

# Advances

in Meteorological Science and Technology

# 气象科技进展

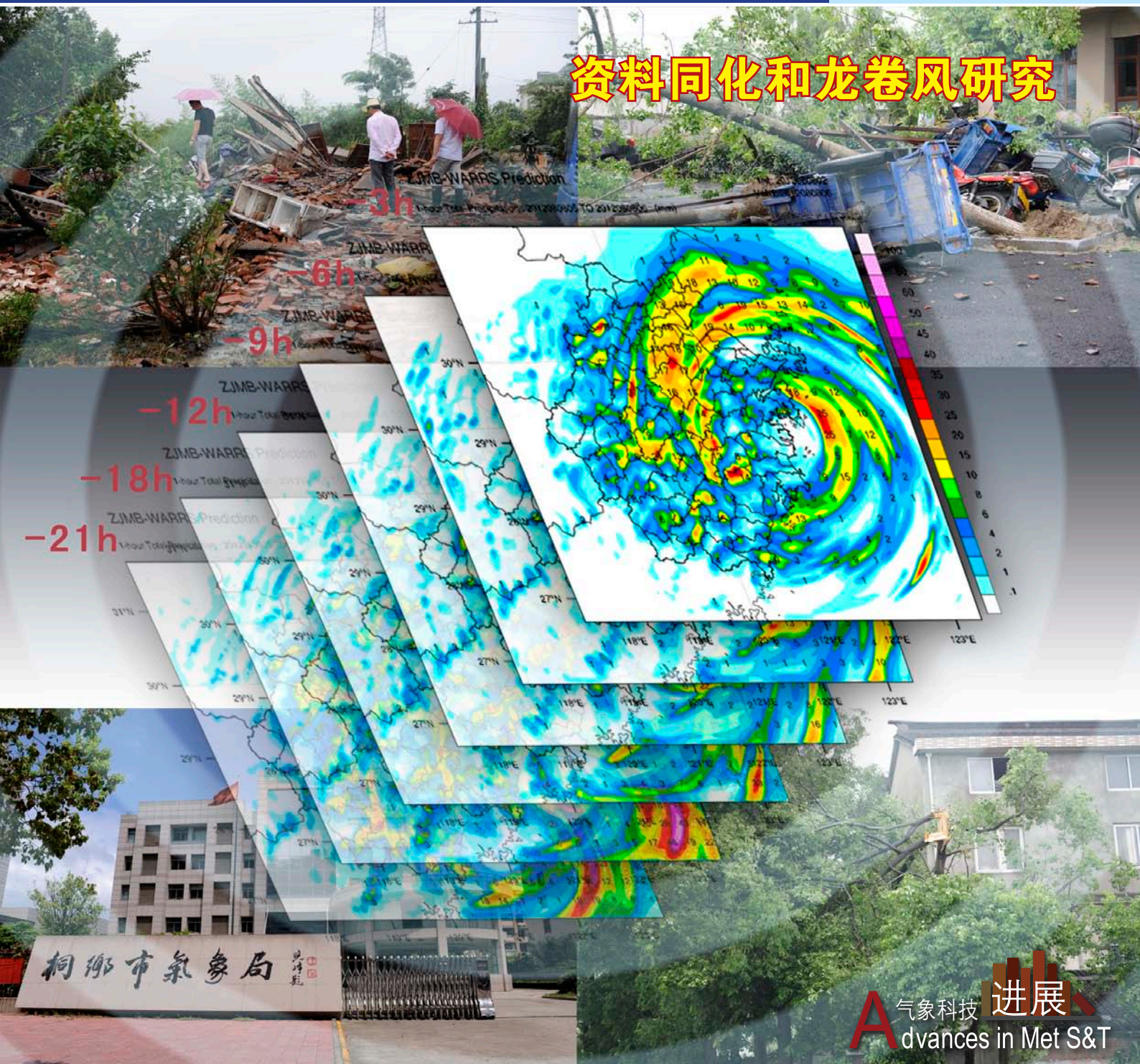
ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

## No.6

2015年12月  
第5卷 第6期

### 资料同化和龙卷风研究



中国气象局气象干部培训学院 主办

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

**名誉主编** 丑纪范 中国气象局气象干部培训学院  
**主编** 许小峰 中国气象局

**副主编**

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

**常务编委 (按音序排名)**

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

**编委 (按音序排名)**

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

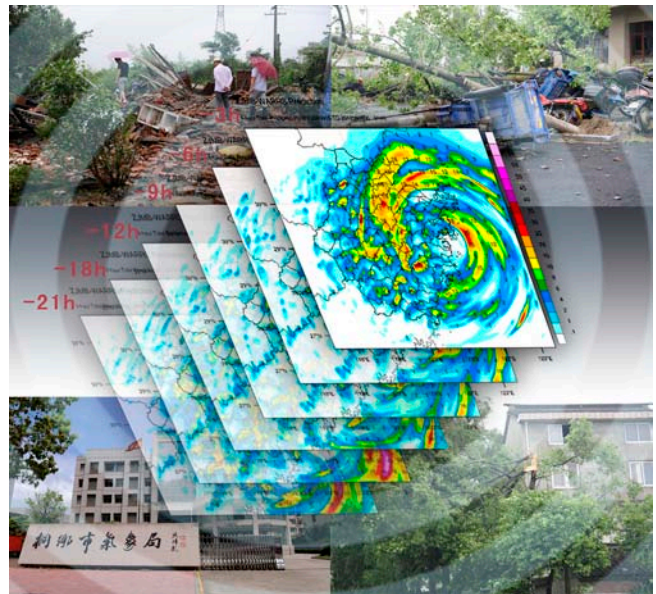
**海外编委 (按音序排名)**

陈镜明	李 俊	刘征宇	金飞飞	王 斌
翁富忠	张大林	张广俊	邹晓蕾	

**编辑部**

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

ISSN 2095-1973  
CN 10-1000/P  
定价: 30元



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

## 目 次

第5卷 第6期 2015年12月

1 许小峰: 主编语

### 研究论文

#### 封面报道 浙江省气象业务现代化

- 6 邱金晶, 陈锋, 董美莹, 余贞寿: 浙江省快速更新同化系统的建立与检验评估
- 13 范玉芬, 陈政豫, 杨冬晨, 潘士雄: 桐乡“7.12”飊线和局地龙卷风过程的诊断分析

### 研究进展

- 17 谈建国, 顾问: 城市化降水效应研究进展
- 23 李磊, 胡非, 刘京: CFD技术在我国城市气候环境微尺度问题中的应用
- 31 赵华睿, 吴立广, 梁湘三: MWT方法在分离台风环流中初步应用
- 37 张书余, 张夏琨, 王春玲, 王宝鉴: 一次中等强度冷空气对人群高血压疾病影响的实验研究

### 专题 基层现代化

- 42 崔粉娥, 李飏, 畅巨峥, 李卫敏: 两次副热带高压外围沿海暴雨过程对比分析

## 主编语

自上个世纪80年代开始,中国气象业务现代化的进程全面开启,一直延续至今,不断推进。近年来,随着硬件设施具备了一定基础,现代化的重心更多侧重于科技内涵的提升,不仅在国家级业务单位要以国际先进水平为目标,对于承上启下的省级气象业务体系的建设,现代化的步伐也在加快。本期封面报告推出了“浙江省气象业务现代化”栏目,两篇文章分别介绍了该省预报业务中基于WRF模式和ADAS同化系统建立的浙江省快速更新同化系统(P6),评估显示该系统在日常降水和台风暴雨预报业务中效果显著;另一篇文章对发生在桐乡市的龙卷风强对流事件的分析诊断(P13),反映了浙江基层气象科技人员在分析总结局地强对流天气、提升预报和预警方面所做出的努力。本期特写文章通过采访这两篇文章的作者及相关科研人员,从特定视角给出了一些与推进气象业务现代化相关的思考(P66)。

快速城市化是现代社会发展进程的重要特征之一,而城市化对气候的影响不仅仅体现在广为人知的城市热岛效应上,近数十年来的许多外场试验和观测事实表明,城市的迅速发展同样也影响着城市降水的时空分布。本期文章(P17)通过回顾城市化降水效应的有关研究进展,概述了城市化进程通过改变城市下垫面属性、城郊热平衡差异、局地环流等因素,从而对降水造成的影响。同城市化造成的降水效应相比,对于城市气候中城

市冠层内部的一些微尺度气象或环境问题的研究,如城市风环境、热环境及空气污染,计算流体力学技术的应用则体现了其独特的优势(P23)。

在西北太平洋热带地区,台风活动总会受到不同时空尺度的天气气候系统(如MJO)的影响,它们对台风生成、结构强度变化和路径都有重要影响,如何从观测或者再分析资料中分离出台风环流及其环境气流是此类研究面临的一个重要问题。本期文章(P31)使用了一种分离台风环流的多尺度窗口变换(MWT)方法,有助于研究复杂的多时间尺度环流相互作用过程。

与浙江省气象业务现代化栏目相呼应,本期“基层现代化”栏目的4篇文章(P42—P60),介绍了不同地区的基层气象部门,包括气象局系统外的气象从业人员,在强天气过程分析等方面做出的一些有特色的工作。另外,基层预报人员对一些气象行业标准的思考和疑问(P61)尤为值得关注。

大气科学类科技期刊作为大气科学学术交流、成果发布的重要载体,越来越受到气象业务和科研机构的重视,本期“论坛”文章(P63)选取了总被引频次、影响因子等关键指标,对我国34种大气科学类期刊进行了评价,其结果可为广大气象科研工作者、决策管理者、期刊主办单位了解期刊状况提供参考。

许小峰

- 48 沈永生, 蒋宗孝, 王正廷, 官晓东: 三明市强对流天气的风廓线雷达探测分析
- 53 聂颖, 余星源, 戴维士: 南京机场20130625低空风切变天气过程分析
- 58 张德宏, 王苏, 唐宇, 王山旗: 淮安地区雷暴日及地闪特征分析

## 论坛

- 61 李良武, 拓砚军, 陈文涛: 降水预报检验标准浅议
- 63 郭志梅: 我国大气科学类期刊总被引频次和影响因子统计分析

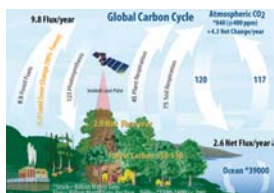
## 科学观察

- 2 读图 数字 榜单

## 往事钩沉

### 事件

- 72 气象史料挖掘与研究工程项目组: 新中国最初的气象培训班



P2

## 阅读

### 特写

- 66 贾朋群, 徐虹: 浙江气象舞翩跹——浙江省气象业务现代化采访侧记

### 书评

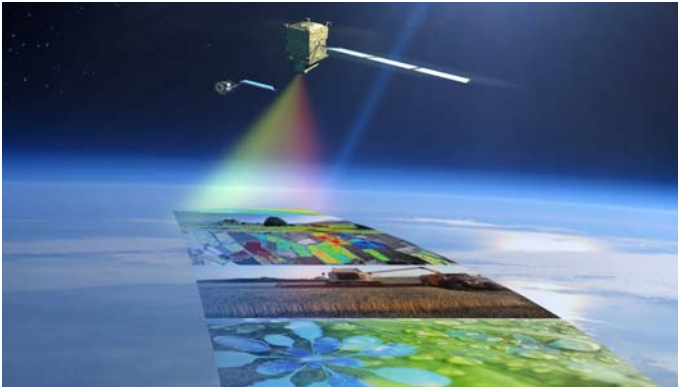
- 69 叶梦姝: 用数学语言写就的物理之诗——重温傅里叶《热的解析理论》
- 70 韩佳芮: 《评估天气和气候: 气象水文服务的经济学评估》简介

### 信息

- 12 第二届气象科技史研究学术研讨会召开
- 36 新书架
- 75 编辑选编
- 79 涓流细雨
- 80 第80页评刊
- 封3 媒体扫描



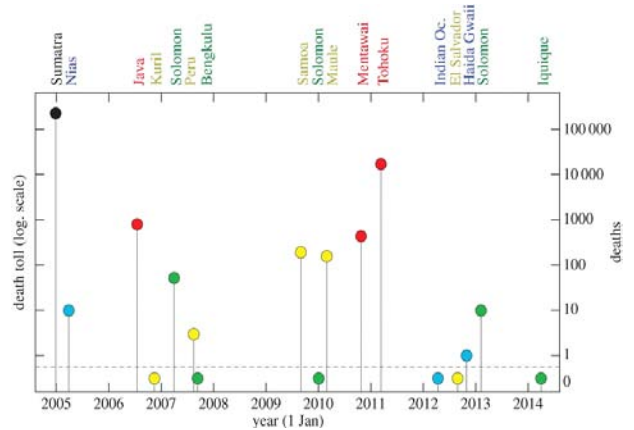
封3



### 植被健康：用卫星测量

在气象卫星国分别推出其下一代业务卫星时，一些专题探测卫星设计和释放计划也不断出台。欧洲空间局（ESA）计划通过探测和测量植物将太阳光和大气二氧化碳转化为能量时发出的微光，跟踪世界植被的健康。目前，光合作用尚无法从空间进行观测，这颗名为FLEX（Fluorescence Explorer，荧光探索）的卫星上的新传感器将首次尝试，如果该星能按照计划在2022年入轨，它将是ESA的第八颗地球探测卫星。

来源：ESA



### 近十年来发生的17次海啸：

2004年印尼海啸灾难后，全球又发生过16次海啸，其中14次成灾并导致伤亡。美国西北大学学者在近期《哲学学报A》“海啸研究”专辑中，评述了上述17次海啸过程（图中给出总计17次海啸导致的死亡人数），强调降低损失需要科学家、工程师和决策者之间更加有效的合作，才能形成人类抵御海啸灾害更高层次的智慧。

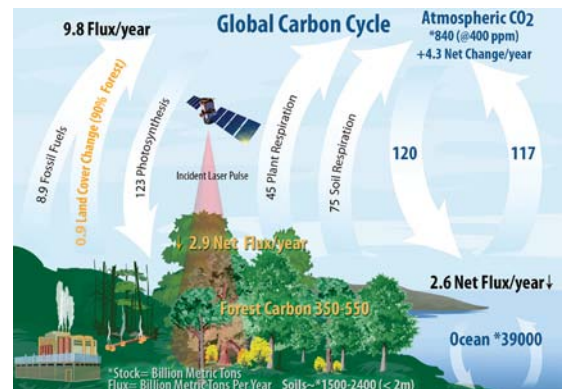
来源：《哲学学报A》



### 北极海冰保持“低调”

美国国家雪冰数据中心（NSIDC）的探测资料显示，2015年北极海冰面积最小值，较1979—2000年平均值（图中黄色线）少了34%。北极夏季海冰面积最低值均出现在过去9年里，因此NSIDC告诫北极海冰很可能进一步减少。

来源：NSIDC



### 卫星探测：揭示全球碳循环的细节

美国科学院（NAS）在最新发表的关于NASA卫星地球观测持续性的报告中，给出了全球碳循环全景图以及卫星探测的示意图。图中碳储量的单位是10亿公吨，通量单位是10亿公吨/年。1个ppm大气CO<sub>2</sub>相当于2.13Pg碳。

来源：NAS

数字

**1/2** 一项最新研究表明，自1750年以来人类排放的二氧化碳已经被地球海洋吸收了近30%，其中环绕南极的南大洋水域虽仅占海洋面积的四分之一，但可能占了上述吸收的1/2。

**94%** “十二五”期间我国基层气象业务能力获得极大提升，1690个县成立了气象灾害防御领导机构，全国88.1%的县（市）开展气象灾害预警发布业务，自动气象站的乡镇覆盖率达到94%。

**2690**万km<sup>2</sup> 世界气象组织日前宣布，2015年南极臭氧洞面积达到2690万km<sup>2</sup>，是有记录以来位于2000和2006年之后的第三面积最大记录。发布机构认为，这一结果可归因于极地平流层较冷温度范围的增加。

## 国际“资料同化”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 NCEP/NCAR 40-year reanalysis project	Kalnay, E	BAMS, 1996, 77(3)	12914
2	The ERA-40 re-analysis	Uppala, SM	QJRM, 2005, 131(612)	3886
3	The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system	Dec, DP	QJRM, 2011, 137(656)	2921
4	Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte-Carlo methods to forecast error statistics	Evensen, G	Journal of Geophysical Research-Oceans, 1994, 99(C5)	1571
5	Coupling an advanced land surface-hydrology model with the PENN State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity	Chen, F	Monthly Weather Review, 2001, 129(4)	1482
6	A comprehensive meteorological modeling system - RAMS	Pielke, RA	Meteorology and Atmospheric Physics, 1992, 49(1-4)	1132
7	North American regional reanalysis	Mesinger, F	BAMS, 2006, 87(3)	1077
8	The national-meteorological-centers spectral statistical-interpolation analysis system	Parrish, DF	Monthly Weather Review, 1992, 120(8)	922
9	MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications	Rienecker, MM	Journal of Climate, 2011, 24(14)	913
10	The NCEP climate forecast system reanalysis	Saha, Suranjana	BAMS, 2010, 91(8)	836

来源: EPA

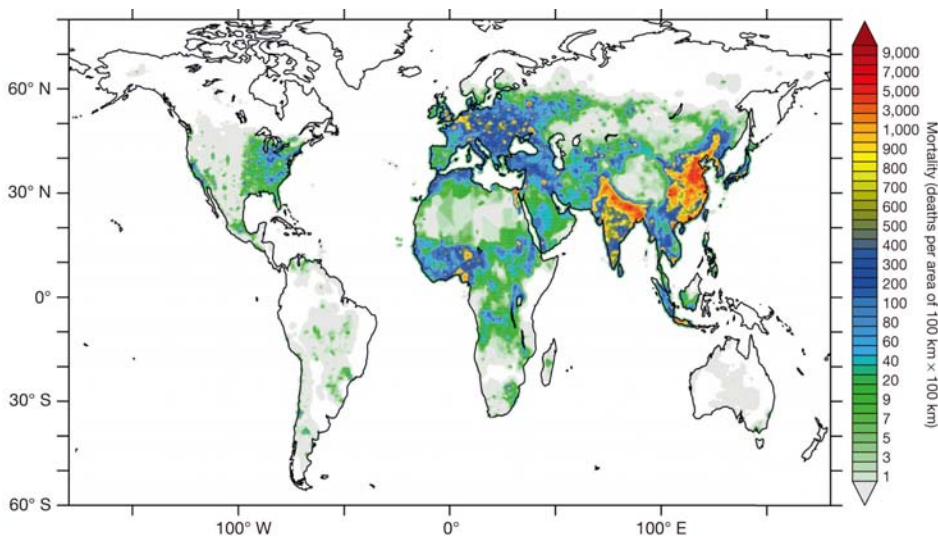
来源: SCI-E数据库, 检索时间: 2015年11月9日

张定媛提供



## 空气质量智能观测初现

美国环保署(EPA)近来通过扶植技术推广和创新活动,让空气质量的观测手段正在改变,越来越多的智能观测将进入大众生活。这些手段具有低成本、可移动等特征,可以让市民握在手中,获知家居环境以及道路等处的空气质量信息。



## 室外空气污染——人类健康的杀手

来自德国等多国学者在一项研究中,分析并量化评估了包括臭氧和细颗粒物在内的全球室外空气污染与过早死亡率之间的关系。图中给出2010年全球和室外空气污染相关的死亡率分布,从全球和国家角度,揭示了环境污染和人类健康的重要联系。

来源: Nature

1883万km<sup>2</sup>

2015年10月6日,南极海冰达到该年度的最大,覆盖了1883万km<sup>2</sup>,该数值在南极海冰范围卫星监测37年记录中位于中游:是第二十二低记录和第十六高记录。

14%

国际数据公司的统计显示,中国目前拥有的科学数据量占全球的14%,但数据利用率不到0.4%,大量数据的常态是“沉睡中”。

130km

法国学者利用16年卫星跟踪资料研究南极帝企鹅数量改变时发现,气候异常使海水每升高1℃,会让南极辐合带向南偏移130km,从而影响帝企鹅的数量。

4.7倍

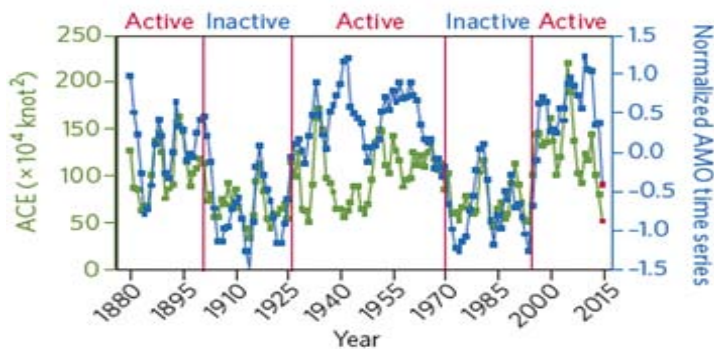
中科院地理所的一项研究表明,北京城市热岛30年扩张了4.7倍,城乡热岛强度秋季差异从1984年的1~2℃增加到当前的3~6℃。



### 全球海洋与气候的联系：CLIVAR项目20年的追求

1995年8月，世界气候研究计划（WCRP）四个核心项目之一CLIVAR（Climate and Ocean: Variability, Predictability and Change，气候变率及可预报性计划）项目的第一份科学计划出台，这项影响深远的探索气候与海洋的科学项目启动。最新出版的CLIVAR Exchanges以专辑的方式，纪念CLIVAR项目成功实施20周年，专辑封面图展示了多平台对海洋探测的场景。

来源：CLIVAR



### 大西洋活跃飓风期进入尾声？

美加学者用反映大西洋飓风活跃程度的两个指数ACE（累积气旋能量）和AMO（大西洋年代振荡），将1880—2014年划分为飓风活跃期和非活跃期，并对目前所处的活跃期是否进入了尾声进行了分析和探讨。

来源：Nature Geoscience



### 飞得更高：借助鸟类观测大气运动

阿姆斯特丹大学的学者，借助在4个兀鹫身上安装的GPS装置（大图），记录它们飞跃法国南部大高原的轨迹（小图，其中环形飞行线路指示兀鹫在借助热气流力无需拍动翅膀而获得高度，随后则为持续滑行），分析给出高空气流风速的估计。科学家利用GPS装置每3秒钟给出的兀鹫位置以及空中鸟类运动信息，估计出高原上空风速和风向以及空气的垂直运动情况。这项研究成果在美国气象学会会刊（BAMS）上在线发表。

来源：BAMS

数字

**0.01**人/100万人

英国学者统计了自1850年代以来，英国每年因闪电导致死亡人数的变化，发现年死亡人数从最初1850年代每年1.1人/100万人，大幅度减少到2010年代的0.01人/100万人。

**1**℃

世界气象组织最近发表的2015年全球气候状况临时声明指出，2015年1—8月，全球地表平均温度比1880—1899年工业革命时期大约高1℃，2015年可能是有记录以来的最暖年份。

**8960**km/h

这是人类在太阳系以外行星上观测到的第一个天气数据——标号为HD 189733 b，一个被称为“热木星”外星行星上的风速。

## 国际“龙卷风”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	A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes	Hong, SY	Monthly Weather Review, 2006, 134(9)	1055
2	Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales	FUJITA, TT	Journal of the Atmospheric Sciences, 1981, 38(8)	372
3	The advanced regional prediction system (ARPS) - A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. Part II: Model physics and applications	Xue, M	Meteorology and Atmospheric Physics, 2001, 76(3-4)	312
4	Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis	Lemon, LR	Monthly Weather Review, 1979, 107(9)	294
5	A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters	Rasmussen, EN	Weather and Forecasting, 1998, 13(4)	252
6	The advanced regional prediction system (ARPS), storm-scale numerical weather prediction and data assimilation	Xue, M	Meteorology and Atmospheric Physics, 2003, 82(1-4)	199
7	Temporal fluctuations in weather and climate extremes that cause economic and human health impacts: A review	Kunkel, KE	BAMS, 1999, 80(6)	184
8	Close proximity soundings within supercell environments obtained from the rapid update cycle	Thompson, RL	Weather and Forecasting, 2003, 18(6)	175
9	A study of the tornadic region within a supercell thunderstorm	Klemp, JB	Journal of the Atmospheric Sciences, 1983, 40(2)	175
10	Exploration of certain features of tornado dynamics using a laboratory model	Ward, NB	Journal of the Atmospheric Sciences, 1972, 29(6)	160

来源: SCI-E数据库, 检索时间: 2015年11月9日

郑秋红提供

## Defending against rising seas, in gray and green

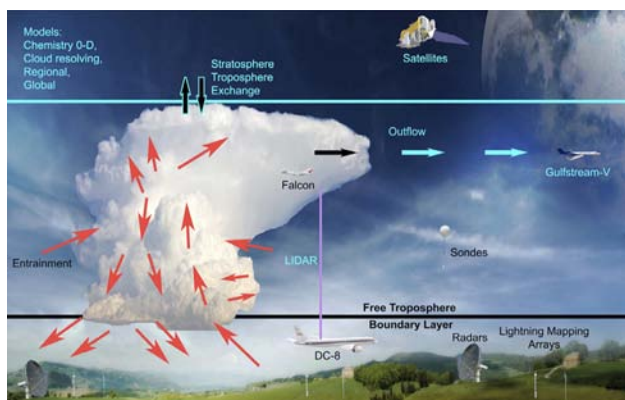
Some researchers are using a mix of gray and green coastal defense structures, such as seawalls, flood gates, and rock groins. They say greener structures—including natural or built marshes, oyster and coral reefs, and sandy barrier islands—can provide protection with less ecological damage and a greater ability to adapt to rising seas. Combining green and gray structures could create hybrid, layered defenses that offer both ecological and economic benefits.



## 应对上升的海洋 变灰色为绿色的方案

Science杂志近期推出了“海洋和气候”专栏,探讨了海洋与气候方面的科学问题。专栏介绍了NOAA科学家摒弃海堤、防洪闸和堆石防波堤等“灰色”方案,提出和成功实践的应对海平面上升的“绿色”做法:建造有生命的海岸线。2000年以来,NOAA通过与参与者共同培育大量牡蛎壳和在沙地上种植沼泽禾草,很好地呵护了该机构位于海岛上的一处设施。

来源: Science



## DC3: 揭示风暴与大气成分之间的联系

在美国中部开展的深对流和化学 (Deep Convective Clouds and Chemistry, DC3) 项目外场试验 (图中给出观测战略示意图), 将与风暴相关的动力学、结构、电场活动和大气化学同步观测的结果进行综合分析, 改进我们对对流层化学成分受雷暴影响的认识。试验结果在近期的BAMS上发表

来源: BAMS

879 hPa

10月23日登陆墨西哥的Patricia飓风打破了多项气象纪录: 登陆前快速加强的飓风, 风速接近每小时324km, 中心气压为879hPa, 成为西半球有记录以来最强飓风。

2.05 亿

联合国减灾机构最新发表的报告显示, 1995—2015年, 全球记录到6457起与天气相关的灾害, 导致60.6万人死亡, 40多亿人受到影响, 每年平均有2.05亿人受到天气灾害的影响。

13°C

斯坦福大学学者领衔的一项利用166个国家和1960—2010年间的数据库开展的研究表明, 全球经济生产力会随着年平均温度的升高而提高, 并在13°C时达到顶峰, 温度继续升高时, 经济生产力就会下降。

# 浙江省快速更新同化系统的建立与检验评估

邱金晶 陈锋 董美莹 余贞寿

(浙江省气象科学研究所, 杭州 310008)

**摘要:** 浙江省快速更新同化系统 (Zhe-Jiang WRF-ADAS Rapid Refresh System, ZJWARRS) 基于WRF模式和ADAS同化系统 (中尺度预报模式ARPS的数据同化系统) 建立, 每3h同化吸收最新观测资料进行短临预报。选取2014年夏季和台风“菲特”期间该系统的表现为例, 评估该系统在日常降水和台风暴雨预报中的应用效果。结果表明, ZJWARRS对夏季降水的时间演变和空间分布把握较好, 但预报总体偏强。对3h累计降水预报结果呈逐步修正趋势, 体现了快速更新同化系统预报时效越临近效果越好的优势, 预报水平较原浙江省中尺度数值预报业务系统有所提高。3h滚动更新对“菲特”路径预报修正效果明显。ZJWARRS能较好预报出台风降水强度逐渐加强后又逐步减弱的演变过程, 但降水强度和范围存在低估, 形态检验表明降水的结构预报和实况的相似度较高。

**关键词:** 快速更新同化系统, ZJWARRS, 预报评估, 台风, 夏季降水

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.06.001

## Establishment and Evaluation of Zhejiang WRF-ADAS Rapid Refresh System

Qiu Jinjing, Chen Feng, Dong Meiyang, Yu Zhenshou

(Zhejiang Meteorological Research Institute, Hangzhou 310008)

**Abstract:** The Zhejiang WRF-ADAS Rapid Refresh System (ZJWARRS) is built up based on WRF model and ADAS, providing the short-time numerical weather prediction by assimilating the latest observations every three hours. The real-time forecasting performance, during the period from June to August and Typhoon Fitow (1323) are accessed. The results show: (1) ZJWARRS has shown a fairly good accuracy in forecasting the spatial-temporal variation of precipitation during the flood season. On the regional average, ZJWARRS overestimates the amounts of precipitation. Based on the verification results of 3 h accumulated precipitation, one can draw a conclusion that the shorter the forecast time length is, the higher the prediction accuracy is. Compared with Zhejiang WRF ADAS Real-time Modeling System (ZJWARMS), ZJWARRS is better on forecast capacity. (2) For Typhoon Fitow, the track prediction improves greatly with 3h updates forecasts. As a whole, the system gives a good forecast on the evolution of Typhoon Fitow. The areas and amounts of 24 h accumulated precipitation during Fitow are both under-predicted. However, the result of MODE is a further indication of the conclusion that ZJWARRS correctly shows the structure of the main rain belts during Fitow.

**Keywords:** rapid refresh system, forecast assessment, typhoon, summer precipitation

### 0 引言

随着气象观测手段和计算机技术的不断改进, 如何充分、有效地利用各种常规、非常规观测资料来形成较为准确的模式初值场, 已经成为进一步提高数值预报水平的关键问题, 资料同化 (Data Assimilation) 和快速更新同化系统 (Rapid Refresh System, RRS) 的研究已经成为数值预报领域内的研究热点。

快速更新同化系统是在高分辨率数值模式的基础

上, 采用高频次更新的同化分析吸收密集的观 (遥) 测资料, 为数值模式提供高质量的初始场实现精细数值预报。RRS以前一时次的 (依据更新周期) 预报为背景场, 通过资料同化模块不断地吸收最新的观测资料来修正背景场, 形成预报初始场进行短临预报。美国快速更新同化预报系统 (RUC/RAP) 引入高时间密度观测资料实时运行, 可以有效地提高初值质量, 通过试验也表明了快速更新的预报系统非常适用于短临临近预报<sup>[1-3]</sup>。在国内, 快速更新同化系统研究和应用上也取得了一定的进展: 北京<sup>[4]</sup>、上海<sup>[5]</sup>、广东<sup>[6]</sup>、湖北<sup>[7]</sup>等省市都各自引进或建立了快速更新同化系统。这些快速更新同化预报系统在同化了各类常规及非常规资料后, 为预报模式提供高质量、高时空分辨率

收稿日期: 2015年3月27日; 修回日期: 2015年9月15日  
第一作者: 邱金晶 (1988—), Email: jinjing\_qiu@163.com  
资助信息: 浙江快速更新同化数值预报业务系统研发和应用 (二期) (2013ZD01)

的多种要素的精细初值，为天气分析提供高质量格点场，为精细化预报奠定了良好的基础，有效地提高了各省市（区）的短时临近预报业务能力。

浙江是全国自然灾害频发的省份之一，尤其以气象灾害更为突出。据统计，每年由气象灾害引起的经济损失占全部自然灾害经济损失的90%以上。台风、暴雨、冰雹、龙卷、雷暴、大风等中小尺度强对流天气，往往还会造成城市积涝、山洪暴发、泥石流肆虐等严重的自然灾害。这些中小尺度强对流天气具有局地性强和突发性强的特点，传统的临近预报技术和数值天气预报技术很难提前做出准确的预报。浙江省现有的中尺度数值预报业务系统（Zhejiang WRF ADAS Real time Modeling System, ZJWARMS），可提供72h预报时效、1h时间分辨率、12h更新频次的浙江省和中国东部两个区域的数值预报产品。ZJWARMS在降水数值预报中发挥了重要的作用，但仍存在不足：

（1）冷启动模式，模式需要较长的spin-up时间；  
（2）一天运行两次，12h更新一次模式初值，不能及时把握对流系统的发展过程。进行较短时间间隔的高频资料同化，建立快速更新同化系统是弥补上述不足、提高短时临近预报技术的有效手段。为此，基于曙光TC5000高性能计算机开发了浙江省快速更新同化系统（Zhejiang WRF-ADAS Rapid Refresh System, ZJWARRS）。

本文从系统总体设计、预报模式、同化系统、业务流程四个方面重点介绍浙江省快速更新同化系统，并针对2014年夏季（6—8月）以及台风个例“菲特”

期间模式预报的降水结果进行定量评估，展示同化系统的应用效果。

## 1 浙江省快速更新同化系统介绍

### 1.1 系统总体设计

图1为ZJWARRS的总体设计框架，该系统主要包括：（1）多源数据采集质控处理模块：自动收集GFS/T639资料、常规观测资料、自动站资料、雷达基数据资料等，并进行包括质量控制和格式转换在内的数据处理；（2）资料同化模块：利用中尺度预报模式ARPS的数据同化系统即ADAS同化系统中的Bratseth连续迭代方法、微物理调整系统和复杂云分析系统，对地面观测、探空资料、雷达资料等进行同化和三维云分析，构建一个具有高分辨率的三维初始场和降水场，再通过基于湿绝热或非绝热初始化的方法对温、湿和风分量等进行调整，获取融合更多观测信息的模式初始场；（3）数值模式积分模块：基于同化模块生成的初始场，利用WRF模式向前积分进行数值预报，得到预报结果；（4）数值产品生成分发显示模块：对模式原始预报结果进行解释应用，制作各类不同需求的数值预报产品，通过数据分发模块自动向各个需求部门发送每次预报的图片结果、数据结果、历史存档资料等，实现预报产品的全省共享；（5）模式评估检验模块：利用MET工具对模式预报结果进行准实时检验，给出降水及温度等预报要素的检验结果，包括误差、TS评分、ETS评分、空报率、漏报率等统计要素。

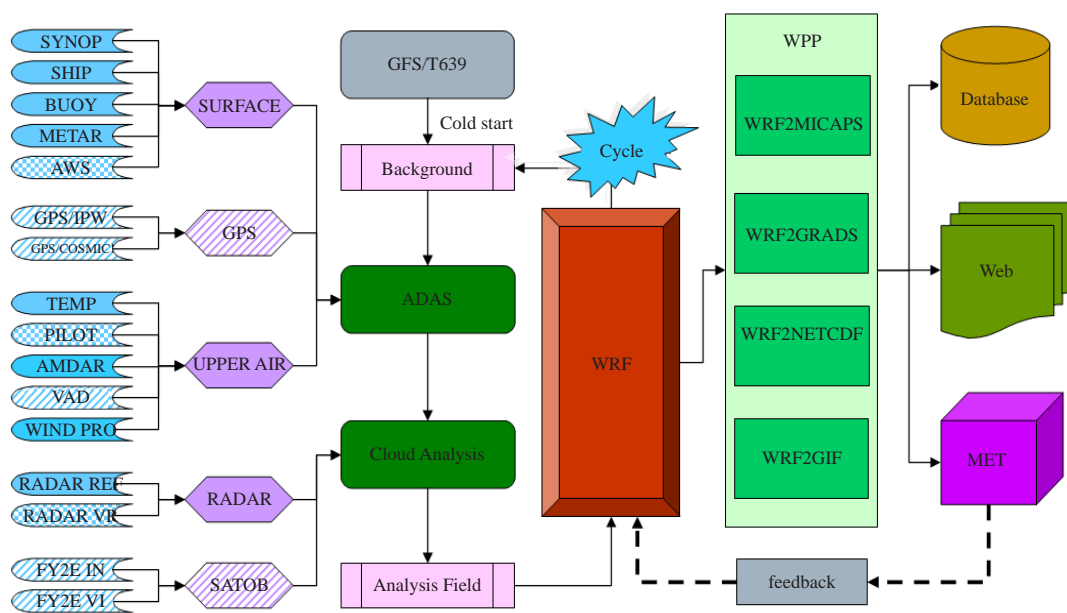


图1 浙江省快速更新同化系统（ZJWARRS）总体设计

## 1.2 预报模式

系统采用WRF 3.4.1为预报模式，选用双重嵌套，分辨率各为9和3km。9km分辨率的大区域（华东区域，大致范围：22°—42°N，106°—128°E）重点覆盖影响浙江的大尺度系统，3km分辨率的小区域（浙江区域，大致范围：26°—32°N，117°—124°E）重在识别影响浙江的中尺度系统。

为了进一步优化模式的物理过程，参考各方案的特点和现有研究结果，最终的模式物理方案为：两重区域的微物理方案均采用WSM 6-Class方案<sup>[8-9]</sup>，陆面过程使用Noah方案<sup>[10-12]</sup>及UCM城市方案<sup>[13-14]</sup>，行星边界层采用Yonsei University (YSU) 参数化方案<sup>[15]</sup>，表面层使用基于Monin-Obukhov的MM5相似理论<sup>[16]</sup>，长波、短波辐射选用RRTMG快速辐射传输方案<sup>[17]</sup>，不采用积云参数化方案。

## 1.3 同化系统

系统以ADAS系统同化观测资料，提供高质量的预报初始场，并用WRF模式向前积分进行预报。目前

ADAS同化了以下观测数据：探空观测和地面气象站观测（包括常规天气观测SYNOP，船舶观测SHIP，机场地面报METAR，浮标BUOY等）。另外，利用ADAS中的复杂云分析系统同化了新一代天气雷达CINRAD-SA/SB的反射率。

## 1.4 业务流程

系统在每日02时（北京时，下同）开始，每3h运行一次，一天共8次，每次预报24h。其中14时（06UTC）冷启动一次，初猜场为NCEP的GFS模式08时（00UTC）起报的6h预报场，其余时次的初猜场为ZJWARRS系统的3h预报场，经过ADAS同化观测数据后得到模式初始场。图2为ZJWARRS的业务流程示意图。在每次循环中，系统分七步完成作业流程：

（1）资料收集、质控及解码；（2）初猜场及边界条件的生成；（3）资料同化生成初始场；（4）主模式积分预报；（5）数值产品生成；（6）准实时评估检验；（7）产品发布。

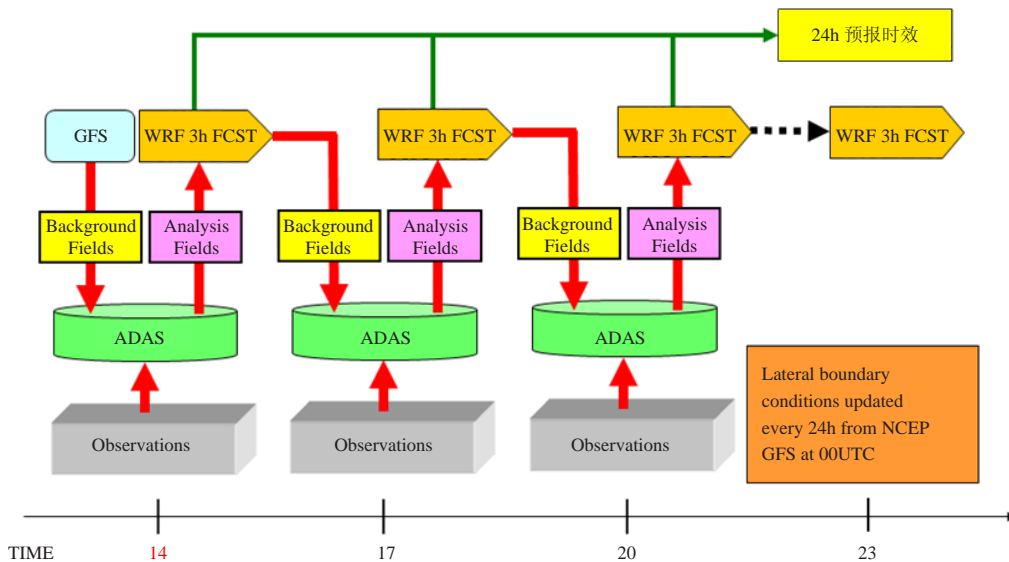


图2 ZJWARRS业务流程示意图

## 2 系统应用及评估效果

### 2.1 评估方案

浙江省快速更新同化系统已经投入业务运行2年多，下面选取2014年夏季和台风“菲特”期间，作为该系统在日常降水预报和台风暴雨中的应用案例进行效果评估，评估中还给出原有中尺度数值预报业务系统的结果，进行对比。

实况台风路径和强度资料取自中央气象台台风实时定位资料，实况降水资料选用浙江省1900多个包

括区域自动站在内的站点观测资料，要素为定时的小时雨量累计值，时间分辨率为1h。采用气象业务中常用的双线性插值方法，将快速更新同化系统和中小尺度数值预报系统预报数据插值到全省1900多个气象站点，将此作为数值模式对各个气象站点的降水预报资料，将实况站点资料和模式站点资料进行评估。除了偏差、均方根误差、皮尔森相关系数等常用的评估指标外，还给出了TS、ETS、命中率（PODY）、空报率（FAR）、漏报率（FOM）、范围偏差评

分(FBIAS)等多个检验量<sup>[18-19]</sup>,共同描述模式的降水预报性能。此外,还采用了基于目标诊断技术(MODE)<sup>[20-21]</sup>对台风降水形态进行检验,该方法将预报和观测进行分解,通过识别降水落区目标体,获取目标属性(面积、质心、轴向),计算预报降水落区和实况的相似程度,评估模式的预报能力,避免了传统检验方法仅给出结论而无诊断信息的弊端。

## 2.2 夏季降水评估结果

浙江省夏季的主要影响系统为梅雨、台风和强对流等高影响和灾害性天气,模式对这些天气的预报能力对于防御洪涝灾害具有重要意义。

### 2.2.1 24h 累计降水

2014年夏季降水过程比较明显,首先对快速更新同化系统24h累计降水预报进行评估。通过对比全省区域平均模式预报和实况的降水演变(图3),分析模式对全省降水总量随时间发展趋势的预报能力。由图3a可见,模式的预报较好地描述了降水发生、发展以及减弱的演变过程。6月下旬开始出现梅雨期降水、台风降水以及局地强对流降水,平均误差序列(图3b)表明误差多数情况下为正值,模式预报偏大程度较明显。统计评估时段内的预报24h累计降水量平均值为10.77mm,观测平均值为8.56mm,误差平均值为2.21mm,进一步证明了上述结论。由图3c的空间相关系数序列看到,预报与实况基本为正相关,空间相关系数最高可达0.9,平均值为0.22。

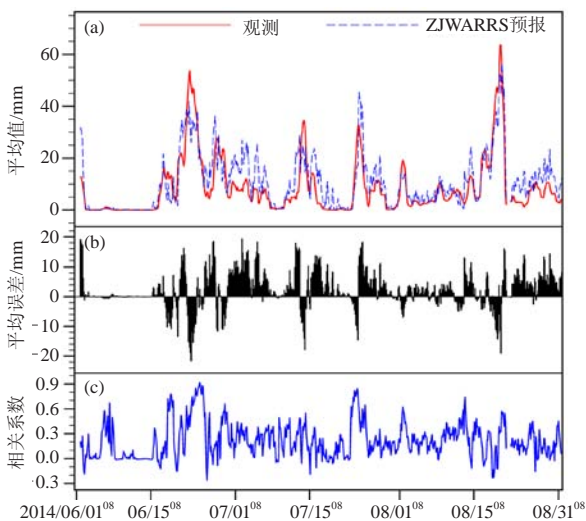


图3 2014年夏季24h累计降水ZJWARRS逐3h预报检验结果 (a) 预报和实况; (b) 平均误差; (c) 空间相关系数

由表1可知,同化系统对降水的预报能力随着降水量级的增大而减小,预报的TS评分从小雨以上级别的0.56逐步下降到大暴雨以上级别的0.01,命中率从0.76下降到0.03,范围偏差评分均大于1,表明模式预

报降水范围偏大,预报小雨以上级别的降水最接近于1,大雨以上级别降水预报范围偏大最多。比较空报率和漏报率可以看到,空报多,漏报少,可见模式预报误差主要是由于过分预报造成。综合各参数检验结果,模式对于小雨以上级别的降水应用价值最高。

表1 2014年夏季浙江省24h累计降水ZJWARRS预报累加检验结果

量级/mm	TS	ETS	FBIAS	PODY	FAR	FOM
≥0.1 (小雨及以上)	0.56	0.10	1.61	0.76	0.37	0.24
≥10 (中雨及以上)	0.25	0.10	3.22	0.47	0.64	0.53
≥25 (大雨及以上)	0.14	0.07	3.36	0.29	0.77	0.71
≥50 (暴雨及以上)	0.06	0.04	3.16	0.13	0.88	0.87
≥100 (大暴雨及以上)	0.01	0.01	2.67	0.03	0.95	0.97

### 2.2.2 3h 累计降水

选用更精细的评估要素——3h累计降水,对2014年夏季快速更新同化预报系统的3h滚动预报进行评估。全省平均而言,3h降水偏强,误差在0~1.2mm,绝对误差在1.5~2mm,均方根误差在4mm左右。从不同预报时效降水和实况的空间相关系数(图4)看到,空间相关系数随着提前预报时间的缩短不断提高,可见观测资料的不断引进使得同化系统对于降水的空间分布形态有一个逐步修订作用。

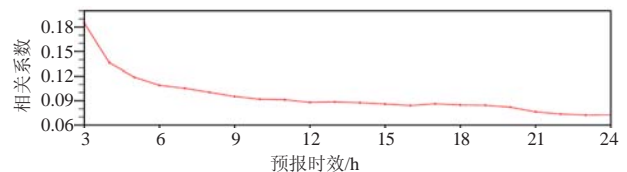


图4 不同预报时效的空间相关系数

利用TS、ETS等分级指标,得到的3h累计降水不同预报时效的评估指标序列(图5)表明,在相同预报时效的降水预报评分中,预报水平基本随着降水量级的减小而稳步提升。对于小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨以上级别降水的TS评分、ETS评分、命中率、漏报率,随着提前预报时效的缩短,得分呈增加趋势,3h预报时效得分均为最高,进一步说明不断引进最新观测资料后,快速更新同化预报系统对于3h累计降水预报结果呈逐步修正趋势,体现了快速更新同化系统预报时效越临近效果越好的优势。

为了进一步说明快速更新同化系统的优势,将原有中尺度数值预报业务系统的评估结果与之对比。挑选全天8个时刻(00、03、06、09、12、15、18和21时),分别将提前量为0~24h的快速更新同化系统和提前量为0~72h的中尺度数值预报系统,针对2014年夏季上述8个时刻的所有3h累计降水预报检验结果分别进行累加平均,给出检验量平均偏差和小雨以上级

别降水TS评分的对比图（图6）。由图6a可知，除21时外，其他时刻同化系统预报偏差均小于中尺度数值预报系统，预报值更为接近实况；图6b表明同化系统的TS评分一致高于中尺度数值预报系统。由此可见，快速更新同化系统的预报水平较原有中尺度数值预报业务系统有所提高。

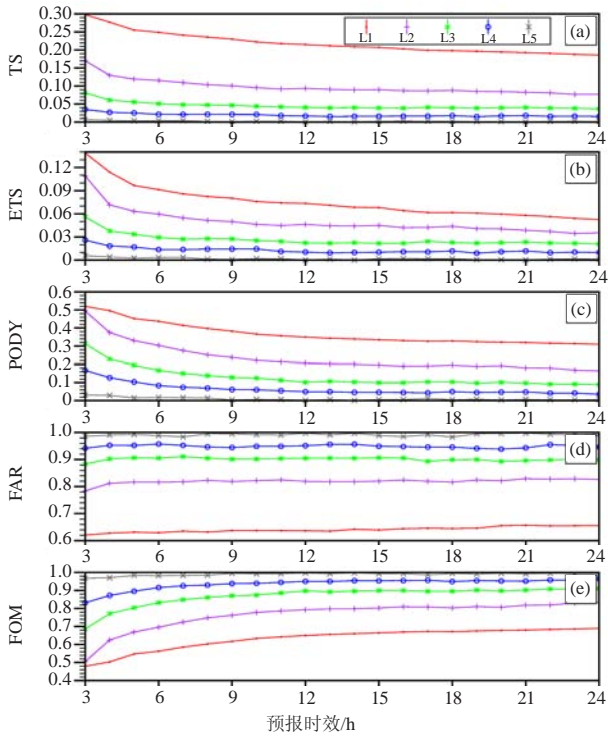


图5 不同预报时效的评估指标 (L1: 小雨以上级别; L2: 中雨以上级别; L3: 大雨以上级别; L4: 暴雨以上级别; L5: 大暴雨以上级别)

### 2.3 台风天气评估结果

“菲特”是1949年以来在10月登陆我国的最强台风，给浙江带来了罕见狂风暴雨，重创了宁波和余姚地区。下面以“菲特”为例，初步探讨快速更新同化预报系统对台风的预报效果。

#### 2.3.1 “菲特”台风路径和强度评估结果

“菲特”台风的实况路径和不同预报时效的预报路径（图7）表明，预报误差基本在23~32km，均值为27km，随着预报时效的缩短，路径误差逐步减小，可见，快速更新同化系统对台风路径预报有较好的修正作用。强度误差统计显示，初始时刻台风强度的定强误差较为明显，绝对误差达11.3hPa，绝对误差随着提前时间的增加呈V型变化，在提前15h的预报中出现5.6hPa最小绝对误差。对比气压偏差看到（预报值减去观测值），模式预报强度整体偏弱，初始定强偏弱最明显，为11.0hPa。12~24h预报时效误差较小，有较好的应用价值。由于台风初始定强存在较大误差，ZJWARRS系统对于台风强度的临近修正不明显，因此，今后要改进系统的预报性能，需要在台风涡旋初

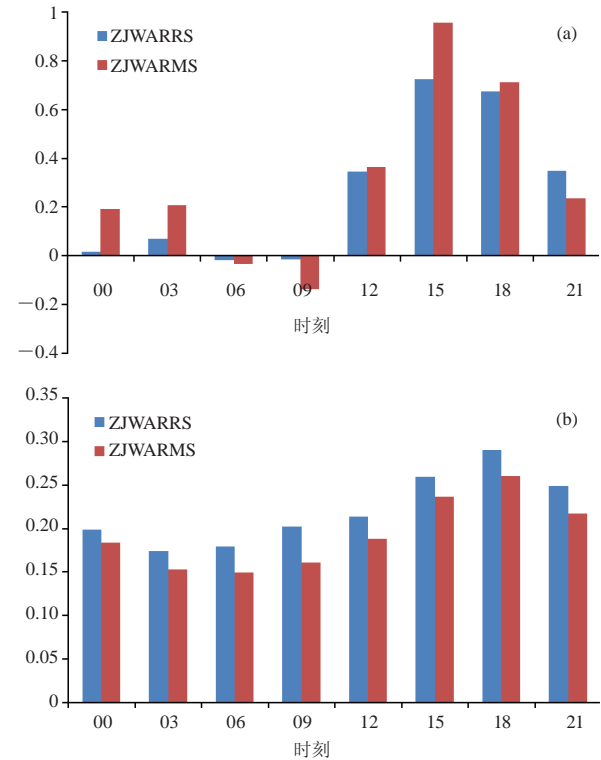


图6 ZJWARRS和ZJWARRMS的3h累计降水预报检验对比 (a) 平均偏差; (b) 小雨以上级别降水的TS评分

始化方面开展工作，而如何减少初始时刻台风强度误差将是侧重点。

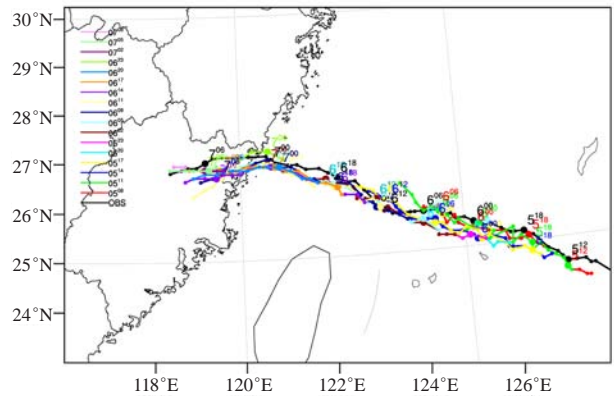


图7 “菲特”台风期间各时次起报的路径（彩色）和实况（黑色）

#### 2.3.2 “菲特”台风降水评估结果

比较5日20时至8日20时的24h累计降水实况和预报分布和演变看到（图8），模式较好预报出降水强度逐渐加强后逐步减弱的演变过程。5日20时—6日20时的24h累计降水，浙江东南沿海的雨带预报效果较

好，但是浙江西北角的降水预报偏弱。6日20时—7日20时，预报基本报出了温州、台州附近的降水中心，

而宁波到杭嘉湖地区的雨带强度和实况存在一定的偏差。7日20时—8日20时，雨带位置预报偏西。

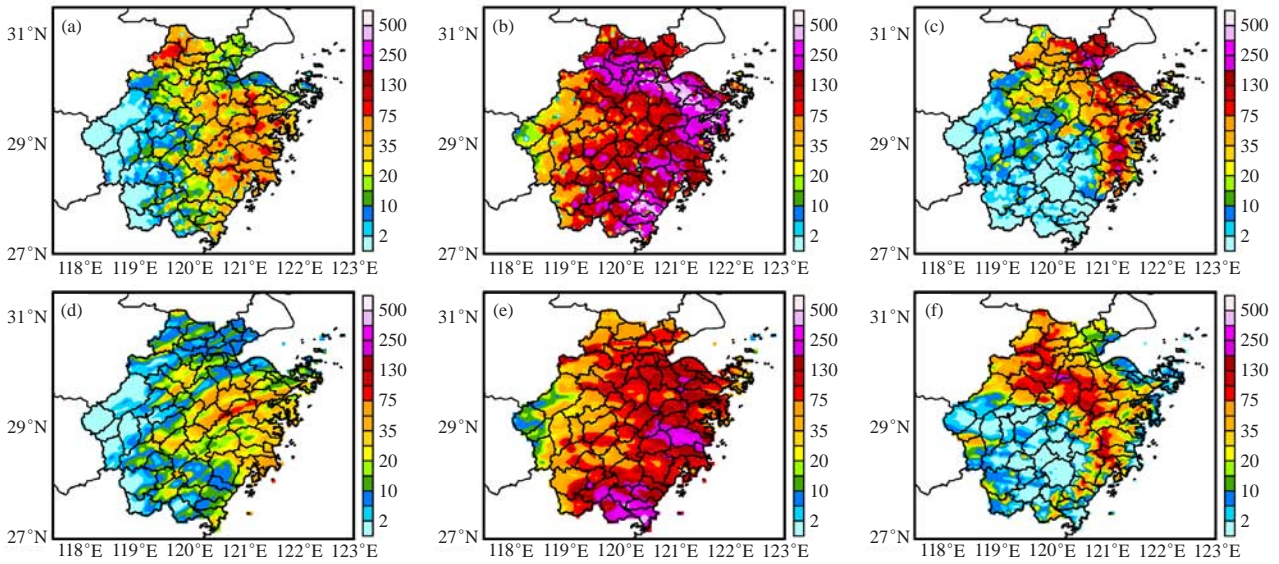


图8 2014年10月5日20时—8日20时的逐24h累计降水的实况 (a~c, 单位: mm) 和预报 (d~f, 单位: mm) (a, d) 10月5日20时—6日20时; (b, e) 10月6日20时—7日20时; (c, f) 10月7日20时—8日20时

为了更好地评估模式结果，选取“菲特”台风雨强最强的10月6日20时—7日20时24h累计降水，采用基于目标诊断技术，对这一时段的降水形态进行检验，这里检验暴雨及以上级别的降水落区。结果(图9)表明，预报场有1个目标中心，与实况1号目标中心匹配很好，相似系数达到1，另外与实况2号目标中心也存在一定联系。由图9还可知，暴雨及以上级别的预报降水面积比观测面积偏小。可见模式24h累计降水预

报整体虽然存在降强度和范围都偏小的现象，但对降水的结构预报和实况相似较好，仍有较高应用价值。

### 3 结论与讨论

浙江省快速更新同化预报系统基于WRF模式和ADAS同化系统建立，目前该系统已经投入业务运行，每3h提供一次0~24h的预报产品。本文重点介绍了该系统的总体设计、预报模式、同化系统以及业务流程。相比于传统的数值模式，浙江省快速更新同化系统有如下优势：(1) 实现了模式冷启动和热启动的合理组合，缩短了spin-up时间；(2) 利用资料同化模块有效利用多种高密度、高频率观测资料，在临近预报中发挥了重要作用。

本文利用2014年夏季降水和台风“菲特”个例预报情况针对浙江省快速更新同化系统进行评估，结果表明，同化系统能较好反映夏季降水的时间演变和空间分布，预报降水总体偏强，预报能力随着降水量级的增大而减小。3 h累计降水的评估结果表明，不断同化吸收最新的观测资料后，预报系统对于3 h累计降水预报结果得到逐步改进，体现了快速更新同化系统预报时效越临近效果越好的优势，且预报水平较原有浙江省中尺度数值预报业务系统有所提高。随着预报时效的缩短，系统对台风“菲特”路径预报有较好的修正作用。虽然预报整体存在降水强度和范围都偏小的现象，但模式能较好地预报出“菲特”带来的强降水

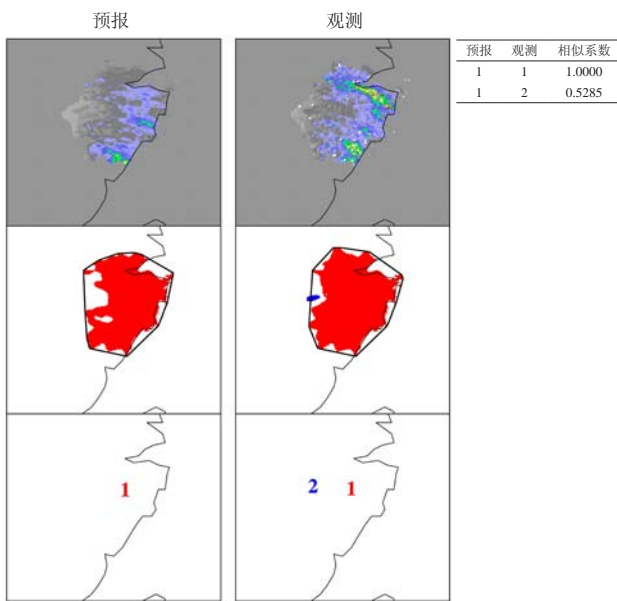


图9 基于目标诊断技术对10月6日20时—7日20时24h累计降水(暴雨及以上级别)形态检验结果

的落区、强度的大致分布和发展演变。mode检验进一步表明模式对降水的结构预报和实况相似较好，仍有较高参考价值。

评估结果体现了浙江快速更新同化系统的优势，为系统地使用提供了参考依据，也在一定程度上明确了今后改进浙江省快速更新同化预报系统需要进一步开展工作的方向。此外，本文仅针对“菲特”个例开展台风预报评估，所得结论有待今后更多个例的评估工作来验证，而且本文目前只对浙江省本地的两个模式进行了检验，今后还需要利用其他全球模式进行对比检验，加深对其的认识。

#### 参考文献：

- [1] Benjamin S G, Brundage K J, Morone L L. The Rapid Update Cycle Part I: Analysis/model description// Technical Procedures Bulletin No. 416, NOAA/NWS, 1994: 16pp.
- [2] Benjamin S G, Smirnova T G, Brundage K, et al. A 13-km RUC and beyond: Recent developments and future plans. Preprints, 11th Conf. Aviation, Range, Aerospace Meteor, AMS, Hyannis, MA, October 2004.
- [3] Benjamin S G, Moninger W R, Weygandt S S, et al. Technical Review of Rapid Refresh/RUC Project. NOAA/ESRL/GSD internal review, 3 Nov 2009.
- [4] 范水勇, 陈敏, 仲跻芹, 等. 北京地区高分辨率快速循环同化预报系统性能检验和评估. 暴雨灾害, 2009, 28(2): 119-125.
- [5] 陈葆德, 王晓峰, 李泓, 等. 快速更新同化预报的关键技术综述. 气象科技进展, 2013, 3(2): 29-35.
- [6] 陈子通, 黄燕燕, 万齐林, 等. 快速更新循环同化预报系统的汛期试验与分析. 热带气象学报, 2010, 26(1): 49-54.
- [7] 王叶红, 彭菊香, 公颖, 等. AREM-RUC 3h快速更新同化预报系统的建立与实时预报对比检验. 暴雨灾害, 2011, 30(4): 296-304.
- [8] Hong S Y, Dudhia J, Chen S H. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. Mon Weather Rev, 2004, 132: 103-120.
- [9] Hong S Y, Lim J O J. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). J Korean Meteorol Soc, 2006, 42: 129-151.
- [10] Koren V, Schaake J, Mitchell K, et al. A parameterization of snowpack and frozen ground intended for NCEP weather and climate models. J Geophys Res, 1999, 104(D16): 19569-19586.
- [11] Chen F, Dudhia J. Coupling an advanced land surface hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I. Model implementation and sensitivity. Mon Weather Rev, 2001, 129: 569-585.
- [12] Ek M B, Mitchell K E, Lin Y, et al. Implementation of Noah land surface model advancements in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. J Geophys Res, 2003, 108(D22): 8851.
- [13] Kusaka H, Kondo H, Kikegawa Y, et al. A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multilayer and slab models. Bound -Layer Meteorol, 2001, 101: 329-358.
- [14] Kusaka H, Chen F, Tewari M, et al. Performance of the WRF model as a high resolution regional climate model: Model intercomparison study. The seventh International Conference on Urban Climate, 29 June-3 July 2009, Yokohama, Japan.
- [15] Hong S Y, Pan H L. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. Mon. Weather Rev, 1996, 124(10): 2322-2339.
- [16] Jimenez P A, Dudhia J, Gonzalez-Rouco J F, et al. A revised scheme for the WRF surface layer formulation. Mon Weather Rev, 2012, 140: 898-918.
- [17] Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. J Geophys Res, 2008, 113(D13):1395-1400.
- [18] 丁金才. 天气预报评分方法评述. 南京气象学院学报, 1995, 18(1): 143-150.
- [19] Brown B, Gotway J H, Bullock R, et al. The Model Evaluation Tools (MET): Community tools for forecast evaluation. Preprints, 25th Conf on International Interactive Information and Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology, Phoenix, AZ, Amer Meteor Soc, 9A.6. 2009.
- [20] Davis C A, Brown B G, Bullock R G. Object-based verification of precipitation forecasts, Part I: Methodology and application to mesoscale rain areas. Monthly Weather Review, 2006, 134: 1772-1784.
- [21] Davis C A, Brown B G, Bullock R G. Object-based verification of precipitation forecasts, Part II: Application to convective rain systems. Monthly Weather Review, 2006, 134: 1785-1795.

## 第二届气象科技史研究学术研讨会召开

■ 陈正洪

2015年12月12-13日，“第二届气象科技史研究学术研讨会”在中国气象局气象干部培训学院召开。来自中国气象局、清华大学、北京大学等机构以及国际气象史学会首任主席James R. Fleming、国际气象史学会第三任主席Vladimir Jankovic、欧洲大学校际科学技术社会联盟主席Matthias Dörries等国际友人学者共120余人参会。

会议交流的34个报告，涉及气候变化、天气预报、气象科技发展、学科建设等领域。中国气象局副局长、气象干部培训学院院长许小峰主持第一天的会议时指出，研讨会目的在于交流和研讨大气科学技术的历史发展，挖掘创新规律，促进气象教育和干部培训水平的提高，促进气象科学事业的进一



步发展，凝聚更多力量。Fleming认为，这次研讨“有国际性、跨学科、跨代际，令我印象深刻”。

(作者单位：中国气象局气象干部培训学院)

# 桐乡“7.12”飚线和局地龙卷风过程的诊断分析

范玉芬<sup>1</sup> 陈政豫<sup>1</sup> 杨冬晨<sup>1</sup> 潘士雄<sup>2</sup>

(1 浙江省桐乡市气象局, 桐乡 314500; 2 浙江省嘉兴市气象局, 嘉兴 314000)

**摘要:** 2014年7月12日浙江省桐乡市一次飚线过境, 导致局地出现12级狂风, 造成倒房死伤人的重大灾害。通过对大风灾情的实地调查, 环境背景场强对流参数和周边杭州、湖州多普勒天气雷达回波特征分析, 发现这是一次强中气旋发展伴随局地龙卷风发生的过程, 龙卷风发生在飚线弓形回波前沿凸起部分。对本次过程的分析表明, 环境场中最佳对流有效位能(BCAPE)和风暴相对螺旋度(SRH)增大、抬升凝结高度低, 则出现局地龙卷风的可能性越大。在龙卷风等突发强对流事件的预报中, 风廓线产品中西南急流的加强和中心轴下沉、中高层冷空气的切入等, 对风暴的触发、雷暴系统的加强有预报提前量。此外, 大风重灾发生后, 灾区实况及周边多普勒雷达径向速度场资料是判断风灾类型和级别的重要数据资料。

**关键词:** 飚线前沿龙卷, 灾情调查, 环境背景, 多普勒天气雷达回波特征

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.06.002

## Diagnostic Analysis of a Tornado Event Associated with the Squall Line in Tongxiang, 12 July 2014

Fan Yufen<sup>1</sup>, Chen Zhengyu<sup>1</sup>, Yang Dongchen<sup>1</sup>, Pan Shixiong<sup>2</sup>

(1 Tongxiang Meteorological Bureau of Zhejiang, Tongxiang 314500 2 Jiaxing Meteorological Bureau of Zhejiang, Jiaxing 314000)

**Abstract:** On July 12, 2014, a squall line formed across Tongxiang, Zhejiang. Strong gust winds appeared in Yuanfeng and Jinniu villages and resulted in human casualties and property damage. Through the survey of the disaster, the analysis of environmental conditions and echo characteristics on Hangzhou and Huzhou Doppler weather radars, it is shown that a tornado was produced by a strong cyclonic circulation which had developed associated with the squall line. The strong cyclone occurred in the forefront of the convex portion of bow echo below 1km. The increase of the best convective available potential energy (BCAPE) and storm relative helicity (SRH), and the decrease of lifting condensation level enhanced the likelihood of tornado. The strengthening and sinking of southwest jet together with the mid- and high-level cold air helped trigger the storm.

**Keywords:** squall line tornado, disaster investigation, environmental background, Doppler weather radar

### 0 引言

2014年7月12日19—21时, 浙江湖州、嘉兴有一次飚线天气过境, 带来7~9级以上大风、短时暴雨和密集雷电。本次灾害前的预警和灾后深入的分析表明, 新一代多普勒天气雷达CINRAD/SA中重要的产品, 如中气旋(M)、弱回波区(WER)、龙卷涡流特征(TVS)等能为龙卷风的监测预警提供警示。中气旋往往与强对流天气有关, 根据多年雷达资料统计, 大部分中气旋伴有雷雨大风、冰雹等, 5%~20%的中气旋伴有龙卷风<sup>[1]</sup>。一些研究表明<sup>[2-3]</sup>, 有利于F2级(藤田级数)以上强龙卷生成的两个有利条件分别是低的抬升凝结高度和较大的低层(0~1km)垂直风

切变。0~1km的垂直风切变越大, 抬升凝结高度越低, 则龙卷出现的可能性越大。我国江淮流域的梅雨期常会有龙卷发生, 而且通常与梅雨期的暴雨相伴。

Trapp等<sup>[4]</sup>统计表明, 在探测到中气旋时, 大约只有20%的龙卷发生概率, 而在探测到中气旋底部距离地面不超过1km的情况下, 龙卷发生概率约为40%, 而且, 中气旋底部越靠近地面, 龙卷概率越高。目前美国基层气象台发布龙卷警报的准则是(在环境低层垂直风切变和相对湿度较大情况下): (1) 探测到强中气旋; (2) 探测到中等以上强度中气旋, 并且其底部距离地面不超过1km。

本文试图利用上述概念和研究成果, 对一次疑似龙卷风的过程进行分析, 给出浙江北部地区龙卷风过程的诊断结果, 讨论目前台站对龙卷风等局地强天气预报和分析策略。

收稿日期: 2015年6月17日; 修回日期: 2015年9月19日  
第一作者: 范玉芬(1962—), Email: 357194679@qq.com



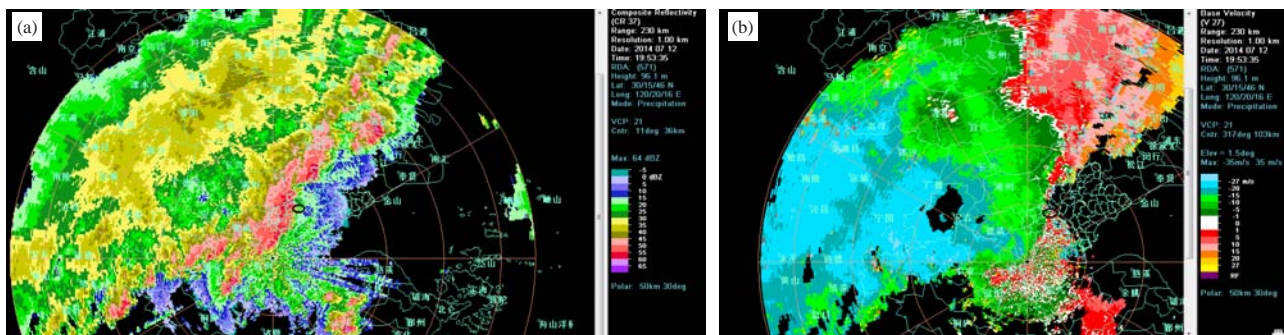


图2 杭州雷达2015年7月12日19:53时组合反射率 (a) 和1.5°径向速度 (b) (黑圈为龙卷处)

19:59) 自西北向东南横扫过该区域, 具有龙卷性质。而此过程中狂风受灾区就位于B7经过的地方(图3), 此风暴移动速度达22m/s。中气旋B7经过的地区风力大, 速度快, 影响时间仅几到十几分钟, 与灾害实况较符合。



图3 2014年7月12日20时前后浙江省嘉兴桐乡龙翔街道局地龙卷风、B7路径示意图

### 3.3 杭州雷达径向速度场中气旋识别

在杭州雷达径向速度产品分析中(图2b), 19:53前后, 龙翔西北偏西方向存在径向速度对, 不同仰角(0.6、1.0和2.0km)都能分析到, 与B7相对应。2.0km高度上速度对强度最强也最好分辨。3km水平距离风切变达35~37m/s, 偏北风速20~27m/s, 偏南风10m/s以上, 可判断存在一个超级单体。中气旋底部小于1km, 极有可能存在龙卷<sup>[4, 10]</sup>。

### 3.4 湖州雷达站径向速度产品分析

在湖州雷达径向速度产品(2.4°)中(图略), 在19:53灾区龙翔附近(约1.5km高度)有一个中气旋, 龙翔西南方向有大片正速度区, 并有大片速度模糊, 龙翔东北方向的小范围的负速度。此处距离湖州雷达站约35km, 此时出现的速度模糊, 速度模糊值最大可能为39~44m/s, 负速度最大为-20m/s, 根据中气旋强度标准计算, 距离雷达中心32km处转动速度31m/s, 可判断为强中气旋。

## 4 风廓线观测

从对局地龙卷重灾区的上游湖州(重灾区西北方向35km处)和下游嘉兴(重灾区偏东方向25km处)两站风廓线产品(图4和图5)的分析中, 可以得出: (1) 雷雨发生前1km高度以上都是深厚的西南急流, 最大值超过20m/s, 在雷暴发生前西南急流明显加强, 随着系统的靠近, 急流轴向下移至1.5~2km附近; (2) 在雷暴天气发生前, 1000m高度附近有明显西南与东北风的切变, 在500~700m高度风向随高度逆时针旋转, 飚线过境切变消失, 1500m以

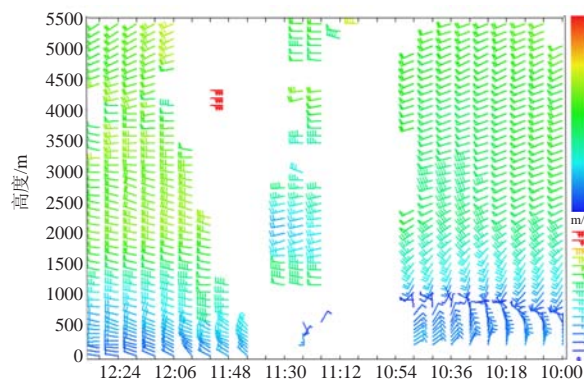


图4 湖州雷达水平风廓线  
2014年7月12日(世界时10:00—12:30)

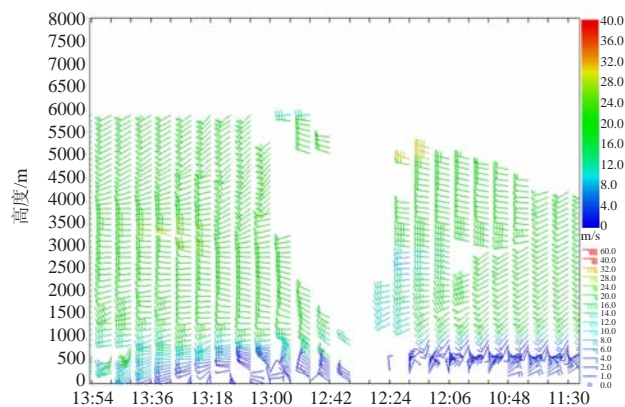


图5 嘉兴雷达水平风廓线  
2014年7月12日(世界时11:30—14:00)

下转成一致的NW气流；（3）雷雨发生前半小时，3000~5000m有西北气流契入，最低可渗透到2200m附近；在雷暴发生时，可以看到底层有雷暴高压过境（20:36—21:48），发生在地面辐合线附近，且移速较快；（4）20:00—20:20，嘉兴测站500~800m高空风向随高度先逆时针旋转，后顺时针旋转的快速变化（图5），北风与南风、东北风与西南风对峙，风的垂直切变值12~16m/s，垂直速度7m/s左右，由于嘉兴风廓线测站处于重灾区偏东区25km，强中心东移时已明显减弱，故量值明显偏小。

风廓线产品对飚线影响垂直风结构有较好的表达，切变层的高度、垂直风切变的大小，以及西南急流的加强和中心轴下沉以及中高层冷空气的契入，对风暴的触发、雷暴系统的加强可提前预报。

## 5 小结

1) 飚线雷暴大风天气系统移动速度一般都在60km/h以上，所以飚线云形的判断、弓形回波、径向速度图中的中气旋识别和强度判断对预报服务人员很重要；底层强烈中气旋的出现和低空维持<sup>[11]</sup>，表明龙卷风的产生有很大可能性，此时应考虑立即发布龙卷风预警<sup>[10]</sup>。

2) 在对强天气背景场充分了解的基础上，关注最佳对流有效位能、风暴相对螺旋度等大风预报的相关指数，抬升凝结高度均较低（<1km）时，有利于灾害性龙卷产生；风廓线产品对飚线影响垂直风结构有较好的提示，而切变层的高度、垂直风切变的大小，以及西南急流的加强和中心轴下沉、中高层冷空气的契入，都对风暴的触发、雷暴系统的加强有利，

可提前做出预报。

3) 大风灾情发生后，应及时开展灾情调查，掌握事故现场第一手资料，有利判断大风的级别。在对周边多普勒雷达资料作全方位的资料收集和分析时，由于超级单体相距雷达站的方位和距离不同，可识别的效果相差较大。

## 参考文献

- [1] 郑峰, 谢海华. 我国近30年龙卷风研究进展. 气象科技, 38(3): 296-299.
- [2] Schmocker G K, Przybylinski R W, Lyn Y J. Forecasting the initial onset of damaging downburst winds associated with a mesoscale convective system (MCS) using the mid-altitude radial convergence (MARC) signature. Preprints, 15th Conf on Wea Analysis and Forecasting, Norfolk, VA: 1996.
- [3] Evans J S, Doswell III C A. Investigating derecho and supercell proximity soundings. Preprints, 21st Conf Severe Local Storms (San Antonio, TX). Amer Meteor Soc, 2002, 635-638.
- [4] Trapp R J, Stumpf G J, Manross K L. Areassessment of the percentage of tornadic mesocyclones. Wea Forecasting, 2005, 20: 680-687.
- [5] Fujita T T. Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity. Satellite and Mesometeorology Research Project Report 91. Chicago, IL: the University of Chicago, 1971.
- [6] Purdom, J F W. Subjective interpretation of geostationary satellite data for nowcasting. // Nowcasting. Browning K A. Ed. Academic Press, 1983, 149-166.
- [7] Przybylinski R W, Gery W J. The reliability of the bow echo as an important severe weather signature. Preprints, 13th Conf On Severe Local Storms, Tulsa. Amer Meteor Soc, 1983, 270-273.
- [8] Przybylinski R W. The bow echo: Observations, numerical simulations, and severe weather detection methods. Wea Forecasting, 1995, 10, 203-218.
- [9] 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展. 气象学报, 2012, 70(3): 312-337.
- [10] 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.
- [11] 张红雨. 山西省域龙卷风发生特征及相关分析. 研究与探讨, 2007, 8: 39-42.

# 城市化降水效应研究进展

谈建国 顾问

(上海市气象科学研究所, 上海 200030)

**摘要:** 大量观测事实已经证实城市化降水效应的存在。城市化进程通过改变城市下垫面属性、城郊热平衡差异、局地环流等, 从而影响了降水的时空分布。随着各国城市化的加剧, 城市化对降水的影响越来越受到科学家和城市规划者的关注。回顾了城市影响降水强度和降水空间分布的观测事实, 城市化降水效应的机制以及研究方法, 提出了城市化降水效应研究中存在的问题, 并对今后的研究方向作了展望。

**关键词:** 城市化, 降水, 城市边界层, 研究进展

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.06.003

## Research Progress on Urban-Induced Rainfall Effect

Tan Jianguo, Gu Wen

(Shanghai Institute of Meteorological Science, Shanghai 200030)

**Abstract:** A large number of observations have proven the existence of urbanization precipitation effect. Urbanization process affects the precipitation distribution by the process of urban underlying surface properties changing, urban-suburban thermal equilibrium difference and local circulation. With the city sprawling, scientists and city planners are increasingly focusing on the influence of precipitation by urbanization. This paper reviews the observations of precipitation intensity and spatial distribution differences, mechanism and research methods for urbanization effect. Finally, the problems and further research directions of urbanization precipitation effect are discussed.

**Keywords:** urbanization, rainfall, urban boundary layer, research progress

### 0 引言

城市化是指人口向城市地区集中, 致使城市区域不断扩张的过程。世界城市化发展的经验表明, 城市化快速发展是任何一个国家或地区无法逾越的阶段<sup>[1]</sup>。据联合国估计, 世界人口已超70亿, 其中一半生活在城市区域。预计到2025年, 有近50亿人将生活在城市<sup>[2]</sup>。城市化给城市环境、基础设施建设带来新机遇和新挑战的同时, 也改变了自然环境的本来面貌。其中城市下垫面的改变是最为直接的, 城市下垫面通常是由混凝土、沥青等构成的建筑物和道路组成的, 这些表面具有较小的反照率、较大的热容量、较大的粗糙度和不透水性<sup>[3]</sup>。人类的生产生活又产生了额外的人为热源和气溶胶。城市化进程加快, 使得城市热岛等现象越来越显著, 也改变了城市局地的能量

平衡、边界层结构和大气成分, 导致局地天气、气候及环境的变化<sup>[4]</sup>。以往城市气候研究主要集中在城市热岛和环境污染方面, 近数十年来的外场试验和观测事实表明城市的迅速发展也影响着城市降水的时空分布。城市区域局地感热和潜热输送加强了大气低层的位势不稳定, 直接触发了对流; 地表温度在加强感热输送触发降水上扮演了最重要的角色, 城市下垫面的非均匀性加强了降水的局地性; 局地对流降水的水汽来源于地表的蒸发和低层风场辐合时水汽的向上输送<sup>[5]</sup>; 沿海城市海风锋和城市热岛可对最大降水落区起到触发机制或“诱导”、增幅作用<sup>[6]</sup>, 城市对气候的影响不仅限于以上方面。城市化效应改变了城市局地环流状况, 影响了降水的分布和强度。本文回顾了城市影响降水的观测事实、城市化降水效应的机制和研究方法, 最后提出了城市化降水效应研究中存在的问题并对今后的研究方向作了展望。

### 1 城市影响降水的强度和空间分布

城市的迅速发展改变局地环流状况, 影响城市降水的时空分布, 已引起了广泛关注。周淑贞<sup>[7]</sup>在我国首先提出了城市“五岛”效应, 其中包括“雨岛”,

收稿日期: 2014年3月12日; 定稿日期: 2014年7月10日  
 第一作者: 谈建国(1969—), Email:jianguot@21cn.com  
 资助信息: 国家自然科学基金(41275021); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306010, GYHY201306055); 上海市气象局研究型科研专项(YJ201301, YJ201303)

许多研究都发现城市化导致大城市降水量和强降水事件增多。例如：周建康等<sup>[8]</sup>将南京雨量站1922—1999年雨量分为7个阶段进行统计分析，发现该区域发生大雨、暴雨的频率及年降水量均有增加的趋势。廖镜彪等<sup>[9]</sup>统计了广州51年降水资料发现城市化造成广州大雨、暴雨和大暴雨等强降水日数增加。更多国外文献记载了城市化影响降水的分布，城市有使城区及其下风方向降水增多的效应。Changnon<sup>[10]</sup>用美国伊利诺伊州乌尔班纳1950—1959年的降水资料绘制了等雨量图，发现该市东部（下风方向）的降水量大于城市中心和其他区域。这是最早直接指出城市化对降水有影响的文章。Huff等<sup>[11]</sup>分析了美国圣路易斯长期降水资料后发现，在城市及其下风方向，月平均和季平均降水量以及降水天气现象的发生频率，明显高于周围邻近地区；这种降水分布的异常在夏季最显著，并且表现出随着城市化进程有进一步增强的趋势。20世纪70年代在Changnon的建议下，美国实施了METROMEX计划，目标是研究大城市对中尺度和对流性降水的影响。METROMEX计划的主要研究结果表明，城市效应导致了暖季降水增加，在大城市及其下风方向50~75km范围降水要比其他地方增加5%~25%，降水增加的范围和强度与城市规模有关<sup>[12]</sup>，城市对降水分布的影响<sup>[13]</sup>见图1；这一结果得到了许多研究的证实<sup>[14-18]</sup>。除了在美国，Molders<sup>[19]</sup>对德国莱比锡和德累斯顿的研究同样发现，城市两边外侧缘和下风方向降水增加。

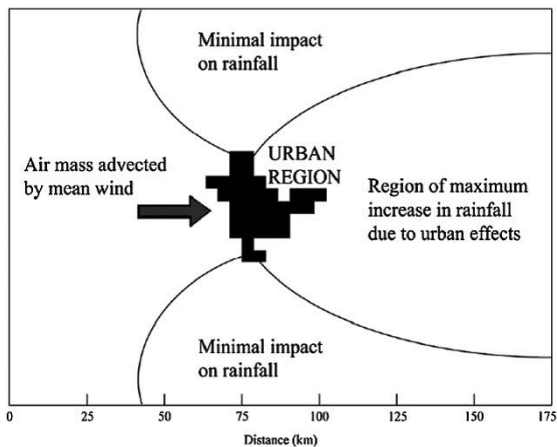


图1 城市影响降水分布示意图（引自参考文献[13]）

城市影响降水分布的研究在国内相对较少。吴息等<sup>[20]</sup>通过对1996年北京城区与郊区一年自动站小时降水数据的分析指出，由于城市的热力和动力作用，城市效应对下风区短历时降水雨量增加的影响最明显，而在市中心短历时降水暴雨的发生概率和强度增加最为显著。周丽英等<sup>[21]</sup>利用40年的降水资料从气候学角

度分析了上海城郊降水的空间差异，发现市区降水增加率为郊区的1.5倍，且城、郊降水差异呈现了扩大趋势。不仅单个城市，城市群对降水分布也有影响。赵文静等<sup>[22]</sup>基于TRMM卫星探测资料研究了长江三角洲降水特征，发现长三角城市群所在区域与邻近平原地区相比有明显的降水增幅，夏季降水高值中心在城市群下风方向，上海市表现最为突出，降水高值中心在上海市中心下风方向约60~70km。

## 2 城市化降水效应的机制

城市是如何增强降水并影响其局地性分布的？

Changnon等<sup>[12]</sup>在对METROMEX观测资料分析和数值模拟的基础上，指出城市对夏季中等以上强度的对流性降水的增雨效果尤其显著，并提出了城市增强降水并影响其分布的三种假说机制：一是城市热岛效应；二是城市下垫面和冠层的摩擦效应；三是城市凝结核效应。虽然这三种城市化增加降水的机制存在不确定性，但是几十年来仍不断地出现新的研究结果支持METROMEX计划的研究结论。

### 2.1 城市热岛效应

城市热岛效应使城市上空层结不稳定，容易形成对流云和对流性降水。城市热岛效应对降水的影响一般体现在夏季（暖季），尤其是盛夏弱风、无云的情况下。Atkinson<sup>[23]</sup>分析了1959年8月21日在伦敦发生的雷暴，首次将城市热岛和雷暴的发生联系起来。Changnon<sup>[24]</sup>分析了圣路易斯市连续5年的天气过程，发现热岛环流可以触发并增强雷暴、强降水和强风暴等对流性天气，改变了云和风暴的动力结构。Shepherd等<sup>[15, 25]</sup>发现城市热岛向下风方向传播时会促进低云生长，城市热岛效应改变边界层结构主要通过以下途径（图2）：（1）使近地面的气温升高，层结更加不稳定；（2）城市表面强迫使热空气上升，城市表面由于风的辐合形成相对低压；（3）城市热岛环流和海陆风环流耦合，在城市或者城市下风方向形成边界层辐合线<sup>[26]</sup>。

Vukovich等<sup>[27]</sup>对城市热岛效应下边界层气象要素的变化做了敏感性试验，发现在有城市的情况下近地层的温度廓线是超绝热的，城市热岛越强近地面的垂直风速就越大，层结越趋于不稳定。Bornstein等<sup>[28]</sup>研究发现纽约城市对夏季白天雷暴的形成和移动两方面都有影响。在平静的区域流场情况下，纽约热岛激发对流活动。Bornstein等<sup>[14]</sup>对1999年7月26日发生在亚特兰大的对流过程进行分析，发现雷暴发生之前城市热岛强度在2.0~2.5K，城市热岛形成的水平风场辐合可达 $1.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。Dixon等<sup>[29]</sup>也发现在亚特兰大夜间，热

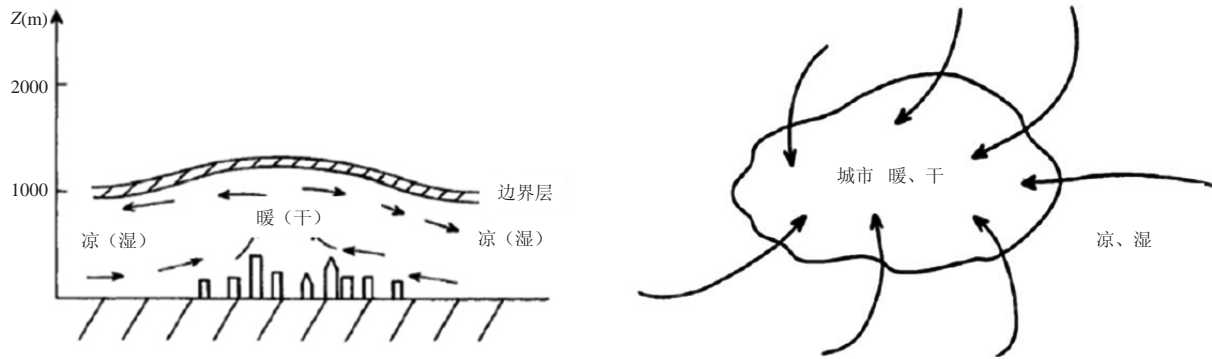


图2 城市热岛影响边界层结构示意图(引自参考文献[26])

岛在适当的稳定性和湿度条件下可以激发雷暴。Guo等<sup>[30]</sup>对北京2003年7月4日的降水过程做了分析,发现城市化以后感热通量增加但是潜热通量减少,降水空间分布会更加集中。孙继松等<sup>[31]</sup>从暴雨个例分析角度,研究了城市边界层过程在北京2004年7月10日局地暴雨过程中的作用,发现在夏季晴空背景下,城市热强迫有利于形成城市中尺度低空风场辐合线,并加强边界层内中心城区风场垂直切变,这种强迫有利于对流降水的维持。

## 2.2 城市下垫面和拖曳效应

随着城市化进程的推进,建筑物的密度和高度不断增加。城市高楼林立,城市下垫面的拖曳作用可使经过城市的气流减速。下垫面的粗糙度与建筑物高度有关,城市建设导致了城市空气动力学粗糙度明显增大。刘罡等<sup>[32]</sup>对南京2005年夏季的边界层风场做了分析,发现市区观测点的摩擦速度平均值为0.55m/s,郊区为0.4 m/s。市区摩擦速度比郊区大,反映出城市建筑物扰动平均气流场而产生机械湍流,加强了湍流运动,使得城市近地层中的动量通量增大。张宁等<sup>[33]</sup>用一个湍流能量闭合的三维城市街渠气流模式对一个居民区的建筑物群对流场结构的影响进行了诊断分析,

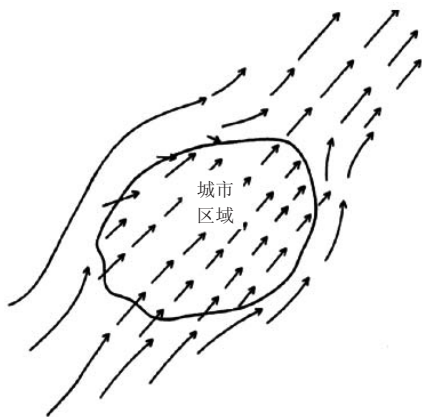


图3 城市拖曳作用造成城市区域风速减弱示意图(引自参考文献[26])

发现由于建筑物的阻挡和拖曳作用会造成城市区域风速的减弱(图3),这种作用在垂直方向上可达建筑物平均高度的2倍。

城市拖曳效应主要通过以下四个方面影响城市的降水:(1)延长天气系统滞留在城市的时间,使降水时间延长,降水强度增大<sup>[12,14,34]</sup>;(2)降低近地面风速,导致近地面风场产生辐合,触发对流降水;(3)迫使近地层的平均动能向湍流动能转化,使得城市近地层中的动量通量增大;(4)城市冠层导致的降水云团的分裂或绕流<sup>[14,35]</sup>。

Vogel等<sup>[36]</sup>对圣路易斯市的研究发现城市地表粗糙度对降水的主要影响在于改变其时空分布特征和短持续降水。Tomohiko等<sup>[37]</sup>对东京地区1999—2007年的8个短时强降水过程做了模拟,发现城市的存在使得城市背风位置有风场辐合区,辐合区输送的水汽足以抵消城市下垫面水汽供应不足而使得城市背风方向的降水偏多。Rozoff等<sup>[38]</sup>用中尺度模式模拟了1999年圣路易斯市的一个风暴过程,发现城市地表的粗糙度引起的风场辐合可以触发深厚的湿对流。Miao等<sup>[39]</sup>用WRF耦合单层城市冠层模式模拟了1996年8月1日北京市的降水过程,发现飚线经过城市时被分裂成了两个对流单体。Niyogi等<sup>[40]</sup>用雷达反射率因子对美国印第安纳波利斯市2000—2009年夏季的91个雷暴过程作了分析,发现超过60%的雷暴经过城市时结构发生了改变,经过郊区时结构发生改变的雷暴仅占25%,水平尺度较大的雷暴有在城区上空分裂以后再在市区下游合并的趋势。

## 2.3 城市热岛与海陆风、山谷风的相互作用

由于许多城市位于沿海、沿湖或者山地地区城市热岛和复杂地形的相互作用对降水的影响也多有研究。Yoshikado<sup>[41, 42]</sup>运用二维静力边界层模式模拟了日本东京的环流状况,指出由于海风锋和热岛环流的辐合,沿海的垂直速度会加强,而且是没有城市情况下

的2倍,垂直尺度加大。Yoshikado<sup>[43]</sup>发现在海陆风的影响和作用下,城市热岛会持续;若海风锋具有在城市上空滞留的倾向,更易造成风场辐合。国内,苗曼倩等<sup>[44]</sup>和李维亮等<sup>[45]</sup>运用数值模拟证实,由于海风、江(湖)风环流与城市热岛效应之间存在相互增强的过程,长江三角洲地区沿江一带容易形成水平风速辐合,并和该地区降水量的增加有直接关系。Wang等<sup>[46]</sup>通过对北京2004—2007年的加密自动站降水和风场数据进行分析,发现夏季北京市区的降水在傍晚有个高峰,这与城市热岛效应和山谷风的耦合在市区形成的风场辐合有关。Lin等<sup>[47]</sup>对台湾1994年7月22日的一次暴雨过程做了敏感性试验,发现城市热岛环流和山地迎风面的抬升作用能促发对流,且城市规模越大,该城市下风方向的降水增幅就越显著。东高红等<sup>[48]</sup>对2010年8月16日天津城区出现的一次局地强降水过程进行分析,发现城市热岛与海风锋叠加而成的辐合线能激发局地不稳定能量的释放,从而产生局地强对流天气。

## 2.4 城市气溶胶效应

城市排放的大量污染物中含有吸湿性凝结核。城市空气中的凝结核比郊区多,可能有利于降水的形成<sup>[49]</sup>。但这些凝结核对降水的形成究竟起什么作用,却仍是一个有争议的问题。Kar等<sup>[50]</sup>调查了1989—1999年云地闪资料发现城市与周边地区相比闪电密度增加,这与城市空气存在较高的PM<sub>10</sub>和SO<sub>2</sub>浓度有正相关。Rosenfeld<sup>[51]</sup>研究认为城市和工业排放的气溶胶大部分是小云滴的凝结核,小尺度的云滴碰撞粘附很弱,形成不了大雨滴,从而抑制雨雪的形成。Borys等<sup>[52]</sup>发现城市气溶胶会抑制冬季的降水,气溶胶提供了大量小尺度云滴凝结核,小尺度云滴的下落速度和碰并受到抑制,只能产生小冰晶和较弱的降雪。但是,Andreae等<sup>[53]</sup>认为气溶胶对对流降水是有促进作用的。尽管气溶胶抑制了云滴的碰并增长,但增加了云滴在空中滞留的时间,使云滴能经过凝结作用继续增长,如果有合适的上升气流,云滴可以到达较高的海拔成为冰晶,使云体变得深厚,导致闪电和对流性的强降水。Rosenfeld等<sup>[54]</sup>用显式的云微物理过程模拟了热带地区的降水过程,发现在开始阶段,气溶胶抑制暖云降水的同时也抑制了下沉气流,使得活跃的上升气流有时间产生更深厚的强对流系统。Khain等<sup>[55]</sup>针对气溶胶“动力学效应”的研究发现,由于下沉气流推迟发生以及冰相过程释放潜热的加热作用还可增强上升运动,这都有可能使降水最终出现增多。总的来说,气溶胶对城市降水的影响确实存在,

但是气溶胶对降水的抑制或者是加强要取决于云的类型、季节、气候带和城市的地理位置及地形。

## 3 城市影响降水的研究方法

### 3.1 单站分析和中尺度网观测

限于观测手段和数值模式效果等条件的制约,早期研究仅限于单站分析,对城市中某个站点进行时序观测,或者对多个城郊站点进行对比观测和统计分析,其精度和代表性不足,一般较难准确地反映出城市化对区域降水的影响,但还是得出了一些有启示性的结果,例如在北京、上海、南京和广州等大城市利用城区和郊区长时间序列的气象要素分析得出的城市化后城、郊降水的差异<sup>[7-9,20-21]</sup>。

随着中尺度网的建设,精细化自动气象站网的资料逐渐运用到分析城市对雷暴、降水分布等的影响中来。20世纪70年代在Changnon等<sup>[12]</sup>的建议下,美国实施了METROMEX计划,旨在研究由于城市化导致的城市气象要素和天气气候的改变。该计划以圣路易斯市为中心约80.5km半径范围内建立了天气观测网,其中包括250个雨量筒、24个温-湿记录仪、6个雷暴声频探测器、3部探空仪、2部雷达和大气化学分析仪器等,试验持续了5年。20世纪90年代为了对1996年的奥林匹克运动会进行气象保障,美国实施了亚特兰大观测计划(PROJECT ATLANTA)。美国国家气象局在亚特兰大市建立了由52个地面站组成的中尺度网。其中大部分站每15min采集一次温度、相对湿度、降水、风向风速数据<sup>[56]</sup>。这两次大规模系统性的观测计划为城市化降水效应的研究提供了大量珍贵数据,并诞生了很多经典的原创性的研究进展。

### 3.2 卫星和地面遥感观测

近年来,随着遥感技术的蓬勃发展,许多学者已经开始利用遥感手段来分析城市化对降水的影响。与台站资料相比,遥感探测得到的降水资料具有空间分布均匀、区域代表性强等优点,因此,更适合于分析城市及其周边区域的降水情况。Shepherd等<sup>[15]</sup>采用TRMM卫星资料分析了1998—2000年美国10个大城市夏季降水分布,发现大城市下风30~60km处的月降水率平均增加28%,市区增加约为5.6%。Mote等<sup>[17]</sup>用Doppler雷达资料分析发现由于城市降水效应亚特兰大东部郊区(下风方)夏季夜间和早晨这段时间内的降水增多30%。江志红等<sup>[57]</sup>基于CMORPH卫星降水资料分析了长江三角洲地区南京、杭州、上海和苏州等主要城市的降水分布特征,结果表明:长三角城市效应主要表现在夏半年降水强度和空间分布上,在700hPa平均引导气流控制下,城市中心和下风向地区的夏半

年降水强度比上风向地区增加5%~15%，最大值通常位于城市中心下游20~70 km。

### 3.3 综合观测

无论是单站和中尺度网观测，还是卫星和地面遥感观测都是只揭示了城市或城市群是否对降水产生影响，但其原因和机制尚不清楚。近年来，国际上开展了一系列的针对城市天气研究的综合观测项目，这些观测项目都采用地面观测网、地基遥感（天气雷达、激光雷达）和卫星遥感等手段对发生在城市边界内的物理过程及其对降水的影响进行综合观测和分析，尝试从物理机制上解释城市影响降水的原因。例如：芬兰赫尔辛基Testbed关注城市及周边的中尺度预报和扩散问题<sup>[58,59]</sup>，美国休斯敦的环境气溶胶与雷暴项目（HEAT）关注城市污染物与雷暴之间的关系<sup>[60]</sup>，日本东京大都市圈对流研究（TOMACS）关注城市区域各种的中尺度过程<sup>[61]</sup>。

### 3.4 数值模拟

除了综合观测分析外，数值模式也被用到城市化降水效应的研究中。基于多种模拟手段的数值模拟研究已经证实，城市热岛效应可以对环境流场产生重要作用，从而影响降水。Thielen等<sup>[34]</sup>采用一个 $\gamma$ 中尺度模式（Clark模式）模拟巴黎地区城市地表粗糙度对对流性降水发展的影响，发现城市热通量增加和下垫面粗糙度的增加引起局地环流变化而导致市区降水增加。为了更好地表征城市下垫面变化、城市建筑物和城市人为热源等城市化因素对城市热岛、海陆风环流的影响，许多研究尝试将高分辨率的土地利用资料、城乡能量平衡模型引入到城市边界层数值模拟中<sup>[62]</sup>。Lemonsu等<sup>[63]</sup>把能量平衡模型（Town Energy Budget）耦合到Meso-NH大气模式模拟海陆风条件下法国马赛城市边界层的垂直结构。Shem等<sup>[64]</sup>采用中尺度WRF模式来模拟亚特兰大城市化对夏季雷暴的影响。与没有城市参数化方案对比，考虑了城市影响后的降水在城市下风向增加10%~13%。Gutiérrez等<sup>[65]</sup>利用WRF模式耦合了多层城市冠层模式的高分辨率uWRF模式模拟纽约的海陆风环流和城市热岛。Chen等<sup>[66]</sup>利用ARE-WRF模式耦合城市冠层模式（UCM）研究城市地表强迫和海陆风环流的相互作用。Miao等<sup>[39]</sup>运用WRF模式采用500m空间分辨率模拟分析城市过程对2006年8月1日一次局地暴雨的影响。

## 4 存在问题和展望

城市化影响了局地降水的时空分布，但以往的研究着重于对该现象的描述和对城市化降水效应可能原因的定性分析，对其中的微物理过程认识还不足。这

主要是因为：（1）缺乏高密度观测资料，尤其是缺乏对城市边界层和城市下垫面的观测。特别需要加强对城市边界层垂直廓线和边界层高度、不同下垫面能量平衡中各通量的观测，以及多部雷达、多波段雷达组合的云物理观测等。（2）降水的数值模拟研究一般侧重于中尺度，因此需要引入高分辨的城市下垫面资料、地表热量平衡、城市人为热源排放及城市边界层观测信息，发展复杂的城市冠层模式来描述实际的城市形态，城市边界层与下垫面、地-气相互作用等过程。数值模拟在城市化降水效应方面有以下问题尚待解决，包括：（1）基于地理信息系统、卫星遥感等手段将细致的建筑物三维信息和下垫面属性引入到城市冠层模式中；（2）城市人为热源参数化方案的确定；（3）城市气溶胶排放清单的引入；（4）城市水文过程的建立；（5）云物理参数化过程等。

### 参考文献

- [1] 陈波翀, 郝寿义. 自然资源对中国城市化发展水平的影响研究. 自然资源学报, 2005, 20(3): 394-399.
- [2] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Population Prospects: The 2012 Revision, Key Findings and Advance Tables. Working Paper No.ESA.P/WP.226, 2013. [http://esa.un.org/unpd/wpp/Documentation/pdf/WPP2012\\_KEY%20FINDINGS.pdf](http://esa.un.org/unpd/wpp/Documentation/pdf/WPP2012_KEY%20FINDINGS.pdf).
- [3] 寿亦萱, 张大林. 城市热岛效应的研究进展与展望. 气象学报, 2010, 70(3): 338-353.
- [4] 蒋维楣, 陈燕. 人为热对城市边界层结构影响研究. 大气科学, 2007, 31(1): 37-47.
- [5] 李昉英, 宇如聪, 傅云飞, 等. 一次热对流降水成因的分析和模拟. 气象学报, 2008, 66(2): 190-202.
- [6] 束炯. 上海城市在热岛和海风锋影响下特大暴雨的初步分析. 华东师范大学学报(自然科学版), 1987, (4): 81-87.
- [7] 周淑贞. 上海城市气候中的“五岛”效应. 中国科学 化学, 1988, 18(11): 1227-1234.
- [8] 周建康, 黄红虎, 唐运忆, 等. 城市化对南京市区域降水量变化的影响. 长江科学院院报, 2003, 20(4): 44-46.
- [9] 廖镜彪, 王雪梅, 李玉欣, 等. 城市化对广州降水的影响分析. 气象科学, 2011, 31(4): 384-390.
- [10] Changnon S A. A climatological evaluation of precipitation patterns over an urban area// Air over cities. Technical Report A 62-65. Washington D C: US Public Health Service, 1962, 37-67.
- [11] Huff F A, Vogel J L. Urban, topographic and diurnal effects on rainfall in the St. Louis region. J Appl Meteor, 1978, 17(5): 565-577.
- [12] Changnon S A, Semonin R G, Auer A H, et al. METROMEX: A review and summary (Meteorological Monographs Volume 18, No. 40). Boston: Amer Meteor Soci, 1981.
- [13] 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 and Climato, 2009, 48: 251-269.
- [14] Bornstein R, Lin Q. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies. Atmos Environ, 2000, 34: 507-516.
- [15] 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.
- [16] Shepherd J M. A review of current investigations of urban induced rainfall and recommendations for the future. Earth Interactions, 2005, 9: 1-7.
- [17] Mote T L, Lacke M C, Shepherd J M. Radar signatures of the urban effect on precipitation distribution: A case study for

- Atlanta, Georgia. *Geophysical Res Letters*. 2007, 34, L20710. DOI:10.1029/2007GL031903.
- [18] Hand L, Shepherd J M. An investigation of warm season spatial rainfall variability on Oklahoma City: Possible linkages to urbanization and prevailing wind. *J Appl Meteor Climatol*, 2009, 48: 251-269.
- [19] Molders N. Landscape changes over a region in East Germany and their impact upon the processes of its atmospheric water-cycle. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 1998, 68: 79-98.
- [20] 吴息, 王晓云, 曾宪宁, 等. 城市化效应对北京市短历时降水特征的影响. *南京气象学院学报*, 2000, 23(1): 68-72.
- [21] 周丽英, 杨凯. 上海降水百年变化趋势及其城郊的差异. *地理学报*, 2001, 56(4): 467-476.
- [22] 赵文静, 张宁, 汤建平. 长江三角洲城市带降水特征的卫星资料分析. *高原气象*, 2011, 30(3): 668-674.
- [23] Atkinson B W. A preliminary investigation of the possible effect of London's urban area on the distribution of thunder rainfall, 1951-1960. *Trans Inst Brit Geogr*, 1968, 44: 97-118.
- [24] Changnon S A. Urban effects on Severe Local Storms at St.Louis. *J Appl Meteor*, 1978, 17: 578-586.
- [25] Shepherd J M, Burian S J. Detection of urban-induced rainfall anomalies in a major coastal city. *Earth Interactions*, 2003, 7(4): 1-17.
- [26] Cotton W R, Pielke R A. Inadvertent human impacts on regional weather and climate. *Human Impacts on Weather and Climate*, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007, 73-148.
- [27] Vukovich F M, Dunn J W. A theoretical study of the St. Louis heat island: Some parameter variations. *J Appl Meteor*, 1978, 17: 1585-1594.
- [28] Bornstein R, LeRoy M. Urban barrier effects on convective and frontal thunderstorms. Preprint volume, Fourth AMS Conference on Mesoscale Processes, Boulder, CO, 25-29 June, 1990.
- [29] Dixon P G, Mote T L. Patterns and causes of Atlanta's urban heat island-initiated precipitation. *J Appl Meteor*, 2003, 42(9): 1273-1284.
- [30] Guo X L, Fu D H, Wang J. Mesoscale convective precipitation system modified by urbanization in Beijing City. *Atmospheric Research*, 2006, 82: 112-126.
- [31] 孙继松, 王华, 王令, 等. 城市边界层过程在北京2004年7月10日局地暴雨过程中的作用. *大气科学*, 2006, 30(2): 221-234.
- [32] 刘罡, 孙鉴宇, 蒋维楣, 等. 城市大气边界层的综合观测研究——实验介绍与近地层微气象特征分析. *中国科学技术大学学报*, 2009, 39: 23-32.
- [33] 张宁, 蒋维楣, 王晓云. 城市街区与建筑物对气流特征影响的数值模拟研究. *空气动力学学报*, 2002, 20(3): 339-342.
- [34] Thielen J, Wobroch G W, Mestayer A, et al. The possible influence of urban surfaces on rainfall development: A sensitivity study in 2D in the meso-  $\gamma$ -scale. *Atmos Res*, 2000, 54: 15-39.
- [35] Loose T, Bornstein R D. Observations of mesoscale effects on frontal movement through an urban area. *Mon Wea Rev*, 1977, 105(5): 563-571.
- [36] Vogel J L, Huff F A. Relation between the St.Louis urban rainfall anomaly and synoptic weather factors. *J Appl Meteor*, 1978, 17: 1141-1152.
- [37] Tomohiko I, Takeki I, Hiroshima A. Diagnostic study of the effects of a large city on heavy rainfall as revealed by an ensemble simulation: A case study of central Tokyo, Japan. *J Appl Meteor*, 2011, 50: 713-728.
- [38] Rozoff C M, Cotton W R, Adegoke J O. Simulation of St. Louis, Missouri, land use impacts on thunderstorms. *J Appl Meteorol*, 2003, 42: 716-738.
- [39] Miao S G, Chen F, Li Q C. Impacts of urban processes and urbanization on summer precipitation: A case study of heavy rainfall in Beijing on 1 August 2006. *J Appl Meteor*, 2011, 50: 806-825.
- [40] Niyogi D, Pyle P, Lei M. Urban modification of thunderstorms: An observational storm climatology and model case study for the Indianapolis urban region. *J Appl Meteor*, 2011, 50: 1129-1144.
- [41] Yoshikado H. Vertical structure of the sea breeze penetrating through a large urban complex. *J Appl Meteor*, 1990, 29: 878-891.
- [42] Yoshikado H. Numerical study of the daytime urban effect and its interaction with the sea breeze. *J Appl Meteor*, 1992, 31: 1146-1164.
- [43] Yoshikado H. Interaction of the sea breeze with urban heat islands of different sizes and locations. *J Meteor Soc Japan*, 1994, 72: 139-142.
- [44] 苗曼倩, 唐有华. 长江三角洲夏季海陆风与热岛环流的相互作用及城市化的影响. *高原气象*, 1998, 17: 280-289.
- [45] 李维亮, 刘洪利, 周秀骥, 等. 长江三角洲城市热岛与太湖对局地环流影响的分析研究. *中国科学: 地球科学*, 2003, 33(2): 97-104.
- [46] Wang J L, Zhang R H, Wang Y C. Areal differences in diurnal variations in summer precipitation over Beijing metropolitan area. *Theor Appl Climatol*, 2012, 110: 395-408.
- [47] Lin C Y, Chen W C, Liu S C, et al. Numerical study of the impact of urbanization on the precipitation over Taiwan. *Atmos Environ*, 2008, 42: 2934-2947.
- [48] 东高红, 刘一玮, 孙蜜娜, 等. 城市热岛与海风锋叠加作用对一次局地强降水的影响. *气象*, 2013, 39(11): 1422-1430.
- [49] Rosenfeld D. New insights to cloud seeding for enhancing precipitation and for hail suppression. *J Wea Mod*, 2007, 39: 61-69.
- [50] Kar S K, Liou Y A, Ha K J. Aerosol effects on the enhancement of cloud-to-ground lightning over major urban areas of South Korea. *Atmos Res*, 2009, 92(1): 80-87.
- [51] Rosenfeld D. Suppression of rain and snow by urban air pollution. *Science*, 2000, 287: 1793-1796.
- [52] Borys R D, Lowenthal D H, Mitchell D L. The relationships among cloud microphysics, chemistry and precipitation rate in cold mountain clouds. *Atmos Environ*, 2000, 34(16): 2593-2602.
- [53] Andreae M O, Rosenfeld D, Artaxo P, et al. Smoking rain clouds over the Amazon. *Science*, 2004, 303: 1337-1341.
- [54] Rosenfeld D, Ulbrich C W. Cloud microphysical properties, processes, and rainfall estimation opportunities. *Meteorological Monographs*, 2003, 30: 237-258.
- [55] Khain A, Rosenfeld D, Pokrovsky A. Aerosol impact on the dynamics and microphysics of deep convective clouds. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2005, 131(611): 2639-2663.
- [56] 梁丰, 陈明轩, 王玉彬. 近两届奥运会气象服务保障综述. *气象*, 2002, 28(10): 3-8.
- [57] 江志红, 唐振飞. 基于CMORPH资料的长三角城市化对降水分布特征影响的观测研究. *气象科学*, 2011, 31(4): 355-364.
- [58] Dabberdt W F, Koistinen J, Poutiainen J, et al. The Helsinki Mesoscale Testbed - An invitation to use a new 3-D observation Network. *Bull Amer Meteor Soc*, 2005, 86, 906-907.
- [59] Koskinen J T, Poutiainen J, Schultz D M, et al. The Helsinki Testbed: A mesoscale measurement, research, and service platform. *Bull Amer Meteor Soc*, 2011, 92: 325-342.
- [60] Orville R, Zhang R, Nielsen G J, et al. Houston Environmental Aerosol Thunderstorm (HEAT) Project. Department of Atmospheric Sciences, Texas A&M University, College Station, TX, 2013. [http://atmo.tamu.edu/ciams/heat/HEAT\\_plan.pdf](http://atmo.tamu.edu/ciams/heat/HEAT_plan.pdf).
- [61] Maki M, Misumi R, Nakatani T, et al. Tokyo Metropolitan Area Convection Study for Extreme Weather Resilient Cities (TOMACS). ERAD 2012-The Seventh European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, 2013. [http://www.meteo.fr/cic/meetings/2012/ERAD/extended\\_abs/NET\\_236\\_ext\\_abs.pdf](http://www.meteo.fr/cic/meetings/2012/ERAD/extended_abs/NET_236_ext_abs.pdf).
- [62] Ohashi Y, Kida H. Local circulations developed in the vicinity of both coastal and inland urban areas: A numerical study with a mesoscale atmospheric model. *J Appl Meteor* 2002, 41: 30-45.
- [63] Lemonsu A, Bastin S, Masson V, et al. Vertical structure of the urban boundary layer over Marseille under sea-breeze conditions. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 118: 477-501.
- [64] Shem W, Shepherd J M. On the impact of urbanization on summertime thunderstorms in Atlanta: Two numerical model case studies. *Atmos Res*, 2009, 92(2): 172-189.
- [65] Gutiérrez E J, Gonzalez J E, Bornstein R D, et al. Numerical simulations of sea breeze circulations and urban heat islands in NYC with a high resolution urban-mesoscale model(uWRF). Ninth symposium on the urban environment, 5, August, 2010.
- [66] Chen F, Miao S, 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.

# CFD技术在我国城市气候环境微尺度问题中的应用

李磊<sup>1</sup> 胡非<sup>2</sup> 刘京<sup>3</sup>

(1 深圳市气象局深圳市国家气候气象台, 深圳 518040; 2 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室, 北京 100029; 3 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 从城市风环境、热环境及空气污染等多个方面回顾了计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 技术在我国城市气候环境微尺度问题有关研究中的应用。通过回顾可发现, 当城市气候环境研究着眼于城市街区尺度和城市冠层内部时, CFD可充分发挥其描述复杂几何形体的能力, 给出街区内部的热力、动力以及物质扩散的细节, 具有中尺度模式难以比拟的优势。我国在本领域的研究起步较晚, 但近二十年来由于高速城市化进程所激发的强烈需求而发展迅速, 已有大量研究在此领域开展并取得成果。未来随着高性能计算机计算能力的逐渐提高, CFD有望在大气环境质量预报、机场风切变预报以及风能评估等多个领域中投入业务应用。

**关键词:** 计算流体力学, 城市气候环境, 微尺度

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.06.004

## Application of CFD Technique on Micro-Scale Issues in Urban Climatic Environment Researches in China

Li Lei<sup>1</sup>, Hu Fei<sup>2</sup>, Liu Jing<sup>3</sup>

(1 Shenzhen National Climate Observatory, Municipal Meteorological Bureau of Shenzhen, Shenzhen 518040

2 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 School of Municipal Environment Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract:** Covering such aspects as urban wind environment, urban thermal environment and air pollution, the application of computational fluid dynamics (CFD) technique is reviewed on the micro-scale issues in urban climatic environment researches in China. Through the review it is found that when urban climatic environment researches focus on the urban neighborhood scale and focus on the phenomena within the urban canopy layer, CFD technique has special capabilities in describing complex geometries and provides the details of thermal, dynamic and diffusion processes within the urban blocks, which cannot be realized by meso-scale models. Generally speaking, the initiation of researches in this field in China is relatively late, but the progress made over the last 20 years is quite rapid and the achievements in this field are quite productive due to the strong demand inspired by the rapid urbanization process of China. In the future, along with the improvement of the capability of high performance computer, it is expected that CFD technique will be applied in many operational jobs, such as atmospheric environment forecasting, wind shear forecasting in airports and wind energy assessment.

**Keywords:** computational fluid dynamics (CFD), urban climatic environment, micro-scale

### 0 引言

近30年来, 我国经历了快速的城市化进程, 根据中国社会科学院发布的《城市蓝皮书: 中国城市发展报告》, 2011年我国城镇人口已达到6.91亿人, 城

镇化率达到了51.27%。快速的城市化进程, 对我国城市气候和环境造成了明显的影响, 为缓解城市化在气候环境方面的不利影响, 为政府决策部门提供科技支撑, 近年来国内在城市气候环境科学领域展开了大量研究, 并取得了丰硕的成果<sup>[1-5]</sup>。

城市气候环境虽然仅是大气科学中的一个分支, 但也包含非常丰富的研究内容, 当前广义的城市气候环境问题已经从早期的“五岛”(热岛、雨岛、混浊岛、干岛和湿岛)效应拓展到整个城市边界层的大气

收稿日期: 2014年1月2日; 修回日期: 2014年3月9日

第一作者: 李磊(1977—), Email: chonp@163.com

资助信息: 国家自然科学基金项目(51278308); 城市气象科学研究基金(UMRF2013(LH)05)

物理环境与化学环境问题，其本身也包含了若干更细的分支。近20年来，有大量研究集中在城市冠层内的微尺度问题上。城市冠层内的微尺度问题，指空间尺度从几米到十千米范围内的问题。从数值模拟角度而言，在这个尺度范围内科里奥利（Coriolis）力不再重要，但对于几何形态复杂的下垫面，不能再简单地通过参数化来解决，必须通过足够复杂而精确的边界条件来描述。对于中尺度大气问题来说，城市的影响可以通过添加人工热源和改变计算网格的动力学粗糙度来解决<sup>[2]</sup>，但对于深入城市冠层内部的微尺度问题，则必须考虑另外的方法。

计算流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）是一种研究流体热-动力学问题的技术，利用CFD建立研究对象的计算模型，将流体动力学应用于该模型进行计算，可以分析流体在该模型上的动力学和热力学行为。由于具有一些中尺度模式不具备的特点，CFD已被广泛应用于与城市冠层内微尺度问题有关的研究，本文对国内在这一领域的研究工作做了详细回顾。

## 1 CFD技术的特点

由于以研究流体流动为核心任务，CFD技术的核心内容是大气科学工作者都非常熟悉的纳维-斯托克斯（Navier-Stokes）方程组，以及围绕如何数值求解纳维-斯托克斯方程组的一系列算法方案。但是它通常还包括一些大气科学工作者较少使用的技术，如CAD（computer aided design）建模技术、非结构化网格划分技术，以及结果可视化显示技术等<sup>[6]</sup>，在数值求解方面CFD则使用了有限体积法（finite volume method, FVM）。有限差分法、有限元法和有限体积法等均属于空间离散化方法（spatial discretization method），但有限体积法更适用于非结构化网格，有助于在模拟中刻画复杂几何形体。这些特点，使得CFD能够被用于与城市冠层内微尺度问题有关的研究。同时，值得特别指出的是，由于经常被用于城市微尺度问题，CFD本身也成为微尺度的代名词，国外有些学者专门提出了CFD尺度（CFD scale）这一名词，作为与中尺度对应的名词<sup>[7]</sup>。对于城市冠层而言，CFD与中尺度模式最大的区别在于，CFD可以在模拟中“显式”地描述建筑物的存在；而中尺度模式一般只能对建筑物的影响做参数化，建筑物引起的绕流等流动在模拟中不可见，因此这种描述可称为“隐式”的。

大体上，CFD与中尺度模式的区别如表1所示，由表1可知，微尺度模式在研究对象、核心问题、关

键物理量等多个方面都存在不同，这是由CFD自身的特点所决定的。需要特别指出的是，表1所列举的区别并非是绝对的，例如国内有些科研机构同样开发了一些微尺度数值模式，这些模式在数值求解方法上并非基于FVM，但是由于采取了一些特别的技术手段，这些模式同样可以“显式”地描述建筑物的存在，且主要用于模拟城市冠层内的问题，因此在广义上它们也可归为CFD类模式。目前在国内用户较多的CFD软件包括FLUENT，CFX，PHOENICS和STAR-CD等，而自主开发的微尺度模式则主要以南京大学的USSM模式为代表<sup>[8-10]</sup>。

表1 CFD用于城市气候环境问题时与中尺度模式的主要区别

项目	CFD	中尺度模式
研究对象	城市冠层以内	城市冠层以上
核心问题	冠层内复杂几何边界和热-动力过程的精细描述	冠层与上界大气物质能量交换的参数化描述
关键物理量	风速、气温	降水、气温、风速、湿度
关注过程	湍流运动	天气演变
水汽问题	较少考虑相变	考虑水汽相变
数值方法	有限体积	有限差分
应用领域	人居环境	天气气候

## 2 CFD工具准确性的验证

在应用于任何具有实际应用价值的研究之前，数值模拟工具本身的准确性必须得到确认，对于CFD也不例外，国内外均有大量研究对CFD的准确性进行了验证。CFD的核心基础是纳维-斯托克斯方程组，而选择合适的湍流闭合方案则是准确求解纳维-斯托克斯方程组的前提。Gosman<sup>[6]</sup>指出，并没有对所有问题都普适的湍流闭合方案，针对不同研究问题，应选择相对适合的闭合方案。利用CFD研究城市气候环境问题，究竟应选择什么样的湍流闭合方案，是一个需要事先解决的问题，而风洞实验则为解决这个问题提供了必要的实验数据。Li等<sup>[11-12]</sup>利用从汉堡大学获得的单体绕流风洞资料<sup>[13]</sup>对3种湍流闭合方案——标准k-ε模型、RNG k-ε模型和realizable k-ε模型——进行了检验，发现realizable k-ε模型在单体绕流问题中，计算更准确。为验证CFD在解决热力学问题方面的可靠性，Xie等<sup>[14]</sup>采用了热力学风洞实验的数据对CFD软件FLUENT进行了验证，李磊等<sup>[15]</sup>和Li等<sup>[16]</sup>利用水槽实验<sup>[17]</sup>和热力学风洞实验<sup>[18]</sup>进行了验证，证实FLUENT确实可以较好地再现热力学风洞所观测到的数据。图1给出了李磊等<sup>[15]</sup>利用FLUENT进行数值模拟与Liu等<sup>[17]</sup>水槽实验的结果之间的对比，由图可知，选择合适的参数化方案和物理模型，CFD可以较好地再现水槽实验中的观测结果。

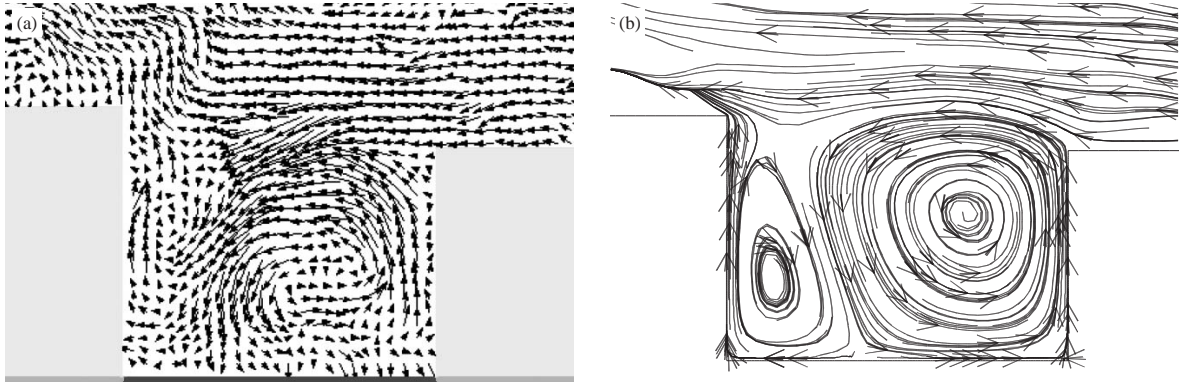


图1 水槽实验 (a) 与数值模拟 (b) 得到的流场结构<sup>[15]</sup>  
(风从右侧吹向左侧,  $Fr=0.05$ )

### 3 城市风环境问题研究

城市的局部风环境问题属于城市气候环境微尺度问题范畴, 在城市地区, 建筑物的存在可能会造成风环境的恶化, 影响行人的舒适度, 甚至对行人带来危险<sup>[19]</sup>, 对建筑物的设计方案进行风环境评价已显得日益重要。Murakami等<sup>[20]</sup>指出, CFD技术已被广泛地应用于人体尺度到城市尺度的风环境分析研究中。国外的学者在20世纪90年代即已开始利用CFD技术分析城市风环境舒适度问题<sup>[21]</sup>。国外研究认为, 不同的建筑物布局方案会对风环境造成影响, 有必要建立一套评估风环境的体系, 以便选出最佳设计方案, 而CFD技术在其中可以发挥重要作用。与风洞试验相比, CFD模拟可以获得解域空间内任意格点的资料, 而风洞实验获得的数据就相对有限; 同时, 用CFD技术完成一个典型的建筑群风环境影响评估, 通常只需2~3周的时间, 远小于风洞试验完成同样案例评估所需要的时间。

傅晓英等<sup>[22]</sup>在国内较早利用CFD研究风环境问题, 他们提出应用CFD技术对规划的建筑群进行小气候数值模拟, 预测规划方案使楼宇、街区小气候发生的改变, 以便调整方案趋利避害。周莉等<sup>[23]</sup>利用FLUENT模拟某高层建筑群附近的风环境, 得出了建筑物在不同风向条件下的风场和压力。他们的研究表明, 风在受到第一个阻碍后所形成的涡旋最为强烈, 压力梯度最大, 是最危险的受力区, 在建筑群中, 最靠近迎风面的建筑物所受负压最大, 且建筑物间的间距对建筑群周围的风环境有较大影响。唐毅等<sup>[24]</sup>应用PHOENICS对广州某住宅小区的风环境进行了模拟分析, 分析了住宅小区内不同位置风环境受周围建筑物布局、高度等情况的影响, 对住宅小区的规划设计提供了技术支持。林波荣等<sup>[25]</sup>运用PHOENICS

研究了中国传统民居四合院的建筑设计对周边区域和四合院内的风环境的影响, 得出了一系列有趣的结论, 他们的研究表明在研究中国传统民居的特点时, 引入CFD技术是深入了解其微气候效应的新手段。Li等<sup>[11]</sup>利用FLUENT建立了一个理想的街区模型(如图2所示), 以此为基础研究了高大建筑物对行人高度风环境安全性的影响。研究结果表明, 高大建筑物确实会带来风环境安全隐患, 其对行人造成伤害的可能性大小, 取决于风向、建筑物的几何尺寸以及与周边建筑物的距离等因素。Wang等<sup>[26]</sup>利用自己开发的模式评估了一个实际街区内高层建筑周边的风环境特征。相对于大风条件下的风环境安全性问题而言, 追求更好的通风能力对于大多数城市来说更具有现实意义, 李磊等<sup>[27]</sup>利用USSM研究了街区详细规划与风环境的关系, 在总结数值模拟试验结果的基础上指出, 对于街区详细规划即使保持容积率不变, 按照一定原则对方案进行调整, 仍可在一定程度上改善街区内的通风条件。同时, 他们进一步提出应建立基于数值模拟的城市街区详细规划通风评估。

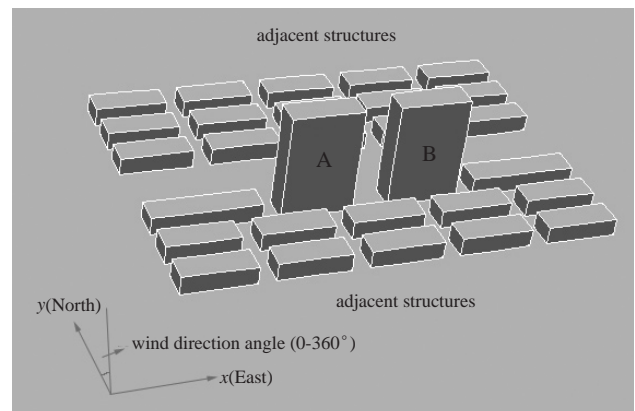


图2 利用FLUENT建立的理想街区模型<sup>[11]</sup>

国内的一系列研究表明，城市街区的风环境已成为目前比较受关注的问题，包括大气科学、建筑学及规划学在内的许多学者都在这一领域展开了研究，而CFD技术的引入可以帮助深入细致地、从定性到定量地分析和了解由于建筑或建筑群影响所产生的复杂风环境。

#### 4 城市热环境问题

近年来，由于全球变暖和城市化进程的双重作用，城市的热环境舒适度问题越来越引起人们的关注，在2012年举行的第八届国际城市气候大会上，展示了集中在这个领域的大量研究工作<sup>[28-30]</sup>。在研究城市微尺度热环境方面，CFD因其可以给出城市冠层内热-动力耦合过程的精细结构而得到了广泛的应用。

国内进行此方面研究的主要是建筑环境领域的相关学者。Li等<sup>[31]</sup>提出简化的地表面温度计算方法，然后与CFD风环境模拟相结合，从而在较小的计算负荷下进行热环境计算。刘艳红等<sup>[32]</sup>将CFD与RS技术相结合，对城市中五类常见的绿地空间格局在垂直和水平方向上进行温度场和风速场数值模拟，探讨了不同绿地空间格局与城市热环境之间的关系。宋晓程等<sup>[33]</sup>尝试在CFD模拟中导入水体与大气间热水分传输的计算新方法，研究城市水体对周边建筑热湿环境的影响（图3）。邵建涛<sup>[34]</sup>和Shao等<sup>[35]</sup>在总结URANS在进行建筑绕流提出改进的非线性k-ε模型及边界设定方

案，专门讨论建筑、路面等不透水人工表面与大气间的非稳态传热特性，进而分析其热浮力作用。另外，利用CFD模拟得到的热气候物理参数，还可进一步探讨室外人体热舒适性感觉及其分布。与气象预报中常用的一些简化舒适度指数不同<sup>[36]</sup>，建筑环境领域一般采用标准等效温度\*（standard effective temperatures, SET\*）或生理等效温度（physiological equivalent temperature, PET）等结合了人体对热湿环境生理响应的指标<sup>[37]</sup>，从而更适用于城市微尺度的舒适性研究。如Lin等<sup>[38]</sup>利用CFD研究了不同住宅区绿化条件下室外SET\*分布情况，发现由于水分蒸腾、遮阳以及风速衰减等不同因素的综合作用，树木对室外舒适度不一定起到改善作用。

总体上，目前国内利用CFD进行城市热环境研究的尚不是很多，其主要原因在于热环境问题除了受风环境影响外，还涉及到太阳辐射、城市人工排热、城市各种不同下垫面自身的热力属性及其与城市大气间的传热等大量复杂现象。另外，与风环境问题有所不同的是，热环境问题本质上是非稳态过程，进行常规的稳态模拟在理论和实际现象上都存在矛盾，而进行CFD非稳态模拟又要面临计算机性能等方面的制约。因此，研究城市热环境问题所面临的各种问题都要比单纯研究风环境问题要复杂得多，但从另一个角度看，这又正好为本领域的研究提供了充足的发展空间。

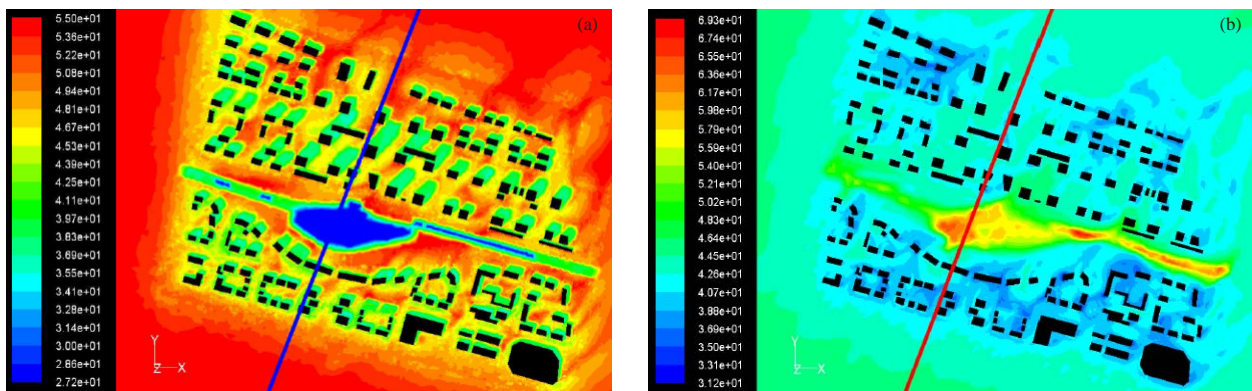


图3 CFD模拟的城市水体及其周边建筑区域内热湿环境<sup>[33]</sup>  
(a) 下垫面温度（单位：℃）；(b) 相对湿度（单位：%）

#### 5 城市空气污染问题

由于汽车尾气排放对城市大气环境的影响，城市街区微尺度的污染物输送扩散问题引起了高度重视，而这正是CFD技术被广泛应用的另一个领域。在这一领域，国外早期研究的重心放在了动力学过程<sup>[39-41]</sup>，对于热力作用的影响关注不多。但近十年来，热力作

用对物质扩散的影响已逐渐成为本领域研究的主要内容<sup>[14, 42-43]</sup>。

国内学者在本领域的进展也非常迅速，金颖等<sup>[44]</sup>尝试用FLUENT解一个经典的高架源扩散问题，他们设计了一个单点烟囱排放污染物的模型，选用标准k-ε湍流闭合模型进行计算，然后用解决这类问题的经

典高斯模型进行对比验证,证明FLUENT可以合理地模拟出单点高架源排放造成的污染状况。程雪玲<sup>[45]</sup>用FLUENT详细地研究了街道峡谷污染问题,用风洞实验数据进行验证,发现无论是风场还是污染物浓度,数值模拟和试验的结果都吻合得非常好。通过分析街区中污染物的分布,程雪玲等<sup>[46]</sup>定量地比较了湍流扩散程度与层流扩散程度的差别;另外她还比较了“开放街区峡谷”与“城市街区峡谷”的扩散能力,得出的结论是,“城市街区峡谷”由于其内部旋涡结构的影响,使得扩散能力要差一些。李磊等<sup>[47]</sup>建立了一个假想的3维街道十字路口模型,并用FLUENT模拟了两种风向条件下该街区的污染物分布情景。他们选取RNG  $k-\varepsilon$ 湍流闭合方案进行计算,并定性分析了污染物在街道十字路口内的分布情况,发现计算结果是合理的。蒋德海等<sup>[48]</sup>建立了不同形状建筑物构成的街谷模型和存在高架桥的街谷模型,然后利用FLUENT研究了街谷内的湍流参数分布和污染扩散特征。苗世光等<sup>[49]</sup>利用异模式耦合的方法,研究了城市小区气象条件与污染扩散的精细化预报问题,认为街区尺度的

污染预报在理论上是可行的,这为未来建立业务化的街区尺度污染预报系统奠定了基础。王宝民等<sup>[50]</sup>利用微尺度模式对北京商务中心区的大气环境进行了模拟,指出交通高峰时段主要道路尤其是交叉路口可能出现 $\text{NO}_x$ 浓度超标的情况。在前期研究基础上,李磊等<sup>[51]</sup>进一步研究了热力作用对街谷污染扩散的影响,他们利用FLUENT的包辛尼斯克近似模型,研究了温度层结和地表加热对街道峡谷内污染扩散能力的影响,得出结论认为即使街谷上空被逆温层覆盖,地表加热仍可有效地帮助提升街谷内的扩散能力。Li等<sup>[16]</sup>进一步研究了不同背景风速条件下街谷底部加热对于街区扩散能力的影响,他们给出了静风条件下街谷底部加热激发街谷内环流的物理过程,并指出即使是在静风条件下街谷的热力作用也可以激发出足够强的环流,能够驱散污染物(图4)。同时, Li等<sup>[16]</sup>还指出对于固定高宽比的街谷,存在一个风速阈值,当背景风速大于该阈值时,动力学作用决定了街谷内的环流特征,而当背景风速低于该阈值时,热力作用的影响则占有重要地位。

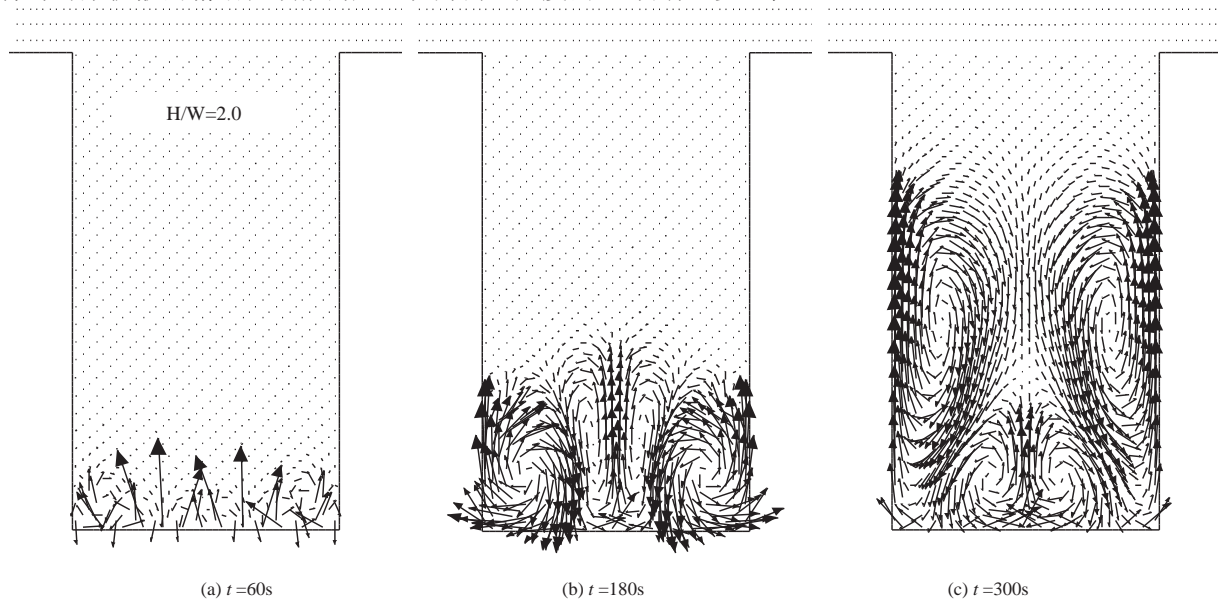


图4 FLUENT模拟的静风条件下地表加热激发街谷环流的过程<sup>[16]</sup>

可见, CFD技术的出现,使得人们能够着眼城市的局部研究微尺度空气污染问题,这些研究可以深入到城市冠层内部,分析污染物在建筑物周围和街区上空的输运和扩散规律。CFD技术的特点使得它在与街区大气环境相关的科研或业务工作中上有着良好的应用前景,诸如小区、建筑建设的环境影响评价,分析街道拓宽、建筑物改建等对环境的影响,以期得出合理建设方案等等。

## 6 其他相关研究

### 6.1 复杂地形的模拟

早期利用CFD开展城市气候环境微尺度研究,很少考虑到复杂地形的存在,而事实上,国内外均有大量城市是建立在复杂地形之上的,因此用CFD描述复杂地形的影响,成为城市气候环境微尺度研究不可回避的问题。程雪玲等<sup>[51]</sup>利用FLUENT进行了平地上不同风条件下烟羽扩散的数值模拟实验,并与相应

的风洞实验数据进行了对比,取得不错的效果。在程雪玲等<sup>[51]</sup>的研究中,还利用FLUENT的CAD建模部分进行了复杂地形网格生成的研究,研究首先建立了一个地形复杂的丘陵地区的计算模型,并对计算模型进行了结构化网格划分,从而为下一步利用CFD进行复杂地形条件下污染物扩散输送的数值试验提供了必要条件。李磊等<sup>[52]</sup>以北京的佛爷顶和我国西南某峡谷为研究对象,利用FLUENT模拟了复杂乃至陡峭地形的风场结构,他们指出“相比于普通中尺度模式,FLUENT可以更为精确地描述下垫面的复杂地形特征,因而能够在小尺度范围内得到分辨率更高且更为准确的复杂地形上的近地层风场模拟结果。”这些研究为进一步将CFD的应用延伸到复杂地形之上的城市气候环境研究打下了基础。

## 6.2 与中尺度模式的耦合

尽管CFD在描述复杂几何形体方面有着中尺度模式难以比拟的优势,但它仍然存在自己的局限性,这些局限性主要体现在两方面:一是难以描述地表热力平衡过程,二是因模拟范围较小难以获得大范围环流的背景信息。为了弥补CFD这方面的不足,李磊<sup>[53]</sup>提出了将中尺度模式与CFD耦合的思路,依靠这种方法,既可利用CFD来精细描述复杂几何形状下垫面对风、温的影响,又能利用中尺度模式获取大尺度环流的信息,并提供下垫面能量平衡计算得到的更准确的地表温度。随后,以中尺度模式RAMS和CFD软件FLUENT为工具, Li等<sup>[54-55]</sup>先后给出了北京佛爷顶和香港国际机场的成功例子。尤其是在香港国际机场的案例模拟中, Li等<sup>[55]</sup>利用RAMS与FLUENT耦合的方法研究了台风情境下建筑扰动引起的风切变问题,他们在模拟中同时考虑了复杂地形和建筑群的存在,得到了较好的模拟结果(图5)。更进一步, Li等<sup>[56-57]</sup>用RAMS与FLUENT耦合方法模拟了香港国际机场地

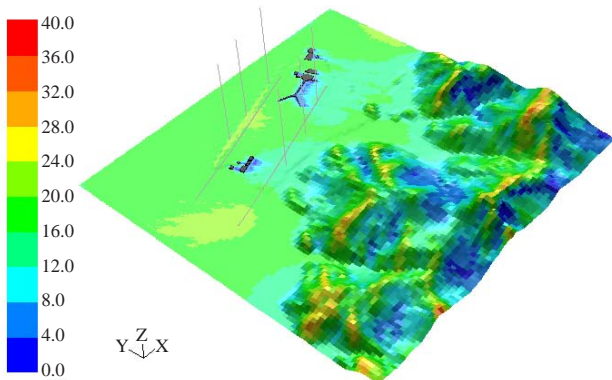


图5 RAMS/FLUENT方法模拟的香港国际机场的风速分布<sup>[55]</sup>

形引起的背风波,获得了不错的效果。在业务应用层面,苗世光等<sup>[58]</sup>建立了一个多模式嵌套的数值预报系统,将小区尺度模式与中尺度边界层模式耦合,进行青岛奥林匹克主题公园10m分辨率的风场预报,并在2008年北京奥运会青岛帆船比赛中进行了服务,取得了良好效果。Li等<sup>[59]</sup>以北京为对象,尝试将WRF与他们自行开发的基于大涡模拟(large eddy simulation, LES)方案的CFD模式进行耦合。相对于常用的雷诺平均(reynolds averaged Navier-Stokes, RANS)类型的湍流闭合方案,LES通常能获得更精确地模拟结果,但同时也需要更细的计算网格和消耗更多的计算资源。但Li等<sup>[59]</sup>采用了特别的处理方法,将关心区域的建筑物进行准确地“显式”处理,而非关心区域的区域当作拖曳粗糙元,从而节省了计算量,计算结果也与实测结果相当一致。这些工作,无疑为未来建立真正可用的CFD预测业务系统奠定了基础。

## 7 讨论与展望

结合作者在本领域的研究工作,回顾了CFD技术在我国城市气候环境微尺度问题中的应用。通过回顾可发现近十余年CFD技术已被广泛应用于我国城市气候环境微尺度问题多个方面的研究,尤其是当研究问题着眼于城市街区尺度和城市冠层内部,CFD可充分发挥其描述复杂几何形体的能力,给出街区内部的热力、动力以及物质扩散的细节,从而具有中尺度模式难以比拟的优势。

从总体来看,国外由于开展研究较早,CFD技术在城市气候环境微尺度问题领域已经被广泛地应用;在国内,虽然开展研究较晚,但近十余年来由于高速城市化进程所激发的强烈需求而发展迅速。Gosman<sup>[6]</sup>曾指出,CFD技术还远远没有发挥全部潜能,因为人们往往认为CFD技术是一种高科技而心存畏惧。然而事实上,随着计算机科学的发展,CFD软件甚至已可以在微机上流畅运行,解决大量实际问题,目前国内建筑和规划领域对CFD的广泛应用即是很好的佐证。

最后,特别值得讨论的一点在于商业CFD软件在科学研究中的应用,一直以来对于商业CFD软件用于城市气候环境领域的基础研究存在一定争议和质疑,这主要是由于商业CFD软件的源代码不公开,其核心部分只能被当作“黑箱”。同时,商用CFD软件的出现,导致一些使用者在对计算流体力学基本原理及其在城市气候环境领域的应用原则缺乏必要了解的情况,产出了大量似是而非的“研究成果”,这一现象

在工程实际应用中尤为普遍,对于这样的现象,还是值得注意的。尽管如此,我们仍应正确评价商业CFD软件在科学研究上的价值,商业CFD软件往往提供了丰富的参数设置接口,并同时提供了用户自定义函数(user defined function)接口,使得研究者可根据需要拓展CFD的功能,包括增加源项、改变流体物理属性和设置边界条件等内容。因此在作者看来,商业CFD软件实际上提供了一个以计算流体力学为核心的可拓展的平台,可帮助研究者摆脱相对枯燥和繁琐的编程,而把精力集中在所关注的科学问题本身。

关于CFD未来的发展,在研究领域,正如本文前文所述,由于当前城市微气候的热力学问题研究尚不成熟,CFD在本领域的发挥空间还较大,关于热压力、舒适度等多方面的问题都有待继续研究。除此之外,关于CFD自身如何更适用于真实大气的模拟,也值得探讨,例如如何在通用CFD软件中加入科里奥利力,以适应10km以上尺度的研究,类似的工作有待进一步开展。在业务应用领域,随着高性能计算机运算速度的不断提升,制约CFD投入实际业务应用的瓶颈正在慢慢消失。在未来,基于并行计算的CFD技术很有可能在以下几个领域逐渐投入业务应用:(1)城市街区的大气环境质量预报,在与数值预报模式耦合之后,CFD能够获得更精细的冠层内的风场与湍流结构,从而为预报汽车尾气污染提供了可能性;(2)航空风切变预报,对于建立在山地周边的机场(例如香港国际机场),可考虑利用CFD精细刻画复杂和陡峭地形的能力,进行低空的风切变预报;(3)城市地区的风能评估及预报,利用CFD预报建筑影响条件下的风能评估和风功率预报,为城市地区的风能利用示范工程(例如风光互补路灯)提供服务。当然,除此之外,还有更多可能应用的领域无法一一列举。总之,有理由相信,随着未来计算机技术的提升和新理论及算法的引入,CFD技术将有可能取得新的突破并在城市气候环境领域中得到更广泛的应用。

#### 参考文献

- [1] 徐祥德, 汤绪. 城市化环境气象学引论. 北京: 气象出版社, 2002: 284.
- [2] 杨玉华, 徐祥德, 翁永辉. 北京城市边界层热岛的日变化周期模拟. 应用气象学报, 2003, 14(1): 61-68.
- [3] 徐祥德, 丁国安, 卞林根. 北京城市大气环境污染激励与调控原理. 应用气象学报, 2006, 17(6): 815-828.
- [4] 张爱英, 任国玉, 周江兴, 等. 中国地面气温变化趋势中的城市化影响偏差. 气象学报, 2010, 68(6): 957-966.
- [5] 蒋维楣, 苗世光, 张宁, 等. 城市气象与边界层数值模拟研究. 地球科学进展, 2010, 25(5): 463-473.
- [6] Gosman A D. Developments in CFD for industrial and environmental applications in wind engineering. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 81: 21-39.
- [7] Yamada T. Numerical simulations of airflow and transport and diffusion from wind tunnel to terrain scales. The seventh international Conference on Urban Climate, Yokohama, 29 June-3 July, 2009.
- [8] 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 Science, 2004, 21: 103-112.
- [9] Miao S G, Jiang W M, Wang X Y, et al. Impact assessment of urban meteorology and the atmospheric environment using urban sub-domain planning. Boundary Layer Meteorology, 2006, 118(1): 133-150.
- [10] 蒋维楣, 王咏薇, 刘罡, 等. 多尺度城市边界层数值模式系统. 南京大学学报(自然科学版), 2007, 43(3): 221-237.
- [11] Li L, Hu F, Cheng X L, et al. The application of computational fluid dynamics to pedestrian level wind safety problem induced by high-rise buildings. Chinese Physics, 2004, 13(7): 1070-1075.
- [12] Li L, Hu F, Cheng X L, et al. Numerical simulation of the flow within and over an intersection model with Reynolds-averaged Navier-Stokes method. Chinese Physics, 2006, 15(1): 149-155.
- [13] Leiti B, Schatzmann M. Compilation of experimental data for validation purposes, CEDVAL. Hamburg: Meteorology Institute, Hamburg University. <http://www.mi.uni-hamburg.de/cedval>. 1998.
- [14] Xie X M, Liu C, Leung D Y C, et al. Characteristics of air exchange in a street canyon with ground heating. Atmospheric Environment, 2006, 40(33): 6396-6409.
- [15] 李磊, 房小怡, 张立杰. 不同气温层结条件下地面加热对街谷扩散能力的影响. 环境科学学报, 2012, 32(9): 2253-2260.
- [16] Li L, Yang L, Zhang L J, et al. Numerical study on impact of ground heating and ambient wind speed on flow field and pollutant diffusion in street canyon. Advances in Atmospheric Sciences, 2012, 29(6): 1227-1237.
- [17] Liu H Z, Liang B, Zhu F R, et al. A laboratory model for the flow in the urban street canyons induced by bottom heating. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, 20(4): 554-564.
- [18] Uehara K, Murakami S, Oikawa S, et al. Wind tunnel experiments on how thermal stratification affects flow in and above urban street canyons. Atmospheric Environment, 2000, 34(10): 1553-1562.
- [19] Ansley R W. Politics of pedestrian level urban wind control. Building and Environment, 1989, 24(4): 291-295.
- [20] Murakami S, Ooka R, Mochida A, et al. CFD analysis of wind climate from human scale to urban scale. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 81: 57-81.
- [21] He J M, Song C S. Evaluation of pedestrian winds in urban area by numerical approach. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 81: 295-309.
- [22] 傅晓英, 刘俊, 许剑峰, 等. 计算流体力学在城市规划设计中的应用. 四川大学学报(工程科学版), 2002, 34(6): 36-39.
- [23] 周莉, 席光. 高层建筑群风场的数值分析. 西安交通大学学报, 2001, 35(5): 471-474.
- [24] 唐毅, 孟庆林. 广州高层住宅小区风环境模拟分析. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2001, 33(4): 352-356.
- [25] 林波荣, 王鹏, 赵彬, 等. 传统四合院民居风环境的数值模拟研究. 建筑学报, 2002, 5: 47-48.
- [26] Wang B M, Liu H Z, Chen K, et al. Evaluation of pedestrian winds around tall buildings by numerical approach. Meteorology and Atmospheric Physics, 2004, 87: 133-142.
- [27] 李磊, 吴迪, 张立杰, 等. 基于数值模拟的城市街区详细规划通风评估研究. 环境科学学报, 2012, 32(4): 946-953.
- [28] Xuan Y L, Mochida A, Li Q, et al. Optimal building arrangement to maximize thermal acceptance of outdoors under different climates. 8<sup>th</sup> International Conference on Urban Climate and 10<sup>th</sup> Symposium on the Urban Environment, Dublin, 2012.
- [29] Johansson E, Yahia M W. Improving outdoor thermal comfort

- in warm-humid Guayaquil, Ecuador through urban design. 8<sup>th</sup> International Conference on Urban Climate and 10<sup>th</sup> Symposium on the Urban Environment, Dublin, 2012.
- [30] Matzarakis A M, Frohlich D. Application of micro-scale models for bioclimatic assessments – Examples from Freiburg. 8<sup>th</sup> International Conference on Urban Climate and 10<sup>th</sup> Symposium on the Urban Environment, Dublin, 2012.
- [31] Li X, Zhen T Y, Zhao B, et al. Numerical analysis of outdoor thermal environment around buildings. *Building and Environment*, 2004, 40: 853-866.
- [32] 刘艳红, 郭晋平, 魏清顺. 基于CFD的城市绿地空间格局热环境效应分析. *生态学报*, 2012, 32(6): 1951-1959.
- [33] 宋晓程, 刘京, 郭亮, 等. 城市水体对局地热湿气候影响的CFD初步模拟研究. *建筑科学*, 2011, 27(8): 90-94.
- [34] 邵建涛. 建筑外表面对流换热特性研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 49-90.
- [35] Shao J T, Liu J, Zhao J N. Evaluation of various non-linear k-ε models for predicting wind flow around an isolated high-rise building within the surface boundary layer. *Building and Environment*, 2012, 57(11): 145-155.
- [36] 罗晓玲, 兰晓波, 李岩瑛, 等. 人体舒适度指数预报体系研究. *干旱区资源与环境*, 2011, 18(8): 59-62.
- [37] Spagnolo J, Dear R de. A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia. *Building and Environment*, 2003, 38(5): 721-738.
- [38] Lin B R, Li X F, Zhu Y X, et al. Numerical simulation studies of the different vegetation patterns' effects on outdoor pedestrian thermal comfort. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96: 1707-1718.
- [39] Tominaga Y, Murakami S, Mochida A. CFD prediction of gaseous diffusion around a cubic model using a dynamic mixed SGS model based on composite grid technique. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 67/68: 827-841.
- [40] Walton A, Cheng A Y S, Yeung W C. Large-eddy simulation of pollution dispersion in an urban street canyon—Part I: comparison with field data. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(22): 3601-3613.
- [41] Chang C H, Meroney R N. Numerical and physical modeling of bluff body flow and dispersion in urban street canyons. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, 89: 1325-1334.
- [42] Cheng W C, Liu C, Leung D Y C. On the correlation of air and pollutant exchange for street canyons in combined wind-buoyancy-driven flow. *Atmospheric Environment*, 2009, 43: 3682-3690.
- [43] Cheng W C, Liu C H. Large-eddy simulation of turbulent transports in urban street canyons in different thermal stabilities. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2011, 99: 434-442.
- [44] 金颖, 周伟国, 阮应君. 烟气扩散的CFD数值模拟. *安全与环境学报*, 2002, 2(1): 21-23.
- [45] 程雪玲. 大气边界层内湍流扩散的数值模拟. 北京: 清华大学, 2003: 59.
- [46] 程雪玲, 胡非. 影响街区峡谷浓度扩散的因素. *城市环境与城市生态*, 2004, 17(2): 39-41.
- [47] 李磊, 胡非, 程雪玲, 等. FLUENT在城市街区大气环境问题中的一个应用. *中国科学院研究生院学报*, 2004, 21(4): 476-480.
- [48] 蒋德海, 蒋维楣, 苗世光. 城市街道峡谷气流和污染物分布的数值模拟. *环境科学研究*, 2006, 19(3): 7-12.
- [49] 苗世光, 张朝林, 江晓燕等. 城市小区气象条件与污染扩散精细预报研究. *环境科学学报*, 2006, 26(10): 1729-1736.
- [50] 王宝民, 刘辉志, 桑建国. 北京商务中心区大气环境的数值模拟. *气候与环境研究*. 2007, 12(5): 604-618.
- [51] 程雪玲, 胡非. 复杂地形网格生成研究. *计算力学学报*, 2006, 23(3): 313-316.
- [52] 李磊, 张立杰, 张宁, 等. FLUENT在复杂地形风场精细模拟中的应用研究. *高原气象*, 2006, 29(3): 621-628.
- [53] 李磊. 城市边界层的多尺度模拟研究. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2005: 101.
- [54] Li L, Zhang L J, Zhang N, et al. Study on the micro-scale simulation of wind field over complex terrain by RAMS/FLUENT modeling system. *Wind and Structure*, 2010, 13(6): 519-528.
- [55] Li L, Chan P W. Numerical simulation study of the effect of buildings and complex terrain on the low-level winds at an airport in typhoon situation. *Meteorologische Zeitschrift*, 2012, 21(2): 183-192.
- [56] Li L, Chan P W, Zhang L J, et al. Numerical simulation of a lee wave case over three-dimensional mountainous terrain under strong wind condition. *Advances in Meteorology*, 2013, Article ID 304321.
- [57] Li L, Chan P W, Zhang L J, et al. Numerical simulation of terrain-induced vortex/wave shedding at the Hong Kong international airport. *Meteorologische Zeitschrift*, 2013, 22: 317-327.
- [58] 苗世光, 孙桂平, 马艳, 等. 青岛奥帆赛高分辨率数值模式系统研制与应用. *应用气象学报*, 2009, 20(3): 370-379.
- [59] Li L, Miao S G, Zhang C L, et al. Study on micro-atmospheric environment by coupling large eddy simulation with mesoscale model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2012, 107/108: 106-117.

# MWT方法在分离台风环流中初步应用

赵华睿<sup>1,2</sup> 吴立广<sup>1</sup> 梁湘三<sup>1</sup>

(1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044; 2 大连市气象局, 大连 116001)

**摘要:** 由于越来越多研究需要从观测或者再分析资料中分离台风环流和环境气流, 尝试将多尺度窗口变换 (multiscale window transform, MWT) 方法应用于分离台风环流, 并与空间分离法和Lanczos滤波法进行了比较。理想化试验表明, MWT方法在用于对台风环流的分离时, 比另外两种方法误差小。当再分析资料中台风强度较强时, 单一分离方法都存在较大的误差。为了减小台风环流分离中的误差, 可以先利用空间分离法初步滤去台风环流, 然后再利用MWT方法或Lanczos滤波法进一步分离台风环流。

**关键词:** 台风环流, 空间分离法, 多时间尺度环流, 时间滤波

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.06.005

## Preliminary Application of the MWT Method to Separate Tropical Cyclone Circulation

Zhao Huarui<sup>1,2</sup>, Wu Liguang<sup>1</sup>, Liang Xiangsan<sup>1</sup>

(1 Nanjing University of Information Science and Technology, Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing 210044 2 Dalian Meteorological Bureau, Dalian 116001)

**Abstract:** More and more researches need to separate tropical cyclone circulation from its environment in the observation and reanalysis data. The multiscale window transform (MWT) method is applied to the separation of tropical cyclone circulation from its environment and compared with tropical cyclone spatial removal technique and Lanczos filter in time. Through using these approaches to idealized wind fields, the MWT method is better than the other two approaches in the separation of tropical cyclone circulation. It is also found that the performance of the combined approach is better than that of individual approaches. In order to obtain better results, the spatial removal technique can be used first to separate tropical cyclone circulation and then the MWT or Lanczos filters in time is used for further separation of tropical cyclone circulation.

**Keywords:** tropical cyclone circulation, tropical cyclone spatial removal technique, multi-time scale flows, filter in time

### 0 引言

在西北太平洋热带地区, 台风活动总是伴随不同时间尺度的环境气流, 这些环境气流大致可以分为三类: 周期为40~50或30~60d的Madden-Julian振荡 (MJO) [1-3], 周期为10~20d的准两周振荡[4-8], 以及3~10d的天气尺度扰动[9-10]。环境气流对台风活动的影响一直是台风研究领域的重要课题之一, 许多研究表明, 这些不同时间尺度的热带环流对台风生成、结构强度变化和路径都有重要影响[11-13]。在这些研究中, 经常需要从观测或者再分析资料中分离出台风及其环境气流。例如, Wu等[14]利用Lanczos时间滤波方法 (以下简称Lanczos滤波法) 将风场资料分为20d以

上的MJO尺度分量、10~20d的准两周振荡尺度分量和10d以下的天气尺度分量, 研究低频环流影响东海附近突然北折台风路径的机理。Hsu等[15]利用Kurihara等[16-17]提出的台风环流空间分离法, 研究了台风活动对西北太平洋季节内振荡、年际变化以及季节平均环流的贡献。

为了研究复杂的多时间尺度环流相互作用过程, Liang等[18]提出了一种新的局地多尺度窗口变换的分析方法——multiscale window transform (MWT) 方法, 目前该方法在气象领域的应用还比较少。这个方法的优点在于, 在保证局地能量不变的基础上, 将传统的平均-涡动分离法推广为可用于对三个以上尺度进行分离的方法, 由于利用了多尺度窗口转换, 滤波对象的平均状态不需要是时间上均匀或者是平稳时间序列。MWT方法首先定义代表不同时间或者空间尺度的、相互正交的窗口, 然后利用正交基的尺度转换对各尺度窗口进行重构, 从而得到代表不同时间或

收稿日期: 2013年12月1日; 修回日期: 2014年7月28日  
 第一作者: 赵华睿 (1987—), Email: huarui@nuist.edu.cn  
 通信作者: 吴立广 (1963—), Email: liguang@nuist.edu.cn  
 资助信息: 国家重点基础研究发展计划 (2009CB421503);  
 江苏省重点学科建设基金

者空间尺度的分量。MWT方法作为一种时间滤波方法，可以用来分离台风环流。本文的主要目的是介绍MWT方法在台风环流分离方面的应用。

为了评估分离台风及其环境气流方法的效果，将MWT方法与空间分离法和Lanczos滤波法的结果进行比较。虽然，后两种方法已经被广泛用于台风环流的分离，然而对于这些方法分离台风环流的效果仍缺乏了解，为了弥补这方面的不足，研究将通过理想试验来评估这些方法在分离台风环流中的效果。

## 1 资料和方法

本文主要通过理想试验来讨论台风风场的分离方法，为了能够准确了解这些方法的分离效果，理想场的构造如下：采用不随时间变化的平均风场作为台风活动的背景场，这里选用NCEP提供的FNL一日四次的700hPa风场资料，计算出2004年7—9月平均风场作为背景风场。背景风场的水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ，空间范围为 $20^{\circ}\text{S} \sim 50^{\circ}\text{N}$ ， $90^{\circ}\text{E} \sim 160^{\circ}\text{W}$ 。为了模拟台风在给定背景风场上活动，利用JTWC最佳路径资料集提供的台风中心位置和台风最大风速，在每6h的背景风场上叠加对称的人造涡旋<sup>[19]</sup>，人造涡旋在空间上半径为550km，最大风速位于110km处。

为了方便，这里简要介绍台风环流空间分离法（图1）。首先，用一个简单的三点迭代平滑方法，将原始风场分离为基本场和扰动场两部分，此时台风环流包含在分离出来的扰动场中。然后，以台风中心位置为中心，定义一个空间范围，根据切向风速 $<6\text{m/s}$ 且切向风速的径向梯度 $<4 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ 或者切向风速 $<3\text{m/s}$ 等滤波条件<sup>[16-17]</sup>将台风环流从扰动场中分离出来，扰动场中的剩余部分即为非台风环流，其中空间范围与台风强度有关<sup>[16-17]</sup>。最后，将非台风环流并入基本场，这样就分离出台风环流及其环境风场。

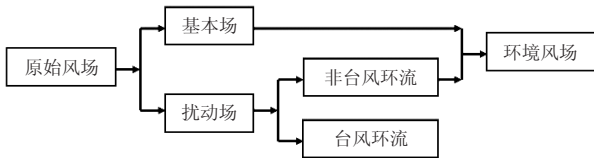


图1 台风环流空间分离法流程图

Liang等<sup>[18]</sup>提出的MWT方法在保证局地能量不变的前提下，以Meyer的多分辨率分析为基础，将传统的平均-涡动分离法推广为可用于对三个以上尺度进行分离的方法。该方法通过定义代表不同时间或者空间尺度的、相互正交的窗口，并利用正交基的尺度转换对各尺度窗口进行重构，从而得到代表不同时间或者空间尺度的分量。这与Lanczos滤波法分离出的不同

时间尺度分量相似，前人的工作<sup>[14]</sup>中已将Lanczos滤波法用于分离台风环流，因此，与Lanczos滤波法相似的MWT方法对于分离台风环流同样存在适用性。需要指出的是，MWT方法对滤波的周期有一定限制，必须是2的整数次方。为了能够得到天气尺度的台风环流，本文选择MWT方法的截断周期为8d，为了与Lanczos滤波法的效果比较，我们设计的Lanczos低通滤波器的截断周期也为8d。图2所示设计的Lanczos低通滤波器的响应函数，滤波器可以将6d以下的扰动完全滤去，但是周期为6~20d的扰动受到不同程度的歪曲。如果本文定义天气尺度扰动为全风场和低通滤波以后风场的差，周期6~8d的天气尺度扰动会有所削弱。

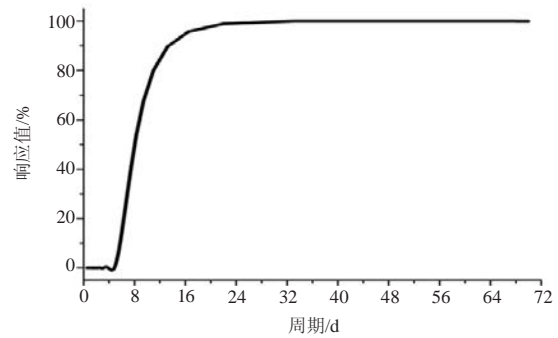


图2 截断周期为8d的Lanczos低通滤波器的响应函数

## 2 单一方法比较

首先考虑一个强度较弱的热带气旋，资料来自活动在2004年7月12日06时（UTC，下同）—16日12时期间的热带风暴圆规，该热带风暴的生命史为4d多，7月14日18时达到的强度为23m/s，中心位于 $20.1^{\circ}\text{N}$ ， $120^{\circ}\text{E}$ （图3a），台风中心附近的环境风场以偏南风为主（图3b），风速小于4m/s。从图3可以看到，三种方法在一定程度上都分离出热带风暴的气旋性环流，但是对应的环境风场与图3b有明显区别。空间分离法得到的环境风场中台风中心附近仍有明显的气旋性环流（图3d），即叠加上去的人造涡旋没有被完全分离出来。在Lanczos滤波法和MWT方法得到的环境风场中（图3f和3h），虽然不像空间分离法那样在环境风场上保留明显气旋性环流，但是台风中心附近的风场存在较为明显的气旋式切变。

为了进一步说明滤波效果，我们计算三种方法得到的环境风场与图3b的差（图4）。空间分离法得到的环境风场与背景风场之间的差异较大，最大差值风速可达6m/s，差不多是“圆规”强度的四分之一，差异较大区域出现在台风中心附近半径为300km范围内（图4a），这是由于该方法仅对台风中心附近有限区域内风场进行分离。与空间分离法比较，Lanczos滤

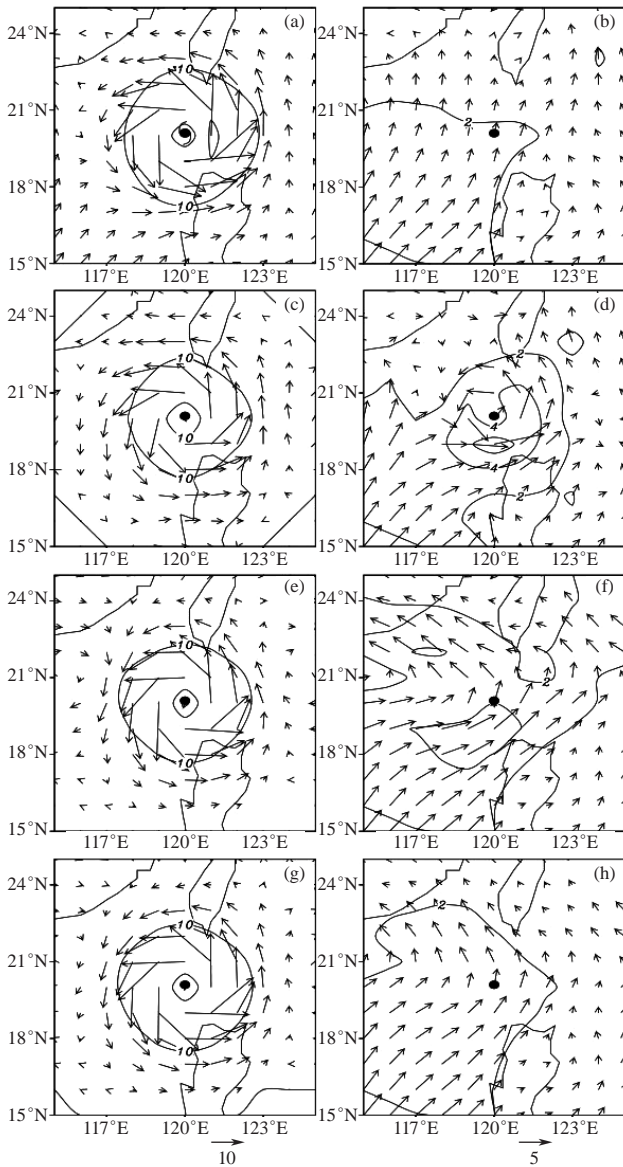


图3 2004年7月14日18时700hPa风场及等风速线(单位: m/s)  
 (a) 理想风场, (b) 背景风场, (c)、(d) 分别为空间分离法得到的台风环流和环境风场, (e)、(f) 和 (g)、(h) 分别为 Lanczos滤波法和MWT方法得到的天气尺度风场和环境风场 (台风符号及黑色圆点代表台风中心位置; 图3a, 3c, 3e和3g等值线间隔10m/s, 图3b, 3d, 3f和3h等值线间隔2m/s)

波法和MWT方法得到的环境风场与背景风场之间的差异较小(图4b和4c), 其最大差值风速分别约为3和1m/s, 虽然这两种方法是对整个区域滤波, 但是差异主要出现在路径两侧300km范围内。这种沿路径两侧的误差, 表明了时间滤波的特点, 即结果受到前后时次环流的影响。这个个例表明, 对于较弱的热带气旋, Lanczos滤波法和MWT方法优于空间分离法, 而MWT方法优于Lanczos滤波法。

在西北太平洋上经常观测到双台风活动, 为了考虑台风强度和双台风活动的影响, 我们设计了一个双

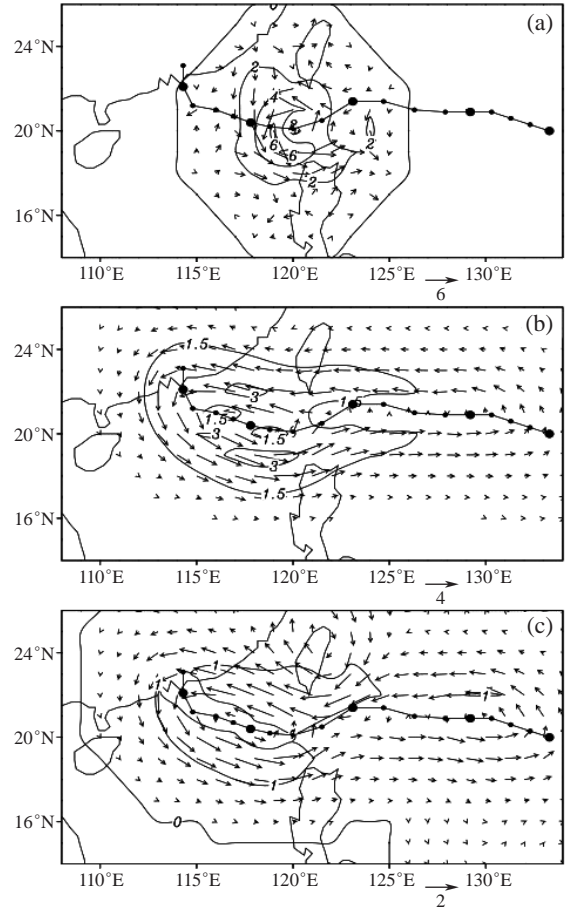


图4 图3中三种方法得到的环境风场与理想背景风场之间的差值风场

(a) 空间分离法, (b) Lanczos滤波法, (c) MWT方法 (等值线表示风速差异的大小, 单位: m/s, 间隔分别为 2, 1.5和1m/s)

台风同时出现的试验。台风个例选取发生在2004年8月的台风暹芭和艾利, 如图5所示, 23日00时台风暹芭强度达到80m/s, 这时台风艾利强度为31m/s, 两个台风中心分别位于15.2°N, 143.7°E处和22.8°N, 126.2°E处。三种方法在一定程度上也都提取出台风中心附近风速较大的气旋式环流作为台风环流, 而相应的环境风场则不同于理想的背景风场。与弱台风情况一样, 空间分离法得到的环境风场主要表现为台风中心附近仍存在气旋式环流, 特别对于东边的超强台风暹芭(图5d)。与空间分离法相比, Lanczos滤波法和MWT方法得到的环境风场误差明显较小(图5f和5h), 但是台风中心遗留的气旋性环流非常明显, 特别是在“暹芭”附近。同样将三种分离台风环流方法得到的环境风场与理想背景风场进行比较(图6)。空间分离法得到的环境风场与背景风场之间的差异较大, 两个台风中心附近最大差值风速分别达到16和8m/s, 这些较大的风速主要出现在台风中心附近300km范围

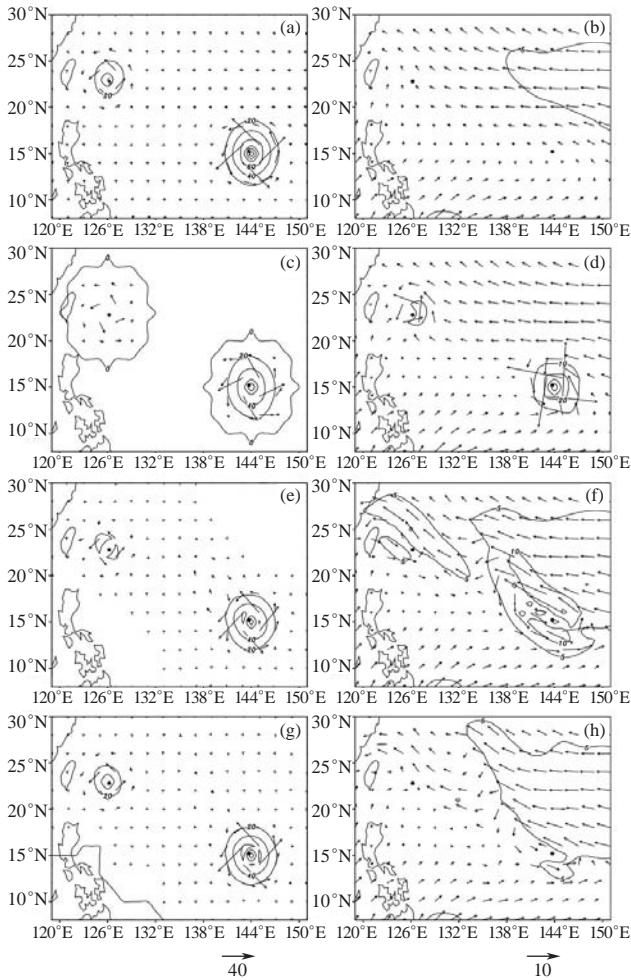


图5 同图3, 但为2004年8月23日00时  
(图5a, 5c, 5e和5g等值线间隔20m/s, 图5d等值线间隔10m/s, 图5b, 5f和5h等值线间隔5m/s)

内; Lanczos滤波法得到的环境风场与背景风场之间的差异略小些(图6b), 两个台风中心附近最大差值风速分别约为12和6m/s, MWT方法得到的环境风场与背景风场之间的差异最小(图6c), 两个台风中心附近最大差值风速分别约为6和3m/s, 这两种方法相对较大的差值风速都出现在路径两侧300km范围内。从图6可以看到, 在超强台风存在的条件下, 虽然MWT方法得到的环境风场也比弱台风大, 但是三种方法比较, MWT方法的误差最小。同时, 我们注意到对强台风环流分离时, 三种方法都有较大的误差。对于此双台风个例中的弱台风艾利, 三种方法的分离效果与其对弱台风圆规的分离效果较为相似, 比较而言, 后者分离效果略好些, 这可能与强度有关, 台风圆规的强度略弱于台风艾利。

### 3 组合方法比较

从上文分析可以看到, 分离强度较弱的热带风暴

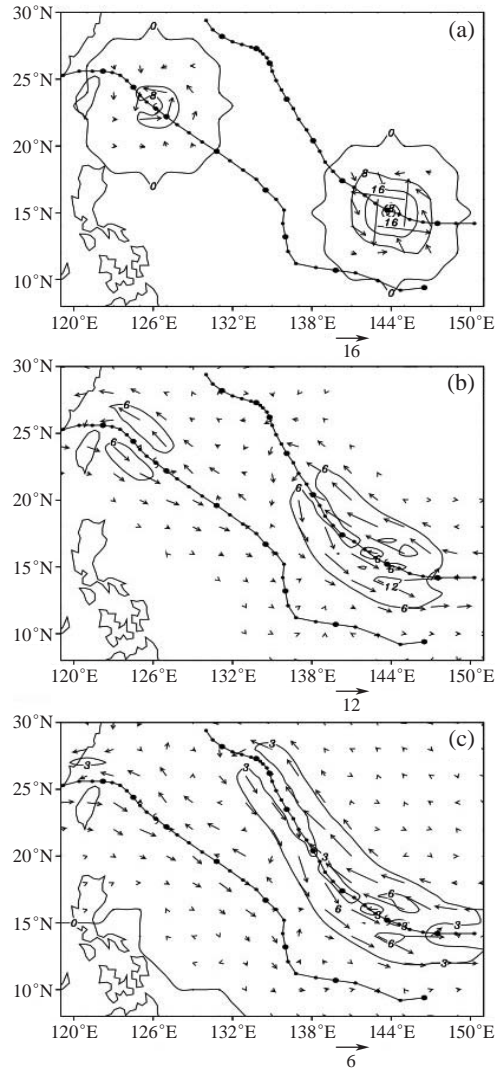


图6 图5中三种方法得到的环境风场与理想背景风场之间的差值风场

(a) 空间分离法, (b) Lanczos滤波法, (c) MWT方法  
(等值线表示风速差异的大小, 单位: m/s, 间隔分别为8, 6和3m/s)

环流时, MWT方法的误差较小, 但是当台风强度较大时, 尽管它比其他两种方法误差小, 但是分离效果仍然不是很好。Hsu等<sup>[15]</sup>的分析发现, 由于在台风活动期间没有相应强度的反气旋活动, 这种非对称效应不能通过时间滤波中平滑算子来消除。前面的试验提示我们, 可以首先利用空间分离法, 大幅度减弱台风涡旋的强度, 然后再通过时间滤波来分离台风环流及其环境气流。因此, 重复上述的两个试验, 不同之处在于将Lanczos滤波法和MWT方法分别用于经过空间分离法分离后的风场。

图7是单个台风活动个例中7月14日18时分离出来的环境风场和理想风场的差值场。虽然较大的误差仍然出现在台风路径两侧300km范围内, 但是两种组合

方法得到的低频环境风场与背景风场之间的差异都不超过1.5m/s, 明显小于单独使用一种方法时的结果, 在一定程度上减弱了时间滤波法受前后时次环流形势影响而出现的沿路径拉长的风速较大的气旋式环流。图8是对应双台风活动个例中分离出来的环境风场和理想风场的差值场。我们可以发现, 无论是分离出的台风环流还是相应的低频环境风场, 两种组合方法得到的结果都较为相似。组合空间分离法和Lanczos滤波法得到的低频环境风场与背景风场之间的差异最大不超过4.5m/s, 主要出现在台风路径两侧300km范围

内; 组合空间分离法和MWT方法得到的低频环境风场与背景风场之间的差异最大不超过3m/s, 同样出现在台风路径两侧300km范围内。由此可见, 组合方法明显优于单一方法, 空间分离法和MWT方法组合又优于空间分离法和Lanczos滤波法的组合。

#### 4 总结

台风活动于多时间尺度的环境气流中, 为了研究这些环境气流与台风环流的相互作用, 越来越多的研究需要从观测和再分析资料场中将台风环流和环境

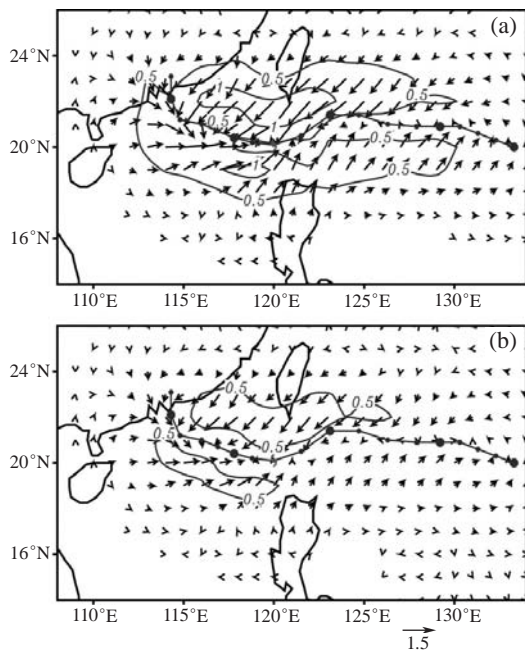


图7 同图4, 但 (a) 为空间分离法和Lanczos滤波法组合, (b) 为空间分离法和MWT方法组合 (等值线表示风速差异的大小, 单位: m/s, 间隔为0.5 m/s)

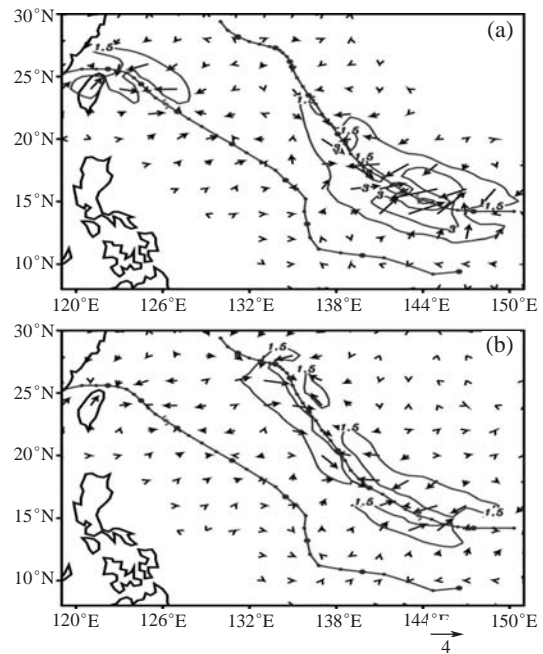


图8 同图6, 但 (a) 为空间分离法和Lanczos滤波法组合, (b) 为空间分离法和MWT方法组合 (等值线表示风速差异的大小, 单位: m/s, 间隔为1.5 m/s)

气流分离开来。本文尝试将MWT方法应用于分离台风环流, 通过理想化试验分析其分离效果, 并与空间分离法和Lanczos滤波法进行了比较, 其优缺点如表1所示。研究表明, MWT方法在用于对台风环流的分离时, 比另外两种方法误差小。当再分析资料中台风强度较强时, 单一分离方法都存在较大的误差。为了减小台风环流分离中的误差, 可以先利用空间分离

法初步滤去部分台风环流, 然后再利用MWT方法或Lanczos滤波法。研究表明, 组合空间分离法和时间滤波法优于单一的台风环流分离方法。研究进一步发现, 通过增加Lanczos滤波法的滤波系数, 可以使该方法的分离结果与MWT方法的分离结果更为接近, 但滤波系数的增加意味着将损失更长时段的资料。需要指出的是, MWT方法在资料序列的长度和滤波频率的选取上都存在一定的限制, 若要去掉这些限制, 则需要对原资料序列进行插值处理, 其分离效果需要进一步研究。

表1 不同台风环流分离方法优缺点对比表

方法	优点	缺点
单一方法		
MWT方法	不会造成资料损失; 误差小于另外两种单一方法	资料序列的长度和滤波频率的选取存在限制
空间分离法	不要求资料具有较长时间序列	误差较大
Lanczos滤波法	误差小于空间分离法, 但大于MWT方法	需要通过损失资料长度来提高滤波效果
时空组合方法	误差小于单一方法	具有参与组合的时间滤波方法的资料限制

#### 参考文献

- [1] Madden R A, Julian P R. Detection of a 40–50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. J Atmos Sci, 1971, 28: 702–708.
- [2] Madden R A, Julian P R. Description of global-scale circulation cells in tropics with a 40–50 day period. J Atmos Sci, 1972, 29:

- 1109–1123.
- [3] Madden R A, Julian P R. Observations of the 40–50-day tropical oscillation: A review. *Mon Wea Rev*, 1994, 122: 814–837.
- [4] Murakami M, Frydrych M. On the preferred period of upper wind fluctuations during the summer monsoon. *J Atmos Sci*, 1974, 31: 1549–1555.
- [5] Murakami M. Cloudiness fluctuations during summer monsoon. *J Meteor Soc Japan*, 1975, 54: 175–181.
- [6] Krishnamurti T N, Ardanuy P. 10 to 20-day westward propagating mode and "Breaks in the Monsoons". *Tellus*, 1980, 32: 15–26.
- [7] Chen T C, Chen J M. The 10–20-day mode of the 1979 Indian monsoon: Its relation with the time variation of monsoon rainfall. *Mon Wea Rev*, 1993, 121: 2465–2482.
- [8] Kiladis G N, Wheeler M. Horizontal and vertical structure of observed tropospheric equatorial Rossby waves. *J Geophys Res*, 1995, 100: 22981–22997.
- [9] Lau K H, Lau N C. Observed structure and propagation characteristics of tropical summertime synoptic scale disturbances. *Mon Wea Rev*, 1990, 118: 1888–1913.
- [10] Chang C P, Chen J, Harr P, et al. Northwestward propagating wave patterns over the tropical western North Pacific during summer. *Mon Wea Rev*, 1996, 124: 2245–2266.
- [11] Gray W M. Global view of the origin of tropical disturbances and storms. *Mon Wea Rev*, 1968, 96: 669–700.
- [12] Emanuel K. A Statistical Analysis of Tropical Cyclone Intensity. *Mon Wea Rev*, 2000, 128: 1139–1152.
- [13] Holland G J. Tropical cyclone motion: Environmental interaction plus a beta effect. *J Atmos Sci*, 1983, 40: 328–342.
- [14] Wu L, Zong H, Liang J. Observational analysis of sudden tropical cyclone track changes in the vicinity of the East China Sea. *J Atmos Sci*, 2011, 68: 3012–3031.
- [15] Hsu H H, Hung C H, Lo A-K, et al. Influence of tropical cyclones on the estimation of climate variability in the tropical western North Pacific. *J Climate*, 2008, 21: 2960–2975.
- [16] Kurihara Y, Bender M A, Ross R J. An initialization scheme of hurricane models by vortex specification. *Mon Wea Rev*, 1993, 121: 2030–2045.
- [17] Kurihara Y, Bender M A, Tuleya R E, et al. Improvements in the GFDL hurricane prediction system. *Mon Wea Rev*, 1995, 123: 2791–2801.
- [18] Liang X S, Anderson D G M. Multiscale window transform. *SIAM J. Multiscale Model. Simul*, 2007, 6: 437–467.
- [19] Wang Y. On the bogusing of tropical cyclones in numerical models: The influence of vertical structure. *Meteor Atmos Phys*, 1998, 65: 153–170.

## 新书架

### NEW BOOK

 感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



**Weather and Climate Resilience:**  
Effective Preparedness Through National  
Meteorological and Hydrological Services  
《天气与气候弹性：国家气象与水文部门  
有效准备》(丛书)

编著者：David P. Rogers 等  
出版者：World Bank Publications  
出版年：2013



《竺可桢全集》  
编著者：竺可桢

出版者：上海科技教育出版社  
出版年：2014



《中国干旱、强降水、高温  
和低温：区域性极端事件》

编著者：任福民等  
出版者：气象出版社  
出版年：2015



《中国应对气候变化的政策  
与行动：2014年度报告》

编著者：解振华（主编）  
出版者：中国环境出版社  
出版年：2015

# 一次中等强度冷空气对人群高血压疾病影响的实验研究

张书余<sup>1</sup> 张夏琨<sup>2</sup> 王春玲<sup>3</sup> 王宝鉴<sup>4</sup>

(1 河北省气象局, 石家庄 050021; 2 国家气象中心, 北京 100081;  
3 北京市气象局, 北京 100089; 4 兰州中心气象台, 兰州 730020)

**摘要:** 通过中等强度冷空气对人群高血压疾病影响的实验研究, 探讨冷空气对高血压疾病影响的机理。选取甘肃省张掖市为实验地点, 于现场研究前, 经健康筛查及血液学检查和实验过程严格的质量控制, 最后确定30例心脑血管疾病患者为病例组, 30例健康人为对照组。在2013年4月27—28日冷空气发生的过程中进行了科学实验, 分别于冷空气暴露前、过境时和过境后对60名研究对象进行了血压、去甲肾上腺素 (NE)、肾上腺素 (E) 和血管紧张素 II (ANG II) 检测, 分析了其在冷空气过境前、中、后的变化。结果表明, 冷空气暴露过程可导致人群NE、E和ANG II的代谢和分泌显著增加, 引起无论是心血管病人还是健康人血压升高, 并且在冷空气影响结束后还不能立刻恢复。通过这些生化指标分析得知, 冷空气过程导致心脑血管病人和健康人血压的升高途径主要是交感神经系统 (SNS) 的激活, ANG II浓度水平的升高, 进而促进NE的释放增加, 激活血管紧张素系统 (RAS)。通过这些系统的综合作用, 共同导致血压的升高; 初步探讨了冷空气活动导致人群血压升高的可能机理。

**关键词:** 冷空气, 去甲肾上腺素, 血管紧张素 II, 高血压, 机理

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.06.006

## Effects of Moderate Strength Cold Air Activity on Hypertensive Patients

Zhang Shuyu<sup>1</sup>, Zhang Xiakun<sup>2</sup>, Wang Chunling<sup>3</sup>, Wang Baojian<sup>4</sup>

(1 Hebei Provincial Meteorological Bureau, Shijiazhuang 050021 2 National Meteorological Centre, Beijing 100081  
3 Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089 4 Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou 730020)

**Abstract:** The mechanism underlying the effects of cold air on hypertensive disorders was investigated in an experimental study examining blood pressure and biochemical indicators. Zhangye, a city in Gansu Province, China, was selected as the experimental site. Health screening and blood tests were conducted. 30 cardiovascular disease patients and 30 healthy subjects were recruited. The experiment was performed during a cold event during April 26–29, 2013. Blood pressure, norepinephrine (NE), epinephrine (E) and angiotensin II (ANG-II) levels of the 60 subjects were evaluated 24 h before cold air activity, during cold air activity, and 24 h after cold air activity. The change before, during, and after the cold air activity was analyzed. Cold air exposure can cause a significant increase of metabolism and secretion of norepinephrine (NE), epinephrine (E) and angiotensin II (ANG-II) in subjects. Furthermore, the mean value of NE, E, ANG II and the systolic blood pressure still maintained at a high level one hour after the end of the cold air exposure. The impact of cold air exposure on the change of blood pressure was shown in both cardiovascular patients and healthy people, and the effect on the cardiovascular patients lasted longer. Cold air exposure increases blood pressure in cardiovascular disease patients and healthy subjects via the sympathetic nervous system (SNS) that is activated first and which augments ANG-II levels accelerating the release of the norepinephrine and stimulates the renin-angiotensin system (RAS). The combined effect of these factors leads to a rise in blood pressure. This paper discusses preliminarily the possible mechanism for increasing human blood pressure led by cold air.

**Keywords:** cold air, norepinephrine (NE), angiotensin II (ANG-II), hypertension disorders, mechanism

收稿日期: 2014年2月17日; 修回日期: 2014年7月10日  
第一作者: 张书余 (1958—), Email: zhangsy@cma.gov.cn  
资助信息: 国家自然科学基金项目 (40975069); 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201106034)

## 0 引言

随着近些年来世界范围内对冷空气引发心脑血管疾病的关注和研究, 冷空气已被公认为是造成心脑血管疾病发病率和死亡率增加的重要危险气象因素之

—<sup>[1-11]</sup>。世界卫生组织 (World Health Organization, WHO) 的一份研究报告表明, 较冷的中国北方高血压疾病及相关心脑血管疾病发病率明显高于较暖和的南方<sup>[12]</sup>。急性冷刺激能够引起人体血压的收缩压升高20mmHg以上<sup>[13-14]</sup>, 而短暂的低温刺激也能引起人类和动物血压的迅速增加<sup>[15-19]</sup>。许多流行病学研究结果提示在寒冷季节里低温可能会最终造成高血压疾病<sup>[20]</sup>, 并导致中风及心梗等高血压相关心脑血管疾病的发生<sup>[21-23]</sup>。实验模拟冷空气对大鼠的冷刺激, 均可以导致大鼠血脂四项 (甘油三脂、血清总胆固醇、高密度脂蛋白胆固醇和低密度脂蛋白胆固醇) 及血粘度升高<sup>[24-25]</sup>。Lou等<sup>[26]</sup>模拟不同强度等级的冷空气对高血压和健康大鼠的影响, 表明随着冷空气强度的增加, 不论是对健康还是对患高血压的大鼠, 对血压的影响随着冷空气的强度增加而更加明显。在此基础上, 文献[27-28]通过动物实验对其影响机制进行了初步研究, 那么在冷空气发生发展的过程中是否对人群的影响也是具有类似的机制呢? 本文以2013年4月发生在甘肃省张掖市的一次中等强度冷空气为实验实例进行了研究, 甘肃省张掖市地处中国北方, 气候类型复杂, 天气多变, 温差较大。它是中国西北方冷空气东移南下的必经要道, 每年影响我国约95%的强冷空气会从甘肃省经过。恶劣的天气条件会对当地居民生活和身体健康造成很大影响, 尤其是对心脑血管疾病患者带来更大的威胁。在本次中等强度冷空气对人群心脑血管影响实验过程中, 分别检测了冷空气过境前、过境期间和过境后心脑血管疾病病人和健康人血压和去甲肾上腺素 (NE)、肾上腺素 (E) 和血管紧张素 II (ANG II) 等指标水平, 分析其在冷空气过境前、过境期间和过境后的变化, 探讨冷空气活动对人群高血压疾病的影响机理。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地点

选择没有化学工业污染, 空气质量符合环境空气质量一、二级标准, 空气洁净度优良, 天气多变, 温差较大的西部和西北部冷空气南下必经之处的甘肃省张掖市作为研究地点。

### 1.2 研究对象

采用随机整群抽样的方法, 选取张掖市人民医院为监测点, 查阅距监测点半径1000m范围内、年龄在40~70岁的居民健康档案, 经健康筛查及血液学检查无器质性疾病却具有血压高症状的心脑血管病人, 于现场实验前, 选择无烟酒嗜好, 近3天未服用心脑血管疾病药物的患者70例, 按相同入选条件选择健康人

70例作为对照。2013年4月26—29日, 工作人员对纳入实验的人群进行问卷调查, 问卷内容包括近4天的身体状况、饮食、服用药物和活动范围等情况, 尽量排除混杂因素, 保持病例组和对照组相同的暴露史。同时按实验方案要求进行各种检验。实验过程中放弃依从性差 (未按时采血、测量血压) 及不符合条件 (服用了各种药物、精神受到刺激及患流行性感冒等疾病) 者, 最终数据来自全程严格执行实验条件的心脑血管疾病病人30例 (男女各15例) 作为病例组, 入选的患者主要包括: 6例脑血栓、2例脑溢血、12例冠心病和10例高血压疾病的志愿患者, 平均年龄为59岁。按相同入选条件选择健康人30例 (男女各15例) 作为对照组, 平均年龄为55岁。病例组和对照组的性别和年龄构成差异无统计学意义 (均 $P>0.05$ )。

### 1.3 实验资料采集

1) 测定指标: 血压 (BP)、E、NE和ANG II等指标。

2) 样品采集: 于冷空气过境前24h (4月26日上午)、过境时 [气温降至最低 (4月28日05:00—07:00)] 和过境后24h (4月29日上午) 分别采集空腹肘静脉血各5ml, 样品均收集至无抗凝剂真空采血管内, 于3000r/min离心后, 血清于-80℃冻存。

3) 测定方法: 各类生化指标采用酶联免疫吸附 (ELISA) 双抗体夹心法检测, 即用纯化的样本抗体包被微孔板, 制成固相抗体, 再加入待测样本及酶标试剂, 形成抗体-抗原-酶标抗体复合物, 经过洗涤加入显色剂, 然后在450nm波长下测定吸光度, 计算待测样本浓度。ELISA试剂盒由美国R&D公司生产, 西安科昊生物工程有限公司分装。酶标仪由奥地利TECAN公司生产, 检测由兰州大学医学实验中心完成。

4) 环境气象资料: 本次人群实验研究在甘肃省张掖市2013年4月26—29日的一次冷空气活动时进行。冷空气过程资料, 包括气温、气压、相对湿度等逐时监测数据由兰州中心气象台提供。逐日空气质量资料由张掖市环保局提供。冷空气类型按中央气象台2006年制定的中国冷空气等级国家标准GB/T20484—2006确定<sup>[29]</sup>。

### 1.4 质量控制

人群现场实验点选择在空气质量优且没有其他因素影响的地点。实验前首先对参加实验的医生、护士、课题组研究生及相关人员进行培训, 使每个参加实验的工作人员均熟悉患者及健康人的纳入标准、掌握生物样品采集要求和规范及其他注意事项, 并与检

测医院联系确保检测的及时准确。检测的试剂均达到生化指标检测级别和标准。及时建立Excel数据库，对数据进行严格的复查和审核。

### 1.5 统计学方法

利用SPSS19.0软件建立数据库并对所有指标数据进行统计分析和处理，计量数据均以平均值±标准差( $\bar{x} \pm s$ )表示，计算方差齐性后利用单因素方差分析对三组间各指标结果进行差异检验分析，两组间比较采用独立样本t检验。

## 2 结果分析

### 2.1 环境气象要素变化分析

由表1和图1可见，张掖市2013年4月26日最低气温为16.2℃，28日为8.8℃，48h最低气温下降7.4℃，根据GB/T20484-2006<sup>[29]</sup>，本次冷空气符合中等强度冷空气标准，属于一次中等强度冷空气过程。另外，最低相对湿度为6%，出现在冷空气过境前26日06时，最大相对湿度为43%，出现在冷空气过境时28日06时（表略）。最低气压为998.3hPa，出现在冷空气过境前27日03时，最高气压为1009.9hPa，出现在冷空气过境后28日08时（表略）。4月26—29日张掖空气中SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>日平均浓度分别小于6和10μg/m<sup>3</sup>，可吸入颗粒物为40~60μg/m<sup>3</sup>（表略）。空气质量优良，对人体健康的影响可以忽略不计。

表1 2013年4月张掖市冷空气过程的基本气象数据(单位:℃)

温度	26日	27日	28日	29日
$T_{\max 24}$	26.1	19.4	16.4	26.5
$T_{\min 24}$	16.2	14.9	8.8	10.4
$\Delta T_{\min 48}$			7.4	4.5

注： $T_{\max 24}$ 为日最高气温， $T_{\min 24}$ 为日最低气温， $\Delta T_{\min 48}$ 为48h内最低温之差。

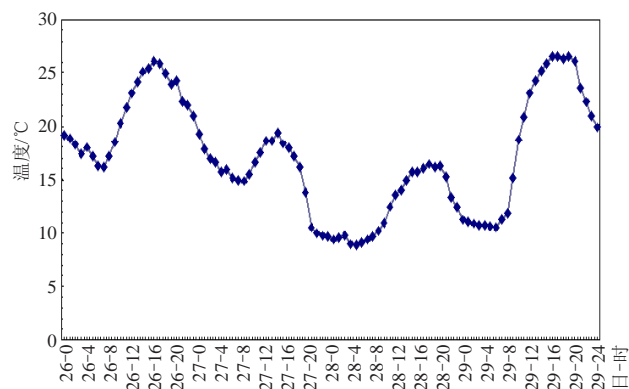


图1 2013年4月26—29日张掖市温度变化

### 2.2 NE 检测结果分析

图2是冷空气活动中病例组和对照组NE平均水平变化，病例组和对照组在冷空气过境前、中、后

三个时段的NE水平呈增加趋势，其中病例组为持续增加，在冷空气暴露时为306.86ng/L，与暴露前比增加了148.13ng/L，并且在冷空气影响结束后仍维持在较高水平，为363.39ng/L，与暴露前比增加了204.66ng/L，过境后与过境前、过境中相比，均有明显差异( $P < 0.05$ )。对照组在冷空气过境后NE平均水平略有下降，但与过境前相比有明显差异( $P < 0.05$ )。

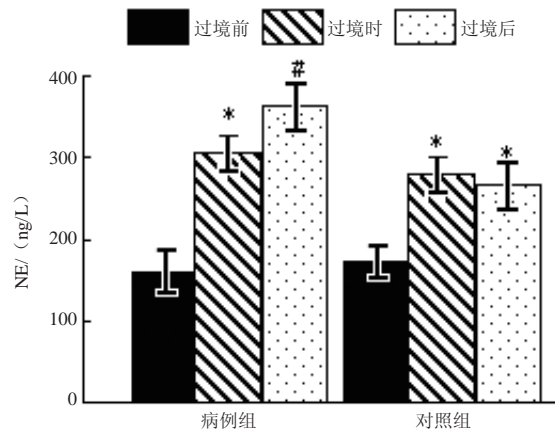


图2 冷空气活动过程中病例组和对照组NE平均水平变化趋势 (\*与过境前比较,  $P < 0.05$ ; #与过境时比较,  $P < 0.05$ )

### 2.3 E 检测结果分析

图3所示，冷空气活动前、中、后病例组和对照组E均呈现正增长趋势，但增长的幅度很小，无明显差异( $P > 0.05$ )。以病例组为例，在冷空气暴露时为78.65ng/L，与暴露前比增加了1.34ng/L，并且在冷空气影响结束后仍维持在较高水平，为81.3ng/L，与暴露前比增加了3.99ng/L。冷空气过境后，对照组E水平较过境时出现小幅度降低，但高于过境前水平。

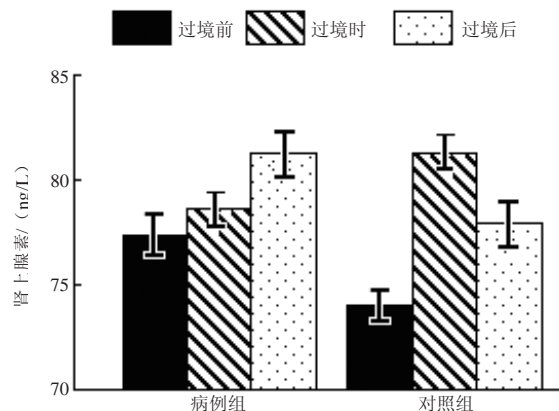


图3 冷空气活动过程中病例组和对照组E平均水平变化

### 2.4 ANG II 检测结果分析

图4是冷空气活动过程中病例组和对照组ANG II平均水平变化趋势。在冷空气过境前、中、后三个时段，无论是病例组还是对照组ANG II的平均水平均呈

正增长趋势,其中与过境前比较,病例组和对照组过境时分别升高了39.1和46.7ng/L,存在着显著性差异( $P<0.001$ );过境后病例组、对照组的ANG II的平均水平有所下降,但均大于过境前的水平,分别升高26.1和34.7ng/L,并存在显著性差异( $P<0.005$ )。

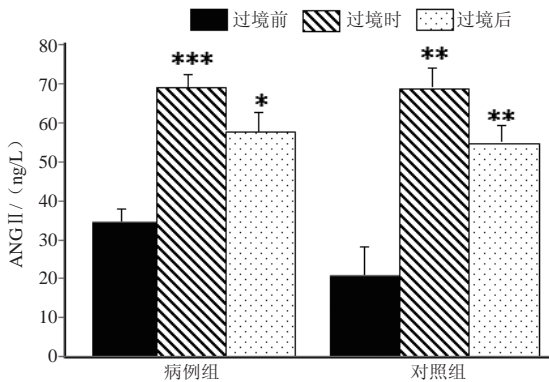


图4 冷空气活动过程中病例组和对照组ANG II的水平变化 (\*\*与过境前比较,  $P<0.001$ ; \*\*与过境前比较,  $P<0.01$ ; \*与过境前比较,  $P<0.05$ )

## 2.5 血压的检测结果分析

表2和图5是在冷空气活动过程中各个时期检测的病例组和对照组血压收缩压和舒张压的平均值变化。在冷空气过境前、中、后三个时段,病例组和对照组的血压舒张压和收缩压平均值变化趋势均呈正增长,以病例组为例,收缩压平均值在冷空气暴露时为136.3mmHg,与暴露前比增加了11.6mmHg,在冷空气过境时达到最大。在冷空气影响结束后收缩压平均值仍在较高水平上维持,为131.7mmHg,与暴露前比增加了7.1mmHg,过境后出现回落,但仍比过境前高。病例组在冷空气影响时,与过境前比具有显著性差异( $P<0.05$ ),而对照组无显著性差异( $P>0.05$ )。在冷空气活动同一时期的血压,病例组和对照组对应比较,统计均存在显著性差异( $P<0.05$ )。由此可见,冷空气可引起无论是心血管病人还是健康人血压升高,对心血管病人的影响更显著,并且在冷空气影响结束后还不能立刻恢复。

表2 冷空气活动过程中血压收缩压测定结果分析 ( $\bar{x} \pm s$ , 单位: mmHg)

	病例组			对照组(健康人)		
	40~50	50~60	60~70	40~50	50~60	60~70
过境前	121±3	124±5	129±4	115±5	118±4	129±5
过境中	132±5*	137±6*	140±7*	121±4	127±6	137±7
过境后	127±4	133±4	135±6	118±3	124±4	131±5

注: \*与过境前比较,  $P<0.05$ 。

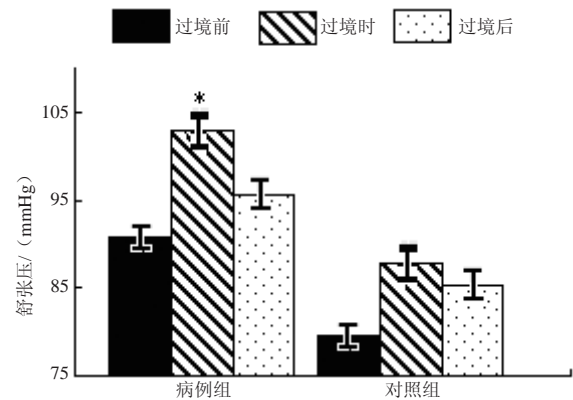


图5 冷空气活动过程中血压舒张压水平变化趋势 (\*与过境前比较,  $P<0.05$ )

## 3 讨论与总结

### 3.1 讨论

为了研究本次中等强度冷空气过程对血压影响的机制,我们检测了病例组和健康对照组血中的NE、E和ANG II等血浆浓度水平。综上结果分析发现ANG II血浆浓度无论在病例组还是对照组都呈升高的趋势,而且在过境时其浓度最高,与血压的变化趋势相同。在病例组和健康对照组血浆中NE浓度的变化也出现了同样的趋势,只是病例组其浓度在过境时和过境后中呈持续升高,过境后血压虽有下降,但仍处于较高水平,而健康对照组这种状态仅出现在过境时,过境后无论是NE浓度还是血压很快恢复,预示该冷空气过程对病例组血压的影响时间将长于健康对照组。

NE血浆浓度的升高说明机体交感神经系统(SNS)正被激活,而ANG II血浆浓度的升高表明机体内血管紧张素系统(RAS)也被激活,这两个系统的激活必然导致血压的升高。NE和ANG II都是收缩血管物质,具有很强收缩血管功能。NE与肾上腺素能 $\alpha$ 受体结合,使得全身血管广泛收缩。ANG II可作用于血管平滑肌,引起全身微动脉收缩。在这两个物质的作用下,全身血管收缩,从而导致血压的升高。许多研究已经充分证明了冷刺激中血压的变化机制是由于兴奋了SNS和RAS从而导致血压的升高<sup>[30,31]</sup>。尽管与这些研究中所运用的冷刺激不同,此次冷空气过程中气温是逐渐下降的,但对于机体也是一种冷刺激过程,并同样导致了血浆NE和ANG II浓度的升高。由此我们不难得出结论,冷空气导致机体血压的升高也是通过兴奋SNS和RAS来进行的。循环血中NE的来源除了肾上腺髓质外,也有一部分来源于肾上腺能神经末梢的释放,而ANG II也能通过这条途径<sup>[32]</sup>增加NE的释放,则我们在该冷空气过程中发现的NE增加主要是由ANG II的增加所引起的。如上所述,本次冷空气

过程导致心脑血管病人和健康人血压的升高途径主要是激活RAS系统,使得ANG II浓度水平升高,进而促进NE释放的增加,也因此兴奋SNS。通过这些系统的综合作用,共同导致血压的升高。

### 3.2 结论

通过以上实验和分析可得出以下结论:(1)冷空气活动对心脑血管疾病影响最大、最敏感指标是NE和ANG II;(2)冷空气过程导致心脑血管病人和健康人血压升高的途径主要是激活SNS,ANG II浓度水平的升高,进而促进NE释放的增加,激活RAS。通过这些系统的综合作用,共同导致血压的升高;(3)冷空气过程对心脑血管病人血压变化的影响比健康人显著,而且冷空气对心脑血管病人影响的时间长于健康人。

#### 参考文献

- [1] Sotaniemi E V, Huhti E, Takkanen J. Effect of temperature on hospital admissions for myocardial infarction in a subarctic area. *Br Med J*, 1970, 4(1): 150-151.
- [2] Kunst A L, Mackenbach J. Outdoor air temperature and mortality in the Netherlands: A time-series analysis. *Am J Epidemiol*, 1993, 137(3): 331-340.
- [3] Marchant B R, Stevenson R, Wilkinson P, Timmis A. Circadian and seasonal factors in the pathogenesis of acute myocardial infarction: The influence of environmental temperature. *Br Heart J*, 1993, 69(5): 385-387.
- [4] Hong Y R, Lee J, Ha E, Kwon H, et al. Ischemic stroke associated with decrease in temperature. *Epidemiology*, 2003, 14(4): 473-478.
- [5] White C G. The partial thromboplastin time: Defining an era in coagulation. *J Thrombosis Haemostasis*, 2003, 1(11): 2267-2270.
- [6] Dobson J. Cold periods and coronary events: An analysis of populations worldwide. *J Epidemiol Community Health*, 2005, 59(1): 551-556.
- [7] Kendrovski V. The impact of ambient temperature on mortality among the urban population in Skopje, Macedonia during the period 1996-2000. *BMC Public Health*, 2006, 6(2): 1-6.
- [8] Analitis A, Katsouyanni K, Biggeri A, et al. Effects of cold weather on mortality: Results from 15 European cities within the PHEWE project. *Ame J Epidemiol*, 2008, 168(12): 1397-1408.
- [9] Kysely J, Pokorna L, Kyncl J, et al. Excess cardiovascular mortality associated with cold spells in the Czech Republic. *BMC Public Health*, 2009, 9(1): 19.
- [10] Wang Xiaoyu, Aghwts B. Temperature variation and emergency hospital admissions for stroke in Brisbane, Australia, 1996-2005. *Inter J Biometeorol*, 53(6): 535-541.
- [11] 张书余, 王宝鉴, 谢静芳, 等. 吉林省心脑血管疾病与气象条件关系分析和预报研究. *气象*, 2010, 36(9): 115-119.
- [12] Thorvaldsen P A, Kuulasmaa A, Schroll M. Stroke incidence, case fatality, and mortality in the WHO MONICA project: World Health Organization Monitoring Trends and determinants in cardiovascular diseases. *Stroke*, 1995, 26(1): 361-367.
- [13] Korhonen I. Blood pressure and heart rate responses in men exposed to arm and leg cold pressor tests and whole-body cold exposure. *Int J Circumpolar Health*, 2006, 65(2): 178-184.
- [14] Komulainen S, Tähtinen T, Rintamäki H, et al. Blood pressure responses to whole-body cold exposure: Effect of metoprolol. *J Hum Hypertens*, 2004, 18(12): 905-906.
- [15] Fregly M J, Schechtman O. Direct blood pressure measurements in rats during abrupt exposure to, and removal from, cold air. *Proc Soc Exp Biol Med*, 1994, 205(2): 119-123.
- [16] Qian Z M, Koon H W. Area postrema is essential for the maintenance of normal blood pressure under cold stress in rats. *Exp Brain Res*, 1998, 121(2): 186-190.
- [17] Raven P B, Niki I, Dahms TE, et al. Compensatory cardiovascular responses during an environmental cold stress, 5 degrees C. *J Appl Physiol*, 1970, 29(4): 417-421.
- [18] Li Y, Alshaer H, Fernie G. Blood pressure and thermal responses to repeated whole body cold exposure: Effect of winter clothing. *Eur J Appl Physiol*, 2009, 107(6): 673-685.
- [19] Scriven A J, Murphy M B, Dollery C T. Changes in blood pressure and plasma catecholamines caused by tyramine and cold exposure. *J Cardiovasc Pharmacol*, 1984, 6(5): 954-960.
- [20] Barnett A G, Dobson A J, McElduff P, et al. Cold periods and coronary events: An analysis of populations worldwide. *J Epidemiol Community Health*, 2005, 59(7): 551-557.
- [21] Caicoya M R, Lasheras C, Cuello R, et al. Stroke incidence in Austria, 1990-1991. *Rev Neurol*, 1996, 24(1): 806-811.
- [22] Marchant B R, Stevenson R, Wilkinson P, et al. Circadian and seasonal factors in the pathogenesis of acute myocardial infarction: The influence of environmental temperature. *Br Heart J*, 1993, 69(1): 385-387.
- [23] Sheth T N, Muller J, Yusuf S. Increased winter mortality from acute myocardial infarction and stroke: The effect of age. *J Am Coll Cardiol*, 1999, 33(1): 1916-1919.
- [24] Luo Bin, Zhang Shuyu, Ma Shoucun, et al. Effects of cold air on cardiovascular disease risk factors in rat. *Int J Environ Res Public Health*, 2012, 9(7): 2312-2325.
- [25] Luo Bin, Zhang Shuyu, Ma Shoucun, et al. Artificial cold air increases the cardiovascular risks in spontaneously hypertensive rats. *Int J Environ Res Public Health*, 2012, 9(9): 3197-3208.
- [26] Luo Bin, Zhang Shuyu, Ma Shoucun, et al. Effects of different cold-air exposure intensities on the risk of cardiovascular disease in healthy and hypertensive rats. *Int J Biometeorol*, 2014, 58(1): 185-194.
- [27] 张书余, 马守存, 周骥, 等. 模拟寒潮对高血压疾病影响机理的实验研究. *气象*, 2013, 39(6): 830-835.
- [28] 张夏琨, 周骥, 张书余, 等. 模拟寒潮对高血压疾病的影响实验研究. *气象*, 2014, 40(6): 784-788.
- [29] 国家气象中心(中央气象台). GB/T 20484-2006. 冷空气等级. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [30] Olli A T, Lauri T, Pirkko H, et al. Are the blood pressure and endocrine responses of healthy subjects exposed to cold stress altered by an acutely increased sodium intake? *Euro J Appl Physiol*, 2001, 84(2): 48-53.
- [31] Sun Z R, Zhong Z, Alouidor J, et al. Angiotensinogen gene knockout delays and attenuates cold-induced hypertension. *Hypertension*, 2003, 41(1): 322-327.
- [32] Dzau V R. Tissue Angiotension system in cardiovascular medicine paradigm shift. *Circulation*, 1994, 89(1): 493-498.

# 两次副热带高压外围沿海暴雨过程对比分析

崔粉娥<sup>1</sup> 李颯<sup>1</sup> 畅巨峰<sup>2</sup> 李卫敏<sup>1</sup>

(1 河北省秦皇岛市气象局, 秦皇岛 066000; 2 河北省青龙满族自治县气象局, 青龙 066500)

**摘要:** 2010年8月4—5日和8月21—22日两次天气过程都是在副热带高压外围产生的沿海大暴雨天气。利用常规观测资料、自动站降水资料、NCEP再分析等资料, 从大尺度环流场、物理量场、数值预报产品等方面对这两次过程进行综合诊断分析, 以为河北海岸带暴雨提供一定的依据。结果表明, 这两次暴雨过程均具有河北海岸带夏季暴雨的特征, 是典型的副热带高压边缘大暴雨天气。水汽辐合区与暴雨的落区有较好的对应关系, 边界层附近水汽的输送对降水起增大作用, 两次过程的不同点在于影响系统和对流稳定度。当T639模式降水产品预报秦皇岛有大到暴雨, 且秦皇岛位于副热带高压边缘, 此时应重点分析水汽辐合区、高能舌和上升速度大值中心叠加区域; 如果该区域存在中尺度系统触发机制, 则该区域可能是沿海暴雨到大暴雨的落区。

**关键词:** 副热带高压, 暴雨, 物理量场, 对比分析

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.06.007

## Comparison Analysis of the Two Coastal Rainstorm Courses of Subtropical High Peripheral Precipitation

Cui Fene<sup>1</sup>, Li Yang<sup>1</sup>, Chang Juzheng<sup>2</sup>, Li Weimin<sup>1</sup>

(1 Qinhuangdao Meteorological Bureau of Hebei, Qinhuangdao 066000 2 Qinglong Manchu Autonomous County Meteorological Bureau of Hebei, Qinglong 066500)

**Abstract:** Two coastal heavy rains on August 4-5 and 21-22, 2010 were caused by subtropical high. Based on the conventional observation data, precipitation data from automatic stations and NCEP reanalysis data from NCEP/NCAR center, it is diagnosed mainly from circulation situation, influence system, physic and numerical forecast products, providing a basis for coastal zone in Hebei heavy rains. The results indicate: both of the two processes, which happened against a favorable circulation background had the characteristics of the coastal zone in Hebei summer rainstorm, are typical of the subtropical high edge heavy storm. The rainstorm area which corresponded well with the convergence zone of vapor flux water vapor near the boundary layer has a growth effect on the precipitation. Differences appeared from the trigger mechanism and the stability of convection when it has big-heavy rains in Qinhuangdao according to T639 forecast production. If there is a trigger mechanism of mesoscale system in such area, it will probably be the falling area of coastal heavy rains.

**Keywords:** subtropical high, rainstorm, physical feature, comparison analysis

### 0 引言

秦皇岛位于河北省东北部, 濒临渤海湾, 由于受海陆风产生的次级环流影响, 是局部暴雨的多发地。暴雨常常带来局部或流域性严重洪涝灾害, 给人们的生产和生活造成严重影响<sup>[1-4]</sup>。为此, 气象学者对暴雨做了大量研究, 取得了一系列成果<sup>[5-11]</sup>。但目前对河北海岸带暴雨多是针对典型个例从不同角度进行分析总结, 针对多个个例的对比分析较少。如李延江等<sup>[12-15]</sup>从不同方面分析了秦皇岛海岸带暴雨, 认为中尺度暴雨云团沿副热带高压588dagpm线西北侧的引导

气流方向移动, 在有利的低层风场辐合区, 造成河北海岸带暴雨。在同一“母体”中尺度回波带背景下, 不同时刻 $\gamma$ 、 $\beta$ 中尺度降水系统互相扰动导致海岸带致灾暴雨。王宏等<sup>[16-17]</sup>和张晓亮等<sup>[18]</sup>分别分析了湿位涡和高、低空急流耦合与河北海岸带暴雨的对应关系, 认为低空急流为暴雨的产生提供了大量的水汽。本文利用常规观测资料, 采用北京大学系开发的客观分析诊断图形系统, 对2010年8月秦皇岛海岸带两次致灾暴雨过程的天气系统、物理量、数值预报产品等进行对比分析, 以期对秦皇岛沿海暴雨预报、预警提供参考。

### 1 暴雨过程概况及特征

2010年8月4日(简称过程1)和2010年8月21日

收稿日期: 2014年7月8日; 修回日期: 2015年2月2日  
第一作者: 崔粉娥(1977—), Email: cuifene@126.com

(简称过程2)是两次典型的副热带高压外围产生的暴雨天气过程(图1)。据区域自动站显示:两次过程秦皇岛各地都出现了强降水天气,过程降水量大于50mm。过程1有23个区域气象站降水量超过100mm,最大出现在抚宁榆关178mm,强降水时段出现在4日23时—5日05时,抚宁榆关站3h总降水量为126.3mm,为短时暴雨。过程2有31个区域气象站降水量超过

100mm,最大出现在青龙曹碾167mm,20日20时—21日15时强降水区在北中部,22日凌晨在沿海一带,昌黎团林站小时最大降水量为27.8mm,两次过程维持时间较长,雨量分布比较均匀。

从图1看出,两次暴雨过程强降水落区不太一致,过程1位于海岸带0~40km;过程2位于北部山区,但沿海降水量都大于50mm。由于过程2的大值区

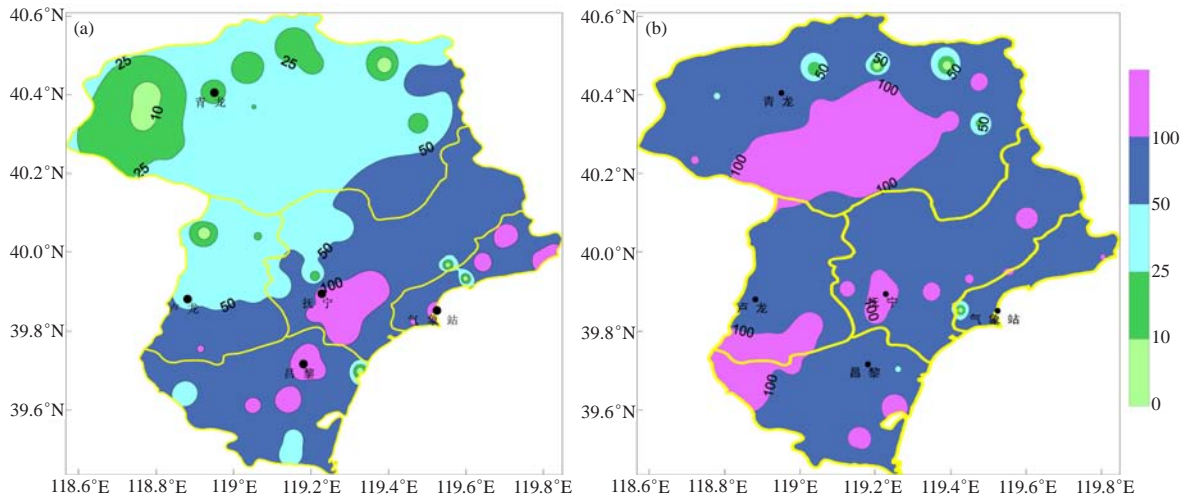


图1 两次暴雨过程秦皇岛区域气象站降水分布(单位:mm)  
(a) 2010年8月4日20时—5日20时; (b) 2010年8月20日20时—22日08时

位于北部山区,且持续时间较长,故造成的损失相对要大些。据有关部门统计,过程1暴雨灾害中抚宁和卢龙县受灾较重,其他县(区)为农田小范围内涉及低洼处积水,因灾造成直接经济损失达4300万元。过程2暴雨过程有4个县(区)出现不同程度灾情,受灾人口达24.97万人,农作物受灾面积9990.6hm<sup>2</sup>,直接经济损失达8057.1万元。在两次暴雨过程中,秦皇岛市气象台将预警信号均提前升级为红色,并发布重要气象专报和地质灾害预警,提前对强降水过程进行了防御,减小了气象灾害带来的损失。

## 2 天气背景和环流形势

2010年8月4日08时,500hPa欧亚中高纬度呈一槽一脊型(图略),在东北以北有一低涡,低涡中心经贝湖东侧向南甩下高空槽,低涡和槽均配合有一-24℃和-18℃的冷中心,秦皇岛处于槽前宽广的西南气流中,500hPa急流轴从河套北边缘经张家口一直伸向黑龙江南部,最大风速达28m/s。副热带高压稳定少动,588线在40°N附近沿渤海海岸线呈西南—东北向,此时850hPa从大兴安岭西侧经北京到河套存在切变线。至4日20时高空槽移到了111°E,高空急流稳定少动。而850hPa切变线东移到118°E,在秦

皇岛区上游,此时,由山东半岛到辽宁东南部形成低空急流带。

2010年8月20日20时,500hPa欧亚中高纬度呈一槽一脊型(图略),副高稳定维持在40°N附近,且呈带状分布。此时700hPa在河套地区存在切变线,由于低空水汽充沛,切变线在向东北移动过程中,在河北中北部低区发展为低涡,产生秦皇岛北中部部分地区的大暴雨天气。21日20时以后随着系统东移和副高南落,不断有冷空气下滑影响秦皇岛,出现了沿海大暴雨天气。

中高纬度有利的环流形势配置为沿海暴雨的产生提供了背景场,副热带高压稳定在40°N附近(渤海沿岸),且呈带状分布,两次暴雨过程均由高空槽与副热带高压共同作用产生。强降水落区(图2)分别位于高空急流出口右侧和低空急流入口左侧,在低层切变线或低涡附近。两次区域性暴雨的降水性质均为混合型降水,但过程1对流性更强。

从强降水时段典型物理量参数(表1)可知,两过程满足暴雨基本条件,过程1的K指数和相当位温明显高于过程2,说明过程1的不稳定性较强,过程2的动力条件强盛。

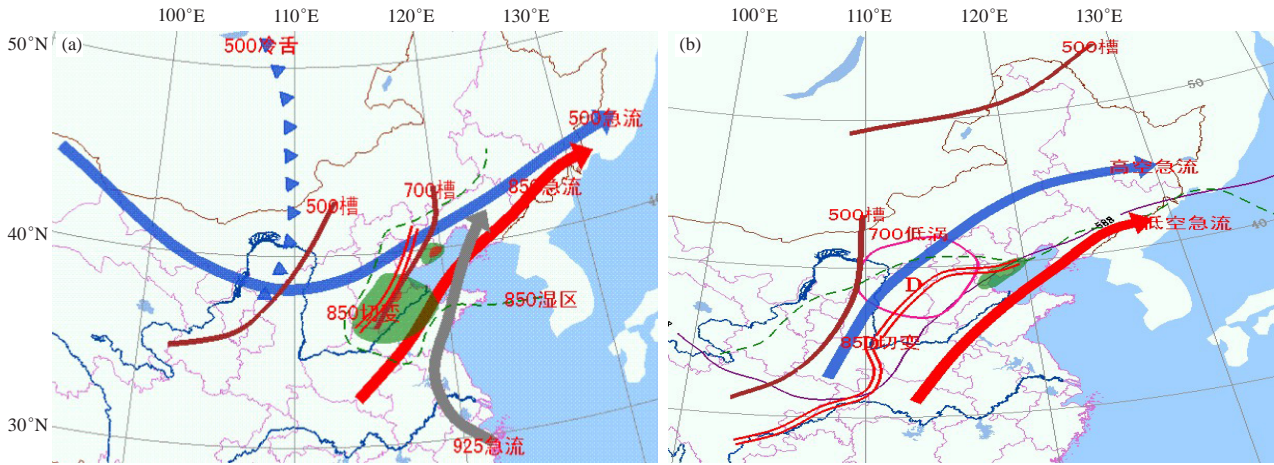


图2 两次过程强降水综合配置图：(a) 2010年8月4日20时；(b) 2010年8月21日08时

表1 秦皇岛站典型物理量参数

时间	K指数/°C	沙氏指数(SI)/°C	850hPa水汽通量/g·kg <sup>-1</sup> ·m·s <sup>-1</sup>	850hPa相当位温/°C	850hPa比湿/g·kg <sup>-1</sup>	500hPa垂直速度/Pa·s <sup>-1</sup>
4日20时	35	-1	10	80	16	-14
21日20时	29	2	22	69	13	-17

### 3 暴雨成因对比分析

#### 3.1 水汽条件

充足的水汽是形成暴雨的必要条件。在暴雨过程中通常有显著的水汽输送条件，强降水落区上空有丰富的水汽汇合。由两次暴雨过程500、700、850、925hPa的比湿和相对湿度地理分布（图略）可见，两次暴雨过程四层比湿和相对湿度都比较大。8月4日20时秦皇岛沿海比湿和相对湿度500hPa分别达4g/kg、70%，700hPa分别达9g/kg、70%，850hPa分别达16g/kg、98%，925hPa分别达18g/kg、99%，随着系统东移南压，高湿区也随之南压。8月21日20时秦皇岛沿海比湿和相对湿度500hPa分别达6g/kg、100%，700hPa分别达8g/kg、70%，850hPa分别达13g/kg、90%，925hPa分别达14g/kg、95%。

从以上分析可知，两次暴雨过程水汽条件充沛，湿层深厚，850hPa比湿大于12g/kg，达到沿海暴雨指标，中层湿度小说明有干冷空气入侵，有利于对流降水的产生。500~700hPa是副高边缘SW暖湿气流输送水汽，850~925hPa是低层黄海、渤海高湿区<sup>[19]</sup>，SE-E急流作用下暖湿平流向西岸区输送水汽，这是沿海大暴雨的主要特征。过程1水汽条件明显优于过程2，所以过程1对流性较强。

水汽通量表征水汽的来源，水汽通量散度表征水汽的辐合和辐散<sup>[11]</sup>。由两次暴雨过程中925hPa的水汽通量和水汽通量散度图（图3）可知，两次过程中水汽的主要通道主要来自于西太平洋-东海-黄海-渤海，其

次是高空槽前的西南暖湿气流。水汽通量辐合区和水汽通量散度负值区与暴雨的落区有较好的对应关系，暴雨区水汽通量均超过了一12。过程1中，水汽通量辐合大值区从赤峰到河北东北部，而过程2中，水汽通量辐合区集中在内蒙古-北京-秦皇岛，水汽通量散度值更大，最大可达-6。综合分析各高度水汽条件可知：降雨区上空气柱中的水汽条件非常有利于强降水的产生，过程1湿层深厚，维持时间较长，对流性较强，过程2水汽集中，短时水汽输送较强。

#### 3.2 不稳定条件

相当位温 $\theta_e$ 反映了大气的温湿状况，它的分布反映了大气中能量的分布。等值线密集区为能量锋区，而暴雨的发生必需要有能量锋区的存在<sup>[20]</sup>。由850hPa上 $\theta_e$ 场（图4）可以看出，两次暴雨过程的 $\theta_e$ 的高值区与水汽通量及水汽辐合区相对应，秦皇岛位于高能舌区，中心值大于350K。暴雨北侧有 $\theta_e$ 等值线密集区，随着系统东移和副高南落，斜压性加强且不稳定区域向东北方向移动，产生沿海地区强降水。

由乐亭探空站的大气温湿及稳定度参数（表2）可知，暴雨发生之前秦皇岛沿海为层结不稳定状态，K指数大于28，SI指数小于0，满足河北海岸带暴雨指标。整层比湿积分（IQ）大于5700g/kg，表示水汽含量是充足的。随着暴雨的发生和副高南落，各值向有利于层结稳定的方向发展。

通常用相当位温随高度的变化 $\partial\theta_e/\partial p$ 表示大气的稳定度，当 $\partial\theta_e/\partial p > 0$ 时，即当相当位温随高度降低时，

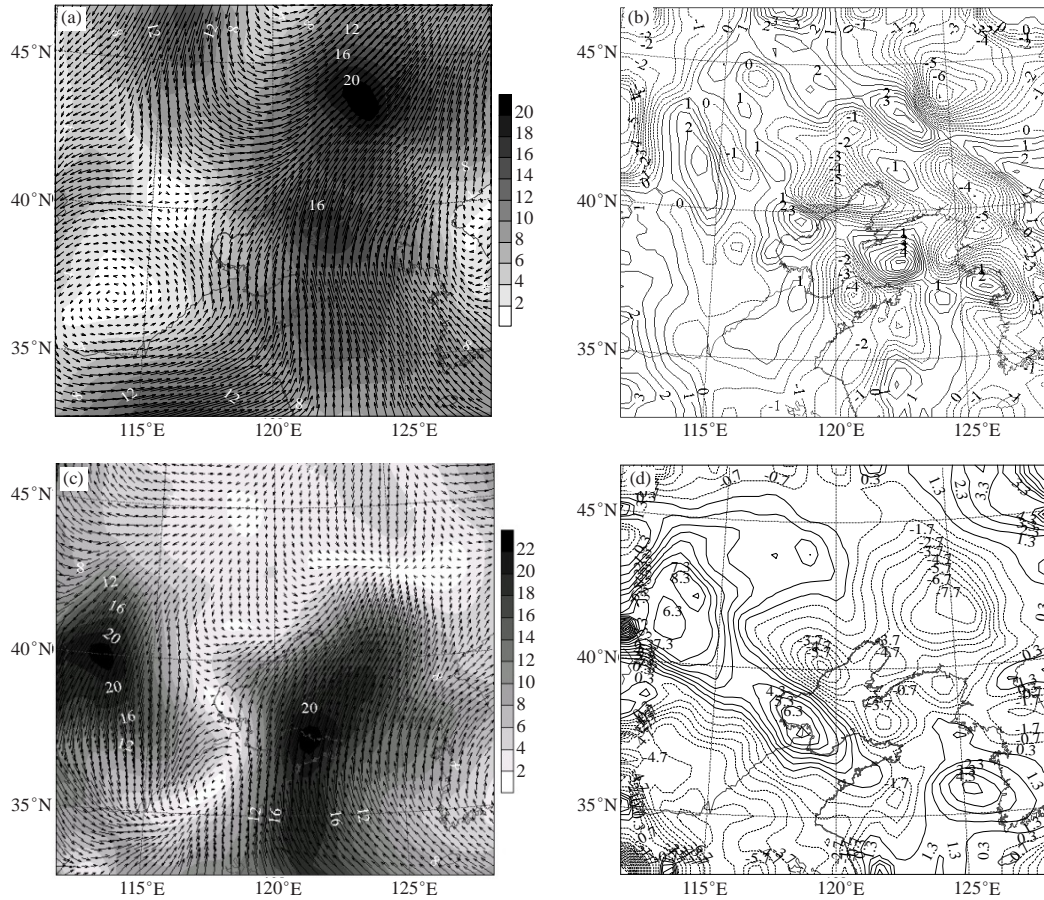


图3 两次暴雨过程925hPa水汽通量(矢量)(a和c, 单位:  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )和水汽通量散度(b和d, 单位:  $10^{-8}\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) (a, b) 2010年8月4日20时; (c, d) 2010年8月21日20时

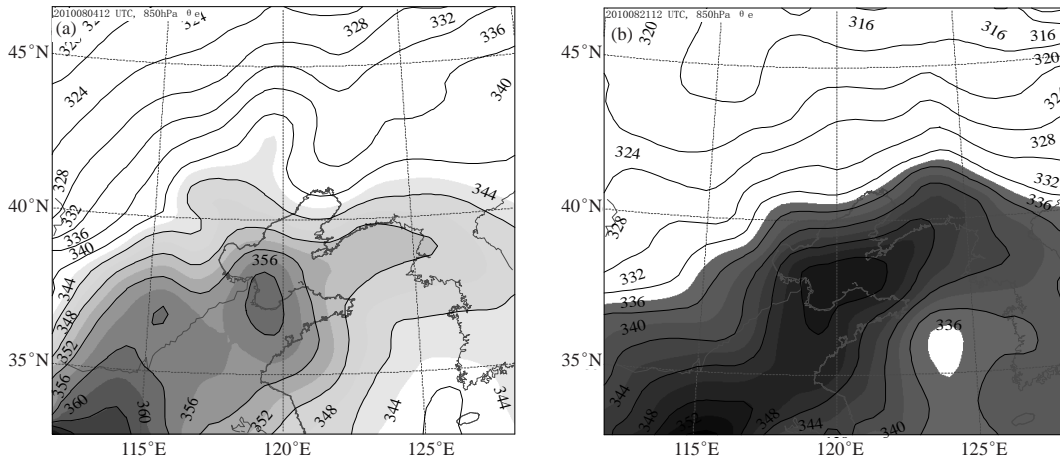


图4 两次暴雨过程850hPa相当位温场(单位: K, 阴影区为 $\theta_e$ 高值区)

(a) 2010年8月4日20时; (b) 2010年8月21日20时

表2 乐亭探空站两次暴雨过程大气温湿度及稳定度参数

	20100804过程			20100821过程		
	4日08:00	4日20:00	5日08:00	21日08:00	21日20:00	22日08:00
K/°C	33	41	18	29	38	34
SI/°C	0.46	-2.41	14.7	0.63	-1.78	2.44
CAPE/( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	64.3	226.8	1.3	0	0.4	0
IQ/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	5757.3	7044.1	4520.4	4366.8	5814	5094.6

大气层结处于对流不稳定。分析暴雨区上空相当位温沿119°E的垂直剖面图(图5)可见, 过程1在秦皇岛以东有一相当位温高值区, 中心值达360K, 暴雨区上空850hPa以下大气处于不稳定状态, 为暴雨的发生积累了大量不稳定能量; 过程2暴雨区上空850hPa以下大气

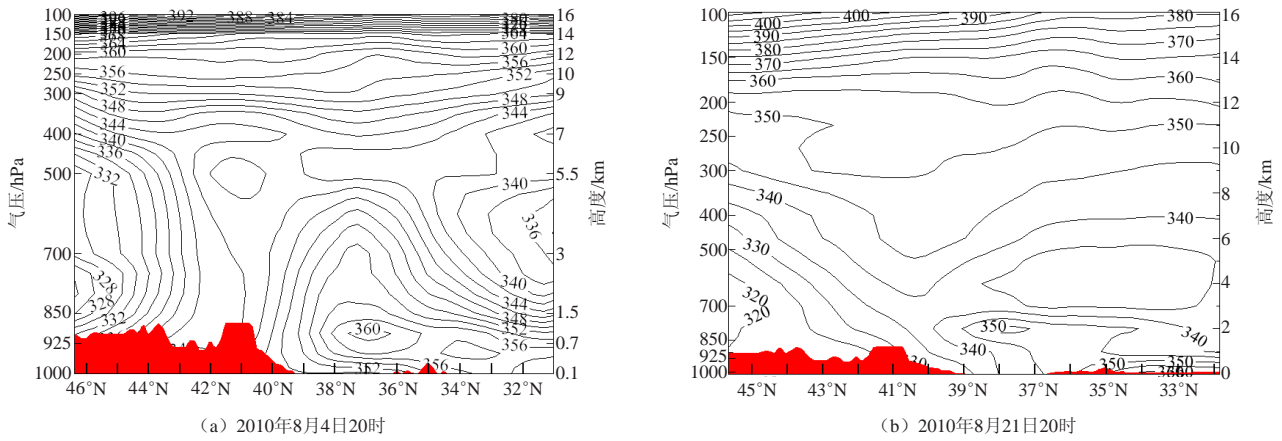


图5 两次过程相当位温 (单位: K) 沿119°E的高度-纬度剖面 (暴雨中心位于40°N处, 红色代表地形高度)

处于对流稳定状态。总之, 过程1中各不稳定参数均优于过程2, 说明过程1表现出强烈的层结不稳定, 对流活动比过程2旺盛。

### 3.3 动力条件

分析两次过程的垂直速度剖面 (图6) 可知, 两次过程的高低空垂直运动有较相似之处, 在40°N附近

存在明显的垂直运动大值区, 且上升速度在500hPa左右的高度表现最为强烈, 与暴雨落区有很好的对应关系。细微之处在于, 过程2中, 垂直速度大值区范围较广, 中心数值明显大于过程1。

散度是反映辐合辐散的物理量, 从散度垂直剖面 (图6) 可知, 两次过程辐散中心位于200~300hPa,

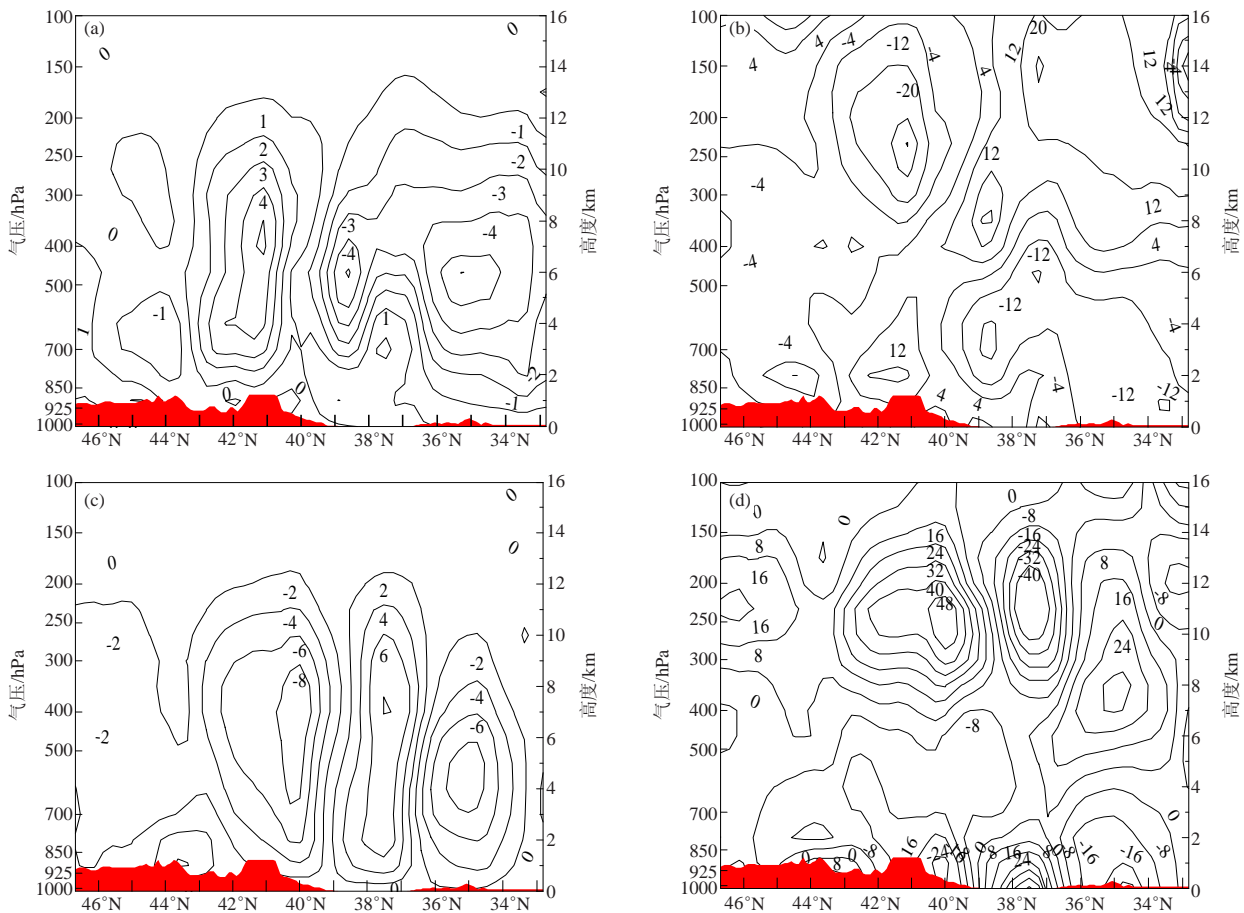


图6 两次过程垂直速度 (a和c, 单位:  $10^{-1}\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 和散度 (b和d, 单位:  $10^{-6}\text{s}^{-1}$ ) 沿119°E的高度-纬度剖面 (红色代表地形高度) (a, b) 2010年8月4日20时; (c, d) 2010年8月21日20时

辐合中心位于850~700hPa, 辐散轴与辐合轴上下对应比较一致, 都位于39°—40°N附近, 但中心数值过程2大于过程1, 说明此时低层辐合高层辐散条件较好, 辐合中心和上升运动中心有较好的对应, 强烈的辐合上升运动为两次暴雨天气过程提供了很好的动力场。

### 3.4 T639 降水预报效果检验

应用T639数值预报产品的24h实效降水预报, 与加密自动站实况降水资料对两次暴雨过程的降水预报进行检验, 发现过程1中, T639模式预报秦皇岛为大值区, 降水量小于50mm, 明显比实况偏弱, 且降水中心位于天津静海一带, 与实况偏差较大。过程2中, T639模式对秦皇岛北中部暴雨到大暴雨落区把握较好, 对南部沿海强降水区, 比实况偏弱。

总之, 两次暴雨过程中, T639降水预报产品有一定的参考性, 但强降水中心都有偏差, 且过程1预报效果明显不如过程2。当T639降水预报产品预报有大到暴雨, 且秦皇岛位于副高边缘, 如果综合其他有利条件, 可以考虑沿海出现暴雨到大暴雨的可能性。因此, T639预报大到暴雨可以作为秦皇岛暴雨预警的一个参考。

## 4 小结及讨论

1) 中高纬度有利的形势配置为沿海暴雨的产生提供了背景场, 两次过程均具有河北海岸带夏季暴雨的特征, 是典型的副高边缘大暴雨天气。不同点在于影响系统和对流稳定度。

2) 两次暴雨过程湿度层较深厚, 水汽输送路径相似, 边界层附近水汽的输送对降水起增大作用。水汽通量辐合区与暴雨的落区有较好的对应关系。

3) 两次过程850hPa相当位温 $\theta_e$ 的高值区与水汽通量及水汽辐合区相对应, 代表了两次过程的不同落区; 过程1表现出强烈的层结不稳定, 对流活动比过程2旺盛。

4) 当T639模式降水产品预报秦皇岛有大到暴雨, 且秦皇岛位于副高边缘, 此时应重点分析水汽通量辐合区、高能舌和上升速度大值中心叠加区域; 如果该区域存在中尺度系统触发机制, 则该区域可能是沿海暴雨到大暴雨的落区。

### 参考文献:

- [1] 路爽, 廖国进, 侯亚红. 一次沈阳地区暴雨过程分析. 安徽农业科学, 2010, 38(9): 4665-4668.
- [2] 张杰, 张艳, 贾奎奎, 等. 鲁中山区一次暴雨大暴雨过程分析. 安徽农业科学, 2010, 38(4): 1952-1954.
- [3] 张少林, 王俊, 周雪松, 等. 山东“7.18”致灾暴雨成因分析. 气象科技, 2009, 37(5): 528-532.
- [4] 毛冬艳, 乔林, 陈涛, 等. 2004年7月10日北京暴雨的中尺度分析. 气象, 2005, 31(5): 42-26.
- [5] 陈忠民, 何光碧, 崔春光. 对流、湿度锋与低空急流的耦合-持续性暴雨维持的一种可能机制. 热带气象学报, 2007, 23(3): 246-254.
- [6] 许美玲, 段旭, 孙绩华, 等. 与低空急流相伴的暴雨天气诊断分析. 云南大学学报, 2004, 26(4): 320-324.
- [7] 林毅, 刘铭, 刘爱鸣. 高低空急流在闽西北大暴雨过程中的作用及数值模拟. 气象科学, 2006, 26(4): 449-455.
- [8] 李丹, 王昌双, 刘伟. 东北冷涡引发的局地暴雨数值模拟. 气象与环境学报, 2009, 25(6): 29-33.
- [9] 王丽荣, 裴宇杰, 陈明轩, 等. 北京对流性天气的高空气候背景分析. 气象与环境学报, 2005, 23(5): 1-7.
- [10] 陈传雷, 阎琦, 吴艳青, 等. 2009年7月辽宁3次局地短时暴雨过程对比分析. 气象与环境学报, 2010, 26(4): 12-16.
- [11] 管勇, 刘玉明, 胡丽华, 等. 广东两次特大暴雨成因的诊断对比. 气象科技, 2010, 38(5): 565-571.
- [12] 李延江, 陈小雷, 张宝贵, 等. 渤海西海岸带大暴雨中尺度云团空间结构分析. 高原气象, 2013, 32(3): 818-828.
- [13] 李延江, 高岑, 周艳军, 等. “08. 8. 11”河北海岸带中 $\gamma$ 、 $\beta$ 尺度大暴雨分析. 气象, 2009, 35(4): 94-101.
- [14] 李延江, 陈小雷, 景华, 等. 渤海强对流天气监测及概念模型初建. 海洋预报, 2013, 30(4): 45-56.
- [15] 李延江, 张俊峰, 葛红萍. 海上偏东风对秦皇岛岸区降水及温度的影响. 安徽农业科学, 2012, 40(13): 7811-7812.
- [16] 王宏, 寿绍文, 王万筠, 等. 一次局地暴雨过程的湿位涡诊断分析. 自然灾害学报, 2009, 18(3): 129-134.
- [17] 王宏, 马凤莲, 王万筠, 等. 湿位涡分析在河北东北部暴雨预报中的应用. 干旱气象, 2008, 26(4): 86-90.
- [18] 杨晓亮, 李江波, 杨敏. 河北2007年7月18日局地暴雨成因分析. 气象, 2008, 34(9): 47-56.
- [19] 陈志明. 对流云团与低空急流耦合相互作用研究——云团再生和维持的一种机制. 大气科学, 2005, 29(30): 496-502.
- [20] 施望芝, 金琪, 郭施, 等. 湖北一次冰雹天气过程的落区诊断分析和预报. 热带气象学报, 2004, 20(2): 212-217.

# 三明市强对流天气的风廓线雷达探测分析

沈永生 蒋宗孝 王正廷 官晓东  
(福建省三明市气象局, 三明 365000)

**摘要:** 利用永安风廓线雷达对近年来发生在三明的强对流天气进行特征分析。分析表明: 水平风场上强对流发生前在1500~5000m一般伴有短波影响, 0~500m高度伴有风向随时间旋转, 说明中低层有小槽波动, 近地层有小尺度气旋活动; 降雹天气时, 5~6km最大风速均达25m/s以上, 以西南或偏西风居多, 短时强降水时最大风速达15m/s; 在0~1500m高度出现大风核( $\geq 20\text{m/s}$ )时, 一般伴随降雹天气; 降雹时, 6000m以下一般会出现 $\geq 20\text{m/s}$ 的西南急流, 可探至4000m以下, 同时 $\geq 12\text{m/s}$ 的急流可探至1600m以下; 而强降水 $\geq 12\text{m/s}$ 的急流可探至2000m以下。垂直速度上测站出现降水时其上空均出现 $\geq 4\text{m/s}$ 的垂直速度区, 出现强对流天气时 $\geq 4\text{m/s}$ 的垂直速度区一般会扩展到3600m以上, 强度越强扩展的高度越高; 降雹和短时强降水的最大速度值差别不明显, 但一般降雹时的最大正速度区(3000~5000m)高于强降水的最大正速度区(1000~3000m)。

**关键词:** 风廓线, 强对流, 特征

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.06.008

## Analysis of Wind Profile Radar in the Severe Convective Weather in Sanming

Shen Yongsheng, Jiang Zongxiao, Wang Zhengting, Guan Xiaodong  
(Sanming Meteorological Bureau of Fujian Province, Sanming 365000)

**Abstract:** The characteristics of the severe convective weather in Sanming were analyzed by using wind profile radar of Yong'an. The results show that there was an effect of shortwave between 1500-5000m before the severe convective broke out on horizontal wind field, and the wind direction had revolved with time under 500m. It showed that the weak wave had been moving eastward on middle and low levels, and there was a little-scale rotation circulation on the surface layer. The maximum wind speed reached more than 25m/s during the hail fall, and the direction of wind was mostly west and southwest. The maximum wind speed reached more than 15m/s during the short-time heavy rainfall. It appeared that when the wind speed reached more than 20m/s between 0-1500m, the hail fall often occurred. The southwest jet stream of more than 20m/s often appeared under 6000m and even under 4000m. Meanwhile, the jet stream of more than 12m/s often appeared under 1600m and the jet stream of more than 12m/s often appeared under 2000m during a heavy rainfall. The vertical velocity more than 4m/s often appeared during a rainfall, and the vertical velocity of more than 4m/s generally reached 3600m. Additionally, if the vertical velocity was faster, the height was higher. The maximum vertical velocity of a hail fall was not obviously different from a short-time heavy rainfall. However, the area of the maximum positive velocity during a hail fall was larger than that of the short-time heavy rainfall.

**keyword:** wind profile, severe convection, characteristics

### 0 引言

由于高时空分辨率的优势, 风廓线雷达资料在短时强对流天气预报中的应用越来越受到重视。根据风廓线雷达强对流天气越来越广的研究<sup>[1-3]</sup>, 表明利用风廓线雷达可以实时监测水平风的垂直切变及其发展变化全过程, 可弥补常规资料时间间隔长、天气分析难度大等不足。

福建省的三个探空站, 分别位于邵武、福州和厦门, 永安刚好位于这几个探空站间的空白区域, 因而永安风廓线雷达资料不仅弥补了福建省三个探空站间高空资料的空白, 更由于其时空分辨率超过任何一种高空风测量系统, 从而可以显示出短波波动等天气系统连续详实的变化过程。永安市风廓线雷达为固定式边界层风廓线雷达(CFL-03), 能够不间断地提供探测高度0~6km的大气水平风速、风向、垂直气流及大气折射率结构常数等气象要素随高度的分布。

本文利用永安风廓线雷达的有利条件, 对近年来发生在三明的冰雹大风、短时强降水天气进行特征分析。

收稿日期: 2014年5月26日; 修回日期: 2014年10月22日  
第一作者: 沈永生(1976—), Email: 250312413@qq.com  
资助信息: 2013年中国气象局预报员专项

## 1 资料与方法

根据2011年10月—2014年3月三明市强对流（短时强降水和冰雹大风）时段资料，发现三明市在该时段内共发生冰雹大风天气过程12个。以永安站为代表统计永安大气监测站1h雨量 $\geq 20\text{mm}$ 的天气过程，发现永安大气监测站在该时段内共发生短时强降水天气过程8个。

统计收集相应时段的每6分钟风廓线雷达资料，包括水平风矢量、垂直径向速度和功率谱，对强对流天气发生前后测站上空水平风矢量、垂直径向速度进行时空特征分析。

## 2 2012年4月11日永安强对流天气分析

在所收集的资料中仅2012年4月11日永安测站同时出现冰雹、大风和短时强降水等强对流天气，是风廓线分析的一个很好典型个例，本文首先选取该个例进行详细分析，以发现其中典型特征。

### 2.1 天气概况

2012年4月11日福建中北部出现大范围冰雹大风和短时强降水等强对流天气。此过程中三明市受灾最为严重，全市共有8个县（市）出现降雹，3个县（市）出现大风。作为风廓线雷达所在地的永安在此次过程中共有8个乡镇街道（安砂镇、曹远镇、燕东街道、燕南街道、燕西街道、燕北街道、上坪乡和青水乡）出现冰雹天气，城区测站16:46（北京时间，下同）观测到直径7mm的冰雹，18:34—18:37观测到27.5m/s的大风。全市1h雨量 $\geq 20\text{mm}$ 的测站有4个，1h雨量 $\geq 10\text{mm}$ 的测站有15个，占全永安市测站的72%。最大1h雨量为35.2mm，出现在城区。图1为4月11日永安城区1h雨量柱状图，从图中可以看出降水主要集中在17时（17:00—17:59，下同）和19时两个时次，1小时雨量分别为17.4和35.2mm，降雹和大风分别出现在强降水时段前的30~60min。

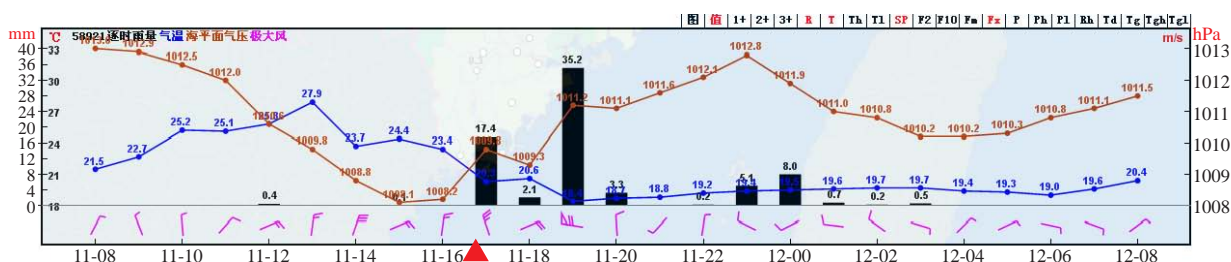


图1 2012年4月11日08时—12日08时永安逐时资料（▲7mm冰雹）

### 2.2 风廓线雷达资料分析

本次个例短时强对流时段集中在16—20时，本文选取11日08—24时16h的风廓线资料进行分析，主要分为四个时段，分别为：11日08—12，12—16，16—20时和11日20—12日00时。

#### 2.2.1 第一阶段短时强对流分析

从图2a中可以发现在08—12时3000m（700hPa，下同）以上为一致的西南气流，大于20m/s的大风从08时的3500m逐渐向下伸展至3200m，3000m高度的风速也由14m/s的偏西风逐步转为16m/s的西南风，西南急流从500hPa向下延伸到700hPa。10:50—12:00从1500m（850hPa，下同）至3000m有一偏西风转西北风，随后转西南风的过程，说明有一浅槽东移。此时，低层北风加强，且向上扩展，12时伸展至750m（925hPa，下同）。

08:00—10:30的1500~3000m永安上空以偏西风为主，750~1500m为西南风，随着时间的推移，南风的分量逐渐增强，风随高度的顺转越来越明显，说明低层暖平流加强。同时，低层南风加强，11:18在

500~1000m出现一大风核——最大风速达16.8m/s的西南风，1500m高度风向迅速转为北风，垂直风切变明显，说明测站上空存在有利于地面气旋发展的中小尺度系统。另外，从400~1600m在10:54前为偏南风，11:24为北风，期间有些数据空白，结合雷达回波此时有降水回波经过测站，数据空白为降水导致水平风计算误差过大而被剔除。

从图2b上看，11:18—11:24在低层（700~1250m）出现一中心达4.1m/s正速度区，且在其上方区域可以看出有弱的正速度区，而在其下方垂直速度较弱。从4m/s的垂直速度所处的高度说明低层750~1200m有雨滴下落，由于雨滴高度较低，雨滴因碰并作用增大效果低于其自身蒸发效果，到近地层测得的垂直速度降低，降水效率较差，实际观测到0.4mm降水。

总体而言，此阶段中层有浅槽过境，低层受小尺度气旋影响，由于南方的暖湿势力较强，永安处于暖区内增温明显，主要为能量积累阶段。

#### 2.2.2 第二阶段短时强对流分析

从图3a中可以发现在3000m以上西南气流继续增强，5000m（500hPa，下同）从观测的数值来看，

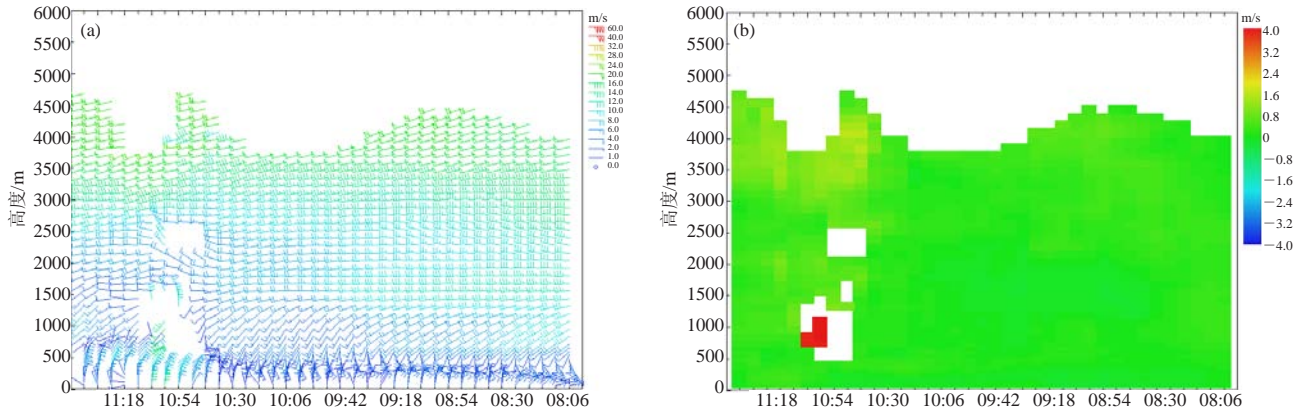


图2 2012年4月11日08—12时水平风速风向 (a) 和垂直速度 (b) 时间-高度分布

最大达24m/s，而在3000m西南风风速也同时增加到20m/s，大于20m/s的大风继续向低层扩展，最低扩至2500m，5000m在14:12—15:06可以看到一个明显的东北转西南风，说明此时500hPa有一槽过境。1500~3000m该阶段仍为西南气流控制，3000m的风速达20m/s，说明西南急流在500和700hPa继续增强。而此时，低层北风则抬升到近1000m。此阶段高层的强盛西南气流不断向低层扩展，而低层的北风同时也不断向高层延伸，同时两者不断加大，垂直风切变

不断增大达 $5.3 \times 10^{-3}/s$ ，有利于风暴的发生发展。在500~1000m有多次南风转北风过程，说明低层小尺度气旋发展活跃。

从图3b上看，此阶段无大于4m/s的垂直速度，实况测站也未发现降水，在14:06左右3000m开始出现1.3m/s的上升速度，说明上升速度午后起开始加强。

总体而言，此阶段中高层仍有浅槽波动，低层气旋多发且高度逐渐发展，南方的暖湿势力依旧强大，永安处于暖区内继续增温，能量继续堆积。

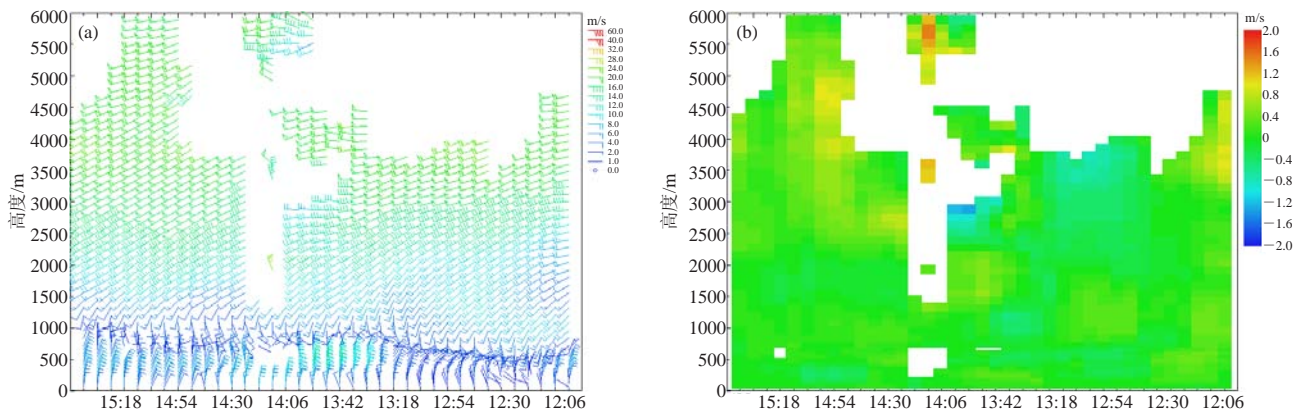


图3 2012年4月11日12—16时水平风速风向 (a) 和垂直速度 (b) 时间-高度-分布

### 2.2.3 第三阶段短时强对流分析

16—20时是永安对流风暴发展最为强盛的阶段，其中16:46降雹（直径7mm），18:34—18:37大风（27.5m/s），17和19时则分别出现1h雨量达17.4和35.2mm的强降水。随着超级对流单体的发展过境，风廓线雷达资料均出现一定程度的缺失，如16:36—17:12和18:36—19:00。本文通过资料连贯性分析，分析此阶段风场特征。

在图4a中16:30在5000~5500m出现29.1m/s的大风，切变增强，切变层次升高，强对流也开始发展加强。风向不连续线逐渐抬升，冰雹发生前16:30抬升至

1000m以上，而结束后已抬升至1500m。从冰雹结束后17:30的资料可以看出，在800~1500m的高度层出现了西北风，近地面为东北风，而1500m高度层以上仍为西南风，所以在低层为冷平流的情况下，出现了强度很强的降水。

18:30在500~800m高度探测到32m/s的西南风，随后测站上18:34—18:37探测到大风。18:54在6000m高度测到32m/s的西南风，近地面仍然是西北风，以冷平流为主。20:00之后，近地面风向由东北风转向偏南风，700hPa高度又有一波动东移，带来不稳定的降水。

在图4b中，16:30在5000~6000m在已有的资料中

出现一个8.2m/s大的下沉速度区，而在2500m以下均为弱的上升速度区（ $\leq 0.4\text{m/s}$ ），2500~5000m资料缺失，说明冰雹在16:30开始从5000m高空下落，根据连续性可以推断在16:30—17:12应该有一大的下沉速度区及地。18:54—19:54可以发现有一宽广的下沉速度大值区，其发展趋势是大值中心高度逐渐降低，在

19:24之后4000m高度以上下沉速度开始小于4m/s，并逐渐减弱，但在4000m以下下沉速度始终维持在4m/s以上。说明18:54开始强降水开始影响测站，并一直持续至19时，由于上层下沉速度减弱，说明强降水也将随后减弱。

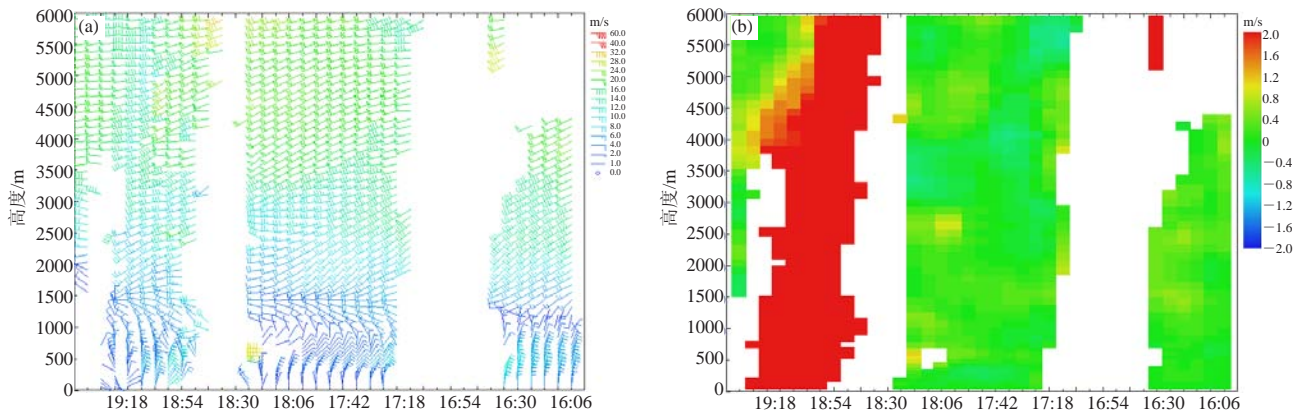


图4 2012年4月11日16—20时水平风速风向 (a) 和垂直速度 (b) 时间高度-分布

#### 2.2.4 第四阶段强降水分析

在图5a中在4000m以上西南气流减弱为以偏西气流为主，23时之后开始转北风且北风加大。在1500~4000m在19:48—21:00有一西北气流转西南气流过程，在22:12—23:06有一西南气流转偏北气流过程，说明冷暖势力在此交汇，低层锋区已压到永安，23:06—23:24的60~6000m为一致偏北风，23:30在1500m以下又转南风，说明地面锋区到达永安。

从水平风速上看，22:18—23:12在3000m以下有一西南偏南风—偏西风—偏北风过程，且500~1500m有一最大风速为27.4m/s的大风核，说明有强风暴过境。从雷达回波（图略）上看到在23时前后永安确实有一风暴经过市区。

从图5b可以看到，有三个时段下沉速度大于4m/s的时段，其中第一时段为19时强降水过程的尾声。第二个时段21:18—21:48，此时测站未检测到降水，考虑此时可能为强风暴外围的下层气流区，与随后发生的低层偏西大风有一定关联。第三阶段22:42—24:00同第三阶段降水时段，有一宽广的下沉速度大值区，其发展趋势是大值中心高度逐渐降低，22—23时出现明显降水，2h雨量合计13mm。

### 3 强对流天气特征统计

对风廓线雷达上能够表征强对流特征的相关数据进行统计（表1），相关数据选取依据：在水平风场方面选取12和20m/s风速的最低稳定高度，即此高

度点上需有1000m高度风速稳定在此风速上，反映急流的强度；0~6km垂直风变；0~1500m大风速核最大风速，可反映在低层是否存在小尺度气旋及其强弱；0~500m高度风向随时间旋转，反映近地层是否存在中小尺度气旋。在垂直速度方面选取下沉速度 $\geq 4\text{m/s}$ 的高度，在降水过程中可反映降水粒子发展的高度；下沉速度最大值，在降水过程中可认为其大小与降水粒子成正比；最大值高度，在降水过程中可认为是大粒子所处高度。

### 4 结论

在水平风场上：

1) 在西风带系统引发的强对流发生前，在水平风场上1500~5000m一般伴有短波影响，0~500m伴有风向旋转，说明中低层有小槽波动，近地层有小尺度气旋活动；台风引发的短时强降水风廓线特征主要受台风的位置和移向影响，受台风环流影响中低层风向、风速一致性较好，仅近地层可能伴有小尺度气旋；副热带高压边沿强对流因其发展的高度较高，强天气发生时中低层均会出现明显的小尺度旋转。

2) 降雹天气时5~6km最大风速均达25m/s以上，以西南或偏西风居多，短时强降水时最大风速均达15m/s以上。

3) 在0~1500m高度出现大风核（ $\geq 20\text{m/s}$ ）时，一般伴随降雹天气。

4) 降雹时6000m以下一般会出现 $\geq 20\text{m/s}$ 的西南急

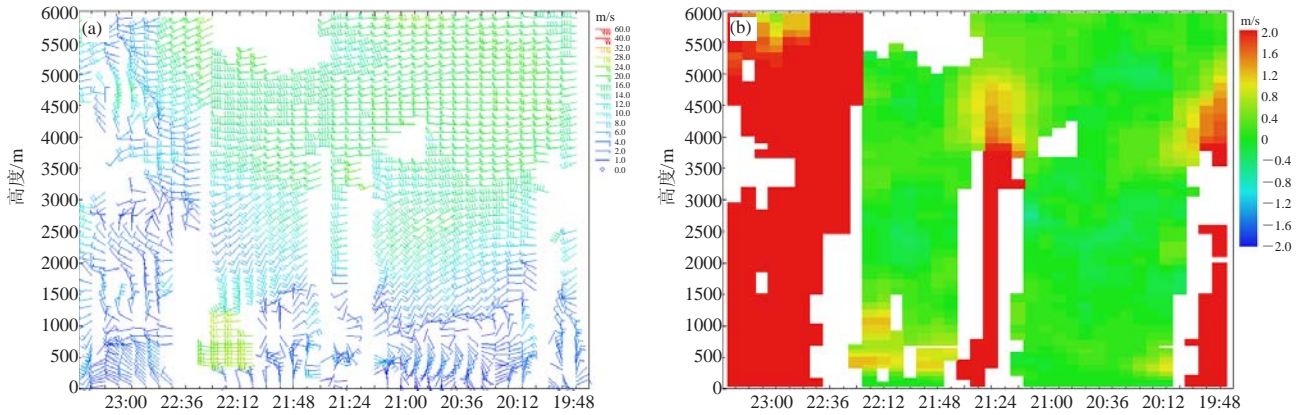


图5 2012年4月11日20—24时水平风速风向 (a) 和垂直速度 (b) 时间-高度分布

表1 2011年10月—2014年3月三明市强对流天气风廓线雷达特征统计

日期	强天气类型	20m/s	12m/s	0~6km	0~1500m	0~500m	≥4m/s	最大值	最大值高度	
		最低高度/m	最低高度/m	垂直风切变/(m/s)	核最大风速/(m/s)	风向旋转	高度/m	/(m/s)	/m	
		水平风场					垂直风场			
2012年04月11日	①②	3600	1560	32.0	30.3	有	6000	8.2	5160	
2012年04月12日	①②	3000	1200	31.9	26.1	有	3800	8.3	3120	
2012年04月15日	①②	2040	1080	31.3	无	有	3720	5.3	2760	
2012年04月28日	①②	无	1200	25.5	无	有	3480	5.4	1200	
2012年05月01日	①②	1920	840	29.2	无	有	4440	8.6	3480	
2013年03月20日	①②	1320	960	46.5	20.4	有	3360	7.1	3000	
2013年03月24日	①②	1920	1080	34.7	无	有	3720	7.2	2640	
2013年04月04日	①②	1440	960	30.7	无	有	3720	8.1	2160	
2013年04月17日	①②	3360	1320	30.0	无	有	3600	6.8	2640	
2014年03月26日	①②	3360	3000	24.2	无	有	无	无	无	
2014年03月27日	①②	3840	1920	27.6	无	有	3600	6.5	3240	
2014年03月28日	①②	2040	1320	24.7	无	有	3120	5.8	1920	
2012年04月25日	②	1200	600	39.6	无	有	4080	9.6	3120	
2012年06月11日	②	无	1920	18.5	无	有	5280	9	3960	
2012年08月03日	③	前期一致偏北气流, 后期台风中心从测站东北侧移至西北侧, 转为一致偏南气流						5040	7	2760
2013年04月18日	②	4080	960	27.1	无	有	4440	7.4	2160	
2013年05月10日	②	3240	1800	23.0	无	有	4200	6.8	3120	
2013年06月04日	②	无	1920	12.9	无	有	4200	8.4	960	
2013年08月26日	④	无	无	28.9	无	各层旋转明显	5760	7.2	2880	
2013年08月30日	③	1000m以上为一致北风, 1000m以下强降水时段伴有风向旋转风速突变特点						5760	8.3	3600

注: ① 冰雹大风, ② 短时强降水, ③ 台风短时强降水, ④ 副热带高压边缘短时强降水。

流, 可探至4000m以下,  $\geq 12\text{m/s}$ 的急流可探至1600m以下; 而强降水 $\geq 12\text{m/s}$ 的急流可探至2000m以下。

在垂直速度上:

1) 测站出现降水时其上空均出现 $\geq 4\text{m/s}$ 的垂直速度区, 出现强对流天气时 $\geq 4\text{m/s}$ 的垂直速度区一般会扩展到3600m以上, 强度越强扩展的高度越高。

2) 降雹和短时强降水的最大速度值差别不明显, 但一般降雹时的最大正速度区(3000~5000m)高于强降水的最大正速度区(1000~3000m)。

由于永安风廓线雷达建站时间短, 测站出现强对流天气的个例明显偏少, 受其制约, 本文把三明区域

出现冰雹大风以及测站出现1h雨量 $\geq 20\text{mm}$ 的个例均作为研究对象, 因个例少, 所以本文仅针对强对流风廓线雷达进行特征分析, 总结的指标具有一定的局限性, 检验效果如何需待在今后的实践中检验并进一步完善。

#### 参考文献

- [1] 顾映欣, 陶祖钰. UHF多普勒风廓线雷达资料的初步分析和应用. 气象, 1991, 17(1): 31-36.
- [2] 李华宏, 曹杰, 杞明辉, 等. 雷达风廓线反演在云南强降水预报中的应用. 高原气象, 2012, 31(6): 271-277.
- [3] 刘淑媛, 郑永光, 陶祖钰. 利用风廓线雷达资料分析低空急流的脉动与暴雨关系. 热带气象学报, 2003, 19(3): 63-68.

# 南京机场20130625低空风切变天气过程分析

聂颖<sup>1</sup> 余星源<sup>2</sup> 戴维士<sup>3</sup>

(1 民航江苏空管分局气象台, 南京 211113; 2 南京信息工程大学, 南京 210044; 3 江苏省气象局, 南京 210008)

**摘要:** 2013年6月在南京机场发生了一起多机组报告遭遇风切变并采取中断起飞或进近操作的天气过程。此次过程使得多架次飞机采取中止进近或紧急避让, 对飞行安全造成较严重影响; 而因为风切变的隐蔽性和突发性, 气象服务在当天未能提前做出预报。本文通过对过程中观测资料、机场当地的雷达及其反演产品以及物理量场的资料总结, 从低层理查森数计算结果发现本次过程中低空的风切变情况与地面观测上一次简单的风向切变不同, 中低空切变线过境的低层切变线辐合引发的机场进近区域低空强烈湍流, 使低空飞行即将降落的航空器产生强烈颠簸, 从而操作困难。中低层的切变线过境时可以激发持续较长时间近地面低空风切变, 此种类型的低空风切变的开始和结束时间与中低空切变线的移动情况相关。在探讨此次风切变机制时, 发现地面观测资料多要素的转折性变化、多普勒雷达产品和WAFS (Weather Area Forecast System) 数值预报产品的再分析资料对风切变预报有一定的参考作用, 可以帮助预报员做出判断, 从而保障飞行安全。

**关键词:** 风切变, 多普勒雷达产品, 理查森数, 低层切变线辐合机制

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.06.009

## Research of the Low-Level Wind Shear Process in 20130625 in Nanjing Airport

Nie Ying<sup>1</sup>, She Xingyuan<sup>2</sup>, Dai Weishi<sup>3</sup>

(1 Jiangsu Air Traffic Management Bureau, Nanjing 211113 2 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044 3 Jiangsu Meteorological Bureau, Nanjing 210008)

**Abstract:** In June 2013, there was a report that many flight units encountered wind shear and their take-off was interrupted due to the weather process in operation at Nanjing airport. This process urged several planes to take emergency avoidance, and caused a serious effect on the safety of flight. Besides, because of the hidden and sudden wind shear, meteorological service agencies failed to make an advance prediction that day. This paper summarizes the data of the process of observation, products of local radar in the airport and data of the physical quantity field. From the low-level Richardson number of wind shear, we find that its direction was different from the last simple process of low altitude in surface observation and that the convergence of the shear line caused a strong turbulence near the airport, shaking low flying airplanes strongly, thus making them difficult to operate. From the analysis of the long-time wind shear weather process, we think that low layer shear line transit can cause a long-time low-level wind shear, and when it occurs in the approaching area, the wind shear will be very dangerous for flights. In the discussion of the wind shear mechanism, we find that slight changes of ground observation data, Doppler radar products and the Weather Area Forecast System (WAFS) numerical forecast products have some reference function to the prediction of wind shear, and it can help forecasters use their judgment, so as to ensure flight safety.

**Keywords:** wind shear, radar products, Richardson number, low-level convergence

### 0 引言

在航空飞行过程中, 起飞和降落阶段的风切变是造成飞行事故的主要杀手。因低空风切变天气的突发性、隐蔽性较强, 气象保障过程中, 对风切变天气的预报始终是难点。国外研究<sup>[1-2]</sup>指出形成风切变的一些

天气学和地形因素。赵鸣等<sup>[3]</sup>观测并研究了天津250m气象铁塔的观测资料, 发现风随高度变化值夜间大、白天小, 高度越高越明显; 风速切变存在随温度梯度增加而增加的现象, 同样越高越明显。李秀莲等<sup>[4]</sup>阐述了风切变对飞行的影响及其预报时效分析, 认为各种风切变存在的时间和空间尺度不同, 高度也不同, 对飞行影响程度各异, 可预报的时效差异也较大。高空槽和急流风切变时间和空间尺度大, 可预报的时效达十几个小时; 中层急流空间尺度次于前者; 逆温层

收稿日期: 2014年3月11日; 修回日期: 2014年9月2日  
第一作者: 聂颖(1969—), Email: 18936881669@126.com  
资助信息: 民航江苏分局2014年气象服务项目

顶附近以及跑道面上的风切变不仅空间尺度小、存在时间短且变化大，预报时效只能是临近预报。

本文中探讨的这次多机组报告风切变天气过程，发生在近地面区域，但隐蔽性强，持续时间长且影响的航班数量多，在当地较为罕见。文中使用机场当天观测记录，通过常规资料分析、去量纲值比较、反演资料分析和再分析预报数据来探讨预报方法，使用湍流数据分析还原飞机的大气动力影响情况，希望找出此次过程发生的特点，为未来预报提供帮助。

## 1 探测资料概况

南京机场地面观测使用Vaisala公司生产的自动观测设备，提供风、气压、温度和天气现象等的24h观测数据，每小时向世界航空组织发布一次各种气象要素的天气报告。南京地区的雷达探测资料包括各种降水天气强度、高度、速度回波资料以及雷达反演风廓线资料（velocity azimuth display, VAD）风场资料。因近地面风切变现象的发生区域常常很小，在地面观测设备中常常探测不到，很多情况下机组报告也成为探测的主要途径。

## 2 过程分析

### 2.1 天气过程

2013年6月25日11:13—13:32（北京时，下同），南京机场进近区域范围收到四次航空器报告的天气（表1）。

表1 2013年6月25日南京机场四次航空器报告资料

时间/BT	地点	天气现象
11:13	24号跑道滑行区域	风切变
12:02	06号跑道进近区域	强上升气流
12:51	06号跑道，600英尺高度附近	风切变
13:31	距06号跑道6km，高度为300~400m	强颠簸（或垂直方向风切变）

通过表1航空器的报告可见在11:13—13:30南京机场近地面附近发生了水平方向和垂直方向风切变，最先出现在地面附近，之后位置稍高。当天气象观测记录（表2）显示当时机场小雨伴轻雾天气，09:00—10:00地面风速较小，而风向开始变化，10:00—12:00风向出现了很大的改变，风速也有所增加，达到了特殊天气变化的标准。为了较清楚地表现变化过程，对全部观测值相对于均值的变化程度进行计算，使用各物理量和09:00—14:00的物理量均值进行比值计算，利用这种无量纲方法对观测资料的演变进行分析（图1），综上可见09:00—14:00南京机场的风向从西南风转为东北风，发生了降温，同时能见度迅速好转，显示一次低空切变线经过机场并最终受冷气团影响的天气过程。11:00—12:00各项要素变化最

为激烈，而在次期间滑行中和进近区域的飞机同时观测到地面和超低空的风切变或气流紊乱情况，并认为可能对飞行造成影响而中止了起飞。

表2 2013年6月25日南京机场观测资料

时间/BT	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00
平均风向/°	140	170	50	50	70	60
平均风速/(m/s)	3	3	4	5	4	4
主导能见度/m	1300	1600	8000	7000	8000	7000
天气现象	-RA, BR	-RA, BR	-RA, BR	-RA, BR	-RA, BR	-RA, BR
云/m	5Fn210 8Sc1200	6Fn210 8Sc1200	2Fn150 6Fn210 8Sc1200	6Fn210 8Sc1200	6Fn210 8Sc1200	6Fn210 8Sc1200
温度/°C	25.9	26.3	23.1	22.1	22.8	22.8
湿度/%	94	94	94	95	95	95
修正海平面气压/hPa	1001.7	1001.4	1001.6	1001.3	1001.1	1000.8

注：-RA代表雨；BR代表轻雾；Fn代表碎雨云；Sc代表层积云。

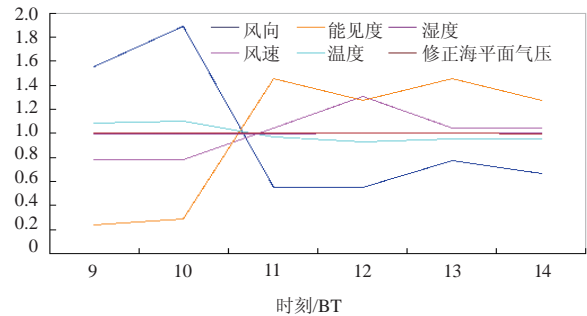


图1 2013年6月25日各观测分量均值去量纲化的演变  
横坐标时间（北京时），纵坐标比值

为了找到这次风切变天气过程持续较长时间的原因，发现预报规律，查找以下几个方面的资料，并进行了探讨分析。

### 2.2 天气形势

对当时的天气形势进行分析后发现，地面上南京地区处于一个鞍形场中，北侧有一低涡，雨区成东西带状分布于本场北侧（图略）。高空850hPa上在本场附近有一个低涡切变线，气旋性切变明显。在700和500hPa上均处于槽线的槽前偏西南气流之中，暖湿气流输送条件好，在机场及周围地区形成降水（图略）。在切变线影响及持续性较弱降水的期间，机场地面及近地面上空出现了持续两个多小时的低空风切变及乱流天气过程。

### 2.3 雷达资料

#### 2.3.1 低空风切变发生和消散时段的降水天气的不同特征

在雷达图像上，风切变报告的初始时段（图2a），机场处于降水回波带中，飞机报告位置的西北侧和北侧以及东北都有较强降水。强回波中心顶高达到12km左右。之后，降水回波略南压，机场受这次中低空的切变线影响造成的降水持续了近10h，强降水在移动靠近机场时渐渐分散，之后的时段机场逐渐被数块较

强的降水回波包围，且周围回波越来越趋于零散。最后一次机组报告时（图2b），降水已较之前零散，位置在第一次报告位置的南10km的小块降水区中。显示

受切变线南下影响，地面和近地面上空气流紊乱。发生自北向南的多起机组报告水平和垂直方向的风切变现象。

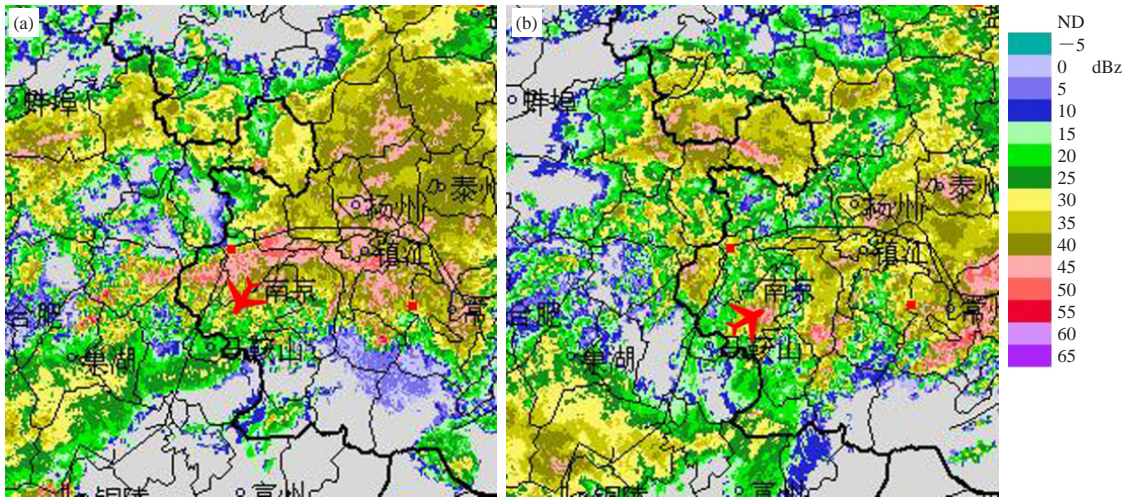


图2 2013年6月25日南京机场两次风切变报告时的雷达回波（单位：dBz）  
（a）11:13第一次机组报告，（b）13:31第四次机组报告

### 2.3.2 低空风切变发生和消散时段的雷达速度图分析

雷达基本反射率回波图上能较好地探测降水和强对流的情况，在雷达的风场资料上可以直接探测风的变化情况。

图3a是对风切变报告阶段11:13多普勒雷达速度回波图的计算反演结果，图中代表了11:00—13:30阶段的速度图像。可见四次风切变报告时的风场情况。图3a上的零速度线反映的风场旋转和切变特性明显，

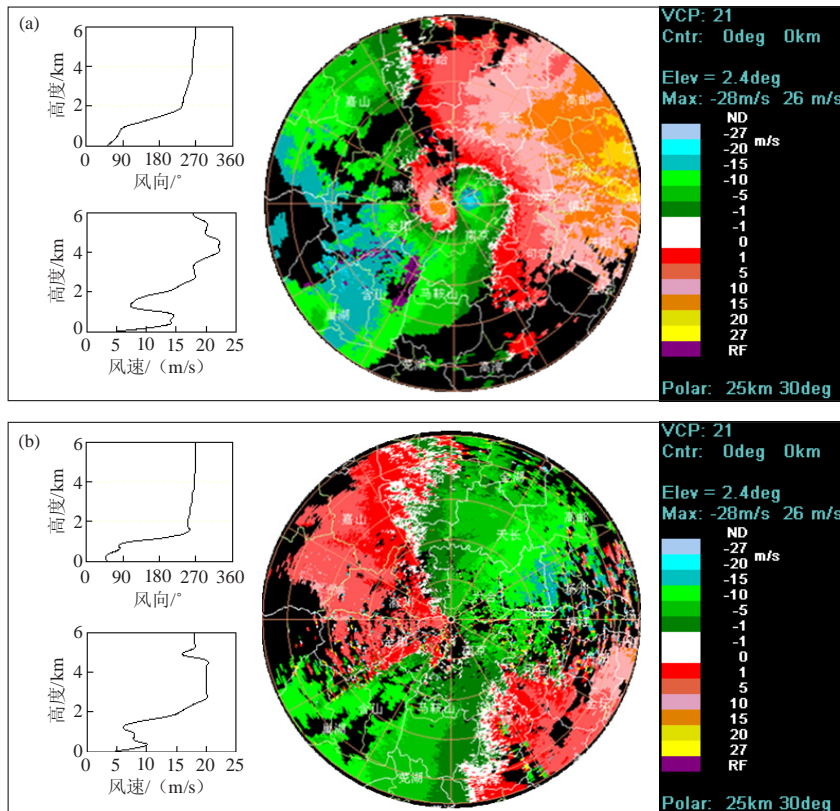


图3 2013年6月25日11:13（a）和14:49（b）南京机场的雷达速度和反演计算

零速度线的S形旋转缺口绿区正对南京机场所在的位置。风向随高度顺转，在中低层有一个突变的过程。风速图上随高度在低层有两个风速突变的特性，即在2km以下低层到中层有一个突增的大值区域，之后迅速减小再增加。显示在多次风切变的报告阶段的低层风切变特征。图3b显示了风切变密集报告阶段结束后，风场的探测情况。可见在低层2km以下的风向仍然顺转，而风速的变化远小于之前，之后风切变报告消失。

### 2.3.3 低空风切变发生时段的风速反演风廓线资料风场特征

详细分析四次风切变发生时段的风速反演风廓线资料 (velocity azimuth display, VAD)，在四次报告过程中显示，300~2100m的狭窄高度空间里，风向从50°~100°的偏东风转为200°~250°的偏西风，垂直方向的风向变化在100°以上。为了更清楚地分析风向风速在垂直方向上的变化，对风廓线资料做进一步研究计算。图4可以更清楚地看到在垂直方向上的风向风速的变化特征：在垂直方向上风速呈V型变化，300~2100m风速存在一个低谷，风向的变化曲线也在这一高度区间出现了折角；而根据航空器的报告，风切变也大致发生在这一高度区间。

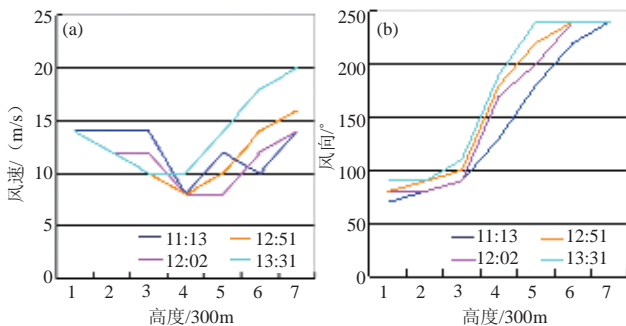


图4 2013年6月25日机组报告四次时次过程的风切变的风速(a)和风向(b)随高度的变化

## 2.4 数值预报再分析产品

在对数值预报产品的比较后发现此次风切变过程中，江苏省气象台对Weather Area Forecast System (WAFS) 数值预报产品的再分析资料在大尺度范围以及发展趋势上有较好的参考作用，图5中WAFS数值预报风切变产品显示出区域性的0~3km强风切变区域的东移南下过程，南京以北的淮河流域在垂直方向上存在着密实强风切变中心区域，未来的2h内强风切变中心随时间自北向南移动，强风速中心渐趋疏散，但仍保持一定强度，而在消散之前机场出现了密集报告的风切变天气。同时，这种大值区的范围也与当天的

降水区域有很好的吻合度。说明低空风切变的形成和切变线降水之间的关系，以及风切变的存在对区域性降水的维持的有利作用。在上空切变线降水天气过程中，降水范围可以辅助制作风切变区域预警。但是，由于范围较大，精确预报需要结合其他资料作出判断。

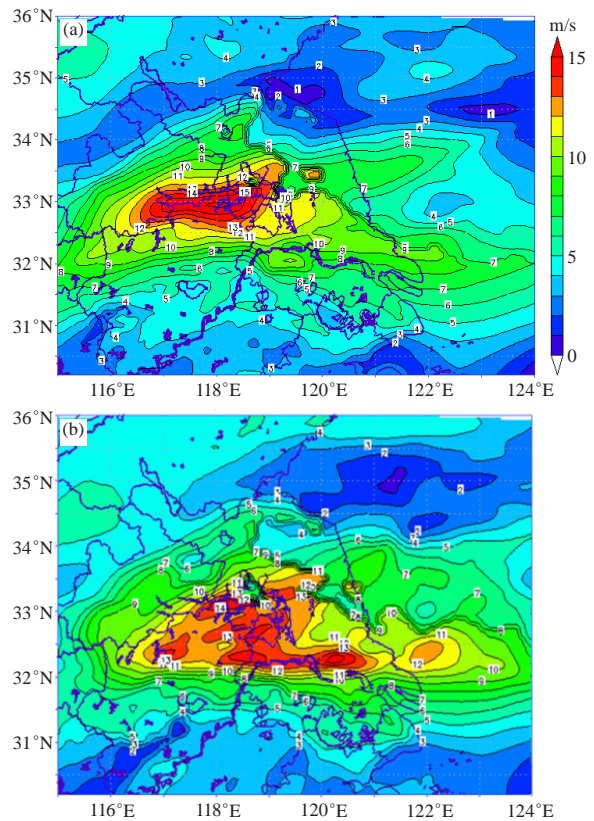


图5 2013年6月25日11:00 (a)和13:00 (b) WAFS数值预报产品的0~3km风切变再分析资料

## 3 飞行器的环境湍流影响指数

为更加深入地研究此次低空风切变过程的内在机制，对过程的湍流物理量进行了计算。因为风切变产生的湍流是影响飞行安全的要因，所以通过对湍流指数的分析可以判断机组报告风切变时飞行中气层的风切变现象造成的湍流对飞机飞行姿态和动力的影响情况。理查森数 ( $Ri$ ) 的计算如下：

$$Ri = \frac{g}{T} \cdot \frac{\gamma_d - \gamma}{\left(\frac{\Delta u}{\Delta z}\right)^2}$$

式中， $\bar{T}$ 为气层的平均温度， $g$ 为重力加速度， $\frac{\Delta u}{\Delta z}$ 为单位高度速度的变化率， $\gamma_d - \gamma$ 为干湿空气温度递减率的差值。越小，湍流发展越强烈<sup>[5]</sup>，一般来说，颠簸也越强。根据经验，当 $4 > Ri > 0.5$ 时，一般飞机有轻度颠簸；当 $Ri < 0.5$ 时，有中度或强烈颠簸。根据自动观测系统的记录和多普勒雷达的反演风资料，计算了地

面到2100m高度的 $Ri$ ，并对比机组遭遇的四次风切变时 $Ri$ 随高度的变化（图6）。

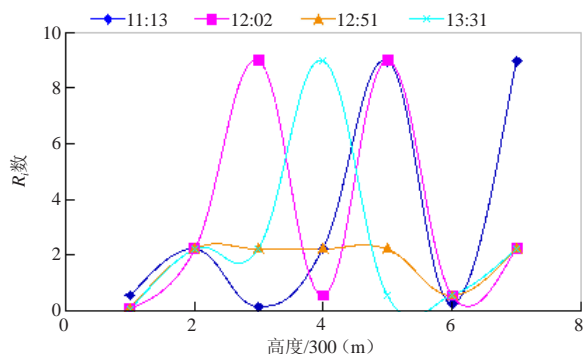


图6 2013年6月25日南京机场机组报告四次时次过程的风切变的高度- $Ri$ 图

可见四次过程在300~1800m高度上均有小于1.0的值出现，这两个存在湍流较强的区域也是几次风切变的报告区域，即300m左右和进近区域 $Ri$ 基本维持在4以下，也就是机组会有轻度以上的颠簸感，四次过程在0~300m高度上 $Ri$ 数均小于0.5，有中度到强烈的颠簸，飞机在如此低高度上出现强烈的上下波动，对飞行危害极大，而此次过程持续时间之长，影响飞行数量之多，也较罕见。初始阶段的第二次飞机报告过程中垂直方向2000m的距离里，低 $Ri$ 数有3个之多，说明大气在飞机降落区域湍流极不稳定，使飞行受到极大地影响。

#### 4 结论

分析2013年6月25日一次多机组遭遇低空风切变过程，机场当时正处于区域性的切变线辐合降水之

中，低层切变线在移动过程中产生了较长时间的低空风切变，包括水平和垂直方向的风切变。持续近2h的低空风切变对飞机的飞行动力环境产生了一定影响，微小的操作失误都有可能造成灾难性的后果。此次过程同以往认识中大多数的风切变生消快、移动快和范围不大等特征不同，需要在预报中引起注意。

在雷达的资料图中，风向和风速切变变化预示着风切变的发生和发展，但预报时效较短，只能在临近预报中使用。WAFS资料的风切变再分析预报资料提供了较长的预判时间和大范围的风切变信息，但提高精确性需要结合其他资料。当地面观测系统探测到风向和风速的变化时，需要结合上述资料分析判断未来风切变的发生和维持情况，如出现大于 $60^\circ$ 的风向变化，即便是5m/s左右的风速，也需要引起注意，在稍高区域里可能存在影响航空器飞行的低空切变线，需要及时发布风切变警报。中低层切变线位置和移动情况是机场未来可能发生和消散低空风切变的直接原因。

#### 参考文献

- [1] Bencatel R, Sousa J. Shear Wind Estimatio. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. 08-11 August 2011, Portland, Oregon.
- [2] Chan P W. Atmospheric turbulence in complex terrain: Verifying numerical model results with observations by remote-sensing instruments. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2009, 103: 145-157.
- [3] 赵鸣, 唐有华, 刘学军. 天津塔层风切变的研究. *气象*, 1995, 22(1): 7-12.
- [4] 李秀连, 付强, 王科, 等. 风切变对飞行的影响及其预报时效分析. *气象科技*, 2010, 38(2): 170-173.
- [5] 赵树海. 航空气象学. 北京: 气象出版社, 1994, 144-158.

# 淮安地区雷暴日及地闪特征分析

张德宏 王苏 唐宇 王山旗

(江苏省淮安市气象局, 淮安 223001)

**摘要:** 利用2007—2012年的江苏省闪电定位仪资料, 结合1961—2012年的淮安地区6个县(区)的雷暴日人工观测资料, 分析了该地区地闪的时空分布特征。结果表明, 地闪次数与雷电活动的强弱、当日发生的频次有着密切的关系。地闪的季节变化呈单峰型分布, 极值出现在7月或者8月。绝大多数地闪是负闪击, 占95.3%。地闪密度有南多北少的特征, 重落雷区和强落雷区集中在洪泽湖的南部、盱眙和金湖地区。

**关键词:** 闪电定位仪, 地闪特征, 地闪密度分布, 时间权重法

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.06.010

## Analysis of Lightning Density in Huaian Region

Zhang Dehong, Wang Su, Tang Yu, Wang Shanqi

(Huai'an Meteorological Bureau, Huai'an 223001)

**Abstract:** By studying the cloud-to-ground (CG) data from 2007 to 2012 and the observational data of thunderstorm of six stations in Huai'an during 1961 to 2012, the climatic characteristics of the lightning are analyzed. The results show that the numbers of lightning in one day have a close relationship with their activity intensity and frequency on the same day. Seasonal variations of lightning are unimodal distribution and the extreme value always appears in July or August. The lightning activities occurred more frequently in southern regions than in northern regions. Lightning protection should be an important task particularly in regions surrounding the south of Hongze Lake, Xuyi and Jinhu.

**Keywords:** lightning location system, lightning characteristics, lightning density distribution, time-weighted average method

### 0 引言

近几年随着雷电探测技术的发展, 闪电定位系统监测越来越受到重视, 闪电定位仪在我国得到广泛应用。目前在江苏省建设的闪电定位系统采用ADTD-2型三维闪电探测仪探测系统, 该闪电探测系统可以全天候监测测站150~200km范围内的地闪, 输出的参数有地闪的时间、位置、强度和极性, 该系统共设9个探测站点, 分别位于徐州、连云港、淮安、建湖、盱眙、扬州、南京、南通、宜兴, 实时地将各站所测数据发往中心数据站进行定位算法处理, 进而计算出闪电的位置、强度等。

淮安市地处江苏的中北部, 是暖温带与亚热带过渡地带, 冷暖气流频繁交汇, 多雷电灾害。以往研究<sup>[1-2]</sup>已发现春季和秋季雷暴日主要的发生区域位于江苏的中南部, 并且平均雷暴日均自北向南增多, 夏季雷暴高值区向北推移主要位于江苏的中部和中北部地区。但目前对淮安地区的闪电定位仪资料还没有开展系统性分析。本文旨在分析淮安地区地闪活动特征, 并

结合人工雷电观测资料, 绘制淮安地区的地闪密度分布图, 为防雷减灾研究与服务提供科学参考。

### 1 资料

收集整理淮安市辖涟水、市区、楚州、洪泽、金湖、盱眙等6个气象观测站1961—2012年雷电资料、2007—2012年闪电定位仪资料。资料统计时, 一日之内发生数次雷暴时只计为一个雷暴日; 一小时内发生数次雷暴时只计为一个雷暴时; 在淮安地区有一次闪电记录就视为发生了一次地闪。

### 2 淮安地区闪电活动的气候特征

#### 2.1 总体特征

2007—2012年, 淮安地区共发生地闪的次数不少于199,988次。其中2007年总地闪次数最多, 为52,877次; 2012年次数最少, 为20,248次。对比目测雷击数据(表1)发现, 雷暴总日数最多的年份, 并不一定是总地闪次数最多的年份。比如2008年虽然雷暴总日数最多为228d, 但地闪总次数却明显比2007年(雷暴总日数为195d)偏少; 2009年虽然雷暴总日数最少为142d, 但监测到的地闪总次数却明显比2012年(雷暴总日数为150d)明显偏多。这说明地闪次数与雷电话

收稿日期: 2014年5月14日; 修回日期: 2015年4月1日  
第一作者: 张德宏(1963—), Email: haff001@126.com

动的强弱、当日发生的频次有着密切的关系。因此在进行雷电分析的时候,应充分利用人工观测雷暴数据和地闪定位数据进行综合分析。

表1 2007—2012年雷暴总日数、地闪总次数统计

年份	6站人工观测雷暴总日数	地闪总次数	正闪次数	负闪次数
2007	195	52877	2344	50533
2008	228	35934	1726	34208
2009	142	32361	2170	30191
2010	192	33842	1289	32553
2011	196	24726	824	23902
2012	150	20248	1385	18863

## 2.2 时间分布特征

从月总地闪次数变化图(图1)可以看出,淮安地区总地闪次数有明显的季节变化特征,呈单峰型分布。1, 10, 11, 12月很少发生闪电, 2—5月闪电略有增加, 6月闪电开始增多, 7, 8月猛增, 9月骤减。其中2007, 2008, 2011年发生地闪次数在7月达到峰值。2009, 2010, 2012年的峰值出现在8月。分析可知, 地闪主要发生在7—8月, 是因为这个时期空气中水汽的含量最充足, 暖湿气流的上升使得对流旺盛, 云体发展较高, 有利于电荷的形成和积累, 较易形成地闪。进入9月以后, 天气开始转凉, 天气较干燥, 地闪也就迅速减小。从这6年的数据来看, 2—3月会有一个小峰值, 比如2007, 2009, 2010年, 这与淮安地区的气候特点有关。2—3月初春乍暖, 气温逐渐上升, 热力作用开始加强, 若遇到前期温度升温较高, 而南下的冷空气势力也很强, 冷暖空气交汇时, 容易出现春雷、发生闪电, 这与当年发生雷暴初日吻合。此外, 分析7—8月的地闪资料还会发现, 地闪主要集中在12—20时, 这主要是因为午后到傍晚下垫面受日照影响, 温度升高, 热力条件好, 有利于雷电发生。

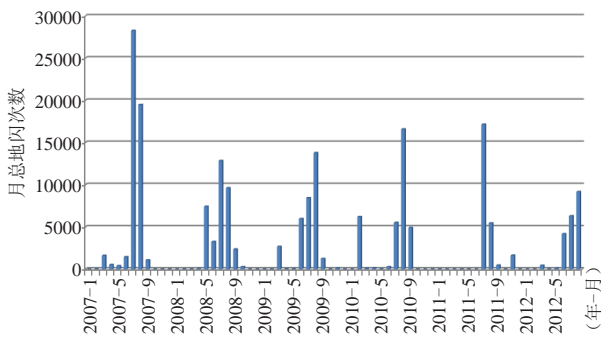


图1 2007—2012年淮安地区月总地闪次数

## 2.3 空间分布特征

淮安地闪空间分布有明显的规律性。2007—2012年, 市区最少为986次, 盱眙县最多达10956次, 是

市区的11倍。其他县(区)次数相差不大, 从少到多依次是涟水县(4113次)、淮阴区(4131次)、洪泽县(4259次)、楚州区(4958次)、金湖县(5183次)。盱眙县地闪发生次数是其他县(区)的2倍以上。考虑到因不同地区面积不同对地闪总次数的影响, 本文计算了每平方千米的地闪次数(简称年平均地闪次数), 并与人工观测的年平均雷暴日数对比(图2)。分析发现, 两类数据均具有南部多、北部少的地域分布特征。

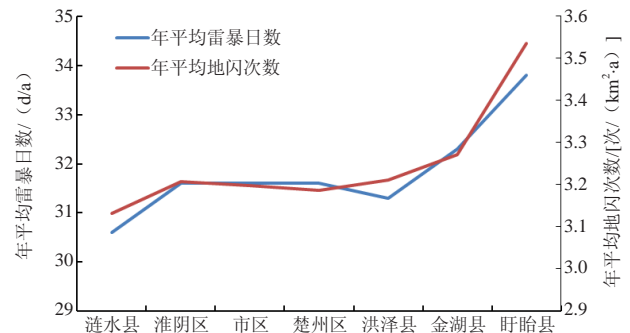


图2 2007—2012年淮安的年平均雷暴日数和年地闪次数分布

## 2.4 正负地闪变化特征

2007—2012年淮安地区地闪平均强度为31.86kA, 盱眙平均强度最强, 为36.5kA, 淮阴区最小, 为29.1kA, 地闪强度总体上也呈北低南高(表2)。闪电定位仪探测到的地闪分为正地闪和负地闪, 其中正地闪次数偏少, 约占总次数的5%左右, 大部分为负地闪。这可能是因为对流云团中负电荷主要位于云体的下部, 正电荷主要位于云体的上部, 云体的主要部分与地面之间更容易发生负闪有关。进一步分析发现, 全市正地闪的平均强度为38.52kA, 明显高于负地闪, 分析原因主要是因为负地闪发生的机会多于正地闪, 而云中电荷是守恒的, 单次正闪的强度就比负闪的强。此外, 不同强度的地闪出现的频率也有很大差别, 各县(区)闪电强度多集中在20~50kA的频率最高, 占总地闪的50%以上, 小于20kA的闪电频率次之。100kA及以上的闪电次数最少, 只有1%~2%。

表2 淮安地区各地闪电强度分布统计

台站	正地闪 平均强度	负地闪 平均强度	负地闪次数/ 正地闪次数	不同强度的地闪出现频率(%)			
				0~ 20kA	20~ 50kA	50~ 100kA	≥100 kA
市区	35.8	-30.2	16.5	30	54	14	2
淮阴区	39.7	-27.0	15.2	40	50	9	1
楚州区	33.9	-28.3	12.4	37	52	10	1
涟水县	44.3	-28.6	17.5	34	56	9	1
洪泽县	36.4	-31.8	18.9	21	65	12	2
盱眙县	42.6	-30.9	24.2	17	71	11	1
金湖县	36.9	-30.9	15.9	34	56	9	1

### 3 地闪密度分布特征

传统的人工观测雷暴资料虽表征雷电的时空分布特征,但仅由本观测站是否听到雷声为准。受监听范围限制,在测站稠密时,容易出现各站重复记录;在测站稀疏时,各站人工监听的雷暴日参数实际上只能用于各分隔区域,不能表示连续区域。另外听到的雷声既包括云地闪发出的,也包括云内闪和云际闪发出的,并不能准确表征地面落雷的频繁程度。而闪电定位仪具有自动化程度高,资料客观、准确等优点,用其监测雷电,可以弥补传统人工观测误差大、主观性强的缺点。

为了更为客观地求得淮安地区地闪密度分布,本文综合利用人工观测雷电数据和闪电定位仪的监测数据,使用时间权重法计算出地闪密度 $N_g^{[3-4]}$ 。具体做法是:

1) 淮安市国家基准气候站安装有闪电定位系统,以该站点(118°56'E、33°38'N)为中心,按 $0.06^\circ \times 0.06^\circ$ 间距,共划分出318个格点;

2) 根据人工观测资料计算地闪密度 $N_{g1}$ (次/ $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ )。将划分出的318个格点分解到6个测站,根据6个测站多年平均年雷暴日(如市区1961—2012年的年均雷暴日为31.6d),再利用GB/T 21714.2-2008中给出的 $N_g$ 计算公式:

$$N_g = 0.1T_d \quad (1)$$

式中, $T_d$ 为格点对应6个测站多年平均的年雷暴日,进而求出该格点的地闪密度值,记为 $N_{g1}$ ;

3) 根据闪电定位仪观测资料计算地闪密度 $N_{g2}$ (次/ $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ )。利用闪电定位监测到的某地区全年地闪次数,就可以得到该地区的地闪年平均密度。计算公式为:

$$N_{g2} = D/S \quad (2)$$

式中, $S$ 为以各个格点为圆心、半径为3km的区域面积, $D$ 即为该区域内一年的地闪次数(次/a);

4) 用时间权重法计算 $N_g$ (次/ $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ )。将用上面两种方法计算得到的 $N_{g1}$ 和 $N_{g2}$ 带入时序多指标决策TOPSIS中的时间权重法公式:

$$N_g = \frac{N_{g1} \times T_1 + N_{g2} \times T_2}{T_1 + T_2} \quad (3)$$

式中, $T_1$ 是人工观测雷暴日资料的年数, $T_2$ 是有闪电定位仪观测资料的年数。

利用式(3)就可以计算出318个格点的 $N_g$ 值。

5) 为给出淮安地闪密度的一个宏观分布,根据雷电活动强弱将淮安地区分为4个区域,其中地闪密度 $\leq 3.30$ 次/ $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 为弱落雷区;3.30次/ $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ <地闪密度 $\leq 3.70$ 次/ $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 为一般落雷区;3.70次/ $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ <地闪密度 $\leq 4.10$ 次/ $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 为重落雷区;地闪密度 $> 4.10$ 次/ $\text{km}^2 \cdot \text{a}$

为强落雷区。

6) 根据以上的区域划分,绘制淮安地区地闪密度图(图3),发现在淮安地区约有41.5%的区域属于一般落雷区,主要分布在中部;弱雷区大多位于涟水县境内;而重落雷区和强落雷区集中在洪泽的南部,盱眙大部和金湖地区,共计占淮安地区36.9%的区域,其中重落雷区约占23.2%、强落雷区约占13.7%。

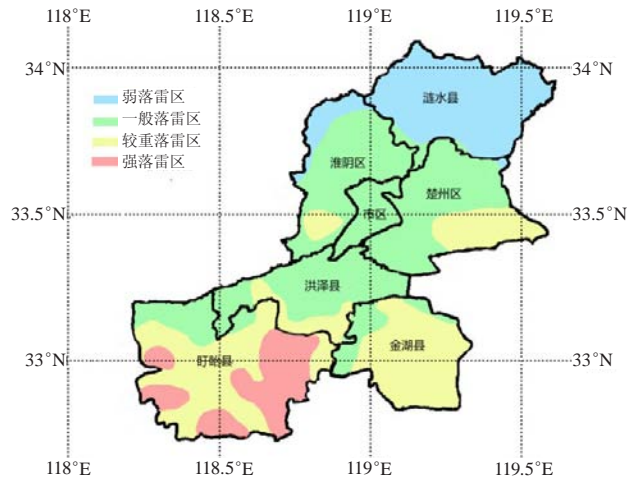


图3 淮安地区地闪密度分布图

结合淮安的地形图不难看出,由于淮安北部地处冲积平原,雷电发生率相对于南部来说较少。南部的盱眙境内,丘陵山区地形对中尺度雷暴系统有动力抬升作用,可以加深对流;洪泽、盱眙和金湖境内相对于淮安的北部地区有较多水域,由于陆地与水体之间的下垫面差异,受日射增温的速度相差很大,构成了冷热源水平和垂直的差异,从而形成对流,所以洪泽南部,盱眙大部和金湖地区多雷暴发生也是必然的。

### 4 结论

淮安地区总地闪次数有明显的季节变化特征,呈单峰型分布。1, 10, 11, 12月很少发生闪电,2—5月闪电略有增加,6月闪电开始增多,7, 8月猛增,9月骤减。

淮安地区的地闪密度分布特征是南多北少。淮安北部地处冲积平原,雷电发生率相对较少,重落雷区和强落雷区集中在洪泽的南部、盱眙大部和金湖地区,因此这些区域相较其他区域而言更应注重雷电防护。

#### 参考文献

- [1] 李霞,汪庆森,巩晴霞,等.苏州地区雷电分布规律分析.气象科学,2006,26(4): 442-448.
- [2] 刘梅,魏建苏,俞剑蔚,等.近57a江苏省雷暴日时、空分布气候特征.气象科学,2009,29(6): 827-832.
- [3] 冯民学,焦雪,韦海容,等.江苏省雷电分布特征分析.气象科学,2009,29(2): 246-251.
- [4] 高毅,劳小青,李健生,等.雷击风险评估中雷击大地年平均密度的计算.气象研究与应用,2009,30(3): 68-70.

# 降水预报检验标准浅议

■ 李良武 拓砚军 陈文涛

从预报精细化发展的趋势看，解决降水预报检验标准问题的有效措施是尽快推进定量化降水预报，使分级预报过渡到降水量值预报。

按照中国气象局要求，2013年1月1日开始，全国各级气象台站城镇预报实行以分段预报（12小时间隔）为基础的精细化预报，以提高预报的时间分辨率。根据要求，城镇预报检验中12小时降水量等级执行原来24小时降水量等级标准，即以原来24小时降水量标准来替代现在的12小时降水量标准（如预计12小时降水量为40.0mm，按照原来的12小时标准应为“暴雨”或者“大到暴雨”，按照新标准，则应预报“大雨”或者“大到暴雨”）。笔者在具体执行中发现有一些问题值得商榷，并提出了一些可能的解决办法。

## 一、存在的不足和问题

### 1 预报检验标准与社会其他行业对降水量的等级标准矛盾

近几十年来，关于降水量等级的科普宣传，无论是24小时降水量等级，还是12小时降水量等级，一直是原来的标准，现在的预报检验标准与原来标准相比，相当于提高了1倍。按照新标准，等级12小时降水量标准采用原来24小时降水量标准，相当于原来24小时雨量集中在12小时内。

目前水文、水利部门仍然执行原来的降水等级标准。这样，气象部门报给政府的材料与防汛、水利等部门呈报给政府的材料对同一降水概念的表述，含义不同，政府对降水量的认知就会出现混乱，直接的影响是，在制定防灾减灾规划方面，两个不同的标准，对防灾减灾的要求有很大的区别；防灾减灾工作可能会大灾小防，影响防灾效果，严重的话甚至会造成人员伤亡财产损失。

### 2 不同时效量级标准有矛盾

现行预报检验，一方面检验12小时间隔降水预报，一方面也检验24小时间隔降水预报，两个时间长度悬殊很大，而数据标准相同，不知是出于何种考虑。比如，在某一天的24小时预报中，前12小时和后12小时都预报暴雨，若降水量实况为：前12小时43.2mm，后12小时48.8mm，24小时累计降水达到92.0mm，暴雨分段预报全错了，只有24小时预报是正确的。目前对预

报员的考核以12小时分段预报检验为依据。

安徽省共82个观测站，2015年3月17日20时—18日08时仅3个站点降水量大于50mm，3月18日08时—20时没有站点降水量大于50mm，3月17日20时—18日20时有14个站点日降水量大于50mm。比较这次降水分布发现，降水主要集中在3月17日20时—18日08时，12小时暴雨仅占24小时暴雨的21%。剩下的11个站点，约占79%的站点，24小时合计降水量达到暴雨，而前12小时和后12小时降水量均未达到暴雨。同样方法统计这次降水的大雨，24小时合计降水量达到大雨的，全省有34站，只有8站在前12小时或后12小时降水量达到大雨，剩下26站，前12小时和后12小时降水量均未达到大雨。24小时合计降水量达到中雨的，全省有29站，22站在前12小时或后12小时降水量中雨，剩下7站，前12小时和后12小时降水量均未达到中雨。在中雨或以上量级合并统计，共77站，前12小时或后12小时降水量均未达到24小时量级的为44站。

### 3 预报量级分段不合理，影响预报员量级把握

现行预报文件，鼓励使用小雨、中雨、大雨、暴雨等降水量级术语，尽量避免使用小到中雨、中到大雨、大到暴雨等过渡性量级术语。不过，在预报实践中，预报量级估计本身可能只能是在一定范围内。而且很多时候，降水量级估计就在两个量级之间，比如10mm左右（5~15mm），25mm左右（20~30mm），50mm左右（40~60mm），100mm左右（80~120mm），这时候使用过渡性术语，可能比较好说明问题。

## 二、解决方法和建议

### 1 预报检验要有历史连续性，又兼顾现实变化

预报检验标准使用原12小时降水量级标准的同时，兼顾24小时降水量级标准检验（表1）。具体来说，参考以下原则：（1）12小时降水量实况符合12小时预报降水量级标准，24小时降水量实况还要达到或超过12小时预报量级的24小时降水量级（例如，预

报夜里中雨时，当实况5.0~14.9mm时，日降水量也应该大于9.9mm）；（2）12小时降水量实况达到12小时预报降水量级标准，日降水量没有达到实况与12小时预报量级一致的24小时预报降水量级标准，这时参考降水量0.0的检验方法（例如，预报夜里大雨时，当实况15.0~24.9mm时，日降水量小于24.9mm）；（3）如果12小时降水量未达到12小时预报降水量级标准，空报处理。

## 2 微调12小时降水量级标准，减少12小时量级与24小时量级差异多的现象

预报检验标准使用原12小时降水量级标准的同时，结合24小时降水量级标准。具体说来，就是小雨上限提高，更接近24小时上限，同理，中雨、大雨、暴雨、小雪、中雪、大雪、暴雪上调降水量级的上下限（表2）。也可以用原来24小时预报量级标准错位作为12小时降水量级标准，即：小到中雨、中到大雨、大到暴雨、暴雨到大暴雨、大暴雨到特大暴雨的24小时标准分别作为中雨、大雨、暴雨、大暴雨、特大暴雨的12小时标准。同理，把小到中雪、中到大雪、大到暴雪的24小时标准分别作为中雪、大雪、暴雪的12小时标准（表3）。

## 3 定量化预报

预报定量化，推进定量化降水预报，使分级预报过渡到降水量值预报。12小时预报直接用定量化降水量来替代分级，如用小于10mm来替代小雨，或者预报5~15mm，或者预报10~20mm……。24小时预报沿用原来的分级预报标

表1 建议降水等级标准（单位：mm）

等级	12小时	24小时	等级	12小时	24小时
小雨	0.1~4.9	0.1~9.9	暴雨到大暴雨	50.0~104.9	75.0~174.9
中雨	5.0~14.9	10.0~24.9	大暴雨到特大暴雨	105.0~170.0	175.0~300.0
大雨	15.0~29.9	25.0~49.9	小雪	0.1~0.9	0.1~2.4
暴雨	30.0~69.9	50.0~99.9	小到中雪	0.5~1.9	1.3~3.7
大暴雨	70.0~140.0	100.0~249.9	中雪	1.0~2.9	2.5~4.9
特大暴雨	>140	≥250	中到大雪	2.0~4.4	3.8~7.4
小到中雨	3.0~9.9	5.0~16.9	大雪	3.0~5.9	5.0~9.9
中到大雨	10.0~22.9	17.0~37.9	大到暴雪	4.5~14.9	7.5~14.9
大到暴雨	23.0~49.9	38.0~74.9	暴雪	≥6.0	≥10.0

表2 降水量等级标准提高前后比较（建议）（单位：mm）

等级	12小时	12小时（新）	等级	12小时	12小时（新）
小雨	0.1~4.9	0.1~7.9	小雪	0.1~1.9	0.1~1.9
中雨	5.0~14.9	8.0~19.9	小到中雪	0.5~1.9	0.9~2.9
大雨	15.0~29.9	20.0~37.9	中雪	1.0~2.9	2.0~3.9
暴雨	30.0~69.9	38.0~74.9	中到大雪	2.0~4.4	3.0~5.9
大暴雨	70.0~140.0	75.0~199.9	大雪	3.0~5.9	4.0~7.9
特大暴雨	>140	≥200	大到暴雪	4.5~14.9	6.0~12.9
小到中雨	3.0~9.9	4.0~14.9	暴雪	≥6.0	≥8.0
中到大雨	10.0~22.9	15.0~29.9			
大到暴雨	23.0~49.9	30.0~64.9			
暴雨到大暴雨	50.0~104.9	65.0~149.9			
大暴雨到特大暴雨	105.0~170.0	150.0~275.0			

表3 降水等级标准错位调整比较（建议）（单位：mm）

降水量等级标准变化前后比较					
等级	12小时	12小时（新）	等级	12小时	12小时（新）
小雨	0.1~4.9	0.1~4.9	小雪	0.1~0.9	0.1~1.2
中雨	5.0~14.9	5.0~16.9	小到中雪	0.5~1.9	0.5~2.4
大雨	15.0~29.9	17.0~37.9	中雪	1.0~2.9	1.3~3.7
暴雨	30.0~69.9	38.0~74.9	中到大雪	2.0~4.4	2.5~4.9
大暴雨	70.0~140.0	75.0~174.9	大雪	3.0~5.9	3.8~7.4
特大暴雨	>140	≥175.0	大到暴雪	4.5~14.9	5.0~9.9
小到中雨	3.0~9.9	4.0~9.9	暴雪	≥6.0	≥7.5
中到大雨	10.0~22.9	10.0~24.9			
大到暴雨	23.0~49.9	25.0~49.9			
暴雨到大暴雨	50.0~104.9	50.0~99.9			
大暴雨到特大暴雨	105.0~170.0	100.0~249.9			

准。这样既照顾到历史延续性，又能满足现在人们日益迫切的精细化预报的要求。

（作者单位：李良武，陈文涛，安徽省宿州市气象局；拓砚军，内蒙古自治区巴彦淖尔市气象局）

# 我国大气科学类期刊总被引频次和影响因子统计分析

■ 郭志梅

2008—2014年,我国大气科学类期刊载文量、影响因子年际变化不大,但总被引频次逐年上升;与全国统计源期刊平均值相比,总被引频次、影响因子明显偏高。这说明我国大气科学类期刊整体上办刊质量较好,载有的论文质量较高,学术影响力较高。

大气科学类期刊作为大气科学及相关领域学术交流的平台,越来越受到科研机构、科研人员的重视,而体现其传播能力的量化指标的总被引频次、影响因子是目前公认的可以较为客观的评价期刊的指标。本文对2009—2015年版《中国科技期刊引证报告(扩刊版)》收录的我国34种大气科学类期刊的总被引频次、影响因子进行了统计分析,以期从文献计量学角度评估我国大气科学类期刊的学术影响力和学术水平,为广大科研工作者及有关人员提供参考。34种大气科学类期刊基本信息见表1。

## 一、载文量

载文量,是指来源期刊在统计当年发表的全部论文数,它们是统计期刊引用数据的来源。载文量越多,表明期刊的信息越丰富。

图1是2008—2014年我国34种大气科学类期刊载文量各年度的平均值。从图1可以看出,2008—2014年我国34种大气科学类期刊载文量变化不大,基本上在7年平均103篇附近波动。大气科学类期刊的载文量与全国来源期刊平均值相比明显偏少,比全国统计源期刊平均载文量328篇偏低68.6%,这与大气科学相对来说是一个比较专业的小学科,相关研究人员比其他学科少有直接关系。

## 二、总被引频次

总被引频次,指该期刊自创刊以来所登载的全部论文在统计当年被引用的总次数。这是一个客观实用的评价指标,可以显示该期刊被使用的程度,从历史的角度反映了期刊论文的学术影响力。就某篇论

文而言,被引用的次数越多,说明该论文受人关注的程度越高,其学术影响力越大。

图2是2008—2014年我国34种大气科学类期刊总被引频次各年度的平均值。可以看出,2008—2014年,34种大气科学类期刊与全国统计源期刊的总被引

表1 我国34种大气科学类科技期刊基本信息

序号	期刊名称	创刊时间	主办单位
1	Advances in Atmospheric Sciences (AAS)	1984	中国科学院大气物理研究所
2	Journal of Meteorological Research (JMR)	1987	中国气象学会
3	Advances in Climate Change Research (ACCR)	2010	国家气候中心
4	Journal of Tropical Meteorology (JTM)	1995	中国气象局广州热带海洋气象研究所
5	暴雨灾害	1982	中国气象局武汉暴雨研究所
6	成都信息工程学院学报	1986	成都信息工程学院
7	大气科学	1976	中国科学院大气物理研究所
8	大气科学学报	1978	南京信息工程大学
9	大气与环境光学学报	1988	中国科学院安徽光学精密机械研究所
10	干旱气象	1958	中国气象局兰州干旱气象研究所
11	高原气象	1982	中国科学院寒区旱区环境与工程研究所
12	高原山地气象研究	1981	中国气象局成都高原气象研究所
13	广东气象	1973	广东省气象学会
14	贵州气象	1962	贵州省山地环境气候研究所
15	黑龙江气象	1984	黑龙江省气象学会
16	内蒙古气象	1977	内蒙古气象局; 内蒙古气象学会
17	气候变化研究进展	2005	中国气象局国家气候中心
18	气候与环境研究	1996	中国科学院大气物理研究所
19	气象	1950	国家气象中心
20	气象科技	1973	中国气象局气象探测中心等
21	气象科技进展	2011	中国气象局气象干部培训学院
22	气象科学	1980	江苏省气象学会
23	气象水文海洋仪器	1988	长春气象仪器研究所
24	气象学报	1925	中国气象学会
25	气象研究与应用	1956	广西气象学会
26	气象与环境科学	1978	河南省气象局
27	气象与环境学报	1984	中国气象局沈阳大气环境研究所
28	热带气象学报	1984	中国气象局广州热带海洋气象研究所
29	沙漠与绿洲气象	1956	新疆维吾尔自治区气象学会
30	山东气象	1976	山东省气象科学研究所
31	陕西气象	1968	陕西省气象局; 陕西省气象学会
32	应用气象学报	1986	中国气象科学研究院等
33	浙江气象	1979	浙江省气象局; 浙江省气象学会
34	中国农业气象	1976	中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所

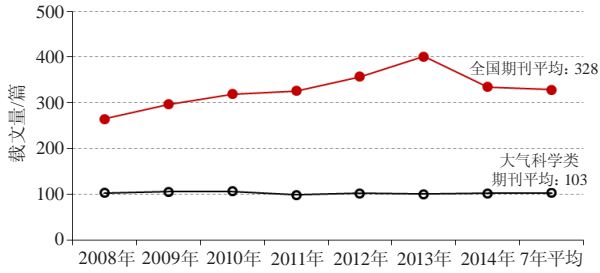


图1 2008—2014年我国34种大气科学类期刊载文量各年度的平均值

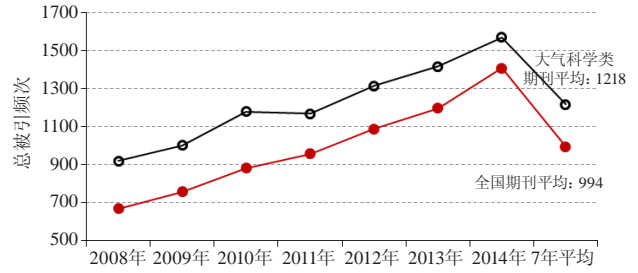


图2 2008—2014年我国34种大气科学类期刊总被引频次各年度的平均值

频次平均值变化趋势一致，呈逐年上升趋势；7年各刊合计总被引频次为38717次；7年各刊平均总被引频次为1218次，比全国统计源期刊平均值994次高出22.5%。

图3是2008—2014年我国34种大气科学类期刊总被引频次的离均差率堆积柱状图。可以看出，2008—2014年，《气象》、《高原气象》、《大气科学》、《气象学报》和《应用气象学报》5种期刊总被引频次明显高于34种大气科学类期刊的平均值，7年平均离均差率在246.0%~141.9%，说明这5种期刊被他刊引用借鉴的程度高；其他7年平均离均差率相对较低的期刊，可能与期

刊出版周期、载文量、创刊时间较晚以及文种为英文等原因有关。

### 三、影响因子

影响因子，是国际上通行的一个期刊评价指标，是E·加菲尔德于1972年提出的，指的是某期刊前两年发表的论文在统计当年的平均被引用次数。它是一个相对数量指标，用期刊论文的平均被引率揭示了学术思想传播的深度和广度，可以较公平地评价各类期刊。通常，期刊影响因子越大，它的学术影响力越大。

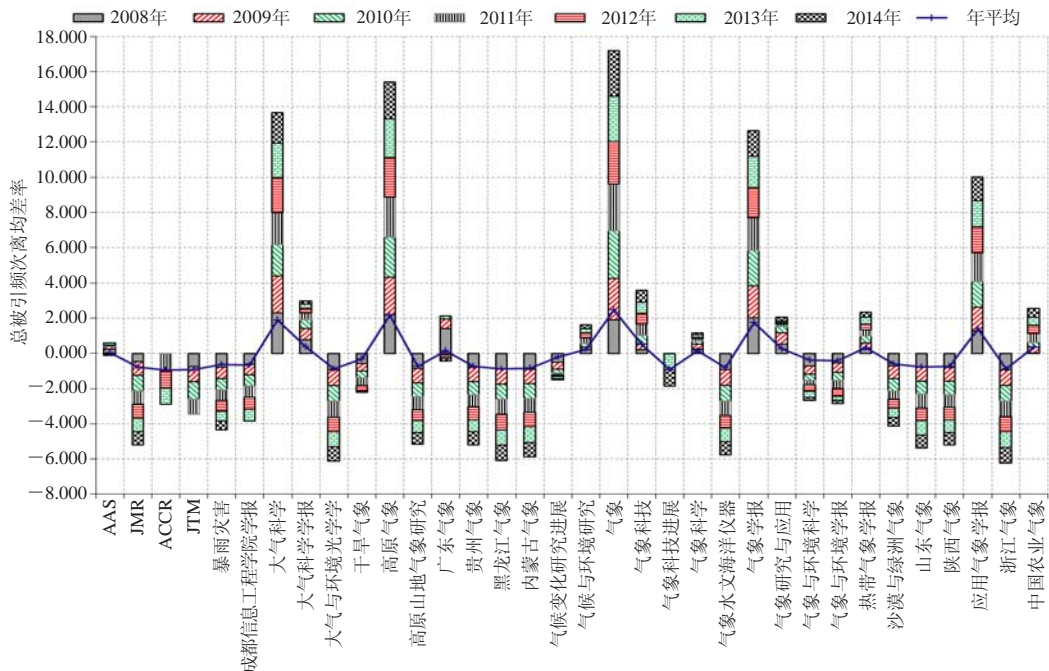


图3 2008—2014年我国34种大气科学类期刊总被引频次的离均差率堆积柱状图

图4是2008—2014年我国34种大气科学类期刊影响因子各年度的平均值。可以看出，2008—2014年，34种大气科学类期刊影响因子变化幅度不大，与全国统计源期刊的趋势基本一致，7年平均值在1.08上下波动。其中，2010年相对最高，为1.31；2012年相对较低，为0.89。大气科学类期刊的平均影响因子整体

上比全国统计源期刊平均值明显偏高，说明大气科学类科技期刊整体上办刊质量较好，载有的论文质量较高，学术影响力也较大。

图5是2008—2014年我国34种大气科学类期刊影响因子的离均差率堆积柱状图。可以看出，除《广东气象》和《气象研究与应用》在2008年和2009年异常

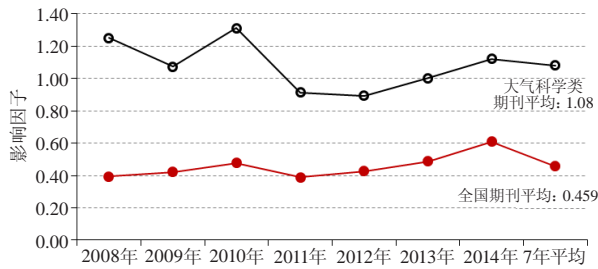


图4 2008—2014年我国34种大气科学类期刊影响因子各年度平均值

偏高外，其他期刊2008—2014年逐年的影响因子变化较稳定。2008—2014年，《暴雨灾害》、《大气科学》、《大气科学学报》、《干旱气象》、《高原气象》、《广东气象》、《气候变化研究进展》、《气候与环境研究》、《气象》、《气象科技》、《气象科学》、《气象学报》、

《气象研究与应用》、《气象与环境科学》、《气象与环境学报》、《热带气象学报》、《应用气象学报》和《中国农业气象》18种期刊影响因子高于各刊平均值1.08，7年平均离均差率为129.2%~0.5%，说明这18种期刊在大气科学领域的学术影响力高，论文平均被引用次数多；《Advances in Atmospheric Sciences》、《高原山地气象研究》、《气象科技进展》和《沙漠与绿洲气象》4种期刊的影响因子处于全国统计源期刊平均值和34种大气科学类期刊平均值（0.459~1.08）之间，7年平均离均差率在-13.6%~-40.9%之间，说明这4种期刊上发表的论文平均被引用次数在大气科学领域期刊中属于中等；其余12种期刊的影响因子低于全国统计源期刊平均值0.459，说明这12种期刊在大气科学领域平均被引用次数相对偏少，学术影响力相对较低。

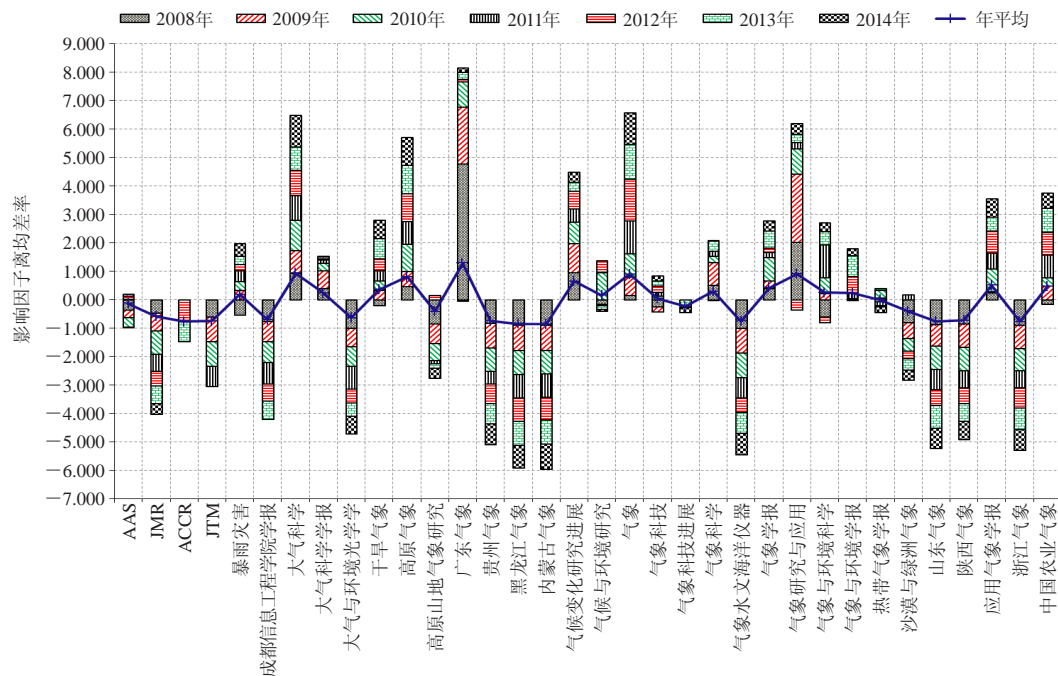


图5 2008—2014年我国34种大气科学类期刊影响因子离均差率堆积柱状图

#### 四、小结

从整体上来说，2008—2014年，我国34种大气科学类期刊载文量变化不大，总被引频次呈逐年上升趋势，影响因子变化不大，基本上在7年平均值上下波动。与全国统计源期刊平均值相比，总被引频次、影响因子明显偏高，分别偏高22.5%、135.3%，文献来源量偏低68.6%。说明大气科学是一个专业性较强的小学科，但大气科学类期刊整体上办刊质量较好，比较重视引文，有较强的利用文献的能力，载有的论文质量较高，呈现出较高的学术影响力。

从2008—2014年各刊总被引频次、影响因子的高

均差率来看，有关指标显著高于各刊平均值的期刊主要来自中国科学院和中国气象局；一些注重期刊发展（表现为更改期刊名称，突出期刊专业特色，拓宽期刊稿件领域等方面）的高等院校和省级气象部门主办的期刊也有较好表现。

本文分析的结果可为科研管理的政策制定提供依据。尽管引文指标是学术影响力评价的一个重要的参考，但并不能完全取代其他的评价方法，例如同行评议。因此，尽量灵活地应用计量指标，才能为研究实体的学术影响力或绩效评价提供客观可靠的依据。

（作者单位：中国气象局气象探测中心）

# 浙江气象舞翩跹

## ——浙江省气象业务现代化采访侧记

■ 贾朋群 徐虹

ENSO是目前气象学者知晓的预测天气气候最强信号之一，凭借对ENSO的监测，一定程度上可以提前对干旱、洪涝和热带风暴等天气气候灾害做出预测。最近，《美国气象学会会刊》报道指出：ENSO不仅能影响降水和温度，还会改变急流的位置。这也让人联想：或许ENSO还和一些局地尺度和生命期很短的激烈天气，例如冰雹、飚线和龙卷风等联系在一起。最新的研究证实，中等强度的拉尼娜事件能够让美国南部生成更多的龙卷风和冰雹。

如果说大尺度环流的机理研究可能在提示龙卷风等中尺度天气的趋势方面有所帮助的话，那么具体到每一次天气过程的预警，则要另谋他途。就龙卷风而言，每年平均出现1300次龙卷风的美国，其龙卷风预警的提前时间，长期在10分钟上下徘徊，进展并不理想。追其缘由，短生命期的中尺度激烈天气过程一般只能依靠监测和预报员经验进行判断，而数值预报产品则因为资料更新速度问题，对短临预报帮助甚微是主要原因之一。然而，探测技术和大数据时代带来的数据快速处理和传输，特别是新一代气象卫星普遍缩短了星载传感器的扫描周期，导致数值天气预报的核心技术——快速同化系统的更新周期，先进国家已经从最初的6小时左右加快到1小时，甚至到了分钟量级。这样的改变，给龙卷风等区域和中小尺度激烈天气预警得到数值预报产品更加有力的支持，带来了新的曙光。

本期封面报道——“浙江省气象业务现代化”栏目，选取了浙江省在数值天气预报的快速同化系统（P6）和龙卷风分析（P13）两篇文章，从



本期“浙江省气象业务现代化”专栏让我们真实感觉到了浙江气象人前行的坚定步伐，他们的实践反映的是气象基层稳步推进现代化的风采。

一个侧面代表了我国基层气象业务系统在高科技的数值预报，以及面对局地激烈天气导致灾害的预警等方面的能力。为了进一步探究浙江省气象业务现代化进展和细节，本文作者针对本期专栏作者以及相关科研人员进行了采访，亲身感觉到浙江气象人上进的脉动，也引发出一些和现代化相关的思考。

### 1 区域性的ZJWARRS集中体现先进模式能力，局地资料的加入是亮点

为了解决精细化短时临近（0—24h）数值天气预报的缺失问题，浙江省气象局研制了快速更新同化预报系统（Zhejiang WRF-ADAS Rapid Refresh System, ZJWARRS）并投入业务运行，它是我国不多的几个省级气象部门主导研制和投入业务的快速同化系统之一。该系统除了常用的地面、探空资料之外，还同化了一些本地资料，如飞机报、雷达风廓线、多普勒雷达反射率等，实时提供了较高时空分辨率、较高更新频次的覆盖浙江省的全要素数值天气预报产品。

展望未来，ZJWARRS将融入更多和更为细化的模式本地资料，如地形和陆面覆盖等，以及新增的自动站数据和卫星观测数据，其中卫星数据的更多引入，应该是系统性能提升的关键，而一些目前流行的同化先进技术，如4DVAR、EnKF、Hybrid等的应用，也有助于这种提升的实现。

### 2 当模式产品遇见龙卷风等中小尺度激烈天气的短临预报，早日握手是国际前沿研究内容和共同期待

ZJWARRS的更新周期目前是3小时，基本上与本期专栏另一篇文章描述的发生在浙江北部中气旋伴随龙卷风的整个过程的时间相当，而致灾的龙卷风过程，从孕育到结束不过半小时左右。这也是为什么基层预报员面对即将到来的中小尺度天气系统，目光集中在雷达等监测产品上而很少关注数值预报产品，后者仅仅在趋势分析时体现其价值所在。桐乡“7.12”龙卷风预警过程（链接1）中，预报一线人员认为，目前的各种数值预报产品的价值，大多体现在24小时或更长时间天气形势的预估上，还很难在短临预报中与监测实况的指示意义相提并论，尽管数值预报短临产品还是能大致“框定”激烈天气的范围（图1左）。美国学者最新的研究，则借助风暴尺度数据同化和集合预报等技术，在美国强风暴实验室的基于预报的预警系统（Warn-on-Forecast System）试验中，借助模式的力量已经成功将龙卷风的预警时间延长了10分钟（图1右）。图1中的比较，让我们看到了差距和希望。

### 3 桐乡“7.12”龙卷风即是历史的延续，更向未来的气象服务提出挑战

浙北地区是典型的江南水乡，在物产丰美的同时，自然灾害也时常

链接1 桐乡“7.12”龙卷风预警过程

7月11日下午：桐乡市气象台发布一周气象信息，提出密切关注12—14日傍晚的局地强对流天气。

12日16:00：短期天气预报指出“今天夜里到明天阴有阵雨或雷雨，雨量中等，局部大到暴雨；偏南风3~4级，雷雨时偏北风短时风力6~8级”。

12日19:40：发布强降水提醒，“受切变线南压影响，未来3小时我市有中到大雨，局部暴雨；有降水时伴有强雷电和大风影响，请做好相关防御”。

12日19:44：发布雷电黄色预警信号：受强对流影响，今夜我市将自西而东出现强雷电、7~9级雷雨大风等剧烈天气，部分地区有暴雨，请防范。

12日21:35：发布实况通报，预报后期天气。

13日：上午查看灾情，下午与嘉兴市局、省气象台视频会商，得出天气过程结论。

桐乡市气象台提供

发生。就龙卷风事件而言，根据当地记载和气象记录，解放前后该地区发生过至少16起（链接2）。本期专栏文章描述的2014年7月12日龙卷风事件，造成了1人死亡，农作物受灾面积1389亩（1亩=666.67m<sup>2</sup>），倒塌房屋33间，1人死亡和1人重伤，转移人员25人，直接经济损失860万元的灾害。其中，龙卷风导致一些游客的交通工具受损，他们在获取理赔证据时，需要气象部门出具的大风等级证明。因此，快速认定事件的性质和对小范围强风等级进行估计，成为小尺度天气事件成灾后基层气象预报员必须应对的挑战。正是灾情和预报员的责任意识，加上灾后理赔现实需求，促成了本期这篇论文的构思。预报员严谨的分析和灾后调动更多探测资源（如嘉兴、湖州和杭州等地的雷达图像），最大限度地还原了事件真实情

景，最终通过与省台、湖州、台州等雷达短期天气专家联合鉴定了这次飊线伴随龙卷风的过程，为重灾区的保险理赔提供了科学严谨的大风气象证明。我们在对基层预报员点赞的同时，还有很多需要思考的问题。

首先，面对局地强灾害天气，我们的预报能力是否还有提升空间？桐乡市气象局针对“7.12”龙卷风过程的服务，无疑是相当成功的，其中特别是在灾害前1天发布了提示，在提请政府相关部门和民众关注的同时，也起到了提示值班预报员保持警惕的作用。然而，采访中我们得知，7月11日（星期五）恰好是发布一周天气信息的时候，依据数值预报产品比较成功地“捕获”了发生在24小时以后的天气过程。如果这次过程发生在一周更靠后的时间里，浙江省局以及其他预报员熟悉的各种数值预报产品是

否还如此“给力”还令人难以判断。因此，这次服务中早期预警中含有的“幸运”成分，还需要我们踏实地提供预报能力才有可能让我们继续“幸运”下去。

如果和中气旋相关的飊线和龙卷等现象增多，那么国外，尤其是龙卷风盛行的美国气象机构采用雷达及其他方法开展的预报预测研究，应该引起我们更多的注意（图2），其中，其快速同化系统中对龙卷风这类短生命过程的捕捉技术，尤其值得关注。而中国龙卷在傍晚多有发生，与美国多发生在午后情形存在差异，则需要我们积累更多的资料开展研究。

再者，对天气实况细节的关注和探测产品的深入挖掘，将是基层预报员的必修课。虽然浙北地区出现龙卷风并非罕见，但就一个地方来说，基本上是十年或更长时间一遇，因此预报员针对龙卷风预报的经验累积需很长时间。采访中，嘉兴市气象局首席预报员陆琛莉坦言，灾情上报后基于预报员培训和知识经验，定性为飊线，没有想到过是龙卷风。正是预报员基于一些细节的思考，例如旅游者的车辆在大风中平移了10米左右、新装修不久的酒店大门在风中损毁、距离不远的树木被刮倒的方向却不同、重灾区呈现“一条线”的特征等，唤醒了预报员的警觉：只有龙卷风能够解释这一切！此外，通过日新月异的探测产品，对激烈天气核心内容的快速辨认也是很大的挑战。本刊主办机构专

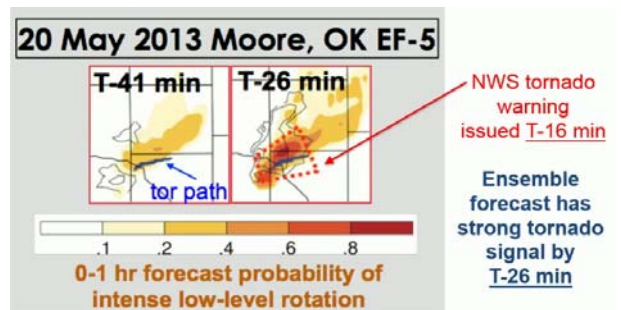
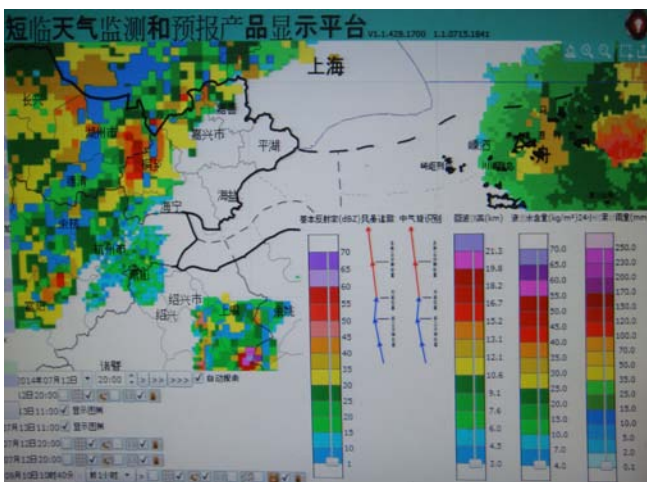


图1（左）浙江省数值预报平台2014年7月12日20:00提供的天气监测和预报产品；（右）美国NSSL针对一次强龙卷的个例研究中，借助风暴尺度数据同化和集合预报技术，数值产品提前26分钟给出低层大气旋转增强的龙卷风信号，较目前业务预警时间提前了10分钟

家俞小鼎老师在最初看到专栏“7.12龙卷风”论文时，在肯定作者对龙卷风的定性是正确的，并给出了较为充分的论据的同时，一针见血地指出，作者初稿中指出的雷达图像中可能预示龙卷风的所谓速度对，其实是速度模糊，即向着雷达的速度非常大，而离开雷达速度较小，这是因为爬线以很快速度向着雷达移动导致的。作者后来与专家建立了密切联系，不仅在论文图2中按照专家意见加入了雷达径向速度图，更准确地给出了局地龙卷风在雷达上的痕迹，更结合实例对雷达的探测功能有了深刻的认识。采访中几位作者尤其感慨针对具体问题专家的点拨作用。我们虽然很难设想所有基层预报人员遇到类似问题都能像本文作者这样幸运，得到对口专家的“点拨”，但是，采访中我们也确实感到，中国气象局的各级培训机构应该更加结合预报实践，增加预报员与专家针对具体预报问题的直接交流机会，而气象科技期刊在这方面也是可以助力的，正如桐乡市气象局副局长朱周平所言：“基层人员交流机会少，尤其是技术人员参加培训等的机会更是少之又少，一些新知识、新技术来源渠道不多但又是基层预报员最需要的，而目前一些期刊“高大上”的内容偏多，实用性不够。”

最后，当大数据时代来临，互联网+整天被高喊的时候，我们是否该为基层预报员做更多的实事？采访

## 链接2 浙江北部历史上有记载的龙卷风灾害

1949年前12次：

- 元至正十五年（1355年）：嘉兴，坏民居百余；
- 明嘉靖十二年（1533年）：桐乡，压死二十余人；
- 明嘉靖四十一年（1562年）：嘉兴、嘉善，屋宇伤者千数；
- 明嘉靖四十三年（1564年）：嘉兴，大雷电，龙见；
- 明崇祯十六年（1643年）：桐乡，拔木坏屋；
- 清顺治十五年（1658年）：海盐，蛟龙尽起入海，水涨平地行舟；
- 清康熙八年（1669年）：海盐，雹击死一人，覆舟死无人；
- 清康熙十四年（1675年）：嘉善，冰雹；
- 清康熙四十四年（1705年）：桐乡，飓风龙风大作，摄去人无数，坏民居四十余家，压死八人；
- 清乾隆三十八年（1773年）：平湖，舟有掷至数里外者；
- 清乾隆四十七年（1782年）：平湖，有物空中过；
- 民国十五年（1926年）：嘉兴，风来时，下垂若螺，桥梁、牌坊、民屋倒塌，长四五里，伤数百人。

1949—1995年前4次：

- 1982年8月21日：嘉善，2个公社受龙卷风袭击，倒房12间，死1人；
- 1986年7月15日：平湖、海盐、嘉兴，2个公社14个乡受龙卷风袭击，2.5万亩农田受灾，倒房760间，倒电杆360根，死亡3人；
- 1991年8月7日：吴兴、嘉善、嘉兴，28个乡受龙卷风袭击，风力12级以上，倒房3000多间，死亡9人，经济损失3700万元；
- 1995年7月21—24日：嘉兴、嘉善、平湖、海宁，共22个乡117个村遭龙卷风和冰雹袭击，风力普遍有11~12级死伤各2人，直接损失2405.6万元。

嘉兴市气象局首席预报员陆琛莉 提供

中一个细节触动了我们。如前所述，短临预报时间就是生命。预报员及时发出预警信息，除了手中的各种监测和预测产品外，最“靠谱”的信息，是天气系统在上游的表现——天气实况。但是，目前“灾情逐级上报”体制下，预报员准确、及时获得上游天气实况很难，如果恰巧台站位于多地

市或省交界处，则几乎成了奢望（因为临省出现的灾情先要逐级上报到该省省级气象局，才可能再逐级下放到位置更近但跨过省界的下游台站）。预报员们有时无奈地找寻社交平台上非专业、有几分随意但还算及时的信息。“天气无国界”常被气象人提及，但现实中的行政边界，却实实在

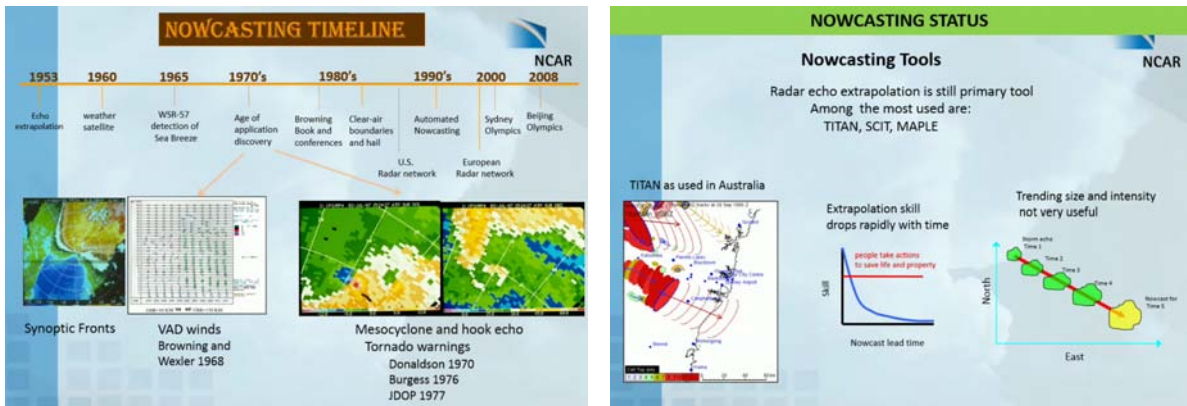


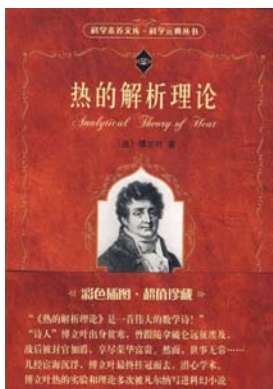
图2 美国气象学会第37届雷达会议上，雷达专家在对雷达与短临预报的梳理中，指出中气旋和龙卷预警等在1970年代已经成熟（左），并到目前一直是最重要的工具，其他工具的开发也开始发力（右）

（下转71页）

## 用数学语言写就的物理之诗

## ——重温傅里叶《热的解析理论》

■ 叶梦姝



法国物理学家、数学家傅里叶（1768—1830年）的论著《热的解析理论》是科学史上公认的划时代经典著作。从研究对象上来看，它突破了牛顿以来所规定的理论力学范围，开创了数学物理学的崭新领域；从研究方法上来看，它记载着傅里叶级数与傅里叶积分的诞生经过，被恩格斯和麦克斯韦评为“一首优美的数学的诗”。本书的另一个震撼之处在于其命题的宏大与数学处理的普遍性，傅里叶希望解释的热现象是包括大气、海洋、地壳等在内广泛的自然热现象，他希望为这个太阳辐射笼罩的地球上无处不在的热对流和热交换建立一个基于数学的统一理论体系。

### 一、热学：19世纪物理学的使命

19世纪初时，力学已经发展到了一个较为完善的阶段，欧拉和拉格朗日引入了更多数学方法使得矢量力学发展成为了分析力学，并得到了适用于广义坐标和广义力的拉格朗日方程，力学研究的范围大大扩展了。但于此同时，热学和电学等现象的研究仍然游离于数学方法之外，一方面由于其本质尚未被人类透彻了解，另一方面表达其物理

【编者语】

热的作用服从于一些不变的规律，如果不借助于数学分析，就不可能发现这些规律。傅里叶阐明的这个理论的目的就是要论证这些规律：它把热传导的所有物理研究都归结为已经有实验所给出的那些积分运算问题。

过程的数学模型较为复杂。对于热学来说，几个世纪以来，人们一直为热到底是一种物质还是一种运动而争论不休。整个18世纪，人们都用热质说来解释能量守恒定律、比热、潜热等现象，甚至在拉瓦锡的元素列表中，也把热算作是一种无重量流体。虽然18世纪末时，伦福德和戴维通过实验向“热质说”和“燃素说”发起了有力的挑战，但直到1860年能量守恒及转化定律建立之前，“热质说”一直支配着主流的热学研究。

### 二、适用于广泛热现象的数学规律

傅里叶对热现象的兴趣来源于其对气候、天气、天文、潮汐等自然现象的观察。他在《热的解析理论》的绪论中声称，“和重力一样，热贯穿在宇宙间一切物质之中，它的射线充斥于空间的所有部分”，他思考了气候带与纬度、海拔、地形、盛行风向的关系，观察到了太阳辐射引起的空气的大规模运动，以及不同高度的气温差异。但是，他并没有陷入到对热本质的纠缠中，也没有执着于某个热定的热现象（当时的观测资料也不足够），而是致力于从现象出发建立关于热的普遍理论，集中解决了热在非均匀加热的固体中的分布传播问题。“当热贯穿到流体物质中，并在它们之中以不断改变每一分子的温度和密度而决定内部运动时，我们能够用微分方程来表示这样的复杂作用的规律吗？流体动力学一般方程中的有效变化是怎样的”，

傅里叶希望“揭示这种元素（热）所服从的数学规律”，因为热的理论是“构成物理学的最重要的分支之一”。对于物理学来说，他把物理问题表述为线性偏微分方程的边值问题来处理，也极具创新。

### 三、造福后人的数学工具

数学分析是傅里叶的工具。原书题目下面柏拉图的名言“数控制着火”表明了傅里叶新柏拉图主义者的身份，他声称“数学的分析同自然界本身一样广阔”，早年作为中学数学教员和拉格朗日助教的经历使得傅里叶对于线性偏微分方程的处理驾轻就熟。为了解析热的过程，他开创了“傅里叶分析”这一数学分支：即任意函数通过一定的分解，都能够表示为正弦函数的线性组合的形式，而正弦和余弦函数在物理上是已被充分研究的一类函数，其性质和计算方法都相对简单。正如傅里叶所说，“对自然的深入研究是数学发现最丰富的源泉”，他从大气等的热现象抽象出来的数学问题推动了纯数学的研究。现代数学发现，傅里叶变换具有非常好的性质，它既有用、又好用，以至于各学科科研与工程技术中，傅里叶积分和傅里叶变换都是广泛应用的数学方法。

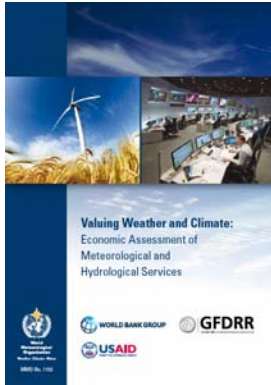
### 四、未完成的数学与物理之诗

作为一名理论学家，傅里叶论著的简洁性、清晰性和普遍性一直为人称道。他的理论有很强的几何直观，每一个数学表达式都有其对应的物理意义。科学史家认为，这

(下转70页)

## 《评估天气和气候：气象水文服务的经济学评估》简介

■ 韩佳芮



WMO, 2015年

1970—2012年，全球范围内出现约8835次与天气气候和水文相关的灾害，造成了1.94万人的死亡及2.4万亿美元的经济损失。气象水文灾害的数量几乎增加了5倍，每10年的经济损失从1560亿美元增加到8640亿美元。为应对日益增加的灾害风险，世界各国不断通过提高预报预测服务能力尽可能地向社会提供天气、气候和水文信息及预报，以控制灾害所造成的损失。然而，气象服务作为一种与经济密切相关的信息服务，需要通过合理的投入追求最大的收益。世界各国

(上接69页)

与傅里叶广泛参与社会活动，而非在象牙塔中苦心孤诣有关。傅里叶的科学研究几乎都是业余完成的，年轻时他曾是一名文学爱好者，后来成为了一名数学助教，而后从政，以埃及研究院秘书的身份随拿破仑远征埃及，并作为地方行政长官历经多次宦海沉浮，年近半百才到科学院任职，有时间专心完成学术专著。

傅里叶对热现象的研究并没有随着《热的解析理论》一书的出版



气象服务社会经济效益评估相关问题研究不仅对进一步提高气象服务的针对性和实效性有着重要的促进作用，同时是为气象部门争取资金支持，在社会经济发展中提高气象部门的影响力等方面都具有重要的现实意义。

国家气象水文服务部门在提高服务质量、多样性和覆盖面的同时，同样面临着与其他公共机构相似的挑战——充足和持续的资金支持。为了争夺、优化利用稀缺的公共投资资源，满足快速发展的需求，各国气象水文部门需要以科学、客观、全面的方法证明其服务效益远高于服务生产和传播的成本。因此，气象服务社会经济效益评估相关问题研究不仅对进一步提高气象服务的针对性和实效性有着重要的促进作用，同时是为气象部门争取资金支持，在社会经济发展中提高气象部门的影响力等方面都具有重要的现实意义。

气象服务效益评估工作一直是WMO关注的重点领域之一。2015年，WMO正式出版了评估气象/水文服务经济效益的出版物《评估天气和气候：气象水文服务的经济学评

估》(Valuing Weather and Climate: Economic Assessment of Meteorological and Hydrological Services, WMO-No.1153)，由美国国际开发署(United States Agency for International Development, USAID)适应气候变化开发项目Engility公司的Glen Anderson, WMO的Haleh Kootval以及世界银行集团的减灾和恢复全球基金会(Global Facility for Disaster Reduction and Recovery, GFDRR)的Daniel Kull共同组织编写。该书在系统总结国际上气象水文效益评估研究和案例的相关成果基础上，从气象/水文服务产生效益的“价值链”出发，详细介绍了气象/水文服务效益评估工作从设计到实施的基本框架，给出效益评估的具体流程，并从经济学角度出发给出评估气象/水文服务效益、服务提供成本计算及进行效益-成本分析的主要方法。此外，该

而画上句点，大气的热现象持续吸引着这位科学家的好奇心，使他成为了大气层保温效应的发现者。在阅读了洪堡的《论等温线的温度报告》后，傅里叶计算出，一个物体，如果有地球那样的大小，以及到太阳的距离和地球一样，如果只考虑入射太阳辐射的加热效应，那它应该比地球实际的温度更冷。傅里叶猜测，是星际辐射或者地球的大气层的隔热作用使得大气保持了现在的温度。事实上，他原计划

将他对热的相关研究的物理工作也扩充成一本书，名为《热的物理理论》，这也是他晚年一直钻研的问题。此书或许能对《热的解析理论》中未能充分讨论的热的动力效应进行解释，大气热力学和动力学的发展历史或许能够改写。然而傅里叶于1830年溘然长逝，本书最终未能完成，在科学史上留下了永恒的遗憾。

(作者单位：中国气象局气象干部培训学院)

书还针对如何就评估结果与用户沟通给出相关建议。

该书共分为十个章节。第一章为总体简介，介绍了气象、水文服务及服务经济效益评估的背景，并在此基础上明确提出本书的目标及路线图。

第2—4章主要帮助读者理解效益评估的基本情况。第2章介绍了气象/水文服务的产生和传播过程及其产生经济价值的机制。第3章解释了实施气象/水文服务社会经济效益研究的目的及介绍了对评估结果感兴趣的的不同用户群体。第4章主要为社会经济效益评估工作的规划、启动和实施等具体过程提供建议，给出了开展社会经济效益研究的10个步骤，并介绍了主要参与研究的主体，以指导研究准备工作的开展。

第5—8章介绍了效益评估相关经济学理论以及具体评估效益、成本和进行效益—成本分析（BCA）的方法论等。第5章主要为读者提供了社会经济效益研究相关的经济学理论背景，并对第6—8章所涉及的效益，成本和收益成本分析（BCA）的定义和概念进行了介绍。由于不同用户、不同效益类型，其评估方法不同，第6章对评

估气象水文服务效益的不同方法进行综述，并提供相关案例解释不同方法的优势和局限性。如一些方法会涉及到大量的数据收集、用户调查，如进行服务支付意愿（WTP）调查及建立经济效益评估模型等，而其他方法的实施过程相对简单。国家气象水文部门需要根据服务用户的类型，考虑资源和时间的限制来选择适用的效益估计方法。第7章从国家气象/水文部门的角度出发对服务生产和传播不同阶段中所产生的成本进行了阐述。第8章描述了进行效益成本分析中用于比较效益和成本的标准和方法，并解释了所产生的价值折价或集中的原因。本章还在如何通过效益成本分析的结果分析研究的不确定性和敏感性等方面给予一定的指导意见。

效益评估成果的沟通交流是效益评估工作最后一环，涉及教育、宣传和质量评审及气象水文服务应用等多方面工作，在第9章中主要介绍了与用户沟通相关的多个重要方面，例如如何通过广播、电视、平面媒体、网络、短信和会议等多种方式向不同受众发布不同类型的评估成果等。第10章主要对本书进行总结，以及就如何在未来效益评估

中改进评估方法给出建议，并对未来工作进行展望。

此外，该报告还包括5个附录，包含气象水文相关词汇表、经济学术语、全球范围内气象水文服务发展及其效益评估进展的历史背景，评估气象水文服务效益的非经济学的社会科学方法调研以及9个社会经济效益评估研究案例总结等五部分内容。

简之，该书可视为国际上开展气象水文服务效益评估的指南性书籍，一方面对各国气象水文部门如何设计、实施和开展效益评估工作给予具体指导，另一方面也重视效益评估成果的宣传，强调气象/水文学家、社会经济学家以及用户团体（包括潜在用户、政府部门及相关基金组织）之间的有效沟通。此外，该书是从经济学角度评估服务的效益，利用单独章节（第5章：Economic Essentials）介绍经济学背景知识，并强调利用不同评估方法的优势评估不同类型的效益，这个也是本书的亮点之一。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）

（上接68页）

在地挡在了天气系统移动的途中。在这里，“扁平化”管理的理念是沉甸甸的。实际上，激烈天气发生后，当地预报员第一时间通告下游预报员对致灾系统保持警惕，应该是预报员最基本的职业素质。然而，我们在告别仅靠电话和传真传送信息进入网络时代后，对天气系统移动路径沿线预报员之间的联动似乎有所忽略，而建立这样的平台对目前的通信技术而言，实在不是难事，关键是各级管理部门

需要树立替预报员着想意识。

本期“浙江省气象业务现代化”专栏，是本刊在设立了“基层现代化”栏目后，第一次具体到特定的省市，并且以封面报道的方式推出，意在让气象科技的前沿进展，高效和及时地与基层气象现代化融合。虽然栏目的两篇文章，仅是浙江省气象业务现代化实践的侧面，但是却让我们真实感觉到了浙江气象人前行的坚定步伐，他们的实践反映的是气象基层

稳步推进现代化的风采。本文作者和两篇文章作者的交流，特别是在桐乡市气象局的实地采访，更是让我们体会到了浙江气象人勇于争先的进取精神。当然，2020年中国全面实现气象现代化还要面对各类挑战，还需要气象人更大的努力。

（作者单位：贾朋群，中国气象局气象干部培训学院；徐虹，浙江省气象学会）

# 新中国最初的气象培训班

## 气象史料挖掘与研究工程项目组

### 1 导言

国人的气象教育培训最早当始于1913年中央观象台气象科正式成立之后。时任气象科科长的蒋丙然先生在其自传中提及“因就观象台人员中遴选对气象工作有兴趣而诚实可靠者二人，加以训练”。但大规模的培训则在1921年才开始，“设立气象训练班方案，呈教育部请求准予照办。因即厘订课程，着手招生，课程以气象学为主，注重理论及实用，与观测绘图诸工作，此外则有天文、地震、文牍各科。气象学每日两小时，训练期间为三个月”。“毕业学生陈开源等三十余人，成绩均佳，因招考时特别严格，而训练时亦特别认真也。结业后除酌留数人在台<sup>①</sup>分发各科服务外，均分发各测站”。1923年，中央观象台又举办了第二期气象训练班，一切同第一期，毕业学生约三十人<sup>②</sup>。

1917年1月，张謇在南通军山建立我国第一个私人气象台，伊始即为本台和外单位培训气象人员。学习期限一般为半年，有的只3个月。

1928年，中央气象研究所成立。竺可桢先生于1929年3月在北极阁开办第一届气象练习班，学员14人。上课和实习共6个星期。第二届于1931年4月初在南京威贤街中国科学社开学，学员40人，学习期限9个月。第三届于1934年10月开学，学生50人，学习期限6个月。第四届于1936年11月开办，1937年2月结束，只录6名学员（其中1人未报到）<sup>③</sup>。

1939年12月1日，国民政府航空委员会“测候训练班”成立，刘衍淮任训练班班长，第一期收训28人，并于1940年6月22日毕业。此后该训练班一直持续到1949年12月迁往台湾，为国民党空军培养了大量气象人才<sup>④</sup>。

1945年3月，中央军委三局在清凉山举办了中国共产党历史上第一个气象训练队。共有学员21名。3月开学，5月结业，主要学习内容包括气象知识、气象仪器使用及



1928年，中央气象研究所成立。竺可桢先生于1929年3月在北极阁开办第一届气象练习班，学员14人。上课和实习共6个星期。

观测方法。学员毕业后，分配到各解放区建立气象观测站。1947年3月，胡宗南进攻延安，延安气象台随军委三局撤离延安。1948年8月，辗转两千余千米合并于华北军区电信工程专科学校，很快该校陆空通讯班改称为陆空通讯气象专业班<sup>⑤</sup>。气象课程内容按初级气象人员的要求，设天气常识、天气预报知识、地面气象观测和气象仪器等课。1949年5月，合并于华北军区航空处训练队<sup>⑥</sup>。

### 2 新中国第一个气象培训班的成立

1948年12月13日，随着解放战争的节节胜利，要求军委三局气象队人员去接收当地国民党的气象机构，为新中国气象事业的建立和发展做准备。

1949年2月9日，接管了国民党华北气象台。4月1日，华北军区航空处在北平成立。航空处下设场站科，张乃召任科长。场站科下设气象股，邹竞蒙任股长。这是军委气象局建立前组建的第一个气象管理机构。

1949年6月24日，傅涌泉接收了国民党中央气象局留下的南京气象总站。1949年9月上旬，曾宪波、王伯成等接收了上海气象台<sup>⑦</sup>。

当时的南京、上海国民党政府的气象机构较多，规模较大。接收后为了开展正常的业务工作亟需补充人员。

1949年12月，华东军区航空处<sup>⑧</sup>文工团计划招收80名文工团员，而报名者却有800余名。“考虑到当时接收的国民党气象人员数量很少，年纪也较大，恢复和建立新的台站，开展业务工作，急需补充新生力量。我找到张慕韩参谋长，汇报了气象工作需要人员的情况，张慕韩

① 指中央观象台。

② 蒋丙然，蒋丙然自传，《庆祝蒋右沧先生七十晋五诞辰纪念特刊》，民国四十六年九月二十五日出刊。

③ 《江苏气象志》。

④ 气象史料挖掘与研究工程项目组，国民政府时期空军的气象教育培训，气象科技进展，2015，5。

⑤ 《延安时代的气象事业》编纂委员会编著，《延安时代的气象事业》，气象出版社，1995。

⑥ 孔永，回忆陆空通讯气象专业班，《中国人民解放军气象史丛稿》（总参气象局）。

⑦ 《延安时代的气象事业》编纂委员会编著，《延安时代的气象事业》，气象出版社，1995。

⑧ 民国38年（1949年）4月，为接收国民党空军和民航在宁沪杭遗留的机构、人员和装备器材，中央军委从东北航空学校和第三野战军抽调部分干部，组成华东军区航空接收委员会。4月24日，成立南京空军接管部。5月15日，在苏州成立上海军管会空军部（后进入上海）。9月1日，以上海军管会空军部为基础，将南京空军接管部和山东、杭州接收办事处合并改编为华东军区航空处。任命蒋天然为处长，顾光旭为副处长，林征为副政治委员。下辖济南办事处和南京、青岛、徐州、杭州四个航空站。1950年1月，华东军区航空处由上海迁往南京。（江苏军事志、上海军事志）。

同意从中分给气象一部分人”<sup>①</sup>。曾宪波赶到上海闸北一所中学进行面试。钮叙凯回忆道<sup>②</sup>：“我们经过文化考试以后，一个解放军干部就找我们谈话，他说分派我们去学气象。对气象我们也不懂，从初中到高中课本上也没有讲气象的，只懂得天文，不懂气象。当时听了以后，心里面也不太乐意，因为不懂气象是做什么的。所以跟解放军干部提出来我们能不能去学机械。后来这个同志就跟我们宣传了一下气象监测，那个时候因为我们也是刚刚参加革命，也不好去讨价还价，那让我们学气象就学气象吧。”曾宪波很顺利地录取了100名<sup>③</sup>学员。又从苏南公学<sup>④</sup>要了一部分人，准备开办气象训练班。这批人员就是新中国建立后培养的第一批气象观测和通讯干部，这对随后华东气象观测网的建立起了重要作用。

从编制上讲，气象训练班隶属于华东空军干训大队训练队。该队于1949年10月上旬在上海龙华机场成立。干训大队共有9个中队，每个中队学习某一方面，气象训练班被编为第四中队，其他如无线电通讯为第六中队，还有机务、领航、参谋业务等等。

1949年12月，华东军区航空处迁南京，气象训练班也随同迁往。先在中央路一个小院子里。钮叙凯回忆道：“到南京以后，发现这个院子里面已经有五六十个人在那里了，他们都已经穿上军装了，比我们先到。所以整个一个中队，将近可能100多人。分三个分队，一个分队30多个人，分队长是解放军。一个分队下面分三个班，总共9个班，一个班大概是11个人左右。刚到南京时，一方面进行政治学习，由指导员上课，小组讨论。后来就逐步进行气象知识授课。再后来，要开始观测实习，中央路院子场地很小，1950年1月迁入明故宫机场。”

第四中队队长赵琴，政治指导员陈思南，负责教员叶桂馨，另有教员宋励吾、朱佩珍、陶永昕、毛敬义、周琳、刘德馨、朱家善、陈文言、李海波、易仕明、曾广琼等。学员分别来自空军预科总队、无锡苏南公学、华东航空处文工团、机械大队、上海宝山中学等，共计113人。1950年3—4月，又从高射炮团、特纵司令部转进18人，合计131人。这批学员，文化程度不一，从小学到大学都有，大部分是高中程度，年龄18~24岁，个别稍大一些。这期训练任务，主要是培养空军气象台站的

面观测员。因此课程有两门：气象观测与气象知识。在465小时的训练时间内，气象观测、观测实习与气象常识达354小时，也学点空军与防空常识。这期训练为期6个月，1949年12月上旬开学，计划于1950年6月中旬结业，后鉴于当时台湾海峡形势，急需加强空防等原因，部分学员提前结业，1950年3月即开始陆续分配工作。分配以华东地区为主，并面向全国空军。有一部分文化程度稍高、成绩比较优秀的学员，结业后留下再学习预报、高空探测或测政工作（即台站管理）<sup>⑤</sup>。

通过半年的学习，学员要掌握所有的基本观测的程序，从到一个新的地方，建立一个气象站，一直到开展观测工作。

这期训练班是中华人民共和国成立初期，在全国最早、影响较大的一次气象业务技术干部的培训。

其间，还有山东农学院学员观测实习班，这批学员原是山东农学院气象专科班的。1950年2月由华东航空处接收并入伍。接收后，其中一部分学员就地分配在山东省空军各台站工作，另有35名学员调至南京山西路<sup>⑥</sup>集训。由于他们原已学过气象基础理论，集训纯属补课性质，着重学习航空气象观测知识及进行观测实习。1950年4月开学，5月即结束，后实习一个多月，当时负责教员为束家鑫，实习后，同明故宫训练队结业的学员一道分配至华东新建或原气象台站工作<sup>⑦</sup>。

### 3 高空探测和预报辅助培训班

1950年2月初，华东军区航空处气象处在南京成立，地址在南京北极阁山上。由航空处副处长林征兼任气象处处长，张政、程纯枢为副处长。吕东明为军事气象组组长，曾宪波为副组长，傅涌泉为观测组组长，张汉松为预报组组长。这是新中国成立后，各大军区之中最先成立的地区气象领导机构。行政上属军区建制，业务上归军委气象局统一领导。

钮叙凯于1950年6月气象训练班结业后分配至华东军区航空处气象处（北极阁）当观测员。

1950年6月，为了尽早恢复高空观测，先从明故宫气象训练队抽调成绩优秀的学员7人，到北极阁气象处，在曾宪波的指导下，一边整修探空设备，一边学习高空观测技术。曾宪波从接收的器材中找出美式无线电探空设

① 我所经历的建国前后的气象工作，曾宪波，风雨征程——新中国气象事业回忆录第一集，气象出版社，2006。

② 钮叙凯访谈实录。

③ 此处曾宪波的回忆可能有误。据徐南侠，华东大区时期的气象教育工作，见：风雨征程——新中国气象事业回忆录第一集（气象出版社，2006），学员分别来自空军预科总队、无锡苏南公学、华东航空处文工团、机械大队、上海宝山中学等，共计113人。另据钮叙凯回忆，从上海迁往南京时，学气象的一共有30多人，见钮叙凯访谈实录。

④ 1949年5月11日，苏南第一所革命干部学校——苏南公学在无锡建立。苏南公学的前身是设在苏北解放区的华中大学，无锡解放时迁锡，由中共苏南区委员会和苏南行政公署举办，苏南行署文教处直接领导。校长董希白，副校长吴天石、李仲林。1950年迁往常熟。在锡先后办学三届，吸收社会上的青年知识分子和原国民党政府的部分工作人员，培养为人民服务的思想，并传授各项革命工作的业务知识。共培训干部5000多人。

⑤ 徐南侠，华东大区时期的气象教育工作，见：风雨征程——新中国气象事业回忆录第一集，气象出版社，2006。

⑥ 山西路口西流湾，是民国政府时期南京气象站（约于1948年11—12月成立）所在地。

⑦ 同注6。

备，同年9月，军委气象局派田明远<sup>①</sup>至南京，负责全面整理探空仪器。在整理过程中，发现这批仪器均可修复使用，于是便建议军委气象局和华东气象处的领导成立探空训练班。10月，在南京山西路<sup>②</sup>办起解放后第一个无线电探空训练班。这期学员共17名，除南京的原有7名外，从北京气象训练队、中央气象台调来7名，又在南京新招收3名。文化程度多数是高中毕业或大学肄业，年龄最小17岁，最大35岁。教员有田明远、周南屏、曾宪波等，主要学习无线电工程原理及无线电实习、探空仪原理及检修、气球探空仪施放技术。课程结束后，进行4周施放球实习。结业仪式于1951年2月28日举行。学员结业后，分别留在南京及到北京创建探空站。

钮叙凯在北极阁工作到11月份就接到通知再去学习。这次参加的是预报辅助训练班。训练班于1950年11月7日开学，地点在南京山西路西流湾一个院子里，里面有两三栋房子。该班共有学员24人，都是从观测训练队结业不久的观测人员中抽调而来，大部分只经过观测实习，年龄20岁左右，文化程度不一，进入训练班后，先安排复习数理，然后学习天气学原理，并从大量分析天气图实习中，熟悉天气图分析技术与预报方法。通过培训，培养从事预报辅助工作或气象参谋人员。班主任由华东空司气象处器材股股长王德育兼任，韩希庆任政治指导员，宋励吾为主任教员，陶永昕、李文尧、祝启桓等为教员。

钮叙凯说，当时学习的条件比较差。只有宋励吾一个老师上课，他上午给我们讲课，下午、晚上他写讲义、备课。我们没有书，没有课本。我们学员下午画天气图。所以我们整个学习期间，画了不少天气图，但画的都是地面天气图，没有高空天气图。老师讲的内容，也基本都是一些气象常识，比较简单。但大多都是比较经典的，比如说冷锋下来的时候，冷锋上面会出现什么天气，这个都是标准的。但实际天气变化是很复杂的。我们这个训练班讲课只占一半时间，另一半时间就是画天气图。所以我们这个预报班，叫预报辅助班，是作为预报员的助手。

1951年5月预报辅助训练班就结业了（图1）。彼时原华东军区航空处气象处已改隶华东军区司令部，称华东军区司令部气象处。钮叙凯回忆，我们当时整编成陆军，分配的时候，因抗美援朝空军需要，18个同志去了空军。剩下的6个人里，有两个分到上海气象台，一个分到浙江的温州气象站，还有一个被海军要去了。剩下两

个在气象处，我是其中之一。



图1 1951年5月气象训练队预辅班结业留影

这批学员是中华人民共和国成立后，华东地区首批培训的新预报人员<sup>③</sup>。此后，随着各大军区气象处的成立，各大区的气象培训都陆续开展起来。

#### 4 结语

国人自开创气象事业以来无不重视人才培养，而教育培训作为人才培养的一个主要手段，从蒋丙然先生到竺可桢先生皆然。

另一方面，民国时期的气象高等教育始于竺可桢先生1921年秋在东南大学创建新型地学系，增设地质、气象等新式课程，先后培养出一批突出的地理、气象人才，如张其昀、胡焕庸、黄厦千、沈孝凰、吕炯、朱炳海、朱文荣、张宝堃、徐近之、郑子政等。1944年8月，气象组从地理学系分出，成立国立中央大学气象系，是我国大学中成立的第一个气象系。1929年，清华大学成立地理学系，开设气象学课程，并建立气象台。1947年，原有的地学系气象组也独立成气象学系。1936年5月，浙大史地学系成立。1939年7月，浙大文科研究所史地学部成立，分为史学组与地学组，1940年增设气象学组。新中国成立前，中央大学、清华大学、浙江大学是培养气象高等教育人才的主要基地。但大学气象教育培养的人才在数量上无法满足气象事业发展的需要（如1942年，中央大学气象组毕业生仅仅4人）。

新中国成立后，随着接收国民党的气象台站和机构以及布局新中国气象事业的发展需要，加大气象教育培训力度也就成为了必然选择。

① 我国高空气象探测的奠基者之一。20世纪50—60年代对我国自行研制58型、59型探空仪及其建站布局作出了杰出贡献，填补了我国高空气象探测技术的空白。

② 另一说为北极阁华东气象处院内，见我所经历的建国前后的气象工作，曾宪波，风雨征程——新中国气象事业回忆录第一集，气象出版社，2006。

③ 当时华东气象处还举办了其他培训，详情参见徐南侠，华东大区时期的气象教育工作，见：风雨征程——新中国气象事业回忆录第一集，气象出版社，2006。

## 编辑选编

“青藏高原环境变化”专题——《科学通报》2015年第60卷第32期

《青藏高原环境变化科学评估报告》是一个集科学、政府、用户3个层面为一体的多方共同努力的成果，是一个集中反映青藏高原环境变化多年科学研究和社会实践的系統总结成果，是一个为科学研究服务、为政策制定服务、为社会发展服务的公共产品。本期《科学通报》，以五篇“青藏高原环境变化”专题论文展示该报告的部分成果。

其中，陈德亮等基于环境代用指标、观测数据和相关统计资料，从气候、水体、生态系统、陆表环境、人类活动影响和灾害风险6个方面，采用温度、降水、冰川、积雪、湖泊等26项指标内容，归纳了冷/暖、干/湿等60项指标特征，揭示了青藏高原过去2000年和现代环境变化的基本事实，重点评估了环境变化和人类活动影响，同时预估了未来100年环境的不同情景。文章所用资料全部来自公开发表的科学文献和省部级及以上的统计数据，是首次青藏高原环境变化科学评估的简要版本，体现了《青藏高原环境变化科学评估报告》的基本框架、指标体系和主要结论，反映了当今科学界对青藏高原环境变化的科学认知水平。

张人禾等回顾了21世纪青藏高原区域多种气候和环境要素变化预估研究的进展，包括气温、降水、极端天气气候事件、冻土、积雪、冰川、径流和植被等，预估结果主要来自于SRES和RCP情景下气候模式的预估以及物理统计模型的预估。结果表明，未来青藏高原地面气温将升高，21世纪后期增温更显著。总体来说21世纪高原降水以增加为主，极端天气气候事件增加。高原未来冻土面积缩小，冻土活动层厚度增加，积雪日数和积雪深度

减少，冰川将以退缩为主。径流的未来变化较复杂，不同流域之间的差异较大，径流在不同流域表现为增加和减少并存。青藏高原植被对气候变化的响应敏感而脆弱，21世纪中后期青藏高原的生长季长度增加，常绿林/森林出现在高原东部和南部，灌丛植被类型将会扩展并入侵高寒草原。根据已有的研究结果，文章对这些气候与环境要素在21世纪中期（2030—2050年）和后期（2080—2100年）的变化进行了综合集成，给出了它们在21世纪中期和后期的可能变化范围。

崔鹏等基于青藏高原与气候变化相关的地表自然灾害（滑坡、泥石流、山洪、干旱、雪灾）的孕灾和成灾特点，遴选出不同类型灾害的危险性评估指标，进行灾害危险性评估；依据对承灾体的危害程度和方式，分别针对山地灾害（滑坡、泥石流、山洪）和气象灾害（干旱和雪灾）进行区域易损性评估；对危险度和易损度评估值进行归一化处理，完成灾害综合风险评估。评估结果表明：高度风险区主要位于青藏高原西部和南部边缘地区，占20.55%，包括川西高原和藏东南；中度风险区主要位于青藏高原中南部、中西部以及东北部地区，占30.26%，包括西藏南部、青海北部以及四川西北部地区；低度风险区主要位于青藏高原中部地区，占37.64%，包括西藏中北部与青海西南部地区；微度风险区主要位于青藏高原北部与西北部，占11.55%，包括西藏北部与新疆南部地区。最后，分析了当前防灾减灾存在的问题，并提出相应的减灾对策。

气溶胶与东亚季风相互影响的研究进展——《中国科学：地球科学》2015年第45卷第11期

中国科学院地学部在第33次科学与技术前沿论坛对气溶胶与季风相互作用进行了深入讨论和评估。吴国雄等综述了在此次论坛上所报

告的国际和中国气溶胶与东亚季风相互作用有关的研究进展。研究表明：1) 东亚季风能影响气溶胶的输送，特别是可以由气溶胶引起的持续性强雾-霾天气过程的生成和发展提供适宜的大气环流背景场，东亚季风还在季节、年际、年代际等多时间尺度上影响气溶胶的输送和空间分布特征，季风区域的高水汽特征还可能影响气溶胶的光学及辐射效应；2) 已有证据表明气溶胶对于中国部分区域云的物理特征和降水有明显影响，在东南沿海地区，增加气溶胶的含量可能会抑制轻型和中度降水，对强降水可能有强化作用，但是此问题极为复杂，值得深入研究；3) 东亚夏季风活动的年际变化对中国区域气溶胶浓度和空间分布有明显影响，而且近几十年季风的减弱很可能利于区域气溶胶浓度增加。同时期，中国大气污染排放量的显著增加很可能减小了海陆温差和纬向差异，也不利于季风的增强。此外，文章对未来加强季风与气溶胶相互作用的研究给出了部分参考建议，还指出气溶胶对于东亚季风环流影响研究的不确定性。

数值天气预报中分析同化基本方法的历史发展脉络和评述——《气象》2015年第41卷第8期

数值天气预报中分析同化的基本方法先后经历了多项式函数拟合方法、逐步订正方法、最优插值方法、变分方法和集合卡尔曼滤波方法。朱国富首先根据相关的经典文献力求本色地介绍这些方法的基本思想和实施的具体要点；然后，着重于它们的上下承接关系，试图阐述同化的历史发展脉络，评述这些方法的显著特征和创新性，以期清晰地理解资料同化的循序渐进的内在发展逻辑。此外，从起源上阐明“主观分析”与“客观分析”、“初猜场”与“背景场”、“分析”与“同化”、以及“更新”、“新息”等基本概念，以期准确地

理解和把握“大气资料同化”的由来和内涵。

### 登陆台风精细结构的观测、预报与影响评估——《地球科学进展》2015年第30卷第8期

端义宏等撰文介绍了2015年立项的国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“登陆台风精细结构的观测、预报与影响评估”。项目将通过进行登陆台风精细结构的野外科学试验,开展登陆台风精细结构的多源资料分析理论和方法研究,探索登陆台风精细化结构演变规律及其对风雨分布的影响机理,发展高分辨率台风数值预报模式关键技术,开展台风灾害影响(预)评估方法研究等,揭示环境因子及其自身内部的多尺度系统相互作用如何影响登陆台风精细化结构的演变,以及精细结构的演变如何影响台风风雨强度和分布,力争提高登陆台风精细结构的模拟、预报和影响评估能力。

### 华北地区水位下降是否会减缓气温上升——《地球物理学报》2015年第58卷第10期

华北地区由于长期持续的地下水过量开采,导致了大面积地下水位大幅下降,引发地面塌陷、地下水水质污染等一系列地质环境问题,这些现象早已为人们所熟知和关注。然而地下水位下降还会造成百米量级浅部地温及其梯度的变化,因此即使来自地球深部的大地热流密度没有变化,年度平均的从表浅部位通过地表实际传导进入大气的热流密度会减小,这是中外文献中尚未见讨论过的问题。尹凤玲等通过数值模拟发现假定在大地热流密度不变的条件下,华北数万平方千米地下水位下降会造成百米尺度内的地温降低,从而传入大气的热流密度降低40%以上,且会持续数百年以上的时间。这种长时间大范围的传导入大气的热流密度变化对

环境会造成什么影响是一个十分值得关注的问题。这一预测在一定程度上得到了气象站地温观测数据的支持,但由于目前气象观测站只有3.2m深度范围内的地温资料,累计不超过五六十年的,中间还有10余年的间断,而且表浅深度地温受地表多种因素的影响也较大,这些资料难以对我们关心的地下水位下降引起流入大气的热流密度变化这一问题提供直接确凿的数据来进行分析,因此今后有必要开展对地下数十乃至数百米地温进行持续精确的监测工作。

### 中国平均降水和极端降水对气候变暖的响应:CMIP5模式模拟评估和预估——《地球物理学报》2015年第58卷第9期

吴佳等基于24个CMIP5全球耦合模式模拟结果,分析了中国区域年平均降水和ETCCDI强降水量(R95p)、极端强降水量(R99p)对增暖的响应。定量分析结果显示,CMIP5集合模拟的当代中国区域平均降水对增暖的响应较观测偏弱,而极端降水的响应则偏强。对各子区域气温与平均降水、极端降水的关系均有一定的模拟能力,并且极端降水的模拟好于平均降水。在RCP4.5和RCP8.5情景下,随着气温的升高,中国区域平均降水和极端降水均呈现一致增加的趋势,中国区域平均气温每升高1℃,平均降水增加的百分率分别为3.5%和2.4%,R95p增加百分率为11.9%和11.0%,R99p更加敏感,分别增加21.6%和22.4%。就各分区来看,当代的区域性差异较大,未来则普遍增强,并且区域性差异减小,在持续增暖背景下,中国及各分区极端降水对增暖的响应比平均降水更强,并且越强的极端降水敏感性越大。未来北方地区平均降水对增暖的响应比南方地区的要大,青藏高原和西南地区的R95p和R99p增加最显著,表明未来这些区域发生暴雨和洪涝的风险将增大。

### 大气甲烷浓度变化的源汇因素模拟研究进展——《地球科学进展》2015年第30卷第7期

鲁易等从甲烷大气化学过程、传输模式和反向模拟机理等方面综述了大气甲烷浓度变化及其源汇研究的主要进展及存在的问题。基于数据同化算法的反向模拟能有效降低全球及国家尺度甲烷排放估计的不确定性。但在具体的算法实施中,先验的甲烷排放估计和地面站大气甲烷浓度测定的不确定性量化仍然主要是经验性的,缺乏严格和系统性的量化算法。相对于有限的地面站测定,基于卫星平台的大气甲烷浓度变化监测数据极大地提高了数据的空间覆盖度,进一步促进了反向模拟的应用。当前的反向模拟研究在全球尺度上确认了自然湿地甲烷排放对大气甲烷浓度年际波动的决定性作用;在国家尺度上,反向模拟在国家温室气体清单的“可核查”方面也有广泛的应用前景。

### 气候容量及其对气候安全风险管理的的作用——《地球科学进展》2015年第30卷第6期

全球气候安全问题已经日益突显,为了开展气候安全风险管理的,国内学术界最近提出了气候容量的概念。然而,目前对气候容量的科学认识十分有限,甚至还没有比较统一的科学定义,对如何通过气候容量评价开展气候安全风险管理的也没有明确的技术思路。张强等在归纳总结以往研究的基础上,进一步讨论了气候容量及其对气候安全风险管理的的作用,对气候容量给出了更加科学的定义和合理的诠释,并且分析了气候容量的科学属性和基本特征,探讨了全球气候安全风险的总体趋势,提出了利用气候容量的杠杆作用提升气候安全风险管理和气候资源开发利用水平的初步思路。

**雷达观测到的湖体对流在登陆和地形抬升期间的演变**——The evolution of lake-effect convection during landfall and orographic uplift as observed by profiling radars. *Monthly Weather Review*, Vol. 143, No. 11.

安大略湖东部地区是北美东部最大季节性降雪多发的区域之一，其中，又以安大略湖下风处（东岸）约30km的Tug Hill高原（海拔600m）的降雪量为最。在Tug Hill高原，湖体对流效应受到了伴随着登陆和地形抬升的中尺度强迫的影响。美国纽约州立大学奥尔巴尼分校的Minder等使用安大略湖冬季湖体效应系统试验的雷达数据，分析了导致Tug Hill高原强降雪的湖体对流的内陆演变特征。从安大略湖岸到Tug Hill，沿一线设置了四部K波段微型降雨雷达（MRR），并使用一部X波段雷达（XPR）进行了附加观测。分析对象为发生在Tug Hill高原的一次强烈的湖体效应降雪，等量液态降水（LPE）为6.4cm。这次事件表现出强烈的内陆增强特征，在15km的水平距离内，LPE增加了1.9倍。MRR谱揭示此内陆增强不是由于湖对流深度或强度的增加。随着内陆距离的增加，回波从对流向层状形态转变，同时变得没那么强烈，过渡更均匀、更频繁。回波频率的内陆增强（可能是地形强迫）对降雪增强有所贡献。XPR观测重现了MRR所探测到的基本的垂直结构，同时也体现出海拔低于600m的Tug Hill迎风坡的降雪受到了抑制，这可能伴随于云升华或水凝物平流。基于29次事件的统计也表明，以上所述的对流内陆演化是安大略湖东部湖体效应风暴的常见特征。

**1997年7月Oder洪水期间土壤湿度在产生强降水中的角色**——On the role of soil moisture in the generation of heavy rainfall during the Oder flood event in July 1997. *Tellus A*, 2015, Vol. 67.

土壤湿度—大气反馈在世界许多区域的气候中都扮演了重要的角

色，这不仅表现在平均气候态，也表现在极端事件上。一些研究已经显示出干旱和热浪的强度和幅度受到了干/湿（土壤湿度）条件的显著影响。然而目前很少有研究关注土壤湿度对强降水事件的影响。为此，德国亥姆霍兹联合会海岸研究所的Ho-Hagemann等以1997年7月Oder洪水事件为例，研究了土壤湿度在强降水形成中的角色。研究使用了区域气候模式COSMO-CLM（作为一个非耦合的standalone模式）和耦合系统模式COSTRICE，在后者中，COSMO-CLM和海洋（TRIMNP）、海冰模式（CICE）进行了耦合，耦合区域为波罗的海和北海。模拟结果显示，耦合模式能够捕捉到导致Oder洪水的强降水的第二阶段（7月18—20日），而非耦合模式不能。敏感试验表明，耦合模式的较好表现归因于模拟的1997年7月中欧的土壤湿度条件，耦合模式中的土壤湿度要大于非耦合模式。这个发现说明强降水事件之前的土壤湿度显著影响了第二阶段强降水的生成。较好的模拟效果也暗示了大气—海洋耦合有助于特定极端事件的模拟。不过，没有哪个版本（无论耦合或不耦合）能捕捉到降水的第一阶段（7月4—8日），尽管土壤湿度条件的不同，这表明土壤湿度对强降水产生的重要性强烈依赖于事件本身和有关的大气环流型式。

**全球气候模式在模拟全球气候类型地理分布时的缺陷**——Deficiencies in the simulation of the geographic distribution of climate types by global climate models. *Climate Dynamics*, 2015, in press.

评估全球气候模式可以反映全球气候模式对现实气候的模拟能力。一般来说，相关系数、偏差和标准误差等指标可以用来评估全球气候模式对单个变量的模拟能力。然而，这些指标不能评估同一模式对不同变量的协同模拟能力。基于不同变量划分的气候类型的分布，可以反映不同变量协

同变化的空间属性。另外，气候类型的分布同陆地生物圈及其分布具有紧密的联系。通过全球气候模式模拟的全球气候类型的分布可以预测未来陆地生物圈的有关变化。为此，沈阳农业大学的张先亮等评估了CMIP5中9个全球气候模式对全球气候类型的模拟能力。结果表明，基于全球气候模式模拟的变量划分出的全球气候区，在很大面积上和实际的气候区的分布不同。对于多数模式的结果，分布到错误气候区的区域占陆地总面积的30%~50%。另外，基于模式模拟结果得到的气候区变动和实际气候区的变动也有很大的差别。气候区变动的区域及气候区变动的面积都不能很好的通过模式模拟得到。因此，全球气候模式的模拟结果不能很好地反映全球气候区的分布以及气候区的变动状况，这表明全球气候模式的空间模拟能力还需要进行改善。

**1998—2012年全球变暖停滞中的欧亚冬季变冷**——Eurasian winter cooling in the warming hiatus of 1998–2012. *Geophysical Research Letters*, 2015, Vol. 42, No. 19.

使用5种不同的全球温度数据集，德国汉堡大学的Li等分析了不同纬度带地表温度趋势对近期变暖“停滞”（hiatus）的相对贡献幅度。研究认为，1998—2012年的全球平均地表温度趋势受到了欧亚明显的冬季变冷趋势的强烈影响。为寻找这种冬季变冷趋势的驱动因素，研究利用ECHAM6模式，设置了3种不同的海表温度和海冰方案，对每一种设置，进行了20个成员的集成模拟。试验表明，过去几十年间，北极海冰的减少并没有驱动北半球大尺度环流的系统变化。观测到的1998—2012年欧亚冬季变冷趋势基本上源自大气内部变率，并构成了一种极端气候事件。不过，观察到的北极海冰减少增强了欧亚大陆冬季气候的变化，从而增加了极端欧亚冬季变冷趋势的概率。

**京津唐区域城市扩张对地表温度的累积影响**——The cumulative effects of urban expansion on land surface temperatures in metropolitan Jingjintang, China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, Vol. 120.

快速城市化进程已经导致许多农田和自然植被转换成了不透水层，从而大幅改变和影响了地表特性和陆-气交互过程。中科院遥感地球所的胡永红等使用Landsat卫星数据，分析了京津唐区域2001—2010年的城市化进程。研究首先将基于Landsat的土地利用分类结果合成为1和10km两种分辨率的栅格数据，并使用MODIS产品获取了年和季节地表温度数据(LST)。然后，使用滑动窗和梯度分析方法，检测了城市用地和其他土地类型间的LST差异，以分析城市化水平对LST的影响。研究发现，2001—2010年，该区域的城市化范围增加了1.6倍，其中新的城市化区域的45%是由耕地转变而来。这使得京津唐区域的年平均LST增加了 $0.85 \pm 0.68^\circ\text{C}$ ，并且夏季的变暖幅度最大。在1km栅格内，城市用地增加10%将使年LST增加约 $0.21^\circ\text{C}$ 。城市化导致的白天LST和夜晚LST的增加程度分别约为 $1.03 \pm 1.38^\circ\text{C}$ 和 $0.78 \pm 1.02^\circ\text{C}$ 。城市化引起的变暖趋势存在明显的季节和昼夜差异，而且变暖趋势很有可能是由土地特性、辐射传输和人为热释放等因素的共同效应所引起。

**城市化对炎热沙漠城市气候的影响：土地覆盖、局地气候和季节特征的作用**——Urban climate modifications in hot desert cities: The role of land cover, local climate, and seasonality. *Geophysical Research Letters*, 2015, in press.

温带区域的城市热岛效应(UHI)已经得到了研究者的广泛关注。相比，对于炎热、干旱环境下城市化对气候的影响目前依然知之甚少，尽管这些地区的城市化进程

也在不断加速中。为此，阿联酋马斯达尔科学技术研究院的Lazzarini等使用源自MODIS和Landsat遥感数据的地表温度、归一化植被指数、不透水层面积等资料，分析了位于中东、北非和北美的8个炎热沙漠城市(阿布扎比、科威特市、利雅得、多哈、拉斯维加斯、菲尼克斯、比斯科拉、比卡内尔)土地覆盖和温度之间的关系。研究发现，不同沙漠城市显示出了相似的气候格局：白天，城市区域的温度要低于郊区(UCI，城市“凉岛”)；夜晚，则相反(出现城市热岛效应)。观测到的白天城市“凉岛”很大程度上可以用植被相对丰度、裸地比例和局地气候条件来解释，而调节干旱地区边界层动态的物理过程需要进一步的研究。

**缺水气候条件下的径流减少与CO<sub>2</sub>对植被的影响相一致**——Reduced streamflow in water-stressed climates consistent with CO<sub>2</sub> effects on vegetation. *Nature Climate Change*, 2015, in press.

全球环境变化影响着水资源的时空分布，但如何量化这种影响仍然存在挑战。特别是，对于响应于大气CO<sub>2</sub>浓度增加的植被变化对水循环的影响，目前知之甚少。澳大利亚麦考瑞大学的Ukkola等使用基于遥感的归一化植被指数(NDVI)和长期的水平衡蒸散(ET)数据，对190个基本未受人为干扰的流域进行了分析，分析的时间段为1982—2010年，研究发现，过去30年间，植被受到水分限制的降水阈值显著下降了，而半湿润和半干旱流域的植被有所增加(greening)，同时也消耗了更多的水，导致了径流的显著减少(24%~28%)。相比，干旱和湿润区域NDVI和ET的变化并不显著，其中，干旱区域高比例的C4植物可能导致CO<sub>2</sub>施肥效应并不明显。研究表明，植被水利用效率的增加以及缺水区域径流的减

少，可能使未来降水减少的问题变得更为复杂。

**基于卫星植被指数的地中海东部地区250m分辨率年蒸散产品**——Annual evapotranspiration retrieved from satellite vegetation indices for the eastern Mediterranean at 250m spatial resolution. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, Vol. 15.

以色列巴伊兰大学的Helman等利用卫星植被指数建立了一个分辨率为250m的地中海东部地区蒸散量估算模型，该模型被称为植被指数参数化估算蒸散模型(PaVI-E)。PaVI-E模型基于MODIS植被指数(归一化植被指数NDVI和增强型植被指数EVI)与具有广泛的植物功能型代表性的16个FLUXNET站点观测的年总蒸散量之间的经验关系。研究首先分别建立了一年生植被系统(如农田和草地)和一年生、多年生混合植被系统(如林地，森林，萨王纳和灌丛)的经验关系。植被指数能够解释不同植被系统年蒸散量的大部分方差(一年生植被系统为71%，一年生、多年生混合植被系统为88%)，但是在多变量回归中增加地表温度，或对温度和绿度模型进行修正都不会导致相关变得更好( $p > 0.1$ )。建立经验关系后，PaVI-E被用来提取2000—2014年地中海东部地区的年蒸散量。模型估计的蒸散量与沿该地区降水梯度流域水分平衡计算出的年蒸散量相关系数非常高( $R=0.92$ ,  $p < 0.01$ )。同其他粗糙分辨率的ET产品相比，比如与目前两种业务化的中等分辨率的ET产品——LSA-SAF MSG Eta (3.1km)和MODIS (MOD16, 1km)在148个地中海东部流域相关系数分别高达0.75和0.77( $p < 0.001$ )，相对偏差为 $-5.2\% \sim 5.2\%$ 。由于目前缺乏针对地中海东部地区的高分辨率(<1km) ET模型，本研究提出的模型将对该地区水文研究，以及管理该地区最宝贵的水资源非常有益。

## 《《 涓流细雨 》》

“This agreement shows the trust and confidence that the Member States have in the way ESA and EUMETSAT cooperate to make Europe a leader in satellite meteorology. The MetOp-SG satellites will maintain Europe’s leading edge in the development of meteorological systems, instruments, technologies and applications, and in the provision of weather forecasting and monitoring services.”

“这份协议显示出成员国对于以ESA和EUMETSAT合作方式让欧洲处于卫星气象领先地位的信任和信心。欧洲第二代气象业务卫星将让欧洲在开发气象系统、仪器、技术和应用，以及提供天气预报和监测服务方面保持在前沿。”

——日前，ESA（欧空局）和EUMETSAT（欧洲气象卫星组织）签署合作协议，确保持续开发欧洲第二代气象业务卫星（MetOp-SG）并将在2021年中期提供极轨气象观测。MetOp-SG将组成EUMETSAT第二代气象卫星的极轨系统部分，计划在2021年到2040年代中期提供关键性、业务化的气象观测。谈到这份合作协议的签署，ESA主任Johann-Dietrich Woerner如是说。

“Dr. White is a bridge between science and government and the world of politics, and it is credited him with building the institutions for environmental monitoring and management that we just take for granted today.”

“怀特博士是架构在科学和政府及政界之间的桥梁，他会因构建了今天看来理所当然的环境监测和管理的体系而被人们怀念。”

——在美国五任总统期间担任NWS局长，亲历了天气卫星发射和最早提出气候变化卫星警告的怀特（Robert M. White）博士，2015年10月逝世，享年92岁。洛克菲勒大学人类环境项目负责人Jesse H. Ausubel对怀特的上述评价，也许代表了很多人的心声。1963年，肯尼迪总统任命怀特为NWS局长时，他是位于康涅狄格州一家旅游保险公司下属的天气监测组织研究中心的主任。两年后，约翰逊总统任命他为新组建的由天气局和联邦海岸和大地测量局合并的环境科学服务管理局的局长。1970年，该局成为今天的NOAA，怀特在尼克松、福特和卡特三任总统期间担任NOAA局长，直到1977年卸任。1983—1995年，他是美国国家工程院的院长。

“India is not part of the problem of global warming, but we want to be part of the solution”

“印度不是全球变暖问题的一部分，而我们想成为解决方法的一部分。”

——2015年10月2日，印度宣布到2030年前40%的能源来自非化石燃料，相对于2005年水平，2030年减少33%~35%的碳密度（单位GDP排放）。印度环境部长Prakash Javadekar在谈到在联合国巴黎大会前做出的这一承诺时，用一句简单的话表达了印度政府的态度。

“These research investments are designed to accelerate the development and use of advanced observing systems, forecast models, and other decision-support tools that will improve our nation’s resilience to hazardous weather. By engaging with a broad array of academic and other research partners, we aim to improve scientific understanding of these hazardous and extreme weather phenomena to solve the real problems our citizens, businesses, and leaders face every single day. Congressional leadership was instrumental in making these projects a priority.”

“这些研究投入是为了加速开发和利用先进的观测系统、预报模式和其他决策支持工具，这将提高国家面对灾害天气的弹性。通过与学术界和其他研究伙伴的广泛融合，我们的目的是改进对这些灾害和极端天气现象的科学认知，解决市民、商家和管理者每天面对的问题。国会的领导有助于确定这些优先开展的项目。”

——NOAA日前宣布，投入570万美元，通过合作研究协议和拨款的方式，开展改进灾害和极端天气预报的合作研究。这些灾害天气覆盖了龙卷风、飓风、强降水、洪涝和雪暴等天气。NOAA局长Kathryn Sullivan解释了这一做法的目的所在。据悉，这次投入将促成NOAA与27个位于16个州的学术、政府和企业研究机构之间针对4个领域的合作：美国东南部龙卷风试验中旋转起源验证（190万美元）；联合飓风试验平台（140万美元）；水文气象试验平台（120万美元）和灾害天气试验平台（120万美元）。

“This is one of the most important new initiatives from NWS we have seen for Emergency Managers in years.”

“这是近年来看到的NWS针对应急管理最重要的创新之一。”

——在美国气象学会最近召开的一次主题为“预报环境威胁的创新方法”会议上，来自北卡罗利市天气预报台的代表介绍了该台在解决预报员面对大量增加的概率信息，但却难于融进业务产品的难题时，采用向应急机构提供天气过程可能导致的最小（10%概率）和最大（90%概率）影响，作为官方预报的补充，进而得到了当地应急官员如上所述的肯定。

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

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

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

## 第80页评刊

来信截至 2015年12月10日

夏旭东

今年第九号台风“灿鸿”登陆点的定位是否是依据Dvorak技术？另外“灿鸿”登陆时，JMA并没有明确指出要灿鸿在舟山市登陆，个人感觉此次定位还是存在一定误差，不知2015年第4期“台风定强技术及业务应用”一文的作者许映龙老师能否解答一下？谢谢！

回复 (from作者)

Dvorak技术是世界各国台风业务中心台风业务定强的主要依据，特别是针对海上台风，而当台风移到近海或海岛附近，台风业务定强的主要依据则是地面观测资料（风速、气压）或雷达观测资料（径向速度）。台风定位则一般是根据台风云型特征或雷达回波特征（台风眼、螺旋云带曲率中心、上冲云顶等特征）或地面风场的闭合环流中心来确定的。

今年第九号台风“灿鸿”登陆点是根据地面观测和雷达观测资料确定的，而台风登陆点的确定则一般是根据地面风场是否存在闭合的环流中心来确定的，也即只有当地面观测到闭合环流中心，才确定台风登陆。

关于“灿鸿”是否登陆，可能确实存在偏差，这一方面是由于当时业务中对观测资料的仓促分析而导致，另一方面是当时面临的现实服务需求所决定，我们将会年底台风最佳路径修订时给予充分考虑，并进行订正。感谢该读者对我们工作的支持和理解。

朱刚

2015年第5期的“辽宁强对流天气物理量阈值探索统计分析一文”，总结了一些物理量参数值在各类强对流天气的分布区间，确定了强对流天气类型判断阈值。该文提到的探空构建技术，我觉得十分新颖，很受启发。北方强对流天气多发于午后，但对流即将发生时的环境条件把握不充分；另外，探空的空间分辨率较低，而产生对流的中小尺度系统空间尺度较小，所以难以准确观测，增加探空密度又需要大量人力物力。所以我觉得利用现有的手段加密探空的资料是非常有实用价值的手段，值得借鉴。

回复 (from编辑部)

探空数据的重要性除了揭示大气层结，更是各种遥感数据的标尺。除加密观测外，COSMIC等项目获取的包括海洋上的大气层结数据，是解决探空空间分布不够的有效途径之一。

(上接79页)

“NOAA needs to come clean about why they altered the data to get the results they needed to advance this administration’s extreme climate change agenda. The Committee intends to use all tools at its disposal to undertake its Constitutionally-mandated oversight responsibilities.”

“NOAA应说清楚为什么改变数据以获得推进该局的极端气候变化进程所需的结果。委员会计划利用所有可调动的手段，履行其被赋予的监督职责。”

——在美国国会履职28年，任众议院科学委员会主席的Lamar Smith，最近因与NOAA管理者在气候变化研究问题上看法相左，使得双方间气氛异常紧张。众议院共和党气候变化怀疑论领军者Smith，这次抓住NOAA科学家今年6月在Science杂志上发表的文章，该文章声称，“他们纠正了来自船只和浮标站温度读取的偏差，同时加入了新的北极地表监测数据，从而得出全球温度总体升高出现了15年间歇（global warming hiatus）实际上并未发生，而仅仅是一个数据误差”。Smith在质疑科学家成果的同时，给出上述表态来质疑NOAA。

“WMO is pleased that the World Radiocommunication Conference has recognized the importance of earth observations and the sharing of related information to monitor climate change, which is the cause of melting ice caps and glaciers, increasing sea levels and warmer oceans, with record global temperatures and more extreme weather events. We need radio frequencies to receive electromagnetic signatures to increase understanding of our environment and of atmospheric changes. This is important

for both climate change mitigation and adaptation.”

“WMO非常高兴世界无线电通讯大会认识到地球观测和共享监测气候变化相关信息的重要性，气候变化是冰川融化、海平面上升和海洋变暖，以及全球温度升高和极端天气事件加剧的原因。我们需要无线电频率接收电磁信号以增加对环境和大气变化的认识。这对气候变化减缓和适应都是重要的。”

——2015年世界无线电通讯大会（WRC-15）修改和更新了无线电条例，大会决定对于天气预报、灾害警报和气候监测至关重要的无线电频率，将继续供气象界使用，并且保护其免受其他应用的干扰。WRC-15的决定受到WMO的欢迎，WMO秘书长Jarraud先生发表了上述看法。

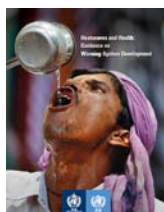
“We’ve never been able to measure the upper third or so of a hurricane, I think we’re going to learn a lot from that.”

“我们还从来没有能够观测飓风上部大约三分之一的部分，我想我们将从那里的观测数据中学到很多。”

——2015年10月23日在墨西哥西海岸登陆的飓风Patricia，是历史记录中的最强飓风。该飓风在太平洋东部受厄尔尼诺影响异常温暖海水的驱动下，一天之内从1级风暴加强到5级，登陆前风速超过每小时322km。Patricia飓风是第一批被NASA配备全套探测装置的美国空军WB-57 轰炸机飞跃探测的飓风之一，这一探测研究瞄准飓风与平流层之间的相互作用。MIT气象学者Kerry Emanuel如此评价这样的穿越飓风探测的意义。

### 《科学通报》 2015年10月

本期封面报告给出的是解读“全球变化与健康”专题。专题的4篇文章分别为：“保护星球健康：人类应对全球环境变化行动的终极目标、气候变化的影响：温水青蛙还是灾难临头、迈向人类健康和文明的新境界：星球健康、保护人类健康是应对全球变化的核心任务和终极目标”。未来10~20年，人类必须面对有史以来最为严峻的全球变暖、生物多样性减少和资源耗竭等生存风险。为了克服这些从全球到局部尺度的挑战，实现人类社会持续发展，2015年各国领导人已经两度聚首，就发展融资和可持续发展目标寻求策略。本期封面显示了采用北京师范大学基于卫星观测的植被叶面积指数30多年间的变化情况和联合国环境发展署等编制的2010年全球人均GDP数据展示世界社会经济和生态状况的分布。



### 《热浪和健康：预警系统开发指南》 2015年

世界气象组织和世界卫生组织近期联合发表的这份指南，是在过去50年里热浪事件不断增加的背景下，针对相关部门开发热浪预警系统而提出的。一些国家已经开发了类似系统，出版者希冀借助这本指南的出版，推进这样的预警系统被更加广泛地应用。

### 《强化美国全球变化研究项目的参与度》 2015年10月

由项目指导委员会牵头出版的这份报告（印前版），介绍了美国全球变化研究项目（USGCRP）有13个美国联邦实体参与其中。USGCRP越来越多地集中在推进决策的研究，期待着更多领域研究人员的参与和公众的理解与支持。



### 《天气》增刊 2015年9月

这本由英国皇家气象学会主编的期刊，把最新出版的增刊交给了年轻人——不仅指期刊文章的主要作者，还特别包括大部分编辑人员。这期增刊的一个特点，就是从社论到主要文章，在作者信息里增加了作者所在的年级，这期英国中小学生和大学本科生们共同编辑的期刊，勾画出未来英国气象学者之风采。

## 媒体扫描

## MEDIA SCAN



### 《研究思想和产出》2015年

这份即将创刊的新期刊，从期刊名称（The Research Ideas and Outcomes, RIO）中不难猜出，这将是一份有别于其他的期刊，发表研究循环中的所有产出：项目书、数据、方法、工作流程、软件、项目报告和学术论文等等，将上述要素放入RIO单一的合作平台，配以最透明、开放和公共评议等机制。据悉，该期刊将从2015年11月1日起接受来自所有领域科学家的投稿，包括科学、技术人文和社会科学（<http://rio.pensoft.net/>）。

### 《哲学学报A》 2015年10月

这份世界上最古老的科技期刊，本期瞄准了海啸研究，专辑主题为“海啸：跨越科学、工程和社会”，凸显了该领域多学科和领域的属性。专辑组织的14篇论文中，有10篇为评述文章，覆盖了该主题各方面的进展。该杂志近期还组织了北极海冰、地球系统中气候的反馈及应对和适应气候变化—作为知识的不确定性等主题为气象界感兴趣的专辑。



### 《中国气象服务产业发展报告》 2015年10月

这本中国气象服务协会组织编写的综合性报告，系统梳理了中国气象服务产业发展历史、现状和发展前景。报告250多页，包括了概述篇、专题篇和附录等三个部分。

# Advances in Meteorological Science and Technology (Bimonthly)

Vol.5 No.6, December, 2015

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 Zheming  
Fei Jianfang  
Guan Zhaoyong  
He Jianxin  
Huang Jianping  
Liao Xiaohan  
Lü Shihua  
Jia Pengqun (executive)

## Managing Editors

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

## Editors

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

## Overseas Editors

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

## Editorial office

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

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

Printed by  
Beijing Jinjishi Printing Limited Liability Company

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

## Main Contents

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

- 6 Qiu Jinjing, Chen Feng, Dong Meiyong, Yu Zhenshou/  
Establishment and Evaluation of Zhejiang WRF-ADAS  
Rapid Refresh System
- 13 Fan Yufen, Chen Zhengyu, Yang Dongchen, Pan Shixiong/  
Diagnostic Analysis of a Tornado Event Associated with the  
Squall Line in Tongxiang, 12 July 2014
- 17 Tan Jianguo, Gu Wen/ Research Progress on Urban-Induced  
Rainfall Effect
- 23 Li Lei, Hu Fei, Liu Jing/ Application of CFD Technique  
on Micro-Scale Issues in Urban Climatic Environment  
Researches in China
- 31 Zhao Huarui, Wu Liguang, Liang Xiang San/ Preliminary  
Application of the MWT Method to Separate Tropical  
Cyclone Circulation
- 37 Zhang Shuyu, Zhang Xiakun, Wang Chunling, Wang  
Baojian/ Effects of Moderate Strength Cold Air Activity  
on Hypertensive Patients
- 42 Cui Fene, Li Yang, Chang Juzheng, Li Weimin/ Comparison  
Analysis of the Two Coastal Rainstorm Courses of Subtropical  
High Peripheral Precipitation
- 48 Shen Yongsheng, Jiang Zongxiao, Wang Zhengting, Guan  
Xiaodong/ Analysis of Wind Profile Radar in the Severe  
Convective Weather in Sanming
- 53 Nie Ying, She Xingyuan, Dai Weishi/ Research of the Low-  
Level Wind Shear Process in 20130625 in Nanjing Airport
- 58 Zhang Dehong, Wang Su, Tang Yu, Wang Shanqi/ Analysis  
of Lightning Density in Huaian Region

## Forum

- 61 Li Liangwu, Tuo Yanjun, Chen Wentao/ Discussion on the  
Inspection Standard of Precipitation Forecast
- 63 Guo Zhimei/ Bibliometric Analysis on Academic Impact of  
the Atmospheric Science Journals in China

## Survey

- 2 Picture/ Number/ Ranking

## History

### Event

- 72 The Group for Mining and Research on the Meteorological  
History/ The Initial Training Courses in Meteorology in  
the New China

## Reading

- 66 Jia Pengqun, Xu Hong/ A Perspective on the Modernization  
Practice in Zhejiang Province
- 69 Ye Mengshu/ Book Review: Analytical Theory of Heat
- 70 Han Jiarui/ Book Review: Valuing Weather and Climate:  
Economic Assessment of Meteorological and Hydrological Services