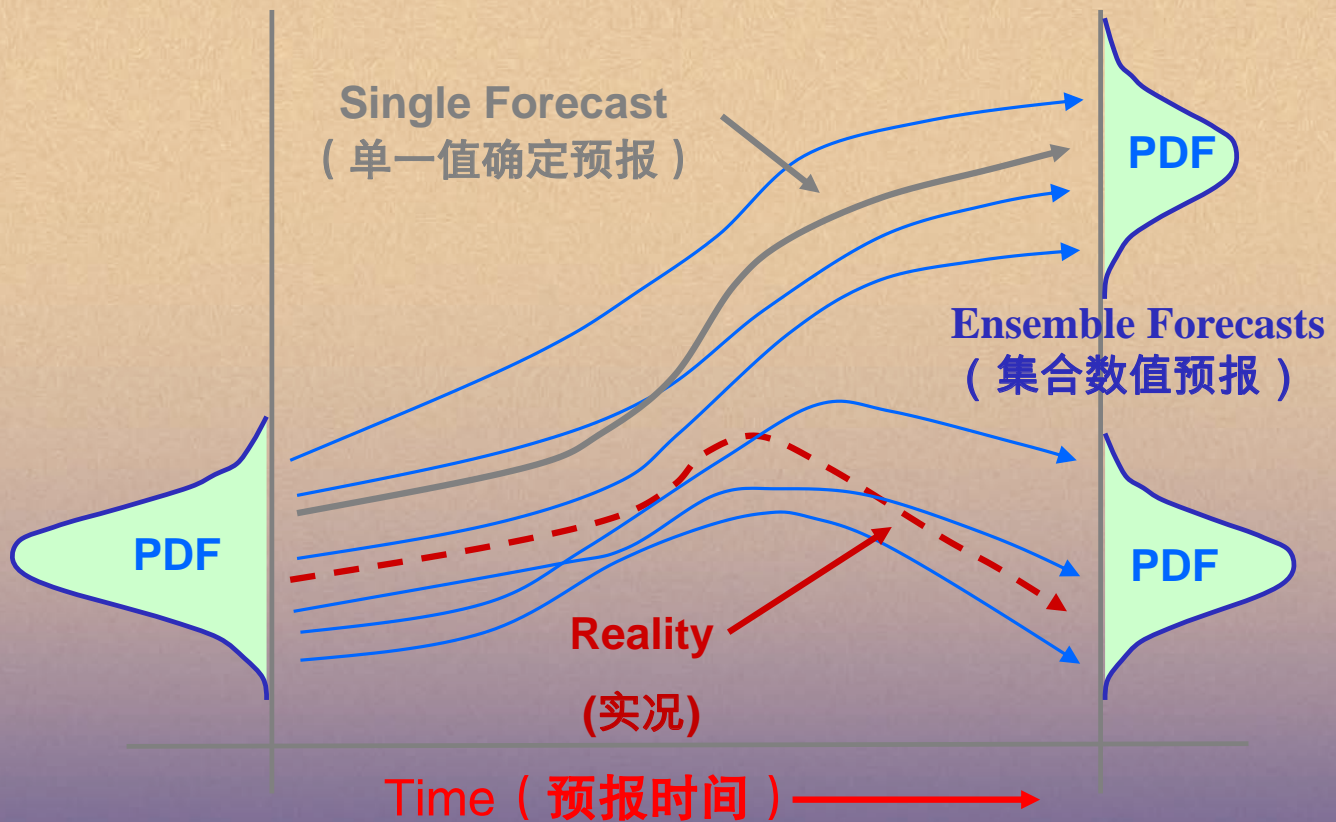


集合数值预报



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

名誉主编 丑纪范 中国气象局气象干部培训学院
主编 许小峰 中国气象局

副主编

肖子牛 中国气象局气象干部培训学院
翟盘茂 中国气象科学研究院
罗云峰 中国气象局
王会军 中国科学院大气物理研究所
李维京 国家气候中心
胡永云 北京大学
谈哲敏 南京大学
费建芳 解放军理工大学
管兆勇 南京信息工程大学
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)

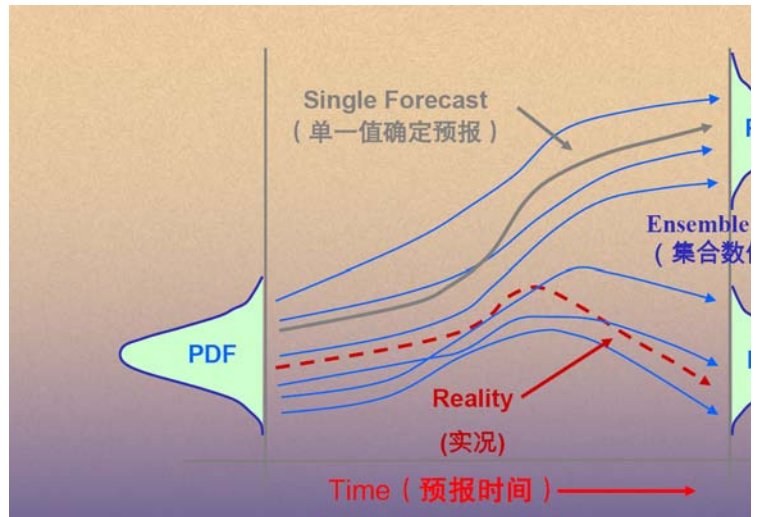
毕宝贵	陈云峰	陈振林	崔春光	崔讲学
董文杰	封国林	郭 虎	何金海	何 清
胡 欣	胡玉蓉	胡跃文	姜 彤	雷小途
李 慧	李集明	李良福	李耀辉	李跃清
梁旭东	刘晶森	刘黎平	刘 实	卢乃锰
陆日宇	罗 兵	罗亚丽	马 力	马舒庆
马耀明	毛恒青	彭莹辉	浦一芬	石广玉
宋 燕	汤 绪	田 红	万齐林	王 斌
王东海	王建林	王晓云	王延青	王迎春
王 元	王在志	王自发	温 敏	文洪涛
吴立广	谢志辉	闫冠华	杨 崧	杨昭明
姚学祥	伊 兰	翟武全	张 华	张立祥
张小玲	张跃堂	赵广忠	周定文	周凌晔
周显信	朱定真	朱小祥	祝燕德	邹立尧

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: 北京宝昌彩色印刷有限公司
国际标准刊号: ISSN 2095-1973
国内统一刊号: CN 10-1000/P
定价: 30元



本刊已被教育阅读网、万方数据、《中国学术期刊网络出版总库》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4卷 第5期 2014年10月

1 许小峰: 主编语

研究论文

封面报道

6 杜钧, 李俊: 集合预报方法在暴雨研究和预报中的应用

专题 城市气象

21 冯锦明, 王君, 严中伟: 城市化气候效应研究的新进展

30 陈明轩, 王迎春, 高峰, 等: 雷达气候研究进展及其在城市区域强天气临近预报中的应用

42 房小怡, 郭文利, 马京津, 等: 低碳城市规划与气候可行性论证

研究进展

48 施晓晖: 青藏高原东缘对流云和水汽观测试验简介

54 范锦龙, 张明伟, 曹广真, 等: 全球干旱卫星监测计划

专题 基层现代化

58 严敏, 马姗姗, 冯贵宾, 等: 北京市海淀区PM₁₀污染特征及其与气象要素的关系

主 编 语

地球大气是高度非线性的复杂系统,由此导致的天气预报不确定性问题也成为难以克服的障碍。尽管数值天气预报方法在实际业务上取得了巨大成功,但依然难以达到完美程度,大气的混沌本质制约了问题的解决。而集合预报的思路与方法正是面对这一困境应运而生的,这一概念于1969年由Epstein首先提出,经过20世纪70—80年代的探索和研究,并随着大规模并行计算机的发展,于90年代开始在上主要预报中心的天气预报实践中被陆续采用,使得由于初值和计算引起的模式不确定性问题得到了显著改善。

本期主打文章以暴雨预报为例,阐述了集合数值预报方法在处理天气可预报性问题中的应用(P6)。集合数值预报并不是要做出一个更准确的单一值预报,由于初值不止一个,甚至模式也不止一个,所以集合预报提供的是一组结果,而如何从这一组预报结果中提取有用的信息,则是集合预报解释应用中需要解决的问题。在暴雨预报这类误差较大的预报产品制作过程中,集合预报方法应是大有可为的。与发达国家相比,我国集合预报技术研究和应用起步较晚,虽然在近几年取得了一些研究成果,但仍有不小差距,深入的学习和研究需进一步加强。

前两期,本刊专门讨论了自然因子在气候变化中的作用。但除自然因子外,人为因素显然也不能小觑,如近几十年来的快速城市化进程导致的气候效应,已经得到了广泛关注(P21)。雷达信息已在天气预报中获得广泛应用,而利用雷达资料进行气候分析则是近些年才在国际上逐步发展起来的(P30),这一方法可以揭示某一地区强天气发生发展的气候特征,从而也可为短期或临近预报提供背景支持。另外,城市空气污染已

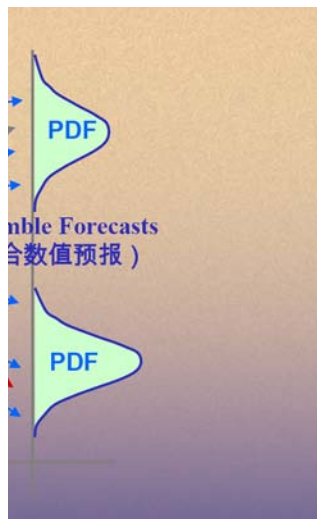
成为城市化进程中的一个必须面对的重要问题,污染源排放和气象条件都会对城市大气污染物的变化和分布造成影响(P58)。如何兼顾环境与发展,是个值得认真思考的问题,构建低碳城市(P42)或许是一条值得探讨的途径。

针对重要问题开展科学试验计划一直是推动气象科学发展的有效途径。继1979年和1998年两次大规模青藏高原大气科学试验之后,第三次青藏高原大气科学试验已于今年全面展开。这次试验的顺利实施离不开前期的各种观测、预试验,例如,青藏高原东缘对流云和水汽观测试验(P48)重点关注了青藏高原东缘对流云结构和水汽输送的变化及其对灾害性天气的可能影响,获取的资料和分析结果为青藏高原第三次大气科学试验提供了科学支持。气象领域的全球性计划也是全球共同应对气候变化问题的重要手段,其中,全球干旱卫星监测计划(P54)便是地球观测组织为全球干旱监测预警而推出的一个范例。

本期“论坛”文章给出的大气科学类毕业生就业形势的分析(P63),在近几年毕业生就业形势日趋严峻的形势下,大气科学类毕业生的就业前景呈现良好态势,这可能为年轻学生选择这一专业带来更强信心。

2014年是中国气象学会成立90周年,在“往事钩沉”栏目,我们从海峡两岸气象科技交流的角度,回顾了作为中国最悠久的学术组织之一的气象学会所经历的一些重要事件。尽管两岸的气象管理因政治因素被海峡分开,但借助气象学会这一桥梁,使两岸气象交流与合作不断得以推进和加强,构成了顺畅的沟通渠道。

许小峰



封面图: 集合数值预报

科学观察

2 读图 数字 榜单

论坛

- 63 刘鹏, 陈昌春, 徐磊: 2006—2013年大气科学类毕业生就业形势分析及展望——以南京信息工程大学为例

特写

- 66 朱紫阳, 张艳, 潘魏伟: 2003—2012年JCR大气科学(气象学)源期刊学术影响力的研究
70 李婧华, 张定媛: “集合预报”主题文献计量分析

往事钩沉

人物/事件

- 76 沈冰冰: 海峡两岸气象科技交流发展时间表
78 叶鑫欣, 焦艳, 傅刚: J.皮叶克尼斯及海气相互作用研究

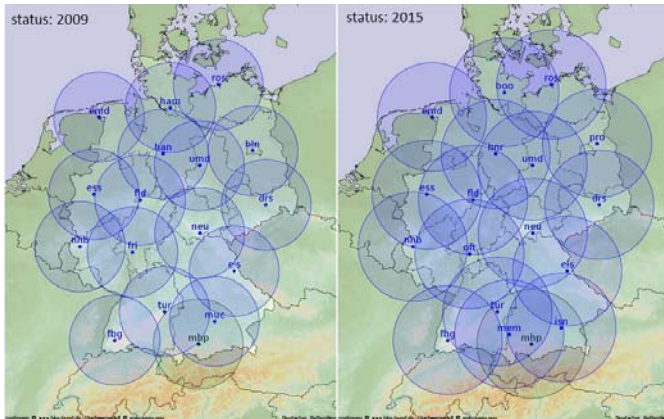
阅读

信息

- 20 《雾物理化学研究》出版
53 《气象科学论文文献计量统计年度报告(2014)》发布
72 编辑选编
80 第80页评刊
封3 媒体扫描



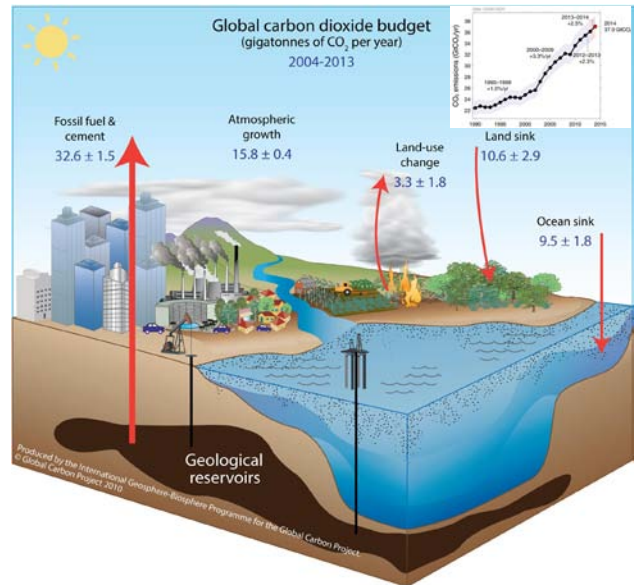
封3



德国雷达网：期待更好的降水扫描覆盖

德国气象局 (DWD) 业务雷达网中的16部雷达, 在1987—2000年间陆续建设完成, 其中1994年以后建设的雷达为探测范围更大的多普勒雷达。2009年开始, DWD实施雷达网的现代化建设, 雷达更新为新的极化C-波段多普勒雷达。2012年雷达成功增加了5分钟体扫描功能, 为提高临近预报质量打下基础。图中给出最近召开的欧洲雷达气象会上, DWD展示引入极化多普勒雷达系统前后, 雷达降水扫描探测范围从125km增加到150km (图中给出两种分辨率覆盖区对比), 强降水系统因此能被更多的雷达扫描捕捉到, 从而更加准确地定位。2015年, 德国将完成最常用的降水雷达扫描全覆盖。

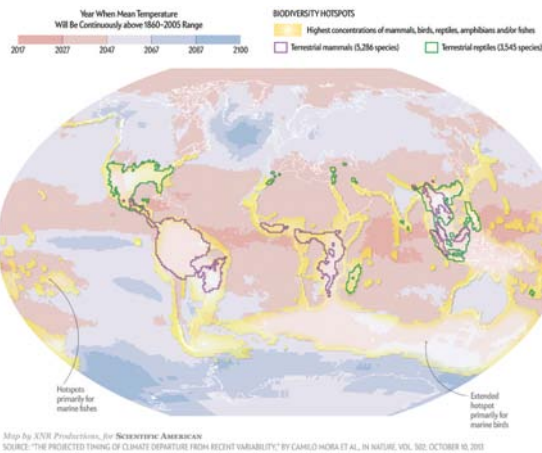
来源: DWD



全球碳循环：人类的干扰还在持续

全球碳项目 (Global Carbon Project) 近日首次发布了年度评估报告, 这份由来自12个国家和68个机构的88位学者共同完成的评估, 利用了最新的碳排放探测数据, 全面给出了全球碳排放源的家底。报告更加清晰地给出了最近10年人类活动对全球碳循环的干扰的全景图 (大图)。报告给出1990年以来三个时段碳排放的增长率 (小图) 以及2013全球排放量: $36.1 \pm 1.8 \text{ GtCO}_2$, 较1990年增加61%。报告预计2014年碳排放将更多, 为 $37.0 \pm 1.9 \text{ GtCO}_2$, 较1990年更是增加65%。

来源: Global Carbon Project



气候变暖威胁生物多样性

近期《科学美国人》杂志在“图表科学”栏目刊登的这张图, 解释了气候变暖对生物多样性造成的影响。如果各国继续以目前的速率排放二氧化碳, 全球不同区域将在21世纪内分阶段陆续变得平均温度持续高于1860—2005年的记录 (左上色标), 这样的温度改变, 会给多种生物密集区 (黄色区域) 以及陆地哺乳动物 (5286个物种, 紫红色线区域) 和陆地爬行动物 (3545个物种, 绿色线区域) 带来影响。

来源: Scientific American

数字

50 万美元

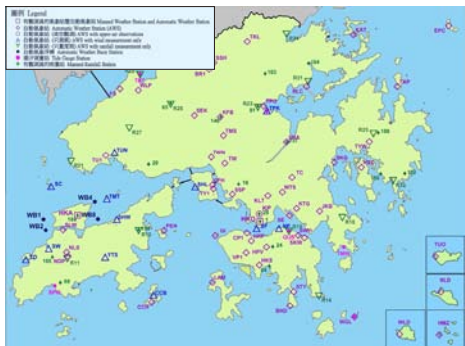
美国在夏威夷进行的具有56年历史的对大气二氧化碳观测标志性的“基林曲线”观测项目, 在政府资助出现问题时, 最近获得美国慈善家连续5年每年30万美元的资助。

31 cm

美国一家公司 (DigitalGlobe) 8月13日发射的商业卫星WorldView-3具有每个像素31cm的分辨率。据悉, 美国商务部6月刚刚通过的法规, 将商用图像的分辨率提高到了25cm。

47.2 个

英国龙卷风和风暴研究组织 (TORRO) 的学者, 统计了1981—2010年发生的龙卷风后, 得出英国每年平均出现龙卷风 47.2 ± 10.5 个, 龙卷风发生的日数为 24.3 ± 3.3 天。



香港天文台：各种天气观测站遍布特区

香港气象记录的出版，始于1884年，常规的出版物从2007年开始，包括了自动气象站和潮汐观测记录。根据香港天文台（HKO）最新的观测报告，香港目前有2个有人观测气象站，自动气象站的数量在2013年底达到了84个，几乎覆盖了特区各个地方。此外，还有主要由志愿者打理的，有观测员的雨量站以及沿海自动气象浮标等，以及6个潮汐测量站。

来源：HKO

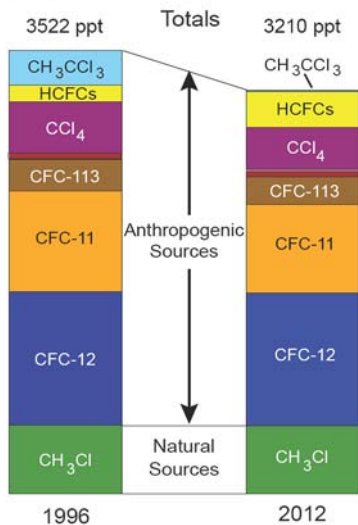
国际“集合预报”主题被引频次最高的前10篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引频次
1	The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation	Molteni, F	Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1996, 122(529): 73-119	673
2	Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations	TOTH, Z	Bulletin of the American Meteorological Society, 1993, 74(12): 2317-2330	617
3	Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method	Toth, Z	Monthly Weather Review, 1997, 125(12): 3297-3319	499
4	Development of a European multimodel ensemble system for seasonal-to-interannual prediction (DEMETER)	Palmer, TN	Bulletin of the American Meteorological Society, 2004, 85(6): 853-872	430
5	Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF Ensemble Prediction System	Buizza, R	Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1999, 125(560): 2887-2908	350
6	A system simulation approach to ensemble prediction	Houtekamer, PL	Monthly Weather Review, 1996, 124(6): 1225-1242	305
7	Optimal sites for supplementary weather observations: Simulation with a small model	Lorenz, EN	Journal of the Atmospheric Sciences, 1998, 55(3): 399-414	256
8	Multimodel ensemble forecasts for weather and seasonal climate	Krishnamurti, TN	Journal of Climate, 2000, 13(23): 4196-4216	245
9	Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States	Wood, AW	Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2002, 107(D20): 4429	241
10	Interpretation of rank histograms for verifying ensemble forecasts	Hamill, TM	Monthly Weather Review, 2001, 129(3): 550-560	226

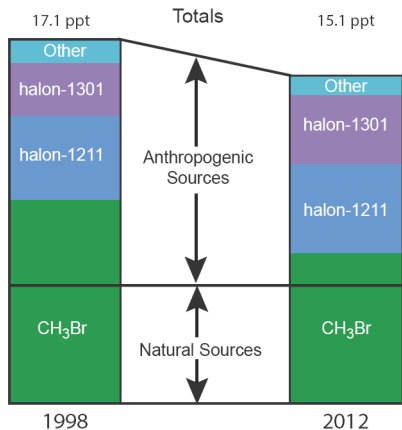
来源：SCI-E数据库，检索时间：2014年9月5日

李婧华 提供

Tropospheric Chlorine Source Gases



Tropospheric Bromine Source Gases



地球臭氧层有望恢复

也许几十年以后，保护地球生物的地球臭氧层能够恢复如前，这一乐观的估计，是一份由36个国家的将近300位科学家最新完成的、由WMO和UNEP等机构共同发布的《2014年臭氧层消耗科学评估报告》（印前版）阐述的主要观点。报告这一重要观点的依据，是人类排放的导致臭氧层消耗的对流层氯化物（左图）和溴化物（右图），2012年的含量和1990年代末比较有了明显减少，而这种成功的减排，要归功于《蒙特利尔议定书》对上述人类排放物的限制得到了各国较好的执行。

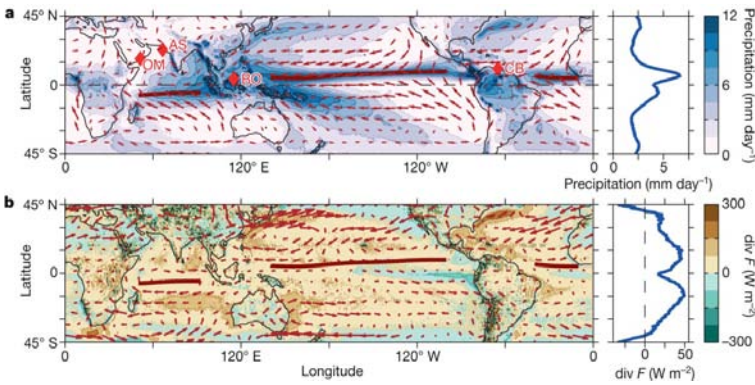
来源：WMO

3倍 美国著名的伍兹霍尔海洋研究所对全球海洋开展为期8年的采样分析后发现，工业革命以来人类活动已经使得全球海洋表面汞浓度提高了3倍，这会让食用鱼体内蓄积的汞含量上升，从而增加人类汞中毒风险。

40% ~ 45% 获得国务院批复的《国家应对气候变化规划（2014—2020）》，落实了我国2009年公布的到2020年的目标，这些目标包括，到2020年，碳排放强度在2005年基础上降低40%~45%。

500项 9月23日联合国气候峰会指出，近年来，全球已有约60个国家设立了500项与气候变化相关的法律，约40个国家已建立了碳排放初级市场交易系统。

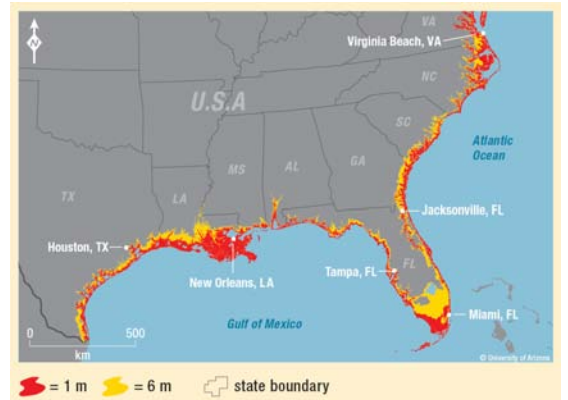
读图



ITCZ: 地球天气气候活跃中心

ITCZ (热带辐合带) 是气象学者一直关注的特别区域, 平均位置位于2°—9°N之间的这个带状区域, 是地球上降水率最强的地方。美国和瑞士学者共同对ITCZ的持续观测和研究进行了评述, 揭示出其在大气环流和能量平衡等方面的独特特征。他们用a图描述位于降水最大(彩标)的海上ITCZ(红线)和地表风(向量)辐合的重叠。图左侧框内给出纬带平均降水。图中还标出拥有古代记录的四个点, 这些点分别位于阿曼(OM; 17°N, 51°E)、阿拉伯海(AS; 23°N, 67°E)、婆罗洲(BO; 4°N, 115°E)和卡里亚科盆地(CB; 11°N, 65°W), 具有长期观测值的记录, 可支持整体分析。在b图中, 可以看出大气湿静能通量F(向量)在ITCZ附近较弱, 但其散度div F(彩标)一般为正值。图左侧框给出纬带平均的湿静能量通量辐散。

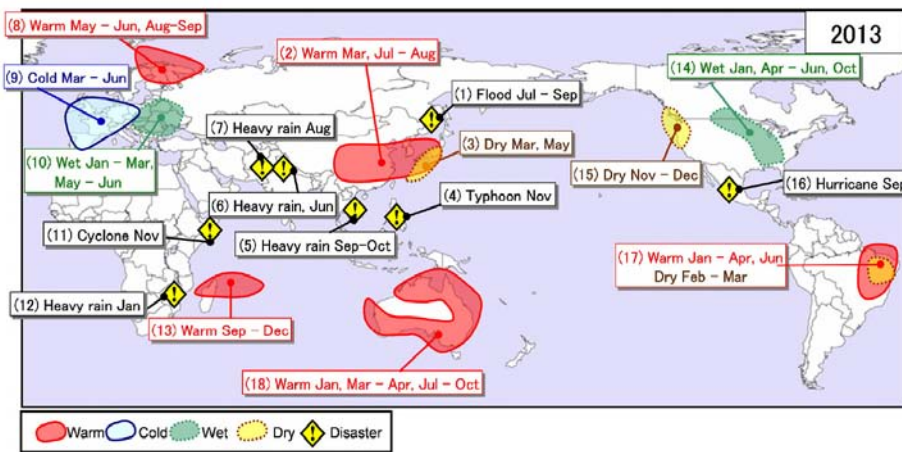
来源: Nature



美国海湾战略: 气候变化带来挑战

美国国家科学院(NAS)近日发表了海湾研究项目的战略视角报告, 对未来30年涉及海湾地区的研究进行了战略展望。报告特别提示气候变化在项目执行期间对海湾沿海地区有更加明显的影响。海湾地区对海面升高尤其表现得脆弱。海湾沿海加速的海面上升速率, 会对今天海面高度不足1m(图中红色区域), 甚至6m(图中黄色区域)的广大区域形成威胁。

来源: NAS



2013年: 气候多变化

日本气象厅(JMA)最新发布的2013年度气候变化监测报告中, 梳理了2013年全球气候异常事件。在总计18个气候异常事件中, 强降水(包括台风和飓风)及造成的灾害占据主要地位, 其次是不同区域的偏暖或偏冷, 其中偏暖时往往发生干旱。

来源: JMA

数字

325m

巴西和德国计划在巴西亚马孙雨林深处建造一个高度为325m的气候观测塔, 预计明年11月监测的观测塔, 将开展气象和大气二氧化碳观测, 对空气中气体交换和化学反应进行监测。

1420万人

位于瑞士的一家研究机构最近发表的一份研究报告指出, 2013年全球因自然灾害有2200人被迫在国内迁徙, 其中因风暴导致的迁徙为1420万人, 其中亚洲最多, 为1380万人。

100万吨

投资12亿美元的世界第一座具有碳捕捉能力的燃煤发电厂10月2日在加拿大萨斯喀彻温省正式开始建设, 这座电厂设计每年捕捉100万吨左右的二氧化碳。

中国“集合预报”主题被引频次最高的前20篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引频次
1	美国WRF模式的进展和应用前景	章国材	气象, 2004/12	214
2	集合预报的现状和前景	杜钧	应用气象学报, 2002/2	128
3	动力延伸预报产品释用方法的研究	李维京	气象学报, 1999/6	98
4	国家气象中心集合数值预报业务系统的发展及应用	李泽椿	应用气象学报, 2002/2	89
5	集合数值预报发展与研究进展	陈静	应用气象学报, 2002/8	83
6	降尺度技术在月降水预报中的应用	陈丽娟	应用气象学报, 2003/12	80
7	物理过程参数化方案对中尺度暴雨数值模拟影响的研究	陈静	气象学报, 2003/6	77
8	动力气候模式预测系统业务化及其应用	李维京	应用气象学报, 2005/12	73
9	华南中尺度暴雨数值预报的不确定性与集合预报试验	陈静	气象学报, 2003/10	71
10	中国业务动力季节预报的进展	丁一汇	气象学报, 2004/10	66
11	短期集合预报技术在梅雨降水预报中的试验研究	王晨稀	应用气象学报, 2003/2	63
12	中国科学院大气物理研究所短期气候预测系统的改进及其对1998年全国汛期旱涝形势的预测	林朝晖	气候与环境研究, 1998/12	62
13	一种新型的中尺度暴雨集合预报初值扰动方法研究	陈静	大气科学, 2005/9	50
14	支持向量机回归方法在实时业务预报中的应用	冯汉中	气象, 2005/1	46
15	短期气候数值预测的进展和前景	丑纪范	科学通报, 2001/6	45
16	国家气象中心集合数值预报检验评价	皇甫雪官	应用气象学报, 2002/2	42
17	和预报员谈数值预报	薛纪善	气象, 2007/8	39
18	集合预报方法研究及应用进展综述	段明铿	南京气象学院学报, 2004/4	37
19	集合预报最优初值形成的四维变分同化方法	龚建东	科学通报, 1999/5	37
20	数值模式的预报策略和方法研究进展	任宏利	地球科学进展, 2007/4	36

来源: CAJD数据库, 检索时间: 2014年8月21日

张定媛提供

AUTHOR SURVEY

In April 2014, the co-chairs of Working Group I (WG1) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) invited 259 WG1 coordinating lead authors, lead authors and review editors to take an online questionnaire on their experiences. Of these, 172 responded.

1 Attitude towards, and willingness to serve, the IPCC

More than 90% rated their overall experience as good or better. Meanwhile, 68% would serve again; 20% would not. The role of review editor was widely criticized as having responsibility without power.

Please rate your overall experience.



2 Workload

Since governments commissioned the first assessment report, published in 1990, the burden on the scientists has increased at an accelerated pace. A search for 'climate change' in the Thomson Reuters Web of Science yields 7,106 articles from 1900 to 2000, the time of the third assessment report. More than 110,000 articles published since 2001 include the term.

The amount of literature to be assessed was a challenge.



The amount of data to be processed was a challenge.

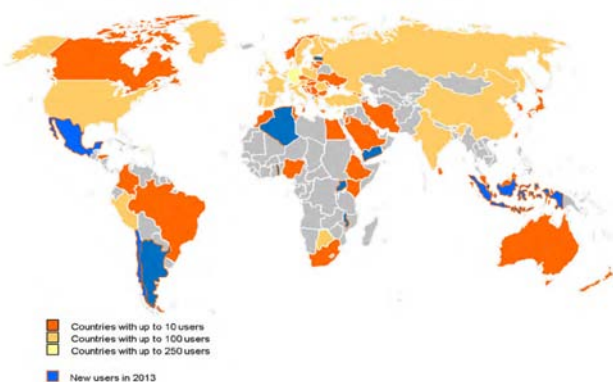


IPCC AR5作者群肯定评估过程

2014年4月, IPCC第五次气候变化评估 (AR5) 第一工作组联合主席邀请259位报告主要作者回答网上问卷, 172位主要作者的反馈给予这项工作正面评估。其中, 90%以上的主要作者总体感觉评价是好以上, 更有68%以上表示愿意再参加, 而后一比例偏低也和大多数作者认为评估的工作量较大 (图中给出针对文献和数据评估工作量的反馈) 密切相关。

来源: Nature

CM SAF users per country



CM SAF: 应用遍及全球

在欧洲气象卫星应用组织 (EUMETSAT) 开发的气候监测卫星应用设施 (Satellite Application Facility on Climate Monitoring, CM SAF) 框架下, 德国气象局 (DWD) 联合其他欧洲国家气象局, 将该平台开发成获取数十年各种卫星数据和产品的平台, 尤其受到各国气候学者的欢迎。如图所示, CM SAF在全球的用户数量不断上升, 这些用户来自研究机构、大学、气象部门以及私企。

来源: DWD

10次

美国阿肯色州大学的学者通过年轻的研究分析, 发现过去600年里出现的10次最弱海岸涌升流中, 1950年之后出现了4次, 1850年之后出现了7次。

15天

近日, 中国天气网改版后将天气预报时效从原来的7天延长至15天, 并增加了未来3天每3小时预报、景点天气预报、空气质量实况等信息。

60亿人次

自20世纪70年代以来, 航空旅客人数增加了一倍, 约达每年30亿人次, 预计到2030年将再翻一番, 达每年60亿人次。近日召开的国际民用航空组织 (ICAO) 和WMO之间十年一次的联合气象学专题会议认为, 随着向全球空域的全面管理的转变, 航空气象服务部门有机会实现服务的现代化。

集合预报方法在暴雨研究和预报中的应用

杜钧¹ 李俊²

(1 美国国家海洋和大气管理局 国家环境预报中心, 美国; 2 中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉 430074)

摘要: 机理了解不够和可预报性问题的忽略是暴雨预报不尽人意的两大原因。主要讨论第二方面, 即如何面对和处理可预报性问题, 这对如何提高现有数值预报的价值、做好气象服务尤其重要。根据作者多年的研究和实践经验以及直接接触的一些研究和方法, 简要地总结了数值集合预报方法在暴雨研究和预报中的应用, 具体包括以下四个方面: (1) 暴雨集合预报系统的建立: 初值和物理扰动、成员数、模式分辨率、资料同化和“虚拟”集合预报; (2) 预报方法: 集合异常预报法、再预报相似集合法和台风路径聚类法; (3) 在预报后处理与订正中的应用: 平均、成员排序与最佳成员法、加权平均、概率匹配平均法和集合动力因子法; (4) 对暴雨天气系统的机理分析与模式初值的改进: 初值扰动差异分析和集合敏感性法、目标观测。希望国内气象业务部门能在日常业务中借鉴以上方法以提高暴雨预报和服务水平, 为今后的研究工作提供一个新的起点、方向和方法, 这包括指导现有的一些业务集合预报系统今后的进一步完善。

关键词: 暴雨, 集合预报, 预报订正, 天气诊断, 目标观测, 资料同化

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.05.001

Application of Ensemble Methodology to Heavy-Rain Research and Prediction

Du Jun¹, Li Jun²

(1 National Centers for Environmental Prediction (NCEP), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), USA

2 Wuhan Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430074)

Abstract: Inability in correctly predicting heavy rain events is primarily due to two reasons: lack of full understanding its physical mechanism and negligence of its predictability limit. How to deal with its predictability limit is the focus of this review paper, which is especially important to enhance the value of numerical weather prediction products to better serve end-users. Based mainly on authors' own or directly involved researches and experiences, many applications of ensemble methodology to heavy rain research and prediction are briefly overviewed. Specifically speaking, the following four general areas are discussed: (1) ensemble prediction system including initial condition and model/physics perturbations, optimal ensemble size, model resolution, data assimilation, and various "virtual" ensembles; (2) forecast methods including ensemble anomaly forecasting, reforecasting analog ensemble, and storm track clustering; (3) forecast post-processing and calibration including ensemble mean, performance ranking and best member, weighted ensemble mean, probability-matched ensemble mean, and ensemble of dynamic factors; and (4) weather system analysis and model initial condition improvement including perturbation difference analysis, ensemble sensitivity, and targeted observation. It is expected that this review will inspire actions from both operation and research communities: many proven-to-be effective methods described in this paper could be adopted in routine weather forecasting practice by operational meteorologists to improve their forecast and service; research community could have a new starting point with new ideas and a clearer direction for future science and technology development including the improvement of current existing operational ensemble prediction systems in years to come.

Keywords: heavy rain, ensemble forecasting, forecast calibration, weather diagnosis, targeted observation, data assimilation

1 引言

暴雨是中国的主要重大灾害性天气之一, 它造成巨大经济损失并威胁人类的生命^[1], 大量的科研力量也因此集中在同暴雨有关的工作上^[2]。譬如, 随便翻

阅一本中国的气象专业杂志, 就可看到有关暴雨的文章: 国家专门设立了研究暴雨的专业研究所(即中国气象局武汉暴雨研究所, <http://www.whihr.com.cn>)。虽然如此, 目前的暴雨预报仍然不尽如人意, 远远不能满足气象服务的需求^[3]。原因可能有两大方面: 一是对暴雨产生的机理了解不够, 特别是对它在不同情形下的中、小和微尺度的物理过程没有完全了解和掌握^[4], 因此还不能在数值模式中精确地描述这些过

收稿日期: 2013年10月18日; 修回日期: 2014年1月6日
第一作者: 杜钧(1962—), Email: Jundu_noaa@yahoo.com
资助信息: 国家自然科学基金(41275107)

程, 导致模式没有能力预报出所有不同类型的暴雨; 二是没有科学地面对和处理其可预报性问题, 强降水过程往往是在极其复杂过程下多尺度系统非线性相互作用下的一种综合结果, 任一环节如初值(包括大气、下垫面和侧边界)、物理过程和参数化方案以及模式的计算处理上的细小差别都有可能致预报结果的重大差别^[5-6], 所以即使一个模式有能力来预报它, 其预报的不确定性也很大^[7-8]。而预报的不确定性问题又在当前的预报实践中被忽略^[9-10], 结果使公众和用户得不到关于预报的全面信息(即各种可能性及其可信度)而失去本来可以做出更优决策的机会^[11-12]。

本文的讨论主要集中在第二方面, 即如何面对和处理其可预报性问题, 这一问题对如何提高现有数值预报的价值和做好气象服务尤其重要^[11-12]。集合数值预报方法是一种专门用来定量估计预报误差也即预报不确定性的动力学方法^[7, 13-14], 因此, 它在暴雨这类预报误差很大的预报制作过程中大有作为。需要强调的是, 集合预报的主要目的是针对某一特定的预报系统来实时定量地模拟该系统对任一气象要素随时间、空间以及天气系统而变化的可能预报误差的分布, 并不是要做出一个更准确的单一值预报^[7-14], 第2和第3节讨论有关“预报误差的预报”或称为“可预报性的预报”的内容; 虽然如此, 集合预报的第二类作用也确实可以改进预报本身的准确性, 这主要通过两种途径来实现: 一是通过对原始预报的后处理, 如集合平均方法^[15]来过滤掉可预报性低的预报信息和预估成员相对优劣法^[16]来选取最佳成员或进行加权平均等(第4节), 二是通过预报不确定性信息的反馈来改进模式初值而间接地提高预报的可预报性, 达到提高预报精度的目的, 如基于集合预报的目标观测^[14, 17](第5节)和资料同化^[18](第2.3节)。本文简要地总结了集合数值预报方法在暴雨研究和预报中的应用, 具体包括四个方面: (1) 暴雨集合预报系统的建立: 初值和物理扰动、成员数、模式分辨率、资料同化和“虚拟”集合预报; (2) 预报方法: 集合异常预报法、再预报相似集合法和台风路径聚类法; (3) 在预报后处理与订正中的应用: 平均、成员排序与最佳成员法、概率匹配平均法和集合动力因子法; (4) 对暴雨天气系统的机理分析与模式初值的改进: 初值扰动差异分析和集合敏感性法、目标观测。第6节则对上述内容做一总结和讨论。

本文是根据作者多年的研究和实践经验以及直接接触的一些研究和方法的总结, 虽然它涉及范围较广, 但并不是, 也不奢望是对现有文献的全面回顾。通过总结, 希望能起到两个作用: (1) 气象业务部

门能在日常业务中应用众多行之有效的方法来提高暴雨预报和服务水平; (2) 为今后的研究工作提供一个新的起点、方向和方法, 这包括指导现有的一些业务集合预报系统的进一步完善。

2 暴雨集合预报系统

2.1 初值扰动

早期研究^[15, 19-20]表明, 降水预报对模式的初值很敏感, 因此基于初值的集合预报系统在强降水预报上不但能改进单一值的确定预报, 也能提供各降水量级较可靠的概率预报。我们的研究^[21]进一步表明初值扰动场的空间结构比扰动幅度的大小(当然不能虚假地过大)对集合预报离散度的作用更重要。因为大暴雨经常同对流系统活动有关, 为了使初值扰动结构中能反映对流系统, 陈静等^[22]在应用增长模繁殖法(BGM)^[23-24]的扰动产生过程中用两个具有不同对流参数化物理方案的模式预报之差(传统上用两个具有相同物理过程的模式预报之差)来产生初值扰动场, 结果表明由此产生的扰动结构能较好地反映对流活动区而进一步改进集合预报对暴雨预报的效果。关于不同空间尺度的初值扰动场对降水集合预报离散度影响的研究表明^[25], 虽然较大尺度(波长64~90km)的初值扰动场相对较小尺度(波长2~8km)的扰动场而言对集合成员预报的总离散度起主导的作用, 但它对小尺度(波长8~32km)预报误差的模拟似乎贡献很小或无能为力; 而较小尺度的扰动场却可以模拟出小尺度(波长8~32km)以及中尺度(波长64~512km)的预报误差。这一结果在没有明显天气尺度系统作用下, 即弱背景环流形势下的强降水(如对流降水)尤其明显, 这时初值扰动中较小尺度的结构比较重要; 而在强天气尺度系统控制下的强降水(如锋面降水), 较大尺度和较小尺度初值扰动场对模式小尺度预报误差的作用都差不多, 这时初值扰动中小尺度的结构就相对不重要。上述结果也许可以部分解释我们在一项研究中所看到的为什么直接用高分辨率的区域模式所生成的初值扰动场其集合预报效果要优于从低分辨率全球集合预报系统降尺度而来的初值扰动^[26]。为了综合利用大、小尺度扰动的各自优点, NCEP的短期集合预报系统(SREF)采用了大、小尺度混合的初值扰动场: 即在区域模式生成的较小尺度扰动场(16km)基础上再叠加上由全球集合预报系统生成的较大尺度扰动场(55km), 结果表明这样做可以有效地提高集合离散度的增长率和集合预报的效果。为了使初值扰动同侧边界扰动相匹配, 奥地利气象局的区域集合预报系统也采用了这种分别来自全球和区域集

合预报的大、小尺度混合的初值扰动方法，取得较好效果。

研究中发现夏季午后雷阵雨以及近地面气温的预报对模式土壤湿度初值很敏感^[27-29]。原因是雷阵雨能否出现的一个关键因素是气块能否被加热抬升至对流凝结高度：当太阳短波辐射被地表吸收后，如下垫面较湿则这部分热能用来蒸发（即转化为潜热），而不加热上面的空气，使气块不易被加热上升达到对流凝结高度而产生对流降水；反之，下垫面较干时，地面通过长波辐射加热上面的空气（即转化为感热），使气块上升达到对流凝结高度而产生对流降水。考虑到目前模式中所用的土壤湿度资料精度很低即不确定度很大，所以对土壤湿度初值进行扰动的集合预报可以较好地模拟夏天雷阵雨降水以及近地面气温预报的不确定性或可能的预报误差。

由于计算机运算速度的限制，在实际的业务集合数值预报中集合成员数不能太多，否则模式分辨率就会过低，因此在一定计算机资源下，集合成员数和模式分辨率要有一个合理的配置。早期关于集合成员数的研究表明^[15]，对于降水集合预报（平均预报和概率预报）一般成员数达到10个左右就基本接近“最大可获得的预报技巧”。但是Du等^[15]的结果是基于空间分辨率较粗（80km）用对流参数化方案的数值模式，那么对于基于空间分辨率很细的显式计算云物理模式的集合预报系统呢？最近Clark等^[30]的研究结果表明，即使对于这种基于高分辨率（4km）风暴尺度集合预报系统的降水概率预报，10个左右成员似乎也足够了，但同时也指出随着预报时效的延长和模式空间分辨率的增加，要接近“最大可获得的预报技巧”所需的成员数也随之增加。这一结论同Richardson^[31]的结论一致：即一个事件可预报性愈低，要达到“最大可获得的预报技巧”所需的集合成员数就愈多。因此，对于一般短期天气预报，在保证一定成员数的情况下（如10个成员），尽量增加模式空间分辨率和应用较完善的物理方案应是提高预报水平的一种较优选择；Clark等的研究^[32-33]也证实了这一点：对于降水（对流天气系统）的预报，5（10）个成员4km显式计算云物理模式的小集合预报系统的预报效果较15（30）个成员20km对流参数化物理模式的大集合预报系统好。但对于较长时效的预报如中期和季节的数值预报（可预报性很低），较多的集合成员数则可能会比增加模式空间分辨率更重要^[34]。模式的垂直分辨率对降水预报质量的影响也很大^[35]，但似乎还没人从集合成员数与垂直分辨率的合理分配角度进行过定量的讨论。

2.2 物理和模式扰动

早期集合预报研究的注意力主要集中在初值不确定性上，但后来Brooks等^[36]、Mullen等^[37]发现集合成员降水预报的发散性对不同的同化系统和不同的物理参数化方案也很敏感。根据这一思路在美国国家气象局国家环境预报中心（NCEP）建立了世界上第一个基于多初值、多模式和多物理的短期区域集合预报业务系统（SREF，<http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/SREF/SREF.html>），它于2000年开始每天运行，并于2001年正式变成业务预报系统^[38-39]。实践证明，多物理、多模式方法是对暴雨和其他较难预报的天气要素如雾^[40]等行之有效的集合预报方法；这种多物理、多模式集合预报方法对中国南方暴雨的试验^[41]和2008年北京奥运会期间的实时试验^[42]也证实它是一种行之有效的方法；并且这种方法在当不同的模式具有相反的系统性偏差时效果尤其显著^[42]。关于物理扰动同初值扰动相对集合离散度的相对贡献大小，许多研究结果都看到物理扰动的贡献似乎是第二位的^[43-44]，这对降水以外的其他大气变量如温、压、湿、风场更是如此（对于降水预报，有时它们的作用可以相当；对于小尺度的强降水，物理扰动的作用甚至可以超过初值扰动），大尺度的集合离散度仅通过初值扰动而得到，而物理扰动仅对风暴附近局部地区离散度场在强度如降水量和结构上可有较大的修改作用。打个比方，初值扰动决定了一幅肖像画中人的大致轮廓，而物理扰动则可修改人的五官位置和形状。考虑到天气尺度的误差增长进入非线性阶段大约需1d左右的时间^[45]，对于降水而言，一般认为在前24h预报中物理扰动的作用较大，而24h以后初值和侧边界扰动会起主要作用。但Clark等^[46]的研究表明，即使在前24h，初值和侧边界扰动对降水预报也可能起主导作用。Stensrud等^[47]进一步指出，在强天气尺度强迫形势下（如锋面降水），物理扰动相比初值扰动作用较小，而在弱的大尺度强迫背景下（如纯热对流降水），物理扰动作用较初值扰动作用更大或相当。

虽然多模式和多物理的扰动方法实际效果较佳，但鉴于在一个数值预报中心发展和维护多个模式和多种物理方案并不易，因此它不是一种经济的最佳选择。所以，近年来，随机物理扰动方法的发展和研究变得比较热门^[48-55]。虽然从文献中可以看到一些正面结果的报告（主要是“离散度—预报技巧关系”有所改进），但根据我们自己正在进行的研究看到这一方法目前并不成熟，其产生的集合离散度远远小于初值扰动或多物理方案或多模式技术所产生的离散度（随机动能后向散射

SKEB法^[52]可能是个例外), 虽然它在局部地区可以较大幅度地改变降水量, 但对模拟降水位置的不确定性几乎无能为力; 可喜的是对小尺度预报误差的模拟, 随机物理扰动的作用可与初值扰动相当(这对风暴尺度的局地强降水非常重要), 另外, 如果在初值扰动基础上叠加随机物理扰动, 则其综合集合预报结果对最终暴雨预报不确定性的模拟有所改进^[56]。

鉴于物理过程的重要性、复杂性以及物理扰动与初值扰动的相互作用等^[57-59], 如果在一个集合预报系统中不全面包括物理过程的误差源, 该集合系统就不可能准确地模拟出局地性很强的所有天气的预报误差分布。如Du^[60]在一项研究中发现, 只要所用模式有误差, 即使在一个集合预报系统中对初值扰动的表征很准确, 基于该集合的预报概率密度的分布总会在少数一些地域完全错误, 并且很难预测这些错误分布会出现在什么地方, 这些少数地域称为“不可预报点”。因此, 作者认为今后需进一步深入研发新的、较全面的、较有效的随机物理扰动方法(SKEB方法是否真的有效, 还有待进一步证实); 也有人认为物理扰动方法比较乐观, 认为各种物理扰动方法都差不多, 所以简单的物理扰动方法在实践中就够用了^[61]。我们认为衡量随机物理过程扰动方法是否成功的一个重要指标是它能否有效地复制现行的多模式和多物理扰动法的效果, 要实现这一点在目前看来似乎还比较困难。对于模式中的许多误差源, 我们现在还不完全了解, 有些虽知道但还没有完全认识和应用, 如模式地形和实际地形有很大的差异, 所以扰动模式地形对暴雨集合预报应该有较显著的影响, 这些都需要做进一步的工作。

2.3 模式和资料同化

活跃的对流系统和局地地形往往是造成强降水的直接原因, 要准确地预报这些对流系统以及它们与地形的相互作用来模拟这种暴雨过程, 基于显式云物理高分辨率($<5\text{km}$)模式的风暴尺度集合预报是必需的, 这在2009年8月登陆台湾的强台风莫拉克(Morakot)造成的台风特大暴雨和2012年7月21日北京的特大暴雨这些历史性事件的研究中得到了很好的体现^[18, 62]。不用高分辨率模式, 这些重大天气过程的细节都不能被准确地描绘出来; 这些研究也看到, 除了应用显式云物理的高分辨率模式以外, 资料同化技术也是关键: 譬如, 当采用直接同集合预报系统耦合由集合成员来提供与气流相关的背景误差估计场的集合卡尔曼滤波(EnKF)技术^[63-66]所产生的分析场作为模式初值时就能较好地预报莫拉克台风暴雨, 反之如采用三维变分同化法所产生的分析场作为初值则不能

很好地预报这次台风的强降水^[18]。

区域集合预报系统需要由更大区域的或全球的集合预报系统来提供侧边界条件, 有时也直接提供初始条件。在模式区域较大时, 来自侧边界的影响相对较小; 但当区域较小时, 对集合预报的离散度影响巨大^[67]。鉴于计算机资料的限制, 目前高分辨率($<5\text{km}$)显式云物理模式的风暴尺度集合预报区域都比较小, 因此侧边界条件影响很大。因为许多数值预报中心自己并不直接运行一个区域较大的“中间分辨率”区域集合预报, 所以一个实际问题就是对显式云物理的风暴尺度($<5\text{km}$)集合预报系统其侧边界和初值是否可以由较低分辨率(目前一般为 $30\sim 50\text{km}$)的全球集合预报系统来提供而不影响预报质量, 或还需要在这两者之间有一个起过渡或桥梁作用的基于参数化物理模式的“中间尺度”区域集合预报系统先把全球粗网格资料进行降尺度。Marsigli等^[68]最近对此问题用一个 2.8km 显式云物理模式的风暴集合预报系统进行了比较: 一是用 32km 欧洲中期气象预报中心的全球集合预报来“直接”驱动(提供侧边界和初值条件)这 2.8km 风暴尺度集合系统, 二是先把 32km 全球资料用一个 7km 参数化云物理的区域集合预报进行降尺度再“间接”地驱动这 2.8km 风暴尺度集合系统。结果发现: (1) 对于 500hPa 高度场, 两者预报差异都在集合预报的离散度之内而不明显; (2) 对于降水预报, 两者在 $12\sim 45\text{km}$ 的空间尺度上有不能忽略的明显差异, 显然这对局地的强降水预报会有影响; 虽然如此, 但他们发现降水预报的技巧两者却没有明显区别。因此, 他们认为用 32km 全球集合预报来直接驱动 2.8km 显式云物理模式的风暴尺度集合预报似乎是可行的。当然, 这个工作还很初步, 今后应有更系统的研究来跟进特别是对强对流降水的影响。

2.4 各种替代法产生的“虚拟”集合预报

在没有足够计算机资源来运行你理想中的真正意义上的集合预报系统时, 为了能定量估计预报不确定性, 许多研究人员提出了各种各样的替代办法来帮助实现这一梦想。时间滞后法^[69]和“穷人”集合法^[70]是较早时期提出的此类方法的两个代表。时间滞后法(time-lagged ensemble)就是把起始时间不同但终止时间相同的同一个模式所产生的所有预报集合起来, 这方法的缺点是不同长度时效的预报质量不一样, 所以在制作集合产品时要对不同成员采用不同的权重, 其长处是应用了过去不同时刻模式初值的信息。

“穷人”集合法(poor-man ensemble)是因自己不能运行模式而简单地把能获得的众多来源不同的别

的模式预报集合在一起，其坏处也是模式质量不一，所以对不同成员需要采用不同的权重来产生集合预报产品，长处是导致预报不确定的误差源的表征比较全面，因为它考虑了不同的初值和同化系统、不同的物理和模式的动力框架等，所以集合离散度会较大，并且各成员系统性偏差会不一样，因此在集合平均过程中往往会互相抵消而使平均预报非常出色^[42]。大家所熟知的“超级集合预报”^[71]概念其实就是“穷人”集合法加上对每一成员的统计订正（多元线性回归），并且它的最后产品是一个单一值决定论的预报而并不是概率预报，所以最早的“超级集合预报”并不是现在真正意义上的集合预报，名称有些误导，可能称之为“多模式的统计回归法”更合适。

2004年作者也提出了“双分辨率混合集合预报法（dual-resolution hybrid ensembling）”^[72]，前提是有有一个高分辨率的单一预报和一个低分辨率的集合预报，原理是把两者结合起来各取其精华——基础预报由高分辨率提供（比较精确）而预报不确定性信息由低分辨率集合预报提供（计算机资源允许）来产生一个新的“虚拟”高分辨率集合预报。具体做法是，把低精度集合预报每个成员分解为两部分：控制预报和预报扰动（即扰动成员与控制预报之差），再把预报扰动叠加到高精度单一预报上来产生新的集合成员，也就是用高精度预报来代替原低精度控制预报再还原为集合预报。叠加办法可用“单边法”，即只加，这样保持成员数和原集合一样；也可用“双边法”，即亦加亦减，这使成员数比原集合增加一倍。此法的优点是利用了高分辨率模式的长处（如对暴雨雨量预报较准确），使原集合预报准确率提高，同时又保留了

集合预报的不确定性信息；可能的缺点是因为预报扰动部分和基础预报部分来自不同分辨率的模式预报，有可能导致天气系统在时空位置上的不匹配。但作者的实践经验表明，只要高、低精度预报所用的模式相同，预报时效不太长（如<3d），这一不匹配问题似乎不明显。该法已在美国国家环境预报中心的区域和全球集合预报业务中运行多年：在区域集合预报上把21个成员的16km北美区域短期集合预报系统嫁接到基于2个4km-WRF（NCEP NMM和NCAR ARW）模式的几个小区域单一预报上，结合产生一个具有44个成员、2天预报时效和多区域（美东、美西、阿拉斯加、夏威夷和波多黎各）的风暴尺度集合预报，这对于改正强降水雨量和近地面风场预报有较大的帮助；在全球集合预报上把55km的全球集合预报系统GEFS同27km的单一全球预报系统GFS相结合，考虑到高精度预报比低精度预报的优势随着预报时效的延伸而递减，在两者结合的过程中应用了一个权重函数，它从预报起始的1.0（即完全用高精度GFS作为基础预报）逐渐随预报时间的延长而下降，至第5天降为0（即完全用原来低精度的GEFS）。这样混合集合后，也大大地改进了原有全球集合预报的效果。

不久前，Schwartz等^[73]针对高分辨率模式虽然在降水量级预报较好，但在具体位置上有很大的不确定性，而试验了一种所谓“邻居法”（neighborhood approach，或较确切地应称为“相邻格点法”）通过增尺度来估计预报的不确定性来产生降水概率预报（也可产生集合平均预报）。具体来说（图1），在一个预先设定的空间尺度范围内（认为模式对小于此尺度的预报没有确定性技巧而不可在确定论的意义上

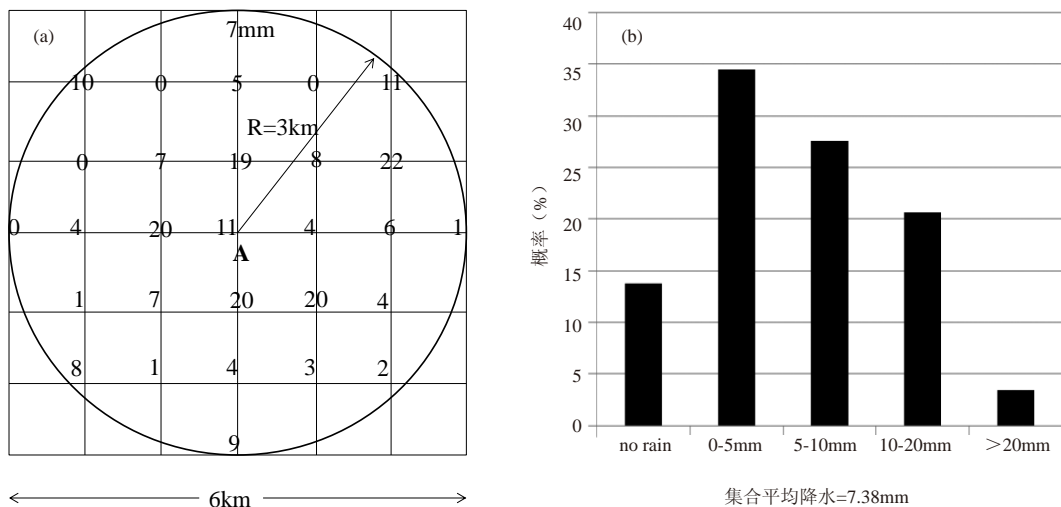


图1 在高分辨率（1km）模式降水预报中，用“相邻格点法”通过增尺度（a）来产生A点降水概率预报和平均预报（b）的示意图

相信)所有模式格点的值组成一个集合预报,根据这些格点的值来计算代表中心点的降水概率和集合平均。图1a中模式的原始分辨率为1km,但认为模式对小于6km的降水没有确定预报技巧;所以,通过一个6km的范围(图1a)来计算A点的降水概率和集合平均降水(图1b)。这样可以把单一模式预报转化为概率预报,也可把只有少量成员的小集合预报变成一个成员较多的大集合预报。此法的原理是增尺度(通过增尺度来增加预报的可靠性),关键是如何根据实际问题(模式的预报能力)来确定一个合理的增尺度半径(如图1的例子是3km)。注意,虽然一个模式在小于某一空间或时间尺度下也许没有确定论意义上的预报技巧,但它可以有统计意义上的预报技巧,所以为了充分利用精细的物理方案或地形资讯等原因,完全有理由在小于此尺度的分辨率下运行此模式。

3 预报方法

3.1 集合异常预报法

对罕见极端高影响天气,即使一个模式有能力来预报它,其数值预报也至少有以下两大难点:一是有多大把握所预报的天气确是极端事件?二是其具体的定时、定量、定点预报稳定可靠吗?杜钧等^[74]通过对2012年北京7月21日特大暴雨事件的分析显示,集合预报以及它和气候资料相结合的“集合异常预报法”可以提供比单一模式预报更可靠和更准确的信息,从而有效地缓解上述两大难点来大大地提高重大灾害性天气的预报能力。此法的具体步骤如下,通过计算“标准化异常度”(公式1)把数值模式预报同气候资料相比较(图2),可以判断所预报的事件是否是罕见的极端事件,一般其绝对值超过3(即同气候平均之差超过气候标准差三倍)往往为极端事件的

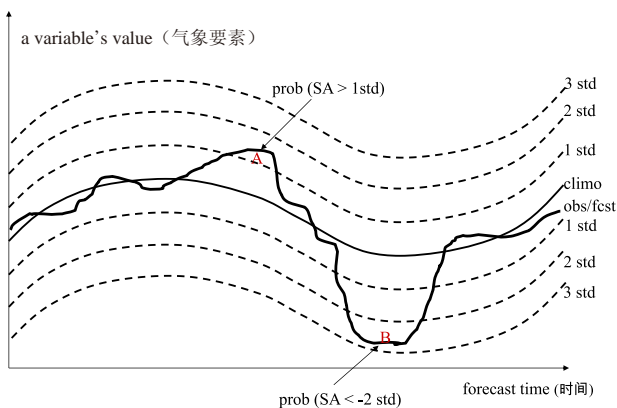


图2 “标准化异常度”方法的示意图^[74]:把一个预报或观测的气象要素(粗黑线)同其长期的气候平均(细黑线)和标准差(虚线)进行比较,来衡量该要素的异常度,即用偏离气候平均达多少个标准差来表示

表征;并进一步同集合预报相结合,计算集合中每一个成员的“标准化异常度”就可导出某一等级的极端事件出现的概率大小或其预报的可信度。根据这一可信度来增加或减弱预报员对该预报的信心,就可有效地提高对罕见极端高影响天气预报的可靠性。结合天气事件的异常度(代表天气影响的大小)和异常预报的概率(代表预报的可信度)还可导出一个二维量化的灾害性天气预报“社会影响矩阵”;它综合考虑了天气的影响度和预报的可信度,定量地表示某一灾害性天气预报的可能潜在社会影响大小,这无疑比现在的单一确定性预报更科学。他们的研究也看到,从大尺度形势来说,北京“7·21”大暴雨事件的大尺度环境相当典型,是一次可预报性很高的事件,现在的数值预报模式已有能力在近6天前做出大致的预测,但问题是在具体细节方面如降水落区位置、量级以及起止时间在后续预报中存在很大的不确定性,其可预报性却很低,表现在单一模式前后不同时效的细节预报无论在空间位置上还是在强度上都存在很大的跳跃性或不连续性,这使单一模式预报的应用价值大打折扣,因为预报员不知如何适从。然而,他们发现基于集合预报特别是多模式集合的预报,如集合平均和概率预报则可提供更可靠或更连贯的细节预报从而大大地提高预报的应用价值;不但如此,集合预报还可较单一模式预报延长实际可预报性的时效,如在北京“7·21”事件中北京地区量级超过100mm大暴雨的实际可预报性时效提前了2天。

任一天气要素的“标准化异常度”或SA (Standardized Anomaly)可定义如下:

$$SA(x,t) = \frac{FCST(x,t) - MEAN_clim(x,t)}{SD_clim(x,t)} \quad (1)$$

即SA(x,t)就是度量预报值FCST(x,t)超过或低于实际大气的气候平均值MEAN_clim(x,t)达几个气候标准差SD_clim(x,t),标准化异常度SA是地点x和时间t的函数。注意,如果预报有很强的系统性偏差,SA就有可能高估或低估异常度的倾向。所以,在计算SA前,最好对原始的预报资料先进行偏差订正。关于“集合异常预报法”的详细讨论请参阅文献[74],该文献同时还简单地介绍了一种类似的,被ECMWF采用的“极端预报指数”(Extreme Forecast Index, EFI)方法。

3.2 再预报相似集合预报法

Hamill等^[75-76]利用“再预报”(reforecasting)的资料从中找相似,再基于集合预报的思想和表达方法来作暴雨预报。此法的具体步骤和原理如下,首先是

再预报,用最新的业务数值模式(以保证再预报和业务所用的模式一致)利用再分析资料作为初值回算过去一段时期(如过去30年)的每日模式预报以建立一个“过去预报的资料库”(这一步需要大量的计算机资源),这种回算至少是一个成员(即集合控制预报),一般再加几个集合扰动成员一起回算,这既可增加样本数也考虑了初值或物理的不确定性;二是找相似,针对“当前的模式预报”如暴雨事件对每一模式格点在过去再预报资料库中的前后5天(30年 \times 11天 \times N 集合成员数=330 N 样本数, N 最少等于1;在下面的“大气河流”试验中 $N=11$)逐点找相似(如降水量级相似);第三,在所有挑选出的相似预报中,用“对应的实况”来代替预报作为新的预报值,组成新的由实况组成的集合预报(其集合成员数随相似度的要求而异);最后,用所有相似预报对应的实况所组成的新集合成员来计算每一格点上降水超过某一阈值,如50mm的概率以及集合平均等预报产品。从上可见,实施此法需有三套资料:当前单一或集合的模式预报、过去单一或集合的再预报资料,以及过去观测资料。再预报相似集合法的长处有以下两点:一是通过用实况代替模式预报自动订正了模式的误差如模式的系统性偏差,所以对模式要求较低,即使模式不完全有预报能力,也有可能得到有用的预报信息,如此法对中期预报效果尤其明显(见下面“大气河流”试验的例子)就是因为模式对中期预报的可预报性较低;二是考虑了预报的不确定性或可预报性(用概率来表达)。此法的不足是在找相似的过程中没有直接考虑时空结构的相似,但这一点在实际应用中似乎并没有构成问题,可能是因为:(1)在时间上做了前后5天的限定,所以对应的天气系统不至于太离谱(如冷锋降水对应台风降水);(2)在具体个例预报中,模式预报和实况在空间上都自动具有有物理意义的自相关空间结构,如某一种天气系统并不是随机的。另外,相似度的选取有一定的任意性。

全球中期集合预报系统的再预报资料库已在美国国家环境预报中心的业务预报中投入使用^[77],但因受计算机资源的限制(另外,一般也认为再预报资料对短期预报的效果可能没有像对中期预报的效果那么明显和必需),还没有在区域短期集合预报模式上开展。由NCEP“天气预报中心”(Weather Prediction Center, WPC)主持,在2012年开展的“大气河流”

(Atmospheric River)试验中对“再预报相似集合预报法”和“多模式集合法”进行了对比试验,试验证明再预报相似集合预报法对于中期暴雨预报(3~6天, $>75\text{mm}/24\text{h}$)效果较佳,明显优于基于多模式的中期TIGGE^①集合预报(由美国国家环境预报中心20个成员GEFS、加拿大气象中心20个成员CMCE和欧洲中期气象预报中心51个成员ECENS,三个全球模式集合系统合成):在8次同大气河流现象相关、发生在美国西海岸的大暴雨事件中(其中故意选了一次没有达到 $>75\text{mm}/24\text{h}$ 标准的“虚假”事件),结果发现对于提前3.5天的预报再预报法有7次优于多模式法,只有在那一次“虚假”事件中因空报(实际上是雨量报得不够大)而变差;对于提前5.5天的预报,再预报法在6次事件中比多模式法有明显改进,1次平手(“虚假”事件),仅1次略差。图3(3.5天预报)和图4(5.5天预报)给出其中2011年1月17日的例子:所有三家单独集合预报系统(GEFS、CMCE和ECENS)以及它们合成的多模式集合预报(ARENS)外加一个3.5天预报时效的7km区域集合预报系统(HMT-ENS)全部漏报了发生于华盛顿州和俄勒冈州西部的6块主要暴雨日雨量超过约75mm的雨量中心区(斜线阴影区),只有加拿大气象中心的集合预报CMCE在5.5天预报中对华盛顿州西北部的一个雨量中心略有反映,但却明显空报了位于俄勒冈州和加利福尼亚州相交处的一大片暴雨中心(图4b);而基于再预报相似的集合预报(Reforecast)在4天(比其他模式预报时效多半天)预报中对此6个暴雨中心都有反映(概率1%~15%,图3e),在6天预报中也对其中5个暴雨中心有反映(图4e),当然它也空报了位于俄州和加州相交处的暴雨中心。试验结果看到再预报相似集合预报法的一个缺陷可能是会出现空报现象,但对于可预报性很低的事件如中期暴雨预报,空报现象在科学上是可以理解和应该预见的;在实践中,对重大灾害性天气漏报造成的危害可能远远大于空报。再预报相似集合法在这个试验中明显优于多模式集合法的原因可能是目前的数值预报模式对于中期暴雨预报水平还不高^[78],待以后模式进一步改进,基于集合预报系统的中期暴雨预报水平也会相应提高。但是即使到那个时候,3.1节讨论的预报不确定性问题仍将永远存在,集合预报也因此将永远是预报暴雨的必需途径来处理这预报不确定性的科学事实。

① TIGGE (the THORPEX Interactive Grand Global Ensemble): THORPEX (The Observing System Research and Predictability Experiment) 是世界气象组织(WMO)世界天气研究计划(WWRP)中的一个研究项目: http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/thorpep_new.html

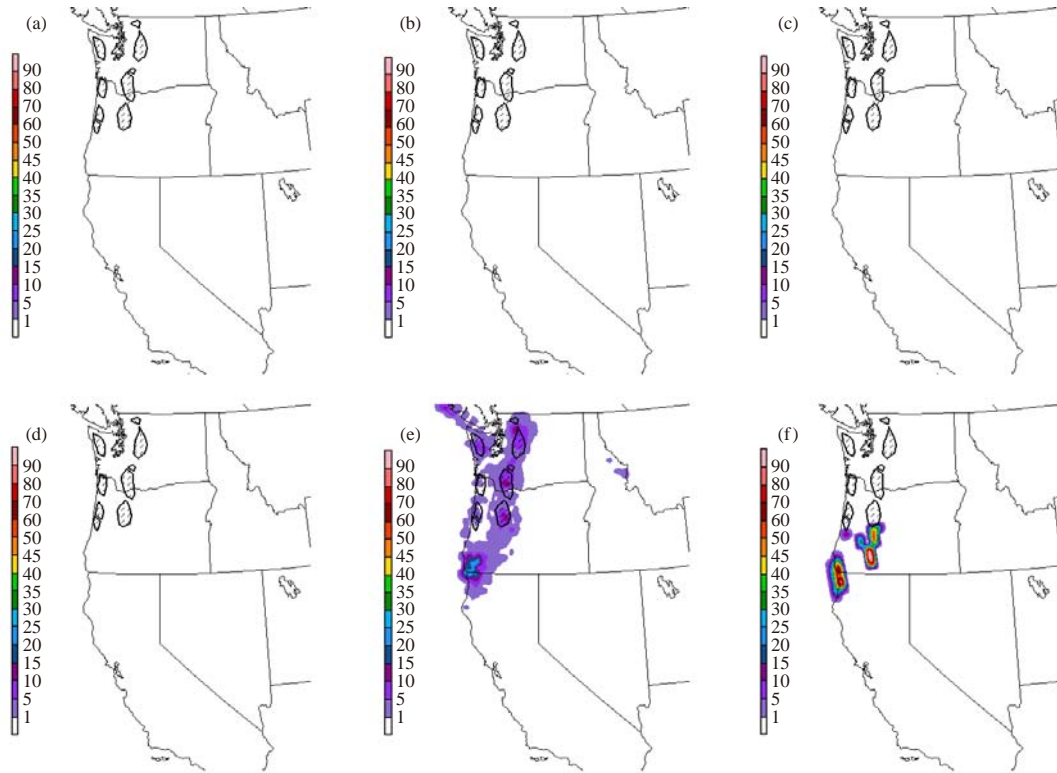


图3 “再预报相似集合预报法”和“多模式集合法”的对比试验（个例：2011年1月16日00z-17日00z美国西海岸大暴雨），实况（斜线阴影区）：6块主要暴雨雨量超过75mm/24h的雨量中心区位于华盛顿州和俄勒冈州西部；提前3.5天的“雨量超过75mm/24h”概率预报（颜色）：美国国家环境预报中心GEFS（a）、加拿大气象中心CMCE（b）、欧洲中期天气预报中心ECENS（c）、多模式GEFS/CMCE/ECENS合成集合预报ARENS（d）、再预报相似集合预报法Reforecast（提前4天，e）、7km区域集合预报系统HMT-ENS（f）

丑纪范等^[79-82]也提出过类似的思想，认为未来的天气事件总可在历史时期找到相似的信息，因此可以利用过去的相似信息作为预测将来之用以弥补数值预报中模式初值信息之不足。当然，再预报相似集合预报法不仅考虑了初值的不足，同时也考虑了物理的不足以及其他各种限制可预报性的因素并且进一步把这些预报不确定性在最后预报产品中定量地表达出来。

3.3 台风路径聚类法

通过对集合预报成员台风路径进行聚类分析来提高台风暴雨的预报服务水平是台湾“中央气象局”应用集合预报的一种方法^①。由于台湾岛中央山脉的存在，地形抬升机制对降水的增幅作用明显，因此台风路径的少许差异使气流与山脉的夹角不一样所造成的暴雨降水量相差巨大。所以，他们对集合成员（也包括所有能获得的单一确定预报）以不同的路径，特别是准备对外发布的最佳路径来进行聚类，然后再根据路径（位置）类似的成员（不管该预报的原来预报

时效）分类制作不同的暴雨预报以备在不同台风路径（位置）情形下使用。针对受地形强烈影响的台湾地区台风暴雨情形，Fang等^[83]进一步提出了用双分辨率的集合预报系统来预报台风暴雨，此法的基本前提是：低分辨率模式的集合预报成员一般都大大地低估暴雨降水量，而因计算机资料的限制用高分辨率模式做集合预报又不能有很多集合成员，但要可靠地用集合预报系统来估计台风的路径和降水的空间分布却需要有足够多的集合成员，因此他们设计了双分辨率的集合预报系统：36km低分辨率的集合预报有32个成员，而4km高分辨率的集合预报仅仅有8个成员。这样用低分辨率的众多集合成员来估计最有可能的台风路径（集合平均）以及用同集合平均路径（位置）相近的成员来估计暴雨分布的空间结构，再用高分辨率集合成员来调整暴雨雨量预报（具体如何调整，请参阅第4节）。类似这些方法，在其他地区特别是山地暴雨的研究和预报应该都适用。

① 洪景山，个人交流

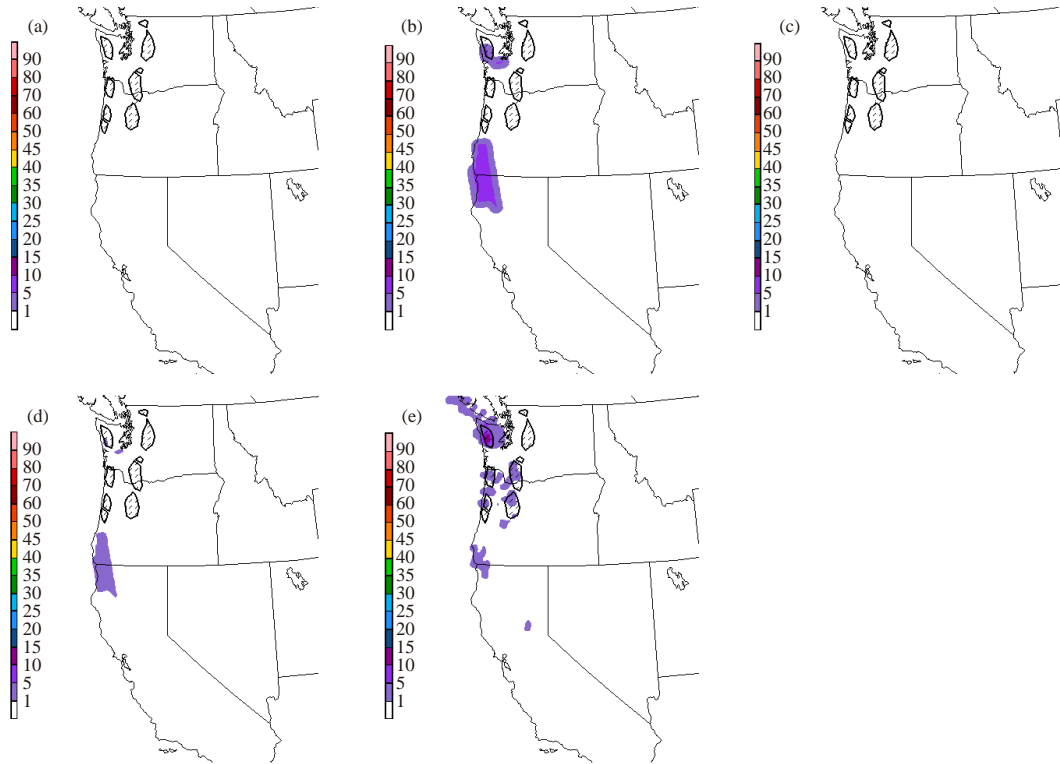


图4 同图3，但是提前5.5天的预报并且没有7km的区域集合预报HMT-ENS

4 用集合预报做暴雨预报的订正

利用集合预报信息，还可以用来订正单一值预报。一般而言，由于集合平均过程的非线性过滤作用把成员中可预报性较低的成分过滤掉而留下各成员共有的信息，因此集合平均预报往往比单个预报更准确（这儿也有平滑造成的虚假贡献。对同一预报而言，一个比较平滑的场比一个具有许多细小结构的场评分要好，因为细小结构很容易报错而在定量评比中不利）。但这一结论往往不完全适用于降水预报，正如Du等^[15]的早期研究中指出虽然平均后降水位置可能变得比较准确，但集合平均往往使小降水区扩张过大而大降水区缩减过小，这一问题当集合离散度愈大时（如预报时效愈长和多模式集合）就愈严重。因此简单的集合平均并不适合做降水预报尤其是对很强或很弱两端的降水（最合适的表达应该用概率）。用集合中值预报来代替集合平均预报可以稍微缓解这一问题但不能彻底解决这一缺陷。Du等^[16]提出了一种预估成员相对优劣的方法（称之为“杜一周排序法”）来选取最佳成员或进行加权平均等，方法的原理是：如果模式没有系统性的偏差，集合成员预报应该围绕在真值的周围，有些上有些下、有些左有些右，那么

从理论上来说所有集合成员的平均应该是最靠近真值的，所以愈靠近集合平均的成员就应该愈准确。根据这一原理就可用成员与集合平均之间的相对距离来事先对一个集合预报预估其成员的相对优劣（包括最佳和最差成员）并计算出各成员的相对权重系数（用于计算加权集合平均和调整概率密度函数分布）。如果选择最佳的成员作为单一值预报，这不仅可能使预报准确性得以提高，还可使预报保留细小的空间结构而避免了集合平均带来的光滑；坏处是浪费了其他成员提供的有用信息^①。杜一周排序法不同于其他方法的根本之处是它不需要知道每个成员过去（统计）的表现，而只依赖各成员的现时预报本身，是一种随时、随地域和随气流而变的准动力学办法（但对成员排序的计算方法是静态的）。注意：因为排序过程是相对每一预报时效单独进行的，与前后预报时效没有联系，所以即使同一序号的“成员”（如最佳成员）在前后不同预报时效（尤其是当预报时效较长时）很可能对应不同的集合成员，即在时间上没有连续性，时间上不连续性问题在实际应用中（如用来驱动一个扩散模式或图像放映显示）可能会带来不便。为了保持时间上的连续性，可以尝试一种更具内在联系和动力

① 为了尽量不浪费其他成员的有用信息而又可采用最佳成员，一个折中的办法是先对集合成员进行聚类，然后在每一分类的子集合中选出最佳的成员作为其代表预报

意义的方法，就是在模式积分过程中在保持合理的离散度前提下不断让成员向集合平均位置靠拢（nudging members toward ensemble mean），当然具体怎么做需要实际试验；另外，对排序结果进行一些简单合理的调整也能解决这一时间不连续性问题（在集合成员聚类法中就用这种办法使某一类的相似预报解保持时间上的连续性）。Du等^[16]应用了大气的一些基本状态变量（风、温、压、湿）而并没有对降水进行研究。上面的讨论看到降水的平均预报并不理想，因此把杜一周排序法直接应用到降水预报场或间接地应用到同降水密切相关的其他变量上而不是降水场本身，是否更有效需进一步的研究。他们还利用排序法得到的每个成员不同权重对加权集合平均同简单（等权重）集合平均进行比较，发现：（1）当集合成员数愈少（多），加权平均效果愈显著（不显著）；（2）当一个集合中成员间的表现相差较大（小）时，加权平均效果愈好（差）；（3）一般来说，加权平均较简单平均的改进程度可能有限（ $<10\%$ ），特别当集合成员数足够大时，加权平均可能同简单平均相差无几，因此不能期望过高，而要明显提高集合平均水平，必须要有独立的新信息，如加入一个不同的模式。利用集合成员不同的权重也可调整预报概率分布，这可在以后的研究中试验。

为了彻底解决“集合平均使小降水区过大而大降水区过小”这一缺点，Ebert^[70, 84]提出了“概率或频率匹配法”来订正集合平均降水预报，原理是保证集合平均预报在不同量级降水出现的频率保持同平均前的

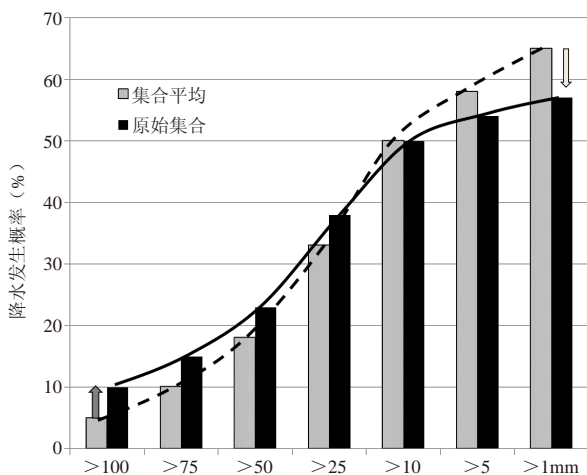


图5 “概率或频率匹配集合平均法”示意图：用原始集合成员的频率分布（实线）来订正简单集合平均降水预报的频率分布（虚线）：下调小降水的频率、上调强降水的频率

原始集合预报出现的频率一致，即使小降水出现频数不增多，大降水出现的频数不减少（图5）。最后的预报由两部分合成：降水的空间分布来自较准确的集合平均，而降水量出现的频率则来自较准确的原始集合各成员预报，具体步骤如图5所示。首先，根据所有格点的降水预报值，分别统计出集合平均预报和原始集合预报（包括所有集合成员）在各降水量级出现的频率分布；然后，比较两者的分布，利用多项式拟合技术求得不同雨量的订正系数（比率），并逐点应用到集合平均预报雨量上，把集合平均预报各降水量级的频率分布调整到原始集合预报的分布（实施的技术方案可参阅文献[85]^①）。结果表明，这一方法对于消除虚假的小降水区和增幅雨量被低估的大降水区，尤其是暴雨效果非常好^[84-85]。

概率匹配法能提高预报准确性是因为它综合了两种不同预报的优势：即集合平均预报在降水位置上较准确，而原始集合成员在降水量级或各量级降水出现的频率分布比较准确，因此把两者结合起来就得到一个较好的预报；反之，如果没有了这两种优势，那么综合后的预报就不会理想。譬如，受到地形强烈影响的台湾地区台风暴雨就出现这种情形：一方面，因为台风路径的集合离散度在登陆前后往往很大，而受台湾中央山脉的影响使不同台风路径所产生的暴雨雨量相差悬殊，因此简单地包括所有集合成员所产生的平均预报降水位置并不佳；另一方面，原始集合成员的降水量级也或因模式分辨率不够而偏小或因强烈的地形作用而系统地偏大，因此原始集合预报提供的雨量出现频率分布也不理想。这时，简单地应用概率匹配法所产生的集合平均预报效果并不好。针对这种特殊情况，Fang等^[83]通过运行一对双分辨率的集合预报系统（“低分辨率大集合预报”和“高分辨率小集合预报”，见3.3节），在应用概率匹配集合平均法之前先对降水分布位置和降水量进行调整和订正并取得较好效果。具体步骤如下：（1）从低精度原始大集合预报中导出每隔3h的集合平均台风位置，即路径（因为成员多，认为较准确；试验表明台风路径预报对模式分辨率并不是很敏感）；（2）对每一固定的平均台风位置，从低精度原始大集合预报中选出所有同这平均台风位置相近的成员（不管原预报时效）重新组成一个新集合（称为低精度新集合），并用这低精度新集合产生相对该台风位置的简单集合平均降水预报（因为成员多，认为其降水的空间分布较合

① 顺便指出，如果把一个降水预报的降水量出现频率同观测降水频率相比较，则此法就可应用到降水预报的偏差订正中。李俊等^[85]的试验表明此法对预报降水量和降水区面积偏差订正都有很好的效果，但却没有能力来订正预报降水的位置误差

理)；(3)类似地，对应每一低精度新集合成员的台风位置，从高精度原始小集合中挑选出所有同它们位置相近的所有预报(不管原预报时效)也重新组成一个新集合(称为高精度新集合)，并从这高精度新集合导出相对某一平均台风位置的简单集合平均降水(鉴于成员较少，其降水空间分布位置需做调整)；

(4)根据低精度新集合的平均降水，调整高精度新集合平均降水的空间位置分布来期望得到较好的降水位置预报；(5)对高精度新集合每一成员的降水量进行偏差订正得到较好的降水量级发生频率的估计(认为降水量级总体来说是合理的，但部分受地形影响而常被高估的降水需要偏差订正)；(6)对降水空间分布被调整过的高精度新集合平均降水与每一个进行过偏差订正的高精度新集合成员应用概率匹配法产生一个新的合成集合(称为高精度新合成集合)；

(7)最后，从这高精度新合成集合可以产生降水的简单集合平均或概率匹配集合平均以及概率预报等，他们发现经过这样处理的新合成集合，其概率匹配平均降水和简单平均降水的预报技巧差不多(说明前期这些位置调整和降水量偏差订正是有效的)，并且都明显优于原来单纯的低精度新集合和单纯的高精度新集合预报。

“集合动力因子”法是高守亭^[86]提出的利用集合概念来诊断和定性描述暴雨落区的一种方法。暴雨是热力和动力过程相互作用的产物，许多描述热力和动力场的物理因子，如广义湿位温、水汽通量散度、对流涡度矢量垂直分量及质量垂直螺旋度等都应该在暴雨区有明显反映。但考虑到在不同类型暴雨过程中，这些物理因子的反映可能有差异，所以仅仅用某一物理因子来描述暴雨落区并不可靠；而利用多个因子(集合)共同给出的综合结果则会比较稳定可靠。这种方法对于诊断和定性描述暴雨落区，如台风暴雨和四川低涡暴雨确实有很好的对应关系^[87-88]。科学的价值在于预测未来，下面从预报的角度来分析一下此法的优缺点和可能的潜力。首先，此法并不是一种独立的预报方法而是数值模式的直接输出结果(如同常见的对流有效位能、气块抬升指数、涡度、散度等诊断量一样)，所以其结果好坏依赖于模式的质量；第二，此法只能定性地指出暴雨可能范围或强降水落区等，而不能定量地预报雨量；第三，为了更好地区别应用这些因子，需要仔细分析哪些物理因子是果(暴雨本身的反映)，哪些物理因子是因(造成暴

雨)以及它们超前反映(提前暴雨)的时间长短，如它只是暴雨本身的反映，那么它可用来描述暴雨过程，但其预报的功能就有限，而那些造成暴雨的物理因子其预报的价值可能会更大，所以需要描述这些物理因子的清单；第四，鉴于目前的数值预报模式已能直接预报暴雨，并且不管在落区还是雨量上已有相当的能力，所以在暴雨落区预报上来定量地比较集合动力因子法是否优于当前业务模式的直接预报是一项首先应该做的调查^[89]；最后，如果并不明显优于数值暴雨预报，此法是否可以用作订正模式预报之用？譬如目前高分辨率的显式云物理模式常常有许多虚假的小区域风暴降水或漏报一些局地性的强降水，那么此法能否预先指出模式空报、漏报之处或用来帮助校准暴雨中心的位置等，此法用于订正模式暴雨预报是一项有实际意义的，应该做进一步研究的工作。顺便指出，集合动力因子法只是利用了集合的概念而并不是第2节中所讨论的真正意义上的集合预报。

5 应用集合预报研究天气系统发展机理和指导目标观测

集合预报成员的离散度不但可以定量描述预报的不确定度以增加预报信息来提高气象服务质量，而且还可分析天气系统为何发展与不发展的热力和动力原因，进一步利用集合敏感性^[90-91]等工具还可帮助预报员了解为什么某一天气系统不好预报的上游原因，并可指导下一步的目标观测^[92-93]，以改进下一时刻数值模式的初值质量来提高对该天气系统后续预报的可预报性^[14]。另一个应用集合预报离散度信息来改进模式初值的途径是通过集合预报系统与资料同化系统的直接耦合，这已在第2.3节讨论过，在此不再重复。

作者^[17]利用中国气象局武汉暴雨研究所的区域集合预报系统^[21, 26, 94]，对常造成长江、黄河中下游地区大暴雨的主要天气系统西南涡进行了集合分析，通过分析“东移”和“滞留”两组集合成员的模式初值扰动结构，看到东移和不东移的西南涡在热力场和动力场结构上的系统性差异，这些有利于西南涡东移的特征结构和以前他人通过观测分析、数值试验等其他手段所揭示的特征是一致的。这说明集合预报资料确实可以被用来正确地了解一个天气系统发展与否的机理。这种直接利用集合预报成员的不同表现来研究天气系统的机理给我们开拓了一个崭新的研究方法(可称之为“即时研究”，real-time research)，因为它不同于传统的“观测研究”(需要有包含众多相似个例^①的特殊观测资料)

① 但这些个例间只是大致相似而已，它们所处的大尺度环流背景其实还是有很大差别，但这对集合各成员来说却并不是问题(即具有完全一致的大尺度环流背景)

和“数值模拟研究”（需要专门设计和进行初值或物理的敏感性试验等），它不需要事先专门的试验设计而只要利用每天可获得的现成的业务集合数值预报资料就可即时对你感兴趣的个例分析为什么有些成员报得“好”，而另外一些成员报得“不好”的可能因素，这对广大业务预报人员来说是一种唾手可得的办法。更具深远意义的是，我们的研究表明借用仅仅基于相关系数的简单“集合敏感性”工具^[90]（而不一定需要复杂的手段，如奇异矢量法）就可以根据集合预报的离散度帮助“目标观测”在上游地区找到有效的“预报误差敏感区”，并通过略微“改进”敏感区内的风场或水汽场的初值就可大大地改进西南涡的短期数值预报。鉴于此，建议应该以针对改进西南涡预报为目的，开展用中尺度区域集合预报结合集合敏感性方法来指导的实际“目标观测”野外试验，来验证实际目标观测对西南涡短期数值预报改进的效果是否同该研究模拟的一样。如是，无疑将对改进东移西南涡造成的暴雨预报有巨大的实际意义并可在实际业务中应用。

在中期数值预报上，为了提高中高纬气旋风暴的可预报性，集合预报用来指导目标观测中应在上游何处进行加密气象观测已是美国气象局业务数值预报的一部分^[95-96]。这种中期预报（如美国东海岸冬季的爆发性气旋）的预报误差敏感区常常同上游（如日本上空）急流区的Rossby波包有关^[97-98]（即下游效应^[99]）。陶诗言等^[100]也发现欧亚上空急流区的Rossby波同中国的高影响天气如华北深槽暴雨或北上台风暴雨等有密切的关系。这种关系在目前的全球中期数值模式预报中已大致可提前1周甚至更长时间被预报出来，但难处是其下游产生的气旋强度和位置却有非常大的不确定性（其实在1~3天的短期预报也是如此）。所以事先有目的地通过目标观测手段对上游敏感区进行加密观测来尽量减少模式初值中对Rossby波包的描述误差从而提高后续中高纬气旋风暴强度和位置预报的准确性是一种主动有效的科学手段。在此新领域，集合预报方法有着其他决定论方法无可比拟的优势。类似地，Zheng等^[91]利用全球集合预报资料，通过计算集合敏感性试图提供一个让预报员来了解气旋位置和强度预报不确定性来源的工具。

6 总结和讨论

本文根据作者自己多年的研究和实践经验以及直接接触的一些研究和办法，简要地总结了数值集合预报方法在暴雨研究和预报中的应用，这包括以下几个方

面：暴雨集合预报系统、预报方法、预报后处理与订正，以及暴雨天气系统的机理分析与模式初值的改进。

(1) 在集合预报系统发展方面，建立高分辨率（1~3km）具有显式云物理的风暴尺度集合预报系统势在必行。从目前结果看，采用基于集合卡尔曼滤波（EnKF）（或集合—变分混合）技术与资料同化系统耦合所产生的初值集合来驱动集合预报效果似乎较佳；但在风暴尺度下现有的初值扰动方法是否适用以及如何改进或创新是一个需要研究的课题，目前的初值扰动主要是针对斜压不稳定的天气尺度系统，如何有效地扰动对流不稳定的中小尺度系统尚需探讨；目前的扰动方法对于短时（<24h）的预报效果似乎也不理想，如其导出的集合预报往往比对应的高精度单一预报差；扰动土壤湿度初值对于改进夏季午后雷阵雨以及近地面气温预报有较好的效果。在模式物理扰动方面，多模式和多物理扰动方法被证实是行之有效的方法，但随机物理过程扰动目前还不成熟，所产生的集合离散度太小（也许SKEB法是个例外），因此需要进一步深入研发新的、较全面有效的随机物理扰动方法，在显式云物理模式中如何引入随机物理过程，是否需要云物理的集合方案或直接扰动云中各种含水量和随机相态过程等，以及认识物理扰动如何同初值扰动相互作用等，这些都需进一步研究。另外，模式地形与实际地形有很大的不同，在暴雨集合预报中应该考虑地形的扰动来模拟由此导致的暴雨误差分布特征。直接用低分辨率的全球集合预报来驱动显式云物理模式的风暴尺度集合预报是否可行还需进一步探讨，特别是对中小尺度对流降水的效果。在有限的计算机资源下，对于一般短期天气预报，在保证一定成员数的情况下（如10个成员），尽量增加模式空间分辨率和应用较完善的物理方案应是提高预报水平的一种较优选择；但对于较长时效的预报如中期和季节的数值预报（可预报性很低），采用较多的集合成员数则可能会比增加模式空间分辨率更重要。在计算机资源不允许的情况下，许多“虚拟”的集合预报也可用来有效地定量估计预报的不确定性，文中介绍了时间滞后法、“穷人”集合法、双分辨率混合集合预报法和相邻格点法。

(2) 在集合预报方法方面，高影响天气和异常事件的预报是重点。集合异常预报法可明显地提高暴雨特别是异常少见的特大暴雨预报的可靠性；再预报相似集合预报法是动力和统计方法巧妙相结合，在目前模式预报水平还不够好的情况下是对中期暴雨预报水平提高有特殊效果的一种方法；台风路径聚类法

可有效地提高受地形强烈影响的台风暴雨的预报准确性，类似的方法也可用于山地暴雨的预报。

(3) 在预报后处理订正方面，对于降水预报要用概率匹配平均来替代简单的集合平均以减少暴雨雨区和雨量的低估，在特殊情形下（如受地形强烈影响的台风暴雨）在应用概率匹配平均法前要对原始集合降水预报进行一些处理；另外，对平均预报和各成员预报还应该进行模式偏差订正。文中还介绍了一种预估集合成员相对优劣的“杜一周排序法”来选取最佳成员或进行加权平均等。“集合动力因子”法用于订正模式暴雨预报可能会有实际意义，应该做进一步研究。除了订正平均值如偏差（反映模式的水平），更要订正集合离散度的分布（反映集合技术的水平），使集合离散度能正确地反映预报的误差（“离散度-预报技巧”关系）和概率预报能可靠地反映预报的真实可信度^[14]，因为可靠的概率预报是用户决策是否正确的关键^[12]。

(4) 在研究方法方面，本文介绍了一种直接利用集合预报成员的不同表现来研究天气系统机理的“即时研究”新方法，它对广大业务预报人员来说是一种易得的手段。因此，这对加强业务与科研的互动，加速提高预报水平会有促进作用。

(5) 在数值预报总体系统方面，集合预报应该用来指导进行目标观测，通过改进模式初值来提高某些选定的重大天气系统或事件预报的可预报性；为了科学地反映观测和预报的不确定性，集合预报系统还需要与资料同化系统耦合为一个有机的整体。这是数值预报系统（观测—同化—预报—服务）从“单一值、单向”的决定论系统向“多值、交互式”的概率论系统转化所迈出的坚实一步^[7]。

通过总结，希望本文能起到如下两个作用：气象业务部门能在日常业务中应用本文介绍的众多行之有效的办法来提高气象预报和服务水平；为今后的研究工作提供一个新的起点、方向和方法，这包括指导现有的一些业务集合预报系统^[94, 101]今后的进一步完善。虽然讨论了许多方面，但最终目的只有一个，就是向用户提供尽可能详细和全面的气象预报使不同的用户可以充分运用全面的（不是目前这种确定性单一值的、用户无法选择的、不全面的）气象预报信息来选择性地做出最适合自身经济或社会风险承受能力的最佳决策。本文希望能对天气预报从“确定性单一值的不完全预报”向“多选择的包含了不确定性的完全预报”理念转变^[10]起到促进作用。

致谢：感谢Thomas Workoff先生帮助绘制图3和图4。

参考文献

- [1] 章国材. 防御和减轻气象灾害. 气象, 2006, 32(3): 3-5.
- [2] 陶诗言, 等. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980.
- [3] 陈云峰, 高歌. 近20年我国气象灾害损失的初步分析. 气象, 2010, 36(2): 76-80.
- [4] 张大林. 各种非绝热物理过程在中尺度模式中的作用. 大气科学, 1998, 22(4): 548-561.
- [5] Lorenz E N. 混沌的本质. 刘式达, 刘式适, 严中伟译. 北京: 气象出版社, 1997.
- [6] 丑纪范. 大气科学中的非线性与复杂性. 北京: 气象出版社, 2002.
- [7] 杜钧, 陈静. 单一值预报向概率预报转变的基础: 谈谈集合预报及其带来的变革. 气象, 2010, 36(11): 1-11.
- [8] 王东海, 杜钧, 柳崇健. 正确认识和对待天气预报的不确定性. 气象, 2011, 37(4): 385-392.
- [9] 杜钧, 陈静. 天气预报的公众评价与发布形式的变革. 气象, 2010, 36(1): 1-6.
- [10] 杜钧, 康志明. 天气预报中不确定性问题的调查分析. 气象科技进展, 2014, 4(1): 58-67.
- [11] US National Research Council. Completing the Forecast: Characterizing and Communicating Uncertainty for Better Decision Using Weather and Climate Forecasts. Washington D C: The National Academy Press, 2006.
- [12] 杜钧, 邓国. 单一值预报向概率预报转变的价值: 谈谈概率预报的检验和应用. 气象, 2010, 36(12): 10-18.
- [13] 杜钧. 集合预报的现状和前景. 应用气象学报, 2002, 13(1): 16-28.
- [14] Du J, Yu R C, Cui C G, et al. Using a mesoscale ensemble to predict forecast error and perform targeted observation. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 33(1): 83-91.
- [15] Du J, Mullen S L, Sanders F. Short-range ensemble forecasting of quantitative precipitation. Mon Wea Rev, 1997, 125: 2427-2459.
- [16] Du J, Zhou B B. A dynamical performance-ranking method for predicting individual ensemble member's performance and its application to ensemble averaging. Mon Wea Rev, 2011, 129(10): 3284-3303.
- [17] Li J, Du J, Zhang D L, et al. Ensemble-based analysis and sensitivity of mesoscale forecasts of a vortex over southwest China. QJ R Meteorol Soc, 2014, 140: 766-782.
- [18] Zhang F, Weng Y, Kuo Y H, et al. Predicting typhoon Morakot's catastrophic rainfall with a convection-permitting mesoscale ensemble system. Weather and Forecasting, 2010, 25: 1816-1825.
- [19] Stensrud D J, Brooks H E, Du J, et al. Using ensembles for short-range forecasting. Mon Wea Rev, 1999, 127: 433-446.
- [20] Yuan H, Mullen S L, Gao X, et al. Verification of probabilistic quantitative precipitation forecasts over the southwest United States during winter 2002/03 by the RSM ensemble system. Mon Wea Rev, 2005, 133: 279-294.
- [21] 李俊, 杜钧, 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.
- [22] 陈静, 薛纪善, 颜宏. 一种新型的中尺度暴雨集合预报初值扰动方法研究. 大气科学, 2005, 29(5): 717-726.
- [23] Toth Z, Kalnay E. Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations. Bul Amer Meteor Soc, 1993, 74: 2317-2330.
- [24] Toth Z, Kalnay E. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method. Mon Wea Rev, 1997, 125: 3297-3319.
- [25] Johnson A, Wang X G, Xue M, et al. Multiscale characteristics and evolution of perturbations for warm season convection-allowing precipitation forecast: Dependence on background flow and method of perturbation. Mon Wea Rev, 2014, 142(3): 1053-1073.
- [26] 李俊, 杜钧, 王明欢, 等. AREM模式两种初值扰动方案的集合降水预报试验及检验. 热带气象学报, 2010, 26(6): 217-228.
- [27] Du J, Gayno G, Mitchell K E, et al. Sensitivity study of T2m and precipitation forecasts to soil moisture initial condition using NCEP WRF ensemble system. 22nd Conf on Weather Analysis and Forecasting/18th Conf on Numerical Weather Prediction, 2007, Park City, UT. American Meteor Soc.
- [28] Aligo E A, Gallus Jr W A, Segal M. Summer rainfall forecast spread in an ensemble initialized with different soil moisture

- analyses. *Weather and Forecasting*, 2007, 22: 2, 299-314.
- [29] Sutton C, Hamill T M, Warner T T. Will perturbing soil moisture improve warm-season ensemble forecasts? A proof of concept. *Mon Wea Rev*, 2006, 134: 3174-3189.
- [30] Clark A J, Kain J S, Stensrud D J, et al. Probabilistic precipitation forecast skill as a function of ensemble size and spatial scale in a convection-allowing ensemble. *Mon Wea Rev*, 2011, 139: 1410-1418.
- [31] Richardson D S. Measures of skill and value of ensemble prediction systems, their interrelationship and the effect of ensemble size. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2001, 127: 2473-2489.
- [32] Clark A J, Gallus Jr W A, Xue M, et al. A comparison of precipitation forecast skill between small convection-permitting and large convection-parameterizing ensembles. *Wea and Forecasting*, 2009, 24: 1121-1140.
- [33] Clark A J, Gallus Jr W A, Xue M, et al. Convection-allowing and convection-parameterizing ensemble forecasts of a mesoscale convective vortex and associated severe weather. *Wea Forecasting*, 2010, 25: 1052-1081.
- [34] Ma J H, Zhu Y J, Wobus R, et al. An effective configuration of ensemble size and horizontal resolution for the NCEP GEFS. *Adv Atmos Sci*, 2012, 29(4): 782-794.
- [35] Aligo E A, Gallus Jr W A, Segal M. On the impact of WRF model vertical grid resolution on Midwest summer rainfall forecasts. *Weather and Forecasting*, 2009, 24: 2, 575-594.
- [36] Brooks H E, Tracton M S, Stensrud D J, et al. Short-range ensemble forecasting: Report from a workshop, 25-27 July 1994. *Bull Amer Meteorol Soc*, 1995, 74: 2317-2330.
- [37] Mullen S L, Du J, Sanders F. The Dependence of ensemble dispersion on analysis-forecast systems: Implications to short-range ensemble forecasting of precipitation. *Mon Wea Rev*, 1999, 127: 1674-1686.
- [38] Du J, Tracton M S. Implementation of a real-time short-range ensemble forecasting system at NCEP: An update. 9th Conference on Mesoscale Processes, 2001, Ft Lauderdale, Florida. *Amer Meteor Soc*, 355-356. <http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/SREF/reference.html>
- [39] Du J, DiMego G, Tracton M S, et al. NCEP short-range ensemble forecasting (SREF) system: multi-IC, multi-model and multi-physics approach. Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling (edited by J. Cote), Report 33, CAS/JSC Working Group Numerical Experimentation (WGNE), WMO/TD, 2003, No. 1161, 5.09-5.10. <http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/SREF/reference.html>
- [40] Zhou B B, Du J. Fog prediction from a multimodel mesoscale ensemble prediction system. *Wea and Forecasting*, 2010, 25: 303-322.
- [41] 吴政谦, 徐海明, 王东海, 等. 中尺度多模式超级集合预报对2010年6月19-20日中国南方大暴雨过程的分析. *热带气象学报*, 2012(5): 653-663.
- [42] Duan Y H, Gong J D, Du J, et al. An overview of the Beijing 2008 Olympics Research and Development Project (B08RDP). *Bull Amer Meteor Soc*, 2012, 93: 381-403.
- [43] Du J, et al. The NOAA/NWS/NCEP Short Range Ensemble Forecast (SREF) system: Evaluation of an initial condition vs multiple model physics ensemble approach. 16th Conf on Numerical Weather Prediction/20th Conf on Weather Analysis and Forecasting, Seattle, WA. *Amer Meteor Soc*, 2004. <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/71107.pdf>
- [44] Kong F Y, et al. Preliminary analysis on the real-time storm-scale ensemble forecasts produced as a part of the NOAA Hazardous Weather Testbed 2007 Spring Experiment. 22nd Conf on Weather Analysis and Forecasting/18th Conf on Numerical Weather Prediction, Park City, UT. *Amer Meteor Soc*, 2007. <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/124667.pdf>
- [45] Gilmour I, Smith L A, Buizza R. Linear Regime Duration: Is 24 Hours a Long Time in Synoptic Weather Forecasting? *J Atmos Sci*, 2001, 58: 3525-3539.
- [46] Clark A J, Gallus Jr W A, Chen T C. Contributions of mixed physics versus perturbed initial/lateral boundary conditions to ensemble-based precipitation forecast skill. *Monthly Weather Review*, 2008, 136: 6, 2140-2156.
- [47] Stensrud D J, Bao J W, Warner T T. Using initial condition and model physics perturbations in short-range ensemble simulations of mesoscale convective systems. *Mon Wea Rev*, 2000, 128: 2077-2107.
- [48] Buizza R, Palmer T. Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF ensemble prediction system. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1999, 125: 2887-2908.
- [49] 谭燕, 陈德辉. 基于非静力模式物理扰动的中尺度集合预报试验. *应用气象学报*, 2007, 18(3): 396-406.
- [50] Teixeira J, Reynolds C. Stochastic nature of physical parameterizations in ensemble prediction: A stochastic convection approach. *Mon Wea Rev*, 2008, 136: 483-496.
- [51] Li X, Charron M, Spacek L, et al. A regional ensemble prediction system based on moist targeted singular vectors and stochastic parameter perturbations. *Mon Wea Rev*, 2008, 136: 443-462.
- [52] 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.
- [53] Charron M, Pellerin G, Spacek L, et al. Toward random sampling of model error in the Canadian ensemble prediction system. *Mon Wea Rev*, 2010, 138: 1877-1901.
- [54] Berner J, Ha S Y, Hacker J P, et al. Model uncertainty in a mesoscale ensemble prediction system: Stochastic versus multiphysics representations. *Mon Wea Rev*, 2011, 139: 1972-1995.
- [55] Bouttier F, Vié B, Nuissier O, et al. Impact of stochastic physics in a convection-permitting ensemble. *Mon Wea Rev*, 2012, 140: 11, 3706-3721.
- [56] 李俊, 杜钧, 刘羽. 北京“7.21”特大暴雨不同集合预报方案的对比试验. *气象学报*, 2014, 待发表.
- [57] Jankov I, Gallus Jr W A, Segal M, et al. The impact of different WRF model physical parameterizations and their interactions on warm season MCS rainfall. *Wea Forecasting*, 2005, 20: 1048-1060.
- [58] Jankov I, Schultz P J, Anderson C J, et al. The impact of different physical parameterizations and their interactions on cold season QPF in the American river basin. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, 8(5): 1141-1151.
- [59] Jankov I, Gallus Jr W A, Segal M, et al. Influence of initial conditions on the WRF-ARW model QPF response to physical parameterization changes. *Weather and Forecasting*, 2007, 22(3): 501-519.
- [60] Du J. Impact of model error and imperfect initial condition perturbations on ensemble-based probabilistic forecasts: Unpredictable spots. 17th Conference on Numerical Weather Prediction/21st Conference on Weather Analysis and Forecasting, Washington DC, Aug 1-5, 2005, *Amer Meteor Soc*, 2005. <http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/SREF/reference.html>
- [61] Leoncini G, Plant R S, Gray S L, et al. Ensemble forecasts of a flood-producing storm: Comparison of the influence of model-state perturbations and parameter modifications. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2013, 139 (670): 198-211.
- [62] Zhang D L, Lin Y, Zhao P, et al. The Beijing extreme rainfall of 21 July 2012: “Right results” but for wrong reasons. *Geophys Res Lett*, 2013, 40: 1426-1431.
- [63] Houtekamer P L, Mitchell H L. Data assimilation using an ensemble Kalman filter technique. *Mon Wea Rev*, 1998, 126: 796-811.
- [64] Houtekamer P L, Mitchell H L. A sequential ensemble Kalman filter for atmospheric data assimilation. *Mon Wea Rev*, 2001, 129: 123-137.
- [65] Anderson J L. An ensemble adjustment Kalman filter for data assimilation. *Mon Wea Rev*, 2001, 129: 2884-2903.
- [66] Evensen G. The ensemble Kalman filter: Theoretical formulation and practical implementation. *Ocean Dyn*, 2003, 53: 343-367.
- [67] Du J, Tracton M S. Impact of lateral boundary conditions on regional-model ensemble prediction. In: Ritchie H. Research

- Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. Report 28, CAS/JSC Working Group Numerical Experimentation (WGNE), WMO/TD-No. 942, 6.7-6.8, 1999.
- [68] Marsigli C A, Montani A, Paccagnella T. Provision of boundary conditions to convection-permitting ensemble: Comparison of two different approaches. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2014, 21: 393-403.
- [69] Hoffman R N, Kalney E. Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting. *Tellus A*, 1983, 35A(2): 100-118.
- [70] Ebert E E. Ability of a poor man's ensemble to predict the probability and distribution of precipitation. *Mon Wea Rev*, 2001, 129: 2461-2479.
- [71] Krishnamurti T N, Kishtawal C M, LaRow T, et al. Improved weather and seasonal climate forecasts from multimodel superensemble. *Science*, 1999, 285(5433): 1548-1550.
- [72] Du J. Hybrid ensemble prediction system: A new ensemble approach. Symposium on the 50th Anniversary of Operational Numerical Weather Prediction, University of Maryland, College Park, Maryland, June 14-17, 2004. Amer Meteor Soc, <http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/SREF/reference.html>
- [73] Schwartz C S, et al. Toward improved convection-allowing ensembles: Model physics sensitivities and optimizing probabilistic guidance with small ensemble membership. *Wea Forecasting*, 2010, 25: 263-280.
- [74] 杜钧, Grumm R H, 邓国. 预报异常极端高影响天气的“集合异常预报法”: 以北京2012.7.21特大暴雨为例. *大气科学*, 2014, 38(4): 685-699.
- [75] Hamill T M, Whitaker J S, Mullen S L. Reforecasts: An important dataset for improving weather predictions. *Bull Amer Meteor Soc*, 2006, 87: 33-46.
- [76] Hamill T M, Whitaker J S. Probabilistic quantitative precipitation forecasts based on reforecast analogs: Theory and application. *Mon Wea Rev*, 2006, 134: 3209-3229.
- [77] Hamill T M, Bates G T, Whitaker J S, et al. NOAA's second-generation global medium-range ensemble reforecast dataset. *Bull Amer Meteor Soc*, 2013, 94: 1553-1565.
- [78] Qian W H, Li J, Shan X L. Application of synoptic-scale anomalous winds predicted by medium-range weather forecast models on the regional heavy rainfall in China in 2010. *Science China: Earth Sciences*, 2013, doi: 10.1007/s11430-013-4586-5.
- [79] 丑纪范. 数值天气预报的创新之路——从初值问题到反问题. *气象学报*, 2007, 65(5): 673-682.
- [80] 任宏利, 丑纪范. 统计-动力相结合的相似误差订正法. *气象学报*, 2005, 63(6): 988-993.
- [81] 龚建东, 丑纪范. 论过去资料在数值天气预报中使用的理论和方法. *高原气象*, 1999, 18(3): 392-399.
- [82] 邱崇践, 丑纪范. 天气预报的相似-动力方法. *大气科学*, 1989, 13(1): 20-28.
- [83] Fang X Q, Kuo Y H. Improving ensemble-based quantitative precipitation forecast for topography-enhanced typhoon heavy rainfall over Taiwan with a modified probability-matching technique. *Mon Wea Rev*, 2013, 141: 3908-3932.
- [84] Ebert E E. Probability-matched ensemble mean. 2001. <http://www.cawcr.gov.au/staff/eee/etrap/probmatch.html>
- [85] 李俊, 杜钧, 陈超君. 降水偏差订正的频率(或面积)匹配方法介绍和分析. *气象*, 2014, 40(5): 580-588.
- [86] 高守亭. 大气中尺度运动的动力学基础及预报方法. 北京: 气象出版社, 2007.
- [87] 王成鑫, 高守亭, 梁莉, 等. 动力因子对地形影响下的四川暴雨落区的诊断分析. *大气科学*, 2013, 37(5): 1099-1110.
- [88] 许雯, 何金海, 高守亭, 等. 集合动力因子对登陆台风“莫拉克”(0908)暴雨落区的诊断与预报研究. *大气科学*, 2013, 37(1): 23-35.
- [89] 冉令坤, 齐彦斌, 郝寿昌. “7·21”暴雨过程动力因子分析和预报研究. *大气科学*, 2014, 38(1): 83-100.
- [90] Torn R D, Hakim G J. Ensemble-based sensitivity analysis. *Mon Wea Rev*, 2008, 136, 663-677.
- [91] Zheng M H, Chang E K M, Colle B A. Ensemble sensitivity tools for assessing extratropical cyclone intensity and track predictability. *Wea and Forecasting*, 2013, 28(5): 1133-1156.
- [92] Emanuel K, Langland R. FASTEX adaptive observations workshop. *Bull Amer Meteor Soc*, 1998, 79: 1915-1919.
- [93] Langland R H. Issues in targeted observing. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2005, 131: 3409-3425.
- [94] 李俊, 王明欢, 公颖, 等. AREM短期集合预报系统及其降水预报检验. *暴雨灾害*, 2010, 29(1): 30-37.
- [95] Toth Z, Szunyogh I, Majumdar S, et al. Targeted observations at NCEP: Toward an operational implementation. 4th Sym Integrated Obs Sys, Amer Meteor Soc, 2000.
- [96] Szunyogh I, Toth Z, Morss R C, et al. The effect of targeted dropsonde observations during the 1999 Winter Storm Reconnaissance Program. *Mon Wea Rev*, 2000, 128: 3520-3537.
- [97] Chang E K M, Yu D B. Characteristics of wave packets in the upper troposphere. Part I: Northern Hemisphere winter. *J Atmos Sci*, 1999, 56: 1708-1728.
- [98] Chang E K M. Characteristics of wave packets in the upper troposphere. Part II: Seasonal and hemispheric variations. *J Atmos Sci*, 1999, 56: 1729-1747.
- [99] Yeh T C. On energy dispersion in the atmosphere. *J Atmos Sci*, 1949, 6: 1-16.
- [100] 陶诗言, 卫捷, 梁丰, 等. Rossby波的下流效应引发我国高影响天气的分析. *气象*, 2010, 36(7): 81-93.
- [101] 邓国, 龚建东, 邓莲堂, 等. 国家级区域集合预报系统研发和性能检验. *应用气象学报*, 2010, 21(5): 513-523.

《雾物理化学研究》出版

■ 黄红丽

雾是发生在近地层水平能见度低于1000m的天气现象。针对雾造成日益显著的不利影响和气象部门普遍关注的热点问题，基于对长江三角洲地区雾、广东湛江海雾和南方过冷雾的研究成果，撰写而成的《雾物理化学研究》一书已于近日出版。

该书介绍了著者有关中国雾物理化学过程宏观、微观特征的研究成果。内容涉及：雾外场综合观测试验；辐射雾、平流雾及平流辐射雾的宏观特征；陆地

雾和海雾的微观特征；陆地雾和海雾的化学特征；过冷雾微物理特征。这些内容有利于读者系统、深入地认识中国雾物理化学过程及相应物理化学机制，为中国雾害监测和预警及空气质量预报等提供了科学基础。

(作者单位:气象出版社)



城市化气候效应研究的新进展

冯锦明¹ 王君^{1,2} 严中伟¹

(1 中国科学院东亚区域气候—环境重点实验室, 北京100029; 2 中国科学院大学, 北京100049)

摘要: 随着人类社会经济的不断发展, 世界各地特别是中国城市化进程十分迅速。城市化的气候效应已成为一个具有重大现实与科学意义的问题, 不少科技工作者已经利用观测资料和数值模式对城市化的气候效应进行了一系列的研究。首先从观测资料的角度介绍城市化气候效应的具体表现, 然后根据城市化进程影响区域气候的三类主要途径, 即城市土地利用变化、人为热释放和人为气溶胶排放, 对国内外城市化气候效应的研究, 特别是数值模拟研究, 进行了综合回顾与分析。结合作者近几年所做的工作, 系统总结了城市化气候效应研究的新进展以及所面临的问题, 并提出了城市化气候效应的应对策略和未来研究展望。目前的城市化气候效应模拟研究结果还具有较大的不确定性, 随着模式物理过程的改进完善和高性能计算能力的迅速提升, 进行高分辨率和长时间的城市化区域气候效应集合模拟研究将成为解决这一领域关键科学问题的有效途径。

关键词: 城市化, 气候效应, 人为热释放, 数值模拟, 高分辨率

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.05.002

New Advances in the Research of Climatic Effect of Urbanization

Feng Jinming¹, Wang Jun^{1,2}, Yan Zhongwei¹

(1 Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia (RCE-TEA), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: With the development of human society and the acceleration of urbanization in the world, especially in China, climatic effect of urbanization has become a realistic issue with important scientific significance. Many scientists have conducted a series of studies on the climatic effect of urbanization using observation data and the numerical simulation. In the paper, firstly, based on the analysis of observation data, the climatic effect of urbanization is introduced, and then, according to the three main ways (the urban land use change, anthropogenic heat release and artificial aerosol emissions), there is a comprehensive review and analysis of the studies on climatic effect of urbanization both in China and abroad, especially in the numerical simulation. Combined with the work of the author in recent years, the new progress in the study on climate effect of urbanization as well its the problems is summarized. The adaptation strategies for climate effect of urbanization and the future research prospects are proposed. There is a large uncertainty in the present simulation results for climate effect of urbanization. Along with the improved physical processes in model and rapid development in high-performance computing technology, the high resolution and long-period ensemble simulation is sure to become an effective way to resolve the key scientific issues in urbanization.

Keywords: urbanization, climatic effect, anthropogenic heat release, numerical simulation, high resolution

1 引言

近百年全球变化已成为各方关注的科学问题^[1]。地表气温上升和极端天气气候事件频发使得人们意识到人类活动正在深刻改变着全球气候系统。二氧化碳、甲烷等温室气体和气溶胶排放, 土地利用方式改变被认为是人类活动影响气候系统的典型方式。然

而, 具体到某些区域或是局地尺度, 城市化等其他类型的人类活动对气候的影响同样是不可忽略的。城市化改变陆面物理属性(如反照率、发射率和热传导率等)和形态特征, 使得城市区域具有更大的热容量、波文比以及粗糙度^[2-3]。城市陆表的不透水性使得水汽蒸发减少, 地表感热增加。加之, 辐射在城市冠层内部的多次反射和吸收使得白天城市吸收的能量在夜晚更难以长波辐射的形式散失。这些陆面特征的变化显著影响地表能量收支、边界层高度和热力结构以及局地/区域大气环流, 从而改变城市及其周边的区域气候^[4-6]。同时, 城市地区的能源消耗所带来的人为

收稿日期: 2013年6月6日; 修回日期: 2013年7月18日

第一作者: 冯锦明(1971—), Email: fengjm@tea.ac.cn

资助信息: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05090000);

中国科学院知识创新工程重要方向项目

(KZCX2-EW-202)

热释放显著改变地表能量平衡, 导致城市边界层结构变异, 从而影响城市区域环境^[7-15]。此外, 城市地区也是人为气溶胶排放最剧烈的地区, 气溶胶的直接、半直接和间接效应会对城市区域气候产生一定的影响^[16-19]。这些因素的综合效应使得城市区域气候与周边其他地区显著不同, 最典型的表现就是城市与乡村之间的温度差异以及城市地区的降水异常分布。

在气候变暖背景下, 快速城市化进程已然造成了许多气候环境问题, 如持续的高温热浪天气^[20-21]和空气污染事件^[22]。考虑到城市地区人口密集, 预期未来会有更多的人口生活在城市, 认识城市化的气候效应对提高人们生活舒适度、帮助城市决策者提高应对极端天气的能力以及减少城市地区的能源消耗具有现实的意义。例如, Stone^[23]指出在城市区域, 相比单独的温室气体减排, 辅以改善城市土地利用方式对缓解气候变化可能会更有效。

当下中国的城市化进程十分迅速, 已有的城市化规模巨大, 不仅沿海地区三大城市群的城市地域密集连片, 中国内陆也呈现大中城市星罗棋布、迅速扩张的面貌。这些不同规模等级广泛分布的城市群实际上会在更大范围的时空尺度对区域气候产生影响, 加之城市间密集的道路网, 使城市的人为热释放、气溶胶排放延伸至城市外围的大范围区域。2012年冬季中国东部持续长时间和大范围的雾霾天气就是这一现象最好的例证。城市区域尤其是密集的城市群区域对气候变化的影响既具有城市局部的地域特征, 也具有更大范围的区域特点。这些特点使得常规观测手段难以获得全面的观测信息, 也难以反映不同尺度上存在的气候特征, 更不能用以预测未来中国在更加高度城市化情形下的区域气候演变状况。数值天气气候模式正是解决这些问题的重要手段。其中, 区域气候模式可以描述不同时空尺度上气候系统、系统内部各组成部分之间的复杂相互作用, 通过借助各种参数化模型表达陆面及大气的各种物理过程, 因而能够综合反映下垫面改变以及人类活动对气候产生的影响, 有助于揭示城市化效应对区域气候的影响机理, 寻求改善城市气候环境的途径并对未来的区域气候变化进行科学的预估。

为全面了解城市化气候效应的研究现状, 本文将首先从观测资料的角度介绍城市化气候效应的具体表现, 然后重点根据现有的数值模拟研究成果, 从城市土地利用、人为热释放和气溶胶等方面来阐述城市化气候效应的成因与机理, 最后对相应的应对策略进行适当讨论。

2 城市化气候效应

城市化气候效应的最直接表现是城市地面气温的变化, 即所谓的“热岛效应”。早在19世纪, 英国学者霍华德就从台站温度记录中发现伦敦市内的气温比周边郊区要高^[24], 这一工作被认为是城市化气候效应研究的开端。此后, 不断有研究者通过资料分析发现城市热岛效应的存在, 范围遍及各个纬度带以及气候区^[25]。然而, 由于传统气象观测台站数量有限、空间分布离散, 过去工作在定量研究城市热岛效应强度和范围时得出的结论往往存在差异。近些年越来越多自动观测站被用来检测城市气象要素, 这将大大提高城市热岛效应研究结果的准确性^[26]。随着现代观测技术的发展, 很多学者也开始使用卫星遥感资料反演城市地表温度, 从更细微的尺度来分析研究城市热岛效应的时空演变规律^[27]。

由于城市化发展、能源消耗的增加, 城市热岛的强度和范围不断扩大, 从而影响局地气温上升趋势^[28-30]和极端温度事件的发生频次^[31]。过去研究对城市化效应对增温趋势贡献大小的结论不统一, 主要原因在于所用观测资料的质量和分析方法的不同。为评估温度趋势中的城市化效应, 局地气温观测序列的前后一致性(或称均一性)是需要重点考虑的问题。由于站点迁移、观测仪器和规范更改等因素, 很多站点观测序列存在非均一性, 即某段或某几段时期的观测数值存在系统性的偏差。另一个关键问题如何科学地划分不同类型的站点(如城市站和乡村站)。过去的研究大都采用人口或经济规模^[32]、夜晚灯光指数^[33]以及遥感观测的土地覆盖信息^[34]进行城乡站点划分。不同方法得到的分类结果很不一致, 导致城市化效应结论也不一致。此外, 城市化气候效应对极端温度事件发生频次也存在一定的影响。Wang等^[31]发现北京地区近30年快速城市化对极端暖夜(冷夜)的增加(减少)趋势贡献为12.7%或2.07d/10a(29.0%或5.06d/10a), 对于持续(3d)的极端冷夜事件, 城市化效应显著加强了其减少趋势, 贡献达34%。

城市化气候效应的另一个重要方面体现在城市降水格局的改变。早期大多数研究侧重于利用地面气象站点、雷达和遥感观测等获得的降水资料揭示城市的存在对区域降水多少和空间分布的影响。一些研究很早就发现城市下风向暖季的降水相比其他地方增多9%~17%^[35-37]。Bornstein等^[4]通过分析亚特兰大地面气象站点资料发现城市热岛能引起近地面的大气辐合上升并诱发暴雨。Shepherd等^[38]发现城市下风向30~60km处的月平均降水比其他地方多出28%。

Chen等^[39]指出城市化使得台北地区下午雷暴频次增加67%，由此引发的降水增加77%。Hand等^[40]利用探空和再分析资料分析揭示奥克拉荷马市下风向地区比其他地方显著湿润，从而印证了城市化效应对降水的影响比起农业活动和地形等因素更占主导地位。Kishtawal等^[41]指出印度季风区强降水的增多与城市化效应引起的降水异常信号有关联。通过分析雷达资料，Niyogi等^[42]发现风暴会在城市上风向分裂，再在下风向聚合。然而，也有研究发现城市化发展会导致城市区域降水减少。例如，Kaufmann等^[43]利用遥感观测以及气象台站资料分析了中国珠三角地区降水减少和城市土地利用的时空关系，发现城市化对当地降水减少起着至关重要的作用，这种效应很可能是由陆面水循环改变所引起的。Zhang等^[44]发现北京东北部地区夏季降水的减少和城市面积快速扩张之间存在显著的相关关系，而夏季气溶胶光学厚度并没有明显的长期变化趋势，因此气溶胶变化和降水减少不存在统计学上的关系。总之，城市化气候效应对降水的影响结论还不统一，这可能与城市所处的区域气候类型（内陆或是沿海）、城市的规模大小以及其他因素（如气溶胶）影响有关。未来研究需要更长时间、更高密度的城市气象观测网络，辅以其他先进观测手段（如卫星遥感），定量出不同地区、不同类型、不同规模的城市对该地区降水的作用。

城市高大的建筑物和城市热岛的加强使得地表粗糙度增加，进而导致城市近地面风场特性的改变。Bornstein等^[45]通过分析纽约地区地面风速资料发现城市和乡村的风速存在差异，差异具有明显的日变化，大小与风向和上游风速大小有关。Li等^[46]通过对比市区和区域平均的风速观测资料发现，近几十年北京城市化发展加剧了市区的风速减弱趋势，其贡献可达区域平均趋势的20%。

3 城市化气候效应的成因

3.1 城市土地利用变化

城市土地利用方式改变是城市化发展影响区域气候最直接的途径。然而，现今用来研究气候变化的全球气候模式因其空间分辨率过粗，不能细致刻画只占地球表面很小部分的城市区域的土地利用状况。因而，我们需要通过分辨率更高的区域气候模式进行更高精度的区域气候模拟，对城市化气候效应给出科学的评估。过去研究为了将城市和其他土地利用类型区分开，简单地改变城市所在区域下垫面的某些物理属性。但是，由于城市建筑物的三维结构对地表反照率、热容量和粗糙度等存在一定的影响，这种简单的

处理方式不足以准确描述城市下垫面和区域大气之间的相互作用。近些年，城市冠层模型被成功引入到区域气候模式中，其对城市区域气候模拟的改进已被很多研究所证实^[47-49]。例如，Jin等^[50]指出了为了将未来气候变化预估结果准确降尺度到一些重要的城市区域，非常有必要将城市冠层参数化方案引入到气候模式中。

城市土地利用方式改变引起的区域气候效应首先体现在地表气温上。Trusilova等^[51]通过数值模拟发现城市土地覆盖导致城市区域夏季气温日较差下降（ 1.26 ± 0.71 ） $^{\circ}\text{C}$ ，冬季下降（ 0.73 ± 0.54 ） $^{\circ}\text{C}$ 。Hamdi等^[52]通过长时间模拟发现城市化使得布鲁塞尔地区的最高和最低气温上升速率分别增加 $0.05^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.14^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，城市土地利用改变导致的增暖效应占区域整体增暖的45%。Zhang等^[53]通过敏感性试验发现城市化效应引起城市地区冬季平均地表气温上升（ 0.45 ± 0.43 ） $^{\circ}\text{C}$ ，夏季上升（ 1.9 ± 0.55 ） $^{\circ}\text{C}$ 。Feng等^[44]发现城市下垫面改变使得中国区域全年增温 0.13°C ，部分城市化显著的地区（如长三角地区）增温可达 0.84°C 。通过对中国三大城市群高分辨率嵌套模拟，Wang等^[54]发现城市土地利用使得城市地区地表气温上升 1°C 左右，此效应在夏季体现最为明显。城市土地利用方式改变引起区域增温是绝大多数研究所认同的结论，但量化的增温结果仍需未来更高质量的土地利用数据、更完善的气候模式，以及更准确的城市参数和高分辨率的长期气候模拟。

城市土地利用导致的气候效应的另一个体现是对降水发生和分布的改变。近些年，随着数值模式的发展，越来越多的工作试图从数值模拟的角度证实并且解释城市化效应对降水的影响。例如，Shem等^[55]通过WRF模式模拟发现亚特兰大下风向降水有明显增多，这点与之前很多研究结论相符合。Shepherd等^[56]通过模拟一个降水个例发现，在不考虑城市的情况下，休斯敦西北地区的对流性降水相对于考虑城市的情况会变少。Lin等^[57]发现引入正确的土地利用信息对城市降水模拟至关重要，城市化效应能显著影响边界层中大气的热力和动力过程。Miao等^[58]通过不同城市土地利用情景的敏感性数值试验证实城市对于风暴移动路径和降水量起着重要的作用，城市化效应使得城市区域的爬线破裂成对流单体，最终降水量的变化幅度取决于城市化的程度。与之前大多数观测资料分析得到的结果不同的是，近些年有些模拟研究发现城市土地利用可能会使城市地区的降水减少。通过对北京地区两个典型的夏季降水过程进行敏感性试验，Zhang等^[44]发现城市扩张很可能是北京近几十年降水

减少的重要原因，增加植被覆盖有利于降水增加，从而缓解该地区的缺水状况。Wang等^[54]通过高分辨率嵌套模拟同样发现，城市土地利用会使中国长三角和珠三角地区夏季降水显著减少（图1）。降水减少的原因可能是城市土地利用导致自然植被和土壤被不透水层替代，区域蒸发显著减少，水汽供应不足，加之边界层变厚使得水汽在其中混合得更加均匀，导致对流有效位能降低，对流抑制能量增加，从而不利于区域降水的发生（图2）。城市化对降水的影响还具有较大的不确定性，原因在于过去多数研究选取的是个别天气过程进行数值模拟，部分区域气候模拟的时间跨度也不够长。未来更长时间、更多来源的观测资料和长时间高分辨率的气候模拟可为我们提供更为可靠的研究结论。

此外，Hou等^[59]通过敏感性数值模拟试验得出，北京近50年的城市化造成区域平均风速减少0.4m/s，其贡献占整体风速减弱的35%。Lo等^[6]发现准确的的城市土地利用数据和参数化方案对于模拟中国珠三角地区城市化对海陆风环流的影响至关重要，结果表明城市土地利用使得城市地区和周边海域的温差加强，造成夜晚海风能够深入到更加内陆的地区。Chen等^[60]通过敏感性试验发现城市的存在有利于近地面风的停滞，城市土地利用造成的气温变化显著影响休斯敦地

区的风场结构。

城市土地利用还对城市地区某些污染物浓度存在一定的影响。Jiang等^[61]发现未来气候变化将导致休斯敦地区日最高臭氧浓度上升2.6ppb，而城市土地利用却使得日最高臭氧浓度上升3.6ppb，两者对臭氧浓度的作用因地区不同而不同，未来气候变化将使得八月极端臭氧污染日增加1~2天，而城市土地利用却使其增加2~3天。

3.2 城市人为热释放

所谓的“城市化效应”不单由上述因素所引起，城市区域的人类活动导致的热释放也是一个重要的气候因子。工业能源消耗、商业及居民住宅的热排放、车辆的油料燃烧以及人体新陈代谢是人为热释放的重要来源^[62]。通过能源消耗数据的分析，Ichinose等^[7]发现东京市中心的人为热白天超过400W/m²，冬季最高值可达1590W/m²。Offerle等^[8]发现欧洲地区城市中心的人为热强度可以达到32W/m²。Quah等^[9]发现新加坡的商业区逐时人为热释放最高可达113W/m²，高密度住宅区达17W/m²，低密度住宅区达13W/m²。由于相关数据的缺乏，人为热释放的气候效应研究的难点在于很难准确描述人为热的时空分布。现阶段研究普遍采用基于能源消耗清单和地面能量守恒的方法对人为热释放进行估算，两种方法各有优缺点，需要根据研

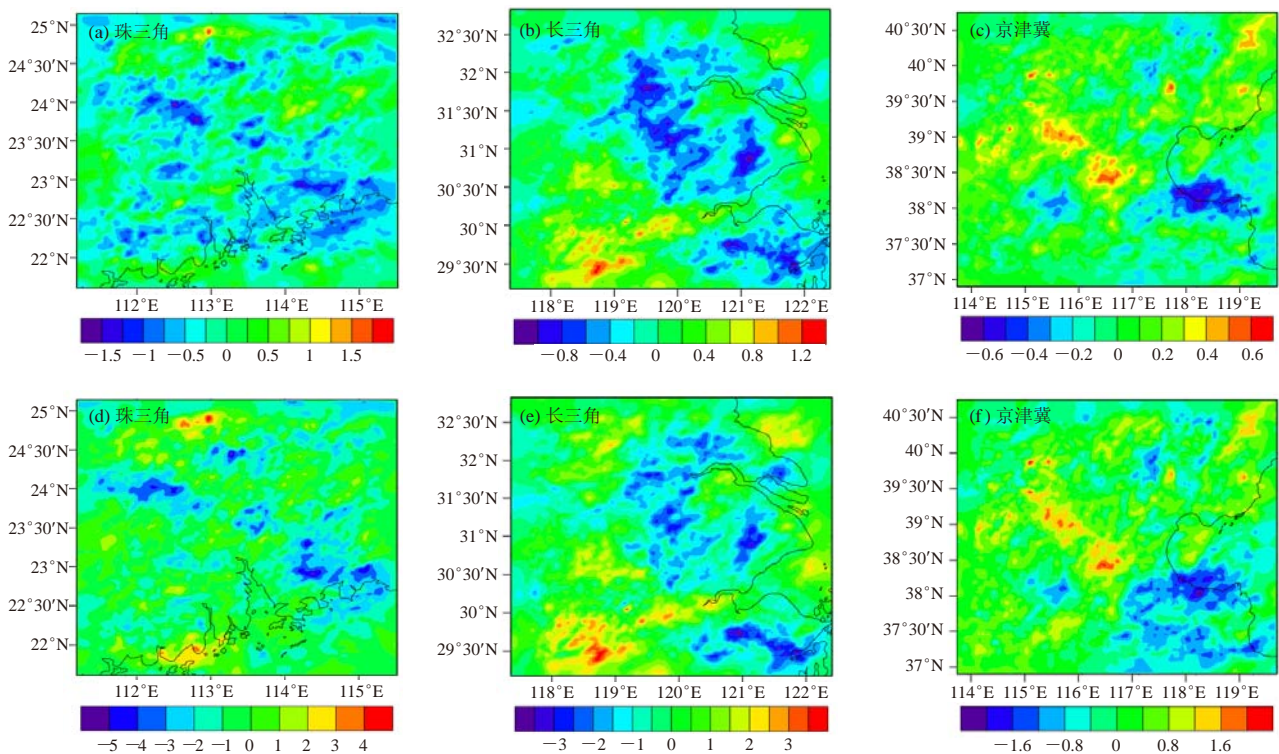


图1 城市土地利用变化导致珠三角、长三角和京津冀地区全年 (a, b, c) 和夏季 (d, e, f) 降水变化 (单位: mm/d)^[54]

究对象的实际情况进行选择。

前人对于人为热释放的研究工作大多集中于使用各种数据精确描述人为热的时空分布特点。近些年随着数值模式的发展,越来越多的研究开始关注人为热释放对城市区域气候的影响。Ichinose等^[7]发现减少城市能源消耗可以使得地表气温下降0.5℃。Ohashi等^[10]指出东京商业区内1~2℃的气温上升是由空调的废热排放造成的。de Munck等^[11]认为可将巴黎市区0.5℃的气温上升归结于人为热释放,并且指出空调的使用在地表气温上升中的重要性。Block等^[12]首次进行了人为热释放对区域气候影响的数值模拟分析,研究发现2W/m²的人为热释放能使地表气温上升0.15℃,在个别地区(德国鲁尔地区),额外20W/m²的人为热释放能导致0.5℃的增温,但人为热释放对区域降水影响并不显著。然而,此工作仅是对冬季进行了模拟,人为热释放的气候效应在其他季节的情况仍是未知。利用现今和未来人为热释放预估清单,Flanner^[13]指出2100年人为热释放将会使全球地表气温上升0.4~0.9℃。Zhang等^[63]发现当前的气候模式模拟的20世纪后半期气候变化趋势相较于观测存在一定偏差,人类能源消耗导致的热释放对大气环流和区域气候造成的影响与这种偏差十分相似,尤其是在冬季和秋季,从而显示人类能源消耗作为一种没有加入气候系统的外部强迫很可能是造成当前的气候模式存在偏差的原因。Feng

等^[14]发现人为热释放导致中国区域气温上升0.15℃,在个别城市化明显地区(如长三角地区)增温将达到0.89℃。通过使用更加接近实际的人为热释放数据和高分辨率嵌套模拟,Feng等^[15]发现人为热释放使得中国三大城市群城市地区气温上升0.5~1.0℃,降水分布格局发生变化。图3给出了人为热释放引起的区域降水季节内变化,可以看出,珠三角和长三角地区夏季降水有所增加,在城市区域,这种增加会更加显著,原因是城市地区风场和水汽发生辐合,上升运动增强,对流有效位能增加,从而导致夏季降水显著增多(图4和图5)。京津冀地区的夏季降水变化不太显著,原因可能是与该地区处于季风气候区边缘、地形比较复杂、中高纬度的天气过程频繁、局地对流活动弱等因素有关。

3.3 城市人为气溶胶排放

除城市土地利用变化和人为热释放外,人为气溶胶排放也是引起城市化气候效应的重要因素。人为气溶胶对大气辐射的改变可能会减弱以上两个因素对城市区域增温的影响,人为气溶胶的直接、半直接和间接效应可能对该地区的降水变化(强度和分布格局)存在一定的作用。关于人为气溶胶的直接、半直接和间接效应的研究有很多,但是真正关注人为气溶胶对城市区域气候影响的研究却相对较少。过去由于模式对气溶胶气候效应的参数化不够完善,多数工作采用

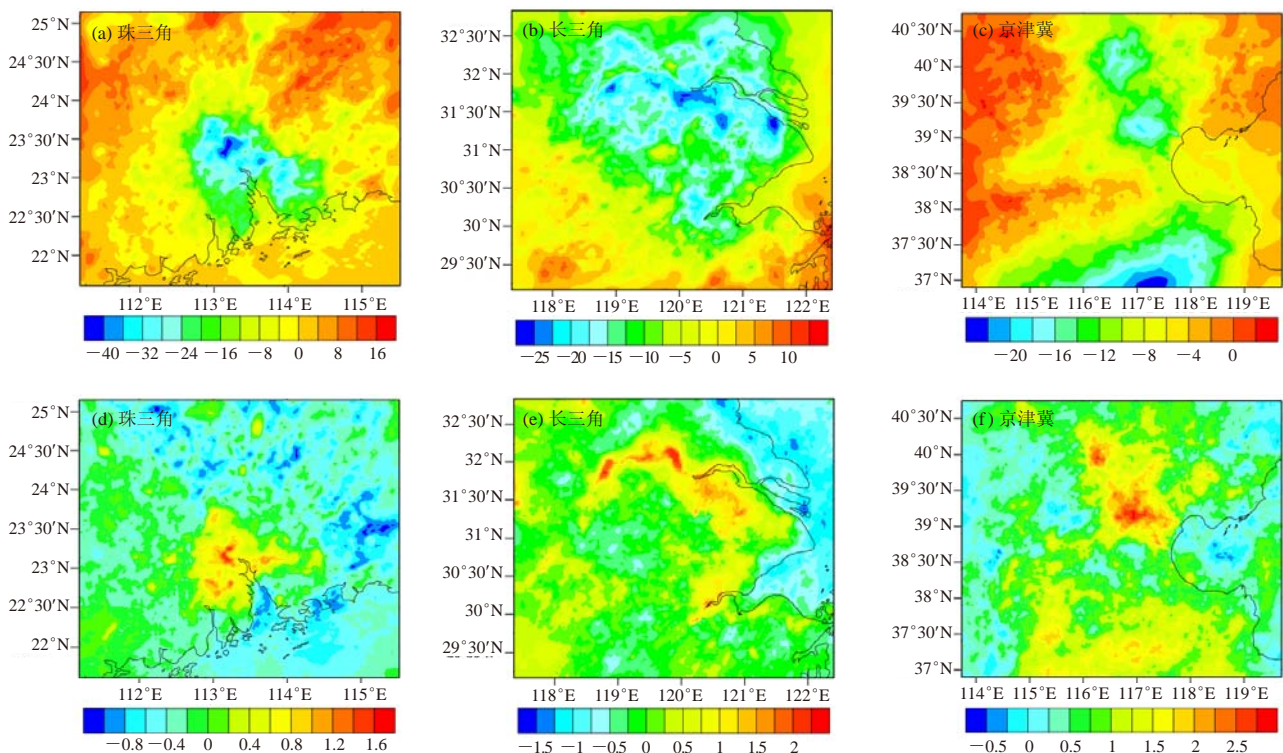


图2 城市土地利用变化导致夏季对流有效位能(a, b, c)和对流抑制能(d, e, f)的变化(单位: J/kg)^[54]

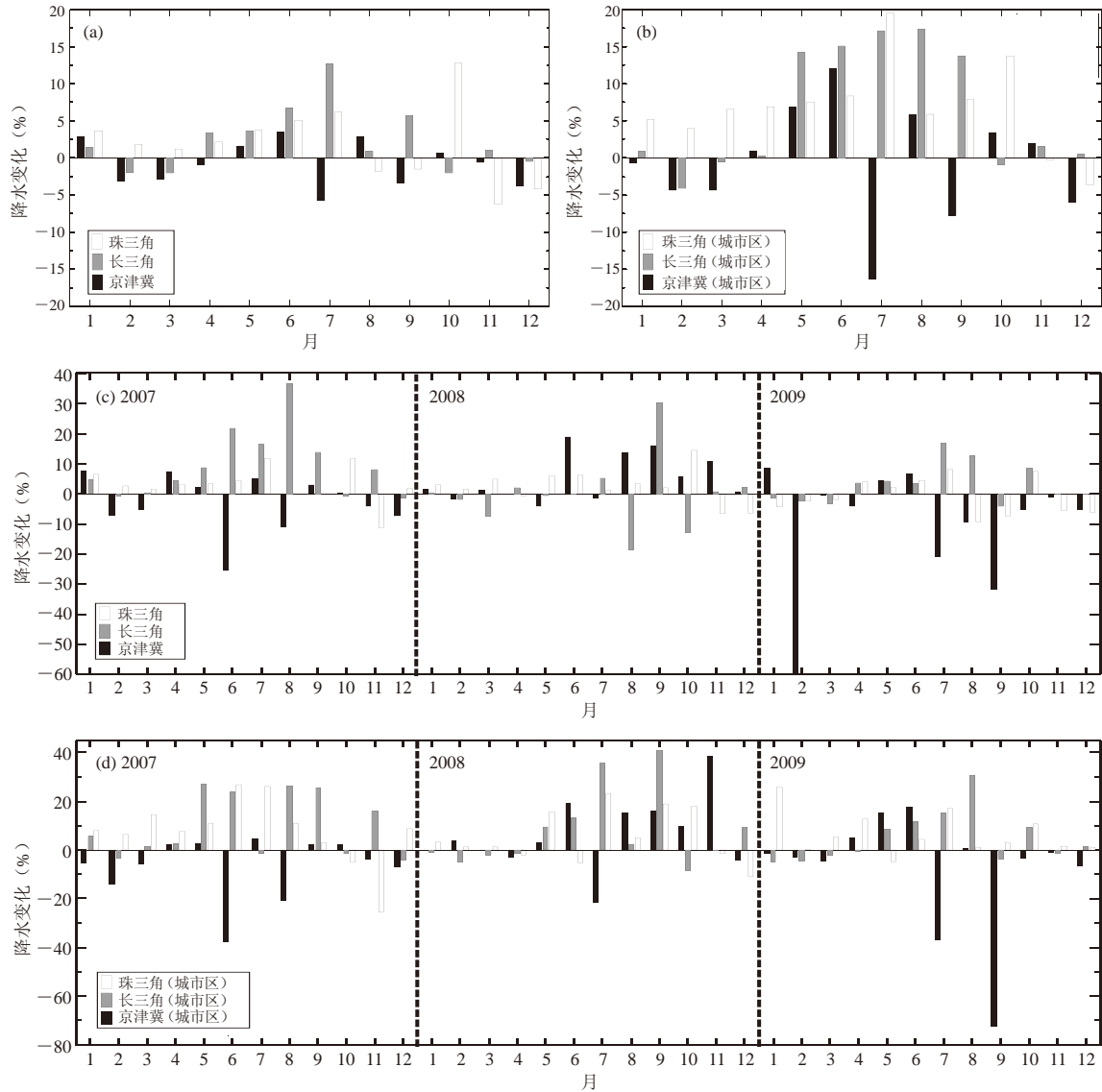


图3 人为热释放引起的模拟区域平均 (a, c) 和城市地区平均 (b, d) 的月降水变化百分比^[15]

观测资料来研究气溶胶与城市降水的关系。例如, Jin 等^[16]通过分析纽约和休斯敦各个时间尺度的MODIS云量观测、AERONET气溶胶观测、PM_{2.5}站点观测和TRMM降水数据发现,城市云量和气溶胶存在反位相关关系,而气溶胶对降水变化不存在显著的影响。Jin 等^[17]再次通过遥感观测资料发现,气溶胶对水云粒子大小存在显著影响,除小于2.5mm/d的小雨外,气溶胶对其他类型的降水没有影响。近些年也有研究试图通过数值模式探索气溶胶对城市地区降水的影响,如Heever 等^[18]通过中尺度模式模拟发现,城市下风向的暴雨大多是由城市热岛引起的辐合所致,而与气溶胶的增加没有显著关系。Carrio 等^[19]发现城市降水量随着城市化进程呈现单调增长,原因在于城市土地利用

对海陆风环流的加强作用,然而城市降水并不随着气溶胶浓度的增加呈现线性的变化。

以上研究大多是基于遥感观测分析和针对个别天气过程的模拟,要想真正揭示气溶胶对城市区域气候的影响,需要高分辨率的长期的气候模拟。随着人们对气溶胶气候效应认识的加深,模式对气溶胶在气候系统中所起的作用将描述得更加清晰,这将帮助我们了解人为气溶胶对城市区域气候的影响。

4 城市化气候效应的适应对策

城市化气候效应研究的意义在于它能使人们更清晰地认识其发生的特点及原因,从而制定科学的对策减缓和适应城市化发展带来的不利影响。随着人们对周围环境和生活质量要求的提高,越来越多的学者

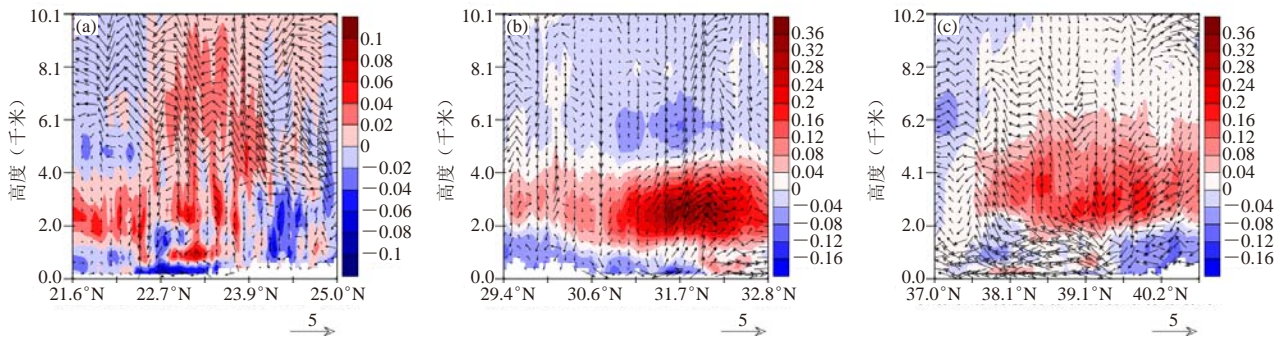


图4 人为热引起的沿珠三角 (a)、长三角 (b)、京津冀 (c) 西南-东北方向垂直剖面上水汽混合比和场 (v 、 w) 变化^[15] (水汽混合比单位: g/kg, 垂直风速单位: dm/s, 水平风速单位: m/s)

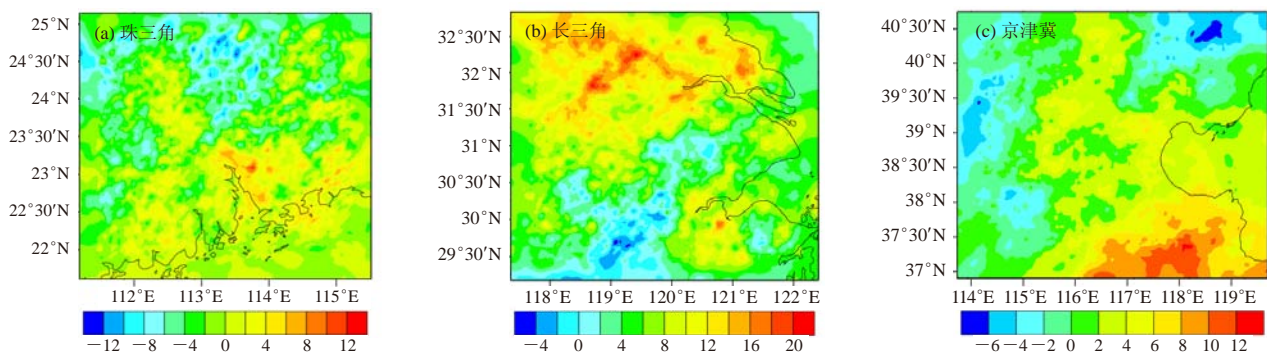


图5 人为热释放引起的夏季对流有效位能变化空间分布^[15] (单位: J/kg)

开始考虑如何在城市区域尺度改善气候变化和城市化效应带来的负面影响。Akbari等^[64]认为增加城市反照率可以降低夏季气温,进而使得空气质量转好、空调使用量下降。通过相关数据的统计分析发现,在全球尺度上,增加城市屋顶和不透水铺砌表面的反照率所导致的负辐射强迫效应相当于44Gt二氧化碳的减排所产生的效果。Oleson等^[65]使用耦合城市冠层模型的全球气候模式模拟研究发现,如果将全球城市的房屋屋顶变成白色,全球平均的城市热岛强度将下降33%,城市日最高气温将下降0.6℃、日最低气温将下降0.3℃。由于高纬度地区冬季太阳辐射较弱,白色屋顶对该地区热岛效应的减缓效果不太明显。Auer^[66]建议用绿地将城市中的工业区、商业区和居民区分隔开,可以缓解城市化气候效应。Zhang等^[44]通过数值模拟试验认为增加植被覆盖能够缓解北京地区夏季降水减少的趋势,相比种植树木而言,种草的改善效果更明显。Zhang等^[67]发现在西南盛行风条件下,巴尔的摩市相比华盛顿市存在更高的地表气温和更差的空气质量,其原因在于上风向地区卫星城的城市化发展对下风向地区区域气候存在影响,合理设计卫星城市的位置对于减少城市化气候效应引起的负面影响具有一定的作用。

5 未来研究展望

本文回顾了观测记录中城市化气候效应的综合表现,并从三方面总结了城市化气候效应模拟研究方面的成果,概述了与城市化气候效应有关的研究方法、结论不确定性以及存在的不足。从现有的研究来看,城市化气候效应研究还有很长的路要走,特别是考虑到中国现阶段快速的城市化进程,国内对城市化气候效应模拟研究的工作还相对较少,与国际的相关研究还存在一定差距,具备广阔的研究空间。过去研究对城市土地利用变化、人为热释放的温度效应研究较多,结论也比较明确,但它们对区域降水的影响还没有完全认识清楚,更精细的能源利用数据以及更合理的参数化方案是解决这个问题的基础。将来研究可以从以下几方面提高对城市化气候效应的认识:首先,发展更加精确描述城市下垫面土地利用类型的遥感资料集,这对模拟城市土地利用方式改变影响区域气候至关重要。其次,着重改善现有城市冠层模型的模拟性能,针对区域城市特点,改进并完善各类城市参数,包括热力参数与形态参数等,并对城市下垫面与区域大气相互作用的相关过程进行更合理的参数化。再次,收集更多、更精细的能源消耗数据以及借助自动站、遥感观测数据对人为热释放的时空分布进

行准确描述, 并将人为热释放更合理地引入到城市冠层模型中。最后, 应该加强城市人为气溶胶对城市区域气候影响的相关研究。

可以看出, 目前的模拟研究结果还具有较大的不确定性。随着模式物理过程的改进完善和高性能计算能力的迅速提升, 进行高分辨率和长时间的城市化区域气候效应的集合模拟研究将成为解决这一领域科学问题的有效途径。

参考文献

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge Univ Press, 2007.
- [2] Oke T R. The energetic basis of the urban heat island. *Q J R Meteorol Soc*, 1982, 108: 1-24.
- [3] Porson A, Harman I N, Bohnenstengel S I, et al. How many facets are needed to represent the surface energy balance of an urban area? *Boundary-Layer Meteorol*, 2009, 132: 107-128.
- [4] Bornstein R, Lin Q L. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies. *Atmos Environ*, 2000, 34: 507-516.
- [5] Liu Y B, Chen F, Warner T, et al. Verification of a mesoscale data-assimilation and forecasting system for the Oklahoma city area during the Joint Urban 2003 Field Project. *J Appl Meteorol Climatol*, 2006, 45: 912-929.
- [6] Lo J C F, Lau A K H, Chen F, et al. Urban modification in a mesoscale model and the effects on the local circulation in the Pearl River Delta region. *J Appl Meteorol Climatol*, 2007, 46: 457-476.
- [7] Ichinose T, Shimodozono K, Hanaki K. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. *Atmos Environ*, 1999, 33: 3897-3909.
- [8] Offerle B, Grimmond C S B, Fortuniak K. Heat storage and anthropogenic heat flux in relation to the energy balance of a central European city centre. *Int J Climatol*, 2005, 25: 1405-1419.
- [9] Quah A K L, Roth M. Diurnal and weekly variation of anthropogenic heat emissions in a tropical city, Singapore. *Atmos Environ*, 2012, 46: 92-103.
- [10] Ohashi Y, Genchi Y, Kondo H, et al. Influence of air-conditioning waste heat on air temperature in Tokyo during summer: Numerical experiments using an urban canopy model coupled with a building energy model. *J Appl Meteorol Climatol*, 2007, 46: 66-81.
- [11] de Munck C, Pigeon G, Masson V, et al. How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France? *Int J Climatol*, 2013, 33: 210-227.
- [12] Block A, Keuler K, Schaller E. Impacts of anthropogenic heat on regional climate patterns. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L12211, doi:10.1029/2004GL019852.
- [13] Flanner M G. Integrating anthropogenic heat flux with global climate models. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L02801, doi:10.1029/2008GL036465.
- [14] Feng J M, Wang Y L, Ma Z G, et al. Simulating the regional impacts of urbanization and anthropogenic heat release on climate across China. *J Clim*, 2012, 25: 7187-7203.
- [15] Feng J M, Wang J L, Yan Z W. Impacts of anthropogenic heat release on regional climate in three vast urban agglomerations in China. *Adv Atmos Sci*, 2014, 31: 1-11.
- [16] Jin M L, Shepherd J M, King M D. Urban aerosols and their variations with clouds and rainfall: A case study for New York and Houston. *J Geophys Res*, 2005, 110: D10S20, doi:10.1029/2004JD005081.
- [17] Jin M L, Shepherd J M. Aerosol relationships to warm season clouds and rainfall at monthly scales over east China: Urban land versus ocean. *J Geophys Res*, 2008, 113: D24S90, doi:10.1029/2008JD010276.
- [18] Heever S C, Cotton W R. Urban aerosol impacts on downwind convective storms. *J Appl Meteorol Climatol*, 2007, 46: 828-850.
- [19] Carrio G G, Cotton W R, Cheng W Y Y. Urban growth and aerosol effects on convection over Houston. Part 1: The August 2000 case. *Atmos Res*, 2010, 96: 560-574.
- [20] Barriopedro D, Fischer E M, Luterbacher J, et al. The hot summer of 2010: Redrawing the temperature record map of Europe. *Science*, 2011, 332: 220-224.
- [21] Robine J M, Cheung S L K, Roy S L, et al. Death toll exceeded 70000 in Europe during the summer of 2003. *C R Biol*, 2008, 331(2): 171-178.
- [22] Ma J Z, Chen Y, Wang W, et al. Strong air pollution causes widespread haze-clouds over China. *J Geophys Res*, 2010, 115: D18204, doi:10.1029/2009JD013065.
- [23] Stone B. Land use as climate change mitigation. *Environ Sci Technol*, 2009, 43: 9052-9056.
- [24] Howard L. The Climate of London Deduced from Meteorological Observations (3rd edition). London: Harvey and Dorton Press, 1833.
- [25] Arnfield A J. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int J Climatol*, 2003, 23(1): 1-26, doi: 10.1002/joc.859.
- [26] Yang P, Ren G Y, Hou W, et al. Spatial and diurnal characteristics of summer rainfall over Beijing municipality based on a high-density AWS dataset. *Int J Climatol*, 2013, 33(13): 2769-2780, doi:10.1002/joc.3622.
- [27] Chen X L, Zhao H M, Li P X, et al. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 104: 133-146.
- [28] Böhm R. Urban bias in temperature time series: A case study for the city of Vienna, Austria. *Clim Change*, 1998, 38: 113-128.
- [29] Gaffin S R, Rosenzweig C, Khanbilvardi R, et al. Variations in New York city's urban heat island strength over time and space. *Theor Appl Climatol*, 2008, 94: 1-11, doi:10.1007/s00704-007-0368-3.
- [30] Ren G Y, Chu Z Y, Chen Z H, et al. Implications of temporal change in urban heat island intensity observed at Beijing and Wuhan stations. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L05711, doi:10.1029/2006GL027927.
- [31] Wang J, Yan Z W, Li Z, et al. Impact of urbanization on changes in temperature extremes in Beijing during 1978-2008. *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 1-7, doi:10.1007/s11434-013-5976-y.
- [32] Hua L J, Ma Z G, Guo W D. The impact of urbanization on air temperature across China. *Theor Appl Climatol*, 2008, 93: 179-194.
- [33] Hansen J, Ruedy R, Sato M, et al. A closer look at United States and global surface temperature change. *J Geophys Res*, 2001, 106(D20): 23, 947-23, 963, doi:10.1029/2001JD000354.
- [34] Gallo K P, McNab A L, Karl T R, et al. The use of NOAA AVHRR data for assessment of the urban heat island effect. *J Appl Meteorol*, 1993, 32: 899-908.
- [35] Changnon S A. The LaPorte weather anomaly-Fact or fiction? *Bull Amer Meteor Soc*, 1968, 49: 4-11.
- [36] Landsberg H E. Man-made climate changes. In *Proc Symp Phys and Dyn Climatology of the World Meteorol Org.* WMO: 1974, 347: 262.
- [37] Huff F A, Changnon S A. Climatological assessment of urban effects on precipitation at St. Louis. *J Appl Meteor*, 1972, 11: 823-842.
- [38] Shepherd J M, Pierce H, Negri A J. Rainfall modification by major urban areas: Observations from spaceborne rain radar on the TRMM satellite. *J Appl Meteor*, 2002, 41: 689-701.
- [39] Chen T C, Wang S Y, Yen M C. Enhancement of afternoon thunderstorm activity by urbanization in a valley: Taipei. *J Appl Meteorol Climatol*, 2007, 46: 1324-1340.
- [40] Hand L M, Shepherd J M. An investigation of warm-season spatial rainfall variability in Oklahoma City: Possible linkages to urbanization and prevailing wind. *J Appl Meteorol Climatol*, 2009,

- 48: 251-269.
- [41] Kishtawal C M, Niyogi D, Tewari M, et al. Urbanization signature in the observed heavy rainfall climatology over India. *Int J Climatol*, 2010, 30: 1908-1916.
- [42] Niyogi D, Pyle P, Lei M, et al. Urban modification of thunderstorms: An observational storm climatology and model case study for the Indianapolis urban region. *J Appl Meteorol Climatol*, 2011, 50: 1129-1144.
- [43] Kaufmann R K, Seto K C, Schneider A, et al. Climate response to rapid urban growth: Evidence of a human-induced precipitation deficit. *J Clim*, 2007, 20: 2299-2306.
- [44] Zhang C L, Chen F, Miao S G, et al. Impacts of urban expansion and future green planting on summer precipitation in the Beijing metropolitan area. *J Geophys Res*, 2009, 114: D02116, doi:10.1029/2008JD010328.
- [45] Bornstein R D, Johnson D S. Urban-rural wind velocity differences. *Atmos Environ*, 1977, 11: 597-604.
- [46] Li Z, Yan Z W, Tu K, et al. Changes in wind speed and extremes in Beijing during 1960 - 2008 based on homogenized observations. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2011, 28: 408-420.
- [47] Masson V. A physically based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorol*, 2000, 94: 357-397.
- [48] Martilli A, Clappier A, Rotach M W. An urban surface exchange parameterization. *Boundary-Layer Meteorol*, 2002, 104: 261-304.
- [49] Kusaka H, Kimura F. Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: Impact on urban heat island simulation for an idealized case. *J Meteor Soc Japan*, 2004, 82(1): 67-80.
- [50] Jin M L, Shepherd J M. Inclusion of urban landscape in a climate model: How can satellite data help? *Bull Am Meteorol Soc*, 2005, 86: 681-689.
- [51] Trusilova K, Jung M, Churkina G, et al. Urbanization impacts on the climate in Europe: Numerical experiments by the PSU-NCAR mesoscale model (MM5). *J Appl Meteorol Climatol*, 2008, 47: 1442-1455.
- [52] Hamdi R, Deckmyn A, Termonia P, et al. Effects of historical urbanization in the Brussels Capital Region on surface air temperature time series: A model study. *J Appl Meteorol Climatol*, 2009, 48: 2181-2196.
- [53] Zhang N, Gao Z Q, Wang X M, et al. Modeling the impact of urbanization on the local and regional climate in Yangtze River Delta, China. *Theor Appl Climatol*, 2010, 102: 331-342.
- [54] Wang J, Feng J M, Yan Z W, et al. Nested high-resolution modeling of the impact of urbanization on regional climate in three vast urban agglomerations in China. *J Geophys Res*, 2012, 117: D21103, doi:10.1029/2012JD018226.
- [55] Shem W, Shepherd M. On the impact of urbanization on summertime thunderstorms in Atlanta: Two numerical model case studies. *Atmos Res*, 2009, 92: 172-189.
- [56] Shepherd J M, Carter M, Manyin M, et al. The impact of urbanization on current and future coastal precipitation: A case study for Houston. *Environ Plan*, 2010, 37B: 284-304, doi:10.1068/b34102t.
- [57] Lin C Y, Chen W C, Chang P L, et al. Impact of the urban heat island effect on precipitation over a complex geographic environment in northern Taiwan. *J Appl Meteorol Climatol*, 2011, 50: 339-353.
- [58] Miao S, Chen F, Li Q, et al. Impacts of urban processes and urbanization on summer precipitation: A case study of heavy rainfall in Beijing on 1 August 2006. *J Appl Meteorol Climatol*, 2011, 50: 806-825.
- [59] Hou A Z, Ni G H, Yang H B, et al. Numerical analysis on the contribution of urbanization to wind stilling: An example over the Greater Beijing Metropolitan area. *J Appl Meteorol Climatol*, 2013, 52: 1105-1115.
- [60] Chen F, Miao S G, Tewari M, et al. A numerical study of interactions between surface forcing and sea breeze circulations and their effects on stagnation in the greater Houston area. *J Geophys Res*, 2011, 116: D12105, doi:10.1029/2010JD015533.
- [61] Jiang X Y, Wiedinmyer C, Chen F, et al. Predicted impacts of climate and land use change on surface ozone in the Houston, Texas, area. *J Geophys Res*, 2008, 113: D20312, doi:10.1029/2008JD009820.
- [62] Sailor D J, Lu L. A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas. *Atmos Environ*, 2004, 38: 2737-2748.
- [63] Zhang G J, Cai M, Hu A X. Energy consumption and the unexplained winter warming over northern Asia and North America. *Nature Climate Change*, 2013, 3: 466-470, DOI: 10.1038/NCLIMATE1803.
- [64] Akbari H, Menon S, Rosenfeld A. Global cooling: Increasing world-wide urban albedos to offset CO₂. *Clim Change*, 2009, 94: 275-286.
- [65] Oleson K W, Bonan G B, Feddema J. Effects of white roofs on urban temperature in a global climate model. *Geophys Res Lett*, 2010, 37: L03701, doi:10.1029/2009GL042194.
- [66] Auer A H. Correlation of land use and cover with meteorological anomalies. *J Appl Meteorol*, 1978, 17: 636-643.
- [67] Zhang D L, Shou Y X, Dickerson R R. Upstream urbanization exacerbates urban heat island effects. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L24401, doi:10.1029/2009GL041082.

雷达气候研究进展及其在城市区域强天气临近预报中的应用

陈明轩¹ 王迎春² 高峰¹ 肖现¹ 程丛兰¹

(1 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089; 2 北京市气象局, 北京 100089)

摘要: 首先介绍了近年来国际上在雷达气候研究方面的一些进展, 特别聚焦于不同地区对流风暴和对流性降水的日变化特征, 以及京津冀地区雷达气候研究的一些最新成果。主要揭示了不同地区对流的形成、加强和日循环传播与太阳加热、地形强迫、盛行风及天气尺度和中尺度系统活动等存在紧密联系。其次, 对雷达气候学的另一特色研究——采用三维风暴属性追踪统计的方法也进行了介绍。文章也从城市化影响对流风暴和对流性降水发展演变以及从雷达气候学角度研究城市地区强天气两个方面, 做了研究进展的一些回顾。最后, 对雷达气候学在城市地区强天气演变机理研究及精细化临近预报预警方面的应用进行了讨论。

关键词: 雷达气候, 对流, 降水, 城市化, 临近预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.05.003

An Overview of Progresses in Radar Climatology and Its Prospective Applications in Nowcasting Severe Weather over Urban Regions

Chen Mingxuan¹, Wang Yingchun², Gao Feng¹, Xiao Xian¹, Cheng Conglan¹

(1 Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089

2 Beijing Meteorological Service, Beijing 100089)

Abstract: International progress in radar climatology in recent years is introduced first in this paper, focusing on diurnal variations of convective storms and precipitation in different regions in the world based on radar climatology, and some research findings of radar climatology for diurnal variations of warm-season convective storms over contiguous North China (Beijing and its vicinity). Studies of radar climatology mainly reveal initiation, enhancement, and diurnal cycle and propagation of convection over different regions, which has a close relationship with solar heating, topographical forcing, prevailing winds, as well as synoptic and meso-scale systems. Statistics of identified and tracked 3D storm properties are another especial study of radar climatology, and are also presented. Studies and progress in effects of urbanization on convective storms and precipitation, and studies on convective weather over urban regions based on radar climatology are also reviewed. Finally, application prospects of radar climatology in analysis on convective mechanism and fine-scale nowcasting of convective storms and precipitation over urban regions are discussed in the paper.

Keywords: radar climatology, convection, precipitation, urbanization, nowcasting

1 引言

天气雷达可以获得高时空分辨率的探测资料, 是目前对流风暴三维特征和强降水最为快速有效的气象探测工具之一^[1]。如果能够对某一地区长时间的天气雷达资料(目前主要是单部雷达或者雷达组网观测得到的反射率因子资料)进行统计分析研究, 就能够了解对流风

暴和对流性降水的精细时空分布和演变特征, 也包括强天气的出现频率和风暴属性等, 这就是所谓的雷达气候研究。自从20世纪70年代开始, 随着计算机和数字化天气雷达技术的发展, 使得利用计算机处理海量雷达探测资料成为可能时, 就已经有学者开始了雷达气候研究。Kuo等^[2]利用一个X波段试验雷达的4年夏季观测资料, 开展了美国Black Hills地区的雷达气候研究, 首次揭示了该地区对流降水回波的时空分布特征及其在不同盛行风形势下时空分布频率的差异, 可以说是为雷达气候研究开创了先河。近几十年来, 随着天气雷达在世界各地

收稿日期: 2013年5月30日; 修回日期: 2013年9月5日

第一作者: 陈明轩(1973-), Email: mxchen@ium.cn

资助信息: 国家自然科学基金(41075036); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306008)

的广泛业务应用和雷达资料的不断积累, 雷达气候研究已经成为对流天气气候特征研究的主要方向之一, 使用的雷达资料也从单部雷达的回波观测转换为使用三维雷达组网拼图资料。特别是在美国, 自20世纪80年代后期 WSR-88D业务雷达在全美的布网应用开始, 随着雷达资料的积累, 已经开展了大量的雷达气候研究方面的工作。在国际上, 也有学者利用长时间的雷达估测降水资料进行对流性降水的气候统计研究, 这也可以归属于雷达气候研究范畴。通过雷达气候研究, 不但能够为理解强对流天气的发展演变机制提供有效帮助, 为对流风暴和对流性强降水的临近预报和预警提供背景资料和科学依据, 也能够为评估和发展对流尺度数值预报、定量降水预报以及天气和气候系统模式提供一个评判基准。

随着全球城市化进程的加剧和大型城市的不断扩展, 城市和城市群地区强对流天气的发展演变越来越受到人们的关注。强对流天气经常会给城市地区带来重大的灾害损失, 包括人员伤亡、交通阻塞、城市建筑受损等。而城市下垫面的改变和城市热岛效应^[3-5]等也会对强对流天气的发生和发展产生明显影响。如果将雷达气候与城市气象特别是城市地区对流天气研究相结合, 将有助于理解城市地区强对流天气的发展演变特征以及城市环境对强对流天气的影响机理, 对提升城市地区强天气的发展演变和临近预警起到重要推动作用。

本文主要介绍近年来国内外特别是国际上关于雷达气候研究方面的一些进展, 并从城市化影响对流风暴和强降水发展演变以及从雷达气候角度研究城市地区强天气两个方面, 做了一些研究进展的简介。最后, 对雷达气候研究及其在城市地区强天气临近预报方面的应用前景进行了讨论。

2 雷达气候研究进展

2.1 对流日变化气候特征及盛行风影响

雷达探测资料具有高时空分辨率的特性, 对揭示对流天气(包括对流风暴和对流性降水)时空分布的短周期变化特别是日变化特征具有独特优势。而对流的日变化特征对强天气的临近预报预警以及对流尺度数值天气预报物理过程的改进等均具有重要意义。因此, 对流天气日变化特征研究成为雷达气候研究的主要内容之一。世界各地的学者对此开展了大量的研究, 揭示了不同地区对流风暴和对流性降水的日变化特征, 以及不同天气系统、气候特征和地形强迫对对流日变化的影响机理。在美国, Carbone等^[6-7]和 Ahijevych等^[8-9]通过对美国大陆多年的WSR-88D雷达资料的统计研究, 分析了美国大陆对流性降水回波出现频率的时空分布特征, 揭示了降水回波存在明显的

日循环和半日循环的周期性传播气候特征, 以及由于落基山等山区的动力抬升和局地热力强迫作用, 导致降水系统存在明显的山区新生并向下游(向东)不断传播的特征(如图1和图2所示)。Carbone等^[6]的研究同时也指出, 对流的日循环特征主要是由于太阳加热作用的日变化而形成的, 并且具有不可预报性, 因为数值预报包括资料同化系统主要是基于准平衡气流和天气尺度强迫的动力学基础而设计的, 其对由于天气尺度而形成的具有较长周期性变化和生命史特征的对流系统具有较高的可预报性, 而盛夏期间主要以热力对流系统为主, 所以数值预报的准确性要差很多。Hsu等^[10]利用覆盖美国大陆的8年暖季雷达估测降水资料, 通过波谱分解方法, 得出了美国大陆对流性降水存在半天、1天、4天等多个周期性变化特征, 其中日循环特征最为明显, 而且小于5天的高频振荡表明中尺度对流系统主要以向东传播为主, 与Carbone等^[6]得

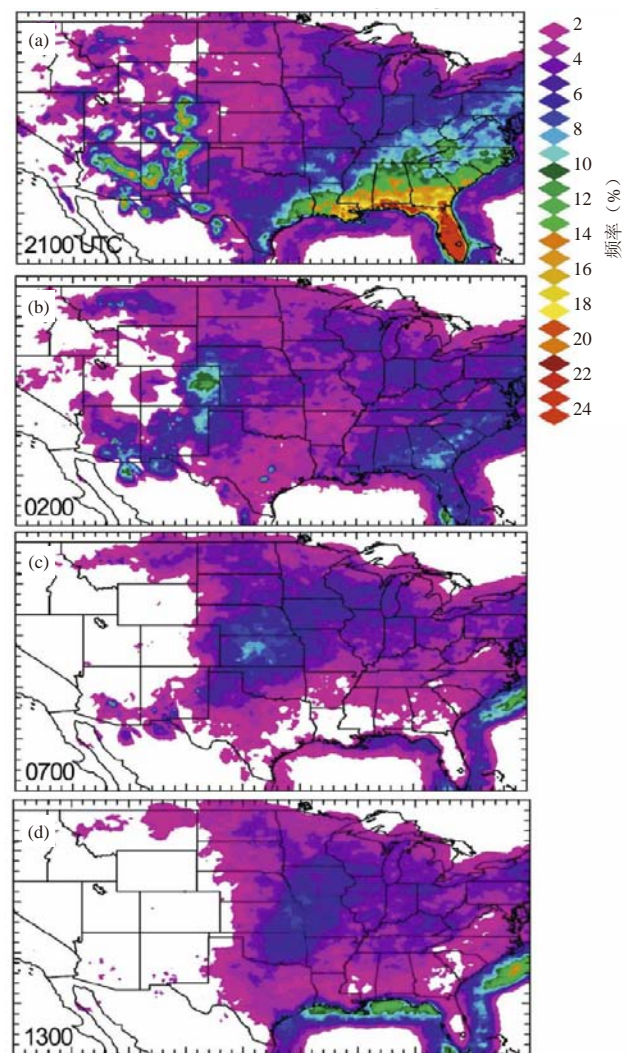


图1 美国大陆6—8月雷达回波出现频率^[7]
(a) 2100UTC; (b) 0200UTC; (c) 0700UTC; (d) 1300UTC

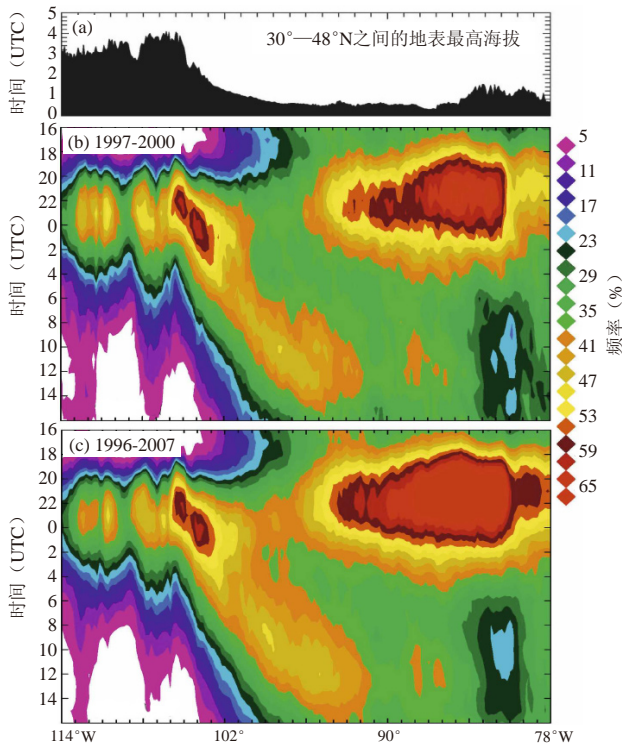


图2 美国大陆6—8月雷达回波出现频率Hovmöller图^[7]
(沿纬度平均的时间—经度图)

(a) 对应的平均地形廓线; (b) 1997—2000年资料统计结果; (c) 1996—2007年资料统计结果

出的结论相似。Lang等^[11]和Rowe等^[12]利用北美季风试验加强观测期间的雷达观测资料,对2004年7—8月发生在美国西南部及墨西哥湾北部的强对流个例进行了统计分析,发现地形强迫对对流风暴的每日新生和传播起到关键作用,由于局地加热对流一般在山区生成,然后在向下游传播的过程中得到明显加强。在欧洲,Weckwerth等^[13]利用多年的雷达观测资料,对德国西南部到法国北部地区的对流风暴新生和加强的气候特征进行了研究,揭示了这一地区的对流风暴存在显著的日循环和频率峰值特征,每日加热和山区地形强迫对风暴的新生和加强起到关键作用,对流首先在山区大量形成,大约2h后到达平原地区。Pavai等^[14]利用中国研制的WSR-98D雷达的多年探测资料,研究了罗马尼亚Bobohalma地区对流出现频率的变化特征,发现这一地区夏季对流的日变化与地形高度存在紧密关系,对流频繁地在较高地形的地区新生,然后向平原地区传播。

在中国,近年来主要基于地面观测和卫星资料,开展了不同地区的对流气候特征研究,特别是对流性降水的日变化特征研究,取得了很多重要的成果^[15-24],这里不做详细介绍。然而,基于高时空分辨率的雷达探测资料的对流气候特征研究工作则相对较少。Lin等^[25]利用多年的雷达探测资料以及闪电、探空和地面资料等,

研究了台湾地区在弱天气尺度强迫形势下午后对流风暴的气候特征,发现台湾地区在弱天气尺度形势下的对流风暴出现频率存在显著的午后最大峰值特征,对流频繁出现的地区与台湾的地形分布一致,且在弱天气尺度形势下,对流不存在明显的传播特征。Yeung等^[26]对36个影响香港地区的热带气旋个例的雷达回波和降水特征以及地形作用进行了统计分析研究,为热带气旋及其降水临近预报提供了背景资料。

随着中国大陆新一代天气雷达布网的完成和雷达资料的多年积累,在我国不同地区开展精细的雷达气候研究的资料条件已经逐渐成熟。特别是在京津冀地区,为做好北京奥运会等大型活动的气象保障服务,已经在北京及其周边地区建立了日趋完善的新一代天气雷达网,并且具备了较为可靠的实时雷达资料质量控制体系,也积累了多年的雷达组网资料^[27-28]。这些条件为这一地区的雷达气候研究奠定了良好的基础。Chen等^[29]首次利用2008—2011年暖季5—8月份京津冀地区6部新一代天气雷达逐6min的反射率因子三维拼图资料,研究了这一地区对流风暴出现频率的暖季平均日变化特征,以及暖季主要月份(6、7、8月)对流风暴日变化的差异。暖季平均日变化特征研究揭示了京津冀西北部山区是暖季对流活动的主要源地,由于太阳加热,西北部山区在午后风暴出现频率显著增加,且大多数的对流风暴从西北部山区向山脚甚至东南平原地区传播和发展。到下午接近傍晚时段,在京津冀山脚附近,特别是在北京及其周边地区,对流风暴出现频率显著增大,风暴的增强和新生与地形对低层偏南暖湿气流的强迫上升存在密切联系(图3)。在夜间到凌晨时段,对流风暴主要在东南部平原地区发展,风暴频率随着时间的推移逐渐减小,风暴频率最低时段发生在早晨。对比图2和图3可以看出,京津冀地区的对流风暴日循环和传播特征与Carbone等^[7]对美国大陆的对流风暴日循环和传播的研究结果存在一定的相似性。上述研究结论也与Zheng等^[16]以及He等^[22]利用卫星资料开展的这一地区对流日变化特征的研究结论类似。从Chen等^[29]的研究结果来看,区域平均的风暴频率显示,京津冀地区的对流风暴存在显著的双峰值特征:主要峰值是由于地形强迫导致的午后到傍晚时段山脚附近的对流频发和增强,次要峰值是由于平原地区有利的触发机制导致的夜对流频发(图4)。He等^[22]利用数值模式资料分析后发现,华北平原地区有利的夜对流触发机制与山区—平原的次级环流上升支以及夜间东南平原地区的低空西南急流存在密切联系。在Chen等^[29]的研究中,通过对比暖季各月的对流风暴出现频率特征发现,西北部山区午后热

对流出现频率最高在6月，最低在8月，而在平原地区午后对流出现频率最高在7月。地形强迫效应对对流风暴的增强和新生的影响，表现最为明显是在7月，其次是6月。对于平原地区夜对流而言，出现频率最高在7月和8月，而6月较低。暖季各月的风暴出现频率的平均日变化趋势和双峰值特征与整个暖季的平均趋势相似，表明6—8月的对流风暴控制了整个暖季这一地区对流风暴的日变化特征。平均而言，7月这一地区的暖季对流风暴（包括长生命史的中尺度对流系统和短时生命史的对流单体）的出现频率最高（图4）。对流风暴在6月和7月存在明显的自西北向东南的传播特征，且6月传播速度最快。

上述国内外关于对流日变化气候特征的研究是目前雷达气候研究的主流，其成果主要揭示了不同地区对

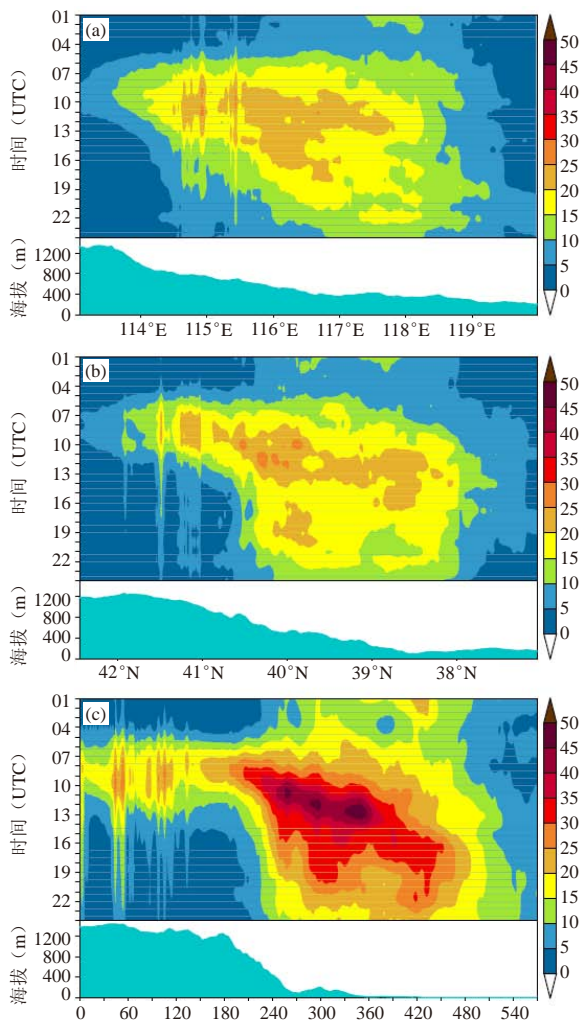


图3 京津冀地区暖季40dBz以上雷达回波出现频率 Hovmöller图^[29]

(a) 纬向平均结果；(b) 径向平均结果；(c) 西南—东北向平均结果（每幅图下方的蓝绿色区域为对应的地形平均廓线）

流的形成、加强和日循环传播与太阳加热、地形强迫以及天气尺度和中尺度系统的活动存在紧密联系。一般来说，山区作为主要的热源，是夏季午后对流的主要源地^[9, 11-13, 25, 29-30]。在一些地区，对流具有明显的向下游移动和发展传播的特征，而且在对流下山的过程中，由于地形强迫，使得低层吹来的暖湿空气产生强烈抬升，从而导致对流（包括对流风暴和对流性降水）在山脚附近明显加强，也频繁出现对流风暴的新生^[8-13, 29]；而在另一些地区，特别是以山区为主的地区（如我国的台湾地区），如果没有强的天气尺度系统的影响，对流的传播特征也不是非常明显^[25, 30]。

早在20世纪70年代，Kuo等^[2]开展的雷达气候研究就揭示了暖季对流的发展演变和时空分布特征与盛行风存在密切联系。他们发现，对于美国Black Hills地区来说，因为不同方向的盛行风对应于不同的天气系统，对流回波在西南、西北向的盛行风形势下出现的频率最高。近年来，一系列的雷达气候研究进一步表明，对流风暴和对流性降水每日新生、演变和传播与盛行风存在密切关系^[11, 26, 30-31]。Lang等^[11]和Rowe等^[12]的研究发现，由于盛行风与环境垂直风切变、大气波动等存在密切联系，再加上地形的影响，因此对对流的演变传播和时空分布特征产生重要影响。Yeung等^[26]和Saxen等^[30]的雷达气候研究也发现，不同的盛行风形势下，对流的出现频率差异明显。对流发展演变与盛行风的密切关系，也被数值模拟研究所证实^[32]。最近，利用京津冀地区6部雷达4年暖季的反射率因子资料，计算了500和925hPa

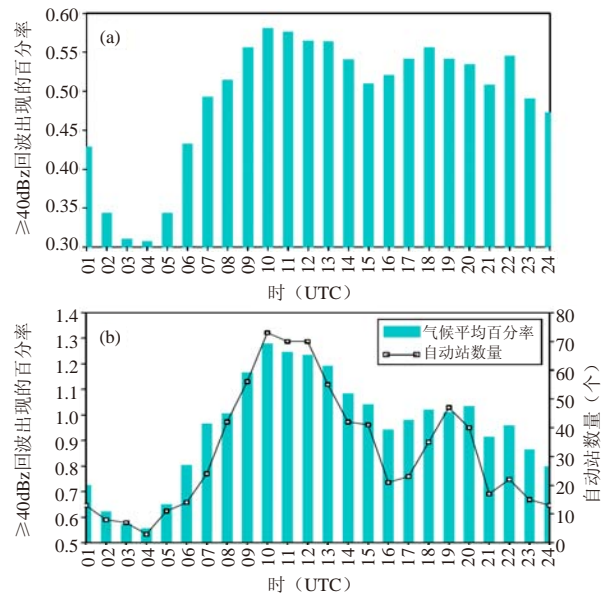


图4 暖季平均的逐小时40dBz以上雷达回波出现的百分率^[29]
(a) 京津冀地区的平均结果；(b) 北京地区的平均结果（图b中的粗黑线表示在每个小时时段过去24h雨量记录达到50mm以上的北京地区自动站数量）

不用盛行风向下的对流风暴的出现频率分布，可以看出其存在显著的差异：在500hPa，西西南（WSW）和西西北（WNW）风向形势下风暴出现频率显著偏高；在925hPa，南西南（SSW）和南东南（SSE）风向形势下，风暴出现频率显著偏高（图6）。初步分析也表明，在500hPa WSW和WNW风向下，对应的是偏西气流，主要与影响京津冀地区暖季对流风暴的三类天气系统（冷涡、西来槽、西太平洋副热带高压）存在直接联系。在925hPa SSW和SSE风向下，对应的是京津冀南部平原地区的低层偏南风，有利于低层偏南暖湿气流的向北推进，并在地形强迫抬升作用下，对对流的发生和加强起到关键作用。

如雷达气候研究结果所言，不同高度的盛行风代表了不同的天气系统和形势。一般而言，500~700hPa高度的盛行风代表了影响对流移动和传播的天气系统或引导气流，而低层（如925hPa高度）的盛行风则代表了低空急流的方向和强度，这些均与对流的每日发展演变和传播存在密切关系。进一步地，这种高低空风形势相配合所形成的垂直风切变（包括风速切变和风向切变）以及地形对低空急流带来的暖湿空气的强迫抬升作用，对对流日变化也具有显著的正面影响。这从Parker等^[33]针对美国大陆对流日变化以及Lang等^[11]和Rowe等^[12]针对北美季风试验区域（墨西哥湾北部地区）对流日变化的雷达气候研究中也均得到了很好的验证。

另外，基于雷达观测资料，也可以开展对流风暴和对流性降水的月季、季节、年季变化等的气候特征研

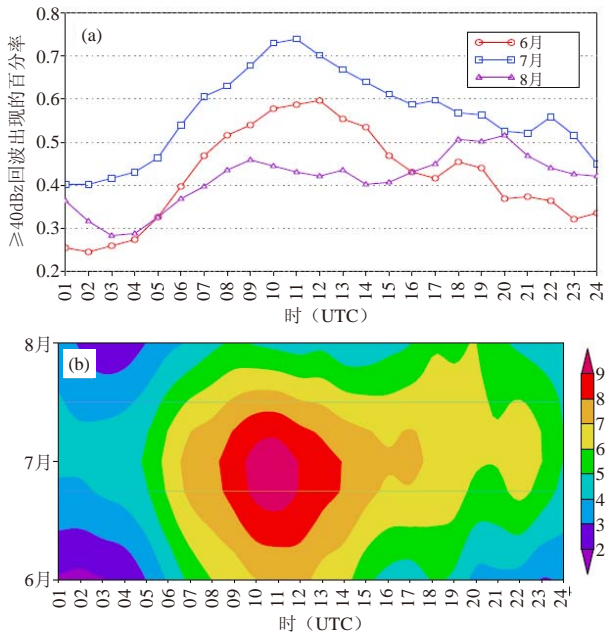


图5 京津冀区域平均的暖季6—8月各月逐小时40dBz以上雷达回波出现百分率 (a)，以及出现频率的月—小时分布图 (b) ^[29]

究。Hocker等^[34]利用10年的雷达反射率因子资料，研究了发生在美国Oklahoma地区的飚线系统的出现频率年季变化、月季变化、日变化以及时空分布和移动路径等的气候特征。Murray等^[35]利用10年的雷达资料，研究了美国东北部地区对流风暴的时空分布特征，揭示了这一地区的对流风暴时空分布存在明显的年季差异，以及与天气尺度系统的年季活动规律密切相关。Carbone等^[36]也尝试利用7年暖季的雷达资料研究揭示美国大陆对流的年季变化，并对北美季风环流和ENSO对对流发展演变的影响进行了初步分析。但是，类似的雷达气候研究均需要利用较长时间积累的雷达资料，这样从气候学意义上来讲才具有一定的可靠性，这方面的工作目前开展得还不是很多。

2.2 风暴属性的识别追踪和统计

对于雷达气候研究，也有一些学者采用风暴属性追踪统计的方法进行。这种方法首先是基于雷达三维反射率因子回波，利用风暴识别和追踪分析算法对每个风暴单体的属性进行识别、分析和追踪，然后再对得到的所有风暴的有效属性进行统计分析，得出某一地区对流风暴属性及发展演变和传播的气候特征。目前，比较有代表性的对流风暴识别和追踪分析算法包括风暴三维属性追踪算法TITAN^[37]以及风暴质心追踪算法SCIT^[38]，采用风暴属性追踪统计的雷达气候研

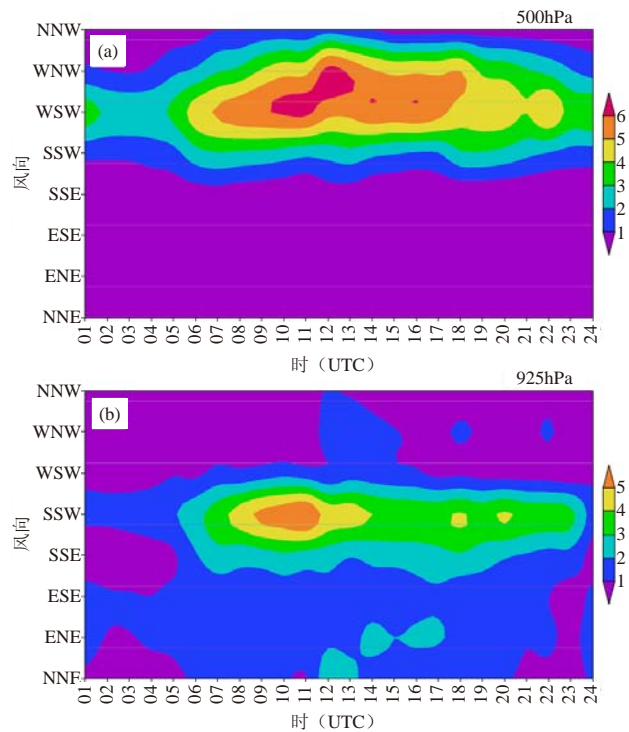


图6 40dBz以上雷达反射率因子指示的京津冀区域平均的逐小时风暴出现频率的风向—小时分布图 (a) 500hPa; (b) 925hPa

究也基本上基于这两种算法。Henry^[39]利用TITAN, 通过对美国丹佛附近的雷达观测资料进行风暴追踪和统计研究, 揭示了83%的单体风暴的生命史不会超过30min, 而超过88%的多单体风暴和超级单体风暴的生命史超过30min, 为丹佛地区对流风暴尺寸和强度的临近预报提供了改进的科学基础。Saxen等^[30]利用TITAN算法对美国一个多山地区的对流风暴属性的追踪统计也表明, 风暴的生命史、平均面积、移动传播速度、强度以及回波顶高等, 均表现出显著的差异和明显的峰值特征。在欧洲和南美洲, 也有学者尝试利用TITAN进行风暴属性的识别和追踪统计, 并得出了一些有意义的、定量的风暴气候学属性特征, 为对流的诊断分析和临近预报提供了科学背景支持^[40-41]。Mohee等^[42]利用SCIT算法, 对美国北Dakota州的对流风暴属性的气候特征进行了研究, 发现风暴出现频率在傍晚到凌晨存在明显的峰值, 风暴的平均生命史为24min左右, 平均移速为16.4m/s左右, 风暴向偏东北方向的移动趋势最为明显, 在暖季每月的变化差异也很明显, 并开展了一系列的对流风暴气候特征属性的分析。

在国内, 韩雷等^[43]首次利用2003—2007年5—8月天津塘沽的新一代多普勒天气雷达三维反射率因子数据, 对天津及邻近地区的对流风暴的气候分布特征进行了统计分析。通过对风暴的识别和追踪结果的统计分析, 给出了京津地区对流风暴的面积、体积、顶高、最大反射率因子、生命史和运动规律等定量的强对流风暴气候统计特征。从韩雷等^[43]给出的对流风暴面积和体积的地理分布可以看出(图7), 北京西北部 and 西南部地区风暴的面积较小, 而东部则明显较大。根据Chen等^[29]对该地区对流日变化的雷达气候

研究, 并依据天气学分析, 可以推测出西北部山区的对流风暴可能更多为热力对流, 空间与时间尺度都较小, 而在东部平原地区出现具有较好组织性和长生命史特征的对流风暴系统的频率明显较高。目前, 作者正在利用京津冀地区6部雷达5年(2008—2012年)暖季5—9月的反射率因子三维拼图资料和TITAN算法, 对这一地区的对流风暴三维属性进行细致的气候特征统计研究, 相关的工作这里不再介绍。

对基于高时空分辨率雷达三维资料追踪识别得到的对流风暴的三维属性进行定量统计分析, 是雷达气候研究的一大特色, 目前来说, 也是其他资料和方法所不能比拟的。与使用常规观测资料和静止卫星红外亮温的统计结果相比, 使用雷达资料进行这样的气候统计不仅可以给出对流风暴的三维空间信息的统计结果(如体积和顶高等), 还可以给出风暴的生命史、移速、移向等定量气候分布特征, 从而可进一步充实对某一地区对流天气气候特征的认识。

2.3 基于雷达气候研究的个例分析

这里, 基于京津冀地区雷达气候初步研究结果^[29], 对三个影响北京地区的典型对流风暴个例进行对比分析, 分别是2012年“7·21”特大暴雨以及2013年“6·24”和“6·28”强对流天气个例。图8是40dBz以上雷达组合反射率因子回波的时间序列图。由图可以看出, 不同天气形势下的对流风暴, 均存在明显的由山区和山脚向下游平原地区传播发展的特征。而且, 从这三个个例来看, 在接近傍晚时段, 在京津冀山脚附近特别是在北京及其周边地区, 对流风暴的面积明显增大, 组织性得到显著加强。从北京南郊观察台的探空来看(图略), 对于这三个个例, 低层925hPa环境风均为明显的偏南风, 这表明对流风暴的

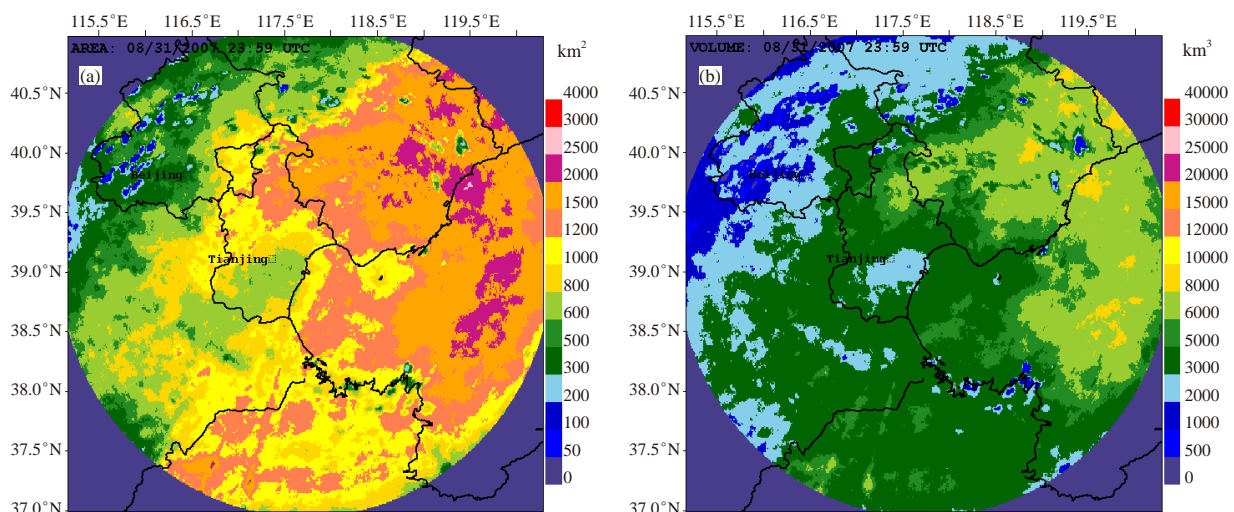


图7 基于TITAN追踪识别结果统计得到的天津及其邻近地区对流风暴平均面积(a)和体积(b)的地理分布^[43]

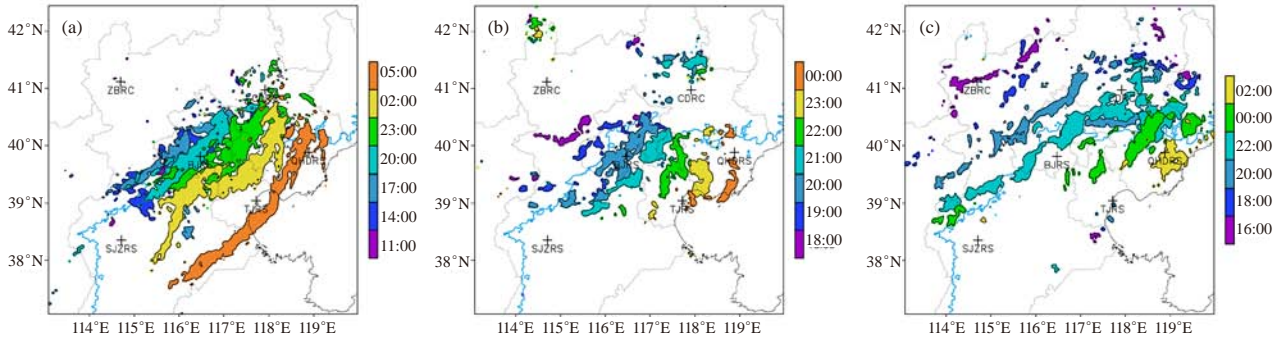


图8 京津冀地区雷达反射率因子 $\geq 40\text{dBz}$ 的对流风暴回波时间序列

(a) 2012年7月21日; (b) 2013年6月24日; (c) 2013年6月28日(图中粗蓝线为200m地形等高线;图中不同颜色代表不同时间(北京时间)的40dBz以上回波覆盖范围)

增强和新生与地形对低层偏南暖湿气流的强迫上升存在密切联系。上述三个个例分析与Chen等^[29]的雷达气候学研究结果一致。对比这三个个例来看,“7·21”特大暴雨个例的雷达回波传播速度明显偏慢,从山脚传播到渤海湾附近大约耗时9h,而“6·24”和“6·28”强对流个例的雷达回波传播速度较快,从山脚传播到渤海湾仅耗时4h左右。Chen等^[29]的雷达气候学研究指出,京津冀地区的对流风暴在6和7月存在明显的自西北向东南的传播特征,且6月传播速度最快,也符合这三个个例的实际观测结果。从500hPa探空风来看,“7·21”和“6·28”个例500hPa环境风为WSW,风暴向下游的传播方向更偏东,而“6·24”个例的500hPa环境风则为WNW,风暴的传播方向更偏向东南。这也与我们最新得出的雷达气候学研究结果一致。

精细的雷达气候研究结果是强对流天气精细化预报所必须的科学背景,可以用来指导预报人员对实际的强天气个例进行预报,也可以将雷达气候研究结果集成进自动化的强天气客观预报系统中,用来发展和改进强天气的自动化客观预报和预警^[25, 28, 30]。

3 雷达气候在城市强天气临近预报中的应用

3.1 城市对局地降水及强天气的影响

近年来,国际上开展了大量的城市化和城市区域特征对局地降水及强天气影响的研究。对于局地降水,大部分研究都表明,城市会导致局地降水量及强降水频次的增加,尤其在城市的下风方,这种效应更加明显^[44-50]。但是,部分学者认为,城市效应会导致局地降水有不同程度的减少^[51-53]。总之,目前城市对局地降水的可能影响问题,国际上存在两种相反的观点:多数研究者认为,城市的动力、热力作用使城区和城市下游地区降水增加;有一些研究者认为,城市大气污染物的微物理过程会使城市下游地区的降水减少。我国就城市对局地降水的影响也开展了一些研

究,得到的结论也不尽相同^[54-57]。关于城市对局地强对流天气的影响,国内外研究表明,由于城市规模的不断扩大,导致城市下垫面变化并引起城市热岛等城市效应的不断加强,非常有利于近地面辐合的增强和局地热力环流的产生,导致暖湿气流上升强度加大,从而引起城市地区强对流天气的新生和强烈发展^[58-68]。总的来说,城市化和城市特征对局地降水和强对流天气的影响存在较强个性,不同地区的研究结论不尽相同。在我国城市化加剧的今天,城市对局地降水和强对流天气的影响究竟如何,降水及对流的新生、增强或减弱与热岛强度、城市边界层特征等存在怎样的一种关系,尚需进一步研究。

3.2 雷达气候与城市强天气临近预报的应用结合

从上文的介绍来看,一方面,基于高时空分辨率雷达观测资料的雷达气候研究,能够揭示对流风暴和对流性降水的精细时空演变特征;另一方面,虽然总体来说城市区域的尺度相对较小,但城市对对流天气的影响却非常显著。因此,如果利用雷达气候研究来揭示城市地区对流的时空变化特征,就具有一定的优越性。但是,就目前来说,国内外在这方面开展的工作还不是很多。Bentley等^[69]利用10年的雷达反射率因子拼图资料,分析了美国Atlanta地区的对流气候变化特征,发现在Atlanta的城市地区以及城市扩展地区,与强的城市热岛效应相对应,对流风暴的出现频率明显偏高,表明城市对局地强对流的发生和增强具有明显正面效应。另外,城市下垫面的改变,也能够引起对流风暴的动力和热动力特征的明显变化。最近,Niyogi等^[70]开展了美国印第安纳州最大城市和首府Indianapolis地区对流风暴的雷达气候研究,并对城市地区和周边非城市地区的对流特征进行了比较,揭示了大城市对区域对流的影响。他们发现,在城市地区超过60%的对流风暴会改变结构,而在非城市地区,

仅为25%。白天的城市环境对对流风暴的影响明显高于夜晚。雷达气候分析指出这一地区的对流风暴在接近城市地区上风方时易出现分裂而在下风方时又极易出现合并,使得在城市地区上风方主要以中等尺寸的对流风暴为主,而在下风方则是小尺寸和大尺寸风暴出现的概率较高。同时,Niyogi等^[70]开展的敏感性数值模拟试验也表明,如果在模式中去掉Indianapolis城市地区边界层等的影响时,导致模式中的区域辐合和对流、地面能量平衡、边界层结构等发生明显变化,从而导致实际发生的对流风暴不能够被很好模拟出来。除了利用雷达资料外,Ntelekos等^[71]也利用闪电资料和地面观测资料,分析了美国马里兰州Baltimore附近的城市群地区暖季对流风暴的时空分布特征,包括季节变化、日变化和空间频率等,发现风暴频率在城市地区与非城市地区存在显著差异,并指出这与城市热岛等城市化效应存在密切联系。Hand等^[31]也利用地面观测和卫星资料,分析了美国Oklahoma城附近的

暖季降水气候特征,发现在弱天气尺度强迫形势下,城市效应对降水影响最为明显,城市不同地区的湿度分布非常不均匀,城市下风方地区湿度最大,降水也经常会出现异常。在上述Chen等^[29]针对京津冀地区的雷达气候研究中,也透视出北京城市效应对对流风暴的发生发展起到了关键作用。从北京城区附近风暴概率变化的时段来看,20:00—21:00之间观测的城区内对流风暴出现频率仍然较低,而从21:00开始至00:00,城区内观测的孤立对流风暴单体出现的频率突然增大(图9)。上述分析表明此段时间内北京城市效应对对流风暴的加强或者新生的作用最为明显,这可能与城市热岛及城市陆面不均匀性存在密切关系,但还需要进一步去研究。上述为数不多的雷达气候学与城市对流特征相结合的研究表明,城市局地环流特征(如城市热岛环流)对局地强对流的发生和增强具有明显的正面效应。另外,城市特殊的下垫面和边界层特征,也对对流风暴的结构和热动力特征产生明显影响。

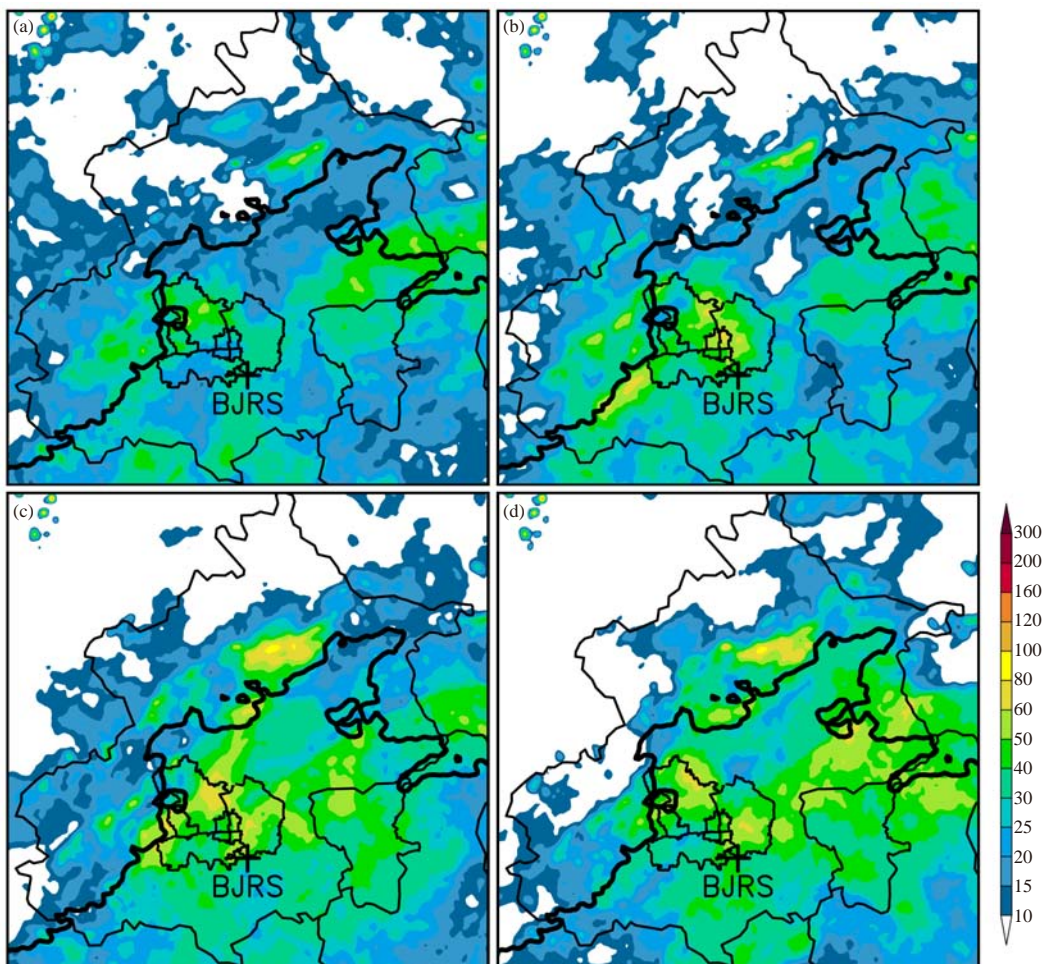


图9 北京地区雷达反射率因子 $\geq 40\text{dBz}$ 的对流风暴回波出现频率
(a) 20:00—21:00; (b) 21:00—22:00; (c) 22:00—23:00; (d) 23:00—00:00
(北京时; 图中粗黑线为200m地形等高线; 修改自文献[29]的图2)

可以看出, 如果将雷达气候研究与城市地区对流天气研究相结合, 不但可以掌握城市地区和城市化对流风暴和对流性降水的影响, 也可以改进对城市地区对流天气的临近预报和预警。在国际上, 雷达气候研究结果作为一个区域强对流天气发生发展和演变传播的气候背景资料, 已经被应用于局地对流天气的自动临近预报试验中^[30, 72]。在北京自动临近预报系统 (BJANC) 的参数调整优化和系统评估中^[28], 我们也已经初步应用了一些雷达气候研究结果^[43, 73], 但如何将上述最新的京津冀雷达气候研究结果^[29]应用于对流天气的自动临近预报中, 许多方面还有待于进一步深入研究。更为重要的是, 如何将雷达气候研究专门应用于城市地区对流天气精细的临近预报和预警中, 目前还未发现国际上有任何的报道或出版的论文。基于以往的研究经验, 可以认为, 对于一个特定的城市或城市群地区, 发展一套集雷达气候研究结果、城市热岛效应、城市下垫面影响效应、城市冠层和城市水文特征等在内的城市地区对流天气概念模型, 同时在模型中也必须考虑一些精细的对流热动力特征^[74-80], 并将概念模型集成进对流天气临近预报的专家系统中 (可利用类似于文献^[28]和^[72]的模糊逻辑集成方法), 再结合城市地区精细的探测资料分析和地理信息系统 (GIS), 将能够有效提升对城市地区对流天气和对流性降水的监测分析和临近预报、预警能力。另外, 利用临近预报和数值预报的融合技术 (Blending), 也是提升对流尺度定量降水预报特别是城市地区暴洪短时临近预报能力的重要手段^[81-82]。

4 结束语

通过对国内外雷达气候研究成果的描述可以看出, 雷达气候研究对于理解一个区域内对流风暴和对流性降水的精细时空分布和演变特征非常关键, 也非常有助于作为中小尺度天气现象的对流天气的临近预报和预警能力以及定量降水预报能力的提升。从本文的介绍可以看出, 国际上特别是在美国, 已经针对不同区域的对流风暴和对流性降水, 开展了大量的雷达气候研究。目前, 美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 强风暴预测中心已经有专门的网页提供美国本土几乎每部雷达站覆盖范围内的强天气气候特征图 (包括短时大风、冰雹、龙卷的出现报告统计图, 强天气年际变化、月季变化、日变化图), 以及相关的分析表格, 供预报人员进行强天气临近预报和预警业务时参考 (网址: www.spc.noaa.gov/climo/online/rda/)。美国佛罗里达州

立大学也制作了一套佛罗里达州和南佐治亚州的雷达气候学数据集, 为佛罗里达州环保部门的地面降水和地下水资源模拟以及NOAA的水文气象分析和预报等提供科学参考 (网址: fuelberg.met.fsu.edu/research/fdep/gguina/climo.html)。本文也介绍了雷达气候研究结果可在强天气自动临近预报专家系统中得到应用。另外, 雷达气候研究结果可用于雷达杂波和雷达观测偏差分析, 从而有助于改进雷达的观测质量, 进而也能够改进雷达的定量降水估测效果^[83-84]。但是, 我国在雷达气候研究方面开展的系统性工作还不是很多。目前, 我国新一代天气雷达已经基本完成布网, 部分地区也已经积累了多年的雷达观测资料, 开展雷达气候研究的资料条件业已成熟。作者基于上海及其周边地区6部新一代天气雷达在2010年5月1日—9月14日上海世博会期间的逐6min反射率因子观测资料, 统计得到了上海及其周边地区2010年暖季的对流风暴日循环特征 (图10)。从这个初步的雷达气候结果可以看出, 至少在2010年暖季, 上海及其周边的对流风暴存在明显的日循环和传播特征, 其中影响上海地区的对流峰值主要出现在10:00—12:00之间, 但是不同时段影响的区域完全不同。

另一方面, 近年来, 随着国家经济发展和战略调整, 我国城市化进程的速度显著加快, 不但大城市发展规模逐渐扩大, 而且也已经涌现出了“长三角”、“珠三角”、“环渤海”等大中城市云集的城市群地区。国内外研究也说明, 城市环境对对流天气的影响非常明显。而且更为重要的是, 城市地区对对流天气灾害的承载能力更加脆弱, 需要更为准确、及时和精细化的对流天气临近预报和预警服务。因此, 如前文所言, 这就促使我们应该将雷达气候研究与城市地区对流天气研究有效结合, 从而提升城市地区对流天气的精细临近预报和预警能力。在国际上, 已经开始尝试将雷达气候研究与地理信息系统 (GIS) 相结合, 对对流风暴和对流性降水的气候特征进行更为精细的研究^[34, 85], 这也为城市 (群) 地区精细尺度的对流天气研究与雷达气候研究及城市环境特征相结合提供了一种新思路。

当然, 雷达气候研究也具有一定不确定性。首先, 天气雷达的探测资料具有一定的局限性, 比如雷达地物杂波 (包括城市区域的高建筑物杂波)、亮带回波、波束阻挡、不同雷达之间的标定差异等, 均影响到天气雷达对真实对流回波的探测, 进而影响到雷达气候研究的效果^[86]。其次, 在雷达站稀疏的地区, 一些区域成为雷达探测的“空缺”区, 而这些区域将不可能获得有效的雷达气候研究结果^[86]。另外, 正如

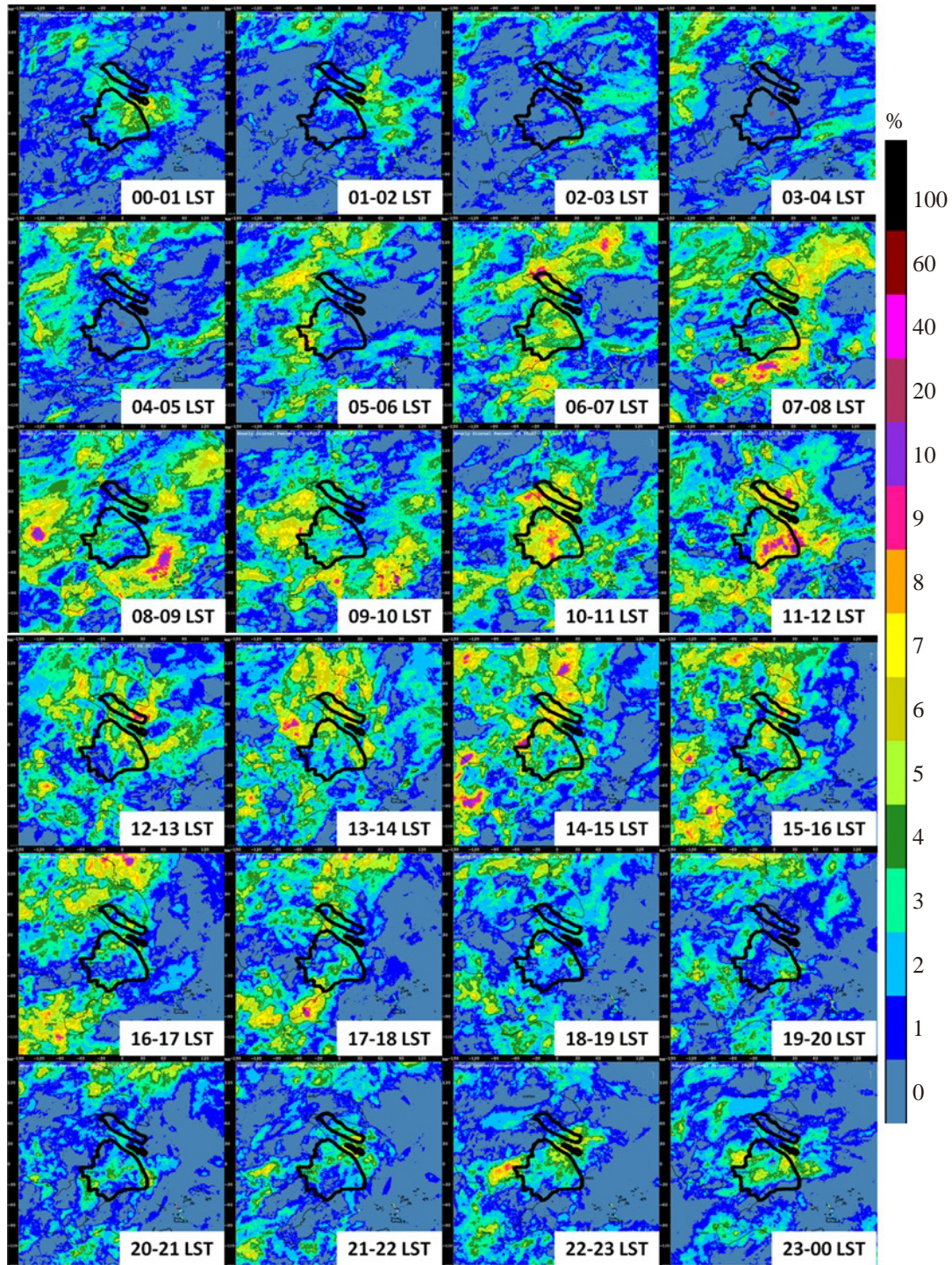


图10 上海及其周边地区雷达反射率因子 $\geq 35\text{dBz}$ 的对流风暴回波出现概率(%) (图中粗黑线表示上海地区)

Chen等^[29]所强调的一样,利用几年的雷达资料进行暖季对流天气气候特征的研究,就需要确保影响这一地区暖季的大气环流不出现异常,否则,雷达气候研究结果可能不具有代表性。在如何将雷达气候研究有效应用于城市地区对流天气的临近预报和预警的研究和业务中,也面临许多的课题。

参考文献

- [1] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等.多普勒天气雷达原理与业务应用.北京:气象出版社,2006.
- [2] Kuo J T, Orville H D. A radar climatology of summertime convective clouds in the Black Hills. *J Appl Meteor*, 1973, 12(2): 359-368.
- [3] Rao P K. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite. *Bull Amer Meteor Soc*, 1972, 53(8):

- 647-648.
- [4] Carlson T N, Augustin J A, Boland F E. Potential application of satellite temperatures measurements in the analysis of land use over urban areas. *Bull Amer Meteor Soc*, 1977, 58(12): 1301-1303.
 - [5] Matson M, McClain E P, McGinnis D F, et al. Satellite detection of urban heat islands. *Mon Wea Rev*, 1978, 106(12): 1725-1734.
 - [6] Carbone R E, Tuttle J D, Ahijevych D A, et al. Inferences of predictability associated with warm season precipitation episodes. *J Atmos Sci*, 2002, 59(13): 2033-2056.
 - [7] Carbone R E, Tuttle J D. Rainfall occurrence in the U.S. warm season: The diurnal cycle. *J Climate*, 2008, 21(16), 4132-4146.
 - [8] Ahijevych D A, Carbone R E, Davis C A. Regional-scale aspects of the diurnal precipitation cycle. 31st Inter Conf on Radar Meteor, Amer Meteor Soc, Seattle, WA, 2003.
 - [9] Ahijevych D A, Davis C A, Carbone R E, et al. Initiation of precipitation episodes relative to elevated terrain. *J Atmos Sci*, 2004, 61(22): 2763-2769.
 - [10] Hsu H M, Moncrieff M W, Tung W W, et al. Multiscale temporal variability of warm-season precipitation over North America: Statistical analysis of radar measurements. *J Atmos Sci*, 2006, 63(9): 2355-2368.
 - [11] Lang T J, Ahijevych D A, Nesbitt S W, et al. Radar-observed characteristics of precipitating systems during NAME 2004. *J Climate*, 2007, 20(9): 1713-1733.
 - [12] Rowe A K, Rutledge S A, Lang T J, et al. Elevation-dependent trends in precipitation observed during NAME. *Mon Wea Rev*, 2008, 136(12): 4962-4979.
 - [13] Weckwerth T M, Wilson J W, Hagen M, et al. Radar climatology of the COPS region. *Q J R Meteor Soc*, 2011, 137: 31-41.
 - [14] Pava C, Vamos C. Statistical characteristics of reflectivity field in areas covered by the Bobohalma WSR-98D radar. *Romanian J Meteor*, 2006, 8(1-2): 1-20.
 - [15] Wang C C, Chen G T J, Carbone R E. A climatology of warm-season cloud patterns over East Asia based on GMS infrared brightness temperature observations. *Mon Wea Rev*, 2004, 132(7): 1606-1629.
 - [16] Zheng Y, Chen J, Chen M, et al. Statistic characteristics and weather significance of infrared TBB during May-August in Beijing and its vicinity. *Chin Sci Bull*, 2007, 52(24): 3428-3435.
 - [17] Zhang H, Zhai P. Temporal and spatial characteristics of extreme hourly precipitation over Eastern China in the warm season. *Adv Atmos Sci*, 2011, 28(5): 1177-1183.
 - [18] Zhai P, Zhang X, Wan H, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. *J Climate*, 2005, 18(7): 1096-1108.
 - [19] Yu R, Zhou T, Xiong A, et al. Diurnal variation of summer precipitation over contiguous China. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L01704, doi: 10.1029/2006GL028129.
 - [20] Yu R, Xu Y, Zhou T, et al. Relation between rainfall duration and diurnal variation in the warm season precipitation over central eastern China. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L13703, doi: 10.1029/2007GL030315.
 - [21] Yin S, Chen D, Xie Y. Diurnal variations of precipitation during the warm season over China. *Int J Climatol*, 2009, 29: 1154-1170.
 - [22] He H, Zhang F. Diurnal variations of warm-season precipitation over Northern China. *Mon Wea Rev*, 2010, 138(4): 1017-1025.
 - [23] Chen G, Sha W, Iwasaki T. Diurnal variation of precipitation over southeastern China: Spatial distribution and its seasonality. *J Geophys Res*, 2009, 114: D13103, doi: 10.1029/2008JD011103.
 - [24] Chen G, Sha W, Iwasaki T, et al. Diurnal variation of rainfall in the Yangtze River Valley during the spring-summer transition from TRMM measurements. *J Geophys Res*, 2012, 117: D06106, doi:10.1029/2011JD017056.
 - [25] Lin P F, Chang P L, Jou B J D, et al. Warm season afternoon thunderstorm characteristics under weak synoptic-scale forcing over Taiwan Island. *Wea Forecasting*, 2011, 26(1): 44-60.
 - [26] Yeung L H, Chan S, Cheng P. Radar climatology of Hong Kong and its application to landfalling tropical cyclone rainfall estimation. 35th Inter Conf on Radar Meteor, Amer Meteor Soc, Pittsburgh, Pa, 2011.
 - [27] 陈明轩, 高峰. 利用一种自动识别算法移除天气雷达反射率因子中的亮带. *应用气象学报*, 2006, 17(2): 207-214.
 - [28] 陈明轩, 高峰, 孔荣, 等. 自动临近预报系统及其在北京奥运期间的应用. *应用气象学报*, 2010, 21 (4): 395-404.
 - [29] Chen M, Wang Y, Gao F, et al. Diurnal variations in convective storm activity over contiguous North China during the warm-season based on radar mosaic climatology. *J Geophys Res*, 2012, 117: D20115, doi:10.1029/2012JD018158.
 - [30] Saxen T R, Mueller C K, Warner T T, et al. The operational mesogamma-scale analysis and forecast system of the U.S. Army Test and Evaluation Command. Part IV: The White Sands Missile Range Auto-Nowcast System. *J Appl Meteor Climatol*, 2008, 47(4): 1123-1139.
 - [31] Hand L M, Shepherd J M. An investigation of warm-season spatial rainfall variability in Oklahoma City: Possible linkages to urbanization and prevailing wind. *J Appl Meteor Climatol*, 2009, 48(2): 251-269.
 - [32] Tucker D F, Crook N A. Flow over heated terrain. Part II: Generation of convective precipitation. *Mon Wea Rev*, 2005, 133(9): 2565-2582.
 - [33] Parker M D, Ahijevych D A. Convective episodes in the East-Central United States. *Mon Wea Rev*, 2007, 135(11): 3707-3727.
 - [34] Hocker J E, Basara J B. A 10-year spatial climatology of squall line storms across Oklahoma. *Int J Climatol*, 2008, 28: 765-775.
 - [35] Murray J C, Colle B A. The spatial and temporal variability of convective storms over the Northeast United States during the Warm Season. *Mon Wea Rev*, 2011, 139(3): 992-1012.
 - [36] Carbone R E, Tuttle J D, Ahijevych D A. Inter-annual and semi-diurnal variations in summertime precipitation. 31st Inter Conf on Radar Meteor, Amer Meteor Soc, Boston, 2003.
 - [37] Dixon M, Wiener G. TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting—A radar-based methodology. *J Atmos Oceanic Technol*, 1993, 10 (6): 785-797.
 - [38] Johnson J T, MacKeen P L, Witt A, et al. The storm cell identification and tracking algorithm: An enhanced WSR-88D algorithm. *Wea Forecasting*, 1998, 13(2): 263-276.
 - [39] Henry S G. Analysis of thunderstorm lifetime as a function of size and intensity. 26th Conf on Radar Meteor, Amer Meteor Soc, Norman, OK, 1993.
 - [40] Goudenhoofd E, Delobbe L. Statistical characteristics of convective storms in Belgium derived from volumetric weather radar observations. *J Appl Meteor Climatol*, 2013, 52(4): 918-934.
 - [41] Gomes A M, Held G. Characterization of storm properties during the TroCCiBras Experiment. 32nd Conf on Radar Meteor, Amer Meteor Soc, Albuquerque, 2005.
 - [42] Mohee F M, Miller C. Climatology of thunderstorms for North Dakota, 2002-06. *J Appl Meteor Climatol*, 2010, 49(9): 1881-1890.
 - [43] 韩雷, 俞小鼎, 郑永光, 等. 京津及邻近地区暖季强对流风暴的气候分布特征. *科学通报*, 2009, 54(11): 1585-1590.
 - [44] Takahashi H. Secular variation in the occurrence property of summertime daily rainfall amount in and around the Tokyo Metropolitan area (in Japanese with an English abstract). *Tenki*, 2003, 50: 31-41.
 - [45] Shepherd J M. A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future. *Earth Interactions*, 2005, 9: 1-27.
 - [46] Diem J E, Brown D P. Anthropogenic impacts on summer precipitation in central Arizona. *U S A Prof Geogr*, 2003, 55 (3): 343-355.
 - [47] Matthew S, Raman S, Suresh R, et al. Urban effects of Chennai on sea breeze induced convection and precipitation. *J Earth Sys Sci*, 2008, 117(6): 897-909.
 - [48] Burian S J, Shepherd J M. Effects of urbanization on the diurnal rainfall pattern in Houston: Hydrological processes. *Rainfall Hydrol Proc*, 2005, 19: 1089-1103.
 - [49] Dixon P G, Mote T L. Patterns and causes of Atlanta's urban heat island-initiated precipitation. *J Appl Meteor*, 2003, 42: 1273-1284.
 - [50] Molders N, Olson M A. Impact of urban effects on precipitation in

- high latitudes. *J Hydrometeorol*, 2004, 5: 409-429.
- [51] Tayanç M, Karaca M, Yenigün O. Annual and seasonal air temperature trend patterns of climate change and urbanization effects in relation to air pollutants in Turkey. *J Geophys Res*, 1997, 102 (D2): 1909-1920.
- [52] Rosenfeld D. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. *Science*, 2000, 287: 1793-1796.
- [53] Van den Heever S C, Cotton W R. Urban aerosol impacts on downwind convective storms. *J Appl Meteor Climatol*, 2007, 46(6): 828-850.
- [54] 苗世光, Chen F, 李青春, 等. 北京城市化对夏季大气边界层结构及降水的月平均影响. *地球物理学报*, 2010, 53(7): 1580-1593.
- [55] 王喜全, 王自发, 齐彦斌, 等. 城市化进程对北京地区冬季降水分布的影响. *中国科学D辑: 地球科学*, 2008, 38(11): 1438-1443.
- [56] 吴风波, 汤剑平. 城市化对2008年8月25日上海一次特大暴雨的影响. *南京大学学报 (自然科学)*, 2011, 47(1): 71-81.
- [57] Guo X, Fu D, Wang J. Mesoscale convective precipitation system modified by urbanization in Beijing City. *Atmos Res*, 2006, 82: 112-126.
- [58] Jauregui E, Romales E. Urban effects on convective precipitation in Mexico City. *Atmos Environ*, 1996, 30: 3383-3389.
- [59] Bornstein R, Lin Q. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three cases studies. *Atmos Environ*, 2000, 34: 507-516.
- [60] Baik J J, Kim Y H, Chun H Y. Dry and moist convection forced by an urban heat island. *J Appl Meteor*, 2001, 40: 1462-1475.
- [61] Changnon S A, Westcott N E. Heavy rainstorms in Chicago: Increasing frequency, altered impacts, and future implications. *J Amer Water Res Assoc*, 2002, 38: 1467-1475.
- [62] Craig K, Bornstein R. MM5 simulation of urban induced convective precipitation over Atlanta. 4th Conf on the Urban Environ, Amer Meteor Soc, Norfolk, VA, 2002.
- [63] Rozoff C, Cotton W R, Adegoke J O. Simulation of St. Louis, Missouri, land use impacts on thunderstorms. *J Appl Meteor*, 2003, 42: 716-738.
- [64] Chen T C, Wang S Y, Yen M C. Enhancement of afternoon thunderstorm activity by urbanization in a valley: Taipei. *J Appl Meteor Climatol*, 2007, 46(9): 1324-1340.
- [65] Miao S, Chen F. Formation of horizontal convective rolls in urban areas. *Atmos Res*, 2008, 89: 298-304.
- [66] Shem W, Shepherd M. On the impact of urbanization on summertime thunderstorms in Atlanta: Two numerical model case studies. *Atmos Res*, 2009, 92: 172-189.
- [67] 蒙伟光, 闫敬华, 扈海波. 城市化对珠江三角洲强雷暴天气的可能影响. *大气科学*, 2007, 31(2): 364-376.
- [68] 江晓燕, 刘伟东. 从不同的陆面资料看城市化对北京强降水的影响. *气象学报*, 2006, 64(4): 527-536.
- [69] Bentley M L, Ashley W S, Stallins J A. Climatological radar delineation of urban convection for Atlanta, Georgia. *Int J Climatol*, 2009, 30(11): 1589-1594.
- [70] Niyogi D, Pyle P, Lei M, et al. Urban modification of thunderstorms: An observational storm climatology and model case study for the Indianapolis urban region. *J Appl Meteor Climatol*, 2011, 50(5): 1129-1144.
- [71] Ntelekos A A, Smith J A, Krajewski W F. Climatological analyses of thunderstorms and flash floods in the Baltimore metropolitan region. *J Hydrometeorol*, 2007, 8(1): 88-101.
- [72] Mueller C, Saxen T, Roberts R, et al. NCAR Auto Nowcast System. *Wea Forecasting*, 2003, 18(4): 545-561.
- [73] 王令, 丁青兰, 陈明轩, 等. 北京地区夏季对流风暴的雷达气候初步研究. *中国气象学会雷达气象学与气象雷达委员会第二届学术年会文集*, 2006.
- [74] 孙继松. 北京地区夏季边界层急流的基本特征及形成机理研究. *大气科学*, 2005, 29(3): 445-452.
- [75] 王婷婷, 王迎春, 陈明轩, 等. 北京地区干湿雷暴形成机制的对比分析. *气象*, 2011, 37(2): 142-155.
- [76] 陈双, 王迎春, 张文龙, 等. 复杂地形下雷暴增强过程的个例研究. *气象*, 2011, 37(7): 802-813.
- [77] 陈明轩, 王迎春. 低层垂直风切变和冷池相互作用影响华北地区一次飑线过程发展维持的数值模拟. *气象学报*, 2012, 70(3): 371-386.
- [78] 陈明轩, 王迎春, 肖现, 等. 基于雷达资料四维变分同化和三维云模式对一次超级单体风暴发展维持热动力机制的模拟分析. *大气科学*, 2012, 36(5): 929-944.
- [79] 孙继松, 何娜, 郭锐, 等. 多单体雷暴的形变与列车效应传播机制. *大气科学*, 2013, 37(1): 137-148.
- [80] 陈明轩, 王迎春, 肖现, 等. 北京7·21暴雨雨团的发生和传播机理. *气象学报*, 2013, 71(4): 569-592.
- [81] Kober K, Craig G C, Keil C, et al. Blending a probabilistic nowcasting method with a high-resolution numerical weather prediction ensemble for convective precipitation forecasts. *Q J R Meteor Soc*, 2012, 138: 755-768.
- [82] 程丛兰, 陈明轩, 王建捷, 等. 基于雷达外推临近预报和中尺度数值预报融合技术的短时定量降水预报试验. *气象学报*, 2013, 71(3): 397-415.
- [83] Chang P L, Lin P F, Jou B J D, et al. An application of reflectivity climatology in constructing radar hybrid scans over complex terrain. *J Atmos Oceanic Technol*, 2009, 26(7): 1315-1327.
- [84] Overeem A, Holleman I, Buishand A. Derivation of a 10-year radar-based climatology of rainfall. *J Appl Meteor Climatol*, 2009, 48(7): 1448-1463.
- [85] Hocker J E, Basara J B. A geographic information systems-Based analysis of supercells across Oklahoma from 1994 to 2003. *J Appl Meteor Climatol*, 2008, 47(5): 1518-1538.
- [86] Parker M D, Knievel J C. Do meteorologists suppress thunderstorms? Radar-derived statistics and the behavior of moist convection. *Bull Amer Meteor Soc*, 2005, 86(3): 341-358.

低碳城市规划与气候可行性论证

房小怡¹ 郭文利¹ 马京津¹ 杜吴鹏¹ 王晓云² 蒋品平³

(1 北京市气候中心, 北京 100089; 2 中国气象局气象探测中心, 北京 100081; 3 中国气象局, 北京 100081)

摘要: 低碳城市目前已成为世界各地共同追求的经济发展目标。从实现低碳城市最有效的手段——低碳城市规划出发, 介绍低碳概念对城市规划的冲击, 阐述了我国低碳城市规划现状和主要内容。论述了气候可行性论证的必要性和发展现状, 以及气候可行性论证如何在低碳城市规划中发挥作用。提出了作为支撑城市低碳规划技术手段之一, 气候可行性论证可以在设计和实现低碳城市规划的政策引导、技术支撑、体制创新等三个方面提供支撑。文中着重就气候可行性论证作为技术支撑展开了论述。

关键词: 低碳城市, 气候可行性论证, 城市规划

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.05.004

The Low-Carbon Urban Planning and Climate Feasibility Study

Fang Xiaoyi¹, Guo Wenli¹, Ma Jingjin¹, Du Wupeng¹, Wang Xiaoyun², Jiang Pinping³

(1 Beijing Municipal Climate Center, Beijing 100089 2 Meteorological Observation Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081 3 China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: Low-carbon city is a common economic development consideration for every country. From the point of low-carbon planning view, this paper, starting by introducing the impact that low-carbon concept puts, on city planning, illustrates the current situation and major problems of Chinese low-carbon planning. The ending part of this paper discusses how climate feasibility study could make its contribution to the low-carbon planning and suggests the climate feasibility study, as one of low-carbon city planning technologic methods, could play its role in policy guide, system innovation and technology support, the last of which is discussed in detail.

Keywords: low-carbon, climate feasibility study, urban planning

1 引言

近年来, 随着全球变暖和极端气候事件的频繁发生, 由温室气体排放所引起的气候变化及其带来的可能影响已成为国际社会关注的重大问题。世界各国都正在着手进行温室气体减排、低碳发展战略等研究和社会实践工作, 兴起了低碳区域、低碳城市建设的热潮^[1]。

在《联合国气候变化框架公约》和《京都议定书》的框架下, 我国政府近年来先后发布了《中国21世纪议程—中国21世纪人口、环境与发展白皮书》(1999)、《气候变化国家评估报告》(2006)、《中国应对气候变化国家方案》(2007)、《中国应对气候变化科技专项行动》(2007)和《中国应对气候变化的政策与行动》白皮书(2008), 2009年11月国务院常务会议讨论通过了我国2020年控制温室

气体排放行动目标, 2010年7月, 国家发展改革委员会下发了《关于开展低碳省区和低碳城市试点工作的通知》, 掀起了低碳城市的建设高潮。确定首先在广东、辽宁、湖北、陕西、云南五省和天津、重庆、深圳、厦门、杭州、南昌、贵阳、保定八市开展试点工作。随后第二批试点城市也陆续批复, 各城市也以不同的定位进行低碳城市建设, 如刚获国家发改委批准的低碳城市武汉, 拟推绿色信贷。而杭州首创水上高速公路, 成为建设低碳城市的一张“标签”。从相关方案制定和所采取的行动来看, 我国政府在应对气候变化工作主要从温室气体减排和增强碳汇能力方面入手, 在低碳城市建设中, 其关注点主要集中在前端的科研和末端的排放两个环节上, 相对而言对城市规划设计在减缓和适应气候变化方面提及的较少, 对其重要性还认识不足^[2], 即尚未充分认识到城市规划设计在节能减排和低碳城市建设中的重要意义和作用。本文正是从此出发, 初步探讨了气候可行性论证如何与低碳城市规划相结合, 优化城市规划设计, 保障低碳城市经济发展模式的顺利实现。

收稿日期: 2013年5月30日; 修回日期: 2013年9月17日
第一作者: 房小怡(1977—), Email: fangxybj@163.com
资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106032);
北京市科技计划课题(Z131106003513009)

2 低碳城市规划

2.1 概念与必要性

“低碳”一词首先出现在英国《我们未来的能源——创建低碳经济》（英国贸易与工业部，2003年）白皮书的“低碳经济”概念中。低碳经济的核心思想是指以更少的能源消耗获得更多的经济产出。城市作为碳减排的关键，低碳城市的概念应运而生，它是指以城市空间为载体发展低碳经济，实施绿色交通和建筑，转变居民消费观念，创新低碳技术，从而达到最大限度地减少温室气体排放的目的^[3]。作为建设城市和管理城市的基本依据和城市发展的源头，城市规划肩负着建设低碳城市的重要角色。

众所周知，城市规划是一门复杂的综合学科，既要统观经济、社会、历史保护等人为因素，又要考虑环境、气象、生态等自然因素。随着社会科技的进步，规划学科本身也在不断完善。在传统的城市规划理论中，依据资源和建设项目计划的实施而制定的城市规划，着重对建设项目进行空间安排。新时期下城乡规划的本质已经演变为统筹资源、环境和人口，建设发展和保护环境的任务上来。全面建设小康社会和“以人为本”的融合对规划提出更高要求，即规划中必须统筹兼顾、协调综合布局。科学的城市规划无疑是建设低碳城市的第一步。它的有效实施，将通过优化城市空间结构，适应和促进经济社会结构的调整，为低碳城市发展助力。在低碳城市发展概念的冲击下，城市规划如何适应新形势是摆在我们面前的崭新命题。

2.2 发展现状

就低碳城市相关基础理论方面，我国学者在低碳城市发展的方向与路径、低碳城市的概念与内涵、低碳城市规划技术方法等领域开展了初步的研究^[4]。作为规划实施的主要控制手段、低碳城市由概念到可操作的关键——低碳城市规划指标体系，仍处在初期的研究摸索阶段。2010年3月，中国社会科学院公布了低碳城市标准体系，包括低碳生产力、低碳消费、低碳资源和低碳政策四个层面的12个指标，这是中国低碳领域首个最为完善的标准。但中国至今还没有任何正式或官方的低碳城市规划的指标体系。就低碳城市规划建设情况，仅进行了一些城市或地区的试点^[4]，如厦门市低碳城市总体规划纲要中提出，重点将从占碳排放总量90%以上的三大领域（交通、建筑、生产）出发，探索低碳发展模式；上海市的第一个低碳商务区虹桥商务区规划；北京市首个低碳社区丰台区长辛店低碳生态城建设规划方案；无锡市低碳城市发展战略规划等。

纵观而言，我国的低碳城市规划建设与理论工作尚处于探索阶段，且以战略层面为主。低碳城市规划发展所需要的关键技术尚不明晰，以致低碳城市建设工作流于表面、难以深入。

3 气候可行性论证

3.1 概念与必要性

气候可行性论证，是指对与气候条件密切相关的规划和建设项目进行气候适宜性、风险性以及可能对局地气候产生影响的分析、评估活动。目的是合理开发利用气候资源，尽可能避免或者减轻规划和建设项目实施中可能受到来自气象灾害和气候变化的影响，或者源自于项目建设造成的对局地气候的可能影响。

《中华人民共和国气象法》第三十四条第一款规定：“各级气象主管机构应当组织对城市规划、国家重点建设工程、重大区域性经济开发项目和大型太阳能、风能等气候资源开发利用项目进行气候可行性论证。”中国气象局2008年12月1日发布的《气候可行性论证管理办法》也规定与气候条件密切相关的下列规划和建设项目应当进行气候可行性论证。因此，气候可行性论证是《中华人民共和国气象法》和《气候可行性论证管理办法》赋予气象部门的职责。

从另一个方面而言，气候可行性论证又是保证城市规划、社会重大建设项目顺利实施、城市大气污染有效防治等不可或缺的必要环节，如2013年200多米的气象塔现场观测资料确保了日本明石海峡大桥（1999年建成）的长久屹立；而苏格兰的泰(Tay)桥和美国的塔科马(Tacoma)悬索桥就是缺乏充分前期气候可行性论证的佐证；国内的湖北松木坪电厂、广东马坝冶炼厂等，亦是因为前期没有严格论证气候条件，在选址和设计上存在问题，导致烟体无法排出，被迫减产或停产。而不重视城市发展对局地气候的影响，很可能造成难以逆转的严重后果。尽管在治理上投入了大量资金，最终改进环境的收效也会被抵消。如2004年7月北京市来势凶猛的暴雨造成城市交通瘫痪；2004年7月桂林市大雨倾盆，造成市区内涝成灾^[5]；2010年夏季，广州市连遭大雨侵袭，上百辆汽车遭雨水浸泡而报废等。这其中，一个很主要的原因在于进行市政建设时，未能充分考虑当地的气候特点和城市发展带来的气候变化，一旦气候异常，则可能导致财产损失、人员伤亡。相反，如果在城市发展规划中考虑气象条件，合理安排城市建设布局，对于政府及规划、建设部门的科学决策，改善城市环境状况、提高市民生活质量，具有重要的意义和实用价值^[6]。

因此，加强气候可行性论证工作不仅是法律要求

的具体落实，更是合理开发、利用和保护气候资源，维护城市资源环境安全，保障社会经济可持续发展的重要举措。

3.2 发展现状

据各省市气象局上报的数据统计，2005—2010年，气象部门共开展了988项气候可行性论证工作。主要集中在风能太阳能电站选址、核电、城乡规划、交通设施、火电空冷等领域。其中，风电场太阳能电站选址所占比重最大（图1），占总数的38%；其次为核电，占11%；政府行业规划、城乡规划、交通设施和其他各占9%，火电空冷占8%。而输变电路、大型水利工程类所占份额较小。一些省市的论证工作经验丰富、自成风格，如北京市在城乡规划领域，广东气候可行性论证在核电、风能选址以及大型交通设施领域的工作较为突出；吉林、辽宁在风电场和太阳能电站选址方面开展较好；浙江和湖北在大型交通设施领域的气候可行性论证开展比较有特色等。

正如2005年美国气象学会公报中阐述的：“对于大多数国家来说，气候资料与气候信息的应用在大气科学领域中对国民经济发展贡献最大。近年来实用天气预报的发展引人注目，但也未超过应用气候方面的进展。科学与技术的进步、社会经济发展需求的不断变化，将应用气候学推向黄金时代，应用气候学的黄金时代已经到来^[7]”。

作为应用气候学最重要的社会效益体现，气候可行性论证工作在蓬勃发展的同时，仍存在一定问题。一是目前对气候可行性论证工作的宣传和普法力度不够，致使社会各行业对气候可行性论证工作的重要性认识不足，尚无具有约束力的法律（法规）对大型建设项目的气候可行性论证工作进行强制规范，导致许多建设项目没有进行气候可行性论证。二是气候可行性论证工作的技术能力有待提高，缺乏论证内容和方法的基础研究，目前尚无统一规定，导致很多情况下气候可行性论证工作“无章可循”。三是气候可行性论证工作发展速度有限，服务领域局限，诸如重大基础设施、公共工程和大型工程建设项目，重大区域性

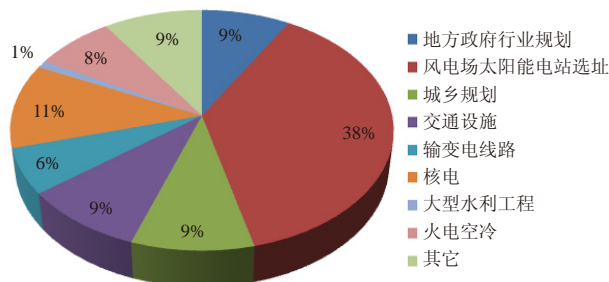


图1 气候可行性论证行业分布

经济开发、区域农（牧）业结构调整建设项目等方面气候可行性论证工作少有开展。四是在上述已开展领域的气候可行性论证工作仍存在着论证内容单一、结果和实际需求不完全吻合等情况。

4 气候可行性论证同低碳城市规划的结合

对于城市规划设计，气候可行性论证能做什么？这在以往的研究、实践过程中已有介绍^[8-9]。两者是相辅相成的关系，即规划设计建立在一个城市的气候环境基础上，同时城市中人类活动及下垫面的变化、建筑群的布局差异，都会对城市气候环境产生不同程度的影响，从而改变城市局地小气候，影响城市污染物的扩散速度和方向。在城市总体布局设计层面上，基于对城市气候特点、城市背景风环境、热环境的空间模拟计算分析，并结合自然山水要素、城市开敞空间、生态绿地、江河湖泊水系及城市低密度开发，规划出大尺度城市通风廊道，主要在以下方面发挥重要作用：（1）传输作用：沟通城市郊区以及城市内部冷源与城市热岛区，促进空气流通，传输冷空气和新鲜空气以平衡和降低城市污染，减轻“城市浑浊岛”；（2）切割作用：系统网格化的城市风道将起到切割城市热场，降低城市热场辐射，缓解城市热岛的规模效应和叠加效应；（3）散热作用：城市通风道本身的散热降温作用可以有效改善城市微气候。总体来说，在城市规划中引入气候可行性论证，就是基于对城市细致空间气候环境的分析，并将其“转译”成规划建议图，从城市用地上给出限制和建议，避免硬质路面过度、无序扩张。一是预防性的防止城市化带来的气候问题，如热岛、干岛、浑浊岛等；二是在城市现实情况下，提出规划修编意见，进行调整建议，从而达到缓解城市气候问题的目的。

对建设项目进行气候可行性论证，一方面是为了保证建筑物能适应当地气候条件，如风压、雪压，同时有效利用光、热、水等气候资源，另一方面减缓所实施的建设项目对城市的气候资源可能造成的破坏，从而导致局地气候的恶化。

在气候资源利用方面，合理开发利用太阳能、风能资源，既可减少环境污染又可减轻能源短缺的压力。但是，由于太阳能、风能利用设施造价较高，一旦布局规划失策，将会造成大量浪费。这时的气候可行性论证工作，在项目预研或者设计初期具有保障性作用。

4.1 气候可行性论证

气候可行性论证的主要内容，气候可行性论证的主要技术流程如图2所示，即通过开展工程所需的气

象要素的短期观测,收集项目所在地或者附近气象站相关地理信息、历史气象资料,进行项目所在地域的不同时间尺度的气温、降水、湿度、风向、风速等气象要素的气候背景分析和工程所需要的气象参数的推算,开展高温酷暑、暴雨洪涝、低温冷害、冰雹、雷电、大风等气象灾害风险分析和模拟以及污染的气象条件分析,部分项目还需分析气候变化的影响,提出预防或减轻气象灾害风险的对策或预防措施。

具体来说,如风能开发时要进行风资源评估并考虑对当地气候的影响,输变线路工程需要考虑电线覆冰以及最大风速推算、大风灾害调查评估,核电站建设之前要考虑当地的龙卷风情况,城市规划要考虑风向、降水对大气污染和城市下水管道的影响等。通过积累,部分行业逐步规范了气候参数的计算方法和设计参数标准,如《公路桥梁抗风设计规范》、《建筑气候区划》、《核电厂厂址选择的极端气象事件》等。

随着气象技术水平和气象现代化程度的提高,地面、雷达、探空、卫星遥感等立体多源观测数据的应用,气候可行性论证技术和现代化水平得到了发展。如在风能资源选址评估中,利用超声风速仪进行阵风锋的观测;利用雷达廓线仪进行近地面层廓线的观测,得到边界层的风特性;在沿海的风能资源模拟中,利用卫星云图进行风向风速的反演,弥补近海地区无常规测风观测,大幅提高测风空间分辨率;在太阳能资源评估中,采用双轴跟踪、单轴跟踪的总辐射、直接辐射、散射辐射和反射辐射等多种太阳能辐射仪器,结合静止、极轨等多源卫星产品资料,利用辐射传输理论进行太阳能资源反演和评估;还有诸如城市规划气候可行性论证领域所用到的大气成分、气溶胶观测等专业化观测数据。

利用中尺度或微观尺度的数值模式,进行微观大气边界层以及大气成分模拟,开展相关气象背景条件

的影响分析。在城市规划的气候可行性论证工作中,针对城市选址、城市功能区、建筑设计和建筑形式等需求,采用多尺度数值模式系统,进行城市尺度、小区尺度或单体尺度的数值模拟,得到气温、湿度、风场等气象环境效应定量分析。

在风能资源评估或选址过程中,采用了MM5(WRF)等中尺度数值模拟、CALMET降尺度模式或BDM三维准静力模式进行风电场微观选址。在跨海大桥建设或者海上风电场选址,采用WRF等中尺度数值模式模拟超强台风对跨海大桥或者海上风机所产生的影响,进而提出符合抗风要求的设计标准。

4.2 低碳规划主要内容

从空间尺度上,低碳城市规划主要内容可归纳为三类^[10]:一是宏观层面的低碳规划,重点解决城市及区域、社会、空间等方面的低碳发展模式;二是中观层面的低碳规划,重点研究“承上启下”低碳城市建设方面的内容;三是微观层面的低碳规划,重点解决城市发展中的具体低碳规划问题。

无论哪种尺度的低碳城市规划,涉及的具体内容主要有六大体系:低碳法规体系、低碳产业体系、低碳城市建设体系、低碳交通与物流体系、低碳生活与文化体系、碳汇吸收与利用体系。其中,低碳法规体系包含节能建筑规范、节约能源规范、可再生能源规范等。低碳产业体系包含低碳农业、低碳工业、低碳技术等。低碳城市建设体系包含基础设施低碳建设、商业区和产业园区低碳发展综合实践区的建设、低碳节能建筑等。低碳交通与物流体系包含公共交通导向、综合交通体系模式、低碳物流体系等。低碳生活与文化体系包含倡导衣、食、住、行、用低碳,以及低碳消费。碳汇吸收与利用体系包含建设园林化城市、提高森林碳汇功能以及“碳税”、“碳排放权交易”等环境经济手段。

4.3 低碳规划与气候可行性论证

低碳城市规划重要的内容就是实现编制城市规划技术的低碳化,而气候可行性论证正是诸多影响低碳规划技术因素中的一部分。在过去对城市规划的气候可行性论证工作中,着眼点主要限于气象扩散条件对城市规划布局的影响,也是主要从这个角度评判不同规划方案的效果。但是,随着低碳城市建设的需求发展,气候对城市规划的支撑作用已经不仅限于气象条件、污染状况的分析和建议。从操作层面上讲,气候可行性论证相比以往进行的气象环境影响评价范围更为广泛。如果将气象环境影响评价归之于气候适宜性分析的话,那么风险性就应当包含气象灾害、极端气

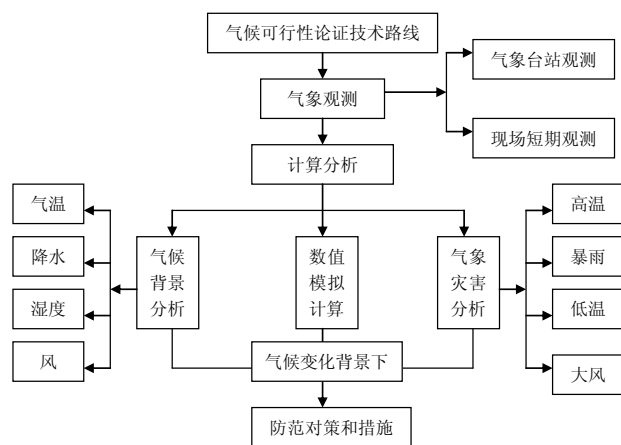


图2 气候可行性论证的技术流程

候事件，甚至未来气候变化趋势下的影响。目前，城市规划中尚未有明确的条文规定要进行风能、太阳能等能源利用。这些都是新时期下，气候可行性论证可以施展的领域。可以说，气候可行性论证切实参与城市规划的过程就是实现城市低碳规划的过程，因为这个过程包含了适应气候、资源利用等措施，从而达到缩减城市规划建设中的碳排放。

那么，气候可行性论证如何在低碳规划中起作用呢？实现低碳城市规划主要有三个方面：设计和实现低碳城市规划的政策引导、技术支撑和体制创新。气候可行性论证工作融入低碳城市规划正是从政策和技术领域入手。

从政策方面，在低碳城市规划前期引导性、动向性政策出台前，应当进行气候可行性论证工作，确保政策的科学性。例如在制定基于主体功能区分类政策来引导城市发展时，应当在切实考虑到当地环境适宜性、气象灾害性、气候资源的前提下，制定出合理的主体功能区地理分区。即应该根据区域的资源环境承载力确定区域发展方向，如重点开发区、优化开发区、限制开发区等。而不是盲目从行政、开发利用角度给出划分。倘若这种不经过气候可行性论证而定的划分要起到未来城市发展的引导作用，其后果可想而知。轻则发展不适，重则资源浪费、破坏环境，以至于推翻重头再来。因此，建议在与气候条件密切相关的重大区域经济开发、公共工程建设等政策制定之初就进行气候可行性论证预研。

从技术领域，以规划过程看，气候可行性论证可以切入低碳城市规划的全过程，即规划前、规划中、规划后。在规划前，根据现状城市用地布局下的气候分析结果，提供环境适宜性分析，为规划师着手规划、布局提供建议。在规划中，对制定的不同方案进行气象环境效应定量分析，并提供调整意见，作为规划师进一步后续工作的参考依据。在规划后，对等待确定的几个规划方案进行定量评估，从而优选方案。如图3所示的北京城市总体规划（2004—2020年），形成两轴一两带一多中心的城市空间布局^①。这种城市布局的形成，气象背景支持是其一。因为从北京市域污染物自净时间来看（图4），东部自净时间短，同样的污染排放，更容易扩散出去，适合产业发展。而嵌入绿地或者利用自然植被对城市进行分割，打散“摊大饼”布局，形成北京分散的多中心发展格局，有利于防止热岛面积的连片发展，减低热岛强度，从

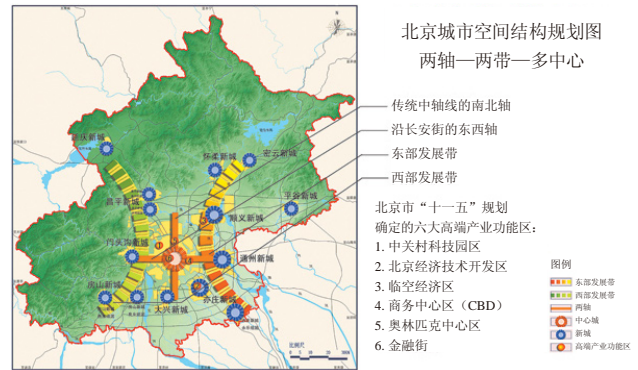


图3 北京城市总体规划空间结构布局（2004—2020年）

而缓解城市热环境。

以规划类型看，气候可行性论证可以渗入到不同尺度的规划中，如区域规划、城市总体规划、城市控制性详细规划。在气候可行性论证的内容上，除了以往的气候背景分析、大气污染背景分析、气象环境适宜性分析等常规论证内容外，贴合低碳城市规划（低碳城市实现要靠低碳规划中的专项研究，需要一定的载体，主要体现在产业、交通、建筑、能源方面），可从建筑、交通、绿地、能源利用方面入手进行气候可行性论证。

具体来说，低碳城市规划有关建筑物方面的设计可从考虑气候变化背景下，建筑物设计参数方面入手。核算出规划所在地区新时期下的参考值替代以往的旧参数值，如建筑风压系数、建筑保温设计室内外温度等。建筑物节能方面，因其与气候条件关系密

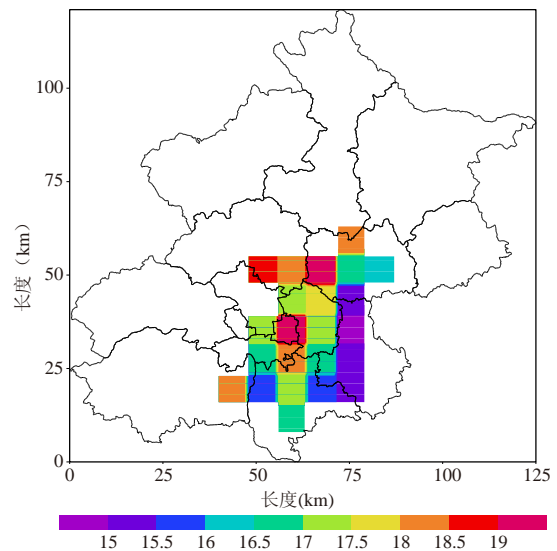


图4 北京市域污染扩散自净时间分布（单位：h）

^① http://image.baidu.com/i?tn=redirect&word=j&juid=EB43FF&sign=cgbzzcoiez&url=http%3A%2F%2Fshixi.bnu.edu.cn%2Ffield-trips%2Fhuman%2Fhum_bj%2Fgthtu08.htm

切,不同分区的辐射量、太阳能有差异,根据区划结果对建筑物节能设计方案提供参数;低碳城市规划有关交通方面的设计可从考虑城市通风方面入手,根据城市各区常年盛行风向,结合主要城市道路走向、宽度设计、绿地设计、水体设计等,为城市通风廊道的规划提供建议;低碳城市规划有关市政建设方面的设计可从排水规划设计标准的制定入手,结合气候变化趋势分析、未来气候预估等方面,为排水规划设计提供必要的参数和技术支持;低碳城市规划有关绿地方面的设计可从绿地选址、绿地布局、绿地形状、绿地比率等方面进行气象模拟分析计算,对比不同方案带来的气候环境差别,为城市规划中绿地设置提供指导;有关清洁能源利用方面,目前的城市规划体系中虽然还没有明确规定,必须要在城市总体规划中进行城市清洁能源利用章节的编写。面对未来的城市发展形势,已有愈来愈多的规划师认识到这个问题的迫切性和必要性。因此,可以在城市低碳规划中增加城市风能、太阳能利用方面的内容,如给出城市屋顶绿化、阳光屋顶的适宜性区划分布,城市产业区划风能利用指导等。

综上所述,目前气候可行性论证可以主要从建筑、交通、市政、能源利用等方面为实现城市低碳规划提供保障。但是,作为实施规划的主要控制手段,将低碳城市由概念到可操作的关键所在,是构建低碳城市规划的指标体系。因此,从气候可行性论证方面提出指标,融入到低碳城市规划指标体系,这是保证低碳城市规划与气候可行性论证有效结合的专业化途径。同时,低碳城市规划与气候可行性论证工作中尚存在一些亟待解决的问题,如目前国际上还没有形成广泛共识的低碳城市评价指标体系,国内低碳城市规划指标体系也尚未建立,进行低碳城市规划气候可行性论证指标研究是具有迫切性和前瞻性的工作。而要保证为规划提供准确的气候可行性论证信息和结果,需要气象观测、数值模拟、评估指标等基础技术的支持。在气象观测方面,除了基本气象站、自动气象站的观测资料外,需要针对一个城市甚至一个规划区进行加密观测,也需要高分辨率遥感卫星资料的应用,将城市用地类型同气象要素信息结合起来,进行空间单元的热环境和通风环境分析。在数值模拟方面,需要完善中尺度数值模式,增加城市冠层、城市人为热源等城市特征的考虑。在应用中,需要提供百米分辨

率的细致风场,对目前的气象中尺度模式提出了更高的技术要求。

5 结语

在全球变暖的大背景下,我国经济快速发展、城市化进程加快,随之而来的气象环境也日益恶劣,给城市规划带来了一系列的挑战。在我国现行的规划体系下,将气候可行性论证同低碳规划结合起来,可以为应对挑战提供线索。未来,气候变化仍将持续,根据相关研究以及政府的有关报告,未来20~100年中国地表气温升高明显,降水量将呈增长趋势且时空变率较大,极端气候事件发生区域也会发生变化。因此,及时制定和采用新的城市规划措施,并及早考虑规划之间、规划与气候之间的整合对于合理利用土地、减缓和适应气候变化,以及应对气候变化带来的不利影响都将具有重大的现实意义。

在城市规划向着低碳城市规划转变、气象环境影响评估向气候可行性论证迈进的双重背景下,本文从低碳城市规划与气候可行性论证出发,初步探讨了在低碳城市建设的大环境下,在技术层面如何将气候可行性论证和城市低碳规划结合起来,为低碳城市发展提出建议。该项工作可以为气象部门开展低碳规划气候可行性论证工作提供思路,为进一步进行低碳城市规划气候可行性论证指标研究奠定基础。

参考文献

- [1] 中国市长协会. 中国城市发展报告(2010). 北京: 城市出版社, 2010.
- [2] 张蔚文, 何良将. 应对气候变化的城市规划与设计——前沿及对中国的启示. 城市规划, 2009, 33(9): 38-43.
- [3] 中国科学院可持续发展战略研究组. 2009年中国可持续发展战略报告. 北京: 科学出版社, 2009: 8-45.
- [4] 罗宏, 吕连宏, 何美梅. 低碳城市规划建设的难点与关键问题. 环境科技, 2010, 23(6): 71-75.
- [5] 钟国平, 李强, 苏志. 浅谈建设项目开展气候可行性论证的必要性. 广西气象, 2004, 25(4): 59-61.
- [6] 王晓云, 汪光焘, 房小怡, 等. 新时期下城市规划建设中环境理念的科 学实施——奥运场馆规划方案大气环境效应研究. 规划师, 2005, 21(10): 84-87.
- [7] 曹晓梅. 美国应用气候学研究与应用现状. 气象科技合作动态, 2005, 1: 26-28.
- [8] 汪光焘, 王晓云, 苗世光, 等. 现代城市规划理论和方法的一次实践——佛山城镇规划的大气环境影响模拟分析. 城市规划学刊, 2005, 6: 18-22.
- [9] Fang X Y, Jiang W M, Miao S G, et al. The multi-scale numerical modeling system for research on the relationship between urban planning and meteorological environment. Advances in Atmospheric Sciences, 2004, 21(1): 103-112.
- [10] 李国亮, 任镇英, 龚葳. 低碳城市规划理论研究. 山西建筑, 2010, 36(34): 24-27.

青藏高原东缘对流云和水汽观测试验简介

施晓晖

(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 近年来, 青藏高原及周边省区(西藏、青海、四川、云南等)的气象业务观测系统建设取得很大成效, 并通过JICA项目国际合作计划的实施, 在高原及其东缘区域初步组成了具有国际先进水平的综合气象监测系统。基于以往研究成果和青藏高原及其周边地区观测条件的改善, 加上中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室观测能力的提高, 青藏高原东缘对流云和水汽观测试验得以实施, 此次试验将重点关注这一区域对流云结构和水汽输送的变化及其对灾害性天气的可能影响, 并将争取改进数值模式中高原及周边区域的云物理过程参数化方案, 提升数值模式的预报能力。

关键词: 青藏高原东缘, 对流云, 水汽, 外场观测

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.05.005

Introduction to Observation Experiment for Convective Cloud and Water Vapor in East Edge of the Tibetan Plateau

Shi Xiaohui

(State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract: In recent years, the operational meteorological observing system in the Tibetan Plateau (TP) and its ambient areas has been improved by using advanced equipment and adding new sites. Furthermore, a new integrated observing system in TP and its ambient areas (NIOST) was built by implementing the international cooperation project funded by JICA (Japan International Cooperation Agency). Based on previous research results and improvement of observing condition in TP and its ambient areas, as well as the enhancement of observing ability of State Key Laboratory of Severe Weather (LASW), the observation experiment to convective cloud and water vapor in the east edge of TP (ETP) could be conducted. This experiment chiefly focuses on the variations of convective cloud and water vapor transportation in ETP, and deals with their impossible impacts on disastrous weather. To enhance the forecasting capability of numerical model, we will study the contributing factor of severe weather and multi-scale feature of water cycle in ETP, and then improve the parameterized scheme of cloud physical process in TP and its ambient areas.

Keywords: east edge of the Tibetan Plateau, convective cloud, water vapor, field observation

1 引言

青藏高原通过大地形的动力、热力作用, 对全球天气气候^[1-6]、东亚季风的进程^[7-9]和水汽输送^[10-15]等都产生着重要的影响, 进而影响到其东部下游地区的暴雨、暴雪等灾害性天气过程。开展以青藏高原主体和东缘区域的外场试验观测, 可以进一步认识青藏高原天气过程及其对我国下游灾害天气的影响, 具有十分重要的科学意义和业务应用潜力。2006—2009年, 中日科学家联合实施了JICA (Japan International Cooperation Agency) 渠道项目的青藏高原及周边新一

代综合气象观测计划, 观测重点目标就选定青藏高原及东缘关键区, 其不仅对东亚季风变化机理研究非常重要, 而且将对青藏高原、东印度洋及西太平洋陆—海—气相互作用, 及其水分循环结构变化信息的获取起着关键的推进作用。JICA项目构建了青藏高原东缘周边新一代综合气象观测系统, 该系统为东亚区域洪涝灾害预报提供了重要的观测资料支持^[16]。

世界气象组织(WMO)世界天气研究计划(World Weather Research Programme)近期确定以最大限度改进天气预报技术为目标, 发展敏感区观测方法及其观测系统。作为与国家经济发展与重大决策关系十分密切的气象服务任务, 灾害天气气候业务预报, 特别是长江洪涝预报, 是关键科学问题之一。近年来的一些研究指出^[9-10, 17], 中国东部梅雨及暴雨系统持续水汽输送与高原水汽“转运站”及海洋水汽源密切相关, 是中国洪涝、干旱灾害预报的关键环节, 如

收稿日期: 2012年8月27日; 修回日期: 2013年5月7日
第一作者: 施晓晖(1972—), Email: sxh@cams.cma.gov.cn
资助信息: 国家自然科学基金重点项目(41130960); 国家自然科学基金面上项目(41275050); 中国气象科学研究院基本科研业务费专项资金重点项目(2011Z001)

何寻找中国东部洪涝、干旱水汽输送上游敏感区或远距离遥相关的水汽源是探讨中国区域灾害天气气候成因的重要问题。因此,在其上游强信号敏感区“高原及其东缘”设计水分循环与对流结构观测网,将对我国区域灾害天气预测理论与技术发展具有重要意义。

由于高原地区站点稀少,且高原东缘水汽输送通道对流结构观测布局的“空白”,对高原及中国东部区域灾害天气预测的前兆性信号的捕捉存在较大的困难,给高原及东部暴雨、雪灾等严重灾害的预测、预警带来极大的不确定性,使高原及下游地区灾害天气的预测水平难以提高。考虑到上述需求,开展青藏高原东缘对流云和水汽的综合观测试验研究十分必要,其将推动第三次青藏高原大气科学试验的进程,提升我国灾害性天气的监测设计与应用能力,研究成果应用于数值模式改进与天气、气候预报技术中,将提高我国气象防灾减灾综合业务能力。因此,中国气象科学研究院于2011年批准了基本科研业务费专项资金重点项目“青藏高原东缘对流云和水汽观测试验及资料分析研究”的立项。目前,观测试验已经基本完成,获取了大量的观测资料,同时项目组也已开展了初步的资料分析工作。本文将对观测试验的目的、方案设计以及后续的研究工作计划等进行介绍,并就存在问题和解决方法进行了讨论。

2 观测试验的目的

基于JICA项目建设的青藏高原及周边地基GPS水汽观测网、边界层通量观测系统及其多源信息数据平台,利用灾害天气国家重点实验室的遥感(主动和被动)探测设备,在中国降水的西南水汽输送通道(孟加拉湾—中南半岛北部—中国西南地区—长江中下游地区)上选取关键站点,开展青藏高原东缘对流云和水汽观测试验,其目的主要是为了满足以下需求。

2.1 加强高原观测的需求

青藏高原地区受其复杂地形以及经济发展相对滞后等因素制约,气象业务观测系统相对薄弱,观测数据主要依赖于地面、探空、卫星等业务观测手段。近年来,JICA项目在这一地区增加了地面自动站观测、GPS水汽监测等设备,而且灾害天气国家重点实验室已发展了多种地基主动式遥感探测系统,为开展青藏高原东缘对流云观测试验提供了设备条件。

大型野外观测试验特别是青藏高原观测试验投资大,如何设计组织观测试验、遥感系统如何部署、新型探测系统在高原地区的探测能力等都需要做系统性的评估与确认。因此有必要建立典型示范观测试验区和开展观测预试验,对设备探测能力、数据处理分析方法、

资料应用等方面进行预试验及方法研究,为青藏高原第三次大气科学试验的方案设计和实施提供经验。

2.2 高原东缘水分循环与下游灾害天气关系研究的需求

青藏高原东侧是我国地形、地质结构最复杂的地区,又是夏季暴雨灾害频发的地区,常诱发山洪、泥石流等严重地质灾害。青藏高原东侧暴雨突发性强,时空分布不均匀。如何准确预报高原东侧暴雨一直是该地区气象工作者长期探索的科学难题。

GMS卫星分析表明,夏季青藏高原地区对流层上层的水汽汇集主要通过高原东南的雅鲁藏布江河谷以及高原西南越过喜马拉雅山、帕米尔高原及其以北地区越过塔里木盆地这些通道。该区域亦是中国及东亚重大灾害天气的水汽输送源区。另外,青藏高原及周边亦表现出显著强“降水核”或“多雨中心”气候特征等,其作为长江、黄河的发源地,也是中国及东亚水资源的重要来源,黄土高原的东缘则为季风过渡带或梅雨边缘区。因此,如何认识全球变化背景下中国大陆地(包括大地形)与低纬海洋关键区之间的海陆差异的变化趋势及其气候灾害的响应特征,已成为该区域天气、气候预测的关键问题之一。

2.3 数值模式中云物理过程研究的需求

高原及周边地区是长江流域洪涝过程的对流云系统最活跃的源区之一,亦是长江流域洪涝过程暴雨系统上游重要的预报敏感区之一。目前数值模式存在不确定性的主要原因为:由于高原站点稀少,目前尚无区域模式同化观测数据及高原区域细化三维大气结构的信息,无法客观描述模式物理过程参数化与辐射、云物理过程影响等关键因素,缺乏高原地区真实观测资料对模式效果进行客观检验。因此,开展青藏高原东缘对流云的综合观测,充分开发已有观测资料与卫星遥感产品的应用潜力,将加强数值模式同化资料来源客观化能力的改善,促进数值模式模拟能力改进,也为检验数值模式效果奠定重要基础。

目前数值模式中高原及东缘复杂大地形背景下的云物理过程观测及其资料融合处理、分析、应用等方面还存在着较多的薄弱环节,严重影响了灾害性天气的预测能力,导致数值模式在高原地区的模拟、预测水平难以提高。观测试验将基于各类常规与三维立体强化观测资料,从中国东部区域灾害天气上游关键区水汽输送及其云结构影响视角,研究高原及东部区域水分循环多尺度时空特征及灾害天气成因理论,改进数值模式中的云物理过程参数化方案,并进行客观性检验,以提升模式预报技术水平。

3 观测试验情况

为清楚认识东亚季风爆发前后，西南水汽输送通道上大气结构的变化以及对流云发生、发展机制，2012年5—7月在云南大理、腾冲开展了加密观测试验。采用多种遥感观测设备，并进行了探空加密观测。试验具体情况如下：

3.1 大理区域加密观测试验

3.1.1 多普勒雷达组网观测

在大理市洱源县布设了实验室双线偏振雷达，与丽江和大理的业务雷达组网观测（图1）。观测资料将进入LAPS模型进行融合分析，获取有关的云参数，以了解对流云的发生、发展机制。

3.1.2 增加雨滴谱仪、微降水雷达、微波辐射仪等遥测设备

配合苍山东坡已建成的自动气象站观测网，在不同高度上布设三台雨滴谱仪，在大理国家气候观象台布设微波辐射计和微降水雷达各一台（图2），并利用已有的风廓线雷达，获取的观测资料可用于细致分析复杂地形条件下强降水天气发生时的微物理过程。

3.1.3 加密探空观测

采用GPS探空从2012年6月26日—7月26日开展了为期一个月的加密试验，其中每日放球三次，分别在北京时08时、14时和20时进行，获取的高分辨率大气温湿廓线将有助于分析季风爆发前、后大气垂直结构的变化，并可用于检验微波辐射计和风廓线雷达的观测资料。

3.1.4 边界层观测

利用大理现有的边界层铁塔观测，并布设大口径闪烁仪，研究边界层铁塔观测的代表性，为今后边界层观测的优化设计提供科学依据。

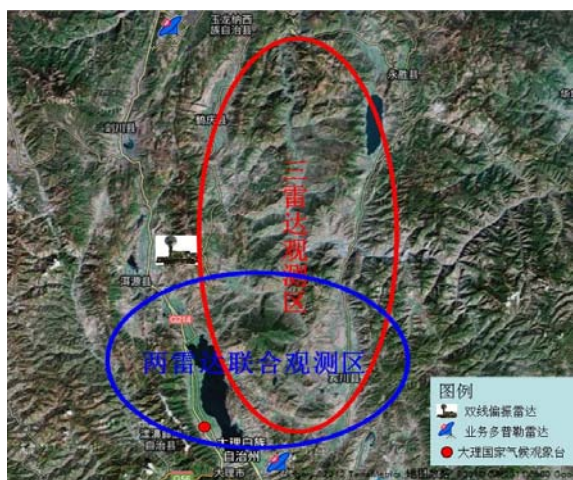


图1 云南大理观测区多普勒雷达组网观测布局

3.2 腾冲区域加密观测试验

3.2.1 遥感观测

在腾冲县气象局布设了毫米波测云雷达和风廓线雷达，进行联合观测，直接获取强降水天气过程中对流云相关参数和大气风场的观测资料，增加微波辐射计、微降水雷达和雨滴谱仪各一台，以获取大气温湿廓线和降水天气微物理过程的观测资料。

3.2.2 加密探空观测

采用业务L波段探空，与大理站的试验同步，从2012年6月26日—7月26日开展了为期一个月的加密试验，由于腾冲是业务探空站，每日北京时间08时和20时有业务探空观测，但为了更加清楚地了解中午前后对流旺盛时期的大气垂直结构特征，试验在每日14时增加了一次探空。获取的资料也可用于风廓线雷达反演大气湿度廓线的方法研究，以及检验微波辐射计的观测结果。

4 研究计划

4.1 多种遥感观测设备的探测能力评估

鉴于高原特殊观测环境，首先开展多种新型设备（双线偏振雷达、毫米波雷达、雨滴谱仪和微波辐射计等）的探测能力和资料质量分析、质量控制方法等方面的研究，并根据获取的资料对设备在高原地区的实际探测能力进行评估分析，为第三次青藏高原大气科学试验的全面开展提供经验。

4.2 多种遥感观测的反演方法及其资料融合分析研究

探讨综合利用风廓线雷达、微波辐射计等遥感观测数据和地基GPS水汽资料，反演水汽垂直廓线的方法，并利用探空观测对反演结果进行检验；研究利用



图2 云南大理观测区多种遥感设备布局

双线偏振雷达、毫米波雷达等遥感观测数据反演云水含量垂直廓线及其滴谱分布的方法，并与雨滴谱仪的观测结果进行对比检验。在验证了反演方法的合理性和反演结果的可靠性以后，这些反演产品可作为天气过程诊断分析和数值模式资料同化等方面研究的数据来源。

引进NOAA开发的局地分析预报系统(LAPS)^[18-19]，开发数据接口，建立高原东缘卫星遥感—地基综合观测资料融合分析平台。该平台输出的常规天气融合分析资料，如温度、气压、湿度、风场等，可以为数值模拟提供高分辨率的初始场和边界条件，但我们更关心的是LAPS具有特色的云分析结果，将利用多普勒、毫米波等雷达的观测资料和反演产品对其进行检验，在确定其可用性之后，与数值模式中云物理过程的相关参数进行对比，争取对数值模式中高原区域的云物理过程有所改进，具体流程如图3所示。

4.3 高原东缘对流云与水汽的结构及其对长江流域灾害天气的影响

选取观测试验期间的强降水天气过程，利用加密观测获取的多种遥感观测数据、反演产品以及LAPS高分辨率融合分析资料，开展对流云演变过程和水汽输送结构的细致分析，以深化认识高原东缘水汽输送与对流云结构的时空变化特征，并探讨其对长江流域灾害性天气的影响机制；开展探空资料和雷达数据的数值同化方法研究，以改进数值模式的预报能力。

5 研究进展

5.1 2012年观测试验

2012年观测试验于2012年5月开始启动，5月15日前后，实验室原有的双线偏振雷达、风廓线雷达和毫米波雷达完成安装调试，开始观测。新增仪器（微波辐射计、雨滴谱仪）于6月20日完成安装，6月21—25日进行了试验性观测。确认仪器设备均运行正常之

后，6月27日，加密探空和多种遥感设备的联合观测正式开始。两台微型降水雷达于2012年7月7日进入腾冲外场试验场地，2012年7月12日开始正常观测。2012年8月16日，外场试验结束。目前项目组已经收集整理了观测试验期间业务观测站网和增设的遥感设备及加密探空的资料，并进行了质量控制，开发了数据共享平台（图4），实现了项目内部的资料共享，今后将逐步向其他科研单位和个人开放。

5.2 开展的研究工作

已经开展的研究工作主要包括：（1）对利用风廓线雷达观测反演大气湿度的方法和青藏高原东南缘雨季降水云的垂直结构特征等开展研究；（2）研究利用地基GPS、双线偏振雷达、风廓线雷达和探空等综合资料，反演水汽含量垂直廓线以及云和降水滴谱分布的方法；（3）开发LAPS模型卫星遥感—地面、探空、雷达综合分析平台的C波段雷达数据接口，为建立高原东缘多源观测资料—卫星遥感融合分析数据集做好技术准备；（4）高垂直分辨率探空资料和雷达观测数据的同化技术开发。

目前上述研究工作已经取得了初步结果，但还有待于进一步的深化和细致分析，以得到更有科学价值的研究成果。

6 结论与讨论

由于特殊的地形及其天气、气候效应，青藏高原在全球大气能量和水分循环中发挥着重要作用，因此对青藏高原的研究受到世界，尤其是亚洲国家的广泛关注。中国科学家在过去30多年间先后进行了两次高原大气科学试验，并与日本、美国、韩国等国的科学家共同开展了多次联合现场观测试验，在高原对东亚季风、全球与区域气候影响作用等方面取得了具有重要国际影响的一系列成果^[20]。但由于过去经济和技术基础相对薄弱、大气探测技术与装备能力有限，观测

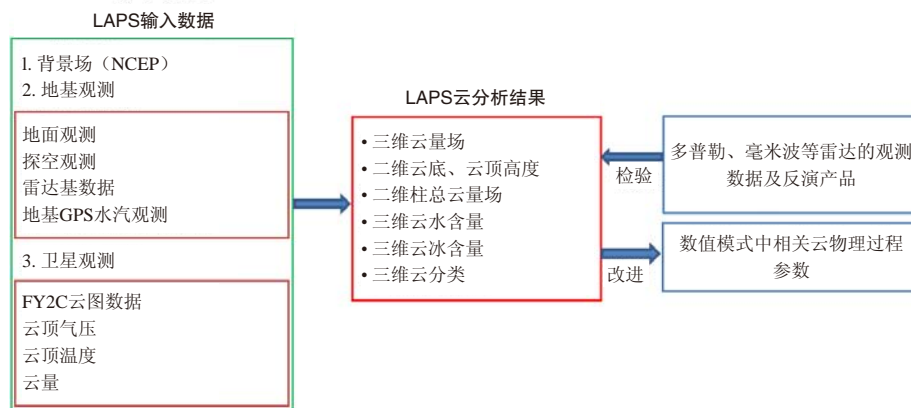


图3 利用LAPS云分析结果改进数值模式云物理过程的流程示意



图4 观测数据共享平台

试验的时间较短、观测要素单一，且主要集中在高原主体，对高原周边区域的观测、研究不够，使得在高原热源结构、水分循环多尺度时空特征、云物理过程等前沿性的科学研究方面还存在较大不足。

近年来，青藏高原及周边地区（西藏、青海、四川、云南等）的气象业务观测系统在装备先进性与站点布局上已有了质和量的飞跃，并通过JICA项目国际合作计划的实施，在高原及其东缘区域构建了无人值守自动气象站、大气廓线仪、边界层通量站与地基GPS水汽观测站网，初步组成了具有国际先进水平的综合气象监测系统。

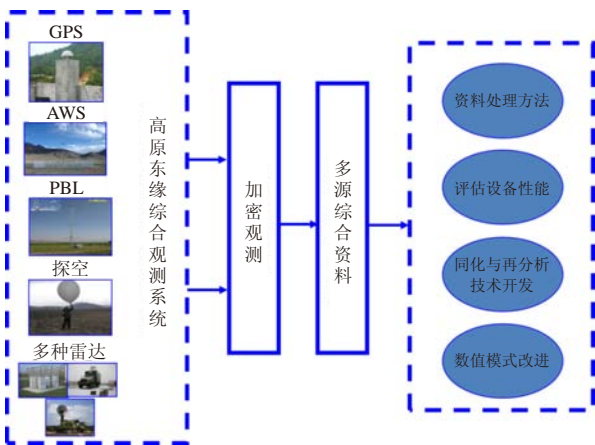


图5 青藏高原东缘对流云和水汽观测试验的总体研究框架示意

正是基于前人的研究成果和青藏高原及其周边地区观测条件的改善，加上灾害天气国家重点实验室观测能力的建设与提高，青藏高原东缘对流云和水汽观测试验得以实施，图5出示了试验的总体研究框架。本次试验重点关注青藏高原东缘对流云结构和水汽输送的变化及其对灾害性天气的可能影响，实施科学设计，以充分发挥高原及其周边地区新一代综合气象观测系统、实验室遥测设备与常规业务监测网的潜力；探讨多种探测资料的综合分析方法，获取的资料和分析结果可以为即将启动的青藏高原第三次大气科学试验观测计划提供科学支持；研究高原及东部区域水分循环多尺度时空特征及灾害天气成因，改进数值模式中高原及周边区域的云物理过程参数化方案，以提升数值模式的预报技术水平。

参考文献

- [1] 叶笃正, 顾震潮. 关于青藏高原对东亚环流和中国天气的影响的研究. 中国科学, 1955(1): 29-33.
- [2] 叶笃正, 陶诗言, 李麦村. 在6月和10月大气环流的突变现象. 气象学报, 1958, 29(4): 249-263.
- [3] 周秀骥, 赵平, 陈军明, 等. 青藏高原热力作用对北半球气候影响的研究. 中国科学D辑: 地球科学, 2009, 39(11): 1473-1486.
- [4] 杨鉴初, 陶诗言, 叶笃正, 等. 西藏高原气象学. 北京: 科学出版社, 1958.
- [5] Huang R H. Numerical simulation of three-dimensional teleconnections in the summer circulation over the northern hemisphere. Adv Atmos Sci, 1985, 2 (2): 81-92.
- [6] Yasunari T, Kanehira A, Koike T. Seasonal and internal variability of snow cover over the Tibetan Plateau and associated atmospheric circulation changes. The second Session of International workshop on TIPEX-GAME/Tibet, Kunming, 2000.

- [7] 吴国雄, 张永生. 青藏高原的热力和机械强迫作用以及亚洲季风的爆发 I. 爆发地点, 大气科学, 1998, 22(6): 825-838.
- [8] 吴国雄, 张永生. 青藏高原的热力和机械强迫作用以及亚洲季风的爆发 II. 爆发时间, 大气科学, 1999, 23(1): 51-61.
- [9] Xu X D, Lu C G, Shi X H, et al. Large-scale topography of China: A factor for the seasonal progression of the Meiyu rainband? Journal of Geophysical Research, 2010, 115, D02110, doi:10.1029/2009JD012444.
- [10] 徐祥德, 陈联寿, 王秀荣, 等. 长江中下游梅雨带水汽输送源汇结构. 科学通报, 2003, 48(21): 2288-2294.
- [11] 徐祥德, 陶诗言, 王继志, 等. 青藏高原一季风水汽输送“大三角扇型”影响域的特征与中国区域旱涝异常的关系. 气象学报, 2002, 60(3): 257-266.
- [12] Xu X D, Lu C G, Shi X H, et al. World water tower: An atmospheric perspective. Geophysical Research Letter, 2008, 35, L20815, doi: 10.1029/2008GL035867.
- [13] 施晓晖, 徐祥德, 程兴宏. 2008年雪灾过程高原上游关键区水汽输送机制及其前兆性“强信号”特征. 气象学报, 2009, 67(3): 478-487.
- [14] Shi X H, Xu X D, Lu C G. The dynamic and thermodynamic structures associated with a series of heavy precipitation events over China in January 2008. Weather and Forecasting, 2010, 25: 1124-1141.
- [15] Zhan R F, Li J P. Influence of atmospheric heat sources over the Tibetan Plateau and the tropical western North Pacific on the inter-decadal variations of the stratosphere-troposphere exchange of water vapor. Science in China, Ser D, 2008, 51(8): 1179-1193.
- [16] Xu X D, Zhang R H, Koike T, et al. A new integrated observational system over the Tibetan Plateau. Bulletin of American Meteorological Society, 2008, 89: 1492-1496.
- [17] 施小英, 施晓晖. 夏季青藏高原东南部水汽收支气候特征及其影响. 应用气象学报, 2008, 19(1): 41-46.
- [18] Steven C A. The LAPS wind analysis. Weather and Forecasting, 1995, 10: 342-352.
- [19] Steven C A, John A M, Daniel L B, et al. The local analysis and prediction system (LAPS): Analyses of clouds, precipitation and temperature. Weather and Forecasting, 1996, 11: 273-287.
- [20] 徐祥德, 陈联寿. 青藏高原大气科学试验研究进展. 应用气象学报, 2006, 17(6): 756-772.

《气象科学论文文献计量统计年度报告(2014)》发布

本刊编辑部

中国气象局图书馆和《气象科技进展》杂志联合编制的《气象科学论文文献计量统计年度报告(2014)》(以下简称《报告》)于2014年9月28日正式发布。此报告基于美国汤森路透开发的Web of Knowledge平台下SCI-E数据库以及中国学术期刊网络出版总库CAJD数据库检索平台,经过3个月的数据调研与分析,对2013年气象科学领域年度论文进行统计和计量。《报告》包括2013年全球和中国“气象和大气科学”领域SCI-E科技论文统计;2013年中国“气象学”领域论文统计(基于CAJD数据库)以及2013年中国气象局系统(指论文责任机构中,含有中国气象局或其直属、下属机构,下同)SCI-E和CAJD论文统计三部分。

《报告》揭示,2013年,全球在“气象和大气科学”领域共发表了12436篇SCI-E论文,中国位居第2位,共计发文2199篇,保持了自21世纪初开始的论文产出力渐进的态势,表明中国已经成为全球该领域最为重要的科技创新力量之一,具备了一定的影响力和话语权。但中国的论文数量与位居第1位的美国的4597篇比较,还有相当的距离。尤其是中国论文在高端期刊刊载的比例偏低,表明我国论文的质量和影响力还有很大的提升空间。

2013年国内发表的“气象学”类论文总数超过了8000篇

(CAJD数据库),属于相对较为活跃的领域之一。中国气象局系统是内气象学论文最主要的产出部门,表明中国气象局作为国家气象主管部门对整个行业科技创新的带动作用明显。

2013年中国气象局系统分别发表了610篇SCI-E论文和7317篇CAJD论文(不局限于气象和大气科学领域)。从SCI-E论文看,国家局直属机构占据了发文章的大部分,“八所”已经成为第二阶梯,尤其难得的是,一些省级机构崭露头角,浙江、广东、北京和上海的气象系统参与发表SCI-E论文均达20篇及以上。

本报告是中国气象局图书馆和《气象科技进展》杂志发布的首份气象科学论文文献计量统计年度报告,旨在从科技文献角度,系统揭示国内外气象科学技术基础和和应用研究取得的年度进展,为气象科技管理和科技决策提供参考咨询。根据委托方中国气象局科技与气候变化司的意见,计划从2015年开始推出年度系列报告,作为中国气象局图书馆的业务信息产品和《气象科技进展》杂志的特别报告,每年夏季发布,供各方参考。



全球干旱卫星监测计划

范锦龙¹ 张明伟¹ 曹广真¹ 张晓煜² 武建军³

(1 国家卫星气象中心, 北京 100081; 2 宁夏气象科学研究所, 银川 750002; 3 北京师范大学, 北京 100875)

摘要: 干旱是损失最严重的自然灾害之一, 干旱监测已受到了广泛关注。目前, 干旱的遥感监测取得了很好的进展, 但是针对全球干旱的监测并未与基于气象数据的全球干旱信息系统实现有机结合。2007年以来, 地球观测组织提倡实施全球干旱监测预警信息系统, 以充分利用遥感的全球监测能力, 而2008年发生的西方金融危机影响了全球干旱监测预警信息系统的建设。2011年全球20国集团农业部长确认的地球观测组织全球农业监测计划再次给全球干旱监测预警信息系统的建设带来了新的机会。美国已经用MODIS数据监测全球干旱以及干旱造成的作物减产分布, 中国的风云卫星也具有全球干旱监测的潜力, 国际社会应该努力推动建立集成遥感监测的全球干旱监测预警信息系统, 为决策者及时提供干旱信息, 以便积极应对可能发生的干旱, 减轻干旱对国家社会经济的影响。

关键词: 全球干旱, 农业干旱, 干旱监测, 卫星监测, 风云卫星

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.05.006

Global Drought Monitoring Initiative with Satellite Data

Fan Jinlong¹, Zhang Mingwei¹, Cao Guangzhen¹, Zhang Xiaoyu², Wu Jianjun³

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

2 Ningxia Institute of Meteorological Sciences, Yinchuan 750002 3 Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract: Drought, one of the severe natural hazards, occurs frequently and widely in the world. Attentions have been drawn to the field of drought monitoring. It has never been well integrated with global drought information system based on the meteorological data, although the global drought monitoring with satellite data has made great progress in the past. Since 2007, the GEO has started to advocate and implement a global drought monitoring and early warning information system in order to develop the global observing capacity of remote sensing. However, the following finance crisis in the west world adversely affected the implementation of this system. In 2011, the agricultural ministers of G20 noticed and recognized the Global Agricultural Monitoring Initiative of GEO, which has provided a new opportunity of promoting the implementation of a global drought monitoring and early warning information system. MODIS data have been successfully used in the US to monitor global crop growth and the loss distribution of crop production due to drought. In China, Fengyun Satellite has a global observing capacity for the global drought monitoring and the relevant support should be there to make this system real. International community should jointly promote the implementation of a global drought monitoring and early warning information system with a remote sensing component in order to provide the decision makers with the drought information and cope with the forthcoming drought.

Keywords: global drought, agricultural drought, drought monitoring, satellite monitoring, Fengyun satellite

1 引言

干旱发生频率较高、范围较广, 全球多数国家均遭受干旱的影响, 干旱已经成为全球最严重的自然灾害之一, 每年干旱造成经济损失达数千亿美元^[1]。干旱按类型一般分为气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱。很多干旱指标被提出并运用于表征不同类型的干旱。其中, 气象干旱的研究最深入、应

用最成熟, 气象观测数据常用于计算这些干旱指标。然而, 气象干旱存在与地面干旱实际反应不一致的问题, 水文干旱和农业干旱比较接近实际的地面干旱。水文干旱监测需要水文观测数据, 而这些数据往往由于敏感性和保密的原因, 广大研究者不能及时获取这些数据, 因而限制了其应用。农业干旱的监测也存在一定困难, 但是遥感数据的易得性却推动了农业干旱卫星监测的发展。研究表明, 世界范围内已存在各种各样的、不同区域的、国家级或地方级的干旱卫星监测系统, 但是与气象数据的结合, 特别是面向全球的干旱卫星监测系统的建立却刚刚开始。自2007年以来, 国际社会已向这个方向推动。地球观测组织

收稿日期: 2013年3月25日; 修回日期: 2013年6月21日
第一作者: 范锦龙(1975—), E-mail: fanjl@cma.gov.cn
资助信息: 国际合作项目(2012DFG21710); 国家科技支撑计划项目(2012BAH29B02)

(GEO)推动的全球干旱监测预警信息系统和现在提出的全球农业监测计划无疑将带动全球干旱卫星监测的进步。

2 全球农业监测计划

作为政府间的国际组织，GEO为全球各国从事地球观测的单位提供了一个基础平台，支持相关合作单位提出新项目，协调全球地球观测战略计划和有关资金的投资方向。GEO基于十年实施计划（2005—2015年）协调建设全球综合地球观测系统（GEOSS）^[2-3]，并为GEOSS确定了框架结构、目标、范围以及9个社会受益领域，即灾害、健康、能源、气候、水、天气、生态系统、农业和生物多样性。

农业作为GEOSS确定的其中一个社会受益领域，2015年前主要推动地球观测数据的广泛应用和提高应用能力来促进可持续农业、水产养殖业、渔业和林业的预警、风险评估、粮食安全、市场效率和沙漠化防御，通过发布天气预报、风暴和极端事件早期预警、中长期气候预测、水污染以及水的供给信息来支持农业可持续管理。为此，GEO正在协调全球农业监测系统的各个组成部分，为农业管理决策提供可靠透明的信息。目前，全球已经存在4个全球级的农业监测系统，其他大多数是国家级或区域级的农业监测系统。2007年，在GEO的推动下，运行这些农业监测系统的单位代表、相关大学的研究人员、对农业监测有浓厚兴趣的学者、管理者以及重要的国际组织代表，包括联合国粮农组织（FAO）、世界气象组织（WMO），共同发起和推动成立了GEO全球农业监测专家委员会。现在该委员会拥有全球300多名人员，几乎包括了全球从事农业监测的重要专家、学者和管理者。

GEO全球农业监测计划（GEO-GLAM）是GEO农业社会受益领域的一个国际计划，其目的是通过利用地球观测数据和技术加强全球粮食产量的监测和估计，增强国际社会对全球、重点国家、重点区域的农业生产的监测和粮食产量的预测能力，同时作为联合国粮食和农业组织正在建设的全球农业监测信息系统的全球粮食产量的输入源。该计划（图1）共分为6部分：（1）增强国家的农业监测能力；（2）加强存在粮食安全风险的国家的监测；（3）加强全球农业生产监测系统的建设；（4）协调卫星和地面观测数据的获取；（5）协调研究和技术开发；（6）分发数据、产品和信息。GEO-GLAM要求全球农业监测委员会提高协调水平，同时借助一些从事地球观测相关的网络和组织推动协调工作，如地球观测卫星委员会

（CEOS）和WMO。

GEO-GLAM在全球有很大的影响力，全球20国集团的农业部长们认为GEO是利用地球观测技术促进实施全球农作物产量监测的最合适机构，并把GEO-GLAM列为他们控制全球粮食价格波动行动计划的一部分。全球20国集团元首再次于2011年11月在戛纳举行的全球20国集团国家元首会议上确认了GEO-GLAM，并承诺给予大力支持。

3 全球干旱监测计划

世界很多国家已经开展了干旱监测、评估、响应、减缓、应对和早期预警的研究工作。2006年，美国开始建设协调和综合的国家干旱早期预警系统（DEWS），并随后建成了国家综合干旱信息系统（NIDIS）。2007年，地球观测部长峰会接受美国建议，计划未来十年在现有工作基础上建立全球干旱早期预警系统（GDEWS），推动全球干旱数据和信息共享，加强沟通和能力建设，全面监测全球范围内威胁逐渐增加的干旱，在危机发生期间及时发布区域干旱预警评价信息。然而，由于随后发生的金融危机，进展很缓慢^[1]。但是，干旱监测在北美洲很成功。在GEO的框架下，美国通过与加拿大和墨西哥的合作，利用美国干旱信息和服务交换中心和基于网络的美国干旱门户网站NIDIS（图2），开发了北美干旱监测系统^[4]。

GEO的全球农业监测委员会具有建立全球干旱卫星监测系统的能力。MODIS产品（例如，16d合成、250m分辨率的归一化植被指数NDVI）已经用来监测全球范围内因旱灾造成的作物减产情况，用户可通过网络界面查询预先定置区域的数据并进行农作物长势和旱情分析，也可进行交互式区域设置，制作生长季的植被指数图，通过比较植被指数异常，如与上一年比较和与多年平均比较，制作当前和多年植被指数差

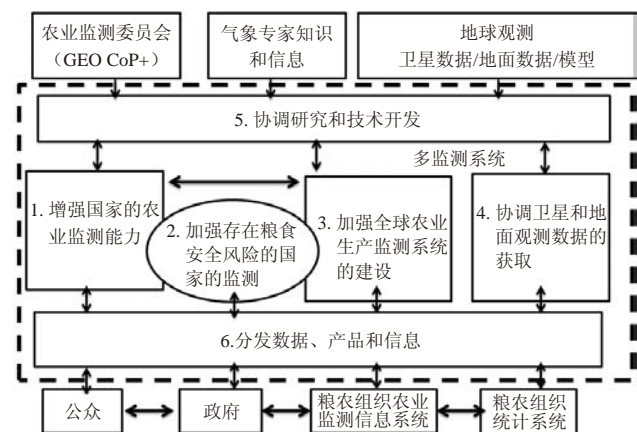


图1 全球农业监测计划组成部分

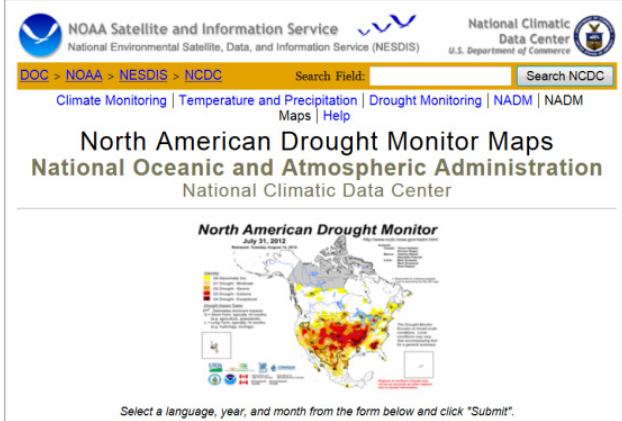
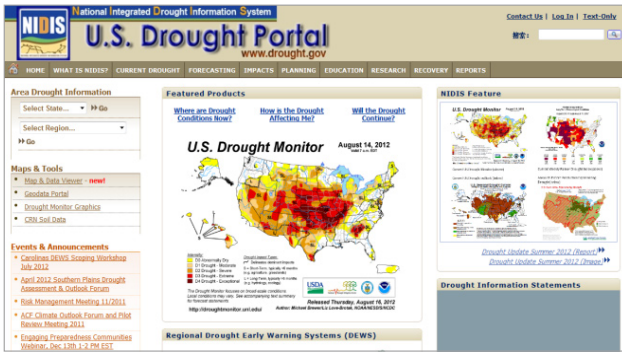


图2 美国干旱监测门户和北美干旱监测信息页面

值图，监测当前的农作物生长状况。图3是2010年6月26日—7月11日的植被指数差值图（与2000—2009年平均植被指数的差），显示了干旱对作物生长的影响。

中国风云（FY）气象卫星也具有监测全球干旱的能力。尽管风云卫星是针对天气应用设计的，但是在其他领域已经得到了广泛的应用，农业监测是其中的一个关键应用领域。FY-3号是第二代极轨气象卫星，FY-3A和FY-3B分别于2008年和2010年发射成功。FY-3A和FY-3B均携带11个有效载荷，其中可

见光近红外扫描辐射计（VIRR）和中分辨率成像仪（MERSI）是农业监测的关键传感器。FY-MERSI与NOAA/AVHRR、EOS/MODIS或者ENVISAT/MERSI拥有相似的观测能力，可监测不同尺度旱灾的发生和发展。当前，国家卫星气象中心可业务化的提供全国植被生长监测和植被干旱监测。图4为风云卫星植被监测和干旱监测的样例。随着世界干旱监测需求的增加，这些应用有望推广到其他区域。此外，国家气候中心也开展了干旱监测、预测预警和影响评估工作，业务化发布全球旱涝指数、中国气象干旱综合指数、标准化降水指数、土壤相对湿度等系列干旱产品和公告，倡导未来干旱监测应从传统的气象干旱向适用于农业干旱、水文干旱监测的综合干旱监测预警发展，在完善多个气象单因子指标开展气象干旱监测的基础上，进一步发展土壤湿度、蒸发量、地下水水位以及卫星遥感资料在干旱监测业务中的量化应用，探索多部门联合开展干旱综合监测评估的业务流程，为抗旱减灾提供决策服务信息。

欧盟委员会（EC）的合作研究中心（JRC）在MARS项目的支持下，定期发布利用植被指数、基于能量平衡的蒸散量以及微波指数等监测的作物生长状况。加拿大农业部门发布基于NOAA AVHRR的NDVI的作物生长状况周报和农业气象统计信息。印度空间部的国家遥感部门利用国家农业干旱评估和监测系统⁵⁾，使用NOAA AVHRR和IRS WiFS NDVI以及天气预报信息，定期发布更小的行政单元的两周干旱公告和月报。类似的系统在全球其他国家也存在。然而，尽管在一些区域和洲的干旱监测已经成功，但是全球干旱卫星监测信息系统仍未出现。全球干旱卫星监测系统的建设仍然面临着各部障碍，包括技术、数据、观测网络、通讯、跨国国际边界的行政和政治问题。

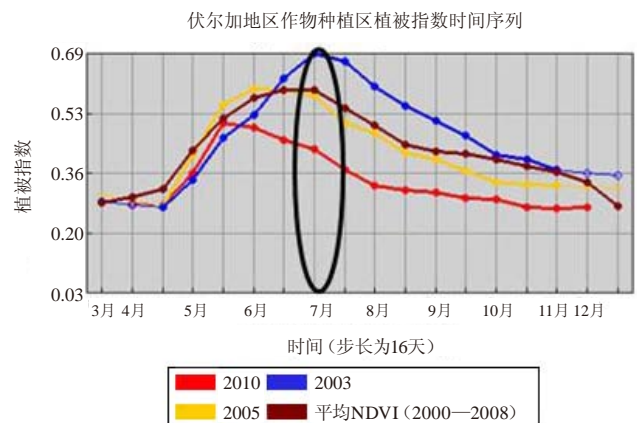
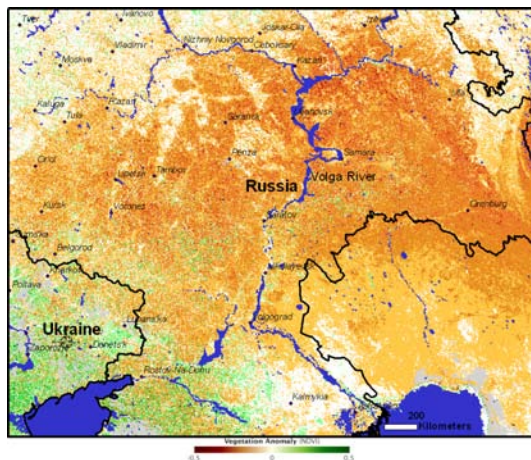


图3 俄罗斯伏尔加地区干旱卫星监测图

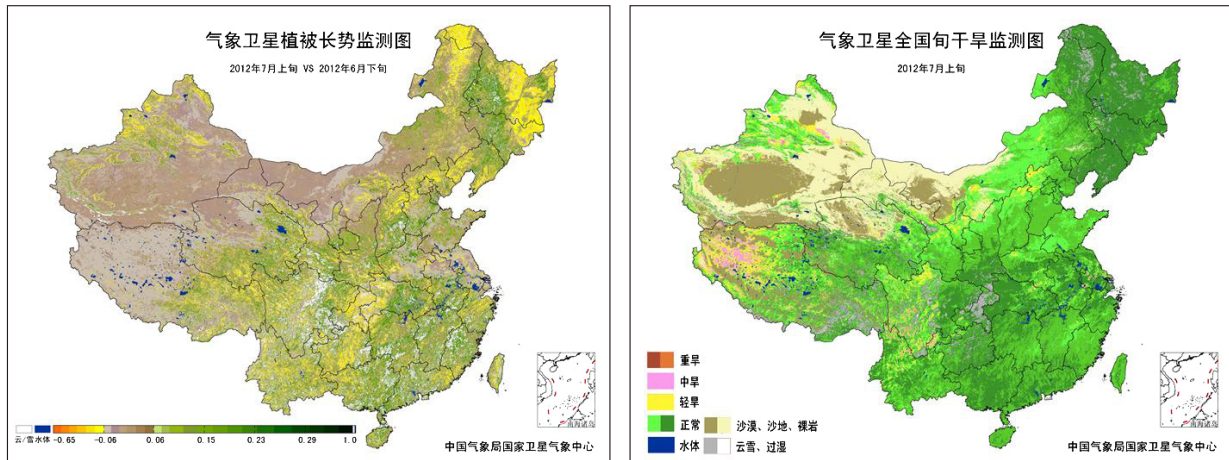


图4 风云卫星干旱监测产品

4 国际社会对全球干旱卫星监测系统的推动

2010年春季,国际上组织了一系列研讨会,推动全球干旱卫星监测的合作。2010年4月,在美国召开的干旱研讨会,倡导国际社会在干旱监测问题上的合作,提出了监测干旱的改进手段和发布干旱监测信息的改进机制^[1]。2012年4月11—13日,世界气候研究计划的全球干旱信息系统研讨会召开,该研讨会集中讨论了建设全球干旱信息系统的关键步骤,这个系统是建立在全球已有的干旱监测、干旱风险管理和短期气候预测的基础上。中国科学家也于2012年6月3—5日召开了“全球气候变化下的干旱监测、评估和计划国际研讨会”,为来自不同国家和组织的科学家提供了一个展示干旱研究成果和分享经验的机会。随后“农业干旱和水资源GEOSS研讨会”也于2012年10月24—25日在北京召开,该会议为农学和水资源的研究者们提供了分享经验和讨论在水的利用、农业干旱、农业开发和气候变化之间相互作用的最新进展的平台。2013年3月11—15日,WMO、FAO和防治荒漠化公约(UNCCD)联合举办了国家干旱政策高层研讨会,会后发表了宣言,号召全球各国制订和实施国家干旱管理政策,合力改善干旱预测和及时分发预测信息,以便提前采取措施,减缓干旱影响。

5 展望

干旱已不是个别国家、个别区域关注的环境问题。最近几年,国际社会认识到了干旱的全球影响,

从技术上和政策方面已在推动建立全球干旱卫星监测和预测信息系统。GEO自2007年以来倡导实施全球干旱早期预警系统,全球20国集团农业部长认可的GEO-GLAM将带动全球干旱监测信息系统的建设,联合国号召全球各国建立国家干旱管理政策。从技术层面讲,多数国家的干旱监测是基于干旱相关的地面观测,如降水、天气、作物状态和水资源可利用量等,卫星观测是这些地面观测的很好补充,卫星可提供大范围、高频次的干旱监测。国际上建立集成遥感监测的全球干旱监测系统的能力是存在的,国际社会应该一起努力,推动早日建成集成遥感监测的全球干旱监测预警信息系统。

参考文献

- [1] Brewer M J, Heim R R. International drought workshop series. Bull Amer Meteor Soc, 2011, 92: 29-31.
- [2] 冯筠, 高峰, 黄新宇. 构建天地一体化的全球对地观测系统—三次国际地球观测峰会与GEOSS. 地球科学进展, 2005, 20(12): 1327-1333.
- [3] 范锦龙. 地球观测数据卫星分发系统发展综述. 地球科学进展, 2012, 27(7): 712-716.
- [4] Heim R R, Brewer M J. The development of an international drought clearinghouse and summary of results of the April 2010 global drought assessment workshop. Proc second int conf on climate, sustainability and development in semi-arid regions, Fortaleza, Brazil, Government of Ceará State.
- [5] Das H P. Satellite based agro-advisory service. Satellite remote sensing and GIS applications in agricultural meteorology, proceedings of the training workshop, 7-11 July, 2003, Dehra Dun, India.

北京市海淀区PM₁₀污染特征及其与气象要素的关系

严敏¹ 马姗姗² 冯贵宾¹ 闫巍² 贾志强³ 高猛² 王健²

(1 北京市海淀区气象局, 北京 100080; 2 北京市延庆县气象局, 北京 102100; 3 北京市大兴区气象局, 北京 102600)

摘要: 通过对2006年1月—2009年12月北京市环境保护局海淀区三个子站的空气质量资料和相对应的三个气象站的气象资料分析发现, 海淀区香山、北部新区、万柳三个站的PM₁₀浓度达到空气质量二级以上(不含二级)的天数占全年的30%, 且浓度超标日数春季>冬季>秋季>夏季, 其中以北部新区空气质量二级以上天数最多, 高达125天。PM₁₀浓度峰值主要出现在上午10时和傍晚19时附近。总体上, 各年空气质量二级以上天数以2006年最多, 2009年最少。通过对PM₁₀的浓度与气象要素做相关分析, 发现PM₁₀的浓度随温度、风速、气压、降水量的增高而降低, 随相对湿度的升高而升高, 风向影响较为复杂。

关键词: 大气污染, PM₁₀, 气象要素

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.05.007

Research on Characteristics of PM₁₀ Air Pollution and the Relationship Between PM₁₀ and Meteorological Elements in Haidian District, Beijing City

Yan Min¹, Ma Shanshan², Feng Guibin¹, Yan Wei², Jia Zhiqiang³, Gao Meng², Wang Jian²

(1 Haidian Meteorological Service of Beijing City, Beijing 100080 2 Yanqing Meteorological Service of Beijing City, Beijing 102100 3 Daxing Meteorological Service of Beijing City, Beijing 102600)

Abstract: The air quality data and meteorological observational data of the three weather stations of Beijing Municipal Environmental Protection Bureau in Haidian district from Jan 2006 to Dec 2009 were analyzed. The results show that the major air pollution was PM₁₀ and it occurred all over the year. The number of days whose air quality was above Class II standard of air quality (not including Class II standard) was about 30% of the year and it was the minimum in 2006 while it was the maximum in 2009. In terms of the season, the pollution occurred following a spring>winter>autumn>summer order. The period reaching the peak concentration of PM₁₀ was between 10 am and 19 pm. The concentration of PM₁₀ decreased with an increase of the temperature, wind speed, air pressure and precipitation, and increased with an increase in the relative humidity while the influence of the wind direction was complex. Meanwhile, the correlation analysis between concentration of PM₁₀ and the meteorological elements was discussed in this paper, which provided a comprehensive evaluation of air quality of the three weather stations in Haidian district and furnished a basis for the research and control of air pollutants in future.

Keywords: air pollution, PM₁₀, meteorological elements

1 引言

20世纪90年代以来, 伴随着城市化进程的加快, 大气环境污染事件明显增多, 对经济社会发展的影响日益加剧^[1]。污染不仅对人体造成巨大伤害, 也影响生产活动、生活活动和城市景观。目前, 空气污染受到各界的普遍关注, 如何兼顾环境与发展已成为重大

问题^[2]。

2012年之前, 北京市的主要污染物包括PM₁₀、SO₂和NO₂, 首要污染物是PM₁₀。已有许多研究对北京市污染物的污染特征进行了分析, 例如, 有关北京近郊区PM₁₀大于等于四级污染日的年、季及随不同天气类型的变化特征、浓度水平和地域分布特征^[2-3], 北京地区污染的气象条件^[4], 北京市城市大气污染物PM₁₀的污染特征^[5], 北京地区污染物浓度与天气形势或气象要素的关系^[6-11], 等等。一些研究^[2, 6]认为污染物浓度由排放源和天气过程共同决定, 当污染源相对固定

收稿日期: 2013年7月23日; 修回日期: 2013年12月16日
第一作者: 严敏(1961—), Email: 1054104457@qq.com
资助信息: 北京市气象局气象科技研发专项(2010BMBKYZX10)

时, 重污染事件的原因则主要归于天气条件^[3, 12]。

在以上研究中, 由于城市边界层大气污染观测资料时间序列较短, 因此在城市大气污染年、季、月、天的特征分析及其影响因子的研究方面不够充分, 也很难具备代表性。本文利用北京市海淀区环境保护局三个子站2006—2009年长达4年的污染资料, 结合海淀区气象局相应站点与时段的地面站气象资料, 从不同角度对PM₁₀的时空变化特征及其气象影响因子进行了全面系统的分析和研究。本研究一方面对海淀区三站的空气质量情况进行了综合评价, 另一方面也为大气污染物的研究与治理提供了依据, 从而可为大气环境规划、管理、污染防治及城市工业布局、合理的能源政策制定提供参考依据。

2 资料与方法

2.1 空气质量数据与气象资料来源

2006—2009年的空气质量实时监控数据来自于北京市海淀区的空气质量自动监测站(包括香山、北部新区、万柳三个子站的数据)(图1), 监测的项目为大气主要污染物PM₁₀, 其浓度资料取前一天12时至当天12时共24h的平均值, 表示当天的污染物日均浓度, 其中2006—2008年的数据为逐日数据, 2009年数据为逐时数据。地面气象数据来自于2006—2009年地面观测站海淀本站、稻香湖站和香山站, 气象要素包括平均气温、相对湿度、风向、风速、气压和降水量。

2.2 空气污染指数

空气污染指数(API)可用来反映和评价空气质量。该指数分为5级: API≤50, 为I级, 空气质量优; 50<API≤100, 为II级, 空气质量良; 100<API≤200, 为III级, 空气质量为轻度污染; 200<API≤300, 为IV



图1 海淀区周边地形示意

级, 空气质量为中度污染; API>300, 为V级, 空气质量为重度污染, 其中达到三级及三级以上污染指数会对人体或环境产生危害^[5]。PM₁₀浓度与污染指数的对应关系见表1。

2.3 方法

本文将统计出主要大气污染物PM₁₀的年、季(3—5月为春季, 6—8月为夏季, 9—11月为秋季, 12月—次年2月为冬季)、月、日(前一日12时—当日12时)的序列图, 对其进行趋势和特征分析, 分析相应的气象要素, 并进行相关分析, 对产生污染的原因进行探索。

3 结果

3.1 不同时间尺度 PM₁₀ 的变化特征分析

3.1.1 年变化特征

2006—2009年海淀区三站(香山站、北部新区站和万柳站)在4年中的PM₁₀的平均状况为: PM₁₀浓度达到空气质量一级天数为60d, 占全年的16.5%; 二级天数为195d, 占全年的53.4%; 三级天数为99d, 占全年的27.1%; 四级天数为6d, 占全年的1.6%; 五级天数为5d, 占全年的1.4%; PM₁₀超标日数(包括三级、四级和五级)占全年的30%。

分析三站2006—2009年PM₁₀浓度达到空气质量五级的平均天数, 发现以万柳站最多, 北部新区站最少, 分别为6d和4d; 四级天数以万柳站最多, 香山站最少, 分别为7d和5d; 三级天数以北部新区站最多, 香山站最少, 分别为115d和81d; 二级天数以万柳站最多, 香山站最少; 一级天数以香山站最多, 万柳站最少。空气质量二级以上天数从多到少为北部新区站>万柳站>香山站, 即空气质量超标日数以北部新区最多, 而空气污染程度以万柳站最重, 中度和重度污染都集中在万柳站。从各年分布来看, 2006—2009年, PM₁₀浓度达到空气质量二级以上天数总体呈逐年递减的趋势, 但三个站的变化趋势各有不同(图2)。

3.1.2 季节变化特征

2006—2009年, 三站各季节PM₁₀浓度达到空气质量二级以上的平均天数呈现出春季>冬季>秋季>

表1 污染指数分级限值

污染指数 (API)	PM ₁₀ 浓度 (μg·m ⁻³)
500	600
400	500
300	420
200	350
100	150
50	50

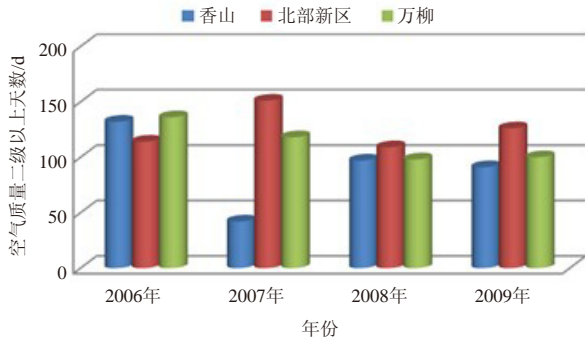


图2 2006—2009年三站PM₁₀浓度达到空气质量二级以上的天数分布

夏季的趋势，所占比例分别为31.8%、29.8%、23.4%和14.6%。万柳和北部新区呈冬季>春季>秋季>夏季，香山地区呈春季>秋季>冬季>夏季，其中北部新区各季节的空气质量二级天数均明显高于香山和万柳。表2给出了三站四季PM₁₀浓度达到空气质量五级、四级和三级的天数分布，可以看出，中度和重度污染大多分布在春季和冬季，以春季最多。

3.1.3 月变化特征

综合2006—2009年三个站点的平均状况，各月之中PM₁₀浓度达到空气质量二级以上天数最多的分别是12月、4月和1月，分布最少的分别是8月、7月和9月。其中，香山站PM₁₀浓度达到空气质量二级以上天数以4月、5月和12月居多，北部新区和万柳站均以12月、4月和1月居多（图3）。

通过对2006—2009年三站各个月份的PM₁₀浓度进行分析，发现万柳站PM₁₀的年平均浓度最大

表2 2006—2009年三站四季PM₁₀浓度达到空气质量五级、四级和三级的天数分布

季节	五级天数 (d)			四级天数 (d)			三级天数 (d)		
	香山	北部新区	万柳	香山	北部新区	万柳	香山	北部新区	万柳
春季	3.8	2.8	3.8	2.5	2.0	2.8	24.3	34.3	28.5
夏季	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	14.3	18.8	14.8
秋季	0.3	0.0	0.5	1.0	0.8	1.0	22.5	26.5	25.5
冬季	1.0	1.3	1.8	1.5	2.8	2.8	19.5	35.8	31.8

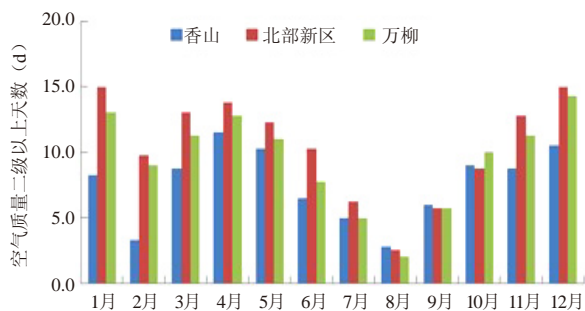


图3 2006—2009年三站各月PM₁₀浓度达到空气质量二级以上的天数分布

(142 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)，北部新区站次之(140 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)，香山站最小(127 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。三个站各个月份的浓度变化趋势是一致的，均是在12月达到最高，1月、3—5月的PM₁₀平均浓度也较高，7—10月的PM₁₀平均浓度相对较低。

3.1.4 四季逐时变化特征

以2009年为例，对三站PM₁₀超标日的逐时浓度按季节进行计算，发现PM₁₀浓度在春季、夏季、秋季和冬季的平均值分别为335、181、335和201 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，以春、秋季比较高。四季PM₁₀浓度变化趋势基本一致：春季在10时和20时达到峰值，在7时达到谷值；夏季在15时和23时达到峰值，5时达到谷值；秋季在19时达到峰值，7时达到谷值；冬季在10时和23时达到峰值，7时达到谷值（图4）。总体上，各个季节的波峰都在18—23时附近和上午10时附近，谷值在上午7时附近。这一方面受逆温影响，另一方面也受上下班的车流高峰影响。

将三站PM₁₀污染达到中度和重度污染的日分为工作日（周一至周五）和节假日（周六、周日及法定节日），发现节假日的PM₁₀浓度略高于工作日，时间变化特征大概一致（图5）。这主要是由于节假日人类活动相对频繁，车辆不限号，污染相对严重一些。

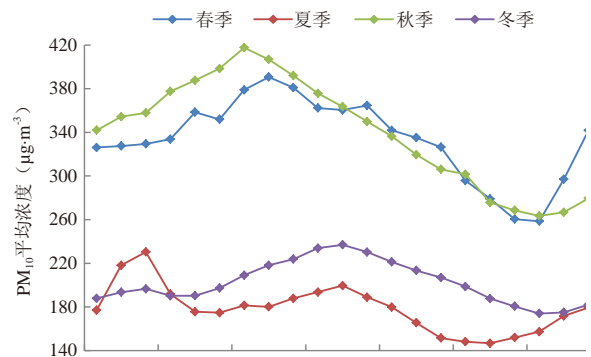


图4 2009年三站空气质量三级的PM₁₀平均浓度逐时变化

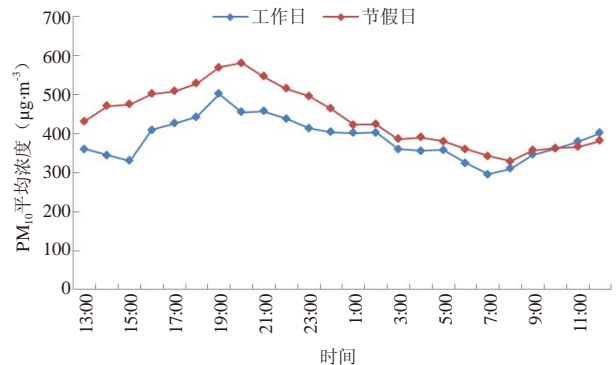


图5 2009年三站空气质量为中度 and 重度污染的工作日和节假日的PM₁₀平均浓度逐时变化

3.2 污染物浓度与气象要素的关系分析

3.2.1 温度

以往研究认为，大气污染物浓度与温度成反比^[9]。一方面由于随着气温升高，大气对流层内垂直对流运动增强，使污染源排放到大气中的污染输送到远方，从而加速了颗粒物的扩散；另一方面，温度降低，需要燃煤供暖（11月15日—次年3月15日），使得PM₁₀等排放增加^[1, 13-14]。

然而，由于地形、季节和局地小气候的影响，PM₁₀浓度与温度的关系也是复杂的。通过对三站气温与PM₁₀浓度做相关分析（表3）表明：在春季和夏季，三站均呈现出显著的正相关，即随着温度升高，PM₁₀浓度也在增加；在秋季，香山站的PM₁₀浓度与气温无显著相关，而北部新区站和万柳站则呈现出负相关；在冬季，香山站呈现出极显著的正相关，北部新区站为极显著的负相关，万柳站的温度同PM₁₀浓度无显著相关。

3.2.2 相对湿度

当相对湿度 $\leq 90\%$ 时，大气中PM₁₀浓度与相对湿度呈显著的正相关，这是由于相对湿度大，有利于大气中的气体转化成为粒子。另外，由于相对湿度的增加，大气颗粒物由于吸湿使得本身所含的液体量增加，大粒子数量增多，因而使得空气中PM₁₀的质量浓度增加^[3, 15]。

通过对2006—2009年三站四季的污染物浓度和相对湿度做散点图，发现污染物浓度较高的点都分布在相对湿度较大的区域，尤其是在相对湿度为50%~95%的区间，这种现象在秋、冬季节很明显，特别是冬季。但是当相对湿度 $> 90\%$ 时，水汽则极可能凝结并形成降雨，此时污染物浓度又会明显下降，这种现象在夏季最常出现（图6）。

对三站各季节PM₁₀浓度与相对湿度进行相关分析，发现：在春季、秋季、冬季PM₁₀浓度与相对湿度呈显著正相关，且冬季的相关系数高于春、秋季，而在夏季则无显著相关，这也充分表明了相对湿度的增大（降水较多的夏季除外）有利于PM₁₀的形成与浓度增加（表4）。

通过对三个站点的年均相对湿度进行分析，发现北部新区 $>$ 万柳 $>$ 香山，分别为58%、55%和53%，

表3 三站各个季节PM₁₀浓度同气温的Pearson相关系数

	春季	夏季	秋季	冬季
香山站	0.154**	0.110**	0.032	0.058**
北部新区站	0.079**	0.154**	-0.083**	-0.112**
万柳站	0.100**	0.046*	-0.049*	0.004

注：* 在 0.05 水平（双侧）上显著，** 在 0.01 水平（双侧）上显著，下同

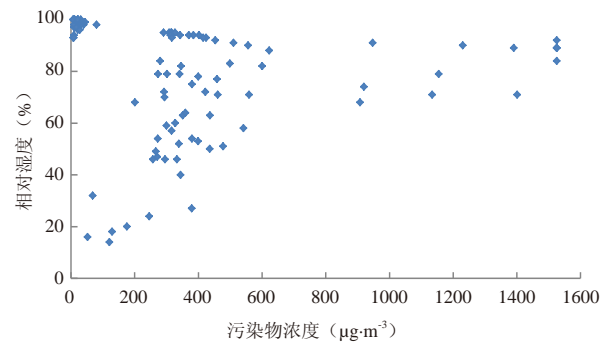


图6 北京市海淀区污染物浓度与相对湿度的散点图

这可能也是北部新区站空气质量超标日数高于万柳和香山的一个重要因素。

3.2.3 气压

根据表5，可以看出，除夏季外，其他季节的气压与污染物浓度大体呈负相关趋势，即本站气压越高，越有利于污染物扩散，使浓度降低。

3.2.4 风速

大气低层风速影响着污染物的传输及扩散过程，长时间的微风或静风则会抑制污染物的扩散，使近地面层的污染物成倍地增加。在本研究中，大气污染物的浓度与2/10min平均风速、最大风速和极大风速都有着显著的负相关关系，尤其是秋季和冬季，不过，在夏季相关性并不显著。需要指出的是，当风速过大时，地表的沙尘会被风带入空中，使得颗粒物质量浓度增大，特别是PM₁₀的质量浓度，这个时候风速就与PM₁₀浓度表现出一种正相关性^[16]。

通过对2006—2009年三站四季的污染物浓度和风速做相关分析，发现三站四季PM₁₀浓度与风速（2min平均风速和极大风速）均呈现显著负相关（表6）。

3.2.5 风向

北京城市污染过程与南部或东南部为主的周边城市排放源污染显著相关，即北京周边向南开口的“马蹄型”地形可能导致南部周边城市排放源远距离输送的污染“滞留”或动力扩散效应，形成北京与南部周边地区污染源的特殊南—北向带状相关影响域^[9]。

表4 三站各个季节PM₁₀浓度与相对湿度的相关系数

	春季	夏季	秋季	冬季
香山站	0.101**	-0.007	0.108**	0.240**
北部新区站	0.154**	-0.055	0.072**	0.321**
万柳站	0.114**	0.018	0.194**	0.302**

表5 三站各个季节PM₁₀浓度与气压的相关系数

	春季	夏季	秋季	冬季
香山站	-0.354**	0.043*	-0.202**	-0.279**
北部新区站	-0.310**	0.055**	-0.101**	-0.227**
万柳站	-0.344**	0.065**	-0.127**	-0.254**

表6 三站各个季节PM₁₀浓度与2min平均风速和极大风速的相关系数

站点	要素	春季	夏季	秋季	冬季
香山站	2min平均风速	-0.056**	0.009	-0.148**	-0.099**
	极大风速	-0.128**	-0.044*	-0.208**	-0.102**
北部新区站	2min平均风速	-0.062**	-0.065**	-0.164**	-0.214**
	极大风速	-0.134**	-0.036	-0.184**	-0.224**
万柳站	2min平均风速	-0.102**	-0.054*	-0.196**	-0.175**
	极大风速	-0.141**	-0.079**	-0.234**	-0.212**

表7 三站各个季节污染物浓度与降水量的相关系数

	春季	夏季	秋季	冬季
香山站	-0.069**	-0.009*	-0.055*	0.038
北部新区站	-0.034	-0.055**	-0.048*	—
万柳站	-0.033	-0.064**	-0.019	—

注：“—”表示冬季无降水。

总体上，风向对污染物浓度的影响很复杂，在不同的站点和不同的季节，风向对污染物浓度的影响也是不同的。通过对海淀区三站空气质量为四级和五级时的风向的统计发现：风向大多是白天北（东北、西北风）转南（东南、西南）风，夜间南（东南、西南）转北（东北、西北）风，在方向转换为南风时，会将南、西南和东南部的污染物输送到海淀区，使污染物沉积。因此，海淀区虽不是污染源产生区，却深受南—北向带状相关影响域传输而来的污染物影响。

3.2.6 降水量

降水量与大气污染物浓度呈负相关，这是因为降水能够冲刷大气中的污染物^[3]，通过对PM₁₀浓度与降水量的相关分析发现，整体两者在春、夏、秋季呈负相关，在冬季相关性不显著。在不同的站点，这种相关性有时并不显著，如春季除在香山站两者呈极显著负相关外，另外两个站的相关不显著，在秋季万柳站的两者负相关不明显（表7）。

4 结论和讨论

4.1 结论

2006—2009年，海淀区香山站、北部新区站和万柳站空气质量超标（三级、四级和五级）天数占全年的30%，空气质量达标天数（一级和二级）占全年的70%。空气质量四级和五级天数分布为：万柳站>香山站>北部新区站，三级天数为北部新区站>万柳站>香山站。PM₁₀浓度达到空气质量二级以上天数在香山站和北部新区站呈逐年波动下降趋势，万柳站呈逐年递减的趋势。二级以上天数最多的月份是12月，最少的是8月。

各季节空气质量二级以上天数总体呈春季>冬季>秋季>夏季，所占比例分别为31.8%、29.8%、

23.4%和14.6%。四级和五级天数主要出现在万柳，三级天数主要出现在北部新区。污染浓度在每日大致出现两个波峰，出现在18—23时附近和上午10时附近，污染物浓度在节假日高于工作日。

污染物浓度与气象要素有很大的关系，其中大气污染物浓度与温度、地面气压、风速、降水量呈负相关，同相对湿度和逆温层厚度呈正相关。北京污染源排放大多聚集在东南—南—西南方向，白天北（东北、西北风）转南（东南、西南）风，夜间南转北风时，会将南、西南和东南部的污染物输送到海淀区，使污染物沉积。

4.2 讨论

鉴于污染资料是北京市国控点资料，而气象资料是北京市地面站资料，两者的测站不是完全一致的。因此，在分析过程中，可能会有一定的影响。

本研究仅讨论了北京市大气污染物短期变化的影响因子，污染物浓度的长期变化除了受到气候条件的影响，更主要的会受到污染源排放的影响。而本文是在假使污染源固定的前提下做的分析，并没有对其他因素做量化的计算，这尚需进一步的研究。

参考文献

- 李扬. 2000—2007年中国重点城市PM₁₀的时空变化特征. 干旱区资源与环境, 2009, 23(9): 51-54.
- 赵越, 潘钧, 张红远, 等. 北京地区大气中可吸入颗粒物的污染现状分析. 环境科学研究, 2004, 17(1): 67-69.
- 王淑英, 张小玲. 北京地区2000年PM₁₀的大气污染年变化特征. 应用气象学报, 2002, 13(特刊): 177-184.
- 段欲晓, 徐晓峰. 北京地区SO₂污染气象条件分析. 城市气象服务科学讨论会学术论文. 北京: 中国气象学会, 2001.
- 宋艳玲, 郑水红, 柳艳菊, 等. 2000—2002年北京市城市大气污染特征分析. 应用气象学报, 2005, 16(B03): 116-122.
- 王莉莉, 王跃思, 王迎红, 等. 北京夏末秋初不同天气形势对大气污染物浓度的影响. 中国环境科学, 2010, 30(7): 924-930.
- 张小玲, 刘建忠, 徐晓峰. 北京春季一次持续浮尘和污染天气过程分析. 气象科技, 2004, 32(6): 420-424.
- 孟燕军, 程从兰. 影响北京大气污染物变化的地面天气形势分析. 气象, 2002, 28(4): 42-47.
- 徐祥德, 丁国安, 周丽, 等. 北京地区冬季大气污染动力-化学过程区域性三维结构特征. 科学通报, 2003, 48(1): 1-6.
- 任阵海, 苏福庆, 陈朝晖, 等. 夏秋季节天气系统对边界层内大气中PM₁₀浓度分布和演变过程的影响. 大气科学, 2008, 32(4): 741-751.
- 隋珂珂, 王自发, 杨军, 等. 北京PM₁₀持续污染及与常规气象要素的关系. 环境科学研究, 2007, 20(6): 77-82.
- 吴兑, 邓雪娇. 环境气象学与特种气象预报. 北京: 气象出版社, 2001.
- 王京丽, 谢庄, 张远航, 等. 北京市大气细粒子的质量浓度特征研究. 气象学报, 2004, 62(1): 104-110.
- 陈雷华, 余晔, 陈晋北, 等. 2001—2007年兰州市主要大气污染物污染特征分析. 高原气象, 2010, 29(6): 1627-1633.
- 车瑞俊, 刘大猛, 袁杨森. 北京冬季大气颗粒物污染水平和影响因素研究. 中国科学院研究生院学报, 2007, 24(5): 556-563.
- 王珩, 于金莲. 大气中PM₁₀浓度的影响因素及其污染变化特征分析. 上海师范大学学报(自然科学版), 2004, 33(3): 98-102.

2006—2013年大气科学类毕业生就业形势分析及展望

——以南京信息工程大学为例

■ 刘鹏 陈昌春 徐磊

大气科学专业作为教育部规定的95个一级学科之一，它的招生与就业，具有一定的行业特殊性。

近年来，我国高校毕业生规模不断增长，总体就业形势较为严峻。此外，有些专业由于培养目标与市场需求存在一定的脱节现象，就业状况不容乐观。大气科学专业作为教育部规定的95个一级学科之一，它的招生与就业，具有一定的行业特殊性。伴随国家与社会对气象预报与多元化气象服务需求的增加，以及气候问题受到社会各界的关注，相对其他专业而言，较容易就业，发展前景良好。然而，受国家整体就业形势较为严峻的影响，不少大气科学专业的在校生对现实与未来都缺乏清晰的认识，以至于容易产生思想上的波动，在气象行业与其他行业之间、在工作与考研之间摇摆。具体表现为以下两种情况：其一，大气科学专业由于就业的针对性很强，主要以气象部门为主，收入并不及一些热门行业丰厚，致使一些毕业生放弃气象领域的对口就业，而选择其他行业；其二，在一些曾经倾向于考研的大气科学类毕业生和在校生中，有一种颇为普遍的想法，他们认为在每年高校毕业生人数增加的情况下，等读完三年研究生，不少气象部门可能都会基本饱和，更不容易找到合适的岗位，还不如现在直接签约任何一个气象部门更加保险。

本文搜集了2006—2013年全国气象部门的岗位需求和南京信息工程大学（以下简称“南信大”）大气科学类毕业生人数，并进行统计分析，探讨了大气科学类毕业生供需比例的关系变化及原因，并对未来的就业形势进行了展望。

一、全国各级气象部门2006—2013年毕业生需求分析

图1展示了全国各级气象部门对不同学历毕业生的总体需求，可以看出，2006—2009年期间总需求有微弱的减少趋势，总需求从2006年的1800余人减少到

2009年的1600余人。而此后，总需求又有了明显的增加趋势，2012和2013年，总需求已经变为2600余人。这种情况与2008年全球经济出现低谷的时间是基本吻合的，2009年之后全球经济出现回暖，而全国各级气象部门总需求也有所增加。此外，总需求出现增加可能与国家对于全国各级气象部门的编制规模调控有关。

另外可以看出，2006—2009年期间研究生以上学历的需求基本上为500~600人，约占总需求的27%~37%；本科生需求为1100~1200人。而到了2010年以后，伴随总需求人数的增加，研究生和本科生的需求都有明显的增加，且研究生的需求比例在小幅上涨。

在就业的地点选择上，除了部分同学倾向于经济发达的城市外，多数的大气科学类毕业生会优先选择回生源所在省份工作，而且他们会先考虑省级或者地市级气象部门，次之选择区县级气象部门。而不同级别气象部门的用人需求从图2可以得知。

除了2008、2013年外，其余年份省市级气象部门

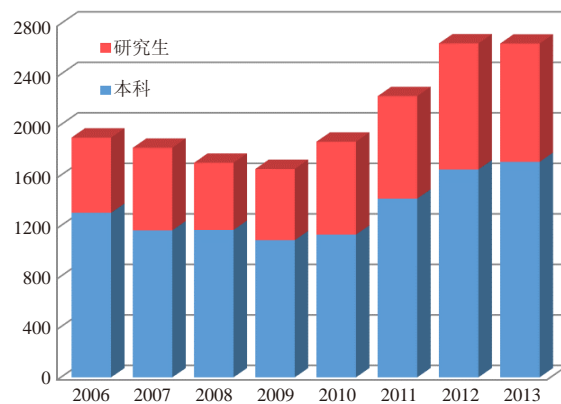


图1 全国各级气象部门需求总人数（按学历）

的需求与总需求呈现相同的变化趋势。而2008和2013年，区县级气象部门的需求较其他年份更大。

特别是2013年全国总需求并未减少，主要是由于区县级气象部门在该年的需求激增，达1200余人，为近年增幅之最。

图3给出研究生学历在省市级气象部门需求中所占的比例。在2006—2013年全国总需求中，研究生的比例都在30%~40%，并没有伴随总需求的变化而发生明显改变，而研究生在省市级气象部门的需求却从40%增加到70%以上，总体上逐年增大，说明省市级气象部门对学历的要求越来越高。可以推断仅本科学历的大气科学类毕业生，未来进入省市级气象局的机会将明显减少。所以，对于大气科学类毕业生的就业而言，如果想进入级别比较高的气象部门，读研是一项很好的选择。而伴随全国高等教育程度的普及，各地区经济的快速增长，以及地方和社会对气象预报更为精细化服务的需要，区县级气象部门对本科及以上学历的毕业生需求也自2009年以后开始逐年增加。

二、南京信息工程大学2006—2013年大气科学类毕业生的统计分析

为了讨论大气科学类专业学生的就业情况，有必要了解高校大气科学类专业设置情况及毕业相关信息。在全国高校中，开设大气科学类本科专业的有：北京大学、南京大学、中国海洋大学、中国科学技术大学、兰州大学、中山大学、浙江大学、云南大学、南京信息工程大学、成都信息工程学院、广东海洋大学等，其中前七位均为教育部直属的“985”高校，而后四位都为省属高校。1999年后虽然地方院校开始全面扩招，但是教育部直属高校并没有增加招生，例如南京大学大气科学专业的本科生这几年的招生名额

都在80人左右。此外，上述四所省属高校中，云南大学和广东海洋大学大气科学专业可能由于定位和规模所限，每年毕业生都在50人以下，还没有出现明显的增加。成都信息工程学院（原成都气象学院），近年出现了明显的扩招，2010年大气科学类本科和硕士毕业生人数达150人左右，而2013年已增加到350人左右，不过这个数字还是小于南信大2006年大气科学类毕业生总数（图4）。上述高校，不包含南信大在内，除了成都信息工程学院有明显扩招外，其余高校的大气科学类毕业生并无明显增加。

南京信息工程大学（原南京气象学院），多年来为全国各级气象部门输送了众多的业务人才，在这些部门中南信大毕业生所占比例很高，甚至在部分地区气象业务部门南信大的毕业生占80%以上。最近几年，全国大气科学类本科毕业生总人数每年为1500~2000人^①，而南信大每年的毕业学生人数大体占到全国的一半以上，所以，此处以南信大毕业生为例，研究大气科学类专业就业的供需关系，是具有代表性和现实意义的。

图4是南信大2006—2013年历年大气科学类专业毕业生人数，在统计中将毕业生分为本科毕业和研究生毕业，研究生包含硕士研究生和博士研究生，其中博士研究生毕业人数每年都在20~50人之间，硕士毕业生人数较多。从图4可以看出，2006年毕业总人数为400余人，之后开始逐年增加，2012年达到最大为1400余人，2013年与之持平。2012年之所以最大，是因为南京信息工程大学滨江学院三本招生的第一届大气科学专业的学生开始毕业，所以激增百余人。每年本科生与研究生人数比例大约都在3:1，没有明显的年变化。

一般而言，如果毕业学生人数占用人单位需

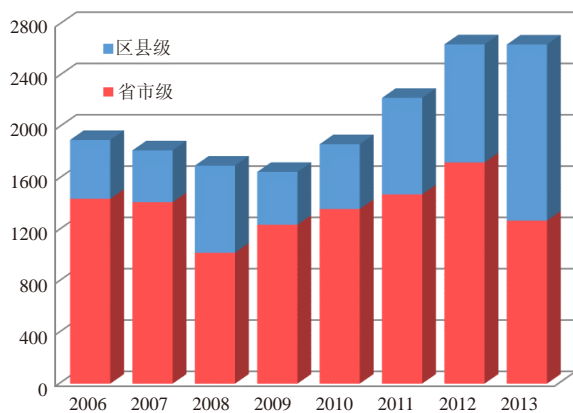


图2 全国各级气象部门需求总人数（按单位级别）

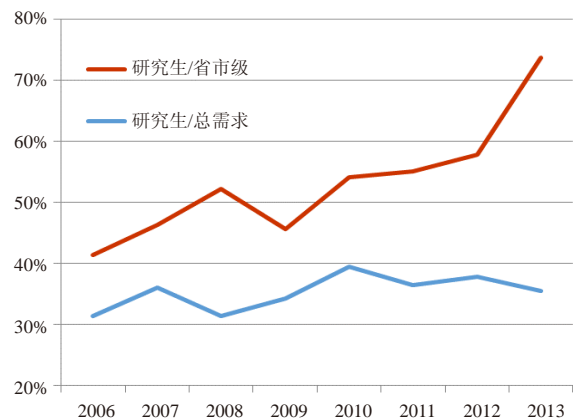


图3 气象部门需求中研究生所占的比例

^① 数据来自<http://gaokao.chsi.com.cn/zyk/zybk/specialityDetail.action?specialityId=73383960>

求人比例（生需比）越高，就业越困难、竞争越激烈。分别以南信大本科与研究生毕业人数除以全国气象部门需求的本科和研究生人数讨论生需比（图5），讨论这两种学历的就业形势。可以发现，2006—2007年，无论是本科还是研究生，生需比都在20%~30%，说明这两年是最易就业的年份。到了2008年，由于此年全国总需求几乎为历年最低，南信大研究生毕业所占生需比也出现了近几年的最大值为40%，此后伴随全国总需求的逐年增加，研究生的生需比又恢复到30%~40%，说明研究生就业形势基本良好。而本科生的生需比在2009年已经接近60%，说明在此以后大气科学类本科生的就业形势已有严峻趋势。不过，2010年以后这个比例没有明显的增加。此外，根据南信大大气科学类专业的历年考研情况来看，估计约有1/3的本科生会考上研究生。也就是说，只有2/3的本科生才是真正就业的人群，那么粗略估计本科生的生需比会由60%降为约40%。所以，虽然本科毕业生并不容易去省市级气象部门工作，但是去区县局就业还是比较乐观的。

三、大气科学类毕业生就业形势展望

从整体而言，大气科学类的毕业生最为主要的就业渠道是全国各级气象部门，未来几年的就业形势基本良好，总体上包括以下几个方面。

(1) 首先，全国气象部门每年会有千余人退休，故每年会招聘一批大气科学类毕业生中作为正常的人员补充。其次，伴随工农业生产的需求与人民生活水平的提高，出行和旅游等活动的增加，对气象业务的需求会越来越高，对于气象领域的专业人才需要也会越来越多。因此，不管未来中国经济大环境的好坏，全国气象部门每年的总需求人数不太可能出现明显的下降。所以在读的大气科学类学生完全没有必要

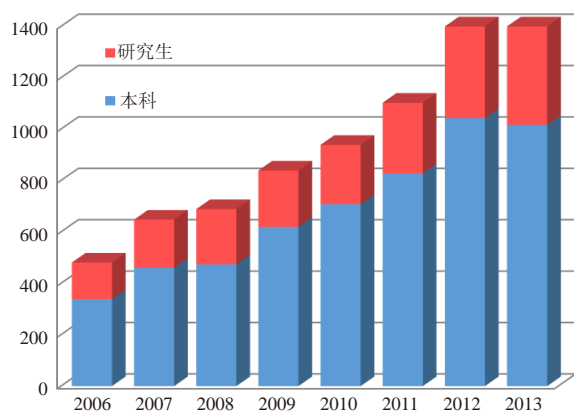


图4 南京信息工程大学大气科学类历年毕业生人数（按学历分）

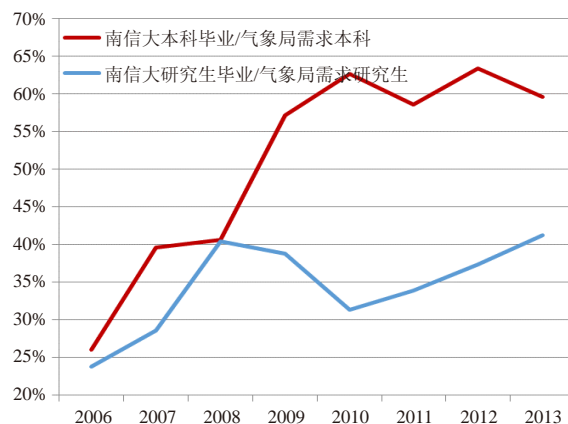


图5 南京信息工程大学大气科学类毕业生生需比

惶恐毕业后找不到工作，或者是读研后不如本科毕业找到的工作好。

(2) 从行业需求看，除了全国各级气象部门外，民航业也是大气科学类毕业生就业的一个选择渠道。自2010年开始，国有三大航空公司南方航空、中国国航、东方航空，已经全部扭亏为盈。那么，伴随航空事业的快速成长，航空公司、机场、空管局已经逐渐成为大气科学类毕业生就业的一个重要选择渠道。

(3) 风电企业、环保类单位、水文与水利部门也是大气科学类就业的一种选择。风能作为一种可再生、无污染的能源，已经被广泛使用，它的获取和利用与气象条件息息相关。环保问题已经成为一个热门话题，特别是雾霾的发生，直接影响人民生活与身体健康，而雾霾的发生不但与污染物的多少有关，还与风速等气象条件有关。此外，PM_{2.5}国家新标准拟在2016年全面实施，各类工程项目的大气环境影响评价的力度必将逐步加强，这些都进一步增加了对大气科学类毕业生的需求。现今社会，对于水文气象的需求也有所增加，分析预测降水形势及走势，以及各类水电站、水库的来水情况，事关经济效益与社会安全。因此风电、环保和水利等领域也已经成为大气科学类毕业生的新增就业渠道。

致谢：感谢江苏省学位办研究生教育教学改革课题（JGZZ13_044）对本文的资助。非常感谢祝亚鹏、丁梦蓉、王晓三位同学对部分资料的处理工作，特别感谢张丑平博士和岳爱武博士给予的帮助和指导。

作者单位：南京信息工程大学

深入阅读

陈倩, 何捷娟. 2012. 从统计图表看大学毕业生就业难问题. 五邑大学学报(社会科学版), 14(1): 89-92.

2003—2012年JCR大气科学（气象学）源期刊学术影响力的研究

朱紫阳 张艳 潘魏伟

期刊学术影响力一般是指学术论文在期刊上公开发表后，对该领域学术界或同行影响的深度和广度。目前对于期刊学术影响力的评价，从初始时期注重期刊的物理属性，逐步转变为关注学术共同体对期刊的感知和认同。经历了一个从“信息密度”—“影响力”—“质量”—“学术地位”的演化过程。这种价值取向更加强调学术共同体的共识，但并不意味着要完全否定定量指标，而是说同行评价与引文等文献计量学评价是互补、互证、互校的关系。另外，引文既是定量评价法，又包含定性评价（同行评议）的观点，当学术引文规范得到较好的遵守时，引文法的定性定量评价作用将得到更好的发挥。因此，基于引文分析的评价方法对于学科期刊学术影响力的测度还是有着非常积极的作用。特别是美国ISI公司发布的期刊引证报告（Journal Citation Reports，简称JCR）数据库，可以较好地实现对学科期刊学术影响力的量化评价。

一、数据来源和研究思路

根据汤森路透2013年6月28日发布的2012版JCR，以及近十年的回溯数据，本文客观分析和解读了大气科学（气象学）期刊的发展沿革和影响力分布特点，同时分析了中国大气科学（气象学）JCR源期刊数据的具体情况，以及同国际该学科一流期刊之间的差距。从具体数据层面探究相关问题，旨在给出提升中国大气科学（气象学）科技期刊学术影响力的相关建议。具体检索时间为2014年1月20日。



2003—2012年JCR大气科学（气象学）源期刊影响力逐年上升，但中国此学科期刊影响力表现欠缺，在国际上还处于较低水平。

二、2003—2012年JCR大气科学（气象学）源期刊的统计分析

1. 期刊数量变化情况

通过检索JCR（2003—2012年），统计分析各年度大气科学（气象学）JCR源期刊数、增减刊数、改名刊数等，帮助科研人员了解JCR大气科学源期刊的变化发展，以便更好地检索、浏览阅读和投稿，加快本学科高品质科技文献的传播速度。为了更好地厘清期刊的变化发展，本文也回溯统计了JCR 2002年的数据。

通过表1，可以看出，JCR大气科学（气象学）源期刊的数量十年间增加了34种，总共增长了85%，其中2009年增幅最大，增加了11种。表1中的期

刊增减反映的是JCR中具体名称的改变，未考虑到期刊名称的变更合并等情况。经过具体考察，我们发现其中有4种出现刊名变更，详情见表2。

根据表1和表2的调查数据，2003—2012年大气科学JCR源期刊除了4种期刊改名，以及ADV SPACE RES在2006年中断一年以外，十年间均保持了稳定且持续增长的态势。同时，2012年大气科学学科类目下退出的INT J GREENH GAS CON，也还属于JCR 2012年源期刊，只是从属于其他两个学科（ENERGY & FUELS；ENGINEERING，ENVIRONMENTAL）。另外，随着交叉学科和相关文献的增长，泛大气科学（气象学）类期刊被JCR收录，而不在这个类目下，也完全有可能，

表1 2003—2012年JCR大气科学（气象学）源期刊数量变化情况

年	刊数	增减数量	具体变更刊名缩写
2003	46	增6	ADV ATMOS SCI; ATMOS CHEM PHYS; IZV ATMOS OCEAN PHY+; METEOROL APPL; PHYS CHEM EARTH; PHYS CHEM EARTH PT B
2004	45	减1	PHYS CHEM EARTH PT B
2005	47	增2	ENVIRON FLUID MECH; OCEAN MODEL
2006	48	增2 减1	J APPL METEOROL CLIM; NAT HAZARD EARTH SYS ADV SPACE RES
2007	51	增3	ADV SPACE RES; CLIM PAST; ENVIRON RES LETT
2008	52	增1	INT J GREENH GAS CON
2009	63	增11	ACTA METEOROL SIN; AEROSOL SCI TECH; ASIA-PAC J ATMOS SCI; DISASTER ADV; IDOJARAS; J AGROMETEOROL; J KOREAN METEOR SOC; J OPER OCEANOGR; MAUSAM; OCEAN SCI; SOLA
2010	68	增6 减1	ATMOS MEAS TECH; ATMOS SCI LETT; AUST METEOROL OCEAN J TROP METEOROL; RUSS METEOROL HYDRO+; WEATHER J KOREAN METEOR SOC
2011	71	增4 减1	NAT CLIM CHANGE; NAT HAZARDS REV; NONLINEAR PROC GEOPH; WIRES CLIM CHANGE AUST METEOROL MAG
2012	74	增4 减1	ADV METEOROL; GEOMAT NAT HAZ RISK; J ADV MODEL EARTH SY; WEATHER CLIM SOC; INT J GREENH GAS CON

如美国地球物理学会 (AGU) 出版的 JGR-Atmospheres、GRL 等。

2. 2003—2012年JCR大气科学 (气象学) 源期刊总体影响力指标统计分析

JCR从2003年开始按照主题类目对期刊进行了分类统计。从这个主题类目下的指标统计数据, 可以了解大气科学 (气象学) 主题类目与其他类目之间的对比情况, 以及在该类目下某个期刊与其他期刊的对比情况。主题类目下的统计指标包括: 总被引次数、中值影响因子、学科集合影响因子、学科集合立即指数、学科集合被引半衰期、期刊总数和论文总数。其中, 中值影响因子 (Median Impact Factor) 统计了主题类目中的所有期刊, 这些期刊按照影响因子排序, 采用该主题类目中间期刊的影响因子, 例如, JCR2012年收录的74种大气科学 (气象学) 期刊的第37和38种期刊的影响因子的均值便是中值影响因子; 学科集合影响因子 (Aggregate Impact Factor) 表示某个学科领域里 JCR 出版年所有期刊的一般文章和评论性文章引用该类目过去两年所有期刊发表的文章的情况, 该数据有利于将该类目下某种期刊与类目中其他期刊通过学科集合影响因子进行对比评价, 反映了该主题类目下文章的平均

引用行为, 它能相对平衡应用学科和基础研究学科比较时的影响因子差异; 学科集合立即指数 (Aggregate Immediacy Index) 表示某一特定主题类目下 JCR 出版年所有期刊引用同一年所有期刊文章的情况, 此数据有利于读者查看该主题类目下期刊平均被引周期, 同时可以看出该主题是否属于快速发展的领域; 学科集合被引半衰期 (Aggregate Cited Half Life) 表示某主题类目下的所有期刊从当前年度向前推算引文数占截止当年引用期刊提供的总引用数的50%的年数。通过对期刊总体影响力的统计分析, 可以在一个学科层面对期刊学术影响力的发展态势有一个整体把握, 从而更好地定位和了解学科内一个具体期刊的学术影响力状况。

表3给出了大气科学 (气象学) SCI源期刊2003—2012年在主题类目层面的变化发展。在这十年间, 无论是期刊总数、论文总数、总被引频次, 还是中值影响因子、学科集合影响因子、学科集合立即指数, 在总量上都保持增长态势, 2003—2012年间, 期刊数增长了28种、论文总数增加15277篇, 总被引次数十年间也相应增加了2.66倍, 中值影响因子涨幅为43.65%, 学科集合立即指数提升了74.22%, 学科集合被引半衰期则保持了相对稳定的增长。这些总体影响力

指标可在评价某种个别期刊影响力时提供参照, 可以适时规避一些学科间因研究冷热、应用或基础领域分布而造成的影响因子差异。

3. 2003—2012年JCR大气科学 (气象学) 源期刊分项影响力指标统计分析

(1) 影响因子

尽管影响因子在很多不合适的场合被人为地误用, 出现“影响因子综合症”、“影响因子神话综合症”等全球性的影响因子崇拜现象, 因此也为很多人诟病, 但就其本质而言, 影响因子仍是衡量期刊学术影响力的重要客观指标之一, 尤其是较长时间的影响因子平均数, 更值得关注。对于大气科学 (气象学) 的 JCR 源期刊的影响因子的变化情况, 我们做了一个十年被连续收录42种源期刊影响因子的统计, 并列出了这42种源期刊影响因子十年平均值分布状况 (表4)。另外, 对于最新 JCR 2012年大气科学 (气象学) 源期刊中影响因子大于1, 且在这42种之外的期刊进行了调查 (表5), 同时对 SCI 和 SCIE 来源期刊进行了区分。

由表4可以发现, 在2003—2012年连续被 JCR 收录的大气科学 (气象学) 期刊中, 平均 IF 在3以上的期刊共有5种, 均为美国和德国出版, 影响因子在1.5和2之间的期刊比例最高, 占总数的45.24%, SCI 期刊共有36种, 占42种总期刊数的85.71%。在表5中, 除了表4中连续收录的42种期刊以外, 2012年 IF > 1 的期刊有20种, 不过, 其中的 SCI 期刊仅有3种, 所占比例为15%, IF > 3 的6种期刊中仅有一种为 SCI 期刊。由此可以看出, 在同一学科内, 影响因子高低与是否为 SCI 期刊之间没有必然联系, 期刊评价更强调综合因素。

(2) 特征因子

汤森路透2009年1月发布的 JCR 增强版增加了两个新的文献计量指标——特征因子值和论文影响分值, 一般也统称为特征因子, 这是继影响因子之后的两个重要文献计量指标。特征因子值 (Eigenfactor Score, 简称

表2 2003—2012年大气科学 (气象学) JCR源期刊名称变化情况

年	原名	现名
2003	PHYS CHEM EARTH PT B	PHYS CHEM EARTH
2006	J APPL METEOROL	J APPL METEOROL CLIM
2009	J KOREAN METEOR SOC	ASIA-PAC J ATMOS SCI
2010	AUST METEOROL MAG	AUST METEOROL OCEAN

表3 2003—2012年JCR大气科学 (气象学) 源期刊主题类目层面统计

年	总被引次数	中值影响因子	学科集合影响因子	学科集合立即指数	学科集合被引半衰期	期刊总数	论文总数
2003	121754	1.212	1.628	0.322	7.3	46	5151
2004	127984	1.472	1.675	0.373	7.4	45	5841
2005	136508	1.358	1.782	0.443	7.3	47	5679
2006	150272	1.445	2.018	0.513	7.4	48	5498
2007	181617	1.562	2.021	0.42	7.5	51	6610
2008	209363	1.683	2.257	0.471	7.6	52	7234
2009	236585	1.663	2.295	0.518	7.6	63	8017
2010	255361	1.601	2.299	0.549	7.6	68	8375
2011	288466	1.667	2.579	0.564	7.5	71	9804
2012	324405	1.741	2.620	0.561	7.7	74	10428
平均	203232	1.540	2.117	0.473	7.49	57	7264

表4 JCR 2003—2012年大气科学（气象学）连续收录42种期刊的十年平均影响因子分布

影响因子 (IF)	数量	刊名
IF>4	3	B AM METEOROL SOC; ATMOS CHEM PHYS; GLOBAL BIOGEOCHEM CY
3<IF<4	2	CLIM DYNAM; J CLIMATE
2.5<IF<3	6	AGR FOREST METEOROL; TELLUS B; CLIMATIC CHANGE; ATMOS ENVIRON; J ATMOS SCI; J HYDROMETEOROL ;
2<IF<2.5	5	Q J ROY METEOR SOC; J AEROSOL SCI; INT J CLIMATOL; MON WEATHER REV; TELLUS A
1.5<IF<2	8	BOUND-LAY METEOROL; J APPL METEOROL CLIM; CLIM RES; INT J BIOMETEOROL; J ATMOS OCEAN TECH; J ATMOS CHEM; THEOR APPL CLIMATOL; ATMOS RES; ANN GEOPHYS-GERMANY
1<IF<1.5	10	J ATMOS SOL-TERR PHY; J AIR WASTE MANAGE; DYNAM ATMOS OCEANS; WEATHER FORECAST; WATER AIR SOIL POLL; ATMOS OCEAN; NAT HAZARDS ; METEOROL Z ; METEOROL ATMOS PHYS; J METEOROL SOC JPN
0<IF<1	8	RADIO SCI; PHYS CHEM EARTH ; METEOROL APPL; ADV ATMOS SCI; TERR ATMOS OCEAN SCI; PHYS GEOGR ; ATMOSFERA ; IZV ATMOS OCEAN PHY+

注：加粗斜体期刊为SCIE期刊，其余均为SCI期刊（JCR 2012）

表5 JCR 2012年大气科学（气象学）收录的42种十年连续期刊以外且IF>1的源期刊

期刊缩写	IF	期刊缩写	IF
NAT CLIM CHANGE	14.472	ENVIRON FLUID MECH	1.899
J ADV MODEL EARTH SY	4.114	NAT HAZARD EARTH SYS	1.751
ENVIRON RES LETT	3.582	ATMOS SCI LETT	1.750
CLIM PAST	3.556	WEATHER	1.539
WIRES CLIM CHANGE	3.462	NONLINEAR PROC GEOPH	1.409
ATMOS MEAS TECH	3.205	SPACE WEATHER	1.370
AEROSOL SCI TECH	2.780	J OPER OCEANOGR	1.353
OCEAN MODEL	2.628	SOLA	1.337
DISASTER ADV	2.272	ADV METEOROL	1.239
OCEAN SCI	2.164	ADV SPACE RES	1.183

注：加粗斜体期刊为SCI期刊，其余均为SCIE期刊（JCR 2012）

EFS) 是对一本期总价值的度量，也即该期刊总的影响力，载文量大的期刊会有较多的被引，会更容易被较多的研究者访问，因此其特征因子值也较大。特征因子的值是一个频率数，因此JCR列表中所有期刊的特征因子值之和是1。论文影响分值 (Article Influence Score, 简称AIS) 即期刊的特征因子值除以其载文量，是衡量篇均影响力的一个尺度，即一本期中平均每篇文章的影响力，这一数据排除了期刊载文量的影响。论文影响分值是标准化数据，因此JCR数据库中篇均文献的论文影响分值是1.00，比如说期刊Neurology在2006年的论文影响分值是2.01，那么该期刊文献的平均影响力是JCR数据中篇均文献影响力的2.01倍。分析这两个指标和其他计量指标的关系，总结其中潜在的规律，对于期刊评价、期刊管理，以及提高期刊从业人员对于期刊质量

的重视程度，都具有重要的意义。本文尝试对JCR大气科学（气象学）74种源期刊的特征因子值和论文影响分值进行排序，并取两者排序名次之和的TOP20期刊（表6）进行研究。

从表4和表6可以看出，两者排名前五的期刊名称一致，只是个别排名次序稍微有些变动，而且在两者TOP 20的期刊中也有18种期刊重合，JCR 2003—2012年大气科学（气象学）连续收录的期刊平均影响因子排名前20中，仅有BOUND-LAY METEOROL（第17名）和J AEROSOL SCI（第13名）两种期刊未出现在表6中，代替的是J ATMOS OCEAN TECH和NAT CLIM CHANGE。这说明影响因子和特征因子的在期刊的分层评价中具有较强的一致性，特别是对大范围的期刊评价具有积极意义。

在这TOP 20期刊中，AMS（美国气象学会）出版的期刊最多，占

了7种，其次为WILEY（4种），SPRINGER、ELSEVIER、EGU分别为2种，AGU、NATURE和IOP各1种。尽管有EGU一类的OA期刊出版，但高质量期刊的出版形式仍然是按照商业期刊社团机制运作。出版频次为月刊的比例最大，共有8种，半月刊3种，季刊和双月刊各有2种和1种，以及不规则5种，可见TOP 20期刊的出版频次最常见的是月刊和半月刊，占到总数55%。在TOP 20期刊创刊年中，最早的三种都是AMS出版的期刊，分别为1872年的MON WEATHER REV、1920年的B AM METEOROL SOC、1944年的J ATMOS SCI，创刊年比较集中在1950—2000年这个阶段，共有11种期刊，2000年以后开始出版的期刊共有4种，其中EGU出版的占了2种，分别为2001年的ATMOS CHEM PHYS，以及2005年的CLIM PAST。

4. 2003—2012年JCR收录中国大气科学（气象学）期刊的影响力分析

2003—2012年被JCR收录的中国大气科学（气象学）期刊主要有4种，分别为中国大陆的ADV ATMOS SCI、ACTA METEOROL SIN、J TROP METEOROL，以及中国台湾的TERR ATMOS OCEAN SCI。4种期刊中影响最大的是ADV ATMOS SCI，1984年创刊，1999年被SCIE收录，2009年被SCI收录，十年平均影响因子值为0.782，且是在4种期刊中唯一一个IF超过1（2012年IF为1.338）的；ACTA METEOROL SIN、J TROP METEOROL先后于2007、2008年被SCIE收录，这两种期刊被收录后都曾出现IF下降的现象，且影响因子数值较低，两者均值分别为0.728和0.316。中国台湾出版的TERR ATMOS OCEAN SCI，创刊于1990年，2003年被SCI收录，在4种期刊中波动幅度最大，最高时影响因子有0.965，最低IF则为0.227，十年平均值为0.624。2003—2012年，这4种期刊历年的影响因子都低于这个学科历年的集合影响因子，表明这些期刊的论文被引用状况处于该主题类目

表6 EFS和AIS排名之和TOP20的JCR 2012大气科学(气象学)源期刊

刊名缩写	EFS	EFS 排名	AIS	AIS 排名	EFS和AIS 之和排名	出版机构 (频次/创刊年)
J CLIMATE	0.08436	2	2.436	4	1	AMS (24/1986)
B AM METEOROL SOC	0.02789	8	4.305	2	2	AMS (12/1920)
ATMOS CHEM PHYS	0.0978	1	1.858	9	3	EGU (24/2001)
CLIM DYNAM	0.02238	5	2.291	6	4	SPRINGER (12/1986)
GLOBAL BIOGEOCHEM CY	0.03266	10	2.659	3	5	AGU (4/1987)
CLIMATIC CHANGE	0.02811	7	1.778	10	6	SPRINGER (12/1977)
MON WEATHER REV	0.01549	4	1.606	14	7	AMS (12/1872)
Q J ROY METEOR SOC	0.02618	9	1.778	11	8	WILEY (6/1955)
J ATMOS SCI	0.0358	6	1.605	15	9	AMS (12/1944)
ENVIRON RES LETT	0.01129	16	1.891	8	10	IOP (4/2006)
INT J CLIMATOL	0.00441	11	1.476	17	11	WILEY (15/1981)
CLIM PAST	0.01911	22	2.228	7	12	EGU (0/2005)
ATMOS ENVIRON	0.0325	3	1.119	26	13	ELSEVIER (40/1967)
AGR FOREST METEOROL	0.01412	12	1.388	18	14	ELSEVIER (12/1964)
J HYDROMETEOROL	0.07196	20	1.713	12	15	AMS (24/1999)
J APPL METEOROL CLIM	0.0217	13	1.194	22	16	AMS (12/1962)
NAT CLIM CHANGE	0.00925	40	7.01	1	17	NATURE (12/2007)
TELLUS A	0.0091	29	1.654	13	18	WILEY (5/1949)
TELLUS B	0.00216	28	1.557	16	19	WILEY (5/1949)
J ATMOS OCEAN TECH	0.01832	17	1.116	27	20	AMS (12/1984)

注: 加黑斜体为SCIE期刊, 其余为SCI期刊

文章的平均水平之下。这些期刊影响力欠缺有诸多原因, 诸如SCI期刊论文收录的地区差异、中国该领域研究的实际水平的局限、中国优秀稿件的外流、难以吸引国际高水平论文的投稿等。中国出版的该类期刊还有更多可提升的空间。

三、结论和建议

(1) 2003—2012年JCR大气科学(气象学)源期刊影响力逐年上升, 但中国此学科期刊影响力表现欠缺, 在国际上还处于较低水平。高影响力源期刊的国家分布主要是美国、德国、荷兰、英国等, 中国该类期刊的影响力还比较低, 分析其原因, 除了JCR源期刊的地域分布差异、中国科技期刊的实际运营状况、科学研究基础的具体差距外, 科技管理政策的差异也是一个非常重要的因素。例如, 国际期刊管理上通用的是登记制, 而中国目前实行的还是一直以来的审批制, 使得国内期刊一直以编辑部的形态存在着, 他们通常不是独立法人, 没有自主财权、人权、物权, 只顾耕耘, 不问金银收成。这在很大程度上会影响到中国科技期刊的发展和壮大。

(2) 期刊影响力的测度不适用于对单个期刊进行评价, 更不适用于将期刊的影响力测评结果作为评价期刊论文的根据。在衡量期刊的影响力时, 大范围的指标数据测度有其存在的价值, 但仅对单个期刊进行考察评价, 则会有失偏颇, 特别是对一些基础研究和综述快报类的期刊, 它们之间进行比较评价没有太多的意义。例如像ENVIRON RES LETT这种综述快报类期刊的影响因子一般会高于同一学科其他类别期刊。在对科技期刊的影响力评价中, 应该坚持分层分类评价。在对表4和表6的分析中, 可以得出: 影响因子和特征因子在较高排名(例如TOP 20)的期刊中, 评价结果更趋于一致, 但在一般情况下, 由于期刊刊载文献的领域范围、文献类型等差异, 期刊的评价指标数值并不能准确地反映出该期刊中文献的价值。判定期刊的影响力, 应该综合各种因素, 比如历史地位、同行认知、期刊的出版机构声誉、期刊的编辑速度、退修反馈的意见的价值等等, 最后才是辅助各种计量数据。期刊的影响力更加强调的是综合因素, 而非仅仅是影响因子的大小。所以以刊评文是错误的策略, 根据发文所在期刊的

影响力指标数据对科研人员、机构进行奖励或排名更是不合科学规律。

(3) 提高科技期刊的学术影响力, 要把期刊的质量放在第一位, 把期刊质量与其生存发展的利益关联起来, 调动各方办刊热情和动力, 尽可能克服中国科技期刊出版业意识形态的局限性, 把期刊的内容生产和经营运作之间的矛盾降到最低。

(4) 学习国外科技期刊社团运营的先进经验, 建立国际化的英文科技出版社团和发布平台, 同时要逐步成为现代企业制度健全、法人治理结构完善的独立的市场竞争主体。可以尝试建立中国大气科学(气象学)学会(协会)期刊集群、科技期刊社团等非营利性组织, 诸如美国的AMS、AGU以及欧洲的EGU等。

(5) 应坚持正确的科研评价导向, 采取综合措施提升科技期刊的影响力。诸如完善稿件同行评议制度, 做到编委、作者和读者的国际化, 加强期刊数字化建设步伐, 尽可能缩短期刊的审稿录用周期, 加快科研成果的传播速度等。

本文由江苏省教育厅2012年高校哲学社会科学研究基金项目(2012SJB870006)和南京信息工程大学图书馆2013年度立项课题(NL-2013005)共同资助。

(作者单位: 南京信息工程大学图书馆)

深入阅读

- 刘雪立. 2012. 全球性SCI现象和影响因子崇拜. 中国科技期刊研究, (2): 185-190.
- 刘艳华, 华薇娜. 2010. 期刊评价新指标——特征因子. 情报杂志, (7): 122-126.
- 刘宇, 叶继元, 袁曦临. 2011. “通往自由之路”: 期刊评价价值取向的演化. 南京大学学报(哲学·人文科学·社会科学版), (3): 147-154, 160.
- 叶继元. 2005. 引文法既是定量又是定性的评价法. 图书馆, (1): 43-45.
- 叶继元. 2013. 学术期刊的质量与创新评价. 浙江大学学报(人文社会科学版), (2): 108-117.

“集合预报”主题文献计量分析

李靖华 张定媛

一、数据来源及统计方法

利用中国知网学术期刊网络出版总库(以下简称CAJD)和ISI Web of Science平台SCI-E数据库,检索统计国内外有关“集合预报”主题论文。采用检索式分别为主题=(集合预报)和TS=(“stochastic dynamic forecast*” OR “stochastic dynamic predict*” OR “ensemble forecast*” OR “ensemble predict*”)进行检索,学科类别限定为全学科,数据年限选择所有年,文献类型选择论文和综述,检索命中该领域国内和国际论文分别为542篇(检索日期为2014年9月)和1858篇(检索日期为2014年9月)。

二、结果统计及分析

1. 论文数量年度变化情况

SCI-E数据库能够检索到最早关于“集合预报”的科技论文是1969年Epstein发表在Tellus上的Stochastic Dynamic Prediction一文。CAJD数据库能够检索到最早的该主题文章是1988年发表在《气象科技》上的“预报‘预报技巧’”一文。图1给出了1969—2014年SCI-E和CAJD数据库中“集合预报”主题研究论文的年代分布,可以看出,国际上“集合预报”的研究大体分为三个阶段。第一

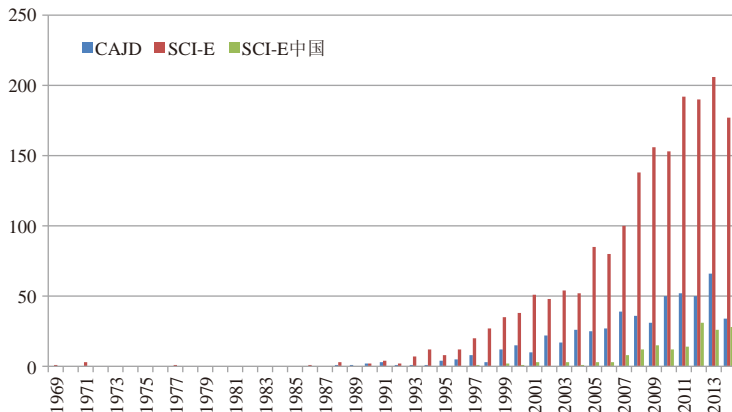


图1 1969—2014年SCI-E和CAJD数据库中“集合预报”研究论文数量变化



高产机构分布也从另一个角度印证了美国和ECMWF及英国在“集合预报”领域的研究优势。

阶段是20世纪70—80年代,此阶段研究内容主要是集合预报理论研究和数值试验,且主题论文产出较少,年产出量均在10篇以下。第二阶段是20世纪90年代,计算机运行能力快速发展,在1992年美国国家环境中心(NCEP)和欧洲中期天气预报中心(ECMWF)先后建立了数值集合预报系统,将集合预报投入业务运行,此期间,“集合预报”论文数量在平稳中开始增加。第三阶段是21世纪以来,集合数值预报产品已在气象台得到广泛应用,此期间论文数量稳步快速增长,年均发表论文超过100篇。国内开展“集合预报”研究起步较晚,CAJD数据库中检索到该主题论文始于1988年,但1998年之前“集合预报”主题论文发文较少,年平均发文量在10篇以内。我国于1996年建立了全球中期集合数值天气预报业务系统,并于1999年开始实时运行。此后,“集合预报”研究进入了快速发展阶段。与此相对应,中国的SCI-E发文在2008年之前增长缓慢,年均发文量小于10篇,从2008年开始有

了一定突破,年均SCI-E发文量超过10篇,2012—2014年SCI-E“集合预报”领域中国共发文85篇,约占这3年SCI-E总发文的15%。可见,中国“集合预报”研究虽起步较晚,但近几年在该领域研究逐渐发力。

2. 国家和机构的产出和影响力分析

表1给出了“集合预报”主题论文产出量排名前10国家的篇均被引次数、产出、总被引次数和h指数。

“集合预报”领域,英国产出量位列第2(366篇),但其篇均被引次数(34.41次/篇)远高于其他国家。篇均被引次数第2高的是瑞士(24.18次/篇)。美国产出和总被引次数均遥遥领先其他国家,但其篇均被引次数(23.64次/篇)位列第3。中国该领域产出虽排在第3,但是篇均被引次数指标上,却在10个国家中排名最后。总体而言,欧美发达国家在“集合预报”领域影响力优势明显,中国产出论文在近几年不断增加,取得了一定成果,但学术影响力有待提高。

表2分别给出了SCI-E和CAJD数据库“集合预报”主题论文排名前10的机构。在SCI-E数据库排名前10的机构中,有4所来自美国,NOAA以223篇产出论文排名第1,其余分别是NACR、美国国防部和俄克拉荷马大学。另外有4所机构来自欧洲,ECMWF以171篇排名第2,其余分别是英国气象局、法国国家科学研究院和英国雷丁大学。高产机构分布也从另一个角度印证了美国和ECMWF及英国在“集合预报”领域的研究

优势。中国气象局和中国科学院分别产出65和45篇，排名第7和第10位。在CAJD数据库排名前10的机构中，中国气象局系统占据7席。此外，南京信息工程大学、中科院大气所和解放军理工大学也是国内“集合预报”主要研究机构。

3. 论文高产期刊和学者分析

表3给出了国内外刊载“集合预报”主体论文较多的期刊。SCI-E数据库中，Monthly Weather Review以近302篇刊载量位列第1，Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society和Weather and Forecasting刊载量超过百篇，位列第2和第3。此外，中国的Advances in Atmospheric Sciences产出33篇。CAJD数据库中，刊载最多的是《气象》，随后是《应用气象学报》和《气象科学》。可以看出，国内外刊载“集合预报”论文较多的期刊主要是关注天气和预报，也有关注地球物理和水文等方面的期刊。表4给出的是国内外“集合预报”主题论文的高产作者。SCI-E数据库中，共有9位学者产出超过大于20篇。有3位高产作者来自ECMWF，还有4位来自美国，包括两位来自俄克拉荷马大学的华裔学者。CAJD数据库中，有6位学者产出大于10篇，解放军理工大学的张立凤产出最多（19篇）。

4. 热门文献和学科领域

关于“集合预报”SCI-E和CAJD被引频次最高的热门文献在P3，P5页榜单给出。检索还发现，“集合预报”主题论文学科领域分布十分广泛。集合预报思想起源于气象预报领域，因此气象学是SCI-E和CAJD主题论文研究最多的学科。但随着“集合预报”方法日趋成熟，“集合预报”研究领域逐渐扩大，其思想和方法被海洋学、水文学、环境科学和生态学等学科“引进”，为这些交叉学科的研究提供了重要推动作用并得以进一步发展。

(作者单位: 中国气象局气象干部培训学院)

表1 “集合预报”主题论文产出量排名前10的国家及其影响力 (SCI-E)

国家/地区	篇均被引次数	产出 (篇)	总被引次数	h指数
英国	34.41	366	12595	59
瑞士	24.18	82	1983	26
美国	23.64	770	18206	60
澳大利亚	20.51	79	1620	19
加拿大	19.94	127	2533	26
法国	18.85	144	2715	28
德国	16.58	148	2421	27
意大利	15.78	126	1988	24
日本	11.12	74	823	14
中国	7.07	164	1152	17

表2 SCI-E和CAJD数据库“集合预报”主题论文产出排名前10的机构

机构 (SCI-E)	产出 (篇)	机构 (CAJD)	产出 (篇)
NOAA	223	国家气象中心	75
ECMWF	171	南京信息工程大学	67
NCAR	84	中科院大气所	54
英国气象局	73	中国气象局	44
美国国防部	69	解放军理工大学	44
美国俄克拉荷马大学	65	中国气象科学研究院	42
中国科学院	65	国家气候中心	31
法国国家科学研究院	59	上海台风研究所	20
英国雷丁大学	51	四川省气象台	18
中国气象局	45	武汉暴雨研究所	16

表3 SCI-E和CAJD数据库刊载“集合预报”主题论文较多的期刊

来源出版物 (SCI-E)	产出 (篇)	来源出版物 (CAJD)	产出 (篇)
Monthly Weather Review	302	气象	60
Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society	173	应用气象学报	48
Weather and Forecasting	128	气象科学	31
Tellus Series A Dynamic Meteorology and Oceanography	64	气象科技	28
Journal of the Atmospheric Sciences	62	大气科学学报	27
Journal of Climate	55	气象学报	24
Journal of Geophysical Research Atmospheres	45	热带气象学报	23
Geophysical Research Letters	43	大气科学	21
Journal of Hydrology	39	气象科技进展	18
Meteorological Applications	37	高原气象	14
Hydrology and Earth System Sciences	37	高原山地气象研究	11
Journal of Hydrometeorology	34	海洋预报	10
Advances In Atmospheric Sciences	33	气候与环境研究	10

表4 国内外“集合预报”主题论文高产作者

作者 (SCI-E)	单位	产出 (篇)	作者 (CAJD)	单位	产出 (篇)
Buizza R	ECMWF	53	张立凤	解放军理工大学	19
Palmer TN	ECMWF	45	智协飞	南京信息工程大学	17
Stensrud DJ	NOAA	33	陈静	国家气象中心	17
Pappenberger F	ECMWF	26	关吉平	解放军理工大学	13
Xue Ming	美国俄克拉荷马大学	24	薛纪善	中国气象科学研究院	11
Hamill TM	NOAA	24	李维京	国家气候中心	10
Doblas-Reyes FJ	西班牙加泰罗尼亚高等研究院	24	王晨稀	上海台风研究所	9
Toth Z	NCEP	23	丑纪范	兰州大学	8
Kong Fanyou	美国俄克拉荷马大学	22	李俊	武汉暴雨研究所	8

深入阅读

陈静, 陈德辉, 颜宏. 2002. 集合数值预报发展与研究进展. 应用气象学报, 13(4): 497-507
李泽椿, 陈德辉. 2002. 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, 13(1): 1-15.

编辑选编

1960年以来东亚季风区云降水微物理的直接观测研究——《气象学报》2014年第72卷第4期

王东海等人指出中国已有云—降水微物理参数的成果可归纳为：(1) 通常云—降水微物理粒子浓度变化较大，但总体变化有一定的范围；(2) 采用 Γ 函数拟合云滴谱更接近实际谱，但不同拟合谱参数差异较大；(3) 可用指数函数和 Γ 函数来拟合层状云降水雨滴谱， Γ 函数拟合积云和层积混合云降水雨滴谱精度更高；(4) 中国冰核浓度较高，冰核浓度随温度的降低近似成指数变化；(5) 冰晶谱、雪晶谱、冰雹谱通常采用指数函数来描述；(6) 通常使用荣格(Junge)和 Γ 函数来分段描述气溶胶粒子谱拟合误差更小。由于云—降水过程及其反馈作用描述不准确是数值模式预报结果不确定性的最大因素，中国正在不断地推进云—降水的微物理观测研究，以期进一步加深对东亚季风区云—降水微物理特征的认识，从而为模式中微物理参数化方案的改进提供观测依据和科学指导。他们同时指出基于数值预报模式中云微物理过程参数化发展的需要，总结了我国1960年以来云—降水微物理直接观测的研究成果，可为东亚地区云—降水微物理研究及其模式参数化方案的改进提供观测依据。

2013年北大西洋破纪录高海温与我国江淮—江南地区极端高温的关系——《科学通报》2014年第59卷第27期

孙建奇在文中指出：2013年7月，我国江淮—江南地区持续高温，多个地区气温打破历史纪录，影响重大。他从气候学的角度开展了其归因研究，结果发现在2013年7月，北大西洋中纬度地区海温持续偏高，打破160年的历史纪录，海温的异常通过遥相关波列与东亚

上空纬向西风和西太平洋副热带高压产生联系，进而可能影响到我国江淮—江南地区夏季气温的变化，这可能是造成该地区2013年7月破纪录高温事件的重要原因。对于江淮—江南地区的极端高温，一般关注的是西太平洋副热带高压的影响。他还指出，江淮—江南地区上空纬向西风的变化也是影响该地区夏季气温变化的重要气候因子，尤其是2013年7月，该地上空纬向西风破纪录的偏弱与夏季气温破纪录的偏高密切相关。这意味着，对于我国江淮—江南地区夏季气温和极端高温事件的研究，不但需要关注西太平洋副热带高压的作用，还需要关注高层纬向风的变化。

GRAPES区域集合预报系统应用研究——《气象》2014年第40卷第9期

张涵斌等采用集合变换卡尔曼滤波初值扰动方法以及多物理过程组合的模式扰动方法，基于业务区域模式GRAPES_MesoV3.3.2.4构建了区域集合预报系统，进行了连续40d的批量试验，重点分析了ETKF初值扰动的结构及其演变特征，并通过概率预报检验方法对GRAPES-REPS进行了集合预报系统性能检验和降水预报检验，分析了该系统对强降水个例的预报效果。试验结果表明，GRAPES-REPS能产生较合理的集合预报初值扰动，扰动结构随流型依赖并对观测有较好的响应，且扰动成员相互正交。扰动总能量分析表明，集合扰动能够随预报时效保持合理增长状态。集合预报检验表明，集合预报结果优于控制预报，集合成员间在72h预报时效内能保持合理的集合离散度。将该区域集合预报系统与业务上基于WRF模式的区域集合预报系统WRF-REPS进行了降水预报对比，表明GRAPES-REPS的降水预报能力表现要优于业务WRF-REPS。强降水个例分析表明，集合预报能较好预报出强降水中心，预报效果明显优于控制预报。

冬季青藏高原上游西风模态与中国降水及NAO的关联——《高原气象》2014年第59卷第27期

宇婧婧等利用ERA40再分析资料和中国区域站点降水观测资料分析了冬季北大西洋至青藏高原上游地区上空西风变率的EOF主要模态(简称高原上游西风模态)，并考察了这些模态与中国区域降水及北大西洋涛动(NAO)之间的联系。研究表明，冬季高原上游最主要的两种西风模态(EOF1和EOF2)都和北大西洋涛动(NAO)显著相关，却与中国冬季降水的关系明显不同：EOF1对应着整体位置偏北、南侧活动中心偏东的NAO型，并与高原西南侧及长江中下游地区冬季降水存在显著正相关；而EOF2对应着整体位置偏南，南侧活动中心位置偏西的NAO空间型，与中国冬季降水却没有显著的相关关系。进一步研究指出，在偏强的EOF1中，低纬异常西风带可向东伸展到位于亚欧大陆中南部的高原上游，造成高原西南侧中下层气流的爬升运动增强，导致高原西南侧降水异常偏多，同时，该西风异常可绕过高原形成异常西南风，与异常偏高的西太平洋副热带高压南侧湿润的东南风异常汇合于长江中下游地区，产生异常辐合上升运动，从而引起长江中下游地区冬季降水增强，反之亦然；而EOF2较EOF1位置偏东、偏南，低纬纬向风东伸较弱，对中国冬季降水影响不明显。这表明冬季高原上游西风异常分布的形态对下游中国区域降水的影响至关重要，而西风EOF1模态是NAO通过上下游效应影响中国冬季降水的一个重要媒介。

复杂地形下北京雷暴新生地点变化的加密观测研究——《大气科学》2014年第38卷第5期

张文龙等指出，2008年8月14日北京发生了雷暴群形式的局地暴雨，雷暴新生地点复杂多变，形成了多个 γ 中尺度的强降水中心。他们利用近年来北京气象现代化建设

取得的加密地面自动站、多普勒雷达、风廓线仪、微波辐射计等多种新型高时空分辨率观测资料及雷达四维变分同化系统(VDRAS)反演资料,通过精细分析地面(边界层)风场、温度场等的演变特征,讨论了雷暴新生地点变化的机制。结果表明:复杂地形与雷暴冷池出流作用相结合,主导了雷暴新生地点的变化,进而影响 γ 中尺度强降水中心的变化;天气尺度高低空槽、槽的配合不一致,并且系统移动缓慢,以及对流层低层的弱的环境垂直风切变,是雷暴冷池结合复杂地形发挥雷暴新生地点主导作用的重要前提;复杂地形使得冷空气在一定范围内流动,在边界层产生碰撞和辐合,起到触发和增强对流作用,并使得对流风暴的形态和走向与地形呈现出紧密相关性;一定强度的冷池出流、边界层前期的暖湿空气和对流不稳定能量的积累,是冷池出流触发雷暴新生和演变的必要条件;北京周边地区的雷暴,通过其雷暴冷池出流沿着沟谷地形或向平原地区流动,与北京山谷或城区的边界层暖湿空气形成辐合抬升机制,触发雷暴新生。

间歇湍流的分形特征—分数维及分数阶导数的应用——《地球物理学报》2014年第57卷第9期

刘式达等指出,分数维由Mandelbrot创立已有30年,分数阶导数在1695年由L'Hospital提出已有400年的历史。刘式达等用物理学中的间歇湍流问题说明分数维及分数阶导数的物理意义。由于间歇湍流涡旋不完全充满空间,所以其维数为 $2 < D < 3$ 。由于小涡旋所占的比例缩小,使得小涡旋的功率减小,因此惯性区功率谱的斜率加大(即功率谱指数加大)。由于大小涡旋共存,所以湍流游动距离即等待时间差别很大,因此造成涡流的异常扩散。由于湍流涡旋的串级(Cascade)或碰撞(Collision)引起的速度变化并不是转瞬的,它会

影响将来的速度场,这就引起了湍流的记忆性,因此,湍流黏性应该用有记忆的分阶拉普拉斯算子。正是涡旋并不充满空间,所以涉及流体力学运算的微点元、微面元和微体积元都要做修改。

卫星—地基—模式统一的自动观测云分类原则和标准的研究——《地球物理学报》2014年第57卷第8期

随着空基、地基云状观测自动化进程的推进,国际通用的人工观测云分类标准不再适用于自动观测。李昉英等提出了适用于自动观测的卫星观测、地基观测和数值预报模式统一的云分类原则和分类标准,依据大气代表性原则、仪器观测可行性原则、历史继承性原则和可扩展性原则,不考虑云的高度,沿用形态学和发生学理论,将云分为卷云、层状云、波状云和积状云4属,更细分为薄卷云、密卷云、波云、雨波云、层云、雨层云、浅积云和深积云8类,列出了各类云特征的定性描述,为自动观测、预报保障和模式评估提供参考。同时指出当地基和星基仪器可探测云的垂直结构时,判识多层云将成为可能,无论如何这与目前制定自动观测云分类的标准并无矛盾。

中国高层大气与电离层耦合研究进展——《中国科学:地球科学》2014年第44卷第9期

万卫星等指出,近年来地球高层大气与电离层之间的耦合研究为众多学者所关注。在回顾这一领域国际上若干研究方向进展的基础上,着重介绍了中国学者的近期研究工作与贡献。首先,扼要介绍了中国高层大气观测的新发展,包括激光雷达、FP干涉仪、全天空气辉成像仪等光学探测,MST雷达、全天空流星雷达等无线电探测手段。在高层大气变化特性研究中,介绍了高层大气的气候学及各种大气波动的研究进展。在高层大气与低电离层的耦合研究方面,介绍了突发

钠层及低热层钠层的观测研究和钠层模式的研究进展,以及突发E层与大气行星波之间的耦合研究工作。在高层大气波动过程与电离层F2层耦合研究中,着重介绍了电离层四波经度结构与高层大气非迁移潮汐之间的耦合特性与机理研究。在热层与电离层耦合的研究方向上,介绍了热层背景大气风场和重力波对电离层的作用、带电粒子对赤道热层的影响与热层赤道异常的形成机理研究等热层电离层相互耦合作用。综合认为,近年来中国学者在高层大气与电离层耦合的研究领域进行了大量工作,包括实验观测及数据分析、模式化与理论研究等。

中国月平均气温可预报性的时空特征及其年代际变化——《科学通报》2014年第59卷第25期

李维京等利用中国1960—2011年资料比较完整的518站逐日气温观测资料,采用非线性局部Lyapunov指数(NLLE)和非线性误差增长理论,定量分析了中国区域月时间尺度平均气温可预报性期限(MTPL)的时空分布和年代际变化特征。分析发现:多年平均的MTPL空间分布存在明显的地域差异,总体来看,东北大部、云南西南部和西北地区东部为可预报性高值区,长江中下游地区及黄淮流域为可预报性低值区;MTPL在各月份的空间分布存在明显的季节变化,总体上表现为冬半年可预报性较低,而夏半年较高;MTPL还具有明显的年代际变化特征,就全国而言,从1970年以来,MTPL具有上升的趋势,在2000年前后出现下降的趋势,尤其是东北地区在1986年之后可预报性显著提高。西北、黄淮、东北MTPL的年代际变化可能与气温的持续性有关。进入21世纪,除南方地区外,大部分地区的MTPL有降低趋势。上述结果为进一步认识我国月尺度气温异常的机理奠定科学基础,并为提高月尺度气温预测能力提供参考。

基于集合经验模态分解改善大气环流模式温度模拟的新方法及其在多模式集合预报中的应用

A novel method to improve temperature simulations of general circulation models based on ensemble empirical mode decomposition and its application to multi-model ensembles. *Tellus A*, 2014, Vol. 66.

大气环流模式（GCM）是模拟过去和未来气候变化最重要的工具。全球现在有40多个GCMs，不同气候模式模拟出的结果也有所不同。已有的研究表明，气候模式的集合模拟是改善模式模拟结果的重要方法。但是，发展其他方法改善气候模式模拟结果也是提高模式模拟准确度的重要方面。沈阳农业大学的张先亮等发展了一个基于集合经验模态分解（EEMD）来改善单个气候模式以及多模式集合模拟结果的新方法，并将该方法应用于CMIP5的八个模式模拟的全球陆地表面温度，验证了其有效性。该方法主要是将八个气候模式模拟的温度基于EEMD方法分解成不同的高低频信号，然后将分解出的第一层高频信号移去，移去后，模式对全球平均值和各大洲的平均值的模拟都可以得到改善。研究表明，应用EEMD方法处理气候模拟数据后可以改善单个气候模式的模拟性能，并且EEMD方法比其他信号分解方法对单个模式模拟性能的改善效果好。另外，基于简单平均集合、多元线性回归法、奇异值分解法和贝叶斯模式平均法的几个模式的集合模拟值也可以通过EEMD方法得到进一步的改善。该方法简单易用，对于提高气候模式对气候变化的模拟准确度具有重要意义。

城市灌溉模块与耦合了城市冠层模式的Noah陆面过程模式的融合

Incorporating an urban irrigation module into the Noah land surface model coupled with an urban canopy model. *Journal of Hydrometeorology*, 2014, Vol. 15, No. 4.

通过在Noah陆面模式（LSM）—单层城市冠层模式（SLUCM）系统内发展

的一个灌溉方案，加州大学洛杉矶分校的Vahmani以位于洛杉矶大都市区的一个超过49km²的城市区域为研究对象，探讨了灌溉对城市水循环的影响。模式的分辨率为30m，模拟时段为两年。敏感性分析表明，日和月的能量收支、水文通量和状态变量对灌溉量和灌溉时间都显著敏感。每月的居民室内用水数据和估算的三种室外用水量被用来校准灌溉方案。利用先前开发的MODIS10 Landsat蒸散量（ET）、Landsat地表温度（LST）产品以及每小时的ET观测，通过加利福尼亚灌溉管理信息系统（CIMIS），评价了模型的性能。结果表明，当纳入灌溉模块时，Noah LSM-SLUCM真实模拟了ET的日变化和季节变化。如果不考虑灌溉，该模式在模拟ET时会产生较大的偏差。例如，在2003年7月和2004年7月，不考虑灌溉时ET的误差分别为-56和-90mm/月，而采用本研究的灌溉方案后，这些值分别减少到-6和-11mm/月。研究表明，灌溉引起的潜热通量增加，导致城市公园地表温度下降了约2℃。本研究开发的模拟框架具有较广的应用价值，包括从室外用水估算到气候变化影响评估。

全球变暖会减弱常绿阔叶林的树木生长：以澳大利亚温带和亚热带桉树林为例

A warmer world will reduce tree growth in evergreen broadleaf forests: evidence from Australian temperate and subtropical eucalypt forests. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, Vol. 23, No. 8.

理解气候对树木生长的影响，对于预测森林如何应对气候变化至关重要，但是目前关于树木跨宏观气候梯度生长的研究较少。为此，澳大利亚塔斯马尼亚大学的Bowman等以澳大利亚的温带、亚热带湿润桉树林（23°—43°S，115°—153°E）为对象，研究了常绿阔叶林的生长与大陆尺度上

的气候变异之间的关系。研究收集了2409个永久森林观测点的数据，形成了一个有关桉树直径增长的数据库（约50万个测量数据）。这些观测点的年平均降水量为558~2105mm，年平均气温为6~22℃。研究使用广义相加模型分析了树木直径增长与气温、降水、蒸发之间的关系。结果显示，树木生长与降水量成正相关，但当年平均降水量超过1400mm时，降水的影响开始变弱。对温度的峰值响应出现在年平均气温为11℃和最热月的最高气温为25~27℃时。低温直接抑制了生长，高温主要是通过减少水的可利用性（以降水/蒸发来表示）来抑制树木生长，不过高温似乎也产生了直接的负面影响。包括了最热月的最高气温和降水/蒸发比的模型，能解释28%的异常，这比单因子模型的解释能力更强。研究认为，澳大利亚温带、亚热带桉树林的生产力可能因气候变暖而大幅下降，因为87%的森林目前正处于年平均温度高于11℃（树木增长率最高）的情形下，而桉树林生产力的下降将会使碳吸收减少。

过去100年来中国东部的地表气温及有关的大尺度气候变异趋势

Trend of surface air temperature in eastern China and associated large-scale climate variability over the last 100 years. *Journal of Climate*, 2014, Vol. 27, No. 12.

中国气科院的赵平等利用重建的回溯至19世纪的连续和均一化的中国东部16个城市（中国最大的工业化区域）的地表气温（SAT）序列，研究了这些区域的SAT线性趋势。分析发现，中国东部SAT的区域均值在1909—2010年间的上升幅度达到1.52℃·100yr⁻¹。

气温上升主要发生在过去的40年，这和另一个地表气温观测序列正好相符，该观测序列同样在此地区，始于1951，站点更加密集（超过400个站点）。另外，本研究收集

了245个站点(从4001个点中)的人口数据,并根据人口规模划分为五个同样大小的组。对这五个组进行从30~60年不同时间长度的比较发现,自1951年以来,人口对气温变暖的贡献为9%~24%。为了证明城市化对气温的影响并没有那么大,本研究进一步确定了大尺度气候指数能解释多大程度的气温上升。研究显示,大尺度气候指数的异常,如热带印度洋SST与西伯利亚大气环流系统,对总的气候变暖的贡献占至少80%。

近期欧亚大陆北方森林变绿响应的转变可能与夏季的变暖、变干相关

——Recent shift in Eurasian boreal forest greening response may be associated with warmer and drier summers. *Geophysical Research Letters*, 2014, Vol. 41, No. 6.

北部的高纬度陆地生态系统目前正经历着急剧升温,最近的研究表明,北方森林面临气候变暖时的脆弱性正在逐渐加强,这主要包括升温引起的干旱胁迫、火灾和虫害的爆发。利兹大学的Buermann等使用新的可利用的卫星植被数据,分析了过去30年北方森林变绿与气候的年际关系。结果表明,由于夏天温度持续升高、降水持续缺乏,导致20世纪90年代中期出现了一个中西部欧亚大陆北方森林向更干、更暖转变的转折点。这可能是夏季高温与森林变绿之间出现大规模负相关的主要原因。如果这样的转变机制持续存在,那么就像植被模型预测的那样,高温和干旱胁迫所引起的北方森林的植被枯死可能比预期进行的更为迅速。

MJO与台湾的冬季降水——Madden-Julian Oscillation and the winter rainfall in Taiwan. *Journal of Climate*, 2014, Vol. 27, No. 12.

台湾师范大学的洪致文等探讨了大气季节内振荡(MJO)对台湾冬季(11—4月)降水产生的主

要影响。研究显示,台湾有更多的降水出现在MJO第3和4相位(印度洋和海洋大陆西部的MJO对流活跃期),而第7和8相位(西太平洋暖池区)的降水偏少。与MJO相关的机制如下:(1)热带到中纬度地区的波列:当MJO移至印度洋中部,Matsuno-Gill型模态被诱发。响应于MJO非绝热加热,热带大气的这种响应特征表现为一对上层反气旋异常,并对称于赤道到加热的西部。位于阿拉伯海和印度北部上空的北部异常反气旋,诱导东北方向传播波列到中纬度地区。该波列由一个集中在东亚的气旋异常所构成,该气旋异常使台湾的冬季降水增强;

(2)来自南海的水分供给的增加:当MJO对流靠近苏门答腊岛和海洋大陆的爪哇时,赤道对流的向东渗透增强了一个低层的偏南气流,导致水分向北输送至台湾和华南地区。因此,受来自南方的水分供应增加的影响,更多的冬季季风降水出现在台湾。

全球陆地区域1km分辨率的逐日温度数据的时空插值

——Spatio-temporal interpolation of daily temperatures for global land areas at 1 km resolution. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, Vol. 119, No. 5.

塞尔维亚贝尔格莱德大学的Kilibarda等使用GSOD(Global Surface Summary of Day)和欧洲气候评估及数据集(ECA&D)构建了时空地统计模型,以预测全球陆地区域1km分辨率的逐日气温。研究使用了时空回归-克里格方法,将MODIS 8天合成影像、地形数据(数字高程模型和地形湿度指数)和与地理位置有关的温度趋势作为协变量,对日平均、最高和最低气温进行了预测,然后用“留一法交叉验证法”评价了逐日气温的预测精度。为了解释地理坐标系上的聚类站点,并得到一个更有代表性的

交叉验证精度,预测值被聚合在500km×500km的土地块上。结果显示,在站点覆盖较为稠密的区域,日平均、最高和最低气温的平均预测精度为RMSE=±2℃,在站点较为稀疏区域,RMSE在±2℃到±4℃之间。较高海拔区域(>1km)和南极的预测精度最差,RMSE大约为6℃。本研究中,模型和预测仅应用于了2011年,但同样的方法可以推广至MODIS LST数据可利用的整个时间段(2001年至今)。

与气候变化引起的欧洲大湖变暖有关的热通量调整——Heat flux modifications related to climate-induced warming of large European lakes. *Water Resources Research*, 2014, Vol. 50, No. 3.

过去几十年间,欧洲一些湖泊的水温有所上升。研究认为,这些湖泊的水温增长与热平衡组分的重新配置有关。为了确定热通量的主要变化和识别1984—2011年间热平衡组分重新配置事件,瑞士联邦水生环境科研所的Fink等探索了大气热交换的时间变化趋势,以博登湖为例,估算了不同热通量对总的热平衡的贡献。研究发现,对太阳辐射(+0.21±0.13 W·m⁻²·yr⁻¹)、长波辐射(+0.25±0.11 W·m⁻²·yr⁻¹)的吸收增加是湖水温度上升(0.046±0.011℃·yr⁻¹)的主要原因。而由于湖水的升温,通过长波辐射(-0.24±0.06 W·m⁻²·yr⁻¹)散发到大气中的热和潜热通量(-0.27±0.12 W·m⁻²·yr⁻¹)同时都有所加强。鉴于入射太阳辐射和变暖的大气导致湖表温度增加,使得更多的长波辐射被释放,更多的水被蒸发,热收支总体上处于一个准稳定状态。在水温缓慢增加的每一层,热通量总是处于平衡状态。总的热容量的变化非常小。另外,入湖河流的变冷效应对湖水热收支的影响也较弱。

海峡两岸气象科技交流发展时间表

沈冰冰



02 1972年8月，第9号强台风袭台，时任国务院总理周恩来亲自批示，要将这一预报告知台湾同胞。从此，拉开了大陆向台湾同胞发布台风、大风警报的序幕。



成启勛 **01**

涂长望

01 1959年，中央气象局局长涂长望在中央人民广播电台发表对台湾的广播讲话，这是两岸隔绝状态后，大陆第一次向台湾气象界公开的广播讲话。同年，台湾学者成启勛从Tellus上看到叶笃正等集体研究的“东亚的大气环流”论文，翻译并刊登在台湾《气象预报与分析》上，这是大陆的气象论文第一次正式出现在台湾气象期刊上。

03 1979年5月，中国气象学会第一次通过新华社和中央人民广播电台公开邀请台湾气象界人士来大陆参观、访问和参加学术会议。



03



04 1980年5月，台湾军方当局举办“大陆气象科技研究会”，并在会后整理撰写报告。

05 1982年1月，中国气象学会首次致函台湾气象界同仁，欢迎派员参加中国气象学会全国会员代表大会暨1982年年会，并向台湾气象当局赠送《气象学报》第39卷一套。



05

06 1982年11月，在菲律宾马尼拉召开的“南海及西太平洋热带气旋学术研讨会”上，两岸气象局局长邹竞蒙与吴宗尧第一次接触。



邹竞蒙 **06**

07 1984年4月，台湾气象学会理事长陈泰然召集成立“两岸气象科技交流推动小组”，负责两岸气象交流事宜。



陈泰然 **07**



09 1989年7月，第一届“东亚及西太平洋气象与气候国际会议”在香港召开，这是海峡两岸分隔40年来第一次以海峡两岸气象学者为主体，在气象领域进行较大规模的面对面的学术交流活动。同时，这次会议首次明确汉语为工作语言。



王时鼎 **08**

08 1988年7月，中、美、澳三国气象学会在澳大利亚共同举办“国际热带气旋”会议，这是台湾气象学者第一次参加由中国气象学会在国外主办的气象学术会议。



20 2014年2月，海协会会长陈德铭与海基会董事长林中森在台北签署《海峡两岸气象合作协议》。



19 2012年6月，两岸气象交流首次列入“海峡论坛”，通过海峡论坛的平台和桥梁效应，加速两岸气象科研和服务合作，共同构建海峡快捷安全走廊，共享两岸和平发展成果。

10 1994年3月，中国气象学会理事长陶诗言率团赴台北参加“海峡两岸天气与气候学术研讨会”，这是大陆气象学者第一次踏上台湾岛并参加两岸共同举办的学术研讨会，拉开了两岸气象科技双向交流的序幕。

11 1994年10月，台湾气象学会理事长陈泰然率团来北京参加“大气科学发展暨海峡两岸天气气候学术研讨会”，这是台湾气象界首次应邀组团来大陆参加学术交流活动。

12 1996年5月，中国气象学会常务理事、中国气象局副局长马鹤年率团赴台参加“第三届东亚及西太平洋气象气候研讨会暨南海季风试验科学规划会议”，实现了两岸气象界从单纯的学术交流走向有实际内容的科学试验合作的突破。

13 1996年8月，台湾大学陈泰然教授率团参加在北京举行的“海峡两岸及邻近地区暴雨试验研讨会”，这次会议标志着海峡两岸气象科技交流进入实质性合作的新时期。

14 1996年9月，台湾文化大学大气科学系学生参访团赴大陆参观访问，这是台湾气象界第一次以学生为主体的参访团，是两岸交流深入的重要表征，也是两岸气象界高层面向下一代而构思运作的成功范例。

15 1996年12月，邹竞蒙理事长率团到台北参加“海峡两岸及邻近地区暴雨研究组委员会第二次会议暨两岸暴雨试验研究科学研讨会”，本次研讨会实现了大陆气象学者首次对台湾台站业务的全面考察。



18 2009年6月，福建省气象台与台湾大学签订《台风暴雨等灾害天气预警技术交流和研究合作的协议》，在全国首次搭建了海峡两岸自然灾害防治交流合作平台，初步建立了两岸交流合作机制，实现海峡两岸交流与合作的历史性突破。



17 2002年4月，由海峡两岸大气科学界专家会审的海峡两岸《大气科学名词对照本》正式出版，这是两岸气象科技交流的重要成果之一。



16 2002年3月，台湾气象部门决定直接接收大陆风云二号地球同步气象卫星信号，以代替日本向日葵五号卫星，作为台湾地区天气预报参考资料，创下两岸气象预报作业合作的首例。

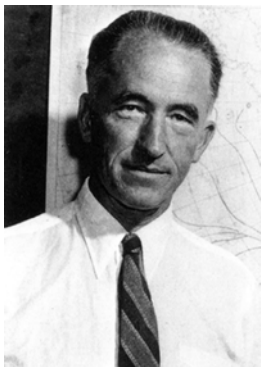


(作者单位：南京信息工程大学)

J.皮叶克尼斯及海气相互作用研究

■ 叶鑫欣 焦艳 傅刚

J.皮叶克尼斯 (Jacob Aall Bonnevie Bjerknes, 1897—1975年) 是著名挪威气象学家V.皮叶克尼斯之子, 是气象学的挪威学派的重要代表人物之一。挪威学派由V.皮叶克尼斯创立, 在20世纪大气科学发展中贡献卓著。J.皮叶克尼斯子承父业, 很早就踏入学术领域, 不仅引领了挪威学派的学术繁荣时期, 更在平均大气环流、海气相互作用等领域做出突出贡献。



J.皮叶克尼斯

J.皮叶克尼斯出生在瑞典斯德哥尔摩, 1907年迁居到挪威, 1924年获得奥斯陆大学博士学位。1914年他曾暂时放弃学业, 到莱比锡协助父亲工作; 1917年前往挪威卑尔根, 负责气象观测站网建设和挪威西部的天气预报工作, 在此期间提出锋面气旋模型的雏形, 并在最终锋面气旋理论成型的过程中起关键作用。1931年, J.皮叶克尼斯受聘于卑尔根博物馆的气象系 (任教授), 在学术领域的成果也逐渐为国际气象界所关注, 曾被邀请到新西兰、英国、荷兰、德国、加拿大、美国等多个国家举办学术讲座, 并在1939年7月访问美国高校和科研机构。然而, 1939年9月第二次世界大战爆发, 挪威遭受德国入侵。在罗斯贝的帮助下, J.皮叶克尼斯决定留在美国, 并顺利就职于加利福尼亚大学洛杉矶分校 (UCLA) 物理系的天气预报研究室。1940年, J.皮叶克尼斯成为UCLA的气象学教授, 在他的推动下, UCLA气象系于1945年正式成立^①, 迅速发展为世界级大气科学中心之一。二战期间, J.皮叶克尼斯曾作为美国空军顾问前往英国、意大利和美国夏威夷、关岛等地。

J.皮叶克尼斯的研究兴趣十分广泛。在卑尔根工作期间, 他定义出大气波动发展过程中的两类主要辐合, 将其命名为“转向线” (steering-line) 和“飑线” (squall-line), 也就是后来的“暖锋”和“冷锋”, 并总结出包含初生、发展、锢囚的完整的锋面气旋生命周期。他还与Carl Ludvig Godske合作, 研究了锋面不稳定问题。随着1928年无线电探空仪的发明和轻型气象仪器

的推广, 连续性的探空气球观测逐渐在技术和资金上得以实现, J.皮叶克尼斯结合这类数据进行了锋面气旋形成机制和高空大气波动的研究。1926年, 他还为挪威探险家罗尔德·阿蒙森^②的极地飞行提供了气象支持。二战结束后, J.皮叶克尼斯着重对平均态的大气环流和西风急流进行了研究。

J.皮叶克尼斯接近60岁时投入到大西洋和热带太平洋海气相互作用领域的研究, 直到1975年在洛杉矶辞世。由他提出的ENSO循环概念所引发的海气耦合系统的研究热潮持续至今。

20世纪50年代末, 也就是J.皮叶克尼斯接近60岁时, 他投入到大西洋和热带太平洋海气相互作用领域的研究中, 直到1975年在洛杉矶辞世。由他提出的ENSO循环概念所引发的海气耦合系统的研究热潮持续至今。J.皮叶克尼斯把他对海气问题的灵感、决心和动力归功于罗斯贝、斯维尔德鲁普 (H. U. Sverdrup) 和汉森 (Bjørn Helland-Hansen)。令人遗憾的是, 在这三位科学家逝世时 (1957年), J.皮叶克尼斯的海气研究刚刚开始。

J.皮叶克尼斯最先关注的是北大西洋区域的海气相互作用现象。他认为20世纪初北大西洋偏暖现象可能是由风应力加强使湾流加速导致的。通过对年际、年代际时间尺度海气之间相互作用的研究, 他发现北大西洋海表面温度 (SST) 的年际变化与西风强度有关: 强西风年, 冰岛格陵兰岛以南SST偏低, 湾流区SST偏高, 并注意到北大西洋涛动 (North Atlantic Oscillation, NAO) 是北大西洋区域重要的外强迫。两个多世纪前, 传教士Hans Egede在日记中也记录了格陵兰岛和丹麦冬季气温年际尺度的反相变化, 而NAO这一术语则是由G. Walker在研究全球大气异常之间关系时提出的。J.皮叶克尼斯分析了冰岛和亚速尔群岛区域的海表面气压差异, 利用1890—1940年的数据研究了北大西洋SST和海平面气压 (SLP) 相关性, 指出年际尺度的SST异常主要与局地海气界面潜热和感热通量变化有关; 年代际尺度的SST异常主要与海洋环流和海洋热交换有关, 通过非局地、缓慢的动力作用完成。北大西洋的气候变率和海气相互作用动力过程吸引了诸多科学家进行观测、理论和数值模式研究。

① 美国第四个大学气象系, 前三个为罗斯贝最早创建的麻省理工学院气象系、加州理工学院和纽约大学气象系

② 罗尔德·阿蒙森 (Roald Amundsen, 1872—1928年), 挪威极地探险家, 是世界西北航道的征服者, 曾经3次率探险队深入到北极地区, 1911年12月14日成为历史上第一个登上南极点的人

J.皮叶克尼斯更为瞩目的工作是以厄尔尼诺 (El Niño) 现象为切入点的热带太平洋研究。El Niño (西班牙语“the infant”, 即“圣婴”) 最初由秘鲁渔民于19世纪初发现并命名, 指热带东太平洋秘鲁、厄瓜多尔等地沿岸的海水异常偏暖, 一般周期性出现在圣诞节附近并持续数月, 给当地渔业造成损失。El Niño逐渐被用来代指每3~6年赤道东太平洋海表面大尺度异常增暖事件, 持续9~12个月, 最长达18个月, 影响可波及世界其他地区。人们对El Niño的研究兴趣也经历了起起伏伏, 从19世纪末的兴起, 到20世纪四五十年代的淡漠, 直到50年代末丰富数据反映太平洋海温与南方涛动 (Southern Oscillation, SO), 即G. Walker于20世纪20年代发现的赤道东西太平洋不规则的气压振荡现象之间存在联系, 重新引发研究热潮。1960年前后, 人们注意到东太平洋的增暖是海温振荡变化的一部分, 可以沿赤道传播到日界线附近。J.皮叶克尼斯对哈得来环流诊断发现, El Niño年环流偏强、北太平洋西风增强进而影响到北美天气, 甚至能影响到欧洲。这种气候异常被理解为暖水区和赤道整个中太平洋之间的“遥相关”。

J.皮叶克尼斯进一步指出, El Niño并不是秘鲁沿岸的局地海洋事件, 而是能够影响大气及整个热带太平洋的振荡变化, 是海气相互作用的结果。他指出沿赤道东西方向的热力差异会导致赤道太平洋上空形成东西向垂直空间内的热力直接环流圈, 即“沃克环流”^① (the Walker Circulation), 并给出在赤道上空大气与外界没有交换的情况下理想的环流型 (图1), 这一纬向环流圈概念模型丰富了人们对大气环流的认识。他提出, El Niño和SO是同一现象的不同侧面, 将二者合在一起称为ENSO; 它们通过沃克环流相联系, 而沃克环流可视为更大尺度SO机制的一部分^②。当热带信风减弱时, 赤道东太平洋温跃层变深、海温增暖, 使信风进一步减弱, 构成完整的正反馈, 此即皮叶克尼斯假设 (Bjerknes Hypothesis)。然而该机制只能解释El Niño或La Niña的建立和维持, 无法说明ENSO位相之间的转换及其准周期性的成因。

基于J.皮叶克尼斯的研究成果, 人们对赤道太平洋的大尺度过程的认识逐渐清晰、深入。大约从1975年起, 研究者普遍将El Niño和SO作为整体, 如今ENSO已被公认为最强而普遍的年际气候变率, 以El Niño为暖位相, La Niña为冷位相。之后提出的延迟振子理论、充放

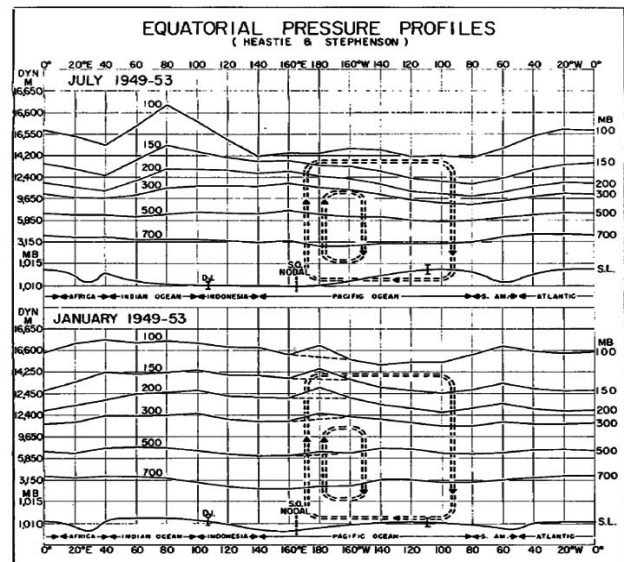


图1 1949—1953年1月和7月赤道上空标准等压面随高度分布

电阵子理论、西太平洋振荡理论等对ENSO循环的形成和周期问题给出了较为合理的解释。

J.皮叶克尼斯活跃在大气科学领域长达55年之久。他热情好客, 许多朋友和同事都曾在他和妻子在洛杉矶圣莫尼卡的家中受到热情款待。他不吝时间听取学生和同事们遇到的问题并加以建议和指导, 尽力传授自己对复杂大气运动进行简化的艺术。对感兴趣的课题, 他习惯于集中精力直到能清晰解释为止。由于对地球物理学的奠基性贡献以及无私的学术合作精神, 1945年J.皮叶克尼斯被美国地球物理联合会 (AGU) 授予堪称最高荣誉的威廉鲍伊奖, 其后还获得了美国气象学会罗斯贝奖 (1960年)、国家科学奖 (1966年) 等。

(作者单位: 叶鑫欣, 北京大学; 焦艳, 国家海洋局北海预报中心; 傅刚, 中国海洋大学)

深入阅读

Eliassen A. 1995. Jacob Aall Bonnevie Bjerknes(1897-1975). Washington D C: National Academy of Sciences.
 Fiolek A. 2004. Pioneers in Modern Meteorology and Climatology: Vilhelm and Jacob Bjerknes- A Selected Bibliography. NOAA Central Library,(1): 1-20.
 Wurtele M G. 1975. Selected Papers of Jacob Aall Bonnevie Bjerknes. North Hollywood, California: Western Periodicals Co.

① J.皮叶克尼斯 (1969) 提到: "...that circulation will be referred to as the 'Walker Circulation' since it can be shown to be an important part of the mechanism of Walker's 'Southern Oscillation.'" (由于该环流是Walker提出的“南方涛动”现象的重要部分, 因此将它命名为“沃克环流”)
 ② J.皮叶克尼斯 (1969) 提到: "... the fluctuations in the running of the Walker Circulation are therefore likely to initiate some of the major pulses of the Southern Oscillation." (沃克环流的扰动可能是南方涛动的重要驱动因素之一)

第80页评刊 来信截至 2014年10月15日

@huangct

作为天文爱好者、气象工作者，看到“天文因子与气候变化”这个专题还是很有兴趣的。主编语提到地球所接收到的太阳辐射能量可以通过太阳总辐照度（TSI）进行量化，而TSI会受到太阳黑子、光斑、耀斑、谱斑、日珥和日冕物质抛射等太阳活动影响而发生改变，而文章《海洋热含量对太阳总辐射11年周期变化的响应》也提到TSI随太阳黑子数有周期变化。这些介绍的都是太阳内部变化改变TSI从而影响气候的变化，而地球绕太阳公转运动中会受到其他大行星的引力干扰使轨道参量变化，这样也会有地球接收太阳辐射的日照量变化。地球轨道运动是椭圆的，在行星摄动下，轨道偏心率会有所变化。当地球轨道偏心率大时，一年中在近日点附近接收的辐射量增加，北方的冬季变暖。另外，有些文章说在第四纪以后，冰期都是出现在地球轨道偏心率最小的时期，间冰期出现在偏心率最大的时期。不知有没有关于“天文动力与气候变化”方面的论文可以拜读一下。

回复（from 作者）

感谢这位读者的建议，我认为您的想法是合理的。

探讨天文或地球运动因子对地球气候系统的影响，关键在于数据。一方面，我们是否有合适的天文或地球运动参数的数据开展相关研究工作；另一方面，是否能够从气候变化信号中分离出相应的天文或地球运动信号。地球旋转参数（EOP）数据大多以年周期为主，而气候系统中，年周期本身就是最显著的信号，如何将地球轨道微小的偏差对气候系统的影响从中分离出来，是非常困难的任务。另外，对于海洋而言，还要考虑海洋本身的观测问题。海洋较为可靠的数据只有半个世纪左右，天文或地球运动中的更长周期变化，也没有办法在海洋中体现出来。这两个因素综合考虑，是我们选择太阳11年周期作为研究海洋热含量异常变化的原因。

@达达爱插画

前几天收到了第4期的杂志，对于“天文因子与气候变化”这个主题，本人在这方面学习比较少，很多地方都不懂。所以只能对有关农业气象学的那篇论文（《阶段性干旱对夏玉米生长发育及产量的影响》）来分享一下我的看法了。

(1) 文章中的试验是对不同生长阶段的夏玉米进行土壤湿度定量控制，水分对作物的影响不仅是土壤中水分对其的影响，还有大气水分也对作物的生长发育产生影响。空气湿度在一定程度上影响了作物的蒸腾作用和光合作用，所以在试验过程中，应保持空气湿度在不同的试验田中不要出现较大的误差。

(2) 从“大喇叭口期”到成熟是玉米的水分临界期，在试验进行时，要注意当地的水分关键期对玉米生长产生的影响，以便减少在自然条件下产生的误差。

回复（from 作者）

对于读者提出的两个问题回答如下：

首先，读者提出“应保持空气湿度在不同的试验田中不要出现较大的误差”。这一点在我们的试验中有充分考虑，首先我们的试验田本身就是整体相连的一片地，是我们人为的把它划分为9个长、宽一样的小区，并且这9个小区是随机排列的，试验田（各小区）之间除了水分控制，其他田间管理都是一样的，其次用来遮雨的可移动的9个遮雨棚各小区也是完全一样的，目的就是尽量避免小区间的差异，并且我们的遮雨棚也不是完全封闭与外界隔绝的，遮雨棚主要遮挡玉米顶部及小区四周的降水，遮雨棚底部距地面近80cm，完全可以满足小区内部与外界的空气流通；最后，遮雨棚主要是在水分控制时段遮挡外界降水，只有在有降水的时候使用，没有降水的时候，遮雨棚都是拉开的，对试验小区没有遮挡，所以空气湿度在各试验田（不同小区）间都是一样的，不会出现较大的误差。

读者提出的第二个问题“要注意当地的水分关键期对玉米生长产生的影响，以便减少在自然条件下产生的误差”。这一点在我们的试验设计中也有考虑。我们的水分控制试验其中一个处理CK是要求全生育期土壤相对湿度都控制在75%左右（基本满足玉米关键期对水分的需求），为了达到土壤水分控制要求，所有的小区每隔5天就要测定一次土壤湿度，CK如果达不到控水要求就要计算灌溉量及时进行灌溉，C1和C2在非控水时段也都和自然状态保持一致。所以即使当地在玉米的水分关键期出现了干旱，我们也有一个处理CK是保持土壤水分适宜的，可以和另外两个不同发育期受旱的处理C1、C2进行比较，这样就避免了当地的水分关键期出现干旱对试验结果的影响，减少了在自然条件下产生的误差。

@pingking-ld

《大气低能见度的影响因子分析及计算方法综述》一文中提到“辽宁中部城市群常出现低能见度事件，主要是由于城市化的快速发展和污染物排放的急剧增加，同时还有高浓度的气溶胶污染的影响”。我是一名在沈阳工作的预报员，针对这种现象，2014年1月1日沈阳市气象局与市环保局联合制作发布“天气和空气质量预报”，市气象台增加空气污染气象条件预报，使公众能及时了解未来环境相关气象条件和空气质量等预测情况，合理安排生产和生活，从而提前应对可能发生的重污染天气。

另外，阅读了《南京一次辐射雾过程的边界层特征》一文后有一点感想：随着社会经济的发展，雾对人民生活的影响越来越重要。在沈阳，除了大范围的平流雾可以影响到沈阳全城外，辐射雾基本上都发生在沈城的局部地区，特别是城区东部。应国家大城市发展要求，要不断提高预报准确率及精细化预报程度，因此加强城区的精细化要素预报研究是十分必要的，特别是灾害性天气的精细化分区预警服务。对于沈城的大雾，主要以局地的辐射雾为主，城区受城市化及东部的长白山地形的影响，在夜间弱气压场的情况下，形成次级环流，使山谷内的冷空气影响城东，增加大雾形成的概率，但大雾分布的具体落区还尚未明确，因此增加了我们精细化分区预警大雾的难度。沈阳以“十二运”气象保障系统建设工作为契机，建成了12个能见度观测站，为雾的观测提供了保障。因此下一步我们的工作，就是要利用能见度仪和区域自动站资料，研究沈城的大雾落区及形成的原因，力争精细化到行政区域，为沈城大城市精细化预报提供保障。

回复（from 编辑部）

感谢您与本刊读者分享您的感悟，不仅让全国读者了解了沈阳气象部门在空气质量及大雾预报方面的工作现状及未来发展方向，也有助于促进邻近省市在该方面的业务交流。本刊也希望您能将自己业务工作中的想法和问题凝练成文，向本刊投稿。

NAE: 气候变化教育联盟 2014年9月

美国工程院（NAE）发布的这份报告，其副标题是“气候变化，工程系统和社会：三次研讨会报告”。这份主要由美国工程院完成的报告，瞄准的目标，是社会为了应对或调剂气候相关的问题，如干旱、海面上升和森林火灾控制等而建设的工程系统，其中的调剂因素就包括了获得公众信任、公众参与和管理。为此，在NSF资助下，美国气候变化教育联盟（阶段I）成立，并于2010年9月开始，包括美国工程院在内的5家联盟成员开展包括研讨在内的各种相关活动。本报告涉及的3次研讨会，第一次针对各种社会和技术维度，第二次则基于前一次会形成的共同语言更深入地展开问题和挑战，第三次则试图扩展已经形成的联盟，希望更多的社区、高校和专业学会及企业加入其中。

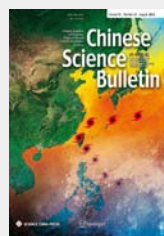


WMO:《温室气体公报》 2014年9月9日

世界气象组织（WMO）发表的这份年度报告，分析了大气中主要温室气体，包括二氧化碳、甲烷和氧化亚氮等在2013年的情形，指出这3种主要温室气体与1750年相比，分别增加了1.42、2.53和1.21倍。这份8页的报告还首次阐述了海洋酸化问题，指出目前海洋酸化的速度是过去3亿年里最快的。

《科学通报》（英文版） 2014年8月

本期杂志的封面论文，是国家海洋局第一海洋研究所的学者针对热带气旋路径预报，探讨非破碎海表波引发的垂直混合的作用。研究者利用WRF模式，模拟了2008—2011年研究领域所有33个热带气旋路径，发现在模拟中考虑非破碎海表波引发的垂直混合要素，对于较强的热带气旋路径预报，有更好的改进。



《科学》 2014年9月26日

本期杂志标题为“你能看到的干旱”的封面图，来自NASA的GRACE（Gravity Recovery and Climate Experiment，重力反演和气候试验）卫星获得的自2002年以来美国加州淡水资源的空前损失（红色）情况。过去的3年时间里，这种干旱状况在延续，让该地区多于15km³的淡水蒸发掉。本期杂志发表的社论和多篇文章，针对加州持续的干旱问题展开讨论。

媒体扫描

MEDIA SCAN

《哲学学报A》 2014年9月

这本以尖锐科学问题作为专辑的杂志，本期的主题涉及英国海洋可持续观测内容。专辑的7篇文章从物理海洋学、海洋生物地球化学、海洋模拟和气候、大地测量、海洋生物多样性和极地海洋性等角度，审视和探讨海岛国家的海洋可持续观测。每篇文章，都给出了作者从其专业角度对主题问题的评估以及对未来发展的见解。5位责任编辑分别来自英国海洋数据中心、南安普顿大学、海洋科学基金会和英国国家海洋中心等机构，从而能够组织一组针对主题的多学科和高水平的评述论文。



《自然-地学》 2014年9期

本期杂志刊载的长论文，也是本期的封面报告，是针对台湾河谷侵蚀的地貌研究成果。这篇由台湾学者与德国和瑞士合作者共同完成的文章，以台湾北部的Daan河谷（大安溪）为例，探讨了窄河谷存在时间短的特征，特别展示了当上游洪水泛滥与河谷相遇时，河谷的快速增宽，侵蚀物质则随着河谷的消失被传送到下游。

《CAAC政策报告》 2014年9月25日

中国清洁空气联盟（CAAC）与清华大学联合发布的报告：《基于“大气十条”的京津冀地区细颗粒物污染防治政策效果评估》指出，如果在2017年全面落实现有的减排措施，京津冀地区能够达到国务院《大气污染防治行动计划（2013—2017）》（“大气十条”）里提出的PM_{2.5}改善目标，即京津冀地区2017年PM_{2.5}浓度比2012年下降25%（其中北京市PM_{2.5}年均浓度控制在60μg/km³左右，天津、河北尚需在已出台的地方行动方案基础上进一步削减污染物）。模拟结果表明，北京市、天津市和河北省PM_{2.5}年均浓度，相比2013年，2017年降幅分别为25.6%、18.7%、14.7%。



《更好的增长，更好的气候》 2014年9月

全球经济和气候委员会最新推出的这份报告，诠释了新气候经济的理念，而这个理念的根本思路，正如报告题目所揭示的，更好的经济增长会带来更好的气候，在这里经济与气候达到了最好的和谐。报告指出，如果正确地进行低碳投入，就如同常规基础设施投入一样是有效的，而且释放出更加重要的经济、社会和环境长期效益。报告分三个部分，全面分析了不同经济类型国家如何实现更加强劲的经济增长和发展目标，同时减少危险气候变化风险。

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 Zhemín
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 Baochang Color Printing Limited Corporation

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

RMB 30.00

Main Contents

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

Article

- 6 Du Jun, Li Jun/ Application of Ensemble Methodology to Heavy-Rain Research and Prediction
21 Feng Jinming, Wang Jun, Yan Zhongwei/ New Advances in the Research of Climatic Effect of Urbanization
30 Chen Mingxuan, Wang Yingchun, Gao Feng, et al/ An Overview of Progresses in Radar Climatology and Its Prospective Applications in Nowcasting Severe Weather over Urban Regions
42 Fang Xiaoyi, Guo Wenli, Ma Jingjin, et al/ The Low-Carbon Urban Planning and Climate Feasibility Study
48 Shi Xiaohui/ Introduction to Observation Experiment for Convective Cloud and Water Vapor in East Edge of the Tibetan Plateau
54 Fan Jinlong, Zhang Mingwei, Cao Guangzhen, et al/ Global Drought Monitoring Initiative with Satellite Data
58 Yan Min, MA Shanshan, Feng Guibin, et al/ Research on Characteristics of PM₁₀ Air Pollution and the Relationship Between PM₁₀ and Meteorological Elements in Haidian District, Beijing City

Forum

- 63 Liu Peng, Chen Changchun, Xu Lei/ Employment Situation Analysis of Atmospheric Science Graduates in 2006-2013 and Its Prospect

Survey

- 2 Picture/ Number/ Ranking

Feature

- 66 Zhu Ziyang, Zhang Yan, Pan Weiwei/ Research on the Academic Influence of JCR of Atmospheric Sciences & Meteorology Source Journals in 2003-2012
70 Li Jinghua, Zhang Dingyuan/ A Bibliometric Analysis of the Scientific Literature on Ensemble Forecasting

History

People/Event

- 76 Shen Bingbing/ Timetable for Cross-Strait Exchanges on the Development of Meteorological Science and Technology
78 Ye Xinxin, Jiao Yan, Fu Gang/ J. Bjerknes and Ocean-atmosphere Interaction Studies

Reading

Information

- 72 Selected Papers