

Advances

in Meteorological Science and Technology

气象科技进展

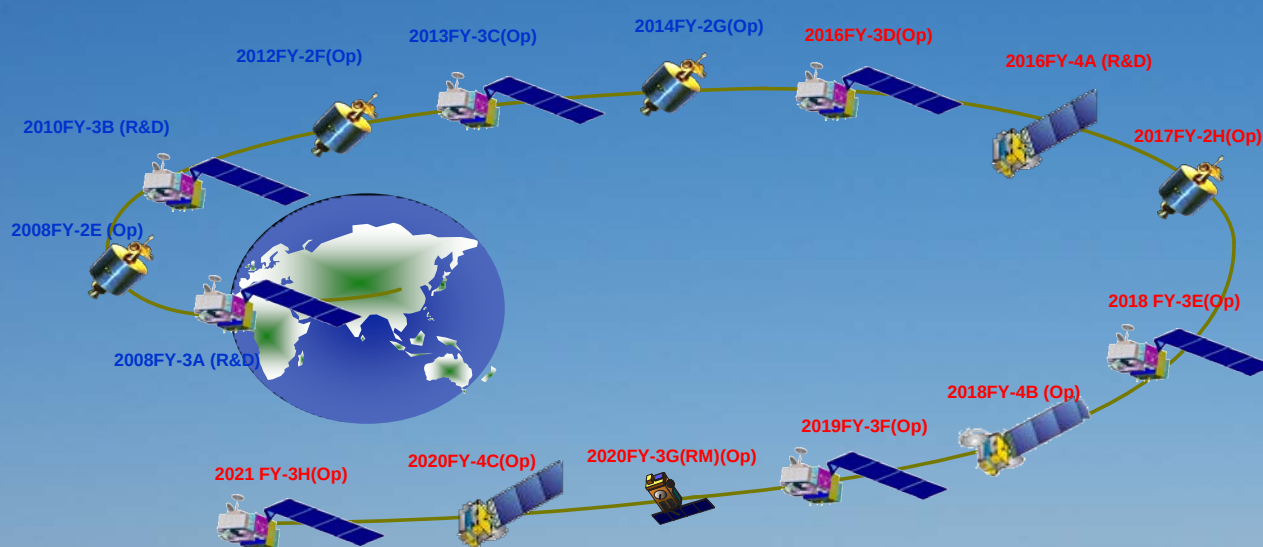
ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

No.1

2016年2月
第6卷 第1期

进展报告2016: 气象卫星业务和研究



气象科技 **进展**
Advances in Met S&T



中国气象局气象干部培训学院 主办

主管 中国气象局
主办 中国气象局气象干部培训学院
出版 《气象科技进展》(英文)编辑部

名誉主编 丑纪范 中国气象局气象干部培训学院
主编 许小峰 中国气象局

副主编

肖子牛 中国科学院大气物理研究所
翟盘茂 中国气象科学研究院
罗云峰 中国气象局
王会军 中国科学院大气物理研究所
李维京 国家气候中心
胡永云 北京大学
谈哲敏 南京大学
费建芳 解放军理工大学
管兆勇 南京信息工程大学
何建新 成都信息工程大学
黄建平 兰州大学
廖小平 国家遥感中心
吕世华 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所
贾朋群 (专职) 中国气象局气象干部培训学院

常务编委 (按音序排名)

成秀虎	高学浩	龚建东	郭学良	李 柏
李国平	倪允琪	曲晓波	任国玉	任小波
沈文海	王卫丹	武炳义	杨修群	俞小鼎
张朝林	张 鹏	张庆云	赵 平	

编委 (按音序排名)

毕宝贵	陈云峰	陈振林	崔春光	崔讲学
董文杰	封国林	郭 虎	何金海	何 清
胡 欣	胡玉蓉	胡跃文	姜 彤	雷小途
李 慧	李集明	李良福	李耀辉	李跃清
梁旭东	刘晶森	刘黎平	刘 实	卢乃锰
陆日宇	罗 兵	罗亚丽	马 力	马舒庆
马耀明	毛恒青	彭莹辉	浦一芬	石广玉
宋 燕	汤 绪	田 红	万齐林	王 斌
王东海	王建林	王晓云	王延青	王迎春
王 元	王在志	王自发	温 敏	文洪涛
吴立广	谢志辉	闫冠华	杨 松	杨昭明
姚学祥	伊 兰	翟武全	张 华	张立祥
张小玲	张跃堂	赵广忠	周定文	周凌晔
周显信	朱定真	朱小祥	祝燕德	邹立尧

海外编委 (按音序排名)

陈镜明	李 俊	刘征宇	金飞飞	王 斌
翁富忠	张大林	张广俊	邹晓蕾	

编辑部

张 萌 侯美亭 秦莲霞 冀文彬 陈忠美

地址: 北京市中关村南大街46号,
中国气象局气象干部培训学院 100081

电话: (010) 68409927/68409933

邮箱: amst@cma.gov.cn

Notes: 气象科技进展编辑部/图书馆/干部学院/CMA

网址: <http://cmalibrary.cn/amst>

投稿系统: <http://qxkjjz.cbpt.cnki.net/EditorCN/Quit.aspx>

官方微博: <http://weibo.com/2115232930/profile>

印刷: 北京金吉士印刷有限责任公司

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

定价: 30元

目 次

第6卷 第1期 2016年2月

(内含: 2016进展报告: 气象卫星业务和研究)

1 许小峰: 主编语

研究论文

研究进展

- 6 陶祖钰, 赵翠光, 陈敏: 谈谈统计预报的必要性
- 14 程志刚, 杨欣悦, 董思言, 孙晨, 吴洋: 利用城市夜间灯光资料和NDVI研究成都地区植被覆盖度变化
- 21 刘永平, 张潇潇, 薛峰: 山东省夏季降水的年代际变化和年际变化
- 26 赵军平, 刘汉华, 周春雨, 曾欣欣: 2013年浙江夏季异常高温及环流特征分析
- 31 李阳, 孔毅, 赵现斌: 气象无人机风速解算新模型的设计及仿真研究
- 37 刘昊辰, 张书余, 周妍妍, 况正中: 模拟热浪及强降温对Apo E^{-/-}小鼠冠心病影响的实验研究
- 42 丁乃千, 陈正洪, 杨宏青, 许杨: 风电功率预报技术研究综述

专题 气象史研究

- 46 杨萍: 笛卡尔与《气象学》

专题 基层气象现代化

- 50 向永龙, 邬昀, 孙士型, 范元月, 饶传新: 三种数值模式对长江上游面雨量预报能力的评估

论坛

- 54 曹鸿兴, 封国林: 界壳论及其应用
- 58 黄红丽, 刘勇洪, 房小怡: 京津唐夏季高温特征及对城市化的响应探析

阅读

信息

- 20 《边界与海洋研究》创刊
- 25/60 新书架
- 61 高被引论文选编
- 63 编辑选编
- 65 涓流细雨
- 67 《大气科学》杂志出版“叶笃正先生百年诞辰纪念专刊”
- 160 《气象科技进展》2015年主要内容回顾
- 封3 媒体扫描

本刊已被万方数据、《中国学术期刊网络出版总库》和CNKI系列数据库以及《中文科技期刊》(维普网)全文收录, 相关著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。作者向本刊提交文章发表的行为(除事先声明外)视为同意文章被上述数据库收录。

主编语

对于数值天气预报而言,无论是模式研制还是实际应用,在评价其准确率时,一般都会将南半球和北半球分别计算,给出南北半球的预报误差曲线。总体而言,由于获取气象探测数据相对充分,北半球的预报结果往往较南半球要准确些,在数值预报技术发展最初的几十年中,基本维持着这样的结果。然而,近二三十年来随着气象卫星探测技术的快速进步,卫星监测数据逐渐成为数值天气预报模式的主要数据来源,且由于卫星资料具有对全球均匀覆盖的特征,南北半球预报准确性的差距近年来呈现大幅度减小的趋势(参见本期P7图),成为气象卫星推进预报能力的最直接证据和美感。

本刊2016年开始推出刊中刊——“进展报告”,用较大篇幅针对一个主题,给出在该领域国内外近期的发展状况和脉络。本期刊载的“进展报告2016”(P68开始)的主题是“气象卫星业务和研究”,以我国风云极轨与静止轨道两个系列气象卫星为重点,更站在全球发展的高度上,从卫星及传感器的发展和遥感技术应用等角度,梳理和阐述气象卫星取得的进展与未来的挑战。在此,特别要感谢国家卫星气象中心为本报告提供的支持,在世界气象组织

(WMO)观测与信息系统司工作的张文建先生,为“进展报告2016”撰写了WMO全球综合观测系统(WIGOS)空间部分2040年远景发展规划的解读文章(P135),使这期进展报告有了更完整的视角和全球前沿背景。

年度首期,编辑部在“回望2015”(P2)中用了不多的图表和数字简要解读了过去一年在气象业务创新方面的一些成果,希望气象科技工作者能不断努力,继往开来,在新的一年里取得更佳成就。

在数值天气预报日益取代主观经验预报的今天,统计预报的重要性仍不容忽视,陶祖钰教授的研究(P6)表明,数值预报和统计预报相结合应是当前天气预报的发展方向。在气候变化的大背景下,不同区域存在其独特的响应特征,本期文章以山东降水变化(P21)和浙江夏季异常高温(P26)为例,探讨了不同区域的气候响应差异。

为了强化本刊每期主题信息的完整性,“编辑选编”栏目增加与当期主题一致的近2~3年发表的“高被引论文选编”(P61),期盼读者通过阅读和获取更多文献信息,能对每期主题有更深入的认识。

许小峰



研究论文

风云系列气象卫星

- 72 张鹏, 郭强, 陈博洋, 冯绚: 我国风云四号气象卫星与日本 Himawari-8/9 卫星比较分析
- 76 谷松岩, 郭杨, 游然, 卢乃锰, 吴雪宝: 风云三号C星微波大气探测载荷性能分析
- 83 廖蜜, 张鹏, 杨光林, 白伟华, 孟祥广, 杜起飞, 孙越强: FY-3C的掩星探测特点和初步结果
- 88 漆成莉, 顾明剑, 胡秀清, 吴春强: 风云三号卫星红外高光谱探测技术及潜在应用
- 94 曹冬杰: 风云四号静止卫星闪电成像仪监测原理和产品算法研究进展
- 99 赵现纲, 谢利子, 卫兰, 林曼筠: 风云静止气象卫星地面应用工程计算机网络系统发展

卫星遥感技术/国际合作

- 104 王舒鹏, 张兴赢, 王维和, 陈林, 方莉: 气溶胶对利用近红外波段反演CO₂浓度精度的影响研究
- 111 孙逢林, 覃丹宇, 游然: 星载SAR降水反演研究简介
- 116 曹广真, 张鹏, 胡秀清, 陈林: 静止与极轨气象卫星监测沙尘的融合算法研究

- 120 卢乃锰, 谷松岩: 静止轨道微波大气探测的技术现状与发展展望
- 124 张晓虎, 陆风, 窦芳丽, 许健民: 国外地球同步轨道气象卫星成像观测模式发展分析
- 129 高浩, 武胜利, 赵长海, 方翔, 刘诚: Charter机制在气象灾害监测中的应用

科学观察/阅读

特写

- 68 王健: 塞北风雪八载 伴星展翅翱翔——记快速发展中的佳木斯气象卫星地面站
- 70 贾朋群, 冀文彬, 田晓阳: 下一代气象卫星: 而今迈步从头越
- 135 张文建: 世界气象组织全球综合观测系统(WIGOS)空间部分2040年远景发展规划的解读
- 146 咸迪, 李雪, 徐喆, 钱建梅: 世界和我国气象卫星数据共享服务现状与展望
- 150 吴灿, 田晓阳: 世界气象卫星主题文献计量分析
- 152 侯美亭, 成伟玲: 风云极轨卫星数据的第一“落脚点”——佳木斯气象卫星地面站采访侧记
- 154 侯美亭: 《无线电频谱需求增加下的主动遥感发展战略》评介
- 156 贾朋群, 张蕾: 气象风云多变换 理念创新得天下——2015年NOAA卫星大会评介

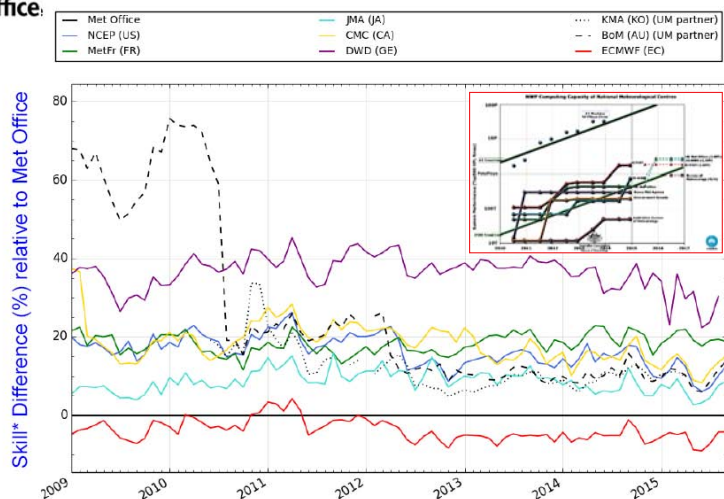
回望2015——透视2015年全球气象

2015年，“下一代气象卫星”葵花-8在7月如期业务化，包括中国在内的多个气象卫星国的下一代卫星蓄势待发引来更多翘盼。21世纪前15年已经过去，似乎也到了气象人反思数值天气预报发展方向的节点——WMO的报告《地球系统的无缝隙预报：分钟到月》和Nature杂志封面评述文章《NWP革命静悄悄》，全面梳理了前沿气象学者思考后的回答——在期待重大突破的同时，看重知识的累积和平衡发展才是可行之路。

本刊



Skill Of Global Model Vs Other Centres



* Parameters: Surface pressure, 500hPa geopotential height, 250hPa/850hPa Winds;
© Crown copyright Met Office Forecast ranges from T+24h to T+120h

全球预报中心数值预报模式：重新洗牌

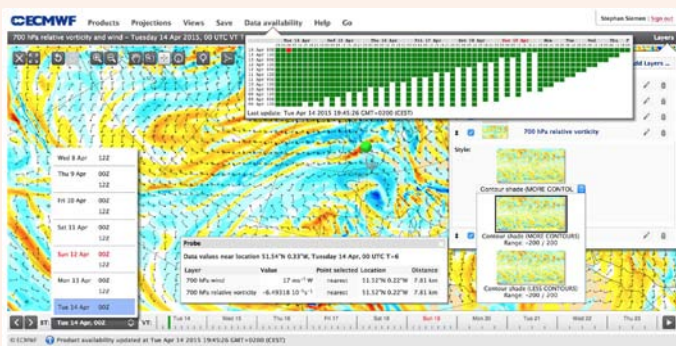
2015年末，在纪念英国业务数值天气预报50年的学术会上，英国气象局（UKMO）负责人给出了这张2009年以来全球8个预报中心数值预报与UKMO比较的水平变化。图中进行比较的指标，综合考虑了全球模式的地面气压、500hPa位势高度和250/850hPa两个高度上的风，预报时段为24~120h。其中除了欧洲中期天气预报中心一枝独秀外，其他中心的预报能力出现交错变化，而各中心计算升级作为最重要的基础设施建设，竞争在2015年出现白热化（小图）。另一项研究指出，目前各大预报中心第8天的预报，和30年前第5天的预报相当。

来源：UKMO

气象业务平台的可视化：融合大数据

2015年欧洲中期天气预报中心（ECMWF）开展的气象可视化活动周，起到了拉近大众与气象科学距离的目的，同时也让全球气象界有机会体会可视化在促进气象预报和用户理解及利用气象产品过程中不可替代的作用。活动周包括了4次以可视化为主题的专业会议，以及可视化系统展览。图中给出主办单位高度可视化的用户界面。

来源：ECMWF

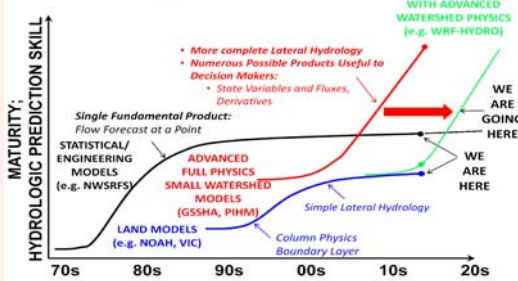


水文气象模拟：多种模式融合是方向

气象灾害中的大部分，和水患相连。不过，NCEP专家指出，过去20~30年，尽管大气模式在不断进展，但是针对流域水文预测的水平难言实质性的进步（图中黑线）。更好和综合性的水信息，无疑来自综合模式水平的提升。而各种模式能力提升的轨迹提示我们，融合地表模式、小流域模式等模式，也许会让我们在水文气象预报领域做得更好。

来源：NCEP

Modeling Evolution



数字

3.5TB

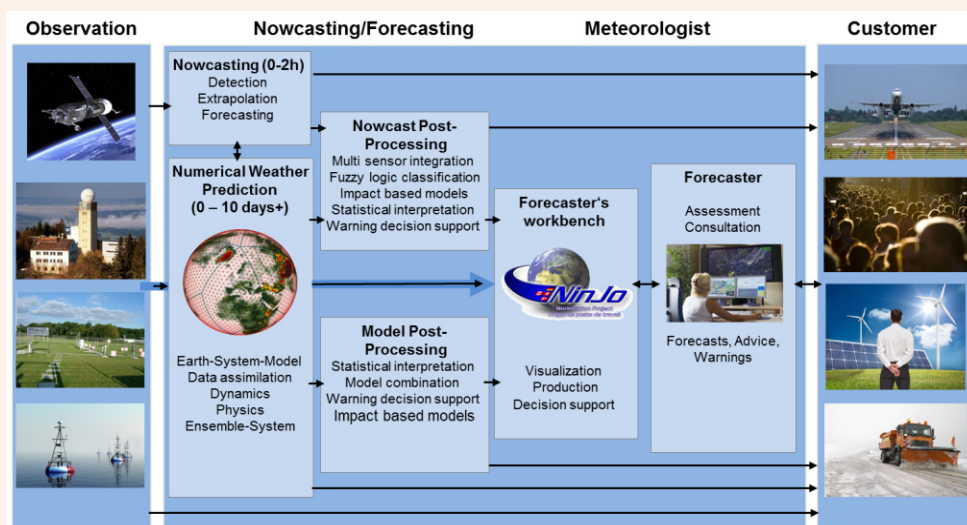
计划在今年10月发射的美国下一代地球静止气象卫星GOES-R/GOES-16一旦投入业务，每天产生的数据量将达到3.5 TB。

350余幅

我国遥感无人机“极鹰2号”近日在南极长城站首飞成功，经过1小时的飞行，获取了350余幅长城站遥感图像。

10%

NOAA 每天从各种观测平台获得20TB以上的资料，但其中具备实时或准实时提供给用户的部分，仅占获得数据的10%。



气象服务：新的业务流程促全方位服务理念的建立

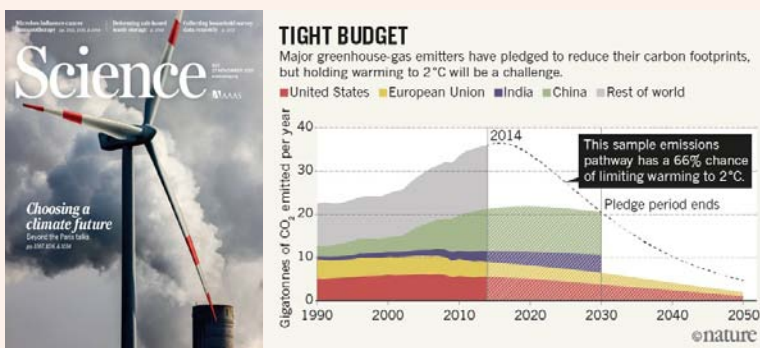
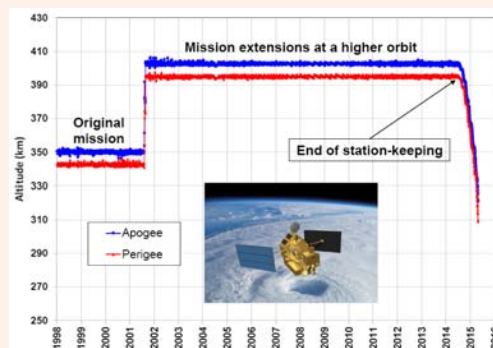
面对社会各方需求，气象服务的流程已经并将发生彻底的改变。图中给出的德国气象局（DWD）业务流程中，与各种气象服务客户见面的，已经不再仅仅是最终的气象预报产品，而是涵盖了从观测开始的几乎各个流程的所有中间产品。

来源：DWD

向TRMM致敬

热带降雨测量卫星（TRMM）的升空和应用，使之成为让全球气象界更真实地感受到卫星时代巨大力量的最有代表性的卫星之一，这颗瞄准最让预报员头疼的降水预报的专门卫星，由美国NASA和日本JAXA联合研制，1997年11月升空。虽然TRMM的预期服役期仅3年，但它顽强地在太空运行了17年之久（图中给出TRMM的生命期和一次调高运行轨道高度）。在提供了大量珍贵的资料后，2015年4月15日，在接替星GPM投入运行后，TRMM被宣布完成使命。TRMM携带的5个传感器（PR、TMI、VIRS、LIS和CERES）第一次几乎全面和准确地解析了热带降水和闪电信息，为相关的天气和气候研究提供了基础和新的依据。向TRMM致敬是2015年每个直接或间接受益于TRMM的人的心声。

来源：NASA



Science/Nature杂志：巴黎气候大会带来什么？

在巴黎气候大会开幕前出版的Science杂志（左图），以传统能源和新能源对比的画面，推出本期的主题专栏——选择气候未来。这是出席巴黎气候大会人员面临的选择，更是地球人必须面对的：图中位于德国莱茵河畔威斯特法伦地区的燃煤电厂与风力发电风车近在咫尺，我们的选择会让地球气候的未来相差万里。巴黎气候大会后，Nature杂志用全球碳排放项目的数据（右图），进一步说明了承诺排放和实现限制升温在2℃之内的目标之间的挑战。

来源：Science/Nature

第2

“2015上海十大科普微信公众号评选活动”，评选出机构和社会两大类最有影响力微信，其中“健康气象”位列机构类十大科普微信公众号的第2位。

70%

我国自主研发的GRAPES全球数值预报系统2015年底通过了业务化评审，该系统于2007年开始研发，目前卫星数据已经在该系统的资料同化数据中占到70%。

13km

美国NCEP最近将其GFS模式的水平分辨率从之前的27km提高到了13km，已经略高于ECMWF全球模式的16km水平分辨率。

机器人“小冰”向你报告天气

2015年12月22日，东方卫视《看东方》节目的天气预报员，换成了一个叫作“小冰”的机器人，这位身份是“见习主播”的机器人，大概是首个正式踏入媒体日常工作岗位的人工智能机器人，这一动态或许代表着天气预报行业或大踏步地走向自动化。

来源：东方卫视



2015年全球华人作者在Nature和Science上发表的大气科学相关论文

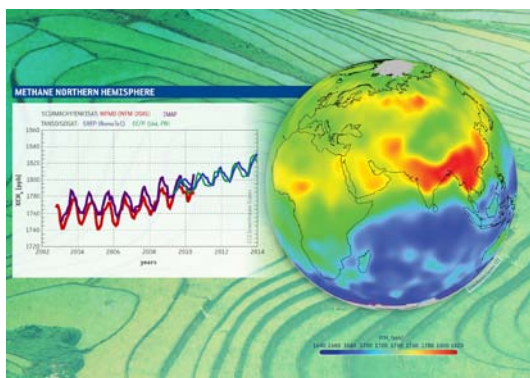
第一作者	第一作者机构	题目	出处
Wang Daiwei	美国东北大学	Intensification and spatial homogenization of coastal upwelling under climate change	Nature, 518(7539):390-394
胡敦欣	中国科学院海洋研究所	Pacific western boundary currents and their roles in climate	Nature, 522(7556):299-308
Liu Zhu	美国哈佛大学	Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China	Nature, 524(7565):335-338
Liu Jianguo	美国密歇根州立大学	Systems integration for global sustainability	Science, 347(6225):963
Chen Tianyu	英国布里斯托大学	Synchronous centennial abrupt events in the ocean and atmosphere during the last deglaciation	Science, 349(6255):1537-1541

来源：本刊

三个4级飓风齐闹太平洋

2015年8月29日，Terra卫星第一次捕捉到在中东太平洋同时出现3个4级以上飓风：它们分别是Kilo、Ignacio和Jimena飓风。

来源：NASA



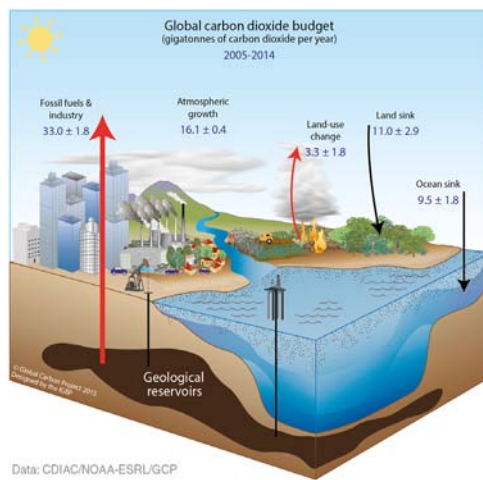
大气甲烷：全球账单公布

日前，欧空局（ESA）气候变化项目（CCI）发表了大气中甲烷的变化和全球分布情况。甲烷是重要的温室气体，其含量自工业革命以来已经提高了两倍多，ESA发布的结果主要基于卫星遥感获得的数据，有助于了解大气甲烷源汇的分布，从而更好地认识其在气候变化中的关键作用。

来源：ESA

全球近10年二氧化碳收支

由全球碳项目编制的《全球碳收支2015》报告，给出了最近10年（2005—2014年）人类活动引发的全球碳循环摆动。报告给出2014年全球矿物燃料和工业排放CO₂为35.9±1.8Gt，预计2015年为35.7±1.8Gt，分别较1990年高出60%和59%。



来源：GLOBAL CARBON PROJECT

数字

0.3℃

美国华盛顿大学水生生物学研究小组调查了1985—2009年间全球湖水数据，发现湖水温度每10年升高0.3℃，变暖速度超过同期大气。

第10位

中国科协评选出2015年“十大科学传播人”，其中气象领域朱定真，也是本刊编委，位列榜单的第10位。

50年

1957—1958年，IGY年期间开展的南极云观测，到1967年中止。50年后美国投资500万美元启动“大气辐射测量西南极辐射试验”，重启对南极云的观测研究。



GOES-R: 确认今年10月发射

被美国气象部门,乃至全球气象界寄予厚望的美国下一代地球静止气象卫星中的第一颗——由NOAA和NASA联合研制的GOES-R卫星的发射时间,几次推迟后终于确定将于2016年10月发射。

来源: NOAA

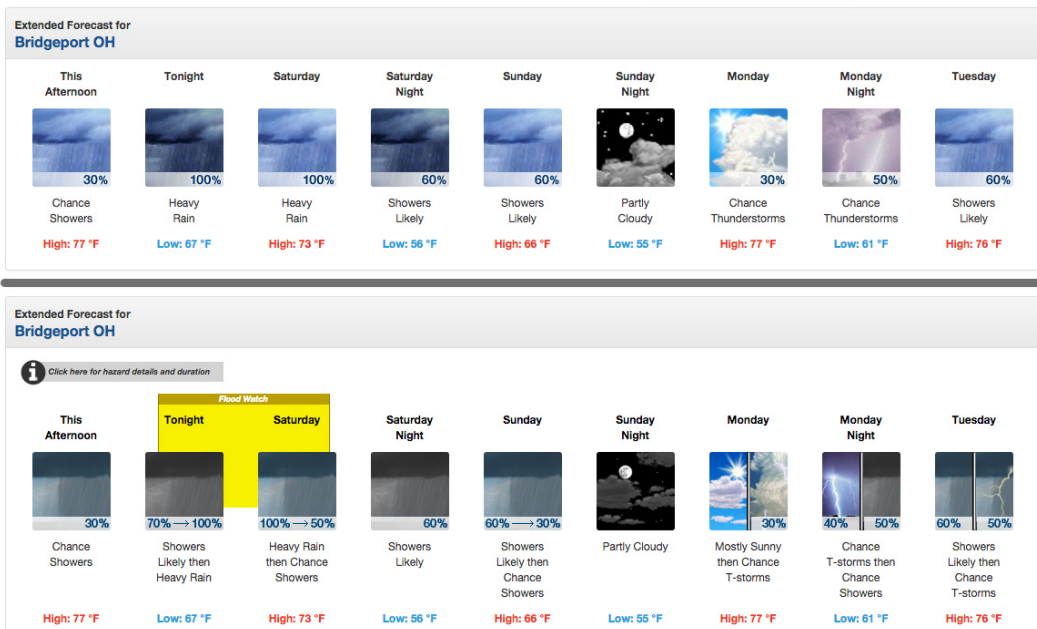
国际“风云卫星”主题被引频次最高的前10篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引频次
1	An overview of a new Chinese weather satellite FY-3A	Dong, CH	Bulletin of the American Meteorological Society, 2009, 90(10)	51
2	Formation of horizontal convective rolls in urban areas	Miao, SG	Atmospheric Research, 2008, 89(3)	37
3	Intercalibration of broadband geostationary imagers using AIRS	Gunshor, MM	Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26(4)	26
4	A new method for cross-calibration of two satellite sensors	Liu, JJ	International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(23)	24
5	Operational retrieval of Asian sand and dust storm from FY-2C geostationary meteorological satellite and its application to real time forecast in Asia	Hu, XQ	Atmospheric Chemistry and Physics, 2008, 8(6)	23
5	CUACE/Dust - an integrated system of observation and modeling systems for operational dust forecasting in Asia	Gong, SL	Atmospheric Chemistry and Physics, 2008, 8(9)	23
7	Data assimilation of dust aerosol observations for the CUACE/dust forecasting system	Niu, T	Atmospheric Chemistry and Physics, 2008, 8(13)	22
8	Estimation of regional evapotranspiration over the North China Plain using geostationary satellite data	Shu, YQ	International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2011, 13(2)	19
8	Characterization of CRCS Dunhuang test site and vicarious calibration utilization for Fengyun (FY) series sensors	Hu, XQ	Canadian Journal of Remote Sensing, 2010, 36(5)	19
10	GSICS inter-calibration of infrared channels of geostationary imagers using Metop/IASI	Hewison, TJ	IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(3)	17

来源: SCI-E数据库

检索时间: 2016年1月21日

田晓阳 提供



用图片发布预报

2015年7月,美国气象局(NWS)与NCAR的科学家合作,在weather.gov网站的局地预报中,推出了新的网上图片预报产品,这一充分利用可视化手段发布的天气预报,其目的就是为了更好传递预报信息。在预报页面,用经过重新设计的图像图标给出预报,这一新颖的预报方式,每天吸引200万~400万点击者。

来源: NCAR-NWS

3.4兆瓦

2016年1月,我国自主研发装机容量3.4兆瓦的国内最大潮流能发电机组,在浙江舟山岱山县秀山岛南部海域下海。

75吨

一家名为Climeworks的瑞士公司将开始每个月从大气中捕获75吨CO₂并通过市场出售,这也是世界上第一家从事CO₂吸收和商业出售的企业。

87.3分

2015年全国公共气象服务总体满意度为87.3分,比2014年提高1.5分,并创下2011年以来的最高分。

谈谈统计预报的必要性

陶祖钰¹ 赵翠光² 陈敏³

(1 北京大学物理学院大气和海洋科学系, 北京 100871;

2 国家气象中心, 北京 100081; 3 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100081)

摘要: 首先从认识论的角度, 即确定论和概率论, 讨论了天气预报具有不确定性, 在数值预报日益取代主观经验预报的今天, 统计预报还有其不可取代的重要性。在方法论上, 统计预报属于客观归纳法; 在理论上, 统计预报具有不受数值预报可预报性限制的特点。统计预报有相关法和相似法之分; 小概率的极端天气, 可以用相似法进行预报。集合预报是确定论方法和概率论方法的有机结合, 是当前天气预报的发展方向。最后指出, 统计预报本身同样存在局限性, 也必须经受实际预报应用效果的检验。

关键词: 天气预报, 统计, 相关性, 相似性, 小概率极端天气

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.001

The Necessity of Statistical Forecasts

Tao Zuyu¹, Zhao Cuiguang², Chen Min³

(1 Department of Atmospheric and Ocean Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871

2 National Meteorological Centre, Beijing 100081 3 Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: First, weather forecast uncertainty is discussed from the perspective of epistemology, namely, deterministic and probabilistic theory. Today, subjective forecast is increasingly replaced by the numerical weather prediction (NWP), but statistical forecasting is still irreplaceable. In terms of methodology, statistical forecasting is objective induction. Statistical prediction is not limited by predictability of NWP in theory. Statistical forecasting has a correlation or similar method; rare event related with extreme weather can be forecasted in similar method. Ensemble prediction method is a combination of deterministic and probabilistic methods, and is the development direction of the current weather forecast. Finally, there are limitations on statistical prediction itself, and statistical forecasting must be also verified by the effect in the forecast practice.

Keywords: weather forecasts, statistics, correlation, similarity, rare event of extreme weather

0 引言

天气预报有主观预报(或经验预报)和客观预报之分, 又有确定性预报和不确定预报(或概率预报)之分。数值模式做出的天气预报, 既是客观预报, 又是确定性预报。预报员的传统预报, 是根据所掌握的理论知识和个人实践经验的主观预报, 既不定量, 又因人因时而变, 有很大的不确定性。目前主观经验预报在天气预报中的贡献已在很大程度上被数值预报所取代。

统计预报也可看作是经验预报, 因为它也是根据以往的资料做出的预报, 只不过它避免了人的主观影响, 故也可看作是客观预报。统计预报的结果虽然是定量的, 但它是建立在概率统计基础上的预报, 所以本质上属于概率预报, 而不属于确定性预报。

数值预报虽然被称作20世纪人类最伟大的科学成果之一, 并成为当前天气预报的基础和主角, 但根据混沌理论, 作为确定性预报它有一个不可逾越的极限——2周的可预报性^[1]。从自然辩证法的哲学观点来看, 偶然性和必然性都客观存在, 两者都不可避免, 天气预报也不例外。自然辩证法还认为, 必然性寓于偶然性之中, 即必然性通过无数个个别事例表现出来, 只要样本数足够多。因此, 统计预报应该是天气预报中一个不可缺少的成员。

早年的统计预报, 由于观测资料的年代短, 样本数不够多, 统计的对象也很不充分, 所以, 统计结果不稳定, 预报效果当然也不理想。这就造成了在过去的数十年中统计预报的地位既不能与数值预报相比, 也不能与主观经验预报效果相比的状况。

在数值预报逐渐逼近可预报性上限的今天, 统计预报的不可缺少性也随之显现出来。本文将从科学研究的方法(演绎法和归纳法)及数值预报的现状和极限谈起, 介绍相关法统计预报和相似法统计预报的特点, 讨

收稿日期: 2014年3月3日; 修回日期: 2014年6月5日

第一作者: 陶祖钰(1939—), Email: taozuyu@pku.edu.cn

资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906003, GYHY201206004, GYHY201306023); 国家重点基础研究发展计划(2013CB430106)

论统计预报超越确定论预报极限的可能性、大概率事件和小概率事件及极端天气预报、集合预报是确定论和概率论的结合等问题,指出统计预报的必要性,强调集合预报是当前天气预报技术的一个重要发展方向。

1 演绎法和归纳法

科学研究方法分为演绎法和归纳法两大类。数值天气预报属于演绎法,即根据已知的规律推演出未来的天气。演绎法的基础是分析,因为它所依据的规律是从对个别样本(或事件)的分析中找出来的。虽然所分析的样本数量是有限的或少量的,甚至可以只有一个样本,但只要所得出的规律具有普遍性,就可以成为演绎法的基础,例如大家熟知的比萨斜塔自由落体实验,在哲学上叫作从个别到一般;确定性预报,则是从一般到个别。

演绎法的特点是唯一性或确定性,不能模棱两可。其数学形式表现为因变量唯一地由自变量决定。数值天气预报就是根据一系列的方程,从初值通过时间积分计算出未来的天气。如果没有计算误差,则理论上初值和预报两者是一一对应的,只不过演绎的方法不是推理而是数值积分。

归纳法是指对已经发生的大量的样本(或事件)进行分类归纳,根据总结出的规律来预报未来天气。经典天气预报属于归纳法,其基础是分型和概念模型(例如锋面气旋模型),根据当前形势和概念模型的相似性来预报未来天气。寻找历史个例的相似性是经典天气预报(或主观经验预报)的本质^[2]。但是主观经验的归纳不仅不够定量,而且不同的人掌握科学知识的程度不同,实践的经验也不同,因此归纳的结果也不具有唯一性。

统计,是现代客观归纳法的数学手段。相对于经验归纳,统计是定量的、客观的归纳。只要统计模型相同,对于同一组数据只有一个统计结果,所以现代的客观归纳法具有一定程度的唯一性。当然,如果模型或数据不完全相同,显然,结果就不具有唯一性。

统计归纳法本身虽然不受物理规律控制(没有预设的控制规律),但如果统计方法足够全面(或充分),统计样本足够大,则统计结果可以揭示客观存在的物理规律。这方面比较成功的典型例子是Wallace等^[3]的“遥相关”研究^[4]。他对北半球冬季500hPa月平均高度场并不事先设定关键区,而是普遍地计算每一个格点与其他全部格点的相关系数。从最大正、负相关系数的空间分布归纳出五种遥相关型,其中纬向的PNA型、EU型和EA型分别反映了太平洋—北美、欧洲—亚洲和东大西洋这三条主要的长波频散路径(图1),具有非常清晰的天气动力学意义^[5-6],在天气预报和气候

诊断的领域中得到了普遍的肯定和应用。

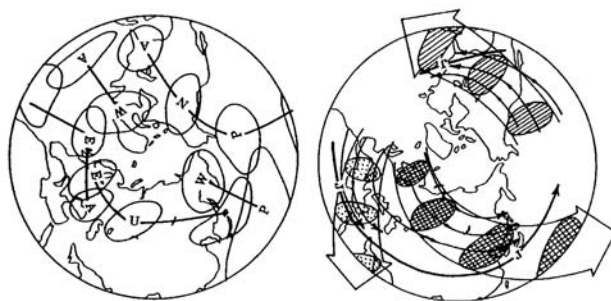


图1 Wallace的遥相关型和长波频散路径^[3]
(闭合圈为相关系数大值中心,实线和J分别为200hPa急流轴和急流中心)

Fig. 1 Wallace teleconnection patterns and long-wave dispersion path (closed loop is correlation coefficient maximum center, Vector lines and J were 200 hPa jet axis and the jet center)

2 数值预报的现状和极限

从欧洲中期数值预报中心(ECMWF)对1981年以来数值预报水平的评估(图2)可以看到,500hPa高度场3天预报的距平相关目前已高达97%,而且进入21世纪后,3天预报相关系数已接近水平线,看不出明显的上升趋势。它似乎表明,500hPa环流形势的3天预报已达到几乎完美的程度,很难再有所提高。其他数值模式与ECMWF相比没有本质上的差别,预报水平也大体相当。但是,从降水和温度等的单站要素的强度、时间的确定性预报来看,无论哪个模式都还有很多不能令人满意之处。即使是看似相对比较容易的2m温度预报,也有相当大的预报误差($\pm 2 \sim 4^\circ\text{C}$)。所以在预报温度、降水等要素时,必须采用数值预报产品的统计释用(如MOS方法(模式输出统计)和PP

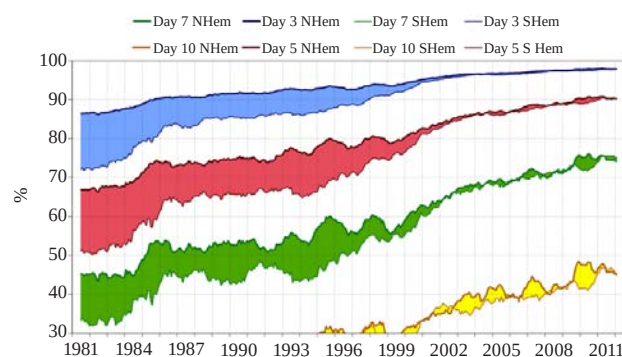


图2 欧洲中期数值预报中心1981—2011年全球和南北半球500hPa高度场预报3, 5, 7和10天距平相关分布
(来源: Uccellini LW美国宇航局/大气海洋局卫星资料同化联合中心成立十周年纪念会报告幻灯片)

Fig. 2 The anomaly correlation coefficient of 500 hPa height forecast field in global and the northern and southern hemisphere at 3 days, 5 days, 7 days, 10 days, Medium-Range Forecast Centre in Europe in 1981—2011

方法（完全预报）等）。

对于降水或强对流天气的预报则更是难以令人满意。例如2012年7月21日北京的特大暴雨过程，世界各国的模式大都在2~3天前就预报了这次强降水过程，但降水强度普遍偏小，降水时间普遍偏晚约6小

时，都没有报出最强的第一场锋前暖区暴雨^[7-8]。从图3所给的北京快速循环中尺度数值模式（BJ-RUC）的预报检验看^[8]，即使是同一个数值模式，不同初始时刻的预报结果也有明显差别。更有甚者，预报水平并不一定随着时效的缩短而变好，表现出时好时坏的现

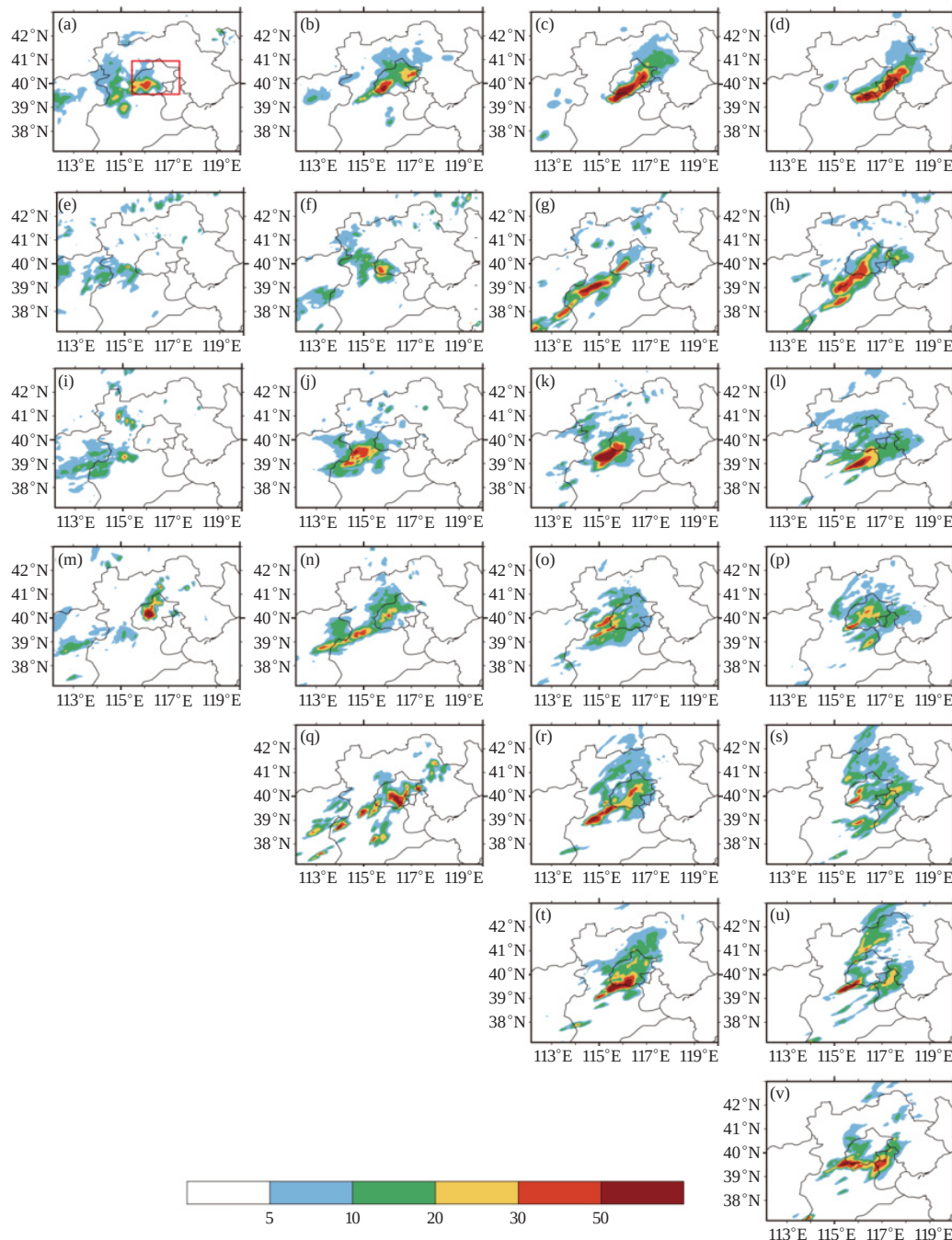


图3 2012年7月21日06, 09, 12和15时（UTC）的观测小时降水（单位：mm）及各起报时刻预报对应时刻的降水分布^[8]（第1—6行分别表示CMORPH降水融合资料起报时间分别为20日21时，21日00, 03, 06, 09和12时，第7行为21日15时实况；各列分别表示21日06, 09, 12和15时的降水分布）

Fig. 3 In July 21, 2012 0600, 0900, 1200 and 1500/UTC observation hour precipitation (mm) and the corresponding time precipitation forecast map (1-6th row denote the reported time of CMORPH precipitation fusion data is at 2100 on the 20th, at 0000, 0300, 0600, 0900 and 1200 on the 21th, the 7th row is real data at 1500 on the 21th; the columns represent precipitation distribution at 0000, 0900, 1200 and 1500 on the 21th)

象。这种摇摆不定就是数值预报“不确定性”的典型表现。它说明虽然模式控制方程所代表的物理规律是确定的,但实际计算结果却存在不确定性,因为初值和每一步差分计算都不是100%的正确,总有一些误差,即使非常微小。所以,不确定性是不可避免的,确定性预报的有效时间长度是有限的。

在图2中还可看到,5,7和10天的相关系数随着预报时效的延长而下降,10天预报的相关系数已下降到不足0.5,作为确定性预报似可认为已无参考价值。欧洲中期预报中心30年的总结说明,确定性预报的水平随时效延长而下降是不可避免的,数值预报的实际能力不可能突破2周可预报性的理论极限。后面将会提到,要突破这个极限的办法是采取确定论和概率论相结合的方法,即数值模式的集合预报。

3 统计预报——超越确定性预报极限

统计预报的性质属于归纳法,统计是归纳的数学手段。统计预报可分为相关法和相似法两大类;相似法又可分为直接相似法和分型相似法两类。

3.1 相关法统计预报

相关法是用预报因子和预报量之间的直接相关性来做预报,例如建立多因子回归方程。在建立预报方程前,通常先要进行因子筛选,即先根据经验和科学知识选取一定数量的因子从中挑选出相关系数最大的作为预报因子。所以,统计方法虽然是定量的、客观的,但也存在因人而异的问题。因为可以作为预报因子的参数很多,选择不同的因子,就会得到不同的统计结果(相对而言,采用不同的统计方法造成的差异则小得多)。在长期天气预报会商中经常遇到这种情况,不同的统计预报得到不同的结果,因而难下预报决心。所以,统计预报也存在主观性。

理论上,如果因子的筛选能够穷尽一切可能的因子,同时样本数又足够大,就可以克服统计预报的主观性。当前计算能力已强大到足已从海量的因子(如数百、数千甚至数万个因子)中筛选预报因子,无需人为地圈定待选因子的范围,那么,统计预报就有可能完全摆脱主观预设的影响,而只反映客观事实的内在联系。

3.2 相似法统计预报

相似法统计预报又可分为两类:直接相似预报和分型相似预报^[2,9-10]。

3.2.1 直接相似预报

如文献[11]所述,直接相似预报就是“从众多的历史个例中找出一个与当前形势相似程度非常高的个例,则可以认为引起当前形势演变的全部机制都基本上隐含在这个历史个例中,因此可以直接根据历史相似个例的演变作为当前预报的基础”,故称为直接相

似预报。在人们对天气形势演变和局地天气产生的物理机制还不甚了解的时代,直接相似法是天气预报的基本方法,故郭树忠等^[2]把它称为经典预报方法。他们定义了一个所谓相似系数(S),

$$S = \frac{N}{\sum_{i=1}^N |(X_i - \bar{X}) - (Y_i - \bar{Y})|},$$

用它在众多的历史样本中找出最相似的个例来制作当前机场天空状况的逐时预报。式中, X_i 为当前某一气象要素的测站值,下标 i 代表测站, Y_i 为同一要素的某一历史个例, N 为测站的总数, $\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ 为全部测站的平均值,即

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i, \quad \bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i.$$

理论上任意一个气象要素场都可以用傅氏级数展开成谐波的集合。两个波长相同的谐波,其相似性应包括振幅、位相和其围绕的平均值三个方面。可以证明^[11],经典的相关系数(C),

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sigma_X \sigma_Y}.$$

由于对变量都做了归一化处理,所以只能反映谐波的位相相似程度,同位相时相关系数为1,反位相时相关系数为-1。而 S 不仅反映位相的相似,还能反映振幅的相似程度。为了使 S 还能同时反映平均值的相似程度,陶祖钰等^[11]对 S 进行了修改,即

$$S' = \frac{N}{\sum_{i=1}^N |(X_i - \bar{X}) - (Y_i - \bar{Y})| + N|\bar{X} - \bar{Y}|},$$

或

$$S'' = \frac{2N}{\sum_{i=1}^N |(X_i - \bar{X}) - (Y_i - \bar{Y})| + N|\bar{X} - \bar{Y}|/4},$$

分母中的 $N|\bar{X} - \bar{Y}|$ 为平均值的差异。

但是,如文献[11]所指出的,“天气形势的相似应包括天气系统的位置、相对强度和绝对强度三个方面。相对强度相似是指高值系统和低值系统之间差异大小的相似。气压系统和温度系统相对强度的大小与锋区、急流等有直接的联系,因此相对强度相似无疑是十分重要的。绝对强度相似是指天气系统本身的数值是否接近。绝对强度和各年的气候特征有关。例如,副热带高压(以下简称副高)的强度和各年副高季节变化的早晚有关,它是天气形势是否相似的一个重要的方面”。因此,试图用一个相似系数来代表二维场的相似无疑是难以做到的。

3.2.2 分型相似预报

天气分型是经典天气预报中最常用的方法。分

型相似法和相关法不同之处在于，前者不仅仅看到气象变量本身，还看到变量的空间和时间分布，然后再按当前实况所属的类型或者最相似的历史个例做出预报。天气形势的主观经验分型种类繁多，有的简约，有的繁琐；有的着眼高空，有的着眼低空或地面，如此等等不一而足。而且，分型的标准往往模糊不清，同一个样本，不同的人会确定为不同的型。

现代统计学中的聚类分析是一种可以客观地按相似性进行分类的方法。例如芬兰Teuvo Kohonen于1981年提出的自组织特征映射（Self-organizing Feature Map, SOM）神经网络法^[12]是一种通过反复调整识

别图像之间的相似程度（包括数值的相似和形状的相似）从而达到聚类的目的。赵翠光用这一技术对2000—2009年6—8月华北地区107次区域暴雨前一天的环流形势场（500hPa高度场、850hPa流场、850hPa温湿场（ θ_{se} ））进行了客观分型^[13]。从图4给出的其中两种型的降水分布和500hPa高度场形势（省略850hPa形势）可见，客观分型结果的天气学意义非常明显。图4a和4b为华北经向型暴雨，其特点是副高偏北、河套低槽明显；图4c和4d为华北的纬向暴雨型，其特点是副高偏东、华北受低槽影响。

现代统计学中分型的方法很多，例如EOF

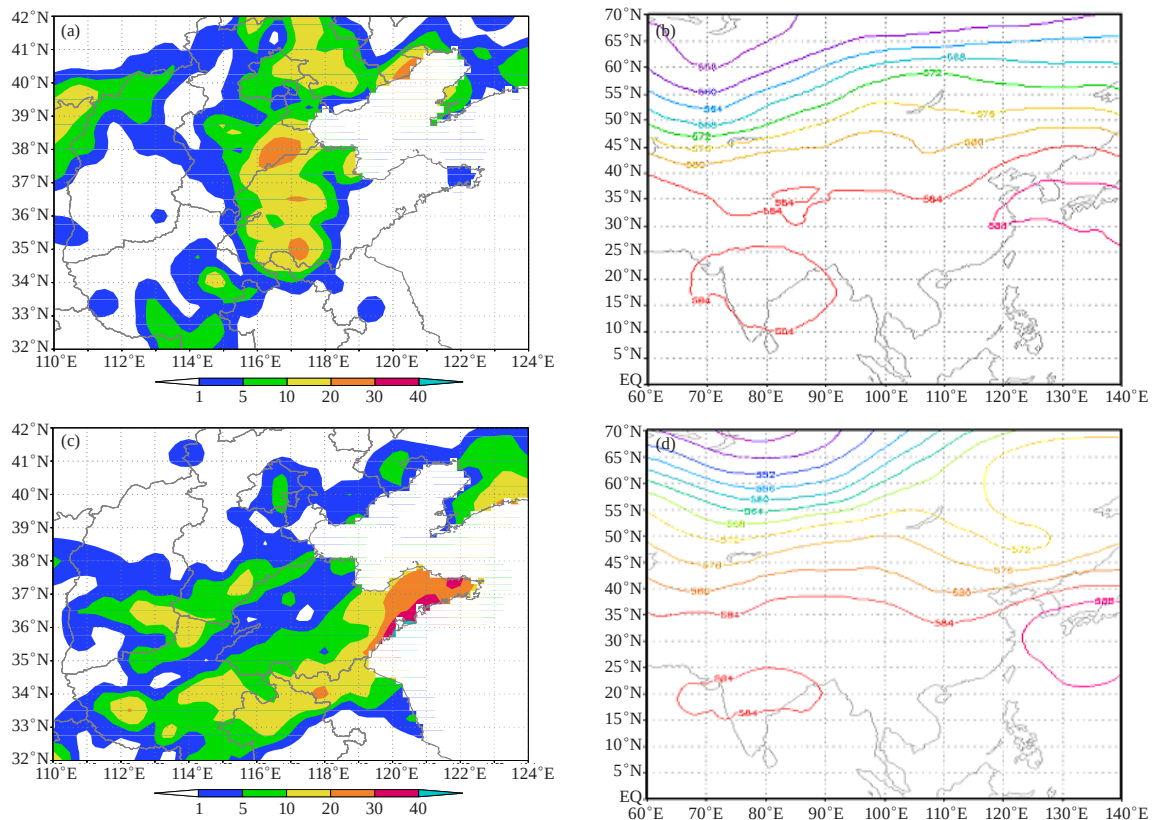


图4 华北夏季区域性暴雨的客观分型^[13]，副高偏北型暴雨典型场（河套低槽类）日平均暴雨实况（a，单位：mm）和500hPa高度场（b，单位：dagpm），副高偏东型暴雨典型场（华北低槽类）日平均暴雨实况（c）和500hPa高度场（d）

Fig. 4 Objective classification of Regional Rainstorm in North China in summer (13), Daily average observed precipitation about northerly subtropical rainstorm type (trough in Hetao) (a, mm) and 500hPa height (b, dagpm), daily average observed precipitation about easterly subtropical rainstorm type (trough in North China) (c, mm) and 500 hPa height (d, dagpm)

（Empirical Orthogonal Function）方法，即经验正交函数分解方法，是一种既包括空间分布特征，也包括时间变化特征的客观分型方法。文献[13]中用旋转主分量（REOF）方法^[14-16]对华北地区夏季降水进行分区，客观地反映出华北范围内不同区域降水的气候特征。

图像识别也是统计学应用中的一个重要领域。广义地看，寻找相似也属于图像识别领域。光流法是一种研究外界物体运动的光影变化在人眼视网膜上所形

成的光的流动的图像识别技术^[17]。它特别适用于图像雷达回波系统的识别和追踪，因此是在短时和临近预报中很有应用价值的一种统计学方法^[18]。

4 讨论

4.1 预报时效

统计预报的特点是不预设物理条件。无论时间间隔多长，只要前后两组数据之间表现出有足够的相关

性,就可以把前一组数据当作预报因子来做预报,因此它没有时效的限制。数值预报时效的理论极限是两周,实际上超过7天高度距平、相关系数小于0.5表明预报接近随机概率,参考价值不大^[7]。因此10天以上的中长期预报,在相当长的时间内还只能依靠统计预报。

直接相似法统计预报的特点是只看结果,不问过程,不讲“道理”。例如相似法统计预报,只要现在相似,则未来也一定相似,无论3天、5天,还是10天、半月,甚至更长的时效,对相似法而言并无差异(注:当然原则上随着预报时效的延长相似的空间范围应该扩大到全球)。虽然我们对统计出来的结果(如分型),可以做出一定的物理解释,但统计过程并不受物理规律控制,因此可以说统计预报是不讲“道理”的。这是统计预报和确定论的数值预报的最大不同。正因为此,统计预报可以不受数值预报时效的可预报性限制。总之,从当前数值预报的水平看,超过一周的延伸期预报就不能直接依靠数值预报,而应该采用统计预报方法来制作,只要样本的数量足够多。

4.2 转折性天气预报

从气象服务的角度看,转折性天气,如寒潮爆发、干旱、连续低温阴雨的开始和结束,或夏季高温伏旱的开始和结束等都是社会大众最关心的,因此是天气预报的重点。从预报的难度来看,连续数日不变的稳定天气最容易预报;但是转折性天气,一旦启动,变化迅速,导致预报失误。此外,对于重大的天气转折,预报员很难下决心当机立断,也是造成预报失误或影响预报服务效果的心理原因,而统计预报的客观性可以为预报员下决心提供支持。因此,统计预报是一种比较适合转折性天气的预报方法。

4.3 极端天气预报——大概率事件和小概率事件

从统计学的角度看,天气事件可简单地分为两大类:大概率事件和小概率事件。大概率事件的样本多,统计关系稳定,比较适用于相关法的统计预报,例如晴雨预报、温度预报等。

极端天气,如暴雨或大暴雨等,属于小概率事件,由于样本很少,无法建立稳定的统计关系,因此不能直接使用相关性做预报。但是,有长期工作经验的预报员仍可以根据亲身经历的案例做出适当的预报,只要历史上曾经有过类似的案例。

相似法是对全体样本进行分类,既包括大概率事件,也包括小概率事件,所以相似法原则上也可用于极端天气预报。例如,2012年7月21日北京的特大暴雨(简称“7·21”暴雨)对北京地区的雨量纪录而言是百年,甚至是二百年一遇的极端暴雨事件。图5出示了2012年7月21日08时的海平面气压场。按Zhao

等^[19]倾斜旋转T模态主成分分析方法对1951—2012年夏季5704个海平面气压场客观分型的结果看(图6)，“7·21”暴雨的环流形势属于暴雨概率最大的第六型,但其气候概率也只有0.491%(图6中环流型概率和暴雨概率的乘积),仍属于小概率事件。从环流型看,此型海上副热带高压偏强,暖湿空气与河套地区的冷空气在华北对峙,是华北比较典型的经向型暴雨形势,在赵翠光^[13]的分型中也同样可以看到这种类型(图4a和4b)。

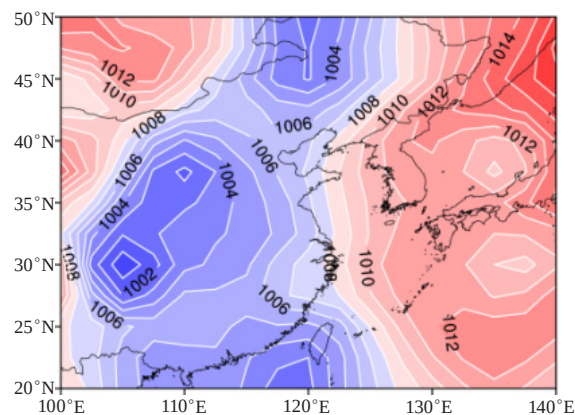


图5 2012年7月21日08时的海平面气压场(单位: hPa)
Fig. 5 July 21, 2013 0800 SLP (unit: hPa)

与此相反的是第二型,环流特征是副高偏南,北方都在冷气团的控制下,所以出现此型暴雨的气候概率更小,只有0.052%,可以说是真正的罕见暴雨。从分型结果中找出对这类罕见暴雨的历史个例进行分析,或许可为此类罕见暴雨的预报提供重要的线索。

上述海平面气压场的客观分型尽管分型时并未考虑降水的情况,但分型的结果却能反映出环流形势与暴雨之间的物理联系。由此可见,只要样本数足够大,统计结果中就会反映出事物内在的规律性。在自然辩证法中这就叫做必然性存在于偶然性之中(或普遍性存在于特殊性之中)。同时,即使是“小概率”事件,它也受普遍的内在规律控制。像2008年金融危机和“9·11”事件,它们的发生也都有前兆可循^[20],极端天气预报也不例外。统计的本质就是将所需要的信息从大量的、充满噪音的信息中提炼出来。在信息爆炸时代(大数据时代)特别需要统计学。

4.4 集合预报——确定论和概率论的结合

如前所述,数值预报属于确定性预报,但是数值模式预报的气象要素(如温度、风和降水)存在相当大的误差。为了提高预报的准确率,人们提出数值预报产品释用方法,如模式输出统计方法MOS(model output statistics)。它将模式输出的物理量作为预报因子,通过建立与预报量之间的统计关系(如逐步回归方程)来完成预报。所以MOS预报是一种确定论和概率论结合

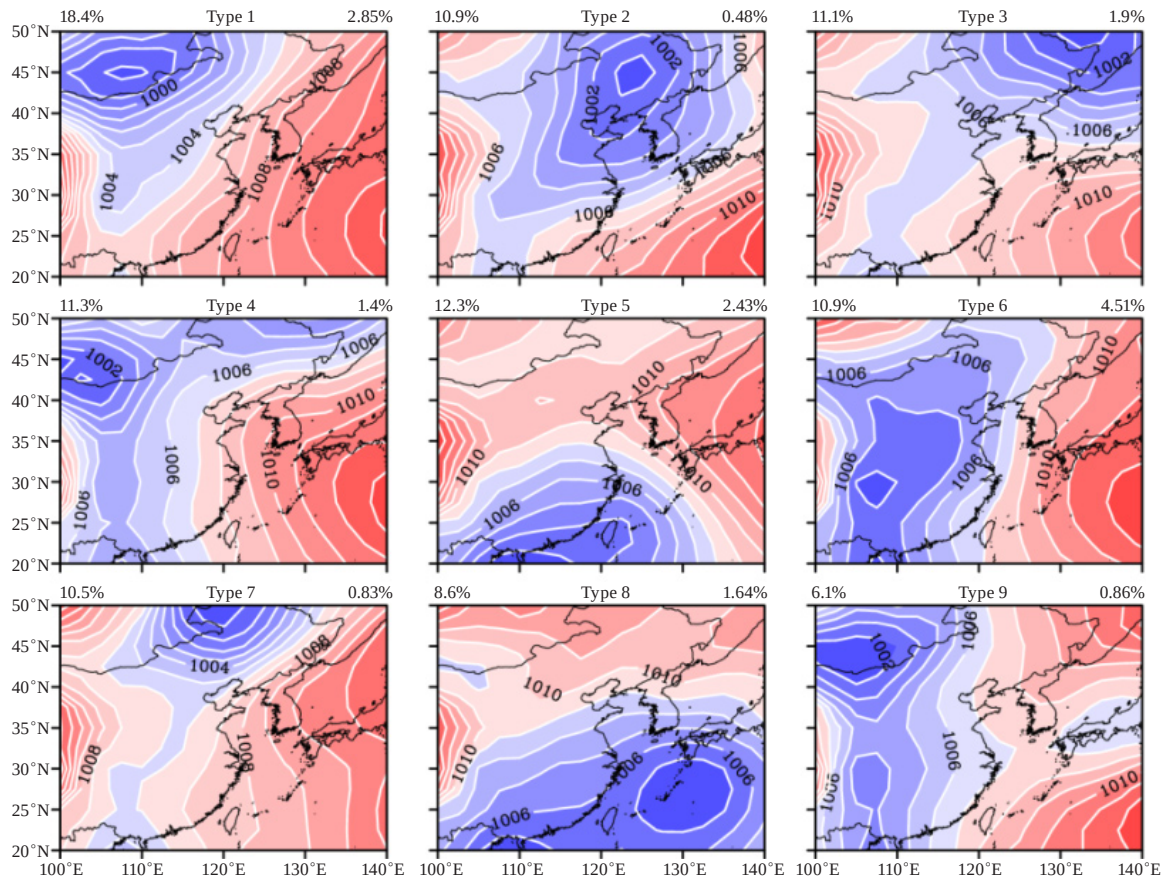


图6 1951—2012年夏季9种海平面气压场客观分型^[19]、发生频率（左上数字）与此型发生暴雨的频率（右上数字）
Fig. 6 Objective classification of nine kinds SLP field in summer 1951–2012^[19], frequency of occurrence (upper left number) and the frequency of this type rainstorm occurs (upper right number)

合的预报方法，是一种间接使用数值预报的方法。

当前数值预报和统计预报相结合的方法是集合预报。所谓“集合”，就是用数值模式制造出数十个乃至上百个不同的预报结果。其中的每一个成员，都与一定的模式过程和初值相对应，都是确定的预报。但是由于每个成员的模式过程或初值多存在一些微小的差异，所以预报结果各不相同，整个集合的预报有一定的离散度。换言之，集合预报是用确定论方法人为制造出来的不确定性。然后，再用统计方法从这个预报集合的离散特征中做出预报。集合预报不同于MOS预报，仍是直接的数值预报，统计只是归纳数值预报结果的方法。更重要的是，集合预报从方案设计开始就在概率论的指导之下进行，所以集合预报是确定论和概率论方法的有机结合。显然，集合预报的思路更符合客观世界变化的根本规律。

特别有意思的是，集合预报不仅可以提供大概率事件的预报，也可提供极端事件的预报。图7是从互联网下载的各国数值模式对721暴雨过程的集合预报比较^[7]。图中给出的不是具体的降水量，而是24h极端降水的发生概率。虽然对图中极端降水的定义及其发

生概率的具体算法还没有深入了解，但图7所显示的预报效果令人惊叹。因此，开展集合预报的研究和应用，在广大预报员中普及集合预报的基本知识是很有必要的。

本文第一作者早年曾做过少量的统计预报工作，所用的也都是比较简单的统计方法。本文只是通过对统计预报基本概念的讨论和几个统计预报具体事例的介绍，试图说明统计预报是天气预报方法中不可缺失一个方面，值得引起大家的重视。

篇后语：初稿完成后，作者又把《信号与噪音——为什么有的预报失败，但有的成功》^[20]和《赤裸裸的统计学——除去大数据的枯燥外衣，呈现真实的数据之美》^[21]这两本书找出来从头至尾重新翻阅。感到除了强调统计预报的必要性，还必须指出统计预报的局限性，还有一些非常重要的话需要说，例如统计预报是否真的可以不讲“道理”。为此补充介绍以下内容。

这两本书都一方面指出“在大数据时代，统计的重要性怎么强调都不过分”，但同时也强调统计数字

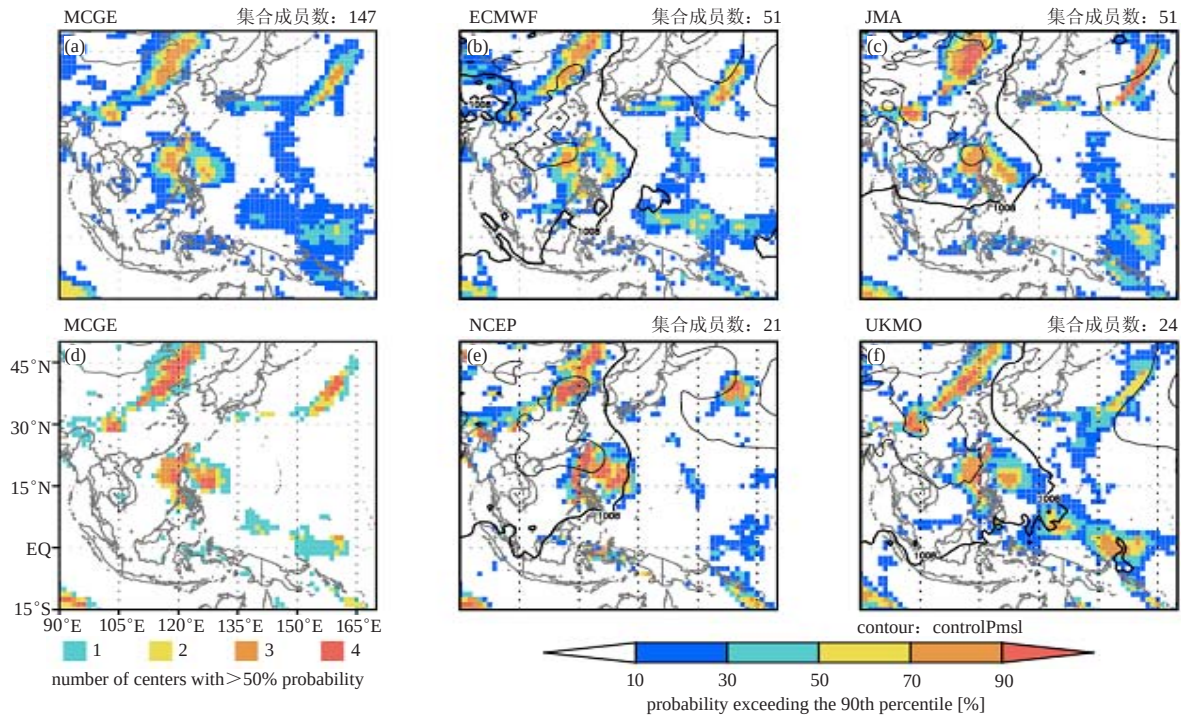


图7 各国模式2012年7月18日20时的第3~4天的24h雨量极端天气概率预报^[7]
(来源: http://tparc.mri-jma.go.jp/TIGGE/tigge_extreme_prob.html)

Fig. 7 Extreme weather probability forecast for 24h rainfall of 3-4th day at 2000 July 18th, in each country mode^[7]

也会“撒谎”。如果数据不足,或者统计方法错误也会得出谬以千里的结论。书中举了一个浅显易懂但值得每一个预报员深思的例子:统计数据可能得出“工作时小憩的人更易死于癌症”这样的结论,但实际是离开办公室休息的员工中有很多人在办公楼入口处抽烟,是抽烟而非小憩引发了癌症。可见,如果在数据处理过程中有先入为主的偏见,就可能犯重大的错误。只有对科学保持谦虚谨慎的态度,承认客观世界具有不可测性和不确定性,才能避免错误。

书中举了瑞典数学家、作家安德烈斯的一句话:用数据说谎容易,但是用数据说出真相却很难。因此书的作者认为最重要的是首先必须明确自己所持的观点源于哪个科学原理,避免曲解统计结果。也就是说统计预报也必须讲“道理”,不可盲目。

书中还有一个重要的观点是:“假设不能算是科学,假设只有通过预测得到检验才能成为科学。”也就是说,中长期预报和气候研究中的统计结论,都要经过预报检验才能成立。总之,“实践才是检验真理的唯一标准”。

参考文献

- [1] 丑纪范. 天气和气候的可预报性. 气象科技进展, 2011, 1(2): 11-14.
- [2] 郭树忠, 罗宝玉. 经典预报自动化系统. 航空气象, 1989, (增刊1): 11-13.
- [3] Wallace J M, Gultzer D S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. Mon Wea Rev, 1981, 109(4): 784-812.
- [4] 陶祖钰, 郭炜. 冬季500 hPa候平均高度场的遥相关. 气象学报, 1989, 47(4): 486-492.
- [5] Hoskins B J, Karoly D J. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. J Atmos Sci, 1981, 38: 1179-1196.
- [6] Simmons A J, Wallace J M, Branstator G M. Barotropic wave propagation and instability and atmospheric teleconnection patterns. J Atmos Sci, 1983, 40: 1363-1392.
- [7] 陶祖钰, 郑永光. “7·21”北京特大暴雨的预报问题. 暴雨灾害, 2013, 32(3): 193-206.
- [8] 姜晓曼, 袁慧玲, 等. 北京“7·21”特大暴雨高分辨率模式分析场及预报分析. 气象学报, 2014, 72(2): 207-219.
- [9] 李南声. 用网格点相关系数法选相似形势场. 气象, 1982, 8(1): 16-17.
- [10] 赵鹏福, 邱志生. 环流型聚类分析问题的初步探讨. 气象, 1985, 11(6): 13-16.
- [11] 陶祖钰, 汤桂生. 寻找相似天气形势的客观方法研究. 大气科学研究与应用, 1993, (5): 81-88.
- [12] Kohonen T. Self-Organization Maps. Berlin: Springer Verlag, 1995.
- [13] 赵翠光. 华北夏季降水多尺度研究及客观预报. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [14] 施能. 气象统计预报. 北京: 气象出版社, 2009.
- [15] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法. 北京: 气象出版社, 1990.
- [16] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 2007.
- [17] 柳士俊, 张蕾. 光流法及其在气象领域里的应用. 气象科技进展, 2015, 5(4): 16-21.
- [18] 韩雷, 王洪庆, 林隐静. 光流法在强对流天气临近预报中的应用. 北京大学学报(自然科学版), 2008, 44(5): 751-755.
- [19] Zhao Y Y, Zhang Q H, Du Y, et al. Objective analysis of circulation extremes during the 21 July 2012 torrential rain in Beijing. Acta Meteor Sin, 2013, 27(5): 626-635.
- [20] 纳特·希尔弗. 信号与噪音. 胡晓娇, 张新, 朱辰辰, 译. 北京: 中信出版社, 2013.
- [21] 查尔斯·惠伦. 赤裸裸的统计学. 曹健, 译. 北京: 中信出版社, 2013.

利用城市夜间灯光资料和NDVI研究成都地区植被覆盖度变化

程志刚¹ 杨欣悦¹ 董思言² 孙晨¹ 吴洋¹

(1 成都信息工程大学大气科学学院高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225;

2 国家气候中心, 中国气象局, 北京 100081)

摘要: 利用SPOT VEG NDVI植被覆盖度数据和DMSP/OLS夜间灯光数据对成都地区近16年来城市化进程对植被覆盖度的影响进行了研究。结果表明: 成都地区城市化进程呈增长的趋势, 但各地区发展程度差异较大。1998—2013年成都地区植被整体覆盖度较好, 且植被覆盖度与夜间灯光亮度值呈显著负相关, 相关系数达-0.78以上。城市活动越强烈的地方植被覆盖度越小, 即城市中心植被覆盖度最低, 距离城市中心越远植被覆盖度较高, 城市化发展迅速的城市周边植被覆盖度变化最大。总体而言, 成都地区植被覆盖程度处于增加趋势或保持相对稳定。

关键词: 城市化进程, NDVI, 植被覆盖度, 夜间灯光数据

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.002

Vegetation Coverage Changes in Chengdu Based on DMSP/OLS and SPOT-VEG NDVI

Cheng Zhigang¹, Yang Xinyue¹, Dong Siyan², Sun Chen¹, Wu Yang¹

(1 Chengdu University of Information Technology, Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225

2 National Climate Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: The effect of urbanization process on vegetation coverage was analyzed by using SPOT VEG NDVI and DMSP/OLS data in the Chengdu region from 1998 to 2013. The results show that: the urbanization in Chengdu experienced a continuing and rapid process, but the degree of development of each region has a big difference. From 1998 to 2013, the overall coverage of vegetation in Chengdu was good, and the vegetation coverage and the night lights brightness values were significantly negative correlated, the correlation coefficient is above 0.78. The more intense urban activities, the smaller the vegetation coverage is, that is, in the center of the city, the vegetation coverage has the smallest value, the farther the distance from the city center, the higher the vegetation coverage is. The change of the vegetation around the city where urbanization is developed fast is the largest. As a whole, the degree of vegetation coverage in the Chengdu region remains relatively stable and increase smoothly.

Keywords: urbanization process, NDVI, vegetation coverage, night light data

0 引言

城市化是一种最强烈的土地利用变化^[1], 是全球变化的重要组成部分。20世纪90年代以来, 我国经济快速发展, 城镇化水平逐步提高, 建成区面积增长迅速, 快速的城市发展改变了城市下垫面性质, 使大量植被逐渐消失^[2]。近年来很多学者针对我国城市空间不断扩张与重建引起的植被覆盖状况变化的问题进行了大量研究, 但研究区域主要集中于华北^[3-5]、西

北^[6-7]、东北^[8-9]等地区的发达城市及城市群。李景刚等^[10]利用DMSP/OLS夜间灯光数据和SPOT NDVI数据评价了环渤海城市群快速城市化过程的生态效应; 安佑志等^[11]利用MODIS时序数据分析了城市化进程中长江三角洲地区植被覆盖度变化, 发现城市及周边地区植被指数呈显著下降趋势, 表明随着城市化进程的加速, 长江三角洲地区植被覆盖状况正面临着恶化。成都作为四川省的省会城市, 近年来经济发展迅速, 土地利用方式发生了较大改变^[12]。因此, 有必要结合成都地区的城市化现状, 从时空分布变化特征着手对其生态环境变化进行较为细致深入的研究。有鉴于此, 本文选取1998—2013年SPOT VEG NDVI数据及美国军事气象卫星 (Defense Meteorological Satellite

收稿日期: 2015年10月27日; 修回日期: 2016年1月8日
第一作者: 程志刚 (1979—), Email: chengzg@cuit.edu.cn
通信作者: 杨欣悦 (1990—), Email: xinyue@foxmail.com
资助信息: 四川省教育厅重点项目 (13ZA0076); 国家自然科学基金 (41275033)

Program, DMSP) 线性扫描业务系统 (Operational Linescan System, OLS) 传感器的夜间灯光数据, 研究了成都及周边卫星城近16年来城市化特征及其与植被覆盖度之间的关系, 以期加深对该地区的城市群发展及生态环境的认识, 为城市的合理布局提供一定的科学依据。

1 资料与方法

1.1 资料介绍

美国军事气象卫星DMSP搭载的OLS传感器最初是为云层监测而专门设计的振荡扫描辐射计, 此后逐渐被应用于探测城镇灯光、渔火等地表活动。目前, 该系列数据已广泛应用于城市化、经济评估、人口估算等研究。本文采用的DMSP/OLS夜间灯光数据来源于美国国家地理数据中心 (<http://ngdc.noaa.gov/eog/>), 选用了基于低灯光数据 (月光微弱条件下获取的数据) 的稳定灯光数据产品, 该数据排除了亮云和水体的影响, 空间分辨率为 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 。

本次所采用的植被覆盖度的遥感数据为基于10d最大值合成 (MVC) 的1998年4月—2014年2月的SPOT-VGT NDVI数据, 空间分辨率为 $1\text{km} \times 1\text{km}$, 该产品经过了系统误差纠正、大气校正、辐射校正、几何校正等, 并将 $-1 \sim -0.1$ 的NDVI值设置为 -0.1 , 且DN值转化为NDVI值的关系式为 $NDVI = 0.004 \times DN - 0.1$ 。

1.2 资料处理方法

1.2.1 夜间灯光图像校正

本研究所采用的夜间灯光数据DMSP/OLS来自6个不同的传感器: F10 (1992—1994年)、F12 (1994—1999年)、F14 (1997—2003年)、F15 (2000—2007年)、F16 (2004—2009年)、F18 (2010—2012年), 由于不同传感器之间的固有差异及成像环境等因素的影响, 导致不同年份、不同传感器的长时间序列数据之间不具有连续性和可比性^[13-14], 参照邹进贵等^[15]的校正模型对夜间灯光图像进行校正。

1.2.2 区域复合灯光指数

利用夜间灯光影像可以构建综合灯光指数来反映城市化的水平, 对地区城市化发展状况开展有效的监测^[16]。为了使灯光指数与城市化水平的关系具有统一性和一致性, 我们选用陈晋^[17]等建立的复合灯光指数 (CNLI) 来研究成都市城市化水平。

$$CNLI = I \times S,$$

$$I = \frac{1}{N_L \times DN_M} \times \sum_{i=p}^{DN_M} (DN_i \times n_i),$$

$$S = \frac{Area_N}{Area},$$

其中, DN_i 为区域内第*i*级像元灰度值, n_i 为区域内该灰度级像元总数, DN_M 为最大可能灰度值 (63), N_L 、 $Area_N$ 分别表示为区域内满足条件 ($P \leq DN \leq 63$) 的像元总数和所占的总面积, $Area$ 为整个区域的面积。P为去除误差的阈值, 本研究确定误差为成都区域内灯光像元总数逐年增加且数值最小的灰度值为最佳阈值。

1.2.3 最大值合成法

NDVI值最大值合成法 (Maximum Value Composites, MVC) 是将NDVI值按月、季或年中各旬数据取最大值, 从而进一步消除云、大气、太阳高度角等的干扰^[18-19]。本文取一年中36旬的NDVI最大值 (M_{NDVI}) 作为年植被覆盖度数据, 计算公式为:

$$M_{NDVI,i} = \text{Max}(NDVI_{ij}),$$

其中, $NDVI_i$ 是第*i*个月的NDVI值, $NDVI_{ij}$ 是第*i*月第*j*旬的NDVI值, $M_{NDVI,i}$ 是像元上NDVI的最大值。

1.2.4 植被覆盖度水平计算

为使植被指数能够定量反映植被信息, 将NDVI值归一到0~255之间, 再根据前人的研究成果^[20-23]将归一后的NDVI像元灰度值分级, 使得定量评价该植被生态景观面积变化规律更为直观: $NDVI_{0-255}$ 的取值范围在0~128, 近红外波段对植被的反射值很低, 地物类型基本为荒漠、水域和居民区等无植被的地区; $NDVI_{129-255}$ 的取值范围在129~255之间, 像元灰度值与植被覆盖度呈正相关, 像元灰度值越大, 植被覆盖程度越高。该计算公式如下:

$$NDVI_{0-255} = \left(\frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right) \times 255,$$

式中, $NDVI_{0-255}$ 为归一到0~255的植被指数值, $NDVI_{\min}$ 、 $NDVI_{\max}$ 分别为研究区内该年份的最小、最大植被指数值。植被覆盖率用于分析植被覆盖水平的年际变化。

2 结果与分析

2.1 成都地区城市扩展时空变化特征

前人研究认为^[24], 夜间灯光数据能较好地反映城市面积。为此, 我们对比分析1998和2012年成都市夜间灯光分布数据 (图1), 结果表明, 成都市城市化进程明显, 主城区与周边郊县灯光亮值大值区逐渐扩大, 连片状分布趋势明显。由于CNLI指数兼顾了区域平均灯光强度及灯光面积两方面的属性特征, 具有较高的年际可比性, 能够较客观地反映出区域的城镇面积规模, 人口密度水平和经济发达程度^[25]。我们分析

了复合灯光指数CNLI随时间变化的趋势(图2), 结果表明, 成都地区城市化水平整体上呈持续上升的趋势, 增长速率为0.09/10a, 说明CNLI随时间增长的趋势比较明显, 成都地区城市化水平呈持续稳定的增长趋势。夜间灯光的亮度可以表示区域城市化的程度, 同时夜间灯光亮度值的平均值较大则意味着该地区的城市化水平相对较高。我们以成都市各

区县行政区划为基础, 统计各区县多夜间灯光亮度值的平均值和最大值, 可以看出, 各区县的城市化程度差异较大, 其中成都市区及其周围市县(双流、新都、郫县、都江堰等)城市化水平相对较高, 而城市化发展程度较低的地区为距离成都市区较远的大邑、蒲江、邛崃、金堂等地区夜间灯光亮度值偏小(图3)。

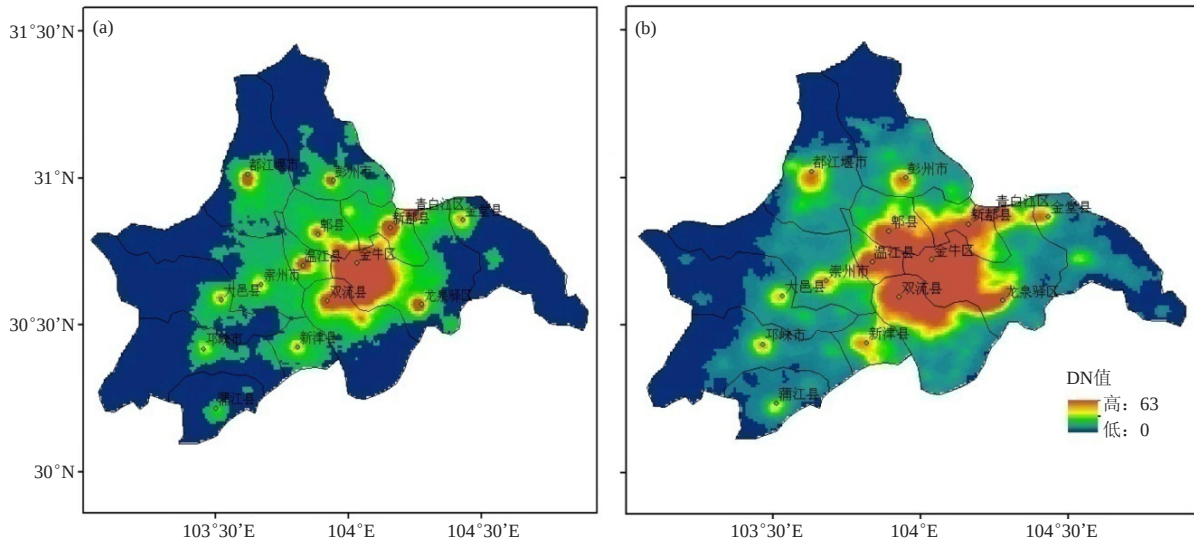


图1 校正后的夜间灯光亮度像元分布(圆点为城镇所在地,下同)
Fig. 1 The distribution of the corrected DMSP/OLS images (black points represent locations of cities)

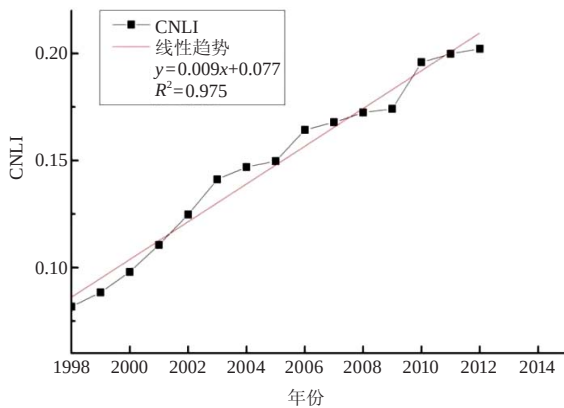


图2 1998—2012年成都地区年际CNLI指数变化趋势
Fig. 2 Trends of CNLI index from 1998 to 2012 in Chengdu

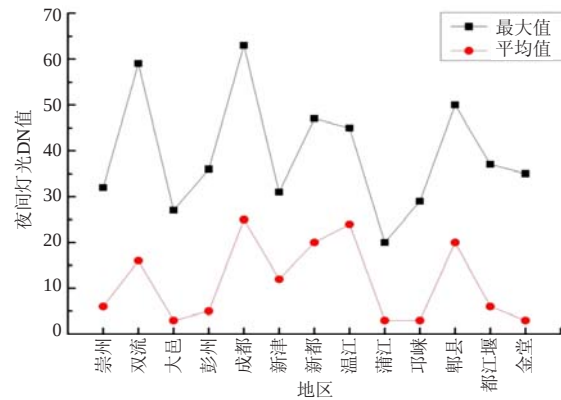


图3 成都市区县夜间灯光亮度值统计
Fig. 3 The statistics of DMSP/OLS nighttime light value in counties of Chengdu

2.2 城市化进程中成都地区城市植被覆盖率变化特征

2.2.1 植被覆盖度时空变化分析

将计算得到的植被覆盖度水平按照表1进行分类, 比较分析1998和2013年植被覆盖等级及其面积, 我们发现1、3、4级植被面积均明显增加, 其变化率分别为16.4%、12.39%、17.18%, 5级植被减少显著,

达50.06%。由此, 我们认为低植被覆盖度区域植被覆盖有所改善, 而植被覆盖度较好的区域植被则有所退化。为进一步反映该地区植被覆盖水平, 将归一化后1998—2013年的NDVI值求平均值, 以成都市区核心区为交点, 沿东—西(W-E)、南—北(N-S)、西南—东北(SW-NE)和西北—东南(SE-NW)四个方向绘制穿越建成区及非建成区的四条不同方向直线,

分析其NDVI变化趋势。结果表明(图4),成都市市中心处达到最低值,在成都周边较发达的市县达到次低值,远离城市则表现为高值。沿SE-NW剖面线,剖面线依次穿过都江堰、郫县、成都市区和龙泉驿形成4个低值区,最小数值分别为95、135、5、110,可以看出低值区范围与大小明显与城市化程度成正比,则城市化程度依次为:成都市区>龙泉驿>都江堰>郫县,相应的NDVI值也呈现出相同的大小关系。为印证以上结论,我们提取2000、2004、2008和2012年 $NDVI < 128$ (即代表较低植被覆盖度)的像元并叠置(图5)。由图可见,成都市区较低植被覆盖度范围不

断向外扩展,而成都市区周边的城市,如郫县、都江堰、彭州、新都、龙泉、双流等,较低植被覆盖度区域均朝着成都市区方向扩展,成都市区周边2000年离散的低值区在后期已连成片区,与图4结论一致。

表1 归一化NDVI与植被覆盖等级对应表

Table 1 The correspondence between normalized NDVI and vegetation coverage grade

NDVI	等级	植被覆盖度
<128	1	5%
129~138	2	5%~15%
139~158	3	15%~30%
159~190	4	30%~60%
191~255	5	60%

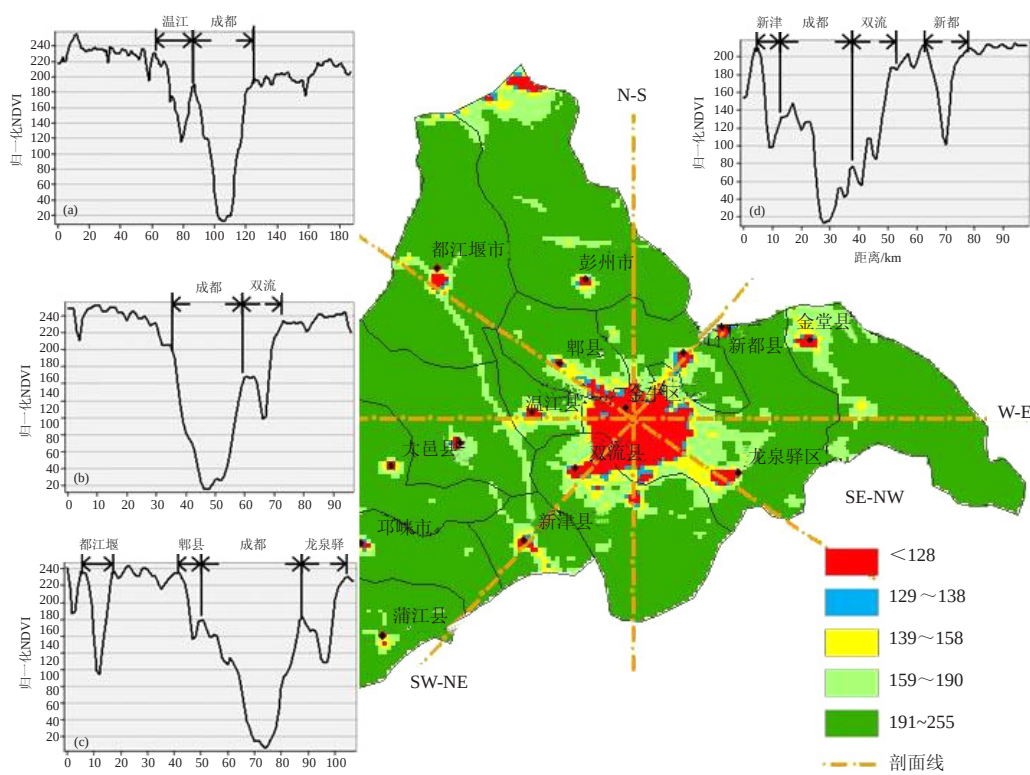


图4 1998—2013成都地区多年归一化NDVI平均值分布及其剖面线
(W-E、N-S、SE-NW和SW-NE为穿越成都市区的剖面线)

Fig. 4 The distribution of normalized NDVI mean values and their profile lines in Chengdu area from 1998 to 2013
(W-E, N-S, SE-NW and SW-NE represent four section lines across Chengdu)

2.2.2 NDVI 变化趋势分析

斜率变化(SLOPE)的绝对值大小反映变化趋势的程度,值越大,则变化程度越大,反之越小。将成都地区最大NDVI均值变化率按表3分为以下5类,分别代表中度退化、轻微退化、轻微改善、中度改善、明显改善五种植被覆盖情况。

由此可以看到成都地区本身生态环境基础较好,总体植被覆盖有所改善,植被覆盖轻微改善和中度改

善占整个研究区的主体。成都市区由于经济发展已达到一定水平,加之2002年以来成都市政府提出创建“国家环保模范城市”,加大绿化建设的力度,对市区主要街道的绿化进行加密,因此成都市区的植被覆盖度有所改善。而远离城市区域,由于社会经济发展水平相对较低,且政府环保观念的提升等因素,植被覆盖度也随之增加。相反,成都市周边地区及其卫星城,由于社会经济发展,城市化进程不断加快,建成

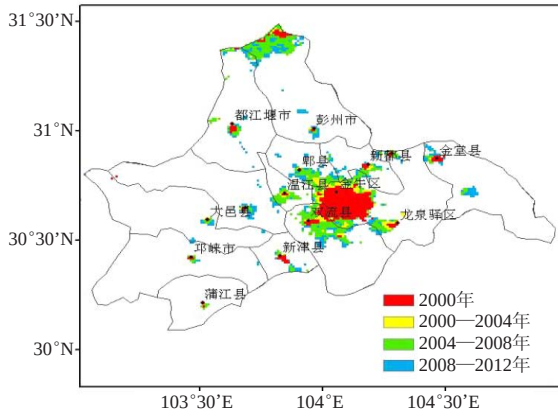


图5 1998—2013年成都地区城市化进程NDVI<128的像元变化

Fig. 5 The pixel changes of NDVI<128 in the process of urbanization in Chengdu area from 1998 to 2013

区面积不断扩大，大量土地利用类型被改变，从而导致植被覆盖度表现为减小趋势。

表2 1998和2013年各级植被覆盖的面积及所占比例

Table 2 The area and percentage of vegetation coverage in 1998 and 2013

等级	1998年		2013年		变化量	
	面积 (km ²)	百分比 (%)	面积 (km ²)	百分比 (%)	面积 (km ²)	百分比 (%)
1	278	1.95	1513	10.59	1226	16.40
2	77	0.54	374	2.62	297	3.97
3	276	1.93	1202	8.41	926	12.39
4	3383	23.68	4667	32.67	1284	17.18
5	10273	71.90	6531	45.71	-3742	50.06

表3 1998—2013年成都地区最大NDVI均值变化趋势统计

Table 3 The statistics of variation trend of NDVI in Chengdu from 1998 to 2013

SLOPE范围	变化程度	所占面积 (km ²)	所占百分比 (%)
-0.0096<SLOPE<-0.0038	中度退化	789	5.59
-0.0038<SLOPE<-0.0015	轻度退化	1639	11.63
-0.0015<SLOPE<0.0001	保持不变	3864	27.41
0.0001<SLOPE<0.0014	轻度改善	4318	30.63
0.0014<SLOPE<0.0045	中度改善	3487	24.74

2.3 成都地区植被覆盖度变化与城市发展关系的探讨

为了考察成都地区城市化进程中植被覆盖度的变化，我们选取相同年份的植被覆盖度和夜间灯光数据，并进行7a平均值的差值计算，即用2006—2012年的平均值减去1999—2005年的平均值，从而滤去年际变率的影响。从图6a中可以看出，成都地区近10年各城市的城郊地区城市化变化最明显，其中成都市城郊变化最大，其次为成都周边卫星城，对比图6a、6b可以看出，植被覆盖度变化最大的区域同样集中于城市扩展的城郊地区，且与灯光灰度值的差值空间分布具

有较好的空间对应关系，表明成都地区近年来的植被覆盖情况与城市化进程密切相关，城市化发展快的城市周边城郊区域植被覆盖度低，远离城市及城市中心的区域植被覆盖度较好且变化程度小。影响植被覆盖度变化的起因复杂多样，图6b中成都地区最北部非城市化区域的NDVI也表现为负值则可能是由于气温及降水等气象因素共同作用的结果，其成因有待进一步讨论。

为进一步研究城市化进程中城市化强弱与植被覆盖度强度的关系，采用分层采样的方法随机选取300个样点，既保证所选样点夜间灯光亮度分布均匀，又剔除采样点选取的人为因素影响。具体方法为：将多年平均夜间灯光亮度值（DN值）以10为间隔分层（如0~10，10~20，…，50~63），共6层，每层随机选取50个样点，提取采样点对应的多年平均

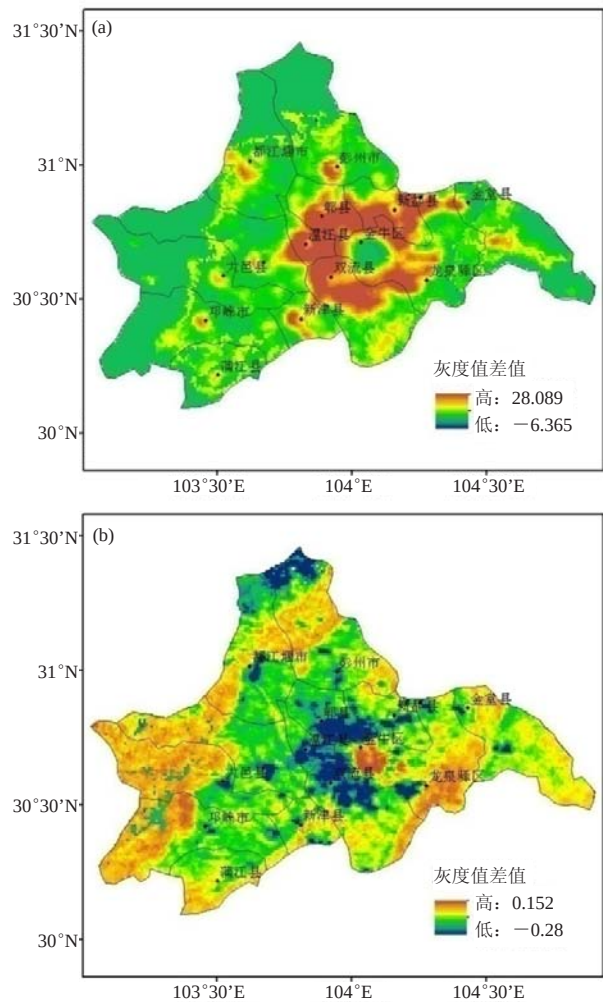


图6 2006—2012年与1999—2005年夜间灯光灰度值 (a) 与同时期NDVI (b) 平均值的差值分布

Fig. 6 Distributions of value difference between the mean of 2006—2012 and the mean of 1999—2005 (a)DMSP/OLS nightlight value (b)NDVI

NDVI, 以分析多年平均的夜间灯光值与植被覆盖度像元值之间关系。若相关系数为正, 则表示该区域的植被覆盖随夜间灯光亮度值的增加而增加, 反之, 则表示呈减少趋势。从图7可以看出, NDVI与夜间灯光亮度平均值呈负相关关系, 相关系数达 -0.901 (通过 0.05 的显著性检验)。结果表明, 夜间灯光亮度值越大, 对应的NDVI值越小。这也说明, 城市化程度越高, 植被覆盖度越小, 城市化对植被覆盖度起削弱作用, 与安佑志等^[11]、刘沁萍等^[26]结论一致。同时, 为了进一步阐明城市化与植被覆盖的显著关系, 我们选择了图6a中夜间灯光灰度值平均值差值大于10的像元范围作为城市化活动强烈地区的代表, 计算了成都地区1998—2012年夜间灯光亮度值与植被覆盖度相关系数 ($p \leq 0.05$) 的空间分布 (图8), 其相关系数为 $-0.936 \sim 0.606$, 由图可见, 且绝大部分城市化活动强烈的地区夜间灯光像元与植被覆盖度呈显著的负

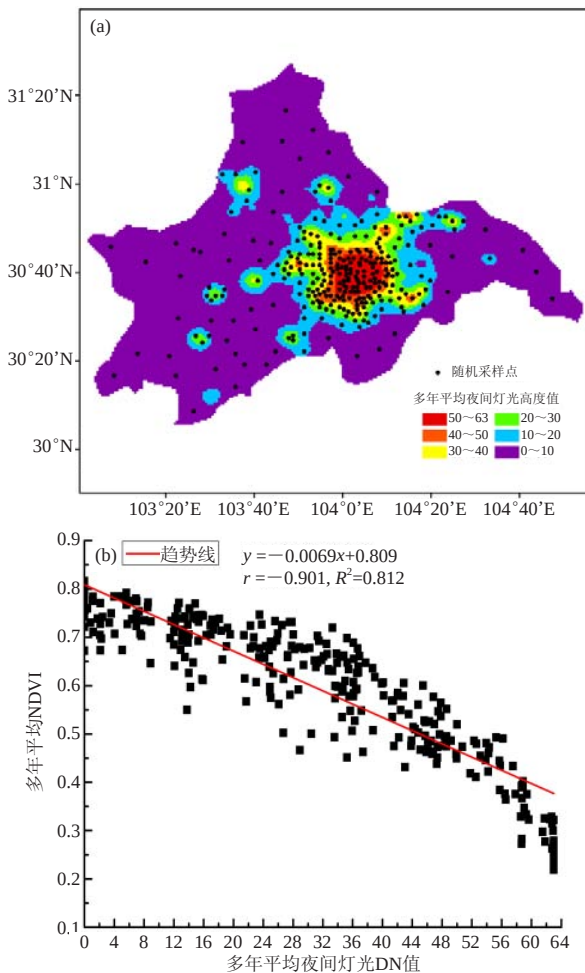


图7 随机采样点示意图 (a) 及多年NDVI与夜间灯光DN值散点图 (b)

Fig. 7 The sketch map of (a) random sampling point and (b) the scatter diagram of average NDVI and DMSP/OLS nightlight value for 15 years

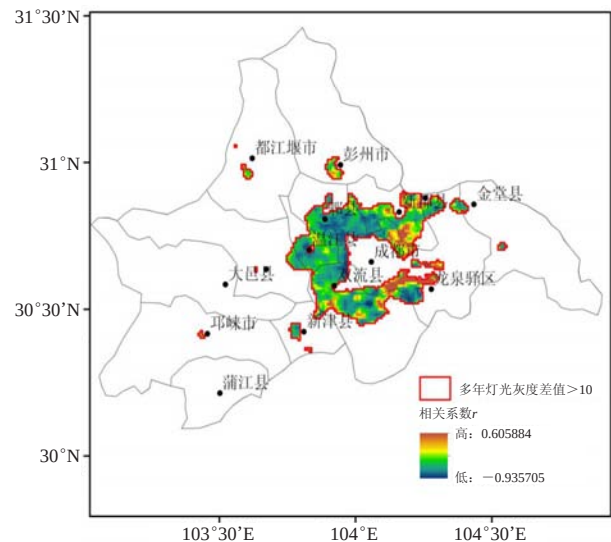


图8 城市化活动强烈区域内NDVI与夜间灯光亮度相关系数空间分布图 ($p \leq 0.05$)

Fig. 8 The spatial distribution of correlation coefficient of NDVI and DMSP/OLS nightlight value in the strong area of urbanization

相关, 进一步说明了城市化对植被覆盖度的影响: 城市化活动集中的城市边缘城郊地区, 城市化活动越强烈, 植被覆盖度越低。

3 结论与讨论

本文利用植被覆盖度SPOT VEG NDVI数据和DMSP/OLS夜间灯光数据, 对成都地区城市城市化进程及其植被覆盖度变化情况进行了研究, 并初步探讨了二者之间的关系, 得到的主要结论有:

1) 成都地区城市化总体水平呈平稳速率增长, 但发展过程中存在区域城市化不均衡的特点: 市区和近郊县的城市化水平较高, 远郊县的城市化发展滞后。

2) 1998—2013年成都地区植被覆盖离散程度增加, 低植被覆盖度区域与城市化程度成正比, 城市活动越强烈的地区植被覆盖度越小, 具体表现为城市中心植被覆盖度最低, 远离城市则表现为较高的植被覆盖度, 在城市化发展迅速的城市周边城郊地区, 植被覆盖度变化最大。

3) 植被覆盖度及夜间灯光亮度值相关分析表明, 植被覆盖度与夜间灯光亮度值呈显著负相关关系, 说明城市化程度越高的地区植被覆盖度越低。但总体而言, 除城市扩展区存在植被覆盖度显著减小的情况外, 城市化并没有带来大面积的植被减少, 成都地区整体植被覆盖度处于增加或保持不变的趋势。

本文虽使用NDVI数据和DMSP/OLS数据对成都地区近10多年来植被变化、城市化水平及二者间相关关系进行了探讨, 但由于仅使用了较短时间序列的植

被覆盖数据,且植被覆盖度受气候因素影响十分明显,因此今后有必要利用长时间序列数据并结合气象数据对成都地区城市化进程中植被变化进行分析。

参考文献

- [1] Shepherd J M. A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future. *Earth Interact.* 2005(9):1-27.
- [2] 曾辉,陈雪.城市化地区植被生态环境效应研究. *生态环境学报*, 2010, 19(11): 2737-2742.
- [3] 刘金龙,郭华东,张露,等.京津唐地区城市化对植被物候的影响研究. *遥感技术与应用*, 2014, 29(2): 286-292.
- [4] 刘斌,孙艳玲,王忠良,等.华北地区植被覆盖变化及其影响因子的相对作用分析. *自然资源学报*, 2015, 30(1): 12-23.
- [5] 张月丛,赵志强,李双成,等.基于SPOT-NDVI的华北北部地表植被覆盖变化趋势. *地理研究*, 2008, 27(4): 745-754.
- [6] 王兮之,梁钊雄.基于MODIS数据的湟水流域植被覆盖变化研究. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(6): 137-142.
- [7] 戴声佩,张勃,王海军,等.基于SPOT NDVI的祁连山草地植被覆盖时空变化趋势分析. *地理科学进展*, 2010, 29(9): 1075-1080.
- [8] 冯莉莉,何贞铭,刘学锋,等.基于MODIS-NDVI数据的吉林省植被覆盖度及其时空动态变化. *中国科学院大学学报*, 2014, 31(4): 492-536.
- [9] 张莲芝,李明,吴正方,等.基于 SPOT NDVI 的中国东北地表植被覆盖动态变化及其机理研究. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(1):171-175.
- [10] 李景刚,何春阳,史培军,等.基于DMSP/OLS灯光数据的快速城市化过程的生态效应评价研究——以环渤海城市群地区为例. *遥感学报*, 2007, 11(1): 115-126.
- [11] 安佑志,刘朝顺,施朝顺,等.基于MODIS时序数据的长江三角洲地区植被覆盖时空变化分析. *生态环境学报*, 2012, 21(12): 1923-1927.
- [12] 冷奕明.成都市城市化进程中土地利用变化研究. 成都: 四川农业大学, 2006: 19-25.
- [13] Elvidge C D, Ziskin D, Baugh K E, et al. A fifteen year record of global natural gas flaring derived from satellite data. *Energies*, 2009, 2(3): 595-622.
- [14] 范俊甫,等. 1992—2010年基于DMSP-OLS图像的环渤海城市群空间格局变化分析. *地球信息科学学报*, 2013, 15(2): 280-288.
- [15] 邹进贵,陈艳华,等.基于ArcGIS的DMSP/OLS夜间灯光影像校正模型的构建. *测绘地理信息*, 2014, 39(4): 33-37.
- [16] 杨眉,王世新,周艺,等. DMSP/OLS夜间灯光数据应用研究综述. *遥感技术与应用*, 2011, 26(1): 45-51.
- [17] 陈晋,卓莉,史培军,等.基于DMSP/OLS数据的中国城市化过程研究——反映区域城市化水平的灯光指数的构建. *遥感学报*, 2003, 7(3): 168-175.
- [18] 张莲芝,李明,吴正方,等.基于SPOT NDVI的中国东北地表植被覆盖动态变化及其机理研究. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(1): 171-175.
- [19] 朱源,王志,彭光雄.基于SPOT-NDVI的贺兰山植被覆盖的时空变化研究. *遥感技术与应用*, 2012, 27(1): 142-148.
- [20] 周兆叶,储少林,王志伟,等.基于NDVI的植被覆盖度的变化分析:以甘肃省张掖市甘州区为例. *草业科学*, 2008, 25(12):23-29.
- [21] 党青,杨武年.近20年成都市植被覆盖度动态变化检测及原因分析. *国土资源遥感*, 2011(4):121-125.
- [22] 李小亚,张勃,靳自宝.基于MODIS-NDVI的甘肃省河东区植被覆盖度动态监测. *水土保持研究*, 2013, 20(1):112-115.
- [23] 孙存举,吴晓青,李浩.基于NDVI的清水县植被变化分析. *四川林勘设计*, 2011(4):13-17.
- [24] 王翠平,王豪伟,李春明,等.基于 DMSP/OLS 影像的我国主要城市群空间扩张特征分析. *生态学报*, 2012, 32(3): 942-954.
- [25] 卓莉,史培军,陈晋. 20世纪90年代中国城市时空变化特征——基于灯光指数CNLI方法的探讨. *地理学报*, 2003, 58(6): 893-902.
- [26] 刘沁萍,杨永春,田洪阵,等.快速城市化时期中国城市建成区植被状况的时空分异特征. *自然资源学报*, 2014, 29(2): 223-236.

《边界与海洋研究》创刊

本刊编辑部

2015年12月,经国家新闻出版广电总局批复同意,多学科交叉综合研究国家边界与海洋问题的学术期刊《边界与海洋研究》创刊。该刊由教育部主管,武汉大学主办,国内外公开发行人,是目前国内外唯一的边海问题跨学科研究期刊。

据悉,2012年武汉大学以中国边界与海洋研究院、国际法研究所为依托,在中央相关部委大力支持下,协同复旦大学、中国政法大学、外交学院、郑州大学、中国社会科学院中国边疆研究所、水利部国际经济技术合作交流中心、国家海洋局海洋发展战略研究所等单位,牵头组建了“国家领土主权与海洋权益协同创新中心”。协同中心的宗旨是,建成融“科学研究、政策建言、人才培养、舆论引导、公共外交”为一体的国家战略平台和世界知名智库。《边界与海洋研究》的创刊,是

“国家领土主权与海洋权益协同创新中心”建设的重要组成部分。

《边界与海洋研究》立足领土海洋学学科,聚焦国家边界与海洋研究的重大理论和现实问题,坚持问题导向,支持跨学科研究,繁荣边海学术,服务国家领土海洋维权,促进国内外边海问题学术交流。该刊的重点领域:国家海洋战略与边海外交;中国与周边国家关系;一带一路与中国周边合作;海洋争端解决与国际法;海洋权益与海洋合作;二战、战后国际秩序与边界海洋争端;钓鱼岛与南海诸岛档案资料与历史研究;中国疆域历史与现状;陆地边界争端与跨境合作;界河管理及跨境水资源争端与合作;极地治理与极地合作;边界海洋信息与技术应用等。

山东省夏季降水的年代际变化和年际变化

刘永平¹ 张潇潇^{2, 3} 薛峰²

(1 山东省郯城县气象局, 郯城 276100; 2 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029;

3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于山东省7个台站的观测资料和其他多种资料, 分析了山东夏季降水的年代际和年际变化。结果表明, 山东省夏季降水经历了显著的年代际变化, 20世纪50—70年代末为多雨期, 70年代末到21世纪初为少雨期。70年代末之后, 太平洋年代际振荡(PDO)从负位相转变为正位相, 东亚夏季风减弱, 导致山东省夏季降水减少。此外, 年代际背景还影响到山东夏季降水的年际变化。在1951—1977年期间, 降水与热带中太平洋(Niño4区)海表温度呈显著负相关, 但在1978年之后, 这种相关关系明显减弱。值得注意的是, PDO指数在2003年之后再次由正转负, 山东夏季有可能再次转变为多雨。

关键词: 年代际变化, 年际变化, 山东, 夏季降水, 太平洋年代际振荡

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.003

Interdecadal and Interannual Variabilities of Summer Rainfall in Shandong Province

Liu Yongping¹, Zhang Xiaoxiao^{2, 3}, Xue Feng²

(1 Tancheng Meteorological Bureau, Shandong Province, Tancheng 276100 2 ICCES, Institute of Atmospheric

Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029 3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Based on the 7-station observation in Shandong Province and other datasets, interdecadal and interannual variabilities of summer rainfall in Shandong Province are analyzed. The result showed that summer rainfall underwent a pronounced interdecadal variability, with more rainfall from 1950s to the late 1970s and less rainfall from the late 1970s to the beginning of the 21st century. After the late 1970s, there occurred a transition for the Pacific decadal oscillation from a negative phase to a positive one, thus leading to a decreased East Asian summer monsoon and less summer rainfall in Shandong Province. In addition, the decadal background plays a role in interannual variability of summer rainfall. During 1951—1977, there was a significantly negative correlation between summer rainfall and sea surface temperature in the tropical central Pacific (Niño4 region). After 1978, however, this relation decreased dramatically. It is also noted that summer rainfall in Shandong Province seems to have entered a more rainfall period along with a transition of PDO from a positive phase to a negative one after 2003.

Keywords: interdecadal variability, interannual variability, Shandong, summer rainfall, Pacific decadal oscillation

0 引言

山东省地处中纬度沿海地区, 受季风气候影响, 年降水量主要集中在夏季, 夏季降水的多少在很大程度上决定着全年的旱涝情况。山东位于华北与江淮之间的过渡地带, 独特的地理位置以及复杂的地形条件, 使得山东夏季降水与华北和江淮地区既有联系又有所差异。陈菊英指出, 山东汛期降水既与全国大部地区汛期降水分布特征具有一致性, 又有本地区的特殊性^[1]。胡桂芳认为山东夏季雨型与全国雨型有一定的

联系, 但并不完全一致^[2]。王庆等指出全国性的大范围雨带位置预报, 常常与山东降水实况相差较大^[3]。因此, 山东夏季降水变化有其明显的区域特征。

受东亚夏季风强弱变化的影响, 山东省夏季降水呈现出显著的年际变化和年代际变化。特别是由于东亚夏季风在20世纪70年代末的衰退, 山东省夏季降水明显减少, 由多雨期转变为少雨期。研究表明, 东亚夏季风的年代际减弱与太平洋年代际振荡(PDO)位相转换造成的热带海洋变暖有关^[4-7]。杨修群等^[8]研究了华北降水年代际变化及相关的海气异常型, 发现当华北地区降水偏少时, 热带中东太平洋海温偏高, 北太平洋中部海温偏低, 表现为PDO的正位相。顾薇等^[9]和邓伟涛等^[10]发现20世纪70年代中后期, 北太平

收稿日期: 2014年6月3日; 修回日期: 2014年7月21日

第一作者: 刘永平(1963—), Email: 13508997296@139.com

资助信息: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05110201); 国家重点基础研究发展计划(2010CB951901)

洋中纬度海温由正距平向负距平转变, PDO由负位相向正位相转变, 西太平洋副热带高压偏南, 东亚夏季风由强变弱, 华北由多雨转为少雨。

年代际背景的变化还影响到气候系统的年际变化及其预测。Gershunov等^[11]发现PDO不同位相阶段ENSO对北美天气气候的影响明显不同。朱益民等^[12]指出ENSO对中国夏季降水异常的影响受到PDO背景的调制。高辉等^[13]发现1980年之后ENSO与我国夏季降水异常相关关系及其在预测中的指示意义明显减弱。与此同时, 南半球环流对中国夏季降水的影响趋于增强^[14]。但考虑到山东省夏季降水的区域特征, 上述有关结论的适用性尚需进一步研究。本文利用山东省7个测站的夏季降水资料, 分析了其长期变化规律, 并将夏季分为多雨期和少雨期, 对比分析了两个阶段的大气环流和海温背景及其年际变化。在此基础上, 根据21世纪以来PDO的变化趋势, 展望了山东夏季降水的未来变化。

1 资料

本文使用以下观测和再分析资料: 1) 中国气象局国家气候中心提供的全国160站1951—2013年夏季(6—8月)降水资料, 选取其中7个站(德州、烟台、青岛、潍坊、济南、临沂、菏泽)作为山东省的代表站; 2) 海表温度(SST)数据来自美国国家海洋大气管理局(NOAA)延伸重建的月平均海表温度资料, 分辨率 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ ^[15]; 3) 美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)提供的大气环流再分析数据集, 分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ^[16]; 4) 美国环境预报中心提供的不同Niño分区的海温指数(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices>), 包括Niño3区(5°N — 5°S , 150° — 90°W), Niño4区(5°N — 5°S , 160°E — 150°W)和Niño3.4区(5°N — 5°S , 170° — 120°W)。5) 美国华盛顿大学提供的月平均太平洋年代际振荡(PDO)指数(<http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>), PDO指数为北太平洋地区(20°N 以北)SST正交函数分解的第一模态。文中冬季指前一年12月和当年1月和2月的平均值, 春季和夏季分别为3—5月和6—8月的平均值。

2 夏季降水的年代际变化

图1为山东省夏季降水距平百分率的时间序列及9年滑动平均。除年际变化外, 夏季降水还呈现显著的年代际变化。在1977年之后, 滑动平均值由正变负, 表明山东省降水由多雨期转变为少雨期。另外值得注意的是, 2003年之后, 滑动平均值再次改变, 因此山东省夏季降水有可能发生再次转折。以1977

年为分界点, 将1951—2003年共53年分为两个时期, 1951—1977年为多雨期(27年), 1978—2003年为少雨期(26年)。在多雨期, 表现为20世纪60年代初和70年代中期的双峰分布, 降水距平在1964年达到次峰值(48%), 在1971年达到最大峰值(60%)。在少雨期, 也出现了20世纪80年代中期和90年代末—21世纪初的两个降水低谷, 最大负异常在2002年(−55%)。另外, 在两个时期降水的年际变化均非常显著, 多雨期降水偏少年共6次, 少雨期降水偏多年共7次。在上述13年中, 1966—1969年的降水偏少年和1993—1996年的偏多年持续4年, 1958—1959年降水偏少持续2年, 其余年份的降水异常均呈现交替发生的现象。

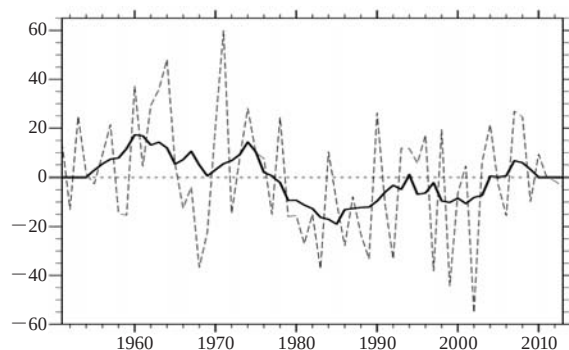


图1 1951—2013年山东省夏季降水距平百分率时间序列(虚线)及其9年滑动平均(实线)(单位: %)

Fig. 1 Time series of summer rainfall anomaly percentage in Shandong Province from 1951 to 2013 (dash line) and its 9-year running mean (solid line) (unit: %)

上述降水的年代际变化与全球和东亚大气环流的变化有关。如图2所示, 全球海平面气压发生了显著变化, 热带气压升高, 其中尤以东亚地区最为显著。同时, 南半球高纬度气压降低, 南极涛动处于正位相, 使西太平洋副热带高压偏南^[14, 17]。同时, 东亚沿海出现偏北风异常, 西南季风减弱(图3), 不利于水汽向北方输送, 山东夏季降水随之减少。

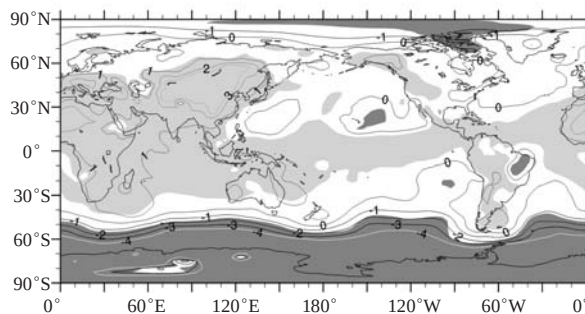


图2 1978—2003年与1951—1977年夏季海平面气压场的差异(单位: hPa)(阴影区为超过0.05显著性水平的区域)

Fig. 2 Sea level pressure difference in summer between 1978–2003 and 1951–1977 (unit: hPa), regions over 5% significance level are shaded

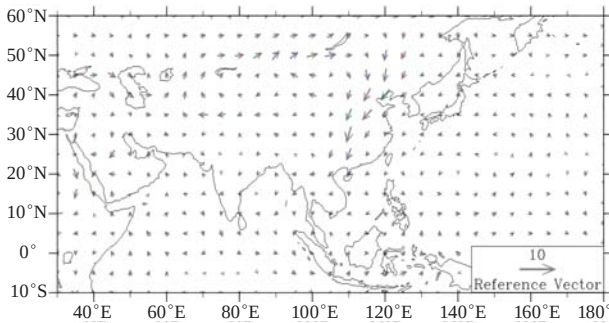


图3 1978—2003年与1951—1977年夏季850hPa风场的差异 (单位: m/s)

Fig. 3 850 hPa wind difference in summer between 1978–2003 and 1951–1977 (unit: m/s)

图4为两个时期SST的差异。在冬季 (图4a), 全球大部分海域SST普遍升高, 其中以热带东太平洋和印度洋以及南大洋最为明显, 但北太平洋和北大西洋SST降低。这种SST异常分布持续到夏季, 太平洋和印度洋升温更为显著, 但北太平洋和北大西洋的降温则有所减弱 (图4b)。上述SST异常分布型类似于PDO的正位相, 说明山东省夏季降水的年代际减弱可能与PDO位相转换有关。

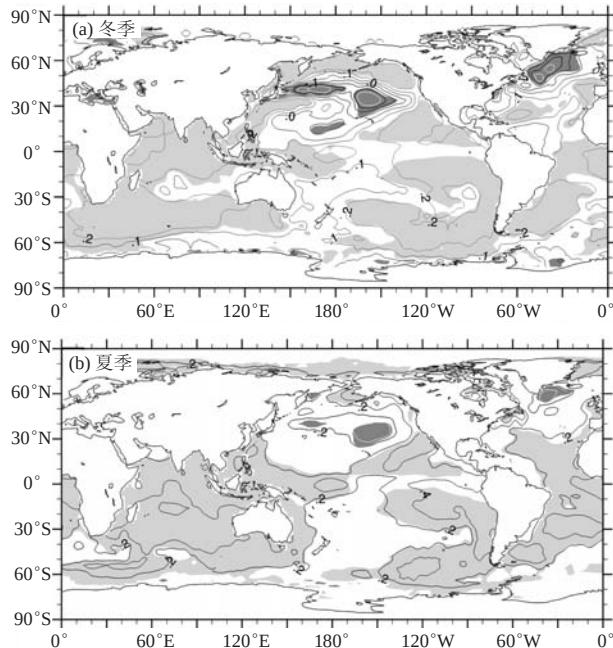


图4 1978—2003年与1951—1977年海表温度的差异 (单位: $^{\circ}\text{C}$) (阴影区为超过0.05显著性水平区域)

Fig. 4 Sea surface temperature difference between 1978–2003 and 1951–1977 (unit: $^{\circ}\text{C}$, regions over 5% significance level are shaded)

图5进一步给出PDO指数的变化及其9年滑动平均。类似于降水和环流场的变化, PDO也表现出明显的年代际变化特征。在20世纪70年代末期, PDO从负

指数 (冷位相) 转变为正指数 (暖位相), 对应于热带大洋的变暖和北太平洋的变冷 (图4)。对比山东省夏季降水与PDO指数的9年滑动平均 (图6), 可以发现二者呈现明显的反相关关系, 原始序列中夏季降水与PDO的相关系数为 -0.327 , 而9年滑动平均的相关系数则高达 -0.877 , 均通过了置信度为1%的显著性检验。1951—1977年多雨时期对应于PDO的冷位相, 而1978—2003年少雨时期对应于PDO的暖位相。此外, PDO指数由负转正的转折点也出现在1977年前后, 与山东夏季降水第一个转折点是一致的。值得注意的是, PDO指数滑动平均值在2003年前后由正转负, 有再次向冷位相转变的趋势, 而山东夏季降水也随之变为正异常, 二者的转变时间也大致相同。

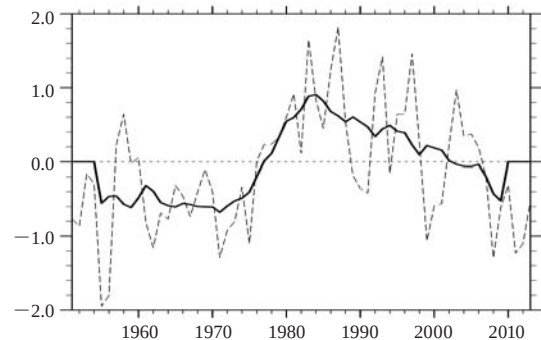


图5 1951—2013年PDO指数时间序列 (虚线) 及其9年滑动平均 (实线)

Fig. 5 Time series of the Pacific decadal oscillation index (dashed) and its 9-year running mean (solid) from 1951 to 2013

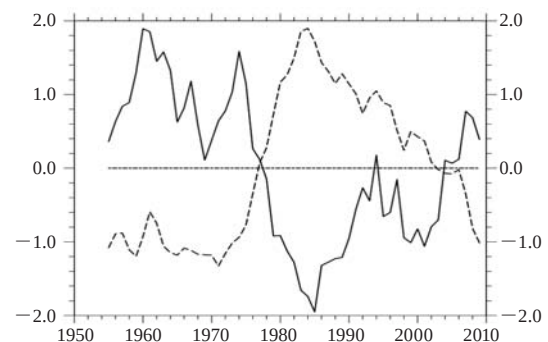


图6 标准化后的9年滑动PDO指数 (虚线) 和山东夏季降水距平百分率 (实线) 的时间序列

Fig. 6 Normalized 9-year running mean Pacific decadal oscillation index (dash line) and normalized summer rainfall anomaly percentage in Shandong Province (solid line)

3 不同年代际背景下降水的年际变化

已有研究表明, 年代际背景的变化不仅影响到中国夏季降水的分布, 而且其年际变化的影响因子也有很大差异, 特别是年代际背景直接调制了ENSO与中国夏季降水的关系^[12-13]。图7为山东夏季降水

在两个时期与冬季SST的相关分布。在前一个时期（1951—1977，图7a），在热带中太平洋为显著负相关，在热带西太平洋为正相关，这种相关分布持续到春季；到夏季则明显减弱（图略）。换言之，当冬季Niño4区SST偏高时，山东夏季降水偏少。但在后一个时期（1978—2003，图7b），上述相关分布完全消失，山东夏季降水与热带太平洋SST无显著相关，说明ENSO对山东夏季降水的影响显著减弱。

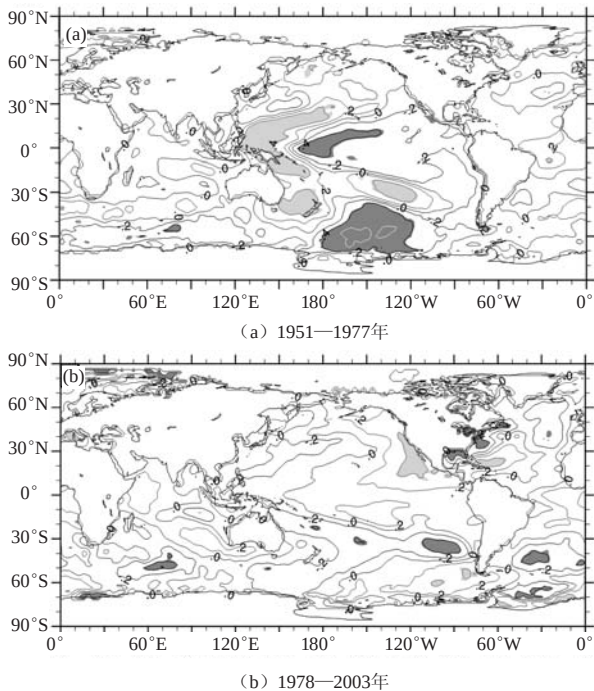


图7 山东省夏季降水与冬季海表温度的相关分布（阴影区为超过0.05显著性水平的区域）

Fig. 7 Correlation coefficient between summer rainfall in Shandong Province and sea surface temperature in winter, regions over 5% significance level are shaded

与整个中国夏季降水有所不同的是，影响山东夏季降水的关键区并非热带东太平洋（Niño3.4区）而是热带中太平洋（Niño4区）。图8给出两个时期Niño4区SST异常与山东夏季降水的时间序列。在前期（1951—1977年，图8a），降水与Niño4区SST呈显著负相关，相关系数为-0.39，通过0.05的显著性检验；而后期的相关关系显著减弱，相关系数仅为0.16。表1进一步给出各季节Niño区域SST与山东夏季降水的相关系数。在前后两个时期的各个季节，降水与Niño3和Niño3.4区的SST相关均不显著，未通过0.05的显著性检验。最显著相关为前期降水与Niño4区SST的相关，最大相关系数超过0.45，通过0.02的显著性检验。但这一相关关系在后期显著减弱，相关系数较低。因此，年代际背景对山东夏季降水预测有重要意

义，选取汛期降水的预报因子必须考虑年代际背景。当PDO处于负位相时，Niño4区SST对山东夏季降水有较好的预测意义。当PDO处于正位相时，Niño4区SST不再适合作为预测因子。

表1 山东夏季降水和各Niño区海温的相关系数（黑体字超过0.05显著性水平）

Table 1 Correlation coefficients between summer rainfall in Shandong Province and sea surface temperature over various Niño regions (correlation coefficients over 5% significance level are indicated with the bold type)

1951—1977年	Niño3	Niño4	Niño3.4	1978—2003年	Niño3	Niño4	Niño3.4
前年秋季	-0.218	-0.219	-0.243	前年秋季	0.146	0.127	0.138
前年冬季	-0.254	-0.393	-0.299	前年冬季	0.166	0.158	0.175
当年春季	-0.248	-0.454	-0.33	当年春季	-0.076	0.008	0.022
当年夏季	-0.208	-0.425	-0.279	当年夏季	-0.24	0.015	-0.125

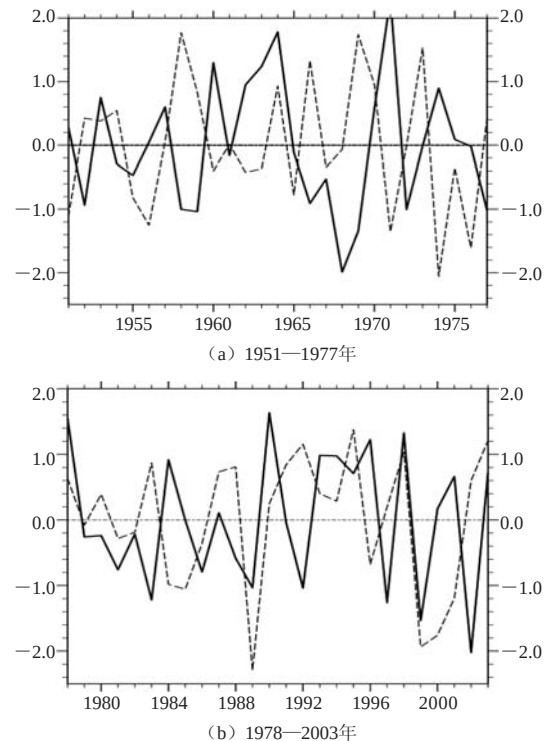


图8 标准化后的山东省夏季降水（实线）与Niño4区SST（虚线）的时间序列

Fig. 8 Normalized summer rainfall in Shandong Province (solid line) and normalized sea surface temperature over Niño4 region (dash line)

4 结论

基于山东省7个测站的降水资料并结合其他多种资料，本文分析了山东夏季降水的年代际变化。结果表明，山东夏季降水经历了从多雨期到少雨期的年代际变化，转折点出现在1977年前后，20世纪50—70年代末为多雨期，70年代末—21世纪初期为少雨期。进一步分析表明，太平洋年代际振荡（PDO）在70年代

末从冷位相转变为暖位相, 东亚夏季风随之减弱, 导致了山东夏季降水减少。

PDO的位相转变还影响到山东夏季降水的年际变化及其预测。1977年之前, 山东夏季降水与Niño4区海温有显著的相关关系, 当冬春季热带中太平洋海温偏高时, 山东夏季降水偏少。但在1978年之后, 二者的相关关系明显减弱, Niño4区海温不能作为山东夏季降水的预测因子, 其他一些因子如南半球环流对东亚夏季风的影响明显增强^[14, 17]。因此, 夏季降水的预测必须考虑到年代际背景。

PDO是太平洋海气耦合系统的一种周期振荡现象, 其位相一般可持续20~30年, 而且从20世纪70年代末到现在的正位相已持续30年, 因此PDO位相有可能再次开始转变。从PDO时间序列可以看到, 2003年之后PDO指数的9年滑动平均值再次从负异常转变为正异常, 据此可以推断, 山东省夏季降水有可能再次转折, 从少雨期转变为多雨期, 这总体上有利于水资源相对匮乏的山东省的工农业生产。同时也应该注意, 夏季发生暴雨的可能性也随之增加, 应注意加强预测和防范。

参考文献

- [1] 陈菊英. 山东区域汛期旱涝预测概论. 山东气象, 2001, 21(3): 12-17.
- [2] 胡桂芳. 山东夏季降水分布型及与全国雨型的关系. 山东气象, 2011, 31(1): 1-4.
- [3] 王庆, 龚佃利, 孙即霖, 等. 山东夏季旱涝指数的振荡特征. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2004, 34(2): 173-181.
- [4] Xue F. Interannual to interdecadal variation of East Asian summer monsoon and its association with the global atmospheric circulation and sea surface temperature. Advances in Atmospheric Sciences, 2001, 18(4): 567-575.
- [5] Zhou T J, Yu R, Zhang J, et al. Why the western Pacific subtropical high has extended westward since the late 1970s. J Climate, 2009, 22: 2199-2215.
- [6] 杨修群, 谢倩, 朱益民, 等. 夏季中国降水型的年代际变化与大气内部动力过程及外强迫因子关系. 大气科学, 2007, 31(6): 1290-1300.
- [7] 陈红, 薛峰. 东亚夏季风和中国东部夏季降水年代际变化的模拟. 大气科学, 2013, 37(5): 1143-1153.
- [8] 杨修群, 谢倩, 朱益民, 等. 华北降水年代际变化特征及相关的海气异常型. 地球物理学报, 2005, 48(4): 789-797.
- [9] 顾薇, 李崇银, 杨辉. 中国东部夏季主要降水型的年代际变化及趋势分析. 气象学报, 2005, 63(5): 728-739.
- [10] 邓伟涛, 孙照渤, 曾刚, 等. 中国东部夏季降水型的年代际变化及其与北太平洋海温的关系. 大气科学, 2009, 33(4): 835-846.
- [11] Gershunov A, Barnett T P. Interdecadal modulation of ENSO teleconnections. Bull Amer Meteor Soc, 1998, 79(12): 2715-2725.
- [12] 朱益民, 杨修群. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的关系. 气象学报, 2003, 61(6): 641-654.
- [13] 高辉, 王永光. ENSO对中国夏季降水可预测性变化的研究. 气象学报, 2007, 65(1): 131-137.
- [14] 孙丹, 薛峰, 周天军. 不同年代际背景下南半球环流变化对中国夏季降水的影响. 气候与环境研究, 2013, 18(1): 51-62.
- [15] Smith T N, Reynolds R W. Extended construction of global sea surface temperature based on COADS data (1854-1997). J Climate, 2003, 16(10): 1495-1510.
- [16] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull Amer Meteor Soc, 1996, 77(3): 437-471.
- [17] 薛峰, 苏同华. 夏季西太平洋副热带高压的年代际变化及其与南半球环流的关系. 自然科学进展, 2009, 19(4): 421-424.

新书架 NEW BOOK

感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



European Climate Vulnerabilities and Adaptation: A Spatial Planning Perspective

《欧洲气候脆弱性和适应: 空间计划视角》

编著者: Philipp Schmidt-Thomé等
出版者: Wiley Blackwell
出版年: 2013



《突发性大气污染监测预报及应急预案》

编著者: 安俊岭等
出版者: 科学出版社
出版年: 2015



《典型区域灾害生态风险评价与管理》

编著者: 李谢辉
出版者: 科学出版社
出版年: 2015



《应对气候变化研究模型与方法学》

编著者: 何建坤等
出版者: 科学出版社
出版年: 2015

2013年浙江夏季异常高温及环流特征分析

赵军平 刘汉华 周春雨 曾欣欣

(浙江省气象台, 杭州 310017)

摘要: 利用NCEP/NCAR再分析格点资料、NOAA海温资料、浙江省常规气象观测资料等, 对浙江省高温天气气候特点及2013年异常高温情况进行研究分析, 以期为今后的高温预报服务提供科学依据和理论基础。结果表明: 浙江省高温日数7月最多、8月次之; 空间分布上呈西多东少、内陆多沿海少的特点; 2013年盛夏浙江省出现近60余年最严重的高温热浪少雨天气, 高温日数异常偏多(7、8月分别比常年多出7和6d), 部分市县极端最高气温屡破历史纪录; 在2013年浙江盛夏高温期间, 北半球大气环流明显异常、极地低涡受阻不能南下、西太平洋副热带高压稳定偏强、冷空气过程时间短强度弱、台风北上活动影响少、中低层有深厚的暖脊并盛行强的下沉气流。

关键词: 高温, 副热带高压, 暖脊, 下沉气流, 环流特征

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.004

Analysis on Characteristic and Cause of Abnormal High Temperature in Summer of 2013 in Zhejiang

Zhao Junping, Liu Hanhua, Zhou Chunyu, Zeng Xinxin

(Zhejiang Provincial Meteorological Observatory, Hangzhou 310017)

Abstract: Based on the datasets from the NCEP/NCAR reanalysis, NOAA-SST dataset, the Zhejiang conventional observation data, the climate characteristics high temperature weather and the high temperature physical cause of 2013 in Zhejiang were explored in this study. The results show that high temperature days of Zhejiang appeared most frequently in July, followed by August. There were more high temperature days in the west region and less ones in the east coast. In the summer of 2013, large sections of Zhejiang Province were hit by heat wave and less rain. It's the worst heat wave in recent 60 years. The high temperature days of Zhejiang in the summer of 2013 were much more than those in the summer of the perennial average. The history records of extreme maximum temperature were broken in few cities and countries frequently. Further evidence shows that the Northern Hemisphere atmospheric circulation anomaly, polar low eddy blocked in the polar region, Northwest Pacific subtropical high remained so stable and so long, the weak cold advent that those processes tended to be short duration and limited strengthness, the less influence by northward landfall typhoon, the warm-deeply ridge, the downdraft at middle and low layer during the period of the summer continuous high temperature in 2013.

Keywords: high temperature, subtropical high, the warm ridge, the downdraft, characteristics of atmospheric circulation

0 引言

近年来, 全国各地高温热浪不断涌现, 极端高温的历史纪录也屡屡被打破^[1]。高温天气会引起少雨、干旱, 特别是持续高温天气, 会造成大面积和严重的干旱天气, 给自然界带来严重缺水, 农田干枯, 庄稼绝收, 人们用水、用电困难。因此, 高温天气与其他灾害性天气一样, 是广大气象工作者研究的课题之一。2003年夏季我国南方出现了大范围的高温天气,

很多研究对于其成因进行了分析探讨, 发现西太平洋副热带高压的偏强和稳定是导致高温的直接原因。杨辉等^[2]分析了2003年夏季中国江南异常高温, 发现西太平洋副热带高压的极度持续偏强和西伸是多系统综合作用的结果。刘还珠等^[3]研究了2003年长江以南高温少雨等异常天气, 表明其与西太平洋副热带高压活动特征有关。该年副热带高压偏强、位置异常偏西, 垂直结构呈现较强的动力性特征, 即低层为辐散下沉运动、高层为辐合, 脊线随高度向北倾斜。朱红等^[4]分析了2003年浙江高温天气得出: 高温强度则与20°N以南印度洋至太平洋的辐合带呈高正相关, 与4月欧亚经向环流指数为负相关。张玛等^[5]在研究2009年夏季中国高温过程得出: 南亚高压与副热带高压有很好

收稿日期: 2014年6月4日; 修回日期: 2014年12月8日

第一作者: 赵军平(1986—), Email: zjp-1213@163.com

资助信息: 中国气象局预报员专项(CMAYBY2014-027);
浙江省青年项目(2013QN01)

的响应关系,随着南亚高压的增强(减弱)东伸(西撤),副高强度进而增强(减弱)西伸(东撤)。低层辐散、副热带西风急流轴偏北、急流中心偏西等有利于夏季高温的发生和维持。陈廷芝等^[6]分析2010年夏季内蒙古干旱高温天气得出:2010年夏季赤道中东太平洋海温已表现为拉尼娜现象,因此是造成内蒙古干旱的原因之一。董彬^[7]在研究对2011年6月8日河南省周口出现42℃以上极端高温天气指出:暖高压脊控制下的中高层辐散、近地面层弱辐合的大气下沉运动和湿度较小空气干燥的物理量场配置,引起晴空辐射增温和下沉运动增温,是极端高温天气形成的主要物理机制。严文莲等^[8]分析了2010年江苏省连续性高温成因,指出盛夏期间前期赤道辐合带不活跃,不利于副高北抬,是造成当年出梅后区域性连续高温偏晚的一个重要原因。以上研究为分析2013年浙江高温的形成机理提供了一定的参考价值。

本研究所用的资料主要为NCEP/NCAR 2.5°×2.5°再分析格点资料、美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供的0.25°×0.25°、2°×2°重建海温资料、浙江省常规气象观测资料、中国气象局160个地面站降水和温度资料等。

1 高温天气概况

1.1 浙江省高温天气气候特征

根据浙江省72个国家级气象台站有一站或多站出现高温即作为一个高温日的标准,统计1951—2012年高温情况发现,浙江省的高温在3—10月均有可能出现,大部分出现在6—9月份,以7月最多,占高温总日数的38.7%,其次是8月,占34.8%,6月位居第3,占11.9%。浙江省极端最高气温为43.2℃(2003年7月31日,丽水)。浙江省的高温日分布具有明显的地域性(图略),总体为西多东少、内陆多沿海少,高值区位于丽水地区、金华地区、衢州地区的常山、江山、龙游和杭州地区西南部的桐庐、建德等地,一般年平均高温日数达30~40d,丽水的年平均高温日数为最多达44.8d,其次是云和(42.2d)。浙江东部沿海地区以及地处浙南山区的泰顺等地的年平均高温日数大都在10d以下,其中嵊山、玉环、南麂最少,建站以来未出现过高温日。从逐年的高温统计情况来看,最多的为2005年,出现86d,其次是2011年,为83d;最少为1954年,只出现34d。

1.2 2013年浙江省盛夏高温特点

1.2.1 异常高温特点

2013年7—8月浙江省高温日明显偏多,其中7月高温日31d,8月27d,分别比常年多出7和6d。在7—8

月高温期间,浙江省平均气温30.1℃,比常年同期偏高2.0℃,为近60余年同期最高;极端最高气温全省平均40.5℃,比常年同期偏高2.9℃,也为近60余年同期最高。有41县(市)极端最高气温破历史同期最高纪录,其中新昌和奉化,分别出现44.1℃(8月11日)和43.5℃(8月7日),打破了浙江省的最高纪录(原纪录2003年丽水43.2℃)。高温持续时间长,≥35℃高温日数全省平均37d,比常年同期偏多20d,其中有47县(市)≥40d,最多的有东阳、永康53d,诸暨达52d,萧山、兰溪、丽水、绍兴51d,富阳、湖州、余姚50d;40℃以上高温日数新昌20d,奉化、萧山15d,富阳、杭州、丽水、余姚、嵊州14d,临安、诸暨13d,绍兴12d,为历史罕见。高温范围广,除个别岛屿外,全省陆地全部出现了≥37℃的高温天气,其中≥38℃有64个县(市)占全省89%(64/72),≥40℃有56个县(市)占全省78%(56/72)。日最高气温≥40℃的站数为8月8日最多,达48个(市),占全省67%(48/72)(图1)。

1.2.2 降水量偏少

2013年高温期间,浙江省降水偏少、干旱严重,没能缓解持续的高温天气。7—8月全省平均降水203.4mm,比常年同期偏少近40%,从单站来看仅有上虞、仙居、龙泉比常年同期偏多,其余站点均偏少。降水量最少的为7月1—8月18日,全省平均降水55.7mm,比常年同期偏少近80%,嵊泗最少仅1.8mm、泰顺最多为209.8mm。全省有30个县(市、区)降水量为当地历史同期最少,共有淳安、海盐、常山、江山等4站降水量破历史同期最少纪录。与常年同期相比,有64站偏少,偏少幅度在10%~90%(图2)。

1.2.3 干旱严重

由于高温强度强、持续时间长、范围广、降水少,气象干旱严重。据浙江省气候中心气象干旱监测,进入7月下旬气象干旱发展迅速,到8月18日浙江省气象干旱达到最严重。全省中度以上气象干旱面积达8.09万km²,其中特旱面积1.29万km²,重旱面积2.42万km²。对人民生活健康、供电供水和工农业生产及国民经济造成严重影响。

2 2013年浙江省异常高温期间环流特征

2.1 北半球大气环流明显异常

从500hPa7月1—8月31日30年的平均高度场(图3)看出,北半球中高纬度主要槽脊位于北美洲,欧亚地区为平直环流。太平洋的低纬度10°—35°N为副热带高压控制,但588hPa闭合线明显分开两环,一环

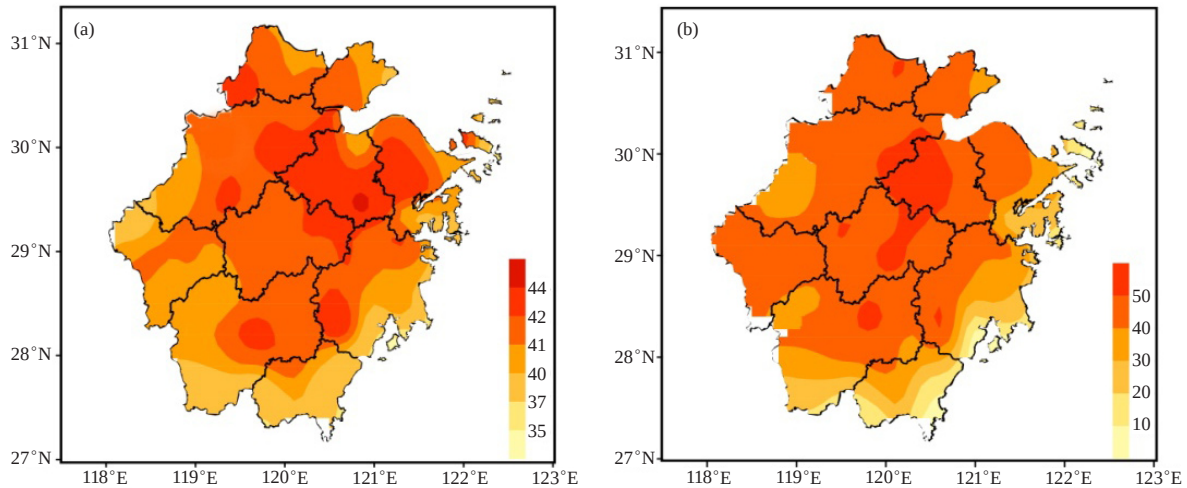


图1 2013年7月1—8月31日浙江省各县(市)最高温度(a, 单位: $^{\circ}\text{C}$)和高温日数(b, 单位: d)分布图
Fig.1 The maximum temperature(unit: $^{\circ}\text{C}$) and the number of high temperature days (unit: d) in counties of Zhejiang Province from 1 July to 31 August of 2013

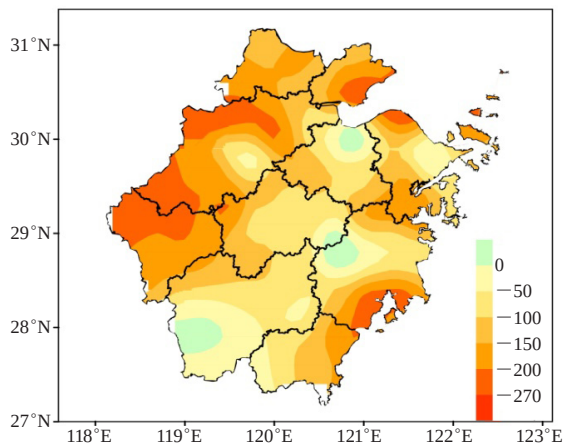


图2 2013年7月1—8月31日浙江省各县(市)降水量距平图(单位: mm)

Fig. 2 The precipitation anomaly in counties of Zhejiang Province from 1 July to 31 August of 2013 (unit: mm)

在西北太平洋的 128°E 至夏威夷群岛,脊线西段位于 28°N ,东段位于 32°N ;另一环在东北太平洋的东部。而2013年7月1—8月31日的平均高度场和距平看,北半球平均高度场有明显的变化,北半球中高纬度大气环流经向度加大,出现三槽三脊,特别是欧亚地区中高纬度环流经向度加大明显,欧洲西北部和亚洲东北部高压脊加强,分别伴有6和7dagpm的位势高度正距平中心。俄罗斯南部和蒙古国出现宽阔的低槽区,并有闭合低压中心,伴有 $-4\sim-2$ dagpm的位势高度负距平,从低槽区中不断有短波槽和弱冷空气东移南下影响亚洲东北部,造成俄罗斯东部和我国东北地区连续大到暴雨。西北和东北太平洋副热带高压明

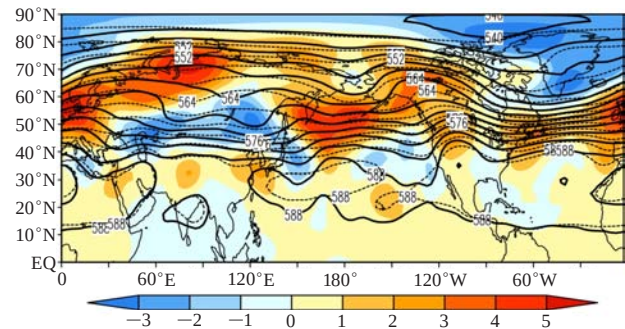


图3 7月1—8月31日500hPa平均高度场(虚线:7月1—8月31日30年平均高度场,实线:2013年7月1—8月31日平均高度场,填色:2013年7月1—8月31日高度距平图)(单位: dagpm)
Fig. 3 The average height field at 500hPa from 1 July to 31 August (dotted line: the average height field at 500hPa from 1 July to 31 August of 1981–2010; solid line: the average height field at 500hPa from 1 July to 31 August of 2013; shaded: height anomaly at 500hPa from 1 July to 31 August of 2013) (unit: dagpm)

显加强,由常年平均两环588hPa等高线闭合高压打通,588hPa等高线西进至 118°E ,我国 $25^{\circ}\sim40^{\circ}\text{N}$ 出现 $1\sim3$ dagpm的正距平。由此可知,2013年盛夏北半球大气环流相对常年出现了明显的异常。

2.2 冷空气异常偏弱

近年来,夏季北极涛动与我国天气的关系也引起了广泛的关注^[9-10]。北极通常受低气压系统支配,当北极涛动处于正位相时,系统的气压差较正常强,限制极区冷空气向南扩展;当北极涛动处于负位相时,系统的气压差较正常弱,冷空气较易向南侵袭。从NOAA公布的2013年7月1—8月31日逐日北极涛动指数来看,呈负位相的日数共26d,比常年同期少10d,冷

空气南下时长明显较短。从2013年7月1—8月31日北半球850hPa温度场来看(图4),在我国25°—40°N存在大范围的正距平区,其中华北和华东地区达到2℃以上。在东北地区存在浅的温度槽,槽底位于38°N附近,跟常年同期的35°N相比,冷空气势力明显偏弱,影响不到我国南方地区,造成我国东北连续大到暴雨。2013年高温期间大气环流与常年平均环流比较有明显的异常(图3),极涡中心偏向西半球,在65°—85°N的暖性高压带恰好将极地的冷性低压包围住,造成冷空气被封闭在极地,不能影响副热带高压的势力,使得副高能够持续稳定的维持^[11]。

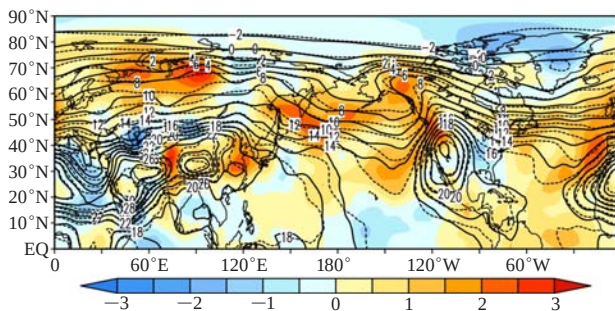


图4 7月1—8月31日850hPa平均温度场(虚线:7月1—8月31日30年平均温度场,实线:2013年7月1—8月31日平均温度场,填色:2013年7月1—8月31日温度距平图)(单位:℃)

Fig. 4 The average temperature field at 850hPa from 1 July to 31 August (dotted line: the average temperature field at 850hPa from 1 July to 31 August of 1981–2010; solid line: the average temperature field at 850hPa from 1 July to 31 August of 2013; shaded: temperature anomaly at 850hPa from 1 July to 31 August of 2013) (unit: °C)

2.3 高温与副热带高压的关系

从2013年7月1—8月31日杭州站和新昌站的日最高温度曲线图(图5)可以看出,2013年夏季35℃以上的高温天气出现6个阶段:第一阶段为7月1—5日,第二阶段为7月8—12日,第三阶段为7月14—19日,第四阶段为7月23—8月1日,第五阶段为8月5—8月17日,第六阶段为8月24—8月29日。38℃以上的高温天气出现在第二、四、五阶段。高温最强的出现在第四和第五阶段,分别达39~42℃和39~44℃。500hPa高度曲线的变化与地面日最高温度曲线变化基本一致,相关系数达到了0.5,远远超过0.01的信度检验。500hPa高度上升,地面日最高温度上升;500hPa高度下降,地面日最高温度下降。特别是:7月2日、7月11日、7月23—28日、8月6—8日500hPa出现阶段性的高点,地面日最高气温也出现阶段性高点,高点越高,地面日最高气温越高。值得注意的是,2013年7—8月杭州站500hPa高度出现586dagpm或以上,地面气温出现35℃或以上;出现588dagpm或以上,地面气

温出现38℃或以上。因此,夏季副热带高压的强弱与高温天气的强弱有直接的关系^[8]。

2013年7—8月高温期间,出现了5次阶段性的降温。杭州站500hPa高度时序图(图5)也可以看出,7月7日、7月13日、7月21日、8月2日、8月22日500hPa高度出现5个阶段性的低点,地面日最高气温也出现阶段性低点。分析发现,第一、三、四个降温时段有高空槽东移,但其较弱偏北,促使副高被迫东退减弱,588hPa等高线退至浙江沿海海面;而第二、五个降温时段分别有台风“苏力”、“潭美”北上,但其位置偏南,副高北抬,浙江东南沿海为东南风。每次降温过程时间短,降幅有限,副高都能够快速恢复增强,使得高温得以持续维持。

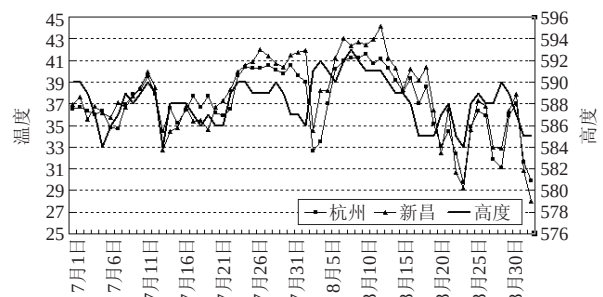


图5 2013年7月1—8月31日杭州、新昌逐日最高气温(单位:℃)以及杭州站500hPa高度时序图(单位:dagpm)

Fig. 5 The daily maximum temperature (unit: °C) at Hangzhou Station and Xinchang Station and the daily height (unit: dagpm) at Hangzhou Station from 1 July to 31 August of 2013

2.4 高温与中低层温度、下沉气流的关系

从中低层的温度及温度平流的变化(图6)可发现,在2013年7—8月高温期间,中低层出现6个阶段的暖脊,分别出现在7月1—5日、7月8—12日、7月

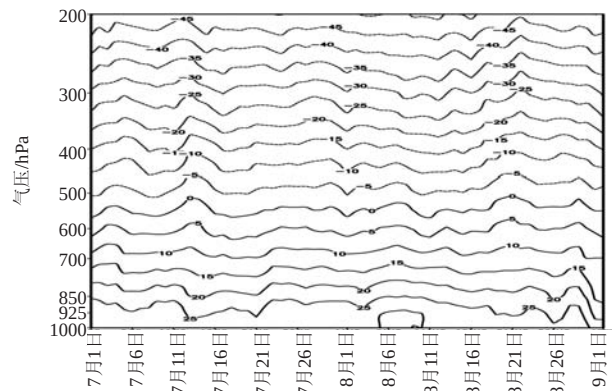


图6 2013年7月1—8月31日杭州站的温度垂直时序图(单位:℃)

Fig. 6 The sequence diagram of vertical temperature structure from 1 July to 31 August of 2013 at Hangzhou Station (unit: °C)

14—19日、7月23—8月1日、8月5—17日、8月24—29日，与6个阶段的高温天气相对应。暖脊发展深厚，除第三阶段以外，其余5个阶段暖脊均发展到500hPa以上，其中第四和第五阶段暖脊发展更高，到400hPa以上，对应的是高温最强的2个阶段，特别是第五阶段25℃等温线发展到850hPa，浙江省出现大面积40℃以上的高温天气。与此形势相配合，杭州和新昌等站也出现了5次高温低值，这正与5个阶段性降温相对应。2013年7—8月，长江流域以南至华南北部地区中低层（500hPa以下）盛行下沉气流。最强的下沉气流出现在850和925hPa，与常年比较，2013年夏季长江流域以南至华南北部地区低层下沉气流明显强于常年，925hPa垂直速度正距平达0~0.09Pa/s，最强的出现在浙江、江西、湖南北部、湖北南部、安徽南部，垂直速度正距平达0.06~0.09Pa/s（图7）。因此，中底层深厚的暖脊以及长江流域以南至华南北部地区的强下沉气流与2013年夏季高温有着密切的关系。

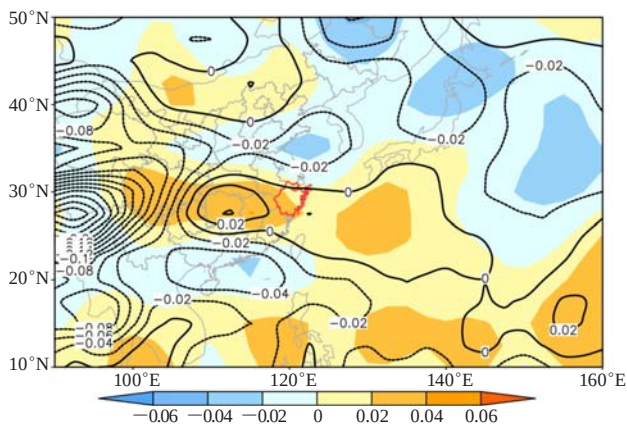


图7 2013年7月1—8月31日850hPa平均垂直速度和距平图
(单位: Pa/s)

Fig. 7 The mean and anomaly of vertical velocity at 850hPa from 1 July to 31 August of 2013 (unit: Pa/s)

2.5 台风活动北上影响少

2013年1—8月，赤道中东太平洋Niño3.4区的海表温度距平均显示为负值（图略），冷海温由东向西伸展，相对常年同期持续异常偏低。在赤道中东太平洋海温负距平的年份，热带气旋在西北太平洋的西北象限的生成频率增加^[12-13]，靠近我国的东南、华南沿海。在持续偏强、脊线位置较高、东西带状的副高偏东气流影响下，不利于热带气旋北上，登陆地点较为偏南。2013年7—8月，有4个热带气旋在我国广东省、海南省以及越南登陆，只有3个在福建中南部沿海登陆。在受到福建登陆的三个热带气旋外围环流影

响，浙江南部出现强降水和大风过程，中北部以阵雨天气为主，高温天气没有得到很大的缓解。

3 小结

1) 浙江省的高温3—10月均有可能出现，大部分出现在6—9月，以7月最多，占高温总日数的38.7%，其次是8月，占34.8%。浙江省的高温日分布具有明显的地域性，总体为西多东少、内陆多沿海少。

2) 2013年盛夏浙江省出现了近60余年最严重的高温热浪少雨天气，高温持续时间之长、强度之强、范围之广、降水之少、蒸发之大，均为历史同期最严重。7—8月高温日数比常年异常偏多，部分市县极端最高气温屡破历史纪录。

3) 2013年浙江盛夏高温期间，北半球大气环流明显异常，极地冷涡受阻不能南下，西北太平洋副热带高压异常偏强并控制浙江。中低层有深厚的暖脊、下沉气流较强，暖层发展越高，下沉气流越强，高温越强。

4) 2013年7—8月，台风影响位置偏南、强度偏弱；冷空气过程位置北、强度偏弱、时间偏短；阶段性的降温、降水并没能缓解高温，使得持续性高温过程频繁且间隔时间短。

参考文献

- [1] 谈建国, 郑有飞. 我国主要城市高温热浪时空分布特征. 气象科技, 2013, 41(2): 347-351.
- [2] 杨辉, 李崇银. 2003年夏季中国长江以南异常高温的分析研究. 气候与环境研究, 2005, 10(1): 80-85.
- [3] 刘还珠, 赵声蓉, 赵翠光. 2003年夏季异常天气与西太副高和南亚高压演变特征的分析. 高原气象, 2006, 25(2): 169-178.
- [4] 朱红, 俞科爱. 2003年浙江高温分析及预报. 气象, 2005, 31(7): 42-44.
- [5] 张玛, 高庆九, 蒋薇. 2009年夏季中国高温分析. 气象科学, 2011, 31(5): 582-590.
- [6] 陈廷芝, 刘克利. 2010年夏季内蒙古干旱高温分析. 第28届中国气象学会年会, 2011.
- [7] 董彬. 2011年6月河南周口极端高温分析. 农业灾害研究, 2012, 2(4): 89-91, 94.
- [8] 严文莲, 韩桂荣, 魏建苏, 等. 2010年江苏省连续性高温特点及成因分析. 气象科学, 2012, 32(3): 293-297.
- [9] 邓伟涛. 夏季北极涛动(AO)、东亚夏季风与中国东部降水的年代际变化关系. 南京: 南京信息工程大学, 2005.
- [10] 郭国龙, 李力, 晏利斌. 夏季北极涛动与亚洲中部干湿状况关系研究. 干旱区研究, 2009, 26(6): 901-908.
- [11] Zhang L S, Xue J J, Wang W G, et al. Comparative analysis of extreme high temperature weather in the summers of 2013 and 2003. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2014, 7(2): 132-136.
- [12] Wang B, Chan J C L. How strong ENSO events affect tropical storm activity over the western North Pacific. J Climate, 2002, 15(13): 1643-1658.
- [13] 赵军平, 吴立广, 赵海坤. 西北太平洋热带气旋潜在生成指数的改进. 气象科学, 2012, 32(6): 591-599.

气象无人机风速解算新模型的设计及仿真研究

李阳 孔毅 赵现斌

(解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101)

摘要: 气象无人机探测过程中, 风速矢量由无人机飞行参数解算得到, 解算方法和对应参数的测量直接影响测风精度。从现有风速解算模型出发, 考虑了气动角、欧拉角、航迹角, 最终确定引入“航迹倾斜角”和“俯仰角”, 建立了一种新的风速解算模型。模型推导过程中发现, 当无人机平稳飞行时, 航迹倾斜角、俯仰角是影响测风精度的关键因素。与现有模型相比, 新模型能有效提高测风精度, 当航迹倾斜角与俯仰角不等时, 必须对风速偏差进行修正。基于新模型的测风误差仿真分析结果表明: 存在某一角度, 当偏流角小于该角时, 风速误差受航迹倾斜角、俯仰角及偏流角共同影响; 当偏流角大于该角时, 风速误差受航迹倾斜角、俯仰角影响较小, 该角的大小与传感器的测量值和误差值有关。

关键词: 气象无人机, 风速解算模型, 航迹倾斜角, 俯仰角, 仿真

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.005

A New Method of Meteorological UAV Wind Velocity Resolution Model Design and Simulation

Li Yang, Kong Yi, Zhao Xianbin

(Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101)

Abstract: In the meteorological UAV detection, wind velocity vector is resolved from UAV flying parameters. The detected velocity accuracy is directly affected by the resolution method and the detection measurement of corresponding parameters. Starting from existing wind resolution models, this paper set up a new wind velocity resolution method which has introduced flying track tilt angle and pitch angle in view of pneumatic angle, euler angle and flying track angle. It is discovered in the model derivation procedure that when the UAV flies stably, flying track tilt angle and pitch angle are the key factors which affect the accuracy for wind velocity accuracy. Compared with existing models, the new model can improve wind detection accuracy effectively, when the flying track tilt angle unequals the pitch angle, the wind speed deviation must be corrected. Detecting error result proves that there exists one angle affected by the detecting value and error value of the sensor. When drift angle is smaller than this angle, wind velocity error is mutually affected by flying track tilt angle, pitch angle and drift angle. When drift angle is bigger than itself, wind velocity error is less affected by flying track tilt angle and pitch angle.

Keywords: meteorological UAV, wind velocity resolution model, flying track tilt angle, pitch angle, simulation

0 引言

高空风的探测对了解大气层的运动状况具有十分重要的意义, 同时也是研究全球及区域气候变化、准确预报天气现象的重要手段。现有高空风测量方法包括: 气球法测风、风廓线仪测风、探空火箭测风、无人机测风。前三种测风法往往在小区域范围内探测垂直廓线, 而无人机由于具有续航时间长、飞行高度高、机动性强、在危险环境中按指定航线探测等优点, 可对大区域水平风场进行连续探测。为满足不同探测需求, 以无人机为平台进行气象探测日益受到人

们青睐。

目前气象无人机高空风探测方法主要包括水平空速归零法、解析测风法、航位推算法以及皮托管测风法。其中水平空速归零法要求无人机在高空水平面上盘旋飞行, 不利于大区域、长航探测; 解析测风法运算过程复杂, 无法实时给出风场信息; 航位推算法算法简单、较易实现, 但测风精度低; 皮托管测风法具有直接探测的优点, 可对大区域进行连续测量, 且估计频率相对较高, 能够为无人机的飞行控制提供高精度的实时风参数。因此皮托管测风法是未来无人机测风技术的发展方向。

皮托管测风法的提出可追溯至1992年, 澳大利亚气象局的Dr Greg Holland论证了可以用气象无人机携带皮托—静压管等有关仪器进行高空风探测^[1], 并

收稿日期: 2014年8月16日; 修回日期: 2015年2月9日

第一作者: 李阳 (1987—), Email: 412481016@qq.com

通信作者: 孔毅 (1954—), Email: qyqxxy123@sina.com

于1995年在美国海军无人机研究办公室的支持下，推出了一系列高性能Aerosonde无人机。到目前为止，Aerosonde系列高性能无人机已多次成功跨越大西洋和南极考察，经受住恶劣天气的考验，获得大量有价值的气象数据。近年来，皮托管测风技术已经在国内外掀起新的研究高潮，如何进一步提高三维风场的测量精度是当前需要迫切解决的问题。已有的研究表明^[2]，气象无人机飞行姿态的不稳定性、运动状态的变化性、传感器的精度以及野值的处理方法是影响和制约测风准确度的关键因素。

随着无人机皮托管技术的不断进步，国内外研究人员开始考虑从无人机不同飞行状态出发，推导非惯性运动状态的测风模型^[3-4]，该过程测量仪器较多，探测成本高，而且引入更多的中间量，误差的传递性导致测量的波动性较大，不仅如此，无人机在实际运动过程中，往往加速中伴随着转动，推导出的单一的非惯性运动模型仍然存在局限性；另外，也有相关学者从地速测量入手，利用卡尔曼滤波法提高导航精度^[5]。当前无人机地速采用GPS测得，其信号分为P码和C/A码，目前民用的为C/A码，定位误差在2.93~29.3m，测速误差为0.3m/s^[6]，因此，几乎可以忽略地速误差对测风精度的影响。鉴于此，本文在现有风速解算模型的基础上，忽略非惯性运动状态和地速误差对测风精度的影响，通过引入航迹倾斜角和俯仰角，将所测得的气流空速和航迹地速同时转换到地理坐标系中，提出一种基于气象无人机飞行姿态改进的测风模型。

1 风速解算模型

1.1 现有风速解算模型

气象无人机测风原理^[7-11]主要是通过探测仪器测量空速、地速，然后利用空速、地速、风速构成的矢量三角形关系解算风速。

空速测量原理是根据测得的静压、总压和温度，应用伯努利方程^[12]和理想气体的状态方程得到空速 v_a ：

$$v_a = \sqrt{2RT \frac{P_t - P}{P}}, \quad (1)$$

其中： v_a 为空速（m/s）； R 为气体常数， $R \approx 287 \text{ m}^2/(\text{K} \cdot \text{s}^2)$ ； T 为静温（K）； P_t 为皮托—静压管测量的总压（Pa）； P 为静压（Pa）。静压和总压的测量均由安装在气象无人机上的皮托—静压管完成，总温的测量由温度传感器完成。

地速 v_g 是根据机载GPS给出的无人机飞行参数，采用四星伪距定位法进行计算。

利用GPS与无人机携带的角度传感器测得的数

据进行对比运算，可获得偏航角、航迹方位角等。空速、地速、风速三者构成的三角形关系^[13]如图1所示。

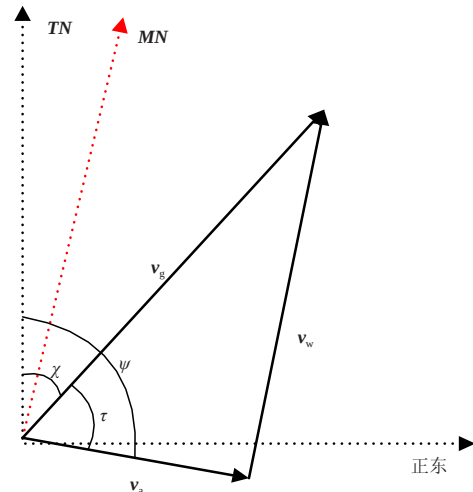


图1 水平面内速度矢量 三角形示意图

Fig. 1 Triangle chart of velocity vector in the horizontal plane

其公式为：

$$v_w = \sqrt{v_g^2 + v_a^2 - 2v_g v_a \cos \tau}, \quad (2)$$

$$\tau = \psi - \chi, \quad (3)$$

其中， TN 为真北方向， MN 为磁北方向， v_w 为风速（m/s）， χ 为水平航迹角， ψ 为偏航角， τ 为偏流角。

理论上，现用测风模型计算的空速为气流坐标系中的空速，地速为航迹坐标系中的地速，利用空速、地速和风速构成三角矢量关系，需将气流空速和航迹地速同时转换到地理坐标系中再进行计算。而实际应用中为计算方便，简化了坐标系之间的角度关系，认为航迹坐标系、机体坐标系和地理坐标系重合^[14]，未对空速和地速进行相应的坐标变换，也未考虑坐标系间的角度关系对测风精度的影响。

1.2 新型风速解算模型设计研究

鉴于现有风速解算模型存在的问题，本文利用坐标系间的变换关系^[15-17]，探讨了气动角、欧拉角、航迹角的引入，将现有气象无人机通过皮托管测量得到的空速以及无人机携带GPS设备测得的地速换算到地理坐标系中。其中，气动角表示气流坐标系与机体坐标系之间的角度关系，如图2a所示，包括攻角、侧滑角，攻角是机体纵轴与迎面气流之间的夹角，侧滑角是飞机速度矢量与机体纵向对称平面之间的夹角；欧拉角表示地理坐标系与机体坐标系之间的角度关系，如图2b所示，包括滚动角、俯仰角、偏航角，滚动角是机体横轴与水平面之间的夹角，俯仰角是机体纵轴与水平面之间的夹角，偏航角是机体纵轴相对预定航向在水平面内的偏转角；航迹角表示航迹坐标系与地

理坐标系之间的角度关系,如图2c所示,包括水平航迹角、航迹倾斜角,水平航迹角是航迹速度矢量在水

平面上的投影与正北方向之间的夹角,航迹倾斜角是航迹速度矢量与水平面之间的夹角。

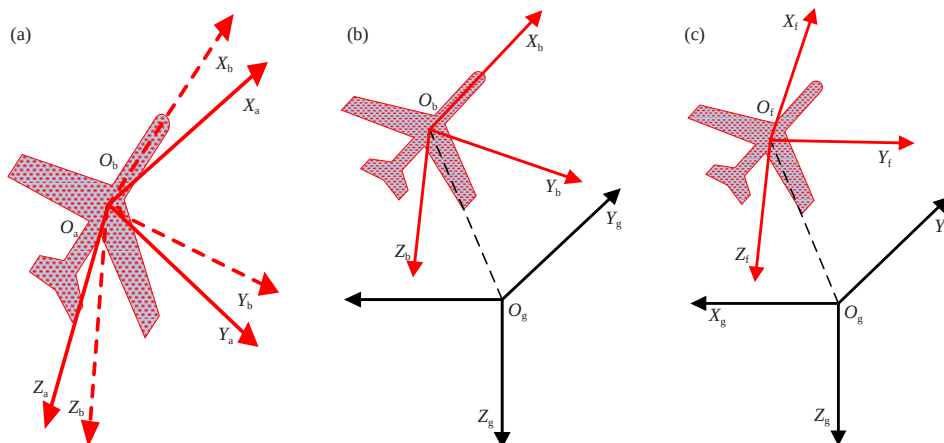


图2 气动角 (a)、欧拉角 (b)、航迹角 (c) 示意图

Fig. 2 Chart of pneumatic angle (a), euler angle (b) and flying track angle (c)

1.2.1 气动角的探讨

无人机高空探测过程中,受气流扰动、飞机结构局部不对称以及机体重心位置偏差等因素的影响,导致皮托—静压管测量总压 P_t 实际为真实气流总压 P_{at} 的一个分量。通过引入气动角,可准确获取气流总压 P_{at} ,进而得到机体空速。

气流坐标系 $O_a X_a Y_a Z_a$ 首先绕 Z_a 轴旋转 β 角,再绕 Y_a 轴旋转 $-\alpha$ 角,得到机体坐标系 $O_b X_b Y_b Z_b$,其中 β 为侧滑角, α 为攻角。气流坐标系与机体坐标系之间的变换矩阵可表示为:

$$C_a^b = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \beta & -\cos \alpha \sin \beta & -\sin \alpha \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ \sin \alpha \cos \beta & -\sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha \end{pmatrix}. \quad (4)$$

由于皮托管安装方向与机体纵轴方向一致,因此气流总压 P_{at} 在机体坐标系中可表示为:

$$C_a^b \times \begin{pmatrix} P_{at} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{at} \cos \alpha \cos \beta \\ P_{at} \sin \beta \\ P_{at} \sin \alpha \cos \beta \end{pmatrix}. \quad (5)$$

测量总压 P_t 为 P_{at} 在机体坐标系中 X 轴方向的大小:

$$P_t = P_{at} \cos \alpha \cos \beta. \quad (6)$$

把式(6)代入理想模型的空速方程,得到气流坐标系下的空速大小:

$$|v_a^a| = \sqrt{\frac{2RT}{P \cos \alpha \cos \beta} (P_t - P \cos \alpha \cos \beta)}. \quad (7)$$

式(7)为气流坐标系中的空速求解方程。其中: v_a^a 为气流空速(m/s),方向为气流坐标系纵轴方向。

根据气流坐标系与机体坐标系的变换关系,气流

空速在机体坐标系中可表示为:

$$v_a^b = C_a^b \times \begin{pmatrix} |v_a^a| \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |v_a^a| \cos \alpha \cos \beta \\ |v_a^a| \sin \beta \\ |v_a^a| \sin \alpha \cos \beta \end{pmatrix}. \quad (8)$$

从数学模型的角度出发分析公式(8),当无人机在某一高度层平稳飞行时,其攻角和侧滑角一般较小($\leq 3^\circ$),可以得到 $|v_a^a| \cos \alpha \cos \beta \approx |v_a^a|$,并且 $|v_a^a| \sin \beta \ll |v_a^a| \cos \alpha \cos \beta$, $|v_a^a| \sin \alpha \cos \beta \ll |v_a^a| \cos \alpha \cos \beta$,因此可忽略其较小分量。同时在实际探测过程中,气象无人机高空飞行受气流扰动的影响,攻角和侧滑角的测量误差比较大,而且其校正又涉及到皮托管和无人机纵向轴线的对准校正、皮托管弯曲的校正、角速率影响的校正以及侧流和升流影响的校正,需要测量皮托管在不同加速度载荷下的弯曲率以及三个姿态角速率等参数。以上各参数的测量需要复杂的系统和解算过程,这在一定程度上增加了研制经费和时间,另外测量参数的增大也增加了输入误差源。因此在无人机水平探测时,可将式(8)近似表示为:

$$v_a^b \approx \begin{pmatrix} |v_a^a| \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

其中: v_a^b 为机体空速(m/s),方向为机体坐标系纵轴方向。由式(9)得到机体空速近似等于气流空速,即可以假定气流坐标系与机体坐标系重合。因此当无人机在同一高度层平稳飞行时,可以忽略攻角、侧滑角等气动角对测风精度的影响。

1.2.2 欧拉角的引入

通过引入欧拉角, 可将机体空速转换到地理坐标系中。机体坐标系 $O_b X_b Y_b Z_b$ 首先绕 X_b 轴旋转 φ 角, 再绕 Y_b

$$C_b^g = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\sin \psi \cos \varphi - \cos \psi \sin \theta \sin \varphi & -\sin \psi \sin \varphi + \cos \psi \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \varphi + \sin \psi \sin \theta \sin \varphi & \cos \psi \sin \varphi - \sin \psi \sin \theta \cos \varphi \\ -\sin \theta & -\cos \theta \sin \varphi & \cos \theta \cos \varphi \end{pmatrix} \quad (10)$$

根据机体坐标系与地理坐标系的变换关系, 机体空速在地理坐标系中可表示为:

$$\mathbf{v}_a^g = C_b^g \times \begin{pmatrix} |\mathbf{v}_a^b| \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |\mathbf{v}_a^b| \cos \psi \cos \theta \\ |\mathbf{v}_a^b| \sin \psi \cos \theta \\ -|\mathbf{v}_a^b| \sin \theta \end{pmatrix} \quad (11)$$

其中: $\mathbf{v}_a^g$ 为地理空速 (m/s)。由式(11)可知, 地理空速矩阵的构建与偏航角、俯仰角有关, 而与滚动角无关。

1.2.3 航迹角的引入

通过引入航迹角, 可将航迹地速转换到地理坐标系中。航迹坐标系 $O_f X_f Y_f Z_f$ 绕 Y_f 轴旋转 δ 角, 再绕 Z_f 轴旋转 χ 角, 则得到地理坐标系 $O_g X_g Y_g Z_g$, 其中 χ 为水平航迹角, δ 为航迹倾斜角。航迹坐标系与地理坐标系之间的变换矩阵为:

$$C_f^g = \begin{pmatrix} \cos \chi \cos \delta & -\sin \chi & \cos \chi \sin \delta \\ \sin \chi \cos \delta & \cos \chi & \sin \chi \sin \delta \\ -\sin \delta & 0 & \cos \delta \end{pmatrix} \quad (12)$$

根据航迹坐标系与地理坐标系的变换关系, 航迹

$$\begin{aligned} |\mathbf{v}_w| &= \sqrt{\mathbf{v}_x^2 + \mathbf{v}_y^2 + \mathbf{v}_z^2} \\ &= \{|\mathbf{v}_g^f|^2 + |\mathbf{v}_a^a|^2 - 2 \times |\mathbf{v}_g^f| \times |\mathbf{v}_a^a| \times [\cos \delta \cos \theta \cos(\psi - \chi) + \sin \delta \sin \theta]\}^{1/2} \quad (16) \\ &= \{|\mathbf{v}_g^f|^2 + |\mathbf{v}_a^a|^2 - 2 \times |\mathbf{v}_g^f| \times |\mathbf{v}_a^a| \times [\cos \delta \cos \theta \cos \tau + \sin \delta \sin \theta]\}^{1/2} \end{aligned}$$

2 模型对比分析

为验证改进模型的准确性, 分别从实验论证和仿真模拟的角度, 对两者进行对比, 同时指出风速偏差随着航迹倾斜角、俯仰角及偏流角变化的规律。

2.1 实验论证

现以某无人机大队于2008年4月17日气象探测数据为例, 采集飞行高度为 $5000 \pm 20\text{m}$ 的数据, 并对数据进行预处理, 带入现有模型以及改进模型中。由于用GPS和测风雷达跟踪的气球测风法探测精度和探测高度最高, 因此将风速解算数据与同一时间同一区域气球法测量的5000m高度的风速进行对比, 如图3所示。

由图3可知: 通过本次实验数据验证发现, 1) 改进模型的风速解算值大于或等于现有模型; 2) 改进模型的风速值在14.5m/s处上下波动, 相对于现有模型更接近于气球法测量值。实验显示改进的风速解算模

轴旋转 θ 角, 最后绕 Z_b 轴旋转 $-\Psi$ 角, 得到地理坐标系 $O_g X_g Y_g Z_g$, 其中 φ 为滚动角, θ 为俯仰角, Ψ 为偏航角。机体坐标系与地理坐标系之间的变换矩阵表示为:

地速在地理坐标系中可表示为:

$$\mathbf{v}_g^g = C_f^g \times \begin{pmatrix} |\mathbf{v}_g^f| \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |\mathbf{v}_g^f| \cos \chi \cos \delta \\ |\mathbf{v}_g^f| \sin \chi \cos \delta \\ -|\mathbf{v}_g^f| \sin \delta \end{pmatrix} \quad (13)$$

其中: $\mathbf{v}_g^g$ 为地理地速 (m/s); $\mathbf{v}_g^f$ 为航迹地速 (m/s)。

1.2.4 风速方程的构建

地理空速、地理地速、地理风速在地理坐标系中构成三角形矢量关系:

$$\mathbf{v}_w = \mathbf{v}_g^g - \mathbf{v}_a^g \quad (14)$$

其中: $\mathbf{v}_w$ 为求解的风速 (m/s)。在地理坐标系中, 风速最终可表示为:

$$\mathbf{v}_w = \begin{pmatrix} |\mathbf{v}_g^f| \cos \chi \cos \delta - |\mathbf{v}_a^a| \cos \psi \cos \theta \\ |\mathbf{v}_g^f| \sin \chi \cos \delta - |\mathbf{v}_a^a| \sin \psi \cos \theta \\ -|\mathbf{v}_g^f| \sin \delta + |\mathbf{v}_a^a| \sin \theta \end{pmatrix} \quad (15)$$

公式(16)为基于气象无人机飞行角度的风速解算改进模型。上式表明, 相对于现有的风速解算模型而言, 本文中的新模型仅引入了“航迹倾斜角”和“俯仰角”。

型优于现有模型。

现对照探测数据以及风速解算值, 发现当航迹倾斜角和俯仰角大小接近时, 风速偏差较小, 而当航迹倾斜角和俯仰角相差较大时, 风速偏差较大, 需使用改进模型进行修正。同时当航迹倾斜角、俯仰角不

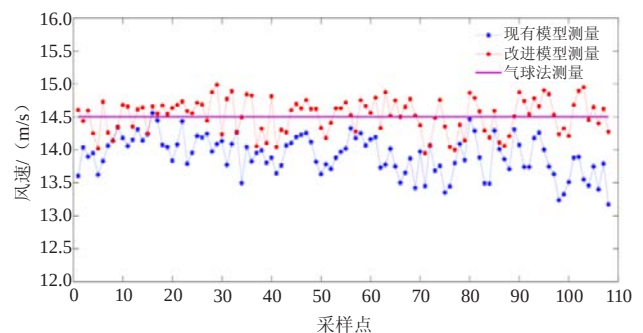


图3 风速解算值对比
Fig. 3 Comparison of wind speed resolution

变, 风速偏差随着偏流角的增大而减小。

2.2 仿真模拟

上述实验验证了改进模型相较于现有模型测风精度更高, 现从仿真模拟角度, 对两种模型进行差值计算, 分析航迹倾斜角、俯仰角及偏流角对测量精度的影响, 间接论证引入航迹倾斜角、俯仰角的必要性。考虑到新模型在现有模型基础上引入了航迹倾斜角、俯仰角, 因此仿真在不同偏流角情况下, 由航迹倾斜角和俯仰角共同引起的风速偏差。

气象无人机在风速测量过程中, 地速和空速的变化范围较小, 假设航迹地速 $v_g^f = 50 \text{ m/s}$, 气流空速 $v_a^a = 40 \text{ m/s}$, 航迹倾斜角 δ 的变化范围为 $-5^\circ \sim 5^\circ$, 俯仰角 θ 的变化范围为 $-5^\circ \sim 5^\circ$, 在偏流角 τ 分别取 10° , 20° , 30° 的情况下, 风速偏差随航迹倾斜角和俯仰角的变化曲面如图4所示。

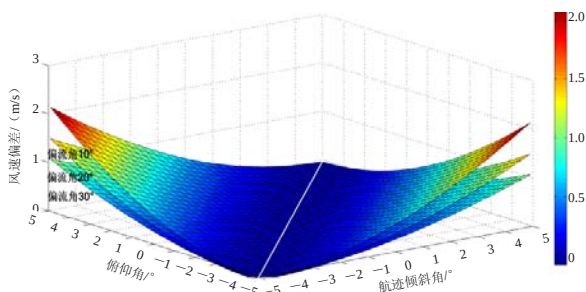


图4 角度引起的风速解算偏差

Fig. 4 Deviation of wind resolution models caused by the angles

由图4可以看出: 1) 取航迹倾斜角与俯仰角上的等值点构建一条等值线, 如图中白线所示, 由角度引起的风速偏差相对于该等值线对称; 2) 当航迹倾斜角与俯仰角相等时, 风速偏差最小; 3) 在航迹倾斜角和俯仰角不变的情况下, 随着偏流角的增大, 风速偏差逐渐减小; 4) 当取等值线左侧, 在同一航迹倾斜角的情况下, 风速偏差随着俯仰角的增大而增大, 当取等值线右侧, 在同一情况下, 风速偏差随着俯仰角的增大而减小; 5) 同样, 取等值线左侧, 在同一俯仰角的情况下, 风速偏差随着航迹倾斜角的增大而减小, 取等值线右侧时, 在同一情况下, 风速偏差随着航迹倾斜角的增大而增大; 6) 改进模型的风速测

量值大于现有模型。

仿真结果说明: 1) 风速偏差对偏流角、航迹倾斜角、俯仰角的大小较敏感, 当航迹倾斜角与俯仰角取值相等时, 其风速偏差最小。由于无人机飞行过程中受气流扰动影响, 航迹倾斜角与俯仰角的大小无法控制, 呈无规律变化, 因此需在现有风速解算模型中加入航迹倾斜角和俯仰角进行修正。2) 现有模型风速解算值往往小于真实值, 改进模型实际是在现有模型测量值的基础上加上一个正修正量, 其大小与姿态角的正余弦值相关。3) 当不考虑航迹倾斜角以及俯仰角情况下, 即两者同时为0时, 改进的风速解算模型与现用测风模型相同, 反证改进模型是在现有模型基础上引入航迹倾斜角和俯仰角两个量, 说明改进模型推导过程是正确的。

3 风速误差分析

3.1 误差计算模型

误差分析采用标准差形式进行分析。假设各输入误差均服从正态分布, 且互不相关, 则改进型测风模型中风速误差标准差为:

$$\sigma_{v_w} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial v_w}{\partial f_i} \right)^2 \sigma_{f_i}^2}, \quad (17)$$

其中, 航迹地速、气流空速、航迹倾斜角、俯仰角、偏航角、航迹方位角误差引起的风速误差分别为:

$$\begin{aligned} \Delta v_1 &= \frac{|v_g^f| - |v_a^a| [\cos \delta \cos \theta \cos(\psi - \chi) + \sin \delta \sin \theta]}{v_w} \Delta v_g^f, \\ \Delta v_2 &= \frac{|v_a^a| - |v_g^f| [\cos \delta \cos \theta \cos(\psi - \chi) + \sin \delta \sin \theta]}{v_w} \Delta v_a^a, \\ \Delta v_3 &= \frac{|v_g^f| \|v_a^a\| \Delta \delta}{v_w} [\sin \delta \cos \theta \cos(\psi - \chi) - \cos \delta \sin \theta], \\ \Delta v_4 &= \frac{|v_g^f| \|v_a^a\| \Delta \theta}{v_w} [\cos \delta \sin \theta \cos(\psi - \chi) - \sin \delta \cos \theta], \\ \Delta v_5 &= \frac{|v_g^f| \|v_a^a\| \Delta \psi}{v_w} \cos \delta \cos \theta \sin(\psi - \chi), \\ \Delta v_6 &= -\frac{|v_g^f| \|v_a^a\| \Delta \chi}{v_w} \cos \delta \cos \theta \sin(\psi - \chi). \end{aligned}$$

由航迹地速、气流空速、航迹倾斜角、俯仰角、偏航角、航迹方位角引起的风速误差标准差为:

$$\sigma_{v_w} = \left[\left(\frac{\partial v_w}{\partial v_g^f} \right)^2 \sigma_{v_g^f}^2 + \left(\frac{\partial v_w}{\partial v_a^a} \right)^2 \sigma_{v_a^a}^2 + \left(\frac{\partial v_w}{\partial \delta} \right)^2 \sigma_{\delta}^2 + \left(\frac{\partial v_w}{\partial \theta} \right)^2 \sigma_{\theta}^2 + \left(\frac{\partial v_w}{\partial \psi} \right)^2 \sigma_{\psi}^2 + \left(\frac{\partial v_w}{\partial \chi} \right)^2 \sigma_{\chi}^2 \right]^{1/2}, \quad (18)$$

式(18)即为航迹地速、气流空速、航迹倾斜角、俯仰角、偏航角、航迹方位角引起的风速误差标准差计算式, 式中, $\sigma_{v_g^f}$, $\sigma_{v_a^a}$, σ_{δ} , σ_{θ} , σ_{ψ} , σ_{χ} 分别为航迹地速、气流空速、航迹倾斜角、俯仰角、偏航角、航迹

方位角的误差标准差。可以看出, 风速误差包括六项误差分量, 按照几何和的形式合成得到总误差。

3.2 误差分析

由误差计算模型可知, 无人机测风精度是飞行参

数及其测量误差等多种因素共同作用的结果。现假设航迹地速 $v_g^f=50\text{m/s}$ ，气流空速 $v_a^f=40\text{m/s}$ ，本文拟根据现有误差模型对航迹倾斜角和俯仰角引起的测风误差进行仿真分析。其飞行参数和相应测量误差见表1。

表1 无人机瞬时飞行参数及误差表

Table 1 UAV instantaneous flight parameters and error

	地速 (m/s)	空速 (m/s)	航迹倾斜角 (°)	俯仰角 (°)	偏流角 (°)
参数值	50	40	-5~5	-5~5	2 5 10 15 20 25
误差值	1	1.5	0.5	0.5	1

综合考虑各参数值的测量误差，带入误差计算模型，得到在不同偏流角情况下，由航迹倾斜角和俯仰角引起的风速误差示意图，图5a为偏流角 $\leq 10^\circ$ 时，角度引起的风速误差；图5b为偏流角 $> 10^\circ$ 时，角度引起的风速误差。

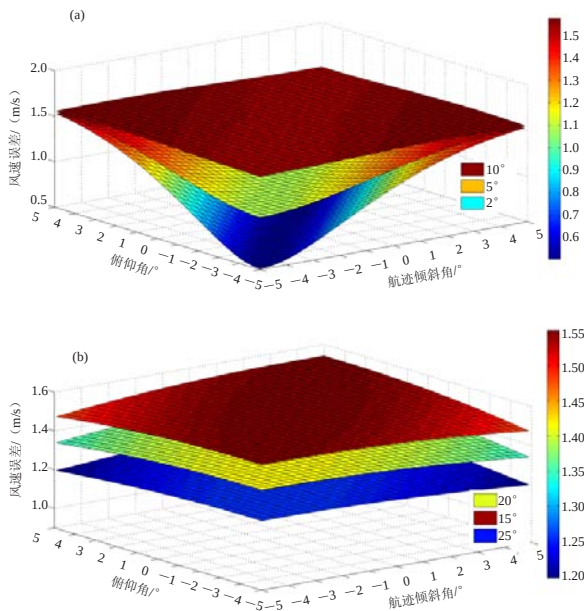


图5 偏流角 $\leq 10^\circ$ 时 (a) 和偏流角 $> 10^\circ$ 时 (b) 角度引起的风速误差

Fig. 5 The case of drift angle is less than or equal 10° (a) or more than 10° (b)

对比图5a和5b得知，1) 该仿真以 10° 为界，当偏流角 $< 10^\circ$ 时，风速误差变化规律相似，呈三维抛物线状，等值线上的点误差值最小；当偏流角 $> 10^\circ$ 时，不同偏流角对应不同的风速误差，且同一偏流角情况下，风速误差约等于某一定值。其中，对于不同的仿真模型，界定角的大小不同，为准确获取界定角，将空速、地速以及测量误差带入公式(18)，得到只包含偏流角、航迹倾斜角及俯仰角的风速误差计

算公式。利用偏微分方程，求解风速误差模型的切平面方程。对切平面方程进行解析，发现存在一个界定角，当偏流角大于等于该角时，对于任意一点的切平面斜率约等于零，即风速误差为定值，当偏流角小于该角时，风速误差是航迹倾斜角、俯仰角、偏流角共同作用的结果。2) 当偏流角取较小或较大值时，风速误差相对较小。即无人机顺风、逆风飞行或当无人机运动方向与风向垂直时，风速误差相对较小。

我国气象探测要求风速误差在10%以内，大量数据显示5000m高度风速在 $14\sim 22\text{m/s}$ ，为提高测风精度，联系误差计算模型，可将风速误差控制在 1.4m/s 以内。现提出提高测风精度的两条途径：一是对探测数据进行处理，剔除由加速、转动、上升幅度过大造成的较大偏差且在新模型中又无法相互抵消的值；二是通过提前估算高空风向，控制无人机机轴与风向的夹角。由于高空气流的扰动以及无人机运动的复杂性，使得无人机很难满足机轴方向与风向平行或垂直，因此对探测数据进行处理和修正是提高测风精度的关键任务。

参考文献

- [1] Holland G J, Webster P J, Curry J A, et al. The Aerosonde Robotic Aircraft: A new paradigm for environmental observations. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, 82(5): 889-902.
- [2] Hou J. Analysis on structure and characteristics of pitot type flowmeter. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2005, 22 (2): 189-193.
- [3] 周树道, 王彦杰. 基于非惯性运动状态的气象无人机测风方法研究. 传感器学报, 2011, 24(1): 155-158.
- [4] 王彦杰, 周树道. 基于转动状态的气象无人机测风方法. 气象科学, 2011, 31(5): 576-581.
- [5] 刘伟. 基于惯性/多普勒组合导航的风速风向测量研究. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [6] 李天文. GPS原理及应用. 北京: 科学出版社, 2003.
- [7] Haering E A. Air Data Calibration of a High-Performance Aircraft for Measuring Atmospheric Wind Profiles. NASA Technical Memorandum 101714, 1989.
- [8] World Meteorological Organization. Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR) Reference Manual. Geneva: WMO, 2003.
- [9] Klopferstein R. Air velocity and flow measurement using a pitot tube. ISA Transactions, 1998, 37(4): 257-263.
- [10] Bouhy J. Evolution of the pitot tube sensor. Flow Measurement Technology in Practice, 1996, 21(1): 1-4.
- [11] Thomas D. Make the most of averaging pitot tubes. Chemical Processing, 2005, 68(7): 33-35.
- [12] 潘锦珊. 气体动力学基础. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- [13] 周伟静, 沈怀荣. 磁偏角对无人机皮托-静压管测风的影响分析. 装备指挥技术学院学报, 2006, 17(4): 97-101.
- [14] 张志远, 罗国富. 舰船姿态坐标变换及稳定补偿分析. 舰船科学技术, 2009, 31(4): 34-40.
- [15] 成旭晟. 矢量变换控制的分析及仿真. 工业科技, 2009, 38(2): 49-50.
- [16] 徐忠富, 王国良, 尹照武, 等. 基于UML的空间位置和坐标变换建模方法. 计算机工程, 2009, 35(16): 42-44.
- [17] 常明飞. GPS/SINS组合导航系统研究. 重庆: 重庆大学, 2007.

模拟热浪及强降温对Apo E^{-/-}小鼠冠心病影响的实验研究

刘昊辰^{1,2} 张书余² 周妍妍^{1,2} 况正中^{1,2}

(1 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044; 2 河北省信息工程学校, 保定 071030)

摘要: 模拟一次典型天气过程, 对比过程中Apo E^{-/-}小鼠体重、肛温及HSP60、SOD、TNF、sICAM-1、HIF-1 α 、ET-1、NO的变化, 探讨冷热刺激对小鼠的影响, 为进一步探讨对心脑血管疾病的影响奠定基础。通过分析南京市实际气象要素资料, 选取一次典型天气过程, 并利用气象环境模拟箱模拟, 将Apo E^{-/-}小鼠分为实验组和对照组, 每组6只, 测量实验过程中各组小鼠体重、肛温, 采用ELISA法测定热浪后小鼠HSP60、SOD、TNF、sICAM-1、HIF-1 α 、ET-1、NO变化情况。结果显示, 小鼠体重不存在统计学差异 ($P > 0.05$), 但在模拟实验过程结束后有所下降 ($P > 0.05$)。肛温热浪组与对照组相比有所升高 ($P > 0.05$), 强降温组则又下降。HSP60、SOD、TNF、sICAM-1、HIF-1 α 表达水平上热浪组均高于对照组, 与热浪组相比强降温组有所下降且具有统计学差异 ($P < 0.05$)。强降温将导致血管收缩。结果表明, 热浪过程会加重动脉粥样硬化疾病的发生发展, 强降温过程可能会极大地增加冠心病等心血管疾病的发病和死亡风险。

关键词: 热浪, 强降温, Apo E^{-/-}小鼠, 动脉粥样硬化, 心脑血管疾病

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.006

Effects of Simulated Heat Wave and Strong Cooling on Risk Factors for Coronary Heart Disease of Apo E Knockout Mice

Liu Haochen^{1,2}, Zhang Shuyu², Zhou Yanyan^{1,2}, Kuang Zhengzhong^{1,2}

(1 College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Information Engineering School in Hebei Province, Baoding 071030)

Abstract: Objective: Simulate a typical weather process and compare the levels of Apo E Knockout Mice' HSP60, SOD, TNF, sICAM-1, HIF-1 α , ET-1, NO, body weight and rectal temperature to study the effects of hot and cold stimulation in mice. In order to further investigate the impact of heat wave on cardiovascular disease, eighteen Apo E Knockout Mice were divided into the heat wave group, strong cooling group and control group. The body weight and rectal temperature of each mouse were measured every day. By use of meteorological environment simulation box, the process of heat wave was stimulated, determining HSP60, SOD, TNF, sICAM-1, HIF-1 α , ET-1, NO of Apo E Knockout Mice, measured by enzyme linked immunosorbent assay (ELISA). The result is as follows, HSP60, SOD, TNF, sICAM-1, HIF-1 α and rectal temperature of Apo E Knockout Mice in group of heat wave were higher than that in strong cooling and control group. Body weight showed no significant difference but risk increased after the simulation process in strong cooling group. Strong cooling will cause vasoconstriction. Conclusion: Thermal stimulation may aggravate atherosclerosis disease development. The process of Strong Cooling may greatly increase the risk of coronary heart disease.

Keyword: heat wave, strong cooling, Apo E Knockout Mice, atherosclerosis, cardiovascular disease

0 引言

心脑血管疾病是一类严重损害人类健康的疾病, 它具有发病率高、致残率高、死亡率高等特点, 其中

冠心病、心肌梗死、脑卒中对健康威胁最为严重。而且, 这类疾病的发生和患者的死亡与气象条件的剧烈变化存在着非常密切的关系^[1]。动脉粥样硬化是冠心病发生的病理基础, 临床研究表明, 氧化应激及炎症反应在动脉硬化损伤的发生发展中起重要作用。心血管疾病患者体内炎症标志物水平较高^[2], 也有动物实验发现, 热应激大鼠早期的炎症因子水平有上升趋势^[3]。热休克蛋白 (HSPs) 也称热应激蛋白, 具有细

收稿日期: 2014年8月18日; 修回日期: 2014年11月6日
第一作者: 刘昊辰 (1989—), Email: xingchen19891228@sina.com
通信作者: 张书余 (1958—), Email: zhangsy@cma.gov.cn
资助信息: 国家自然科学基金项目 (41375121)

胞保护等多种生理功能, 高温、缺氧等外界环境或发热、组织创伤等病理刺激均可促进HSP表达增加。HSP60是HSP家族中的重要一员, 当机体遇到不良刺激时表达水平上升, 可作为机体热应激能力与机体热耐性的敏感性特异指标。超氧化物歧化酶(SOD)是机体内一种重要的抗氧化生物酶, 对维持机体氧化与抗氧化的平衡有重要意义, 作为氧化应激及血管内皮功能研究的可靠指标, 与心血管疾病的发病密切相关^[4]。肿瘤坏死因子(TNF)、可溶性细胞间粘附分子1(sICAM-1)作为反映机体炎症水平的标志, 其表达量的增加往往与急性血管疾病事件有关。另外, 缺氧诱导因子-1 α (HIF-1 α)与缺血性心血管疾病的发生及病情相关, 热浪发生时, 环境温度和氧分压的变化可能使得机体HIF-1 α 的表达发生变化而与冠心病的发生发展有关。内皮素1(ET-1)与一氧化氮(NO)作为调节动物体内血管收缩平衡及心血管功能的重要因子, 两者的动态平衡在血管平滑肌功能及血管张力的调节中具有重要的作用。两者的比值可以反映血管舒张水平, 能够很好地反映热浪刺激对动物血管活动的影响。在研究心血管疾病发病和死亡方面具有重要指示意义。因此, 本文选取HSP60、SOD、TNF、sICAM-1、HIF-1 α 、ET-1和NO作为检测指标。

近年来, 南京高温及热浪天气发生频繁。通过前人研究可知, 无论热刺激还是冷刺激均会对人体健康产生影响, 而现实生活中往往会出现温度骤变过程, 其对人体健康的影响研究相对较少。目前国内外关于高温热浪期间强降温的研究几乎是空白的, 因此有必要研究热浪期间温度骤降过程对人体健康的影响。本文利用南京市实际气象资料, 模拟一次典型热浪过程对Apo E^{-/-}小鼠进行刺激, 分析冷热刺激对Apo E^{-/-}小鼠相关指标的影响。为研究热浪对心血管疾病的影响提供一个参考。

1 材料与方法

1.1 仪器

TEM1880气象环境模拟试验箱, 用于模拟温度随时间变化, 并将实验Apo E^{-/-}小鼠放入其中使其受到温度等气象要素的刺激。通过试验箱主控板, 可以设定模拟天气过程中的温压值、温压变化斜率、程序运行方式(定值或程式)、程式段数、循环设置、预约设置以及设置温度(PID区间)的境界值等, 且该设备能保证实验过程中有新鲜的空气进入, 满足实验动物呼吸生理需求。

离心机(TDZ4-W), 实验时离心3000r/min, 15min后分离血浆并储存于-20℃低温冰箱中待检。

TH212专用测温仪, 测温范围在-30~50℃之间, 精度达到 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, 分辨率为 0.1°C , 用于测量小鼠肛温。

此外还有电子天平, 尾动脉无创血压仪, 酶联免疫分析测定试剂盒等。

1.2 实验动物选取

实验动物选用的是SPF级8周龄Apo E^{-/-}基因敲除小鼠。Apo E基因敲除小鼠无论正常或高脂饮食, 由于富含胆固醇的脂蛋白清除障碍, 均可形成高血脂症, 从而使得血浆胆固醇水平较高^[5]。Yutaka Nakashima等的研究表明, 动脉粥样硬化各阶段的病理表现均存在于Apo E基因敲除小鼠中, 而且它能够在所有胸腹动脉中形成广泛的粥样硬化病变, 认为Apo E基因敲除小鼠的动脉粥样硬化病变的发展同人类极其相似^[6]。近年来, Apo E基因敲除小鼠已成为研究动脉粥样硬化发病机制以及抗动脉粥样硬化药理学研究等方面最重要的动物模型之一^[7]。

1.3 动物饲养及分组

实验采用8周龄SPF级Apo E基因缺陷小鼠18只, 体重为25.2~31.0g, 进行标准西方饮食饲养8周, 严格控制昼夜节律, 每日光照开始于08时, 结束于20时, 室内湿度保持在45%左右, 环境温度控制在30℃。然后将18只小鼠按照体重配对并分为对照组(C)、热浪组(H)、强降温组(S), 每组6只。将实验组小鼠放入气象环境模拟试验箱, 暴露于一个完整的天气温度变化过程中, 而对照组则继续按照适应期条件饲养。

1.4 降温等级划分及实验过程

1.4.1 降温等级划分

实验所使用的气象数据为江苏省南京市2001—2010年6—8月份逐时气象要素资料, 在本次研究中采用气温这一单一要素。热浪的定义采用中国气象局制定的标准, 即日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 为高温且高温持续时间 $\geq 3\text{d}$ 。而关于温度骤降的概念在气象上还没有一个明确的定量概念, 因此, 为了便于研究, 本文参考冷空气等级国家标准(GB/T 20484—2006), 根据历史气象数据的统计分析, 制定了高温天气下降温的等级划分标准。划分的原则采用高温天气背景下, 一定时段内持续降温幅度来具体划分降温等级。高温天气下降温判别标准: 以1h、2h、4h、6h、8h连续降温幅度(ΔT_1 、 ΔT_2 、 ΔT_4 、 ΔT_6 、 ΔT_8) $\geq 6^{\circ}\text{C}$ 为标准。将降温等级分为弱降温、中等降温、较强降温、强降温和气温骤降五个等级。详见表1。

表1 高温天气下降温等级划分标准

Table 1 On the dividing standard of cooling level under the high temperature weather

等级	统计标准
弱降温	$6^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_6 \leq 8^{\circ}\text{C}$; $6^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_8 \leq 10^{\circ}\text{C}$
中等降温	$6^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_4 \leq 8^{\circ}\text{C}$; $8^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_6 \leq 10^{\circ}\text{C}$; $\Delta T_8 \geq 10^{\circ}\text{C}$
较强降温	$6^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_2 \leq 8^{\circ}\text{C}$; $8^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_4 \leq 10^{\circ}\text{C}$; $\Delta T_6 \geq 10^{\circ}\text{C}$
强降温	$6^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_1 \leq 8^{\circ}\text{C}$; $8^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_2 \leq 10^{\circ}\text{C}$; $\Delta T_4 \geq 10^{\circ}\text{C}$
温度骤降	$8^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_1 \leq 10^{\circ}\text{C}$; $\Delta T_2 \geq 10^{\circ}\text{C}$

1.4.2 实验曲线建立

依据本文研究内容, 本文选取了一次南京持续时长为3d的实际热浪过程以做探讨, 实验模拟温度曲线模型选择为2006年6月19日5时—22日11时的高温热浪期间突然强降温天气过程, 两小时持续降温幅度超过 10°C 。

模拟曲线如图1所示。对照组(C)实验温度选取为动物适应性饲养造模时的温度 30°C , 实验组分别为热浪组(H)、强降温组(S), 对应图中2个采样点。热浪组和强降温组分别为了研究热刺激和温度骤降对Apo E^{-/-}小鼠的影响。

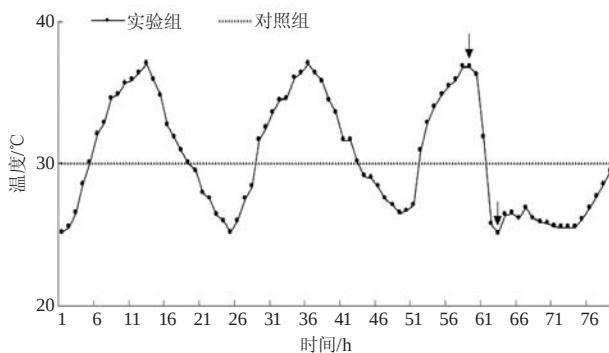


图1 实验温度曲线 (箭头指出部分为采样点)

Fig. 1 The experimental temperature curve

1.4.3 实验过程

对进行实验的小鼠进行随机分组后, 首先按照适应期条件进行空白对照饲养一周, 测量小鼠基本生理指标并记录。然后将12只实验组Apo E^{-/-}小鼠放入气象环境模拟试验箱中按照实验温度设好程序, 对小鼠进行刺激。在热浪过程结束温度骤降开始时刻(59h)和温度骤降过程结束时刻(63h), 分别取出热浪组小鼠(6只)和强降温组小鼠(6只), 测量其基本生理指标, 包括肛温、体重。并摘取小鼠心脏, 取心尖部称重, 并加入9倍0.9%生理盐水进行匀浆, 于3000r/min离心15min, 取上清液于 -20°C 低温冰箱中存储, 随后采用ELISA法测定小鼠HSP60、SOD、TNF、sICAM-1、HIF-1 α 、ET-1、NO变化情况。对照组饲养条件同适应期, 检测步骤与实验组相同。

1.4.4 统计分析

采用SPSS19.0统计软件进行统计分析。资料数据用 $\bar{x} \pm s$ 表示。组间各指标结果用单因素方差分析, 两两比较采用独立样本t检验, $P < 0.05$ 认为有统计学差异。

2 结果分析

2.1 肛温与体重

肛温、体重是小鼠的基本生理指标, 热浪过程期间小鼠肛温的波动情况能够反映出小鼠对冷、热刺激的直接反映。如表2所示, 实验期间各实验组小鼠肛温和体重变化情况可以看出, 各组间Apo E^{-/-}小鼠体重变化不存在统计学差异($P > 0.05$), 但在模拟实验过程期间小鼠体重呈现持续减轻的变化情况, 热浪过程结束后较实验开始时下降了0.15g。与此同时, 对小鼠肛温的检测结果可以得出, 各组别小鼠肛温变化明显。随着实验过程的持续, 热浪组小鼠肛温上升了 0.06°C , 与对照组小鼠肛温相比并无统计学差异($P > 0.05$)。但随着温度骤降过程的发生, 小鼠肛温表现出明显的下降, 强降温组小鼠肛温与对照组和热浪组相比分别下降了1和 1.06°C , 差异有统计学意义($P < 0.05$, $P < 0.01$)。

表2 Apo E^{-/-}小鼠肛温及体重变化比较 ($\bar{x} \pm s$, $n=6$)Table 2 Rectal Temperature and Body Weight changes in Apo E^{-/-} mice ($\bar{x} \pm s$, $n=6$)

组别	对照组(C)	热浪组(H)	强降温组(S)
肛温($^{\circ}\text{C}$)	37.98 ± 0.25	38.04 ± 0.25	$36.98 \pm 0.21^{*}\#$
体重(g)	28.03 ± 2.48	28.00 ± 1.88	27.88 ± 1.33

注: *为 $P < 0.05$ 与对照组相比; #为 $P < 0.01$ 与热浪组相比。

2.2 HSP60、SOD、TNF、sICAM-1、HIF-1 α

表3所示检测结果可以看出, 热浪—强降温过程模拟结束后, Apo E^{-/-}小鼠HSP60、SOD、TNF、sICAM-1、HIF-1 α 这五项检测指标的变化情况均表现出相同的趋势, 即热浪组小鼠较对照组小鼠均有显著升高, 而随着小鼠经历温度骤降过程的刺激后, 五项指标有所缓解, 均表现出不同程度的下降。其中, 热浪组小鼠心肌组织匀浆HSP60含量较对照组升高了 1.43ng/ml , 升高显著, 具有统计学差异($P < 0.05$), 强降温过程使得HSP60表达水平恢复, 与热浪组相比差异有显著性($P < 0.05$)。热浪组SOD表达水平上升十分明显, 与对照组相比上升幅度高达45.72%, 具有统计学差异($P < 0.01$), 温度骤降的发生也使得强降温组小鼠SOD表达水平有所下降, 与对照组和热浪组相比均有统计学差异($P < 0.01$, $P < 0.01$)。TNF和sICAM-1标志着机体炎症反应程度, 二者在经历热浪刺激后均表现出显著升高的

表3 Apo E^{-/-}小鼠HSP60、SOD、TNF、sICAM-1、HIF-1 α 变化比较 ($\bar{x} \pm s$, $n=6$)
Table 3 HSP60、SOD、TNF、sICAM-1、HIF-1 α changes in Apo E^{-/-}mice ($\bar{x} \pm s$, $n=6$)

指标	对照组 (C)	热浪组 (H)	强降温组 (S)
HSP60 (ng/ml)	6.45 $\pm$ 0.47	7.88 $\pm$ 0.29 [△]	5.60 $\pm$ 0.39 ^{△□}
SOD (ng/ml)	166.02 $\pm$ 20.96	241.92 $\pm$ 3.97 [*]	216.54 $\pm$ 7.87 ^{*#}
TNF (pg/ml)	6.79 $\pm$ 0.67	7.98 $\pm$ 0.69 [*]	7.08 $\pm$ 0.83 ^{*#}
sICAM-1 (ng/L)	66.43 $\pm$ 2.16	150.91 $\pm$ 3.34 [*]	138.81 $\pm$ 5.77 ^{*#}
HIF-1 α (ng/L)	63.90 $\pm$ 3.66	87.70 $\pm$ 2.69 [*]	80.04 $\pm$ 3.32 ^{*#}

注: [△]为 $P<0.05$ 与对照组相比; [□]为 $P<0.05$ 与热浪组相比; ^{*}为 $P<0.01$ 与对照组相比; [#]为 $P<0.01$ 与热浪组相比。

情况,尤其是sICAM-1,热浪组与对照组相比高出84.48ng/L,增幅达到1.27倍之多,虽然温度骤降过程使得强降温组表达水平较热浪组而言均有所下降,但从表中可以看出二者强降温组的表达水平相对对照组仍处于较高的水平,差异具有显著性($P<0.01$)。同样,与冠心病等缺血性疾病的发生发展密切相关的HIF-1 α 表达水平在经历热浪刺激后显著升高,热浪组小鼠比对

照组小鼠高出23.8ng/L,两组相比具有统计学差异($P<0.01$),温度骤降虽也使其缓解,但与对照组相比仍具有统计学差异($P<0.01$),处于较高水平。

2.3 ET-1 和 NO

图2中(a—c)分别显示的是此次模拟过程结束后小鼠血浆中ET-1、NO及NO/ET-1的表达水平。在热浪期间小鼠血浆ET-1表达水平有小幅下降,通过了显著性检验($P<0.01$),在经历温度骤降过程后迅速升高了2.48ng/L,与热浪组相比具有统计学差异($P<0.01$)。而NO的表达水平在受到热浪过程刺激后明显升高,热浪组比对照组高出2.31 μ mol/L,增幅高达67.77%,而温度骤降则使得NO表达水平下降,与热浪组相比具有统计学差异($P<0.01$)。NO与ET-1两者的比值可以反映血管舒张水平,热浪组与对照组相比显著升高,机体血管趋于舒张散热,而温度骤降过程导致NO/ET-1显著下降与热浪组相比具有统计学差异($P<0.01$),将会导致机体血管迅速收缩。

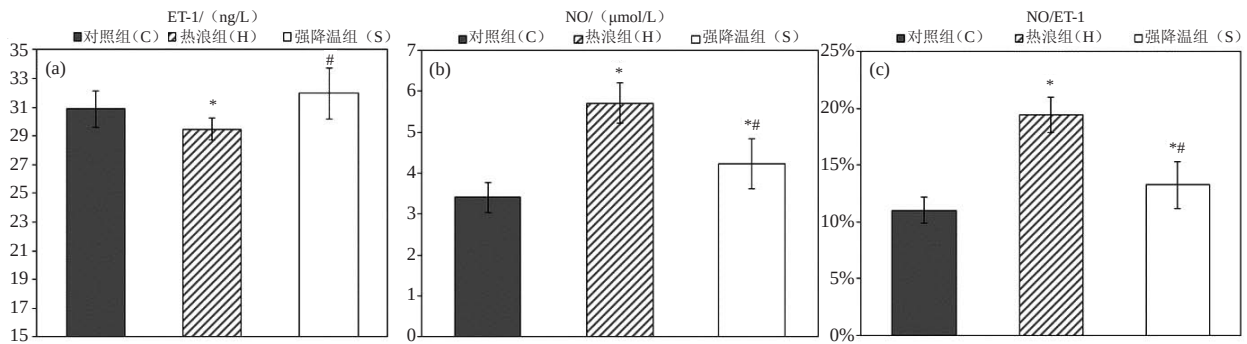


图2 Apo E^{-/-}小鼠ET-1 (a)、NO (b) 和NO/ET-1 (c) 的变化情况
Fig. 2 ET-1 (a)、NO (b) and NO/ET-1 (c) concentration changes in Apo E^{-/-} mice
(*为 $P<0.01$ 与对照组相比, #为 $P<0.01$ 与热浪组相比)

3 讨论与结论

动物会采用各种生理学、行为学机制来对体温调节,这对其生存对策、分布模式、适应进化途径及生活史对策有深刻影响。而对体温的调节过程也正是对环境变化的适应。但无论人还是动物,对维持体温恒定的能力都有限。当发生热刺激时,小鼠的温觉感受器会产生冲动传入体温调节中枢,在神经系统作用下,机体会表现为心肌收缩增强、心排血量增加、外周血管扩张,从而增加散热,体温上升,所以,热浪会刺激小鼠体温上升^[8]。而低温环境中,小鼠首先通过体温调节机制减少散热、增加产热,尽量维持体温的恒定。如皮肤血管收缩降低体表温度,缩小皮肤表面与环境间温度梯度,减少散热,体外周温度下降,其结果必然会产生热债,从而使体温降低^[9]。冷

刺激会导致血压升高等一系列生理反应。吴伟康等^[10]通过老年鼠和青年鼠对比实验研究发现,在经历低温环境刺激后,老年鼠体温下降幅度明显高于青年鼠,而冷刺激停止后,体现自然恢复能力明显低于青年组。由此可见,在热浪过程中应提高对温度骤降过程的警惕,在对体温的影响上强降温更加明显,且更要重视对老年人的保护,特别是动脉粥样硬化、冠心病等血管功能异常的老年人。

1999年Ross提出了动脉粥样硬化是一种炎症性疾病的说法。心血管疾病患者体内炎症标志物水平较高,在受到外界刺激时,机体内部的氧化与抗氧化作用平衡会遭到破坏,产生大量氧自由基,使得机体处于氧化应激状态,因此导致了SOD表达水平的升高,而脂质代谢紊乱和细胞损伤越严重,会引起脂质

过氧化、细胞毒性作用,破坏血管内皮,促进不稳定斑块形成^[11-12]。HSP60的表达水平与冠心病发病风险极为相关,其高表达的群体患病风险会提高数倍。本次实验结果表明,热浪过程可以诱导机体HSP60表达水平增加。机体在热刺激下产生过多的HSP60可以活化免疫细胞,诱导内皮细胞、巨噬细胞分泌大量TNF- α 、ICAM-1等炎性细胞因子^[13-14],增加炎性细胞粘附及脂质沉积,从而形成动脉粥样硬化,加速病变。而本次模拟试验通过对TNF及sICAM-1表达水平的检测结果则证明了这一理论。持续性高强度的热刺激可以导致机体过热,TNF等细胞因子表达显著上升,引发炎症损伤。sICAM-1表达升高后,可通过诱导白细胞粘附于血管内皮,形成血栓,同时,介导的激活白细胞所产生的氧自由基和血管活性物质可引起内皮损伤。缺氧诱导因子-1(HIF-1)是一种具有转录活性的核蛋白,与缺氧适应、炎症过程中的大量相关基因的表达相关。HIF-1 α 除了已被人们认知的在低氧环境中的功能,在热耐受性及热适应响应也有着重要作用,可在热环境下被诱发^[15]。有研究表明,TNF表达上升也会上调HIF-1 α 活性,本次实验结果也表明,热浪刺激可通过诱导心肌组织中HIF-1 α 的表达,增大冠心病发病风险,所以,高温热浪使得体内炎症反应加强,TNF- α 、sICAM-1等炎性细胞因子显著升高,是热浪过程增加冠心病风险的一个诱因。虽然小鼠经历热浪期间强降温刺激后HSP60、TNF、sICAM-1及HIF-1 α 表达水平均表现出下降的情况,但温度骤降会使得血管收缩,增强机体血液凝血功能^[16]。NO与ET-1作为调节动物体内血管收缩平衡及心血管功能的重要因子,在冠心病病理机制研究中有重要地位,两者的比值可以反映血管舒张水平,能够很好地反映热浪刺激对动物血管活动的影响。本次实验对ET-1和NO的检测结果可以明显发现,在温度骤降发生后血管收缩因子显著升高,NO与ET-1的比值也反映出血管将趋于收缩。由于热浪期间机体可能存在血管内皮损伤,形成了不稳定斑块、炎性细胞粘附及脂质沉积,在温度骤降发生时血管迅速收缩将极大加速动脉粥样硬化

及血栓的形成,从而导致冠心病等心血管疾病的发病和死亡。

综合上述实验结果可以得出,热浪过程会诱使机体炎症标志物水平显著升高,从而加重动脉粥样硬化疾病的发生发展,而热浪期间强降温过程将导致血管迅速收缩,将极大地加速动脉粥样硬化及血栓的形成,从而增加冠心病等心血管疾病的发病和死亡。因此,在热浪期间应提高对强降温过程的关注,在热浪过程期间尤其要重视保护已经存在脂质代谢异常的人群,提前做好预防措施以减少冠心病等心血管疾病的发病和死亡。

参考文献

- [1] 高霞,李素芹,张大辉.心脑血管疾病与气象条件关系分析研究.第28届中国气象学会年会: S14气候环境变化与人体健康.北京:中国气象学会,2011: 135-141.
- [2] 陈璠,周玫.氧化应激-炎症在动脉粥样硬化发生发展中作用研究的新进展.中国动脉硬化杂志,2008,16(10): 757-762.
- [3] 郑春雨,张伟,梁永刚.热应激大鼠早期炎症因子水平及乌司他丁干预的效果.医学研究生学报,2011,24(1): 25-28.
- [4] Wang C, Zhang S, Tian Y, et al. Effects of simulated heat waves on ApoE^{-/-}Mice. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2014, 11(2): 1549-1556.
- [5] 张晓明,杨继红. Apo E与动脉粥样硬化的关系及Apo E基因敲除小鼠在动脉粥样硬化研究中的应用.昆明医学院报,2012(Z1): 169-172.
- [6] Szmitko P E, Verma S. C-Reactive protein and the metabolic syndrome: Useful addition to the cardiovascular risk profile? . Journal of the Cardiometabolic Syndrome, 2006, 1(1): 66-69.
- [7] Tedgui A, Mallat Z. Cytokines in atherosclerosis: Pathogenic and regulatory pathways. Physiological Reviews, 2006, 86(2): 515-581.
- [8] 张书余.医疗气象预报.北京:气象出版社,2010.
- [9] 徐斌,梅丹.环境温度对缺氧大鼠体温的影响.解放军预防医学杂志,2001,19(1): 38-39.
- [10] 吴伟康,罗汉川,侯灿.冷应激对老年小鼠体温、血糖浓度和血浆MDA水平的影响.老年学杂志,1991(05): 302-304, 320.
- [11] 张志辉,周胜华,祁述善,等.氧化应激,炎症与冠心病患者冠状动脉斑块的关系.中南大学学报(医学版),2006,31(4): 556-558.
- [12] 刘阳,张义,李英杰.冠心病患者氧化-抗氧化平衡检测及其临床意义.武警医学院学报,2010(009): 717-719.
- [13] 王贺,卢义.热休克蛋白60与冠状动脉粥样硬化关系的研究进展.中国实验诊断学,2012,16(4): 750-753.
- [14] 杨军,吴小庆,薄小萍,等.血清中人热休克蛋白60的检测在急性冠状动脉综合征中的价值分析.现代医学,2011,39(1): 1-5.
- [15] 田颖.基于小鼠试验探讨热浪对冠心病的影响机理.南京:南京信息工程大学,2014.
- [16] 罗斌,张书余,周骥,等.探讨模拟冷空气降温过程对健康大鼠和高血压大鼠凝血功能的影响.中国应用生理学杂志,2012,28(5): 390-393.

风电功率预报技术研究综述

丁乃千^{1, 2} 陈正洪³ 杨宏青³ 许杨³

(1 南京信息工程大学, 南京 210044; 2 恩施州气象局, 恩施 445000; 3 湖北省气象服务中心, 武汉 430074)

摘要: 从20世纪中后期开始, 丹麦等多个西方国家已经展开对风电功率预测的研究, 而我国在该领域的研究开展得比较晚。在很长一段时间内, 各国风电场均采用单一的预测方法进行风电功率预测, 基本能够满足风电场及整个电力系统的需求。但是, 随着风电产业的飞速发展, 市场竞争越来越激烈, 传统单一的预报方法逐渐不能满足需求, 而集合预报在很大程度上能够解决这一问题。传统单一的方法所能做到的准确率已经达到比较高的水平, 提升空间不大, 集合各单一方法的优点能大大提升预测准确率。本文主要综合阐述各种传统预测方法, 并结合各国的试验对比分析对集合预报作简要说明。

关键词: 风电功率, 预测方法, 传统, 集合预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.007

Review of the Research for Wind Power Prediction

Ding Naiqian^{1, 2}, Chen Zhenghong³, Yang Hongqing³, Xu Yang³

(1 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044 2 Enshi Meteorological Bureau of Hubei, Enshi 445000 3 Hubei Meteorological Service Centre, Wuhan 430074)

Abstract: Since the mid of 20th century, Denmark and other Western countries have started the research of wind power forecast, from a single method to ensemble methods, while it started relatively late in our country. Over a very long period of time, the wind farms around the world have been using a single method to forecast wind power and have basically met the wind farm and the whole power system requirements. But, with the rapid development of wind power industry, the increasingly fierce market competition, the traditional single method wouldn't meet the needs of the future of wind power, while the ensemble forecast can solve this problem to a large extent. The accuracy rate of the traditional single method has reached a relatively high level and it is hard to getting higher level. Assembling the advantages of each method, the new way can greatly enhance the accuracy rate of prediction. This paper mainly focuses on the various traditional forecasting methods, which are expounded comprehensively. Combined with the analysis of experimental comparison of countries, the ensemble prediction is briefly explained.

Keywords: wind power, prediction methods, tradition, ensemble forecast

0 引言

随着人类社会的发展, 煤炭、石油等主要矿物能源的供应日趋紧张, 而我们赖以生存的环境也因为矿物能源的大量使用正逐步恶化。为了改善生存环境, 风能、太阳能等洁净的可再生能源的利用就显得尤为重要, 其中, 风资源的开发和利用, 在最近几年得到了飞速发展。据全球风能理事会 (Global Wind Energy Council, GWEC) 统计^[1], 截至2013年全球风电累计装机容量已达318GW, 累计增长率达到了12.5%, 在过去五年 (2009—2013年) 全球风电市场规模扩大了约200GW。预计2014年及未来的市场前景将会更为乐观。我国预计在2020年, 风电总装机容量将达到200GW。由于大规模风电均采用的是并网运行模式,

所以对风电功率预测预报的需要显得尤为重要。

1 风电功率预测预报的意义

风电具有随机性、间歇性和波动性等特点, 风力发电给电网调度带来了极大的困难, 这些难点严重阻碍了风电的发展。首先, 对风电进行有效调度和科学管理, 可以提高电网接纳风电的能力。电网系统需要风电场、风电功率预测预报系统在提前一天提供准确的风电功率预测曲线, 使得电网可以更多的吸纳风电, 提高风力发电在电网中所占份额; 同时, 根据预报结果合理安排发电计划, 减少系统的旋转备用容量, 提高电网的经济性。其次, 风电功率预报是风电场运营、提高风机可利用率的重要手段, 还可以指导风电场计划检修。根据风电功率预报安排在小风或无风的情况下进行风电场定期维护、检修及故障排除等工作^[2]。因此, 做好风电功率预测预报服务工作, 对全球风电产业的发展会起到积极推进作用。

收稿日期: 2014年3月11日; 修回日期: 2014年9月2日
第一作者: 丁乃千 (1987—), Email: 1179716703@qq.com

2 风电功率预测预报技术方法

2.1 技术方法的分类

早期国内外研究人员通过把风速的预测值带入风速与风电机组电力输出的关系式中进行计算可以获得风电功率的预测值,或者根据已有的风电功率数据建立模型计算分析而获得预测值^[3]。

按照预测时效,可以划分为:长期预测、中期预测、短期预测和超短期预测^[4]。本文主要针对短期预测和超短期预测进行阐述。

按照采用的预测模型可分为:统计方法、物理方法及组合模型方法。

2.2 各种技术方法的介绍

统计预测方法即不考虑风速变化的物理过程(图1),采用数学统计方法,在历史数据与风电场输出功率之间建立映射关系,以此来对风电功率进行预测方法的统称,包含:1)确定性时序模型预测方法,常用的包括卡尔曼滤波法、时间序列法(ARMA)和指数平滑法等^[5];2)基于智能类模型的预测方法,常用的包括人工神经网络法(如BP神经网络法)、小波分析法、支持向量机(SVM)回归法和模糊逻辑法等^[6-7]。

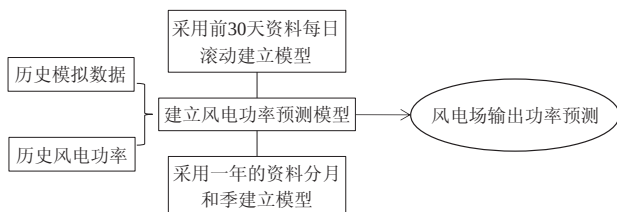


图1 统计预测方法流程

Fig. 1 Statistical prediction method process

物理预测方法^[8]是指根据气象部门提供的数值天气预报(NWP)的气象预报结果,得到风电场的风向、风速、大气压强和空气密度等天气数据,然后根据风机周围的物理信息(包括地形、等高线、地表粗糙度及周围障碍物等)得到风电机组轮毂高度的风速和风向信息的最优估计值,最后根据已建立的风速与风电功率的统计模型给出风电功率预测(图2)。

组合预测方法即把两种或者多种预测方法有机结合,提高了预测精度。其中,具有代表性的方法包括:利用BP神经网络、径向基函数神经网络与SVM进行风电功率预测的风电场输出功率组合预测模型^[9];将SVM、模糊逻辑、神经网络结合使用的预测方法^[10];基于相似性样本的多层前馈神经网络风速预测方法^[11];或利用小波函数将原始波形进行不同尺度的分解,将分解得到的周期分量用时间序列进行预测,其余部分采用神经网络进行预测,最后将信号序列重

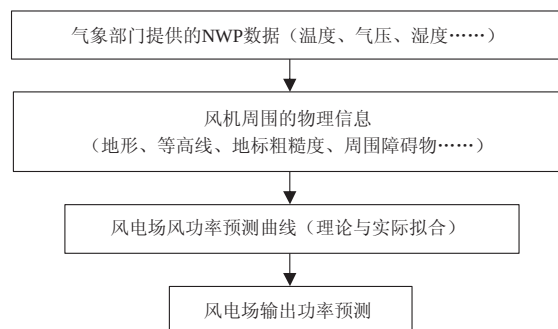


图2 物理预测方法流程

Fig. 2 Physical prediction method process

构得到完整的风速预测结果的预测方法^[12];利用自适应模糊神经网络法进行风速预测的方法^[13];在模型训练时采用遗传算法的模糊风速及风电功率预测^[14]。

2.3 技术方法的不足与改进

2.3.1 统计方法

1) 自回归滑动平均(ARMA)模型。它是时间序列建模方法中最为成熟的一种,但它仅适用于零均值的平稳随机序列。风速或者风电功率的时间序列具有非平稳随机序列的特点,因此,建立风速或风电功率预测的ARMA模型时首先需进行数据时间序列增加趋势性及周期性的非平稳化处理。模型建立之后,可通过检验变量的自相关函数以及偏相关函数确定模型的阶次,而模型参数的确定通常采用最小二乘法^[15],还可以通过卡尔曼滤波法及滚动时间序列来改进原有预测模型^[16-17],也可以引入经验模式分解^[18]或者局域波分解方法^[19]来对时间序列法进行改进,而考虑到风速或者是风电场输出功率时间序列本身具有混沌性及混沌时间序列的短期可预测性,也可以采用混沌方法预测风电场的短期风速或者是风电输出功率^[20-21]。

2) 人工神经网络(ANN)法。以BP神经网络模型为例,在实际应用中,BP算法存在两个重要的问题:收敛速度慢和目标函数存在局部极小点,因此在对风速预测模型中主要加入了动量项和采用学习率可变的BP算法^[22]。

2.3.2 物理方法

基于NWP的风电功率预测方法已较成熟,为了优化使用NWP数据,可采用结合模糊逻辑的神经网络模型,利用SVM进行预测^[23],但它的数学模型复杂,需运行在超级计算机上,应用有一定的局限性,短期预测的效果有时还不如持续型预测模型^[24]。可利用改进的NWP数据进行短期风电功率预测,通过从邻近风机获得的测量数据提高本风机预测水平,进一步提高预测质量^[25]。从NWP本身出发,它是在一定的初值条件下,

通过数值计算来求解一系列的天气过程方程组,从而得出来的预报数据,所以可以对它的内部参数进行可行性简化和修改,使得最终计算出来的数据精确度得到进一步提高。对于中尺度NWP模式,往往在运用于具体风电场时,则显得空间分辨率太小,所以就有了中尺度模式嵌套小尺度,这种降尺度的模式通过一些试验,比如MM5+CFD+MOS的模式^[26-28],能有效提高预报准确率。

2.3.3 组合预测法

组合预测法具有很强的优势,但前提都是要在获得一定数量的历史数据的基础上完成,当遇到某些无法获得历史风速序列数据或仅已知历史年份月平均风速和风速标准差情况时,就难以进行预测。此时利用基于灰色模型的、对未来年份中对应月的风速分布参数进行预测的方法^[29]。通过该模型,可以使用较少的历史数据而获得较高的精度,预测所得到的参数即可以用来评估风电场的风资源,又可以根据概率分布的逆运算获得符合预测参数的风速序列。

3 国内外风电功率预报系统

3.1 国外风电功率预报系统

由于国外风电功率预测工作起步较早,因而预测方法和手段已经成熟,运行的模式也在不断的实际应用中得到了很好改进。其中,以丹麦、英国、德国和美国等欧美国家为首的技术最为发达。比较有代表性的预测系统包括^[2]:

丹麦Risø国家实验室开发的Prediktor预测系统,其是全球第一个风电功率预测软件,该模型的NWP系统采用的是高分辨率有限区域模型,根据地心自转定律和风速的对数分布图,将高空的NWP风速转化为某一地点的地面风速,再利用WAsP程序进一步整体考虑风电场附近障碍物、粗糙度变化等因素得到更高分辨率的风速预测,最后经过发电量计算模块PARK考虑风机尾流的影响,预测的时间尺度为36h。

德国与丹麦共同开发的Previento预测系统是一个以德国6个地点的时间尺度为24h数值预报结果进行空间细化,同时考虑了当地的粗糙度和地形,并利用制造商提供的风机发电功率曲线将预测的风速映射为输出功率。

西班牙的LocalPred预测系统利用高分辨率的中尺度模式MM5结合流体力学软件来计算风速等气象场,再通过统计模块对预测的风速进行修正,最后通过处理历史数据与同期风速等气象场建立的功率输出模型进行功率预测。

还有一些比较先进的预测系统^[2]如:德国ISET开发的WPMS预测系统,丹麦技术大学开发的WPPT及Zephyr预测系统,英国Garrad Hassan公司开发的GH

Forecaster功率预测系统,法国的AWPPS风功率预测系统以及美国的AWS Turewind公司的eWind预报系统。

3.2 国内情况风电功率预报系统

相对国外而言,国内研究起步较晚,但是已有不少系统投入国内各风电场的运行中^[2]。

中国电力科学研究院研发的预报系统(WPFS)、中国气象局公共服务中心的风电功率预报系统(WINPOP)以及湖北省气象服务中心牵头开发的风电量预报系统和可移植的风电功率预测预报系统(WPPS)等多种预报系统。

WPFS预报系统是使用Java语言进行开发的,采用了浏览器/服务器(B/S)结构,数据库使用ORACLE9i,可以对单独风电场或特定区域的集群预测。能够预测风电场次日0~24h 96个点的出力曲线,系统能够设置每日预测的时间及次数,考虑到出力受阻和风机故障对风电场发电能力的影响,可进行限电和风机故障等特殊情况下的功率预测。目前,该系统已经在吉林电网及江苏的各个风电场正常运行。

WINPOP系统使用了MySQL数据库,采用了C/S(Client/Server)结构,基于全球天气分析服务系统(GWASS)平台开发,可对各类异类结构数据的综合分析处理,可以实现地图漫游监控,具备地图放大、缩小、漫游、坐标显示、比例尺显示及对风电场的实景监控。本系统所运用的模式算法有:SVM、人工神经网络、自适应最小二乘法。该系统已在河北、甘肃、宁夏和内蒙古等地风电场正常运行。

WPPS系统使用C#作为开发语言,数据库使用Microsoft Server2008 R2,算法包括:原理法、动力统计法和持续法。其优势在于,可以根据风电场的实际运行情况而对算法进行最优化的选择,灵活有效地解决了预报准确率低的情况,适用于各类地形的风电场场址的选择。该系统已在湖北和甘肃等多家风电场正常运行。

4 预报效果检验

国外,Lange等^[30]对多种方法进行了检验,其中ANN的均方根误差(RMSE)在11.6%左右,SVM的RMSE在10.3%左右,ME和NNS处于它们之间,而这几种方法的集合比单一方法的RMSE都要小在10.1%左右。NWP,NWP1,NWP2和NWP3的RMSE分别在5.8%、5.9%和6.1%左右,而集合后的RMSE则为4.7%。Slougher等^[31]利用BMA(Bayesian model averaging)的各种改进方法对数值天气集合预报方法的结果进行集合订正,发现每种改进方法的平均绝对误差都在3.3左右,而覆盖率则在77%以上,效果明显优于单一的数值天气集合预报。Giebel等^[32]对DMI-

HIRLAM等各个NWP模式进行了介绍,并在对丹麦的6个风电场进行预报检验对比时,发现所有风电场DMI、DWD和MOS集合后的风功率预报误差是最小的,而单一的预报方法误差都要大于集合预报的误差。

在国内,刘永前等^[33]运用径向基网络法和持续法为代表的单一模型及两者的组合模型进行预报所得到的结论为例,分别对其预报效果进行分析说明:持续法在3~6h以内的预报结果与实际观测值的变化趋势基本相符,风速的RMSE为2.2m/s,风机出力的预报误差为12.9%;而径向基神经网络法在短时的预报结果与实际观测值的变化趋势也基本相符,但误差比持续法的要稍微大一点,风速的预报RMSE为2.5m/s,风机出力的预报误差为15.9%,跟踪风速的变化比持续法要及时;两者组合后的预报结果,风速预报准确率要比神经网络法高0.3m/s,比持续法高0.1m/s,风电机组出力的预报准确率要比神经网络法高3%,比持续法高0.9%。许杨等^[34]对多种短期预报方法进行对比发现:物理法1、2、3和动力统计法在不同月份的准确率不尽相同,但总体而言动力统计法更适用于该风电场的实际运行。

根据效果检验,可以看出,虽然系统运用的方法不一样,应用的风电场也有所区别,但总的预报效果还是基本能够达到预期,满足了风电场和相关行业的需求。同时,我们在预报方法的改进与准确率的提高上都存在很大的发展空间。

5 结论

风电功率预报技术发展到今天已有30多年的历史,目前已形成了一个较为成熟的体系,各种预报方法相继被提出且在业务运行中取得了好的效果。

就各个方法而言,它们都存在优点和缺点,在实际工作中都具有一定的局限性,且难以突破;而当对数值模式集合或对多种预报结果进行组合后,准确率得到了明显的提高,很好地弥补了单一法在适用性上的缺陷。这也为未来的风电功率预报技术的发展指明了新的方向。

参考文献

- [1] 于华鹏.全球风能理事会:2013年全球风电累计装机达318GW[DB/OL].<http://news.hexun.com/2014-02-11/162031694.html>,2014-02-11.
- [2] 陈正洪,许杨,许沛华,等.风电功率预测预报技术原理及其业务系统.北京:气象出版社,2013.
- [3] 洪翠,林维明,温步瀛.风电场风速及风电功率预测方法研究综述.电网与清洁能源,2011,27(1):61-62.
- [4] 韩爽.风电场功率短期预测方法研究.北京:华北电力大学能量与动力工程学院,2008.
- [5] Billinton R, Chen Hua, Ghajar R. A sequential simulation technique for adequacy evaluation of generating systems including wind energy. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1996, 11(4): 728-734.
- [6] Cao L, Li R. Short-term wind speed forecasting model for wind farm based on wavelet decomposition. IEEE Transactions on DRPT, 2008.
- [7] Bernhard L, Kurt R, Bernhard E, et al. Wind Power Prediction in Germany-Recent Advances and Future Challenges. European Wind Energy Conference, Athens, 2006.
- [8] 王健,严干贵,宋薇,等.风电功率预测技术综述.东北电力大学学报,2011,31(3):21-22.
- [9] 刘纯,范高峰,王伟胜,等.风电场输出功率的组合预测模型.电网技术,2009,33(13):74-79.
- [10] Sideratos G, Hatziairgiyriou N D. An advanced statistical method for wind power forecasting. IEEE Transactions on Power Systems, 22(1): 258-265.
- [11] 张国强,张伯明.基于组合预测的风电场风速及风电机组功率预测.电力系统自动化,2009,33(18):92-95.
- [12] 杨琦,张建华,王向峰,等.基于小波-神经网络的风速及风力发电量预测.电网技术,2009,33(17):44-48.
- [13] 吴兴华,周晖,黄梅.基于模式识别的风电场风速和发电功率预测.继电器,2008,36(1):27-32.
- [14] Damousis I G, Theocharis J B, Alexiadis M C, et al. A fuzzy model for wind speed prediction and power generation in wind parks using spatial correlation. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(2): 352-361.
- [15] 胡百林,李晓明,李小平,等.基于ARMA模型的水电站概率性发电量预测.电力系统自动化,2003,15(3):62-65.
- [16] 潘迪夫,刘辉,李燕飞.风电场风速短期多步预测改进算法.中国电机工程学报,2008,28(26):87-91.
- [17] 潘迪夫,刘辉,李燕飞.基于时间序列分析和卡尔曼滤波算法的风电场风速预测优化模型.电网技术,2008,32(7):82-86.
- [18] 栗然,王粤,肖进永.基于经验模式分解的风电场短期风速预测模型.中国电力,2009,42(9):77-81.
- [19] 管胜利.基于局域波分解及时间序列的风电场风速预测研究.华北电力技术,2009(1):10-13.
- [20] 罗海洋,刘天琪,李兴源.风电场短期风速的混沌预测方法.电网技术,2009,33(9):67-71.
- [21] 罗海洋,刘天琪,李兴源.风电场短期风速的改进Volterra自适应预测方法.四川电力技术,2009,32(3):16-19.
- [22] 陈玲.风电场风速和功率预测方法研究.武汉:武汉大学,2012.
- [23] Sideratos G, Hatziairgiyriou N D. An advanced statistical method for wind power forecasting. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 258-265.
- [24] Negnevitsky M, Potter C W. Innovative Short-Term Wind Generation Prediction Techniques. Power Engineering Society General Meeting, 2006.
- [25] Khalid M, Savkin A V. Adaptive Filtering Based Short-Term Wind Power Prediction with Multiple Observation Points/ICCA 2009. IEEE, 2009: 1547-1552.
- [26] Adrian G, Fiedler F. Simulation of unstationary wind and temperature fields over complex terrain and comparison with observations. Beitr Phys Atmosph, 1991, 64: 27-48.
- [27] Giebel G, Badger J, Marti P I, et al. Short-Term Forecasting Using Advanced Physical Modeling-the Results of the ANEMOS Project. European Wind Energy Conference, 2006: 1-29.
- [28] Frey-Buness F, Heimann D, Sausen R. A statistical-dynamical downscaling procedure for global climate simulations. Theor Appl Climatology, 1995, 50: 117-131.
- [29] 丁明,吴伟,吴红斌,等.风速概率分布参数预测及应用.电网技术,2008,32(14):10-14.
- [30] Lange B, Rohrig K, Ernst B, et al. Wind power prediction in Germany - Recent advances and future challenges. European Wind Energy Conference and Exhibition, Athens (GR), 2006.
- [31] Slougher J M, Gneiting T, Raftery A E, et al. Probabilistic wind speed forecasting using ensembles and Bayesian model averaging. Amer Stat Assoc, 2010, 105: 25-35.
- [32] Giebel G, Badger J, Landberg L, et al. Wind power prediction using ensembles. Technical Report, Risø National Laboratory, Risø-R-1527(EN), Roskilde, Denmark, 2005.
- [33] 刘永前,韩爽,杨勇平,等.提前三小时风电机组出力组合预报研究.太阳能学报,2007,28(8):840-842.
- [34] 许杨,陈正洪,杨宏青,等.风电场风电功率短期预报方法比较.应用气象学报,2013,24(5):627-629.

笛卡尔与《气象学》

杨萍

(中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

摘要: 笛卡尔的著作《气象学》一书第一次打破了亚里士多德维持了近两千年的气象学体系, 具有开创性的意义。本文系统梳理了《气象学》的主要内容和重要观点, 重点介绍了笛卡尔在物质假说、降水、云、风、虹等方面的认识, 并围绕笛卡尔的科学研究思想谈了几点思考, 希望能给从事科学研究及气象科技史研究的学者提供一些参考。

关键词: 笛卡尔, 气象学, 方法论, 天气现象

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.008

Descartes and the Meteorology

Yang Ping

(China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081)

Abstract: The *Meteorology* which Descartes wrote beat the meteorology system which had lasted for two thousand years by Aristotle in the first time, and has an initiating significance. This paper combed through the views of Meteorology, focusing on the areas of metaphysical theory, rain, cloud, wind, rainbow and so on, and makes reference of the ideas of Descartes, in order to offer some help for the study of meteorological history.

Keywords: Descartes, meteorology, methodology, weather phenomenon

0 引言

勒内·笛卡尔 (Rene Descartes, 1596—1650 年), 法国著名的哲学家和科学家。他最为人知的论断“我思故我在”开创了崭新的哲学时代, 其形而上学的思想至今仍旧在哲学史上存在着范围甚广和持久的影响。但是, 笛卡尔的个人成就远非如此。除了哲学上的贡献外, 笛卡尔在自然科学方面的成就令后人景仰: 他改变了人们关于世界的概念, 第一个提出了运用少数几条基本法则来理解所有物理变化的观念, 并将其运用到多个领域的研究中; 他建立了高等数学的重要基础, 是解析几何的发明者; 他发明了现代数学求解方程中常用未知量的表示, 创立了表示数字的立方和高次幂的标准符号; 他的机械唯物论把物理学与形而上学完全分开, 创立了著名的“动量守恒定律”; 他在34岁时完成《世界》一书的手稿, 他的《屈光学》确立了光的折射与光所穿越的介质密度的关系。笛卡尔具有令人吃惊的创造性思维, 敢于向他所处的时代占统治地位的成见和权威发起挑战, 并与

弗兰西斯·培根 (Francis Bacon) 齐名被称为近代科学史上两位“伟大的旗手”^[1-3]。

气象学作为一门年轻的科学, 其发展历史尚未得到足够的重视。关于笛卡尔在气象科学发展历程中的突出贡献关注甚少。笛卡尔在1937年第一部公开出版的著作作为《谈谈方法》、《气象学》和《屈光学》、《几何学》三篇论文作为《谈谈方法》的附录一同出版。尽管《谈谈方法》正文已有多位学者将其译为中文^[3], 但附录《气象学》一直尚未见其中文版, 仅仅在刘昭民所著的《西洋气象史》中部分谈及了笛卡尔的气象学观点^[1]。有关笛卡尔的其他参考资料中, 对其气象学观点的介绍通常是浅尝辄止。事实上, 笛卡尔打破了亚里士多德维持了近两千年的气象学体系, 建立了一种简洁一致的解释方法来研究大气中各种自然现象, 让气象学开始成为一门真正意义上的科学。可见, 笛卡尔的《气象学》这本著作值得气象科技史的学者们进行深入研究。

本文在概述笛卡尔的生平和其对气象领域贡献的基础上, 简要介绍《气象学》这本著作的完成背景和章节, 重点围绕物质假说、降水、云、风、虹等方面介绍了笛卡尔在这些领域方面的认识和观点, 力图归纳和总结出笛卡尔在气象学方面的成就和贡献, 为后人提供借鉴和参考。

收稿日期: 2015 年 8 月 14 日; 修回日期: 2016 年 1 月 4 日
第一作者: 杨萍 (1981—), Email: zz96998@163.com
资助信息: 中国气象局“气象科技史研究”项目; 国家自然科学基金 (41375069)

1 笛卡尔及对气象学领域的贡献

1.1 笛卡尔的生平简介

笛卡尔是17世纪法国著名的哲学家和科学家。他出身贵族，却对政治没有兴趣，致力于对新科学的研究和探索。笛卡尔少年时代非常好学，就读于欧洲最著名的学校拉·弗来施（La Fleche）公学，攻读语文、历史、文学、神学、哲学、法学、医学等众多古典学科，并大量阅读多个领域的书籍，博览众书的学习积累是笛卡尔批判思考世界的原动力。成年后，笛卡尔放弃书本教条，收集各种经验，并辅以理性思考去认知世界。他在1618年以绅士志愿兵的身份加入了荷兰莫里斯亲王的军队，并投入大量时间从事科学研究。1649年，他到瑞典为女王授晨课，由于无法适应当地的生活，因肺炎于1650年离世。笛卡尔偏爱新科学，认为只有科学才能给人类带来幸福。作为近代史上众多的科学家之一，笛卡尔不是多产的学者，从他第一部作品问世（1637年）到最后一部著作出版（1649年）一共只经历了十二年的时间，然而，他为物理学、数学、光学、气象学等多个自然科学领域做出了许多惠及后人的贡献^[5-8]。

1.2 笛卡尔对气象学的贡献

从古希腊亚里士多德时代到17世纪的两千年之间，气象学的发展极为缓慢，亚里士多德的《气象论》在中世纪被视为神明经典，极大束缚了中世纪学者以观察和实验探究气象科学的尝试。中世纪后期，哥白尼提出了“日心说”，伽利略借助于自制的观测仪器为哥白尼的天文学观点做辩护，开普勒继承和发展了哥白尼的行星天文学，这些成就尽管还不能和17世纪的科学革命相提并论，但对于推动科学革命的到来功不可没。在这一时代背景下，对新科学进行研究的要求越来越迫切，于是在大气科学领域，出现了笛卡尔这样一位具有划时代意义的科学家。

笛卡尔对于气象学的贡献突出：首先，他近乎完全摆脱了亚里士多德《气象论》的束缚，使气象学成为了具有科学性质的一门学科；其次，笛卡尔创立了一个全面的新理论——机械唯物论，其核心思想“通过观察收集材料，再总结成能够理解的理论体系”在气象学的分析中得到了充分的体现，为气象学的研究打开思路；再次，笛卡尔追求化复杂为简单的研究思路，他所撰写的《谈谈方法》成为其进行气象学研究的原则与规范，至今仍有很多值得后人学习和借鉴之处。

2 《气象学》简介

2.1 《气象学》的撰写背景

在撰写《气象学》之前，笛卡尔曾经着手撰写

著作《世界》，并于1633年前后完成定稿，希望勾勒出一种能解释所有自然现象的统一学说。但是，由于该书阐述的日心说等理论超越了他所处的时代，并被教会压制，因此，《世界》这部作品直至笛卡尔死后才得以出版。庆幸的是，该书的诸多观点在《谈谈方法》（1637年）中得以体现。

1637年以前，笛卡尔先后完成了《屈光学》、《几何学》和《气象学》这三部作品，在此基础上，笛卡尔撰写了一本关于方法论的著作《谈谈正确运用自己的理性在各门学问里寻求真理的方法》（简称《谈谈方法》），这四部作品在1637年合并为一本书出版，《谈谈方法》作为正文，《气象学》等其他三部作品以附录的形式呈现^[3]。从《气象学》的内容来看，《世界》一书中的一些假说在这本书中得以体现。值得一提的是，《谈谈方法》正文中提到了认识客观世界的四条基本原则，在《气象学》一书中有不少体现。这四条原则为：第一，要尽量避免轻率判断，即使对待权威说法也要保持怀疑的态度；第二，遇到复杂问题时，可以把它分解为一系列简单的问题；第三，要按照次序认识并解决系列问题，逐步回溯到原始的复杂问题；第四，要尽量全面细致地考虑问题，确信准确无误^[2]。

2.2 《气象学》的章节简介

《气象学》一书分为十讲，第一讲讨论了陆地上关于物质的本质，提出了物质假说理论，第二讲讨论了蒸汽和其他蒸散物（exhalations），第三讲讨论盐的特性及形成原因，第四讲讨论风的属性，第五讲讨论云的形成，第六讲讨论与降水相关的雪、雨、雹等自然现象，第七讲围绕风暴、闪电以及其他空中燃烧的火焰展开论述，第八讲利用光学原理讨论彩虹的特性和形成机理，第九讲围绕着云的颜色、晕等自然景观展开论述，第十讲谈了假日现象及形成原因。通观全书，笛卡尔将物质假说理论运用到对各种自然现象的解释中去，本文将重点介绍该理论对于风、云、降水等常见自然现象的解释，笛卡尔还提出了光学原理，并将其运用到虹、晕、假日等现象的解释中去，本文将以彩虹现象的研究为代表介绍其光学原理的主要观点^[4]。

3 《气象学》的重要观点^[4]

3.1 物质假说理论

在《气象学》开篇，笛卡尔便提出了物质假说理论。他认为，仅考虑物质构成的形状和组成，水、空气、土等物体都可以看作由不同形状、大小、排列不规整的物质构成，并推导了固体和液体的形成过程。他认为，当这些物质相互缠绕和交叉成篱笆状时，便形成诸

如土、木头等固体，当这些物质并未交错而只是简单组合，以致于稍一运动就会分开，便形成了比较稀薄的液体，比如水或油。在解释光的传播时，笛卡尔设想出一种感官无法感知的精微物质（fine material），这些精微物质可以沿任何方向做直线运动，能够散布于液体和固体极其细小的气孔（pore）中，这种物质产生的热量与受太阳激发的程度成正比。在这样一个假设下，他解释了为何人觉得夏季比较热、为什么白天比夜晚暖和、为什么离赤道越近就越热等问题。

在提出物质假说的基础上，笛卡尔解释了蒸汽的产生原理。他认为，物质在物体的气孔中运动，促使物体的一部分与整体相脱离，并上升到空气中形成蒸汽。基于蒸汽的解释理论，他还进一步解释了为什么在暖季或中午的湖水比多云或冷季时干涸得更快；还解释了为什么冬季人们能够看到哈气而夏季却不能看到。此外，笛卡尔提出了蒸散物（exhalations）的概念，他认为蒸散物比蒸汽呈现出更多的形态，因为蒸散物的组成物质更加多样和变化。

除了利用物质假说理论解释蒸汽和蒸散物的形成外，笛卡尔对海洋中的盐分也进行了详细的阐述和研究。他认为，盐是由长而硬的物质组成的，在水中不会蒸发，因为盐太重，所以不能轻易地悬浮在空中；用沙子过滤能够提取海水中的盐，因为沙子的物质只能让水物质通过，而拦截了长而硬的盐物质；盐水要明显重于清水，因为组成盐水的物质更厚更重，能够在更小的空间中进行组合。此外，他还利用物质假说理论讨论了为什么盐和雪在一起会容易融化，而水和碎冰在一起却会成为冰，以及为什么赤道地区海水的含盐量要大于极地等问题。

3.2 对风的认识

笛卡尔对于所有自然现象的解释几乎都是在物质假说理论的前提下展开的。他认为风是因为是受到多种物质的影响所产生的现象。例如，大吼大喊或者轻微扇动就能强迫空气的流动，从而产生风。他认为更加强烈的风一般是来自于海面或地表上升的蒸汽运动，甚至还设计了一个装入少量水的空心球（被称为汽转球），用此模型来理解和解释自然界存在的风。

对于风的性质，笛卡尔做了大量和仔细的观察，并对自己所观察到的现象逐一加以解释。

他提出东风比西风更干更洁净，是与西风逆行于蒸汽自东向西运动的惯性相关；白天盛行猛烈干冷的北风，是因为在赤道地区有更多的蒸汽升至空中，北方相反，并受到更多外力，迫使物质更容易向各个方向运动；他还解释了为什么白天盛行吹海风，那是因为受太阳照射后，海洋蒸发的水汽比在陆地多，而陆地很多地方干旱而不能提供如此多的水汽。类似

地，他解释了为什么春季尤其是三月份的风是所有季节中最干的，还解释了南风一般盛行于夜间且轻缓、潮湿的原因。

3.3 对云的认识

笛卡尔认为蒸汽不仅产生了风，也是产生云的根本原因。当蒸汽在扩散过程中越来越不透明时，如果向地表扩散就形成雾，如果蒸汽继续抬升，就会形成云。促使蒸汽越来越不透明的主要原因是构成蒸汽的细小微粒受外力作用后，与其他微粒足够近直至碰撞后，会聚集成小水滴或小冰片，因此云层是由这些聚集成的小水滴或小冰片组成的。除非受到风的影响，那些小水滴的形状一般呈现圆形，如果他们的体积增大到空气无法支撑时，就会快速地降落到地面形成雨，如果周围的空气不够暖和，无法溶解水滴的冻结，就形成了雪。

笛卡尔解释了为什么云所处的高度存在不同。他认为，云一般是在有风的过程结束之后形成。云能够在距离地面不同高度形成，出现错落有致的堆叠，这主要取决于蒸汽在上升过程中发生聚合所用的时间。这种情形在山区更容易出现，因为山区对蒸汽的热力抬升作用更为复杂。对于相对更高的云，那里的空气更加寒冷，遇冷结冰的可能性更大，因此，高处的云往往由细长的小冰片组成。

此外，笛卡尔还研究了云的形状。他认为，天气平静且少风的情况下，云的形状一般会不规则、不均匀。如果蒸汽在上升中遇到了几股强烈的阵风，风受阻被迫形成漩涡，从而蒸汽受到了来自不同方向的均衡外力，此时云的形状就较为统一。如果风因受到太阳热或其他原因比较温暖，那么云在形成中需要一个将小冰粒包裹起来的外壳，此时形成的云往往会更加厚重和巨大。

3.4 对降水的认识

笛卡尔认为，降水非常复杂多变，其不确定因素很大，因此人类很难准确地进行降水的预测，这个观点即便今天来看，仍旧是了不起的结论。

笛卡尔利用物质假说理论，解释了雨、雪、雹的形成。他认为，在风、流动的空气等外界因素的作用下，云层里最高层的小冰片会首先下降，在降落途中颗粒间的相互吸引使其变大变重，当他们降落到地面尚未来得及溶解，便形成雪，如果冰片在溶解过后，遇到了冷风使其再次凝冻，便形成了雹。如果周围空气比较温暖，冰片被溶解成小水滴，当水滴的体积增大的空气不能够支持时，抑或水滴下方的空气发生收缩，再或水滴上方的空气压迫，就会形成雨降落在地面。关于降水强度，笛卡尔做了进一步分析，他认为水滴下方空气收缩所造成的降水一般非常弱，有时甚至形成不了降水而只是下了一场雾；但是，如果是

上方空气压迫云发生下沉,那么往往会形成大雨。此外,在闷热的夏季,有时候还未看到云过来就有降水落下,这主要是由于别处的风与空气中大量水汽作用的结果。

在雹的研究中笛卡尔非常重视观察。他在《气象学》一书中详细介绍了在1635年2月4日发生的一次雹事件,他观察到最初的雹颗粒非常微小,而后在冷风的作用下变大,并产生了类似齿轮一样的六角冰雹。他认为,六角形冰雹是空气中的热量、蒸汽、强风相互作用后形成的一个产物。关于雹为何会有不同的形状,笛卡尔这样解释,雹形状的不同和形成过程相关:当遭遇冷风,使得下降的水滴迅速凝结,这时容易形成透明的圆形冰雹;当正在融化的雪片遭遇冷风,还没有形成圆形的水滴便被冰冻,便形成了形状不规则的雹。

3.5 利用光学原理认识虹等自然现象

笛卡尔对于光学现象的研究起源于沙因奈尔(Christopher Scheiner)1629年夏天在罗马附近观察到了一种幻日现象。笛卡尔对此抱有了极大的兴趣,并着手研究光学的原理。他提出了一种理论:最高云层由冰片和雪组成,风融化并冻结了它们,形成了坚硬的、透明的冰环,其功效如透镜,产生了假日现象。这种解释听起来非常荒谬,但是,正是通过对幻日现象的深入追寻,笛卡尔才开始了对光的研究。他吸收了阿尔海森(Alhazen)和开普勒(Johanns Kepler)光学著作的精华,利用物质假说理论解释光的现象,勾勒了光的形成原理,并阐释了反射和折射定律。

利用光学原理解释各种自然现象的论述中,笛卡尔关于虹的解释是最为全面和详尽的。他认为,当空气中大量的水汽被阳光照射后,进入人们的眼睛,便形成了虹。这种自然现象不一定在遥远的天空中发生,也可能是在很靠近人们的地方形成。他还指出,虹是一种弧形,圆形水滴的尺寸并不能改变虹的弧度,并用图形解释了虹形成的光学原理(图1)。对于虹的形成原因,笛卡尔通过复杂的计算和对几何图形的分析得到,虹主要是通过光线的两次折射和一次反射进入眼中,还有部分是通过光线的两次折射和两次反射进入眼中。此外,笛卡尔还指出,虽然彩虹呈现出红、黄、蓝等不同的颜色,但这些颜色形成的机理是相同的。由于笛卡尔掌握了反射、折射等光学原理,尽管他还不能说明彩虹的颜色为什么如此排列,但他对虹的成因分析与起亚里士多德时代相比,已经称得上是科学。

4 总结

从笛卡尔《气象学》这本专著中,我们能够看到,笛卡尔对气象学及自然科学领域的贡献巨大。首先,笛卡尔非常重视观测和实验。17世纪开始,自然科学的研究开始全面注重观测和实验,笛卡尔便是最

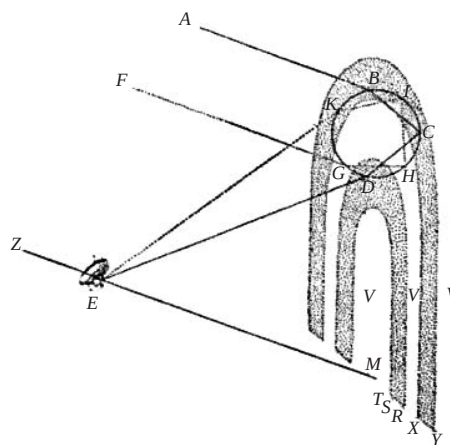


图1 彩虹形成的光学原理^[4]
Fig. 1 Rainbow diagram

早从事气象观测的先锋之一。笛卡尔在《气象学》一书中对降水、云、风、虹等多种天气现象进行了详细的描述,这些观测事实得益于他制造并使用了大量的观测仪器。其次,笛卡尔建立了一套假说(物质假说理论),用于解释各种自然现象。能够通过观测从千变万化、看似毫无关联的自然现象中找出共性,化繁为简,尽管解释结果存在偏差,但是,笛卡尔这种科学的研究方法已经远超过了他所处的时代,即便到今天仍旧值得后人借鉴。第三,笛卡尔尝试多学科相互融合。笛卡尔在气象学中值得后人称道的工作之一是对彩虹的成因分析,与亚里士多德时代关于虹分析的最大不同是笛卡尔引入了光学的原理、运用反射和折射定律来解释虹,从而使其分析和研究结果具有了科学的意义。

笛卡尔是世界科学史上的著名人物,是一位具有远见卓识的思想家,尽管人们对其贡献的评价多种多样,但是,值得肯定的是,笛卡尔在气象学中的诸多观点给后人的研究提供有价值的参考,同时,其创造性思维、挑战权威、否定和怀疑真理的科学精神也值得继承和发扬。

致谢:衷心感谢中国气象局许小峰研究员及两位评审专家对本文撰写过程中给予的指导和帮助。

参考文献

- [1] 刘昭民. 西洋气象史. 台湾: 中国文化大学出版部, 1981.
- [2] 杨萍, 叶梦姝, 陈正洪. 气象科技的古往今来. 北京: 气象出版社, 2014.
- [3] 笛卡尔. 谈谈方法. 王太庆, 译. 北京: 商务印书馆, 2000.
- [4] Descartes R. Discourse on Method, Optics, Geometry, and Meteorology. Olscamp P J. Indianapolis: Bobb-Merrill, 1965
- [5] 王洋. 笛卡尔科学及其哲学之间的关系问题研究. 上海: 华东师范大学, 2012.
- [6] 蒙虎. 十七世纪西方数学的自然哲学背景. 西安: 西北大学, 2003.
- [7] 周晓亮. 直觉与演绎: 笛卡尔的方法论选择及其困境. 云南大学学报: 社会科学版, 2004, 4(1): 3-10.
- [8] 汤姆·索雷尔. 笛卡尔. 李永毅, 译. 南京: 译林出版社, 2014.

三种数值模式对长江上游面雨量预报能力的评估

向永龙¹ 邬昀² 孙士型¹ 范元月¹ 饶传新¹

(1 宜昌市气象局, 宜昌 44300; 2 湖北省气象信息与技术保障中心, 武汉 430079)

摘要: 利用2007—2008年长江上游逐日面雨量实况和中国T213、日本JMH、德国GER三种数值模式降水预报格点资料, 采用TS评分方法, 检验三种数值模式对长江上游面雨量 $\geq 20\text{mm}$ 强降水的预报能力。检验结果显示, 日本JMH模式12~36h预报评分达38.5%; 中国T213模式为28.2%; 德国GER模式为26.9%。并且在对降水落区进行定性评估的基础上, 建立了降水预报产品与流域面雨量实况的线性回归方程。

关键词: 长江上游, 面雨量, 数值预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.009

Evaluation of Three Forecasting Models to Area Rainfall Prediction in Upstream of Yangtze River

Xiang Yonglong¹, Wu Yun², Sun Shixing¹, Fan Yuanyue¹, Rao Chuanxin¹

(1 Yichang Meteorological Office of Hubei Province, Yichang 443000 2 Hubei Meteorological Information and Technical Support Center, Wuhan 430079)

Abstract: Using the daily area rainfall of observation and three forecasting models in the upper reaches of the Yangtze River from 2007 to 2008, based on TS scoring methods, the capability is inspected of the models to heavy prediction over the upper reaches of the Yangtze River. Test results show that the three models are of different precipitation forecasting capacity: the score of Japan's JMH Model is 38.5%; the score of China's T213 model is 28.2%; the score of Germany GER model is 26.9%. Based on the qualitative assessment of precipitation area, a linear regression equation is established for precipitation forecast products and the precipitation.

Keywords: upstream of Yangtze River, area rainfall, forecasting models

0 引言

长江上游是指宜昌南津关以上的广大地区, 流域面积约100万 km^2 , 多年平均径流量4510亿 m^3 , 年平均径流深约1000mm, 平均径流系数为0.51。若按其水文分区, 则可划分为金沙江、岷沱江、嘉陵江和乌江四大流域, 其中宜宾至宜昌统称为长江上游干流。为便于统计和预报分区, 又将其划分为宜宾至重庆、重庆至万州、万州至宜昌三个区段。

统计表明, 金沙江流域来水量占宜昌径流量的33%, 岷沱江为22%, 屏山—宜昌区间和嘉陵江各占16.4%和15.6%, 乌江为11%。因此, 长江上游流域降水是三峡水库入库流量的主要来源。三峡水库作为长江中下游防洪的关键性水库, 长江上游流域面雨量预报是水库防洪、运行调度的重要依据。其长江上游面雨量预报技术也越来越受到重视, 其中: 李才媛等采用统计模型方法建立了长江上游短期强降水预

报系统^[1], 陈静应用动态相似方法制作长江上游逐日降水量预报^[2], 李才媛等应用灰色预测模型预报长江上游流域面雨量^[3-4]。但更多是应用数值模式产品与专业人员人工订正相结合的方法制作长江上游面雨量预报。目前, 各种数值模式描述的物理过程和前后处理、参数化方案及时空分辨率各不相同, 因而预报性能各有差异。为提高流域面雨量预报准确率, 发挥气象预报在水库运行调度中的作用, 有必要对数值模式降水产品的预报能力进行评估, 进而研究多模式综合集成预报方法^[5-6]。

1 资料来源和方法

1.1 资料来源

雨量实况来自于长江上游流域内已建的各个气象站点当日08—次日08时(北京时, 下同)的日雨量资料, 日面雨量取各站点日雨量的算术平均值。

数值模式降水预报产品则取自于MICAPS格点资料中的第四类数据, 以前一日20时为初时场。德国GER、JMH产品采用前一日20时的12h雨量预报, 由YYMMDD20.024+ YYMMDD20.036计算出未来

收稿日期: 2015年10月14日; 修回日期: 2016年1月20日
第一作者: 向永龙(1957—), Email: 1093006787@qq.com
通信作者: 邬昀(1983—) Email: 23481324@qq.com

24h雨量预报值; T213采用前一日20时的3h雨量预报: YYMMDD20.015+ YYMMDD20.018+ YYMMDD20.021+ YYMMDD20.024+ YYMMDD20.027+ YYMMDD20.030+ YYMMDD20.033+ YYMMDD20.036, 得到未来24h雨量。当部分时次预报结果原始资料缺失时, 采用前一日08时(+12)资料代替。

中国T213中期数值天气预报模式水平网格距 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$; 德国GER中期数值预报模式水平网格距为 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$; 日本JMH中期数值预报模式水平网格距为 $1.25^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ 。

数值模式流域面雨量采用FORTRAN语言进行计算, 调用该程序后在输入初始时刻的对话框中, 输入前一日20时(例如输入08062420表示08年6月24日20时初始场计算出25日08时—26日08时面雨量), 再由流域内各格点降水预报值的算术平均值, 计算出长江上游流域6个分区的24h面雨量^[7-8]。

1.2 资料处理方法

设流域面雨量实况为 y , 数值模式降水预报产品为 x 。计算两组数据间的相关系数 r :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

设有 n 种预报方法, 对其预报对象得出预报结论为 $\{y_i\}$ ($i=1, 2, \dots, n$), 利用 n 个历史样本, 按最小二乘法得到线性回归集成预报为:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i, \quad (2)$$

其中 b_0 为预报对象的平均值, b_i 反映了预报因子的相

对重要性及它们的相互关系。

2 降水检验

2.1 TS评分

针对长江上游面雨量 $\geq 20\text{mm}$ 的强降水, 分别检验T213、JMH和GER数值模式的定性预报能力。只有当数值模式预报值和面雨量实况同时 $\geq 20\text{mm}$, 则评为正确; 当数值模式预报值 $< 20\text{mm}$, 而面雨量实况 $\geq 20\text{mm}$, 则评为漏报; 当数值模式预报值 $\geq 20\text{mm}$, 而面雨量实况 $< 20\text{mm}$, 则评为空报。然后分流域评定其TS评分、偏差(B)、空报率(KO)、漏报率(LO)和预报效率(EH)。

TS评分: $TS=NA/(NA+NB+NC)$,

偏差: $B=(NA+NB)/(NA+NC)$,

漏报率: $LO=NC/(NA+NC)$,

空报率: $KO=NB/(NA+NB)$,

预报效率: $EH=(NA+ND)/(NA+NB+NC+ND)$,

上式中, NA 代表模式预报正确的次数; NB 代表模式空报的次数; NC 代表漏报次数; ND 代表除预报正确、空报和漏报以外的样本数。

表1已经给出了三种数值模式降水预报产品的TS评分结果。对表1检验结果进行比较, 三种数值模式产品对全流域强降水预报的面雨量正确率有一定差别, 其中, JMH模式预报效果较好, 为38.5%; T213模式次之, 为28.2%; GER模式效果最差, 为26.9%。从流域分区TS评分结果分析看, 三种模式产品预报能力也不尽相同。JMH模式对嘉陵江、乌江流域、宜宾—重庆段和重庆—万州段的预报能力明显优于T213和GER模式; 而T213模式对万州—宜昌段强降

表1 三种数值模式对2007—2008年长江上游各分区强降水的定性预报能力
Table 1 Qualitative forecasting ability of three kinds of numerical models for heavy rainfall in the upper reaches of the Yangtze River during 2007–2008

数值模式	检验项目	岷沱江	嘉陵江	乌江	宜宾—重庆	重庆—万州	万州—宜昌	流域合计
T213	正确率	0.167	0.400	0.200	0.000	0.231	0.500	0.282
	偏差	2.500	0.909	0.636	0.222	1.000	0.895	0.886
	漏报率	0.500	0.455	0.727	1.000	0.625	0.368	0.586
	空报率	0.800	0.400	0.571	1.000	0.625	0.294	0.532
	预报效率	0.783	0.804	0.739	0.761	0.565	0.739	0.732
JMH	正确率	0.200	0.500	0.643	0.389	0.316	0.286	0.385
	偏差	2.000	0.909	0.917	1.778	0.563	0.421	0.873
	漏报率	0.500	0.364	0.250	0.222	0.625	0.684	0.479
	空报率	0.750	0.300	0.182	0.563	0.333	0.250	0.403
	预报效率	0.826	0.848	0.891	0.761	0.717	0.674	0.786
GER	正确率	0.154	0.231	0.417	0.313	0.235	0.273	0.269
	偏差	2.750	0.455	0.417	1.333	0.750	0.474	0.761
	漏报率	0.500	0.727	0.583	0.444	0.667	0.684	0.627
	空报率	0.818	0.400	0.000	0.583	0.556	0.333	0.510
	预报效率	0.761	0.783	0.848	0.761	0.717	0.652	0.754

水的预报能力优于其他两种，但它对宜宾—重庆段强降水的预报能力最低。

对三种数值模式的漏报率进行统计，T213和GER对长江上游强降水的漏报率较高，分别为58.6%和62.9%；而JMH的漏报率较低，为47.9%，特别是对乌江和宜宾—重庆段强降水的漏报率仅为20%左右，说明JMH模式对乌江和宜宾—重庆段强降水有较好的预报能力。

统计三种数值模式的空报率，T213和GER对长江上游强降水的空报率较高，分别为53.2%和51.0%；JMH的空报率较低，为40.3%。三种模式对各分区强降水的表现各不相同，特别是JMH和GER模式对乌江强降水的空报率较低，仅为15%左右。当这两种数值模式同时预报乌江流域和长上干有强降水时，其可信度在60%左右。

2.2 总体相关性检验和单模式产品线性回归

TS评分仅仅对长江上游面雨量 $\geq 20\text{mm}$ 强降水的预报能力进行了检验，若评估这三种数值模式对一般降水的预报能力，还需进一步了解预报和实况间的相关性。检验中，采取不区分流域以增加样本数，将各流域分区的面雨量实况值与数值模式预报的降水量进行合并统计，分别计算得出三种数值模式降水预报值与降水实况值的相关系数。统计表明：JMH模式降水预报值与面雨量实况值相关性最高，其相关系数为0.4881；T213模式降水预报值与面雨量实况值的相关性次之，其相关系数为0.3394；GER模式降水预报值与面雨量实况值的相关性较低，其相关系数为0.3215。以上三种模式其相关系数均大于0.3，有一定的可信度。

为提高预报准确率，根据公式（2），建立T213、JMH、GER三种数值模式降水预报值（ X ）和面雨量实况值（ Y ）之间的线性回归方程进行检验，其回归方程为：

T213模式： $Y=0.3075X+8.17$ ，

JMH模式： $Y=0.6078X+4.48$ ，

GER模式： $Y=0.3552X+8.55$ 。

上述线性回归方程，已通过276个样本的订正检验，实际效果较好。在使用中，只需将三种数值模式面雨量预报值代入相应方程计算，即可投入业务应用，以提高预报准确率。

2.3 分区相关性检验和多元线性回归

比较降水实况和数值模式降水产品的相关性，可将流域内分区面雨量按升序排列，其分布曲线呈指数曲线，三种数值模式曲线分布仍呈上升趋势，但其拟

合状况并不理想（图略）。

检验三种数值模式产品与降水实况间的相关系数表明（表2）：JMH模式与实况的相关性最好，平均达0.599，但分区域时差别较大：乌江流域相关性为0.849，嘉陵江流域为0.770，重庆至万州段为0.250。GER模式与实况的相关性次之，平均为0.414；四川盆地、乌江和长上干的相关系数为0.5左右，而三峡区间相关系数最低，重庆—万州段的相关性最差，为0.051，基本没有什么参考价值。相对于其他两种模式，T213模式与实况的相关性较差，平均为0.322，四川盆地的相关系数在0.450左右，但宜宾—重庆段的相关系数仅为0.005，价值不大。

表2 长江上游分区面雨量实况与三种数值模式降水预报值的相关系数

Table 2 The correlation between the rainfall data in the upper reaches of the Yangtze River and the precipitation forecast values of three kinds of numerical models

模式	岷沱江	嘉陵江	乌江	宜重	重万	万宜	平均
T213	0.424	0.502	0.387	0.005	0.238	0.373	0.322
JMH	0.587	0.770	0.849	0.641	0.250	0.494	0.599
GER	0.496	0.462	0.560	0.522	0.051	0.396	0.414

工作中，为充分发挥三种数值模式的综合效力，可令流域面雨量预报值为（ y ），则岷沱江流域面雨量预报值为 y_1 ；嘉陵江流域为 y_2 ；乌江流域为 y_3 ；宜宾至重庆段为 y_4 ；重庆至万州段为 y_5 ；万州至宜昌段为 y_6 。则令前一天20时为初始场的T213模式12~36h的面雨量产品为 x_1 ；JMH模式12~36h面雨量产品为 x_2 ；GER模式12~36h的面雨量预报产品为 x_3 。然后将历史样本依次代入方程进行回归计算，得出多元回归方程，见表3。

表3 T213、JMH和GER三种数值模式对长江上游流域面雨量的线性回归

Table 3 The linear regression equation of three kinds of numerical models to the rainfall in the upper reaches of the Yangtze River

流域	多元线性回归方程
岷沱江	$y_1 = -2.023 + 0.047x_1 + 0.452x_2 + 0.210x_3$
嘉陵江	$y_2 = -1.565 + 1.024x_2 - 0.015x_3$
乌江	$y_3 = -1.758 + 0.014x_1 + 0.84x_2 + 0.130x_3$
宜宾—重庆	$y_4 = 1.077 - 0.060x_1 + 0.503x_2 + 0.207x_3$
重庆—万州	$y_5 = 10.831 + 0.168x_1 + 0.239x_2 - 0.053x_3$
万州—宜昌	$y_6 = 6.406 + 0.177x_1 + 0.580x_2 + 0.155x_3$

3 应用多模式综合集成与人工订正方法开展面雨量预报效果

统计2007年汛期（5—9月）共发布长江上游面雨量预报153份（次），实际长江上游六大流域（区间）出现1个或1个以上预报区域（区段）日面雨量

(08—次日08时) $\geq 20\text{mm}$ 的强降水共38次, 除2007年7月23和28日强降水预报位置有偏差, 9月16日乌江、宜宾至重庆段强降水预报量级与实况有出入外, 其余35次均提前24h报出, 其中9次强降水预报量级较实况略偏小, 2次略偏大, 24次降水落区、量级预报与实况基本相符。面雨量预报准确率为56.8% (预报准确率 = 正确次数 / (预报次数 + 漏报次数))。

统计2008年汛期(5—9月)共发布长江上游面雨量预报153份(次), 实际长江上游流域出现1个或1个以上预报区域(区段)日面雨量(08—次日08时) $\geq 20\text{mm}$ 的强降水共24次, 面雨量预报准确率为51.1%。表4是2007年汛期长江上游流域面雨量部分落区、量级预报与实况。

表4 2007年5—9月长江上游部分时段面雨量预报效果检验 (单位: mm)
Table 4 May–September monthly rainfall forecast over the upper reaches of the Yangtze River in 2007 (unit: mm)

时段	项目	岷沱江	嘉陵江	乌江	宜重段	重万段	万宜段
5月30日08时—5月31日08时	实况	2.6	22.6	0.1	7.0	5.0	23.3
	24h预报	15~25	15~25	1~5	10~15	10~20	15~25
6月8日08时—6月9日08时	实况	5.6	16.7	20.6	12.4	24.9	11.6
	24h预报	10~20	5~10	20~30	15~25	15~25	5~10
6月18日08时—6月19日08时	实况	1.1	5.3	4.6	8.0	30.7	49.9
	24h预报	1~5	15~25	10~20	5~10	25~35	25~35
7月9日08时—7月10日08时	实况	11.8	1.8	24.2	29.0	10.6	15.5
	24h预报	0	0	15~25	20~30	15~25	10~20
7月18日08时—7月19日08时	实况	14.2	19.6	3.6	25.9	27.4	18.1
	24h预报	10~20	25~35	0	15~25	25~35	10~20
7月29日08时—7月30日08时	实况	0.2	6.1	34.9	10.1	20.9	39.4
	24h预报	0	5~10	15~25	10~20	15~25	25~35
8月31日08时—9月1日08时	实况	14.4	17.2	18.9	7.7	22.8	27.5
	24h预报	10~20	15~25	15~25	15~25	25~35	35~45

4 结论

1) 采用TS评分方法, 用T213、JMH、GER三种数值模式对长江上游面雨量预报能力进行评估: JMH模式预报效果为38.5%; T213模式为28.2%; GER模式为26.9%。
2) 检验三种数值模式预报产品与流域分区降水实况间的相关系数表明: JMH模式与实况相关性最好, 平均达0.599; GER模式次之, 为0.414; T213模式较差, 为0.322。尽管三种模式对流域分区的相关性表现不同, 差别很大, 但只要区别对待, 仍具有一定借鉴意义。
3) 三种数值模式对长江上游流域暴雨落区的分布形态、中心位置和强度预报有一定参考价值。实际工作中, 如果专业技术人员通过对其预报结果进行综

合评估, 并根据天气形势的变化进行人工订正, 对提高长江上游流域面雨量预报准确率会大有帮助。

参考文献

[1] 李才媛, 王仁乔, 王丽, 等. 长江上游流域短期强降水面雨量预报系统. 气象, 2003, 29(3): 34-37.
[2] 陈静. 动态相似方法在长江上游逐日降水预报中的应用. 气象, 2000, 26(6): 40-47.
[3] 李才媛, 顾永刚. 灰色预测模型在长江上游流域面雨量预报中的应用. 气象科技, 2003, 31(4): 223-230.
[4] 王丽, 王仁乔, 金琪. 应用综合统计方法预报长江上游短期强降水面雨量. 气象, 2003, 29(3): 23-26.
[5] 罗剑琴, 孙士型, 陈少平, 等. 长江上游流域数值预报产品评价分析. 暴雨灾害, 2007, 26(3): 246-250.
[6] 何光碧, 陈静, 肖玉华, 等. AREM数值模式对2005年汛期四川的降水预报. 气象, 2006, 32(7): 64-71.
[7] 邬昀, 陈海山. 基于数值模式产品的三峡库区水量预报初步研究. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
[8] 孙士型, 范元月, 张小培, 等. 三种数值模式对长江上游面雨量预报能力评估//湖北省气象学会. 湖北省气象学会学术年会学术论文详细文摘汇集. 武汉: 湖北省气象学会, 2008.

界壳论及其应用

曹鸿兴 封国林

系统论将世界视为系统与系统的集合，研究世界的任何部分，界壳论则把研究目标放在系统怎样通过其周界影响环境，以及环境通过周界反作用于系统。因此，可以说界壳论是系统科学的一个分支。

鸡蛋的外壳、地球的大气层、人的衣服、生物膜、国界和互联网中的防火墙等都是界壳现象，它普遍存在于物质世界和精神世界。界壳论是研究系统周界的一般性理论，即研究存在于系统周界中的某些共同规律及其在信息、工程、物理、生物、心理和哲学等领域中的应用。

本文从应用角度介绍界壳论，先通过实例来说明什么是界壳论，从界壳论的起源、演化及其应用范畴来说明界壳问题的普遍性，然后论述界壳论的基本原理，进一步叙述界壳论的种种应用实例，特别是其在气象中的应用。

系统论将世界视为系统与系统的集合，研究世界的任何部分，就是研究相应的系统本身及其与环境的关系。界壳论则把研究目标放在系统怎样通过其周界影响环境，以及环境通过周界反作用于系统。因此，可以说界壳论是系统科学的一个下属分支。对系统周界或边界的研究早已有之。在微分方程中的边值问题，早在19世纪就已提出，是早期的界壳论问题，不过，这里边界只是一个从属体，而不是研究的主体。从瓦特蒸汽机出现后，人们就研究各种各样的热工系统，研究这些系统的热量输入和输出以及怎样防止热量的损失。热工系统的各个环节都和界壳论的主要论题——交换和保护相联系。又如动物冬眠早为人们所关注，生物学家对此做了深入的观测和分析。冬眠的洞可以使动物免受或少受寒冷侵犯，同时，不吃不喝、减缓呼吸是动物用身体来卫护自己免于死亡。可以看到，动物冬眠时有双重界壳——洞和体表在起作用。界壳论是从演绎的角度来讨论这些早已存在的问题，加以从当代科学来统一地研究，创立新的概念和理论。

一、界壳现象

在现实世界中存在着大量的界壳现象。例如一个村庄或一个城市，只有为数不多的若干条道路与其周围相通，也就是，进出村庄或城市是受到约束的。在

现代，信息通道畅通与否反映了其城市的发达程度。一个细胞的细胞膜保证这个细胞可以存活下去并且可以与外界交换物质和能量，这都归因于离子在细胞膜中来回运动。在两个不同的国家或部落间存在深深的心灵隔阂，可以引起这两个国家和部落之间的持续冲突甚至战争。衣服是为防风保暖，但盔甲是为了防刀箭，盔甲是古代战争的重要防身手段。

在国家的边界上都有国防军把守，防止他国人进入。只有在若干口岸才准许人员、物资进出。而口岸的多少与繁忙程度往往是该国经济发展程度的反映。

动物几乎都有领土行为。一只动物到了某地会用尿把周围圈起来，防止其他动物侵入。一只外来昆虫误入蚁群就会被咬死，是动物的保护行为。又如猫的自我保护行为，只要房间里放个箱子，很快猫会将其占领。

不同宗教之间的沟壑是十分显著的，教义的不同、崇拜对象的不同以及仪式的差别，使得其难以沟通。于是各种不同类别的宗教都结成了几乎准封闭的界壳。为了世俗利益和权力，以及地盘的争夺，会发展成宗教战争。十字军东征就是历史范例。

二、界壳论的提出与发展

界壳论由中国学者曹鸿兴于1988年提出，已有专著出版，且召开过全国性学术讨论会及出版论文集，互联网上也已有许多有关界壳论的介绍和研究。提出界壳理论是由于受到自然现象和周围环境的启发。例如龟、鳖、蜗牛长有一个坚硬的甲壳用以保护自己，尽管它们因此而行动缓慢，却正是这重甲壳保护了它们免受吞噬，以致繁衍生息，在与地球环境和生态的残酷斗争中保存下来，没有灭绝。又如，当你工作在某一个单位，你就在这单位登记在册，不能随便离开，要受到该单位规章制度的种种约束。单位就是约束你的一个界壳。你生活在特定社会中，呆在特定国家，生活在某个城市或乡村，你就生活在特定的界壳中。这些界壳现象需要从物理、数学、生物学和社会学等角度来研究。而学术分支一旦被提出，就有不断

深入研究的潜力。

界壳论的第一篇文章为《界壳现象及其学术框架》，2002年正式发表于《集对分析与界壳论的研究与应用》一书中。有关界壳论的第一本专著《系统周界的一般理论——界壳论》于1997年出版，奠定了界壳论发展的基础。而2011年出版的《界壳论精要及其应用》一书则已显示出其发展的丰富内容。*Modeling of System Boundary: Periphery Theory*一书即将出版，预示着该项研究正向国际化迈进。界壳论是界壳现象的模型化，2008年以前主要以描述连续的微分方程作为模型化的手段，由于微分方程的数学难度，限制了它在许多学科中的应用。此后，提出了界壳量化的原理和数学方法，开辟出了更多应用领域，尤其是人文科学中的应用途径。

三、界壳及其理论

界壳理论是研究系统周界的一般性理论，它并不具体研究个别系统周界，而是研究存在于系统周界中的共同规律。界壳论认为系统是由若干相互作用的部分组成的复合体，与系统相邻并与之依附的部分称为环境或者外界，分隔系统与环境的边界称为周界。无论从系统向环境或是从环境向系统的物质、能量、信息的传输都必须经过这一周界。系统周界对系统的生存、调控和演化起着关键作用，甚至是决定性的作用。如果系统的周界具有：

- 1) 卫护系统的生存和发展，
- 2) 进行环境和系统间的交换，

则把这样的周界称为界壳。界壳论研究界壳的普适性规律，从一般意义上研究界壳的结构、功能和行为。例如，界壳论不研究城墙是怎么建的，城门用什么建；只研究城墙的一般性功能，即防卫敌人，且通过城门，人员和物资得以进出，以维持城里人的生存。

界壳论从一个全新观点来讨论诸如系统平衡和发展、生命生存、种族冲突、信息安全等不同学科中的问题。可以说，界壳论是一块正待开拓的科学处女地。

四、界壳要素

周界中卫护系统的部分称为界壁，其交换功能的部分则称为界门或通道。无论界壁还是界门都占有空间维度。因此，本质上界壳是在环境和系内之间占有空间或相空间的特定位置。可以说界壳是空间意义上的物理概念。

1. 开放度

从结构上讲，界壳由界壁（ W ）和界门或通道（ P ）组成。设系统的周界记为 L ，其周长为 l ，定义

界壳开放度 ρ 为通道宽度 p 与周长 l 之比，即

$$\rho = p/l. \quad (1)$$

开放度 ρ 是界壳论的基本概念。界门大小取决于多种因素，例如家居的门的宽度和高度就取决于人的身高和身宽，以及家具大小；海关多寡取决于进出人员和物资的多少。显然，开放度是结构上的，对不同的物质、能量和信息，开放度是不同的。例如古代城门只限制人员和物资的进出，却不能阻止阳光的进入；也就是说，作为生命十分需要的阳光这一能量，城墙对它而言是全开放的，即 $\rho=1$ 。

2. 交换率

另一个重要的界壳要素是交换率，它是功能上的，是对能量、物质或信息通过界门能力的量度。例如A机场的空运量远远大于B机场，人跑步时的空气交换量比平静时要大。

交换率 α 定义为通过界门交换的实际量 E_s 与存在于环境和系统中的可交换量 E_e 之比：

$$\alpha = E_s/E_e. \quad (2)$$

这是一个较为抽象的定义，对于具体问题要设计适合该问题的交换率。交换包括输入和输出两部分。净交换量则是输入和输出之差。输入和输出是一个极为广泛的概念，从某个城市的能源粮食供应、垃圾的运出和处理，到食物、空气进入人体和粪便、汗液的排出等。

3. 界壁抗力

界壁是用来卫护系统的，其卫护功能的大小可以用抗力来表示。例如，乌龟壳的抗力显然比蜻蜓的外壳抗力要大。从这些例子可以归纳出界壁抗力 R 是界壁结构 C 、外在攻击 A 和系统状态 D 的函数，即：

$$R=f(C, A, D)。$$

针对不同的问题可以定义相应的界壁抗力。例如设计一个水坝就可以用相应的水力学方程来计算；酒桶的破损强度可以用实验来确定。确定界壁抗力在实际问题中是十分重要的。

五、界壳的数学描述

界壳可由微分方程和离散界元的量化来定量描述。在控制论和系统论中，微分方程是描述系统状态变化的主要手段，作为系统一部分的周界，显然可以用微分方程来描述。尤其是偏微分方程，它对系统边界的描述，也正是界壳论所需要的。但怎样把这些有关成果应用到界壳论，至今尚处初创阶段。现举一例说明。

在虫口模型中，可以加进一个开关参数 δ ，即

$$x_{n+1} = (\lambda + \delta)x_n(1 - x_n), \quad (3)$$

式中, λ 为模型参数, 构造一个可以依据 x 增量自动调整的参数 δ ,

$$\delta = \begin{cases} 1 & (x_{n+1} - x_n) / (x_n - x_{n-1}) < 1 \\ 0 & (x_{n+1} - x_n) / (x_n - x_{n-1}) \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

公式 (4) 中, 当 x 的增加量等于或超过前一时刻的增加量时, 关闭开关, 参数 $\delta=0$, 阻止系统外的物质、能量或信息进入; 当 x 的增加量低于前一时刻的增加量时, 开关打开, 参数 $\delta=1$, 允许系统外的物质、能量或信息进入。显然这是一个界门交换随着系统状态而变的自适应模型。

离散界元量化的基本原理为: 设界壳元素为界元 u , 其卫护度为 $\mu(u)$, 交换度为 $v(u)$, 也就是对每一个界元 u 都给定一对值 $[\mu(u), v(u)] \in [0, 1]$, $\mu(u) + v(u) \leq 1$ 。由此导出界壳的各种量度和计算公式。

μ, v 可以根据专业知识事先给定, 如同模糊集合论中给定隶属函数那样; 也可以运用量测数据来计算。有了 μ, v , 就可以对界壳的总卫护度和总交换度进行对比分析。也可以对不同界壳做定量比较, 进一步可分析界壳功能的时间演化, 并建立数学模型, 对未来制作预报。界元量化为界壳论在多个科学分支, 特别是在社会科学、人文科学中的应用提供了有效的数学工具。

六、界壳论的应用

由于界壳论的研究对象是系统的周界, 而系统是一个普适概念, 系统也必然由它的周界来与其环境相分隔, 因此界壳论的应用自然十分广泛。从物质世界到精神领域, 从自然科学到社会科学, 可以是描述性应用, 也可以是数学性应用。已应用的领域有: 水文水资源、农业生态、交通运输、经济系统、热工工程、网络安全、抽象代数、核物理、矿产和体育等。

1. 市场

当一个公司在某个方面很强大时, 那就会围绕着这个强点形成流程、资源的协同方式, 这种方式很像一种壳, 让壳里面的东西被强化, 搁置壳外面的东西。当胶片相机是柯达、佳能等主要利润来源的时候, 它很难去做数码相机, 因为这是新技术, 要冒风险, 初期利润又低, 正常情况下一般人是不去做的, 这是墨守成规的企业形成的自我约束界壳。所以, 突破市场的往往是小企业, 在原来的战场拼杀不过该领域的领军企业, 就只能先做点另类的东西, 付出辛苦工作, 但只要技术有潜力, 到后来就可能成为时代的主宰。

2. 军事

冷兵器时代, 士兵和将领都穿上盔甲, 以防刀枪

刺入。而在热兵器时代, 则发明了坦克, 既能攻又能防。中国的城墙和西方的城堡都是为防敌人进攻而建的。且有门洞可以出入, 以进行人员和物质的交流。中国的长城则是汉民族为防异族入侵而建的。长城上设有多处关口, 如山海关、居庸关和嘉裕关等, 同样是为交流物资和信息而设。到全球化时代, 则出现了导弹防御系统。针对信息战, 设立防火墙。既要让有用信息进入系统, 又要拦截病毒、木马和黑客等的入侵。总之, 一部军事技术史, 也是一部界壳论原理的应用和成长史。

3. 生物

生物中有各种各样的界壳现象, 从细胞膜到宏观物体, 形成种种界壳套。可以说, 生物是界壳论的活生生的模板。这里仅举“生物入侵”一例来说明。生物入侵是指某种生物从外地自然传入或人为引种后成为野生状态, 并对本地生态系统造成一定危害的现象。

七、界壳论在气象中的应用

气象部门作为一个系统来研究, 显然不同于诸如铁道、水利等部门, 占主导地位的是信息流而不是物流。气象信息的交换都需通过“气象界门”, 否则无法进出气象系统。可以说, 气象部门是一类典型的信息型界壳系统。例如, 不少受灾群众因缺乏快速通信设备而不能及时得到气象预报, 遭到伤害乃至死亡; 又如, 城市热岛效应就是因为向外散热通道太窄, 以致热量堆积在系统(城市)内的结果。在气象中已有的应用领域有: 气象灾害、设施农业气象、统计气象、天气预报和气象服务等。

1. 气候温室效应

大气圈是地球生命的保护层。大气使地球表面温度维持在适合生命发生、发展的范围。自工业革命以来, 向大气排放二氧化碳、甲烷等温室气体, 使大气能透过太阳短波辐射, 而地面长波辐射被增加了的温室气体反射了回来。于是地球热平衡遭到破坏。形象地比喻, 原来的大气是一条薄被子, 现在, 由于温室气体增加, 大气变为一条厚被子, 地表热量散发不到地球以外的空间去。所以气候温室效应是一个典型的界壳论问题。散热通道不畅, 地球必然增温。

2. 大气的螺旋结构

从界壳论来探讨大气中的螺旋状结构(图1)。根据界壳论, 系统边界要有足够的开放度和交换率, 以便让足够的环境能量进入系统, 系统才能生存和发展。也就是试图从系统的能量平衡方程导出大气的螺旋状结构。

通过边界 s 进入系统的能量应满足:

$$-\int_s MV_n ds \geq 0, \quad (5)$$

式中 M 为动能、位能和势能之和再加压力 p , V_n 为法向速度。在临界情况下上式取等号, 对二维流场引入速度势, 在一定假设条件下, 可以导出一个泊松方程, 齐次情况下即讨论拉普拉斯方程的解, 其中它的一个调和函数解即为对数螺线, 即有

$$\chi(r) = -k_1\theta - C_2 \ln r, \quad (6)$$

式中, χ 为速度势, r 和 θ 为距离和夹角, k_1 、 C_2 为常数。



图1 云的螺旋状结构

3. 大气可预报性

大气可预报性是气象学的一个经典问题, 一直在学术上受到重视。若在初始场上有误差, 则对大气运动方程积分经多长时间, 误差倍增或更大, 这一时间长度称之为可预报性。Thompson和Lorenz等研究了大气可预报性, 奠定了动力可预报性的理论基础。至今, 一般认为, 逐日天气预报的可预报时效为2~3周。后来把可预报性扩展到统计可预报性, 乃至统计-动力可预报性。由于对可预报性的定义和研究方法不同, 可预报性研究多种多样, 结论差别也不小。这里, 用界壳论原理来探讨大气可预报性, 显然, 不同于上述传统方法, 可以说是研究大气可预报性的另类途径。

把开放度的概念引伸到时间维度, 定义可预报度

$$\zeta = 1 - \mu,$$

式中,

$$\mu = [(n-1)\beta T + q] / (n\beta T + q), \quad (7)$$

式中, n 表示用初始观测值 x_0 对时段 T 的天气作第 n 步预报, β 为与气象变量有关的系数, 可取 $\beta = |b|$, $\beta = 1/C_v$ 等, b 为变量的一阶自回归系数, C_v 为变量的变

差系数, q 为由观测 x_0 的时刻到预报制作时刻的时段。

称 ζ 为界壳论意义下的大气可预报度。 ζ 为研究信息(如温度、湿度、气压等)经过通道 q 来做 T 时段天气预报所具有的可预报度, 由于 q 越长, 制作预报时利用的观测信息离得越远, 显然其可预报度越小, 故式中采用 $(1-\mu)$ 的形式。取 $\beta=1$, 式(7)变为

$$\zeta = 1 - [(n-1)T + q] / (nT + q), \quad (8)$$

当取 $\beta = |b|$ 时, 若 $\beta=1$, 则 $b=1$, 即自回归系数取1, 即变量下一时刻的预报量等于初始时刻的实测值, 再下一时刻的预报量仍等于初始时刻的实测值, ……如此下去。因此可以称它为“呆子”预报, 即“呆子”预报的可预报度。

取 T 为24h, 若制作24h预报, 则 $n=1$; 做48h预报, 则 $n=2$, 依此类推。计算中取 $q=1, 2, 3, 4$ 。由此用式(8)进行计算。结果表明, 不管预报日数 d 长短, 随 q 增加, 可预报度 ζ 值减小, 这在 $d=1$ 时最明显。同时, 用同一初始观测值做预报, 随着预报步数增加, 可预报度 ζ 值随之减小。

进一步对可预报度数据做黄金分割, 发现天气可预报度中存在黄金分割率。把逐日预报长度分成1~3d, 4~8d和9~20d三段, 最长只能报到21d, 因为这是最后一个分割点, 且预报度已小于0.05。根据现在的天气预报水平, 1~3日为逐日天气预报的可信段, 4~8日为预报可参考段, 9~20日为开发段, 21日为预报时效极限值。显然, 这些结果与传统可预报性的研究所得是相当一致的。

致谢: 本文由全球变化研究国家重大科学研究计划(2012CB955902)和国家自然科学基金(41375079)共同资助。

深入阅读

- 曹鸿兴. 1997. 系统周界的一般理论——界壳论. 北京: 气象出版社.
- 曹鸿兴, 陈国范, 封国林. 2001. 界壳论在气象中的应用. 气象科技, 29(3): 46-50.
- 曹鸿兴, 封国林, 蔡秀华, 等. 2011. 界壳论精要及其应用. 北京: 科学出版社.
- 赵克勤, 曹鸿兴. 2002. 集对分析与界壳论的研究与应用. 北京: 气象出版社.

(作者单位: 曹鸿兴, 中国气象科学研究院、国家气候中心; 封国林, 国家气候中心、扬州大学物理与技术学院)

京津唐夏季高温特征及对城市化的响应探析

■ 黄红丽 刘勇洪 房小怡

城市化不是引起高温的唯一原因，大气环流和全球气候变暖也可能是引起高温的主要原因，深入对比研究大气环流和城市化对高温的影响将是未来研究的重点。

改革开放以来，中国的城市化进程加快，极端高温天气发生越来越频繁，呈现出强度大、频次高、范围广等特点，极端高温事件往往与特重干旱相伴而来，严重威胁人们的生命及能源、水资源和粮食安全等。高温热浪在夏季严重影响人体健康，甚至会造成死亡。高温还使用水量、用电量急剧上升，从而给人们的生活、生产带来很大影响。历史统计资料表明，在美国，高温热浪比飓风、洪水和龙卷风一起造成的死亡总和还要高。在我国，大量学者对城市高温特征及对城市化的影响进行了研究，贺懿华等、王迎春等、连志鸢等分别研究了武汉、北京、石家庄高温气候特征和成因。崔林丽等研究了上海市极端高温变化特征，并分析了城市化对极端高温的影响。毛留喜等研究了川渝高温对生态环境的影响。在京津冀一体化大背景条件下，本文对京津唐城市群进行高温研究，分析了京津唐高温特征，探讨了城市化过程对高温的影响。

数据集所用基础数据来源于国家气象信息中心“地面基础气象资料建设专项的中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集（V3.0）”，该数据集使用RHtest（PMFT/PMT）方法对气温日值序列做均一性检验订正，对检出的不连续点利用台站元数据信息进行逐点查证，同时结合元数据分析和气候资料序列合理性分析对各台站资料序列的均一性状况进行综合判断，经过了严格的质量控制，各站数据完整性和数据质量较好。

我国定义日最高气温（ $T_{\max}$ ）超过 35°C 为高温天气，因此规定凡是测站每天的极端最高气温达到 35°C 及以上就记为一个高温站次，为区分高温天气出现的不同程度，达到 37°C 及以上记为一个强高温站次，达到 40°C 及以上记为一个极端高温站次。本次选取北京、天津、唐山三个城市30个气象站（图1）近50年（1963—2012年）日最高气温，统计京津唐地区6—8月 35°C 、 37°C 和 40°C 及以上各旬以及近50年的高温日数，形成各站高温日数序列，结合地理信息系统数据研究城市群高温的时空概率分布特征。并选定具有代表

性的城市站和郊区站（图1）（分别为北京站与平谷站、天津城市气候监测站与宝坻站、唐山站与滦县站）研究高温对城市化的响应。

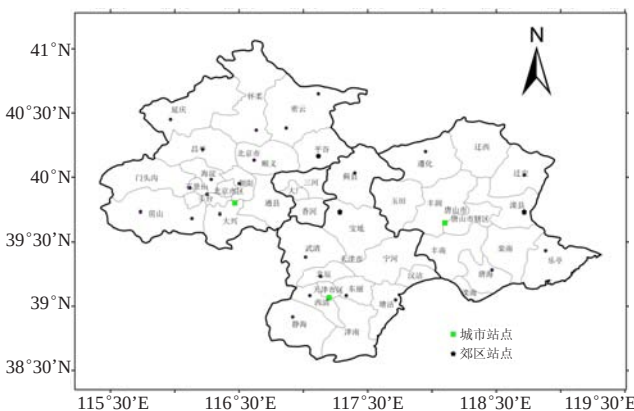


图1 京津唐城市群气象站点分布

一、京津唐高温时空概率分布特征

根据近50年（1963—2012年）30个气象站夏季（6—8月）各旬高温日数统计，结合GIS与地理信息系统数据绘制的 35°C 及以上（图2）、 37°C 及以上，以及6—7月（8月没有出现 40°C 及以上高温，故没有列出） 40°C 及以上（图略）高温概率空间分布图。分析发现，天津静海市是 35°C 及以上高温概率极高值中心，除8月下旬外高温发生的概率都是最大的，此外，北京市区和天津市周围是另外两个高值中心，主要是城市区域发展速度快，植被、绿地、水体等自然下垫面被各种建筑、广场、道路等热容量小的人工构筑物取代，且密集高大的建筑物使城市风速减小，使热量不易散失造成的。6—7月， 35°C 及以上高温呈现中部大于四周、南高北低的态势，北京市区和天津市周围形成高温线，受地形、经济发展以及城市化程度的影响相对较低，北京市呈现往西和往北递减的趋势，天津则呈现往西北、往北递减的趋势。唐山市的高温呈现西高东低，并且唐山西部发生高温的概率要大于唐山市区，可能主要是因为唐山靠海的缘故，具体原因需要进一步分析。

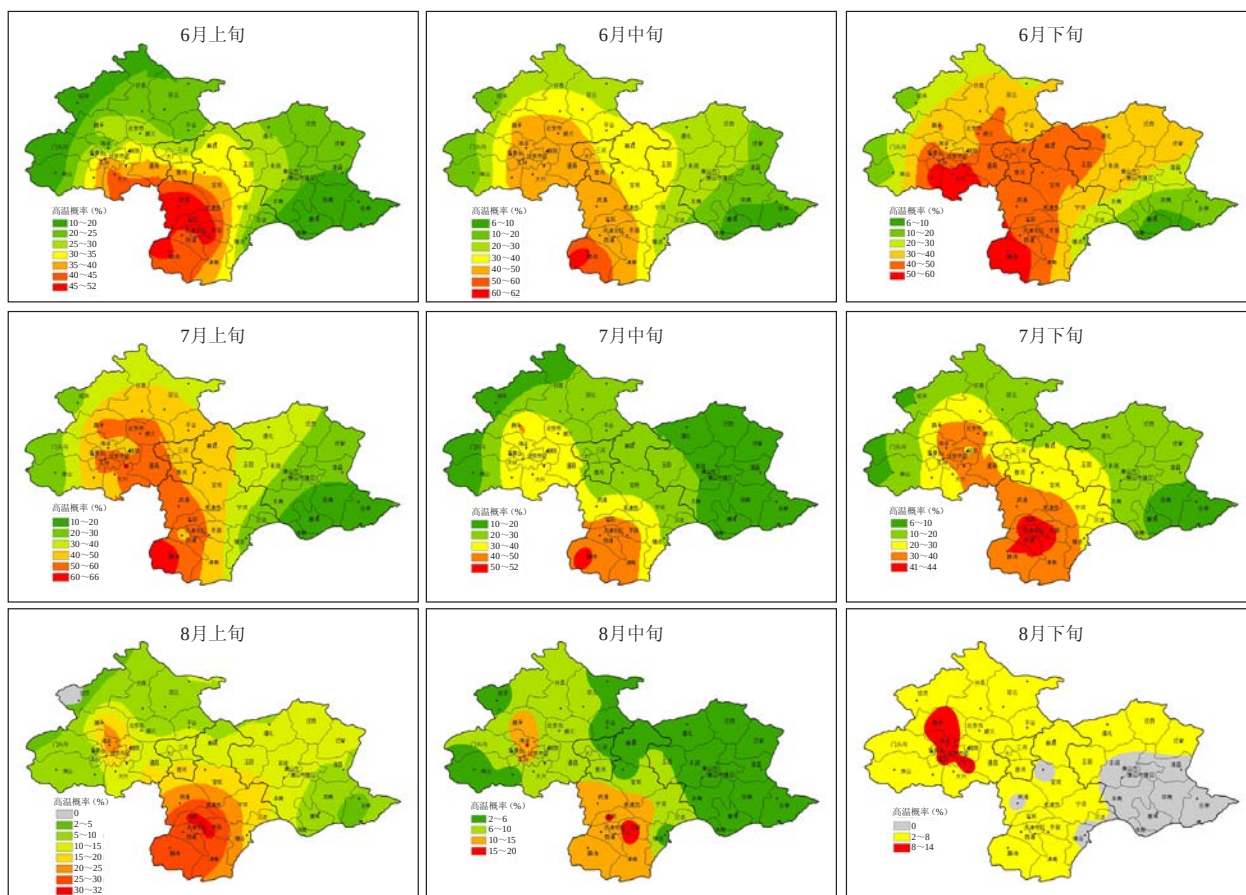


图2 京津唐6—8月各旬35℃以上高温概率分布(%)

近50年来,京津唐35℃及以上高温主要发生在6月中下旬和7月上旬,大兴、静海等地高温概率超过60%,唐山发生高温概率较小,6月下旬和7月上旬唐山市区及西部一带高温发生概率比其他时段偏大。

6—7月,37℃和35℃及以上高温空间分布基本相同,但概率明显减小。6、7月,37℃及以上高温主要发生在北京市中心和天津市中心及周边区域以及唐山市西部地区,在6月下旬和7月上旬有一半以上地区高温概率超过15%。8月,37℃及以上高温概率明显减小,8月中下旬,天津、唐山没有出现高温。

6月上旬发生40℃及以上极端高温范围高于6月中下旬,7月40℃及以上极端高温范围明显大于6月,高温的极大值出现在7月中旬的昌平、海淀地区,高温概率为6%。

二、城市化过程对高温的影响

分析发现,北京站和平谷站出现35℃(图3)和37℃以上高温日数的变化趋势大致相同(图略),20世纪60—70年代初期和90年代中期以后是2个多高温时段,70年代中期—90年代中期则是少高温时段。

40℃以上高温日只在2个多高温时段有出现(表1)。

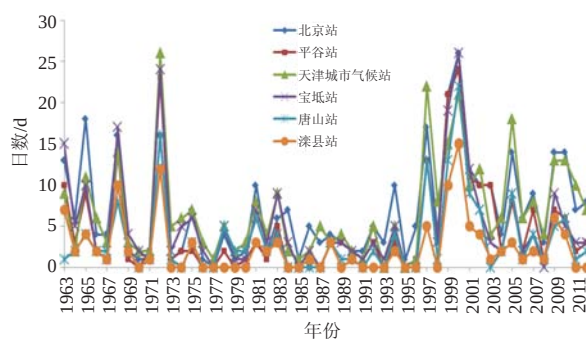


图3 城市站与郊区站35℃及以上高温日数对比

从高温的出现情况看,城市化效应使北京站的高温明显要多于郊区平谷站,北京城市化达到相当高的水平。在1997—2012年,郊区平谷站35℃及以上的高温日数占近50年的54%,37℃及以上的高温达到63%,40℃及以上的高温都是在这段时间发生的,由此看出平谷的城市化发展较快,城市化效应也在逐步显现。

天津市城市气候站和郊区站宝坻站出现35℃(图3)和37℃及以上高温日数的变化趋势大致相同(图略),与北京高温变化趋势相似。20世纪60—70年代初期和

表1 城市站和郊区站高温日数(d)统计

温度	北京站	平谷站	天津城市气候站	宝坻	唐山	滦县
≥35℃	347	228	339	265	170	120
≥37℃	88 (1997—2012年为50d)	59 (1997—2012年为37d)	85 (1997—2012年为46d)	83 (1997—2012年为41d)	39 (1997—2012年为30d)	23 (1997—2012年为14d)

90年代后期以后是2个多高温时段,70年代中期—90年代中期则是少高温时段。40℃及以上高温日只在2个多高温时段有出现(表1)。

唐山站和滦县站出现35℃(图3)和37℃及以上高温日数的变化趋势大致相同(图略),20世纪60—70年代初期和90年代后期以后是2个多高温时段,70年代中期—90年代中期则是少高温时段,由于唐山城市发展水平偏低,纬度稍高,离海岸线近,总的高温日数比北京和天津要低。40℃及以上高温日只在2002年的城市站唐山站出现过。

总体上看,城市站高温日数明显多于郊区站,主要可能是因为受城市化建设影响,城市工业、交通、生活放出大量热量和污染物,而污染物又会吸收热量产生温室效应,使大气升温。在35℃及以上高温中,北京站比平谷站高34%,天津城市气候站比宝坻站高大约30%,唐山站比滦县站多42%,天津城郊差别较小可能是因为两站相距较近,城市气候站距离海岸线较近的缘故。城市化效应对高温的影响逐渐显现,1997—2012年表现得尤为明显,随着城市化的发展和城镇人口的增多,城市高温可能会越来越明显。

三、讨论

以上分析可看出,天津市静海区和唐山西部地区发生高温的概率明显高于市区,与城市化关系较小。城市化不是引起高温的唯一原因,大气环流和全球气候变暖也可能是引起高温的主要原因,因此,深入对比研究大气环流和城市化对高温的影响将是未来研究的重点。此外,城市化使下垫面发生改变,定量研究城市化对高温的影响也将是未来研究的重点,利用卫星遥感等手段将可以更精确地研究城市下垫面改变对高温的影响。

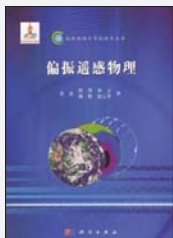
深入阅读

- 崔林丽,史军,周伟东.2009.上海极端气温变化特征及其对城市化的响应.地理科学,29(1):93-97.
- 贺懿华,谌伟,李才媛,等.2007.武汉市盛夏高温气候特征和成因及预报.气象科技,35(6):809-813.
- 连志鸾,尤凤春.2005.石家庄高温闷热天气气候特征与预报方法.气象,31(6):17-21.
- 毛留喜,钱拴,侯英雨,等.2007.2006年夏季川渝高温干旱的生态气象监测与评估.气象,2007,33(3):83-88.
- 王迎春,葛国庆,陶祖钰.2003.北京夏季高温闷热天气的气候特征和2008夏季奥运会.气象,29(9):23-27.

(作者单位:黄红丽,气象出版社;刘勇洪、房小怡,北京市气候中心)

新书架 NEW BOOK

感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



《地球观测与导航技术丛书:
偏振遥感物理》

编著者:晏磊等
出版者:科学出版社
出版年:2014



《台站地面综合观测业务软件
(ISOS) 用户操作手册》

编著者:中国气象局气象
探测中心
出版者:气象出版社
出版年:2014



《风暴潮对我国沿海影响
评价》

编著者:于福江等
出版者:海洋出版社
出版年:2015



《低轨卫星精密定轨理论与
方法》

编著者:郭金运等
出版者:测绘出版社
出版年:2014

高被引论文选编

“风云系列气象卫星”主题

来源数据库：SCI-E和CAJD，检索时段：2014—2015年

FY-3 VIRR热红外通道在轨辐射定标的评估和校正——Assessment and correction of on-orbit radiometric calibration for FY-3 VIRR thermal infrared channels. *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6, No. 4.

风云-3 (FY-3) 可见光红外扫描辐射计 (VIRR)，以及它的前身——FY-1C&D卫星搭载的多光谱可见光红外扫描辐射计 (MVISR)，已经积累了超过14年的全球连续观测。此数据资料对于天气预报、气候监测和环境研究等具有重要意义。数据质量是数值天气预报 (NWP)、卫星数据同化和定量遥感应用的关键。国家卫星气象中心的徐娜等使用低地球轨道 (LEO) 星下点同步观测 (SNO) 交叉定标方法，评价了FY-3A和FY-3B搭载的VIRR在热红外 (TIR) 通道的辐射定标精度。参考基准使用了METOP-A搭载的IASI的高光谱探测资料。结果表明，FY-3B/VIRR TIR 定标精度优于FY-3A/VIRR。FY-3A/VIRR测定的亮温比IASI偏低，月平均偏差在通道4为 $-2 \sim -1\text{K}$ ，通道5为 $-1 \sim -0.2\text{K}$ ，两通道间存在约 1K 的系统性偏差。FY-3B/VIRR的亮温与IASI更加一致，年平均偏差在通道4为 $0.84 \pm 0.16\text{K}$ ，通道5为 $-0.66 \pm 0.18\text{K}$ 。FY-3A/VIRR的亮温偏差显示出对目标温度的依赖性和季节变化特征，而FY-3B/VIRR的亮温没有发现这些问题。目标温度依赖性偏差归因于探测器的非线性特征。使用大量交叉匹配样本，重新评估了FY-3A/VIRR TIR通道的非线性校正系数。结果表明，使用新的非线性校正系数可以大大纠正目标温度依赖性和系统偏差。

使用中国气象卫星数据检测中国积雪——Monitoring snow cover using Chinese meteorological satellite data over China. *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 143.

积雪在水文过程和全球气候变化研究中扮演了重要角色。地球静止卫星的高时间分辨率可以提供丰富的实时积雪信息。北京师范大学的杨俊涛等使用FY-2D、FY-2E和FY-3B数据分析了中国的积雪状况。研究首先结合FY-2D、FY-2E搭载的可见光和红外自旋扫描辐射计 (VISSR)，以及FY-3B搭载的微波成像仪 (MWRI) 数据，改进并使用阈值方法提取了中国的积雪信息，并将FY卫星反演的积雪信息与MODIS积雪产品 (MOD10A1和MYD10A1) 和交互式多传感器冰雪制图系统 (IMS) 积雪产品进行了对比。然后，使用2010—2011年和2011—2012年气象站的冬季积雪观测数据，对FY卫星积雪信息和IMS积雪产品进行了验证，同时也分析了高程和土地覆盖类型对雪反演精度的影响。结果表明，相比于MODIS产品，FY-2D和FY-2E VISSR数据的结合使用减少了30.47%的云遮蔽。验证显示，FY积雪产品的准确度为91.28%，类似于IMS积雪产品。研究表明，地球静止卫星和被动微波遥感的综合监测能使中国的积雪监测到达一个高准确度水平。

使用MODIS数据和“三角法”估算华北平原区域尺度的蒸散——Regional-scale estimation of evapotranspiration for the North China Plain using MODIS data and the triangle-approach. *International*

Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, Vol. 31.

丹麦DHI GRAS公司的Rasmussen等使用改进的“三角法” (triangle-approach)，估算了中国华北平原的日尺度蒸散。该方法实现简单，并且对地面观测数据的要求有限 (只需要空气温度和湿度)，本方法的关键在于计算蒸散比 (evaporative fraction, EF)。本研究使用MODIS NDVI和地表温度 (LST) 数据计算出了EF，并结合MODIS卫星数据和FY-2地面入射太阳辐射 (Surface Solar Irradiance, SSI) 产品以及台站气温数据，估计了用于蒸腾的能量。研究结果表明，本研究估算的日尺度ET在方法上具有可行性，其季节蒸散格局与其他方法估算的ET较为一致。不过，有迹象表明，本方法估算的ET比其他基于遥感的方法和模型模拟的方法有些高估。无论如何，本研究提出的方法在估算日尺度ET的空间分布时相对简单易行，适用于那些地面数据相对有限的区域。

中国河口和海岸悬浮颗粒物的多传感器制图——Satellite multi-sensor mapping of suspended particulate matter in turbid estuarine and coastal ocean, China. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, Vol. 35, No. 11-12.

华东师范大学的沈芳等选取五种传感器 (Terra MODIS、Aqua MODIS、Envisat MERIS、FY-3 MERSI、GOCI) 的L1级数据，提出了一种悬浮颗粒物 (SPM) 浓度的反演算法，并针对这些传感器分析了该算法的兼容性及其产品的一致性。使用多种传感器的优势在于，能够提高访问频次，弥补不同传感器过境的时间缝隙。SPM算法包括两步：1) 从大气层顶 (TOA) 表观反射率中提取出经过大气校正的离水辐射率 (water-leaving reflectance)；2) 利用公式将离水反射率转换成SPM浓度。

同时,结合2004—2012年间的17次现场测量数据,对SPM反演算法进行了再校正,以适合于多传感器反演。结果显示,GOCI反演的SPM和Envisat MERIS反演的SPM在1:1散点图上的拟合效果最好。在过境时间上几乎同步的三个传感器(Envisat MERIS、Terra MODIS和FY-3 MERSI)反演的SPM在3个固定观测站也具有较好的一致性,而且与实测数据的相关性较好。

FY3A/MERSI地表温度反演——《遥感技术与应用》2014年第29卷第4期

MERSI是我国第二代极轨气象卫星上的重要传感器,可获取高空间分辨率和高时间分辨率的对地观测影像。为使Jiménez-Munoz&Sobrino算法更适用于FY3A/MERSI传感器通道特性,胡菊旸等更新了大气函数的估算系数,并引入观测角度因子,以获取更为精确像元间更为平滑的地表温度。用MODTRAN 4模拟验证该算法精度,得引入角度因子后反演精度显著提升,所有角度下平均误差为 $-0.6 \pm 2.2\text{K}$ 。用实测的敦煌戈壁地表温度和MODIS地表温度产品评价MERSI反演结果,显示MERSI地表温度的空间分布准确,结果精度也较高。与实测温度对比,平均误差为 1.74K ,均方根误差小于 1.9K 。研究区域与MODIS地表温度间差异平均为 2.6307K 。虽然会受云检测精度和观测亮温偏高的影响,由MERSI反演的高精度地表温度在相关科研和业务方面仍然具有极好的应用前景。

贵州初夏两次暖区暴雨的对比分析——《气象》2014年第40卷第2期

周明飞等利用常规气象观测资料、NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 格点再分析资料和FY-2D卫星红外云图云顶亮温TBB资料,对贵州2008年5月25—26日(简称08.05)和2010年6月28—29日(简称10.06)初夏两次暖区暴雨天

气过程进行对比分析,探讨两次暴雨发生发展的天气学条件差异。结果表明:暖区暴雨形成时,地面均为热低压控制,地面辐合线加强触发暖区暴雨发生;850hPa低空急流明显加强,暴雨区位于低空急流左前侧。所不同的是:两次暴雨过程中高层影响天气系统不同,08.05暴雨中层影响系统为高原槽,10.06暴雨中层影响系统为两高切变低涡,高层为南亚高压脊。08.05暴雨过程中,多个 β 中尺度对流单体独立发展逐渐合并为一个 α 中尺度对流系统,对流云发展旺盛、伸展高度较高、具有混合相层和暖云层剖面结构,属于积状云为主的混合降水。10.06暴雨,经历了两次 β 中尺度对流系统的发展和减弱,对流云团呈东北—西南向的带状和椭圆状,对流发展高度较低,具有深厚的暖云层,回波在暴雨区持续时间较长,属于层状云和积状云混合降水。通过对两次暴雨触发机制讨论得出,贵州暖区暴雨预报应着眼于影响贵州的低空急流的建立和加强以及地面低压中辐合线的加强锋生。

梅雨锋短时大暴雨的多尺度环境场分析——《气象》2014年第40卷第5期

郑婧等利用常规观测资料、FY-2E卫星TBB资料以及NCEP FNL再分析资料对2011年6月14日江西北部梅雨锋大暴雨的环境场进行分析。结果表明:1)在极为有利的天气形势下,江南北部锋生以及低空急流对地形的强迫作用导致 β 中尺度系统强烈发展,是短时暴雨的触发机制。2)稳定的环流背景下,500hPa东亚大槽槽后冷平流与南方暖湿气流持续在江南北部对峙,是暴雨带稳定于赣北的原因。强的热力不稳定、较强的垂直风切变、低层充沛的水汽供应以及强烈的辐合抬升是短时暴雨产生的有利环境场。3)多尺度系统的协同作用和稳定维持,使西南急流异常强盛。暴雨区上空强垂直上升运动、高空强

辐散、低空强辐合与中尺度系统的发展互相耦合,导致梅雨锋上出现大暴雨。干冷空气与暖湿气流在地面至对流层中低层汇合,激发正涡度柱沿假相当位温锋区倾斜向上发展;强烈上升气流穿越锋区加大了层结的不稳定,激发大量不稳定能量释放,使暴雨具有强对流性。4)不同性质气流在赣东北的交锋、边界层强辐合与喇叭口地形的相互作用是赣东北成为暴雨中心的原因。

一次强飑线及飑前中小尺度系统特征分析——《气象》2014年第40卷第8期

马中元等使用常规天气、灾情、自动站、卫星云图、雷达回波和风廓线雷达等资料,采用统计对比分析和特征提取等方法,对2012年4月10日强飑线天气系统进行分析,结果表明:1)此次强飑线是由若干个倾斜深厚对流单体所组成,具有紧密排列的回波带结构。2)云图上表现为中尺度对流系统(MCS)结构特征,随着MCS东移降水冷却、西南气流输送暖湿空气和午后地面温度不断升高,地面开始形成温度梯度较大的温度锋区。3)飑线形成前期,MCS南侧出现多条平行短带“梳状”回波特征,并在其南端不断产生对流单体回波,最后发展成飑线回波带。4)飑线移动前方不断产生具有“前伸”、TBSS和假象回波结构的局地雹云超级单体回波群,这些飑前中小尺度系统是产生此次冰雹灾害的主要回波系统。5)5min风廓线雷达资料在前期阶段,能够观测到西南急流的演变情况,包括急流中的大风区。6)当飑线系统临近时,受飑线中尺度环流的影响,飑线移动前方具有较强的上升运动,且伸展高度可以达到6000m,但垂直速度、Cn2和SNR都较小;当飑线系统过境时,具有很强的水平风切变,受到强降水的下曳作用,垂直速度、Cn2和SNR都明显加大;飑线系统过境后,恢复到前期阶段。

编辑选编

SMOS土壤湿度和亮温产品在陆面模式中的同化——Assimilation of SMOS soil moisture and brightness temperature products into a land surface model. *Remote Sensing of Environments*, 2016, in press.

欧空局土壤湿度和海洋盐度 (SMOS) 卫星的重要目的之一就是提供具有足够精度和时空覆盖的全球表层土壤水分 (SM) 估计。通过耦合SMOS卫星的观测数据, 陆面模式 (LSM) 的预测技巧有望得到改善。然而, SMOS数据的同化充满挑战。确切地说, SMOS观测数据的空间分辨率比模式更粗。这样, 同化算法不得不考虑尺度的不匹配问题, 或者需对卫星产品进行降尺度。而且, SMOS提供的SM是由亮温数据 (TB) 通过辐射传输模型 (RTM) 转换得到。直接同化TB进入LSM可能更佳。SMOS TB产品包括不同的入射角和不同极化方式, 这也使得同化数据充满了更多选择。为此, 比利时根特大学的Lievens等以澳大利亚东部Murray Darling流域为研究区域, 评估了同化不同的SMOS产品对土壤水分和径流预测技巧的改善能力。SMOS观测数据被同化进入VIC (Variable Infiltration Capacity) 模式, 并使用集合卡尔曼滤波方法耦合到通用微波陆表发射率模型 (CMEM) 平台。在相似的没有进行优化的同化设置下, 对这些不同观测产品的同化进行了评估, 并通过模拟的土壤湿度和径流与实测之间的比较进行了验证。结果显示, 同化粗尺度SM数据最能改善预测技巧。同化降尺度SM对预测的改善要弱一些, 可能是由于云覆盖影响降尺度方法、导致使用的观测数据量下降造成的。而同化TB数据的效果受到TB数据的不同极化方式和不同角度的显著影响, 效果最好时 (水平极化, 入射

角 42.5°) 已接近同化粗尺度SM对土壤湿度预测的改善。

日本新一代地球静止气象卫星 Himawari-8 (葵花-8) 海温产品——Sea surface temperature from the new Japanese geostationary meteorological Himawari-8 satellite. *Geophysical Research Letters*, 2016, in press.

Himawari-8 (葵花-8) 是日本气象厅 (JMA) 的新一代静止气象卫星。日本宇宙航空研究开发机构 (JAXA) 与JMA合作生产了Himawari-8海温 (SSTs) 产品。辐射传输物理过程的非线性会引起卫星SSTs的系统误差, 本研究发展了一套新的可以减少系统误差的准物理算法用于计算SST; 并使用基于贝叶斯推理的方法检测了云像元。然后, 将2015年7—8月的浮标数据与Himawari-8 SSTs进行了对比。结果显示, 与浮标数据相比, Himawari-8 SSTs的均方根差 (RMSD) 约为0.59 K, 偏差约为-0.16K。其中, 视场边缘的SSTs多为正偏差。

一种稳定的雪—气耦合模式——A stable snow-atmosphere coupled mode. *Climate Dynamics*, 2016, in press.

ENSO是众所周知的热带地区存在的一种水 (海) —气耦合模式, 那么, 在中高纬地区, 是否也存在一种水 (雪) —气耦合模式? 针对这一问题, 中国人民解放军61741部队的赵亮等利用近130年的全球陆地积雪资料, 采用自主研发的全窗口滑动相关方法, 发现在北半球中高纬地区, 存在一种较为稳定的雪—气耦合模式, 本研究称为SNAO模式。这一模式是北半球冬季陆地积雪的第一主模态与北极涛动 (AO) 之间耦合作用的结果。并且, 这种SNAO模式在近几十年变得越来越强; 类似与ENSO模式中的关键因子——热带太平洋和印度洋海温和气压异常, SNAO模式也有两个关键因子: 欧洲积雪异常和极涡

异常, 这两个地区的积雪和大气异常往往会激发冬季北半球中高纬地区积雪和大气产生SNAO模式。研究进一步发现, 北半球冬季积雪的第二模态与南极涛动 (AAO) 有关, 其相关的稳定性不如SNAO模式, 但是北半球积雪中的AAO信号有较强的季节连续性。通过这些雪—气耦合模式, 秋季积雪能够影响冬季大气; 冬季大气能够影响春季积雪。

测量城市植被的空间分布格局及其对季节地表温度的影响——Measuring the spatial arrangement of urban vegetation and its impacts on seasonal surface temperatures. *Progress in Physical Geography*, 2015, Vol. 39, No. 2.

城市绿地是城市生态系统的重要组成部分, 其通过提供树荫和蒸散发作用, 可以有效调节城市气温。众所周知, 植被覆盖度与地表温度成负相关, 然而城市环境下植被的空间分布 (聚集或分散) 对气温的影响却鲜为人知。为此, 美国亚利桑那州立大学的Fan等将遥感技术和空间统计相结合, 量化了植被的空间配置对Phoenix城市中心的季节地表温度的影响。研究的目标在于: 1) 采用连续空间自相关指标结合高分辨率遥感数据, 确定绿色植被覆盖的空间分布; 2) 通过控制植被覆盖度的影响, 检测草和树木 (特别是它们的空间格局) 影响季节和昼夜地表温度时的不同角色; 3) 调查不同地理尺度下的植被—温度关系的敏感性。研究使用了一种局部空间自相关指数——局部Moran's I, 计算了城市植被的空间格局。结果显示, 绿色植被的聚集或少破碎化分布格局比离散型格局更能有效降低地表温度。局部Moran's I指数和地表温度的关系在夏季的白天最为强烈, 在冬季的夜晚最弱。多元回归分析也证实植被的空间格局对季节地表温度具有显著影响。对不同地理尺度的植被空间格局分析表明, $200\text{m} \times 200\text{m}$ 的范围是检测植

被——温度关系的最佳尺度。本研究提供了一种量化城市组分空间格局和检测其影响城市环境的生物物理特性的方法框架，可能有助于城市可持续发展和管理。

晨昏轨道微波温度计资料同化对降水定量预报的影响及其对三轨卫星系统的意义——《大气科学》2016年第40卷第1期

极轨卫星的高级微波温度计（Advanced Microwave Sounding Unit-A，简称AMSU-A）辐射资料对提高降水定量预报的水平有重要作用。但是极轨卫星的轨道特征导致承载其上的微波温度计资料在区域同化系统中存在严重缺测。邹晓蕾等重点分析了晨昏轨道卫星上微波温度计资料同化对墨西哥湾沿岸定量降水预报的重要影响。研究选取了早晨星NOAA-15、上午星MetOp-A和下午星NOAA-18，利用美国NCEP（National Centers for Environmental Prediction）的业务同化系GSI（Gridpoint Statistical Interpolation）资料同化系统，进行了加和不加NOAA-15 AMSU-A资料的两组资料同化和预报试验，来阐明晨昏轨道卫星上微波温度计资料同化对墨西哥湾沿岸降水预报的重要影响。试验结果分析表明如果仅同化NOAA-18和MetOp-A资料，在协调世界时00:00和12:00的同化时间，在墨西哥湾和美国西部大陆就是卫星观测资料缺测区，而早晨星NOAA-15资料正好可以填补这个资料空缺。模式预报也表明，同化NOAA-15的AMSU-A资料可以对墨西哥湾降水有持续的正影响。这一研究证明了保持有搭载着AMSU-A或者相似仪器的早晨星，对区域降水预报的重要性。由于目前NOAA-15是唯一的一颗正在运行的、已远超过其正常运行期的早晨星，通过技术手段维持NOAA-15的AMSU-A仪器更超长期运行也就特别重要。

中国风云卫星与海洋卫星近海SST资料融合技术及应用研究——《地球科学进展》2015年第30卷第10期

苗春生等选用美国LAPS（Local Analysis and Prediction System）数据融合系统对中国风云（FY）和海洋（HY）卫星在我国东部海域SST反演数据进行融合处理。该融合系统能够协调区域大气和下垫面海洋要素的时空特征，协调不同要素间的特征状态及匹配规律，生成适合多要素诊断计算的区域规范化数据。针对该系统没有现成的卫星SST反演数据输入接口，对船舶站SST反演数据接口进行了数值调整；依据FY卫星及HY卫星SST数据的不同特点，尤其是随卫星轨道发生的不同时空变化，在输入卫星反演数据至LAPS系统之前，进行了多项预处理，包括对卫星反演数据异常值的判别与剔除、海陆边界要素异常梯度的鉴别与去除、不同卫星轨道坐标系网格要素的规范化处理、平滑去噪音等。经多项验证，预处理后的FY和HY卫星监测反演数据更有利于LAPS系统资料融合效果的正确性与合理性。再经LAPS系统的数据融合处理和各项验证，融合场既能保持卫星SST精细化的时空特征描述，也弥补了卫星资料非区域全覆盖的局限。将SST融合场对寒潮与冷空气过程中的东部海域海气影响进行热动力物理量时空变化诊断应用，对海面SST和感热通量的中尺度强度演变、南北空间变化差异均给出了量化描述。

单颗粒气溶胶质谱测定颗粒的有效密度——《中国科学：地球科学》2015年第45卷第12期

单颗粒质谱技术已被广泛应用于气溶胶粒径和质谱特征的测量，而对其他微物理性质的应用研究仍十分欠缺。张国华等基于单颗粒气溶胶质谱仪（SPAMS），建立了两种测量气溶胶颗粒有效密度的方法：一是利用SPAMS测径系统记录

的颗粒散射光信号与Mie理论模型计算得到的光散射截面呈正相关关系，通过最小二乘法拟合得到气溶胶颗粒的有效密度；二是通过差分电迁移粒径分析仪（DMA）-SPAMS仪器联用，同时测量气溶胶颗粒的电迁移和真空空气动力学粒径，从而计算不同粒径气溶胶颗粒的有效密度。通过标准小球，硫酸铵和硝酸钠的测试，证明本研究建立的两种方法均可应用于气溶胶有效密度的测量。该方法有效地拓展了SPAMS的分析功能，使之成为能够同时对颗粒物的粒径、化学成分、光散射和密度的综合测量技术，为深入认识气溶胶的环境和气候效应提供了强有力的分析手段。

大气能量传播及不同纬度间大气相互作用的研究进展——《气象学报》2015年第73卷第6期

早期的理论分析认为大气中临界纬度的存在使得热带-热带外的大气活动互不影响。然而，大量的观测事实表明中低纬度大气运动存在着明显的动力联系。为了帮助人们更好地理解大气中的遥相关现象，在大量文献的基础上，杨崧等综述了几种波能量传播理论：1）大圆理论指出了罗斯贝波在球形大气中的传播特征；2）西风通道理论发现了中纬度瞬变扰动越赤道传播的“走廊”；3）能量堆积-波列发射理论揭示了热带扰动影响到更高纬度大气活动的可能过程；4）赤道波侧向膨胀理论则利用转折纬度的概念更进一步解释了这种中低纬度大气相互作用的物理机制；5）经向基本流理论则认为在一定的条件下定常波可以穿过热带东风带传播到另一半球。此外，文中还回顾了波-流相互作用诊断方面的研究进展，尤其是关于罗斯贝波、惯性重力波和赤道开尔文波。大气能量的经向传播具有显著的年变化和年际变化，这与ENSO、西风急流、大洋中部槽等的变化密切相关。

《《 涓流细雨 》》

“Many disasters would not happen and many lives and livelihoods would be saved if there was greater public awareness of the threats posed by natural hazards such as tsunamis. Declaring November 5, World Tsunami Awareness Day is a welcome step. It will help to focus attention on measures which can be taken to reduce risks from both man-made and natural hazards and to ensure that more people live and work in places which are free from the threat not just of tsunamis but other sudden onset hazards such as earthquakes, floods and storms. It should be remembered that the 2004 Indian Ocean tsunami which claimed some 230,000 lives from countries across the world galvanised political commitment to reducing disaster risk and disaster losses. The memory of that event helped to ensure the adoption of the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction this year which sets targets for the first time on reducing mortality, the numbers of people affected, economic losses and damage to critical infrastructure from disasters.”

“如果公众意识能对海啸这样的自然灾害所带来的威胁有更充分的认识，很多灾难就不会发生，很多生命和生计就能得到保护。2015年11月5日，世界海啸警示日的建立是一个很好的步骤。警示日的设立能帮助人们专注于可以减少人为和自然灾害带来风险的措施，确保更多的人生活和工作在远离海啸以及地震、洪水和风暴等突发灾害的地方。应该记住2004年印度洋海啸让多个国家的约23万人罹难，从而启动了减少灾害风险和损失的政治承诺进程。对那次事件的记忆帮助确保了今年降低灾害风险仙台框架获得通过，第一次设立了减少死亡率、受影响人数、灾害给关键基础设施带来的经济损失和损坏的目标。”

——联合国大会根据日本和智利牵头提出的议案，确认11月5日为世界海啸警示日。对此决议，联合国减灾办公室的Margareta Wahlström发表了上述看法。

“Weather, climate, water and related environmental conditions have a major impact on our global society and economy, WMO Members have to be better prepared for extreme weather events and to adapt to the changing climate, and National Meteorological and Hydrological Services will be pivotal to these efforts. I look forward to leading WMO in an era when attention is focussed on how to implement the ambitious Paris Agreement on climate change and cut emissions of greenhouse gases. The scientific and meteorological community will continue to work to strengthen the knowledge and services that will underpin climate-smart decision-making and effective and practical action. My objective as Secretary-General will be to develop WMO activities so that they give even greater support to National Meteorological and Hydrological Services, which are now working in an increasingly challenging operating environment”

“天气、气候、水和相关环境条件对全球社会和经济具有重要影响，WMO成员需更好应对极端天气事件和适应变化的气候，国家气象和水文局在其中将起关键作用。我期待在关注于如何落实信心满满的巴黎气候变化协议和减少温室气体排放的时代引领WMO。科学界和气象界将继续努力强化知识和服务，以支持智能气候决

策和有效且实际的行动。我作为秘书长的目标将是促进WMO活动开展，从而给予当前面对挑战性不断增加的业务环境的国家气象水文局以更大的支持。”

——新任WMO秘书长佩蒂瑞·塔拉斯（Petteri Taalas）就其新任命在WMO官方网站发表上述表态。在2015年6月召开的世界气象大会上，塔拉斯被任命为世界气象组织下一任秘书长，他接替已有3个任期的米歇尔·雅罗（法国），从2016年1月1日起担任WMO秘书长，任期4年。David Grimes（加拿大）当选WMO主席。Antonio Divino Moura（巴西）、Mieczyslaw S. Ostojski（波兰）和Abdalah Mokssit（摩洛哥）分别当选第一、第二和第三副主席。塔拉斯自2002年起担任芬兰气象局局长，在2005—2007年还曾担任WMO发展和区域行动司司长。他在管理国家和国际专家组织方面经验丰富，在提高效率、创新、提升客户及职员满意度方面都表现出较强的能力。他具有较强的科学背景，特别是在大气科学研究方面。他在全球气候变化、卫星方法学和大气化学方面已发表了约50个出版物。塔拉斯曾在数个国家和国际组织任职，并担任管理层职务（例如WMO执行理事会和欧洲中期天气预报中心理事会成员），他还曾担任EUMETSAT理事会和EUMETNET理事会的主席。

“It’s certainly true that we are recognized as the world leader in global numerical weather prediction out to a couple weeks ahead. But one can oversimplify this, because that statement about who has the best predictions is the average over many forecasts. The ECMWF is recognized as being at the forefront of how to do that data assimilation to get the most from the observations. We take our observations not at just a single time but over a window of several hours. Information from prior short-range forecasts is merged with the observations.”

“在提前数周的全球数值天气预报方面，我们当然被认为是世界领先者。但是，人们会过分简化这个说法，因为那只是意味着很多预报平均来看谁做得最好。ECMWF意识到，作为数据同化的领先者，怎样才能从观测中获得最多信息。我们不仅仅在一个时间点上利用观测，而是在几个小时的时间窗口里这样做。前期短期预报信息与观测要相互融合。”

——2015年底卸任ECMWF主任的Alan Thorpe先生，在接受《今日物理》杂志采访时，针对在数值天气预报领域，ECMWF世界第一、英国气象局和美国气象局排在二、三位的观点时，做了如上回答。其中不乏作为领导人的自豪和审慎，也道出了数据同化在数值预报中的关键作用。

“Jason-3 will continue the legacy of the Topex/Poseidon and earlier Jason satellites by gathering environmental intelligence from the world’s oceans, Jason-3 will tell us about the heat of the ocean, vital data if a tropical storm or hurricane is tracking into that location. Having up-to-date sea surface temperatures will help NOAA forecasters better determine if a storm may intensify.”

“Jason-3将解析世界海洋的环境，让Topex/Poseidon和早期Jason卫星的使命继往开来，Jason-3将会告诉我们海洋的热量，以及一旦热带风暴或飓风进入视野的关键数据。掌握最新海表面温度将帮助NOAA的预报员更好地确定风暴是否会加强。”

——2016年1月17日，美国和欧洲（参加机构有NOAA、

NASA、CNES和EUMETSAT)联合研制的监测海洋高度系列卫星的最后一颗——Jason-3升空并进入预定的距离地球830英里的地球低轨道。该卫星将进行6个月的卫星负载仪器的在轨测试,之后将业务化,并且和2008年升空的Jason-2卫星共同开展探测。Jason-3上搭载的雷达高度计,每10天能够对地球上95%的无冰海洋进行探测。该系列卫星最早可以追溯到1992年发射的Topex/Poseidon卫星,从那时起的23年来,全球海平面升高了70mm,平均每年3mm。谈到新的卫星发射成功,NOAA卫星和信息局局长Stephen Volz博士做出如上阐述。

“History is written by those who commit, not those who calculate. Today you have committed.”

“历史是由承诺者而非计算的人写就,今天你们做出了承诺。”

——2015年12月在法国巴黎召开的气候大会达成减排协议后,法国总统奥朗德向各国谈判代表说道。

“Congress should pass the Wildfire Disaster Funding Act. Pending in the House and the Senate, the bill would change how the federal government budgets for the suppression of wildfire disasters, making it similar to the way other responses to natural disasters are funded.”

“国会应该通过林火灾害基金法,众参两院还在审理,这样的法案将改变联邦政府预算如何抑制林火灾害,使得类似应对其他自然灾害资助渠道建立起来。”

——2015年美国林火可能会达到一个破纪录的水平,前9个月大约4.5万次火灾的过火面积就达到了350万 hm^2 ,而10月才经常是美国林火最多的月份。今年美国林业局也首次将超过其预算一半的经费投入到火灾管理。大自然保护协会(The Nature Conservancy)北美区域协会所属的恢复美国森林组织主席Christopher Topik在Science杂志上撰文,呼吁建立美国林火灾害基金法。

“We’re excited to bring more supercomputing power to the scientific community. Whether it’s the threat of solar storms or a heightened risk in certain severe weather events, this new system will help lead to improved predictions and strengthen society’s resilience to potential disasters.”

“向科学界提供更强大的计算能力很令我们兴奋。无论是太阳风暴的威胁还是某些激烈天气事件升级的风险,这一新系统有助于改进预报和强化社会对潜在灾害的弹性。”

——NCAR在2016年初宣布,引进以怀俄明州首府“夏延”(Cheyenne)命名的新超级计算机系统。在解释该系统的意义时,NCAR业务和服务主任Anke Kamrath做出以上表述。据悉,将在2017年交付的由SGI公司制造的“夏延”计算机系统,其运算速度将达到每秒5340亿万次,是目前在NCAR运行的IBM“黄石”计算机系统的2倍多。此外,新系统的内存高达313TB,计算节点超过4000个。按照今天的标准,“夏延”的计算能力在全球勉强可以排进前10名。

“In the past decade, ECMWF has improved substantially the model components and the algorithms used to estimate the initial and forecast states, expressed in terms of a probability distribution function (PDF) of earth-system states. Atmospheric processes

have been made more realistic, and ocean processes, aerosols and chemical species have been included in the forecast model. These advances have led to the extension of ensemble-based, probabilistic predictions out to sub-seasonal and seasonal time ranges. How far ahead can we provide skilful forecasts? More precisely, if we consider phenomena with increasingly coarse scales (both spatially and temporally), how far ahead can we predict them? In this talk, these questions are addressed applying the forecast skill horizon framework to ECMWF ensemble forecasts. Results based on 1 year of forecasts indicate that the forecast skill horizon for instantaneous, grid-point fields is between 16–23 days, while it is considerably longer for time- and spatial-average fields. Forecast skill horizons longer than the 2 weeks, thought to be the limit up to twenty years ago, are now achievable thanks to major advances in numerical weather prediction.”

“过去10年,ECMWF大幅度改进了模式组件和估计初始状态和预报状态的算法,用概率分布函数(PDF)表示地球系统的状态。大气过程更加接近真实情况,而海洋过程、气溶胶和化学物质进入了预报模式。这些进展使得基于集合预报的概率预报拓展到季节内和季节时间段。那么我们提供有技巧预报最早到底是多长时间?更准确地说,如果我们考虑不断增加的空间和时间粗糙尺度天气现象,我们能够提前多长时间预报它们?我的报告里,这些问题通过应用ECMWF集合预报的预报技巧范围框架(the forecast skill horizon framework)加以讨论。基于1年预报的结果表明,对于瞬时、格点场而言,预报技巧的范围在16~23天之间,而对于时间和空间平均场而言要长得多。预报技巧的时间段长于直到20年前认为的2周预报极限,是因为在数值天气预报方面取得了重要进展。”

——在2016年初美国气象学会年会上,来自欧洲中期天气预报中心的Roberto Buizza以“预报技巧的时间界限”为题,在“无缝隙天气和气候预报——多尺度可预报性的期待和局限特别研讨会”上作了特约发言。

“It sure looks to me like we’ve changed phases in the PDO” / “If you try to look at PDO and global temperatures, you can come up with a variety of relationships”

“我确信我们似乎已经改变了PDO进程。” / “如果你关注PDO和全球温度,你会明白其中的各种关系。”

——来自NASA、NOAA和英国气象局独立的全球温度记录均表明,2015年是有记录以来全球温度最高的一年。来自NOAA的数据表明,2015年比之前最高温度记录的2014年再高出0.16 $^{\circ}\text{C}$,从而达到新高,同时也让全球平均温度较工业化前增高幅度超过1 $^{\circ}\text{C}$ 。在谈到这一最高记录产生的原因时,NCAR学者Kevin Trenberth和NCEP主任Thomas Karl不约而同提到了太平洋十年振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO),后者为一个15~30年循环,在正位相和负位相在太平洋分别出现较暖 and 较冷的表面温度。

“The International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP), which ended in December 2015, can take considerable credit for coordinating and catalyzing much of this fundamental research. The recently launched Future Earth research program builds on this legacy and is the right response to the new scientific challenges.”

“2015年12月结束的国际地圈—生物圈计划

(IGBP) 在协调和促进这项基础研究中获得了巨大声誉。最近启动的未来地球研究计划继承这一荣誉, 是新的科学挑战的正确应对。”

——地球联盟 (Earth League) 主席, 瑞典斯德哥尔摩大学教授 Johan Rockström, 以“未来地球”为题, 为最新出版的 Science 杂志撰写的社论中, 结合巴黎气候大会阐述了联合国可持续发展目标和构建稳定和弹性地球系统两项研究的重要意义, 礼赞 IGBP 项目和为新的传承项目呐喊。

“All are nominal, fully functioning, and delivering data to us, more than half of the world's 10 largest weather-forecasting agencies have sent Spire letters of intent for data licensing agreements.”

“所有都正常, 全功能运行, 向我们发回数据, 世界上10个最大的天气预报机构一多半都致函 Spire 表达获取数据协议意向。”

——2015年9月, 美国 Spire 公司成功发射了4颗“狐猴-2” (Lemur-2) 立方体卫星 (CubeSat), 借助无线电掩星技术, 从这些卫星传回的数据中可以获得大气层结资料。Spire 公司的创办人和 CEO, Peter Platzer 先生如此介绍“狐猴-2”卫星。虽然他并没有透露目前在空中的这些卫星每天到底能获得多少大气层结数据, 然而他表示, 今后两年该公司可能每个月发射4~8颗低成本的“狐猴-2”卫星, 在2016年底前该技术走入正轨后, 每天可以获取2万条大气层结廓线。

《大气科学》杂志出版“叶笃正先生百年诞辰纪念专刊”

■ 本刊编辑部

为纪念我国现代大气科学奠基人之一、国际著名气象学家——叶笃正先生的百年诞辰, 《大气科学》杂志2016年第1期出版了“叶笃正先生百年诞辰纪念专刊”。专刊收集了从不同方面反映叶先生的卓越成就以及在他的教导下学生的研究成果, 约十余篇文章, 以作为对叶先生的怀念。

专刊收录论文如下:

从 Rossby 波能量频散理论到准定常行星波动力学研究的发展——黄荣辉等

青藏高原和亚洲夏季风动力学研究的新进展——吴国雄等

全球变暖减缓期陆地地表气温变化特征和 CMIP5 多模式的未来情景预估——何金海等

晨昏轨道微波温度计资料同化对降水定量预报的影响及其对三轨卫星系统的意义——邹晓蕾等

南海夏季风爆发早晚的经向环流异常的机理研究——温之平等

关于《大气环流的若干基本问题》——吕建华

区域海气耦合模式 FROALS 的发展及其应用——周天军等

基于云亮温和降水回波顶高度分类的夏季青藏高原降水研究——傅云飞等

热带印度洋海温海盆一致模的变化规律及其对东亚夏季气候影响的回顾——黄刚等

青藏高原夏季地面热源的气候特征及其对高原低涡生成的影响——李国平等

植被对干旱趋势的影响——刘永强

2004年与2006年7~9月西北太平洋上空大尺度环流场与天气尺度波动的差别及其对热带气旋生成的影响——冯涛等

FGOALS模式4个版本太平洋年代际气候变率模拟的比较——张雅乐等

关于气候变化对社会经济系统影响的机理和途径的探讨——丑洁明等

夏季中国华北与印度降水之间的关联及其成因分析——林大伟等

华北汛期降水分离时间尺度降尺度预测模型的改进——阮成卿等



塞北风雪八载 伴星展翅翱翔

——记快速发展中的佳木斯气象卫星地面站

佳木斯气象卫星地面站 王健

2007年成立的佳木斯气象卫星地面站，是地处我国最东北端的气象卫星地面站，与已建成的北京、广州、乌鲁木齐等气象卫星地面站一起构成了我国气象卫星地面接收站网。

佳木斯站目前主要承担我国风云系列气象卫星的在轨测试、极轨气象卫星数据接收和传输、静止气象卫星测距、空间天气环境监测及遥感数据应用等任务。

自2008年5月成功接收到FY-3A星发射后首轨资料以来，佳木斯站业务发展迅速，由单一接收业务拓展到多系统并行业务。2010年11月完成FY-3B星7个探测器的7条首轨资料接收任务，2013年完成FY-3C星10个探测器的7条首轨资料接收任务。同年，新增FY-2

号静止气象卫星测距业务，加强了地面测距业务的可靠性，进一步提高了卫星测距精度。2011年10月开始接收空间天气卫星数据，2015年11月安装了空间天气电离层闪烁仪，拓展了空间天气观测业务。

建站至今，佳木斯站已完成从蹒跚学步到独立运行的转换。极轨卫星数据的接收与传输、遥感资料的处理与转发、遥感应用产品的生成和为地方服务等已形成稳定的业务化能力，并培养了一支业务熟练的技术维护和设备保障队伍。从接收FY-3A单星数据，发展到接收和传输FY-3A、FY-3B、FY-3C三颗卫星数据。从建站当年接收1098轨增加到2015年的5592轨。截止到目前共接收FY-3号卫星数据28269轨。

进 2016 气象卫星业务和研究 展报告 2016年2月 / 6卷1期



进展报告2016

特约专家

许健民
张 鹏
张文建
王劲松
董超华
方宗义
俞卫平
张志清
施进明
黄富祥

特约编辑

成伟玲
张 蕾

图片支持

国家卫星气象中心
佳木斯气象卫星地面站

仰望

望星空，在宇宙天体之外，地球外空间近地轨道上有约1300颗正常运转的人造卫星，这些人造体每时每刻在向地球人提供全球通信、GPS导航、天气预报等多种信息。这些很难用肉眼与太空群星分离开的梦幻般的人造卫星，也确实是由后来以科幻大师闻名的学者——英国科幻小说家亚瑟·查理斯·克拉克最先提出。1945年，当时28岁，二次世界大战时加入英国皇家空军并从事雷达防御系统技术工作的克拉克，发表了具有历史意义的科学幻想论文《地球外的中继——卫星能给出全球范围的无线电覆盖吗？》，他在这篇文章里，详细预言了可将包括广播和电视等无线电信号，传播到全球的地球同步卫星的系统。当时克拉克的设想让很多人表示怀疑，却在20年后随着“晨鸟”地球同步卫星的发射，幻想变真，也把人类彻底送入了卫星时代，地球同步卫星轨道因此命名为“克拉克轨道”。

如果说克拉克最初的设想还有什么遗憾的地方，那就是地球卫星除了具有他设想的通信功能以外，还具备让他当时从事的雷达探测具有更加广泛的全球视角，而探测的对象可以是地球表面环境、大气层中几乎所有要素。几乎与人类1960年进入卫星时代同步，气象探测也进入了卫星时代，放大了克拉克设想的同时，人造卫星也给人类带来了更多的福祉。今天，包括中国在内的气象卫星国家和组织，在WMO等国际机构的协调下，建立和不断完善极地轨道和地球静止轨道气象卫星体系，成为地球监测和数值天气预报最重要的数据支撑。

“进展报告2016”瞄准气象卫星的发展，从中国风云系列卫星和世界气象卫星发展两个侧面，阐述全球主要气象卫星更新换代进程，把握不断发展的脉络，展望未来更快发展的方向。

目录

风云系列气象卫星

- 72 我国风云四号气象卫星与日本 Himawari-8/9 卫星比较分析
- 76 风云三号C星微波大气探测载荷性能分析
- 83 FY-3C的掩星探测特点和初步结果
- 88 风云三号卫星红外高光谱探测技术及潜在应用
- 94 风云四号静止卫星闪电成像仪监测原理和产品算法研究进展
- 99 风云静止气象卫星地面应用工程计算机网络系统发展

卫星遥感技术/国际合作

- 104 气溶胶对利用近红外波段反演 CO₂ 浓度精度的影响研究
- 111 星载SAR降水反演研究简介
- 116 静止与极轨气象卫星监测沙尘的融合算法研究
- 120 静止轨道微波大气探测的技术现状与发展展望
- 124 国外地球同步轨道气象卫星成像观测模式发展分析
- 129 Charter机制在气象灾害监测中的应用

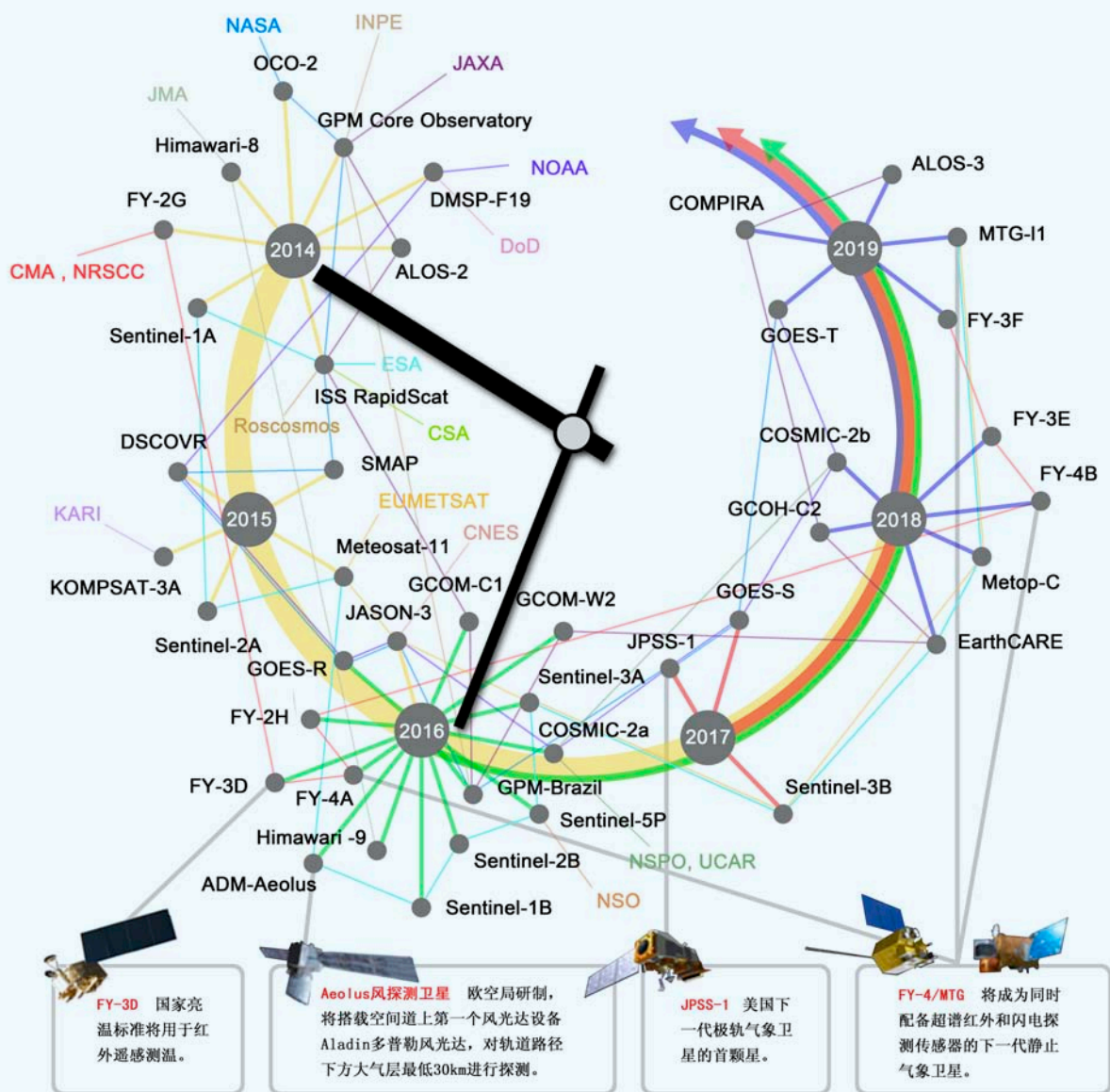
特写

- 68 塞北风雪八载 伴星展翅翱翔——记快速发展中的佳木斯气象卫星地面站
- 70 下一代气象卫星：而今迈步从头越
- 135 世界气象组织全球综合观测系统(WIGOS)空间部分2040年远景发展规划的解读
- 146 世界和我国气象卫星数据共享服务现状与展望
- 150 世界气象卫星主题文献计量分析
- 152 风云极轨卫星数据的第一“落脚地”——佳木斯气象卫星地面站采访侧记
- 154 《无线电频谱需求增加下的主动遥感发展战略》评介
- 156 气象风云多变换 理念创新得天下——2015年NOAA卫星大会评介

下一代气象卫星：而今迈步从头越

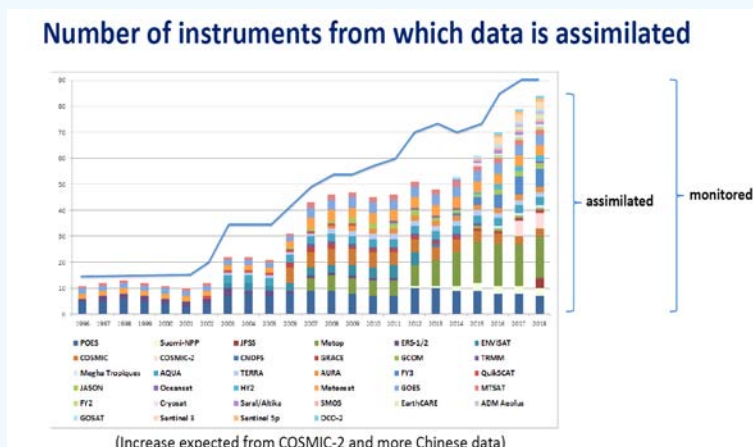
■ 贾朋群 冀文彬 田晓阳

世界气象组织（WMO）通过其OSCAR（观测系统能力和评估）项目给出的统计表明，目前在轨的气象和地球观测卫星达到123颗，其中地球静止卫星20颗、极地轨道卫星80颗，漂移轨道等其他轨道卫星23颗。人类进入卫星时代以来，通过235个空间项目，已经在和计划中将644颗气象卫星送入绕地球轨道。这些卫星上负载仪器的类型达到28大类，共计914种；探测和传输数据使用的无线电频率达1347个；目前有78个机构参与了各种气象卫星项目。人类近期和未来几年发射气象卫星的步伐不减（部分卫星项目见下图），其中被标记为下一代气象业务卫星以及换代的气象关键要素监测卫星尤其令人期待。



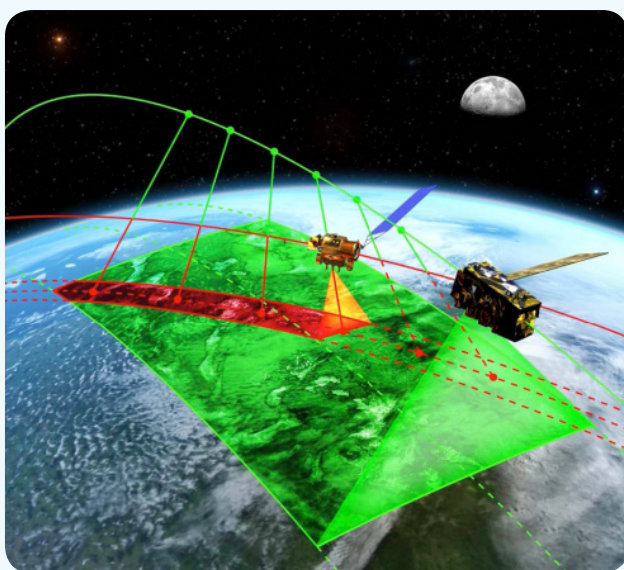
1 更多的卫星数据将被量化使用：进入数值天气预报（NWP）同化系统

目前，80种搭载在气象卫星上的传感器数据可供NWP同化系统选用，未来卫星传感器的数量将超过100种，同化的卫星数据量将是目前的10倍，达到 2×10^8 量级，而卫星数据量在所有同化数据中的比例几乎不变，依然维持98%的高比例。卫星的多样性，可以实现卫星对不同圈层和要素进行全覆盖式的观测，从而形成对地球环境的天基综合观测体系。



2 卫星间组网的实现带来多层次探测和卫星传感器互定标的红利

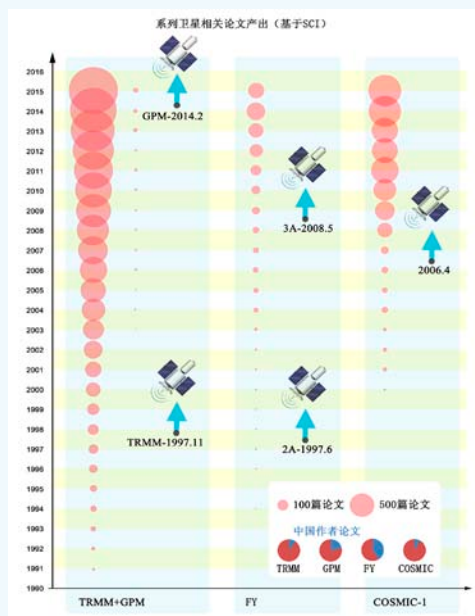
卫星族群和组网的形成，使得探测目标有机会被多种卫星探测捕捉，这些资料或者揭示影响目标物的不同要素场，或者给出该目标主要要素的层结变化等，而不同卫星仪器类似探测数据之间还可以进行相互校准，从而提高整个星座测量的准确性和一致性。



3 科技创新是气象卫星更加辉煌的基石

“天上一颗星，地上几万兵”。任何气象卫星，从设计到制作，从样机检验到数据算法等等过程，都是大批学者辛勤劳动带来的。包括中国风云气象卫星在内的一些主要气象业务卫星和气象要素探测卫星，其主题文献都随卫星的生命期延续。

(作者单位：中国气象局气象干部培训学院)



我国风云四号气象卫星与日本Himawari-8/9 卫星比较分析

张鹏 郭强 陈博洋 冯绚

(国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 从观测仪器种类、观测波段设置、观测时空分辨率、仪器灵敏度、仪器定标精度、数据服务能力等六个方面比较和分析了我国风云四号(FY-4)试验星与日本Himawari-8/9卫星的水平和差距。从观测仪器种类方面来看, Himawari-8/9卫星只装载了辐射成像仪(AHI), FY-4试验星除装载一台与AHI性能基本相当的扫描辐射成像仪(AGRI)外, 更将首次在静止轨道上同时实现红外干涉式高光谱探测和闪电探测; 观测波段设置方面, FY-4试验星搭载的AGRI与Himawari-8/9 AHI基本相当; 时空分辨率方面, AHI略优于AGRI; 仪器灵敏度方面, AHI和AGRI在发射波段基本一致, AHI在反射波段明显优于AGRI; 仪器定标精度方面, AHI和AGRI基本相当; 数据服务能力方面, FY-4试验星仍然采用传统的卫星直接广播和借助通信卫星转发两种模式, 而Himawari-8/9以互联网云服务为主, 可按需灵活调配服务内容和性能且运维成本较低。

关键词: 风云四号试验星, Himawari-8/9卫星

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.010

The Chinese Next-Generation Geostationary Meteorological Satellite FY-4 Compared with the Japanese Himawari-8/9 Satellites

Zhang Peng, Guo Qiang, Chen Boyang, Feng Xuan

(National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract: The Chinese next-generation geostationary meteorological satellite FY-4 will be launched in 2016, equipped with advanced geostationary radiation imager (AGRI), geostationary interferometric infrared sounder (GIIRS) and lightning mapping imager (LMI). This paper, from several aspects, such as spectral region, spatial resolution, temporal resolution, sensitivity, calibration accuracy and the way of data broadcasting, compares the FY-4 satellite with the Himawari-8/9 satellites developed by the Japan Meteorological Agency.

Keywords: the FY-4 satellite, the Himawari-8/9 satellites

0 引言

经过四十多年的发展, 我国已经独立自主发展了风云极轨与静止两个系列气象卫星, 成功发射了14颗, 实现了系列化发展、业务化运行, 实现了从“试验应用型”到“业务服务型”的转变。这其中, 一方面, 第一代静止气象卫星(FY-2)已有三颗卫星, 即FY-2E/F/G星在轨业务运行, 分别定点于86.5°E、112°E和105°E, 形成了“双星观测、互为备份”的

业务观测格局, 并可在需要时实现机动加密观测的业务能力; 另一方面, 第二代静止气象卫星(FY-4)的首颗试验卫星计划于2016年发射, 除了常规的成像探测外, 该星将在国际上首次同时实现红外高光谱垂直探测和闪电探测^[1], 这将在很大程度上提高我国在短临天气预报、应对气候变化等防灾减灾方面的观测能力, 巩固国际气象卫星大国的地位。

自1977年以来, 日本的静止系列气象卫星已经历了两代, 即第一代GMS卫星(共发射5颗, 一直服役到2003年)和第二代MTSAT卫星(MTSAT-1R和MTSAT-2, 计划工作到2015年), 其第三代静止气象卫星首发星Himawari-8已于2014年10月7日发射并在2015年业务化, 接替正在服役的MTSAT-2卫星。

收稿日期: 2015年4月30日; 修回日期: 2015年9月19日

第一作者: 张鹏(1970—), Email: zhangp@cma.gov.cn

通信作者: 郭强, Email: guoqiang@cma.gov.cn

资助信息: 国家自然科学基金(41275034, 91338203)

该系列的第二颗Himawari-9星计划于2016年发射。Himawari-8/9最显著的特点就是装载了国际上最先进的静止轨道成像仪AHI，它与美国下一代静止气象卫星（GOES-R）上计划装载的先进基线成像仪（ABI）同为ITT EXELIS公司研制，二者仅有个别波段在性能指标上稍有差异。显然，在充分研究和分析Himawari-8/9系列卫星探测和应用技术的基础上，客观认识我国静止系列气象卫星在发展水平和技术能力上的差距和不足，是十分必要的，这对于后续气象卫星规划和研制有重要参考意义。

1 主要比较分析

本节从观测资料种类、观测波段设置、观测时空分辨率、仪器灵敏度、仪器定标精度、数据服务能力等六个方面，展开对比分析。同时，简要介绍一下FY-4卫星特有的红外高光谱垂直探测仪和闪电成像仪。

1.1 观测资料种类

由表1可知，从观测资料种类上来说，Himawari-8/9和FY-4试验星都具有满足气象、环境监测所需的传统的二维成像观测，而FY-4试验星还具备对空间环境要素进行探测的能力。特别是，FY-4试验星新增了静止轨道的红外波段三维垂直探测（具有913个探测波段）和闪电探测能力，这对于进一步提高中小尺度上的短临天气监测和预报水平至关重要。

表1 Himawari-8/9和FY-4试验星观测资料种类对比

Table 1 Comparison of the payloads onboard Himawari-8/9 and FY-4

	Himawari-8/9	FY-4试验星
	AHI, 二维成像观测	AGRI, 二维成像观测
有效载荷与观测资料种类	—	GIIRS, 三维垂直探测
	—	LMI, 闪电探测
	—	SWMS, 空间探测

由于Himawari-8/9系列卫星仅有辐射成像仪（AHI）^[2]，因此，以下在观测波段设置、观测时空分辨率、仪器灵敏度、仪器定标精度等方面的比较，也仅限于与FY-4 AGRI进行对比。

1.2 观测波段设置

由表2可知，日本第三代Himawari-8/9和我国第二代FY-4同属新一代静止气象卫星，其通道设置和数量上比较接近。

1.3 观测时空分辨率

在空间分辨率方面，Himawari-8/9的可见光通道空间分辨率为0.5~1km，红外通道空间分辨率为2km；FY-4试验星的空间分辨率，可见光波段达到0.5~1km，中短波红外达到2km，长波红外达到4km（表2）。这其中，与Himawari-8/9相比，FY-4在长波

表2 Himawari-8/9和FY-4试验星观测波段设置及空间分辨率对比

Table 2 Comparison of spectral region and spatial resolution of Himawari-8/9 and FY-4

Himawari-8/9		FY-4 (A星)	
中心波长 (μm)	分辨率 (km)	中心波长 (μm)	分辨率 (km)
0.47	1	0.47	1
0.51	1	—	—
0.64	0.5	0.65	0.5~1*
0.86	1	0.825	1
—	—	1.375	2
1.6	2	1.61	2
2.3	2	2.225	2~4*
3.9	2	3.725H	2
—	—	3.725L	4
6.2	2	6.25	4
6.9	2	7.1±0.2**	4
7.3	2	—	—
8.6	2	8.5±0.5***	4
9.6	2	—	—
10.4	2	10.8±0.5	4
11.2	2	—	—
12.4	2	12.0±0.5	4
13.3	2	13.5±0.3	4

注：*表示这两个波段的原始观测数据分辨率分别为1km和2km，但通过采用特殊的采样和处理手段后，用户获得图像分辨率可以达到0.5km和1km；**表示B星时调整为2个通道，即6.75~7.15μm和7.24~7.60μm；***表示C星时调整为2个通道，即8.4~9.0μm和9.42~9.8μm。

红外波段上空间分辨率相对较低，主要是受制于探测器和制冷器研制水平，预计该项技术可在FY-4第二颗业务星上得到全面解决。

在观测时间分辨率方面（表3），Himawari-8/9全圆盘观测需10分钟，台风尺度区域观测需2.5分钟；FY-4试验星全圆盘观测需15分钟，台风尺度的区域观测需3分钟^[5]，略逊于Himawari-8/9，但与GOES-R相当^[6]，基本达到了国际静止气象卫星同期水平。

表3 Himawari-8/9和FY-4试验星观测时间分辨率对比

Table 3 Comparison of temporal resolution of Himawari-8/9 and FY-4

	Himawari-8/9	FY-4试验星
全圆盘观测	10分钟	15分钟
区域观测	2.5分钟（日本本土、台风尺度系统）	3分钟（2500km×2500km）

1.4 仪器灵敏度

由表4不难看出，FY-4业务星可见光、近红外波段主要波段的典型信噪比约为200，比Himawari-8/9低50%；除高温探测波段（3.8_B）和13.3μm波段外，FY-4试验星红外波段典型灵敏度为0.2K，与Himawari-8/9相当，具体指标对比详见表4。上述差距主要也是由探测器制造工艺、整星温度控制水平等因素造成，有望在FY-4后续业务星中逐步解决。

表4 Himawari-8/9和FY-4试验星仪器灵敏度指标对比
Table 4 Comparison of sensitivity of Himawari-8/9 and FY-4

中心波长 (μm)	Himawari-8/9	FY-4试验星
0.470	300@100%	90@100%
0.510	300@100%	—
0.645	300@100%	150@100%
0.860	300@100%	200@100%
1.375	—	150@100%
1.610	300@100%	200@100%
2.260	300@100%	200@100%
3.8_A	0.2K@300K	0.2K@300K
3.8_B	—	0.7K@300K
6.30	0.2K@300K	0.2K@300K
6.95	0.2K@300K	0.25K@300K
7.35	0.2K@300K	—
8.70	0.2K@300K	0.2K@300K
9.66	0.2K@300K	—
10.50	0.2K@300K	0.2K@300K
11.20	0.2K@300K	—
12.30	0.2K@300K	0.2K@300K
13.3	0.2K@300K	0.5K@300K

1.5 仪器定标精度

由表5不难看出,对于FY-4试验星,在波段增加、空间分辨率提高的条件下,全部波段的定标精度有望优于1K,争取达到0.5K。总的来说,从定标精度来看,FY-4定标精度与Himawari-8/9基本相当。

表5 Himawari-8/9和FY-4试验星仪器定标精度对比
Table 5 Comparison of calibration accuracy of Himawari-8/9 and FY-4

卫星	反射波段定标		发射波段定标	
	定标指标	实际性能	定标指标	实际性能
Himawari-8/9	5%	—	1K	—
FY-4试验星	3%~5% (0.45~0.49μm除外)	优于5%	1K (13.2~13.8μm除外)	优于1K (争取0.5K)

1.6 数据服务能力

1.6.1 FY-4 试验星数据服务

FY-4试验星在数据服务方面,主要采用传统的高速率信息传输和低速率信息传输两种方式进行(表6)。

表6 FY-4试验星数据广播方式
Table 6 The way of data broadcasting of FY-4

FY-4试验星
HRIT1广播1路: 8Mbps
HRIT2广播1路: 3M/1Mbps
LRIT/EWAIB广播1路: 150Kbps/2Kbps

1.6.2 Himawari-8/9 数据服务

Himawari-8/9不携带用于数据直接分发的设备。卫星获取的所有图像通过互联网云服务(Internet cloud service)分发给国家气象和水文局(NWHs)。JMA还开展HimawariCast服务,即把基本的图像数据通过通信卫星分发给NMHSs。具体来说:

1) 互联网云服务

为了发布海量的图像数据,JMA为东亚和西太平洋地区的用户提供互联网云服务。为了能够使用云服务,要求用户的网速至少为25Mbps。

表7列出了Himawari-8/9通过云服务分发的观测数据集,可用于生成所有16个波段的最优空间分辨率产品。真彩色图像将以PNG格式提供。快速扫描观测的图像以NetCDF格式分发。

表7 Himawari-8/9通过互联网云服务分发的数据
Table 7 Imagery distribution via a cloud service

数据格式	观测区域	
Himawari标准数据	全圆盘	• 全圆盘: 每10分钟
	重点区域	• 重点区域: 每2.5分钟
		• 16 通道
		• 最高空间分辨率
真彩色图像 (PNG)	全圆盘	• 真彩色合成图像
	重点区域	• 全圆盘: 每10分钟
		• 重点区域: 每2.5分钟
		• 最高空间分辨率
快速扫描图像 (NetCDF)	重点区域	• 重点区域: 每2.5分钟
		• 16 通道
		• 最高空间分辨率

为了继续为在线JDDS(JMA Data Dissemination System)用户提供服务(表8),JMA保留通过JDDS数据分发系统提供HRIT文件数据。

表8 Himawari-8/9保留的JDDS连续分发数据集
Table 8 Imagery distribution via JDDS

数据格式	观测区域	
HRIT	全圆盘	• HRIT格式
		• 每30分钟更新一次
		• 仅有五个通道
		• 低空间分辨率

2) HimawariCast服务

HimawariCast分发的数据(表9)包括HRIT、LRIT格式的图像数据,以及一些气象数据,如:数值预报产品、场地观测资料等。

表9 Himawari-8/9通过通信卫星分发的数据集
Table 9 Imagery distribution via HimawariCast

数据	格式	备注
Himawari-8/9 全圆盘	HRIT	• 10分钟更新一次。
	LRIT	• HRIT: 5 bands
		• LRIT: 3 bands
		• 低空间分辨率
数值预报产品	SATAID	• JMA Global Model全球模式
		• 6小时更新
观测资料(地面、船舶、探空)	SATAID	• 覆盖东亚及西太平洋区域
洋面风(来自EUMETSAT)	SATAID	• 数据由EUMETSAT提供, JMA负责转换数据格式

3) Himawari-8/9数据服务能力分析

Himawari-8/9的观测图像数据主要通过两种方式向用户分发:互联网云服务和HimawariCast服务,其标准数据,即所有16个波段的最优空间分辨率、最高

时间分辨率的数据只通过互联网云服务的方式分发。同时, Himawari-8/9互联网云服务的优点表现在:一方面,不用建设任何硬件设备从而可以降低成本;另一方面,管理层可根据业务发展的规模和需求,调配所需的服务组合。

1.7 FY-4 特有探测仪器简介

FY-4试验星将装载红外干涉式高光谱探测仪(GIIRS)和闪电成像仪(LMI),实现我国在地球同步轨道上的首次红外高光谱探测和闪电成像探测,表10和表11分别给出了GIIRS和LMI的主要性能指标。

GIIRS将极大提升我国在地球同步轨道上对大气温度、湿度和若干痕量气体特性参数的空间和时间四维结构及其变化规律的观测能力,改进垂直分辨率,为数值天气预报和气候研究服务。同时,LMI也将实现闪电成像观测,获取卫星观测覆盖区内的闪电分布图,为灾害性强对流天气预警和军事应用服务。值得一提的是,如果FY-4试验星能在2016年如期发射,将在全球范围内首次实现在一个卫星平台上同时完成光学成像、红外高光谱探测和闪电探测等一系列高精度对地观测,具有里程碑式的意义。

表10 红外干涉式高光谱探测仪(GIIRS)主要性能指标
Table 10 Characteristics of GIIRS

	波长范围	分辨率 (cm^{-1})	通道数
光谱参数	长波红外: $700\sim 1130\text{cm}^{-1}$	0.8	538
	中波红外: $1650\sim 2250\text{cm}^{-1}$	1.6	375
	可见光: $0.55\sim 0.75\mu\text{m}$		
空间分辨率	长波/中波红外波段: 16km (星下点) 可见光波段: 2km (星下点)		
运行模式	中国区域: $5000\text{km}\times 5000\text{km}$ 中尺度区域: $1000\text{km}\times 1000\text{km}$		
时间分辨率	中国区域: $< 1\text{h}$ 中尺度区域: $< 0.5\text{h}$		
灵敏度	长波红外: $0.5\sim 1.1$; 中波红外: $0.1\sim 0.14$ (单位: $\text{mW/m}^2\cdot\text{sr}\cdot\text{cm}^2$) 可见光: $S/N>200$ ($\rho=100\%$)		
定标精度	辐射定标精度: 1.5K (3σ); 光谱定标精度: 10ppm (3σ)		
量化等级	13比特		

表11 闪电成像仪(LMI)主要性能指标
Table 11 Characteristics of LMI

空间分辨率	7.8km (星下点)
探测器规模	$400\times 300\times 2$
中心波长	777.4nm
带宽	$1\text{nm}\pm 0.1\text{nm}$
探测率	$>90\%$
虚警率	$<10\%$
动态范围	>100
信噪比	>6
帧频	2ms
量化等级	12比特
测量误差	10%

2 结论

Himawari-8/9是日本第三代静止气象卫星,装载了目前国际上最先进的AHI,成像观测的综合性性能优异。在我国,第二代静止气象卫星(FY-4)首发星也计划于2016年发射,整体探测性能和应用能力将在现有基础上有质的提高。对比中、日两国静止气象卫星,二者在综合探测能力、仪器观测能力、量化应用水平以及数据服务能力等四个方面各有优劣,具体来说:

1) 在综合探测能力方面, FY-4具有对天气气候和空间环境的探测能力,且FY-4试验星将首次在静止轨道上同时实现红外高光谱垂直探测和闪电探测。Himawari-8/9卫星则主要关注于对天气气候系统的辐射成像观测。

2) 在仪器观测能力方面, Himawari-8/9 AHI在观测波段设置和时空分辨率方面,略优于FY-4试验星AGRI。

3) 在量化应用水平方面,除FY-4 AGRI反射波段灵敏度稍低, Himawari-8/9 AHI和FY-4 AGRI在仪器灵敏度和定标精度等性能上基本相当。

4) 在数据服务能力方面, FY-4卫星采用传统的卫星直接广播和借助通信卫星转发两种模式。Himawari-8/9卫星则采用了以更为灵活的互联网云服务方式为主,并兼顾通过通信卫星来实现对HRIT/LRIT低分辨率资料的HimawariCast广播方式。需要指出的是, Himawari-8/9数据服务模式需要用户有高速互联网接入能力,建议FY-4卫星可在未来条件成熟的时候借鉴采用。

参考文献:

- [1] 杨军,等.气象卫星及其应用.北京:气象出版社,2012.
- [2] Himawari-8/9: User's guide. [Online]. <http://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>
- [3] 张如意,王玉花. FY-2C星辐射定标及其结果分析. 上海航天, 2005, S1: 31-35.
- [4] 李卿,董瑶海. 中国气象卫星技术成就与展望. 上海航天, 2008, 1: 1-10.
- [5] 王淦泉,陈桂林. 地球同步轨道二维扫描红外成像技术. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 429-433.
- [6] 周润松,葛榜军. 美国新一代气象卫星系统发展综述. 航天器工程, 2008, 17(4): 91-98.
- [7] 郭强,陈博洋,张勇,等. 风云二号卫星在轨辐射定标技术进展. 气象科技进展, 2013, 3(6): 6-12.

风云三号C星微波大气探测载荷性能分析

谷松岩 郭杨 游然 卢乃锰 吴雪宝

(中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 风云三号C星是我国第二代极轨气象卫星的首发业务星, 星上装载了3个被动微波遥感载荷(微波成像仪、微波温度计Ⅱ型和微波湿温探测仪), 其中微波成像仪完全延续了风云三号A/B星的设计, 两个微波大气探测载荷微波温度计Ⅱ型和微波湿温探测仪是在风云三号A/B星微波温度计和微波湿度计成功在轨运行和应用的基础上, 根据应用需求在功能和性能两个方面从设计层面实现了大幅提升。本文重点介绍风云三号C星微波温度计Ⅱ型和微波湿温探测仪的功能、性能和设计指标, 综述风云三号C星星载微波大气探测能力。风云三号C星星载微波大气探测系统, 通过通道细分、探测频点增加和空间采样技术优化, 突破了我国星载微波探测载荷技术瓶颈, 提升了大气温湿度廓线的综合探测能力。

关键词: 风云三号C星, 微波温度计Ⅱ型, 微波湿温探测仪, 星载大气探测系统, 大气参数反演

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.011

The Performance of Microwave Sounders Board on FY-3C Satellite

Gu Songyan, Guo Yang, You Ran, Lu Naimeng, Wu Xuebao

(Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites; China Meteorological Administration; National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstracts: FY-3C is the first satellite of Chinese second generation operational polar orbiting meteorological satellite series. Three passive microwave instruments are on board the FY-3C satellite: MWRI is just following the design of FY-3A/B, MWTS-Ⅱ has made great progress on channels splitting at the oxygen absorbing lines, and MWHTS has not only made more channels at vapor absorbing line, but also designed a new sounding frequency at 118GHz. All those have made great progress at the design stage. In this paper, we give some key points on FY-3C/MWTS-Ⅱ and MWHTS, introduce the performance and design parameters of them. And finally we make an analysis on retrieval and sounding.

Keywords: FY-3C, MWTS-Ⅱ, MWHTS, sounding system, atmosphere parameter profile retrieval

0 引言

风云三号C星(FY-3C)是我国第二代极轨气象卫星的首发业务星, 主要任务之一就是获取全球全天候高精度大气参数为数值天气预报提供初始场信息。FY-3C装载了3个被动微波遥感载荷(微波成像仪、微波温度计Ⅱ型和微波湿温探测仪), 其中微波成像仪完全延续了风云三号A/B试验星的设计, 两个微波大气探测载荷(微波温度计Ⅱ型和微波湿温探测仪)在风云三号A/B星微波温度计和微波湿度计的基础上, 借鉴在轨运行和应用的成功经验, 根据数值天气预报和台风雨强对流天气系统监测分析等不断提升的应用需求, 在功能和性能两个方面从设计层面实现了跨越式提升。

风云三号A/B两颗试验卫星上的微波温度计在50~60GHz强氧气吸收带设计了4个探测通道, 用于获取从地面到平流层下部的大气温度垂直结构分布信息; 微波湿度计在150~191GHz频段内设计了5个通道获取大气湿度的垂直结构分布信息。风云三号A星在轨超过5年和B星在轨超过3年的成功运行和应用, 在星载微波大气探测载荷研制和遥感信息应用两个方面都取得了突破性成果, 但面对日益增长的应用需求, 凸显出微波温度计通道个数少、带宽过宽、空间分辨率低等不足; 而微波湿度计尽管在探测能力上与欧美同类载荷(AMSU-B、MHS等)相当, 但由于缺少89GHz窗区通道, 使得降水检测和微波背景辐射探测能力受到抑制。同时针对我国遭受台风暴雨等强对流天气袭击的特点, 迫切需要提升星载大气探测系统对对流层上部热力结构和大气降水结构的探测能力。为此, 在考虑我国星载微波大气探测载荷的设计研制技术能力的前提下, 根据应用需求完成了FY-3C星微波

收稿日期: 2013年11月1日; 修回日期: 2014年6月12日
第一作者: 谷松岩(1963—), Email: gusy@cma.gov.cn
资助信息: 国家自然科学基金(41201360)

温度计Ⅱ型和微波湿温探测仪的指标设计。

本文重点介绍FY-3C星微波探测载荷的功能、性能和设计指标,综述FY-3C星载微波大气探测载荷新增的大气探测能力,推进新型微波遥感信息在天气预报业务中的应用。

1 星载微波大气探测载荷

1.1 国内外主要星载微波大气探测载荷介绍

星载微波大气探测载荷指用于大气温湿度廓线探测的星载被动微波辐射计,一般利用大气氧气吸收线进行大气温度廓线探测,利用大气水汽吸收线进行大气湿度廓线探测。星载微波大气探测载荷发展可以追溯到20世纪60年代的前苏联,当时苏联发射的“宇宙卫星”,利用4通道微波辐射计开展了大气探测试验。后来,美国在20世纪70年代发射了“海洋卫星”,进一步在航天这一高度上实现了对地球海洋环境的被动微波遥感探测。继海洋卫星之后,美国在雨云卫星及国防卫星上都成功装载了被动微波探测仪,进一步将被动微波遥感从理论研究向应用研究推进。

美国1972年发射的雨云卫星装载了电扫描微波辐射计,利用50~60GHz的氧气吸收带探测大气温度结构。1978年美国发射了业务环境卫星泰罗斯系列,装载了专门用于大气探测的微波探测器(MSU),与红外大气探测器(HIRS)结合,实现了大气垂直温度廓线的遥感探测,形成TOVS体系。为满足军事气象需要,美国从1987年开始实施DMSP计划,陆续发射的卫星装载有用于大气温度廓线探测的特种微波温度探测仪SSM/T和用于大气湿度廓线探测的SSM/T-2。DMSP计划提高了空间微波对地遥感探测能力。在当代DMSP计划中,SSMIS取代了SSM/I、SSM/T和SSM/T-2,实现了垂直探测和成像遥感的有机结合^[1]。

美国在业务环境卫星NOAA-K系列上,发展了20通道先进微波探测器(AMSU),取代MSU形成了新一代大气探测系统ATOVS^[2-3]。其中,AMSU-A利用50~60GHz的氧气吸收带探测大气温度廓线,AMSU-B利用183GHz的水汽吸收线探测大气湿度廓线,后来MHS取代AMSU-B继续利用183GHz的水汽吸收线探测大气湿度廓线。

2002年升空的NASA EOS系列卫星上,载有与AMSU性能相当的先进微波大气探测器,其中包括巴西研制的湿度探测仪HSB和欧洲研制的微波湿度探测器MHS。欧洲极轨气象卫星MetOp上的大气探测系统与美国业务环境卫星上的系统相同。

美国目前国家极轨业务环境卫星系统SNPP上的星载大气探测系统是ATMS^[3],用两副天线完成

了AMSU系统中三副天线的探测任务,在仍然沿用50~60GHz氧气吸收带进行大气温度廓线探测的同时,在183GHz水汽吸收线附近增加了探测通道数,提升了大气湿度场的探测能力。

我国星载微波遥感技术起步较晚,FY-3A星装载的微波温度计和微波湿度计是我国星载微波大气探测载荷首次升空并实现定量应用的里程碑。经过A/B两颗试验星的应用,发展了FY-3C星的微波温度计Ⅱ型(MWTS-Ⅱ)和微波湿温探测仪(MWHTS),在原探测频点附近细化增加通道数量,同时增加了118GHz新的探测频点,提升对流层上部大气温度廓线探测精度,提升风云三号业务星的大气探测能力。

1.2 关键性能指标对比

目前在轨运行的星载大气探测载荷包括美国NOAA、EOS卫星和欧洲极轨业务气象卫星MetOp上的AMSU-A、AMSU-B和MHS,以及SNPP卫星上将大气温湿度探测合为一体的ATMS。表1给出了微波大气探测载荷频点设置对比,从表中可以看到风云三号微波大气探测载荷(MWTS-Ⅱ和MWHTS)覆盖了ATMS在50~60GHz氧气吸收带和183GHz水汽吸收线附近的所有大气探测通道,同时增加了118GHz氧气吸收线附近的一组大气温度廓线探测通道;而对于大气窗区辅助探测通道,FY-3C星设置了89和150GHz两个高频通道,受卫星平台资源限制,缺失了低频23和31GHz两个窗区通道,但FY-3C同星装载的微波成像仪设置有23.6和36.5GHz两个相近频点,弥补了MWTS-Ⅱ的不足,因此综合FY-3C微波遥感探测载荷的频点配置资源,FY-3C具有了与ATMS相当的大气探测资源。

星载大气探测载荷与定量应用密切相关的关键性能参数除通道的中心频点外,主要有灵敏度、定标精度和波束宽度。表2给出了MWTS-Ⅱ、MWHTS和ATMS的关键性能设计指标,可以看到两颗业务星大气探测载荷相同探测频点(50~60GHz和183GHz)的波束宽度一致,这表明它们具有相同的水平空间分辨率;通道数相同,说明它们空间垂直分辨能力相当。50~60GHz频段大气温度廓线探测通道的定标精度相同,灵敏度MWTS-Ⅱ的指标略低于ATMS;183GHz大气湿度廓线探测通道FY-3C星的定标精度为1.5K,优于ATMS的2.0K;灵敏度也是略低于ATMS。窗区通道89GHz,FY-3C星的MWHTS波束宽度为2.0°,优于ATMS的2.2°;经过遥感信息反卷积重采样处理后,结合MWHTS中心频点位于118GHz氧气吸收线的大气温度探测通道,将得到更高水平分辨率的大气温度廓线探测数据,为获取到更精细的大气温度廓线结构带来

新的能力提升空间。

风云三号卫星从试验星A/B发展到业务首发星C, 仪器性能指标得到稳步提升。图1是与定量应用密切相关的通道灵敏度指标在轨实测结果与设计指标的对比, 可以看到从B星开始, 微波大气探测载荷通道灵敏度指标就有显著提升, C星仪器进一步保持了高灵敏度水平, 为星载大气探测载荷的定量应用和数值预报同化应用奠定了基础。

2 FY-3C星大气探测能力分析

2.1 通道权重函数分析

星载微波大气探测仪器的通道权重函数曲线反映了大气中各个气压层的辐射对探测器接收到的来自整个大气层辐射的贡献大小, 即大气向上的辐射主要是来自哪一层大气的贡献。每个通道权重函数曲线的峰值代表大气对向上辐射贡献最大的气层。

定义中心波数为 ν^* 的权重函数为

$$W = \frac{\partial \tau(\nu^*, p, \theta)}{\partial \ln p}, \quad (1)$$

$$\tau(\nu^*, p, \theta) = \exp(-u), \quad (2)$$

式中, $\tau(\nu^*, p, \theta)$ 是中心波数为 ν^* 的通道透过率, u 是光学厚度。

本文利用VDISORT模式计算美国标准大气在FY-3C星通道频点的每层光学厚度, 根据式(2)计算出每层的透过率, 然后根据式(1)计算出各个通道的权重函数。

图2是MWTS-II氧气吸收带50~60GHz的一组通道权重函数计算结果, 可以看到FY-3C星MWTS-II的13个通道的权重函数峰值分布均匀, 覆盖了从地面一直到大气上层2hPa的整层大气, 吸收带中心通道权重函数峰值位置较高, 吸收带远翼通道权重函数峰值位置较低, 窗区通道权重函数可达地面, MWTS-II的权重函数峰值分布特征为大气温度廓线的精确探测奠定了基础。

图3是MWHTS在118GHz氧气吸收线附近和183GHz水汽吸收线附件的两组探测通道权重函数计算结果。从图3a中可以看到FY-3C星MWHTS在118GHz氧气

吸收线附近8个探测通道权重函数的峰值分布均匀, 覆盖了从地面到大气上层30hPa的整层大气, 吸收带中心通道权重函数峰值位置较高, 吸收带远翼通道权重函数峰值位置较低, 窗区通道权重函数可达地面, 为提高大气温度廓线的精确探测奠定了基础。从图3b中可以看到FY-3C星MWHTS在183GHz水汽吸收线附近5个探测通道权重函数的峰值均匀覆盖了从地面到400hPa的大气层, 吸收带中心通道权重函数峰值位置较高, 吸收带远翼通道权重函数峰值位置较低, 为大气湿度廓线的精确探测奠定了基础。

2.2 新增探测频点和通道特性

相对于风云三号A/B试验卫星上装载的MWTS和MWHS而言, FY-3C星的MWTS-II和MWHTS新增探测频点是118GHz氧气吸收频点和89GHz的窗区探测频点; 新增的探测通道包括118GHz附近的一组8个探测通道、50~60GHz波段的9个通道、89GHz一个通道和183GHz附近的2个通道。

对于氧气吸收通道而言, 根据分子微波波谱学理

表1 微波大气探测载荷通道中心频率对比

Table 1 Center frequency analysis for microwave atmospheric sounders

中心频率 (GHz)	AMSU	MHS	ATMS	MWTS	MWHS	MWTS-II	MWHTS	主要用途
23.80	通道1		通道1					大气窗区
31.4	通道2		通道2					大气窗区
50.3	通道3		通道3	通道1		通道1		大气窗区
51.76			通道4			通道2		大气窗区
52.8	通道4		通道5			通道3		地表层大气温度
53.596	通道5		通道6	通道2		通道4		700 hPa温度
54.40	通道6		通道7			通道5		400 hPa温度
54.94	通道7		通道8	通道3		通道6		250 hPa温度
55.50	通道8		通道9			通道7		180 hPa温度
57.290344(fo)	通道9		通道10	通道4		通道8		90 hPa温度
fo ± 0.217	通道10		通道11			通道9		50 hPa温度
fo ± 0.3222 ± 0.048	通道11		通道12			通道10		25hPa温度
fo ± 0.3222 ± 0.022	通道12		通道13			通道11		10 hPa温度
fo ± 0.3222 ± 0.010	通道13		通道14			通道12		6 hPa温度
fo ± 0.3222 ± 0.0045	通道14		通道15			通道13		3 hPa温度
89.0	通道15/16	通道1	通道16				通道1	大气窗区
118.75 ± 0.08							通道2	hPa温度
118.75 ± 0.2							通道3	hPa温度
118.75 ± 0.3							通道4	hPa温度
118.75 ± 0.8							通道5	hPa温度
118.75 ± 1.1							通道6	hPa温度
118.75 ± 2.5							通道7	hPa温度
118.75 ± 3.0							通道8	hPa温度
118.75 ± 5.0							通道9	hPa温度
150.0	通道17	通道2			通道1/2		通道10	大气窗区
165.5			通道17					大气窗区
183.31 ± 1	通道18	通道3	通道22		通道3		通道11	hPa湿度
183.31 ± 1.8			通道21				通道12	hPa湿度
183.31 ± 3	通道19	通道4	通道20		通道4		通道13	hPa湿度
183.31 ± 4.5			通道19				通道14	hPa湿度
183.31 ± 7	通道20	通道5	通道18		通道5		通道15	hPa湿度

表2 星载微波大气探测载荷关键性能指标
Table 2 Key specifications of microwave atmospheric sounders

通道序号	中心频率 (GHz)	灵敏度 (K)	定标精度 (K)	波束宽度 (°)
MWTS- II				
1	50.3	1.5	1.5	2.2
2	51.76	0.9	1.5	2.2
3	52.8	0.9	1.5	2.2
4	53.596	0.9	1.5	2.2
5	54.40	0.9	1.5	2.2
6	54.94	0.9	1.5	2.2
7	55.50	0.9	1.5	2.2
8	57.290344(fo)	0.9	1.5	2.2
9	fo±0.217	1.5	1.5	2.2
10	fo±0.3222±0.048	1.5	1.5	2.2
11	fo±0.3222±0.022	2.3	1.5	2.2
12	fo±0.3222±0.010	3.0	1.5	2.2
13	fo±0.3222±0.0045	4.5	1.5	2.2
MWHTS				
1	89	1.0	2.0	2.0
2	118.75±0.08	3.6	2.0	2.0
3	118.75±0.2	2.0	2.0	2.0
4	118.75±0.4	1.6	2.0	2.0
5	118.75±0.65	1.6	2.0	2.0
6	118.75±1.1	1.6	2.0	2.0
7	118.75±2.1	1.6	2.0	2.0
8	118.75±3.0	1.0	2.0	2.0
9	118.75±5.0	1.0	2.0	2.0
10	150	1.0	1.5	2.0
11	183±1	1.0	1.5	1.1
12	183±1.8	1.0	1.5	1.1
13	183±3	1.0	1.5	1.1
14	183±4.5	1.0	1.5	1.1
15	183±7	1.0	1.5	1.1
ATMS				
1	23.80	0.9	2.0	5.2
2	31.4	0.9	2.0	5.2
3	50.3	1.2	1.5	2.2
4	51.76	0.75	1.5	2.2
5	52.8	0.75	1.5	2.2
6	53.596	0.75	1.5	2.2
7	54.40	0.75	1.5	2.2
8	54.94	0.75	1.5	2.2
9	55.50	0.75	1.5	2.2
10	57.290344(fo)	0.75	1.5	2.2
11	fo±0.217	1.2	1.5	2.2
12	fo±0.3222±0.048	1.2	1.5	2.2
13	fo±0.3222±0.022	1.5	1.5	2.2
14	fo±0.3222±0.010	2.4	1.5	2.2
15	fo±0.3222±0.0045	3.6	1.5	2.2
16	89.0	0.5	2.0	2.2
17	165.5	0.6	2.0	1.1
18	183.31±7	0.8	2.0	1.1
19	183.31±4.5	0.8	2.0	1.1
20	183.31±3	0.8	2.0	1.1
21	183.31±1.8	0.8	2.0	1.1
22	183.31±1	0.9	2.0	1.1

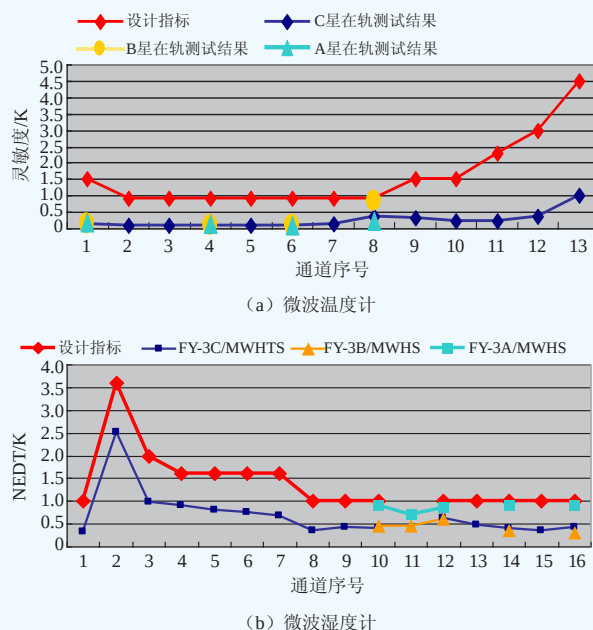


图1 FY-3C较FY-3A/B卫星仪器灵敏度指标提升情况
Fig. 1 Noise Equivalent Differential Temperature (NEDT) of sounders on FY-3C in comparison with those on FY-3A/B: (a) Microwave Temperature Sounder; (b) Microwave Humidity Sounder

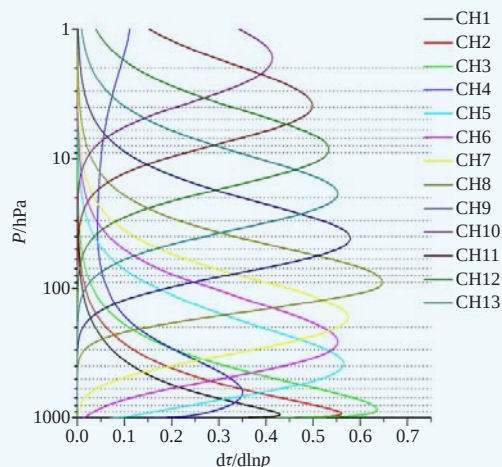


图2 MWTS- II 通道权重函数分布
Fig. 2 Weighting function for MWTS- II

论, 气体对微波的吸收和发射主要是分子转动能级之间的量子跃迁, 氧分子在微波波段共产生46条共振吸收线, 其中有45条位于风云三号微波温度计的50~60GHz波段内, 随着气压的不同, 这些谱线产生不同程度的加宽, 形成吸收带, 是进行大气温度层结探测的最佳微波频段; 另外一条孤立的共振吸收线位于风云三号微波湿度探测仪的118GHz, 可用于大气温度层结的辅助探测。在进行大气温度层结探测时, 118GHz高频微波可以提供比50~60GHz更高的空间分辨率。因此将两个频段结合更有利于大气的

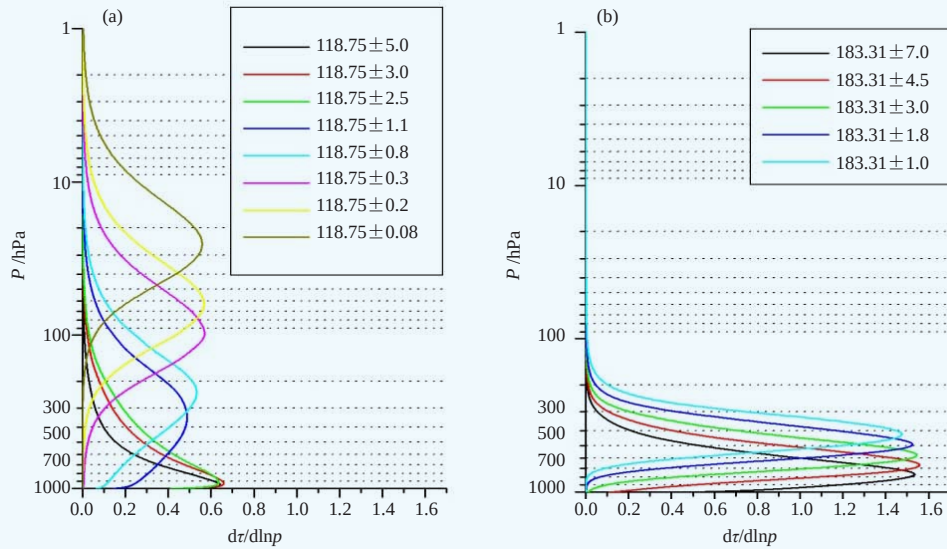


图3 MWHTS在118GHz氧气吸收线 (a) 和在183GHz水汽吸收线 (b) 附近通道权重函数
Fig. 3 Weight function of MWHTS (a) for O₂ absorption line at 118GHz; (b) for H₂O absorption line at 183GHz

温度层结探测。

这些新增探测频点和探测通道对云雨大气粒子辐射特性有明显响应, 选择Katrina台风登录前, 发展最为旺盛的2005年8月28日的数据进行辐射模拟。台风模拟数据来自威斯康星大学的非流体静力学中尺度模式系统 (University of Wisconsin-Non-hydrostatic Model System, 简称UWNMS)。这一模式是Gregory Tripoli教授开发的多重嵌套的中尺度模式, 该模式是为反演系统提供基础数据而开发出来的^[4-5]。UWNMS是目前较先进的中尺度数值预报模式之一, 已被广泛应用于各种中尺度现象的研究^[6-9]。Mugnai等^[10]曾将UWNMS的模拟结果与MM5的模拟结果进行了对比, 结果表明, 两模式在风暴组织特性的模拟上非常相近, 且由这两个模式构建的数据集所反演出降水率的统计特性有很好的 consistency。FY-3C星微波大气探测载荷新增探测频点和通道辐射特性分析, 利用UWNMS分析场结果, 首先选择穿过Katrina台风眼的一条竖剖线 (位置见图4) 共252个点的数据作为正演辐射传输模式的输入, 数据代表了剖线经过的台风螺旋云带、云墙和眼区的大气廓线和云中微物理廓线的特征。

模拟计算结果 (图5) 表明台风云系中液态和冰态粒子含量较多的云墙区对吸收线远翼通道影响较大, 亮温衰减明显, 且越远离吸收峰, 亮温衰减的越剧烈。而在台风云系中液态和冰态粒子含量较少的台风眼区和外围螺旋云带, 对各通道亮温影响小。与台风云系冰态粒子峰值浓度对应的亮温变化中118GHz频点远翼通道和吸收峰通道的亮温差比183GHz和

50~60GHz的大, 这表明风云三号卫星微波大气探测载荷新增的118GHz探测频点对识别台风云系中冰相粒子分布具有潜在的应用能力。图5c中与台风云墙区冰粒子含量峰值对应的亮温衰减变化, 反映了云墙区的对流结构, 183GHz各通道代表了不同高度湿度场结构, 各通道亮温峰谷位置有向右的倾斜趋势, 表明云墙区分析点的对流轴倾斜; 而118GHz各通道亮温峰谷位置比较一致, 表明各层冷中心一致, 没有明显倾斜。尽管所有这些模拟分析结果都有待实际探测资料的验证, 但FY-3C星大气探测载荷在台风监测分析中的应用前景让人鼓舞。

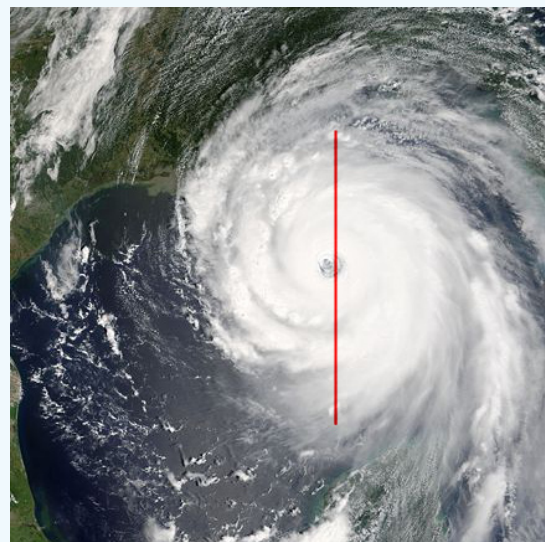


图4 Katrina台风可见光云图
Fig. 4 Katrina imager of visible band

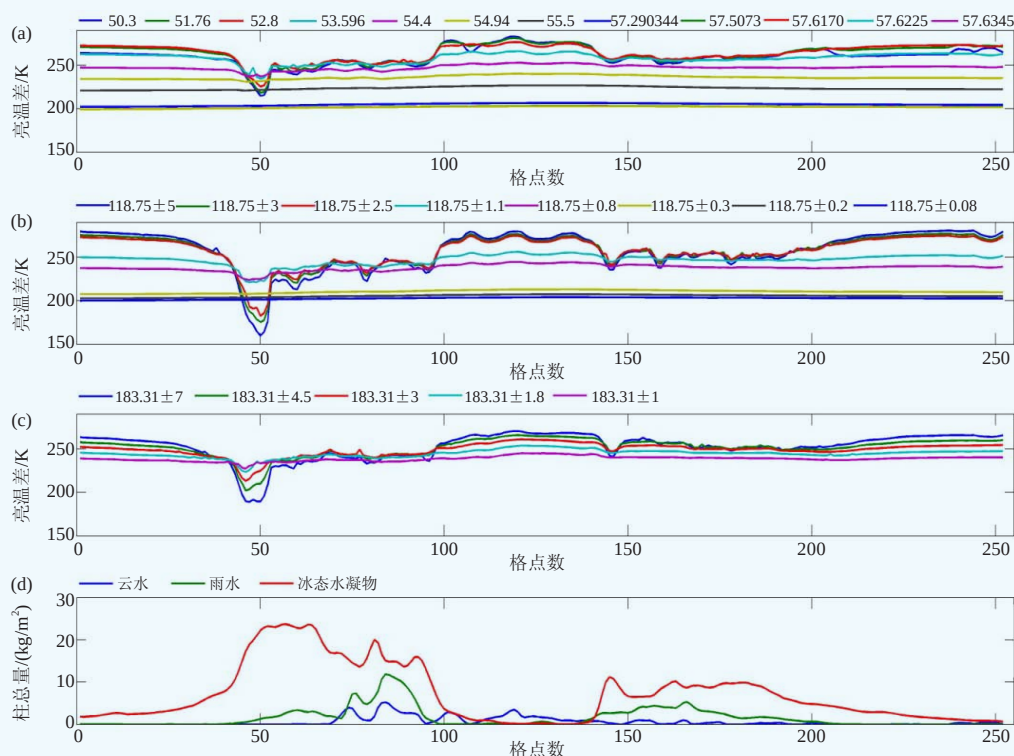


图5 MWTS-II和MWHTS吸收通道辐射响应模拟分析

(a) MWTS-II在50~60GHz频点吸收通道模拟亮温；(b) MWHTS在118GHz频点吸收通道模拟亮温；(c) MWHTS在183GHz频点吸收通道的模拟亮温；(d)与图a、b和c对应位置的冰态水、雨水和云水的等效柱含水量

Fig. 5 Analysis of channels brightness temperature character for MWTS-II and MWHTS

(a) MWTS-II at 50~60GHz; (b) MWHTS at 118GHz; (c) MWHTS at 183GHz; (d) equivalence water content for ice, rain and cloud

2.3 大气温湿廓线参数反演分析

大气温度和湿度是天气预报的两个基本要素。大气参数的垂直探测是通过对具有吸收特征的谱区进行观测完成的。这种观测得到了不同高度大气的微波辐射，然后，利用这些观测的辐射值通过反演可以获得大气参数垂直廓线。例如，如果要探测温度，先选择一个光谱区域，在这个谱区，大气的吸收是由一种在大气中充分混合的气体造成的，因而这种气体的浓度是已知因子，辐射的变化只是反映吸收气体的温度变化，代表了在某一高度范围内的加权平均温度，其权重是由大气透射率随高度变化而决定的，这个量就是权重函数，它取决于该气体的浓度、温度和压力垂直分布。

为了分析FY-3C星大气探测载荷大气温湿度廓线反演能力，选择统计反演方法来进行模拟分析。统计反演方法的关键是建立回归方程，计算相应的回归系数。一旦给定回归系数，根据卫星观测通道的亮度温度可以反演出大气温度和湿度廓线。该方法的优点是反演过程本身不需要计算复杂的大气透过率，因此计算速度快，结果稳定；其缺点是反演结果不能很好地

反映局部特征。对于统计反演方法而言，建立统计回归方程和计算回归系数是关键，而且必须选取具有代表性的统计样本库，这里根据气候数据集和辐射传输模式计算产生统计样本库。

大气温度和湿度廓线反演样本库是利用TIGR3（1125条大气廓线）和微波辐射模式首先计算出每条大气廓线的各个通道的大气透过率，进而利用辐射传输模式转换成辐射亮度温度而生成的。其中TIGR3的90%样本主要用于大气温度和湿度廓线反演回归系数的计算，而TIGR3的10%廓线主要用于独立样本的精度检验。

为了正确评价统计反演方法，本文利用TIGR3的10%廓线作为独立样本对大气温度和湿度反演廓线进行误差统计分析。图6a给出了单独使用54GHz和118GHz时温度廓线的反演精度，可以清楚地看出，尽管54GHz频点附近的辐射信号比118GHz频点的辐射信号要强许多，但辐射模拟时只考虑了风云三号A/B星的54GHz频点的4个通道辐射亮温进行计算，与118GHz的7个通道反演结果相比，118GHz附近7个通道的反演结果优于54GHz附近FY-3A/B-MWTS 4个通

道的反演结果。图6b给出了使用54GHz、118GHz和高频氧吸收参考频点425GHz3个频点的3种组合的温度反演精度，从图中可以清楚地看出，无论在大气的低层，还是中高层，联合使用3个频点，能够获得最佳

的温度反演结果，平均而言，118GHz与54GHz频点组合后大气温度廓线反演误差比单频点反演精度高，在1.0K左右。多频点大气温度探测通道的联合使用能够改善大气各个层次上的反演精度。

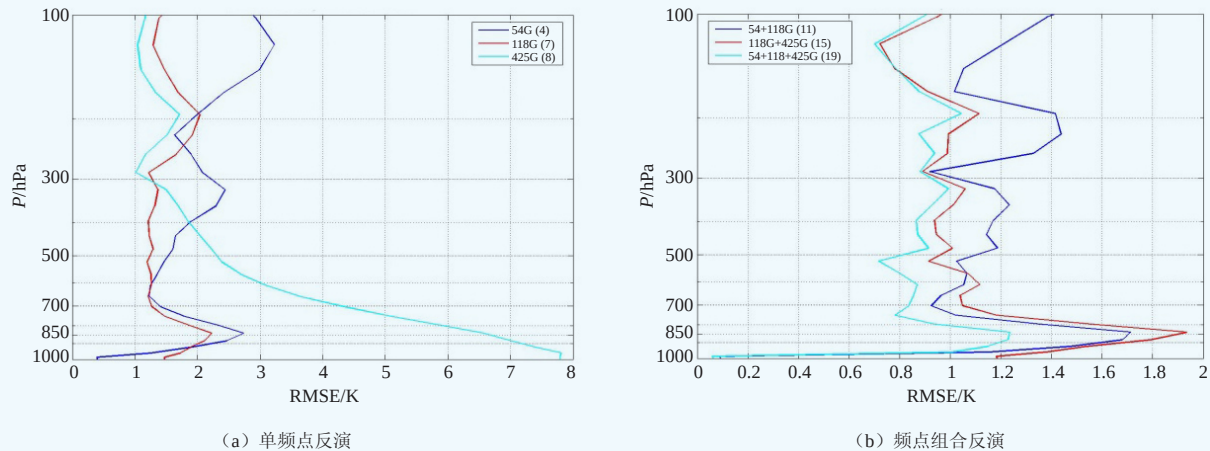


图6 大气温度反演的RMSE误差
Fig. 6 Retrieval RMSE of atmospheric temperature profile
(a) for single frequency retrieval; (b) for multi-frequency retrieval)

3 结语

FY-3C星大气探测载荷的功能、性能和设计指标，都优于风云三号A/B星。FY-3C星载微波大气探测系统，通过通道细分、探测频点增加和空间采样技术优化等，突破了我国星载微波探测载荷技术瓶颈，星载大气探测能力大为提升。

118GHz新探测频点的设计能改善对流层顶附近大气温度廓线反演精度，提升台风热力结构的星载微波探测能力，同时能改进微波湿温探测仪对大气湿度的探测精度。氧气和水汽吸收通道数量的增加，能有效改善FY-3C大气探测系统大气参数垂直探测精度，仪器测量精度的提高也保障了星载微波大气探测载荷的在轨探测精度。

与风云三号A/B星相比，FY-3C星微波湿温探测仪增加的89GHz窗区探测通道在完善了地气系统背景微波辐射探测的同时，也提升了星载微波大气探测载荷大气降水参数的探测能力。FY-3C星载大气探测载荷的遥感信息在未来业务应用中将发挥巨大作用。

参考文献

- [1] Yan B H, Weng F Z. Intercalibration between special sensor microwave imager/sounder and special sensor microwave imager. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2008, 46: 984-995.
- [2] JPL. AIRS project algorithm theoretical basis document Part 3: Microwave instruments. JPL D-17005, Version 2.1, 2000.
- [3] NOAA KLM User's Guide (Satellite and data description of NOAA's Polar orbiting satellites from NOAA-15 and later), Feb 2009.
- [4] Tripoli G J. A Nonhydrostatic mesoscale model designed to simulate scale interaction. *Mon Wea Rev*, 1992, 120: 1342-1359.
- [5] Tripoli G J, Smith E A. Introducing Variable-Step Topography (VST) coordinates within dynamically constrained Nonhydrostatic Modeling System (NMS). Part 1: VST formulation within NMS host model framework. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2014, 66: 28-57.
- [6] Hitchman M H, Buker M L, Tripoli G J, et al. Nonorographic generation of Arctic polar stratospheric clouds during December 1999. *J Geophys Res*, 2003, 108, 8325, doi:10.1029/2001JD001034.
- [7] Hitchman M H, Buker M L, Tripoli G J, et al. A modeling study of an East Asian convective complex during March 2001. *J Geophys Res*, 2004, 109, D15S14, doi:10.1029/2003JD004312.
- [8] Buker M L, Hitchman M H, Tripoli G J, et al. Long-range convective ozone transport during INTEX. *J Geophys Res*, 2008, 113, D14S90, doi:10.1029/2007JD009345.
- [9] Mehta A V, Smith E A, Tripoli G J. Relating convective and microphysical properties to large-scale dynamical and thermodynamical processes within Tropical Cyclones. *American Geophysical Union, Fall Meeting* 2008.
- [10] Mugnai A, Smith E A, Tripoli G J, et al. Explaining discrepancies in passive microwave cloud-radiation databases in microphysical context from two different cloud-resolving models. *Meteor Atmos Phys*, 2008, 101: 127-145.
- [11] Li J, Zhang S W, Jiang J S, et al. In-orbit performance of Microwave Humidity Sounder (MWS) of the Chinese FY-3 meteorological satellite. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2010 IEEE International. Honolulu, HI, 25-30 July 2010.
- [12] Wang Z Z, Li J, Zhang S W, et al. Prelaunch calibration of Microwave Humidity Sounder on China's FY-3A meteorological satellite. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, *Geoscience and Remote Sensing Letters*, IEEE, 2011, 8: 29-33.
- [13] 谷松岩, 王振占, 李靖, 等. 风云三号A星微波湿度计主探测通道辐射特性. *应用气象学报*, 2010, 21(3): 335-342.

FY-3C的掩星探测特点和初步结果

廖蜜^{1, 2, 3} 张鹏³ 杨光林³ 白伟华⁴ 孟祥广⁴ 杜起飞⁴ 孙越强⁴

(1 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2 南京信息工程大学, 南京 210044; 3 国家卫星气象中心, 北京 100081;
4 中国科学院空间科学应用中心, 北京 100190)

摘要: 全球导航卫星掩星接收机 (GNOS-Global Navigation Satellite System Occultation Sounder) 是风云卫星首次尝试掩星探测技术的仪器, 它能够同时兼容GPS (Global Positioning System) 和我国自主研制的北斗BDS (BeiDou navigation satellite) 信号。简要介绍了国际上掩星探测技术的发展情况, 以及我国的首个民用掩星接收机GNOS的仪器概况, 对其数据的主要处理过程进行了描述, 并利用欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 再分析资料进行对比分析, 结果显示GNOS-GPS 掩星中性大气折射率在5~25km有最优的探测精度, 标准偏差在1%以内, 中高纬度的精度好于低纬度地区。掩星探测的精度与国外同类掩星数据类似, 体现了GNOS掩星探测的价值, 但对于30km以上的高度, 精度还有待进一步提高。

关键词: FY-3C, 掩星探测, GNOS, 折射率

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.012

Status of Radio Occultation Sounding Technology of FY-3C GNOS

Liao Mi^{1, 2, 3}, Zhang Peng³, Yang Guanglin³, Bai Weihua⁴, Meng Xiangguang⁴, Du Qifei⁴, Sun Yueqiang⁴

(1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081 2 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044 3 National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081 4 Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract: This paper gives a brief introduction to the status of radio occultation technology implemented on FY-3C and describes the instrument mounted on it, GNOS (Global Navigation satellite system Occultation Sounder). The data processes are stated as well. To evaluate its performance, the refractivity profiles are compared by making use of ECMWF reanalysis in terms of global and different latitudes. The results show that the performance of GNOS-GPS is the best at the vertical range of 5-25km with the standard deviation below 1%, consistent with other occultation sounders. The expected result demonstrates that middle and high latitudes show less bias than lower areas, due to fewer multipath effects of moist atmosphere. These results illustrate that FY-3C has possessed a new sounding ability with the first trial, but still has much work to do to improve the precision at higher altitude.

Keywords: FY-3C, radio occultation technology, GNOS, refractivity

0 引言

无线电掩星探测技术, 是指在导航卫星与低轨卫星的相对运动过程中, 导航卫星发射的无线电信号切过大气层, 再被低轨卫星上的接收器接收。这样的信号不同于在真空中直线传播的信号, 由于它与大气的相互作用, 从而使其发生弯曲或延迟并包含大气层的信息^[1]。早期低轨卫星 (LEO) 上的接收机主要设计为接收美国GPS导航卫星发射的信号, 因此无线电掩星探测也叫GPS-LEO掩星探测, 随着其他类似导航卫星系统的完善, 如俄罗斯的GLONASS、欧洲

的GALIEO以及我国的北斗BDS, 为增加掩星观测的数量, 接收机可以设计为兼容接收多种导航卫星的信号, 这样的掩星观测技术也被统称为GNSS-LEO掩星观测。接收机设计为双频信号接收, 如接收GPS导航卫星信号的 $f_1=1573\text{MHz}$ 和 $f_2=1234\text{MHz}$ 波段, 记录信号相位和振幅随时间的变化, 同时结合导航卫星和低轨卫星高精度的位置和速度信息, 利用复杂的反演算法得到以时间为函数的大气或电离层的附加相位, 再反演为以碰撞高度为函数的弯曲角廓线以及几何高度为函数的折射率廓线, 最后结合背景场信息, 反演得到温湿压廓线^[2]。

早在20世纪60年代, 美国使用这样的技术用于行星大气的探测^[3], 后经模拟实验证实也能用于地球大

收稿日期: 2015年8月27日; 修回日期: 2015年12月29日
第一作者: 廖蜜 (1986—), Email: liaomi@cma.gov.cn

气的探测^[4]。随着星载发射机上的时钟性能逐步稳定且制造成本降低、卫星定位精度的不断提高,以及GPS全球定位系统的组建,无线电掩星探测技术用于地球大气的设想得以实现。20世纪90年代,以GPS/MET项目的开展为契机,掩星探测计划得以顺利实施^[5],并最终反演得到地球大气物理参数廓线,经验证该类廓线尽管水平分辨率较低(大约300km)、最低探测高度还不能伸展到近地面,以及像其他卫星探测一样无法得到直接的风场测量,但其具有的高垂直分辨率、高精度、全球分布,不受云、降水或气溶胶的影响,无需定标,与传统探空廓线完全独立等特征使得掩星探测资料有极大的应用价值^[6]。在GPS/MET的短暂试验之后,有着更先进探测技术的掩星计划随即开展,如德国CHAMP、阿根廷SAC-C。2005年,美国和中国台湾合作的COSMIC掩星探测星座,能够近实时、高精度、多数量地提供掩星廓线,为数值天气预报、天气气候分析等多领域的应用提供保障。此外,欧洲Metop极轨卫星上的掩星接收机GRAS也开始业务运行,进一步提高了高质量掩星数据的数量。这些掩星探测数据能够有效地应用到数值天气预报、天气和气候分析、电离层研究以及辐射定标等领域^[7-10]。

目前,在现有的掩星探测计划中,每天大约有3000条左右的掩星探测廓线,对于同化掩星资料用于数值天气预报而言,还未能达到同化预报的数据饱和和量。我国的掩星探测计划在2000年之后即开始筹备,及至2013年9月23日风云极轨气象卫星FY-3C发射时,搭载了我国第一个民用导航卫星信号接收机,即全球导航卫星掩星接收机GNOS,它可以同时接收GPS导航信号和BDS北斗导航信号用以掩星探测。作为风云卫星在掩星探测技术上的首次尝试,GNOS仪器及产品的现状是本文讨论的主要内容。

1 仪器介绍

全球导航卫星掩星接收机GNOS设计为采用国际上最先进的开环跟踪(Open-loop)技术^[11],采样频率为100 Hz,与锁相环跟踪相比,这一技术可跟踪信号至地面1~2km高度处。针对电离层的应用需求,对GNOS天线结构进行专门设计,监测范围最高可至800km。与国际上已经实施和计划中的掩星探测任务不同,GNOS除接收GPS信号以外,还兼容中国自主研发构建的北斗二代导航卫星信号,这一特点一方面将使GNOS摆脱对GPS信号的信赖,另一方面,也会使GNOS接收的掩星事件加倍。单一星座状态下,GNOS每天可得到的中性大气廓线和电子浓度廓线在500次左右,兼容北斗信号可使掩星数量增至1000次

左右。在目前的业务状态下,GPS信号的掩星廓线产品能够达到业务的近实时处理,但BDS信号处理的产品还不能近实时获取。

GNOS掩星探测仪由1个数据处理单元、3个射频处理单元以及3副天线组成,3副天线分别为前向掩星接收天线、后向掩星接收天线以及定位接收天线。卫星前进方向的天线及射频单元用于接收上升的大气和电离层掩星信号,后向方向的天线及射频单元接收下降的大气和电离层掩星信号,顶部定位接收天线及射频单元接收非掩星信号,用于低轨卫星的精密定轨。天线峰值增益为10dB。对于GPS信号GNOS设计了14个通道,其中8个用于定位,6个用于掩星探测;对于BDS它有8个通道,其中4个定位,4个掩星探测。详细仪器参数见表1。

表1 GNOS 仪器的主要参数
Table 1 GNOS instrument parameters

接收频率	GPS	$f_1=1575.42$ MHz $f_2=1227.60$ MHz
	BDS	$f_1=1561.098$ MHz $f_2=1207.14$ MHz
码型	GPS	L1C/A、L2C、L2P
	BDS	B1I、B2I
通道数	GPS	14 (8个定位观测, 6个掩星观测)
	BDS	8 (4个定位观测, 4个掩星观测)
采样率	定位	1Hz
	电离层掩星	1Hz
	大气层掩星	闭环 50Hz 开环 100Hz
载波相位精度	2mm	
伪距测量精度	≤ 30 cm	
实时定位精度	≤ 10 m	
晶振短稳	10E-12	
掩星天线峰值增益	10dBi (方位角 $\pm 35^\circ$, 水平角 $\pm 7.5^\circ$)	
等效噪声温度	250K	
动态范围	-145~-100dBm	
信号带宽	GPS P码	20.46MHz
	BDS	4.092MHz

2 数据处理流程介绍

图1是GNOS中性大气数据处理流程的概略图,显示了从原始观测数据到大气参数的主要处理过程。

2.1 精密定轨

精密定轨(POD)的作用即是精确确定卫星位置和速度以及GNSS接收机钟差,用于后续计算附加相位,它是后端反演产品精度的重要保证。在进行精密定轨时,需要输入的数据包括定位天线测量得到的L1和L2波段的伪距和载波相位、IGS(International GNSS Service)网站提供的GPS轨道和发射机偏离GPS时间的钟差信息、低轨卫星的姿态信息以及地球倾向性参数。GNOS的数据处理包括近实时和后处

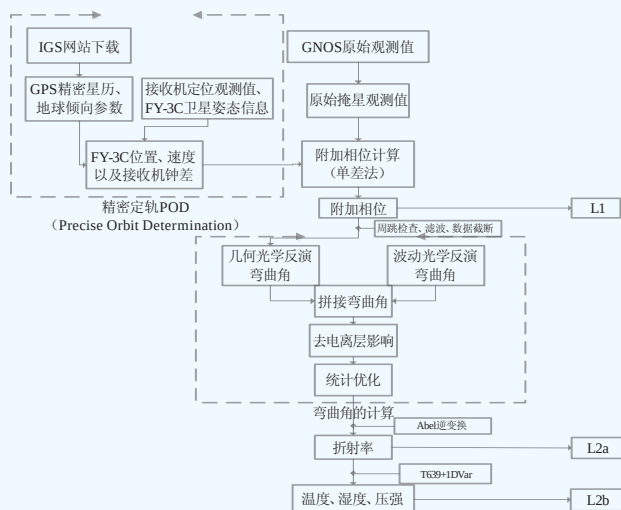


图1 GNOS 大气掩星数据处理流程
Fig. 1 Flow chart of GNOS atmospheric processing

理两条业务主线，在近实时过程中精密定轨用到的GPS轨道是IGS提供的超快速精密轨道信息，时效在3h内，而后处理则选用精度更高的轨道信息，时间滞后15d。经在轨测试，GNOS精密定轨的精度能够达到设计目标，即实时定位精度小于10m，速度精度小于0.1m/s，后处理定位精度小于20cm，速度精度小于0.2mm/s。

2.2 Level1 附加相位的计算

GNOS附加相位的计算目前采用的是通用算法—单差法^[12]，它在掩星探测的同时接收一个参考星的信息，通过掩星和参考星之间的差值，来进一步消减低轨卫星的钟差。

2.3 Level 2 产品反演

2.3.1 弯曲角

在反演之前，以时间为函数的附加相位将会被进行周跳检查和平滑处理，再利用导航卫星和低轨卫星之间的几何关系，依据几何光学反演方法，假设单一路径传播以及球对称的情况下，反演以碰撞参数为函数的弯曲角^[13]。几何光学方法在25km以上有较高的反演精度，但25km以下，由于垂直折射率梯度较大，射线会出现多路径效应，如继续采用几何光学反演则会带来较大的误差，因此在25km以下，采用波动光学（CT2）反演方法，将时间坐标转换到频率坐标系统下进行处理。

要得到中性大气的弯曲角、折射率及后续产品，还需考虑电离层对中性大气的影响。由于电离层粒子对不同无线电频率有不同的响应，而中性大气的弯曲角不随频率的变化而变化，因此采用一个简单的线性

组合，即可消掉绝大部分电离层的影响。但这种线性组合方法仍会带来一些残余影响，因此还必须采用最优估计的方法，结合气候背景场信息（MSIS），得到最优的无电离层影响的中性大气弯曲角廓线。

2.3.2 温湿廓线

掩星反演温湿廓线存在一个水汽模糊的问题，即不能同时反演得到温度和水汽廓线。如在干大气状态下，不考虑水汽的影响，那么就能直接得到干大气的温度产品，这样的假设在水汽含量较少的环境下适用，但在热带地区尤其是对流层低层，水汽含量丰富不能忽略的时候，这样的反演就存在较大的误差。考虑到这样的情况，GNOS反演温湿廓线采用的是一维变分的方法，即利用T639模式预报场作为背景先验信息，结合观测场和背景场，拟定观测误差协方差和背景误差协方差，反复多次迭代，最后同时反演出温度和湿度廓线。

3 产品精度

GNOS有多级产品，可以满足不同的应用需求，最直接的应用即是将弯曲角或折射率廓线经资料同化系统用于数值天气预报。弯曲角或折射率的精度可以最直接地反映GNOS仪器的探测性能和反演方法的有效性，而最后端的温湿廓线，由于已包含了预报模式的信息，它的精度已不再完全是掩星资料的精度。因此，直接简单而有效的衡量手段之一则是对折射率廓线进行精度验证。由于BDS产品尚未进入业务化，因此以下的验证结果只针对GNOS接收GPS信号的反演产品。

本文对2013年11—12月的近实时GNOS-GPS折射率产品，利用ECMWF的 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 格点、最高可达1hPa的37层标准气压层高度的再分析资料进行对比分析。尽管目前最理想的检验数据是传统的无线电探空资料，但是探空站点也存在一定的局限性，如分布不均匀，观测频次较低，站点数量较少，尤其是海洋、山地和极区等地，可能会带来较大的系统性误差。选择再分析资料作为检验数据的原因是格点均匀分布，与掩星观测的时空匹配样本较多，且有效值的高度较高，可以从不同角度反映掩星观测廓线的探测情况。

ECMWF再分析资料与GNOS掩星观测资料的时间差设定为 $\pm 1h$ ，将再分析资料插值到时间匹配后的掩星廓线的空间位置上，利用温湿压数据计算折射率变量，再将再分析资料的折射率和掩星观测的折射率廓线统一垂直插值到以200m为间隔的0~50km高度范围内，最后计算两者之间随高度变化的折射率相对差值。

图2为GNOS折射率和COSMIC折射率与ECMWF再分析资料的平均偏差（实线）和标准偏差（正负一个标准偏差，能更形象地展示掩星数据的误差范围，虚线所示）。图中右部为样本数量在每层的分布情况。平均偏差可以反映与ECMWF再分析资料的系统误差，标准偏差可以反映掩星探测折射率的随机误差及其稳定度。图中所示，掩星折射率与ECMWF再分析资料之间总体平均偏差很小，约 -0.1% ，反映了掩星资料几乎无偏的特性。在2km以下两者有相对明显的负偏差，在那样的垂直范围内，掩星信号的信噪比有所降低，并且由于对流层低层湿度较大、垂直密度梯度变化明显更容易出现掩星信号多路径效应，造成掩星折射率在对流层低层的负偏差和略大的标准偏差，这与国际上的同类掩星数据在低层的精度情况类似^[14]；而在35km以上，则除了掩星本身的观测误差外（信噪比低、热噪声、电离层残余影响等）^[15]，还与ECMWF再分析资料在高空的误差有关。对比COSMIC与ECMWF的比较结果，在30km以下，GNOS与COSMIC在平均偏差和标准偏差方面，曲线起伏特征吻合得较好，变化值差异较小；而在30km以上，标准偏差的差异逐渐加大，这可能与GNOS在高层信号微弱处的信噪比较低有关。此外，ECMWF再分析资料中已同化了COSMIC数据^[16]，两者有一定的相关性，高层大气折射率呈较小的绝对值，在相对差异的比较中相关就更加明显。

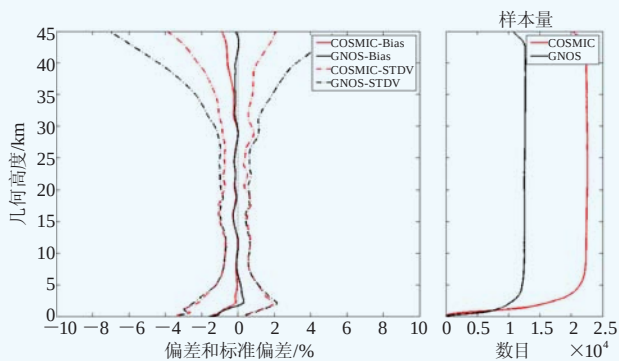


图2 GNOS和COSMIC折射率与ECMWF再分析资料比较的平均偏差、标准偏差以及参与计算的样本量

Fig. 2 The bias and standard deviation of the refractivity between GNOS and ECMWF reanalysis, and between COSMIC and ECMWF reanalysis, together with their collocated samples

总体来看，GNOS掩星探测精度最好的范围为5~25km，其标准偏差值在1%以内，这与利用再分析资料^[14]或探空资料^[17-18]分析CHAMP^[19]或其他同类掩星数据^[20]时得到的结论相同。GNOS折射率廓线与无线电探空的比较^[21]，由于受空间样本的限制，平均标准

偏差略大于1%，但也在设计指标2%以内。在2km以下的垂直范围内标准偏差稍大，约2.5%，这受制于低层湿气的多路径效应，而在30km以上的垂直范围，标准偏差逐渐增大，这除了受掩星探测的误差影响外，还由于在高层折射率绝对值较小，微小的变化会被相对差异放大。总的来说，这样的垂直误差特征与同类掩星资料的验证结果类似。

除了总体的掩星精度，分纬度带的精度结果如图3所示。由于掩星事件的全球均匀分布，可以将掩星廓线按高纬度（ 60° — 90° N， 60° — 90° S）、中纬度（ 30° — 60° N， 30° — 60° S）以及低纬度（ 30° N— 30° S）进行分析。可以看出，中高纬度的平均偏差和标准偏差差异不大，与全球平均的误差特征类似，且在5~25km的“黄金范围”标准偏差更小，约0.5%，这是由于除了在中高纬度样本量相对更多以外（受极轨卫星倾角的影响），水汽含量较少，信号受其干扰产生多路径效应的影响较小。但在低纬度则有一样的误差特点，平均偏差和标准偏差都更大，尤其是热带地区的对流层低层。此外在15~30km的垂直范围内，标准偏差和平均偏差都出现明显的“波动”特征，并在大约17km处有一个显著的反折。由上面的讨论可知，掩星探测在5~25km是探测性能最好的范围，这样的波动极有可能是ECMWF再分析资料引入的。再分析资料垂直层数有限，垂直分辨率较折射率数据来说低很多，对于对流层顶较大的垂直温度梯度，不能很细致地反映，因此在这样的垂直范围内，GNOS折射率数据与ECMWF再分析数据的对比出现较大的“波动”特征。

4 总结

GNOS-GPS各级反演产品已于2014年6月在卫星遥感数据服务网上向公众开放，而GNOS-BDS的业务化处理也将在后续BDS系统精密星历近实时部署完成后实现。本文在简单介绍了国际上掩星探测技术的发展情况后，对我国的首个民用掩星接收机GNOS的仪器属性以及其主要的产品反演过程进行了简要的描述。为量化地说明GNOS仪器的探测性能，以其折射率产品为检验对象，利用ECMWF再分析资料完成时空匹配后进行统计分析，结果显示，GNOS-GPS掩星折射率在5~25km有最优的探测精度，标准偏差可达1%以内，中高纬度的精度好于低纬度地区。此外，掩星探测资料由于有较高的垂直分辨率，较再分析资料更能反映对流层顶以上的垂直特征。以上掩星精度的特点与国外同类掩星数据类似，体现了GNOS掩星探测的价值，但对于风云气象卫星的首次尝试，掩星探测技术和反演方法还有待继续发展，尤其是对于

30km以上的高层, 精度还有待进一步提高。

致谢: 感谢ECMWF提供再分析资料和CDAAC提供COSMIC掩星数据。

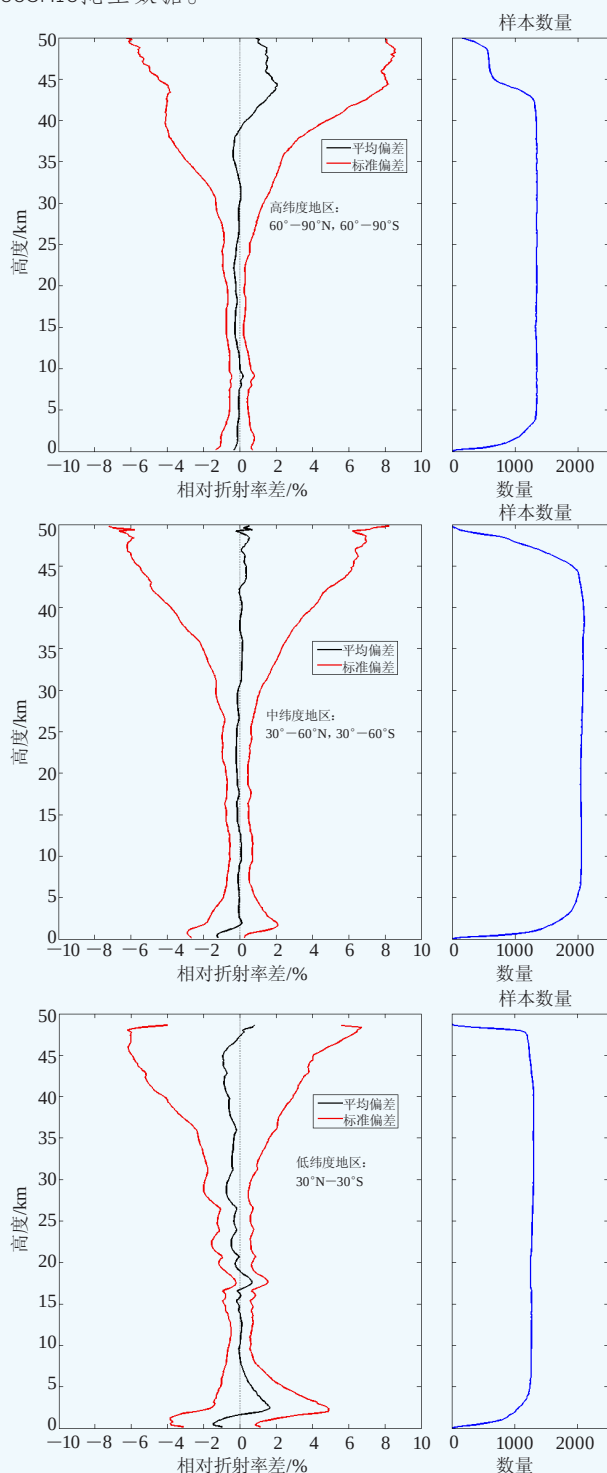


图3 GNOS折射率与ECMWF再分析资料在高、中、低纬度的平均偏差和标准偏差以及参与计算的样本量

Fig. 3 The bias and standard deviation of the refractivity between GNOS and ECMWF reanalysis in terms of high latitudes, middle latitudes and low latitudes, and together with their collocated samples

参考文献

- [1] Kursinski E R, Hajj G A, Bertiger W I, et al. Initial results of radio occultation observations of Earth's atmosphere using the Global Positioning System. *Science*, 1996, 271: 1107-1110.
- [2] Rocken C, Anthes R, Mxner M, et al. Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere. *J Geophys Res*, 1997, 102: 29849-29866.
- [3] Kliore A J, Hamilton T W, Cain D L. Determination of some physical properties of the atmosphere of Mars from changes in the Doppler signal of a spacecraft on an earth occultation trajectory. JPL, Technical Report, 1964, 32-674.
- [4] Phinney R A, Anderson D L. On the radio occultation method for studying planetary atmospheres. *J Geophys Res*, 1968, 73: 1819-1827.
- [5] Yunck T P, Liu C H, Ware R. A history of GPS sounding. *TAO*, 2000, 11: 1-20.
- [6] Anthes R A, Rocken C, Kuo Y H. Applications of COSMIC to meteorology and climate. *Terr Atmos Oceanic Sci*, 2000, 11(1): 115-156.
- [7] Kuo Y H, Sokolovskiy S V, Anthes R A, et al. Assimilation of GPS radio occultation data for numerical weather prediction. *TAO*, 2000, 11: 157-186.
- [8] Schreiner W, Sokolovskiy S, Hunt D, et al. Analysis of GPS radio occultation data from the FORMOSAT-3/COSMIC and Metop/GRAS missions at CDAAC. *Atmos Meas Tech*, 2011, 4: 2255-2272.
- [9] Anthes R A. Exploring Earth's atmosphere with radio occultation: contributions to weather, climate and space weather. *Atmos Meas Tech*, 2011, 4: 1077-1103.
- [10] Chen X, Zou X. Postlaunch calibration and bias characterization of AMSU-A upper air sounding channels using GPS RO Data. *J Geophys Res*, 2014, 119: 3924-3941.
- [11] Bai W H, Sun Y Q, Du Q F, et al. An introduction to the FY3 GNOS instrument and mountain-top tests. *Atmos Meas Tech*, 2014, 7: 1817-1823.
- [12] Schreiner W, Rocken C. Quality assessment of COSMIC/FORMOSAT-3 GPS radio occultation data derived from single- and double-difference atmospheric excess phase processing. *GPS Solut*, 2010, 14:13-22.
- [13] 胡雄, 曾杭, 张训斌, 等. 大气GPS掩星观测反演方法. *地球物理学报*, 2005, 48(4): 768-774.
- [14] Kuo Y H, Wee T K, Sokolovskiy S, et al. Inversion and error estimation of GPS radio occultation data. *J Meteor Soc Japan*, 2004, 82: 507-531.
- [15] Li Y, Kirchengast G, Scherllin-Pirscher B, et al. A new dynamic approach for statistical optimization of GNSS radio occultation bending angles for optimal climate monitoring utility. *J Geophys Res*, 2013, 118, doi:10.1002/2013JD020763.
- [16] Poli P, Healy S B, Dee D P. Assimilation of Global Positioning System radio occultation data in the ECMWF ERA-Interim reanalysis. *Q J R Meteor Soc*, 2010, 136: 1972-1990.
- [17] Kuo Y H, Schreiner W S, Wang J, et al. Comparison of GPS radio occultation soundings with radiosondes. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L05817, doi:10.1029/2004GL021443.
- [18] Poli P, Ao C O, de la Torre Juárez M, et al. Evaluation of CHAMP radio occultation refractivity using data assimilation office analyses and radiosondes. *Geophys Res Lett*, 2003, 30 (15), 1800, doi:10.1029/2003GL017637.
- [19] Hajj G A, Ao C O, Iijima B A, et al. CHAMP and SAC-C atmospheric occultation results and intercomparisons. *J Geophys Res*, 2004, 109: D06109, doi:10.1029/2003JD003909.
- [20] 杜明斌, 杨引明, 丁金才, 等. COSMIC反演精度和相关特性的检验. *应用气象学报*, 2009, 20(5): 586-593.
- [21] 廖蜜, 张鹏, 毕研盟, 等. 风云三号气象卫星掩星大气产品精度的初步检验. *气象学报*, 2015, 73(6): 1131-1140.

风云三号卫星红外高光谱探测技术及潜在应用

漆成莉¹ 顾明剑² 胡秀清¹ 吴春强¹

(1 中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 国家卫星气象中心, 北京 100081;

2 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 高光谱大气探测仪具有高光谱分辨率、高灵敏度和高精度光谱辐射定标等特点, 在大气温湿度廓线反演、数值天气预报同化、气候变化研究以及大气痕量气体探测等应用上有显著的优势。我国风云三号极轨气象卫星的FY-3A/B/C三颗卫星上成功装载了自主研制的通道式红外探测仪器—红外分光计 (IRAS), 获取了从可见光到红外波长范围内26个通道的辐射观测, 并应用于资料同化、全球大气温度和水汽廓线反演等。从FY-3D星开始将装载红外高光谱大气探测仪以替代IRAS, 标志着红外高光谱大气垂直探测系统新纪元的开始。以风云三号卫星红外高光谱大气探测仪为例, 介绍了卫星红外高光谱探测技术的进展和地面应用系统预处理过程的关键技术环节, 给出了红外高光谱资料的潜在应用, 并对在数值天气预报同化和大气探测应用方面的难点问题进行了分析和探讨。

关键词: 风云三号, 高光谱干涉仪, 资料同化

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.013

FY-3 Satellite Infrared High Spectral Sounding Technique and Potential Application

Qi Chengli¹, Gu Mingjian², Hu Xiuqing¹, Wu Chunqiang¹

(1 Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081 2 Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083)

Abstract: High spectral infrared sounders possess distinct advantages in application of atmospheric temperature and humidity profiles retrieval, numerical weather prediction (NWP), climate change study and trace gas measurement due to high spectral resolution, low radiometric noise and high spectral and radiometric accuracy. Infrared Atmospheric Sounder (IRAS) was successfully launched onboard FY-3A/B/C satellites. It measures 26 channels of radiance from visible to infrared spectral range and was used in data assimilation, global atmospheric temperature and humidity profile retrieval, et al. A high spectral infrared atmospheric sounder (HIRAS) designed and manufactured completely by China will be carried onboard FY-3D, marking a new epoch of infrared high spectral vertical sounding system in China. FY-3D /HIRAS was taken as an example, and satellite infrared high spectral sounding technique and key preprocessing issues of high spectral infrared sounders were summarized as well as analysis and discussion of difficult problems that exist in high spectral infrared data application of NWP and climate study.

Keywords: FengYun 3, high spectral sounder, data assimilation

0 引言

红外探测仪器是利用热红外波段对地球大气垂直分布、地表等参数遥感的一类仪器, 其共有特点是根据地球大气中不同波长发射辐射的平均自由程不同, 其辐射贡献的峰值高度层也不同, 即权重函数位于不同高度大气层, 在大气窗区及气体吸收带翼区和中心

设置不同的通道来探测大气垂直结构, 采用的分光技术主要有滤光片分光、光栅分光和干涉分光等。主要遥感参数包括三维大气温度、湿度廓线, 大气状态和云、气溶胶、臭氧等大气成分的三维垂直结构, 以及地气系统的辐射收支等。这类仪器观测资料和产品主要应用在数值天气预报、空气质量监测、气候变化监测、全球辐射能量收支、大气微量气体变化等领域。

分光技术是红外大气探测仪器研制过程的关键技术, 可以采用滤光片轮、光栅或干涉技术来实现, 并衍生出不同技术方案的探测仪器。滤光片分光仪器光谱分辨能力 (通道响应函数中心波长 λ 和通道响应函

收稿日期: 2015年9月17日; 修回日期: 2015年12月28日

第一作者: 漆成莉 (1979—), E-mail: qicl@cma.gov.cn

资助信息: 国家高技术研究发展计划 (2015AA123701); 国家自然科学基金 (41275104); 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室开放课题

数半峰全宽 $\Delta\lambda$ 的比值 R)仅为50~100左右,光栅和干涉分光仪器的光谱分辨能力要高于1000。

世界上第一个探测类仪器—光栅分光仪,也称红外辐射分光仪(SIRS-A),于1969年4月载于美国雨云3号试验天气卫星(NIMBUS-3)^[1]。SIRS-A在15 μm CO_2 吸收带选择8个红外谱段,星下点水平分辨率259km,用于探测大气温度廓线。虽然SIRS-A资料的垂直分辨率低,瞬时观测视域很大,大约90%以上的测值受到云的干扰,但仍然给当时的天气分析/预报业务带来了改进效果。HIRS(高分辨红外辐射探测仪)为跨轨扫描,且具有较高分辨率的红外辐射探测器,由20个通道组成,即19个红外通道和1个可见光通道^[2]。其中位于15 μm CO_2 吸收带的7个通道和位于4.3 μm CO_2 吸收带的5个通道,主要用于探测大气温度的垂直分布;位于6.3 μm H_2O 吸收带的3个通道,主要用于探测大气湿度的垂直分布;位于11~12和3.7~4.1 μm 的6个窗区通道,主要用于探测地表温度和云检测。HIRS的星下点水平分辨率为17.4km。美国静止气象卫星(GOES)上携带的大气红外探测仪是GOES-Sounder,其通道设置类似于NOAA卫星上的HIRS^[3]。

我国2008年及之后成功发射的FY3A/B/C星上均装载了滤光片式红外大气探测仪器—红外分光计(IRAS)。IRAS在0.69~15 μm 的光谱范围内设置了26个通道,前20个通道设置类似于NOAA/HIRS仪器,另外增加了6个可见近红外通道,用于大气温湿度廓线的探测^[4]。

1987年,世界气象组织(WMO)曾指出,只有当全球大气温度、湿度探测的精度达到无线电探空的水平后,才能对数值天气预报做出重大的改进。无线电探空的精度相当于在对流层大气温度的均方根误差(RMS)精度达到1K,大气湿度的精度达到10%,大气廓线的垂直分辨率达到1km。与需求相比,通道式探测仪器由于受滤光片式分光技术的限制,光谱和辐射测量精度不足,约2.0K和20%的反演精度和几千米的探测垂直分辨率已经基本上达到了滤光片式大气垂直探测仪的能力的上限,无法满足发展中的数值天气预报的需要,因此人们把发展红外高光谱技术放到了首位。

1 红外高光谱仪器的发展

实现高光谱分辨率红外大气探测的技术途径主要有两种:光栅技术和干涉技术。实践表明,在星上实现光栅技术成本高,技术难度更大,这是因为光栅分光降低了入射到仪器探测器部分的光通量,要求红外探测器具有极高的探测灵敏度。光栅的不均匀性,使得探测得到的上千个光谱通道需要逐一进行星上光

谱和辐射定标,极大地增加了仪器设计和资料预处理的难度。星上环境对光栅造成的热变形效应,更给探测资料的处理引入了大量的随机误差,降低了资料反演的精度。干涉分光的优势之一是高光通量,它通过Fourier变换空间或时间序列调制的干涉图,恢复得到高光谱分辨率的大气准连续吸收光谱。同时,光路设计上不会对入射光束过多地分束,也不会降低仪器探测的光通量。

目前有三个高光谱大气探测仪器在轨运行,AIRS是首个在卫星上实现真正意义上的高光谱分辨率红外大气探测的仪器,于2002年5月4日载于美国NASA EOS-Aqua卫星,红外3.7~15.4 μm 范围内有2378个通道,光谱分辨能力大于1200,绝对辐射测量精度优于0.2K,跨轨扫描幅宽2650km,星下点分辨率13km,用于探测大气温、湿廓线、臭氧总量等。2006年10月19日,欧洲气象卫星应用组织(EUMETSAT)的第一颗极轨气象卫星Metop-A把法国研制的迈克尔逊干涉分光技术的高光谱红外大气探测器IASI带入太空。IASI除了分光技术不同于AIRS外,最大特点是实现了对地球大气在3.62~15.5 μm 范围的连续光谱观测,光谱分辨率0.5 cm^{-1} ,光谱采样0.25 cm^{-1} ,共8461个通道,星下点分辨率12km,跨轨扫描幅宽2052km。利用IASI高分辨率连续光谱观测,还可提取大气其他成分,如 CO 、 N_2O 、 CH_4 、 SO_2 。2011年10月28日,美国新一代极轨气象卫星系列JPSS的准备星NPP(后更名为Suomi NPP)把高光谱红外探测器CrIS带入太空,采用干涉分光技术,三段式光谱覆盖探测(0.92~15 μm)共1305个通道,在长、中、短波段的光谱分辨率分别为0.625 cm^{-1} 、1.25 cm^{-1} 、2.5 cm^{-1} ,跨轨扫描幅宽2200km,星下点分辨率14km^[5]。欧洲的高光谱分辨率红外大气探测仪(IRS)是为装载到EUMETSAT新一代三轴姿态稳定的静止气象卫星MTG(计划于2017年左右发射)系列而研制的,以实现同一地域的高频次、高垂直分辨率的大气温、湿廓线等探测。

中国正在研制并将装载到计划于2016年发射的FY-3D和新一代静止气象卫星FY-4的高光谱红外大气探测器,分别称HIRAS、GIIRS,这两个仪器均采用干涉分光技术。为了让用户深入了解红外高光谱仪器,推动卫星数据的应用,本文重点以风云三号红外高光谱大气探测仪为例,介绍红外高光谱仪器的组成及观测原理,以及数据处理关键技术和难点,探讨红外高光谱仪器的潜在应用和在应用中需要进一步攻关的技术难题。

2 FY-3D红外高光谱大气探测仪

2.1 仪器简介

FY-3D红外高光谱大气探测仪（HIRAS）将是FY-3极轨气象卫星系列上的首个高光谱红外探测仪器，由中国科学院上海技术物理研究所研制，这是我国自主研发、制造的红外高光谱精密光机遥感仪器。仪器采用二维指向补偿、干涉仪前置、冷光学、大冷量辐射制冷、小面阵红外探测器技术路线，实现与国际同类仪器相当的光谱分辨能力和系统灵敏度等高性能探测能力^[6]。表1和2给出了该仪器的主要技术性能设计指标。

表1 FY-3D/HIRAS红外高光谱大气探测仪技术指标
Table 1 FY-3D/HIRAS instrument characteristics

参数	特征
扫描周期	10s
视场角	1.1°
像素/扫描线	58
最大扫描角度	±50.4°
辐射定标精度	0.7K
光谱定标精度	7ppm
光轴星下点指向偏差	<±0.25°

表2 FY-3D/HIRAS红外高光谱大气探测仪通道光谱特征参数
Table 2 FY-3D/HIRAS spectral characteristics

波段	光谱范围 (cm ⁻¹)	光谱分辨率 (cm ⁻¹)	灵敏度 (用户) (NEAT@250K)	通道数目
长波IR	650~1136 (15.38~8.8μm)	0.625	0.15~0.4K	778
中波1 IR	1210~1750 (8.26~5.71μm)	1.25	0.1~0.7K	433
中波2 IR	2155~2550 (4.64~3.92μm)	2.5	0.3~1.2K	159

红外高光谱大气探测仪在轨期间有三种工作模式，即发射入轨初期模式、对地扫描模式和定标模式。发射入轨初期，仪器需要进行干涉仪动镜解锁，防污罩加热去污，在辐射制冷温度达到工作温度后，进行干涉仪星上光校。对地扫描模式是红外高光谱大气探测仪的常规观测模式，此模式下扫描镜跨轨扫描工作，共观测29个驻留视场，每个视场包括4个像素。红外高光谱大气探测仪仪器设计采用多元小面阵并行观测，可以同时延长干涉图的形成时间，并且尽可能多的形成对地观测瞬时视场。三个小面阵同时观察地面的同一目标视场，各波段的小面阵探测器同时观测4块不同目标区域，每一个探测元对地观测张角为1.1°，对应星下点地面瞬时视场大小约为16km，像元之间地面距离26.17km（图1）。探测器将干涉光学产生的干涉信号转换为电信号，经过信号处理与放大，并数字化后传输给卫星数据传输系统。定标模式指每条扫描线均扫描两次冷空间和两次内黑体定标源进行辐射定标。地面大气辐射经45°扫描镜

扫描后，反射进入干涉仪子系统，由分束器分成两路相干光，一路由分束器反射的光线经过定镜反射后，再次透射分束器；另一路分束器透射的光线经过动镜反射后，回到分束器，并被分束器表面反射，动镜在往复运动控制下，两路光线的光程差随动镜的运动位置不同而不同，从而使得干涉光光强信号随光程差而发生变化，动镜一次平稳运动可以得到一幅目标的双边干涉图。入射能量经过干涉子系统后形成干涉光进入望远镜系统，望远镜系统收集光束后进入分色片将入射能量按光谱分开，分别使用长波分色片和中波分色片分离长波通道（8.8~15.38μm）、中波1通道（5.71~8.26μm）和中波2通道（3.92~4.64μm）的辐射信号，并经透镜汇聚到探测器上。

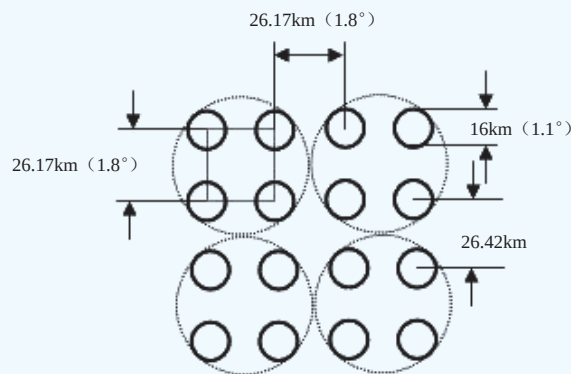


图1 探测器对应地面视场图

Fig. 1 HIRAS detector ground projection of field of view size

在干涉系统中使用标准参考光谱为干涉光谱信号提供光谱谱线基准和电子学采样信号的时间基准。标准参考光谱使用的是长寿命的高稳频激光器作为信号源，激光信号与目标信号共用干涉光路，在动镜运动时，同时对激光信号和地气系统的目标信号进行调制，使用硅光探测器检测激光的干涉信号，该干涉信号的变化严格对应干涉系统的光程差变化，由于共用动镜运动系统，由此得到的激光干涉信号就提供了对目标干涉图进行等光程差采样基准，为目标光谱图的准确反演提供了技术保障。

2.2 仪器技术方案

红外高光谱大气探测仪系统主要由光学系统、干涉仪子系统、探测器子系统组成。光学系统作为收集和分析地球和大气辐射的部件，负责将观测目标的红外辐射信号接收并汇聚到探测器上，包括扫描、干涉分光、汇聚、分色、再汇聚等一系列过程。望远镜系统位于干涉仪子系统之后，主要功能是将干涉调制信号收集汇聚。中继光学系统功能是将望远镜系统汇聚的光按系统要求的波段进行分色并使各波段的光进入

对应通道，包括转折反射镜、红外窗口，分色片、视场光阑等。HIRAS的探测扫描是通过二维扫描机构带动扫描镜进行工作，扫描镜在力矩电机的驱动下做跨轨扫描运动，在扫描镜驻留观测时，直线电机驱动扫描镜完成沿轨补偿运动。干涉仪的主要功能是使输入的红外辐射产生自调制，接收遥控指令，向外输出红外干涉信号、采样控制信号以及干涉仪状态遥测信息等。干涉仪包括红外干涉和激光干涉两个组成部分。

红外高光谱探测仪要求在地面模拟真空低温环境进行光学性能的装校和测试，其分色片及各通道组件需置于低温工作环境，探测器组件工作于85K。长波探测器采用HgCdTe探测器，中波1采用HgCdTe探测器，中波2采用Insb探测器。3个红外波段的探测器分别封装成3个组件，每个探测器组件包含4元探测器。制冷系统对红外探测器和中后继光路制冷，以提高整机灵敏度和减少仪器背景辐射影响。

3 地面预处理关键技术

红外高光谱大气的探测仪采用复杂的光机结构，具备较强的星上处理功能，同时需要地面和卫星系统密切配合，实现多环节预处理和光谱辐射定标处理，才能生成高精度的L1产品。针对地面数据处理过程，核心处理技术包括星上和定标前处理技术、精准辐射定标，精准光谱订正、预处理产品精度验证和质量控制等（图2）。针对红外高光谱大气探测仪获取的地球场景和定标目标原始干涉图数据，进行星上模拟信号采样、噪音检测、压缩、滤波抽样、脉冲计数等处理技术研究。干涉仪精准辐射定标是针对黑体、冷空等定标源的周期观测，深入研究定标源可能受到的太阳和月亮污染并进行精确订正；精确引入仪器背景辐射模型和黑体发射模型；并基于二次谐波能量分析从干涉信号中识别出非线性特征；基于干涉图的非对称性研究相位误差导致的复数定标方法。由于干涉仪辐射与光谱的紧密耦合问题，需要开展干涉仪精准光谱订正，在轨光谱订正处理包括仪器线型函数ILS的确定和波长位置的确定，激光器频率稳定和影响ILS函数的探元离轴问题，离线光谱订正需要采用辐射传输模拟地球目标光谱来订正仪器的固定光谱偏差。

一个新型仪器的观测数据必须在对其观测误差、仪器噪声等特征有了足够的了解和评估后才能给用户使用，尤其是气候监测和数值预报同化用户。因此经过辐射定标和光谱定标等一系列预处理转换后的卫星观测结果还需要借助可靠的评估方法进行精度验证，基于偏差分析结果实现对定标参数优化以及数据质量的控制。仪器观测系统的偏差来源于多个方面，如定标过程的不确定性（如太阳污染、探测器非线性

等），对在轨光谱响应函数变化的未知性，偏差特性还会随时间和扫描角度的变化，随轨道和季节变化等，只有突破了红外高光谱干涉仪高精度定标的一系列关键技术，才能加深气象卫星用户和仪器研制方对干涉仪器的工作原理、数据特征、精准定标等方面的技术理解，生成高光谱干涉仪高精度一级产品，提升我国在高光谱仪器研制和资料处理及同化应用方面的能力，确立我国在相关技术上的国际地位。

4 红外高光谱资料的应用展望

十多年来，国内外学者在星载红外高光谱大气探测资料应用方面开展了大量研究工作，取得了许多有益的进展^[7]。这里基于已有研究，探讨我国风云三号卫星红外高光谱大气探测仪器资料的潜在应用能力和需要攻破的技术难点。

4.1 数值天气预报应用

我国红外高光谱探测仪器的首要应用目标是数值天气预报（NWP）同化应用，即通过观测的大气发射/吸收光谱来得到高垂直分辨率、高精度的大气温湿度廓线信息作为NWP的初始场。为了建立初始场的最优估计，利用同化技术把观测与预报模式结合起

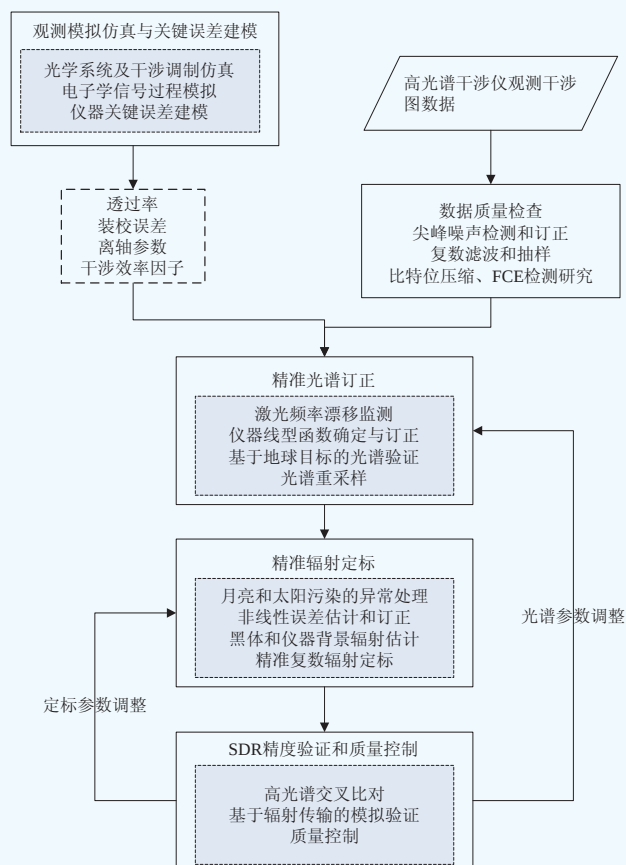


图2 HIRAS地面预处理关键技术路线图
Fig. 2 HIRAS ground processing key technology route chart

来,如今最常用的是四维变分同化技术(4DVAR)。卫星探测类仪器如微波仪器、红外高光谱仪器成为支持数值预报的全球观测系统的重要部分,在过去二十年里迅速成为对NWP影响最大的观测资料,超过当前同化的任何其他观测资料^[8]。全球多个数值天气预报中心报告显示,目前的业务同化预报系统中,就单个仪器资料对模式的贡献率,高光谱红外探测仪对同化预报效果的影响最大。对NWP应用而言,位于 $645\sim 800\text{cm}^{-1}$ ($15.5\sim 12.5\mu\text{m}$) 光谱区域范围内的 CO_2 吸收线主要提供的是大气温度廓线信息;位于 $800\sim 1200\text{cm}^{-1}$ ($12.5\sim 8.3\mu\text{m}$) 光谱区域是大气窗区,包含了地表温度和近地面的水汽信息; $1200\sim 1600\text{cm}^{-1}$ ($8.3\sim 6.3\mu\text{m}$), 提供了水汽的垂直分布信息。

此外,由于高光谱仪器的光谱分辨率高(超过1000个通道),即大气垂直分辨率高,以及低噪声水平,因此包含了比以前的通道式业务垂直探测仪器多一个量级以上的大气结构信息。目前制约红外高光谱仪器观测同化应用的难点之一是有云资料的同化,大部分NWP中心可以同化使用简单云模式模拟计算的有云视场观测,如薄云、完全有云、高云视场,而对复杂的多层云的情况还未找到可行的解决方案,仍然是一个活跃的研究方向^[9]。同化卫星观测的难点之二是水汽观测的同化效果很不显著,原因是有仪器对水汽含量的非线性响应,以及水汽含量的高时空变化性。要开发出更先进的可以同化有云和水汽观测的方案,需要数据同化方案、辐射传输模式以及NWP模式本身均取得重要进展^[10-11]。最近有研究直接利用干涉图观测数据进行产品反演,例如直接用干涉图来代替选取的部分独立通道辐射进行水汽反演,则能得到更好的垂直分辨率和精度^[12-13]。

4.2 天气预警应用

在大气的红外窗口区存在很多较弱的水汽和 CO_2 吸收线,这些吸收线光谱区的辐射能够提供检测对流层低层热力结构变化的关键信息,红外高光谱仪器的光谱分辨率提高后,不仅可以获取更高精度的大气参数,更重要的是提高了大气探测在垂直方向上的分辨率,这给卫星资料应用提供了很大优势。AIRS仪器在轨工作后,CIMSS开发了可表征大气不稳定状态的几种大气不稳定度指数产品,分析其在中尺度大气环流场和突发性强对流天气中的应用个例。在强风暴发生前,卫星高光谱大气探测器观测的大气湿度和温度的水平和垂直分布信息能够提供更丰富的中尺度环流信息,如大气不稳定度和边界层结构等与风暴触发相关的指标,这些指标对于强风暴的邻近预报和短期预报都非常重要^[14]。大气不稳定指数可以使用台站资

料、数值预报输出、再分析资料以及卫星反演的温湿度廓线,与云参数、大气可降水量等卫星产品结合使用,可为强对流事件提供更丰富的预警信息。Li等^[14]用WRF模式模拟低光谱ABI和高光谱仪器HES红外辐射,在垂直方向上,HES的垂直分辨率远高于ABI,在红外区有超过1000个光谱通道,能准确体现湿空气向上抬升并与干空气混合的过程,大大提高了对水平和垂直方向上大气温度和湿度信息时间演变的刻画精度,对强对流天气的邻近预报十分有利。

目前国际上在轨的红外高光谱仪器具有相似的分辨率和探测精度,综合使用这些资料可以提高卫星资料的时间和空间覆盖。我国风云三号和风云四号气象卫星上的红外高光谱大气探测仪器(GIIRS)将会协同观测,提供更高频次的大气温湿度廓线和不稳定度指数产品,为改进天气预警服务提供重要信息。

4.3 大气成分反演应用

红外高光谱数据的第三个重要应用目标是大气成分反演和监测,可以反演痕量气体和气溶胶的垂直分布廓线,如臭氧、一氧化碳、甲烷等,在空气质量监测中显示了极大的潜力,而且可以提供长期连续的大气成分记录用于研究其年际变化^[15]。红外 $15.3\mu\text{m}$ 、 $4.3\mu\text{m}$ 波段是很强的 CO_2 吸收带,加之高光谱仪器的信噪比表现和光谱分辨率都比过去通道式红外观测跨越了一个量级以上,基于红外高光谱观测可以得到高层大气中 CO_2 信息。AIRS、IASI观测光谱覆盖了 CH_4 红外 $7.6\mu\text{m}$ 、 $3.7\mu\text{m}$ 波段,能用于大气中 CH_4 浓度时空分布变化监测^[16], $4.6\mu\text{m}$ 波段观测也可以用于CO时空分布变化的遥感监测。

红外高光谱观测还可以用于测量一些过去认为从太空不能探测到的活性气体种类的浓度,如氨气^[17],以及用于一些近实时突发事件的探测,如火灾和火山爆发等。大气成分的反演方法有基于目标成分的敏感性波段观测数据,通过对目标成分廓线的非线性迭代,最终实现模式模拟光谱与观测光谱拟合,得到最可能的大气成分的廓线信息;也可以基于神经网络方法,通过构造合适的网络结构,快速提取卫星大气参数。但实现上述诸多应用的先决条件是仪器光谱辐射的精准定标,对仪器辐射精度要求十分苛刻。大气成分的监测应用有可能成为风云三号卫星红外高光谱大气探测仪器的又一潜在应用目标。

4.4 在气候研究上的应用

目前在轨的红外高光谱观测仪器(AIRS, IASI, CrIS)的性能和定标评估结果显示它们完全有能力用于气候研究。如AIRS资料可以帮助理解和模拟水汽和云等气候分量在大气水文循环过程中的作用,证实

了水汽对气候变暖的响应。2002年以来, AIRS观测数据显示海面温度与250hPa高度的水汽含量呈正相关; AIRS数据也被用来分析2007年异常的北极冰层融化, 分析深对流云(DCC)的发生频率与热带纬向平均表面温度的相关性等。IASI观测已经用于多个重要气候变量(ECVs)的研究及其他重要气候数据库的建立, 这些气候变量包括温度和水汽廓线、云和气溶胶、人为温室气体以及臭氧、地面温度和比发射率等。当数据记录累积超过5年以上, 即可用于研究一些气候变量事件, 如ENSO、赤道辐合带(ITCZ)振荡、热带大气季节内振荡(MJO)事件等。对于全球气候观测系统(GCOS)计划最重要的是构建均匀的、稳健的、长期的气候变量数据记录。红外高光谱仪器的绝对辐射定标精度可达0.2K, 辐射稳定性在 10^{-3} K/a量级, 频率稳定性优于5ppm, 具有很好的探测灵敏度。只要红外高光谱仪器提供的长时间序列的辐射定标数据记录令人满意, 一定能为全球气候变化和模式预测研究做出重要贡献。无疑风云三号卫星的红外高光谱大气探测仪器将为气候研究提供新的重要数据源。

4.5 卫星红外辐射基准的应用

当初建立全球天基交叉定标系统(GSICS)的首要目标之一是为静止轨道成像仪器的红外通道开发出交叉定标产品, 满足其全球统一辐射基准的应用^[18]。由于红外高光谱探测仪器光谱覆盖范围宽, 光谱分辨率高, 辐射一致性和光谱定标精度能达到0.1K和5ppm以下, 因此一直被GSICS列为全球在轨统一的红外辐射交叉定标源。GSICS最初基于Aqua/AIRS作为参考源开发GEO-LEO红外交叉定标算法, 当Metop/IASI发射上天, 其在连续光谱覆盖上更有优势, 从而被采纳为新的红外交叉定标基准源。除了作为GSICS静止卫星红外辐射基准源, 高光谱探测仪还能用于同一平台上的极轨卫星红外通道的辐射基准, 由于同一平台的观测时间同步、空间配准更准确, 因此能获得更多种类的样本用于订正其他仪器红外通道的观测偏差, 包括随角度变化和随轨道变化的误差。即将在轨运行的风云三号红外高光谱大气探测仪器, 有可能成为国际GSICS的一员新兵。

5 总结

简要综述了卫星红外探测仪器的发展。详细介绍了我国FY-3D星将要装载的红外高光谱大气探测仪HIRAS, 包括仪器的结构、观测原理和系统组成以及仪器观测数据预处理中所涉及的核心关键技术。基于国内外已有研究结果, 探讨和分析了风云三号卫星高光谱仪器在天气、气候和环境监测等多领域中的潜在应用。由于风云卫星高光谱探测仪器完全由国内自行

设计和研制, 设计方案和数据特征均和国外同类仪器有很大区别, 尤其在星上数据压缩和处理方面, 因此后端数据应用均需要参考实际卫星在轨测试评估的数据误差特征以及性能指标, 进行相应的开发应用, 这样才能更好地在我国自主的NWP和气候模式应用中发挥最大应用价值。

参考文献

- [1] Wark D Q, Hilleary D T, Anderson S P, et al. Nimbus satellite infrared spectrometer experiment. *Geoscience Electronics, IEEE Transactions on*, 1970, 8(4): 264-270.
- [2] Ellingson R G, Yanuk D J, Lee H T, et al. A technique for estimating outgoing longwave radiation from HIRS radiance observations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1989, 6(4): 706-711.
- [3] Smith W L, Revercomb H E, Woolf H M, et al. Improved geostationary satellite soundings for the mesoscale weather analysis/forecast operation. *ESA, Mesoscale Analysis and Forecasting* p 79-83(SEE N 88-11239 02-47), 1987.
- [4] Qi C, Xu H, Yin D. FY3C IRAS on-orbit performance and measurements validation//SPIE Asia Pacific Remote Sensing. *International Society for Optics and Photonics*, 2014: 926409-926409-11.
- [5] Han Y, Revercomb H, Cromp M, et al. Suomi NPP CrIS measurements, sensor data record algorithm, calibration and validation activities, and record data quality. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(22): 12,734-12,748.
- [6] 顾明剑. FY-3(04)星红外高光谱大气探测仪初样设计报告. 中国科学院上海技术物理研究所, 2015.
- [7] 董超华, 李俊, 张鹏, 等. 卫星高光谱红外大气遥感原理和应用. 北京: 科学出版社, 2013.
- [8] Hilton F, Armante R, August T, et al. Hyperspectral Earth observation from IASI: Five years of accomplishments. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(3): 347-370.
- [9] Lavanant L, Fourrié N, Gambacorta A, et al. Comparison of cloud products within IASI footprints for the assimilation of cloudy radiances. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2011, 137: 1988-2003.
- [10] Stengel M, Lindskog M, Undén P, et al. An extended observation operator in HIRLAM 4D-VAR for the assimilation of cloud-affected satellite radiances. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2010, 136: 1064-1074.
- [11] Guidard V, Fourrié N, Brousseau P, et al. Impact of IASI assimilation at global and convective scales and challenges for the assimilation of cloudy scenes. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2011, 137: 975-1987.
- [12] Grieco G, Masiello G, Serio C. Interferometric vs spectral IASI radiances: Effective data-reduction approaches for the satellite sounding of atmospheric thermodynamical parameters. *Remote Sens*, 2010, 2: 2323-2346.
- [13] Grieco G, Masiello G, Serio C, et al. Infra-red atmospheric sounding interferometer correlation interferometry for the retrieval of atmospheric gases: The case of H₂O and CO₂. *Appl Opt*, 2011, 50: 4516-4528.
- [14] Li J, Li J L, Otkin J, et al. Warning information in a preconvection environment from the geostationary advanced infrared sounding system - A simulation study using the IHOP Case. *J Appl Meteor Clim*, 2011, 50: 776-783.
- [15] Clerbaux C, Boynard A, Clarisse L, et al. Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/METOP sounder. *Atmos Chem Phys*, 2009, 9: 6041-6054.
- [16] Zhang X Y, Bai W G, Zhang P, et al. Spatiotemporal variations in mid-upper tropospheric methane over China from satellite observations. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56: 3321-3327.
- [17] Clarisse L, Clerbaux C, Dentener F, et al. Global ammonia distribution derived from infrared satellite observations. *Nat Geosci*, 2009, 2: 479-483.
- [18] Hewison T J, Wu X Q, Yu F F, et al. GSICS inter-calibration of infrared channels of geostationary imagers using Metop/IASI. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, 2013, 1160-1170.

风云四号静止卫星闪电成像仪监测原理和产品算法研究进展

曹冬杰

(中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 静止卫星闪电成像仪通过光学成像探测实现闪电定位, 能够对闪电活动进行长时间连续监测, 为中国地区强对流天气预警和区域闪电活动特征研究提供观测基础。结合国外静止卫星闪电成像仪研究现状, 针对风云四号静止卫星闪电成像仪工作原理和产品算法进行了介绍。

关键词: 闪电成像仪, 实时事件处理器, 虚假信号滤除算法, 聚类分析

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.014

The Development of Product Algorithm of the Fengyun-4 Geostationary Lightning Mapping Imager

Cao Dongjie

(Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract: The lightning mapping imager equipped on the satellite is a new technique for lightning observation. The lightning imager equipped on the geostationary satellite could map the optical emission from the lightning discharge and locate the flash. The FY-4 geostationary lightning mapping imager could observe lightning activities continuously, and provide for the severe weather forecasting and lightning activity characterization in China. The paper showed the development of observation method and product algorithm of the satellite lightning imager, discussed the instrument and introduced product algorithm of the lightning imager.

Keywords: lightning imager, real-time event processing, false signals filtering algorithm, cluster analysis

0 引言

闪电放电过程会产生很强的光辐射, 根据闪电的放电特征, 卫星搭载的闪电成像仪通过探测777.4nm中性氧原子近红外吸收谱线的闪电光辐射, 能够确定闪电发生的准确位置^[1-2]。国际上在轨运行的星载闪电成像仪搭载于近赤道非太阳同步轨道卫星, 包括装载于Microlab-1卫星上的闪电光学瞬变探测器(OTD)^[3-5]和装载于热带降水测量计划任务卫星(TRMM)上的闪电成像仪(LIS)^[5-6]。作为LIS的原型, OTD自1995年开始投入运行, 相对赤道倾角70°, 轨道高度740km, 观测区域为75°S—75°N, 轨道周期为100分钟, 完整覆盖全球需55天, 用于探测闪电光辐射的电荷耦合器件探测阵列(CCD)大小为128×128, 观测视场为1300km×1300km, 空间分辨率为10km, 闪电探测率为50%~66%。LIS自1998

年开始投入运行, 工作波长为中性氧原子近红外谱线777.4nm, 带宽为0.909nm, 相对赤道倾角35°, 轨道高度350km, 观测区域为35°S—35°N, 轨道周期90分钟, 完整覆盖全球需49天, CCD面阵为128×128, 观测视场为1300km×1300km, 空间分辨率为3~6km, 其中, 星下点分辨率为3.7km, 闪电探测率为88%。2001年8月轨道抬升至402.5km, 星下点分辨率为4.3km。LIS利用星上实时事件处理器(RTEP)对观测数据进行星上预处理和虚假信号滤除, 并将数据实时发送至地面接收站。

卫星闪电观测产品在天气和气候研究中有重要应用^[7-10]。在低轨道卫星闪电成像仪OTD和LIS的基础上, 通过发展静止卫星闪电成像仪实现对闪电的连续、实时观测, 从而实现雷电的追踪和预警, 成为了国际上雷电空间探测的主要发展方向。美国、中国和欧洲均陆续开展静止卫星搭载闪电成像仪的设计和研发。美国静止卫星^[11](GOES-R)闪电成像仪(GLM), 计划2016年发射, CCD面阵大小为1372×1300, 空间分辨率为8~14km, 闪电探测率为

收稿日期: 2015年9月11日; 修回日期: 2015年12月18日
作者: 曹冬杰(1980—), Email: caodj@cma.gov.cn
资助信息: 国家自然科学基金(41305015)

70%，虚警率为5%。欧洲第三代静止卫星（MTG）闪电成像仪（LI）^[12]，计划2018年发射。中国新一代静止卫星风云四号（FY-4）闪电成像仪（LMI）^[13-14]是我国第一次自主研制的星载闪电成像仪，在仪器研制和产品生成算法等方面都面临着巨大的挑战，首星计划于2016年发射。美国、中国和欧盟静止卫星闪电成像仪，仪器结构和工作原理相似，未来将构成近乎全球覆盖的天基闪电观测网，将对全球闪电探测、大气电学研究等相关领域产生重要影响。

同低轨道卫星闪电成像仪相似，静止卫星闪电成像仪主要包括CCD面阵以及用于星上数据预处理和背景信号滤除的星上实时事件处理器（RTEP），地面处理系统主要包括卫星观测数据定标和定位，以及包括虚假信号滤除和聚类分析等产品算法的产品生成系统。本文对静止卫星闪电成像仪的仪器工作原理和产品生成算法进行详细介绍。

1 仪器工作原理

1.1 仪器工作原理

静止卫星闪电成像仪CCD观测波长为777.4nm，CCD探测来自闪电放电过程产生的光辐射，探测到的光辐射强度数据通过星上RTEP进行星上数据预处理和地面产品生成系统。首先，采用背景光估计等方法滤除CCD面元探测的背景光，提取可能来自于闪电的发光“事件”，数据实时发送至地面接收站。其次，地面接收站对RTEP下传的数据进行定标和定位处理，输出经定标定位后的包含发光“事件”的发生时间，位置和强度等信息的闪电成像仪产品。最后，利用产品算法软件，进行虚假信号滤除和聚类分析，输出包含闪电“事件”、“组”和“闪电”的发生时间、位置和强度等信息的闪电成像仪产品，应用于业务服务和科研。风云四号静止卫星闪电成像仪的观测视场如图1所示，基本能够覆盖中国地区及邻近陆地和海洋区域，实现中国地区闪电活动特征的观测。

1.2 星上 RTEP 算法

星上RTEP接收CCD面阵并行输出的原始观测数据，经信号接收与限幅、多帧平均背景估值、背景信号去除、逐元阈值自适应设置、闪电信号探测、闪电信号编码^[14]，将闪电“事件”与背景数据一并输出给信息编码电路并传至地面接收测站。

GLM利用RTEP实现背景光滤除，如图2所示，星上RTEP算法主要目的是对原始数据进行背景光去除，减小背景光对闪电观测的影响，白天背景光的变化主要与太阳角度、云体反射率和地面反照率有关，根据背景光的特征，滤除方法包括空间滤除、光谱滤除、

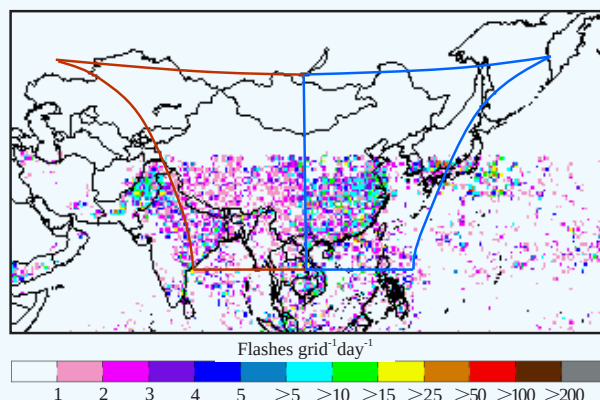


图1 风云四号静止卫星闪电成像仪观测范围（图中不同颜色圆点表示TRMM搭载的LIS观测的2008年7月闪电频数分布日均值）

Fig.1 FOV view from the FY-4 LMI (lightning observations in July, 2008 from the NASA LIS on board the TRMM (TRMM/LIS) low earth-orbiting satellites)

积分滤除和多帧平均背景估值方法^[15]。风云四号静止卫星闪电成像仪将针对背景光特征，综合采用多种方法实现背景光滤除。

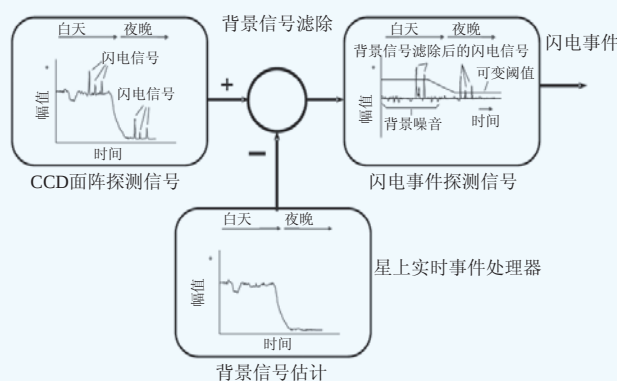


图2 闪电成像仪星上实时事件处理器^[16]

Fig. 2 Real Time Event Processor on Lightning Mapping Imager^[16]

1) 空间滤除。将闪电成像仪焦平面阵列上的每个探测像元的瞬时视场（IFOV）与云顶区域闪电闪击发出的光辐射在空间尺度上进行分析（如5~10km区域），比较闪电信号与背景光。例如，当IFOV范围大于10km时，闪电信号与背景光将没有明显区分，原因是云层对云内垂直分布的闪电放电电源发出的光的散射沿径向光强逐渐减弱，而云顶散射的太阳光在径向方向上的光强则基本不变。如果IFOV范围小于10km，闪电信号和背景光都将减小，但电子噪声不变，因此探测系统信噪比减小。

2) 光谱滤除。利用以777.4nm谱线为中心谱线的窄带干涉滤波器实现光谱滤除，窄带滤波器能够提高探测系统的信噪比，使得相对较弱的闪电信号不会被

背景光“淹没”。

3) 积分滤除。对CCD面阵焦平面上的观测信号在时域进行积分,利用闪电脉冲持续时间(400 μ s的倍数)与背景光持续时间(整秒的倍数,常数)不同的特点进行背景光滤除。积分时间为CCD面阵数据读出之前,各像元电荷积累所需的时间。闪电信号与背景光信号的比值随积分时间接近闪电脉冲持续时间而升高。如果积分时间太短,闪电信号可能在相邻的两帧之间被分离,导致信噪比降低。观测时,闪电成像仪的实际积分时间设置为1.8ms,这样的积分时间设定可最大限度的减小闪电信号被分离的可能,使探测效率最大化。

4) 多帧平均背景估值^[2]。将每秒开始的数帧原始数据做平均,给出背景估值,进而将缓慢变化的背景光从输出的原始数据中滤除,提取瞬态变化的闪电“事件”。同时,采用根据背景强度自适应调整探测阈值的方法,实现瞬态点源弱小目标探测效率最大化,减小背景光的影响。

2 闪电产品生成算法

闪电产品算法对经地面处理系统定标定位处理后的发光“事件”进行虚假信号滤除和聚类分析,输出闪电“事件”、“组”和“闪电”的发生时间、位置和强度等信息,以及基于结构树的闪电“事件”、“组”和“闪电”之间的从属关系。

2.1 虚假信号滤除算法

闪电成像仪CCD面阵探测的原始数据中的噪声主要来源于闪电成像仪的仪器探测系统噪声,包括重复噪声(CCD面阵探测产生)、鬼影噪声(CCD面阵输出设备产生)、棒棒糖噪声(光辐射强度饱和)、轨迹噪声(探测的高能粒子)和冲击噪声等(来源不明,此类噪声表现为杂散点,可导致聚类的闪电“组”远超于真实的闪电“组”个数)。不同CCD面元噪声在总噪声中所占的比例和降噪方法有所不同^[17],可采用面元噪声滤除方法,针对不同噪声特征,对噪声进行初步滤除。

经面元噪声滤除方法处理后的观测数据中仍然存在噪声,这些噪声只能在聚类分析后做进一步滤除,即虚假信号滤除。风云四号静止卫星闪电成像仪虚假信号滤除算法如图3所示,对聚类分析后的闪电“事件”、“组”和“闪电”产品,首先分析特定区域是否只存在一个“事件”、“组”或“闪电”,若出现此类情况,则可能为虚假信号。然后,对聚类分析输出的闪电产品采用如下方法滤除不同噪声产生的虚假信号,蒙特卡洛方法滤除粒子噪声(CCD面阵探测的高能粒子影响产生的随机分布的噪声),背景噪声

分析(对前一步滤除的“闪电”的重新分析来判断背景噪声),过渡区域滤除(明暗过渡的观测区域,如积雪区、海岸线和云边缘等),闪烁滤除(滤除太阳光散射影响卫星观测平台),边缘滤除(滤除CCD面阵边缘的噪声),关联滤除(区域绝大部分闪电“事件”为虚假“事件”,那么该区域剩余的相关“事件”也为虚假“事件”),“组”滤除(如果“闪电”只包含一个“组”,那么判断这个“闪电”为虚假“闪电”)。

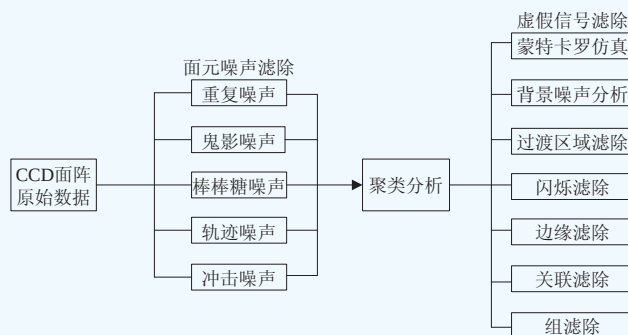


图3 虚假信号滤除算法流程图

Fig. 3 Flow chart of false signal filtering algorithm

2.2 聚类算法

2.2.1 模拟代理数据生成

由于云层的散射和吸收作用,闪电发出的光辐射^[18]在云层中传输,光辐射强度会发生衰减,由于闪电光源非稳态光源的特殊性,应用蒙特卡罗方法可较为准确地模拟闪电光辐射在云中的辐射传输过程^[19]。此外,由于卫星探测的闪电光辐射来自于云顶,因此需利用云顶高度订正提高闪电定位精度^[20]。由于云层对闪电光辐射的影响较为复杂,这里暂不对该过程进行分析。

风云四号静止卫星闪电成像仪模拟代理数据的生成方法如下,首先假定光脉冲的位置和发生时间,其次生成正态分布的光脉冲对应的电流幅值,最后利用经验分布函数^[21]和电流幅值,获得“发光事件”的辐亮度值,以及每个光脉冲对应的光子分布。代理数据模拟结果如图4所示。图4a所示为模拟的光子分布,图4b所示为由光子分布得到的辐亮度分布,图中的辐亮度值是各格点光辐亮度的叠加值,图中颜色变化对应于不同范围的辐亮度值,辐亮度的单位为 $\mu\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ 。模拟区域范围为 $10^{\circ}\times 10^{\circ}$,格点大小为 $0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$ 。可以看出,光子数集中区域,光辐亮度较强。利用上述方法获得的模拟代理数据已应用于风云四号静止卫星闪电成像仪的聚类算法仿真测试。

2.2.2 聚类算法

聚类算法的作用是将闪电“事件”聚类为“组”

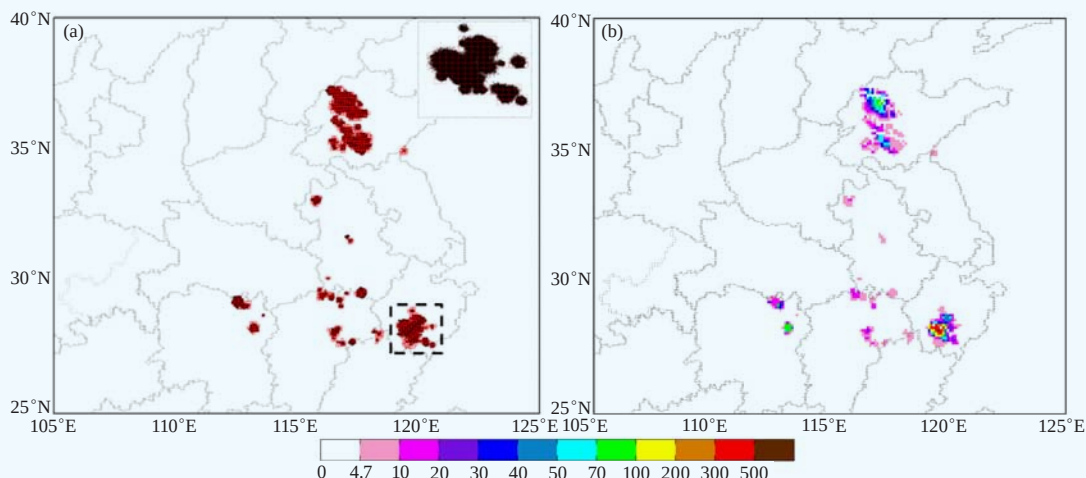


图4 应用算法测试的模拟代理数据

(a) 闪电事件光辐射模拟光子分布; (b) 闪电事件光辐射模拟辐亮度分布

Fig. 4 Simulation of proxy data which is used to test the product generated algorithm

(a) a simulated storm in an area of $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ with the generated photons (black dots) and detected events (red squares),
(b) radiance of detected events

和“闪电”，如图5所示，建立闪电“事件”、“组”和“闪电”呈结构树状的级联关系。“组”由同一帧相邻CCD面元的“事件”构成，而“闪电”由时间间隔不大于330ms，空间距离不大于16.5km的“组”构成。这里定义的“闪电”对应于一次真实的闪电过程，而“组”则对应于地闪的一次回击或云闪的一次K变化，但并不是一一对应的关系，一次闪电包含的“组”的个数可能大于实际的“闪击”个数，因为“闪击”之间的放电过程可能也会被判断为“组”。

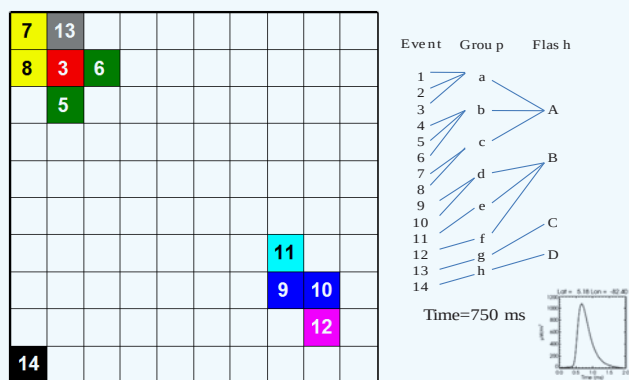


图5 聚类算法示意图^[17]

Fig. 5 Diagram of clustering algorithm^[17]

闪电成像仪产品生成算法流程图如图6所示，将经噪声滤除后的L1级闪电产品作为输入数据，对闪电“事件”进行聚类分析，首先判断该“事件”辐亮度是否满足探测阈值，进而判断其是否属于已有的“组”，如属于已有的“组”，则将其聚类为该

“组”，否则将其定义为一个新的“组”；然后判断该“事件”所属的“组”是否属于已有的“闪电”，如属于已有的“闪电”，则将其聚类为该“闪电”，

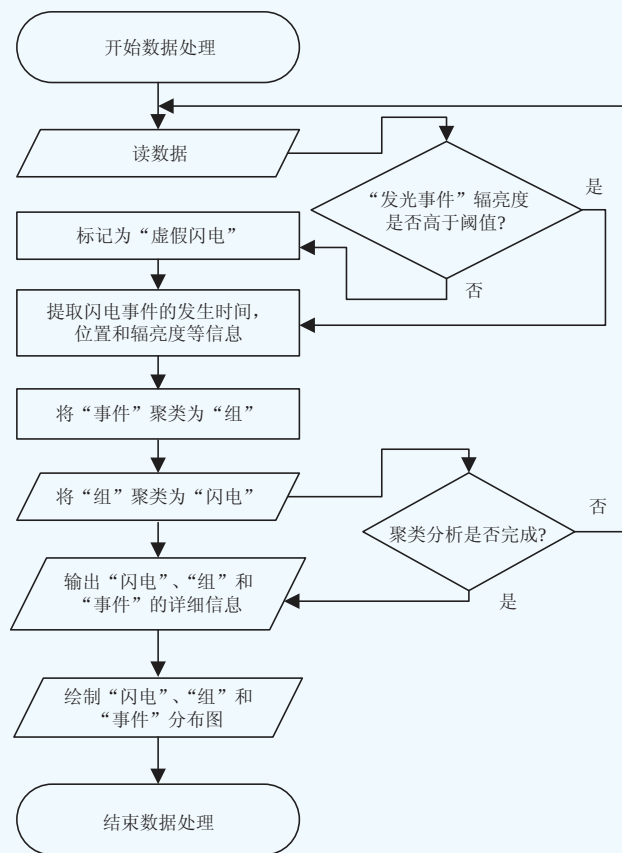


图6 闪电成像仪产品算法流程图

Fig. 6 Flow chart of product generated algorithm

否则将其定义为一个新的“闪电”。若一个“事件”被归为多个“组”，则将这些“组”合并为同一个“组”，然后将该“事件”归为这个“组”。若一个“组”被归为多个“闪电”，则将这些“闪电”合并为同一个“闪电”，然后将该“组”归为这个“闪电”最后输出“事件”，“组”，和“闪电”的位置经度和纬度等信息，进而建立“事件”，“组”，和“闪电”的呈树状结构的从属关系。

风云四号静止卫星闪电成像仪产品生成算法综合了虚假信号滤除算法和聚类算法，在产品生成算法的设计中考虑了中国地区闪电分布特征，参考同步观测的卫星云检测和云相态产品中的云类型识别等信息，进一步滤除虚假信号，提高闪电产品定位精度。卫星发射前，闪电成像仪的探测率和虚警率需根据试验室仪器正样测试结果进行预估^[4]，卫星发射后利用在轨观测数据结合其他闪电定位产品进行准确评估。未来计划基于闪电成像仪全面背景观测数据，采用深对流云目标观测方法对闪电成像仪777.4nm通道仪器辐射衰减特性进行评估；利用闪电成像仪在轨观测数据，中国地基闪电定位网闪电定位产品和雷达观测产品，开展闪电成像仪产品生成算法的检验和闪电探测产品的验证。

3 结论与展望

本文主要介绍了卫星闪电成像仪的工作原理和产品生成算法，在此基础上对即将应用于观测的风云四号静止卫星闪电成像仪做了详细介绍。

1) 静止卫星闪电成像仪通过探测777.4nm中性氧原子近红外吸收谱线的闪电光辐射实现闪电定位，包括用于观测发光“事件”的CCD面阵，用于星上数据预处理和背景信号滤除的星上实时事件处理器，用于数据定标定位和产品生成的地面处理系统。可以为强对流层实时监测、预警预报提供有益的观测信息，具有重要的应用前景。

2) 闪电成像仪星上RTEP算法主要采用多帧背景评估方法，确定背景光强度，实现对CCD面阵探测的原始观测数据进行背景光滤除。此外，针对不同噪声，采用不同的噪声滤除方法，减小噪声对闪电观测的影响。

3) 闪电成像仪产品算法采用虚假信号滤除和聚类分析方法，对经定标定位处理后的闪电成像仪观测数据进行进一步处理。首先滤除发光“事件”中的虚假“事件”，然后利用聚类分析将闪电“事件”聚类为“组”和“闪电”，参考云检测和云相态产品中的云类型识别等信息，进一步滤除虚假“闪电”产品，最后输出聚类分析得到的闪电“事件”、“组”和“闪电”的发生时间、位置和强度等信息，以及基于结构树的闪电“事件”、

“组”和“闪电”之间的从属关系。

风云四号静止卫星闪电成像仪将实现对中国及周边地区的闪电活动全天候连续观测，提供覆盖范围广、时间分辨率高的总闪分布数据，可用于分析中国地区闪电分布特征，实时闪电定位产品的应用，对于研究强对流天气过程，实现雷暴预警和预报，对流初生判断，强风暴活动的提前预警等有重要意义。

参考文献

- [1] Christian H J, Goodman S J. Optical observations of lightning from a high altitude airplane. *J Atmos Oceanic Technol*, 1987, 4: 701-711.
- [2] Christian H J, Blakeslee R J, Goodman S J. The detection of lightning from geostationary orbit. *J Geophys Res*, 1989, 94: 13329-13337.
- [3] Christian H J, Discoll K T, Goodman S J, et al. The optical transient detector (OTD). *Proc 10th Int Conf on Atmosph, Elec, Osaka, Japan, ICAE*, 1996: 368-371.
- [4] Koshak W J, Stewart MF, Christian H J, et al. Laboratory calibration of the optical transient detector and the lightning imaging sensor. *J Atmos Ocean Tech*, 2000, 17(7): 905-915.
- [5] Boccippio D J, Koshak W J, Blakeslee R J. Performance assessment of the optical transient detector and lightning imaging sensor. Part I: Predicted diurnal variability. *J Atmos Oceanic Tech*, 2002, 19(9): 1318-1332.
- [6] Christian H J, Blakeslee R J, Goodman S J, et al. The Lightning Imaging Sensor. *Proc 11th Int Conf on Atmospheric Electricity, Guntersville, AL ICAE*, 1999, 746-749.
- [7] Ceil D E, Goodman S J, Boccippio D J, et al. Three years of TRMM precipitation features. Part I: Radar, radiometric, and lightning characteristics. *Mon Wea Rev*, 2005, 133: 543-566.
- [8] Ceil D E, Buechler D E, Blakeslee R J. Gridded lightning climatology from TRMM-LIS and OTD: Dataset description. *Atmos Res*, 2014, 135-136: 404-414.
- [9] Boccippio D J, Goodman S J, Heckman S. Regional differences in tropical lightning distributions. *J Appl Meteor*, 2000, 39: 2231-2248.
- [10] Christian H J, Blakeslee R J, Boccippio D J, et al. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector. *J Geophys Res*, 2003, 108(D1): 4005.
- [11] Goodman S J, Blakeslee R J, Koshak W J, et al. The GOES-R Geostationary Lightning Mapper (GLM). *Atmospheric Research*, 2013, 125-126: 34-49.
- [12] Finke U, Hauf T. Detect and locate lightning events from Geostationary satellite observations, Report part II, Feasibility of lightning location from a Geostationary Orbit, EUM/CO/02/1016/SAT, 2002.
- [13] 黄富祥, 郭俊柏, 冯小虎. 闪电成像仪虚警率和探测率模拟计算. *光子学报*, 2009, 38(12): 74-78.
- [14] 鲍书龙, 唐绍凡, 李云飞, 等. 静止轨道瞬态点源多目标闪电信号实时探测技术. *红外与激光工程*, 2012, 41(9): 2390-2395.
- [15] Goodman S J, Mach D, Koshak W, et al. GLM lightning cluster-filter algorithm, algorithm theoretical basis document. Ver 4.0, NOAA NESDIS Center for Satellite Applications and Research, Washington, DC, 2010.
- [16] Mach D M, Goodman S J, Koshak W J, et al. GOESR Geostationary Lightning Mapper performance specifications and algorithms. NOAA STAR GOES-R AWG Review, Madison, United States, 2008.
- [17] Christian H J, Blakeslee R J, Goodman S J, et al. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the Lightning Imaging Sensor (LIS). NASA-MSFC, Earth Science Department, 2000.
- [18] 郑秀书, 谢屹然, Toumi R. 闪电的光辐射能分布特征. *高原气象*, 2004, 23(4): 476-480.
- [19] 胡丽琴, 黄富祥. 基于蒙特卡罗方法的卫星光学波段闪电辐射观测模拟. *光学学报*, 2012, 32(11): 1101001.
- [20] 陈圣波, 杨莹, 崔腾飞. 静止卫星闪电探测中云影响研究. *地球物理学学报*, 2012, 55(3): 797-803.
- [21] Finke U, Grandell J, Defer E, et al. The Lightning Imager (LI) on MTG-Scientific studies and developments, AGU-Fall Meeting San Francisco - CA, USA, 2010.

风云静止气象卫星地面应用工程计算机网络系统发展

赵现纲 谢利子 卫兰 林曼筠
(国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 计算机网络系统是风云系列静止气象卫星地面应用工程的重要组成部分, 是卫星在轨管理和卫星观测数据接收、处理、存档、服务的重要支撑。自第一颗静止气象卫星发射以来, 计算机网络系统规模不断扩大, 其架构经历了近二十年的滚动发展和持续改进。对该发展历程和取得的成果进行了回顾, 并对未来计算机网络系统建设所面临的诸多机遇和挑战进行了分析。最后, 基于灵活的作业和资源调度技术, 设计了具有良好可靠性和可扩展性的我国新一代静止气象卫星风云四号地面应用工程计算机网络系统架构。

关键词: 风云气象卫星, 地面应用系统, 云计算, 资源调度

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.015

The Development of Computer Network and Storage System in Fengyun Geostationary Meteorological Satellite Ground Segment

Zhao Xiangang, Xie Lizi, Wei Lan, Lin Manyun
(National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract: Computer Network and Storage (CNS) system is an important component of the meteorological satellite engineering. CNS supplies resources and environments for the satellite in-orbit management, satellite observation data receiving, processing, archiving and service. Since the first geostationary meteorological satellite was launched, the scale of the computer network of the ground segment has been greatly expanded; its architecture has experienced nearly twenty years of rolling development and continuous improvement. In this paper, the development process and the results are reviewed. The opportunities and challenges of CNS construction are well analyzed. Finally, based on the flexible job and resource scheduling technology, a new structure with high scalability and reliability of CNS for FY-4A geostationary meteorological satellite is raised up.

Keywords: Fengyun, ground segment, cloud computing, resource scheduling

0 概述

地面应用工程作为风云气象卫星五大系统之一, 负责卫星的日常运行管理和卫星的状态监视, 实现卫星数据的接收、实时处理和广泛应用^[1]。其中, 计算机网络系统(CNS, Computer Network and Storage)则是支撑地面应用系统运行的骨架和基石, 负责计算环境支撑、资源分配、作业调度、数据传输以及产品分发。在风云二号系列气象卫星地面应用系统中, 计算机网络系统不仅是地面应用系统运行的支撑, 还是数据处理的指挥调度中心。计算机网络系统的架构设

计直接影响到地面应用系统的稳定性、可靠性、时效性、安全性、可扩展性和可维护性。

自1997年发射第一颗风云静止气象卫星FY-2A至今, 我国共累计成功发射7颗风云二号静止气象卫星, 其中FY-2A/B/C/D已离轨, 目前在轨运行的静止气象卫星为FY-2E/F/G三颗。回顾我国静止气象卫星的发展历程, 其计算机网络系统架构一直随着信息技术浪潮的变革而持续改进。静止气象卫星计算机网络系统的发展也经历了从大型机到小型机, 再到通用X86计算平台的变革过程。其网络互联带宽也由10Mb逐步提升至10Gb。所采用的存储技术也由单一的磁带、磁盘发展到目前磁盘阵列、网络存储以及分布式存储等多种存储技术共存的局面。地面应用系统的业务能力也由单星观测提升至目前的双星加密观测、高

收稿日期: 2015年10月22日; 修回日期: 2015年12月29日

第一作者: 赵现纲(1976—), Email: xgzhaog@189.com

通信作者: 谢利子(1982—), Email: xielizi@cma.gov.cn

资助信息: 国家高技术研究发展计划(2011AA12A104)

频次区域扫描和多星统一管理,实现了国内外多颗卫星资料的统一接收和处理。风云二号静止气象卫星地面应用系统体现了自主创新和集成创新,成果具有自主知识产权,工程总体质量和水平达到同期国际先进水平,被誉为“天地一体化的典范、地面应用系统的楷模”^[2]。风云二号C星地面应用系统获得国家科技进步一等奖,这也是国家对于地面应用系统工程(包括计算机与网络系统)的具体肯定。

展望未来, FY-4A作为我国第二代静止气象卫星的首颗卫星,与FY-2系列卫星相比,其卫星平台、工作模式、星载仪器、观测密度和精度均有很大的变化和提高。表1列出了两代卫星仪器数、通道数、产品数量的对比。经测算, FY-4A卫星原始数据量是风云二号单星的160倍,经过定位、定标和光谱图处理后形成的一级数据约为风云二号单星的80倍。数据量百倍的增长和近乎苛刻的服务质量要求对地面应用系统的计算机网络架构设计提出了新的挑战。

表1 FY-2E、FY-4A卫星仪器、通道及产品数量对比表

Table 1 The comparison between FY-2E and FY-4A satellite on instruments, number of channels and product

	FY-2E	FY-4A
星上搭载的遥感仪器数	1	4
扫描成像辐射计仪器通道数	5	14
卫星的产品数量	15	55

FY-4A气象卫星地面应用工程计算机网络系统在继承FY-2系列气象卫星地面应用系统建设成功经验的同时,需要结合当前流行的云计算、物联网、大数据等新技术,建设气象卫星数据处理与服务私有云,进一步提升系统的可靠性、可扩展能力、管理能力和服务能力。统筹考虑静止、极轨两个系列计算资源的共享使用,摒弃竖井式建设模式,规避信息孤岛和单点故障。设计开发云平台、自主资源调度软件,实现对不同品牌、不同架构计算资源的统一整合、管理与使用;通过计算虚拟化、网络虚拟化、存储虚拟化,实现更加灵活的计算环境规划、部署和动态迁移。未来的网络将以40Gb、100Gb带宽互联,存储将以存储虚拟化为媒介,对SAN、IPSAN进行整合,辅以NAS、集群NAS等多种各具特点的存储技术。基于卫星需求,通过融合相关领域先进技术和产品, FY-4A气象卫星地面应用系统将成为集气象卫星大数据处理、应用、服务功能于一身的新一代气象卫星数据中心。

1 历史发展回顾

1.1 初始创建

风云系列静止气象卫星的第一代计算机网络系统初建于20世纪80年代末—90年代初,在当时是从无

到有的创新工程,以FY-2A星地面应用系统计算机网络系统为代表。系统采用了集中式的架构,以大型机IBM4381、富士通M770为主要的处理服务器,辅以各类监控管理终端,集中完成各类卫星数据和任务的处理;同时,采用自主研发的、定制的通信接口和专用网络实现数据传输和交换。

FY-2A业务系统由指令和数据接收站,资料中心和运行控制中心组成。在资料中心,对卫星资料进行处理的核心计算机选取了当时性价比较高的富士通大型机,配置了多台终端用于数据交互和系统管理。前端的卫星数据接收处理采用两套工作站。设备之间的网络互联采用10Mbps以太网。目前来看,这些核心处理设备的配置和性能还不如现在一台主流的PC机,但在当时的环境下,该套设备的处理能力和稳定性在业界位列前茅。该套系统从立项到完成系统调试花费了近6年的时间,自1991年设备安装后,持续稳定运行超过10年,很好的承载了FY-2A星的在轨测试和试验运行,以及后续系统的开发改进。整个系统的建设是一个摸索学习的过程,培养了一大批卫星数据处理以及大型机系统的专业人才。

在2000年初,为了满足FY-2A/B星双星共同运行的需要,对上述FY-2A计算机网络系统进行了改造与扩建。资料中心增加了四台UNIX服务器;设备之间的网络互联也由10Mbps以太网一跃升级为1000Mbps骨干互联和100Mbps桌面接入。

“定制化”是第一代风云卫星计算机网络系统建设的特点,从计算资源、存储资源到网络连接,都存在着相当大比例的定制设备,这也是当时IT设备百家争鸣、通用性差的时代特征所导致的。该阶段IT系统的建设和维护难度都很高,整个系统是一个封闭神秘的黑匣子。

1.2 业务化运行

FY-2A/B星同属于风云二号(01)批次卫星,作为试验应用卫星,其在轨寿命较短。风云二号(02)批次卫星包含FY-2C/D/E三颗卫星,从FY-2C星开始,所有卫星均为业务卫星,业务化运行对地面系统的性能和稳定性提出了更高的要求。因此,计算机网络系统再次升级换代,建成了如图1所示的风云二号(02)批多星管理地面系统IT架构。第二代计算机网络系统在主机方面以IBM power系列AIX小机双机HA架构为特点;在网络方面,采用标准以太网实现数据的传输与交换;在存储方面,引入光纤存储网络SAN支撑实时业务处理,采用磁带库进行数据近线存储,在线存储容量达到TB级;在数据处理和任务管

理方面，引入任务级分布式处理的理念^[3]，对复杂的卫星数据接收处理和管理流程进行任务归类，通过定制负载均衡调度软件LSF实现复杂作业流的调度和管理^[4]。从第二代计算机网络系统开始，我国静止气象卫星地面系统开始进入了业务化运行，采用该架构的计算机网络系统成功支撑了多颗卫星业务（包括我国风云卫星以及如MTSAT等国外部分卫星）的稳定运行，期间各项运行指标均满足中国气象局设定的业务考核要求。



图1 风云二号（02）批地面系统架构图示
Fig. 1 The ground segment architecture of FY-2 (02)

风云二号（03）批次包括F/G/H三颗卫星，目前已经发射FY-2F和FY-2G两颗。H星计划于2017年底发射。风云二号（03）批次气象卫星地面系统的计算机网络部分架构沿用了前期高端UNIX小机加高端SAN存储的结构。如处理主机采用IBM Power 780双机，存储采用日立VSP高端SAN。在网络部分使用了诸如IRF等虚拟化堆叠技术^[5]以提高核心网络的稳定性，不同品牌网络设备之间采用三层互联。该架构很好地承载了双星加密以及高频次区域观测业务的稳定运行。

“双路冗余”是第二代风云卫星计算机网络系统建设的主要特点。如计算节点的双机HA，存储双活，网络双链路。通过双路冗余的设计有效避免了单点故障，提升了业务运行的可靠性。不过，仍存在资源调度与业务逻辑强耦合，应用与计算资源强耦合的问题。维护工作的难度将随着设备规模的增加而急剧上升。

2 FY-4A卫星计算机网络系统介绍

2.1 新一代IT支撑系统的设计理念

回顾风云系列静止气象卫星计算机网络系统多年的发展历程，其IT支撑系统综合性能有超过1万倍的增长，骨干网络带宽也从几兆的专用通信接口发展到万兆。第一代IT支撑系统可称之为大型机时代，其

主要问题是设备购置成本高，使用维护难度大。系统间接口极其复杂且兼容性问题导致系统故障率高，业务运维压力很大；第二代IT支撑系统可称之为高可用服务器时代，其主要问题是系统的通用性和扩展性较差，主机和存储设备可选择余地不大，长期在此架构上开发的各类应用，其迁移难度和工作量都很高，不利于系统的可持续性发展。

根据气象卫星发展规划，至2020年，还将计划发射近10颗气象卫星。随着观测仪器种类的增加、仪器观测能力的大幅提升，气象卫星获取的原始观测数据信息量将呈爆炸性增长，而后续处理所产生的临时数据以及产品数据量会以几何级数膨胀；卫星遥感反演技术的深入研究，将使得卫星遥感产品的种类日益丰富，多仪器、多星融合产品也将不断涌现，通过IT支撑系统生成的数据信息量倍增；而卫星观测与地面观测、数值预报联动等新的应用方向，将进一步提高对卫星遥感产品的时效要求；这些因素都对IT支撑系统的综合性能提出更高要求，现有的第二代计算机网络系统难以满足需求，气象卫星业务的发展呼唤新一代IT支撑系统的到来。

近年业界流行的云计算^[6]是一种崭新的IT建设理念，提出了IT资源持续发展、异构平台整合以及跨系统互操作与协同管理的理想计算环境，目的是让各类资源按需分配并随需求和负载的变化而弹性伸缩。风云静止气象卫星的下一代IT支撑系统的建设，将全方面借鉴和采纳云计算的先进理念和成熟技术。

在主机系统的设计方面，小型机凭借其稳定可靠和单机综合处理能力强大的特性，使得它在以往的IT支撑系统中得到广泛应用，在某些高可靠应用环境以及单机计算能力有特殊要求的应用场景应该予以保留。与此同时，通用X86机架服务器、刀片服务器不论从市场占有率还是设备可靠性方面都有了长足的进步^[7]。新一代IT支撑系统内部一定是异构计算资源并存，需实现资源的统一管理调度。从长远看，X86通用计算设备的可靠性不断提高，RAS特性不断完善，从理论上已经具备取代小型机的可能。但从应用迁移的角度而言，其在气象卫星地面应用系统内完全取代传统UNIX服务器还需要一个过渡的过程。

在网络系统的设计方面，新一代的IT支撑系统将继续采用硬件广域网加速设备和应用软件优化并用的方法优化广域网传输^[8]。骨干网络带宽将升级至40Gbps/100Gbps，多路万兆网卡聚合将成为高端服务器接入的普遍方式。为强化网络的稳定性，新一代的IT支撑系统除了提高单个设备的可靠性、设置冗余链

路和节点等措施之外，还将优先选用扁平化的网络设计、采用IRF/VSS/vPC等虚拟化技术^[9]简化网络结构、提高网络的可管理性。在集群计算网络以及共享文件系统方面将采用IB互联，充分发挥IB网络低延迟高带宽的特性。

众所周知，CPU不是数据处理能力的全部，对于气象数据处理而言，数据IO能力更受关注，具体指标包括数据读写带宽、延迟以及IOPS。新一代IT支撑系统架构开始由“以计算为中心”转向“以数据为中心”，数据处理模式由单胖节点顺序处理转变为多瘦节点并行处理。由此，IO能力可并行扩展的分布式存储系统、本地计算技术^[10]将成为优选设备和策略。在海量数据归档方面，磁带库的性价比无可替代。采用自建近线存储和公有云存储服务相结合方式以满足卫星观测数据存档业务在容量和可靠性两方面不断提高的迫切需求。

2.2 FY-4A 计算机网络系统结构设计

FY-4A计算机网络系统（FY-4A CNS）是FY-4A气象卫星地面应用系统数据处理的基础支撑平台，其结构如图2所示。FY-4A计算机网络系统的设计充分考虑了资源统一管理和调度、业务逻辑与资源调度剥离、统一运维管理、应用评价与持续改进以及未来多星IT系统资源共享等问题。



图2 FY-4A计算机网络系统结构示意图
Fig. 2 The ground segment architecture of FY-4A

FY-4A CNS将采用网络虚拟化技术构建40Gb/100Gb核心网络互联；通过基于资源调度的私有云技术构建计算资源池^[11]，实现异构计算资源的统一池化，对外提供资源管理与作业调度标准接口，轻松支持与其他信息系统的统管共用通过存储虚拟化^[12]、分布式存储等技术构建10PB级存储资源池；通过统一网管实现集中资源监控；通过资源调度保证作业处理的高可靠和高时效，实现硬件计算资源和虚拟化计

算资源的统一管理和调度；通过应用运行特征抓取分析平台，为各类应用提供持续性的优化支持。通过对资源的统一池化，将使IT系统从“双路冗余”提升至“多路冗余”，通过容器、虚拟化技术实现应用的封装与漂移，将各类复杂应用彻底与计算资源剥离，应用服务在计算资源池内无缝漂移，使系统整体达到可用性不低于99.99%的业务目标。

2.3 FY-4A 计算机网络应用软件

硬件是躯干，软件是灵魂。FY-4A计算机网络系统通过自主开发资源调度软件实现资源池化，实现对异构物理主机和虚拟主机的统一管理和灵活调度；通过系统监视管理软件实现业务运维现代化，通过典型应用测试与优化分析软件实现各类应用以及业务系统的持续性改进。

系统监视管理软件负责统一管理风云四号卫星地面应用系统计算机平台的所有IT资产，实现资产的注册登记与集中管理；在此基础上，通过设置各类配置参数，采用多种手段统一采集系统运行过程中的各类信息，实现对各类硬件资源、软件资源、基础设施环境状态实时、准实时监视，并将监视信息以可视化的方式统一展现；系统通过结合运维人员的工作经验，设置故障报警阈值，实现对各类故障的分级报警与及时上报；系统还依据统计分析、数据挖掘等技术，生成各类运维报表，降低运维人员的工作强度，提高系统维护的便捷性，实现IT系统的量化运维和精准管理。

资源调度软件主要负责底层计算资源的调度，实现跨异构负载均衡调度集群的统一计算资源调度。业务逻辑与资源调度剥离是目前云计算数据中心发展趋势，如元调度器MESOS被列为APACHE基金会的重点项目。如图3所示，资源调度分系统从地面应用系统

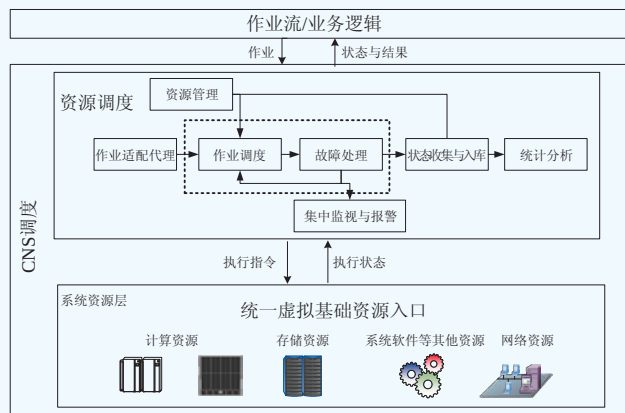


图3 FY-4A地面应用系统分级调度架构图
Fig. 3 The hierarchical scheduling architecture of FY-4A ground segment

各系统的二级业务调度接收其提交的单个作业,根据作业的输入、输出和约束条件等生成可运行的作业指令,并根据当前资源实际负载、作业资源需求、资源池特性等情况分配作业到具体的资源池以及计算资源上运行。在作业运行过程中,监视作业状态,并根据需要将作业状态返回给各系统二级调度,对异常作业和调度故障能够根据提前定义好的故障处理策略进行自动或半自动处理。通过资源调度实现异构资源的池化,实现对风云卫星地面应用系统IT资源统一管理和统一调度,彻底抛弃竖井式架构,消灭信息孤岛和单点故障。

典型应用测试与优化分析软件负责评估和了解应用系统资源使用及其合理性,对资源消耗最大的应用提出优化建议,力保资源使用率保持在合理范围。CNS将建立典型应用量化测量软件,对各类典型应用的资源需求与资源消耗实际状况进行收集与评估(评估指标包括通用指标和微架构级指标),对典型应用本身和资源配置提出优化建议,确保资源使用率保持在合理范围。对业务系统内各类应用、算法进行量化评价,包括业务上线前对应用进行体检、在业务运行过程中对应用和平台进行评估并提供优化建议,从而支撑风云四号科研试验卫星业务系统的持续改进。

3 总结

风云系列卫星从立项至今已经发展了四十多年,地面应用工程计算机网络系统也经历了二十多年的滚动发展。计算机网络系统的架构由两方面因素决定:一是卫星数据处理和服务的时效性、可靠性需求;二是信息技术、产品的发展变化。采纳合适的产品、技术,开发灵活的应用软件以构建满足风云系列气象卫

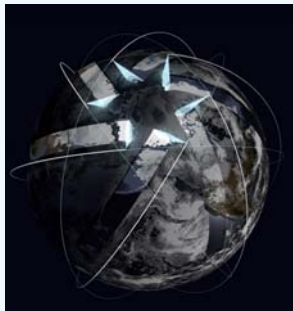
星业务运行的IT支撑系统是地面系统建设的重要工作内容。本文回顾了我国静止气象卫星地面应用工程计算机网络系统架构的发展变化,对三代IT支撑系统进行了详细的介绍。展望未来,自主研发基于资源调度的气象卫星数据处理云是气象卫星地面系统发展的方向和目标,新一代静止气象卫星计算机网络系统将以气象信息化中“集约化建设、资源充分共享”为指导原则,以云计算、资源调度、大数据等前沿技术为技术路线,构建成为以自主创新、高可靠、易扩展、可持续优化、具备与其他系统统管共用为特点的新一代大气卫星观测数据中心。

参考文献

- [1] 董超华,许健民,张文建,等.风云三十年——国家卫星气象中心成立三十周年纪念.国家卫星气象中心,2001.
- [2] 杨军,许健民,董超华,等.气象卫星及其应用.北京:气象出版社,2012.
- [3] 胡华平,金士尧,王维.分布式系统高可用方案的选择.系统工程与电子技术,2000,22(3): 65-67.
- [4] 贾树泽,杨军,施进明,等.新一代气象卫星资料处理系统并行调度算法研究与应用.气象科技,2010,38(1): 96-101.
- [5] 黄石平,谢健,阚宏宇.IRF虚拟化技术在网络中的应用研究.实验技术与管理,2014(11): 124-126.
- [6] 陈康,郑伟民.云计算:系统实例与研究现状.软件学报,2009,20(5): 1337-1348.
- [7] 黄昆.x86服务器市场如何提升数据、系统、应用及业务的高可用性.中国金融电脑,2012(2): 88.
- [8] 卫兰,林曼筠,赵现纲,等.广域网加速在FY-3气象卫星数据传输中的应用.应用气象学报,2012,23(1): 121-128.
- [9] 周辉,李勇,苏厉,金德鹏,等.基于虚拟化的网络创新实验环境研究.电子学报,2012,40(11): 2152-2157.
- [10] 崔杰,李陶深,兰红星.基于Hadoop的海量数据存储平台设计与开发.计算机研究与发展,2012,49(S1):12-18.
- [11] 刘永金,黄科.运营商业平台云计算资源池建设方案探讨.电信科学,2013,29(9): 201-206+211.
- [12] 吕小兵.存储虚拟化整合技术研究.航空制造技术,2015(6): 83-85.

芬兰Iceye小卫星观测：将天气雷达网送入地球轨道

■ 本刊编辑部



芬兰几家企业合作启动并得到欧盟研发项目280万美元资助的Iceye小卫星项目,计划将雷达送入小卫星平台,从而能有效避免云层、坏天气和黑暗的干扰,实现全天候对天气系统的

有效监测。研发企业用成熟的可移动技术,将雷达传感器压缩到可载入小卫星平台,同时采用小型化和工业制造方式批量生产适合的雷达图像仪,最终装载到数十颗重量仅是目前地球观测卫星1/20的小卫星上,实现雷达网在地球轨道上组网,从而让卫星信息对地面天气系统的反应时间,从数天减少到几分钟。

(更多信息,请访问<http://iceye.fi/>)

气溶胶对利用近红外波段反演CO₂浓度精度的影响研究

王舒鹏¹ 张兴赢¹ 王维和¹ 陈林¹ 方莉²

(1 国家卫星气象中心, 北京 100081; 2 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101)

摘要: 近红外波段CO₂浓度反演误差主要与气溶胶散射作用引起的吸收光程改变量难以精确估计有关。此外, 不同的气溶胶模式及下垫面反射率条件下吸收光程改变量也不尽相同。针对不同气溶胶模式条件下, 忽略气溶胶散射对CO₂浓度反演精度的影响进行分析。研究发现, 对乡村型、对流层型和海洋型气溶胶来说, 忽略气溶胶散射效应, 在暗地表时(反射率<0.1)会导致CO₂浓度反演结果低估; 当地表反射率超过0.1后, CO₂浓度反演结果均为高估, 且随地表反射率的增加, 反演误差增加。对城市型气溶胶模式来说, 忽略气溶胶影响均会导致CO₂浓度反演结果低估, 随地表反射率增加, 反演误差递减。在典型观测几何下, 地表反射率(1.6μm)和气溶胶光学厚度(0.55μm)在0.1~0.3范围内时, 忽略气溶胶影响, 城市型、海洋型、乡村型以及对流层气溶胶分别会引入-0.1%~-0.5%、0.22%~1.92%、0.09%~1.46%及0.02%~0.45%的反演误差。在利用GOSAT观测光谱对XCO₂(干燥空气下CO₂平均混合比)进行反演时发现, 相比GOSAT发布结果(389.814ppm, 1ppm=10⁻⁶), 基于地基实测气溶胶特性数据的XCO₂反演结果(390.95ppm)与地基观测结果(390.737ppm)有更好的一致性。

关键词: XCO₂反演, 近红外波段, GOSAT, 气溶胶

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.016

The Influence of Aerosol Particles on Retrieval Accuracy of CO₂ Concentration Using Near Infrared Bands

Wang Shupeng¹, Zhang Xingying¹, Wang Weihe¹, Chen Lin¹, Fang Li²

(1 National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081

2 Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract: The main difficulty in retrieving CO₂ concentration from near-infrared observations comes from the uncertainty of light path change brought about by scattering of the atmospheric aerosols. The scattering effect described by different aerosol models and surface reflectances may lead to different light path changes. This paper aims to study the influence of neglecting aerosol scattering on CO₂ retrieval accuracy for different aerosol models. It is found that for rural, tropospheric and marine aerosol models, the neglecting of aerosol scattering results in underestimation of CO₂ retrievals at low surface reflectances (<0.1), but overestimation at surface reflectance over 0.1 and the increasing retrieval errors with increasing surface reflectances. For the urban aerosol model, the neglecting of aerosol scattering results in underestimation of CO₂ retrievals at any surface reflection, and the retrieval errors decrease with increasing surface reflectances. For typical observation geometry, a surface reflectance of 0.1-0.3 at 1.6μm and aerosol optical depth (AOD) of 0.1-0.3 at 0.55μm, the neglecting of aerosol scattering leads to retrieval errors of (-0.1%) - (-0.5%), 0.22%-1.92%, 0.09%-1.46% and 0.02%-0.45% for urban, marine, rural and tropospheric aerosol models respectively. XCO₂ (the dry air column averaged mixing ratio of CO₂) was retrieved from GOSAT observations with in-situ measurements of aerosol properties as input parameters. Comparison with ground-based XCO₂ measurements shows that the retrieved XCO₂ (390.95ppm) is more consistent with the measured XCO₂ (390.737ppm) as compared to that of GOSAT L2 product (389.814ppm).

Keywords: retrieval of XCO₂, near infrared bands, GOSAT, aerosols

0 引言

基于近红外高光谱卫星遥感的CO₂监测, 由于

其高时空分辨率、全球覆盖、低成本以及对近地面CO₂浓度变化的高敏感性, 逐渐成为监测与人类活动相关的CO₂源汇信息的重要手段^[1-2]。2002年搭载于ENVISAT上的SCIAMACHY^[3], 2009年发射的近红外波段的高光谱探测仪GOSAT^[4]和2014年美国发射的OCO-2^[2]都可以通过观测近红外波段的太阳光反射光谱来反演近地面CO₂含量。即将发射的下一代近红外

收稿日期: 2015年8月31日; 修回日期: 2015年12月29日
第一作者: 王舒鹏(1984—), Email: wangsp@cma.gov.cn
资助信息: 国家高技术研究发展计划(2011AA12A104);
国家自然科学基金(41306185)

高光谱温室气体载荷,包括欧洲的CarbonSat^[5]以及中国的TanSat等多个载荷^[6-7],都将为更好地获取近地面温室气体的源汇信息提供支持。

影响近红外太阳反射光谱反演CO₂浓度的要素众多^[8]。但最大的不确定性来自大气中气溶胶的散射作用所带来的光程改变的不确定性^[9]。气溶胶的散射作用可能增加光程,也可能减小光程。在下垫面反射率较低时,传感器接收到的光子通过大气散射直接进入传感器而不经地表反射,此时的光程是减小的。相反,在下垫面反射率较高时,到达传感器的光子由于气溶胶或云与地表的多次散射作用,光程增加^[10]。GOSAT 官方发布的CO₂反演产品的地基验证结果表明,忽略气溶胶和云的散射作用对光程的改变,即使在晴空条件下,都可能对CO₂反演精度带来较大的误差^[11-12]。研究发现,撒哈拉沙漠的沙尘型气溶胶可以对SCIAMACHY的CO₂总量反演误差达到10%^[13],远超过在区域尺度上(约1000km×1000km)监测碳源汇的需求精度(<1%)^[14]。以往很多研究基于单次散射假设对气溶胶散射作用引起的CO₂浓度反演误差进行量化分析。也有研究在气溶胶多次散射假设下,对气溶胶散射引起的CO₂浓度反演误差进行分析^[10, 15],但并没有考虑不同下垫面反射对反演精度的影响。考虑到地表反射率是决定有效光程的重要参数,Aben等^[16]在更大范围的地表反射率条件下,分析了不同气溶胶光学厚度和薄卷云存在条件下的散射误差。杨东旭等^[17]通过不同气溶胶模式对1.6μm波段强弱吸收带的辐射光谱比的影响来评价气溶胶散射对反演的影响。

考虑到不同气溶胶模式和下垫面反射率条件下,气溶胶散射效应并不相同,本研究重点在不同地表反射率和不同气溶胶模式条件下,对忽略气溶胶散射对XCO₂反演精度的影响进行分析。此外,本文在实测气溶胶模式和几种典型气溶胶模式假设下,分别利用GOSAT观测光谱分别对XCO₂进行反演,并对不同气溶胶假设引起的反演误差进行分析。

1 正向辐射传输模拟及反演

本文所采用的正向辐射传输模型是SCIATRAN 3.2^[18],该辐射传输模式基于离散坐标法对辐射传输方程进行求解,为简便起见,在求解中忽略偏振贡献。在模拟传感器的卷积效应时,采用Boxcar型响应函数,传感器各波段半波宽(HWMF)与GOSAT对应波段参数相同,1.6μm波段和2.05μm波段分别约为0.03512nm和0.054nm。

在计算吸收气体的消光系数时,为了提高计算

精度,采用逐线积分(LBL)的方式计算,采样点间隔为0.001nm。在辐射传输计算时,将整个大气分为20层。在所选波段内存在的吸收气体为CO₂和H₂O。这两种吸收气体每一层的消光系数都通过该层所包含的各子层的消光系数相加得到。每一子层内近似认为压强恒定。太阳吸收光谱来自于Kurucz^[19]的太阳吸收线表。吸收气体的吸收截面通过HITRAN2008数据库^[20]中的吸收线参数计算获得。图1给出在GOSAT光谱分辨率下,1.6μm波段使用HITRAN2012^[21]和HITRAN2008的光谱差异。虽然相比2008版,2012版中CO₂的吸收线条数增加了许多,但是两者的总线强几乎相同,不同HITRAN数据库版本得到的透过率相差很小,只有在少数CO₂强吸收的地方存在一些波动,卷积后两者差在整个波段上几乎为0,可以认为2008版和2012版在该波段中对CO₂的敏感性相同。

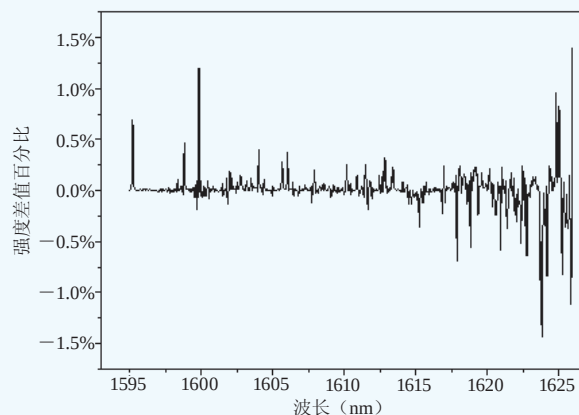


图1 使用HITRAN2008和HITRAN2012光谱库得到的模拟光谱差异(1.6μm波段)

Fig. 1 Difference between the spectrum at 1.6μm simulated using HITRAN2008 and HITRAN2012

在模拟过程中同时考虑大气分子和气溶胶粒子的散射影响。考虑到在实际CO₂反演中,有云存在的条件下反演结果可信度往往较低,假定模拟场景为无云情况。通过瑞利散射假设对大气分子散射进行模拟^[22],其对应的光学厚度是波长和大气分子数密度的函数。在模拟过程中选择的不同气溶胶模式来自于LOWTRAN气溶胶数据库^[23]。不同的气溶胶模式为:海洋型气溶胶(能见度:23km,相对湿度:70%),城市型气溶胶(能见度:10km,相对湿度:70%),乡村型气溶胶(能见度:23km,相对湿度:70%)和一般对流层气溶胶(能见度:23km,相对湿度:70%)。气溶胶光学厚度(AOD)的变化范围为0.05~1.0(0.55μm)。气溶胶散射特性模拟基于球形粒子假设,通过Mie散射对其散射相函数进行模拟。假定地表为朗伯体,两个CO₂吸收波段地表反射率相

同。利用迭代的非线性最小二乘法视线光谱匹配^[24]，对待反演参数进行反演。表1给出正向模拟时不同场景的参数变化范围。

表1 不同气溶胶模式的单次散射反照率 (SSA) 和不对称因子 (g) (1.536 μm)
Table 1 The SSA and asymmetry factor of different aerosol models (at 1.536 μm)

气溶胶模型	SSA	g
海洋型	0.99	0.89
对流层型	0.81	0.54
乡村型	0.86	0.64
城市型	0.56	0.90

2 忽略气溶胶散射对反演精度影响分析

大气气溶胶对 CO_2 反演的主要影响体现在其散射作用会改变到达传感器的入瞳光的光程。虽然在反演波段内气溶胶的散射特性相对一致，该光程改变量的估计误差仍会直接影响 CO_2 反演精度。气溶胶的光学特性 (AOD)、微物理特性 (SSA和不对称因子)、气溶胶粒子的垂直分布、下垫面反射率以及观测几何都会影响由散射作用引起的光程改变量，甚至光程改变的符号。

传感器接收到的光强 I_{tot} 可以表达为^[10]:

$$I_{\text{tot}} = I_{\text{dir}} + I_{\text{bsct}} + I_{\text{srf}} + I_{\text{rsct}} + I_{\text{msct}} \quad (1)$$

其中， I_{dir} 代表直射太阳光，即没有经过大气散射、仅经过一次地表反射后直接进入传感器的光强； I_{bsct} 代表大气后向散射，即仅经过大气中的分子和气溶胶后向散射进入传感器的光强； I_{srf} 代表大气散射光经地表反射直接进入传感器的光强； I_{rsct} 代表直射太阳光经地表反射后又经过一次大气散射进入传感器的光强； I_{msct} 代表经过大气和地表多次散射进入传感器的光强。若没有气溶胶散射存在，传感器接收到的光强以直射光项 I_{dir} 为主，大气散射项可以忽略。在气溶胶散射存在的情况下，大气散射项不能忽略，与直射光项 I_{dir} 相比，大气后向散射项 I_{bsct} 引起吸收光程缩短，而前向散射项 (I_{srf} , I_{rsct} , I_{msct}) 引起吸收光程增加。

考虑到大气散射对短波红外波段光程的改变是气溶胶散射与下垫面反射联合作用的结果^[25]。图2给出对应于LOWTRAN的不同气溶胶模式 (乡村型、对流层型、海洋型和城市型气溶胶) 在不同AOD (0.55 μm) 下，太阳天顶角为30°、观测天顶角为0°时，如忽略气溶胶散射， CO_2 柱浓度反演精度随地表反射率的变化。各相关要素的变化范围见表2。

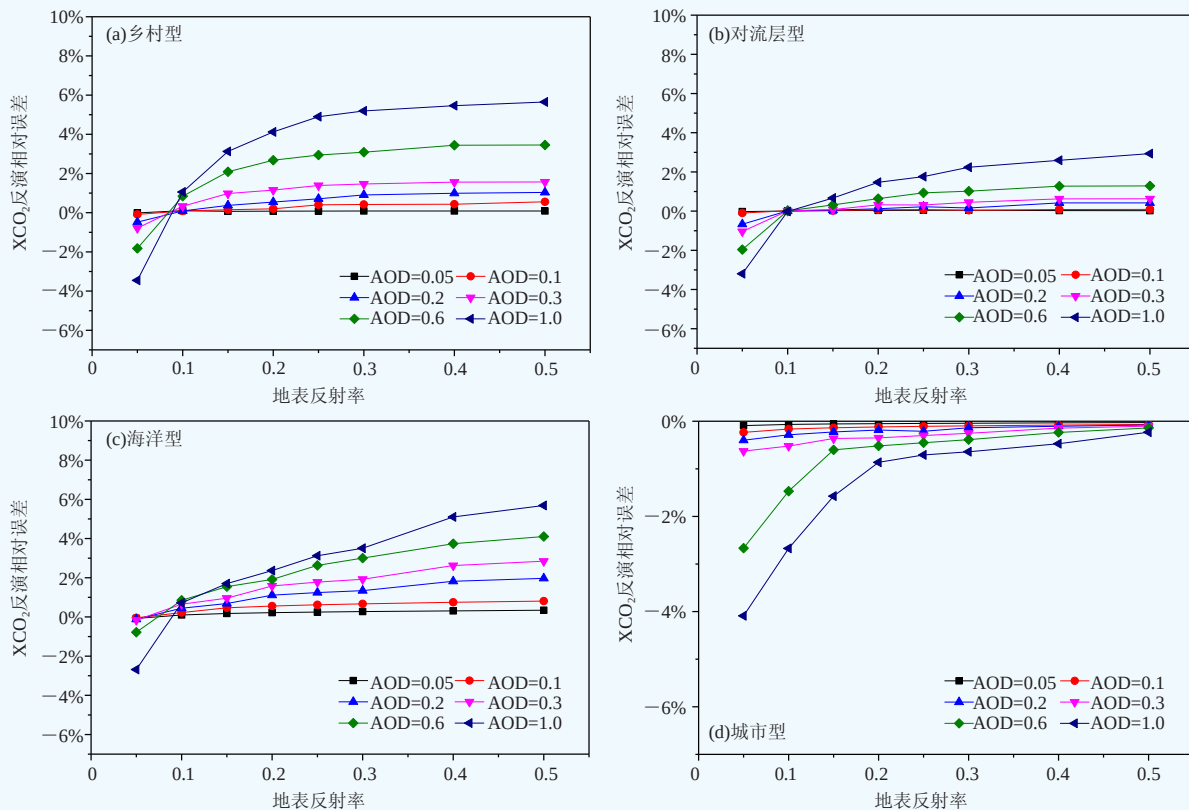


图2 乡村型 (a)、对流层型 (b)、海洋型 (c) 和城市型 (d) 气溶胶模式在不同AOD (0.55 μm) 情况下，忽略气溶胶存在时， XCO_2 反演相对误差 (真值为385ppm) 随地表反射率的变化

Fig. 2 Variation of the XCO_2 retrieval error introduced by ignoring aerosol scattering with the surface reflectance for different AOD(0.55 μm) under (a) rural, (b) tropospheric, (c) marine and (d) urban aerosol model

表2 气溶胶对CO₂反演精度影响分析中各要素的变化范围
Table 2 The variation range of parameters used in the study on CO₂ retrieval accuracy affected by aerosols

参数	变化范围
地表反射率	0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5
气溶胶模式	海洋型气溶胶, 城市型气溶胶, 乡村型气溶胶, 对流层型气溶胶
AOD (0.55μm)	0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0
观测几何	太阳天顶角 (30°), 观测天顶角 (0°)

在相同AOD和地表反射率情况下, 忽略海洋型和城市型气溶胶散射的反演误差明显大于忽略乡村型和对流层型气溶胶的误差 (AOD>0.5时, 反演误差可能超过15%)。在海洋型和城市型气溶胶模式下忽略气溶胶散射影响进行反演时, 为了保证反演结果的合理性, 需要对模拟光谱进行多项式校正, 减小由于气溶胶宽通道信号引入的反演误差。

对乡村型、对流层型和海洋型气溶胶模式, 在相同AOD下, 当地表反射率较低 (<0.1) 时, 忽略气溶胶散射影响会导致XCO₂反演结果低估; 当地表反射率超过0.1时, XCO₂反演结果高估且随地表反射率的增加反演误差逐渐增加; 在相同地表反射率条件下, 随AOD增加, 反演误差增加。这是由于在暗地表时, 传感器接收到的光强主要来自于大气后向散射项 I_{bsct} , 相比忽略气溶胶散射时的主要贡献项 I_{dir} , 吸收光程缩短, 因此反演的CO₂含量偏低。随着地表反射率的增加, 大气前向散射逐渐成为传感器入瞳光的主要贡献。此时前向散射项 ($I_{\text{srf}}, I_{\text{rsct}}, I_{\text{msct}}$) 的贡献增加, 后向散射项 (I_{bsct}) 贡献减弱, 前向散射项对应的吸收光程要大于直射光项, 因此反演的CO₂含量增加。城市型气溶胶模式与上面三种气溶胶模式不同: 在相同AOD情况下, 忽略气溶胶散射影响, 均导致CO₂反演结果低估; 随地表反射率增加, 误差递减, 即暗地表反演误差最大。在相同地表反射率条件下, 随AOD增加, 反演误差增加。

当地表反射率 (1.6μm) 和AOD (0.55μm) 在0.1~0.3时, CO₂柱总量反演误差对城市型气溶胶为-0.1%~-0.5%, 海洋型气溶胶为0.22%~1.92%, 乡村型气溶胶为0.09%~1.46%, 对流层气溶胶为0.02%~0.45%。本文的结果与Aben等^[16]得到的结论基本一致。Aben等^[16]发现强吸收的城市气溶胶会引起反演结果偏低, 而其他气溶胶模式除在暗地表会出现反演结果偏低外, 当地表反射率超过0.1时都会出现反演结果偏高。本文得到的海洋型气溶胶和城市型气溶胶的反演误差范围小于Aben等^[16]的结果 (分别引入0.1%~2.8%和-1.1%~0的反演误差)。这是由于本

文在这两种气溶胶模式下利用二阶多项式对宽通道信号进行校正, 压制了反演误差所致。Mao等^[10]通过强弱吸收带的辐射光谱比的变化来研究不同气溶胶模式对XCO₂反演精度的影响, 发现海洋型气溶胶对XCO₂反演精度影响最大 (~15ppm), 吸收性城市型气溶胶影响最小 (~1ppm)。与本文结论差异的原因在于, 基于强弱吸收带的辐射光谱比的校正可以大幅度削弱地表反射率或气溶胶引入的宽通道信号所导致的误差, 但对由气溶胶散射引起的吸收光程变化造成的误差削弱效果较差, 即对城市吸收型气溶胶 (SSA为0.52) 引入的误差校正最好, 而对在该波段散射性较强的海洋型气溶胶 (SSA为0.98) 引入的误差校正效果较差。该差异也说明, 无论反演误差是由于气溶胶或地表吸收还是由于散射引起的光程改变所引入, 基于二次多项式拟合宽通道信号的校正结果都较好。如果反演中无法获取气溶胶特性信息, 可以考虑用该校正方法提高反演精度。

3 反演实例分析

2013年8月在敦煌定标场 (40.19°N, 94.31°E) 开展了针对GOSAT L2级CO₂产品的精度评价试验。为了进一步说明气溶胶模式的不确定性对CO₂浓度反演的影响, 在地基实际气溶胶参数和以上不同气溶胶模式假设条件下分别利用GOSAT观测光谱对XCO₂进行反演。

考虑到CO₂反演需要无云场景, 采用GOSAT L2级 CAI 云检测产品对无云场景进行辨识。经过比较, 在地基同步观测时间内 (2013年8月19—25日), 仅有8月24日的GOSAT对应点观测光谱数据满足良好的无云场景条件。表3给出观测站位置信息及同步观测的环境参数信息。选择与地基观测站点位置最为接近的曝光点数据进行反演, 利用地基观测数据得到反演时刻附近的环境及大气参数。图3给出2013年8月24日拉曼偏振大气探测激光雷达在测得的GOSAT过境前后0.532μm大气消光系数廓线。图4和图5给出0.532μm消光系数时空演化图和0.532μm偏振系数时空演化图。可以看出试验当日, 敦煌地区大气洁净, 上午9:00—夜间20:00, 0.532μm的大气光学厚度在0.1以下, 且整日比较稳定。GOSAT过境时 (15:30前后), 大气中气溶胶粒子浓度较上午有所增长。整日大气偏振系数大多在0.15以下, 大气中气溶胶主要为规则的细粒子。14:00以后3km以下空气中有较薄的沙尘传输。由消光系数廓线可以看出, 当日敦煌地区大气边界层约为3km, 峰值在1.5km处。图6为2013年8月24日10:00—19:00 10km高度内大气粒子有效半径时空

演化图, 结果显示GOSAT过境前后, 地面到3km之间粒子有效半径主要集中在 $1\sim 1.5\mu\text{m}$ 。图7给出基于地

基CE318观测数据反演得到的GOSAT过境前后气溶胶粒子体积谱分布。

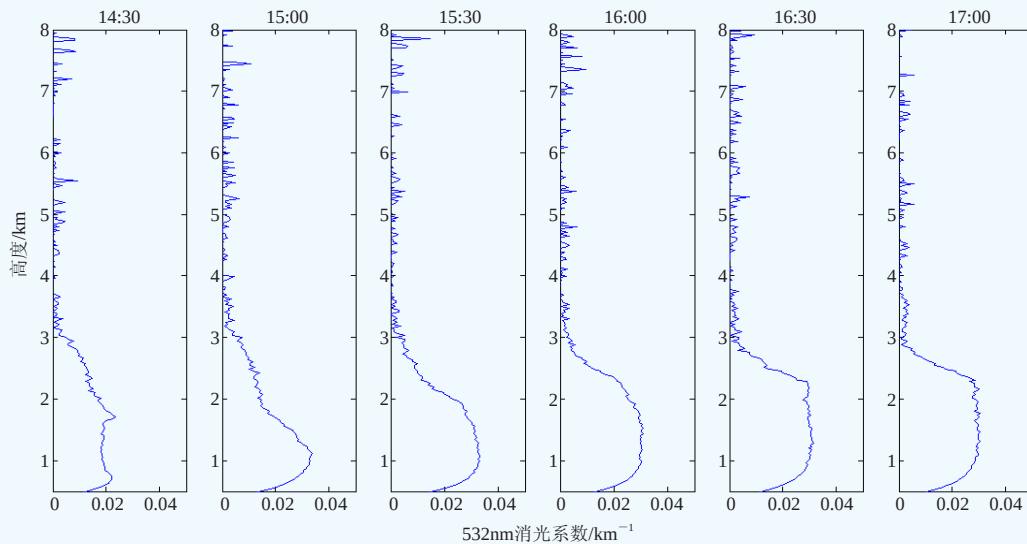


图3 2013年8月24日GOSAT过境前后敦煌站 $0.532\mu\text{m}$ 大气消光系数廓线

Fig. 3 The atmospheric extinction profiles at $0.532\mu\text{m}$ measured at Dunhuang near GOSAT overpass on August 24th, 2013

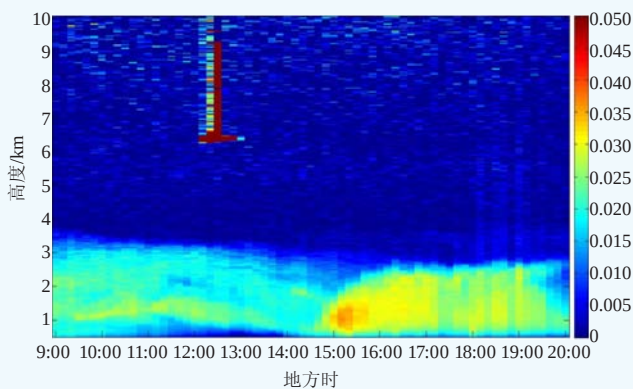


图4 2013年8月24日敦煌站 $0.532\mu\text{m}$ 消光系数时空演化图

Fig. 4 The space-time diagram of atmospheric extinction at $0.532\mu\text{m}$ measured at Dunhuang on August 24th, 2013

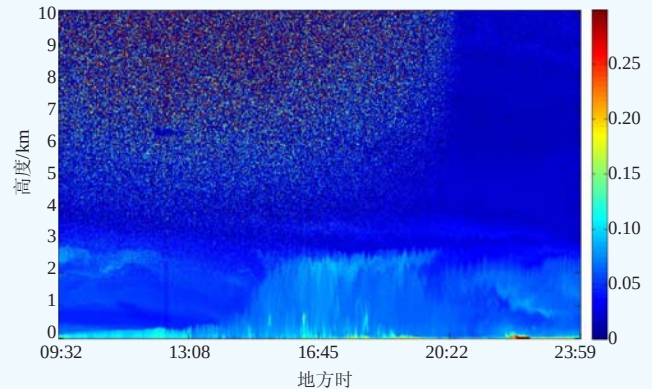


图5 2013年8月24日敦煌站 $0.532\mu\text{m}$ 偏振系数时空演化图

Fig. 5 The space-time diagram of aerosol polarization coefficient at $0.532\mu\text{m}$ measured at Dunhuang on August 24th, 2013

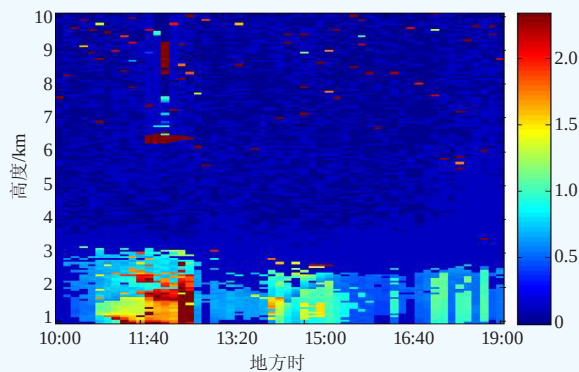


图6 2013年8月24日敦煌站粒子有效半径时空演化图

Fig. 6 The space-time diagram of aerosol effective radius measured at Dunhuang on August 24th, 2013

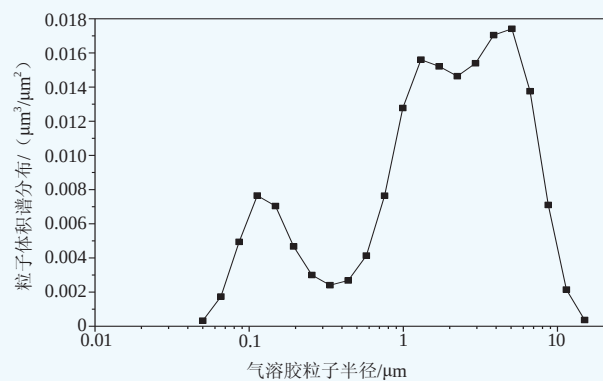


图7 基于CE318观测数据反演得到的GOSAT过境前后气溶胶粒子体积谱分布

Fig. 7 The aerosol volume size distribution during the GOSAT overpass retrieved from CE-318 measurements

表3 观测站位置信息及同步观测的环境参数

Table 3 The location of the ground observation station and simultaneous environmental parameters

观测站点参数	参数值
观测站点经纬度及高程	40.14°N, 94.32°E, 1.14km
卫星过境时刻	2013-08-24 15:08 (北京时间)
观测数据时刻	卫星过境前后20分钟内
卫星过境时段地表气压	867.99hPa
相对湿度	28.22%
卫星过境时段地面温度	30.78℃
大气垂直柱水汽含量	1.89g/cm ²
气溶胶参数 (1.6μm)	AOD: 0.06, SSA: 0.87 Ratioshape: 24.67
地表反射率	1.6μm: 0.31; 2.0μm: 0.34
试验场区域	10km×10km矩形同步观测区内11个测点, 每个测点多次测量, 左上角 (94.26°N, 40.18°E), 右下角 (94.38°N, 40.09°E), 中心点 (94.32°N, 40.14°E)
GOSAT对应曝光点经纬度	40.19°N, 94.31°E
气象条件描述	试验时段内, 观测时段的平均温度在30℃左右, 敦煌场地的温度日变化过程稳定, 上午温度迅速上升, 最高温度出现在下午14时以后, 温度变化不大, 高温可以持续到19时左右。相对湿度小于30%, 较为干热, 相对湿度的日变化也比较稳定, 在14时左右降到最低值。试验场地风速基本在5 m/s以下的微风

根据表3所列的环境参数先验值, 反演XCO₂。表4给出反演结果、GOSAT L2产品和地基观测结果的比较。在反演中除了XCO₂, 还对地表反射率, 大气垂直柱水汽含量、温度和压强廓线修正量进行反演。根据反演结果, 地表反射率和先验观测值差异明显, 在1.6μm和2.0μm波段分别为0.289和0.291。这是由于地表反射率实际观测值是在垂直方向上观测获得的, 没有考虑地表的方向反射特性。

表4 XCO₂反演结果比较

Table 4 Comparison of XCO₂ results

曝光点经纬度	40.19°N, 94.31°E	
曝光点时间	2013-08-24 07:08 UTC	
XCO ₂ 值	反演结果	390.950ppm
	GOSAT L2	389.814ppm
	地基观测结果	390.737ppm

为了进一步说明不同气溶胶模式对XCO₂反演结果的影响, 图8给出在实测AOD情况下, 不同LOWTRAN气溶胶模式和实测气溶胶模式情况下XCO₂反演结果。此时观测几何及其他环境参数均采用地基实测数据。相同AOD, 不同气溶胶模式下, 城市型和海洋型气溶胶引入的XCO₂反演误差最大, 分别为-1.97ppm和1.58ppm; 乡村型气溶胶引入的反演误差最小(0.48ppm)。这可能是由于乡村型气溶胶与实际气溶胶模式的差异相对较小, 特别是SSA差异为0.01, 而海洋型气溶胶和城市型气溶胶的SSA与实

际偏差分别为0.12和-0.31。此时城市型气溶胶模式假设下XCO₂反演结果偏低与上文的分析结论是一致的。

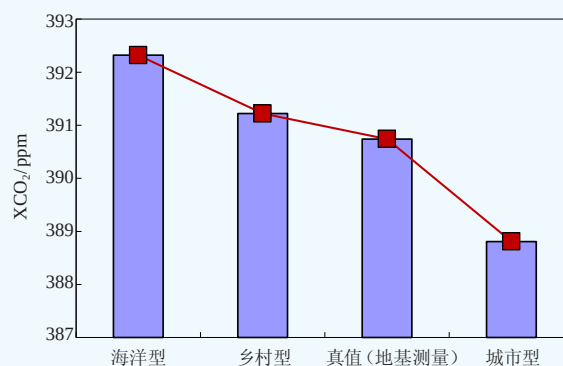


图8 不同气溶胶模式和实际观测条件下XCO₂反演结果

Fig. 8 The XCO₂ retrievals with different assumed aerosol types and the ground-based measured aerosol model.

4 结论

本文主要研究了不同气溶胶模式条件下, 忽略气溶胶散射对近地面CO₂浓度反演精度的影响。

对乡村型、对流层型和海洋型气溶胶模式来说, 在相同AOD条件下, 在低地表反射率(<0.1)时, 忽略气溶胶散射影响会导致XCO₂反演结果低估; 当地表反射率超过0.1时, XCO₂反演结果高估, 且随地表反射率的增加, 反演误差逐渐增加。而对城市型气溶胶模式来说, 在相同AOD条件下, 忽略气溶胶影响, 均会导致XCO₂的反演结果低估; 且随地表反射率增加, 误差递减。

忽略海洋型和城市型气溶胶散射影响, XCO₂反演误差明显大于其他两种气溶胶(AOD>0.5条件下反演误差可能超过15%)。采用二次多项式拟合宽通道信号校正观测光谱后可以取得较好的反演结果, 在反演中如果无法精确获取气溶胶特性信息可以采用该校正方法提高反演精度。

在不同气溶胶模式假设条件下利用GOSAT观测光谱对XCO₂进行反演。通过反演结果对比发现, 基于地基实测气溶胶特性数据的XCO₂反演结果与地基观测结果有更好的一致性。此外, 在实测AOD、不同气溶胶模式下, 城市型和海洋型气溶胶假设下引入的XCO₂反演误差最大, 分别为-1.97ppm和1.58ppm; 而乡村型气溶胶引入的反演误差最小(0.48ppm), 这主要是由于乡村型气溶胶与实际气溶胶模式的SSA差异相对较小所致。

参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY: Cambridge University Press, 2007.

- [2] Boland S, Bösch H, Brown L, et al. The need for atmospheric carbon dioxide measurements from space: Contributions from a Rapid Reflight of the Orbiting Carbon Observatory. Technical Report, OCO Science Team, NASA Jet Propulsion Laboratory, 2009.
- [3] Schneising O, Buchwitz M, Bovensmann H, et al. Three years of SCIAMACHY carbon dioxide and methane column-averaged dry air mole fraction measurements. Proceedings ENVISAT Symposium. 2007.
- [4] Yokota T, Yoshida Y, Eguchi N, et al. Global concentrations of CO₂ and CH₄ retrieved from GOSAT: First preliminary results. Sola, 2009, 5: 160-163.
- [5] Bovensmann H, Buchwitz M, Burrows J P, et al. A remote sensing technique for global monitoring of power plant CO₂ emissions from space and related applications. Atmos Meas Tech, 2010, 3: 781-811.
- [6] 刘毅, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 卫星遥感大气CO₂的技术与方法进展综述. 遥感技术与应用, 2011, 26(2): 247-254.
- [7] 施海亮, 熊伟, 罗海燕, 等. 新型超光谱大气CO₂遥感探测技术. 光电工程, 2013 (8): 36-41.
- [8] 邹铭敏, 陈良富, 陶金花, 等. 短波红外通道CO₂观测的温度敏感性分析. 红外与毫米波学报, 2012, 31(5): 455-462.
- [9] Oshchepkov S, Bril A, Yokota T, et al. Effects of atmospheric light scattering on spectroscopic observations of greenhouse gases from space: Validation of PPDF-based CO₂ retrievals from GOSAT. Journal of Geophysical Research, 2012, 117: D12305-D12305.
- [10] Mao J, Kawa S R. Sensitivity studies for space-based measurement of atmospheric total column carbon dioxide by reflected sunlight. Applied Optics, 2004, 43(4): 914-927.
- [11] Reuter M, Buchwitz M, Schneising O, et al. A method for improved SCIAMACHY CO₂ retrieval in the presence of optically thin clouds. Atmos Meas Tech, 2010, 3: 209-232.
- [12] Qu Y, Zhang C M, Wang D Y, et al. Comparison of atmospheric CO₂ observed by GOSAT and two ground stations in China. International Journal of Remote Sensing, 2012, 34: 3938-3946.
- [13] Houweling S, Hartmann W, Aben I, et al. Evidence of systematic errors in SCIAMACHY-observed CO₂ due to aerosols. Atmos Chem Phys, 2005, 5: 3003-3013.
- [14] Patra P K, Maksyutov S, Sasano Y, et al. An evaluation of CO₂ observations with solar occultation FTS for inclined-orbit satellite sensor for surface source inversions. J Geophys Res, 2003, 108.
- [15] Buchwitz M, Burrows J P. Retrieval of CH₄, CO, and CO₂ total column amounts from SCIAMACHY near-infrared nadir spectra: retrieval algorithm and first results. Proceedings of SPIE 5235, remote sensing of clouds and the atmosphere VIII, 2004.
- [16] Aben I, Hasekamp O, Hartmann W. Uncertainties in the space-based measurements of CO₂ columns due to scattering in the Earth's atmosphere. J Quant Spectrosc Radiat. Transfer, 2007, 104: 450-459.
- [17] Yang D X, Liu Y, Cai Z N. Simulations of aerosol optical properties to top of atmospheric reflected sunlight in the near infrared CO₂ weak absorption band. Atmos Oceanic Sci Lett, 2013, 6: 60-64.
- [18] Rozanov V V, Rozanov A V, Kokhanovsky A A, et al. Radiative transfer through terrestrial atmosphere and ocean: software package SCIATRAN. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2014, 133: 13-71.
- [19] Kurucz R L. New atlases for solar flux, irradiance, central intensity, and limb intensity. Memorie della Società Astronomica Italiana Supplement, 2005, 8: 189.
- [20] Rothman L S, Gordon I E, Barbe A, et al. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2009, 110: 533-572.
- [21] Rothman L S, Gordon I E, Babikov Y, et al. The HITRAN2012 molecular spectroscopic database. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2013, 130: 4-50.
- [22] Bodhaine B A, Wood N B, Dutton E G, et al. On Rayleigh optical depth calculations. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1999, 16: 1854-1861.
- [23] Shettle E P, and R W Fenn. Models of the atmospheric aerosols and their optical properties, in AGARD Conference Proceedings No. 183, ADA028-615, 1976.
- [24] Crisp D, Bosch H, Brown L, et al. OCO (Orbiting Carbon Observatory)-2 Level 2 full physics retrieval algorithm theoretical basis, Tech Rep OCO D-65488, NASA Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, version 1.0 Rev 4. available at: http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/acdisc/documentation/OCO-2_L2_FP_ATBD_v1_rev4_Nov10.pdf (last access: January 2012), 2010. 13042, 13045.
- [25] Dubuisson P, Borde R, Schmechtig, C, et al. Surface pressure estimates from satellite data in the Oxygen A-band: Applications to the MOS sensor over land. J Geophys Res, 2001, 106: 27277-27286.

CGMS发表气象卫星价值评价的指导文件

本刊编辑部

包括中国气象局在内的16个环境卫星相关组织参加的气象卫星协调组织 (the Coordination Group for Meteorological Satellites, CGMS) 的目标, 是协调全球业务气象卫星系统。CGMS通过保护轨道资源、出台应急计划、改进数据质量、支持用户、促进资料共享和在关键领域开发卫星产品等实现其宗旨。

2013年, CGMS在其第41届全会上成立了社会经济效益专家组 (Socioeconomic Benefits Tiger Team, SETT), 以获得卫星观测系统社会经济效益评价的可靠方法, 探索与利益相关者交流的有效途径。

SETT成立后, 完成了主题文献调研, 搜集了CGMS成员、世界气象组织和其他相关机构社会经

济评估方面的实践信息。在这些工作的基础上, 2015年10月发表了这份评估气象卫星价值的指导文件。

这份文件给出了评价问题的背景、研究设计、评价方法、一般框架、汲取教训、关键术语和个例研究等内容。

未来, SETT还将在已有基础上, 对概念注释完善和社会化, 从业务分析和经济分析两个方面确定社会经济效益研究可依据的资源, 同时对与外界交流这项研究的结果做出规划。



星载SAR降水反演研究简介

孙逢林 覃丹宇 游然

(中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 降水是水循环的主要组成部分之一, 具有重要的气象学、气候学与水文学意义。对降水及其区域和全球分布进行精准测量, 一直是一个颇具挑战的科学问题。星载微波遥感器提供的数据, 可以有效减少卷云对降水反演精度的影响。经过近50年的发展, 星载微波遥感器的降水反演算法也逐渐发展成熟起来。简要回顾了几代被动与主动星载微波降水测量仪器。针对实孔径低分辨率微波遥感器探测的降水场动态范围变小的问题, 介绍了利用高分辨率SAR数据进行降水探测的前向物理模型以及修正的沃尔塔积分降水反演方法与基于统计的反演方法。

关键词: 星载微波遥感, 合成孔径雷达, 降水, 反演算法

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.017

Brief Introduction to Research on Spaceborne Synthetic Aperture Radar Retrieval of Precipitation

Sun Fenglin, Qin Danyu, You Ran

(Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract: Precipitation is a fundamental component of the global water cycle. It is a key hydrologic variable of the water cycle in meteorology. Accurate observation of precipitation for regional and global distributions has always been a challenging scientific goal. Spaceborne Microwave data may carry precipitation information suppressing the impact of Cirrus. With five-decade development of spaceborne sensors, the approaches to retrieving precipitation are prosperously developed. A brief review of generations of passive and active precipitation microwave sensors is given. More recently, forward physical model and the inversion techniques named Volterra Integral Equation (VIE) approach and model-oriented statistical (MOS) methodology to quantitatively derive precipitation by spaceborne Synthetic Aperture Radar measurements are presented to enhance spatial resolution and improve the statics of precipitation fields and dynamics of rain rate.

Keywords: spaceborne microwave remote sensing, SAR, rain rate, retrieval algorithms

0 引言

降水是水循环的重要组成部分。从物理机制角度看, 降水与潜热释放的大气环流运动相关, 并影响着海水的盐度、江河湖泊以及地下水资源。另外, 降水与生物生存以及人类社会经济的发展也息息相关。极端灾害事件伴随着不同类型的降水过程如洪水、泥石流等对人类生命与财产构成严重的威胁。降水的精确测量能够加深我们对水汽循环、大气循环和中尺度风暴特征的理解, 有助于我们认识极端天气系统的发展过程, 并对其灾害性影响做出预测与估计^[1-3]。

目前, 测量全球尺度降水率分布的唯一可行方法是借助于卫星遥感技术, 星载遥感手段能够提供较

大范围覆盖的降水测量^[4-5]。早期的遥感降雨反演主要依赖于被动遥感, 包括地球静止卫星和近地轨道卫星可见光和红外遥感器^[6-7], 同时也发展了一系列可见光/红外降雨反演算法^[8-9]。微波遥感器提供的卫星数据, 可以有效减少卷云对降雨反演精度的影响^[10]。在降水探测方面, 微波波段提供的信息与可见光和红外波段相比具有补充作用^[11]。微波能够穿透厚云与降水, 其涵盖的信息是云内部的响应, 与降水机制息息相关。星载微波辐射计观测降水时, 由于水凝物等对电磁波谱具有强烈的衰减作用, 因此, 被动微波遥感能够提取到降水信息。在过去的三十年中, 被动微波辐射计从单通道低分辨率的ESMR (Electronically Scanning Microwave Radiometer) 发展到高分辨多频率通道的AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observation System)。自从DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) 搭

收稿日期: 2015年8月31日; 修回日期: 2015年12月29日
第一作者: 孙逢林 (1986—), E-mail: sunfl@cma.gov.cn
资助信息: 国家高技术研究发展计划 (201402KY042)

载的SSM/I成功发射,微波辐射计成为降水反演的主要仪器。TRMM卫星搭载了降雨雷达(PR)以及微波成像仪(TMI),掀开了雷达测量降水新的一页。利用星载降水雷达观测降水时,利用水凝物对电磁波谱强烈的散射以及双程衰减信息反演降水更为直接。同时利用PR获得的降水信息也加速了被动微波遥感降水算法的发展。作为TRMM的延续与发展,GPM(Global Precipitation Measurement Mission)搭载了双频降雨雷达DPR(Dual-frequency Precipitation Radar)以及微波成像仪GMI(GPM Microwave Imager),能够更精确地提供中高纬度降水信息^[12]。

但利用星载微波资料反演降水,仍然存在着巨大的挑战。传统微波仪器采用的是真实孔径天线,其空间分辨率由天线口径尺寸决定。Marzano等^[13]的分析结果表明,不仅仅是降水率的均值,整个降水场的统计特性都会因实孔径天线方向图决定的点扩散函数加权平均而改变。实孔径测雨雷达与辐射计波束的不均匀性填充将引入一定的误差,并使得测量的降水率动态范围变窄^[14-15]。相控阵雷达可以提高一定的分辨率,但不能有质的提高,并且其电扫描视场有限。去除大气以及目标运动降质影响,SAR可能是唯一可以提供百米量级空间分辨率对降水观测的星载微波遥感器。SAR采用多普勒频率锐化来提高方位向(顺轨)分辨率,通过脉冲压缩(一般是Chirp线性调频信号)的方法提高距离向(交轨)分辨率^[16]。当SAR系统的工作频率提升时,可以明显地观测到地面成像受到强降水的干扰。

SAR作为新型的相干型主动微波仪器,可以大幅度提高空间分辨率,但需要建立比较精确的模型才能在降水探测中发挥重要作用^[13]。Moore等^[17-18]首先针对用于全球降水监测的SAR,从雷达方程的信噪比与可测降水率最小值等方面进行了验证;针对SAR降水率反演研究,Pichugin等^[19]提出了沃尔塔积分反演算法并对算法进行了验证,该算法数学推导严谨,精度高,但运算量巨大;Weinman等^[20-21]提出了面向模型的统计方法(model of statistics, MOS),以及分析了将球面波简化为平面波的误差影响,并将基于MOS的反演算法和VIE算法进行了对比;Marzano等^[13]进一步论证了X波段SAR测雨的能力,并且给出了根据雨区衰减补偿回波图像的方法。

目前国内学者也开展了不少SAR降水反演的研究。陈嘉琪等^[22]对降水粒子电磁特性与SAR成像进行了仿真研究。彭华等^[23]针对不同粒子属性,利用离散偶极子快速仿真SAR降水粒子雷达散射截面。王欣

等^[24]针对降水对C波段SAR散射截面的影响进行了分析。谢亚楠等^[25]提出了MOS的改进方法并通过对雨滴形状的分析来提高X波段SAR图像—降水率分布反演精度。

1 SAR降水探测回波模型

为防止目标模糊,SAR测量采用的是侧视观测模式,因此不可避免的发生掩叠等问题(如图1所示的是SAR平面波降雨探测模型,一个回波距离门单元包含了降雨体散射与下垫面散射叠加的信息),需要根据降雨体对SAR回波信号进行精确建模。

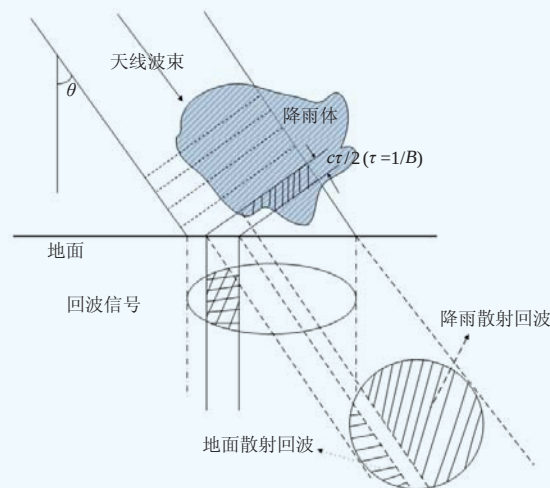


图1 SAR降水雷达回波信号掩叠现象示意图

Fig. 1 A depiction of a precipitation SAR imaging scenario which illustrates the layover effect

真实的雷达反射率被用来反演降水垂直分布廓线。真实的雷达反射率 Z_e 与测量的雷达反射率 Z_m 之间存在以下关系:

$$Z_m(r) = A(r)Z_e(r) + \delta_{Z_m}(r) \quad (1)$$

其中, r 表示目标到雷达的距离; δ_{Z_m} 表示测量值存在的误差; A 是衰减系数:

$$A(r) = e^{0.11 \ln(10)PIA(r)} \quad (2)$$

其中, PIA 是双向路径积分衰减,具体可表示为:

$$PIA(r) = 2 \int_0^r [k_p(s) + k_{CLW}(s) + k_{WV}(s) + k_{O_2}(s)] ds \quad (3)$$

其中, k_p 、 k_{CLW} 、 k_{WV} 、 k_{O_2} 分别表示降水、云液态水、水汽、氧气吸收系数。

2 SAR降水归一化雷达散射截面模型

SAR图像—降水率前向模型如图2所示。为简化模型,入射波假设为角度为 θ 的平面波;降水分为冰层与降水层两层,高度分别为 z_h 与 z_0 ;测量的归一化雷达散射截面 σ_{SAR} 由两部分组成:地表的后向散射 σ_{srf} 以及降水体散射 σ_{vol} ,表示为

$$\sigma_{SAR}(x, y) = \sigma_{srf}(x, y) + \sigma_{vol}(x, y) \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{srf}}(x) = \sigma^0(x) \exp \left\{ -2 \int_{x-z_h \tan \theta}^x k[x_1, (x-x_1)/\tan \theta] \frac{dx_1}{\sin \theta} \right\} \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{vol}}(x) = \sin \theta \int_x^{x+z_h/\tan \theta} \eta[x_t, (x_t-x)\tan \theta] e^{-2 \int_{x_1-X(x,\theta)}^{x_t} k[x_k, z_h-x_1/\tan \theta] \frac{dx_k}{\sin \theta}} \frac{dx_t}{\cos \theta} \quad (6)$$

式(5)中, $k(\text{km}^{-1})$ 表示消光系数, $\sigma^0(x)$ 表示地表归一化散射截面。式(6)中, $\eta(\text{km}^{-1})$ 表示雷达反射率(或者是体散射系数); x_1 、 x_k 、 x_t 表示 x 方向变量, $X(x, \theta) = (z_h - x_1 \tan \theta) \tan \theta$ 。

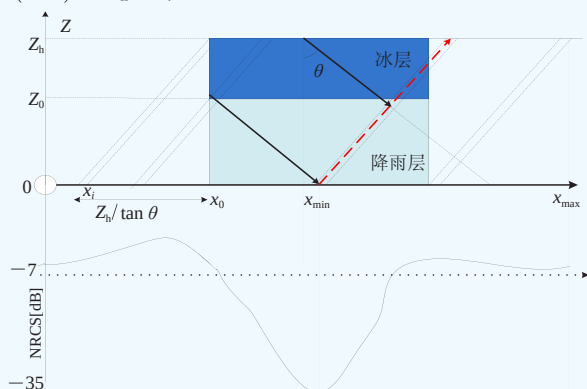


图2 降水分层模型与SAR归一化雷达散射截面响应
Fig. 2 Schematic view of the precipitation SAR model and NRCS response

3 SAR降水反演方法

降水垂直分布廓线的反演算法可分为两步。首先,由测得的垂直廓线 Z_m 估算 Z_e ,这一步相当于对雷达信号衰减进行校正。然后,再建立 Z_e 与降水率 R_r 之间的模型关系,即

$$z_e = aR_r^b \quad (7)$$

根据该经验模型,可以建立 $k(x, z)$ 以及 $\eta(x, z)$ 与 $R_r(x, z)$ 之间的关系(图3)^[26]。系数 a 与 b 取决于粒子尺寸分布、形状、以及成分。为简化模型,避免微观物理参数的严格选取过程,一般采用经验的回归模型:

$$k(x, z) = aR_r^b(x, z) \quad (8)$$

$$\eta(x, z) = \frac{\pi^5 |K|^2}{\lambda^4} Z_g(x, z) = \frac{\pi^5 |K|^2}{\lambda^4} cR_r^d(x, z)$$

其中, Z_g 为瑞利等效反射因子, K 为粒子复介电因子($|K|^2$ 对于水取值为0.93,对于冰取值0.19),参数

a 、 b 、 c 、 d 为经验系数取决于波长与季节降水特征。对于X波段SAR以及典型的陆地对流降水云条件下系数如表1所示^[27]。

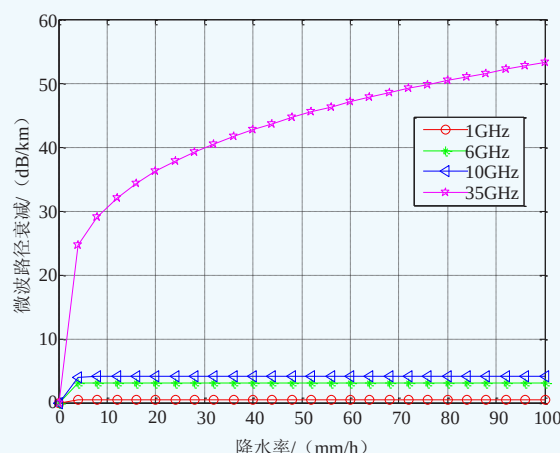


图3 微波路径衰减与降水率ITU模型(圆极化)
Fig. 3 Specific attenuation given versus the rain rate in units of mm/hr after the ITU Model

表1 降水与雪的经验系数

Table 1 Summary of constants for rain and snow

类型	a	b	c	d
降水	2.6×10^{-3}	1.11	300	1.35
雪	5.6×10^{-3}	1.6	182	1.6

3.1 修正的沃尔塔积分方程反演方法

SAR降水的沃尔塔积分方程反演方法是针对式(5)一式(8),引入了函数:

$$f(u) = \exp \left(-2 \int_u^{\infty} k(v) \frac{dv}{\sin \theta} \right) \quad (9)$$

将式(8)按式(9)进行变量替换,联立式(4)得到第二类的沃尔塔积分方程,通过该积分方程的求解最终得到降水率的分布。修正的沃尔塔积分方程反演方法流程图如图4所示。沃尔塔积分方程求解方法需要多次数值积分计算,且受到计算科特斯

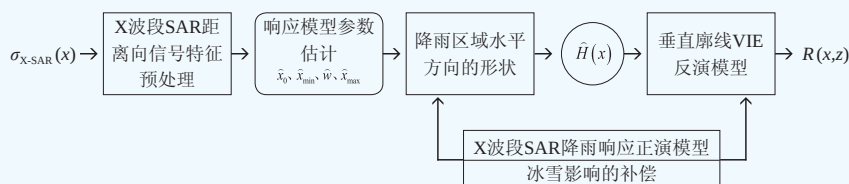


图4 降水率分布的修正VIE反演框图
Fig. 4 Schematic view of the modified VIE algorithm

系数的限制,进行数值积分的点不宜多,通过插值的方法获得的降水率分布精度容易受损。

3.2 基于 MOS 的降水反演方法

基于MOS的降水反演方法利用SAR归一化散射截面计算二维分布的降水率,建立降水率分布模型,采用变量分离的方法:

$$R_r(x, z) = H(x)V(z) \quad (10)$$

其中,降水率分布垂直方向分解模型 $V(z)$ 采用的是CFAD(Contoured Frequency by Altitude Diagrams)模型^[28]:

$$V(z) = \begin{cases} V(0)[0.85 + 0.15(1 - z/z_0)^{0.62}], & 0 \leq z \leq z_0 \\ V(z_0) \left(\frac{z_h - z}{z_h - z_0} \right)^p, & 0 \leq z \leq z_0 \end{cases} \quad (11)$$

参数 P 定义了冰层等效降水率。降水率分布水平方向分解模型 $H(x)$ 采用对称的三角形、梯形或者高斯分布。基于空间分布模型的降水率反演核心算法通过SAR回波数据预处理,得到降水起点、回波最小值、降水区域宽度等参数,在某个区域分别采用修正MOS模型(流程图如图5所示)获取降水垂直分布的形状和降水速率等信息。

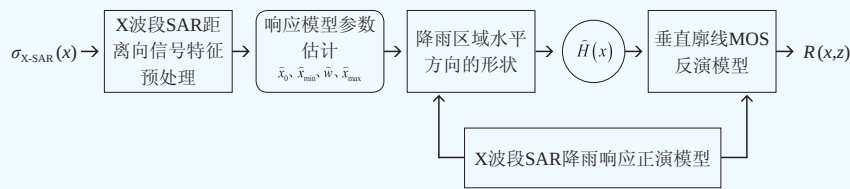


图5 降水率分布的修正MOS反演框图
Fig. 5 Schematic view of the MOS algorithm

图6给出了地面S波段气象雷达数据、TerraSAR-X数据、PR数据以及TMI数据降水率反演结果^[13]。各仪器的一维分辨率信息如下: TerraSAR-X以及地面S波段气象雷达的分辨率大概为0.5km,而PR对应的分辨率为4km, TMI(37GHz)的分辨率为15km。PR与TMI反演结果由S波段气象雷达数据反演结果通过对应的天线波束卷积核卷积而成。对比各仪器反演结果可

知:降水场存在不均匀性,空间梯度较大;在这样的情况下, TMI与PR由于波束较宽(卷积核较宽),产生了强烈的波束填充效应,与地面气象雷达降水率结果对比,其反演降水场的动态范围减小,降水率极值地区不能精确地估计(TMI较PR更为严重); SAR数据反演的降水率与地面气象雷达降水率结果较吻合,波束填充效应明显减弱。

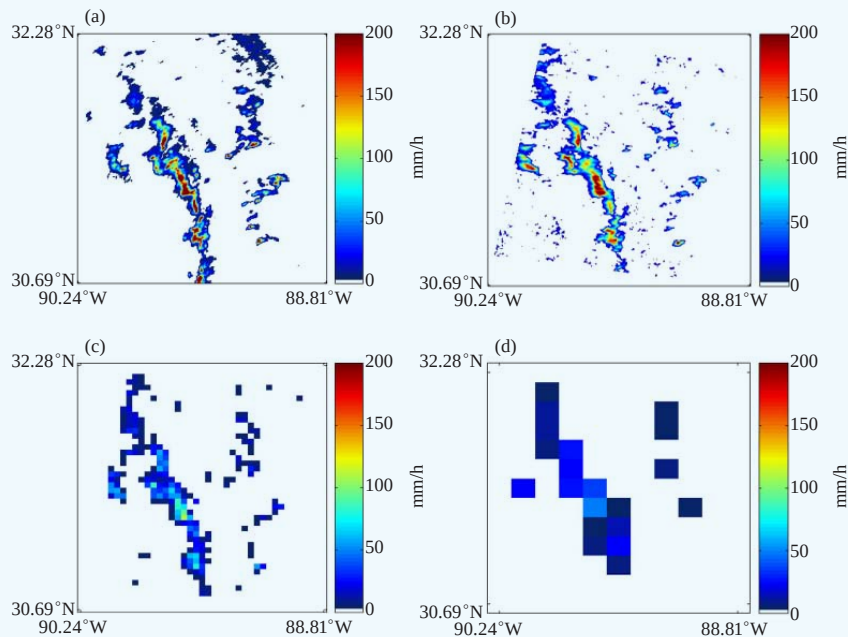


图6 各仪器降水反演对比(单位: mm/h): (a) 地面气象雷达NEXRAD Z-R关系反演的降水率; (b) TerraSAR-X修正MOS降水率反演结果; (c) PR观测数据降水率反演结果; (d) TMI观测数据降水率反演结果

Fig. 6 Rain-rate obtained by different sensors(mm/h): (a) map of measured rain-rate obtained by standard NEXRAD Z-R, (b) map of TSX estimated rain-rate, (c) map of PR-like estimated rain-rate, and (d) map of TMI-like estimated rain-rate

4 总结与展望

本文对SAR降水反演算法进行了简要介绍。目前的各反演算法都是为仪器以及其资料量身定作，具有各自的优缺点。从反演结果看，降水SAR在PR基础上，能够提供足够的分辨率，能够在一定程度上减轻降水反演非均匀性波束充塞效应。但目前提出的SAR反演降水率分布的方法都建立在如下假设条件基础上^[29-30]：1) 降水区域下垫面贡献恒定的散射截面，通过无降水时测量得到；2) 降水中粒子组成、尺寸等与微波的关系已知，并且可以通过模型建立；3) 降水分布垂直方向与水平方向独立。这些假设条件比较粗糙，可能并不完全符合实际情况，对算法反演精度造成影响。对这三个假设条件的修正将是后续工作需要重点解决的问题。

参考文献

- [1] Xie P, Arkin P A. Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78(11): 2539-2558.
- [2] Trenberth K E. Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 2011, 47(1): 123-138.
- [3] Mueller B, Seneviratne S I. Hot days induced by precipitation deficits at the global scale. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(31): 12398-12403.
- [4] Engman E T, Gurney R J. *Remote sensing in hydrology*. Chapman and Hall Ltd, 1991.
- [5] Stephens G L, Kummerow C D. The remote sensing of clouds and precipitation from space: A review. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2007, 64(11): 3742-3765.
- [6] Ba M B, Gruber A. GOES multispectral rainfall algorithm (GMSRA). *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40(8): 1500-1514.
- [7] Griffith C G, Woodley W L, Grube P G, et al. Rain estimation from geosynchronous satellite imagery-visible and infrared studies. *Monthly Weather Review*, 1978, 106(8): 1153-1171.
- [8] Kidd C. Satellite rainfall climatology: A review. *International Journal of Climatology*, 2001, 21(9): 1041-1066.
- [9] Levizzani V, Bauer P, Turk F J. *Measuring precipitation from space: EURAINSAT and the future*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [10] Kummerow C, Hong Y, Olson W, et al. The evolution of the Goddard Profiling Algorithm (GPROF) for rainfall estimation from passive microwave sensors. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40(11): 1801-1820.
- [11] Michaelides S, Levizzani V, Anagnostou E, et al. Precipitation: Measurement, remote sensing, climatology and modeling. *Atmospheric Research*, 2009, 94(4): 512-533.
- [12] Hou A Y, Kakar R K, Neeck S, et al. The Global Precipitation Measurement (GPM) mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, 95: 701-722.
- [13] Marzano F S, Mori S, Chini M, et al. Potential of high-resolution detection and retrieval of precipitation fields from X-band spaceborne Synthetic Aperture Radar over land. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2010, 15(3): 859-875.
- [14] Tanelli S, Im E, Durden S L, et al. The effects of nonuniform beam filling on vertical rainfall velocity measurements with a spaceborne Doppler radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19(7): 1019-1034.
- [15] Durden S, Tanelli S. Predicted effects of nonuniform beam filling on GPM radar data. *Geoscience and Remote Sensing Letters*, IEEE, 2008, 5(2): 308-310.
- [16] 卡明, 东辉. 合成孔径雷达成像: 算法与实现. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [17] Moore R, Mogili A, Fang Y, et al. Rain measurement with SIR-C/X-SAR. *Proceedings of the 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'96)*. Nebraska, USA: 1996.
- [18] Atlas D, Moore R K. The measurement of precipitation with synthetic aperture radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1987, 4(3): 368-376.
- [19] Pichugin A, Spiridonov Y G. Spatial-distribution of rainfall intensity recovery from space radar images. *Soviet Journal of Remote Sensing*, 1991, 8(6): 917-932.
- [20] Weinman J, Marzano F. An exploratory study to derive precipitation over land from X-band synthetic aperture radar measurements. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47(2): 562-575.
- [21] Weinman J, Marzano F, Plant W, et al. Rainfall observation from X-band, space-borne, synthetic aperture radar. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2009, 9(1): 77-84.
- [22] 陈嘉琪, 陈如山, 彭华, 等. 降雨粒子电磁特性分析及雨区目标成像. *电波科学学报*, 2011, 26(5): 888-893.
- [23] 彭华. 高频电磁快速仿真及降雨粒子散射特性分析. 南京: 南京理工大学, 2011.
- [24] 王欣, 邵伟增, 沙远红, 等. 降雨对 SAR 后向散射截面的影响. *海洋湖沼通报*, 2014, 2: 15-22.
- [25] 谢亚楠, 万智龙, 刘文渊. 基于SAR测量的改进型VIE降雨反演算法. *上海大学学报(自然科学版)*, 2012, 18(5): 464-469.
- [26] ITU-R P.838-3-8, Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. ITU, Geneva, Switzerland, 2008.
- [27] Smith P L. Equivalent radar reflectivity factors for snow and ice particles. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1984, 23(8): 1258-1260.
- [28] Yuter S E, Houze Jr R A. Three-dimensional kinematic and microphysical evolution of Florida cumulonimbus. Part II: Frequency distributions of vertical velocity, reflectivity, and differential reflectivity. *Monthly Weather Review*, 1995, 123(7): 1941-1963.
- [29] Ahamad A. Limitation on the use of a spaceborne SAR for rain measurements. NASA contractor report NASA CR-196486.
- [30] Marzano F S, Weinman J A. Inversion of spaceborne X-Band synthetic aperture radar measurements for precipitation remote sensing over land. *Geoscience & Remote Sensing IEEE Transactions on*, 2008, 46(11): 3472-3487.

静止与极轨气象卫星监测沙尘的融合算法研究

曹广真 张鹏 胡秀清 陈林

(中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 为了综合应用静止气象卫星与极轨气象卫星沙尘监测的结果, 更好地进行沙尘信息的判识, 采用改进的证据理论方法, 进行静止卫星FY-2D/2E红外差值沙尘指数(infrared difference dust index, IDDI)产品与极轨气象卫星FY-3A沙尘强度指数(dust strength index, DSI)沙尘监测产品的融合处理, 划分沙尘发生过程中的有沙尘暴发生区、无沙尘暴发生区及可能沙尘暴发生区。融合结果与气象站点观测结果的对比分析表明, 本算法可以将静止气象卫星与极轨气象卫星遥感沙尘监测结果进行较好地融合, 更好地划分沙尘暴发生的区域, 对于沙尘暴过程的监测、评估和分析具有重要的参考价值 and 指导意义。

关键词: 静止气象卫星, 极轨气象卫星, 红外差值沙尘指数, 沙尘强度指数, 改进的证据理论, 数据融合

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.018

Study on the Fusion of Dust Products of Geostationary and Polar-Orbiting Meteorological Satellites Based on Improved Evidence Theory Algorithm

Cao Guangzhen, Zhang Peng, Hu Xiuqing, Chen Lin

(Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract: The objective of this study was to integrate the advantages of multi-source remote sensing to monitor dust storms and better discriminate between regions where dust storms occur. Firstly, The traditional evidence theory algorithm was improved by not only considering the certainty of the evidence, but also considering the average level of support for the subsets of evidence in the discrimination framework in the process of evidence combination by reducing the conflict between synthesized data. Then the algorithm is applied to the FY-2D/2E infrared difference dust index (IDDI) and the FY-3A dust strength index (DSI) to categorize the study region as either a dust storm area, non-dust storm area, or possible dust storm area. Finally, the result was validated and analyzed using the monitored data from ground stations. Both the accuracy and reliability of the dust monitoring results were considerably improved using our method.

Keywords: geostationary meteorological satellite, polar-orbit meteorological satellite, infrared difference dust index, dust strength index, improved evidence theory algorithm, data fusion

0 引言

沙尘天气是我国西北和华北北部地区经常出现的强灾害性天气。准确监测沙尘强度, 分析沙尘天气的时空分布特征, 对于区域生态环境具有十分重要的意义。

传统的沙尘监测方法主要是通过设立地面监测站点进行的, 其优点在于可以实时实地进行连续观测, 缺点在于其受到人力、物力、财力和技术的限制, 很难进行大规模布点, 无法实现大范围系统性沙尘暴发

生、移动和沉降的监测。随着遥感技术的不断发展, 不同平台、不同空间分辨率、不同时间分辨率和不同谱段特征的遥感器陆续升空, 卫星遥感技术克服了传统监测方法中的缺点和不足, 已成为沙尘区域分布和沙尘强度监测的重要技术手段。

红外差值沙尘指数(infrared difference dust index, IDDI)是目前国内外静止卫星沙尘暴业务产品生成广泛采用的参数之一, 其数值是卫星观测到的实时目标亮温与地表背景亮温之差, 其中地表背景亮温是同时刻晴空大气的地表亮温。IDDI值越大, 代表空气中的沙尘越多, IDDI越小, 代表空气中的沙尘越少。欧洲科学家将其用于Meteosat长时间序列资料的处理, 并将结果用于沙漠气候的相关分析^[1-2]。

收稿日期: 2015年9月3日; 修回日期: 2015年12月20日
通信作者: 曹广真(1976—), Email: caogz@cma.gov.cn
资助信息: 北京市科技新星项目(2010B037); 国家自然科学基金(41475031)

我国从20世纪90年代开始发展沙尘暴卫星遥感方法。郑新江等^[3-4]在90年代主要利用极轨气象卫星NOAA/AVHRR的多通道数据进行沙尘目标判识,同时还开展了卫星遥感沙尘光学厚度和载沙量初步研究。胡秀清等^[5]自2001年着手开展用静止气象卫星进行自动沙尘暴监测研究,并于2006年重点引入IDDI参数,开发了一套静止气象卫星沙尘暴自动监测业务算法,应用于GMS-5、GOES-9、我国风云二号静止气象卫星等遥感资料。张鹏等^[6-7]以米散射理论为基础,利用MODIS的8.5 μm 、11 μm 和12 μm 通道红外观测,开发了一套MODIS沙尘暴定量遥感算法,除提供沙尘检测产品外,还获取沙尘气溶胶光学厚度产品、沙尘粒子有效半径产品和沙尘总量产品。随着新一代极轨气象卫星FY-3A/3B/3C的发射,我国沙尘定量产品的开发也得到发展,如已经业务运行的VIRR沙尘强度指数(dust strength index, DSI)产品,以及探索开发的沙尘高度产品等。另外,一些新的技术和方法,也不断被探索应用到遥感沙尘信息的反演和应用上^[8-10]。

但是,遥感技术进行沙尘监测同样具有局限性。由于成像原理不同和技术条件的限制,任何单一的遥感手段获取的数据在几何、光谱和空间分辨率等方面存在明显的局限性和差异性,不能够全面反映沙尘目标物的特征,应用范围有限。通过建立有效的多源信息融合方法,进行多源遥感沙尘信息的融合,实现遥感观测彼此之间的优势互补,全面监测并分析沙尘过程,将有助于对沙尘形成机理的科学认识,更好地科学指导沙尘天气的防治、城市生态环境建设等工作。为了从多源遥感沙尘监测结果中判断有沙尘暴发生区、无沙尘暴发生区以及可能沙尘暴发生区,开展彼此之间的融合处理十分必要。本文采用改进的证据理论方法,进行静止卫星FY-2D/FY-2E IDDI沙尘监测产品与极轨气象卫星FY-3A DSI产品的融合处理,划分沙尘发生过程中的有沙尘暴发生区、无沙尘暴发生区及可能沙尘暴发生区。

1 数据源及其特征

FY-2D IDDI产品: 基于FY-2D L1级数据所开发的沙尘监测产品,时间频次1h,逢半点生成。空间分辨率5km。

FY-2E IDDI产品: 基于FY-2E L1级数据所开发的沙尘监测产品,时间频次1h,逢整点生成。空间分辨率5km。

FY-3A DSI产品: 基于FY-3A L1级数据所开发的沙尘强度监测产品,时间频次1次/d,生成时间视卫星过境时间而定,对于北京及周围地区一般是地方时上

午10:30左右。空间分辨率1km。

2 融合方法

2.1 证据理论

证据理论,又称Dempster-Shafer (D-S)理论^[11],是一种处理不确定性信息的理论。在D-S证据理论中,首先将待识别对象所有可能类型的集合所构成的空间定义为识别框架 Θ , Θ 中所有子集组成的集合 2^Θ 中任何假设集合A的基本概率赋值函数BPAF为 $m(A)$,信任函数Bel(A)和似然函数Pls(A)表示问题的不确定性。

虽然D-S理论提供了相关证据的合成方法,能融合多个证据源提供的证据,但其合成公式存在不足,尤其是证据之间存在冲突时,合成结果有可能违背常理,已经有不少工作从不同角度对其进行了改进^[12-14]。本文采用综合考虑证据本身的确信度和证据对辨别框架中子集的平均支持度两个方面进行证据间的加权合成,对传统的证据理论进行了改进,降低了证据合成过程中证据之间的冲突,我们曾将该方法较好地用于多时相微波遥感图像地表变化检测^[14],主要步骤如下:

1) 通过证据 m_j 的不确定熵 $E(Am_j)$ 计算其确信度 $C(Am_j)$:

$$C(m_j) = \alpha \cdot e^{-E(m_j)} \quad (1)$$

其中, $E(m_j) = -\sum_i S(B_i) \ln S(B_i)$, $S(B_i) = \sum_{A_i \cap B_i \neq \emptyset} \frac{m_j(A_i)}{J(A_i)}$, $\{B_i, i=1,2,\dots,K\}$ 为 Θ 的基元, $J(A_i)$ 为焦元 A_i 中包含的基元的个数, α 为可选系数。

$C(m_j)=1$ 表示证据 m_j 的确信度为100%,包含的有用信息最多,而 $C(m_j)=0$ 则表示其确信度为0,不包含任何有用信息。

2) 利用计算所得的确信度作为权值更新证据对辨别框架 Θ 及其他焦元 A_i 的基本概率赋值,并实现基本概率赋值的归一化处理,得:

$$m(\phi) = 0 \quad (2)$$

$$m'_j(A_i) = m_j(A_i) \cdot C(m_j) \quad (3)$$

$$m'_j(\Theta) = m_j(\Theta) \cdot C(m_j) + (1 - C(m_j)) \quad (4)$$

3) 利用以上更新后的基本概率赋值,修改证据组合规则:

$$m(A) = \sum_{\cap A_i = A} \prod_{1 \leq j \leq n} m'_j(A_i) + K' \cdot m''_j(A), \quad A \neq \phi, \Theta \quad (5)$$

$$K' = \sum_{\cap A_i = \phi} \prod_{1 \leq j \leq n} m'_j(A_i) \quad (6)$$

$$m''_j(A) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n m'_j(A) \quad (7)$$

$$m(\Theta) = 1 - \sum m(A) \quad (8)$$

其中, $m_j^*(A)$ 表示各证据加权后对A的平均支持度, K' 表示各证据加权后的总冲突概率赋值, 将该值按照加权组合后的各焦元的平均支持度进行加权分配。

2.2 BPAF 的定义

将图像的所有像元作为检测对象, 定义识别框架 Θ_s :

$$\Theta_s = \{Y, N\} \quad (9)$$

其中, Y表示有沙尘暴发生, N表示无沙尘暴发生, 因此, 2^{Θ_s} 的非空子集包括 $\{Y\}, \{N\}, \{Y, N\}$ 。

BPAF的定义通过FY-2D/2E IDDI产品或FY-3A DSI产品定义:

$$m(\{Y\}) = (1 - e^{-\beta d})(1 - \alpha) \quad (10)$$

$$m(\{N\}) = e^{-\beta d}(1 - \alpha) \quad (11)$$

$$m(\{Y, N\}) = \alpha \quad (12)$$

其中, d 代表FY-2D/2E IDDI产品或FY-3A DSI, α 取为最大IDDI值或DSI值的倒数, 因为IDDI值或DSI数值越大, 沙尘暴发生与否判决的不确定性越小, $\alpha = 1/\max(d)$ 。

2.3 融合、判别及变化类型的检测

根据BPAF计算有沙尘暴发生及无沙尘暴发生的基本概率赋值、各证据的确信度和证据对有沙尘暴发生及无沙尘暴发生的平均支持度, 然后采用改进后的合成规则进行合并运算, 得到所有证据的BPAF, 作为进行判别的基础。在判别时, 使用的规则如下:

目标类别应具有最大的基本概率赋值;

目标类别的基本概率赋值与其他类别的基本概率赋值差值必须大于某阈值, 即表示每一证据对所有不同类的支持程度应保持足够大的差异;

不确定性概率必须小于某阈值, 即对目标类别的无知程度或证据的不确定性不能太大;

目标类别的基本概率分布值必须大于不确定性概率值, 即对某目标知道很少时, 不能对其分类。

3 实验

选择2012年4月27日发生在北京及其周边地区的一次沙尘过程, 选用时间相近的FY-3A DSI产品, 以及FY-2D和FY-2E IDDI产品, 采用改进证据理论进行三者之间的融合, 划分有沙尘暴发生区、无沙尘暴发生区和可能沙尘暴发生区。其中FY-3A DSI的获取时间是世界时3:50, FY-2D IDDI的获取时间是世界时3:30, FY-2E IDDI是世界时3:00。

图1和图2分别显示了FY-2D和FY-2E的IDDI产品, IDDI的数值变化范围分别为0~30、0~50, 其数值的大小反映了空气中沙尘的多少。IDDI大于0的区域, 被认为是沙尘暴发生区, 否则为无沙尘暴发生区。图3显示了FY-3A DSI产品, DSI的数值变化范围为0~64, 其数值大小反映沙尘强度的强弱。DSI大于0的区域, 被认为是沙尘暴发生区, 否则为无沙尘暴发生区。对比图1、图2和图3可以看出, 虽然时间间隔不长, 但不同卫星平台监测的有、无沙尘暴发生的区域却有较大差别。图4显示了采用改进的证据理论方法对图1—图3的沙尘信息产品进行融合处理所得的沙尘暴发生区划分结果, 除了有沙尘暴发生区和无沙尘暴发生区, 还划分了可能沙尘暴发生区。

为了检验和分析所划分的沙尘暴发生区的准确性, 根据“现在天气现象电码表”选取2012年4月27日世界时3:00的站点观测, 分别叠加在图1—图4上, 其中品红色圆点表示观测时有“尘”、“沙”的站点, 代表可能有沙尘暴发生的情况, 黑色圆点表示“观测时有沙尘暴”的站点, 代表有沙尘暴发生的情

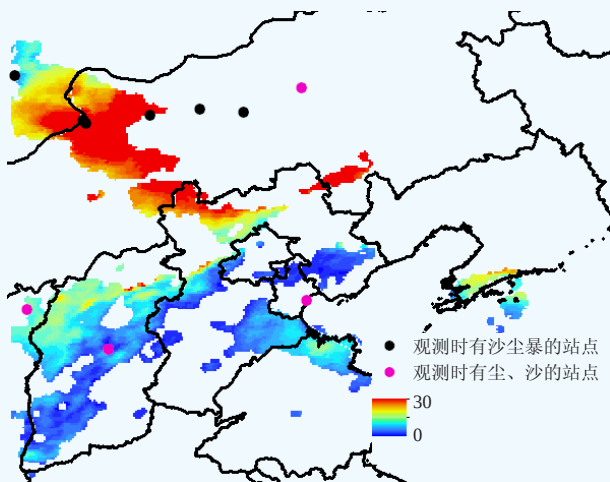


图1 FY-2D IDDI产品 (世界时3:30)

Fig. 1 FY-2D IDDI (UTC3:30)

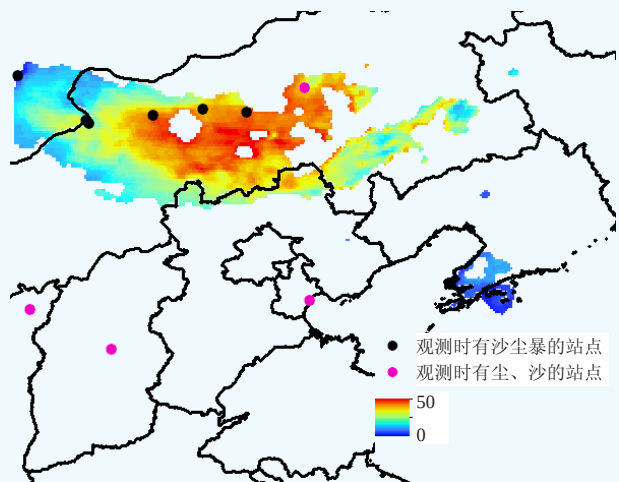


图2 FY-2E IDDI产品 (世界时3:00)

Fig. 2 FY-2E IDDI (UTC 3:00)

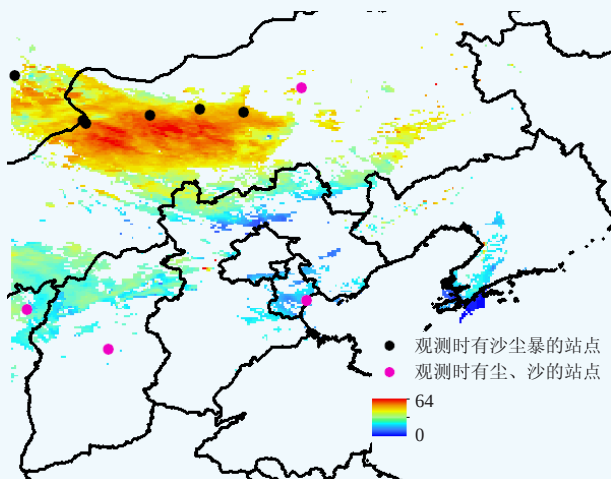


图3 FY-3A DSI产品 (世界时3:50)
Fig. 3 FY-3A DSI (UTC 3:50)

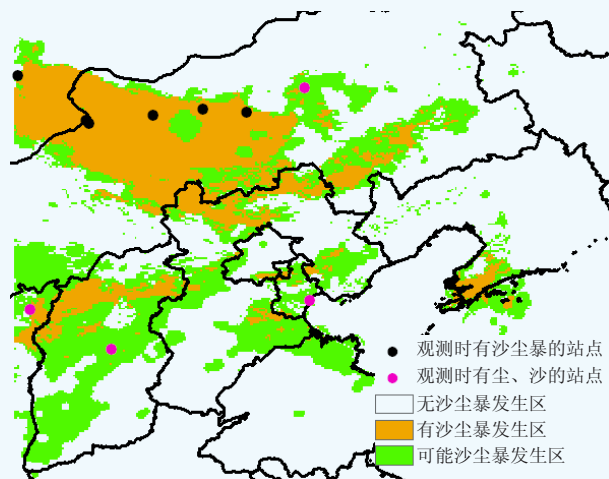


图4 FY-2D/2E/3A 融合沙尘监测产品
Fig. 4 Fusion result of FY-2D/2E/3A dust products

况。从图1 FY-2D IDDI产品与站点观测的叠加可以看出, FY-2D IDDI与品红色圆点的观测一致性较好, 但与黑色圆点的观测一致性不理想, 说明FY-2D对于可能沙尘暴发生的监测准确性较高, 但对有沙尘暴发生的监测准确性不够。而从图2 FY-2E IDDI产品与站点观测的叠加可以看出, FY-2E的IDDI与黑色圆点的观测一致性较好, 但与品红色圆点的观测一致性却不理想, 说明FY-2E对于有沙尘暴发生的监测准确性较高, 但对可能沙尘暴发生的监测准确性不高, 图3是FY-3A DSI产品与站点观测的叠加, 总体显示了与图2相似的一致性特征, 但FY-3A DSI与黑色和品红色圆点的观测一致性较高一些, 说明其不论对有沙尘暴发生, 还是对可能沙尘暴发生的监测准确性都较FY-2E高。而图4 FY-2D/2E/3A融合沙尘监测结果与站点观测的叠加则显示了很好的一致性, 说明融合结果对于有沙尘暴发生与可能沙尘暴发生监测的准确性与可靠性。

4 结论

采用综合考虑证据的确信度和证据对辨别框架中子集的平均支持度的改进的证据理论方法, 进行静止卫星FY-2D/FY-2E IDDI沙尘监测产品与极轨气象卫星FY-3A DSI沙尘产品的融合处理, 划分沙尘发生过程中的有沙尘暴发生区、无沙尘暴发生区和可能沙尘暴发生区。通过各监测结果与站点观测的叠加显示, 说明了融合结果对有沙尘暴发生与可能有沙尘暴发生监测的准备性与可靠性。

随着我国新一代极轨气象卫星风云三号业务化经验的积累以及新一代静止气象卫星试验星2016年按计划即将发射, 我国的沙尘暴遥感监测能力将大大提高, 监测水平将大大增强, 不仅可以提供高时间分辨

率、高空间分辨率和高光谱分辨率的真彩色或假彩色沙尘暴监测图像, 还可以通过逐渐完善的业务系统及时提供定量的沙尘暴监测产品, 也将为本文方法的进一步发展、改进以及更好的应用提供丰富、科学的数据源, 以更准确地进行沙尘过程的监测。

参考文献

- [1] Legrand M, Plana-Fattori A, N'Doumé, C. Satellite detection of dust using the IR imagery of Meteosat. 1. Infrared difference dust index. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(D16):18251-18274.
- [2] Brooks N. Dust-climate interactions in the Sahel-Sahara zone of Northern Africa, with particular reference to late twentieth century Sahelian drought. Climatic Research Unit, University of East Anglia, Norwich U K, 2000.
- [3] 郑新江, 罗敬宁, 陆文杰, 等. 2000年3—4月卫星监测沙尘天气分析. 遥感信息, 2000(2): 26-27.
- [4] 郑新江, 陆文杰, 罗敬宁. 气象卫星多通道信息监测沙尘暴的研究. 遥感学报, 2001, 5(4): 300-306.
- [5] 胡秀清, 卢乃锰, 张鹏. 利用静止气象卫星红外通道遥感监测中国沙尘暴. 应用气象学报, 2007, 18(3): 266-275.
- [6] Zhang P, Lu N, Hu X, et al. Identification and physical retrieval of dust storm using three MODIS thermal IR channels. Global and Planetary Change, 2006, 52: 197-206.
- [7] 张鹏, 张兴赢, 胡秀清, 等. 2006年一次沙尘活动的卫星定量遥感和分析研究. 气候与环境研究, 2007, 12(3): 302-308.
- [8] 徐辉, 余涛, 顾行发, 等. 利用分裂窗通道比辐射率遥感判识沙尘气溶胶研究. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(5): 1189-1193.
- [9] 王玲, 李正强, 李东辉, 等. 基于遥感观测的折射指数光谱特性反演大气气溶胶中沙尘组分含量. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(6): 1644-1649.
- [10] 曹广真, 张鹏, 陈林, 等. 地面能见度观测在卫星遥感IDDI指数中的融合应用. 遥感技术与应用, 2013, 28(4): 588-593.
- [11] Klein L A. Sensor and data fusion concepts and application (second edition). Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1999.
- [12] Yager R. On the dempster shafer framework and new combination rules. Information Sciences, 1987, 41: 93-137.
- [13] 孙全, 叶臭清, 顾伟康. 一种新的基于证据理论的合成公式. 电子学报, 2000, 8: 117-119.
- [14] Cao G Z, Hou P, Jin Y Q, et al. Fusion of features in multi-temporal SAR imagery to detect changes in urban areas. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30: 5989-6001.

静止轨道微波大气探测的技术现状与发展展望

卢乃锰 谷松岩

(国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 分析了静止轨道微波大气探测的重要性, 介绍了发展静止轨道微波大气探测的国内外技术现状和所面临的技术挑战。在论述新型干涉式综合孔径技术体制优势的基础上, 提出将传统真实孔径与新型干涉式综合孔径技术体制相结合, 发展我国静止轨道微波大气探测的设想。

关键词: 静止轨道微波探测, 真实孔径, 干涉式综合孔径

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.019

The Status and Prospects of Atmospheric Microwave Sounding by Geostationary Meteorological Satellite

Lu Naimeng, Gu Songyan

(National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract: The importance of atmospheric microwave sounding onboard the geostationary meteorological satellite is analyzed, and the technical challenge being faced with the development of the microwave instrument is introduced. After discussing the advantage of a new type of microwave interference synthesis aperture radiometer, a hybrid system, combining the traditional real aperture and the synthesis aperture together, is proposed. This hybrid system could be valuable to the development of Fengyun geostationary microwave satellite.

Keywords: geostationary microwave sounding, real aperture, interference synthesis aperture

0 引言

对台风、暴雨、强对流等灾害性天气过程的高时效、高精度监测对提高天气预报准确率具有重要意义。尽管极轨气象卫星具有通道信息丰富、空间分辨率高的特点, 然而, 较长的回归周期限制了极轨气象卫星资料在灾害性天气监测中的应用。当前的极轨双星观测体系只能保障6h的观测周期, 暴雨强对流天气的典型生命史也是6h, 因此, 极轨气象卫星观测资料的应用存在时效问题。即使未来通过多星组网的方式使卫星的观测频率增加到每3h一次, 也无法完全满足天气预报对多变的湿度场、热力场、中小尺度暴雨和强对流等灾害性天气的观测需要。对这些灾害性天气现象发生、发展和消亡的高时间分辨率监测需要依靠静止气象卫星。

与可见光和红外探测不同, 微波一方面可以很好地穿透云雨大气, 另一方面云雨大气也会通过吸收、发射和散射作用对微波辐射的传输产生影响。云雨大气对微波的吸收、发射和散射作用与大气的热力结构

和微物理特性有关。因此, 可以通过微波探测反演出云雨大气的热力结构和微物理特性。在静止平台上搭载微波大气遥感仪器将在提高观测频次的同时, 提高气象卫星对云雨大气的探测能力。

目前国际上静止轨道微波大气探测仍是一项技术空白, 而极地轨道卫星上的微波大气探测始于20世纪70年代。美国1972年发射的雨云卫星装载了电扫描微波辐射计, 利用50~60GHz的氧气吸收带探测大气温度结构。1978年美国发射了业务环境卫星泰罗斯系列, 装载了专门用于大气探测的微波探测器MSU, 与红外大气探测器HIRS结合, 实现了大气垂直温度廓线的遥感探测, 形成TOVS体系。为满足军事气象需要, 美国从1987年开始实施DMSP计划, 陆续发射的卫星装载了用于大气温度廓线探测的特种微波温度探测仪SSM/T和用于大气湿度廓线探测的SSM/T-2, DMSP计划提高了空间微波对地遥感探测能力。在当代DMSP计划中, SSMIS取代了SSM/I、SSM/T和SSM/T-2, 实现了垂直探测和成像遥感的有机结合^[1]。

美国在业务环境卫星NOAA-K系列上, 发展了20通道先进微波探测器AMSU, 取代MSU形成了新一代大气探测系统ATOVS^[2-3]。其中AMSU-A利用50~60GHz的氧气吸收带探测大气温度廓线,

收稿日期: 2013年12月2日; 修回日期: 2014年6月30日
第一作者: 卢乃锰(1963—), Email: lunaimeng@nsmc.cma.gov.cn
资助信息: 国家自然科学基金(41201360)

AMSU-B利用183GHz的水汽吸收线探测大气湿度廓线，后来MHS取代AMSU-B继续利用183GHz的水汽吸收线探测大气湿度廓线。

2002年升空的NASA EOS系列卫星上，载有与AMSU性能相当的先进微波大气探测器，其中包括巴西研制的湿度探测仪HSB和MHS。欧洲极轨气象卫星MetOp上的大气探测系统与美国业务环境卫星上的系统相同。

美国目前国家极轨业务环境卫星系统Suomi NPP上的星载大气探测系统是ATMS^[3]，用两副天线完成了AMSU系统中三副天线的探测任务，继续沿用50~60GHz氧气吸收带进行大气温度廓线探测，同时在183GHz水汽吸收线附近增加了探测通道数，提升了大气湿度场探测能力。

我国星载微波遥感技术起步较晚，第二代极轨气象卫星风云三号装载的微波温度计和微波湿度计是我国星载微波大气探测载荷实现定量应用的里程碑。卫星风云三号卫星微波大气探测系统包括覆盖50~60GHz的大气温度探测仪和150~183GHz的微波湿度探测仪。从目前的使用情况看，风云三号微波大气探测系统很好地揭示了台风、暴雨等天气系统内部大气热力结构，对于提高天气预报、数值天气预报水平具有重要作用。经过A/B两颗试验星的应用，在风云三号首发业务星C星上发展了微波温度计II型(MWTS-II)和微波湿温探测仪(MWHTS)，MWTS-II在50~60GHz大气氧气吸收带附近增加了通道数量，MWHTS在保留并细分183GHz频点探测通道的同时增加了118GHz新的探测频点，提升对流层上部大气温度廓线探测精度，进一步拓展风云三号业务星的大气探测能力^[4-6]。这些成果为发展静止轨道微波大气探测技术奠定了基础。

发展静止轨道大气微波探测技术，实现对地球大气全天候、全天时的观测，对提高未来天气预报的准确率意义重大。因此，尽管静止气象卫星的轨道高度高，扫描成像难度大，目前国际气象卫星大国都在致力于发展静止轨道微波大气探测技术。然而由于静止轨道微波探测本身的技术难度，相关航天计划尚未得以实施。在这种形势下，全球气象卫星协调组织(CGMS)在其第34届会议所形成的文件中明确指出希望中国作为一个气象卫星大国能够率先实现静止轨道微波大气探测。从制定航天计划的角度看，目前中国在发展静止轨道微波探测方面已经与欧美站在同一起跑线上，但无论是在仪器制造技术还是在科学基础支撑方面，我国与发达国家相比都存在一定差距。

1 静止轨道微波大气探测所面临的挑战

虽然空间微波遥感技术得到了极大发展，但由于静止轨道星地距离远，采用真实孔径天线条件下实现高空间分辨率探测的难度很大，到目前为止，国际上所有微波大气探测仪器都搭载在低轨卫星上。NASA曾经考虑在未来静止轨道气象卫星中搭载微波辐射探测仪，欧洲也提出了静止平台微波大气探测的概念。从技术体制上看，静止轨道微波探测可以通过真实孔径和干涉式综合孔径两种技术体制来实现^[7-9]。传统的真实孔径方案以美国的静止轨道微波观测平台(Geostationary Microwave Observatory, GEM)与欧洲的微波大气探测静止观测平台(Geostationary Observatory for Microwave Atmospheric Sounding, GOMAS)为代表，采用2~3m的天线覆盖从毫米波到亚毫米波多个探测波段，真实孔径方案的问题在于所需要的天线口径大，形面加工要求高，扫描驱动难度大。3m天线基本上已经达到了若干年内的技术极限，继续提升分辨率较为困难，在毫米波低端难以满足应用需求，但亚毫米波对大气底层探测能力又很有限。天线技术的发展成为目前真实孔径体制发展的一个技术难点。另一个新的技术体制是干涉式综合孔径技术，以美国的地球静止轨道合成孔径辐射计(Geostationary Synthetic Thinned Aperture Radiometer, GeoSTAR)和欧洲的地球静止轨道大气探测器(Geostationary Atmospheric Sounder, GAS)为代表。

GeoSTAR地面原理样机的初步测试结果及成像结果达到了预期效果，这强有力地支持了毫米波干涉式综合孔径体制的发展。而GAS采用了更先进的稀疏天线阵列旋转分时采样方案，在降低载荷系统本身复杂度的同时，也大大降低了项目的技术风险与成本。这些都预示着干涉式综合孔径体制在静止轨道微波探测方面的良好发展前景。综合孔径技术体制的主要技术难度在于所需的单元天线/接收机数目多，加工一致性要求高，定标难度大，系统复杂。

2 干涉式综合孔径技术体制优势分析

鉴于探测频率、天线口径、地面分辨率之间固有的物理关系，真实孔径技术体制比较适用于较高频率的大气探测。相比之下，新型干涉式综合孔径成像技术可以将天线接收口面有效稀疏为多个小口径的单元天线，解决真实孔径成像中探测频率越低、空间分辨率越差的问题。这种技术在利用较低频率进行大气温度探测时具有更大优势。尽管干涉式综合孔径探测仪起步较晚，技术体制复杂，但由于其较小的物理口径便于星载应用，且具有进一步提升分辨率的潜力，近年来发展迅速，代

表了被动微波遥感技术的一个发展方向^[9-11]。

干涉式综合孔径技术采用稀疏的小天线阵列取代大口面实孔径天线,通过各个单元天线之间的两两相关实现对视场内亮温分布的空间频率域测量,在空间频率域构成一个等效虚拟大孔径,再通过对空间频域测量数据作傅氏变换得到观测区域的亮温图像。

在将干涉式综合孔径技术应用于地球静止轨道卫星方面,NASA自2002年开始通过IIP计划(Instrument Incubator Program),支持了JPL实验室的GeoSTAR项目,2005年完成地面原理样机研制。GeoSTAR采用固定式的Y形天线阵列稀疏方案,设计50~56GHz和183GHz两个探测频段,每个探测频段约需300个单元的天线接收机,实现能够满足应用需求在50~56GHz频段实现空间水平分辨率优于50km、垂直分辨率2~4km、扫描周期30min的大气温度廓线探测;在183GHz频段实现空间水平分辨率优于25km、垂直分辨率2~4km、扫描周期5~10min的大气湿度廓线探测。这样的探测结果可以极大地提升对灾害性强降水系统的监测预警能力^[12-13]。

欧空局从2002年也开始通过AO(Announcement of Opportunity)方式对下一代地球同步轨道毫米波辐射计开展可行性研究,2004年选定瑞典SAAB公司的旋转扫描综合孔径方案进入地面样机GAS研制。GAS星载系统将包括53、118、183、380GHz四个频点。水平空间分辨率可望达到30km。由于GAS系统Y型阵列的旋转,将每个探测波段所需要的天线单元数降到100左右,另外进一步采用多时延数字相关方案,减少所需探测通道滤波器组的数目。

总体来讲,目前世界上对下一代地球同步轨道被动微波载荷的技术体制选择仍然处于权衡评估阶段。

以GEM/GOMAS为代表的传统真实孔径方案研究时间较早,从20世纪90年代即开始预研,方案较为成熟,但由于技术体制限制,继续提升空间分辨率较为困难,在亚毫米波段难以有效满足大气温度层结探测的应用需求;以GEOSTAR和GAS为代表的干涉式综合孔径方案起步较晚,技术体制较为复杂,在进一步提升分辨率上更具潜力。其中,GEOSTAR的地面样机的初步测试及成像结果达到预期指标;而GAS采用了更先进的稀疏天线阵列旋转分时采样方案,以增加部分机械旋转机构为代价换取载荷系统本身复杂度的降低,从而降低了项目的技术风险与成本。随着毫米波部件工艺水平的不断提高,干涉式综合孔径体制的地球同步轨道毫米波大气探测辐射计将走向实际应用。

3 我国静止轨道微波大气探测发展现状

我国近年来在发展静止轨道微波探测方面投入较大,国家航天局、科技部、中国气象局对此都有所部署,其中“十一五”国家863重点项目“地球同步轨道毫米波大气温度探测仪”面向干涉式综合孔径毫米波大气温度探测的技术前沿和静止轨道微波探测的重大应用需求开展研究,突破了分时采样方式与稀疏天线阵列的联合优化设计、旋转扫描综合孔径微波辐射计反演成像算法等关键技术,将伪极网格傅里叶变换的概念引入旋转扫描体制干涉成像,在国际上首次实现了综合孔径圆环天线阵列自旋及重点区域成像的工作体制,大大降低了星载系统的复杂度,并针对该体制建立了相应的系统性能指标分析方法、阵列优化设计方法、定标方法以及系统设计流程,图1是静止轨道毫米波大气温度探测仪全尺度样机及成像实验结果^[14-15]。

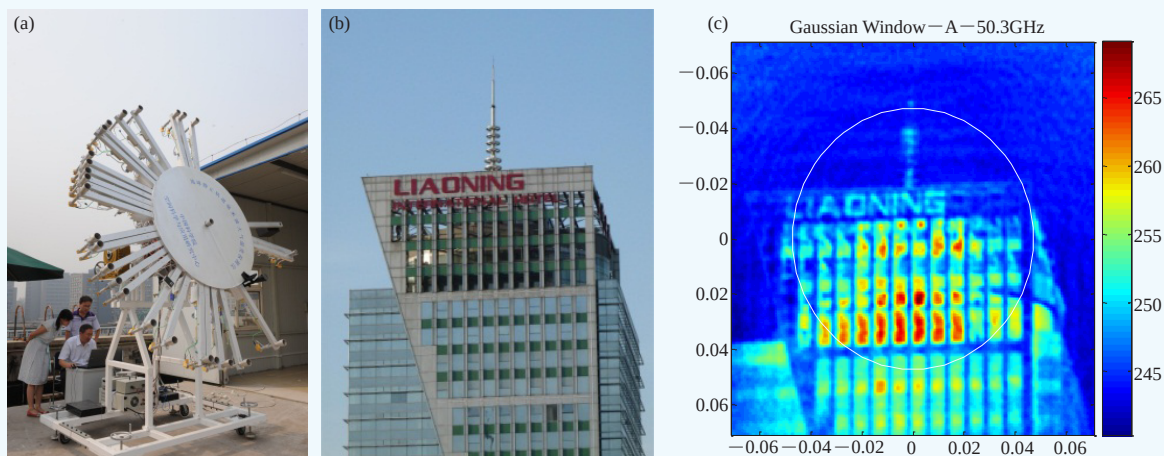


图1 静止轨道毫米波大气温度探测仪全尺度样机及成像实验结果

(a) 全尺度原理样机; (b) 实际景物; (c) 成像试验结果

Fig. 1 Geostationary Interferometric Millimeter wave Atmospheric Sounder (GIMS) full scale prototype and imaging results
(a) full scale prototype; (b) the actual scene; (c) imaging results

“十二五”国家863启动了“静止轨道大口径双模微波大气探测仪”的研制，在大的综合孔径天线中央，设计小的真实孔径天线。利用综合孔径技术克服低频微波探测空间分辨差的难题，实现53GHz大气氧气吸收带探测大气温度廓线；利用真实孔径天线技术增加亚毫米波大气探测。在双模微波大气探测仪的设计中，凝聚了综合孔径和真实孔径两种技术体制的综合优势。预计“十二五”后期将完成样机研制任务。这些工作的开展，对于推进静止轨道微波探测卫星的工程立项具有重要意义。

“十一五”期间中国气象局国家卫星气象中心还在国家863计划支持下完成了静止轨道云雨大气微波遥感科学仿真研究和载荷关键性能指标的仿真研究。为未来利用静止轨道微波遥感探测开展业务应用奠定了基础。

4 未来展望

静止轨道气象卫星对于监测台风、暴雨等快速发展的强灾害性天气系统具有独到的优势。目前的静止轨道气象卫星上没有微波遥感仪器，无法得到云团内部的温度和湿度结构以及降水参数信息，这极大地削弱了对突发灾害性天气的监测能力。因此，我国气象卫星发展规划中明确将下一代风云静止气象卫星分为光学星和微波星两个系列，其中光学星已进入工程型号研制。微波星由于面临巨大的技术挑战，还处在论证阶段。

立足于目前的技术积累，未来的静止轨道微波大气探测卫星应充分考虑传统真实孔径和新型干涉式综合孔径技术优势的结合和互补，在50~60GHz的温度探测最佳频段采用综合孔径技术体制，而在湿度探测的最佳频段183GHz采用真实孔径技术，实现静止轨道

大气温度和湿度的联合探测。按照目前的技术部署，我国将有可能先于欧洲和美国，成为第一个开展静止轨道微波大气探测的国家。

参考文献

- [1] Yan B H, Weng F Z. Intercalibration between special sensor microwave imager/sounder and special sensor microwave imager. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2008, 46: 984-995.
- [2] JPL. AIRS project algorithm theoretical basis document part 3: Microwave Instruments. JPL D-17005, Version 2.1, 2000.
- [3] NOAA KLM User's Guide (Satellite and data description of NOAA's Polar orbiting satellites from NOAA-15 and later), Feb 2009.
- [4] 游然, 谷松岩, 郭扬, 等. 风云三号卫星微波温度计的在轨性能长期稳定性分析. 气象科技进展, 2013, 3(4): 13-17.
- [5] 谷松岩, 郭扬, 王震占, 等. 风云三号A行微波湿度计探测通道定标分析. 气象科技进展, 2013, 3(4): 43-49.
- [6] 杨忠东, 卢乃猛, 施进明, 等. 风云三号卫星有效载荷与地面应用系统概述. 气象科技进展, 2013, 3(4): 6-12.
- [7] Staelin D, Kerekes J, Solman F J. Final report of the geosynchronous microwave sounder working group. MIT Lincoln Laboratory, Lexington MA, Aug. 22, 1997, prepared for NOAA/NESDIS GOES Program Office.
- [8] Solman F J, Staelin D H, Kerekes J P, et al. A microwave instrument for temperature and humidity sounding from geosynchronous orbit. In Proc IGARSS, Seattle, WA, Jul 1998.
- [9] Bizzarri B. et al. Requirements and perspectives for MW/sub-mm sounding from geostationary satellite. EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Dublin, Ireland, 2-6 September 2002.
- [10] Staelin D H, Kerekes J P, Solman. Geosynchronous microwave sounders working group (GMSWG) final report. Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, 1997.
- [11] Pinori S, Baordo F, Medaglia C M, et al. On the potential of sub-mm passive MW observations from geostationary satellites to retrieve heavy precipitation over the Mediterranean Area. Advances in Geosciences, 2006, 7: 387-394.
- [12] Thompson A R, Moran J M, Swenson G W Jr. Interferometry and synthesis in radio astronomy. New York: John Wiley and Sons, 1986.
- [13] Lambrihtsen B, Tanner A, Gaier T, et al. Developing a GeoSTAR science mission. Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2007.
- [14] 张升伟, 等. 地球同步轨道毫米波大气温度探测仪研究总结报告. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2012.
- [15] 张成. 干涉式成像微波辐射计遥感图像的模拟与成像分析. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2007.

Hera地球观测卫星将在2016年发射

■ 本刊编辑部

位于美国加州的Hera Systems公司计划从2016年10月开始，陆续发射能够提供高分辨率信息的地球观测卫星集群。据悉，首批卫星的数量为9个，之后增加到48个，从而实现覆盖和组网。Hera卫星运营后，每平方千米图像的售价仅为1~2美元（分辨率1m×1m）或3美元（分辨率0.5m×0.5m）。此外，目前卫星资料处理的门槛还比较高，至少需要博士量级的技术人员且要有充足

的耐心，而Hera Systems公司通过推出GeoSnap™

创新App有望改变这一状况，卫星数据可期待进入客户自选风格。

（更多信息，请访问<http://www.herasys.com>）



国外地球同步轨道气象卫星成像观测模式发展分析

张晓虎 陆风 窦芳丽 许健民

(国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 经过多年的发展, 国外气象卫星从定时开展全圆盘观测逐步发展到定时全圆盘观测与灵活的区域观测相结合的灵活机动观测模式。定时全圆盘观测主要用于支持大尺度天气系统追踪, 数值预报应用以及气候数据集建设; 区域观测主要是充分发挥新一代卫星成像仪器时间空间分辨率的优势, 开展1000~2000km尺度天气系统, 尤其是中小尺度快速变化的对流系统和台风的监测, 为天气分析和预警服务。选取有代表性的新一代静止气象卫星两类成像仪器, 以采用长线性二维扫描成像机制的美国GOES-R成像仪/欧洲MTG成像仪和采用焦平面成像机制的韩国气象海洋卫星海洋水色仪作为典型光学成像类仪器, 讨论其灵活成像模式, 以期为我国第二代静止气象卫星风云四号的观测模式优化提供参考。

关键词: 静止气象卫星, 风云二号, 风云四号, 区域观测, 高频次

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.020

Analysis on the Observation Model of Foreign Geostationary Meteorological Satellite

Zhang Xiaohu, Lu Feng, Dou Fangli, Xu Jianmin

(National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract: After years of development, the observation mode of foreign geostationary meteorological satellite was progressively developed from regular full disk to a combination of regular full disk and regional mode. Regular full disk observations used to support tracking of large-scale weather systems, applications of numerical weather prediction and construction of climate data sets, while regional observations used to monitor 1000-2000 km scale weather systems, especially typhoon and rapidly changing small and medium-scale convective systems. Regional observation gives a full play to the new generation of satellite imaging instruments advantage of temporal and spatial resolution in weather analysis and early warning service. In order to provide reference of the observation mode optimization for China's second generation geostationary meteorological satellites (fengyun 4 series), two representative typical optical imaging instruments of new generation geostationary meteorological satellites, linear array two-dimensional scanning imaging instrument of GOES-R(US) & MTG(Europe) and focal plane array ocean color instrument of Korea Meteorological ocean satellite, are selected to discuss its flexible imaging mode.

Keywords: geostationary meteorological satellite, FY-2, FY-4, regional observation, high frequency

0 概述

自1997年发射第一颗风云静止气象卫星FY-2A至今, 我国已累计成功发射7颗风云二号静止气象卫星, 目前在轨运行静止气象卫星有四颗, 其中FY-2E/G 两颗卫星承担东亚区域全圆盘定时观测任务, FY-2F专门用于区域观测任务, FY-2D承担在轨备份任务。由于风云二号系列卫星均采用自旋稳定的姿态控制方式, 仪器只能在南北方向进行成像区域调整。因此, 我国静止气象卫星组网观测模式采用了FY-2F专门支持区域3~6分钟间隔的观测, FY-2G、FY-2E两颗

卫星专门用于北半球和全圆盘观测的协同组网观测方式。这种组网观测模式充分利用了风云二号气象卫星的观测资源, 实现了专星专用, 区域观测和全球观测各自开展, 互不冲突。然而, 新一代静止气象卫星寿命设计寿命达到10年, 很难在轨部署多颗卫星分别承担全圆盘观测和区域观测任务, 因此要求一颗卫星同时承担全圆盘观测和区域观测任务^[1-2]。

为了同时满足用户对全圆盘观测和灵活区域观测的要求, 国际上采用了两种方式满足用户需求, 第一是充分利用新一代长线性探测器技术突破, 将观测任务切割成碎片, 将分时观测的碎片拼接成全圆盘云图和区域观测云图; 第二是充分利用焦平面探测器技术的发展, 发展专门承担区域快速成像的仪器。第一种方式的实现难点是仪器工作方式的重新设计, 即从仪

收稿日期: 2015年10月19日; 修回日期: 2015年12月26日
通信作者: 陆风 (1973—), Email: lufeng@cma.gov.cn
资助信息: 国家自然科学基金 (41175023)

器分时进行区域和全圆盘观测,变为将区域和全圆盘观测任务碎片化后穿插实现,然后通过数据拼接实现满足用户需求的区域和全圆盘观测,这需要重新定义仪器工作方式,增加了仪器可靠性的要求和数据处理的难度;第二种工作方式的难点主要是仪器研制。

1 历史发展回顾

1.1 卫星发展历程

美国从1975年10月17日发射第一颗业务地球静止气象卫星GOES-A到现在的GOES-N已经历两代卫星。美国从1994年4月13日发射第二代业务地球静止气象卫星GOES-I—M开始,卫星的姿态控制方式采用三轴稳定,观测仪器可以实现区域的灵活观测。美国新一代业务静止气象卫星GOES-R预计2016年秋季发射。

欧空局(ESA)自1977年11月23日发射第一代地球静止气象卫星METEOSAT到现在的MSG(METEOSAT Second generation)经历两代卫星。这两代卫星均采用自旋稳定的观测方式,其卫星仪器工作方式与目前中国静止轨道业务气象卫星类似。欧洲下一代MTG卫星将采用三轴稳定方式,支持观测仪器的区域灵活观测。目前MTG卫星尚处于设计阶段,从公开文献调研得知,其继承了MSG卫星的观测模式,建立针对少数观测通道的高时间分辨率局地观测,以及较低空间分辨率的多通道全球观测^[3]。

日本自1977年7月14日发射第一颗气象卫星以来,已经历两代卫星,从日本2005年2月26日成功发射的第二代气象卫星静止气象卫星MTSAT开始,日本静止气象卫星全面采用三轴稳定方式工作。2014年日本成功发射的第三代静止气象卫星葵花八号,具有最高500m分辨率、分钟级的连续区域观测能力^[4]。

从上述分析可见,国际静止轨道气象卫星的工作方式都是从自旋稳定向三轴稳定发展,因此首先回顾一下自旋稳定和自转稳定两种卫星工作方式。

自旋稳定气象卫星绕自旋轴以一定的角速度旋转,本身具有较高的角动量,在宇宙空间卫星的角动量近于守恒,因而自转轴的方向始终不变的指向宇宙空间中的某一点。自旋稳定气象卫星自转轴与轨道平面近于垂直,成像仪器安装在卫星侧面,扫描成像是依靠卫星的自旋实现东西向扫描,以及仪器光学系统在南北向的步进来完成的。由于地球在静止卫星高度的视角只有18°,因此卫星每自转一周,只有20%的时间朝向地球,因此仪器观测效率不高,很难提高卫星观测的时间频次^[2]。

三轴稳定卫星是在相互垂直的三个轴都进行姿态控制,不允许任何一个轴向产生超出规定值的转动

和摆动,这样可以保证在对地面安装的成像仪始终对准地球,此时的成像过程是通过星载成像仪的二维扫描(线列扫描)实现或者指向机构把相机指向观测目标(焦平面器件),极大提高对地观测效率。

1.2 静止气象卫星观测需求

静止气象卫星主要的应用是为天气预报和监测预警服务,天气预报的基础是大气环流和大气扰动变化的时间、空间尺度。大气环流和大气扰动是气象现象的重要特征,它们不是无序发生、发展和衰减的,而是分别具有代表性的时间和空间尺度。

Orlansky^[5]、世界气象组织大气科学委员会以及日本气象厅,根据中尺度分析理论和大量天气现象,总结出了大气环流和各类扰动特征的水平尺度和时间尺度(表1)。归纳起来,大气扰动通常划分为天气尺度(水平尺度为2000km以上,时间尺度为1日以上至数日)、中尺度(水平尺度为2~2000km,时间尺度为几小时至一天)以及小尺度(水平尺度为2km以下,时间尺度为几十分钟至几小时)。近20年来的研究表明,暴雨、台风、冰雹、雷雨大风、闪电、龙卷等强对流天气以及沙尘暴和雪暴等是最为主要的突发性强灾害性天气,它们是在一定的天气尺度形势背景下由中尺度系统直接造成的,也是预报的重点和难点。从表1列出的这些中尺度系统的种类以及它们的水平尺度和时间尺度可以看出,常规气象观测资料的时间和空间分辨率远远不能满足捕捉和分析这些系统的要求,从而要想预报它们几乎是不可能的,因此。需要发展气象卫星,提供高时空分辨率的观测。

1.3 静止气象卫星观测模式的发展

早期静止气象卫星采用了自旋稳定的观测模式,卫星依靠高速自旋保持姿态稳定^[6]。辐射计光轴垂直于自旋轴,可在一定范围内($\pm 10^\circ$)沿南北方向作一维步进运动,沿东西方向的扫描是随卫星本体自旋实现,自身无法控制,在一周360°内只有20°对准地球观测成像,扫描效率只有5.6%。可以进行区域观测,形成一幅横贯地球东西的条带图像,对小区观测远不如三轴稳定卫星灵活迅速。

2020年前后,国际主要的静止气象卫星均将进入三轴稳定的时代,具备提高观测效率的可能。目前美国GOES-R以及欧洲和日本为代表的新一代气象卫星成像仪采用长线列二维扫描方式实现全圆盘观测,并兼顾区域观测;而以韩国气象海洋卫星(COMS-1)为代表的海洋水色仪采用焦平面器件,利用指向机构把相机指向观测目标以实现区域快速观测。上述技术发展各有特点,其应用目标都是提供

表1 Orlansky^[5]的尺度定义及其相应的各种大气扰动时间和水平尺度特征
Table 1 Scale definitions and different processes with characteristic time and horizontal scales

L_s	T_s	1月	1日	1时	1分	1秒	
10000km							大尺度 α
2000km		斜压波					大尺度 β
200km			锋面和飓风				中尺度 α
20km			夜间低空急流、 爬线、惯性波、 云团、山脉和湖泊 扰动点				中尺度 β
2km				雷暴、内重力波、 晴空湍流、城市 影响			中尺度 γ
200m				龙卷、 深对流			小尺度 α
20m					尘沙暴、 热泡、 尾流		小尺度 β
						柱状气流、 粗糙度、 湍流	小尺度 γ
大气科学委员会 建议的定义		气候尺度	天气 行星尺度	中尺度	微尺度		

卫星全天24小时，高频次高空间分辨率的对地观测。以下分别介绍。

1.3.1 线扫描仪器应用

随着探测器技术的发展，已经可以在静止卫星上应用可见光波段近千探元，红外通道数百探元的观测器件，这就使得成像仪器东西扫描一次，可以同时获取数百千米广大区域的成像（日本葵花八号一次扫描可以获取500km宽度的地球影像）。由于具备了

如此高效的仪器观测能力，在设计卫星应用观测模式前，首先凝练出美日新一代静止气象卫星成像仪的应用需求，即区域观测、全圆盘观测、凝视观测和南北观测，表2给出了这四种需求的典型应用。

图1展示了美国最新一代GOES-R卫星成像仪观测模式，其中值得关注的要点是仪器观测时间的碎片化设计，即在全圆盘观测（粉色）在周期内插入区域观测（蓝色）和中尺度观测（绿色）^[7-8]。通过这样的

表2 国际新一代静止气象卫星仪器观测的应用需求
Table 2 Application requirements of next-generation geostationary meteorological satellite instruments

观测模式	典型应用	成像区域示意
区域观测	台风, 地标, 重点区域机动高频次观测	
全圆盘观测	全圆盘定时观测, 支持气候应用	
南北扫描	仪器测试	
凝视	黑体定标, 恒星观测	

安排, 在15min的一轮观测周期内区域观测(蓝色为美国本土区域, 绿色为中尺度天气系统观测), 全圆盘观测(粉色)的开始时间均是等时间间隔的, 其时间特性为, 每15min一次全圆盘观测, 每隔5min一次美国本土观测, 每隔半分钟进行一次中尺度小区域观测。这三种资料均是等时间间隔, 非常有利于预报员对天气系统的分析, 最直观的应用就是云图动画, 同时也保证了卫星导风等定量大气参数反演对观测等时间间隔的需要。

欧洲第三代静止气象卫星MTG的成像仪定义了两种观测范围^[4]。一种覆盖地球圆盘(FDC), 观测重复周期为10min; 另一种为四分之一圆盘, 观测重复

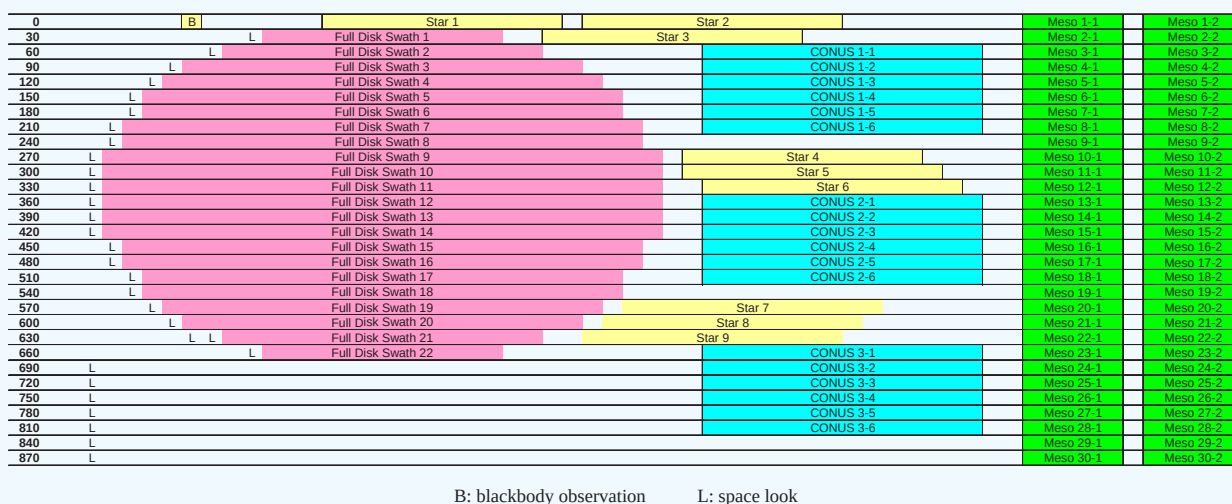


图1 美国GOES-R卫星成像仪观测模式^[8]
Fig. 1 Observation mode of GOES-R Imager^[8]

周期为2.5min, 主要用于欧洲地区的观测。根据观测范围定义了三种观测模式: 全圆盘观测模式、区域观测模式和交错观测模式。全圆盘观测模式(图2a)是连续全圆盘覆盖观测, 重复周期为10min, 每个周期里进行1次全圆盘观测; 区域观测模式(图2b)是连续区域覆盖观测, 重复周期为2.5min, 每个周期里进行1次区域观测; 交错观测模式(图2c)是全圆盘观测和区域观测交错进行, 重复周期为15min, 每个周期里先进行1次全圆盘观测, 然后进行2次区域观测。

日本已经成功发射的葵花八号的成像仪与美国GOES-R卫星成像仪类似, 从制造GOES-R成像仪的Exelis公司购买。其成像仪设计与GOES-R相同, 由于日本国土狭小, 区域观测所需时间比较短, 因此将观测模式定义为每10min一次全圆盘观测, 每2.5min一次日本本土观测, 此外还设计了地标观测模式和台风区域观测模式^[5]。

1.3.2 焦平面观测仪器应用

在长线列扫描为基础的成像仪器迅速发展的同时, 基于焦平面器件的相机也开始在静止轨道搭载。韩国在世界上首次成功在静止卫星上搭载了用于观测海洋水色的地球同步海洋水色仪(GOCI), 选用了e2v公司组装和筛选的千万像元规模的CMOS图像传感器, GOCI同时具备6个可见光通道和两个近红外通道, 仪器安置在一个二维驱动机构上, 卫星仍然采用三轴稳定工作方式, 保持面向地球, 通过驱动机构灵活调整成像仪实现不同观测区域的灵活观测。在GOCI成功获取了区域500m分辨率图像的基础上, 韩国正在发展新一代海洋水色仪GOCI-2, 预计将达到250m的高分辨率, 同样具备可见光和近红外通道观测能力。GOCI-2将同时具备全圆盘1km观测和区域250m观测能力, 计划新增大气订正通道和微光通道。



图2 欧洲MTG卫星成像仪观测模式
Fig. 2 Observation mode of MTG Imager

2 小结

风云系列卫星已经发展了40多年，其中静止气象卫星系列正在实现从自旋稳定的风云二号向三轴稳定的风云四号的升级换代。近年来，国际静止卫星应用不断创新，从单纯的定时全圆盘观测满足共性观测需求发展到专项应用目标驱动的观测系统设计，日本和韩国已经演示了技术可实现性，美国计划于2016年发射的GOES-R也采用这种观测应用需求驱动系统设计的发展思路。展望未来，观测应用需求驱动的卫星观测系统设计将是气象卫星发展的方向和目标，技术进步首先要满足行业应用需求，新一代静止气象卫星观测任务将会在典型应用驱动的卫星仪器、卫星平台优化技术上构建，以突出典型应用，高时空分辨率、高光谱和高精度为特点的新一代对地观测系统。为了实现这一点，长线列为代表的首先满足全圆盘观测任务，同时兼顾区域灵活观测的仪器和以区域高时空分辨率观测为主要应用需求的焦平面成像仪两个技术体制也将在在较长时间平行发展，以满足不同产品应用领域的个性化需求。

需要说明的是，目前新技术发展迅猛，美国为主的GOES-R卫星成像仪体制（含日本葵花八号的成像仪）已经率先显示出灵活区域观测的优势，这种方案选取一台仪器同时兼顾区域观测和全球观测，技术复杂，其碎片化的观测虽然保证了观测开始时间的等间

隔，但是对于间隔一定距离空间的观测地点，观测时间会有微小的秒级别的差异。另外一种解决方案是放置两台成像仪器，一台侧重高灵敏度多光谱全圆盘应用，另外一台侧重高时间分辨率、有限通道的高空间分辨率应用。这种解决方案更面向气象应用需求，值得在风云四号后续业务卫星观测系统设计中重点关注。

参考文献

- [1] 董超华, 许健民, 张文建, 等. 风云三十年——国家卫星气象中心成立三十周年纪念. 国家卫星气象中心, 2001.
- [2] 杨军, 等. 气象卫星及其应用. 北京: 气象出版社, 2012.
- [3] MTG End-User Requirements Document [EURD], EUMETSAT, 30 March 2010. [Online]. http://www.eumetsat.int/website/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_FILE&dDocName=pdf_mtg_eurd&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&Rendition=Web.
- [4] Himawari-8/9 Himawari Standard Data User's Guide, Japan Meteorological Agency, 31 October, 2013. [Online]. http://www.data.jma.go.jp/mscweb/en/himawari89/space_segment/hsd_sample/HS_D_users_guide_en_v11.pdf.
- [5] Orlansky J. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. Bulletin of the American Meteorologists Society, 1975, 56: 527-530.
- [6] Lu F, Zhang X H, Xu J M. Image navigation for the FY2 geosynchronous meteorological satellite. J Atmos Oceanic Technol, 2008, 25: 1149-1165.
- [7] Geostationary Operational Environmental Satellite R-Series (GOES-R) Spacecraft Features that Allow Near-Continuous Observation. [Online]. <http://www.goes-r.gov/downloads/AMS/2013/presentations/J-3-3a-Linch.pdf>.
- [8] GOES-R Instrument Operations. [Online]. http://www.goes-r.gov/downloads/AMS_2009_GOES-R_Instruments_v4.pdf.

Charter机制在气象灾害监测中的应用

高浩 武胜利 赵长海 方翔 刘诚

(国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 近年来在气象灾害和衍生灾害的业务监测中, 高分辨率卫星遥感影像和雷达卫星数据的作用越来越重要。虽然中国的环境减灾卫星和资源卫星已在业务中得到应用, 但是仍不能满足对高分辨率卫星影像和雷达卫星数据的需求。国际减灾宪章机制(Charter机制)是目前运行最成功的政府间减灾机制之一, 通过授权用户向遭受灾害的地区无偿提供及时的卫星遥感数据, 用于灾害的监测和评估。中国气象局作为中国的授权用户, 已启动两次针对气象灾害的Charter机制, 通过获取各类高分辨光学影像和雷达卫星影像分别对2010年8月7日甘肃舟曲泥石流灾害和2013年8月东北洪涝灾害的监测显示, 国际减灾宪章提供的高分辨率卫星影像是对中国气象卫星及陆地观测卫星数据监测气象灾害和衍生灾害的有效补充, 在业务应用中起到了重要的作用。

关键词: 气象灾害, Charter机制, 卫星遥感, 业务应用

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.021

The Application of Charter in Meteorological Disaster Monitoring

Gao Hao, Wu Shengli, Zhao Changhai, Fang Xiang, Liu Cheng

(National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract: The high resolution satellite data and Radar satellite data have become very important in the meteorological disasters and derived disasters monitoring in recent years. Although, the HJ-1A/B and ZY-3 satellite data are used in the operational application, the need for the high resolution optical and SAR satellite data still couldn't be fulfilled. As one of the successful intergovernmental mechanism of disaster mitigation, Charter aims at providing cost-free satellite data in time to those affected by natural disasters through authorized users for disaster monitoring and evaluation. China Meteorological Administration, as the authorized users of Charter in China, has twice triggered Charter activations for mud-rock flow monitoring in Zhouqu county of Gansu province on Aug 7th 2010, and flood monitoring in the northeast of China on Aug 16th 2013, respectively. It is showed that the high resolution satellite imagery is an effective complement for meteorological disasters and derived disasters monitoring by meteorological satellites and earth observation satellites, and plays an important role in the operational application.

Keywords: meteorological disaster, Charter mechanism, remote sensing, operational application

0 引言

中国是世界上自然灾害发生频繁、灾害种类多样的国家之一, 其中气象灾害是自然灾害中最为频繁而又严重的灾害之一^[1]。气象灾害及其衍生灾害直接或间接对人民生命和财产安全、国民经济造成极大的损失。而且, 随着中国经济的高速发展, 气象灾害造成的损失也呈现上升的趋势, 直接影响中国社会和经济的发展。

随着中国气象卫星事业的不断发展, 风云气象卫星在气象灾害的业务监测中发挥了重大作用。风云气

象卫星作为中等空间分辨率的卫星, 针对一些重大灾害的监测和评估, 仍有一定的局限性。例如, 气象卫星和陆地观测卫星等光学卫星在有云层的遮挡时, 对地表的监测能力不足; 气象卫星的空间分辨率在一些局地重大灾害的监测和评估中仍显不足; 陆地观测卫星的分辨率尚无优于1m的民用卫星数据, 无法提供更丰富的细节信息。近年来, 业务监测中高分辨卫星影像, 特别是雷达卫星影像日趋重要, 尽管中国的环境减灾卫星和资源卫星已在业务中得到不断应用, 但仍不能满足重大气象灾害业务监测的需求。

作为“空间与重大灾害”国际宪章(Charter)成员国授权用户, 近年来中国气象局针对重大气象灾害启动了两次国际宪章机制(Charter机制), 获取的高分辨率卫星影像和雷达卫星数据在减灾评估中起到

收稿日期: 2014年5月6日; 修回日期: 2014年8月12日

第一作者: 高浩(1982—), Email: gaohao@cma.gov.cn

资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306049)

了重要的作用。本文针对中国气象局针对重大气象灾害及其衍生灾害监测中启动的这两次国际减灾宪章机制，对国际减灾宪章机制做详细介绍，重点介绍启动的两次Charter机制在气象灾害监测中的应用，分析其在国家卫星气象中心气象灾害业务监测中的作用。

1 Charter机制简介

“空间与重大灾害”国际宪章（International Charter “space and major disasters”，简称Charter），是目前影响最大的国际减灾机制之一，旨在通过授权用户向遭受自然或人为灾害的地区提供统一的空间数据获取和交付系统^[2-4]。每个成员机构都承诺提供资源支持宪章条款，并帮助减轻灾害对人类生命和财产的影响。国际宪章由欧洲空间局（ESA）和法国国家空间研究中心（CNES）在1999年7月于奥地利维也纳UNISPACE III大会后发起，加拿大空间局（CSA）于2000年10月20日签署该宪章。2000年11月1日，该宪章正式宣布实施^[2]。截止到2015年，共有15个航天或减灾机构加入并提供卫星应急支持。中国国家航天局（CNSA）于2007年5月代表中国作为正式成员加入宪章，国家减灾委和中国气象局为中国的授权用户^[5]。

目前各成员机构为Charter服务的卫星资源数量达到60多颗，包括RADARSAT、SPOT、PLEIADES、Landsat、TerraSAR-X、ENVISAT、QuickBird、GeoEye、DMC Constellation等光学和雷达卫星，其中也包括中国的风云系列卫星、CBERS、SJ-9A和高分一号卫星。截止到2014年3月底，Charter已为世界范围内遭受洪灾、滑坡、泥石流、地震、森林火灾、飓风等重大灾害的国家或地区提供了500次数据和技术支持，调动了60多颗卫星资源，为110多个国家提供了20多万景卫星数据，为受灾国家和地区的减灾救灾及灾后重建提供了及时有效的人道主义援助。作为Charter中国的授权用户，当中国遭遇重大气象灾害，比如洪涝、泥石流等灾害，且中国气象局启动相应灾害的二级及以上响应时，就可以申请启动国际减灾宪章，但当灾情严重时，并不局限于二级响应。截止目前，由中国气象局针对重大气象灾害启动的国际宪章有两次，分别针对2010年8月的甘肃舟曲泥石流灾害（Call_321）、2013年8月的东北大范围洪涝灾害（Call_447）。

2 国际宪章数据优势

近年来中国气象灾害频发，风云气象卫星在气象灾害及其衍生灾害的监测和评估方面发挥了巨大的作用，在业务运行中风云卫星在对暴雨、台风、雪灾、海冰等恶劣天气的实时预报和监测也为防灾减灾提供

了重要的依据。

风云系列卫星属于中等空间分辨率的卫星，其最高分辨率为250m，在监测大范围的自然灾害时具有一定的优势，当发生小范围的重大自然灾害时，其空间分辨率并不能满足业务需求，并且在有大量云覆盖的情况下，光学卫星并不能穿透云层。Charter机制成员机构对授权用户可提供数据服务的卫星资源有45种（表1），不但卫星数量多、传感器种类丰富、空间分辨率多样，而且不同卫星也提供了较高的过境频次，在灾害的监测中具有一定的针对性和优势，特别是雷达卫星能全天时、全天候工作并且能够穿透云层，能弥补光学卫星的不足。目前中国的民用雷达卫星数量较少，Charter提供的雷达卫星数据弥补了国内雷达卫星数据少、洪涝灾害监测中获取雷达数据不足的缺陷。此外，中国缺乏空间分辨率优于1m的民用卫星数据，而Charter提供的卫星数据分辨率为亚米级，这些卫星数据为泥石流、地震等灾害的监测提供了丰富的细节信息，在重大自然灾害监测和评估中发挥了关键作用。

3 两次启动Charter机制获得的数据及在气象灾害监测中的应用

3.1 2010年8月甘肃舟曲泥石流监测

泥石流是气象衍生灾害中的常见地质灾害，其分布广，危害大。目前对泥石流的监测采用多种手段相结合，其中遥感影像解译是业务监测中的重要方法，高分辨率的卫星影像和雷达卫星数据为泥石流的监测提供了重要的影像数据。

2010年8月7日晚至8日凌晨，甘肃省舟曲县强降雨引发泥石流灾害，对当地造成重大损失。中国气象局紧急启动国际减灾宪章机制（Call_321），先后获取了日本宇宙航空研究开发机构（JAXA）提供的ALOS/AVNIR-2光学卫星影像2景、ALOS/PALSAR雷达卫星影像2景、法国国家空间研究中心（CNES）提供的SPOT-5高分辨率光学卫星影像3景，加拿大空间局（CSA）提供的RADARSAT-2高分辨率雷达卫星影像2景，用于此次由于强降雨引发的泥石流灾害的监测和评估。由于气象卫星的空间分辨率不足，不能对泥石流灾害的滑坡体进行有效的监测，而环境减灾星的空间分辨率（30m）也不足以监测到滑坡体的细节信息，因而通过Charter获取的10m分辨率的ALOS卫星数据和5m分辨率的SPOT-5卫星数据在对滑坡体的监测和灾害发生诱因的分析中起到了关键的作用。此外，由于持续的强降雨，灾害发生时光学卫星不能穿透云层对下垫面进行监测，通过Charter获取的3m分辨

表1 Charter机制提供的卫星数据
Table 1 Satellite data from the international charter

数据机构	卫星/传感器	类别	空间分辨率
法国国家空间研究中心 (CNES)	PLEIADES	光学 (Optical)	0.5~2.8m
	SPOT	光学 (Optical)	2.5~20m
	FORMOSAT-2	光学 (Optical)	2~8m
中国国家航天局 (CNSA)	CBERS	光学 (Optical)	2.7~260m
	SJ-9A	光学 (Optical)	2.5~10m
阿根廷空间委员会 (CONAE)	SAC-C	光学 (Optical)	35~350m
加拿大空间局 (CSA)	RADARSAT-1	雷达 (SAR)	10~100m
	RADARSAT-2	雷达 (SAR)	1~100m
德国航空航天中心 (DLR)	TerraSAR-X	雷达 (SAR)	1~40m
	TanDEM-X	雷达 (SAR)	1~40m
	RapidEye constellation	光学 (Optical)	6.5m
英国国家航天局 (UKSA)	UK-DMC2	光学 (Optical)	22m
	NigeriaSat-2	光学 (Optical)	2.5~32m
	Deimos-1	光学 (Optical)	22m
	NigeriaSat-X	光学 (Optical)	22m
欧洲空间局 (ESA)	ERS	雷达 (SAR)	30m
	ENVISAT	光学和雷达 (Optical & SAR)	30~1000m
	PROBA	光学 (Optical)	5~36m
	Sentinel-1	雷达 (SAR)	5~40m
巴西国家太空研究院 (INPE)	CBERS	光学 (Optical)	2.7~260m
印度空间研究组织 (ISRO)	Cartosat-1	光学 (Optical)	2.5m
	Cartosat-2	光学 (Optical)	1m
	Cartosat-2B	光学 (Optical)	1m
	Resourcesat-2	光学 (Optical)	5.8~56m
	RISAT-1	雷达 (SAR)	1~8m
	Oceansat-2	光学 (Optical)	236×360m
日本宇宙航空研究开发机构 (JAXA)	ISS	光学 (Optical)	120~240m
	ALOS	光学和雷达 (Optical & SAR)	2.5~100m
韩国航空宇宙研究院 (KARI)	Kompsat-2	光学 (Optical)	1~4m
美国国家海洋与大气管理局 (NOAA)	POES	光学 (Optical)	1100m
	GOES	光学 (Optical)	1~8km
俄罗斯联邦航天局 (ROSCOSMOS)	Kanopus-V	光学 (Optical)	2.1~10.5m
	Meteor-M	光学 (Optical)	450~900m
	Resurs-P	光学 (Optical)	1~24m
欧洲气象卫星组织 (EUMETSAT)	Metop-S	光学 (Optical)	1100m
	Meteosat Second Generation	光学 (Optical)	1~3km
	Meteosat First Generation	光学 (Optical)	2.5~5km
美国地质调查局 (USGS)	Landsat-5	光学 (Optical)	30~120m
	Landsat-7	光学 (Optical)	15~60m
	Landsat-8	光学 (Optical)	15~100m
	QuickBird	光学 (Optical)	0.6~2.4m
	IKONOS	光学 (Optical)	0.8~3.2m
	Worldview-1	光学 (Optical)	0.5m
	Worldview-2	光学 (Optical)	0.5~2m
	GeoEye-1	光学 (Optical)	0.4~1.65m

率的Radarsat-2和12.5m分辨率的ALOS/PALSAR雷达卫星影像弥补了这方面的不足,及时提供了灾害发生时的泥石流监测信息,为救灾提供了重要的数据支持。

利用空间分辨率为10m的日本ALOS卫星2010年8月10日的AVNIR光学卫星影像(图1)对甘肃舟曲泥石流灾害的监测分析表明,灾害发生后舟曲县城北部

三眼裕、罗家裕出现明显的滑坡体信息。三眼裕的滑坡灾害最为严重,滑坡体将原来的植被及建筑全部掩埋,一直延伸到白龙江,同时,流经舟曲县城的白龙江水体信息有明显增加,并延伸至沿岸的城区内。定量计算显示,三眼裕滑坡体长2km、宽150m,面积约0.24km²;罗家裕滑坡体面积约0.07km²。

利用空间分辨率5m的法国SPOT-5光学卫星2010

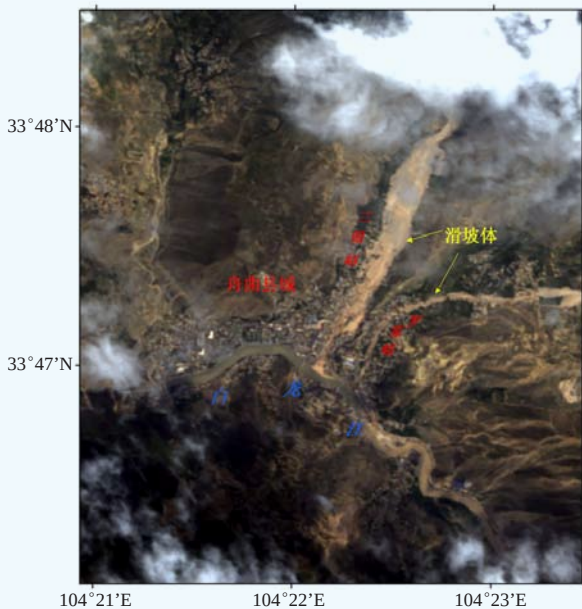


图1 ALOS卫星2010年8月10日甘肃省舟曲县泥石流监测图
Fig. 1 Mud-rock flow monitoring graph of Zhouqu, Gansu Province by ALOS on 10 August 2010

年8月15日的影像数据，结合DEM高程数据分析显示（图2），舟曲县城特大泥石流灾害的三眼峪和罗家峪泥石流来自于北部三眼峪集水区和罗家峪集水区，集水区地形和植被的共同作用是引发特大泥石流灾害的重要因素。三眼峪集水区呈现扇形漏斗状，山顶最高处海拔约3700m，舟曲县城海拔约1300m，两条沟谷的汇合处约2000m，从山顶道汇合处的沟谷有数千米的落差，从山谷汇合处到县城又有数百米的落差，经计算发现，三眼峪的集水区面积约20.5km²。利用空间分辨率5m的法国SPOT-5卫星2008年7月1日的影像数据分析显示，舟曲县北部的山区前期的植被覆盖较低，沿山脊的沟谷两侧多为裸露的褐色岩石和裸土，



图2 SPOT卫星2010年8月15日甘肃省舟曲县3D监测图
Fig. 2 Three D monitoring graph of Zhouqu County, Gansu Province by SPOT-5 on 15 August 2010

这是形成泥石流的重要因素。相比较，罗家峪沟的集水区面积经为14.8km²，集水区面积、海拔落差、山脊植被裸露程度都轻于三眼峪沟。强降雨时，雨水沿多条沟涧直接泻入山谷中的主沟槽，雨水携带沙石和裸土形成泥石流，在多条山谷的狭窄交汇处汇合，直接形成特大泥石流。因此，舟曲县附近特殊的地形，如扇形集水区、漏斗状山谷、巨大的海拔落差，以及植被覆盖状况和短时间内集中的强降水是共同引起甘肃舟曲县8月7日特大泥石流灾害的致灾因子。

3.2 2013年8月东北洪涝灾害监测

2013年8月以来，中国东北地区的持续强降水造成嫩江、松花江和黑龙江流域发生自1998年以来的最大洪涝灾害。持续阴雨天气使得利用风云气象光学卫星难以及时监测该地区的洪涝水体，急需能穿透云层、全天候、全天时工作的雷达卫星影像对东北地区下垫面洪涝水体进行监测服务。因而，8月16日中国气象局启动国际宪章（Call_447）申请获取东北洪涝灾区的雷达卫星数据，开展洪涝水体的监测和评估。

通过Charter机制获取了东北灾区嫩江下游、吉林桦甸和黑龙江下游区域的数据，包括美国地质调查局（USGS）提供的Landsat-8灾前和灾后光学影像、高分辨的WorldView-1、Quickbird遥感影像数据；德国航空航天中心（DLR）提供的嫩江下游、吉林桦甸和黑龙江下游TerraSAR-X灾后和灾前影像；加拿大空间局提供的嫩江下游、吉林桦甸和黑龙江下游洪涝灾区RADARSAT-2灾前和灾后影像；法国国家空间研究中心提供的洪涝灾区灾后SPOT-5光学影像；印度空间研究组织（ISRO）提供的洪涝灾区RISAT-1灾后雷达影像数据、Resourcesat-2 Awifs光学影像；英国灾害监测卫星国际图像公司（DMCii）提供的灾区灾后光学影像，共计1106景。

国家卫星气象中心及时对从Charter获取的各类卫星和雷达影像数据进行了处理分析，对此次东北地区洪涝水体变化范围进行了监测分析，相关的监测成果图和分析报告报送至中国气象局相关决策部门、以及黑龙江当地的相关政府部门，为此次洪涝灾害的评估和救灾提供了关键的数据。此外，针对东北洪涝灾害启动的Charter机制也得到了中国气象报等相关媒体的陆续报道，同时国家卫星气象中心工作人员也参加了中国气象频道关于东北洪涝灾害监测的专题节目，对此次洪涝与1998年的洪涝灾害进行了详细的对比分析。

3.2.1 雷达遥感监测水体优势及方法

东北地区洪涝发生后，持续的降雨云团使得光学和红外卫星都无法穿透云层对东北地区的水体进行

实时监测,而合成孔径雷达卫星(Synthetic Aperture Radar, SAR)作为一种主动式微波传感器,具有全天候、全天时成像的特点,可以穿透云层对水体进行监测(图3)。SAR影像是目前监测洪涝灾害最为有效的遥感技术,但是SAR数据并不容易获取。SAR影像

上,水体由于镜面反射回波强度较小,在图像上呈现出暗色或者黑色,而陆地的回波强度较大,呈现灰白色或者黑灰色,因而在SAR影像上水陆界限明显,可以清晰的看到洪水淹没范围,利用SAR影像可以迅速地监测洪涝灾害。

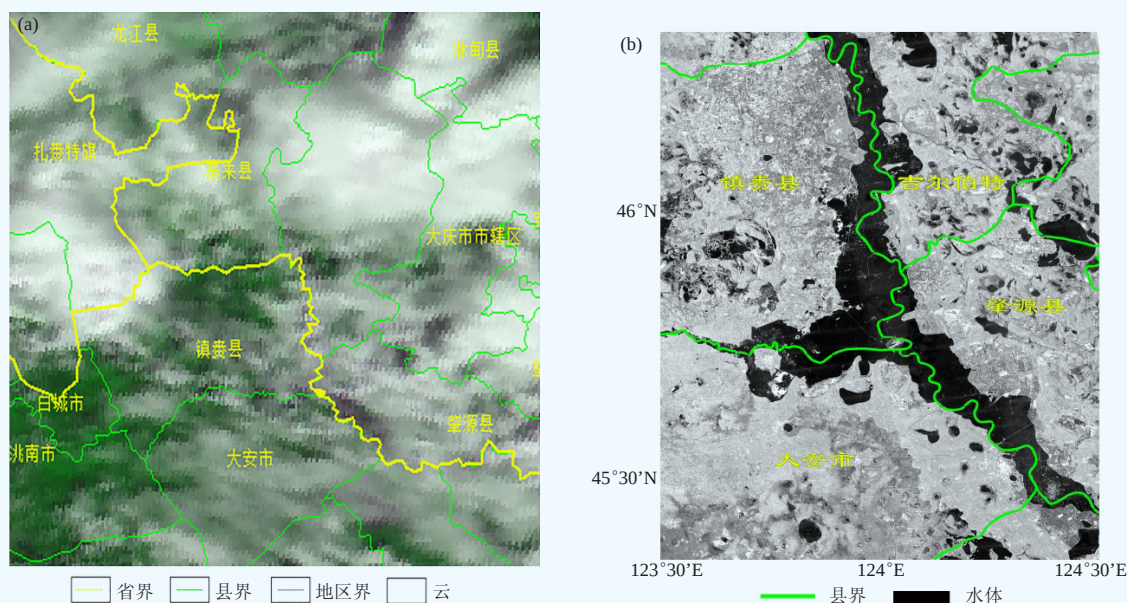


图3 光学卫星与雷达卫星性能对比(2013年8月17日), (a) FY-3A; (b) TerraSAR-X
Fig. 3 Comparison of optical and radar satellite capability on 17 August 2013, (a) FY-3A; (b) TerraSAR-X

利用SAR影像对洪涝灾害进行监测时,首先对SAR影像进行几何精校正,多采用多项式校正方法。Charter提供的数据都已进行了地理精校正,在应用中可以忽略此步。其次,利用雷达卫星影像数据的相关参数表,将影像亮度值转为后向散射系数。第三,对SAR影像进行滤波。由于雷达发射的是纯相干波,相干波照射地面产生衍射,地面目标上随机散射面的散射信号与发射的相干信号之间的干涉作用会使图像产生相干的斑点噪声,严重影响图像的质量和使。在消除斑点噪声的同时还要保留图像更多的锐度和细节,并增强水体信息,因而必须根据实际情况,选择合适的滤波器对雷达影像进行滤波。实际应用中,经常采用基于局域统计特性的空域自适应滤波方法,如Lee滤波、Sigma滤波等^[6-8],或者空域相干斑算法自适应处理,如Kuan滤波、Frost滤波等^[9-10],在本次灾害监测中对所获取的雷达卫星影像数据进行了Lee滤波。最后,利用滤波后的影像选择合适的后向散射系数阈值提取影像中的水体。准确的后向散射系数阈值是提取水体精度的保证,在本次水体监测应用中,采用基于水体内像元灰度特征值和水陆边界像元点灰度值确定阈值的方法,这两种方法也是经过

试验表明最能反映真实水体边界的方法,其误差在 $\pm 1\% \sim \pm 4\%$ ^[11],能够满足利用SAR影像监测洪涝的需要。

3.2.2 SAR 影像监测东北洪涝

利用2013年8月19日加拿大RADARSAT-2雷达卫星数据与2013年6月17日的美国Landsat-8陆地卫星数据对嫩江下游流域的水体变化的监测显示(图4),嫩江下游和松花江西段的水体范围与持续强降水前相比,水体范围显著增宽。嫩江下游河段水体最宽处达8km,是此次持续强降水前该处河段宽度的数十倍。嫩江下游区域多处出现大范围新增水体,其中齐齐哈尔市新增水体面积约480km²、肇源县约560km²、杜尔伯特蒙古族自治县约1050km²、泰来县约470km²。

利用2013年8月21日空间分辨率12.5m的加拿大RADARSAT-2雷达卫星数据和2013年7月23日空间分辨率30m的美国Landsat-8陆地卫星数据对黑龙江及松花江下游绥滨县、同江市水体变化的监测显示(图5),8月21日黑龙江在绥滨县、同江市河段的水体范围较7月23日显著增宽,黑龙江在绥滨、同江沿江地区形成了大范围的洪涝积水,在俄罗斯境内沿江区域也形成了严重的洪涝水体。与7月23日相比,松花江下游绥

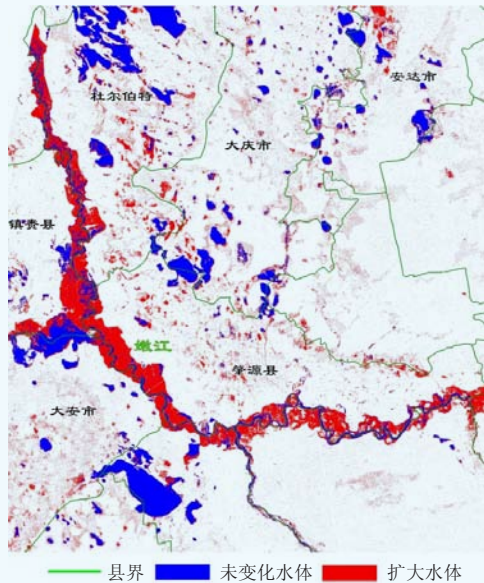


图4 RADARSAT-2雷达卫星（2013年8月21日）与 Landsat-8光学卫星（2013年7月23日）嫩江水体监测图
Fig. 4 Water monitoring graph of Nenjiang by RADARSAT-2 (21 August 2013) and Landsat-8 (23 July 2013)

滨县段有一处新增洪涝水体，绥滨县境内泛滥洪水面积积约392km²，同江市境内部分地区的泛滥水体面积约200km²。另外，黑龙江该处河段在俄罗斯境内形成的泛滥水体约943km²。

4 小结

作为中国在国际减灾宪章（Charter）的授权用户，中国气象局针对气象灾害启动的两次Charter机制，通过获取Charter成员机构的高分辨光学影像和雷达卫星影像分别对2010年8月7日甘肃舟曲泥石流灾害和2013年8月东北洪涝灾害进行了业务监测服务，应用实践显示国际减灾宪章提供的高分辨率卫星影像和雷达卫星影像数据种类丰富、空间分辨率多样、过境频次高，并且具有特定的性能优势，弥补了中国民用雷达卫星数据不足，亚米级高分辨率卫星数据不足的缺陷。相关数据与中国卫星互补，对气象卫星监测气象灾害和衍生灾害起到重要的补充作用，并且有效提高了灾害监测的频次和范围，在业务应用中发挥了关键作用，为决策服务部门和相关各级部门的灾害评估、防灾救灾等提供了及时、准确、可靠的信息。

根据Charter机制预案^[12]，除洪涝、泥石流等对高分辨率卫星资料需求迫切的自然灾害之外，该机制还能够应用于地震、火灾、雪灾、海冰等其他各类自然灾害。我国是一个自然灾害频发的国家，上述灾种在我国均可能会出现，因此，在可预见的未来，Charter

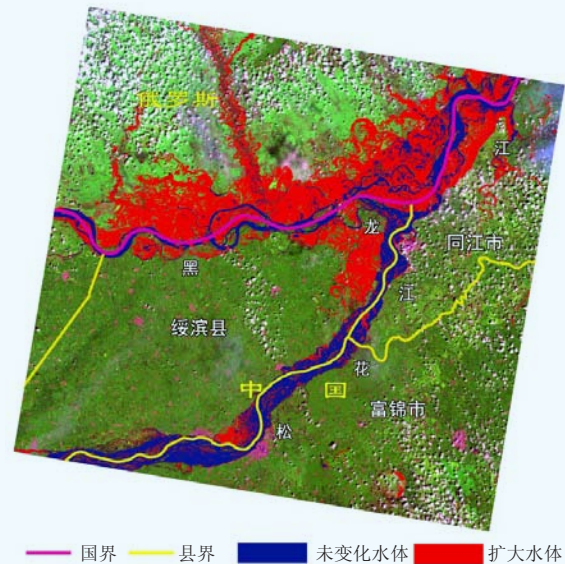


图5 RADARSAT-2雷达卫星（2013年8月21日）和 Landsat-8光学卫星（2013年7月23日）绥滨水体监测图
Fig. 5 Water monitoring graph of Suibin by RADARSAT-2 (21 August 2013) and Landsat-8 (23 July 2013)

机制将是我国防灾减灾的重要手段之一。

参考文献

- [1] 王静爱, 史培军, 王平, 等. 中国自然灾害时空格局. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] Bessis J L, Béguignon J, Mahmood A. The International Charter "Space and Major Disasters" initiative. Acta Astronautica, 2004, 54: 183-190.
- [3] Mahmood A, Cubero-Castan E, Platzek G, et al. South American perspective of the International Charter "Space and Major Disasters". Advances in Geosciences, 2008, 14: 13-20.
- [4] Bessis J L, Béguignon J, Mahmood A. Three typical examples of activation of the international Charter "Space and Major Disasters". Advances in Space Research, 2004, 33: 244-248.
- [5] 李传荣, 范大一, 唐伶俐, 等. "空间与重大灾害" 国际公约组织的作用、贡献与意义. 遥感技术与应用, 2008, 23(3): 112-116.
- [6] Lee J S. Refined Filtering of Image Noise Using Local Statistics. Computer Graphics and Image Processing, 1981, 15(4): 380-389.
- [7] Lee J S. Speckle Analysis and Smoothing of Synthetic Aperture Radar Images. Computer Graphics and Image Processing, 1981, 17(1): 24-32.
- [8] Lee J S. Speckle Suppression and Analysis for Synthetic Aperture Radar Images. Optical Engineering, 1986, 25(5): 636-643.
- [9] Kuan D T, Sawchuk A A, Strand T C, et al. Adaptive Noise Smoothing Filter for Images with Signal-Dependent Noise. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 1985, PAMI-7(2): 165-177.
- [10] Frost V S, Stiles J A, Shanmugan K S, et al. A Model for Radar Images and Its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 1982, PAMI-4(2): 157-166.
- [11] 柳钦火, 辛晓洲, 唐博, 等. 定量遥感模型、应用及不确定性研究. 北京: 科学出版社, 2010.
- [12] Mahmood A, Bessis J L, Béguignon J, et al. International Charter "Space and Major Disasters": Emergency On-Call Officer Procedure. RSCSA-PR0418, CSA, 2014, 109pp.

世界气象组织全球综合观测系统(WIGOS) 空间部分2040年远景发展规划的解读

■ 张文建

由世界气象组织(WMO)基本系统委员会牵头制定的WMO全球综合观测系统(WIGOS)的2040年远景发展规划,需要对两个方面开展预测,即预测气象服务需求和预测科技发展进步。WMO期望该远景发展规划有助于各会员国提前预测气象部门应对未来气象服务需求所面临的挑战,也期望全球航天机构及卫星操作国在考虑制定本国的气象卫星和相关对地观测卫星远景发展规划时,充分考虑将WMO综合观测系统空间部分的远景发展规划作为需求牵引的指导。

1 引言

第17届世界气象大会(2015年)赞同由世界气象组织(WMO)基本系统委员会(CBS)牵头制定WMO全球综合观测系统(WIGOS)的2040年远景发展规划。这个新的远景发展规划应当作为WMO的纲领性指导文件,充分地考虑到2040年可能出现或演进的新的气象服务需求(包括多种新的应用领域,例如气候服务、空气质量预报和监测、水圈和冰雪圈的监测服务需求等),并对到2040年的全球观测系统格局和信息技术的发展进步进行预测。

WMO的第一个全球观测系统(GOS)2015年远景发展规划于2002年发布,此后以此规划为指导于2005年制定并发布了全球观测系统演进发展实施计划(EGOS-IP)。2009年,WMO发布了全球观测系统(GOS)2025年远景发展规划,并于2012年更新发布了新的全球观测系统演进发展实施计划(EGOS-IP 2025)。

本文主要阐述和解读新的全球综合观测系统2040年远景发展规划的空间观测系统(以下简称远景发展规划)。推动制定2040年远景发展规划的三个主要因素如下。

1) 在WIGOS框架中设定规划目标。需要特别提出的是,原来的2025年远景发展规划是针对全球天气监测计划(World Weather Watch)下的全球观测系统(GOS)的远景发展规划,主要以满足天气监测为主,兼顾其他计划。而2040年的远景发展规划是在WIGOS框架下。WIGOS包括了目前WMO的全部全球观测系统,即世界天气监测计划下的全球观测系统、监测全球大气成分的全球大气监测计划(GAW)、WMO水文观测系统和正在建立的全球冰冻圈监测

计划(GCW)等。全球空间天气监测也逐步成为WIGOS的一个重要组成部分。近年来WMO新发展的一些应用项目或计划,其观测需求并没有包括在以前的2025年远景发展规划中,例如2009年启动的全球气候服务框架(GFCS),2011年启动的全球冰冻圈监测计划(GCW),空气质量的预报监测,全球空间天气服务需求等等。所以WIGOS框架下的2040年远景发展规划的范围大大拓展了,其目的就是通过这个框架性的远景发展规划,满足WMO全部计划的观测需求。

2) 在对2040年空间技术进步预测的框架下设定目标。新技术的发展是渐进性的,包括新的遥感仪器、新的卫星轨道概念、卫星间的组网配合、星上数据处理和数据压缩、新的数据传输手段等等。在过去数十年间一些研发卫星计划,例如全球热带降水测量计划(TRMM)、全球降水测量计划(GPM)、美国和欧洲相关国家的海洋观测计划等,都非常及时地响应了WMO的观测系统远景发展规划,所以WIGOS的2040年卫星系统远景发展规划,有意将这些卫星系统纳入WMO空间计划的2040年业务系统协调之中。

3) 由于气象卫星的高效益和对于社会公益事业不可估量的贡献,近年来已经有一些重要发展预示着全球气象卫星操作者进一步扩大的可能性。目前出现的气象卫星商业化发展的苗头,既可望增强对全球气象卫星体系的贡献,也带来了国际协调和数据政策上的复杂性。

将新的全球综合观测系统远景发展规划设定在2040年,主要是因为气象卫星的发展越来越体现出长远发展战略指导的重要性,所以远景发展规划应该

超前于目前世界主要空间大国已经基本确定的空间计划，并应包括新的卫星轨道的使用，可能的新兴卫星国家的加盟，以及业务卫星与科学技术先导卫星、商业卫星的有机结合等等，以便体现出超前性和指导性。同时，远景发展规划应该既体现出雄心勃勃的发展气势，但又需考虑到技术实现的可行性。

2 2040年气象业务服务需求预测

联合国关于 2015 年后可持续发展议程综合报告中提示的社会发展趋势，WMO最新的发展战略报告（2016—2019年）中提出的全球社会需求，以及联合国其他相关组织（如世界卫生组织，世界粮农组织等）的发展战略和相关报告，为展望和预测2040年气象业务和服务发展的需求提供了重要的参考依据。

1) 气象服务于减灾防灾。高影响天气、海洋天气、气候和水文事件（风暴、洪水、干旱等）可在全球范围造成灾难性后果，可导致大量人员伤亡、流离失所和社区遭到破坏，造成的社会和经济成本是巨大的，仅财政影响本身就十分可观。从WMO发展战略报告提供的1970—2009年期间每十年全球经济损失总值（图1），可以看出各类气象水文灾害造成的每十年经济损失有明显增加的趋势。在过去十年间全球每年因自然灾害带来的保险损失约100亿~500亿美元。进一步提升气象服务对于防灾减灾的贡献可以更好地体现气象服务的社会经济效应。按灾害类别划分，风暴和洪水分别占据灾害损失的第一和第二位，且明显高于其他灾害造成的损失。随着气候变暖造成极端天气气候事件频次进一步增加且强度增大的总体趋势，这两个方面的防灾减灾气象服务未来（到2040年）必定仍然是重中之重。

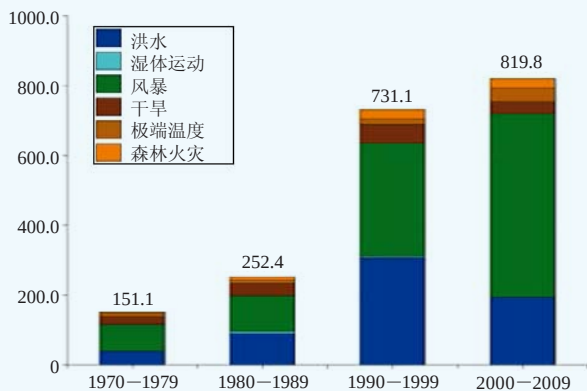


图1 1970—2009年按灾害类别划分的每十年全球经济损失总值，均调整到2011年的价值并以10亿美元为单位（出处：WMO和CRED，2013年）

2) 沿海和大城市气象服务。到2040年全球人口将达到接近90亿，其中估计有7亿人生活在极度贫困

中；目前全球有50%以上人口生活在城市地区，而到2040年居住和生活在城市中的人口将达到70%左右，且更多集中在沿海地区。这个趋势表明，精细化的城市和沿海地区气象服务将成为突出的气象服务需求。

3) 空气质量预报和监测服务。世界卫生组织2014年报告指出，2012年有700万人由于空气污染过早死亡，其中在东南亚的中等和低收入国家和西太平洋地区尤其严重，而死于室内空气污染和室外空气污染的人数分别为330万和260万人。随着人们对于未来提高生活质量的追求，未来空气质量的预报和监测必将成为气象服务的重要需求之一。

4) 气象服务于经济社会可持续发展。联合国秘书长报告预测，2050年将有7.8亿人口无法获得清洁水；将有13亿人缺乏电力供应等等。全球气候服务框架确定的五个重点领域（农业、减灾防灾、水资源、健康和能源）基本涵盖了国家可持续发展相关的气候服务需求，明确了增强和全面改进气候服务信息的重要性。随着未来气象服务的质量进一步提高和范围的进一步拓展，必将为更多的国家经济社会支柱产业（航空、交通、旅游、农业、商业、保险等）提供更好的增值服务。

3 2040年主要气象服务领域发展预测及对气象卫星观测的需求

3.1 用户需求增长的总体趋势

目前WMO每个计划对观测系统发展需求的总体趋势都是：更高，更快，更准。更高：希望观测得到更高的空间分辨率和更高的光谱分辨率；更快：进一步加快观测频次和更快地获取卫星观测；更准：即首先需要进一步提高观测精准度（高精度，高信噪比）以满足气候和痕量及污染气体的观测需求。

应用于气候监测和再分析，观测精准性、连续性、长期稳定性和完整性需求进一步提高，以确保长期基本气候变量的观测、变量产品的生成和基本气候数据记录长期连续性。需要在所有在轨卫星上都设置测量参考标准，以支持业务辐射测量的校准，进而通过卫星间的传感器互定标系统达到整个星座测量的准确性和高度一致性。需要建立全球定标基准卫星，并要求参考标准的精度仪器应覆盖空间对地观测所使用的全部光谱波段。

3.2 天气领域

3.2.1 数值天气预报

1) 服务需求及发展前景预测

先进的全球数值天气预报（NWP）模式可输出长

达15d的中期天气预报，水平分辨率达到15~50km，垂直分辨率在地球表面附近达10~30m，在平流层为500~1000m左右。目前利用NWP的输出预测极端天气和气候事件的成功率在逐步提高。基于集合预报的统计方法也越来越多地用于较长期的天气预报。这种集合预报需要对NWP中所有输入资料的不确定性有很好的了解。

参考美国国家航空航天局（NASA）地球科学展望报告和其他相关报告，预测2040年的NWP的一些需求指标如下：

- 7~10d的预报准确率达到90%以上；
- 可以常规发布7d的降水预报；
- 常规发布7d的区域强局地风暴预报，具有中等到较高的准确度；
- 提前4d预报洪水；
- 3d台风（飓风）路径预报精度达到75海里，2d台风（飓风）强度预报精度（以风速为指标）达到9节（海里/小时）；
- 可以开展7/10d的空气质量预报。

为满足精细化气象服务需求（大城市、沿海地区等），到2040年左右，全球NWP单模式的分辨率需要达到1km，集合预报模式分辨率需要达到5km，200个层次和100个诊断变量，非静力和完全耦合模式、区域模式的分辨率甚至可以达到100m。

2) 对于卫星观测的需求

NWP的准确度很大程度上取决于如何准确完整地估计大气的初始状态，为实现上述2040年需求指标，期望2040年气象卫星可以为全球NWP提供的关键大气变量是（按重要性排序）：

- 卫星观测的三维大气风场（从近地面层到平流层所有层面）和二维的地表气压场；
- 具有足够垂直分辨率的三维大气温度和湿度分布（在对流层低层和多云的地区更重要）；
- 基于卫星的降水估计和云参数；
- 海洋上层（0~500m）温度和土壤湿度（对中期预报的后沿，即10~15d的预报更加重要）；
- 海冰和雪水当量；
- 气溶胶和痕量气体。

现代数据同化系统能够有效地利用全球地面常规同步观测和非同步（任意时间）观测这两种数据。常规观测水平分辨率和覆盖范围有很大限制，但却具有高精度度和高垂直分辨率的优势，由于是直接测量所需的模型变量（温度、湿度、风等），所以观测容易直接使用；卫星探测数据是遥感观测，提供了非常良

好的水平分辨率和全球覆盖范围，但是垂直分辨率不高，观测的是非模式直接变量，需要一种较为复杂的正演模式将其转化为模式变量。四维变分同化使得我们可以从观测的时间序列和高频次观测中（例如每小时观测）获得更多的大气动态信息。

3.2.2 临近预报和短期天气预报

1) 服务需求及发展前景预测

一些与天气有关的决策需要具有较高的空间和时间分辨率（高达1km，几分钟）的准确预报。临近预报通常指未来0~2h，而超短期预报指2~12h。尽管人们追求“无缝隙”预报系统，但是应该指出的是，这些不同时间段的预报对观测资料的需求有很大不同。传统上，临近预报技术主要是根据观测数据采用观测外推法，现在正在发展的高分辨率区域数值天气预报模式，且越来越有效地指导超短期预报。2040年临近和短期天气预报的服务需求指标预测如下：

- 提前6~12h有效地预报雷暴的发生区域（对流扰动）；
- 实时地监测台风和强对流系统的强度和路径变化；
- 提前60分钟预报龙卷风；
- 对局地灾害性事件（森林火灾、火山爆发、局地暴风雪、空气污染、化学或放射性事故等）进行实时监测和发展趋势预测。

主要发达国家依赖其成熟完善的天气雷达网和高分辨率数值预报模式的结合建成具有先进水平的临近预报和超短期天气预报系统。在没有成熟雷达网络的发展中国家和不发达国家，预报系统发展的条件受限。所以WMO鼓励发展中国家发展基于卫星资料和数值预报的“低成本”临近预报系统。

2) 对于卫星观测的需求

以观测外推技术为主的临近预报和超短期天气预报，除了和NWP需求相同的气象变量观测（例如云和降水、三维风场、三维湿度和温度场等）以外，还需要多一些关键大气变量（如台风和强对流系统的结构及环境场）和地表变量（如气压、风、能见度和污染天气状况、短波辐射、雷电、沙尘暴和火山爆发监测）。指导临近预报和超短期天气预报用的高分辨率区域模式则需要更高空间分辨率的卫星观测和更高的观测频次，以满足高分辨率模式快速更新循环同化的需要。

未来卫星观测支持临近预报和超短期天气预报的观测重点的发展方向为：1) 静止轨道卫星的多通道成像快速区域扫描观测，需要的快速成像频次在分钟的量级上，空间分辨率在百米的量级上，通道应该

在20个以上，这种能力的提高可以有效识别各种天气和地表灾害现象（洪涝、火灾、滑坡泥石流等）。随着全球下一代静止气象卫星在未来5年相继投入业务运行，其观测能力已经比较接近上述目标，但是完全实现其目标可能需要期待更下一代静止卫星的发展。

2) 雷电观测。过去的一些低地球轨道试验卫星已经证实了卫星载荷监测地面雷电现象的有效性。但是到目前为止，尚未实现地球静止轨道卫星对于雷电现象的观测。目前一些空间大国即将发射的气象卫星（例如中国风云四号卫星，美国GOES-R卫星和欧洲的第三代静止气象卫星MTG）都载有闪电成像仪器，空间观测雷电的时代马上就要到来。但是其探测精度和准确度、覆盖范围、时效和应用有效性需要经过实际应用得到证实，仪器也需要经过进一步改进和优化才能满足实际应用需求。

3) 攻克对台风强度和强对流降水系统的直接观测和预报的挑战。目前对台风强度的直接观测和预报进展缓慢，主要原因是目前从静止气象卫星轨道上只能进行红外大气探测和红外可见光成像观测，因而只能观测云顶信息，并不能透过云顶实现对降水系统内部结构和强对流过程的观测。极轨气象卫星虽然具有微波垂直探测和成像观测能力，但是无论是覆盖范围和观测频次都不能满足直接监测的需求。

由于台风强度和强对流降水造成的巨大经济损失和社会影响，对台风强度的监测和提供预测所需重要数据仍是未来卫星观测系统发展的首要任务。未来可能的解决方案包括：1) 实现极轨小卫星群的微波组网观测。如果最低要求达到每小时一次观测的话，则需要均匀分布在极地太阳同步轨道平面上有12颗卫星。如果和未来业务化的低倾角降水测量卫星星座结

合，则可以大大提高观测频次，但是需要充分协调和加强国际合作才能完成。

2) 开展静止气象卫星轨道微波探测试验和业务运行。由于静止气象卫星的轨道高度是极轨（或低地球轨道）卫星的约40倍，如果期望达到接近极轨的观测需求和技术性能的话，其技术难度具有很大挑战性。WMO大力鼓励在静止气象卫星轨道高度上开展高频微波的重点区域探测，其技术前景可行，应用潜力巨大。更长远的预期也可能是两种体系的结合，取长补短，与目前静止/极轨卫星上的可见光红外成像和垂直探测体系互补的方式相类似。

3.3 气候领域

3.3.1 短期气候预测和气候服务

1) 服务需求及发展前景预测

季节和年际气候预测的物理基础在于气候的缓慢变化，例如海洋和陆地表面（包括冰冻圈部分）。其中利用大气和海洋的耦合模式开展的ENSO和北大西洋涛动（NAO）的周期预测是目前最具有可预测性的季节性时间尺度相关的现象。

WMO发起的第三次世界气候大会（2009年8月31日—9月4日）呼吁制定全球气候服务框架（GFCS），2012年WMO特别届会通过了GFCS的实施计划方案。方案包括了观测监测、模式发展、气候信息系统和气候服务界面等分系统。最终使气候服务在许多社会经济和气候敏感部门应用产生服务效益。目前，全球气候服务框架提出了五个重点服务领域，包括气候为农业和粮食安全服务、减灾防灾、水资源、健康和能源，并提出了两年、六年和十年的预期目标。可以预期，到2040年GFCS的业务化运行必将成为WMO的全球业务协调的重点之一（表1）。

表1 国际文献提出的2040年短期气候预测目标

主要领域	目前状况	2040年期望目标
常规短期气候预测	短期气候预测初步成功	可以以较高精度预报从数周到数月的短期气候
短期气候预测为极端天气事件、农业、减灾和健康服务	短期气候预测可以发现与异常天气事件、洪水、农作物和疾病之间的关联	短期气候预测可以有足够的精度来预测这些事件用于决策参考依据
厄尔尼诺事件预测	可以模拟重现过去的厄尔尼诺事件	可以常规预报15-20个月的厄尔尼诺事件
气候降水预测	基于气候预测，可以提供有用的区域尺度年降水预测	基于气候预测，可以提供有用的区域尺度年降水预测
十年气候展望	基本理解十年气候变率的诱发因子	常规发布具有有用精度的十年气候预测

2) 对于卫星观测的需求

对于气候模式的观测需求来说，海洋和大气海洋耦合模式的初始化使用了包括大气和海洋的观测数据。在气候模式初始场数据的同化方法上，各业务中心采用的方法有很大差别。有些简单的模式仅仅同化大气风场的信息，而更复杂的模式则同化了地球下表面（土壤温度）的信息和从卫星观测反演出的地形地

貌和地球表面温度的数据。对不同涛动的预测所需的主要观测变量也可能是不同的。如何进一步发展耦合模式的同化技术，以便能够最佳地使用观测来改进模式的初始化场仍然是耦合模式发展的重大挑战。

GFCS所确定的五个重点领域对于观测的需求尚在论证的初步阶段。尽管全球气候观测系统（GCOS）所确定的大部分基本气候变量（ECV）和

用于短期气候预测的观测都可以用于气候监测和服务,但是针对GFCS上述五个重点服务领域的业务服务,还应该明确提出有针对性的观测需求,并且在监测和预测产品的精度及时效要求方面提出明确的要求。短期气候预测模式仍然是各类气候服务的基础业务平台。目前季节预报模式初始化主要使用的是大气和海洋表面温度的观测。对于先进的耦合模式的数据同化系统发展,下列数据是重要的:

- 海洋参数:海洋表面和下表面温度,海洋盐度,海冰(包括海冰覆盖面积和海冰厚度);
- 地表参数:土壤湿度,雪覆盖面积和雪水当量等;
- 大气和太阳:平流层状态,太阳光谱辐照度。

而对于十年期的气候预测模式初始化来说,海洋和大气的再分析场是模式初始化的主要信息源,且用于后期验证。十年气候预测的关键观测需求为:上层海洋温度和盐度(从表面到海洋表面下500m),海流,平流层状态,海冰厚度,太阳光谱辐照度,土壤湿度和雪盖等。

目前尚不能从卫星上直接观测的变量为:

- 海洋表面以下的温度,盐度和海洋洋流(目前主要依靠海洋浮标等就地观测,空间分辨率和全球覆盖不能满足要求);
- 海冰厚度和积雪厚度;
- 土壤湿度(尽管已经有了很大进展,土壤湿度仍处在试验观测阶段);

以上这些短期气候预测所需要的重要变量,有待于2040年前新的遥感技术的出现,并在2040年前后达到可以实用的观测效果。

3.3.2 气候系统观测与监测

1) 服务需求及发展前景预测

气候系统由大气、海洋、陆地表面、冰雪覆盖层和生物圈等五个部分组成,以各种方式影响着地球上的人类活动,包括水的供应、粮食生产、大气空气质量、生态系统和人类健康,甚至人类迁徙。随着2040年预计人口达到90个亿,对于地球资源(水、粮食和能源等)的需求相应增加,全球变暖也不断改变着地球气候系统之间的联系,使得对于地球气候和环境的预测的不确定性增加,地球系统的准确预测变得越来越重要。在到2040年的未来二十多年中,我们必须超越目前的主要着眼于对地球系统的各个组成部分进行研究的基本立足点,把视点提升到将地球气候作为一个整体系统(结合大气、海洋、生物圈和固体地球)开展综合观测和模拟,以便达到能够准确和定量地预测地球气候系统的能力。这些预测能力将实现知情决

策水平,进而提高生活质量、经济的可持续发展以及全球社会稳定。对于WIGOS的2040年发展的远景规划来说,观测整个地球气候系统是关键发展方向和难点。总体目标如下:

- 观测整个地球气候系统,以能够从气候各个组成部分的变化追踪到对整个气候系统的影响;
- 模拟整个地球气候系统及其所有分系统(组成部分),使得气候系统的任何分系统的变化可以预测;
- 不断地改进对于整个地球气候系统行为及其动态演变的描述,使其能够更好地符合对于地球气候系统的观测;
- 实现对地球气候系统的有效预测(包括对于预测的不确定描述),对经济社会各有关方面的决策提供有实际应用价值的支持和服务。

2) 对于卫星观测的需求

为响应第十六次世界气象大会关于“建立从空间监测气候架构”的决议,由WMO、地球观测卫星委员会(CEOS)和气象卫星协调组织(CGMS)组成的特别工作组编写了一个关于“建立从空间气候监测架构战略”的报告,指出从卫星观测和监测气候系统存在巨大挑战,目前观测的主要不足如下:

- 目前的许多用于监测气候系统的卫星观测仪器本来并不是针对监测气候所设计的,其观测精度和稳定性和同样仪器在不同卫星上的接续性和一致性都难以达到气候系统监测的要求;
- 目前大部分气象卫星序列没有计划确保连续稳定运行达到气候监测所需要的时间序列,也没有在某个重要气候变量观测仪器失效情况下的专门针对气候监测目的卫星应急计划(即卫星系统之间的相互备份支持计划);
- 数据共享政策尽管最近已经取得很大的进步,但是和天气观测数据相比,对于气候数据共享的重要性认识,和实现气候数据交换的业务化尚未实现,需要更大努力;
- 气候监测需要加强建立包括终端到终端的气候信息系统,从数据采集、数据质量控制、数据存归档、处理发掘,到再加工和气候数据记录生产准入等管理工作所需的系统建设。

远景规划提出了一个从空间监测气候的一个逻辑架构,即需要一个由业务和研发卫星加上特殊任务卫星相结合的星座,该星座应该在观测气候系统能力,观测精度和持续性方面明显超出目前的观测能力,要承诺执行长期和持续的气候观测,并保持广泛的和开放的数据共享政策和应急计划。进一步的计划是,在

全面评估观测需求的基础上, 结合各国卫星长远发展规划, 制定和设计一个“从空间监测气候架构”的物理体系结构并制定出清晰的发展路线图, 作为远景发展规划的一个重要组成部分, 以便WMO协调和帮助卫星拥有国和有关单位实施和运行。

3.4 大气成分和空气质量观测

3.4.1 服务需求和发展前景预测

第十七届世界气象大会通过了第46号决议案, 要求WMO的所有会员国支持建立全球综合温室气体信息系统(IG3IS)实施计划, 主要内容包括: 1) 支持进一步改进和发展全球温室气体(二氧化碳、甲烷等)、气溶胶、臭氧和氧化亚氮监测网络; 2) 按照全球大气监测(GAW)计划的质量保证原则, 开展温室气体的观测; 3) 在规定的时间内确保及时提交观测数据以及元数据到WMO的专用数据和信息中心, 元数据应该纳入统一WMO全球综合观测系统数据库。目前IG3IS实施计划正在编写中, 但是计划的实施需要更多年的努力。

刚刚通过的联合国气候变化框架公约巴黎大会(2015年)协议, 显示了世界各国政府更主动地参与努力限制和减少大气中温室气体排放的决心。但如何客观定量地监测全球二氧化碳在不同地区的排放仍是一个悬而未决的事情。期望全球综合温室气体信息系统作为一个独立的基于科学观测和分析的重要观测与信息系统, 用于独立量化自然和人为的温室气体源和汇, 提供可操作的信息, 以帮助会员在增强的时空尺度上了解和管理温室气体收支, 并可为会员提供相关政策方面可付诸于行动的信息。全球气候服务框架的“健康”主题包括了对于空气质量服务的需求。

3.4.2 对于卫星观测的需求

目前全球大气成分和空气质量观测的主要不足如下:

- 实地观测站网的密度(包括陆地, 海洋和自由大气中)远远不足, 从卫星平台上观测温室和污染气体尚处在探索和初步发展阶段;
- 不同尺度的观测(如全球和区域观测)和在不同介质中的观测(如在大气中观测与二氧化碳分压观察室中观测)之间的不兼容性;
- 在全球/区域和局地尺度的传输模型中, 模式的复杂性和性能都不足。

以上的主要不足, 使得无法充分地观测到二氧化碳和甲烷的空间和时间分布, 仅仅利用目前有限的几个地面观测站的观测导致了全球分析的很大不确定性, 严重地制约了对于全球碳循环的认知能力和对未来的气候监测预测能力。卫星将是测量全球二氧化碳

和甲烷的时空分布的最有希望的技术手段之一, 有望改善对于这些气体的源和汇估计的准确度。

卫星观测温室和污染气体尚在初步发展阶段。在过去的二十年间, 试验了两种探测温室气体(CO_2 和 CH_4)的卫星仪器。第一种是热红外(TIR)高光谱探测仪, 利用温室气体对于红外通道辐射的吸收原理来探测温室气体的浓度分布, 其代表仪器是装载于美国地球观测系统(EOS)上的大气红外探测器(AIRS), AIRS采用尖端的红外分光光谱仪技术, 有2378光谱通道, 比以往的红外探测器的光谱分辨率高100倍以上, 可以测量温室气体和其他一些气体(如臭氧、一氧化碳、二氧化碳、甲烷和二氧化硫等)。第一颗卫星于2002年5月发射成功, 生成了月平均的全球一氧化碳、二氧化碳和甲烷分布图。发现的主要问题是, 该仪器对于二氧化碳和甲烷吸收灵敏度的峰值在中对流层(400hPa水平)。因此, 所观测到的气体浓度的全球平均值分布与地面气体排放的位置无法对应。

第二类型卫星仪器是利用短波红外(SWIR)观测, 其原理是用来测量在0.76、1.6和2.0 μm 由二氧化碳和分子氧所反射的太阳光, 达到测量大气温室气体的目的。典型代表仪器是装载于欧洲环境卫星(ENVISAT)上的扫描成像吸收光谱大气绘图仪(SCIAMACHY)。与热红外观测温室气体技术相比, 短波红外观测到的温室气体的丰度敏感区位于地球表面附近。由于 CO_2 和 CH_4 的源和汇主要来源在地表附近, 所以短波红外比长波红外技术更适合用于温室气体的观测。但是SCIAMACHY观测和反演的精度(对于碳通量)不能达到精度(1%~2%)和准确度(-1.5%)的要求。

近期又有两个专门用于温室气体观测的卫星成功发射。一个是日本于2009年1月发射的温室气体观测卫星(GOSAT), 它配有两台仪器: 热红外和近红外传感器碳观测傅里叶变换光谱仪(TANSO-FTS)和云与气溶胶成像仪(TANSO-CAI)。TANSO-FTS执行从短波红外到热红外的高光谱分辨率的测量(0.758~14.3 μm), 用于弥补仅仅长波红外观测的不足。另外一个美国研制的在轨二氧化碳观测台(OCO)。其中第一颗卫星2009年发射失败, 第二颗卫星于2012年7月16日发射成功。卫星设计寿命两年, 16天重复观测周期。尽管宣称这两颗卫星的载荷仪器都比第一代卫星仪器(AIRS和SCIAMACHY)有很大提高, 但是数据处理显示仪器噪声还是影响产品精度的主要原因。当然, 如何提高空间分辨率以避免

云和水汽的干扰，同时又不降低观测的精度要求，仍然是未来此类仪器发展的挑战。

从21世纪初开始，由于空气污染问题日益严重地影响人们的生活，为了满足实时监测污染气体的需求，一些航天机构开展了从卫星上监测大气污染和空气质量的试验计划，包括计划于2018年发射的美国对流层排放和大气污染监测（TEMPO），计划于2018年发射的韩国静止卫星平台地球环境监测成像光谱仪（GEMS）。计划搭载于欧洲第三代静止气象卫星上的欧洲哨兵4号（Sentinel-4）的紫外—可见光—近红外探测光谱仪。这些卫星仪器主要采用紫外和可见光近红外高光谱探测技术，空间分辨率可以达到7~8km，可以实现每小时一次对于固定区域的观测。相信到2040年此类技术和仪器可以完全达到业务化的要求。

4 2040年空间技术发展趋势及满足业务需求的可能性展望

4.1 2040年WIGOS空间系统远景发展规划的基本思路

综合上述不同领域的需求，WMO召开了2040年WIGOS空间系统发展研讨会，在WMO基本系统委员会卫星专家组提出的建议的基础上，提出了2040年WMO全球综合观测系统空间远景发展规划如下的4层体系结构。

4.1.1 布局明确的业务骨干卫星系统

这个骨干系统，具有确定的全球轨道布局和仪器配置，观测技术明确，被定义为最基本和最底线的业务卫星系统。它是建立在WMO会员国卫星操作者庄重承诺的基础上，也是当前CGMS每个成员国的目前业务卫星系统的不断补充完善和发展演进到2040年的主要格局，是WMO卫星计划所协调和规划的未来的骨干系统的集合。这个主干系统将得到各国政府的严格承诺和经费保证，以确保获取WMO成员国和计划所需要的“基本数据”，并确保此骨干卫星观测系统的长期稳定运行。到2040年此骨干卫星系统应该比目前的业务卫星系统有很大的改进和增强，主要应包括：

- 地球静止轨道圈：提供常规多光谱可见光/红外成像，红外超光谱大气垂直探测，紫外/可见/近红外垂直探测（大气成分和大气污染监测），闪电成像。

- 地球低轨道太阳同步轨道平面：在3个轨道平面（清晨/上午/下午）核心星座上携带高光谱红外垂直探测仪，可见光/红外成像仪（包括昼/夜微光成像），微波成像仪，微波垂直探测器，散射计等。在此基础上再增加空间和时间均匀配置的另外三个太阳同步轨道卫星，且这三颗卫星上特别强调要携带微波

成像仪和探测器（其他仪器配置可以有灵活性），和三个核心轨道星座形成最佳配置以实现全球降水、台风和强对流监测，同时提高整个极轨星座的可靠性和改进时间采样频次。

- 宽幅带雷达高度计：可以是专门卫星计划，也可以搭载在其他低地球轨道卫星上，实现海洋全覆盖的高精度海面高度观测。

- 全球降水测量雷达：由降水测量雷达、云雷达、微波探测仪和成像仪组成的倾斜轨道（地球低轨道）星座。

- 红外双视角成像仪：用于高精度海面温度观测。

- 低频微波成像：在6.7GHz的微波图像（用于全天候海面温度观测）和低频微波成像（主要用于土壤湿度和海洋盐度观测）。

- 微波跨轨道垂直探测：主要用于获取平流层和中间层大气温度廓线。

- 紫外/可见/近红外探测仪进行星下点和临边探测：主要用于大气成分观测。

- 绝对校准的宽带辐射计和太阳总辐照度（TSI）和太阳分光辐照度（SSI）辐射计：主要用于监测太阳辐照度变化和地球大气辐射收支测量。

- 无线电掩星探测：完全融入骨干星座，用于温度廓线、湿度廓线和电子密度廓线探测。

- 高分辨率的多光谱可见光/红外成像仪：主要用于海色、土地利用、植被和洪水监测。

- 合成孔径雷达图像：用于海况和海冰、土壤湿度观测等。

- 重力测量任务：主要观测地下水、海洋参数等。

- 空间天气观测：在拉格朗日点（L1）包括太阳日冕仪和无线电光谱仪，太阳风原位等离子体和高能粒子和磁场观测。

- 空间天气观测仪器包：搭载于静止卫星轨道（GEO）和地球低轨道（LEO）的测量等离子体、高能粒子和地球磁场的仪器。

- 在轨仪器定标标准：包括紫外、可见/近红外、热红外、微波绝对校准测量参考标准仪器，用于全球卫星定标和互定标标准。

4.1.2 开放包容的业务骨干卫星观测支撑系统

这个系统是布局明确的业务骨干卫星系统的重要支撑，也是为了提供必须的“基本数据”，但是却以一种更加开放的方式来定义和接纳它。包括并不预先确定采用什么观测技术和使用什么轨道配置，具有灵活性，有利于计划实施，以便及时地囊括最新技术使其融入到骨干系统中，达到进一步的系统优化，包括：

- 地面风和海况观测：例如通过全球导航卫星系统反射任务、被动微波、合成孔径雷达；

- 通过紫外—可见光—近红外（UV-VIS-NIR）和微波的平流层/中间层临边探测器；

- 激光雷达观测风和气溶胶廓线（利用多普勒和双/三频后向散射效应）；

- 激光雷达（DIAL）探测大气水汽廓线；

- 激光雷达测量海冰厚度；

- 亚毫米成像探测云相位；

- 近红外成像观测二氧化碳和甲烷等；

- 多角度、多极化辐射计探测气溶胶和辐射收支；

- 高空间分辨率陆地或海洋观测（多极化合成孔径雷达、高光谱可见光图像）；

- 高时间频次微波探测（地球静止轨道或低地球轨道星座）；

- 近红外光谱仪测量表面气压；

- 大椭圆轨道连续可见光和红外成像观测（主要覆盖和连续观测北极和南极地区）；

- 太阳磁场，太阳超紫外/X射线成像仪和X射线辐射计，包括在地球与太阳连线线上（如L1点）和地球与太阳连线外（如L5、L4点上）；

- 太阳风等离子体、高能粒子和磁场观测，太阳日冕与日光层成像观测，磁层的高能粒子探测等。

4.1.3 业务开拓者和技术或科学的示范系统

这个系统旨在主要为2040年以后的业务骨干卫星系统的发展演进开拓道路，例如：

- 增强大气/电离层探测的掩星星座的新的卫星加盟；

- 用于观测植被的雷达和激光雷达；

- 高光谱分辨率的微波传感器；

- 超越L1点外的日冕磁场成像仪和太阳风观测；

- 电离层/热层光谱成像仪，电离层电子和主要离子密度探测器。

本层次的计划任务可以依托多元化平台，例如使用小卫星验证和示范有关科学仪器或完成特定的科学任务，也可以作为卫星应急计划补充某个卫星仪器失效产生的空白，甚至可以利用国际空间站验证和演示某些科学仪器或观测方法。

4.1.4 其他补充观测系统

这个系统将鼓励和充分吸纳由WMO其他会员国和第三方贡献的卫星，包括政府机构、学术团体或商业机构的贡献。这个系统可能增强骨干系统的观测，以提供更多的“基本数据”或“附加数据”。WMO会对此类观测系统的贡献方推荐有关标准和最佳实践以便贡献者考虑遵守，以促进此类卫星系统对WMO

会员国提供有价值的数 据，并对骨干系统进行补充和增强。

4.2 远景发展规划应关注的几个重要趋势

4.2.1 气象卫星操作者从目前少数几个国家为主，向更多操作者国家加入转变

气象卫星操作者从20世纪60年代初的美国和前苏联两个国家，逐步拓展到目前的包括中国、日本、印度、韩国和欧洲气象卫星组织在内的七个主要业务卫星运行组织。已经可喜地看到：目前这些卫星操作者的能力在逐步增强，基本上都已经从前期论证研发阶段，发展到了成熟的业务制造和运行阶段，卫星系统的可靠性和系统性都在增强，不断提升WMO的空间观测骨干系统。例如中国已经承诺承担凌晨极轨气象卫星的轨道业务系统；欧洲气象卫星组织会员国联盟的成员在逐年增加，其极轨气象卫星在同一轨道上已经实现接力飞行（即在同一轨道平面上两颗卫星间距10~20分钟飞行观测，既实现了在轨备份也增加了观测频次）。

展望2040年，期望并相信全球有更多的国家和航天组织加入气象/环境卫星操作者。根据前期的预研究并根据发展趋势，预测可能性和潜力比较大的国家和项目如下：

- 加拿大极区通信和天气卫星（PCW）项目：加拿大航天局（CSA）与加拿大环境部（EC）、国防部（DND）和其他政府部门合作，于2008年9月完成了该项目的需求和概念阶段论证研究（阶段0），2001年接续完成了项目任务定义阶段（阶段1）的论证。这项研究论证的结果证明，可以运行两颗高椭圆轨道（HEO）卫星系统，这两颗卫星都携带三个主要载荷（Ka和X波段的通信转发器，21通道成像光谱仪和一个空间天气监测仪器包）。对于极区来说，这种轨道其功能类似位于赤道的静止卫星，它可以提供北极地区连续24h宽带通信服务，提供覆盖全部北极地区的多光谱图像用于高时间频次（每15分钟一次）和空间分辨率（1.5~3km）地监测极区的高寒天气和气候变化，对于北极地区的空间天气监测将为航空航天安全提供很有价值的服务。这个项目的成功将大大弥补静止气象卫星在纬度60°以上的地方空间分辨率迅速下降、纬度70°以上基本无法应用的空白，对于高纬度地区的天气预报和气候监测业务和研究都会产生不可估量的贡献。通信和空间天气监测功能也弥补了极地地区气象数据收集和空间天气监测的空白。

- 非洲气象卫星计划：在非洲第二次气象部长峰会（AMCOMET-2，津巴布韦，2012年10月15—19

日)上,通过了探索建立非洲气象卫星计划的倡议。其后,这个倡议在2013年1月的非洲联盟首脑会议上得到了大多数非洲国家元首和政府首脑的赞同,并进一步决定成立一个联合工作组对此计划开展可行性研究。

• 巴西的空间计划基本涵盖了全部空间技术和应用范围。巴西航天局是拉丁美洲最大的空间组织,其2010年的预算就达到了2.1亿美元。目前巴西拥有十颗以上卫星,其中一半以上是由巴西国家空间研究院(INPE)设计并和工业部门签署合同制造的。在地球观测领域,从1984年开始,巴西与中国开始空间技术合作,并于1999年成功发射了第一颗中巴地球资源卫星,目前已经成功地发射了四颗,对气象防灾减灾作出了贡献。巴西已经发射的一些卫星上载有空间环境(天气)探测仪器。巴西也是一个气象灾害频发的国家,INPE是地球观测委员会(CEOS)的正式成员,和巴西气象局共同开展了许多气象卫星数据在防灾减灾领域的应用。目前美国的静止气象卫星对于南美半球的观测频次不能满足南美国家的需求,即使即将发射的美国新一代静止气象卫星(GOES-R),除了正常观测模式以外,其针对于灾害性天气事件的加密观测模式仅仅适用于美国国内,没有执行美国国土以外的针对灾害性天气气候事件的加密观测机制。期望巴西和其他南美航天国家根据国家需求进一步拓展地球观测使命并加入WMO空间计划的协调。

4.2.2 卫星星座从以业务气象环境卫星为主,向业务卫星加先进的研发卫星系统相结合的多星座体系转变

气象卫星发展的初期(20世纪60—80年代),是以研发卫星为先导,然后将其成熟技术逐步转移到业务气象卫星的发展模式。随着天气观测卫星技术和业务系统的成熟,加上地球气候、海洋和环境观测需求的驱使和航天先进技术发展的需要,在过去的20多年间,许多国家的航天机构(如NASA,欧空局,中国国家航天局,日本空间局等)相继发射了一系列的先进的地球观测卫星(业界称之为研发卫星),是对业务气象卫星的重大补充,也对WMO的许多计划(特别是全球气候观测计划,全球大气监测计划,全球气候研究计划等)和成员国的业务和科技发展作出了很大贡献。期望到2040年,一些目前已经验证成功地研发卫星加入业务卫星序列,而一些更加先进的研发卫星计划出台,形成新的业务加研发卫星共同运行的格局并能够得到更加充分的国际协调和谐发展。期待如下的成功研发卫星星座转入2040年业务体系:

• 全球降水观测星座:从1997发射成功的热带降水测量使命(TRMM)和其后续的2014年2月发射成

功的全球降水测量计划(GPM),通过一颗核心观测卫星(装载有一个主动探测雷达和一个被动微波辐射计及其他辅助测量仪器)和数颗载有微波探测器的极地轨道业务卫星,以及其他地球轨道的试验卫星,目前已经开始试验运行。但是TRMM一开始就被定义为试验卫星任务,其主要科学目标就是加强对热带的降水气候和降水变率的认识,加上没有业务应用的安排,加上主动探测雷达观测范围限制(200km扫描宽度),严重影响了实时业务应用效益的发挥。而GPM计划接受了TRMM计划的经验和教训,从一开始就定义其为业务前期试验计划,兼顾了科研和业务应用两个方面,期望达到预期效果。NOAA已经表示了很强的兴趣,在GPM成功后接手开展其业务模式概念的计划。如何兼顾降水气候研究/业务和灾害性对流性天气(包括热带气旋、台风、陆地强降水等)监测预测的要求也是很大挑战。中国风云气象卫星规划中也有降水测量卫星的序列。所以在2040年前全球降水卫星星座加入全球气象卫星业务星座具有非常高的可能性和可行性。

• 全球大气成分和空气质量监测星座:前节给出了2018—2019年间即将发射的几颗监测大气污染的卫星系统。这些卫星虽然分别分布于欧洲、美洲和亚洲,但是均处于试验阶段,覆盖范围仅仅局限于这些发射卫星国家国土及其周边地区。期望到2040年这些仪器技术完全成熟,卫星观测范围实现全球覆盖,卫星形成完整的星座并在WMO的协调下纳入全球骨干业务卫星体系。

• 美国、欧洲和亚洲的先进地球观测卫星:21世纪初开始,美国、欧洲和亚洲(以中国、日本和韩国为主)航天大国相继发射了许多先进的地球观测卫星。以美国为例,NASA为开展地球科学研究(其中绝大部分是气候科学研究),从21世纪初开始平均每年投入约20亿美元发射了一系列先进的地球观测卫星。其中著名的发射成功的和即将发射的卫星包括有:轨道碳观测卫星-2号(OCO-2),土壤湿度主动和被动观测卫星(SMAP),冰雪观测卫星1号和2号(ICESat-1, ICESat-2),气候绝对辐照度和折射率观测卫星(CLARREO-1,以及下一个CLARREO-2,计划2020发射),重力恢复和气候实验卫星及其后继卫星(GRACE, GRACE-FO),平流层气溶胶和气体试验卫星(SAGE III),形变、生态系统结构和冰动力学卫星(DESDynI)等。这些卫星及其遥感仪器技术的成功及其后续计划的持续发展,定会对未来2040年远景发展规划的技术实现做出巨大贡献。

4.2.3 卫星轨道从传统的地球同步（静止）轨道和近极地太阳同步轨道，向多种轨道平面转变

典型的有望加入2040年骨干卫星系统的新的轨道类型，包括如上所述的全球降水测量星座主卫星使用的是地球低倾角轨道（非太阳同步轨道，飞行高度407km，轨道与赤道平面夹角为65°）。加拿大极区通信和天气卫星（PCW）项目使用的是绕地球两极飞行的大椭圆和大偏心率轨道。全球组网分布的GPS掩星座轨道，以及观测太阳和空间天气的拉格朗日点轨道等等。多轨道的好处是增加了整个星座的轨道多样化，提高了整个卫星体系的可靠性和互补性，同时也增加了观测的频次（特别是低倾角卫星增加了热带和低纬度地区的观测频次），而大偏心率轨道增加了极地地区的观测的频次和全覆盖观测。

4.2.4 卫星遥感仪器从以被动遥感为主，向被动与主动遥感相结合转变；从传统的可见光红外和微波光谱段观测，向全光谱覆盖和高光谱分辨率观测转变

从上述第一层的骨干卫星系统和第二层的骨干卫星支撑系统所提出的观测仪器系统，可以明显看出一些主动遥感仪器，例如卫星高度计、降水测量雷达、激光雷达、合成孔径雷达等主动遥感仪器将进入骨干卫星系统，将大大拓展各类气象和环境应用。从光谱方面，到2040年骨干卫星系统的遥感仪器将光谱覆盖增加到从紫外到长波红外，高频微波（亚毫米波）到低频微波（分米波）的全部波段。高光谱分辨率仪器将从目前的仅限于红外波段仪器，拓展到在全光谱频段上均能够开展高光谱分辨率观测（包括高光谱分辨率紫外、可见光、近红外乃至微波仪器），这将大大拓展和丰富所获取的遥感信息。例如，紫外和可见光短波红外波段的高光谱分辨率仪器将成为大气温室气体和污染气体监测的主要和重要频段。低频微波和亚毫米波是目前业务使用的微波波段向微波频率两端的拓展，微波低频段穿透性更好，应用于土壤湿度遥感、全天候海面温度和盐度观测等，而亚毫米波对于云粒子敏感，可以探测云的相态信息，也可以用于静止轨道的大气垂直探测。工作在激光波段的各类激光雷达仪器将成为2040年气象卫星观测载荷系统中的新的重要成员，有望获取全球风场、大气成分、气溶胶和污染气体监测等。多角度、多极化观测仪器将提供附加信息，更加有利于高附加值产品的生产和多领域的应用。

4.2.5 卫星地面系统从卫星运行接收为主，向牵头发展应用网络和作为业主代表验证卫星投资效益转变

地球观测卫星系统工程是高科技、高投入、高风险

和高效益的系统工程。首先，空间系统的复杂性必将导致地面系统的复杂性的增加，先进的空间系统必然需要先进的地面系统来支撑（包括数据量的急剧增加、数据传输、预处理、产品生成和大数据管理的压力等）。最终的投资效益体现在应用的效果上。全球地球观测卫星系统工程都要扭转“重天轻地”的传统投资理念，从卫星规划开始就将相关应用纳入整体规划体系。地面应用系统牵头单位要主动协调全国乃至全球卫星应用网络的建设和发展，并通过应用不断累积和统计，体现卫星投资效益的应用领域的成果。通过应用及时反馈对于卫星系统（包括轨道、仪器、数据获取等）进一步改进的建议和举措，是促进整体卫星系统工程的健康和可持续发展的重要环节。

5 远景发展规划中值得关注的几个问题

1) 数据获取的及时性和数据管理

首先对于许多实时业务应用，数据获取的及时性非常重要。对于用于临近及短时天气预报的静止气象卫星来说，实时获取观测是最基本要求。对于数值天气预报模式提供重要数据输入的极轨气象卫星来说，数据越是接近实时，效果越好，其目标是在全球任何地区得到观测后30分钟内数据进入模式。目前许多全球数值预报中心已经从WMO协调的极轨气象卫星的“区域先进探测再传输服务”（RARS）及时获得极轨卫星探测数据而获益（已经接近30分钟的目标）。但是先进卫星仪器系统随着空间分辨率增高和仪器通道增多，加上观测频次提高，在过去的30年间，卫星的数据量呈指数级增长，必将对未来数据通信（星—地间数据传输）和用户端数据获取带来新的挑战 and 压力。例如，目前通过日本葵花8号卫星的广播分发系统（HIMAWARICast）获取的卫星数据延迟达数十分钟以上，而通过地面网络获取数据受限于网路带宽。期望到2040年信息技术和云技术的进一步发展，并采用卫星上数据处理和压缩技术等解决数据获取的瓶颈。气候业务和研究需要管理全部卫星数据序列和定期再处理对地面系统的数据管理提出了挑战。此外，未来的气象卫星观测数据的时效性要求是否需要卫星数据中继等，都需要根据未来发展确定。

2) 卫星观测与地面观测的协调

目前的WIGOS 2040年远景规划的研讨工作主要集中在空间系统，主要是空间系统需要更长时间的远瞻性和计划性。但是地面系统的远景发展规划是不可或缺的。即使从卫星系统发展的角度，特定的卫星计划都需要考虑如何充分利用地面的观测来补足，包括地面系统作为真值验证的观测等，地面定标验证系统

等。最终的2040年远景规划应该充分地体现如何最佳地布局全球地面和空间观测网络实现最佳的全球观测系统的投资效益。

3) 无线电频率的保护

随着商业通信和地球观测系统的发展，对于观测频率的争夺日益激烈，观测频段的保护已经成为WMO和全部成员国的一项重大任务。特别在微波波段，由于和通信系统所使用的频段重叠，造成微波探测频段保护的巨大困难。应该大力扩大被动微波频段对于地球观测的重要性的宣传。没有频率就没有卫星上的地球观测，为整个人类谋福祉的事业，其重要性远远高于商业利益。

4) 商业化气象卫星的补充作用

传统上，航天公司都是作为政府的合同方承担卫星研制和发射任务，由气象部门作为业务代表组织卫星规划，接收并运行管理卫星和组织卫星应用等。未来一些国家的气象卫星发展模式可能会发生改变，并导致部分气象卫星的商业化，一些商业卫星公司认为新的卫星数据政策可能诱发潜在的巨大经济效益。NOAA目前发布了商业化空间政策，一些美国公司已经公布了他们的商业化气象卫星发展计划，并宣称将提供更加有应用实效且价格非常具有竞争力的卫星数据和产品等。正面的看法是，商业行为引入竞争机制可能导致商业空间系统得到新的发展，进而增强全球空间观测系统。但是目前尚没有这样用商业模式支撑全球公益事业发展成功的范例。我们应当预见其相关风险，并在以下几个方面问题需谨慎处理：

- 商业化模式必将导致数据交换的限制，从而在整体上降低了数据的可用性（降低了应用效益）
 - 处于商业机密保护的需要，用户和国际协调机构可能无法获取卫星和仪器系统的详细的技术规范，导致无法确保获取仪器的可追溯性和可靠性信息
 - 由于私营企业都有自己的市场目标，无法像政府机构那样遵守国际承诺和约束，也无法参与WMO主持下的全球协调
 - 商业计划的短期行为可能产生一定的政治吸引力，但是却对以满足国家、区域或全球需求国家或区域组织（例如欧洲气象卫星组织）卫星长期计划规划所必须的长期的筹资机制和决策过程产生负面影响
- 在这些机会和挑战面前，很重要的是要确认这种

商业活动健康并成功演进发展的先决条件和如何合理地纳入国际体系。从WMO的角度，目前基本的估计是：政府主导的气象环境卫星在可以预见的未来仍是骨干系统，应该重申WMO会员国代表其政府机构对运行骨干卫星系统的政治承诺。即由政府机构或其他政府指定的代理机构，继续承担不断发展和优化骨干卫星系统的责任，包括对应用需求的滚动评估和对卫星应急计划的响应，遵守国际免费数据交换原则。而商业化的小卫星系统可能提供一些补充或支撑观测。

WMO第40号决议（CG-12）提供了一个有用的概念框架，从中可以找出公共机构和私人企业提供如何能相互补充数据：为了确保提供“基本数据”的自由，成员必须有一个WMO协调的，由政府控制骨干观测系统，而商业运营商可以提供“额外的数据”以增强观测系统。公共/私营伙伴关系可以结合这两个方面，例如政府主导的卫星项目提供免费共享的“基本数据”，以满足由政府制定的公共服务目标；商业航天机构可以针对特定商业运营客户群体提供和销售“附加数据”服务。

6 结束语

需要强调指出的是，提前25年做远景发展规划是非常具有挑战性的。首先需要准确把握对于到2040年经济社会发展对于气象服务的需求的预测，其次还要从气象服务需求的预测中准确确定对于观测的需求（包括气象卫星和地面观测系统），最后也可能是最具有挑战性的是对于观测技术发展的预测，即在多大程度上观测技术的进步能够满足气象服务对于观测的需求。

远景发展规划目前尚在初期发展阶段，须经多方咨询和反复论证，最终目标是提交第18届世界气象大会（2019年）批准实施。期望本远景发展规划有助于WMO各会员国提前预测气象部门响应未来气象服务需求的挑战，并考虑到航天发展的长期计划特性，尽早提出和明确对未来空间观测的需求。也期望全球航天机构及卫星操作国在考虑制定本国的气象卫星和相关对地观测卫星远景发展规划时，确保充分考虑到WMO综合观测系统空间部分的远景发展规划需求牵引的指导。

（作者单位：世界气象组织）

世界和我国气象卫星数据共享服务现状与展望

■ 咸迪 李雪 徐喆 钱建梅

自1960年世界上第一颗气象卫星升空以来,气象卫星应用不断深化,美国、欧洲、日本、俄罗斯、印度等先后建立了各具特色的气象卫星应用服务体系,大大推进了卫星资料在气象及相关领域的应用。我国气象卫星和卫星气象事业经过40多年的发展,已逐步形成以风云极轨和静止两个系列气象卫星为主的气象卫星观测业务体系,为国家减灾防灾和应对气候变化提供了有力支撑。通过风云一号、风云二号和风云三号卫星地面应用系统的建设,国家卫星气象中心综合利用CMACast、卫星直收站、地面宽带网、业务内网和互联网技术,逐步建成了一套天地一体化的气象卫星数据共享服务体系。

我国气象卫星数据共享服务主要经过三个发展阶段。第一阶段为20世纪80—90年代末,气象卫星由初期的试验卫星逐步转入在轨业务运行,性能相对稳定,同时形成了包含大型计算机构成的地面资料接收处理系统,卫星数据主要用于大型科研项目以及对重大天气和遥感事件的监测中,数据共享服务介质以磁带为主;第二阶段为20世纪90年代末至21世纪初,极轨卫星和静止卫星的观测方式、精度以及频率都有了较大发展,使气象卫星数据需求逐步扩大,并随着计算机逐渐普及以及互联网的出现,利用数据库管理系统,也使共享服务手段得到提升,第一次建立起通过互联网对指定用户提供气象卫星数据共享服务的平台;第三阶段为21世纪初至今,气象卫星仪器和数量不断增加,每日存档数据量逐步增长至TB级别,公众和专业人员对气象卫星数据的需求不断扩大,互联网逐渐成为数据共享服务的主要手段。



到2014年,每日在国家卫星气象中心存档的卫星数据产品共计92类,数据量2.2TB,存档总量达到6.5PB,其中风云三号卫星的数据量最多,占总存档量的84%。

目前主要以美国、欧洲、日本和中国为主的国际气象卫星数据共享机制已经日臻成熟,世界气象组织(WMO)和地球观测组织(GEO)在其中起到领导和协调的作用,并搭建了全球卫星数据和产品的共享平台。

一、国际气象卫星数据共享情况

1. 国际组织领导下的全球气象卫星数据共享

WMO从2003年起开始建立一个通用、综合、高效的信息服务平台(WIS),用于支撑WMO各项计划及各个成员之间的数据共享,WIS中的资料存档服务中心(DCPC)承担了包括气象卫星的数据共享服务功能。GEO从2005年正式提出地球观测数据卫星分发系统(GEONETCast)的概念,目前由中国气象局(CMA)、美国国家海洋和大气管理局(NOAA)和欧洲气象卫星应用组织(EUMETSAT)分别运营覆盖全球的数据广播分发系统(CMACast、GEONETCast Americas和EUMETCast),借助通信卫星,把地基和空基观测数据产品及时传送给广大用户,目前已经拥有超过3000个用户。

2. 美国的公益性气象卫星数据共享

美国在气象卫星遥感数据共享方面一直走在世界前列,凡是政府资助产生的数据均采取“完全与开放”数据共享政策和公益性共享机制。美国通过多个政府机构,将采

集的各类气象卫星遥感数据和产品向全球开放,为全球科学工作者提供便利的数据服务。

美国国家航空航天局(NASA)的数据共享服务基于1990年成立的分布式动态数据中心(DAAC),目前共有12个数据中心,数据量每天都在大幅增长中,如Terra卫星每天大约新增194GB的数据。用户通过登录任何一个DAAC的EOS数据门户网站(EDG),均可在一个统一的界面上搜索、订购或下载数据。

NOAA负责运行管理多颗静止和极轨卫星,国家环境卫星数据和信息中心(NESDIS)直属于NOAA,负责提供由卫星和其他来源获取得到的全球环境数据。

3. 欧洲气象卫星数据共享

欧洲的气象卫星数据共享服务在欧盟的基本框架下,以EUMETSAT为主导,主要为欧洲各个成员国和科研业务用户提供气象卫星数据的共享,目前有两种方式:EUMETCast广播和EUMETSAT网站。准实时数据用户可以通过搭建广播接收系统,接收EUMETCast广播的气象卫星数据以及其他气象资料,其他用户通过EUMETSAT网站直接注册用户,并实现历史数据的检索和下载。

二、我国气象卫星数据共享状况

1. 气象卫星服务数据和产品

经过40多年的发展,我国已经成功发射14颗风云系列气象卫星,其中静止轨道气象卫星(风云二号)7颗,极地轨道气象卫星7颗(其

中风云一号4颗，风云三号3颗）。除此之外，国家卫星气象中心还存储了从20世纪80年代至今，接收处理的美国、日本和欧洲20多颗卫星的数据产品。随着卫星仪器的时间分辨率、光谱分辨率和空间分辨率的逐步提高，数据产品种类越来越丰富，数据量也越来越多。到2014年，每日在国家卫星气象中心存档的卫星数据产品共计92类，数据量2.2TB（图1），存档总量达到6.5PB，其中风云三号卫星的数据量最多，占总存档量的84%。

静止和极轨两个系列气象卫星的数据产品根据卫星和仪器的特点不同而各具特色（表1）。我国第一代静止气象卫星风云二号共分为三个批次：01批卫星包括两颗星FY-2A和FY-2B，属于试验型地球静止气象卫星；02批有三颗星FY-2C、FY-2D和FY-2E，为业务型地球静止气象卫星；03批有三颗星FY-2F、FY-2G和FY-2H，主要业务定点位置在东经86.5°、105°和112°，实现了对欧亚大陆和太平洋中西部的覆盖。风云二号卫星的数据产品以高时效、高时间分辨率图像产品为主，主要用于天气分析，特别是用于中尺度强对流灾害性天气系统临近预警和预报，监视生命周期较短的中小尺度天气系统等。我国极轨气象卫星目前已经发展了两个系列（风云一号和风云三号），风云一号共4颗卫星，FY-1D作为该系列的最后一颗业务卫星，已经于2012年停止运行。风云三号共分为三个批次，01批卫星包括两颗星FY-3A和FY-3B，属于试验型极轨气象卫星；02批包括两颗星FY-3C和FY-3D，为业务型极轨气象卫星；03批暂定为四颗卫星，在仪器性能和运行模式等方面将有更多改进。极轨气象卫星具有全球观测能力和高分辨率两大特点，可以以比较高的时间频次和分辨率观测地球两极地区，可以为中期数值天气预报提供全球海温、湿度、云和辐射等气象参数，同时监测大范围的自然灾害、生态和环境变化，实现

对全球变化的跟踪和监测。

2. 数据共享服务现状和成果

天地一体化的数据共享服务体系利用现代化的通信、网络和IT技术，通过通信卫星、气象卫星自身、气象宽带网以及互联网，为不同需求的用户提供获取气象卫星数据的多种渠道：卫星广播（包括直收站和CMACast）、专线网络（中国气象局地面宽带网）、互联网以及人工协议服务。

随着数据共享服务体系的逐步完善，国家卫星气象中心已经实现完全自动化的数据检索共享系统，风云卫星遥感数据服务网（<http://satellite.nsmc.org.cn>）自2005年开通以来，逐渐受到广大气象卫星数据用户的认可，已经成为中国风云卫星用户获取风云卫星数据以及相关卫星数据的主要途径之一。每年对外共享数据超过400TB，为400多个各类国家、省部级项目提供气象卫星数据支持。服务领域不仅主要包括国内外气象、遥感、环境、航空航天、农林牧渔等传

统行业，同时也在建筑、电力、水利、汽车、石油、医学、质检等其他领域发挥重要作用。

网站注册人数和数据订单也逐年增多，2014年的订单数（42284个），较2005年增长26倍。风云卫星数据得到广大用户的认可，在网站订单的统计结果中，风云卫星数据的文件数占总体的97%，数据量占总数据量的90%。

3. 用户空间和行业分布

风云卫星遥感数据服务网通过全自动化的数据准备流程，在无人值守的情况下实现7×24小时的数据订购和服务。截至2014年，网站注册用户已经超过3.3万人（图2）。国内注册用户分布在全国各地，包括港澳台地区在内的所有省（市、自治区）。除此之外，来自全世界70多个国家的用户也通过英文网站下载风云卫星遥感数据。

根据现有用户资料统计分析表明，网站国内注册用户主要来自于121个行业，其中47%的用户来自于教育

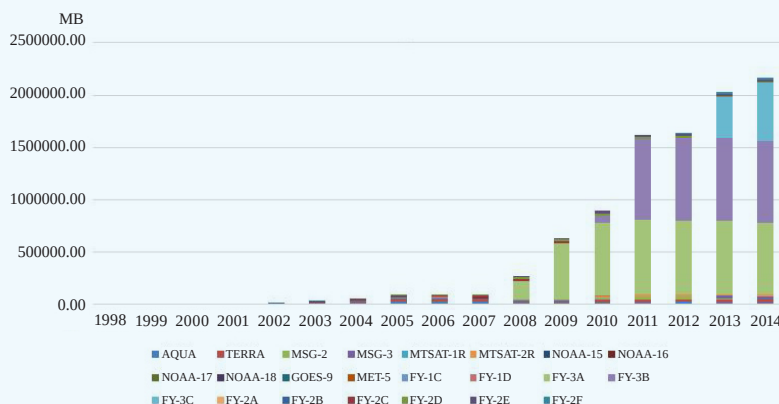


图1 国家卫星气象中心每日卫星数据存档数据量（1998—2014年）

表1 静止气象卫星和极轨气象卫星数据产品分类对比

产品分类	静止气象卫星数据产品 (以FY-2G为例)	极轨气象卫星数据产品 (以FY-3C为例)
1级数据	可见光扫描辐射计（VISSR）1级数据	12个仪器的1级数据
图像产品	标称投影图像产品，中国大陆区域、海区等区域分区图产品，网站和电视服务产品	极轨卫星全球拼图
大气产品	云检测、云分类、云迹风等	大气温湿度廓线、大气可降水等
海洋产品	海面温度等	海冰覆盖、海面温度、海面风速等
陆表产品	地表温度、雪覆盖等	植被指数等
辐射产品	黑体亮度温度、射出长波辐射等	射出长波辐射、大气顶扫描视场辐射等
空间天气产品	空间环境监测等	太阳辐照度、地球辐射收支、空间环境监测等

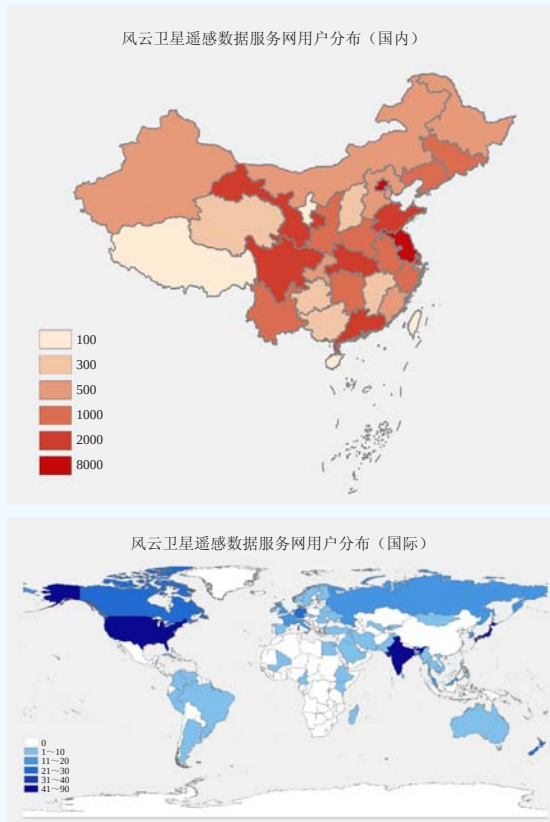


图2 风云卫星遥感数据服务网国内和国际用户分布

行业，这些用户主要由高校教师、本科、硕士和博士研究生构成，专业以遥感和大气科学为主；18.6%的用户来自于气象行业；14.9%的用户来自于研究和试验发展行业，即中科院、农科院等相关科研行业。电力、国家机构、生态保护、工程技术、电气制造业和农业等行业也是主要用户来源。

4. 数据用途分析

经过多年的应用实践和数据免费共享，气象卫星数据逐步得到国内外用户的认可，在气象及相关领域中得到了广泛应用（图3），包括预报研究、遥感监测、生态环境监测、气候变化研究、遥感监测、生态环境监测、气候变化研究、大气污染防控、重大气象服务和气象要素特征分析等方面。

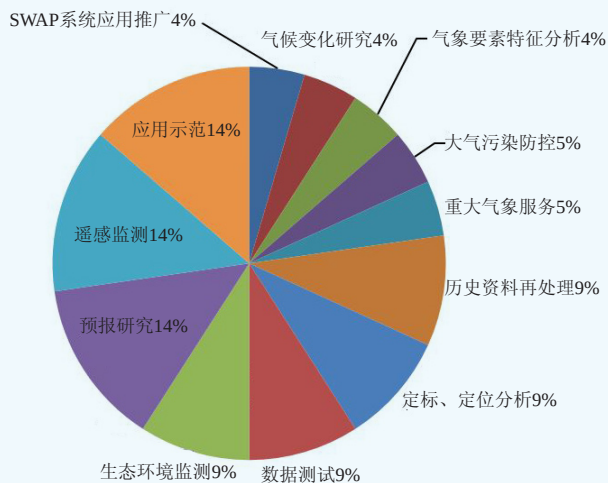


图3 风云卫星遥感数据主要用途

5. 卫星数据在科学研究中的应用

为了进一步跟踪用户对风云卫星数据在获取、应用、质量等方面的需求，国家卫星气象中心从2013年开始对网站用户开展大范围的用户调查。通过分析2014年的调查结果，可知风云卫星数据已经在各类科研项目中得到广泛使用，所有参与调查的用户利用卫星数据在正式刊物上发表文章226篇，其中中文文章192篇，英文文章34篇，重点支持各类科研项目611个（表2）。

表2 风云卫星数据支持各类项目

项目类型	项目数
国家自然科学基金	129
省级研究项目	122
公益性行业科研专项	108
国家973计划	55
市县局研究项目	51
国家863计划	47
局小型基建项目	45
国家科技支撑计划	36
国家重点科技成果推广计划	7
全国教育科学规划课题	7
国家杰出青年科学基金	4

三、我国气象卫星数据共享趋势展望

1. 卫星观测能力不断提高

随着我国气象卫星的不断发展，卫星监测手段将更加丰富，时空分辨率和光谱分辨率均有所加强，同时卫星的寿命和运行成功率也随之提高，可以为用户提供更加精确、稳定的服务。

风云三号（03批）卫星在不断改进现有仪器观测性能的基础上，还有可能增加降雨雷达卫星和晨昏轨道卫星。降雨雷达卫星可以克服雨量站和地基雷达的局限，实现对降水更准确的监测和预警。晨昏轨道卫星将完善和丰富我国现有的现代气象业务观测体系，可向我国的8点钟会商业务及时提供微光、红外和微波的综合观测信息，也可以在凌晨时刻提供针对台风、暴雨和强对流等的卫星监测。

风云四号系列卫星将在未来两年内发射,将提供更高时空分辨率的观测数据,同时也提供了更加机动的区域扫描功能、闪电定位以及垂直探测的能力。

2. 卫星遥感产品更加丰富

卫星遥感产品从定性分析逐渐发展为定量化遥感。随着定位和定标技术的不断发展,风云三号卫星地面应用系统将建立稳定的数据质量检验系统,可以为用户定期提供风云卫星数据的质量检验报告,利用多源空基和地基探测数据提高风云卫星遥感产品的精度。产品内容越来越丰富,涵盖大气产品、温湿度廓线产品、辐射产品、地表产品、海洋产品和大气成分产品,在空间和时间上全面弥补地面气象观测站和雷达的缺陷。同时,也可以为数值预报提供更加丰富的卫星同化产品,提高数值预报的准确率。

3. 天地一体化的数据共享服务体系日趋完善

随着IT技术的迅猛发展,国家卫星气象中心积极探索采用新技术实现气象卫星遥感数据的快速服务和精细化服务,完善新一代天地一体化的数据共享和服务体系(图4)。在数据可视化、数据分发以及遥感应用等方面不断推陈出新。未来将在国家级层面,依托于海量分布式存储与国家级CIMISS平台,实现实时更新的风云卫星数据PB级全集(历史数据与实时数据)直达用户

桌面共享。在省级层面,依托于天上卫星直接广播、CMACast播发、地上CIMISS系统分发,实现内容互补、互为备份的实时卫星数据高效服务。国家级与省级卫星数据共享形成固化统一的卫星数据与定量产品编目结构,与卫星遥感应应用平台无缝连接,透明调用。同时不断丰富卫星数据产品,借助互联网和移动互联网技术,搭建开放数据平台,推进卫星数据的产业化发展。同时,气象卫星遥感数据作为国家民用空间基础设施建设的一部分,与陆地卫星数据中心、海洋卫星数据中心互相支持、互为补充、互为备份,共同推进遥感卫星数据资源的共享。

基于气象卫星各种能力的不断加强,国家卫星气象中心通过后续气象卫星地面系统工程建设,逐步形成以国家卫星气象中心数据中心为主中心,建设一个数据备份中心,多个地域分中心的分布式天地一体化数据共享和服务体系。

4. 服务手段趋于多元化

1) 针对气象行业用户:借助气象信息化建设,充分利用卫星广播和地面专线,实现国省一体的卫星遥感数据服务,根据对静止卫星和极轨卫星的不同需求,为MICAPS和遥感应应用平台提供及时、高效、专业的数据支撑;

2) 针对专业用户:大力发展国家民用空间基础设施——气象卫星

数据中心,与陆地卫星、海洋卫星两大数据中心互为补充,公开长时间序列卫星数据集,开放算法和数据集交流共享平台,为国内外遥感专业用户提供天地一体化的数据共享服务;

3) 针对企业用户:利用公有云等IT新技术,开放企业级数据检索和可视化产品调用接口,通过支持若干个应用示范项目,为企业创新和万众创业提供丰富的卫星数据产品接入平台;

4) 针对公众用户:根据公众需求,开发多元化的增值服务和产品,并开放数据接口,支持多样化的客户端平台,建立可视化的演示平台,同时与高校、公开课组织合作,加强风云卫星遥感数据的科普和培训,让更多的公众了解卫星气象知识;

5) 针对国际合作用户:加强与美国、欧洲、日本等国家以及WMO、GEO等国际组织的合作,以卫星广播和国际交换为主,同时辅以公有云技术,为不发达地区和其他国际用户提供风云卫星数据服务。

深入阅读

- 冯筠,高峰,黄新宇. 2005. 构建天地一体化的全球对地观测系统——三次国际地球观测峰会与CEOSS. 地球科学进展, 12(20): 1327-1333.
- 钱建梅,孙安来,徐喆,等. 2012. 风云气象卫星数据存档和服务系统. 应用气象学报, 23(3): 369-376.
- 施进明,钱建梅,林曼筠. 2010. 新一代遥感数据中心建设的关键技术. 气象科技, 38(4): 472-477.
- 杨军,董超华,等. 2011. 新一代风云极轨气象卫星业务产品及应用. 北京: 科学出版社.
- 张鹏,杨磊,谷松岩,等. 2015. 晨昏轨道卫星的气象应用需求分析. 气象科技进展, 5(2): 6-12.

(作者单位: 国家卫星气象中心)

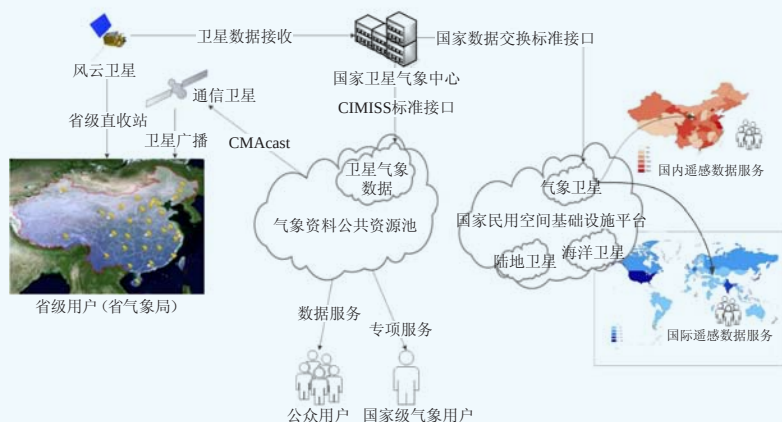


图4 天地一体化的气象卫星遥感数据共享服务体系

世界气象卫星主题文献计量分析

■ 吴灿 田晓阳

一、数据来源及统计方法

利用ISI Web of Science平台SCI-E数据库，检索统计国际“气象卫星”主题论文。检索式设定为TS=satellit*。数据年限选择所有年，文献类型选择论文与综述，学科类别限定为气象和大气科学领域，检索日期为2016年1月22日。对上述检出论文的时间分布、发文机构、国家及作者等进行统计。

二、统计结果与分析

1. 论文产出年代分布

本次检索命中气象卫星主题论文共23409篇（中国大陆学者参与的为1617篇），其中最早收录的气象卫星主题论文为美国国家气象局的Fritz等人于1960年发表在*Monthly Weather Review*上的*Cloud Pictures from Satellite Tiros I*一文。

图1给出了SCI-E数据库气象卫星主题论文的年代分布。从年均发文量来看，可将气象卫星主题论文总量增长划分为三个阶段：第一阶段为1960—1990年，美国和前苏联分别在1960年代发射了极轨卫星，以及美国向地球静止轨道发射

中国的发文量虽然位居第五，具有相对的优势，但从学术影响力指标来看，与世界最先进水平相比仍存在明显的差距。

了首颗装备气象观测设备——自旋扫描云照相机的“应用技术卫星”（ATS），之后该领域的研究逐步开展起来，但是这一阶段论文数量增长缓慢，且论文总量极为有限，年均发文量约为32篇；第二阶段为1991—2006年，在这一时期，美国、俄罗斯、中国和欧盟等国家和地区相继发射和建立了极轨和静止气象卫星系统，并逐步投入到气象业务中，气象卫星主题论文开始呈现快速上升趋势，年均发文量在600篇左右，较第一阶段增长十分迅速；第三阶段为2007年至今，气象卫星主题论文产出较上一阶段进一步增加，年均发文量超过1000篇，达到1387篇，增长了一倍多。同时，中国在该主题下的SCI-E发文量呈现稳步增长的趋势，2000年之前，该领域年均发文量低于10篇，此后迅速增长。2001—2015年，中国在该主题下的年均发文量突破100

篇，达到103篇，增长了近10倍。

2. 国家与机构产出及影响力分析

从发文量来看，“气象卫星”主题论文主要来自美国、德国、英国和法国等（表1）。这些国家在气象卫星研究领域具有很大优势。美国是世界上最早发射极轨卫星和静止气象卫星的国家，并以绝对优势处于该领域研究的首位，其发文量占论文总量的50.1%。德国、英国和法国是该领域研究的第二集团，其发文量分别占该领域论文总量的9.2%~11.1%。中国、日本、加拿大、俄罗斯、印度和意大利为第三集团，该集团的发文量约占该领域论文总量的4.3%~6.9%。从学术影响力指标来看，美国的h指数高达165，总被引次数和篇均被引频次也远远高于其他国家。可见，美国在该研究领域占据绝对主导地位。第二集团国家的篇均被引频次在26.70~32.19之间，h指数约为100。

这些指标水平与美国相比虽有一定的差距，但仍然显著高于第三集团国家的指标水平。中国的发文量虽然位居第五，具有相对的优势，但从学术影响力指标来看，与世界最先进水平相比仍存在明显的差距。SCI-E被引频次最高的“风云卫星”主题热门文献在本期榜单（P5）给出。

在机构层面，“气象卫星”主题论文SCI-E数据库发文量前十的国际及国内机构见表2。从国际机构来看，发文量前十的机构中，有八所均来自美国，其中，美国国家航空航天局（NASA）的发文量和美国国

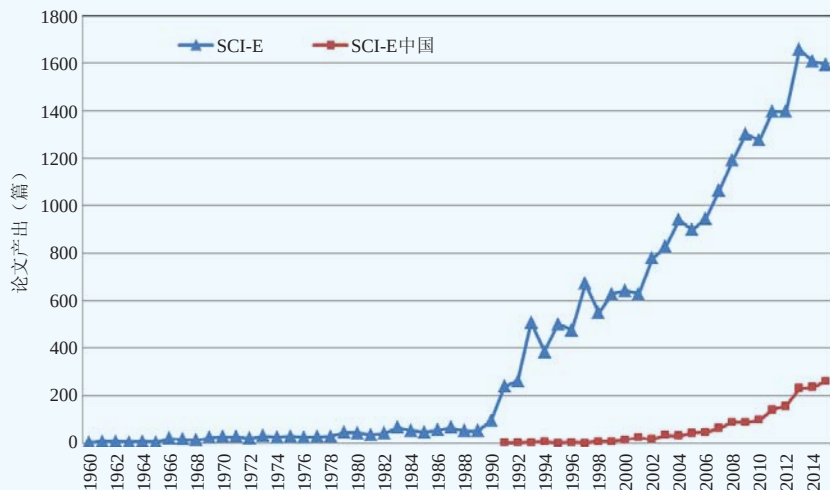


图1 1960—2015年SCI-E数据库中气象卫星主题论文数量年度变化趋势

家海洋和大气管理局（NOAA）的发文量最高，分别为3766篇和2091篇，远远高于位列第三的法国国家科学研究中心（1417篇），再次说明美国在该研究领域占据绝对的主导地位。中国科学院以746篇的发文量位列第九位。从国内主要的发文

机构来看，中国科学院和中国气象局在该主题领域优势明显，其发文量遥遥领先于位列其后的其他研究机构。在该主题领域下，中国合作较密切的外国机构见表3。由表可知，主要的合作机构大多数为美国的相关机构，说明在“气象卫星”

领域，我国与美国的合作最为活跃和密切，此外，与法国和日本也有一定程度的合作。

3. 高产作者及来源期刊分析

SCI-E数据库气象卫星主题论文产出达60篇以上的学者共22位（表略），主要来自美国（13位），其

表1 气象卫星主题论文SCI-E数据库发文量前十的国家及其影响力

序号	国家/地区	产出（篇）	总被引次数	篇均被引频次	h指数
1	美国	11709	378059	32.29	165
2	德国	2598	69367	26.70	99
3	英国	2271	73103	32.19	104
4	法国	2157	62998	29.21	99
5	中国	1617	25202	15.59	63
6	日本	1609	36929	22.95	80
7	加拿大	1287	36508	28.37	87
8	俄罗斯	1095	11116	10.15	47
9	印度	1025	9204	8.98	42
10	意大利	1004	20538	20.46	63

注：h指数指一个国家（学者、机构）发表某学科的n篇论文中有h篇论文每篇至少被引用h次，其余（n-h）篇论文每篇的被引用次数均小于h次

表2 SCI-E数据库气象卫星主题文献产出量前十的国际/国内机构

序号	国际机构	产出（篇）	国内机构	产出（篇）
1	美国国家航空航天局	3766	中国科学院	746
2	美国国家海洋和大气管理局	2091	中国气象局	272
3	法国国家科学研究中心	1417	北京大学	109
4	美国国家大气研究中心	1161	北京师范大学	109
5	美国马里兰大学	1021	南京信息工程大学	101
6	美国加州理工学院	946	武汉大学	80
7	美国科罗拉多大学	900	清华大学	61
8	美国加州大学	891	兰州大学	59
9	中国科学院	746	南京大学	55
10	美国国防部	736	中国海洋大学	47

次为德国（4位），法国、加拿大（各2位）和英国（1位）。刊载气象卫星主题论文的主要期刊见表4。刊载量超过500篇的期刊共13种，Journal of Geophysical Research: Atmospheres以4271篇刊载量位列第1。此外，这13种期刊中有7种期刊为1区期刊，其刊载的论文数为9445

篇，约占该领域发文总量的40.3%。

三、结果讨论

总体而言，NASA、NOAA是该主题论文的重要产出机构。美国在该研究领域占据主导地位；此外，德国、英国和法国在该领域的综合影响力较高。中国在该领域的研究呈现稳步增长的趋势，但影响力与

上述国家相比仍存在明显差距。中国科学院和中国气象局是国内开展气象卫星研究最主要的机构，未来应进一步增强气象部门与国内外科研院所的合作，不断增强我国在气象卫星领域的科技实力和影响力。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）

表3 “气象卫星”领域中国与之合作密切的外国机构

序号	机构	合作产出（篇）
1	美国马里兰大学	111
2	美国国家航空航天局	103
3	美国国家海洋和大气管理局	101
4	美国国家大气研究中心	65
5	法国国家科学研究中心	55
6	美国加州大学	45
7	美国能源部	38
8	日本东京大学	31
9	美国哈佛大学	31
10	美国夏威夷大学	29

表4 SCI-E数据库刊载气象卫星主题论文的主要期刊

期刊	载文量（篇）	期刊分区
Journal of Geophysical Research: Atmospheres	4271	1
Advances in Space Research	2319	3
Atmospheric Chemistry and Physics	1467	1
Journal of Climate	1180	1
Monthly Weather Review	897	1
Annales Geophysicae	831	3
Journal of Atmospheric and Oceanic Technology	719	2
Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics	701	2
Journal of the Atmospheric Sciences	589	1
Radio Science	576	3
Journal of Applied Meteorology	541	2
Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society	539	1
Atmospheric Measurement Technique	502	1

风云极轨卫星数据的第一“落脚地”

——佳木斯气象卫星地面站采访侧记

■ 侯美亭 成伟玲

如果把气象卫星比作一支进入太空完成探测任务的风筝，那么控制风筝的线变成了卫星联系地面的无线电波，而手握这根线的，就是分布在世界各地的卫星地面站。佳木斯气象卫星地面站（以下简称佳木斯站）是我国本土的四个气象卫星地面站之一，其主要职责就是接收中国和世界上其他极轨气象卫星数据。佳木斯站与北京、广州、乌鲁木齐及瑞典基律纳站一起构成了风云气象卫星数据全球接收网，各站的地面数据接收覆盖如图1所示。作为我国东北部的卫星站，佳木斯站最大接收范围为北至俄罗斯东北部、西至我国新疆境内、南至我国长江流域、东至日本东部海洋的近圆形区域。

据佳木斯站王健站长介绍，2004年建站之初，面临着无经验、无专业人员甚至卫星系统都没见过等诸多困难。经过两年的艰苦努力，完成了项目选址、可行性研究、立项、规划、设计、征地、审批等项目前期工作。在2007年底，

FY-3气象卫星地面应用系统一期工程土建建设完成。2008年5月29日，佳木斯站成功接收到FY-3A星发回的第一轨探测资料。目前，佳木斯站已经形成一套成熟的业务体系（链接1）：按照业务种类区分，包括了极轨系统、静止系统、空间天气系统等；按照业务运行方式区分，可分为站管理系统、天线系统、信道系统、进机系统、存储与网络系统以及服务系统等。

陈东风副站长介绍了星上数据向地面站传输的具体过程。传输可分为实时数据传输和延时数据传输两部分。实时数据传输是指数据在星上获取后同步下发至地面接收站，再由地面接收站同步接收并传输至卫星中心数据汇集，快速生成应用产品，实时数据一般应用于全国性气象、环境产品或空间天气应

作为我国东北部的卫星站，佳木斯站最大接收范围为北至俄罗斯东北部、西至我国新疆境内、南至我国长江流域、东至日本东部海洋的近圆形区域。



用；延时数据传输是指将卫星在地面接收区以外获取的数据在到达地面接收区域后进行下发，地面站在接收的同时实时传输至卫星中心，形成全天全球应用产品。实时数据全球广播，卫星过指定地面站时下发全球延时数据，出指定站时记录全球数据。

极轨业务与静止业务的主要内容都是卫星观测数据的接收，都是通过微波为载体传输到地面站，再由地面站通过庞大的专用网络进行汇集，数据传输的方式方法不尽相同。然而，两种卫星的应用方式不同，静止卫星距离地球较远，约为

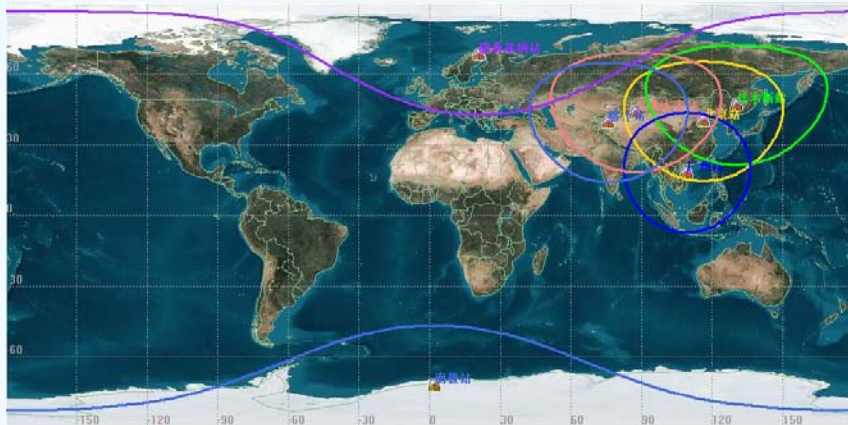


图1 风云卫星数据接收站网二维覆盖图：不同颜色的线表示线内所属范围为各站天线在5°仰角时的接收范围，绿色线圈内为佳木斯站接收范围（国家卫星气象中心朱爱军研究员提供）

链接1 佳木斯站的数据接收和处理

主要接收：

- 国内风云三号A、B、C三颗极轨卫星的L、X双频段以及风云二号D静止卫星S频段；
- 国外NOAA系列极轨卫星L频段、EOS/MODIS系列极轨卫星L频段、NPP系列极轨卫星多频段、SPOT系列极轨卫星X频段；
- WMO成员和机构卫星多频段兼容接收。

数据处理：

- 快速的优化拼接，形成最佳质量的Level-0数据，实时转发至卫星中心数据服务室。
- 目前已经具备风云三号A、B、C三星以及EOS/MODIS的Level-0数据处理能力，能够快速的将Level-0数据处理为Level-1数据，并可为用户提供直传服务。

36000km, 相对地球静止, 适用于全国范围的大型区域快速观测, 数据更新频率快, 单次观测数据覆盖范围广, 可进行短时大部分区域的连续性观测, 适用于连续性的云图动态观测; 极轨卫星距离地球较近, 平均为880km, 数据精细度较高, 观测图像更加细致清晰, 适用于局部地区的区域性连续观测以及全球资料的积累观测。

对于京外的地面站, 极轨业务一般占业务比重相对较大。极轨业务天线通常分布于全站院区的各个角落, 且有着较高的部署要求(各天线相距最短距离严格限制)、环境要求(电磁环境无干扰、建筑环境限高无遮挡)和转动性能要求(半球面旋转范围、最大角速度可达 $20^{\circ}/s$), 单星任务间隔约104分钟, 可进行多星并行业务; 静止业务一般以测距业务为主, 是主站必备的附属业务系统, 静止业务天线一般相对集中, 部署方面除单方向无遮挡要求外并无其他严格要求。佳木斯站业务运行科吴斌科长介绍, 佳木斯站静止天线部署于院区的西南方向, 转动范围较小, 业务时间上属定时性业务, 专星专用业务(链接2)。

总体来说, 佳木斯地面站的业务系统为自动化附加人工维护的状态, 主要的日常业务是气象卫星的入轨跟踪、数据接收、资料传输及接收设备设施维修维护等。地面站依照卫星中心下发的任务表进行站内调度逐一执行, 数据在本地实时缓存实时转发至卫星中心汇集。以上业务流程目前均处于计算机程序化自动控制状态, 但为了万无一失, 配备人工值守巡视巡检等人工业务, 以及业务设备的定期维护、应急预案。

佳木斯站还是宣传气象很好的

链接2 佳木斯站的数据接收天线

天线:

- 极轨系统12m口径卡塞格伦式天线2部(图2)以及在建1部、待建1部;
- 4.2m口径天线2部, 静止系统5米口径拉杆式天线1部, 待建2部。

数据接收:

- 同时跟踪4颗极轨气象卫星、1颗静止气象卫星;
- 以上天线全部建成后可同时跟踪6颗极轨气象卫星及3颗静止气象卫星。



图2 佳木斯站极轨卫星系统12m口径卡塞格伦式天线

受到接收解调系统设备限制, 目前佳木斯站仅能同时处理2颗极轨卫星数据接收和1颗静止卫星的测距, 待天线全部建成后, 将具备同时处理多颗极轨卫星接收和多颗静止卫星测距能力。



图3 佳木斯站卫星科普宣传展厅

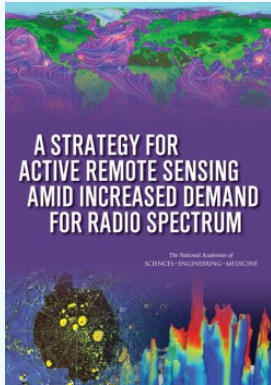
阵地。伴随地面站的建设, 全站职工一直想办法, 利用边角碎料, 甚至是矿泉水瓶、废旧铁锅等, 做出了逼真的气象卫星和接收天线等的模型。地面站办公室陈荣主任带领我们参观站上占地200m²的科普宣传展厅(图3), 她说, 这个即将正式向社会开放的气象卫星专题科普展

厅, 以气象卫星科技为主题, 重点开展保护生态环境、防灾减灾, 培养科学素养、科技创新等内容的宣传教育。

(作者单位: 侯美亭, 中国气象局气象干部培训学院; 成伟玲, 国家卫星气象中心)

《无线电频谱需求增加下的主动遥感发展战略》评介

■ 侯美亭



NAP, 2015年

无线电频谱 (Radio Spectrum) 是频率介于0Hz和300GHz之间的电磁波谱, 其中0.3~300GHz范围的波谱被称为微波, 微波是科学界主动遥感主要使用的频谱范围。相比, 被动遥感使用的波谱范围更为宽泛, 即包括微波波段, 也包括频率大于300GHz的可见光、红外、热红外等波段。同可见光、红外相比, 微波的波长更长, 因此微波能够穿透云层、雾、沙尘等, 并且不受大气散射的干扰, 几乎在所有天气和环境条件下都可以检测到微波能量。这也是主动遥感大都采用微波波段的重要原因。

无线电频谱是一种宝贵的资源, 在社会许多行业领域都有重要的应用价值 (图1)。鉴于此, 许多国家都设有专门的机构对其进行监管。比如, 在美国, 隶属美国商务部的国家电信和信息管理局 (NTIA) 管理联邦政府频谱的使用, 美国联邦通信委员会 (FCC) 负责所有非联邦政府的频谱使用管理; 在英国, 设有专门的电信监管机构Ofcom负责频谱的管理。在日益增加的电子产品和移动通信技术的推动下, 社会对频谱的需求增长很



科学界以及相关的业务部门必须积极参与频谱分配和部署过程, 确保满足科学界对频谱资源的需求。

快。由其带来的无线技术的扩散对科学界主动遥感系统的干扰也不断增加, 特别是在L和C波段。因而, 如何满足各界 (特别是科学界) 对频谱资源的需求, 以及如何重新分配和共享频谱, 以便更高效的利用频谱, 也成为各频谱监管部门所面临的迫切问题。

为此, 来自美国多所高校、研究所及公司的科学家组成的主动遥感对无线电频谱利用调查委员会、物理学和天文学委员会以及美国国家科学院共同发布了《无线电频谱需求增加下的主动遥感发展战略》

(A Strategy for Active Remote Sensing Amid Increased Demand for Radio Spectrum) 一书, 探讨了主动遥感利用频谱资源的有关问题及应对战略。该书于2015年由美国国家科学院出版社 (NAP, The National Academies Press) 出版, 其主要目标有3个:

- (1) 指出主动遥感对于社会的重要性;
- (2) 介绍目前和未来主动遥感有效利用电磁频谱所面临的威胁;
- (3) 为主动遥感所需频谱的保护和有效利用提供具体的建议。

本书共包括9章: 第1—6章介绍了主动遥感的重要价值, 并分别阐述了其在大气、海洋、陆表、空间物理、行星科学等几大领域的应用情况; 第7—9章则阐述了频谱资源的分配政策、主动遥感仪器面临的射频干扰问题以及缓解干扰的有关技术和建议。总体上, 本书内容可以汇总为以下3个方面。

一、主动遥感的重要性

主动遥感是指由探测器主动向目标物发射一定能量的电磁波, 再由至少一个接收器接受目标物反射或散射电磁波的遥感系统。通过测量目标物的反射或散射特性, 就可以分辨目标物的物理状态。在不同

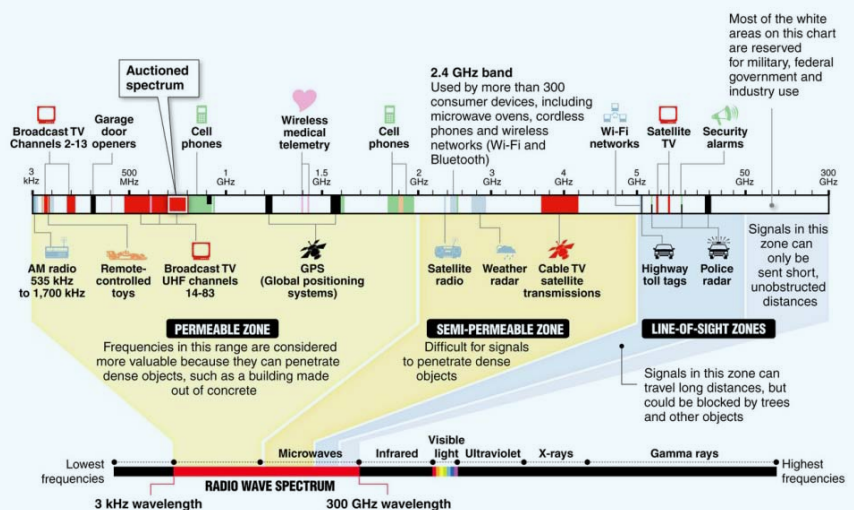


图1 无线电频谱及其应用

(来源: New America Foundation, MCT, Howstuffworks.com)

领域，主动遥感的目标物也有所差异。比如在大气科学领域，主动遥感的目标物主要包括地球大气、海洋和陆地表面，其探测器平台可以在地面、空中和/或卫星上。

目前，主动遥感已经成为研究和预测地球环境（包括大气、海洋和陆地表面以及地球附近空间环境）短期和长期变化的主要工具，对于理解地球的天气与气候变化、固体地球过程、空间天气灾害等至关重要。

不同领域的主动遥感技术对科学和社会的重要影响，具体包括：

- 1) 大气主动遥感可以提供对风暴、全球大气环流的深入了解；
- 2) 海洋领域，主动微波传感器可提供洋流、波浪和风速和风向测量，是被动微波、可见光和红外测量的重要补充。其对全球天气预测、风暴和飓风预警、波浪预测、沿海风暴潮、船舶航线、商业捕捞等具有重要应用价值；
- 3) 主动遥感测量雷达，包括真实孔径雷达、合成孔径雷达（SARs）和散射计，能为土地利用、环境管理等提供必要的数据库；
- 4) 电离层的主动遥感对于理解其附近空间区域的物理特征、以及预测空间天气事件对电力、通信等行业的影响直观重要；
- 5) 行星雷达天文学中的主动遥感技术，有助于人类提高对太阳系的理解、制定卫星发射计划以及跟踪和表征可能威胁到地球的近地小行星。

二、主动遥感所需频谱的有效使用在当前和未来面临的威胁

主动遥感使用的频率基本决定于所研究的物理现象。对于每种测量类型，很难把其所使用频段转换到其他频段。因此，对于那些对社会发展非常有必要的主动遥感测量，必须保证它们所需的频谱资源。

主动遥感传感器面临的频谱问题主要有两类：1) 与被动传感器一样，主动传感器也受到了其他无线电服务的射频干扰（Radio-frequency Interference, RFI）；2) 与被动系统

不同的是，主动遥感系统也发射信号，因此可以根据业务进行调整，以确保它们不会干扰其他服务。随着对频谱资源不断增长的使用和需求，这两个问题越来越影响到主动传感器当前和未来的发展。

当前和未来RFI问题，具体例子如下：

- 1) 在一些情形下，对主动传感器的传输限制大大阻碍了其收集科学数据的能力，如对欧空局BIOMASS卫星计划在某些区域上空的传输限制，因为BIOMASS对U.S. DOD SOTR（美国国防部空间对象跟踪雷达）系统存在干扰。在一些波段保守的干扰标准使科学操作变得困难，对超高频（UHF）和L波段的限制也随着时间不断提高。

- 2) 部分波段的RFI环境正日益恶化。对于大量使用并得到充分研究的L波段的1215~1300MHz部分，世界范围内观测到的RFI的量正不断增加，特别是在北美、欧洲和东亚尤为严重（图2）。欧空局称，在C波段，RFI也在增长。

- 3) 近期，商业服务计划在地球探测卫星分配频谱中的扩张将威胁到具有高附加值的C波段的科学雷达测量。例如，拟议的5350~5470 MHz无线局域网（RLAN）服务将严重限制欧空局的Sentinel-1星座（哥白尼计划）和加拿大的Radarsat-2和RadarSat星座任务（RCM）。RLAN发射器的宽波段、噪声状特性很难或无法得到减轻。

- 4) 虽然有多个波段被分配到

地球探测卫星主动频谱上，然而仅有部分波段正在使用，或根本不被使用。由于容纳新的服务的不断压力，在未来可能更难在这些波段上建立新的科学任务。

- 5) 目前，RFI已不再是行星雷达天文学观测的一个重要障碍。然而，随着对近地小行星图像高空间分辨率的需求，导致了对带宽需求的增加，将来RFI可能会是一个大问题。为方便获取近地小行星高空间分辨率影像，需要分配60~120MHz的带宽。比如，NASA JPL Goldstone雷达目前拥有200MHz的带宽，其中中心频率为8.600GHz。

应该指出的是，例行报告通常指出了其他非科学来源传感器对主动科学传感器的干扰，而科学传感器似乎很少会干扰其他服务。其原因之一是通信系统可以抵抗具有窄脉冲波形与低占空比的雷达系统的干扰，窄脉冲波形与低占空比正是科学和业务雷达的典型特征。而不同的主动科学传感器之间可能会存在干扰，比如NASA CloudSat上的雷达可以干扰射电天文测量雷达。

当前，RFI缓解技术可以在UHF、L和C波段上显著地降低干扰对科学传感器的影响，C波段以上频率进行的科学测量基本上已经不再受到RFI问题的影响。因此，主动遥感能够更有效地与一些服务分享频谱，这取决于干扰信号的性质。

此外，表征RFI影响主动遥感空间仪器的困难之一是当前世界范围内主动遥感信号发射器信息不够全

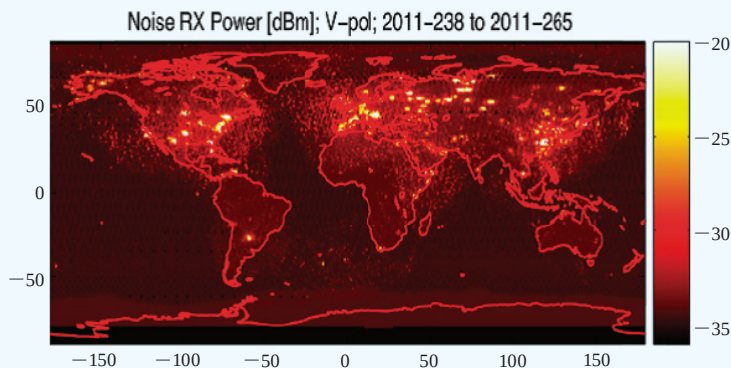


图2 Aquarius L波段观测到的射频干扰（RFI）（来源：NASA/JPL-Caltech）

气象风云多变换 理念创新得天下

——2015年NOAA卫星大会评介

■ 贾朋群 张蕾

一、引言: 关于NSC

2015年4月27日到5月1日, 2015年NOAA(美国海洋大气管理局)卫星大会(NSC)在马里兰州的Greenbelt成功举办。来自全球相关领域(气象卫星信息的用户和提供方)的650位学者报名参会, 可谓盛况空前。为了配合这次大会的召开, 从4月22日开始, 卫星遥感跨机构工作组会议、GOES数据技术工作组会和NOAA GOES数据国际用户培训等在会前相继举办, 为大会的召开烘托了人气, 也增加了技术含量。

作为东道主, NOAA大约有200人参会, 而NOAA的合约人和外国机构的参会人员达到240人。在国际学者方面, 包括中国在内的全球39个国家和地区的大约100人参加了会议。会议分5个板块, 安排了近70个报告, 使得整个会议紧凑和内容十分充足。特别是, 大会的主题定位于“准备未来的环境卫星”, 使得

大会成为各气象卫星国和组织争相展示未来气象卫星全貌的舞台。本文主要会议报告和会后动态, 介绍大会折射的未来气象卫星领域的新理念。

2013年3月, 第一次NSC召开, 会后主办机构还专门发布了会议总结报告, 针对会议上代表们提出的34个涉及各卫星传感器数据、培训、数据管理等问题, 发表了《2013年NSC行动和反馈》报告。2013年会议取得很好的效果, 也让NSC成为大约每2年举办一次的系列会议, 当然, 会议并没有按照一般学术会议那样, 被冠以“XX届”, 而是用举办年区分, 也许是为了具有更好的灵活性和时代感。

继2013年4月成功召开首次NOAA气象卫星大会(NSC)之后, 2015年4月27日—5月1日, NOAA召开了第二次气象卫星大会。因为这次会议到会专家广泛、会议报告内容全面, 使得这次会议成为具有全面当前和未来气象卫星事业发展的良机。



但是, 无论NSC如何演进, 从首届会议确定的大会全称, 即“NOAA Satellite Conference (NSC) for Direct Readout, GOES/POES, and GOES-R/JPSS Users”(面向直读以及GOES/POES和GOES-R/JPSS用户的NSC)并没有改变, 也就是说NSC实际上是用户大会。但是, 从连续两次会议结构上看, NSC倡导的是“气象卫星信息的使用者和提供者的直接交流”, 这也应该是NSC最显著的标签。此外, 2015年大会还给出了一个“热点主题(spotlight theme)”, 即“为未来的环境卫星做准备(Preparing for the Future of Environmental Satellites)”, 正是这一主题, 也让这次会议具有了“承

面, 以及RFI环境的特性随时间推移不断演变。同时, 目前尚缺乏一种好的指标, 以量化各种主动遥感科学测量仪器(如散射计、高度计、SARs、干涉仪等)的退化信息。这使得准确地量化RFI对特定主动传感器的影响、如何减轻RFI以及如何共享频谱变得困难。

三、保护和有效使用主动遥感所需频谱的建议

1) 科学界的行动

科学界以及相关的业务部门必须积极参与频谱分配和部署过程, 确保满足科学界对频谱资源的需求。科学界也应提供更多信息, 使监管部门更好地意识到主动遥感的

价值。这种价值包括减少自然现象对社会产生不利影响的经济价值, 以及来自科学研究的非经济价值。

2) 政府层面的行为

政府相关部门应积极支持主动遥感的发展, 监督频谱分配。例如, NASA应提高影响主动遥感的RFI环境的表征, 其他机构(如NOAA、NSF等)也应积极参与其中。另外, 应增加对科学界主动遥感的频谱分配。

3) 通信业可以采取的行动

短波中小型基站通信中毫米波频率的使用, 将大大增加网络容量(达到一个数量级), 从而减少对频谱和主动遥感用户的压力。无线产业应

考虑利用微型基站方法, 通过发展发射塔和网络, 增加毫米波频率在6G通信和通信标准中的使用。

4) 寻找频谱共享的机会

多功能相控阵雷达为频谱共享提供了可能。比如, NOAA的多功能相控阵雷达项目(MPAR), 旨在使用单个相控阵天气雷达, 同时执行飞行器跟踪、风廓线和天气监测等多种任务。FAA(美国联邦航空局)和NOAA也正在合作发展能执行这两个机构不同任务的单个的S波段多功能雷达。此外, 建议开展频率再利用技术的调查, 以减少对整个S波段的频谱需求。

(作者单位: 中国气象局气象干部培训学院)

上启下”的意味，尤其值得关注。

二、当气象卫星大踏步迈向高分辨时，会倒逼地面预报系统做出改变

美国天气局（NWS）首席业务官员Murphy在开幕式上，做了论述卫星资料对NWS重要性的演讲，他指出，虽然全球拥有35颗不同的环境探测卫星，但是天基探测和预测的能力却出现弱化。面对政府预算的减少，天基设备的能力几乎被全部挖掘出来，进一步的挑战也就尤其尖锐。Murphy认为，传统上，低轨（LEO，主要指极轨）卫星主要为NWP提供数据，而静止卫星（GEO）拥有帮助预报员判断天气形势的优势。但是，目前二者的区别正在走向模糊。例如，低轨道卫星资料越来越多地被预报员利用，特别是在阿拉斯加州天气和沿海风的预警方面；而静止卫星上的一些探测资料，也通过不断改进的数据同化系统，越来越多地在NWP中获得应用。因此，两个种类卫星的全面融合即是方向，也是气象卫星界最重要的挑战之一。Murphy分析了卫星快速探测获得的资料，在进入延迟时间很长的数据同化过程后，其价值会大幅度降低。他因此提出2.5小时同化窗口的概念，希望通过更快速的更新尽可能避免因卫星数据的延迟使用限制激烈天气预警的改进。

NWS代表的发言也向与会专家提出一个值得思考的问题：在进入高时空分辨的新一代天基观测时代，如何确保所有资料最快速有效地被业务预报圈利用？要做到这一点，也许所有的地面系统要有所改变，至少要和天基观测的节奏保持一致才行。

三、美国换代气象卫星平台初露端倪

2016年初发射升空的Jasson 3，宣告未来美国下一代气象卫星即将登场。会上NOAA卫星和信息局长

还直接宣告了到2017年NOAA另外3颗重要卫星的发射时间：GOES-R（2016年2季度，现改为10月份）、COSMIC-2a（2016年3季度）和JPSS-1（2017年2季度）。其中JPSS-1代表了重要技术改进，目前其搭载的VIIRS、OMPS-N、CrIS和CERES等仪器已经装载完毕；而一再推迟发射的GOES-R，其性能更是成倍提高：谱信息的数量提高3倍，空间分辨率提高4倍，对高影响天气系统的扫描速度提高5倍。可以说，上述卫星的发射和成功运行，加上之前已经升空的GPM和SMAP等卫星，将开启NOAA气象卫星的换代周期。

实际上，背负美国下一代静止气象卫星盛名的GOES-R，其换代的实质来自两个关键传感器：ABI和GLM。和以往GOES搭载的类似仪器不同，先进基准图像仪（ABI）不仅是GOES-R系列卫星的基本仪器，其探测通道增加到覆盖可见光和近红外的16个通道（原为5个），前述的GOES-R主要性能数倍提高主要来自ABI。目前，世界上欧洲、日本和韩国等国家的下一代地球静止气象卫星，类似ABI的仪器几乎成为标配，尤其是ABI与日本葵花-8卫星上

的AHI相比，只是在2个通道上的波长不同而已。如果说ABI是对原载仪器的改进，那么，地球静止闪电电测绘仪（GLM）则是填补空白。GLM能够对西半球所有的闪电活动进行探测，探测的时间延迟仅仅20秒。GLM资料的出现，给目前的预报带来了改进的机会，也同时提出了挑战。首先，闪电一般总是和激烈天气联系在一起，延迟很小的GLM数据，如果能够和模式预报结合起来，不仅能够改进预报，还能够大幅度提高预警的提前时间。但是，目前的数据更新系统，有可能让时效性很强的GLM无所作为。会上，科学家们讨论了GLM与NOAA新推出的高分辨率（3km）快速同化系统（HRRR）可能的结合方式，即通过HRRR时间延迟集合技术，最终解决GLM与目前业务体系相融合的可能（图1）。

本次大会并没有来自NASA的代表就NASA主导构建的空基平台中大气和环境探测内容做重要的发言，此外，美国与其他国家和地区联合开展的项目，例如，美日联合开发的GPM（全球降水观测）等也不见专门的介绍，这是大会让人略感遗憾的地方。

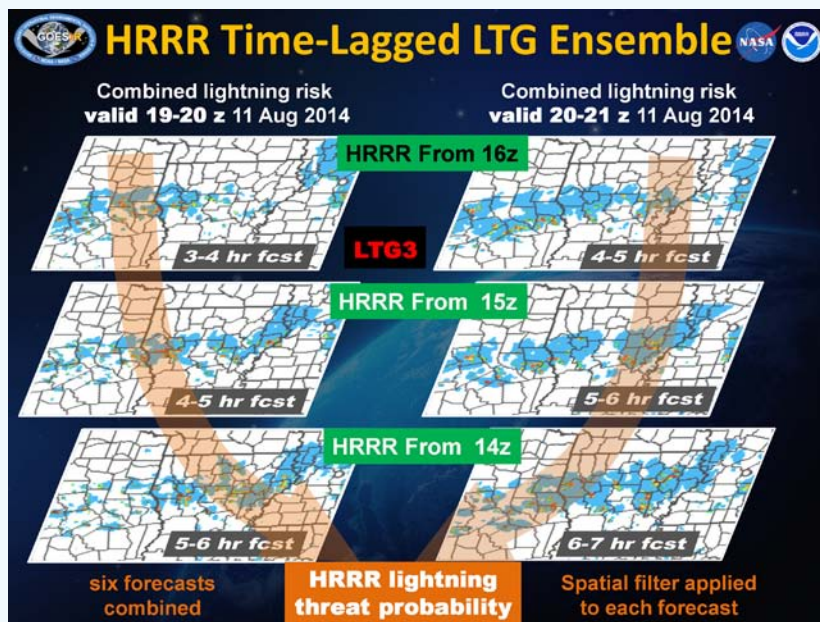


图1 高分辨快速同化系统（HRRR）的时间延迟LTG集合技术，可望将吸纳快速更新的GLM资料

四、卫星数据获取和培训，一个都不能少

会议的最后2个板块，分别探讨卫星数据的发布和获取以及气象卫星的教育和培训，这既是一种务实，即想用户之想，更是卫星技术快速发展带来的必然：卫星数据快速融入预报和研究模式带来更多的数据接口问题，而卫星和卫星搭载传感器的多样化和复杂化，正在让气象卫星培训成为科研和业务人员入门的必要程序。未来面对一个特定的天气系统，可以从极轨、静止轨道上甚至小卫星等更加多变轨道上，获得时间和空间域最接近的多个卫星及星载传感器探测资料，要了解如此众多卫星资料的视角和特点，没有相关的培训几乎不可想象。

正如很多与会者的感觉，如果说世界上气象资料的全球共享走在了前面，那么全球卫星资料的共享则更是一面旗帜。地球静止卫星在全球的定位都是卫星国间协商的结果，其中资料的共享显然是前提。针对JPSS卫星和GOES-R卫星资料的获取，大会分别安排了4个和3个报告进行了介绍。

在教育和培训方面，来自美国的代表分别介绍了区域培训、合作所、COMET项目以及虚拟培训等手段中涉及卫星的部分。这些教育和培训的共同特点是超前性。美国即将升空的气象卫星的主页上，几乎无一例外都有教育板块，提供该卫星工作原理和对气象预报和研究促进意义等信息，而在COMET的超过2000个英语气象卫星课件中，已经有数十个针对GOES-R的培训课件（英语69个，西语25个，法语16个）。NOAA的国家实验室和与高校合建的合作所，往往能够利用其本身就是新卫星传感器或产品研发基地的优势，开展更加有含金量的培训。例如，CIRA（大气研究合作所）和CIMSS（气象卫星研究合作所）两个合作所推出了VISIT（卫星综合培训可视学院）和SHyMet（卫星水文和

气象）两个针对预报员的培训计划，它们与WMO的虚拟实验室共同构筑美国业务和学术气象卫星新技术的培训和研发基地，吸引力众多相关机构形成影响广泛的平台。

五、日韩气象卫星发展受关注

日本气象厅卫星项目主任（隶属于气象厅数据处理局的系统工程部）在大会开幕式后，做了论述日本地球静止卫星发展的报告，特别是针对最新发送升空的葵花卫星技术突破和资料使用，进行了全面的描述。报告副标题“葵花端口和葵花云的数据应用（Data Utilization via HimawariCast and HimawariCloud）”，因为旗帜鲜明提出了“云”理念，使其现代气息大增。

日本地球静止卫星的发展，实际上暗合了始于1977年偏向气象业务应用的葵花系列卫星的发展历程。如果说美国的S-NPP卫星开创了新一代极轨气象卫星之先河，那么2014年升空并在2015年7月业务化的葵花-8卫星，则是下一代地球静止卫星的先锋。日本地球静止气象卫星也从GMS过渡到MTSAT之后，进入了静止卫星技术突破的新阶段。日本气象厅以葵花-8和葵花-9卫星，开启其下一代地球静止气象卫星的时代，在国际上具有领先优势，这既有其近40年地球静止气象卫星开发历史做奠基，也有其受益于与美国等国开放和共同开发技术战略的成分。

葵花-8卫星2014年的成功发射将成为人类地球静止气象卫星发展里程碑事件。该卫星每10分钟即可获得一幅完整全彩色图像，仅为MTSAT卫星的1/3，而针对日本国土和敏感区域的扫描战略，更是缩短到2.5分钟，可以极大地提高资料获取的时效。

葵花-8卫星的另一个亮点，是明确提出“葵花云”（Himawari Cloud）的理念并应用于卫星数据服务。目前，葵花云向每个国家的主管气象部门指定的1个机构提供1个账号，提供实时资料。历史资料服

务则针对所有非营利的研发用户，由日本科学组织（Japanese Science Group）提供。此外，葵花云还借助世界气象组织的WIS（WMO信息系统）端口以及JDDS（JMA互联网FTP向各国国家气象部门提供数据备份）提供数据服务。目前，葵花云能够提供3种数据，每天的数据量接近400GB，葵花云整体的业务化有望在2015年中实现。利用云技术，葵花-8卫星数据在观测开始8分钟之内，第一个扫描数据段（每次HSF图像扫描数据被分为10个数据段，每个数据段含有16个通道数据文件）即可以下载，最后1个数据段的数据在扫描结束后的7分钟内即可下载。借助“云”技术，葵花-8卫星真正实现了天上观测与地面数据的转同步数据获取。

会上，韩国气象局（KMA）国家气象卫星中心的Sang Jin LYU做了关于KMA气象卫星现状和未来计划的报告。KMA气象卫星的发展，无论是极地轨道还是地球静止轨道，均起步于1992年，且20多年来一直保持高速发展的态势，几乎每1~2年，都有新的卫星升空，尤其是2010年地球静止轨道卫星COMS（通信、海洋和气象卫星）的发射和计划在2018年实施发射的下一代GK-2A星，以及计划在2018年及之后几年发射的多个极轨卫星，不仅引起了全球关注，也使韩国据此跻身世界具有极轨和静止双轨道气象卫星国家行列。

实际上，韩国的下一代地球静止卫星的主要成像设备与美国下一代静止气象卫星GOES-R卫星成像设备类似。韩国还计划发展低轨道（LEO）卫星，加载合成孔径雷达（SAR）主动遥感设备。

目前，COMS运行稳定，2011—2014年资料可获取率达到了99.31%的较高水平。韩国还和斯里兰卡、菲律宾、老挝等亚太国家合作，向这些国家提供接受设备、业务监测和分析系统以及技术支持和

培训,很好地扩大了COMS卫星的价值和影响。此外,KMA还通过承担WOM二区协示范虚拟实验室项目(VLab)开展培训和亚太及国际各种气象卫星相关的协调和工作会议,扩大其影响力(如,第19届TOVS国际会议)。

目前在轨的韩国极轨卫星(KOMPSAT系列)以及COMS卫星的换代卫星,Geo-KOMPSAT-2A(前面加前缀Geo)研发计划。预计在2018年升空的2A星,在2012—2018年的设计阶段就与2B星在星载仪器上明确了分工,即2A星装载气象和空间天气传感器,而2B星专注于海洋和环境探测。2A星相对于COMS的改进,与美国等换代卫星类似,星载的主要仪器,如微波图像仪(MI)改进为先进微波图像仪(AMI)之后,空间分辨率提高4倍、时间分辨率提高4倍,扫描频道是原来的3倍,获得的产品数量是原来的3.5倍。其中,每2分钟即可完成对韩国扫描,最终产品的数量将会达到52种。韩国气象卫星日渐丰满是很多参会人的直接感觉。

六、欧洲换代卫星同样可期

2015年7月15日,欧洲气象卫星开发组织(EUMETSAT)第二代卫星中第四颗也是最后一颗卫星MSG-4卫星成功发射。MSG-4升空进行业务运行后,将更名为Meteosat-11,这颗卫星也肩负了第二代与第三代卫星间承上启下的作用,具有重要的历史意义。MSG-4将以初始状态被“存储”在其轨道上,直到第三代气象卫星开始“服役”。MSG-4进行业务化并开始服务后,将为下一代卫星发展提供重要的数据支持,而第三代气象卫星(MTG)预计在2019年和2021年发射。欧洲卫星计划的目标是未来几十年继续覆盖全球的卫星观测。未来主要卫星有:Meteosat第三代气象卫星(MTG)、EUMETSAT第二代极轨卫星以及哥白尼卫星。

MTG卫星的主要任务是支持

高影响天气的短时预测。它具有连续性和增强的MSG影像服务,添加了新的闪电成像能力,并且在世界上首次实现了创新的红外超光谱探测。这些能力都成为MTG卫星的短时预测的有力武器。MTG还有一个次要任务,就是欧洲空气质量监测。需要哨兵4、IRS、IRST等卫星图像协同合作。

从2019年起,第三代气象卫星(MTG)将陆续发射六颗新的卫星:四颗MTG-I成像卫星(预计运行服务20年)以及两颗MTG-S探测卫星(预计运行服务15.5年)。这两种类型将被放置在地球同步轨道相同的经度上。MTG计划确保了直到21世纪30年代后期太空气象数据的获取。

利用第三代气象卫星(MTG),可以期待持续从的地球静止轨道可见光通道观测,也可利用红外及紫外/可见光探测仪器观测。

MTG系列卫星使欧洲气象卫星第一次不仅实现了可以为天气系统成像,还能通过对大气化学成分的复杂性进行分层和更深入的洞察,从而对大气层进行分析。MTG提供的10分钟一次的全盘图像,以及红外和紫外/可见探测任务所得到的数据,对未来产品的量化反演是非常关键的。

欧盟委托欧洲气象卫星组织负责开发四个哨兵卫星,作为哥白尼太空组成部分,致力于大气、海洋和气候监测。哨兵3是一个低地球轨道任务卫星,支持有关全球海洋和陆地的环境服务,以高精度和可靠性支持海洋预报系统和对环境和气候的监测。哨兵3是哨兵系列卫星之一,是哥白尼的计划的组成部分。哥白尼计划将会对星球做一个连续的“健康检查”。按照哥白尼计划,EUMETSAT将负责哨兵-3(海洋部分)、4和5的运行,ESA负责哨兵1、2和3(陆地部分)的运行。

七、结语:气象卫星大会及其背后的“话语权”

目前,世界各国共同开展的

气象和环境探测活动,每天提供大约20亿条观测信息,而这些信息的99.9%来自主要依靠卫星探测平台的遥感资料。气象卫星组成的星群和空间网络,实际上代表着人类对地球大气和环境的感知和逐步加深的认知。在成功发射了人类第一颗气象卫星的美国,其近期战略性的演进,不仅具有强大的技术优势,同时也在与气象业务互动和对接中,大踏步地向新一代气象卫星平台迈进。

2013年,NOAA探路气象卫星大会,组织了首次NSC,尽管会议的结构、甚至邀请嘉宾和主讲嘉宾,都与欧洲的会议有相似的地方,但依然可以说是填补了空白,2015年的再次主办,基本确定了NOAA今后每2年的上半年举办气象卫星大会的格局(近年来,欧洲卫星大会一般在下半年举行),于是,类似极地轨道卫星的上午和下午轨道,美欧形成了气象卫星大会的世界格局。NOAA多年之后急于补充卫星大会的空白,追其原因,除了世界气象卫星大发展的背景之外,最近几年来NOAA在气象卫星上的预算和卫星用途等,频遭国会和包括审计总署在内的其他组织的质疑,几近因预算削减导致其卫星数据难以为继,也应该是起因之一。尤其是,一些舆论认为,气象卫星探测带来的巨大市场,已经激活了本来就位于创新前沿的美国企业,国家完全可以通过复制NASA与SpaceX公司之间购买契约,实现市场化的气象卫星战略。

在这次大会上,韩国代表在报告中明确提出了也要举办气象卫星大会的设想,这种似乎要在“上午、下午轨道”之外,增加“昏晨星”的举动,也许会一发不可收拾,成为各卫星国争相模仿的举动。可以预见,随着全球气象卫星换代,气象卫星大会或许会形成“你方唱罢我登场”之群雄争锋的局面。

(作者单位:中国气象局气象干部培训学院)

《气象科技进展》2015年主要内容回顾

第一期

- 6 张颖娴, 丁一汇: 北半球温带气旋客观研究方法及其模拟和预估的研究进展
- 18 扈海波, 熊亚军: 城市极端高温灾害研究综述
- 23 孟春雷: 城市陆面模式研究进展与展望
- 29 殷梦涛, 邹晓蕾: 极轨气象卫星高光谱红外探测仪简介
- 40 张定媛, 廖宏: 大气甲烷的源和汇及其浓度的观测模拟研究进展
- 48 李永生, 朱玉祥, 王莹: 影响黑龙江夏季气温的大尺度环流因子分析
- 53 徐兴波, 韩庆红, 徐驰: “布拉万”和“梅花”北上影响吉林省产生降水差异的天气学特征对比分析
- 60 陈宫燕, 李彦军, 李静: 林芝地区夏季旱涝年环流场和OLR场特征分析
- 66 乔赛男, 张丽娟, 杨平, 张晓慧: 松嫩平原2000—2012年生长季农作物含水量变化分析
- 70 翟永, 刘津: 建设地理信息大数据的思考
- 72 张文建(译校): WMO全球观测系统演进发展实施计划(EGOS-IP)执行摘要
- 79 王绍武: 《全球变暖的科学》后记

第二期

- 6 张鹏, 杨磊, 谷松岩, 胡秀清, 吴晓京, 吴荣华, 毕研盟, 刘诚: 晨昏轨道卫星的气象应用需求分析
- 13 张广俊, 蔡鸣, 胡爱学: 城市能量消耗对全球气候影响的模拟研究
- 18 雷小途, 余晖: WMO登陆台风预报示范项目研究进展
- 24 赵俊虎, 杨杰, 龚志强, 封国林: 2013年中国夏季降水动力—统计气候预测及检验分析探讨
- 29 李良福, 覃彬全, 杨磊, 糜翔, 刘青松: 缆索承重桥的缆索防雷技术研究
- 35 邹晓蕾, 翁富忠, 田小旭: AMSR2仪器上新增设的C波段通道对陆地无线电频率干扰的有效缓解
- 42 包红军, 王莉莉, 梁莉: 对国家级渍涝风险气象预报预警业务模型的优化与改进
- 48 王莉莉, 陈德辉: 基于GRAPES的陆—气双向反馈模式降水在洪水预报中的检验
- 53 刘永和, 张万昌: 基于DEM的流域河网信息自动提取算法
- 59 蔡鸣, 张大林, 许秦: 从地形罗斯贝波到非静力中尺度动力学: 重温周晓平先生经典著作
- 63 刘俊, 鞠永茂, 杨弘: 气候变化背景下的城市暴雨内涝问题探析
- 66 李婧华: 从2014年国际顶级期刊论文看世界大气科学领域华人学者的影响研究活动
- 68 李婧华, 吴灿: “极轨卫星”主题文献计量分析
- 70 戴洋: 气候变化综合评估模式研究: 任重道远
- 73 王邦中: 并不遥远的全球气候治理过程

第三期

- 6 穆穆, 周非凡: 基于CNOP方法的台风目标观测研究进展
- 18 张广俊: 天气和气候模式中的质量通量型大气对流参数化(中英文对照)
- 40 杨莲梅, 李曼: “96·7”中亚低涡持续活动能量转换和频散特征
- 49 任国玉: 气候变化常用术语释义
- 57 叶爱中, 段青云, 徐静, 马凤, 邓敦学: 基于GFS的飞来峡流域水文集合预报
- 62 林伟文, 曾鸿阳, 朱定真: 气象传媒服务制作策略的新挑战
- 64 沈文海: 气象业务信息系统未来基础架构探讨——“云计算”和“大数据”在气象信息化中的作用
- 67 吴灿, 李婧华: “目标观测”在大气科学领域应用的主题文献计量分析
- 76 贾朋群, 郑秋红: 基林和基林曲线: 人类定量认识自身与自然关系的先行者和风向标

第四期

- 8 邱拓, 刘锦丽, 段树, 吕达仁, 毕永恒: 双基地多普勒雷达的风场反演能力评估

- 16 柳士俊, 张蕾: 光流法及其在气象领域里的应用
- 22 许映龙, 张玲, 向纯怡: 台风定强技术及业务应用——以Dvorak技术为例
- 35 张金强, 宣越健, 刘明远, 万晓伟, 白志宣: 大气臭氧探空仪: 技术指标及对比分析
- 45 何思远, 刘晓阳, 孙大利: 测雨雷达反演雨滴谱剔除垂直气流方法的研究
- 53 官清华, 黄光庆, 张俊香: 广东省小流域地区降雨诱发的滑坡灾害预警体系探讨
- 57 王红丽, 黄建菲, 尚媛媛: 贵州省交通气象服务分析评估
- 62 朱明, 廖小华, 夏金: 十堰市气温变化对中稻生长期及产量的影响
- 66 周锦程, 林峰, 赵建伟, 李菊: 政府购买公共气象服务: 效率和效益的提升
- 68 王宇, 钟琦: 欧洲中期天气预报中心(ECMWF)2014年预报性能
- 70 贾朋群, 蔡金玲: 新老教师汇聚 指点开拓缤纷——“教指委”2015年7月大连活动侧记
- 72 侯美享: 《遥感中的尺度问题》评介

第五期

- 6 陈法敬, 陈静: “SEEPS”降水预报检验评分方法在我国降水预报中的应用试验
- 14 赵俊虎, 周杰, 叶天舒, 杨柳, 封国林: 2013年夏季中国北涝南旱环境场及异常成因分析
- 24 钱恺, 刘锦丽, 毕永恒, 韩永, 吕达仁: 高时空分辨率观测资料对两次夏季北京暴雨的特征分析
- 33 沈越婷, 钱传海, 李泽椿, 范广洲: 热带气旋集合预报技术的应用情况简介
- 43 黄泓, 王学忠, 姜勇强, 陈中一: 热带气旋尺度涡旋对非对称热力扰动演变的影响
- 50 孙大利, 刘晓阳, 王久珂, 何思远: 雨量站网测量精度的评估
- 55 崔胜权, 梁寒, 李爽: 辽宁强对流天气物理量阈值探索统计分析
- 60 张梅: 自动气象站异常记录分析及处理方法
- 63 成伟玲, 咸迪: 风云气象卫星在产品应用中前行
- 66 何海鹰: 中国基层气象服务市场规模估计——基于地市级气象局局长调查问卷进行的分析
- 68 叶梦姝: 从气象爱好者到科学原子论之父——读道尔顿《化学哲学新体系》有感
- 69 张泓波: 气候变化研究的重要视角——《成本效益分析杂志》“气候变化”专辑评介
- 71 气象史料挖掘与研究工程项目组: 国民政府时期空军的气象教育培训

第六期

- 6 邱金晶, 陈锋, 董美莹, 余贞寿: 浙江省快速更新同化系统的建立与检验评估
- 13 范玉芬, 陈政豫, 杨冬晨, 潘士雄: 桐乡“7·12”飑线和局地龙卷风过程的诊断分析
- 17 谈建国, 顾问: 城市化降水效应研究进展
- 23 李磊, 胡非, 刘京: CFD技术在我国城市气候环境微尺度问题中的应用
- 31 赵华睿, 吴立广, 梁湘三: MWT方法在分离台风环流中初步应用
- 37 张书余, 张夏琨, 王春玲, 王宝鉴: 一次中等强度冷空气对人群高血压疾病影响的实验研究
- 42 崔粉娥, 李颀, 畅巨峰, 李卫敏: 两次副热带高压外围沿海暴雨过程对比分析
- 48 沈永生, 蒋宗孝, 王正廷, 官晓东: 三明市强对流天气的风廓线雷达探测分析
- 53 聂颖, 余思源, 戴维士: 南京机场20130625低空风切变天气过程分析
- 58 张德宏, 王苏, 唐宇, 王山旗: 淮安地区雷暴日及地闪特征分析
- 61 李良武, 拓砚军, 陈文涛: 降水预报检验标准浅议
- 63 郭志梅: 我国大气科学类期刊总被引频次和影响因子统计分析
- 66 贾朋群, 徐虹: 浙江气象舞翩跹——浙江省气象业务现代化采访侧记
- 69 叶梦姝: 用数学语言写就的物理之诗——重温傅里叶《热的解析理论》
- 70 韩佳芮: 《评估天气和气候: 气象水文服务的经济学评估》简介
- 72 气象史料挖掘与研究工程项目组: 新中国最初的气象培训班

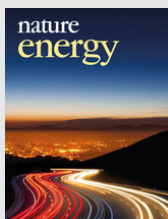


《1995—2015年天气
相关灾害的人类损失》
2016年1月

这本由灾害流行病研究中心发表的出版物，针对天气相关的灾害，给出过去20年严肃和透彻的统计。报告分5个章节，从多个侧面给出灾害统计结果，强调COP21 达成新的气候变化协议的重要性。

《自然：能源》创刊
2016年1月

这是2016年新创刊的3份自然杂志子刊之一。来自美国、荷兰和英国的多位学者，以“能源前沿”为题目，在期刊“特写”栏目里撰写了创刊词。这本覆盖了广泛领域的期刊，也包含社会科学和政策研究范畴。

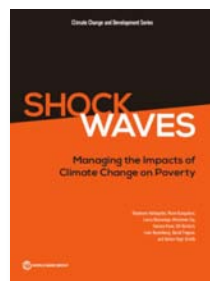


《2016年世界发展报告：
数字红利》
2016年1月

世界银行这份用包括中文在内的多种语言发表的年度报告，瞄准数字化这一热门主题。报告的内容中，包括了探索互联网时代对提供公共服务有效性方面影响的内容。

《新闻周刊》
2016年1月15日

“大融化”是这本时政类周刊本期的封面报道主题。不厚的期刊，却用了12个页面和具有震撼性的图片，告诉读者目前发生在南极的大融化，虽然在地质时期是常见的，但现在的场景却更可能意味着，我们在靠近着危险之边缘。



《冲击波：管理气候变化对
贫困的影响》
2016年1月

世界银行最新出版的这本图书，应该说正是时候。巴黎气候大会积极的结果，让我们更加有理由将终结贫困和稳定气候变化放在一起思考，二者也是全球实现可持续发展的重要步骤。全书分6章论述了这两个宽泛和相关关联的主题。

媒体扫描

MEDIA SCAN

《大自然》
2016年1月

“客观理性地认识气候变化”是本期的主题。期刊邀请方精云院士撰写了同名刊首语。强调气候变化是自古以来就有的现象，需要人们客观、理性地思考和面对。



《SCIENCE CHINA—
Earth Sciences》
2016年1月

本期封面报道介绍了中美学者就气溶胶与中国季风相互作用研究的综述文章，指出人类活动导致某些气溶胶增加，使得中国东部灾害更频繁发生。

Advances in Meteorological Science and Technology (Bimonthly)

Vol.6 No.1, February, 2016

Supervisor China Meteorological Administration (CMA)
Sponsor CMA Training Centre
Published by Editorial Office of Advances in Meteorological
Science and Technology

Honorary Editor Chou Jifan, CMA Training Centre

Editor-in-Chief Xu Xiaofeng, CMA

Associate Editors

Xiao Ziniu
Zhai Panmao
Luo Yunfeng
Wang Huijun
Li Weijing
Hu Yongyun
Tan Zhemin
Fei Jianfang
Guan Zhaoyong
He Jianxin
Huang Jianping
Liao Xiaohan
Lü Shihua
Jia Pengqun (executive)

Managing Editors

Cheng Xiuhu, Gao Xuehao, Gong Jiandong, Guo Xueliang, Li Bai, Li Guoping, Ni Yunqi, Qu Xiaobo, Ren Guoyu, Ren Xiaobo, Shen Wenhai, Wang Weidan, Wu Bingyi, Yang Xiuqun, Yu Xiaoding, Zhang Chaolin, Zhang Peng, Zhang Qingyun, Zhao Ping

Editors

Bi Baogui, Chen Yunfeng, Chen Zhenlin, Cui Chunguang, Cui Jiangxue, Dong Wenjie, Feng Guolin, Guo Hu, He Jinhai, He Qing, Hu Xin, Hu Yurong, Hu Yuewen, Jiang Tong, Lei Xiaotu, Li Hui, Li Jiming, Li Liangfu, Li Yaohui, Li Yueqing, Liang Xudong, Liu Jingmiao, Liu Liping, Liu Shi, Lu Naimeng, Lu Riyu, Luo Bing, Luo Yali, Ma Li, Ma Shuqing, Ma Yaoming, Mao Hengqing, Peng Yinghui, Pu Yifen, Shi Guangyu, Song Yan, Tang Xu, Tian Hong, Wan Qilin, Wang Bin, Wang Donghai, Wang Jianlin, Wang Xiaoyun, Wang Yanqing, Wang Yingchun, Wang Yuan, Wang Zaizhi, Wang Zifa, Wen Min, Wen Hongtao, Wu Liguang, Xie Zhihui, Yan Guanhua, Yang Song, Yang Zhaoming, Yao Xuexiang, Yi Lan, Zhai Wuquan, Zhang Hua, Zhang Lixiang, Zhang Xiaoling, Zhang Yuetang, Zhao Guangzhong, Zhou Dingwen, Zhou Lingxi, Zhou Xianxin, Zhu Dingzhen, Zhu Xiaoxiang, Zhu Yande, Zou Liyao

Overseas Editors

Chen Jingming, Li Jun, Liu Zhengyu, Jin Feifei, Wang Bin, Weng Fuzhong, Zhang Dalin, Zhang Guangjun, Zou Xiaolei

Editorial office

Zhang Meng, Hou Meiting, Qin Lianxia, Ji Wenbin, Chen Zhongmei

Add: CMA Training Centre, 46 Zhongguancun Nandajie,
Beijing 100081, China
Tel: +86-10-68409927/68409933
Email: amst@cma.gov.cn
http://library.cma.gov.cn/amst
http://weibo.com/2115232930/profile

Printed by

Beijing Jinjishi Printing Limited Liability Company

ISSN 2095-1973
CN 10-1000/P
RMB 30.00

Main Contents

1 Xu Xiaofeng/ Message from the Editor-in-Chief

Article

- 6 Tao Zuyu, Zhao Cuiguang, Chen Min/ The Necessity of Statistical Forecasts
- 14 Cheng Zhigang, Yang Xinyue, Dong Siyan, Sun Chen, Wu Yang/ Vegetation Coverage Changes in Chengdu Based on DMSP/OLS and SPOT-VEG NDVI
- 21 Liu Yongping, Zhang Xiaoxiao, Xue Feng/ Interdecadal and Interannual Variabilities of Summer Rainfall in Shandong Province
- 26 Zhao Junping, Liu Hanhua, Zhou Chunyu, Zeng Xinxin/ Analysis on Characteristic and Cause of Abnormal High Temperature in Summer of 2013 in Zhejiang
- 31 Li Yang, Kong Yi, Zhao Xianbin/ A New Method of Meteorological UAV Wind Velocity Resolution Model Design and Simulation
- 37 Liu Haochen, Zhang Shuyu, Zhou Yanyan, Kuang Zhengzhong/ Effects of Simulated Heat Wave and Strong Cooling on Risk Factors for Coronary Heart Disease of Apo E Knockout Mice
- 42 Ding Naiqian, Chen Zhenghong, Yang Hongqing, Xu Yang/ Review of the Research for Wind Power Prediction
- 46 Yang Ping/ Descartes and the Meteorology
- 50 Xiang Yonglong, Wu Yun, Sun Shixing, Fan Yuanyue, Rao Chuanxin/ Evaluation of Three Forecasting Models to Area Rainfall Prediction in Upstream of Yangtze River
- 72 Zhang Peng, Guo Qiang, Chen Boyang, Feng Xuan/ The Chinese Next-Generation Geostationary Meteorological Satellite FY-4 Compared with the Japanese Himawari-8/9 Satellites
- 76 Gu Songyan, Guo Yang, You Ran, Lu Naimeng, Wu Xuebao/ The Performance of Microwave Sounders Board on FY-3C Satellite
- 83 Liao Mi, Zhang Peng, Yang Guanglin, Bai Weihua, Meng Xiangguang, Du Qifei, Sun Yueqiang/ Status of Radio Occultation Sounding Technology of FY-3C GNOS
- 88 Qi Chengli, Gu Mingjian, Hu Xiuqing, Wu Chunqiang/ FY-3 Satellite Infrared High Spectral Sounding Technique and Potential Application
- 94 Cao Dongjie/ The Development of Product Algorithm of the Fengyun-4 Geostationary Lightning Mapping Imager
- 99 Zhao Xiangang, Xie Lizi, Wei Lan, Lin Manyun/ The Development of Computer Network and Storage System in Fengyun Geostationary Meteorological Satellite Ground Segment
- 104 Wang Shupeng, Zhang Xingying, Wang Weihe, Chen Lin, Fang Li/ The Influence of Aerosol Particles on Retrieval Accuracy of CO₂ Concentration Using Near Infrared Bands
- 111 Sun Fenglin, Qin Danyu, You Ran/ Brief Introduction to Research on Spaceborne Synthetic Aperture Radar Retrieval of Precipitation
- 116 Cao Guangzhen, Zhang Peng, Hu Xiuqing, Chen Lin/ Study on the Fusion of Dust Products of Geostationary and Polar-Orbiting Meteorological Satellites Based on Improved Evidence Theory Algorithm
- 120 Lu Naimeng, Gu Songyan/ The Status and Prospects of Atmospheric Microwave Sounding by Geostationary Meteorological Satellite
- 124 Zhang Xiaohu, Lu Feng, Dou Fangli, Xu Jianmin/ Analysis on the Observation Model of Foreign Geostationary Meteorological Satellite
- 129 Gao Hao, Wu Shengli, Zhao Changhai, Fang Xiang, Liu Cheng/ The Application of Charter in Meteorological Disaster Monitoring