

Advances

in Meteorological Science and Technology

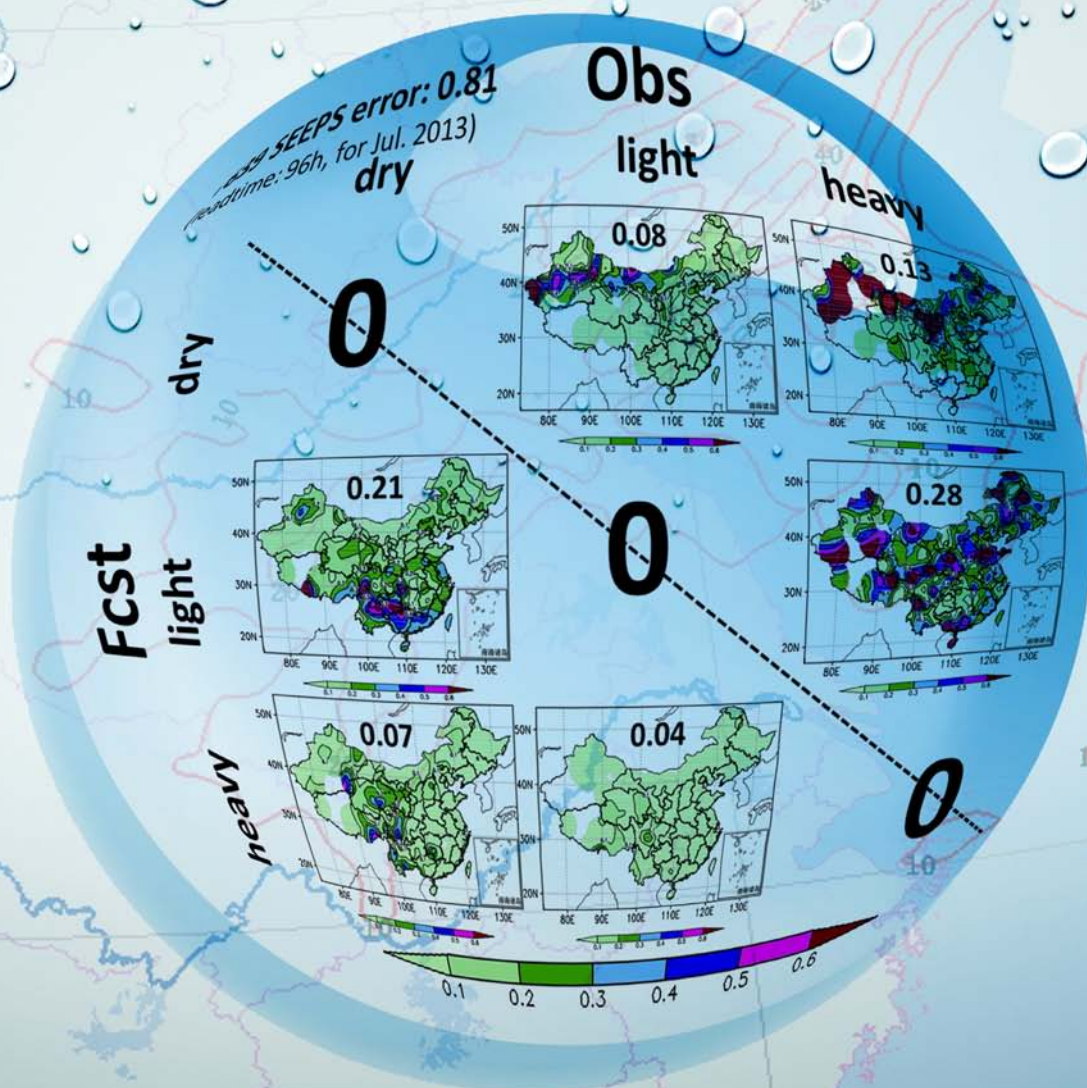
气象科技进展

ISSN 2095-1973
CN 10-1000/P

No.5

2015年10月
第5卷 第5期

定量降水预报SEEPS误差



气象科技 **进展**
Advances in Met S&T



中国气象局气象干部培训学院 主办

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

名誉主编 丑纪范 中国气象局气象干部培训学院
主编 许小峰 中国气象局

副主编

肖子牛 中国科学院大气物理研究所
翟盘茂 中国气象科学研究院
罗云峰 中国气象局
王会军 中国科学院大气物理研究所
李维京 国家气候中心
胡永云 北京大学
谈哲敏 南京大学
费建芳 解放军理工大学
管兆勇 南京信息工程大学
何建新 成都信息工程学院
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	刘晶森	刘黎平	刘 实	卢乃锰
陆日宇	罗 兵	罗亚丽	马 力	马舒庆
马耀明	毛恒青	彭莹辉	浦一芬	石广玉
宋 燕	汤 绪	田 红	万齐林	王 斌
王东海	王建林	王晓云	王延青	王迎春
王 元	王在志	王自发	温 敏	文洪涛
吴立广	谢志辉	闫冠华	杨 崧	杨昭明
姚学祥	伊 兰	翟武全	张 华	张立祥
张小玲	张跃堂	赵广忠	周定文	周凌晔
周显信	朱定真	朱小祥	祝燕德	邹立尧

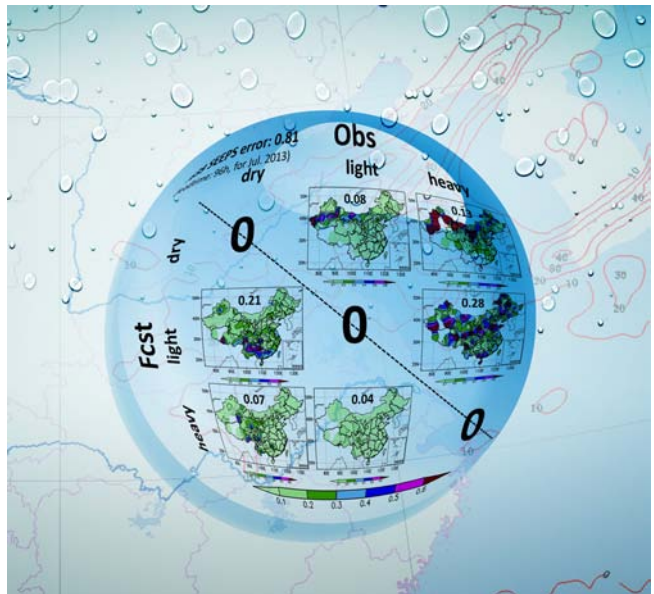
海外编委 (按音序排名)

陈镜明	李 俊	刘征宇	金飞飞	王 斌
翁富忠	张大林	张广俊	邹晓蕾	

编辑部

张 萌 侯美亭 秦莲霞 冀文彬 陈忠美
地址: 北京市中关村南大街46号,
中国气象局气象干部培训学院 100081
电话: (010) 68409927/68409933
邮箱: amst@cma.gov.cn
Notes: 气象科技进展编辑部/图书馆/干部学院/CMA
网址: <http://library.cma.gov.cn/amst>
官方微博: <http://weibo.com/2115232930/profile>
印刷: 北京金吉士印刷有限责任公司

ISSN 2095-1973
CN 10-1000/P
定价: 30元



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

目 次

第5卷 第5期 2015年10月

1 许小峰: 主编语

研究论文

封面报道

6 陈法敬, 陈静: “SEEPS”降水预报检验评分方法在我国降水预报中的应用试验

研究进展

14 赵俊虎, 周杰, 叶天舒, 杨柳, 封国林: 2013年夏季中国北涝南旱环境场及异常成因分析

24 钱恺, 刘锦丽, 毕永恒, 韩永, 吕达仁: 高时空分辨率观测资料对两次夏季北京暴雨的特征分析

33 沈越婷, 钱传海, 李泽椿, 范广洲: 热带气旋集合预报技术的应用情况简介

43 黄泓, 王学忠, 姜勇强, 陈中一: 热带气旋尺度涡旋对非对称热力扰动演变的影响

专题 水文气象

50 孙大利, 刘晓阳, 王久珂, 何思远: 雨量站网测量精度的评估

主编语

降水是气象预报中最受关注的要素之一,如何科学、合理地评估定量降水的预报误差,是实现降水预报产品改进、订正的基础工作之一。传统的降水检验评分方法需要首先划分降水等级,以此为依据,评判预报与实况的一致性。若是在不同气候区域,当同一量级的降水发生概率相差较为悬殊时,这样的评分结果在合理性上就存在缺陷了,不同气候区域的预报结果难以相互比较。2010年,欧洲中期天气预报中心提出了一种新的降水检验方法——“概率空间中的稳定公平误差(SEEPS)”方法,该方法以降水概率为基础进行降水分类,较好地克服了降水检验中分类较多和受气候特征影响的问题。本期主打文章(P6)将SEEPS方法应用到中国区域降水的预报检验中,对中央气象台的定量降水预报进行了评估试验。作者还通过与传统检验评分进行对比分析,阐述了SEEPS的优势及在我国的应用中需要面对的一些问题。这样的分析和考量,加上本期推出“水文气象”专题最后一篇文章(P50)探讨雨量站网的测量精度以便于雨量站的规划和布局优化,相信读者会从中受到启发。

随着全球变暖,降水预报也面临着降水分布发生改变、旱涝异常等“新常态”带来的更大挑战。20世纪80年代后,中国夏季频繁出现南涝北旱,而北涝南旱相对较少,但2012和2013年却连续出现了典型的北涝南旱,对其成因的深究(P14)可为未来的长期预测提供依据。2011年6月23日和2012年7月21日发生在北京地区的两次大暴雨让人记忆犹新,测雨雷达、测云雷达、风廓线雷达等高时空分辨率观测资料的应用为深入分析强天气系统的特征提供了便利(P24),如何利用好各种先进

的探测技术手段和获取的信息,准确预报高影响天气,提高预报时效,还有待于气象科技人员持续的探索和努力。数值天气预报是现代天气业务的主要方法,随着数值预报技术的发展,热带气旋(TC)预报业务,特别是全球TC路径预报在近20年间取得了长足进展。本期文章(P33)概述了ECMWF、NCEP、JMA和CMA等全球主要数值预报中心的TC集合预报技术,展望了未来TC集合预报的发展和应用趋势。相比,尽管TC路径预报水平得到了很大提高,但对TC强度和结构变化的研究进展相对缓慢,而深入理解控制TC强度变化的动力机制(P43)将有助于这方面的研究。

当前,我国服务业的开放和社会化进程的推进明显加快,在理解气象服务面临的市场竞争前,需要先考量气象服务的市场存量到底如何,本期“论坛”文章(P66)通过对地市气象局长的问卷调查,估计了中国基层气象服务市场的潜在规模。若想培育、拓展未来更大的气象市场空间,还需要更有力的政策支持,包括气象卫星资料(P63)在内的气象数据的开放,应该走在前面。

气象事业的发展,离不开数学、物理、化学等基础学科的支持。当我们向前展望,酝酿、探索未来的进步与创新时,对基础理论经典文献的“回望”,仍具有其拓展视野、启发思考的价值。本期开始在“阅读”栏目向读者介绍选自北京大学出版社历时多年出版的“科学元典”丛书中的部分经典。感谢气象干部培训学院的叶梦姝老师主持这个栏目并撰写了第一篇文章。

许小峰

专题 基层现代化

- 55 崔胜权, 梁寒, 李爽: 辽宁强对流天气物理量阈值探索统计分析

短论

- 60 张梅: 自动气象站异常记录分析及处理方法

论坛

- 63 成伟玲, 咸迪: 风云气象卫星在产品应用中前行
66 何海鹰: 中国基层气象服务市场规模估计
——基于地市级气象局局长调查问卷进行的分析

科学观察

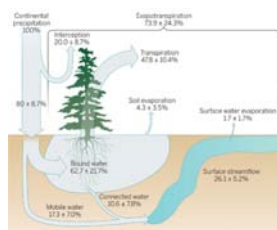
- 2 读图 数字 榜单

往事钩沉

事件

- 71 气象史料挖掘与研究工程项目组: 国民政府时期空军的气象教育培训

P4



阅读

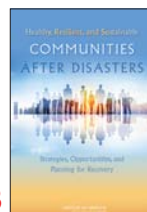
书评

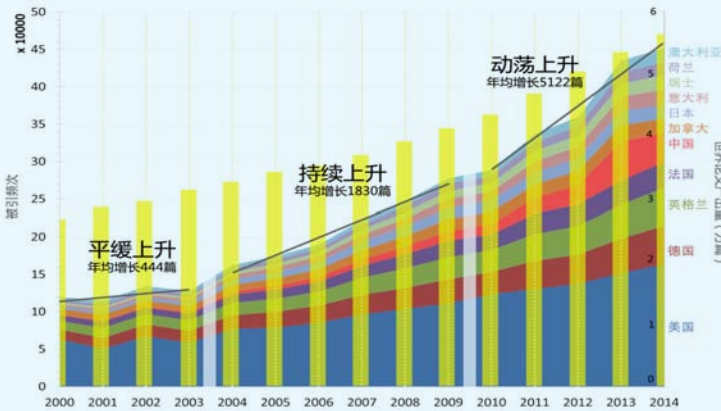
- 68 叶梦姝: 从气象爱好者到科学原子论之父——读道尔顿《化学哲学新体系》有感
69 张泓波: 气候变化研究的重要视角——《成本效益分析杂志》“气候变化”专辑评介

信息

- 42 追赶和特色: 第32届中国气象学会年会及S21分会场侧记
59 新书架
67 Nature杂志关注NWP
75 编辑选编
79 涓流细雨
80 第80页评刊
封3 媒体扫描

封3





全球大气科学论文引用频次：“三段式”提升

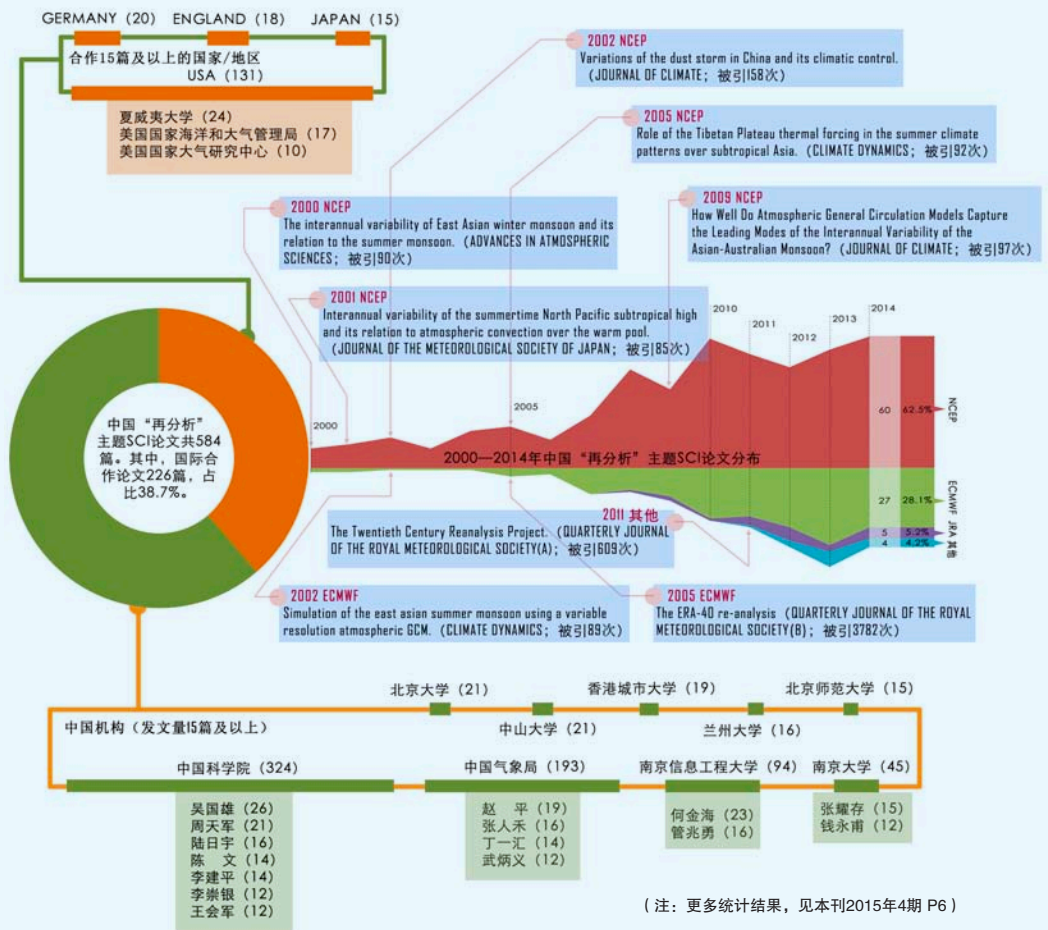
统计给出2000—2014年全球大气科学论文产出（黄色柱，右侧坐标）和被引总数超过2万次的11个国家论文被引情况（左侧坐标）。15年里，被引频次从每年10万篇次左右，经过3个台阶跳跃，达到每年被引超过45万篇次。

来源：本刊

再分析研究——中国研究论文持续增加

对2000—2014年“再分析”主题中国SCI论文的统计表明，15年的发文量达到584篇，其中国际合作论文占38.7%。中国学者最关注的是NCEP再分析数据（分布中红色区域），其次为ECMWF（绿色区域）和JRA（粉色区域）再分析数据。中国科学院、中国气象局和7所高校发文量在15篇以上，一些团队和学者具有很高的论文产出力和影响力（图中按照发表时间和涉及的再分析库，标记给出前8篇高影响论文和被引用次数）。

来源：本刊



数字

44亿吨

一项最新的研究表明，2011年全球海洋吸收了44亿吨二氧化碳，这一数值比当年人类活动的释放量多出10%，也是10年前吸收能力的两倍。

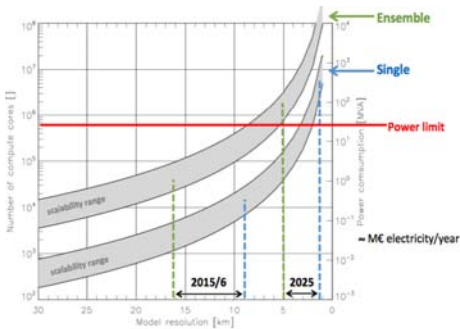
2.5万欧元

2015年9月两年1次的哈利欧登(The Harry Otten)气象创新奖(2.5万欧元)颁发给提出利用飞机凝结痕迹观测大气风和湿度思想的法国国家科学研究中心的Olivier Boucher。

26%~28%

澳大利亚政府8月11日宣布，在2030年之前，其温室气体排在2005年基础上减少26%~28%，这也是巴黎峰会前最后一个做出减排承诺的国家。

国际“降水预报检验”主题被引频次最高的前10篇论文



Scalability问题：未来数值天气预报无法回避

欧洲中期天气预报中心（ECMWF）学者最近在美国做的一个学术报告中，指出了Scalability（可扩展性、可伸缩性）问题。该中心集合预报和单模式预报随着模式分辨率的提高，将在10年左右后接近和超过中心能耗极值。作者结合该中心预报系统（IFS）向OOPS（Object Oriented Programming System，面向目标程序设计项目）的转化，给出了应对战略和建议。

来源：ECMWF

序号	题名	第一作者	来源	被引频次
1	Interpretation of rank histograms for verifying ensemble forecasts	Hamill, TM	Monthly Weather Review,2001,129(3)	266
2	Verification of eta-RSM short-range ensemble forecasts	Hamill, TM	Monthly Weather Review,1997,125(6)	204
3	Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events	Roberts, NM	Monthly Weather Review,2008,136(1)	162
4	Calibrated probabilistic forecasting using ensemble model output statistics and minimum CRPS estimation	Gneiting, T	Monthly Weather Review,2005,133(5)	155
5	Evaluation of 33 years of quantitative precipitation forecasting at the NMC	Olson, DA	Weather and Forecasting,1995,10(3)	140
6	Experiences with 0-36-h explicit convective forecasts with the WRF-ARW model	Weisman, ML	Weather and Forecasting,2008,23(3)	127
7	Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: Methodology and application to mesoscale rain areas	Davis, C	Monthly Weather Review,2006,134(7)	126
8	Evaluation of MM5 and Eta-10 precipitation forecasts over the Pacific northwest during the cool season	Colle, BA	Weather and Forecasting,1999,14(2)	126
9	Aspects of effective mesoscale, short-range ensemble forecasting	Eckel, FA	Weather and Forecasting,2005,20(3)	115
10	Initial results of a mesoscale short-range ensemble forecasting system over the Pacific Northwest	Grimit, EP	Weather and Forecasting,2002,17(2)	111

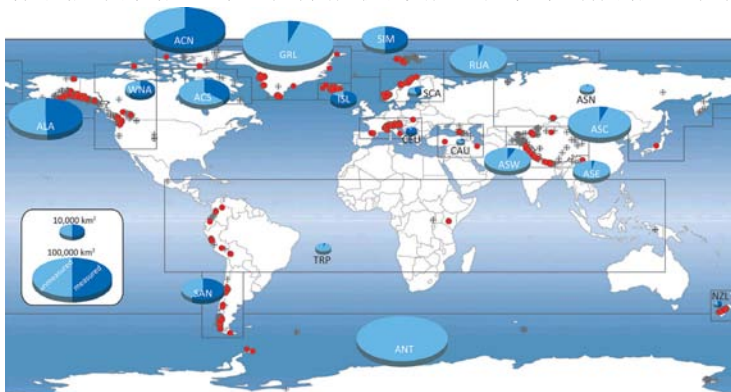
来源：SCI-E数据库，检索时间：2015年7月16日

李婧华提供

21世纪初全球冰川空前快速萎缩

世界冰川监测组织最新发表的报告，通过对16世纪以来4.7万个以上观测记录的分析发现，当前冰川退化的速度几乎是20世纪后期的2倍。图中给出19个区域冰川面积和变化记录，其中，饼图给出区域冰川面积（不包括格陵兰和南极冰盖）和已有观测覆盖比例，连续和间断观测记录点分别用红点和黑色十字表示）。19个区域为：(1) 阿拉斯加 (ALA)；(2) 西北美洲 (WNA)；(3) 北极加拿大北部 (ACN)；(4) 北极加拿大南部 (ACS)；(5) 格陵兰 (GRL)；(6) 冰岛 (ISL)；(7) 斯瓦尔巴和扬马延 (SJM)；(8) 斯堪的纳维亚 (SCA)；(9) 俄罗斯北极 (RUA)；(10) 亚洲北部 (ASN)；(11) 中部欧洲 (CEU)；(12) 高加索和中东 (CAU)；(13) 中亚 (ASC)；(14) 东南亚 (ASE)；(15) 西南亚 (ASW)；(16) 低纬 (TRP)；(17) 南安第斯 (SAN)；(18) 新西兰 (NZL)；(19) 南极和亚南极岛屿 (ANT)。

来源：Journal of Glaciology



10分钟

澳大利亚气象局在湿季开始前，基于日本葵花-8卫星信息，将卫星天气信息的更新时间调整为10分钟，与雷达信息更新周期一致。

3万亿株

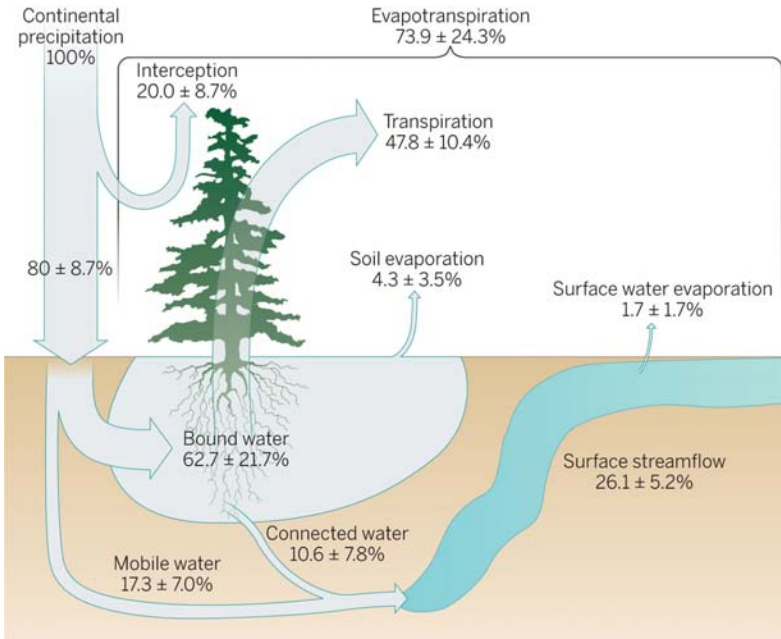
世界上除南极洲以外树木数量估计为3万亿株，地球上每人拥有422颗树木。而人类砍伐树木的数量每年超过了150亿株。

350万公顷

今年以来美国发生的大约4.5万次林火，过火面积达到350万公顷以上，导致数百住宅被毁，至少4人死亡。

50亿千瓦

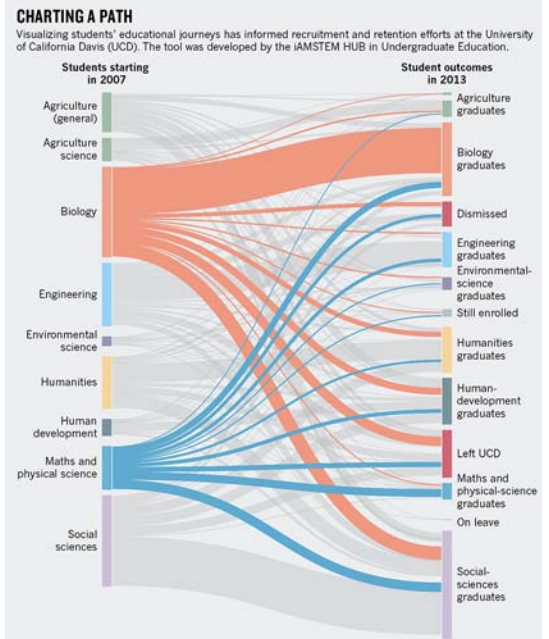
中国气象局风能太阳能资源中心完成的新一轮全国风能资源评估表明，我国陆地70米高空的风能可开发量为50亿千瓦。



量化全球水循环

在大气、陆地和海洋之间每年发生多少水交换？美国多所大学学者利用NASA的Aura卫星上的对流层辐射分光计（TES）高分辨氢原子水同位素资料给出了回答。他们利用卫星数据及其他各种数据源，估算给出全球植物蒸发、径流和蒸发等通量值。

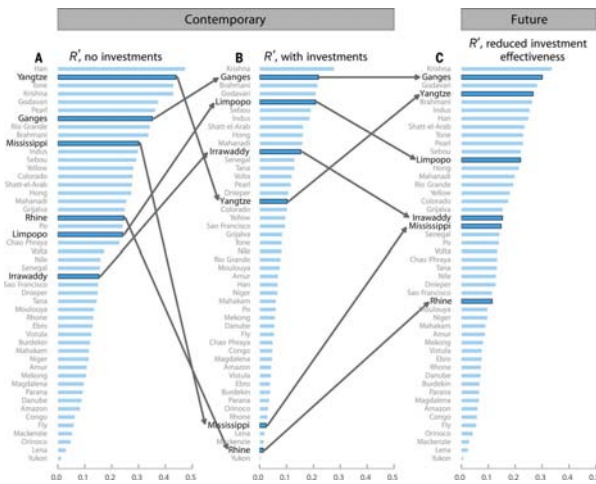
来源: Science



学科交叉：科学交汇的第一步？

在《自然》杂志最近组织的“培养21世纪科学家”教育专栏的文章中，给出了加州大学2007年不同专业入学学生在2013年从事行业之间的转化关系图。其中，在两个时间点都占比例很小的“环境科学”学科，学生走向和学科人才背景的“发散”趋势与其他学科几乎是一样的。

来源: Nature



全球三角洲：风险之地

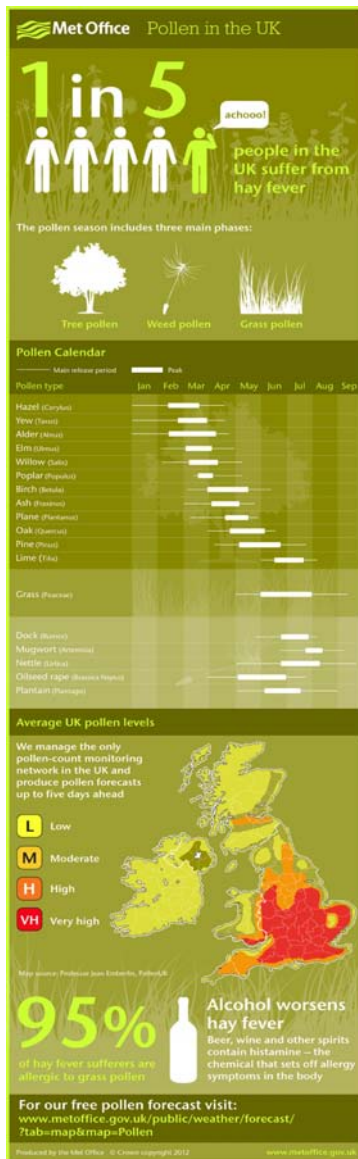
美国学者一项针对全球48个主要沿海三角洲灾害风险的研究和对所有三角洲当前和未来灾害风险的排名表明，这些目前总共居住着3.4亿人口的区域，其脆弱性的改变，较多地依赖于投资。因此，发展中国家三角洲地区未来面对洪涝等灾害的巨大风险，值得警惕。

来源: Science

数字 **36.7°C** 2015年英国在经历了平静的春天后，6月底开始出现持续高温天气，7月1日伦敦希思罗机场观测到36.7°C高温，是有记录以来英国最热的7月温度记录。

7个 欧洲中期天气预报中心日前宣布，包括中国气象局在内的7个预报中心（BoM, CMA, ECMWF, JMA, MeteoFrance, NCEP和Rushydromet）的数据已经可以通过其S2S数据端口获取。

1.1%~3.0% 一项针对美国电力供给和气候变化的研究表明，当出现10年连续干旱时，美国脆弱电站（目前占46%）的夏季发电能力下降1.1%~3.0%，最多达7.2%~8.8%。



健康出行：躲开花粉

在英国，每5个人就有1人患花粉病，对这些人来说，英国气象局（UKMO）提供的针对不同类型花粉的预报信息，就成为出行前必须获取的重要信息。

来源：UKMO

中国“降水预报检验”主题被引频次最高的前15篇论文

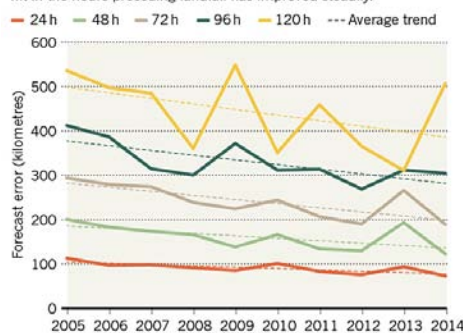
序号	题名	第一作者	来源	被引频次
1	区域气候模式对东亚季风和中国降水的多年模拟与性能检验	李巧萍	气象学报,2004/02	120
2	2004年主汛期各数值预报模式定量降水预报评估	王雨	应用气象学报,2006/03	58
3	GRAPES中尺度模式对2005年长江流域重大灾害性降水天气过程预报性能的检验分析	叶成志	热带气象学报,2006/04	54
4	2002年主汛期国家气象中心主客观降水预报对比检验	王雨	气象,2003/05	49
5	2002—2005年T213数值降水预报产品分析检验	管成功	气象,2006/08	47
6	区域气候模式对中国夏季降水的10年回报试验及其评估分析	刘一鸣	应用气象学报,2005/S1	47
7	数值预报产品和客观预报方法预报能力检验	张建海	气象,2006/02	45
8	降水检验方案变化对降水检验评估效果的影响分析	王雨	气象,2007/12	39
9	基于TIGGE资料的流域概率性降水预报评估	赵琳娜	气象,2010/07	27
10	2004年汛期(5~9月)主客观降水预报检验	王雨	热带气象学报,2006/04	27
11	GRAPES_Meso模式的降水格点检验和站点检验分析	熊秋芬	气象,2011/02	24
12	AREM短期集合预报系统及其降水预报检验	李俊	暴雨灾害,2010/01	26
13	2007年汛期AREM模式降水预报效果检验分析	公颖	暴雨灾害,2007/04	25
14	MM5中尺度非静力模式对云南省降水预报检验	许美玲	气象,2002/12	24
15	T639模式对2008年长江流域重大灾害性降水天气过程预报性能的检验分析	周慧	气象,2010/09	23

来源：CAJD数据库，检索时间：2015年9月20日

李靖华提供

IMPROVING HURRICANE PREDICTION

NOAA's ability to predict where a hurricane in the Atlantic basin will hit in the hours preceding landfall has improved steadily.



飓风“卡特里娜”：10年后的进展

2005年袭击美国的“卡特里娜”飓风已经过去10年，10年里美国飓风路径预报获得了持续的改进，其中更具有意义的提前2天（48h）飓风登陆点预报误差，从2005年的204km，提高到2014年的120km。

来源：National Hurricane Center

91.2分

上海市发展研究中心针对上海市气象现代化的中期评估报告，给出了上海气象现代化的得分91.2分的高分。

441万km²

2015年夏季，北极海冰范围减少到441万km²，这是1979年有卫星观测以来的第4个北极海冰范围最少值。

73%

美国皮尤研究中心的一项调查表明，73%的美国公民能够分清占星术与天文学之间的区别所在。

3倍

目前，化石燃料二氧化碳排放量的70%发生在城市地区，到2030年全球城市区域将扩大3倍，城市减排因此非常迫切。

“SEEPS” 降水预报检验评分方法在我国降水预报中的应用试验

陈法敬 陈静

(国家气象中心, 北京 100081)

摘要: 介绍了国际上一种新的降水检验方法——概率空间中的稳定公平误差 (stable equitable error in probability space, SEEPS) 的原理、计算方法和误差特征, 并应用于我国定量降水预报检验进行评估试验。SEEPS方法在评分意义、降水分类、评分计算及评分应用等方面, 比传统检验评分更加灵活, 具有更清晰的实际意义。利用两个降水概率阈值, SEEPS方法将降水气候概率分布划分为“干”、“小雨”、“大雨”三类; 该方法基于降水概率计算误差矩阵, 根据站点分布密度计算区域平均评分权重系数。SEEPS在不同降水概率下具有不同的误差评分特征, 使其能够自动适应不同的降水气候。SEEPS不仅可以定量化给出降水预报能力的高低, 还可以通过分析不同观测和预报分类组合的误差评分, 给出造成评分高低的成因。利用2007年3月—2013年12月24h累积降水逐日观测资料, 对中央气象台预报员定量降水预报进行了SEEPS检验试验, 并与传统的检验评分进行比较。结果表明: 预报员定量降水预报的误差主要来源为两类——预报“小雨”对观测“大雨”的漏报和预报“小雨”对观测“干”类型的空报, 合计占到了总误差的近七成; 前者说明预报员降水预报量级较实际降水偏小, 后者说明预报员对“小雨”的大范围、高频率空报也可以导致总体预报效果的明显下降。SEEPS方法对降水预报能力的评估结论与传统检验评分总体相当, 但SEEPS检验指标更简单直接, 便于管理层和决策层面使用, 具有较好的推广应用价值。

关键词: 降水预报, 检验方法, SEEPS, 概率检验

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.05.001

The Application Experiment of a New Score for Precipitation Verification Based on the SEEPS Principle

Chen Fajing, Chen Jing

(National Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract: The principles, computation and error characteristics of a new method newly developed internationally for precipitation verification, i.e., SEEPS (Stable Equitable Error in Probability Space), are briefly introduced in this paper. With regard to score meaning, precipitation classification, score calculation and application, SEEPS is more flexible and has clearer practical meaning than traditional verification scores. The SEEPS method is applied in the verification and assessment experiment for quantitative precipitation forecasts in China region, and some issues encountered in the application are talked about. Climatic precipitation probability distribution is divided into three classifications, ‘dry’, ‘light’ and ‘heavy’ by two thresholds in SEEPS. Error matrices are determined by the precipitation probability. Area mean is weighed based on the station density. Possessing different error score characteristics under varying precipitation probabilities makes SEEPS automatically adapt to various kinds of precipitation climate. The ability of precipitation forecasts is quantified by the SEEPS values, and different elements of SEEPS can also be analyzed to find the reason why the SEEPS score is high or low. Daily observations of 24-hour accumulated precipitation from Mar. 2007 to Dec. 2013 are used in the SEEPS verification test for quantitative precipitation forecasts (QPF) of forecasters in the National Meteorological Center of CMA. Results show that the two main categories of forecasters’ QPF errors are misses of heavy precipitation with light precipitation forecasts, and false alarms of “dry” with light precipitation forecasts. These two kinds of errors account for about 70 percent of all errors. The former explains the order of forecast precipitation is lower than observations and the latter states that false alarms with large areas and high frequencies can also obviously deteriorate the whole forecast performance. Conclusions of SEEPS are approximately equivalent to those of traditional verification scores. But the SEEPS score is simpler and more suitable for use in management and decision making, and has more value for popularization and application.

Keywords: precipitation forecast, verification method, SEEPS, probabilistic verification

收稿日期: 2014年1月4日; 修回日期: 2014年6月24日
通信作者: 陈静 (1966—), E-mail: chenjing@cma.gov.cn
资助信息: 中国气象局关键技术集成与应用项目 (CMAGJ2014Z03);
国家自然科学基金项目 (41075035); 中国气象局新技术推广项目 (CMAGJ2012Z01); 科技部国家科技支撑计划 (2009BAC51B00); 国家重点基础研究发展计划 (2012CB417204); 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY200906007)

0 引言

定量降水是气象预报中最受关注的气象预报要素, 如何评估定量降水预报准确率, 从理论到实践均处于不断的发展、改进之中。目前, 业务降水预报检验主要分为预报员主观降水检验和客观统计降水检验两类。主观检验主要以单站降水观测为基础, 对比分析降水预报的时间、落区与强度误差等, 并分析其成因^[1]。这种降水检验方法直观, 但不便于总体上客观、定量地评价降水预报能力。客观方法主要基于二分类事件[事件发生或不发生, 即(0, 1)事件]的传统检验评分方法, 采用列联表给出统计评分。这类降水检验方法, 可以从多个角度、不同量级检验、评估降水预报性能^[2-6], 但同样不能单独给出代表降水预报整体性能的一个定量指标。

近年来, 国际上新发展了多种降水预报检验方法。Ebert^[7]研究了模糊检验, 该方法不追求预报与观测在位置上的精确匹配, 利用一个滑动的某一尺度的窗口, 对落在该区域中的所有降水观测与预报进行统计, 优点是插值问题就不再存在, 允许预报存在一定的空间位置偏差。新兴起的空间检验方法也获得了广泛的研究与应用^[8], 如Davis等^[9-11]研究的MODE方法, 通过获取观测与预报的降水落区形状, 计算两者空间位置、面积和轴向等要素的差异, 该方法是主观天气学检验的客观量化。此外, 国际上还新发展了一些与决策、经济价值相关联的预报检验方法^[12], 及针对极端降水等小概率事件的检验方法^[13]。

一般说来, 业务检验评分倾向于应用简单、客观的指标, 而且是越简单越好。由于传统的降水检验评分需要划分降水等级, 不便于评估比较不同气候区域特征的降水预报性能, 2010年欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的Rodwell等^[14]研究了一种新的降水检验方法——概率空间中的稳定公平误差(stable equitable error in probability space, SEEPS), 以克服降水检验中分类较多及受气候特征影响大的问题。传统分量级统计检验中, 不同量级检验结果不一致时, 就难以确定总体检验结果的好坏。在不同气候区域, 同一量级的降水发生概率相差较为悬殊时, 传统的统计检验评分就不适合进行相互比较。SEEPS方法结果是一个综合评分, 其降水分类以降水概率为基础进行划分。相比传统检验评分, SEEPS方法更好地处理了上述两种情况。2012年, Haiden等^[15]利用SEEP方法, 评估了ECMWF、英国气象局(UKMO), 美国环境预报中心(NCEP)、日本气象厅(JMA)和加拿大气象局(CMC)等五个国家和地区的数值

预报模式1~10d的降水预报性能, 通过与传统降水检验方法进行对比, 分析了不同模式降水预报能力的差异。在对降水预报的检验中, 与传统二分类降水检验方法相比, 基于降水气候概率的降水检验新方法SEEPS具有一些明显不同的特征。2011年世界气象组织(WMO)在第十六届大会上, 确定ECMWF作为确定性数值预报检验领导中心(Lead Centre for Deterministic Forecast Verification, LC-DNV), 制定了确定性数值预报检验的一套标准评分的制作与交换流程, 确保不同中心数值预报产品的检验信息的一致性。现在SEEPS降水检验方法已在LC-DNV中获得业务应用, 可对ECMWF、UKMO、NCEP和JMA等四个数值预报中心全球数值模式的24h累积降水预报分区检验, 检验结果通过ECMWF的网页([http://apps.ecmwf.int/wmolcdnv/scores/surface.mean\(tp\)](http://apps.ecmwf.int/wmolcdnv/scores/surface.mean(tp)))查询显示。

在评分意义上, 传统二分类检验方法, 包括TS/ETS评分、预报偏差(Bias)、空报率、漏报率等, 是利用某一降水量级上降水分类列联表的四类观测—预报情况的站点数 a 、 b 、 c 、 d , 近似代表四类观测—预报情况面积, 构成评分指标, 以此来考察预报某一方面的性能^[2]。首先, 这类评分指标依赖于站点的分布状况; 高站点密度的区域, 可能会主导整个评分。其次, 这类评分的计算形式, 致使其逐日评分的时间均值, 与利用整段时间内的检验样本计算获得的评分并不相等。因此, 不同的评分计算方式可能会得到两种不同的检验结论。SEEPS方法不同于此, 它是基于降水气候概率, 在概率空间中将降水分为三类, 并对降水分类 3×3 列联表中不同观测—预报情况给予不同的SEEPS误差评分, 计算概率空间中基于降水气候概率的预报误差。SEEPS评分的时间均值与该时间段内的SEEPS评分是一致的, 并且与区域平均计算的先后顺序无关。通过降低高站点密度区域的站点权重, 以避免高站点密度区域主导区域平均SEEPS评分。

在评分计算上, 传统二分类检验方法需要对降水量级分级(一般分为小雨、中雨、大雨、暴雨和特大暴雨五级), 计算降水分类 2×2 列联表中的四类观测—预报情况站点数, 由此计算各检验评分。SEEPS检验方法中, 也对降水进行了分类(“干”、“小雨”、“大雨”), 但依据是降水气候概率, 对降水分类 3×3 列联表中不同观测—预报分类给予不同的SEEPS误差评分, 由此获得一个可以代表降水预报整体性能的单—评分。

在评分应用上, 判断和评估一种降水预报的整体性能时, 若利用传统检验评分, 需要综合不同量级上

的不同检验评分，做出一个定性的、描述性的预报检验结论。经常遇到下面的两种情况，两种预报的同一传统检验评分（如TS评分）在不同降水量级上的大小次序是相反的；同一降水量级上，两类不同的传统检验评分（如空报率与漏报率）检验结果相反（如漏报率低、空报率高的预报）。利用SEEPS检验方法获得的是单一检验评分，可以直接定量地给出不同降水预报整体预报能力的差异，这对于一些依赖于预报性能判断、评价的决策是很方便的。同时，通过分析构成SEEPS误差评分及观测—预报列联表的九个元素，可以判断、理解观测—预报的九个不同分类对SEEPS误差的贡献，显示预报中存在的主要缺陷，为改进预报性能提供指导信息。

本文将SEEPS方法应用到中国区域降水预报检验中，简要介绍SEEPS方法的原理，对中央气象台预报员2007—2013年的定量降水预报进行了评估试验，并与传统检验评分进行对比分析，对SEEPS应用中存在的问题进行了讨论。

1 SEEPS评分原理及计算方案简介

1.1 基于概率分布特征的降水分类方法

将某一站点降水按其气候概率分布特征划分为“干”、“小雨”、“大雨”三类，定义其概率分别为 P_1 、 P_2 和 P_3 ，三类降水概率满足条件： $P_1+P_2+P_3=1$ ，设 P_1 定义为24h累积降水 $\leq 0.2\text{mm}$ 的累积概率，“小雨”降水概率 P_2 为“大雨”降水概率 P_3 的两倍，即 $P_2=2P_3$ 。当“干”的气候概率 P_1 确定后，小雨和大雨的概率值也就随之确定。按概率进行分类，可以减小观测降水样本的异常值影响，降低对降水观测样本的质量控制要求。

设降水观测与预报分别为 v 和 f ，对“干”、“小雨”和“大雨”三类降水事件，定义一个 3×3 列联表，如表1所示。该列联表为降水观测与预报的二维离散概率分布，代表SEEPS检验方法的降水类别及预报特征。若是“完美预报”，则列联表对角线元素之和为1： $P_{11}+P_{22}+P_{33}=1$ ，非对角线元素均为0；若是无技巧的随机预报，则降水观测的条件概率分布 $P(v|f)$ 与边缘分布 $P(v)$ 相同，与参数 f 无关；即 $P(v|f=1)=P(v|f=2)=P(v|f=3)=P(v)$ 。

表1 SEEPS检验方法的降水分类预报与观测 3×3 列联表

		观测			
		概率	P_1	P_2	P_3
预报	f	Cat	1	2	3
	1	P_{11}	P_{12}	P_{13}	
	2	P_{21}	P_{22}	P_{23}	
	3	P_{31}	P_{32}	P_{33}	

1.2 SEEPS方法原理简介

Gandin等^[16]定义了一个高效的检验评分，如下：

$$S = \sum_{f,v} P_{fv} S_{fv} \quad (1)$$

式中， P_{fv} 为降水预报 f 与观测 v 的二维离散概率分布， S_{fv} 是对应的评分矩阵。记无技巧预报的评分为 S_C ，“完美预报”评分为 S_P 。若要评分是“公平的”，则式（1）需要满足条件：

$$\text{Perfect FC: } \sum_v P_v S_{vv} = S_P \quad (2)$$

$$\text{Constant FC: } \sum_v P_v S_{fv} = S_C \quad \forall f \quad (3)$$

式中， P_v 为降水观测 v 离散形式的概率分布。

Rodwell等^[14]基于Gandin等^[16]的研究，将降水预报检验评分SEEPS定义为概率空间中预报误差的一种度量，满足式（2）和（3），且 $S_C=1$ ， $S_P=0$ 。SEEPS值域期望为 $[0,1]$ ，1代表无技巧预报，0代表“完美预报”。定义SEEPS技巧评分为 $1-SEEPS$ 。在保证能够具有足够的检验评估能力的前提下，需要将SEEPS评分对抽样不确定性的敏感性最小化。为此，SEEPS还需满足限制条件：

$$\text{Strong Perfect FC: } S_{vv} = 0 \quad \forall v \quad (4)$$

这个限制条件可以使一个“完美预报”的SEEPS评分不仅期望为0，且任一有限样本的平均值也为0。

1.3 SEEPS误差矩阵数学模型

Rodwell等^[14]设计了式（1）中预报误差评分 S_{fv} 的一种结构：

$$S_{fv} = \begin{cases} |f-v|a + \delta_{if}(c-a), & v > f \\ |f-v|b + \delta_{vi}(d-b), & v < f \\ 0, & v = f \end{cases} \quad (5)$$

式中， a 、 b 、 c 和 d 为正值。若 $i=j$ ，则 $\delta_{ij}=1$ ；若 $i \neq j$ ，则 $\delta_{ij}=0$ 。已经证明，若要此误差评分结构满足常量预报限制条件式（3），则需要分类 $n \leq 3$ 。为获得更高的检验分辨能力，选定SEEPS的降水分类数目 n 为3。3分类误差评分的结构形式如表2所示。

表2 SEEPS 3×3 误差评分矩阵结构^[14]

		观测			
		概率	P_1	P_2	P_3
预报	f	Cat	1	2	3
	1	0	c	$c+a$	
	2	d	0	a	
	3	$d+b$	b	0	

除限制条件式（4）之外，式（2）和式（3）可以写为：

$$\text{Perfect FC: } \sum_v P_v S_{vv} = 0 \quad (6)$$

$$\text{Constant FC: } \sum_v P_v S_{fv} = 1 \quad \forall f \quad (7)$$

利用限制条件式(4)、(6)和(7),可由式(5)获得关系式:

$$\begin{aligned} b &= \frac{P_3 a}{1 - P_3} \\ c &= \frac{1 - P_3 a}{1 - P_1} \\ d &= \frac{1 - P_3 a}{P_1} \end{aligned} \quad (8)$$

此外,考虑一种极限情况以确定 a 的取值。假设存在某种预报,总是能正确预报“干”和“小雨”(或“小雨”和“大雨”),但观测为“大雨”(或“干”)时,却总是预报为“小雨”。由表2误差评分结构可知这两类预报误差评分底限是 $\min(p_3 a, 1 - p_3 a)$ 。当 $a=1/(2p_3)$ 时,评分底限取极大值0.5。 a 取此值,可以奖励预报所有可能出现的结果,而不是只预报发生频率高的分类。

由 $a=1/(2p_3)$ 和关系式(8),以及 $P_1+P_2+P_3=1$, $P_2=2P_3$,可以获得以降水分类“干”的概率 P_1 表达的SEEPS误差评分矩阵:

$$S_{fv} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{1-P_1} & \frac{4}{1-P_1} \\ \frac{1}{P_1} & 0 & \frac{3}{1-P_1} \\ \frac{1}{P_1} + \frac{3}{2+P_1} & \frac{3}{2+P_1} & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

由(9)式可以看到,SEEPS误差评分矩阵由 P_1 唯一确定。在不同气候区域,“干”的概率值 P_1 差别很大,误差评分矩阵差异也很大,见表3。

表3 SEEPS误差评分矩阵(潮湿气候 $P_1=0.1$,干旱气候 $P_1=0.85$)^[14]

	观测		
	“干”	“小雨”	“大雨”
概率	0.10	0.60	0.30
“干”	0.00	0.56	2.22
“小雨”	5.00	0.00	1.67
“大雨”	5.71	0.71	0.00
概率	0.50	0.33	0.17
“干”	0.00	1.00	4.00
“小雨”	1.00	0.00	3.00
“大雨”	1.60	0.60	0.00
概率	0.85	0.10	0.05
“干”	0.00	3.33	13.33
“小雨”	0.59	0.00	10.00
“大雨”	1.11	0.53	0.00

从表3中可见,对于多雨气候区, P_1 较小,SEEPS误差评分矩阵的下三角元素(对应“干”的漏报)较大;对于干旱气候区域, P_1 较大,SEEPS误差评分矩阵的上三角元素(对应“大雨”的漏报)较大。这说明基于降水发生概率($1-P_1$)的SEEPS误差评分矩阵随不同气候区域或降水季节而变;因此SEEPS的突出特点是对不同气候区域或降水季节的同一预报特征(如对“大雨”的漏报)具有不同的误差评分,即对预报误差的“惩罚”与降水气候概率相关,故SEEPS可自动适应不同气候区域或降水季节的站点降水概率,使得多个站点的SEEPS误差评分融合更合理,区域平均和时间平均更有意义。

1.4 SEEPS与降水气候特征相关联的误差评分特点

ECMWF利用观测站点历史降水资料计算SEEPS误差矩阵。因为SEEPS评分中降水概率具有年变化特点,利用质量控制的站点逐月历史降水观测数据,逐月定义“干”的概率阈值 P_1 ,换句话说,某一观测站SEEPS误差评分矩阵是逐月变化的,同一个月内每天的SEEPS检验都采用同一个误差评分矩阵;由式(9)可计算得到各观测站点的SEEPS误差评分矩阵。事实上,由于极端降水的频次及降水量值对概率 P_1 影响很小,故SEEPS误差评分矩阵对历史降水数据的质量控制要求并不高。

在SEEPS降水分类中,将“小雨”和“大雨”概率关系设定为 $P_2=2P_3$,而非 $P_2=P_3$ 或 $P_2=3P_3$ 的考虑是,既尽可能提高区分“小雨”和“大雨”的阈值,以提高对高量级降水的辨识能力,又不至于使SEEPS误差评分的标准差明显变大,而让SEEPS变得很不稳定。

1.5 SEEPS根据站点密度加权区域平均

针对观测站点检验的最大问题是观测站地理分布不均对评分统计后处理结果代表性的不利影响。如中国区域的降水观测站具有东部密集西部稀疏的特点,如何融合疏密不同地区的SEEPS误差评分,获得有代表性的区域平均检验结果,以避免高站点密度区域的SEEPS值主导区域平均SEEPS结果呢?SEEPS检验方法提出了加权区域平均计算方案。

如检验采用 N 个观测站点,设 ρ_k 为站点 k 附近的站点密度,用高斯核函数表达为:

$$\rho_k = \sum_l e^{-(\alpha_{kl}/\alpha_0)^2} \quad (10)$$

式中, α_{kl} 是站点 k,l 对地心的张角,由这两个站点的地理经纬度唯一确定。 α_0 是一个参考角度,取 $0.75^\circ(83\text{km})$ 。当 $\alpha_{kl}>4\alpha_0$ 时,站点 l 对 ρ_k 计算的影响可以

忽略不计。因为 $a_{kk}=0$ ，所以 $\rho_k \geq 1$ ，设站点权重系数

$$W_k = \frac{1}{\sum_l \rho_l} \rho_k$$

为 W_k ，与站点密度呈反相关，则降水检验误差评分SEEPS的加权区域平均表达式为：

$$S = \sum_k W_k S_k \quad (11)$$

考虑站点分布密度后的SEEPS区域平均值，可以抑制高站点密度区域的SEEPS评分在区域平均SEEPS评分中所占比重，能够更客观地表达预报在整个预报区域内的整体预报能力。

2 SEEPS在中央气象台定量降水预报检验中的应用试验

2.1 降水观测站及权重分布

观测站点为中国范围内参与GTS国际交换的384个观测站点。观测站点分布东密西疏，特别是在西藏、新疆的大片区域内，站点分布稀少。按照SEEPS方法中的站点权重分布（图略），站点稀疏的西部地区的站点权重，约是站点稠密的东部地区的两倍左右。这可以平抑东部地区稠密站点的SEEPS误差评分在中国区域平均SEEPS误差评分中所占比重，使区域平均SEEPS更能代表预报在全国范围内的整体预报能力。

2.2 检验数据

预报数据采用中央气象台2007年3月—2013年12月共7年的7天预报时效内24h定量降水预报（quantitative precipitation forecast, QPF）。由于预报员QPF的站点预报是降水等级区间预报，在无准确的站点预报值的情况下，统计检验中采取的预报匹配方法较为简单。将QPF站点预报值定义为如表4所示的降水量值。

表4 预报员QPF预报的相当降水量（mm）

	QPF预报区间	预报相当值
预报	0	0.0
	0~2	1.0
	2~5	3.5
	5~10	7.5
	10~20	15.0
	20~25	22.5
	25~50	37.5
	50~100	75.0
	100~250	175.0
	≥250	350.0

2.3 中国区域 SEEPS 降水分类特征

在对SEEPS检验试验结果进行展示分析之前，先分析SEEPS评分的降水分类特征，可以帮助更深入

地理解SEEPS检验结果。由30年气候降水观测数据（1980—2009年）统计获得的中国区域1, 4, 7和10月的24h累积降水“干”概率分布（图略）可见，冬季干，夏季湿，春季和秋季的湿中心不同，前者位于华南地区，后者位于西南地区的四川盆地地区。7月中国范围内最“干”（ P_1 大）的区域是西北地区，“干”概率 P_1 超过0.8，降水极少。降水频率最高（ $1-P_1$ ）区域在西南地区，包括西藏东南部、四川大部及云南等地区。这里的日降水概率普遍超过0.5，很“湿润”。

从“大雨”的阈值分布（图1）来看，“大雨”阈值整体呈现由东南往西北逐渐递减的特点。该阈值在江淮流域较大，最高达到25~30mm，与传统降水检验方法“大雨”量级相当，说明该地区“大雨”的降水量较高；“大雨”阈值在西北地区较小，只有5~10mm，说明该地区“大雨”的降水量较小。

综合“干”概率分布及“大雨”阈值分布特点，可以知道，西北地区降水概率小、“大雨”阈值很小，说明该地区降水量很小；降水量较大的地区为降水概率大的西南地区及“大雨”阈值高的江淮流域，以及华南地区。

3 SEEPS与传统评分的QPF检验对比分析

在具有显著气候差异的干旱少雨地区和热带湿润地区，由于SEEPS降水分类基于降水分类的概率比例，使得SEEPS方法与传统评分具有不同的应用特征。在降水的分类上，传统降水检验评分采取的是固定阈值；如24h累积降水分类中的“无雨”、“小雨”、“中雨”等的量级固定为： $<0.1\text{mm}$ ， $0.1\sim 10\text{mm}$ 和 $10\sim 25\text{mm}$ 等。这种采取固定阈值的方法，从降水气候概率角度看是不合理的，它忽略了不同地区（或季节）的降水气候差异；例如，同一时期的江淮流域降水量明显高于西北地区，而两者用同一暴雨阈值计算检验评分，会使得西北地区对“中雨”及以上量级降水站数 a 的贡献远远低于江淮流域。这种采用固定阈值的做法，会使得高降水气候概率的区域（或季节）主导（如TS、Bias、空报率、漏报率等）与降水分类列联表中 d 无关的所有评分。在SEEPS降水检验方法中，依据观测站点降水气候概率，在概率空间中将该站点降水划分为三类，并使“小雨”发生概率为“大雨”的两倍。这样，区分“小雨”与“大雨”的降水阈值是变化的。变化阈值的优点就是，可以使具有不同降水气候概率的地区，如新疆地区与江淮流域，具有同样机会来影响区域平均SEEPS评分。

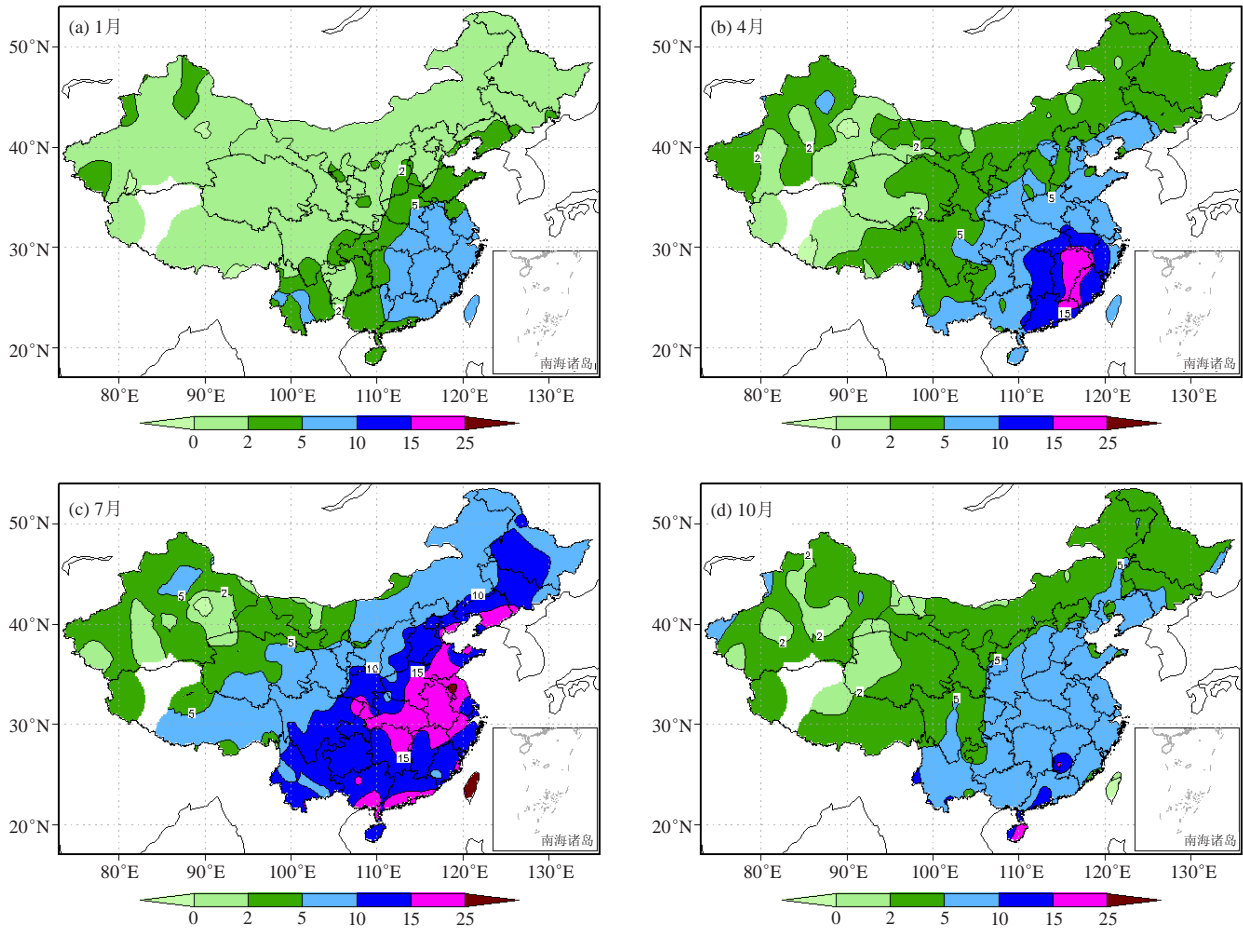


图1 基于SEEPS降水分类的中国区域1 (a) , 4 (b) , 7 (c) 和10月 (d) 24h累积降水 (00UTC) 的“大雨” 阈值分布

降水的年变化与上述降水的地区差异一样, 也会使传统检验方法的固定阈值与SEEPS方法的变化阈值具有不同的特征。对于传统检验方法, 在年尺度的评分计算中, 固定阈值会使得降水少的“干”季, 对“中雨”及以上量级的降水站数 a 的贡献远小于降水量多的“湿”季, 从而使得“湿”季主导整个评分; 或在逐日评分的时间平均中, 因“中雨”及以上量级在“干”季缺少定义, 而使得“湿”季主导整个评分。在SEEPS方法中, 利用一年中不同时间的降水气候概率, 定义该时间的降水分类, 故每一个观测站点上的降水阈值是随时间变化的。SEEPS方法采取的这种随时间变化的降水阈值, 可以使“干”季与“湿”季在整体平均的SEEPS评分中具有相当的影响力。SEEPS方法是基于降水概率采用的随时间、空间变化的降水阈值, 使得SEEPS评分均值具有更完整的时间和空间代表性。

图2是预报员在中国区域24h累积降水预报的SEEPS技巧评分。从图2可见, 预报员1~7d时效预报SEEPS技巧评分呈现波浪式上升, 2013年达到最高,

2010年评分相对较低。图3是预报员传统检验评分的公平成功指数ETS评分。总体上看, 各量级2013年的ETS评分均达到最大值, 但在其他年份, 不同量级的降水表现不一。以2012年为例, 小雨量级的ETS评分是历年中最低的, 而中雨量级的ETS几乎是历年中较高的, 比较难以给出一个综合性的预报水平的评估。SEEPS评分则不同, 可将不同量级的评分综合成一个参数, 便于综合评估。

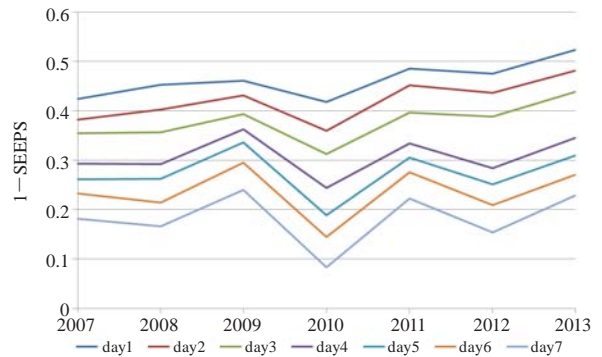


图2 2007—2013年中国区域24h累积降水 (00UTC) QPF 的SEEPS技巧评分

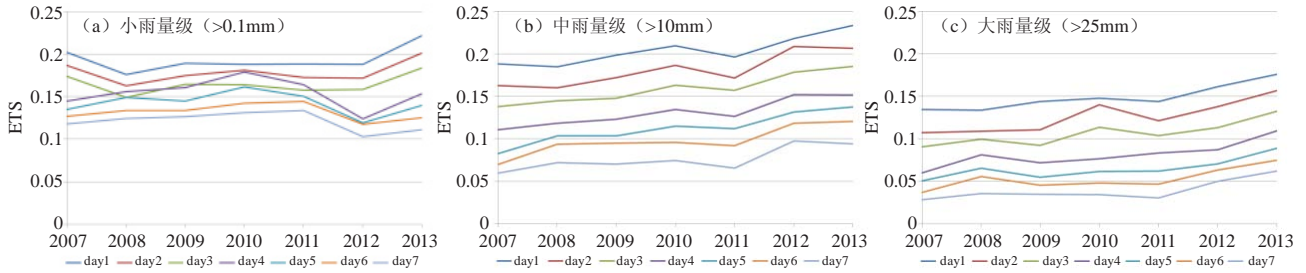


图3 2007—2013年预报员24h降水QPF公平成功指数ETS评分

图4是2013年8月预报员24h累积降水48h时效的QPF预报SEEPS误差。QPF预报SEEPS总误差为0.56，SEEPS技巧评分为0.44。图中展示了各类漏报和空报的空间分布，其中3类漏报的SEEPS误差之和为0.26，3类空报SEEPS误差之和为0.20；这说明漏报、空报对预报效果的影响大致相当。从图中预报员QPF的SEEPS误差分布特征可见，预报“干”对比观测“小雨”和预报“干”对比观测“大雨”这两类漏报的SEEPS误差高值区主要分布在新疆、内蒙古等西北地区；预报“小雨”对比观测“大雨”此种类型漏报

的SEEPS误差高值区主要分布于华北、东北地区。预报“小雨”对比观测“干”这个类型的空报误差分布高值区主要位于西南地区，而预报“大雨”对比观测“干”这个类型的空报误差分布高值区主要位于西南、西北地区。总体上说，预报员QPF预报误差的主要来源为两类：预报“小雨”对比观测“大雨”的漏报和预报“小雨”对比观测“干”类型的空报，合计占到了总误差的65%；前者说明预报员降水预报量级较实际降水偏小，后者说明预报员对“小雨”的大范围、高频率空报也可以导致总体预报效果的明显下降。

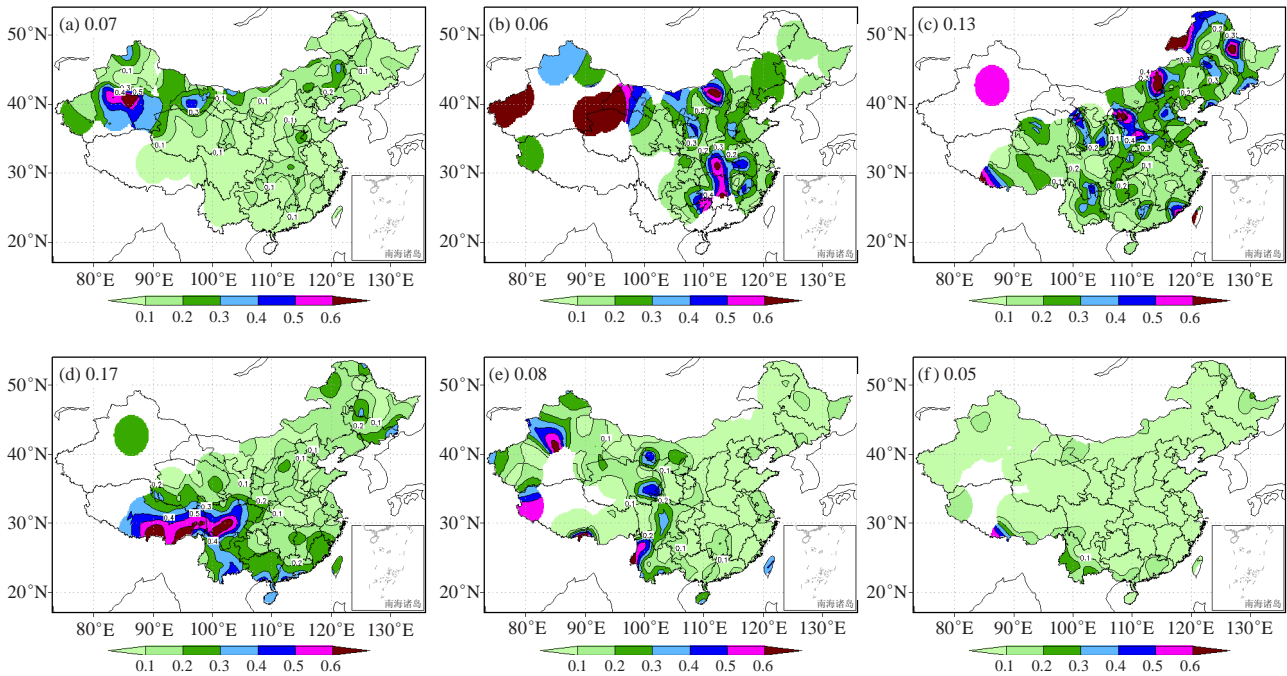


图4 2013年8月预报员24h累积降水48h预报SEEPS误差分类分布,预报对比观测
(漏报: (a) “干”对比“小雨”; (b) “干”对比“大雨”; (c) “小雨”对比“大雨”;
空报: (d) “小雨”对比“干”; (e) “大雨”对比“干”; (f) “大雨”对比“小雨”)

4 总结与讨论

降水检验SEEPS方法是近期ECMWF研究的评估降水预报技巧的单一评分，本文将SEEPS方法应用到预报员中国区域QPF降水预报检验中，介绍了基于降

水概率分布的三分类降水误差检验方法SEEPS的计算原理、约束条件和计算数学方案，对中央气象台预报员定量降水预报进行了评估，并与传统检验评分进行了对比分析。

SEEPS方法基于降水气候概率，在概率空间中进行降水分类，使SEEPS评分具有可随时间、空间变化的可变降水阈值，克服了传统检验方法中，因较为显著的空间、时间上的降水概率差异而引起的不同检验评分难以直接对比分析的困难，从而在概率空间中将预报误差定量化。SEEPS评分具有与站点密度呈反相关的站点权重，使其区域平均值不受高站点密度区域的主导，具有更好的区域整体代表性；逐日SEEPS评分的时间平均值与由检验时段内所有样本计算获得的SEEPS评分等价，这使得SEEPS评分的时间平均具有更明晰的实际意义。SEEPS利用降水气候概率，在概率空间中把降水分为“干”、“小雨”和“大雨”三类，使得“小雨”概率为“大雨”概率的两倍。由此，SEEPS将降水检验评分表达为两个矩阵的标量积：一个 3×3 列联表矩阵，为降水观测与预报的二维离散概率分布，代表了概率空间中的降水预报特征；另一个为基于降水概率的 3×3 误差评分矩阵，代表了误差评分特征。降水预报特征体现了概率空间中的模式（或预报员）预报性能；误差评分特征表现在在一定降水概率下，SEEPS评分对概率空间中不同预报误差的“惩罚”。SEEPS将检验评分分为“预报”与“评分”这两部分，因而可以分析一个预报SEEPS评分高低的成因。SEEPS在不同降水概率下具有不同的误差评分特征，使其能够自动适应不同的降水气候。

SEEPS对降水预报的评分总体上与传统检验评分的结论是相当的，但检验指标更加简单，更加直接，其提供了清晰、简洁的定量化指标，便于管理与决策。从图1可以看到，以SEEPS方法的降水分类获得的“大雨”量级阈值，即使在7月，也只有江淮很小区域达到传统检验评分的“大雨”量级，因此SEEPS方法的不足是对传统降水检验方法中的“大雨”及以上量级的降水预报无检验分辨能力，不适用于对此类大量级降水事件的检验。对于极端气候条件（极“干”， $P_1 > 0.85$ 或极“湿”， $P_1 < 0.1$ ）下的降水预报，SEEPS方法也不适用；对于此类属于小概率事件的降水，其预报检验需要用专门的极端事件检验方法^[17]。

目前国际上SEEPS方法的应用仅限于24h累积降水的预报检验。进一步拓展SEEPS方法的应用范围，将其用于更高时间分辨率（如6h累积）的降水预报检验是SEEPS方法下一步的重要研究方向之一。

致谢：感谢中国气象局数值预报中心王雨、李莉、李应林、赵滨和邓莲堂等提供的建议与帮助。

参考文献

- [1] 崔锦, 周晓珊, 张爱忠, 等. 天气学检验在东北区域数值模式秋冬季降水预报中的应用. 气象与环境学报, 2009, 25(4): 17-21.
- [2] Wilks D S. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences (2nd). New York: Academic Press, 2006.
- [3] Jolliffe I T, Stephenson D B. Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science. New York: Wiley and Sons Ltd, 2003.
- [4] 王雨. 若干数值模式对2003年夏季青藏高原中南部降水预报检验. 高原气象, 2004, 23: 53-58.
- [5] 王雨, 闫之辉. 降水检验方案变化对降水检验评估效果的影响分析. 气象, 2007, 33(12): 53-61.
- [6] 王雨, 公颖, 陈法敬, 等. 区域业务模式6h降水预报检验方案比较. 应用气象学报, 2013, 24(2): 171-178.
- [7] Ebert E E. Fuzzy verification of high resolution gridded forecasts: A review and proposed framework. J Appl Meteor, 2008, 15: 51-64.
- [8] Casati B. New developments of the intensity-scale technique within the Spatial Verification Methods Intercomparison Project. Wea Forecasting, 2010, 25: 113-143.
- [9] Davis C B, Brown B, Bullock R G. Object-based verification of precipitation forecasts, Part I: Methods and application to mesoscale rain areas. Mon Wea Rev, 2006, 134: 1772-1784.
- [10] Davis C A, Brown B, Bullock R G. Object-based verification of precipitation forecasts, Part II: Application to convective rain systems. Mon Wea Rev, 2006, 134: 1785-1795.
- [11] Davis C A, Brown B, Bullock R G, et al. The Method for Object-based Diagnostic Evaluation (MODE) applied to numerical forecasts from the 2005 NSSL/SPC Spring Program. Wea Forecasting, 2009, 24: 1252-1267.
- [12] Richardson D S. Skill and relative economic value of the ECMWF ensemble prediction system. Quart J Roy Meteor Soc, 2000, 126: 649-667.
- [13] Ferro C A T, Stephenson D B. Extremal Dependence Indices: Improved verification measures for deterministic forecasts of rare binary events. Wea Forecasting, 2011, 26: 699-713.
- [14] Rodwell M J, Richardson D S, Hewson T D, et al. A new equitable score suitable for verifying precipitation in numerical weather prediction. Quart J Roy Meteor Soc, 2010, 136: 1344-1363.
- [15] Haiden T M, Rodwell M J, Richardson D S. Intercomparison of global model precipitation forecast skill in 2010/11 using the SEEPS score. Mon Wea Rev, 2012, 140: 2720-2733.
- [16] Gandin L S, Murphy A H. Equitable skill scores for categorical forecasts. Mon Wea Rev, 1992, 120: 361-370.
- [17] Stephenson D B, Casati B, Ferro CAT, et al. The extreme dependency score: A non-vanishing measure for forecasts of rare events. J Appl Meteor, 2008, 15:41-50.

2013年夏季中国北涝南旱环境场及异常成因分析

赵俊虎^{1, 2} 周杰³ 叶天舒² 杨柳³ 封国林¹

(1 国家气候中心, 北京 100081; 2 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000;

3 扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225002)

摘要: 2013年夏季中国降水总体呈北涝南旱的分布特征, 华北地区、东北地区和西北大部降水异常偏多, 而淮河流域、云贵高原至江南地区降水异常偏少。2013年夏季降水异常有其特定的环境场和物理机制, 首先从东亚大气环流系统相互配置的角度分析了2013年夏季北涝南旱对应环境场的异常, 结果表明: 2013年夏季东亚夏季风偏强, 西太平洋副热带高压(以下简称副高)偏强, 位置偏西偏北, 加强了水汽向北输送; 同时欧亚中高纬地区为冷性低压控制, 阻塞高压活动偏少, 不利于冷空气南下; 冷暖空气在我国北方地区长时间对峙, 导致北方降水偏多。其次, 探讨了前冬海洋和积雪等外强迫异常对东亚大气环流的可能影响, 发现2013年前冬至夏季, 赤道太平洋中东部海温偏冷, 而北印度洋和西北太平洋海温偏暖, 夏季热带沃克(Walker)环流和西太平洋哈得来(Hadley)环流异常, 西太平洋南部尤其是菲律宾海附近热带辐合带对流活动偏强, 使得副高偏北, 东亚夏季风偏强; 前冬欧亚积雪异常偏多, 有利于夏季贝加尔湖以东盛行深厚的冷性低压, 东亚副热带西风急流增强, 也有利于副高加强、西伸和北扩。东亚夏季风环流系统既受海温和积雪等外强迫的影响, 同时系统之间也存在相互作用, 环流系统之间的不同配置是造成区域旱涝异常分布的直接原因。

关键词: 北涝南旱, 东亚夏季风环流系统, 海温和积雪

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.05.002

Preliminary Studies on the Environment Field and Cause of Northern Flood and Southern Drought During the Summer of 2013 in China

Zhao Junhu^{1,2}, Zhou Jie³, Ye Tianshu², Yang Liu³, Feng Guolin¹

(1 National Climate Centre, Beijing 100081 2 Department of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

3 Department of Physical Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225002)

Abstract: On the whole, the distribution of summer precipitation over China in 2013 is flood in the north and drought in the south. The precipitation anomaly is more than usual in North China, the Northeast and Northwest, while that in the Huaihe River, Yungui Plateau and the south of Yangtze River is less than usual. The summer precipitation anomaly in 2013 has its particular background and physical mechanism. In this paper, we have analyzed the reason of the summer precipitation anomaly in two main aspects: firstly, the East Asian atmospheric circulation systems anomaly, which is corresponding with the summer rainfall anomaly, is analyzed. Results show that in 2013 the East Asian summer monsoon (EASM) is stronger, the Western Pacific Subtropical High (WPSH) is also stronger with the anomalous westward and northward movements of the WPSH, all of which strengthen the water vapor transport northward movements. At the same time, Eurasia mid-high latitude area is controlled by the cold low pressure, blocking high resistance less activity, which is adverse for the cold air moving southward. Cold and warm air masses confront each other in north China for a long time, leading to more precipitation in this area. Secondly, the prophase anomalies, such as previous winter sea surface temperature (SST) anomaly and the snow anomaly, which has a major impact on the atmospheric circulation in East Asia, have been discussed. Results show that from the previous winter to the summer in 2013, the east-central equatorial Pacific Ocean SST is lower while the north Indian Ocean and the northwest Pacific SST is higher. The summer tropical Walker circulation and Hadley circulation of West Pacific ocean is abnormal. In the south of West Pacific ocean especially near the sea of the Philippines, the convection of the tropical convergence zone is stronger, resulting in the northward of the WPSH and the strengthening of the EASM. The previous winter Eurasian snow anomaly is more than usual, which benefits for the cold deep low pressure in the south of the Lake Baikal, the enhancement of the East Asian subtropical westerly jet, and the northward and westward movements of the subtropical high. Not only the EASM circulation systems are affected by both SST and snow cover, but also there exists interaction between different systems, which is the direct reason for the regional precipitation anomaly distribution.

收稿日期: 2013年12月26日; 修回日期: 2014年3月18日

第一作者: 赵俊虎(1985—), E-mail: zhaojh@cma.gov.cn

资助信息: 国家自然科学基金项目(41505061和41375069);

国家重点基础研究发展计划(2012CB955902)

Keywords: flood in the north and drought in the south, the East Asian summer monsoon circulation systems, sea surface temperature and snow cover

0 引言

全球气候变暖背景下,气象灾害的时空分布特征发生了明显的变化,大范围旱涝、高温热浪及冰冻雨雪等极端天气气候事件发生更为频繁,造成的损失越来越严重^[1-2]。其中发生在夏季的大范围干旱和洪涝灾害造成的损失尤为严重,夏季旱涝也是我国短期气候预测的核心内容^[3-4],因此,对旱涝异常的气候成因分析^[5-8]及其趋势的预测研究^[9-12]备受关注。20世纪80年代之后,中国夏季降水由50和60年代的北涝南旱转变为南涝北旱^[13],进入21世纪之后,夏季雨带推进到淮河流域^[14]。陶诗言等^[15]研究了1998年夏季长江流域洪涝灾害的气候背景和大尺度环流条件;陈桂英等^[16]探讨了1999年夏季中国南涝北旱的成因;毕宝贵等^[17]分析了2003年淮河洪涝与西太平洋副热带高压(以下简称副高)异常及成因的关系等。对异常年份旱涝形成机制的研究有助于对降水影响机制的认识和预测水平的提高。

2013年夏季(6—8月),中国旱涝并存、区域高温和强台风等异常气候突出。降水整体略偏多,但时空分布极不均匀,空间上大体呈北涝南旱的分布特征,逐月旱涝分布也有明显差异。6月,全国平均降水量接近常年同期,北方地区降水以偏多为主,其中西藏西部、西北、华北和内蒙古大部等地降水偏多5成至1倍,局部地区偏多1倍以上;青藏高原东部、西南、华南、江南及黄淮等地降水偏少5~8成,局部偏少8成以上。7月,全国平均降水量较常年同期偏多,其中华北、东北及四川盆地东部异常偏多5成以上,成都等局地暴雨洪涝灾害频繁,华南北部至长江流域降水偏少5成以上。8月,全国降水异常偏少,东北大部和华南降水偏多2成以上,部分地区偏多5成以上,局部区域发生严重的暴雨洪涝灾害,其余大部分地区降水偏少。此外,7月下旬至8月中旬,江南出现了罕见的大范围持续高温天气;整个夏季仅有三个台风登

陆且均在华南沿海登陆^[18]。

随着全球显著变暖,20世纪80年代后多年中国夏季出现南涝北旱,而北涝南旱几乎没有出现,2012^[19]和2013年却连续出现了典型的北涝南旱,在这种全球变暖的背景下出现的北涝南旱与20世纪50和60年代的北涝南旱环境场不同。造成2013年夏季中国旱涝等气候异常事件有其特定的气候环境场,对其成因及其物理机制的研究,有助于进一步提高气候预测水平。本文首先从2013年夏季东亚大气环流系统关键成员的配置及其相互作用分析降水异常的直接成因,然后探讨了海温和积雪等外强迫对东亚夏季风系统的可能影响。

1 资料和方法

采用中国气象局国家气候中心常规业务中使用的1951—2013年中国160站月降水资料,中国气象局信息中心提供的753个测站逐日降水量资料;NCEP/NCAR全球经纬网格(2.5°×2.5°)再分析月平均位势高度场、风场、海平面气压和比湿等资料,美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的全球2°×2°月平均海温重建资料,时段均为1948年1月—2013年8月。资料均取1981—2010年为气候态。

利用丁一汇^[20]提出的水汽输送和收支计算方法,进行水汽特征分析,其中,大气中水汽输送向量场 \vec{F} 为:

$$\vec{F}(\lambda, \varphi, p, t) = \frac{1}{g} q \vec{V} \quad (1)$$

对单位面积空气柱,总的水汽水平通量为:

$$\vec{Q}(\lambda, \varphi, t) = \int_{p_s}^{p_t} \vec{F} dp = \int_{p_s}^{p_t} q \vec{V} \frac{dp}{g} \quad (2)$$

式中, q 为比湿; $\vec{V} = (u, v)$, u 和 v 分别为纬向和经向风速; g 为重力加速度; P_s 为表面气压; P_t 为顶部气压,这里取300hPa。

2 2013年夏季降水实况

图1给出了2013年夏季中国降水量(图1a)和降

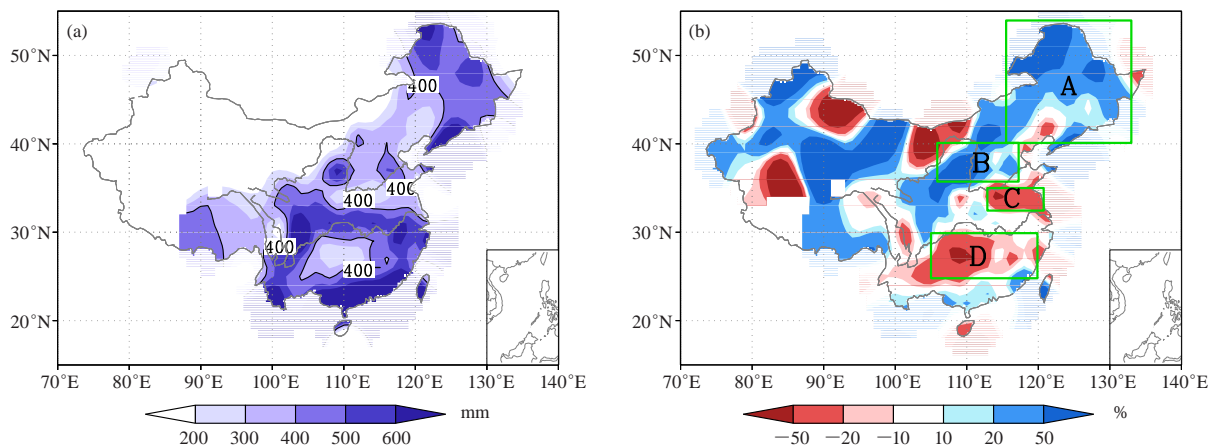


图1 2013年夏季降水量(a)和降水距平百分率(b)分布

水距平百分率分布图(图1b)。由图1a可见,2013年夏季我国东北、长江流域、江南、华南、西南及华北部分地区降水量超过了400mm,西北地区降水量低于200mm。由降水距平百分率分布图(图1b)可见,2013年夏季中国降水呈典型的北涝南旱异常分布,降水异常偏多的区域主要位于东北、华北、华西及西北大部,偏多20%以上,部分地区偏多50%以上;降水异常偏少的区域主要位于淮河流域(图1b中C区域)和长江以南的云贵高原至江南一带地区(图1b中D区域,以下统称江南地区),偏少20%以上,青藏高原东部、河套西北部和北疆东部降水也偏少(图1)。

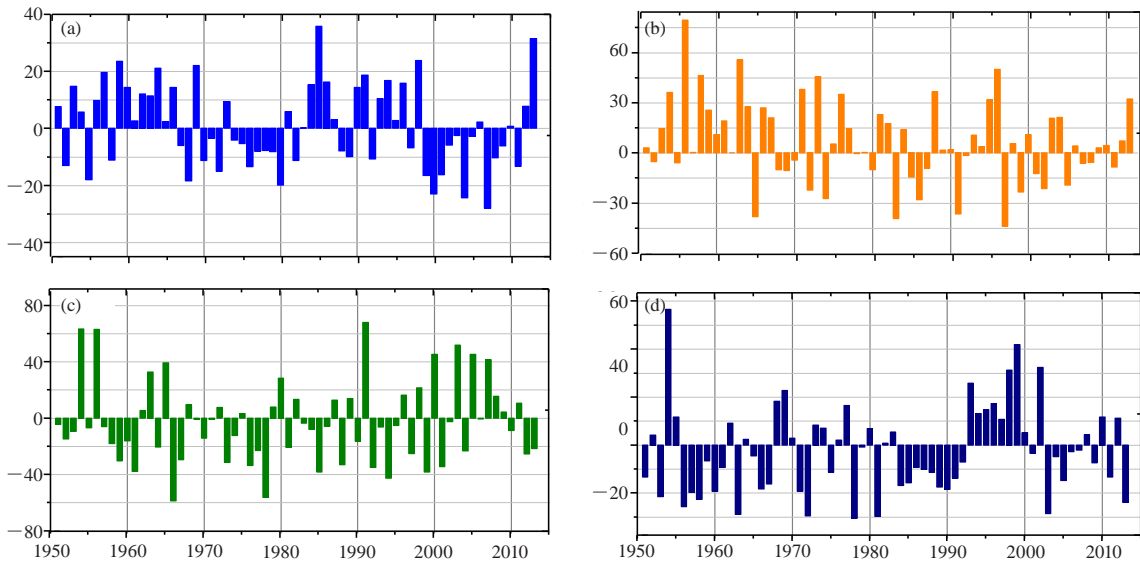


图2 1951—2013年全国代表区域降水距平百分率(单位:%)年际变化
(a)东北;(b)华北;(c)淮河;(d)江南

3 2013年夏季大气环流概况及中国夏季降水异常成因

3.1 2013年夏季大气环流概况

大气环流尤其是东亚夏季风(EASM)的异常是引起中国夏季旱涝异常分布的直接原因。图3给出了2013年夏季海平面气压(SLP)、低层850hPa风场、中层500hPa位势高度场及高层200hPa纬向风和位势高度场的异常。从图3a可见,中国东北至日本岛以东的海洋一带和孟加拉湾至中国南海群岛一带为SLP负异常,而中国东海及其以东一带为SLP正异常,热带西太平洋和日本岛以东洋面的SLP偏低不利于海陆气压差的增加;中国东海以东SLP正异常,而中国东部地区SLP负异常,有利于海陆气压差增大,即有利于EASM增强。从850hPa风场距平(图3b)也可见,中国大陆东南部为南风距平,长江下游至东海为一反气旋距平环流,而东北为一气旋距平环流,导致长江流

域降水偏少而东北降水偏多。在对流层中层500hPa高度场上(图3c),副高偏强,且显著西伸北翘,而欧亚40°—55°N为宽广的负距平控制,不利于阻塞高压(以下简称阻高)发生和发展,中高纬以纬向环流为主。在高层环流场上(图3d),副热带西风急流中心位于45°N左右,较常年异常偏北偏强,南亚高压偏北偏东,均有利于副高的西伸和北抬。

3.2 2013年夏季水汽输送异常情况

大气中水汽输送和收支是研究全球大气环流持续和变化的一个重要方面,因为水汽是形成降水的必要条件之一^[21]。Simmonds等^[22]指出中国东南部的水汽主要来自南海和孟加拉湾,对于东北和华北的大部分地区,中纬度的西风带水汽输送起主导作用。王可丽等^[23]分析了西风带与季风对中国西北地区的水汽输送,发现西北大部分地区的水汽来源于西风带,南亚夏季风的水汽输送主要影响西北地区南部和东部。

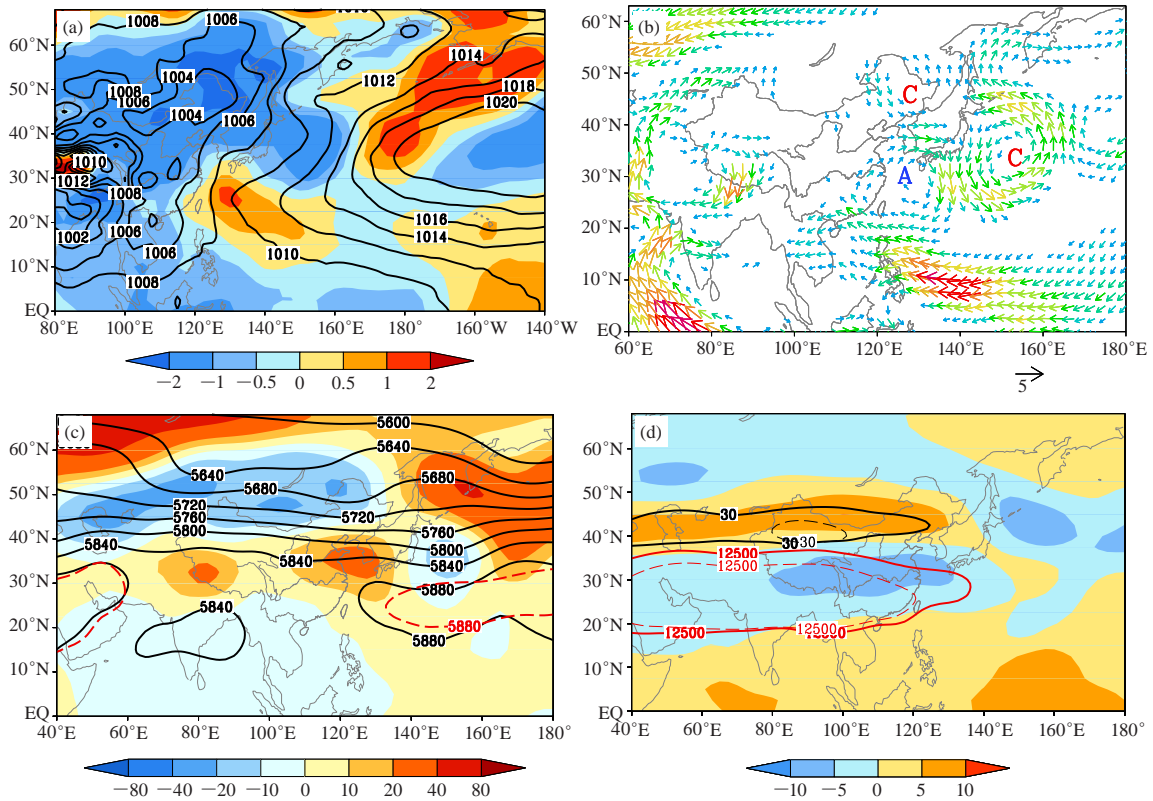


图3 2013年夏季东亚大气环流

(a) 海平面气压场 (等值线: 气压场, 阴影: 距平); (b) 850hPa风场距平场;
 (c) 500hPa高度 (黑色实线: 2013年, 虚线: 气候态5880gpm等值线) 和距平场 (阴影); (d) 200hPa纬向风
 (黑色实线: 2013年30m/s等值线, 黑色虚线: 气候态30m/s等值线) 及距平场 (阴影) 和高度场 (红色实线: 2013年
 12500gpm等值线, 红色虚线: 气候态12500gpm等值线)

2013年夏季 (图4a) 与多年平均的整层水汽输送通量矢量场一样, 中国不同地区水汽来源不同, 东部地区的水汽主要来源于孟加拉湾的西南风水汽输送、南海的越赤道气流水汽输送及副高东南侧转向的西南水汽输送, 而华北和东北地区除了上述水汽输送以外, 还有西风带的水汽输送, 西北地区主要是西风带的水汽输送, 青藏高原的水汽主要来源于孟加拉湾的西南水汽输送和西风带的水汽输送。在2013年夏季整层水汽输送的矢量距平图上 (图4b), 中国东南部地区为东南风水汽输送异常, 华北和东北地区主要为西南风水汽输送和西风带的水汽输送。从图4c可见, 中国地区的水汽辐合辐散与夏季降水异常有较好的对应, 华北东部和东北地区为水汽辐合区, 降水偏多; 江南为水汽辐散区, 降水偏少; 而华北西部和淮河流域分别为水汽辐散和辐合, 与降水不一致, 这可能与冷空气的强弱有关。以东北地区为例, 分析了区域整层水汽收支情况 (图4d): 2013年夏季东北地区水汽主要从西、南边界流入, 水汽从北、东边界流出; 通过西边界面和南边界面的整层积分水汽通量的比例约为3:2,

表明来自西风带的水汽输入较强, 来自季风的水汽输入次之; 水汽净收入较常年偏多60%。2013年夏季东北地区水汽来源充沛, 是降水偏多的重要原因。

3.3 东亚夏季风系统关键成员季节内变化与配置

极端干旱和洪涝这些重大的气候异常事件均受东亚夏季风的影响而产生^[4], 但东亚夏季风各子系统自身的异常差异、各子系统间的不同配置、东亚夏季风与中高纬系统的配置形势等又会造成相同气候背景下不同区域的旱涝分布^[24]。因而, 详细分析各年夏季的气候异常特征和可能成因对于监测和预测很有必要。国内外诸多研究^[25-29]表明中国气候系统的关键成员: 阻高、东北冷涡、东亚夏季风及副高, 这四个天气气候系统均对我国夏季气候有着重要影响。阻高的形成、维持以及崩溃, 增强了中高纬的经向环流, 有利于冷空气的南下; 东北冷涡活动一方面导致东北地区降水偏多气温偏低, 另一方面也有利于冷空气频繁南下影响我国南方地区; 东亚夏季风把大量的暖湿空气从海洋输送到我国大陆地区, 为持续性强降水提供了

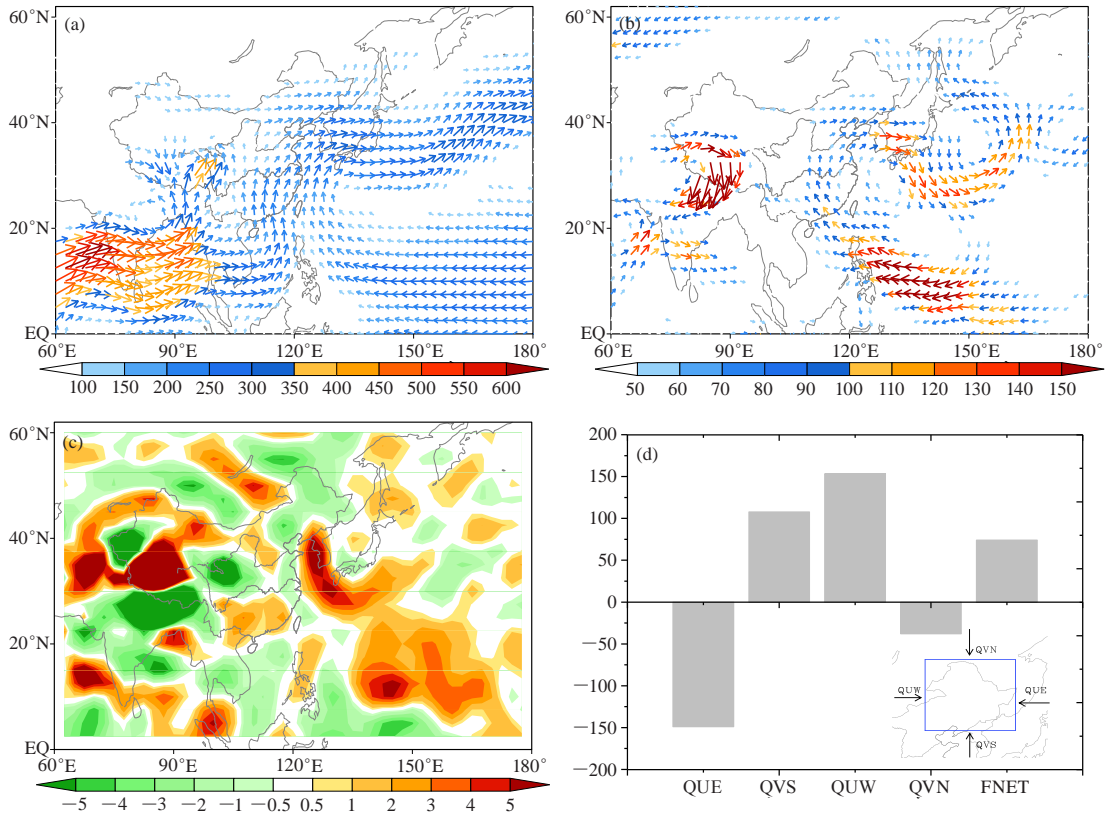


图4 2013年夏季整层水汽异常情况

(a) 水汽输送矢量场[单位: $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$]; (b) 水汽输送距平场[单位: $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$]; (c) 辐合辐散异常场[单位: $10^5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; (d) 通过东北地区东南西北四个边界 (QUE, QVS, QUW, QVN) 的总水汽通量 (单位: 10^6 kg/s) 和区域水汽收支 (FNET, 单位: 10^6 kg/s)

充足的水汽供应; 副高的东西进退及南北向摆动对降水量的多寡和雨带位置有重要影响。主雨带的形成是阻塞、东北冷涡、东亚夏季风和副高的最佳配置(或锁定), 四个系统的不同配置影响着夏季冷暖气流的对峙位置, 进而导致夏季主雨带位置发生差异。基于以上原因, 图5给出了2013年夏季这四个系统的季节内配置特征和北方洪涝的天气学模型。

对500hPa位势高度场做 $50^\circ\text{--}60^\circ\text{N}$ 平均的经度-时间剖面来分析阻塞形势在2013年夏季随时间的演变过程(图5a)。2013年夏季欧亚中高纬阻塞活动稀少: 6月中旬后期及8月中旬, 乌拉尔山地区出现了两次阻塞过程, 但仅持续数日; 整个夏季贝加尔湖地区几乎没有出现阻塞过程; 7月中旬, 鄂霍次克海地区出现了一次弱的阻塞。国家气候中心(National Climate Center, NCC)检测表明, 东北冷涡活动频繁, 其中6月, 发生一次持续冷涡活动, 从6月11—18日, 活动日数达8d; 7月东北冷涡活动更为频繁, 共发生四次冷涡活动, 分别是7月1—4, 9—12, 16—19和24—26日, 活动日数达16d; 8月共有两次冷涡过程, 分别是7—9和22—29日(图5b)。结合图5h可见, 东北冷涡

活动期间, 东北地区便出现强降水过程。东亚夏季风整体偏强, 阶段性变化显著。从东亚夏季风指数逐日演变图(图5c)可见, 整个夏季除6月第2和3候及8月第6候外, 其余时间东亚夏季风都异常偏强。6月上旬至中旬, 季风涌稳定在 $20^\circ\text{--}30^\circ\text{N}$, 并有两次北进过程; 7月上旬至8月中旬, 季风涌向北推进并维持在 $35^\circ\text{--}45^\circ\text{N}$, 最北影响达 50°N (图5d)。从图5e可见, 6月第5候副高主体加强并第一次北跳, 稳定在 20°N 以北, 7月第2候副高主体加强并第二次北跳, 稳定在 26°N 以北, 副高主体位置较气候态持续偏北达 3°N 以上, 副高第一、二次北跳多年平均为6月第2候和7月第4候^[30], 副高第一次北跳偏晚而第二次北跳偏早, 直接导致长江入梅晚出梅早, 而华北雨季开始偏早。整个夏季, 副高有五次西伸过程, 西伸程度强于多年平均, 尤其是7月中下旬至8月底(图5f)。副高偏北阶段, 我国北方降水也偏多, 降水量还与副高西伸密切相关(图5h)。副高持续的稳定偏北, 季风涌北进的几个阶段中一次次的脉动把大量的水汽输送至我国北方地区, 与中高纬南下的冷空气相遇对峙(图5g), 造成北方地区持续性强降水(图5h)。

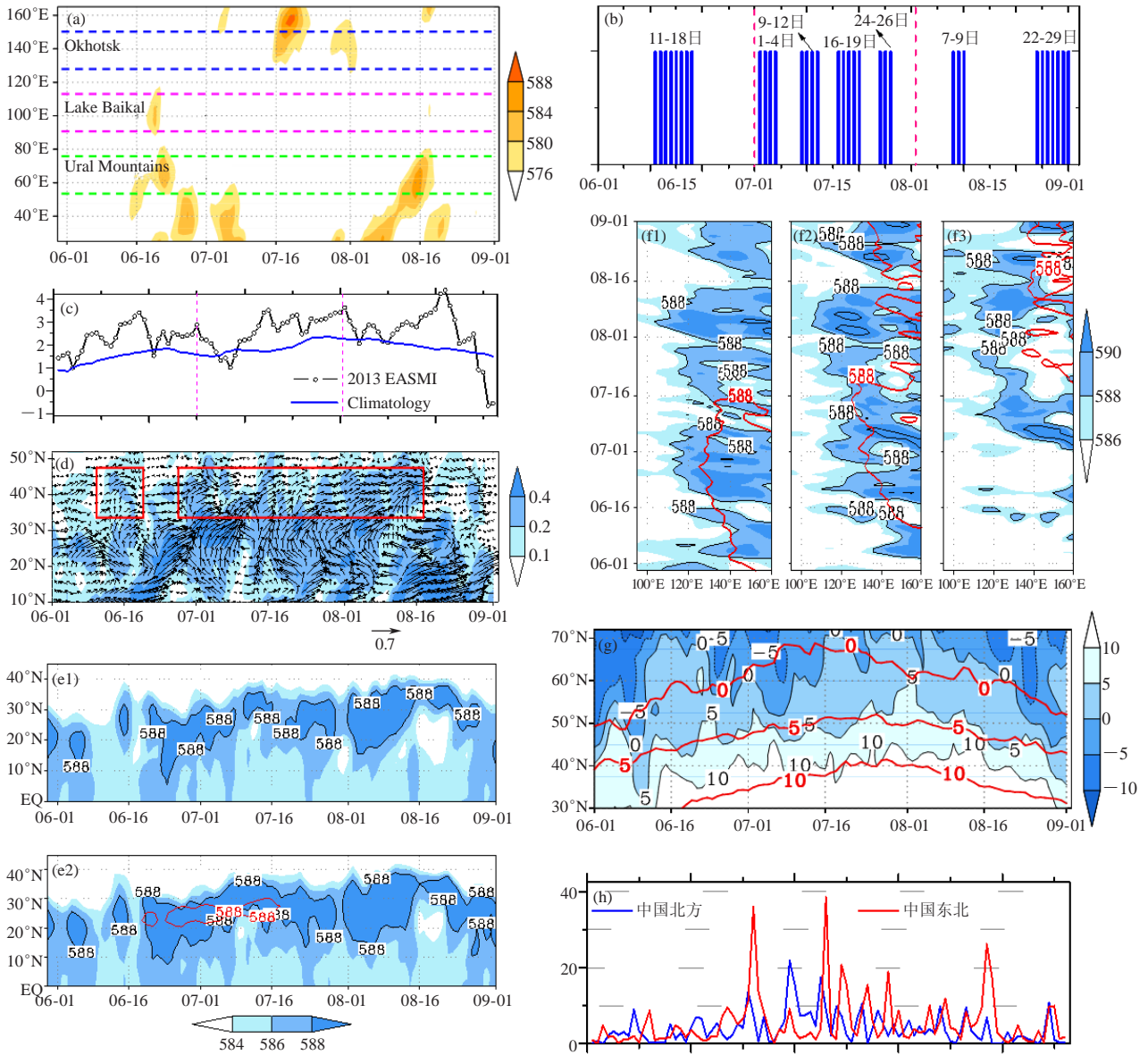


图5 2013年北方洪涝的天气学模型

(a) 500hPa位势高度 40°—60°N 平均的 6—8 月经度—时间剖面；(b) 东北冷涡活动日（直方图表示存在东北冷涡，根据 NCC 监测绘制）；(c) 东亚季风逐日指数（点线为逐日指数，蓝色曲线为气候态，数据源自 NCC）；(d) 105°—125°E 平均季风涌随时间的演变 [箭头表示整层（1000~300hPa）季风的水汽通量（单位： $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ），阴影区表示水汽通量 $>0.1 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$]；(e1~e2) 分别为 6—8 月 500hPa 位势高度（单位： dagpm ）110°—130°E 和 120°—140°E 平均的纬度—时间剖面；(f1~f3) 分别为 6—8 月 500hPa 位势高度（单位： dagpm ）20°—25°N，25°—30°N 和 30°—35°N 平均的经度—时间剖面（红色曲线为气候态）；(g) 105°—125°E 平均的 700hPa 温度的时间—纬度剖面（阴影区温度 $\leq 10^\circ\text{C}$ ，红色曲线为气候态，等值线间隔 5°C ）；(h) 北方平均逐日降水演变（单位： mm ）

综上所述，2013 年夏季欧亚中高纬度阻塞形势较弱，东北冷涡活跃，中高纬度以纬向环流为主，冷空气路径偏北，同时东亚夏季风偏强和副高偏强偏北，在这四个系统的稳定配置（锁相）下，中高纬的冷空气与低纬季风和副高带来的水汽在我国北方地区长时间对峙，造成我国北方大范围长时间的降水，导致整个夏季北方降水异常偏多。

4 外强迫对大气环流的影响

东亚地区大气环流的异常受大气外部强迫因子，如太平洋、印度洋海温及欧亚积雪和青藏高原积雪等因子影响，同时还受大气内部动力过程影响，即受海—陆—气系统相互作用的影响和制约^[31]。其中，海温是大气的最主要外强迫因子，其异常将改变海洋向大气输送的水汽和潜热通量等，导致局地对流活动和

大气高层与低层的辐合、辐散场的异常，并通过大气遥相关、沃克环流和哈得来环流等的改变影响全球大气环流，进而导致气候异常。在夏季，印度洋和太平洋等不同下垫面热力状况将会导致副高、季风等发生改变，直接影响到我国的旱涝分布^[32]。

4.1 2013年前冬至夏季海温的演变

图6给出了2012/2013年冬季、2013年春季和夏季的海表温度异常（sea surface temperature abnormality, SSTa）分布及Niño区各指数的演变。2012/2013年冬季北太平洋SSTa呈西北正东南负分布，其中西风漂流区SSTa大于0.5℃，北印度洋呈一致偏暖状态，南印

度洋呈西负东正的偶极子模态（图6a）；春季北太平洋SSTa仍呈西北正东南负分布，但赤道中东太平洋冷海温强度减弱，北印度洋仍呈一致偏暖状态，南印度洋也仍维持西负东正的偶极子模态（图6b）；夏季赤道东太平洋SSTa小于-0.5℃，中高纬正距平加强，北印度洋偏冷，加大了海陆热力差异，有利于夏季风加强（图6c）。海温从前冬到春季有较好的持续性，从夏季开始有所改变。从各区指数随时间的演变可见（图6d），2013年1月，Niño各区指数均低于0℃，之后至9月Niño1+2区指数持续低于-0.5℃，而其他区指数基本在-0.5~0℃，表明2013年1月以后赤道东太平洋发生了La Niña事件。

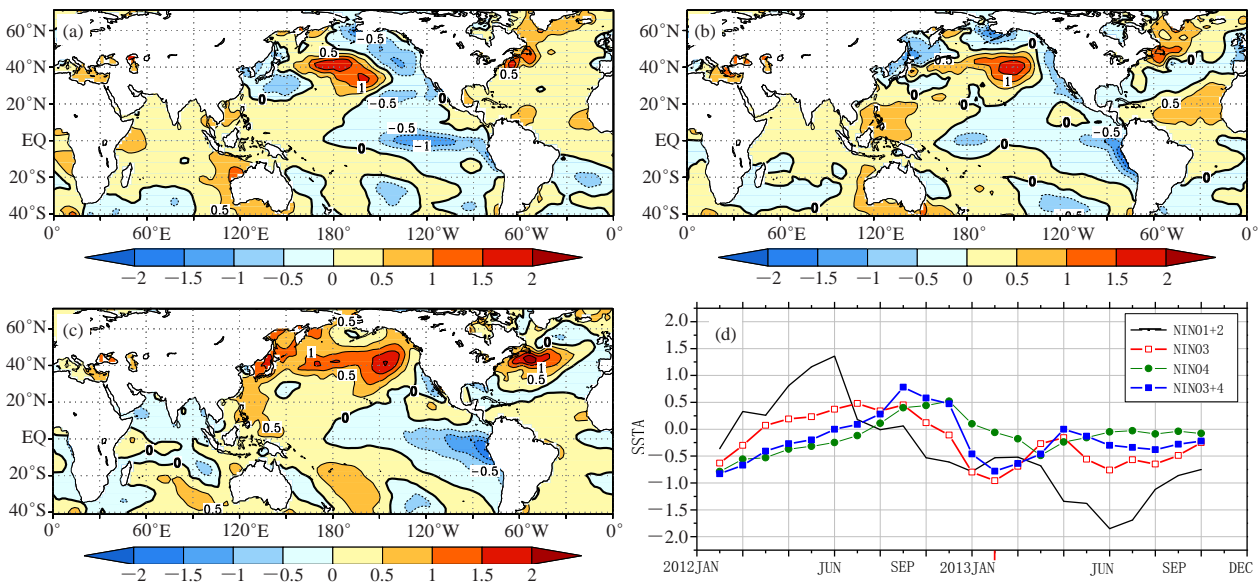


图6 2013年前冬 (a)、春季 (b)、夏季 (c) 海表温度距平 (单位: ℃) 分布和Niño指数 (d)

4.2 海洋和积雪对2013年夏季东亚大气环流的可能影响

副高是东亚夏季风系统主要成员之一，它的南北强度和位置对我国夏季旱涝有着决定性的影响。2013年夏季副高整体偏强，略偏北和异常偏西，具体表现为：6月强度和位置接近常年；7月副高断裂为东西两个高压，西部偏西偏北；8月副高异常偏西偏强，西伸脊点达115°E，较气候态偏西20个经度，且西部主体异常偏北（图略）。研究表明，副高对赤道中东太平洋海温的响应落后4~6个月^[33]，在La Niña事件发生后次年夏季副高明显偏弱偏北^[34]；冬、春季北印度洋海区海温偏暖，有利于夏季副高偏强与偏西^[35]。图7和8分别给出了2013年夏季逐月5°—25°N纬向平均的经向垂直距平环流图和125°—140°E经向平均的纬向垂直距平环流图，分别表示沃克环流和西太平洋地区哈德

利环流对副高强弱和位置的影响。

由图7a可见，6月印度洋和西太平洋上空分别为两支顺时针的沃克环流，印度洋的上升支和下沉支中心分别位于70°E和105°E，这可能是受到了前期该地区暖洋面的影响，西太平洋的上升支和下沉支中心分别位于130°E和170°E，则可能受到了太平洋东冷西暖海温的影响；即赤道地区大气响应出现两支顺时针的沃克环流，表现为印度洋偏暖和东部型La Niña事件的特征。西太平洋海区的哈得来环流上升支位于0°—15°N，下沉支位于20°—25°N（图8a），副高位置接近常年，位置略偏北。7月，印度洋至西太平洋地区大气响应出现一支异常强的沃克环流，60°—120°E地区以上升距平气流为主，而西太平洋120°—180°E的海区下沉距平气流偏强（图7b），这与春季印度洋暖海温的维持和赤道中东太平洋冷海

温的减弱有关。西太平洋海区的哈德利环流上升支仍位于 0° — 15° N, 但下沉支向北扩展到 15° — 30° N附近(图8b), 沃克环流和哈得来环流的调整导致7月副高西伸北抬。随着夏季印度洋海温的变冷, 8月印度洋至西太平洋上空出现了异常偏强的下沉距平气流(图7c), 哈得来环流下沉支进一步向北扩展到 25° — 30° N附近(图8c), 使得副高进一步西伸北抬。从2013年夏季西太平洋(110° — 120° E)射

出长波辐射距平的时间—纬度剖面图(图略)也可发现, 6月中上旬、7月中旬至8月底西太平洋南部(0° — 25° N), 尤其是菲律宾海和暖池附近, 热带辐合带对流活动异常偏强。由此可见, 2013年前冬至夏季热带太平洋和印度洋海温的异常及演变, 通过影响沃克环流、西太平洋哈得来环流及热带辐合带对流活动的调整, 很大程度上决定了副高季节内强度及位置的变化。

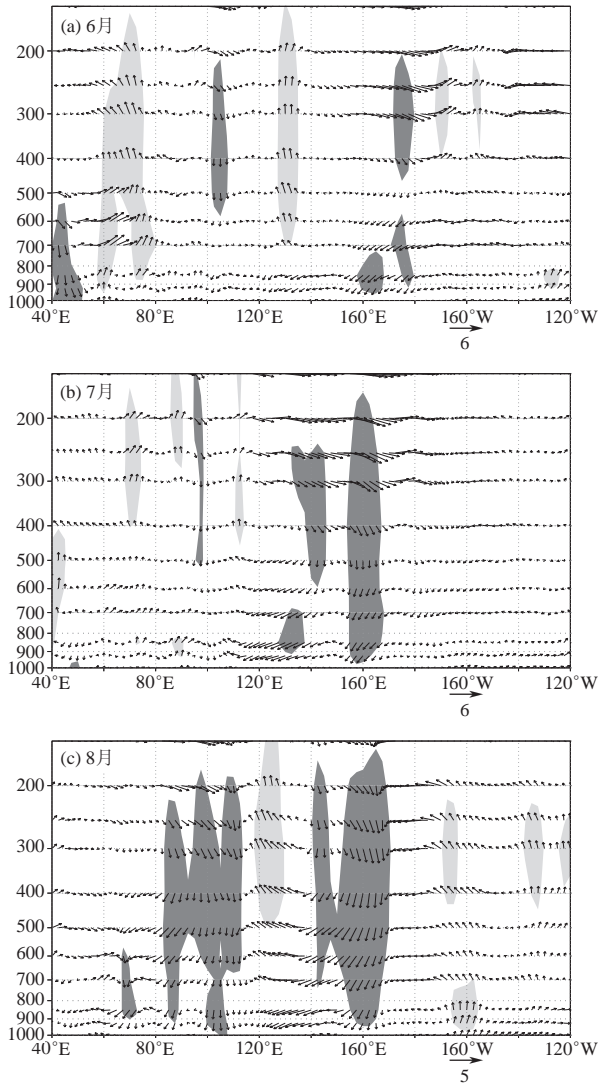


图7 2013年夏季 5° — 25° N纬向平均的经向垂直距平环流(垂直速度扩大至100倍, 单位: 10^{-2} hPa/s; 浅、深阴影区分别表示垂直速度距平小于 -1.5×10^{-2} hPa/s和大于 1.5×10^{-2} hPa/s; 经向风速单位:m/s)

副高作为东亚大气环流系统中重要的一员, 其变化除了受海温下垫面异常的影响外, 同时还受到东亚西风急流、南亚高压以及中高纬环流的异常和调整的影响。由图3d可见, 2013年夏季南亚高压偏东, 东

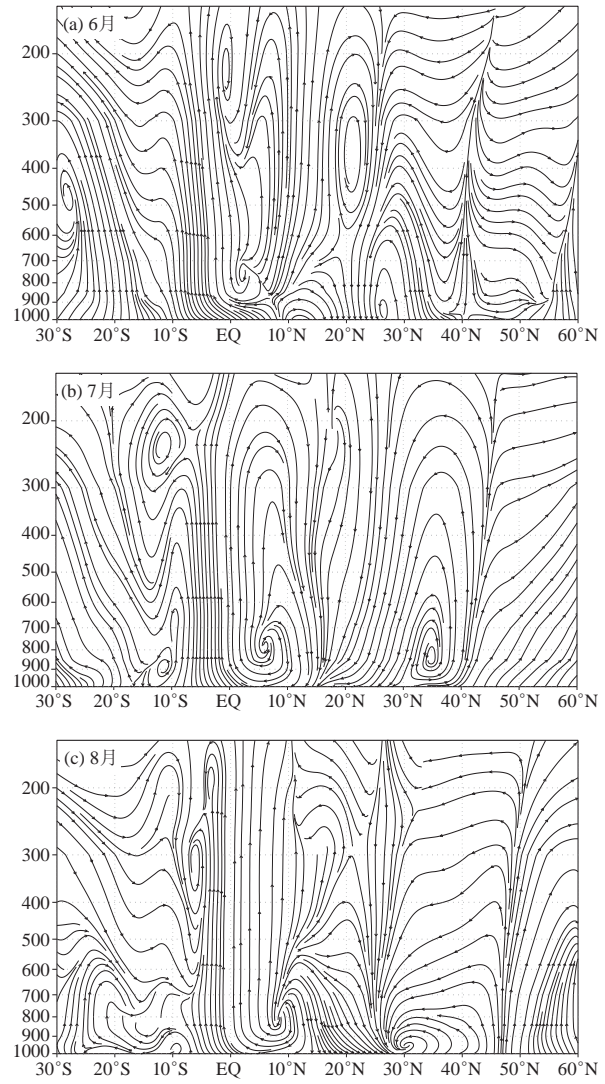


图8 2013年夏季 125° — 140° E经向平均的纬向垂直距平环流(垂直速度扩大至100倍, 单位为 10^{-2} hPa/s; 纬向风速单位:m/s)

亚西风急流偏强偏北, 欧亚中高纬地区以纬向环流为主, 均有利于副高加强、偏西和北扩。然而, 2013年夏季副高偏强偏西, 但脊线仅偏北 0.5 个纬度, 副高的这种特征有利于江淮地区降水偏多, 实况却是华北

和东北降水异常偏多，而江淮降水偏少，这可能是由于中高纬度高度场偏低，以纬向环流为主，不利于冷空气南下。毛恒青等^[36]研究表明，东北亚阻塞的强盛年基本上与El Niño相对应，太平洋海温异常会激发东亚地区的遥相关波列，致使东北亚地区500hPa高度场异常，从而使东北亚阻塞高压异常。2013年前冬至夏季，赤道中东太平洋海温维持偏冷状态，不利于夏季东北亚阻塞高压的形成和维持。

此外，图9给出了1974—2013年前冬欧亚大陆和青藏高原积雪面积距平序列。由图可见，2013年前冬欧亚积雪面积异常偏大（位列近40年来的第四位），而高原积雪略偏少。研究表明，前冬欧亚大陆北部积雪增多年的夏季，贝加尔湖以东易盛行异常冷低压，东亚副热带西风急流增强，副高加强、西伸和北扩，江南地区在副高的控制下易干热^[37]；而冬季高原积雪偏少会导致从冬至夏高原地面感热加热增强，造成从冬至夏高原上升运动加强，有利于南亚高压的增强，另一方面增强了东亚季风的强度，副高偏北，使得长江流域降水偏少^[38]。由此可见，2013年前冬欧亚积雪异常偏多和高原积雪偏少，可能是夏季中高纬环流、副高及东亚夏季风异常的另一个主要原因。

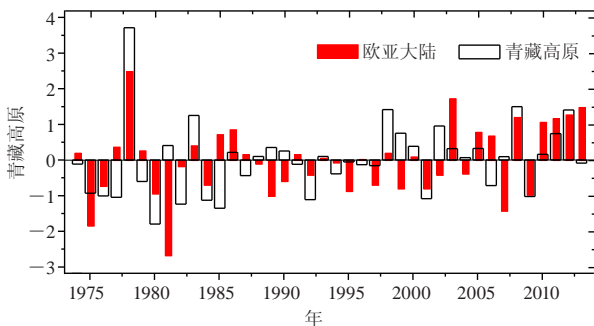


图9 1974—2013年前冬欧亚大陆和青藏高原积雪面积距平 (单位: 10^6km^2)

综上所述，在前冬太平洋和印度洋海温、欧亚积雪等外强迫异常的影响下，2013年夏季东亚大气环流发生异常，即中高纬阻塞高压活动偏弱，副高偏北，东亚夏季风偏强，东北冷涡活跃，导致我国夏季北方降水异常偏多，南方降水偏少。此外，华南南部受西太平洋强台风的影响，降水偏多。

5 结论和讨论

对2013年中国夏季降水实况进行回顾，分析导致降水异常的东亚大气环流系统的配置特征，以及海温和积雪等外强迫对东亚大气环流的影响，具体结论如下：

(1) 2013年我国夏季降水整体略偏多，大体呈北涝南旱的分布特征，夏季主雨带位于华北和东北地区，西北大部降水也异常偏多，其中东北等地发生洪

涝，而淮河流域和云贵至江南等地降水异常偏少，气象干旱严重。

(2) 从东亚夏季风环流系统季节内配置特征可见，2013年夏季东亚夏季风总体偏强，阶段性变化显著，副高第一次北跳偏晚第二次北跳偏早，季节内多次加强西伸，加强了水汽向北输送；同时欧亚中高纬地区为冷性低压控制，季节内东北冷涡活动频繁，欧亚阻塞高压活动偏少，不利于冷空气南下；在东亚夏季风系统关键成员的这种配置下，冷暖空气于我国北方地区辐合，导致了夏季北方地区发生多次强降水过程。

(3) 图10给出了前冬海温和积雪等外强迫异常对东亚夏季风系统关键成员的影响、东亚夏季风系统成员的相互作用和配置，及其对2013年中国夏季降水异常的影响机理。前冬至春季印度洋偏暖、太平洋东冷西暖，通过沃克环流和哈得来环流等，使副高偏强、偏西偏北，东亚夏季风加强；冬、春季高原积雪偏少，通过感热加热使夏季南亚高压增强东扩，进而促使副高加强西伸；冬、春季欧亚积雪异常偏多，导致贝加尔湖以东盛行异常冷低压，东北冷涡活跃，东亚副热带西风急流增强，副高加强、西伸和北扩。中高纬以纬向环流为主，不利于冷空气南下，而副高偏西偏北，东亚夏季风偏强，加强了水汽向北输送，冷暖空气在我国北方地区长时间对峙，导致北方降水偏多。

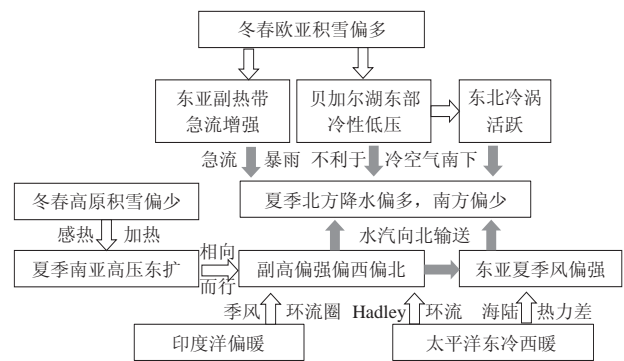


图10 2013年中国夏季降水异常机理分析——气候模型

本文从东亚夏季风环流系统季节内异常的配置分析了2013年夏季中国北涝南旱的直接成因，并进一步探讨了海温和积雪等外强迫异常对东亚夏季风环流系统的可能影响，以期为中国夏季旱涝检测、归因和预测提供一定参考。此外，进入21世纪以来，中国夏季主雨带逐渐北移，淮河流域连续几年出现了严重的洪涝灾害，例如2000，2003，2005和2007年^[17,39-41]，而2012年^[19]和2013年夏季主雨带进一步北移至黄河流域及其以北地区，呈现出北涝南旱的态势，是否意味着一次新的旱涝趋势的年代际转折？这是一个值得关注和探讨的问题，将另文分析。

参考文献

- [1] 第二次气候变化国家评估委员会. 第二次气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2011.
- [2] 吴国雄, 李建平, 周天军, 等. 影响我国短期气候异常的关键区: 亚印太交汇区. 地球科学进展, 2006, 21(11): 1109-1118.
- [3] 丑纪范, 徐明. 短期气候数值预测的进展和前景. 科学通报, 2001, 46(11): 890-894.
- [4] 黄荣辉, 蔡榕硕, 陈际龙, 等. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系. 大气科学, 2006, 30(5): 730-742.
- [5] 李维京. 1998年大气环流异常及其对中国气候异常的影响. 气象, 1999, 25(4): 20-25.
- [6] 封国林, 杨涵涌, 张世轩, 等. 2011年春末夏初长江中下游地区旱涝急转成因初探. 大气科学, 2012, 36(5): 1009-1026.
- [7] 封国林, 孙树鹏, 赵俊虎, 等. 基于2009年初长江中下游地区持续阴雨过程的10-30天延伸期稳定分量的提取及配置分析. 中国科学 地球科学, 2013, 43(5): 836-847.
- [8] 赵俊虎, 封国林, 王启光, 等. 2010年我国夏季降水异常气候成因分析及预测. 大气科学, 2011, 35(6): 1069-1078.
- [9] 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.
- [10] 丑纪范, 徐明. 短期气候数值预测的进展和前景. 科学通报, 2001, 46(11): 890-894.
- [11] 李维京. 现代气候业务. 北京: 气象出版社, 2012.
- [12] 宋连春, 肖风劲, 李威. 我国现代气候业务现状及未来发展趋势. 应用气象学报, 2013, 24(5): 513-520.
- [13] 顾薇, 李崇银, 杨辉. 中国东部夏季主要将水型的年代际变化及趋势分析. 气象学报, 2005, 63(5): 728-739.
- [14] 黄荣辉, 陈际龙, 刘永. 我国东部夏季降水异常主模态的年代际变化及其与东亚水汽输送的关系. 大气科学, 2011, 35(4): 589-606.
- [15] 陶诗言, 张庆云, 张顺利. 1998年长江流域洪涝灾害的气候背景和大尺度环流条件. 气候与环境研究, 1998, 3(4): 290-298.
- [16] 陈桂英, 张培群, 许力. 1999年夏季中国降水南多北少成因初探. 气候与环境研究, 2001, 6(3): 312-320.
- [17] 毕宝贵, 章国材, 李泽椿. 2003年淮河洪涝与西太副高异常及成因的关系. 热带气象学报, 2004, 20(5): 505-514.
- [18] 龚志强, 王艳娇, 王遵娅, 等. 2013年夏季气候异常特征及成因简析. 气象, 2014, 40(1): 119-125.
- [19] 赵俊虎, 支蓉, 申茜, 等. 2012年我国夏季降水预测与异常成因分析. 大气科学, 2014, 38(2): 237-250.
- [20] 丁一汇. 高等天气学. 北京: 气象出版社, 2005.
- [21] 丁一汇, 胡国权. 1998年中国大洪水时期的水汽收支研究. 气象学报, 2003, 61(2): 129-145.
- [22] Simmonds I, Bi D, Hope P. Atmospheric water vapor flux and its association with rainfall over China in summer. J Climate, 1999, 12(5): 1353-1367.
- [23] 王可丽, 江灏, 赵红岩. 西风带与季风对中国西北地区的水汽输送. 水科学进展, 2005, 16(3): 432-438.
- [24] 贾小龙, 陈丽娟, 龚振淦, 等. 2010年海洋和大气环流异常及对中国气候的影响. 气象, 2011, 37(4): 446-453.
- [25] 施能, 朱乾根, 吴彬贵. 近40年东亚夏季季风及我国夏季大尺度天气气候异常. 大气科学, 1996, 20(5): 575-583.
- [26] 张庆云, 陶诗言. 亚洲中高纬度环流对东亚夏季降水的影响. 气象学报, 1998, 56(2): 199-211.
- [27] 吴国雄, 丑纪范, 刘屹岷, 等. 副热带高压研究进展及展望. 大气科学, 2003, 27(4): 503-517.
- [28] 何金海, 吴志伟, 江志红, 等. 东北冷涡的“气候效应”及其对梅雨的影响. 科学通报, 2006, 51(23): 2803-2809.
- [29] 杨涵涌, 封国林, 沈柏竹, 等. 中国夏季东北冷涡强度的定量分析. 大气科学, 2012, 36(3): 487-494.
- [30] 张庆云, 陶诗言. 夏季西太平洋副热带高压的北跳及异常的研究. 气象学报, 1999, 57(5): 539-548.
- [31] 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流. 气象学报, 2003, 61(4): 559-568.
- [32] 肖子牛, 孙绩华, 李崇银. El Niño期间印度洋海温异常对亚洲气候的影响. 大气科学, 2000, 24(4): 461-469.
- [33] 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(4): 422-428.
- [34] 应明, 孙淑清. 西太平洋副热带高压对热带海温异常响应的研究. 大气科学, 2000, 24(2): 193-206.
- [35] 蒋国荣, 沙之钰, 蔡剑平. 印度洋和北太平洋海温与夏季西太平洋副热带高压长期变动的关系. 海洋预报, 1991, 8(1): 16-24.
- [36] 毛恒青, 李月安, 姚学祥, 等. 1998年夏季东北亚阻塞高压异常的大尺度环流特征及成因初探. 南京气象学院学报, 2011, 24(2): 221-227.
- [37] 穆松宁, 周广庆. 冬季欧亚大陆北部新增雪盖面积变化与中国夏季气候异常的关系. 大气科学, 2010, 34(1): 213-226.
- [38] 韦志刚, 陈文, 黄荣辉. 青藏高原冬春积雪异常影响中国夏季降水的数值模拟. 高原山地气象研究, 2008, 28(1): 1-7.
- [39] 谭桂容, 孙照渤, 朱伟军, 等. 2007年夏季降水异常的成因及预测. 大气科学学报, 2009, 32(3): 436-442.
- [40] 司东, 丁一汇, 柳艳菊. 中国梅雨雨带年代际尺度上的北移及其成因. 科学通报, 2010, 55(1): 68-73.
- [41] 龚志强, 赵俊虎, 封国林. 中国东部2012年夏季降水及年代际转型的可能信号分析. 物理学报, 2013, 62(9): 099205.

高时空分辨率观测资料对两次夏季北京暴雨的特征分析

钱恺^{1,2,3} 刘锦丽¹ 毕永恒¹ 韩永² 吕达仁¹

(1 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测重点实验室, 北京 100029;

2 南京大学大气科学学院, 南京 210093; 3 解放军94701部队, 安庆 246001)

摘要: 利用S波段测雨雷达、毫米波测云雷达、风廓线雷达等观测资料对2011年6月23日和2012年7月21日(以下简称7·21暴雨)发生在北京地区的两次中尺度对流系统(MCS)引起的大暴雨观测资料进行分析, 结果表明: 导致两次暴雨的回波均具有线状对流特征, 其组织形态为平行层状(PS)降水中尺度对流系统; 两次暴雨中PS型MCS与长江中下游地区此类MCS移动方向偏东或东北略有不同, 而是向偏东或东南方移动, 但7·21暴雨过程中最后阶段影响北京形成的PS型MCS却是向东北移动的。毫米波测云雷达可以观测到测站上空及周边云的形态特征及发展情况, 回波强度及速度可以展现出云的演变、内部结构特征以及降水状态。而风廓线资料表明两次暴雨在风场变化中均存在着相似的特征, 两次暴雨前期低层均存在东风层, 这与北京特殊地形的共同作用可能是导致夏季强降水的因素之一; 同时, 暴雨发生之前存在对流层低层风速明显增大的过程。低层扰动的加强、风向之间的切变以及超低空急流均有可能是导致强降水的原因。

关键词: 暴雨, 中尺度对流系统, 测雨雷达, 测云雷达, 风廓线雷达

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.05.003

Analysis of Two Heavy Rainstorms in Summer Beijing by Using Observation Data with High Temporal and Spatial Resolution

Qian Kai^{1,2,3}, Liu Jinli¹, Bi Yongheng¹, Han Yong², Lü Daren¹

(1 Key Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation(LAGEO), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029 2 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093 3 Unit 94701, PLA, Anqing 246001)

Abstract: By using S-band weather radar, 8.6 mm wave-length cloud radar and wind profile radar data, the two heavy rainfalls in June 23, 2011 (hereinafter referred to as the 6-23 rainstorm) and July 21, 2012 (hereinafter referred to as the 7-21 rainstorm), which occurred in Beijing area, are caused by a meso-scale convective system (MCS). Observation results show that the characteristics of linear convection were found in two rainstorms, and its organization mode was classified as parallel stratiform MCS (PS). Such MCSs in the middle and lower reaches of the Yangtze River move to the east or northeast, but these two MCSs move to the east or southeast. However, the PS which affect Beijing during the final stages is moving to the northeast. Millimeter wave cloud radar could observe the morphological characteristics and development of the cloud over the station. The intensity and velocity of the echo show the evolution, internal structure of the cloud and precipitation state. The wind profiler data indicate that similar changes of the wind field existed in two rainstorms. The interaction of the east wind in the boundary layer during its early stages and the special terrain might be one of the factors leading to the heavy rain in that summer, Beijing. Meanwhile, the velocity in low-troposphere increases significantly before rainstorm. The strengthening of low-level disturbances, wind direction shear and the ultra low-level jet are likely to be the causes of heavy precipitation.

Keywords: rainstorm, meso-scale convective system, weather radar, cloud radar, wind profile radar

0 引言

由暴雨等引起的洪涝已经成为我国较为严重的自

然灾害之一, 针对如何提高此类灾害性天气的预报预警能力是气象学者关注的重点。我国是一个暴雨频发的国家, 除西北地区以外, 其他区域几乎都会发生暴雨。暴雨的发生与中尺度天气系统紧密相关, 随着各种观测网络的建立以及观测资料的多样化, 对直接影响暴雨的系统——中尺度对流系统(MCS)的研究,

收稿日期: 2014年3月17日; 修回日期: 2014年7月28日
第一作者: 钱恺(1983—), E-mail: qiankai_nju@163.com
资助信息: 国家重点基础研究发展计划(2010CB428601)

越来越被气象学者所重视。

Orlanski^[1]、Parker等^[2]对MCS的特征做出如下定义：雷达回波反射率大于40dBz、水平尺度范围大于100km、持续时间3~24h。针对MCS所导致的极端降水，Maddox等^[3]在1979年将美国151个致洪暴雨个例分成三类，并总结出每种类型的形势场及共有的环境特征。Doswell等^[4]指出任何地区的总降水量与降水率和持续时间直接相关，而降水率依赖于湿空气、垂直运动和降水效率，持续时间则与系统的尺度、移动速度以及暴雨内部降水强度的变化相关。Schumacher等^[5-6]利用自动雨量站与组网雷达对美国洛基山脉以东1999—2001年116次极端降水个例的观测表明，65%的极端降水是由MCSs造成的；同时对1999—2003年中184次极端降水事件的研究表明，7月发生极端降水的概率最为频繁，美国北部及平原地区的极端降水只在暖季（4—10月）发生，且极端降水几乎都是由MCS所导致，而南方地区任何季节都可发生极端降水，热带系统产生的极端降水占有相当大的比例。

台湾地区针对致洪暴雨的预报，在1985年制定了台湾地区中尺度试验（Taiwan Area Mesoscale Experiment, TAMEX）计划，其研究的主要内容为梅雨锋、MCS以及地形和两者之间的相互作用^[7]。日本于1998年启动了“中尺度对流系统的结构和发生发展机理研究”计划，利用1999—2002年在中国东海和日本九州获取雷达等观测资料对梅雨锋进行了深入的研究^[8]。国内的诸多研究也基本集中在长江中下游及华南地区。通过1997年“海峡两岸及邻近地区暴雨试验研究”、1999年“我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究”及2004年“我国南方致洪暴雨监测与预测的理论和方法研究”等，对中尺度暴雨系统的研究取得了一系列的研究成果^[9]。程麟生等^[10]对中纬度的MCS的研究进展做了全面的综述。近年来，华北地区处于相对干旱期，对华北地区强降水的研究相对较少，对引发华北暴雨的中尺度系统的结构和特征还不是很清楚^[11]，而华北暴雨与华南暴雨及长江中下游的梅雨又不尽相同，因此，对于引发华北/北京地区暴雨的MCS值得我们进一步关注与研究。

王令等^[12]对6·23暴雨分析表明中尺度对流云带是造成强降水的主要原因；陈赛男^[13]对本次暴雨的研究表明造成此次降水过程中的强降水是由 β 中尺度对流单体和 γ 中尺度对流单体强烈发展引起的；针对7·21暴雨，方翀等^[14]将本次暴雨分为三个阶段，分别为暖区降水阶段（09:30—16:00）、锋面降水阶段（16:00—22:00）和消散阶段（22:00—05:00），并

指出本次极端降雨成因包括对流系统持续的“列车效应”，以及低质心高效率的降雨对流系统。湛芸等^[15]研究表明低涡切变线及华北地形共同触发了MCS的暖区生成发展；低涡北跳、MCS后向传播特性使暖区MCS东移速度慢，形成“列车效应”，造成降雨持续时间长。孙军等^[16]指出降水过程首先以层状云降水和分散的对流性降水为主。随着干冷空气的侵入逐渐转化为高度组织化的对流性降水，多个中小尺度对流云团组织化发展并形成中尺度对流复合体（MCC），产生极端强降水。孙建华等^[17]利用HYSPLIT模式模拟不同层次水汽轨迹表明：3000m的水汽主要来源于从南海经我国西南地区到华北的西南通道，2000m的水汽分别来源西南通道和黄淮，对流层低层（约1000m）的水汽主要来源于黄海；通过雷达反射率表明第二阶段降水中回波在层状云系的南侧组织成了线状对流，组织形态为典型的层状云与对流云平行的类型（parallel stratiform precipitation, PS型）。

虽然对这两次暴雨过程已经有了多方面的分析，但我们仍希望利用掌握的这两次降水过程的一些高时空分辨率的观测资料对华北/北京地区产生暴雨的MCS特征进行分析，为理解暴雨结构与过程特征提供进一步认识，以期更有效地提高临近预报的能力。

1 资料介绍

本文使用的资料主要包括有：ECMWF再分析资料（ $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ ）、北京市气象局自动雨量站数据、S波段测雨雷达资料、毫米波测云雷达和风廓线雷达等数据；所有观测数据在使用前均已进行质量控制；文中时间均为北京时。图1显示了北京市气象局的自动雨量站、S波段雷达和风廓线雷达的分布情况以及中国科学院大气物理研究所（以下简称大气所）的风廓线雷达、毫米波测云雷达及自动雨量站的分布。

自动雨量站资料由北京市气象局短临交互预报系统（VIPS）^[18]的自动雨量站提供。在该系统中，北京市境内共有188个自动雨量站，可提供每个雨量站的降水、温度、湿度、气压、风向以及风速等数据。大气所自动雨量站位于北京市华严里40号楼楼顶（ 39.9768°N ， 116.3612°E ），该自动雨量站不属于VIPS系统。

S波段测雨雷达位于北京市南郊观象台（ 39.8061°N ， 116.4694°E ），其中雷达观测半径为230km，波长10cm，测量参数主要包括反射率和径向速度等。

毫米波测云雷达同样位于大气所华严里40号楼楼顶。雷达波长8.6mm，探测范围150m~40km，测量参数主要有反射率、速度、速度谱宽以及线性退极化比等。

风廓线雷达分别位于海淀(39.9870°N, 116.2906°E)和大气所科研楼楼顶(39.9768°N, 116.3612°E)。两部雷达均为边界层风廓线雷达,探测高度为3000m。

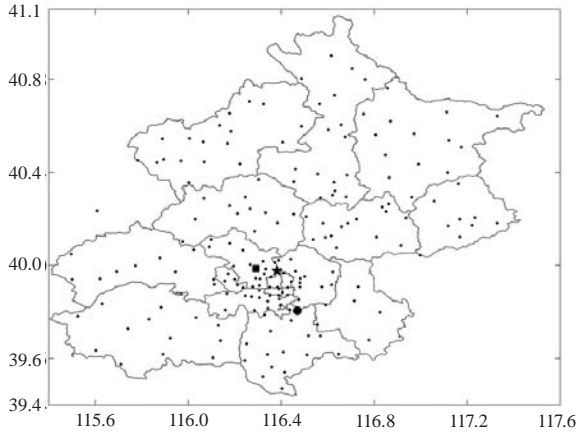


图1 试验观测站点分布
(北京市自动雨量站(·)、S波段测雨雷达(•)、海淀风廓线雷达(■),毫米波测云雷达、大气所风廓线雷达及自动雨量站(★))

2 暴雨概况及天气形势

2.1 暴雨概况

2011年6月23日和2012年7月21日,北京地区发生近几年来较为严重的两次暴雨灾害天气。6·23暴雨约从15时开始至22时降水逐渐停止,石景山、房山等中南部地区出现了24h超过100mm的降水;而7·21暴雨持续近18h,21日11时左右降水开始至22日05时降水结束,北京市部分地区出现了洪涝,市区则出现了内涝,房山区24h累计降水超过400mm。两起暴雨均导致人员伤亡和财产损失,对社会造成了巨大的影响。

2.2 天气形势

利用ECWMF再分析资料对两次暴雨进行分析。2011年6月23日08时,在500hPa天气图上(图2a),中高纬地区呈现典型的“两槽一脊”型,贝加尔湖地区附近为一阻塞高压,我国东北至河套地区为一横槽,高压前部的偏北气流将冷空气源源不断地向南输送。西太平洋地区则是强盛的副热带高压,暖湿空气沿副热带高压(以下简称副高)低层850hPa的急流不断向北运动,冷暖空气在华北中北部交汇。中纬度地区200hPa高空存在一条明显的西风急流,北京上空的急流明显加强,位于急流入口区的右侧。在850hPa流场(图2c)中,华北的西北部为一低涡,与500hPa横槽形成较为有利的高空槽暴雨^[19],有利于造成华北/北京地区的强降水。

2012年7月21日08时(图2b),中高纬贝加尔湖

地区为一冷涡,温度场落后于高度场,冷涡中不断分裂出的冷空气向南推进,河套地区的低压槽缓慢东移。我国东部沿海地区则由副高控制。北京位于200hPa高空急流的右侧,850hPa有低空急流逐渐形成并向华北地区移动,而位于河套地区的低涡(图2d)与副高之间则形成了“东高西低”的气压梯度,低涡与500hPa的低压槽相配合,同样也是较为典型的华北暴雨天气形势。

综合比较,两次暴雨均是在较为典型的华北暴雨天气形势下产生的,6·23暴雨为“两槽一脊”型,7·21暴雨为“东高西低”型,其共同特征均为高空槽配合低层低涡的发展而导致暴雨的产生,在其发生发展过程中都伴随有低涡、副高和高低空急流等天气系统。6·23暴雨中副高相对于7·21暴雨中更偏东,副高主体位于日本东南洋面上,而7·21暴雨中副高更偏西,位于我国东部洋面,与贝加尔湖冷涡形成对峙的局面,这也是造成7·21暴雨相对于6·23暴雨维持时间更久、两次暴雨表现出不同降水特征的原因之一。

3 观测结果分析

3.1 S波段测雨雷达回波特征分析

针对这两次MCS引起的北京暴雨过程,利用S波段雷达资料着重分析对流回波在北京地区的组织类型特征。

层状回波在强对流回波两侧或前方发展的MCS称之为平行层状(PS)降水MCS。图3a,3c和3e展示了6·23暴雨过程中回波变化过程。15:54对流回波主体已经位于北京市境内(图3a),且发展已经非常旺盛,呈东北—西南走向分布并向东南方移动,带状回波特征较为明显。至17:30(图3c),强对流主体已移至北京的东南部,对流强度略有减弱,但在回波的前段仍然可以分辨出带状强对流回波带;19:00之后(图3e)强对流回波已经移出北京,影响北京的过程基本结束。

7·21暴雨过程中回波的变化相对要复杂很多,在PS型MCS形成之前对流回波先期经历了“列车效应”,导致了第一阶段的强降水。因此我们给出与6·23暴雨中相似的第二阶段线状对流影响过程进行分析。图3b揭示了7·21过程中19:00对流回波带状结构非常明显,呈东北—西南分布,而此时的移动方向则是向东移动。至20:48对流主体逐渐移向北京东部(图3d),强回波带分裂为两条,一条位于东部,另一条位于房山,房山地区连续经历线状对流的影响,也导致了该地区的降水量大增。PS型MCS同样出现在了降水趋于消散的阶段(图3f),位于北京的西南方,但

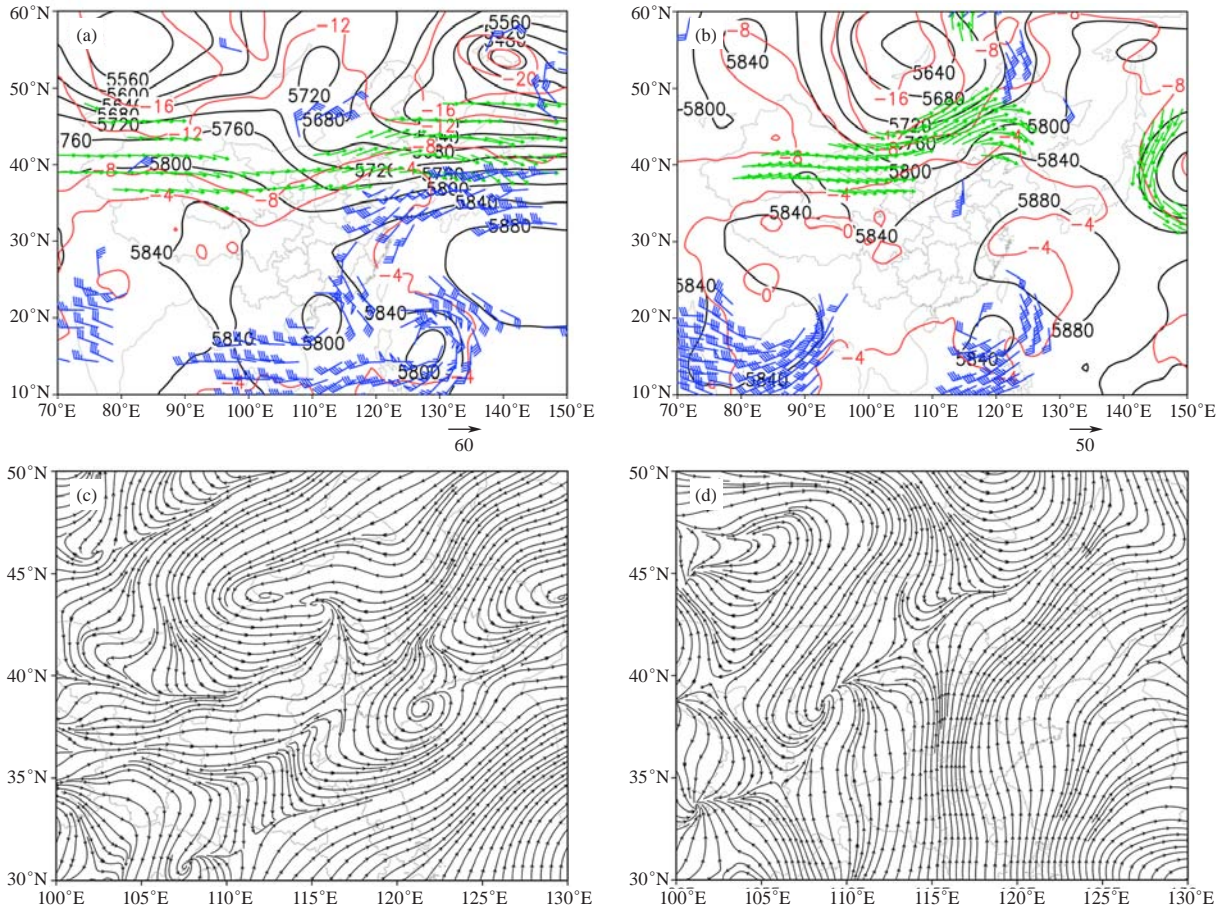


图2 2011年6月23日08时 (a) 和2012年7月21日08时 (b) 500hPa位势高度 (黑色实线, 单位: gpm)、温度 (红色实线, 单位: $^{\circ}\text{C}$)、200hPa高空急流 (风矢表明 $\geq 30\text{m/s}$) 和850 hPa低空急流 (风羽表明 $\geq 12\text{m/s}$) ; 2011年6月23日08时 (c) 和2012年7月21日08时 (d) 850hPa流场

是与之之前不同的是强度和影响范围都较小, 并向东北的城区移动, 致使城区在22日02时左右迎来最后一次强降水过程, 小时降水量达到30mm。

综合两次暴雨过程, S波段雷达可以很容易地分辨出MCS的特征, 两次暴雨过程的相同之处在于对流发展最为旺盛的时刻 (图3a和3b) 均体现了线状对流特征, 其组织形态为平行层状 (PS) 降水MCS。与长江中下游地区的此类MCS (PS型) 大多是向东或东偏北移动^[20]不同的是, 这两次MCS主体则是向东或偏东南方向移动, 只有7·21暴雨过程中23:54 (图3f) 北京西南外的PS型MCS是向东北方向移动。而两次暴雨对流回波的区别在于7·21暴雨较6·23暴雨更为复杂, 先期暖区降水中的“列车效应”也是导致7·21降水量大于6·23暴雨的原因之一, 6·23暴雨只经历了单次强对流的影响。

3.2 毫米波雷达回波特征分析

利用毫米波测云雷达可以观测到测站上空及周边云的水平及垂直结构, 反射率及速度等信息可以清晰

地反应出云的宏观及微观特征。由于毫米波雷达波长较短, 对于强降水有一定的衰减作用, 因此毫米波测云雷达对于反射率值介于 $-40\sim 10\text{dBz}$ 的非降水云及弱降水云的观测具有重要意义, 强降水探测一般使用波长较长的S波段测雨雷达。因此, 利用毫米波测云雷达观测北京夏季强对流过程中的云的变化, 并结合其他探测设备进行联合观测, 可以加深对强对流过程的认识。表1为极化测量下的标准反射率等级。

表1 标准反射率等级

类型	反射率/dBz
非降雨云	< -40
边界云	-20~10
毛毛雨	< 25
雨	25~60
干雪 (低密度)	< 35
干冰晶 (高密度)	< 25
湿雪 (正融化)	< 45
霰	40~55
冰雹 (<2cm)	50~60
冰雹 (>2cm)	55~70
雨夹冰雹	50~70

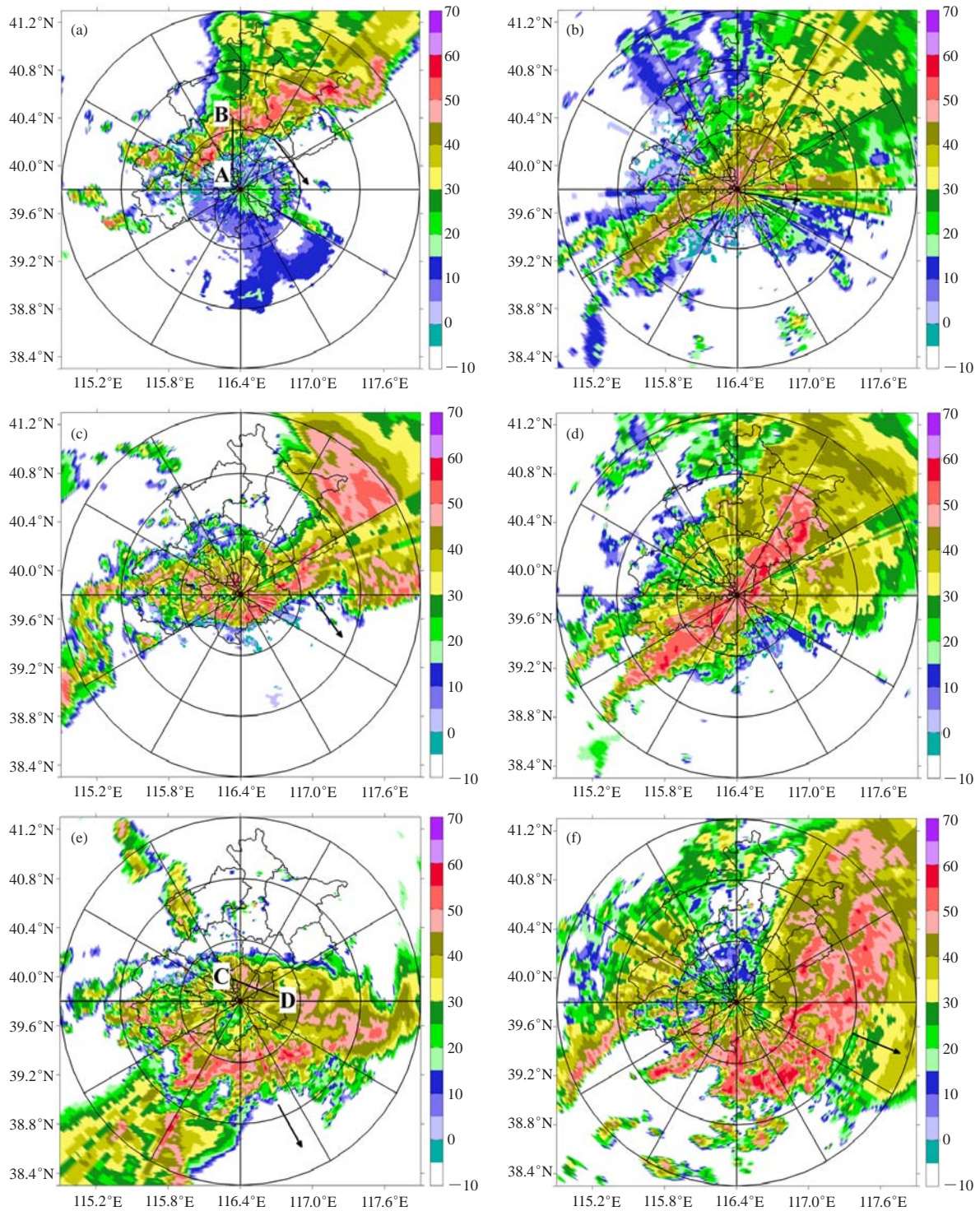


图3 6·23暴雨15:54 (a)、17:30 (c)和19:30 (e) 1.5°仰角雷达回波反射率 (单位: dBz) ; 7·21暴雨19:00的0.5°仰角 (b)、20:00的1.5°仰角 (d)和23:54的1.5°仰角 (f) 雷达回波反射率 (单位: dBz) (黑色箭头代表对流回波移动方向)

图4a和4b分别是6·23暴雨中15:50—15:56所观测反射率因子与速度。测站6km以上存在厚度约为4km云层, 云底较为平直, 云顶呈现不规则形态, 云顶与云底的回波反射率约为-15dBz, 云内反射率介

于一5~5dBz。随着时间推移, 云内的反射率逐渐加强至10dBz, 表明云体的增强与发展。图4b所展示的是云内垂直速度的分布, 云内基本以弱下沉气流为主。在本次垂直探测后不久, 本场开始出现降水。

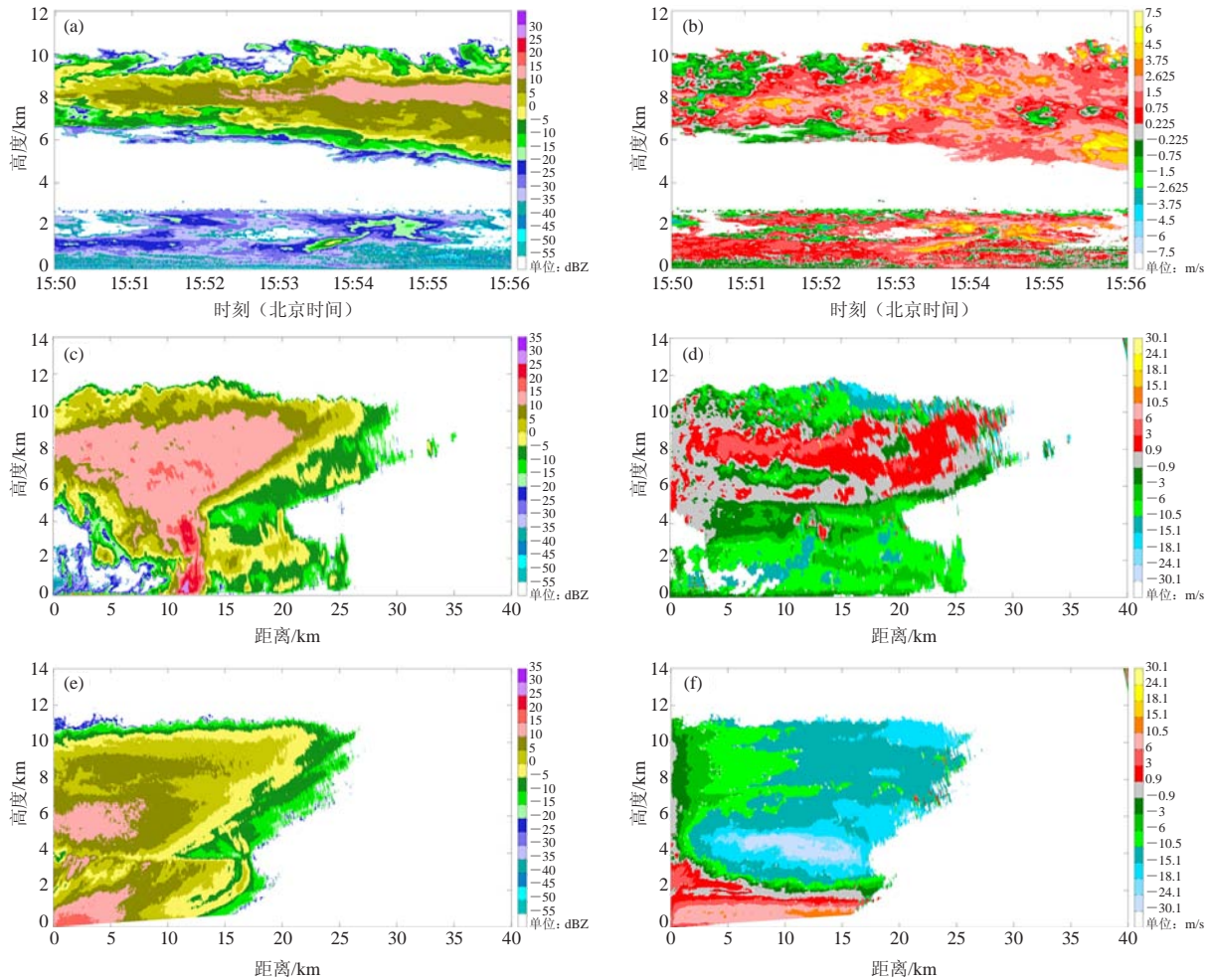


图4 2011年6月23日15:00—15:56的云反射率图 (a) 与速度 (b) (正值代表下沉气流、负值代表上升气流); 2011年6月23日15:56沿图3b中AB的云反射率 (c) 与速度 (d); 2011年6月23日19:30沿图3f中CD的云反射率 (e) 与速度 (f)

图4c和4e分别是15:56分沿图3a中AB和19:30沿图3e中CD做的RHI扫描。这两次过程分别展示了本站降水之前与降水经过本站时的探测情况。图4c中强对流刚逐渐向本站移动, 云状具有明显的积云特征。在距离本站10km的底层出现高于25dBZ的回波, 并且回波接地, 表明已有降水产生; 低层的上升气流逐渐加强 (图4d), 而6km以上则是下沉气流, 这样的垂直速度分布同样有利于降水的产生。图4e中积云特征则是在4km高度出现了明显的0°C亮带。亮带的出现能够更好地识别出冰水之间的差别, 因为同等体积下冰的散射是水的1/5, 所以亮带之上以冰粒为主, 亮带之下反射率大值区则以水滴为主。底层回波约20dBZ, 表明有较强的降水出现; 同时刻的速度图 (图4f) 中, 底层已经转变为下沉气流, 而对流后部 (云体后部) 则出现了较强的上升运动。

对7·21暴雨连续观测表明: 自05:00站点上空出现高度7000~9000m的卷云 (图5a), 反射率介

于一30~-10dBZ, 云底高度随着时间逐渐降低。09:00之后云内回波逐渐增强, 09:20回波接地, 表明雷达上空出现高度较低的云层或有弱降水出现。11:00后低层回波增强至20dBZ, 测站出现较强的降水。13:50—15:00的观测 (图5c) 在5.5km高度上存在0°C层亮带。速度图5d中, 整个对流已经呈现出下沉速度, 而在粒子下落过程通过0°C层亮带时, 出现了下沉速度突然增快, 由原先的0.5m/s增至6m/s, 产生这样的原因主要可能是小冰粒本身很小, 在遇到融化层前速度也相对较小, 通过融化层后粒子融化, 快速形成降水降落至地面。而图5c和5d中14:15—14:38的回波则可能由本站的强降水 (图5e) 而导致的衰减。

通过对两次暴雨过程中云的观测表明, 降水前均先出现高度较高的卷云, 随着时间的发展高度逐渐降低, 并伴随积云发展。回波的强度与速度可以帮助我们判别云的演变、内部特征以及降水状态; 0°C层亮带则可以分别云中粒子的状态。

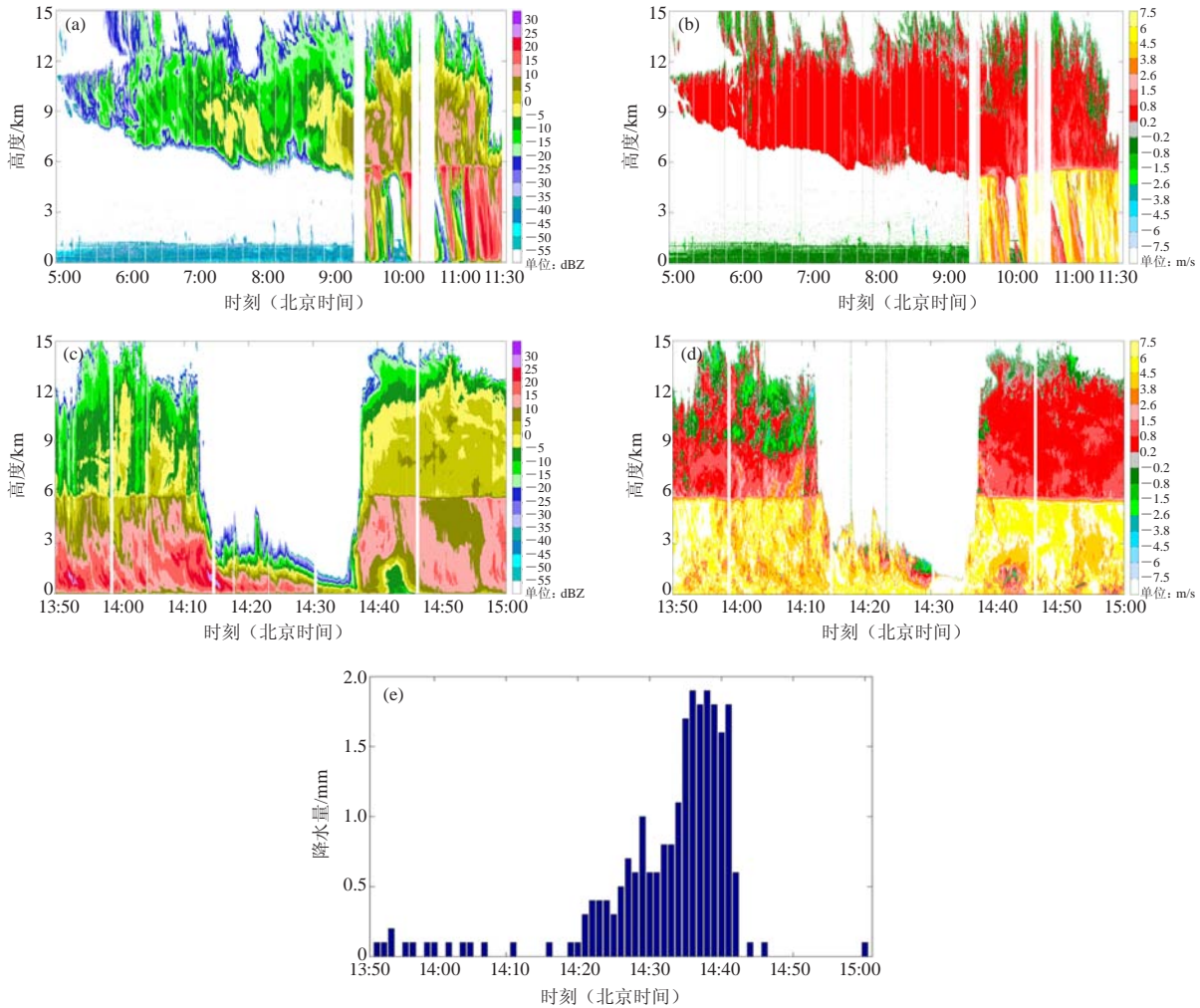


图5 2012年7月21日05:00—11:30的云反射率 (a) 与速度 (b) (正值代表下沉气流、负值代表上升气流); 21日13:50—15:00的云反射率 (c) 与速度 (d); 大气所自动雨量站监测雨量 (e)

综合S波段测雨雷达与毫米波测云雷达: S波段测雨雷达可以忽略雨水的衰减, 较为全面地反映出对流系统的演变过程, 但是对于弱云及非降水云的探测能力则略显不足; 而测云雷达可以细致地反应出经过测站上空云的演变过程, 有助于我们了解云的物理结构与规律, 也能够了解对流系统的变化特征。因此, 有效的利用两者各自的探测优势, 进行联合探测, 可以对MCS做更精细的研究。

3.3 风廓线雷达对两次强降雨过程的探测

风廓线雷达为实时监测、分析天气系统, 尤其是中小尺度天气系统的发生、发展的物理机理分析提供了可能^[21]。风廓线雷达的探测高度除了与雷达技术指标有关之外, 还受天气状况的影响。当有天气系统过境、高空水汽增加时, 伴有探测高度明显增加现象^[22]。因此, 我们在使用数据前, 滤掉了观测中的无效数据。文中所使用的两部风廓线雷达直线距离约6.8km。

降水量的分布表明7·21暴雨过程中城区经历了三次强降水(图6a和6b), 而6·23暴雨仅有一次(图6c和6d)。7月21日10:00—16:00是北京城区第一次强降水过程(图6a), 风场在低层约300m高度以下为偏东风和北风, 随着高度逐渐转变为东南风或南风。海淀站(图6b)从12:00在1500m高度上出现大于12m/s的风速, 至13:30, 500m的低空出现大于12m/s的风速, 存在着明显的风速脉动向下扩展的过程。第二次强降雨过程发生在21日17:00—22:00, 北京城区的最强降雨时间主要发生在20:00前后, 从图6a和6b中可看出, 17:00垂直方向500m高度的风向有南北风向逆转的过程, 至19:00, 500m以下水平风向发生东西风之间的逆转, 且低空急流随高度有增强的趋势, 1500m高度中的已经出现20m/s的急流。在第三阶段中, 从两站的风廓线中可以看出1500m以下的风向于22日01:00发生了反向变化, 并且风速迅速加强。600m高度上在

02:00两个测站均有大于12m/s的超低空急流出现。

而图6c和6d中6·23暴雨降水量不及前者，降水只集中某一段时间内，这与线状对流的快速发展和移动有关。6·23暴雨中降水与7·21暴雨中第一次强降水相似。降水发生之前1000m以下的偏东风随高度降低，风速逐渐减弱，1000m之上风向转为偏南及西南，这与郭虎等^[23-24]对边界层的偏西风对近地面层顶空气的后卷产生加强作用的表述非常吻合。临近降水时17:00两站低层50~500m的低空偏东风风速已经增加至10~12m/s，出现超低空急流，风速大值区有向下传播的现象，并且风向在约1500m的高度上发生顺转，19:00之后风向则为逆转，表明该高度在降水后期逐渐由冷空气控制。

通过对北京两次MCS过程的探测表明，结合之前的研究^[23-24]揭示了北京特殊地形所诱发的扰动作用，

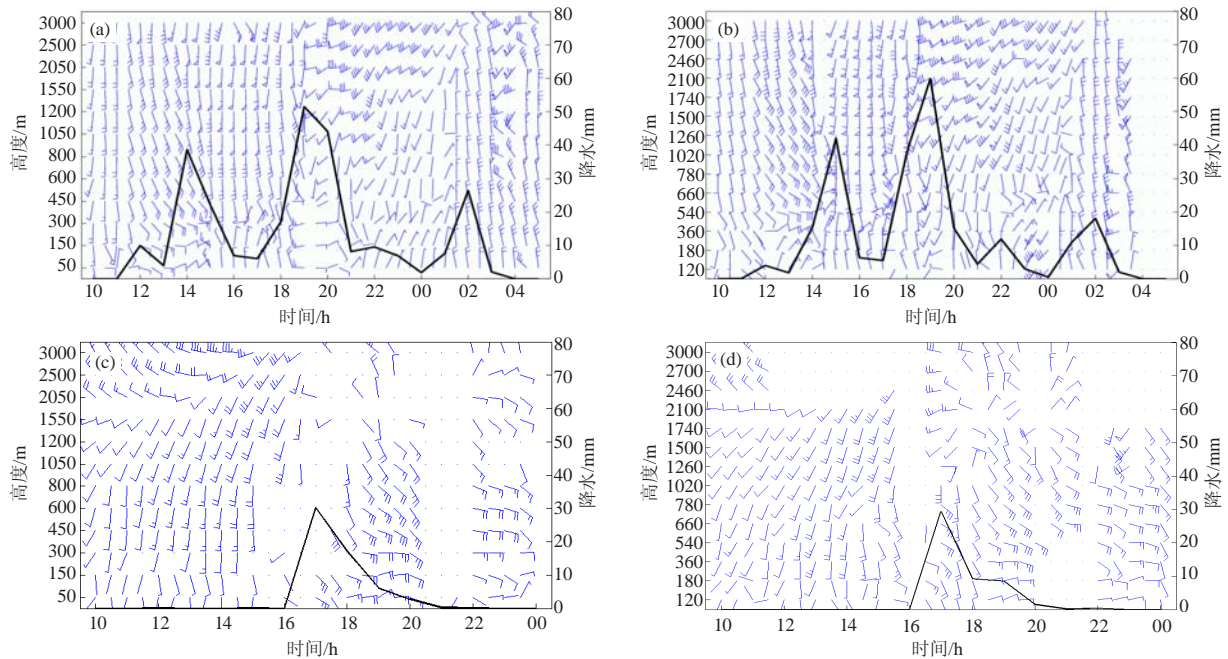


图6 大气所 (a, c) 和海淀 (b, d) 风廓线雷达每30min的平均风场及其对应的每小时雨量 (黑色实线)
(a, b) 2012年7月21日09时至22日06时; (c, d) 2011年6月23日10时至24日00时

4 小结与讨论

通过对6·23与7·21发生于北京地区两次持续性暴雨天气过程的ECMWF再分析资料及高时空分辨率资料分析，结果表明：

1) 两次暴雨均是在较为典型的华北暴雨天气形势下产生的，其共同特征均为高空槽配合低层低涡的发展，两次暴雨过程中均伴随有低涡、副高和高低空急流等天气系统。6·23暴雨中副高相对于7·21暴雨中更偏东，副高主体位于日本东南洋面上，而7·21暴

雨中的东风可能存在着重要的影响。综合两次暴雨过程中风廓线资料，6·23暴雨与7·21暴雨中第一次强降水过程与郭虎等^[23-24]提出的由北京地形作用而导致的空气沿山体抬升产生向后卷扬的概念模型非常一致，从而证明了地形的影响。同时，7·21暴雨中第一阶段中还存在明显的大值风速下传的现象，且下传速度快，一小时内由3000m高度上出现的20m/s的风速至低层500m出现大于12m/s的风速，这表明低层扰动的加强有可能是产生强降水的原因之一；而7·21暴雨中第二阶段的强降水则伴随着南风与西南风之间的切变以及低空急流的加强过程；第三阶段的情况与之相似，不仅存在南北风之间的切变，而且还有急流向低层扩展的现象，甚至出现超低空急流，这些均可能是导致强降水的因素。

雨中副高位于我国东部洋面，与贝加尔湖冷涡形成对峙，这是造成7·21暴雨相对于6·23暴雨维持时间更久、两次暴雨形成不同降水特征的原因之一。

2) 测雨雷达资料分析表明，平行层状 (PS) 降水MCS在这两次暴雨过程均有着重要的影响，但7·21暴雨对流回波过程更为复杂。经过先期暖区对流产生的“列车效应”之后，锋面降水过程中形成较为明显的PS型线状对流导致了第二次的强降水；而6·23暴雨对流回波则相对单一，局地性明显，其对流形态同样

具有平行层状(PS)降水MCS的特征。两次暴雨中PS型MCS与长江中下游地区此类MCS移动方向偏东或东北略有不同,而是向偏东或东南方移动,但7·21暴雨过程中最后阶段形成的PS型MCS是向东北移动的。

3) 毫米波测云雷达可以观测到测站上空及周边云的形态特征及发展情况,回波强度及速度可以展现出云的演变、内部结构特征以及降水状态。结合两次暴雨过程,测站在暴雨来临之前均先出现高度较高的卷云,随后云层逐渐降低,并伴随积云的发展,回波强度逐渐加强,最终强反射率回波接地即地面降水开始出现;0°C层亮带可以分别分辨云中粒子的状态。

4) 两次暴雨的风廓线展现了MCS低层风场特征。分析表明,两次暴雨在风场变化中均存在着相似的特征,但7·21过程风场更复杂。从风场的变化特征看,6·23暴雨与7·21暴雨前期降水过程均存在东风层,与北京特殊地形的共同作用可能是导致夏季强降水的因素之一;同时,两次暴雨过程发生之前均存在对流层低层风速明显增大的过程。风向的切变以及出现超高空急流等低层扰动加强的现象,这些均有可能是造成强降水的原因。

尽管文中利用高时空分辨率的探测资料揭示了北京6·23与7·21暴雨过程中的MCS特征,对于华北地区线状对流的组织类型和环境特征与长江中下游及华南地区的有何不同,仍需通过更多的个例对比研究。由于仪器本身仍存在一定时空布局的局限性,因此仅利用探测设备对暴雨等形成、维持的机制,地形对于华北地区MCS的产生和维持的作用等分析远远不够,在今后的工作中借助数值模拟手段来进一步研究。

致谢:北京市气象局提供资料。

参考文献:

- [1] Orlanski I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bull Amer Meteor Soc*, 1975, 56: 527-530.
- [2] Parker M D, Johnson R H. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems. *Mon Wea Rev*, 2000, 128: 3413-3436.
- [3] Maddox R A, Chappell C F, Hoxit L R. Synoptic and Meso- α scale aspects of flash flood events. *Bull Amer Meteor Soc*, 1979, 60: 115-123.
- [4] Doswell C A, Brooks H E, Maddox R A. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. *Wea Forecasting*, 1996, 11:560-581.
- [5] Schumacher R S, Johnson R H. Environmental properties of extreme-rain-producing mesoscale convective systems. *Mon Wea Rev*, 2005, 133: 961-976.
- [6] Schumacher R S, Johnson R H. Characteristics of U.S. Extreme Rain Events during 1999-2003. *Amer Meteor Soc*, 2006, 21:69-85.
- [7] 吴天琪. 台湾地区中尺度试验(TAMEX)简介. *气象科技*, 1992, 20(6): 47-51.
- [8] 孙晶. 梅雨锋暴雨中尺度对流系统研究若干进展. *气象科技*, 2011, 39(3): 257-265.
- [9] 倪允琪,周秀骥,张人禾,等. 我国南方暴雨的实验与研究. *应用气象学报*, 2006, 17(6): 690-704.
- [10] 程麟生,冯伍虎. 中纬度中尺度对流系统研究的若干进展. *高原气象*, 2000, 21(4): 337-347.
- [11] 赵宇,崔晓鹏,高守亭,等. 引发华北特大暴雨过程的中尺度对流系统结构特征研究. *大气科学*, 2011, 35(5): 945-962.
- [12] 王令,卞素芬,王国荣,等. 2011年6月23日北京暴雨多种探测资料的分析. 第28届中国气象学会年会——S1第四届气象综合探测技术研讨会, 2011.
- [13] 陈赛男. 北京“6·23”暴雨天气形成特征及云物理过程的影响研究. 北京:中国气象科学研究院硕士, 2013.
- [14] 方翀,毛冬艳,张小雯,等. 2012年7月21日北京地区特大暴雨中尺度对流条件和特征初步分析. *气象*, 2012, 38(10): 1278-1287.
- [15] 谌芸,孙军,徐璐,等. 北京721特大暴雨极端性分析思考(一)观测分析及思考. *气象*, 2012, 38(10): 1255-1266.
- [16] 孙军,谌芸,杨舒楠,等. 北京721特大暴雨极端性分析思考(二)极端性降水成因初探及思考. *气象*, 2012, 38(10): 1267-1277.
- [17] 孙建华,赵思雄,傅慎明,等. 2012年7月21日北京特大暴雨的多尺度特征. *大气科学*, 2013, 37(3): 705-718.
- [18] 苏德斌,孙成云,余东昌,等. 短临交互预报系统VIPs设计开发与应用. *气候与环境研究*, 2010, 15(5): 571-578.
- [19] 陶诗言. 中国之暴雨. 北京:科学出版社, 1980: 115-117.
- [20] 王晓芳,崔春光. 长江中下游地区梅雨期线状中尺度对流系统分析 I: 组织类型特征. *气象学报*, 2012, 70(5): 909-923.
- [21] 宋巧云,孙成云,梁丰,等. 风廓线雷达在北京市气象局的业务应用. *气象科技进展*, 2013, 3(5): 24-28.
- [22] 何平,朱小燕,阮征,等. 风廓线雷达探测降水过程的初步研究. *应用气象学报*, 2009, 20(4): 465-470.
- [23] 郭虎,段丽,杨波,等. 0679北京香山局地大暴雨的中小尺度天气分析. *热带气象学报*, 2008, 19(3): 265-275.
- [24] 郭虎,段丽,卞素芬,等. 利用加密探测产品对“06731”北京奥体中心局地暴雨结构特征的精细分析. *热带气象学报*, 2008, 24(3): 219-227.

热带气旋集合预报技术的应用情况简介

沈越婷^{1,2} 钱传海² 李泽椿² 范广洲¹

(1 成都信息工程大学, 成都 610225; 2 国家气象中心, 北京 100081)

摘要: 数值集合预报技术的不断改进和升级促进了热带气旋集合预报技术的发展和應用, 热带气旋集合预报在日常业务中发挥着越来越重要的作用。概述了ECMWF、NCEP、JMA和CMA等全球主要数值预报中心的热带气旋集合预报技术, 总结了当前热带气旋集合预报产品在路径、强度、风雨及生成预报等方面的应用, 对未来热带气旋集合预报的发展和應用进行了展望。

关键词: 热带气旋, 集合预报, 路径预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.05.004

A Review on Applications of Tropical Cyclones Ensemble Prediction Technologies

Shen Yueting^{1,2}, Qian Chuanhai², Li Zechun², Fan Guangzhou¹

(1 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225 2 National Meteorological Centre, CMA, Beijing 100081)

Abstract: The development and advancement of numerical ensemble prediction technologies have improved tropical cyclone (TC) ensemble forecasts and their applications. TC ensemble forecast has played a more and more important role in TC routine operations. This paper summarizes the TC ensemble prediction systems of ECMWF, NCEP, JMA AND CMA, overviews the applications of TC ensemble prediction on TC' track, intensity, precipitation and genesis forecasts etc., and looks into the future development and application of TC ensemble predictions.

Keywords: tropical cyclone, numerical ensemble prediction, track forecast

0 引言

热带气旋 (tropical cyclone, TC) 业务预报的核心支撑来自于数值预报。数值预报技术的发展, 为预报员提供了准确性越来越高、时效性越来越长、表现形式越来越丰富的指导产品, 推动了TC预报业务的快速发展。近20年来全球TC路径预报取得了长足进步。中央气象台24h台风路径预报误差和20年前相比减少了80~100km, 48h路径预报准确率与20年前的24h预报准确率相当, 72h路径预报准确率甚至高于20世纪90年代初48h预报水平^[1]。而在北大西洋, 2010年1~3d的飓风路径预报误差和15年前相比减少了50%, 4~5d的误差和10年前相比减少了40%^[2]。

数值天气预报是现代天气业务的第一次革命, 预报员正是站在数值预报这一“巨人”肩膀上使得TC路

径预报效果稳步提高。然而, 数值预报不是万能的, 即便再好的数值模式有时也会出现较大的偏差^[3], 2008年的强台风“风神”、2010年超强台风“鲇鱼”、2011年超强台风“梅花”和“南玛都”等, 由于ECMWF等数值模式的确定性预报出现较大偏差, 导致预报员对台风登陆点的预报出现较大误差, 引起较大的社会反响。

大气的混沌特性表明大气状态的演变对初始场非常敏感, 即便初始场的微小误差 (这种误差甚至小到预报员无法注意到) 也可能导致完全不同的预报结果^[3-5]。所以, 对于单一的确定性数值模式而言, 即便拥有“最好”的初值, 也永远无法做出完美的数值预报。针对这一问题, Epstein^[6]和Leith^[7]首先提出集合预报思想。相对于确定性数值模式只进行一次数值积分, 集合预报就是对模式初始场加入一系列小扰动, 再利用这些扰动初始场进行数值积分, 从而得出未来天气演变的多种可能性。除对初始场进行扰动外, 一些集合预报系统还对模式物理过程进行不同组合来开展集合预报 (多物理过程集合预报), 而另一些集合预报系统则采用多个模式进行集合预报 (多模式集合预报系统)。

收稿日期: 2014年2月20日; 修回日期: 2014年10月10日
第一作者: 沈越婷 (1988—), E-mail: anna88516@163.com
通信作者: 钱传海 (1968—), E-mail: chqian@cma.gov.cn
资助信息: 中国气象局2013年小型基建项目“灾害性天气预报业务系统的改进与升级 (二期) —台风监测预报业务改进”

集合预报是减小因初始条件不确定性、模式物理过程不确定性及模式不确定性对数值预报结果产生影响的有效方法。集合预报系统通常包括一个与集合预报成员具有相同分辨率,但是没有进行初始扰动和模式扰动的控制预报,也有个别的集合预报系统完全由集合成员组成。集合预报能提供比单一确定性模式更为丰富的信息。如果所有集合成员做出的预报非常相似,无疑就会增强预报员的信心,如果不同集合成员给出的预报非常发散,那就预示着未来天气发展具有较多不确定性。集合预报包含了天气演变的不确定性估计,不同用户在应用集合预报产品时可依据成本和损失比做出最优的决策,因而能得到更多的经济效益^[8-9]。

在前期研究探索和数值试验后,美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)^[10-12]和欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)^[13]于1992年12月率先建立了各自的全球集合数值预报业务系统。集合预报已越来越广泛应用于中、短期天气预报和短期气候预测^[14-19]。集合预报的业务化应用是现代天气业务的第二次革命^[20]。

集合预报技术应用于TC的数值预报研究起始于20世纪90年代中期^[21-32]。而随着计算机性能的快速提高和资料同化技术的发展,TC集合预报在近十年来逐步投入业务应用。2004年ECMWF依托其集合预报系统(一个控制预报和50个扰动预报)开始发布全球TC集合预报产品,包括TC中心位置、海平面最低气压、中心附近最大风速和TC袭击概率等^[33]。

TC集合预报在TC业务预报中发挥着越来越重要的作用,预报员在使用集合预报产品方面积累了愈发丰富的经验,开发了更有针对性的解释应用产品。下文首先对我国TC日常业务预报中常涉及的ECMWF、NCEP、日本气象厅(Japan Meteorological Agency, JMA)和中国气象局(China Meteorological Administration, CMA)等全球数值预报中心的TC集合预报系统进行阐述,然后分析TC集合预报产品在实际业务中的应用,最后进行讨论和展望。

1 全球主要数值预报中心TC集合预报系统

1.1 ECMWF的TC集合预报系统

1992年12月,ECMWF与NCEP建立了全球最早的集合预报系统,标志着集合预报从研究和试验阶段正式走向业务应用^[21, 33-35]。

集合预报的核心之一是初始场扰动技术。不同的集合预报系统构造初始扰动,或估计初始场的不确定性的方法各有不同。ECMWF最初基于奇异向量法

(singular vector, SV)来构造其初始扰动成员^[13, 36],SV值越高,表示在规定时间内(即最优间隔)扰动增长就越快,扰动增长的快慢是导致预报不确定性增加与否的主要因素。考虑到热带地区的扰动增长机制不同于热带外地区,对于热带地区,当有TC时计算湿SV值,以此来表征TC内部及附近区域的分析误差^[35, 37-39];在热带外地区,ECMWF分南、北半球(或冬、夏半球)分别计算SV值,否则会使夏半球的SV值偏小^[34]。

ECMWF早期的集合预报系统并没有考虑模式的不确定性问题。1998年10月ECMWF开始使用随机参数化扰动方案(stochastic perturbed parameterization tendencies, SPPT)^[40]对物理参数化过程中的敏感因子进行扰动,以期增加集合离散度,提高概率预报技巧^[34];2009年9月ECMWF对SPPT方案进行了修订^[41];2010年10月将能量补偿方案(spectral stochastic backscatter scheme, SPBS)^[42-44]与修订后的SPPT算法一同用于业务集合预报系统。

由于早期较低的分辨率和初始扰动技术的局限性等,ECMWF全球集合预报系统并不适用于TC预报。随着计算机性能的快速提升及持续的技术变革,ECMWF不断优化和升级其集合预报系统,其中包括:四维变分资料同化(4D-VAR)技术的改进、大量极轨卫星和静止卫星观测资料的应用、海气耦合模式的改进、初始场扰动技术由SV升级为演化的奇异向量法(evolved SV)并进而升级为集合资料同化-奇异向量法(ensemble of data assimilation SV)等^[45-47]。另外,ECMWF一直致力于提高其集合模式水平分辨率和垂直分辨率:1992年12月ECMWF建立了基于T63L19模式的集合预报系统;至2006年,ECMWF建立了可变分辨率的集合预报系统,即1~10d的预报采用T_L399L62,10~15d的预报采用T_L255L62^[33-34, 37];至2010年,1~10d的集合模式升级为T_L639L62,而10~15d的集合模式升级为T_L319L62^[34]。同时集合成员也由最初的33个上升到现在的51个(表1)。

尽管ECMWF全球集合预报系统的预报着眼点并不在TC,也不像NCEP或其他集合预报系统那样针对TC采用涡旋重定位技术(vortex relocation technique),但由于其在热带地区(30°N—30°S)构造扰动成员时计算TC的湿SV值,并考虑了非绝热物理过程效应,因而使得ECMWF集合预报系统在预报TC时非常有效^[48]。

从2004年10月始,作为常规业务产品的一部分,ECMWF开始发布TC集合预报产品,包括TC中心位置、海平面最低气压和中心附近最大风速及TC袭击概

表1 ECMWF、NCEP、JMA、CMA (热带气旋) 集合预报系统参数概况

初始扰动方法	模式不确定性	模式分辨率	预报时效/d	集合成员	预报时次/UTC	涡旋重定位技术	
ECMWF	EDA-SV	SPPT-SPBS 可变的分辨率: T ₁ 639L62 (1~10d) T ₁ 319L62 (10~15d)	15	51	0000 1200	/	
NCEP	ETR	STTP 可变的分辨率: T ₁ 255L42 (0~8d) T ₁ 190L42 (8~16d)	16	20	0000,0006 1200,1800	是	
JMA	SV	STTP	T ₁ 319L60	5.5	11	0000,0006 1200,1800	是
CMA	BGM	/	T ₁ 213L31	5	15	0000 1200	是

注: ①表中各参数为截至2013年6月30日的数据;

②JMA、CMA各运行2套集合预报系统,即常规集合预报系统和TC集合预报系统,表中数据为JMA和CMA TC集合预报的相关参数;

③截至2013年6月30日,上述各集合预报系统所对应之确定性数值预报模式分别为T₁1279L137 (ECMWF)、T₁148L64 (NCEP)、T₁959L60 (JMA)和T₆39L60 (CMA)。

率产品等^[45]。上述TC集合预报图形类产品可在ECMWF官方网站(www.ecmwf.int)上获取(图1),相应的文字类产品经全球通信系统(Global Telecommunication System, GTS)向WMO各成员发放。

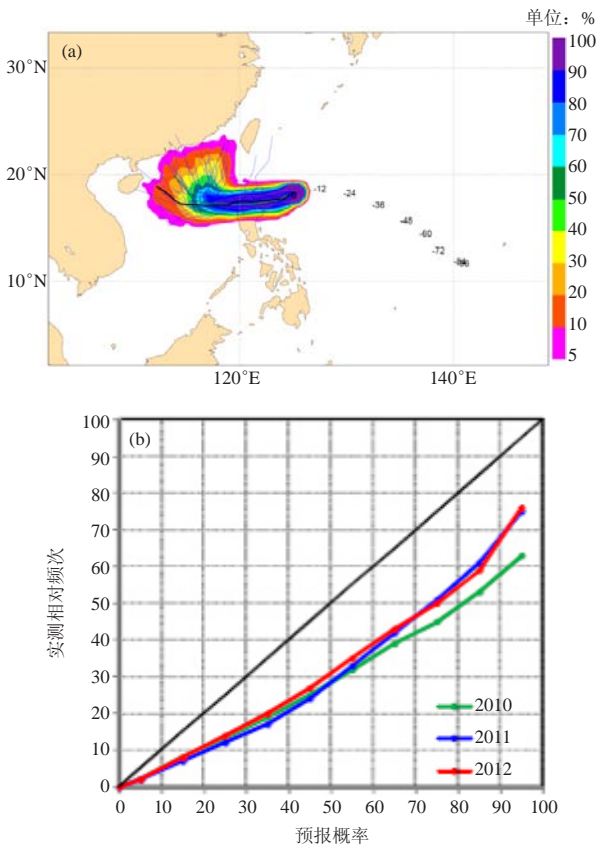


图1 (a) 基于ECMWF集合预报系统的TC袭击概率产品(图中个例是2010年超强台风“鲑鱼”,预报起始时刻为2010年10月17日1200UTC);(b) ECMWF 2010—2012年TC袭击概率产品评估

1.2 NCEP 热带气旋集合预报系统

NCEP全球集合预报系统采用了与ECMWF不同的初始场扰动方法,即增殖向量法(breed vector, BV)^[10, 23],并在1992年建立的集合预报系统中投入

业务应用。BV方法的局限性在于其初始扰动方差是由不随时间变化的气候场分析误差限定的,且扰动之间并未接近正交^[21]。2006年5月NCEP在其升级后的集合预报系统中使用重新尺度化集合转换技术(ensemble transform with rescaling, ETR)生成集合预报初始扰动成员^[49]。ETR方法生成的各扰动之间接近正交,同时保留了BV法依流型变化,代表误差最快增长的非线性扰动,以及计算资源耗用少的优点。目前NCEP集合成员数由最初的2个增加为现在的20个,每日0000, 0600, 1200和1800UTC起报。NCEP集合预报系统其预报时效达16d,水平分辨率于2010年2月升级为T190,到2012年NCEP再次提高了分辨率,将0~8d的分辨率提高到T255L42,8~16d维持原来的T190L42。

在模式的不确定性方面,NCEP从2010年2月起使用随机全倾向扰动法(stochastic total tendency perturbation, STTP)^[50-52],增加集合离散度,减少集合平均预报中的系统误差。

NCEP全球集合预报系统在处理TC时与ECMWF最大的不同之处在于使用了涡旋重定位技术^[53]。涡旋重定位技术的核心是先在模式初值场中确定涡旋位置,然后将模式涡旋从环境场中分离出来,随后将涡旋移到其被观测位置。如果初值场中的涡旋比实际观测弱,则加入人造涡旋(bogus vortex)予以修订。涡旋重定位技术在2000年首先用于NCEP的全球确定性模式GFS(Global Forecast System),2004年修订版的涡旋重定位技术被移植到NCEP的全球集合预报系统(Global Ensemble Forecast System, GEFS)。涡旋重定位技术的应用使NCEP热带气旋路径预报的发散度明显减少,同时其集合平均路径误差比没有涡旋重定位的要小得多(图2)。

1.3 JMA 热带气旋集合预报系统

JMA运行两套业务集合预报系统,其一是常规的全球中期天气预报集合系统,其二是台风集合预报系

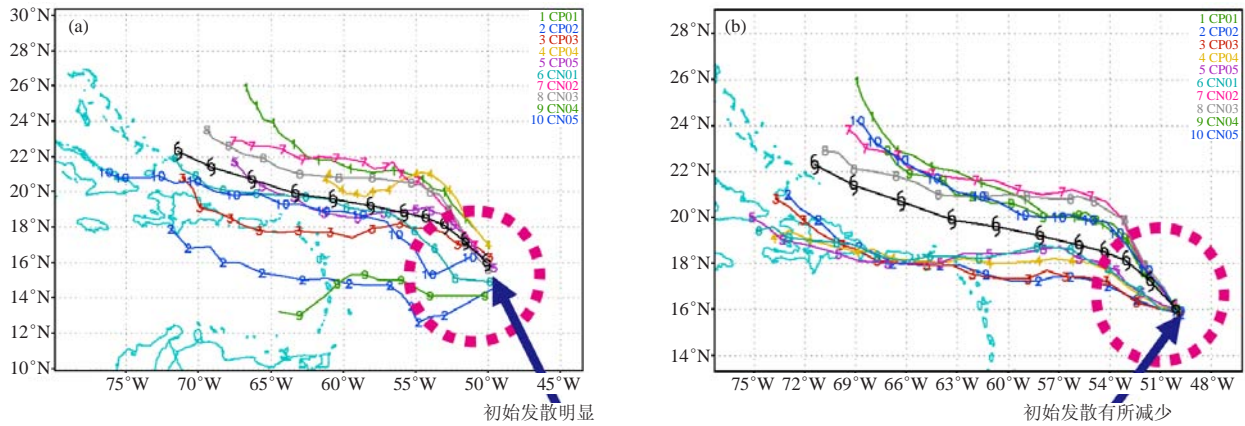


图2 NCEP集合预报系统对北大西洋飓风Frances (2004年8月28日00时) 的路径预报^[54]
(a) 没有涡旋重定位时飓风路径预报; (b) 经涡旋重定位后飓风路径预报

统 (Typhoon Ensemble Forecast System, TEPS), 前者有51个成员, 后者有11个成员。

经过2007年5—12月的准业务运行和评估后, 2008年2月, JMA建立了业务化的台风集合预报系统TEPS。与ECMWF集合预报系统一样, TEPS也是利用SV方法构造集合成员, 但两者最大的差别在于目标区域和权重模^[35]的选定。对于TEPS而言, 湿SV的计算限定在整个热带地区 (20°S—30°N), 而不是像ECMWF那样只限定在TC及其附近区域, 而干SV的计算则限定在北半球 (30°—90°N)。另外, TEPS并没有其自身的资料同化系统, 而是依赖于JMA的全球 (确定性) 模式系统GFS来为其提供初始条件^[55-56]。当下列两个条件同时被满足时, 由JMA的值班预报员启动TEPS: (1) 已有TC位于日本东京区域台风中心责任区域内 (0°—60°N, 100°—180°E), 或预计未来24h有TC移入上述责任区内; (2) TC最大平均风速超过34节 (1节=0.514m/s, 34节约为17.5m/s, 相当于我国热带风暴的强度), 或预计未来24h内TC的强度能达到上述阈值。

TEPS一次能同时追踪3个TC, 如果责任区内同一时间有4个TC存在时, 则需要进行人工干预, 按其影响或受关注程度选出3个目标TC进行作业^[57]。TEPS一天运行4次, 其预报起始时刻分别是0000、0006、0012和0018UTC, 预报时效为132h。JMA正计划对其台风集合预报系统进行升级, 除提高分辨率外, 其集合成员将由11个增加到25个, 期望能进一步改进台风预报效果^[58]。

1.4 CMA 热带气旋集合预报系统

1996年9月, CMA建立了基于T63L16的中期集合数值预报系统并投入试运行^[6], 采用时间滞后平均法生成扰动初值。1998年6月CMA将T63L16的中期集

合数值预报系统升级为T106L19集合预报系统, 并于2001年3月实现业务运行。该系统采用SV生成初始扰动, 集合预报成员为32个。针对该系统存在的系统发散度低、集合平均预报技巧与控制预报相当、集合预报的产品与效果检验产品不足等问题, 2006年底CMA对原有集合预报系统进行了升级, 建成了一套基于增长模繁殖法 (breeding growing mode, BGM) 的T213全球集合预报系统。该系统所用计算资源较少, 预报效果提高, 概率预报技巧大幅度被改善, 给出了分析误差的分布特点, 并以此构造了控制误差增长幅度的地理掩模方案; 同时, 开展了集合预报产品的偏差订正, 以期改善系统偏差, 丰富概率预报产品。

2008年6月, CMA将全球ATOVS资料三维变分同化系统应用到T213集合预报系统中, 进一步提高了集合预报系统的性能。2010年之后, 试验并实施了集合转换 (ensemble transform, ET) 初值扰动方法和物理过程扰动。目前正在进行以全球T639系统为主体的集合预报升级工作。

2006年, CMA在T213全球集合预报背景场扰动基础上开发了TC集合预报系统。由于TC路径数值预报业务模式采用T213全球模式集合预报系统的控制预报, 使得TC的涡旋强度在TC生成初期偏弱, 导致T213全球模式集合预报系统在预报TC路径时有时偏差较大。为了改进这一缺点, TC集合预报系统将TC涡旋初始化技术引入到扰动背景场中, 经过对扰动分析场中浅涡旋的强度调整使得分析场中的涡旋强度同观测更加接近。TC路径集合预报系统于2007年7月进入实时运行阶段, 有TC时每天两次启动业务, 提供120h预报。

2 TC集合预报产品应用

随着TC集合预报技术的不断发展和集合预报产品的不断丰富, TC集合预报产品越来越被广大业务和科

研人员所接受，在日常TC预报中发挥着越来越重要的指导作用。

TC路径集合预报发散度的大小可以用来度量TC路径预报信心指数^[35, 59-60]，当集合成员发散度较小时，预示着未来TC移动较为稳定，路径预报误差也较小；当集合成员发散度较大时，预示着路径预报的不确定性较大，路径预报误差也较大。

事实上，在TC集合预报面世之前，已有业务或科研人员尝试了一种简单的集合预报技术，也被称为“穷人”的集合预报技术，即将不同的确定性模式或官方预报结果进行简单的平均。这种方法多用于TC路径预报，今天已习惯称之为TC路径集成预报。Goerss^[59]认为，考虑到不同模式的相对独立性，基于不同模式的简单集合（或集成）的TC路径预报结果，一般来讲，要比其中任一单个模式的预报更加准确。Elsberry等^[60]研究了西北太平洋TC路径集成预报发散度与集成平均误差的关系，并提出了一种先剔除误差大的成员后再将剩余成员进行平均的集成方法，这种有选择性的集成方法比所有成员的集成平均预报效果要好。Williford等^[61]则利用多元回归技术计算不同成员的权重系数，经过加权平均后的TC路径集成预报比单一模式预报结果有明显改进。早期TC集成预报技术为后来TC集合预报的应用奠定了思路 and 基础。

2.1 TC集合预报产品在TC路径预报中的应用

除开发众多TC集合预报相关应用产品外，在TC集合预报应用方面我国预报员也逐步由定性走向定量。Qi等^[62]利用ECMWF、JMA、NCEP和CMA的TC集合预报资料，提出了两种TC路径预报方法，即选择性简单平均和选择性加权平均（图3），并对

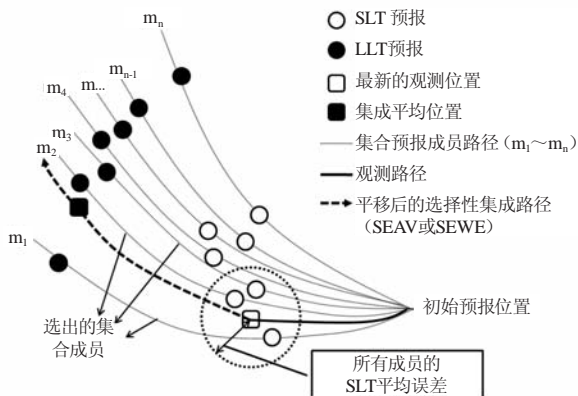


图3 选择性简单/加权平均示意图^[62]

（虚线圆圈半径表示所有集合成员短时效（short leading time, SLT）内的平均路径预报误差，圆圈中心的小方框表示TC最新观测位置。该图例显示只有3个成员的短时效误差小于集合平均误差，因而被选中做长时效(long leading time, LLT)的路径预报（如图中黑方框所示））

2010—2012年西北太平洋35个台风个例进行了预报试验和效果评估。结果表明，选择性简单平均的预报效果要好于加权平均，而相对于单一模式的集合平均预报效果而言，选择性简单集成方法在72hTC路径预报误差方面有5%~30%的改进率。选择性简单/加权平均方法的关键在于“有效成员”的选取，其选取标准是在已知当前TC实况位置的前提下，评估全体集合成员在过去短时效内（如从模式起报时刻1200UTC至次日0000UTC）的预报误差，凡是预报误差小于集合平均误差的成员皆被选为有效成员。

张长安等^[63]、钱奇峰等^[64]基于ECMWF的TC集合预报产品，发展了另外一种适用于台风路径业务预报的TC集合预报订正方法。该方法与Qi等^[62]选择性简单/加权平均方法相同之处在于根据集合成员过去短时效内（如6~12h）表现优劣的基础上，优选出误差较小的成员进行平均，而不同之处在于成员数量的选取。钱奇峰等^[64]在统计分析ECMWF集合预报系统2010—2012年TC路径预报效果后，提出了不同预报时效（24~96h）应选择不同的最佳成员数（图4）进行简单平均，从而达到更好的预报效果。该方法在2012—2013年中央气象台的试用结果显示基于优选成员的集合平均比ECMWF所有成员的集合平均要好，目前该方法已在中央气象台的TC路径预报中得到应用，并已成为TC路径预报最有效的指导产品。

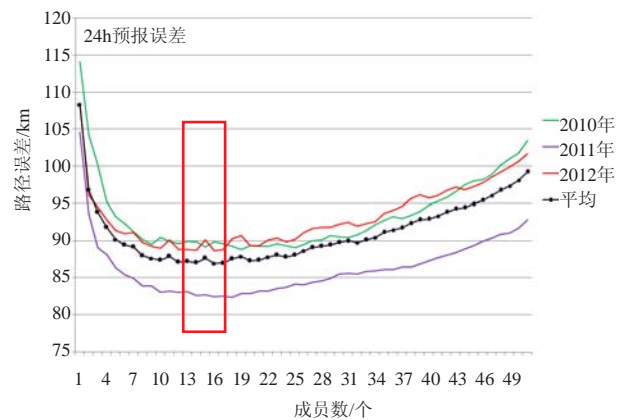


图4 基于ECMWF集合预报的TC路径预报订正方法中最佳成员数的选取（红色方框显示当最佳成员数为13~17个时，24h TC路径预报误差为最小）

从图5可以看出，EC确定性模式和集合平均的准确性相比较，在短时效内（24~48h）两者基本相当，如确定性预报的24h误差为69km，而集合平均的误差为68km。当时效延长时，集合平均的结果要好于确定性模式，72~120h集合平均分别比确定性模式的误差要分别小6、6和35km，这正好体现了集合预报的优势。若考虑模式结果的可用性（模式的前

12h基本用不上），无论确定性模式还是集合模式其准确性大打折扣，确定性模式的24h路径预报误差由69km增大为98km，集合平均的24h误差由68km增大为100km，而此时，集合订正方法展现了其优势，24h误差只有82km。

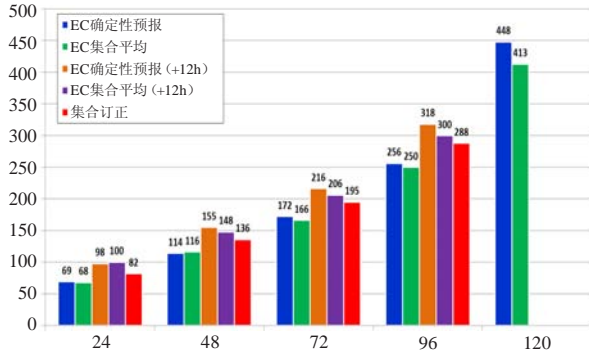


图5 2013年不同方法（EC确定性模式、EC集合平均及基于EC集合预报订正方法）台风路径预报误差比较

（EC确定性预报和EC集合平均是指确定性模式及集合预报各时效路径预报误差；EC确定性预报（+12h）是指从模式起报时刻顺延12h后再进行相应时效的误差评定，因为当模式完成资料收集、积分、后处理并将预报结论发送到预报员手上时，基本上已过去了8~12h，即模式的前12h预报对预报员来讲并没有发挥其作用，所以评定模式误差时应从其发挥作用的时效开始；同上，EC集合平均（+12h）是指从集合预报系统起报时刻顺延12h后再进行相应时效的误差评定）

2.2 TC 集合预报产品在 TC 强度预报中的应用

过去二十年来世界各国在TC路径预报方面取得了长足发展，但TC强度预报准确率仍停滞不前^[1]。目前业务中仍广泛使用统计方法、气候持续法或统计动力相结合的方法等开展TC强度业务预报。TC集合预报虽然提供TC强度预报，如TC中心附近最大风速（图6）和海平面最低气压预报，但由于模式本身还不能准确描述TC内核结构及TC强度变化物理过程，因此TC强度集合预报目前只能为预报员提供TC强度变化趋势，如TC强度未来是增强还是维持或减弱等，为最终强度预报提供定性参考。目前，世界各国对TC强度集合预报的订正能力或定量应用水平远不及TC路径集合预报。另外，如前所述，ECMWF集合预报系统本身并不像NCEP或CMA集合预报系统对台风涡旋做过重定位技术处理，也没有对涡旋强度进行重新调整，因此，即便其路径集合预报稍好于其他几个集合预报系统，但就其强度集合预报水平而言并不具备任何优势。相对于集合预报系统，同时期的业务确定性模式具有更高的分辨率，更先进的资料同化技术，或更完善的物理参数化方案等优势，预报员更倾向于参考其强度预报结果。如何提高TC强度集合预报应用水平，除需要不断总结和挖掘经验外，最根本的还是要提高

模式本身对TC的强度预报水平。

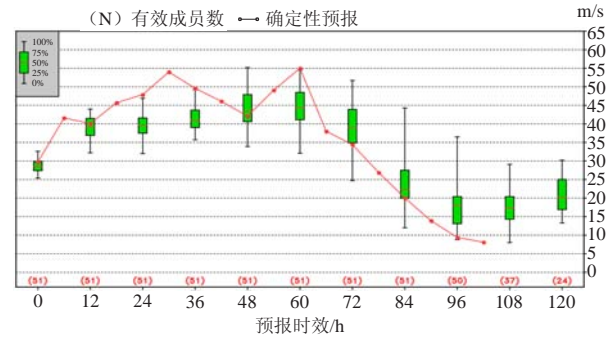


图6 基于ECMWF集合预报的台风苏力（SOULIK）的最大风速离散度图

2.3 TC 集合预报产品在 TC 降水预报中的应用

由于TC路径和强度预报的不确定性，使得TC降水预报更具挑战性。基于集合预报的直接概率、贝叶斯模型平均（bayesian model averaging, BMA）和逻辑回归等方法，可以定量地描述TC降水的概率密度函数，从而提供TC不同量级降水（如小雨、中雨、大雨和暴雨等）的发生概率，进而提高TC不同量级降水的准确率。另外，针对确定性模式对TC降水极值总是偏弱的特点，集合预报成员中降水最大值、降水90%分位数等信息可以为TC最大降水量预报提供有效参考，从而弥补确定性预报对TC降水预报偏弱的缺陷。同时，基于集合预报的极端天气预报指数（Extreme Forecast Index）可以提供极端降水风险提示^[3]。当然，集合预报的应用，尤其是对TC路径集合预报的订正技术已经在某种程度上提高了TC路径预报准确率，进而为提高TC降水预报奠定了一定基础。

2.4 TC 集合预报产品在 TC 生成预报中的应用

TC生成预报与TC强度预报一样，是TC业务或研究领域另一个世界性难题。此前多是应用统计方法，或根据海温、切变或潜热释放等开展TC生成预报^[65]。

Daniel等^[66]对CMC、ECMWF、GFS、NOGAPS和UKMET五个全球模式（确定性模式）对北大西洋2004年以来的约140个热带风暴生成预报进行了评估。结果表明，模式预报TC生成的能力随时间和空间而变化，并且每年表现最好的模式都不相同。空间分析表明不同的模式对某一特定区域的TC生成预报有优势；时间分析的结果则不出所料，模式的预报能力随着预报时效延长而降低。当多个模式预报同一个TC生成事件时，那么TC生成概率会显著增大。整体而言，模式对TC的生成预报有一定能力，但其空报率也较高^[67]。

TC集合预报为开展TC生成预报提供了新的手段，朱跃建指出可根据全球集合预报系统制作TC生成

的概率预报,关键是要对不同集合预报系统找寻其可靠的TC生成判据或标准,然后可据此制作多模式TC生成预报产品^[67]。

日本气象厅基于THORPEX Interactive Grand Global Ensemble (TIGGE)数据集资料,评估了ECMWF、JMA、NCEP以及英国气象局(UKMO)全球集合预报系统对2009—2012年台风主汛期(7—10月)西北太平洋TC生成预报效果^[68],结果显示,所有的集合预报系统都能至少提前5 d成功预报TC的生成。

NCEP根据其集合预报系统已实时制作北大西洋和西北太平洋TC生成的概率预报产品,其总体思路是选择一些能描述TC初始涡旋的特征物理量,如对流层低层850hPa(700hPa、海平面)最大相对涡度、850hPa(700hPa)最小位势高度、850hPa(700hPa、海平面)最大风速、海平面气压梯度等;然后基于统计分析对上述物理量设定阈值,如涡旋附近最大风速须大于5m/s,850hPa最大涡度大于等于 $10^{-4}s^{-1}$,并且300~500hPa层的温度异常大于 $0.5^{\circ}C$,当这几个条件全部满足时,认为该涡旋将发展。

对集合预报而言,若某集合成员预报在T时刻内(24或48h等)满足TC生成的阈值条件,则认为该成员将在T小时内预报有TC生成,“生成成员数/集合预报总成员数”即为该涡旋在T小时内的生成概率(图7)。如果集合预报的多数成员预报某海域将有TC生成,那么预报员则要认真考虑这种可能性^[48,69-71]。

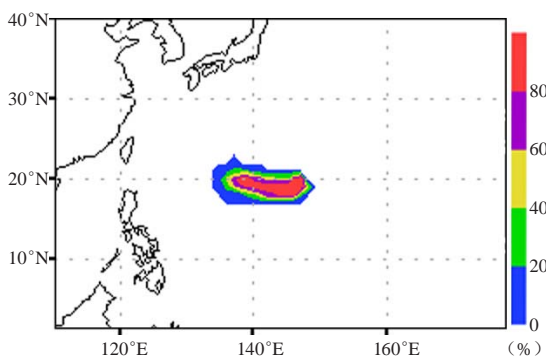


图7 基于NCEP集合预报的TC未来48h生成概率(2013年7月7日1200UTC)。随后,在该海域生成当年第7号热带风暴“苏力”,中央气象台于2013年7月8日00UTC开始进行编号

2.5 TC集合预报产品在TC异常路径预报中的应用

虽然台风路径预报在过去20年间取得了长足进步,预报准确率稳定提高,但每年仍会遇有一些路径较为异常的台风,特别是当环境场快速调整,或多系统相互作用等复杂情况下,台风路径预报不确定性明显增加,预报误差往往较大。2008年强台风“风神”、2010年超强台风“鲇鱼”、2011年超强台

风“南玛都”、2012年强台风“启德”等都是近几年出现的典型个例,由于ECMWF等数值模式的确定性预报出现较大的系统性偏差,导致预报员对台风登陆点的预报出现较大误差。单一的确性模式不足以作为预报员提供未来环流形势演变的丰富信息,此时集合预报的优势得以显现,因为它包含了未来天气形势演变的多种可能性和概率分布特征。Qian等^[72]基于ECMWF集合预报资料对2010年超强台风“鲇鱼”在南海异常北翘的动力学机制和可预报性进行了分析。首先将集合成员分成两组,即转向组和西行组,每组10个成员(图8),进而对这两组路径所对应的环流形势和引导气流等进行合成分析,结果表明台风涡旋大小和早期移动快慢等对后期路径北折起着重要作用。

当面对复杂路径,或当TC集合预报路径发散度较大时,如何发掘集合预报的有用信息,如何从众多集合成员中“找寻真相”,尽力降低预报的不确定性,仍是摆在预报员面前的难题。集合预报的聚类分析技术^[3](是指在特定区域,把在相空间中演变状况相似的集合成员组成一组,并以此提取集合预报概率分布的最重要信息)提供了某种思路,即可将TC集合预报路径进行分簇,通过合成分析不同路径簇所对应的形势场差异,为TC异常路径预报提供参考。

3 结语与展望

相对于单一确定性模式而言,集合预报能提供未来天气演变的多种可能性,是减少预报不确定性的有效方法。集合预报产品越来越得到广大预报员的认同,在日常业务预报中发挥着越来越重要的作用。

随着整个集合预报技术的发展,作为集合预报的重要组成部分,TC集合预报近些年也取得了很大的进展。世界各主要数值预报中心针对TC的集合预报技术不尽相同,JMA和CMA等建立了专门的TC集合预报系统,而ECMWF和NCEP等虽然没有建立独立的TC集合预报系统,但依托其全球集合预报技术的整体优势和对目标TC特殊的技术处理,展示了很好的TC集合预报效果。

TC集合预报产品成为TC预报业务的重要参考:预报员针对实际业务需求开发了众多TC集合预报指导产品,积累了较为丰富的TC集合预报应用经验,开发了基于TC路径集合预报的订正技术、不同量级降水指导产品和TC生成概率预报产品,显示了很好的应用效果;但TC集合预报产品在强度预报方面的应用尚显不足。

集合预报技术目前仍处于进一步发展中。集合预报系统的预报能力通常和它采用的模式的预报能力相当,且具有它所使用的模式的所有系统误差。因此,

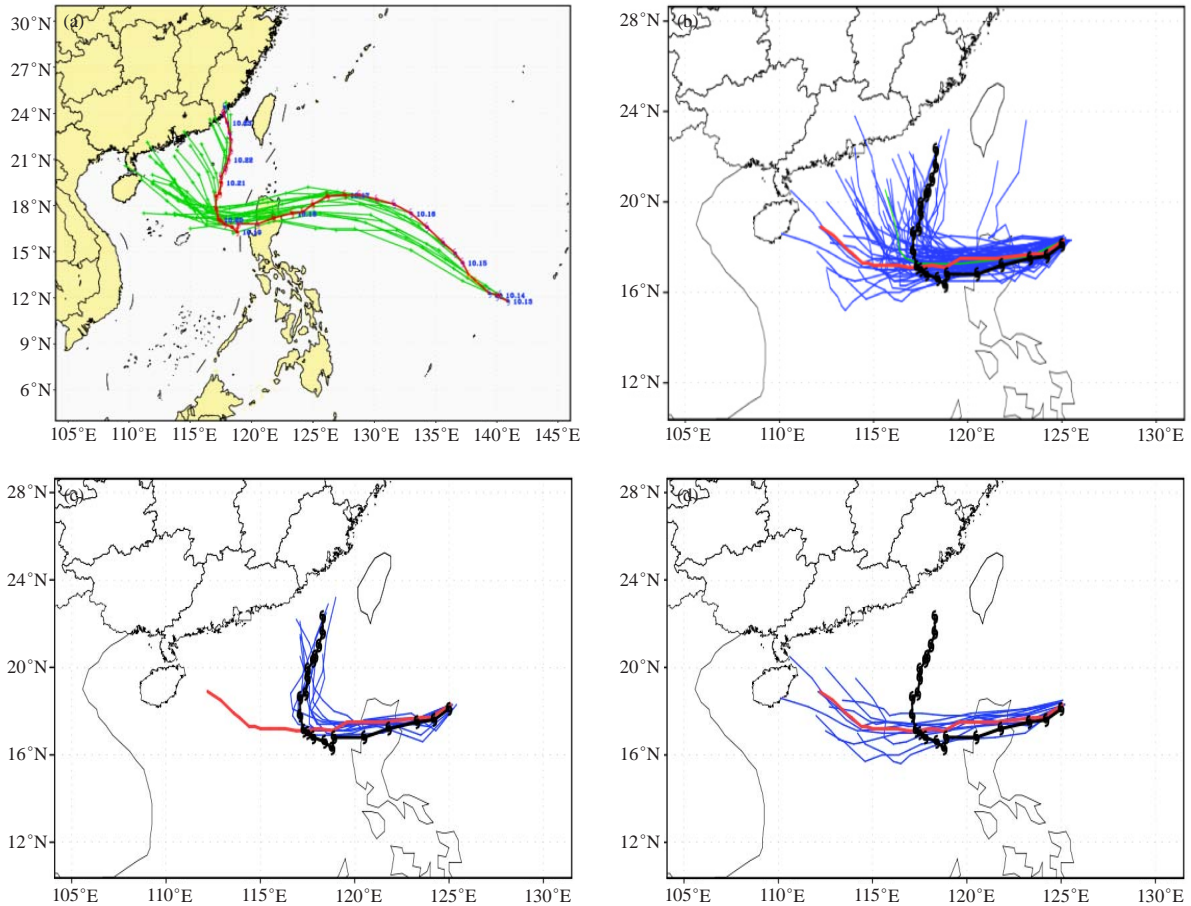


图8 2010年超强台风“鲑鱼”路径预报

(a) 中央气象台路径预报 (对转向点的预报基本失败); (b) ECMWF 2010年10月17日1200UTC的TC路径预报 (蓝线为集合预报, 路径发散度较大, 近一半的成员转向北上, 另一半继续西行; 绿线为集合平均路径; 红线为确定性模式预报; 黑线为实况路径); (c) 转向组 (线条说明同b); (d) 西行组 (线条说明同b)

集合预报相对于确定性预报而言只是“锦上添花”，集合预报技术的进步依赖于模式本身的发展和集合预报技术的改进，包括模式物理过程和参数化方案的改进、模式分辨率的提高、集合成员数的增加等。当然，涡旋初始化及其扰动技术、物理过程的扰动技术作为TC集合预报的重要技术环节应予以持续的关注和改进。另外，由于目前全球TC集合预报系统的分辨率还不够精细，尚不能反映TC的精细结构，导致TC集合预报产品在强度和降水预报的应用效果明显不如其在TC路径预报的效果好，因此现阶段还应大力发展TC区域集合预报系统。由于集合预报与集合同化无可避免地联系在一起，因此集合同化（如EnKF）是TC区域集合预报系统的重要发展方向。相对于TC全球集合预报，区域集合预报技术难度也稍大，除了全球集合预报应该考虑的技术之外，还需要考虑边界扰动、大尺度不确定性的影响等；同时，由于需要考虑TC更精细的结构，TC涡旋的结构性扰动也需要有特别的技

术。当然，随着计算机性能的快速提高，如果未来全球集合预报系统的分辨率能达到5km或更高，那时，区域集合预报系统是否还有存在的必要值得商榷，但这至少将是10年以后的事情。

集合预报含有比确定性预报丰富得多的信息，作为预报员如何尽可能利用这些信息来提高预报的准确性，同时又将预报的不确定性科学地、定量地告知用户则还有很多工作要做。随着集合预报的普及和公众科学素养的提高，公众将会更倾向接受含有不确定性的预报信息，而不是由预报员“自作主张”地将预报的不确定性隐藏起来而告知他们一个唯一的、貌似“确定”的结果。当预报的不确定性或预报误差可以定量描述时，用户将可以据此做出更好的决策，同时也会变得更能够容忍我们预报中的小失误^[73]。因此，集合预报的快速发展必将推动一些新的产品，特别是不确定性信息或概率产品的开发和应用。

另外，随着网络技术的飞速发展，预报员

已能实时获取世界各主要数值预报中心的集合预报产品, 如何实现众多集合预报产品在业务平台上便捷高效地显示, 如何让预报员从海量集合预报信息中快速攫取“有用”信息, 则对TC业务平台的建设提出了更高要求。

参考文献

- [1] 钱传海, 端义宏, 麻素红. 我国台风业务现状及其关键技术. 气象科技进展, 2012, 2(5): 36-43.
- [2] Cangialosi J P, Franklin J L. 2010 National Hurricane Center Forecast Verification Report, 2011, 77. http://www.nhc.noaa.gov/verification/pdfs/Verification_2010.pdf.
- [3] WMO. Guidelines on Ensemble Prediction Systems and Forecasting. WMO, 2012, 23. http://www.wmo.int/pages/prog/www/Documents/1091_en.pdf.
- [4] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow. J Atmos Sci, 1963, 20: 130-141.
- [5] Lorenz E N. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. Tellus, 1965, 17: 321-333.
- [6] Epstein E S. Stochastic dynamic prediction. Tellus, 1969, 21: 739-759.
- [7] Leith C E. Theoretical skill of Monte Carlo forecasts. Mon Wea Rev, 1974, 102: 409-418.
- [8] Joslyn S, Pak K, Jones D, et al. The effect of probabilistic information on threshold forecasts. Wea Forecasting, 2007, 22: 804-812.
- [9] Nadav-Greenberg L, Joslyn S. Uncertainty forecasts improve decision-making among non-experts. J Cognitive Eng Deci Making, 2009, 3: 209-227.
- [10] Toth Z, Kalnay E. Ensemble forecasting at NCEP and the breed method. Mon Wea Rev, 1997, 125(12): 3297-3319.
- [11] Tracton M S, Kalnay E. Operational ensemble prediction at the National Meteorological Center. Wea Forecasting, 1993, 8(3): 379-398.
- [12] Tracton M S, Du J. Short range ensemble forecasting (SREF) at the National Center for Environmental Prediction. Beijing: WMO Workshop on the Use of Ensemble Prediction, 2000.
- [13] Molteni E, Buizza R, Palmer T N, et al. The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation. Quart J Roy Meteor Soc, 1996, 122(529): 73-119.
- [14] 王晨稀, 梁旭东. 热带气旋路径集合预报试验. 应用气象学报, 2007, 18(5): 586-593.
- [15] 杜均. 集合预报的现状和前景. 应用气象学报, 2002, 13(1): 16-28.
- [16] 李泽椿, 陈德辉. 国家气象中心集合数值预报业务系统的发展及应用. 应用气象学报, 2002, 13(1): 1-15.
- [17] Stensrud D J, Brooks H E, Du J, et al. Using ensembles for short-range forecasting. Mon Wea Rev, 1999, 127(4): 33-446.
- [18] 王晨稀, 端义宏. 短期集合预报技术在梅雨降水预报中的试验研究. 应用气象学报, 2003, 14(1): 69-78.
- [19] 李俊, 杜均, 王明欢, 等. 中尺度暴雨集合预报系统研发中的初值扰动试验. 高原气象, 2009, 28(6): 1365-1375.
- [20] 端义宏, 金荣花. 我国现代天气业务现状及发展趋势. 气象科技进展, 2012, 5: 6-11.
- [21] 王晨稀. 热带气旋集合预报研究进展. 热带气象学报, 2013, 29(4): 698-704.
- [22] Krishnamurti T N, Ricardo C T, Rohaly G, et al. Physical Initialization and Hurricane Ensemble Forecasts. Wea Forecasting, 1997, 12: 503-514.
- [23] Toth Z, Kalnay E. Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations. Bull Amer Meter Soc, 1993, 74: 2317-2330.
- [24] Zhang Z, Krishnamurti T N. Ensemble forecasting of hurricane tracks. Bulletin of the American Meteo Soc, 1997, 78: 2785-2795.
- [25] 黄燕燕, 袁金南, 万齐林, 等. 基于BDA扰动法的台风路径集合预报试验研究. 热带气象学报, 2006, 22(1): 49-54.
- [26] 黄小刚, 费建芳, 陆汉城. 基于集合Kalman滤波数据同化的热带气旋路径集合预报研究. 大气科学, 2007, 31(3): 468-478.
- [27] 黄小刚, 费建芳, 陆汉城, 等. 基于集合Kalm滤波数据同化与偏差修正的热带气旋集合预报研究. 气象学报, 2010, 68(1): 79-87.
- [28] 朱永褪, 程戴晖. 热带气旋路径动力使用预报的集合预报方案. 气象科学, 2000, 20(3): 229-238.
- [29] 朱永褪, 程戴晖. 热带气旋路径动力释用预报方案的业务应用和集合预报试验. 大气科学研究与应用, 2000, (2): 1-10.
- [30] 程戴晖, 朱永褪. 热带气旋路径的一种动力释用预报方法的研究. 大气科学研究与应用, 1995, (2): 43-48.
- [31] 周霞琼, 张秀珍, 端义宏, 等. 滞后平均法(LAF)在热带气旋路径集合预报中的应用. 气象科学, 2003, 23(4): 410-417.
- [32] 陈德辉. 美国数值预报研究动态与业务进展. 气象, 1998, 24(12): 3-6.
- [33] Buizza R, Bidlot J R, Wedi N, et al. The new ECMWF VAREPS (Variable Resolution Ensemble Prediction System). Quart J Roy Meteor Soc, 2007, 133: 681-695.
- [34] 麻巨慧, 朱跃建, 王益兴等. NCEP、ECMWF及CMC全球集合预报业务系统发展综述. 大气科学学报, 2011, 34(3): 370-380.
- [35] Yamaguchi M, Majumdar S J. Using TIGGE data to diagnose initial perturbations and their growth for tropical cyclone ensemble forecasts. Mon Wea Rev, 2010, 138(9): 3634-3655.
- [36] Buizza R, Palmer T N. The singular-vector structure of the atmospheric global circulation. J Atmos Sci, 1995, 52: 1434-1456.
- [37] Barkmeijer J, Buizza R, Palmer T N. Tropical singular vectors computed with linearized diabatic physics. Quart J Roy Meteor Soc, 2001, 127:685-708.
- [38] Puri K, Barkmeijer J, Palmer T N. Ensemble prediction of tropical cyclones using targeted diabatic singular vectors. Quart J Roy Meteor Soc, 2001, 127: 709-731.
- [39] Leutbecher M, Palmer T N. Ensemble forecasting. J Comput Phys, 2008, 227(7): 3515-3539.
- [40] Buizza R, Miller M, Palmer T N. Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF ensemble prediction system. Q J R Meteorol Soc, 1999, 125: 2887-2908.
- [41] Palmer T N, Buizza R, Leutbecher M, et al. 2009. Stochastic parametrization and model uncertainty // ECMWF tech memo No.598, ECMWF, Shinfield Park, Reading, Berkshire RG2 9AX, UK.
- [42] Shutts G J. 2004. A stochastic kinetic energy backscatter algorithm for use in ensemble prediction systems // ECMWF tech memo No. 449, ECMWF, Shinfield Park, Reading, Berkshire RG29AX, UK.
- [43] Shutts G J. A kinetic energy backscatter algorithm for use in ensemble prediction systems. Quart J Roy Meteor Soc, 2005, 131: 3079-3102.
- [44] Berner J, Shutts G J, Leutbecher M, et al. A spectral stochastic kinetic energy backscatter scheme and its impact on flow-dependent predictability in the ECMWF ensemble prediction system. J Atmos Sci, 2009, 66: 603-626.
- [45] Early medium-range forecasts of tropical cyclones. ECMWF Newsletter No. 102 - Winter 2004/05, 7-14.
- [46] Buizza R, Leutbecher M, Isaksen L. Potential use of an ensemble of analyses in the ECMWF ensemble prediction system. Quart J Roy Meteor Soc, 2008, 134: 2051-2066.
- [47] Buizza R, Leutbecher M, Isaksen L, et al. Combined use of EDA and SV-based perturbations in the EPS. ECMWF Newsletter, 2010, 123: 22-28.
- [48] NHC. Technical Summary of the National Hurricane Center Track and Intensity Models. 2009,18. http://www.vos.noaa.gov/MWL/aug_09/techsummary.shtml.
- [49] Bishop C H, Toth Z. Ensemble transformation and adaptive observations. J Atmos Sci, 1999, 56: 1748-1765.
- [50] Hou D, Toth Z, Zhu Y. 2006. A stochastic parameterization scheme within NCEP global ensemble forecast system // Extended abstract, the 18th AMS conference on probability and statistics, 29 January—2 February 2006, Atlanta, Georgia.
- [51] Hou D, Toth Z, Zhu Y, et al. 2008. Impact of a stochastic perturbation scheme on NCEP global ensemble forecast system // Extended abstract, the 19th AMS conference on probability and statistics, 21—24 January 2008, New Orleans, Louisiana.
- [52] Hou D, Toth Z, Zhu Y, et al. A stochastic total tendency perturbation scheme representing model-related uncertainties in the NCEP global ensemble forecast. Submitted to Tellus, 2010.
- [53] Liu Q, Marchok T, Pan H L, et al. Improvements in hurricane initialization and forecasting at NCEP with global and regional (GFDL)

- models. Tech Procedures Bull, 2002, 472, NCEP/EMC Tech.Rep, 7.
- [54] Liu Q, Lord S, Surgi N, et al. Hurricane Relocation in Global Ensemble Forecast. 27th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. https://ams.confex.com/ams/27Hurricanes/techprogram/paper_108503.htm.
- [55] Kadowaki T. A 4-dimensional variational assimilation system for the JMA Global Spectrum Model. CAS/JSC WGNE Res. Act Atmos Oceanic Modell, 34: 117-118.
- [56] JMA. Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency. Appendix to WMO Numerical Weather Prediction Progress Rep. Japan Meteorological Agency, Tokyo, Japan, 2007, 194. <http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline-nwp/index.htm>.
- [57] Yamaguchi M, Ryota S, Masayuki K, et al. Typhoon ensemble prediction system developed at the Japan Meteorological Agency. Mon Wea Rev, 2009, 137(8): 2592-2604.
- [58] WMO. Review of the activities of RSMC Tokyo 2012 by the RSMC Tokyo. 45th ESCAP/WMO Typhoon Committee session report. Hong Kong, China, 2013: 5-6.
- [59] Goerss J S. Tropical cyclone track forecasts using an ensemble of dynamical models. Mon Wea Rev, 2000, 128: 1187-1193.
- [60] Elsberry R L, Carr III L E.. Consensus of dynamical tropical cyclone track forecasts-Error versus spread. Mon Wea Rev, 2000, 128: 4131-4138.
- [61] Williford C E, Krishnamurti T N, Torres R C, et al. Real-time multimodel superensemble forecasts of Atlantic tropical systems of 1999. Mon Wea Rev, 2003, 131(8): 1878-1894.
- [62] Qi Liangbo, Hui Yu, Peiyan Chen. Selective Ensemble Mean Technique for Tropical Cyclone Track Forecast by Using Ensemble Prediction Systems. Quart J Roy Meteor Soc, 2013. doi:10.1002/qj.2196.
- [63] 张长安, 徐海明, 钱奇峰, 等. 集合预报产品在热带气旋路径预报中的使用方法研究. 福建气象, 2013, 1:16-21.
- [64] 钱奇峰, 张长安, 高拴柱, 等. 台风路径集合预报的实时订正技术研究. 热带气象学报, 2014,(5):905-910.
- [65] Zhang chao, Shu hai-long, Zhang qing-hong, et al. Prediction of tropical disturbance development over the South China Sea using SSM/I Data. J Trop Meteor, 2012, 18(2): 242-248.
- [66] Daniel J, Fuelberg H E, Hart R E, et al. An Evaluation of Tropical Cyclone Genesis Forecasts from Global Numerical Models. Wea Forecasting, 2013, 28: 1423-1445.
- [67] Report of the meeting. THORPEX ICSC GIFS TIGGE Working Group Tenth Meeting. World meteorological organization commission for atmospheric, 2012, 16..
- [68] Activities of the RSMC Tokyo - Typhoon center in 2013 [Online]. Available: <http://www.typhooncommittee.org/46th/Docs/item%206%20Activities%20RSMC/6.1%20ReviewRSMCActivities.pdf>.
- [69] Sippel J A, Zhang F. A probabilistic analysis of the dynamics and predictability of tropical cyclogenesis. J Atmos Sci, 2008, 65(11): 3440-3459.
- [70] Sippel J A, Zhang F. Factors affecting the predictability of hurricane Humberto(2007). J Atmos Sci, 2010, 67(6): 1759-1778.
- [71] Zhang F, Sippel J A. Effects of moist convection on hurricane predictability. J Atmos Sci, 2009, 66(7): 1944-1961.
- [72] Qian Chuanhai, Zhang Fuqing, Duan Yihong. Probabilistic Evaluation of the Prediction and Dynamics of Super Typhoon Megi(2010). Wea Forecasting, 2013, 28: 1562-1577.
- [73] Hamill T M, Brennan M J, Brown B, et al. NOAA's Future Ensemble-Based Hurricane Forecast Products. Bull Amer Meteor Soc, 2012, 93: 209-220.

追赶和特色：第32届中国气象学会年会及S21分会场侧记

本刊编辑部

金秋10月，中国气象学会第32届年会在天津举办。会议以“推进科技创新 支持气象现代化”为主题，进行了大会主会场和多达23个分会场的交流。此外，会议还与企业合作，举办了3场技术专题讲座。会议第21分会是大气科学前沿发展暨JMR/气象期刊编辑作者研讨会。在第一天完成大气科学前沿发展论坛的交流后，10月15日全天，包括本刊在内的气象科技期刊编辑和作者，在年会上有机会直接对话和交流。特别难得的是，来自美国地球物理联盟和美国气象学会（AMS）期刊的相关专家与会，介绍了美国气象类期刊的编辑风格和最新动态，让中国气象学者第一次比较全面地了解了美国同行的工作，深受启发。包括本刊在内的10余种中国气象期刊，以会议报告和研讨介绍两种方式介绍了各自期刊的特点，并通过圆桌讨论的方式，与AMS专家一起进行了气象类科技期刊发展方向的研讨。

AMS明年初将举办第96届年会，与美国同行相比，历史还算悠久的中国气象学会举办年会的经历也只是AMS的三分之一。但是，通过会议交流，至少中国气象期刊人在追赶国外同行的同时，其自身的特色的保持，通过年会尽情展现出来。特别是很多期刊，与国内前沿学者更好地形成了“捆绑”关系，身份是“志愿者”的期刊主编和副主编们更多地介入期刊的策划和选题，使得气象类科技期刊真正让科学家们有了“家”的感觉。而AMS同行介绍的提高论文质量和出版时间的“流水线”式的工作流程，以及论文编辑的各个工序配备专业人员把守的规则，也能启发中方与会者更多的关于打造精品期刊的思考。



AMS出版部主任Ken Heideman在会上展示AMS出版的学术期刊

热带气旋尺度涡旋对非对称热力扰动演变的影响

黄泓^{1, 2} 王学忠¹ 姜勇强^{1, 2} 陈中一¹

(1 解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101;

2 南京大学大气科学学院中尺度灾害性天气教育部重点实验室, 南京 210093)

摘要: 利用经验公式定义了三种不同热带气旋尺度涡旋, 然后分别在其最大风速半径处叠加非对称热力扰动, 用三维涡旋扰动分析和模拟模式 (Three-Dimensional Vortex Perturbation Analyzer and Simulator, 3DVPAS) 模拟、分析了扰动水平结构, 通量传输及能量转换的演变。研究结果显示: 在三种涡旋中, 非对称热力扰动的演变都依次经历了三个阶段, 即静力调整阶段、准静力平衡阶段和增长 (对于不稳定涡旋) 或消亡 (对于稳定涡旋) 阶段。在初始非静力状态下, 伴随着重力波的频散, 扰动位能快速衰减, 而动能快速增加, 热量和动量向外传输。完成静力调整所需的时间主要取决于基态涡旋的稳定性和强度, 强度较弱的稳定涡旋所需时间相对较长。在三个涡旋中, 前两个阶段都伴随着螺旋带结构的生成和演变; 螺旋带在静力调整阶段比准静力平衡阶段具有更大的径向尺度; 最大径向尺度和最长生命期的外围螺旋带易于在稳定涡旋中产生, 而在快速发展的不稳定涡旋中外围螺旋云带则难以形成和维持。由此可知, 热带气旋中的外围螺旋云 (雨) 带的形成伴随着静力平衡调整的过程, 在准平衡状态下, 螺旋带向热带气旋的内核区域集中, 形成眼壁—雨带复合体结构。本文的结论有助于深入理解热带气旋外围螺旋雨带的形成和演变机制。

关键词: 热带气旋强度, 螺旋云带, 热力扰动, 重力波

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.05.005

Effect of Tropical Cyclone-like Vortices on the Evolution of Asymmetric Thermal Disturbances

Huang Hong^{1, 2}, Wang Xuezhong¹, Jiang Yongqiang^{1, 2}, Chen Zhongyi¹

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

2 Key Laboratory of Mesoscale Severe Weather/Ministry of Education and School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract: Three tropical cyclone-like vortices (TCLV) are constructed following the empirical formulas. The asymmetrical thermal perturbations are imposed at the radius of maximum wind of those vortices. The evolution of such perturbations described by disturbed potential temperature, vertical speed and potential vorticity is simulated using Three-Dimensional Vortex Perturbation Analyzer and Simulator (3DVPAS), then the hydrostatic adjustment, the thermal and momentum fluxes, and the energy transformation are analyzed. The results show that the evolution of asymmetric thermal perturbations in three TCLV underwent three main stages, i.e. hydrostatic adjustment, quasi-hydrostatic balance, and growing (for unstable vortex) or decaying (for stable vortex) stages. At the initial non-hydrostatic status, with the dispersion of gravity wave, the perturbation potential energy decreases rapidly, whereas perturbation kinetic energy increases, and the thermal energy and momentum transmit outward. The time taken by the hydrostatic adjustment depends on the stability and intensity of the basic TCLV, and it will take much more time for the stable vortex with less stability to finish such a process. The formation and evolution of spiral band-like structures are shown in the initial two stages, which exhibit a larger radial scale in hydrostatic adjustment stage than quasi-hydrostatic balance stage. It is easier for the outer spiral bands with a longer radial scale and longer lifetime to form in stable vortices, but it is much more difficult for such bands to form and maintain in fast developing unstable vortices. The results in this paper indicate that the formation of distant spiral cloud (rain) bands goes with hydrostatic adjustment in tropical cyclones on the condition of quasi-hydrostatic balance, and spiral bands concentrate inwardly to the inner core of tropical cyclone and finally form the eye-wall and rainbands complex. This research gives a valuable insight into the mechanisms of the formation and evolution of distant spiral rainbands.

Keywords: tropical cyclone intensity, spiral bands, thermal disturbance, gravity wave

收稿日期: 2013年11月30日; 修回日期: 2014年7月31日

第一作者: 黄泓 (1977—), Email: hhong7782@163.com

资助信息: 国家自然科学基金 (40905021 和 41375049);

中国博士后科学基金 (2011M500894)

0 引言

近几十年来, 热带气旋的路径预报水平得到了很大提高^[1-3], 而对热带气旋强度和结构变化的研究进展相对缓慢^[4]。其主要原因在于对控制热带气旋强度变

化的动力机制尚不是十分了解，特别是对称涡旋与螺旋带等非对称结构之间的相互作用。这种复杂的相互作用对热带气旋整体的结构和强度演变具有非常重要的意义。

在理论研究中，通常可以将热带气旋分解为对称和非对称分量。其中，对称涡旋通常利用理论公式对涡旋的切向风速进行定义，这样定义的涡旋又称为基态涡旋。相关研究表明，涡旋中心附近快速衰减的高波数扰动有助于涡旋强度的增加^[5, 6]。衰减的涡旋罗斯贝（Rossby）波通过与基流涡度梯度相互作用产生的扰动涡度持续加强增长的离散谱扰动^[7]。螺旋带是热带气旋中非常显著的非对称结构，它可以通过一种或多种物理过程对热带气旋的结构和强度进行调制^[8-11]。螺旋雨带对飓风风场的影响是由其对非绝热对流加热的直接响应所引起的；从线性的角度而言，飓风风场对雨带加热的响应包括非对称位涡和对称次级环流两部分^[12]。外螺旋雨带中的冷却可以使热带气旋的强度及其内核的紧致性得以维持^[13]；相反，与不稳定对称气旋涡旋相联系的扰动增长是多边形台风眼和台风眼附近中尺度涡形成的原因^[14]。螺旋云带通常通过热力扰动和基流相互作用而形成^[15]：在与积云对流加热类似的非对称热力扰动的影响下所激发的重力波产生新的非对称位涡，该位涡向涡旋中心扩展，最后积聚在涡旋的最大风速半径之内。由此非对称位涡可视为螺旋带的来源。

目前，关于非对称扰动对热带气旋强度的影响已经开展了大量的研究工作，得到了很多有益结论。但是，在对称涡旋对非对称扰动的影响方面还有很多

$$\bar{\zeta}(r) = \begin{cases} \zeta_1 & 0 \leq r \leq r_1 - d_1 \\ \zeta_1 S[(r - r_1 + d_1) / 2d_1] + \zeta_2 S[(r_1 + d_1 - r) / 2d_1] & r_1 - d_1 \leq r \leq r_1 + d_1 \\ \zeta_2 & r_1 + d_1 \leq r \leq r_2 - d_2 \\ \zeta_2 S[(r - r_2 + d_2) / 2d_2] + \zeta_3 S[(r_2 + d_2 - r) / 2d_2] & r_2 - d_2 \leq r \leq r_2 + d_2 \\ \zeta_3 & r_2 + d_2 \leq r \leq r_3 - d_3 \\ \zeta_3 S[(r - r_3 + d_3) / 2d_3] & r_3 - d_3 \leq r \leq r_3 + d_3 \\ 0 & r_3 + d_3 \leq r < \infty \end{cases} \quad (1)$$

式中， $S(x) = 1 - 3x^2 + 2x^3$ 是三次Hermitian多项式，具体参数取值请参阅文献[16]。其中，Cat3涡旋在最大风速半径34.5km处的风速为54.2m/s，其涡度在半径等于26.0km处达到最大值，为 $5.3 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 。Cat1涡旋在最大风速半径42.5km处的风速为36.0m/s，其涡度在半径等于28.0km处达到最大值，为 $2.5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 。TS涡旋的最大风速为21.5m/s，对应的半径为49.0km，其最大的涡度（ $1.5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ ）出现在涡旋中心。

问题尚未得到很好的回答。基于此，本文将利用一个三维的非静力涡旋动力模式来研究非对称热力扰动在不同强度基态涡旋中的演变。首先，利用经验公式定义三个强度不同的基态涡旋，并在其最大风速半径附近叠加一个非对称热力扰动；然后，分别研究热力扰动在不同涡旋中的结构演变，通量传播以及能量转换等；最后，进一步讨论基态涡旋的强度对螺旋带状结构的影响。

1 模式和方法

1.1 模式

本文采用的模式为三维非静力线性涡旋模型^[16]（Three-Dimensional Vortex Perturbation Analyzer and Simulator, 3DVPAS），由美国迈阿密大学David S. Nolan教授研发。该模式的出发方程为柱坐标下干滞弹性动力方程，能够模拟和分析任意给定的扰动在基本气流中的发展演变，分析扰动对基本气流的作用。本文所取的计算区域沿径向的范围为300km，垂直范围为20km，采用网格拉伸技术，对应的格点数分别为121和31。

1.2 涡旋模型的构造

在梯度风平衡和静力平衡的条件下，可以构造接近真实的热带气旋尺度涡旋。在真实的大气中，热带气旋眼区的涡度相对较低，而眼壁区域有较大的涡度值，在相对较远的地方涡度又很低，因此本文采用连接分段常值涡度廓线的方法构造了三种基态涡旋。根据强度分别称为强涡旋（简称Cat3）、中等强度涡旋（简称Cat1）和弱的热带风暴（简称TS）。具体构造方法可参阅文献[16]。其中Cat3和Cat1表达式为：

1.3 非对称热力扰动的定义

3DVPAS模式是一个非静力模型，纯热力扰动可直接作为初始条件^[17]。本文叠加的非对称热力扰动采用类似于文献[16]的方法定义，其对应的位温扰动在 $r-z$ 平面内满足高斯分布：

$$\theta_n(r, z, t = 0) = \theta_0 \exp\left[-\left(\frac{r - r_b}{\sigma_r}\right)^2 - \left(\frac{z - z_b}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (2)$$

式中， $\theta_0 = 1.2\text{K}$ 是最大扰动位温的振幅； r_b 是位温扰动中心所在半径； $z_b = 5\text{km}$ 是位温扰动中心所在高度；

$\sigma_r=20\text{km}$ 和 $\sigma_z=2\text{km}$ 分别为位温扰动在径向和垂直方向的半幅宽度。考虑到实际热带气旋中最大的对流加热通常发生在眼墙附近,因此为不失一般性,本文将热力扰动中心的径向位置取在基态涡旋的最大风速半径处。稳定性分析的结果表明^[16]: Cat3和Cat1涡旋不稳定增长率最大的波数分别为 $n=3$ 和 $n=2$;而TS涡旋对于任意波数的扰动均为稳定的。本文在研究热力扰动的演变时,均将切向波数 n 取为其对应基态涡旋的最不稳定波数。

2 结果分析

2.1 热力扰动的结构演变

在 $z=2330\text{m}$ 高度处,热力扰动叠加在Cat3涡旋

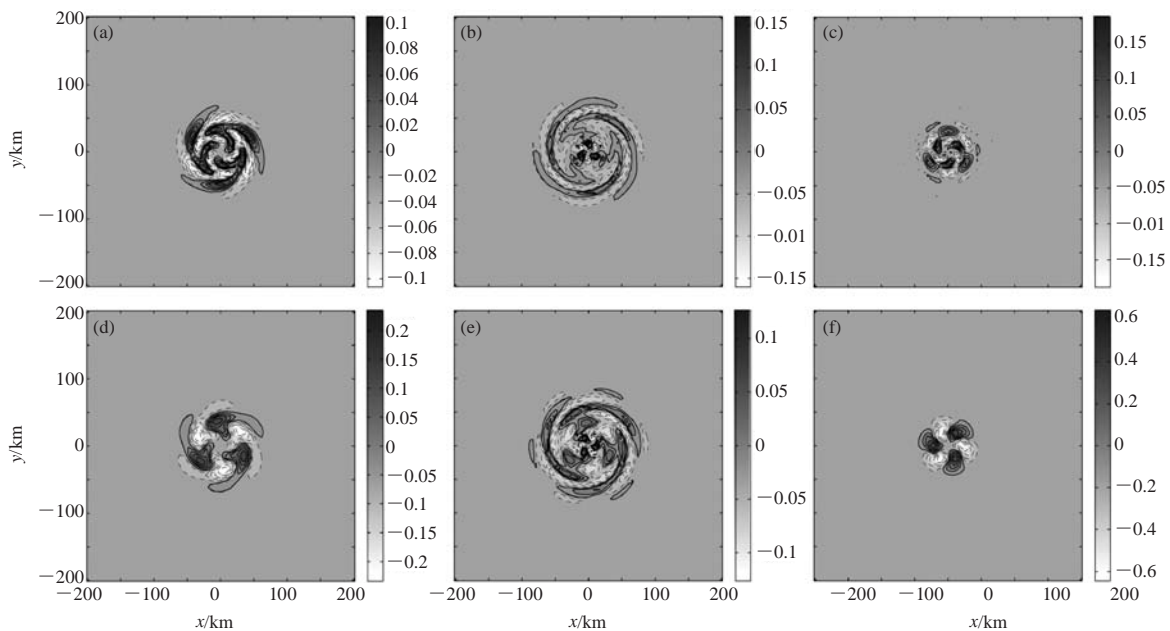


图1 Cat3涡旋垂直速度(a-c,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)和扰动位温(d-f,单位:K)在 $z=2330\text{m}$ 高度的时间演变图(从左到右时间依此为0.15h、0.6h、2.0h)

样的分布被破坏,出现许多小尺度中心,上下层表现出不同相位。这是因为热力扰动引入以后,静力平衡遭到破坏,出现了重力波的频散(图2b)。随着扰动的发展,外围的扰动逐渐减弱,大值中心集中 34.5km 以内,即最大风速半径内,这个位置正好是眼壁的位置。随时间推移,外围扰动减弱,而最大风速半径以内的扰动呈增强的趋势,在距离涡旋中心 20km 附近,不断地有新的正负扰动的交替生成,并伴随向上的运动,随高度增加向外倾斜,扰动向上发展至 8km 附近衰减至消失。扰动位温的演变具有类似特点(图2d—2f)。在中等强度的Cat1基流中,热力扰动的演变与在Cat3涡旋中类似(图略),但其中螺旋带状结构的范围明显偏大,且持续时间更长,在 $t=3.0\text{h}$ 扰动

后,其垂直速度迅速发展并且中心发生分裂,在径向方向形成多个正负中心(图1a)。在基本气流的作用下,扰动随着基流旋转的同时向内外传播,形成螺旋结构(图1b)。随着时间的推移,离中心较远的螺旋带发生断裂并逐渐减弱。约 1.6h 后,外围螺旋结构基本消失;但中心附近的扰动呈不稳定增长,其后扰动快速加强,并集中在距离涡旋中心 50km 的范围内(图1c)。扰动位温的演变表现出与垂直速度一致的演变规律(图1d~1f)。

从垂直分布来看,当在Cat3涡旋的最大风速半径附近叠加热力扰动的初期,其垂直速度在上下层相位相同,在径向上呈正负交替配置(图2a)。但很快这

主要集中在 50km 范围内。

在同样的高度,即 $z=2330\text{m}$ 处,TS涡旋中扰动的演变与Cat3涡旋中差别较大。从垂直速度的分布来看,热力扰动叠加的初期,并没有立即出现螺旋带状的结构(图3a)。约 1h 以后,才开始逐渐出现螺旋带状的结构,但是螺旋臂较粗(图3b)。切向尺度大于径向尺度,并向外传播。随着时间推移,扰动被频散到更广阔空间,螺旋带宽度变窄,外围扰动强度减弱(图3c)。扰动不断向最大风速半径内聚集,且扰动的垂直速度越来越小。扰动不再发展(图3d)。在径向垂直剖面上扰动垂直速度在垂直方向最终表现为同一位相,不再存在重力波,涡旋逐渐恢复静力平衡状态(图略)。

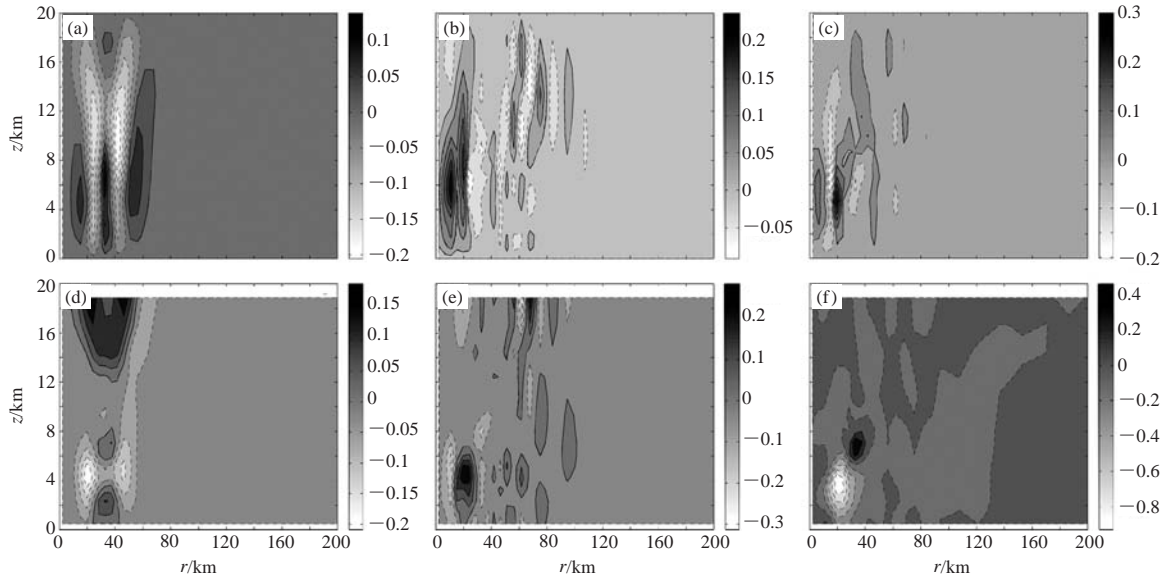


图2 Cat3涡旋中扰动垂直速度 (a-c, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 和位温 (d-f, 单位: K) 在垂直剖面中的时间演变图 (从左到右时间依此为0.15h、1.0h、2.0h)

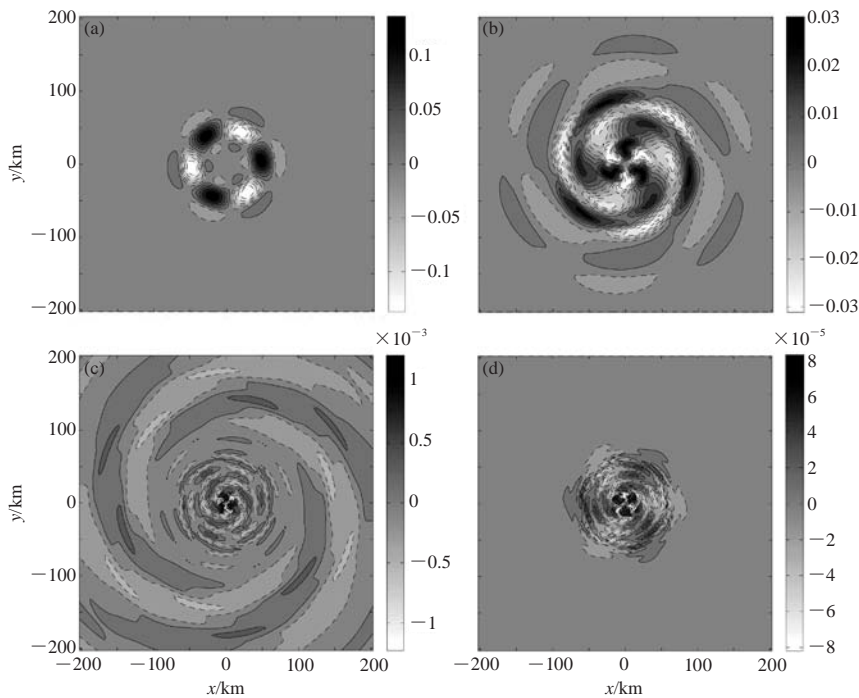


图3 TS涡旋中扰动垂直速度在 $z=2330\text{ m}$ 高度的演变 (从a到d时间依此为0.2h、1.0h、6.0h、15.0h, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

2.2 扰动通量分析

为了研究扰动的传播方向,对三个涡旋中扰动的热量、角动量等通量进行了分析。在Cat3涡旋叠加热力扰动的初始阶段,有垂直向上输送的热通量,但是这个时间持续很短,热通量变化很剧烈(图4a)。在 $t=0.5\text{ h}$ 时,热通量沿各个方向均有传播,这与快速调整有关,表现出无序性,在低层有向外输送的热通量,螺旋带在此阶段得到发展(图4b)。但到了

$t=1.0\text{ h}$,热通量一致向涡旋中心倾斜传播。在最大涡度半径以外,有平均向下传播的趋势,而在该半径以内,则有向上传播的分量(图4c)。此过程伴随着外围螺旋带状结构的减弱,类似于真实大气中的热带气旋组织化过程。从2.0h以后,向上的输送分量减弱消失,热通量方向为内侧输送,热通量最大中心对应于基态涡旋的最大风速半径,中心高度在5km左右(图4d)。热通量的向内输送,使得本来就比周围位温高

的涡旋中心位温升高, 涡旋的内核区域得到进一步发展。Cat1 涡旋热通量的传播与 Cat3 类似 (图略), 在扰动发生的初始阶段, 热通量向各个方向均有传播, 当 $t=2.0\text{h}$, 热通量的无序传播转变成主要向内向外两个方向, 螺旋带得到发展, 随着扰动的发展, 向外传播的分量逐渐减小, 向内的热通量增大, 外围螺旋结构消失, 扰动主要集中在基态涡旋的最大风速半径附近。对于 TS 涡旋 (图略), 扰动发生初期由于快速调

整, 位温通量方向不是很一致。在 $t=2.0\text{h}$ 时, 位温主要向外传播, 此时螺旋带状扰动逐渐加强, 随后向外的传播逐渐减弱, 只剩下低层向内的热通量, 螺旋结构减弱。

扰动角动量的演变以基态涡旋的最大涡度半径为界, 在高低层表现出不一样的传播特征。扰动发展初期, 在扰动叠加高度附近, 扰动角动量通量的值很小, 在其上下方, 则表现出基本一致的传输特征 (图

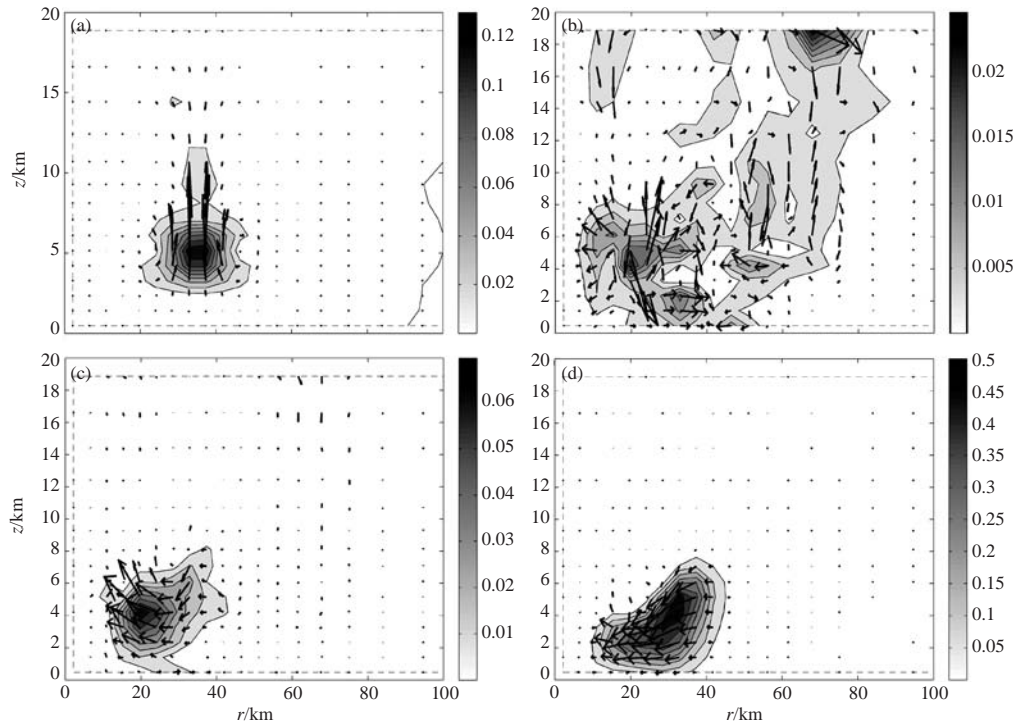


图4 Cat3 涡旋中垂直剖面内扰动热通量演变图 (a-d 分别对应 $t=0.15\text{h}$ 、 0.5h 、 1h 、 2h , 单位: $\text{K}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

5a)。在最大涡度半径内侧, 均表现出一致的向内传播, 而在该半径之外, 扰动角动量则向外传播, 在低层向外传播的扰动角动量比向内传播的大得多。在静力平衡调整的阶段, 涡旋外围的角动量传输增大, 在 8km 以下的层次, 以向外传输为主; 而在该高度以上, 则以向内传输为主 (图 5b)。此时, 在较大的径向范围内出现了螺旋带状结构 (图略)。随着时间的推移, 高层的角动量传输较低层开始削弱, 显著的角动量传输出现在最大风速半径之内的低层区域 (图 5c)。对应于扰动后期的快速发展, 向内的角动量传输集中在涡旋的内核区域, 且不断增强 (图 5d)。

Cat1 涡旋和 TS 涡旋中, 扰动角动量通量也经历了类似于 Cat3 涡旋中的演变过程 (图略), 当向外的角动量输送较大时, 螺旋带状结构明显; 而向外的角动量通量减小、向内的输送增大时, 螺旋结构减弱。与 Cat1 和 Cat3 涡旋不同, TS 涡旋中向内的角动量传输最

终不断减小至消失。

2.3 扰动能量分析

大气对流的发展与能量的转换是分不开的, 对流过程伴随着能量的转换和释放。当热力扰动施加到一个平衡的涡旋中后, 涡旋将经历一个调整过程达到新的准静力平衡状态。在 Cat3 涡旋中, $t=1.0\text{h}$ 之前, 扰动动能和有效位能有一段基本保持不变的时段, 这段时间对应于涡旋的准静力平衡阶段。之后扰动动能和有效位能均快速增长, 但前者的增长速度明显快于后者 (图 6a)。为突出初期热力扰动的变化特征, 图 6b 给出了 $0\sim 1.5\text{h}$ 的演变, 约在 0.1h 以前, 伴随着扰动有效位能的减少, 扰动动能迅速增加。在 Cat1 涡旋中, 扰动能量的演变规律类似于 Cat3 涡旋, 在 $5\sim 15\text{h}$ 这段时间, 能量变化较小, 处于平衡状态, 之后扰动能量也呈快速增长趋势 (图 7a)。但是, 在 TS 涡旋中则表现出较大的差异, 在热力扰动叠加的初期, 伴随着

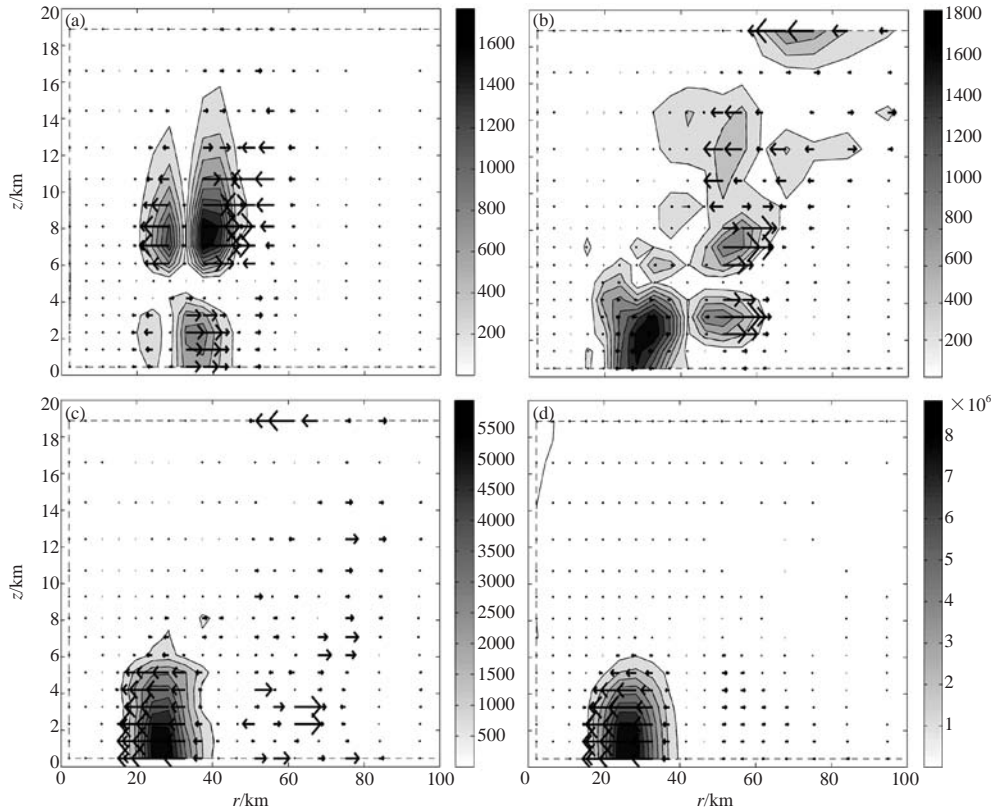


图5 Cat3涡旋中垂直剖面内扰动角动量通量演变图 (a-d分别对应 $t=0.05h$ 、 $0.5h$ 、 $1h$ 、 $4h$, 单位: $m^3 \cdot s^{-2}$)

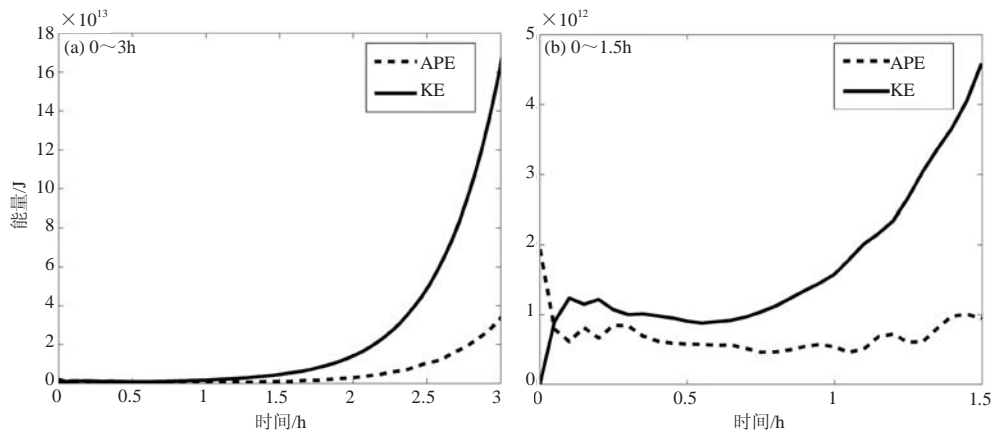


图6 Cat3涡旋中扰动动能 (实线) 与有效位能 (虚线) 随时间的演变

快速的静力平衡调整, 扰动位能减少, 而扰动动能增加, 然后在一个短暂时期两者量值保持相对稳定后, 扰动能量逐渐衰减, 直至被基流吸收 (图7b)。

3 结论

本文利用经验公式定义了三种不同强度的热带气旋尺度涡旋, 然后分别在其最大风速半径处叠加非对称热力扰动, 用3DVPAS模式模拟了扰动水平结构、通量传输以及能量转换的演变。得到了如下结论:

1) 在三种涡旋中, 非对称热力扰动的演变都依

次经历了三个阶段, 即静力调整阶段、准静力平衡阶段和增长 (对于不稳定涡旋) 或消亡 (对于稳定涡旋) 阶段。前两个阶段都伴随着螺旋带结构的生成和演变; 螺旋带在静力调整阶段比准静力平衡阶段具有更大的径向尺度。对于Cat1和Cat3涡旋而言, 经过准静力平衡过程后, 将开始新的非静力平衡状态, 此时扰动迅速增长, 主要聚集在眼壁附近, 外围螺旋带消散。

2) 热力扰动与基本气流的相互作用可以产生螺旋带, 但三种基流中的螺旋带演变特点不同, 主要是

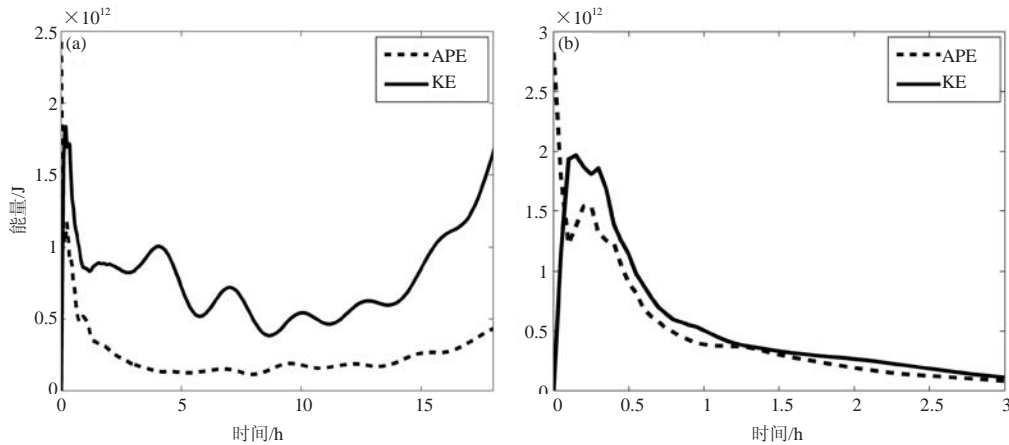


图7 扰动动能（实线）与有效位能（虚线）在Cat1（a）和TS涡旋（b）中的时间演变

表现为螺旋带的范围大小和持续时间。涡旋的强度越强，不稳定增长率越大，螺旋带的持续时间越短，范围也越小。从扰动通量分析结果可知，当螺旋带发展时，热通量和角动量通量方向向外，而当螺旋带减弱时，热通量和角动量通量方向一致向内。

3) 最大径向尺度和最长生命期的外围螺旋带常在稳定涡旋中产生，而快速发展的不稳定涡旋中外围螺旋云带则难以形成和维持。由此可知，热带气旋中的外围螺旋云（雨）带的形成伴随着静力平衡调整的过程，在准平衡状态下，螺旋带向热带气旋的内核区域集中，形成眼壁—雨带复合体结构。

本文的结论有助于深入理解热带气旋外围螺旋雨带的形成和演变机制。但是，由于本文的结论基于理论模式结果，因此还不能直接用于解释实际热带气旋中螺旋带的生消机制，需要后期结合实际观测资料和数值模式的模拟结果开展更加深入的工作。

参考文献

[1] 陈联寿. 热带气旋运动研究进展的综述. 全国热带气旋科学讨论会论文集. 北京: 气象出版社, 2001.
 [2] McAdie C, Lawrence M B. Improvements in tropical cyclone track forecasting in the Atlantic basin, 1970-1998. *Bull Amer Meteor Soc*, 2000, 81(5): 989-998.
 [3] 陈联寿, 孟智勇. 我国热带气旋研究十年进展. *大气科学*, 2001, 25(3): 420-432.

[4] 秦景灏, 端义宏. 我国热带气旋强度变化研究的新进展. 北京: 气象出版社, 2001.
 [5] Carr III L E, Williams R T. Barotropic vortex stability to perturbations from axisymmetry. *J Atmos Sci*, 1989, 46(20): 3177-3191.
 [6] Smith II G B, Montgomery M T. Vortex axisymmetrization: Dependence on azimuthal wave-number or asymmetric radial structure changes. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1995, 121(527): 1615-1650.
 [7] Nolan D S, Montgomery M T. The algebraic growth of wavenumber one disturbances in hurricane-like vortices. *J Atmos Sci*, 2000, 57(21): 3514-3538.
 [8] Cione J J, Black P G, Houston S H. Surface observations in the hurricane environment. *Mon Wea Rev*, 2000, 128(5): 1550-1561.
 [9] Kimball S. A modeling study of hurricane landfall in a dry environment. *Mon Wea Rev*, 2006, 134(7): 1901-1918.
 [10] Chen Y S, Yau M K. Spiral bands in a simulated hurricane. Part I: Vortex Rossby wave verification. *J Atmos Sci*, 2001, 58(15): 2128-2145.
 [11] Franklin C N, Holland G J, May P T. Mechanisms for the generation of mesoscale vorticity features in tropical cyclone rainbands. *Mon Wea Rev*, 2006, 134(10): 2649-2669.
 [12] Moon Y, Nolan D S. The dynamic response of the hurricane wind field to spiral rain band heating. *J Atmos Sci*, 2010, 67(6): 1779-1805.
 [13] Wang Y Q. How do outer spiral rain bands affect tropical cyclone structure and intensity? *J Atmos Sci*, 2009, 66(5): 1250-1273.
 [14] Schubert W H, Montgomery M T, Taft R K, et al. Polygonal eyewalls, asymmetric eye contraction, and potential vorticity mixing in hurricanes. *J Atmos Sci*, 1999, 56(9): 1197-1223.
 [15] 张铭, 黄泓, 张立凤. 大气波谱分析和不稳定性 (第三卷): 热带气旋中的扰动. 北京: 气象出版社, 2010.
 [16] Nolan D S, Montgomery M T. Nonhydrostatic, three-dimensional perturbations to balanced, hurricane-like vortices. Part I: Linearized formulation, stability, and evolution. *J Atmos Sci*, 2002, 59(21): 2989-3020.
 [17] Nolan D S, Grasso L D. Nonhydrostatic, three-dimensional perturbations to balanced, hurricane-like vortices. Part II: Symmetric response and nonlinear simulations. *J Atmos Sci*, 2003, 69(22): 2717-2745.

雨量站网测量精度的评估

孙大利^{1, 2} 刘晓阳¹ 王久珂³ 何思远^{1, 4}

(1 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871; 2 中国人民解放军91395部队, 北京 100243;

3 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 4 白城兵器试验中心, 白城 137001)

摘要: 抽站法和经验公式法是目前比较常用的两种雨量站网规划方法, 这两种方法最终可以确定允许误差和布站精度之间的关系, 但允许误差实际上是相对偏差, 真正的允许误差应当是相对偏差与现有最密雨量站网测量误差的累加, 而现有最密雨量站网的测量精度目前无法进行评估。针对这一问题, 本文把独立同分布中心极限定理引入雨量站网的规划, 通过对模拟降水场的分析计算, 可以对现有最密雨量站网的面雨量测量精度进行评估。利用安徽省2005—2008年梅雨季节降水数据, 统计得出安徽省现有雨量站网面雨量的测量误差在平原和山区分别约为6%~10%和8%~13%。

关键词: 雨量站网, 规划, 抽站法

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.05.006

Research on the Measurement Precision of the Rain-Gauge Networks

Sun Dali^{1, 2}, Liu Xiaoyang¹, Wang Jiuke³, He Siyuan^{1, 4}

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

2 91395 PLA Troops, Beijing 102443 3 The National Marine Environment Forecast Center, Beijing 10081 4 Baicheng

Ordnance Test Center, Baicheng 137001)

Abstract: Reducing the rain-gauge Stations Method and Formula Method is more and more commonly used to design rain-gauge networks. The relationship between relative error (permissible error) of a real rainfall and Rain-gauge networks density can be determined by them. In fact, relative permissible error is relative deviation, The real permissible error is the sum of relative deviation and relative error of the most densely Rain-gauge networks, and it cannot be assessed currently. To solve this problem, a method is obtained from Levy-Lindeberg Theorem theoretically. Based on simulated rainfall fields and high-density rainfall data during Meiyu season in Anhui Province, the measurement precision of the most densely rain-gauge networks is assessed by the Method. We calculated 2005-2008 rainfall data during Meiyu season in Anhui Province and concluded that relative error of the most densely rain-gauge networks is 6%-10% in Huaibei Plain, 8%--13% in the mountains of southern Anhui Province.

Keywords: rain-gauge networks, design, reducing the rain-gauge stations method

0 引言

雨量计是测量降水最直接有效的工具, 测量精度高, 但测量仅限于点上, 对于一定范围来讲, 则因为雨量站密度的影响而缺乏代表性。随着自动化探测技术的提高, 气象水文部门建起了加密自动雨量站网, 雨量站网的设计需考虑两方面的因素, 一是精度, 二是成本, 所以, 科学合理地规划和优化雨量站网, 获取尽可能真实的降水场, 意义十分重大。国内外, 从20世纪60年代开始研究雨量站网的规划问题, 提出和发展了很多研究方法, 有模拟近似法^[1-4]、相关系数

法^[5]、有积差法、锥体法、暴雨中心法、抽站法^[6], 以及经验公式法等^[7], 但由于降雨过程的随机性以及地形分布的复杂性, 导致目前还没有一种通用或固定的布设方法。

目前, 随着加密自动站的大范围布设, 抽站法和经验公式法在我国得到了广泛的应用, 1981—1994年, 原水电部水文司等单位在江西省开展了梅雨区雨量站网密度实验研究, 确认抽站法是一种稳定、合理的分析方法, 简明直观、理论依据较强^[8], 并把此方法列入了《水文站网规划技术导则》, 而经验公式法也是以抽站法为基础的^[7, 9]。抽站法是利用雨量站网稠密地区的全部降雨资料计算面雨量的近似真值, 然后逐步抽取一部分雨量站值, 计算面雨量及其误差, 寻求降水场测量误差(允许误差)与布站精度之家关系的方法, 抽站法中的“误差”是相对于全部雨量站

收稿日期: 2014年7月30日; 修回日期: 2014年9月17日
第一作者: 孙大利(1979—), E-mail:sundl6078@163.com
通信作者: 刘晓阳(—), E-mail:xylu@pku.edu.cn
资助信息: 国家自然科学基金项目(41075011和41375025);
公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006037)

参加计算得到的,雨量站无限加密不现实,所以,抽站法和经验公式法中常用的允许误差实际上是相对于雨量站最密情况下的误差,而不是相对于面雨量真值的误差,因此,严格的意义上只能称为相对偏差,在不考虑雨量自身测量误差的前提下,真正的面雨量测量相对误差应当是相对偏差(允许误差)以及最密雨量站网的面雨量测量误差两者的累加,目前无法对现有最密雨量站网的面雨量测量误差进行评估。

本文把独立同分布中心极限定理引入雨量站网的规划,得到了面雨量测量允许误差与布站精度的关系,在此基础上,推导了面雨量测量的相对误差、相对偏差及雨量站网自身测量误差间的关系,最终用于对现有最密雨量站网的面雨量测量精度进行评估。

1 使用资料说明

本文所使用的资料包括两部分,一是实测降水场资料,来自安徽省2005—2008年梅雨期间雨量站的小时测量数据,安徽省现有雨量站1165个,平均站间距11~12km,雨量站分布如图1所示,矩形框所示区域为后续结果验证及统计计算选定的两个区域,区域一位于淮北平原,区域二位于皖南山区;二是模拟降水场资料,模拟降水场可以回避雨量计自身测量误差,同时模拟降水场可以设定为高分辨率,可更好地满足抽站条件。利用模拟降水场进行验证分析,首先要统计降水分布规律,对安徽省2005—2008年所有梅雨季节降水数据进行统计,发现梅雨期降水概率在空间上与小时降水量(降水强度)呈现很好的伽玛分布关系:

$$P(x) = 0.314x^{-0.6324}e^{-0.2663x} \quad R = 0.9922 \quad (1)$$

式中, x 为雨量, $P(x)$ 为 x 大小的降水出现的概率, R 为拟合复相关系数。

对梅雨期间不同年份,不同月份或不同的降水过程进行统计,降水场的空间分布特征都符合 γ 分布,即无论是年雨量、月雨量、单次雨量还是小时雨量(雨强),雨量的大小与相应雨量出现的频率都呈现

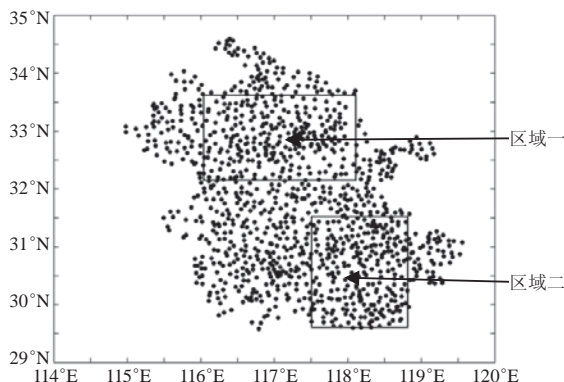


图1 安徽省雨量站分布

很好的伽玛分布关系,其相关系数都在0.98以上,只是拟合系数在10%以内变化。

2 理论推导

2.1 独立同分布中心极限定理引入雨量站网规划

在数理统计中,有独立同分布的中心极限定理^[10]:

设 $\{X_n\}$ 是独立同分布的随机变量序列,且期望 $E(X_n) = \mu$, 方差 $\text{Var}(X_n) = \sigma^2$, 则随机变量

$$Y^* = \frac{(x_1 + x_2 + \dots + x_n) - n\mu}{\sigma\sqrt{n}} \quad (2)$$

的分布函数 $F_n(y)$ 对于任意 y 满足

$$\lim_{n \rightarrow \infty} F_n(y) = \lim_{n \rightarrow \infty} (Y^* \leq y) = \int_{-\infty}^y \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (3)$$

在客观实际中有许多随机变量,它们是由大量的相互独立的随机因素的综合影响所形成的,而其中每一个别因素在总的影响中所起的作用都是微小的,这种随机变量往往近似地服从正态分布。

$\{X_n\}$ 作为独立同分布的随机变量序列是独立同分布中心极限定理成立的前提,对于一个固定的站点,一个雨量计多次随机测量一次降水或多次降水得到的测量值是相互独立的。大气中一种结构(比如云团)移动经过一个地点时,空间上的自相似结构转化成了时间变化的自相似结构^[11]。这与泰勒的“冰冻湍流假设理论”是一致的。考虑到时空的可置换性和相关性,那么某一区域的多个雨量站测量一次或多次降水得到的测量值也同样是独立的随机变量序列,式(1)的结果证明了 $\{X_n\}$ 随机变量符合同分布条件。

$X_1 \sim X_n$ 可以认为是选定的区域内 n 个雨量站的测量值,期望 μ 是这个区域内所有雨量站测量值的平均值, σ 为雨量站测量值的均方差。

将式(2)分子分母同除以 n , 得到

$$Y^* = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i) - n\mu}{\sigma \frac{1}{\sqrt{n}}} \quad (4)$$

式中,分子是面雨量测量值和真值之间的偏差,由独立同分布中心极限定理, Y^* 满足正态分布,根据式(2)

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{\sum_{i=1}^n (X_i) - n\mu}{\sigma \frac{1}{\sqrt{n}}} \leq y \right) = \int_{-\infty}^y \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (5)$$

令

$$A = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (X_i) - n\mu}{\sigma \frac{1}{\sqrt{n}}} \right]$$

则 $\frac{A}{\sigma \frac{1}{\sqrt{n}}}$ 满足 $N(0, 1)$ 标准正态分布。需要注意的是, 偏差 A 是包含符号的, 如果对于不同的 A 做平均, 正负偏差会相互抵消, 即 A 的期望为 0 。所以, 如果要研究偏差的变化, 要对 A 取绝对值, 但 A 取绝对值后, $\frac{|A|}{\sigma \frac{1}{\sqrt{n}}}$ 不再是标准正态分布, 而是将其概率密度函数 x 轴负半轴部分以 y 轴为对称轴翻转到 x 正半轴并与正半轴的 y 值相加后得到的分布。

令

$$\left(\frac{|A|}{\sigma \frac{1}{\sqrt{n}}} \right) = \lambda \quad (6)$$

实际上, 可以求出 $\lambda = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}}$ 。

最终, 定义一个区域的面雨量相对误差

$$\overline{R_e} = \frac{|A|}{\mu} = \frac{\lambda \sigma}{\mu \sqrt{n}} \quad (7)$$

式中, μ 为雨量站测量值的期望, 可认为是平均面雨量的真值, 实际应用中, 用测量值的平均值代替, n 为面积 S 的区域中的雨量站个数, 在气象上, 雨量站的分布比较均匀, 假定一个雨量站控制的面积为正方形, 可以定义两两雨量站之间距离的平均值 (以下称为平均站间距) r , 则 $s = nr^2$, 式 (7) 又可以写成,

$$\overline{R_e} = \frac{\lambda \sigma}{\mu \sqrt{S}} r \quad (8)$$

由式 (7) 和 (8) 可以得出, 对于一固定大小的区域, 面雨量测量的相对误差与平均站间距成正比。

需要说明的是: ①独立同分布的中心极限定理成立还有一个前提, 即 n 足够大, 实际应用中, 一般大于 30 , 就可以利用定理作近似计算^[12]; ②上述推导过程中, 一直用到相对误差的概念, 这主要是延续以前研究人员的一个习惯, 确切的说应该是“相对偏差”, 它与真正的相对误差的差异是计算过程中用雨量站的测量值代替区域面雨量的真值造成的, 而它们之间的差异是本文研究的核心内容之一。

2.2 相对误差与相对偏差的关系——现有雨量站网面雨量测量精度的评估

假设存在一个无限密集雨量站网 A , 其平均站间距为 0 ; 实际具有的最密集雨量站网 B , 在 B 中随机抽取一个雨量站网 C 。对于某一次降水, C 相对于 A 的面雨量测量误差为 R_{CA} , C 相对于 B 的面雨量测量误差为 R_{CB} , B 相对于 A 的面雨量测量误差为 R_{BA} 。在不考虑雨量计自身测量误差的境况下, R_{CB} 实际上是任意雨

量站网面雨量测量的相对偏差, R_{CA} 是其面雨量测量的相对误差, 而 R_{BA} 是目前所具有的最密的雨量站网面雨量测量的相对误差。即

$$R_{CA} = \frac{\mu_C - \mu_A}{\mu_A} \quad (9)$$

$$R_{CB} = \frac{\mu_C - \mu_B}{\mu_B} \quad (10)$$

$$R_{BA} = \frac{\mu_B - \mu_A}{\mu_A} \quad (11)$$

式中, μ_A , μ_B 和 μ_C 分别为 A , B 和 C 某一次降水的面雨量测量值, 实际上 μ_A 为此次降水面雨量的真值。

根据式 (8), 可得

$$R_{CA} = k_1 r \quad (12)$$

$$R_{CB} = k_2 r + b \quad (13)$$

式中, k_1 和 k_2 分别为测量相对误差和相对偏差与平均站间距的关系系数, r 为平均站间距, b 为截距。

联立式 (9) ~ (13), 可得

$$R_{BA} = \frac{1 \pm k_1 r}{1 \pm (k_2 r + b)} - 1 \quad (14)$$

假定雨量站网 B 的平均站间距为 r_0 , 根据相对误差 (偏差) 的定义, 抽取雨量站网 B 中的所有雨量站时, 那么面雨量测量相对于雨量站网 B 的误差 (偏差) 为 0 , 即当 $r = r_0$ 时,

$$R_{CB} = k_2 r_0 + b = 0 \quad (15)$$

式中, k_1 无法直接通过计算获得, k_2 可以通过抽站法获得, 也可以通过式 (8) 直接得到。

为了求得 k_2 的变化规律, 采用模拟降水场资料进行统计计算。模拟降水场利用安徽省梅雨期间降水场空间分布规律 (即式 (1)) 随机得到, 其格点分辨率设为 0.5km , 区域大小为 $200\text{km} \times 200\text{km}$, 即此区域有 160000 个格点, 一个格点相对于一个雨量站, 此区域有 160000 个雨量站。具体计算方法是, 在此区域内取不同密度的雨量站网作为“最密”雨量站网, 在此基础上应用式 (8) 求取面雨量测量相对误差 (偏差) 随雨量站网密度 (平均站间距) 关系系数, “最密”雨量站网的采用均匀抽站方式获得。图 2a 和 2b 是对一个随机模拟降水场统计计算的结果, 体现了关系系数的均方差及相关系数极差随平均站间距的变化情况。可以看出, 关系系数的均方差和极差随平均站间距呈增长趋势, 且在一定的范围内, 关系系数的波动和极差很小。图 3a 和 3b 给出的是对 100 个随机模拟的降水场统计计算的平均情况, 发现关系系数的均方差和极差随平均站间距的变化更加稳定, 同样说明了上述结论。

如图 4 所示, 在平均站间距小于 25km 时, 得到测量相对误差 (偏差) 与平均站间距的关系系数稳定

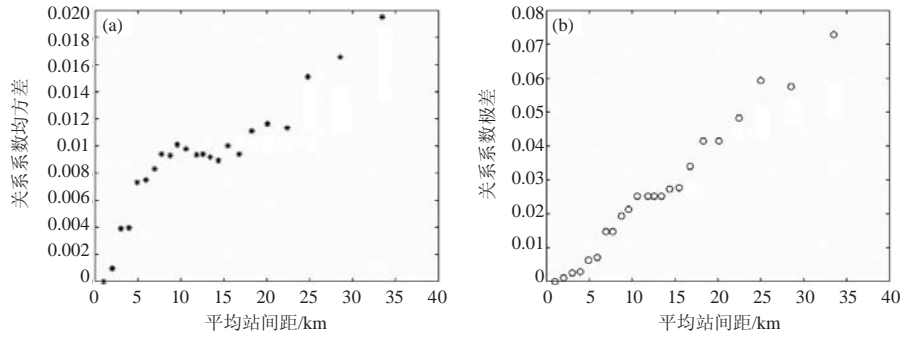


图2 利用模拟降水场得到的关系系数均方差 (a) 和极差 (b) 随平均站间距 (雨量站网密度) 的变化情况

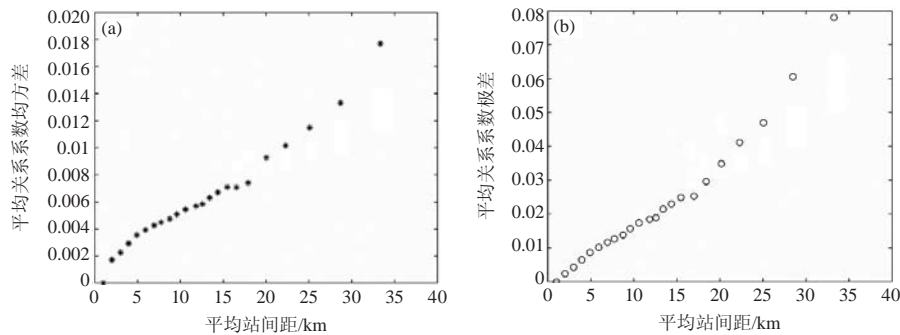


图3 利用模拟降水场得到的关系系数均方差 (a) 和极差 (b) 随平均站间距 (雨量站网密度) 的平均变化情况

在0.61~0.69, 其平均均方差为0.012, 平均极差为0.058; 当平均站间距为15km时, 平均极差在0.03左右, 也就是说当平均站间距小于15km时, 取任一雨量站网, 它们面雨量相对误(偏)差随平均站间距变化的关系系数在±0.03间波动, 用 k_2 代替 k_1 产生的误差不足5%, 所以在一定范围内, 可以认为不同“最密”雨量站网的面雨量测量相对误差(偏差)与雨量站网密度(平均站间距)的关系系数大约相等。

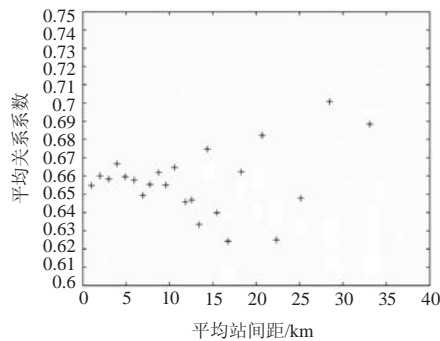


图4 利用模拟降水场得到的平均关系系数随平均站间距 (雨量站网密度) 变化的散点图

把 $r=r_0$ 、式(7)及 $k_1 \approx k_2$ 带入式(14)得到

$$R_{BA} \approx \pm k_2 r_0 = \pm b \quad (16)$$

式(16)说明, 一个雨量站网的面雨量测量相对误差实际上约等于式(13)中的截距项, 如图5所示, 此截距项是由于计算时把最密雨量站雨量站网的面雨量测量值当做面雨量真值造成的, 在一

定范围内, 用相对偏差代替相对误差所造成的差异是微小的。图5中的相对误差即是平均站间距为 r 的雨量站网面雨量测量的相对误差, 相对偏差是可以得到的, 当估测误差与相对偏差相比是一个小量时, 可以用相对偏差近似代替相对误差, 来实现对现有雨量站网面雨量测量精度的评估。例如, 通过对上述方法对模拟降水场的分析计算, 假定现有的最密雨量站平均站间距 $r_0=15\text{km}$, 其面雨量的测量相对偏差为 $15 \times 0.64\% = 9.6\%$, 评估相对误差为 $15 \times 0.03\% = 0.45\%$, 所以可以认为此现有最密雨量站网的面雨量测量误差为9.6%。而以此雨量站网为基础应用抽站法得到的相对偏差与雨量站网的平均站间距(雨量站网密度)之间的关系, 可以近似认为是相对误差(允许误差)与平均站间距(雨量站网密度)的关系。

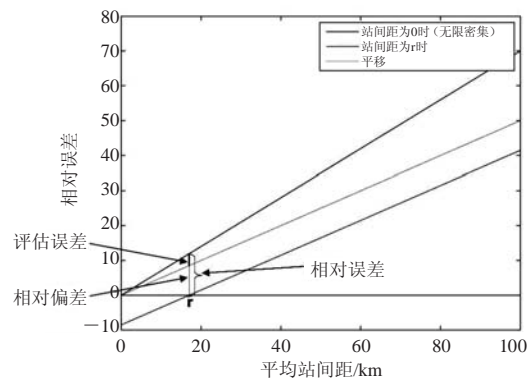


图5 评估现有雨量站网面雨量测量精度示意

3 实例分析

对2005—2008年安徽省梅雨季节降水按图1所示区域（分为稳定性降水和混合型降水）分别进行统计，图1中的区域一（平原）的面雨量测量相对误差与平均站间距的关系系数范围为0.49~0.8，其中稳定性降水在0.49~0.65，混合型降水在0.67~0.8；区域二（山区）的系数范围为0.7~1.41，其中稳定性降水在0.7~0.91，混合型降水在1.1~1.41。图6中， r_0 表示安徽省目前雨量站网的平均站间距，在平原地区（区域一）约为12km（图6a所示），山区（区域二）约为11km（图6b所示），粗实线表示的是安徽现有雨量站网在平原和山区的面雨量测量误差的范围，那么应用式（16）可以得出，对于梅

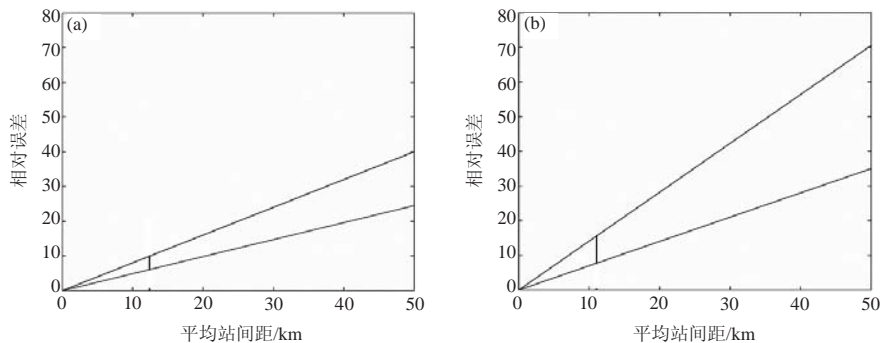


图6 安徽省现有雨量站网在平原（a，区域一）和山区（b，区域二）的面雨量测量精度

4 结论与讨论

1) 由独立同分布中心极限定理可以得到：某一区域的面雨量的测量误差与雨量站密度（平均站间距）呈线性关系，其误差增长斜率由降水场的变系数及区域面积决定。

2) 对于一个雨量站网，可以由独立同分布中心极限定理得出的结论求得面雨量的测量误差与平均站间距的关系系数，已知雨量站网的最小平均站间距，则可以对此雨量站网的面雨量测量精度进行评估。

3) 在抽站法和经验公式法中把相对偏差当做相对误差（允许误差）处理，在一定范围内是可行的，对于不同区域其范围不同，具体大小要通过对该区域进行长时间气候统计得到。

4) 安徽省现有雨量站网面雨量的测量误差在平原和山区分别约为6%~10%和8%~13%，参照雨量计测量降水自身的误差，对于区域面雨量的测量，目前的布站密度是合理的，不需要再加大布站密度。

5) 本文得到的结论，需要两个前提条件，一是只针对区域面雨量，二是针对某区域气候平均状况，而不是针对某一次降水。

6) 文中只用到2005—2008年4年的降水资料，需

要补充更长时间的资料进行统计分析。

国内外普遍认为，用雨量计测量降雨，其系统误差可达5%~15%，任芝花等^[13]应用了30站7年的降水资料统计出中国降雨测量的平均相对误差为4.34%~15.28%。考虑到雨量计本身的测量误差，对于一定区域内的面雨量测量而言，雨量站网的测量精度在15%以内，则认为是合理的。安徽省的降水大部分是稳定性降水和混合型降水，所以，目前的雨量站网可以满足测量精度的要求，其分布是合理的，而在此基础上再对雨量站网进行加密，对于区域面雨量的测量精度不会有实质性的提高。

参考文献

- [1] Bras RF, Rodriguez-Iturbe. Network design for the estimation of areal mean rainfall events. *Water Resources Research*, 1976, 12: 1185-1195.
- [2] Hughes JP, Lettenmaier DP. Data requirements for Kriging: estimation and network design. *Water Resources Research*. 1981, 17: 1641-1650.
- [3] Bastin G, Lorent B, Duque C, et al. Optimal estimation of the average areal rainfall and optimal selection of rain gauge locations. *Water Resources Research*, 1984, 20: 463-470.
- [4] Bogardi I, Bardossy A. Multi-criterion network design using geostatistics. *Water Resources Research*, 1985, 21: 199-208.
- [5] Serehdarna K E. Design of rain gauge network for the Chaliyar River Basin using spatial correlation technique. *Journal of the Institution of Engineers (India)*, Part CI: civil engineering division, 1983, 64: 170-174.
- [6] 崔泰昌. 雨量站网密度分析几种方法之比较. *山西水利*, 2002, (S1): 48-49.
- [7] 舒大兴, 韩金山. 山洪灾害监测雨量站网密度分析探讨. *水文*, 2011, 31: 64-67.
- [8] 水利部水文司. 水文站网规划技术导则. 北京: 水利电力出版社, 1992: 9.
- [9] 刘权授, 张桂娇, 王国栋, 等. 江西雨量站网密度公式. *水文*, 1997, 17(Z1): 10-15.
- [10] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计. 北京: 高等教育出版社, 1989: 134-135.
- [11] 丑纪范. 大气科学中的非线性与复杂性. 北京: 气象出版社, 2002: 18-20.
- [12] 徐姿奕, 汪四水. 独立同分布中心极限定理的应用. *山西大同大学学报 (自然科学版)*, 2007, 23(1): 12-14.
- [13] 任芝花, 王改利, 邹风玲, 等. 中国降水测量误差的研究. *气象学报*, 2013, 61(5): 621-626.

辽宁强对流天气物理量阈值探索统计分析

崔胜权¹ 梁寒² 李爽²

(1 辽宁省气象灾害监测预警中心, 沈阳 110166; 2 沈阳中心气象台, 沈阳 110166)

摘要: 通过对2003—2011年辽宁省强对流天气探空曲线数据文件进行空间及时间构建, 使用MICAPS软件计算统计各物理量参数值, 总结了这些物理量参数值在各类强对流天气的分布区间, 确定了强对流天气类型判断阈值, 其中短时暴雨和冰雹天气的A指数(A)、整层比湿积分(IQ)、K指数(K)、沙氏指数(SI)、0℃高度(H_0)和-20℃层高度(H_{20})六种物理量参数值有明显的区别, 雷雨大风天气介于短时暴雨和冰雹天气之间, 且参数值与两种天气都有较大的交叉。对三类天气的A、IQ和K的对比分析表明, 短时暴雨天气的水汽条件明显要高于冰雹天气, 说明暴雨对水汽的依赖比冰雹天气较高。对比分析 H_0 和 H_{20} , 发现冰雹天气的参数值明显低于暴雨天气。发生冰雹天气的SI高于暴雨天气。

关键词: 强对流天气, 物理量, 统计分析

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.05.007

A Statistic Analysis of the Threshold Value of Strong Convection Weather Physical Quantity in Liaoning

Cui Shengquan¹, Liang Han², Li Shuang²

(1 Liaoning Province Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning Center, Shenyang 110166

2 Shenyang Center Meteorological Station, Shenyang 110166)

Abstract: Based on Liaoning Province from 2003 to 2011 in strong convective weather sounding curve data files for building space and time to get the sounding station sounding curve changes in sounding data file, using MICAPS software calculation for each physical quantity parameter values, the physical distribution range of parameter values in all kinds of strong convective weather is summed up, determining the threshold value based on strong convective weather patterns. In terms of short time of heavy rain and the hail weather index (A), Integral Q (IQ), K Index (K), Showalter Index (SI), zero layer height (H_0), 20 degrees below zero height (H_{20}), the six kinds of physical quantity parameter values have obvious differences. Strong wind weather between short-term rainstorm and hail weather, and its parameter values with two kinds of weather have comparatively large cross connections: (1) analyzing A, IQ, K of three kinds of weather, it is shown that the water vapor of the short-time heavy rain conditions is significantly higher than that of hail weather, and the heavy rain that depends on water vapor than the hail weather is higher; (2) from the H_0 , H_{20} comparing and analyzing the two kinds of physical parameter values of hail weather, the parameter value was lower than that of heavy rain; (3) the hail weather SI is higher than the stormy weather.

Keywords: strong convective weather, physical quantities, statistical analysis

0 引言

探空资料对天气系统的监测和预报有重要作用, 现在已经成为强对流天气预报中必不可少的参考资料之一^[1], 综合利用由探空数据计算的物理量指数进行潜势预报就是重要方法之一。目前国内关于强对流天气的研究很多, 孙继松等^[2]从预报实践的角度讨论了探空和不稳定参数在实际强对流预报中应用的问题, 另外还有通过对天气过程资料的统计分析得出本地

的强对流过程物理量指数阈值, 例如庞古乾等^[3]总结珠三角地区前汛期出现强对流K指数、整层比湿积分(IQ)物理量的阈值。

但是, 常规探空由于观测站稀疏、日观测次数少, 不能很好地描述形成暴雨、冰雹、雷暴大风等强对流天气的特征, 导致利用大量典型个例的诊断分析结果获得强对流天气潜势预报指数比较困难。目前在探空观测中已经增加了02和14时的加密探空观测, 但该观测不定时, 不能满足突发的强对流天气的需求, 因此需要探索新手段来增强探空资料在强对流天气预警中的应用。

为了弥补常规探空资料的不足, 国家强天气预报

收稿日期: 2013年12月26日; 修回日期: 2014年11月19日
第一作者: 崔胜权(1979—), Email: cuishengquan79@163.com
资助信息: 2011年中国气象局预报员专项课题(CMAYBY2011-007)

中心引进了探空构建技术^[4]。利用每日3h间隔地面观测资料，参考临近探空站高空观测资料，假定高空气象要素变化较小，根据地面观测的温度等数据来修正08和20时的探空资料。使用探空构建技术，提取强对流天气发生发展时物理量指数值，使用统计分析方法对大量典型个例进行统计分析，提取强对流天气发生物理量阈值，构建辽宁地区的强对流天气物理量预警指标。

1 资料和方法

1.1 资料

使用2003—2011年辽宁省50个气象观测站的地面气象记录月报表资料、地面观测资料、常规自动站资料 and MICAPS 第五类格式的 $T\text{-log}p$ 温度对数压力图的数据文件；沈阳、营口、大连三部雷达的基本反射率、组合反射率和垂直液态水含量产品资料。

1.2 统计的物理量

- 1) 大气温湿类: A指数(A)、IQ、总指数(TT)；
- 2) 层结稳定类: 沙氏指数(SI)、K指数(K)；
- 3) 热动力综合类: 风暴强度指数(SSI)、强天气威胁指数(SWEAT)；
- 4) 能量类: 对流有效位能(CAPE)、抑制对流有效位能(CIN)；
- 5) 特殊高度层高度: 0℃层高度(H_0)、-20℃层高度(H_{-20})。

各个物理量公式或定义见附录。

1.3 方法

为弥补我国探空资料分辨率不足的问题，使用探空构建^[4]技术，利用每日3h间隔的地面观测，参考临近探空站高空观测资料，构建11, 14, 17, 23, 02和05时的探空资料。具体构建方法：

1) 空间构建。由于高空探测站较少，短时强对流天气不一定发生在探空本站，按照地理位置相近、地形高度相近、气候特点相近和影响系统相近的特点选取探空站一定范围内的观测站，形成一个面的观测区域，将该区域内任何一站观测的天气现象视为该探空站发生的即时天气(图1)。

2) 时间构建。假定14时(或02时)的高空环境与08时(或20时)相似，将拟构建站的14时(或02时)地面观测资料中的气压、高度、温度、露点、风向及风速作为参考探空站点08时(或20时)探空资料第一层资料，其余高度层资料不变，绘制新的探空曲线和计算相关物理量，得到14时(或02时)相关站点的时间构建探空资料。

A, TT, SI, K, SSI, H_0 和 H_{-20} 反映中高层大气

状态的物理量指数，在时间构建过程中将没有变化；IQ, SWEAT, CAPE和CIN反映整层大气状态的物理量，特别是中低层大气变化的物理量指数，时间构建对这几个物理量有一定影响；如果中低层大气不稳定能量加强，SWEAT和CAPE值应该加大，CIN值减小，底层湿度增加，IQ也应该增加。

3) 确定探空构建时次。使用沈阳、营口和大连三部雷达的基本反射率、组合反射率和垂直液态水含量产品资料，分析天气过程在雷达资料中的演变过程，确定强对流天气具体发生时间；在强对流天气发展过程中，天气强度最强的时候是在发展成熟阶段，因此应该使用强对流天气发展最旺盛时刻前时间最近的地面资料进行探空构建。

1.4 样本选取标准

1) 冰雹：在同一天内有3个以上的站点出现冰雹天气。

2) 雷雨大风：在同一天内有3个以上的站点出现8级以上的大风并同时伴有雷暴天气，且在过程发生过程中无冰雹天气产生。

3) 短时暴雨：非汛期(5—7月上旬, 9—10月)的非区域性暴雨天气过程(辽宁省区域性暴雨天气过程定义：一次天气过程中，全省61个基准站中有10个及以上站出现大于50mm以上降水)，同一天内出现10站次以上的短时强降水($\geq 10\text{mm/h}$)。

1.5 样本数量

短时暴雨天气个例21个，冰雹天气个例13个，雷雨大风天气个例20个。

2 结果分析

2.1 数据统计

强对流天气的发生发展有其特定的环境，是在特定条件下出现的短时灾害性天气，一般雷暴等强对

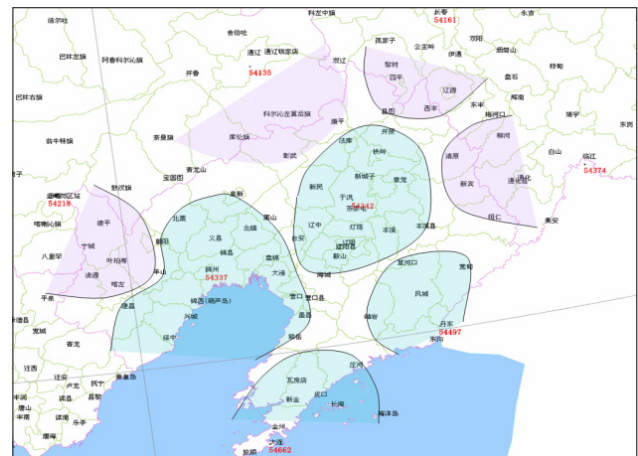


图1 探空站天气观测区域划分

流天气出现必然对应某些物理量的异常。由于能够造成强对流天气发生的物理原因较多,包括地形、大气层结稳定性、局地水汽含量、垂直运动、风的垂直切变、大气不稳定能量和下沉气流强度等,如果仅分析某种物理特征量可能得不到较好的预报结论,因此需要对各种物理量参数进行综合分析,目的在于找到一些较好的预报指标,同时针对这些指标找出强对流天气发生时的阈值,以便预报员定量参考。

因此对冰雹、短时暴雨和雷雨大风的三类强对流天气类型的物理量参数值进行统计,得出12种物理量的值分布范围,如表1所示。

表1 三类强对流天气物理量参数值统计结果

物理量名称	冰雹	短时暴雨	雷雨大风
A	-25~18	3~28	-17~15
IQ	<3000	4500~7200	2000~3500
TT	34~61	42~56	39~58
SI	-2~7	-9~1	-2~4
K指数	17~30	30~46	10~30
SSI	200~500	250~500	200~500
SWEAT	70~550	200~550	40~500
CAPE/ (J/kg)	500~3500	500~1800	1000~1500
CIN/ (J/kg)	0~2	>2	0~2
H_0 /m	<3500	4000~5000	2500~4000
H_{-20} /m	4500~5500	8000~8500	5500~8000

2.2 综合分析

由表1可见, IQ, H_0 和 H_{-20} 三种物理量在三类天气类型有明显的区分,其他物理量的值分布各有差异,下文使用统计学箱型图分别对各种物理量样本数据分布进行详细分析。

2.2.1 沙氏指数和K指数

SI<0表示大气不稳定,易产生对流,而SI负值越小表示大气越不稳定,对流越强^[5-6],但从图2的SI数

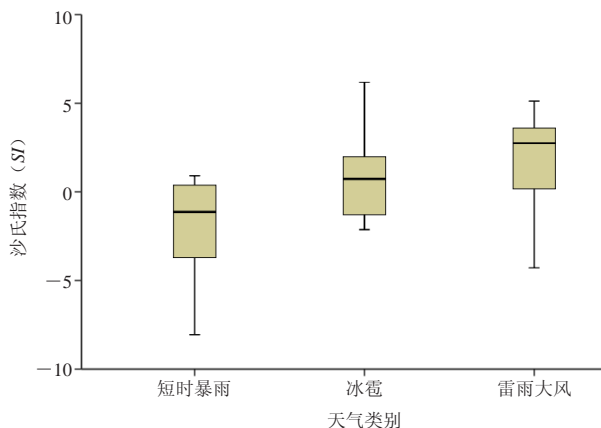


图2 三种强对流天气SI值分布对比图(上下边缘为参数最大和最小值;方箱内为50%统计样本分布;方箱中粗黑实线为统计值的平均值)

据分布上看,只有短时暴雨天气的数据符合SI的定义,冰雹和雷雨大风数据普遍>0。

尽管SI没有符合出现冰雹的经验阈值,而实际天气却出现了强冰雹,可以从SI的定义出发得到解释,SI的定义为500hPa环境温度与气块从850hPa干绝热抬升到其凝结高度,然后湿绝热抬升到500hPa高度时的温度之差。探空构建的过程中,只考虑到地面高度、温度、露点、风向和风速的变化,其余高度层资料不变,现实不能反映地面到850hPa的底层整体的水汽变化,如果水汽不能从地面伸展到850hPa,此SI则失去代表性^[7]。另外,SI是基于探测时间的温度和露点的状态指数,未考虑午后可能发生的加热变化,而在冰雹天气要求湿层较薄,低空暖湿,中层却十分干燥,且在天气发生前,在对流层中低层常常出现一个或两个明显的稳定层和逆温层,因此常常会使SI失去代表性^[8]。

K指数是衡量大气中潜在能量多少的一种指标,K指数在夏季很少出现负值。K指数在暴雨上的表现略大于冰雹和雷雨大风天气,说明暴雨对水汽的依赖条件较高^[9];从图3中的K指数数据看,冰雹、雷雨大风天气 $K<30$,明显小于短时暴雨天气($K>30$),这与K指数是反映中低层稳定性和湿度,一般K指数值愈大,愈有利降水发生,而冰雹、雷雨大风天气要求湿层较薄,低空暖湿,中层却十分干燥的条件相符合;因此,在有强对流天气发生时, $K>30$ 时多发生短时暴雨天气, $K<30$ 多发生冰雹和雷雨大风天气。

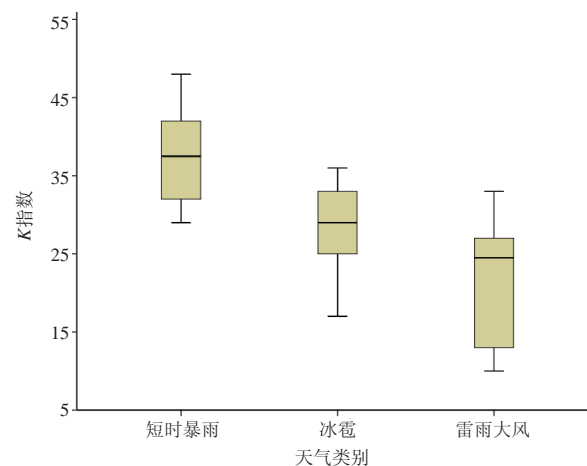


图3 三种强对流天气K指数分布对比图(上下边缘为参数最大和最小值;方箱内为50%统计样本分布;方箱中粗黑实线为统计值的平均值)

2.2.2 A指数和整层比湿积分

根据历史经验,A在暴雨预报中具有一定的作用,利用单点A变化曲线预报降水有一定规律可循。个例表明,当A由负值上升到正值时,天气转为阴

雨,达到10以上时多有降水发生,A下降到负值时则雨停^[9]。从A数据分布上看短时暴雨天气 $A>10$,冰雹的A介于 ± 10 之间,而雷雨大风的A值大部分都 <0 ,其中冰雹和雷雨大风 <0 的数据需要重新考虑使用,冰雹和雷雨大风天气都有伴有降水发生,这与A为负值时则没有降水意义相违背,与探空构建时间同冰雹和雷雨大风天气发生时间对应较差有关。因此,当短时暴雨天气发生 $A>10$,当冰雹和雷雨大风天气发生 $10>A>0$ 。

从图4短时暴雨的IQ明显大于冰雹、雷雨大风,数值范围在4500~7200,而冰雹、雷雨大风的IQ基本上 <3000 ,这与冰雹、雷雨大风天气在中、低层需要有相对干燥的水汽条件,短时暴雨天气整层需要较好的水汽条件相对应。

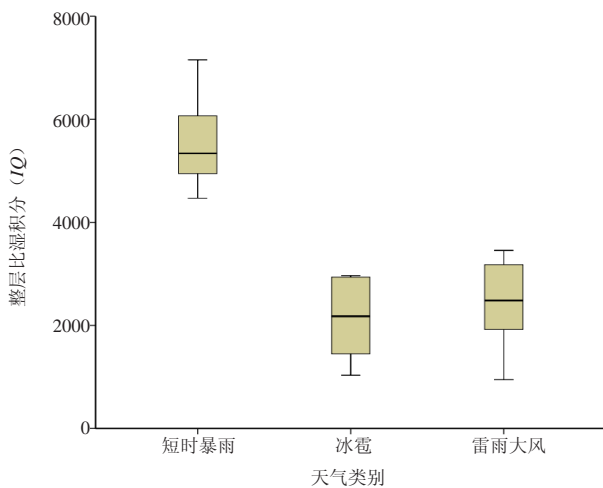


图4 三种强对流天气IQ值分布对比图(上下边缘为参数最大和最小值;方箱内为50%统计样本分布;方箱中粗黑实线为统计值的平均值)

2.2.3 0°C层高度和-20°C层高度

强回波相对于 H_0 和 H_{-20} 等温线高度的位置是判断大冰雹有效方法^[2]。从实际数据分布(表1)可以看出:

1) H_0 : 发生冰雹天气时 $H_0<3500\text{m}$; 发生雷雨大风天气时 $2500\text{m}<H_0<4000\text{m}$; 发生短时暴雨天气时 $4000\text{m}<H_0<5000\text{m}$;

2) H_{-20} : 发生冰雹天气时 $4500\text{m}<H_{-20}<5500\text{m}$; 发生雷雨大风天气时 $5500\text{m}<H_{-20}<8000\text{m}$; 发生短时暴雨天气时 $8000\text{m}<H_{-20}<8500\text{m}$ 。

冰雹和暴雨的区分非常明显,而雷雨大风介于冰雹和暴雨之间,比较接近冰雹天气。

TT 和 SSI 在三种强对流天气类型分布(表1)上没有明显的界限,不能用于区分天气类型。但从实际数据分布上看, TT 最小值分布差别较大,但95%的样本值 >40 , TT 越大表示大气越不稳定; SSI 在三类天气类

型上最小值比较相近,查看天气样本,最小值为冰雹天的一个个例,最小值为208.9。

因此当两种指数处于一定阈值范围有利于强对流天气的发生: $TT>40$ 有利于不稳定天气发生; $SSI>200$ 有利于不稳定天气发生。

$SWEAT$ 对强对流天气的发生有较好指示作用,从样本的分布上看短时暴雨的 $SWEAT$ 比冰雹和短时雷雨大风天气都大,但从 $SWEAT$ 的物理意义上看, $SWEAT$ 值越大越有利于强对流天气发生,并且冰雹相对于短时暴雨是更不稳定的天气,冰雹天气的强天气威胁指数应普遍比短时暴雨天气高,这与探空构建时并不能完全反应冰雹和雷雨大风探空状况有关,因此不能将 $SWEAT$ 用于判别强对流天气的类型。

综上所述,通过对各物理量值的分布特征进行对比分析:(1) IQ , H_0 和 H_{-20} 的样本值在短时暴雨和冰雹天气的分布有明显区别且有明确界限,将暴雨最小值和冰雹天气最大值之间的中间值作为判别类型物理量阈值;(2) A , K 和 SI 的样本值在短时暴雨和冰雹天气的分布有较大区别,但样本值分布略有交叉,取能将70%短时暴雨和冰雹样本区分开的值作为判别短时暴雨和冰雹天气类型有效的物理量阈值;(3) TT 和 SSI 样本值分布没有界限,大部分值交叉,不能用于判别强对流天气类型,但样本值分布有共同特点——均存在最小值,且最小值还比较接近,可以在判断天气是否稳定上发挥作用,当 $TT>40$ 、 $SSI>200$ 时有利于强对流天气发生;(4) $CAPE$ 和 $SWEAT$ 样本值分布没有界限,也没有共同特点,需要通过其他技术方法讨论其应用方法。综合以上分析得出判别短时暴雨和冰雹强对流天气类型有效的物理量及其值得分布(表2)。

表2 判别短时暴雨和冰雹天气的物理量参数阈值

物理量	冰雹	暴雨
A	0~10	>10
IQ	<3000	4500~7200
SI	>0	<0
K	<30	>30
H_0/m	<3500	4000~5000
H_{-20}/m	4500~5500	8000~8500

3 结论和讨论

1) A , IQ , K , SI , H_0 和 H_{-20} 六种物理量参数在短时暴雨、冰雹及短时雷雨大风三种强对流天气类型有明显分布特征,尤其在短时暴雨和冰雹天气有明显区别,因此以上六种指数可以作为判别短时暴雨和冰雹天气类型有效的物理量参数阈值(表2)。

2) TT 和 SSI 不能作为区别强对流天气类型的物理

量阈值, 但可应用于判断天气是否稳定, 当 $TT > 40$ 、 $SSI > 200$ 时有利于强对流天气发生。

3) $CAPE$ 和 $SWEAT$ 对强对流天气的发生有较好指示作用, $CAPE$ 和 $SWEAT$ 值越大越有利于强对流天气发生, 但从实际数据统计上, $CAPE$ 在200~2200, $SWEAT$ 在40~540, 出现这种情况是由于目前探空观测的空间和时间密度不够, 即使进行了探空构建也不能保证观测值获取于强对流发生的最佳时间。

4) 文中结论所用资料时间长度较短、样本有限, 需要进一步扩大资料的时间长度, 充实典型天气个例, 满足统计分析结果的普遍性。

5) 探空构建的效果尚需进一步的研究和实际预报的检验; 以目前的技术方法提取出部分敏感物理量参数, 为在短时预警监测工作中快速判断提供天气类型提供物理量参数指标。

参考文献

[1] 魏东, 孙继松, 雷蕾, 等. 三种探空资料在各类强对流天气中的应用对比分析. 气象, 2011, 37(4): 412-422.
 [2] 孙继松, 陶祖钰. 强对流天气分析与预报中的若干基本问题. 气象, 2012, 38(2): 164-173.
 [3] 庞古乾, 伍志方, 叶爱芬. 珠三角地区前后汛期强对流过程物理量指数对比分析及阈值选取. 热带气象学报, 2012, 28(6): 919-923.
 [4] 何立富, 周庆亮, 谌芸, 等. 国家级强对流潜势预报业务进展与检验评估. 气象, 2011, 37(7): 777-784.
 [5] 张艳玲, 袁媛, 张鹏, 等. 冬春季切变类冰雹发生条件的对比分析. 气象科学, 2004, 4(3): 357-360.

[6] 陆汉城, 杨国祥. 中尺度天气学原理和预报. 北京: 气象出版社, 2000: 198-201.
 [7] 陈晓红, 郝莹, 周后福, 等. 一次罕见冰雹天气过程的对流参数分析. 气象科学, 2007, 27(3): 335-341.
 [8] 周后福, 邱明燕, 张爱民, 等. 基于稳定性和能量指标作强对流天气的短时预报指标分析. 高原气象, 2006, 25(4): 716-722.
 [9] 雷蕾, 孙继松, 魏东. 利用探空资料判别北京地区夏季强对流的天气类别. 气象, 2011, 37(2): 136-141.

附录: 物理量定义说明

名称	公式
A指数 (A)	$A = (T_{850} - T_{500}) - [(T - T_d)_{850} + (T - T_d)_{700} + (T - T_d)_{500}]$
整层比湿积分 (IQ)	$IQ = \int_0^{p_0} q dp$ 式中, q 为比湿, p 表示气压, p_0 为地面气压
总指数 (TT)	$TT = T_{850} + T_{d850} - 2T_{500}$
沙氏指数 (SI)	$SI = T_{e500} - T_{p500}$
K指数 (K)	$K = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T - T_d)_{700}$
风暴强度指数 (SSI)	$SSI = 100[2 + (0.276 \ln(Shr)) + (2.011 \times 10^{-4} Eh)]$ 式中, Eh 为浮力能, Shr 平均垂直风切变
强天气威胁指数 (SWEAT)	$SWEAT = 12T_d + 20(T - 49) + 4f_s + 2f_s + 125(S + 0.2)$ 式中, T_d 为850hPa温度露点, f_s 为850hPa (单位: m/s), f_s 为500 hPa风速 (单位: m/s), S 为Sin (500 hPa风向-850 hPa风向)
对流有效位能 (CAPE)	$CAPE = g \int_{Z_{LFC}}^{Z_{EL}} \frac{T_w - T_v}{T_v} dz$ 式中, T_v 为虚温; 下标 e 和 p 分别表示与环境以及气块有关的物理量; Z_{LFC} 为自由对流高度, 是 $(T_w - T_v)$ 由负值转正值的高度; Z_{EL} 为平衡高度, 是 $(T_w - T_v)$ 由正值转负值的高度
抑制对流有效位能 (CIN)	$CIN = g \int \frac{T_e - T_p}{T_p} dz$ 式中, T 是该层的平均温度, T_e 和 T_p 分别表示环境与气块的温度

新书架 
NEW BOOK

 感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



2014 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium
《2014年IEEE国际地球科学与遥感专题会议》

编著者: IEEE
出版者: IEEE
出版年: 2014



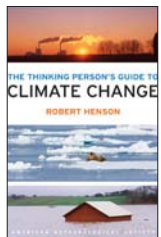
《雷电防护技术及其应用》

编著者: 高学浩
出版者: 气象出版社
出版年: 2015



Earth And Environmental Sciences Vol 2
《地球与环境科学 第2卷》

编著者: Imran Ahmad Dar 等
出版者: Intech
出版年: 2014



The Thinking Person's Guide to Climate Change
《气候变化思索者指南》

编著者: Henson Robert
出版者: American Meteorological Society
出版年: 2014

自动气象站异常记录分析及处理方法

张梅

(河北省气象信息中心, 石家庄 050021)

摘要: 根据中国气象局《地面气象观测规范》、《地面气象测报业务系统软件操作手册》及有关技术规定, 就自动气象站出现的由业务软件导致极大风和最大风时间缺测、采集器关闭时J文件数据重复卸载、传感器更换时出现异常记录等问题进行重点分析, 并提出相关处理方法, 供广大探测业务人员参考, 以期提高自动气象站气象数据质量, 确保观测资料的准确性、连续性、完整性。

关键词: 自动气象站, 异常记录分析, 处理方法

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.05.008

Analysis and Treatment of Abnormal Recording Method of Automatic Weather Stations

Zhang Mei

(Meteorological Information Center of Hebei Province, Shijiazhuang 050021)

Abstract: According to the “standard meteorological observation”, “surface meteorological observation system software operation manual” and relevant technical regulations, some problems were presented at automatic weather stations, problems such as great wind and wind time missing caused by operational software, the duplication unloading of J file data when the collector was switched off and abnormal records when the sensor was replaced. In this paper, these problems are analyzed and addressed. Their relevant processing methods are introduced for the reference of professionals dealing with detection work so as to improve the quality of meteorological data of automatic weather stations and ensure the accuracy, continuity and data integrity.

Keywords: automatic weather station, analysis of abnormal records, processing method

0 引言

随着自动气象站的普及、数据量的增大, 对观测员的技术水平要求也越来越高, 观测员不但要掌握常规的气象观测知识, 还要掌握现代化新型气象仪器设备的原理、性能、使用方法和新型仪器的日常维护技术^[1], 特别是要掌握异常记录的处理方法, 确保观测资料的准确性、连续性、完整性。本文根据从事质量控制多年来积累的经验, 总结了地面自动气象站异常记录的处理方法, 旨在帮助广大探测业务人员对自动气象站异常记录数据的处理更加符合《地面气象观测规范》对观测数据的要求, 把不正常记录的处理控制在基层。

1 常见数据缺测或异常记录的处理

1.1 极大风和最大风出现时间缺测

极大风速是指某个时段内出现的最大瞬时风速值, 而最大风速是指在某个时段内出现的最大10分

钟平均风速值^[2]。由于现行业务软件存在问题, 经常导致24时极大风、最大风时间缺测。一般情况下, 23时59分即为正确极值时间, 只有当极值恰好出现在24时, 极大风、最大风时间才记为2400。如图1所示, 深州2013年7月23日最大风时间缺测, 经查RTD备份文件恰出现在24时, 但是又发现24时正点数据风向和最大风数据风向不一致, 为了避免矛盾, 查看了上一日的RTD文件, 确定最大风速时间为23时59分。最后进行A文件维护。24时的瞬时风速与极大风速也不一致, 虽然极大风速和瞬时风速均为3秒钟滑动平均风速, 但极大风速是指23时59分01—60秒内出现的最大瞬时风速值。一般情况下, 极大风速大于瞬时风速, 所以极有可能出现不一致。

1.2 关闭采集器时J文件数据重复卸载

采集器是自动气象站的核心, 其主要功能是数据采集、处理、存储及数据传输^[3]。当关闭采集器再重新开启时, 极易造成J文件分钟数据的重复卸载, 因气压、相对湿度、气温分钟数据变化极小, 不易判断重复卸载情况, 故需要根据风的分钟数据进行判断。当

收稿日期: 2014年8月20日; 修回日期: 2014年11月11日
作者: 张梅(1976—), E-mail: hbqxzm@126.com

时分/要素	2分钟风向	2分钟风速	10分钟风向	10分钟风速	最大风向	最大风速	出现时间	瞬时风向	瞬时风速	极大风向	极大风速	出现时间	分钟雨量	气温	最高气温	出现时间	最低气温	出现时间	相对湿度	
基本参数	区站号	54608	年	2013	月	07	经度	115° 33'	纬度	38° 00'	观测场高	261	气压高	273	风速高	10E				
00时00分	325	58	327	53	328	53	/	330	62	311	330	2321	1	212	212	0000	212	0000	/	
00时01分	328	52	327	52	326	53	0001	297	45	342	57	0001		211	212	0000	211	0001	/	
00时02分	333	43	329	50	326	53	0001	302	27	342	57	0001		211	212	0000	211	0002	/	
00时03分	336	47	331	49	326	53	0001	326	61	326	61	0003		210	212	0000	210	0003	/	
00时04分	344	46	334	49	326	53	0001	345	42	326	61	0003		210	212	0000	210	0004	/	
00时05分	338	49	335	49	326	53	0001	333	40	340	65	0005		210	212	0000	210	0005	/	
00时06分	329	43	333	47	326	53	0001	311	55	340	65	0005	1	209	212	0000	209	0006	/	

图1 深圳2013年7月23日RTD文件截图

风的分钟数据风向风速连续为同一个数据时，则可以判定为数据重复卸载。

处理方法：A文件的正点数据，当J文件的正点分钟数据也为重复数据时，A文件的正点数据可以用正点的前、后10分钟数据代替^[4]，此时允许A、J文件的不一

致；J文件审核维护，将J文件相应时段内的各要素重复数据均改为缺测。如图2所示，尚义2013年6月23日16时05—16分的数据即为23日16时04分的重复数据，故应将相应时段（05—16分）的气压、气温、相对湿度、风的分钟数据改为缺测，并在一般备注栏内做备注。

日时序	4分	5分	6分	7分	8分	9分	10分	11分	12分	13分	14分	15分	16分
23日15时	165/9	201/8	203/12	162/19	151/23	151/26	141/29	138/29	130/24	124/25	130/25	124/24	111/25
23日16时	349/43	352/49	354/51	355/52	348/51	348/51	348/51	339/31	317/24	295/18	272/19	247/18	209/20
23日17时	144/33	144/33	144/33	144/33	144/33	144/33	144/33	144/33	144/33	144/33	144/33	144/33	144/33
23日18时	147/17	139/15	69/18	28/19	14/19	53/17	27/16	17/17	13/19	7/19	0/23	0/24	358/21
23日19时	142/32	137/33	138/29	143/31	146/27	152/24	150/28	147/29	147/32	147/26	159/22	170/26	169/23
23日20时	151/12	143/16	130/18	132/18	130/19	137/21	138/22	140/22	145/23	142/26	141/23	126/16	107/13
23日21时	206/16	211/24	216/23	213/24	225/26	223/25	239/23	243/26	241/30	222/36	240/32	264/38	283/41
23日22时	158/13	166/13	171/10	180/10	187/11	212/11	231/14	242/19	236/23	230/29	227/24	228/23	225/26
23日23时	158/1	170/0	165/2	154/7	145/9	141/9	143/8	144/7	137/4	115/2	20/1	345/4	329/6

图2 尚义2013年6月23日16时J文件重复数据截图

1.3 更换传感器时的数据处理

更换传感器时，一是要选择最佳时段，避开正点、日极值的出现时间；二是要注意更换传感器的流程，使更换工作快速顺利的完成，保证观测数据的完整。除雨量传感器的更换可以热插拔外，其余传感器的更换均需关闭采集器。地温传感器的更换时间最长，为了防止地温异常数据的上传，更换时应把相应地温参数设置为灰显。当更换传感器影响正点数据时应进行人工补测，并进行正点地面观测数据维护，以保证正点上传数据文件及月报表数据的准确。下面进行详细分析处理。

1.3.1 正点记录缺测或异常时替代顺序

正点数据缺测或异常时，优先代替的顺序如下：正点的60分钟数据→正点前10分钟接近正点的数据→

正点后10分钟接近正点的数据→人工补测数据→内插^[5]（风、降水量除外；水汽压、露点温度、海平面气压需进行相应计算得出）。

1.3.2 正点记录缺测或异常时替代方法

1) 用分钟数据代替：进入正点数据维护，双击“自动气象站观测数据”表格的当前时次单元格，即会弹出当前时次正点前后10分钟的全部要素数据的表格。若当前时次正点数据有缺测，可以通过双击该分钟数据固定列的相应行或某个单元格（除降水量和海平面气压外），即可用该行的全部值或单元格中的值来替代“自动气象站观测数据”表格的相应数据。

如图3所示，以河北省临漳国家一般气象站2011年8月2日08时因采集器故障影响08时所有要素数据缺测。经调用当天的RTD备份文件，发现07时53—57分



图3 临漳8月2日08时正点地面观测数据维护截图

有数据，但经过分析判断，发现07时55分数据正常，所以应用7时55分的数据代替08时的正点数据。

2) 用人工观测值替代：可直接在正点数据维护的相应单元格输入人工观测值。对于需经器差订正的器测数据或需查算数据，可将焦点移至要处理数据的单元格，点击鼠标右键，则会在窗口中部的左侧弹出对话框，类别选择“读数”，并输入相应的人工观测值关闭即可，数据会自动进入相应的单元格中；当自动站相对湿度缺测而气温正常，需用人工观测值代替

湿度记录时，软件会将人工观测的气温、湿度值一并替换到“自动气象站观测数据”的表格中，但按规定气温仍应保留自动站观测值，因此需人工将“自动气象站观测数据”气温单元格中被人工替代的气温值改回原自动站观测值。图4为张北国家基准气候站2013年7月5日08时相对湿度缺测而气温正常，用人工观测值代替湿度记录时的操作过程图示，最后气温值应改回原自动站观测值18.1℃。

3) 内插：在自动观测定时数据缺测，以上数据



图4 张北7月5日08时地面观测数据正点维护截图

都不能获取时，用前、后两定时数据内插求得（风、降水量除外）。并按正常数据统计，若连续两个或以上定时数据缺测时，不能内插，仍按缺测处理。最后做一般性备注。

2 结语

避免数据缺测要时刻注意环境干扰、操作不当及仪器的日常维护^[6]，对于软件造成的缺测，审核时要时刻提高警惕。在仪器更换或校准时要选择最佳时机、严格按照仪器安装顺序及相关注意事项执行。当自动站正点记录异常时应遵循先分钟数据代替再人工

补测，最后内插的原则进行正确的代替。

参考文献

- [1] 李鹏飞, 蔡涛, 王安, 等. 地面气象观测报表疑误记录的处理方法. 气象与环境科学, 2011, 34(增刊): 182-185.
- [2] 中国气象局. 地面气象观测规范. 北京: 气象出版社, 2003.
- [3] 王安, 卢红华, 李丽平, 等. 自动气象站分钟数据跳变分析与处理. 气象与环境科学, 2008, 31(增刊): 205-207.
- [4] 中国气象局. 地面气象测报业务工作手册. 北京: 气象出版社, 2009.
- [5] 陈柏堃, 许嘉玲, 方婉珍. 分钟观测数据文件质量控制初探. 气象研究与应用, 2011, 32(3): 76-78.
- [6] 周青, 梁海河, 李雁, 等. 自动气象站故障分析排除方法. 气象科技, 2012, 40(4): 567-570.

风云气象卫星在产品应用中前行

■ 成伟玲 威迪

国家卫星气象中心通过不断提升卫星产品分发能力，逐步形成了天地一体化的卫星资料分发体系，实现了完全自动化的数据检索共享。

自1988年以来，我国已成功发射14颗气象卫星，涵盖静止和极轨两大系列，完成了从第一代到第二代的过渡，实现了业务化运行。2005年，风云气象卫星被世界气象组织（WMO）纳入国际业务组网，越来越多的国家开始接收、使用风云卫星产品。ECMWF在对我国“风云三号”B星微波湿度计资料进行了长期的跟踪和评价后，认为该资料改进了模式对对流层中层和高层湿度场的分析，增强了卫星观测系统的强壮性（国内也称鲁棒性，是模式评价观测系统的业务用语，即Robust）。国家卫星气象中心通过不断提升地面应用系统功能，使风云卫星系列产品的分发系统得以持续加强和完善，为用户更加快捷地获取各种产品提供了方便。

一、风云卫星产品现状

目前在轨运行的我国第二代极轨气象卫星所携探测仪器从第一代两个增加至12个，实现了从单一遥感成像到地球环境综合探测、从光学遥感到微波遥感、从千米级分辨率到百米级分辨率，其下传信息量为第一代卫星的70倍，年生成、分发产品数翻增62倍，信息量从350G增加到67TB，具备了全球、全天候、多光谱、三维、定量对地遥感探测能力，产品覆盖了大气、海洋、陆表、冰雪和近地空间五大圈层。

国家卫星气象中心同时还接收美国NOAA、EOS极轨系列以及日本MTSAT静止气象卫星，并通过国际资料互换，获得欧洲MSG、METOP等卫星数据，已成为我国业务运行时间最长的遥感数据中心之一，存储着大量的卫星资料，并且具有4个主要特点：

1) 数据量大

卫星数据存储历史可追溯到20世纪80年代的美国NOAA卫星资料。截至2014年底，中心存储的各类卫星数据已经超过6PB，现在每天新增的数据超过4TB，预计到2020年左右，每天新增数据将超过10TB，且所有历史数据将永久保存。

2) 标准统一

为方便气象卫星产品在各领域中的应用，中心依

据国内外现行标准，结合风云卫星特点，制定和形成了一系列行业遥感数据产品规范。截至目前为止，中心已制定完成的相关标准涉及元数据、数据格式、数据分级、数据接口以及遥感监测方法等方面，还有数十个行业标准仍在制定过程中，气象卫星数据标准体系已经逐渐形成。

3) 数据和产品共享

用户可以通过多个渠道多种方式免费获取卫星数据和产品。卫星气象中心利用“在线-近线-离线”的存储架构，即实现了数据的快速共享服务，又保证了数据的安全存储，为提高我国科学研究、卫星数据应用水平提供了必要支撑。

4) 数据和产品的类型丰富

风云卫星通过遥感仪器获取地球表面和云的多波段辐射资料，经过数据预处理生成1级数据，在此基础上，中心的科学团队研发出多种气象卫星产品。产品数量从本世纪初的十几种增加到现在的四大类130余种（表1—2）。

二、产品分发

国家卫星气象中心本着“公开、免费、方便”的原则组建了一套由地面宽带网、国际互联网、卫星广播组成的天地一体化的卫星产品分发体系（图1）。目前风云卫星数据、产品的主要分发途径包括：

1) 中国气象局卫星数据广播（CMACast）系统——数据直播

CMACast系统是气象观测数据和各种气象产品分发的主要渠道，是信息传输业务系统的重要组成部分。

2) DVB-S数据接收系统

DVB-S系统是由国家卫星气象中心研发的国家级遥感数据资料共享平台，主要用于环境与气象卫星数据的广播和处理分析。平台的建成，免除了用户建设卫星数据接收站的大量资金投入，以微小的成本最大限度地获取多颗卫星数据，气象部门的用户群体可以延伸到地县级。

3) 网站数据共享平台

国家卫星气象中心自2005年开始建立的国家级气象卫星数据共享服务网站（satellite.nsmc.org.cn），通

表1 目前的风云卫星1级数据和定量产品

序号	卫星	仪器	产品名称	
1	FY-2D/E/F/G	可见光红外自旋扫描辐射仪 (VISSR)	1级数据, 大气运动矢量 (AMV), 云分类 (CLC), 总云量 (CTA), 云顶温度 (CTT), 沙尘监测 (DST), 用云分析出的湿度廓线 (HPF), ISCCP数据集 (IDS), 陆表温度 (LST), 射出长波辐射 (OLR), 降水估计 (PRE), 降水指数 (PRI), 分区图 (SEC), 积雪覆盖 (SNW), 地面入射太阳辐射 (SSI), 海表温度 (SST), 相当黑体温度 (TBB), 晴空大气可降水 (TPW), 对流层中上部水汽含量 (UTH)	
2	FY-3A/B/C	可见光红外扫描辐射计 (VIRR)	1级数据, 海上气溶胶 (ASO), 全球云量和云分类 (CAT), 云检测 (CLM), 云光学厚度和云顶温度/云高 (CPP), 沙尘监测 (DST), 雾监测 (FOG), 火点判识 (GFR), 陆表反射比 (LSR), 陆表温度 (LST), 植被指数 (NVI), 射出长波辐射 (OLR), 投影区域数据集 (PAD), 海冰监测 (SIC), 海表温度 (SST), 晴空大气可降水 (TPW)	
3		红外分光计 (IRAS)	1级数据, 射出长波辐射 (OLR)	
4		微波温度计 (MWTS)	1级数据	
5		微波湿度计 (MWHS)	1级数据, 大气垂直探测 (AVP), 冰水厚度指数 (IWP), 降水检测 (RDT)	
6		中分辨率光谱成像仪 (MERSI)	1级数据, 陆上气溶胶 (ASL), 海上气溶胶 (ASO), 云检测 (CLM), 陆表反射比 (LSR), 植被指数 (NVI), 海洋水色 (OCC), 投影区域数据集 (PAD), 陆上大气可降水 (PWV)	
7		紫外臭氧垂直探测仪 (SBUV)	1级数据	
8		紫外臭氧总量探测仪 (TOU)	1级数据, 臭氧总量 (TOZ)	
9		微波成像仪 (MWRI)	1级数据, 降水和云水 (MRR), 海冰监测 (SIC), 雪深雪水当量 (SWE), 土壤水分 (VSM)	
10		地球辐射探测仪 (ERM)	1级数据	
11		太阳辐射检测仪 (SIM)	1级数据	
12		地球辐射收支仪器组 (ERBM)	扫描视场大气顶辐射和云 (FTS)	
13		多仪器融合数据 (MULSS)	积雪覆盖 (SNC), 云雪覆盖率 (SNF)	
14		FY-3C	无线电掩星探测仪 (GNOS)	1级数据, 大气密度廓线 (ADP), 大气温度廓线 (ATP), 大气折射率廓线 (ARP), 低层大气湿度廓线 (AMP), 电子密度廓线 (EDP)

表2 风云卫星图像产品和监测分析产品

监测信息	灾害天气	热带气旋、暴雨、沙尘、大雾、霾
	农业生态	干旱监测、地表温度、植被变化、相对蒸散
	地表灾害	水情监测、积雪监测、海冰监测
	环境评估	蓝藻监测、蓝藻水华、城市热岛
应用产品	云图	电视云图、立体云图、可见光、红外、水汽等各通道云图
	定量产品	云顶亮温、云导风、云分类、降水估计、卫星融合海温产品、热能
	文字产品	监测报告、遥感监测月报

过互联网为用户提供历史、实时气象卫星产品、遥感信息、卫星运行动态等服务, 同时基于地理空间信息系统, 发布可视化的卫星数据产品。多年来, 通过优化不断提高系统性能, 缩短卫星数据的准备时间, 已经实现在线数据1小时、近线数据5小时的下载服务。另外, 还通过中国天气网 (www.weather.com.cn)、中央气象台 (www.nmc.cn) 等网站发布实时卫星云图。

4) FTP直接下载

FTP数据下载是目前国内外卫星数据共享服务的主要手段之一, 用户通过互联网登录FTP服务器下载在线存储的各类气象卫星数据产品, 使用方便, 较网站订购更为快捷。

5) 人工数据服务

针对国家重大科研项目、防灾减灾以及有特殊需

求的用户, 可通过人工数据服务方式, 以硬盘、光盘等介质获取大量级卫星数据。

6) 云共享服务

随着互联网技术的发展, 卫星气象中心已经开始搭建云平台, 通过云存储、云计算以及虚拟化等技术, 为用户提供更为高效稳定的数据服务。

7) 其他

除以上数据分发渠道, 中国气象局还通过国际交换途径 (WMO、地球观测组织GEO等) 将风云系列卫星产品共享至全世界。

三、应用成果和展望

国家卫星气象中心目前已建成了完全自动化的数据检索服务系统, 2014年对外分发数据超过800TB,

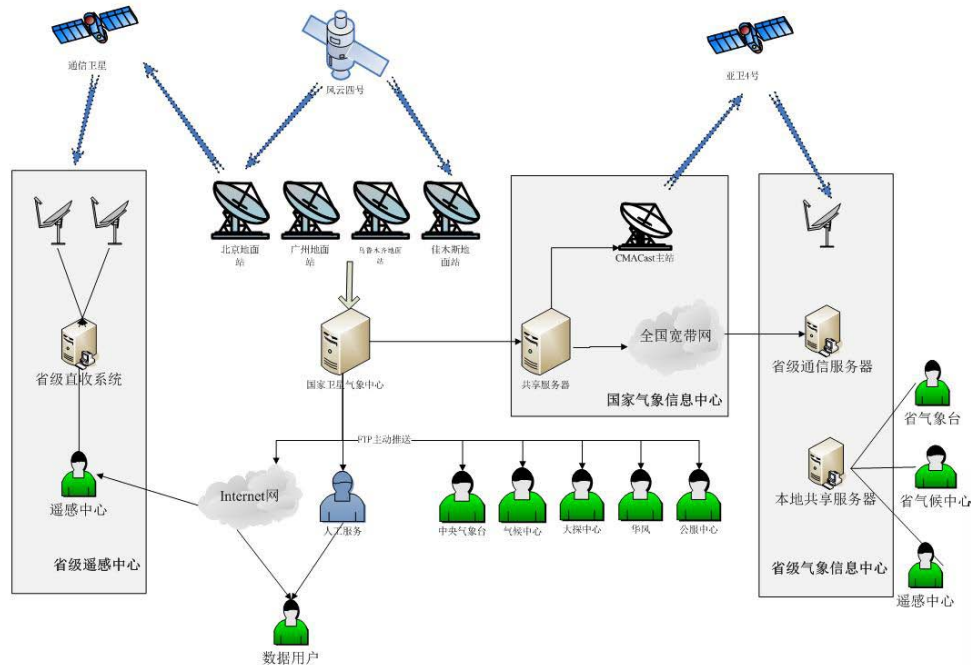


图1 风云卫星数据分发服务示意图

为400多个国家级、省部级项目提供了气象卫星产品支持。卫星产品的下载呈现逐年快速增长趋势。截至2014年，网站访问量为145834人次，页面浏览量为337470次，其中新注册用户为2475人，网站总注册人数达到31646人（图2）。数据服务网服务能力逐步提高，2014年，用户登陆次数达到40874人次，平均每月活跃用户515人，完成数据检索213581次，处理网络订单42284个，订购文件数为49.4万个，数据量为320TB（较上年增长61.2%），其中风云卫星总数据量为289TB（较上年增长89.8%），占订单总量的90.3%，FTP数据下载文件数为126万个，总数据量为640TB（较上年上涨115.4%）。

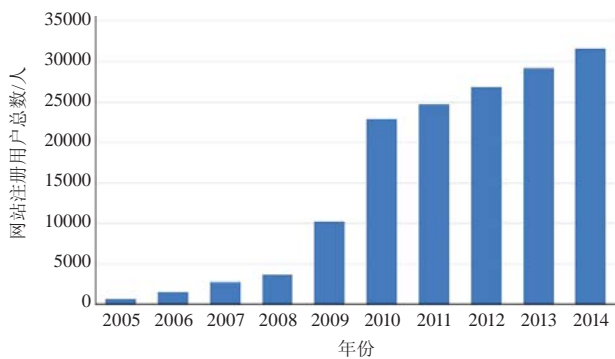


图2 风云卫星遥感数据服务网注册用户总数

根据中国气象卫星的总体战略和发展规划，到2020年，中国将建立“风云四号”静止气象卫星“双星运行、在轨备份”的业务格局，极轨卫星形成上午

星、下午星和降水测量雷达星三星组网观测能力，建立稳定运行的卫星业务系统。到2020年，我国还将发射9颗气象卫星，增加高光谱大气垂直探测仪、闪电成像仪、温室气体探测仪、降水测量雷达等新型有效载荷，能够提供温室气体、闪电成像、降水廓线等一批新型遥感产品，产品的时空分辨率、精度等也将随着新的业务格局明显提高。

未来，国家卫星气象中心将继续通过后续的气象卫星地面系统工程建设，逐步形成一个以国家卫星气象中心数据中心作为主中心，一个异地数据备份中心，多个地域分中心的数据共享服务模式，借助云计算和虚拟化技术，利用卫星广播、互联网等通讯方式，继续提升卫星产品分发服务的专业性。

（作者单位：国家卫星气象中心）

深入阅读

- 钱建梅, 孙安来, 徐喆, 等. 2012. 风云气象卫星数据存档和服务系统. 应用气象学报, 23(3): 369-376.
- 钱建梅, 郑旭东. 2003. 国家卫星气象中心气象卫星资料存档系统. 应用气象学报, 14(6): 756-762.
- 施进明, 钱建梅, 林曼筠. 2010. 新一代遥感数据中心建设的关键技术. 气象科技, 38(4): 472-477.
- 杨军, 等. 2012. 气象卫星及其应用(上). 北京: 气象出版社.
- 杨军, 许健民, 董超华. 2011. 风云气象卫星40年: 国际背景下的发展足迹. 气象科技进展, 1(1): 6-13, 24.
- 张静. 2014. 我国气象卫星风三B星资料首次植入欧洲中期天气预报模式提升我国气象卫星国际影响力. 中国气象报, 2014年10月22日.

中国基层气象服务市场规模估计

——基于地市级气象局局长调查问卷进行的分析

何海鹰

全国地市级及以下基层气象服务目前的市场容量，保守估计应该在50亿元以上。未来5年，这一数字将至少达到200亿元。

当前，我国服务业开放程度和市场化进程日益深化，气象服务全球化发展态势日趋显现，气象服务将不可避免面临市场竞争。在这种情形下，气象服务的市场现状和容量如何，是确定气象服务市场化的规模和制定相关战略和政策必须思考的问题。本文基于调查问卷分析，给出地市级及以下基层气象服务市场的估计。

一、地市级气象局长调查概述

调查时间：2014年10月、2015年3月

调查地点：中国气象局气象干部培训学院

调查对象：地市级气象局局长第6、7期培训班，调查对象涵盖除海南外的30个省（区、市）的地市级气象局。

调查方法：问卷调查法

调查的主要内容有：

1) 气象部门的经费构成情况，即中央财政、地方财政及创收资金情况；

2) 目前及未来五年气象服务的需求情况及气象部门能够提供的气象服务规模。

本次调查共收回46份有效答卷，46份答卷所代表的地区，在全国基本均匀分布，西部略多于东部地区。

二、调查结果基本分析

1 三种经费渠道基本相当，地方财政对气象支持增长最快

从统计的基本数据可以看出，地市级气象局运行经费的构成，可以分为以下几种情况：（1）中央财政占比较多的有12个市局，占26%；（2）地方财政占比较多的有12个市局，占26%；（3）创收占比较多的有16个市局，占35%；（4）中央、地方、创收基本平衡的，有5个市局，占11%；（5）中央、地方经费基本平衡，创收较少的有1个市局，占2%。

基于46份问卷，分析了2012—2014年经费的平

均情况，发现：（1）2012—2014年经费总额呈增长趋势，平均增长率为12.4%，其中2014年经费总额最多是13866万元，最少是420万元；（2）从经费构成来看，创收所占比例稍高，随后是中央财政和地方财政，三种渠道维持基本相当；（3）从3年经费增长来看，地方财政经费增长较快，平均增长率为19.3%。

2 气象服务的市场规模未来5年将翻两番

1) 从市场规模来看，目前市场对气象服务需求（表1）最小值是220万元，最大值是12760万元，平均值是3613万元；未来5年市场对气象服务需求最小值是1000万元，最大值是100000万元，平均值是14713万元；从平均值来看，未来5年市场对气象服务的需求是目前的4.07倍；

2) 从气象部门的服务能力来看，未来5年气象部门的服务能力是目前的3.46倍；

3) 从气象服务需求满足程度来看，目前气象部门可提供的气象服务平均为市场需求的51.7%，未来5年气象部门可提供的气象服务平均为市场需求的43.9%。

3 其他部门提供的气象服务占需求的四分之一

目前除气象部门外，其他机构提供的气象服务主要集中在防雷工程、风险评估、网络信息服务、预警救灾、人影作业、防汛抗旱、交通气象、手机报信息等方面，从整体上看，这些机构提供的气象服务规模较小，从已有的样本看，平均为929万元，相对于气象部门平均3613万元的服务规模，达到气象主管部门规模的25.7%。

表1 气象服务市场需求统计

	有效问卷数量	极小值	极大值	均值
目前市场需求	37	220.00	12760.00	3613.5946
目前气象可提供	37	200.00	7680.00	1868.7297
未来5年需求	36	1000.00	100000.00	14713.8889
未来5年气象可提供	36	500.00	32000.00	6463.8889

4 未来5年气象服务市场潜能巨大

调查显示,未来5年气象部门可增加的服务依次为防雷服务(14个市局)、专业气象服务(12个市局)、气象防灾减灾服务(7个市局)、公共服务(5个市局)、气候可行性论证(5个市局)、气象信息服务(4个市局)、生态环境服务(2个市局)、农业气象服务(2个市局)、精细化服务(1个市局)等领域。

而在被问及未来5年,气象部门仍然无法满足的服务中,依次为精细化预报服务(16个市局)、专业气象服务(11个市局)、防雷服务(4个市局)、生态气象服务(3个市局)、信息服务(3个市局)、气候资源开发(3个市局)、公共气象服务(3个市局)、农业气象服务(2个市局)、气象灾害风险评估(2个市局)等,另外在个人定制、基层需求、科技服务、防灾减灾等也有答卷提出服务需求无法满足。

三、全国基层气象服务市场的初步估计

依据调查问卷获得的信息,可以对目前全国基层(地市级,不包括省级和国家级)的气象服务市场进行粗略的估计。2014年地市级气象局平均经费为3451.4万元,如果考虑全国有315个地市级气象局及54个正处级直辖市区县,那么,通过计算全国地市级的经费总额约为127.3亿元,其中中央财政投入42.6亿元,地方财政投入38.2亿元;创收总额达到46.4亿元。如果考虑到:(1)一些地级和县级行政尚没有

设立气象局,这些地区的气象服务,由周边气象部门代理,(2)计划单列市的气象服务在调查中没有充分体现,(3)本次调查西部地区样本略微偏多,而气象市场发达地区主要分布在东部;那么,全国地市级及以下基层气象服务目前的市场容量,保守估计应该在50亿元以上。未来5年,这一数字将至少达到200亿元。

尽管我国基层气象市场规模客观,但是从气象服务需求被满足的程度来看,目前气象部门可提供的气象服务平均为市场需求的51.7%,未来5年这个比例降至43.9%。如何哺育好基层气象市场,气象部门在自身做大做强、保障基本预报服务的基础上,为市场的繁荣提供包括数据、预报工具、法律法规和气象标准等方面的支持,应该是决策者和基础气象部门共同思考的问题。

(作者单位:中国气象局气象干部培训学院)

深入阅读

WMO-No. 1153. 2015. Valuing weather and climate: Economic assessment of meteorological and hydrological services. [Online]. Available: http://www.wmo.int/pages/prog/amp/pwsp/documents/wmo_1153_en.pdf

任振和. 2007. 气象服务成本分析. 气象软科学, 3: 16-20.

张洪广, 顾青峰. 2004. 气象投入的经济社会效益比较分析. 气象软科学, 2-3: 79-83.

Nature杂志关注NWP

本刊编辑部

Nature周刊的封面文章,来自当期20~30篇文章和短文章。虽然被选中的文章并非位于期刊最显著位置,而是按照文章的性质放入所属栏目,但是封面文章的选取依然是一个谨慎和全面考量的过程,以更加鲜明地表征期刊的特点和风格。Nature封面文章的选取,一般优先考虑的文章,具有几种最重要的Nature风格文章的特点,这些特点包括,例如:科学性突出,从而预示着某领域潜在的科学突破;研究涉及的科学问题被关注或容易被关注,关注人群即可以是学者,也可以是公众;研究结果、思路或手段等可以制作出美感好和令人印象深刻的封面图等。

2015年9月3日出版的Nature杂志,封面文章选择了气象界最为关注的数值天气预报(NWP)主题的评述文章:NWP革命静悄悄。这不仅在近年来非常罕见,而且因为是一篇评述文章,在科技创新内容方面被弱化,因此即使是长文章,进入封面报道编辑的视野也很难得。我们因此有理由相信,这篇作者来自欧洲中期天气预报中心和加拿大环境部的文章,应该是梳理NWP过去、并科学和建设性展望未来的重要论文,而其对科学界和公众的意义以及“可视化”的效果(见封面图,给出期刊出版当天伦敦地区周预报平面产品)则是不言而喻的。

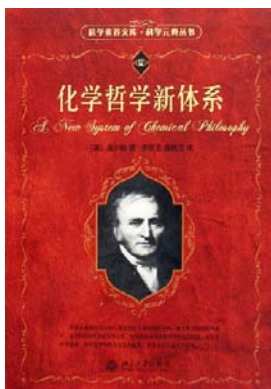
科学哲学家库恩(Thomas Kuhn)曾经指出:“科学不是事实、理论和方法的简单堆砌,科学的发展也不是知识的简单累积,而是通过范式的不断转换所进行的不断革命的进程”。要深刻地理解这句话,特别是对其涉及科学的“革命”的认识,阅读题目中包含了“革命”一词的这篇封面文章,会让人感慨多多。



从气象爱好者到科学原子论之父

——读道尔顿《化学哲学新体系》有感

■ 叶梦姝



19世纪的英国化学家道尔顿因其原子理论垂名于科学史，但鲜有人知道，道尔顿最初的科学兴趣最初来源于其持续了57年的气象观测，他提出原子论的经典之作《化学哲学新体系》是从大气现象出发、到物理学、最终到化学，推动了最后一个基础科学革命——化学革命的完成。

一、定量化学时代的来临

自古希腊以来，人们只知道有“空气”一种气体，说起“气”指的就是“空气”。1756年，苏格兰化学家布莱克在加热石灰石的时候，发现了平时固定在石灰中的“固定空气”（即二氧化碳），随后人们又发现了空气燃烧时消耗不掉的“浊空气”（即氮气），以及使燃烧变得非常剧烈的“火空气”（即氧气）。然而，由于当时认为燃烧需要一种特定的物质“燃素”，因此对燃烧现象的解释依然错误百出，更不用说关于元素的组合方式了。直到1789年，法国化学家拉瓦锡通过燃烧实验的定量测量，提出了以氧化理论为核心的新燃烧学说，突破了化学研究的瓶颈，明确了化学的任务是将自然界的物质分成基本的元素，由此开启了定量化学的新时代。

【编者语】

北京大学出版社《科学素养文库·科学元典丛书》迄今已出版了四十余册，所选均为科学史上的大师经典。本刊选择了丛书中与气象学关系密切、或曾推动过气象学发展的科学元典，并尝试从气象学史的视角进行重新解读，再现近现代不同领域科学名家对天气气候现象的智慧思考，还原气象学与数学、物理学、化学等学科多学科共生、互相促进的科学史背景，梳理气象学研究对其他学科发展之贡献。

二、从大气成分研究到分压定律的发现

道尔顿最初的兴趣是大气的成分及混合方式，他沿着拉瓦锡的道路进行研究，于1801年发现，各地的大气都是由氧、氮、二氧化碳和水蒸气四种“终极质点”混合而成的。那么，为什么像这样多种“弹性流体”构成的混合物，外观上却是均匀一致的，而不像水与油混合时那样明显地分为两层呢？道尔顿认为，气体的均匀混合是因为气体彼此扩散的缘故，这种扩散来源与气体分子之间的排斥力，在气体混合物充分混合、且各成分之间不发生反应的前提下，理想气体混合物的总压力等于各成分的分压力之和，这就是道尔顿气体分压定律。

三、探究物质微粒的变化

除了混合气体分压之外，还有很多其他的现象——加热引起的膨胀、弹性流体（就是气体）的比热、温度不平衡引起的热运动和传导，甚至大气温度垂直和水平分布等，在《化学哲学新体系》的第一部分，这些问题得到了充分的讨论。道尔顿迫切想要通过这些现象了解——当物质融化、蒸发、溶解、凝固、燃烧以及被压缩时，组成物质的微粒到底发生了什么样的变化。虽然在同时期汤姆森的《化学体系》、伯索累的《化学静力学》、莫里的《化学体系》等，都对这个问题进行了思考，但道尔顿更加全面和细

致，并纠正了伯索累误认为是大气压力使地面上的水分子凝聚在一起保持液态等错误之处。

四、从原子假说到科学原子论

在《化学哲学新体系》第二部分中，道尔顿系统地阐述了以上这些现象的理论基础，即定量的化学原子论——化学元素由微小的不可再分的原子组成，分子由原子化合而成；同一种元素的原子都是一样的，不同原

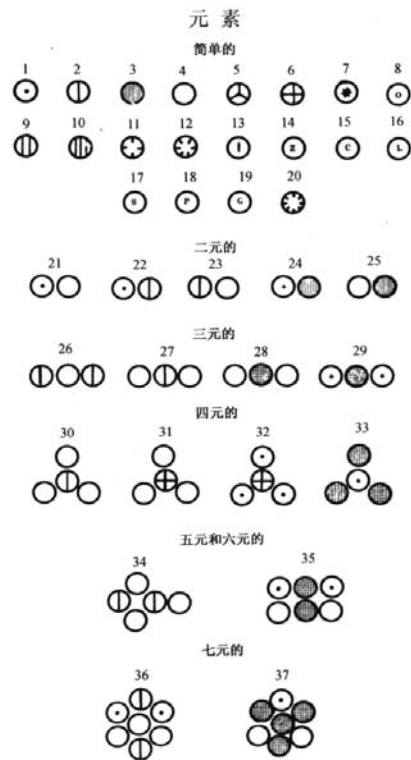


图1 简单元素的原子构成，按序号依此为：氢、氮、碳、氧、磷、硫、苦土、石灰、苏打、草碱、镉土、重土、铁、锌、铜、铅、银、铂、金、汞

气候变化研究的重要视角

——《成本效益分析杂志》“气候变化”专辑评介

张泓波



《成本效益分析杂志》(*Journal of Benefit-Cost Analysis*)，是国际上目前唯一一本成本效益分析(BCA)的专门学术期刊，涉及的研究领域包括了教育、犯罪、健康、贫困、劳动力、法治和有关环境、自然资源、交通、安全和安全项目的社会计



《成本效益分析杂志》2014年第3期出版的“气候评估中实施的成本效益分析进展”专辑，较为全面地阐述了成本效益分析这一经济学领域最为著名的理论和工具在气候变化评估方面的应用状况和发展。

划等。期刊的使命，是推动BCA在各项领域里面的应用。使政策制定的人或者团体能够判断、制定和落实公共政策。

2014年，《成本效益分析杂志》出版了“气候评估中实施的成本效益分析进展”(Perspectives on Implementing Benefit-Cost Analysis in Climate Assessment)专辑。专辑的7篇综述文章涉及气候评价、气候变化评估、气候变化福利经济学等多个方面。

国家、行业和基础设施投资这三个层面是适应气候变化和减缓气

候变化的政策主题。由于各自的属性不同，制定应对气候变化政策时的方法也有所差异。专辑文献中对上述三个层面应对气候变化的研究方法分别提出了思路。

一、行业层面应对气候变化的成本效益分析方法

“美国气候变化经济影响的文献综述”(State of the literature on the economic impacts of climate change in the United States)一文集中探讨了当前相关文献的广度和深度。这些文献涉及了农业、沿海资源、水资源、基础设施、

子的质量一定不同；在物理变化中，分子不会发生变化，只是分子之间的组合方式发生了变化；而在化学反应中，分子重新组合了，原子本身不会发生变化。

历史上，原子假说作为一种自然哲学思想，早在古希腊时期，哲学家德漠克利特就曾经系统论述过。而帮助道尔顿把这种流行两千年的形而上思想变成科学理论的，是来源于对大气等现象的观察而形成的敏锐洞察力。道尔顿从1787年3月24日开始，持续记载了57年气象日记，从未间断，直至他去世的前一天，并在1793年他出版了《气象观测论文集》。道尔顿并不是天资卓越的人，也没有巨人的肩膀或团队的合作，他凭借自己的勤奋刻苦，培养了良好的物理直觉，通过对各种大气现象和规律的观

察和总结，建立了系统的概念体系。

五、功高何需青史名

虽然气象学史中鲜见道尔顿的身影，但是他的原子理论为气象学的研究提供了重要的前提。从亚里士多德到笛卡尔，近两千年以来的古代学者对天气现象的解释都是基于“气火水土四元素理论”或“微粒”、“孔隙”等错误概念，因此始终没有说清楚天气现象的本质，而物质结构理论建立之后，气象学家得以朝着更加正确的方向迈进；他考察一定质量气体在大气中上升或下降中相态变化的研究思路，成为了现代气象学中气块绝热上升或下降的雏形；他记录的超过20万条气象观测日记，是英国民间气象爱好者天气记录的范本，为19世纪初的气象学的研究提供了素材。

六、气象研究推动基础科学进展

自古以来，天气现象吸引了众多目光，亚里士多德、笛卡尔、傅里叶、道尔顿等很多科学家都是气象爱好者。复杂多变的大气现象为数学、物理学与化学等基础科学提供了研究素材，而数学、物理学的成果，又反过来为大气科学的理论进步提供了基础。而今，随着学科细分与科学研究的职业化，以及大气科学与技术本身在20世纪的飞速发展，基础科学研究者参与到大气科学研究的门槛越来越高。让更多其它领域的研究人员和公众成为气象爱好者，了解业务和科研的新进展，或许有助于让大气科学这门古老又年轻的科学永葆活力。

(作者单位：中国气象局气象干部培训学院)

健康、犯罪、能源、劳动力供给和生态等行业领域。此外,文章结合计量经济学与模拟的方法,对农业部门的影响分析给出了很好的解释。

计量经济学主要基于历史的跨部门、时间序列和面板数据,检验了气候变量和物质或者经济产出之间的关系。在经济计量的范畴里,有的研究与土地价值或者利润相关,还有的针对农业开展大类研究,如温度和降雨量对农作物产量的影响等。计量经济学的优势在于计量方法所用的是真实世界中的数据。而经济学方法不需要模拟适应机制的所有影响,只需要建立气候与产出之间的关联即可。但计量经济学的致命缺陷在于统计估计会受到挑战,而且有时也会面临多元化的解释。

模拟的方法通过利益表达机制追踪了成本效益的适应战略。针对那些不适用于计量经济学的方法则通过一系列的气候、生物物理学、行为反应学和经济构成因素对成本效益的适应战略进行了追踪。在农业领域,这些典型的产量模型与美国经济的模拟融合在一起。丰富的数据支持了气候变化与气候影响相关的复杂分析、适应性选择的成本效益的结果以及农业政策和非市场价值的理论方面的探讨。

美国环保局在其1989年发表的报告中,阐述了一些部门在气候变化面前是敏感的并且具有潜在的脆弱性理念。同样,尽管从经验看,气候变化对某些部门的影响是间接的、次要的;然而,IPCC第二工作组AR5报告,也考虑了气候变化对于制造业、采矿业、旅游业、娱乐业、金融业、保险业和其他行业的影响。更进一步地,有学者指出,一些影响对于公众来说是引人注目的,如一些颇具魅力的物种的消失、历史和文明古迹的被侵蚀的风险、生存领域的威胁和生活方式的瓦解等,这些影响又是最难估计的。

二、基础设施决策层面应对气候变化的成本效益分析方法

“在有着深层不确定性的决

策支持进程中植入成本效益分析概念”(Embedding (some) benefit-cost concepts into decision support processes with deep uncertainty)一文介绍了不确定性条件下如何形成最优评价的方法。文章首先介绍了应用BCA决策方法对基础设施应对气候变化进行评价的方法,之后通过运用“健全的决策制定方法”(RDM, Robust Decision Making)对洛杉矶港口基础设施投资进行了案例应用。文章重点强调了科学技术的发展使RDM的运用成为可能。

BCA评价项目可行性的要求包括:(1)货币价值衡量决策结果。如对于污染控制技术的使用是否值得是这样评价的,若购买或者经营某项技术的货币支出小于通过采取有效的措施而节省的人力,则采取污染控制技术,否则,拒绝这项技术;(2)收入超过成本点作为项目可行的临界值;(3)一般情况下,BCA假设项目具有不确定性。将所有情况统一到单一的价值评价体系里面,应用概率密度函数来表示成本和收益的价值量;(4)BCA一般会预设一个流程,这个流程是:专家收集证据,评估成本,并提供一个BCA的排名供决策者参考和采取行动。

RDM的流程是以决策结构演习为出发点,决策者在这里定义目标、价值、不确定性和备选方案。这个流程的关键步骤是确认一个或者多个以初始迭代分析为核心的政策。分析中运用计算机模型产生一个大型的运行数据库,每一个案例都代表着在一个可能的未来备选政策的绩效。这些情景有助于决策分析者识别潜在的方法,认识到决策的缺陷和价值,并且分析判断出这些选择是否值得采纳。这个流程会持续进行,直到决策者找到并确定一个健全的战略为止。

RDM明确地遵循“分析审议”的原则。这个决策支持系统是由目标、决策审议、问题和备选等框架组成。而且,所有的上述元素都必须具备定量的信息构成。

三、国家和国际层面应对气候变化的成本效益分析方法

“气候变化的综合评估:文献综述”(Integrated assessment of climate change: state of the literature)一文重点说明了美国 and 全球范围内应对气候变化的成本效益分析方法的应用。成本效益分析方法在这个层面上的两个重点应用是:(1)全球层面的分析,聚焦最优碳排放足迹和碳价格的计算,最大限度地有利于全球福祉;(2)采用相同的工具,计算美国国内常规流程中所耗费的碳社会成本(SCC, Social Cost of Carbon)。

在国家层面上运用成本效益分析的标准与其他不太一样。一般而言的成本效益分析指的是总收入与总成本的差额,差额越大越好。这里的标准是“最优”。最优碳政策指的是边际碳成本等于边际碳收益。

SCC的分析方法与最优的方法相类似,只是社会碳成本的核算由于气候变化所带来的影响而造成其内容变得相当复杂,但是最优的思想是一致的。

SCC作为另一项政策分析工具正在得到发展和运用,其定义为:由于每吨二氧化碳的排放高于基准排放弧线——没有新的气候政策——所造成的气候损失。社会碳成本的计算类似于常规的BCA概念。

四、小结

《成本效益分析杂志》的这本专辑,总结了气候变化领域中经济方面的研究前沿,为广大的读者从众多的文献中进行选择提供了参考的方向。本专辑7篇文章几乎涵盖了气候变化成本效益分析研究的所有内容,并提出了气候变化特有的挑战,如代际公平、奈特不确定性、深层不确定性、厚尾性等,并为未来的研究提出了方向。

(作者单位:南京信息工程大学经济管理学院)

国民政府时期空军的气象教育培训

气象史料挖掘与研究工程项目组

民国时期的气象教育，除了中央大学、清华大学、浙江大学、山东大学等设有气象组（系）以外，尚有中央研究院气象研究所开展的气象学习班和国民政府空军开展的测候训练班（气象训练班）。气象研究所的气象学习班由竺可桢创办，共办了4期。第一期于1929年3月11日开班，最后一期于1936年12月24日开始，1937年2月1日结束。共培养了近百名气象人员充实到气象部门各个工作岗位上。与之相比，国民政府空军气象训练班在规模上则要大得多，教学体系完备，课程设置丰富，尤其是在抗战时期，为空军抗日空战的气象保障做出了很大贡献。

1 民国空军气象教育培训的起源

民国时期航空气象教育培训最早起源于南苑航空学校。

1913年（民国二年）春，袁世凯采纳总统府顾问、法国驻北京公使武官白理索的建议，决定购买飞机，北洋政府聘请部分外国航空人员在北平南苑开办航空教练所，创建了中国第一所培养航空人才的学校。

经由法国人博乐（此人后来任航校的飞行教官）向法国高德隆飞机公司购得该厂的高德隆G-四型双翼教练机十二架（四十四匹、五十四匹及八十四匹马力的各四架），以及修护厂里的维修器材和设备；与此同时，参谋本部将北京南苑练兵场正式扩建为飞机场，建立大型维修厂及宿舍，同时委派秦国镛^①为首任教练所所长，留美返国的厉汝燕^②为飞行主任教官，蒋丙然^③、越干臣等人为地面学科教官；此外，航校还外聘两位法国飞行教官及技师。

九月正式开学，课程分学科和术科两大类。学科设有航空学、机械学、气象学、陆军战术及战史、外语等课程；术科以练习飞行为主，装卸发动机和修理飞机为辅。

蒋丙然先生在其自传中也提及“南苑航空学校开气象学课程，由余任教授”。可见，近代航空气象教



1935年，在中央航空学校内设立气象台，首任台长由通信人员胡信兼任。1936年中央航空学校欲聘请高级气象专业人员来授课，航空委员会委托中央研究院气象研究所所长竺可桢代为寻找合适人选。

育第一人当为我国近代气象开创者蒋丙然先生。但具体蒋丙然先生在南苑航空学校教职延续至何时则未见明确记载。

1928年10月，有感于空军在现代战争中的重要作用，蒋介石下令成立中央陆军军官学校航空队，航空队主任由时任航空署副署长张静愚兼任。当时的航空队受训地点在南京明故宫机场，机场只有一条土跑道和几间棚屋。11月中旬开始招生，于1929年2月28日正式开学。同年6月7日，航空队奉命改组为航空班。学科教官多为美、日留学生，飞行教官多为南苑航校及广东、云南、保定航校毕业的飞行员。

1931年4月，航空班改隶于航空署，7月1日正式成立军政部航空学校，毛邦初^④是首任校长。同年12月，军政部航空学校由南京迁往杭州，以笕桥原陆军营房为校址，故常被称为“笕桥航校”。1932年9月1日，笕桥航校扩大改组为中央航空学校，直属于国民政府军事委员会，军委会委员长蒋介石自兼校长，毛邦初任副校长。

航校教官大多为美国人，采用美式教学法。除了飞行训练，学员们还要学习飞行学、航空战术、航空仪器、气象学、无线电学、空中侦察、航空史、空中轰炸、空中照相、地理、外文……

此阶段，中央航空学校的气象学教学工作由谁担任也不得而知。

1935年，在中央航空学校内设立气象台，首任台长由通信人员胡信兼任。由于飞行人员必须了解气象，1936年中央航空学校欲聘请高级气象专业人员来授课，

① 秦国镛（1876—1940），湖北省恩施咸丰县人。1901年留学法国、比利时，回国后任陆军部参事。1913年担任中国第一所航空学校校长，亲自驾机试飞，成为第一个国内驾机升空的中国人。

② 厉汝燕（1888—1944），浙江省定海人。1909年毕业于伦敦纳生布敦工业学校。1910年经清军咨府批准入英国布里斯托尔飞行学校学习。1911年受革命军政府委托，在奥地利选购两架“鸽式”单翼机回国，被委任为沪军都督府航空队队长。1913年9月北京南苑航校成立，他任主任教官。

③ 蒋丙然（1883—1966），中国现代气象事业奠基人，中国气象学会创建人之一。1908年震旦大学物理科毕业。1908—1912年在比利时双博罗农业大学学习气象学，获气象学博士学位后回国，任苏州垦殖学校教务长。1913—1924年任中央观象台技正、气象科科长、代理台长、兼任北京南苑航空学校教官，航空署气象科代理科长，北京大学和北京师范大学讲师等职。1924—1937年，任青岛观象台台长，中国气象学会会长、副会长。1937—1945年，任北京大学教授，北京大学农学院院长。1946年任国立山东大学教授，同年去台湾，任台湾大学农学院教授。1958年8月17日，台湾地区气象学会成立，蒋丙然被选为首届理事长。1966年12月24日病逝于台北。

④ 毛邦初（1904—1987），浙江奉化人。1925年入黄埔军校第三期步兵科，次年赴苏联莫斯科中山大学学习。1929年任中央陆军军官学校航空班飞行组长。1930年奉命在杭州笕桥筹建航空学校，次年任校长。1940年升任航空委员会副主任。1949年去台湾，1987年逝于洛杉矶。

航空委员会委托中央研究院气象研究所所长竺可桢代为寻找合适人选。经竺可桢推荐，同年10月刘衍淮^①被委任为简任技正^②并授予中校军衔，担任航空气象学教官。同年12月兼任航校气象台台长。竺可桢在1936年8月13日日记中记载“晨十点刘衍淮（来），余介绍其见蒋坚忍^③，据蒋（云）决拟请在杭州作教官，一二星期内发表”。

对此，刘衍淮自己也有明确记载，“民国二十五年秋应杭州笕桥中央航空学校之邀，到该校接洽到该校任教事宜，于十月六日到差，任简任技正三级教官，向飞行生讲解航空气象学，并兼任该校气象台台长，气象台有编制测候员二人，通信员二人，绘图员一人，机务士一人，以后又增加测候士四人”。

除了刘衍淮任台长兼气象教官外，气象台尚有徐宝箴、耿秉德和赵恕等任测报预报工作。此外，广州（1936年，广东航校改称南京政府中央航空学校广东分校）和洛阳航校分校（1935年6月，在洛阳成立了中央航校分校）内也设有气象室，朱文荣任广州分校气象室主任兼气象教官，章克生和瞿邃理曾任洛阳分校气象助理，广西国民党第四集团军司令部航空学校也成立有测候所，萧强任所长；重庆空军通信训练班和柳州滑翔训练班内，也派有气象工作人员。

1937年“七七事变”后，八月初中央航校急速西迁，隔年改名为“空军军官学校”，飞行高级班设在昆明巫家坝机场。

抗日战争爆发，世界各国大多数袖手旁观，我国孤军奋战。南京沦陷后，我国仅有的不到300架作战飞机，已损失殆尽。

1937年底，幸得苏联的支援。1937—1940年间苏联曾有飞行员驾E-15、E-16、SB-2、TB-3来华，初期提供战斗机72架、轰炸机54架，并指导我方人员驾驶及维修保养，双方训练交接基地就以新疆的伊宁为主，空军气象部队特在迪化（即乌鲁木齐）的第16空军总站成立测候班，负责气象的支援任务。戚启勋^④教授的自传提到，他就是当时空军气象在新疆的负责人。根据他的回忆，他们除为当地我方飞行训练提供气象保障，也曾与萧华先生一同奉命成立训练班，专门训练（含新疆省政府委

托）所需的气象测候人员。

由此可见，当时中央航空学校（包括其广州、洛阳分校）以及其他空军机构在飞行员的培训中皆设有气象学课程，并有专门的任课老师。但至此所有的培训对象皆为飞行员，而非空军气象人员。

2 “测候训练班”的成立和发展

由于航空气象人员的大量需求，经筹划，1939年（民国二十八年）12月1日航空委员会“测候训练班”奉命成立于空军军官学校校内，刘衍淮任训练班班长兼气象台台长，第一期收训停飞学生28人，并于1940年6月22日毕业。从此，空军就有了自己培训的气象人员，测候训练班的成立早于当时中央大学和清华大学独立成立气象系^⑤。

当时班内教职员多由空军军官学校现职人员兼任，气象台工作人员仍为徐宝箴和耿秉德等。专职人员不多。为此，刘衍淮特聘请西南联大气象学教授李宪之^⑥和赵九章^⑦两人来班兼教。

正当第一期正科班学员毕业之际，官校连遭日本飞机轰炸，迫使测候班从空军军官学校迁至飞机场西边1千米许的莲德镇，进驻观音寺内，因陋就简，继续开办第二期正科班。从那时候开始，刘衍淮辞去空军军官学校教官及气象台台长之职务，专任测候班班长，并公开面向社会招生，凡高中毕业或具有同等学历的都可以报考。第二期19名于1940年12月8日开学，1941年7月10日毕业；第三期1942年1月5日开学，7月10日毕业；第四期1943年2月1日入学，8月11日毕业20人；第五期学生39名，1943年3月1日入学，9月4日毕业。正科班五期，毕业学员130余人。

1945年初，刘衍淮率班由昆明迁移到了四川省会成都。

测候班辗转转到成都后，与空军通信班合并成空军通信学校，位于成都太平寺，而测候班班址则设在临近凤凰山飞机场的旧营房区。此处在抗日战争中期曾遭日机轰炸，边整修，边上课。这时，测候班编制扩大，改班长为班主任，增设下属机构，先后有教务与总务两组和军需、医务、训导及监察四室成立，还设立学生大队、

① 刘衍淮（1907—1982），山东平阴人。北京大学毕业。1927年和李宪之等一起参加“中国西北科学考察团”。1930年到柏林大学学习气象学，1934年获博士学位，同年回国，应聘为北平师范大学教授。

② 官名。旧时，中国技术人员的官职。根据南京国民政府文官、技术官任用及俸给的相关法规条例，政府官员分为特任、简任、荐任和委任四等。其中正部级为特任官，次长以下分简、荐、委三等。简任官（大致相当现在副部长至司局级）又分为8级，荐任官（相当于处级）分12级，委任官（相当于科级）分16级。作为政府体制中技术官员的科学家，其技术职衔分为技监（简任1—4级）、技正（简任3—8级，荐任1—9级）、技士（荐任1—10级，委任1—12级）和技佐（委任2—13级）四等。

③ 蒋坚忍，时任中央航空学校教务长。

④ 朱文荣，浙江嘉善人。1920年考入南京高等师范，师从竺可桢。1929年进入气象研究所，是国内最早作测风气球观测及与空军合作飞机探空观测的人。抗战胜利后，空军总司令部成立，出任气象处处长。1948年底随空总移驻台湾。

⑤ 戚启勋，浙江嘉兴人。1935年毕业于中央研究院气象研究所第三届气象学习班。分配至福建南平测候所工作。后去台湾。

⑥ 中央大学气象系成立于1944年，首任系主任是黄厦千；清华大学气象系成立于1946年，首任系主任为李宪之。

⑦ 李宪之，河北省赵县人。1924年考入北京大学理预科，两年后升入物理系。1927年与刘衍淮等一起参加中国西北科学考察团。1930与刘衍淮同赴德国柏林大学深造，1934年获博士学位。1936年11月回国任清华大学副教授，1937年升任清华大学教授。

⑧ 赵九章（1907—1968），河南开封人。1933年毕业于清华大学物理系，1935年赴德国柏林大学深造，1938年获博士学位。回国后，在西南联大任教。1944年经竺可桢推荐，主持中央研究院气象研究所工作。

实习气象台及气象台等。

六期正科班^①在1945年7月10日正式开学，原定学习九个月，但因抗战胜利各地机场气象台急需人，故缩短为六个月，因之于1946年1月31日提前毕业。

在六期学习期间，班主任刘衍淮兼讲气候，其他课程分别由教务组长牛振义、教官宣仕五、彭究成、王鹏飞、郝锡安、钱振武、李永嘉授课。其中，王鹏飞1945年10月到校，讲授《理论气象》、《热学原理》、《大气物理学》等课程。观测实习由教育副官耿秉德兼任。加上多期毕业学员留校任助教，这就为几个班进行“重叠受训”创造了条件，即上一期或二期还没有毕业，下一期接着开课。这样，就大大增加了年际间毕业的总人数。

因时间短，课程安排都十分紧，每天八小时课，晚上两个小时自习，均为菜油小灯，课程一般都没有书，由教官讲，学生作笔记。

抗战胜利后，李宪之路经成都凤凰山来见老朋友刘衍淮，此时因各单位都需复员，交通安排不易，李宪之就先在第七期训练班讲授当时才兴起的“热带气象学”，3个月后才返回北平。回清华大学后不久，1946年清华大学成立气象系，李宪之担任首任系主任。

1946年1月22日，美军气象顾问汪德龙（A.Waldron）上尉、麦嘉德（Mc Cardell）中尉及朱利斯特（Juriest）少尉三人到测候班服务。

实习气象台成立于1946年初，属空军军区台编制，设备由美国军事顾问团气象组支援，主要承担辅导校内毕业班的天气预报实习，兼作全国和西南地区（云、贵、川）航空天气预报（航站、航线）。时效一般为6~12小时，每日定时或不定时为军航部门提供服务，有时为满足民航单位临时需要，还需制作24小时或更长效的预报。台内经常保持预报员十人左右，每日自填自绘大量图表（那时没有培训填图员），计有：东亚地面天气图2张，东亚高空等压面图2~4张（850hPa、700 hPa），中国区域高空气流图3~6张（1500m、3000m、5000m），以及地面24小时变压图，航空天气图（即地面辅助天气图），单站高空风分析图等；之外，还有相当数量的温度对数压力图（沈阳、北平、青岛、西安、兰州、上海、汉口、广州、昆明和成都）。这在当时，维持那样齐备的天气图表，在同行中并不多见，堪称空军气象区台之最。

1946年底汪德龙等顾问先后离去，换了康贝尔（Campbell）上尉及白立志（Barnidge）上士。

据汪之义回忆，1947年4月，他在南京考取了空军通信学校气象班9期正科班。5月，他和9期正科班的同学乘飞机到重庆，之后乘汽车到四川铜梁接受“预科”入

伍生训练（从第六期开始，新生皆要到铜梁接受入伍训练）。

国民党空军通信学校当时采用美军教学考核机制。“预科”入伍生训练分为术科和学科，术科着重身体体质锻炼；学科主要是物理、数学等基础学科学习。每天一大早，汪之义和预科学员们便要出操，要进行翻单杠、跳木马等身体素质训练，每周一还要接受正步队列检阅。在经历预科6个月紧张学习后，汪之义迎来了严格的复试。术科和学科两项中任何一项不及格，即被淘汰。后来，在预科同期学习的百余人中，有近三分之一的学员被淘汰。

1947年5月1日，测候训练班自空军通信学校划出^②，直属空军训练司令部，番号改为空军测候训练班，班主任刘衍淮晋升为上校，学校编制扩大，将实习气象台中通信部分划出成立气象台，台长仍由气象台台长耿秉德兼任。

1947年11月，从美国留学回来的教官亢玉瑾、万宝康、钟达三及在美空军气象学校学习的张鸿材来到测候班，给教学增添了很大力量。此时教务组长一职由亢玉瑾担任，1948年亢玉瑾调气象二大队任大队长后，钟达三任教务组长。实习气象台及气象台由万宝康任台长。耿秉德调任监察官。政训室主任刘公笃。

“复试合格的学员于1947年11月被送到成都市凤凰山机场边的空军通信校气象班学习。学员被分为三个班：高中毕业考进去的，叫正科班，气象预报方向；初中毕业考进去的，叫初级班，气象观测方向；还有一个叫工程班，气象仪器维修方向”，汪之义回忆道。汪之义进入了正科班，当时课程主要分为基础课、技术课、专题讲座三大门类。基础课有数学（英文版微积分、微分方程、向量分析）、大学物理（萨本栋著）、自然地理、英语；技术课有大气动力学、热力学、气象学、气候学、天气分析和预报、热带气象学、大气力学、大气电学、大气光学，大气涛动与中长期预报；专题讲座有无线电学、气象仪器、地面观测、高空观测（气球，探空）、绘天气图和预报实习等。主要由美军气象顾问、留美回国老师担任授课教官。这些课程比之当时的中央大学、清华大学气象系更加实用也更加先进一点，汪之义在这里接受到了诸如“雷达测风”等当时世界领先的气象技术与理论教育。

1948年为测候班极盛时期，同时有10个不同班次。有八期正科班103人，初级班一期55人，初级班三期73人。还有复训军佐班，复训军士班，九期正科班，九期工程组，四期初级班候补军佐班各一班。纵然如此，按照上级规定，在校生不满500人，仍称班，不称校。

① 正科班一般由高中毕业生中录取，从第六期开始，正科班开始培养预报员。初级班一般由初中毕业生中录取，主要培养观测人员。

② 一说为1948年3月划出，见“张大振，刘衍淮与空军测候班”及“赵恕，国民政府航空委员会的气象机构及其沿革，中国近代气象史资料（续编），气象出版社，1995”，赵恕之说当为引用张大振的。但据杨克强和刘衍淮本人回忆应为1947年，见“刘衍淮，我服应气象学五十五年（1927—1982），国立台湾师范大学地理学研究第六期（1982）”。

1948年12月1日，空军测候训练班正式改名为空军气象训练班。学制和课程设置照旧。

学员们先学基础课，后学技术课，再后来就是到气象台实习。课程安排紧，学业压力大，没有寒暑假，为了完成功课，还要经常开夜车，就这样连续18个月的高强度学习后，修完当时大学气象系主要课程。与课程同样紧张的是政治时局，当时国民党的统治已岌岌可危。1948年12月，美军气象顾问随成都的美国空军顾问组撤离。

1949年初，南京空军总部及空军训练司令部迁往台湾，气象训练班顿时经费拮据，向成都中央银行、成都太平寺空军机械学校及空军通信学校借贷，才得以维持伙食和薪饷，待到第九期正科班6月1日毕业，第十期正科班随即停课解散。

至1949年6月，气象训练班只有69人毕业，毕业学员被委任为准尉三级见习气象官。绝大多数学员都被分配到台湾和南方沿海空军气象台站见习。

几年来在成都共培训军官九班次403人，军士五班次229人，合计632人。所有毕业学员，分派到各地空军气象单位任职，是当时空军气象系统中一股骨干力量。

3 空军气象训练班的终结

1949年中国正经历着一场开辟新纪元的历史变革。4月，国共谈判破裂，解放军百万雄师横渡长江，解放了南京。远在西南的成都虽然还没解放，但风声日紧。汪之义回忆说“每天从天气图上发现有越来越多的气象站不再发报了，心里明白这个地方解放啦，当时国民党称为沦陷了”。变革的效应传导到了凤凰山机场的空军气象训练班，惊惶、迷惘等各种情绪在学员中间蔓延，很多学员还没等到毕业，就不辞而别投解放区去了。1949年夏，国民党空军在成都的通信学校、机械学校开始迁往台湾。此后，气象训练班上下栖栖惶惶。11月15日，气象训练班也接到于12月1日迁往台湾的命令。

当时学员面临三条路的选择：一是留大陆；二是到台湾，这是当时气象训练班大多数毕业学员的选择；三是下南洋，凭着当时二十三岁的年龄和文化知识，去打拼谋生。

1948年下半年开始，教授气象仪器的教官杨克强在女友张冰天（其父张克侠任国民党徐州剿总副司令，实为中共地下党员）影响下，打算邀约九期的刘益均、汪之义以及王邦佑等人经巴东前往解放区。当时通路由于国民党把守很紧，1949年年中，四期初级班徐春虹等

人，想先去巴东再转解放区，但到巴东后被挡回，故只能作罢。几人最终决定留在成都等待解放。

12月1日，空军气象训练班开始迁往台湾。凤凰山机场气象台外，四架飞机抢运着气象器材。当天，气象班士官及家属81人乘飞机离开成都，转赴台湾岗山空军训练司令部待命。不愿去台湾的人员就地遣散。九期的汪之义和刘益均、邹钢、郭庆熙四位学员选择了留下，并办理了遣散手续。测训班的结束工作由耿秉德负责，杨克强是成员之一，主管装运器材。在包装器材时，他与刘益均、汪之义、王邦佑等有意保留了一批好的气象器材。空军气象训练班最后一架飞机12月1日飞海南岛三亚。12月中旬开始，成都秩序陷入混乱，一些残余的国民党军队、地方武装不时到凤凰山机场空军训练学校哄抢气象仪器、服装等物资。为了保证器材及人员安全，杨克强、汪之义等将器材全部秘密转移到成都市内支矶石街空军层板厂仓库内保藏起来。

12月27日，解放军举行入城仪式，正式进入成都。解放军军管会空军处的军代表唐绍秋（后任军委民航成都站站长，民航总局机航处长）接收了杨克强、汪之义等人，并派他们当天返回成都凤凰山机场重建气象组，要求一周内安装好观测场仪器设备，开展航站天气观测和预报工作。

让汪之义等人惊诧不已的是：此时担任解放军军管会空军处接管工作联络员的竟是他们曾经的同学，测候训练班初级三期中途投向解放区的原学员周家馨（后改名殷亦赤）。

1950年1月3日，仅仅一周后，气象组迅速恢复业务工作，开始正式编发航空气象报告，承担了北京到成都、重庆到成都航线和支援西藏解放的气象保障服务任务。1月4日，成都军管会空军处正式接管凤凰山气象训练班，9日建成凤凰山气象站。因保护器材有功，军管会为杨克强、汪之义等人颁发了奖状。

至此，国民党空军气象训练班在大陆结束。1951年6月，撤往台湾的气象训练班又于空军通信学校内恢复，隶属教育处，仍由刘衍准任主任。

深入阅读

陈学溶. 2012. 中国近现代气象学界若干史迹. 北京: 气象出版社.
中国近代气象史资料编委会. 1995. 中国近代气象史资料(续编). 北京: 气象出版社.
竺可桢. 2005. 竺可桢全集(第六卷). 上海: 上海科技教育出版社.

编辑选编

2014年赤道东太平洋El Niño事件发展以及停滞过程的成因——《科学通报》2015年第60卷第22期

刘伯奇等撰文指出, 2014年2—3月, 在赤道西太平洋出现西风事件后, 赤道东太平洋产生了显著的暖海表温度异常(SSTA), 标志着一次El Niño事件开始发展, 但随着4月份之后西风事件的减弱消亡, 赤道东太平洋暖SSTA也随之衰减, 指示着2014年El Niño事件的发展在6—8月停滞。资料分析表明, 2014年2月, 来自印度洋的MJO湿位相到达赤道西太平洋后, 西风事件产生, 触发了2014年El Niño事件。3月初, MJO干位相传播至赤道西太平洋后, 西风事件开始减弱。3月中旬以后, 东传MJO信号明显减弱, 这时赤道西太平洋海表东风异常的发展维持与赤道西—中太平洋SSTA的纬向梯度联系紧密。在MJO信号消亡后, 赤道西太平洋的海表异常东风通过风—蒸发反馈作用令当地暖SSTA逐渐加强, 降低了局地海平面气压; 同时该异常东风令赤道中太平洋混合层出现了明显的异常冷平流, 抑制了赤道中太平洋的持续增暖, 使局地海平面气压升高, 从而加大了赤道西—中太平洋的纬向海平面气压梯度负异常, 使得赤道西太平洋的表面异常东风维持加强。这种赤道西太平洋表面异常东风和赤道西—中太平洋SSTA纬向梯度异常的正反馈能够维持到8月份, 导致西风事件减弱消失, 造成El Niño事件的发展停滞。

风云三号C星太阳总辐照度观测结果分析——《科学通报》2015年第60卷第25期

第二代极轨气象卫星风云三号C星(FY-3C)携带的太阳辐射监测仪(Solar Irradiance Monitor, SIM)是FY-3A/B星上同类载荷的改进型, 称为太阳辐射监测仪II型(SIM-II)。齐瑾等针对SIM-II在轨观测获取的日

地平均距离处太阳总辐照度数据, 通过与国外同类产品以及太阳黑子数据进行对比分析, 检验SIM-II太阳总辐照度产品精度, 评估仪器在轨观测能力。比对结果显示, SIM-II太阳总辐照度数据与国外同类产品相比在变化趋势上具有很好的一致性, 与美国NASA发射的太阳辐射和气候变化试验卫星(Solar Radiation and Climate Experiment, SORCE)/总辐照度监测仪(Total Irradiance Monitor, TIM)产品的相对均方根偏差约为 87×10^{-6} , 与比利时皇家气象研究所(RMIB)基于多个星基太阳总辐射观测数据处理得到的太阳总辐照度合成数据(简称RMIB数据)的相对均方根偏差约为 140×10^{-6} 。SIM-II太阳总辐照度与太阳黑子数的相关性分析结果显示二者在极值分布上具有较好的对应; 针对2014年10月太阳超强活动过程的监测结果显示, SIM-II和TIM观测的太阳总辐照度变化与太阳黑子面积变化相关, 当太阳黑子面积增大2470时, SIM-II监测到的太阳总辐照度变化为 -2.94 W/m^2 , TIM监测结果为 -2.98 W/m^2 , 说明SIM-II的观测结果能够定量反映由太阳活动导致的辐射能量变化。研究表明, FY-3C星太阳总辐照度数据已达到国际同类产品的观测精度, 可以用于太阳活动及气候变化监测等相关研究。

近10年北京地区极端暴雨事件的基本特征——《气象学报》2015年第73卷第4期

孙继松等利用北京地区5 min间隔的自动气象站降水观测资料, SA雷达观测资料、FY-2卫星TBB(Temperature of Black Body)资料、常规气象探空资料和 $1^\circ \times 1^\circ$ NCEP/NCAR最终分析资料, 对2006—2013年发生的10次极端暴雨事件(14个区县中, 任意一个区县代表站24h内降水量 $\geq 100 \text{ mm}$, 且暴雨区内至少有一个自动气象站降水强度 $\geq 40 \text{ mm/h}$)的基本特征进行了对比分析。结果表明: 1) 长生命周期的单体或多单

体组织合并的中尺度对流系统(第I类中尺度对流系统)形成的暴雨中心一般位于北京西部山前地区或中心城区, 这种分布与低空偏东气流的地形强迫作用或城市强迫作用有关; “列车效应”对应的多单体中尺度对流系统(第II类中尺度对流系统)形成的极端暴雨事件往往与两次不同属性的降水过程有关: 锋前暖区对流过程和锋面附近的对流过程。因此, 降水分布往往平行于低空急流轴或锋面。2) 第I类中尺度对流系统形成的极端暴雨过程局地性更强, 全市平均降水量远小于暴雨量级(50mm), 其中, 由混合型降水主导的极端暴雨事件一般是由几乎不移动的长生命周期单体反复生消造成的, 对流高度相对较低; 而深对流主导的极端暴雨事件一般由多单体组织、合并、加强造成, 由于对流单体的上冲云顶很高, 最低TBB一般低于 -55°C , 这类极端暴雨事件的短时强降水具有显著的间歇性: 第一阶段的强降水与单体对流发展过程对应, 以后的短时强降水与对流单体组织、合并过程对应。3) “列车效应”对应的多单体中尺度对流系统暴雨过程, 初始阶段一般表现为相互独立的两个对流带, 即与锋面系统对应的对流带和与低空急流轴对应的暖区对流带, 随着锋面对流带逐渐向暖区对流带移动, 低空冷空气逐渐侵入到暖区对流带中, 两条对流云带逐渐合并, 对流活动进一步发展; 或者由于暖区对流带截断锋面对流带的水汽入流, 造成锋面对流减弱, 而暖区对流带组织性更强, 发展更加旺盛。与第I类中尺度对流系统形成的极端暴雨过程不同, 这类暴雨过程往往造成全市平均降水量达到暴雨($\geq 50 \text{ mm}$)甚至大暴雨($\geq 100 \text{ mm}$)。4) 不同类型的极端暴雨过程, 大尺度水汽输送条件不同: “列车效应”造成的暴雨过程多数情况下由源于孟加拉湾和源于西太平洋的两支暖湿季风气流共同构成, 大尺度水汽供应充沛; 而第I类中尺度对流系统中的混合型降水造成的暴

雨过程的水汽来源主要与低空东南气流造成的近海水汽输送有关；第Ⅰ类中尺度对流系统中的深对流主导的深对流暴雨过程中整层水汽含量并不大，多数情况下水汽输送仅出现在对流层低层甚至仅在近地面层内。5) 大多数情况下，无论哪类性质的极端暴雨过程，在强降水发生时刻，雷达强回波高度一般在4km以下，仅有极个别时刻强回波中心高于5km。极端暴雨过程中，环境大气对流有效位能(CAPE)的大小一般与对流发展高度(雷达回波顶高)具有较好的对应关系，但与强降水发生时刻回波强度、最强回波高度、降水强度的对应关系较差。

中国龙卷的时空分布特征——《气象》2015年第41卷第7期

范雯杰等基于《中国气象灾害大典》、《中国气象灾害年鉴》和其他有关资料，根据“增强藤田级别”龙卷级别分类标准，对1961—2010年50年间中国EF2或以上级强龙卷(Significant Tornadoes)和2004—2013年10年间中国EF1或以上级龙卷的时空分布、发生频率和灾害特征进行了统计分析。主要结果如下：1) 1961—2010年50年间共记录到165次强龙卷，含EF2级145次、EF3级16次、EF4级4次，年均3.3次；2) 强龙卷主要分布在中国江淮地区、两湖平原、华南地区、东北地区和华北地区东南部等平原地区，具有在某地频发的特征；3) 165次强龙卷中，1986—1990年间的发生最为频繁，此后呈逐渐下降趋势；大多发生在春、夏两季，4—8月的数量占全年的87%；发生起始时间多集中在12—20时；4) 强龙卷发生过程中多伴有冰雹和/或暴雨等天气现象，其路径长度与强度之间可能存在一定的正相关关系；5) 165次强龙卷至少造成1772人死亡，3.17万人受伤，总结了记录到的最强25次龙卷的灾情特征；6) 2004—2013年10年间共记录到143次EF1或以上级龙卷，含EF1级

121次、EF2级19次、EF3级3次，其空间分布与1961—2010年强龙卷的分布相似；10年间，2005年记录到的数量最多，此后呈逐年下降趋势；7) 利用2004—2013年《中国气象灾害年鉴》和其他相关资料记录的龙卷资料中EF1级龙卷和EF2或以上级强龙卷的发生数量之比，以及不完整的EF0级龙卷与EF1或以上级龙卷的发生数量之比，粗略估计得到1961—2010年50年间中国年均发生龙卷的次数不低于85次，EF1或以上级龙卷年均发生21次，不及美国龙卷发生频率的十分之一。

黄土高原半干旱草地生长季干湿时段环境因子对陆面水、热交换的影响——《中国科学：地球科学》2015年第45卷第8期

岳平等利用黄土高原陆面过程观测试验研究(LOPEX)资料，分析了榆中半干旱草地生长季主要干湿时段陆面水、热过程的差异及环境因子的影响特征。研究发现，干湿时段陆面温、湿特征变化差异明显，干旱时段日平均归一化温度垂直分布结构整体“前倾”，湿润时段则呈“后倾”状；干旱时段，20cm以上浅层土壤是温度的活跃层，干湿时段土壤中热量的传递速率明显不同。干旱时段 H/Rn 和 LE/Rn 与5cm土壤温度之间满足线性关系；湿润时段 H/Rn 和 LE/Rn 与5cm土壤温度为非线性关系，日尺度上陆面水、热交换趋势发生转变的临界土壤温度为16℃。干旱时段 H/Rn 和 LE/Rn 与土壤含水量之间满足线性规律；湿润时段 H/Rn 和 LE/Rn 与5cm土壤含水量之间呈非线性变化， $0.21\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ 是日尺度上陆面水、热交换趋势发生转变的临界点。干旱时段，饱和水汽压差小于0.7kPa时， H/Rn 随饱和水汽压差的增大而增大， LE/Rn 随饱和水汽压差的增大而减小，而当饱和水汽压差大于0.7kPa时， H/Rn 和 LE/Rn 均趋于常数；湿润时段， H/Rn 随饱和水汽压差的增大而增大， LE/Rn 随饱和水汽压差的增

大而减小。上述特征直接体现了陆面环境因子的差异在水、热交换过程中的作用，也间接反映了云降水过程对陆面水、热交换过程的影响。

秋季北极海冰与欧亚冬季气温在年代际和年际尺度上的不同联系——《地球物理学报》2015年第58卷第4期

北极海冰的急剧消融在近年来欧亚大陆频发的低温事件中扮演着关键角色。秋季北极海冰的偏少对应着冬季欧亚大陆的低温天气，然而二者的联系在年代际和年际两种时间尺度上存在显著区别。何金海等运用1979—2012年哈得来中心第一套海冰覆盖率(HadISST1)、欧洲中心(ERA_Interim)的2m温度、风场、海平面气压场、高度场等资料，分别研究了年代际和年际时间尺度上前期秋季北极海冰与欧亚冬季气温的联系。结果表明，欧亚和北极地区(0° — 160°E ， 15° — 90°N)的冬季气温具有显著的年代际和年际变化。在年代际尺度上，温度异常分布在21世纪初由北极冷一大陆暖转为北极暖一大陆冷。这一年代际转折与前期秋季整个北极地区的海冰年代际减少联系密切。秋季北极全区海冰年代际偏少对应冬季欧亚大陆中高纬地区的高压异常，有利于北大西洋的暖湿气流北上和北极的冷空气南侵，造成北极暖一大陆冷的温度分布；在年际时间尺度上，温度异常分布主要由第一模态的年际变化部分和第二模态组成，且第一模态包含的年际变率信号也存在显著的年代际变化。年际尺度上全区北极海冰对欧亚冬季气温的影响远不及位于北冰洋西南边缘的巴伦支海、喀拉海和拉普捷夫海西部(30° — 120°E ， 75° — 85°N)的关键区海冰影响显著。关键区内海冰的偏少会引发冬季的北大西洋涛动负位相，导致北大西洋吹往欧亚大陆的暖湿气流减弱和欧亚大陆中高纬地区的气温偏低。

海表温度的不确定性在与MJO相关的热带对流预测中的作用——What is the role of the sea surface temperature uncertainty in the prediction of tropical convection associated with the MJO? *Monthly Weather Review*, 2015, Vol. 143, No. 8.

在目前许多基于观测的海表温度(SST)的研究中,由于分析步骤和(或)SST定义的不同,导致这些研究存在重大分歧,另外在动力模式中使用的SST可能缺乏足够的精确度,这可能会降低MJO的模拟和预测。基于此,NOAA的王万秋等探讨了SST的不确定性对与MJO有关的季节内降雨量变化的代表性的影响,以及这种影响是如何随对流参数化的变化而变化的。研究使用NCEP大气全球预报系统(GFS)及由三种SST数据强迫的对流参数化方案进行了预报试验。这三种SST数据包括被广泛应用的NCDC SST日数据、TMI反演的SST数据,以及SST气候态数据(仅包括气候学上的季节循环,没有SST异常)。试验结果表明,对于所有的对流参数化方案,与SST气候态数据相比,使用观测的SST(TMI和NCDC)的优势最早可以在预报开始后的5天至一周内看到。此外,TMI SST的预报技巧要好于NCDC SST,这表明在观测分析中,当SST被用作下边界条件时,目前的SST不确定性水平可能导致大的差异。研究结果也表明,模拟和预测可以通过由更精确SST强迫的大气模式或者能表现更真实SST变化的大气—海洋耦合模式而得到改善。

热带、亚热带和温带环境中气旋发展的理想化数值试验——Idealized numerical experiments on cyclone development in the tropical, subtropical, and extratropical environments. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2015, Vol. 72, No. 9.

气旋的发展,特别是在南半球的夏季,在热带和温带非常活

跃,但在亚热带地区处于非活动状态。为了阐明环境因素对热带、亚热带和温带气旋发展的影响,日本东京大学的Yanase等使用一种非静力模式进行了理想化数值试验。试验检测了纬向一致的环境场内的弱的初始涡的发展,环境场包括五种因素:科里奥利参数、纬向风、潜在温度、相对湿度和海洋与大气之间的表面温差。理想化试验成功再现了热带和温带环境中显著的气旋发展,以及在亚热带环境中没有气旋发展。这个结果证实了控制气旋发展中环境场的主导作用。为了找出哪些环境因素抑制了亚热带气旋的发展,研究又进行了一系列的敏感性试验。研究发现,由于低温、强分层和强烈的垂直切变(相对于热带),热带气旋在亚热带不能发展。另一方面,由于小的科里奥利参数和弱垂直切变(相对于温带),温带气旋也无法在亚热带发展。而表面温度差和相对湿度的作用是次要的。本研究结果有助于理解各种类型的天气尺度气旋的气候分布。

东非Gezira灌溉计划导致周边区域的降水持续加强——Rainfall consistently enhanced around the Gezira Scheme in East Africa due to irrigation. *Nature Geoscience*, 2015, in press.

土地利用和土地覆盖变化已显著改变了全球的区域气候格局。许多研究已经关注了过去百年内迅速发展的大规模农田灌溉对区域降水的影响。对西非Sahel地区进行的气候模拟发现,大规模的灌溉计划会抑制灌溉区域的降水,但会增加相邻地区的降水。不过,大规模灌溉计划对降水格局的模拟影响无法与观测进行直接比较。为此,美国麻省理工学院(MIT)的Alter等进行了一种补充的分析:利用MIT区域气候模式(MRCM)对东非Sahel地区已经实施的大规模灌溉计划(Gezira计划,Gezira即苏丹的Gezira区域)进

行数值模拟,并与同一地区的观测进行对比分析。模拟发现,Gezira计划抑制了灌区的降水,但增加了灌区以东的一些区域(非灌区)的降水。对降水、温度和径流的站点观测也证实了模拟结果。从机制上解释,灌溉降低了地表气温,造成了灌溉区域的大气下沉和顺时针的风异常(背景为西南风),从而增加了东部区域的垂直向上运动。本研究认为灌溉能够持续改变灌区及周边区域的降雨格局,其对农业、水文和经济的影响有必要进行进一步检测。

基于重建土壤水分数据的北半球陆地变干趋势的原因——Causes of drying trends in Northern Hemispheric land areas in reconstructed soil moisture data. *Climatic Change*, 2015, in press.

在全球许多地区,土壤水分含量影响着水供应、干旱和洪水的发生、热浪的频率和强度。加拿大环境部的Mueller等评价了由观测到的大气强迫和陆面模型(LSMs)模拟的土壤水分含量,以及参与CMIP5的全球气候模式模拟的土壤水分趋势。该研究将北半球陆地分成干湿区域,分析了这些地区的土壤水分变化。研究发现,无论是LSMs还是CMIP5模式模拟,北半球陆地地区的土壤水分含量在1951—2005年皆出现了显著的下降,特别是在干旱地区。在湿润地区,各模拟得到的土壤水分趋势不太一致。1951—2005年,受干旱早响(定义为土壤水分低于第10百分位的区域)的区域预计增加了20%(LSMs)和30%(CMIP5模式)。通过比较LSM和不同外部强迫下CMIP5模式输出的土壤水分,发现人为强迫显著贡献于观测到的变干趋势,并可以解释受干旱影响区域的增加。在不久的将来,随着大气中温室气体浓度的继续增加,干旱区域将变得更加干旱,这可能对未来供水和粮食安全产生不利影响。

评价22种降水和23种土壤水分产品在亚利桑那东南部一个半干旱区域的效果——Evaluation of 22 precipitation and 23 soil moisture products over a semiarid area in southeastern Arizona. *Journal of Hydrometeorology*, 2015, in press.

目前存在着各种来源的降水和土壤湿度数据，虽然它们都经过严格的测量或估计，但各种产品的精度究竟如何，仍然需要更多的评估。美国亚利桑那大学的Stillman等评估了22种降水和23种土壤湿度产品，并与长期观测的日降水数据（Pobs）和7—9月的土壤水分（SM）数据进行了对比，研究区域位于美国亚利桑那州东南部的站点分布密集的面积约为150km²的一个流域。研究发现，器测/雷达降水产品（如CMAP、PREC/L、GPCP等）的表现最好，其次是卫星和再分析产品，这三类产品的年降水与Pobs的中位相关系数分别0.83、0.46和0.68。而CMIP5模拟的降水是最差的，包括对寒冷季节降水的高估，以及所有模式（仅一个除外）的年降水量都与Pobs缺乏显著相关。研究将土壤水分产品分成了四类：卫星，陆面数据同化系统（LDAS），再分析和模式；对比发现，卫星土壤水分产品的表现最好，其次是LDAS和再分析，而CMIP5的结果最差。例如，与SM数据相比，这4类产品7—9月的无偏RMSD（均方根偏差）中位值分别是0.0070、0.011、0.014和0.029m³·m⁻³。另外，研究还使用两个4km²分辨率的器测/雷达降水产品（PRISM、NCEP/StageIV）解决了Pobs与较粗分辨率产品的尺度不匹配问题，认为整体上尺度不匹配对本研究结果影响较小。研究结果确定了每种产品的长处和薄弱环节，这将有助于未来对它们进行改进的，同时还强调了使用多种器测/雷达和卫星产品以及它们在评价再分析和模式不确定性时的重要性。

检测欧洲破纪录温度演变的人为影响——Detection of anthropogenic influence on the evolution of record-breaking temperatures over Europe. *Climate Dynamics*, 2015, in press.

极端温度事件的变化被期望是人为气候变化导致的结果，但是这些事件的区域性及其何时以及如何变得明显仍然存在不确定性。而由于对极端温度事件的不同定义和分析方法，这个问题在欧洲尤为突出。为此，法国CNRS/ CERFACS气候模拟和全球变化团队的Bador等使用另一种方法，即通过检测破纪录温度的变化，分析了人为的影响。该研究使用观测温度结合气候模式模拟耦合的数据集，评估了20世纪末和21世纪以来破纪录温度变化的可能原因和意义。首先，使用一个简单的检测方法评估了人为强迫的影响在多大程度上能在现今对破纪录温度的观测和模拟的变化中被检测到。然后，使用气候模式研究了欧洲破纪录的日最低和最高气温在21世纪的未变化趋势。相同的检测方法也被用于确定人为信号（相对于模式估计的内部变率）出现的时间。从20世纪80年代起，观测和模拟都发现了冷暖纪录演变的变化，但直到20世纪末它仍停留在内部变率的范围内。与20世纪60年代和70年代相比，20世纪80年代以来，破纪录的日最低和最高温度分别倾向于更少和更多。而仅有自然强迫的模式模拟未能重现20世纪80年代后观测到的变化，而后者与人为强迫下的模拟相一致。20世纪80年代开始的温度偏差预计在21世纪会加重。从21世纪20年代和30年代开始，破纪录温度的年变化将与模式产生的内部变率变得不一致。在RCP8.5情景下，21世纪最后30年的破纪录高温平均将达到20世纪80年代开始时的5倍。相反，低温破纪录将变得非常困难。从分布上看，地中海地区在夏季受到的影响尤为严重，而欧洲中部和东北部的冬天受到的影响更多。

落叶林光合作用和地表物候之间的匹配和不匹配 ——The match and mismatch between photosynthesis and land surface phenology of deciduous forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, Vol. 214–215.

植物物候是陆地生物圈应对气候变化的一个关键指标，也是全球气候的一个重要驱动因子（通过改变碳、能量和水循环）。对植被冠层季节（绿色）动态的遥感监测是在有关与区域气候信息以及生态系统水平上CO₂通量比较的尺度上研究地表物候（LSP）的重要手段。瑞士苏黎世联邦理工学院的D' Odorico等分析了使用三种遥感产品（包括NDVI、物候植被PI、基于EVI的MODIS土地覆盖动态产品）反演的2000—2012年北半球19种落叶阔叶以及混合林的关键物候期之间的关系，并且对基于这些产品的总初级生产力（GPP）提取的光合作用物候开始和结束期与CO₂通量进行了对比。研究利用许多不同的拟合曲线得到了物候的转换日期，三种遥感产品估计的LSP日期存在一定差异。NDVI反演的物候的主要特点是更短的生长季，而EVI延长了大约两周，同光合物候季长度相比。PI反演的生长开始和结束期更加接近GPP时间序列反演的光合物候的开始（ $r^2 = 0.84$, $RMSE = 7.61$ ）和结束期（ $r^2 = 0.61$, $RMSE = 8.57$ ）。研究还发现，PI与高空间分辨率地面数码相机（这种相机在大约一半的所研究的FLUXNET站点都是可利用的）观测到的LSP非常一致。尽管遥感LSP和光合物候之间有很好的关系，但这种关系在不同的落叶林之间是不一致的，这暗示了植物营养生长和光合作用的节奏并不总是相互一致的。

《《 涓流细雨 》》

“This study comes at a critical time for Earth system science across NASA, NOAA, and the USGS, as the efforts of the past few decades have ushered in a golden era of Earth remote sensing, but we have yet to determine how best to sustain this enterprise across basic research, applied research, applications, and operations. A prime example of this challenge is space-based observations in support of weather monitoring and prediction.”

“在NASA、NOAA和USGS地球系统观测的关键时候，开展这项研究恰当其时。过去几十年里，我们引领着地球遥感领域的黄金时代，但是我们需要确定如何在基础研究、应用研究、应用领域和业务等多层面上更好地保持下去。面对这一挑战的重要例子，就是天基观测支撑天气监测和预报。”

——横跨NASA、NOAA和USGS等美国联邦部门地球观测在2018—2027年如何开展，美国科学院将就此开展调查，调查由在国家研究理事会成立的“天基地球科学和应用十年调查委员会”承担，出任该委员会联合主席，来自UCAR的Antonio Busalacchi就这项工作给出如上描述。据悉，调查将给出美国新一代卫星地球观测针对NASA、NOAA和USGS的优先领域以及在2018—2027年的十年间开展的各项活动的建议。

“It a great time to reflect on achievements and look forward to future discoveries.”

“这是一个很好的展示成就和展望未来探索的时机。”

——英国气象局哈得来中心迎来25周年纪念日。1990年，当时的英国首相撒切尔为哈得来气候中心揭幕，25年来该中心从开发世界上最复杂的气候模式，到认知全球气候系统，为英国在气候变化方面赢得了领先的荣誉。谈到25周年纪念日活动，中心主任Stephen Belcher发表了上述看法。

“The concept of international meteorologists had been on Met Office’s drawing board for some time, but we’d never previously had the resources to make it happen. Haiyan’s severity brought things forward, albeit with dual-role consultants who spend 50% of their time on international matters. It’s about moving away from the idea of ‘here’s your weather forecast’ to ‘here’s your weather forecast, its consequences – and how you can ensure the comms chain flows’.”

“国际气象学家的理念在英国气象局的蓝图中已经有些日子了，但我们以前从未投入资源实施。台风“海燕”的严重性推进了实施进程，尽管（派去）顾问还要用50%的时间处理国际事务。（这次行动）就是要摒弃‘这就是做出的预报’的观念，转变到‘这就是做出的预报，还有预报的后果——而且还要知晓怎样做才能确保面向客户管理系统链的运行’。”

——2013年在菲律宾造成6000人死亡，数百万人无家可归的台风“海燕”，促成英国气象局派出由Bob Turner领衔的

6人专家组组成国际气象学家小组支持菲律宾气象局行动。小组由核心气象业务人员和其他非业务领域的专家组成，Bob谈到这次行动时特别解释了这次活动的理念和小组将预报和减灾紧密结合起来的思想。

“We’re putting sex-specific names on a thing with no biology. Can we ever move away from it?”

“我们将有性别的名字加在非生物体之上，我们就不能摒弃这一做法吗？”

——造成至少500亿元损失和导致147人死亡的2012年飓风“桑迪”被从飓风名单中剔除，1953年以来，已经有78个大西洋飓风名因损失巨大，或存在争议被废止。今天，飓风命名涉及多种不同语言和文化，1970年代开始，一直仅用女性名字的飓风名称被加入了男性名称，而伊利诺伊大学2014年针对飓风名称效果的研究让人大跌眼镜：公众对女性飓风名警惕性减弱，从而加大了灾害风险。尽管这项研究引发争议，但研究者坚信这样的结果并将持续进行研究，而飓风历史学者Liz Skilton则用上述观点，质疑将飓风贴上性别标签的做法。

“By showing how high the flood water could rise in terms of brick courses, and providing a corresponding estimate of economic damage, these new maps can help residents see the impact of low probability flooding scenarios”

“通过用升高的砖层显示洪水将到达的高度，同时提供相应高度时经济损失的估计值，这些新的洪水分布图帮助居民认清低可能性洪水情形的影响。”

——英国国家海洋中心（NOC）和利物浦大学，通过将—一个洪水泛滥模型与海浪效果模拟结合在一起，联合开发出了一个新的可视化工具，能够预测沿海洪水给三角洲周边社区带来的最大损失。该项目的负责人、来自利物浦大学的Thomas Prime，对该新工具做了进一步的描述。

“We really cannot predict, even on a 12-hour notice, where these storms are going to be.”

“我们确实不能预报，即使是提前12小时告知这些风暴将去哪里也做不到。”

——一项持续45天，耗资1350万美元的PECAN（Plains Elevated Convection At Night，夜间平原抬升对流）项目外场试验日前结束。试验中科学家试图揭示出在白天太阳加热引发的风暴消失了一段时间后，为什么夜间会有风暴形成和发展。为此，试验人员夜间驾车在激烈天气发生的路径上布设仪器。谈到试验和项目的意义，PECAN首席专家，怀俄明大学大气科学家Bart Geerts如是说。

“The formation of the Drought Risk Management Research Center strengthens NOAA and the federal-state partnerships that help to make the nation more resilient to drought. It will fill a vital role in linking the best available research, data and information to states and communities as they plan for and cope with the impacts of this pervasive hazard.”

第80页评刊

来信截至 2015年10月10日

梁升

2015年第4期的“贵州省交通气象服务分析评估”一文，通过对专业人员和社会公众的问卷调查，分析评估了贵州省气象部门对于公路交通服务的满意度等问题，对了解气象对交通服务的情况有很大的帮助，对进行航空气象服务分析和评估有很大启发。但是在交通运输方式上，通常包含铁路、公路、水运、航空和管道等，一般把上述几种交通运输方式的综合称为交通，本文从题目到内容的叙述上都采用“交通”一词，而主要的研究内容是公路的气象服务分析和评估，不够严谨，会给读者误导，通读全文才发现主要是针对公路交通运输的气象服务。

回复 (from作者)

目前开发的交通气象服务平台网站，主要用在公路、铁路部门，读者提到的，特别是城市管道的专业气象服务，是将拓宽的服务领域，感谢读者提出了文章中不足之处。

@笑点滴哭点滴

2015年第4期的“广东省小流域地区降水诱发的滑坡灾害预警体系探讨”一文，介绍了该预警系统的框架和方法，并提出临界降雨量是滑坡预警的关键指标。在各地的滑坡预警系统中，都十分重视临界降雨量的确定，那么针对小流域的滑坡中，临界降雨量如何确定？与一般滑坡预警中的临界降雨量确定有什么不同吗？谢谢！

回复 (from作者)

在华南地区，小流域地区的滑坡以降雨型小型滑坡为主，其形成机理和主控因素与其他滑坡有本质性的区别，且近年来我们发现，小流域的滑坡虽然个体规模小，但却呈现空间上集聚和群发性的特征，这种群发性和集聚性的特征使得滑坡预警与一般的单体滑坡预警有区别，群发性特征使得滑坡与滑坡之间产生了连锁效应。

关于小流域集群式滑坡临界降雨量的确定方法与一般滑坡相似，常用的方法大体上相似，可利用统计方法、经验观测方法及物理模型等方法，但因集群式滑坡又具有一般滑坡的连带作用和累积效应，因此利用一般的临界降雨量确定的方法会造成偏差，在一般的滑坡预警的基础上应叠加累积效应来确定临界降雨量的大小。

(上接79页)

“干旱风险管理研究中心的成立，加强了NOAA和联邦-州的联系，有助于国家面对干旱更具有弹性。该中心将在最适用的研究、数据和信息与州及社区需求之间充当重要的联系人，帮助后者规划和应对这一流行灾害的影响。”

——由NOAA国家综合干旱信息系统 (NIDIS) 资助的干旱风险管理研究中心日前在University of Nebraska-Lincoln成立，该中心将和国家干旱减灾中心 (National Drought Mitigation Center) 合署办公。在谈到该中心的作用时，NIDIS主任Roger Pulwarty发表了上述看法。

“NOAA welcomes this new role from the aerospace sector. In fact, NOAA spends at least \$20 million in appropriated dollars annually to purchase commercially-provided satellite, lightning, airborne, and in situ data. NOAA anticipates purchasing more data over the coming

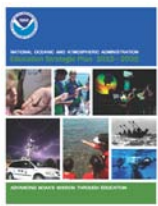
years as the aerospace industry matures and develops new and additional data streams, and as NOAA has a chance to evaluate how these commercial sources of data can meet its operational requirements.”

“NOAA欢迎航空业的新角色。实际上，NOAA每年至少支出2000万美元购买商业卫星、闪电、空基和实测数据。NOAA预期未来几年购买更多数据，这是因为航空业在成熟和开发出更多新的数据集，还因为NOAA有机会评估这些商业数据源如何满足我们的业务需求。”

——2015年7月14日，美国国会举行了第二次“推进商业天气数据应用：合作改进预报”听证会。听证会上，国会议员指出NOAA的卫星系统的脆弱性和需要把目光转向航空市场，寻求更为健康的卫星数据保障。针对议员和各界要求气象部门更多关注、购买和使用美国商业航空地球观测数据，NOAA副局长Manson Brown在证词中做出如上表述。

《主动遥感与无线电频谱需求增加战略》 2015年

主动遥感已经成为目前研究和预测包括大气、海洋和陆地表面的地球环境，以及地球近空间环境之短期和长期变化最重要工具。各种主动遥感设备对无线电频谱资源的占用及产生的问题，已经而且在未来会更加突出地显露出来，对无线电频谱这样的拓展可能不大的自然资源的协调和更有效的利用，是涉及很多学科的科学家不能回避的问题。美国科学院跨物理和天文学、工程学和医学等多个委员会组成的主动遥感对无线电频谱利用调查委员会最新发表的这份报告，瞄准这一可能在未来成为瓶颈的问题，制定战略，未雨绸缪，试图为这一关系国计民生重要工具的发展和应用保驾护航。

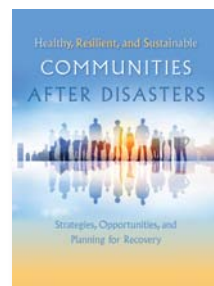


《2015—2035年教育战略》 2015年8月

NOAA最新发表的这份今后20年教育战略，明确提出其在“环境智慧”中的作用。战略依据美国竞争法案赋予的职责制定，并将在今后每5年进行更新。

《科学》 2015年8月21日

本期给出的封面“森林健康”专栏，用5篇评述文章和多篇新闻报道，从不同角度描述了这一主题的科学问题。封面图为科学家在澳大利亚开展树木生态调查的场景。



《灾后的健康、弹性和可持续社区》 2015年9月

巨灾发生后，灾后重建就成为政府、科学家和大众最关心的事情。美国科学院最新发表的这份报告认为，国家标注为“回到从前”的这类努力，实际上对很多社区来说“从前”远不完美。如何让更多的从可以预知的风险中解脱出来，建设更好的社区，成为本报告的主题。

媒体扫描

MEDIA SCAN

《自然》 2015年9月10日

本期封面报道瞄准全球森林密度地图。耶鲁大学领衔多国科学家，利用40万个地面树木密度观测结果，制成了全球树木密度地图。



《美国气象学会会刊》 2015年7期

本期以封面报道形式，介绍了中国科学院和中国气象局等机构学者撰写的，介绍中国南海中尺度水文和海洋气象网建设以及基于该网的观测在南海海—气相互作用方面取得的成果。



《CM SAF第一份业务报告》 2015年7月23日

欧洲气象卫星应用组织的卫星应用设施—气候监测（CM SAF）项目发表了第一份业务报告，时间涵盖了2015年前6个月。这份报告，即表明该项目活动阶段性进展，更预示：随着卫星数据的累积，卫星信息将更多地进入气候业务。

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

Honorary Editor Chou Jifan, CMA Training Centre

Editor-in-Chief Xu Xiaofeng, CMA

Associate Editors

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

Managing Editors

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

Editors

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

Overseas Editors

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

Editorial office

Zhang Meng, Hou Meiting, Qin Lianxia, Ji Wenbin, Chen Zhongmei

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

Printed by
Beijing Jinjishi Printing Limited Liability Company

ISSN 2095-1973
CN 10-1000/P
RMB 30.00

Main Contents

1 Xu Xiaofeng/ Message from the Editor-in-Chief Article

- 6 Chen Fajing, Chen Jing/ The Application Experiment of a New Score for Precipitation Verification Based on the SEEPS Principle
- 14 Zhao Junhu, Zhou Jie, Ye Tianshu, Yang Liu, Feng Guolin/ Preliminary Studies on the Environment Field and Cause of Northern Flood and Southern Drought During the Summer of 2013 in China
- 24 Qian Kai, Liu Jinli, Bi Yongheng, Han Yong, Lü Daren/ Analysis of Two Heavy Rainstorms in Summer Beijing by Using Observation Data with High Temporal and Spatial Resolution
- 33 Shen Yueting, Qian Chuanhai, Li Zechun, Fan Guangzhou/ A Review on Applications of Tropical Cyclones Ensemble Prediction Technologies
- 43 Huang Hong, Wang Xuezhong, Jiang Yongqiang, Chen Zhongyi/ Effect of Tropical Cyclone-like Vortices on the Evolution of Asymmetric Thermal Disturbances
- 50 Sun Dali, Liu Xiaoyang, Wang Jiuke, He Siyuan/ Research on the Measurement Precision of the Rain-Gauge Networks
- 55 Cui Shengquan, Liang Han, Li Shuang/ A Statistic Analysis of the Threshold Value of Strong Convection Weather Physical Quantity in Liaoning
- 60 Zhang Mei/ Analysis and Treatment of Abnormal Recording Method of Automatic Weather Stations

Forum

- 63 Cheng Weiling, Xian Di/ The Development and Improvement of Fengyun Meteorological Satellite by the Application of Products
- 66 He Haiying/ An Estimation on the Size of the Meteorological Service Market under Provincial-level in China

Survey

- 2 Picture/ Number/ Ranking

History

Event

- 71 The Group for Mining and Research on the Meteorological History/ Meteorology Education and Training for Air Force During the Nanjing Nationalist Government Period

Reading

- 68 Ye Mengshu/ Book Review: A New System of Chemical Philosophy
- 69 Zhang Hongbo/ Review to a Special Issue of JBA Entitled Perspectives on Implementing Benefit-Cost Analysis in Climate Assessment