

Advances

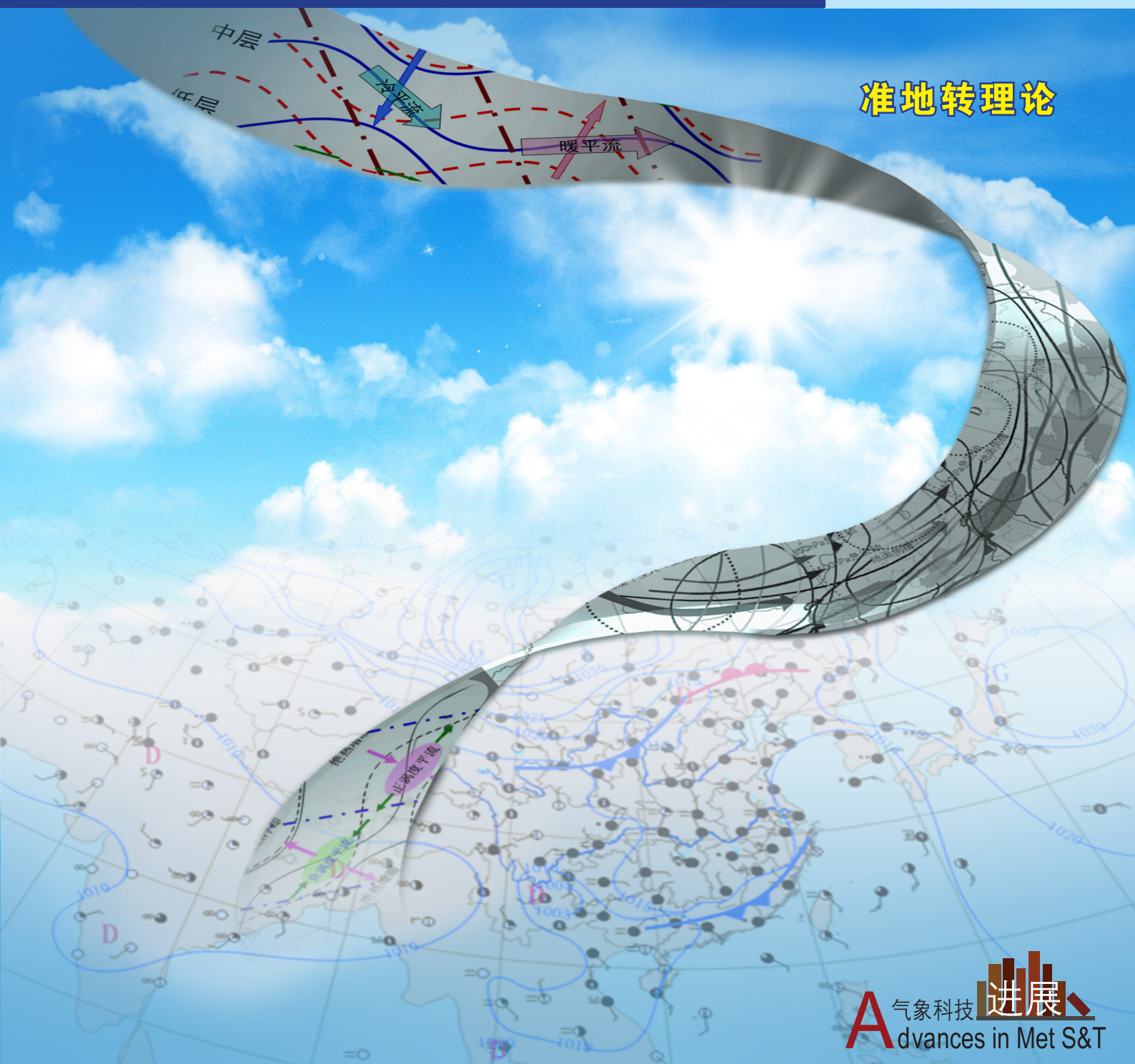
in Meteorological Science and Technology

气象科技进展

No.3

2012年6月
第2卷 第3期

准地转理论



气象科技 **进展**
Advances in Met S&T

ISSN 2095-1973



中国气象局气象干部培训学院 主办

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

名誉主编 丑纪范 中国气象局气象干部培训学院
主编 许小峰 中国气象局

副主编

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

常务编委 (按音序排名)

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

编委 (按音序排名)

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

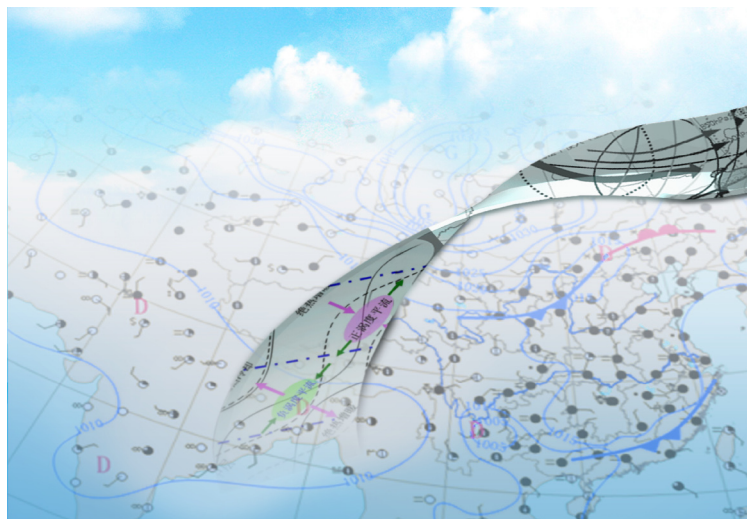
海外编委 (按音序排名)

陈镜明	李 俊	刘征宇	金飞飞	王 斌
翁富中	杨 崧	张大林	张广俊	邹晓蕾

编辑部

张 萌 侯美亭 胡 英 陈忠美
地址: 北京市中关村南大街46号,
中国气象局气象干部培训学院 100081
电话: (010) 68409927/68409933
邮箱: amst@cma.gov.cn
Notes: 气象科技进展编辑部/图书馆/干部学院/CMA
网址: <http://library.cma.gov.cn/amst>
官方微博: <http://weibo.com/2115232930/profile>
印刷: 北京宝昌彩色印刷有限公司

国际标准刊号: ISSN 2095-1973
国内统一刊号: CN 10-1000/P
定价: 20元



本刊已被教育阅读网、万方数据、《中国学术期刊网络出版总库》及CNKI系列数据库收录。

目 次

第2卷 第3期 2012年6月

研究论文

封面报道

- 6 陶祖钰, 周小刚, 郑永光: 天气预报的理论基础——准地转理论概要及其业务应用

准地转理论(quasi-geostrophic theory), 是预报员建立清晰的预报思路所必须掌握的动力学基础……

研究进展

- 17 任福民等: 近30年ENSO研究进展回顾
25 王绍武: 月平均大气环流与短期气候预测
27 李莹等: 2011年华西秋雨特征及其成因分析
34 杨霏云等: 作物模型、遥感和地理信息系统在国外农业气象服务中的应用进展及启示
39 姚秀萍等: 气象服务效益评估研究和业务进展

“卫星资料应用”专题系列

- 45 邹晓蕾: 极轨气象卫星微波成像仪资料

短论

- 51 冀文彬等: 一种基于复杂网络社团的CDN性能优化模型

论坛

- 53 张菊芳等: 中美气象灾害题材影片的对比较分析

主编语

在20世纪初,伴随现代气象学的发展,建立了早期的地转理论,1948年美国著名气象学家Charney提出了准地转分析方法,在随后的20世纪50—60年代,数值天气预报模式从正压转向斜压,这一方法发挥了重要作用,为解决数值天气预报中完整的大气动力、热力偏微分方程组的数值解提供了可行方案,并逐步在大气动力学分析与诊断中进一步奠定了其核心理论地位。准地转理论是以物理学三大定律为基础的完整、严密的理论体系,是天气预报业务中必须掌握的重要理论之一。

然而,随着大气科学的快速发展,数值预报模式也出现了巨大变化,将完整的原始方程组应用于业务数值预报已不再成为问题。此时就提出了这样一个问题:面对数值预报技术取得的成功,一些经典理论,例如准地转理论,是否已经完成了历史使命,而只能存在于教科书和气象史的回顾当中呢?本期封面报道文章(P6)对这一问题给出了回答,认为尽管现代预报员可以拿到较为复杂的数值预报模式产品,但当预报员进行预报分析时,经典理论所涵盖的基本科学规律是无法违背的,这正是气象学经典理论的魅力和价值所在。预报员需要加强的基础能力和科学思维方式的训练,对经典理论的深入、透彻了解,不应该随着预报员的更新换代而被淡化,甚至遗忘。当然,在不断完善的预报环境中,预报员如何更有效地理解和运用经典理论,本文只是开了个头,希望有更多的人参与探讨。

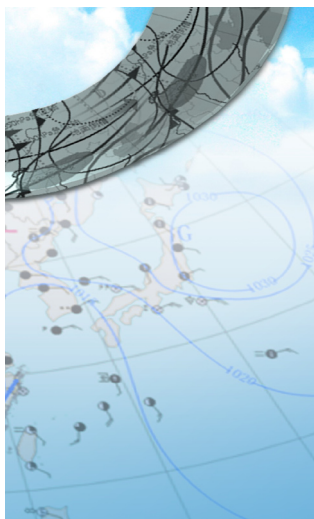
无论是气象学经典理论、业务模式还是评估手段,都是在前人智慧的积累、碰撞中诞生和应用,并逐渐被完善的。只有对前人的智慧进行总结和梳理,对其思想和发现的理解才会更加深入,新思路的火花才会不断被激发。近些年热门的研究领域,如ENSO(P17)、短期气候预测(P25)、农业气象服务(P34)和气象效益服务评估(P39)等的国内外研究回顾和启示都将在本期呈现。

2011年是我国总降雨量偏少,年平均降水量为近60年有完整探测记录以来的最低值。但在秋季,却出现了少见的华西秋雨,其降水量仅次于最高的1964年和次高的1975年,造成了较严重的区域洪涝和地质灾害。国家气候中心的研究人员对2011年我国华西秋雨的特征和成因做了系统分析(P27),认为拉尼娜事件、低纬度海洋水汽供应充足、中高纬度冷空气异常活跃及副热带高压稳定等因素共同促成了这一气候事件的发生。

在本期的卫星资料应用的系列文章中(P45),邹晓蕾教授进一步介绍了极轨卫星上的微波探测仪的发展进程及在气象资料业务中所起的重要作用,关心卫星资料应用的读者可从中获取到有用的信息。

近日,本刊编辑部走访了山西省河曲县国家基本气象站,通过与台站人员深入对话全面感受气象科技工作。希望以此契机拉开本刊编辑走访台站的序幕,借力接通“地气”让刊物质量上一个台阶。

许小峰



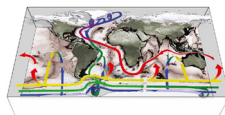
P6

封面报道: 天气预报的理论基础——准地转理论概要及其业务应用

封面图: 现代天气分析中的准地转理论

科学观察

2 读图 数字 榜单



P2

特写

56 贾朋群: 日美合作开发卫星双频降水雷达——能否续写TRMM的辉煌

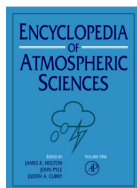
阅读

会评

57 贾朋群: 延伸期预报: 任重道远——“大气低频振荡和延伸期预报”研讨会评介

书评

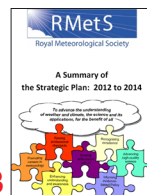
59 黄红丽等: 《大气科学百科全书》——大气科学的全景图像



P59

信息

- 16 会议信息
- 33 新书架
- 58 编辑走台站: 山西河曲站
- 60 文摘(中文文献)
- 62 文摘(英文文献)
- 封3 媒体扫描



封3

往事钩沉

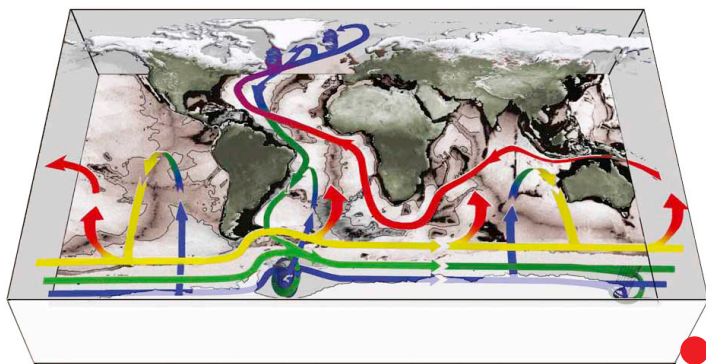
人物

64 张健: 用科学为保护地球臭氧层呐喊——罗兰



P64

读图



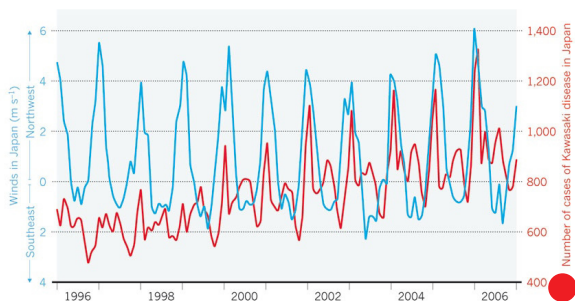
MOC: 海洋上的重要环流

在全球海洋上，经向翻转环流（the meridional overturning circulation, MOC）是影响气候和气候变率的主要机制，美国MIT学者最近完成的一项研究认为，以往关于MOC的研究将焦点放在北大西洋，即因热散失触发海水沉降的发生地。然而环流的关键难题，是南大洋上通过涌升流海流从海面以下返回的路径。这一返回路径在很大程度上被风驱动。作者综合前人研究成果，给出包括MOC在内的全球海洋环流概念图。

来源：Nature—Geoscience

SEASONAL CYCLE

The number of Kawasaki disease cases in Japan (red) is slowly rising, for unknown reasons, but is strongly correlated with the average velocity of winds coming from the northwest (blue) — the direction of central Asia.



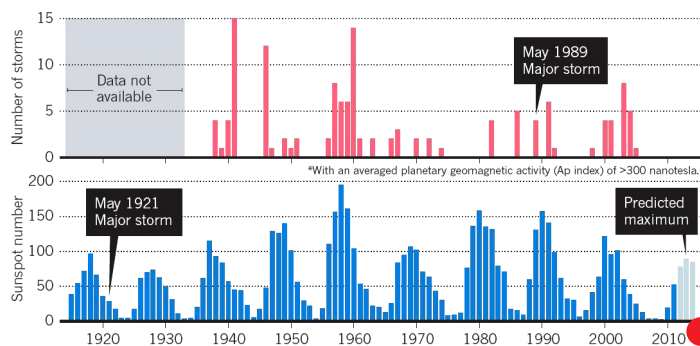
川崎病与风场关系值得关注

川崎病（Kawasaki disease）是一种主要发生在5岁以下婴幼儿的病因未明的全身血管炎性疾病。最新的一项针对日本川崎病的研究，将病因与风向联系起来，认为源自亚洲中部的大尺度的风能够将川崎病带到日本，这也解释了该病发病率与风向有很好的相关性。也许，研究人员能够从太平洋上空的气流中，揭示川崎病的发生规律。

来源：Nature

SOLAR CYCLES

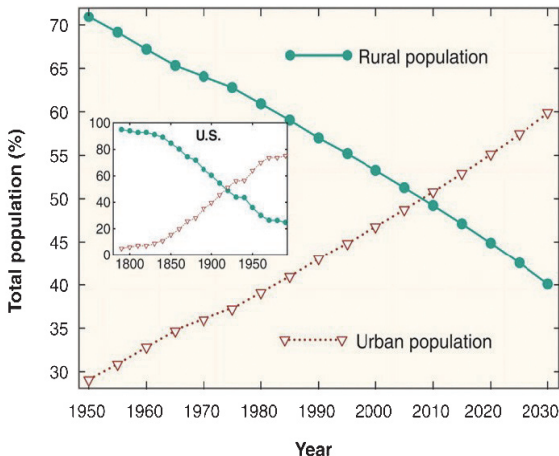
The number of severe* space weather storms each year (top) is related to, but not precisely determined by, short- and long-term patterns in solar activity (bottom).



空间天气风暴：技术型社会必须防备的灾害

现代社会越来越多地依赖各种技术设备和系统维持其运转，1989年地球经历的地磁风暴使得加拿大500万人口断电9小时。造成这起灾害的原因，是所谓日冕物质抛射（coronal mass ejections, CME），即在太阳大气磁暴过程中发生的磁等离子体的巨大喷射。当CME到达地球就会向地球磁场注入大量能量，引发地球磁场变化，让电网等技术设备发生紊乱。空间天气预报显示，今后几年将迎来空间天气风暴高发期。

来源：SWPC/NOAA



城市气象研究：更多人口受益

美国科学院（NAS）最新出版的《城市气象：预报、监测和满足用户需求》报告，全面梳理了城市气象学进展，特别是未来需要面对的挑战。图中给出1950—2030年（预测）世界城市和农村人口变化，以及美国1790—1990年人口情况（小图）。

来源：NAS

数字

14~18m

法国、英国和日本科学家在一项研究中，利用在塔希提岛进行的一项大型珊瑚礁钻探项目的结果，首先确定了“融水脉动1A”事件发生在距今14650—14310年之间，这个时间正好与一次气候变暖高峰一致。当时海平面上升了14~18m。这样大幅度的海平面上升表明，南极洲的冰层融化可能对这些变化的发生做出了贡献，从而揭示出南极冰层融化与海平面上升之间的关系。

90%

我国第一颗海洋动力环境卫星——海洋二号卫星，集主、被动微波遥感器于一体，每天可观测全球近90%的海洋，极大提升了我国海洋观测能力。

90%

世界银行最新发表的报告《城市和洪水：21世纪城市洪水风险管理指南》指出，过去30年最大的7次洪水都发生在亚洲，90%因洪水死亡或受到影响的人生活在亚洲，因此亚洲是世界上对洪水最为脆弱的地区。

国际“准地转理论”主题被引频次最高的前10篇论文

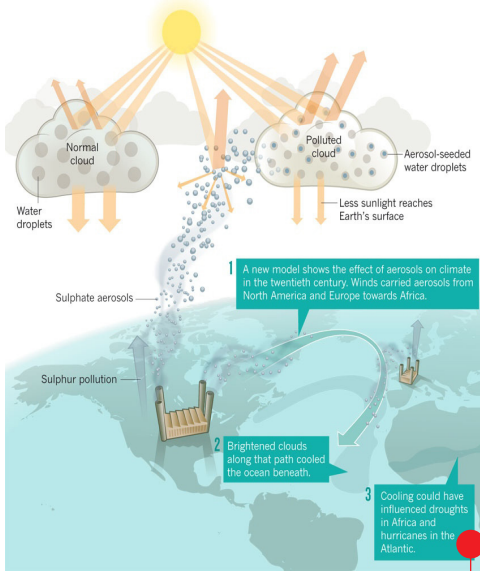
排名	篇名	第一作者	来源	被引频次
1	Data assimilation using an ensemble Kalman filter technique	Houtekamer, PL	Monthly Weather Review, 1998, 126(3)	487
2	Analysis scheme in the ensemble Kalman filter	Burgers, G	Monthly Weather Review, 1998, 126(6)	450
3	A sequential ensemble Kalman filter for atmospheric data assimilation	Houtekamer, PL	Monthly Weather Review, 2001, 129(1)	385
4	An ensemble adjustment Kalman filter for data assimilation	Anderson, JL	Monthly Weather Review, 2001, 129(12)	347
5	Ensemble data assimilation without perturbed observations	Whitaker, JS	Monthly Weather Review, 2002, 130(7)	333
6	Distance-dependent filtering of background error covariance estimates in an ensemble Kalman filter	Hamill, TM	Monthly Weather Review, 2001, 129(11)	259
7	Singular vectors, metrics, and adaptive observations	Palmer, TN	Journal of the Atmospheric Sciences, 1998, 55(4)	237
8	Hydrologic data assimilation with the ensemble Kalman filter	Reichle, RH	Monthly Weather Review, 2002, 130(1)	223
9	A Monte Carlo implementation of the nonlinear filtering problem to produce ensemble assimilations and forecasts	Anderson, JL	Monthly Weather Review, 1999, 127(12)	214
10	Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model	Roeckner, E	Journal of Climate, 2006, 19(16)	212

来源: SCIE数据库, 检索时间:2012年5月30日

胡英提供

THE POWER OF POLLUTION

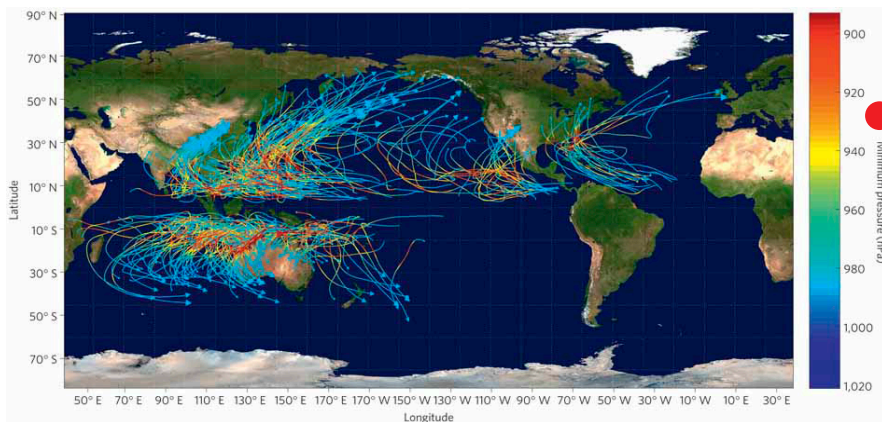
Aerosols — tiny particles from pollution, volcanoes, dust and other sources — can reflect or absorb sunlight directly, or seed cloud droplets and brighten clouds. New climate models suggest that aerosols and clouds can have bigger than expected influences.



污染改变气候

污染与气候的关系, 科学家们至少关注和研究了几十年。一项新的研究表明, 在20世纪, 地球风场将北美和欧洲的气溶胶输送到非洲, 途中含气溶胶的更加明亮的云将海水冷却, 带来非洲干旱和大西洋飓风。这一机理也许为气候模式更加准确预测21世纪气候变化提供帮助。

来源: Nature



全球热带气旋灾害损失呈现增加趋势

温室气体排放的潜在影响之一是增加极端事件的损失。美国学者量化研究了这种增加的量级, 发现即使没有气候变化, 热带气旋带来的损失也将加倍。这种损失集中在北美、东亚和加勒比—中美洲地区。

来源: Nature—Climate Change

10亿英镑

英国最近重新启动了碳捕捉竞争项目, 面向企业投入10亿英镑, 寻求在2016—2020年前建立针对发电厂排放二氧化碳的捕捉和封存设施。这项最早在2007年宣布的项目, 包括了1.25亿英镑的研究经费。

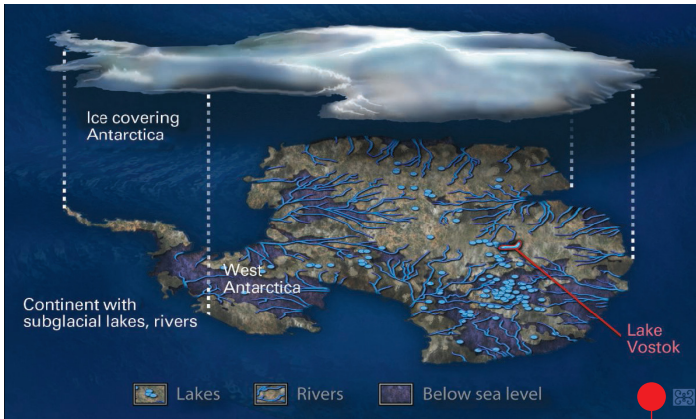
10年

欧空局 (ESA) 4月初宣布, 科学家已经与Envisat卫星失去了联系。该卫星于2002年升空, 是ESA最主要的地球观测卫星, 在服役的10年时间里, 星载的10种仪器返回了臭氧、云和温室气体等大量有价值的观测资料。

800美元

为了扩大学术期刊的影响, 美国气象学会 (AMS) 计划推出论文开放共享选择, 即只要作者另外支付800美元出版费用, 其在AMS期刊上发表的论文即可在发表之后免费下载。此前, AMS已经推出了发表满2年论文全文免费共享的服务。

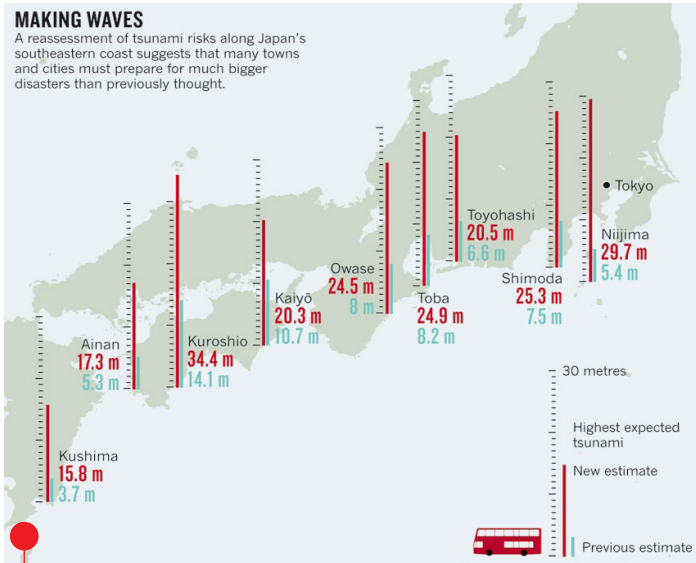
读图



南极冰盖等待被揭开

2012年2月，俄罗斯南极考察队经过30多年的努力，终于在南极东方湖钻透了南极冰盖。然而，南极冰盖复杂的河流和湖泊组成的复杂水文网络，等待科学家们进一步了解和认识。

来源：Science



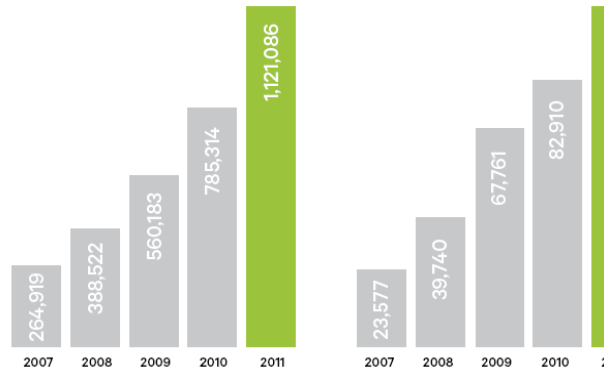
日本海啸：要防患更大灾害

日本政府指定的由东京大学海啸专家率领的一个科学家小组，利用新的海啸模式对日本地震及其引发的海啸风险进行了评估。最新结果显示，日本沿海绝大多数地区的海啸风险远高于2003年进行的同样评估的结果。例如高知市（Kōchi）最大海啸浪高从14.1m增加到34.4m。

来源：Nature

Annual increase in monthly visitors

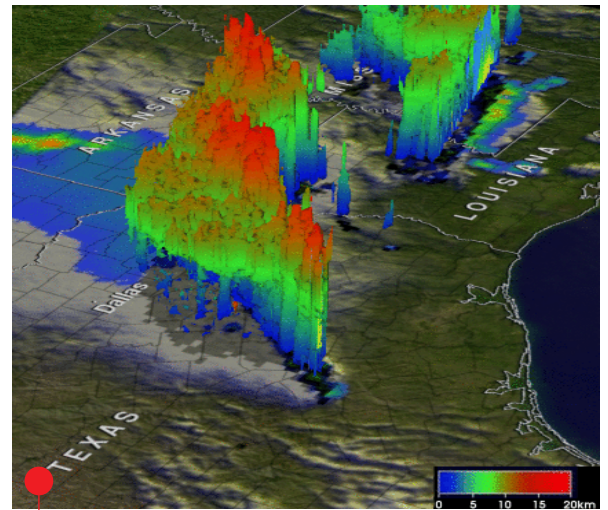
Average daily visitors to metSERVICE.com



Source: Nielsen Market Intelligence

新西兰气象局：网页持续成热点

最近发表的新西兰气象局2011年度报告，给出了最近5年2011年，日访问量5年里平均增加了453%。



TRMM卫星捕捉龙卷风立体水汽图像

2012年4月4日，TRMM卫星扫过德克萨斯州东北部时，正遇到龙卷风发生，经过对TRMM探测资料分析，特别是利用TRMM上搭载的降水雷达，成功获得了龙卷风强度的3-D图像和降水垂直分布图。图中可以看见龙卷风风暴范围，强烈的风暴到达13km的高度。

来源：NASA

数字

20%

欧盟公布的2014—2020年预算建议中，与气候相关的预算占到20%，总资金至少达到170亿欧元。这一建议的资金支持力度是目前2倍。

700万

今年5月12日是我国第四个“防灾减灾日”，中国气象局副局长许小峰在接受人民日报记者专访时指出，从2009年起国家级和省级气象部门陆续开通了气象服务官方微博达41个，全国气象微博粉丝超过700万。市民获得气象信息，微博成重要途径。

4200万

亚洲开发银行发表的《应对气候变化和亚太地区的迁徙》报告称，2010—2011年，亚太地区因极端自然灾害导致的移民人数达4200万以上。

中国“准地转理论”主题被引频次最高的前20篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引频次
1	“91·7”梅雨锋暴雨的螺旋度分析	杨越奎	气象学报, 1994/03	111
2	湿 Q 矢量表达式及其应用	张兴旺	气象, 1998/08	104
3	天气数值预报中使用过去资料的问题	丑纪范	中国科学, 1974/06	80
4	台湾岛地形对台风移动路径的作用	罗哲贤	大气科学, 1995/06	76
5	完全 Q 矢量的引入及其诊断分析	姚秀萍	高原气象, 2001/02	64
6	影响热带气旋结构和运动的两类因子的数值研究	陈联寿	气象学报, 2001/02	56
7	准地转 Q 矢量分析及其在短期天气预报中的应用	白乐生	气象, 1988/08	56
8	中国 Q 矢量分析方法的应用与研究	岳彩军	高原气象, 2005/03	52
9	关于冬季北半球定常行星波传播另一波导的研究	黄荣辉	中国科学 (B辑), 1983/10	52
10	1980年夏季华北干旱时期东亚阻塞形势的位涡分析	毕慕莹	应用气象学报, 1992/02	50
11	热带气旋逆时针打转异常路径的可能原因	罗哲贤	中国科学 (B辑), 1991/07	46
12	修改的 Q 矢量表达式及其应用	张兴旺	热带气象学报, 1999/02	41
13	准地转 Q 矢量诊断场与暴雨关系的分析	杨小艳	气象, 1995/11	39
14	Q 矢量及其在天气诊断分析中应用研究的进展	岳彩军	气象, 1999/11	37
15	夏季青藏高原上空热源异常对北半球大气环流异常的作用	黄荣辉	气象学报, 1985/02	36
16	斜压涡旋中的通风气流与热带气旋移动的关系	田永祥	气象学报, 1996/01	33
17	简单斜压大气中热成风的建立和破坏(一)	陈秋士	气象学报, 1963/01	32
18	大气动力学模式的比较研究	张可苏	中国科学, 1980/03	31
19	定量分析几种 Q 矢量	岳彩军	应用气象学报, 2003/01	29
20	昆明准静止锋的准地转 Q 矢量分析	李英	气象, 1999/08	29
20	边缘区域扰动演变对台风结构的影响	罗哲贤	大气科学, 1994/05	29

来源: CNKI中国学术期刊总库, 检索时间:2012年5月30日

胡英提供

106,986

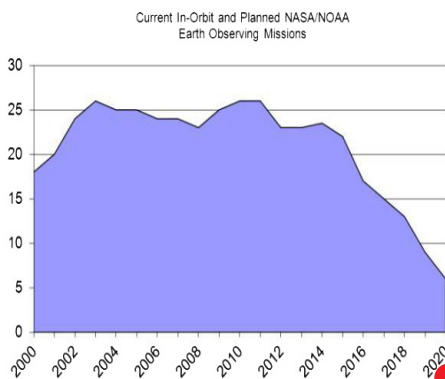
453

% increase in average daily visitors to metsservice.com over the past 5 years

2011

该局网页被访问次数的统计, 结果表明从2007年到

来源: metsservice.com



美国在丧失地球观测的优势

美国科学院科学研究委员会(NRC)针对美国卫星观测的研究报告指出, 由于延期、项目改变和经费严重不足等原因, 美国未来地球观测前景不容乐观。2009年2月和2011年3月NASA轨道观测卫星和Glory卫星的发射相继失败, 使得美国的地球观测系统进入“能力快速下滑”阶段。图中为2000年以来美国地球观测项目数量以及对未来的预测。

来源: NRC

9500人

美国劳工部最新发表的《职业展望手册》统计结果表明, 2010年美国大气科学(包括气象)领域从业人员总计9500人, 预计到2020年将增加1000人, 年增加11%, 与平均就业人员增加率基本持平。报告还显示, 2010年5月, 大气科学从业人员平均年工资为8.778万美元。

1°C

美国哈佛大学公共卫生学院近日发表的一篇研究报告指出, 夏季温差每升高1°C, 老年糖尿病患者死亡率增加4%, 心脏病患者死亡率增加3.8%。

1100人

2000年以来, 我国突发地质灾害平均每年造成死亡和失踪约1100人, 经济损失120亿~150亿元。目前我国约有地质灾害隐患点近24万个, 威胁人口1359万。为此, 国务院批复了《全国地质灾害防治“十二五”规划》。

天气预报的理论基础 ——准地转理论概要及其业务应用

陶祖钰¹ 周小刚² 郑永光³

(1 北京大学物理学院大气和海洋科学系, 北京 100871; 2 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081;

3 国家气象中心, 中国气象局, 北京 100081)

摘要: 准地转理论 (quasi-geostrophic theory), 是预报员建立清晰的预报思路所必须掌握的动力学基础。从垂直运动和天气系统发展的诊断这两个天气预报的根本问题出发, 介绍了准地转理论的来源, 指出它是近代大气动力学的正压大气长波理论向现代大气动力学的多层斜压大气数值模式发展的历史必然。准地转方程组的推演过程说明, 准地转理论是基于严密数学推导和物理洞察力的、建立在物理学三大定律 (动量、能量、质量守恒) 之上的完整的大气动力学理论体系, 因此是大气动力学的核心。 ω 方程和位势倾向方程的强迫项表明, 温度平流和涡度平流是最基本的预报因子, 它们导致地转平衡的破坏, 同时又通过所伴随的次级环流使地转平衡得到不断地恢复 (即地转适应过程), 从而使大尺度环流在缓慢的变化中始终保持准水平和准地转平衡状态。准地转理论还揭示了温度平流是使后倾斜压扰动发展的根本原因, 而涡度平流所伴随的垂直环流则导致了大尺度环流系统热力结构的变化。最后给出了一些在常规天气图上可以直接使用的定性规则作为准地转理论在实际预报中应用的参考。

关键词: 准地转动力学, 大尺度环流系统, 斜压发展, 次级环流, 地转适应

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2012.03.001

Theoretical Basis of Weather Forecasting: Quasi-Geostrophic Theory Summary and Operational Applications

Tao Zuy¹, Zhou Xiaogang², Zheng Yongguang³

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

2 CMA Training Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: The quasi-geostrophic (QG) theory is the dynamic basis that forecasters must master to establish a clear idea of weather forecasting. In this paper, from the two fundamental issues of weather forecasting that are the diagnosis of vertical movement and the development of weather systems, the origin of the QG theory is introduced. It is pointed out that it is a historical inevitability of the modern atmospheric dynamics developing from the atmospheric long-wave theory to the multi-level baroclinic atmospheric numerical model. The inference of the QG equations shows that the QG theory is a complete theoretical system of atmospheric dynamics, based on rigorous mathematical derivation and physical insight and built on top of the three laws of physics (conservations of momentum, energy, and mass), so it is the core of the atmospheric dynamics. The forced terms of omega equation and the geopotential tendency equation show that temperature advection and vorticity advection are the most basic predictors, which lead to the destruction of geostrophic balance, and make geostrophic equilibrium restored (ie, geostrophic adjustment process) through the associated secondary circulation, so that large-scale circulation in the slow-changing always maintains the quasi-level and quasi-geostrophic equilibrium. The QG theory also revealed that the temperature advection is the basic reason for the development of backward tilted baroclinic disturbance, yet the vertical circulation associated with the vorticity advection has led to changes in the thermal structure of large-scale circulation systems. Finally, some qualitative rules in conventional weather maps can be used directly as a QG theory application in the operational weather forecasting.

Keywords: quasi-geostrophic dynamics, large-scale circulation systems, baroclinic development, secondary circulation, geostrophic adjustment

收稿日期: 2012年4月9日; 修回日期: 2012年4月23日

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

资助信息: 国家科技支撑项目 (2008BAC37B00); 公益性行业专项 (GYHY200906003, GYHY201206004); 国家自然科学基金 (41075011)

1 引言

准地转理论是以水平气压梯度力和地转偏向力之间的准平衡状态为基本特征的中纬度大尺度斜压扰动发展机理的动力学理论的简称, 其英文缩写为QG (quasi-geostrophic theory)。它是天气预报的理论基

础,也是整个大气动力学理论的核心和精华。本文将对准地转理论的科学意义、应用价值及其来龙去脉作概要的介绍。写作本文的目的是因为经过省级预报员轮训发现当前预报员的预报实践严重脱离(甚至是背离)这一基本理论;从相关院校的动力气象和天气学教科书看,使本科生能对准地转理论有个基本认识还很困难。因此中国气象局将准地转理论列为全国预报员的培训内容。本文即是轮训课堂教学内容的总结。

对于准地转理论涉及到的一些大气动力学、热力学的基本概念虽然本文有一些简要的解释,必要时读者可查阅Holton(霍尔顿)的《动力气象学引论》^[1]原书以及作者在学习该书基础上编写的北京大学教材《天气过程诊断分析原理和实践》^[2]。最后文中给出了一些在常规天气图上可以直接使用的定性规则作为准地转理论在实际预报中应用的参考。

2 准地转理论是天气预报的根本

2.1 天气预报的根本问题是什么

严格地讲,对环流形势和天气实况进行外推不能算真正意义上的“预报”。在天气变化比较平稳的情况下,“外推”基本上可以满足日常预报需要。但是在天气发生转折的时候,如天气由晴转雨或由雨转晴、环流由经向转纬向或纬向转经向,以及天气系统的生消,“外推”就完全无能为力,而这时恰恰是最需要预报的时候,是对预报员能力的考验。

真正意义上的“预报”应该包括两个基本方面:一是垂直运动问题,即能够根据当前的环流形势和天气系统判断垂直运动的方向和强度,从而认识当前雨、雾、雷、雪等天气发生的原因;二是发展问题,即能对环流形势,包括槽脊、气旋反气旋、锋面、急流等天气系统和未来的演变趋势做出正确的估计,并在此基础上对未来的天气做出预报。

上面的两点是天气预报中最困难的问题。判断垂直运动的困难在于,大尺度环流的垂直运动非常小,其量级只有 10^{-2} m/s,而水平运动,风的量级为 10^1 m/s,两者相差3个数量级。由于垂直运动只有水平运动的千分之一,所以大尺度运动是准水平运动,并把大尺度水平环流称为基本环流。垂直运动及与之相联系的水平辐散运动则被称为次级环流(secondary circulation,也译作二级环流)。垂直运动由于太小无法直接测量;大尺度运动与地转风很接近,根据实测风计算水平散度的误差也非常大。因而,诊断垂直运动成为天气预报的核心问题之一。

发展问题是天气预报的第二个困难。可以毫不夸张地说,整个天气学的历史就是围绕发展问题展开的。从锋面学说温带到气旋模型,从力管环流理论到

斜压不稳定理论,都是为了解决发展问题而提出的。这些理论的价值是指出了斜压性(即水平温度差异)是维持大气环流和引起天气系统发展的根本原因,但是它们都不能对未来的发展趋势做出具体的预报。

20世纪前期有了高空天气图以后,曾经出现过一些发展理论,例如萨特克利夫的发展指标、佩特森的发展公式,基倍尔的平流动力学理论等^[3,4],为实际天气预报工作提供了一些具有一定动力学意义的预报思路和方法。它们的特点都是“高空决定论”,即强调高空环流对地面系统发展的作用。由于它们没有把高低空环流系统作为一个整体(即斜压扰动)来认识,所以都没有回答高空环流系统是如何发展的问题。

要解决发展问题,理论上的困难在于大尺度运动是水平方向上的准平衡运动(即准地转运动)。由于水平加速度非常小,无法准确计算,因而不能准确掌握环流的变化趋势。

2.2 准地转诊断方程组的出现

20世纪30年代末,随着高空观测网的建立,在大量观测资料基础上,罗斯贝提出了著名的长波理论。40年代前期,基倍尔由小参数法得到了准地转的预报方程。不久,Charney(恰尼)等人利用尺度分析法对大气运动方程组进行简化,也得到了准地转的预报关系式。这些都为数值天气预报方法的诞生提供了必要的理论基础。虽然早在1922年理查森就做了有历史意义的第一次数值预报试验,但真正有实用价值的数值预报是从正压模式开始的,因为理查森计算出的6小时变压高达145hPa完全不符合大气的实际情况^[5]。所以,只按试验结果看,这是一次失败的试验。失败的原因是在于试验是在气压倾向方程和运动方程基础上进行的,对大尺度环流的准地转特点还没有认识。

正压模式是以涡度方程代替原始运动方程的数值模式。正压模式也是一层模式,因为正压大气中等压面上的温度是均匀的,没有温度变量,所有等压面的形势都相同,所以只需要一层,用500hPa一个等压面就可以代表整个大气层。正压模式中大气的运动是完全的水平运动,因为正压模式中空气的密度是常数,所以大气是不可压缩的,即水平散度为零,因此也没有垂直运动。正压模式中只有一个自变量——等压面位势高度,风场和涡度场都遵从地转风关系由高度场唯一决定,所以正压模式也是地转模式。由于正压模式充分考虑了大尺度环流的准地转特征,所以它成为最早的数值预报业务模式。

但是,正压模式的物理本质是仅仅依靠绝对涡度守恒来做500hPa涡度场的预报,所以它不可能预报出环流系统的强烈发展。同时,正压模式中没有垂直运动,所以它也不能预报降水。显然,数值天气预报必

须从正压模式向斜压模式发展。

斜压模式是多层模式，斜压性表现在等压面上温度分布的不均匀和由静力学关系决定的高低层等压面形势的差异。斜压模式中温度不是常数，所以密度也不是常数，大气是可压缩的，即散度不等于零。散度是引起涡度个别变化的原因，即涡度方程中的散度制造项，所以斜压模式可以预报各层环流系统的发展。高层和低层的散度受质量补偿原理控制（即低空辐合一定被高空辐散抵消，反之亦然）因此高低层环流的变化是相互关联的，既不是“高空决定地面”，也不是“地面决定高空”。通过连续方程可以从散度的垂直分布决定垂直运动的方向，所以斜压模式可以预报降水。图1是一个最简单的斜压模式（两层模式）的示意图。

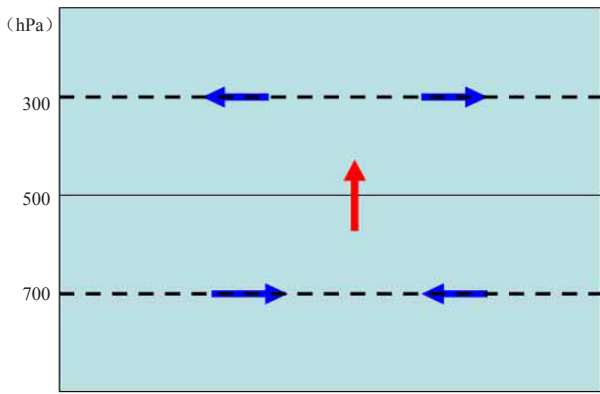


图1 一个最简单的斜压模式（两层模式）示意图

（用500hPa将整个大气分为上下两层，上层用300hPa来代表，下层用700hPa代表；蓝色箭头表示上下层的水平散度，红色箭头表示500hPa的垂直速度；散度和垂直速度之间符合质量连续方程）

斜压模式也只有一个自变量等压面位势高度，只不过它是三维的，而正压模式中它是二维的。斜压模式中的温度场由等压面之间的厚度唯一决定，风场也由地转风关系决定。在这个意义上，斜压模式也是地转模式。但是，斜压模式中有散度和垂直速度，因此斜压模式不是完全的地转模式，所以被称为准地转模式。为了解决准地转斜压模式中垂直速度的计算问题，Charney提出了根据等压面位势场诊断垂直速度的 ω 方程，即准地转 ω 方程：

$$\left[\nabla^2 + \frac{f_0^2}{\sigma} \frac{\partial^2}{\partial p^2} \right] \omega = \frac{f_0}{\sigma} \frac{\partial}{\partial p} \left[\mathbf{V}_g \cdot \nabla \left(\frac{\nabla^2 \Phi}{f_0} + f \right) \right] - \frac{1}{\sigma} \nabla^2 \left[\mathbf{V}_g \cdot \nabla \left(\frac{\partial \Phi}{\partial p} \right) \right] \quad (1)$$

式中，左边是 p 坐标垂直速度 ω 的空间 (x, y, p) 的二次微商项 $\partial^2/\partial x^2$ ， $\partial^2/\partial y^2$ ， $\partial^2/\partial p^2$ ，即 ω 对的水平和垂直分布；右边是等压面位势高度 Φ 的各种空间微商项

（其中地转风 \mathbf{V}_g 可写成位势高度 Φ 的水平梯度）。 ω 方程是一种可通过迭代法从位势高度场 $\Phi(x, y, p)$ 求出垂直速度 $\omega(x, y, p)$ 数值解的微分方程（泊松方程）。等号右边的项称为强迫项，在等压面形势图上都是已知的，因此可以求出 ω 的空间分布。由地转风关系可知，右边第一项是地转涡度平流的垂直微商；由静力学关系可知，右边第二项是厚度平流（即温度平流）的拉普拉斯。

准地转 ω 方程中没有时间变量 t ，所以它不是预报方程而是诊断方程，但对斜压模式而言，它是不可缺少的。

与准地转 ω 方程项类似的还有准地转位势倾向方程：

$$\left[\nabla^2 + \frac{f_0^2}{\sigma} \frac{\partial^2}{\partial p^2} \right] \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) = -f_0 \mathbf{V}_g \cdot \nabla \left(\frac{\nabla^2 \Phi}{f_0} + f \right) - \frac{f_0}{\sigma} \frac{\partial}{\partial p} \left(\mathbf{V}_g \cdot \nabla \left(\frac{\partial \Phi}{\partial p} \right) \right) \quad (2)$$

式中，未知量是位势倾向 $\partial \Phi / \partial t$ ，它同样可由方程右边的等压面位势高度 Φ 的各种空间微商项求出。方程右边第一个强迫项是地转涡度平流，第二项是厚度平流（即温度平流）的垂直微商。

倾向方程和 ω 方程好像是一对孪生兄弟，在形式上具有很强的相似性，因为它们都来源于同一套控制方程组，并通过类似的方法导出。

3 准地转理论是大气动力学的核心

20世纪70年代，Holton在他的《大气动力学引论》^[1]中把 ω 方程和倾向方程所组成的准地转方程组称为大气动力学的核心理论（见此书的前言），因为它从控制大气状态最基本的物理定律推导出来的，它既能反映大尺度水平环流的变化机理及垂直运动的产生机理，同时又能揭示水平环流与次级环流之间通过不断地调整 and 适应保持准地转平衡状态。在他的书中，对诊断方程组中所包含的准地转过程机理及其天气预报意义做了系统的阐述。

3.1 准地转理论来源于物理学三大定律

准地转理论是建立在物理学三大基本定律之上的大气动力学理论体系。物理学的三大基本定律是动量守恒定律、能量守恒定律及质量守恒定律。它们在大尺度大气动力学中表现为涡度方程、热力学方程和连续方程这三个控制方程：

$$\text{涡度方程: } \frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\mathbf{V}_h \cdot \nabla (\zeta + f) - Df_0 \quad (3)$$

$$\text{热力学方程: } \frac{\partial T}{\partial t} = -\mathbf{V}_h \cdot \nabla T + \omega (\Gamma_d - \Gamma) \quad (4)$$

$$\text{连续方程: } D + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0 \quad (5)$$

准地转方程组是以这三个方程为基础在干绝热和地转

近似(6)及静力平衡(7)的条件下导出的。

$$u_g = -\frac{1}{f} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \quad v_g = \frac{1}{f} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial p} = -\frac{RT}{P} \quad (7)$$

涡度方程是水平运动方程(8)的变形。

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{\partial \Phi}{\partial x} + fv \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -\frac{\partial \Phi}{\partial y} - fu \end{aligned} \quad (8)$$

由于大尺度水平运动具有准地转平衡的特点,在原始形式的运动方程中,加速度是个小项,难以准确计算,而涡度方程中的涡度倾向是可以计算的大项。

散度方程是运动方程(8)的另一个变形。

$$\frac{dD}{dt} = -\nabla^2 \Phi + f\zeta - \beta u \quad (9)$$

涡度方程和散度方程加在一起才和水平运动方程在物理上等价。但是对于大尺度运动,散度倾向的量级非常小,与其他项相比可以忽略不计,于是散度方程就简化为地转风涡度表达式:

$$-\nabla^2 \Phi + f\zeta_g = 0 \quad (10)$$

式(1)和式(2)中的 $\nabla^2 \Phi$ 就反映了准地转方程来源于涡度方程。

3.2 准地转方程组的导出过程

第一步:利用连续方程消除涡度方程中的散度。地球的自转决定了旋转是大尺度水平运动场的基本形式。涡度是单位面积的环流,所以涡度场的预报就是大尺度环流的预报。涡度方程中涡度的局地变化是大项,但造成涡度个别变化的散度与水平运动的加速度一样也是个难以准确计算的小项。为了消除涡度方程中的散度,在导出倾向方程时借助了连续方程[式(5)],用垂直速度的垂直微商 $\partial\omega/\partial p$ 代替散度。借助连续方程在物理上意味着将高低空等压面环流的变化紧密地联结在一起。

第二步:利用热力学方程消除连续方程中的垂直速度。但是, ω 本身也是未知量,而且如前所述,它是天气预报需要解决的另一个难题。为此需要利用热力学方程来“反算” ω ,即将 ω 写成温度的函数。

第三步:利用静力学关系消除温度变量。在三维大气中,根据静力学关系[式(7)],温度这个变量可以用位势高度的垂直微商 $\partial\Phi/\partial p$ (即位势厚度)来代替。

经过上面三个步骤,大尺度运动的涡度方程中就只剩一个变量 Φ 。只需将带有时间微商的位势倾向项集中在等号的左侧,准地转的涡度方程就变成了如式(2)所示的位势倾向方程。

推导 ω 方程的方法与推导倾向方程类似,也是将涡度方程和热力学方程结合起来,但保留带有 ω 的项,而消除带有时间微商的项。消除时间微商项的办法是将准地转的涡度方程对 p 垂直微商,对厚度形式的热力学方程做拉普拉斯运算。最后将带有 ω 的项集中在方程的左边,右边都是位势 Φ 的空间微商,于是就得到了准地转的 ω 方程。

从上述推导过程可见,涡度方程[式(3)]和热力学方程[式(4)]是两个最基本的方程,方程中都有时间的微商,因此是决定流场变化和温度场变化的控制方程。连续方程[式(5)]和静力学关系[式(7)]都没有时间变量,它们只起到分别将高空和低空的流场和温度场(即位势厚度场)联系起来的作用。地转风关系[式(6)]和地转涡度关系[式(8)]则是起到把流场和位势场两个不同的场联系起来的作用(也就是将运动场和质量场联系起来)。

4 准地转方程组的物理解读

4.1 “准地转”的含义(基本特征)

“准地转”是准地转平衡的简称,即地转偏向力和水平气压梯度力两者处于准平衡状态。在有了探空观测后,人们才认识到在中纬度行星边界层以上的自由大气中盛行准地转平衡。高空风与地转风很接近,说明准地转平衡是大尺度运动的基本特征。地转偏向力也称为科氏力,它是惯性运动在自转的地球所显示出来的力。大尺度环流的许多现象都与地球的自转有关。

4.1.1 地转运动是定常的水平运动

完全的地转平衡情况下的运动称为地转运动,其加速度为零,所以地转运动是定常运动,不随时间变化。由于地转风的散度恒为零,所以垂直运动也为零,因此,地转运动也是纯水平运动。

4.1.2 准地转运动是变化缓慢的准水平运动

准地转运动是在接近地转平衡状况下的运动,所以加速度很小,但不等于零,因此准地转运动是一种变化很缓慢的运动。准地转运动的散度不等于零,但它比涡度小一个量级,所以垂直运动很微弱,所以它是准水平运动。因为有垂直运动,所以只有在三维空间内才能认识准地转过程,即必须从高低空的相互影响上才能认识准地转过程。

“准地转”在数学形式上表现为,一方面利用地转平衡关系将大气控制方程中的涡度和风用地转涡度和地转风来取代,但是又保留了涡度方程中的散度和热力学方程中的垂直速度。

“准地转”在物理内涵上意味着,大尺度环流始终维持准地转状态说明大尺度过程中既包含地转平衡不断地被破坏,又包含地转平衡不断地得到恢复(在

理论气象中被称为风场和位势高度场之间的地转适应过程)。两者加起来构成准地转过程。

总之,准地转运动是变化缓慢的准水平运动,大尺度环流的演变是在地转平衡的不断破坏和恢复中进行的。

4.2 平流的作用

要认识准地转过程,只要把准地转方程组(1)和(2)中位势高度的各种空间微商还原成涡度和温度,如式(11)和(12)所示:

$$\nabla^2 \omega + \frac{f_0^2}{\sigma} \frac{\partial^2 \omega}{\partial p^2} = \frac{f_0}{\sigma} \frac{\partial}{\partial p} [\mathbf{V}_g \cdot \nabla (\zeta_g + f)] + \frac{R}{\sigma p} \nabla^2 [\mathbf{V}_g \cdot \nabla T] \quad (11)$$

$$\nabla^2 \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) + \frac{f_0^2}{\sigma} \frac{\partial^2}{\partial p^2} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) = -f_0 \mathbf{V}_g \cdot \nabla (\zeta_g + f) - \frac{f_0^2 R}{\sigma p} \frac{\partial}{\partial p} (\mathbf{V}_g \cdot \nabla T) \quad (12)$$

如上所示,无论是 ω 方程还是倾向方程,等号右侧的强迫项都与涡度平流和温度平流有关,虽然它们有的是平流的垂直微商($\partial/\partial p$),有的是平流的水平拉普拉斯($\nabla^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$)。所以准地转方程的数学形式表明,平流过程(涡度平流和温度平流)是引起水平环流变化和垂直运动的根本原因,平流过程就是地转平衡的破坏过程。

如果把式(12)左边的两项和右边的两项分别

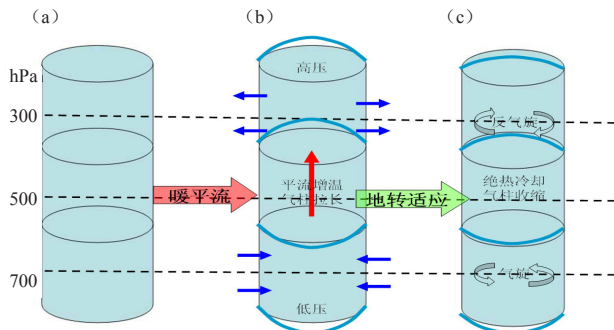


图2 与温度平流相关联的准地转过程示意图
(以中层暖平流为例)

(图中用三个圆柱表示整个大气层,以300,500,700hPa三个等压面分别代表高、中、低三层。(a)为初始状态:完全的地转平衡状态,等压面为水平面,涡度为零。(b)为非地转平衡状态:暖平流使中层变暖、密度变小、气柱拉长,高层等压面上凸、低层等压面下凹(用蓝色粗弧线表示);向外的气压梯度力使高层辐散、向内的气压梯度力使低层辐合(用蓝色箭头表示);中层为与散度垂直差异相配合的上升运动(用红色箭头表示)。(c)为通过适应过程所达到的新的地转平衡状态:上升运动使中层绝热冷却、密度变小、气柱收缩;高层等压面上凸减小、低层等压面下凹减小;高层辐散产生负涡度(以弧形带状矢线表示)与高压相配合、低层辐合产生正涡度与低压相配合;高、低层都恢复地转平衡状态,散度和垂直速度均为零,但流场和位势场均发生了变化)

对应起来看,倾向方程所表达的内容是正涡度平流引起局地涡度增加(或局地位势高度降低)、暖平流引起局地温度升高,它和涡度方程及热力学方程所表达的内容没有任何不同,也没有增加任何新的内容。回顾倾向方程的导出过程,这是很容易理解的。比较难以理解的是,式(12)还表达了涡度平流可以引起温度的局地变化以及温度平流也可以引起涡度的局地变化。换言之,倾向方程还表达了温度场和涡度场之间存在相互的影响,这是单独使用涡度方程或热力学方程无法获得的。为了认识两个场之间的相互影响过程,需要先通过式(11)了解垂直运动的产生机理。

4.2.1 温度平流和垂直运动

式(11)左端是 ω 的两个二阶微商项。其中第一项 ω 的拉普拉斯 $\nabla^2 \omega$ 和方程右端温度平流的拉普拉斯 $\nabla^2 (-\mathbf{V}_g \cdot \nabla T)$ 相对应,但符号相反。它表示当温度平流为正时, ω 为负,即暖平流导致上升运动。我们可以利用与图1类似的两层模式来认识其中的物理机理,如图2所示,只是把图1中的500hPa扩大为有一定厚度的中间层。温度平流的拉普拉斯表示温度平流水平分布的不均匀性。当中层有一个暖平流中心时,局地增暖、密度减小、厚度增加、上层等压面凸起、下层等压面下凹,导致上层辐散、下层辐合,从而产生上升运动(图2b)。即,温度平流通过改变位势场破坏地转平衡导致产生垂直运动。

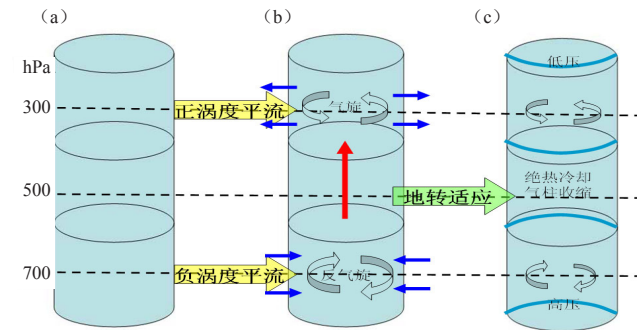


图3 与涡度平流相关联的准地转过程示意图
(以高层正涡度平流、低层负涡度平流为例)

(图中用三个圆柱表示整个大气层,以300,500,700hPa三个等压面分别代表高、中、低三层。(a)为初始状态:完全的地转平衡状态,等压面为水平面,涡度为零。(b)为非地转平衡状态:正涡度平流使高层出现气旋式环流(以弧形带状矢线表示)、负涡度平流使低层出现反气旋环流;向外的气压梯度力使高层辐散、向内的气压梯度力使低层辐合(用蓝色箭头表示);中层为与散度垂直差异相配合的上升运动(用红色箭头表示)。(c)为通过适应过程所达到的新的地转平衡状态:上升运动使中层绝热冷却、密度变小、气柱收缩;高层等压面下凹、低层等压面上凸(用蓝色粗弧线表示);高层辐散使气旋式环流减弱与低压相配合,低层辐合使反气旋环流减弱与高压相配合;高、低层都恢复地转平衡状态,散度和垂直速度均为零,但流场和位势场均发生了变化)

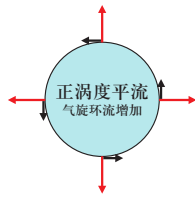


图4 正涡度平流引起辐散的示意图
(黑色箭头为正涡度平流引起的气旋环流增加, 红色箭头为相应的地转偏向力)

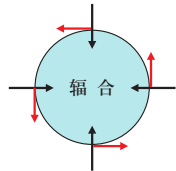


图5 辐合气流 (黑色箭头) 转变为气旋式环流的示意图
(红色箭头为地转偏向力)

4.2.2 涡度平流和垂直运动

ω 方程左端的第二项是 ω 对 p 的二阶微商。根据连续方程(5), 散度是 ω 对 p 的一阶微商, 所以 ω 对 p 的二阶微商就是散度对 p 的一阶微商, 即

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial p^2} = -\frac{\partial D}{\partial p} \quad (13)$$

它与等号右侧的涡度平流垂直微商 $\frac{\partial[-V_g \cdot \nabla(f + \zeta)]}{\partial p}$ 相对应, 表示上层正涡度平流引起辐散、下层负涡度平流引起辐合, 从而产生上升运动。如图3所示, 上(下)层正(负)涡度平流使局地涡度增加(减小), 在科氏力的作用下产生辐散(辐合)。涡度平流引起辐合辐散的机理可用图4来说明, 图中的气旋式环流表示由于正涡度平流引起的局地涡度增加, 短箭头表示气旋环流增加所伴随的地转偏向力的增加, 并引起了辐散运动。即, 涡度平流通过改变流场引起地转偏向力的变化而破坏地转平衡并导致产生垂直运动。

4.2.3 温度平流和环流变化

前面温度平流的作用是引起温度变化从而改变位势场引起辐合辐散和垂直运动。但在旋转的地球上, 水平辐合辐散会在地转偏向力的作用下转化为气旋式和反气旋式环流(图5)。在涡度方程中表现为局地涡度变化和散度制造项 $(-fD)$ 成正比, 即辐合使涡度增加, 辐散使涡度减小。因此当暖平流引起上升运动的同时, 高层的辐散将引起反气旋涡度增加, 低层辐合将引起气旋式涡度增大(图2c)。可见, 温度平流通过辐合辐散也会引起流场的变化, 而且这种变化具有高低空相反的趋势。

4.2.4 涡度平流和位势倾向

类似地, 在图3中, 高空正涡度平流引起的辐散和低空负涡度平流引起的辐合导致中层上升运动。但

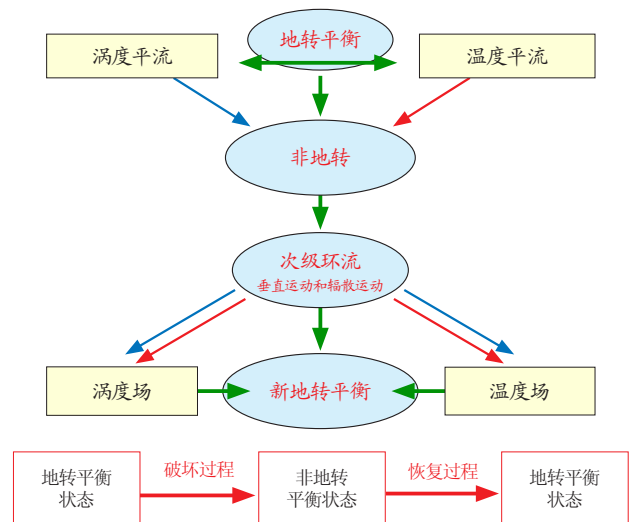


图6 准地转过程示意图

(红色箭头和蓝色箭头分别表示温度平流和涡度平流的作用, 绿色箭头表示地转平衡从破坏到恢复的过程)

是上升运动所伴随的绝热冷却使密度增大、上下层等压面之间的厚度减小, 导致高层等压面位势下降, 低层等压面位势上升。可见, 涡度平流的垂直微差可以通过垂直运动的绝热变化而影响位势场。

4.3 次级环流的作用

在准地转动力学中, 大尺度水平环流的平流所起的强迫作用是环流系统发生变化并引起次级环流的根本原因。但是, 次级环流在准地转过程中也有十分重要的作用(图6), 它表现为下面几个方面:

- 1) 它使温度场和流场发生相互影响, 如4.2.3和4.2.4所述。
- 2) 它使平流引起的温度场和流场的变化仍保持地转平衡, 如图2和3所示。
- 3) 它使高低空环流的变化保持静力平衡和热成风平衡。
- 4) 它对平流起负反馈的作用, 如暖平流引起的温度升高总会部分地被上升引起的绝热冷却所抵消; 正涡度平流引起的涡度增加总会部分地被辐散引起的负涡度所抵消。次级环流的负反馈作用使大尺度环流的演变具有“慢变”的特征。

5 准地转理论在预报中的应用

5.1 诊断位势倾向和垂直运动的定性规则

准地转方程组的简洁性决定了天气预报中诊断位势倾向和垂直运动的方向也非常简洁、方便。考虑了二阶微商和零阶微商之间的关系, 霍尔顿把它总结为如下的定性规则: 位势倾向的(降/升), 取决于涡度平流的(正/负)+(冷/暖)平流随高度减小; 垂直运动的(上升/下沉), 取决于(正/负)涡度平流

随高度增加+温度平流的（暖/冷）。其中不随高度变化的平流项都是诊断同一等压面上的位势倾向和垂直速度。它们也可以表述为：任意等压面上的正涡度平流，将引起该等压面的位势下降，反之亦然；任意等压面上的暖平流，与该等压面上的上升运动相对应，反之亦然。为了便于记忆，它们可以简化为如下的口诀：“正涡度平流减压，负涡度平流加压”（注意：此处的加压和减压就是正变高和负变高），“暖平流上升，冷平流下沉”。这些口诀直接就可以在天气图上应用，如霍尔顿书中所给的后倾斜压扰动（温度槽落后于气压槽）中温度平流与高空位势倾向的关系（图7）。

对于随高度变化的平流项（也称为平流的垂直微差项或差动平流项），在天气图上应用时就没有这样简单了。但是考虑到高低空等压面形势的实际情况，高空表现为西风带波动，低空表现为闭合的涡旋（气

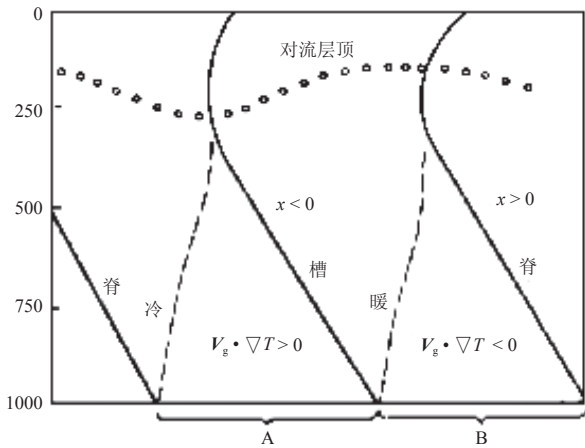


图7 发展的天气扰动中温度平流和高空位势倾向关系的的东西向剖面图（A区和B区分别表示对流层低层的冷平流和暖平流区）^[6]

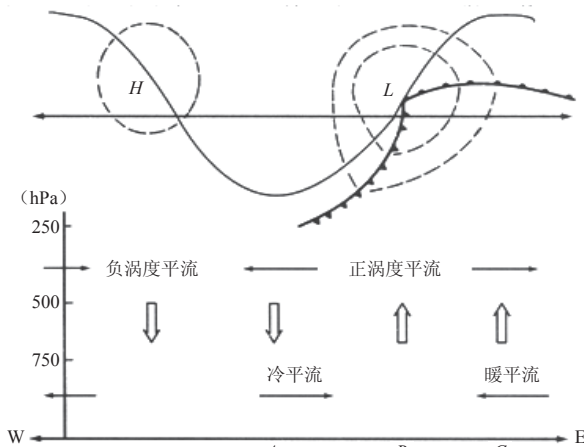


图8 与发展的斜压波相联系的二级环流（上图为500hPa等高线（实线），1000hPa等高线（虚线）以及地面锋示意图；下图为沿基线II'垂直剖面上的二级环流（散度和垂直运动场））^[7]

旋或反气旋），所以（正/负）涡度平流总是随高度增加的（图8）。

温度平流则相反，可以认为总是随高度减小的。在低层等压面图上，如850hPa等压面图，等温线可以和等高线反位相，如图9a中的蒙古到东北华北地区，冷暖平流都非常显著。越到高空，静力学关系决定了等压面上的等高线越来越和等温线平行，温度平流变得很不明显，如图9b所给的500hPa等压面图。因此在日常预报中，对平流的垂直微差项只需考虑高层等压面图上的涡度平流和低层等压面图上的温度平流。结合图2和3，相应的定性规则可以表述为如下形式：

* 低空冷平流，高空减压地面加压；低空暖平流，高空加压地面减压。

* 高空正涡度平流，引起上升运动；高空负涡度平流，引起下沉运动。

（注：从倾向方程得到的1000hPa等压面倾向和温度平流的关系与上述规则相反，其原因可能与地面是固定的下垫面，其性质和空中的等压面有原则的不同；另一种可能是，在边界层内，温度平流是随高度增加的。此问题虽然还须进一步探讨，但是对海平面气压场“暖平流减压，冷平流加压”，只需用静力学关系即可得到合理的解释。）

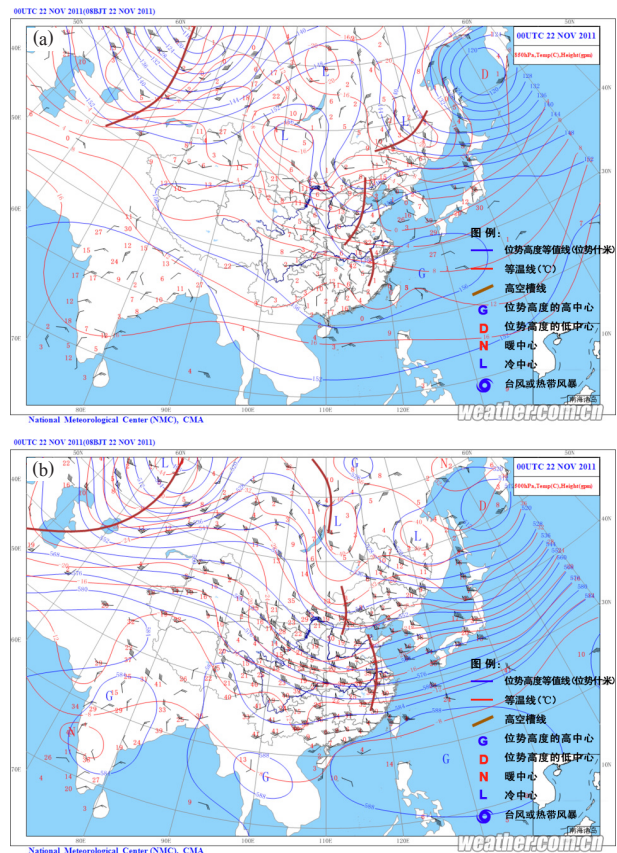


图9 2011年850 hPa (a) 和500 hPa (b) 天气图（取自中国天气网）

综上所述，准地转诊断方程在日常预报中的应用是十分简洁明了的，它可以归结为常规天气图上的两个因子，温度平流和涡度平流，以及前文中的4条定性规则（*号标注）。

5.2 发展的诊断

5.2.1 斜压扰动的垂直结构

发展问题指的是天气系统的生消或加强和减弱。它是天气预报中最关键的问题，因为它涉及天气变化趋势的改变，特别是强烈的发展。预报员对天气变化的“预见性”，就依赖于对发展问题的诊断能力。

严格讲，表征天气系统强度的量不是气压（在等压面上为位势高度，下同）和温度本身的数值，而是它们的不均匀性，即气压（或位势高度）和温度的水平梯度大小，是高低压之间的气压差和冷暖气团之间的温度差决定了天气的强度。从大气动力学的观点看，表征环流系统（槽、脊、气旋、反气旋）流场强度的量是涡度中心的数值，在地转近似的前提下是位势高度的拉普拉斯（ $\nabla^2\Phi$ ）；表征环流系统热力性质（即斜压性）强度的量是温度梯度。因此发展问题就是涡度系统强度的变化和锋区强度的变化。

无论是正涡度中心还是负涡度中心，涡度平流都永远是零，显然涡度场本身的平流不会使涡度中心的强度发生变化。众所周知，中纬度大尺度环流系统发展的根本原因是斜压性，温度场落后于气压场的后倾斜压扰动是加强的，反之，是减弱的，分别如图10和11所示（注：正压扰动，温度场是均匀的，不存在温度场扰动，等压面形势不随高度变化）。利用准地转

诊断方程组可以非常清晰地认识高低空环流系统加强或减弱的原因。

图10和11与霍尔顿的示意图（图7）相类似，也将大气分为高、中、低三层。为了便于和常规天气图相对应，高、中、低三层可以理解为图2和3中的300，500和700hPa等压面。根据热成风关系，在高层，等高线和等温线接近平行，所以温度场的波动和高度场的波动位相相同。根据地面天气图上暖低压、冷高压的基本特征，在低层，温度场的波动和高度场的波动位相相反（位相相差半个波长，即 180° ）。在中层，当温度场的波动落后高度场的波动四分之一波长（即 90° ）时，槽脊的轴线向西倾斜（图10）；当温度场的波动超前高度场的波动 90° 时，槽脊的轴线向东倾斜（图11）。

5.2.2 温度平流使后倾斜压扰动发展

从图10a所给的后倾斜压扰动结构可见，在高层槽的下方，中层为槽后脊前，由于等温线落后等高线，为冷平流区。按照准地转 ω 方程，冷平流的强迫作用会引起下沉运动。按照高低空质量补偿原理（连续方程），应有高层辐合和低层辐散相配合。由涡度方程可知，辐合制造正涡度，辐散制造负涡度，而辐合正好位于高空槽的正涡度中心，辐散位于低空脊的负涡度中心，所以高低层的正负涡度中心都将加强。

同样道理，在高层脊的下方，中层为槽前的暖平流，它将使高层脊和低层槽的涡度中心加强。温度平流使高、低空槽脊都得到加强表明，斜压性是使流场扰动加强的根本原因。从图10a还可以看到，上升

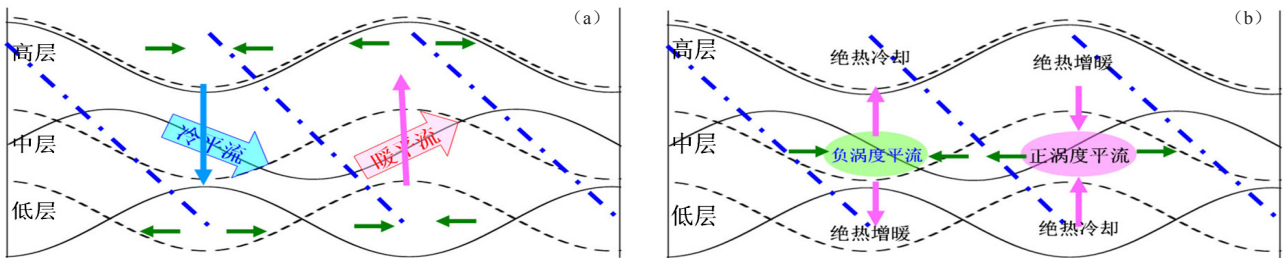


图10 温度场落后气压场的后倾斜压扰动结构示意图

(a) 温度平流的分布，(b) 涡度平流的分布以及它们所引起的次级环流

(实线为等高线，代表水平流场的波动；虚线为等温线，代表温度场的波动；蓝色点划线为槽线和脊线在垂直方向上的轴线；绿色箭头表示水平散度，红色箭头表示垂直运动)

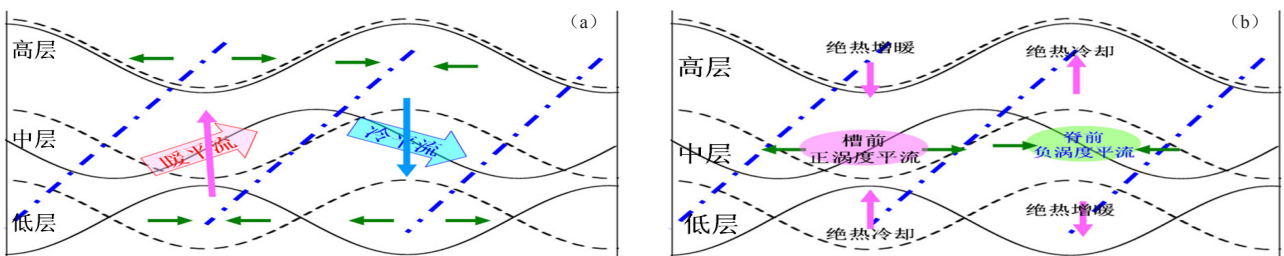


图11 温度场超前气压场的前倾斜压扰动结构示意图（图例与图10相同）

和下沉运动与温度场的暖脊和冷槽相对应，并由于暖空气上升冷却、冷空气下沉增暖，暖脊和冷槽都将减弱。这样的次级环流具有正环流的性质，它表明流场扰动动能的增加来自有效位能的释放。因此，准地转理论不仅解释了后倾斜压扰动发展中涡度系统增强的机理，而且还保持了与能量守恒定律的一致性，显示出准地转理论在物理学上的严谨性。

5.2.3 涡度平流的垂直微差使后倾斜压扰动低层锋消、高层锋生

从图10b所给的涡度平流分布可见，在中层的槽前脊后为正涡度平流区，槽后脊前为负涡度平流区，它们正好与高层和低层的槽区和脊区相对应。槽和脊分别对应正负涡度中心，涡度平流为零。所以，从中层到高层，涡度平流随高度减小；从低层到中层则相反，涡度平流随高度增加。按照准地转 ω 方程，中上层和中下层的垂直运动方向也应相反。如图中所示，在温度场的冷槽区，中上层为上升运动，中下层为下沉运动。上升绝热冷却使上部的冷槽增强，下沉绝热增暖使下部的冷槽减弱。同样，在温度场的暖脊区，中层为槽前脊后的正涡度平流区，垂直运动的分布中上层为下沉运动，中下层为上升运动，绝热过程引起的温度变化也是使高空的暖脊加强，低空的暖脊减弱。总之，后倾斜压扰动中，中层的涡度平流可以引起低空的温度场扰动减弱、高空的温度扰动增强。

按照锋生理论，反环流（冷区上升、暖区下沉）引起锋生，正环流（冷区下沉、暖区上升）引起锋消。后倾斜压扰动中涡度平流引起的上下相反的垂直环流将引起低层锋消和高层锋生的作用。

值得指出的是，在图10b还标注了与从 ω 方程得到的上下相反的垂直运动按连续方程所应有的散度。上部下沉、下部上升，中层为辐散；上部上升、下部下沉，中层为辐合。从图中可以发现，散度和涡度平流之间正好符合正涡度平流导致辐散，负涡度平流导致辐合的关系。从中也体现出准地转方程组理论框架的完备性。

5.2.2和5.2.3的分析表明，在后倾斜压扰动的发展过程中，流场扰动是高低空同时发展的。也就是说，从准地转动力学理论的观点来看，地面气旋和反气旋的发展和高空槽脊的发展是同时发生的。最早的锋面气旋学说是地面决定论，认为先有锋面后有气旋；到了高空气象学阶段，强调高空槽引起了地面气旋发展，是高空决定论。也有把气旋分为两类：第一类是先有地面锋面，高空槽不明显；第二类是先有高空槽，地面锋面不明显^[8]。这些学说都是把高空和地面分隔起来讨论气旋的发展问题。只有到了准地转动力

学阶段，才把高低空的发展统一起来，一体化的讨论气旋发展问题。值得指出的是，直到现在气象界还存在高空决定论的思想方法，如所谓“高低空锁相”的观点。

5.2.2和5.2.3中得到的结论与观测事实是一致的。例如，“流场扰动高低空同时发展、温度场扰动低空衰减高空发展”的规律，和地面气旋强烈发展成锢囚气旋的同时，高空槽也强烈加深，并成为高空冷涡相一致。“低层锋消、高层锋生”的规律，则或可说明副热带锋区仅存在于对流层上半部的原因。此外，锋消和锋生分别与正环流和反环流相对应，正环流使有效位能减小转化为扰动动能，反环流使扰动动能减小转化为有效位能。大气环流和气旋数值模拟研究^[9, 10]都表明，在气旋发展区对流层下半部有显著的动能制造，但在对流层的高层存在一个动能的负制造区，它与图10由准地转理论得出的后倾斜压扰动中的次级环流是一致的。

5.2.4 温度平流使前倾斜压扰动衰减

与发展的后倾斜压扰动相反，温度平流使前倾斜扰动衰减。如图11a所示，当中层的温度槽超前高度槽时，槽脊线在垂直方向上就向东倾斜成为前倾的斜压扰动。虽然冷暖平流所带来的次级环流是相同的，但辐合辐散与槽脊的配置与图10a相反，槽区辐散，脊区辐合，所以高低层的槽脊的正负涡度中心都将减弱。次级环流的性质则是冷区上升、暖区下沉，其性质属于反环流，说明在流场扰动减弱的同时，温度场扰动加强，符合能量守恒的规律。

类似地，涡度平流对前倾斜压扰动的作用是使低层锋生、高层锋消（图11b），也与后倾扰动相反，这里不再详细分析。需要说明的是，在天气学中，对扰动的衰减注意得很少，需要有更多的研究才可能对前倾扰动在天气分析和预报中的应用价值做出必要的讨论。

5.3 天气系统预报的一些定性规则

根据作者在天气分析和预报实践中应用准地转理论的体会，下面试着给出一些可能比较实用的预报高、低空天气系统发展的定性规则供参考使用。为了文字的简洁，规则中的温度平流都是指850或700hPa低层等压面上的温度平流；涡度平流都是指500或300hPa高层等压面上的涡度平流。

5.3.1 与低层温度平流相关的预报规则

温度平流强度的定性判别：低层等压面图上等高线和等温线越密、风速越大且风向和等温线的夹角越大，则温度平流越强。也可以根据等高线和等温线交割成的平行四边形的大小来判断，面积越小，温度平

流越强。

地面天气系统的预报规则:

1) 低层温度平流和地面3小时变压负相关; 暖平流越强, 负变压越强; 冷平流越强, 正变压越强。

2) 地面气旋向强暖平流区移动, 并强度加强 (可表现为: 中心气压降低, 或闭合等压线数目增加, 或在该区域有新的气旋生成)。

3) 不很强的暖平流可引起地面高压脊减弱或倒槽的东伸和发展, 也可引起低层等压面上低涡和暖切变 (东西向的横切变) 发生或发展, 并常可伴随西南风或低空急流的加强。

4) 地面高压脊向强冷平流区伸展。

5) 冷暖平流都很强时地面等压线密集度将加强并出现大风天气。

高空天气系统的预报规则:

1) 低层温度平流和高空等压面上的变高正相关; 暖平流越强, 正变高越强; 冷平流越强, 负变高越强。

2) 高空槽向强的冷平流区移动并加深 (可表现为: 槽区等高线向南伸, 等高线变密, 振幅加大, 冷涡切断等), 以及槽后偏北气流加强。

3) 高空脊向强暖平流区伸展并加强, 以及脊后偏南气流加强。

5.3.2 与高层涡度平流相关的预报规则

涡度平流强度的定性判别: 涡度是诊断量不是气象要素, 因而常规高空图上没有等涡度线, 所以无法直接判别涡度平流的性质及强度, 只能根据等高线的疏密和曲率或测站风的风速和风向判别涡度的正负及大小, 然后再判断涡度平流。涡度和涡度平流定性判别规则大致有如下几条:

1) 槽区为正涡度区, 脊区为负涡度区, 槽前脊后为正涡度平流, 槽后脊前为负涡度平流。

2) 等高线间隔越小、越弯曲 (即曲率越大) 则涡度越强, 涡度平流一般也越强。

3) 闭合环流形势 (闭合的低压和高压) 涡度平流一般都很小; 波动环流形势 (西风气流中的槽脊) 涡度平流比较显著。

4) 测站风的风速大小和涡度及涡度平流的大小关系非常密切, 高空急流或强风区附近往往有强的涡度中心和涡度平流。

5) 槽后等高线密集、槽前等高线稀疏 (疏散槽) 表示存在强大的正涡度平流。

高空涡度平流和地面气旋反气旋及锋面的预报规则:

1) 高空槽前脊后正涡度平流越强 (常表现为东侧的脊显著), 地面气旋迅速加深。

2) 高空槽后脊前负涡度平流越强 (常表现为西侧的脊显著), 地面反气旋加强。

3) 高空急流出口区的涡度平流可引起地面锋生, 入口区的涡度平流可以引起锋消。

上面只是列举了一些比较常见情况的判别和预报的定性规则, 它们的物理意义都可以用准地转方程组来解释, 这里不再重复。

6 总结

本文从天气预报的基本问题出发, 对准地转动力学理论的来源和应用作了系统的介绍。准地转理论是中纬度大尺度斜压扰动发展机理的动力学理论的简称, 不能应用于低纬和中小尺度天气系统。其主要内容和结论可概括为:

1) 以诊断方程组 ω 方程和位势倾向方程为代表的准地转理论解决了天气预报的两个根本问题, 垂直运动和天气系统发展方向的判断, 温度平流和涡度平流是最基本的预报因子 (诊断方程的强迫项)。

2) 准地转理论是建立在物理学三大定律 (动量、能量、质量守恒) 之上的大气动力学理论体系, 它是基于严密数学推导和物理洞察力的近代大气动力学的核心。准地转理论的出现是近代大气动力学 (正压大气长波理论) 向现代大气动力学发展 (多层斜压大气数值模式) 的历史必然。

3) 准地转理论完整地揭示了大尺度环流系统演变机理的物理图像: 涡度和温度的水平平流导致地转平衡的破坏, 同时又通过所产生的次级环流使地转平衡得到不断地恢复, 从而使大尺度环流在缓慢的变化中始终保持准水平和准地转平衡状态。

4) 准地转理论合理地解释了温度平流是使后倾斜压扰动高低层流场扰动同时发展的根本原因, 而涡度平流则使大尺度环流系统热力结构发生变化。

值得说明的是, 虽然准地转方程组是在干空气和绝热条件下导出的, 但是本文在讨论准地转过程中涉及的一些物理理念也可以帮助我们理解与湿空气和非绝热相联系的天气现象。例如水汽凝结或地表感热加热的作用, 可以类比于温度平流所起的局地增温作用, 它们同样可以引起低层等压面降低和高层等压面升高的效应。又如温度垂直递减率的大小和地转适应过程有关, 所以当温度垂直递减率较大, 即静力稳定度较小的情况下, 同样大小的强迫作用可引起更大的垂直运动。

总之, 准地转理论为我们提供了认识天气形势变化的内在机理, 所以天气预报应该在准地转理论的指导下进行。但是, 当前非静力原始方程数值预报模式中包含的物理过程远远超越了准地转理论所能描述

的范围。例如，潜热反馈、下垫面非绝热过程、云和长短波辐射与大气之间的相互影响等，这些复杂的物理过程都不是准地转理论所能描述的。这是包括大气科学在内的流体力学发展的必然趋势^[1]。所以，当前的天气预报已不可能也不应该脱离数值天气预报，回到纯粹的经验预报。但是也不能不经思考、机械地只按数值预报的结果来发布预报。预报员存在的价值就在于能在数值预报的基础上发挥人的主观能动性。需知，数值模式好比是一台“时间机器”，它不仅提供温度、降水、风、能见度等这些气象要素和天气现象的预报，而且也提供了未来数天之内的整套天气图，甚至还包括雷达回波图。预报员的主观能动性就体现在：在准地转理论的指导下从数值模式的各种产品中提前把握环流形势和天气的未来发展趋势，从而在天气预报中获得主动性。

致谢：感谢中国气象局和气象干部培训学院对准地转动力学理论的重视并将它列入全国预报员培训的

教学大纲。近3年与许多教师和预报员在课堂上和课下的讨论为作者提供了许多启发。

参考文献

- [1] Holton J R. An Introduction to Dynamic Meteorology. Academic Press Inc, 1972.
- [2] 陶祖钰, 谢安. 天气过程诊断分析原理和实践. 北京: 北京大学出版社, 1989.
- [3] 佩特森 S. 天气分析和预报 (上册, 运动和运动系统). 程纯枢, 译. 北京: 科学出版社, 1958.
- [4] 北京大学地球物理系天气学教学小组. 天气学 (上册, 第一分册). 南京: 南京气象学院翻印, 1964.
- [5] 纪立人. 数值天气预报发展进程中若干亮点的回顾及其启迪. 气象科技进展, 2011, 1(1): 40-43.
- [6] Holton J R. An Introduction to Dynamic Meteorology (3rd ed). Academic Press Inc, 1992.
- [7] 吕美仲, 侯志明, 周毅. 动力气象学. 北京: 气象出版社, 2004.
- [8] 北京大学地球物理系气象教研室. 天气分析和预报. 北京: 科学出版社, 1976.
- [9] Kung E C, Tanaka H. Energetics analysis of the global circulation during the special observation periods of FGGE. J Atmos Sci, 1983, 40: 2575-2592.
- [10] 张玉玲, 仲亚琴. 东北低压大风天气的数值模拟和诊断分析. 气象学报, 1985, 43(1): 97-105.
- [11] 李家春. 流动无处不在. <http://bjyouth.yinet.com/3.1/1111/01/6410027.html>

会议信息

- ◆ 第三十九届COSPAR科学会议 (39th COSPAR Scientific Assembly), 2012年7月14—22日, 印度, Mysore (<http://www.cospar2012india.org/Default.aspx>)
- ◆ 国际辐射会议 (International Radiation Symposium), 2012年8月6—10日, 德国, 柏林 (<http://irs2012.org/>)
- ◆ 第三届WMO/WWRP国际临近预报和超短期预报会议 (3rd WMO/WWRP International Symposium on Nowcasting and Very Short Range Forecasting), 2012年8月6—10日, 巴西, 里约 (<http://www.wsn12.com/register/>)
- ◆ 第三代能源及化学——2012上海环境增值能源与化学国际会议, 2012年8月11—13日, 上海 (<http://e2-chemicals.sjtu.edu.cn/>)
- ◆ 第四届数字地球峰会 (4th Digital Earth Summit 2012), 2012年9月2—4日, 新西兰, 惠灵顿 (<http://www.digitalearth12.org.nz/>)
- ◆ 对流层廓线国际会议 (International Symposium on Tropospheric Profiling, ISTEP), 2012年9月3—7日, 意大利, L'Aquila, AQ (<http://cetemps.aquila.infn.it/istp/>)
- ◆ 第二届业务水文预报和水资源管理数据同化国际研讨会 (2nd International Workshop on Data Assimilation for Operational Hydrologic Forecasting and Water Resources Management), 2012年9月10—12日, 韩国, 仁川 (<http://www.da-workshop.com>)
- ◆ 中国生态学会2012年学术年会, 2012年9月12—14日, 长春市 (<http://www.esc.org.cn/>)
- ◆ 2012全国特大地山地质灾害学术研讨会, 2012年9月13—15日, 四川省成都市 (http://www.cas.ac.cn/hy/hyyg/201204/t20120405_3549932.shtml)
- ◆ 第十五届国际河流与湖泊环境会议 (The 15th International Symposium on River and Lake Environments), 2012年10月15—19日, 湖南, 张家界 (<http://isrle2012.csp.escience.cn>)
- ◆ 第六届IPWG学术会 (6th IPWG Workshop), 2012年10月15—19日, 巴西, Sao Jose dos Campos (<http://www.isac.cnr.it/~ipwg/meetings/saojose-2012/Saojose2012.html>)
- ◆ 空间天气和现代社会的挑战 (Space Weather and Challenges for Modern Society), 2012年10月22—24日, 挪威, 奥斯陆 (<http://www.tiems.info/about-tiems/oslo-conference-2012.html>)
- ◆ 日地物理国际会议 (International Symposium on Solar-Terrestrial Physics) 2012年11月6—9日, 印度, 浦那 (<http://www.iiserpune.ac.in/~isstp2012/>)
- ◆ 太阳物理无线电观测 (Solar Physics with Radio Observations), 2012年11月20—23日, 日本, 爱知 (<http://st4a.stelab.nagoya-u.ac.jp/SPRO2012/>)
- ◆ 第一届IUGG GRC极端自然灾害及其影响会议 (First IUGG GRC Conference on Extreme Natural Hazards and Their Impacts), 2012年12月8—12日, 美国, 加州 (<http://www1.chapman.edu/~rsingh/GeoRisk2012>)
- ◆ 地球系统管理东京会议: 复杂构造, 多重机制 (Earth System Governance Tokyo Conference: Complex Architectures, Multiple Agents), 2013年1月28—31日, 日本, 东京 (<http://tokyo2013.earthsystemgovernance.org/>)

近30年ENSO研究进展回顾

任福民¹ 袁媛¹ 孙丞虎¹ 曹璐²

(1 国家气候中心, 中国气象局, 北京 100081; 2 江苏省气象台, 南京 210008)

摘要: 作为年际气候变化中的最强信号, ENSO现象很早以来就备受关注。ENSO不仅是造成全球气候异常的一个重要原因, 也是导致亚洲季风异常和我国旱涝发生的关键因素。回顾了近30年国内外ENSO研究的最新进展, 并重点从ENSO动力学理论、ENSO预测方法、ENSO的年代际变化特征、ENSO的分类、ENSO的指标、ENSO的气候影响和ENSO的业务现状等七个部分进行了回顾和总结, 尤其对最近几年关于不同分布型ENSO事件的研究进展做了比较详细的归纳总结。此外, 文章还讨论了在ENSO不同分布型的监测指标设定及气候影响等方面需要进一步深入研究的问题。

关键词: 近30年, ENSO, 研究进展, 回顾

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2012.03.002

Review of Progress of ENSO Studies in the Past Three Decades

Ren Fumin¹, Yuan Yuan¹, Sun Chenghu¹, Cao Lu²

(1 National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008)

Abstract: As the strongest signal of the interannual climate variability, the El Niño/Southern Oscillation (ENSO) has attracted great attention. ENSO not only plays an important role in the droughts and floods over China, and in the anomaly of Asian monsoon, but also exerts a great impact on the global climate anomalies. The paper provides a review of ENSO research in the past 30 years, mainly in the following seven aspects: ENSO dynamical theory, ENSO prediction methods, interdecadal variations of ENSO, classification of ENSO type, monitoring indices of ENSO, the possible climate impacts by ENSO and the status of current ENSO operations. Recent studies of different distribution types of ENSO have also been summarized in great detail. Moreover, the paper discussed potential further studies in several topics, such as the monitoring indices of different distribution types of ENSO and their climate impacts.

Key Words: past three decades, ENSO, progress, review

1 引言

发生在热带太平洋地区的ENSO现象是年际气候变化中的最强信号, 它以2~7年的周期不断循环, 并在暖位相和冷位相分别表现为El Niño和La Niña事件。El Niño和La Niña事件的出现不仅直接造成热带太平洋地区的天气气候出现异常, 还会以遥相关的方式间接地影响热带太平洋以外地区乃至全球的天气气候。鉴于ENSO的重要性, 它的研究工作始终深受关注和重视, 成果亦不断涌现。

本文试图对近30年来国内外在ENSO方面的研究进展给出总结, 包括ENSO动力学理论、ENSO预测方法、ENSO的年代际变化特征、ENSO的分类、ENSO

的指标、ENSO的气候影响和ENSO的业务现状等七个部分。

2 ENSO动力学理论

自Bjerknes发表ENSO是热带大气和海洋相互作用这一著名观点后, El Niño的理论研究越来越受到重视, 特别是近20年关于El Niño形成的理论与推测不断涌现。关于El Niño形成的动力学机理主要包括: 信风张弛、ENSO循环、延迟振子、纬向异常风应力、季节内振荡、强寒潮、印-太海气齿轮式耦合等。

20世纪70年代提出的海洋学模型^[1]比较完整地描写了El Niño现象在赤道附近地区的海洋现象及演变。模型强调了前期信风增强而形成的能量积累的作用。通常情况下, 赤道太平洋洋面上空盛行偏东信风。在赤道南北两侧东南信风和东北信风的驱动下, 赤道太平洋表层海水自东向西流动, 形成表层洋流。这股洋流将太平洋表层暖的海水输送到西太平洋堆积, 使得西太平洋水位不断上升, 热量也不断积蓄^[2]。在信

收稿日期: 2011年11月11日; 修回日期: 2012年1月11日

第一作者: 任福民 (1968—), Email: fmren@163.com

资助信息: 2008年国家标准项目“厄尔尼诺、拉尼娜事件定义”; 国家自然科学基金(41005038); 公益性行业专项(GYHY20090601)

风明显减弱的情况下海洋位能释放，表层暖水向东回流，东太平洋海面升高，海面增暖，斜温层增厚，出现El Niño现象^[3]。而当信风异常偏强时，赤道太平洋表层海水自东向西流动的流量将加强。由此将导致西太平洋堆积更大量的暖海水，并导致La Niña现象的发生。

Wyrтки的El Niño模型虽然指出了信风异常的重要作用，但并没有深入考虑大尺度海气相互作用。当考虑大尺度海气相互作用时，ENSO可以认为是海气耦合系统中的一种振荡，它可以通过自身物理过程的变化和相互反馈而激发和驱动^[3]。为了揭露ENSO循环，各种海气耦合模式相继诞生，并取得了很好的结果^[4, 5]。海气耦合过程中，热带海洋在受到风应力强迫的同时，除了引起海洋中各要素场的变化外，还将通过海洋不稳定过程激发海洋Kelvin波和Rossby波。这些波动在ENSO的形成、发展过程中起到了重要作用。黄荣辉等^[6]的研究表明，在El Niño发展阶段，热带西太平洋赤道以北为气旋式环流异常，而在El Niño盛期时为反气旋式环流异常。他们的研究指出，在El Niño发展阶段前，西太平洋暖池变暖造成了此气旋性环流异常，与此相联系，在印度尼西亚和赤道西太平洋上空产生西风异常。当El Niño事件发展到成熟阶段，西太平洋暖池变冷造成了此反气旋性环流异常，从而使印度尼西亚和赤道西太平洋上空产生东风异常。由此形成的赤道附近的纬向风异常通过激发出海洋中的赤道波系，对于El Niño事件的发展与衰减和La Niña事件的发生产生重要的动力作用。

李崇银^[3]用一个概念模型清楚地说明了ENSO循环的动力学机制。赤道西太平洋地区的SST一般都比较低，若因某些原因，一旦那里信风出现异常（减弱），便可以激发产生出异常的暖性Kelvin波，并向东传播；由于海气耦合相互作用，这种异常的暖性Kelvin波在东传过程中可得到较强发展，最终导致El Niño事件。而在暖性Kelvin波东传的同时，海气耦合相互作用还将激发产生一种向西传播的冷性Rossby波，它一方面可使西太平洋的SST降低，另一方面在西岸反射而成为冷性Kelvin波。若这时信风出现异常（增强），冷性Kelvin波将在西太平洋持续产生和东传，并通过海气耦合作用又激发产生暖性Rossby波，它同暖性Kelvin波在赤道东太平洋海岸反射后的暖性Rossby波一起传到赤道西太平洋，一方面使赤道西太平洋SST增加，另一方面它在西岸反射而成暖性Kelvin波，这又为下一次循环准备了条件。

基于以上这些理论，Jin^[7]建立了一个新的ENSO概念模型。该模型基于两个基础：一是由Bjerknes提出的将热带海洋大气相互作用的正反馈作为增长机

制，二是由Cane、Zebiak和Wyrтки提出的赤道热容量充放电效应作为位相转换机制。该模型将SST动力学和海洋适应动力学结合成一个耦合的大盆尺度的充电振子，该充电振子依靠纬向平均赤道海洋温跃层深度和赤道风应力之间的非平衡性得以实现。经过了广泛的相对耦合系数试验，该充电振子可分别具备自激或随机持续的功能。其周期稳定在3~5年。该充电振子清楚地表现了ENSO的慢变物理特性，并表现为一个无须明确延迟波的延迟振子。对于热带海洋大气的相互作用，上述充电振子模型可以直接从Cane和Zebiak模式的动力框架推导得出^[8]。在此基础上，Bejarano等^[9]进一步发展了该理论，指出温跃层反馈和纬向平流反馈分别代表以下两个过程：即由平均上升流形成的次表层海温距平垂直平流和由距平洋流引起的SST纬向平流，而正是这两个过程通过不同途径控制了主导耦合模，从而有效制约着ENSO的发展和位相转换。随后，Bejarano等^[10]深入探讨了与ENSO现象相关联的海洋大气主导耦合模，发现不同类型的主导耦合模——特别是准四年振荡和准两年振荡这两个最重要的耦合模的共存现象可以合理地解释观测到的ENSO行为。

与延迟振子理论不同，张人禾等^[11]所揭示的观测事实强调了首先出现在热带西太平洋的纬向异常风应力及其东传在维持ENSO循环中的重要作用。他们发现观测的大洋中西部纬向风应力异常出现在热带中东太平洋海温变化之前。随着西风应力异常不断加大且向东传播，此时赤道中东太平洋的海面温度不断升高；当西风应力异常达到最大且其最大中心东传到日期变更线附近时，赤道中东太平洋的海面温度达到最高。随着西风应力异常向东移，在其西边的热带西太平洋出现了东风应力异常。赤道西太平洋的东风异常出现在赤道中东太平洋海面温度达到最高值之前。随着东风应力异常的加强和向东移动，赤道中东太平洋的海面温度正异常不断减弱，直至海面温度正异常消失并出现海面温度负异常。进一步的研究^[11, 12]指出，热带西太平洋纬向风应力的变化及其东移与赤道东太平洋海面温度的变化存在着内在的动力学联系，并且纬向风应力东传时比其静止时所激发出的海洋Kelvin波有更大的强度。

虽然热带太平洋地区海气相互作用在ENSO的发生、发展和消亡中起着重要的作用，但一些研究也表明，热带太平洋区域以外海气系统同样对ENSO循环具有重要影响。李崇银等对季节内振荡与El Niño的关系研究发现，热带大气季节内振荡的年际变化同El Niño事件的发生有密切关系。在El Niño发生之前，

热带大气季节内振荡的动能异常增强；伴随El Niño的爆发，热带大气季节内振荡的动能迅速减小，而准定常系统的动能却急速增强。因此，当热带大气季节内振荡出现异常发展（年际异常）后，过剩的季节内振荡的扰动动能将被传送给准定常系统，使准定常系统强烈发展，在海气相互作用下激发产生El Niño事件^[2,3]。

另外，冬半年东亚冬季风的异常活跃（强寒潮频繁）也可能是导致El Niño事件发生的机制之一^[3]。东亚冬季风（寒潮）活动的异常活跃，可以通过行星波列不断将能量向东南方向频散到热带中、西太平洋地区，引起热带中、西太平洋地区偏东信风不断被削弱，并使得对流活动和降水增强，而大气对流活动的增强将激发强的30~60天季节内振荡，通过海气耦合相互作用激发El Niño的发生^[13]。黄荣辉等^[14, 15]也指出ENSO循环可能是亚洲季风区与环流区之间存在的低频振荡的产物，并指出赤道附近西风异常可能是ENSO发生的一个必要条件，而这种西风异常的产生与东亚季风区的西风异常向赤道的传播有关。

近几年，随着印度洋偶极子现象的发现^[16, 17]，印度洋海温与ENSO之间的相互作用也成为非常热门的话题；袁媛等^[18]指出，1970年代之前印度洋偶极子与太平洋ENSO事件具有较强的相互独立性，而1970年代之后两者相互联系、相互影响。同时还指出，偶极子不仅仅受到ENSO的影响，反过来也会影响ENSO的强度。吴国雄等^[19]早在1998年就指出，赤道印度洋和东太平洋海表温度年际变化之间存在着显著的正相关，并指出印度洋这种与ENSO相关联的变化，与ENSO之间存在内在的物理联系。它们之间的联系是由沿赤道印度洋上空纬向季风环流和太平洋上空Walker环流之间显著的“齿轮式”耦合造成的，并提出从大气环流的角度来说，印度洋地区季风环流的异常可能是ENSO事件形成的一种触发机制。孟文等^[20]从模拟分析角度进一步证实了这一发现，并指出太平洋或印度洋上的大气异常信号可以通过这种“齿轮式”耦合作为桥梁，影响另一地的海气相互作用。Kug等^[21, 22]近期的研究再次指出，作为厄尔尼诺的特征之一，印度洋海温的变暖对于ENSO将起到负反馈作用。这一负反馈作用对于强厄尔尼诺事件以及随后而来的拉尼娜事件尤其明显。

3 ENSO预测方法

正是由于ENSO对全球气候变化有着极大的影响，自20世纪80年代以来，各国科学家广泛开展ENSO预测研究。目前ENSO预测模型主要分为两类，即统计学模型和动力学模型^[23-25]。

自从Zebiak等^[26]首次使用简化海气耦合模式（ZC）

成功预测了1986/1987年的El Niño事件后，国内外的科研和业务单位相继投入了大量的人力和物力，开展各种不同复杂程度的海气耦合模式预测系统的研发工作，以满足各国业务单位对ENSO等季节—年际预测业务的需要^[27-31]。当前主要发达国家，如美国气候预测中心（CPC）、美国气候与环境国际研究中心（IRI）、欧洲中期天气预报中心（ECMWF）、日本气象厅（JMA）、日本全球变化Frontier研究所、澳大利亚气象局研究中心（BMRC）、中国国家气候中心（NCC）的ENSO预测系统均以复杂海（陆）气耦合模式系统为主^[32-39]，甚至开始尝试未来利用气候系统模式^[39, 40]进行跨季度—年际气候预测。

尽管不少国家已开始利用复杂气候模式发布未来12~24个月内的ENSO趋势预测产品，但在准确性上，没有一个国家的动力模式能预报出ENSO事件循环过程的每一细节^[41, 42]。从影响气候模式ENSO预测技巧的主要因素看，主要是由于模式本身不完善以及大气和海洋初始场存在不可避免的系统性、随机性等观测误差所引起的^[42-47]。如，Yan等^[48, 49]、Latif等^[23]分析了ENSO的可预报性问题，指出由于气候变化本身的非线性和不规则的特性以及大气的随机强迫，即较短时间内的ENSO预测同样存在着一定的不确定性。因此，对于ENSO预测也应该存在类似于在大气集合预报中对不确定性的考虑，恰当的估计和模拟出ENSO预测的初始不确定性和预报过程的不确定性，以弥补单一确定性预报的不足。由此，许多工作针对ENSO预报中（耦合的）初始扰动对ENSO集合预报的影响开展了研究。Moore等^[50]、Kleeman等^[51]直接应用了“最优扰动”（亦即Singular Vector）方法在一个ICM中，分析发现ENSO预报水平与样本离散度以及最慢衰减的增长模振幅有很强关系。Kirtman^[41]强调了ENSO预报应该是具有概率预报性质的，并应用LAF方法用6个样本在COLA模式中进行了集合后报试验。Cai等^[52]、Yang等^[53]分别在ZC模式和NSIPP（NASA季节到年际预报计划，NASA Seasonal to Interannual Prediction Project）CGCM两个耦合模式中检验了“Breeding”方法，分析了与ENSO变化相关的耦合增长模的空间分布。穆穆等^[54]用CNOP（条件非线性最优扰动，Conditional Nonlinear Optimal Perturbation）方法在ZC模式中研究预报时刻对预报结果有最大影响的初始误差，也可分析非线性模式的最不稳定的初始模态。这些结果的应用表明，采用集合预报的办法可以在一定程度上减少初值中的不确定性，提高ENSO预测的准确率。

综上，要进一步提高气候模式对ENSO的预测技巧，需要通过改进模式、提高观测资料质量或者采用

集合预报这一途径来逐步解决。在未来ENSO预测方式的选择上,总体将依赖具备复杂海(陆)气耦合能力的气候模式系统,并结合集合预报这一技术手段,这已成为国内外的共识。

在ENSO统计预测方法方面,常用方法主要有典型相关分析(Canonical Correlation Analysis,简称CCA)^[55,56]、奇异谱分析(Singular Spectrum Analysis,简称SSA)^[57]、主振荡分析(Principal Oscillation Pattern analysis,简称POP)、线性反置模型^[58]、气候持续性模型^[59]、马尔科夫链^[60]、相似预报模型^[61]、滤波最优叠合模式^[62]、(复)经验正交函数分析、回归分析和神经网络等方法。在目前动力学方法发展还未完全成熟的情况下,ENSO统计预测方法仍将在相当长的时间内具有不可或缺的发展空间和重要的应用价值。

4 ENSO的年代际变化特征

王绍武等^[63]利用Niño 3区、Niño C区海表温度序列及两个SOI序列,同时考虑SST和SOI建立了1867—1998年季分辨率的ENSO指数序列。根据ENSO指数序列,并参考Wright的SOI指数及其他资料,确认了1867—1998年ENSO事件,共确定出32次暖事件(正SST、负SOI)及32次冷事件(负SST、正SOI)。对每次事件的强度分强、中、弱三等进行了评估。虽然1982/1983年暖事件的峰值最高,但从整个事件的平均强度来看,1997/1998年的暖事件则是130多年来最强的一次。另外,近20年是暖事件的多发期。

Cane^[64]回顾了ENSO气候变化研究并指出,在过去几年,人们对于ENSO的古气候记录知识迅速加深。ENSO循环在所有相关历史记录资料中都确实存在,可以追溯到13万年前。在全新世的早期和中期,ENSO循环表现为系统性偏弱,而且模式研究指出这一结论来源于北半球夏季近日点平均气候改变的一种结果——夏末和秋初减弱的振幅。来自珊瑚的数据显示在过去的1000年内ENSO循环的强度存在明显的年代际和更长时间尺度的变率;这意味着这可能是由于太阳辐射中包含了太阳和火山变率的缘故,并由Bjerknes反馈得到加强。一些证据表明,这一反馈在20世纪已经起了作用,而且一些模式结果也表明,在未来温室效应的情景下结果仍存在较大不确定性。用于未来气候预估的复杂大气环流模式在ENSO的未来演变方面表现出很大的不确定性。一些模式预估ENSO活动将更加频繁,而另一些模式则预估偏少,反映出高度不确定性的预估结论。

Yu等^[65]从持续性特征角度分析了ENSO春季障碍现象的年代际变化特征,1958—2001年ENSO事件赤道太平洋海温异常在中太平洋和东太平洋可视为两个

不同的过程:在赤道中太平洋,位相转换和持续性障碍总是发生在春季;在赤道东太平洋,位相转换和持续性障碍存在年代际变化,即持续性障碍在1976/1977年和1989/1990年发生了两次明显的突变,这主要是受赤道太平洋平均温跃层深度的变化的影响所致。

5 ENSO的分类

关于ENSO事件分布型的研究是近几年非常热门的话题,主要原因可能是2000年以来发生的El Niño事件基本都不同于传统的El Niño事件,最大海温正距平分布的区域不在传统定义ENSO事件的Niño 3区,而是向西移动到日界线附近,由此带来的气候影响也与传统ENSO事件的影响有着明显的差异,因此这一现象引起了科学家们广泛的关注。

然而事实上早期的研究已经注意到El Niño事件的发生过程包括两类,一类主要在太平洋东部(秘鲁沿岸)增暖再向西扩展,另一类则主要在赤道中太平洋出现大范围增暖并自西向东扩展^[66-68]。但直到最近几年,研究者才意识到在ENSO事件的发展过程中,受海表温度异常不同分布形态的影响,热带对流加热场的分布特征表现出显著的差异,由此提出应该依据海表温度异常的空间分布形态将El Niño分为不同分布型,来研究其发生机理及气候影响。他们将这主要在赤道中太平洋增暖的El Niño事件称为日界线El Niño^[69]、El Niño Modoki^[70]、暖池El Niño^[71]或中部型El Niño^[72],而在太平洋东部特别是秘鲁沿岸增暖的El Niño事件相应被称为典型El Niño、冷舌El Niño或东部型El Niño。为便于理解,本文用中部型和东部型的命名方式来区分不同分布型的El Niño事件。统计发现,20世纪90年代以后发生的8次El Niño事件中,有5次都是中部型,而另外3次则兼有中部型和东部型的共同特征,Kug等^[71]称之为混合型El Niño。

东部型El Niño的海表温度异常中心主要分布在赤道东太平洋地区靠近南美沿岸,也即是通常所说的Niño 3区;这一类型El Niño的发生及发展演变受到整个热带太平洋温跃层、热容量及表面风变化的影响;反位相事件经常在El Niño事件结束后发生,因此它常被称为一次循环;东部型El Niño主要以年际变化为主,但也具有1976/1977年前后的年代际变化特征,表现为在这之前以2年周期为主,而之后以4年周期为主^[71,72]。

与之不同,中部型El Niño的海表温度正距平中心主要分布在赤道太平洋中部,也即是Niño 4区^[71,72],而赤道东太平洋和西太平洋海温相对较冷,从而使得整个赤道太平洋形成“-+ -”的海温分布型^[70];海温异常沿赤道传播的特征不明显,而主要在局地发展消亡^[72];中部型El Niño事件的发生及发展演变可能更多

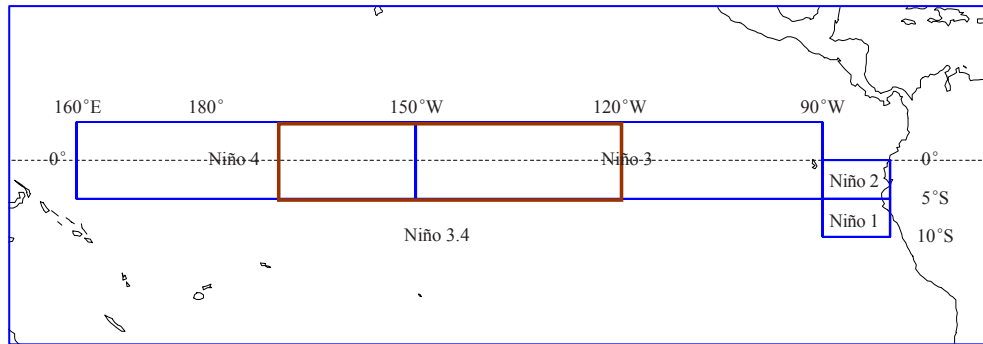


图1 ENSO监测关键区分布 (引自国家气候中心)

的基于大气外强迫^[72]或者纬向平流^[71, 73]等机制;反位相事件不常紧跟发生,因此不同于东部型El Niño被称为一次循环,它常被称为一次事件^[71, 72];中部型El Niño具有明显的年代际背景,并以2年的周期为主^[72, 74]。另外, Yeh等^[73]提出中部型El Niño事件在1990年代后发生的频率显著增加,这可能与全球气候变暖,尤其是赤道太平洋海温的年代际增暖有关。

6 ENSO的指标

ENSO事件研究的指数有多种,最常见的是ENSO监测关键区(图1)海表温度指数如Niño 1+2, Niño 3, Niño 4, Niño 3.4和JMA指数(类似Niño 3指数,但关键区的南北范围为4°S—4°N)^[75],以及基于地表大气气压的南方涛动指数SOI。此外,许多研究还提出其他一些指数,如由6个变量经主成分分析得到的多变量ENSO指数(Multivariate ENSO Index (MEI))^[76]、代表Niño 1+2区与Niño 4区之间海表温度梯度的TNI[Trans-Niño Index (TNI)]^[77]指数和Niño综合区(Niño Z= Niño 1+2+3+4)海温指数^[78]等。近几年针对不同类型的ENSO事件,又发展一些新的监测指数如反映海表温度距平“+ -”分布型的假厄尔尼诺指数[El Niño Modoki index (EMI)]^[70]、分别反映东部型(EP)和中部型(CP) ENSO事件的海温指数^[72, 79]。为了对EP和CP型ENSO进行更有效地识别,曹璐等^[80]提出了一个指标组,即由Niño 3和Niño 4两个指数共同对ENSO事件进行判别。

关于EP和CP次表层海温指数, Yu等^[79]利用1958—2001年海洋同化资料100m以上在东太平洋(80°—90°W, 5°S—5°N)和中太平洋(160°E—150°W, 5°S—5°N)区域内的平均海温距平建立得到。分析发现上述次表层指数较之SST指数具有更强的独立性,并表现出更适合于识别EP和CP型ENSO特性。基于该指数识别的两类ENSO事件,强厄尔尼诺事件主要表现出EP型特征,而强拉尼娜事件则更趋向于CP型特征;对于弱的厄尔尼诺事件和强拉尼娜事件,则表现出相反的特性。对于20世纪两个强的厄

尔尼诺事件,1997/1998年事件表现为单一的EP型特征,而1982/1983年事件则兼有EP和CP型特征——由前期的弱CP型转换为后期的强EP型特征。

Hanley等^[81]研究指出,就现有的ENSO指数,对于究竟哪个指数能最好表征ENSO的演变特征这一问题,科学界尚未形成一致的看法。他们通过比较分析发现, Niño 4指数对于厄尔尼诺的反映相对较弱,而Niño 1+2指数对于拉尼娜的反映相对较强。指数的敏感性分析表明, ENSO指数的选取依赖于研究的ENSO位相。JMA指数对拉尼娜比所有其他指数来得敏感,而SOI、Niño 3.4和Niño 4指数对厄尔尼诺的敏感程度几乎一样并均强于JMA、Niño 1+2和Niño 3指数。

关于ENSO的定义,目前国际上并无统一的标准。Trenberth^[75]采用海洋—大气耦合关键区——Niño 3.4区(5°S—5°N, 120°—170°W)指数5个月滑动平均连续6个月 $\geq 0.4^{\circ}\text{C}$ ($\leq -0.4^{\circ}\text{C}$)定义为一次El Niño (La Niña)事件。王绍武等^[63]根据所研究问题的不同,选择了标准化的综合指数连续两季达到异常时分别定义为暖事件和冷事件。通常,国际气候业务中心采用如下一些标准:美国NOAA以Niño 3.4区SSTA的3个月滑动平均值连续5个月 $\geq 0.5^{\circ}\text{C}$ ($\leq -0.5^{\circ}\text{C}$)定义为一次El Niño (La Niña)事件;日本气象厅采用5个月滑动平均月JMA指数连续6个月(其中必须包含10, 11和12月) $\geq 0.5^{\circ}\text{C}$ ($\leq -0.5^{\circ}\text{C}$)定义为一次El Niño (La Niña)事件;中国气象局国家气候中心依据Niño Z海温距平指数 $\geq 0.5^{\circ}\text{C}$ ($\leq -0.5^{\circ}\text{C}$)至少持续6个月(过程中间可有一个月未达标准)则定义为一次El Niño (La Niña)事件,如若该区指数 $\geq 0.5^{\circ}\text{C}$ ($\leq -0.5^{\circ}\text{C}$)持续5个月,且5个月的指数之和 $\geq 4.0^{\circ}\text{C}$ ($\leq -4.0^{\circ}\text{C}$)时,也定义为一次El Niño (La Niña)事件。

7 ENSO的气候影响

从近30年的研究成果看, El Niño对全球天气气候的影响主要表现在:南美沿岸国家异常多雨,巴西东北部、中美洲、印度尼西亚、澳大利亚东部及周边国

家出现干旱，非洲东南部干旱而东非多雨，加拿大西部和美国北部暖冬，美国南部冬季潮湿多雨，西北太平洋和北大西洋热带风暴减少，以及东北亚（包括中国东北、日本北部和朝鲜等地）夏季易出现低温^[2]。龚道溢等^[82]对近百年来ENSO对全球陆地降水的影响研究表明：在El Niño年，全球陆地降水显著减少，而在La Niña年全球陆地降水则显著增加。

我国位于东亚季风区，东亚夏季风和冬季风的异常直接造成了我国气候的异常，ENSO正是通过大气环流以“遥相关”的形式影响到东亚季风系统的每个成员，并由此间接地影响我国的气候^[2]。ENSO被认为是影响东亚季风年际异常的关键因子^[83-86]。研究表明，在El Niño年，东亚夏季风减弱^[87]，我国夏季主要季风雨带偏南，江淮流域多雨的可能性较大，而北方地区特别是我国华北到河套一带常出现少雨和干旱^[88, 89]。在El Niño年的秋冬季，我国北方大部分地区降水比常年偏少，南方大部分地区降水比常年偏多^[90]。另外，在El Niño年东亚冬季风偏弱^[3, 91]，我国常出现暖冬冷夏，特别是我国东北地区由于夏季温度偏低，出现低温冷害的可能性较大^[92]。

造成这些影响的原因是：当赤道东太平洋海温异常升高时，其上空的对流活动变得活跃，导致这一地区降水增多，南美沿岸国家也因此异常多雨。同时，对流区的东移又使得西太平洋地区降水大大减少，从而使得印度尼西亚、澳大利亚东部及周边国家出现干旱。通过大气环流的作用，El Niño将热带地区大气和海洋的异常信号传给了热带其他地区及中高纬地区，从而对全球气候带来不同程度的影响^[2]。

然而进一步的研究发现，当中部型El Niño发生时，由于赤道太平洋海温异常分布的不同，对流活跃区较东部型El Niño偏西，在赤道太平洋上空地区可能会形成两个异常的Walker环流圈，从而对南美、北美西海岸，甚至日本和新西兰气候的影响与东部型El Niño的影响可能完全相反^[69, 70]。由于海温偏高，赤道太平洋中部为相对偏湿的区域，由此会在西北太平洋上空对流层中层激发正位相的PJ（Pacific-Japan）波列，在东北太平洋—北美地区上空的对流层中层激发正位相的夏季PNA（Pacific-North American）型，从而导致西北太平洋夏季风偏强，东亚夏季风偏弱^[74]，而在东部型El Niño年东亚夏季风却是偏强的。中部型El Niño还会导致美国西部冬季经常出现北干南湿的“跷跷板”式气候分布特征，而当东部型El Niño发生时美国西部大部地区冬季都以偏湿的气候特征为主。另外，与东亚冬季风相联系的反气旋在东部型El Niño年一般出现在菲律宾地区，而当中部型El Niño发生

时，此反气旋会西移到我国南海地区，由此而导致东亚南部完全相反的降水异常分布特征^[93-95]。最新的研究表明，在东部型El Niño次年的春季和夏季，我国华南降水偏多，而在中部型El Niño次年的春季和夏季，我国华南的降水则会偏少^[96, 97]。事实上，这种特征不仅仅表现在我国华南，主要出现在东亚东南部，而且从两类分布型El Niño的当年夏季到次年夏季都有明显差异^[98, 99]。

8 ENSO的业务现状

世界气象组织（WMO）自2006年以来根据赤道太平洋海温的发展演变状况准定期发布ENSO的最新报告（El Niño/La Niña Update）。该报告由WMO与美国气候和社会国际研究院（the International Research Institute for Climate and Society of USA, IRI）共同协作完成，贡献者包括相关国家的气候业务中心或研究机构。在ENSO业务方面，主要的气候业务中心或研究机构如下：

美国国家海洋大气局气候预测中心（NOAA/CPC），其网站实时提供包含反映大气和海洋异常状况的十分丰富的ENSO监测诊断产品，并有多种统计与动力模式的ENSO预测结果，以及专家讨论会商结论。美国气候和社会国际研究院（IRI）提供以下ENSO产品：ENSO展望简讯、ENSO技术分析最新报告、多种形式的ENSO预测产品（概率预报、预测集合）。澳大利亚气象局（BoM）实时提供翔实的ENSO监测诊断产品，同时在ENSO预测业务方面有模式集合预测系统（POAMA）专门的产品。

在亚洲，中国国家气候中心（CMA/NCC）提供较全面的ENSO监测诊断产品，ENSO预测产品来源于两个耦合动力模式和四个统计模式。日本气象厅（JMA）制作有专门的ENSO监测诊断产品，其ENSO预测产品主要来源于其海气耦合模式。韩国气象局（KMA）也提供实时的ENSO监测预测业务。

国际厄尔尼诺研究中心（CIIFEN）2003年1月成立于厄瓜多尔，隶属于WMO。该中心致力于减少ENSO事件对拉丁美洲临近太平洋地区带来的气候和经济社会影响，其网站主要提供西班牙语的ENSO监测预测及气候趋势预测产品，且主要面向拉丁美洲临近太平洋的国家和地区。

9 结束语

本文从五个方面对近30年来国内外在ENSO研究方面的最新进展给出总结，以往研究已经取得了丰硕的成果，特别是在ENSO动力学及预测理论方面更加显著。现有的研究不仅将ENSO循环看成是热带太平洋区域海气相互作用问题的研究，而且也开始关注

到热带印度洋通过大气桥与ENSO循环之间的相互作用。但是, ENSO循环不仅仅是一个热带问题, 对于热带以外区域海气系统对ENSO循环影响的机理方面还缺乏更深入的认识。因此, ENSO循环与热带外系统特别是整个亚澳季风系统之间的相互作用将可能成为未来一个重要的研究课题。此外, 对于ENSO的不同类型及其有效表征指标、以及ENSO事件对全球特别是我国天气气候的影响机理等科学问题也将备受关注。

致谢: 初审和终审几位专家对本文存在的问题提出了宝贵的修改意见, 对本文的质量提高起到了重要作用。作者在此深表谢意!

参考文献

- [1] Wyrski K. El Niño-the dynamic response of the equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing. *J Phys Oceanogr*, 1975, 5: 572-584.
- [2] 翟盘茂, 李晓燕, 任福民. 厄尔尼诺. 北京: 气象出版社, 2003.
- [3] 李崇银. 气候动力学引论. 北京: 气象出版社, 2000.
- [4] McCreary J P. A model of tropical ocean-atmosphere interaction. *Mon Wea Rev*, 1983, 111: 370-387.
- [5] Cane M A, Zebiak S E, Dolan S C. Experimental forecasts of El Niño. *Nature*, 1986, 321: 827-832.
- [6] 黄荣辉, 张人禾, 严邦良. 热带西太平洋纬向风异常对ENSO循环的动力作用. *中国科学D辑*, 2001, 31: 697-704.
- [7] Jin F F. An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part I: A Stripped-Down Coupled Model. *Journal of the Atmospheric Science*, 1997, 54: 811-829.
- [8] Jin F F. An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part II: A Stripped-Down Coupled Model. *Journal of the Atmospheric Science*, 1997, 54: 830-847.
- [9] Bejarano L, Jin F F. Collective role of thermocline and zonal advective feedbacks in the ENSO mode. *Journal of Climate*, 2001, 14: 3421-3432.
- [10] Bejarano L, Jin F F. Coexistence of equatorial coupled modes of ENSO. *Journal of Climate*, 2007, 21: 3051-3067.
- [11] 张人禾, 黄荣辉. El Niño事件发生和消亡中热带太平洋纬向风应力的动力作用 I. 资料诊断和理论分析. *大气科学*, 1998, 22: 597-609.
- [12] 严邦良, 黄荣辉, 张人禾. El Niño事件发生和消亡中热带太平洋纬向风应力的动力作用 II. 模式结果分析. *大气科学*, 2001, 25: 160-172.
- [13] Li C Y. Interaction between anomalous winter monsoon in East Asia and El Niño Events. *Adv Atmos Sci*, 1990, 7: 36-46.
- [14] 黄荣辉, 傅云飞, 臧晓云. 亚洲季风与ENSO循环相互作用. *气候与环境研究*, 1996, 1: 38-54.
- [15] 黄荣辉, 吴仪芳. 关于ENSO循环动力学的研究. // 海洋环流研讨会论文集. 北京: 海洋出版社, 1992.
- [16] Saji N H, Goswami B N, Vinayachandran P N, et al. A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 1999, 401: 360-363.
- [17] Webster P J, Moore A M, Loschnigg J P, et al. Coupled ocean-atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997-98. *Nature*, 1999, 401: 356-360.
- [18] 袁媛, 李崇银. 热带印度洋偶极子与ENSO事件关系的年代际变化. *科学通报*, 2008, 53: 1429-1436.
- [19] 吴国雄, 孟文. 赤道印度洋-太平洋地区海气系统的齿轮式耦合和ENSO事件 I 资料分析. *大气科学*, 1998, 22: 470-480.
- [20] 孟文, 吴国雄. 赤道印度洋-太平洋地区海气系统的齿轮式耦合和ENSO事件 II 数值模拟. *大气科学*, 2000, 24: 15-25.
- [21] Kug J S, Kang I S. Interactive feedback between ENSO and the Indian Ocean. *Journal of Climate*, 2006, 19: 1784-1801.
- [22] Kug J S, Kirtman B P, Kang I S. Interactive feedback between ENSO and the Indian Ocean in an interactive ensemble coupled model. *Journal of Climate*, 2006, 19: 6371-6381.
- [23] Latif M, Anderson D, Barnett T, et al. A review of the predictability and prediction of ENSO. *J Geophys Res*, 1998, 103: 14375-14393.
- [24] 张人禾, 周广庆, 巢纪平. ENSO动力学与预测. *大气科学*, 2003, 27(4): 674-688.
- [25] 郑飞. ENSO集合预报研究. 北京: 中国科学院研究生院大气物理研究所, 2007.
- [26] Zebiak S E, Cane M A. A model El Niño-Southern Oscillation. *Mon Wea Rev*, 1987, 115: 2262-2278.
- [27] 周广庆, 李崇银. 西太平洋暖池次表层海温异常与炭关系的模拟结果. *气候与环境研究*, 1999, 4: 346-352.
- [28] Mason S J, Goddard L, Graham N E, et al. The IRI seasonal climate prediction system and the 1997/98 El Niño event. *Bull Amer Met Soc*, 1999, 80: 1853-1873.
- [29] Palmer T N, Alessandri A, Andersen U, et al. Development of a European multi-model ensemble system for seasonal to interannual prediction (DEMETER). *Bull Amer Met Soc*, 2004, 85: 853-872.
- [30] Alves O, Balmaseda M A, Anderson D, Stockdale T. Sensitivity of dynamical seasonal forecasts to ocean initial conditions. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2004, 130: 647-667.
- [31] 丁一汇, 李清泉, 李维京, 等. 中国业务动力季节预报的进展. *气象学报*, 2004, 62(5): 598-612.
- [32] Saha S, Nadiga C, Thiaw J, et al. The NCEP climate forecast system. *Journal of Climate*, 2006, 19: 3483-3517.
- [33] Anderson D L T, et al. Development of the ECMWF seasonal forecast system 3. ECMWF Tech Memo 503, Eur Cent For Medium Range Weather Forecasts, 2006.
- [34] Molteni F, et al. ECMWF seasonal forecast system 3. CLIVAR Exch, 2007, 43: 7-9.
- [35] Ishikawa I, Tsujino H, Hirabara M, et al. Meteorological Research Institute Community Ocean Model (MRI.COM) manual. Technical Reports of the Meteorological Research Institute, 2005, 47 (in Japanese).
- [36] Mason S J, Goddard L, Graham N E, et al. The IRI seasonal climate prediction system and the 1997/98 El Niño event. *Bull Amer Met Soc*, 1999, 80: 1853-1873.
- [37] Wang G, Kleeman R, Smith N, et al. The BMRC coupled general circulation model ENSO forecast system. *Mon Wea Rev*, 2002, 130: 975-991.
- [38] Luo J J, Masson S, Behera S, et al. Seasonal climate predictability in a coupled OAGCM using a different approach for ensemble forecasts. *J Climate*, 2005, 18: 4474-4497.
- [39] 吴统文, 等. 国家气候中心气候系统模式研发进展报告. 北京: 国家气候中心, 2009.
- [40] Kirtman B P, Min D. Multimodel ensemble ENSO prediction with CCSM and CFS. *Mon Wea Rev*, 2009, 137: 2908-2930.
- [41] Kirtman P B. The COLA anomaly coupled model: Ensemble ENSO prediction. *Mon Wea Rev*, 2003, 131: 2324-2341.
- [42] Jin E K, James L K, Wang B, et al. Current status of ENSO prediction skill in coupled ocean-atmosphere models. *Climate Dyn*, 2008, 31: 647-664.
- [43] Goswami B N, Shukla J. Predictability of a coupled ocean atmosphere model. *J Climate*, 1991, 4: 3-22.
- [44] Chen D, Zebiak S E, Cane M A. Initialization and predictability of a coupled ENSO forecast model. *Mon Wea Rev*, 1997, 125: 773-788.
- [45] Chen D, Cane M A, Kaplan A, et al. Predictability of El Niño in the past 148 years. *Nature*, 2004, 428: 733-736.
- [46] Moore A M, Kleeman R. The dynamics of error growth and predictability in a coupled model of ENSO. *Quart J Roy Met Soc*, 1996, 122: 1405-1446.
- [47] Moore A M, Zavala-Garay J, Tang Y, et al. Optimal forcing patterns for coupled models of ENSO. *J Climate*, 2006, 19: 4683-4699.
- [48] Yan X, Cane M A, Zebiak S E. Predictability of a coupled model of ENSO using singular vector analysis. Part I: Optimal growth in seasonal background and ENSO cycles. *Mon Wea Rev*, 1997, 125: 2043-2056.
- [49] Yan X, Cane M A, Zebiak S E, et al. Predictability of a coupled model of ENSO using singular vector analysis. Part II: Optimal growth and forecast skill. *Mon Wea Rev*, 1997, 125: 2057-2073.

- [50] Moore A M, Kleeman R. Skill assessment for ENSO using ensemble prediction. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1998, 124: 557-584.
- [51] Kleeman R, Moore A M. A new method for determining the reliability of dynamical ENSO predictions. *Mon Wea Rev*, 1999, 127: 694-705.
- [52] Cai M, Kalnay E, Toth Z. Bred vectors of the Zebiak-Cane model and their application to ENSO predictions. *J Climate*, 2003, 16: 40-55.
- [53] Yang S C, Cai M, Kalnay E, et al. ENSO bred vectors in coupled ocean-atmosphere general circulation models. *J Climate*, 2006, 19: 1422-1436.
- [54] 穆穆, 段晚锁. 条件非线性最优扰动及其在天气和气候可预报性研究中的应用. *科学通报*, 2005, 50: 2695-2701.
- [55] Barnston A G, Ropelewski C F. Prediction of ENSO episodes using canonical correlation analysis. *J Climate*, 1992, 5: 1316-1345.
- [56] 江志红, 丁裕国, 周琴芳. 用于ENSO预测的一种广义典型混合回归模式及其预报试验. *热带气象学报*, 1999, 15: 322-329.
- [57] 丁裕国, 江志红, 朱艳峰. Nino海区SSTA短期气候预测模型试验. *热带气象学报*, 1998, 14(4): 289-296.
- [58] Penland C, Magorian T. Prediction of Niño 3 sea surface temperatures using linear inverse modeling. *J Climate*, 1993, 6: 1067-1076.
- [59] Knaff J A, Landsea C W. An El Niño Southern Oscillation climatology and persistence (CLIPER) forecasting scheme. *Weather Forecast*, 1997, 12: 633-652.
- [60] Xue Y, Leetmaa A, Ji M. ENSO prediction with Markov models: The impact of sea level. *J Climate*, 2000, 13: 849-871.
- [61] 任福民, 周琴芳. 赤道中东太平洋海温相似预报研究. *气象学报*, 2001, 59(1): 49-58.
- [62] 任福民, 郭艳君, 周琴芳. ENSO预测的滤波最优叠合模式研究. ENSO监测和预测研究. 北京: 气象出版社, 1999.
- [63] 王绍武, 龚道溢. 近百年来的ENSO事件及其强度. *气象*, 1999, 25(1): 9-14.
- [64] Cane M A. The evolution of El Niño, past and future. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 230: 227-240.
- [65] Yu J Y, Kao H Y. Decadal changes of ENSO persistence barrier in SST and ocean heat content indices: 1958-2001. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112. doi: 10.1029/2006JD007654.
- [66] Rasmusson E M, Wallace J M. Meteorological aspects of El Niño/Southern Oscillation. *Science*, 1983, 222: 1195-1202.
- [67] Fu C B, Diaz H, Fletcher J. Characteristics of the response of sea surface temperature in the central Pacific associated with the warm episodes of the Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, 1986, 114: 1716-1738.
- [68] Wang B. Interdecadal changes in El Niño onset in the last four decades. *J Climate*, 1995, 8: 267-285.
- [69] Larkin N K, Harrison D E. On the definition of El Niño and associated seasonal average U.S. weather anomalies. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L13705. doi:10.1029/2005GL022738.
- [70] Ashok K, Behera S K, Rao S A, et al. El Niño Modoki and its possible teleconnection. *J Geophys Res*, 2007, 112, C11007. doi: 10.1029/2006JC003798.
- [71] Kug J S, Jin F F, An S I. Two types of El Niño events: Cold tongue El Niño and warm pool El Niño. *J Clim*, 2009, 22: 1499-1515.
- [72] Kao H Y, Yu J Y. Contrasting Eastern-Pacific and Central-Pacific types of ENSO. *J Clim*, 2009, 22: 615-632.
- [73] Yeh S W, Kug J S, Dewitte B, et al. El Niño in a changing climate. *Nature*, 2009, 461: 511-514.
- [74] Weng H, Ashok K, Behera S K, et al. Impacts of recent El Niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific Rim during boreal summer. *Climate Dynamics*, 2007, 29: 113-129.
- [75] Trenberth K E. The Definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78: 2771-2777.
- [76] Wolter K, Timlin M S. Monitoring ENSO in COADS with a seasonally adjusted principal component index: Proc of the 17th Climate Diagnostics Workshop, Norman, OK, NOAA/NMC/CAC, NSSL, Oklahoma Clim. Survey, CIMMS and the School of Meteor, Univ of Oklahoma, 1993.
- [77] Trenberth K E, Stepaniak D P. Indices of El Niño evolution. *J Clim*, 2001, 14: 1697-1701.
- [78] 李晓燕, 翟盘茂. ENSO事件指数与指标研究. *气象学报*, 2000, 58(1): 102-109.
- [79] Yu J Y, Kao H Y, Lee T, et al. Subsurface ocean temperature indices for Central-Pacific and Eastern-Pacific types of El Niño and La Niña events. *Theor Appl Climatol*, 2011, 103: 337-344.
- [80] 曹璐, 孙丞虎, 任福民, 等. 一种综合监测两类不同分布类型 ENSO事件指标的研究. *热带气象学报*, 2012, 待发表.
- [81] Hanley D E, Bourassa M A, O'brien J J, et al. A Quantitative Evaluation of ENSO Indices. *Journal of Climate*, 2003, 16(8): 1249-1258.
- [82] 龚道溢, 王绍武. 近百年 ENSO 对全球陆地及中国降水的影响. *科学通报*, 1999, 44: 315-320.
- [83] Zhang R, Sumi A, Kimoto M. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China. *Adv Atmos Sci*, 1999, 16: 229-241.
- [84] Chang C P, Zhang Y, Li T. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part I: Roles of the subtropical ridge. *J Climate*, 2000, 13: 4310-4325.
- [85] Zhou W, Chan J C L. ENSO and the South China Sea summer monsoon onset. *Int J Climatol*, 2007, 27: 157-167.
- [86] Zhou L T, Tam C Y, Zhou W, et al. Influence of South China Sea SST and the ENSO on winter rainfall over South China. *Adv Atmos Sci*, 2009, 27: 832-844.
- [87] 陶诗言, 张庆云. 亚洲冬夏季风对 ENSO 事件的响应. *大气科学*, 1998, 22: 399-407.
- [88] Huang R H, Wu Y F. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism. *Adv Atmos Sci*, 1989, 6: 21-32.
- [89] 赵振国. 厄尔尼诺现象对北半球大气环流和中国降水的影响. *大气科学*, 1996, 20: 422-428.
- [90] 龚道溢, 王绍武. ENSO对中国四季降水的影响. *自然灾害学报*, 1998, 7: 44-52.
- [91] 何溪澄, 丁一汇, 何金海. 东亚冬季风对 ENSO 事件的响应特征. *大气科学*, 2008, 32: 335-344.
- [92] Wang S W. El Niño and summer temperatures in Northeast China, 1860-1980. *Tropical Ocean-Atmosphere Newsletter*. 1984, 25: No.4.
- [93] Weng H, Behera S K, Yamagata T. Anomalous winter climate conditions in the Pacific rim during recent El Niño Modoki and El Niño events. *Climate Dynamics*, 2009, 32: 663-674.
- [94] Weng H, Wu G X, Liu Y M, et al. Anomalous summer climate in China influenced by the tropical Indo-Pacific Oceans. *Climate Dynamics*, 2011, 36: 769-782.
- [95] Feng J, Wang L, Chen W, et al. Different impacts of two types of Pacific Ocean warming on Southeast Asian rainfall during boreal winter. *J Geophys Res*, 2010, 115, D24122. doi: 10.1029/2010JD014761.
- [96] Feng J, Chen W, Tam C Y, et al. Different impacts of El Niño and El Niño Modoki on China rainfall in the decaying phases. *Int J Climatol*, 2010. doi: 10.1002/joc.2217.
- [97] Feng J, Li J. Influence of El Niño Modoki on spring rainfall over south China. *J Geophys Res*, 2011, 116, D13102. doi: 10.1029/2010JD015160.
- [98] Yuan Y, Yang S. Impacts of different types of El Niño on the East Asian climate: Focus on ENSO cycles. *J Climate*, 2012, accepted.
- [99] Yuan Y, Yang S, Zhang Z. Different evolutions of the Philippine Sea anticyclone between eastern and central Pacific El Niño: Possible effect of Indian Ocean SST. *J Climate*, 2012, accepted.

月平均大气环流与短期气候预测

王绍武

(北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871)

摘要: 回顾了长期天气预报发展的历史, 指出对月、季尺度而言, 长期“天气”预报是不可能的, 其预测的目标只能是“气候”。月平均大气环流是气候预测的主要工具, 应用月平均环流给气候预测打开了一扇大门。

关键词: 长期天气预报, 气候预测, 月平均大气环流

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2012.03.003

Monthly-Mean Atmospheric Circulation and Climate Prediction

Wang Shaowu

(Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract: History of studies on long-range weather forecasting is reviewed, indicating that long-range “weather” forecasting is impossible. “Climate” is the unique target in monthly to seasonal predictions. Constructions of monthly-mean atmospheric circulation open a door on climatic prediction, and provide an important means in practice of prediction.

Key words: long-range weather forecasting, climatic prediction, monthly-mean atmospheric circulation

1 引言

大约在19世纪末已经有人开始做气候预测, 那时称为“长期天气预报”^[1]。后来, 到了20世纪50—60年代, 可预报性研究有了长足的进步^[2], 无论理论研究、观测研究, 还是数值试验研究均表明, 逐日天气预报的上限是2~3周。人们开始认识到逐日天气预报是不可能做到“长期”的。“长期”预报的对象只可能是气候特征, 如月平均环流、月平均温度或月降水量。因此, 从20世纪80—90年代, 人们逐渐采用“短期气候预测”这个名词来代替“长期天气预报”。但是, 这绝不仅仅是一个名词的更替, 而是包含着原苏联天气学方法长期预报的失败与美国月平均环流图方法的发展。本文专门对这个问题的认识历程进行研讨。

2 天气学方法长期天气预报的失败

早在20世纪初期苏联建立之前, 俄罗斯就开始了长期预报研究, 当时称为长期天气预报, 领导人为穆尔坦诺夫斯基(Мультановский), 所以也称为穆氏学派的长期预报^[3]。这个学派的基本资料为欧亚地区的逐日海平面气压图。当时长期天气预报的基础是自然天气季节。把1年划分为6个自然天气季节, 即除春、秋两季外, 夏季分初夏、盛夏, 冬季分为前冬、后冬。每个自然天气季节约1个多月到2个多月, 长短不一。每个自然天气季节的气候特征是相对稳定的, 所以气旋、反气旋均相对集中在某个地理区域。确实, 1个冬季的气候时常并不是整个冬季

全冷或整个冬季全暖。有时先冷后暖, 有时先暖后冷。所以, 把冬季划分为两个季节反映了气候变化的特征。夏季这种情况就更为明显了。如中国的初夏为长江中下游梅雨季节, 而盛夏为华北的雨季。并且显然有时季节偏早, 有时又偏迟。因此, 划分自然天气季节适应每年的天气气候特点, 也确实有一定实际意义。

但是, 这个学派却缺少有力的预报工具和预报方法。当时, 作为长期预报的基本工具是所谓的综合图, 即把1个自然天气季节的逐日天气系统用不同的符号标注在同一张天气图上, 用以显示气旋或反气旋盛行的区。综合图有三个缺陷: (1) 综合天气图无法提供定量的信息。在综合图上我们只能看到高低压区分界线。因此也就杜绝了发展动力学预测的道路。20世纪中期苏联又建立了吉尔斯学派, 划分大气环流型, 把北半球的环流型分为E, C, W三种型, 研究型的变化及对气候的影响^[4]。由于北半球的环流型太粗, 尽管后来又有不少学者划分了更细的环流型, 但是基本框架仍是逐日的环流型, 依然未能突破天气学定性分析限制。这种情况一直延续到1970—1980年代。(2) 穆氏学派没有找到任何有力的季节预报工具。综合图只能定性地反映每个自然天气季节的环流特征, 不包括任何预报信息。因此穆氏学派的预报只好求助于韵律、位相等天气学研究。而这些研究充其量只能提供某个时刻的天气, 而得不到要预报的季度的气候信息。(3) 把季节起讫日期逐年变化的自然天气季节做长期预报的对象, 不是减少而是增加了预报的难度。例如要做春季预报, 先要预报春季开始期及结束期、再预报季节的气候特征。由于春季的气候特征与开始期

收稿日期: 2011年11月17日; 修回日期: 2012年1月11日
作者: 王绍武(1932—), Email: swwang@pku.edu.cn
资助信息: 科技部创新方法工作专项(2008IM020500)

及结束期并没有固定的关系,所以把预报气候特征一个量变为要预报起始、结束及特征三个量。在主要以统计学方法做预报,因而准确率较低的情况下,更增加了预报的复杂性。在这种情况下,资料处理也是一个难题。由于每年每个自然季节长度不同、起始及结束日期不固定,因此很难在年与年之间进行比较。而且,如果计算自然季节的平均温度及降水量时,一旦有一个季节的起讫日期有变化就至少要影响到两个季节的气温、降水量平均值。同时,由于自然季节长短及天文日期不固定,各年同一季节之间的平均气温与降水量是无法比较的,更无法如现代气候分析计算距平。

无论穆氏学派还是吉尔学派都未能脱离天气学的范畴,没有能找到一个从天气资料中提取气候信息的工具和方法。因此即使注意到大气环流的影响,也未能在预测中体现。始终把天气作为预报对象,这是与气候学发展的进程背道而驰的。当世界上许多科学家已经认识到可预报性问题的的重要性时,依然做“长期”天气预报,是这个学派失败的根本原因。

3 月平均环流的意义

美国早在1940年代就另辟蹊径,开始做30天(后改为月)平均环流的预报。Namias^[5]于1953年发表了10年经验总结,采用平均环流作为预测的基本工具,后来又发展到做季度预报^[6]。这种思路是与短期气候预测的理论一致的。气候预测与天气预报的基本不同是,气候预测的对象是天气的统计量,而天气预报的对象是天气本身。Namias学派把月平均环流作为基本工具,这就打开了应用动力学方法之门。当然,Namias当时的预报模式仍然是统计模式,用Rossby大气长波理论解释月平均图上大气长波的运动也有问题,但是,无论如何,是这个学派奠定了现代短期气候预测工作的基础。

首先,月平均环流的时间尺度是适当的,应用是方便的。作短期气候预测面对的是月-季尺度的大气环流与气候变化。因此,其工具应该能突出反映出大气环流的长期变化。众所周知,大气环流有尺度为3~5天的短期过程,也有3~4周的指数循环过程或30~60天振荡。做月平均正好把这两种尺度的过程在很大程度上平滑掉。所以,月平均环流正好能显示出我们最需要的大气环流长期变化。例如10天平均就不大可能平滑掉指数循环过程,而季平均时间又太长,显示不出需要预测的月际变化。其次,Namias指出月平均温度与降水量与月平均环流有密切关系。这也是开展数值模式预报的一个基本思想。因为时至今日短期气候预测中可预报性较大的仍然是大气环流而不是局地的气候。因此,用大气环流模式预测大气环流异常,然后通过统计方法再预测难度更大的气温与降水量距平是可行的,这也是统计学和动力学结合的一种方式。第三,Namias指出月平均环流演变之间有继承关系。这就是说月平均环流变化是有规律可循的。今

天我们认识的大气环流变化规律已经比Namias在1940及1950年代丰富多了。Namias晚期致力于海表温度异常、雪盖等物理因子对大气环流影响的研究^[7],这也是现代短期气候预测的基础。先预测ENSO,再用来强迫大气环流的两步法,就是在这个思想基础上发展起来的^[8]。总之,除了没有一个大气环流模式之外,Namias的预报思路与现代的短期气候预测理念基本是一致的。中心思想就是预测月平均大气环流,再通过环流预测局地气候。所以,月平均图的建立把短期气候预测带上了一条正确的发展道路。

4 月平均环流的预测

1970年代中就有人开始应用大气环流模式做月平均环流预测,到1990年代初已经做了大约200个案例^[9]。当时预测的是500hPa月平均高度,而不像Namias,他研究的是700hPa高度。因为500hPa反映的是对流层中层环流,与地面气候有更好的关系,特别在东亚有高大的地形,500hPa优势更为明显。北美没有高原,至今仍有时使用700hPa高度。

一直到1990年代中期,月平均环流的预测大多只使用大气环流模式,用固定的或逐步衰减SST异常做强迫,只做1个月预测,预测与观测的高度距平的相关系数在0.35~0.40之间。而持续性预报的相关系数为0.20~0.25,因此可以说,大气环流模式的气候预测已经有一定预测能力。近10余年已经有不少国家或单位采用海气或海陆气耦合模式做预测,而且普遍采用了集合预测,特别是多模式集合预测,预报水平有所提高^[10]。

5 小结

把月平均环流作为气候预测的目标是一条正确的途径,因为这是一个统计量。长期预报能够做的只可能是统计量,这就是以Namias为代表的学派生命力的源泉。原苏联长期天气预报学派违背了可预报性原理,因此就失败了。我们应该吸取的教训是:气候预测的对象只可能是统计量,预测的是概率密度函数,而不是确定的量。

参考文献

- [1] 王绍武,赵宗慈.长期天气预报基础.上海:上海科学技术出版社,1987.
- [2] 王绍武,林本达,等.气候预测与模拟研究.北京:气象出版社,1993.
- [3] 杜列多娃,等.苏联天气图方法的长期天气预报.杨鉴初,译.北京:中国科学院出版社,1953.
- [4] 章基嘉,葛玲.中长期天气预报基础.北京:气象出版社,1983.
- [5] Namias J. Thirty-Day Forecasting: A Review of a Ten Year Experiment. Meteorological Monographs, 1953.
- [6] Namias J. A 5-year experiment in the preparation of seasonal outlooks. Mon Wea Rev, 1964, 92: 449-464.
- [7] Namias J. Seasonal interaction between North Pacific Ocean and the atmosphere during the 1960' s. Mon Wea Rev, 1969, 97: 173-192.
- [8] Ji Ming, Kumar A, Leetmaa A. Climate forecast system for seasonal predictions. Proceedings of Eighteenth Annual Climate Diagnostics Workshop, November 1-5, 1993: 350-353.
- [9] 王绍武.短期气候预测研究的历史及现状.//王绍武.气候预测研究.北京:气象出版社,1996.
- [10] 丁一汇.季节气候预测的进展和前景.气象科技进展,2011,1(3):14-27.

2011年华西秋雨特征及其成因分析

李莹 李维京 艾婉秀 陈峪

(国家气候中心, 中国气象局, 北京 100081)

摘要: 2011年入秋以来, 华西北部、黄淮、华北南部等地秋雨明显, 具有局地降水强度大、持续时间长的特点, 灾害影响重。形成此次秋雨异常事件的主要原因是受La Niña事件的影响, 赤道中东太平洋地区海温异常偏低, 在西北太平洋到我国沿海一带形成“异常气旋—反气旋对”的环流特征。在这样的环流配置下, 低纬地区经孟加拉湾北上的西南气流强盛, 与源自西太平洋偏强的东南气流汇合, 来自海洋的暖湿空气源源不断地向北输送, 源自西太平洋的偏东水汽输送异常明显, 对降水异常偏多起主要作用; 在中高纬度地区, 贝加尔湖以东地区维持异常低槽区, 易引导冷空气持续频繁南下影响我国华西北部及其以北地区。同时, 副高主体偏北少动使得冷暖气流在华西北部至黄淮一带交汇并稳定维持, 从而形成较大范围的持续性降水。

关键词: 华西秋雨, 水汽输送, 拉尼娜事件

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2012.03.004

Analysis of Autumn Rainfall Characteristics and Its Causes in West China in 2011

Li Ying, Li Weijing, Ai Wanxiu, Chen Yu

(National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing)

Abstract: Since the autumn of 2011, there has been obvious precipitation in northern areas of West China, Huang-Huai and southern areas of North China, which is characterized by high local intensity, long duration and serious disasters. The formation of this precipitation is mainly due to the SST of the middle and east Pacific Ocean abnormally lower, which was effected by the La Niña events and results in anomaly cyclone and anticyclone gyre circulation pattern in the Northwest Pacific and offshore region. Under such conditions, southwest airflow which moves northward along the Bay of Bengal, keeps strong and joins southeast airflow from the Western Pacific, thus warm and moist air from the ocean is continuously transported northwards. The eastern water vapor transport from the western Pacific is significantly obvious and mainly contributes to the significantly more precipitation. In the meantime, abnormal trough maintains to the East of Lake Baikal, which guides the cold air frequently to the north of West China and its northern areas. The main subtropical high, located abnormally north and moving little, results in the cold and warm air converge and maintains from the northern part of the West China to the Huang-Huai area, causing the continuous precipitation.

Key words: autumn rainfall in West China, moisture transport, La Niña events

1 引言

华西秋雨是我国西部地区秋季多雨的一种气候现象, 主要出现在四川、贵州、重庆、云南、甘肃东部和南部、陕西关中和陕南、湖南西部、湖北西部一带。一般出现在9—11月, 主要降雨时段出现在9, 10两个月^[1]。2011年入秋以来, 华西北部、黄淮、华北南部等地秋雨明显。尤其在华西地区, 由于持续性的强降水, 出现了严重的暴雨洪涝及次生地质灾害。2011年9月17日, 陕西西安市灞桥区出现山体滑坡, 造成重大人员伤亡。长江流域的渠江、乌江下游、汉

江上游部分支流以及黄河流域渭河等14条河流发生超警以上洪水, 汉江、渭河流域出现2011年最大洪水, 持续秋雨天气还对秋收作物造成了很大影响^[2, 3]。

早在1990年, 施能^[4]就指出我国秋季降水与ENSO有密切关系。龚道溢等^[5]研究表明, El Niño年江南地区降水偏多, 北方偏少; La Niña年情况相反。秋季降水与ENSO的关系远比夏季降水与ENSO的关系紧密, El Niño年我国秋季降水出现南多北少分布型的频率增加近20%, 而La Niña年出现南多北少型的频率减少20%^[6]。在El Niño年, 西北地区秋季大部分地区降水偏少, La Niña年则情况相反^[7]。不仅如此, 刘宣飞等^[8]认为, IOD(印度洋偶极子, Indian Ocean Dipole)对中国秋季降水也有显著影响, 主要影响区集中在中南和西南地区。进入21世纪以来, 华西秋雨有明显增多

收稿日期: 2011年11月22日; 修回日期: 2012年2月27日

第一作者: 李莹(1984—), Email: yingli@cma.gov.cn

资助信息: 国家科技支撑计划(2007BAC29B04)

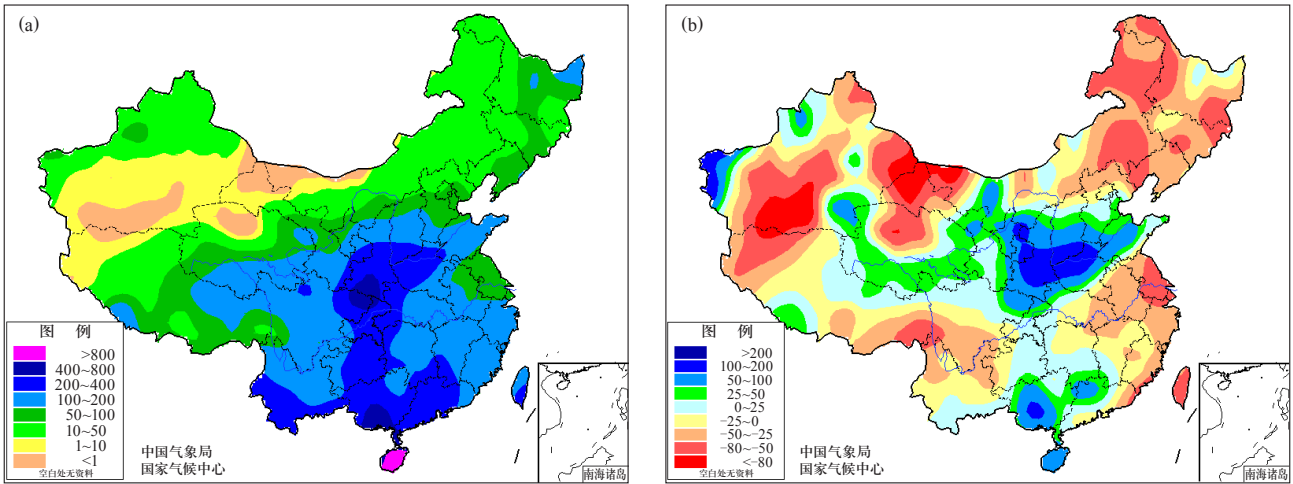


图1 2011年9—10月全国降水量 (a, 单位: mm) 和降水距平百分率 (b, 单位: %) 分布图

的趋势^[9]。鲍媛媛等^[10]、方建刚等^[11]、赵珊珊等^[12]、贾小龙等^[13]都针对华西秋雨进行过研究。最新监测显示^[14]，2010年7月—2011年3月的La Niña事件结束后，春末到夏初赤道中东太平洋海表温度整体上接近正常。8月份，赤道中东太平洋海表温度负距平又开始逐步加强扩大，并于9月份再次进入La Niña状态。

本文将针对2011年秋季华西的降水特点进行分析，并通过海温和大尺度环流异常进行诊断研究，以给出2011年秋季华西降水的特征和成因的初步分析。

2 资料

本文所用的资料有以下三部分：(1) NCEP/NCAR的 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的月平均再分析资料，包括高度场、风场、比湿场和海平面气压场；(2) 降水资料包括国家气候中心整编的160站月平均降水数据和2400多站逐日降水数据；(3) 1951—2011年哈德莱环流中心的月平均海表温度数据，空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。

3 2011年秋季降水异常的时空特征

2011年9—10月，我国降水集中在中部和南方的部分地区，常年华西秋雨区的北部地区（陕西、四川东北部、重庆北部等地）、黄淮及华北西南部秋雨天气明显，西北东部、西南东北部、华北西南部、江汉西北部等地累积降水量一般在200mm以上，其中陕西中南部、河南西部、四川东北部、重庆北部等地达300~500mm（图1a），四川南江（779.9mm）、万源（603.1mm）、旺苍（552.5mm）、平昌（517.9mm）和陕西紫阳（590.8mm）等地超过500mm。降水距平呈现北多南少的分布特征，西北地区东部、黄淮大部、华北南部及四川东北部、湖北西北部等地降水量普遍偏多5成至1倍，其中陕西中部、河南西北部、山西南部等地偏多达1倍以上（图1b），宁夏盐池和陕西武功等地累积降水量较常年同期偏多

2倍以上。2011年秋雨区的降水量位列历史同期第三（图2），少于1964和1975年（以上两年均在夏秋季发生La Niña事件），从长期看，秋雨区降水量有减少的趋势，但就其年代际变化而言，自21世纪以来，华西秋雨又进入到偏多的时期，这同白志虎等^[9]和贾小龙等^[13]的研究结论相一致。

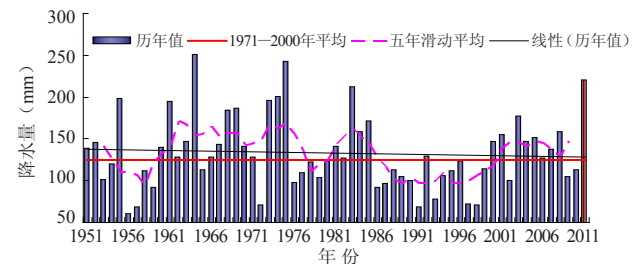


图2 2011年9—10月秋雨区降水量历年变化 (单位: mm)

陕西、河南、山西、四川、甘肃、青海、湖北的部分地区9—10月降水日数普遍有20~30d，青海南部、重庆大部、陕西南部、湖北西北部、四川大部等地局部超过30d（图3a）。甘肃中部、青海东部和南部、陕西东南部、河南、山东东部、山西南部和河北南部等地降水日数较常年同期偏多4~8d（图3b）。秋雨区平均降水日数为25d，较常年同期偏多4d，尽管长期来看秋雨区降水日数有减少的趋势，但近10年的降水日数明显多于20世纪80年代中期到20世纪末（图4）。四川芦山（28d）、天全（27d）、名山（22d），青海班玛（24d）等地连续降水日数超过20d。总体来看，2011年华西北部、黄淮、华北南部等地秋雨明显，具有降水持续时间长和局地降水强度大的特点，灾害影响重。

4 大尺度环流特征

由2011年9—10月500hPa位势高度场可见（图5a），欧亚中高纬地区呈现典型的两槽两脊分布型，贝加尔湖以东地区有一深槽，有利于冷空气在贝湖以北地区

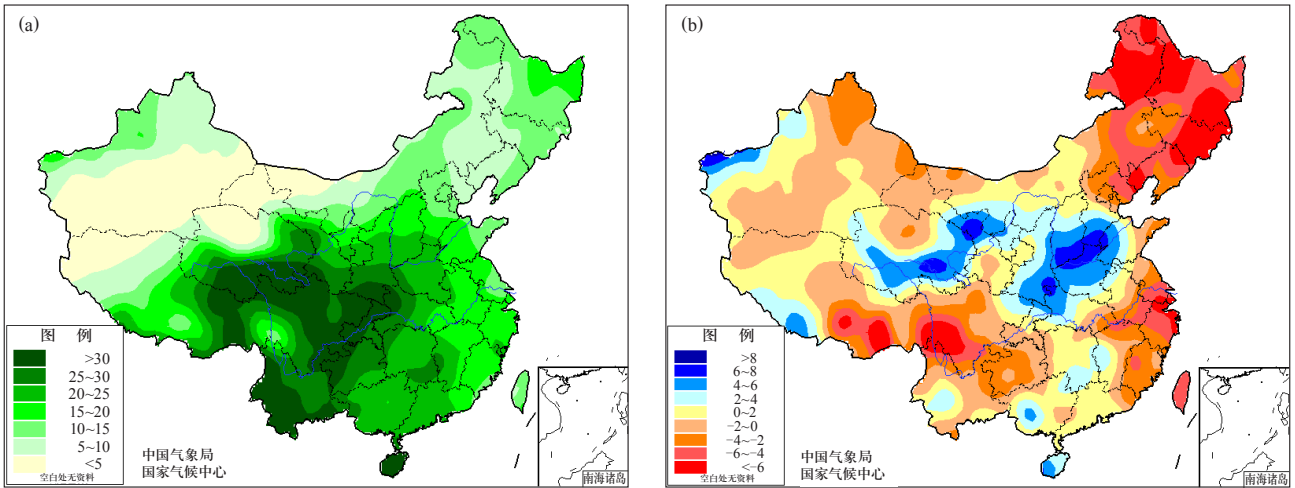


图3 2011年9—10月全国降水日数 (a) 和距平 (b) 分布图 (单位: d)

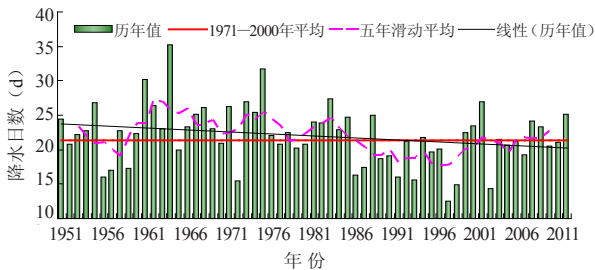


图4 2011年9—10月秋雨区降水日数历年变化 (单位: d)

堆积, 伴随着上游短波扰动, 槽后不断有冷空气分裂南下侵入我国。从500hPa位势高度距平场看(图5b), 欧亚地区中高纬度从西到东有一“负—正—负—正”的波列, 负距平中心一个位于乌拉尔山以西, 另一个位于贝加尔湖以东到鄂霍次克海地区。从大气环流型来看, 这属于大西洋欧洲环流E型分布(经向环流, 长波槽在大陆东部, 长波脊在大陆西部), 9月该环流型出现了18d, 10月出现6d。南海西部和中南半岛北部也为负距平区。以上形势表明, 副高位置偏北、强度偏强, 有利于将冷空气阻挡在四川

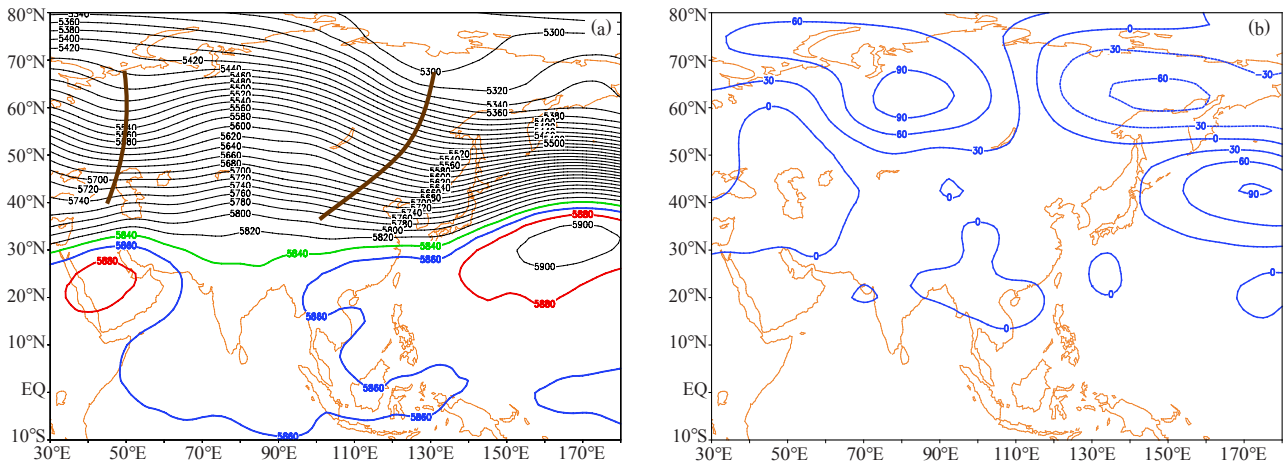


图5 2011年9—10月500hPa高度场 (a) 及其距平 (b) (单位: gpm)

盆地及其以北地区, 副高偏北和印缅槽加深共同作用, 有利于来自孟加拉湾和西北太平洋的水汽向我国内陆输送, 使得冷暖空气稳定交汇于我国华西北部到华北南部一线, 有利于形成持续性降水。

图6给出了9—10月700hPa风场距平的分布图。在南海洋面有一气旋性异常中心, 其东南侧有东南风异常, 在我国华东地区上空为反气旋环流, 这样东部沿海就形成了一“异常气旋—反气旋对”环流系统, 其反气旋异常东侧来自东海的偏东气流与来自南海的气流辐合, 增强了自太平洋向内陆的东南水汽输送。同时在贝加尔湖有一异常的反气旋性环流, 加强了其东侧偏北风, 使得来自贝加尔湖的强冷空气向我国北方地区输送。冷暖气流在我国华西上空交汇, 形成一异常的气旋性辐合区。

为了详细分析水汽输送的情况, 图7进一步给出了整层积分的水汽输送场及其异常的分布, 图中有两条主要的水汽通道向华西地区输送水汽, 一条是经阿拉伯海—印度半岛—孟加拉湾进入我国的西南水汽输

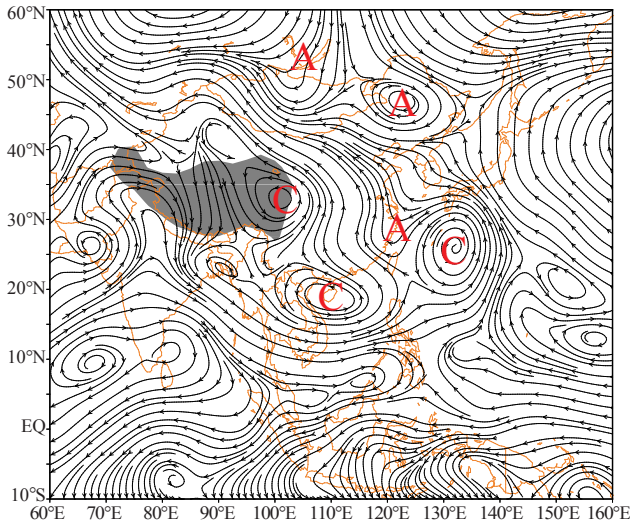


图6 2011年9—10月700hPa风场距平 (单位: $m \cdot s^{-1}$)

送通道; 另一条是源自太平洋的偏东水汽输送通道; 两者在西南地区汇合后继续北上将水汽一直输送到 $30^{\circ}N$ 以北地区, 西风带也有弱的水汽输送到华西地区, 水汽汇合形成强的辐合中心 (图略)。从水汽输

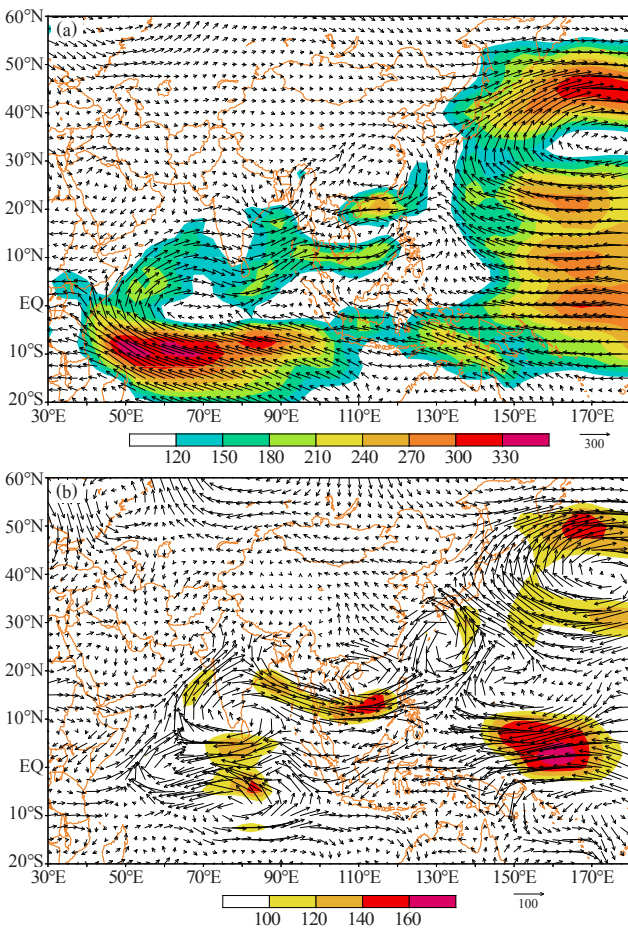


图7 2011年9—10月整层积分的水汽输送通量 (a) 和异常 (b) (单位: $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$)

送整层积分的异常场来看, 源自孟加拉湾上空强劲的西风水汽输送异常, 横跨中南半岛进入南海后转向为偏东水汽输送进入我国内陆。2011年秋雨降水异常的主因是由源自西太平洋偏东水汽输送的异常增多所造成的。

5 La Niña事件对2011年秋季降水和大尺度环流异常的影响机理分析

诸多研究表明, ENSO事件对我国秋季降水有显著影响。将1951—2010年9—10月Niño 3指数^①与我国160站降水做同期相关 (图8), 可以发现, 相关系数呈现北负南正的分佈特征, 负相关显著的区域位于江淮地区以及甘肃南部、宁夏南部、陕西北部、山西中部、青海东部、新疆东部和南部等地。由此表明, 赤道中东太平洋海温异常偏低时, La Niña事件发生, 此时华西北部降水易偏多。

将历史上夏秋季发生La Niña事件的年份 (1962, 1967, 1974, 1984, 1995, 1998和2007年) 合成9—10月的降水距平百分率分佈, 如图9所示。La Niña事件发生时的降水异常偏少区域与图8中的负相关区域有很好的对应关系, 华西北部、西北大部、东北东部、华中西部等地降水偏多, 与相关系数的统计结果 (图8) 基本一致, 除西北地区的部分区域外, 也与2011年降水异常的情况 (图1b) 相似。

为了进一步分析La Niña事件对我国初秋降水影响的可能机制, 给出夏秋季发生La Niña事件年合成的9—10月500hPa位势高度场距平图 (图10), 乌拉尔山附近为异常高脊区、巴尔喀什湖—贝加尔湖一带为异常低槽区, 且东亚高度场有西高东低的异常分佈, 均有利于北方冷空气不断分离南下, 甚至越过秦岭。在低纬度地区, 阿拉伯海到孟加拉湾一线均为负

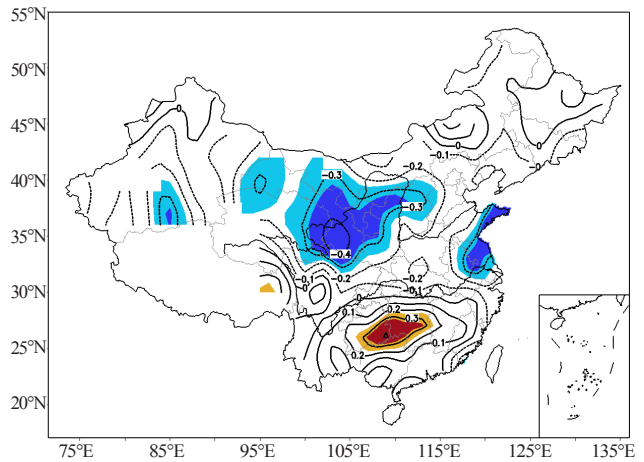


图8 2011年9—10月Niño 3指数与同期降水的相关分佈图 (阴影区表征分别通过95%和99%显著性水平检验的区域)

① Niño 3指数用来表征赤道中海表温度的异常情况, 由区域平均 ($5^{\circ}S-5^{\circ}N, 150^{\circ}-90^{\circ}W$) 的海表温度异常值计算得到, 当其大于 $0.5^{\circ}C$ 时表示厄尔尼诺事件发生, 当其小于 $-0.5^{\circ}C$ 时表示拉尼娜事件发生。

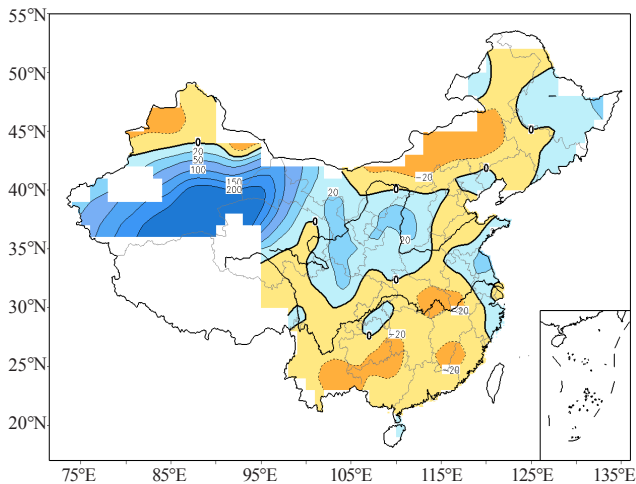


图9 夏秋季发生的La Niña事件合成的9—10月降水距平百分率(单位: %)

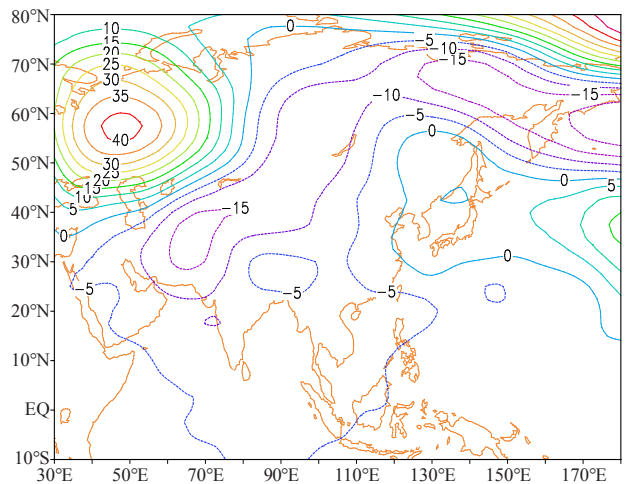


图10 夏秋季发生的La Niña事件合成的9—10月500hPa高度场距平(单位: gpm)

异常区,表明La Niña发生时,印缅槽也是加深的,西南季风加强,有利于来自印度洋的西南暖湿气流向我国内陆输送。Wang等^[15]研究指出,当发生El Niño暖(La Niña冷)事件时,菲律宾海附近会出现异常反气旋(气旋)性环流,这是ENSO遥强迫、季风年循环和季风—暖洋面相互作用的结果^[16]。700hPa风场距平合成显示(图11a),在西太平洋20°N附近有一气旋性异常区,印证了上述观点。值得关注的是,在气旋性异常区的西北侧对应有一反气旋性异常区,列举夏秋季发生La Niña事件且我国北方秋季降水异常偏多的2007, 1995, 1984, 1974, 1967和1962年的降水距平百分率分布图和700hPa环流异常场(图12),在西北太平洋到我国沿海一带都能找到这样的“异常气旋—反气旋对”环流系统,而这一对系统的相对位置和相对强弱对应了同期不同的降水强度和异常分布,一般来讲,异常系统偏北,雨带也随之偏北。由此说明,

这一“异常气旋—反气旋对”环流系统,是影响华西秋季降水异常的关键系统。

从水汽输送条件来看,经孟加拉湾的西南气流和副高西侧的偏南气流均偏强,有利于暖湿气流向我国北方地区输送,两支气流在我国南方地区异常辐合,形成一条自副高西南侧北上,由西南向东北的水汽输送异常通道(图11b)。受副高位置偏北的影响(图10),冷空气受阻于华西北部及其以北地区,使冷暖空气持续交汇于华西北部、渭水流域和汉水流域一带,从而造成该地区连绵不断的秋雨天气。

6 结语

总的来说,2011年华西秋雨具有局地降水强度大、持续时间长的特点,灾害影响重。形成此次降水异常的原因有以下几个方面:

(1)受La Niña事件的影响,赤道中东太平洋地区海温异常偏低,在西北太平洋到我国沿海一带形成“异常

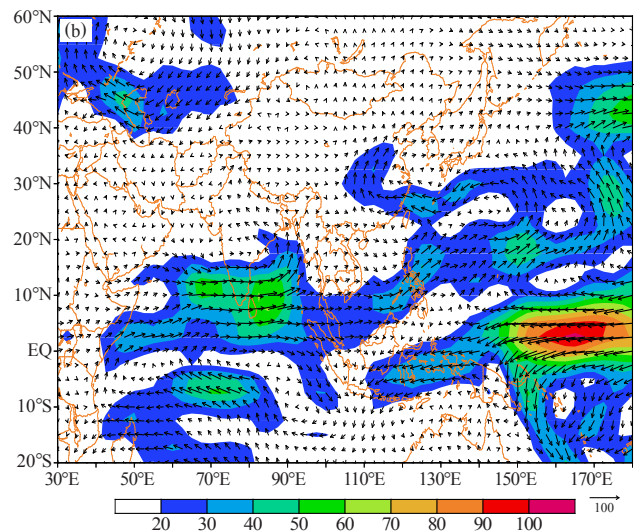
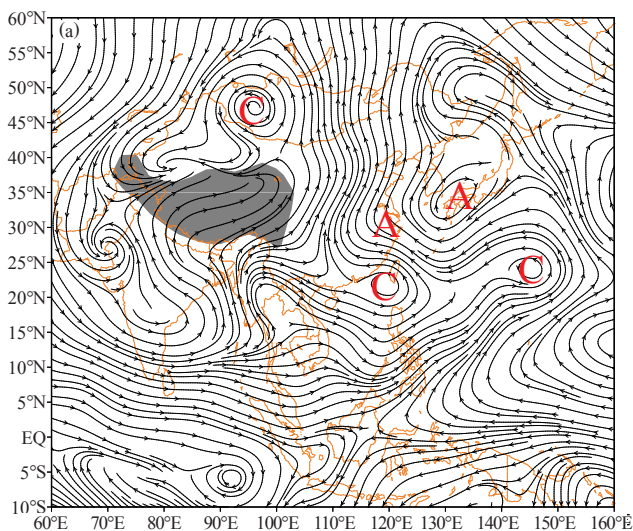


图11 夏秋季发生的La Niña事件合成的700hPa风场距平(a,单位: m/s)和整层积分的水汽输送通量距平(b,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

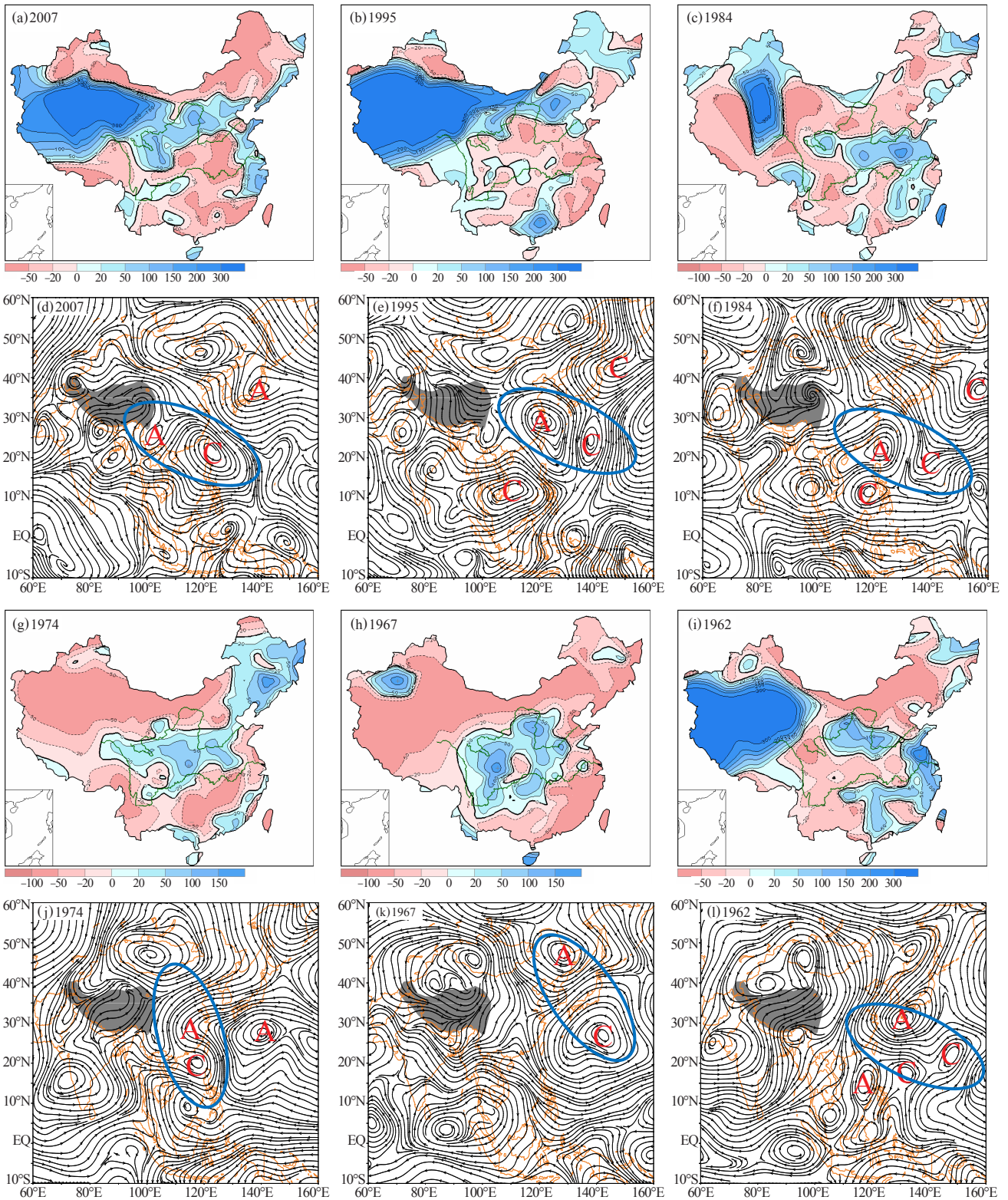


图12 典型La Niña发生年(2007, 1995, 1984, 1974, 1967和1962年), 全国降水距平百分率分布图(a, b, c, g, h, i, 单位: %)和700hPa风场距平(d, e, f, j, k, l, 单位: $m \cdot s^{-1}$)

气旋—反气旋对”环流系统,这是影响华西秋季降水的关键系统;(2)低纬地区,经孟加拉湾北上的西南气流强盛,与源自西太平洋偏强的东南气流汇合,将来自海洋的暖湿空气源源不断地向北输送,源自西太平洋的偏东

水汽输送异常明显,对降水异常偏多起主要作用;(3)中高纬地区,贝加尔湖以东地区维持异常低槽区,易引导冷空气频繁南下影响我国华西北部及其以北地区;(4)副高主体偏北少动使得冷暖气流在华西北部至黄淮一带交

汇并稳定维持,从而形成较大范围的持续性降水。

致谢: 本文成文过程中参考了国家气候中心的多期服务材料和产品, 谨致谢忱。

参考文献

- [1] 国家气候中心. 重要气候信息2011年第119期(总第504期): 9月以来华西秋雨分析及未来趋势预测. 北京: 国家气候中心, 2011.
- [2] 国家气候中心. 重要气候信息2011年第121期(总第506期): 9月以来西北部、黄淮等地降水异常偏多. 北京: 国家气候中心, 2011.
- [3] 国家气候中心. 重大气象信息专报: 9月以来我国西北东部、黄淮等地降水异常偏多 汉江渭河出现严重秋汛. 北京: 国家气候中心, 2011.
- [4] 施能. 厄尔尼诺/南方涛动与我国秋季大尺度降水预报. 南京气象学院学报, 1990, 13(2): 174-183.
- [5] 龚道溢, 王绍武. 近百年ENSO对全球陆地及中国降水的影响. 科学通报, 1999, 44(3): 315-320.
- [6] 湛芸, 施能. El Niño/南方涛动与我国秋季气候异常. 热带气象学报, 2003, 19(2): 137-146.
- [7] 李耀辉, 李栋梁, 赵庆云, 等. ENSO对中国西北地区秋季异常降水的影响. 气候与环境研究, 2000, 5(2): 205-213.
- [8] 刘宣飞, 袁慧珍. 印度洋偶极子与中国秋季降水的关系. 南京气象学院学报, 2006, 29(5): 644-649.
- [9] 白虎志, 董文杰. 华西秋雨的气候特征及成因分析. 高原气象, 2004, 23(6): 884-889.
- [10] 鲍媛媛, 阿布力米提, 李峰, 等. 2001年华西秋雨时空分布特点及其成因分析. 应用气象学报, 2003, 14(2): 215-222.
- [11] 方建刚, 白爱娟, 陶建玲, 等. 2003年陕西秋季连阴雨降水特点及环流条件分析. 应用气象学报, 2005, 16(4): 509-517.
- [12] 赵珊珊, 张强, 陈峪, 等. 渭河、汉水流域秋季降水的变化特征. 气候变化研究进展, 2006, 2(4): 181-183.
- [13] 贾小龙, 张培群, 陈丽娟, 等. 2007年我国秋季降水异常的成因分析. 气象, 2008, 34(4): 86-94.
- [14] 国家气候中心. 重要气候信息2011年第126期(总第511期): 赤道中东太平洋进入拉尼娜状态. 北京: 国家气候中心, 2011.
- [15] Wang B, Wu R, Fu X. Pacific-East Asia teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? J Climate, 2000, 13: 1517-1536.
- [16] Wang B, Yang J, Zhou T, et al. Interdecadal changes in the major modes of Asian-Australian Monsoon variability: Strengthening relationship with ENSO since the late 1970s. J Climate, 2008, 21:1771-1789.

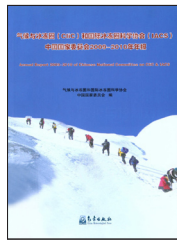
新书架 
NEW BOOK

 感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆阅览室阅读或凭索书号借阅



《强对流天气分析与预报》

编著者: 章国材
 出版者: 气象出版社
 出版年: 2011
 索书号: P45/112



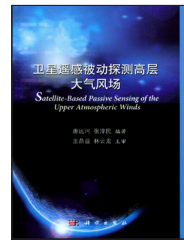
《气候与冰冻圈(CliC)和国际冰冻圈科学协会(IACS)中国国家委员会2009—2010年年报》

编著者: 气候与冰冻圈和国际冰冻圈科学协会中国国家委员会
 出版者: 气象出版社
 出版年: 2011
 索书号: P343.6/9/2009-2010



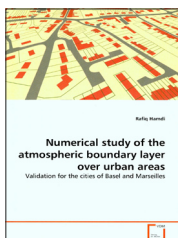
《地球的第二热源: 空间电磁感应加热》

编著者: 缪志先
 出版者: 气象出版社
 出版年: 2011
 索书号: P35/6



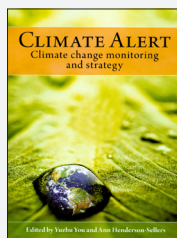
《卫星遥感被动探测高层大气风场》

编著者: 唐远河, 张淳民
 出版者: 科学出版社
 出版年: 2011
 索书号: P407/6



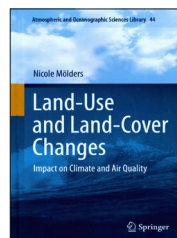
Numerical Study of the Atmospheric Boundary Layer over Urban Areas: Validation for the Cities of Basel and Marseilles
 《城市大气边界层的数值研究: 以巴塞尔和马赛为例》

编著者: Rafiq Hamdi
 出版者: VDM Verlag Dr.Müller
 出版年: 2010



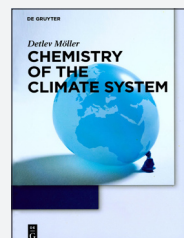
Climate Alert: Climate Change Monitoring and Strategy
 《气候预警——气候变化监测及战略》

编著者: Yuzhu You 等
 出版者: Sydney University Press
 出版年: 2010



Land-Use and Land-Cover Changes-Impact on Climate and Air Quality
 《土地利用/土地覆盖变化——对气候和空气质量的影响》

编著者: Nicole Mölders
 出版者: Springer
 出版年: 2012



Chemistry of the Climate System
 《气候系统化学》

编著者: Detlev Möller
 出版者: DE Gruyter
 出版年: 2010

作物模型、遥感和地理信息系统在国外农业气象服务中的应用进展及启示

杨霏云 高学浩 钟琦 郑秋红
(中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

摘要: 作物模型、遥感和地理信息系统在国外农业气象服务工作中发挥着重要作用, 发达国家主要将这三种现代科学技术应用在农作物生长发育条件评价、产量预报、气象灾害和气候变化对农业生产的影响评估及预估、农业生产管理等工作中。美国、法国、荷兰、澳大利亚和加拿大等国对于作物模型、遥感和GIS的应用较为成熟。通过总结这三种现代科技在美国、澳大利亚等国农业气象服务中的应用情况, 提出目前我国农业气象服务在现代科技应用中与国外发达国家相比, 存在科技研发体系化、规模化不足, 基础理论研究不深入、应用不够广泛等差距, 并提出了加强相关现代科技应用的建议。

关键词: 农业气象科技, 作物模型, 遥感, 地理信息系统, 进展

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2012.03.005

The Application Advances of Crop Models, Remote Sensing and GIS technology in Foreign Agrometeorological Service

Yang Feiyun, GaoXuehao, Zhong Qi, Zheng Qihong
(CMA Training Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: Advanced science and technology, such as crop models, remote sensing and GIS, have played an important role in foreign agrometeorological service in recent decades. In developed countries, they are mainly applied in evaluation of crop growth condition and yield forecast, assessment and projection of impact of meteorological disasters and climate changes on agriculture and agriculture management, etc. Crop models, remote sensing and GIS applications are more mature in some countries such as the United States, France, the Netherlands, Australia and Canada. Firstly, progress of the three-techniques application in foreign agrometeorological service is reviewed in this paper. Then, Compared with the developed countries, the gaps of application of advanced science and technology in agrometeorological service in China are analyzed, including the insufficiency of research and development system and scale, lacking of thorough studies of basic theories, and needing to promote the application of these techniques. Finally, suggestions for enhancing these techniques, application in China are recommended.

Key words: agrometeorological service, crop model, remote sensing, GIS technology, development suggestions

1 引言

作物生长模拟模型(简称作物模型)是农业气象科研取得的一个重大科研成果。荷兰、美国、澳大利亚等发达国家在20世纪六七十年代相继开始进行作物模型的研究, 农业气象科技逐渐向量化方向发展。自20世纪60年代开始, 作物模型的发展大致经历了初创、奠基和发展应用三个阶段。20世纪60年代为理论初创阶段, 荷兰的de Wit教授等构建了作物冠层的光合作用模式, 开创了作物生长模拟理论。20世纪70—80年代为理论奠基阶段, 作物光合作用、呼吸作用、生长过程的理论研究广泛开展, 产生了大量模拟作

物生长发育和产量形成过程的模型。20世纪90年代以来, 作物模型开始进入发展应用阶段。作物模拟过程得到进一步优化完善, 与此同时, 作物模型开始与其他学科或技术相结合, 如农业资源、土壤学、畜牧学以及遥感技术等, 并在农业生产决策管理、作物生长监测和产量预测以及区域和全球尺度上的环境、资源、可持续发展、气候变化影响等方面得到广泛应用。

20世纪早期照相技术的发明, 可以认为是遥感技术的最早起源。经过近百年的发展, 已构成地面、空中、太空三个立体层面。由于可以大范围获取地面信息和客观反映地面物体的形态特征, 对地遥感从70年代美国及其他国家相继发射了地球资源和气象卫星后迅速发展起来。20世纪末期以来遥感资料被广泛应用于农业资源的调查、农作物估产和农业气象灾害监测

收稿日期: 2011年10月17日; 修回日期: 2011年12月2日
第一作者: 杨霏云(1971—), Email: yangfy@cma.gov.cn
资助信息: 2009年中国气象局气象软科学研究项目“农业气象发展战略研究”

等方面。

地理信息系统 (Geographical Information System, 简称GIS), 是20世纪60年代开始迅速发展起来的集地理空间数据处理与计算机技术于一体的一门交叉技术学科。随着计算机技术、信息技术、空间技术的发展, 地理信息系统的应用越来越广泛, 到目前为止, 已成功应用到100多个领域。世界上常用的GIS软件已达400多种。

本文选择作物模型、遥感、GIS这三个在农业气象业务服务中有发展潜力的现代科技, 阐述了国外的相关进展, 指出了我国存在的差距, 提出了应用设想。

2 国外主要农业气象业务服务相关科技进展

2.1 作物模型研究及应用进展

作物模型的研究原理。作物模型是从系统科学研究的视角入手, 应用农业生态系统物质平衡和能量守恒原理及物质能量转换原理, 以光、温、水、土壤等条件为环境驱动变量, 运用数学物理方法和计算机技术, 对作物生育期内光合、呼吸、蒸腾等重要生理生态过程及其与气象、土壤等环境条件的关系进行逐日动态数值模拟, 再现农作物生长发育及产量形成过程的一种模型。它综合考虑大气、土壤、作物遗传特性和田间管理等因素对作物生长及产量形成的影响, 是一种面向作物生长发育过程进行实时监测评估的数值模拟模型。作物模型每个参数都有明确的生理意义, 克服了传统的作物—天气统计模型在动态量化评估中的缺陷, 能更好地解释作物生长过程, 实现作物生长动态监测, 为发展数字农业、精准农业提供了基础能力支撑, 因此也成为各国农业气象学者研究的努力方向。

近40年作物模型研究实现了快速发展。美国、荷兰、澳大利亚等国家在20世纪七八十年代在系统分析论和各种模拟实验的基础上, 建立了以模拟玉米、小麦、棉花等作物的光合作用、呼吸作用、发育速度、干物质积累及分配、叶的生长和衰老以及土壤水分平衡等作物生长发育和环境条件影响的作物模型。20世纪90年代以来, 模型进入发展应用阶段, 一些经过多年发展的系列模型经过持续的普适性和准确性检验, 开发了可操作性强的界面和系统, 在作物生长发育评价、气候变化和灾害评估等方面发挥了巨大的作用^[1]。2010年世界气象组织农业气象专门委员会对其会员国的调查结果显示, 目前在世界上应用较广泛的模型有DSSAT、AgrometShell和AquaCrop等^[2]。

作物模型已广泛应用于农业生产管理服务。美国以谷类作物CERES系列模型和豆类作物GROPGRO模型为核心研发的农业技术转化决策支持系统 (The

Decision Support System for Agrotechnology Transfer, 简称DAAST), 通过输入农场各地块的土壤和生产管理数据, 模拟得出各地块的作物生长发育趋势, 用以安排灌溉、施肥、收获时间等生产调度管理, 模拟结果还可以用于确定各地块最优的管理措施组合^[3]。经过十几年的应用推广和不断优化, 到2010年, DAAST系统已被100多个国家应用^[4]。APSIM是澳大利亚开发的模拟小麦、玉米、棉花、油菜、豆类、牧草的生长环境中的土壤特征变化的模型。天气和管理措施引起的土壤特征变量的连续变化被作为模拟的中心, APSIM目前对施肥、灌溉、土壤侵蚀、土壤氮素和磷素平衡、土壤温度、土壤水分平衡、溶质运移、残茬分解等过程都有相应的模块。目前应用的领域已经包括种植制度、作物管理、土地利用、作物育种、气候变化和区域水平衡等^[5]。

作物模型普遍服务于作物产量预测评估。WOFOST是荷兰瓦赫宁根de Wit学派开发的系列作物模式之一, 以WOFOST为核心的作物生长监测系统(CGMS)成功地应用于日常农业气象服务^[6], 欧洲联合研究中心(JRC)每月利用CGMS的结果^[7], 发布欧洲地区作物生长监测预测公报, 包括欧盟15国及区域的气候概述、农业气象条件分析、卫星遥感监测和产量预测, 为欧盟制定粮食进出口贸易计划提供丰富可靠的科学依据。ORYZA是荷兰水稻研究所开发的模拟水稻生长发育及环境变化的模型, 该模型能够动态和定量地描述潜在生产水平、水分限制水平和氮素限制水平下的水稻生长发育和产量形成。从20世纪90年代中期至今, ORYZA系列模型日趋完善, 并不断推出升级版^[8]。

近几年, 作物模型在产量预测应用中还引入概率预报的理念和方法, 较好地解决了进行作物产量长期趋势预测时, 因季节尺度以上预报存在不确定性影响预测产量结果准确性的问题。DEMETER是一种由多种模式天气的集合, 预测值能够输出包含概率的天气初始量^[9]。印度使用63个DEMETER成员的输出作为GLAM作物模式的输入量, 模拟了印度西部的花生产量, 得到了作物产量的概率分布, 这个结果比以往的完全量化的产量预测结果更加客观^[10]。Cantelaube等^[11]运用DEMETER集合的输出和WOFOST作物模式对欧洲的小麦产量进行了概率预报, 经对照分析, 运用DEMETER集合比使用原业务系统能够获得更好的、更可信的季节产量预报。

近年来作物模型还被用于评估全球气候变化对农业生产的影响, 为全球粮食安全、农业可持续发展提供策略建议。20世纪90年代初期, 随着气候变化对

农业影响的研究逐渐深入，作物模型被尝试用在评估气候变化中。1989—1992年由美国环境保护署资助，27个国家参加了以“气候变化对国际农业的影响”为主题的项目研究，作物模型被开始尝试应用在预测不同气候变化情景下CO₂浓度增加对作物的影响中^[12]。在此基础上，21世纪以来，各国利用作物模拟模型与气候模式结合开展气候变化对农业生产影响模拟的研究进一步增多，气候学家和农业气象学家发展了一系列作物模型与气候模式嵌套的方法^[13]，使作物模型在评估气候变化对农业的影响的应用方面更加方便。美国、加拿大、澳大利亚、法国等国应用这些成果预测未来气候背景下农作物产量的变化、气象灾害的变化和农作物种植制度或种植结构的变化等，并根据模型的结果制定适应与减缓气候变化战略和粮食安全策略。

2.2 遥感技术在农业气象服务中的应用

遥感技术为农业气象服务提供了重要科技支撑。遥感数据可以有效填补地面气象观测的空白区域，实现高时空分辨率的农业气象观测。自20世纪70年代农业气象遥感技术应用研究开展以来，遥感技术就开始在农业气象服务中迅速得到应用，遥感数据被广泛用于作物生长状况评价、产量预报以及农业干旱、冰冻、林火等农业气象灾害的早期监测。据2005年世界气象组织农业气象专门委员会统计，各会员国在农业气象服务中使用遥感数据的比例达到53%^[14]。

遥感技术在主要粮食作物作物单产和总产估算中得到较好应用。美国对地遥感观测技术研发起步较早，遥感数据成为监测植被条件和产量指标的重要信息来源。美国农业部（USDA）、国家海洋大气管理局（NOAA）、宇航局（NASA）和商业部在20世纪70年代就开始利用遥感技术进行“大面积农作物估产试验”（Large Area Crop Inventory and Experiment）^[15]，成为遥感应用于农业气象服务的里程碑。目前美国农业部的作物产量评估司（PECAD）汇集了遥感专家、农业经济专家、作物病理和水文地理等各方面专家，对全球的基于NOAA的遥感资料作分析，不仅预测美国本土的作物产量，还估算其他国家的谷物，油籽和棉花面积和产量^[16]。近年来，印度在农业气象遥感应用技术方面发展较快，为了满足不同遥感应用的需求，设立了一些区域遥感中心，每个区域中心专注于解决本区域特点的农业遥感问题^[14]。印度在作物估产的遥感观测方面较为成功，印度农业部1991年开始利用遥感数据进行作物估产，经过10多年的经验积累，到21世纪初估产准确率已超过90%^[17]。

遥感技术在作物生长状况监测评价中的应用

情况。欧盟MARS计划（Monitoring Agricultural ResourceS）是遥感技术应用于农业的10年研究项目，以期快速得到农作物早期统计信息。1989年项目开始开展，经过10年的研究，MARS计划成功地综合了遥感数据和作物模型，进行了农作物种植面积清查，农作物总产量清查和农作物总产量预报（CGMS）^[18]。近年，印度农业区域遥感国家中心（RRSSC）提出了“综合利用空间农业气象和地面观测资料预报农业产出”的概念，除最大化应用遥感数据外，还综合应用了多种数据源来掌握作物及其生长发育的信息^[19]。俄罗斯、加拿大、日本、阿根廷、巴西、泰国等国家也相继开展了对小麦、水稻、玉米、大豆、棉花等作物的遥感监测，并尝试利用不同的卫星数据监测作物长势。加拿大农业部以1km分辨率的SPOT4卫星遥感影像为基础，研究林木的叶面反射率、叶绿素含量、CO₂含量，预测生长速度^[20]。澳大利亚近年来尝试在监测灌溉农田的土壤含盐量工作中应用遥感技术，拓展了在遥感在作物生长及环境评价中的应用领域^[21]。

遥感技术在农业气象灾害监测方面发挥了重要作用。自遥感技术开始应用以来，高分辨率的卫星资料是监测台风、林火、干旱和洪涝的主要方式。21世纪以来，用以监测自然灾害的卫星资料已被应用于数值模式和预报运算，监测结果可直接与决策系统连接^[22]。利用遥感监测土壤湿度和农业干旱的技术相对复杂，一直是各国农业气象科研人员研究的一个方向。目前国外常用NOAA等气象（环境）卫星资料监测干旱，美国农业部1999年8月利用遥感数据、地面多种指标集成的美国干旱监测（USDM）已作为业务化产品，提供每周一次的预报^[23]。

在遥感技术的应用中，提高对卫星数据的获取和共享拓展应用领域是一项必要工作，国外一些发达国家已经建立起由高分辨率气象卫星信息集成的数据集。而南非已开始着手建立一个完整和校正过的逐日NOAA-AVHRR图像和数据集，包括归一化植被指数^[24]。

2.3 地理信息系统在农业气象服务中的应用

地理信息系统在国外农业气象服务应用中比例非常高。地理信息系统是集地理空间数据处理与计算机技术于一体的技术学科。GIS能高效管理气候和农业气象资料、遥感资料或数字地图等不同来源的数据，利用数据集的交互，统计、评估和量化各个数据间的相互关系，并在地区或国家尺度上进行图形化展示。因此，GIS技术发展之初，即开始应用于农业气象服务领域。GIS技术在近20年来应用研究得到迅速发展，特别是2000年以来，应用GIS技术开展农业气象服务的国家比例逐年快速增加。据2010年世界气象

组织农业气象专门委员会统计,其会员国在农业气象业务服务中使用GIS的比例为79%,而2002年仅为40%^[21]。世界上很多国家实现了GIS与遥感、全球定位系统等现代科技的有机结合,大大提高了农业气象灾害的监测和评估、作物估产、农业生产信息的管理等的精细化和定量化程度。

GIS在农业资源和生态状况监测、利用和保护等方面应用十分广泛。加拿大是最早进行GIS研究并开发GIS软件的国家,Guelph大学运用经济学水文模型开展了加拿大退耕还林与地表水保护研究,并利用GIS空间分析能力,优化研究退耕土地的数量和空间分布^[25]。美国资源部和威斯康星州合作建立的GIS系统,通过收集耕地面积、湿地分布面积、季节性洪水覆盖面积、土壤类型、专题图件信息、卫星遥感数据等信息,建立威斯康星地区的土壤侵蚀模型,提出了合理的治理方案^[25]。

GIS在农业生产管理服务中发挥较大作用。GIS具有精细化的空间分析能力的特点,在精细化的农业生产管理服务中发挥了巨大作用。国外很多发达国家综合利用GIS、作物模型进行农业生产管理。美国的DSSAT与ArcView(一种GIS软件系统)结合,形成了AEGIS(农业环境地理信息系统),进行农场级的生产管理、气候变化影响评估和区域农业生产的宏观管理。美国中西部航空联盟(UMAC)还通过将遥感、GIS和GPS数据给农民共享和提供培训的方式让农民了解这些高新技术在农业中的应用方法,农民可以运用这些数据和图像监测农场中风雹、洪涝过后作物的受损情况,农田中耕对作物的损害等,以利于农民选择正确的耕作方式和灾后救治的措施^[26]。

GIS在农业气象灾害的监测评估中应用也较为普遍。许多国家利用基于GIS支持下的农业气象灾害监测系统,可综合各种信息,定量监测农业气象灾害区域、危险程度,对受害作物面积进行分析、计算、评估,并进行灾害演变规律的预测研究。2000年在法国业务化运行的ISOP(Information et Suivi Objectif des Prairies)系统,就是整合土壤、气象、作物等多种数据信息的成功范例,该系统设计将STICS作物模型和GIS运行结果存储在一个数据集中,灾害发生时可以方便地合成精细化的灾害预警地图,实现农业气象灾害的风险管理。比如,在干旱发生时客观评估真实的产量损失,评价不理想的土壤—气候条件造成的损失程度^[27]。澳大利亚将公共电话系统与GIS相结合,用于各类极端天气事件、农业气象灾害及火警自动报警,系统能自动向受影响地区发送警报,并实时反馈没有响应的家庭^[2]。

3 我国农业气象服务在作物模型、遥感及GIS应用上的差距

中国的农业气象服务始于20世纪50年代,改革开放30年来,农业气象科研有了长足的进步,一些现代科技也开始在农业气象服务中得到应用。比如,中国很多学者在尝试运用荷兰WOFOST作物模型、荷兰ORYZA 2000进行小麦、玉米、水稻等产量预测和灾害影响评估;一些学者在研究国外模型的基础上建立了一些自主开发的作物模型,比如水稻钟模型。遥感在80年代后期开始被用来作物估产,GIS在近些年也有较快发展。但与发达国家相比,我国的农业气象服务在高新科技的应用上尚存在不小的差距。

一是农业气象科研体系化、规模化程度较低。美国、荷兰、澳大利亚等国家在现代科技研究应用方面,都有相对稳定的团队或机构集中在某一专题领域持续研究,并不断将成果在农业气象服务中推广应用。而我国无论是研究机构还是高校,虽有许多农业气象学者在作物模型、遥感、GIS等农业气象科研领域进行研究,但团体化、规模化程度不够,研究成果难以得到集成,导致总体水平很难有层层递进式的突破,很难形成成规模的、实用性非常强的农业气象服务应用系统。

二是基础理论研究及试验基础差距明显。国外无论是在作物模型还是遥感、GIS等现代科技的研究应用过程中,都有大量的基础理论研究作为支撑,同时有大量的本地化试验验证和应用检验,作物模型、遥感模型等参数经过不断优化调整,模拟结果越来越接近实际情况。而国内研究或应用的模型,大多是借鉴国外模型或利用国外模型修改参数,由于模型机理不清楚、试验验证数据缺乏,影响了模型的构建和参数的选择,模型的准确性很难满足农业气象服务的实际应用需求。

三是高新技术的推广应用力度不足。作物模型已成为国外农业气象服务的重要支撑,而在中国农业气象业务中应用推广率非常低,作物模型机理性强、定量化程度高的整体效益很难得到发挥。遥感和GIS技术近些年在中国虽然有了较快的发展,但由于标准规范少、数据共享差等原因,在农业气象业务服务中的发展规模和普及程度都与发达国家存在着明显的差距。

4 应用现代科技开展农业气象服务的思考

加强国外作物模型的本地化研究,集中科研力量自主研发模型系统。中国近些年对于作物模型的应用明显增多,但应用随意性较大。应注意根据本地的农业特色慎重选择国外作物模型,深入研究模型参数的机理意义,注意分析品种变化、产量差异,仔细进行

模型参数调整。要对国外引进模型进行多点、长序列资料的验证,避免根据有限点验证就大范围使用。集中研究力量、自主研发本地模型应成为中国发展作物模型研究的主攻方向,要在加强本地农作物生长发育及受气象条件影响机理研究的基础上,结合作物品种特性,有针对性、循序渐进地改造已有模型,扎实推进新模块、新方法的研究,逐步发展实用性较强、具有自主知识产权的模型系统。

加强标准化建设和集约化研发,推动规模化应用。标准不统一、信息共享差是影响和制约遥感和地理信息技术规模化应用的主要障碍。应加强农业、国土资源、水利、气象、海洋等部门的沟通协作,主动了解相关部门对农业气象服务的需求,协商建立遥感和地理信息系统的数据标准、统一接口协议。加强气象部门不同层级业务系统需求的调研,启动遥感和GIS系统基础业务平台的统一研发,在组织专门培训的基础上,有序推进在各级业务系统中的应用推广工作。

加强综合集成研发,提高农业气象服务系统的科技内涵和整体效益。作物模型、遥感和地理信息系统综合集成应用是农业气象服务中现代科技应用的发展方向。要坚定不移地推进作物模型、遥感、GIS在我国农业气象服务中的应用,加强作物模型、遥感和地理信息系统三个领域的学术交流与技术研讨,加强各相关行业、领域的数据共享,尽快启动三项现代科技的系统集成研发,切实提高农业气象服务的科技含量,形成农业气象服务的综合实力。

参考文献

- [1] 孙成明,王余龙.作物模拟技术的研究现状及其发展对策探讨.中国农学通报,2005,21(3):131-133.
- [2] WMO. Abridged Final Report with resolutions and recommendations of fifteenth session of the CAgM. WMOPub No. 1062,2010.
- [3] Sinclair T R, Seligman N G. Crop modeling: From infancy to maturity. *Agronomy Journal*, 1996,88: 698-704.
- [4] 曹宏鑫,赵锁芳,葛道阔,等.作物模型发展探讨.中国农学科学,2011(17):3520-3528.
- [5] McCowm R L, Hammer G L, Hargreaves J N G, et al. APSIM: a bivek software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems*, 1996, 50:255-271.
- [6] The MARS (Monitoring Agricultural ResourceS) Unit. <http://mars.jrc.ec.europa.eu/mars/>.
- [7] JRC. <http://ec.europa.eu/dgs/jrc/index.cfm>.
- [8] Kropff M J, van Laar H H, Matthews R. ORAZA1, An ecophysiological model for irrigation rice production. SARP Research Proceedings. Wageningen: DLO Research Institute for Agrobiology and Soil Fertility, 1994.
- [9] Palmer T N, Alessandri A, Andersen U, et al. Development of a European multi-model ensemble system for seasonal to inter-annual prediction (DEMETER). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004, 85: 853-872.
- [10] Challinor A J, Wheeler T R, Slingo J M, et al. Probabilistic simulations of crop yield over western India using the DEMETER seasonal hindcast ensembles. *Tellus*, 2005, 57A: 498-512.
- [11] Cantelaube P, Terres J M. Seasonal weather forecasts for crop yield modelling in Europe. *Tellus*, 2005, 57A: 476-487.
- [12] Cynthia R, Iglesias A. Implications of climate change for international agriculture: Crop modeling study. US: Environmental Protection Agency of United States, 1994.
- [13] Hansen J W, Indeje M. Linking dynamic seasonal climate forecasts with crop simulation for maize yield prediction in semi-arid Kenya. *Agric For Meteorol*, 2004, 125:143-157.
- [14] WMO. CAgM-XIV Abridged final report. WMOPub No.1014,2006.
- [15] 周清波.国内外农情遥感现状与发展趋势.中国农业资源与区划, 2004, 25(5): 5-7.
- [16] Doraiswamy P C, et al. User requirements for satellite and other remotesensing information in the field of agricultural. CAgM report No. 95,2004.
- [17] 曾开祥,姚红.印度的航天遥感.国防科技工业,2003(2):53-54.
- [18] Perdigao V. Information derived from earth observation and ground surveys. // Perdigao V. MARS Project, Ten Years of Demand-Driven Technical Support. Proceedings of a Conference, Brussels, April22-23,1999. SAI/ARIS, Joint Research Centre, 2000.
- [19] Parihar J S, et al. FASAL: An integrated approach for crop assessment and production forecasting. // KuligowskiR, et al. Agriculture and Hydrology Applications of Remote Sensing. SPIE-the International Society for Optical Engineering, 2006: 6411-01.
- [20] 罗名海.加拿大GIS技术的应用与发展.地理空间信息, 2007, 5(1): 5-7.
- [21] Zhou D M, et al. Climatic regionalization mapping of the Murrumbidgee Irrigation Area, Australia. *Natural Science*, 2009(19): 1773-1779.
- [22] Sarewitz D, Pielke Jr R. Extreme events: A research and policy framework for disasters in context. *International Geology Review*, 2001, 43(5): 406-418.
- [23] Svoboda M, et al. The Drought Monitor. *Bull Am Meteorol Soc*, 2002, 83:1181-1192.
- [24] MonnikK. Role of Drought Early Warning Systems in South Africa's Evolving Drought Policy. In: Sivakumar MVK, MOtha R. Managing Weather and Climate Risks in Agriculture. Springer, 2007.
- [25] 徐秀梅,张新华.美国、加拿大农业考察.宁夏农林科技, 2003(3):53.
- [26] Seelan S K, Laguette S, Casady G M, et al. Remote sensing applications forrecision agriculture: A learning community approach. *Remote Sensing of Environment*, 2003,88:157-169.
- [27] Huard F, et al. Agrometeorological database management strategies and tools in France. // Motha R P, Sivakumar M V K. Proceedings of an Expert Group Meeting, Wshington DC, October16-20, 2000. WashingtonD C: WAOB-2001-2, AGM-4, WMO/TD No.1075, 2001.

气象服务效益评估研究和业务进展

姚秀萍 吕明辉 张晓美 王丽娟 王昕

(中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081)

摘要: 介绍了气象服务效益评估工作在国内外的概况, 列举了气象服务效益评估过程所涉及的社会效益、经济效益等方面的评估理论和技术方法, 给出了我国气象服务效益评估领域中的成果, 尤其是中国气象局公共气象服务中心成立(2008年)后, 气象服务评估方面的业务进展和成果, 同时展望了气象服务效益评估相关工作。指出, 在理论上, 气象服务效益评估理论和技术方法急需充实和完善, 气象服务效益评估涉及多学科多领域, 需要数理统计学和社会学等学科理论和技术方法的支撑; 在业务上, 气象服务效益评估业务除了和国际接轨之外, 还需要有中国气象本身的属性和特征, 应该拥有长、中、短期各种产品; 为此人才队伍建设显得愈发重要。

关键词: 气象服务, 效益评估, 进展

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2012.03.006

Research and Operational Advance on Weather Service Benefit Assessment

Yao Xiuping, Lu Minghui, Zhang Xiaomei, Wang Lijuan, Wang Xin

(Public Meteorological Service Center of CMA, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: The evolution situation and the prospect about the weather service benefit assessment (shorten as WSBA) is introduced in this paper. The theories and techniques about WRBA concerned with social benefit and economic benefit are exhibited. The achievements on WSBA, especially after the foundation of the CMA Public Weather Service in 2008, are showed. It is indicated that the theory and the technique of WSBA need to be added and perfected because WSBA covers multi-subjects such as mathematics, statistics, sociology and so on. It also shows that WSBA ought to develop various WSBA products, taking into account the weather service features in China. Therefore, more attention must be drawn theoretically and practically, and the talented people are urgently needed.

Key words: weather services, benefits evaluation, advance

1 引言

随着社会、经济和科技的发展, 气象服务对经济建设、社会发展和人民生活的影响日益明显, 气象服务也从提供简单的气象信息服务, 转变为产生经济效益的社会生产力, 从而使得效益问题始终贯穿于气象服务的全过程^[1]。因此, 采用科学客观的方法开展气象服务效益的评估是十分必要的。

世界气象组织(WMO)很早就认识到气象服务对社会经济发展的重要作用和其在投入和产出经济学上的双面性, 即支持气象预报服务需要巨大的资金投入, 同时气象服务也具备经济和社会效益^[2]。中国是最早参加WMO有关气象效益评估活动的发展中国

家, 学术界也针对相关问题展开了一系列的研究, 为我国进一步深入开展气象服务效益评估工作, 推进气象事业持续快速地发展奠定了很好的基础。本文在回顾国内外气象服务效益评估发展现状的基础上, 介绍了气象服务效益评估的理论研究、主要技术方法以及气象服务效益评估业务工作的开展情况, 分析指出效益评估业务化进程中存在的问题, 以及对未来工作的展望。

2 气象服务效益评估的发展概况

2.1 WMO 气象服务效益评估的概况

一直以来, WMO在气象服务效益评估工作的推广上担任重要角色。早在1960年代, WMO就开始关注气象和水文服务的经济和社会效益问题。WMO分别于1990, 1994和2007年召开了三次专题会议^[2, 3], 讨论如何在投入和效益之间找到气象工作的平衡点。其中, 2007年主题为“天气、气候和水服务的的社会经济效益”的第三次专题会议^[3], 最终形成了提

收稿日期: 2011年11月11日; 修回日期: 2012年3月27日
第一作者: 姚秀萍(1967—), Email: yaosp@cma.gov.cn
资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106037);
国家软科学(2011GXQ4B026); 气象软科学研究项目[2012]第033号

高天气、气候和水信息服务社会效益的14项行动计划。

2.2 国外气象服务效益评估的概况

2.2.1 开展成本和效益分析

20世纪60年代开始,美国国家天气局(NWS)进行了一系列气象服务成本—效益分析,得出的气象服务的总体国家收益与投入的比例是10:1^[4]。1992年,NWS对现代化建设和机构调整进行了成本效益分析^[5]。

1997年起,澳大利亚气象局开始展开气象服务评估,分城市、农村和各区域中心三类来进行问卷调查,用于量度用户对气象服务的满意程度、预报的准确程度,以及天气信息的传播等内容,调查结果主要用于改进服务,调整业务结构和进行指标考核^[4]。

2.2.2 推行量化的气象服务考核体系

1993年,美国政府将国家气象活动的绩效考核法制化,制定绩效指标体系并逐年给出考核结果^[4]。英国气象部门自1996年开始实施企业化运行,政府要求气象局要特别强调资金运作的有效性,评价体系中更注重投资效益指标,追求实现“国家需求—有价格的功能/服务—核算”达到良性循环。同时在评价过程中,强调业务服务水平历史延续性,将用户的投诉作为重要指标^[4]。

澳大利亚气象局2005—2010年期间要求对气象服务进行具体和量化的绩效考核,并针对每个目标从数量、质量和价格三方面进行量化分析,让人们能更清晰地了解国家投入与气象服务之间的联系。2002年,NWS在制定新世纪战略规划时,除了提出一系列的预报准确率指标作为衡量执行情况的标准外,每年还会进行用户调查,作为定性的评估标准^[6,7]。

2.2.3 注重气象对经济的影响分析

21世纪,学者通过对美国各行业GDP产值与天气和气候的估算,得出气象因素与美国经济之间的联系^[8],并在“天气与社会综合研究”项目推动下^[9],计算美国经济与气象的关系,分析各州气象敏感性和对产值的影响和排名^[2]。2002年,Stratus咨询公司评估得出美国目前的预报系统每年为每个家庭带来的经济价值是109美元,给国家带来的总体效益(公共和商业气象服务效益)是114亿美元^[10]。

2.3 我国气象服务效益评估的概况

我国的气象服务效益评估大致可划分为萌芽阶段(1983—1988年)、探索阶段(1994—1997年)和进一步发展阶段(2006年至今)^[11]。

从20世纪90年代到中国气象局公共气象服务中心成立之前^[1],全国规模的公众气象服务效益评估共举行了3次,3次调查在规模和方式上存在着一定的差

异,但主要内容基本一致,以调查公众获取气象服务的行为习惯、分析公众对气象服务的需求、分析公众气象服务的社会效益和经济效益为主要内容;通过调查“公众对气象服务的总体满意程度”,分析公众对气象服务的“满意率”或“满意度”;通过运用影子价格法、损失调查法、支付意愿法等方法来实现对经济效益的评估^[12]。

与此同时,中国气象局分别组织了4次全国性的行业气象服务效益评估。1994年,首次运用经济学和统计学理论建立评估模型,对行业气象服务效益做出定量评估。2006—2008年,中国气象局每年组织行业气象服务效益评估工作,评估沿用2006年制定的方案,对部分重点行业的气象服务贡献率、气象服务效益值,对气象服务的敏感度、需求度、满意度等进行评估^[12]。

中国气象局公共气象服务中心成立以后,气象服务效益评估进入业务化运行阶段,相关工作将在第四部分进行介绍。

3 气象服务效益评估的研究现状——理论和方法

气象服务效益是社会效益、经济效益和生态效益的统一体,具有多元性、层次性、整体性和正面性的特点^[11],气象服务效益评估是一项比较复杂的工作,需要从理论上对气象服务效益评估进行界定和研究,也需要进行方法研究。

3.1 气象服务效益评估的理论研究

1957年,竺可桢先生就指出,要通过气象服务来提高各行业的经济效益^[13]。对于我国这样的农业大国而言,气象对于农业经济效益的影响最为直接和显著,因而最先受到关注^[14],尝试建立模型进行气象经济效益评价^[15],并将气象与经济的关系以学术命题加以阐述^[16]。

随着社会对于气象服务需求的逐渐多元化,人们开始对气象服务的属性展开思考,气象经济的概念引起关注^[17],人们意识到气象是具有巨大潜在需求的产业^[18]。气象服务产品既是一种公共物品^[19],也是一种生产要素^[20],并且具有强烈的时效性等特征^[21],其经济价值是通过用户使用气象服务产品来实现的;而气象信息的不确定性,使得依据其进行的决策属于不确定型决策,因此评价其所带来的经济效益的方法也将是一个专业问题^[22]。由于气象服务效益评估在理论和实践中都存在许多模糊概念,如气象服务的经济效益究竟应该包含哪些内容^[22,23],气象灾害所造成的损失是否应计入气象服务经济效益中等。气象工作者也希望能从具体的评估中总结出一些理论,说明公众气象

服务是有规律可循的,如社会公众对各类气象信息服务的需求基本符合马斯洛层次需求理论和行为经济学的信息“易得性理论”^[24]。2006年,许小峰等^[1]应用劳动价值理论、公共物品理论和效用价值理论,系统地气象服务成本和效益评估进行了讨论。

3.2 气象服务效益评估的方法研究

从气象服务效益评估工作的实践来看,按照不同的划分标准,气象服务效益可以划分成不同的类型^[25]。本文仅介绍了目前开展较多的公众气象服务效益评估和行业气象服务效益评估的常用评估方法。

3.2.1 公众气象服务社会效益评估方法

气象服务满意度是衡量公众气象服务社会效益的一项重要指标^[1],主要指气象服务用户对所感受到的气象产品及服务所产生和带来的效益或者效果,与他们所期望的气象服务质量相比较之后,所形成的感觉状态^[26]。公众气象服务满意度的评估最常用的是抽样调查的方式,了解公众对现有气象服务的满意度和需求情况,根据统计结果得到公众对气象服务的满意度评价,提出具体的改进意见^[27, 28]。目前,公众气象服务效益评估正在从描述性统计的阶段逐步向客观定量评估阶段发展。层次分析法、结构方程模式是已经应用于公众气象服务满意度评估中的两种统计方法。

(1) 层次分析法

层次分析法(The Analytic Hierarchy Process, 简称AHP)是20世纪70年代由美国学者Saaty提出,是解决多目标评价决策问题的一种定性和定量相结合的有效方法^[29]。层次分析法的基本思路是根据问题的性质和要达到的总目标,将问题分解为不同的组成因素,并按照因素间的相互关联影响以及隶属关系将因素按不同层次聚集组合,形成一个多层次的分析结构模型,从而最终使问题归结为最低层(供决策的方案、措施等)相对于最高层(总目标)的相对重要权值的确定或相对优劣次序的排定。

层次分析法的基本步骤分为四步,分别是建立层次结构模型、构造判断矩阵、层次单排序及其一致性检验、层次总排序及其一致性检验。层次结构模型由

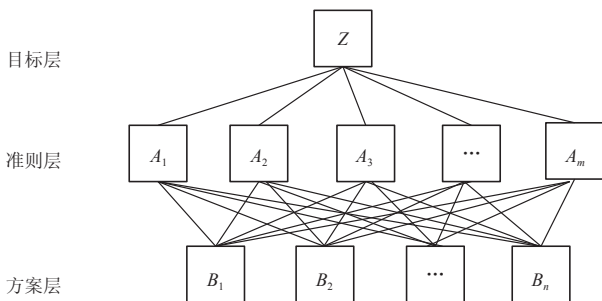


图1 层次分析法的分析模型示意图

目标层(Z)、准则层(A_1, A_2, \dots, A_m)、方案层(B_1, B_2, \dots, B_n)三部分构成,具体模型如图1所示。判断矩阵的构造主要是根据1至9级倒数标度表^[30](表1),采用专家咨询法赋值,构建目标层和各指标类别层的判断矩阵。然后根据专家所给出的判断矩阵,计算出权重并进行一致性检验,最后综合得出各个方面及其相关因素的权重。

运用层次分析法所设计的公众气象服务满意度指标体系中,指标相互间逻辑关系明确,指标体系能够完整反映评价对象的全貌,但容易受主观因素的影响^[30]。在实际应用中,多采用层次分析法与定量综合法相结合的办法,筛选指标,构建满意度评价指标。目前,已有学者利用层次分析法和波士顿矩阵相结合,建立了气象服务满意度组合矩阵分析模型^[29]。

表1 判断矩阵元素的标度方法^[30]

标度	含义
1	两个因子相比,重要性相等
3	两个因子相比,前者比后者稍微重要
5	两个因子相比,前者比后者明显重要
7	两个因子相比,前者比后者强烈重要
9	两个因子相比,前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	介于相邻两个判断项值的中间
倒数	若因素 <i>i</i> 与 <i>j</i> 相比较的判断值为 a_{ij} ,则因素 <i>j</i> 与 <i>i</i> 相比较的判断值 $a_{ji}=1/a_{ij}$

(2) 结构方程模型^[31]

结构方程模型(Structural Equation Modeling, 简称SEM),也称线性结构模型。它是利用一定的统计分析技术,对复杂现象的理论模式进行处理,根据理论模式与实际数据关系的一致性程度,对理论模式做出评价,以达到对实际问题进行定量研究的目的。结构模型主要用于研究不可直接测量变量(即潜变量)与可测量变量之间关系,以及潜变量之间的关系。

结构方程模型分为测量模型与结构模型。测量模型部分是验证性因子分析模型,主要是表示观测变量与潜变量之间的关系,模型形式为:

$$x = AX\xi + \delta$$

$$y = AY\eta + \varepsilon$$

其中, x 为 $p \times 1$ 阶外生观测变量向量, y 为 $q \times 1$ 阶内生观测变量向量; ξ 是 $m \times 1$ 阶外生潜变量(即潜在的自变量)向量, η 是 $n \times 1$ 阶内生潜变量(即潜在的因变量)向量; AX 为 $p \times m$ 阶矩阵,是外生观测变量 x 在外生潜变量 ξ 上的因子载荷矩阵; AY 为 $q \times n$ 阶矩阵,是内生观测变量 y 在内生潜变量 η 上的因子载荷矩阵; δ 为 $p \times 1$ 阶测量误差向量, ε 为 $q \times 1$ 阶测量误差向量, δ, ε 表示不能由潜变量解释的部分。

结构模型部分又称为潜变量因果关系模型,主要表示潜变量之间的关系。模型形式为:

$$\eta = \beta\eta + \Gamma\xi + \zeta$$

其中, η 是内生潜变量向量, ζ 是外生潜变量向量; β 是内生潜变量 η 的系数矩阵, 也是内生潜变量间的通径系数矩阵, Γ 是外生潜变量 ζ 的系数矩阵, 也是外生潜变量对相应内生潜变量的通径系数矩阵; ζ 为残差向量, 是模式内未能解释的部分。

结构方程模型的建立过程有三个主要步骤, 分别是构造模型、估计模型参数, 以及检验模型对数据的拟合程度。在公众气象服务满意度评估中, 可引入结构方程模型, 构建观测模型和结构模型来探索潜变量及其相互间的因果关系。目前, 气象部门已经在传统顾客满意度测评模型的基础上, 构建了公众气象服务满意度的结构方程模型^[32]。

3.2.2 公众气象服务经济效益评估方法

支付意愿法、节省费用法和影子价格法是国内外使用比较广泛的经济效益评估方法。

支付意愿法也被称为自愿付费法, 也是国内外比较认可的公益性服务或公益性设施效益的评估方法之一, 很多公众气象经济效益评估都应用支付意愿法来进行计算^[33]。节省费用法和支付意愿法在计算方法上基本一致, 不同的是从为消费者节省费用的角度考虑最终的效益。“影子价格”是目前在公众评估中最常用的方法, 参照天气预报自动查询台电话每拨通一次的价格, 扣除通讯部门的成本和效益, 就可以得到每人每次获取天气预报的影子价格。

由于支付意愿法、节省费用法和影子价格法的使用非常广泛, 但各自仍存在着一定的局限性, 因此很多公众气象效益评估过程中, 都会同时利用三种方法进行计算, 进行平均或选择其中较能有代表性的数值作为最终的气象服务效益值^[34-36]。

3.2.3 行业气象服务经济效益评估方法

(1) 德尔斐 (Delphi) 法

德尔斐 (Delphi) 法又称专家调查法, 或称之为专家评分法、专家咨询法, 是最常用的一种评估方法。它是一种综合多名专家经验与主观判断, 通常采用函询调查, 向相关领域的专家分别提出问题, 将他们回答的意见整理归纳, 匿名反馈后多次征询意见, 至专家意见趋于一致, 最后对评价结果进行评估检验。专家调查法应用广泛^[37, 38], 其本质上是利用专家的知识 and 经验对未知事件进行预测和评估, 适用于一些缺乏资料的领域^[39]。

(2) 投入产出法

投入产出法是研究经济体系中各个部分之间投入与产出的相互依存关系的数量分析方法。通过编制投入产出表、建立相应的线性代数方程体系, 综合分析宏观经济比例关系及产业结构等基本问题^[40]。如气象

服务对丰满水库增加发电效益和减少水灾的计算^[41]; 如通过对天气预报、人工增雨、防雹等方面的经济效益估算, 计算出1992—1994年内蒙古自治区地方气象事业投入与收益比为1:13^[42]。由于在评估中很难量化的计算行业最终产出的经济效益中究竟哪些是气象产生的直接或间接经济和社会效益, 因此导致最终结果较为粗放。

(3) “影子”价格法

行业气象服务效益所应用的“影子”价格法是结合行业专业有偿气象服务的效益和行业投入产出比, 以及气象服务在行业中的覆盖面等一系列指标来进行计算。该方法的缺点是行业投入产出比的值不好确定, 统计年鉴中的数值与实际数值具有一定差异。

(4) 损失矩阵法

将天气过程分为强度不同的等级, 形成天气的预报量与实际量的联合概率分布, 从中计算出不同防范措施下所造成的损失值, 与不依据预报服务遭受损失间的差值, 就视为预报服务的直接经济效益。如计算临汾地区农户依据预报服务, 和不依据预报服务遭受损失的差值, 看作是预报服务的直接经济效益^[43], 并计算出用户所支付的费用与预报服务创造的经济价值平均比值为1:200^[43]。但这种计算方法中只计算由天气因素直接造成的纯损失, 其他间接因素及受灾后停工停产所造成的损失等, 均难以进行估计。

此外, 成果参照法、贝叶斯决策理论^[44]的信息模型、权变分析法、生产效应法也是较为成熟的行业气象服务效益评估方法。

4 气象服务效益评估业务的现状

公众气象服务满意度评价、行业气象服务效益评估和气象服务典型案例分析评价是当前我国气象服务效益评估业务的三项主要内容。

4.1 我国公众气象服务满意度评价业务

作为中国气象局的常规业务, 2009—2011年, 中国气象局采用第三方调查的方式, 连续三年联合国家统计局开展全国公众气象服务满意度和需求调查, 通过权威社会调查、客观评估分析, 进一步了解社会公众对气象服务的满意程度和需求, 为气象部门改进气象服务工作提供了一定依据。通过国家权威统计部门对此项工作的参与, 保证公众气象服务满意度评价方案的合理性、问卷调查过程的规范性以及调查结果的权威性。调查分析结果显示, 近3年来(2009—2011年), 全国公众气象服务满意度依次为87.5分、83.5分和85.7分^[45-47], 该结果目前已经成为全国气象部门综合考评的重要指标之一。

在评估方法上, 保留单指标评价方法的同时,

建立公众气象服务满意度评价指标体系，规范公众气象满意度等级划分，保证公众气象服务满意度评价的科学性和规范性。以2010年公众气象服务满意度评价指标体系为例（表2），在以公众气象服务总体满意度为目标层（一级指标）的评价指标体系中，设有二级评价指标3个，分别为气象服务信息内容、气象服务信息发布和气象知识宣传普及，作为影响公众气象服务满意度的最重要因素；针对这3个二级指标，又分别选取对其满意度影响最大的因素作为三级评价指标，共计13个指标。

表2 2010年公众气象服务评价满意度指标体系的构成

一级指标 (潜变量指标)	二级指标 (潜变量指标)	三级指标 (观测指标)
公众气象服务总体满意度	气象服务信息内容	通俗性 实用性 准确性 表现形式 种类丰富性
	气象服务信息发布	发布的及时性 发布渠道的多样性 获取的方便性
	气象知识宣传普及	宣传普及渠道 可读性 趣味性 气象常识普及面 及时获取气象灾害防御知识

4.2 我国行业气象服务效益评估业务

2009—2011年，中国气象局公共气象服务中心牵头全国各省（区、市）共同开展了针对具体行业的行业气象服务效益评估工作，先后开展高速公路、电力、旅游、风电、公路交通等五个国民经济重点领域和行业的行业气象服务效益评估工作，并得到了以上五个行业的行业气象服务贡献率和效益值^[48-52]，具体见表3。

在评估方法上，行业气象服务效益评估采用了专家评估法与微观评估法相结合的方法。总体上仍沿用德尔菲法，在典型企业效益值测算中，引入对比分析法。在计算企业的效益值时，考虑了企业根据气象服务采取措施的成本和气象服务不准确带来的损失，因此，将气象服务效益分为四部分进行测算，避免了以往评估中存在的正、负效益的问题。这四个部分分别是没有使用气象服务时的损失、使用气象服务无法避免的损失、根据气象预报采取措施的成本、由于气象预报与实况不符带来的损失。在典型单位气象服务效

表3 部分行业气象服务效益评估结果

评估行业	评估年份	贡献率 (%)	效益值 (亿元)
高速公路	2009	0.80	22.00-28.00
电力	2010	0.22	73.56
旅游	2010	0.59	74.34
公路交通	2011	1.09	61.00
风电	2011	1.85	8.85

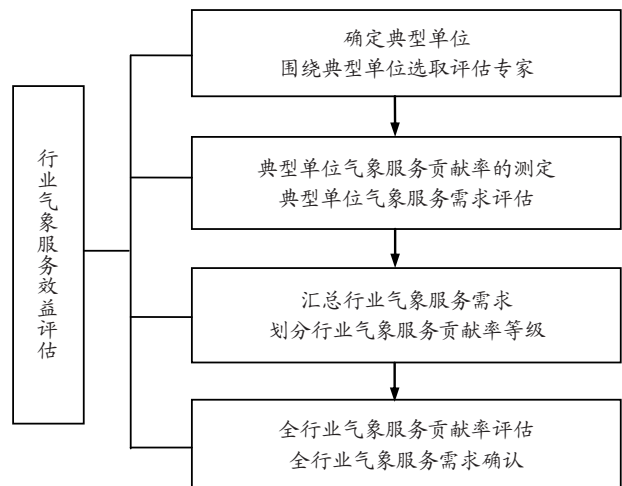


图2 行业气象服务效益评估框架

益基础上，进行全行业气象服务效益值的测算。具体流程如图2所示。

此外，行业气象服务效益评估还针对当前行业气象服务的现状与差距、行业气象服务的需求进行深入的调查评估。

4.3 气象服务典型案例分析评价业务

2009—2011年，中国气象局公共气象服务中心探索并建立了气象服务典型案例分析评价业务，针对灾害性天气、高影响天气和重大社会活动或事件，分析服务问题，总结服务经验，挖掘服务需求，提出对策建议^[53]。气象服务典型案例分析评价不仅是中国气象局用以评价气象部门工作绩效的评价工具，也是对气象部门服务能力、工作机制和运行效力的总结，对改进工作方法、提高服务水平具有较好的指导作用，同时也为进一步研究探索气象服务共性问题 and 普遍规律积累基础性数据。特别是2011年气象服务典型案例分析评价首次采用了深入基层、深度访谈等方式，遴选大城市暴雨防御、中小河流山洪气象服务等案例进行深度分析^[54, 55]，并在此基础上研发了面向高端决策用户的评价产品——《气象服务评价公报》。

5 气象服务效益评估的发展展望

气象服务效益评估的目的是从科学客观准确的角度全面了解气象服务工作，以及气象服务的效益。近年来，气象服务效益评估研究逐渐成为气象科学研究领域的一个重要组成部分，并且逐步建立和形成相关业务，气象服务效益评估工作正逐步从临时性、阶段性项目向常态化的业务过渡。

天气气候预测中不确定性^[56]以及气象灾害的复杂性，决定了气象服务效益评估的研究是一项涉及多学科的复杂系统问题。在理论研究上，气象服务效益评估的理论和关键技术急需充实和完善，在大气科学

的学科背景下,更多地借鉴或引用数理统计学、社会学、经济学以及管理学等学科的理论和技术方法,以期在多学科融合基础上丰富和完善气象服务效益评估的研究内容和研究深度,在一定程度上推动气象服务效益评估理论研究和学科建设。

近年来开始被关注的气象服务生态效益,也可能成为气象服务效益评估的一个研究重点和研究方向。随着全球化的进程,中国气象服务效益评估要有国际化的发展理念,借助WMO等重要平台,开展国际交流合作和评估结果的国际比对,真正做到与国际接轨。

参考文献:

- [1] 许小峰,等.气象服务效益评估理论方法与分析研究.北京:气象出版社,2009.
- [2] 贾朋群,任振和,周京平.国际上气象预报和服务效益评估综述.气象软科学,2006(4):84-120.
- [3] World Meteorological Organization. Madrid Conference Statement and Action Plan. Madrid: WMO, 2007.
- [4] 贾朋群,刘英金.美国气象现代化历程和发达国家气象现代化指标体系.气象软科学,2008(2):57-93.
- [5] Raygor, Scheller. 美国国家气象局现代化和机构调整计划专题介绍.气象软科学,1993(3):1-3.
- [6] 章国材.美国国家天气局天气预报准确率及现代化计划.气象科技,2004,32(5):1-2.
- [7] National Weather Service. Working Together to Save Lives: National Weather Service Strategic Plan for 2005-2010.
- [8] Dutton J R. Opportunities and priorities in a new era for weather and climate services. Bull Am Meteorol Soc, 2002, 83: 1303-1311.
- [9] Larsen P H. An Evaluation of the Sensitivity of U.S. Economic Sectors to Weather. SSRN, 2006[2006-05-05]. <http://ssrn.com/abstract=900901>.
- [10] Lazo J K. Economic value of current and improved weather forecasts in the US household sector. Report prepared for the NOAA. Boulder, CO: Stratus Consulting Inc, 2002.
- [11] 韩颖,浦希.我国气象服务效益评估综述.气象软科学,2009(2):67-73.
- [12] 姚秀萍,吕明辉,范晓青,等.我国气象服务效益评估业务的现状与展望.气象,2010,36(7):62-68.
- [13] 竺可桢.竺可桢文集.北京:科学出版社,1979.
- [14] 王秉昆,景宗澍.农业气象经济效益探讨.农业经济,1983(2):45-49.
- [15] 史国宁.建立气象经济模式的基本原则.气象,1983,9(12):19-22.
- [16] 黄宗捷,蔡久忠.气象经济学.成都:四川人民出版社,1994.
- [17] 许小峰.“气象经济”概念辨析.江西气象科技,2003,26(4):12-14.
- [18] 计国忠.论气象经济在我国的发展及其前景.新疆气象,2004,27(5):30-31.
- [19] 王俊,程光光.从气象服务看公共物品供给问题.社会科学论坛,2005(1):138-139.
- [20] 黄宗捷,蔡久忠.关于气象服务产品社会属性的认识.成都气象学院学报,1995,9(3):50-55.
- [21] 黄宗捷.公众气象服务(产品)收费的理论的思考.成都气象学院学报,1998,13(3):194-199.
- [22] 史国宁.气象服务经济效益评价中的几个基本概念.气象,1997,23(1):29-30.
- [23] 周逸萍.气象科技服务经济效益评估模型及其应用.山东气象,2001,21(1):51-53.
- [24] 段欲晓,潘进军,李青春.北京地区公众气象服务需求分析.干旱气象,2009,27(2):172-176.
- [25] 马鹤年,沈国权,阮水根,等.气象服务学基础.北京:气象出版社,2001.
- [26] 罗慧,李良序.气象服务效益评估方法与应用.北京:气象出版社,2009.
- [27] 王新生,陆大春,汪腊宝,等.安徽省公众气象服务效益评估.气象科技,2007,35(6):853-857.
- [28] 李有宏,贺敬安,张海珍,等.青海省2006年公众气象服务效用定量评估.青海科技,2009,(2):16-18.
- [29] 罗慧,谢璞,薛允传,等.奥运气象服务社会效益评估的AHP/BCG组合分析.气象,2008,34(1):59-65.
- [30] 安海岗,于光,董铁柱,等.地质资料社会化服务顾客满意度调查研究.资源与产业,2011,13(5):117-122.
- [31] 吴明隆.结构方程模型——AMOS的操作与应用(第2版).重庆:重庆大学出版社,2010.
- [32] 王桂芝,都娟,曹杰,等.基于SEM的气象服务公众满意度测评模型.数理统计与管理,2011,30(3):522-530.
- [33] 李海红.青海省气象服务效益评估及成本分析.青海气象,1995,(2):36-38.
- [34] 濮梅娟,解令运,刘立忠,等.江苏省气象服务效益研究(I)公众气象服务效益评估.气象科学,1997,17(2):196-202.
- [35] 陈军,邹红斌,黄焕寅.湖北省公益气象服务效益评估.湖北气象,1999,(1):36-39.
- [36] 李峰,郑明玺,黄敏,等.山东公众气象服务效益评估.山东气象,2007,(1):22-24.
- [37] 于庚康,秦铭荣,季润生,等.江苏省气象为农业服务效益评估模型.气象,2001,27(2):29-31.
- [38] 刘志明,晏明,张文哲.吉林省气象卫星遥感技术服务效益评估研究.遥感技术与应用,1998,13(2):21-26.
- [39] 方立清,姚胜,尚新利,等.河南主要农作物气象科技服务效益评估方法.河南气象,1998,(2):40-41.
- [40] 蔡久忠.论气象服务的行业经济效益.成都气象学院学报,1995,10(4):283-294.
- [41] 马琼.丰满水库气象服务直接经济效益的评估方法.吉林气象,1996,(1):36-37.
- [42] 付敬政,李红宇,王国勤.地方气象事业投入与产生效益评估.内蒙古气象,2002,(4):4-6.
- [43] 戴有学,郭志芳,代淑媚,等.气象服务经济效益的一种客观计算方法.气象科技,2006,34(6):741-744.
- [44] Solow A R, Adams R F, Bryant K J, et al. The value of improved ENSO prediction to U.S. agriculture. Climatic Change, 1998, 39(1):47-60.
- [45] 中国气象局公共气象服务中心.2009年全国公众气象服务评估分析报告.北京:中国气象局公共气象服务中心,2009.
- [46] 中国气象局公共气象服务中心.2010年全国公众气象服务评估分析报告.北京:中国气象局公共气象服务中心,2010.
- [47] 中国气象局公共气象服务中心.2011年全国公众气象服务评估分析报告.北京:中国气象局公共气象服务中心,2011.
- [48] 陈振林,孙健,等.高速公路气象服务效益评估(2009).北京:气象出版社,2010.
- [49] 陈振林,孙健,等.旅游行业气象服务效益评估(2010).北京:气象出版社,2011.
- [50] 陈振林,孙健,等.电力行业气象服务效益评估(2010).北京:气象出版社,2011.
- [51] 中国气象局公共气象服务中心.风电行业气象服务效益评估.2012,待出版.
- [52] 中国气象局公共气象服务中心.公路交通行业气象服务效益评估.2012,待出版.
- [53] 孙健,毛恒青,姚秀萍,等.全国气象服务典型案例集(2009—2010).北京:气象出版社,2011.
- [54] 中国气象局公共气象服务中心.气象服务评价公报(2011年第25期):贵州望谟“6·06”特大山洪、泥石流灾害气象服务分析.北京:中国气象局公共气象服务中心,2011.
- [55] 中国气象局公共气象服务中心.气象服务评价公报(2011年第28期):北京“7·24”暴雨过程气象服务分析评价.北京:中国气象局公共气象服务中心,2011.
- [56] 叶笃正,严中伟,戴新刚,等.未来的天气气候预测体系.气象,2006,32(4):3-8.

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2012.03.007

“卫星资料应用” 专题系列

极轨气象卫星微波成像仪资料

邹晓蕾^{1,2}

(1 佛罗里达州立大学地球海洋大气科学系, 美国; 2 南京信息工程大学资料同化研究与应用中心, 南京 210044)

第一个微波成像是1987年6月18日由美国空军防御气象卫星计划发射的极轨卫星F-8上搭载的专用微波成像仪。从那之后, 空军防御气象卫星计划的一系列极轨卫星F-10/11/13/14/15被成功发射, 并且均搭载了专用微波成像仪、专用微波温度探测仪和专用微波水汽探测仪(表1和图1)。在空军防御气象卫星计划F-16和F-17上, 专用微波成像仪、专用微波温度探测仪和专用微波水汽探测仪被专用传感器微波成像仪/探测仪取代了。

极轨气象卫星上搭载的其他微波成像仪包括美国国家航空航天局Aqua卫星上搭载的地球观测系统先进微波扫描辐射计, 美国国防部Coriolis实验卫星上的全极化微波辐射计, 中国第二代极轨卫星风云三号B星

(FY-3B)上的微波成像仪, 和地球观测系统先进微波扫描辐射计的继任者, 第一期水循环全球变化观测卫星上的先进微波扫描辐射计2。

表1列举了空军防御气象卫星计划F-8/10/11/13/15/16/17, Aqua卫星, Coriolis实验卫星, FY-3B和第一期水循环全球变化观测卫星的发射日期。图1展示了它们的过赤道地方时和观测时段。譬如现在共有7颗极轨卫星防御气象卫星计划F-15/16/17, Aqua卫星, Coriolis实验卫星, FY-3B和第一期水循环全球变化观测卫星可以每天为全球提供14次微波成像仪资料。

表2总结了专用微波成像仪、专用传感器微波成像仪/探测仪、全极化微波辐射计, 地球观测系统先进微波扫描辐射计2观测的通道频率比较。专用微波成像仪共有7个成像仪通道(通道1~7), 频率19.35, 37.0和85.5GHz上均有垂直和水平两个极化通道, 22.235GHz只有垂直极化通道。专用传感器微波成像仪/探测仪也有7个成像仪通道(通道12~18), 其中通道12~16与专用微波成像仪的通道1~5完全相同, 通道17~18

表1 空军防御气象卫星计划F-8/10/11/13/15/16/17, Aqua卫星, Coriolis实验卫星, FY-3B和第一期水循环全球变化观测卫星的发射日期和过赤道时间

Table 1. Launch dates and equator crossing time (ECT) of the ascending node of DMSP SSM/I and SSMIS, Aqua AMSR-E, Coriolis WindSat, FY-3B MWRI as well as GCOM-W1 AMSR-2. ECT changes slowly with time due to an orbital drift. The ECT presented in this Table is the time at the launch time

Satellite	Sensor	Launch Date	Return Date	ECT
DMSP F08	SSM/I	1987 June	December 1991	06:15
DMSP F10		1990 Dec.	1997 Nov.	19:42
DMSP F11		1991 Dec.	2000 May.	18:11
DMSP F13		1995 May.	2009 Nov.	17:42
DMSP F14		1997 May.	2008 Aug.	20:29
DMSP F15		1999 Dec.	Present	21:10
DMSP F16		2003 Oct.	Present	21:05
DMSP F17	SSMIS	2006 Dec.	Present	17:31
Aqua	AMSR-E*	2002 May.	Present	13:30
Coriolis	WindSat	2003 Jan.	Present	18:00
FY-3B	MWRI	2010 Nov.	Present	13:40
GCOM-W1	AMSR-2	2012 May	Present	13:30

注: * AMSR-E由于天线旋转问题已于2011年停止生产数据。目前, NASA与JAXA正在评估AMSR-E的状态, 考虑下一步的动作

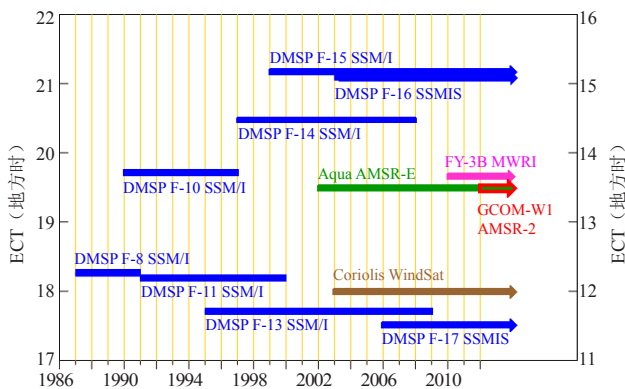


图1 空军防御气象卫星计划F-8/10/11/13/15/16/17 (蓝色), Aqua卫星 (绿色), Coriolis实验卫星 (棕色), FY-3B (紫色)和第一期水循环全球变化观测卫星 (红色)的过赤道地方时和观测时段(防御卫星和Coriolis实验卫星的ECT为左侧轴, 其他卫星为右侧轴)

Fig. 1 The local equator crossing time (ECT) and observing time periods with microwave imager observations from SSM/I onboard DMSP F-8/10/11/13/15 (blue), SSMIS onboard DMSP F-16/17 (blue), AMSR-E onboard Aqua (green), WindSat onboard Coriolis (brown), MWRI onboard FY-3B (purple), and AMSR2 onboard GCOM-W1 (red). The ECT of all the DMSP satellite series and Coriolis are indicated on the y-axis on the left and that of all other satellites are indicated on the y-axis on the right. The ECT shown is for the ascending node except for DMSP F-8

收稿日期: 2012年4月15日

作者: 邹晓蕾, Email: xzou@fsu.edu

资助信息: 科技部全球变化研究国家重大科学研究计划 (2010CB951600)

表2 专用微波成像仪、专用传感器微波成像仪/探测仪、全极化微波辐射计, 地球观测系统先进微波扫描辐射计、FY-3B的微波成像仪和先进微波扫描辐射计2观测的通道频率比较 (v和h分别表示垂直和水平极化)

Table 2. Channel frequencies observed by SSM/I, SSMIS, WindSat, AMSR-E, MWRI, and AMSR-2. Here “v” and “h” represent vertical and horizontal polarization, respectively

	SSM/I	SSMIS	WindSat	MWRI	AMSR-E	AMSR-2
Channel	—	—	1~2	—	1~2	1~2
Frequency	—	—	6.8v, h	—	6.925v, h	—
Channel	—	—	—	—	—	3~4
Frequency	—	—	—	—	—	7.3v, h
Channel	—	—	3~8	1~2	3~4	5~6
Frequency	—	—	10.7v, h	—	10.65v, h	—
Channel	1~2	12~13	9~14	3~4	5~6	7~8
Frequency	19.35v, h	—	18.7v, h	—	18.7v, h	—
Channel	3	14	15~16	5~6	7~8	9~10
Frequency	22.235v	—	—	—	23.8v, h	—
Channel	4-5	15~16	17~22	7~8	9~10	11~12
Frequency	37.0v, h	—	37.0v, h	—	36.5v, h	—
Channel	6~7	17~18	—	9~10	11~12	13~14
Frequency	85.5v, h	91.665v, h	—	—	89.0v, h	—

的频率为91.665GHz而专用微波成像仪的通道6~7的频率为85.5GHz。全极化微波辐射计包含两个低频频率为6.8GHz和10.7GHz, 还有18.7GHz和37.0GHz, 它的四个频率都有垂直和水平极化。地球观测系统先进微波扫描辐射计有12个成像仪通道, 频率分别为6.925, 10.65, 18.7, 23.8, 36.5和89.0GHz。除了6.925GHz外, FY-3B的微波成像仪与地球观测系统先进微波扫描辐射计的频率均一致。先进微波扫描辐射计2也与地球观测系统先进微波扫描辐射计的通道相同, 只是临近6.925GHz增加了一个新的频率7.3GHz。

极轨气象卫星上搭载的微波成像仪主要用于提高地面遥感探测能力^[1]。微波成像仪探测的主要是地表向上的热辐射, 对一些地表参数很敏感, 如土壤湿度, 植被含水量, 地表温度和雪盖。因此, 微波成像仪资料被用来反演土壤湿度、植被含水量、地表温度^[2-4]和雪盖^[5]。

专用微波成像仪、专用传感器微波成像仪/探测仪、全极化微波辐射计、地球观测系统先进微波扫描辐射计、FY-3B微波成像仪和先进微波扫描辐射计2都是采用圆锥扫描方式的辐射计。不同于跨轨扫描辐射计, 圆锥扫描辐射计的所有视场都有定常的入射角。图2提供了FY-3B微波成像仪在10.65GHz上沿着三条升轨扫描线的视场分布示意图。FY-3B是一颗下午星, 它在距离地球836km高度的近极地的圆形轨道上运行。当FY-3B向北飞行时(如升轨轨道), 微波成像仪自右(东)向左(西)观测地球254次。FY-3B微波成像仪的扫描角不变, 但随频率变化而变化。视场大小与波束宽度、入射角和卫星高度也有关系。FY-3B微波成像仪的第一个视场和星下点的连线与最后一个

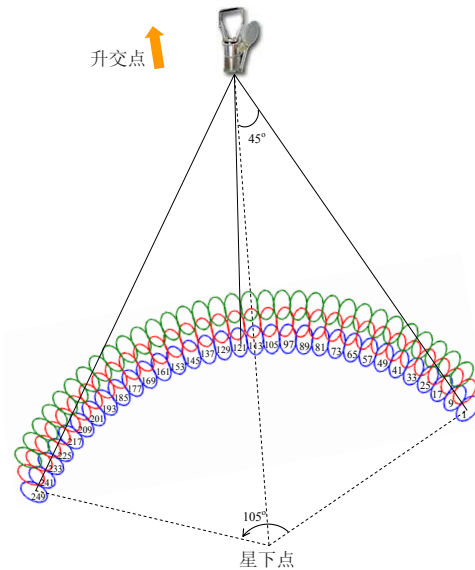


图2 FY-3B微波成像仪在10.65GHz上沿着三条升轨扫描线的视场分布示意图

Fig. 2 A schematic illustration of FY-3B MWRI position, nadir, scan angle, as well as those 32 FOVs at 10.65 GHz plotted at an interval of eight FOVs along three scan lines plotted at an interval of four scan lines of the conical-scanning MWRI on board FY-3B for the ascending node. 视场和星下点的连线之间的角度是105°, 所有视场的入射角都是45°。

图3a为FY-3B微波成像仪完整的一段轨道上的扫描观测点分布, 图3b显示了10.65GHz通道的视场形状, 而图3c说明了微波成像仪所有通道的视场精确大小。我们看到, FY-3B微波成像仪的视场呈椭圆形, 其在星下点的长轴沿着卫星飞行轨迹的方向, 而沿一条扫描线上的前半部分视场长轴是西南至东北向, 后半部分的视场长轴为东南至西北向。相邻的视场之间重叠很显著。不同于跨轨扫描辐射计如风云三号卫星的微波温度计^[6], 微波成像仪的视场大小是与频率相关的, 通道的频率越高, 观测的分辨率越高(图3c)。10.65GHz通道的视场在沿着卫星轨道和横跨轨道方向的直径分别为85km和51km; 但在89GHz通道上, 微波成像仪的视场长轴和短轴都减小至20km以下。

如前所述, 微波成像仪主要是用于提高地表参数的遥感探测能力。从图4可以看到, FY-3B微波成像仪的所有通道的权重函数都在地表面达到最大值。因此, 微波成像仪探测到的辐射量是地表辐射和近地面不同垂直层的大气向上的微波辐射的加权总和, 且对权重函数最大高度上的大气温度最敏感。在频率最低的通道上(即10.65GHz), 大气对观测到的辐射量贡献最小。除了23.8和36.5GHz通道外, 通常通道的频率越高, 权重函数越宽, 低频通道的权重函数在高频通道的内侧。因而, 如果大气的贡献是显著的, 不同通道之间的观测亮温是相关的。实际上, 低频成像仪通道中无

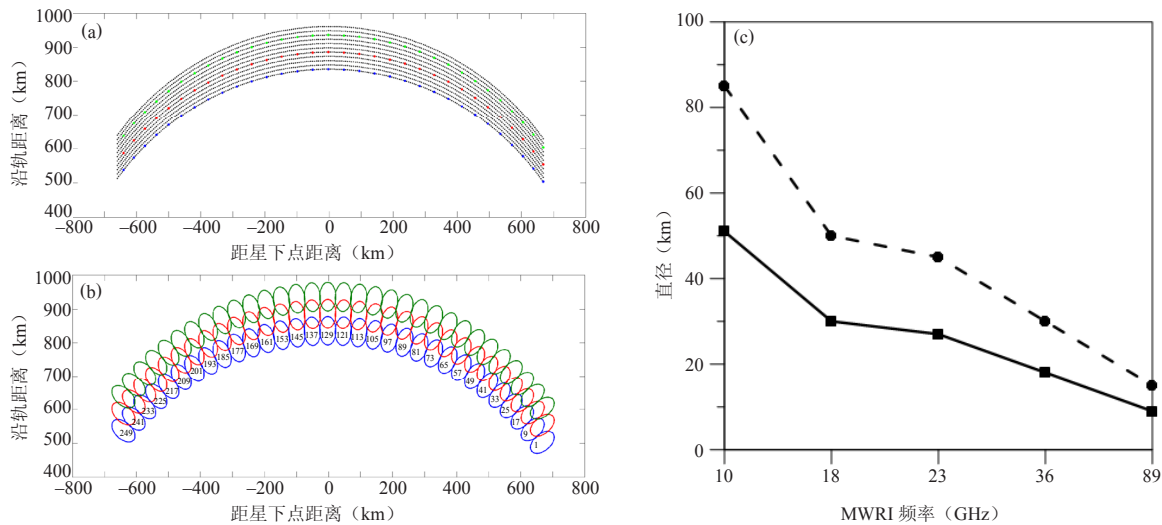


图3 FY-3B微波成像仪完整的一段轨道上的扫描观测点分布 (a)；10.65GHz通道的视场形状 (b)；微波成像仪所有通道的视场精确大小 (c)

Fig. 3 (a) Spatial distributions of FY-3B MWRI FOVs for the 10.65 GHz channels, with FOVS colored at an interval of four and eight in the across-track and along-track directions, respectively. The total number of MWRI FOVs along a single scan line is 254. (b) FOVS plotted at an interval of four and eight in the across-track and along-track directions, respectively. The across-track and along-track FOV resolutions are 51 km and 85 km, respectively. (c) The cross-track (solid) and along-track (dashed) diameters of the FY-3B MWRI FOVs at different frequencies

线电频率干扰的识别就是从这个物理基础出发的^[7, 8]。

图5显示了2011年2月6日FY-3B的微波成像仪在89.0GHz水平极化方向上亮温观测的空间分布。可以看到，在低纬地区轨道之间的间距很大。亮温值可以从晴空条件下的280K变化至有雪或者云时的170K。图6是在晴空（图5的点A）和有雪覆盖（图5的点B）的情况下不同通道间的亮温差。晴空点A位于（122.49° W, 46.01° N），有雪覆盖的点B位于（99.95° W, 46.09° N）。在晴空条件下，除了36.5GHz外，

相同极化方向的亮温值随着频率增高而增大（图6a）；在有雪的情况下，正好相反（图6b）。垂直极化的亮温通常高于水平极化的。

不同微波成像辐射仪频率的观测分辨率差异，将会导致陆地与海洋、陆地与冰原边界附近的通道不一致性较大。尽管低频微波成像通道观测到的大气分辨率比先进微波探测装置A型和微波湿度探测仪的大气分辨率更高，在对这些观测资料的直接同化时，仍然面临着与先进微波探测装置A型和微波湿度探测仪同样的问题：有云辐射同化和地表辐射同化的挑战^[9]。将F-16搭载的专用微波水汽探测仪和专用传感器微波

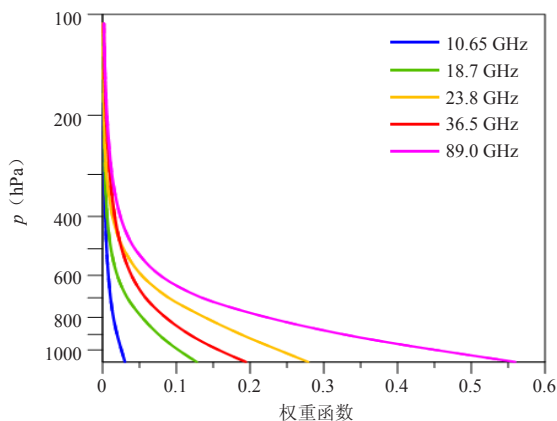


图4 FY-3B微波成像仪在10.65GHz, 18.7GHz, 23.8GHz, 36.5GHz和89.0GHz通道的权重函数

Fig. 4 Weighting functions (WFs) of the ten FY-3B MWRI channels at 10.65 GHz (blue), 18.7 GHz (green), 23.8 GHz (orange), 36.5 GHz (red) and 89.0 GHz (purple) channels calculated by the Community Radiative Transfer Model (CRTM) based on the US standard atmosphere. WFs for vertical and horizontal polarization at the same frequency overlap

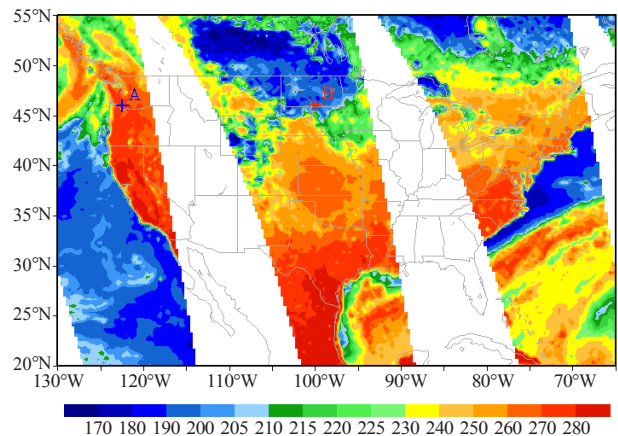


图5 2011年2月6日FY-3B的微波成像仪在89.0GHz水平极化方向上亮温观测的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of FY-3B MWRI brightness temperature observations at 89.0 GHz horizontal polarization on February 6, 2011

成像仪/探测仪资料并入美国国家环境预报中心的全球预报系统,发现观测与模拟的偏差显现较大的区域依赖特征,必须发展特殊的偏差订正方案。还发现专用传感器微波成像仪/探测仪资料的噪音比相同频率的先进微波探测装置A型的通道大,需要利用空间平均法来降低专用传感器微波成像仪/探测仪资料的噪音。利用极轨卫星搭载的微波成像仪辐射观测资料来改进数值天气预报系统的业务预报水平,目前还尚需进一步优化。

自专用微波成像仪系列开始以来,微波成像仪辐射观测从1987年7月至今(图1)已延续了数十年。专用传感器微波成像仪/探测仪还将至少继续使用至下个十年。多个相似传感器持续且有足够重叠观测期的长时间记录,是建立适应于进行气候研究的气候数据集的关键。然而,几乎所有的圆锥扫描微波成像仪,

都是基于其天气和环境应用而设计和校准的。为了建立一个适用于气候研究、持续且高质量的微波成像辐射气候数据集,必须对不同的传感器以一个基准卫星或稳定的基准系统为参照来进行仔细校准^[10-12]。均对传感器交叉校准进行了开创性研究。除此之外,还要分析并去除因仪器退化、卫星轨道偏移、太阳辐射和天线反射导致的信号干扰等因素^[13, 14]。经过校准的专用微波成像仪气候数据集可在<http://www.ssmi.com/ssmi>下载。

结合所有现有的微波成像仪、专用微波成像仪、专用传感器微波成像仪/探测仪、全极化微波辐射计、球观测系统先进微波扫描辐射计、FY-3B的微波成像仪和先进微波扫描辐射计2,将进一步改进对地球和大气水循环的监控和预报能力。

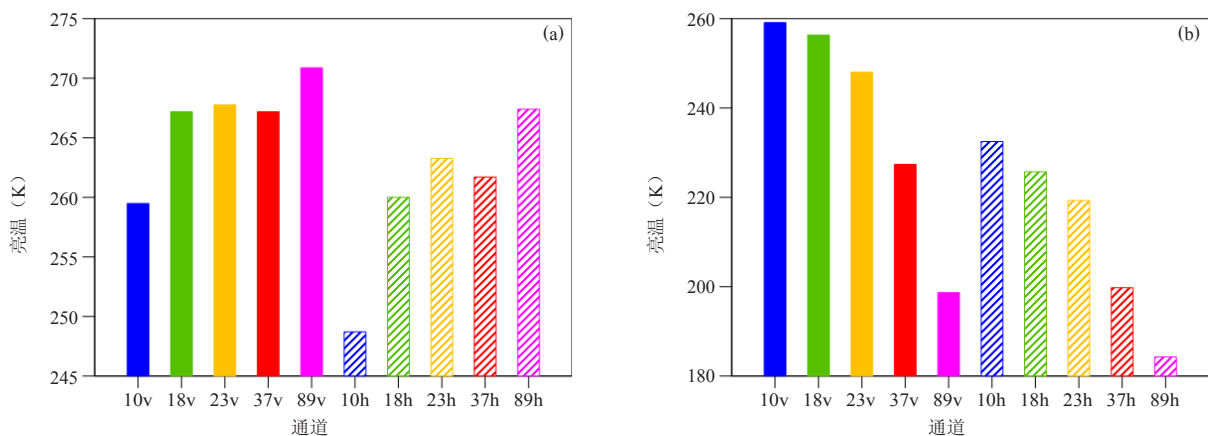


图6 晴空和有雪覆盖情况下不同通道观测的亮温

Fig. 6 FY-3B observed brightness temperatures at (a) clear-sky point A located at (122.49oW, 46.01oN) and (b) snow point B located at (99.95oW, 46.09oN) on February 6, 2011. Points A and B are indicated in Fig. 5

Serial of Applications of Satellite Observations

Introduction to Microwave Imager Radiance Observations from Polar-Orbiting Meteorological Satellites

Zou Xiaolei^{1, 2}

(1 Department of Earth, Ocean and Atmospheric Sciences, Florida State University, USA

2 Center of Data Assimilation for Research and Application, Nanjing University of Information and Science & Technology, Nanjing 210044)

The first microwave imager sensor is the Special Sensor Microwave Imagers (SSM/I) onboard the US Air Force Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) polar-orbiting satellite F-8, which was launched on June 18, 1987. Since then, a series of polar-orbiting DMSP satellites, F-10/11/13/14/15, have been successively launched, with SSM/I, the Special Sensor Microwave/Temperature sounder (SSM/T) and the Special Sensor

Microwave/Water Vapor sounder (SSM/T2) onboard (see Table 1 and Fig. 1). The legacy sensors SSM/I, SSM/T and SSM/T2 were replaced by the Special Sensor Microwave Imager/Sounder instrument (SSMIS) on DMSP F-16 and F-17.

Other microwave imager sensors onboard polar-orbiting meteorological satellites include the Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS (AMSR-E)

onboard NASA Aqua satellite, the WindSat radiometer onboard the Department of Defense (DoD) Coriolis satellite, MicroWave Radiation Imager (MWRI) onboard the Chinese second generation polar-orbiting Feng-Yun three satellite (FY-3B), and the successor of AMSR-E, AMSR-2, onboard the Global Change Observation Mission 1st -Water (GCOM-W1) satellite.

The launch dates are listed in Table 1. The local equator crossing time (ECT) and observing time periods of DMSP F-8/10/11/13 /15, DMSP F-16/17, Aqua, WindSat, FY-3B and GCOM-W1 are illustrated in Fig. 1. As of today, there are seven polar-orbiting satellites, F-15/16/17, Aqua, Coriolis, FY-3B and GCOM-W1, together providing 14 daily global microwave imager radiance measurements.

Channel frequencies observed by SSM/I, SSMIS, WindSat, AMSR-E, MWRI, and AMSR-2 are summarized in Table 2. A total of seven imager channels (channels 1~7) are available from SSM/I, with both vertical and horizontal polarizations at 19.35, 37.0, 85.5 GHz and only vertical polarization at 22.235 GHz. SSMIS also have seven imager channels (channels 12~18), with the frequencies of channels 12~16 exactly the same as SSM/I channels 1~5 and the frequencies of channels 17~18 changed to 91.665 GHz from 85.5 GHz for SSM/I channels 6~7. Two low-frequencies, 6.8 GHz and 10.7 GHz, are included in WindSat, along with 18.7 GHz and 37.0 GHz. Both vertical and horizontal polarizations are measured by WindSat at all four frequencies. AMSR-E has 12 imager channels measuring at 6.925, 10.65, 18.7, 36.5 and 89.0 GHz. MWRI has the same frequencies of AMSR-E except for the 6.925 GHz channels. AMSR-2 is the same as AMSR-E except that a new 7.3 GHz adjacent to 6.9 GHz is added.

Microwave imager sensors onboard polar-orbiting meteorological satellites are primarily designed to enhance surface sensing capabilities^[1]. The upwelling thermal emissions from the Earth's surface that are sensitive to surface parameters such as soil moisture, vegetation water content, surface temperature, and snow cover are measured by the microwave imager sensors. Measurements from above-mentioned microwave imager sensors are used for retrieving soil moisture, vegetation water content, and surface temperature^[2-4] and snow cover^[5].

All SSM/I, SSMIS, WindSat, AMSR-E, MWRI, and AMSR-2 are conical scanning radiometers. Unlike cross-scanning radiometers, all field-of-views (FOVs) have a constant scan angle from a conical scanning radiometer. Figure 2 provides a schematic illustration of the FOV

distribution at 10.65 GHz along three scan lines of the conical scanning MWRI onboard FY-3B for the ascending node. FY-3B satellite moves in a circular, afternoon-configured, near-polar orbit at an altitude of 836 km above the Earth. As the satellite FY-3B moves toward north (e.g., ascending node), the MWRI onboard FY-3B observes the earth 254 times from left (east) to right (west). The size of FOV does not vary with scan angle and is determined by the channel frequency, beam width, scan angle, as well as satellite altitude. The angle between the first and last FOVs from nadir is 105°. All FOVs have a 45° constant scan angle.

The full scans with all MWRI observation points are shown in Fig. 3a, the FOV shapes for the 10.65 GHz channels are provided in Fig. 3b, and the exact FOV sizes for all MWRI channels are shown in Fig. 3c. It is seen that the along-track FOV size assumes an elliptic shape, with its longer axis oriented along the across-track direction at nadir, from southwest to northeast for the beginning half of FOVs along a scan line, and from southeast to northwest for the other half of FOVs. There are significant FOV overlaps. Different from cross-scanning radiometers such as MWTS^[6], the FOV size of MWRI is frequency dependent. The higher the frequency of a channel is, the higher the observation resolution is (Fig. 3c). The along-track and across-track diameter of the FOV at 10.65 GHz is 85 km and 51 km, respectively. Both the long axis and short axis of MWRI FOV decrease to less than 20 km at 89.0 GHz.

As mentioned earlier, microwave imager radiometers are designed for increasing remote-sensing capability for surface parameters. As can be seen in Fig. 4, weighting functions (WFs) of all FY-3B MWRI channels reach the maximum values at the Earth's surface. Therefore, all measured radiances are a sum of surface radiation and a weighted sum of the upwelling microwave radiation emitted from different layers of the atmosphere near the surface. The measured radiation is most sensitive to the atmospheric temperature at the altitude where WF reaches the maximum value. The atmospheric contribution is the smallest at the lowest frequency (i.e., 10.65 GHz). Except for channels at 23.8 or 36.5 GHz, it is generally true that the higher the frequency of a channel, the broader the weighting function is. It is noticed that WFs of lower frequency channels are usually embedded in higher frequency channels. Therefore, some channel correlations are expected if the atmospheric contribution becomes significant. Identifications of radio-frequency interferences for low-frequency imager channels are in fact based on

this physical basis^[7, 8].

Figure 5 shows a spatial distribution of FY-3B MWRI brightness temperature observations at 89.0 GHz horizontal polarization on February 6, 2011. Significant orbital gaps are found in low latitudes. Brightness temperatures can vary from 280 K under clear-sky conditions to about 170 K when snow or cloud is present. Differences in brightness temperatures of different channels are presented in Fig. 6 under both clear-sky (see point A in Fig. 5) and snow (e.g., point B in Fig. 5) conditions. The clear-sky point A is located at (122.49°W, 46.01°N) and the snow point B is located at (99.95°W, 46.09°N). The observed brightness temperatures with the same polarization increase with frequency under the clear-sky condition except for 36.5 GHz (Fig. 6a). The opposite is true under the snow condition (Fig. 6b). Brightness temperatures at vertical polarization are in general higher than those at horizontal polarization.

The differences of observation resolution among different frequencies of microwave imager radiometers shall result in different channel correlations near the boundaries between land and ocean, and those between land and ice sheet. Although the atmosphere is more transparent at low-frequency microwave imager channels than Advanced Microwave Sounding Unit-A (AMSU-A) and Microwave Humidity Sounder (MHS), direct assimilation of these measurements faces the same challenges as AMSU-A and MHS: cloudy radiance assimilation and surface-sensitive radiance assimilation. SSMIS data onboard F-16 was incorporated into the NCEP GFS system^[9] and has a regional dependent O-B (i.e., observation minus model simulation) feature, and requires a spatial average to reduce SSMIS data noise which is much larger than the AMSU-A channels of the same frequencies. The values of microwave imager radiance measurements from polar-orbiting satellites for improving the numerical model forecast skill of any NWP system have yet to be further optimized.

The history of microwave imager radiance measurements, starting from SSM/I series, now spans several decades from July 1987 to the present (see Fig. 1). The SSMIS will continue to operate for at least the next decade. The long record of consistent measurements from multiple similar sensors with sufficient overlapping periods is extremely important in generating a climate data record (CDR) for climate study. However, almost all microwave conical scanning imager instruments were originally designed and calibrated for their weather and environment applications. In order to produce a consistent

and high quality microwave imager radiance CDR for climate applications, different sensors have to be carefully calibrated to a reference satellite or a stable reference system. Pioneering work on intersensor calibration can be found^[10-12]. In addition to correcting instrument offsets (i.e., biases) by intersensor calibration, instrument degradation, satellite orbital drift, signal interference by solar illumination and antenna reflector emission must be investigated and their contributions to CDR must be removed^[13, 14]. Recalibrated SSM/I datasets computed by Remote Sensing Systems (RSS) are currently available at <http://www.ssmi.com/ssmi>. It is expected that a combination of all available microwave imager sensors, SSMI, SSMIS, AMSR-E, WindSat, MWRI and AMSR-2, can provide improved capability of monitoring the water cycle in the Earth and the atmosphere.

参考文献/Reference

- [1] Kawanishi T, Sezai T, Ito Y, et al. The Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System (AMSR-E), NASA's contribution to the EOS for global energy and water cycle studies. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2003, 41: 184-194.
- [2] Njoku E, Li L. Retrieval of land surface parameters using passive microwave measurements at 6 to 18 GHz. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1999, 37: 79-93.
- [3] Njoku E, Koike T, Jackson T et al. Retrieval of soil moisture from AMSR data. In: *Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Earth's Surface and Atmosphere*. Pampaloni P, Paloscia S, Eds. VSP Publications, 2000, 525-533.
- [4] Li L, Gaiser P W, Gao B C, et al. WindSat global soil moisture algorithm and validation. *IEEE Trans Geosci Rem Sens*, 2010, 48: 2224-2241.
- [5] Kelly R, Chang A, Tsang L, et al. A prototype AMSR-E global snow area and snow depth algorithm. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2003, 41: 230-242.
- [6] Zou X. Observation resolutions of microwave temperature sounding instruments onboard polar-orbiting meteorological satellites. *Advances Meteor Sci & Tech*, 2012, 2: 38-41.
- [7] Li L, Gaiser P W, Bettenhausen M, et al. WindSat radio-frequency interference signature and its identification over land and ocean. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2006, 44: 530-539.
- [8] Zou, X, Zhao J, Weng F et al. Detection of radio-frequency interference signal over land from FY-3B Microwave Radiation Imager (MWRI), *IEEE Trans Geo Remote Sensing*, 2012, accepted.
- [9] Yan B, Weng F. Assimilation of F16 Special Sensor Microwave Imager/Sounder data in the NCEP global forecast system. *Weather and Forecast*, 2012, 27: 700-714.
- [10] Colton M C, Poe G A. Intersensor calibration of DMSP SSM/T's: F-8 to F-14, 1987-1997. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1999, 37: 418-439.
- [11] Wentz F J, Ricciarduli L, Hilburn K, et al. How much more rain will global warming bring? *Science*, 2007, 37: 233-235.
- [12] Yang S, Weng F, Yan B, et al. Special Sensor Microwave Imager (SSM/I) intersensor calibration using a simultaneous conical overpass technique. *J Appl Meteor & Clim*, 2011, 50, doi: 10.1175/2010JAMC2271.1.
- [13] Kunkee D B, Swadlley S D, Poe G A, et al. Special Sensor Microwave Imager Sounder (SSMIS) radiometric calibration anomalies- Part I: Identification and characterization. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2008, 46: 1017-1033.
- [14] Yan B, Weng F. Assessments of F16 Special Sensor Microwave Imager and Sounder antenna temperatures at lower atmospheric sounding channels. *Advances in Meteorology*, 2008, doi:10.1155

一种基于复杂网络社团的CDN性能优化模型

冀文彬¹ 王京祥¹ 刘喆²

(1. 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081; 2. 北京语言大学汉语水平考试中心, 北京, 100083)

A CDN Performance Optimization Model Based on Community of Complex Network

Ji Wenbin¹, Wang Jingxiang¹, Liu Zhe²

(1 CMA Training Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Chinese Proficiency Test Center, Beijing Language and Culture University, Beijing 100083)

现代远程教育越来越多地依赖流媒体技术作为支撑,包括视频广播、VOD (Video On Demand) 和虚拟教室等。大量数据信息以及实时性强的音视频流媒体给网络带来了额外的负载,并向网络提出了在分散的地理位置之间支持实时、交互的业务流需求,网络的设计往往需要采用新的模型和技术加以满足。

CDN (Content Delivery Network, 内容分发网络) 以物理骨干互联网为载体,在Internet上增加一层新的网络架构,将原网站的内容分布到最接近用户的网络“边缘”上。它利用分布广泛的内容缓存服务器,将单点对所有点的星型服务提供模式改进为多点对应各自所属范围内访问请求的分布式服务提供模式。这种架构在技术上可以解决在远程教育等领域由于用户访问量大、服务器分布不均给骨干网带来的拥塞问题,同时可以提高用户访问流媒体内容的范围和响应速度。因此,CDN在远程教育教学上具有广泛的应用空间。

然而,随着网络规模的不断扩大和多媒体数据需求的不断膨胀,CDN同样面临着诸多挑战。例如,由于突发热点内容的访问,网络服务器负载分布不均,导致相继故障等。因此,需要在宏观整体上分析CDN的特征量、网络结构与网络性能的关系,指导网络优化。经过大量的研究证实,CDN所覆盖的Internet具有典型的复杂网络特征。利用复杂网络的相关理论优化CDN结构与访问机制来提高性能十分具有可行性。

1 CDN主要技术与应用

CDN是由一个建立并覆盖在Internet之上,由分布在不同区域的缓存服务器群组成的虚拟网络。缓存服务器也称反向代理服务器^[1],处理对Web服务器的请求,组

织位于本地Web服务器和Internet的直接通信。CDN能够根据实际的流量和负荷状况,将用户请求在不同服务器之间合理分配,将网站信息内容高效、稳定、快捷地发布到离用户最近的网络物理边缘。它由原始网站服务器、内部DNS (Domain Name System) 服务器、GSLB (Global Server Load Balance) 控制服务器、内容管理系统和分布各地的CDN内容缓存服务器五部分构成^[2]。

CDN工作流程如图1所示,用户端提交访问连接域名,CDN DNS判断用户来路,在进行域名解析时考虑各缓存服务器与用户端距离、当前运行状况等因素挑选出最优的可供访问的服务器并将其IP返回给客户。CDN采用Pull和Push两种主流的内容分发技术^[3],源服务器采用Push技术将流媒体内容主动分发到各边缘节点代理服务器。如果用户请求页面命中代理服务器上的缓存,代理服务器直接将缓存内容返回;否则,代理服务器节点启动Pull方法,先向原始Web服务器发出请求取回数据,在本地缓存后再返回用户。这种方式降低了Web服务器的负载,提高系统的响应速度。

CDN在实际应用中虽然具有GLSB、智能DNS等

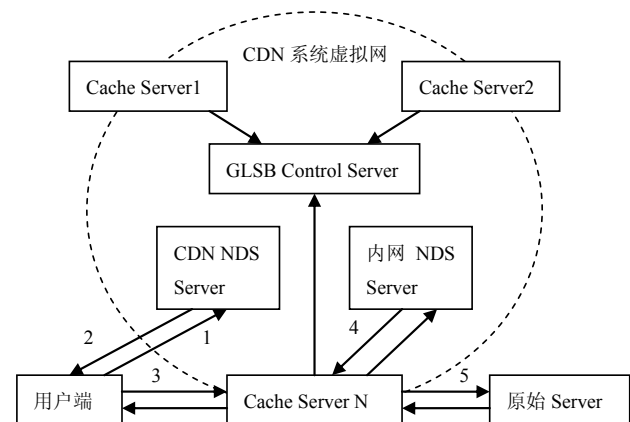


图1 CDN系统虚拟网结构与工作流程

收稿日期: 2011年5月16日; 修回日期: 2011年9月14日
第一作者: 冀文彬 (1982—), Email: stiw@yahoo.cn

设备,但是在服务器群的层面上看,其结构在本质上仍类似于代理缓存服务器位于网络边缘而原始服务器位于网络核心的星型拓扑,具有一定的脆弱性且缓存命中率不高。因此,需要从整体宏观角度出发,改进虚拟网络拓扑和资源访问机制。

2 复杂网络主要特点与研究意义

随着Internet快速发展,网络一致性规律成为网络动力学中一个很活跃的主题。自1998年Watts等^[4]关于小世界网络和1999年Barabási等^[5]无标度网络的提出,复杂网络已成为各学科领域的热门研究课题。一些基本概念和特征量如最短路径、度分布、聚类系数、介数等陆续被提出,用于描述复杂网络的拓扑特性和动力学性质。

复杂网络研究发现Internet同时具有两个基本特征:大的平均聚类系数、小的最短路径的小世界特性;具有幂律分布特征^[5]的无标度网络度分布(最新研究结果表明,用重尾分布来描述Internet度分布更为接近)。类似于社会关系网络中“物以类聚,人以群分”的特性,实际网络都具社团结构。即每个社团内部的节点之间的连接相对紧密,但是各个社团之间的连接却相对稀疏。这些特征为研究、调整CDN结构奠定了基础。

3 基于复杂网络社团的CDN性能改进模型

将复杂网络的相关理论实践于CDN结构之上,有利于提升网络的性能和服务水平,同时也便于研究大规模流媒体在复杂网络中的行为特征研究。本文主要是以命中率、并发访问量为系统性能判定指标,首先建立以下模型。

假设网络中存在 n 台边缘缓存服务器。 M 为原始服务器资源数,参数可通过网络设备、服务器测定和传递。如果第 j 个服务器中存在第 i 个文件的缓存,则设布尔型示性函数 $I_{ij}=1$;否则 $I_{ij}=0$ 。设集合 Θ 为 $\{W | W=(I_{i1}, I_{i2}, \dots, I_{iM}), M, i \in N, i \in [0, n]\}$,特征向量 $W_i \in \Theta$ 表示原始服务器在各缓存服务器中的缓存状况, W_0 为原始服务器的特征向量。定义 i, j 间的距离为

$$D_{ij} = \|W_i \oplus W_j\|_1 = \sum_{k=1}^M |I_{ik} - I_{jk}| \quad (1)$$

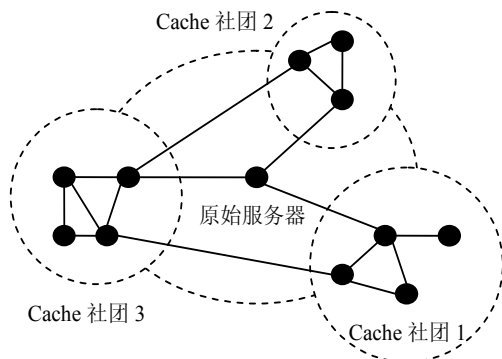


图2 生成3个社团的结构示意图

下面将自动划分网络为不同的社团。类似Newman快速算法^[6],首先初始化网络为 n 个节点独立社团。取实数 δ ($\delta > 0$) 作为判定边存否的阈值,在每次迭代过程中计算

$$e_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } (D_{ij} \leq \delta) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$k_i = \sum_j e_{ij} - 1 \quad (3)$$

$$m = \frac{1}{2} \left(\sum_{i,j} e_{ij} - n \right) \quad (4)$$

$$a_i = \frac{k_i}{2m} \quad (5)$$

依次合并有边相连的社团对,并计算合并后的模块度增量

$$\Delta Q = \frac{e_{ij} + e_{ji}}{2m} - 2a_i a_j = \frac{2m e_{ij} - k_i k_j}{2m^2} \quad (6)$$

根据贪婪算法的原理,每次合并应该沿着使 Q 增大最多或者减少最小的方向进行。每次合并后,对相应的元素 e_{ij} 更新,并将与 i, j 社团相关的行和列相加,此处算法复杂度为 $O(m+n)$ 。重复执行上述步骤,不断合并社团,直到整个网络都合并成为一个社团,最多要执行 $n-1$ 次合并。即整体的算法复杂度为 $O[(m+n)n]$,对于稀疏网络则为 $O(n^2)$ 。算法完成后,得到一个社团结构分解树状图,通过选择在不同位置断开可以得到不同的网络社团结构。在这些社团结构中,选择一个对应着局部最大 Q 值,就得到最好的网络社团结构。

此时,CDN根据内容划分为不同社团,同组社团缓存服务器之间的内容耦合度高,反之较低。各社团推选带宽高、处理能力强、负载轻的节点作为主缓存服务器与原始服务器相连。此社团映射结构存储于CDN DNS,定期更新结构。图2给出了以三个社团为例的覆盖网络结构示意图。

相比原始CDN模型,此模型在缓存访问效率命中率上有一定的提高,因社团内部的节点和各主缓存服务器分担了原始服务器的负载,增强了系统的整体效率。

参考文献

- [1] 陈仁章,孟小华.基于CDN技术实现教育网网站的跨网络快速访问.计算机工程与设计,2010,31(9):1909-1910.
- [2] 谢冬松.应用CDN技术改善远程教育网络服务.中国电化教育,2006(3):100-103.
- [3] 余红梅,樊自普.CDN架构下流媒体代理缓存策略的研究.电子测试,2010(3):22-26.
- [4] Watts D J,Strogatz S H. Collective dynamics of small world networks. Nature,1998,393(4):440-442.
- [5] Barabási A L, Albert R. Emergence of Scaling in Random Networks. Science,1999,286(5439):509-512.
- [6] Newman MEJ. Fast algorithm for detecting community structure in networks. Phys Rev E,2004,69(6):066133.

中美气象灾害题材影片的对比分析

■ 张菊芳 王丽岩 李如彬

灾难片，是指以对人类造成巨大灾难的天灾人祸为题材的影片，一直是所有电影中最受百姓追捧的类型片之一。人类的生存环境到底发生着什么样的变化？地球的未来是什么？气象及自然灾害题材影片，往往以惊心动魄、极度刺激视听感官的宏大天灾场面吸引、震撼观众的心灵，留下难以磨灭的印象。这类影片的票房指数随着计算机图形技术的发展而不断攀高。在广大百姓中，影响范围之大、程度之深是其他宣传媒体不可比拟的。灾难电影，作为传播力超强的载体，其科普功能、对提高公众的防灾意识都能起到惊人的效果。

一、中国、美国气象自然灾害影片发展轨迹

20世纪30年代是国外，特别是美国灾难片的热潮期，如《庞贝城的末日》（1935年）、《旧金山》（1936年）、《飓风》（1937年）等影片，都是那个时期的作品。70年代，是灾难片的第二个小高峰期，涌现了《海神号遇难记》（1972年），《摩天大楼失火记》（1974年）和马克·罗宾逊执导的《大地震》（1974年）等影片。好莱坞灾难片的真正黄金时代是90年代后，随着科技的日益发展，计算机图形技术的完善，使得灾难场面的逼真重现能够通过技术实现，灾难片开始大行其道。其中以1996年的《龙卷风》最为著名。次年的《烈火熔城》、《泰坦尼克号》，随后又有《世界末日》（1998年）、《彗星撞地球》（1998年）、《后天》（2000年）、《纽约大地震》（2000年），直到2009

年拍摄的《2012》，灾难片进入了美国电影史最辉煌时期，并进入了最卖座影片之列，从而确立了灾难片的地位。

中国拍摄的完整的灾难电影可以追溯到20世纪70年代，1979年我国拍摄了以1976年唐山大地震为背景的灾难影片——《蓝光闪过之后》（图1）。之后80、90年代有《特级警报333》（1983年）、《冰河死亡线》（1986年）、《大气层消失》（1990年）等。进入21世纪先后有《极地营救》（2002年）、《惊涛骇浪》（2003年）、《危情雪夜》（2004年）等影片，包含了洪水、河流凌汛、雪灾多种灾难。但无论是数量还是质量都无法和美国等发达国家灾难片相提并论，更没能进入大多数电影爱好者的视野、为广大老百姓所知晓。也谈不上起到科普、提高大众防灾减灾意识和能力的功效。

2008年，冯小宁执导的电影《超强台风》，让中国灾难电影得到了本土观众相对较高程度的认可。2010年，冯小刚又一作品《唐山大地震》横空出世，6.6亿的票房赚足了口碑，成为迄今为止国内自然灾害类题材影片中最具影响力、最具人气的热门大片。

二、调查结果分析——中美气象、自然灾害题材影片的差距

如上所述，中美自然灾害类影片较多，考虑题材相似性以及制作年代相近性两大因素，我们选择美国的《龙卷风》和中国的



图1 我国1976年制作的灾难片海报

《超强台风》，美国的《2012》和中国的《唐山大地震》这两组影片作为研究对比分析对象。

为了对中美气象自然灾害类影片做出相对客观的对比分析，2010年中国气象局华风影视集团针对电影的主要受众群体——大学生设计并发放了一份有关“获得和提高防灾减灾知识方面”的调查问卷，其中就《龙卷风》、《超强台风》、《2012》和《唐山大地震》电影设立了“看过”和“印象最深”问题。调查问卷具体发放和回收结果见表1。

6所高校2000多学生的有效答卷，初步给出了一个量化的答案。一个不争的事实是国内的电影制作水平包括灾难题材影片不及国外发达国家的同类产品。无论在传播力和影响力度上都存在较大差距。

根据2021份有效调查卷统计数

表1 调查问卷统计数据

学校名称	发放问卷(份)	有效问卷(份)
中央民族大学	400	315
北京外国语大学	400	345
中国人民大学	400	308
北京航空航天大学	400	359
北京交通大学	400	343
北京理工大学	400	351
合计	2400	2021

据结果分析,可以从以下几个方面对比中美灾害影片。

1 传播力上的差距

看过《龙卷风》的人数是288人,占总数2021的14%;看过《超强台风》的人数是195人,占总数的10%;看过《2012》的人数是917人,占总数的45%;看过《唐山大地震》的人数是756人,占总数的37%(图2)。

2 影响力上的差距

认为《龙卷风》印象最深的有3人,认为《超强台风》印象最深的只有1人;认为《2012》印象最深的有365人,认为《唐山大地震》印象最深的有278人(图3)。

需要说明的是,由于调查问卷的发放对象只限于中国北京,对于世界范围而言会存在偏差,所以,实际差距会比以上结果更大。

3 差距正在缩小

通过上述数据,我们不难看出:对《龙卷风》印象最深人数是《超强台风》的3倍。对《2012》印象最深人数是《唐山大地震》的1.31倍,呈现一个下降的趋势。看过《龙卷风》人数是看过《超强台风》人数的1.46倍。看过《2012》人数是看过《唐山大地震》人数的1.21倍,也为下降的趋势。

这是一个可喜可贺的事实,随

着我国国民经济、科学技术等各方面的发展,电影制造业在近阶段取得了非同凡响的进步。无论是人气还是影响力度方面,我国的作品和发达国家相比,其差距正在减小。

三、构成差距的关键元素分析

以下就《龙卷风》与《超强台风》两部影片,分析造成中美灾难片差距的元素,包括剧作自身结构、主要人物设计、视听设置、计算机图形技术、投资成本等。

1 影片剧作结构

影片的剧作结构直接决定了影片故事是否能吸引观众,决定了影片的口碑和传播力。

《龙卷风》的剧作结构中交织着两条情节线索,即爱情线和事业线。爱情线和事业线互相纠结、互相影响着推动故事发生、发展到结束,打造大起大落的一波三折,情节紧凑,故事完美。

相比之下,《超强台风》的故事性较弱。影片由若干零碎的情节组成。所以,《超强台风》更像是多个桥段生硬的堆砌,每个情节或称小故事由于其分量微小远不足以成就一部标准长度影片的主线。影片除了台风事件的发展之外,没有一条强有力的、贯穿始终、能够承担起一个优秀影片故事发生、发展、高潮、结尾的完整情节线。

2 剧中人物设计

任何故事都是人的故事,鲜活的人物塑造是影片成功的前提。

《龙卷风》中女一号的塑造采用了20世纪90年代好莱坞的经典手法——童年心理创伤型。男一号比尔的设计为性格转变型。影片中男女一号在故事开始和结尾命运是发生戏剧性转变的,这也是好故事的标志之一。

而《超强台风》中男一号许市长,几乎就是一个新版“高大全”。女气象专家也是一心为公的女强人,观众看不到她的缺点,不真实。而且主人公命运与故事毫无关系,不能扣人心弦。

3 视听元素

电影的视听元素,担负着表达影片故事情节发展、情绪变化的重任。视听的质量直接决定了影片有无将故事诠释到位,灾难片更是一直以强大的视听著称。

仔细总结《龙卷风》中涉及的场景,发现它几乎就是一部公路片。全片110分钟,室内场景的时间不超过15分钟。将近100分钟的时间都是在野外。而《超强台风》有不少视觉场面还是做得相当成功的,尽管不少地方是直接模仿的。比如台风来袭时,一头奶牛被大风刮得从空中飞过,这是直接从《龙卷风》学来的。无论如何,《超强

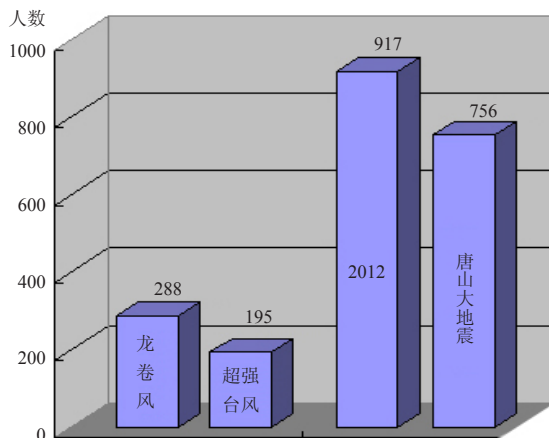


图2 看过该电影的人数直方图

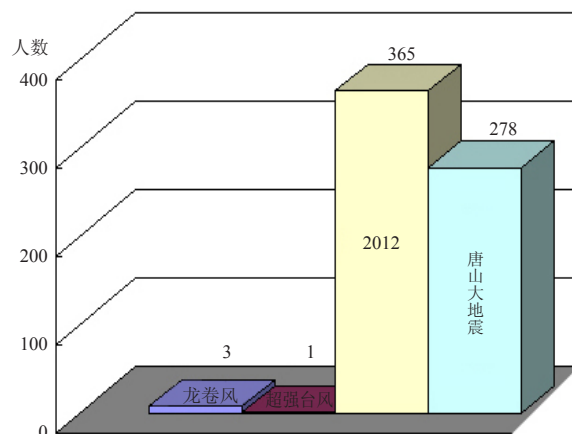


图3 对该电影印象最深的人数直方图

台风》中台风引发的洪水场面特效还是值得赞叹的，特别是一艘船被刮冲上陆地的情景，给不少人留下深刻印象。还有市长带领大伙躲在厂房内的那场戏，都相当震撼。声效制作也比较到位。应该说，正是《超强台风》的视觉特效比较成功，赢得了观众的一定口碑。在《唐山大地震》出品前，《超强台风》可算是我国灾难题材影片中特效制作最成功的一部。当然，和《龙卷风》相比，差距依旧悬殊，尽管《龙卷风》是在《超强台风》出品前的12年前制作的。

4 影片中的科普元素及其表现形式设计

一部好的灾害题材影片不仅能对大众就灾害起到警示作用，还能普及灾害科普知识、切实提高大众的防灾减灾意识和能力。电影《龙卷风》和《超强台风》同样都涉及了一些科普元素，但是表现方式上有一定的差距，举例分析如下：

《龙卷风》中包含的科普知识点有：1) 龙卷风不同强度的等级划分为F1~F5五个等级，其强度依次递增；2) 龙卷行进路径诡异多变；3) 龙卷风周边地区伴随有强降水、冰雹等天气等。以上知识巧妙地嵌在情节中，推动情节变化。比如龙卷风的等级划分，编剧设计为追风队伍在这一天内，追上了破坏力一次比一次更强的龙卷，从F2级别一路追到F5，而角色的情绪变化以及行为发展等情节点与龙卷升级紧密关联、互相影响、互相推进。加上视觉画面上龙卷破坏力造成灾害场面的升级，让观众在接受故事和影像的同时不知不觉地接受了科普知识的传播。

在《超强台风》中包括：1) 台风

路径是多变的；2) 台风的命名方式；3) 台风登陆后易生成局地龙卷；4) 台风眼等。但是这些知识点未能和情节紧密地结合，未能通过故事情节来表达，基本上都是由剧中的气象专家以较长的篇幅口述出来，观众在这类长篇赘述点上极容易“出”戏，这样的信息传播方式相对不容易接受，达不到预期效果。

四、计算机图形技术上的差距

下面结合《2012》和《唐山大地震》的对比，说明灾难片中计算机图形特效作用并进行比较。

利用计算机技术进行视觉设计和生产的领域，通称为计算机图形。计算机图形技术的不断前进推动了灾难片的快速发展。不用说，我国的计算机图形技术和美国相比可以说是相去甚远。

《2012》的计算机图形制作阵容和内容：1) Uncharted Territory公司：洛杉矶和拉斯维加斯彻底毁灭等场面等400多个CG镜头。2) Doule Negative公司：梵蒂冈圣彼得大教堂毁灭场景，黄石公园内庞大的火山岩和火山灰云、熔岩喷发及断层开裂等场景，以及数字人群等200多个镜头。3) 索尼图形图像运作公司：喜马拉雅山内巨型造船厂、九艘长1km的船，船上有几千名乘客、数百名船员和几十辆汽车。大型CG环境等154个镜头。4) Scanline VEX公司：复杂的模拟水的镜头100多个。5) Evil Eye Picture公司：环境、绿屏背景等45个镜头。《2012》影片计算机图形制作共动用近百位数字艺术家，制作了近1500个计算机图形视觉特效场景。《2012》成本是2亿美元。

《2012》的视觉听觉震撼效

果在电影史上达到了一个极致，以至于其故事性基本被人忽略，然而就凭它这登峰造极的视听画面，“2012”这组数字在全球如地震本身一般刺激了全人类大众的灵魂。该片已成了“毁灭”的代名词在各类媒体流传开来，影片表现的逼真性及其表达的理论的逻辑性甚至造成了少数人的一度恐慌。一部影片能够达到如此巨大的效果，堪称史无前例。影片导演罗兰·艾默里奇说：“我喜欢描述城市遭受虚拟的劫难，那样会让大家警醒，居安思危。”他做到了。

再看《唐山大地震》，共制作有三百多个特效镜头，其中相当一部分是请加拿大、英国的制作公司完成的，韩国的制作公司负责了现场特效部分。《唐山大地震》的成本为1.3亿人民币左右。

影片《唐山大地震》的主体其实不是地震。影片本身上映后在国内势如破竹的票房，客观上起到了提醒大众天灾频发，大家要保护地球的功效。当然和《2012》相比，尤其是视听方面，差距是不言而喻的。

国内的计算机图形制作技术水平远不如美国，虽然资金是部分原因，但不是唯一因素。

随着气候变化加剧，极端灾害天气的不断频发，减灾教育和公众意识培养迫在眉睫，电影作为对公众传播力强大的载体能快速达到对大众的防灾意识教育的目的。为此，倡议影视界、科学教育界行动起来，大力推进我国灾害题材电影事业的发展，以大幅提高目前我国电影手段减灾教育和防灾意识培养的水平。

(作者单位：中国气象局华风影视集团)

日美合作开发卫星双频降水雷达 ——能否续写TRMM的辉煌

贾朋群 编译

2012年3月，美日合作项目GPM (the Global Precipitation Measurement, 全球降水观测) 中核心观测仪器——双频降水雷达 (Dual-frequency Precipitation Radar, DPR) 研制完成后，从日本运抵位于马里兰州的NASA戈达德太空飞行中心。这意味着预计在2014年2月或更早升空的GPM卫星进展顺利。

卫星观测具有高技术特征，又具有全球覆盖 (特别是极地轨道卫星) 的优势，因此成为全球技术合作的排头兵。这一点在气象卫星探测领域也表现得十分充分。一个典型的例子就是20世纪末实施的热带降雨观测卫星 (TRMM) 计划，正是在该计划中，主动遥感设备——测雨雷达 (PR) 首次被装载在卫星平台送入天空，从而大大推进了人们对热带降水的认识。目前TRMM计划的延伸及拓展计划——GPM正在按部就班开展，TRMM当初带来的惊喜，是否可以被继续期待呢？

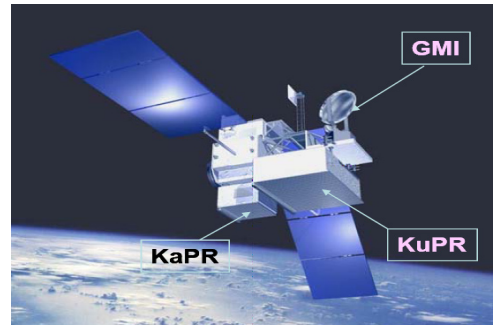


图1 GPM卫星和主要传感器示意图

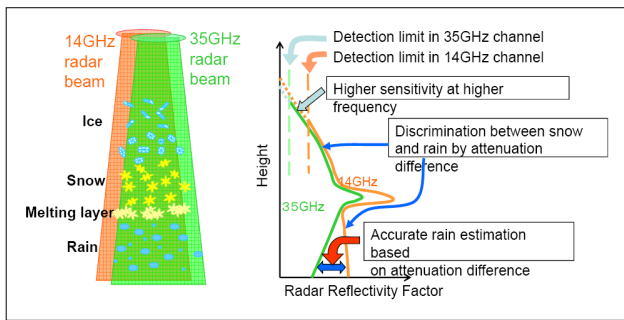


图2 DPR的3D降水观测示意图

降水物形态的探测能力，主要靠两束雷达波对降水目标物更加透彻的解析获得 (图2)。

在表1中，对比了DPR两部雷达以及TRMM雷达主要技术指标。其中与TRMM相比，DPR降水探测的分辨率由TRMM时代的0.7mm/h提高到0.2mm/h，这将是一个重要突破。

在卫星产品方面，由于DPR与更加精细的GPM结合，一些新的卫星雷达综合探测降水产品令人期待。

表1 DPR与TRMM PR数据对比

项目	KuPR	KaPR	TRMM PR
天线类型	主动位相阵 (128)	主动位相阵 (128)	主动位相阵 (128)
频率	13.597和13.603GHz	35.547和35.553GHz	13.796和13.802GHz
扫描宽度	245km	120km	215km
水平分辨	5km (星下)	5km (星下)	4.3km (星下)
Tx 脉宽	1.6μs (x2)	1.6μs (x2)	1.6μs (x2)
变幅分辨	250m (1.67μs)	250m/500m (1.67/3.34μs)	250m
观测范围	18~-5km (星下点附近映像)	18~-3km (星下点附近映像)	15~-5km (星下点附近映像)
PRF (脉冲重复频率)	VPRF (4206 Hz±170 Hz)	VPRF (4275 Hz±100 Hz)	固定PRF (2776Hz)
采样数	104~112	108~112	64
Tx 峰功率	>1013W	>146W	>500W
最小探测Z _e	<18dBz (<0.5mm/h)	<12dBz (500m res) (<0.2mm/h)	<18dBz (<0.7mm/h)
测量精度	±1dB之内	±1dB之内	±1dB之内
数据率	<112Kbps	<78Kbps	<93.5Kbps
质量	<365kg	<300kg	<465kg
能耗	<383W	<297W	<250W
尺寸	2.4×2.4×0.6m	1.44×1.07×0.7m	2.2×2.2×0.6m

全球降水观测/双频降水雷达 (GPM/DPR) 被日本宇宙航空研究开发机构 (JAXA) 列入灾害和气候变化观测项目，其美方合作者是NASA。这一点即延续了TRMM的合作方式，同时也几乎完全沿袭了TRMM的分工，即项目的主动遥感仪器——DPR由日方研制。实际上，DPR也是GPM项目的主要亮点之一，特别是在超越TRMM的期待方面，DPR更是不可或缺的创新和跨代的星载仪器。

GPM最重要的探测仪器，包括GMI (GPM微波成像仪) 和DPR，后者又是由两部频率不同的降水雷达KaPR和KuPR组成 (图1)。DPR具有的对降水三维观测和对

降水物形态的探测能力，主要靠两束雷达波对降水目标物更加透彻的解析获得 (图2)。在表1中，对比了DPR两部雷达以及TRMM雷达主要技术指标。其中与TRMM相比，DPR降水探测的分辨率由TRMM时代的0.7mm/h提高到0.2mm/h，这将是一个重要突破。在卫星产品方面，由于DPR与更加精细的GPM结合，一些新的卫星雷达综合探测降水产品令人期待。可以预期从DPR传感器以及结合GPM上的GMI传感器，获得三个方面的降水相关产品。首先是KuPR和KaPR雷达获得的降水廓线产品，其轨道覆盖宽度分别为245km和125km。第二类产品是DPR两部雷达以及共同演绎计算得到的产品，如雷达获得的反射率、降水类型、消光订正雷达反射率廓线以及降水率廓线等，这类产品中最为重要的是两部雷达资料共同给出的降水率廓线、雨滴尺度分布、降水状态 (雨/雪) 等。最后是DPR以及DPR和GMI共同反演得到的平均降水观测、平均亮度带高度和雨像素数字等。这部分数据为全球覆盖给出每个月分布，其中对全球降水观测分布的时间分辨率达到1h/月，地理分辨率为0.1°格点。需要指出的是，DPR获得的雨滴尺度分布产品，对于降水的强弱高度敏感，准确性也有变化，因此雨滴谱的校准，需要其他卫星同时观测的数据才能完成，这也是GPM与其他卫星共同研发的原因之一。

(作者单位：中国气象局气象干部培训学院)

延伸期预报：任重而道远

——“大气低频振荡和延伸期预报”研讨会评介

■ 贾朋群

大约30年前，笔者就读于京城的大学气象专业，在完成前两年的基础课程后，大三开始终于迎来了天气图分析、预报实践等专业课。记得老师在预报实习课程中，经常重复的一句话，大意是：预报北京天气，你就要看上游张家口的实况。从那时候起，天气系统传播的概念开始萌生，但也曾幼稚地幻想：那是不是北京一周或更长时间以后的天气，就要看更远的接近北极区的某个地方？难道气象预报如此简单吗？

当大气混沌本质以及天气的“可预报性”的概念逐渐被业内人士广为接受的时候，现代社会脆弱性的不断加剧使得灾害天气，特别是重大灾害预警的时间尽量提前的“刚性”需求越来越强。试想如果我国南方地区每年春节前后是否会

遭受长时间雨雪灾害能够提前预知，会给运输部门和返乡的人们带来多少从容？“刚性”的需求让气象预报短板显露出来。十天以上到一个月天气预报，这一世界难题，中国科学家必须面对和做出怎样的回答？2012年4月18—20日，由中国气象局兰州干旱气象研究所和南京信息工程大学共同主办，在海口召开的“大气低频振荡延伸期过程预报技术研讨会”上，与会专家智慧的碰撞，不仅勾画出了一些有效预报方法，更让延伸期预报在理论上重大突破之前即在操作层面获得进展的希望露出曙光。

在这些可行的预报方法中，低频天气图预报方法引起与会专家极大的兴趣。这种方法首先要确定影响预报地点的关键区，而关键区

的划分也可以有几种手段，但都要依据历史资料进行大量分析。例如预报上海降水，关键区的选取有南北多达6个（图1），而这些关键区又恰好与影响上海降水的各种天气系统相关。1990年代初，孙国武和何金海就提出了低频天气图方法。会上，孙国武研究员指出，延伸期预报的主要推动，还是需求。包括上海世博会等在内的重大事件应急和长期旱涝转折点等，都需要有较短短期天气预报更长时间的提前预报量，同时还要给出比气候预测更为详尽的描述。而目前的动力延伸模式预报，其可用时限因大气混沌本质的限制进展缓慢，大约每10年预报时间延长大约2天。国外多家中期数值预报业务和研究机构持续几十年攻关，但进展并不理想。例如，英国气象局甚至因为预报误差太大而停止了持续很长时间的月预报业务。

来自云南的预报团队，利用MJO的活动规律，对云南近年来持续干旱过程中降水的出现进行了试验预报，取得了很好的效果，提前10天甚至更长时间预报出云南干旱持续时“湿窗口”起始时间。

会议上的这些研究成果给人不少新意。例如，这些研究看似运用的是统计方法，但实际上强调的是大气动力响应之间的一种呼应关系，其理论基础则是较为成熟的大气低频振荡。尽管按照大气混沌理论，一周到十天以上的大气传播信号因为发散而不可用，但研究者认为，导致不确定性的大气信号发散只是其中的一部分，而另一部分在某种意义上还是因大气的波动性质而传播，传播的信号不仅可以借助滤波等技术手段捕捉到，还能利用MJO等大气振荡机制分析可传播信号的放大和对预报区域的影响，从而做

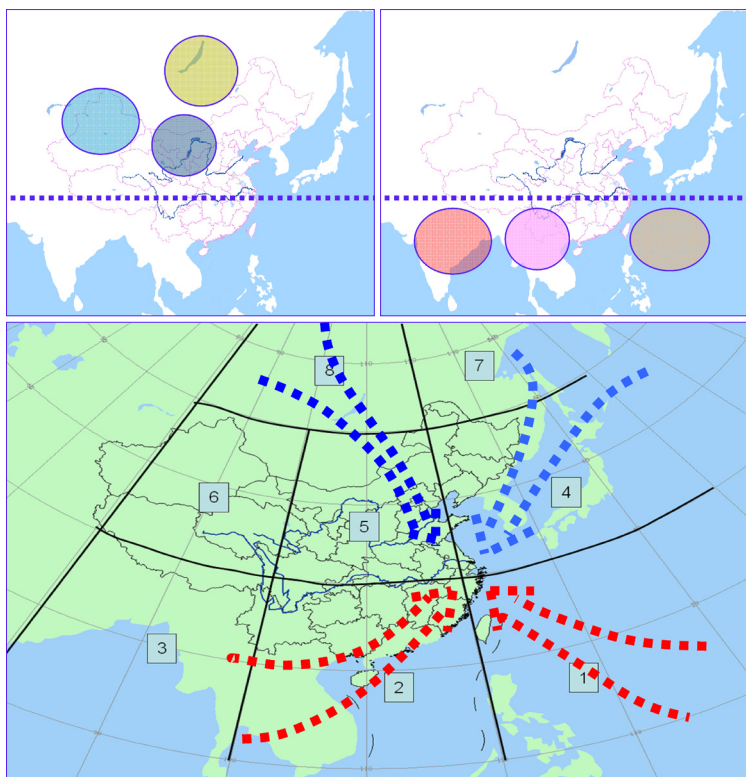


图1 低频天气图预报中上海降水预报的南北关键区（上）和关键区的影响机制（下）

出远远高于随机判断和单纯依靠统计计算的有效延伸期天气预报。

可以说，这次会议再一次吹响了延伸期预报的进军号。2011年，中国气象局将“月内重要过程与趋势预测系统”列为现代气候业务建设试点任务，并在2012年加快了低频天气图预报方法在各省市的推广工作。然而，与会学者清醒地知道，包括低频天气图在内的新技术虽然在多个地方的预报实践中取得

了不错的效果，但走向业务化也面临不小的挑战，需要更深入细致的研究跟上，特别是各地联合攻关。

例如，目前的延伸期预报技术到底属于主观预报还是客观预报就存在很大的争议，预报要素选取和预报结果精细化程度如何等，也还没有完全一致的意见。会议通过研讨，确定了编写《延伸期预报手册》，希冀在一定程度上解决这类问题，例如关键区的确定是否唯

一，“窗口期”预报是否能列做延伸期预报的一种形式等。

南信大何金海教授在对会议进行总结时说得好，尽管延伸期预报的一些重要概念需要进一步达成共识，但发展阶段应该允许一些不同，通过研讨逐渐统一。因为目前延伸期预报从机理上看，是放大了大气慢速运动而弱化了其中的快速振荡，因此是可以依靠的预报工具。

(作者单位：中国气象局气象干部培训学院)

编辑走台站：山西河曲站

本刊编辑部



河曲站测报员向编辑介绍观测项目

《气象科技进展》编辑部为了提升自身能力，按照既定工作计划开始“编辑走台站”的一线气象台站走访活动。2012年5月初，活动的第一站我们来到山西省忻州市河曲县气象

站。平时更多在电脑前工作的编辑们，在这里和县气象局的新老测报员一起观测，通过采访进行交流，在体验了基层测报员日常工作的同时，对气象工作的认识也在加深。

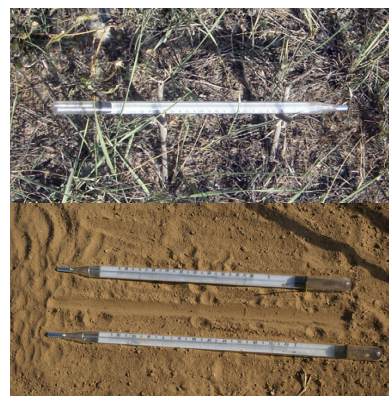
山西省忻州市位于山西省西北部，而河曲在忻州的最西部，黄河在这里掉头向南，时而平直向前，时而曲径环绕，河曲大约由此得名。河曲县气象局建于1954年，属国家基本站，担负着24小时航危报和8次绘图报的观测发报任务，是山西省四个参加国际气象资料交换的站点之一；同时也是国家一级农气站，担负着两种作物的观测发报任务和物候观测等任务。2010年，河曲县气象局获得中国气象局“文明台站标兵”的称号。

在河曲气象观测场，地面观测负责人张占良老师详细介绍了河曲气象观测日常业务。河曲的航空测报对于附近的机场安全十分重要，这也让我们真实地感觉到气象工作在地方的辐射力。另外，这里的电线结冰观测吸

引了我们，见到我们不解的眼光，张老师解释说，电线结冰观测是“随时应变”的，即以电力部门实际使用的电缆为对象，新换代的更粗的电缆第一时间进入观测场，替代了以前的细电缆。当来到地表温度观测场地时，张老师告诉我们，他发现夏季这里裸露地表的温度经常居高不下，而草地上的温度则要低很多，于是由于好奇加上作为气象观测员的责任感，就出现了裸露地表与草地温度的“业余”对比观测。他还针对新的蒸发观测设备，与原设备进行持续对比观测，并且已得出一些成果。山西省局还以课题形式支持这项研究。编辑部借机郑重向张老师约稿，希望通过我们的杂志，将这项事关气象基础资料均一性和可持续性的重要工作，介绍给更多的人。



电线结冰粗细线缆对比观测 (摄影 裴彤)



裸露地表温度、草面温度对比观测

《大气科学百科全书》——大气科学的全景图像

■ 黄红丽 周诗健

半个世纪前, 想要阅读大气科学某一领域及相关领域的所有著作是有可能的, 而现今, 大气科学及相关科学著作涉猎的范围、作品的规模以及复杂性不断增加, 科学期刊数量越来越多, 这使得研究人员查阅文献有一定困难, 而百科全书这种独特的著作形式会为读者提供极大方便。基于以上历史背景, 美国学术出版社 (Academic Press) 于2002年出版了《大气科学百科全书》 (Encyclopedia of Atmospheric Sciences, EAS), 主编为美国华盛顿大学的J.R.Holton, 副主编由J.A.Curry (美国亚特兰大地球和大气科学学院) 和J.A.Pyle (英国剑桥大学大气科学中心) 担任。作者团队涉及400多名科学家, 分别来自学术单位、政府机关和产业部门, 另有31名学者组成的编辑委员会 (负责推荐专题和作者, 并审阅初稿)。为了及时跟进时代发展, EAS还在2011年出了第二版, 对第一版做了修订, 扩展至350个条目, 但总体来讲变动不大。

► EAS内容简介

EAS是公认的权威性参考资料, 书中包含1900多幅图片和照片 (很多是全彩图片); 涉及主题范围很广, 如大气化学、生物地球化学循环、古气候、边界层、云、大气环流、全球变化、中尺度气象学、臭氧、卫星遥感和天气预测等, 还包括国内少有涉及的方面, 如“法律气象学 (FORENSIC METEOROLOGY)”等; 涵盖了大气科学理论和应用的各个方面, 可谓是一副展现大气科学全景的画卷。EAS是有关大气科学、海洋科学和环境科学领域的学术单位、政府机关及产业部门的理想参考资料。适用于大学本科生阅读和了解有关知识、资料, 同时提供给研究者这

一领域的最新信息。

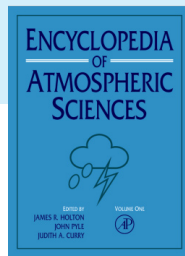
EAS中含3个及以上条目的项目统计 (总计31个项目, 171个条目) 显示: 这些条目中, 有关对流层化学和平流层化学的条目有21个, 卫星探测有11个, 化学观测有9个。可见该书对卫星探测和大气化学过程类的新领域的重视; 此外, 对与生活 and 生产活动密切相关的内容, 如气溶胶、边界层、全球变化以及观测手段 (雷达、激光雷达、观测平台等) 也相当关注; 与此同时, 对大气科学的经典内容和基础知识 (如大气环流、动力气象学、中尺度气象学、天气预报等) 的撰写也占据了相当的篇幅。

► EAS查阅方式

EAS的项目按首字母顺序排列, 项目下设条目, 有的项目仅有一个条目, 有的项目则包含按一定逻辑顺序排列的多个条目。总体来看, EAS体例大致统一, 大多数条目用一至三级标题撰写, 几乎每个条目都有“引言 (Introduction)”、“本书参见 (See also)”、“深度阅读 (Further Reading)”等固定一级标题, 便于检索与阅读。

► EAS条目示例

以“气候变化”项目为例。气候变化项目共包括生物圈作用和反馈、气候变化对人类的影响、臭氧变化趋势、地表温度变化趋势和高层大气变化5个条目。其中“地表温度变化趋势”条目主要从温度资料的质量、基本资料的整合、半球和全球时间序列及温度记录的分析进行叙述。讨论了在陆地和海洋领域基本温度数据的质量。指出, 20世纪初至今地球表面温度升高了约0.6℃; 气候变暖在1920—1944年和1975年之后两个时期之外未曾呈现过线性变化; 尽管半球和全球变暖具有显著性差异, 但这两个时期气



Academic Press, 2002年出版, 2011年再版

候变暖的空间型在有限的几个区域表现出明显的季节特征。对温度变化的进一步研究表明: 相对于极端暖事件的增加, 极端冷事件的减少更说明了变暖的增多, 且夜间发生的概率高于白天; 通过欧洲仪器观测的长期记录和从大量多种多样的标志物获得的千年尺度的古气候信息, 分析验证了在较长时间尺度下20世纪的变暖; 最新的证据表明, 20世纪不仅是千年间最暖的时期, 其变暖速度也是史无前例的, 其中, 20世纪90年代是最暖的十年, 1998年是最暖的一年 (摘自2002版)。该条目站在客观的角度对气候变暖进行了阐述。

目前, 国内仅有综合类百科全书包含了气象学的部分内容, 如《中国大百科全书》 (第二版), 与气象学有关的内容分散于各卷, 不易查找, 内容也不够全面; 网络上的某些百科全书又不具权威性。因此, 中国气象局正组织专家编纂具有中国特色的《中国气象百科全书》, 是以大气科学为基础, 以中国气象事业发展为特色的专科性百科全书, 是一部为具有一定知识水平读者提供的, 具有良好可读性和科普性的工具书。内容涵盖我国气象科学领域各主要学科内容和气象工作、气象防灾减灾工作任务, 融会国内外气象科学领域的先进科技成果, 反映我国气象科研、气象业务特色和气象事业发展的历史足迹。共约350万字, 约2400条目, 将于2015年正式出版。而EAS已被选作撰写该书的重要参考资料。

(作者单位: 气象出版社)

文摘 (中文文献)

冰期-间冰期印度夏季风变迁的动力学机制被评为“2011年度中国科学十大进展”——《中国科学基金》2012年第26卷第2期

科技部基础研究管理中心评出“2011年度中国科学十大进展”，其一：中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室安芷生研究员与中外合作者，运用中国大陆环境科学钻探工程在青藏高原东南缘鹤庆盆地获取的666m湖泊沉积岩芯，利用古地磁、碳-14测年和轨道调谐手段，重建了更新世（过去260万年）印度夏季风变迁的历史；并通过印度夏季风变迁时间序列的精细结构及其与全球记录对比的深入分析，建立了冰期-间冰期印度夏季风动力学理论。该研究显示，更新世中期印度夏季风变率加大，主要受控于北半球冰量变化；而更新世早期和晚期印度夏季风变率较小，可视为南北半球气候相互作用的结果；并发现在冰期，印度夏季风开始增强的时间先于冰量最大值产生的时间是南半球气温变化通过马斯克林高压而产生的气压推动的结果。这指示南北半球冰量和气温通过控制跨赤道气压梯度变化，驱动了冰期-间冰期印度夏季风的变迁。相关研究成果发表在*Science* (333:719-723)上。

2009年秋至2010年春西南地区严重干旱的成因——《大气科学》2012年第36卷第3期

黄荣辉等撰文指出，2009年秋至2010年春，热带西太平洋和热带印度洋处于升温状态，它使得热带西太平洋上空产生反气旋异常环流，造成了西南气流异常在我国东南沿海加强，而华南和华中地区上空处于低槽控制，因而在高原东部为槽后西北气流和下沉气流所控制，造成了从孟加拉湾来的水汽很难到达云贵高原，从而引起了此区域降水长期偏少。结果还表明了中高纬度地区的环流异常对此次严重干旱也有重要影响。由于从2009年冬季到2010年春季中高纬度准定常行星波传播的极地波导偏强，而低纬波导偏弱，这导致波的E-P通量在

60°N附近对流层和平流层为辐合，而在35°N附近对流层中、上层为辐散，从而引起纬向平均西风在60°N附近对流层和平流层减弱，而在35°N附近对流层中、上层加强，造成了北极涛动(AO)为很大的负值。由于AO为负值，东亚冬季冷空气活动强且路径偏东，使得到达西南地区冷空气偏弱，从而引起西南地区持续性严重干旱的发生。

南大洋物理过程在全球气候系统中的作用——《地球科学进展》2012年第27卷第4期

马浩等撰文，从南极底层水、南极绕极流、南大洋海冰、南大洋与热带之间的遥相关，以及南大洋对气候变化的响应等多个角度梳理了南大洋物理过程，特别是动力过程在全球气候系统中的作用，较为完整地总结了对南大洋气候效应的已有认识，并结合南大洋研究现状对未来有价值的科学问题和潜在的研究热点，如改进耦合模式中南大洋气候态的模拟效果，南极融冰的事实和成因进行了探讨。南大洋在气候系统中起着不可忽视的重要作用，在全球变化中扮演着举足轻重的角色。在短时间尺度上，南大洋与热带之间通过“海洋通道”和“大气桥”相连接，并能够通过影响越赤道气流改变东亚夏季风的强度；在长时间尺度上，AABW和ACC是热盐环流全球输送带的重要组成部分，有力地调节着全球的热量和能量分布。在全球气候变化的背景下，南大洋海温升高、盐度减小、海冰增多、西风增强，其响应特征既表现出与全球其他大洋相一致的“共性”，也表现出其独有的“个性”。

大气数值模式变量的物理分解及其在极端事件预报中的应用——《地球物理学报》2012年第55卷第5期

丑纪范在归纳钱维宏研究组9篇原创性文章的基础上，探讨了大气变量物理分解后需要进一步研究的理论问题和应用前景。文章还提到，如何减少漏报和空报率是今后努力奋斗的目标。从根本上说，是需要将物理气候统计的方法发展为动力学的方法。具体的，要研究瞬变扰动天气图上哪些指标有物理意义，以及哪些扰动可能引发极端气象事件的物理机制。这显然是个困难的问题，因为瞬变扰动天气图上的量，比如风速，并非实际的

气流。这需要从动力学上证明，实际气流中被分离出的部分，它们对该现象不起作用，犹如实际风在分解为速度势部分和流函数部分时，辐合辐散（垂直运动）完全由速度势部分所产生的那样。只有倒向问题得出的指标获得动力学的阐明，并为实际预报所证实时，那才是真正的指标。显然，要攻克极端气象事件预报的难题，人们还有很长的路要走。

从湍流经典理论到大气湍流非平衡态热力学理论——《高原气象》2012年第31卷第1期

胡隐樵等系统回顾了大气湍流经典理论发展简史，进一步详细介绍了大气湍流非平衡态热力学理论。大气湍流非平衡态热力学理论在熵平衡方程中引入动力过程，进而统一推导出大气湍流输送的Fourier定律、Flick定律和Newton定律，证明了Dufour效应、Soret效应、可逆动力过程与热力不可逆湍流输送过程之间的交叉耦合效应，以及湍流强度定理。这些定律和定理中得到了观测的事实验证，同时它们的唯象系数也由观测资料所确定。湍流强度定理揭示，湍流发展的宏观原因是速度和温度的剪切效应，Reynolds湍流和Rayleigh-Bénard湍流共存于大气湍流中。热力过程和动力过程间耦合效应现象的发现突破了传统湍流输送理论。热力和动力过程间的耦合原理认为，一个宏观量的输送通量包括这个量的梯度湍流输送量和速度耦合输送通量两部分。在一个很宽的尺度范围内，地表面的空间特征是非均匀的。下垫面非均匀性造成的对流运动将引起大气的辐散或辐合运动。这可能是导致地表能量收支不平衡的重要原因之一。垂直速度对垂直湍流输送的交叉耦合效应为非均匀下垫面大气边界层理论的发展，并为克服地表能量收支不平衡问题及非均匀下垫面大气边界层参数化遇到的困难提供了可能的线索。

格子玻尔兹曼方法模拟大气边界层中的阵风结构——《科学通报》2012年第57卷第10期

程雪玲等撰文指出，东亚北方冬春季常会出现寒潮冷锋天气，冷锋过后有明显的下沉气流，且伴随强阵风。观测数据分析表明，阵风结构具有相干性，是春季沙尘暴能够被输送

到边界层上部,从而远距离传输的重要条件。格子玻尔兹曼方法(Lattice Boltzmann method, LBM)是一种基于Boltzmann分子输运方程的数值流体计算技术,自从出现以来,由于其在微观水平描述运动的特点,一直被用来研究湍流等复杂运动,在格子玻尔兹曼方法中引入大涡模式,使其能够应用到大气边界层湍流场,模拟阵风的产生及发展,得到了具有波动和涡旋相结合的相干结构,从而解释了阵风相干结构起沙扬尘的机理。进一步分析表明:在气流分离处水平风速减小,在稍低于气流分离的地方下沉气流速度最大,且随着向上向下远离该处,下沉速度减小。通过提取阵风结构,可以看到阵风产生的摩擦速度与湍流摩擦速度的量级相当,湍流摩擦速度是在靠近地面处大,因此造成地面的起沙,而随着高度的增加,阵风摩擦速度逐渐与湍流摩擦速度大小相当,也就是说二者对上空的扬尘共同起作用,而随着高度的继续增加,阵风的摩擦速度超过湍流摩擦速度,成为扬尘的主要因素,这种现象在下游更明显。

从气候学角度揭示亚洲季风区夏季降水日变化特征——《中国科学:地球科学》2012年第42卷第4期

毛江玉等从气候学角度揭示了亚洲季风区夏季降水日变化特征。结果表明,降水日变化振幅和位相存在显著的地域性差异。亚洲大部分陆地及海岸带、印度尼西亚群岛及其附近洋面降水日变化显著,其相对振幅大都在40%以上。其中海岸带的陆面(如我国东南沿海地区、中南半岛沿岸)和孟加拉湾西北部的洋面上,降水最大值至少是日平均值的两倍。尽管热带陆面上降水日变化的基本特征是极大值一般出现午后至傍晚,但印度半岛中南部和中南半岛中部地区的峰值位相却推迟到21—00时。在西太平洋和赤道印度洋上,降水的日变化较弱,其相对振幅低于40%,相应的峰值位相出现在午夜至早晨。可是,在南海、孟加拉湾北部和阿拉伯海东部这三个洋面上,降水峰值却出现在白天。南亚和东亚一些地区的降水日变化,峰值位相还具有明显的经向传播。在印度中东部地区,同时存在自北向南和自南向北的位相传播,二者均到达中部地区而结束。沿着我国东部和加里曼丹岛所在经度带,前者位

相从海洋向内陆传播,而后者从陆地向外海传播,显示出海岸带型日变化规律。孟加拉湾海域降水日变化位相具有纬向传播特征,极大降水区于凌晨起源于印度半岛东岸的海陆交界处,其后向东传播,于18时到达孟加拉湾东岸,最后深入中南半岛。

2011年国内外气候概况——《气象》2012年第38卷第4期

《气象》2012年第4期刊登3篇文章对2011年全球和中国气候概况以及海洋和大气环流异常对中国气候的影响进行了阐述。2011年,全球气温偏高,为有观测记录以来的第十个暖年,是近60年来出现拉尼娜事件的年份中全球气温最高的一年。全球热带气旋活动较常年偏少。两次拉尼娜事件一次于4月结束,一次于9月生成。年初,低温、寒流席卷亚洲大部,暴风雪频繁袭击北美地区。西欧和中国东部出现严重春旱。夏季,非洲东部经历了20世纪80年代以来最严重的干旱,而东南亚、巴基斯坦和中南美洲洪涝灾害严重。全球极端偏暖事件主要出现在欧洲西部和西北部、南亚南部、东亚中西部、北美东南部等地;极端偏冷事件主要出现在东亚、澳大利亚、非洲南部和美国东北部和西部等地。而南美中东部、东南亚及中国东南部、日本、澳大利亚北部、非洲西部等地出现了极端强降水事件。研究发现,2010/2011年拉尼娜事件和台风活动是导致东南亚洪涝出现的重要原因,而巴基斯坦洪涝主要与印度洋正位相偶极型海温分布有关。2011年,中国气候总体呈现暖干特征。全国年平均气温较常年偏高0.5℃,为1997年以来连续第15个暖年;年降水量556.8mm,较常年偏少9%,为1951年以来最少。年内,我国未出现大范围持续性严重干旱和流域性洪涝灾害,低温冰冻和雪灾、局地强对流、热带气旋灾害较轻。但区域性、阶段性气象灾害频发。华北、黄淮出现近41年来最重秋冬连旱;长江中下游出现近60年来最重冬春连旱,6月旱涝急转,发生暴雨洪涝灾害;西南出现近60年来最重夏秋旱;华西和黄淮秋汛明显;华南南部10月发生较重暴雨灾害;强降水造成北京等大城市发生内涝;夏季南方大部持续高温,多地高温破历史记录;台风纳沙、梅花影响范围广、致灾程度较重。全球海洋外源强迫和大

气内部动力过程共同作用下的大气环流系统组合异常,是造成2011年中国大部地区降水异常偏少,温度明显偏高,呈现暖干型气候特征的主要原因。

预测西北太平洋年热带风暴生成频数的新方案——《气象学报》2012年第70卷第2期

王会军撰文指出,利用前期1—2月和4—5月平均的东半球格点降水与500hPa高度场资料,通过多元线性逐步回归,建立了西北太平洋年热带风暴生成频数的预测方案。分别使用了欧洲中期数值预报中心和美国国家环境预测中心的大气再分析资料,建立了两个预测模型,对1979—2002年的预测交叉检验的距平相关系数分别为0.78和0.74。预测的多年平均绝对误差是3.0和3.2,即多年平均西北太平洋年热带风暴生成频数的10%左右。进一步指出:实际预测中可以把两个模型的预测结果平均作为最后预测结果,这样的话,多年交叉检验的距平相关系数是0.88,多年平均的预测绝对误差是1.92个。这样就可能得到更加准确的预测。此结果还只是该方案的交叉检验结果,尚需在实际预测中进一步检验其能力。

NCEP再分析资料在强对流天气产生环境分析中的适用性——《应用气象学报》2012年第23卷第2期

王秀明等考察了NCEP再分析资料在我国强对流天气产生环境分析中的适用性,选取2002—2009年多普勒天气雷达识别的60例超级单体风暴个例,对比分析常规探空资料和NCEP再分析资料提取的温、湿、风垂直廓线,结果表明:NCEP再分析资料计算的对流有效位能因对抬升气团湿度敏感而与观测间差异较大,宜用K指数、温度直减率分析大气层结稳定度;因对流层中高层风与探空差异不大,其中500~700hPa的风与探空近乎一致,因此NCEP再分析资料计算的深层、中层风垂直切变参量可靠性较高NCEP再分析资料水汽参数与探空资料差异大,特别是在大气边界层,需用观测资料订正;边界层物理量,特别是风向与探空差异显著,因此不宜用NCEP再分析资料讨论雷暴触发问题;平均而言,NCEP再分析资料湿度廓线低层偏干而中层偏湿,925hPa以上风速偏小,降低了强对流发生概率。

文摘 (英文文献)

WRF中尺度数据同化系统在2007—2009年春季强天气事件中的应用——Application of a WRF mesoscale data assimilation system to springtime severe weather events 2007–09. *Monthly Weather Review*, 2012, Vol. 140, No. 5.

NOAA强风暴实验室的Wheatley等使用WRF模式的集合数据同化系统,研究了2007年春季至2009年的出现在美国的许多强天气事件的预报初始化方法。以往有关的试验已经显示,集合卡尔曼滤波(EnKF)数据同化方法具有揭示中尺度特征的能力,例如干线和对流驱动的冷池,它们在对流的发展过程中扮演了重要角色。因此,本研究使用始于EnKF分析的集合预报试验计算了所分析的每一次事件的强天气参数,然后和没有进行集合数据同化的控制集合预报进行了对比。与地面观测相比,在0~6个小时的预报时段内,集合预报试验的所有事件的均方根误差普遍较小。在距离龙卷风实际发生处最近的模式格点上,0~6小时集合预报试验的集合平均显著龙卷风参数(STP)和STP>1的概率经常大于控制预报。同样,集合预报试验的中尺度对流系统(MCS)维持概率(MMP)也常大于控制预报。两种方案的差异在95%的检验水平上是显著的,这表明,甚至较短时段内的集合数据同化也能提高强天气事件的预报能力。

地基大气观测用于城区温室气体排放验证的评估——Assessment of ground-based atmospheric observations for verification of greenhouse gas emissions from an urban region. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, Vol. 109, No. 22.

为确保限制温室气体排放国际协议的有效性和公平性,需对其效果进行评价。使用直接观测的大气温室气体浓度对其展开验证,将有助于检验减排是否已经实现。哈佛大学的McKain等利用盐湖城的CO₂地面观测

网采集的数据,评价了地面观测以及一个高分辨率(1.3km)中尺度大气传输模型(WRF-STILT)对于检验大城市地区温室气体排放随时间变化的能力。尽管由于对浅层环流和边界层层结变化的模拟并不完善,导致模拟数据并不能真正在逐小时尺度上与观测匹配,但是模拟得到的CO₂的许多变化特征依然与观测具有较好的一致性。使用两个优化程序后,足以在95%的置信水平上识别出15%或者更大程度的区域月排放通量的变化。研究认为,从地面和/或空间上的完整的柱测量比地面上的点测量更适于分析小尺度过程上CO₂的再分布,从而可以获取更精确的变化趋势。

一个准地转模式中由海洋SST锋触发的大气动力特征——Atmospheric dynamics triggered by an oceanic SST front in a moist quasigeostrophic model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2012, Vol. 69, No. 5.

法国Pierre Simon Laplace研究所的Deremble等使用一个包含了湿过程的三层准地转模式(QG3)研究了大气对海洋锋的响应特征,着重关注了响应于位于不同纬度的海表温度(SST)锋的上层大气急流的调整机制。当SST锋足够强大时,往往会锚定大气急流,这表明急流的空间位置和格局主要受到了SST锋所处纬度的影响。通过分析地表感热和潜热通量对急流强度和位置的影响,发现当SST锋出现变化时,由湿过程引起的潜热释放也会改变,从而影响急流的经向位移。而且,潜热释放和地表感热通量也共同作用于急流的强度变化。这些结果强调了SST锋和湿过程在影响中纬度急流以及伴随的风暴路径时所扮演的角色。

使用160年的气温观测数据对21世纪全球变暖的模拟改进——Improved constraints on 21st-century warming derived using 160 years of temperature observations. *Geophysical Research Letters*, 2012, Vol. 39, L01704.

采用比以往许多研究更长时间尺度的气温观测数据,加拿大气候模拟和分析中心的Gillett等基于第二代的加拿大地球系统模式(CanESM2)模拟了气温变化对温室气体排放、人

为气溶胶以及火山爆发等自然强迫的响应。研究发现,基于160年(1851—2010年)气温观测数据的模拟显示,在三种具有代表性的浓度排放途径下,2091—2100年间全球平均气温将比工业化前上升1.2~4.3℃;而仅温室气体变化引起的瞬时气候响应(Transient Climate Response, TCR)约为1.3~1.8℃,这比采用较短时间尺度的气温观测数据(1900—1999年)的模拟结果(TCR约为1.7~2.6℃)也要低。

土地覆盖变化引起的气候模式模拟的极端温度的变化——Climate model simulated changes in temperature extremes due to land cover change. *Journal of Geophysical Research*, 2012, Vol. 117, D04108.

澳大利亚新南威尔士大学的Avila等使用一个耦合了复杂陆面方案的气候模式,探讨了土地利用/土地覆盖变化(LULCC)对极端气候指数的影响,极端气候指数使用了ETCCDI推荐的定义。研究发现,许多与温度有关的极端气候指数受到了LULCC的影响,引起了局地 and 区域尺度上温度的显著变化。和CO₂加倍对气候的影响相比,LULCC引起的极端温度变化可能在区域尺度上掩盖或放大了CO₂增加带来的气候效应。在一些区域,LULCC强迫引起的温度变化幅度和CO₂加倍相似。该研究结果可能使气候变化监测和归因研究复杂化了,但也为以后准确确定区域尺度上CO₂增加对气候变化的贡献提供了一个清晰的方向。

降水对乍得湖干旱化的响应——The precipitation response to the desiccation of Lake Chad. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2012, Vol. 138, No. 664.

乍得湖位于非洲半干旱的Sahel地区,由于一系列的干旱和人为影响,其湖面面积已从1960年的25000km²下降至目前的约13500km²。如此大的一个开放水体几近消失,这将对湖周边地区的气象产生不可忽略的影响。在雨季,这种影响可能会随着经过乍得湖的向西传播的对流系统而波及到更远的西部。比利时天主教鲁汶大学的Lauwaet等使用一个区域大气模式

(ARPS)研究了乍得湖干旱化对区域水文和对流过程产生的影响。使用了三种乍得湖情景来反映1960年、目前以及未来乍得湖的状态,在未来情景中乍得湖及周边湿地被认为完全消失。模式模拟的时间范围为2006年的7—9月,包含了乍得湖地区的雨季在内。结果发现,总降水量和水文循环的各组分基本不受湖存在与否的影响。只是在1960年情景下,湖东岸的降水有所增加。模拟显示,在湖的顺风方向,边界层湿度和温度被显著改变。对一个中尺度对流系统(MCS)的个例分析发现,不稳定的边界层大气首先导致MCS加剧,然而随着冷池传播的有效性降低,MCS系统的持续又被改变。这种机制能够解释不同情景之间乍得湖附近降水格局的差异。研究结果表明,尽管大尺度的大气过程没有受到乍得湖变化的影响,但是局地敏感性是不可忽视的。

城市区域反照率增加带来的长期效应——The long-term effect of increasing the albedo of urban areas. *Environmental Research Letters*, 2012, Vol. 7, No. 2.

由于对太阳光具有较强反射作用的某些城市表面(白色屋顶和浅色路面)能够使城市的反照率增加,因此若在城市和人类其他定居区域普遍采用这些材料,那么将会出现抵消一部分全球变暖带来的温度升高的潜在可能。加拿大Concordia大学的Akbari等使用一个中等复杂程度的全球气候模式(UVic ESCM)模拟了城市表面反照率增加带来的长期(10年至百年)效应。通过分别增加 20° — 45° N、 20° — 45° S之间所有陆地区域的反照率,发现若反照率增加0.01,每平方米陆表将会产生 3×10^{-15} K的全球变冷效应,这种温度下降规模相当于减少大约7kg的 CO_2 排放。而如果仅增加城市区域的反照率,全球变冷效应约为0.01~0.07K,相当于减少250~1500亿吨的 CO_2 排放。

一个地球系统模式对理想化辐射强迫的敏感性——Sensitivity of an Earth system climate model to idealized radiative forcing. *Geophysical Research Letters*, 2012, Vol. 39, L10702.

Hadley中心的Andrews等检验了该中心新的地球系统气候模式HadGEM2-ES

对辐射强迫的气候反馈效应。该模式新包含了生物地球物理和化学过程,为了确定这些过程对气候反馈的影响,同时进行了不包含这些过程的模拟试验。模拟发现,在 CO_2 增加4倍的试验中,这些生物地球物理和化学过程的引入并不会改变全球气候模式的灵敏度。然而,当 CO_2 的变化没有和植被进行耦合时,或者使用非 CO_2 强迫——太阳常数的增加来对模式进行强迫时,模拟结果显示澳大利亚的沙尘释放有所增加,从而加大了对太阳短波辐射的反射,这也减小了模式的全球敏感性。研究认为,在标准的 CO_2 敏感性实验中,由于HadGEM2-ES模式中 CO_2 对植物的施肥效应,导致了强烈的植被负反馈,从而对气候变化的影响较小。

亚马逊地区生物质燃烧气溶胶对云的影响——模拟和卫星、实地观测对比——Comparing results from a physical model with satellite and in situ observations to determine whether biomass burning aerosols over the Amazon brighten or burn off clouds. *Journal of Geophysical Research*, 2012, Vol. 117, D08203.

气候系统中,气溶胶对云、降水和辐射平衡的影响依然具有很大的不确定性。生物质燃烧(BB)气溶胶粒子可以通过改变微物理过程和辐射(半直接和云吸收)而对云产生影响。斯坦福大学的Ten Hoeve使用一个空气污染—天气预报模式(GATOR-GCMOM)分析了亚马逊地区气溶胶对混合相云、降水及辐射场的影响,并与遥感及实地观测进行了对比。观测和模拟结果都表明,在低的气溶胶光学厚度(AOD)下,云光学厚度(COD)随AOD的增加而增加;在高的AOD下,COD随AOD的增加而减小,这和以前的观测和模拟是一致的。COD的增加可归因于微物理和动力过程的综合影响,而COD的减小是由于辐射影响(尤其对薄云和暗云)占据了主导所造成的。遥感观测和模拟结果之间的相似性表明,这些相关是基于物理基础而不是由卫星反演方法决定的。研究认为,不同的气溶胶浓度下,微物理过程和辐射效应各自的影响也并不相同。如果模式不包含

气溶胶辐射效应,则可能会高估气溶胶的微物理过程影响,而低估了气溶胶(包含黑色和棕色碳气溶胶)的变暖效应。

CO_2 过饱和导致湖泊初级生产力增加——Carbon dioxide supersaturation promotes primary production in lakes. *Ecology Letters*, 2012, Vol. 15, No. 6.

地球上的大多数湖泊都存在 CO_2 过饱和问题。通过对位于北方高纬度区域的 CO_2 过饱和和湖泊的采样分析,瑞典Umea大学的Jansson等发现 CO_2 过饱和和湖泊的浮游植物初级生产力超出了 CO_2 处于平衡态的湖泊的大约10倍, CO_2 以及磷、氮等一起决定了大多数贫营养湖泊的浮游植物初级生产力和生物量大小。土地利用、气候变化引起的陆地有机碳的变化,导致了对湖泊的有机碳输入的改变,进而,湖中的微生物对输入有机碳的矿化是 CO_2 过饱和的主要驱动力。

A-Train卫星廓线数据用于气象教育和培训——Meteorological Education and Training Using A-Train Profilers. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, Vol. 93, No. 5.

NASA A-Train系列卫星提供了以往天气卫星影像数据无法比拟的丰富的大气垂直廓线信息。其中,CloudSat和CALIPSO卫星数据生动地描绘了二维产品的垂直维度信息。然而,许多天气预报员从来没有见过这些廓线,不能理解其包含的云和降水系统的基本信息。这些廓线都伴随着相应的天气卫星影像,可以解释不同的天气机制。文中给出的廓线例子包括了锋面系统,海洋层积云,地形障碍,热带气旋和强雷暴。美国海军研究实验室的Lee等认为使用A-Train,尤其是CloudSat和CALIPSO两颗卫星的数据,对天气预报员以及学生进行教育培训具有巨大潜力。

用科学为保护地球臭氧层呐喊——罗兰

张健 编译

2012年3月10日，诺贝尔奖获得者、美国加利福尼亚大学教授、化学家弗兰克·舍伍德·罗兰（1927—2012年）先生离世，享年85岁。联合国环境署网站上发表消息：向弗兰克·舍伍德·罗兰教授致敬！

罗兰出生于美国俄亥俄州的小城——特拉华市，他16岁（1943年）就考入俄亥俄卫斯理大学，于1948年毕业并获得学士学位，随后进入芝加哥大学化学系，于1951年和1952年连续获得硕士和博士学位。毕业后，罗兰先后在普林斯顿大学和堪萨斯大学工作。1964年，罗兰来到加州大学尔湾分校并创建了化学系，担任该系教授和系主任。1978年他当选美国国家科学院院士，并于1993年担任美国科学促进协会主席。

罗兰在1974年首次提出了氟利昂对臭氧层的损耗，是最先为臭氧层变薄而敲响警钟的化学家。他的研究主要涉及大气化学和化学反应动力学，研究成果卓越、获奖无数：1983年获得泰勒环境成就奖；1989年获得日本国际奖；1993年将美国化学协会彼得·德拜奖收入囊中；1994年获得美国地球物理协会罗杰·雷维尔奖；直至1995年，罗兰达到了他化学人生的巅峰，荣获诺贝尔化学奖。

1974年，执教于加州大学化学系的罗兰和助手莫利纳在*Nature*杂志上刊登文章（Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone），首次指出被人们使用后的氯氟碳化合物会上升到平流层，在太阳的紫外线照射下分解出氯气自由基，这会破坏臭氧。他们发现，那些有可能产生大量气雾剂排放物的氟利昂，广泛存在于除臭剂、制冷剂和护发产品中，而这种物质将对臭氧层产生

致命的损害。

没有想到，这惊人的发现公之于众后，却招致诸多同行代表的反对和怀疑。化学系的同事对罗兰避而远之；1975—1985年，整整10年间，没有任何一所大学聘请他任教。在那个氟氯化碳大行其道的年代里，甚至还有一份商业出版物指责罗兰和莫利纳“破坏了资本主义”。

直到11年后，当英国科学家在南极洲上空发现臭氧层出现空洞时，罗兰的研究成果才被人们承认。紧接着，1987年，《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》诞生，禁止含氟利昂等其他有损臭氧层的气雾剂复合物排放。该公约的制定，至今仍被认为是国际环境保护进程中的标志性事件。

国家科学研究院主席拉尔夫·西塞罗尼在一次采访中说道，“这个发现的意义不可估量，它开启了一个全新的领域，全世界的科学期刊、科学报道，大学的研究项目、大学的科研人员全都逃不出这个话题。而在20世纪七八十年代，那个关于臭氧争议的‘冷战时期’，罗兰他们所提出的领域太新了，以至于大多数科学家不明白到底发生了什么，他们似乎还未做好任何准备接受这个发现。”拉尔夫后来又表示：“这项发现最让人震惊之处在于，它让你意识到，随手抓起的某个小玩意儿，或许就会破坏地球。”

直到1995年，罗兰、莫利纳以及同事克鲁岑才在德国普朗克科学院领取了这个被埋没了21年的诺贝尔奖。

在进行化学研究的同时，罗兰在其他一些领域也做了先驱性的工作，如监测微量气体并研究其化学作用，其中包括对大气中甲烷含量



升高的研究。然而，他最伟大的成就应该是他证明了看似简单的化学反应会以很大的规模进行，并最终产生全球性的影响。

“他拯救了世界，让这个世界免于重大灾难。”加州大学尔湾分校物理科学系主任肯尼思·扬达这样评价罗兰，“我们失去了最好的朋友和导师。”

由于罗兰和莫利纳的伟大发现，《保护臭氧层维也纳公约》于1985年诞生，随后关于臭氧空洞的发现更推进了国际社会共同采取行动保护臭氧层的进程。1987年形成了《蒙特利尔议定书》，《蒙特利尔议定书》被认为是保护环境方面最成功的国际协议之一，1990年又通过《蒙特利尔议定书（伦敦修正案）》，它体现了发展中国家与发达国家“共同但有区别的责任”原则，具有里程碑式意义，到2009年，联合国所有成员国都签署了《蒙特利尔议定书》。



罗兰是一位出色的科学家，他执着的探索精神和锲而不舍的意志力，以及强烈的保护环境的社会责任感，使他致力于臭氧层大气化学的研究，对保护子孙后代做出了突出贡献。

（张健，特约撰稿人，中国气象局气象干部培训学院）

《英国皇家气象学会2012—2014年战略》

这份今后三年的战略，给出了学会的目标和优先领域，其中包括建立两个工作组，分别致力于开发会员收益和就气候变化进行交流。据介绍，学会管理者已经开始策划召开系列会议，与气象圈子以外人员进行交流。同时，学会还计划与“感知科学”团队合作，出版名为“感知...”的系列出版物。

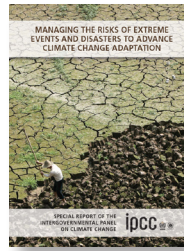
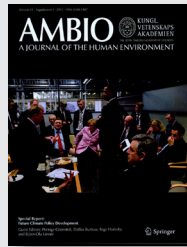


《澳大利亚气象局2010—2011年报》

这份年报指出，大城市中97%的被调查人群以及全澳94%的接受调查者对公共天气预警的及时性和准确性表示满意。基于网上调查，97%的人对气象局的网上服务和电话服务的满意度则分别为98%和100%。目前澳大利亚气象局拥有62部天气雷达、863个地面观测站、7349个雨量站、2339个水文监测站、42个海平面和潮汐监测站、22个浮标站、28个海浪浮标站、16个电离层站、9个日地辐射监测设施和8个臭氧监测站。

AMBIO 2012年“未来气候政策制定”增刊

这本由瑞典皇家科学院编辑的著名人类环境杂志，在2012年出版了“未来气候政策制定”专门增刊，一方面纪念于2001年生效的京都议定书发布10周年；另一方面，刊载了从科学角度探讨气候政策问题的10篇文章，分别从社会经济、排放贸易体系、气候政策的短期和长期目标、气候友好的技术开发和国际气候谈判等角度，围绕增刊主题展开讨论。



IPCC:《管理极端事件和灾害风险促进气候变化适应》报告 2012年3月

极端的天气和气候事件与暴露的、脆弱的人类和自然系统结合，就酿成灾害。这份报告探索了这一挑战，认为天气气候相关的灾害，具有社会和物理维度，因此，物理事件的频率和严重性的变化会影响到灾害的风险，而空间多样性、暴露度及脆弱性的时间动态变化也起到同样作用。报告回顾了1950年以来全球某些极端事件的变化，指出在全球尺度上日极端高温事件将增多，极冷事件将减少。由极端气候事件造成的经济损失总体将呈增加趋势。

《科学通报》(英文版) 2012年4月

本期封面文章发表了中国科学院、清华大学等机构学者就我国湿地保护的监测和评估研究成果。作者认为，中国为了保护湿地资源，建立了湿地保护区网，但这些保护区在国家层面上的效果尚没有报告。研究利用遥感获得的1978—2008年湿地数据，对最近30年我国国家湿地保护的效果进行了估计，指出我国湿地保护区总面积过去30年减少到8152.47km²，全国91个国家级保护区中大约有79%状况令人担忧。情况较差的保护区主要位于长江流域、东部沿海、三江流域和西南地区。尽管88%的国家湿地保护区为相对原始地区，但大多数已经显现出衰退的早期警报信号，需要给予及时关注。

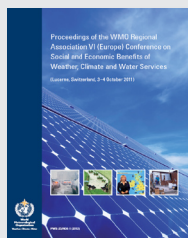


媒体扫描

MEDIA SCAN

《科学美国人》 2011年第5期

NOAA局长卢布琴科和美国国家天气局局长共同在本期杂志上发表气象科普文章“更好地监视风暴”。文章指出新技术使得龙卷和飓风预警时间延长，每年能够挽救几百人的生命。文章从强大的雷达、空中之眼(卫星)、海量数据、更好的科学与更佳决策等几个方面，阐述了气象工作者科学应对以龙卷风和飓风为代表的、常造成瞬间灾害的风暴的积极作为及其包含的科技创新内涵。期刊网页还给出NOAA应对极端天气的多媒体宣传片。

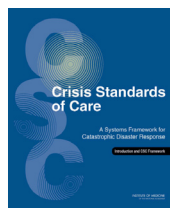


《WMO四区协(欧洲)天气、气候和水服务社会经济效益文集》 2012年

WMO四区协(RA VI)在WMO和瑞士气象部门(MeteoSwiss)的支持下，2011年10月3—4日召开了该区协同学术会议，该区协30个国家和6个研究机构以及2个UN组织的代表与会，13位特约发言人在会上介绍了最新研究进展。本文集汇集了这次会议主要成果，对于全球气象学有很好的参考价值。这次会议的文章摘要和演示文件还可以在网下载。(ftp://ftp.wmo.int/Documents/PublicWeb/dra/eur/SEB_Conf_Oct2011/presentations/)。

《风险护理标准:重大灾害应对系统框架》 2012年

美国科学院最新发表的这份报告，借用了医学护救词汇论述针对巨大灾情的系统应对。2009年H1N1病毒流行，美国卫生及公共服务部邀请医学研究所召集专家开展相关研究，提出州和地方公共健康机构应对自然和人为巨大灾情的国家指导意见。经过几年的研究，医学研究所提出了这份风险护理标准(CSC)。

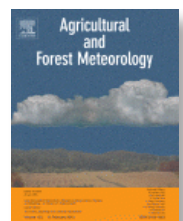


WMO《海洋气象服务手册》 2012年版

WMO以第558号出版物的方式出版了2012年版《海洋气象服务手册》，从而为进一步规范和促进海洋气象服务的国际合作提供了基础。该手册同时也提出各成员国在海洋气象服务方面的责任，以确保海洋气象服务的开展在全球和不同的区域顺利开展。手册进一步强调和加强了世界天气监测网(WWW)等基础设施对海洋气象服务的支持。这本手册包括卷I和卷II，分别论述全球和区域海洋气象服务。

《农业和林业气象》 2012年特刊

《农业和林业气象》2012年2月推出“陆气相互作用:观测、分析和模拟进展，纪念Thomas Andrew Black”专辑。读者可以在网上阅读(<http://www.sciencedirect.com/science/journal/01681923/153>)。专辑的16篇文章就主题领域的多方面进展进行了较全面评述，文章作者主要来自加拿大和美国。Black博士担任全球生物气象委员会会员达40年之久，在2010年美国气象学会第29届农业和林业气象大会上，为Black设立了通量观测和模拟专门会场，本专辑的部分论文，即是基于那次会议上的科学报告完成的。



Advances in Meteorological Science and Technology (Bimonthly)

Vol.2 No.3, June, 2012

Supervisor China Meteorological Administration (CMA)
Sponsor CMA Training Centre
Published by Editorial Office of Advances in Meteorological Science and Technology

Honorary Editor Chou Jifan

Editor-in-Chief Xu Xiaofeng

Associate Editors

Xiao Ziniu
Zhai Panmao
Luo Yunfeng
Wang Huijun
Li Weijing
Hu Yongyun
Tan Zhemin
Fei Jianfang
Guan Zhaoyong
Zhou Dingwen
Huang Jianping
Liao Xiaohan
Lü Shihua
Jia Pengqun (executive)

Managing Editors

Cheng Xiuhu, Gao Xuehao, Gong Jiandong, Guo Xueliang, Li Bai, Li Guoping, Ni Yunqi, Qu Xiaobo, Ren Guoyu, Ren Xiaobo, Shen Wenhai, Wang Weidan, Wu Bingyi, Yang Xiuqun, Yu Xiaoding, Zhang Chaolin, Zhang Peng, Zhang Qingyun, Zhao Ping

Editors

Bi Baogui, Chen Yunfeng, Chen Zhenlin, Cui Chunguang, Cui Jiangxue, Dong Wenjie, Feng Guolin, Guo Hu, He Jinhai, He Qing, Hu Xin, Hu Yurong, Hu Yuewen, Jiang Tong, Lei Xiaotu, Li Hui, Li Jiming, Li Liangfu, Li Yaohui, Li Yueqing, Liang Xudong, Liu Jingmiao, Liu Liping, Liu Shi, Lu Naimeng, Lu Riyu, Luo Bing, Luo Yali, Ma Li, Ma Shuqing, Ma Yaoming, Mao Hengqing, Peng Yinghui, Pu Yifen, Shi Guangyu, Song Yan, Tang Xu, Tian Hong, Wan Qilin, Wang Bin, Wang Donghai, Wang Jianlin, Wang Xiaoyun, Wang Yanqing, Wang Yingchun, Wang Yuan, Wang Zaizhi, Wang Zifa, Wen Min, Wen Hongtao, Wu Liguang, Xie Zhihui, Yan Guanhua, Yang Shaoming, Yao Xuexiang, Yi Lan, Zhai Wuquan, Zhang Hua, Zhang Lixiang, Zhang Xiaoling, Zhang Yuetang, Zhao Guangzhong, Zhou Lingxi, Zhou Xianxin, Zhu Dingzhen, Zhu Xiaoxiang, Zhu Yande, Zou Liyao

Overseas Editors

Chen Jingming, Li Jun, Liu Zhengyu, Jin Feifei, Wang Bin, Weng Fuzhong, Yang Song, Zhang Dalin, Zhang Guangjun, Zou Xiaolei

Editorial office

Zhang Meng, Hou Meiting, Hu Ying, Chen Zhongmei

Add: CMA Training Centre, 46 Zhongguancun Nandajie,
Beijing 100081, China
Tel: +86-10-68409927/68409933
Email: amst@cma.gov.cn
<http://library.cma.gov.cn/amst>
<http://weibo.com/2115232930/profile>

Printed by

Beijing Baochang Color Printing Limited Corporation

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

RMB 20.00

Main Contents

Message from the Editor-in-Chief

Article

- 6 Tao Zuyu et al/ Theoretical Basis of Weather Forecasting: Quasi-Geostrophic Theory Summary and Operational Applications
17 Ren Fumin et al/ Review of Progress of ENSO Studies in the Past Three Decades
25 Wang Shaowu/ Monthly-Mean Atmospheric Circulation and Climate Prediction
27 Li Ying et al/ Analysis of Autumn Rainfall Characteristics and Its Causes in West China in 2011
34 Yang Feiyun et al/ The Application Advances of Crop Models, Remote Sensing and GIS technology in Foreign Agrometeorological Service
39 Yao Xiuping et al/ Research and Operational Advance on Weather Service Benefit Assessment
45 Zou Xiaolei/ Introduction to Microwave Imager Radiance Observations from Polar-Orbiting Meteorological Satellites
51 Ji Wenbin et al/ A CDN Performance Optimization Model Based on Community of Complex Network

Forum

- 53 Zhang Jufang et al/ The Comparison and Analysis of Meteorological Disaster Films

Reading

Meeting Review

- 57 Jia Pengqun/ Atmospheric Low-Frequency Oscillation and Extended Range Forecast

Book Review

- 59 Huang Hongli et al/ Encyclopedia of Atmospheric Sciences

Information

- 33 New Publication
58 Eyes on Weather Station by Editor: Hequ, Shanxi
60 Selected Papers

History

People

- 64 Zhang Jian/ Frank Sherwood Rowland

Survey

- 2 Picture/ Number/ Ranking

Feature

- 56 Jia Pengqun/ Japan-U.S. Joint Mission Built on the Continued Success of TRMM: Dual-Frequency Precipitation Radar