

Advances

in Meteorological Science and Technology

气象科技进展

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

No.6

2019年12月20日

第9卷 第6期



吉林人工影响天气

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

王志强 中国气象局气象干部培训学院
 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
 于玉斌 中国气象局
 李维京 国家气候中心
 胡永云 北京大学
 谈哲敏 北京大学
 孙健芳 中国气象局公共气象服务中心
 费建芳 国防科技大学
 赵立成 国家气象信息中心
 张鹏 国家卫星气象中心
 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 中国科学院地理科学与资源研究所
 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	郭虎	郭学良
李柏	李国平	罗云峰	倪允琪	曲晓波
任国玉	任小波	沈文海	王存忠	王怀刚
王卫丹	武炳义	杨修群	俞小鼎	张朝林
张庆云	赵平			

编委 (按音序排名)

毕宝贵	陈镜明	陈峰	陈振林	崔春光
崔讲学	董文杰	杜钧	封国林	何金海
何清	胡欣	胡跃文	姜彤	金飞
雷小途	李集明	李俊	李良福	李耀辉
李跃清	李忠	李旭东	刘晶	刘黎平
刘立成	刘实	刘征宇	卢乃锰	彭宇
罗兵	罗亚丽	马舒庆	马耀明	彭莹
浦一芬	宋燕	索渺清	汤绪	田红
万齐林	王斌	王斌(海外)	王东海	王海元
王建林	王式功	王延青	王迎春	王元广
王自发	卫晓敏	温敏	翁富	吴立
谢志辉	闫冠华	延晓冬	杨武全	杨松
杨昭明	姚学祥	伊兰	翟武	张大林
张广俊	张立祥	张小玲	张跃堂	赵广忠
周定文	周建华	周凌	周信	朱定
朱小祥	朱玉洁	祝燕德	邹立尧	邹晓蕾

编辑部

张萌 侯美亭 秦莲霞 冀文彬 江剑民
 崔晓军

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

本期责任编辑: 侯美亭

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

定价: 30元

目次

第9卷 第6期 2019年12月20日

1 许小峰: 主编语

研究论文

研究进展

- 6 雷小途, 刘伟东, 赵瑞, 闫冠华: 近十年中国气象科技成果概述
- 12 饶莉娟, 高山红, 张恺: WRF模式中不同边界层及云微物理方案对两次黄海海雾个例数值模拟的影响
- 20 赵磊, 高松, 吴钰, 杜钦: 一种中尺度数值预报模式数据并行传输应用研究
- 26 谷秀杰, 冯丽莎, 田力, 董贞花, 王友贺: 2016年冬季河南三次持续污染过程的环流及关键气象要素特征
- 35 樊蕴馨, 徐伟, 莫丽: 2009—2017年上海市雷电活动及灾害时空特征研究

短论

- 40 郭智亮, 高聪晖, 谢文锋, 陈淑敏, 黎伟标: 2005—2017年白云机场能见度变化特征及其与影响因子关系研究
- 44 贺秋艳, 刘越屿, 杨加艳, 郭斌: 湖南省雷电活动及雷电特征分析
- 49 段文广, 刘燕, 段文强, 石永玮, 李秋明, 贾亦阳: VR技术在地面气象观测设备保障技能培训中的应用

专题 基层气象现代化

- 53 崔粉娥, 畅巨峰, 燕成玉, 张晨宇: 一次燕山南麓局地大暴雨的成因分析及数值预报检验
- 61 易志学: 半世纪来贵州雷山降水及气温特征与喀斯特地貌溶蚀性分析

论坛

- 67 尤焕苓, 叶彩华, 古月: 2017年北京马拉松气象影响分析与服务技术模式创新探讨
- 70 崔佳: 气象数据在电视天气预报节目中的多样态呈现

往事钩沉

人物

- 119 贾朋群: 阅读、思考、编程: 现代气象大师的范式——记美国气象学家诺曼·菲利普斯

主编语

人工影响天气作业目前已发展成为我国气象业务的重要组成部分,追溯其起源,由于是一个实践、理论、再实践的不断探索过程,很难确定一个准确的时间节点。从比较正规和有影响力的视角来看,1958年,吉林省实施我国第一次人工增雨作业,开创了我国通过飞机进行人工影响天气试验的先河,被公认为是一个重要的起始点。60余年来,经过几代人工影响天气工作者的不懈努力,吉林人工影响天气事业蓬勃发展,人工影响天气在吉林抗旱增雨、防雹减灾、森林防扑火、水库蓄水和生态文明建设等方面发挥了重要作用。人工影响天气已成为吉林防灾减灾和空中云水资源开发利用的重要手段。基于吉林省气象部门在人工影响天气领域取得的显著成果,本期推出以“吉林人工影响天气”为主题的刊中刊,以期为我国与人工影响天气有关的业务和研究工作提供参考和借鉴。

吉林人工影响天气业务目前已构建了“以开发空中云水资源为核心、以保障粮食安全和生态文明建设为目标、以抗旱增雨和防雹减灾为重点、以科技研发为支撑”的人工影响天气体系(P76)。全国首个人工增雨基地——吉林省白城人工增雨基地(P74),不仅为吉林本省抗旱防火做出了重要贡献,也为其他省份以及重大活动提供了气象保障。除了空中作业以外,吉林省人工影响天气地面业务也不断扩大,如何通过地面业务满足未来发展需求值得进一步关注(P110)。

人工增雨作业方案设计和效果检验是人工增雨作业过程中的两个重要环节。科学合理的作业方案设计(P104)是作业效果的基础,作业是否有效果可以验证作业方案设计的合理性。吉林省建立了4万 km²的外场试验效果检验区(P77),以开展相应的作业效果评估。新兴的技术也为提高

人影业务水平带来了契机,比如物联网技术的应用有效提升了人工影响天气装备管理的信息化和自动化水平,促进了人工影响天气业务的科学化和规范化水平(P100)。

人工影响天气本质上是人为影响大气的过程,特别是云微物理过程。当海洋上低层大气中的水汽发生凝结时,就可能产生一种影响海上交通运输、沿岸的生产与生活的天气现象——海雾。本期文章(P12)利用数值模拟方法,探讨了不同边界层及云微物理方案对两次黄海海雾个例的影响,为理解海雾过程提供了参考。与低层大气气溶胶微物理属性有关的另一现象就是灰霾。随着灰霾天气出现越来越频繁,灰霾的研究已成为一个热点,导致灰霾的两大重要因素是污染物排放和大气的稳定度(P26),但天气条件不应是灰霾频发的借口,减少污染物排放才是治霾之本。

本期“往事钩沉”栏目(P119)关注了美国气象学家诺曼·菲利普斯(1923—2019),这位现代气象学的“巨人”,在相关新闻里他也被称为“理论气象先行者,展示了数值模式可以预报天气、并开发了首个地球气候大气环流模式”。

吉林省人工影响天气办公室作为本期“刊中刊”的支持单位,在论文组织、图说设计等方面做了大量工作;来自中国科学院东北地理与农业生态研究所、东北师范大学、南京大学、南京信息工程大学、国防科技大学和中国气象局系统等机构的专家参与了论文的评审,并带来了独特的审视人影工作的视角。借此机会,向上述及所有参与此项工作的单位和学者给予的支持表达衷心的感谢。

许小峰



- 74 张立友: 耕云播雨 初心为民
- 76 胡靖彪, 李旭, 丁瑶, 王德鑫: 六十年来敢争先 新时代里谱新篇——吉林省人工影响天气发展巡礼

研究论文

研究进展

- 82 李薇, 谷笑楠, 胡靖彪, 王超群, 齐颖, 汪晓梅: 不同情形下温度低于0℃时饱和水汽压的计算
- 86 关志宇: 白山市人工影响天气作业能力发展沿革及效益分析
- 91 于翠红: 吉林省区域自动气象站雨量数据的质量分析与评估
- 95 吴曼丽, 陈力强: 一次东北冷涡天气过程雷电气象潜势条件诊断分析

技术报告

- 100 张小培, 李宏宇: 物联网技术在人工影响天气业务中的应用

- 104 孙海燕, 谷笑楠, 王旗, 齐彦斌: 吉林省一次飞机增雨过程方案设计及效果分析
- 110 邢凤娟, 许乐, 穆清晨, 王德鑫, 崔红: 吉林省人工影响天气地面业务现状及发展需求分析

论坛

- 113 谢静芳, 李云峰: 发展精细化行业气象服务的初步思考

图说 吉林人工影响天气

- 78 李旭, 谷笑楠: 前进中的吉林人影
- 80 李旭, 王超群: 东北区域人工影响天气中心进展

科学观察

- 2 读图 数字 榜单

阅读

会评

P2

- 122 贾朋群, 温康民: 早期定量气象观测价值的再开发: 从ACRE说开去



信息

- 19/34/39/48 李婧华/田晓阳/郑秋红/张定媛: NOAA推出四项新战略: 无人系统、组学、云服务、AI

- 125 高被引论文选编
- 126 编辑选编
- 128 涓流细语
- 封3 媒体扫描

封3





SMOS卫星：在轨探测10年

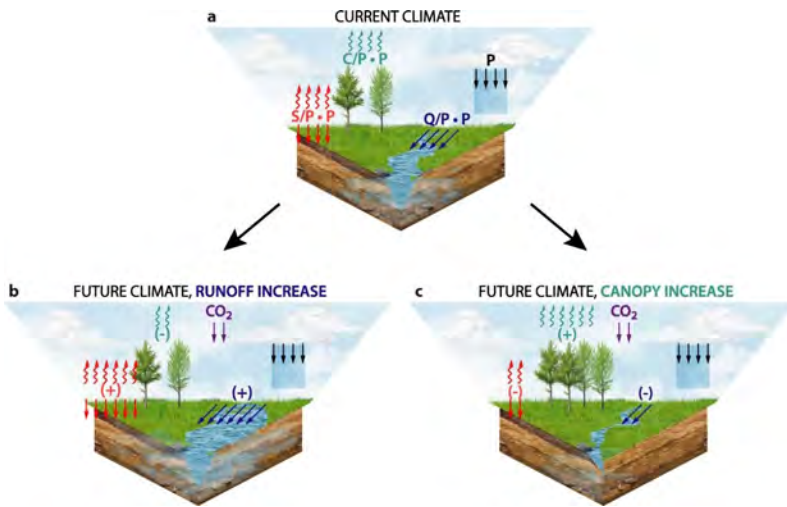
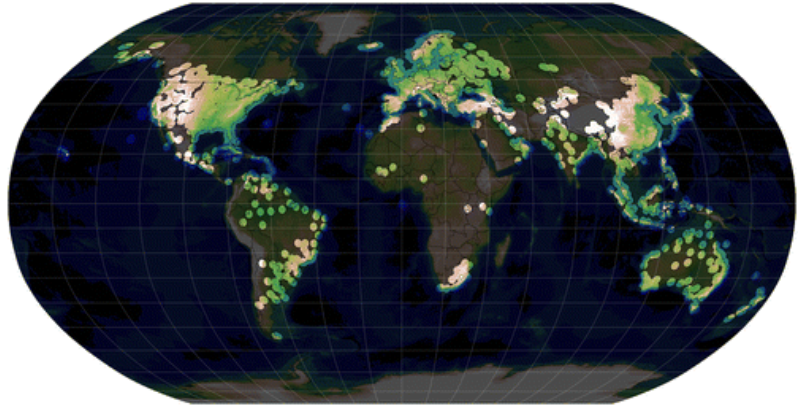
土壤湿度和海洋盐分（SMOS）卫星在轨10年，不仅超出了计划服役时间，还超额完成了其原始科学目标。SMOS探测的土壤湿度和海水盐分均是全球水循环中的重要要素，10年来SMOS得到的数据，推进了我们对水循环和地球表面与大气交换的认识。

来源：ESA

全球气象雷达覆盖

芬兰等多国学者在了一项雷达数据应用的最新研究中，给出了目前全球气象雷达覆盖图。图中，假定每个雷达的有效探测半径为200 km而不考虑雷达的带宽、极化和局地地形等。图中标注的雷达信息来自WMO数据库，但该数据库并非包括了所有业务雷达。作者补充了数据库以外来自中国、菲律宾、越南和缅甸等国家的部分雷达信息。

来源：BAMS



气候变化让北美更加干燥

全球水通量大约有60%通过植物的蒸腾作用进入大气。植物就像连接土壤和大气的“吸管”，控制着水如何从陆地流向大气。美国哥伦比亚大学的学者在了一项最新的研究中认为，植被是决定陆地上能留下多少水的重要因素。他们的研究揭示了二氧化碳和全球变暖的综合效应如何改变“吸管”的大小？图中给出不同气候条件下降水的分割情景。

来源：Nature Geoscience

数字

9

经联合国教科文组织政府间海洋学委员会批准，我国承建的南中国海区域海啸预警中心11月5日启动业务化运行，为南中国海周边中国、文莱、柬埔寨、印尼、马来西亚、菲律宾、新加坡、泰国和越南等9个国家提供全天候地震海啸监测预警服务。

12个月

德国波茨坦气候影响研究所的学者，日前借助基于对整个太平洋地区各监测点气温变化之间联系进行分析的模型，提前12个月做出下一个厄尔尼诺将于2020年底达到顶峰，可能导致全球平均气温升幅在2021年创下新记录的预测。

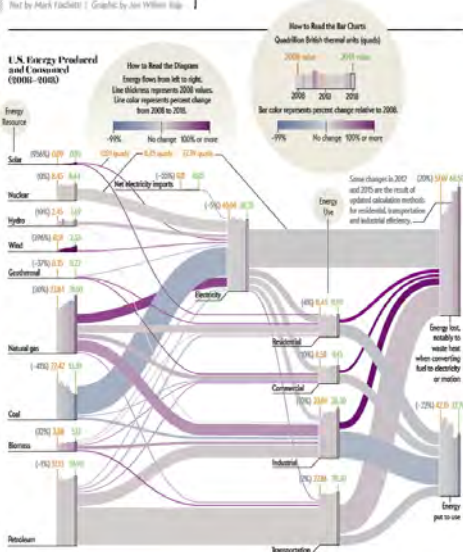
49%

研究者追踪了386位气候变化异见者（包括学者、科学家、政治家和商业人士）和同样数量支持气候变化有人为因素的气候科学家的数字足迹，发现前者在媒体报道中出现的频率较后者高出49%，但两个群体在主流媒体中的能见度，差异则降到1%。

国际“人工影响天气”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	Satellite-based insights into precipitation formation processes in continental and maritime convective clouds	Rosenfeld, D	Bulletin of the American Meteorological Society	388
2	The effects of desert particles coated with sulfate on rain formation in the eastern Mediterranean	Levin, Z	Journal of Applied Meteorology	365
3	Rainfall modification by major urban areas: Observations from spaceborne rain radar on the TRMM satellite	Shepherd, JM	Journal of Applied Meteorology	286
4	An unattended cloud-profiling radar for use in climate research	Moran, KP	Bulletin of the American Meteorological Society	259
5	A steerable dual-channel microwave radiometer for measurement of water-vapor and liquid in the troposphere	Hogg, DC	Journal of Climate and Applied Meteorology	190
6	Storm water pollution in the urban environment of Genoa, Italy	Gnecco, I	Atmospheric Research	134
7	Geoengineering Earth's radiation balance to mitigate CO ₂ -induced climate change	Govindasamy, B	Geophysical Research Letters	147
8	Precipitation modification by major urban areas	Huff, FA	Bulletin of the American Meteorological Society	136
9	A review of cloud seeding experiments to enhance precipitation and some new prospects	Bruintjes, RT	Bulletin of the American Meteorological Society	105
10	Calculations pertaining to hygroscopic seeding with flares	Cooper, WA	Journal of Applied Meteorology	92

GRAPHIC SCIENCE



2008—2018年美国能源生产和消费账本

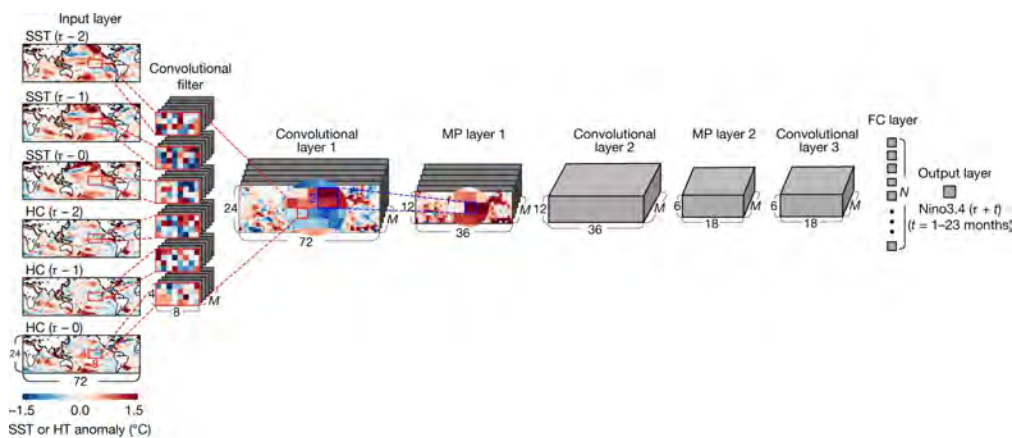
Scientific American杂志最新一期在科学读图栏目给出2008—2018年美国能源在生产 and 消费两端的情景，指出过去十年能源清洁化的趋势如能维系，能源经济走向绿色的步伐会加快。

来源: Scientific American

来源: SCI-E数据库

检索时间: 2019年11月24日

侯美亭 提供



用AI技术预报ENSO

韩国和中国学者在最新研究中，通过训练卷积神经网络 (convolutional neural network, CNN) 开展多年ENSO预报。图中给出CNN模型构架，包括1个输入层 (预报器)，3个卷积层，2个MP (max-pooling, 最大池化) 层，1个FC (fully connected, 完全连接) 层和1个输出层 (预报值)。

来源: Nature

1.6倍

学者通过建立埃博拉病毒病溢出的多元数学模型进行分析发现，在所有气候变暖的情景下，可能爆发埃博拉病毒病的地区将会增加，尤其是非洲中西部以前没有出现过疫情的地区，溢出事件导致的爆发可能性会增加1.6倍。

10%

美国一对靠在受到干旱威胁的加州种植水果和酿酒发家的亿万富翁夫妇，向加州理工学院捐款7.5亿美元，用于气候变化和可持续性研究。这笔捐款将用于气候科学、能源、生物燃料和可分解塑料等领域的研究。

3.5级

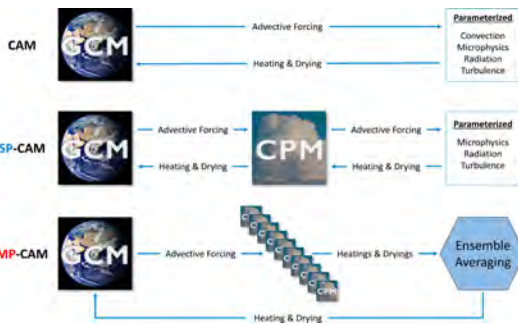
美国地震学者在最新的研究中指出，强大飓风产生的波浪可能猛击海底，带来“风暴地震”，这种背后的驱动力为飓风或大风暴形成深涌的海浪，能造成强度3.5级地震，虽不被人们感知，却可被地震仪器探测到。



风能科学中的巨大挑战

美国和丹麦等多国学者，在最新的研究中梳理了风能作为一门交叉学科，需要面对的科学问题，并阐述了该领域面对的巨大挑战。如图，风能科学问题的挑战，在空间尺度上从全球天气系统到风机机翼边界层，在时间上从天气的季节扰动到次秒级动力控制，还包括电力生产与需求之间的平衡等。

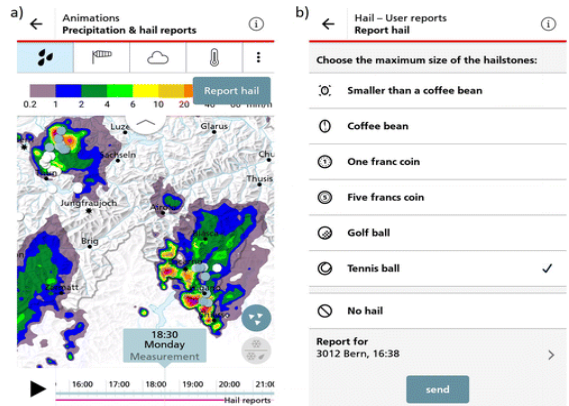
来源: Science



多实例超级参数化

英国和美国学者在最新研究中，提出了多实例超级参数化 (Multiple - Instance Superparameterization) 的概念，并架构了超参数化CAM模式 (SP-CAM) 和多实例超参数化CAM (MP-CAM)。图中给出CAM、SP-CAM和MP-CAM 等3种模式的原理图。其中SP-CAM参数化的第2行发生在CPM (云解析模式) 尺度; 同样的CPM尺度参数化也发生在MP-CAM集合平均之前。(图中简写词: GCM = global circulation model; CPM = cloud-permitting model; CAM = Community Atmosphere Model; SP-CAM = superparameterized CAM; MP-CAM = multiple-instance SP-CAM)。

来源: JAMS



众包用于冰雹大小观测

通过众包方式获得冰雹大小观测数据，是瑞士学者最新创新活动之一。从2015年5月以来，活动通过App用户获得了59000个冰雹大小的数据。左图为2018年5月7日雷达降水观测与众包冰雹报告 (蓝白色点) 分布动画截图，右图为用户报告APP操作屏幕，其中冰雹大小用网球、高尔夫球和铅笔大小作为标尺，方便用户给出冰雹大小的准确信息。

来源: BAMS



观测海洋生物的运动

以保护海洋生物为目的的海洋环流观测已经渐成规模，包括直接和间接技术在内的多种技术在应用中。由于一些方法仅适用于某些物种，研究团队一般采用多种方法，监测海洋生物的运动。图中展示了跟踪、遗传、生物地球化学和模拟等方法以及这些方法上的联系。

来源: The Scientist

数字

1% 欧盟的一项新的数据库数据显示，只要将1%的土地转化为可再生能源生产，就能够满足欧盟的电力消费需求，欧盟可再生能源的生产潜力巨大。

40% 全球水稻种植面积达6400万公顷，年产7亿吨。到2100年世界人口将达100亿，这意味着50亿人的饮食依赖水稻，但科学家发现随着全球变暖，微生物能够更大程度地破坏土壤中氮的稳定性，导致那时水稻产量减少近40%。

6米 丹麦日德兰半岛的一处灯塔，1900年启用时，位于距离海岸线200米处，现在距离海岸仅6米，不得不进行迁移。



美国海军帮助NOAA维护海洋观测设施

美国一家研究机构，战略风险委员会在最新发表的关于气候变化国家安全卫星的分析报告中，利用这张美国海军士兵修理NOAA浮标站的图片，说明应对气候变化这一史无前例的风险，需要全国上下合作应对才是正确的选择。

来源：The Council on Strategic Risks

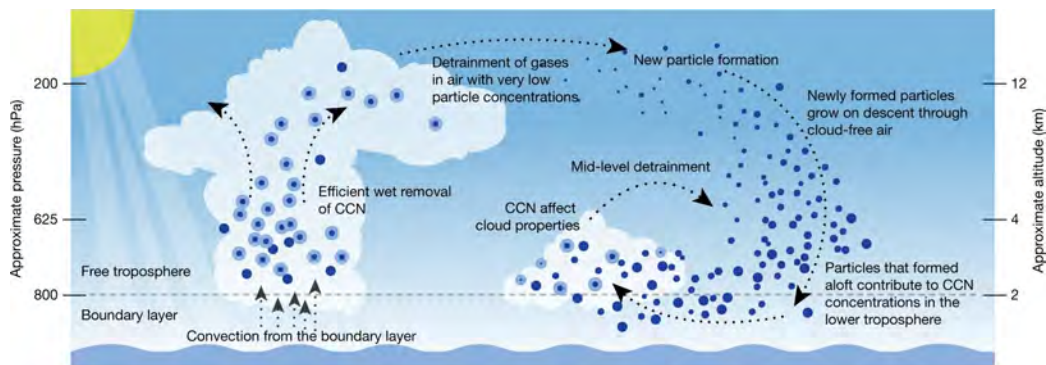
中国“人工影响天气”主题被引频次最高的前10篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引频次
1	中国近40年来雾的研究	李子华	气象学报, 2001, (5)	365
2	三维冰雹云催化数值模式	洪延超	气象学报, 1998, (6)	167
3	冰雹形成机制和催化防雹机制研究	洪延超	气象学报, 1999, (1)	131
4	我国的主要气象灾害及防御对策	辛吉武	灾害学, 2007, (3)	100
5	华北地区层状云微物理特性及气溶胶对云的影响	黄梦宇	南京气象学院学报, 2005, (3)	97
6	我国生物冰核研究进展	孙福在	中国农业科学, 1996, (5)	83
7	层状冷云数值模式	胡志晋	气象学报, 1983, (2)	83
8	近年来云降水物理和人工影响天气研究进展	雷恒池	大气科学, 2008, (4)	81
9	Parsivel激光降水粒子谱仪及其在气象领域的应用	濮江平	气象与环境科学, 2007, (2)	75
10	对人工影响天气若干问题的探讨	毛节泰	应用气象学报, 2006, (5)	73

来源：CAJD数据库

检索时间：2019年11月26日

张萌 提供



热带云凝结核的新来源

美国和奥地利等国学者在一项研究中，揭示了热带云凝结核（CCN）的新来源。图中左侧表示深对流云抬升边界层空气。较大粒子（CCN；深蓝色圆）被激活产生云滴（深色中心的浅蓝圆），并通过高空降水和湿沉降排除（“湿移除”）。可溶性差的气溶胶前体逸出、氧化和形成新粒子，下沉时通过凝结和凝固生长，很多在到达边界层顶之前达到CCN尺度。这些CCN可充分影响云属性。

来源：Nature

1/3 联合国粮农组织最新发布的《2019世界粮食及农业状况》显示，世界上每年约1/3的粮食被损失或浪费，其中14%的粮食在从生产至零售环节之前就损失了。

7.6% 联合国环境规划署最新发布的《排放差距报告》表明，未来10年全球碳排放量需每年下降7.6%才能实现1.5℃温控目标，这需全球整体减排力度在现有水平上至少提升5倍。

6% 巴西学者利用2000—2016年林火事件、烟羽流动、降水和冰川融化数据进行了模拟研究，发现2007—2010年亚马孙流域火灾严重时，黑炭和粉尘共同作用可使得年冰川融化率增加6%。

近十年中国气象科技成果概述

雷小途^{1, 2} 刘伟东^{2, 3} 赵瑞² 闫冠华²

(1 上海市气象局, 上海 200030; 2 中国气象局科技与气候变化司, 北京 100081; 3 北京市气象局, 北京 100089)

摘要: 利用中国气象局气象科技管理信息系统的信息数据, 对2005—2017年我国气象领域科技成果的类别、产地、所属学科、获奖情况及资助项目来源等基本特征进行了初步分析。年均600余项科技成果的产出, 充分体现了气象事业的科技型特点; 科技成果认定、中试和业务准入等管理办法的相继出台, 促进了近年来科技成果的爆发式增长, 也凸显了加强科技成果管理的必要性和重要意义; 从成果类型及获国家级科技奖情况看, 加强气象学科的基础理论研究和气象科技的原始创新仍任重道远。

关键词: 气象, 科技成果, 综述, 转化

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.06.001

An Overview on the Achievements of Meteorological Science and Technology in China

Lei Xiaotu^{1, 2}, Liu Weidong^{2, 3}, Zhao Rui², Yan Guanhua²

(1 Shanghai Meteorological Service, Shanghai 200030 2 Department of Science and Climate Change of China Meteorological Administration, Beijing 100081 3 Beijing Meteorological Service, Beijing 100089)

Abstract: Based on the information of the Meteorological Science and Technology Management Information System of the China Meteorological Administration, this paper preliminary analyzes the basic characteristics of the meteorological research achievements (MRA) in 2005-2017, including the category, origin, subject, awards and the source of funded projects. The results show that on average more than 600 MRA a year fully reflects the scientific and technological characteristics of meteorological services. The successive introduction of management measures such as the identification, test bed, and operational access has promoted the explosive growth of MRA in recent years. It also highlighted the necessity and significance of strengthening the management of MRA. On the other hand, from the types of MRA and the national science and technology awards, much still remains to be done in terms of basic theoretical research and original innovation on meteorological science and technology.

Keywords: meteorology, meteorological research achievement, overview, research to operation

0 引言

科技成果是指通过科学研究与技术开发所获得的、具有学术意义和实用价值的创造性知识产品, 其表现形式主要包括: 公开发表的论文论著、拥有著作权的软件或专利、正式颁布的标准及经过鉴定或认定的科研成果^[1]。近年来, 中国气象局还把在推进气象现代化建设中形成的业务技术报告、决策服务材料、发展规划、软科学研究报告及在日常气象业务和服务工作中建立的业务系统和平台(含研发的仪器设备)、数据集、技术方法和指标、科普作品等, 也一并纳入科技成果的范畴进行统一管理。

为提高生产力水平而对科技成果所进行的后续试

验、开发、应用、推广直至形成新技术、新工艺、新材料、新产品, 发展新产业等活动, 即为科技成果的转化^[2]。

为促进科技创新和成果转化, 美国早在1986年和1997年先后发布《联邦技术转移法》和《联邦技术转让商业化》, 欧盟则发布了《促进科学和产业合作研究与知识扩散指南》。我国除序列性的五年发展计划外, 早在改革开放初期, 就提出了“科学技术是第一生产力”, 近年来又发布《国家创新驱动发展战略纲要》《中国制造2025》和营造“大众创业、万众创新”的社会创新氛围, 极大地激活了科技创新潜力, 科技论文论著和技术专利等科技成果呈“井喷”态势。此外, 我国还于1996年发布并于2015年修订了《中华人民共和国促进科技成果转化法》、2016年发布《实施促进科技成果转化法若干规定》和《促进科技成果转化行动方案》、2017年发布《国家技术

收稿日期: 2018年11月20日; 修回日期: 2019年5月29日
第一作者: 雷小途(1968—), Email: leixt@typhoon.org.cn
通信作者: 闫冠华(1968—), Email: yangh@cma.gov.cn

转移体系建设方案》等，促进了我国科技成果的转化和应用^[3-4]。

自2006年国务院发布《关于加快气象事业发展的若干意见》以来，中国气象局与科学技术部等联合印发《气象科学和技术发展规划（2006—2020）》和《国家气象科技创新体系建设意见》，制定《气象科技创新体系建设指导意见（2014—2020年）》《国家气象科技创新工程（2014—2020年）实施方案》，并于2013年启动“天气、气候、应用气象和综合气象观测四项研究计划（2013—2020年）”等，有效整合了部门内外的气象科技资源，促进了气象科技成果的不断涌现^[5-8]。此外，为促进气象科技成果转化，中国气象局创建了“天气预报”和“气候预测”等10个气象科技成果中试基地。目前，中国气象局已建立了气象科技成果的认定、登记、中试、业务准入等较完整的流程。

本文概述了近十几年我国气象领域登记在册的主要科技成果，旨在推介并促进气象科技成果的转化应用、更好地发挥其在提升我国防御气象灾害能力方面的贡献。

1 数据来源

本文使用的气象科技成果信息主要取自中国气象局于2012年创建（中国气象局科技与气候变化司管理委托气象干部培训学院运行保障）的气象科技管理信息系统（简称“科技管理系统”，<http://www.cmakjgl.cn>），该系统是中国气象行业科技成果发布、展示和交流服务的主要信息平台，目前已收录2005—2017年的科技成果8843项（含专利104项、著作权软件362个和标准2059个），另含登记的发表论文和论著。

虽然论文是科技成果的重要表现形式，但由于基于论文论著的各类综述和分析比较多，因此本文对气象科技成果的描述和分析不包括论文和论著。

2 年际分布及成果类别

大气科学是研究大气中的各种现象及其演变规律并在此基础上为人类服务的一门学科。2005—2017年，我国气象科学研究领域共产出8843项科技成果，年均680.2项，成果丰硕，凸显我国气象事业的科技型特点。

2.1 年际分布特征

从历年登记的气象科技成果数（图1）可见，各年产出（登记）的成果数差别很大，最多的2017年产出近1600项，是最少年2005年146项的近11倍（值得注意的是，或许仍有不少成果尚未在科技管理系统进行登记，特别是系统上线之初）。

总体而言，自2005年以来，我国的气象科技类成果数量呈现指数增长趋势，其中自2014年前后起表现

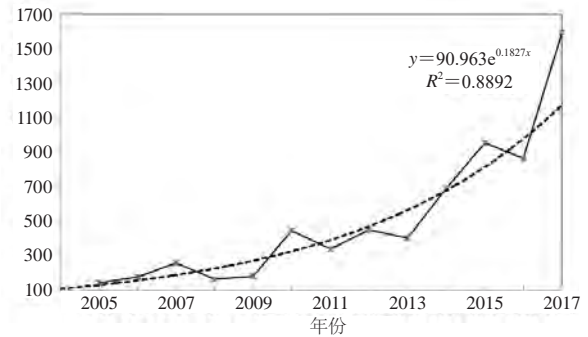


图1 2005—2017年我国气象科技成果的历年分布（虚线—年成果数的变化趋势）

Fig. 1 Number of Chinese science and technology achievements in the meteorological area between 2005 and 2017 (Dotted line represents the temporal trend)

出爆发式增长的态势，这或许与2015年前后中国气象局发布的《科技成果认定办法》等不无关系，也表明加强对科技成果的规范和科学管理十分必要和重要。

2.2 成果类别特征

科技成果按其性质分为基础理论类成果、应用技术类成果和软科学类成果三大类。其中，基础理论成果，是指在基础研究和应用研究领域取得的新发现、新学说。应用技术成果，是指在科学研究、技术开发和应用中取得的新技术、新工艺、新产品、新材料、新设备和计算机软件等。软科学成果，是指对科技政策、科技管理和科技活动的研究所取得的理论、观点和标准等。

2005年以来，我国8843项各类气象科技成果中，应用技术类成果达6233项，约占总成果数的70.5%，基础理论类成果419项，约占总成果数的4.7%（图2）。这客观反映了近十几年我国气象科学研究紧紧围绕气象现代化建设需求，开展以应用业务技术为主、基础

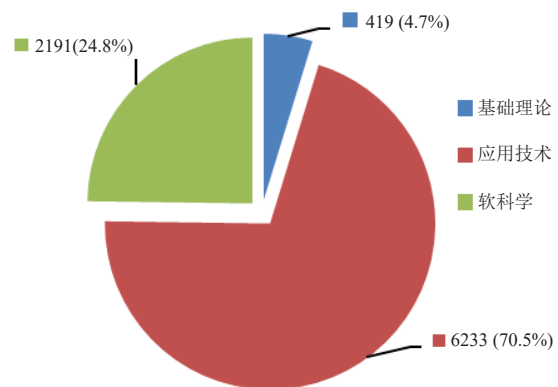


图2 2005—2017年我国各类气象科技成果分布
Fig. 2 Distribution of different categories of Chinese science and technology achievements in the meteorological area during 2005—2017

理论为辅的研究特点。值得注意的是，软科学类的成果占总成果数的近4成，其中包括国家标准和行业标准共计2059个，这与气象事业的规范化和标准化要求及特点分不开，也是中国气象局始终重视行业规范和标准建设的结果。

另一方面，虽然近年来中国气象局十分重视大气科学的基础理论研究及涉及体制机制改革的软科学研究，但总体而言，基础理论及软科学类成果总体仍略显偏少（图3）。其中基础理论类成果，年均仅32.2项，最多的2017年仅为102项，最少的2008年则为0项，此外2009和2006年也只有3项和4项；体制机制及政策类软科学成果（即标准类除外）则更少，年均仅约10项，最多的2017年也只有45项，最少的2009年为0项（2013年前均不足10项）。因此，基础理论研究及软科学研究仍应当切实加强。



图3 我国各类气象科技成果的历年分布 (2005—2017年)
Fig. 3 Annual number of different categories of Chinese science and technology achievements in the meteorological area from 2005 to 2017

3 成果产地及资助项目

3.1 成果产地分布特征

从气象科技成果的产地分布看（图4a），中国气象局所在地北京产出的气象科技成果最多，约占全国总成果数的9.3%，其次是广东和浙江，分别占7.1%和6.5%，安徽、福建、上海、江苏、湖北和山东省的产出也均占全国总数的4%以上。

此外，从地区分布看，华东是主产区（占全国的33%），其次是华北（占22.1%）和华南（占11.1%），东北、华中、西南、西北相对较少，分别占总成果数的7.7%、7.7%、7.4%和10.9%。

从气象部门科技成果的产出机构看（图4b），气象部门的科技成果主要产自中国气象科学研究所和八个专业研究所（即“一院八所”），约占气象部门总成果数的71.4%，充分显现“一院八所”改革以来其气象部门科研重地的贡献和价值。

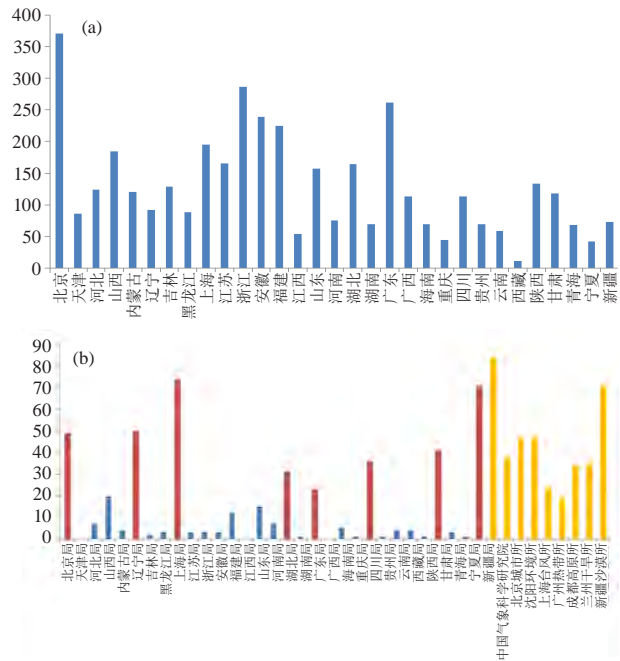


图4 2005—2017年全国各地 (a) 和全国气象部门 (b) 产出的科技成果

Fig. 4 (a) Number of science and technology achievements of the meteorological area in different provinces from 2005 to 2017; (b) Number of science and technology achievements of the meteorological area in different departments from 2005 to 2017

3.2 资助项目

从科技成果的资助项目来源看（图5a），产自“部门计划”的气象科技成果最多（占比约32.0%），产自“国家计划”的成果其次（约占19.1%）。其中，“部门计划”中约82%的来自中国气象局。中国气象局的计划中，又以“气候变化专项”和“关键技术集成与应用”，产出了约半数的应用技术类成果。国家计划资助的气象科技成果中，约半数产自于“公益性行业（气象）科研专项”和“国家自然科学基金”。这些统计数据，客观反映了近年来中国气象局（科技与气候变化司）主导的“气候变化专项”和“公益性行业（气象）科研专项”等的成效和影响力。

此外，值得注意的是，有约18.3%（仅次于“部门计划”和“国家计划”）的成果源自科技人员兴趣的自选项目（或没有项目资助），表明气象领域的科技人员具有相当高的投身科学研究和技术开发的自觉性。

由图5b可见，在所有的气象科技成果中，有约半数的为独立研究完成，约8%是与院校合作研究完成的，有2%和1%分别是与企业 and 国（境）外机构合作研究完成的。充分体现了气象部门强劲的独立研发能

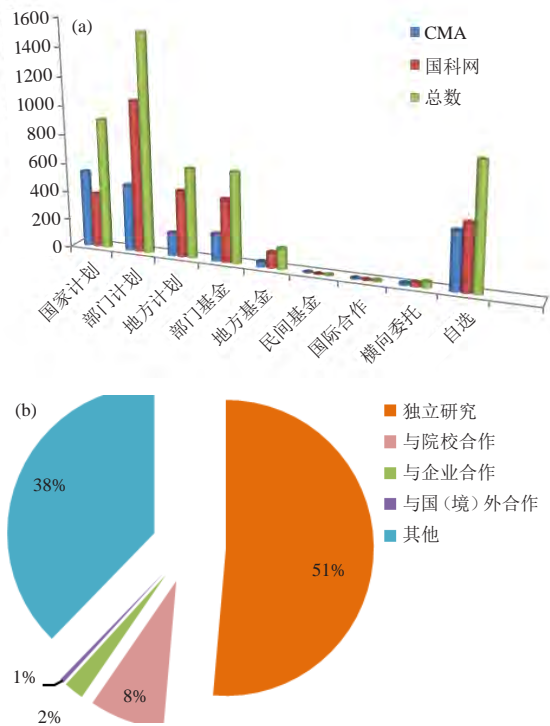


图5 气象科技成果的资助项目 (a) 和研究形式 (b)
Fig. 5 Funding resources (a) and research channels (b) for science and technology achievements

力和气象事业科技型的特点，也反映近年来中国气象局大力推进的“局校合作”“局企合作”和国际合作等在促进气象科技创新中的作用正逐渐显现。

4 成果所属的学科分布

图6给出了2005—2017年气象科技成果所属的学科分布，应用气象领域的科技成果最多（约占41.9%），其次为天气领域（约占31.3%），再其次为综合观测及气候领域，分别占总成果数的11.7%和8.7%。

应用气象科技成果，主要分布在农业气象、环境气象、交通气象、电力气象、旅游气象、防雷、水产养殖、气候资源利用及风险分析等领域。天气领域的科技成果，主要涉及数值天气预报技术和模式系统、客观业务预报技术及系统改进、台风暴雨和强对流等极端天气的形成机理及监测预报技术、高温和干旱、青藏高原和季风水汽循环、大风和低温等。综合观测领域的科技成果，包括卫星、雷达、风廓线、微波辐射、雨滴谱、自动观测等多源资料的获取、质量控制及数据库、数据融合及天气系统自动识别技术等。气候领域的科技成果，涉及气候数值预报技术及模式系统、极端气候事件监测识别及短期气候预测、气候变化及其影响评估、气候区划和气候可行性论证等。

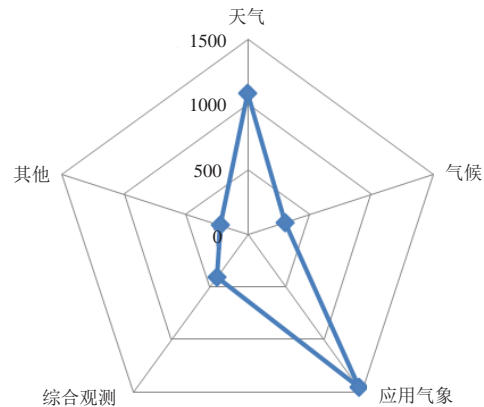


图6 各学科领域的气象科技成果分布
Fig. 6 Distribution of science and technology achievements along different disciplines

上述气象科技成果的分布，客观反映了气象与社会经济发展各行各业的紧密关系，也大致体现了天气预报、综合观测及气候预测等相关科研业务在气象事业中的重要性。

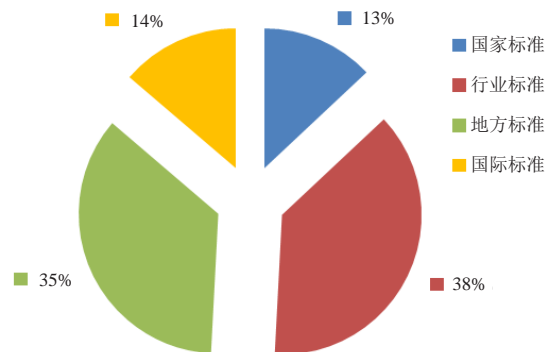


图7 2005—2017年各类气象标准数分布
Fig. 7 Number of different levels of meteorological standard released from 2005 to 2017

2005—2017年的气象科技专利主要集中在综合观测学科领域，特别是有关气象观测设备和技术改进的实用新型专利、发明专利及外观设计型专利。2005—2017年的气象软件著作权主要是业务系统和平台，包括天气预报、气候监测预测、农业气象等应用气象领域的业务系统。2005—2017年的气象标准类成果相对较多，包括“热带气旋等级”等国家标准194项、“地面气象观测规范”等行业标准564项、“山川秀美工程治理前后县域气候变化评价规定”等地方标准528项、“雷电损害危险评估”等国际标准205项，分别占气象领域标准总数的13%、38%、35%和14%。

5 获奖情况

获奖是科技成果的创新性和潜在应用价值被认可

的重要标志之一，气象科技成果除投入业务应用外，也有不少获奖。据不完全统计，2005—2017年，气象类科技成果共获国家级奖20项（年均1.4项）、省部级奖244项（年均17.4项）。

5.1 国家级奖

在2005—2017年所获的20项国家级奖中，以国家科技进步奖为主，共17次（占85%），国家自然科学奖3次（占15%），获奖年份等主要信息见表1。

由表1可见，2005—2017年，气象部门获国家级科技奖的科技成果年均约1.5项，获奖成果涉及卫星和遥感等监测技术、数值预报和人机交互等预报关键技术、暴雨和干旱等极端天气、沙尘和防雷、海气相互作用和气候预测、农业气象和生态、碳收支和气候变化、奥运和人工增雨等气象监测预报和服务的众多核心业务领域。这也是近年来中国气象科技创新发展取得显著进步的有效印证之一。

值得注意的是，气象部门作为第一获奖单位的仅12项（年均0.86项）且均为“二等奖”。据悉，最近一次获国家级一等奖的气象科技成果是2003年国家气候中心主持的“我国短期气候预测系统的研究”（获国家科学技术进步一等奖），距今已15年。此外，至今气象部门没有获得过“国家技术发明奖”。

值得注意的，气象部门作为第一获奖单位的仅12项（年均0.86项）且均为“二等奖”。据悉，最近一次获国家级一等奖的气象科技成果是2003年国家气候中心主持的“我国短期气候预测系统的研究”（获国家科学技术进步一等奖），距今已15年。此外，至今气象部门没有获得过“国家技术发明奖”。

表1 2004—2017年获国家级奖的气象类科技成果
Table 1 National awards received in the meteorological area during 2005 to 2017

成果名	奖项名称	等级	气象部门获奖最高排名单位（排名）	获奖年份
全球变化热门话题丛书	国家科学技术进步奖	二	国家气候中心（1）	2005
新疆生态安全遥感监测与信息系统的技术集成和应用	国家科学技术进步奖	二	新疆维吾尔自治区气象卫星遥感中心（5）	2006
我国梅雨锋暴雨遥感监测技术与数值预报模式系统	国家科学技术进步奖	二	中国气象科学研究所（1）	2006
海陆气相互作用及其对副热带高压和我国气候的影响	国家自然科学奖	二	中国气象科学研究院（4）	2007
我国新一代多尺度气象数值预报系统	国家科学技术进步奖	二	中国气象科学研究院（1）	2007
风云二号C业务静止气象卫星及地面应用系统	国家科学技术进步奖	一	国家卫星气象中心（2）	2007
气象防灾减灾电视系列片：远离灾害	国家科学技术进步奖	二	中国气象局公共气象服务中心（1）	2008
人工增雨技术研发及集成应用	国家科学技术进步奖	二	中国气象科学研究所（1）	2008
奥运气象保障技术研究及应用	国家科学技术进步奖	二	国家气象中心（1）	2009
中国大陆地碳收支评估的生态系统碳通量联网观测与模型模拟系统	国家科学技术进步奖	二	中国气象科学研究院（1）	2010
现代化人机交互气象信息处理和天气预报制作系统	国家科学技术进步奖	二	国家气象中心（1）	2011
《防雷避险手册》及《防雷避险常识》挂图	国家科学技术进步奖	二	气象出版社（1）	2011
主要农作物遥感监测关键技术研究及业务化应用	国家科学技术进步奖	二	国家气象中心（3）	2012
中国遥感卫星辐射校正技术系统	国家科学技术进步奖	二	国家卫星气象中心（1）	2012
Argo大洋观测与资料同化及其对我国短期气候预测的改进	国家科学技术进步奖	二	中国气象科学研究所（1）	2012
沙尘对我国西北干旱气候影响机理的研究	国家自然科学奖	二	国家气象信息中心（4）	2013
两系法杂交水稻技术研究与应用	国家科学技术进步奖	特	湖南省气象科学研究所（18）	2013
中国西北干旱气象灾害监测预警及减灾技术	国家科学技术进步奖	二	中国气象局兰州干旱气象研究所（1）	2013
气候预测的若干新理论与新方法研究	国家自然科学奖	二	国家气候中心（5）	2014
农业旱涝灾害遥感监测技术	国家科学技术进步奖	二	中国气象科学研究所（3）	2014

5.2 省部级奖

表2列出了2005—2017年气象部门（所属单位）所获的244项省部级科技进步类奖的基本情况，可见：期间共获一等奖24项（年均1.7项）、二等奖93项

（年均6.6项）、三等奖127项（年均9.1项），而且绝大部分是以排名第一单位的身份获奖（约占省部级奖总数的89.7%）。

表2 2005—2017年获省部级奖的气象类科技成果统计
Table 2 Provincial or ministerial awards received in the meteorological area during 2005 to 2017

获奖等级	气象部门为排名第一单位获奖的项目数/项	非第一排名单位获奖的项目数/项	总获奖数/项
一等奖	14	10	24
二等奖	82	11	93
三等奖	123	4	127
合计	219	25	244

随着奖项等级的提高，气象部门以第一单位获奖的比例明显降低。由表2和图8可见，以第一单位获二等奖的比例降为88.2%，获一等奖的比例降为58.3%。

以第一单位所获的一等奖中，有超过半数的奖为中国气象局或中国气象学会颁发，即：2005—2017年，气象部门只有5项成果获省（直辖市、自治区）的科技进步类奖，年均不足0.4项。表明，气象部门的科技成果在地方（省）的认可度和显示度仍有待提高。

此外，2005—2017年，我国还获得世界气象组织

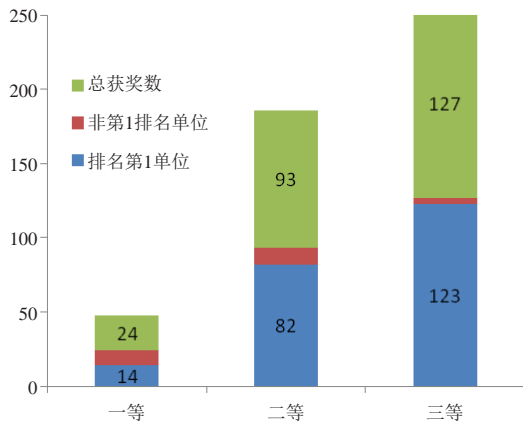


图8 2005—2017年获各级省部级奖的气象科技成果数分布
Fig. 8 Number of provincial or ministerial awards at different levels received in the meteorological area during 2005 to 2017

颁发奖项共9次（年均0.6项），包括“国际气象组织（IMO）奖”3人次（叶笃正、秦大河、曾庆存），“WMO维拉—维萨拉仪器和观测方法发展和实施奖”2次（陆其峰、杨帆等），“WMO青年科学家研究奖”4人次（张祖强、效存德、孙颖、陈峰）。这些奖项表明，我国的气象科技在国际上已具有一定的影响力。

6 结论与讨论

对中国气象局“气象科技管理信息系统”登记的2005—2017年的气象（大气科学）类科技成果，进行了初步分析，获得以下结论：

1) 从成果数量看，除发表论文论著外，近十余年气象部门年均产出600余项科技成果，且呈现逐年指数增长的趋势，特别是中国气象局发布科技成果认定、中试基地管理和科技成果业务准入等管理办法后，促进了成果的爆发式增长。

2) 从成果类型看，应用技术类的成果占绝大多数（70.5%），这一方面客观反映了近十多年我国的气象科学研究紧紧围绕气象现代化建设需求开展，以应用业务技术为主、基础理论和软科学为辅的研究特点，另一方面也反映了我国气象基础理论及软科学研究仍应切实加强。

3) 从地域分布看，“北上广”及浙江、安徽、福建、江苏、湖北和山东等是近十余年我国气象科技成果的高产区。从气象部门的单位看，“一院八所”产出的科技成果约占气象部门科技成果总数的71.4%，充分显现“一院八所”的改革成效和在气象科技创新中举足轻重的地位。

4) 从资助项目看，“气候变化专项”和“关键技术集成与应用”项目产出了约半数的应用技术类成果。“国家计划”产生的成果中有约半数受“公益性行业（气象）科研专项”和“国家自然科学基金”资助。这客观反映了中国气象局“气候变化专项”和“公益性行业（气象）科研专项”等的成效。此外，还有近2成的科技成果源自科技人员兴趣的自选项目（或没有项目资助），这充分体现了气象科技人员投身科技创新的高度自觉性。

5) 从所属学科看，科技成果主要分布在应用气象、天气、综合观测及气候领域，这客观反映了气象与社会经济发展各行各业的紧密关系，也大致体现了天气预报、综合观测及气候预测等相关科研业务在气象事业中的重要性。

6) 从获奖情况看，气象部门年均获国家级科技奖1.5项，涉及卫星遥感、数值预报、极端天气气候监测预测等核心业务领域，是近年来气象科技创新发展的缩影之一。但是，作为第一获奖单位年均仅0.86项且均为“二等奖”，最近一次获“一等奖”还得追溯至2003年（距今已15年），且至今尚未获得过“国家技术发明奖”。在所获的“省部级一等奖”中，约58%是第一获奖单位，且其中有超过半数的奖为中国气象局（或中国气象学会）颁发。可见，加强气象科技创新仍任重而道远。

需要说明的是，本文仅是基于中国气象局（科技与气候变化司）“气象科技管理信息系统”的登记成果进行初步分析结果，或许并未包括我国气象领域的全部科技成果（如在地方（省级）科研业务单位登记的成果），而且也没有涉及论文论著的分析。

参考文献

- [1] 崔建海. 科技成果转化的基本理论及发展对策. 山东农业大学学报(社会科学版), 2003, 5(7): 112-114.
- [2] 贺德方. 对科技成果及科技成果转化若干基本概念的辨析与思考. 中国软科学, 2011, 11: 1-7.
- [3] 梁秀英, 罗虹. 标准化科技成果的分类研究. 标准科学, 2009, 8: 4-7.
- [4] 邹立尧, 闫冠华. 气象科技成果认定机制初探. 中国科技成果, 2016, 1: 10-12.
- [5] 陈鹏飞, 朱玉洁, 申丹娜. 关于科技创新驱动气象现代化发展的思考. 科技与创新, 2018, 20: 48-51.
- [6] 隋丹, 安巍, 裴宇航, 等. 气象科研成果转化现状及对策分析. 科技创新导报, 2018, 12: 152-154.
- [7] 申丹娜, 李研. 我国气象系统科技创新能力区域差异分析. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2018, 10(1): 81-90.
- [8] 荆国栋, 邹立尧, 王亚光, 等. 气象业务系统类科技成果后效评估指标体系构建. 中国科技信息, 2014, 21: 195-196.

WRF模式中不同边界层及云微物理方案对两次黄海海雾个例数值模拟的影响

饶莉娟¹ 高山红² 张恺¹

(1 青岛市黄岛区气象局, 青岛 266400; 2 中国海洋大学, 青岛 266100)

摘要: 利用WRF模式及其循环三维变分同化系统, 以发生在2006年3月6—8日和2012年3月27—28日的两次大范围黄海海雾事件为研究对象, 针对不同的边界层方案和云微物理方案, 设计了4组海雾数值模拟对比试验。模拟结果显示: 对于2006年较为浓厚的海雾个例, 边界层方案采用YSU、云微物理方案采用Lin得到的模拟雾区与观测事实最为相符; YSU和Thompson方案、MYNN和Lin方案的组合模拟结果次之。边界层方案采用MYJ时, 无论采用何种云微物理方案, 模拟结果均较差。而对于2012年较为淡薄的海雾个例, 采用不同云微物理方案之间的差异较小, 采用不同的边界层方案得到的模拟雾区差异显著。采用MYNN边界层方案得到的模拟雾区与观测事实最为相符, 而YUS和MYJ方案均不能很好地模拟出此次海雾过程。

关键词: 黄海海雾, WRF模式, 数值模拟, 边界层方案, 云微物理方案

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.06.002

Impact of Boundary Layer and Cloud Microphysics Schemes in WRF Model on Numerical Simulation of Two Yellow Sea Fog Cases

Rao Lijuan¹, Gao Shanhong², Zhang Kai¹

(1 Huangdao District Meteorological Office in Qingdao, Qingdao 266400 2 Ocean University of China, Qingdao 266100)

Abstract: Four groups of numerical experiments covering two heavy sea fog events (March 6-8, 2006 and March 27-28, 2012) over the Yellow Sea were conducted by using WRF model and its 3DVAR system. The simulation results showed that the simulated fog areas were very similar to the observation for the dense sea fog case in 2006 if YSU was adopted as boundary layer scheme and Lin was chosen as cloud microphysical scheme. The simulated fog areas of YSU and Thompson scheme, MYNN and Lin scheme came second. When adopting MYJ as boundary layer scheme, the simulated fog areas were very poor compared with observation regardless of the cloud microphysical scheme. For the thin sea fog case in 2012, simulated sea fog area mostly depended on boundary layer scheme but little on cloud microphysical scheme. The best combination of boundary layer scheme was MYNN, while neither YUS nor MYJ can properly simulate the sea fog process.

Keywords: sea fog over the Yellow Sea, WRF model, numerical simulation, boundary layer scheme, microphysical scheme

0 引言

海雾是海洋上低层大气中的一种水汽凝结现象, 由于水滴或冰晶的大量聚积, 使能见度低于1 km^[1], 给海上交通运输、沿岸的生产与生活造成严重影响。黄海是我国近海发生海雾最为频繁的海区^[2]。近年来我国从多方面对海雾进行了研究: 海雾天气气候学研究^[3-7]、海雾遥感探测和观测分析^[8-11]、海雾微物理研究^[12-15]和海雾数值模拟研究^[16-18]等。其中, 海雾的数值模拟研究蓬勃发展, 已成为研究海雾的不可缺少的

主要方法^[19-20]。但边界层方案和云微物理方案直接影响海雾的数值模拟质量。

WRF (Weather Research and Forecasting) 模式有多个边界层方案和云微物理方案可供选择, 这些方案都有各自的特点、适用条件及优势。研究表明, 选取不同边界层方案和云微物理方案对降水、气温、风速、台风等模拟效果均存在显著差异^[21-25], 对雾的模拟也是如此。陈阳权等^[26]对乌鲁木齐机场一次冻雾天气过程进行数值模拟研究, 发现此次冻雾过程对边界层方案较为敏感; 黄政等^[27]对江苏省高速公路网2011—2013年发生的21场大雾过程进行研究, 表明云微物理方案选用WDM6, 边界层方案选用QNSE雾的

收稿日期: 2018年8月23日; 修回日期: 2019年5月31日

第一作者: 饶莉娟 (1987—), Email: raol201@163.com

资助信息: 青岛市气象局青年科研专项课题 (2016qdxqx15)

数值模拟效果最优；王佳等^[28]对2006年沪宁高速公路的一次持续性大雾的模拟中，发现对相对湿度等常规气象要素的模拟，各个参数化方案的模拟效果都较好，对直接表征能见度的液态水含量的模拟，云微物理过程采用Lin方案模拟效果最好；陆雪等^[29]利用2005—2011年11次春季黄海海雾个例开展WRF模式参数化方案敏感性研究，发现边界层与云微物理方案的最佳组合为YSU与Lin方案，最差为Mellor Yamada与WSM5方案；而Steenefeld等^[30]在对英国的一次强浓雾过程的研究中，则发现云微物理方案WDM6要优于WSM5和WSM6。

本文以发生在2006年3月6—8日和2012年3月27—28日的两次大范围黄海海雾事件为研究对象，

利用WRF模式及其循环三维变分同化系统（循环3DVAR）设计了一系列数值模拟对比试验，并对雾区模拟效果进行检验和分析。

1 海雾个例

1.1 观测雾区

以发生在2006年3月的一次浓厚海雾与发生在2012年3月一次较为淡薄的海雾为研究对象。高山红等^[31]利用MODIS可见光云图以及MTSAT-1R红外通道数据，得到2006年海雾/低层云个例的演变过程（图1）。此外还给出了黄海周边地面和海上船舶的水平能见度的观测事实。利用夜间双通道法及Wang等^[32]提出的方法反演得到了2012年海雾个例的演变信息（图2）。

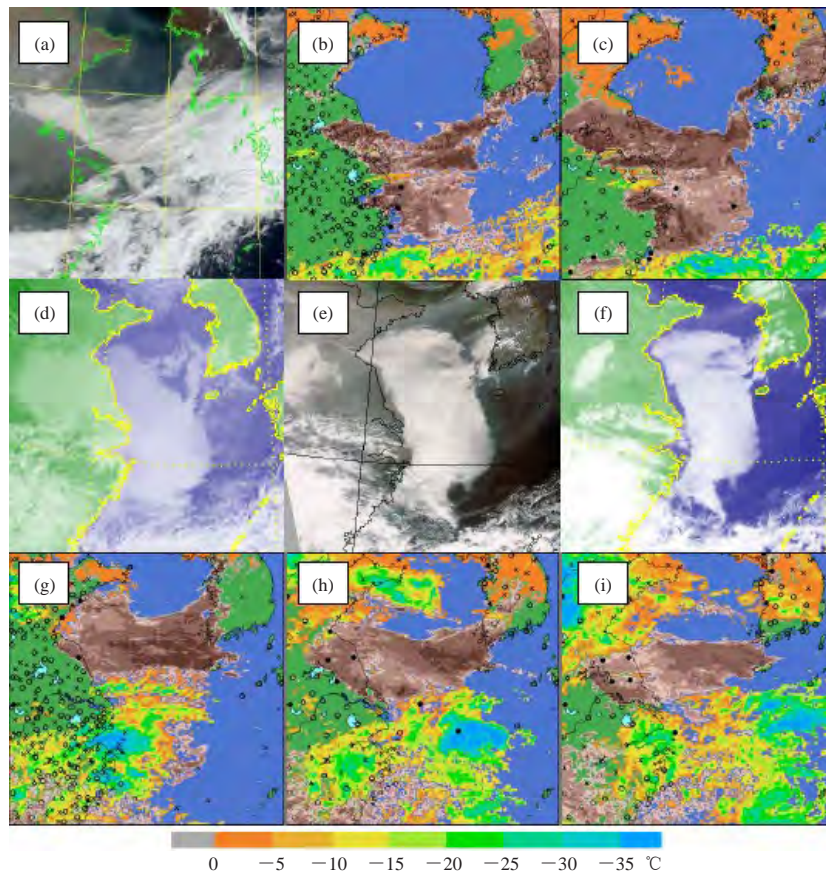


图1 2006年3月6—8日海雾演变的卫星观测事实^[31]

（图a和e为MODIS可见光云图，图d和f为MTSAT-1R可见光云图，图b-c与g-i为MTSAT-1R双通道数据反演图片（棕色表示海雾/低云，深绿色与深蓝色分别代表海陆分布，其他色彩表示红外1通道亮温分布）。图a~i对应的时间（当地时间）分别为：3月6日10: 22, 20: 00, 3月7日02: 00, 08: 00, 12: 25, 14: 00, 20: 00, 3月8日02: 00, 05: 00。图中符号•、▲、○和×分别代表0~1 km, 1~2 km, 2~10 km和10 km以上的地面水平能见度观测）

Fig. 1 Satellite observation from 6 to 8 March, 2006^[31]

(Figs. 1a and 1e, Figs. 1e and 1f are MODIS and MTSAT-1R visible images, respectively. Figs.1 b-1c and 1g-1i are MTSAT-1R dual-channel derived images (brown color represents sea fog/ stratus, dark green and dark - blue colors indicate land and ocean, respectively, and other colors represent bright temperature distribution of the channel-1) .

Figs. 1a-1i represent the following time: 1022, 2000 BT on 6 March, 0200, 0800, 1225, 1400 and 2000 BT on 7 March, 0200 and 0500 BT on 8 March, respectively. The symbols “•”, “▲”, “○”, and “×” represent the observed visibility with values 0-1 km, 1-2 km, 2-10 km and more than 10 km, respectively)

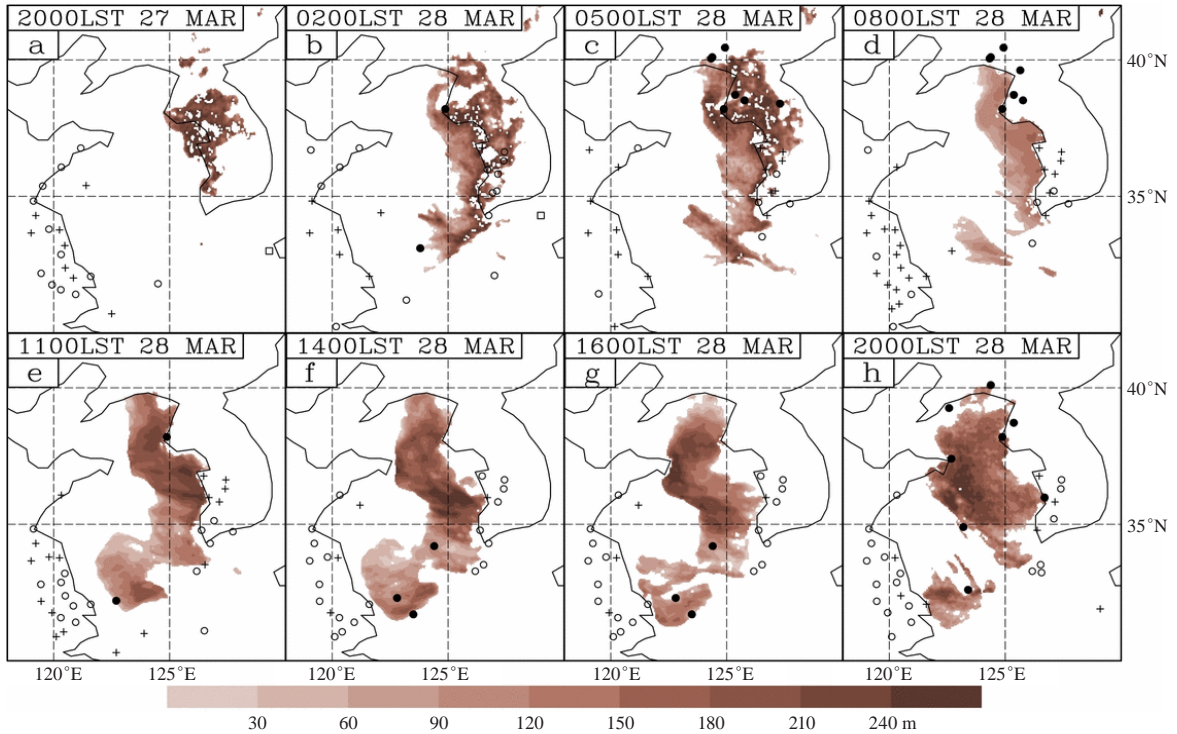


图2 2012年3月27—28日海雾演变的MTSAT反演观测事实
(填色为雾区与雾顶高度, 图中符号含义见图1)

Fig. 2 The sea fog detection algorithm using MTSAT data from 27 to 28 March 2012
(The fog area and fog top height, the meanings of the symbols in the figure are shown in Fig. 1)

1.2 天气形势与边界层特征

考察发生两次海雾个例的天气背景发现, 两次海雾的形成与发展均是受到高压系统的影响, 其天气型为北太平洋高压脊线^[1, 3], 海雾发生前至海雾生成及

维持阶段均有暖湿空气从台湾海峡附近向黄海海域输送, 并且形成逆温层结。

2006年个例沿图5中A-B线做海面至800 hPa温度风速剖面(图3), 从图中可以看到本次海雾发展过

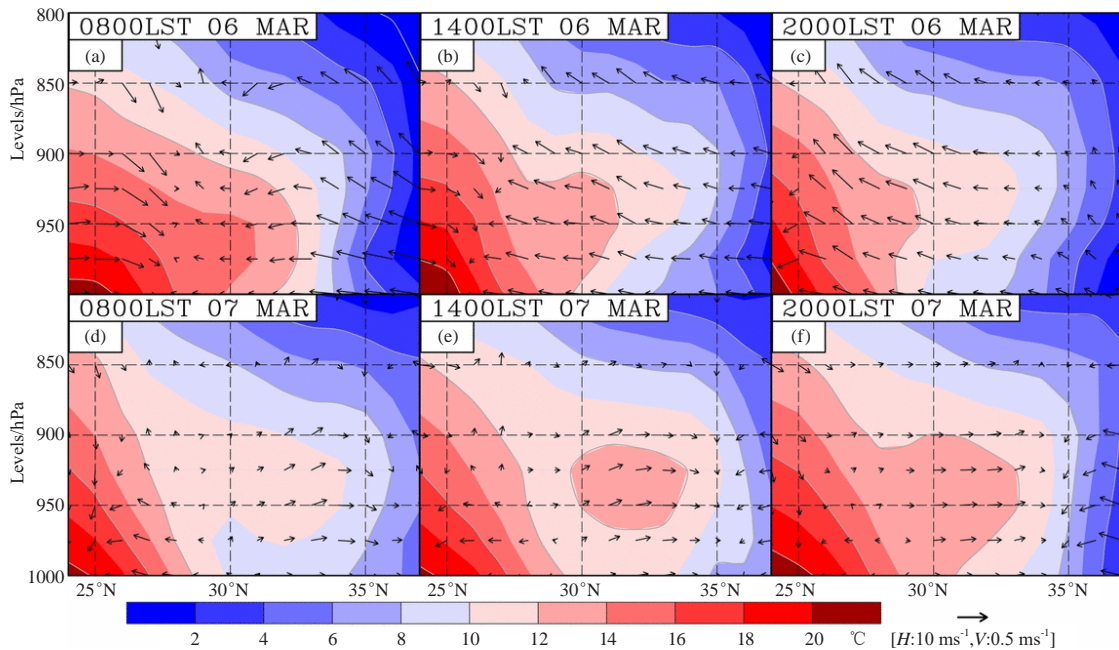


图3 沿图5中A-B线的海面至800 hPa温度与风速的垂直剖面图

Fig. 3 Vertical sections of temperature and winds along the A-B line of Fig. 5 from sea surface to 800 hPa

程中逆温始终存在，且发展较高。7日14 LST由于海上高压中心移出黄海，黄海上空为偏南风，使得逆温增强。由于逆温层较高，且水汽充沛，海雾发展较厚，从可见光云图中也可看出本次海雾较为浓厚。2012年个例沿图5中C-D线做海面至800 hPa温度风速剖面（图4），从图中可以看到2012年海雾个例发生前，27日白天黄海上空逆温即已存在。在南向气流的作用下，逆温向北推进并且加强。而在28日，黄海西北方向的高压入海，黄海受其前部影响，风向转为偏北风，其带来较干冷的空气使得暖湿空气南退。由于逆温层较低，海雾不能突破逆温层向上发展，本次海雾发展高度较低。从高分辨率的MODIS卫星云图上可看出本次海雾较为淡薄，尤其是南部海雾，其下垫面蓝色海水隐约可见。

作用下，逆温向北推进并且加强。而在28日，黄海西北方向的高压入海，黄海受其前部影响，风向转为偏北风，其带来较干冷的空气使得暖湿空气南退。由于逆温层较低，海雾不能突破逆温层向上发展，本次海雾发展高度较低。从高分辨率的MODIS卫星云图上可看出本次海雾较为淡薄，尤其是南部海雾，其下垫面蓝色海水隐约可见。

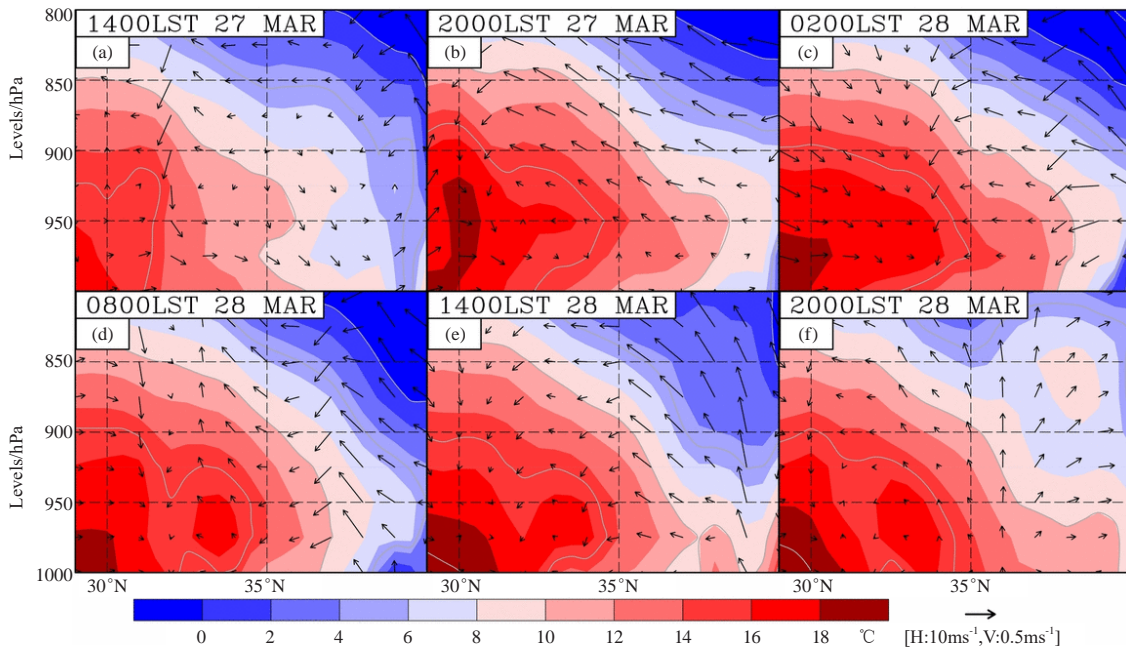


图4 沿图5 C-D线的面至800 hPa温度与风速的垂直剖面图

Fig. 4 Vertical sections of temperature and winds along the C-D line of Fig. 5 from sea surface to 800 hPa

2 WRF数值试验

2.1 WRF 模式设置

借助WRF模式模拟此次的海雾演变过程，模式设置的详细信息和模式各个物理选项的选取见表1，模拟的区域设置如图5所示，采用了双重双向嵌套，分辨率较高的内区（图5中的D2区域）覆盖了海雾演变的范围。

为模拟试验提供背景数据和边界条件的是FNL再分析数据（ $1^\circ \times 1^\circ$ ，6 h/次）和NEAR-GOOS（ $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ）日平均海温数据。主要依据内区的模拟输出结果对结果进行分析。

2.2 试验设计

为了得到最佳的模拟海雾的云微物理方案和边界层方案，利用WRF模式及其循环3DVAR同化模块，通过设置不同的云微物理方案和边界层方案，设计了4组数值模拟对比试验（表2）。两次个例同化时间窗均为12 h，模拟时段分别为北京时间2006年3月6日08时—8日08时和2012年3月27日20时—28日20时。所有

表1 WRF模式设置

Table 1 Specifications of the WRF model

区域与选项	具体设置
	两重嵌套, Lambert conformal投影 中心点 (32.5°N, 123°E)
区域与分辨率	大区: 格点数110×120 小区: 格点数151×151 大区: 水平分辨率30 km 小区: 水平分辨率10 km 垂直分辨率: 44 η层*
时间步长	120 s, 40 s
积云方案	Kain-Fritsch方案
辐射方案	长波辐射: RRTM方案 短波辐射: Dudhia方案
陆面过程	Noah陆面模式
背景误差	CV5

* $\eta = 1.0000, 0.9990, 0.9985, 0.9975, 0.9950, 0.9925, 0.9900, 0.9850, 0.9800, 0.9775, 0.9700, 0.9540, 0.9340, 0.9090, 0.8800, 0.8506, 0.8212, 0.7918, 0.7625, 0.7084, 0.6573, 0.6090, 0.5634, 0.5204, 0.4798, 0.4415, 0.4055, 0.3716, 0.3397, 0.3097, 0.2815, 0.2551, 0.2303, 0.2071, 0.1854, 0.1651, 0.1461, 0.1284, 0.1118, 0.0965, 0.0822, 0.0689, 0.0566, 0.0452, 0.0346, 0.0249, 0.0159, 0.0076, 0.0000$. 850 hPa以下各层对应的海拔高度分别大约为: 0, 32, 61, 110, 169, 228, 322, 469, 658, 890, 1184, 1417 m.

的数值试验均采用了相同的区域设置、初始场、物理选项（除了边界层方案和云微物理方案外）、背景场数据和海温数据。

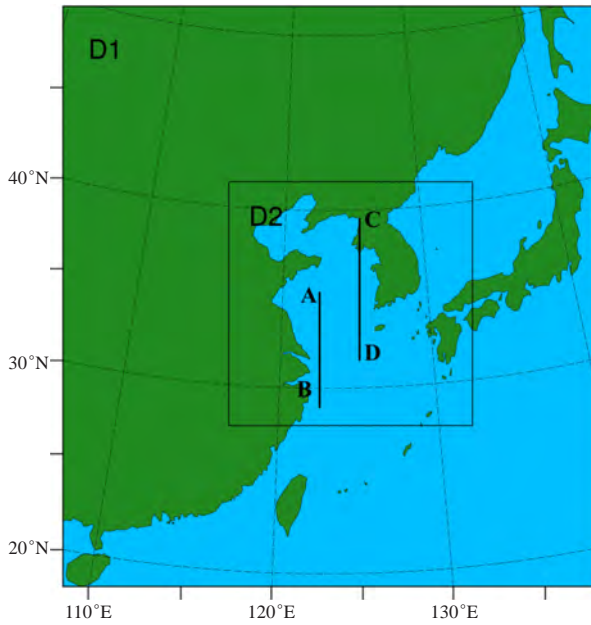


图5 WRF数值试验的模拟区域
Fig. 5 Domains of WRF numerical experiment

表2 试验设计
Table 2 Design of experiments

组别	边界层方案	云微物理方案
第一组	YSU	Exp_A: Lin et al. scheme Exp_B: WSM 5-class Exp_C: WDM 5-class Exp_D: Thompson
第二组	MYNN 2.5 level TKE	Exp_A: Lin et al. scheme Exp_B: WSM 5-class Exp_C: WDM 5-class Exp_D: Thompson
第三组	MYNN 3level TKE	Exp_A: Lin et al. scheme Exp_B: WSM 5-class Exp_C: WDM 5-class Exp_D: Thompson
第四组	Mellor-Yamada-Janjic TKE	Exp_A: Lin et al. scheme Exp_B: WSM 5-class Exp_C: WDM 5-class Exp_D: Thompson

3 模拟结果分析：雾区的对比

图6为2006年个例第一组的4个数值模拟试验给出的海雾演变过程。图中彩色填充区域为数值试验模拟出的海雾或低层云顶高度水平分布，蓝色等值线为10 m高度云水含量 $>0.1 \text{ g/kg}$ 的区域，两者重合的区域即可认为是雾区，而其他部分则认为是低层云区。图中行排从上到下，依次对应每组试验中的Exp_A~Exp_D（分别为Lin方案、WSM5方案、WDM5方案及Thompson方案）；列排从左到右依次对应模拟的时间。将图6与海雾演变过程的卫星观测事实（图1）进行比较可以发现：Exp_A较好地呈现了海雾生成并向北逐渐发展的过程，模拟的海雾雾区与观测结果较为接近，但没有体现出3月8日海雾向南

退移并逐渐消散的过程；Exp_B与Exp_D的模拟结果较为接近，模拟的海雾雾区以及10 m高度的云水含量 $>0.1 \text{ g/kg}$ 的区域较Exp_A减小，但比Exp_C的模拟结果更接近实际观测；Exp_C的结果与观测事实相差较大，模拟的海雾雾区整体上偏小，3月7日午后本应该是海雾发展的旺盛期，但Exp_C模拟的海雾区域却缩小了很多。

2006年个例的第二组数值模拟试验结果如图7，可以明显地看出图中的4个模拟试验模拟的海雾雾区及10 m的云水含量 $>0.1 \text{ g/kg}$ 的区域较图6整体变小，与观测有一定差距，但基本上体现出了从3月6日海雾发生、发展，至7日海雾发展到旺盛期后，海雾在8日向南退移并逐渐消退的整个过程，Exp_C的模拟结果与观测事实相差仍然最大。从整体上看，4个试验模拟结果之间的差异有所减小。第三组试验的模拟结果与第2组的模拟结果十分相近，而第四组的4个模拟试验的结果与观测事实相差较大，模拟效果较差（图略）。

仅从雾区的模拟结果来看，2006年个例边界层方案采用YSU方案时，云微物理方案采用Lin方案得到的模拟结果较为理想，采用WSM5及Thompson方案的模拟结果次之。边界层方案采用MYNN 2.5 level TKE scheme（MYNN2.5）和MYNN 3rd level TKE scheme（MYNN3）时模拟结果较YSU稍差，而采用Mellor-Yamada-Janjic TKE scheme（MYJ）时的模拟结果最为不好，与观测事实不相符。

然而对于2012年个例，采用不同云微物理方案之间的差异较小，主要差异在于采用不同的边界层方案。这与陆雪等^[29]结论相符，即边界层方案对WRF模式雾区模拟结果起决定作用，而微物理方案影响较小。图8是2012年个例不同边界层方案的对比试验给出的模拟结果（云微物理方案均为Lin方案），图中行排从上到下，依次对应的边界层方案为MYNN2.5、YSU、MYJ（MYNN3的结果与MYNN2.5较为相似，故略去）。与观测事实相比，采用MYNN2.5方案模拟得到的海雾雾区的变化同卫星云图观测到的事实相符，特别是海雾向北且向南的推进过程、海雾发展成成熟后的形态以及整齐的西边界（与观测相比较为偏南）。而采用YSU与MYJ方案的模拟结果与观测却相距较远，只得到朝鲜半岛沿岸的海雾，北部及南部的海雾都没有模拟出来。

通过对比模拟试验发现，边界层方案较云微物理方案对两次个例的模拟结果影响更大。而边界层方案中，YSU方案与MYNN方案在2006年个例与2012年个

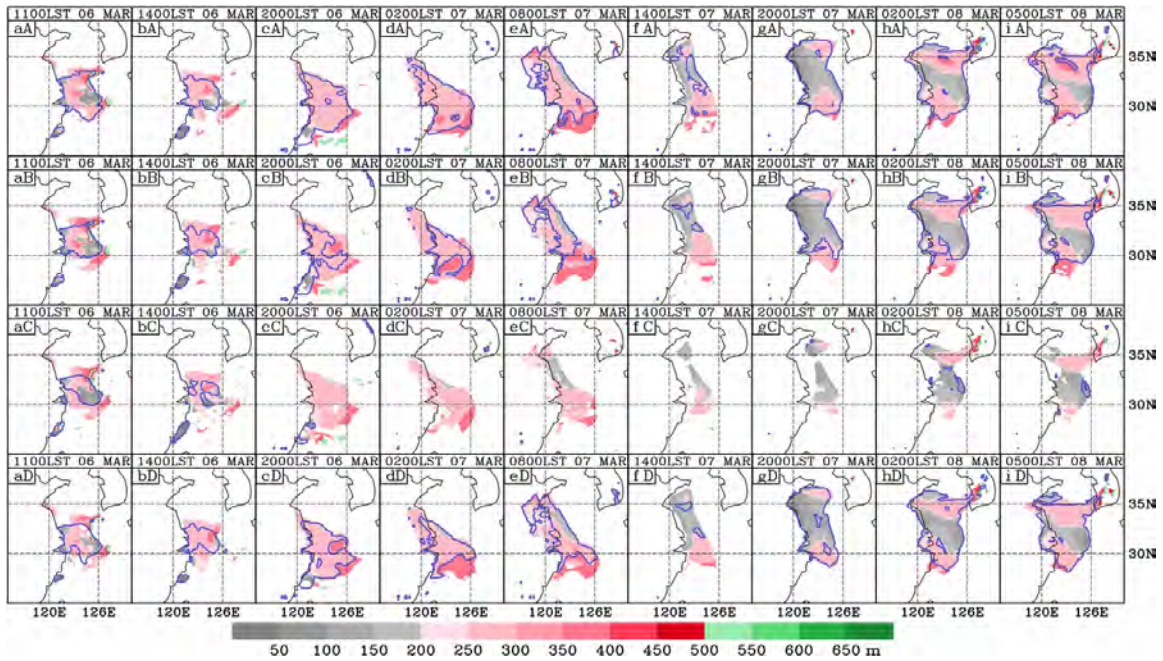


图6 2006年个例第一组模拟试验给出的海雾演变过程
(标示X代表试验Exp-X编号 (X=A,B,C,D), x为模拟时间顺序编号 (x=a, b, c, d, e, f))

Fig. 6 Evolution of the first group of simulated sea fog case 2006
(The markers "X" and "x" have the following meaning: X represents experiment Exp-X (X=A, B, C, D), and x represents simulated time serial number (x=a, b, c, d, e, f))

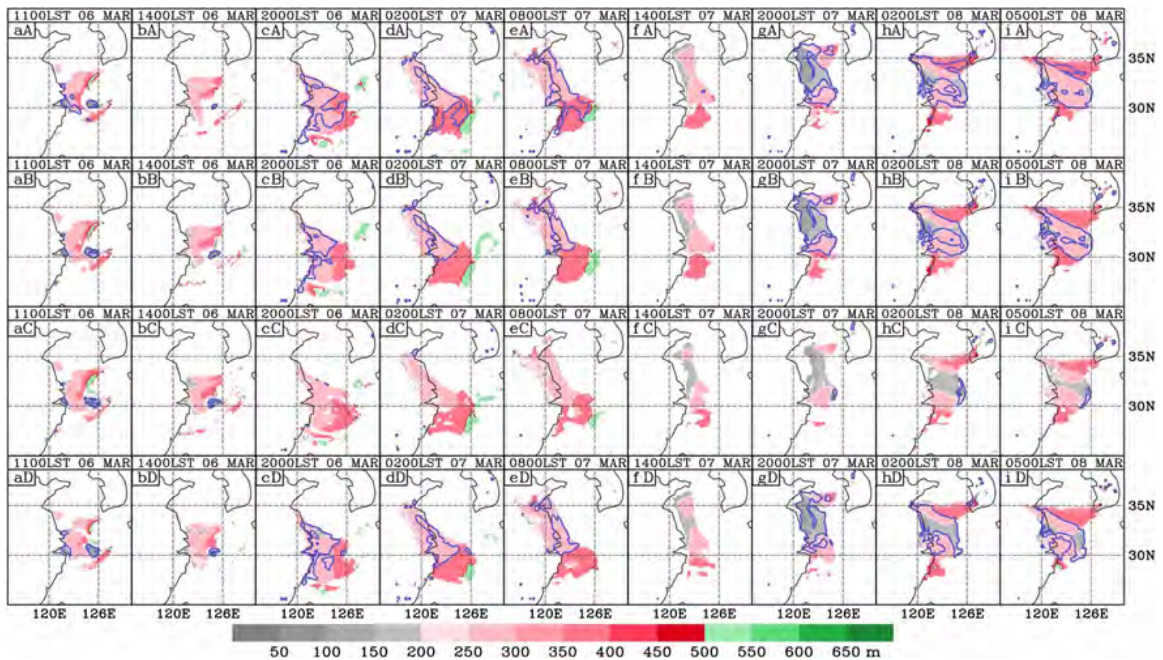


图7 2006年个例第2组模拟试验给出的海雾演变过程
Fig. 7 Evolution of the second group of simulated sea fog case 2006

例中的表现完全不同。对于2006个例来说YSU方案较MYNN方案好，而2012个例则是MYNN方案模拟更为准确，YSU方案的模拟结果却相差甚远。

不同的边界层方案对边界层刻画是不同的，正

是因为如此才导致不同的海雾模拟结果。YSU方案属于一阶K闭合方案，它是从MRF (Medium-Range Forecast) 方案改进而来的，改进的部分考虑了逆梯度输送在计算垂直扩散系数与边界层高度中的作用，考

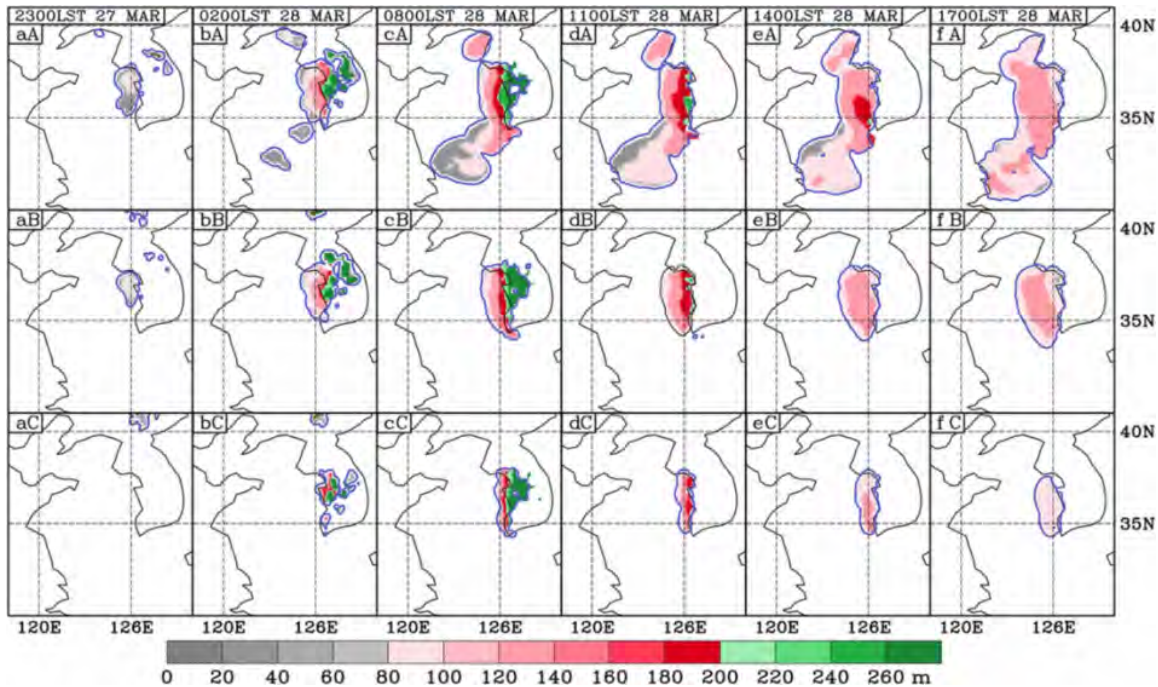


图8 2012年个例模拟试验给出的海雾演变过程
Fig. 8 Evolution of the sea fog case 2012 numerical experiments

考虑了Prandtl数对边界层高度的影响作用，削弱机械强迫引起的边界层混合，增强热量引起的自由对流下边界层混合^[33]。MYNN方案是基于M-Y方案改进而成，是一个预报湍流动能的参数化方案。MYNN方案是针对M-Y方案忽视浮力的作用、长度尺度表达式不明确、混合层高度过高以及湍流能量级过大的不足加以改进的^[34-35]。2006年个例较2012年个例更为浓厚，较为浓厚的海雾其湍流强度比淡薄海雾更强。猜想由于YSU方案刻画的湍流强度小于MYNN方案，对于湍流较强的浓海雾，MYNN方案刻画的湍流过强，使海雾脱离海面而消散，而YSU方案对此类海雾刻画的湍流强度适合其维持与发展。而对于湍流较弱的淡薄海雾，YSU方案刻画的湍流弱而不利于海雾生成，但是由于MYNN方案得到的湍流较YSU强，更适合此类海雾的发生发展，从而模拟得到了较好的结果。以上猜想需要在今后工作中进一步验证。

4 结论

本文选取同为在高压系统影响下形成与发展的两次海雾个例为研究对象，利用WRF模式，针对不同的边界层方案和云微物理方案，设计了4组海雾数值模拟对比试验。得到以下结论：

1) 对于2006年较为浓厚的海雾个例，边界层方案采用YSU、云微物理方案采用Lin得到的模拟雾区与观测事实最为相符；YSU和Thompson方案、MYNN和

Lin方案的组合模拟结果次之。边界层方案采用MYJ时，无论采用何种云微物理方案，模拟结果均较差。

2) 对于2012年较为淡薄的海雾个例，采用不同云微物理方案之间的差异较小，而采用不同的边界层方案得到的模拟雾区差异显著。采用MYNN边界层方案得到的模拟雾区与观测事实最为相符，而YUS和MYJ方案均不能很好的模拟出此次海雾过程。

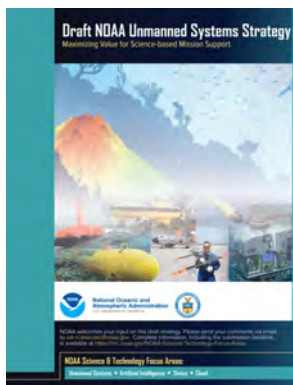
参考文献

- [1] 王彬华. 海雾. 北京: 海洋出版社, 1983.
- [2] 张苏平, 鲍献文. 近十年中国海雾研究进展. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2008, 38(3): 359-366.
- [3] 杨悦, 高山红. 黄海海雾天气特征与逆温层成因分析. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2015, 45(6): 19-30.
- [4] 周发琇, 王鑫, 鲍献文. 黄海春季海雾形成的气候特征. 海洋学报: 中文版, 2004, 26(3): 28-37.
- [5] 江敦双, 张苏平, 陆惟松. 青岛海雾的气候特征和预测研究. 海洋湖沼通报, 2008(3): 7-12.
- [6] 黄彬, 毛冬艳, 康志明, 等. 黄海海雾天气气候特征及其成因分析. 热带气象学报, 2011, 27(6): 920-929.
- [7] 王鑫, 黄菲, 周琇. 黄海沿海夏季海雾形成的气候特征. 海洋学报: 中文版, 2006, 28(1): 26-34.
- [8] 黄彬, 高山红, 宋煜, 等. 黄海平流海雾的观测分析. 海洋科学进展, 2009, 27(1): 16-23.
- [9] 黄健. 海雾的天气气候特征与边界层观测研究. 青岛: 中国海洋大学海洋环境学院, 2008.
- [10] 张苏平, 任兆鹏. 下垫面热力作用对黄海春季海雾的影响: 观测与数值试验. 气象学报, 2010, 68(4): 439-449.
- [11] Zhang S P, Xie S P, Liu Q Y, et al. Seasonal variations of Yellow Sea fog: observations and mechanisms. Journal of Climate, 2009, 22(24): 6758-6772.
- [12] 闫之辉, 邓莲堂. WRF模式中的微物理过程及其预报对比试验. 沙漠与绿洲气象, 2007, 1(6): 1-6.

- [13] 胡瑞金. 海雾生成过程中平流、湍流、辐射效应研究. 海洋学报: 中文, 1998, 20(1): 25-32.
- [14] 孟宪贵, 张苏平. 夏季黄海表面冷水对大气边界层及海雾的影响. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2012, 42(6): 20-27.
- [15] 任兆鹏, 张苏平. 黄海夏季海雾的边界层结构特征及其与春季海雾的对比. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2011, 41(5): 23-30.
- [16] 傅刚, 王菁茜, 张美根, 等. 一次黄海海雾事件的观测与数值模拟研究: 以2004年4月11日为例. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2004, 34(5): 720-726.
- [17] Gao S H, Lin H, Shen B, et al. A heavy sea fog event over the Yellow Sea in March 2005: analysis and numerical modeling. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, 24(1): 65-81.
- [18] Fu G, Guo J, Xie S P, et al. Analysis and high-resolution modeling of a dense sea fog event over the Yellow Sea[J]. *Atmospheric Research*, 2006, 81(4): 293-303.
- [19] 傅刚, 李鹏远, 张苏平, 等. 中国海雾研究简要回顾. 气象科技进展, 2016, 6(2): 20-28.
- [20] 史得道, 吴振玲, 高山红, 等. 海雾预报研究综述. 气象科技进展, 2016, 6(2): 49-55.
- [21] 张宁. WRF模式云微物理参数化方案预报效果分析. 气象与环境科学, 2016, 39(3): 50-59.
- [22] 沈新勇, 马铮, 郭春燕, 等. 不同边界层参数化方案对一次梅雨锋暴雨过程湍流交换特征模拟的影响. 热带气象学报, 2017(6): 793-811.
- [23] 沈晓燕, 颜玉倩, 肖宏斌, 等. WRF模式不同参数化方案组合对青海气温、降水及风速模拟的影响. 干旱气象, 2018, 36(3): 423-430.
- [24] 江丽芳, 尹毅, 刘春霞. 边界层参数化方案对台风“莫拉菲”热力和动力结构特征影响的对比. 海洋预报, 2017, 34(4): 20-31.
- [25] 吴珊珊, 邹海波, 单九生. 不同积云和微物理方案对“麦德姆”台风登陆后路径的影响. 暴雨灾害, 2018(1): 41-47.
- [26] 陈阳权, 杜安妮, 窦新英, 等. WRF模式对乌鲁木齐机场一次冻雾天气的数值预报对比试验分析. 沙漠与绿洲气象, 2018(2): 63-70.
- [27] 黄政, 袁成松, 包云轩, 等. 基于不同参数化方案的高速公路大雾过程的数值模拟试验. 气象, 2016, 42(8): 944-953.
- [28] 王佳, 缪启龙, 严明良, 等. 采用不同参数化方案对沪宁高速公路浓雾过程的模拟试验. 气象与减灾研究, 2012, 35(1): 29-35.
- [29] 陆雪, 高山红, 饶莉娟, 等. 春季黄海海雾WRF参数化方案敏感性研究. 应用气象学报, 2014, 25(3): 312-320.
- [30] Steeneveld G J, Ronda R J, Holtslag A A M. The challenge of forecasting the onset and development of radiation fog using mesoscale atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, 2015, 154(2): 265-289.
- [31] 高山红, 齐伊玲, 张守宝, 等. 利用循环3DVAR改进黄海海雾数值模拟初始场 I: WRF数值试验. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2010, 40(10): 1-9.
- [32] Wang Y, Gao S, Fu G, et al. Assimilating MTSAT-Derived humidity in nowcasting sea fog over the Yellow Sea. *Weather & Forecasting*, 2012, 29(2): 205-225.
- [33] Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, 2006, 134: 2318-2341.
- [34] Nakanishi M. Improvement of the Mellor-Yamada turbulence closure model based on large-eddy simulation data. *Boundary-Layer Meteorol*, 2001, 99: 349-378.
- [35] Nakanishi M, Niino H. An improved Mellor Yamada level-3 model with condensation physics: its design and verification. *Boundary-Layer Meteorol*, 2004, 112: 1-31.

无人系统是NOAA实现优先任务的新机遇

■ 李婧华



无人系统(UxS)的快速发展,为执行NOAA优先任务创造了新的机会。NOAA最新发布的《无人系统(UxS)战略》草案中提出了未来的发展框架,以期形成需求驱动的、具有成本效益、安全、合规的无人系统。战略提出了5大目标:在企业层面协调和支持UxS运营;在NOAA任务中扩展UxS应用;加快UxS研究向业务转化;加强和扩大UxS伙伴关系;提高员工对UxS使用和操作的熟练度。

NOAA表示,战略将提高对UxS的理解、协调、认识和应用,推进NOAA的研究和业务应用科学任务,并希望



在每个任务领域能够取得革命性进展。通过实施该战略,NOAA希望实现其机构首要任务,即恢复在数值天气预报方面的全球领导地位,并可持续地扩大美国蓝色经济。

(作者单位:中国气象局气象干部培训学院)

一种中尺度数值预报模式数据并行传输应用研究

赵磊 高松 吴征 杜钦
(重庆市气象科学研究所, 重庆 401147)

摘要: 以重庆中尺度数值预报模式为例, 设计开发一种针对中尺度数值预报模式海量数据的并行传输程序, 提高数据传输的效率。重庆中尺度数值预报模式每天输出的大量数据需传输到数据管理服务器处理和备份。目前模式的数据传输任务是以scp单核串行程序为主, 数据传输时间长, 不能充分利用处理器核和网络带宽, 未有效满足重庆天气预报业务对模式数据及时使用的需求; 设计开发的并行传输程序以进程池为主要架构, 采用Rsync代替scp提高模式数据传输速率; 同时, 基于输出的模式数据的特征实现多种数据分治策略, 对比选择最佳的数据分治策略; 结果表明基于最佳数据分治策略的并行传输程序能够极大减少数据传输时间, 极大利用空闲的处理器核和网络带宽资源。

关键词: 数值预报模式, 并行传输, 数据分治策略, Rsync

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.06.003

Parallel Transmission of Data from a Mesoscale Numerical Prediction Model: An Application Study

Zhao Lei, Gao Song, Wu Zheng, Du Qin
(Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147)

Abstract: Taking the Chongqing Mesoscale Numerical Prediction model as an example, the authors designed and developed a parallel transmission program for large data of the mesoscale numerical prediction model to improve transmission efficiency. The large dataset the Chongqing mesoscale model produced has been transferred to the data management server for every day processing and analysis. The one-core serial program with scp was currently used to complete the task. Because it took more time and could not make full use of cpu cores and network bandwidth, this program could not meet the demand of timely use of Chongqing Weather Forecasting. The parallel transmission program takes process pool as main architecture, and adopts Rsync instead of scp to improve the data transmission speed. Meanwhile the model data is divided on the basis of data features, and the best data partition strategy would be chosen by comparison. The results showed that the parallel transmission program with the best data partition strategy can greatly reduce the data transmission time, and effectively improve the availability of cpu cores and network bandwidth.

Keywords: numerical prediction model, parallel transmission, data partition strategy, Rsync

0 引言

目前中尺度数值预报模式是局部区域天气预报业务系统中重要的组成部分, 为天气预报业务提供技术支持。重庆中尺度数值预报模式是以WRF (Weather Research and Forecasting Model) 为核心模块开发的一种数值天气预报模式, 是重庆精细化数值天气预报系统的重要组成部分, 为重庆本本地区域复杂天气变化过

程预测预报提供依据和参考。重庆中尺度数值预报模式的运行平台是SGI Altix uv 1000系列大型机, 该模式一天运行2次(00\12 UTC), 预报时效96 h, 该模式输出可用的业务数据是NetCDF格式的平面二维(2 Dimension)数据, 大小13 GB左右/次, 一天数据量约26 GB。根据业务和科研需求, 输出的平面二维数据需及时传输到数据管理服务器上处理及归档, 该数据管理服务器运行了多种数据处理串行程序, 数据交换频次较高, 但由于很多程序设计上的缺陷, 仍有部分网络带宽资源和CPU核资源未被有效利用。目前, 该类型数据的传输工作是采用基于SCP技术的单核串行程序实现, 该程序能够长期稳定运行, 传输单次中尺度模式数据实际耗时约2 h, 传输延时长, 造成数据

收稿日期: 2018年5月21日, 修回日期: 2019年7月16日
第一作者: 赵磊(1984—), Email: zhaoleicuit@126.com
资助信息: 重庆市气象局业务技术攻关重点/团队-数值预报应用技术团队项目(YWGGTD-201716); 高性能计算机系统与数值预报系统建设项目(2016-2019)

无法及时被气象业务和科研人员参考和使用；且该程序也不能充分利用空闲的网络带宽和数据管理服务器资源。

因此，针对现有数据传输程序的缺点，本文设计开发一种新的并行数据传输程序，并对数值天气预报模式的数据有效分治划分，在不影响数据管理服务器中其它数据传输和处理程序的实际环境下，实现一种可应用业务的基于最佳数据分治策略的并行传输程序，有效提高中尺度数值预报模式数据的传输效率。

1 数据并行传输程序

1.1 并行传输网络架构

重庆中尺度数值预报模式的相关程序在以SGI大型机和曙光服务器节点所组成的高性能集群平台上运行；模式数据通过该集群千兆以太网网络传输到数据管理服务器（图1），SGI大型机和数据管理服务器之间通过网络交换机连接，工作模式为全双工，网络整体带宽为1000Mbps。数据管理服务器是一台曙光高性能服务器节点，管理约37种数值预报相关业务数据资料的传输和处理工作，也管理着科研用户的天气过程试验资料；服务器架构是对称多处理器（Symmetrical Multi-Processing, SMP）^[1-2]，具备16个处理器核（即CPU Core）。服务器节点之间基于基础的TCP/IP协议实现数据传输交互。

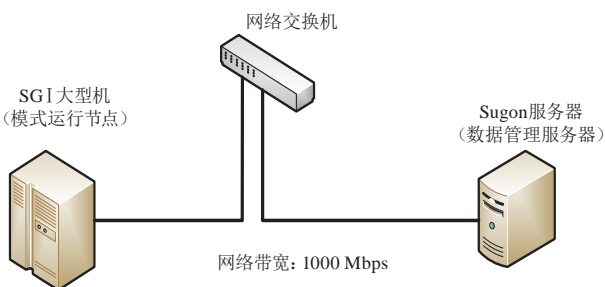


图1 并行传输网络拓扑

Fig. 1 The network topology of parallel transmission

1.2 并行传输程序

基于现有有限的网络和数据管理服务器资源，构建的并行传输主程序按照预先设计的参数构建一进程池，该进程池中每一进程只占用一个处理器核，数据传输任务由主程序依次分配给进程池中的进程去执行，进程池中各个进程间相互独立，在执行任务时它们之间没有信息交互规程，是一种易并发执行过程^[3-4]；传输任务完成后的进程处于空闲态并返回进程池中，进程池将空闲态的进程信息反馈给主程序，主程序检查传输任务列表，并将新的传输任务分配给空闲态的进程执行；当任务列表中无数据传输任务，且所有传输

任务的进程都执行完毕，进程池将所有空闲态的进程信息反馈给主程序，由主程序回收所有进程并关闭进程池。

该并行传输程序采用Python语言和Rsync同步技术^[5-6]实现数据传输流程。Python是目前较流行的一种高级解释型编程语言，运行该语言编写的程序调试运行的基础是在相应的操作系统平台安装的Python解释器^[7]；该语言拥有众多开源的软件包，非常适合多领域的编程开发和科研人员使用，本程序采用multiprocessing包^[8]，通过multiprocessing.Pool函数构建一个含有多个进程的进程池；Rsync是Linux系统中非常流行的数据同步传输和备份技术，拥有SSH（Secure SHELL）和C/S架构两种配置应用方式，能实现数据的快速复制、远程复制、文件传输和安全文件传输等功能，以及相同局域网内多个服务器之间的数据快速传输及同步功能，Rsync使用一种远程更新协议，该远程更新协议采用一个有效的总和检查搜索算法，该算法允许Rsync通过网络链接仅传输两端之间数据的不同部分，且可以压缩和校验数据^[5-6, 9]；本程序的子功能模块函数采用第一种配置应用方式，即在两台服务器之间采用SSH协议^[6]实现身份验证，身份验证通过后，调用Rsync实现服务器端到端的数据传输。

该并行传输主程序的流程（图2）在启动初始化后，根据试验测试环境要求灵活配置处理器核数和划分分治数据包大小。因每一进程占用一个处理器核，配置处理器核数可理解为设置进程池中进程数目。从并行传输主程序的源码可看出，在初始化和配置相关变量后，process_nn为处理器核数，dip_n为分治的数据包大小，主程序首先通过create_list函数创建dip_n分治数据包大小的传输任务列表，接着通过Python的Pool函数创建一个进程数为process_nn的进程池；传输任务列表中任务由主程序分配给具体的进程，此过程由apply_async函数完成。因数据管理服务器的处理器核资源有限，划分分治后的数据传输任务数目均会大于进程池中进程数目，进程池中进程并发执行后，具体执行数据传输的函数是rsy_2d_list，在该函数中采用Rsync检测和传输数值预报模式的输出数据；主程序一直等待进程池中出现空闲态进程，若传输任务列表里仍有待执行的任务，程序及时再将列表里的传输任务分配给进程池中的空闲态进程；并行传输主程序循环反复检测传输任务列表和进程池中进程态，直至传输任务全部执行且进程池中进程均为空闲态后，并行程序关闭进程池和回收进程资源，整体的传输程序

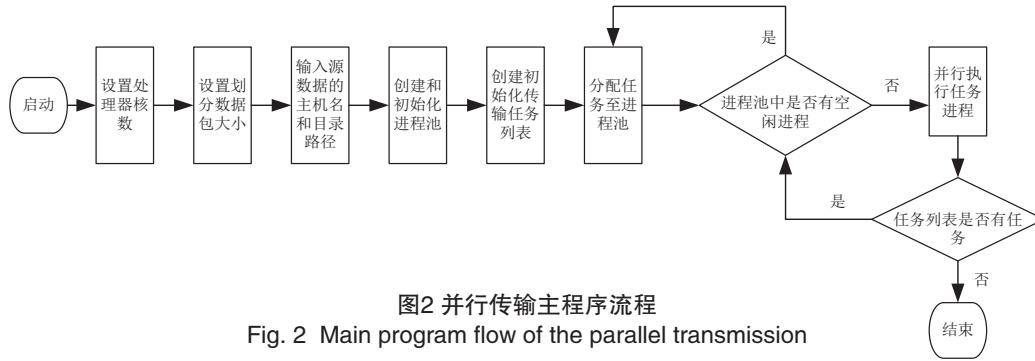


图2 并行传输主程序流程
Fig. 2 Main program flow of the parallel transmission

流程结束。

```
#并行传输主程序的源码
if __name__ == '__main__':
    startt=int(time.time())
    dip_n=sys.argv[1] # 设置模式2d数据分治数据包大小值
    process_nn=sys.argv[2] # 设置并行程序的CPU资源数
    nn=string.atoi(dip_n)
    process_n=string.atoi(process_nn)
    # filename存储2d数据包含的气象要素种类，包含温、压、湿、风以及降水等
    list_result=create_list(filename,nn) # 根据分治数据包大小值，通过该函数将2d数据按照气象要素种类进行划分，划分后返回一个列表对象，供下面使用
    print list_result #输出列表，检查2d数据划分是否准确
    log_file=log_rsync_data2d.log # 指定数据传输的日志记录文件
    len_result=len(list_result)-1 # 确定列表最后一个元素的下标，作为任务分配终止逻辑判断条件参数
    pool=multiprocessing.Pool(processes=process_n) # 利用python的multiprocessing创建进程池，该进程池包含了prpcess_n个进程
    print "start allocate processes to job\n"

    while len_result >= 0: # 未到达划分分治列表的最后时，循环向进程池分配数据传输任务
        print "----rsync_2d_list----"
        pool.apply_async(rsy_2d_list,(list_result[len_result],)) # 将划分列表中的元素传给传输任务，将传输任务分配到进程池中的一个进程，并开始启动进程
        len_result=len_result-1
        print list_result[len_result]
```

```
pool.close() # 当所有的数据传输任务进程完成后，关闭进程池
pool.join() # 释放进程池所占资源，回调到主程序中，继续执行主程序下面代码
endtt=int(time.time())
print "sub processes done and exit\n"
print "total run: %d seconds\n"%(endtt-startt)
if os.path.isfile(log_file):
    output_f=open(log_file,'a')
    output_f.write("%d core %d element %d\n"%(process_n,nn,endtt-startt)) # 计算并行的运行时间，并将时间写入日志记录中
    output_f.close()
```

2 数据划分与分析

数据及问题的划分分治在并行程序设计中占有重要地位，是并行程序开发过程中首要解决的问题^[3]，合理的数据划分分治将大幅提高并行程序的工作效率，本节重点开展针对重庆中尺度数值预报模式数据划分分治及对比分析。

2.1 划分分治

重庆中尺度数值预报模式输出的数据格式为NC格式二进制的2d (2 dimension) 数据文件，该模式一次输出的数据量约13 GB，整体数据由18444左右个小文件组成，文件数量庞大而无序，每一小文件约700 K左右，表示不同时空分辨率下的一种气象要素场（如温、压湿、风、降水）数据，该数据共包含气象要素场100多种，包含业务需求的两种空间分辨率（27 km和3 km）的数据，27 km类型的预报时间分辨率为3 h，3 km类型的时间分辨率为1 h，因此，针对同一种气象要素场，空间分辨率3 km的数据量要大于空间分辨率27 km的数据量。根据上述的数据特征，本文曾依照空间分辨率划分数据，划分后的数据包粒度太粗，且3 km分辨率数据传输时间始终会大于27 km分辨率数据传输时间，实际并行程序时间以

3 km分辨率传输时间为准，程序整体运行负载不均衡；按照文件总数进行划分，又无法快速识别业务上优先级别高的气象要素场数据是否完整可用。最终寻求将数据的气象要素场种类作为划分的依据开展数据的划分分治。

数据分治划分流程（图3）和划分程序源代码详细阐述了模式数据的划分的过程。其中基础的是获取模式2d数据气象要素场的类型文件，此文件包含了传输的模式数据的所有要素场名称。划分分治的功能函数是create_list，该函数需设置两个参数，模式数据的气象要素场种类文件参数filename和划分分治的数据包大小参数n；在初始化列表变量后，读取和处理气象要素场类型文件中的要素场，生成一个初始的列表存放在内存，按照变量n值的大小，计算划分分治数icount和分治后的余数rest_n，通过初始列表的下标值nex_i和pre_i，尽可能均等划分初始列表中的气象要素场，并将划分后的结果依次存储于传输任务列表中，最后将划分分治后的传输任务列表返回给主程序。

#数值模式数据划分功能——划分程序源代码

```
def create_list(filename,n):
```

```
# 初始化该程序中所要使用的变量。
```

```
L_re=[]
```

```
new_L_re=[]
```

```
new_L_re01=[]
```

```
if os.path.isfile(filename): # 判断2d数据要素文件是否存在。filename提取和存储模式2d数据包含的所有的气象要素。
```

```
print "the file is exist\n"
```

```
# 读取气象要素的数据到内存中，通过两个循环
```

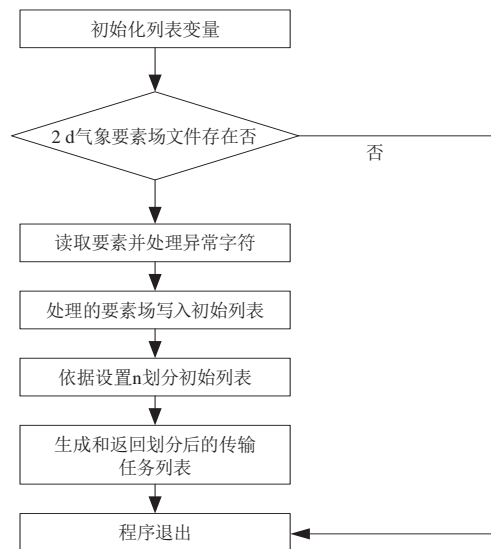


图3 数据划分流程

Fig. 3 The flow of data partition

将要素数据有效存储于初始列表中，去除异常字符，便于划分操作

```
ffile=open(filename,'r')
```

```
for line in ffile:
```

```
line=line.strip("\n").split(",")
```

```
L_re.append(line)
```

```
ffile.close()
```

```
for list_e in L_re:
```

```
str_e=str(list_e).strip("[]").strip("''")
```

```
new_L_re.append(str_e)
```

```
icount=len(new_L_re)/n # 根据设置的划分数据包大小，确定划分分治数
```

```
rest_n=len(new_L_re)%n # 划分后，确定最后一项数据包大小
```

```
while icount > 0:
```

```
if rest_n == 0: # 当余数为0时，2d数据会被均等划分
```

```
nex_i=icount*n
```

```
pre_i=(icount-1)*n
```

```
new_L_re01.append(new_L_re[pre_i:nex_i])
```

```
if rest_n != 0: #当余数不为0时，最后一项数据包大小值不等于n，而是rest_n,但rest_n只能小于n，所以整体不会延长数据并行传输时间。
```

```
pre_i=icount*n
```

```
nex_i=pre_i+rest_n
```

```
new_L_re01.append(new_L_re[pre_i:nex_i])
```

```
rest_n=0
```

```
icount=icount-1
```

```
else:
```

```
print "the file not exist"
```

```
del L_re
```

```
del new_L_re
```

```
return new_L_re01 # 返回根据n划分好的传输任务列表
```

依据模式数据气象要素场的类型，划分原则为一方面划分的数据包包含的气象要素场类型不能太多，避免数据包粒度变粗，影响传输程序执行效率；另一方面尽可能实现均等划分，确保传输并程序负载均衡；基于上述原则本文将模式数据划分为4种不同粗细粒度的分治数据包，形成4种数据分治策略（表1），其中分治数据包大小是指每个分治策略下分治数据包包含的气象要素场类型数目，划分分治数是指每个分治策略下总共划分多少个分治数据包，4种分治策略

中最细粒度的是分治数据包含1种气象要素场，最粗力度的分治数据包含6种气象要素场；下面将对对比分析这4种不同数据分治策略在不同的处理器核数下的运行趋势。

表1 数据分治策略
Table 1 The data partition strategy

分治策略	数据分治策略 1	数据分治策略 2	数据分治策略 3	数据分治策略 4
分治数据包大小	1	2	3	6
划分分治数	174	87	58	29

串行单核的数值模式传输程序平均运行时间约7810s，数据传输时间很长，这主要是因为现有数据管理服务器从一个物理网络接口每天传输交互约37种数值预报模式相关的数据，物理网络接口负载过大的导致的，但网络带宽并没有最大化的利用。本文将4种不同数据分治策略应用到并行传输程序中，通过运行时间、加速比和并行效率三种指标对比分析，综合选择最佳分治策略；加速比 (S) 是衡量并行传输程序一个重要指标，是指单核运行时间 (T_s) 和多核并行运行时间 (T_p) 的比值，该值越大表明并行运行时间越短^[2, 10-11]；并行效率 E 是在加速比上的基础上引入了每次并行使用的处理器核数 n ，实质上是单核运行时间和多核并行运行时间乘以核数 n 的比值，再乘以100%，主要描述并行程序运行过程中系统开销时间的占比^[4, 11]。

2.2 试验和对比分析

试验测试环境为实际的业务应用环境，在不影响数据管理服务器其他数据传输交互业务的实际情况下，极大化的占用空闲态的处理器核资源和网络带宽。在实际应用环境下测试，发现当并发执行进程数超过8时，数据传输会出现大量丢包现象，进程数设置超过10时，数据传输完全中断失败，这说明进程数设置为8以上的值时，便无服务器资源和网络带宽可供分配使用，且逐渐开始占用其他数据传输处理程序的资源，所以为了实现业务应用环境下本并行传输程序改善的实际效果，设置的进程数的阈值为8。服务器节点操作系统均为SUSE 11 Linux x86_64，服务器节点均安装Python，并实现了SSH身份验证，试验分为三种类型，为了保证试验效果和试验数据的可信度，试验过程中处理器核数递增间隔为2；对比分析过程中，各个指标的对比分析图中将离散试验数据用不同的类型曲线连接，以便直观展示各分治策略的变化趋势。

不同数据分治策略下的并行运行时间均优于单核串行程序 (图4)。各分治策略随着核数增加，并行

运行时间逐渐缩小，当处理器核数从2到4时，运行时间降幅较大，运行时间差2000多秒，从4增至8时，并行运行时间降幅度明显缩小，时间差均在300 s左右，从各分治策略的转折线可看出，核数的增加并不意味着运行时间会以相同的速度减少，主要是随着核数的增加，系统在分配任务的进程数增多到一定程度，进程间通信开销大幅度增长，但系统总线只有一条，所以才导致并行运行时间降低力度缩小，运行效率开始渐渐降低；分治策略1、2、4运行时间趋势一致且几乎重合，在超过4个处理器核后，趋势线的斜率有明显一致的变化。分治策略3有点不同，在处理器核数由2增至6时，趋势线斜率变化相对而言变化不大，增至到8时，趋势线斜率和其他策略保持一致，这说明随着核数增加，分治策略3的运行时间降低力度明显，且运行时间开始逐渐优于其他分治策略。

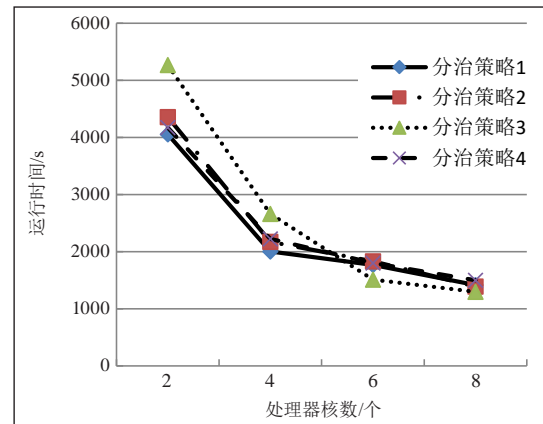


图4 数据分治策略运行时间变化趋势

Fig. 4 The data partition strategies runtime versus number of cores

分治策略的加速比和并行时间变化趋势有一定的关联 (图5)。随着处理器核数的增加，各分治策略下的加速比均呈现非线性的上升趋势。从图3中折线的斜率可看出，分治策略1、2、4的处理器核数从2增至4时，加速比变化幅度较大，数据传输效率提升效果明显，核数从4增加到8时，加速比变化趋势发生了转折，加速比变化幅度相对减小；分治策略3的加速比变化趋势有点不同，当处理器核数增加到6时，加速比变化趋势最大，核数从6增至8时，加速比趋势趋于平缓；分治策略3使用处理器核数增加到4时，加速比值均低于其他分治策略，随着处理器核数不断增加，加速比值逐渐提高，并最终优于其他分治策略，在超过4个处理器核数后，该分治策略对数据的传输效率改善效果最大。加速比趋势变化和上述的并行运行时间的趋势变化类似，说明并行运行时间变化趋势决定加速比变化趋势。

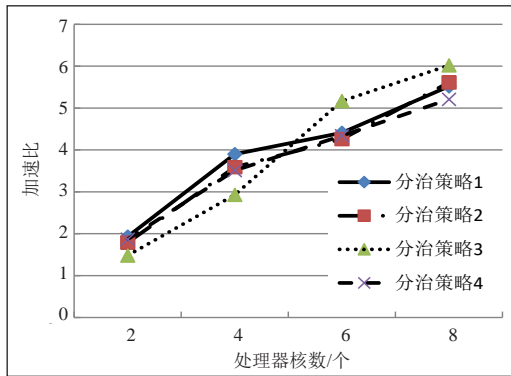


图5 数据分治策略加速比变化趋势

Fig. 5 The data partition strategies acceleration ratio versus number of cores

最后,对比分析一下不同分治策略的并行效率(图6),随着处理器核数增加,分治策略的并行效率均呈现不同的下降趋势。主要因为即随着处理器核数资源占用越来越多,进程数越多,并行程序需耗费更多系统开销时间来完成资源调度分配,导致数据并行传输处理时间所占比重降低;分治策略1、2、4呈现的趋势较为一致,并行效率从90%左右逐渐降低至70%以下,且是非线性的变化趋势,处理器核数增至4个以上时,并行效率降低明显;而分治策略3却呈现另外一种变化趋势,它的并行效率虽然整体上是逐渐降低,但在核数增至到6时,并行效率开始大幅提升,这一点和其策略其它两个指标有一定的关联,该分治策略前两个指标可以看出,当核数从4增至6时,该分治策略发生较大变化,指标值从最差变为最佳,系统开销时间占比相对于整体并行传输时间最低;从整体并行效率变化趋势看,分治策略3并行化效率变化范围控制在70%~85%,整体变化范围比较稳定,其他分治策略并行效率的变化范围和降低力度相对较大。

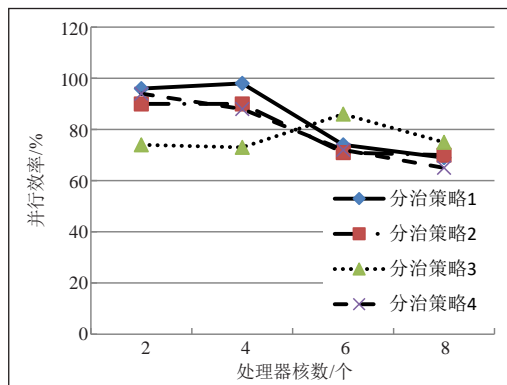


图6 数据分治策略并行效率变化趋势

Fig. 6 The data partition strategies parallel efficiency versus number of cores

为充分利用现有空闲网络带宽和服务器处理器核资源,实现数据传输运行时间最短和并行传输程序稳定和最佳并行效率,综合对比上述并行运行时间、加速比和并行效率三个指标,分治策略3是并行数据传输应用的最佳策略,基于该分治策略的并行传输程序能够能将传输时间从7810 s缩小至1297 s,加速比高达6.02,网络带宽利用率提高了6倍左右,且并行效率维持在75%左右,数据管理服务器的处理器核利用率达到50%。

3 结论

以重庆中尺度数值天气预报模式为例,中尺度数值预报模式的数据并行传输程序在现有网络和计算机资源基础上,采用Python和Rsync数据传输同步技术构建和实现;根据模式数据的特征和实际业务应用环境,将模式数据划分为4种分治策略,对比分析4种不同的分治策略,综合选择最佳的数据分治策略,最终实现最优的模式数据并行传输。最优数据并行传输一方面极大减少模式数据并行传输时间,提高模式数据传输效率,另一方面也较充分利用数据管理服务器中空闲的处理器核和网络带宽,为中尺度数值预报模式海量数据高效率传输备份提供一种解决方案。但重庆精细化数值天气预报系统不仅包含重庆中尺度数值预报模式,按照建设要求还将包含其他不同尺度多类型数值天气预报模式,传输的数据量也将大幅增大,未来将进一步研究基于MPI的进程组间无阻塞通信方式的更加通用的并行传输应用技术,以满足重庆精细化数值天气预报系统的更大容量数据高效率传输需求。

参考文献

- [1] Michael R K. 李德龙,译.精通UNIX shell 脚本编程(第二版).北京:清华大学出版社,2010.
- [2] Wilkinson B. 陆鑫达,译.并行程序设计(第二版).北京:机械工业出版社,2006.
- [3] Wesley J C. 宋吉广,译. Python 核心编程(第二版).北京:人民邮电出版社,2007.
- [4] 张云泉.并行计算模型与算法.北京:机械工业出版社,2016.
- [5] 金之雁,颜宏.并行环境中的有限区域数值预报模式并行计算试验.高原气象,1996,15(1): 21-27.
- [6] 何骞,卓碧华.一种远程文件同步方法.计算机应用,2012,(2): 566-568.
- [7] 杨健才,张华,金之雁.高分辨率下数值预报模式并行计算方法研究.甘肃气象,1999,17(1): 16-18.
- [8] 喻伟,颜宏,金之雁.并行效率初步研究.应用气象学报,1996,7(1): 61-68.
- [9] 周昆,王东勇,朱红芳,等.中尺度数值模式在IBMP690上的并行测试.气象科学,2006,26(6): 651-654.
- [10] The Python Software Foundation. multiprocessing---Process-based "threading" interface [EB/OL]. [2014-08-17]. <https://docs.python.org/2/library/multiprocessing.html>
- [11] 林玉成,赵瑞,罗兵.基于Rsync的中央气象台数据备份机制及优化设计.高原山地气象研究,2014,34(1): 81-85.

2016年冬季河南三次持续污染过程的环流及关键气象要素特征

谷秀杰^{1, 2} 冯丽莎^{1, 2} 田力^{1, 2} 董贞花^{1, 2} 王友贺^{1, 2}

(1 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室, 郑州 450003; 2 河南省气象台, 郑州 450003)

摘要: 2016年11月28日—2017年1月11日, 河南省出现了3次持续多日的中度及其以上的污染天气过程, 分别为2016年11月28日—2016年12月5日、2016年12月15日—21日、2016年12月28日—2017年1月11日, 尤其最后一次, 持续时间长达15 d。第二次污染过程的后4 d, 严重污染自北向南发展到全省。为了今后对持续污染天气的预报有所参考, 对3次污染过程的气象要素演变及高空地面形势进行详尽分析, 总结具有预报意义的天气学特征: 当昼夜温差下降到4~6 °C、温度露点差下降到0~5 °C、风力约为2 m·s⁻¹、气压变幅 < 5 hPa时, 可能会产生严重污染天气; 污染期间, 500 hPa高度正距平达5 dagpm以上, 海平面为负距平或与常年同期相当, 逐日高空环流显示, 河南境内多短波槽活动或长期受偏西到西南气流影响, 地面一般为均压场或鞍型场, 气压梯度小, 风力弱, 当高低空在此形势配置下时, 均有利污染天气的出现或加重; 当925 hPa与1000 hPa的风切 < 1.5 m·s⁻¹, 近地层湍流扩散弱, 大气维持静稳状态, 有利污染天气的发生发展; L波段探空显示, 当200 m以下有逆温, 100 m以下风速 < 3 m·s⁻¹, 贴地层相对湿度在50%左右时, 有可能出现重污染天气; 在污染持续期间若出现小雨量级降水时, 污染会有所减弱, 但不会彻底清除; 当高空转为较强西北气流或地面有强冷空气南下时, 即气压梯度显著增加、风力明显加大, 污染天气将彻底结束。

关键词: 持续污染, 形势场特点, 气象要素演变, L波段探空数据特征

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.06.004

Circulation and Key Meteorological Factors for the Three Consecutive Air Pollution Processes in Henan During the Winter of 2016

Gu Xiujie^{1, 2}, Feng Lisha^{1, 3}, Tian Li^{1, 3}, Dong Zhenhua, Wang Youhe^{1, 2}

(1 CMA·Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, Zhengzhou 450003 2 Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003)

Abstract: Three air pollution events happened from November 28, 2016 to January 11, 2017 in Henan Province. They occurred during November 28- December 5, 2016, December 15-21, 2016, and December 28, 2016-January 11, 2017 respectively. Each pollution event lasted several days, especially 15 days for the last one, with magnitude of moderate or above. Four days after the second air pollution process, serious pollution was spread from the north to the south covering the whole province. For enabling better forecast of consecutive air pollution event in the future, this study analyzed the evolution of meteorological elements and the situation of the upper ground surface of the three pollution processes in detail. Weather features with predictive significance were summarized. Serious pollution weather may be triggered in case the temperature difference between day and night drops to 4~6°C, dew point temperature drops to 0~5°C, the wind is about 2 m·s⁻¹, and pressure amplitude is less than 5 hPa. During the pollution period, there were more short-wave trough activities in Henan. The ground was generally equalized or saddle-shaped probably because of the west-to-southwest airstream in the long-term. Air pollution is prone to occur when the pressure gradient was small, and the wind force was weak. As indicated by the L-band sounding data, heavy pollution may occur when there is temperature inversion below 200 m, the wind speed below 100m is less than 3 m·s⁻¹, and the relative humidity of the surface layer is about 50%. The pollution will be weakened but not completely removed if there is light rainfall. When the sky turns into a stronger northwest airstream or the ground has strong cold air south (i.e., the pressure gradient force increases and the wind force obviously increases), the polluted weather will be completely disappeared.

Keywords: consecutive pollution, characteristics of the situation field, evolution of meteorological element, L-band sounding data feature

收稿日期: 2018年10月8日; 修回日期: 2019年3月8日

第一作者: 谷秀杰(1977—), E-mail: gxjwang@163.com

资助信息: 中国气象局预报员专项项目(CMAYBY2017-043);
河南省气象局暴雨预报创新团队

0 引言

灰霾主要是由悬浮在空气中的细颗粒引起的大气能见度降低的天气现象, 与空气污染程度的变化关系密切^[1]。随着经济规模迅速扩大和城市化进程的加

快, 污染物排放量日益增大, 灰霾天的出现越来越频繁, 灰霾天气的研究已成为一个热点。司瑶冰等^[2]、饶晓琴等^[3]和朱彬等^[4]研究表明, 影响空气污染发生的原因有多种, 一是本地污染物的排放或者局地污染物的输送达到一定量; 二是有利污染物堆积的气象条件。影响城市大气污染的最重要两大因素是污染物排放和大气的稳定性, 导致污染物浓度变化的主导因素是天气变化。

目前, 已有一些气象工作者就气象条件与污染的关系做了相关研究, 如张夏琨等^[5]和山义昌等^[6]分别研究了石家庄市和潍坊市空气质量与气象条件的关系; 杨兰芳等^[7]和赵敬国等^[8]分析了兰州市城区大气受烟尘污染的变化特征及空气污染与气象条件的关系; 肖舜等^[9]和孟燕军等^[10]分析了西安世园会园区大气环境质量与气象因子的关系, 并归纳了影响北京市大气污染物变化的地面天气形势场特征; 纪晓玲等^[11]探讨了银川市灰霾天气环流分析及预报思路。大量研究结果^[12-13]表明, 气象条件通过影响污染物的稀释、扩散、传输和转化过程, 进而影响污染物的时空分布。然而目前关于连续污染天气的相关预报研究还不够, 远不能满足连续污染天气预报、预警业务的开展和为政府、公众提供信息服务的需求。大气扩散的理论研究和试验研究表明, 在不同的气象条件下, 同一污染源排放所造成的地面污染物浓度可相差几十倍乃至几百倍。这是由于大气对污染物的扩散稀释能力随着气象条件的不同而发生巨大变化缘故。因此, 深入研究连续污

染期间以及结束时的气象要素演变特征和高空、地面环流特点十分必要, 可为今后连续污染天气的持续、结束气象条件研判以及预报预警业务开展提供科学依据。针对以上需求, 本文就河南省2016年冬季出现的3次大范围持续污染天气过程, 利用常规高空、地面观测资料、NCEP再分析资料以及L波段探空资料等, 从环流场、距平场、温压湿要素演变特征以及近地层逆温等方面进行了详尽分析, 从而凝练出对预报、预警具有重要参考价值的定性及定量指标。

1 污染实况

2016年末—2017年初, 河南省出现了多次、持续性的中度到严重污染天气过程(图1)。第I次过程发生在2016年11月28日—12月5日, 持续8 d, 其中12月2日为全省中到重度污染, 12月5日北中部部分地区为重度污染, 其他时段均为轻到中度污染。第II次过程发生在2016年12月15—21日, 持续7 d, 其中15—17日全省大部分地区为中到重度污染, 18日沿黄河及以北地区加强为严重污染, 19—20日严重污染进一步扩展到全省。第III次过程发生在2016年12月28日—2017年1月11日, 持续长达15 d, 其中2016年12月28日—2017年1月3日, 几乎为全省性重度污染, 豫北部分县市为严重污染; 2017年1月4—7日污染范围明显缩小, 强度也有所减弱, 豫北转为重度污染, 其他地区减弱为轻到中度污染或良; 8—11日污染再次加强, 除西部三门峡地区外, 其他大部分地区均为中到重度污染, 稍弱于过程开始阶段。

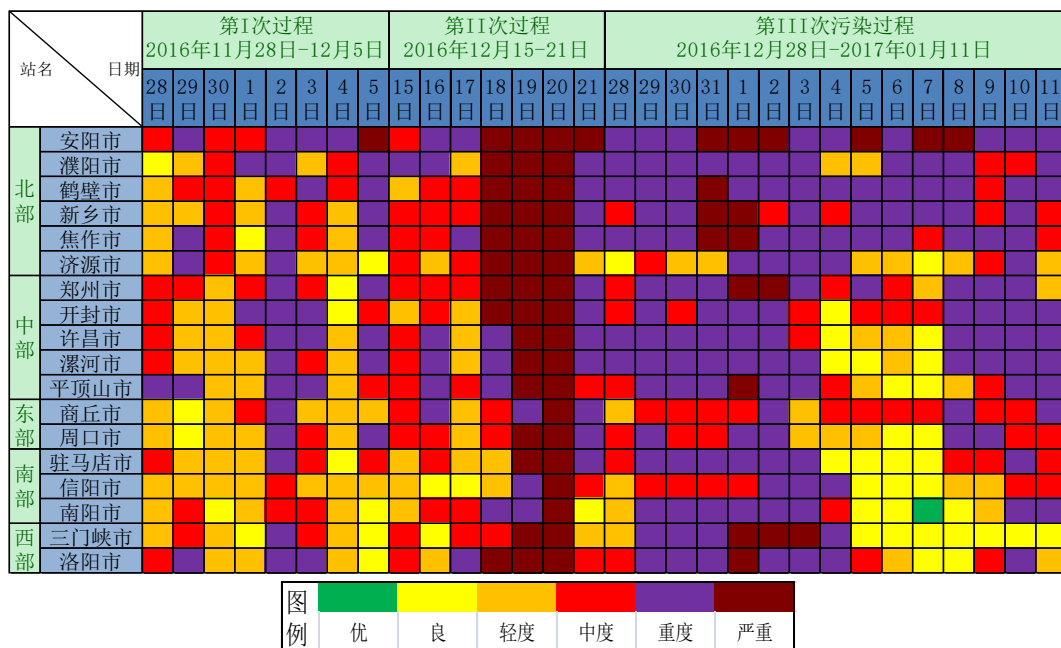


图1 3次污染过程实况

Fig. 1 Actual situation of three pollution processes

2 气象要素特征

为了了解污染天气产生、持续和结束与气象要素演变的关系，并归纳总结其变化特征，为今后污染天气的预报提供有利参考。分别对3次污染过程自北向南选取安阳站（北部）、郑州站（中部）和信阳站（南部）3个代表站，作为主要分析对象，制作3站污染期间气温、气压、露点和降水折线图，对比分析各要素演变特征及其对应的污染时段。

第I次污染过程从安阳（图2a）和郑州（图2b）两站的温度变化曲线可知，北中部夜间最低温度在 $2\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，白天最高温度 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右，昼夜温差 $11\sim 13\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，信阳站（图2c）昼夜温差略小，约 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。3站气压均在 $1015\sim 1035\text{ hPa}$ 摆动，变化幅度达 20 hPa ，结合地面图可知，在2016年12月2日前受高压带控制，2日后逐渐转入由东北经华北南伸的低压带中的均压场里，同时伴随污染逐渐加强，5日，由于强冷空气东移南下，西部西北风、北部偏北风逐渐加大到 $6\sim 8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，河南上游局地出现扬沙，伴随着风力逐渐加大及有利的风向，上游的浮尘与扬沙逐渐向河南省输送，使得 PM_{10} 浓度明显升高，造成北中部地区重度污染。除5日外，其他时段风力均为 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右，边界层扩散条件较差，有利于污染天气出现。

第II次污染过程从3站的折线图（图2d~2f）可知，2016年12月18—20日，严重污染期间，3站气象要素共同特征为，早晚温差逐渐缩小，由前期的 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右下降到 $4\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，即最高温度在降低、最低温度在升高。3站露点温度在严重污染发生前的17日均有明显升高趋势，而后安阳站稳定在 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，郑州站稳定在 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，信阳站逐渐上升到 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右，温度露点差减小到 $0\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，部分时刻露点温度接近气温，空气基本达到饱和，部分吸湿粒子凝结增大但没有达到下沉的比重，这时会使污染加重。由于污染期间几乎无冷空气影响，海平面气压维持在 1025 hPa 左右，变化幅度不超过 5 hPa ，气压梯度小、风速小。21日强冷空气南下，并伴有弱降水，风力的加大及降水的产生有利污染物的扩散和沉降，污染由严重转为重度。22日，冷空气继续南下，风速及温度露点差显著增大，静稳的大气层结被打破，污染天气进一步减弱并消散。

第III次污染期间温度及露点温度变化（图2g~2i）表明，二者有呈同位相变化趋势，白天气温升高时，露点温度略有升高，夜间气温逐渐降低，有时最低温度会降到与露点温度相同，空气基本达到饱和状态，此时为雾霾混合态。海平面气压折线显示，2016年12月29日之后气压在 $1020\sim 1030\text{ hPa}$ 变化，变

动幅度约为 10 hPa ，风速依然为 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右，风向以偏北或北北东为主。2017年1月4—7日，污染减弱阶段，全省大部分地区出现了小雨天气，从降水的柱状图可知，南部信阳站降水明显强于北部的安阳站，此时南部地区污染迅速减弱，部分地区以良为主，北中部地区仍为重度污染，这一事实说明，降水越明显，湿沉降作用越显著。本次污染结束的显著特征是温度露点差明显增大，如2017年1月12日14时，3站气温在 $10\sim 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，露点温度 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右，二者差值超过 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

上述对污染期间气象要素演变分析表明，当最高温度降低，最低温度升高，昼夜温差减小时；露点温度升高或恒定时，温度露点差减小，甚至部分时段空气达到饱和时；温度与露点温度有呈同位相变化趋势时，温度露点差无变化或减小时；均有利污染天气的出现。当昼夜温差下降到 $4\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，温度露点差下降到 $0\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，风力约为 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，气压变幅 $< 5\text{ hPa}$ 或强冷空气开始南下 PM_{10} 浓度明显升高时，均有可能产生严重污染天气，若上述气象条件无明显改善，污染天气将持续。当有弱降水或弱冷空气影响时，风力略有增加，污染会稍有缓解，但不会彻底清除。只有强冷空气南下导致气压快速升高、风力迅速加大到 $6\sim 8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、温度露点差显著增加，或者有明显降水出现时，污染天气将彻底结束。

3 形势场演变及距平场特征

3.1 500 hPa 形势演变及距平场特征

天气形势从根本上决定了气象要素的分布和变化，从而决定了大气的扩散能力与大气的稳定程度。对一个地区而言，污染源的变化在短时间内是相对稳定的，在这种情况下，污染物浓度的高低变化主要取决于大气的扩散能力。第I次污染期间，12月2日20时500 hPa高空图显示，在 70°E 附近、 45°N 以北地区有高压脊逐渐发展并东移，同时在 120°E 、 70°N 附近有500 dagpm的低压中心逐渐向东南方向移动，至3日20时，高压脊东移到 80°E 附近，东部低涡中心稳定少动，508 dagpm的等高线南压到 55°N 附近，河南省受低压底部及脊前不断东移南下的短波槽影响。4日20时高压脊继续东移到 90°E 附近、 40°N 以北地区，低涡中心东南移到 130°E 、 60°N 附近，随着高压脊的进一步东移，河南省由西西南气流转为西西北气流影响，至5日20时，脊线继续东移到 100°E 附近，低涡移至 135°E 、 58°N 附近，此时，河南省处在脊前、低涡后部的西北风里，同时伴有强冷空气南下，扩散条件明显改善，污染天气逐渐减弱消散。污染期间距平场显

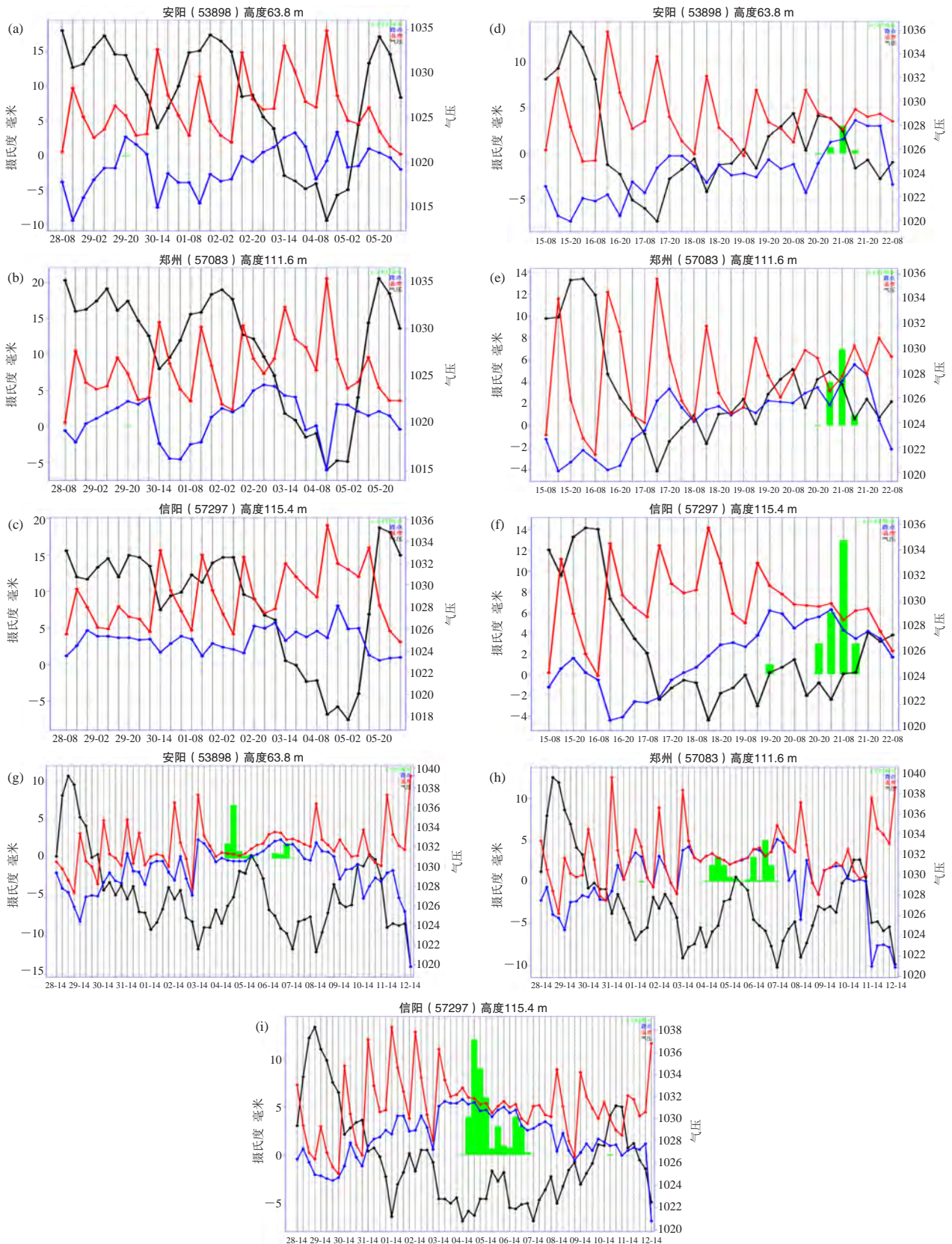


图2 3次污染期间安阳 (a、d、g)、郑州 (b、e、h)、信阳 (c、f、i) 站气温、气压、露点折线图
 Fig.2 Temperature, pressure, and dew point in Anyang, Zhengzhou and Xinyang during the three pollution periods
 (a), (d), (g) are for Anyang Station; (b), (e), (h) are for Zhengzhou Station; and (c), (f), (i) are for Xinyang Station

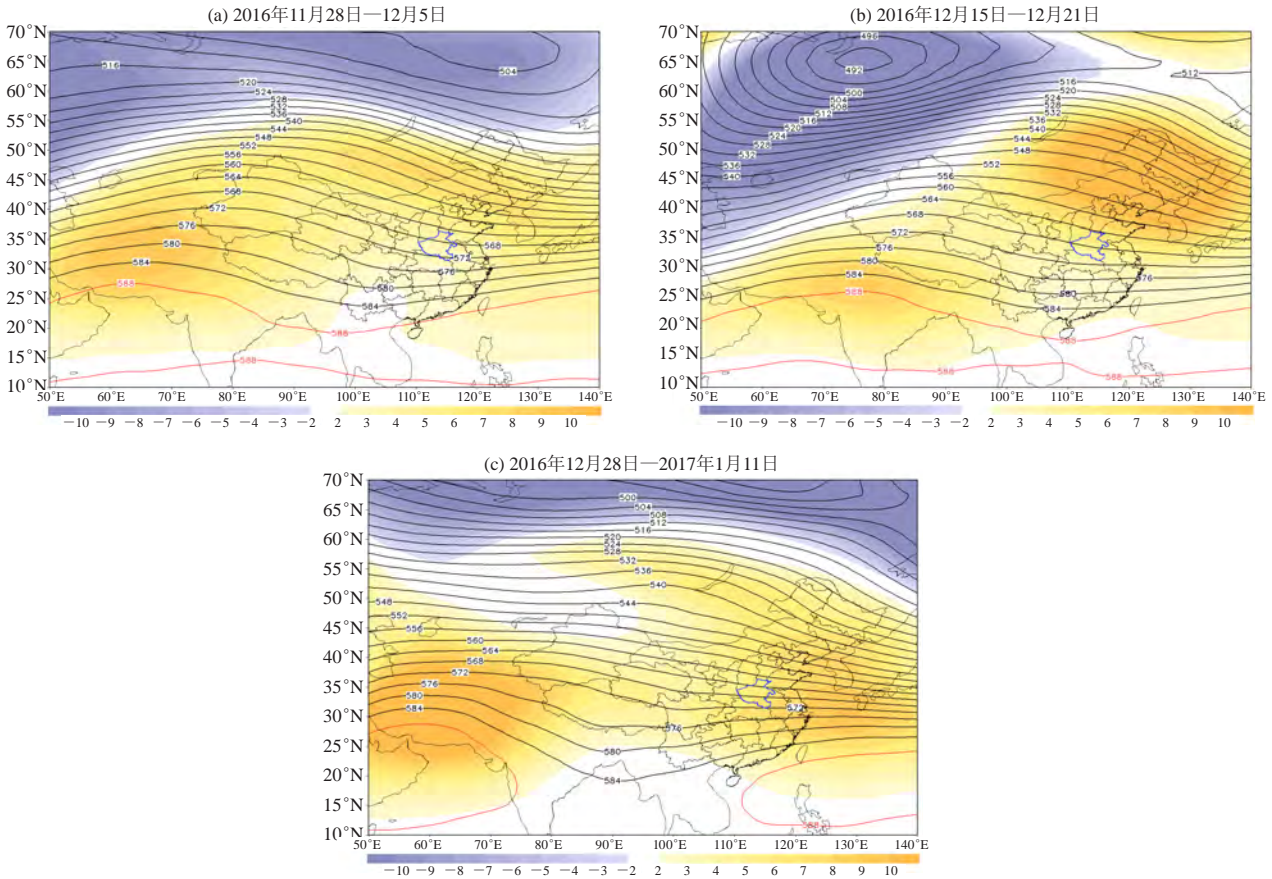


图3 500 hPa平均高度(等值线)及距平场(色斑)

(a) 第I次过程; (b) 第II次过程; (c) 第III次过程(单位: dagpm)

Fig. 3 500 hPa average height (contour) and anomalous field (spot): (a) the first process, (b) the second process, and (c) the third process (unit: dagpm)

示(图3a), 55°—60°N以北地区为负距平区, 以南为正距平区, 且在80°E以西、25°—40°N之间有一正距平中心, 中心强度达8 dagpm, 河南省所处区域正距平约为5 dagpm。

第II次污染期间, 即2016年12月15—21日, 500 hPa形势场在70°—80°E及60°N以北地区始终维持492 dagpm低压中心, 这一特征与第I次过程有所不同, 在20°—60°N为平直西风环流, 且不断有短波槽东移影响河南省, 这点与第I次过程非常相似, 直至21日20时, 转受西北气流控制, 污染彻底结束。第II次过程500 hPa平均高度场(图3b)显示, 河南省所处的中纬度地区环流与第I次较为相似, 均为西西北气流影响, 但在65°N、80°E附近有496 dagpm的低压中心与第I次过程明显不同, 由低压中心向西南一直延伸到35°N均为负距平区, 东北到华北为正距平区, 河南省处在6~7 dagpm正距平区域内。

第III次过程500 hPa形势场显示, 2016年12月28—29日, 河南省由西北气流转为西南气流, 12月

30日—2017年1月3日, 在80°—120°E、65°—75°N地区维持庞大的低压系统, 另外南支槽位于90°E、15°—30°N附近, 在30°—60°N中纬度地区为平直西风环流, 不断有短波槽东移影响河南省, 这一特征与前两次过程基本相同, 同时也说明高空环流平直且有短波槽东移是有利于污染天气形成的天气尺度特征之一。4日20时, 南支槽东移到95°E附近, 河南省转为西南气流影响, 同时在贝加尔湖南侧有低槽逐渐发展并东南移, 与中纬度低槽合并后于7日20时移过河南省, 在此期间河南省产生了弱降水, 污染略有缓解, 但低槽过后环流并没有明显调整, 8—11日依然以平直西风气流为主, 底层湍流扩散较弱, 污染天气略有发展并持续。距平场显示(图3c)与第I次过程较为相似, 在55°—60°N以北地区为负距平区, 以南为正距平区, 且在80°E以西、25°—40°N之间有一正距平中心, 中心强度达8 dagpm, 河南省处在正距平约为5 dagpm的区域。

对三次污染过程的500 hPa形势演变及距平场

分析表明, 污染期间, 河南省所处的中纬度地区多为平直西风环流, 每隔2~3d有短波槽移过或长期受偏西到西南气流影响, 且为正距平, 强度达5~7 dagpm, 上述特征均不利东亚大槽的建立和冷空气南下, 但有利于静稳天气形成及维持, 进而导致污染天气出现。

3.2 地面形势演变及距平场特征

第I次污染过程中, 2016年11月20日08时地面场显示, 新疆到贝加尔湖南侧一带为1040 hPa庞大高压区, 随后高压主体逐渐向东扩展, 29日08时, 高压带断裂成两部分, 一个中心位于新疆北部, 另一中心位于东北地区, 河南省处在两高之间的均压场里。30日—12月1日, 西部的高压中心不断东移到河套地区, 河南受扩散冷空气影响, 扩散条件逐渐转好, 从上面的实况分析可知, 此时河南全省为轻到中度污染, 污染相对较弱。2日20时河南省处在均压场里, 扩散条件明显变差, 此时也是本次污染过程最严重的时段。3日20时, 由东北北部经华北直到河南省为一低压带, 同时, 在贝加尔湖西侧有1042.5 hPa的高压中心逐渐发展。4日20时, 高压中心略南移, 但冷高压的前锋已东南伸到华北北部, 受冷空气推挤, 东北地区的低压带快速收缩东移到日本海到山东半岛, 随着冷空气的进一步东移南下, 冷空气前锋于5日白天到达河南省, 风力快速加大, 河南省上游局地出现了扬沙天气, PM_{10} 浓度显著升高, 并造成北中部地区重度污染。由于强冷空气作用, 维持多日的静稳大气层结被打破, 近地层湍流扩散明显增强, 污染天气彻底结束。

第II次污染期间逐日地面图演变显示, 河南省处在北高南低的气压场里, 但气压梯度非常小, 以2~3 $m \cdot s^{-1}$ 东北风为主, 由于华北地区的严重污染, 弱的北-东北风将上游的污染物传输到河南。2016年12月21日08时, 前期在贝加尔湖附近逐渐堆积加强的冷空气, 沿河西走廊经河套地带继续南下影响河南省, 河南省西部地区风力逐渐加大到4~6 $m \cdot s^{-1}$, 配合高空西北气流, 大气的扩散条件逐渐增强, 维持多日的污染天气陆续消除。

第III次污染过程地面场分析表明, 2016年12月28—31日期间, 河南省处在高压里的均压场中, 风力小, 不利污染物扩散。2017年1月1—2日, 河套地区有冷高压东南移, 但由于河南省北部和西部同时加压, 河南省大部分地区风力依然较小, 湍流扩散仍然很弱, 污染物进一步累积, 因此在2016年12月28日—2017年1月3日期间, 污染逐渐加重, 大部分地区

以重度污染为主。4日以后, 贝加尔湖到新疆地区北部维持1040 hPa的冷高压中心, 不断有冷空气扩散南下, 配合东移的高空槽, 河南省出现弱降水天气, 由于降水的稀释及沉降作用, 4—8日期间污染略有减弱。降水结束后, 8—11日高空转受槽后偏西气流控制; 地面图上, 冷中心位置维持不变, 河套地区气压梯度增大, 河南省处在大梯度区前沿的均压场里, 扩散条件较差, 重污染区由河南省北部逐渐扩展到中部。12日起, 高空形势明显调整, 700 hPa转为西北气流; 地面场显示, 河南省西部气压梯度明显加大, 偏西风加大到4 $m \cdot s^{-1}$, 持续长达15 d的中到重度污染天气结束。

综上所述, 污染期间地面为均压场或鞍型场, 风力约为2 $m \cdot s^{-1}$, 并且无特定风向。即便有弱冷空气扩散南下, 气压略有升高, 但风力无明显增加时, 污染天气依然维持。当出现小雨量级的降水时, 污染会有所减弱, 但不会消除, 并且在降水发生前后污染有加重趋势。当高空转为较强西北气流或地面有强冷空气影响, 即风力加大到6~8 $m \cdot s^{-1}$ 时, 污染会彻底清除。由于排放到大气中的污染物在风的作用下, 会被输送到其它地区, 风速愈大, 单位时间内污染物被输送的距离愈远, 混入的空气愈多, 污染浓度愈低, 所以风不但对污染物进行水平搬运, 而且有稀释冲淡的作用, 所以当强冷空南下, 风力明显增大时持续多日的污染天气将结束。

3次污染过程平均海平面气压场及距平场(图4a~4c)显示, 从新疆北部经西北至华北及蒙古国境内为1028 hPa控制的庞大高压带, 锋区位于长江及以南地区, 河南省处在二者过渡地带的均压场中且为负距平或与常年持平。地面为均压场, 等压线稀疏, 气压梯度力小, 不利于近地层风力的加大, 负距平同样说明冷空气势力较弱, 湍流扩散有限, 有利于污染天气出现。

4 低层大气层结特征

4.1 风切变特征

从925 hPa与1000 hPa的风切变可知, 第I次过程(图5a)风切变在1.5~2.5 $m \cdot s^{-1}$, 相对后两次稍大, 因此第一次污染过程要弱于后两次。后两次污染过程(图5b~5c)风切变均<1.5 $m \cdot s^{-1}$, 水平风垂直切变小不利于近地面污染物的垂直扩散, 近地层湍流扩散非常弱, 大气维持静稳状态, 底层污染物很难向上层或周边扩散, 使得污染物在大气层底部聚集, 并随时间逐渐累计, 污染也随之加重。直到有强冷空气南下, 大气静稳状态被打破, 底层污染物得到有效稀释

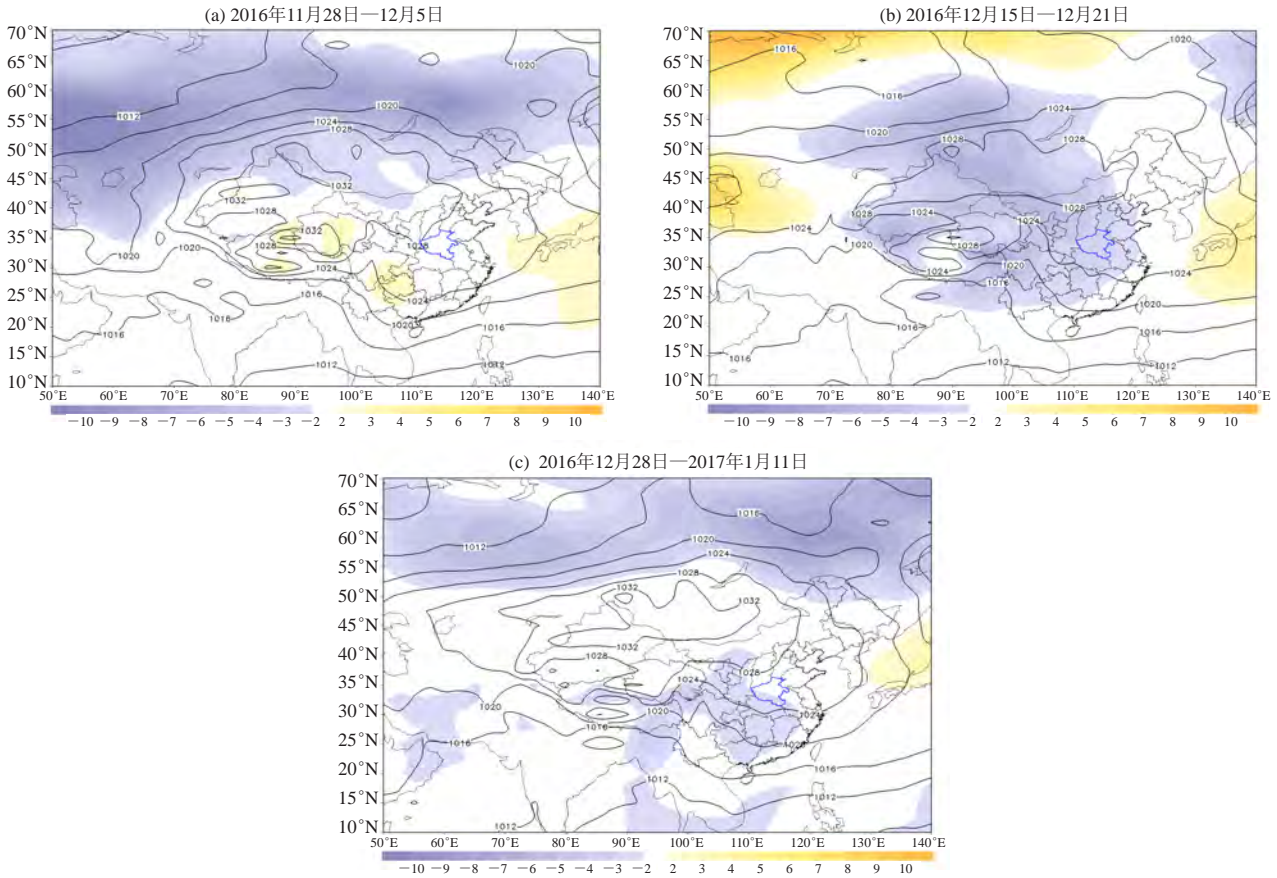


图4 平均海平面气压（等值线）及距平场（色斑）；（a）第I次过程、（b）第II次过程、（c）第III次过程（单位：hPa）
Fig.4 Mean sea level pressure (contour) and anomalous field (spot)
(a) the first process, (b) the second process, and (c) the third process (unit: hPa)

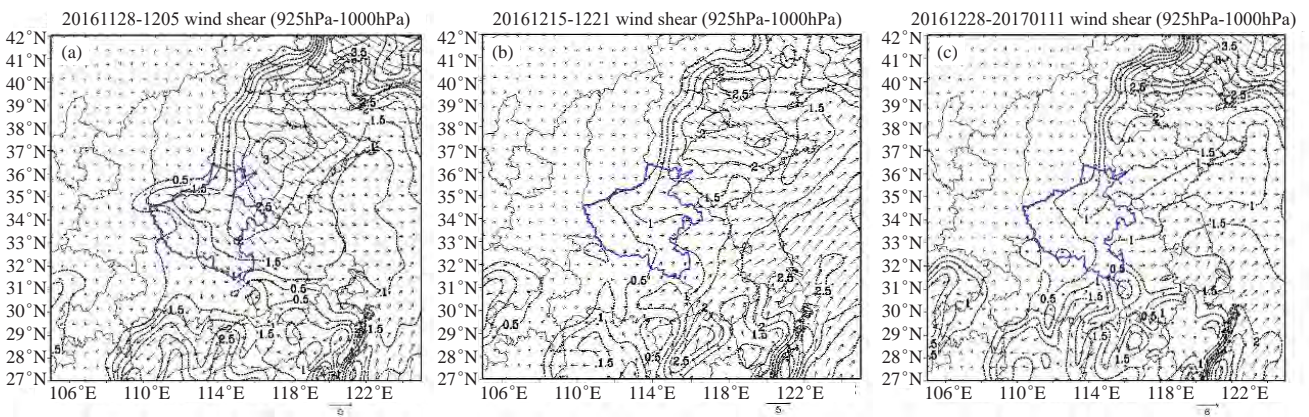


图5 925 hPa与1000 hPa的风切变
(a) 第I次过程；(b) 第II次过程；(c) 第III次过程（单位： $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ）

Fig. 5 Wind cut of 925 hPa and 1000 hPa (a) the first process, (b) the second process, and (c) the third process (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

与扩散，污染天气彻底结束。

4.2 L 波段探空数据特征

姜大膀等^[14]对兰州市区低空大气温度层结特征及其与空气污染的关系研究表明：空气污染物浓度与市区上空逆温层发生频率呈正相关；与低空大气层结温

度递减率呈负相关。L波段探空仪是我国近年来气象业务中广泛运用的新一代高空探测系统，可探测从地面到3000 m高空的风向、风速、气温、气压、湿度等气象要素，能较好反映逆温情况。

图6为3次污染期间郑州站L波段探空剖面图，从

中可知200 m以下均有逆温存在, 大气中逆温层的出现, 会增强大气稳定性, 阻碍空气垂直运动发展, 使得大量的烟、尘、水汽凝结物等聚集在近地面, 造成空气污染。100 m以下风速均 $<3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 贴地层相对湿度在50%左右。当低层湿度大, 高层湿度明显减小(图6a)或1000 m以下风力均 $<3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 并且50%的相

对湿度增至600 m左右时(图6b), 将出现重度到严重污染, 如12月2日及12月18—20日。另外, 在2017年1月4—8日弱污染期间(图6c), 近地层基本无逆温, 1000 m以下相对湿度均为80%左右并伴有降水出现。可见, 当近地层大气温度递减率较小或有贴地逆温层存在, 以及大气处于下湿上干时, 大气层结稳

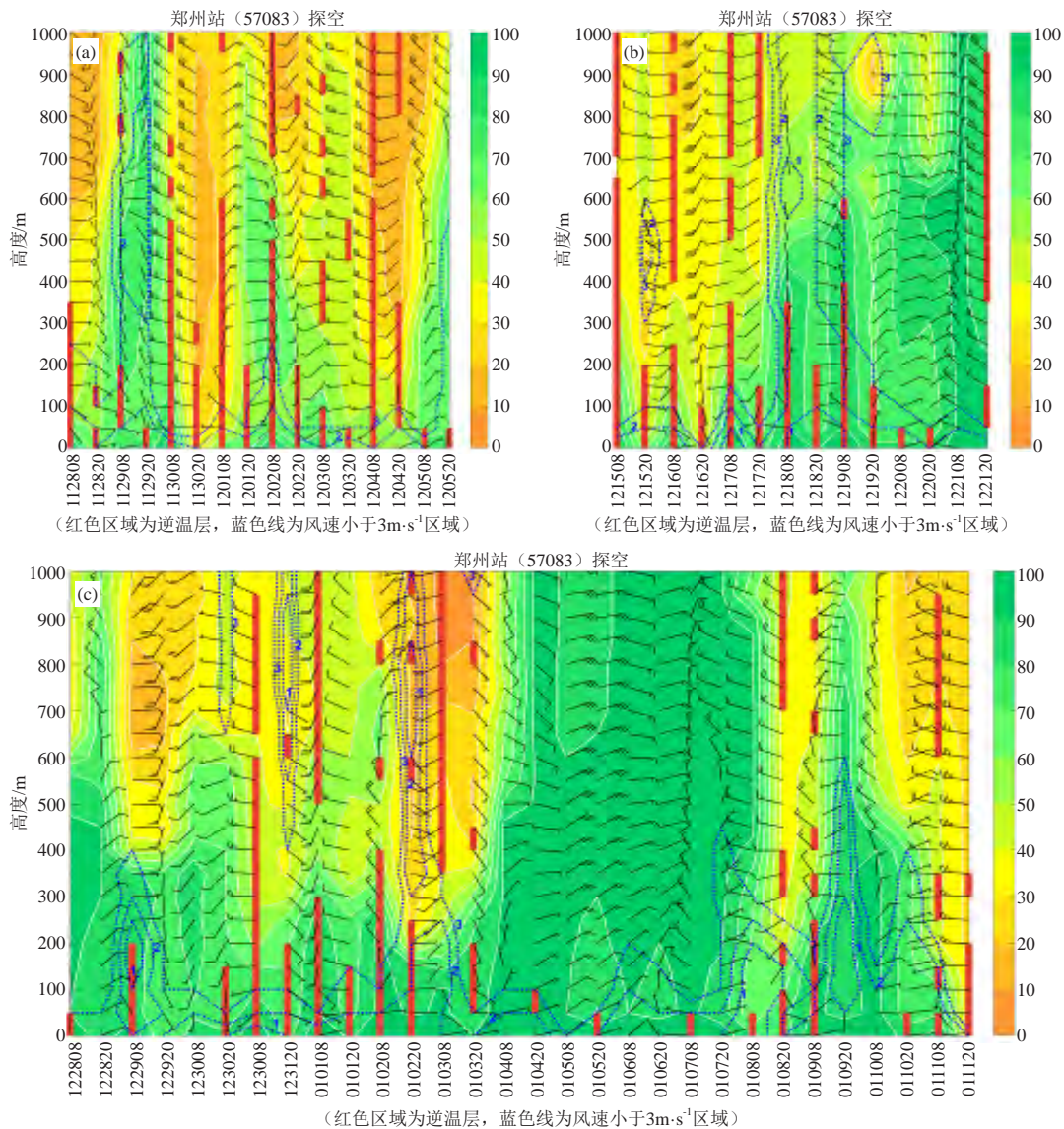


图6 郑州站L波段探空图(色斑为相对湿度, 单位: %)

(a) 第I次过程; (b) 第II次过程; (c) 第III次过程

Fig. 6 L-band sounding map of Zhengzhou station (color of the spot represents different relative humidity unit: %) (a) the first process, (b) the second process, and (c) the third process

定, 大气对污染物的稀释扩散能力减弱, 往往会造成近地面严重污染。

5 结论

1) 通过对3次污染期间气象要素演变的详尽分析, 可知当气压显著下降且变化幅度 $<5 \text{ hPa}$ 、风力

$2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右、昼夜温差下降到 $4\sim 6^\circ\text{C}$ 、温度露点差下降到 $0\sim 5^\circ\text{C}$ 或强冷空气南下 PM_{10} 浓度明显升高时, 均可产生严重污染天气, 若上述气象条件无明显改善, 污染天气将持续。当有弱降水或弱冷空气影响, 风力略有增加时, 污染会稍有缓解, 但不会彻底清除。当

有强冷空气南下即气压快速升高、风力明显加大到 $6\sim 8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以及温度露点差迅速增加到 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,或有明显降水时,污染天气将会彻底结束。

2) 污染期间河南所在区域,500 hPa逐日环流场表现为每隔2~3d有短波槽移过或长期受偏西到西南气流影响,合成场为平直的西风环流控制且为正距平,不利于东亚大槽的建立和冷空气南下,有利于静稳天气出现;地面为均压场或鞍型场为负距平或与常年持平,冷空气势力较弱,等压线稀疏,气压梯度力小,不利于近地层风力的加大,湍流扩散有限,有利于污染天气的出现。

3) 当出现小雨量级的降水时,污染会有所减弱,但不会消除,并且降水发生前后污染有加重的趋势。当高空转为较强西北气流或地面有强冷空气影响即风力增加到 $6\sim 8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,污染将彻底清除。

4) 短期内在空气污染物排放量变化不大的情况下,当近地层大气温度递减率较小或有贴地逆温层存在时,大气层结稳定,空气污染物的稀释扩散能力减弱,往往会造成严重污染。L波段探空剖面表明,污染期间200 m以下均有逆温存在,100 m以下风速均 $<3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,贴地层相对湿度在50%左右。当低层湿度大,高层湿度迅速减小时,或1000 m以下风力均

$<3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,并且50%的相对湿度增至600 m左右时,将出现重度到严重污染。

参考文献

- [1] 朱岗篁. 大气污染物理学基础. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- [2] 司瑶冰, 官春宁, 郑有飞, 等. 呼和浩特市大气污染与天气气候的关系. 气象科技, 2005, 33(2): 173-177.
- [3] 饶晓琴, 李峰, 周宁芳, 等. 我国中东部一次大范围霾天气的分析. 气象, 2008, 34(6): 89-96.
- [4] 朱彬, 苏继锋, 韩志伟, 等. 秸秆焚烧导致南京及周边地区一次严重空气污染过程分析. 中国环境科学, 2010, 30(5): 585-592.
- [5] 张夏琨, 王春玲, 王宝鉴. 气象条件对石家庄市空气质量的影响. 干旱气象, 2011, 29(1): 42-47.
- [6] 山义昌, 徐太安, 王善芳, 等. 潍坊市近10年空气质量与气象条件的关系. 气象, 2004, 30(10): 47-51.
- [7] 杨兰芳, 李宗义. 兰州市城区大气烟尘污染的变化与气象条件分析. 气象, 2004, 30(8): 53-57.
- [8] 赵敬国, 王式功, 王嘉媛, 等. 兰州市空气污染与气象条件关系分析. 兰州大学学报: 自然科学版, 2013, 49(4): 491-503.
- [9] 肖舜, 沈瑾, 刘璐, 等. 西安世园会园区大气环境质量与气象因子关系分析. 干旱气象, 2012, 30(1): 1-7.
- [10] 孟燕军, 程丛兰. 影响北京大气污染物变化的地面天气形势分析. 气象, 2002, 28(4): 45-47.
- [11] 纪晓玲, 桑建人, 马筛艳, 等. 银川市灰霾天气环流分析及预报思路. 干旱气象, 2013, 31(4): 820-824.
- [12] 徐晓峰, 李青春, 张小玲. 北京一次局地重污染过程气象条件分析. 气象科技, 2005, 33(6): 543-547.
- [13] 刘波. 南昌市一次连续空气污染过程的气象条件分析. 气象与减灾研究, 2009, 32(2): 68-72.
- [14] 姜大膀, 王式功, 郎咸梅, 等. 兰州市区低空大气温度层结特征及其与空气污染的关系. 兰州大学学报: 自然科学版, 2001, 37(4): 133-139.

生物技术推进蓝色经济——NOAA组学战略介绍

田晓阳

NOAA希望通过基因组学、蛋白组学、代谢组学等各种生物组学('Omics)工具加强对海洋和五大湖地区生物群落的长期监测和了解,以有利于渔业管理、水产养殖业发展、食品和水安全、物种和栖息地保护、海鲜消费者保护以及天然产物发现等,实现生态系统资源的可持续管理。

相比传统人工采样,组学与自动采样结合可以更高效地指示生态状况,也提供更详细的生物信息。但更多的信息也对机构计算能力和人员能力提出了新挑战。据此,NOAA提出了组学战略的5个目标。目标1针对基础架构,保障数据收集、处理、分析、存储和管理,这将与云计算和人工智能能力建设等战略联合进行。目标2提出应在“蓝色经济”的优先事项领域,比如有害物种、海产品状态等,实施针对性项

目。目标3专注研究向业务的转化,生物组学可以与很多其他新兴技术组合,增强常规业务,也提供新的业务项目,这一条中包含对技术验证和技术转化规划的要求。目标4是机构内和与其他机构的合作,承诺资助上有所倾斜。目标5立足员工能力,提出应加强人员培训、聘用等方面工作。



(作者单位: 中国气象局气象干部培训学院)

2009—2017年上海市雷电活动及灾害时空特征研究

樊蕴馨^{1, 2, 3} 徐伟^{1, 2} 莫丽^{1, 2}

(1 北京师范大学地理科学学部环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875;

2 北京师范大学应急管理部-教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 3 上海市气象灾害防御技术中心, 上海 200030)

摘要: 利用上海市全雷电网监测等收集的雷电及其灾情数据, 通过ArcGIS空间分析技术和数理统计方法, 分析2009—2017年间上海市雷电活动(致灾因子)和雷电灾情的时空特征。结果表明: 上海市雷电活动年际差异明显, 高发期在每年的6—9月, 每天的12—17时。上海市雷电密度总体为西北高东南低, 密集于中心城区、宝山区、和浦东新区北部。从天气背景场来看, “槽前型”天气背景容易导致上海雷电活动发生。上海雷电灾害时空分布与雷电致灾因子类似, 高发于每年6—9月, 浦东新区、宝山区和中心城区灾情相对严重, 主要损失类型为“电力设施”。

关键词: 雷电活动, 雷电灾害, 时空分布, 上海

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.06.005

Spatial-Temporal Patterns of Lighting and Disasters in Shanghai from 2009 to 2017

Fan Yunxin^{1, 2, 3}, Xu Wei^{1, 2}, Mo Li^{1, 2}

(1 Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster of Ministry of Education, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875 2 Academy of Disaster Reduction and Emergency Management,

Ministry of Emergency Management & Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875

3 Shanghai Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Shanghai 200030)

Abstract: In this study, the spatial-temporal patterns of the lightning strokes and disasters of Shanghai were analyzed based on the ArcGIS technology and statistical method. The results showed that the annual difference in lightning was obvious in Shanghai. Lightning was frequent from June to September and from 12:00 o'clock to 19:00 o'clock. Northwestern areas, especially the central urban area, Baoshan district, and the north of Pudong district, had high lightning density. Trough type weather was easier to trigger lightning than other types of weather in Shanghai. The spatial-patterns of lightning disasters were very similar to the ones related to lightning. Power facilities damage was the most serious lightning disasters.

Keywords: lightning hazard, lightning disaster, spatial-temporal pattern, Shanghai

0 引言

雷电是雷云之间或雷云与地面之间产生放电, 同时伴随着强烈的电光和声音的一种自然现象。雷电可分为云闪和地闪, 其中云闪包括云内闪、云间闪和云-空气闪, 地闪是指发生在云体与地面之间的对地放电过程。地闪对地面物体会造成很大威胁, 文中所研究的雷电过程主要指地闪。雷电具有大电流、高电

压、强电磁辐射等特征, 是联合国国际减灾十年委员会(IDNDR)公布的全球最严重的10种自然灾害之一^[1]。雷电过程造成灾害的主要形式为“直接雷击”和“感应雷击”^[2]。

国内外已开展了一些关于雷电活动和雷电灾情的相关研究。Elson^[3]对英国雷电灾情数据进行分析时发现, 英国在一个半世纪里雷灾人员伤亡数有明显的下降趋势。刘佼等^[4]对1998—2008年中国雷电灾害的时空特征、行业影响和人员伤亡等进行了统计分析, 指出每年6—8月为雷灾的高发月份, 电力为全国雷灾影响最为严重的行业; 马明等^[5]根据1997—2006年全国雷电灾害数据库和星载闪电探测数据, 分析了我国雷电灾害的分布特征, 认为我国雷灾和闪电活动的时

收稿日期: 2018年11月23日; 修回日期: 2019年6月3日
 第一作者: 樊蕴馨(1992—), Email: fanyunxin03@sina.com
 通信作者: 徐伟(1979—), Email: xuwei@bnu.edu.cn
 资助信息: 科技部国家重点研发计划课题(2018YFC1508802),
 教育部-国家外国专家局高等学校创新引智计划项目(B08008)

间特征是紧密相关的；林建等^[6]根据全国847站逐日雷暴日资料分析，认为全国雷电高发于每年的4—9月的午后至深夜；景元书等^[7]利用历年雷暴统计资料，计算了江苏省各地区的雷暴可能初终日等时空特征；易燕明^[8]等分析了珠江三角洲雷电灾害的损失及基本特征，指出雷电灾害已成为影响珠江三角洲地区的第四大自然灾害；高焱等^[9]分析了海南省1999—2011年雷电灾害特征，认为海南岛的雷灾空间分布与雷暴活动的空间分布不是很一致。陈宇等^[10]研究了大连市地闪分布特征并在此基础上研究了雷电危险度等级。综上，雷电活动的发生具有较为明显的规律，但各地时空分布特征均有差异，分析某个地区的雷电活动及雷电灾害分布对当地防灾减灾工作具有指导意义。

上海市地处30°—32°N，是我国乃至国际重要的经济、金融、贸易、航运和科技创新中心，也是我国雷电多发区。根据《中国气象灾害大典上海卷》^[2]记载，20世纪90年代以前，上海市重大雷击灾害多由“直接雷击”引发火灾造成，而在20世纪90年代以后，“感应雷击”上升为重要的雷击灾害。为了更好地监测上海市地闪分布情况，上海市气象局目前已建立起全国第1套TS7/8000全雷电探测系统^[11]。李京校等^[12]通过对雷击风险特征，分析了雷电监测预警对人身伤亡风险和经济损失风险的影响。文中基于2009—2017年间上海市全雷电网监测的地闪回击数据和接警平台等多渠道收集到雷电灾情数据，探究雷电灾害致灾因子（地闪回击）和灾情的时空分布特征，旨在为上海市防雷减灾工作提供参考依据。

1 数据和方法

1.1 数据

涉及的数据主要包括雷电灾害致灾因子（地闪回击）和灾情两类数据。其中，致灾因子数据来自上海市气象灾害防御技术中心的维萨拉闪电定位系统，数据时间段为2009年1月—2017年12月。上海市维萨拉闪电定位系统建于2008年，由金坛、启东、绍兴、马迹山四个探测站组成，采用3站定位，平均距离为178 km。采用的闪电定位法为MDF（磁定向法）和TOA（时间到达法）联合的时差侧向法。

所使用的雷电灾情数据为上海市110指挥中心接警平台报灾、区县上报等多途径收集的2009年1月—2017年12月上海市雷电灾害灾情数据，其中大部分数据来自于110接警平台，该数据来源于上海市居民因雷电导致受灾后报警，数据均由上海市气象灾害防御技术中心提供。

1.2 方法

采取的主要方法是ArcGIS空间分析技术和数理统计方法。利用ArcGIS软件对地闪数据和灾情数据进行了区域分类，同时对地闪回击数据的密度进行了计算。利用数理统计方法对雷电致灾因子的年、月、日活动特征、天气背景特征，雷电灾害的时空分布特征以及承灾体分布进行了统计分析。

2 上海市雷电致灾因子时空分布

2.1 上海市雷电活动时间分布特征

2009—2017年，上海市全雷电网监测系统共监测到地闪回击数据约40万条，分别从年、月、小时3个时间尺度对上海市雷电致灾因子（地闪回击）进行统计分析（图1）。从图1a来看，上海市地闪回击活动年际差别明显。从图1b来看，上海市雷电活动大多

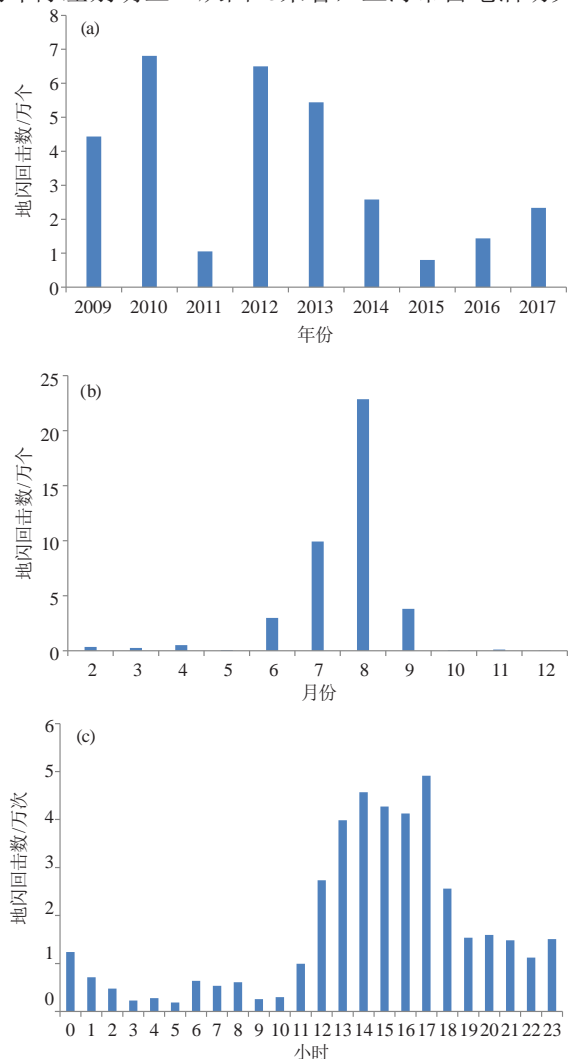


图1 上海市2009—2017年地闪回击活动时间分布特征：
(a) 逐年，(b) 逐月，(c) 逐时
Fig. 1 Temporal characteristics of lightning strokes during 2009–2017 in Shanghai

发生在6—9月，其中以8月最密集，占全年总地闪的55.9%。其主要原因可能是夏季热力条件和动力条件好，易导致强对流发生发展。从小时分布情况来看，上海市闪电活动主要活跃于12—17时，这和郑淋淋等^[13]对全国雷暴日的统计分析结论基本一致。其主要原因可能是午后升温较快，易堆积不稳定能量。

2.2 上海市雷电活动空间分布特征

根据2009—2017年的40万条地闪回击数据的经纬度信息，在ArcGIS软件中通过空间统计得到各区的地闪回击数（表1），同时采用点密度分析方法，生成1 km×1 km的点密度（图2），可以看出，上海市地闪回击密度总体为西北高东南低，其中又以黄浦江和长江交汇处的中心城区、宝山区、浦东新区北部较为密集。特别是长江入海口地区，密度最高处平均每年约20个/km²。这和杨露华等^[14]在探究1994—2004年上海地区强对流特征时得出的结论基本一致，上海本地产生的强对流云团易发生在黄浦江沿岸及长江沿岸。

表1 上海市各区2009—2017年地闪回击数
Table 1 Number and density of lightning strokes in different districts during 2009—2017 in Shanghai

区域	地闪回击数 /个	地闪回击密度 个/(km ² ·a)	区域	地闪回击数 /个	地闪回击密度 个/(km ² ·a)
中心城区	29544	11.4	松江区	38059	6.9
浦东新区	78523	6.2	青浦区	42221	7.0
宝山区	25834	9.5	闵行区	25812	7.7
崇明区	67506	5.5	奉贤区	31935	4.9
嘉定区	36329	8.7	金山区	27805	5.1

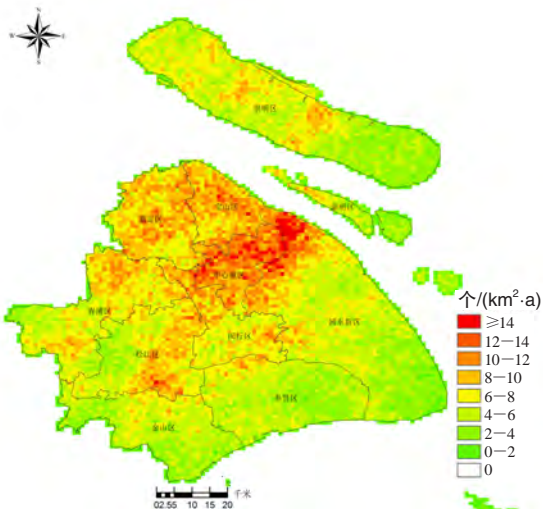


图2上海市2009—2017地闪回击密度图
Fig. 2 Density of lightning strokes during 2009—2017 in Shanghai

2.3 上海市雷电活动天气分布类型

雷电活动通常不是单一的天气过程，往往是有

复杂的天气背景场造成的，陈雷等^[16]在对2004—2013年长三角地区雷暴天气进行统计分析时，根据天气特征将雷暴天气分为“槽前型”“副高边缘型”“槽后冷涡型”“副高热对流型”和“东风波型”这5种类型。为了进一步探究上海市雷电活动的特征，在此基础上对上海市雷电进行天气特征分类。为了方便统计，将“副高边缘型”和“副高热对流型”统一为“副高影响型”，将“东风波”型和其他天气背景场统一归为“其他”型。通过对40万条地闪数据发生日数的统计，发现过去9年中，维萨拉闪电定位系统共有551 d监测到地闪回击。其中“槽前型”天气系统影响194 d，“槽后冷涡型”天气系统影响153 d，“副高影响型”天气系统100 d，“其他型”天气系统104 d（表2）。从统计结果看来，2009—2017年，“槽前型”天气背景带来的强对流天气最为明显。

表2 上海市强对流天气系统对2009—2017年雷电致灾因子的影响

Table 2 The influence of strong convection types on lightning and associated disasters during 2009—2017 in Shanghai

类型	天数/d	占比/%
槽前型	194	35
冷涡型	153	28
副高影响型	100	18
其他型	104	19

3 上海市雷电灾情时空特征

2009年1月—2017年12月，上海市气象灾害防御技术中心通过上海市110接警中心接报和各区上报等多种手段，累计收集到雷电灾害594起。为了进一步研究雷电灾害和地闪回击的相关关系，利用皮尔森相关系数对两者的年、月数据进行分析，发现地闪回击和雷电灾害年分布相关系数为0.717 ($p < 0.05$)；月分布相关系数为0.953 ($p < 0.05$)。从计算结果可知，上海市地闪回击和地闪回击数据有着较强的相关关系，且月分布相关关系更为明显。

3.1 雷电灾情时间分布特征

图3给出了2009—2017年间上海市雷电灾害的时间分布特征，同时与上海市地闪分布特征进行对比。

从图3a可以看出，2013年以前上海市雷灾个数波动较大，2013年以后上海市雷电灾害个数总体趋于减少，这和近年来地闪活动趋于减少的趋势具有一致性。从图3b可看出，雷电灾害的月分布走势与地闪活动的月特征也具有高度的一致性。其中2—5月，上海市地闪活动次数较少，雷电灾害数也极少。6—9月为雷电的高发季节，雷电灾害也随之明显增多，在8

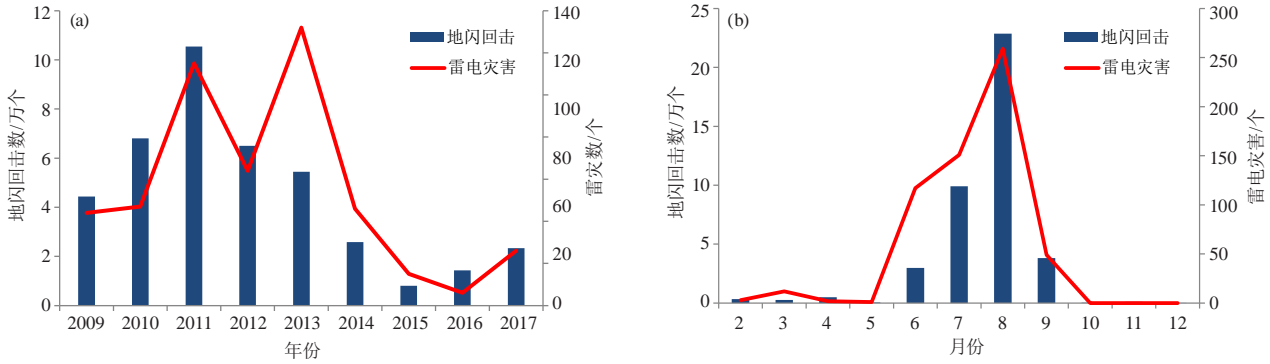


图3 上海市2009—2017年雷电灾害时间特征：(a) 年际特征，(b) 月际特征
Fig. 3 Temporal variations in lightning and associated disasters during 2009–2017 in Shanghai

月份达到峰值。11—1月地闪活动很少甚至无地闪活动，9年来未记录收到有雷电灾害发生。近年来雷电灾害趋于减少，这和地闪的逐年减少有关，同时也和城市的发展、雷电防护能力的提高以及居民防灾减灾意识的提升有着很大的关系。

3.2 雷电灾害空间分布特征

为了探究上海市雷电灾害的空间分布特征，将上海市雷电灾害分区统计，计算出各区的雷电灾害密度值，并根据密度值进行分级显示，结果如图4所示。可以看出，上海市雷电灾害高密度区集中在中心城区、宝山区和浦东新区。上海市雷电灾情密度图和上海市地闪回击密度图相似，总体呈现西北高，东南低的特征，这说明雷电灾情的发生和致灾因子（地闪回击）有着高度的相关关系。

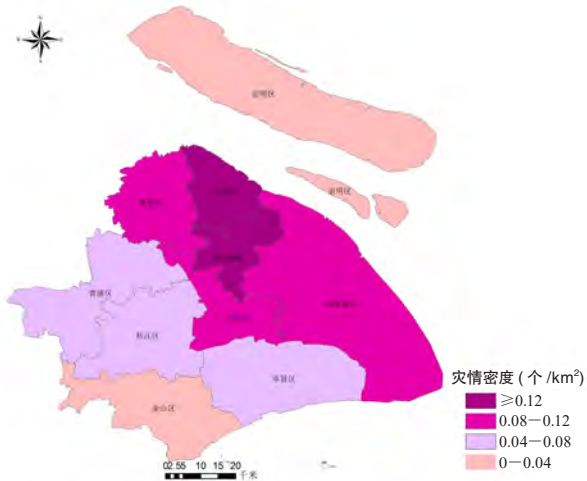


图4 上海市2009—2017年雷电灾害密度
Fig. 4 Density of lightning associated disasters during 2009–2017 in Shanghai

根据上海市的特征以及报灾人对雷电灾害详细描述的描述，将收集到的594起雷电灾情按照承灾体类

型分为为“人员伤亡”“电力设施故障”“建筑物损害”“信号灯受损”“车辆受损”和“其他”这6个类型，并分别统计其频次（表3）。

表3 上海市2009—2017年雷电灾害分区统计
Table 3 Summary of lightning associated disasters by district during 2009–2017 in Shanghai

区域	人员伤亡	电力设施故障	房屋受损	信号灯受损	车辆受损	其他	合计	灾情密度 (个/km ²)
中心城区	2	64	7	14	6	13	106	0.37
宝山区	1	43	14	6	0	6	70	0.23
崇明区	0	24	10	0	5	6	45	0.03
奉贤区	2	26	13	2	1	4	48	0.06
嘉定区	2	27	7	2	3	3	44	0.09
金山区	0	15	3	2	1	2	23	0.03
闵行区	0	23	8	4	0	1	36	0.09
浦东新区	2	83	21	10	8	11	135	0.10
青浦区	3	35	5	1	3	2	49	0.07
松江区	1	25	6	3	1	2	38	0.06
合计	13	365	94	44	28	50	594	—

从表3可看出，上海市“人员伤亡”最多出现在青浦区，而“信号灯”受损最多出现在中心城区，这是因为中心城区交通密集，“其他”类报警占比最高也是在中心城区，这说明中心城区经济集中，易受雷电灾害影响。除这3种承灾体以外，其他承灾体各区分布最高的均在浦东新区，这和浦东新区的区域面积大有关。

2009—2017年，上海市共发生雷击致人员伤亡13起，涉及18人次。从区分布看，人员伤亡大多发生在郊区，这和郊区空旷地域多，雷电防护措施较薄弱有关。从承灾体总体分布看来，所有的灾害类型中，“电力设施故障”占比最高，为61.4%，这说明雷电过程对上海的“电力设施”影响最为严重，这和胡先锋等^[17]在对1998—2004年中国雷电灾害进行分析时发现的规律是一致的。

4 结论与讨论

1) 2009—2017年上海市雷电活动年际差异明显,近年来呈递减趋势。就年内分布而言,多发于6—9月,其中以8月最为密集;就日内分布而言,12时—17时是雷电的高发时段。就空间分布而言,闪电密度总体为西北高东南低,雷电天气活动最易受“槽前型”天气背景场的影响。

2) 上海市雷电灾害灾情的时空分布与雷电活动具有高度的一致性:雷电灾害数量从2009—2017年也呈现降低的趋势,6—9月为集中期;就空间而言,中心城区、宝山区和浦东新区为重灾区。从损失类型来看,上海市雷电活动对“电力设施”的影响最大。

在对上海市雷电活动研究过程中发现,上海市雷电灾害的发生和雷电活动的时空特征有高度的一致性,对雷电灾害的讨论主要集中在对致灾因子的强度分析,未能考虑承灾体的脆弱性,如何从灾害学的观点出发,结合雷电活动致灾因子(地闪)和承灾体的脆弱性,综合分析雷电灾害风险,是后期要研究的重点内容。如何克服现有资料的局限性,定量分析雷电活动和雷电灾害的因果关系,以及雷电灾害的形成机理,是未来研究工作的一个重点。此外,如何开展雷电灾害风险的定量评估,也是未来雷电灾害研究的一项重要内容。

参考文献

- [1] 许小峰. 雷电灾害与监测预报. 气象, 2004, 30(12): 17-21.
- [2] 徐一鸣, 徐惠文, 柯晓新, 等. 中国气象灾害大典上海卷. 北京: 气象出版社, 2006.
- [3] Elson D M. Deaths and injuries caused by lightning in the United Kingdom: analyses of two databases. Atmospheric Research, 2001, 56: 325-334.
- [4] 刘佼, 肖稳安, 陈红兵. 全国雷电灾害分析及雷灾损失预测. 气象与环境科学, 2010, 33(4): 21-26.
- [5] 马明, 吕伟涛, 马义军. 我国雷电灾害及相关因素分析. 地球科学进展, 2008, 23(8): 856-865.
- [6] 林建, 曲晓波. 中国雷电事件的时空分布特征. 气象, 2008(11): 22-30, 129-130.
- [7] 景元书, 申双和, 李明. 江苏省雷暴气候特征分析. 灾害学, 2000, 15(1): 27-30.
- [8] 易燕明, 杨兆礼, 万齐林, 等. 雷电灾害对珠江三角洲区域经济发展的影响. 资源科学, 2005, 27(1): 64-68.
- [9] 高毅, 周方聪, 劳小青. 1999—2011年海南岛雷电灾害特征分析. 自然灾害学报, 2014, 23(5): 253-262.
- [10] 陈宇, 王蕾, 杨超, 等. 大连地区闪电活动时空特征分析及雷击风险度综合指数预测研究. 气象科学, 2017, 37(6): 832-838.
- [11] 王强, 黄晓虹, 许晓东. 上海市全雷电探测系统及其应用. 自然灾害学报, 2012, 21(2): 187-193.
- [12] 李京校, 扈海波, 樊荣, 等. 雷电监测预警对雷击风险评估的影响分析. 气象科学, 2013, 33(6): 678-684.
- [13] 郑淋淋, 孙建华, 卫捷. 我国雷暴的日变化特征. 暴雨灾害, 2011, 30(2): 137-144.
- [14] 杨露华, 尹红萍, 王慧, 等. 近10年上海地区强对流天气特征统计分析. 大气科学研究与应用, 2007(2): 84-91.
- [15] 邓德文, 周筠珺. 全球雷电活动研究进展. 高原山地气象研究, 2011, 31(4): 89-96.
- [16] 陈雷, 戴建华, 汪雅. 近10a长三角地区雷暴天气统计分析. 暴雨灾害, 2015, 34(1): 80-87.
- [17] 胡先锋, 刘彦章, 肖稳安. 1998—2004年中国雷电灾害特征分析. 气象与减灾研究, 2007, 30(3): 56-59.

NOAA云战略——最大化NOAA云服务的价值

■ 郑秋红

NOAA在云应用方面的丰富经验已经在诸如卫星数据产品和服务、数值天气预报、海洋模式、大数据分析、存储和传播等多领域开始展现,这些领域的性能和技巧得到了显著提高。NOAA云战略草案(2019—2024年)给出了指导NOAA采取和利用云服务的战略,旨在最大化NOAA云服务的价值。

环境数据是NOAA的基石,几乎支撑着NOAA所有的任务。同时,NOAA的数据量非常庞大、复杂和分散,处理、存储和传播数据的系统和基础设施也是复杂的、分布式的。在可预见的未来,NOAA的数据量和传播速度将呈指数级增长,这需要大大提高其能力和财力来扩大IT基础设施和服务的规模,以支持这种增长。这些现实给NOAA带来了复杂的挑战和新的机遇,而这些机遇许多都体现在云服务中。战略草案

默认的NOAA云服务架构是一个代理的、多供应商、多租户的FedRAMP商业云平台。云战略包含5个目标:通过快速采用基于云的服务实现创新;驱动向云智能迁移;确保安全并广泛地访问云服务;为云共享服务提供有效的管理;为从事云工作的员工授权。这些目标共同推动NOAA朝着利用云服务的潜力来推进任务的方向改变和定位。



(作者单位: 中国气象局气象干部培训学院)

2005—2017年白云机场能见度变化特征及其与影响因子关系研究

郭智亮¹ 高聪晖² 谢文锋¹ 陈淑敏³ 黎伟标³

(1 中国民用航空中南地区空中交通管理局气象中心, 广州 510406;

2 福建省气象台, 福州 350001; 3 中山大学大气科学学院, 广州 510275)

摘要: 利用广州白云机场2005—2017年的大气能见度、相对湿度、风速、气温等要素的逐时观测资料, 结合花都花东站2012—2017年PM_{2.5}浓度的逐时观测数据, 分析了近年来白云机场能见度的变化特征, 探究了能见度与气象要素、大气污染物之间的关系。结果表明: 2005—2017年白云机场能见度呈逐年增大趋势, 低能见度出现次数总体呈减少趋势。2—4月是机场低能见度时期, 7月能见度最大。能见度日变化显著, 最低能见度通常出现在清晨, 午后明显好转。白云机场能见度与相对湿度、PM_{2.5}浓度呈负相关关系, 与风速、气温成正相关关系, 其中PM_{2.5}浓度对能见度的影响最明显。当相对湿度小于80%时, 能见度下降得较为缓慢; 而当相对湿度超过80%时, 能见度急剧降低。相对湿度越大, 出现低能见度所需的PM_{2.5}浓度值就越小。地面风速在0~4 m·s⁻¹时, 相对湿度越大, 能见度随风速的增长趋势越显著。

关键词: 能见度, 气象要素, PM_{2.5}浓度, 相关分析

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.06.006

Temporal Characteristics and Influencing Factors of Visibility in Baiyun Airport from 2005 to 2017

Guo Zhiliang¹, Gao Conghui², Xie Wenfeng¹, Chen Shumin³, Li Weibiao³

(1 Meteorological Center of Middle South Regional Air Traffic Management Bureau of CAAC, Guangzhou 510000

2 Fujian Meteorological Center, Fuzhou 350000

3 School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275)

Abstract: Based on the automatic observation system data of Guangzhou Baiyun Airport from 2005 to 2017, and the observational data of PM_{2.5} at Huadong Station from 2012 to 2017, this study analyzed the temporal variation and influencing factors of visibility in Baiyun Airport. The results showed that the visibility of Baiyun Airport tended to increase year after year, and the frequency of low visibility < 1000 m trended to decrease. The diurnal and seasonal variation of visibility was significant, and the visibility was usually lowest in the early morning and was improved significantly in the afternoon. Visibility was significantly and positively correlated with wind speed, relative humidity, and temperature, whereas it was negatively correlated with PM_{2.5} and relative humidity. Among all factors, PM_{2.5} had dominant control on visibility. With increase of relative humidity, the visibility decreased slowly and markedly when the relative humidity was below and above 80%, respectively. When the wind speed was less than 4 m/s, the visibility increased with increase of wind speed at a greater rate at higher relative humidity conditions.

Key Words: visibility, meteorological element, PM_{2.5} concentration, correlation analysis

0 引言

大气能见度是指正常视力的人在白天无云天空背景条件下, 辨认出视角大于0.5°的地面黑色目标物的形体或轮廓的最大水平距离。据相关统计^[1], 1951—

1998年我国发生的飞行事故中有245次与气象因子有关, 其中19.2%由低能见度造成。研究机场近地面能见度变化特征及其影响因素, 对于飞机的安全起降具有重要意义^[2-3]。Naegele等^[4]通过分析美国西部和西南部18个城市的机场能见度资料, 总结了影响能见度的4个因素: 硫酸盐、人口增长、测量标准和天气要素(如高压、逆温、静风等)。朱蕾等^[5]发现乌鲁木齐机场近30年低能见度日数增长趋势明显, 雾、浓烟和沙尘暴是造成机场低能见度的主要天气。沈俊等^[6]、周斌斌等^[7]发现, 低云和低能见度造成航空事故占最

收稿日期: 2018年11月1日; 修回日期: 2019年5月13日
第一作者: 郭智亮(1989—), Email: 172673771@qq.com
资助信息: 广州市科技计划项目(201903010036); 高校基本科研业务费青年教师培育项目(20187411031610006); 国家自然科学基金项目(41675043)

大的比例, 每年雾造成的航运经济损失比龙卷还要大。目前, 白云机场日均起降航班1300架次左右, 能见度对机场影响日益加大。1998年冯彦华等^[8], 发现雾和降水是造成白云机场低能见度的主要天气现象。张美平等^[9]统计了搬迁前的旧白云机场低能见度气候特征, 发现低能见度小于1 km的日数有逐年上升的趋势。区志中等^[10]对比新旧白云机场天气的差异性及成因时, 发现新机场搬迁后出现大雾的频率多一倍。

目前, 对白云机场低能见度个例的研究较多^[11-15], 自2003年搬迁、2004年投入使用后, 白云机场能见度的气候统计方面的研究工作比较缺乏。本文利用白云机场2005年1月至2017年12月的逐时观测资料, 对白云机场搬迁后能见度的年、月、日变化特征以及影响能见度的气象因子进行相关分析, 研究能见度和影响因子之间的关系, 填补了白云机场在这方面的研究空白。

1 数据来源

广州白云国际机场跑道上安装VAISALA公司的MIDAS IV气象自动系统, 对常规气象要素进行观测。民航中南空管局气象观测席位半小时一次进行常规观测并发布航空例行天气报告, 例行天气报告中能见度是观测员根据气象自动观测系统采集数据加以人工修订后发布, 相对湿度、风速及气温的数据为自动观测系统采集的数据。本文选取时段为2005—2017年的逐时例行天气报告中观测数据, 另外将能见度小于1 km出现的次数作为低能见度次数。

新白云机场地处广州市区北部白云和花都交界处, 花都区花东自动环境监测站位于白云机场正北面6 km, 是距离白云机场最近的一个自动环境监测站点, 本文选取广州环境保护局提供花都区花东自动环境观测站的PM_{2.5}的逐时观测数据代表新白云机场的PM_{2.5}数值, 目前环保局仅提供2012—2017年逐时PM_{2.5}观测资料供研究使用。

2 能见度变化特征

利用2005年1月—2017年12月白云机场的能见度逐时观测资料, 对能见度和低能见度次数的年、月和日变化趋势进行了分析。从逐年变化趋势来看(图1), 近13年来机场能见度呈逐年增长趋势, 平均每年增大约190 m; 低能见度次数总体是减少的趋势, 2005年低能见度出现次数最多, 之后大幅度减少, 2017年低能见度仅出现1次。从月变化特征曲线来看(图2), 机场能见度呈现明显的峰、谷变化曲线, 3—4月是低能见度时期, 之后能见度不断增大, 至7月份达到最



图1 白云机场能见度和低能见度次数的年变化特征
Fig. 1 Annual variation of visibility and low visibility in Baiyun Airport

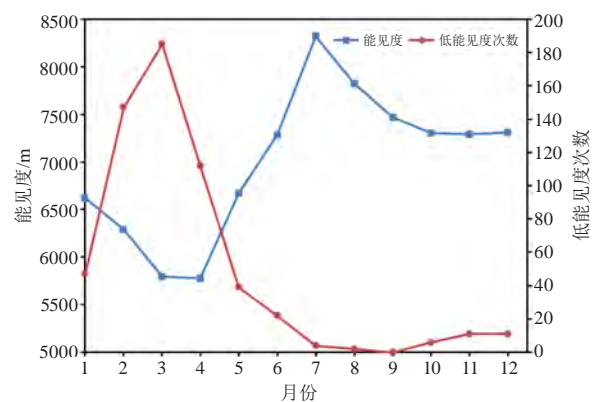


图2 白云机场能见度和低能见度次数的月变化特征
Fig. 2 Monthly variation of visibility and low visibility in Baiyun Airport

高值, 随后再逐渐降低, 季节变化特征显著; 低能见度次数的月变化也表现出类似的特征, 2—4月低能见度出现次数最多, 都在100次以上, 随后低能见度出现次数迅速减少, 7—10月低能见度出现次数基本在10次以下。

图3给出了白云机场能见度和低能见度次数的日

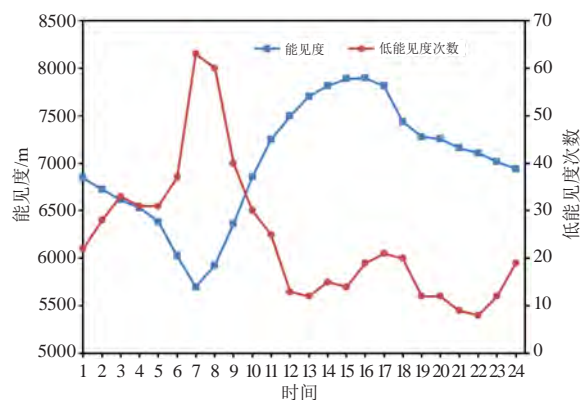


图3 白云机场能见度和低能见度次数的日变化特征
Fig. 3 Diurnal variation of visibility and low visibility in Baiyun Airport

变化特征, 07时机场能见度最低、低能见度出现次数最多, 之后能见度持续增大、低能见度出现次数迅速减少, 15—16时能见度达到最大值, 而低能见度出现次数是在22时最少。朱焱等^[16]在苏州市的能见度研究中得出了类似的日变化特征, 但是其年、月变化特征与白云机场相去甚远, 由此说明各地能见度变化的局地特征非常显著。

3 影响能见度的主要要素及相关关系分析

大气污染物和气象条件是影响大气能见度的主要因素^[17-18]。本文采用相关系数法量化了2012—2017年白云机场风速、相对湿度、气温和PM_{2.5}对能见度的影响, 得到逐时能见度与各气象要素、PM_{2.5}浓度的相关系数(表略)。对比相关系数可知, PM_{2.5}对能见度的影响作用最强, 相对湿度、风速对能见度的影响作用次之, 气温对其影响最小。

3.1 能见度与相对湿度的关系

大气中的水汽含量是影响能见度的一个重要因素^[19]。为了更好地分析相对湿度(RH)对能见度的影响, 利用2012—2017年逐时观测资料, 以1%相对湿度为间隔, 得到各区间相对湿度与平均能见度的散点分布(图4)。可以看出, 能见度与相对湿度呈明显的负相关关系。不同区间的相对湿度, 平均能见度的下降趋势不尽相同。当RH<40%时, 平均能见度基本在9000 m以上, 相对湿度每增加1%, 平均能见度降低37.8 m; 当40%≤RH<80%时, 平均能见度在8000~9000 m, 相对湿度每增加1%, 平均能见度降低26.5 m; 而当RH≥80%时, 平均能见度在8000 m以下, 并且随着相对湿度的增加, 平均能见度迅速降低, 每增加1%的相对湿度, 平均能见度降低216.3 m。由此可见, 环境相对湿度小于80%时, 能见

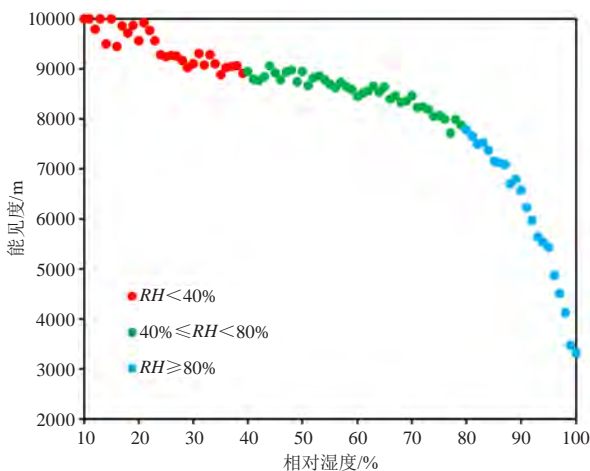


图4 能见度与相对湿度的关系

Fig. 4 Relationship between visibility and relative humidity

度下降得较为缓慢; 当环境相对湿度超过80%时, 能见度才会急剧降低。

3.2 能见度与PM_{2.5}浓度的关系

大气能见度的降低与空气中气溶胶粒子的消光率有密切联系^[20-21]。不同相对湿度下, 大气颗粒物的组成成分不同, 其形成的气溶胶吸湿增长因子也不同^[22]。因此, 根据前文的研究将相对湿度分为RH<40%、40%≤RH<80%、RH≥80%三个区段, 得到不同区段相对湿度下PM_{2.5}浓度与能见度的散点分布(图5)。总体上, 随着PM_{2.5}浓度的增加, 能见度呈下降趋势, 但不同相对湿度下PM_{2.5}浓度对能见度的影响程度不同。环境相对湿度越小, 出现低能见度所需的PM_{2.5}浓度值就越大; 反之, 环境相对湿度较高时, 较小的PM_{2.5}浓度值就可以导致低能见度的出现。此外根据拟合曲线, 在PM_{2.5}浓度为50 μg/m³时, 当RH<40%能见度在9 km左右, 而当RH≥80%能见度不足5 km。由此说明, 在一定的PM_{2.5}浓度下, 环境相对湿度越大, 能见度越低。这是因为空气中相对湿度较高时会促进大气颗粒物的吸湿增长, 造成颗粒物粒径的增长, 使得消光系数增加, 从而导致大气能见度降低^[23]。

3.3 能见度与风速的关系

地面风场一般是通过稀释大气污染物和改变大气的稳定度来影响大气能见度的。利用2012—2017年逐时观测资料, 得到不同级别风速和平均能见度的曲线图(图6)。总体上, 能见度随着地面风速的增大而增大。地面风速不超过4 m·s⁻¹时, 能见度随风速的增长趋势较为显著, 地面风速越大, 越有利于大气污染物的稀释扩散。地面风速大于4 m·s⁻¹, 能见度随风速的增长趋势较为平缓, 能见度基本维持在9 km左右。地面风速大于9 m·s⁻¹, 平均能见度有所降低, 但此时样本数较少, 没有太大参考价值。图7进一步给出了不同相对湿度下能见度与风速的关系, 可以看出, 地面风速在0~4 m·s⁻¹时, 相对湿度越大, 能见度随风速的增长趋势越显著。风速大于4 m·s⁻¹, 能见度随风速的增长趋势都趋于平缓, 此时风速对能见度的影响不大, 但相对湿度越大能见度越低。

4 结论

1) 2005—2017年白云机场能见度呈逐年增大趋势, 低能见度出现次数总体呈减少趋势。其季节变化特征显著, 2—4月是低能见度时期, 之后能见度不断增大, 至7月达到最高值, 随后再逐渐降低。从日变化来看, 最低能见度通常出现在清晨, 午后明显好转, 之后又逐渐降低。

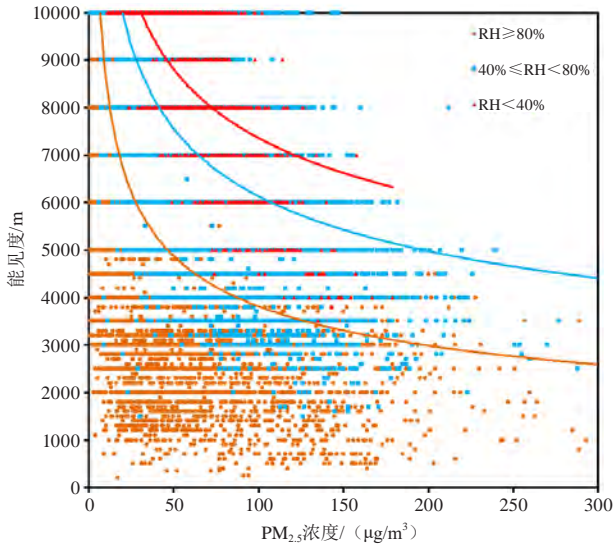


图5 能见度与PM_{2.5}浓度的关系
Fig. 5 Relationship between visibility and PM_{2.5}

2) 白云机场能见度与相对湿度、PM_{2.5}浓度呈负相关关系, 与风速、气温成正相关关系, 其中PM_{2.5}浓度对能见度的影响最明显。

3) 当相对湿度小于80%时, 能见度下降得较为缓慢; 而当相对湿度超过80%时, 能见度急剧降低。不同相对湿度下PM_{2.5}浓度对能见度的影响程度不同, 相对湿度越大, 出现低能见度所需的PM_{2.5}浓度值就越小。地面风速在0~4 m·s⁻¹时, 相对湿度越大, 能见度随风速的增长趋势越显著。

参考文献

[1] 洪全. 重庆市大气能见度变化趋势及影响因子. 重庆大学学报(自然科学版), 2003, 26(5): 151-154.
[2] 陈静, 赵春生. 大气低能见度的影响因子分析及计算方法综述. 气象科技进展, 2014, 4(4): 44-51.
[3] 陈廷良. 现代运输机航空气象学. 北京: 气象出版社, 1992, 162-171.
[4] Naegel P S, Sellers W D. A study of visibility in eighteen cities

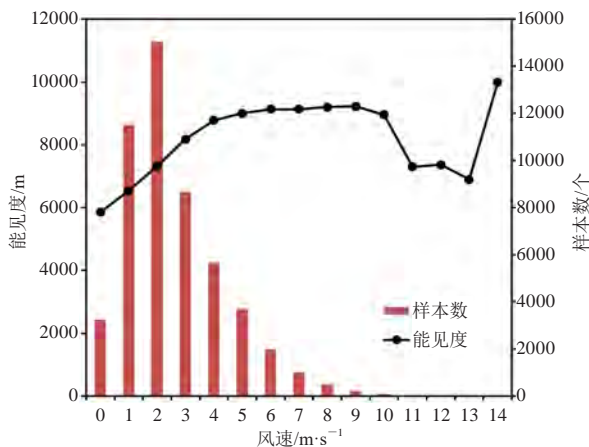


图6 能见度与地面风速的关系
Fig. 6 Relationship between visibility and ground wind speed

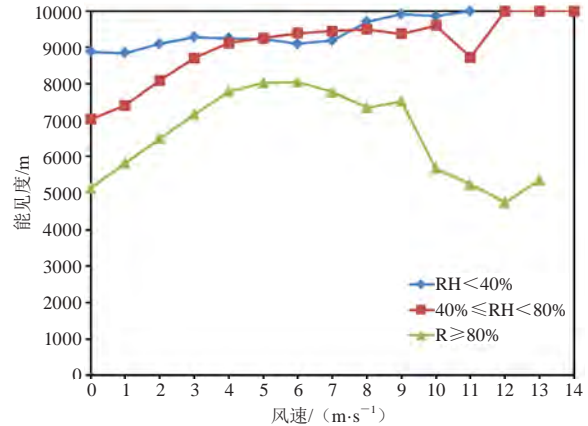


图7 不同相对湿度下能见度与风速的关系
Fig. 7 Relationship between visibility and ground wind speed for different relative humidity conditions

in the western and southwestern United States. Monthly Weather Review, 2009, 109(11): 2394-2400.
[5] 朱蕾, 朱国栋. 乌鲁木齐机场近30年低能见度天气特征分析. 中国民航飞行学院学报, 2012, 23(5): 27-30.
[6] 沈俊, 阎凤霞, 王燕雄. 虹桥机场能见度变化特征分析. 热带气象学报, 2008, 24(1): 99-104.
[7] 周斌斌, 蒋乐, 杜钧. 航空气象要素以及基于数值模式的低能见度和雾的预报. 气象科技进展, 2016, 6(2): 29-41.
[8] 冯彦华, 邓文珍. 白云机场低能见度气候的统计特征. 热带气象学报, 1998, 14(4): 369-373.
[9] 张美平, 敖淑珍. 广州白云机场低能见度气候特征. 2003, 31(3): 163-165.
[10] 区志中, 陈穗军, 黄奕铭, 等. 广州新旧白云机场天气的差异性及成因. 广东气象, 2006, (1): 39-41.
[11] 敖淑珍, 张美平. 近31年广州白云机场低能见度的气候特征. 民航科技, 2003, (4): 2-30.
[12] 楚建杰. 白云机场低云低能见度天气的几个影响因子. 广东气象, 2003, 30(1): 30-32.
[13] 钟家杰, 刘峰. 华南春季一次锋面大雾的边界层特征. 广东气象, 2000, 29 (1): 2-4.
[14] 文丹青, 黄波. 广州白云机场两次低云低能见度对比分析. 气象研究与应用, 2010, 31(S2): 16-17.
[15] 刘峰, 林智, 钟加杰. 广州白云机场一次低云低能见度天气过程的成因. 广东气象, 2007, 29(3): 21-23.
[16] 朱焱, 杨金彪, 朱莲芳, 等. 苏州市能见度与影响因子关系研究. 气象科学, 2011, 31(5): 626-631.
[17] 杨军, 李子华, 黄世鸿. 相对湿度对大气气溶胶粒子短波辐射特性的影响. 大气科学, 1999, 23(2): 239-247.
[18] Cao J Q. PM2.5 and the environment in China. Beijing: Science Press, 2014: 256-261.
[19] Gong S Y, Feng J L. Relationships among relative humidity, PM10 concentration and atmospheric visibility in Shanghai. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(6): 628-632.
[20] Schlenker J C, Malinowski A., M S T, et al. Crystals Formed at 293 K by Aqueous Sulfate-Nitrate-Ammonium-Proton Aerosol Particles. Journal of Physical Chemistry A, 2004, 108(43): 9375-9383.
[21] Liu X, Cheng Y, Zhang Y, et al. Influences of relative humidity and particle chemical composition on aerosol scattering properties during the 2006 PRD campaign. Atmospheric Environment, 2008, 42(7): 1525-1536.
[22] 王启元, 曹军骥, 甘小凤, 等. 成都市灰霾与正常天气下大气PM_{2.5}的化学元素特征. 环境化学, 2010, 29(4): 644-648.
[23] Nesslerer R, Weingartner E, Baltensperger U. Effect of humidity on aerosol light absorption and its implications for extinction and the single scattering albedo illustrated for a site in the lower free troposphere. Journal of Aerosol Science, 2005, 36(8): 958-972.

湖南省雷电活动及雷灾特征分析

贺秋艳 刘越屿 杨加艳 郭斌

(湖南省气象灾害防御技术中心, 长沙 410007)

摘要: 基于湖南省各气象台站1956—2013年的雷暴观测资料和2008—2017年的ADTD闪电监测定位数据, 运用数理统计方法对湖南省雷电时空分布及雷电灾害进行了统计分析。分析结果表明: 湖南省年均雷暴日数为49.9 d, 总体上呈现出缓慢的递减趋势, 每10年减少约3.493 d; 全省平均每年观测到的地闪回击频次约34万次; 每年3月开始雷电活动逐步加强, 7月、8月是雷电活动高峰期; 雷电逐时分布呈现单峰型, 主要集中在15—17时; 岳阳、长沙、怀化、邵阳等地发生的雷电灾害偏多; 因雷击造成的人员伤亡大部分发生在农村, 农村防雷安全工作亟需加强。

关键词: 雷电活动, 雷电灾害, 分布特征, 农村防雷

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.06.007

Characteristics of Lightning Activity and Lightning Disaster in Hunan

He Qiuyan, Liu Yueyu, Yang Jiayang, Guo Bin

(Meteorological Disaster Prevention Technology Center of Hunan Province, Changsha 410007)

Abstract: Based on the thunderstorm observation data from 1956 to 2013 of meteorological stations in Hunan, the lightning monitoring data from 2008 to 2017, and lightning disaster data from 2002 to 2017, the spatial and temporal distribution characteristics of lightning activities and lightning disaster in Hunan were analyzed. The results showed that the annual average number of thunderstorm days in Hunan was 49.9; it decreased at a rate of 3.493 days /10 years. The CG lightning return stroke observed in the whole province was on average about 340,000 times per year, with July and August being the peak months of the lightning return stroke. Hourly distribution of lightning return stroke appeared as a single-peak which occurred mainly from 15:00 to 17:00. Yueyang, Changsha, Huaihua, and Shaoyang were the lightning disaster-prone areas. Most lightning casualties have occurred in rural. Therefore, lightning protection safety work of the rural needs to be strengthened.

Key words: lightning activity, lightning disaster, distribution characteristics, lightning protection of rural

0 引言

雷电是大气中强烈的超长距离放电过程, 通常伴随着强对流天气过程而发生, 是一种常见的自然现象。雷电因其强大的电流、炙热的高温、强烈的电磁辐射以及猛烈的冲击波等物理效应能够在瞬间产生巨大的破坏作用^[1-3], 造成严重的人员伤亡和经济损失。湖南位于长江中游之间、南岭以北, 地处云贵高原向江南丘陵和南岭山地江汉平原的过渡地带, 春季冷暖空气交绥频繁而剧烈, 夏季晴热高温, 多午后局地热对流, 这些气候特点加之复杂的地形地貌使其雷暴活动较多, 是全国多雷暴的省份之一, 造成的雷电灾害事故列全国第八位^[4]。

近年来, 国内对雷电活动和雷电灾害特征的研究

越来越多。黄肖寒、王学良、朱浩^[5-7]等众多学者分析了广西、湖北、安徽等地雷暴气候的统计特征, 总结了雷电活动的年际变化、季节变化及空间分布等特征; 陈涛等^[8]学者利用湖南省地面观测得到的雷暴资料(1971—2005年)及ADTD闪电监测定位数据(2006年4月—2007年7月), 研究了全省雷暴及闪电活动特征, 然而其历史资料时序性较短。为此, 本文基于全省97个地面气象观测站1956—2013年雷暴日观测资料、2008—2017年ADTD闪电监测定位数据及2002—2017年雷电灾害资料的基础上, 运用数理统计方法分析了湖南省雷电时空分布及雷电灾害特征, 同时对造成全省农村雷电灾害的成因进行了总结分析, 旨在能为以后的农村防雷提供参考。

1 数据和处理

雷暴日资料来源于湖南省97个地面气象观测站的1956—2013年(共58 a)雷暴观测数据。在研究中, 即在一天内(20时至次日20时), 只要听到1次或1次以

收稿日期: 2018年9月3日; 修回日期: 2018年12月13日
第一作者: 贺秋艳(1986—), Email: 512448568@qq.com
资助信息: 湖南省气象局科研课题(XQKJ18B069)

上的雷声就算是1个雷暴日，而不论该天雷暴发生的次数和持续时间^[9]。湖南省年均雷暴日数为全省97个台站历年平均雷暴日数的均值。

雷电灾害资料记录了每次雷灾发生的时段、地点、雷灾起数、人员伤亡及财产损失情况，以及引起雷灾的主要原因等。由于资料本身不全，如在某年部分区域缺失雷灾记录，同时某些农村地区存在封建迷信的思想和交通信息闭塞，还有部分雷灾未上报，因此本研究得到的是雷灾特征的不完全统计结果。

闪电监测资料源于湖南省ADTD型闪电监测网，该监测网由安装在长沙、常德、邵阳、永州及郴州等地的10台闪电定位仪组成，于2008年投入使用，监测覆盖全省，能够全天候、连续记录雷电发生的时间、位置、强度、极性 etc 参数。根据文献[10]结论：云闪中具有小峰值电流（<10 kA）可满足云地闪探测标准而被闪电定位仪接受，故导致闪电定位仪探测记录的闪电数量增多，因此要把电流强度小于10 kA的正地闪回击去掉。

2 湖南省雷电活动特征

2.1 雷暴日特征

据湖南省1956—2013年雷暴日观测资料，年均雷暴日数为49.9 d，运用最小二乘法计算年雷暴日数的趋势定量变化，得出其一次线性方程为 $y = -3.493x - 0.621$ ，其中气候倾向率为 $-3.493 \text{ d}/10\text{a}$ ，表明从1956年开始，湖南省年均雷暴日数在总体上呈现出缓慢的递减趋势，每10年减少约3.493 d。

雷暴出现最多的年份是1973年，为71.3 d，出现最少的年份是2011年，30.3 d。1989年之后，除1994年、1997—1998年雷暴日略高于年均雷暴日数以外，其他年份雷暴日数均低于年均雷暴日数（图1）。

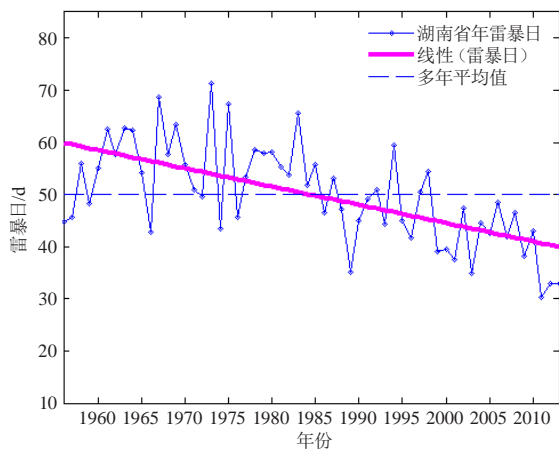


图1 湖南省1956—2013年雷暴日变化趋势

Fig. 1 The inter-annual variation of thunderstorm days in Hunan from 1956 to 2013

湖南省雷暴日空间分布总体上湘南多于湘北、湘西多于湘东（图2），湘北最低年均雷暴日为34.3 d，湘南最高达71.5 d。这种分布特征与地形关系密切，最强的雷暴活动带在南岭北部一线，次强雷暴活动带与雪峰山脉平行，基本与山脉走向一致。根据湖南省行政区域分析，郴州、永州、邵阳及怀化等地雷暴日数较高，多于全省年均雷暴日数，常德、益阳、岳阳、湘潭、湘西土家族苗族自治州等地雷暴日数较低，少于全省年均雷暴日数。

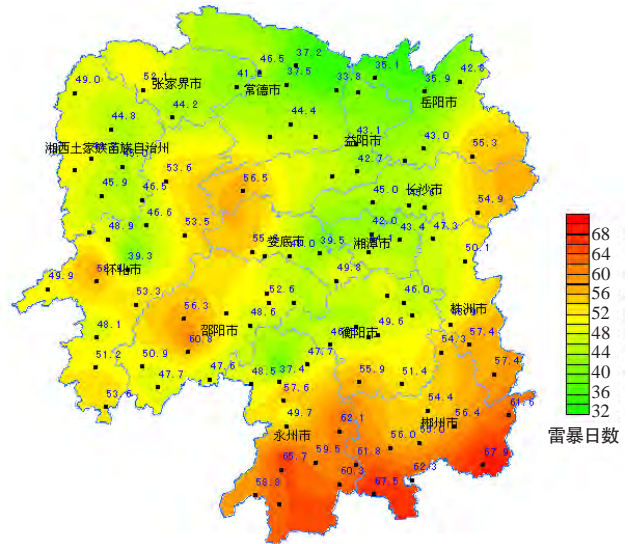


图2 湖南省雷暴日空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of the number of thunderstorm days in Hunan

2.2 闪电活动特征

根据湖南省2008—2017年的ADTD闪电监测定位数据，近10a观测到的地闪回击频次年际变化明显，全省平均每年观测到的地闪回击频次约34万次，其中2014年最多，达59万次，2009年最少，仅19万次（图3），前者比后者的3倍还多。

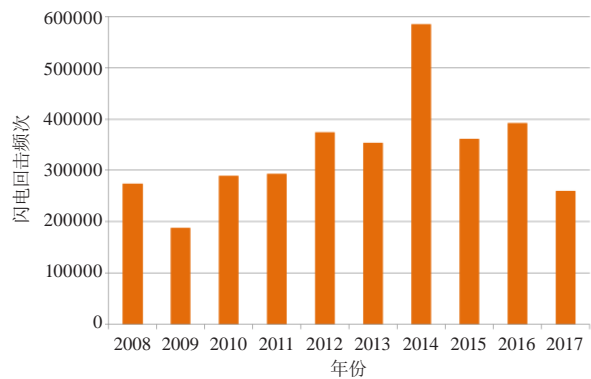


图3 湖南省2008—2017年地闪回击频次逐年分布

Fig. 3 Yearly distribution of CG lightning return strokes in Hunan from 2008 to 2017

每年3月至9月为湖南省汛期，雷电活动较频繁^[11]。据闪电监测资料分析，一年中每个月均有雷电活动发生，1月、11月和12月发生最少，2月、10月次之，从3月开始雷电活动逐步加强，4—9月为雷电多发时段，其中7月、8月是雷电活动高峰期（图4）。

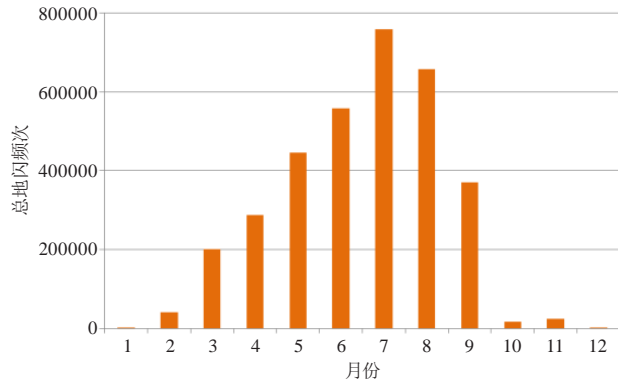


图4 湖南省2008—2017年地闪回击频次逐月分布

Fig. 4 Monthly distribution of CG lightning return strokes in Hunan from 2008 to 2017

气候定义每年3—5月为春季，6—8月为夏季，9—11月为秋季，12月至次年2月为冬季^[12]。对不同季节的闪电进行逐时分布统计，结果表明，春季雷电活动两个高峰值出现在02时、17时；夏季多集中在15—17时；进入秋季后，雷电活动相对于春、夏两季急剧减少，但9月份仍有雷电活动，高峰期集中在15—17时（图5）。

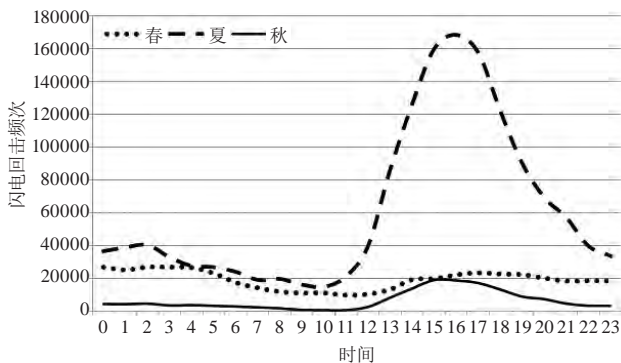


图5 湖南省2008—2017年地闪回击频次逐时分布

Fig. 5 Hourly distribution of CG lightning return strokes in Hunan from 2008 to 2017

根据观测到的地闪回击密度分布（图6）可见，湘北多于湘南、湘西多于湘东，常德、娄底、岳阳、邵阳及湘西土家族苗族自治州等地的地闪回击密度较为密集。

对比分析发现，全省地闪回击密度的空间分布与雷暴活动的空间分布存在较大的差异，造成这一差异的主要原因是两者的定义有所差别，因为根据地面观测规定，一天内（20时至次日20时）只要听到1次或1

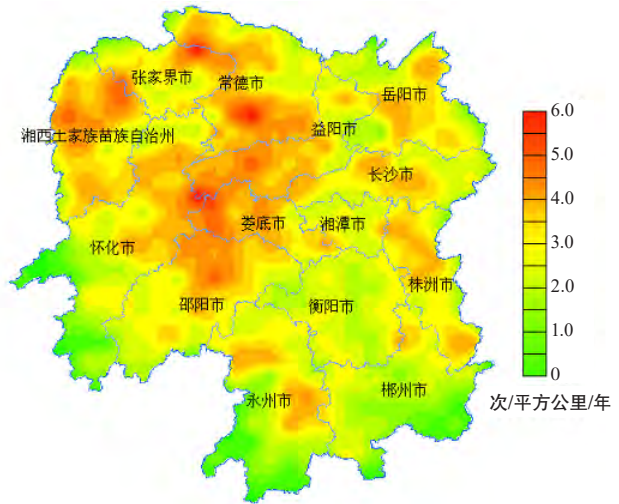


图6 湖南省地闪回击频次空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of CG lightning return strokes in Hunan

次以上的雷声就算是1个雷暴日，而1个雷暴日中可能有数次、数百次甚至数万次闪电。

为了证实上述推测，本文基于ADTD闪电监测定位数据，定义一天内（20时至次日20时）只要观测到1次闪电，就为1个闪电日，进而得出闪电日的空间分布（图7）。通过对比发现，湖南省雷暴日活动高值区与闪电日高值区都集中在永州、郴州及怀化等地，两者的空间分布规律总体上比较一致。

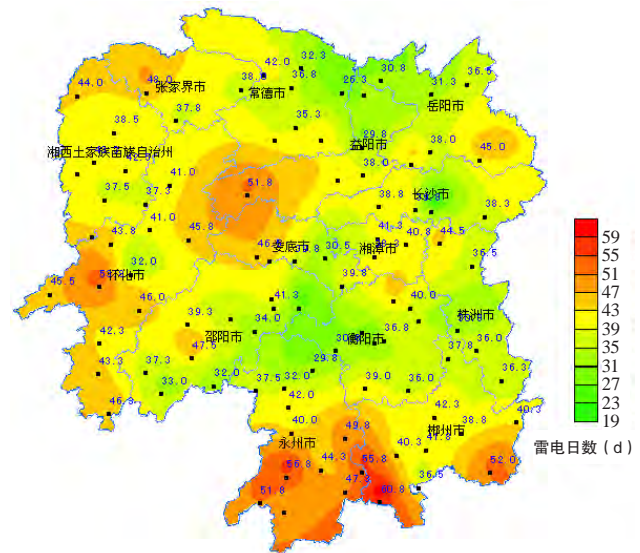


图7 湖南省闪电日空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of lightning days in Hunan

3 湖南雷电灾害情况

3.1 湖南雷电灾害基本情况

据不完全统计，2002—2017年全省共计发生雷电

灾害事故2050起，造成人员伤亡共555人（其中城市因雷击伤亡167人，农村因雷击伤亡388人），直接经济损失合计达22457.2万元。其中2004年发生雷灾事故最多，达288起，共造成65人伤亡，直接经济损失3568.1万元（图8）。从全省雷电灾害变化走势看，2009年以来，全省因雷电灾害造成人员伤亡、财产损失明显减少。

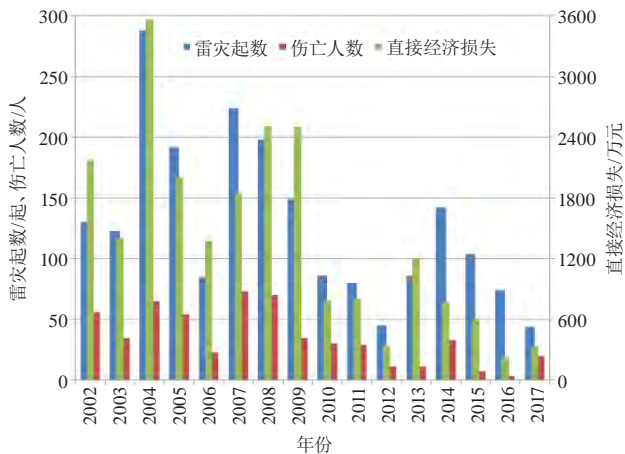


图8 湖南省2002—2017年雷灾统计

Fig. 8 Cases of lightning disasters in Hunan from 2002 to 2017

湖南省雷电灾害事故起数存在着明显的空间分布不均（图9），岳阳、长沙、怀化及邵阳等地发生的雷电灾害事故偏多，分别为23.7起/a、15起/a、11.5起/a及11.3起/a；湘潭和湘西土家族苗族自治州发生的雷电灾害事故相对较少。这与全省地闪回击密度的分布情况基本一致。根据雷灾事故的发生地类型统计，雷灾多发生在城市，雷灾起数及经济损失远超过农村。

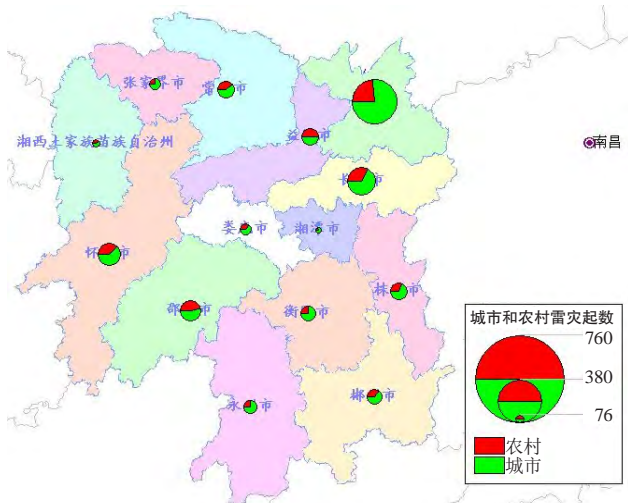


图9 湖南省城市和农村雷灾起数分布

Fig. 9 Distribution of number of lightning disasters in Hunan

但是，通过对全省2002—2017年城市和农村雷击

伤亡总人数进行对比发现（图10），农村因雷击伤亡人数为388人，占全省雷击伤亡总人数的70%；城市因雷击伤亡人数为167人，占全省雷击伤亡总人数的30%。由此可见，农村是雷灾事故中人身伤亡的重灾区，也是当前防雷减灾的薄弱环节^[13]。

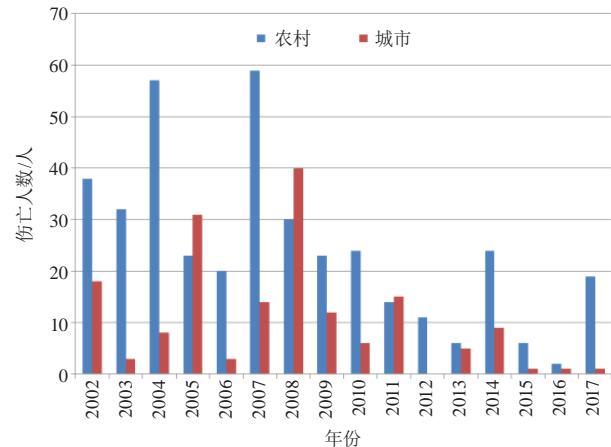


图10 湖南省城市和农村雷击伤亡人数对比

Fig. 10 Comparison of the number of lightning casualties in rural and urban in Hunan

3.2 湖南农村雷灾成因分析

通过对全省农村雷电灾害多发区域的走访、调查，结合历史农村发生的雷灾事故，分析湖南农村雷灾事故的原因，主要有以下几个致灾因素。

3.2.1 湖南农村建筑选址、结构特点与雷灾的关系

湖南农村建筑的选址上，摸索出了一个适合人们居住的“风水宝地”的环境模式，即以背山面水（或依山傍水），左右两边围护为理想格局的模式^[14]。这种山水相伴的自然环境里，水汽能源源不断的从周遭环境中得到补充，大气中水汽较周边环境更为充足，气候、气温、气压又随着山势变化显著，局部大气对流的强度比较大，对雷雨云的形成提供了足够多的条件。在湖区，由于水面的宽阔、平坦，水的良导电性，加大了农村民居的雷击发生概率；在山区，独有的立体小气候特征，特别是山地的抬升作用，很容易就导致了局部对流云系的发展，加大了雷击发生的概率。因此，湖南农村民居的选址为农村地区雷击多发埋下了种子。

其次，湖南农村建筑多为木质、砖混、钢混结构，多数有屋脊，屋脊部位高耸突出属于易遭受雷击部位，在农村雷灾中较为普遍。

3.2.2 农村生活习惯与雷灾的关系

湖南农村传统的“日出而作，日落而息”的农业生产生活方式一直还在延续，人们大多数时间在田头田间、湖泊水边劳作。据文中图5分析，湖南春、夏

季节雷电活动多集中在15—17时，该时段正是农民在户外或田间进行劳作的时候，当雷雨天气发生时，农民来不及躲避，或在附近的树下、野外简易的工棚及草屋等地躲雨，极易遭受雷击造成伤亡。

3.2.3 农村经济发展与雷灾的关系

目前，湖南农村开始由“传统”走向“现代”，农村也开始追求“文明、健康、休闲、科学”的和谐新生活模式，电脑、电视、太阳能热水器等家用电器进入了寻常百姓家，但由于农村防雷基础设施投入不足，电力线、有线电视线、电话线及网络线等都是由较为空旷的农田里电杆架空支撑引入，一旦雷电击中这些架空线缆或是击中附近区域，雷电流以及感应过电流就会通过线缆引入到室内，严重威胁着室内电器设备和人员的安全。

4 小结

1) 湖南年均雷暴日数为49.9 d，总体上呈现出缓慢的递减趋势，每10年减少约3.493 d。

2) 湖南近10年观测到的地闪回击频次年际变化明显，全省每年观测到的回击频次平均约34万次，其中2014年最多，达59万次。

3) 每年3月开始雷电活动逐步加强，4月至9月为雷电多发时段，其中7月、8月是雷电活动高峰期。逐时分布呈现单峰型分布，多发生在下午时段，具体主要集中在15—17时。

4) 通过对比发现，湖南雷暴活动与地闪回击密度的空间分布存在较大差异，雷暴日空间分布总体上呈现湘南多于湘北、湘西多于湘东；地闪回击密度分布总体上呈现湘北多于湘南、湘西多于湘东，常德、

娄底、岳阳、邵阳及湘西土家族苗族自治州等地的地闪回击密度较为密集。雷暴日活动和雷电日分布规律总体上比较一致，高值区都集中在郴州、永州、邵阳及怀化等地。

5) 岳阳、长沙、怀化、邵阳等地发生的雷电灾害事故偏多，湘潭和湘西土家族苗族自治州发生的雷电灾害事故相对较少。

6) 全省因雷击造成的人员伤亡，大部分发生在农村。其主要原因是，农田附近缺乏必要的避险场所，以及农村的各类建（构）筑物缺少雷电防护措施。

参考文献

- [1] 陈渭民. 雷电学原理. 气象出版社, 2003.
- [2] 刘维成, 陶健红, 邵爱梅, 等. 雷电监测预警预报技术简述. 干旱气象, 2014, 32(3):446-453.
- [3] 黄嵘, 许广浩, 马宁. 义乌市雷电灾害特征分析. 浙江气象, 2011, 32(3):44-46.
- [4] 邓战满, 王智刚, 杨建友, 等. 湖南省农村雷电灾害情况探讨. 中华民居(下旬刊), 2014(9). 211-212.
- [5] 黄肖寒, 黄卓帆, 李有为, 等. 河池市雷电时空分布特征及雷击灾害风险区划. 气象研究与应用, 2016, 37(4):102-105.
- [6] 王学良, 王海军, 李卫红. 近45年湖北省雷电日数的时空变化特征分析. 暴雨灾害, 2007, 26(1):85-89.
- [7] 朱浩, 王凯, 程向阳, 等. 安徽省雷电灾害特征分析及区域灾情评估. 长江流域资源与环境, 2015, 24(1):162-168.
- [8] 陈涛, 吴岚, 韩波, 等. 湖南省雷电特征及闪电数据分析. 防灾科技学院学报, 2008, 10(3):38-42.
- [9] 肖稳安, 张小青. 雷电与防护技术基础. 气象出版社, 2006.
- [10] 彭治班, 廖晓农, 梁丰, 等. 国外雷电监测与预报研究. 北京: 气象出版社, 2003.
- [11] 邓战满, 谢露, 曾震, 等. 湖南省雷暴地闪特征初步分析. 价值工程, 2014(28):306-307.
- [12] 张静, 吕军, 项瑛, 等. 江苏省四季变化的分析. 气象科学, 2008, 28(5):568-572.
- [13] 吕海勇, 李文飞, 吴坚. 1995—2014年广东省雷电灾害事故的统计分析. 广东气象, 2015, 37(6):52-55.
- [14] 高波, 郭在华, 刘凤姣. 湖南农村民居雷灾风险浅析. 新农村(上半月), 2012(7):9.

利用AI推进NOAA需求驱动的任务优先级

张定媛



NOAA在一系列任务领域的人工智能(AI)应用方面的丰富经验已经证明了其性能和技能的改善，大大降低了成本和计算时间。NOAA发布的AI战略将通过提高整个机构AI开发和使用的效率和协作，极大地扩展AI在NOAA每一个任务领域的应用，并降低数据处理的成本，为社会提供更高质量和更及时的科学、产品和服务。

新战略为AI技术的使用设定了组织程序目标：(1) 建立有效的组织结构和流程，以在整个NOAA中推进AI；(2) 推进AI研究和创新，以支持NOAA的使命；(3) 加快AI研究向业务能力的转变；(4) 加强和扩大AI合作伙伴关系；(5) 提高员工的AI水平。NOAA还计划建立一个NOAA人工智能中心来协调活动，在预算制定中优先考虑AI项目，并在领导层中促进对AI的关注。为了确保NOAA AI战略实现性能、技能和效率方面的变革性进步，NOAA正在制定AI战略实施计划或“路线图”，该计划定义了详细的行动项目、期限和职责。

(作者单位：中国气象局气象干部培训学院)

VR技术在地面气象观测设备保障技能培训中的应用

段文广¹ 刘燕² 段文强³ 石永玮² 李秋明¹ 贾亦阳¹

(1 甘肃省兰州市气象局, 兰州 730020; 2 甘肃省兰州市人影办, 兰州 730020; 3 甘肃省酒泉市气象局, 兰州 735000)

摘要: 虚拟现实 (VR) 作为近年来极为火热的高新技术, 在诸多领域中得到了广泛应用。VR应用到气象部门地面观测设备保障技能培训, 降低了硬件投资且增强了培训效果。介绍了VR技术和实现工具, 分析了VR技术在气象地面观测设备保障培训中的应用场景, 初步设计了虚拟观测场仿真培训系统, 最后对虚拟观测场的基本交互式设计及实现做了重点阐述。

关键词: 虚拟现实, 虚拟观测场, 仿真培训系统, 交互式设计

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.06.008

VR Technology Application in the Skills Training for Guarantee of the Ground Meteorological Observation Equipment

Duan Wenguang¹, Liu Yan², Duan Wenqiang³, Shi Yongwei², Li Qiuming¹, Jia Yiyang¹

(1 Lanzhou Meteorologic Bureau of Gansu Province, Lanzhou 730020 2 Lanzhou Weather Modification Office of Gansu Province, Lanzhou 730020 3 Jiuquan Meteorologic Bureau of Gansu Province, Jiuquan 735000)

Abstract: Virtual reality (VR) has been widely used in many fields in recent years. Its application to the skills training for guaranteeing the ground meteorological observation equipment not only reduces the hardware investment and enhances the training effect, but also to improve the practical repairing skills of technical staff who are looking after the basic meteorological equipment. This paper introduces the VR technology and implementation tools and analyzes the application scenarios of VR technology in the training of guaranteeing ground meteorological observation equipment. Then, simulation-training system of virtual observation field is designed. Finally, the basic interactive design and implementation of virtual observation field is discussed in detail.

Keywords: virtual reality, virtual observation field, simulation training system, interactive design

0 引言

随着地面观测自动化、无人化的实现, 基层气象台站需要大量的地面观测设备保障人才, 中国气象局干部培训学院及分院承担着培训任务, 在市县级装备维修技能的实际培训时, 需要大量的实际操作培训才能够使学员牢固掌握维修技能。但由于地面观测场需要实时采集、上传数据, 无法为学员提供真实的训练场地, 而购置及更新换代大批量的培训设备需要一笔大的开销, 各培训学院的实训设备数量并不能满足每个学员一台进行实际操作, 有些甚至由教学老师直接播放PPT演示。由于缺乏交互式操作, 导致学员积极

性无法充分调动起来, 教学效果受到影响。

虚拟现实 (virtual reality, VR) 是采用以计算机技术为核心的现代高技术生成逼真的视、听、触觉一体化的特定范围的虚拟环境^[1]。将虚拟现实技术应用到气象系统地面观测设备维修技能培训, 开发虚拟现实培训系统, 不但可仿真出与真实观测场一样的场景、设备、仪器, 而且实现学员对场景中的仪器、设备的交互操作。

1 虚拟现实技术概述

虚拟现实技术是包括仿真技术、计算机图形学、人机交互技术、多媒体技术、传感技术、人工智能等是多种技术的集合。虚拟现实技术有以下几个重要的特征^[2]: (1) 多感知性 (Multi-Sensory), 指具有现实世界中人所具有的感知功能, 包括视觉感

收稿日期: 2018年7月13日; 修回日期: 2019年1月30日
第一作者: 段文广 (1975—), Email: 5245214@qq.com

知、听觉感知、触觉感知、运动感知等；（2）沉浸感（Immersion），使用户感觉像在真实的客观世界环境中，能够沉浸在虚拟环境中，有身临其境的感觉；（3）交互性（Interaction），用户能够对虚拟环境中各种对象的进行动态交互；（4）自主性（Autonomy），虚拟环境中的物体能够按照现实世界的物理定律进行动作。

VR实现的主要工具阐述如下。

1) 虚拟现实建模语言（VRML）

VRML是在Internet上构造3D对象的语言，可灵活高效地创建三维模型，适合在Internet上进行传播和信息交互，具有平台独立性、易交互、易扩展等特点，具体实现过程包括三维静态建模和动态交互仿真两部分。首先建立三维场景模型，根据观测场整体规划划分为若干子场景，使用场景图（scene graph）数据结构建立3D实境^[3]，对于场景中单个设备的几何形状、外观材质等三维造型进行逐个定义，对于复杂形状的设备可以通过3DSMAX进行三维建模导入即可，最后根据设备间的关联关系，通过Inline节点组合在一起，构成整个场景的虚拟三维模型。动态交互仿真功能可通过位置、方向、坐标、触摸、时间等节点设计动态过程，对于复杂的交互动作，可利用Java或Java Script编程语言扩充VRML的功能，共同完成动态交互仿真功能^[4]。基于VRML的虚拟现实系统结构如图1所示。

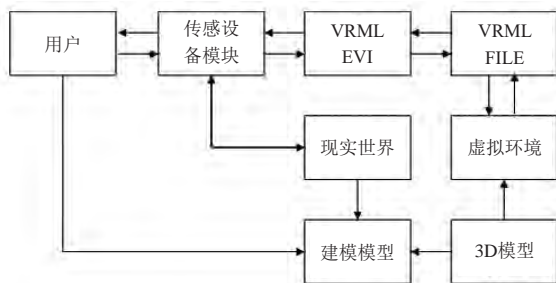


图1 基于VRML的虚拟现实系统

Fig. 1 The virtual reality system-based on the VRML

2) 虚拟现实建模软件（3D Studio Max）

3D Studio Max是一款功能强大的三维建模工具软件，通过可视化建模方式，以所见即所得的方式完成复杂的建模任务^[5]。首先根据观测场的现实布置对建模的一些基本模型进行相应比例的设置，采用3D Studio MAX软件建立观测场所需要的场景、设备模型及工具模型，其次收集观测场围栏、小路、观测设备的纹理，进行纹理和材质的处理得到具有真实感的三维虚拟模型^[6-7]，最后通过Export输出VRML文件（.wrl），调入VRML编辑器进行编辑处理，将子场景进行组合，生成需要的仿真场景。

3) 虚拟现实开发语言（Java或Java Script）

Java是一种可以撰写跨平台应用软件的面向对象的程序设计语言。VRML为Java或Java Script提供了灵活的编程嵌入接口，通过其强大的对象交互和处理消息的能力，扩展了VRML的动态交互功能。使用Java对VRML的script节点编程、封装属性和建立场景图内部消息通道能够实现虚拟实体丰富的动态交互功能。Java程序对虚拟场景中输入事件的响应流程为：虚拟场景中输入的事件经路由传入script节点，Java程序对从script节点处获取的事件进行响应，产生一系列动作，再将响应的结果信息反馈到script节点中，修改节点的域值实现人机交互，完成对虚拟场景中仿真对象的移动、旋转、拆装等动作。

4) 数据存储（XML、SQL数据库）

通过XML文档和SQL数据库实现对系统的数据进行管理，包括注册学员的信息、训练的项目及操作规范等。

虚拟现实作为近年来极为火热的高新技术，在教育、远程医疗、科学试验、旅游等领域中得到了广泛应用，并且已经取得了巨大的成功^[8-11]。虚拟现实技术在气象领域的主要体现在天气应用程序和影视节目制作中，中央电视台天气预报栏目就应用虚拟现实技术模拟极端天气发生时的真实状况，大大提高了气象影视节目的收视率^[12]。

2 VR技术在地面观测设备保障培训中的应用场景

创建一个虚拟地面观测场不需要规划训练基地和购置大量的观测设备，而且硬件支持所需要的成本也非常少，同时还可实现资源共享。地面观测设备保障虚拟仿真培训系统的实现，可以让设备保障人员更加直观的掌握观测设备的维护、维修内容，其应用的场景分为以下三种。

2.1 设备日常巡检

通过该系统，新进业务人员可对观测场场景、巡检内容和工作标准规范进行充分了解，为即将开始的工作做好最充分的技术准备。学员可以在和现实观测场环境一样的虚拟观测场景当中，完成包括清扫百叶箱、整理地面温度场、清理雨量筒等的日常巡检工作的模拟。

2.2 故障处理及传感器更换

通过设定采集器、传输线路、传感器故障点，以任务的形式让设备保障人员在虚拟观测场景中进行故障点排查、更换采集器或传感器备件，提高应急保障能力。

2.3 设备检定

在虚拟观测场景中，通过设定设备检定的工作步骤，让设备保障人员熟练掌握各类传感器的拆装及标校设备的使用方法。

3 基于VR技术的虚拟观测场仿真培训系统设计

以先进的三维建模技术、虚拟现实技术、人机交互技术为核心，并综合应用硬件外设，开发基于VR技术的虚拟观测场仿真培训系统，包括系统的功能要求、虚拟观测场构成模块及平台的设计及实现等。

3.1 虚拟观测场仿真培训系统的功能要求

虚拟观测场仿真培训系统应实现如下功能：第一要为学员提供一个逼真的实验环境，从观测场的全景、观测仪器的布局到各个传感器元件都要与现实环境相吻合；第二要利用交互式设计来营造一个真实感很强的训练环境，使学员能够实现训练环节中每个操作步骤的训练，切实掌握维修技能；第三要注重细节展示，为学员提供场景中的单个仪器造型的3D图形，包括每个可拆分元器件的造型图，使学员对仪器设备更好理解和认识；第四要为学员提供训练的演示和指导书，为学员成功进行训练操作提供指导，在寓教于乐中快速掌握维修技能。

3.2 虚拟观测场的构成模块

结合训练设计需求系统主要包括以下五个模块（图2）：

第一个模块，虚拟场景展示，包括全景展示，包括整个观测场全景、设备仪器安装位置、观测场围栏、小路、草地等；场景中单个设备造型的展示，包括采集器箱、百叶箱、翻斗式雨量计、称重式雨量计、能见度仪等，以及每个设备的元器件造型的展示，比如采集器箱内采集器模块、通讯模块、防雷板、气压计、蓄电池及电源线信号线等。

第二个模块，虚拟标校训练的交互式过程中所用到的标校设备展示，包括雨量标校仪、风向风速校验仪、万用表等。

第三个模块，虚拟更换设备训练的交互式过程中所用到的工具展示，包括螺丝刀、专用钳、扳手、卷尺、毛刷等。

第四个模块，虚拟观测场交互训练的自动演示动画。

第五个模块，虚拟观测场交互的自主训练，学员可结合训练演示、训练指导书对虚拟观测场景中的观测设备进行交互训练。

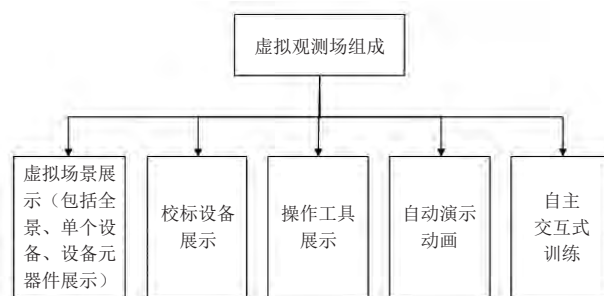


图2 虚拟观测场组成模块

Fig. 2 The module of virtual observation field

3.3 仿真培训系统的设计和实现

虚拟观测场仿真培训系统属于专业培训系统，以虚拟现实技术为基础，结合基层维护保障人员日常巡检维护和故障维修的实际工作，设计并开发出界面友好、真实自然、交互性好、实用性强、形式多样的仿真培训系统。系统可通过VRML和3ds Max建立真实感的三维虚拟模型，使用Java或Java Script编程语言实现交互控制过程，使用C#或C++设计系统的架构并实现接口层、功能层实现层中各个模块的功能，通过XML文档和SQL数据库实现对系统的数据进行管理。

3.3.1 系统架构设计

仿真软件支撑平台的架构主要包括两层^[13]：

（1）接口层，主要包括图形用户接口、输入控制接口及其他一些输入输出接口，主要有操作虚拟观测场中观测设备的硬件装置及驱动硬件装置的接口程序等，如数据手套、VR头盔；（2）功能实现层，主要包括用户界面（UI）设计模块、角色设计模块、任务设计模块、触发设计模块、动作设计模块、资源管理模块等，主要有虚拟观测场中观测设备模型的信息库、规则库以及支持交互操作的工具及应用程序。

3.3.2 系统功能实现

根据3.3.1节提出的系统架构，系统功能应能实现友好的用户操作控制界面、灵活多样的界面样式，以及按需定制的考核任务设计、遵循操作实际的动作设计、符合逻辑关系的条件设计，还可根据场景不同具有导入不同的场景文件、提供在线帮助的标准规范知识库及学员信息管理的资源管理等功能，应包括如下几个子系统组成。

1) 虚拟地面观测场整体展示子系统：对整个地面观测场进行浏览、巡查，包括整个场景、观测设备安装位置、观测场围栏、小路、草坪的整体展示。

2) 观测设备局部展示子系统：对采集器、各个传感器的近距离局部细节的展示。

3) 动态演示子系统：动态演示采集器、传感器

各个部件的构成，对虚拟观测场的日常巡检，传感器计量检定、故障排查的操作流程进行多媒体动态演示。

4) 设备拆装训练子系统：对采集器、传感器拆装步骤提供交互式操作训练。

5) 传感器检定标校训练子系统：对传感器计量检定、标校操作步骤提供交互式操作训练。

6) 观测场日常巡检训练子系统：对观测场设备日常巡检内容提供交互式操作训练。

7) 实训考核管理子系统：设置采集器、传感器故障点，对故障点进行排查、维修，进行交互式操作训练，针对培训效果进行综合评分，考核训练成效。

8) 系统管理子系统：系统后台维护，包括数据库、学员登录权限管理、考核任务设计等的管理维护。

4 虚拟观测场的基本交互式设计及实现

4.1 设计流程

第一步，在3D Studio Max建模工具中把相应的造型建模出来，对造型的材质和纹理进行优化设置，导出后缀名为wrl的VRML文件；第二步，利用Vrmlpad编辑工具对VRML文件相应的优化设计；第三步，进行交互式设计，利用6种插补器、8种传感器及脚本节点技术对相应的造型进行一个交互式设计；第四步，对设计效果进行浏览，不断修正优化，即可利用浏览器对VRML文件进行浏览和交互体验^[14]。

4.2 基本交互式技术融入

虚拟观测场仿真培训系统中人机交互功能的实现是系统开发的重点和难点，从设备的平移到传感器的更换都需要大量的人机交互操作，必须实现虚拟观测设备能够针对每一个操作步骤做出符合物体运动规则的相应动作变化。具体实现则要通过Java或Java Script语言对VRML进行编程，结合交互式的关键技术对场景中的节点设置插补器和传感器及脚本节点，实现虚拟场景中仿真对象与外界动作指令的交互。

以雨量传感器日常维护为例，对该设备维护的虚拟现实仿真包括雨量筒的拆装、信号线的连接、翻斗的清扫等，下面以场景中拆卸雨量筒为例说明如何实现交互控制过程。拆卸雨量筒动作分析：首先，触摸到雨量筒；其次，进行旋转动作，逆时针旋转5°卸下雨量筒，最后进行垂直方向和水平方向动作，即可取

下雨量筒。

当操作者通过三维鼠标或数据手套触碰雨量筒时，接触到雨量筒，当进行逆时针旋转时，雨量筒卸下，通过垂直方向向上和水平方向的移动，将雨量筒放置到指定位置。以上只是对拆卸雨量筒动作的程序实现的简单描述，要增加更加真实的感觉，还要增加一些诸如雨量筒纹理变化，实现雨量筒旋转的效果等。虚拟观测场仿真培训系统中需要大量的更复杂更逼真的交互功能，均可使用Java或Java Script语言与VRML进行混合编程实现。

5 结语

气象部门装备维修业务实行省市县三级布局^[15]，市县级装备保障人员承担本辖区内所有国家级自动站、区域站等设备的维修、标校工作。虚拟现实技术在气象设备保障培训中有广泛的应用前景，建立从地面观测站、区域站，到土壤水分观测站、农田小气候站，再到高空观测设备、雷达观测设备维修维护的虚拟仿真培训系统，将AR（增强现实）及MR（混合现实）等虚拟技术应用到其中，增强更加真实的操作体验，将大大提高基层装备保障技术人员实际维修技能，具有很高的实用价值。

参考文献

- [1] 李新晖, 陈梅兰. 虚拟现实技术与应用. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [2] 喻晓和. 虚拟现实技术基础教程. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [3] 黄文丽. VRML语言入门与应用. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
- [4] 邹珺. 使用VRML构建虚拟境界的技术研究. 软件工程师, 2016, (3): 22-23.
- [5] 郭叙成. VRML及Java技术在虚拟场景中的研究. 信息技术与信息化, 2005, (Z1): 128-130.
- [6] 李冉, 蔡正林. 结合VRML和Java建立动态场景. 电脑与信息技术, 2005, (1): 33-35.
- [7] 鲁强, 孔英会, 贾俊敏. VR技术及其在电力仿真培训系统中的应用. 湖南电力, 2004, (1): 36-39.
- [8] 王同聚. 虚拟和增强现实(VR/AR)技术在教学中的应用与前景展望. 数字教育, 2017, (1): 1-10.
- [9] 张晓宇. 虚拟现实技术在医学上的应用. 科技与创新, 2017, (3): 17-20.
- [10] 郭立萍, 李光霞, 董硕. 虚拟现实技术在构建虚拟旅游环境中的应用. 安徽农业科学, 2010, (18): 9811-9813.
- [11] 李金. 基于VR的农业虚拟实验室设计和研究. 科技视界, 2016, (23): 14.
- [12] 张媛. 气象影视节目虚拟现实技术的应用现状及趋势研究. 气象科技进展, 2016, (6): 59-61.
- [13] 张帅, 严浩军. VR技术在智能化供用电仿真培训领域的应用. 电子世界, 2017, (22): 199-200.
- [14] 舒道伟. 基于VR的虚拟实验室的基本交互式设计. 云南大学硕士学位论文, 2016.
- [15] 省级观测装备维修业务分级指导意见出台. 中国气象报, 2017-12-20(1).

一次燕山南麓局地大暴雨的成因分析及数值预报检验

崔粉娥¹ 畅巨峰² 燕成玉¹ 张晨宇¹

(1 河北省秦皇岛市气象局, 秦皇岛 066001; 2 河北省青龙满族自治县气象局, 秦皇岛 066500)

摘要: 利用常规观测资料、区域自动站、卫星云图及多普勒天气雷达资料, 对2013年6月28—29日发生在秦皇岛地区一次局地大暴雨过程进行了综合分析, 并从环流形势、影响系统、降水强度和落区等方面对多种数值预报进行检验。结果表明: 中尺度对流复合体和线状回波中的超级单体, 造成了北部山区的短时强降水, 强降水区域位于黑体亮度温度TBB度最大处, 燕山山脉地形抬升作用和中尺度风场辐合是本次过程的触发机制。多种数值模式产品对暴雨有一定的预报能力, 但强降水中心都偏北, 且未能体现出大于100 mm的大暴雨区域。对产生暴雨天气影响系统位置和强度的预报, 不同的数值模式有所差异, ECMWF模式对亚洲地区中高空环流预报的结果更为准确, 对弱高空槽系统预报偏差较大。冷涡天气形势下, 当各种数值预报模式均预报有降水时, 降水量级一致或相差不多, 并且日本传真图在秦皇岛附近预报有25 mm左右降水中心时, 考虑地形作用, 秦皇岛北部山区降水量级可增加一个量级或稍大一些。由于各家数值预报对地形作用难以准确把握, 从而对地形诱发的中小尺度系统容易漏报。

关键词: 低涡, 模式检验, 大暴雨

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.06.009

The Cause and Numerical Prediction of a Strong Convective Weather Process at the Southern Foot of Yanshan

Cui Fen'e¹, Chang Juzheng², Yan Chengyu¹, Zhang Chenyu¹

(1 Qinhuangdao Meteorological Bureau, Qinhuangdao 066000

2 Qinglong Manchu Autonomous County Meteorological Bureau, Qinglong 066500)

Abstract: Based on the MICAPS conventional observation data, regional automatic station, satellite cloud pictures, and Doppler weather radar data on June 28 and 29, 2013 in Qinhuangdao area, a local torrential rain process was analyzed. Several numerical products from the aspects of circulation situation, influence system, and precipitation elements were inspected. The results showed that the mesoscale convective complexes and super monomer in linear echo mainly contributed to the short-time strong rainfall in the northern mountainous area. The heavy rain area was located in the TBB maximize gradient. Yanshan mountain terrain lifting effect and mesoscale wind field convergence triggered this process. The numerical model products had certain ability in forecasting rainstorm, but the heavy precipitation center predicted was deviated to the north and failed to capture the heavy rainstorm area > 100 mm. Different numerical models produced different results in terms of the position and intensity of the heavy rain. ECMWF mode was more accurate in predicting mid- and upper-level air circulation in the Asian region, but it was less accurate in predicting weak upper trough system. When all numerical prediction models predicted to rain in the cold vortex weather situation, the precipitation level was consistent or similar. When the Japanese FAX forecasted about 25 mm rainfall in the vicinity of Qinhuangdao, the precipitation level in the northern mountainous area of Qinhuangdao can be increased by an order of magnitude or larger by including the topographical effects. Because the numerical prediction was difficult to incorporate the terrain effect, the prediction was usually unsatisfactory at the small-meso scale system.

Keywords: low vortex, numerical model test, heavy rain

收稿日期: 2018年6月28日; 修回日期: 2019年5月28日

第一作者: 崔粉娥(1977—), Email: cuijene@126.com

资助信息: 河北省气象局科研项目(15ky31)

0 引言

致灾暴雨一直是广大气象工作者关注的重点^[1-3]。大范围对流性暴雨多数是由中尺度对流系统或中尺度对流复合体而产生^[4-5], 由对流风暴引起的强天气

很容易漏报而成为众多学者关注和研究的重点^[6-16]。而对数值预报产品进行评估、检验,是数值预报产品在实际预报业务中有效应用,提高天气预报准确率的重要途径之一。许多学者从不同角度做了大量的检验工作^[17-27],孟英杰等^[17]认为,在武汉区域降水预报中,JAPAN模式的综合预报性能好于T213、AREM、GRE模式。肖明静等^[19]对汛期山东降水预报进行了多模式检验,结果认为一般性降水和小雨预报,24 h、48 h降水MM5模式评分结果均为最差,T639模式预报效果最好;中雨及以上量级,两个区域模式均不如T639模式预报效果好。蔡梦宁^[26]认为ECMWF模式对各影响系统及要素的预报最接近实况JAPAN模式和T639模式次之。程锦霞^[27]对主要物理量因子的T639预报场进行检验,结果认为垂直速度预报最优,其次是涡度、散度、涡度平流预报,水汽通量、假相当位温24~72 h预报产品参考价值较大。本文通过对基层气象台(站)常用的几家数值模式在一次局地大暴雨过程中的预报情况进行检验,为预报工作者正确使用数值模式产品提供依据。

2013年6月28—29日,秦皇岛市各县区出现强降雨天气,降水分布不均匀,北部青龙为大暴雨,卢龙为暴雨,昌黎、抚宁为大雨,其他地区为中雨,并伴有较强雷电。5个区域气象站降水量超过100 mm,26个区域气象站超过50 mm,最大出现在青龙土门子为132.6 mm。强降水时段出现在28日22时至29日00时,小时雨强最大为59.7 mm,3 h累计降水量超过100 mm,达短时暴雨标准。本次过程降水时段集中,降水强度大,且强降水出现在北部山区,跟燕山南麓地形关系较大。

1 环流背景及影响系统分析

500 hPa环流形势中高纬度呈一槽一脊型,2013年6月27日08时贝加尔湖附近形成一低涡,在鄂霍次克海存在一阻塞高压,该低涡系统稳定少动,强度不断加强,到28日20时低涡中心强度从544 dagpm增强至542 dagpm,并配合有一20℃的冷温度中心。由于涡后部冷空气不断分裂南下,在28日20时形成阶梯槽,一支位于贝加尔湖南部,另一支位于华北北部,这种形势有利于冷空气补充南下影响秦皇岛地区。在相应的200 hPa上,秦皇岛地区受高压脊控制,脊前呈疏散状,表明高空存在辐散,有利于中低层气流辐合上升。

在28日20时的700 hPa和850 hPa上,秦皇岛受西南气流和温度脊控制,700 hPa在河北西北部至内蒙古一带温度露点差小于2℃,说明水汽充沛。850 hPa在河北、山西、内蒙古交界处存在一切变。

本次强降水过程的影响系统是高空短波槽和东蒙低涡。由中尺度环境场(图1)可知:由于东蒙冷涡稳定少动,且不断发展加强,冷空气不断分裂南下影响河北东北部地区。秦皇岛位于高空冷温度槽和低压暖脊之间,且为K指数大值区,该区域为不稳定区域,有利于产生对流活动。强降水落区位于高空急流出口右侧和低压急流入口左侧,850 hPa显著湿区,且K指数大于32℃。切变线和地面辐合线触发了秦皇岛北部短时强降水。

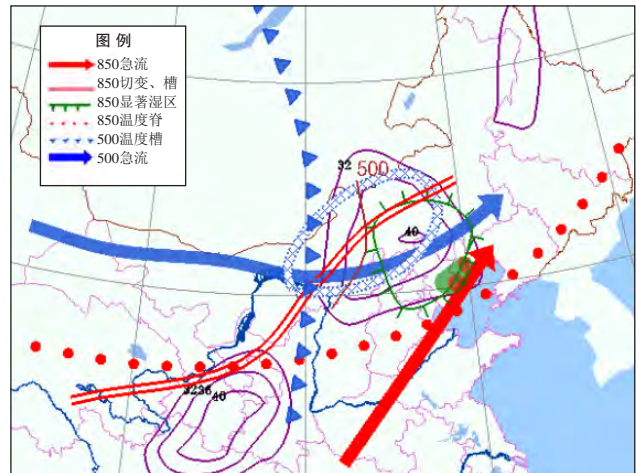


图1 2013年6月28日20时高低空系统配置图
(其中紫色线条代表K指数场,绿色区域为暴雨区)
Fig. 1 Configuration of high and low weather system at 2000 BT on 28 June 2013
(The purple line represents K exponential field, and the green area represents the rainstorm area)

由图2可知,28日20时秦皇岛受低压控制,辐合线位于河北和内蒙交界,青龙站小时降水量为1.9 mm。到23时随着系统东移和冷空气补充,辐合区位于河北北部,并在河北东部产生新的辐合区,河北西北部处于气旋性曲率大值区,青龙站小时雨量达到32.2 mm,说明该区域辐合强,有利于对流活动的发展。到29日02时河北东北部转为反气旋环流,秦皇岛北部受东北气流控制,降水明显减弱,04时降水基本结束。

2 中尺度特征分析

2.1 卫星云图演变分析

从红外云图动态分析可知:28日08:30在河北西北部有一低涡云系,该云系范围较宽广(图3a)。由于高空冷空气补充南下及日本海阻塞高压的存在,有利于对流云团加强发展和维持,在22:30低涡云系发展为中尺度对流复合体MCC(图3b),该云系结构密实,青龙县位于TBB梯度最大处,该时刻与最大

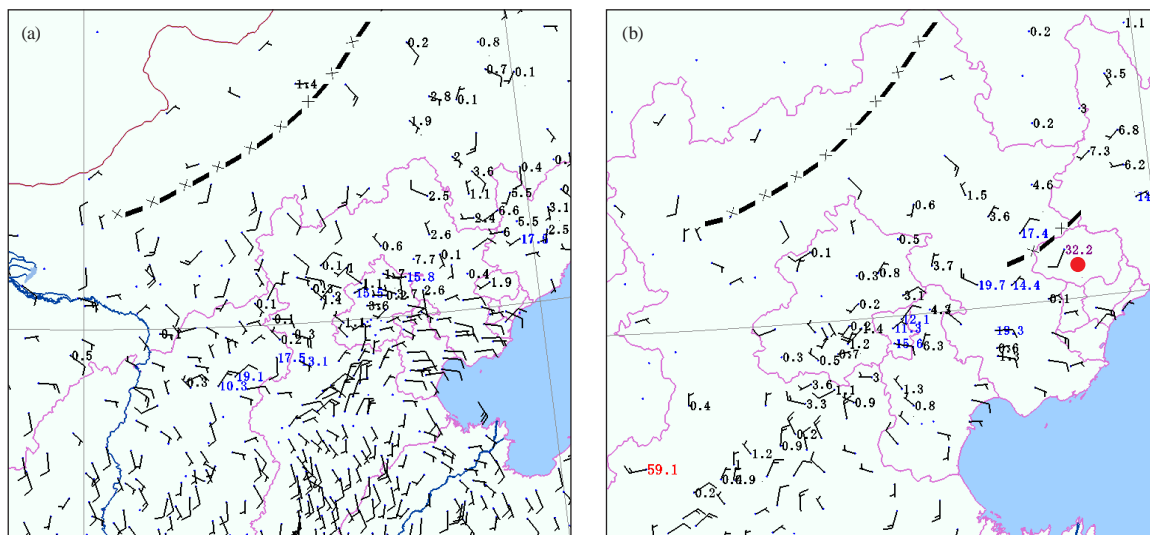


图2 2013年6月28日20时和23时加密站风场叠加小时雨量(红色区域代表青龙站)
Fig. 2 Wind field and hourly rainfall (The red area represents Qinglong station)
(a) 2000 BT on 28 June; (b) 2300 BT on 28 June 2013

小时降水量相吻合(图3e)。随着系统东移和低层辐合减弱,从00:30开始,对流云团东南部的云系逐渐减弱与主体分离,云团结构开始松散(图3c),至03:30对流云团基本移出秦皇岛(图3d),强降水明显减弱,后期转为分散的降水云系影响,降水趋于结束(图3e)。

2.2 多普勒雷达组合反射率演变分析

本次过程的强降水时段出现在28日22时至29日04时,由组合反射率因子的动态变化(图4)可知:28日20时青龙上空开始有弱降水回波,在兴隆到宽城一带存在一窄带回波,大片降水回波中镶嵌着超级单体,中心强度值为50~60 dBz,该回波带缓慢向东南方向移动。位于秦皇岛上空的回波带呈线状,线状回波中不断有超级单体影响秦皇岛市北部县区,类似“列车效应”。21时青龙上空降水回波中心强度最大值为60 dBz,由于秦皇岛市西北部位于切变线附近,且低层湿度条件较好,并且在北京一天津一带不断有带状降水回波生成,使该回波带经过降水区时回波中心强度值稳定维持在55~65 dBz,青龙最大小时降水量达到44.3 mm。29日02时降水回波的线状结构开始松散,秦皇岛市转为零散的降水回波影响,该降水回波影响秦皇岛市长达4~5 h,从而造成北部山区暴雨到大暴雨。04时以后降水明显减弱,降水趋于结束。

2.3 闪电资料及自动站资料分析

分析强降水时段基本径向速度图和闪电实况图(图略)可知:秦皇岛市降水出现在28日20时至29日04时,北部山区为雷电极高密度区域。速度图在低空

有明显的东南气流输送水汽,青龙县区附近低层为辐合,高层为辐散,有利于上升运动的维持,且中低层为大范围正速度区包围有负速度区,有“逆风区”存在,该区域与强降水区域吻合。5 min加密自动站风场显示(图略):28日21:30青龙县区有明显的风场辐合,29日01:30青龙转为南到东南风,中尺度风场辐合减弱、消失,降水开始明显减弱。

3 物理量诊断分析

3.1 水汽条件分析

分析可知:水汽通量散度辐合区位于河北东部,最大值为 $-3 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$,同时次的水汽通量场显示有东南和西南两支气流输送水汽,水汽主要来源于渤海和黄海(图5a)。850 hPa比湿大于 $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,这充分说明中低层充沛的水汽条件,对降水起到增幅作用,有利于产生短时强降水(图5b)。

3.2 热力条件分析

相当位温 θ_e 是一个重要的温湿特征参数,由相当位温的径向剖面图(图6a)可知:秦皇岛上空在900 hPa附近存在一闭合暖区,中心值达342 K,且850 hPa以下为位势不稳定区域,与径向分量大正值区相对应,偏南风有利于暖湿气流输送。

在 $T-\ln P$ 图上(图6b),湿层较厚,高湿区达700 hPa高度,925 hPa存在一浅薄的逆温层,并且存在风切变。 K 指数为34, SI 指数为-9.12, $CAPE$ 值为2766.1,整层比湿积分为4682.7,这说明大气为层结不稳定状态,蕴含着不稳定能量,为强降水的产生提供了不稳定条件。同时, -20°C 层高度为5.8 km,

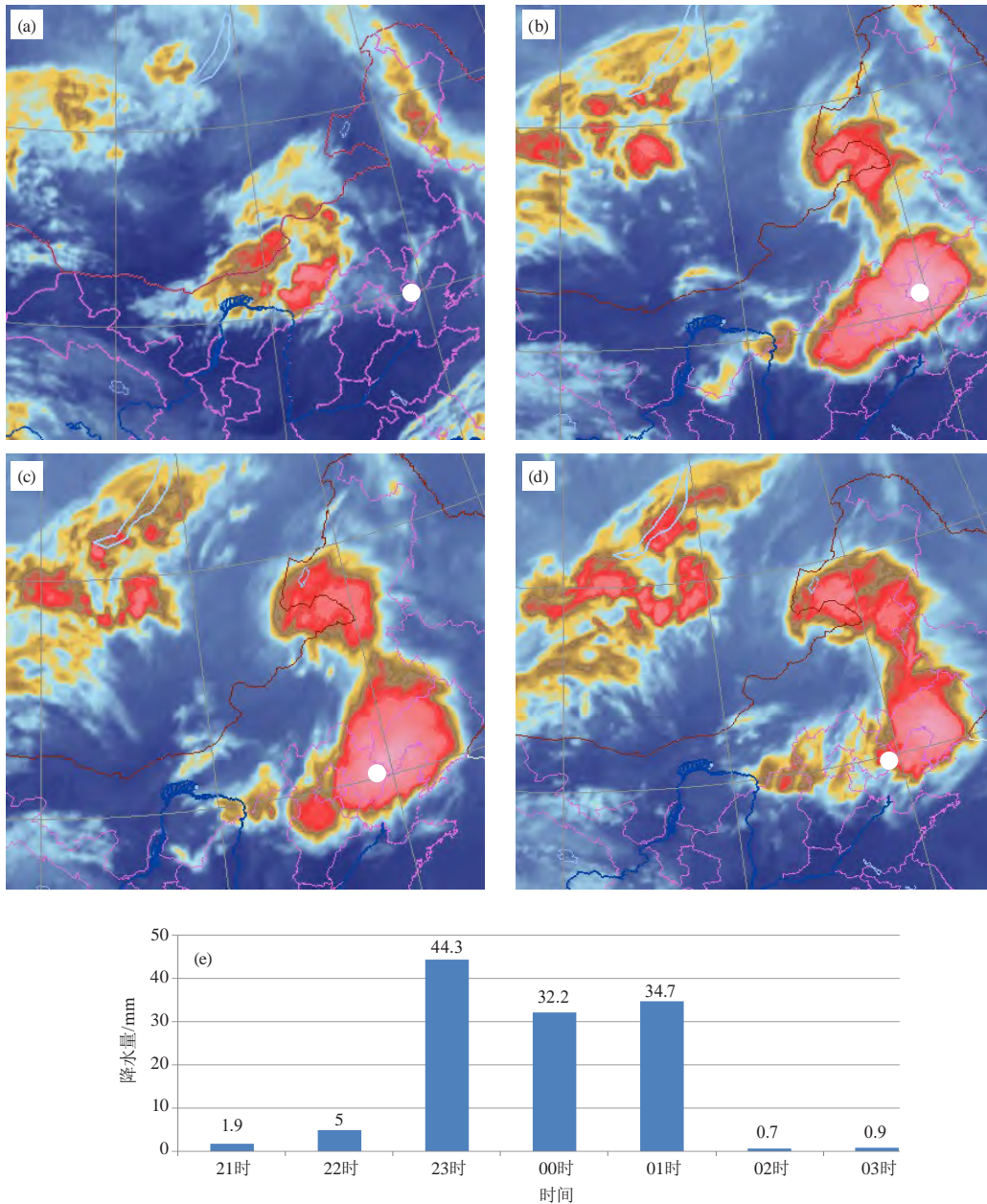


图3 2013年6月28—29日红外云图 (其中白圆圈代表秦皇岛): (a) 28日08:30, (b) 28日22:30, (c) 29日00:30, (d) 29日03:30和 (e) 青龙站逐小时降水量

Fig. 3 Infrared cloud image (a) 0830 BT on 28 June, (b) 2230 BT on 28 June, (c) 0030 BT on 29 June and (d) 0330 BT on 29 June 2013 and hourly precipitation (e) at Qinglong station (The white circle represents Qinhuangdao)

0 °C层高度为4.3 km, 但由于中低层湿层深厚, 且风切变小, 不满足大风、冰雹等强对流天气的条件。

3.3 动力条件分析

从垂直速度剖面可以看出秦皇岛北部地区600 hPa以下为上升运动区, 最大上升速度中心值为 $-40 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图7a), 对应散度场在300 hPa以下为辐合区 (图7b), 中心值为 $-16 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, 高层为辐散区, 中心值为 $24 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, 正散度明显大

于负散度, 说明高空急流抽吸作用明显, 有利于降水增强。

4 数值预报产品检验分析

4.1 环流形势检验 (T639 模式/EC 模式)

对比EC、T639模式500 hPa高度场预报稳定性 (图8), 可以看出: 对东蒙冷涡系统, EC模式和T639模式各时效均预报出544 dagpm低涡中心, EC模式和T639模式24 h、48 h预报接近实况场, 72 h预

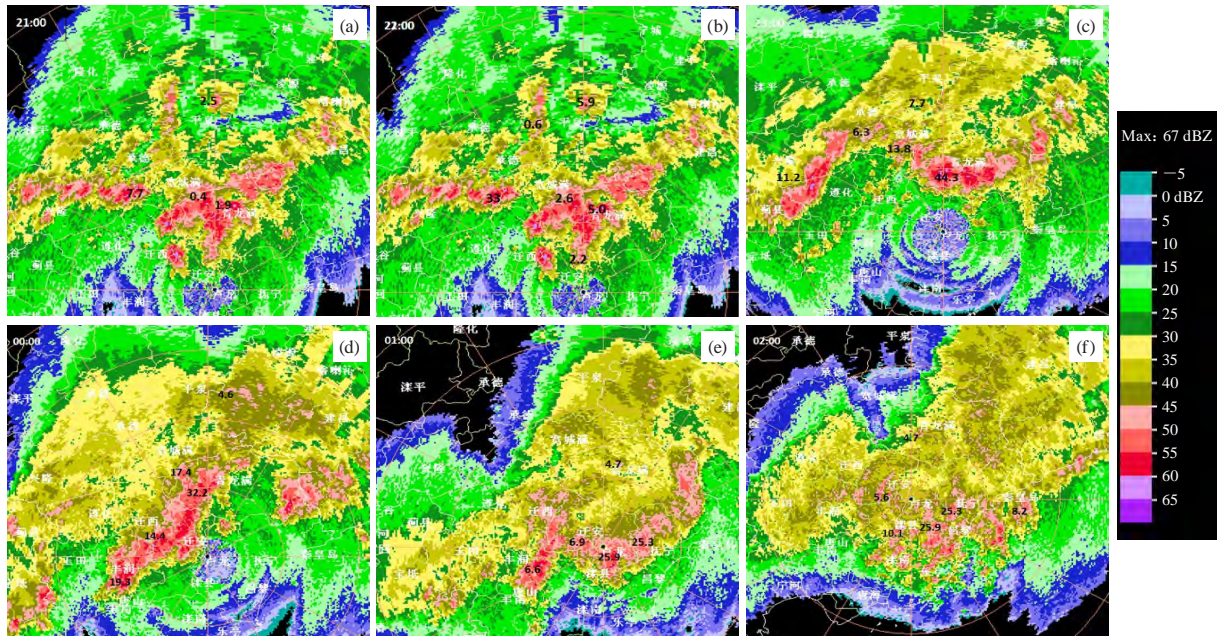


图4 2013年6月28日21时—29日02时组合反射率 (单位: dBZ) 与小时降水量 (单位: mm) 配置图

(a) 28日2100 BT; (b) 28日2200 BT; (c) 28日2300 BT; (d) 29日0000 BT; (e) 29日0100 BT; (f) 29日0200 BT

Fig. 4 Combined reflectance (unit: dBZ) and hourly precipitation (unit: mm) from 2100BST 28th to 0200BST 29th

(a) 2100BST on 28 June; (b) 2200BST on 28 June; (c) 2300BST on 28 June; (d) 0000BST on 29 June; (e) 0100BST on 29 June; (f) 0200BST on 29 June

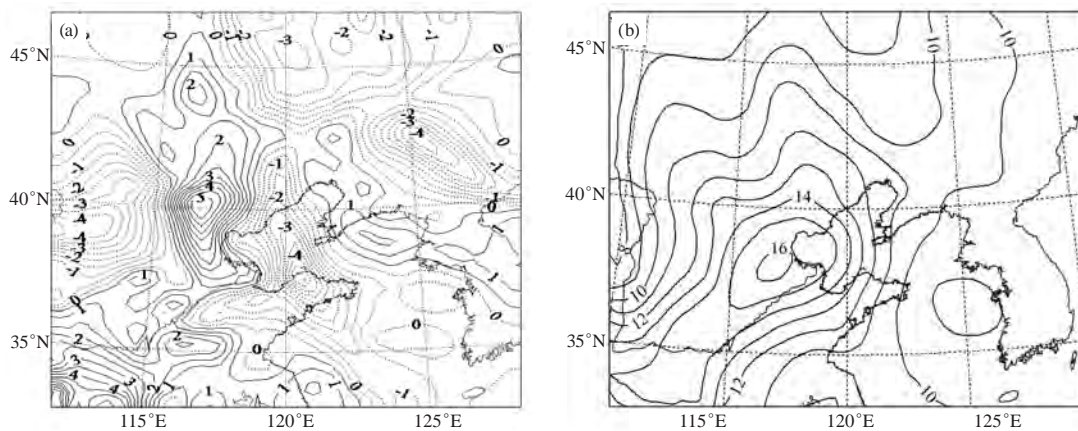


图5 2013年6月28日20时850 hPa (a) 水汽通量散度 (单位: $10^{-6} \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$) 和 (b) 比湿场 (单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Fig. 5 Moisture flux divergence field (units: $10^{-6} \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$) and specific humidity (units: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) at 850 hPa at 2000 BT on 28 Jun 2013

报EC模式较实况场略偏强, T639模式较实况场略偏弱; 对副热带高压584 dagpm特征线时次的预报, EC模式的预报比较稳定, 跟实况基本一致, T639模式误差较大。对日本海阻塞高压T639模式各时效均预报偏弱, 且时效越长稳定性越差, EC模式各时效预报效果较好。

4.2 850 hPa 风场检验

对影响华北东北部的低空急流系统(图9), 两家模式24 h时效预报的风速均较实况偏弱, 对850 hPa

切变线预报均偏弱、偏北, EC模式对秦皇岛北部的风向预报偏差较大。

4.3 降水强度及落区检验

对降水落区进行检验(图10), 本次强降水过程, 各家数值预报对雨带的走向把握较好, 从预报量级上看, 均存在预报偏小的情况, 特别是对大暴雨的落区预报效果均不理想, 稳定性差。对华北地区东北部中雨以上量级的降水, 各家模式预报均偏北, 强度偏弱。各家指导产品强降水中心为大雨到暴雨, 比

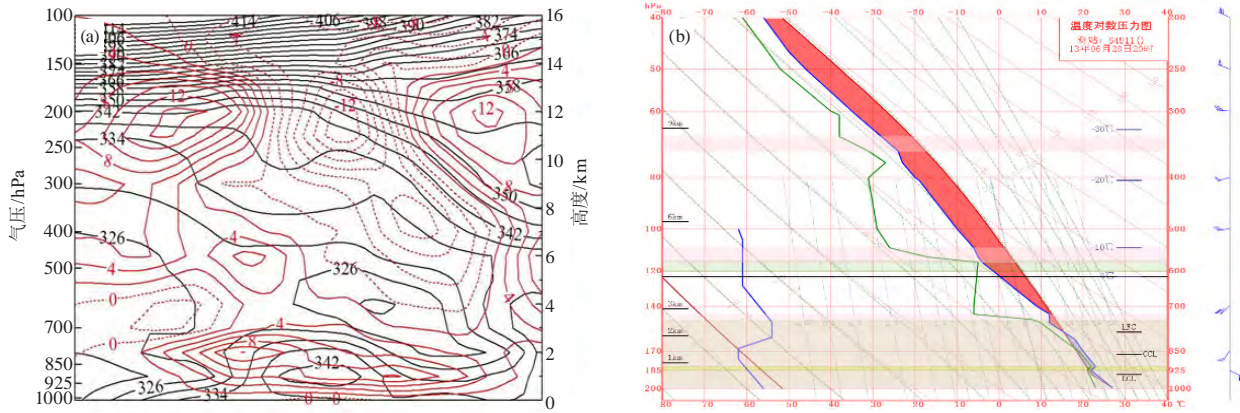


图6 2013年6月28日20时 (a) 相当位温沿119°E径向剖面 (单位: K) 叠加风速径向分量和 (b) 北京探空图 (黑色: 相当位温; 红色: 风速径向分量)

Fig. 6 The vertical cross-section of potential equivalent temperature (units: K) along 119°E with the radial component of the wind velocity (a) and sounding figure from Beijing station at 2000 BT on 28 June 2013 (b) (The black represents potential equivalent temperature; the red represents radial component of the wind velocity)

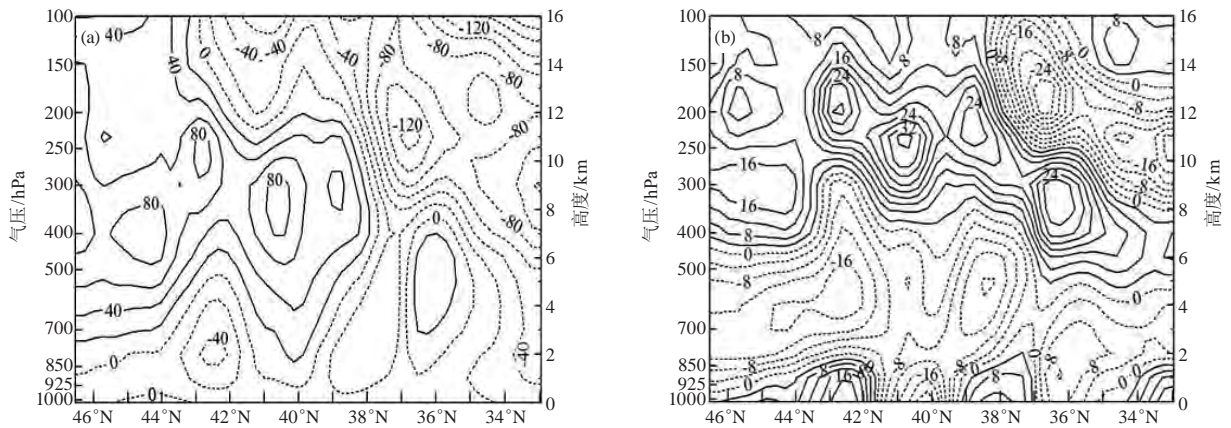


图7 2013年6月28日20时沿119°E径向剖面的 (a) 垂直速度 (单位: $m \cdot s^{-1}$) 和 (b) 散度 (单位: s^{-1})

Fig. 7 The vertical cross-section of vertical velocity (a, units: m/s) and divergence (b, units: s^{-1}) along 119°E at 2000 BT on 28 June 2013

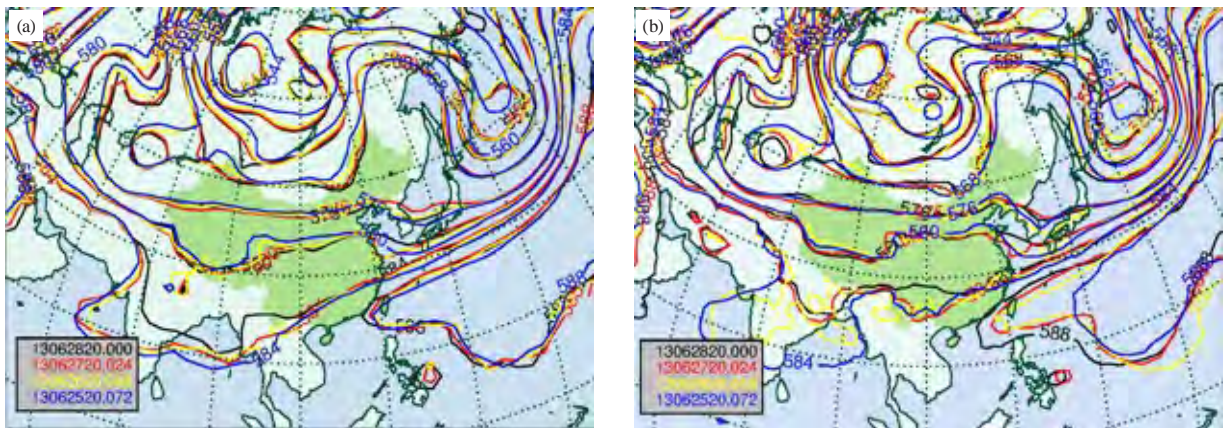


图8 2013年6月28日20时500 hPa高度实况场及对应24 h、48 h、72 h预报 (a) EC模式; (b) T639模式

(其中黑色为实况场, 红色表示24 h预报, 黄色表示48 h预报, 蓝色表示72 h预报)

Fig. 8 The actual field at 500 hPa and the corresponding forecasts at 24 h, 48 h and 72 h: (a) EC model; (b) T639 model (black: actual field, red: 24 h forecast, yellow: 48 h forecast, blue: 72 h forecast)

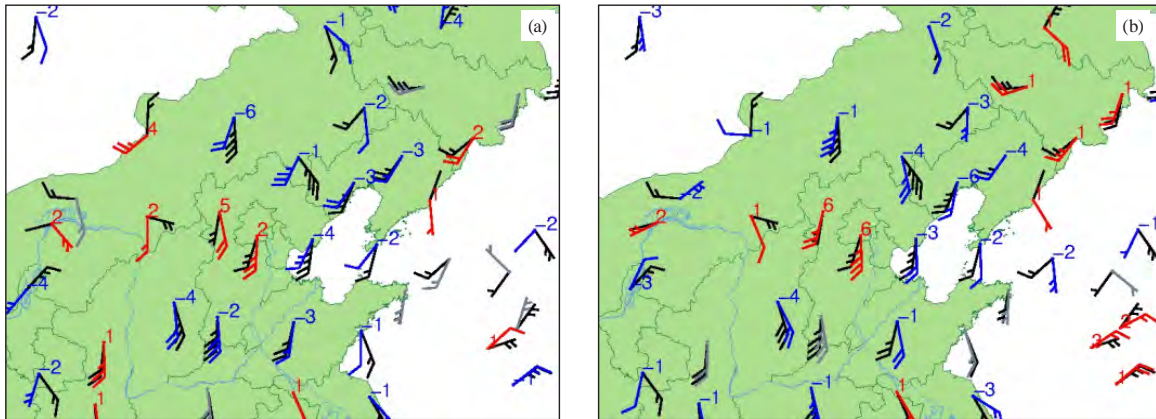


图9 2013年6月28日20时850 hPa风场实况及EC (a)、T639 (b) 模式24 h时效预报图
 (其中黑色表示观测值, 红色表示预报值大于观测值, 蓝色表示预报值小于观测值)
 Fig. 9 Wind field at 850 hPa and 24 h forecast from EC (a) and T639 (b) models (black: observed value, red: Larger than observed values, blue: Less than observed values)

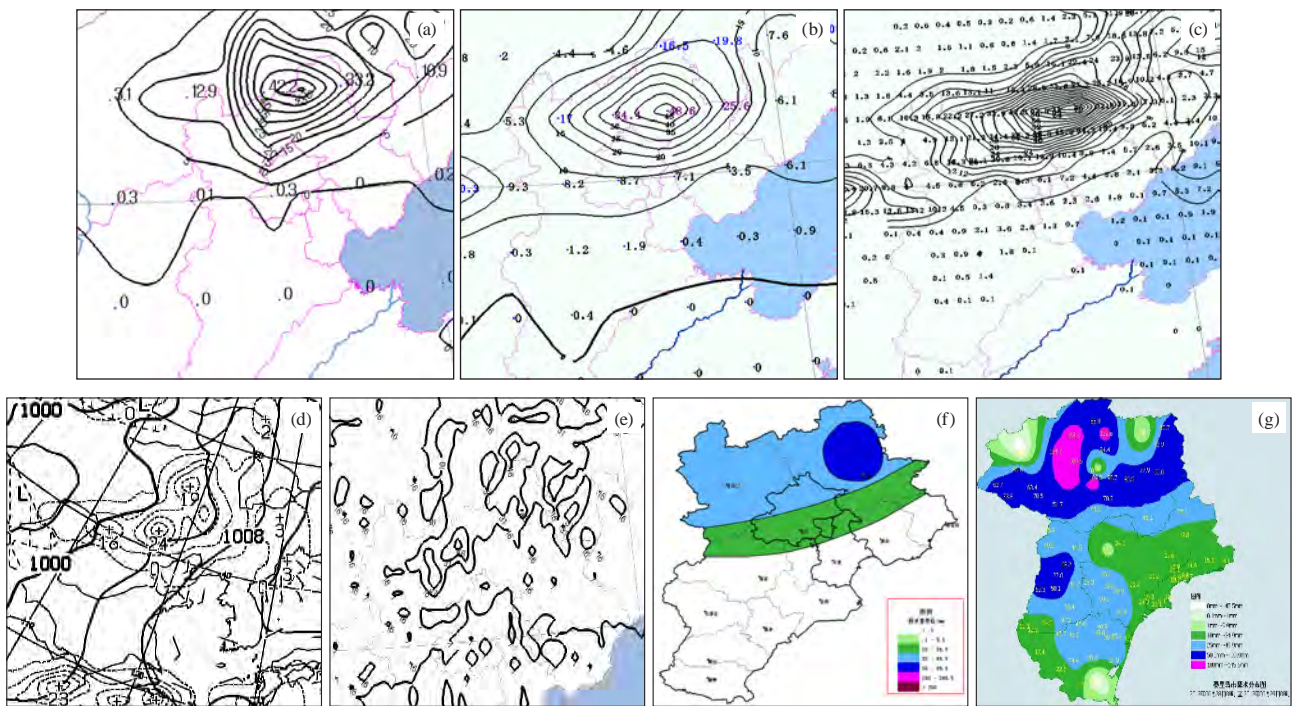


图10 2013年6月28日08时至6月29日08时累积降水量预报及实况 (单位: mm)
 (a) T639; (b) EC; (c) 日本细网格; (d) 日本传真图FAX; (e) GRAPES; (f) 省台预报; (g) 实况
 Fig. 10 Forecast and reality of cumulative precipitation (unit: mm) from 0800 BT on 28 June to 0800 BT on 29 June 2013
 (a) T639; (b) EC; (c) Jap-thin; (d) FAX; (e) GRAPES; (f) Provincial forecast; (g) Actual

较一致, 但强降水中心都偏北, 且未能体现出大于 100 mm 的大暴雨区域。T639 预报偏差较大, 量级为大雨并且中心在河北张家口一带, 偏差较大。日本细网格和省台指导预报对强降水落区偏差较小, 中心略偏北, 更接近实况。

上图的基本结论是: 各家预报均预报了一次大到暴雨过程 (即雨量在 25~50 mm), 只有省台综合预报为暴雨到大暴雨过程 (即雨量为 50~100 mm), 但

位置普遍偏北。总之各家模式对这次过程的预报能力基本相同。造成位置偏北的原因可能与大尺度流场的预报存在缺陷有关。

整体而言, EC 模式的预报对亚洲地区中高空环流预报的结果更为准确, 对弱高空槽系统预报偏差较大。日本细网格和省台指导预报对暴雨落区的预报偏差较小, 而降水极值预报需结合强对流工具、实况加密资料及时更新预报, 发布短临预报。

冷涡天气形势下,各种数值预报模式均预报有降水,且降水量级一致或相差不多时,考虑地形作用,秦皇岛北部山区降水量级可增加一个量级或稍大一些;当细网格预报有大雨,数值接近暴雨时,应考虑有暴雨或局地暴雨出现。

5 结论

(1) 本次暴雨过程是由于东蒙冷涡稳定少动,影响系统是高空低涡和高空槽,触发机制是切变线和中尺度风场辐合。强降水落区位于水汽通量大值区,600 hPa以下强上升运动区和850 hPa以下位势不稳定区域。

(2) 对500 hPa中高纬环流场、槽线进行检验,对东蒙冷涡预报T639和EC两模式预报都比较稳定,但对日本海阻高预报T639预报偏弱,且时效越长稳定性越差。EC模式对弱高空槽系统预报偏差较大,需重点关注。

(3) 降水强度和落区检验:各家数值模式预报产品对雨带走向把握较好,但对降水的强度把握均较实况偏弱、偏北。在降水量级上,日本细网格和省台指导预报偏差较小。

综上所述,检验结果由于其局限性并不能全面精确地评述每种模式的预报性能,只能从典型个例给相似天气过程的模式预报解释应用提供一个参考。

参考文献

- [1] 高松影,孙连强.日本数值预报产品在丹东地区降水预报的检验和评估.气象,2006,32(6):79-84.
- [2] 王雨.2002年主汛期国家气象中心主客观降水预报检验.气象,2003,29(5):21-25.
- [3] 张晶,姚文,何晓东,等.营口地区数值预报降水产品定量检验和预报指标研究.气象与环境学报,2014,30(1):30-35.
- [4] 项续康,江吉喜.我国南方地区的中尺度对流复合体.应用气象学报.1995,6(1):9-17.
- [5] 蒙伟光,王安宇,李江南,等.华南暴雨中尺度对流系统的形成及湿位涡分析.大气科学,2004,28(3):330-341.
- [6] 吴紫煜,姚雯,李超,等.京津冀地区中 α 尺度飑线过程中大风特征分析及成因初探.气象与环境科学,2016,39(2):90-98.
- [7] 李改琴,吴丽敏,许庆娥,等.一次下击暴流天气特征分析.气象与环境科学,2016,39(3):60-67.
- [8] 马月枝,苏爱芳,叶东,等.2014年7月14日新乡强对流过程成因分析.气象与环境科学,2017,40(1):54-63.
- [9] 孟妙志.K指数在暴雨分析预报中的应用.气象,2003,29(8):1-2.
- [10] 马鸿青,丁治英.河北中南部一次大暴雨个例的成因诊断.干旱气象,2009,27(3):254-262.
- [11] 王金兰,陈红霞,段中夏,等.河南省一次致灾强对流天气的中尺度分析.气象与环境科学,2014,37(3):14-20.
- [12] 李艳芳,程胜,吴彬.2012年4月2日华东灾害性飑线大风成因分析.气象与环境科学,2014,37(4):59-65.
- [13] 王秀明,周小刚,俞小鼎.雷暴大风环境特征及其对风暴结构影响的对比研究.气象学报,2013,71(5):839-852.
- [14] 杨晓霞,李春虎,杨成芳,等.山东省2006年4月28日飑线天气过程分析.气象,2007,33(1):74-80.
- [15] 张琪.三门峡地区一次飑线天气成因及特征分析.气象与环境科学,2015,38(4):76-83.
- [16] 苏爱芳,梁俊平,崔丽曼,等.豫北一次局地雹暴天气的预警特征和触发机制.气象与环境学报,2012,28(6):1-7.
- [17] 孟英杰,吴洪宝,王丽,等.2007年主汛期武汉区域四种数值模式定量降水预报评估.暴雨灾害,2008,27(3):273-277.
- [18] 赵晓琳.2012年12月至2013年2月T639、ECMWF及日本模式中后期预报性能检验.气象,2013,39(5):653-658.
- [19] 肖明静,盛春岩,石春玲,等.2010年汛期多模式对山东降水预报的检验.气象与环境学报,2013,29(2):27-33.
- [20] 肖明静,隋明,范苏丹,等.3种数值模式温度预报产品在山东应用的误差分析与订正.干旱气象,2012,30(3):472-477.
- [21] 张国华,张江涛,张南,等.基于河北区域天气分型的多模式降水检验评估.气象,2011,37(8):968-976.
- [22] 崔粉娥,王勇,李慧君.多家数值产品沿海大暴雨预报性能检验.气象科技,2013,41(4):696-702.
- [23] 贾丽红,张慧岚,肖开提·多莱特,等.T639数值产品对影响新疆主要系统的预报检验评估.气象,2012,38(8):971-976.
- [24] 陈超君,李俊,王明欢.2013年汛期华中区域业务数值模式降水预报检验.气象与环境学报,2015,31(2):1-8.
- [25] 肖红茹,王灿伟,周秋雪,等.T639、ECMWF细网格模式对2012年5—8月四川盆地降水预报的天气学检验.高原山地气象研究,2013,33(1):80-85.
- [26] 蔡梦宁.2012年9—11月T639、ECMWF及日本模式中后期预报性能检验.气象,2013,39(2):253-258.
- [27] 程锦霞.2013年5月河南一次大暴雨成因分析及数值预报检验.气象与环境科学,2014,37(2):42-48.

半世纪来贵州雷山降水及气温特征与喀斯特地貌溶蚀性分析

易志学

(贵州省雷山县气象局, 雷山 557199)

摘要: 利用贵州省雷山国家气象站1961—2015年55 a的气温和降水观测资料,采用统计分析的方法,分析雷山县近55 a来的气温和降水的变化特征及趋势。结果表明:近半世纪来,雷山县降雨主要发生在6月,月平均降雨量和降雨日数分别为250.5 mm和18.9 d;年平均降雨量呈增多趋势,其趋向率为0.37 mm/10 a,而年降雨日数却呈减少趋势,其趋向率为-3.07 d/10 a,其主要原因是夏季降水强度增强、频次增多所致,其次为冬季降水;年平均气温以0.08 °C/10 a趋势上升,且近10 a气温呈明显增加趋势,波谷与波峰之间振幅明显,从各季节分析,各季气温均以不同程度上升,其中又以冬季和秋季贡献最大,增温率分别达0.12 °C/10 a及0.11 °C/10 a;贵州雷山地处亚热带季风气候区,气候湿润、降水丰富、降水量大、流水作用强烈、地表径流相对稳定,逐年降水量和逐年平均气温的上升引起的喀斯特地貌溶蚀性潜能呈上升趋势。

关键词: 降水, 气温, 特征, 溶蚀性

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.06.010

Precipitation and Air Temperature Characteristics and Karst Landform Solubility Analysis for Recent Half Century in Leishan Guizhou

Yi Zhixue

(Leishan Meteorological Station, Leishan 557199)

Abstract: Temporal variations of air temperature and precipitation in the past 55 years were analyzed for Leishan County by using statistical methods and observational data of Leishan National Weather Station from 1961 to 2015. The results showed that rainy days at Leishan County in the last half century mainly occurred in June, with average rainfall and rainy days in June being 250.5 mm and 18.9 days, respectively. While the average annual rainfall increased at a rate of 0.37 mm per 10 years, the annual rainy day decreased at a rate of 3.07 day per 10 years. The main reason was the increase in the rainfall intensity and frequency in summer followed by winter. Annual average temperature increased at a rate of 0.08 degrees per 10 year with more obvious increase in the recent 10 years when there was an obvious increasing trend of amplitude between trough and crest. Air temperature increased in each season to different degrees, with winter (0.12°C/10 years) followed autumn (0.11°C/10 years) being the season with the greatest increase. The increase in annual precipitation and annual average air temperature resulted in a potential increase of Karst landform solubility and erosion.

Key words: precipitation, temperature, characteristics, solubility

0 引言

贵州喀斯特地貌形成与贵州的岩石和气候密切相关。贵州岩石以石灰岩等可溶性岩石为主,透水性强;贵州地处亚热带季风气候区,降水丰富、湿度大、流水作用强烈。喀斯特地貌是具有溶蚀力的水对可溶性岩石(大多为石灰岩)进行溶蚀等作用所形成的地表和地下形态的总称,又称溶岩地貌。除溶蚀作

用以外,还包括流水的冲蚀、潜蚀,以及坍塌等机械侵蚀过程。降水是喀斯特溶蚀过程中溶蚀介质的主要补给源,降水量与溶蚀量的正相关关系已被许多学者论证^[1],同时在相同条件下,温度与溶蚀速度呈正相关^[2]。岩石的可溶性是溶蚀过程中另一个必要条件,岩石可溶性与溶蚀量有着正相关关系也已为许多岩性和喀斯特水化学分析及模拟试验所证实^[3]。贵州省为核心的中国西南岩溶区,由于地质环境脆弱性大、敏感度高,面临人口超载和经济社会落后的双重压力,同时由于历史原因致使生态环境严重退化,出现了大

收稿日期: 2018年7月24日;修回日期 2019年3月8日
作者: 易志学(1984—), Email: ououyr@163.com

面积基岩裸露的石漠化问题。土壤侵蚀是石漠化发生的直接原因，岩溶区土壤侵蚀的研究较为滞后。不同土地利用方式下容许侵蚀量，具体为研究岩溶区人类活动造成的土壤质量差异，并深入探讨不同土地利用方式对溶蚀成土速率的影响，这对于探索出土壤退化演变过程和科学认识岩溶作用、合理利用和保护岩溶区土壤资源，对于土壤侵蚀防治和石漠化治理，发展岩溶区农村经济均有重要的科学意义和广泛应用前景^[4]。

雷山县地处云贵高原丘陵盆地过渡的斜坡地带，地势东北高、西南低，境内最高海拔2178 m，最低海拔480 m，境内山峦起伏、河谷纵深、地形破碎、切割深厚，河流下切冲刷强烈、地形复杂。雷公山与境内之猫鼻岭（海拔1620 m）、桥堂（海拔1763 m）、脚尧山顶（2000 m）、雷公坪（2041 m）呈西南—东北向分布。境内地形地貌复杂，地层岩性抗风化能力弱，岩结构破碎疏松，降水量充沛，每年受季风和冷暖气流的影响，易发暴雨、干旱等气象灾害。贺中华等^[5]研究表明洪水资源化是解决喀斯特地区水资源严重缺乏的有效途径。罗健等^[6]研究指出溶蚀性受气温、降水和人类活动的交替影响，在不同的时间段内，其受影响的程度不一；王冬银等^[7]研究指出降水量、温度等因素也是控制岩溶速率的主要因素之一；在雷山由强降水诱发的各类气象灾害时有发生，由于特殊的地理位置，交通不便，农村人员居住较分散，80%以上的人口居住偏远的高寒地区，受气候、交通、信息的影响，防灾减灾的能力很弱^[8]。因此，气象灾害的发生给人民生命财产带来了较大损失。对雷山县近55 a降水和气温变化特征进行详细的分析研究，将对决策气象服务和防灾减灾工作具有显著重要的意义。同时对喀斯特地貌的研究在理论和生产实践上也有重要意义。

1 资料来源及处理方法

1.1 资料来源

利用雷山国家气象站1961—2015年55 a的气温和降水观测资料为研究对象（资料由雷山县气象局气象资料档案室提供），对月降水量、年降水量、各级降水日数、年平均气温、年极端气温等资料进行统计分析。其中季节划分采用气象划分法，即3—5月为春季，6—8月为夏季，9—11月为秋季，12月—次年2月为冬季。

1.2 方法

为了解气象要素长期趋势变化，计算时间序列 x_i 与自然数数列 t_i （1, 2, ..., n）之间的相关系数，称为

趋势系数^[9]。即

$$x_i = a + bt_i \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

式中， b 为趋势系数，可表示时间序列长期趋势变化的方向和程度。它消去了气象要素的均方差和单位对线性回归系数数值大小的影响，从而可在不同地理位置、不同气象要素之间比较趋势变化大小。

2 降水变化特征

2.1 月平均降水量、月平均降水日数变化特征

根据雷山县1961—2015年的月降水资料，统计各月的平均降水量和降水日数。由表1可见，月平均降水量、月平均降水日数最大值都出现在6月，分别为250.5 mm和18.9 d，分别占全年18.85%和10.58%；月平均降水量最小值出现在1月，为29.4 mm，占全年百分率2.21%，而月降水日数最小值出现在11月，为11.6 d，占全年6.47%

表1 月平均降水量及月平均降水日数特征
Table 1 Monthly average precipitation and rainy day characteristics

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
降水量/mm	29.4	38.7	58.9	126.8	182.7	250.5	191.1	147.6	81.1	93.9	60.6	67.5
百分率/%	2.21	2.91	4.43	9.54	13.75	18.85	14.37	11.10	6.10	7.07	4.56	5.11
降水日数/d	13.6	13.6	15.2	17.0	17.8	18.9	17.3	15.9	11.8	14.0	11.6	12.2
百分比/%	7.60	7.60	8.48	9.50	9.95	10.58	9.67	8.89	6.61	7.83	6.47	6.82

2.2 年降水量、年降水日数及各级降水日数变化特征

从图1a可以看，雷山县近55 a的年平均降水量为1328.8 mm，历史年降水量最大值是2015年为2291 mm，最小年降水量是1989年的922.9 mm，历史最大值与历史最小值相差达1368.1 mm。年降水量变化趋势略呈增加趋势，其趋向率为0.37 mm/10 a，表明年降水量呈增加趋势，但不显著。为了研究方便，采用累积距平方法计算年降水量距平百分率^[10]，以距平百分率+20%（-20%）定义降水量偏多（偏少），计算出距平降水量1594.5 mm和1063.0 mm为临界值。根据降水量偏多（偏少）年的标准，可以看出降水量偏多的年份有：1977、1979、1993、2002和2015年，特别是2015年的年降水量异常偏多，距平百分率达102.95%；降水量偏少的年份有1986、1989、2003、2005和2011年，1989年最少，距平百分率为-30.54%。

从5 a滑动平均曲线不难看出，近55 a来，雷山县从20世纪60年代开始一直到80年代，年降水量一直处于增多趋势，而到80年代中期开始，年降水量有明显的减少趋势，进入21世纪，随着全球气候变暖，人类

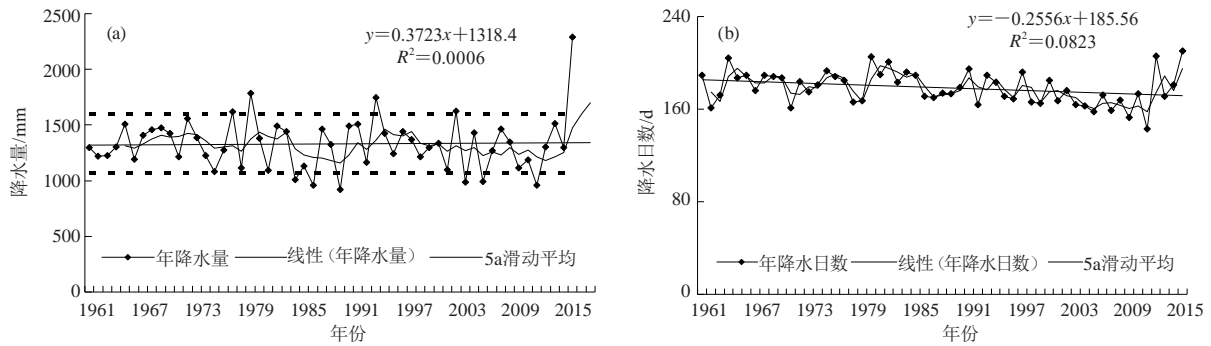


图1 雷山县近55 a年降水量 (a)、降水日数 (b) 年际变化趋势

Fig. 1 Interannual variation in annual rainfall (a) and rainy days (b) in the last 55 years in Leishan County

活动对气候影响因素增多等, 雷山县暴雨处于频发、多发时期。

将日降水量 ≥ 0.1 mm定义为一个降雨日, 根据雷山县近55 a来降水日数趋势(图1b)不难看出, 雷山县年降水日数平均为178.9 d, 最大为2015年的210 d, 最小为2011年的143 d, 最大年份与最小年份相差67 d, 且都发生在近几年。从趋势分析来看年降水日数总体呈下降趋势, 其趋向率为 -3.07 d/10 a, 并通过0.01显著性检验, 表明年降水日数呈显著减少趋势。年降水量呈增多趋势, 而降水日数呈减少趋势, 表明

降水越来越其中, 发生强降水的频率在增大。

为了研究其降水的变化特征, 采用日降水划分标准^[1], 将小雨、中雨、大雨、暴雨以上等级的日数进行趋势分析(图2)。

由图2d可见, 雷山县近半世纪以来, 除了暴雨以上量级呈上升趋势, 其趋向率为 0.64 d/10 a, 而小雨、中雨和大雨日数(图2a、3b、3c)均呈下降趋势, 其小雨、中雨和大雨的趋势率分别为 -2.31 d/10 a、 -0.80 d/10 a和 -0.24 d/10 a。

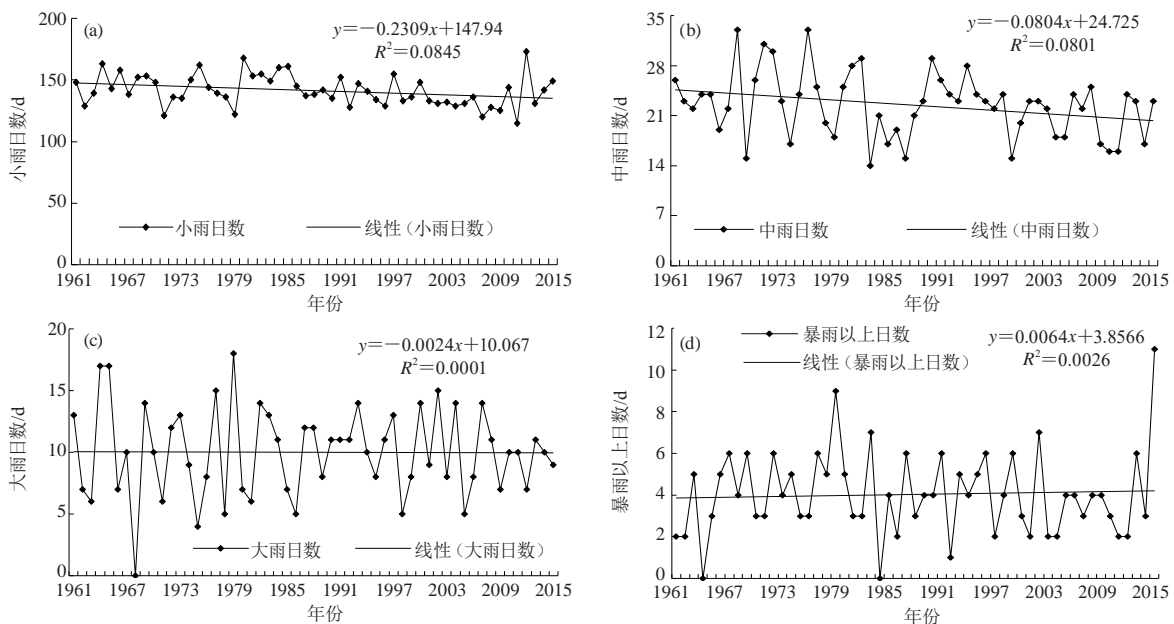


图2 雷山县近55 a小雨日数 (a)、中雨日数 (b)、大雨日数 (c)、暴雨以上日数 (d) 趋势变化

Fig. 2 Inter-annual variation in light (a), moderate (b), heavy (c), and torrential rain days (d) in the last 55 years in Leishan County

2.3 季降水量及降水日数变化特征

由图3a、3b可见, 近半世纪来, 雷山县春季的累计降水以2013年的796.1 mm最大, 最小累计降水为

1989年的206.8 mm, 最大与最小相差589.3 mm, 春节期间降水日数最多为1967年的67 d, 最少是1987年的36 d, 相差31 d。其降水量趋势和降水日数均呈下降

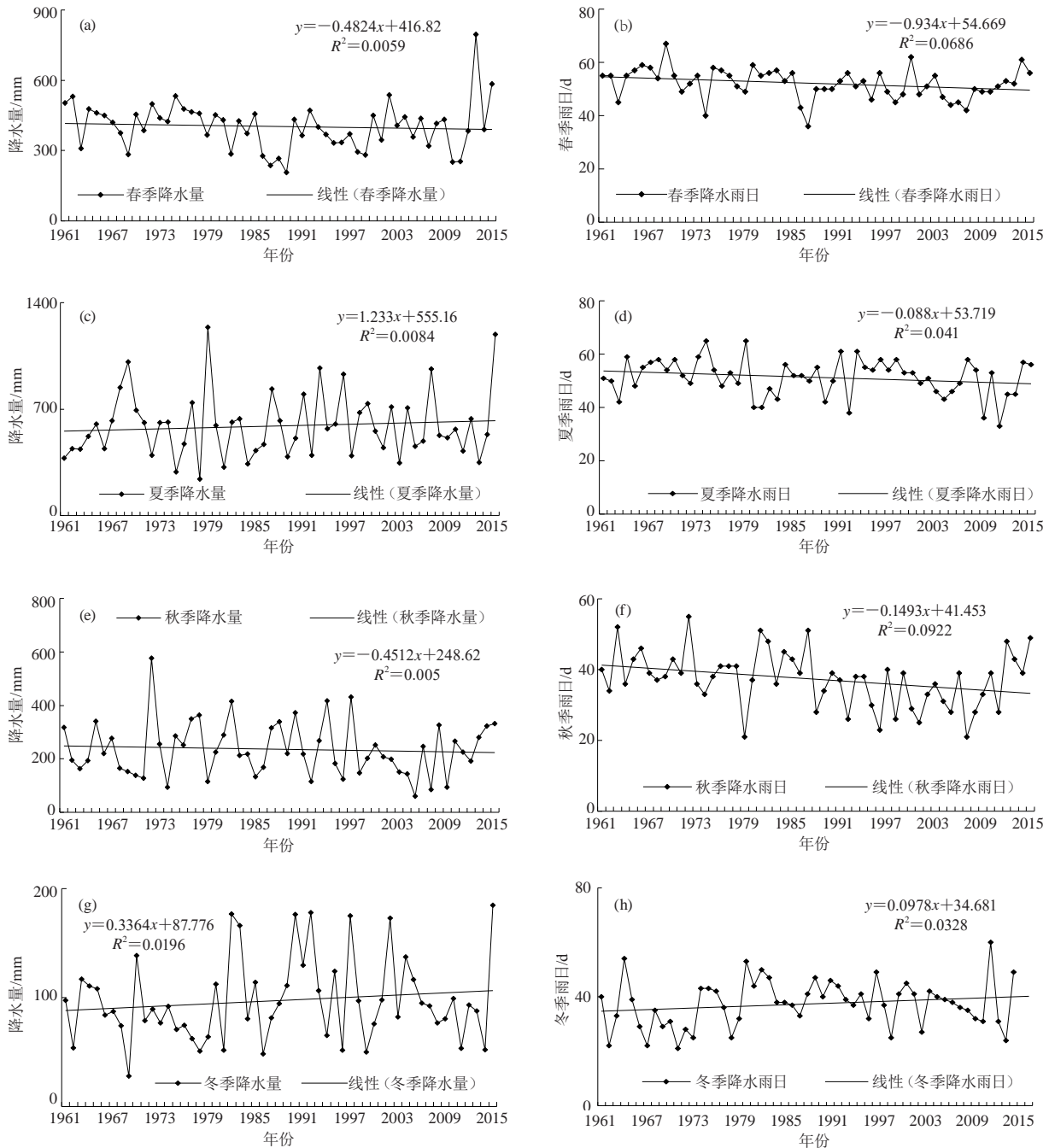


图3 雷山县近55 a四季降水量 (a, c, e, g) 及降水日数 (b, d, f, h) 变化特征

Fig. 3 Seasonal precipitation (a, c, e, g) and number of rainy days (b, d, f, h) in the last 55 years in Leishan County

趋势, 其趋势率分别为 $-4.82 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 、 $-0.93 \text{ d}/10 \text{ a}$ 。

图3c、3d分析, 夏季累计降水量最大值为1979年 1237.2 mm , 最小值为1978年 239.6 mm , 相差达 997.6 mm 。而夏季降水日数最多为1974年和1979年的 65 d , 最少为2011年的 33 d , 相差达 32 d 。从其趋势率分析来看, 夏季累计降水量呈上升趋势, 且上升趋势明显, 趋势率为 $12.33 \text{ mm}/10 \text{ a}$, 而降水日数呈下降趋势, 其趋势率为 $-0.88 \text{ d}/10 \text{ a}$, 均通过了0.05的显著性

检验, 这说明, 夏季累计降水的增多趋势对年降水量贡献最大, 同时也表明夏季降水时间跨度缩小了, 而强降水的频次正在日益呈上升趋势。

由图3e、3f不难看出, 秋季的累计降水量和降水日数均呈下降趋势, 其下降趋向率分别为 $-4.51 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 和 $-1.49 \text{ d}/10 \text{ a}$ 。然而冬季(图3g、3h)各月累计降水量和降水日数也呈上升趋势, 其倾向率分别为 $3.36 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 、 $0.98 \text{ d}/10 \text{ a}$, 且通过了0.05

显著性检验,这说明随着全球气候变暖的趋势,人类对气候干扰因素增多,冬季的降水频次也呈显著上升趋势。

3 气温特征分析

3.1 年平均气温、年极端最高气温、年极端最低气温变化特征

根据雷山县1961—2015年的平均气温资料,分析其气温变化特征,由图4a可见,雷山县近55 a的年平均气温为15.4 °C,最高为2015年的16.4 °C,最低为1984年的14.3 °C;年平均最高气温与年平均最低气温相差2.1 °C。从其倾向率分析来看,雷山县年平均气温正以0.08 °C/10 a的趋势上升。在经历了20世纪80年代的冷期时段后(图4b),气温呈缓慢的增温趋势,特别是近10 a来,随着全球气候变暖的趋势,气温增幅较大,曲线振幅明显。

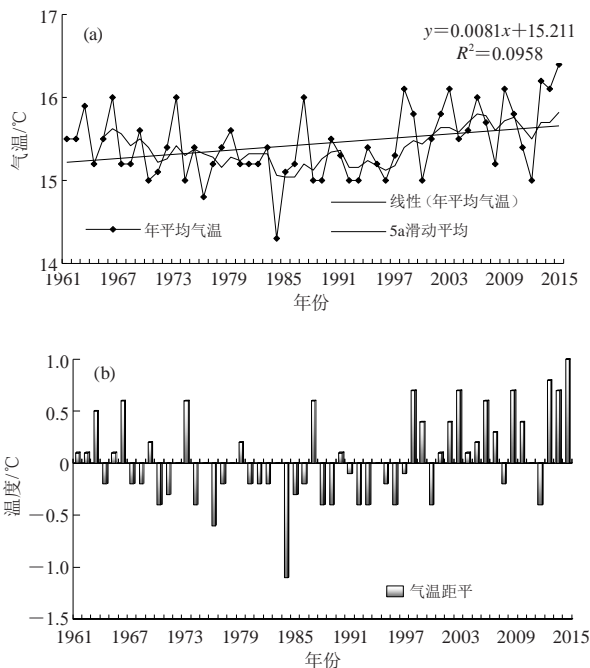


图4 雷山县近55 a平均气温(a)及温度距平(b)特征
Fig. 4 Average air temperature and temperature anomaly characteristics in the last 55 years in Leishan County

由图5a可见,雷山县近55 a年极端历史最高气温的最大值为2013年的35.9 °C,最小值为1987年的31.7 °C,最大与最小值相差4.2 °C,近半世纪来年极端最高气温以0.28 °C/10 a趋势缓慢上升。而年极端最低气温(图5b)呈上升趋势,且这种上升趋势非常明显,增温率为0.55 °C/10 a。历史最大值为1977年的-8.9 °C,最小值为2015年的-2.0 °C,年极端最低气温最大值与最小差相差高达-7.7 °C。历史年极端最高气温与历史年最低气温相差达44.8 °C。

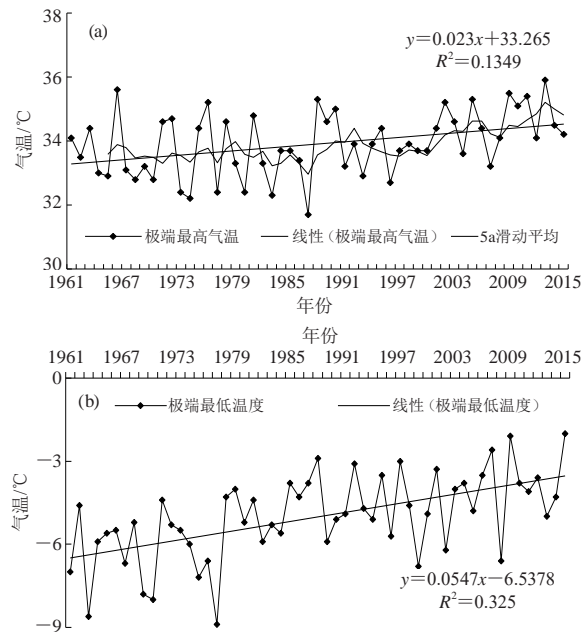


图5 雷山县近55 a极端最高气温(a)及极端最低气温(b)特征
Fig. 5 Extreme maximum (a) and minimum (b) air temperature characteristics in the last 55 years in Leishan County

3.2 各季气温变化特征

为了进一步了解雷山县气温变化特征,分析了雷山县四季平均气温变化规律(图6)。由图6a可见,雷山县近55 a冬季和春季平均气温多以不同程度

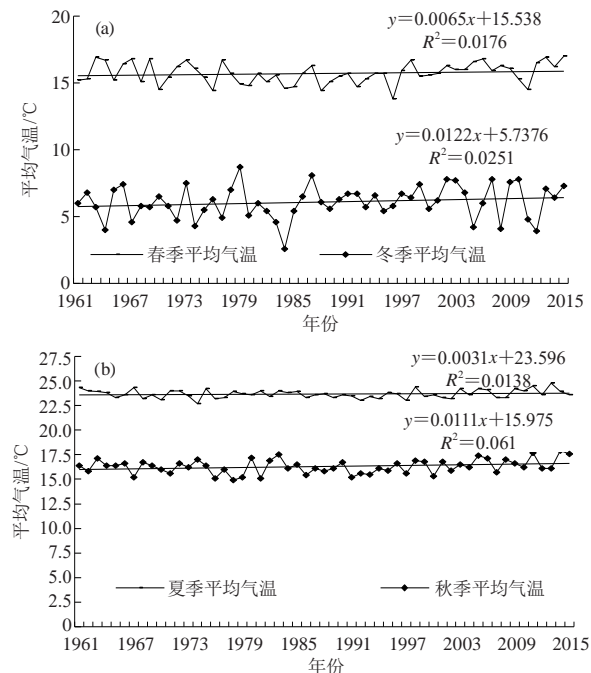


图6 雷山县近55 a四季平均气温变化特征
Fig. 6 Seasonal average air temperature characteristics in the last 55 years in Leishan County

响应气候变暖的趋势, 冬季年平均气温为6.7 °C, 年平均最低为1984年的2.6 °C, 最高为1979年的8.7 °C, 相差6.1 °C, 且冬季年平均气温波谷与波峰之间振幅明显, 升温率为0.12 °C/10 a, 并通过了0.05显著性检验。春季年平均气温为15.7 °C, 年平均气温最低值为1996年的13.8 °C, 最高值是2015年的17.0 °C, 两者相差3.2 °C, 从气温趋势线分析, 春季增温不是很明显。同样夏季(图6b)可见, 夏季年平均气温为23.7 °C, 年平均气温最高值为2013年的24.8 °C, 最低值为1974年的22.7 °C, 最高与最低相差2.1 °C, 气温曲线振幅不明显, 增幅率不高。最后, 秋季(图6b)年平均气温为16.3 °C, 最高值为2014年的17.9 °C, 最低值为1978年的14.9 °C, 相差3 °C, 从趋势线分析, 秋季平均气温从进入21世纪后, 气温曲线振幅较大, 半世纪以来整体以0.11 °C/10 a的速度开始上升。

4 喀斯特地貌溶蚀性分析

喀斯特溶蚀率与气温及降水的关系, 随着年均降水量 P 或年平均气温 t 的增加, 喀斯特溶蚀率 $K[r]$ 也增加, 由于本文基础数据有限, 故研究略去岩性、地貌等性质, 依据现有的降水和气温资料对喀斯特地貌溶蚀性做了粗略的分析, 根据参考文献数据^[12-14]建立两者的相关关系, 其关系可以用式(1)和式(2)来表达:

$$K[r]=0.001870P[1.442], \quad (1)$$

$$K[r]=0.0057207t[3.322], \quad (2)$$

式中, $K[r]$ 的单位为mm/a, 即平均每年因喀斯特作用而蚀去的石灰岩的厚度。将年降水资料和年平均气温代入式(1)和式(2), 结果不难发现, 其溶蚀性主要是降水影响。故略去气温项(图7)。

由图7可见, 雷山县近55 a来溶蚀率也呈逐年上升趋势, 最大值在2015年达6.17 mm。但是在实际生活中, 影响喀斯特地貌的溶蚀性因素诸多, 比如CO₂、地下水径流、地貌植被情况等, 由于本文资料收集有限, 采用的是定量计算, 故在实际应用中还有充分考虑CO₂、地貌等诸多因素变化情况来开展修订, 以便接近实际情况^[15-17]。

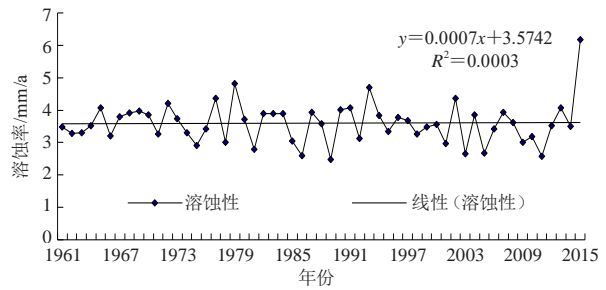


图7 近55 a降水对喀斯特地貌溶蚀性变化特征
Fig. 7 Characteristics of precipitation-related karst erosion in Karst landforms in the last 55 years in Leishan county

参考文献

- [1] Sweeting M M. Karst and climate—a review. *Zeitschrift fur Geomorphologie, Supplementband*, 1980, 36(49): 203-216.
- [2] White W B. Rate process, chemical kinetics and karst landform development//Lefearced R G. *Groundwater as a geomorphic agent*. London: Allen & Unwin, 1984: 227-248.
- [3] 中国科学院地质研究所岩溶教研组. 中国岩溶研究. 北京: 科学出版社, 1979.
- [4] 杨新. 岩溶区不同土地利用方式下土壤容许侵蚀研究. *自然灾害学报*, 2011, 20(4): 223-228.
- [5] 贺中华, 陈晓翔, 梁虹, 等. 典型喀斯特地貌空间配置的洪水资源化机理——以贵州省为例. *热带地理*, 2014, 34(2): 225-233.
- [6] 罗健, 蒋勇军, 李林立, 等. 表层岩溶泉水化学特征环境敏感性分析——以重庆金佛山水房泉为例. *西南大学学报(自然科学版)*, 2013, 35(1): 148-154.
- [7] 王冬银, 章程, 谢世友, 等. 亚高山不同植被类型区的雨季岩溶溶蚀速率研究[J]. *地球学报*, 2007, 28(5): 488-495.
- [8] 易志学, 潘齐平. 雷山县降水型地质灾害特征及风险预警指标. *陕西气象*, 2018, 32(2): 37-41.
- [9] 顾欣, 田楠, 潘平珍. 黔东南暴雨气候特征及其地形影响. *气象科技*, 2006, 34(4): 441-445.
- [10] 谢仁波, 舒国勇, 晏理华, 等. 近40 a铜仁地区降水量和雨日的变化特征. *贵州气象*, 2011, 35(4): 351-356.
- [11] 王芬, 曹杰, 李腹广, 等. 贵州不同等级降水日数气候特征及其与降水量的关系. *高原气象*, 2015, 34(1): 145-154.
- [12] 冉景丞, 何师意. 亚热带森林岩溶区土壤CO₂迁移动态初步研究. *贵州地质*, 2001, 18(4): 247-252.
- [13] 李矩章, 林钧枢, 房金福. 喀斯特溶蚀强度分析与估算. *地理研究*, 1994, (3): 90-97.
- [14] 吴凤珠, 张宝, 王力. 台江县近46 a降雨和降雨侵蚀力变化特征分析. *贵州气象*, 2017, 41(4): 463-467.
- [15] 姚姚, 撒利明, 王尚旭, 等. 深层碳酸盐岩溶风化壳溶洞型油气藏地震波场的理论研究(英文). *Journal of Chinese Geophysical Society Applied Geophysics*. 2005, (2): 94-102
- [16] 章程, 谢运球, 吕勇, 等. 不同土地利用方式对岩溶作用的影响——以广西弄拉峰丛洼地岩溶系统为例. *地理学报*, 2006, (11): 228-234.
- [17] Fu B J, Zhao W W, Chen L D, et al. A multiscale soil loss evaluation index. *Chinese Science Bulletin*. 2006, 51(4): 448-456.

2017年北京马拉松气象影响分析与 服务技术模式创新探讨

■ 尤焕苓 叶彩华 古月

北京市气象局基于互联网和大数据融入式气象服务技术,探索开展“互联网+气象+体育”保障服务模式,用智慧气象科技服务于2017年北京马拉松赛事筹备、赛中和赛后保障全程,获得赛事组委会、社会公众和媒体的一致好评。结合气象条件对马拉松的影响,分析此次服务模式的创新之处,总结经验和不足,为类似体育赛事等气象保障提供参考和借鉴。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.06.011

近年来,我国马拉松赛事数量呈井喷式增长,2016年达328场,近280万人次参加,比2014年开办场次增长5倍多,参加人次增长了2倍,而北京马拉松(以下简称“北马”)则是国际公认的中国最高水平马拉松赛。2017年9月17日第37届北马有来自42个国家和地区的近3万名运动员参赛,创造了国内单场马拉松赛事破3 h完赛的人数之最,达到了358人,是一场高规格、高质量的赛事。全长42.195 km的马拉松长跑是最耗费体力的运动之一,对气象条件十分敏感,不同天气对马拉松的筹备、比赛的开展及完赛成绩都有很大影响。影响大的气象因子有气温、风向风力、降水、空气湿度等,尤其是气温和风速对整个比赛有着极大的影响。例如,在气温较高的条件下参加比赛容易发生中暑或晒伤,且气温与马拉松相关的心脏骤停、心源性猝死均有显著的正相关关系。而在气温过低时则又容易发生冻伤等。气压与男子优秀运动员比赛成绩呈显著负相关,即气压越高,成绩越好;但气压与男子一般运动员和女子成绩的关系不显著。风对运动员比赛成绩影响表现在两方面:一是散热,二是阻力或推力,风力使女子运动员体内散热更快,利于取得好成绩,男子运动员比赛成绩受风速的影响则不显著^[4]。因此一般来说,马拉松赛事组织者在公布马拉松运动成绩时,通常会附加说明比赛时的气候(气温、湿度、风向、晴雨等)以供人们参考。

当前针对马拉松参赛者的研究,主要集中在运动员的身体机能、训练方法、运动营养、成绩影响因素等方面,而对马拉松参赛者服务需求的相关研究较少。北京市气象部门通过对马拉松运动与气象条件

之间关系的研究分析,全面了解马拉松参赛者气象服务需求,紧密联动赛事组委会(以下简称“组委会”),打破多年传统只简单提供天气预报的服务模式,创新开展融入式“互联网+气象+体育”保障服务新模式,融入式服务方式、智慧型精细化专项服务产品及全媒体融入传播,协同发挥作用,服务效果显著增强,对提高马拉松参赛者的运动成绩,帮助运动员更好地体验运动快乐等发挥了重要作用。本文分析了马拉松与气象条件关系,以及针对不同影响开展“北马”气象保障服务的过程和创新模式,总结了服务中的经验和不足,为类似体育赛事等气象保障可提供参考和借鉴。

1 气象条件分析

1.1 马拉松与气象条件

叶殿秀等通过对1981—2003年北马比赛成绩和同期马拉松比赛日气象观测资料研究分析得出最适宜马拉松比赛的气象条件(表1)。

表1 最适宜马拉松比赛的气象条件

马拉松项目	天空状况	气温/°C	风速/(m/s)	相对湿度/%	气压/hPa
男子	微量降雨	14~16	2~4	30~60	1015~1020
女子	微量降雨	14~16	2~5	30~60	1015~1025

由表1可见,能带来凉意的微量降雨、体感略低的气温、中等强度的气压和湿度及轻拂的微风有利于马拉松运动员取得好成绩。

1.2 2017年北京马拉松气象条件分析

2017年9月17日,北京天气晴朗,阳光照射强

收稿日期:2018年11月12日;修回日期:2019年7月25日

烈，偏北风2~4 m/s，气温从早晨的19℃上升至中午的29℃左右。气象条件对此次马拉松比赛的主要影响为：风速、湿度都比较适宜，气压值略低，气温明显偏高。

2010年北京国际马拉松赛更名为“北京马拉松”，2010—2014年均每年在每年10月中下旬进行，2015年举办时间从10月调整到9月。从近三年的天气情况（南郊观象台）来看（表略），2017年气温最高，加上阳光曝晒，天气最为炎热。

略低的气压值对大部分运动员没有影响，可以不计考虑。但明显偏高的气温和强烈的阳光曝晒会对整个比赛带来明显影响。在炎热的环境中进行马拉松比赛，其无氧代谢的能量供应相对增加，导致血液和组织中的乳酸堆积就会增加，使工作能力下降，并提前出现疲劳状态，影响比赛成绩。从2016年和2017年完赛率来看，在参赛人数基本相当、参赛入选标准提高的情况下，2017年完赛率（95.51%）比2016年（95.56%）却略有下降，天气带来的影响不可忽略。据现场参赛人员反馈，大部分人员都感到曝晒炎热的天气增加了比赛的难度。另外，对赛前准备的运动员和组织者来说，早晨19℃左右的气温，体感偏凉。

通过北马官方数据分析，按照3万人参与的马拉松比赛标准计算，对比2016年和2017年，2017年饮用水增加18%，喷淋海绵用水增加300%，医疗喷雾增加20%，盐袋增加50%。高温下跑马拉松会导致身体大量出汗，因此降温补水尤为关键，建议运动员在每个补水站都进站补水和电解质，并用降温海绵对身体进行适当降温，以减轻疲劳感，防止脱水。

天气对马拉松的影响在众多场次赛事中都有体现。2019年5月25日，陕西宝鸡陈仓国际马拉松因气温最高达35℃、道路地表温度高达72℃，提前终止了比赛。2014年10月19日北马当天，北京的PM_{2.5}指数达到331，属于重度污染，比赛现场不少跑者都戴起了各式各样的高倍防护口罩，成为马拉松历史上“奇特”的一幕，可见高污染天气带来影响之恶劣程度。1981年和1982年北马比赛均遇到大风天气，特别是1982年比赛出现了6~7级大风，导致运动员的成绩平平。

2 服务过程

2.1 公开意见征集

马拉松比赛对气象条件敏感而且具有专业性。为了深入了解运动员真实和有针对性的服务需求，建立融入式服务组织模式，首次面向社会公开邀请5位北马参赛选手代表召开办公会，征集北京马拉松气象服

务方案意见，根据需求建议调整服务内容，改进服务方式。参赛选手代表对此融入式组织模式高度肯定，提出了多条有价值的意见和建议。赛后北马参赛人员和媒体记者普遍反映，本届气象服务比往届更贴近运动员需求。

2.2 分众化服务技术

在直通式调研和需求反馈的基础上，制定差异化、针对性的气象服务策略，按照赛事气象服务受众划分5类人群：组委会、跑者、保障部门、媒体和观众，精准分析需求并研究针对性产品及发布策略，相比传统服务只笼统推送服务提示更具靶向性、精准性、及时性，满足了“分众化”的气象服务需求（表2）。

表2 针对不同服务对象的措施与建议

服务对象分类	措施与建议
组委会	比赛当天天气以晴晒为主，气温较高，赛事中后期气温可达32℃，建议沿途增加喷淋降温设施、赛道冰块和饮水补给
运动员	出发时气温为19℃，建议着装夹衣；开跑一小时后升温明显，紫外线增强，赛期最高气温可达29℃左右，请根据自身情况，及时调整比赛策略，同时注意防晒补水，预防中暑由于天气晴热，建议增加医疗配备和应急保障人员
保障部门	提醒工作人员自身做好防晒措施，佩戴墨镜、太阳帽等，开跑两小时后气温升至25~30℃，易发中暑
公众	早上气温较凉，建议着装夹衣，中午前后气温较高、紫外线强，适宜穿着短袖类衣物，建议做好防晒补水
媒体	策划晴晒与北马相关主题宣传，关注晴热天气，注意防暑降温

2.3 气象跑团融入北马赛场

首次组建由8名气象工作者组成的气象跑团，全程融入马拉松赛场。比赛中他们既是参赛选手又是现场服务保障人员，获取一手气象和赛场实时信息。气象跑团随身携带气象观测穿戴设备，成为移动气象观测站，改变了以往气象保障车单点服务的保障模式。实时监测并回传不同赛道上和参赛选手位置的气象要素实况信息，为赛事现场指挥提供了决策依据，积累了赛事期间的天气实况和资料。

2.4 全媒体融入式传播

近年来，新媒体以其便捷高效的特点，大大提升了马拉松运动推广的速度、广度、精度和深度。充分利用社会化资源，以新媒体技术为基础，全媒体融入式矩阵式发布气象服务信息。赛前召开新闻发布会，通过北京电视台、北京日报、北京新闻广播、北京青年报等各大主流媒体发布“北马”天气和相关服务提示信息。利用微博、微信、网站、电视、显示屏、预警塔等全媒体手段和北马官方渠道跟踪传播北马气象预报预警信息。北马现场指挥中心大屏实时接入沿线天气实况、预报和服务提示，服务现场决策。“气

象北京”官方双微滚动发布北马当天天气预报和沿线逐小时精细化预报。在北京电视台《天气预报》《天气联播》《体育气象》《生活气象》等节目中相继播报北马期间天气情况，邀请专家对马拉松天气进行科普解读。“北马”专题通过组委会官方微信向公众推送。“北马”当天天气预报通过组委会官方短信向所有参赛选手、志愿者和服务保障人员发布。比赛当日（17日）07—10时，北马沿线的复兴门和车道沟预警塔逐小时滚动发布当前位置的天气实况、未来1 h天气预报和提示信息，为参赛选手随时调整跑步节奏和保障人员现场保障提供参考。

通过中国天气网推出“2017年北京马拉松气象服务专题”，提供北京地区精细的实况和预报信息、“马拉松与天气”科普资讯和宣传片，以及现场报道资讯，实时解读天气对比赛的影响，多条信息被主流媒体转载。融入式全媒体的应用明显提高了传播效率和影响力。

2.5 “互联网+气象+体育”气象服务模式

基于互联网技术，融合气象大数据和服务信息，2017年北马服务将科技融入赛事保障的全过程、全用户、全渠道，形成了“互联网+气象+体育”气象服务新模式。让参赛者、组织者针对北马线路制作沿线天气预报，并根据参赛选手到达不同点位的时间，提供不同时段5个关键点位的逐小时温度、风向风速、湿度、紫外线强度等全要素预报。同时针对马拉松运动特点，首次考虑风向与参赛选手跑步方向的关系，增加体感风向（如顶风和侧风）的描述和预报。提前近一个月为组委会和参赛选手提供微信小程序，制作基于位置的1 km分辨率10 min更新的精细化预报产品。气象跑团首次配戴可穿戴气象观测设备，实时回传赛道沿线的温、湿、压、紫外线等数据，实时提供现场气象保障，提升了服务的精细化和人性化效果。

3 小结与讨论

1) 2017年北京马拉松是有史以来天气最热的一次北马赛事，晴晒炎热天气对运动员健康和比赛成绩、组织方筹备应急保障都带来了很大挑战。不过由于气象预报服务及时、精准、全面，筹备准备充分，充分利用社会化全媒体矩阵式发布精细化贴心式气象服务信息，在服务产品的内涵和受众影响力等方面

都比传统服务显著增强，本届马拉松被跑友们评论为组织最有力的一次北马。中国田协评价此次北马气象服务：“为组委会科学合理配备物资和救援力量提供科学依据”；北京市体育局评价：“气象保障服务是不可缺少的，起到非常好的服务效果”；人民日报、网易、腾讯等媒体广泛报道，社会各界看到了更“接地气”、更具“科技感”的气象服务。刘雅鸣局长批示：“认真总结经验，创新思维，不断提高气象服务水平”。矫梅燕副局长指示：“北京市气象局探索创新‘气象+互联网+赛事’服务方式，显示了智慧气象的广阔发展空间。请北京市局进一步总结提炼，形成标准化的服务模式，推动构建精细化、个性化智慧气象服务体系”。

2) 本届马拉松以互联网环境为基础，以气象科技为支撑，将智慧气象充分融入到赛事保障过程中，创建了“气象+互联网+赛事”的马拉松气象服务新模式，对日益兴盛的马拉松运动提供了精细化、人性化的服务保障案例。此模式在2018年北马气象服务中得到了充分应用，效果良好。马拉松气象服务技术的研究与应用，为互联网时代体育气象服务奠定了基础。

3) 鉴于气象条件对马拉松比赛的重要性，不同地区比赛日期的选择需要充分论证当地气象条件的影响。对于北京来说，5—9月容易出现较高温天气、3—4月容易有大风和温差大天气，10月则需要关注雾、霾天气。南方地区更要考量高温高湿天气对马拉松比赛的影响。

深入阅读

- Ely M R, 2007. Impact of weather on marathon-running performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(3): 487-493.
- 孟广琳, 张苏平, 1992. 天气条件对马拉松跑的影响: 北京国际马拉松比赛调查分析. *体育科学*, (2): 33-36.
- 武雪莲, 2012. 气象条件对马拉松成绩影响的研究. *中国体育科技*, 48(5): 16-20.
- 许臻晔, 廖育鲲, 黄文婵, 等, 2018. 马拉松相关心脏骤停与气象因素的相关性分析. *中国运动医学杂志*, 37(5): 65-69.
- 叶殿秀, 宋艳玲, 张强, 2005. 气象条件与北京国际马拉松比赛成绩的关系. *气象科技*, 33(6): 589-593.

(作者单位: 尤焕苓, 叶彩华, 北京市气象服务中心; 古月, 北京市气象局)

气象数据在电视天气预报节目中的多样态呈现

■ 崔佳

气象数据是天气节目的根基。在如今的技术条件下，要想提供服务性更好、创造力更强、用户满意度更高的天气节目，必须在气象数据的多样态呈现方面深入研究。通过最新的天气节目实践事例，深入分析了气象数据多样态呈现的可能性，以及未来的发展方向。或可为未来天气节目创新发展提供一些借鉴，并起到抛砖引玉的作用。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.06.012

在气象领域，最多见的就是各类数字、数据，几乎所有的气象信息背后都铺陈着大量数据。这些气象数据，虽朴实无华，但科学严谨。而虚拟技术，则充满想象力、灵活多变，且善于展现。把二者结合起来，取长补短，其创造力必定更强。

目前的天气节目中，虚拟技术还多限于对场景的表现，至于气象数据要素的呈现，则通常是以背景的方式出现的。然而，从目前的趋势以及未来的发展方向来看，在虚拟场景中，气象数据的展现一定是立体、多元的，这样气象数据才更具说服力、感染力和表现力。

1 气象数据空间样态的呈现

现今出现在天气节目中的图形多以数据图形为主，比如常见的天气实况图、预报图，都是出现在主持人“身后”的模式，而主持人所做的就是对着身后的天气图形指指点点。对气象数据空间样态呈现方式的改变，就是在虚拟技术的帮助下，让气象数据，以灵活多样的形式展现，并且能够被主持人随意调度、演示、拆解，同时，让气象数据信息完成从主持人“身后”到“人前”的空间转换，这样，会使气象节目的观赏性和传播效果大幅提升。

比如，中国气象频道《天气点对点》的一期节目中（图1），在北京夏季暴雨时段进行直播，将城区分钟级降水预报叠加其他数据信息，立体直观的呈现在主持人的“人前”，数据展现方式大气、新颖，既便于主持人演示、解说，又方便用户获取关键信息，参考出行。完成了气象数据空间样态呈现方式从“身后”到“人前”的转换。

再比如，CCTV2《第一印象》一期节目中（图2），



图1 中国气象频道《天气点对点》节目视频截屏



图2 CCTV2《第一印象》节目视频截屏

对雨天行车车速进行解读。它对不同量级的降水条件与车速的关系给予直观展示。在此过程中，汽车从主持人“身后”的屏幕中，开到了“人前”的演播室里，产生了明显的空间变化。与此同时，加入汽车行驶音效进行配合，生动立体的解读了天气数据。

气象数据空间样态的呈现方式从“身后”到“人前”的转换，让有遮挡的图形，变得一目了然，内容更加清晰可辨，甚至似乎触手可及。这样的空间样态呈现方式，最大的特点便是拉近了节目与用户的距

收稿日期：2018年8月17日；修回日期：2019年6月28日

离，同时也便于主持人对于数据的深度讲解。它将会是今后电视天气节目数据呈现的主流方式。

2 气象数据时间样态的呈现

当我们能够获取到的气象数据越来越专业化和精细化，就需要有更先进的技术来对气象实况与预报两个时态的数据进行充分的解读。

对气象数据时间样态呈现方式的改进，就是对两个时间样态数据的充分解读，结合分析，形成具有“温度”（服务性）、“力度”（权威性）的公共气象服务产品。

2.1 当冰冷的气象数据有了“温度”

严谨专业的实况和预报气象数据，如果我们不去解读诠释及展现，只是原样照搬到用户面前，不但提高了理解门槛，无法完成有效传播，而且数据本身也给人冷冰冰，缺乏温度与共鸣的感觉。

所以，在应用虚拟技术对气象数据的呈现做优化的时候，我们首先就是要解决实况与预报两种时态的数据，它们的“温度”问题，要让用户感觉到贴近与共鸣，体会出公共气象服务是温暖人心并且贴近生活的。

比如，中国气象频道《天气点对点》在对北京暴雨的直播报道中（图3），以永定门桥为例，结合降雨实况、实地道路情况、附近五百米内排水口个数等实况信息，以及未来雨势变化等预报信息，演示了未来一到两小时内，永定门桥下可能将面对的积水问题。^[2]



图3 中国气象频道《天气点对点》节目视频截屏

该直播报道，利用虚拟建模反映出实际降雨已经产生的积水量、道路实况和基建信息，同时，利用动态虚拟演示，展示未来降雨预报信息，将未来降雨可能带来的积水量变化，直观展示出来，以生动的演示，来提醒公共服务需要注意的方面。这样对实况和预报两种时间样态气象数据信息进行的细致处理，呈现出的是温暖的、体贴的、关切的公共气象服务意识。

2.2 气象数据的“力度”该怎样体现

气象部门权威发布的各类天气实况数据，预警预报信息，专业精细，科学严谨。其背后体现的是气象科学的严肃性与权威性，既有分量又有力度，它是公共气象服务的根基。也正因为深谙其蕴含的分量与力度，所以，天气节目在灾害性天气的报道中，容易陷入刻板严肃、晦涩难懂的状态之中，这必定会大大降低传播效果，反而削弱了对公众的预警提醒作用。

当我们使用虚拟技术去解读和诠释灾害性天气的时候，我们应该最大化的去解构数据，挖掘不同时态数据背后的信息，然后，想办法用最好的视听效果去呈现数据，从而体现出数据背后所承载的分量与力度。

比如，中国气象频道的北京暴雨直播（图4），该节目根据天气预报中雨势将加强的情况，及分钟级降水预报，结合已经出现的积水量实况，精确计算出未来的积水深度，并叠加地势分析、管网情况以及人口分布等实况信息，着重指出北京市第七十一中学极易在当天下午3时前出现积水，建议学校提前放学。这样通过一系列数据分析得出的合理化建议，体现了公共气象服务的权威性与责任心。



图4 中国气象频道《天气点对点》节目视频截屏

3 气象数据模拟样态的呈现

酒香也怕巷子深，天气数据再有用，也需要卖力“表现”，提高其表现力。所以，对于气象数据模拟样态的改进，就需要我们把气象数据用形象生动的方式模拟出来，以达到直观有效的科普效果。

3.1 通过花式展现提高气象数据表现力

在虚拟技术的大力帮助下，天气数据的表现力也在大大提高，即便是传统的最高气温预报、逐3小时降水预报，也可以有不同的呈现方式。雷达回波剖面图（图5），可以让它立起来。数据还是那个数据，但是稍加包装，便会眼前一亮，耳目一新。

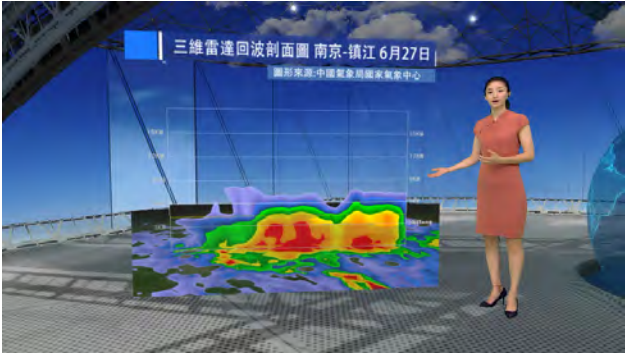


图5 凤凰卫视《凤凰气象站》节目视频截屏

3.2 把气象数据“演”给你看

天气数据，很多都是由一个个数字构成的，比如多少毫米降雨对应什么降雨量等级，几级风对应着什么样的天气现象。每个数字都对应一个相关的气象内容，不便于理解记忆和媒介传播。而如果把这些数据用更好的表现手段展示出来，再配合一定的“表演”之后，就可以记得住、看得懂了。而这个“表演”，可以是主持人在特定虚拟场景里的各种演示。

比如，CCTV2《第一印象》的节目中（图6），主持人曾做过一些“表演”，例如，将不同风力等级下，人体遭受到的打击展现出来。



图6 CCTV2《第一印象》节目视频截屏

这种对于灾害的直观生动的展示，远比在节目中只是用语言和文字进行风险提示要更直接，警示作用也更强。

又如，主持人还演示了身处户外遭遇雷电天气时的正确做法——抱头蹲下（图7）。以及错误做法——雷电天气时拿自拍杆拍照。

通过这样具有表现力的演示，用户获得的信息是具有感染力和画面感的，天气数据得到了更好的诠释，公共气象服务想要传达的防灾减灾理念，也会有效地渗透进用户的心中。如果在未来的防灾减灾宣传



图7 CCTV2《第一印象》节目视频截屏

工作中，更多的用到虚拟技术来直观展示灾害的影响力、将影响到的范围、会造成的影响，其传播效果和防范作用一定更强。新技术在防灾减灾工作的全面应用，一定会使我们的气象服务更具有贴近性。

4 结语

在大数据时代，要想更好的服务受众。我们应该从数据源头入手，挖掘出气象数据呈现的多种方式和创新空间，比如，数据呈现时的空间转换，不同时段的数据与不同需求叠加，以更好地满足用户需求，用不同的视听手段全方位表现数据、演示数据等等。在大数据时代，数据应用不再仅仅是千篇一律，而是从市场需求出发，打造符合各行业特定需要的定制化气象大数据应用和精细化气象服务。只有通过对气象数据多样态，多角度的一系列解读与呈现，再配合硬件水平的不断提升，我们的天气节目，才能在新的传媒环境下保持活力。

与此同时，在气象节目创新发展的过程中，我们一定要对硬件设施进行更新迭代、不断加入新的技术手段为我所用，比如，虚拟演播室技术、增强现实技术的运用等等。这些技术手段将会帮助我们提高对气象数据的解读和表现能力，让我们的数据更好地为公众服务。不过，在对新技术应用的过程中，也会面临一些难题，比如快速设计制作虚拟模型，使之能够实现日常实时业务化使用，还需要我们积累大量的虚拟模型资源库，并培养更多的专业人才。这样才能持续不断地提供更优质的公共气象服务。

深入阅读

赵嵘, 陈琛. 2017. 电视预报节目图形虚拟化呈现探索. 广播与电视技术, 44(7): 72-74.

秦晔, 黄程, 王轶, 等. 2017. 第十届气象影视服务业务竞赛节目剖析. 气象影视技术论文集(十一). 北京: 气象出版社.

(作者单位: 北京华风气象影视技术中心)

进展报告2019：吉林人工影响天气



支持机构：吉林省人工影响天气办公室

耕云播雨 初心为民

吉林省白城人工增雨基地 张立友

吉林省白城人工增雨基地原为白城人工降雨基地，是隶属于吉林省气象局管理的吉林省政府直属事业单位。

1992年，吉林省政府为解决吉林西部春季“十年九旱”的自然状况，挂牌成立了白城人工降雨基地，同时加挂白城地区人工降雨防雹办公室的牌子，隶属白城地区行署管理。单位主要职能为负责全区人工降雨和防雹工作。由省政府投资，在日伪时期遗留机场的基础上，经过重新勘测设计建设有飞机起降跑道一条、航管楼一座、停机坪及联络道等基础设施。1993年，白城撤地设市，白城人工降雨基地成为隶属白城市政府管理的参公事业单位。

2002年，为加强吉林省人工影响天气工作，提高农业生产和改善生态环境的能力，省政府为基地购买Y—12IV型飞机一架。按照民航部门规定，飞机必须由航空公司运营，因此组建了白城通用航空有限责任公司。公司为国有独资企业，隶属于白城人工降雨基地。目前公司有飞机两架，另一架为Y5—B8002。公司于2003年4月15日正式成立，东北民航管理局颁发公司经营许可证。

2010年，经中国气象局、吉林省政府共同协商研究，为了理顺白城人工降雨基地的管理体制，同意建制上划为吉林省政府直属事业单位，由吉林省气象局统一管理，并更名为吉林省白城人工增雨基地。目前，基地有正高级专业技术职称2人，副高级专业技术职称6人，内设机构有办公室、气象台、飞行保障科及地面保障科。调整后，不再承担白城地区防雹工作职能，而主要职能即负责全省飞机人工影响天气的实施工作。

白城大青山机场位于白城市北郊，距市中心6.5 km，占地面积2.47 km²。机场始建于日伪时期，为空军二级永备机场。1991年11月，省政府与空军协商同意，确定白城大青山机场由白城人工降雨基地管理及使用。2002年12月，民航东北地区管理局批准



为白城通用航空有限责任公司机场，由白城通航公司使用，同时也是吉林省人工增雨专用机场。现有800 m×27 m跑道1条，1100 m²航管楼一座，停机坪、联络道等共计4200 m²。另有车库、自动气象观测站、油槽车等基础设施。多年来，吉林省白城人工增雨基地依托白城大青山机场为吉林省抗旱增雨、农业发展和生态文明建设做出了突出贡献。

白城通用航空有限责任公司是目前我国气象系统唯一一家拥有自己的飞机、自己的机场、专门从事人工影响天气的公司。自公司成立以来，主要承担全省飞机人工增雨任务，2003—2009年，每年4月1日—7月15日执行本省人工增雨作业，完成本省任务后，先后到河南、青海、甘肃以及山东等地执行过人工增雨任务，得到兄弟省市的认可；2007、2008年还分别到上海、青岛执行特奥会、奥帆赛的保障任务；2009年5月奉命到黑龙江省伊春执行森林灭火任务；2012年，保障吉林省延吉市成立60周年大庆活动。近两年春季，飞机转场吉林省东部长白山地区，实施人工增

进 2019 吉林人工影响天气
展报告 2019年12月/9卷6期

特约专家

孟旭 (中国气象局减灾司)
俞卫平 (国家气象中心)
陆春松 (南京信息工程大学)
张继权 (东北师范大学)
闫敏华 (中国科学院东北地理与农业生态研究所)
杨雪艳 (吉林省气候中心)
胡靖彪 (吉林省人工影响天气办公室)

特约编辑

胡靖彪 (吉林省人工影响天气办公室)
丁瑶 (吉林省人工影响天气办公室)
张立友 (吉林省白城人工增雨基地)
关志宇 (吉林省白山市气象局)

白城增雨专用机场

雨(雪)作业,有效降低森林火险等级,为森林火灾的提前预防做了积极工作,得到当地政府的充分肯定。公司运营16年,截止2019年11月底,飞机已累计飞行2276 h,起降1442架次。

在完成农业生产和生态文明建设增雨作业的同时,增雨基地更在实际工作中与驻训部队合作共赢,信息共享,共享基础设施,将白城大青山机场的楼房无偿提供出来供驻训部队使用;践行军民鱼水情,有力保障边防部队运送伤员,为挽救官兵生命安全做出贡献,得到黑龙江省军区党委的特别感谢;互通科学技术,不断加强与驻场部队的沟通协调,共享跑道风、场压等气象信息,一定程度上解决了“车同轨、书同文”的问题。不仅促进了吉林省气象部门军民融合深度发展,更以此助力了吉林气象脱贫攻坚工作。

吉林省白城人工增雨基地的成立与发展,开创了吉林飞机人工增雨事业的新篇章,开启了吉林通用航空事业的新征程,开拓了吉林抗旱及森防的新道路,为吉林气象事业大发展的伟大历程增添了浓墨重彩的一笔。

目录

- 74 张立友:耕云播雨 初心为民
76 胡靖彪,李旭,丁瑶,王德鑫:六十年来敢争先 新时代里谱新篇——吉林省人工影响天气发展巡礼

研究进展

- 82 李薇,谷笑楠,胡靖彪,王超群,齐颖,汪晓梅:不同情形下温度低于0℃时饱和水汽压的计算
86 关志宇:白山市人工影响天气作业能力发展沿革及效益分析
91 于翠红:吉林省区域自动气象站雨量数据的质量分析与评估
95 吴曼丽,陈力强:一次东北冷涡天气过程雷电气象潜势条件诊断分析

技术报告

- 100 张小培,李宏宇:物联网技术在人工影响天气业务中的应用
104 孙海燕,谷笑楠,王旗,齐彦斌:吉林省一次飞机增雨过程方案设计及效果分析
110 邢凤娟,许乐,穆清晨,王德鑫,崔红:吉林省人工影响天气地面业务现状及发展需求分析

论坛

- 113 谢静芳,李云峰:发展精细化行业气象服务的初步思考

图说 吉林人工影响天气

- 78 李旭,谷笑楠:前进中的吉林人影
80 李旭,王超群:东北区域人工影响天气中心进展

六十年来敢争先 新时代里谱新篇 ——吉林省人工影响天气发展巡礼

■ 胡靖彪 李旭 丁瑶 王德鑫

回顾吉林省人工影响天气工作从1958年至今的发展历程。吉林省人工影响天气事业以增雨防雹为手段，服务于农业抗旱减灾、森林防扑火和水库蓄水等领域。吉林省人影办目前全面强化提升飞机和地面作业指挥能力，大力推进生态修复型人工影响天气事业的进程，力争为推动区域联动和吉林全面振兴发展新局面作出更大的贡献。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.06.013

1 主席要求 人民需求

1956年1月，毛泽东主席主持最高国务会议，讨论通过《1956年—1967年全国农业发展纲要》。其间，时任中央气象局局长涂长望汇报说，我们研究《气象科学研究12年远景规划》时，大家都同意把人工影响天气列为重点项目。毛泽东主席说：“人工造雨很重要，希望气象工作者多努力”。

1958年，吉林遭受60年未遇的大旱，水库干涸、江河断流，全省人民的生产和生活受到了严重的威胁，省政府号令“全民抗旱”。吉林省气象局受到有关人工影响天气文章的启发，提出实施人工增雨的建议，很快得到了省委省政府的批准，在有利于实施人工增雨作业的天气条件下，于7月末开始对丰满水库上空进行了20架次的飞机增雨作业，对缓解旱情起到了积极作用，同时也拉开了中国气象史上第一次开展飞机人工增雨工作的序幕，在我国实现了零的突破，吉林省人工影响天气工作也因此被载入气象事业的里程碑。

2 风雨兼程 敢为人先

从1958年开始，吉林省人工影响天气工作坚持科研型业务发展方向，走科研与业务紧密结合的道路，从未停下人工影响天气事业前进的脚步。

1980年4月，吉林省政府成立吉林省人工降雨防雹领导小组及办公室（即吉林省人工影响天气办公室的前身），负责全省人工降雨、防雹的组织管理，吉林省人工影响天气工作进入了统一管理阶段。1988年成立了我国第一个人工降雨基地，1997年成立我国第

一个人工影响天气联合开放实验室。2003年由省政府出资购买了我国第一架人工增雨作业专用飞机，在白城修建了我国第一个人工增雨专用机场。2013年国家第一个人工影响天气区域中心落户吉林（图1）。



图1 东北区域人工影响天气中心

吉林省人工影响天气办公室承担了国家、省和部门多项重点科研项目、国家自然科学基金、中国气象局关键技术、省科技厅项目，撰写论文100余篇，在一类核心杂志上发表约20余篇，其中SCI发表10余篇。与吉林大学合作开展“人工影响天气纳米复合催化剂的研制开发”工作，将纳米技术引入人工影响天气工作中。

六十年来，吉林人影工作年均增加降水30亿 m^3 ；防雹保护农田面积超过4万 km^2 ，年均减少雹灾损失近1亿元。农民群众称人工防雹为“农田卫士”。1999年第九届全国冬运会、2007年第六届亚洲冬季运动会、2017年建军90周年阅兵的幕后，吉林人影工作者在为开展增雪、消（减）雨工作而默默付出，圆满保障了各类庆祝活动的顺利召开。1987年，大兴安岭

收稿日期：2019年5月16日；修回日期：2019年8月29日

特大森林火灾，根据李鹏总理关于“气象部门要做好人工降雨”的批示，省人工增雨飞机立即飞抵大兴安岭，不失时机地抓住有利天气条件进行人工增雨作业共15架次，使火场周围2万 km²的土地上降了中到大雨。2017年内蒙古毕拉河大火，吉林省又出动高性能飞机，为扑灭森林大火做出了巨大贡献。

六十年来，通过几代人的不懈努力，已初步构建了：以开发空中云水资源为核心，以保障粮食安全和生态文明建设为目标，以抗旱增雨和防雹减灾为重点，以科技研发为支撑的人工影响天气体系。

3 崭新时代 再谱新篇

党的十八大以来，吉林人影以“四融合一规范”（与省台、军民航、机组、区域内人影办）为抓手，全面强化提高作业指挥能力。吉林人影连续荣获“全省精神文明建设工作先进单位”荣誉称号、被人力资源和社会保障部、中国气象局评为全国人工影响天气工作先进单位。进入新时代以来，吉林人影形成了以调配指挥3架国家高性能飞机为主导、区域内共11架增雨作业机群（图2），9个飞机作业基地的人影飞机作业格局，使飞机作业面积、连续作业能力和多机联合作业能力均大幅提升。新增、更新自动化增雨防雹火箭221部，建设完善标准化作业点321个，建立了一体化科学指挥平台。建立了4万 km²的效果检验区（图3），可开展相应的作业效果检验；建设了新装备考核系统，可开展对各类催化剂的检测，并具备实



图2 东北区域11架人影作业飞机建设规划布局

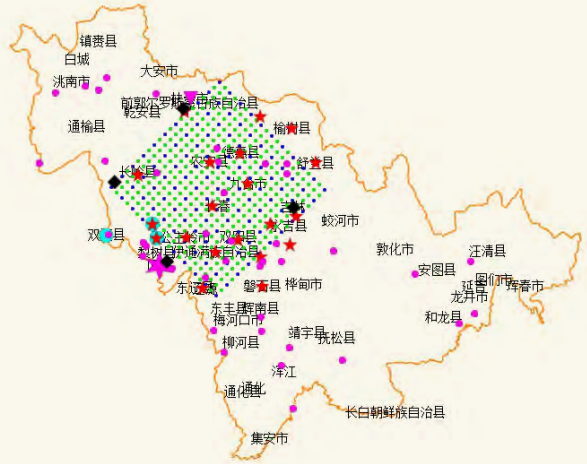


图3 人影外场试验的效果检验区

现人工影响天气新型高效催化剂、探测设备、催化设备的研制和业务应用试验的能力。

为了提高人影作业指挥的科学性、完整性、实时性和合理性，吉林人影办按照国家人影中心五段业务流程，努力提高“三适当”的科学水平。充分利用作业条件识别系统对天气过程进行分析，实现对云场和云区宏观、微观结构等条件的预报以及播云过程、效果的模拟预报。结合监测分析，开展人工影响天气不同目标作业预报，以满足不同时段作业设计和决策指挥的需要。根据天气条件和作业需求，针对一些天气过程，制作人影过程报、潜式报、飞行方案、预警报、效果分析报。实现了每一次天气过程、不同需求（增、减）的科学作业。

今后，吉林人影将进一步凝练新时代生态文明建设人影保障服务的新需求，结合东北区域中心的优势，整合东北区域增雨飞机和地面高炮、火箭、燃烧炉等增雨设备，开展生态修复、森林火灾防控人工影响天气作业，努力推进生态建设、大气污染防治工作。为此进一步强化部门联动，与空军、空管建立视频会商专线；切实发挥人影在抗旱增雨、防灾减灾等工作中的作用。充分发挥人影在水库蓄水中的作用，加强对流域定点、定向增雨技术的研究，在增加水库蓄水供调蓄和发电的同时，协助改善汇水区生态环境，涵养汇水水源，以缓解中下游的断流现象发生。

（作者单位：吉林省人工影响天气办公室）

前进中的吉林人影

PROGRESS

李旭 谷笑楠

(吉林省人工影响天气办公室, 长春 130062)

吉林省人工影响天气事业自1958年发展至今, 一直受到党和各级政府的关怀和支持, 得到中国气象局及有关科研院校许多专家的帮助和指导。这些关怀与支持, 成为激励吉林省人工影响天气工作不断前的动力。十八大以来, 依托东北区域人工影响天气工程, 东北区域人工影响天气中心落户吉林省, 在以习近平新时代中国特色社会主义思想的引领下, 吉林正全面强化提升飞机、地面作业指挥能力, 大力推进生态修复型人工影响天气事业的进程, 为推动区域联动和全面振兴发展新局面作出更大的贡献。

1958



吉林省在我国**第一个**开展飞机人工增雨作业



吉林省人民政府第216号令通过《吉林省人工影响天气管理办法》, 2011年3月1日起施行。

1982

成立吉林省气象局人工降雨防雹防霜办公室



《吉林省飞机人工增雨(雪)作业业务规范》正式出版

2010

1986

更名为吉林省人工降雨防雹办公室

《空中水资源开发工程》纳入《吉林省增产百亿斤商品粮食能力建设工程》中

2009

1988

成立我国**第一个**人工降雨基地

2008

1997

更名为吉林省人工降雨防雹指挥中心

更名为吉林省人工影响天气办公室

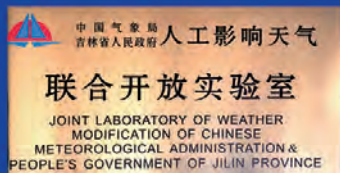
2003

1998

成立我国**第一个**人影实验室-中国气象局吉林省人民政府人工影响天气联合开放实验室

2001

由省政府出资购买我国**第一架**人工增雨作业专用机在白城修建**第一个**人工增雨专用机场创造了飞机夜航增雨记录





全国**第一个**区域人工影响天气中心
(东北区域人工影响天气中心)在
长春挂牌成立



新装备试验考核
系统验收完成

2019

完成人影作业指挥五段式业务
产品全流程制作
吉林省人影弹药监控管理系统
和地面作业空域申报批复建设

2018

2017

中国气象局
吉林云物理野外科学试验基地
二〇一八年一月

2013

建成了国家-区域-省-市-县
人工影响天气作业指挥高清视
频会商系统并投入业务使用

2014

首次跨省(区)联合作业
人影会商

2015

国家高性能人工增雨专用飞机入列



2016

东北区域人工影响
天气飞机作业保障
中心建成



国家高性能人工增雨飞机飞行轨迹



东北区域人工影响天气中心进展

李旭 王超群

(吉林省人工影响天气办公室, 长春 130062)

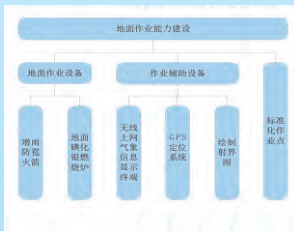
2013年8月全国首个区域人工影响大气中心—东北区域人工影响大气中心落户吉林省, 在全国人影事业发展史上具有里程碑意义。

在中国气象局的正确领导下, 在国家人工影响天气中心的指导和区域内各省区气象局的支持下, 东北区域人工影响天气中心作为国家人影中心的分中心, 按照东北区域人影中心的职能要求和初设, 积极推进七大系统工程建设, 边建设边开展服务。到目前共实施跨区域联合飞机增雨作业约70余架次, 飞行作业近300 h, 作业效果明显, 跨区域联合作业能力显著提高, 为东北区域粮食增产增收、防雹减灾、生态环境建设、森林防火、重大气象服务保障等方面做出了积极的贡献。

飞机作业能力建设

形成了3架高性能飞机、11架小型飞机、9个飞机作业基地的人影飞机作业格局, 飞机作业面积、连续作业能力和多机联合作业能力均大幅提升。

飞机分布图



地面人影作业系统

建设完成了人影标准化作业点842个, 火箭1041部, 其中智能化火箭221部, 高炮1582门, 人影标准化作业站点的建立, 展现了人影作业的现代化标准, 确保了人影作业的安全性。

观测系统

布设了1套C波段移动多普勒天气雷达、1套车载移动X波段双偏振多普勒雷达、1套全自动GPS探空系统、3套GPS/MET站, 提高了观测质量。



C波段雷达



X波段双偏振雷达车



GPS探空系统

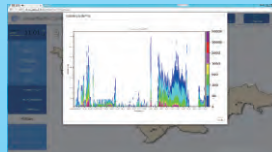
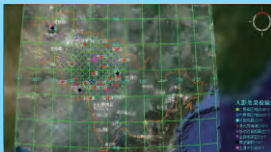
区域飞机作业保障中心

具有空域申请协调、飞机实时指挥监控、机载设备维护保障、飞机空地勤人员后勤保障和业务技术人员培训等多重功能, 可以为区域飞机联合作业提供整体保障支持。



效果检验外场试验区

建立了4万km²的效果检验区, 布设了3套风廓线雷达、4套微波辐射计、20台全自动雨滴谱仪、40套自动土壤水分观测站等, 现已将观测设备纳入全省综合观测业务系统中进行管理。



人影作业指挥业务系统

已建立国家区域省市-县的人工影响天气通讯系统、作业指挥高清视频会商系统，高性能计算机也已投入业务使用。

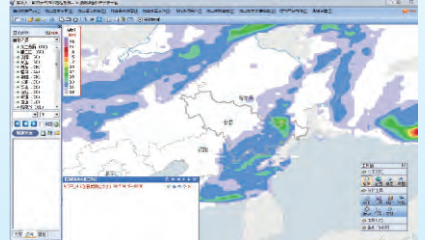
已建成东北区域各级人影综合分析处理系统 (CPAS_DB)，实现“横向到边”和“纵向到底”的人影五段实时业务和人影信息系统，形成了支撑人影实时业务稳定运行的数据系统。



高性能计算机



高清视频会商系统



CPAS

人影作业过程预报
2016年第1期(总第1期)
吉林省人工影响天气办公室 2016年03月30日 15时

人影作业潜力预报和作业预案
2016年第1期(总第72期)
吉林省人工影响天气办公室 2016年03月31日 15时

人影作业条件预警报
2016年第1期(总第2期)
吉林省人工影响天气中心 2016年04月01日 07时

飞机人工增雨作业方案
B-3455号飞机第1架次第1次设计
吉林省人工影响天气办公室 2016年04月01日 08时

人影作业效果分析报
2016年第1期(总第1期)
吉林省人工影响天气中心 2016年04月02日

2016年04月02日作业效果分析

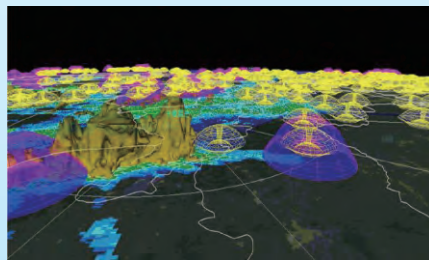
一、作业概况及合理性分析

受高空槽影响，吉林省大部地区将出现小到中雨或阵雪天气，1日开展两次增雨作业，具体飞行概况见表1。

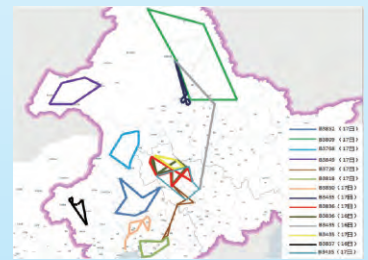
飞行时间	B3455: 6:32-9:50
航班时间	B3456: 7:00-9:20
作业最高高度	约3.5km
作业飞行	20160401 通辽 08时晴空
催化剂风层	220 层
催化剂风速	30m/s
催化剂用量	B3456: 8号 AgI 100条
催化剂型号	AgI 产量 325g/瓶

图1: 飞行轨迹图
图2: 2016年04月01日作业反轨分析图

人影制作发布的产品



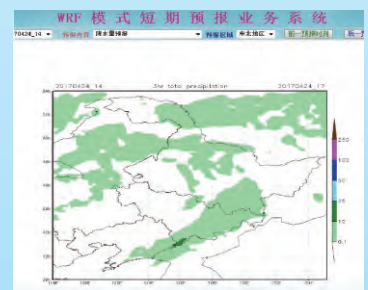
人影信息三维分析系统



飞行轨迹



作业指挥系统 移动终端



WRF降水量预报

新装备试验考核系统

对敦化3305工厂厂区原有的联合开放实验室进行改扩建,建立了80m³爆炸室和风洞新装备试验考核系统,可开展对人工影响天气各类催化剂的检测,具备了科学研发的基础,为开放实验室提供了装备和技术支撑,形成开放、合作、共赢的良好局面。



1200L云室



风洞洞体



雾滴谱仪实物图



气溶胶粒子测量仪外观图



80m³专用地下爆炸室



不同情形下温度低于 0°C 时饱和水汽压的计算

李薇 谷笑楠 胡靖彪 王超群 齐颖 汪晓梅

(吉林省人工影响天气办公室, 长春 130062)

摘要: 利用2018年1月和5月长春站探空资料, 通过理论分析和实例计算讨论了不同情形下、温度低于 0°C 时, 如何合理地应用相对于水面和相对于冰面的饱和水汽压公式来计算饱和水汽压; 计算了2018年5月29日实际大气的饱和比, 分析了不同饱和比对应的云中饱和状况和粒子相态; 结果表明: 依据《常规高空气象观测业务规范》、数据计算和物理意义, 可以整层采用相对于水面饱和水汽压公式计算大气可降水量; 而讨论云粒子的形成、增长及产生降水的微观物理过程, 需根据粒子的相态和粒子所处的周围环境来考虑应用哪种饱和水汽压公式; 探空数据计算表明, 实际大气中存在冰水共存相对于水面饱和、相对于冰面过饱和的环境; 在400 hPa, 云中存在水面欠饱和、冰面过饱和的环境。

关键词: 饱和水汽压, 大气可降水量, 异质核化, 饱和比

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.06.014

Calculation of Saturated Vapor Pressure at Temperatures Below 0°C Under Different Conditions

Li Wei, Gu Xiaonan, Hu Jingbiao, Wang Chaoqun, Qi Ying, Wang Xiaomei

(Jilin Weather Modification Office, Changchun 130062)

Abstract: Using the sounding data at Changchun Station in January and May of 2018, theoretical analysis and case calculations are carried to discuss how to properly apply the saturated vapor pressure formulas to water and to ice when the temperature is lower than 0°C under different conditions. The saturation ratio of the actual atmosphere on May 29, 2018 is calculated. The saturation state and particle phase of the cloud corresponding to different saturation ratios are analyzed. The results show that: according to the "Regular High Air Image Observing Service Specification", data calculation and physical meaning, the precipitable water can be calculated by only the saturated vapor pressure formula with respect to water; To discuss the formation, growth of cloud particles and microscopic physical processes of precipitation, it is necessary to consider which saturated vapor pressure formula should be applied according to the phase of the particles and the surrounding environment in which the particles are located; The calculation of sounding data shows that there is coexistence of ice and water in the actual atmosphere, where it is saturated with respect to water and supersaturated with respect to ice; there is an environment where is unsaturated with respect to water and is supersaturated with respect to ice at 400 hPa in actual atmosphere.

Keywords: saturated water vapor pressure, precipitable water, heterogeneous nuclearization, saturation ratio

0 引言

饱和水汽压是计算空气绝对湿度、相对湿度、露点、比湿等大气湿度要素的基础。其计算公式繁多^[1-4]。其中, Goff-Gratch公式是世界气象组织(WMO)1966年建议采用的饱和水汽压计算公式。针对这些公式, 董双林等^[5]和罗丽等^[6]进行了分析, 张志富等^[7]进行了露点温度计算的对比分析和探讨。这些研究都是对不同的饱和水汽压经验公式的对比分析, 而对于温度低于 0°C 时如何合理地应用相对于水面和冰面的饱和水汽压公式来计算和讨论水汽压相关问题的研究所见不多。而低温时饱和水汽压的计算至关重要, 因为

如果在温度低于 0°C 时就武断地应用冰面饱和水汽压公式, 其计算结果和物理意义可能会存在偏差。本文利用长春站的探空资料, 采用Magnus公式, 通过理论分析和实例计算, 讨论了在计算大气可降水量和研讨云微物理问题时, 如何合理地应用相对于水面和冰面饱和水汽压公式, 以期有助于对涉及大气可降水量和云降水粒子形成、增长机制相关问题的理解和研究。

1 计算大气可降水量时饱和水汽压公式的选用

1.1 大气可降水量计算方法

大气可降水量(Precipitable Water, PW), 它表示单位面积垂直大气柱内所包含的水汽总量, 也就是假如垂直气柱内的水汽全部凝结降落, 那么在气柱底

收稿日期: 2018年12月25日; 修回日期: 2019年5月10日
第一作者: 李薇(1968-), E-mail: lw_dxj@126.com

面上所累积的液态水深度。其计算公式为:

$$W = -\frac{1}{10\rho g} \int_{p_0}^{p_z} q(p) dp, \quad (1)$$

式中, W 是大气可降水量, 单位mm; ρ 是液态水密度, 单位是 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; g 是重力加速度, 单位 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; p_0 、 p_z 分别是地面和 z 高度处气压值, 单位hPa; q 是比湿, 单位 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。比湿的计算公式是:

$$q = 622 \frac{e}{p}, \quad (2)$$

式中, e 是水汽压, 单位hPa; 采用Magnus公式计算:

$$e = A \times 10^{\frac{at_d}{b+t_d}}, \quad (3)$$

式中, A 、 a 、 b 是常数, $A=6.11$; 对于水面 $a=7.5$, $b=237.3$; 对于冰面 $a=9.5$, $b=265.5$; t_d 是露点温度, 单位 $^{\circ}\text{C}$ 。因大气水汽主要集中在对流层下部, 一般只需计算从地面到300 hPa处。

由上述公式可看出, 水汽压是计算大气可降水量的关键。现行《常规高空气象观测业务规范》推荐使用的饱和水汽压公式是Goff-Gratch公式, 其适用温度范围是 $-50\sim 100^{\circ}\text{C}$, 根据罗雨等^[6]的研究成果, 在 $-50\sim 50^{\circ}\text{C}$ 范围内可采用Magnus公式替代Goff-Gratch公式, 所以本文采用形式简洁、得到广泛应用的Magnus公式。

1.2 以 -20°C 为界的对比分析

20世纪30年代, 在欧洲飞机观测发现, $-20\sim -12^{\circ}\text{C}$ 的云中仍有许多过冷水滴, 在 $-30\sim -20^{\circ}\text{C}$ 仍可观测到液滴^[8], 同时, 在近几年的实际业务工作中, 模式计算给出的吉林省云垂直结构显示, 过冷水主要集中在 $-20\sim 0^{\circ}\text{C}$ 层。因此本文利用2018年1月和5月长春站08、20时探空资料, 采用两种方法: (1) 整层采用相对于水面的饱和水汽压公式计算大气可降水量 W_w ; (2) 以 -20°C 为界, 温度 $\geq -20^{\circ}\text{C}$ 采用相对于水面的饱和水汽压公式, $< -20^{\circ}\text{C}$ 采用相对于冰面的饱和水汽压公式计算大气可降水量 W_i 。计算和对比分析1月和5月两种方法得到结果的绝对偏差 $W_w - W_i$ 和相对偏差 $\frac{W_w - W_i}{W_w} \times 100$ 。

1月和5月两种方法得到结果的绝对偏差(图略)最大值分别为0.67 mm和0.62 mm, 但1月份大气可降水量均值为3.8 mm, 5月份大气可降水量均值为20 mm, 可见绝对偏差不能很好地反应两种方法计算结果偏差的大小, 因此重点分析两种方法得到结果的相对偏差(图1)。由图中可看出, 5月两种方法计算结果的相对偏差不大, 最大值出现在1日20时, 也只有4%; 而1月气温比较低, 这时两种方法计算结果的相对偏差变化幅度较大, 尤其是20日20时—27日08

时, 期间最大值出现在23日08时, 为32%。这是由于这一期间地面温度已低于 -20°C , 整层大气可降水量都是由相对于冰面的饱和水汽压公式计算得到的。可见在地面温度低于 -20°C 时, 两种方法计算结果的相对偏差较大。显然, 这种相对偏差的大小与分界温度有关。

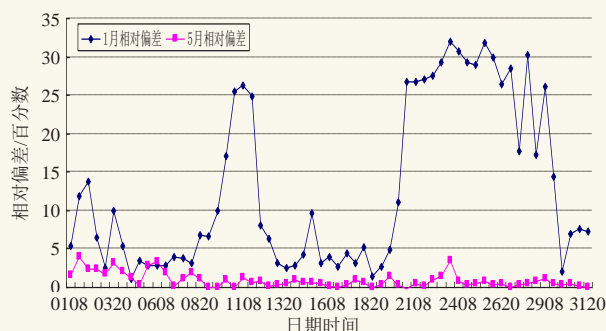


图1 以 -20°C 为界两种计算方法结果相对偏差
Fig. 1 Relative deviation of the results of two calculation methods with -20°C as the boundary

1.3 以 -40°C 为界的对比分析

一般认为纯水滴同质冻结核化温度约为 -40°C , 且有飞机实测和地基偏振激光雷达探测证实, 温度在 $-37.3\sim -34.3^{\circ}\text{C}$ 的过冷卷云是以同质冻结核化为主^[9], 说明在温度高于 -40°C 时, 还是有过冷水滴存在的, 本文又以 -40°C 为界, 温度 $> -40^{\circ}\text{C}$ 采用相对于水面的饱和水汽压公式, $\leq -40^{\circ}\text{C}$ 采用相对于冰面的饱和水汽压公式, 计算得到了两种方法计算结果的绝对偏差和相对偏差。1月和5月两种方法得到结果的绝对偏差最大值分别为0.14 mm和0.08 mm, 同样, 仍是重点分析两种方法得到结果的相对偏差(图2)。这时, 5月份两种方法计算结果基本一致, 相对偏差最大值出现在4日08时, 仅仅0.8%; 且1月份两种方法计算结果的相对偏差也降低了很多, 最大值出现在24日08时, 为9%, 其余均 $\leq 5.5\%$ 。可见随着分界温度

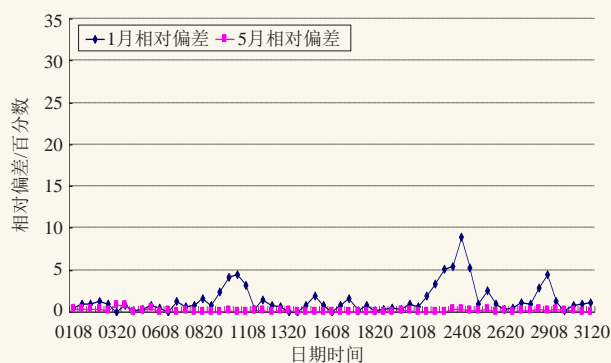


图2 以 -40°C 为界两种计算方法结果相对偏差
Fig. 2 Relative deviation of the results of two calculation methods with -40°C as the boundary

的降低，两种方法计算结果的相对偏差也减小，计算结果也越趋于一致。如果分界温度为0℃，即温度低于0℃时，就武断地应用冰面饱和和水汽压公式来计算大气可降水量，计算结果的相对偏差会更大。

依据现行《常规高空气象观测业务规范》，相对湿度、露点温度的计算都是基于水面饱和和水汽压的，即探空所得的湿度数据在大于-60℃范围内（低于此温度不再计算露点温度）是相对于水面的，因此在此范围内，计算大气可降水量应采用相对于水面的饱和水汽压公式；再者大气水汽主要集中在对流层下部，一般只计算从地面到300 hPa处，300 hPa处的温度一般>-60℃，在此范围内，以-40℃为界，两种方法得到的大气可降水量计算结果趋于一致；所以可以整层采用相对于水面饱和水汽压公式计算大气可降水量。同时，从云物理角度来看，这一结论符合大气可降水量的定义，即“假如垂直气柱内的水汽全部凝结降落，在气柱底面上所聚积的液态水深度”，讨论水汽凝结问题应采用相对于水面的饱和水汽压公式。如果温度低于0℃时，就武断地应用冰面饱和水汽压公式，物理意义会存在偏差。

2 云微物理问题中合理选用饱和水汽压公式

2.1 云滴的异质凝结核化和凝结增长

在云、降水的形成和发展过程中，大气中有些气溶胶粒子可充作凝结核或冰核。其中很大一部分为可溶性盐，如硫酸盐、硝酸盐、氯化物等，这些粒子具有吸湿性，可在不饱和条件下吸湿潮解。由于其平衡水汽压低，可先于凝结核化之前形成溶液滴，利于凝结核化形成云滴。在讨论云滴的异质凝结核化时，其周围环境和液滴表面的饱和问题，自然应用的是相对于水面的饱和水汽压公式。

在云物理学中定义饱和比 $s=e/e_s$ ， e 为实际环境水汽压， e_s 为平液面的饱和水汽压，可以看出 s 亦是天气学中的相对湿度。一般认为云滴凝结增长相应大气中的饱和比为1.001~1.01，当饱和比 $s>1$ 时，水滴凝结增长^[9]。考虑到有降水的天气，实际大气应存在饱和的地方。所以任一选择了长春地区有降水的一天：2018年5月29日，应用当天探空资料计算了各层的饱和比。表1列出了各规定等压面层的温度和温度露点差，表中 S_w 是由相对于水面饱和水汽压公式计算得到的饱和比（相对湿度）， S_i 是实际环境水汽压 e 为相对于水面的， e_s 为相对于冰面的饱和水汽压计算得到的饱和比。由表中数据可以看出，08时850 hPa和700 hPa温度露点差为1℃，这在天气学中一般认为已达到饱和（ $T-T_d \leq 2$ ℃），计算得到的 S_w 约为0.93；

20时除850 hPa外，其他各层的湿度情况都要好于08时，特别是700 hPa，温度露点差为0℃，饱和比 S_w 为1，这应是探空数据能获得饱和比 S_w 的最大值，与水滴凝结增长相应的大气中饱和比接近。探空数据的时空分辨率远逊于机载粒子探测数据，应用机载粒子探测数据也许会得到更精准的结果。

表1 由2018年5月29日探空数据计算的饱和比
Table 1 Saturation ratio calculated from sounding data on May 29, 2018

P/hPa	08时				20时			
	T/℃	T-T _d /℃	S _w	S _i	T/℃	T-T _d /℃	S _w	S _i
地面	14	5	0.718	—	13.9	4.5	0.743	—
850	4	1	0.932	—	6	3	0.810	—
700	-5	1	0.927	0.972	-4	0	1	1.039
500	-21	8	0.483	0.591	-19	4	0.704	0.846
400	-34	7	0.487	0.674	-33	3	0.742	1.016
300	-40	9	0.371	0.541	-47	4	0.630	0.978

2.2 冰的异质核化

冰的异质核化方式目前理论上4种。

1) 凝结-冻结：有些核兼具凝结核和冻结核作用，其核化过程中先使水汽凝结，然后转化为浸润冻结；

2) 接触冻结：其成核作用是在空气中与过冷水滴碰并，以相触的核面为冻结起点，逐渐使过冷水滴完全冻结；

3) 浸润冻结：核从空气中进入过冷水滴或原先就位于过冷水滴内，以其为冻结核心，使过冷水滴产生冻结；

4) 凝华：水汽直接在核上凝华成冰晶。

前3种核化方式要么是涉及水汽凝结，要么是涉及过冷水滴，可见粒子的起始生存环境都涉及液相的水，因此讨论其起始生存环境饱和问题时，考虑的应是相对于水面的饱和水汽压。第4种核化方式，凝华，相对来说要复杂些。大气中自然冰核数浓度很少，尺度也较小，观测和实验对有些核化方式不易区分。比如，即使在环境相对于水面欠饱和时核化成冰，也并不确定就是凝华，因为冰核中可含有可溶性成分，可溶性成分可在低于水面饱和时凝结核化，而其不可溶成分可冻结核化。理论上环境水汽压大于冰面饱和水汽压便可发生凝华。而一旦冰相粒子产生，其表面饱和问题就需要考虑相对于冰面的饱和水汽压。

2.3 冰、水共存

冰晶和水滴共存时，显然需要同时考虑相对于水面和相对于冰面的饱和水汽压。如果环境相对于

水面是饱和的,此时实际环境水汽压就是 e_s ,由于同温度下,水面的饱和水汽压 e_s 大于冰面的 e_i ,所以理论上冰晶表面的饱和比 $s_i=e_s/e_i>1$,且 s_i 值随温度下降,接近于线性增加(图3),这是云中冰晶能迅速增长的有利条件。图中,在 $-1\text{ }^\circ\text{C}$ 时, s_i 已达到1.019; $-15\text{ }^\circ\text{C}$ 时, s_i 达1.156,与水滴凝结增长饱和比(1.001~1.010)相比明显要大得多。实际大气中 s_i 又是怎样的呢?表1中,20时700 hPa饱和比 S_w 为1,环境相对于水面饱和,相对于冰面过饱和。此时 S_i 值为1.039与图3中 $-4\text{ }^\circ\text{C}$ 时的理论值一致,如果这里有冰晶存在,这里环境就是冰水共存的,且有利于冰晶增长;在400 hPa,温度 $-33\text{ }^\circ\text{C}$,温度露点差为 $3\text{ }^\circ\text{C}$, S_w 为0.742, S_i 达到了1.016,可见这里环境是水面欠饱和、冰面过饱和的,且环境湿度条件较好,这里应该是有云的,400 hPa对应的高度是7 km左右,这一高度的云应是以冰相粒子为主。应该注意的是:实际大气中无论是水滴凝结增长还是冰晶吸蚀水汽增长都是动态的,对云中 S_w 、 S_i 分布及降水粒子的形成、增长的研究,还需进行大量的飞机实际探测。

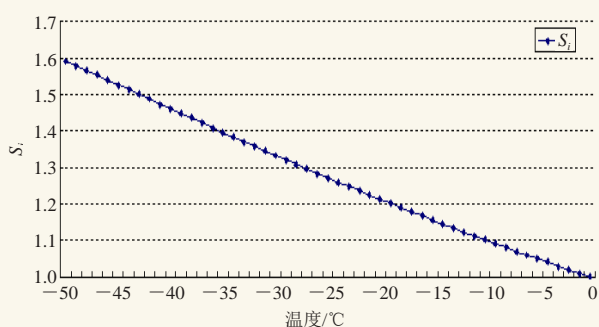


图3 环境相对于水面饱和时冰晶表面的饱和比随温度的变化
Fig. 3 Variation of saturation ratio with temperature at ice crystal surface when the environment is saturated at water surface

综上,在讨论云微物理问题时,研究的是云粒子的形成、增长及产生降水的微观物理过程,这时需要根据粒子的相态和粒子所处的周围环境来考虑应用哪种饱和水汽压公式。

3 小结

通过理论分析和数据计算,应采用相对于水面的饱和水汽压公式来计算大气可降水量。而在讨论云微物理问题时,研究的是云粒子的形成、增长及产生降水的微观物理过程,这时需要根据粒子的相态和粒子

所处的周围环境来考虑应用哪种饱和水汽压公式。

1) 在讨论云滴的异质凝结核化和凝结增长时,其周围环境和液滴表面饱和问题,需应用相对于水面的饱和水汽压公式。

2) 对于冰的异质核化,凝结-冻结、接触冻结和浸润冻结,讨论这3种核化方式粒子的起始生存环境饱和问题,考虑的应是相对于水面的饱和水汽压。第4种,凝华核化,相对复杂些,理论上环境水汽压大于冰面饱和水汽压便可发生凝华。一旦冰相粒子产生,其表面饱和问题就需要考虑相对于冰面的饱和水汽压。

3) 冰晶和水滴共存时,需要同时考虑相对于水面和相对于冰面的饱和水汽压。

实际大气中无论是水滴凝结增长还是冰晶吸蚀水汽增长都是动态的,对云中 S_w 、 S_i 分布及降水粒子的形成、增长的研究,还需进行大量的飞机实际探测。

4) 计算得到饱和比 S_w 为1,应是探空数据能获得饱和比 S_w 的最大值,与水滴凝结增长相应的大气中饱和比接近。

5) 由探空数据计算表明,实际大气中存在冰水共存相对于水面饱和、相对于冰面过饱和的环境;在400 hPa高空的云中也存在水面欠饱和、冰面过饱和的环境。

参考文献

- [1] Goff J. Saturation pressure of water on the New Kelvin temperature scale, transactions of the American society of heating and ventilating engineers. Canada: General Books LLC, 1957: 347-354.
- [2] Murray F. On the computation of saturation vapor pressure. Journal of Applied Meteorology, 1967, 6(1): 203-204.
- [3] Buck A. New equations for computing vapor pressure and enhancement factor. Journal of Applied Meteorology, 1981, 20(1): 1527-1532.
- [4] Hyland R, Alf W. Formulations for the thermodynamic properties of the saturated phases of H₂O from 173.15K to 473.15K. Ashrae Transactions, 1983, 89(2A): 500-519.
- [5] 董双林,崔宏光.饱和水汽压计算公式的分析比较及经验公式的改进.应用气象学报,1992,4(3): 502-507.
- [6] 罗丽,王晓蕾,余鹏.饱和水汽压计算公式的比较研究.气象水文海洋仪器,2003,4: 24-27.
- [7] 张志富,希爽.关于露点温度计算的探讨.干旱区研究,2011,28(2): 275-281.
- [8] 赵柏林.人工影响天气的一些问题.新疆气象,1987(1): 2-5.
- [9] 中国气象局科技发展司.人工影响天气岗位培训教材.北京:气象出版社,2003: 1-33.
- [10] 王英,熊安元.L波段探空仪器换型对高空湿度资料的影响.应用气象学报,2015,26(1): 76-86.
- [11] 姚雯,马颖,高丽娜.L波段与59-701探空系统相对湿度对比分析.应用气象学报,2017,28(2): 218-226.

白山市人工影响天气作业能力发展沿革及效益分析

关志宇

(吉林省白山市气象局, 白山 134300)

摘要: 白山市从20世纪90年代开始开展人影作业, 目前有地面作业站30个, 年增雨(雪)作业能力可达1~3亿 m³。结合2012年5月29日长白山森林防火作业、2018年3月曲家营水库蓄水作业、2014年7—8月农业抗旱作业三次典型人影作业个例, 分析了开展人工影响天气作业在白山市森林防火、水库蓄水、农业抗旱等方面的主要作用, 结合白山现有作业能力, 提出了白山人影工作的重要性及其经济和社会效益, 进而得出每年作业次数20次, 预计可产生9000万元经济效益。

关键词: 白山市, 人工影响天气, 发展, 效益

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.06.015

Evolution and Benefit Analyses of Weather Modification Operation Capacity in Baishan City

Guan Zhiyu

(Baishan City Meteorological Bureau, Baishan 134300)

Abstract: This paper analyzes the temporal and spatial distribution of precipitation in Baishan. The demand of forest fire protection, forest growth, reservoir impoundment, etc. are summarized in details. Considering the current situation of artificial rain increase in Baishan city, the importance, relevant opinions and suggestions on economic and social benefits of the artificial weather influence in Baishan, are put forward. The average annual precipitation in Baishan City is 859.6 mm, but distribution in time and space are severely uneven. The forest coverage rate is 83 %, but forest fires are increasing year by year, so the demands of forest-economy, reservoir impoundment and droughts on agriculture are in outstanding. Since the 1990s, Baishan City started running the operations of artificial weather modification, at present, there are 30 ground operation-stations, and the annual rain(snow) operation capacity can reach up to 1-3 billion cubic meters. Based on following 3 typical cases, the Changbai Mountain Forest Fire Prevention Operation on May 29, 2012, the Qujiaying Reservoir Water Storage Operation in March 2018, and the Agricultural Drought Control Operation in July and August 2014, we analyzed the main role of artificial weather impact on forest fire prevention, reservoir impoundment and drought resistance in Baishan city. According to existing operating capacity in Baishan, the importance of economic and social benefits by the artificial weather influence in Baishan are estimated. Then it is concluded that the number of operations per year should be about 20 times, which is expected to produce ¥90 million in economic benefits. Therefore, it will be a higher input-output ratio for Baishan city.

Keywords: Baishan City, anthropogenic influence on weather, development, benefits

0 引言

白山市地处长白山腹地, 林地面积129 km², 占全市总土地面积85.6%, 是吉林省的重点林区之一, 也是吉林省发生森林火灾最多的地区之一^[1]。近年来受全球变暖和厄尔尼诺等天气现象影响, 白山市年降雨量呈现波动剧烈特征, 同时, 随着社会经济发展、城市化和工业化进程加快, 森林锐减、土地退化、环境污染、水土流失等生态问题日益突出, 严重威胁着区域发展和生态安全^[2]。如何预防和减轻气象灾害,

保护生态环境已成为当前亟待解决的问题。崔金刚等^[3]、蒋爱红等^[4]、赵刚等^[5]均具体分析了人工影响天气在气象防灾减灾中的作用, 并提出了如何促进人工影响天气发展的建议。

本文分析了白山市降水量的时间和空间分布特征, 详细总结了森林防火、林木生长、水库蓄水等对森林防火的需求, 结合白山市人工增雨现状, 提出了白山人影工作的重要性及其经济和社会效益, 并提出相关意见和建议。

1 白山市人工影响天气现状

1.1 白山人工影响天气发展历史沿革

白山市在20世纪90年代初开始开展人影作业。近

收稿日期: 2018年6月18日; 修回日期: 2019年3月18日
第一作者: 关志宇(1972—), Email: 344950177@qq.com

年来人影作业能力发展迅速，针对春夏连旱和森林火险等级偏高，森林火情频繁的异常气候，大力开展人影作业，在扑灭山火、水库蓄水和农业抗旱中发挥了关键作用。近7年来，全市累计开展地面增雨作业达45次，增加降雨量约3亿 m³。

目前，白山人影作业正在由春秋两季季节作业向全年作业转变，由单纯增雨作业向增雨、增雪作业转变，由移动增雨作业向移动作业和固定作业相结合转变，由原始的人工作业向现代化的自动作业和人工增雨作业相结合转变。人工影响天气在森林防火、水库蓄水、农业抗旱等方面正发挥着越来越重要的作用，成为白山市防灾减灾的重要手段之一。

1.2 作业能力现状

2012年以来，政府持续加大人影投入力度，白山人影地面作业能力显著提高。2012年，全市统一采购了移动增雨作业专用车辆5辆，车载式增雨作业火箭发射架和牵引式增雨作业火箭发射架共10部，我市初步具备了移动增雨作业能力。2015年，以东北人影工程建设为契机，白山市气象局集中精力，大力推进固定增雨作业站建设和设备采购工作。白山市现有地面作业站30个，其中地面固定作业站16个，移动作业站14个。增雨火箭24部，地面增雨烟炉6部，人影弹药箱18个，增雨专用车辆5辆，同时购置配备了作业人员专用对讲机、头盔、单兵背囊、作业服装、野外帐篷等各类专业设备，实现了市、县、作业站3级实时人影作业远程指挥功能。目前全市年增雨（雪）作业能力可达1~3亿 m³，作业范围可以覆盖全市1.7万平方公里土地，平均每年开展大规模人影作业8次以上，实现了白山市人影作业能力和科学作业水平的跨越式发展。

2 人工影响天气作业需求分析

2.1 白山降水和水资源分布特征分析

白山市降水量和水资源量在时间和空间上分布极不均匀。白山地区年降水量平均为813.6 mm，空间上各地降水量相差较大（图1），呈现由西北向东南降雨量逐渐减少趋势。江源区年降水量最大，长白县降水量最少，两者相差164 mm，分布极为不均。根据2010年统计数据，全市人均水资源量0.601万 m³/人，但各地人均水资源量同样差别很大，尤其是江源区和浑江区，人均水资源量还没有达到全国平均水平（图2）。

白山市降水量在时间上呈现年际变化大，年内分配不均的特征。统计2005—2014年年降水量情况，发现降水量年际变化显著，尤其是2008年以来，波

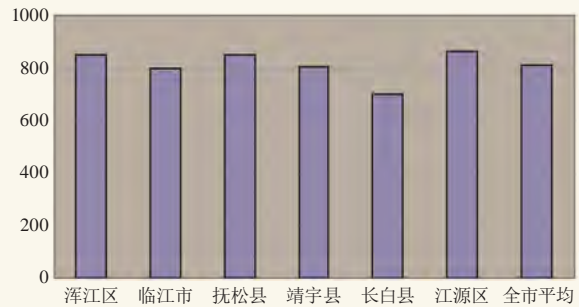


图1 白山各县(市、区)各地年降水量对比图(单位: mm)
Fig. 1 Comparison of average annual precipitation in counties, cities or districts (unit: mm)

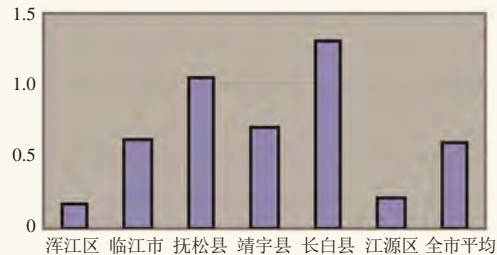


图2 白山各县(市、区)人均水资源对比图(单位: 万 m³/人)
Fig. 2 Comparison of per capita water resources in counties, cities or districts

动剧烈。最大年际降水量(2010年)和最小年际降水量(2014年)之比达到1: 0.53, 差距十分显著(图3)。

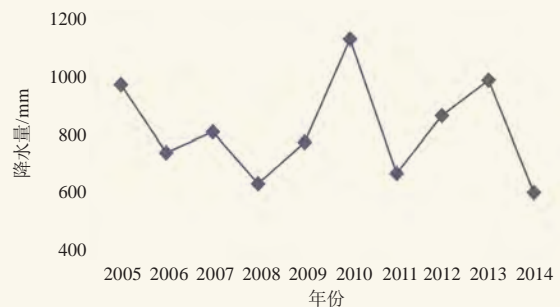


图3 2005—2014年白山市年平均降水量时间序列
Fig. 3 Time series of annual precipitation in Baishan city during 2005—2014

白山市距离渤海湾不足200 km，空中水汽充沛，充足的水汽由西南风源源不断的从渤海湾输送到白山地区。白山市年平均降水量为859.6 mm，年均降水日数达191 d，白山市具备全季节开展人工增雨（雪）作业天气条件。时间和空间分配不均的水资源现状则形成了对开展人工增雨（雪）作业的现实需求。

2.2 森林防火需求分析

白山市地处长白山腹地，森林覆盖率达83%，占长白山林木资源的60%。辖区内有6个国有林业局和6个地方林业局，境内有国家自然保护区2个，国家风

景名胜区5个，国家森林公园8个。截止2015年，已经连续35年无重大森林火灾，但每年防火季节局部火情不断，据白山市林业局统计数据，1989—2010年，全市共发生火情67次，过火面积达118.56 ha。近年来白山市火情成逐年上升趋势（图4），防火压力逐年增加。每年森林防火期开展针对性人工增雨作业需求较为迫切，特别是出现突发性森林火情时，人工增雨常常成为迅速扑灭山火的唯一有效方法。近年，全市平均每年开展森林防火人影作业约4~5次，成为森林防火的重要手段之一。

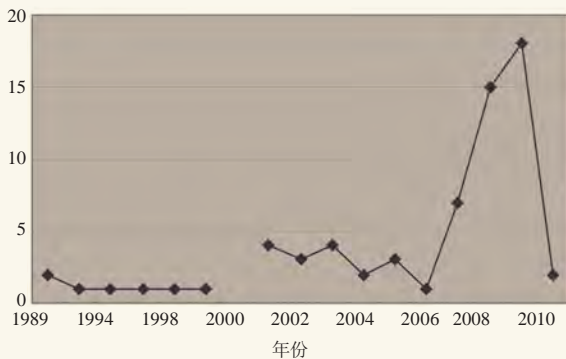


图4 1989—2010年白山市森林火情次数时间序列
(单位: 次)

Fig. 4 Annual times of forest fires in Baishan 1989–2010 during

2.3 林木生长和林下经济需求分析

长白山区树木生长与降水量关系密切，针叶林和阔叶林年轮宽度同生长季前期的降雨或降雪量密切相关。林下经济主要是指以林地资源和森林生态环境为依托，发展起来的林下种植业、养殖业、采集业和森林旅游业等产业。白山市林下资源丰富，境内有1500余种经济植物，人参产量占全国人参产量的80%。人参、中草药等特产业与降水关系密切，尤其是冬季充足的降雪量是人参等经济作物顺利越冬的重要保障。人参适宜在潮湿环境下生长，土壤湿润、空气湿度大对人参生长发育有利。据分析得出，人参产量与年平均相对湿度关系密切，在一定范围内呈线性关系^[6]。

近年来，由于人影作业宣传力度加大，人参种植大户和山林承保大户对全年开展人影作业的需求逐年提高。

2.4 水库蓄水需求分析

白山市境内有鸭绿江、松花江、浑江三大水系，全市水资源总量为80亿 m³。目前已新、扩建水电站53座。鸭绿江流域有中朝两国已建云峰电站等4座大型水电站及40座小、中型水电站。松花江流域有小水电站，下游有白山电厂等大型电站。同时境内有曲家

营水库等7座大型饮用水水库，其他中小型水库200余座。2007年统计数字显示，全市入境地表水资源量为27.43亿 m³，出境量为110.67亿 m³。

近年来，受全球变暖和厄尔尼诺等天气现象等影响，白山市天气气候异常，同时伴随经济发展，各县市区居民饮用水水源地需水量也逐年增加，各级水库每年枯水季对人工增雨需求迫切，尤其是个别年份冬季降水偏少，春季水库蓄水明显不足，开展人工增雨（雪）作业成为缓解水库蓄水不足的重要手段。

2.5 农业抗旱需求分析

农业抗旱主要针对备春耕期间旱情及夏秋季旱情开展人影作业。白山市粮食产量偏低，但农村特色产业种植户相对较多，因此对人影作业有一定需求，全市平均每年开展农业人影作业约1~2次。

3 人影作业实例分析

3.1 森林防火作业

2012年5月29日12时30分，吉林省白山市抚松县境内长白山国家级自然保护区内西坡、锦江峡谷梯子河高山花园处长白山林区发生森林火灾。卫星遥感监测热点200 ha，过火面积30 ha。白山市气象局立即启动预案，成立气象服务应急指挥部，下设现场应急指挥决策组、天气信息情报组、后勤保障组和前方人影作业组，明确分工。决策组立即赶至300 km外的长白山管委会应急指挥中心，开展各项工作。同时市、县气象局联合行动，应急人员及物资到位，迅速开展应急气象服务保障。由市局及5个县气象局共35人组成的前方人影组携带5部增雨火箭发射架、57枚火箭弹向火场集结、待命。省人工影响天气中心调配2部火箭架、201枚火箭弹及时增援，同时增派两架人影作业飞机，实时指导人影作业。16时30分，情报组初步判断29日23时—30日02时、30日午后至傍晚有两个增雨作业时间窗口，最终锁定30日01时20分、03时40分、07时13分可以开展人工增雨作业，作业人员克服夜间和山区作业的双重困难，在现场设置了3个临时火箭作业站点，01时20分—3时00分，03时40分—04时30分，07时13—58分，队伍接连两次再上长白山，共进行4轮增雨作业，作业后火区出现中雨，火场降雨11.2 mm，上游1.2 mm，下游17.3 mm，同时段非作业区无明显降雨。增雨效果非常明显。08时05分，省人工影响天气中心两架增雨作业飞机飞临火场上空，开展第五轮增雨作业。09时，伴随降雨森林火情基本解除。

3.2 水库蓄水作业

2017年12月—2018年2月26日,白山市区降雪量为23.7 mm,较历年偏少43.9%,造成上游来水量大幅度减少,市区水源地曲家营水库来水量明显不足。曲家营水库2018年2月26日上午08时,水库水位574.88 m,库容703万 m^3 ,有效库容213万 m^3 ,市区珍珠门和库仓沟两处地下水水源供水量减少到5000 m^3 /日。

为缓解供水紧张局面,按照市政府要求,市气象局在2月28日、3月7日和3月15日连续开展了3次人工增雪作业。为确保取得实效,市局提出了合理布局、科学作业的要求。作业前组织人员到水源地实地考察,根据天气系统来向和火箭增雪催化影响范围,在水源地汇流区上游设立了4个增雪作业站点,间隔2~4 km,成四边形分布,每个点设置1部火箭发射架。作业开始前多次进行天气会商、确定作业方案。为确保作业信息真实准确,作业过程中采取统一指挥、统一调配、分工明确、分时段、多轮次作业的方式进行作业。作业过程中根据雷达回波和天气系统演变情况,随时调整火箭方位角和仰角,每次发射向左(右)调整 5° 左右方位角,形成扇形作业面,作业过程中随时拍照、随时上报作业量。做到适当时机、适当部位、适当剂量、科学作业。为保证作业效果,作业时间从系统影响初期一直持续到系统结束前2~3小时,根据雷达回波演变情况,间隔40 min左右请令作业一次,如不具备作业条件则暂停作业。三次过程分别作业5轮次、5轮次和8轮次。

3次增雪作业共出动4个县市区的火箭发射架10部次,作业车辆13辆次,作业人员39人次参与作业,共开展人影作业19轮次,发射增雨火箭弹181枚。

第一次增雪作业后,作业影响区出现暴雪天气,作业影响区新增积雪深度18 cm,降雪量达15 mm。对比市区,作业区降雪量增加约8.3 mm。第二次增雪作业后,作业影响区出现大雪天气,降雪量达5.7 mm。对比市区,作业区降雪量增加1.4 mm,高于非作业区域32%。第三次增雨(雪)作业后,作业影响区出现雨转雪天气,作业区降水量达20 mm。同一时间段市区降雪量为15.3 mm,临江降水量11.2 mm,人工增雨(雪)作业增加降水量约7 mm。

3次增雪作业后库区汇流区累计增加降水量约410万 m^3 ,为增加白山市饮用水水源的蓄水量起到了重要作用。3月14日08时—16日08时,水库入库流量达210万 m^3 ,市区饮用水供水紧张局面得到了有效缓解,人影作业取得阶段性胜利。

3.3 农业抗旱作业

2014年7—8月,白山市出现有记录以来的最严重汛期气象旱情,8月7日,白山市气象局根据不同天气系统和干旱区域,在全市范围选取了21个移动增雨作业点。并与市农委、市水文局、浑江区政府进行会商,确定增雨方式和作业区域。12日召开全市抗旱增雨部署会,制定人工增雨作业方案,调配人员和设备,部署增雨抗旱。8月13—14日,长白、抚松、靖宇、临江分别进行了人工增雨作业,作业效果显著。8月15日浑江区已经连续20 d没有降雨,当天下午浑江和江源区出现了难得的作业窗口,相关人员立即行动起来开展增雨作业,作业后影响区普降小雨。8月16—25日作业人员克服困难、再次连续进行8轮增雨作业,一举解除了农业旱情,增加了水库蓄水,再次得到市领导和群众的肯定。

4 人影效益分析

白山市地处长白山主峰的西部和南部,平均海拔较高,是松花江、鸭绿江、浑江三江的源头,抚松县、靖宇县为松花江上游地区,长白县、临江市为鸭绿江上游地区,江源区、浑江区(白山市区)为浑江上游地区。根据抚松小山电站水库入库流量统计数据,5—10月出现10 mm以上量级降雨时,50%以上的降水量通过三条河流流向下游地区;冬季降雪在3—4月会形成桃花水,其中大部分桃花水汇流进入各级河流,并最终流向下游地区。目前已经有新、扩建水电站53座。鸭绿江流域有中朝两国已建云峰电站等4座大型水电站及40座小、中型水电站。松花江流域有小山电站,下游有白山电厂等大型电站。同时境内有曲家营水库等7座大型饮用水水库,其它中小型水库200余座。全市水资源总量为79.1亿 m^3 ^[7]。水系水量主要来源于空中水,降雨和降雪直接影响各大水库蓄水量。因此在白山市开展人工增雨作业,对增加下游地区江河流量作用明显。

4.1 森林防火人影作业效益分析

森林可燃物含水率与无降雨日数和降雨量有显著正相关(图5),而森林火险等级与森林可燃物含水率直接相关。为降低森林火险,市气象局每年森林防火期,均开展全市人工增雨作业。2012—2014年全市共作业50次,增加降水约3亿 m^3 ,每次增雨(雪)作业前后森林可燃物含水率平均下降约40%~60%,森林火险等级下降2~4级。人工增雨(雪)对扑灭山火同样效果显著,2012年5月28日,长白山核心景区发生森林火灾,市气象局组织人影作业人员现场开展增雨作业,发射增雨火箭150余枚,增雨后火区普降小

到中雨，迅速扑灭了余火，效果十分显著。

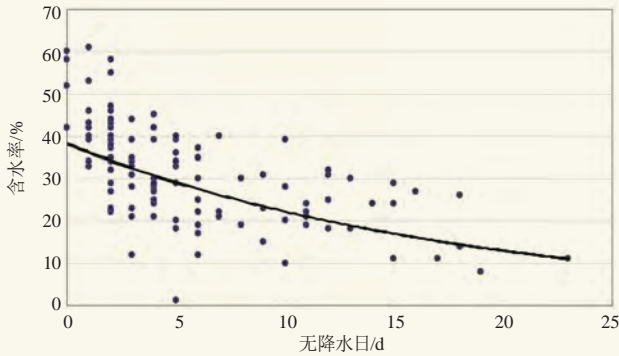


图5 森林可燃物含水率与连续无降水日数关系图

Fig. 5 Relationship between water content of the forest combustible and the continuous days without precipitation

4.2 林木生长和林下经济人影效益分析

白山市森林覆盖率达80%以上，在林区开展大规模增雨（雪）作业，增加全年和少雨（雪）时段降水量，可有效加快林木生长速度，提高林木成活率，并利于改善环境、促进水土保持和水源涵养，形成良性循环。在人参等特产业种植区开展有针对性的增雨（雪）作业有利于人参等林下经济作物顺利越冬，保持土壤湿润和空气湿度，促进经济作物生长，进而提高人参、中草药等的产量，为特产业种养殖户带来显著经济效益。

4.3 水库蓄水人影效益分析

空中降水是流域内面雨量的主要水源，实践证明夏季开展人工增雨作业可以有效增加径流，冬季增雪作业可以增加春季桃花水径流量，进而增加水库蓄水量。2007—2009年，为增加白山电厂水库蓄水量，白山市在松花江上游开展了为期3年的人工增雨（雪）作业，根据吉林省人工影响天气中心与白山电厂联合开展人工增雨水库蓄水发电试验研究项目的要求，白山市气象局于2007年9月18—20日在白山水库流域上游的靖宇境内开展了人工增雨作业。根据作业区域内布设的中尺度加密雨量站监测到的降水量，作业区域内的平均降水量为69.5 mm，分析作业区域由于进行人工增雨而增加34 mm左右的降水量^[8]。2018年2月28—3月15日，为缓解白山市曲家营水库蓄水不足，市区饮用水告急压力，白山市气象局连续开展了3次人工增雪作业，增雪作业后雷达回波强度明显增加，

分析认为水库流域累计增加降雪量约410万 m³。

4.4 资金分配和效益分析

根据白山人影作业需求和作业效果综合分析，按每年作业次数20次，发射增雨（雪）火箭弹1000枚，预计增加降水约4亿 m³计算，每年需投入约300万元。按国际通用投入产出比1:30计算^[9]，预计产生经济效益9000万元。此外人影作业间接的生态效益、环境效益、社会效益同样十分显著。

4.5 开展全年人影作业条件分析

白山市已经具备覆盖全市的人影作业能力，但相较于全季节人影作业需求，作业能力仍显不足。增加全市人影作业装备和人影作业量，可有效提高白山人影作业能力。重点是增加人影作业弹药资金投入，同时大幅度提高人影作业量，由春秋两季作业转为春夏秋冬四季开展人影作业。开展人影作业科学研究，按五个阶段人影作业要求，在适当时机、适当部位、适当剂量开展人影作业，提高人影作业科技含量，实现科学作业。

5 结语

白山市人工影响天气工作取得了长足的发展，具有较明显的经济和社会效益。白山市地处三江源头，空中云水资源丰富，具备全年开展人工影响天气作业条件。白山人影作业需求主要在森林防火、林木生长、水库蓄水、农业抗旱等方面，开展全年人工影响天气作业有较高的投入产出比，是森林防火、水库蓄水、农业抗旱等的有效手段。

参考文献

- [1] 王志红, 关山, 单延龙, 等. 白山地区森林火灾释放碳量的估算. 北京大学学报(自然科学版), 2011, 12(2): 199-200.
- [2] 张继权, 伊坤朋, Hiroshi Tani, 等. 基于 DPSIR 的吉林省白山市生态安全评价. 应用生态学报, 2011, 22(1): 189-195.
- [3] 崔金刚. 浅议人工影响天气在气象防灾减灾中的作用及发展对策. 农业与技术. 2014, 34(1): 168.
- [4] 蒋爱红, 王志龙. 人工影响天气在气象防灾减灾中的作用及发展建议. 农业与技术. 2014, 33(3): 142.
- [5] 赵钢, 周长征, 姜永征等. 人工影响天气在气象防灾减灾中的作用及发展建议. 现代农业科技. 2010(14): 268-268.
- [6] 毕伯钧. 人参气候生态及适宜栽培地选择的研究. 植物生态学与地植物学丛刊, 1985, 9(2): 93-94.
- [7] 王振堂, 楚林海. 白山市水资源合理配置浅析. 吉林水利, 2007, (7): 21-22.
- [8] 李继宝, 邢颖颖, 张传亮. 对白山水库蓄水发电人工增雨作业过程的效果分析. 吉林气象, 2008, (1): 34-38.
- [9] 李玉林, 邓安强, 洪霞. 人工增雨的社会效应和应采取的对策与措施. 江西气象科技, 2001, 3(24): 33-36.

吉林省区域自动气象站雨量数据的质量分析与评估

于翠红

(吉林省人工影响天气办公室, 长春 130062)

摘要: 区域自动气象站雨量资料对于气象预警、决策服务、效果检验都能提供有效的数据支撑, 建立科学有效的雨量资料质量评估与控制方法, 对于提高雨量数据的应用性至关重要。基于吉林省区域自动气象站5年雨量观测历史数据, 提出了适用于本省的雨量数据质量控制方法, 并利用此方法对雨量数据进行质量分析与评估, 最终得到错误及异常数据。根据错误及异常数据占比以及对站点占比情况, 可初步判断样本数据的数据质量相对较高, 可用性较强。

关键词: 区域自动气象站, 雨量, 质量分析

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.06.016

Quality Analysis and Assessment of Rainfall Data at Regional Automatic Weather Stations in Jilin Province

Yu Cuihong

(Jilin Weather Modification Office, Changchun 130062)

Abstract: The rainfall data at regional automatic weather stations can provide effective data support for meteorological warning, decision-making services and effect inspection. Establishing scientific and effective methods for quality assessment and control of rainfall data is essential for improving the applicability of rainfall data. Based on the historical data of 5-year rainfall observations at the regional automatic weather stations in Jilin Province, this paper presents a method for quality control of rainfall data to be suitable for the province, then uses this method to analyze and evaluate the rainfall data, and finally reveal error and abnormal data. According to the proportion of errors and abnormal data and the proportion of corresponding sites, it can be initially judged that the data quality is relatively high and the usability is good.

Keywords: regional automatic weather stations, rainfall, quality analysis

0 引言

区域自动气象站是气象防灾减灾预测预警系统的重要组成部分, 具有速度快、观测密度大、自动化程度高等特点。吉林省2006年开始使用区域自动气象站, 截至2014年吉林省在用的区域自动气象站数量已达1100多个, 其中大部分站点为无人值守的区域站。区域站的观测资料已实现了实时数据上传, 这些观测数据包括雨量、气温、湿度、风速、气压等数据, 它们对气象决策服务、气象预警、气象预报、效果检验等都提供了重要的数据支撑作用^[1]。众多站点的观测数据不可能完全无误, 往往存在观测数据明显异常的情况, 造成数据异常的原因是多方面的, 建立科学有效的资料质量评估与控制方法, 能在数据源头严把数据质量关, 进而提高数据的可用性, 为气象业务提供有效的支撑。

目前, 国内外学者对地面气象站雨量数据的质

量评估方法做过一些研究, 如: 任芝花等^[2]研究了自动站小时降水资料的质量控制方法, 莫遵元^[3]通过极值、空间连续性、时间连续性检查对区域气象站雨量数据异常进行分析处理, Sciuto等^[4]利用神经网络算法对日降水数据进行质量控制, 针对小时观测资料尤其是小时雨量观测资料质量评估方法的研究是比较有限的, 应用到小时雨量资料的质量评估方法主要是气候学界限值检查法, 诸如台站或区域极值检查、要素间内部一致性检查等应用于地面气象资料质量评估的方法基本尚未开展。

本文研究的开展主要基于区域自动气象站对气象决策服务、气象灾害预警等的支撑作用, 着眼于吉林省雨量数据的质量分析及评估, 提出适用于本省的雨量数据质量控制方法, 并在质量控制方法中将区域特点以及设备系统特点融入进来, 进而提升评估方案的全面性及可用性。

1 数据和方法

1.1 数据

本研究利用的数据为吉林省区域自动气象站的

收稿日期: 2018年12月25日; 修回日期: 2019年6月24日
第一作者: 于翠红(1985—), Email: 12379549@qq.com

2007—2011年每年4—9月的雨量数据。这些数据来自吉林省区域自动气象站雨量数据库。所利用的数据格

式详见图1。

首先，需要对数据的可用性做出初步筛查，筛

StationID	观测时间	状态	插入时间	分钟雨量	气温	电池电压
1	2007-10-06 18:11:00	0	2007-10-06 18:15:00	.1	14.2	12.8
1	2007-10-26 16:00:00	0	2007-10-26 16:04:00	.2	15.4	13.1
1	2007-10-26 16:02:00	0	2007-10-26 16:05:00	.4	15.4	13.1
1	2007-10-27 8:17:00	0	2007-10-27 8:21:00	.2	4	12.7
2	2007-10-06 14:29:00	0	2007-10-06 14:33:00	.1	17.4	12.9
2	2007-10-06 14:37:00	0	2007-10-06 14:41:00	.1	17.3	12.9
2	2007-10-06 14:44:00	0	2007-10-06 14:48:00	.1	17.2	12.8
2	2007-10-06 14:49:00	0	2007-10-06 14:52:00	.1	17.1	12.8
2	2007-10-06 14:54:00	0	2007-10-06 14:57:00	.1	17.1	12.8
2	2007-10-06 15:02:00	0	2007-10-06 15:06:00	.1	17.1	12.9
2	2007-10-06 15:25:00	0	2007-10-06 15:29:00	.1	17.2	12.8

图1 样本数据格式

Fig. 1 Sample data format

查结果为：本次数据抽取范围内所研究的区域自动气象站站点数量为797，样本数据总数据条数为1233500条，其中观测时间为空的数据为0条，重复插入的数据为0条，分钟雨量为空的数据也已剔除，数据初步可用。

在正式开始雨量数据的评估流程之前，需要将分钟样本数据转换为小时样本数据，这样才能满足评估方案的要求。转换原则：（1）同一站点同一自然小时内的分钟雨量数据相加和得到小时雨量数据；

（2）同一站点同一自然小时内的分钟温度数据求平均值，得到小时温度数据^[5]。

1.2 方法

1.2.1 界限值检查

1) 气候学界限值检查

气候学小时降水数据的界限值为：0~150 mm/h，超越该限值的数据记为错误数据。

2) 区域界限值检查

根据吉林省的经纬度和降水量空间分布情况，参考全国区域划分及国家气象信息中心发布的区域小时降水界限值分布，吉林省区域的小时降水界限值为0~100 mm/h，超越界限值的数据记为错误数据^[6]。

1.2.2 数据连续无变化检查

雨量计漏斗部分堵塞，承水器收集的降水以匀速渗漏的方式进入翻斗计量；测量仪器故障等情况均会造成数据连续无变化，这是一种数据异常情况。但是同时细雨绵绵似的降水也会造成降水数据连续无变化的情况，所以参考相关研究论著^[6]，提出以下检查方法：

连续6个及以上小时雨量数据相等，且满足以下3类情况之一（其中， $N1 < N2 < N3$ ），视为数据

异常。

1) 连续 $N1$ 个及以上小时雨量（简称 R ，下同）数据相等且 $R \geq 1.0$ mm。

2) 连续 $N2$ 个及以上小时雨量数据相等且 $R \in [0.5, 1.0)$ mm。

3) 连续 $N3$ 个及以上小时雨量数据相等且 $R \in (0, 0.5)$ mm。

1.2.3 针对电压和数据采集系统的检查

区域自动气象站的雨量计和温度计使用同一电源和数据采集系统，温度计在其测量过程中受外界因素的干扰较少，因此可以利用对异常温度数据的检查来判断自动气象站的电源和数据采集系统的工作情况^[7]。结合吉林省的温度变化特点，如果吉林省在4—9月份出现 -5 ℃以下低温和 40 ℃以上高温时视为异常值；如果相邻两个小时的温度值差值 > 8 ℃，则视为异常数据。

根据所选定的评估方法，制定雨量数据质量评估流程，详见图2。

1.2.4 数据类型标记

1) 不满足气候学小时降水数据的限值的界数据记为错误数据，标记为W1。

2) 不满足区域界限值检查的数据记为错误数据，标记为W2。

3) 除W1和W2之外的存在温度值异常的，将这些数据标记为异常数据S1。

4) 除W1、W2、S1外的存在数据连续无变化的，将这些数据标记为异常数据S2^[8]。

5) 未做标记的可直接视为正常数据。

在进行错误及异常数据标记过程中，可同样将对应的站点也归入同一类型的错误及异常情况中，进行

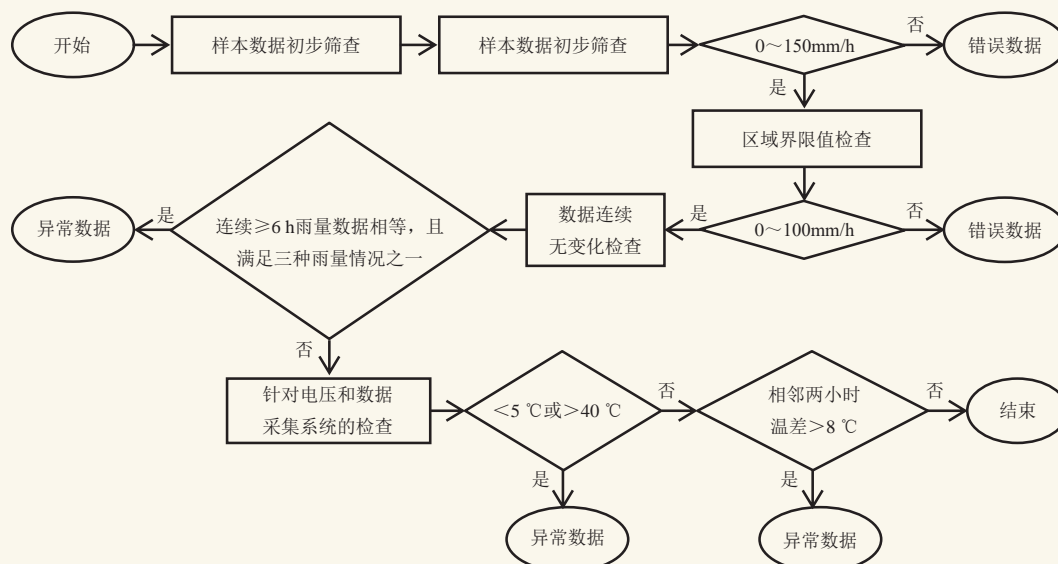


图2 雨量数据质量评估流程图

Fig. 2 Flow chart of the rainfall data quality assessment flow chart

后续分析。

2 结果与分析

根据上述质量评估方法，基于转换后的小时样本数据，编写数据库查询脚本，对各类错误及异常数据进行分析与评估。

依据质量评估方案实施过程的分类情况，样本数据的错误及异常情况已初步得到判定，如表1为站点质量评估结果，表2展示出样本数据质量评估结果，其中正确站点及正确样本数据的占比相对较高，可以初步得出本次雨量资料质量分析与评估过程所抽取的样本数据的可用性还是相对较高的。

表1 站点质量评估结果

Table 1 Results of the site quality assessment

站点总数	正确站点数量	错误站点数量	异常站点数量
797	574	8	215

表2 样本数据质量评估结果

Table 2 Results of the sample data quality assessment

总数据量	正确数据量	错误数据量	异常数据量
1233500	1201932	8	31560

因异常及错误数据条数较多，现以异常温度为例，选取典型的异常或错误数据进行截图展示，图3为吉林省区域自动气象站2006年4月四要素数据中，气温<-5℃或气温>38℃的异常数据；图4为吉林省区域自动气象站2006年4月四要素数据中相邻两小时温度数据差值绝对值>8℃的异常数据。

形成以上错误及异常数据的原因应该是多方面的，建议站点观测人员首先应检查观测设备的运转情

图3 吉林省区域自动气象站四要素 (气温<-5℃或气温>38℃数据)

Fig. 3 The four elements data of Jilin Province automatic weather station (temperature <-5℃ or temperature >38℃)

况，分析设备本身是否存在设备松动、老化、运转不正常等情况，进而导致观测错误及异常；其次，观测人员还应分析设备配套的软件系统，查找是否存在数据获取异常、数据叠加等问题。最后，加强定期巡检及相关理论学习。

3 小结

在对区域自动气象站雨量数据进行质量分析的过程中，也同样发现了异常温度数据，二者是相互检验的过程，相比温度数据有历史同期温度作比较分析，雨量数据的质量分析方法更具有探索性和多元化。目前各省对区域自动气象站的分析研究主要集中在运行维护、故障判断等硬件设备领域，从观测数据角度反

t. Station	t. 观测时间	t. 气温	t1. Station	t1. 观测时间	t1. 气温
2305	2006-04-14 16:15:00		2305	2006-04-14 14:01:00	-20.1
3205	2006-04-26 16:00:00	.9	3205	2006-04-26 14:47:00	15

t. Station	t. 观测时间	t. 气温	t1. Station	t1. 观测时间	t1. 气温
10801	2006-04-29 19:09:00	-6.7	10801	2006-04-29 17:01:00	12.3
10823	2006-04-19 16:36:00	1	10823	2006-04-19 14:34:00	15.9

图4吉林省区域自动气象站四要素200604 (相邻两小时温度数据差值绝对值>8的异常数据)

Fig. 4 The four elements data of Jilin Province automatic weather station 200604 (Abnormal data with an absolute value of the difference between the two consecutive hours of temperature data greater than 8)

推设备观测异常的研究相对较少, 但如广东省、新疆伊犁^[9]、湖南省^[10]等省市也都做了此类研究, 吉林省在区域自动气象站雨量数据质量控制方面的研究相对较少, 希望本文研究内容能对本省区域自动气象站雨量数据质量把控有所帮助。

在充分了解所考察数据所包含的业务内容和数据单位、格式等的前提下, 对可能导致异常数据的原因做了广泛的学习和研究, 并在此基础上建立了有针对性的质量评估方案, 并将此方案进行研究型应用, 主要用于对吉林省区域自动气象站的5年历史数据进行质量评估, 经评估得到该历史数据的正确率、错误率、异常率分别为97%、约为0、3%, 可见该历史数据数据质量相对较高, 对于异常数据及相应站点可进一步分析确定后反馈给有关部门进行跟踪校正。

以上质量评估结果仍存在很多不足之处, 如: 对于异常数据可在后续的研究过程中与雷达数据等进行横向比对, 这样可以增加数据质量评估的可信度; 另外对于历史数据的分析研究, 还不能够实现对实时上传数据的自动化质量控制。

后续将考虑进一步训练质量控制算法, 考虑利用卫星资料或雷达基数据进行定性分析, 从雷达或卫星资料得到可疑数据所属的时间段内区域自动站周围的降雨情况, 从而更深入地对可疑降水量进行分析判断。

参考文献

- [1] 张万东, 龙昭芪, 张凯伦. 浅谈区域自动气象站资料在防灾减灾中的运用. 贵州气象, 2010, 34(5): 42-43.
- [2] 任芝花, 赵平, 张强, 等. 适用于全国自动站小时降水资料的质量控制方法. 气象, 2010, 36(7): 124-126.
- [3] 莫遵元. 区域气象站雨量数据异常的分析与处理. 农业与技术, 2018, 38(5): 146-148.
- [4] Sciuto G, Bonaccorso B, Cancelliere A, et al. Quality control of daily rainfall data with neural networks. J Hydro, 2009, 364: 14-20.
- [5] 何健, 王潜梅, 钱光明, 等. 广东省区域自动气象站资料的质量控制与评估. 广东气象, 2011, 33(3): 37-39.
- [6] 刘雨佳, 陈洪滨, 金德镇, 等. 加密自动气象站雨量计资料的质量控制及其相关关系的研究. 大气科学, 2014, 38(1): 162-163.
- [7] 冯振家. 区域自动气象站雨量自己部分常见故障分析及其维护. 气象研究与应用, 2010, 31(2): 44-45.
- [8] 王军海, 王忠云, 孙小丽. 区域自动气象站雨量标校应注意的问题. 山东气象, 2009, 29(116): 60-61.
- [9] 邱辉, 詹红霞, 刘振永. 伊犁河谷区域自动气象站资料分析. 宁夏农林科技, 2012, 53(9): 120-125.
- [10] 肖勇, 郭金慧. 区域自动气象站质量控制技术的研究及应用. 气象水文海洋仪器, 2016, 3(1): 98-101.

一次东北冷涡天气过程雷电气象潜势条件诊断分析

吴曼丽¹ 陈力强²

(1 中国气象局气象干部培训学院辽宁分院, 沈阳 110166; 2 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110166)

摘要: 利用全国常规天气实况观测资料、欧洲中心数值预报资料和NCEP再分析资料, 采用统计和个例分析相结合的方法, 对东北冷涡产生雷电的气象潜势条件进行了分析。结果表明: 东北冷涡具有明显的对流不稳定能量, 易带来雷电天气, 冷涡的成熟和减弱阶段易产生雷电, 雷电多发生在午后到凌晨, 雷电位于冷涡的东部或东南部区域, 与分散性对流云系相邻, 上冷下暖温度层结下的低空垂直速度、相对湿度、K指数等物理量的大值重合区对应雷电发生区。

关键词: 东北冷涡, 雷电, 气象潜势条件, 诊断分析

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.06.017

Diagnosis and Analysis of Meteorological Potential Conditions of Lightning in the Northeast Cold Vortex, China

Wu Manli¹, Chen Liqiang²

(1 Liaoning Branch, China Meteorological Administration Training Center, Shenyang 110166

2 Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110166)

Abstract: The northeast cold vortex in China is a typical weather system in which lightning often occurs. In this paper, the meteorological potential conditions of lightning in the northeast cold vortex are analyzed by statistical analyses and a case study. The results show that the weather conditions include a strong air flow, sufficient water vapor and strong energy. The strong potential vortices corresponding to the cold vortices in the middle and upper layers provide potential conditions for the occurrence of strong convection. The mature energy of convective instability of the cold vortex is located in the southeast near the center of the cold vortex. The large value coincidence area of the jet stream, the air vertical velocity in low layer, the higher temperature in upper while low temperature in lower layer, the specific humidity and other physical quantities are corresponding to the lightning occurrence.

Keywords: Northeast cold vortex, lightning, meteorological potential conditions, diagnostic analysis

0 引言

雷电是中国东北地区频繁发生的自然灾害, 据统计, 雷电灾害已成为城市仅次于暴雨和台风灾害的第三大气象灾害^[1-2]。雷电是在特定大气环境中发展起来的对流系统, 为描述这种对流系统发生、发展的环境场特征, 国内外研究者总结了大量物理意义明确的热力学、动力学、能量学参数, 并将这些参数应用在对雷电天气的分析和潜势预报中。

高菊霞等^[3]提出通过对两次强雷电过程的闪电特征、天气形势及物理量场分析发现: 西太平洋副热带

高压、西风槽是强雷电天气过程的直接影响系统, 暴雨落区与闪电密集区对应较好, 最强正闪出现在中层相对湿度大于50%的区域内, 最强负闪出现时垂直上升运动较弱, 雷电密度较大区域灾害明显。龚嘉锵等^[4]用WRF模式对发生在南京市区的两次雷电过程进行了模拟, 发现WRF模式高时空分辨率的特点, 使得其对雷电发生前的气象要素资料的获取更加精确, 可进一步地提高利用WRF模式进行雷电预警的效果。李君等^[5]指出淄博市雷电天气形势特征分别为冷锋型雷电、高空槽(切变线)型雷电以及冷涡型雷电。许爱华等^[6]发现高温高湿天气、层结异常不稳定、前倾槽结构、亮温区、强回波伸展高度、“逆风区”和“正速度快速增大区”等特征十分明显, 是预报分析强雷电天气的着眼点。郜凌云等^[7]发现辽宁省内陆城市雷暴活动与近地面气温、亚洲纬向和经向环流有关, 沿海城市雷暴活动与对流层中低层的风场和高度场密切

收稿日期: 2019年4月15日; 修回日期: 2019年8月22日
第一作者: 吴曼丽(1979—), E-mail: 120078087@qq.com
资助信息: 中国气象局沈阳大气环境研究所开放基金项目(2018SYIAE05); 环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM201501); 辽宁省海洋专家型预报员团队建设

相关, 雷暴日数的年际变化与西太平洋副热带高压脊线的位置密切相关。

而东北冷涡是东北地区的典型影响天气系统^[8], 具有多发性和连续性特点, 更是强对流天气的多发天气形势, 也是经常出现雷电天气的典型天气形势。因此, 从东北冷涡天气形势下雷电发生的潜势条件分析着手, 研究东北冷涡天气形势下, 雷电的产生条件和高发区域。

1 资料及方法

统计特征分析的历史资料使用1960—2010年常规气象观测资料; 冷涡个例资料采用中国气象局下发的常规天气实况观测资料、欧洲中心数值预报资料及NCEP再分析资料, 时间2002年7月11—14日, 2005年7月9—13日, 2017年4月22—25日。

东北冷涡(NECV)的定义采用孙力等^[9]的标准, 即东北冷涡是500 hPa天气图上, 115°—145°E、35°—60°N 范围内有闭合等高线, 配合有冷中心或冷槽, 能够持续维持3 d或3 d以上的低压环流系统。

采用天气学分析方法对发生雷电的东北冷涡天气形势进行分析, 寻找冷涡天气发生雷电的机理原因; 采用诊断分析方法, 研究了冷涡背景下各物理量场与雷电发生的密切关系; 利用中尺度分析方法, 寻找对流不稳定即雷电的高发区域。

2 东北冷涡对流不稳定潜势分析

2.1 东北冷涡天气特点

东北冷涡具有明显的对流不稳定能量, 突发性强对流, 带来雷电、大风、冰雹等。陈长胜^[10]在《初夏两次东北冷涡强对流天气对比分析》中提到东北的雷暴日数由冷涡引发的最多, 64%的飚线与冷涡过程有关, 冷涡降雹占东北总降雹日数近一半。对1960—2010年5—9月发生在辽宁省的东北冷涡天气过程进行统计分析(图1), 共出现417次冷涡过程, 平均每年出现8.3次冷涡过程, 这50年气候倾向趋势不明

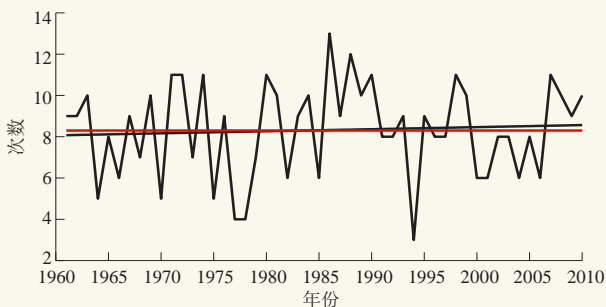


图1 东北冷涡年际变化及年频次

Fig. 1 Interannual variation of frequency of the northeast cold pool

显。另外, 从地面实况资料可知冷涡对流有明显日变化, 多发生在午后到前半夜, 雷暴也对应发生在这个时间段, 这与陈力强等^[8]在2008年研究的冷涡过程中对流有效位能的日变化表现一致(图略)。冷涡还经常产生局地暴雨, 占总数的22%; 区域性暴雨较少, 仅占7%; 未出现过大范围特大暴雨。

2.2 东北冷涡雷电对流不稳定潜势分析

东北冷涡是阻塞系统的切断低压, 所以东北冷涡天气系统的结构和温度层结与切断低压相似。陈力强等^[8]对2002年7月12日东北冷涡天气过程进行数值模拟, 发现东北冷涡天气系统中, 高层暖异常, 中层冷异常, 在对流层上部形成稳定层结, 但随着高度降低, 低层增温, 形成了中低层的低稳定区, 冷涡在中高层对应较强位涡为强对流的发生提供了潜在条件。这个研究结果与切断低压的结构非常相似, 在东北冷涡过程中具有普遍规律。另外, 东北冷涡前部为上升气流, 后部为下沉气流, 雷电等强对流天气易出现在东部或北部, 在那里中层正涡度可以在低层产生环流, 该环流可以带来暖湿气流, 为雷电的发生储存了能量。由于东北地处中高纬, 加之极锋急流和副热带急流的季节变化易形成阻塞系统。东北三面环山、中间平原的地形以及海陆交界的分布使阻塞系统的切断低压易在东北地区维持。阻塞系统的持续性导致了东北冷涡的持续性。由于冷涡持续时间长, 雷电发生的时间也相对较长。

通过对2005年7月8—14日的东北冷涡过程进行分析, 发现冷涡的对流不稳定能量有明显阶段性(图2)。发展阶段结构接近温带气旋, 地面气旋湿斜压不稳定发展是降水产生的机制; 成熟阶段受太阳辐射影响, 以分散性局地对流降水为主。冷涡的不同发展阶段均可对应不稳定能量区, 但其分布有较大差异, 发展阶段不稳定能量区分布于离冷涡中心较远的东南部; 成熟期位于接近冷涡中心东南部; 减弱期位于冷涡减弱形成的低压槽中。

东北冷涡生命期对流不稳定能量的变化, 在冷涡的各发展阶段中高层冷空气条件(一般为700~400 hPa)在冷涡环流区都基本具备, 冷涡各部位最主要的差别在于大气底层的湿度条件, 其次是温度条件。对2005年7月8—14日东北冷涡过程进行分析, 发现对流不稳定能量的积累是一个较长的过程, 在冷涡的发展期能量一直在累积, 能量达到最大, 在成熟期能量的释放是一个短暂的过程, 不足1 h, 非常剧烈, 因此往往发生雷电。不稳定能量的积累和释放过程不稳定参数的变化如表1所示。

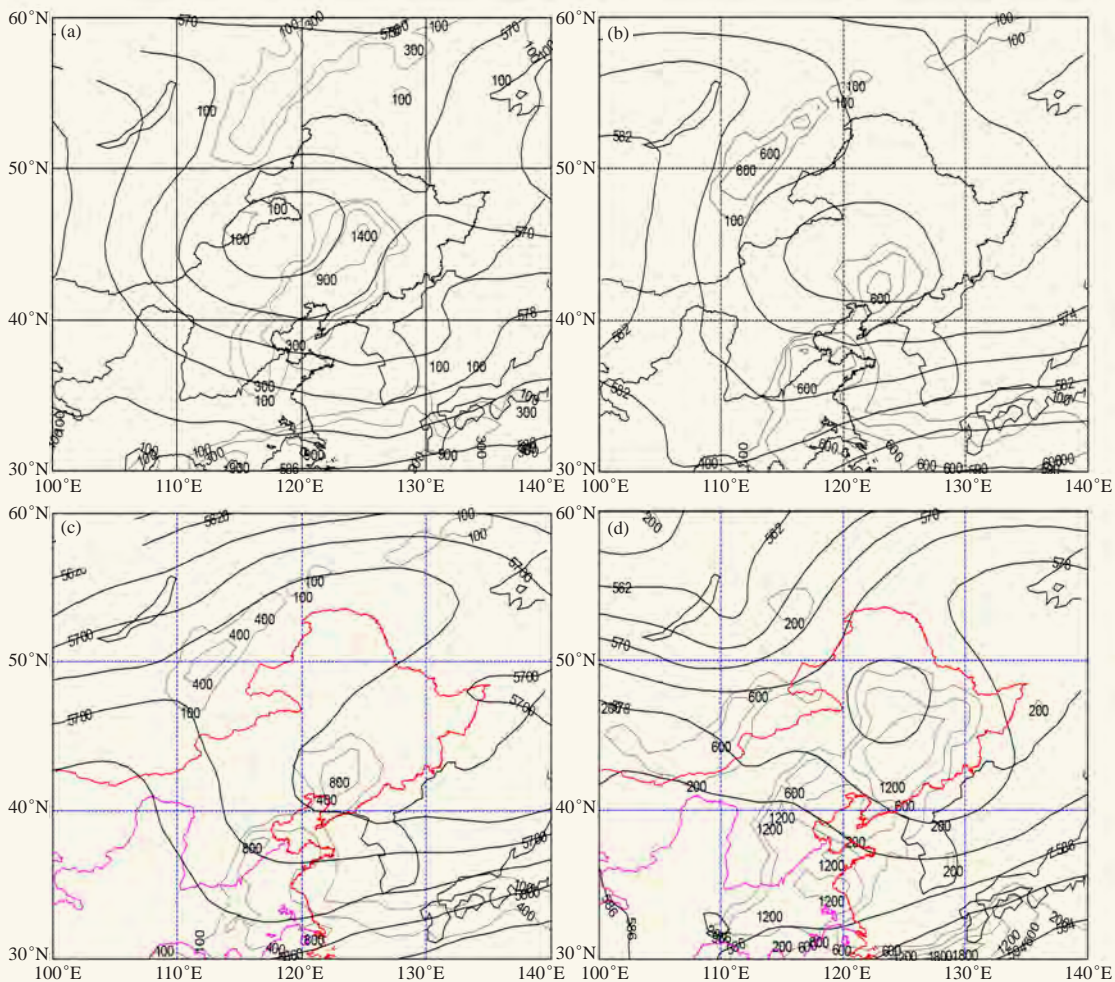


图2 2005年7月9—13日500 hPa高度 (实线) 及对流有效位能 (虚线): (a) 9日08时发展阶段, (b) 10日08时成熟阶段, (c) 10日20时减弱阶段, (d) 13日20时减弱阶段

Fig. 2 500hPa height (solid line) and convective effective potential energy (dashed line) for July 9–13, 2005 (a. at 08:00 on July 9, the development stage; b. at 08:00 on July 10, the maturity stage; c. at 20:00 on July 10, the weakening stage; d. at 20:00 on July 13, the weakening stage)

表1 2005年7月10日不稳定参数的变化

Table 1 Changes of unstable parameters on July 10, 2005

时间	08时	12时	17时	19时	20时
CAPE (J/kg)	304	495	1242	2570	425
CIN (J/kg)	-258	-490	-487	-172	-123
抬升指数	0.3	-2.9	-5.3	-8.8	-2.1
K指数	14	24	31	38	40

3 东北冷涡个例雷电天气潜势分析

选取2017年4月22—25日东北冷涡背景下雷电天气个例, 从环流形势、云图特征和雷电潜势条件等方面进行了分析。

3.1 环流形势分析

2017年4月22日08时, 低涡中心位于贝加尔湖北部, 低涡东南部的高空槽位于东北地区西北部, 东北

地区中部被高压脊控制, 到了20时, 东北地区西北部的高空槽加强发展成东北冷涡。如图3所示, 2017年4月23日08时, 500 hPa环流及温度场东北冷涡中心位于内蒙古以北地区, 强度达到528dgpm, 此时温度槽位于高度中心的后部, 中心最低气温达 -32°C , 是冷涡的发展阶段, 冷中心落后高度中心, 此时东北地区位于冷涡的东南部, 天气相对稳定。到了23日20时, 冷涡中心东移南压, 冷涡冷中心与高度中心重合, 冷涡进入成熟阶段, 此时在冷涡的东南部由于暖湿空气的爬升受到深厚的冷涡冷空气的阻挡, 在垂直方向上强烈抬升, 容易触发对流不稳定能量, 产生雷电天气。24日08时开始东北冷涡缓慢向偏东方向移动, 中心强度略有减弱, 25日20时东北冷涡中心移至黑龙江东北部, 26日移出东北地区。

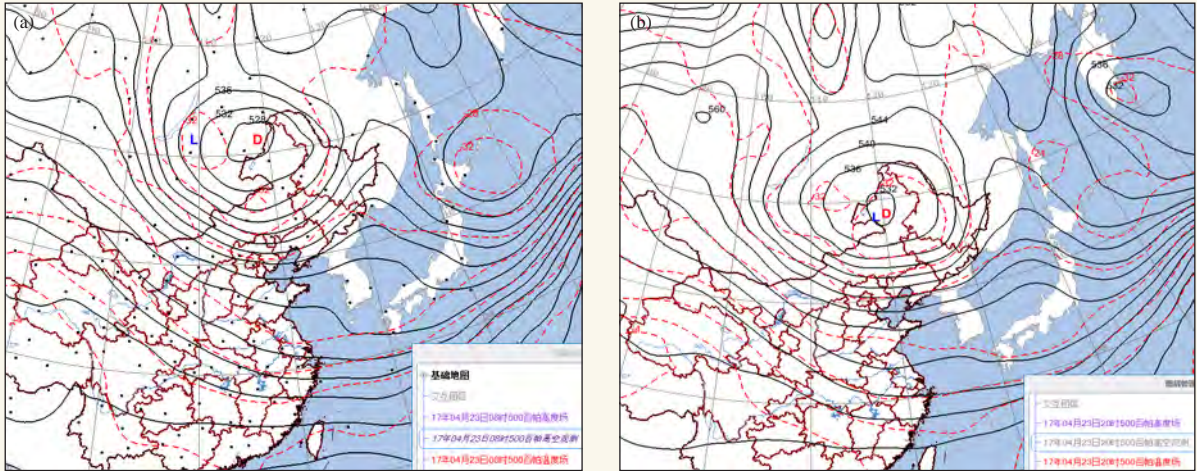


图3 2017年4月23日 (a) 08时, (b) 20时500 hPa环流及温度场
Fig. 3 500 hPa circulation and temperature field on April 23, 2017 (a. 8:00, b. 20:00)

3.2 云图特征分析

2017年4月22日17时冷涡处于发展阶段,如图4a云图呈现逗点形状,配合地面存在气旋,伴有冷锋和暖锋,冷涡中心西侧出现中到大雪,东侧出现阵雨,为稳定性锋面降水,此时没有雷电现象。23日08时(图4b),冷涡仍然处于发展阶段,逗点云系较前期相比,变得浅薄,降水范围扩大至逗点云系的尾部,冷涡的东部和东南部都出现了小雨到中雨,仍为稳定性的锋面降水,没有雷电产生。23日20时,冷涡发展到成熟阶段后,地面气旋中心与500 hPa高空冷涡中心接近重合,降水范围继续扩大发散,降水强度增加。24日02时(图4c)冷涡云系变得分散,在冷涡东南方向新生成许多对流云,此时从大连地区开始发生雷电,雷电范围逐渐扩大到丹东、营口、葫芦岛、辽阳、鞍山和本溪地区,随着对流云发展,在24日03—05时雷电又出现在黑龙江大庆、吉林松原、浑江和通化地区,辽宁和吉林地区的雷电在上午10时左右结束,黑龙江地区的雷电持续到17时,如图4d所示,24日08—17时雷电发生在吉林通化、松原、黑龙江绥化、黑河、齐齐哈尔、伊春以及哈尔滨地区。25日08时冷涡成熟阶段,云系最强区域远离冷涡中心,辽宁降水结束,降水范围北收,强度减弱,多阵雨。25日14时冷涡开始减弱,雷电从11时左右再次出现(图4e),主要发生在吉林的长春、吉林市、延边、浑江和黑龙江的鸡西、鹤岗、佳木斯、双鸭山、大庆、哈尔滨及牡丹江地区,午后14—15时雷电频次最高,18时雷电结束。26日14时冷涡减弱阶段,冷涡已经东移出东北地区,只有残留云系,但仍然有阵雨,26日凌晨和下午黑龙江和吉林的局部地区出现少量雷电(图4f)。

3.3 雷电潜势条件中尺度分析

利用中尺度分析的方法分析本次雷电发生的潜势条件。此次过程24日降水量最大,也是雷电发生范围和频次最大的一天,利用2017年4月24日08时的探空资料进行分析。在500 hPa内蒙古东部有温度冷槽,华北地区有西北急流,850 hPa辽宁东部有低空西南急流,并有温度暖脊,高低空冷暖空气在东北地区交汇,上冷下暖温度层结激发不稳定条件。从700 hPa垂直运动条件看,在东北地区有较强的上升运动,在内蒙古东部冷空气控制区域有下沉运动,雷电一般发生在垂直运动上升区,这个区域也是成云致雨的区域。图5a中橙色线为850 hPa水汽通量,数字为850 hPa比湿 $>3\text{g/kg}$,阴影为850 hPa相对湿度 $>70\%$,从多个表征水汽的物理量特征参数重合的区域可以判断出潜势能量最大的区域,图5b阴影为降水落区,深绿色 $>10\text{mm}$,但是此次过程水汽条件不能满足暴雨条件,实况也是属于中雨量级,产生的对流强度相对也不大,因此更难判断雷电发生区域。图4中雷电的实际发生区域与图5b中雨落区一致,在这里无论是水汽还是上升运动条件都是最有利于形成雷电云的,但是黑龙江和吉林西部的雷电在图5中与各物理量对应并不是很好,中尺度分析也可能会漏掉雷电潜势区域。图6给出了4月24日08时的K指数分布,可以看到东北地区的K指数值并不是很大,吉林和辽宁的中东部有一定的不稳定能量,K指数为24,与雷电的区域对应。另外,这次过程早上08时对流有效位能较弱,以上分析是基于08时的探空,不是能量积累最强的时刻,雷电多发生在凌晨和下午,因此分析有一定局限性,但对于短临雷电潜势预报有一定指示意义。

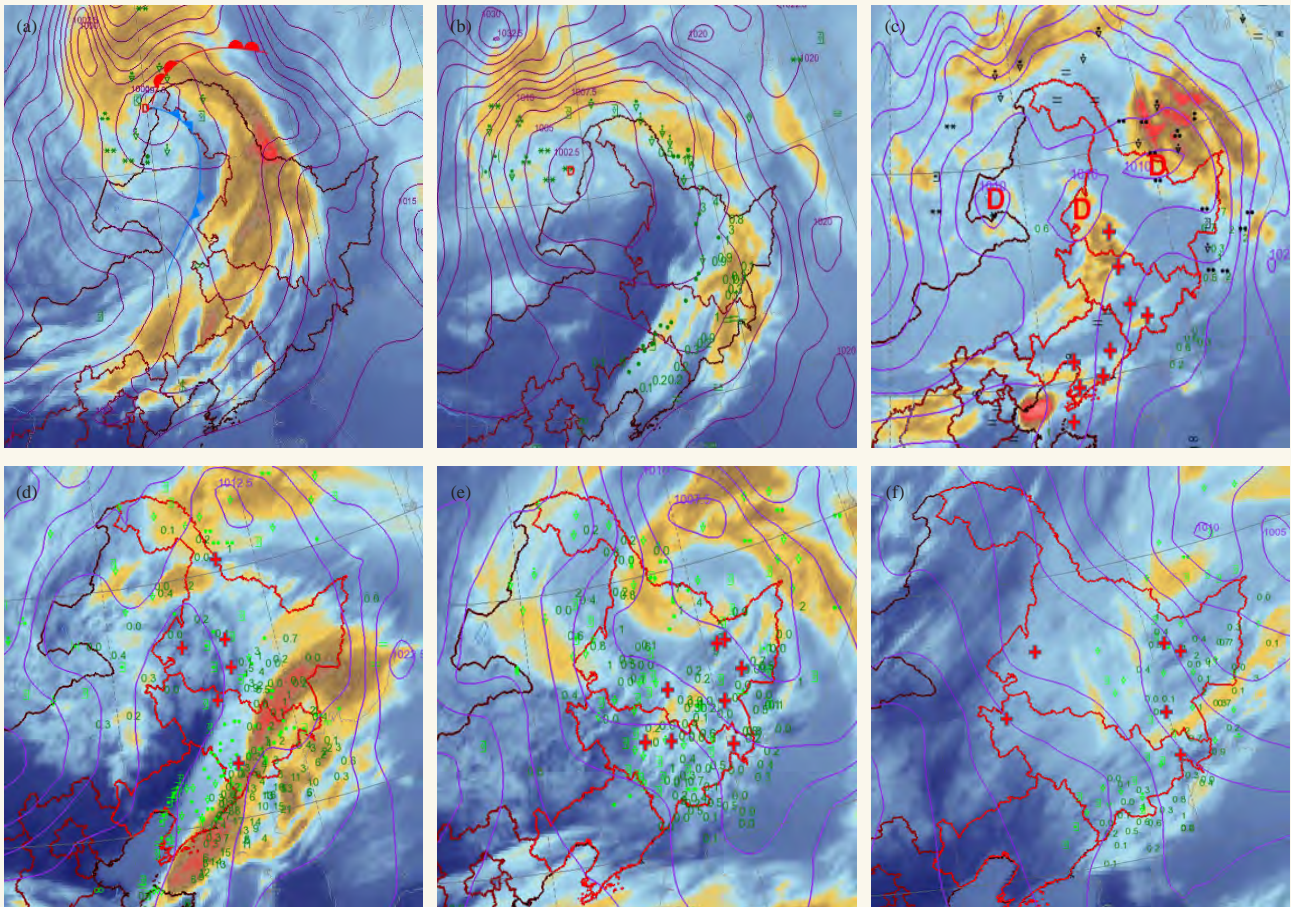


图4 2017年4月22日17时—26日14时冷涡红外云图特征 (紫色线为地面气压场, 绿色为现在天气和6 h降水量, +代表雷电)
(a) 22日17时, (b) 23日08时, (c) 24日02时, (d) 24日14时, (e) 25日14时, (f) 26日14时

Fig. 4 The cold vortex cloud (purple line represents surface pressure field, green line represents current weather and 6-hour precipitation, + represents lightning) from 17:00 on April 22, 2017 to 14:00 on April 26, 2017 (a. 17:00 on Apr 22; b. 08:00 on Apr 23; c. 02:00 on Apr 24; d. 14:00 on Apr 24; e. 14:00 on Apr 25; f. 14:00 on Apr 26)

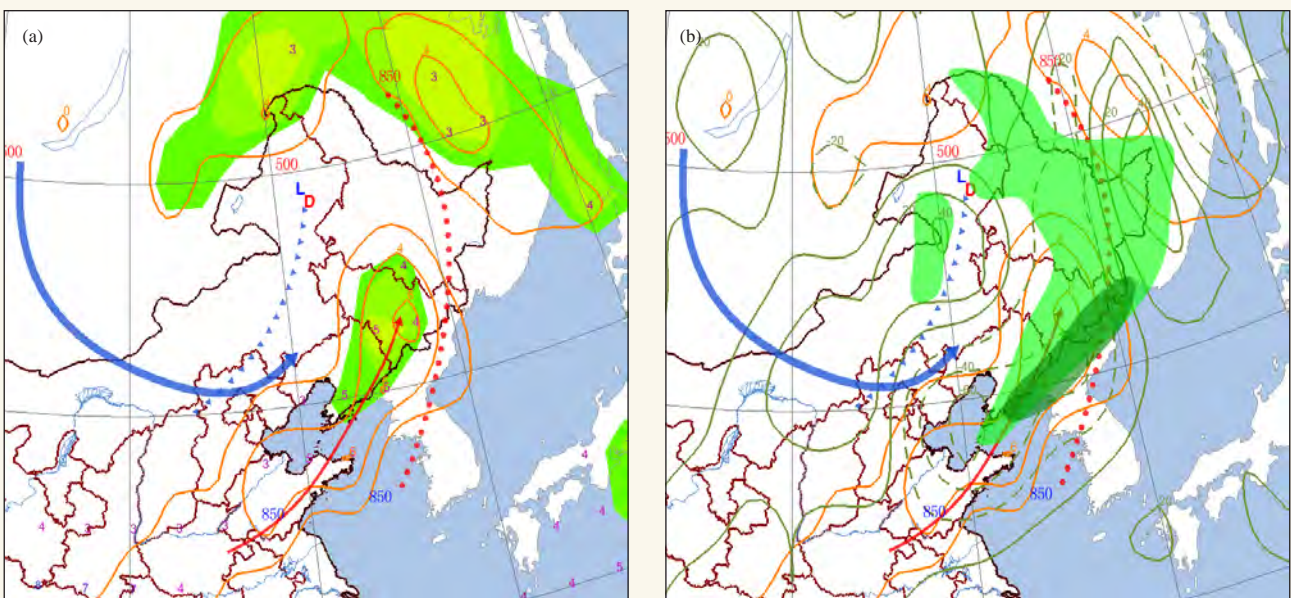


图5 2017年4月24日08时雷电发生条件中尺度分析 (a) 及中尺度分析叠加降水落区 (b)

Fig. 5 Mesoscale analysis of lightning occurrence conditions on Apr 24, 2017

(下转117页)

物联网技术在人工影响天气业务中的应用

张小培¹ 李宏宇²

(1 中国气象局应急减灾与公共服务司人工影响天气处, 北京 100081;

2 中国气象科学研究院人工影响天气中心, 北京 100081)

摘要: 随着计算机和网络信息技术的快速发展, 物联网技术逐渐应用到人工影响天气业务中, 物联网技术的应用有效提升了人工影响天气装备弹药管理的信息化和自动化水平, 促进了全国人工影响天气业务的科学化和规范化水平提高。对物联网技术在我国人工影响天气业务中的应用进行了回顾, 以国家级推动建设的人工影响天气物联网系统为例, 对物联网技术在人工影响天气业务中的应用和成效进行了简要分析。最后讨论了物联网技术在人工影响天气业务应用中存在的问题并提出了发展建议。

关键词: 人工影响天气, 物联网技术, 应用

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.06.018

Application of IoT Technology in Weather Modification

Zhang Xiaopei¹, LI Hongyu²

(1 Weather Modification Division of Department of Emergency Response, Disaster Mitigation and Public Services, CMA, Beijing 100081

2 Weather Modification Centre, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract: With the rapid development of computer and network technology, the IoT (Internet of Things) technology has been being applied to weather modification activities. The application of IoT technology has effectively improved the level of information and automation of weather modification equipment and ammunition management. Furthermore, it has improved the standardized and scientific level of weather modification work across our country. The application of IoT technology in weather modification is reviewed in this paper. The IoT based weather modification system, which has been promoted and established from national level, is used as an example to analyze the function, application, and effectiveness of the IoT technology in weather modification. Finally, the existing problems in the application of the IoT technology in weather modification are analyzed and some suggestions are put forward.

Keywords: weather modification, IoT technology, application

0 引言

自1999年美国麻省理工学院(MIT)提出物联网(Internet of Things, IoT)概念以来, 物联网内涵逐渐完善、技术快速发展^[1-2]。目前, 物联网技术已广泛应用于物流^[3]、公共交通^[4]、公共安全^[5]、现代农业^[6]、教育^[7]等诸多行业和领域。2000年以来, 物联网技术开始应用于气象行业, 包括气象监测^[8-9]、气象预警^[10-11]和气象服务^[12-13]各方面。

近年来, 随着我国人工影响天气(以下简称人影)工作的快速发展, 人影作业规模越来越大, 装备

和弹药使用量逐年增多。目前我国有30个省(区、市)开展人影作业, 涉及飞机、高炮、火箭增雨防雹等业务, 从业人员达到4.6万人^[14], 中国气象局上海物资管理处每年验收人影炮弹80万余发, 火箭弹约10万枚^[15], 我国人影作业规模已位居世界首位^[16]。随着全国人影作业规模不断增大, 人影装备弹药的管理难度也不断增加, 通过纸质表格、登记造册等传统方式对人影装备弹药出入库、使用情况进行管理, 存在时效性不强, 准确度不高的问题, 无法对人影装备弹药流转各环节进行动态追踪管理, 人影装备弹药安全管理存在较大的安全隐患。此外, 传统的人影作业信息采集基本依靠人工记录, 时效性差, 信息量少, 难以满足业务发展需求。因此, 将物联网技术应用到人影装备弹药和作业信息管理中不仅十分必要, 而且越发迫切。

收稿日期: 2018年11月14日; 修回日期: 2019年8月1日

第一作者: 张小培(1983—), Email: zxp03@126.com

资助信息: 中国气象局小型业务项目“人工影响天气作业装备弹药全程监控应用示范”; 气象行业标准项目(QX/T-2017-45)

1 物联网技术在人影业务中的应用

经过多年探索，物联网技术在我国人影业务中的应用步伐不断加快。目前，我国人影业务中已初步实现了装备弹药的全程跟踪管理和作业信息的自动采集传输。本文首先对物联网技术在省级人影业务中的探索进行了总结，并以中国气象局推动建设的人影物联网系统为例，对物联网技术在全国人影业务中的应用及成效进行简要论述，提出了物联网技术在我国人影业务应用中存在问题及发展建议。

1.1 物联网技术在省级人影业务中的探索应用

在气象信息化建设过程中，北京、陕西、贵州、安徽等省级气象部门联合装备弹药生产厂家先后开展了人影装备弹药智能管理的探索工作。2011年，安徽人影办公室联合陕西中天火箭技术股份有限公司研发了安徽省省级人影物联网管理系统，实现了对人员、装备、弹药等信息的采集、传输和信息化管理，以及对作业流程的全程监控、互动和干预提醒等功能，人影作业安全监管能力得到了显著提高^[16]。贵州省、北京市人影办公室也与人影弹药生产厂家共同研发了基于RFID电子标签应用的人影物联网智能管理系统，实现了火箭作业装备、弹药、人员信息的实时监管，提高人影安全监管水平^[17-18]。这些物联网系统的探索与应用，为提高各省级人影业务信息化、自动化水平发挥了积极作用，但是，这些人影装备弹药管理系统主要立足于省级人影业务需求，存在硬件架构和输出信息格式不一致、装备弹药和作业信息的编码规则不规范、不统一等问题；对影子弹药生产、验收和销毁等业务环节的考虑还不充分，没有实现人影装备弹药的全程监控和闭环管理，还不能满足全国人影作业装备弹药的统一监管要求。

1.2 物联网技术在全国人影业务中的推广应用

为解决全国范围内人影作业装备和弹药全程监控和统一监管问题，2015年，中国气象局以气象小型业务项目的形式，启动了“人工影响天气作业装备弹药全程监控应用示范”，项目由中国气象局人影中心牵头，参加单位包括中国气象局上海物资管理处和北京、河南、陕西^[19-20]、贵州等四个示范省（市）。在总结前期省级试点基础上，利用条码识别技术、声光电自动感应技术、移动互联技术等，建设了人影物联网系统，实现了对人影装备弹药的全过程、规范化、自动化和实时监控管理，有效提高了全国人影装备弹药安全管理的科技水平和现代化程度。项目总结提炼了人影装备弹药标识编码技术规范、省级及以下人影装备弹药监控管理系统建设指南，以及人影装备弹药

监控管理系统业务运行规定，为人影物联网技术在全国范围内推广应用奠定了基础。

为进一步扩大物联网技术在人影业务中的应用，2017年中国气象局批复了气象小型业务项目“东北区域四省（区）人工影响天气装备弹药物联网能力建设”，支持黑龙江、吉林、辽宁和内蒙古四省（区）建设省级人影物联网系统，部署专用软件系统及服务器等设备，配置物联网手持移动终端等。目前，东北区域内该项目整体建设工作已基本完成。此外，全国人影发展规划和正在建设推进的各区域人影能力建设项目中也充分考虑了人影物联网系统相关建设内容。

1.2.1 人影物联网系统建设内容

中国气象局气象小型业务项目“人工影响天气作业装备弹药全程监控应用示范”支持建设的人影物联网系统建设内容主要包括人影作业装备弹药全程监控模块、人影作业信息实时采集模块和相关技术标准与规范三部分，各部分主要内容见表1。

表1 人影物联网系统主要建设内容
Table 1 The contents of the weather modification system based on the IoT technology

项目组成的名称	主要内容
人影作业装备弹药全程监控模块	包括国家级人影作业装备弹药出厂验收质量管理、国家级人影作业装备弹药信息管理、示范省级人影作业装备弹药信息管理三个主要组成部分，主要实现对人影装备弹药全过程、自动化和信息化管理
人影作业信息实时采集模块	包括人影飞机作业信息实时采集和人影地面作业信息实时采集两个主要组成部分，实现飞机作业信息、地面作业信息的自动采集、传输、上报和实时监控
相关技术标准与规范	包括人影作业装备和弹药产品统一标识规范、飞机作业信息采集传输规范、地面作业信息采集传输规范，对各类信息的内容、编码格式和传输要求做出统一规定

1.2.2 人影物联网系统总体流程

人影物联网系统涉及的主要环节包括：生产、验收、转运（运输）、仓储、发射（作业）和报废（销毁）等，总体流程见图1。其中，中国气象局人影中心主要负责人影物联网标准制定、技术支持，中国气象局上海物资管理处主要负责人影弹药验收环节的管理，及时将验收合格产品信息通过物联网系统告知各省（区、市）气象局，各省（区、市）气象局采购、使用通过验收的合格产品，同时通过物联网系统将转运、仓储、使用、报废等环节的信息自动上传至系统。

1.2.3 人影物联网系统的主要功能

人影物联网系统主要实现了对人影装备弹药的全流程管理功能和对作业信息的自动化采集功能。人影装备弹药全流程管理功能包括对影子装备弹药生产、验收、仓储、转运、发射、报废与销毁6个环节的全程监控管理（包括溯源、跟踪、定位等），以及对装

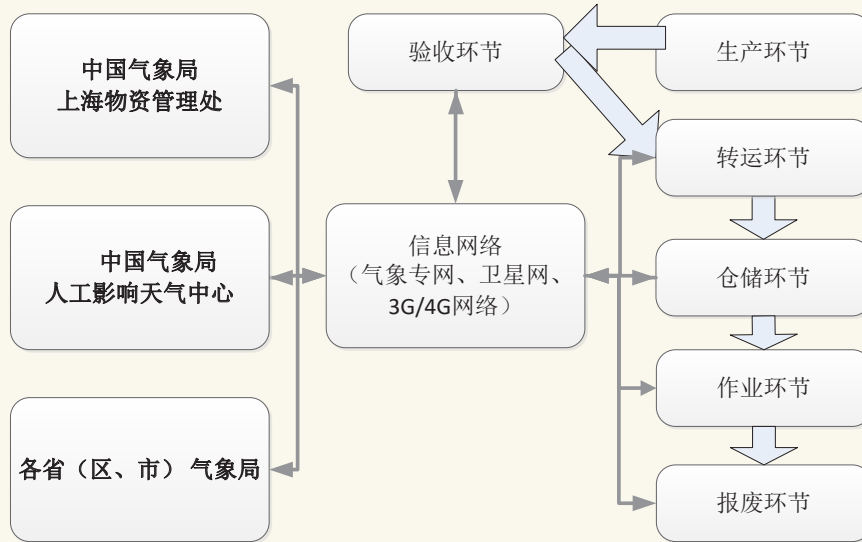


图1 人影物联网系统总体流程

Fig. 1 Flow chart of the weather modification system based on the IoT technology

备弹药的有效期检验、质量跟踪管理等功能，各环节主要功能设计见表2。作业信息自动化采集功能包括对飞机和地面作业信息自动化采集和处理。通过对高炮和火箭信息化改造^[21]，并升级作业飞机使用的北斗系统、人影物联网系统实现了对人影飞机和地面作业信息的自动采集传输和综合展示，各环节主要功能设计见表3。

表2 人影物联网系统弹药管理6个环节的功能

Table 2 The ammunition management function of the weather modification system based on the IoT technology

环节名称	主要功能
生产环节	各生产厂家根据弹药的生产使用安全规定和制订的统一标识规范，通过添加条码标签，作为该弹药唯一身份标识，实现基于条码扫描及感应技术的人影弹药标识及信息采集工作
验收环节	利用条码及感应技术，由气象物资管理部门对人影弹药进行出厂验收，通过验收的产品才能进入下一环节
仓储环节	待入库弹药信息与气象物资管理部门验收合格弹药信息库数据对比，验收通过的弹药方能入库；通过手持终端来扫描感应出入库弹药（以整箱为单位）的条码，实现对作业弹药出入库的跟踪管理，对弹药存储有效期进行监控，提供自动化监控提醒、报警等功能
转运环节	不同仓储库或位置间弹药的转移运输，通过扫描条码、车辆定位及通信传输手段，对弹药转运环节跟踪管理
作业环节	通过库房或作业站点的弹药出库、回库信息来解析实际发射信息；或者利用全自动控制发射系统、远距离声光电等感应器以及发射过程视频图像解析等技术来自动识别发射信息
报废环节	以上各环节中，凡是经发现不合格的人影作业装备和弹药，予以报废，并由对应的生产厂家负责销毁，同时将有关信息传输到气象物资管理部门

2 人影物联网技术应用成效

通过省级人影物联网试点建设和国家级整体推动，目前全国已有27个省（区、市）实现了人影物联网系统的省级部署，29个省（区、市）开展了市、县级物联网管理部署的示范建设，初步实现了人影作业

表3 人影物联网系统作业信息管理功能

Table 3 The cloud seeding information function of the weather modification system based on the IoT technology

环节名称	主要功能
人影飞机作业信息自动采集	升级北斗地面通讯控制设备，并在人影作业飞机上部署机载北斗设备，利用北斗卫星定位、地空数据链技术，实时采集全国各省级人影飞机作业信息。基于地理信息系统实现全国人影飞机飞行与作业状态的实时跟踪、作业动态和统计分析的综合展示
人影地面作业信息自动采集	引入人影火箭和高射炮远程控制自动发射系统，并利用作业站点对火箭和高炮作业的声光电自动感应及识别技术、移动互联网技术，实现人影地面火箭和高炮作业数据的自动化采集，基于地理信息系统实现人影地面作业状态的实时监视、作业动态和统计分析的综合展示

装备弹药和作业信息的自动化、信息化动态管理功能。物联网技术在人影业务应用中取得的主要成效如下：

1) 确定了人影物联网建设技术路线。在人影物联网系统建设过程中，确定了主要基于二维码标识的炮弹、火箭弹和弹药箱管理技术路径^[19]，首次实现了对人影装备弹药的统一编码和唯一身份标识。对炮弹采取激光刻印二维码标识的方式，将物联网信息刻在弹体上，对火箭弹采取粘贴二维码标识的方式，将物联网信息标记在弹体上。对人影弹药和弹药箱信息的采集主要利用基于光学扫描技术的手持式扫描终端，该终端同时内置全球定位系统GPS模块，通过弹药运输车辆和人员携带可实时定位监控装备弹药转运信息。各业务环节采集得到的管理信息，利用有线、无线等通讯网络实时传输到人影物联网系统。

2) 配套制定了人影物联网技术规范和标准。在人影物联网系统建设中，根据业务环节与信息流转要求编制了人影装备弹药监控管理系统应用接口规范，

对系统对外接口进行定义,为国家级、省级人影物联网管理系统和人影其他业务系统数据交互提供了依据。编制了人影作业装备弹药与作业信息管理等配套的行业技术标准,主要包括:人影作业站点、装备弹药的统一编码规范,飞机、地面作业信息采集传输规范等。此外,还制定了《人工影响天气装备弹药监控系统业务试运行规定》,进一步明确了国家、省级、市县级、作业站点各业务层级的职责任务与各级系统软硬件运维及信息安全管理,保障国家级、省级物联网管理系统一体化运行和各项数据信息能够及时有效地收集、传输与上报,发挥系统整体建设效益。

3) 实现了人影装备弹药和作业实施的信息化管理。通过物联网技术在人影业务中的应用,基本实现了对炮弹、火箭弹从生产、验收、运输、存储、使用和报废全寿命周期的自动化跟踪管理,初步实现对作业弹药的精细化和智能化管理。通过条码和电子标签扫描及感应技术自动采集人影弹药信息,通过数字震动与光学采集技术的智能采集传感器自动采集人影作业基本信息,结合地理信息系统、全球定位系统和移动互联网技术,自动传输、分析、处理并实时显示人影作业信息,提高了人影业务信息化水平。

3 小结

总体而言,物联网技术在我国的应用还处于推广应用阶段,目前还存在以下三个问题:一是部分人影作业站点位置偏僻,缺少物联网改造基本条件,人影物联网技术在基层的覆盖比例还不高;二是基层人影作业队伍结构复杂,作业人员年龄偏大、文化素质普遍不高,不利于人影物联网技术的应用和普及;三是人影物联网系统业务化程度还不高,与人影安全管理和信息采集处理系统还存在相对独立运行的情况。

针对上述存在的问题,建议物联网技术在我国人影中的应用可从以下几个方面改进:一是继续在国家层面大力推广人影物联网试点建设成果,通过国家工程项目、地方投资持续推进,为物联网技术向基层延伸创造有利条件,提高物联网技术在基层人影工作中的应用率。二是继续推进“政府主导、社会化服务、民兵预备役”相结合的基层作业人员管理模式,不断提升基层作业人员整体素质,加强人影物联网相关技术培训,促进物联网技术更好应用于基层人影业务之中。三是制定人影物联网系统业务及考核规范,

不断提高人影物联网系统业务化程度,促进人影安全管理、信息采集系统和人影物联网系统融合发展。

物联网技术在人影中的应用,实现了对弹药的全过程跟踪管理,实现了作业和管理信息的自动化采集和传输分析,大大提高了我国人影业务现代化水平,也促进了人影安全管理能力的提升。目前,物联网技术在我国人影业务中的应用整体还处在推广应用阶段,随着物联网技术在人影业务中覆盖度不断扩大和物联网技术的不断提升,物联网技术在我国人影业务中的应用将会越来越广泛,必将为人影科学作业、精准作业和安全作业提供有效的技术支撑。

参考文献

- [1] AutoID Labs homepage. <http://www.autoidlabs.org/>.
- [2] International Telecommunication Union, Internet Reports 2005: The Internet of things. Geneva: ITU, 2005.
- [3] 杜洪礼, 吴隽, 俞虹. 物联网技术在企业供应链管理中的应用研究. 物流科技, 2011, (3): 6-8.
- [4] 诸彤宇, 王家川, 陈智宏. 车联网技术初探. 公路交通科技(应用技术版), 2011, (5): 266-268.
- [5] 林孝平. 物联网技术及其在公共安全领域的应用. 电信快报, 2013, (1): 15-18.
- [6] 朱会霞, 王福林, 索瑞霞. 物联网在中国现代农业中的应用. 中国农学通报, 2011, 27(2): 310-314.
- [7] 陈明选, 徐昉. 基于物联网的智慧校园建设与发展研究. 远程教育杂志, 2012, (4): 61-65.
- [8] 夏于, 杜克明, 孙忠富, 等. 基于物联网的小麦气象灾害监控诊断系统应用研究. 中国农学通报, 2013, 29(23): 129-134.
- [9] 王宏记, 李中华. 基于物联网技术的跨区域气象环境污染监测系统. 计算机测量与控制, 2013, (8): 2259-2267.
- [10] 贾峰, 徐智慧, 简薇薇. 新农村建设服务下物联网农业气象防灾减灾体系研究. 信息系统工程, 2015, (3): 37.
- [11] 钟勇. 物联网在气象灾害预警中的应用. 通信与信息技术, 2012, (2): 78-79.
- [12] 张琦. 基于物联网的智慧气象为农服务系统应用研究. 中国农业信息, 2015, (17): 159.
- [13] 隋莉颖, 王立勋, 杨雪, 等. 物联网技术在道路交通气象领域的应用. 中国交通信息化, 2013, (11): 84-86.
- [14] 郑国光, 郭学良. 人影科学技术现状及发展趋势. 中国工程科学, 2012, 14(9): 20-27.
- [15] 刘伟, 曹焱, 龚茜, 等. 基于物联网的人影作业用弹药管理系统. 电脑知识与技术, 2017, (25): 63-64.
- [16] 李建邦, 周述学, 李爱华, 等. 物联网在安徽省人影业务中的应用. 气象科技, 2014, (6): 1143-1146.
- [17] 刘国强. 物联网技术在贵州人影中的应用. 科技创新导报, 2012, (31): 254-255.
- [18] 刘伟, 田英. 贵州人影作业弹药精细化管理新模式. 贵州气象, 2013, (5): 62-64.
- [19] 左爱文, 刘映宁, 何军, 等. 物联网技术在陕西人影作业装备和弹药全程监控中的应用. 陕西气象, 2018, (3): 37-39.
- [20] 车云飞, 房文, 李宏宇, 等. 物联网在人工影响天气装备弹药管理中的应用. 气象科技, 46(5): 1044-1049.
- [21] 李宏宇, 王华, 贾丽佳, 等. 利用声学方法采集人影高射炮作业数据. 应用气象学报, 2015, 26(5): 590-599.

吉林省一次飞机增雨过程方案设计及效果分析

孙海燕¹ 谷笑楠¹ 王旗^{1,2} 齐彦斌^{1,2}

(1 吉林省人工影响天气办公室, 长春 130062;

2 中国气象局吉林省人民政府人工影响天气联合开放实验室(省重点实验室), 长春 130062)

摘要: 利用多普勒雷达、地面降水、飞机等观测资料, 对2016年4月12日东移北抬影响吉林省的河套低压系统进行人工增雨方案设计和效果分析, 根据作业需求设计了增雨作业实施方案, 选取影响区和对比区, 分析了作业前后雷达回波的变化、地面降水量变化。结果表明: 此次河套低压北上天气系统, 与高空槽配合, 在吉林省境内水汽输送十分丰富, 具有很好的作业条件。通过考虑多种影响因素, 设计了飞行作业方案, 实施作业; 通过影响区和对比区雷达回波对比, 作业后影响区回波具有明显强于对比区回波的特点, 且增加了回波维持时间; 降水量分析显示, 影响区地面降水维持时间也较对比区维持时间增长。

关键词: 增雨, 影响区, 对比区

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.06.019

A Case Study of Design and Effectiveness Analysis of the Rainfall Enhancement by Aircraft in Jilin Province

Sun Haiyan¹, Gu Xiaonan¹, Wang Qi^{1,2}, Qi Yanbin^{1,2}

(1 Jilin Weather Modification Office, Changchun 130062

2 Joint Open Laboratory for Weather Modification of China Meteorological Administration / People's Government of Jilin Province (Key Laboratory of Jilin Province), Changchun 130062)

Abstract: Based on the observation data of Doppler radar, precipitation and aircraft, the design and effect analysis of rainfall enhancement in Meso Scale Vortex in Inner Mougolia Irrigation Area of Yellow River which moved towards Northeast and influenced Jilin Province on April 12, 2016 were carried out. According to the requirements, the implementation scheme of rainfall enhancement was designed. The influence region and the control region were selected. Changes of radar echo and precipitation in these regions before and after the operation were analyzed. Result shows that Meso Scale Vortex in Inner Mougolia Irrigation Area of Yellow River moved towards Northeast and was in cooperation with the upper trough. It brought plenty of vapor to Jilin Province and was with good seeding conditions. By considering many influencing factors, the flight operation scheme was designed and the operation was carried out. By comparing, the echo in the influence region is obviously stronger than that in the control region. Echo maintenance time is increased. The analysis shows that the maintenance time of precipitation in the influence region is also longer than that in the control region.

Keywords: rainfall enhancement, influence region, control region

0 引言

人工增雨作业方案设计和效果检验是人工增雨作业过程中的两个重要环节。科学合理的作业方案设计是作业效果的基础, 作业是否有效果可以验证作业方案设计的合理性。对此, 国内外气象工作者做了大量工作。作业方案设计方面: 李念童等^[1]结合国内

人工增雨飞机的性能, 着重介绍在催化作业和探测时在特定高度上进行水平观测的方案设计; 张永强^[2]针对苏北地区火箭人工增雨作业方案设计进行研究; 刘海群^[3]基于火箭的自身性能特点, 对火箭增雨作业方案进行了研究; 白先达等^[4]分别对各季节、各作业云系的作业进行了总结, 提出了适合不同季节的人工增雨作业方案。效果检验方面: 房彬等^[5]发展了基于聚类的浮动对比区回归统计检验方法(CA-FCM); 曾光平、吴章云^[6]利用雷达资料分析了催化前后宏观参量的变化; 王以琳、雷恒池^[7]通过机载PMS粒子探测系统和GPS卫星定位系统观测, 获得了催化前后云中微物理量变化的证据。

收稿日期: 2018年12月24日; 修回日期: 2019年7月26日
第一作者: 孙海燕(1978—), Email: jl010429@163.com
通信作者: 齐彦斌(1963—), Email: qiyanbin88@126.com
资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406033-05),
国家自然科学基金项目(41775140)

吉林省人影工作者在飞机增雨作业方面做了大量工作。汪学林等^[8]利用吉林机载探测仪器,包括:TPM-1云滴谱仪,TPZ-2含水量仪,铝箔冰雪晶取样器,CM-43和MOS单结管飞机气象计等,在21架次探测中共取得冰雪晶资料469份。冰晶浓度在 $10^2\sim 10^2\text{ L}^{-1}$,平均 12.3 L^{-1} 。雪晶浓度一般集中在 $10^2\sim 10^1\text{ L}^{-1}$,平均为 4.04 L^{-1} 。冰质点浓度随温度的分布:其浓度在 $0\sim -3\text{ }^\circ\text{C}$ 向上增加到 $-3\sim -6\text{ }^\circ\text{C}$ 达到极大,为 32.8 L^{-1} ,往上又单调减少。晶形随高度的分布规律,一般云顶大都由柱状、薄片板状组成。中上部大都由薄片板状、带核心圆盘板状和柱状组成,夹有少量枝星状。云的中下部大都由板状、破碎板状、枝状、破碎枝状、针状等组成。云底大都由针、枝、少量霰及雨滴组成。平均液态含水量的分布:21架次飞行共取得含水量资料582份;平均液态含水量为 $0.12\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,一般在 $0\sim 0.77\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。冰质点浓度在气旋中心北侧比暖锋面和暖锋前明显较高;平均含水量暖锋面是 $0.166\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,比暖锋前和气旋中心北侧都大。暖锋面附近层状云中正温层含水量最大,负温层最小;气旋中心北侧负温层最大;暖锋前正温层最小。在飞机观测方面,游来光等^[9]在吉林利用铝箔取样技术对吉林地区的降水性层状冷云中的冰晶雪晶进行了飞机观测。利用铝箔取样技术,沿飞行航线对云中降水质点连续取样,取样面积为 $4\times 10\text{ cm}^2$,暴露时间 $1\sim 10\text{ s}$ 。取样体积为 $0.28\sim 2.8\text{ m}^3$ 的689份铝箔样片。冰晶垂直分布特点:浓度自云顶向下增加,在云的中下部达到最大,是云层中冰晶浓度垂直分布的一个基本特征。高层云中也观测到在同一高度上冰晶浓度水平分布上有很大的差别。冰晶浓度水平向分布的不均匀和上部云层的发展状况有关。高层云云顶温度和其上部的卷云状况是影响云中冰晶形成的两个基本因子。雪晶浓度值各次飞行间差别也很大,垂直向平均浓度范围在 $7.0\times 10^2\sim 3.0\times 10^3\text{ m}^{-3}$ 。平均看来,在云的上层(一般在 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 层以上 2.5 km),雪晶的平均直径约为 $500\text{ }\mu\text{m}$,至 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 层可达 $1500\text{ }\mu\text{m}$,估计其增长率约为 $0.4\text{ mm}\cdot\text{km}^{-1}$ 。金德镇等^[10-11]总结了吉林省积层混合云引晶试验中的催化层和催化响应层粒子谱特征、过冷水含量变化特征和雷达回波变化特征,分析了飞机播撒液态 CO_2 增雨作业前后云的宏、微观物理结构和降水变化。齐彦斌等^[12-13]利用人工增雨“Y-12E型”飞机,配备有GPS定位数传系统、机载宏观探测设备、King热线含水量仪和PMS云粒子测量系统,对2003年7月8日一次冷涡对流云雨带进行了垂直和水平探测,结合雷达、卫星、地面降水及天气图分析了冷涡的宏

观特征和微观物理结构。汪学林等^[14]对层状云中夹着的对流泡进行系统深入的研究,为人工增雨作业提供依据。刘健等^[15]利用机载云粒子探测系统(PMS)探测资料,对吉林省的一次切变线降水过程的云微物理结构、降水机制进行综合分析。杜鹃等^[16]筛选吉林省的最佳人工影响天气样本集,进行了历史降水天气日云场进行分析。张景红等^[17-18]利用空基微波辐射计获取的探测资料,结合PMS、热线含水量仪等探测资料,利用卫星、雷达、GPS等探测手段的同步观测结果,进行了综合分析,测得吉林省春季各种可实施人工增雨作业的云型的过冷水含量、云体各层微物理结构的变化。

本文选取2016年4月12日吉林省一次飞机增雨作业过程,总结作业方案设计的主要考虑因素,按照一定原则选取对比区,结合雷达资料分析作业影响区和对比区回波变化,根据区域站数据统计作业前后作业影响区和对比区降水变化,对作业效果进行分析。

1 天气形势及作业潜力条件分析

根据4月11日地面天气图分析,河套地区有一低压系统生成,随着系统发展,将逐渐东移北抬影响吉林省(图1a)。根据ECMWF模式预报,在500 hPa与该系统相对应的为一高空槽,12日08时吉林省中部地区处于槽前位置;根据850 hPa风场分析,吉林省中部处于切变前部的西南气流中,对应一个西南水汽输送带,水汽输送条件比较好,850 hPa相对湿度达到80%以上(图1b)。

根据MM5模式预报,4月12日上午,云系覆盖吉林省中部地区,自西南向东北移动,云中有一定量过冷水主要分布在 $0\sim -20\text{ }^\circ\text{C}$ 层(高度在 $1500\sim 5500\text{ m}$) (图2a)。云系从吉林省西南部开始进入白城、四平地区,自西南向东北逐渐发展。随着云系的发展,云层增厚,过冷水含量逐步增大,水汽输送条件较好。4月12日08~14时,吉林省中部地区有增雨作业潜力(图2b)。14时之后增雨作业潜力区东移,吉林省中部地区无增雨作业潜力。

根据4月12日07时长春雷达回波图(图3)可以看出,回波为西南-东北走向,雷达回波顶高在5 km以上;根据模式预报过冷层厚度在2900 m左右,事后根据长春探空数据,08时零度层高度约为700 m,实际过冷层厚度为4300 m。此次作业的对象为较大范围的层状云,具有较厚的过冷层,适宜飞机播撒催化作业。

2 作业方案设计及作业实施

作业方案设计主要考虑以下几方面因素:考虑到

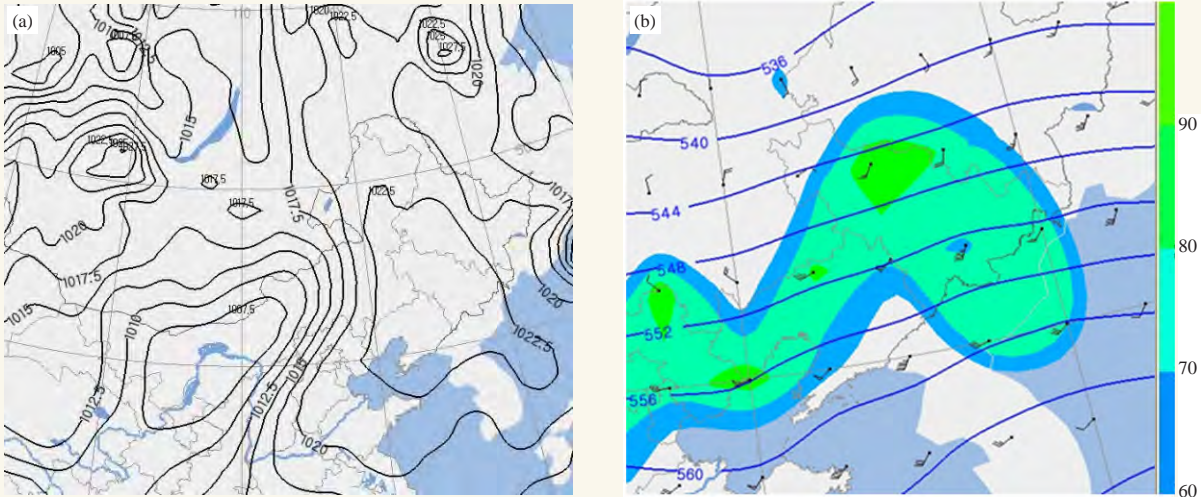


图1 (a) 2016年4月11日08时海平面气压场; (b) ECMWF模式预报2016年4月12日08时500 hPa高度、850 hPa风场、850 hPa相对湿度图
Fig. 1 (a) Surface pressure at 08 BT on April 12, 2016; (b) 500 hPa height, 850 hPa wind and 850 hPa relative humidity at 08 BT on April 12, 2016 predicted by ECMWF model

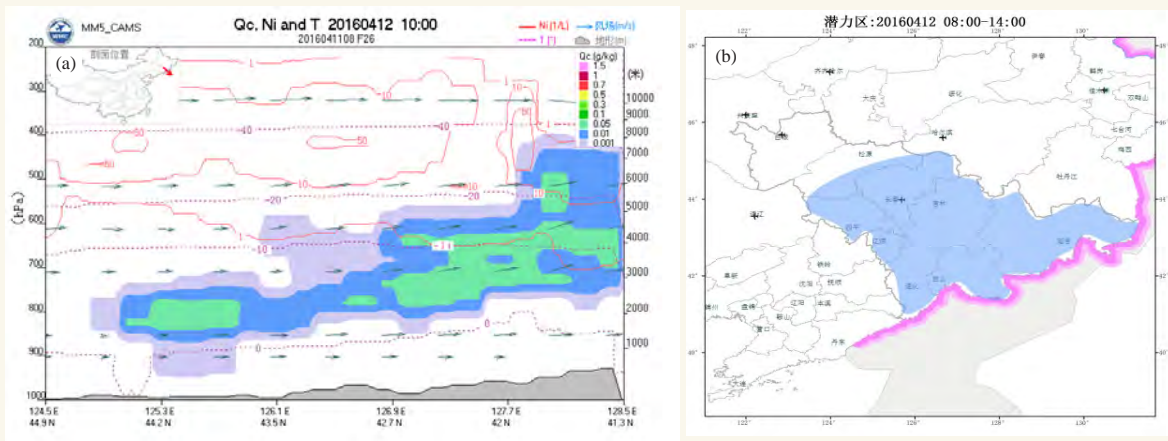


图2 (a) 2016年4月12日10时过冷水分布; (b) 2016年4月12日08~14时增雨潜力区预报图
Fig. 2 (a) Super cooled water at 10 BT on April 12, 2016; (b) Potential areas of rainfall enhancement from 08 to 10 BT on April 12, 2016

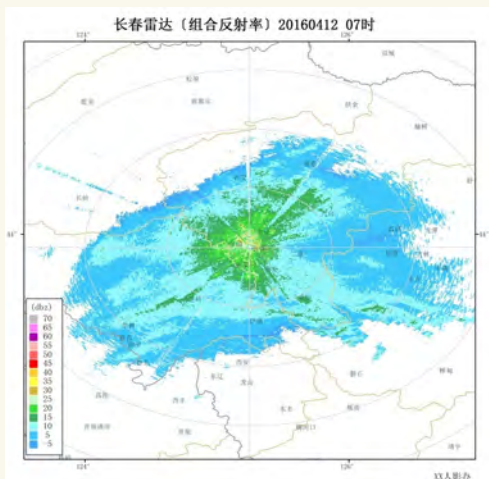


图3 2016年4月12日07时雷达回波图
Fig. 3 Radar reflectivity at 07 BT on April 12, 2016

需求情况,选择吉林省的需水地区;考虑到作业潜力及作业条件,选择增雨潜力及作业条件较好地区作为作业影响区;考虑到云系的移动方向为西南-东北向,作业影响区位置选择为云系进入吉林省的位置,随着云系移动,可将催化剂扩散到下游地区;考虑到作业高度风向为西南风,作业播撒航线要与作业高度层高空风垂直,保证催化剂扩散范围;考虑到播撒的充分性,要在作业影响区域内进行往复播撒,以实现充分播撒,尽量保证作业效果。

分析需水情况,吉林省的需水地区主要为中西部地区;根据前面分析,2016年4月12日08~14时作业潜力及作业条件较好地区为长春、四平及以东的辽源地区;云系进入吉林省的位置为四平、辽源地区,

在此区域播撒，催化剂可以随云系移动向省内的下游地区扩散；因此选取的适宜作业地区为吉林省中部的四平、辽源地区，设计了飞行航线（图4a）。4月12

日08时，飞机从长春机场起飞，在长春伊通以南，辽源、四平公主岭之间区域进行往复播撒，播撒完毕后飞回长春机场，作业结束时间10:50。

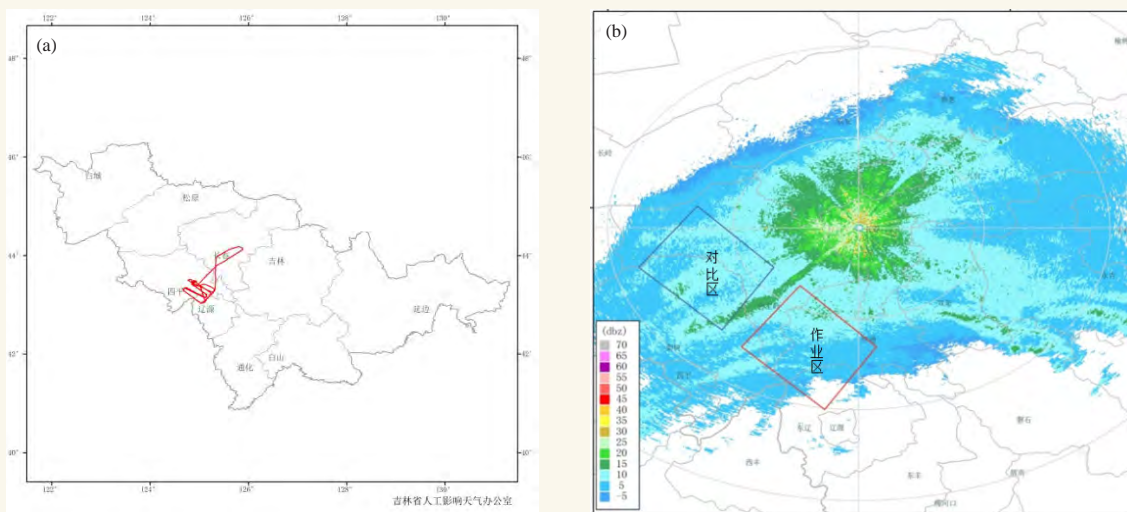


图4 (a) 2016年4月12日飞行航线图；(b) 作业影响区、对比区及2016年4月12日07时雷达回波图
Fig. 4 (a) Flight route on April 12, 2016; (b) The influence region, the control region, and radar reflectivity at 07 BT on April 12, 2016

3 作业效果分析

3.1 对比区选取

为了保证播撒作业不会对对比区产生影响，在作业影响区西北方选取相同面积的区域作为对比区。作业层高空风向为西南-东北方向，作业影响区与对比区的排列方向与风向垂直。作业影响区与对比区之间保留出20 km的区域作为隔离区域，可以保证催化不会影响到对比区。对作业前两区的雷达回波进行对比（图4b），作业前（07时）两区回波强度主要分布在10~25 dBz。作业影响区和对比区10~15 dBz强度回波面积均为1600 km²左右；作业影响区15~20 dBz强度回波面积约为2300 km²，对比区15~20 dBz强度回波面积约为2400 km²；作业影响区和对比区20~25 dBz强度回波面积均约为700 km²。可以看出作业前两区回波强度、面积基本相似，对比区与作业影响区云条件相似，对比区选取较为合理。

3.2 作业后回波变化分析

作业刚开始时（08时），作业影响区回波分布与作业前相比变化不大；对比区10~15 dBz回波面积较作业前减小到1100 km²，5~10 dBz回波面积较作业前增加到700 km²，总体看15 dBz以下回波面积较作业前变化不大；作业影响区和对比区15 dBz以上各强度回波分布类似，与作业前相差不大。

作业期间，对作业影响区雷达回波剖面进行分

析（图5）。在作业开始时（08:18），在飞机播撒位置，作业高度上，有一回波强度大值区，回波强度大值区并未及地。随着作业的持续进行（08:34、08:44），该回波强度大值区高度逐渐下降，且强度逐渐加强，说明云中粒子逐渐增多且向下降落。至09:16，该回波强度大值区及地，说明已经出现地面降水。09:00—09:40期间，相对于对比区，影响区垂直累积液态水明显消耗。但两区整体回波顶高已经明显下降，云系处于减弱阶段。

作业后，作业影响区和对比区回波差异明显（图6）。对比区回波作业后较作业前及作业开始时明显减弱，云中基本无强回波，只剩15 dBz以下弱回波；作业影响区回波明显强于对比区，较作业前及作业开始时有所增强，主要体现在20 dBz以上强度回波面积由900 km²增加到1800 km²。

3.3 作业前后雨量变化分析

通过作业前、作业期间、作业后1 h降水量站数对比（图7）发现，作业开始前（07时），作业影响区主要为5 mm以下降水，只有一个站出现了5 mm以上降水，对比区9个站出现了5 mm以上降水，远多于作业影响区；作业影响区平均降水量小于对比区。作业期间（09~10时），作业影响区降水有所增加，3个站出现了5 mm以上降水，对比区5 mm以上降水站数逐渐减少；作业影响区平均降水量较作业前增加，对

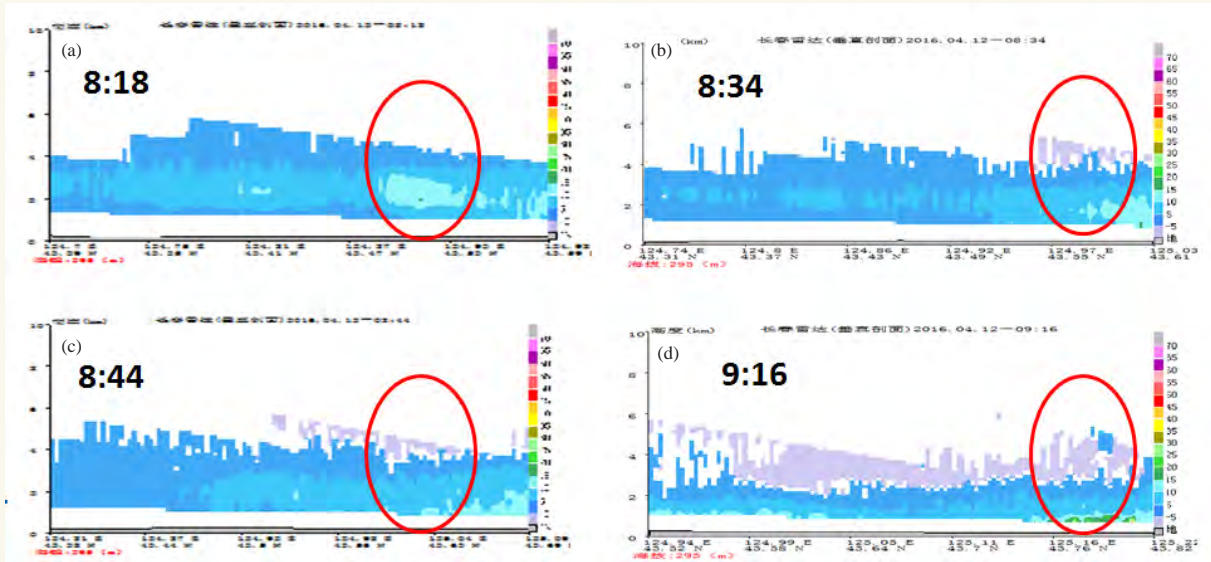


图5 作业期间不同时刻雷达剖面图

(a) 08:18; (b) 08:34; (c) 08:44; (d) 09:16

Fig. 5 Section of radar reflectivity at 08:18, 08:34, 08:44, and 09:16 BT during the seeding time

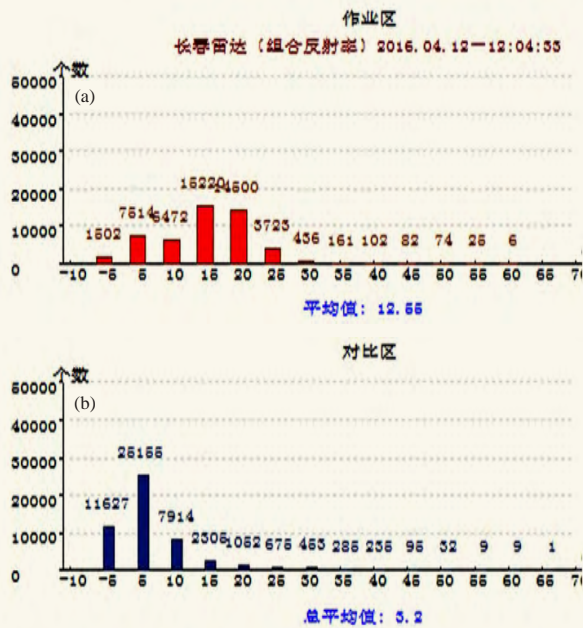


图6 作业后，影响区与对比区雷达回波强度分布图

Fig. 6 Distribution of radar reflectivity in the influence region and control region after seeding

对比区平均降水量呈减小趋势，低于作业影响区。播撒作业2 h后（12:00），两区雨量都处于减少趋势，作业影响区雨量一直高于对比区；作业结束后1 h，对比区降水趋于结束，作业影响区仍有降水维持。

4 结论

此次飞机增雨作业是在河套低压和高空槽影响下，作业影响区处于槽前的西南水汽输送带的天气背

景条件下开展的。考虑吉林省的需水地区主要为中西部地区，根据天气形势分析，吉林省中部处于切变前部的西南气流中，对应一个西南水汽输送带，水汽输送条件比较好。根据模式预报的云微物理结构分析，云系覆盖吉林省中部地区，自西南向东北移动，云中有一定量过冷水主要分布在0~-20℃层（高度为1500~5500 m），随着云系的发展，过冷水含量逐步增大，有较好的作业潜力。根据云系条件分析，此次作业过程为较大范围的层状云，具有较厚的过冷层，适宜飞机播撒催化作业。云系进入吉林省的位置为四平、辽源地区；因此选取的适宜作业地区为吉林省中部的四平、辽源地区。

垂直作业层的高空风向，在作业影响区西北方选取相同面积且回波发展类似区域作为对比区。两区之间保留出20 km的区域作为隔离区域，保证催化不会影响到对比区。

通过对作业影响区和对比区雷达回波对比，发现作业过程中作业影响区云中大粒子逐渐增多且向下降落，作业影响区垂直累积液态水明显消耗。作业后，两区回波均处于减弱阶段，但作业影响区回波明显强于对比区，回波维持时间更长。

作业开始前，作业影响区降水量小于对比区；作业过程中，影响区降水呈增加趋势，对比区雨量呈减少趋势；作业结束后，对比区降水趋于结束，作业影响区仍有降水维持。此次催化作业影响了云中微物理过程，消耗云中过冷水，使地面降水增加，同时，增

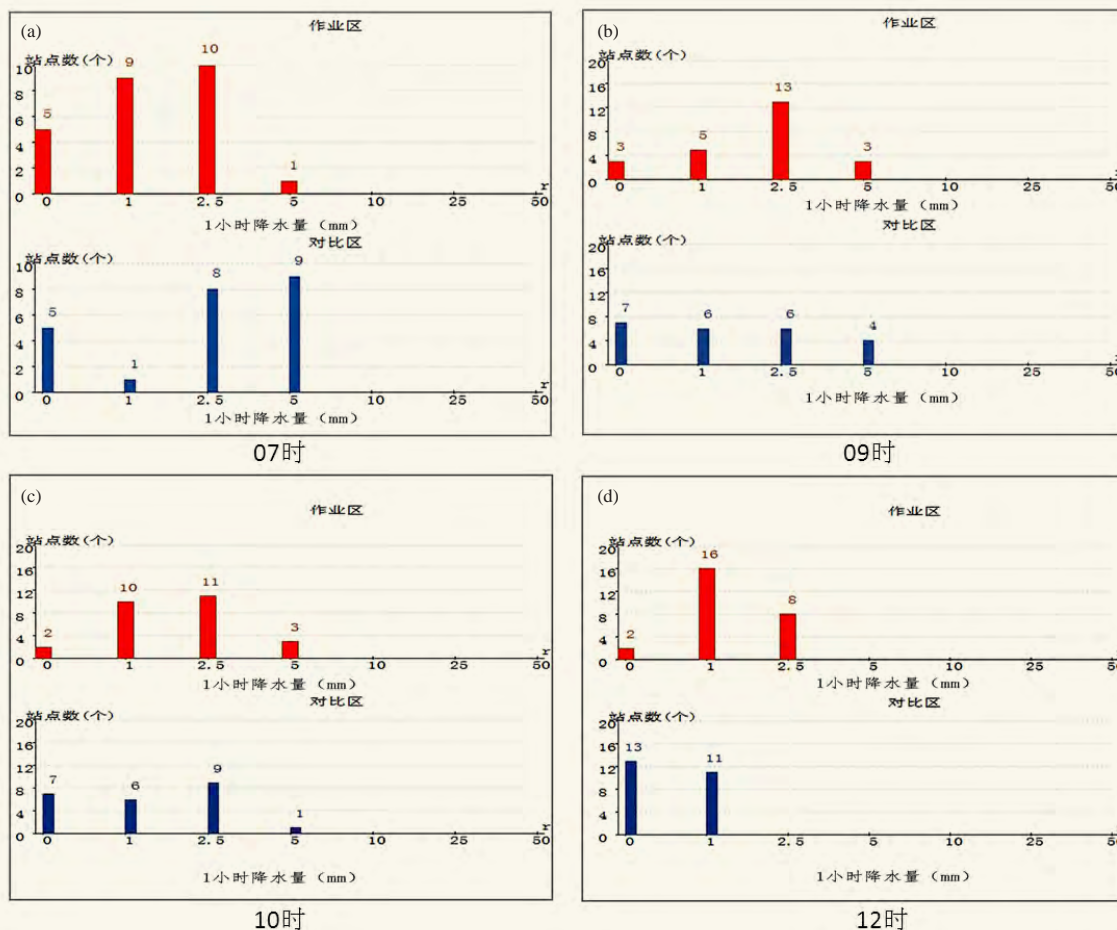


图7 影响区与对比区1 h降水量的站点数变化图

(a) 07时 (作业前); (b) 09时 (作业期间); (c) 10时 (作业期间); (d) 12时 (作业后)

Fig. 7 Numbers of stations with different amounts of one-hour rainfall in the influence region and control region before seeding (07BT), during seeding (09BT, 10BT), and after seeding (12BT)

加了降水的维持时间,起到了正效果。

参考文献

[1] 李念童, 李铁林, 郑宏伟. 河南省飞机人工增雨试验方案设计. 应用气象学报, 2001, 12(s1): 200-205.
 [2] 张永强. 苏北地区火箭人工增雨作业方案设计. 全国云降水物理和人工影响天气科学讨论会, 2000.
 [3] 刘海群. 火箭增雨作业方案设计的探讨. 中国气象学会年会, 2004.
 [4] 白先达, 张雅昕, 杨经科. 广西桂林人工增雨抗旱作业方案设计. 灾害学, 2013, 28(1): 98-101.
 [5] 房彬, 肖辉, 王振会, 等. 聚类分析在人工增雨效果检验中的应用. 南京气象学院学报, 2005, 28(6): 739-745.
 [6] 曾光平, 吴章云. 人工降水. 福建科学技术出版社, 1996: 167-169.
 [7] 王以琳, 雷恒池. 冷云飞机人工引晶检验. 大气科学, 2003, 27(5): 929-938.
 [8] 汪学林, 陆煜钧, 李占柱, 等. 河套低压降水性层状云的云雨特征. 大气科学, 1982, 6(10): 432-441.
 [9] 游来光, 熊光莹, 高明忍, 等. 春季吉林地区层状冷云中冰雪晶的

形成和增长. 气象学报, 1965, 35: 423-438.
 [10] 金德镇. 人工增雨催化物理验证//中国气象学会2005年年会论文集. 中国气象学会, 2005: 12.
 [11] 金德镇, 雷恒池, 郑娇恒, 等. 液态CO₂进行层云催化效果的观测分析//中国气象学会2005年年会论文集. 中国气象学会, 2005: 12.
 [12] 齐彦斌, 郭学良, 金德镇. 一次东北冷涡中对流云带的宏微物理结构探测研究. 大气科学, 2007, 31(4): 621-634.
 [13] 齐彦斌. 东北冷涡积层混合云系统结构降水机制的观测和数值模拟研究. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2008.
 [14] 汪学林, 秦元明, 吴宪君, 等. 层状云中对流泡特征及其在降水场中的作用. 应用气象学报, 2001(S1): 146-150.
 [15] 刘健, 齐彦斌, 蒋彤, 等. 切变线降水系统微物理特征及降水机制个例分析. 气象科技, 2008, 36(4): 396-399.
 [16] 杜娟, 高凤岐, 王超颖, 等. 吉林省西部明显降水天气云场及有利飞机作业天气统计分析. 吉林气象, 2005(3): 25-28.
 [17] 张景红, 谷淑芳, 郑娇恒. 2004年空基微波辐射计在吉林省探测分析. 吉林气象, 2005(3): 16-18.
 [18] 张景红, 郑娇恒, 谷淑芳. 一次典型积层混合云降水的综合探测分析. 吉林气象, 2004(3): 6-8, 36.

吉林省人工影响天气地面业务现状及发展需求分析

邢凤娟¹ 许乐² 穆清晨¹ 王德鑫¹ 崔红¹

(1 吉林省人工影响天气办公室, 长春 130062; 2 吉林省气象局, 长春 130062)

摘要: 通过对700余份2018年吉林省人工影响天气地面作业人员调查问卷分析, 辅以实地调查和电话调查, 分别从年龄分布、文化程度、职业状况、从业时间等四个方面分析当前地面人影作业人员现状; 从作业站作业人员数量、人身保险及劳动保护情况等方面分析地面作业站现状; 从作业指挥、作业能力、监管能力等方面分析地面人影现代化业务现状, 进而综合提出吉林省地面人影业务发展需求分析。

关键词: 人工影响天气, 地面, 现状, 需求分析

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.06.020

Analysis of the Current Ground Weather Modification Operation Situation and Development Demands in Jilin Province

Xing Fengjuan¹, Xu Le², Mu Qingchen¹, Wang Dexin¹, Cui Hong¹

(1 Jilin Weather Modification Office, Changchun 130062 2 Jilin Province Meteorological Bureau, Changchun 130062)

Abstract: Based on more than 700 questionnaires as well as field and telephone surveys about ground operators in Jilin province ground weather modification operation in 2018, this paper analyzes the current general situation of ground operators on 4 aspects: age distribution, education level, occupational status and working time. This paper also analyzes the current situation of ground operation stations on the number of operators, personal insurance as well as the labor protection, and the current ground modernization service on the operation command ability, operation ability and supervision ability. Then, it puts forward the demand analysis of the development on the ground weather modification operation in Jilin province.

Keywords: weather modification, ground, status, demand analysis

0 引言

自1958年我国第一次飞机播撒人工增雨试验在吉林省开展以来, 人工影响天气在吉林抗旱增雨、防雹减灾、森林防扑火、水库蓄水和生态文明建设等方面发挥了重要作用。吉林省人影开展地面作业始于1972年, 主要是高炮防雹, 当时只有2门高炮。20世纪90年代以后, 人影业务需求不断扩大。目前, 吉林省共建成了544个标准化地面作业站, 配备了238门“37”型高炮、510部增雨火箭架和12套增雨燃烧炉。地面作业人员也由20世纪90年代的300余人增加到目前的1000多人。本文旨在通过分析吉林省地面人影作业人员、地面作业站和地面人影现代化业务现状, 探讨分析地面人影业务未来的发展需求。

1 资料来源

1.1 问卷调查

面向2018年吉林省人影地面作业人员全员培训9个班次的学员, 发放调查问卷800份, 收回有效问卷

728份。

1.2 实地调查

2018年吉林省人影安全大检查期间, 到公主岭市大榆树、榆树市青顶山、敦化市新立、东丰县永乐、集安市新开河、吉林市取柴河等36个人影地面作业站实地调研; 9月27—28日, 到松原市、长岭县基层调研; 10月21—27日, 深入吉林大荒地、敦化黑背村防雹站、二道白河森林防火作业点、龙井华龙集团苹果梨防雹站等7个基层站点开展专题调研。

1.3 电话调查

针对调查问卷中的疑问或问题, 开展了26次电话回访和核实。

2 地面人影业务现状及分析

2.1 人员现状

目前, 吉林省各地共有高炮作业人员496人, 火箭作业人员671人, 既是高炮作业人员又是火箭作业人员的162人。

2.1.1 年龄分布

从年龄分布示意图(见图1a)中可以看到, 当

收稿日期: 2018年12月25日; 修回日期: 2019年1月10日
第一作者: 邢凤娟(1979—), Email: 1053204964@qq.com

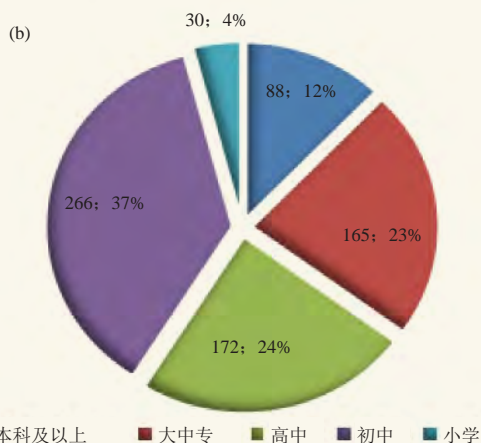
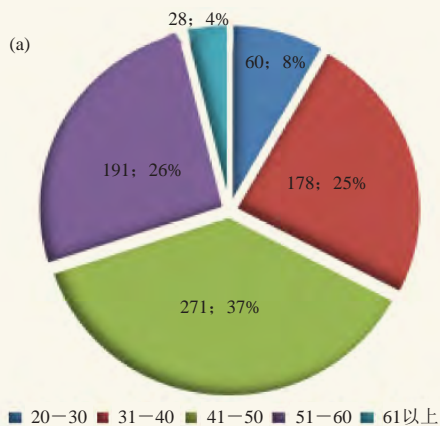


图1 地面人影作业人员年龄 (a) 和文化程度 (b) 分布示意图

Fig. 1 (a) Percentages of the ground operators' age and (b) percentages of the ground operators' educational levels

前全省地面人影作业人员比重最大的为41~50岁, 占37%, 其次为51~60岁和31~40岁, 分别占26%和25%, 20~30岁为8%, 一些乡镇存在人员缺乏的实际困难, 尚有4%左右的61岁以上人员在坚持工作。

2.1.2 文化程度

从图1b来看, 初中文化程度占比最大, 为总人数的37%, 其次分别为高中和大中专, 分别占总人数的24%和23%, 本科及以上学历人员较少, 仅占总人数的12%, 大部分为气象职工和乡镇干部。小学文化的人员占4%。在基层作业点有四成以上是初中及以下文化程度。

2.1.3 职业状况

从人员的职业状况示意图可以看到(图2a), 当前地面人影作业人员以农民为主, 农民加种养大户占总人影作业人员的一半以上, 乡镇干部和气象职工, 占三成, 另外村干部占比13%, 也有约3%左右的基层民兵。

2.1.4 工作年限

从作业人员从事人影工作年限来看(图2b), 3~5年的最多, 占30%, 其次是10年以上的, 占

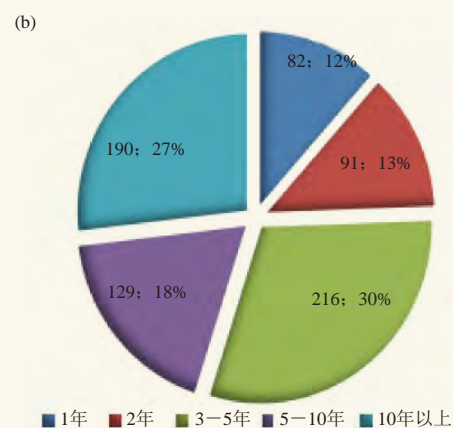
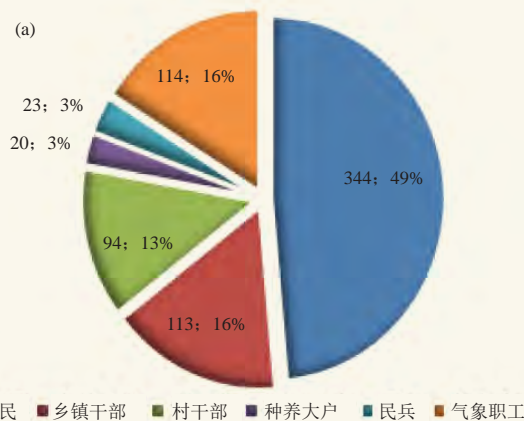


图2 地面人影作业人员职业状况 (a) 和工作年限 (b) 分布示意图

Fig. 2 (a) Percentages of ground operators' professions and (b) percentages of ground operators' working years

27%, 其中工作年限最长的达40年以上, 工作年限在5~10年的人数占总人数的18%, 工作年限为2年和1年的分别占13%和12%。

2.2 作业站现状

2.2.1 作业站人员配备

大部分有高炮的防雷作业站配备4名作业人员, 其他作业站多配备3名作业人员, 占比为69%。个别火箭作业站仅配备了2名作业人员, 个别新建作业站因无法配备符合条件的作业人员而无法投入使用。

2.2.2 劳动合同、人身保险及劳动保护

据不完全统计(图3), 有66%的作业人员与当地主管部门签订了劳动合同, 88%的人员配备了较为完善的劳动保护工具, 91%的作业人员购买了人身保险。

2.3 地面人影业务现代化现状

经过几十年的不懈努力, 吉林省地面人影业务能力和水平都得到了显著提升, 地面业务指挥、地面作

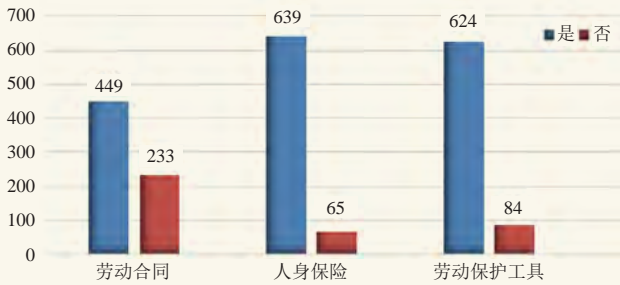


图3 吉林省地面人影作业站人员劳动保护情况统计图
Fig. 3 Labor protection of personnel at the ground operation stations in Jilin province

业、安全监管等方面的现代化水平不断提高，为地面人影业务的进一步发展奠定了良好基础。

2.3.1 地面人影指挥现代化

充分利用省市县一体化的CPAS人影作业指挥系统，从过程预报到潜力预报，为地面人影提供及时的业务指导。通过人影防雹三维作业指挥业务系统，实现了人影高炮、火箭立体防护范围与天气雷达二次产品资料的同步显示，保障了地面人影作业的高效性，提高了地面人影作业效率。

目前，全省共建风廓线雷达3个、激光雨滴谱仪20个、微波辐射计4个、移动双偏振雷达1个、全自动探空仪1个、土壤水分站40个，为地面人影业务的需求分析、指挥指导提供了全面的数据保障。

2.3.2 地面人影作业现代化

近年来，吉林省不断探索地面人影业务发展，为了解决部分地区空域申报难题，布设了燃烧炉12套，同时引进了燃气炮2部。目前全省共建成标准化地面作业站544个，拥有“37”型高炮238门、增雨火箭架510部，其中新型智能化体播撒火箭发射系统221部。

为了提高空域审批效率，解决电话申请审批工作效率低、模式落后等问题，2018年空域申报系统在全省范围开始试运行，空域申报系统的应用，使吉林省地面人影业务向现代化方向迈进了一大步。

2.3.3 地面人影安全监管现代化

为了加强对地面人影作业站的安全监管，2015年吉林省在全部人影作业站点安装了实景监控系统。2018年开始部署人影装备弹药物联网监管系统，实现了对人影弹药的全程、规范、自动化、实时监控和管理，有效提升了吉林省人影安全管理的科技水平和业务现代化程度。

3 发展与需求分析

3.1 加强领导、加大经费投入力度

健全组织领导体系。切实落实主体责任，加强组

织领导，完善领导体系，落实领导责任制。建立相应的管理体制和工作机制，落实必要的机构、编制和工作经费。推进人影经费投入并稳定增长的机制。按照有关人民政府批准的人工影响天气工作计划开展的人工影响天气工作属于公益性事业，所需经费列入该级人民政府的财政预算。鼓励社会资金参与，推动建立主要受益行业投入的机制。加强资金管理，提高使用效益。努力实现基层作业人员的人身保险、劳动合同和劳动保护全覆盖。尽力缩小基层作业人员之间待遇差距，确保队伍稳定。

3.2 强化培训，不断提升现有人员能力

加大对作业人员的培训力度。切实加强培训工作，注重实际操作，严格考核，确保人员合格上岗^[1]。针对县级技术骨干举办提高班，按照师资培训标准，请武器装备专业和有操作经验的教师授课，达到以点带面的效果。开展县级业务交流培训。在省级全员培训的基础上，在作业季前和季中组织开展实用技术培训，交流作业心得，普遍提高作业人员的作业能力和水平，以适应人影现代化的不断发展。

3.3 多措并举，建立符合实际的长效机制

探索人影作业站的撤、改、建机制。按照基层的实际需求，制定符合实际的撤、改、建办法，规范报批等业务流程，推进地面人影业务作业工作健康有序发展。探索吸引人才的机制。根据实际，积极探索制定吸纳高学历的人员从事基层人影工作的制度，在政策和待遇等方面给予优惠政策，努力改善人员结构、提高业务能力、提升作业效率。探索集约式作业队伍模式。在确有困难的地区，按照规范统一选拔人员组建作业大队，探索集中管理，按照需求采用移动式火箭增雨为主、固定作业站为辅，开展人员集约式的增雨作业模式。探索拓展社会化专业服务渠道，提高人工影响天气装备检测维修等社会化保障水平^[2]。

3.4 加强宣传，营造事业留人的良好氛围

充分利用各类科普教育的设施、媒体和活动，提高全社会对人工影响天气的科学认识。大力宣传人工影响天气取得的积极成效，努力营造促进其健康发展的社会氛围。开展人影服务于人民、服务于社会、服务于各行各业的宣传工作，争取公众的认同和支持，吸引文化层次高、责任心强的同志加入基层人影作业队伍。

参考文献

- [1] QX/T 297-2015, 地面人工影响天气作业安全管理要求。
[2] 马官起. 人工影响天气安全管理. 西安: 西北工业大学出版社, 2016.

发展精细化行业气象服务的初步思考

■ 谢静芳 李云峰

精细化预报业务开展已经十余年，但精细化行业气象服务的发展仍处于起步阶段，尤其能源电力、交通等重点行业，预报产品的时空分辨率和可用性还比较有限，服务内容和形式还有待优化和改进。应学习借鉴奥运气象服务等国内外成功经验，创新理念和发展思路，创新谋划服务体系，创新服务技术研发，建立有利于精细化行业气象服务发展的服务体系。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.06.021

近些年来，在精细化行业气象监测和预报业务的支撑下，面向公众和行业的精细化气象服务得到迅速发展，开展了不同形式的精细化气象服务。比如：基于用户位置的手机APP天气预报服务，基于GIS系统为行业用户提供指定位置的气象信息服务，基于交通沿线天气信息开展的交通气象服务等。形成了以精细化预报业务产品为主要支撑的精细化行业气象服务发展模式。

随着精细化行业气象服务的发展，长期以来形成的以预报业务产品为主要支撑的行业气象服务发展模式，在精细化发展过程中面临着新的压力和挑战。尤其是在能源电力、铁路交通等行业，精细化行业气象服务对精细化预报产品的需求，已经超过了当前精细化气象预报业务产品的范畴，单纯依靠现有的精细化气象预报业务产品，已经难以满足用户的需要。应围绕重点行业服务需求，基于先进的数值模式、多模式集成、多源数据融合、机器学习等技术，提高精细化预报产品对行业服务的支撑能力，更好地满足精细化行业气象服务发展的需求。

在数值预报、计算机和通信技术飞速发展、精细化行业气象服务需求不断增长的背景下，总结精细化行业气象服务发展历程和现状，分析存在的问题和精细化行业气象服务的发展需求，思考精细化行业气象服务的发展途径，对于建立和完善精细化预报产品和服务技术支撑体系，发展具有国际先进水平和竞争实力的行业气象服务具有重要意义。

1 精细化行业气象服务发展概述

精细化行业气象服务，是在行业需求引导下、在精细化天气预报支持撑下，逐步发展起来的。精细化

数值预报技术的发展，精细化业务预报产品的支撑，对精细化行业气象服务的发展都具有十分重要的基础性和决定性作用。

1.1 精细化行业气象服务初步发展

从20世纪80年代开始，从供热采暖、粮食晾晒到电力、交通等各行业，我国专业气象服务逐步发展起来。到21世纪初，以用户的群体性和行业化服务需求为主要特征的电力、交通等行业气象服务得到快速发展。这一时期，基于预报业务产品的支撑，服务产品主要是城市站点或者区域范围的、日的或更长时间的气象要素量值或等级的预报。

精细化行业气象服务始于2005年前后。这一时期，尽管数值模式对天气形势的预报水平已经超过了有经验的预报员。但其要素预报能力和可用性仍然有限，对暴雨、强对流等天气，尚不能提供可用的预报。基于数值模式的物理量预报，采用天气学和统计学释用的方法，制作的精细天气要素预报等精细化预报产品，成为行业气象服务的主要内容。同时，在道路交通等领域，研究总结天气对行业气象灾害或事件的影响，建立天气模型和天气指标，使电力、交通等行业气象服务，在天气预报业务产品的基础上得到了进一步深化，形成了基于天气影响并有别于预报业务产品的行业气象服务产品。

1.2 基于预报业务产品的行业气象服务

2010年以后，随着欧洲ECMWF细网格预报模式、美国WRF中尺度数值模式、我国T639、GRAPES等数值预报模式的发展和业务应用，模式预报的气温、降水、风速等气象要素预报性能和时空分辨率显著提高，暴雨等灾害性天气的强度和落区预报的可用

收稿日期：2018年11月15日；修回日期：2019年8月1日

性显著改进。国家气象中心和省级气象台，先后开展了空间分辨率为 $10\text{ km}\times 10\text{ km}$ 、预报时段为24 h的降水落区和灾害性天气落区预报业务和精细化网格预报释用。

与此同时，行业气象服务也得到显著发展。互联网、大数据、移动通信等技术在行业气象服务中得到更广泛应用，基于时空分辨率更精细的气象要素预报产品，开展了基于用户位置的天气信息服务和交通气象服务。

2017年，中国气象局提出应用智能网格预报业务产品，开展精细化行业气象服务的要求，推动了精细化格点预报产品在行业气象服务中的应用，以精细化预报业务产品为支撑，公路和铁路沿线天气预报等基于位置的行业气象服务陆续开展起来。

1.3 2008年奥运气象服务

为奥运会及其他体育运动和赛事活动提供的气象服务，也属于行业气象服务，但2008年奥运气象服务发展之路不同于其他行业。依靠为奥运气象服务建立的精细化监测、预报和服务体系，奥运气象服务在较短时间内实现了服务能力的跨越发展。

1.3.1 服务需求

根据国际奥委会的要求，奥运会天气预报要做到一天至少4次滚动更新、每3 h一次预报，个别情况下每1 h一次预报，预报的气象要素包括气温、湿度、风速、风向等要素的定量预报。奥运会气象服务需求，在时空精细度、要素预报内容和定量化预报等方面，已经超出了当时的短期和短临天气预报业务产品的范畴。

1.3.2 服务体系建设

围绕奥运会精细化服务需求，开展了全面系统的预报和服务体系建设。包括：开展精细化观测系统、精细化模式、精细化预报预警和服务系统的建设和开发；开展数值预报天气学、统计学释用，将自动气象站、浮标站、边界层风塔、风廓线雷达、新一代Doppler气象雷达 VAD风资料同化进模式，建立以天气雷达、风廓线雷达、浮标站、自动站等为依托的气象综合探测系统；实现了赛场及其周边高时空分辨率的立体化探测；引进了高性能计算机系统，建立了以多种数值预报模式为基础的精细化短期、短时预报预警系统；形成了以精细化数值预报模式、业务平台、服务系统、技术研发为支撑的预报业务和服务体系。

1.3.3 服务发展模式

2008年奥运会气象服务，应用了先进的气象监测设备、数值模式、预报技术、信息服务技术等，创立

了发展精细化行业气象服务的经典范例。

当前，行业气象服务精细化、个性化发展趋势日趋显著，对精细化预报产品的需求也日趋迫切。长期以来形成的以预报业务产品为主要支撑的行业气象服务发展模式，在精细化发展过程中面临着新的压力和挑战。尤其是在能源电力、铁路交通等行业，精细化行业气象服务对精细化预报产品的需求，已经超过了当前精细化气象预报业务产品的范畴，单纯依靠现有的精细化气象预报业务产品，已经难以满足用户的需要。回顾和总结奥运气象服务的发展模式和成功经验，深刻认识精细化数值预报技术和精细化预报产品的重要支撑作用，对于明确精细化行业气象服务发展思路，建设和发展精细化行业气象服务体系等，都具有重要参考价值 and 科学指导意义。

2 精细化行业气象服务现状

精细化预报业务开展已经十余年，但精细化行业气象服务的发展仍处于起步阶段，尤其能源电力、交通等重点行业，预报产品的时空分辨率和可用性还比较有限，服务内容和形式还有待优化和改进。

2.1 以预报业务产品为支撑的服务模式

本文中，精细化预报业务产品是指根据中国气象局对气象部门天气预报业务的有关规定，由各级气象台站制作和发布的精细化气象预报产品，包括2006年开始的精细化天气预报业务产品、2017年到目前的智能网格预报业务产品，以及2020年发展规划中的业务预报产品等。精细化数值模式预报产品是指研究运行或业务运行规定之外的数值预报模式提供的精细化格点气象预报产品。

在行业气象服务发展过程中，短时、短期、中期和长期天气预报以及灾害性天预警等预报业务产品，是支撑行业气象服务的主要预报产品。精细化行业气象服务，尤其是省级气象部门开展的精细化行业气象服务，则主要是以精细化预报业务产品为支撑。开展的精细化行业气象服务主要包括：基于GIS系统和交通线路位置的交通气象服务，其他行业用户基于指定位置的气象信息服务等。

尽管国家和省级气象部门研发和运行的数值模式预报产品，以及快速循环同化系统的短临预报产品，在时空分辨率和计算更新时次上，都超过了预报业务产品的规定，但其为精细化行业气象服务提供预报产品和发展支撑的能力还非常有限。

近年来，以精细化预报业务为主要支撑的行业气象服务模式，开始遇到前所未有的需求挑战。电力能源、铁路交通等行业，对精细化气象服务需求发展

迅速，基于自身行业生产、安全和发展的需要，一些行业部门或气象服务公司，开始建设和发展自己的精细化数值预报模式和气象服务系统，以满足行业气象服务的需求。其精细化预报产品的时空分辨率、计算更新时次，尤其是短临数值预报等技术性能指标，更接近用户的需求，服务产品更对接用户的应用场景。基于预报业务产品和气象阈值的精细化行业气象服务，在服务市场的竞争与服务能力的发展中，正面临严峻挑战。

近年来，中国气象局公共气象服务中心致力于发展支持行业气象服务的精细化数值预报业务，提供时空分辨率、预报准确率和计算更新时次更加优化的精细化格点预报和服务产品。2019年，公共气象服务中心基于多个全球数值模式预报产品、国家气象中心5 km智能网格预报产品、省市气象台上传的县级城市主观预报产品、逐小时地面实时观测资料，应用时空降尺度、模式误差滚动订正、多模式变权重集成、主客观预报融合、逐时实况滚动订正24 h预报等技术和方法研制的精细化预报服务产品制作系统，提供给全球任意位置需求点的15 d内不同时效不同时间分辨率（24 h内逐小时预报基于实况逐时滚动订正更新，2~3 d逐小时预报、4~10 d 3 h预报和11~15 d逐12 h预报每日4次更新）、实况与预报一致的预报服务产品。在此基础上，基于气象中心智能网格预报产品，应用机器学习降尺度方法，加工全国范围0~24 h 1 km逐小时降水预报产品。以全国实时气象雷达、气象卫星数据和地面分钟降水观测资料为基础，基于气象学原理，以快速循环为理念，应用人工智能技术，通过并行计算和大数据处理技术加工，形成天气雷达分钟降水产品，其时间尺度上精细到5 min、空间尺度上精细到街道。大幅度提升气象服务数据的可用性与易用性，以满足公共气象服务中心短临预报和气象服务应用的需求。

对于多数省级气象部门来说，由于缺乏研发运行数值预报模式等精细化预报技术的能力，对于本地的行业用户精细化服务需求难以及时有效响应，在一定程度上制约了行业气象服务的发展。依靠引进和运行先进的数值预报模式，虽然能解决一时之需，但若形成持续的发展支撑，在资金、技术、人才等方面都存在困难。

2.2 以要素预报产品为主的行业服务

近年来，随着数值预报技术的发展，预报时空分辨率和定量化预报能力不断提高，精细化要素预报产品也成为了精细化服务产品的主要内容。目前，精细

化行业气象服务主要是在预报产品中增加了行业用户的位置，或者提供基于用户位置的实时定量预报等，除了预报的时空分辨率以外，预报内容和产品形式等，与公众气象服务产品的差异越来越小。

2.3 精细化预报产品准确性的影响

精细化预报产品的时空分辨率显著提高，并且对气温等连续分布的气象要素也有较好的预报能力，但对于分布不连续的强对流等突发灾害天气，其预报准确率和可用性仍然有限。因此，虽然有了精细化的预报业务产品，但对于暴雨、暴雪、大风、雷电等灾害天气，目前的精细化预报业务产品还难以直接应用于精细化行业生产和精准防灾，为行业用户提供的仍然是区域的和气象阈值的预报服务产品。如何将准确性有限的精细化预报产品，更有效地应用于精细化行业气象服务，也是目前需要研究解决的主要技术问题。

2.4 沿用传统服务技术和方法

在应用精细化预报产品的同时，缺乏相应的精细化气象服务技术研发和应用。这种状况不仅影响了精细化气象服务的有效性，也影响了精细化行业气象服务的发展。

一是在基于影响的气象服务方面，缺少与精细化用户特征相结合的精细化气象服务指标。有的行业气象服务，将基于用户位置的精细化预报，与现有的宏观综合气象服务指标相结合，提供影响等级提示和服务指南。由于现有的行业气象服务指标，是基于较大范围和较长时间内的历史灾害事件与历史天气事件的关系建立的，其影响程度和等级由固定的天气要素阈值确定，对于具体位置、具体对象和具体环境特征而言，缺乏精准性。比如：在高速公路上，同样的降雨量和降雨强度，对于排水不畅的汇水区低洼路段和排水性好的高岗路段，对交通产生的影响是完全不同的，精细到路段的天气预报，必须与精细区分的路段特征相结合，才能制作出精细影响的服务产品。因此，应用现有的宏观综合气象服务指标，不仅无法实现精细化的行业气象服务，反而可能给出错误的天气影响提示和服务建议。

二是在服务产品的内容、形式和展示方面，缺乏对精细化预报数据和服务信息的可视化产品的设计研发。产品内容和形式等，多数仍然沿用传统的技术方法，比如：对于时空更精细的定量降雨预报产品，仍然采用区域降雨量等级色斑图，在城市位置展示站点信息等传统的信息显示方式等。信息展示内容比较单一、传统，信息量少、展示精度低，也没有与用户的天气信息应用场景相结合，用户难以从精细预报数据中，精准辨识和高效获取所需的关键天气和行业影响信息。

3 精细化行业气象服务发展需求

基于精细化气象预报发展精细化行业气象服务，其需求主要体现在以下几个方面。

3.1 满足发展需求的精细化预报支撑

尽管精细化气象预报业务产品，对于很多行业气象服务来说，仍然是精细化气象服务的重要支撑。但对于铁路交通、电力能源等行业气象服务，气象预报业务产品的支撑能力明显不足。比如：铁路防洪需要逐个路段的逐1 h甚至更短时间更新的降雨量实况和临近预报，高铁列车运行需要列车位置的分钟量级大风监测和临近预报等。

要发展具有国际先进水平和竞争实力的精细化行业气象服务，必须首先解决精细化预报产品的支撑问题。针对能源、交通等重点行业气象服务领域，围绕行业气象服务需求和发展，在国家层面上建立发展战略，推动先进的数值预报模式、快速循环同化预报系统、多模式集成、多源数据融合、机器学习等的最先进的技术研究和成果的应用，提升突发灾害天气的短临精细化预报有效性和可用性，研发与用户应用场景相结合的精细化行业气象服务产品和系统，实现精细化行业气象服务能力的有效提高。

3.2 更精准地对接行业需求

WMO将基于影响的预报和服务的发展演变过程分为若干阶段，包括：综合天气预报、基于固定气象阈值的预警、使用用户相关阈值的天气预警、与空间/时间相关的阈值和天气预警、基于影响的多灾害预报和预警服务等。

根据WMO的划分方法，我国行业气象服务目前主要还处于基于固定天气阈值的预警阶段，未来应发展基于用户阈值和与时空相关阈值的气象服务，也就是应用精细化天气预报，对接行业用户的天气精细影响特征和信息精细化应用场景，提供更有针对性的天气影响服务。

3.3 研究精细化服务技术

精细化气象服务不同于精细化天气预报。与精细化天气预报相比，精细化气象服务应更注重用户生产过程中的天气影响的精细化服务。通过为特定用户提供特定的气象服务产品，实现精准应对天气影响和精准防灾的目的。

发展精细化行业气象服务，必须开展精细化服务技术研究。包括：研究精细化预报产品的准确性、可用性和服务应用策略，研究基于用户的天气影响精细化特征的精细化行业气象服务指标，设计基于气象信息应用场景的精细化服务产品等。

4 发展精细化行业气象服务的初步思考

目前，精细化行业气象服务既面临着技术基础薄弱、资源能力不足、发展定位不清等困难，也存在着服务需求迫切、市场前景可观等发展机遇。如何提高认识、正确定位、实现快速发展，有许多问题需要我们认真思考。

4.1 行业气象服务发展的新阶段

精细化行业气象服务正面临着一个新的发展阶段。其标志主要有以下几个方面：

一是作为气象服务基础支撑的天气监测和预报精细化技术得到显著发展，精细化预报水平不断提高，精细化行业服务需求日益增加。

二是以互联网、物联网、大数据、云计算、人工智能等为标志的信息技术的飞速发展，为精细化行业服务技术和方法研究、服务产品和系统开发、开展实时响应和快速跟进服务提供了有力的技术支撑。

三是精细化行业气象服务对精细化预报产品提出了新要求。以天气预报业务产品为主要支撑的精细化行业服务模式和以天气预报业务需求为目标的数值模式等预报技术发展模式，不仅无法满足未来精细化行业气象服务发展的需求，在一定程度上也制约了数值模式等先进预报技术的研发与发展。应发展以行业服务前沿需求为导向的数值模式等预报技术研究体系，将最先进的预报技术成果应用于行业气象服务领域，建立和完善能满足不同层次服务需求的精细化预报产品支撑体系。

4.2 从体系建设上谋划和推动发展

要构建有利于发展的气象服务新体系，需要发展新理念、新思路，解决新问题、新需求。在这方面，奥运会气象服务的成功经验，对我们今天发展精细化行业气象服务，仍然具有指导性作用。美国Accuweather和TWC发展集约化预报与服务的经验，也具有借鉴作用。

借鉴奥运气象服务体系建设经验，探讨有利于发展精细化行业气象服务的发展模式，建立技术研发支撑和服务保障体系。比如：由单纯依靠预报业务产品支撑，发展为预报业务、预报研发、社会力量等多渠道的预报产品支撑。

在现有条件下，要发展具有国际先进水平和竞争实力的行业气象服务，仅依靠市场效益推动下的企业自发行为，其发展能力和前景极为有限。应更有效地发挥国家层面的战略引领、技术引导和发展推动作用，并将发展目标落实到有效提高服务能力和竞争实力上。

4.3 创新发展思路，创新技术研究

理念和思路创新，对实现创新发展具有重要意义。创新思考精细化气象服务的理念和发展思路，充分认识精细化服务发展的新阶段，是实现精细化行业气象服务新发展的关键。

要重视精细化气象服务技术、方法、产品等研发创新，研究精细化预报产品在行业精细化服务中的应用技术，发展针对行业的非常规气象要素预报技术，研究探讨人工智能和大数据信息在行业气象服务中的应用技术，强化精细化行业气象服务技术研发和科技成果转化应用，提高对精细化行业气象服务的技术支撑。将研发创新作为与发展精细化预报具有同等重要性的工作，依靠创新研发支持和实现创新发展。

致谢：本文由科技部公益性行业（气象）科研专项（GYHY201306058）资助。

深入阅读

- 高荣珍, 杨育强, 孙桂平, 2007. 基于MM5的青岛近海风速精细化预报. 海洋湖沼通报, (4): 30-36.
- 郭虎, 王建捷, 杨波, 等, 2008. 北京奥运演练精细化预报方法及其检验评估. 气象, 34(12): 18-25.
- 矫梅燕, 2007. 关于提高天气预报准确率的问题. 气象, 33(11): 3-8.
- 罗慧, 李良序, 胡胜, 等, 2007. 公路交通事故与气象条件关系及其气象预警模型. 应用气象学报, 18(3): 350-357.
- 孙健, 陈钻, 李强, 2016. 美国商业气象服务及技术的进展与启示. 气象科技进展, 6(3): 48-54.
- 杨育强, 高荣珍, 马艳, 等, 2008. 海面风精细化集成预报系统在青岛奥帆赛期间的应用. 气象, 34(12): 241-245.

(作者单位: 吉林省气象服务中心)

(上接99页)

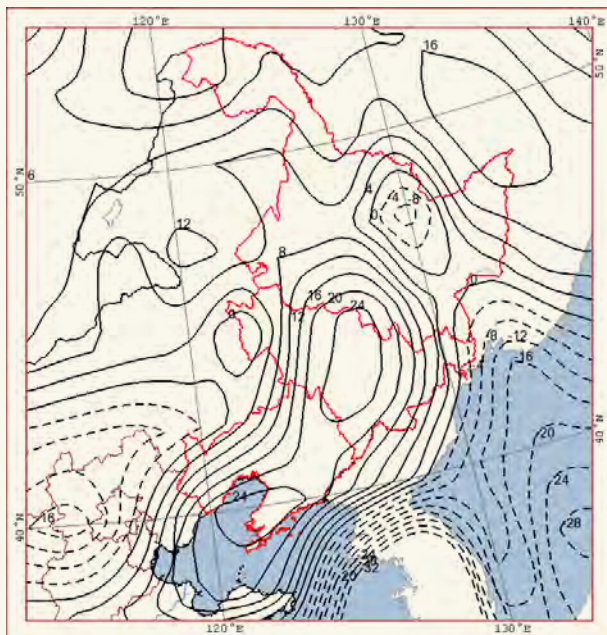


图6 2017年4月24日08时K指数分布

Fig. 6 The K index distribution at 08:00 on April 24, 2017

4 结论

采用统计结果和个例分析相结合的方法，对东北冷涡产生雷电的气象潜势条件进行分析，得出以下结论。

东北冷涡具有明显的对流不稳定能量，易带来雷电天气，由于冷涡对流有明显日变化，多发生在午后到凌晨，雷电也多发生在午后到凌晨。东北冷涡对流不稳定能量有明显阶段性，发展阶段以稳定性锋面降

水为主，此时一般没有雷电，成熟阶段受太阳辐射影响，以分散性局地对流降水为主，此时雷电活动开始频繁，能够一直持续到减弱阶段。

本次个例中雷电主要发生东北冷涡东部和东南部，尤其是对流云生成的区域。通过中尺度分析可以判断雷电潜势，本次个例中700 hPa有较强上升运动，850 hPa比湿 >3 g/kg，相对湿度 $>70\%$ ，有中等强度降水，上述条件重合的区域可以判断出潜势能量最大的区域，对应雷电发生区。

参考文献

- [1] 冯民学, 焦雪, 韦海容, 等. 江苏省雷电分布特征分析. 气象科学, 2009, 29(2): 2246-2251.
- [2] 陈万祯. 浅析等电位连接在建筑物防雷中的作用. 河北北方学院学报: 自然科学版, 2010, 26(4): 24-25.
- [3] 高菊霞, 武麦凤, 徐军昶. 陕西两次特强雷电天气过程物理量场对比分析. 陕西气象, 2012(4): 6-12.
- [4] 龚嘉镛, 郭凤霞, 田琨, 等. 基于WRF模式的雷电潜势预报. 气象科学, 2014, 34(2): 206-212.
- [5] 李君, 宋中玲. 雷电潜势预报研究(英文). Agricultural Science Technology, 2014, 15(12): 2197-2200.
- [6] 许爱华, 郭艳, 马中元. “717”庐山强雷电天气过程技术分析. 江西气象科技, 2003, (1): 21-24.
- [7] 郜凌云, 栾健, 王迪, 等. 辽宁省内陆与沿海城市雷暴活动特征对比分析. 气象与环境学报, 2017, 33(02): 95-100.
- [8] 陈力强, 张立祥, 周小珊. 东北冷涡不稳定能量分布特征及其与降水落区的关系. 高原气象, 2008(2): 339-348.
- [9] 孙力, 郑秀雅, 王琪. 东北冷涡的时空分布特征及其与东亚大型环流系统之间的关系. 应用气象学报, 1994(3): 297-303.
- [10] 陈长胜. 初夏两次东北冷涡强对流天气对比分析. 吉林省科学技术协会. 创新驱动, 加快战略性新兴产业发展: 吉林省第七届科学技术学术年会论文集(下). 吉林省科学技术协会: 吉林省科学技术协会学术部, 2012: 2.



进 2019 展报告 吉林人工影响天气

<http://cmalibrary.cn/amst/201906/>

阅读、思考、编程：现代气象大师的范式

——记美国气象学家诺曼·菲利普斯

■ 贾朋群

会吹法国号的菲利普斯，在长达70年的气象生涯里，为后人演奏了一曲动人的大气环流之歌。他的“阅读、思考、编程”工作范式，简单中透露了过去百年来气象学科发展的主旋律。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.06.022

2019年3月15日，美国气象学家诺曼·菲利普斯(Norman Alton Phillips, 1923—2019年，图1)去世，享年95岁。美国气象学会发表的一篇纪念文章中，称菲利普斯为现代气象学的“巨人”，而他曾长期工作过的MIT，在相关新闻里称其为“理论气象先行者，展示了数值模式可以预报天气并开发了首个地球气候大气环流模式”。随着菲利普斯及其所代表的在20世纪中期创造性地开辟了数值天气预报(NWP)方法的一代学者的相继辞世，这些与最初的NWP理念建立和实践紧密联系在一起的气象大师，将永驻全球气象人的心中。菲利普斯的学术生涯中，围绕气象事业的几次转折，既留下了20世纪中后期的时代烙印，更有气象大师的个人努力和时代机遇相结合的相得益彰的学术发展鲜明特征。



1 第一次转折：战争让菲利普斯选择了气象

菲利普斯1923年7月9日出生在美国芝加哥，他的四位祖父母都是19世纪后期从瑞典移民到的美国，这让他从小生活在多国氛围下。菲利普斯在中学时，加入了学校的乐队，他主吹法国号，也成为他一生的爱好。1940年高中毕业的菲利普斯进入芝加哥大学，主修化学。然而一年后美国加入二战中止了他的学业，

也让他第一次听说了与战争相关的培训中，包含一门叫做“气象”的课程，这一全新的概念立刻吸引了青年菲利普斯。他在加入美国空军之前，先在空军基地进行了几个月的军事培训，又在密歇根大学进行了6个月的物理和数学学习，随后在伊利诺伊空军基地接受了9个月的气象培训。

在完成这些培训后，本应在大学校园里学习化学课程的菲利普斯，从1944年6月到1946年9月战争结束一直在美军的几个基地担任气象预报员，为盟军的军事行动开展气象服务。期间他为美国跨越大西洋的航线提供气象支持，为此需要监测大洋天气的变化。他多次随侦察飞机飞行，在实际大气中领悟培训课程里在天气图上中标识的冷暖气团、锋面和低压中心等系统，尤其是当飞机以250 km的时速穿越锋区时，他真切地感受到了大气中的不连续。战争后期，他被调到通信部门，因此学习了编码和通信线路等知识，这一看似有些偶然的岗位调整，却为他后期专注于数值天气预报埋下伏笔。战争中气象相关工作的经历虽然仅持续2年多一点，但二战这个大熔炉足以让菲利普斯感觉到气象预报是吸引人的科学问题，如果成功解决这个问题，对社会的潜在影响会是巨大的。

1946年，战后被授予第一中尉军衔的菲利普斯返回芝加哥大学。早在战争结束前，菲利普斯就在思考如何改进天气预报的问题。那时的他认为，通过统计方法改进预报是一条明显的途径。再次回到校园，菲利普斯选择了统计课程，同时选修多个气象课程。他分别在1947年、1948年和1951年获得了气象科学的学士、硕士和博士学位。

芝加哥大学有当时美国最强的气象系之一，它是

收稿日期：2019年11月16日；修回日期：2019年11月29日

由罗斯贝于1939年创建的。菲利普斯在这里遇见了多位有名的气象学者，包括：Horace Byers和Victor Starr等，以及当时还年轻，后来成为著名学者的George Platzman、Dave Fultz、Herbert Riehl和Verner Suomi等。菲利普斯的硕士导师是Erik Palmén，在开始学位相关的气象研究初期，他还深受挪威学派的影响，研究了冷空气下沉与风暴形成之间的联系。

菲利普斯开始博士课题研究时，与同为博士生的郭晓岚在一起，执行罗斯贝的一项海军课题。他们分别就诊断和模式分析方法以及正压不稳定展开研究。也正是在这一时期，菲利普斯注意到了成功实现NWP的主要贡献者查尼的工作。那时，查尼已经首次用正压模式完成了大尺度空气运动预报。虽然很多学者理解查尼的研究主题，但知晓其中所利用的数学方法的人却很少。具有很好的数学基础的菲利普斯这时问自己：是否可以用简单的斜压模式进行数值预报？随后在受到了罗斯贝所做学术报告的启发，并在1952年夏天与查尼当面交流后，菲利普斯最终完成了斜压二层模式。

2 第二次转折：追随大师并最终成为大师

在菲利普斯即将完成博士论文时，已经通过多渠道了解了他的学识和能力的查尼，就邀请其完成学业后，加入当时刚刚完成世界上第一次成功的NWP试验的高级研究院（IAS）。1951年9月菲利普斯来到位于普林斯顿的IAS，加入查尼领导的NWP研究团队（图2）。当时该团队面临人员紧张的困境，模式试验成功后，后续工作拓展并向业务化方向发展的重点任务需尽快得到阶段性成果。菲利普斯加入后，全身心投入大气环流模拟工作，让NWP初期包含各种简化的模式，能在天气尺度上揭示出更多的全球环流特点，为其后续发展不仅提供了试验结果，更建立了模式作为研究和预报最有效工具最初的信心。期间，他与查尼合作发表了阐述正压和简单斜压模式数值积分



图2 Platzman(左1, 菲利普斯的博导)、菲利普斯(右2)和查尼(右1) 1952年在IAS计算机房

的重要论文，成为全球大气环流数值模拟研究的一个重要起点，菲利普斯也因此成为大气环流数值模拟研究的重要发起人。

菲利普斯在IAS期间，与查尼拧成一股绳维系创造了NWP辉煌历史的ENIAC项目的后续工作。初期，计算机的极度不稳定是影响效率的主要问题，同时针对模式运行问题，需要在气象和数学两个方面进行判断和分析，才可能找到最好的解决方案。而查尼和菲利普斯优势互补，相互信任和高效合作让项目组在NWP试验成功后，模式和研究内容有了进一步拓展。而实施这项工作的气象组当时仅仅有4个人：查尼、菲利普斯以及一位气象学者和一位程序员。正是在这一时期，菲利普斯分别完成了两篇重要论文，在查尼等人引入斜压不稳定突破性概念后，建立和完善了两层准地转模式，可用于具体天气形势的分析。菲利普斯的这项工作，被学术界认为是世界上第一个大气环流模式，一举确立了其重要的学术地位。

5年后，美国第一台电子计算机ENIAC项目中的气象小组的工作随着以NWP成功并取得阶段性成果而宣告结束，菲利普斯又与查尼一起于1956年来到MIT气象系。MIT的气象系由罗斯贝于1929年建立，是当时具有最浓厚气象底蕴的美国大学气象系。1957年菲利普斯成为副教授，1966年43岁时晋升教授，并在1970年到1974年担任气象系主任。

在MIT，他和查尼共同建立了气象专业图书馆，大量气象专业文献一直是师生们能在研究领域保持领先的基础。即使菲利普斯后来离开了MIT，他还不时回来造访图书馆，学校也一直友好地为菲利普斯保留办公室，方便他随时使用图书馆资源。查尼于1981年去世，美国科学院邀请菲利普斯撰写的查尼生平，菲利普斯也大多在图书馆完成，该生平收录于美国科学院1990年出版的科学家生平著作中。

3 最后一次转折：来到NWS是不忘初心使然

1974年，50岁的菲利普斯来到美国国家气象局（NWS），在他应邀在NWS做完一个学术报告，听众报以热烈掌声时，主持人宣布这位MIT的知名教授将加入NWS。人们露出的惊奇实际是在问：在校园里顺风顺水的菲利普斯为什么要来趟业务预报的水？实际上，与前两次转折是因为战争和项目结束而多少有些被动不同，这时作为美国国家气象中心（NWS的业务机构，是NCEP的前身）首席科学家的菲利普斯，是在人生走过半个世纪后，在事业上的主动选择：即让自己的学识真正能提升气象预报能力。在NWS，直到1988年64岁时退休，菲利普斯都是在怀揣二战期间

让天气预报完美的“初心”，全身心地改进天气预报的手段。

作为业务部门的首席科学家，菲利普斯在二战期间的预报经历和在校长期从事模式研发工作的经验，深知气象业务能力的提升需要保持对新知识的不断吸纳。在“讲座”时上任的菲利普斯，到任就在气象业务部门定时开展学术讲座。这个现在被称为“棕色公文袋”的系列讲座，从开始时的美国国家气象中心，传承到现在的NCEP并一直持续。例如，2016年NCEP就举办了17场讲座^①，平均每个月有3次左右。17次讲座的主讲人，分别来自NOAA、美国高校和NCAR，日本、英国、韩国、西班牙气象部门，以及西班牙超级计算中心等机构。17次讲座，主讲人来自美国国内9人次，美国以外8人次，充分显示了这个内部机构讲座的国际化。17次讲座中，针对模式和业务系统分别达到5次和3次，占主要部分；其他主题包括诊断（3次）、资料同化及验证（各2次）等。这些主题都和业务密切相关，特别是业务系统的讲座，几乎都是围绕当时正在开发的下一代模式系统展开。

在电子化和网络化时代，菲利普斯的这项学术遗产被精细化设计以取得更好效果。例如，讲座一般安排在中午时间举办，这样有助于业务人员在不影响业务工作的前提下保证定时“充电”，了解部门内外最新的相关进展。讲座提前一段时间通过专门的网页提示下次讲座的题目、报告人以及类似学术论文的报告摘要。报告结束后，在报告人许可的情况下，一般还能在网上共享报告人所做报告的课件，可以回味或摘引报告内容。

在NWS，他将之前在大学课堂上讲授的数值天气预报课程转化为气象局嵌入格点模式（NGM），这个

区域模式是美国最早的区域分析和预报系统，于1985年3月27日投入业务运行，直到2009年3月3日退出业务，是NWS少有的业务运行时间达到24年的长寿命系统。因为系统好用和菲利普斯个人对该模式的巨大贡献，美国的天气预报员早就在圈子里将NGM解读为了“Norm's Good Model（菲利普斯的好模式）”。

菲利普斯在MIT培养出来的第一位气象女博士Eugenia Kalnay回忆起她获得学位后继续讲授菲利普斯开创的NWP课程，后来转到NASA工作并最终又与菲利普斯在NWS成为同事。1987年，Kalnay担任菲利普斯所在开发部的主任，这时她从学生转变为菲利普斯的领导，在与菲利普斯讨论他的年度工作计划时充满忐忑。菲利普斯则在该年的工作计划中用3个词化解了她的担忧，他写到：1）阅读；2）思考；3）编程。这个计划不仅让Kalnay充满敬意，实际上也是先生一生气象事业，特别是得到了“NGM”口碑原因的写照：简单中保持深度。

菲利普斯一生获得很多学术荣誉，例如，1956年获得英国皇家气象学会第一个内皮尔·肖奖，1971年获得美国气象学会最高奖罗斯贝奖，1976年成为美国科学院院士，1987年在第十届WMO大会上获得出色讲师奖，1981年获得NOAA局长奖等。菲利普斯退休后依然勤于思考，最后一篇文章发表在他90岁高龄时。

会吹法国号的菲利普斯，在长达70年的气象生涯里，为后人演奏了一曲动人的大气环流之歌。他的“阅读、思考、编程”工作范式，简单中透露了过去百年以来气象学科发展的主旋律（数值模拟和预报技术）为什么从无到有、从失败一步步按照物理学和多学科应用相结合的路走向巨大成功的奥秘。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）

^① 见贾朋群, 李婧华. NCEP讲座: 美国预报员的“加餐”. 科技信息快递, 2016,(8).

早期定量气象观测价值的再开发：从ACRE说开去

■ 贾朋群 温康民

在亚洲，尤其是东亚地区，早期利用科学传感器气象观测的活动，或多或少与西方列强在20世纪初及更早期时期的殖民活动相关。该地区很多早期气象观测，来自传教士设立的气象站，而与这些站的观测活动相关的研究和应用等，也是这一时期现代科学西学东渐传入我国的组成部分。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.06.023

2019年11月4—6日，国际地球大气环流重建（ACRE）计划中国、东南亚和日本子计划联合学术研讨会（以下简称ACRE亚洲联合会）在武汉召开，来自三方以及英国、俄罗斯、加拿大和葡萄牙等多国学者到会，让我们有机会进一步认识早期零散和个别的气象观测记录的价值所在。

1 再分析技术和气候变化研究，催生抢救早期气象观测记录的国际合作项目

数据再分析（RA）技术可谓是气象大数据的集大成的重要工具。RA常被冠以“动力”，即主要依靠数据同化技术，才能得到全球动力再分析的产品。然而，一方面，RA产品具有的时空连续性，在很大程度上是基于以动力框架为引擎的数值模拟得到的；另一方面，RA分析产品生产链的每一步，均要靠观测数据来支撑。这也是为什么早期RA产品的开始时间，多在全球系统气象观测体系建立后的20世纪中叶（如1950年）。然而，随着全球模式复杂性、完整性的持续提升以及应用上的多种需求，RA产品的时间起点，一再被多家主要气象中心向前推，以1900年或更早时间作为RA产品的时间原点。例如，20世纪再分析项目版本3（20CR v3）覆盖了1836—2015年（<http://go.usa.gov/XTd>）。

在气候变化研究方面，可靠的气象记录覆盖时段越长，其变化趋势和规律就越容易解析，尤其是时间尺度较长的年代际到多年代变化。不仅如此，与资料时间的自然累计对比，前推数据不仅加快了数据时间序列长度的增加，而且前推得到的数据，例如1900年及更早的数据，较少受到人类活动的影响，能够更有利于解释地球气候的自然变化并且与人类影响的结果进行对比。

综上所述，人类早期利用现代传感器得到的气象

观测记录，尽管大多在时间和空间上是零散的，但其意义弥足珍贵。正如ACRE CHINA 协调人任国玉教授所言：“ACRE CHINA的目的，就是通过对散落在图书馆、档案部门、气象系统和其他来源的1950年以前的中国及周边区域仪器气象观测记录进行拯救、数字化和分析，从而改进认识东亚气候变率和变化的观测基础。”

2 ACRE亚洲子计划取得多项影响巨大的成果

ACRE计划建立并发展了包括ACRE ARCTIC, ACRE PACIFIC, ACRE ANTARCTICA, ACRE CHINA, ACRE SOUTHEAST ASIA, ACRE JAPAN 等多个子计划，并与其他国际数据拯救计划相关联，如ECA&D, LACA&D, WACA&D, SAC&D, MEDARE, INDARE；还与C3S数据拯救服务（C3S DRS）有很好的合作基础。来自英国气象局的Rob Allan博士作为ACRE计划负责人，会上介绍了ACRE海洋项目的最新进展，其中包括对英国国家档案馆（伦敦）和国家气象档案馆（埃克塞特）的英国海军和商船运输日志清单的整理，包括了1589个商船1854—1900年的日志，1640封皇家海军1788—1909年的日志等。1902—1903年的海洋数据，主要包括在埃克塞特国家气象档案保存的345个商船气象日志里，覆盖了北大西洋和地中海。

Rob Allan博士在会上还介绍了牛顿交叉基金项目历史重大厄尔尼诺现象的全球影响进展，同时介绍了英国气象局牛顿基金会合作计划，牛顿基金旨在发展科学和创新伙伴关系，以促进发展中国家的经济发展和福利，包括CSSP-中国、CSSP-巴西、WCSSP-印度、WCSSP-东南亚、WCSSP-南非。对于如何定义重大厄尔尼诺事件进行了解释，阐述了CSSP /WCSSP和

收稿日期：2019年11月9日；修回日期：2019年11月15日

区域ACRE/C3S DRS对重大厄尔尼诺事件的兴趣，重大厄尔尼诺现象的全球危害工作内容包括观测数据拯救（ACRE/C3S DRS 和 CSSP/WCSP项目）、模型发展、重大厄尔尼诺现象对CSSP/WCSP国家或地区规模的影响、即将发生重大厄尔尼诺现象的气候预测、气候预测和大厄尔尼诺现象的长期前景。

3 中日牵头共同推进东亚气象数据重建

ACRE CHINA活动包括两个方面：一是中国大陆地区的早期数据发掘、拯救、数字化和分析，主要参与单位包括国家气候中心、国家气象信息中心、中国地质大学（武汉）、沈阳区域气候中心、香港天文台、北京气象局信息中心、湖北省气象信息中心、国家海洋信息中心、福建省气候中心、中国气象局干部培训学院、中国科学院地理科学与资源研究所等；二是国际相关国家研究机构，主要包括：UKMO Hadley Centre, Bristol University, German Weather Department (DWD), Seikei University, Tokyo Metropolitan University, Hokkaido University, Singapore Management University等。

ACRE CHINA 负责人任国玉研究员介绍了过去一年中国大陆地区的主要工作进展。例如，通过中国气象局内部合作公关，目前已经完成了全国19个台站早期气象数据数字化工作（图1），并提交CSSP合作方和国际ISSP数据库。19个台站数字化数据库的时间起点，有5个站在1900年或更早（哈尔滨、沈阳、武汉、北京和重庆），最早的北京始于1868年，距今150年之久。时间起点在1900—1930年间的也多达11个站。这些站虽然除了乌鲁木齐站以外，大多分布在中国东部，但在南北方向上分布较为均匀，其在数据分析和再分析中，对于解析欧亚大陆东部特征，无疑具有重要意义。国家气象信息中心近期还要将恢复数据的城市扩大到近100个，其中40个已经初步完成。

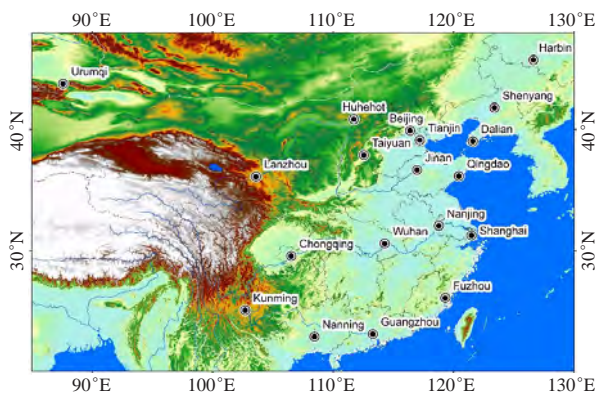


图1 ACRE-中国项目完成早期气象站日气压、温度和降水数据数字化重建的19个站分布

要全面完成这样的工作，由于气象数据记载形式存在太多的变化，需更多的努力和支持才能顺利完成。例如，即使得到了手工记录的数据，由于站点大多经历多次搬迁（例如，沈阳站从1905年以来观测站经历6次搬迁），数据的质量控制和均一化等工作依然是巨大挑战。

ACRE CHINA通过和国际同行密切合作，还获取了一批我国最早的气象观测资料，改写了中国早期气象观测历史。例如，已经获取了由法国传教士钱德明（Joseph Marie Amiot）1757—1762年观测的北京每日（2次）气象观测记录，并完成了数据化和初步质量控制工作；这是迄今我国连续一年以上观测的最早气象记录，观测要素包括地面气温、气压和风向风力；发现并数字化了1698—1699年（1698年末—1699年上半年）由英国人卡宁汉姆（J. Cuningham）在厦门观测的每日（2~3次）地表气压资料，这可能是中国甚至东亚地区连续1个月以上的最早观测记录。关于早年英国人、日本人在东北营口（牛庄）、沈阳和大连等地的观测活动，也获得了新的信息。

在亚洲，尤其是东亚地区，早期利用科学传感器气象观测的活动，或多或少与西方列强在20世纪初及更早时期的殖民活动相关。该地区很多早期气象观测，来自传教士设立的气象站，而与这些站的观测活动相关的研究和应用等，也是这一时期现代科学西学东渐传入我国的组成部分。

在ACRE JAPAN分议题会上，来自日本东京大学的学者，在会上介绍了散存于中国海关档案中《海关医报》中的气象记录。作者认为，1870—1911年存在的《海关医报》，记录了中国32个地方气象信息，报告总数达到421册。该研究在《海关医报》开始时间、气象数据的记录方式等方面，与中国学者针对19个海关城市的研究类似。从日本学者给出的32个海关气象记录覆盖的时间来看，除了少数地方，大部分记录并不是连续的，这或许与当时海关系统要求并不严格，以及那时气象仪器的耐用性和不同海关医务官员的变化有关。

据来自日本的与会专家介绍，韩国和朝鲜气象观测网建立于1904年3月，主要是日本殖民者在当地开展的气象观测。这些站集中在现在的韩国和朝鲜南部，已确认的气象观测地点有木浦、釜山、大邱、仁川、京城、平壤、元山等，此外还包括一些陆军医院。

1863—1864年下关战争期间，荷兰海军舰队航海日志中记录的气象观测数据，对于分析历史时期的日

本气候具有重要价值。参会的日本专家介绍，这些资料收藏在荷兰国家档案馆。例如，荷兰的美杜莎号轮船航行通过日本内海的航海日志被记录其中，这些资料被记载在很厚的航海日志书籍中。1863年7月，在与日本的第一次冲突中，美杜莎号轮船遭到了袭击，英国、荷兰、法国、美国四国组成联合舰队共17艘军舰联合增援。对这些航海资料的初步处理，参会的神户大学Togo教授指出，需要首先获取航线和地点，并标注在地图上；其次，气候分析与历史事件同时进行，最终完成这些观测和信息的数字化。

与中日韩等殖民色彩较浓的早期主要由传教士主持和参与的气象观测不同，还有一些亚洲国家因为与西方国家联系较为密切，在20世纪初出现了基于需求的气象观测。在ACRE 亚洲联合会上，与会的印度专家从茶文化谈起，阐述了隐藏在印度大量私人茶园里的早期气象记录，其中印度东北部因为具有典型的季风气候特征，降水等观测尤其受到重视。

4 抢救气象数据任重道远

最新的RA产品的开发过程中，包括中国在内的亚洲各国的早期气象数据，已经受到广泛关注。例如，中国在20世纪初到二战结束前的三类气象观测，即20世纪30年代中瑞西北可靠探空数据、日本占领区数据和早期中国站观测数据等，已经被美国、欧洲学者关注并通过各种数据库渠道，成为大约始于20世纪初的数据再分析产品的数据支撑（图2）。其中，中瑞西北科考数据尤其珍贵。首先，科考得到的气象数据，包括了地面和高空，考察中利用从西方引进的气象风筝，能够获取高空气象数据，不仅持续时间以年计算，也是当时欧亚大陆中部我国境内独有的高空气象记录。另外，参与观测的是科考队中很有经验的中外气象学者，观测的规范性等均可以说达到当时的领先水准。最后，对比ARCE亚洲联合会议，虽然3种资料中另外两种都有较广泛的设计，中瑞科考数据尚没有被关注，这或许与ACRE CHINA目前更多关注地面数据有关。

如前所述，中国连续1个月以上的最早气象仪器观测，是1698年厦门的气压观测记录。这些最初由西方科学家和传教士将发明不久的传感器带到中国，并借此开展的气象观测，既是西方列强殖民扩张的证据，但同时也是西学东渐的一个渠道，特别是一些学

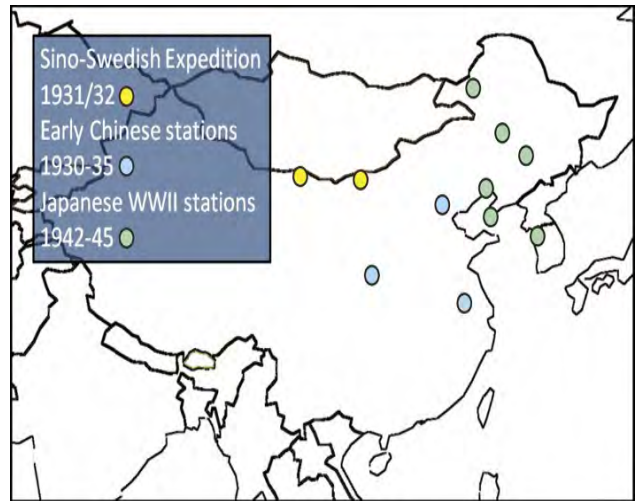


图2 欧洲学者再分析数据库中收集的3类中国早期气象观测数据：1931/1932年中瑞科考、1930—1935年早期中国站和二战期间日本在华建立的气象站（来源：Brönnimann et al., 2018）

者型的传教士，更对中国早期认知现代科学起到了巨大作用。今天我们审视这些气象记录遗产，其实已经到了很紧迫的时间点。

例如，挖掘隐藏在各种档案材料中的气象观测原始数据，工程量浩大。仅在中国气象局档案中，1951年以前的早期气象观测记录，总页数估计超过400万页，其中月报表的站册数多达1443本。此外还有约330万页图像。即使完成这些数据的数字化，也还仅仅是ACRE CHINA这类科学计划的第一步，随后的大量数据融合、质量控制、均一化和分析等工作，任务同样繁重。此外，需要建立很好的渠道，使宝贵的早期观测资料在科学界得到共享，才意味着这些数据真正在研究和应用中体现了其价值，而这些可以堪称为工程的巨大工作量，需要得到国家的持续支持，才有可能逐步完成。

深入阅读

Allan R, Brohan P, 2011. The International Atmospheric Circulation Reconstructions over the Earth (ACRE) Initiative. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(12): 1421-1425.

Brönnimann S, et al., 2018. Observations for reanalyses. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(9): 1851-1866.

何溪澄, 冯颖竹, 2017. 《海关医报》与1877—1894年广州气象观测记录. *气象科技进展*, 7(3):71-73, 80.

（作者单位：贾朋群，中国气象局气象干部培训学院；
温康民，中国地质大学（武汉））

高被引论文选编

编辑：张萌 侯美亭

“人工影响天气”主题

来源数据库：SCI-E和CAJD，检索时段：2017—2019年

使用耦合气溶胶的数值模式模拟强对流风暴——Simulation of a severe convective storm using a numerical model with explicitly incorporated aerosols. *Atmospheric Research*, 2017, Vol. 194.

尽管气溶胶在云生命周期的各个阶段都扮演着重要的角色，但它们在数值天气预报模式中的表现往往相当粗糙。塞尔维亚共和国水文气象局的Lompar等研究了气溶胶在天气研究和预报模式（WRF）的一个微物理参数化方案对云动力学和微物理的影响。研究选择的试验是2014年7月21日下午塞尔维亚西部和中部地区的一个具有超级单体的强中尺度对流系统。研究使用了两种模式设置，即一个明确包含气溶胶（WRF-AE），另一个隐含包含气溶胶（WRF-AI），并与来自地面雨量计网络的降水测量数据，以及与雷达和卫星观测数据进行比较。研究发现，WRF-AE模式准确地捕捉到了从北非、地中海到巴尔干地区的灰尘运输过程。而在较小的尺度上，这两种模拟都将塞尔维亚西部和中部上空的云层位置向东南方向移动，并低估了雷达反射率的最大值。与卫星图像类似，WRF-AE显示中尺度对流系统是一个积雨云团。两种模拟均高估了降水总量：WRF-AE的过度预测在小雨区尤为明显，而WRF-AI给出的异常值更大。与WRF-AI不同的是，WRF-AE能够模拟时间演变和气溶胶进入云层的情况，这在天气预报和人工影响天气方面可能具有重要意义。

从热带到中纬度的积云微物理的飞机观测：对“新的”二次冰过程的暗示——Aircraft observations of

cumulus microphysics ranging from the Tropics to Midlatitudes: Implications for a “new” secondary ice process. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2017, Vol. 74, No. 9.

美国SPEC公司的Lawson等通过对3架飞机在4个地点采集的实测数据进行分析，确定了云基温度、水滴大小分布与强对流云上升气流中心过冷水滴和冰形成之间的关系。研究在加勒比海、墨西哥湾及沿岸、美国东南部、科罗拉多和怀俄明的高积云和馈电单元中收集了大量的数据。加勒比海、墨西哥湾及其海岸以及美国东南部上空的对流云都在上升气流中心形成直径为毫米的过冷水滴。高平原上空的云不会产生过冷的大雨滴，在上升气流中心观测到的 $>70\ \mu\text{m}$ 的雨滴也很少。与过冷大液滴的产生相对应，冰的产生和快速抬升是通过一个假设的二次冰过程，这是基于实验室观察到的大液滴冻结和微小冰粒子的释放。高平原上的云没有经历二次结冰过程，在上升气流核心中，以小液滴形式存在的大量过冷液体的浓度要高得多。根据云底液滴大小分布和温度，建立了计算过冷液态水输送最大液位的经验关系式。这一结论对于模拟水汽和粒子进入对流层上层的输送和积云的吸湿性播撒具有应用价值。

浅层状地形云以及冰晶播撒影响的雷达观测和大涡模拟研究——A case study of cloud radar observations and large-eddy simulations of a shallow stratiform orographic cloud, and the impact of glaciogenic seeding. *Journal of Applied Meteorology and*

Climatology, 2017, Vol. 56, No. 5.

降水的噪声特性导致冰晶播撒对降水的影响尚不确定。美国怀俄明大学的Chu等使用机载多普勒廓线雷达的观测和数值模拟，来检查冰晶播撒对一个非常浅（ $<1\ \text{km}$ ）的基本上被阻塞的云（不是自然地高空或从下面播撒）的影响。这片云具有有限但持续的过冷液态水，云底（顶部）温度为 $-12\ ^\circ\text{C}$ （ $-16\ ^\circ\text{C}$ ），自然降雪非常少。一个 $100\ \text{m}$ 分辨率的天气研究和预报模式（WRF）模拟捕获了观测到的上升稳定性和风廓线，再现了地形影响、云和降水的基本特征。观测和模拟都表明，即使在附近控制区消除了这两个周期之间的自然趋势，局部播撒也会增加目标区域的雷达（或计算出的）反射率。模式敏感性表明，播撒有效地使主要是液体的云冰封，并在播撒羽流中大量增加降雪。这是由于冰粒子数量的急剧增加，而不是由于它们的大小。冰粒子浓度的增加通过云中的气相沉积促进雪的生长，云的温度范围有利于Bergeron过程。

（以上由侯美亭选编）

基于区域历史回归法的辽宁地区一次人工增雨作业效果检验——《气象与环境学报》2017年第33卷第6期

翟晴飞等利用区域历史回归统计分析方法，选取1961—1990年辽宁省国家级地面气象站的日降水量资料作为历史样本，以铁岭地区作为对比区对2016年8月31日阜新地区一次人工增雨作业过程进行效果检验。结果表明：结合探空、雷达、数值模式资料和作业参数分析可知，2016年8月31日阜新地区人工增雨作业过程符合人工增雨作业的合理性要求，绝对增雨量为 $20.06\ \text{mm}$ ，相对增雨率为 119.43% ，通过了 0.01 水平的显著性检验。与国内其他省份应用相同方法进行人工增雨效果检验的个例对比发现，统计变量的选取对人工增雨作业的效果检验较重要。

基于STM32的新一代天气雷达远程监控系统设计——《计算机技术与发展》2017年第27卷第5期

姜小云等为了最大程度发挥新一代天气雷达在天气预报、气象决策和服务、人工影响天气等业务和科研方面的效益，设计了网络远程控制 and 应急解决新一代天气雷达部分故障（软件故障、停机故障、虚警故障等）的系统。通过设计网络继电器开关控制新一代天气雷达伺服控制单元、新一代天气雷达数据采集控制单元、新一代天气雷达发射机主控板等设备电源以实现远程复位，设计新一代天气雷达信号波形监控系统以实现对新代天气雷达设备远程快速在线诊断。其在海南省新一代天气雷达站的实际运行情况表明，该系统应用效果良好，使得新一代天气雷达的系统可用性大幅提高，故障诊断与排除时间大为缩短，在全国天气雷达观测业务年终考评中名列前茅。该系统的设计方法可供其他新一代天气雷达站应用和借鉴。

（以上由张萌选编）

编辑选编

编辑：侯美亭 张萌

利用MODIS观测分析全球地表温度日循环——A global analysis of land surface temperature diurnal cycle using MODIS observations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2019, Vol. 58.

陆地表面温度（LST）的日间变化在气候变化评估、陆气相互作用、城市区域与热相关的健康问题等广泛应用中发挥着至关重要的作用。使用中分辨率成像光谱仪（MODIS）的15年（2003—2017年）LST数据集（版本6），美国纽约城市大学的Sharifnezhadazizi等使用样条插值法估算了从MODIS测量值反演的半小时LST数据。利用北美选定台站的每小时LST地面观测值的初步评估显示，估算值的偏差和误

差小于1 K。研究表明，目前的插值方法能够相当好地捕获不同土地覆被类型LST的日变化。LST的日循环和最高温度的发生时间是从全球尺度上空间和时间一致的插值日LST数据计算的。本研究确定了最大LST时序和日振幅变化较高的区域。全球沙漠区域在研究期间，月均LST范围的变异性普遍较小，而全球大部分陆地区域的日平均LST具有较高的变率。

用随机森林方法对高海拔植被区的MODIS LST数据进行降尺度——Downscaling land surface temperature from MODIS dataset with random forest approach over alpine vegetated areas. *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11.

虽然MODIS LST具有高的时间分辨率和较长的时间序列长度，但其较粗的空间分辨率限制了其在山区的效果。考虑到这一限制，意大利Eurac研究中心的Bartkowiak等利用随机森林算法对LST进行了空间降尺度，以将每日1 km空间分辨率的MODIS LST降尺度到250 m空间分辨率的亚像元尺度。研究使用数字高程模型（DEM）和归一化植被指数（NDVI）作为解释变量，来模拟它们与LST之间的非线性关系，并基于三种不同的像元组合：（1）针对所有像元（BM）；（2）仅使用植被覆盖度大于90%的像元（EM1）；（3）仅使用植被覆盖度大于75%的且具有相同地类的像元（EM2，代表同质性植被覆盖）。然后使用均方根误差（RMSE）和平均绝对误差（MAE）、并与Landsat LST进行对比，来评价该降尺度方法的性能。结果表明，EM1、EM2的误差值小于BM。BM模型的平均RMSE为2.3 K，MAE为1.8 K。EM1和EM2的RMSE和MAE的结果稍好于BM。与EMs相比，相对于Landsat和原始MODIS LST，BM的RMSE和MAE分别减少了22%和18%。尽管存在一些局限（主要是由于云污染和粗分辨

率像元的异质性），但随机森林降尺度显示出了改进LST的巨大潜力。

利用1982—2016年的地表反照率来检测森林和季节性降雪的变化——Monitoring changes in forestry and seasonal snow using surface albedo during 1982–2016 as an indicator. *Biogeosciences*, 2019, Vol. 16.

芬兰气象研究所的Manninen等使用地表反照率时间序列（CLARA-A2 SAL）研究了芬兰1982—2016年融雪的开始和结束日期、融雪季长度和融雪开始前的反照率值的趋势，并比较了JSBACH陆面模式模拟的融雪开始时间和MODIS数据反演的植被生长季开始时间。研究还将JSBACH预测的融雪结束时间与基于芬兰气象研究所（FMI）现场测量和欧盟EU FP7 CryoLand项目提供的积雪覆盖比例（FSC）时间序列产品的融雪结束时间进行了比较。结果表明，用20%反照率阈值估计的融雪期与永久积雪层的融雪期基本吻合。永久雪层定义为积雪持续时间最长的时期，即地面被雪覆盖一半或更多时。在融雪期，反照率达到动态范围1%的阈值后的5~13 d内，植被生长开始。山区植被变绿与积雪完全融化的时间差小于沿海地区。北部的两个植被区（北卡累利阿—凯努和拉普兰西南），有明显的融雪开始时间提前（5~6 d/10 a）和融雪季长度增加（6~7 d/10 a）的趋势。在芬兰北部森林地区，在融雪开始之前，反照率有明显的下降趋势（绝对反照率每十年下降2%~3%）。反照率的下降与树干材积的增加有关。

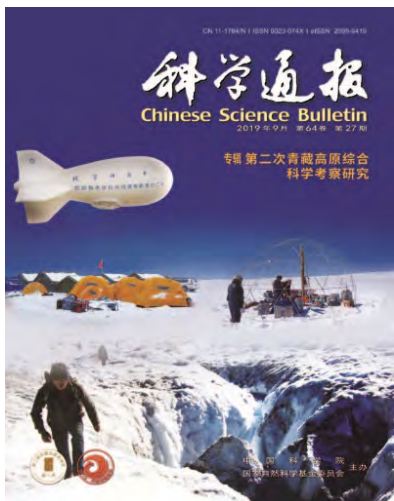
（以上由侯美亭选编）

“第二次青藏高原综合科学考察研究”专辑——《科学通报》2019年第64卷第27期

自20世纪70年代第一次青藏高原综合科学考察开展以来，青藏高原的自然与社会环境发生了重大变化。第二次青藏科考围绕青藏高

原地球系统变化及其影响这一关键科学问题进行开展。姚檀栋院士在发刊词中介绍,在科学工程总体框架下,第二次青藏科考设有十大科考任务,包括西风-季风协同作用及其影响、“亚洲水塔”动态变化与影响、生态系统与生态安全、生态安全屏障功能与优化体系、生物多样性保护与可持续利用、人类活动与生存环境安全、高原生长与演化、资源能源现状与远景评估、地质环境与灾害、区域绿色发展途径。十大科考任务共涵盖了不同科学领域的60多个科考专题。每个科考任务根据自己的目标和特点,领导所属专题开展考察研究。整个科学考察研究将在包括“亚洲水塔”区、喜马拉雅区、横断山高山峡谷区、祁连山-阿尔金区、天山-帕米尔区五大综合考察研究区的19个关键区展开。《科学通报》出版了专辑介绍相关进展,封面的冰面爬涉、冰芯钻取和浮空艇观测,展示了第二次青藏科考从传统科考方式到现代技术运用的重大变化。

其中,程国栋等系统地梳理了青藏高原多年冻土基本特征的现状,主要包括活动层厚度,多年冻土面积、温度和厚度的空间分布,以及多年冻土区地下冰和土壤碳储量等方面的研究进展。通过补充最近监测资料,阐述了高原尺度活动层和多年冻土热状况的动态变化过程及趋势,并分析了这种变化的水



文效应。随后,概述了多年冻土与生态系统、多年冻土与碳循环相互作用关系方面的研究进展。青藏高原多年冻土在过去数十年来发生了不同程度的退化,对多年冻土区地表的水、土、气、生间的相互作用关系产生了显著影响,进而影响着区域水文、生态乃至全球气候系统。该研究可为冻土与气候变化相互作用关系的机理研究提供思路,为寒区环境保护、工程设计和施工提供参考经验。

徐祥德等指出,青藏高原是东亚海陆气相互作用最敏感的地区之一。青藏高原大气水分循环结构特征不仅反映了西风气流与“大三角扇形”影响域季风水汽流的相互作用特征,而且凸现出该区域为全球能量、水汽的交换关键区,构成“亚洲水塔”形成的重要背景;隆升的高原地形和强大的表面辐射加热形成了局地上升对流和高耸入对流层中部中空“热源柱”。研究揭示出此“热力驱动”下青藏高原高、低层互为反环流类似台风的自激反馈机制,其提供了“亚洲水塔”水汽“汇流”与抽吸动力效应。“亚洲水塔”热源驱动机制有助于“世界屋脊”大气“热岛”、“湿岛”的形成和维持,使暖湿气流从低纬海洋向高原输送、汇聚。针对“世界屋脊”高原对流频繁、云降水异常特征,揭示出“世界屋脊”空气低密度条件对高原对流云的触发效应。分析表明,低纬热带海洋成为“亚洲水塔”大气水分循环的重要水汽源区,水汽源区可跨越赤道追踪到南半球。提出了青藏高原“热力驱动”下大气水分循环结构类似全球性大气“水塔”的观点,青藏高原特殊的跨半球大气水分循环构建出“亚洲水塔”和其周边地区独特的大气-水文功能体系。给出了西风与季风协同作用背景下青藏高原为核心区的陆地-海洋-大气相互作用的“亚洲水塔”大气水分循环物理图像。

朴世龙等围绕青藏高原生态系

统结构和功能对气候变化的响应与反馈这一主线,系统总结了气候变化对物候、高山树线、生物多样性、植被生产力和生态系统碳汇功能的影响,阐述了青藏高原植被变化对区域气候的反馈及对亚洲季风的远程影响的研究进展。主要结论如下:气候变暖导致植被返青期总体提前,高原树线位置上升,高寒草原植物物种丰富度和多样性下降;气候变暖总体促进了高原植被生产力、增强了生态系统碳汇功能,但受限于土壤极大的空间异质性和对深层土壤碳动态理解的匮乏,目前对高原土壤碳库及土壤碳汇功能大小的估算仍具有较大不确定性。同时,青藏高原植被变化对近地表气温产生“负反馈”作用;植被活动增强还对东亚季风产生远程影响,导致我国东部夏季降水变化呈现“华南增加-长江黄河中间区域减少”的空间分异格局。未来的研究需要在完善观测体系基础上,加强对高寒生态系统对气候变暖的适应机理及生物地球物理反馈等过程的认知,为优化生态系统管理和保障青藏高原的生态安全提供理论基础。

姚檀栋等指出,近百年来,青藏高原及周边地区冰川整体处于缓慢退缩状态,但20世纪90年代以来,这种状态发生了根本变化。以东帕米尔-喀喇昆仑-西昆仑地区冰川相对稳定甚至部分冰川前进为特征的“喀喇昆仑异常”是青藏高原及周边地区冰川状态失常的一种表现形式;而青藏高原东南地区冰川加速退缩则是这一地区冰川失常的另一种表现形式。高海拔地区的异常升温是青藏高原及周边地区冰川状态失常的重要驱动力。另外,这种冰川状态失常还与气候变暖背景下的西风和季风大气环流过程有关。随着全球变暖的加剧,冰川状态失常直接导致冰崩、冰湖溃决等灾变风险的增加。应对青藏高原及周边地区冰川状态失常的不利影响,需要进一步加强冰川变化监测与研究,加大冰川灾害防范力度。

(以上由张萌选编)

《《涓流细语》》 编辑：贾朋群

“It has been fascinating to see first-hand the incredible work taking place at the Flood Forecasting Centre (FFC) as we celebrate its 10-year anniversary. This week alone, the FFC’s forecasts have helped colleagues at the Environment Agency to issue well over 200 flood alerts and warnings to help keep homes, businesses and communities safe. I’m looking forward to seeing how the FFC develops an even deeper understanding of how we predict and prepare for weather events over the coming years. This work builds on the government’s £2.6 billion investment in new flood schemes to better protect 300,000 homes by 2021.”

“当我们庆祝十周年时，很振奋地见到洪水预报中心（FFC）开展的第一手和令人难忘的工作。仅仅这周，FFC的预报就帮助了环境局的同事发布了超过200个洪水预警，保证家庭、企业和社区的安全。我期待未来见到FFC在我们如何预测和准备天气事件方面的更深刻理解。这项工作给予政府在新规划中的26亿英镑投入，以便在2021年前对30万户家庭的更好地保护。”

——日前，英国气象局纪念该局与环境局在2009年合作成立的洪水预报中心（FFC）运行10周年。FFC让气象局的气象学者与环境局的水文学者一并，提供关键和及时的洪水预警。洪水部长Rebecca Pow在纪念活动中发表了上述看法。

“NOAA is a pioneer with a strong track record of applying the latest science and technology and these new strategies will allow us to dramatically expand these applications across our mission areas. These detailed strategies will enable us to achieve our priorities of reclaiming and maintaining global leadership in numerical weather prediction and sustainably expanding the American Blue Economy.”

“NOAA是应用最新科学和技术的先行者，这些新战略将使得我们极大地扩展这些新科技在各领域的应用。这

些详尽的战略，将使我们恢复和保持在数值天气预报领域的全球领导地位和可持续地扩展美国蓝色经济。”

“Emerging technologies like AI, unmanned systems, ‘omics’, and cloud services hold incredible promise to solve our greatest challenges. The Trump Administration remains committed to unlocking this potential for the benefit of all Americans through national strategies and initiatives. NOAA’s emerging science and technology strategies demonstrate our whole of government approach to innovation and we look forward to continued collaboration and leadership.”

“像AI、无人系统、基因组学和云服务这些新技术，为解决我们的巨大挑战提供了无限的希望。特朗普政府致力于揭示这些潜力并通过国家战略和方案让所有美国人受益。NOAA的新科学和技术战略显示了政府创新的完整性，我们期待持续的合作和引领。”

——近日，NOAA就4项新技术的应用，发表了4份专门的战略并征求公众意见（到12月16日）。在相关的官方报道中，NOAA执行局长Neil Jacobs给出积极的表态，美国政府首席技术官员Michael Kratsios紧接着为这一举措点赞。

“WIFIRE was created to integrate real-time information about wildfires and to use such information for predictive fire behavior modeling. Every fire starts out small. If we can get on top of it in its incipient phase, we have the opportunity to stay on offense. We’re saving lives. That’s the number one thing.”

“WIFIRE能够综合野火实时信息，并用于预测火势模拟。每次林火开始时很小，如果我们能在火情的初期知晓，就有机会制止蔓延。我们在挽救生命，这是第一位的。”

——美国NSF资助265万美元，由加州大学圣地亚哥分校和合作者实施的林火监测WIFIRE项目，随着美国近来林火不断而受到广泛关注，项目首席Ilkay Altintas以及来自Scripps海洋研究所的合作者Adds Neal Driscoll共同描述了系统的功能和意义所在。

(from back cover)

110 Xing Fengjuan, Xu Le, Mu Qingchen, Wang Dexin, Cui Hong/ Analysis of the Current Ground Weather Modification Operation Situation and Development Demands in Jilin Province

Reading

Meeting Review

122 Jia Pengqun, Wen Kangmin/ Redevelopment of Early Quantitative Meteorological Observations from ACRE

Information

126 Selected Papers

Survey

2 Picture/ Number/ Ranking

Forum

67 You Huanling, Ye Caihua, Gu Yue/ Study on Meteorological Impact Analysis and Service Innovation Mode of 2017 Beijing Marathon

70 Cui Jia/ Diversity of Meteorological Data in TV Weather Forecast Programs

113 Xie Jingfang, Li Yunfeng/ The Preliminary Consideration of Developing the Fine Meteorological Service to Trades Based on the Fine Meteorological Forecasting

History

People

119 Jia Pengqun/ Reading, Thinking, Programming -The Paradigm of Modern Weather Masters: Biography of Norman Phillips

《时代》

2019年9月23日

如何在气候变化中生存下来，是这期封面给出的主题。期刊相关内容认为，到2050年，全球变暖仍然是人类面临的重大问题。在回忆过去人类如何在气候变化中生存下来的基础上，文章提示读者：应对气候变化，我们除了改变社会和经济，别无选择，因为人类很难理解正在发生的事情。



《经济学人》

2019年9月21日

随着气候变化问题成为社会经济发展的重大命题，这本著名经济期刊再次将气候搬上封面。本期主题是“全球变暖与所有事情相关”，依据主题，本期在期刊的几乎所有栏目都安排了气候相关文章，总计达到21篇，这或许是前所未有的。封面竖条和颜色，表示1850—2018年相对于1971—2000年平均温度的距平。

《新科学家》

2019年10月19日

天气预报有不确定性，而不确定性是物理学等多个学科要面临的问题：气候变化、脱欧打击、同伴迟到……。充满不确定性的世界如何面对，是这本科普期刊本期封面报道面对的主题。相关文章指出，有很多方法可以评估我们对生活中不确定性的容忍度，从而能帮助人顺利度过各种困境。



《科学世界》

2019年10月

天气预报的科学，是这本科普期刊本期的主题。院士领衔的两位作者用了44个页面，就天气预报和应用层面的科学问题，以图文并茂方式娓娓道来，文中既有人类问天的远古智慧，更有现代预报模式对天气过程的更加精准的解析。

媒体扫描 贾朋群 编辑

MEDIA SCAN

《2018年欧洲、中东和北非林火》

2019年10月

欧盟最新发表的这份年报指出，2018年欧盟地球林火破坏了近17.8万公顷的森林，尽管仅是2017年的六分之一不到，也低于长期平均，但是，更多国家在该年遭遇到大面积林火。



《AMS会刊》

2019年10月

在美国气象学会（AMS）即将迎来成立100周年的时候，这本最新一期会刊，封面主题为“建设天气有序国家”具有特殊意义。尤其是，进一步强调政府与学术界和业界合作，呵护大众。

《2019离岸风电展望报告》

2019年10月29日

国际能源总署发布的这份报告指出，海上风力发电未来可以产生足够满足全球居民和企业需要的电力。尽管2010—2018年全球离岸风电高速发展，但海上风电市场的全部潜力还有待挖掘。



《科学家》

2019年11月

本期以“海洋联系”为主题的封面报道文章，阐述研究者为了保护海洋生命，跟踪海洋生物的故事，其中海洋环流及其变化的作用不可忽视

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-in-Chief

Wang Zhiqiang

Xiao Ziniu

Zhai Panmao

Yu Yubin

Li Weijing

Hu Yongyun

Tan Zheming

Sun Jian

Fei Jianfang

Zhao Licheng

Zhang Peng

Guan Zhaoyong

He Jianxin

Huang Jianping

Liao Xiaohan

Jia Pengqun (executive)

Managing Editors

Cheng Xiuhu, Gao Xuehao, Gong Jiandong, Guo Hu, Guo Xueliang, Li Bai, Li Guoping, Luo Yunfeng, Ni Yunqi, Qu Xiaobo, Ren Guoyu, Ren Xiaobo, Shen Wenhai, Wang Cunzhong, Wang Huaigang, Wang Weidan, Wu Bingyi, Yang Xiuqun, Yu Xiaoding, Zhang Chaolin, Zhang Qingyun, Zhao Ping

Editors

Bi Baogui, Bin Wang, Chen Jingming, Chen Yunfeng, Chen Zhenlin, Cui Chunguang, Cui Jiangxue, Dong Wenjie, Du Jun, Feng Guolin, He Jinhai, He Qing, Hu Xin, Hu Yuewen, Jiang Tong, Jin Feifei, Lei Xiaotu, Li Jiming, Li Jun, Li Liangfu, Li Yaohui, Li Yueqing, Li Zhongming, Liang Xudong, Liu Jingmiao, Liu Liping, Liu Licheng, Liu Shi, Liu Zhengyu, Lu Naimeng, Lu Riyu, Luo Bing, Luo Yali, Ma Shuqing, Ma Yaoming, Peng Yinghui, Pu Yifen, Song Yan, Suo Miaoqing, Tang Xu, Tian Hong, Wan Qilin, Wang Bin, Wang Donghai, Wang Jianlin, Wang Shigong, Wang Yanqing, Wang Yingchun, Wang Yuan, Wang Zifa, Wei Xiaoli, Wen Min, Weng Fuzhong, Wu Liguang, Xie Zhihui, Yan Guanhu, Yan Xiaodong, Yang Ping, Yang Song, Yang Zhaoming, Yao Xuexiang, Yi Lan, Zhai Wuquan, Zhang Dalin, Zhang Guangjun, Zhang Lixiang, Zhang Xiaoling, Zhang Yuetang, Zhao Guangzhong, Zhou Dingwen, Zhou Jianhua, Zhou Lingxi, Zhou Xianxin, Zhu Dingzhen, Zhu Xiaoxiang, Zhu Yujie, Zhu Yande, Zou Liyao, Zou Xiaolei

Editorial office

Zhang Meng, Hou Meiting, Qin Lianxia, Ji Wenbin, Jiang Jianmin, Cui Xiaojun

Add: CMA Training Centre, 46 Zhongguancun Nandajie,
Beijing 100081, China

Tel: +86-10-68409927/68409933

Email: amst@cma.gov.cn

<http://cmalibrary.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

(Including Advance Report 2019: Jilin Weather Modification)

1 Xu Xiaofeng/ Message from the Editor-in-Chief

Article

- 6 Lei Xiaotu, Liu Weidong, Zhao Rui, Yan Guanhu/ An Overview on the Achievements of Meteorological Science and Technology in China
- 12 Rao Lijuan, Gao Shanhong, Zhang Kai/ Impact of Boundary Layer and Cloud Microphysics Schemes in WRF Model on Numerical Simulation of Two Yellow Sea Fog Cases
- 20 Zhao Lei, Gao Song, Wu Zheng, Du Qin/ Parallel Transmission of Data from a Mesoscale Numerical Prediction Model: An Application Study
- 26 Gu Xiujie, Feng Lisha, Tian Li, Dong Zhenhua, Wang Youhe/ Circulation and Key Meteorological Factors for the Three Consecutive Air Pollution Processes in Henan During the Winter of 2016
- 35 Fan Yunxin, Xu Wei, Mo Li/ Spatial-Temporal Patterns of Lighting and Disasters in Shanghai from 2009 to 2017
- 40 Guo Zhiliang, Gao Conghui, Xie Wenfeng, Chen Shumin, Li Weibiao/ Temporal Characteristics and Influencing Factors of Visibility in Baiyun Airport from 2005 to 2017
- 44 He Qiuyan, Liu Yueyu, Yang Jiayang, Guo Bin/ Characteristics of Lightning Activity and Lightning Disaster in Hunan
- 49 Duan Wenguang, Liu Yan, Duan Wenqiang, Shi Yongwei, Li Qiuming, Jia Yiyang/ VR Technology Application in the Skills Training for Guarantee of the Ground Meteorological Observation Equipment
- 53 Cui Fen'e, Chang Juzheng, Yan Chengyu, Zhang Chenyu/ The Cause and Numerical Prediction of a Strong Convective Weather Process at the Southern Foot of Yanshan
- 61 Yi Zhixue/ Precipitation and Air Temperature Characteristics and Karst Landform Solubility Analysis for Recent Half Century in Leishan Guizhou
- 76 Hu Jingbiao, Li Xu, Ding Yao, Wang Dexin/ 60 Years of Development in Jilin Weather Modification
- 82 Li Wei, Gu Xiaonan, Hu Jingbiao, Wang Chaoqun, Qi Ying, Wang Xiaomei/ Calculation of Saturated Vapor Pressure at Temperatures Below 0 °C Under Different Conditions
- 86 Guan Zhiyu/ Evolution and Benefit Analyses of Weather Modification Operation Capacity in Baishan City
- 91 Yu Cuihong / Quality Analysis and Assessment of Rainfall Data at Regional Automatic Weather Stations in Jilin Province
- 95 Wu Manli, Chen Liqiang/ Diagnosis and Analysis of Meteorological Potential Conditions of Lightning in the Northeast Cold Vortex, China
- 100 Zhang Xiaopei, Li Hongyu/ Application of IoT Technology in Weather Modification
- 104 Sun Haiyan, Gu Xiaonan, Wang Qi, Qi Yanbin/ A Case Study of Design and Effectiveness Analysis of the Rainfall Enhancement by Aircraft in Jilin Province

(continued in page 128)