

# Advances

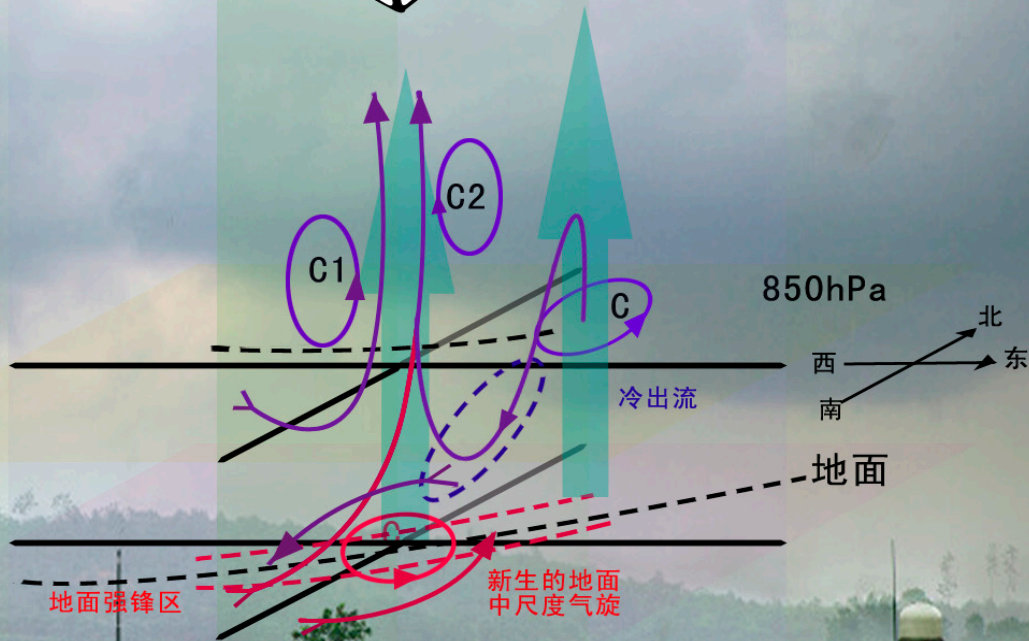
in Meteorological Science and Technology

# 气象科技进展

## No.2

2014年4月  
第4卷 第2期

### 暴雨研究



气象科技 **进展**  
Advances in Met S&T

ISSN 2095-1973



中国气象局气象干部培训学院 主办

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

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

**副主编**

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

**常务编委 (按音序排名)**

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

**编委 (按音序排名)**

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

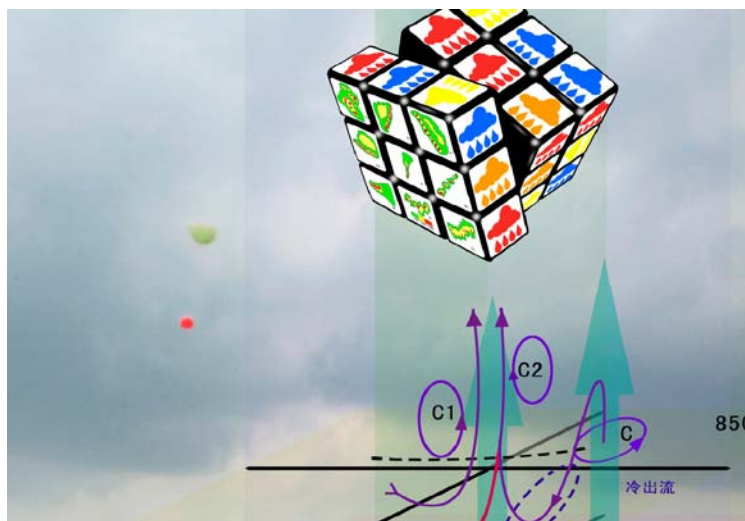
**海外编委 (按音序排名)**

陈镜明	李 俊	刘征宇	金飞飞	王 斌
翁富忠	张大林	张广俊	邹晓蕾	

**编辑部**

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

国际标准刊号: ISSN 2095-1973  
国内统一刊号: CN 10-1000/P  
定价: 30元



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

## 目 次

第4卷 第2期 2014年4月  
(暴雨研究 专辑)

1 许小峰: 主编语

### 研究论文

#### 封面报道

6 崔春光, 林春泽, 王晓芳, 李俊, 彭涛, 张文刚: 2000年以来我国长江中游区域暴雨研究进展

长江中游地区是暴雨多发区和重灾区, 深入认识该区域暴雨形成的中、小尺度天气系统、分析暴雨发生机理与发展暴雨、洪水预报技术, 对于我国防洪减灾具有重要意义……

#### 研究进展

16 王晓芳, 许小峰, 崔春光, 等: 长江流域雨季中尺度对流系统研究——国家自然科学基金重点项目(40930951)成果简介

24 万蓉: 我国暴雨研究中新型探测资料反演技术及其应用

36 赵玉春: 暴雨中尺度过程研究进展

45 王斌, 张健: 美国国家强风暴实验室定量降水估算系统简介

52 彭涛, 沈铁元, 高玉芳, 等: 流域水文气象耦合的洪水预报研究及应用进展

#### 短论

59 闫冠华, 李泽椿, 李巧萍: 太行山脉影响下的华北暴雨分型

62 陈超君, 王钦: 降尺度技术的应用研究进展

66 高琦, 徐明, 李武阶, 等: 我国面雨量研究及业务应用进展

## 主编语

2011年的夏天，“看海”一词迅速走红，成为年度网络流行语，在这个看似简单却不乏调侃和黑色幽默的词语背后，是我国多个城市在暴雨的侵袭下频频呈现一片汪洋，尤其是在北京“7·21”大暴雨后，人们无奈地体验到了现代大都市的脆弱，原本应可以提高人类防御自然灾害能力的城市，因在整体规划设计和预警应对等方面的欠缺，引发了城市之殇。

在我国大力推进城镇化的过程中，城市的环境、生态、结构等发生了翻天覆地的变化，人口密度加大、财富快速集中、高大建筑林立、交通运输拥堵、活动空间狭窄、环境质量降低、热岛效应加剧、排涝系统薄弱等大城市病导致自然灾害风险呈现出逐渐增加的趋势。而在自然灾害防御能力原本就薄弱的农村地区，随着青壮年劳动力向城市转移，教育、科技能力的欠缺，对暴雨、雷电等突发性强天气防范意识和能力的薄弱，气象预警预报信息的传播时效和应对措施不足，使自然灾害所带来的损失更趋严重，已成为广大农民在生产生活中常要面对的现实，也是在各级政府为解决三农问题时必需要考虑解决的重要问题。

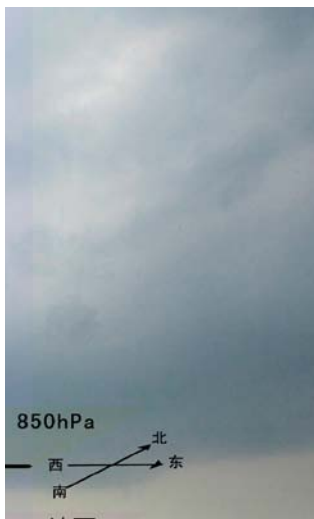
科学地规划、设计城乡的发展，自然灾害的防御是无法回避的重要课题之一。其中加强暴雨形成机理研究，提升暴雨预报预警准确率，降低暴雨造成的损失则是气象部门必须承担的一项重要、艰巨、长期的任务。

本期推出的“暴雨研究”专辑，撰稿人主要来自中国专门针对暴雨问题开展研究的机构——武汉暴雨研究所。这些文章，从一个侧面，给出了目前暴雨研究和预报业务的进展情况。《2000年以来我国长江中游区域暴雨研究进展》(P6)一文从观测资料、机理研究、数值预报与水文应用多方面详细介绍了长江中游区域暴雨的研究进展和研究趋

势展望。专辑的其他文章也从中尺度对流系统研究(P16)、探测资料反演技术及其应用(P24)、暴雨中尺度研究进展(P36)、定量降水估算系统(P45)以及洪水预报应用进展(P52)等方面进行论述。几篇短论则从不同视角审视了暴雨预报问题。我们希望这些研究进展可以帮助读者了解当前国内、国际暴雨研究的新进展，启迪暴雨研究的新思路。

杂志期刊总会有一些共同的规律，例如评价其影响要看读者群，分析其质量要看其编者和作者群。而这两个群体虽有不同，但其间并没有一条严格的界限，时常会有角色转换。如能在他们之间产生互动，从不同角度对期刊展开评论或对话，会有助于听到不同的声音，使期刊保持动力和活力。本刊从这期开始，用一个页面开辟“第80页评刊”栏目，主要目的有两个，一是希望读者能通过读刊，对任何内容提出质疑或新的探讨，我们将以最快速度与文章作者联系，寻求反馈。如果质疑能点出要害问题，并能启发作者新的思维，做出进一步改进工作，本刊的“学术探讨”栏目也会随之诞生，让学术思想通过碰撞产生新的火花；二是期待更多在基层单位从事气象业务的科技人员能结合本职工作，加强阅读和思考，将遇到的气象科技难点凝练成科学问题。目前本刊的读者有许多来自基层气象单位，本刊将会结合在具体业务工作中提出的问题向科研人员约稿，为业务与科研的结合牵线搭桥。与2011年的“看海”一样，2014年因为马航事件，人们对“失联”一词已耳熟能详，本刊互动栏目的推出，就是希望我们的刊物与读者、作者永远不要“失联”，保持持久的互动与沟通，及时听到有助于期刊健康发展的各类意见。

许小峰



## P6

### 封面报道：2000年以来我国长江中游区域暴雨研究进展

封面图：暴雨研究

(照片提供：武汉暴雨研究所)

## 科学观察

2 读图 数字 榜单

### 特写

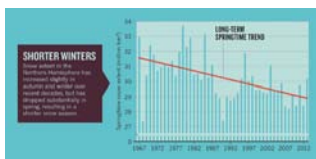
70 李婧华，郑秋红：“中国暴雨”主题文献计量分析

72 王银平：《暴雨灾害》特色化办刊纪略

## 往事钩沉

### 人物

74 叶鑫欣，焦艳，傅刚：伯杰龙及其在天气学分析和高空气象学的贡献



P3

## 阅读

### 信息

51 编辑走台站：广西气象之声

58 《全国基层气象台站简史》(套书)全部出版

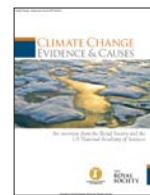
73 新书架

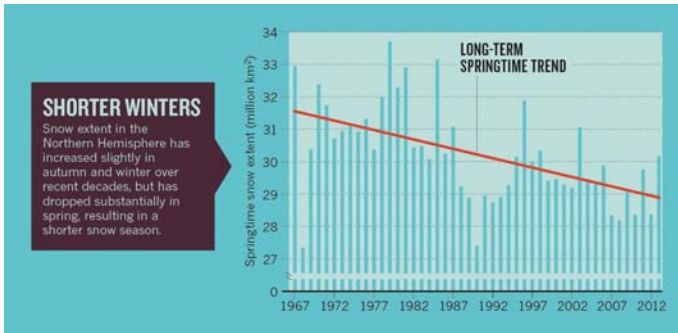
76 编辑选编

80 第80页评刊

封3 媒体扫描

封3





### 冰雪运动的美好能否持续?

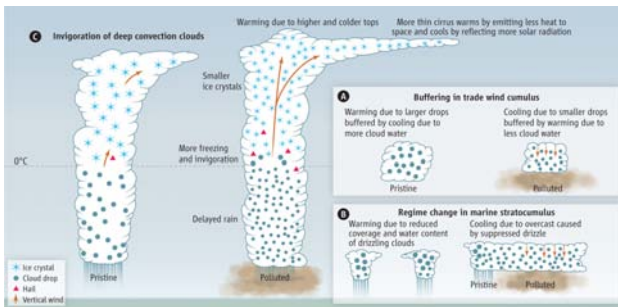
2014年俄罗斯索契冬季奥运会，让更多的人认识了冰雪运动的美好。然而，美国罗格斯大学全球雪实验室的研究统计结果，让人不由担心人类冰雪运动的可持续性。实验室给出1967年以来北半球春季雪范围的变化，其大幅度减少的趋势造成冬季的缩短。气候预测表明，到2080年代，19个以前冬奥会主办地中，只有10个能有足够的雪和2月份较低的气温，适合再次主办冬奥会。

来源：Rutgers Univ. Global Snow Lab

### 气溶胶影响云辐射特性的机制

一项最新的研究表明，通过核化大量较小的云水滴，气溶胶可以以不同方式影响云辐射驱动。(A) 无降水云中的缓冲：较小水滴蒸发更快，引发周围大气向云顶更多混合，从而增加蒸发。(B) 强冷却：原来云层因降水失去水分而破碎，这在正循环中进一步强化了空气净化。(C) 形成更大片和持续更长时间的卷云：通过延迟降水，气溶胶有利于深对流云产生，导致更冷的云顶施放更少热辐射。污染气溶胶引入的冰粒子越小，云砧降水就越缓慢。这就导致更大片和持续时间更长的卷云出现，不利于热扩散和太阳辐射吸收。气溶胶的总体作用则决定于上述机制的相对量级。

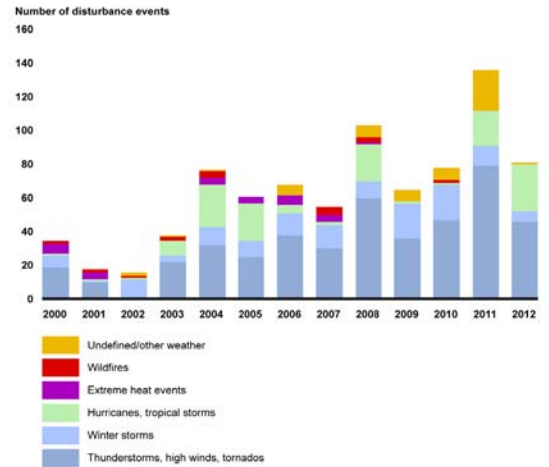
来源：Science



### 天气让电网瘫痪事件

美国审计署 (GAO) 最近在一份能源基础设施风险的报告中指出，2000年以来，美国电网每年因天气原因导致瘫痪事件数量在稳定增加。这种事件经常是因树木损害配电路引致，给公用事业和用户带来巨大损失。

来源：GAO

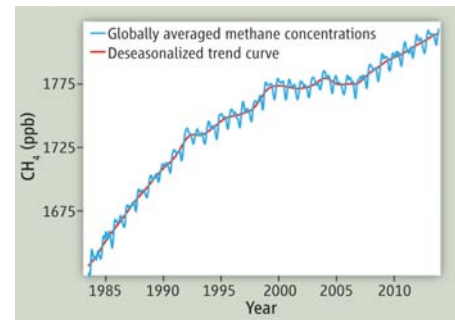


Sources: DOE. "Electric Disturbance Events (OE-417)." U.S. Department of Energy, Office of Electricity Delivery and Energy Reliability. April 2013. <http://www.oe.netl.doe.gov/oe417.aspx>. Data analysis by Evan Mills, Lawrence Berkeley National Laboratory.

### 甲烷又在增加

1750年以来，和人类活动相关的温室气体导致辐射驱动增加的大约五分之一来自甲烷 (CH<sub>4</sub>)。过去30年大气中甲烷含量一直在增加，但是1999—2006年，大气中的甲烷总量几乎保持不变。2007年以后，大气中甲烷含量重新开始快速增加。目前人们对甲烷的这一变化的原因还缺乏认识。

来源：Science



## 数字

**151**次

美国审计署2014年2月发表的题为《极端天气事件——减少联邦财政负担和增加国家弹性》的报告表明，自1980年以来，美国经历了151次损失超过10亿美元的极端天气灾害。

**30%**

也许一段时间后，人们要在风能、太阳能……等可持续能源的名单上，增加岩浆能。美国加州大学的学者指出，岩浆能有望提供比其他可持续能源多30%的能量。

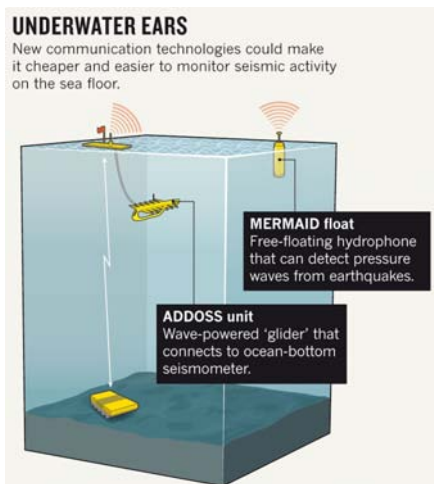
**700**万

世界卫生组织3月25日发布的最新数据表明，2012年全球因空气污染导致各类疾病的死亡人数约为700万。

## 全球地震网向海底延伸

在全球地震网（Global Seismographic Network, GSN）提出超过25年之后，可能就要迎来其名副其实之日。该网在全球的约150个地震站都位于陆地，而新的位于海洋的两套系统：ADDOSS（Autonomously Deployed Deep-Ocean Seismic System，自动部署深海地震系统）和MERMAID（Mobile Earthquake Recorder in Marine Areas by Independent Divers，独立潜水器移动海区地震记录仪）能够弥补该网在海洋海区尺度上的空白。

来源：Nature



## 国际“中国暴雨”主题被引频次最高的前11篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引频次
1	Recent trends in observed temperature and precipitation extremes in the Yangtze River Basin, China	Su, BD	Theoretical and Applied Climatology, 2006, 83(1-4)	61
2	Temporal and spatial trends of precipitation and river flow in the Yangtze River Basin, 1961-2000	Jiang, T	Geomorphology, 2007, 85(3-4)	60
3	A modeling case study of heavy rainstorms along the Mei-Yu front	Chen, SJ	Monthly Weather Review, 1998, 126(9)	49
4	Water use patterns and agronomic performance for some cropping systems with and without fallow crops in a semi-arid environment of northwest China	Li, FR	Agriculture Ecosystems & Environment, 2000, 79(2-3)	43
5	A look inside 'black box' hydrograph separation models: a study at the Hydrohill catchment	Kendall, C	Hydrological Processes, 2001, 15(10)	38
5	The role of vegetation in the retardation of rill erosion	Woo, MK	Catena, 1997, 29(2)	38
7	Water use efficiency and sustainability of different long-term crop rotation systems in the Loess Plateau of China	Huang, MB	Soil & Tillage Research, 2003, 72(1)	37
8	The water vapor transport model at the regional boundary during the Meiyu period	Xu, XD	Advances in Atmospheric Sciences, 2003, 20(3)	24
8	Soil conservation effectiveness and energy efficiency of alternative rotations and continuous wheat cropping in the Loess Plateau of northwest China	Li, FR	Agriculture Ecosystems & Environment, 2002, 91(1-3)	24
10	Hydrological pathway and source area of nutrient losses identified by a multi-scale monitoring in an agricultural catchment	Tang, JL	Catena, 2008, 72(3)	21
10	Implication of relationships among suspended sediment size, water discharge and suspended sediment concentration: the Yellow River Basin, China	Xu, JX	Catena, 2002, 49(4)	21

来源：SCI-E数据库，检索时间：2014年3月11日

李婧华 提供

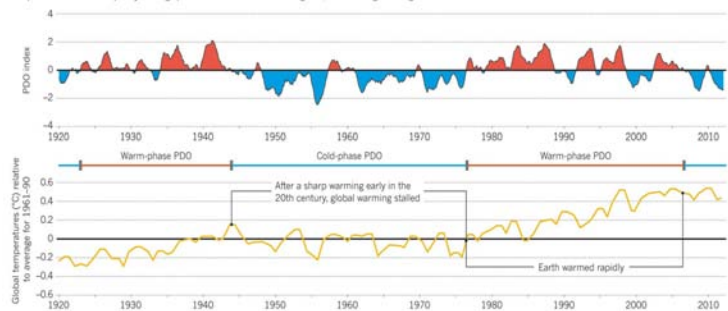
## 找寻丢失的热量：聚焦太平洋海温

全球变暖导致的全球温度增加的进程，自1998年以来出现明显的停滞，温室气体等带来的热量好像“丢失”了，成为气候研究的一个谜团。最新的研究指出，太平洋十年振荡（Pacific Decadal Oscillation, PDO）也许能够解开这个谜团。PDO反映的是太平洋海洋温度的变化，这种变化每15~30年反转一次，当PDO指数为正时，太平洋东部温暖，全球温度快速增加，但当指数为负时，增暖发生停滞。长达16年的“全球变暖间断”之谜是否能够用PDO解释？科学家们正在加紧研究。

来源：Nature

## THE PACIFIC'S GLOBAL REACH

As researchers have investigated why global temperatures have not risen much since 1998, many have focused on an ocean cycle known as the Pacific Decadal Oscillation (PDO). During periods when the PDO index is positive and the eastern Pacific is warm, global temperatures have risen quickly. During spells when the PDO index is negative, the warming has stagnated.



第9位

在2013年首都青少年最喜爱的十个移动APP评选中，“墨迹天气”位列第9位，表明天气要素已经通过数字移动端快速融入了人们日常生活。“墨迹天气”是一款免费天气信息查询软件。

21%

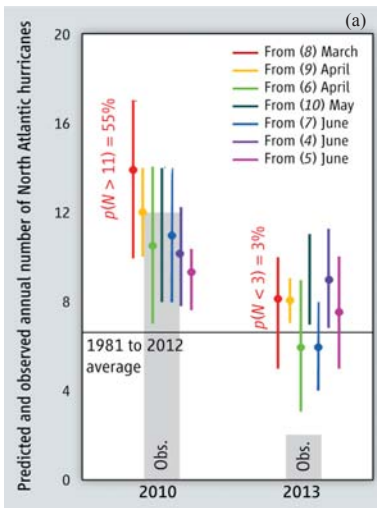
加拿大学者通过分析1800—2005年世界各国温室气体和气溶胶排放量（包括土地利用改变引发的排放），发现该时期全球0.7℃的升温中，美国的贡献占了21%，按照人均排放计算，排在前两位的英国和美国，排放量是中国或印度的10倍还多。

1%

美国马里兰大学的一项研究表明，1957—2012年间，北美6种蝶螈平均每一代比上一代形体小1%。

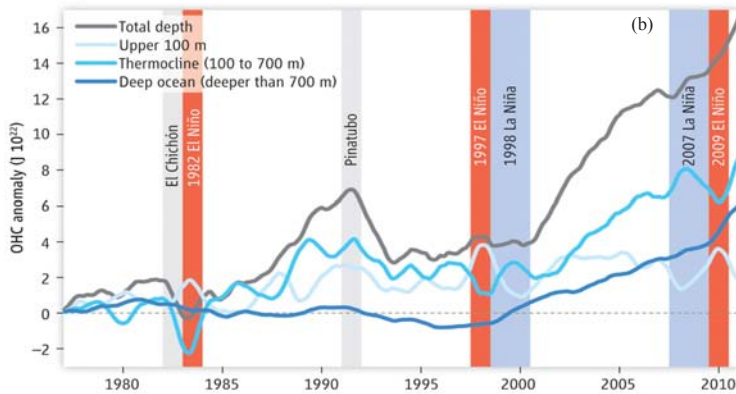
## 气候科学的挑战：飓风的季节预报和海洋热汇

在IPCC发表了最新的气候变化评估报告后，Science杂志从2014年1月开始，在杂志的“特写”栏目刊载“气候科学面临的挑战”系列文章，梳理一些物理气候科学所面临的挑战和讨论如何应对这样的挑战。图a给出了2010年和2013年北大西洋年飓风数量的季节预报和观测值的对比，大多数预报系统对2010年活跃的飓风季预



报比较准确，却在不活跃的2013年集体“失效”。在讨论热带太平洋是否要成为气候变化的主角时，则用海洋热汇说事，给出1980—2011年不同深度海洋热含量（OHC）的变化（图b），指出自2000年以来，深层海洋较前20年变暖速度要快得多；这种海洋变暖可能可以解释过去10年平均大气温度为什么没有升高。图中灰色柱体区域给出El Chichón和Pinatubo火山喷发时间，而黄色和蓝色柱体区域则为几次重要的El Niño和La Niña事件发生时间。

来源：Science



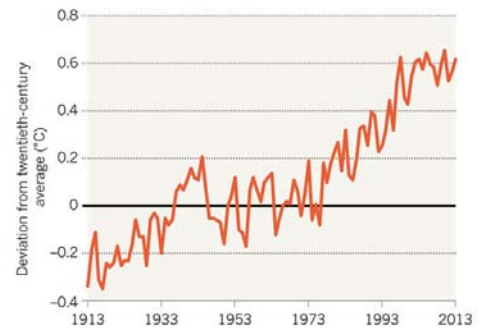
## 2013年全球温度：较20世纪均值高0.62℃

美国海洋大气管理局（NOAA）公布了2013年全球平均温度，指出自1977年以后，全球年均温度均高于20世纪的平均值。相对来说，2013年全球总降水接近均值，但是极端降水和干旱事件频发，巴西和非洲的安哥拉及纳米比亚等经历了数十年以来最为严重的干旱，而非洲其他国家和欧洲阿尔卑斯地区则发生了强降水和洪水。

来源：NOAA

### TAKING THE GLOBE'S TEMPERATURE

Average annual temperatures over land and ocean have exceeded the twentieth-century average each year since 1977.



## 香港天气预报时效将延长到9天

香港气象部门近日宣布，2014年4月开始把天气预报的时效由7天延长至9天，让市民更早掌握未来天气变化，提前计划活动。随着9天天气预报的推出，移动终端程序（APP）“我的天文台”也将逐步加入相关服务。

来源：香港天文台



## 数字

16次

美国犹他州立大学的学者研究了2013年4月发生在盐湖城附近的2次连续岩崩，发现这次对地震网来讲相当于2.5级地震的泥石流发生后数天内，引发了16次地震。

7个

美国农业部近日宣布建立7个区域“气候枢纽”，帮助农民减少碳排放和应对气候变化。这些枢纽将提供气候数据和评估，支持开展农业研究。

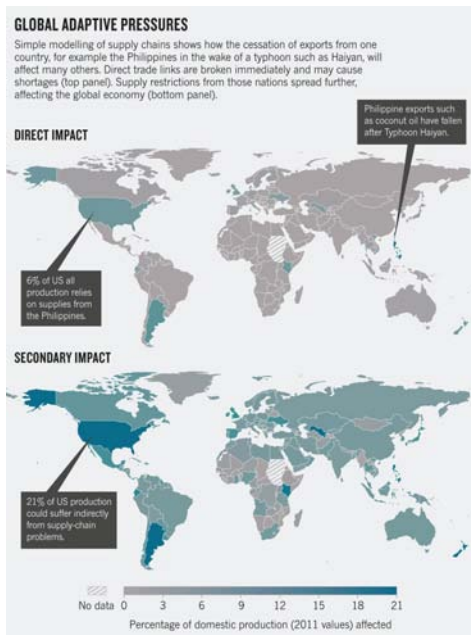
9%

美国国家科学基金委员会最新发表的科学和工程指标报告表明，2000年以来女性大气科学本科学位获得者的比例上升了9%。此外在大气科学领域，美国联邦资助的比例达到82%，是最高的。

## 灾害对全球制造链的影响

用一个简单模式模拟的全球制造业供给链表明，一个国家的出口发生变化，例如菲律宾因遭受“海燕”这样的台风侵袭而停止，将会很大地影响其他国家。这其中包括了供给链立刻断裂并引起短缺这样的直接影响（图上），还有因受到影响国家的供给限制带来的进一步传播从而对全球经济造成间接影响（图下）。

来源：Nature



## 国内“中国暴雨”主题被引频次最高的前20篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引频次
1	湿位涡和倾斜涡度发展	吴国雄	气象学报, 1995/04	551
2	中国降水极值变化趋势检测	翟盘茂	气象学报, 1999/02	432
3	我国热带气旋研究十年进展	陈联寿	大气科学, 2001/03	401
4	登陆热带气旋研究的进展	陈联寿	气象学报, 2004/05	235
5	多普勒速度图上的暴雨判据研究	张沛源	应用气象学报, 1995/03	194
6	近50a新疆气候变化对环境影响评估	胡汝骥	干旱区地理, 2001/02	183
7	暴雨和中尺度气象学问题	丁一汇	气象学报, 1994/03	172
8	1998年一次梅雨锋暴雨中尺度对流系统的模拟与诊断分析	王建捷	气象学报, 2002/02	163
9	位涡在暴雨成因分析中的应用	王建中	应用气象学报, 1996/01	152
10	“987”突发大暴雨及中尺度低涡结构的分析和数值模拟	程麟生	大气科学, 2001/04	150
11	1998年长江流域洪涝灾害的气候背景和大尺度环流条件	陶诗言	气候与环境研究, 1998/04	149
11	暴雨和强对流天气的研究	陶诗言	大气科学, 1979/03	149
13	基于GIS的山洪灾害风险区划	唐川	地理学报, 2005/01	146
14	暴雨中尺度气旋发展的等熵面位涡分析	寿绍文	气象学报, 2001/05	143
15	近10年中国台风暴雨研究进展	程正泉	气象, 2005/12	135
16	台风灾害的模糊风险评估模型	丁燕	自然灾害学报, 2002/01	132
17	利用风廓线雷达资料分析低空急流的脉动与暴雨关系	刘淑媛	热带气象学报, 2003/03	131
18	华北农牧交错带夏季极端气候的趋势分析	龚道溢	地理学报, 2004/02	130
19	1998年中国大洪水时期的水汽收支研究	丁一汇	气象学报, 2003/02	128
20	1998年“二度梅”期间突发强暴雨系统的中尺度分析	贝耐芳	大气科学, 2002/04	126

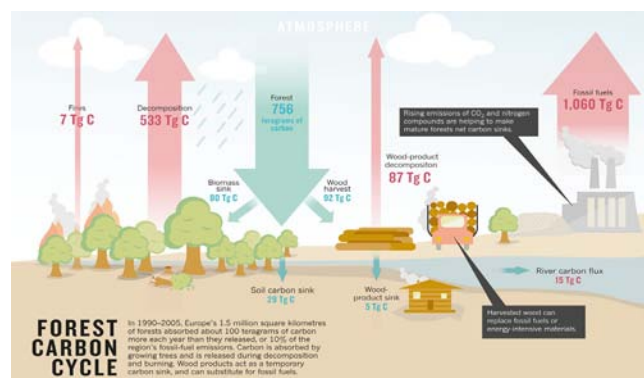
来源：CAJD数据库，检索时间：2014年3月14日

郑秋红提供

## 森林碳循环：化石燃料的双面性

1990—2005年，欧洲150万km<sup>2</sup>的森林吸收了大约100Tg碳，多于其释放的碳量，也是该地区化石燃料排放量的10%。生长的树木能够吸收碳，但当树木本身作为化石，其腐烂或燃烧时又释放碳。木质产品可以看作是临时碳汇，平衡部分化石燃料。

来源：Nature



90%

美国—日本联合研发并于2月27日升空的GPM (Global Precipitation Measurement Core Observatory, 全球降水核心观测) 卫星投入业务运行后，将提供每3小时更新的覆盖全球90%区域的降水资料。

50%

NOAA宣布赤道太平洋东部将在以后几个月转为暖位相，即出现厄尔尼诺现象，NOAA指出，北半球夏季有50%的可能性出现厄尔尼诺。

46次

国家海洋局最新发布的《2013年中国海洋环境状况公报》称，2013年全海域共发现赤潮46次，为近5年最少。

# 2000年以来我国长江中游区域暴雨研究进展

崔春光 林春泽 王晓芳 李俊 彭涛 张文刚

(中国气象局武汉暴雨研究所 暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430074)

**摘要:** 长江中游地区是暴雨多发区和重灾区, 深入认识该区域暴雨形成的中、小尺度天气系统、分析暴雨发生机理与发展暴雨、洪水预报技术, 对于我国防洪减灾具有重要意义。针对长江中游区域暴雨从观测到资料分析、机理研究, 再到数值预报与水文应用研究, 重点从暴雨外场观测试验及资料反演和中尺度资料融合技术、长江中游暴雨MCS(中尺度对流系统)观测分析和理论研究、中尺度暴雨数值模式研究和长江中游水文气象耦合的暴雨洪水预报系统四个方面介绍了2000年以来我国科研业务单位的主要研究进展, 并对制约长江中游区域暴雨研究深入与预报水平提高的主要问题进行了简要讨论, 对未来的研究趋势进行了展望。

**关键词:** 资料融合, 中尺度对流系统, 水文气象耦合

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.02.001

## Review of the Study on Heavy Rain in the Middle Reaches of the Yangtze River Since 2000

Cui Chunguang, Lin Chunze, Wang Xiaofang, Li Jun, Peng Tao, Zhang Wengang

(Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China

Meteorological Administration, Wuhan 430074)

**Abstract:** The middle reaches of the Yangtze River are frequently-occurring heavy rain areas. It is important to have the knowledge of heavy rain mesoscale and small-scale weather systems in these areas, their mechanism, and develop the heavy rain and flood forecasting technology for the flood control and hazard mitigation. From the heavy rain field observation experiment, data inversion and fusion technology, observation analysis and theoretical research on heavy rain mesoscale convective systems, the mesoscale numerical model, and the hydrometeorological coupling rainstorm and flood forecasting system which are the most crucial aspects of observation data analysis, mechanism, numerical prediction, and hydrological application of the study on heavy rain in the middle reaches of the Yangtze River, the main research progress has been briefly reviewed in China since 2000. The problems which obstruct the research depth and forecast quality were also discussed. Finally, the research development tendency was prospected.

**Key words:** data fusion; mesoscale convective systems; hydrometeorological coupling

### 1 引言

长江中游是我国暴雨频发区域, 受中高纬西风带环流系统、亚洲季风系统以及高原东移低值系统的共同作用, 每年5到9月, 暴雨过程频繁, 且持续时间长, 时空分布不均, 既有梅雨期的大范围持续性降水, 也有盛夏局地突发性强降水, 所造成的灾害重、损失大。对长江中游影响最大主要降水集中在每年6月中旬到7月中旬, 即长江梅雨期, 该时期长江流域是极地冷空气和热带暖湿空气频繁交汇的地带, 梅雨

锋上的中尺度天气系统活跃, 它们的活动不仅维持了梅雨期持续性的降水, 而且给暴雨的产生创造了十分有利的条件<sup>[1]</sup>。暴雨是由中小尺度天气系统直接造成的, 但它的发生发展是多尺度环流和天气系统相互作用的结果, 因而暴雨形成是一个十分复杂的问题<sup>[2]</sup>。长江中游区域长江、汉江东西横贯, 洞庭湖、鄱阳湖水系密布, 大小水库众多, 是我国防汛的关键区域。因此长江中游区域暴雨尤其是梅雨锋暴雨的研究受到国内外气象学者和我国科研、业务机构的广泛关注和高度重视, 在国家和地方各类科研项目的推动下, 研究工作取得了明显进步。本文对2000年以来我国长江中游区域暴雨研究进展做一些概括性归纳和总结, 重点从暴雨外场观测试验及资料反演和中尺度资料融合技术、长江中游暴雨MCS观测分析和理论研究、中尺

收稿日期: 2013年9月30日; 修回日期: 2014年1月20日  
第一作者: 崔春光(1964—), Email: Cgcui@whhr.com.cn  
资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106006、GYHY201206028), 国家自然科学基金(40930951)

度暴雨数值模式研究和长江中游水文气象耦合的暴雨洪水预报系统四个方面进行介绍，并对制约长江中游区域暴雨研究深入与预报水平提高的主要因素进行讨论，对未来开展的重点工作与研究趋势进行了展望。

## 2 暴雨外场观测试验及资料反演和中尺度资料融合技术

### 2.1 暴雨外场观测试验

由于引发暴雨的中尺度对流系统具有一定的频发性、突发性以及较小的时空分辨率，使得常规气象观测难以捕获，因此在重点区域开展中尺度暴雨研究的外场观测试验以获取中尺度暴雨三维结构信息对于深入研究暴雨形成机理与提高暴雨预报水平尤为重要。1998年长江流域大洪水以来，国内开展了多次暴雨野外观测试验。如国家973“我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究”2001—2002年汛期开展的长江中下游暴雨外场观测试验以梅雨锋内中尺度暴雨为主要观测对象，获取了大量暴雨过程实时加密资料，极大地推动了长江梅雨锋暴雨中尺度研究和预报<sup>[3]</sup>。国家973“我国南方致洪暴雨监测与预测理论和方法研究”于2008年、2009年5月1日—7月20日实施了我国南方暴雨野外科学试验<sup>[4-5]</sup>，该观测试验是迄今为止国内在单一项目支持下规模最大、装备最为先进的一次暴雨外场观测试验，对我国汛期雨带的主要影响区域及其北抬的完整过程实施加密观测，涉及四个观测区和十三省两市，几乎覆盖整个长江以南地区。投入的设备有55部雷达，48部探空，7000个地面观测站，以及特种设备如C波段和X波段双偏振多普勒雷达与8

毫米波云雷达，组织的多雷达组网观测获取的资料为分析研究暴雨云内水凝物分布、发展对流云微物理过程提供了良好基础，并首次在外场观测试验中实施了机载下投式探空观测，获取了近40条气象廓线的观测资料。

在前述两个973项目支持下开展的暴雨外场观测试验，是国内无论从观测、分析到应用都较为先进的 $\beta$ 中尺度暴雨加密观测试验，尤其是在多遥感途径联合观测、新型装备研制与中试、高时空分辨率的中尺度气象分析场生成等方面进行了有力探索，武汉暴雨研究所作为主要参与单位之一，在此过程中逐步打下了坚实的装备与技术基础。2002年至今，武汉暴雨研究所依托气象业务观测网，在气象灾害频发的长江中游地区建设具备高密度水汽监测、高空观测、云观测、边界层观测、定量降水估算校准观测等功能的 $\beta$ 中尺度暴雨监测外场试验基地（见图1），目前已建成了咸宁、武汉、荆州三个探测基地，与黄石、孝感、荆门、仙桃、神农架、黄冈等多个观测点，在长江中游初步形成了点面相结合的观测布局。基地探测设备包括不同类型和功能的车载雷达、边界层廓线雷达、GPS移动探空系统、微波辐射计、地基GPS/MET站、激光雨滴谱仪、神农架高山梯度气象观测网等。此外，各个基地还设有业务天气雷达、业务高空探空站、自动气象站、雨量站等多种常规观测设备，可对长江中游重要暴雨天气系统的风场、水汽场、降水场、云和降水粒子相态分布进行固定的实时综合观测。2010—2013年汛期，武汉暴雨所在基地内组织多次长江中游梅雨锋暴雨多遥感途径联合观测试验，成

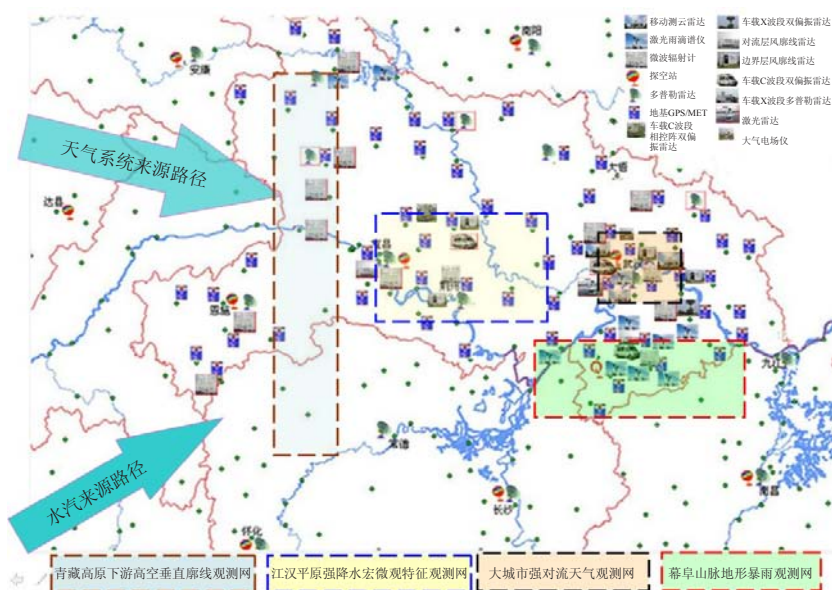


图1 长江中游暴雨监测外场试验基地区域示意图

功捕捉了多次梅雨期重要天气过程，积累了大量多途径高精度同步观测资料，有效推动了暴雨监测预警技术、暴雨机理、暴雨预报等方面研究工作的开展。

## 2.2 资料反演技术

气象卫星和雷达是目前遥感探测暴雨的两种主要手段，在暴雨的监测预警中发挥了重要作用，但其探测得到的基本信息远不能满足暴雨分析的需求，为了得到更多有效的信息，资料反演技术应运而生。科学有效的反演技术能够准确地解译遥感资料中包含的暴雨相关信息，对分析暴雨的发生及发展机制、改进和提高暴雨的预报水平有非常重要的意义。

目前对于暴雨的分析预报具有重要指示作用的参数包括风场、温度场、云特性等，能够详细描述暴雨云团的动力及热力形成条件、云团特征等信息。基于单多普勒雷达和静止卫星云图的风场反演已有数十年历史，其反演技术已比较成熟，随着遥感技术和数学方法的不断发展，数值微分方法和正则化方法被用来提高云导风的反演精度<sup>[6]</sup>，取得了理想的效果。基于雷达风场反演的基本算法，国内外许多学者对其进行了改进<sup>[7-9]</sup>，一定程度上提高了反演精度，但距离业务使用还有一定差距，因此变分法和多雷达风场反演方法被提出。通过比较验证发现，变分法对于风场反演具有较高精度，四维变分法能够反演得到低层风场信息<sup>[10]</sup>，刘黎平<sup>[11]</sup>采用三维变分法实现了双多基地多普勒雷达系统三维风场的有效反演。利用双多普勒雷达同步观测，得到两个方向的径向速度资料，再与其他约束条件结合就可以得到风场的三维结构<sup>[12]</sup>，罗昌荣等<sup>[13]</sup>利用该方法有效地分析了台风外围强带状回波风场结构特征。彭亮等<sup>[14]</sup>将小粒子示踪法用于3mm多普勒雷达云内空气垂直速度的反演。Rosenfeld提出的卫星微物理反演分析方法，对于云的微物理特征的获取提供了非常有效的方法，该方法已在NOAA<sup>[15-16]</sup>、FY<sup>[17-19]</sup>、MODIS<sup>[20]</sup>等卫星资料分析中应用，得到了云的微物理及垂直结构特征。根据Z-qr关系及定常暖云方案，利用雷达反射率因子可以对云的微物理量进行反演<sup>[21]</sup>。刘黎平等<sup>[22]</sup>利用地基Ka波段雷达探测的回波强度、粒子下落速度和速度谱宽数据，在忽略空气上升速度和湍流对雷达观测的速度谱宽的影响前提下，对云液态水含量及滴谱参数进行了反演，并与机载探测数据进行了对比，结果显示两者结果比较一致。大气温度及湿度廓线的探测主要利用星载大气探测仪，其中ATOVS是具有代表性的一种，采用一维变分技术，同时对辐射传输方程做扰动处理，对大气廓线的反演效果较好<sup>[23-24]</sup>。最小方差算法被用于NOAA/

AMSU资料海面大气温度垂直廓线的反演，并明显提高了对流层大部分区域的反演精度<sup>[25]</sup>，而利用特征向量统计反演算法由MODIS资料同样可以反演得到大气温湿廓线<sup>[26]</sup>。王曦等<sup>[27]</sup>利用FY-3A微波辐射计亮温数据，通过建立适用于微波波段的物理迭代算法，反演得到了晴空海域的大气湿度廓线。王祥等<sup>[28]</sup>利用FY-3A卫星近红外波段资料，分别利用双通道比值法与三通道比值法反演了大气水汽含量，并与实测数据进行对比，发现三通道比值法精度更高。经过长时间的积累和不断改进，资料反演技术较之前取得了明显提高，但其中仍存在问题，例如单雷达风场反演算法主要以科研为主，目前还无法达到普适性，难以业务化应用，卫星资料反演主要针对海洋区域，对受复杂地形影响的陆地区域难以开展有效的反演等。随着计算机水平及传感器探测精度的提高，资料反演技术必将会越来越高效，探测资料中更多的有效信息将会被解译，为暴雨的分析研究提供帮助。

## 2.3 中尺度资料融合技术

随着我国中尺度观测系统的建设与完善，卫星、雷达、微波辐射计、GPS、风廓线仪等非常规观测手段日益丰富，所获取的高时空分辨率的探测资料为暴雨中尺度系统的深入分析和预报能力的提高提供了可靠保证，然而这些非常规资料各自独立，且能提供的直接产品大多采用形态学（如回波形状、云图形态）来做定性分析，对中尺度暴雨系统结构特征分析十分有限<sup>[5]</sup>。中尺度资料融合技术可以将分布在全国的地面站观测要素，连同来自卫星、雷达、微波辐射计、GPS、风廓线仪等的各种资料融合成整体，形成包含丰富中尺度信息的中尺度分析场，并可为中尺度数值模式提供高质量的初始场。这为解决多源非常规观测资料在暴雨中尺度天气分析与预报中有效应用的难题提供了一个有效手段。

20世纪90年代以来，国际上普遍采用资料同化技术综合处理各类气象观测数据来重建长期而连续的格点再分析资料，并逐渐使用变分同化取代了最优插值技术，以四维变分同化为基础的集合—变分同化和混合资料同化技术更是成为了未来资料同化的主流发展方向<sup>[29]</sup>。近10年，我国资料同化技术取得了长足进步，但依然缺少系统的中尺度资料融合分析工具。武汉暴雨研究所于2005年与美国NOAA下属的地球系统实验室合作引进了局地分析系统（LAPS），并成功进行了本地化开发，完成了LAPS系统对我国探空资料、地面资料、多普勒雷达资料等的融合同化<sup>[30]</sup>。LAPS系统的基础算法是在背景场基础上采用

距离权重插值得到网格点值, 然后对气温、气压、风的关系采用三维变分进行约束, 对垂直水汽分布采用一维变分进行约束。早在1996年LAPS系统已为夏季亚特兰大奥运会提供服务<sup>[31]</sup>。GOES卫星辐射资料、GPS水汽等资料同化进入LAPS系统后提高了LAPS系统的水汽分析能力<sup>[32]</sup>。武汉暴雨所结合暴雨过程对雷达资料、GPS水汽资料的应用开展了相关研究<sup>[33-34]</sup>。国家973“我国南方致洪暴雨监测与预测理论和研究方法”利用由武汉暴雨所引进的LAPS分析系统, 融合了2008—2009年5月1日—7月20日我国南方暴雨野外科学试验期间所获取的华南、华中、江淮和长三角观测区加密观测探空资料、多普勒雷达资料和地面资料, 生成了水平分辨为5km, 时间分辨为3h的LAPS中尺度分析资料, 批量检验结果表明, LAPS生成的中尺度分析系统能抓住80%以上引发暴雨过程的中尺度影响系统, 尤其对 $\alpha$ 中尺度或 $\beta$ 中尺度系统具有较好的中尺度再现能力, 对于观测区域内由 $\beta$ 中尺度低涡东移及切变线引成的暴雨过程, LAPS中尺度分析场均能很好地再现其中尺度影响系统的发展演变过程, LAPS中尺度分析场的位势高度、温度、相对湿度、风向和风速的分析误差均在观测误差范围内<sup>[5]</sup>。目前在武汉暴雨所业务运行的LAPS系统, 融合了长江流域30多部雷达资料及卫星、GPS、自动气象站等资料, 实现大范围雷达资料的综合应用, 提供3h更新5km分辨率垂直21层近40种物理量的中尺度气象分析场(见图2)。NOAA新开发的变分LAPS系统(VAR-LAPS), 是基于多重网格法上的变分同化系统, 具有传统LAPS系统计算速度快等优点, 并可灵活地在不同的网格上使用不同的约束条件以达到最优的效果<sup>[35]</sup>。VAR-LAPS利用多尺度变分技术解决了旧版本在客观分析中平衡与约束不能同时应用、遥感观测数据没有最佳融合、交叉变量协方差不能直接应用等问题。Li等<sup>[36-37]</sup>利用该系统开展多普勒雷达资料同化

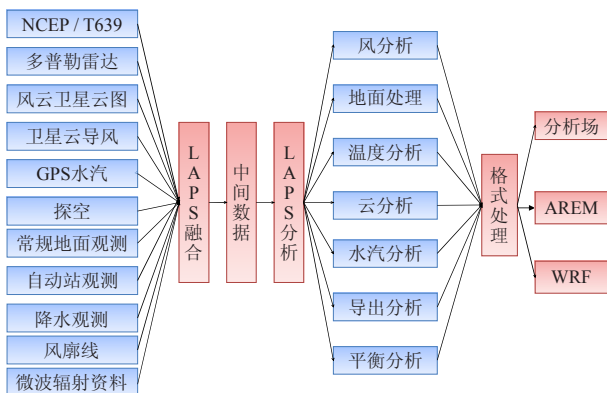


图2 武汉暴雨研究所LAPS系统流程图

对中国海域海温的预报。武汉暴雨所正在开展VAR-LAPS对新型探测资料如风廓线、GPS水汽等的融合同化试验研究。VAR-LAPS作为中尺度资料融合支撑系统将在建立更优暴雨中尺度分析场数据集与提高数值预报模式初始场质量等方面有着广泛的应用前景。

### 3 长江中游暴雨MCS观测分析和理论研究

#### 3.1 长江中游MCS的观测特征

产生暴雨的MCS雷达回波上呈现了多种多样的组织结构形态, 王晓芳等<sup>[38]</sup>将MCS分为线状和非线状, 其中线状又分为8个确定的类型(TS、LS、PS、BL四类MCS为移动型, 而BB、TL/AS、EL、LL四类MCS是准静止的), 而非线状的MCS组织结构特征不显著, 主要是大片回波中嵌有或多或少的无组织强对流回波。Zheng等<sup>[39]</sup>通过研究我国中东部地区的MCS, 考虑到线状弓形回波对流和层状对流易造成大风等剧烈天气, 将弓状回波(BE)和无层状降水的随流线(NS)单独分类。爬线是产生剧烈天气的中尺度对流系统, 最近孟智勇<sup>[40]</sup>对我国东部的爬线特征也进行了研究。

MCS常形成在有利的天气尺度条件下, 如副热带高压、热带气旋、中高纬度槽前、冷涡、槽后等, Meng等<sup>[40]</sup>统计发现有三分之一的爬线形成于短波槽天气形势下。当副热带高压、中高纬度冷空气活动、高原中尺度系统东移、南海季风涌等多尺度天气系统的协同作用在这些系统处于活跃期时, 梅雨锋上出现暴雨, 但并不是整个梅雨锋带上普降强降水, 降水还存在不均匀性, 这说明降水强弱还与局地的气象条件特别是垂直风切变密切相关<sup>[41-43]</sup>。根据实际个例分析和数值模拟, 总结几类线状MCS的结构模型, 并探讨了它们发生发展的可能机制<sup>[44-45]</sup>。

长江流域线状MCS多形成在长江两岸附近, 在宜昌至武汉沿江两岸、湖南东北部是MCS的高发地, 其次为重庆沿江北部、重庆南部至鄂西、大别山两侧、湖南和江西交界山区, 沿地形的低洼地和河谷平地是MCS的多发地。MCS移动路径为东、东偏北、东偏南、南四种, 这与环境场的引导气流有关, MCS日变化活动特征表现为多锋型<sup>[38, 46]</sup>, MCS生命史较长, 水平尺度大, 日落减弱, 午夜再度发展, 即湿对流。陈炯等<sup>[47]</sup>分析中国暖季短时强降水特征, 发现它与MCS的日变化特征一致。祁秀香等<sup>[48]</sup>统计得到2007年夏季我国大陆深对流活动主要集中在4个区域, 除华南沿海地区外, 其余三个: 青藏高原, 云贵高原东部及四川、重庆, 江淮流域等都是中纬度带区, 江淮流域深对流日变化也呈多峰型且明显东传。

### 3.2 MCS 的理论研究

胡伯威<sup>[49]</sup>用一个包含简单积云对流参数化的线性模式讨论在长江流域相当正压性质的梅雨锋上深厚惯性重力波的发生、传播和频散性质，发现与积云对流加热场有最密切关系的低层湿度条件及其水平分布不均匀性质都对扰动的波速和稳定度有重要影响，最有利出现不稳定发展的地方是在“低层湿度锋区”南界附近，因此这里是中尺度对流系统（MCS）的活跃地带。关于频散性质的分析表明，能允许群速度大于相速度的低层湿度条件及其水平分布的特征值范围比较宽。而在上述稳定度接近中性的条件下最有利于出现沿“湿度锋区”轴向的上、下游效应。这个结果也许能很好地解释：在梅雨锋上，恰恰是当一个旺盛的MCS达到顶点而开始趋向衰减时，在它的上、下游很快发展起新的MCS，新、旧MCS一起形成“云团波串”这样一个重要而有趣的观测事实。同样在虚拟高度坐标系中，水平风切变强度不均匀分布对CISK惯性重力波不稳定有重要作用。在一般干的层结大气中，实际可能出现再强的水平风切变的影响也难以使惯性重力波变得不稳定；只有在积云对流潜热参与，原为弱稳定条件下，水平风切变强度不均匀能促使低空急流北侧不稳定扰动的发生发展。而水平风切变强度不均匀对不稳定贡献最大的区域是梅雨锋南侧的急流轴附近<sup>[50]</sup>。

许小峰等<sup>[51]</sup>进一步研究了湿度锋上中尺度对流系统生成和维持的惯性重力波捕获和增长机制（图3）。陈志明<sup>[52]</sup>基于位涡异常与中尺度对流系统发展密切相关的分析事实，在引入水汽变化方程的基础上，通过定义相当湿位涡，导出了非均匀饱和大气中的相当湿位涡方程，

$$\frac{d\zeta}{dt} = \lambda f \frac{L}{c_p T} \left( \frac{\partial T}{\partial z} / \frac{\partial \theta^*}{\partial z} \right) (-V_g \cdot \nabla_h q),$$

由于  $\lambda f \frac{L}{c_p T} \left( \frac{\partial T}{\partial z} / \frac{\partial \theta^*}{\partial z} \right) > 0$ ，可以看出，在有正水汽平流

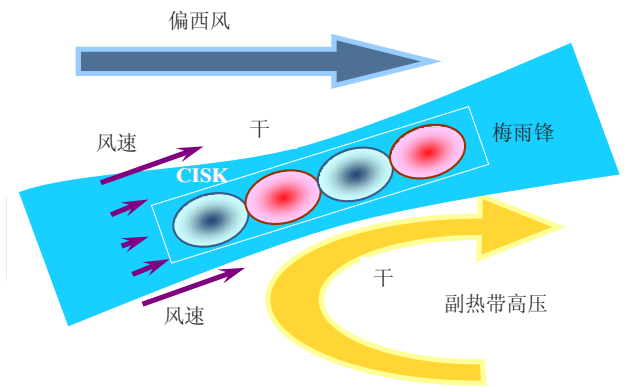


图3 湿度锋上云团波串发生发展示意图<sup>[51]</sup>

( $-V_g \cdot \nabla_h q > 0$ ) 的区域，将促进正涡度增长 ( $\frac{d\zeta}{dt} > 0$ )，有利于中尺度气旋涡加强，起到对流组织化的作用。反之，则不利于中尺度低值系统活动。

关于MCS中对流单体的触发和组织，国外已有一些比较成熟的理论，如RKW理论<sup>[53]</sup>，当冷丘产生的负涡度环流与切变正涡度环流近于平衡，那么入流空气便可垂直地上升对对流是有利的。一个强的、长生命期的爬线系统应该在环境风场与对流的相互作用处于一种最佳状态中出现，这种最佳状态可概括为：对流上升运动可以使对流有效位能充分释放，而不被冷丘或切变产生的环流所干扰，即  $C/\Delta U \approx 1$ 。“RKW”理论不仅用在解释爬线结构，后来Parker等<sup>[54]</sup>也用它来很好地解释其他线状对流系统如LS MCS的结构特征。Parker<sup>[55]</sup>进一步指出，PS MCS的后向建立和平行于对流线降水的发展很大程度上是由环境风垂直切变造成，高层平行于对流线的气流对水物质的输送是平行层状降水形成的重要原因。

Bao等<sup>[56]</sup>用理想二维数值模拟探讨了风暴中新生单体产生的两种不同的机制，一种在Rotunno提出的“最优切变态” ( $C \approx \Delta U$ ) 下新单体在地面冷丘和阵风锋附近分离产生；另一种在“亚最优切变态” ( $\Delta U < 0$ , 即  $C > \Delta U$ ) 下，由于环境风场存在反向切变，此时密度流产生的水平涡度要大于环境风切变产生的水平涡度，密度流将向外扩展较快，使两者处于“亚最优切变态”，此时多单体雷暴系统中的新对流单体不再是从密度流前沿的阵风锋前上升气流分离出来，而是由发展旺盛的主体对流体在其前部中低层激发的垂直上升运动引起的。

### 3.3 中尺度地形对 MCS 的影响

长江中游地区多中尺度地形，长江中游暴雨尤其是（特）大暴雨的发生，与这些地形密不可分。在估计山脉迎风坡降水方面，早期Smith<sup>[57]</sup>提出的简单线性模型降水率的大小由水汽混合比、正交于山脉的风速大小和地形梯度决定。之后，考虑了云微物理过程中云水—雨水的转化时间、雨水下落时间对地形降水的影响<sup>[58-59]</sup>。当湿大气地形费劳德数  $Fr \gg 1$  或者  $Fw \gg 1$  时，气流爬过山脉产生的水平扰动小，线性理论对地形降水能做出较好的解释；当  $Fr \ll 1$  或者  $Fw \ll 1$  时，气流发生水平扰动大，线性理论很难再适用<sup>[60]</sup>。地形阻滞效应限制了该模型的应用<sup>[61-62]</sup>。

赵玉春等<sup>[63]</sup>根据长江中下游中小尺度地形特征和梅雨锋上MCS发展的典型探空曲线，设计理想数值试验来研究中尺度地形对流降水模态，探讨了不同地形

高度、尺度、形状（水平形态比）、环境气流以及旋转效应对降水模态和分布的影响，发现地形重力波破碎触发对流是地形对流降水的主要机制之一，地形重力波的形成、特征和传播受到环境条件制约，也受到地形自身参数的影响。单一的地形动力参数不能完全决定地形对流降水的模态。同时，在天气系统发展的不同阶段，地形相对于对流暴雨系统的位置不同，地形对暴雨对流系统的影响存在着差异<sup>[64]</sup>。廖移山等<sup>[65]</sup>通过对一次特大暴雨过程的天气学机理分析，探讨了冷空气与复杂地形的交叉阻挡对暖湿气流的强迫抬升作用。地形对暴雨对流系统的影响还值得进一步研究。

## 4 中尺度暴雨数值模式研究

### 4.1 中尺度暴雨数值模式发展概述

武汉暴雨所自20世纪80年代开始发展降水模式的研究和业务工作，先后发展了华中暴雨数值预报业务系统（简称CRONWS）、暴雨中尺度分析预报系统（简称MAPS）等，1999年开始，与中科院大气所合作，在国家“973”项目的支持下，基于LASG“REM”模式，发展了新一代暴雨数值模式系统AREM<sup>[66]</sup>，采用 $\eta$ 坐标，抓住了东亚区域的地形特点<sup>[67]</sup>，充分考虑暴雨模式中水汽等要素的强梯度分布特征，设计了两步正定保形水汽平流方案<sup>[68]</sup>，设计了独特的E网格“半格距差分方案”，保证了模式运行效率、精度和稳定度等特点<sup>[69]</sup>。2007年，在行业专项的支持下，针对制约暴雨模式发展的多源资料利用、资料同化、物理过程等关键技术开展了研究，在原有简单初值系统（客观分析）的基础上，发展了先进的多源资料融合技术、四维变分同化技术等，发展了冷云微物理方案，改进和完善了模式边界层、陆面物理过程等方案，同时建立了快速循环预报系统和集合预报系统等，暴雨的定量预报水平得到了显著提高。

### 4.2 资料同化技术

李红莉等<sup>[30, 33-34]</sup>开展了多普勒雷达、风云二号卫星云图、GPS水汽、风廓线雷达、微波辐射计、自动站、地面降水等多源观测资料的同化应用研究，并实现了上述多源观测资料在同一个平台进行同化，并开展了相应的数值预报试验。结果表明，融合同化雷达径向风资料能显著改善中尺度风场结构，GPS水汽资料能调整分析区的湿度场，风廓线雷达能调整风场结构、微波辐射计主要通过反演相对湿度廓线调整模式的湿度场。地面资料是资料同化中的难点，在解决稠密地面资料在模式中的应用方面，武汉暴雨研究所发展了一套降水资料的一维变分同化技术，通过反演大

气温、湿廓线调整模式的初始场<sup>[70]</sup>。以上多源资料的融合均明显增加了模式初始场的中尺度信息，进而提高了模式对强降水的预报能力。

此外，武汉暴雨研究所与地球流体力学数值模拟国家重点实验室合作，发展了一种新的快速有效的四维变分资料同化方法——基于历史拟合投影技术的四维变分同化方法（HSP-4Dvar），该方法解决了国际上经典四维变分中B矩阵低估和奇异处理困难的难题，同时克服了经典四维变分依靠伴随模式和计算量巨大问题，不仅提高了四维变分同化的精度，同时计算时效节省20倍<sup>[71-72]</sup>。

近年来，适应性观测成为数值预报领域发展的热点，武汉暴雨研究所利用WRF模式的伴随同化系统，开展了短期预报误差对观测资料的敏感性研究，该研究可为提高资料同化效率、优化观测网络以及开展目标观测试验提供科学依据。

### 4.3 中尺度模式关键物理过程的改进

在物理过程改进中，重点考虑了那些对中尺度暴雨过程短期预报有重要影响的物理过程，主要包括显、隐式网格尺度云和降水过程、积云对流过程、边界层过程以及地-气交换过程等。在新发展的冷云微物理过程中，考虑了包括水汽、云水、云冰、雨水、雪5种不同相态水物质，以及各种凝结水物质之间凝结/蒸发、凝华/升华、冻结/融化、集聚和碰并等25种复杂的云微物理过程，更好地描述了暴雨成云至雨的变化过程。通过网格变换和变量变换，解决了MYJ方案与AREM模式的匹配问题，通过对边界层观测资料的研究，用更能合理反映地表湿度的变化的通量方案替代了蒸发方案<sup>[73]</sup>。在引进Wang云微物理过程的基础上，修改了冰核的数密度以及雹的截获参数，并对时间尺度的公式进行了修改，改进了对台风和热带、副热带降水的描述能力。此外，通过陆面物理过程引入，改进了模式对下垫面强迫（包括感热，潜热）的估计，从而改进模式预报效果<sup>[74-75]</sup>。

### 4.4 快速更新循环预报技术

在LAPS云分析技术的基础上，武汉暴雨研究所发展了一套3h快速更新同化预报系统（AREM-RUC）<sup>[76]</sup>。该系统于2009年5月下旬投入准业务运行，AREM-RUC每3h更新同化一次，实现了多普勒雷达、加密自动站、GPS水汽等局地高频资料在模式中的应用，这对及时捕捉大气变化和中小尺度天气系统、提高降水预报准确率有重要意义；同时热启动技术的加入<sup>[77]</sup>，有效地抑制了模式的SPIN-UP现象，使模式在短时预报上的应用成为可能。AREM-RUC成

功预报出湖北汛期多次强降水过程，TS评分表明，该系统明显高于原有的模式系统<sup>[78]</sup>，特别是在大雨、暴雨、大暴雨等强降水等级。

#### 4.5 暴雨集合预报技术

暴雨对模式的初值和物理过程都非常敏感，初值扰动的结构比扰动的大小更重要<sup>[79]</sup>，精细的小尺度扰动可以改进对强降水的集合预报<sup>[80]</sup>。在对物理过程扰动的研究中，初步的结果表明随机物理过程方法更适合于接近正压的暖湿环境中的梅雨锋暴雨。此外还开展了基于集合敏感性的目标观测以改进暴雨预报的研究。图4给出了针对一次西南低涡东移过程的集合敏感性试验，通过改善敏感区中敏感因子（水汽和风场）的观测可以改进对西南低涡的路径预报，结果表明，集合预报在认识暴雨机制、开展目标观测方面的潜在用途<sup>[81]</sup>。基于Breeding方法，2009年建立了11个成员的中尺度集合预报系统，提供降水概率等级和预报产品，检验结果表明，由于能提供更多预报信息，集合预报系统优于单一的确定性预报，能有效提高对暴雨预报决策的科学性<sup>[82]</sup>。

#### 4.6 暴雨数值预报业务支撑系统

基于以上研究，武汉暴雨研究所建立起了相对完善的区域数值预报体系，其中包括资料融合系统、确定性预报系统、快速更新循环和集合预报系统等。此外，针对精细化预报的需求，建立了基于WRF3.4模式的精细化预报系统，采用WRF3Dvar，目前以上系统均已实现业务化运行，在预报业务中发挥着技术支撑作用。

### 5 长江中游水文气象耦合的暴雨洪水预报系统

长江中游河流、水库、湖泊众多，汛期防汛形势紧张，迫切需求水文气象耦合的暴雨洪水预报系统来

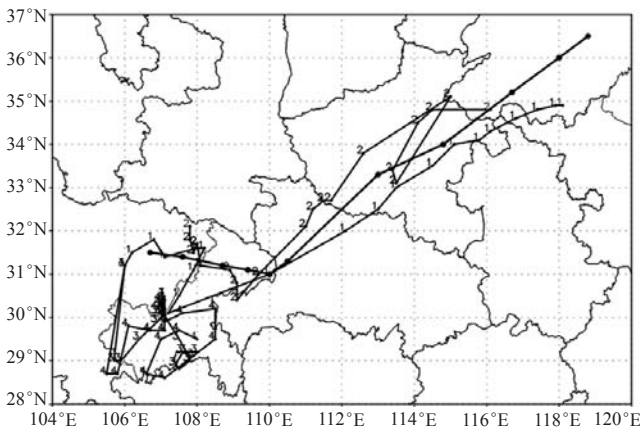


图4 改进敏感区观测后的低涡路径预报试验（标识1和2的点线分别为改进水汽场和风场的低涡预报路径）

开展预报与防汛决策服务。提高洪水预报精度和延长预见期，必须从提高降雨估算精度开始，结合降雨预报，采取流域降雨径流模型和河道洪水演算模型的途径来实现。早在30多年前，陈金荣等<sup>[83]</sup>从长江流域防洪的丰富实践中对水文气象预报已做了精辟而深刻的论述，指出气象预报同水文预报的结合为防洪和水库调度等工作，带来巨大的优越性和必要性，是水文预报发展的必然趋势。文中阐述的基本思想在水文气象预报技术已有许多新的发展和进步的今天，仍然具有指导意义。当前，气象模式和水文模型分别是气象和水文领域里最先进的工具，水文模型与气象模式耦合开展洪水预报必然成为未来发展的方向。

#### 5.1 降水降尺度技术

洪水预报中充分有效地利用天气预报及气象信息，其首要任务就是解决降水信息场与水文模型之间的时间和空间尺度上匹配的问题，缩小两者的尺度差异，寻找水文气象结合的契机。为了有效地提高定量降水估算预报产品在水文预报中的应用，国内外学者从雷达资料同化、模式嵌套、高分辨的区域数值模式、动力释用技术等多方面系统地开展了降尺度方法研究。

##### 5.1.1 观测降水降尺度

基于新一代多普勒雷达探测技术和雨量计实测资料，采用卡尔曼滤波、最优插值、变分、统计权重等多种校正方法，研发高分辨的定量降水估算校正技术<sup>[84-85]</sup>。万玉发等提出了一种基于准同雨团样本概念的雷达与雨量计实时同步结合的降雨估算新技术<sup>[86]</sup>。

##### 5.1.2 预报降水降尺度

基于中尺度数值模式通过资料同化、模式嵌套、动力释用、空间统计等技术提高定量降水预报精度，提高降水分辨率，缩小了天气模式与水文模型网格尺度的差异。例如，中国气象局武汉暴雨研究所利用数值模式动力释用降尺度技术将强降水构成分解为大尺度降水、不稳定降水和地形影响降水，基于AREM模式利用高分辨率（2km×2km）的地形因子（海拔高度、坡度、坡向等）诊断数值模式预报降水，建立精简实用的动力释用降尺度模型，开展试验流域降水预报降尺度试验，获取高时空分辨率（1h、2km×2km）的数值模式降水预报信息<sup>[87]</sup>。

#### 5.2 水文气象耦合技术与实践

水文气象耦合技术主要是利用气象业务中雷达估算降雨及数值预报降雨技术来刻画水文模型的输入场，以改变目前水文模型中降雨量估算的落后方式，进一步提高降雨场估算和预报的时空精度，从而提高洪水模拟预报水平。

### 5.2.1 雷达定量降水估算 (QPE) 与水文模型的耦合

雷达估算降水有时空分辨率高的优点, 可以比较客观地反映降水量相对大小的分布趋势。许继军等<sup>[88]</sup>、彭涛等<sup>[89]</sup>利用武汉、宜昌天气雷达资料结合水文模型对三峡库区清港河、香溪河、白莲河等流域进行了水文预报试验, 结果表明: 利用雷达估测降雨, 与水文模型相匹配, 较好地发挥了二者在表现降雨空间分布变化方面的优势, 能够有效地提高洪水预报精度。

### 5.2.2 定量降水预报 (QPF) 与水文模型的耦合

目前, 定量降水预报 (QPF) 应用于水文预报模型是被水文气象学界普遍认同的发展方向之一。为此长江水利委员会、武汉大学、武汉暴雨所已开展过相关试验: 杨文发等<sup>[90]</sup>考虑预见期内的降水预报信息, 采用降水预报与洪水预报耦合的方法, 对1998年汛期发生在长江上游三峡区间的一次暴雨洪水过程进行了预报试验; 李超群、郭靖等<sup>[91-92]</sup>基于数值模式定量降水预报产品构建了清江隔河岩、汉江丹江口流域的水文气象耦合模型, 开展洪水预报的研究; 崔春光、彭涛等<sup>[93-94]</sup>基于中尺度数值模式 (AREM) 将定量降水预报及其降水集合预报产品引入洪水预报领域, 延长了洪水预见期, 提高了洪水预报精度, 拓展了洪水不确定性预报的新方法。

## 5.3 水文气象耦合的暴雨洪水预报系统

洪水预报系统是在计算机上实现洪水预报联机作业的运行系统, 它靠快速、准确地收集、存储和处理水情、雨情, 通过各种专业数学模型进行洪水预报, 从而及时、准确地做出洪水流量过程的预报, 提高了洪水预报的时效性和精确度。

### 5.3.1 中国洪水预报系统

在我国, 洪水预报系统研制始于1985年, 至20世纪90年代中期, 我国从无到有基本上普及了洪水预报系统。当前, 洪水预报系统研制进展较快, 已开发了具有中国特色的专家交互式洪水预报系统。水利部水文局开发的“中国洪水预报系统” (CNFFS) 和长江委水文局开发的“WIS水文预报平台” (WISHFS) 便是代表性的成果。中国洪水预报系统采用C/S结构, 以全国统一的实时水情数据库为依托, 以地理信息系统为平台, 能方便地构建五类洪水预报方案, 具有标准的、通用的预报模型方法库, 可任意选择多模型、多方法制定预报方案, 具有人工和自动优选结合的模型率定功能, 具有定时预报和人机交互预报功能, 可干预任何信息源和预报过程, 具有全面完善的系统管理功能等, 已在25个流域机构和省 (直辖市、自治区) 的水文部门推广应用<sup>[95]</sup>。

### 5.3.2 流域水文气象实时预报系统

近几年, 中国气象局武汉暴雨研究所在GIS技术以及高分辨的DEM数据的支持下, 基于定量降水估算 (QPE)、定量降水预报 (QPF)、水文预报模型和实时洪水预报技术, 通过雷达测雨技术、中尺度暴雨预报模式技术获取高时空分辨率的水文资料 (降雨等) 场输入水文模型来进行实时水文气象预报 (见图5), 基于Asp.net技术自主设计研发了web形式的流域水文气象实时预报系统, 并实现了与气象信息综合分析处理系统 (MICAPS) 有机融合, 研发了基于MICAPS系统平台的暴雨洪涝预报预警模块。目前系统成功应用于三峡库区、淮河王家坝、清江水布垭等12个流域<sup>[96]</sup>。

## 6 讨论与展望

对近年来我国长江中游区域暴雨研究进展进行了回顾与总结, 得出制约该区域暴雨研究深入与预报水平提高的因素主要体现在以下几个方面。

(1) 已有的外场加密观测试验没有得到能清晰反映暴雨 $\beta$ 中尺度对流系统三维动力热力结构、云微物理结构以及用于诊断分析其发生发展物理机制的加密观测资料, 更没有针对暴雨数值预报模式物理过程方案研发和改进进行有针对性的观测设计和野外观测试验。

(2) 长江中游处于复杂的中小尺度地形环境中, 且引发暴雨的中尺度对流系统存在着多种组织类型。不同复杂地形环境下、不同组织类型的暴雨中尺度对流系统启动、组织、发展、维持和消亡的主要物理机制是什么、之间存在着何种差异并不清楚。

(3) 基于高时空分辨率的卫星、雷达、GPS水汽、风廓线仪、微波辐射计以及地面加密自动站等多源观测, 众多资料亟待质量控制和最大效益的综合应

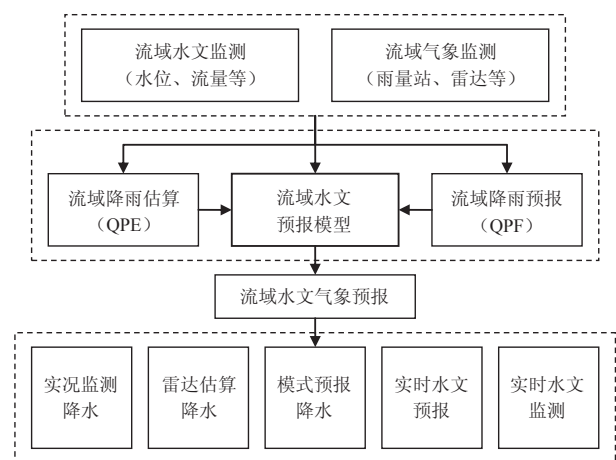


图5 流域水文气象实时预报结构及数据流程

用,尤其是卫星、雷达等高分辨率的遥感资料急需得到有效的融合和同化。区域暴雨数值预报模式中缺乏针对东亚天气特点和青藏高原大地形影响下模式物理过程的描述,对暴雨预报的不确定性研究不够充分。

(4) 水文预报模式和气象预报模式耦合技术研发进展缓慢,时空分辨率的差异导致气象模式与流域水文模型耦合效果不佳,定量降水估算产品在流域洪水预报中未能得到有效合理的应用。

针对上述问题,未来我国长江中游区域暴雨研究可重点开展以下几点工作。

(1) 开展青藏高原东侧及其下游关键区大气边界层科学试验、沿海雨锋切变线、低空急流带、水汽输送带剖面观测、深入内陆的台风暴雨系统野外科学观测,中尺度观测资料融合与反演技术。

(2) 重点研究水汽输送、对流扰动、大气日变化、地形以及惯性重力波等因子对暴雨中尺度对流系统发生发展的影响机制,揭示长江中游暴雨天气系统结构和形成机理。

(3) 开展多源探测资料的同化和云分析技术研究,发展高分辨率非静力暴雨数值模式系统与适合我国区域特色的模式边界层和云微物理过程方案。

(4) 突破以暴雨洪水为对象的水文气象耦合关键技术,建立长江中游干、支流水文气象预报系统。

## 参考文献

- [1] 陶诗言,等.中国之暴雨.北京:科学出版社,1980.
- [2] 丁一汇,张建云,等.暴雨洪涝.北京:气象出版社,2009.
- [3] 倪允琪,刘黎平,高梅,等.长江中下游梅雨锋暴雨野外科学试验.北京:气象出版社,2004.
- [4] 倪允琪,周秀骥,张人禾,等.我国南方暴雨的试验与研究.应用气象学报,2006,17(6): 690-704.
- [5] 崔春光,倪允琪,李红莉,等.中国南方暴雨野外试验(SCHeREX)中尺度气象分析场的建立及其质量评估.气象学报,2011,69(1):26-40.
- [6] 龙智勇,石汉青,黄思训.利用卫星云图反演云导风的新思路.物理学报,2011,60(5): 834-839.
- [7] 周振波,闵锦忠,彭霞云,等.单多普勒雷达风场反演的扩展方法(1):方法与对比试验.高原气象,2006,25(3): 516-524.
- [8] 李华宏,薛纪善,王曼,等.多普勒雷达风廓线的反演及变分同化试验.应用气象学报,2007,18(1): 50-57.
- [9] 方德贤,刘国庆,董新宁,等.单多普勒雷达二维风场反演——Extended VPP方法.气象学报,2007,65(2): 231-240.
- [10] 牟蓉,刘黎平,许小永,等.四维变分方法反演低层风场能力研究.气象,2007,33(1): 11-20.
- [11] 刘黎平,莫月琴,沙雪松,等.C波段双多基地多普勒雷达资料处理和三维变分风场反演方法研究.大气科学,2005,29(6): 986-996.
- [12] 刘黎平.用双多普勒雷达反演降水系统三维风场试验研究.应用气象学报,2003,14(4): 502-504.
- [13] 罗昌荣,池艳珍,周海光.双雷达反演台风外围强带状回波风场结构特征研究.大气科学,2012,36(2): 247-258.
- [14] 彭亮,陈洪滨,李柏.3mm多普勒雷达测量反演云内空气垂直速度的研究.大气科学,2012,36(1): 1-10.
- [15] 刘贵华,余兴,戴进.不同积云微物理特征的卫星反演分析.南京气象学院学报,2009,32(1): 17-23.
- [16] 徐小红,余兴,朱延年,等.一次强飑线云结构特征的卫星反演分析.高原气象,2012,31(1): 258-268.
- [17] 戴进,余兴,刘贵华,等.一次暴雨过程中云微物理特征的卫星反演分析.气象学报,2010,68(3): 387-397.
- [18] 刘贵华,余兴,师春香,等.FY-3A/VIRR反演云微物理特征及与TERRA/MODIS反演结果的比较.高原气象,2011,30(2): 461-470.
- [19] 陈英英.利用FY-3A卫星云图对一次暴雨过程的特征云参数分析.暴雨灾害,32(1): 24-31.
- [20] Lensky I M, Rosenfeld D. Clouds-aerosols-precipitation satellite analysis tool(CAPSAT). Atmos Chem Phys Discuss, 2008, 8: 4765-4890.
- [21] 刘红亚,徐海明,胡志晋,等.雷达反射率因子在中尺度云分辨模式初始化中的应用 I:云微物理量和垂直速度的反演.气象学报,2007,65(6): 896-905.
- [22] 刘黎平,宗蓉,齐彦斌,等.云雷达反演层状云微物理参数及其与飞机观测数据的对比.中国工程科学,2012,14(9): 64-71.
- [23] 王颖,黄勇,黄思源.大气温湿廓线反演问题的研究.国土资源遥感,2008(1): 23-26.
- [24] 潘宁,郁凡.用一维变分法校正卫星资料反演地球大气湿度场的试验研究.地球物理学报,2009,52(12): 2973-2986.
- [25] 王静,赵朝方.最小方差算法反演NOAA/AMSU海面大气温度垂直廓线.海洋湖沼通报,2008(2): 16-23.
- [26] 曲思逸,李国春.利用MODIS红外资料反演大气温湿度廓线的研究.气象与环境学报,2012,28(3): 21-24.
- [27] 王曦,李万彪.应用FY-3A/MWHS资料反演太平洋海域晴空大气湿度廓线.热带气象学报,2013,29(1): 47-54.
- [28] 王祥,赵冬至,苏岫,等.基于岸基实测数据的近红外通道海洋大气水汽反演.红外与毫米波学报,2012,31(6): 550-555.
- [29] 龚建东.同化技术:数值天气预报突破的关键——以欧洲中期天气预报中心同化技术演进为例.气象科技进展,2013,3(3): 6-13.
- [30] 李红莉,崔春光,王志斌.LAPS的设计原理、模块功能与产品应用.暴雨灾害,2009,28(1): 64-70.
- [31] Snook J S. Local domain forecasting support to the 1996 Atlanta Olympic Games. 12th Int Conf on Interactive and Processing Systems for Meteorology, Oceanography, and Hydrology. Atlanta: Amer Meteor Soc, 1996.
- [32] Birkenheuer D. Progress in applying GOES-derived data in local data assimilation. 10th Conf on Satellite Meteorology and Oceanography. Long Beach: Amer Meteor Soc, 2000.
- [33] 李红莉,万蓉,谢有才.利用LAPS系统同化地基GPS水汽资料的应用研究.热带气象学报,2010,26(6): 702-709.
- [34] 李红莉,崔春光,王志斌,等.中尺度分析系统LAPS应用雷达资料的个例研究.高原气象,2009,28(6): 1443-1452.
- [35] Xie Y, Koch S, McGinley J, et al. A space-time multiscale analysis system: A sequential variational analysis approach. Mon Wea Rev, 2011, 139: 1224-1240.
- [36] Li W, Xie Y F, Deng S M, et al. Application of the multigrid method to the two-dimensional doppler radar radial velocity data assimilation. J Atmos Oceanic Technol, 2010, 27: 319-332.
- [37] Li W, Xie Y F, He Z J, et al. Application of the multigrid data assimilation scheme to the China seas' temperature forecast. J Atmos Oceanic Technol, 2008, 25: 2106-2116.
- [38] 王晓芳,崔春光.长江中下游地区梅雨期线状中尺度对流系统分析 I:组织类型特征.气象学报,2012,70(5): 909-923.
- [39] Zheng L L, Sun J H, Zhang X L, et al. Organizational modes of mesoscale convective systems over central East China. Weather and Forecasting, 2013, 28(5): 1081-1098.
- [40] Meng Z Y, Yan D C, Zhang Y J. General features of squall lines in East China. Monthly Weather Review, 2013, 141(5): 1629-1647.
- [41] 王晓芳.长江中下游地区梅雨期线状中尺度对流系统分析 II:环境特征.气象学报,2012,70(5): 924-935.
- [42] 郑淋琳,孙建华.干、湿环境下中尺度对流系统发生的环流背景和地面特征分析.大气科学,2013,37(4): 891-904.
- [43] 崔春光,王晓芳,付志康.多源探测资料在一次非线状MCS分析中的综合应用.气象,2013,9(5): 556-566.
- [44] 王晓芳,胡伯威,李灿.湖北一次飑线过程的观测分析及数值模拟.高原气象,2010,29(2): 471-485.
- [45] 王晓芳,胡伯威,李红莉,等.梅雨期一个伴有前导层状降水对流线的结构特征.高原气象,2011,30(4): 1052-1066.

- [46] 郑永光, 陈炯, 朱佩君. 中国及周边地区夏季中尺度对流系统分布及其日变化特征. 科学通报, 2008, 53(4): 471-481.
- [47] 陈炯, 郑永光, 张小玲, 等. 中国暖季短时强降水分布和日变化特征及其与中尺度对流系统日变化关系分析. 气象学报, 2013, 71(3): 367-382.
- [48] 祁秀香, 郑永光. 2007年夏季我国深对流活动时空分布特征. 应用气象学报, 2009, 20(3): 286-294.
- [49] 胡伯威. 梅雨锋上MCS的发展、传播以及与低层“湿度锋”相关联的CISK惯性重力波. 大气科学, 2005, 2(6): 845-853.
- [50] 王晓芳, 崔春光, 胡伯威. 与水平风切变强度不均匀相联系的CISK惯性重力波. 应用气象学报, 2007, 18(6): 760-768.
- [51] 许小峰, 高丽, Jin F F. 梅雨湿度锋上中尺度对流云团生成和发展的波捕获机制. 自然科学进展, 2009, 19(11): 1203-1208.
- [52] 陈忠明. 非绝热加热、湿斜压热动力耦合强迫激发辐合增长的一种机制. 热带气象学报, 2010, 26(6): 710-715.
- [53] Rotunno R, Klemp J B, Weisman M L. A theory for strong, long-lived squall lines. J Atmos Sci, 1988, 45: 463-485.
- [54] Parker M D, Johnson R H. Simulated convective lines with leading precipitation. Part II: Evolution and Maintenance. J Atmos Sci, 2004, 61: 1656-1672.
- [55] Parker M D. Simulated convective lines with parallel stratiform precipitation. Part I: An archetype for convection in along-line shear. J Atmos Sci, 2007, 64: 267-288.
- [56] Bao X W, Tan Z M. A new mechanism of convective cell regeneration and development within a two-dimensional multicell storm. Acta Meteorological Sinica, 2009, 23(4): 414-427.
- [57] Smith R B. The influence of mountains on the atmosphere. Advances in Geophysics, 1979, 21: 87-230.
- [58] Smith R B. A linear upslope-time-delay model for orographic precipitation. J Hydro, 2003, 282: 2-9.
- [59] Smith R B, Barstad I. A linear theory of orographic precipitation. J Atmos Sci, 2004, 61 (12): 1377-1391.
- [60] 赵玉春, 许小峰, 崔春光. 川西高原东坡地形对流暴雨的研究. 气候与环境研究, 2012, 17(5): 607-616.
- [61] Hughes M M, Hall A, Fovell R G. Blocking in areas of complex topography, and its influence on rainfall distribution. J Atmos Sci, 2008, 66(2): 508-518.
- [62] Zhao Y C. Numerical investigation of a localized extremely heavy rainfall event in complex topographic area during midsummer. Atmospheric Research, 2012, 113: 22-39.
- [63] 赵玉春, 王叶红, 崔春光. 大对流有效位能和条件不稳定下地形对流降水的三维理想数值研究. 气象学报, 2011, 69(5): 782-798.
- [64] 赵玉春, 许小峰, 崔春光. 中尺度地形对梅雨锋暴雨影响的个例研究. 高原气象, 2012, 31(5): 1268-1282.
- [65] 廖移山, 冯新, 石燕, 等. 2008年“7·22”襄樊特大暴雨的天气学机理分析及地形的影响. 气象学报, 2011, 69(6): 945-955.
- [66] 宇如聪, 薛纪善, 徐幼平. AREMS中尺度暴雨数值预报模式系统. 北京: 气象出版社, 2004.
- [67] Mesinger F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. Rev Meteor Aeronaut, 1984, 44: 195-202.
- [68] Yu R C. Application of shape-preserving advection scheme to the moisture equation in an E-grid regional forecast model. Advances of Atmospheric Sciences, 1995, 12(1): 13-19.
- [69] 宇如聪. E网格变量分布下差分格式的性质. 大气科学, 1994, 18(2): 152-162.
- [70] 王叶红, 赖安伟, 赵玉春, 等. 降水资料同化在GRAPES-MESO模式中应用试验研究. 大气科学, 2013, 37(3): 645-667.
- [71] 赵海贝, 王斌, 戴永久. 基于历史样本投影的四维变分陆面数据同化方法及其初步应用. 气候与环境研究, 2009, 14(4): 383-389.
- [72] 赵明, 王斌, 成巍, 等. 一种基于历史样本投影的三维变分同化方法. 气候与环境研究, 2010, 15(2): 199-209.
- [73] 蒋兴文, 何光碧, 李跃清. AREM模式中引入MYJ边界层方案介绍及其试验. 高原山地气象研究, 2010, 30(4): 1-7.
- [74] 杨磊, 徐幼平, 程锐, 等. AREM模式中陆面过程的改进与试验. 暴雨灾害, 2008, 27(1): 1-8.
- [75] 李昉英, 叶成志, 钟中. 陆面参数化方案对两例不同类型暴雨可预报性的影响. 大气科学, 2010, 34(2): 407-417.
- [76] 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.
- [77] 王叶红, 赵玉春, 李红莉, 等. AREM模式的热启动数值模拟——以2007年7月13日暴雨过程为例. 高原气象, 2011, 30(6): 1488-1504.
- [78] 王叶红, 彭菊香, 赵玉春. 两种初值方案对2008年中国汛期降水影响的数值试验. 热带气象学报, 2012, 28(6): 838-852.
- [79] 李俊, 杜钧, 王明欢, 等. 中尺度暴雨集合预报系统研发中的初值扰动试验. 高原气象, 2009, 28(6): 1365-1375.
- [80] 李俊, 杜钧, 王明欢, 等. AREM模式两种初值扰动方案的集合降水预报试验及检验. 热带气象学报, 2010, 26(6): 217-228.
- [81] Li J, Du J, Zhang D L, et al. Ensemble-based analysis and sensitivity of mesoscale forecasts of a vortex over southwest China. Q J R, 2013, doi: 10.1002/qj.2200.
- [82] 李俊, 王明欢, 公颖, 等. AREM短期集合预报系统及其降水预报检验. 暴雨灾害, 2010, 29(1): 30-37.
- [83] 陈金荣, 罗伯昆. 对水文气象预报的认识和实践. 人民长江, 1982(6): 52-59.
- [84] 李建通, 杨维生. 提高最优插值法测量区域降水量精度的探讨. 大气科学, 2000, 24(2): 263-270.
- [85] 尹忠海, 张沛源. 利用卡尔曼滤波校准方法估算区域降水量. 应用气象学报, 2005, 16(2): 213-219.
- [86] 万玉发, 吴翠红, 金鸿祥. 基于准同雨团样本概念雷达和雨量计的实时同步结合方法. 气象学报, 2008, 66(1): 262-273.
- [87] 殷志远, 赖安伟, 公颖, 等. 气象水文耦合中的降尺度方法研究进展. 暴雨灾害, 2010, 29(1): 89-95.
- [88] 许继军, 杨大文, 蔡治国. 分布式水文模型结合雷达测雨用于三峡区间的洪水预报. 长江科学院院报, 2007, 24(6): 42-48.
- [89] 彭涛, 宋星原, 殷志远, 等. 雷达定量估算降水在水文模式汛期洪水预报中的应用试验. 气象, 2010, 36(12): 50-55.
- [90] 杨文发, 等. 降水预报与洪水预报耦合应用初探. 水资源调查, 2003, 24(1): 38-40.
- [91] 李超群, 郭生练, 张洪刚. 基于短期定量降水预报的隔河岩洪水预报研究. 水电能源科学, 2006, 24(4): 31-35.
- [92] 郭靖, 郭生练, 张俊, 等. 汉江流域未来降水径流预测分析研究. 水文, 2009(5): 18-22.
- [93] 崔春光, 彭涛, 沈铁元, 等. 定量降水预报与水文模型耦合的中小流域汛期洪水预报试验. 气象, 2010, 36(12): 56-61.
- [94] 彭涛, 李俊, 殷志远, 等. 基于集合降水预报产品的汛期洪水预报试验. 暴雨灾害, 2010, 29(3): 274-278.
- [95] 刘志雨. 我国洪水预报技术研究进展与展望. 中国防汛抗旱, 2009(5): 13-16.
- [96] Peng T, Wei C Z, Ye J T, et al. Basin hydrometeorology real-time forecast system. Information Computing and Applications, 2012, CCIS307: 665-671.

# 长江流域雨季中尺度对流系统研究

——国家自然科学基金重点项目(40930951)成果简介

王晓芳<sup>1</sup> 许小峰<sup>2</sup> 崔春光<sup>1</sup> 赵玉春<sup>1</sup> 孙建华<sup>3</sup> 陈忠明<sup>4</sup> 傅慎明<sup>3</sup>

(1 中国气象局武汉暴雨研究所 暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430074 2 中国气象局, 北京 100081

3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029 4 中国气象局成都高原气象研究所, 成都 610072)

**摘要:** 长江流域产生暴雨的中尺度对流系统(Mesoscale convective systems, MCS)是雨季强降水的重要影响系统, 深入研究它的组织结构、活动规律及其发生发展机制, 对提高暴雨的预报能力有重大意义。近3年来依托国家自然科学基金重点项目对中尺度对流系统展开了一系列研究, 包括对长江流域产生暴雨的MCS进行组织形态分类、分析了不同线状MCS的结构特征、合成分析了各线状MCS产生的环境条件; 我国三阶地形对降水的影响, 尤其是山地—平原环流对梅雨锋夜间降水的影响; 中尺度地形对对流降水的影响; 湿斜压热动力耦合强迫激发MCS发生发展的影响; 最后总结了长江流域产生暴雨的MCS的物理概念模型。

**关键词:** 中尺度对流系统, 组织结构, 环境条件, 地形, 概念模型

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.02.002

## An Introduction to the Results of the Research on Mesoscale Convective Systems during the Rainy Season in the Yangtze River: A Key Project of the National Natural Science Foundation of China (40930951)

Wang Xiaofang<sup>1</sup>, Xu Xiaofeng<sup>2</sup>, Cui Chunguang<sup>1</sup>, Zhao Yuchun<sup>1</sup>, Sun Jianhua<sup>3</sup>, Chen Zhongming<sup>4</sup>, Fu Shenming<sup>3</sup>

(1 Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China

Meteorological Administration, Wuhan 430074 2 China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

4 Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610072)

**Abstract:** The mesoscale convective system producing heavy rainfall is an important system during the rainy season. The research on its organizational structure, activity patterns and the development of mechanisms is of great significance to improve the storm forecasting ability. In the past three years, based on the project from the National Natural Science Foundation of China, we have been carrying out a series of studies on MCSs, including organizational model, structure characteristics, environmental conditions, and topographic effects on precipitation, especially the mountain-plain stream and meso-scale terrain. The coupling force of wet baroclinic thermal power leads to the development of MCSs. Finally, the physical conceptual model of mesoscale convective systems producing heavy rainfall in the Yangtze River valley is summarized.

**Keywords:** MCS, organizational model, structure characteristics, environmental conditions, terrain, conceptual model

### 1 引言

长江流域产生暴雨的中尺度对流系统是由多积云单体组成的深对流与层状云混合降水的系统。国外对MCS做了许多深入的研究工作, 与产生暴雨的机理有密切关系。众多观测表明, 对流组织化与环境风铅直

切变存在密切的关系, 并且许多数值模拟分析逐渐对此做出了定量表述<sup>[1-6]</sup>。现在已基本公认是由降水蒸发作用产生的地面冷出流与环境切变的相互作用经由前沿新单体的再生促成了对流系统的组织化和维持<sup>[5]</sup>。然而其他许多因子, 例如中层和高层的风切变, 自由大气中的相对湿度和静力稳定度, 对流有效位能(CAPE), MCS引起的重力波和天气尺度作用等都可能对重要影响。再者, 在没有低层环境切变的时候也能观测到MCS, 数值模拟也表明由冷丘与中高层切

收稿日期: 2013年9月30日; 修回日期: 2014年1月2日  
第一作者: 王晓芳(1972—), Email: wxf.xiaofang@gmail.com  
资助信息: 国家自然科学基金项目(40930951; 41375057)

变间、冷丘与低层平均风之间、冷丘与对流自身产生的低层切变之间<sup>[7]</sup>的相互作用以及重力波机制都能激发MCS。Schumacher等<sup>[8]</sup>最新研究表明,在相当湿的环境里,即使没有近地面冷堆,低空急流与深对流加热相互作用激发的低层重力波可使对流组织成一个移动缓慢的MCS。

以往多用卫星资料来展现产生暴雨的MCS的活动,或者用数值模拟或再分析资料诊断产生暴雨MCS的基本环境特征等<sup>[9-10]</sup>,近年来随着我国观测技术的提高,结合中尺度再分析系统研究MCS的可获取数据越来越多<sup>[11]</sup>,在理论上也得到了有一些有意义的结果<sup>[12]</sup>。这里主要以观测分析结合高分辨率数值模拟介绍近3年关于长江流域MCS研究的一些成果。

## 2 长江流域产生暴雨的MCS的分类研究

由线状MCS的组织形态、单体相对系统的移动方向和系统的移动特征,将线状MCS分为8个确定的类型:尾随层状降水MCS(Trailing Stratiform MCS,简称TS)、准静止后向建立MCS(Backbuilding/Quasi-Stationary MCS,简称BB)、邻接层状单向发展MCS(Training Line/Adjoining Stratiform MCS,简称TL/AS)、前导层状降水MCS(Leading Stratiform MCS,简称LS)、平行层状降水MCS(Parallel Stratiform MCS,简称PS)、断裂线状MCS(Broken Line MCS,简称BL)、镶嵌线状MCS(Embedded Line MCS,简称EL)、长带层状降水MCS(Long Line MCS,简称LL)。在8类确定类型中前6类MCS的组织形式、单体发展、系统移动和国外已有MCS分类有共性,故沿用已有的类型名称,后两类MCS尚未有文献提及,特别是长带层状降水MCS,它们是分析长江流域梅雨期MCS类型特征时新统计的两种线状MCS类型,这里仅根据它们的模态特征命名。

王晓芳等<sup>[13]</sup>用雷达组合反射率因子拼图资料统计

得到2010—2012年6—7月长江流域MCS个例大约379个,其中有组织的线状MCS为195个,占51.5%;非线状区域MCS有184个,占48.5%,有组织的线状MCS发生数略占优势(图1)。线状MCS中最大百分数是TS类,为22.6%,大于1/5,其次是BB类,为19.4%,其他线状MCS的百分率从14.4%到3.1%不等。

综合各个类型的大量个例并参考国内外已有的研究,图2给出了长江流域梅雨期成熟阶段MCS的组织类型示意图。非线状MCS(None Linear MCS,简称NL)主要是大片回波中嵌有或多或少的无组织强对流回波,其运动情形很复杂,有快速移动的、有缓慢移动的、有静止的。线状MCS中TS、LS、PS、BL四类是快速移动的,TL/AS、BB、EB、LL则移动缓慢,几乎是静止少动的。移动快的MCS在发展初期产生的降水量一般较小,强降水主要发生在成熟期,由它们发展初期的移动方向和移动速度,可外推未来3~4h内强降水的大致落区;准静止MCS根据其雷达回波特征可预测未来强降水的落区,特别是极端降水天气的预警。显然非线状MCS较线状MCS的组织结构复杂。

此外,Zheng等<sup>[14]</sup>依据回波形态将MCS分为7类,回波形态基本包含在图2各类型中,其中将TS MCS类中的易造成大风剧烈天气的弓状回波单独分为一类,称之为弓状回波。

## 3 长江流域产生暴雨的线状MCS的环境条件

在雨季,暴雨天气往往发生在有利的天气尺度条件下,如副热带高压、中高纬度冷空气活动、高原中尺度系统东移、南海季风涌等多尺度天气系统的协同作用。在这些系统处于活跃期时,梅雨锋上出现暴雨,但并不是整个梅雨锋带上普降强降水,降水存在不均匀性,这说明降水强弱还与局地的气象条件密切相关。王晓芳等<sup>[15]</sup>诊断分析了2010年长江中游梅雨期 $\beta$ 中尺度系统的环境特征,强调了局地大气层结的变

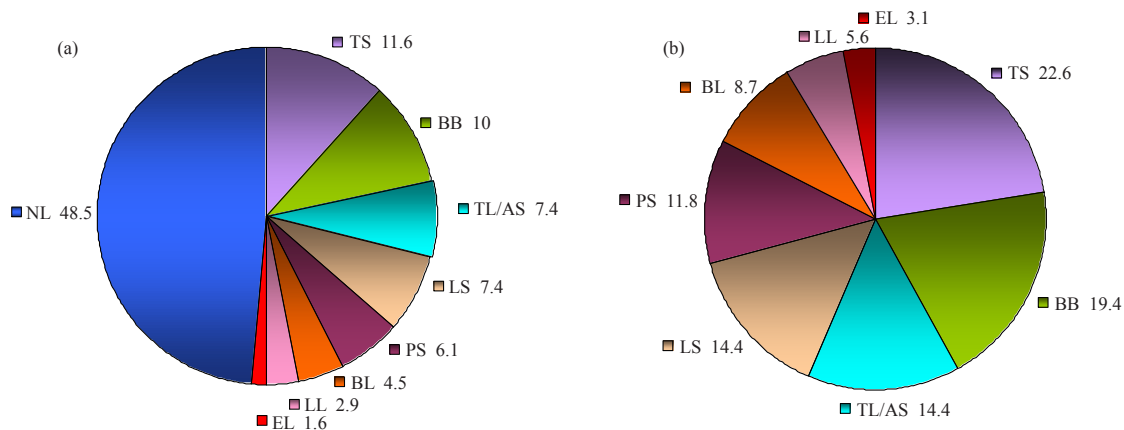


图1 各类MCS百分比分布  
(a) 所有类型MCS百分比; (b) 不同线状MCS百分比

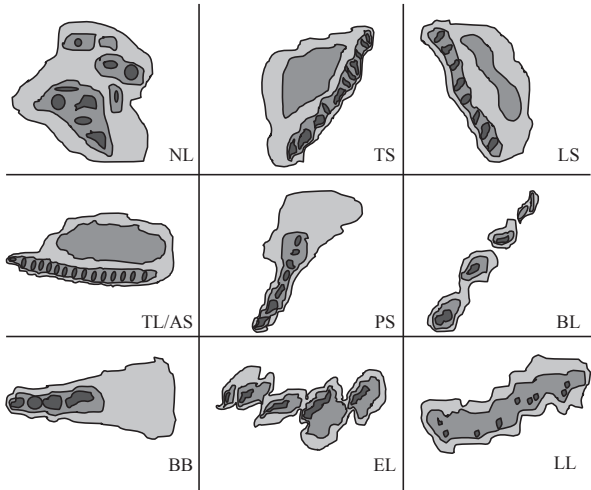


图2 长江流域梅雨期MCS成熟阶段组织类型的雷达反射率因子示意图(阴影由浅到深对应反射率因子值分别为20、30和40dBz)

化特征和锋生作用。

利用探空资料合成5类线状MCS的环境风特征(图3)<sup>[16]</sup>,如TS MCS和TL/AS MCS在对流层随高度都存在较大从前向后的垂直对流线的风分量;LS MCS在对流层随高度首先展示从前向后的垂直对流线的风分量,到中高层就转为从后向前的垂直对流线的风分量;平行对流线的风分量这3类MCS随高度都明显增加;风垂直切变在对流层中层TS MCS和LS MCS都是垂直对流线方向,而TL/AS MCS则表现为平行于对流线方向。PS MCS和BB MCS在对流层平行于对流线的风分量随高度增大,且PS MCS增大得更显著;风垂直切变方向是平行于对流线方向为主,但风垂直切变大小较弱,PS MCS风垂直切变大小比BB MCS略大些。

线状MCS发生在条件不稳定的环境气团中,TS类环境不稳定性最大,其后依次是TL/AS类、LS类、BB类,而PS类则发生在条件不稳定性最小的空气团中。长

江流域梅雨期环境空气的稳定程度与大气中可降水量大小没有明显的对应关系。合成计算它们热力学参数的平均值,不同类MCS发生的环境物理量有明显的差异。

对非线性状MCS,回波组织紊乱,规律性不强。崔春光等<sup>[17]</sup>利用多源探测资料分析了一次非线性状MCS发生发展机理,对流层中低层切变线的维持、冷空气入侵、地面小涡旋流场是对流触发抬升的主要机制,边界层风垂直切变的多样化表明非线性状MCS发展环境的复杂性。郑淋淋等<sup>[18]</sup>对2007—2010年暖季(6—9月)发生在江淮流域46个对流天气过程的环流背景和地面特征进行了统计研究。根据整层可降水量小于或大于等于50mm将这些个例发生的环境分成干环境(10个个例)和湿环境(36个个例)。干环境下发生强对流的天气形势可以分为槽后型和副高边缘型,湿环境下的天气形势可分为槽前型、副高边缘型和槽后型,湿环境下有明显的暖湿区配合。湿环境下槽前型发生的概率最高,地面系统较为复杂,有静止锋、倒槽、冷锋和暖锋,而干环境下在本研究的个例中无槽前型发生。干、湿环境下副高边缘型的对流从地面到500hPa都发生在副高后部的“S”流型的拐弯处,但部分湿环境个例低层有切变线。干环境下槽后型的发生概率较高,而湿环境下发生概率则相对较少。干、湿环境下强对流系统的触发和维持机制存在明显的差异。

## 4 两个不同类型线状MCS的结构特征

### 4.1 TS MCS 结构特征

雷达回波显示TS MCS由系统移动前向后依次是强而窄的回波带、过渡带、后方宽广的次强层状回波区;新单体在对流区前沿产生,成熟单体减弱为后方的弱回波区,在不断的生消交替过程中系统向前移动。

由观测分析和模拟结果总结TS类的概念模型<sup>[19-20]</sup>,如图4a所示。TS MCS由对流区和层状区组成,新单体在对流带前方生成,旧单体在强回波带中

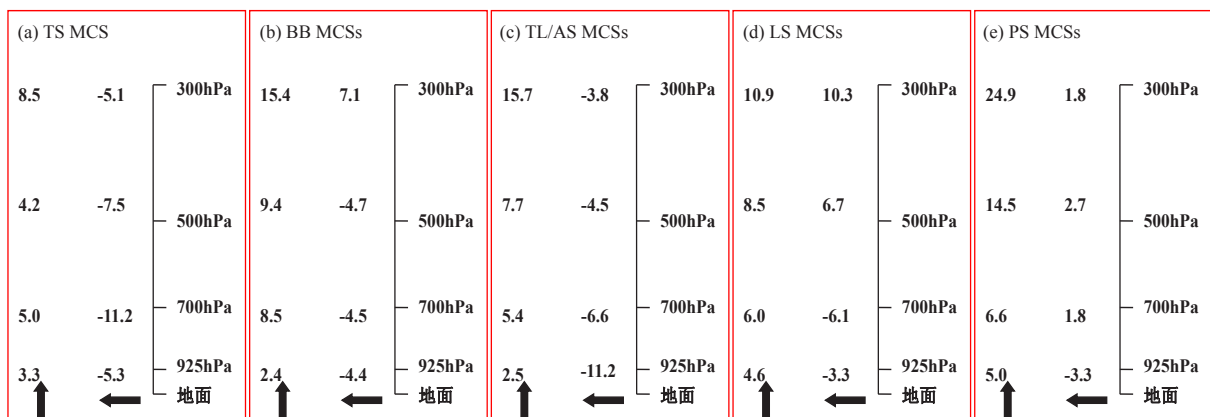


图3 各类线状MCS相对对流线垂直和平行的平均风分量的垂直剖面分布图(竖箭头代表平行对流线的平均风分量,横箭头代表垂直对流线的平均风分量)

减弱为后面的弱回波区；TS MCS内低层南北入流区都为高 $\theta_{se}$ （相当位温）值，气流沿着窄的高湿高 $\theta_{se}$ 值区上升，到对流层高层高 $\theta_{se}$ 值气流分别向北、向南形成系统的出流，向北的倾斜上升支构成了层状区域高层的宽阔上升运动区；层状区中层低 $\theta_{se}$ 值区的下沉气流和近地层北风一起构成系统的北侧入流，对流区前方（南侧）中层低 $\theta_{se}$ 值区的下沉气流和近地南风一起构成系统的南侧入流。低层风切变和TS MCS后部冷池的相互作用是造成TS MCS垂直结构的主要原因。图4b是TS MCS移动的示意图，对流线整体向东南移动，回波单体由东南向东北移动，则新单体主要向南传播。

#### 4.2 LS MCS 结构特征

系统在雷达回波上主要分两部分（图5）：后方回波强而窄的对流带和前方回波相对弱的宽层状降水区，在对流带和层状降水区之间有一条回波更弱的转换带。对流单体有时朝着对流线垂直方向拉长和倾斜。流场上RFLS系统主要由四种气流组成：在层状降水区前方中低层有一个由上而下转为从前向后的入流、对流层低层从后向前的入流、朝前倾斜的上升气流和中上层由后向前的气流。系统在组织阶段开始产生前导层状降水区，到成熟阶段垂直气流发展旺盛，前方的层状降水区变宽。中低层垂直对流线的垂直风切变随时间增大，以及地面冷丘随时间变化减弱或者不变是18日RFLS系统上升气流向前倾斜的主要原因<sup>[21]</sup>。

### 5 长江流域MCS发生发展机理研究

#### 5.1 线状 MCS 的试验

(1) 通过理想风垂直廓线和梅雨期典型温湿廓线的数值模拟，研究了风垂直切变对线性中尺度对流系统组织模态的影响，风垂直切变对线性中尺度对流系统不同组织模态的形成有重要作用，基本气流、风垂直切变、地面冷池和重力波及其相互作用等是决定中尺度对流系统中单体再生、移动和传播以及对流系

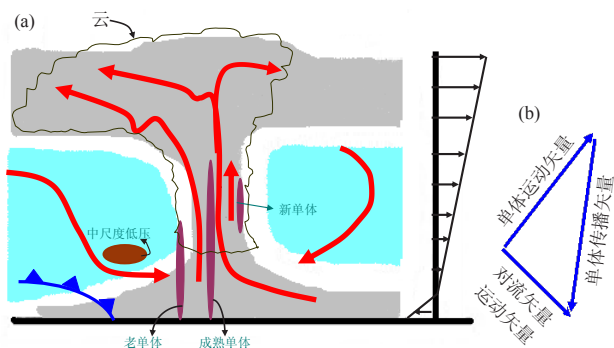


图4 TS MCS垂直剖面结构 (a) 和系统移动 (b) 示意图 (浅灰色是高 $\theta_{se}$ 区，浅蓝色是低 $\theta_{se}$ 区，风随高度演变主要显示了纬向风的变化)

统中层状云形成的重要因子。

(2) 赵玉春<sup>[22]</sup>针对梅雨锋（湿度锋）上或附近偏南暖湿气流一侧中尺度对流系统不断发生发展和长时间维持而引发长江流域暴雨的观测事实，利用WRF模式设计了一系列三维理想数值试验，梅雨锋两侧自身水汽差异造成的质量不平衡可在梅雨锋附近激发出小振幅重力波，在梅雨锋暖湿气流一侧对流层低层产生上升运动，并与非绝热加热过程耦合激发出对流形成一条平行于梅雨锋的对流降雨带，对流系统的尺度一般为20~60km，对流雨带形成后逐渐向南传播，其中对流扰动形成后激发出振幅更大的重力波向南传播，以及对流雨带北侧干下沉气流支的低层回流对新对流系统的触发可能在对流雨带的南移中起到重要作用。基本气流的平流效应使梅雨锋移动，有利于抵消梅雨锋对流雨带南移效应，它对水汽和能量的输送在梅雨锋中尺度对流系统的发生发展中起到了重要作用。风的方向变化引起的风垂直切变有利于梅雨锋对流的启动和中尺度对流系统的组织，并影响中尺度对流系统的移动方向；而风的大小形成的风垂直切变似乎并不利于梅雨锋上对流的启动和中尺度对流系统的长时间维持。

#### 5.2 地形对MCS发生发展的影响

##### 5.2.1 山地-平原环流对梅雨锋上夜间降水的影响

Sun等<sup>[23]</sup>通过对江淮流域强降水的分析发现，在第二级地形的东侧有梅雨锋的强降雨中心存在，降雨中心的日变化显著，并且有夜间降雨峰值。图6给出了梅雨锋上山地-平原环流（mountain-plain solenoid circulation, MPS）、MCS和中尺度对流涡旋（mesoscale convective vortex, MCV）发展的概念模型。梅雨期，在副热带高压和西风带系统的影响下，东西向的雨带位于我国的江淮流域，梅雨锋上的二

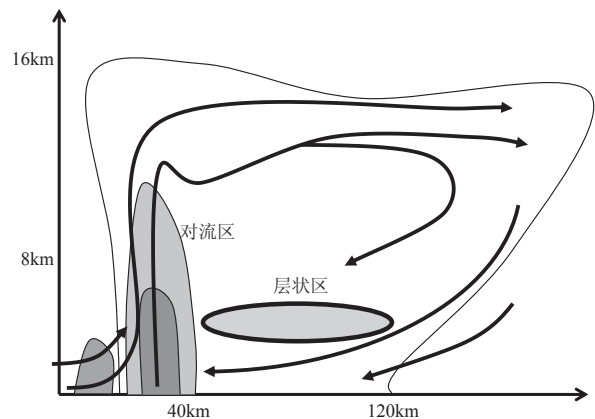


图5 LS MCS系统气流示意图 (带箭头粗线代表系统内气流构成，细实线表示回波强度大小，由外而内分别为5、20和40dBz；浅色阴影代表20dBz，深色阴影为40dBz)

级地形以东地区涡旋较为活跃。白天，在二级地形以东地区有涡旋产生，但由于山地—平原环流下沉支的影响，降雨较弱，较强的降雨发生在梅雨锋的东段，MCV东移带来较强的降雨。而晚上，MPS环流上升支加强了对流，导致了MCV的生成和东移发展，从而有利于激发长江流域MCS发生发展。

### 5.2.2 梅雨期青藏高原等三阶地形对 MCS 发生发展的影响

在Sun等<sup>[23]</sup>研究的基础上，仍然选取2007年7月1—10日梅雨期降水个例做试验，主要结论如下。

我国中纬度地区从西至东三段地形台阶产生了山地—平原环流（图7），从而分别在青藏东部和四川盆地之间，太行山—巫山山脉东部和江淮流域平原间，以及我国沿海地区和其邻近海洋之间产生了白天的三个正热力环流圈（ $S_n$ ）和夜晚的三个反热力环流圈（ $AS_n$ ）。白天正热力环流圈的下沉支分别阻碍了四川盆地和江淮流域上升运动的发展，因此降水量在白天为低值，但是夜晚反热力环流圈的上升支促进了四川盆地和江淮流域梅雨锋上的强上升运动，使降水量达到峰值。夜间高原东部与四川盆地地区的MPS环流圈的上升支的扰动使得西南低涡有所增强，并且向其东北方向伸展，110°E以东的梅雨锋的气旋式切变增强，又由于太行山—巫山山脉东部和江淮流域平原的山地—平原环流在110°E东侧上升支的作用，触发了梅雨锋上的涡旋，同时低空急流对水汽输送和上升运动的维持又有利于梅雨锋涡旋及MCS的发展和维持。

青藏东部在午后至傍晚（06—10时，本文如无特别说明均采用世界时）由于太阳辐射产生的地面加热的积累，对流系统活跃，降水量达到峰值。四川盆地在夜晚初期到次日凌晨（12—20时），由于 $AS_1$ 热力环流上升支的作用，降水量增强。我国东部淮河流域梅雨锋上降水的峰值出现在夜晚后期至次日清晨

（15—23时），与 $AS_2$ 的上升支有关。

山地—平原环流影响梅雨锋降雨是一些天气系统配合和活跃的结果，包括青藏高原和四川盆地、二级地形和东部平原的山地—平原环流，西南涡、梅雨锋涡旋的共同影响。

### 5.2.3 中尺度地形影响

赵玉春等<sup>[24]</sup>根据长江中下游中小尺度地形特征和梅雨锋上MCS发展的典型探空曲线，设计理想数值试验来研究中尺度地形对流降水模态，探讨了不同地形高度、尺度、形状（水平形态比）、环境气流以及旋转效应对降水模态和分布的影响，发现地形重力波破碎触发对流是地形对流降水的主要机制之一，地形重力波的形成、特征和传播受到环境条件制约，也受到地形自身参数的影响。当对流形成后，对流系统自身的下曳气流和降水蒸发冷却形成的向外流出的低层辐散气流可激发出新的对流，同时对流还可激发出重力波与地形重力波相互作用，使地形降水模态复杂化。不同地形高度、尺度、形状和环境气流下，地形降水存在着多种模态，其中迎风坡、背风坡、山顶附近以及地形上下游存在准静止的降水模态，地形上游、下游分别存在向上游、下游传播的降水模态，地形两翼还存在向下游传播的降水模态，对流降水、稳定层结降水以及对流与稳定层结混合的降水均可出现在这些降水模态中，这取决于对流是否触发。地形降水对地形无量纲参数 $v/N_y h$ 和 $Na/v$ 非常敏感，单一地形无量纲参数并不能决定降水的分布。地形下游和两翼降水模态和分布的差异主要与不同地形参数和环境气流下地形激发的重力波特性不同有关（图8）。

### 5.3 湿斜压热动力耦合强迫激发 MCS 发生发展的动力机制探讨

陈忠明等<sup>[25]</sup>从包含非绝热加热的原始方程出发，

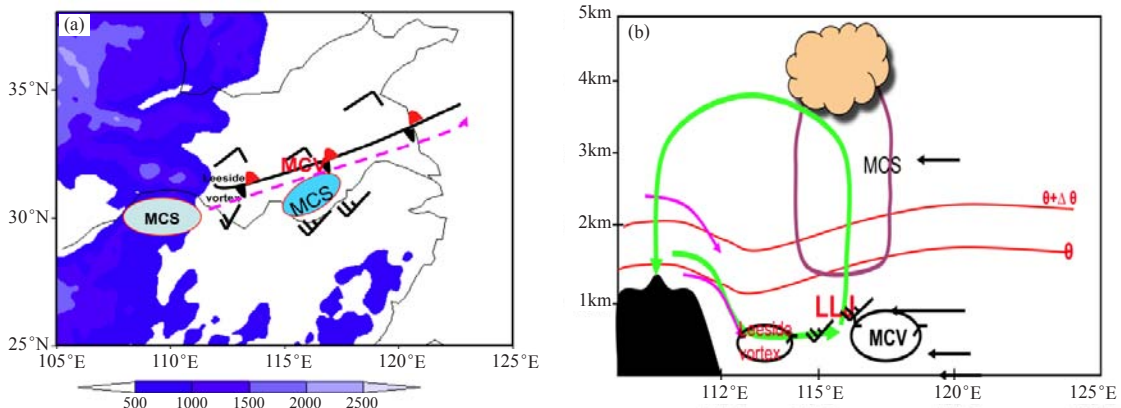


图6 梅雨锋上夜雨峰值概念模型 (a) 梅雨锋MCS、背风气旋和MCV的水平分布（粉色虚线为MCV的移动路径，蓝色阴影为500m以上地形）；(b) 与夜雨峰值相关的所有系统的垂直分布（红线：位温（ $\theta$ ），粉线：下坡风，箭头：距平风，绿线：MPS环流）

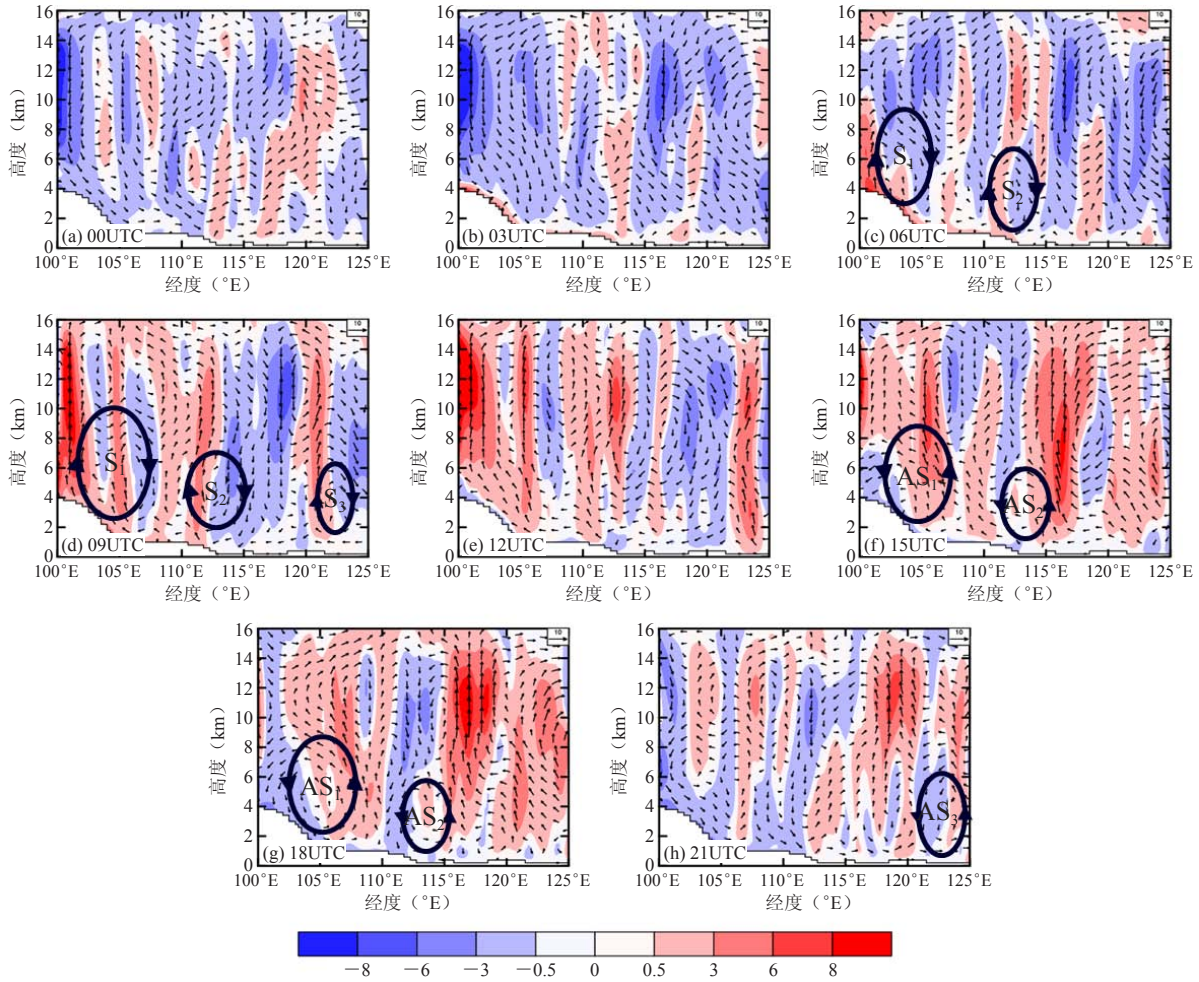


图7 扰动风场和垂直运动 (阴影,  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 日变化的高度—经度剖面 (黑色圆圈表示山地—平原环流)  
 (a) 00时; (b) 03时; (c) 06时; (d) 09时; (e) 12时; (f) 15时; (g) 18时; (h) 21时

将大气的斜压热力作用通过热力学方程引入散度方程, 在替换平衡近似 (alternative balance) 下, 导出了显式包含非绝热加热分布与垂直风切变相互作用、斜压热动力耦合强迫影响的新型散度方程:

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \{-\nabla^2 E + \mathbf{k} \cdot [\nabla \times (f + \zeta) \mathbf{V}]\} + \left\{ \frac{1}{\sigma} (2\mathbf{Q} - f^2 \frac{\partial \mathbf{V}_a}{\partial p}) \cdot \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial p} \right\} - \omega \frac{\partial D}{\partial p} + \frac{R}{\sigma c_p P} \nabla H \cdot \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial p} \quad (1)$$

式中,  $E = \varphi + \frac{\mathbf{V} \cdot \mathbf{V}}{2}$  为压能,  $\mathbf{V}_a$  为地转偏差,  $\mathbf{V}$  为非绝热加热率, 其余为常用符号。  $\mathbf{Q} = \frac{1}{2} [f(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial v}{\partial x}) - h \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial x} \cdot \nabla \theta] \mathbf{i} + \frac{1}{2} [f(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial v}{\partial y}) - h \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial y} \cdot \nabla \theta] \mathbf{j}$  为非地转  $\mathbf{Q}$  矢量。为了分析简便, 先来讨论两种极端的流场结

构: (1) 纯东西风型, 没有南北风分量 ( $v=0$ ); (2) 纯南北风型, 没有东西风分量 ( $u=0$ ); 且大气层结为不稳定 ( $\sigma=0$ ), 若大气层结为稳定, 则分析结果相反。

对于纯东西风型, 没有南北风分量 ( $v=0$ ) 的情形, 则简化 (1) 为:

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \frac{R}{\sigma c_p P} \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial p} \quad (2)$$

由于非绝热加热非均匀分布与垂直风切变相互作用就在加热中心区的上游和下游形成一个辐散和辐合增长偶, 促进辐合中心的向东 (下游) 传播。

对于纯南北风型, 没有东西风分量 ( $u=0$ ) 的情形, 则简化 (1) 为:

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \frac{R}{\sigma c_p P} \frac{\partial H}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial p} \quad (3)$$

由于非绝热加热非均匀分布与垂直风切变相互作用就在加热中心区的上游和下游形成一个辐散和辐合

增长偶，促进辐合中心的向北（下游）传播。

对于实际大气的情况，它既不是纯粹的西风，也不是纯粹的南风，通常以西南风为主，这时，非绝热加热非均匀分布与垂直风切变相互作用激发散度变化的情形也就是上述两种情况的合成，即在加热中心区的上游和下游形成一个辐散和辐合增长偶，促进辐合中心向下游传播。

对于对流层中高层的情形，由于大气层结处于稳定状态 ( $\sigma > 0$ )，则散度局地变率  $\frac{\partial D}{\partial t}$  的正（负）与  $\nabla H \cdot \frac{\partial V}{\partial p}$  的符号相反，非绝热加热非均匀分布与垂直风切变相互作用在低层激发辐合增长的区域上空激发辐散增长，而在低层激发辐散增长的区域上空激发辐合增长。这样一来，在垂直方向上，由于非绝热加热非均匀分布与垂直风切变相互作用在加热中心下游区激发低层辐合增长、高层辐散增长，加速该区域上升运动发展；而在加热中心上游区激发低层辐散增长、高层辐合增长，加速该区域下沉运动发展，从而围绕加热中心区形成一个叠加的次级环流，促进中尺度系统向下游区域传播，并得到加强。这就从理论上对潜

热反馈激发中尺度系统与强降水天气维持给出了一个初步的解释。

## 6 长江流域梅雨锋暴雨系统物理概念模型

赵玉春等<sup>[26]</sup>根据大量个例研究并结合前人研究成果总结了典型梅雨锋暴雨系统的物理概念模型（图9）：在对流层中低层（900~700hPa），梅雨锋辐合带主要由西太平洋副热带高压西侧外围的西南暖湿气流和东北低涡后部（或者华北高压前部）的偏北气流汇流而成<sup>[27]</sup>。梅雨锋（ $\theta_e$ 锋）位于暖湿高 $\theta_e$ 气团和低 $\theta_e$ 气团的交接地带（即 $\theta_e$ 密集带或梯度大值区），梅雨锋正涡度带、辐合带和上升运动带位于 $\theta_e$ 密集带偏南一侧。梅雨锋辐合带恰好位于对流层高层（100hPa）南亚高压脊线附近的强辐散区的下方。梅雨锋倾斜向上伸展，梅雨锋南侧为倾斜向上伸展的高 $\theta_e$ 舌。对流层中层（500hPa）短波槽东移为梅雨锋上的MCS发展提供有利的动力和热力条件（大尺度强迫），梅雨锋南侧的西南低空急流为梅雨锋暴雨的形成提供充分的水汽和能量，同时低空急流出口区附近动力强迫在梅雨锋上MCS的发生发展中起到极为重要的作用<sup>[28]</sup>。梅雨锋云带上有多组 $\alpha$ -MCS不断生消，并伴有 $\beta$ 和 $\gamma$ 中尺

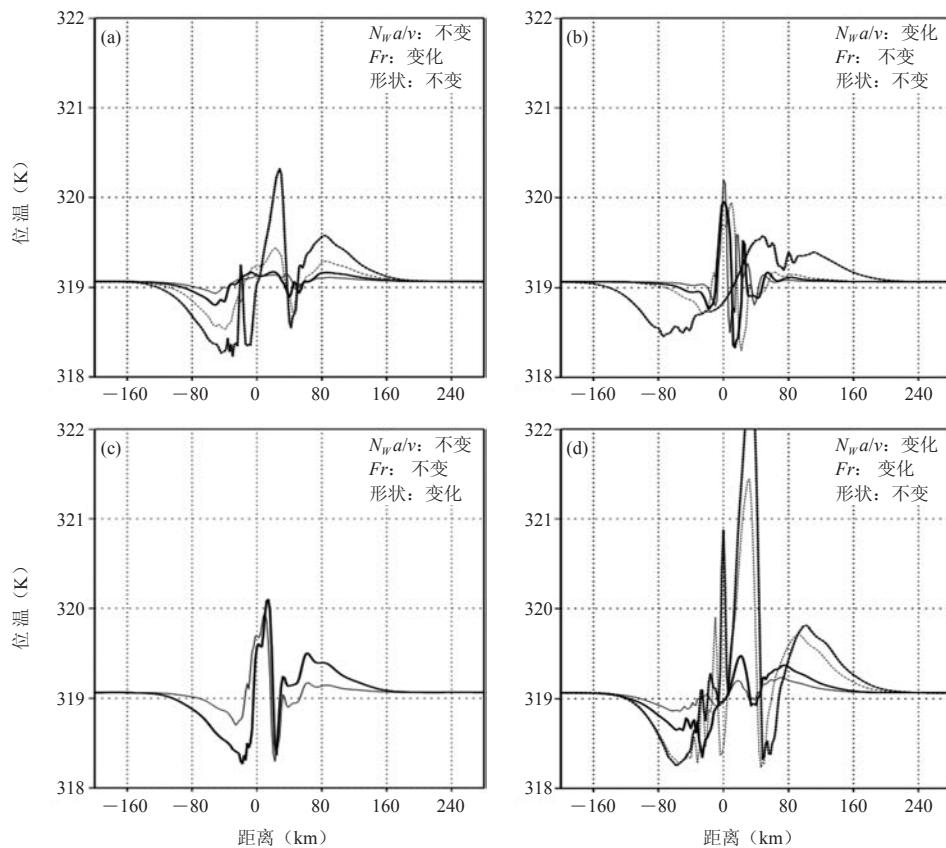


图8 山脉高度 (a)、尺度 (b)、水平形态比 (c) 和环境气流 (d) 试验组积分30min模拟的沿地形中线4km高度上的位温 (单位: K) 分布

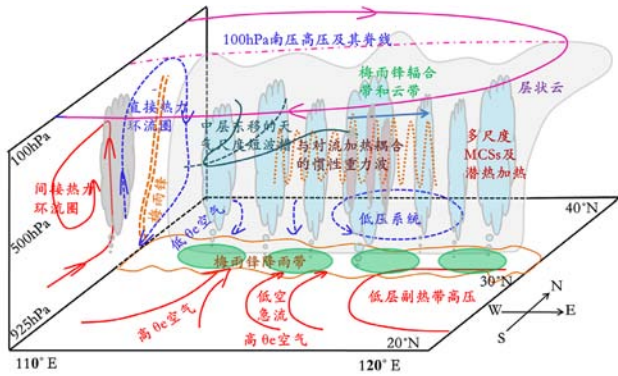


图9 典型梅雨锋暴雨系统物理概念模型示意图

度对流云团活动，这些 $\beta$ 和 $\gamma$ 中尺度对流云团往往嵌套在 $\alpha$ -MCS内，有的也在梅雨锋云带上或者南侧孤立发生发展。梅雨锋偏南暖湿气流一侧的 $\beta$ 和 $\gamma$ 中尺度系统在对流层中低层风场上往往表现为偏南气流中的气旋性扰动。不同尺度的对流系统活动引发的强降水凝结潜热加热对流层中层大气，使梅雨锋附近的气层变得趋于稳定，导致对流活动可能激发出惯性重力波，它在梅雨锋附近活动有利于新对流系统的形成<sup>[29]</sup>。梅雨锋南北两侧分别存在着—热力间接和直接环流圈<sup>[30]</sup>。

## 7 小结

综上所述，项目组在产生暴雨的中尺度对流系统的组织分类、环境条件、结构特征、地形影响及其发生发展机制等方面取得了新的进展。给出了长江流域HRPMCS的统计特性，特别是组织分类，还有MCS的生命史、传播、地理分布以及相应的环境条件。通过大量个例的诊断分析揭示部分线状产生暴雨的MCS成熟阶段的三维结构特征及其形成的可能物理机制。采用高分辨率的数值模拟和设计理想试验揭示了产生暴雨的MCS发生发展的关键影响因子，以及大地形和中尺度地形对MCS发展的作用；给出梅雨锋上MCS发生发展机理的理论解释。综合模拟结果和观测结果的分析，提出了长江流域产生暴雨的MCS的物理概念模型。

### 参考文献

- Parker M D, Johnson R H. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems. *Monthly Weather Review*, 2000, 128(10): 3413-3436.
- Schumacher R S, Johnson R H. Organization and environmental properties of extreme-rain-producing mesoscale convective systems. *Monthly Weather Review*, 2005, 133(4): 961-976.
- Johnson R H, Aves S L, et al. Organization of oceanic convection during the onset of the 1998 East Asian summer monsoon. *Monthly Weather Review*, 2005, 133(1): 131-148.
- Robe F R, Emanuel K A. The effect of vertical wind shear on radiative-convective equilibrium states. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2001, 58(11): 1427-1445.
- Weisman M L, Rotunno R. "A theory for strong long-lived squall lines" revisited. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2004, 61(4): 361-382.
- Weisman M L, Klemp J B, Rotunno R. Structure and evolution of numerically simulated squall lines. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1988, 45(14): 1990-2013.
- LeMone M A, Zipser E J, Trier S B. The role of environmental shear and thermodynamic conditions in determining the structure and evolution of mesoscale convective systems during TOGA COARE. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1998, 55(23): 3493-3518.
- Schumacher R S, Johnson R H. Mesoscale processes contributing to extreme rainfall in a midlatitude warm-season flash flood. *Monthly Weather Review*, 2008, 136: 3964-3986.
- 杨康权, 陈忠明, 张琳. 一次强降水过程中尺度系统发生发展动力机制的诊断分析. *高原山地气象研究*, 2011, 31(1): 12-19.
- 赵玉春, 王叶红. 高原涡诱发西南涡特大暴雨成因的个例研究. *高原气象*, 2010, 29(4): 819-831.
- 崔春光, 倪允琪, 李红莉, 等. 中国南方暴雨野外试验 (SCHeREX) 中尺度气象分析场的建立及其质量评估. *气象学报*, 2011, 69(1): 27-41.
- 许小峰, 高丽, Jin F F. 梅雨湿度锋上中尺度对流云团生成和发展的波捕获机制. *自然科学进展*, 2009, 19(11): 1203-1208.
- 王晓芳, 崔春光. 长江中下游地区梅雨期线状中尺度对流系统分析 I: 组织类型特征. *气象学报*, 2012, 70(5): 909-923.
- Zheng L L, Sun J H, Zhang X L, et al. Organizational modes of mesoscale convective systems over Central East China. *Wea Forecasting*, 2013, 28(5): 1081-1098.
- 王晓芳, 汪小康, 徐桂荣. 2010年长江中游梅雨期 $\beta$ 中尺度系统环境特征的分析. *高原气象*, 2013, 32(3): 750-761.
- 王晓芳. 长江中下游地区梅雨期线状中尺度对流系统分析 II: 环境特征. *气象学报*, 2012, 70(5): 924-935.
- 崔春光, 王晓芳, 付志康. 多源探测资料在一次非线状MCS分析中的综合应用. *气象*, 2013, 9(5): 556-566.
- 郑淋淋, 孙建华. 干、湿环境下中尺度对流系统发生的环流背景和地面特征分析. *大气科学*, 2013, 37(4): 891-904.
- 王晓芳, 胡伯威, 李灿. 湖北一次飑线过程的观测分析及数值模拟. *高原气象*, 2010, 29(2): 471-485.
- 汪小康, 王晓芳, 崔春光, 等. 用新型探测资料分析武汉一次短时强降水过程的中尺度对流系统. *暴雨灾害*, 2012, 31(4): 321-327.
- 王晓芳, 胡伯威, 李红莉, 等. 梅雨期一个伴有前导层状降水对流线的结构特征. *高原气象*, 2011, 30(4): 1052-1066.
- 赵玉春. 梅雨锋对引发暴雨的中尺度对流系统发生发展影响的研究. *大气科学*, 2011, 35(1): 81-94.
- Sun J, Zhang F. Impacts of mountain-plains solenoid on diurnal variations of rainfalls along the Meiyu front over the East China plains. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(2): 379-397.
- 赵玉春, 王叶红, 崔春光. 大对流有效位能和条件不稳定下地形降水的三维理想数值研究. *气象学报*, 2011, 69(5): 782-798.
- 陈忠明, 杨康权. 非绝热加热、湿斜压热动力耦合强迫激发辐合增长一种机制. *热带气象学报*, 2010, 26(6): 710-715.
- 赵玉春, 王叶红, 崔春光. 一次典型梅雨锋暴雨过程的多尺度结构特征. *大气科学学报*, 2011, 34(1): 14-27.
- Zhao Y C, Li Z C, Xiao Z N. A case study on a quasi-stationary Meiyu front bringing about continuous rainstorms with piecewise potential vorticity inversion. *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, 22(2): 202-223.
- 赵思雄, 陶祖钰, 孙建华, 等. 长江流域梅雨锋暴雨机理的分析研究. 北京: 气象出版社, 2004.
- 胡伯威. 梅雨锋上MCS的发展、传播以及与低层“湿度锋”相关联的CISK惯性重力波. *大气科学*, 2005, 29(6): 845-853.
- 沈桐立, 曾瑾瑜, 朱伟军, 等. 2006年6月6-7日福建特大暴雨数值模拟和诊断分析. *大气科学学报*, 2010, 33(1): 14-24.

# 我国暴雨研究中新型探测资料反演技术及其应用

万蓉

(中国气象局武汉暴雨研究所 暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430074)

**摘要:** 为提高暴雨预报准确度和精细度, 暴雨研究从大尺度背景到中小尺度特征, 从宏观结构到微观变化逐渐深入, 暴雨野外科学试验在原有业务网观测模式上, 逐步纳入不同新型探测系统以获取高时空分辨率、高精度、全方位的探测信息满足科研与业务的需求。综述了地基GNSS大气水汽观测, 地基微波辐射计云水、温度和湿度观测, 风廓线雷达测风, 双偏振雷达云水粒子相态观测, 毫米波雷达云观测获得的非常规探测资料在我国暴雨临近预报、暴雨机理分析、中尺度暴雨数值预报中的应用, 简要回顾近年来这些新型探测遥感技术进展及其对暴雨野外科学试验的作用。思考新型探测资料在质量控制和精度描述规范化、二次产品开发提高业务应用效率、多源资料综合应用和深层次挖掘等方面亟待解决的问题, 并初步探讨新型探测资料在暴雨预报研究应用中的未来发展趋势。

**关键词:** 暴雨, 地基GNSS, 微波辐射计, 风廓线雷达, 双偏振雷达, 云雷达, 数值预报, 综合观测

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.02.003

## Research Progress of the Unconventional Observing Technology and the Data Used in the Study of Rainstorm in China

Wan Rong

(Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430074)

**Abstract:** To improve the forecast accuracy and precision, the study of Rainstorm Prediction is now from a large scale background to small scale characteristics, from macro structure to micro changes gradually. In order to obtain a higher spatial and temporal resolution, a higher precision, and fuller elements' observation, in recent years more and more new detection systems have been gradually used in the rainstorm field experiments, which mainly depend on the existing conventional observation network. In this review, the progress of the unconventional data is stated, such as the water vapor observing by the ground-based GNSS network, the temperature and humidity observing by the microwave radiometer, wind observing by WPR, the cloud particles by dual polarization radar observations, and the millimeter wave radar observations of clouds, used in rainfall now-casting, rainstorm mechanism analysis, and the mesoscale numerical prediction of heavy rain in China. The related new remote sensing detection technology in recent years and its promotion to the storm field scientific experiments are reviewed. The problems including the quality control and accuracy description standard of the unconventional observation, the products development, the multi-source data integrated application and their thorough study need to be resolved in the near future.

**Keywords:** heavy rain, ground based GNSS, microwave radiometer, WPR, dual polarization radar, millimeter wave cloud radar, numerical forecast, synthesis observation

### 1 引言

暴雨是不同尺度天气系统相互作用的结果。不同尺度天气系统的相互作用非常复杂, 大尺度系统对中小尺度系统起着控制作用, 中小尺度系统生成强对

流天气(如暴雨), 对大尺度系统有反馈作用。从另外一个角度看, 暴雨的形成受不同的大气参量的共同影响, 因大气水汽、热力与动力因素的配置不同, 暴雨持续时间、发生地点与强度也各异。为提高暴雨预报水平, 有必要弄清楚三种尺度的相互作用, 弄清暴雨的生成条件和物理过程<sup>[1]</sup>, 国内外气象科学家近百年也一直努力通过观测与数值模拟, 从宏观到微观不断探求更精细化、更准确的答案。近10年来我国暴雨观测研究不仅仅依赖雷达、卫星、地面与高空等业务观测网, 而且逐步结合地基GNSS(Global Navigation

收稿日期: 2013年9月29日; 修回日期: 2014年1月20日  
第一作者: 万蓉(1969—), Email: wanrong1@hotmail.com  
资助信息: 国家自然科学基金(41375041); 国家高技术研究发展计划(863计划)(2012AA120902); 修缮购置专项(2007—2013)

Satellite System)、微波辐射计、风廓线、双偏振雷达、云雷达等新型大气探测设备,即未纳入业务观测的非常规观测,在一次次长江中游、华南、华北等暴雨野外科学综合观测中,获取了高时空分辨率、高精度的云、水汽和风场资料信息,我国学者围绕这些新型探测资料,在反演技术、二次产品开发、数值同化、天气分析等方面做了大量工作,加强了对水汽因子、动力条件与云物理等方面的精细了解。

本文将侧重新型探测资料在我国暴雨研究预报方面的应用,回顾新型探测资料反演开发技术、在暴雨研究与数值模式预报中的应用进展、思考当前暴雨研究资料应用中所亟待解决的问题并探讨未来发展趋势。

## 2 新型探测资料反演技术与应用

### 2.1 地基 GNSS 大气水汽观测

大气水汽占大气总体积的4%,对地气系统径向辐射能量平衡、大气的垂直稳定度、云的形成和暴雨的形成及演变有显著影响,通常采用气球探空获取,因布点稀疏、观测时次少,获得的水汽观测资料非常有限。美国GPS(Global Positioning System)、俄罗斯GLONASS,欧盟Galileo和中国北斗等全球导航卫星系统GNSS在进行定位、导航和授时的同时,可从GNSS卫星信号穿过大气层时发生的偏折和延迟中分离出因水汽造成的湿延迟,并反演出分钟级的采样率、全天候、高精度的大气水汽量<sup>[2]</sup>,以补充常规业务的水汽观测。北京地区GPS/VAPOR水汽观测试验、海峡两岸暴雨观测试验、长江中下游梅雨暴雨观测试验等均把GPS水汽观测作为主要内容。截至2012年底,我国GPS水汽监测网共485个站,主要分布于北京、上海、广东、湖北、河北、安徽、四川、香港、青藏高原等省、市、地区,中国气象局也正规划部署站间距约100km的国家级GPS大气探测网,和站间距约10~40km的降水影响敏感地区中小尺度GPS大气探测网,用于监测不同天气尺度的水汽分布,并计划近两年在10个省份150个台站上搭建国家北斗地基增强系统,湖北省在国内首次建成30站的北斗地基增强示范网,从2013年1月开始大气水汽观测,结合武汉大学研发的精密定位定轨软件PANDA(Position And Navigation Data Analysis),实现了北斗导航系统的高精度数据处理,静态精密单点定位精度达到厘米级,基线相对定位达到毫米级<sup>[3]</sup>。地基GNSS大气水汽观测产品天顶大气可降水总量PWV(Precipitation Water Vapor)、信号传播方向上的斜路径大气可降水总量SWV(Slant Water Vapor)和三维层析区域的水汽密度等。

PWV代表测站上空可降水汽总量,国际上GPS

PWV与微波辐射计平均偏差为1.0~1.5mm<sup>[2]</sup>。我国针对华北<sup>[4]</sup>、华南<sup>[5]</sup>、华中<sup>[6]</sup>以及中国区域<sup>[7]</sup>的大气条件建立了加权平均温度模型,并改进优化静力延迟模型<sup>[8]</sup>,PWV与探空平均偏差小于4mm,与微波辐射计平均偏差小于2mm,数据采样间隔为秒级,产品输出时间间隔30min,反演的PWV与探空在43km范围内具有可比性<sup>[9]</sup>。PWV被用于地区大气水汽总量日变化研究<sup>[10]</sup>、入梅诊断与预测<sup>[11]</sup>,以及局地降水前大气水汽的变化<sup>[12]</sup>。无论是梅雨锋暴雨<sup>[13]</sup>、华南暴雨<sup>[14-15]</sup>,台风降水<sup>[16]</sup>、西南涡持续暴雨<sup>[17]</sup>和华西秋雨<sup>[18]</sup>,降水前PWV有陡增急升特征,最大降水强度出现在大气柱水汽含量峰值出现后,与大气水汽有明显联系。局地强降水3与24h变化对未来降水区域和雨量分布有一定的指示意义;PWV在降水过程中不同阶段的趋势变化,反映了500hPa流场,700hPa水汽通量场的变化<sup>[19]</sup>。台风降水产生前一般在达到峰值后7~10h开始出现明显的降水<sup>[16]</sup>(图1)。同化PWV能改善数值模式预报质量。基于MM5或WRF中尺度数值预报模式的PWV同化,能有效调整初始湿度场,明显增强模式初始场描述水汽分布的能力,从而有效地控制模式积分初期对可降水量预报的误差,并对模式6h累积降水量预报有较明显的改善作用<sup>[20-24]</sup>,使模式对大阈值降水的时段、强度和落区的预报性能均获得全面的提高,此现象在模式积分最初的0~6h表现得更为明显<sup>[25]</sup>。在LAPS系统中,同化GPS水汽资料对湿度场产生的调整作用比雷达资料大一个量级,能有效提高下游暴雨量级的TS降水评分<sup>[26]</sup>。

SWV表示地基GPS接收机与卫星两点之间信号路径上的积分水汽含量,一定程度地反映测站周边水汽的分布的不均匀性特征。主要采用双差残差转变为单差残差和非差残差技术计算水平延迟梯度,获取斜路径的天顶总延迟和湿延迟,继而采用同PWV相同的算法得到SWV<sup>[27]</sup>,或基于无电离层影响的GPS非差观测组合直接计算SWV<sup>[28]</sup>。国际上与微波辐射计观测比

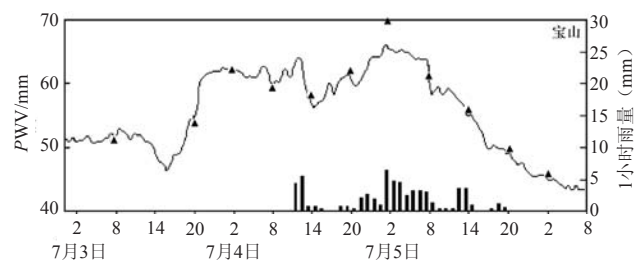


图1 台风Ramasun影响期间上海宝山站的PWV和雨量随时间的变化(单位: mm)<sup>[16]</sup>  
(曲线为GPS探测的PWV值,▲为宝山探空计算的PWV值,黑直方为1h雨量)

较，GPS得到的SWV误差可以达到毫米量级。国内与微波辐射计对比误差小于4mm，相对于PWV而言，SWV能更好地描述测站周边不同空间方位上水汽的变化，在暴雨系统发生发展移动过程中，测站不同方位上的水汽相对SWV变化量可达20%<sup>[29]</sup>。

层析区域的三维水汽密度分布依赖于毫米级精度SWV观测，将GPS加密区域内所有接收站点与不同卫星方向的多个SWV观测值离散化到区域网格中，构建以网格内水汽为未知量的SWV的方程组，求解方程组而获取区域三维网格中的大气水汽量值。为了层析方程组精确求解，层析技术中采用高斯加权函数进行水平约束，利用数值预报结果做先验值，边界条件采用了方差分量估计进行验后定权；针对水汽密度随高度减小的特点，垂直方向上采用随高度变化的非等权约束方法，或引入卡尔曼滤波技术<sup>[31]</sup>，或以多年探空观测作为垂直观测约束，将地面观测作为低层边界值<sup>[32]</sup>，改善区域三维水汽的整体反演精度。国内宋淑丽等<sup>[30]</sup>首次利用上海市区5个GPS站组成的中尺度网反演出60km×60km×10km区域，分辨率为15km×15km×500m大气水汽的三维水汽密度，与数值预报相比1~7km的水汽层析结果更接近无线电探空观测<sup>[30]</sup>。若加入地面观测约束后对2km以下水汽密度的精度有明显提高，2km以下水汽密度与探空的相关性提高了4.3%，标准偏差减小2%<sup>[32]</sup>。不同垂直分辨率下层析结果均方根误差在0.5g/m<sup>3</sup>左右<sup>[33]</sup>。相对于水汽总量而言，直接采用GPS层析技术得出的水汽密度廓线对模式预报进行订正，比湿廓线水汽变化趋势更接近实况，由此订正出来的CAPE值量值也更为接近<sup>[34]</sup>。

## 2.2 地基微波辐射计云水、温度和湿度观测

云水、温度和湿度的变化对于暴雨天气分析和业务预报都有重要的指示意义，微波辐射计是同时探测温度、湿度和云中液态水的较为理想的设备。1989年我国地基2通道微波辐射计可测对流层水汽与液态水，近年来美国的12通道、35通道地基微波辐射计用于我国气象科学试验，遥感大气温度、湿度、水汽、液态水等的垂直廓线，大气水汽、液态水总量等大气参量。35通道地基微波辐射计加入了测雨波段，具备在降水情况下的有效观测能力，在2008—2013年“长江中游梅雨期暴雨外场试验观测”中获取梅雨期对流层、边界层及地面层的温度、湿度等观测数据，为梅雨锋暴雨的机理研究和强降水预报预测提供了支撑。

地基微波辐射计由多通道获取大气微波辐射能量形成辐射电压，并利用液氮标定、理论标定、传输模式等方法标定亮温；根据辐射传输方程中亮温与

大气中的温度、湿度和云水结构相关关系，反演大气温度、湿度、水汽、液态水等的垂直廓线分布以及大气水汽、液态水总量。可使用的反演技术包括牛顿迭代反演法、线性统计法、贝叶斯最大概率法、蒙特卡罗法以及神经网络法等。目前地基12通道、35通道微波辐射计采用的神经网络反演算法，将亮温数据和地面气象参数作为输入层节点，由历史探空资料训练得到神经网络输入层和隐含层各个节点的权重系数，通过反演模块得到从地面到10km不同高度的大气温度、湿度、水汽和液态水的数据。地基12通道微波辐射计与探空比较：温度偏差1.2~4.5K<sup>[35]</sup>、水汽总量平均偏差0.281cm<sup>[36]</sup>、湿度均方根误差在33%<sup>[37]</sup>；35通道微波辐射计与GPS无线电探空比较：可降水量平均偏差-3.8~15.2mm，均方差1.7~10.4mm；温度平均偏差-2.6~3.5℃，均方差0.6~2.0℃；水汽密度平均偏差-0.7~2.0g/m<sup>3</sup>，均方差在0.7~1.6g/m<sup>3</sup>；相对湿度大于GPS无线电探空结果，平均偏差在-4.8%~7.5%<sup>[38]</sup>。由于降水易使设备天线罩上覆盖液态水膜或水滴，影响亮温观测和反演结果，降水天气对于微波辐射计反演精度的影响一直备受关注。定量分析显示微波辐射计反演的温度、水汽密度、相对湿度和可降水量与GPS无线电探空结果之间的系统偏差小于4mm，偏差在无降水时较小，而在有降水时较大<sup>[39]</sup>。

在数据质量控制方面，可利用辐射传输方程和独立来源的大气层结进行各通道亮温仿真计算、用亮温计算值来检验观测值的数据<sup>[40]</sup>。为获取高精度的液态水和可降水量，可基于本地观测改进Liljegren等<sup>[41]</sup>的反演算法参数，得到适合本区域的液态云水路径和可降水量反演，改进的算法与神经网络算法比较，相关系数为0.99，平均相对误差为3.58%，反演结果略偏小于神经网络方法，但趋势一致，比神经网络方法对云更为敏感<sup>[42]</sup>。

精细化的微波辐射计资料较详细地描述对流区的大气物理特征。在层状云中嵌入的对流区中有丰富的垂直积分过冷水含量，量级可达10<sup>3</sup>g/m<sup>2</sup><sup>[43]</sup>；积层混合云降水过程中，空中液态水分布，特别是丰富的低层液态水，与地面降水的产生有直接的关系<sup>[44]</sup>（图2和3）。受不同云系影响时，云液水含量的变化与云量的增减有关，大气水汽、云液水和地面降水存在一定的定量关系，云中液态水仅占气态水的8.7%左右，落回地面的降水占空中水汽量的18%左右<sup>[45]</sup>。微波辐射计资料不仅显示云中充沛的相对湿度和液态水含量条件，也显示出非常利于冰雹粒子群快速累积增长的交替的干、湿分层生长环境<sup>[46]</sup>。

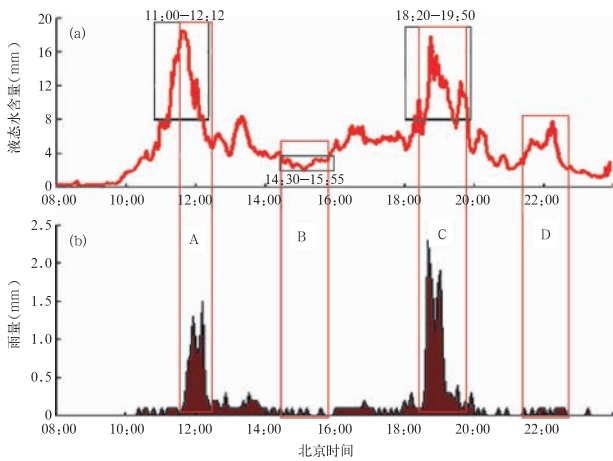


图2 一次积层混合云降水空中液态水与地面降雨的比较<sup>[44]</sup>  
(a) 微波辐射计所测云液态水含量随时间的变化；(b) 地面雨量随时间的变化

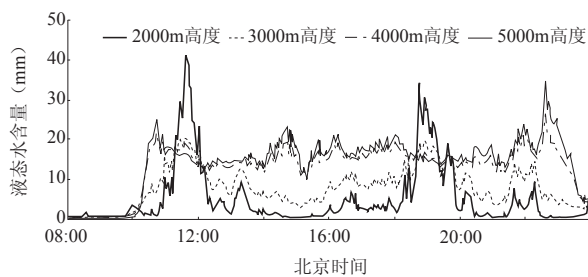


图3 2000、3000、4000和5000m高度层辐射计液态水含量随时间的变化<sup>[44]</sup>

因地面降水的产生滞后于空中水汽、液态水含量变化，可基于微波辐射计资料寻找强天气预警指标。依据降水前1h大气水汽含量、云液态水含量的分布和演变与降水的关系，通过对大气水汽含量与液态水含量的FFT变换选取第一个转折点的不同特征作为判断降水的临近指标<sup>[47]</sup>，或利用微波辐射计获取的不同高度的温度、露点温度和平均相对湿度等资料计算MKI, KI, TT, HI等不稳定指数，对强对流天气有很好的预警指示作用<sup>[46]</sup>。

在数值预报方面，地基微波辐射计反演的相对湿度廓线资料在暴雨中尺度数值预报模式同化后，对降水落区预报改进不明显，但对降水强度预报改进明显，24h降水最大增幅为45mm，同化的站点信息越多，站点与降水中心越近，降水模拟效果越好<sup>[48]</sup>。

### 2.3 风廓线雷达的测风观测

风廓线雷达发射无线电波，并接收因大气湍流影响和散射作用返回的波信号，由回波信号处理和分析得到湍流强度、风向和风速随高度的分布即风廓线。暴雨研究上使用的对流层风廓线雷达有效探测高度从近地面到16km的范围、垂直分辨率120~480m，时间

分辨率6~10min。与其他测风设备如L波段或GPS探空、多普勒雷达、测风经纬仪、测风塔等相比，风廓线雷达以其分钟级的采样率和米级垂直分辨率较好地满足中小尺度暴雨分析与预报的需求。该资料在1998年华南暴雨试验、2001—2002年长江流域梅雨锋强暴雨外场试验、2006年华南五省两特区暴雨野外观测试验、2007—2013年长江中游梅雨期暴雨外场试验中利用风廓线雷达获取了暴雨过程中大气湍流与各高度层风的变化信息，这些信息无论在暴雨落区、强度和持续时间的数值预报上，还是在暴雨的发生发展过程中高低空急流的强度、深度配置、冷暖平流分布、垂直风切变等天气分析中，都起着重要作用。我国风廓线雷达已进入业务布网阶段，截至2012年底，已建成49部边界层风廓线雷达和9部对流层风廓线雷达。

与常规高空探空系统对比，风廓线资料的探测精度以北京南郊CFL-16型风廓线雷达为例，水平风 $u$ 、 $v$ 分量的标准偏差在2.3m/s左右<sup>[49]</sup>；北京延庆CFL-08风廓线雷达风速误差不大于1.5m/s、风向误差不大于 $10^\circ$ <sup>[50]</sup>；上海组网边界层风廓线雷达盛夏时段各层风速的平均标准差分别是3.34~4.03m/s，初冬时段则为3.22~4.12m/s<sup>[51]</sup>；湖北咸宁风廓线雷达在1km以上风向偏差小于等于 $20^\circ$ 、风速偏差小于等于3m/s<sup>[52]</sup>。

为提高测风精度，可通过极大似然法对回波谱的谱矩进行有效估计，显著改善低层取样体积谱矩估计，而有效抑制和去除了杂波干扰<sup>[53]</sup>；可依据噪声频域统计特性计算风廓线雷达功率谱噪声功率<sup>[54]</sup>；利用雨滴下降的平均多普勒速度<sup>[55]</sup>，或利用降水期间谱功率双峰测出垂直气流速度及下降粒子速度<sup>[56]</sup>，对风廓线垂直观测资料进行修正，减少降水对测风精度的影响。经对风廓线雷达多种探测模式探测数据的估算分析发现，雷达参数的确切选用、信噪比、测量方法的合理性以及信号累积得益的认定对大气折射率结构常数的准确估算有较大的影响，为此提出适合风廓线雷达多种探测模式对返回信号信噪比的正确估测和规范化处理方法，正确估算大气折射率结构常数 $C_n^2$ <sup>[57]</sup>。

风廓线雷达产品被广泛用于暴雨形成机理研究中。在地形与北京城市环流共同作用下的 $\beta$ 中尺度暴雨过程中，低空风的垂直切变是维系中尺度对流降水发生、发展的重要条件。一旦迎风坡出现强降水、将形成吹向迎风坡的风速与降水强度之间的正反馈现象；地形坡度越大的地方，产生的上升运动越强<sup>[58]</sup>；北京局地暴雨相联系的对流层偏东风浅薄与深厚不同结构，结合温、湿结构，散度场、涡度场配置分析认为：对流层低层的偏东风对北京的局地暴雨的发生有

重要作用，特别是浅薄偏东风能够在局地形成较强的辐合、暖湿空气局地集中和形成热力不稳定，加之系统的生命期短，发生发展迅速，容易造成突发性的局地暴雨，而且非常容易产生漏报；而深厚偏东风在提供强对流发生所需的对流层垂直切变方面有重要作用，同时，其产生的辐合层次较厚，水汽输送能力较强，同样有利于较强降水的发生，然而持续的偏东风并不是对流风暴的直接触发机制，因此非常容易造成对局地暴雨的空报<sup>[59]</sup>（图4）。此外，地面偏东气流中的切变线以及西部山脉作用时的气流在山前汇聚从而强迫抬升，产生地面中尺度系统；城市热力加强中尺度辐合，容易形成北京城市降水<sup>[60-61]</sup>；在北京夏季暴雨过程中，风廓线显示双层低空急流影响降水，切变线低涡是主要中尺度系统，强降水前地面风场辐合，临近降水辐合层向上发展<sup>[62]</sup>。强对流过程发生前，风廓线雷达资料中均出现明显的风向的垂直切变。风向随高度顺转，有暖平流，为强上升运动提供了有利条件，可产生、维持强对流<sup>[63]</sup>。基于风廓线观测订正的亮带识别算法识别延庆地区亮带厚度为

1000~1500m，上下边界速度差值主要为4~5m/s<sup>[64]</sup>。风廓线雷达与无线电声探测系统的温度廓线综合探测，能高时空分辨率地展示晴空热对流的演变过程和热对流对上层空气的加热效应，有利于加深对热对流泡和边界层热对流运动的认识<sup>[65]</sup>。北京地区风廓线仪布网数值研究表明，天气系统对大气风场的垂直结构特征较为敏感，大气风场随高度的垂直分布和变化对天气过程有明显的的作用，在较短时期就可对大气的空间特征形成深厚的影响。其可在短期天气过程中影响天气系统的温度场结构及相关降水过程，且在以上影响随着预报时效的增加而增强的同时，影响范围也随预报时效的增加而扩大<sup>[66]</sup>。

在暴雨临近期风廓线雷达资料有特征性变化，观测发现：在暴雨发生前的1~2h，水平风向、风速的方差增长迅速<sup>[50]</sup>，低空急流指数反映脉动向地面扩展的程度与中小尺度降水的密切关系，比雨强增大提前2~4h，增大程度与雨强成正比<sup>[67-69]</sup>，高低空急流及其向下的脉动指数与降水强度的增强有密切关系，低空急流向脉动的影响强于高空急流<sup>[70]</sup>。我国学者利用风

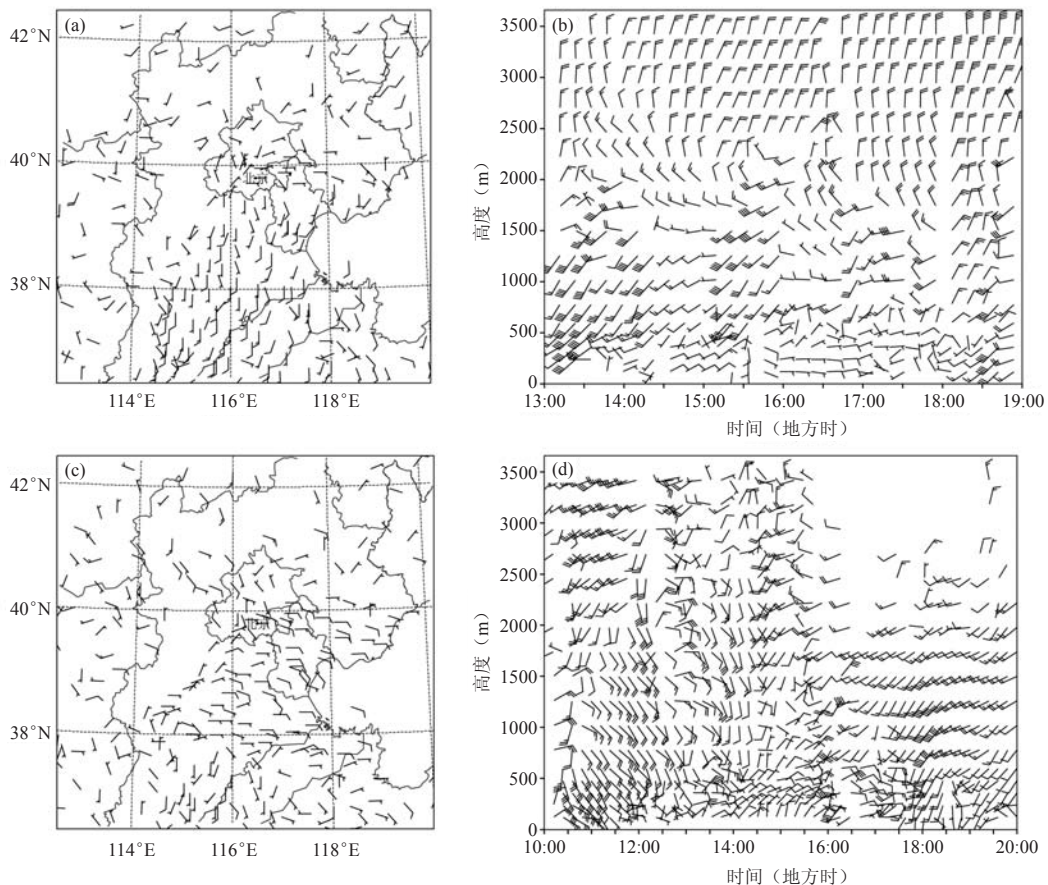


图4 与北京局地暴雨相联系的对流层低层偏东风不同结构<sup>[59]</sup>  
 (a、c为08时地面风观测；b、d为海淀站风廓线时间演变，单位：m/s)  
 (a) 浅薄偏东风个例；(b) 偏东风浅薄结构；(c) 深厚偏东风个例；(d) 偏东风深厚结构

廓线资料提取诸多的暴雨预警指标,如不同高度散度和涡度,结合微波辐射计数据,计算对流有效位能、K指数等动力、热力参数和风暴相对螺旋度等<sup>[71-72]</sup>。

风廓线雷达资料也支持数值预报和定量降水估算。中尺度模式数值试验表明:同化2分钟一次的风廓线雷达资料对降水的模拟有较明显的改善;风廓线雷达资料在进入模式之后,随模式的积分可以把其影响从低层带至高层,并扩展到较大的范围。同化风廓线雷达资料对风场、高度场和湿度场均有明显的改变,对温度场的影响较小<sup>[73]</sup>。降水的雨滴谱对于提高雷达定量测量降水的精度、研究降水机制和云结构很重要,可利用五波束风廓线雷达,通过连续方程求得各层垂直空气运动速度,根据垂直指向波束测出的功率谱导出雨滴谱;或假定雨滴谱为 $\Gamma$ 分布,根据垂直指向的多普勒雷达测得的回波强度、径向速度、多普勒谱宽求得雨滴谱参数<sup>[74]</sup>,来支持定量降水估算。

## 2.4 双偏振雷达云水粒子相态观测

双偏振雷达通过发射、接收水平和垂直偏振波,获得降水目标的水平偏振反射率和垂直偏振反射率之差,即差分反射率,其反映降水粒子在水平和垂直方向尺度大小的差异,可用于降水粒子形状、相态、雨滴和冰雹特征的识别。双偏振雷达的降水粒子相态以及粒子谱特征信息有效用于降水的定量测量订正,联合使用反射率因子和差分反射率反演降水强度,能进一步改善定量测量降水精度。美国已在十多部NEXRAD上进行了双线偏振技术升级改造,在2008—2009年我国南方暴雨野外科学试验(SCHeREX),2007—2013年长江中游梅雨锋暴雨外场试验观测和2013年“973”华南暴雨外场观测中,双偏振雷达探测的加入,加强了暴雨发生发展过程中云中粒子相态识别能力,并提高降水定量测量精度,进一步提高暴雨机理研究和预报与预警能力。

为提高双线偏振探测数据观测质量,国内针对反射率、差分反射率、传播相位、差分相位和相关系数等参数的精确观测,采用自测试校验关键技术确保双偏振通道的一致性<sup>[75]</sup>,通过标定消除系统误差,减小差分反射率因子测量误差<sup>[76]</sup>,建立差分相位质量控制算法,有效识别和消除差分相位数据中的地物杂波,退掉折叠的相位并滤除正常的随机差分相位波动<sup>[77]</sup>;为提高偏振天气雷达对降水观测和水成物识别能力,提高探测质量,如利用模糊逻辑来处理订正偏振参数<sup>[78]</sup>、采用移相器技术调节垂直通道与水平通道的相位差,合成所需要的任意偏振波(如倾斜45°线偏振、圆、椭圆偏振波)改进双偏振同时发射方式<sup>[79]</sup>等。

为提高双偏振雷达降水的估测精度,可在差分传播相移滤波中引入卡尔曼滤波,假设近地面降水粒子的主轴是水平取向,对稳定层状云降水进行衰减订正法<sup>[80]</sup>;或通过设置KDP的阈值,综合利用单位差分传播相移KDP订正法、ZH订正法<sup>[81]</sup>订正方法和固定系数对不同的降雨类型进行衰减订正<sup>[82]</sup>;或采用改进自适应约束算法<sup>[83-84]</sup>对双线偏振雷达进行反射率衰减进行有效订正,特别是当存在较大范围、含对流型降雨时,该订正方法可以明显提高降水的估测精度<sup>[85]</sup>。

双偏振雷达观测为降水系统的微物理结构研究提供了依据。双偏振雷达通过发射水平和垂直方向的电磁波以及采用不同的信号处理方式得到多种测量参数用于观测降水粒子的大小、形状、相态和空间上的翻滚,展现暴雨过程中水凝物转换的云微物理过程和变化特征。国内通过不同的雷达双偏振观测变量对不同降水粒子的敏感程度不同,使用不同的权重建立逻辑判断,不断改进模糊逻辑用于识别水凝物粒子类型,反演结果能较好地反映层状云降水的相态结构,验证了顾震潮<sup>[86]</sup>提出的层状云降水的三层模型,并联合双偏振雷达参数与地面温度反演温度廓线,区分雨滴和融化层之上的雨、冰混合物;大多数层状云表现为在均匀的层状云中有高低起伏的柱状回波镶嵌在其中,而其水凝物粒子的组成结构从上到下为冰晶(霰、干霰、湿霰、雪、过冷水等)、雨区等(图5)。最为显著的特征是霰的范围最大,雨水主要存在于云体的暖区,霰的融化和凝结碰并过程对雨水的形成起到了重要作用。分析认为对于层状冷云降水,冰相粒子的转化主导了整个降水过程,转化效率的高低决定了地面降水的大小<sup>[87]</sup>。通常建立的云粒子相态反演的模糊逻辑算法中的Beta型成员函数,包括:水平反射率因子、线性退偏比、差分反射率及温度0℃、-40℃对应高度等成员变量,反演出的相态有毛毛雨、雨、低密度干冰晶、高密度干冰晶、湿冰晶、干霰、湿霰、小冰雹、大冰雹、雨夹雪和液态水滴等11种,在降水不同阶段,水凝物粒子的演变不同:初始阶段层状云相态呈现分层结构,从上至下依次为高密度干冰晶、湿冰晶和液态水滴;初始阶段云体中的回波大值区核心区域为大的冰相粒子,其余部分为液态粒子;在初始到成熟的阶段演变中,回波大值区上部液态粒子逐步向冰相转化;消散阶段云中零度层亮带逐步消失,温度零度层以上云粒子结构呈现高密度干冰晶包裹湿冰晶的情况<sup>[88]</sup>。双偏振雷达测量参量的变化特征进一步证实了在暴雨形成过程中,由于在零度层以下冰相粒子融化成大雨滴然后再裂碎为小雨滴,形成零度层亮带的现象<sup>[89]</sup>。

## 2.5 毫米波双偏振雷达云观测

云的发生、发展的研究是提高灾害性天气预警预报能力的重要手段。毫米波测云雷达有较宽的多普勒带宽，多普勒效应明显，具有较好的多普勒分辨力，测速精度较高，受地面杂波影响较小，低空性能好，从几微米的云粒子到弱降水回波粒子都能够探测到，并且能够非常精细地探测云体的物理结构，是探测云发生发展及其演变的有效工具<sup>[90]</sup>。在观测非降水及弱降水云时，毫米波测云雷达的探测能力远高于天气雷达，尤其表现在远距离的弱回波探测；而对于较强的降水天气，毫米波测云雷达受衰减影响很大，需要考虑衰减订正。通过毫米波测云雷达观测得到的不同类型云的回波强度个例图分析得到：毫米波测云雷达具有较高的时空分辨率，能够穿透云粒子获得清晰的云水平和垂直结构，探测云的内部特征；能够观测到碎积云、淡积云、浓积云、层积云、雨层云等多类云以及这些云之间的相互演变过程。发展毫米波测云雷达能获取云量、云类等云参数，这些基本参数的获得将有助于研究云内液态水含量、云粒子的谱分布等征，特别是云中液态水含量的三维分布的定量测量，在云—辐射相互作用、暴雨形成研究等方面有重要意义<sup>[91]</sup>。

目前国内外云雷达的频段主要选择在35或94GHz，其对应的波长分别为约8或3mm，其中8mm波长云雷达适合观测非降水云、毛毛雨以及弱降水云系；3mm波长云雷达适合观测卷云。

2007年我国第一部用于天气研究的测云雷达系统诞生，该系统具有多普勒和极化功能，采用全相干体制、8mm波长、单发双收的极化体制，实现定向扫描；探测距离为30km，距离分辨率高达30m，雷达基数据中包括的参量分别为水平反射率因子、多普勒速度、速度谱宽、退极化因子等。中国气象科学研究院率先利用毫米波测云雷达对不同季节云型的观测，获

取了我国第一手关于层云、淡积云、层积云、台风外围云系、降水云、降雪云等不同云的高空间分辨率宏观结构特征信息<sup>[92]</sup>（图6）。在南方暴雨野外科学试验（SCHeREX计划，2008—2009年），长江中游梅雨锋暴雨外场试验（2007—2013年），青藏高原东部及下游关键区大气观测科学试验（2010年），以及“973”华南暴雨外场观测（2013年）中，我国研制的多部测云雷达相继参与观测试验并获取宝贵的信息。

我国毫米波测云雷达资料应用研究主要集中在雷达探测能力评测与宏观特征的反演，如云顶、云底高度的确定，融化层边界的识别等，微观特征的反演如云内云、冰含量的计算，云滴谱分布以及云层湍流结构变化，冰云、水云识别以及云内液态水含量和有效粒子半径大小等在进一步研究中。为提高毫米波多普勒雷达的观测质量，国内采用零速度带和高仰角观测特征相结合的方法对RHI进行退速度模糊<sup>[93]</sup>，利用改进的小粒子示踪法和云雷达反演的垂直速度，订正反演精度受湍流影响的问题<sup>[94]</sup>。融化层边界的识别可以为降水发展的微物理过程提供信息，对雷达观测的降水类型（雪或雨）识别以及降水定量估计非常重要，同样也是雷达水凝体分类、粒子等效半径反演、液水（冰水）含量反演算法的基础，是数值天气预报模式的数据同化、预报结果验证的观测依据之一。毫米波双偏振测云雷达融化层自动识别技术主要依赖于极化参量，包括差分反射率、正交相关系数、差分传播相移和线性退极化比等参量，因为这些参量在层云和对流云中都具有明显的融化层特征。此外，在反射率中没有亮带的情况下，极化参量对融化的水凝体也非常敏感，极化参量对融化层的敏感程度大于反射率因子<sup>[95]</sup>，结合云雷达垂直探测到的雷达反射率因子和极化参量（线性退极化比）的垂直廓线数据，并根据参量在融化层附近显著变化特性，可识别融化层高度和

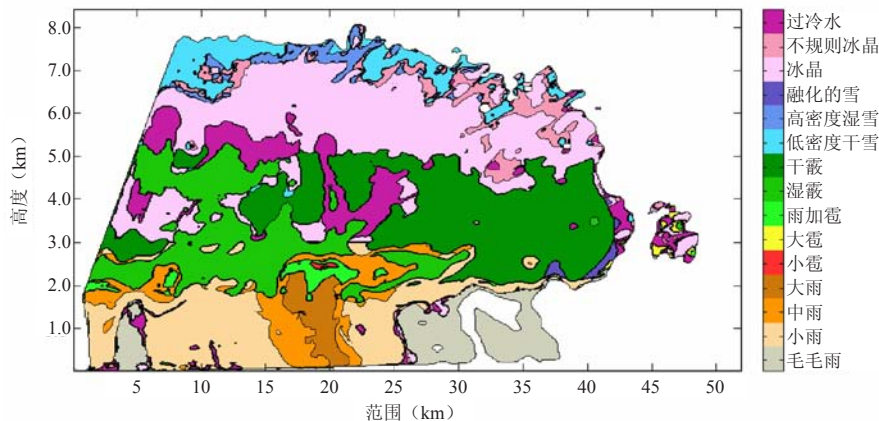


图5 2006年5月8日位于吉林伊通X波段多普勒双线极化雷达探测的云中水凝物粒子分布<sup>[87]</sup>

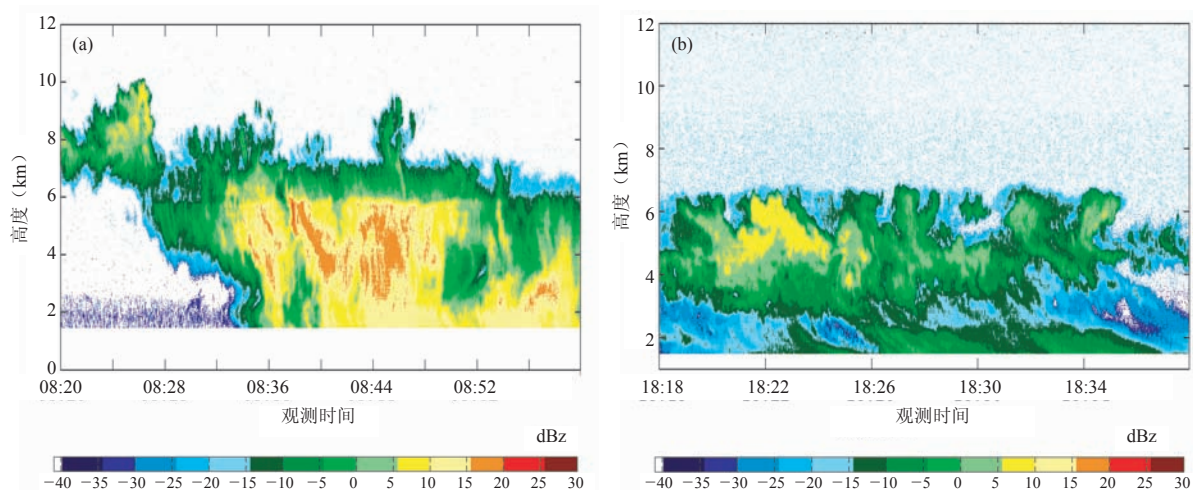


图6 毫米波测云雷达观测得到的不同云类型的回波强度<sup>[92]</sup>

- (a) 台风外围积雨云结构 (雷达位于台风中心左前沿, 内部嵌有正在发展的深对流系统, 5.9km高度存在零层亮带);  
 (b) 层积云 (降水前0.5h观测) 结构 (云顶云底较不均匀, 水平方向连成一片, 云厚达4km)

厚度, 自动识别的融化层上边界平均高度与探空实测偏差小于100m<sup>[96]</sup>。

## 2.6 暴雨综合观测与多源资料应用

暴雨野外科学观测试验是探索研究和解决暴雨预报诸多关键科学问题的基础支撑, 早期的试验完全基于气象业务观测系统<sup>[97]</sup>, 随着暴雨研究的需求的提高和暴雨新型探测技术的更新进步, 近年越来越多的非业务观测现代气象科技新型的设备融入到暴雨的联合观测中, 并逐渐显现出其重要作用。

2001—2002年, 在我国10多家气象科研院所和日本气象专家联合开展的“长江流域梅雨锋强暴雨外场试验”中, 华中、华东区域14个高空加密观测站和100多个地面加密观测站的业务观测网, 以及“风云一号”和“风云二号”卫星、2架无人驾驶遥测飞机、3个闪电记录仪、6部数字化天气雷达、8部多普勒雷达和8个GPS站等首次构成了地、空和天基立体综合观测系统, 长江中下游双多普勒雷达或三多普勒雷达观测系统获取了中尺度暴雨系统的三维立体结构; 立体综合观测形成中尺度暴雨三维结构气象信息的气象数据库, 并由此研制和发展了具有中国特色和拥有自主知识产权的最新的四维同化理论, 以及处理多种气象资料的数值预报模式。

2006年, 广东、广西、福建、湖南、江西五省(自治区)气象局以及香港、澳门两个特别行政区气象台联手开展“华南五省暴雨野外试验”, 首次对华南地区的中尺度灾害天气进行了车载多普勒雷达跟踪观测、车载风廓线仪与车载探空仪跟踪观测、机载下投式探空和机载毫米雷达观测。试验在上述观测区内

实施地面和探空站的时间加密观测, 包括: 9部多普勒雷达、10个业务探空站、169个地面站、600个自动气象站、FY-2C静止气象卫星以及若干个GPS水汽观测站组成的强大的中尺度观测网。此次试验建设了一个中尺度灾害天气三维跟踪观测基地, 实现了监测与预测在同一平台上互动与综合应用, 是我国在中尺度暴雨观测上的突破性尝试, 提升了对暴雨中尺度灾害天气监测、预测与预警的综合能力。

2008—2009年5—7月, 我国南方暴雨野外科学试验(SCHeREX计划)在华南、华中、江淮和长三角四个观测区内投入48个业务雷达、63个探空观测站、近60个GPS水汽观测站、2000个地面观测站和无人自动观测站以及5部车载雷达, 开展 $\beta$ 中尺度暴雨系统观测试验。首次启用车载双偏振多普勒雷达与云雷达等先进装备。这次试验将建立具有适应性功能的中尺度观测网, 获取具有 $\beta$ 中尺度分辨能力的观测资料; 我国首次探索在中尺度暴雨与台风观测中实施飞机下投式探空观测, 以及在局部区域内组织双多普勒雷达的同步观测, 全面提升对 $\beta$ 中尺度强对流系统的观测能力; 建立观测系统与预报系统的互动, 使野外试验资料能实时进入预报系统, 提高中尺度暴雨的预报水平<sup>[98]</sup>。

从2007年开始, 中国气象局武汉暴雨研究所每年汛期抓住有利时机, 组织实施空、地基立体式“长江中游梅雨锋暴雨外场试验”观测, 地基GPS网用于获取暴雨过程大气水汽变化; 微波辐射计获取暴雨过程中大气温度、湿度、水汽密度和液态水含量等随高度变化与分布特征; 移动探空和风廓线雷达追踪获取暴雨系统温度、压强、湿度和风的廓线资料; 移动双

偏振雷达获取暴雨对流云团内部的粒子相态变化特征，云雷达用于分析暴雨前云的结构变化，云间相互影响对暴雨形成的作用等。这些梅雨期对流层、边界层及地面层的立体观测数据，为进一步弄清梅雨期暴雨的形成机理和提高强降水的预报预测提供了良好的数据支撑。

2007和2010年中国气象局武汉暴雨研究所和成都高原气象研究所联合开展“青藏高原东部及下游关键区大气边界层科学试验前期预研究”。青藏高原的动力和热力作用对下游天气有着重要影响，高原低值系统的东移往往造成长江流域出现暴雨洪涝等灾害天气。基于长江中游暴雨外场试验基地新型探测系统，针对青藏高原对下游天气气候影响，完成了青藏高原对下游暴雨的作用的野外观测试验。并开展青藏高原东部及下游关键区大气边界层的观测分析等研究工作，分析了青藏高原及长江中游不同地形、不同季节大气边界层高度及其变化规律，评估主要边界层参数化方案对青藏高原及长江中游边界层高度的刻画能力和对预报降水的影响，建立边界层高度的修正模型，研究边界层物理过程对降水的影响机理。未来几年，将继续开展长江流域大气水汽和云的宏、微观结构的地基、飞机联合观测、利用同化技术等进一步研究高原及周边地区水汽输送对长江流域降水预报的影响，深入开展水汽与云的宏微观发生发展机制以及云参数化订正等研究。

上述各个时期的大型综合观测所积累的观测数据集是一个蕴藏丰富的宝库，值得广泛研究和深入挖掘。我国学者在如何综合使用多源观测数据上取得一定的进展。

利用微波辐射计探测的温湿度数据和风廓线仪探测的水平风数据构造特种探空资料。构造场要素与常规探空具有较一致的变化趋势，定性分析使用时可有效弥补常规探空时间分辨率低的不足，构造探空的温度和经向风、纬向风具有较好的定量使用价值，与温度廓线、低空风廓线相关的参量，如垂直温度梯度、0和-20℃层低空垂直风切变等参量的绝对误差很小，也具有很好的定量使用价值。与湿度相关的参量，如对流有效位能，假相当位温K数，湿度垂直梯度和温度露点差等参量存在不同程度的误差，是由于微波辐射计探测的相对湿度误差较大需要订正<sup>[99]</sup>。对于冰雹、雷暴大风和短时暴雨等三种不同强天气，构造探空与常规探空的热动力物理参量在中的表现基本一致。与常规探空相比，特种探空数据的时间分辨率高，各物理参量的变化特征表现更明显，能更详细地

描述强天气发生前后大气状态的变化。由特种探空计算的多种物理参量在不同强天气的酝酿、发展过程中差别明显，在强天气发生前36h的变化趋势尤其明显，对于上述三类强天气的判别具有明确的短时临近预报意义<sup>[100]</sup>。

多源资料综合应用于局地暴雨形成机理分析。长江中游暴雨外场试验基地的风廓线雷达、地基微波辐射计和常规观测分析显示，引发武汉“2011.6.9”局地短时强降水过程的是一个尾随层云类中尺度对流系统：降水开始前从风廓线上可见地面气压迅速降低，地面风速迅速增大，云底高度波动降低对流层中低层有显著倾斜上升气流，并在其前后形成两个小尺度涡旋，与冷池和风切变抗衡下新单体的生成模型相吻合<sup>[101]</sup>；基于北京市业务观测网以及风廓线网、微波辐射计、GPS水汽分布观测网等新型探测资料，我国学者精细分析了“2006.7.9”夜间香山局地大暴雨中的地形辐合回波带影响系统和风向切变、抬升、 $\gamma$ 中尺度气旋性3种辐合对 $\gamma$ 中尺度强降雨落区构成的动力影响机理、大暴雨落区形成的主要动力源和水汽输送能量来源<sup>[102]</sup>；认识了“2012.7.21”北京地区特大暴雨的中尺度对流条件主要包括非常充沛的水汽，一定的对流不稳定性，对流系统持续的“列车效应”，以及低质心、高效率的降雨对流系统；从风廓线产品与分钟雨量看出锋前暖区降雨的对流系统特征<sup>[103]</sup>；对比分析了北京“2008.8.14”和“2009.7.13”两次突发性强对流局地暴雨形成差异（图7）：从水平风垂直廓线可以看出这两次降水过程的动力机制有很大不同，“2009.7.13”开始时是深厚的暖湿气流、冷空气高空侵入和结束时整层冷空气下沉的前倾槽结构；“2008.8.14”是东风被近地面的东北风强迫抬升。“2009.7.13”的冷空气从高空入侵，降温从高空开始，造成上层干冷，下层暖湿的层结，使得对流发展；“2008.8.14”冷空气从近地面楔入暖空气（东南风）之下，造成暖湿空气被抬升，使对流发展。在预报中要关注水平风的垂直廓线，当低空急流加强，或有扰动生成，高空有波动等都预示着天气的转变<sup>[104]</sup>；比较分析北京“2006.6.27”两个局地暴雨，结果显示微波辐射计液态水含量的集聚增减过程，预示着降水的即将出现和消亡；风廓线雷达揭示了影响系统的风场细节特征，中低层的风切变以及降水前低层的暖平流和小尺度低涡环流，这种系统结构和配置对降水的形成和维持有重要作用<sup>[105]</sup>。

### 3 存在的问题

尽管上述非常规探测资料在反演技术、暴雨形成

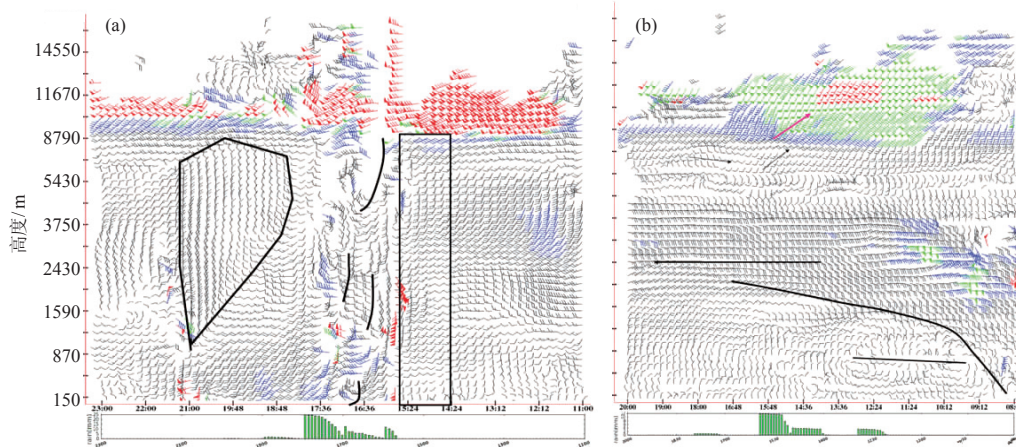


图7 北京南郊观象台水平风垂直分布廓线图<sup>[104]</sup>

(a) 2009年7月13日11—23时, 间隔12min; (b) 2008年8月14日08—20时, 间隔12min

(图中横坐标下的绿色柱状线为南郊观象台自动站每小时5min降水量累加值, a中黑色方框区域显示的是高低空偏南风打通的时段, 黑色多边形区域则显示干冷空气入侵的时间段, 短粗黑实线为切变线; b中黑色粗实线为切变线, 黑色或红色箭头示意风向)

机理、改善模式预报等方面有一定的研究进展, 但距离深入研究和投入业务应用仍然还存在一定的差距。主要表现在以下几方面。

(1) 资料的质量控制技术需要在线能力, 对于资料精度的描述缺乏标准性。前面介绍的暴雨新型资料反演技术, 展示了我国学者在提高资料质量方面的努力, 但天气分析和模式运行等业务应用需要在线、优质与稳定的各级资料。此外, 掌握不同资料的精度是气象观测资料应用的必要前提, 但从目前研究成果看, 即使是对于同一资料, 其精度的描述也不尽相同, 有平均偏差、偏差均方差、偏离率等, 缺乏统一标准, 有待根据业务应用需求进行规范。

(2) 非常规观测资料在天气分析的业务预警预报中应用效率不高, 二次产品开发是瓶颈之一。目前新型探测资料二次开发利用, 还处于初步阶段, 远不能满足预报员的实际需求。预报员希望在第一时间直接使用这些高密度精细的新型探测信息, 如果基于非常规观测资料能反演出一些有天气意义的、预报员日常惯用的物理量指标, 并集中于一个平台, 将大大提高资料的业务应用效益。

(3) 基于非常规观测的科学布网研究有待关注与加强。非常规观测研究是业务观测的预研究阶段, 为以后设备纳入业务观测和应用提供科学依据和技术储备, 有待通过中尺度模式的敏感性试验确定预报敏感区域、不同探测区域的布点空间分辨率、设备选型搭配等设计。

(4) 包含非常规观测的多源资料的综合应用和深层次的挖掘不够。目前高时空分辨率、高精度的新

型探测设备如风廓线雷达、GNSS/MET和微波辐射计等主要通过数值模式改善初始场提高模式预报质量, 但对于多源资料的融合和再构造, 有待找到时空上的合理匹配, 不同精度观测的取舍, 以及站点数据网格化等科学的技术方法; 如何利用新型的云观测、水汽观测和风廓线观测开展模式核心技术(如云参数化、边界层参数化)的研究和改进, 需要做深入的挖掘。

#### 4 新型探测资料应用未来发展趋势

从我国常规气象观测如探空、地面自动站、业务雷达等从新建到现代无障碍业务应用的发展历程, 从目前国际发达国家在气象探测资料方面的管理与应用看, 围绕新型探测资料在暴雨预报研究中的应用, 我国在未来10年将开展如下方面的工作。

(1) 新型资料的规范化、系统化管理。从20世纪末至今, 我国利用多种探测设备在华南、华中、华北、江淮以及青藏高原组织开展了气象综合观测科学试验, 并建立了较为详实的数据集。基于建立这些外场观测数据集的经验, 非常规观测的数据管理, 将逐年向数据准确化、归纳合理化、调用方便化发展, 并针对不同的数据发展反演技术, 建立质量控制评估系统, 为资料用户提供高精度的资料和资料的可用性评价。

(2) 应天气分析业务应用需求, 推进新型探测资料的二次产品开发。新型探测资料在出现初期往往多用于天气个例的特征分析, 定性用于中小尺度分析和精细化的强天气预警。新型探测资料的定量使用有待二次产品的开发, 一是依赖于大样本的分析统计, 针对不同类型天气系统提炼的预警指标才能经得住检验, 有较好的实用性。二是将各种探测的温度、湿

度、风、双偏振量等参数转换为垂直温度梯度、低空垂直切变、对流有效位能、500与850hPa的假相当位温差、K指数、湿度梯度和温度露点差等热力、动力稳定度、水汽输送、定量降水测量等参数，便于预报员直接使用。三是将多种观测信息直接集中在一个平台进行实时处理与显示，便于预报前线人员第一时间调用。

(3) 与机理研究和数值模式的需求相衔接，实现目标化观测。不同于常规业务观测，新型探测资料具备对暴雨过程更细致的描述、更精细化的采样等优势。基于常规观测业务体系和精细化的暴雨新型探测系统，已经可以深入开展大背景天气系统下、中小尺度的天气系统的相互影响和暴雨的发生发展机理研究、地形对暴雨的影响研究，可以深入开展云内部水汽、云水和水成物之间的微物理转化研究，加强了暴雨形成机理分析，也为中尺度数值预报的边界层参数化、云参数化等数值方案的改进提供了良好条件。因此，暴雨综合观测科学试验中新型探测资料的获取，越来越与解决暴雨机理研究关键问题，或改进数值模式中重要物理模型等目标紧密衔接，做到目标化观测。

(4) 暴雨新型探测资料的深度应用并开拓新应用领域。主要体现于：全方位、精细地对重要暴雨天气特征和形成机理进行精细化研究分析；基于风廓线、大气水汽、云、温度等观测，在模式云参数化、边界层参数化等核心技术方面有突破；改进多源资料融合技术，加入新的精细化小尺度观测，改善模式预报初始场，提高模式预报能力；进一步从新型探测资料大样本数据集的天气系统分析中，提取临近预报预警指标，为强天气预报预警服务提供新的有效依据。随着新型探测资料的长时间序列的累计，这些高精度、高时空分辨率资料也将会在气候变化、云水资源评估、环境监测与预报等方面发挥各自的作用。

#### 参考文献

- [1] 陶诗言. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980.
- [2] Duan J, Bevis M, Fang P. GPS meteorology: Direct estimation of the absolute value of precipitable water. *J Appl Meteorol*, 1996, 35: 830-838.
- [3] Shi C, Zhao Q L, Li M, et al. Precise orbit determination of Beidou Satellites with precise positioning. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(7): 1079-1086.
- [4] 李国翠, 李国平, 杜成华, 等. 华北地区地基GPS水汽反演中加权平均温度模型研究. *南京气象学院学报*, 2009, 32(1): 80-86.
- [5] 谷晓平, 王长耀, 吴登秀. GPS水汽遥感中的大气加权平均温度的变化特征及局地算法研究. *气象科学*, 2005, 25(1): 79-83.
- [6] 徐桂荣, 陈波, 万蓉, 等. 地基GPS不同水汽反演方法的误差分析. *暴雨灾害*, 2008, 27(4): 346-350.
- [7] 龚绍琦. 中国区域大气加权平均温度的时空变化及模型. *应用气象学报*, 2013, 24(3): 332-341.
- [8] 徐桂荣, 万蓉, 李武阶, 等. 地基GPS反演大气可降水量方法的改进. *暴雨灾害*, 2009, 28(3): 203-209.
- [9] 袁招洪, 丁金才, 陈敏. GPS观测资料应用于中尺度数值预报模式的初步研究. *气象学报*, 2004, 62(2): 200-212.
- [10] 柳典, 刘晓阳. 地基GPS遥感观测北京地区水汽变化特征. *应用气象学报*, 2009, 20(3): 346-353.
- [11] 曹晓岗, 丁金才, 叶其欣, 等. 利用水汽总量资料诊断入梅时间的方法. *应用气象学报*, 2007, 18(6): 791-801.
- [12] 曹云昌, 方宗义, 夏青. GPS遥感的大气可降水量与局地降水关系的初步分析. *应用气象学报*, 2005, 16(1): 54-59.
- [13] 孙建华, 张小玲, 齐琳琳, 等. 2002年6月20—24日梅雨锋中尺度对流系统发生发展分析. *气象学报*, 2004, 62(4): 423-438.
- [14] 叶其欣, 杨露华, 丁金才, 等. GPS/PWV资料在强对流天气系统中的特征分析. *暴雨灾害*, 2008, 27(2): 141-148.
- [15] 杨红梅, 何平, 徐宝祥. 用GPS资料分析华南暴雨的水汽特征. *气象*, 2002, 28(5): 17-21.
- [16] 丁金才, 黄炎, 叶其欣, 等. 2002年台风Ramasun影响华东沿海期间可降水量的GPS观测和分析. *大气科学*, 2004, 28(4): 613-624.
- [17] 郝丽萍, 邓佳, 李国平, 等. 一次西南涡持续暴雨的GPS大气水汽总量特征. *应用气象学报*, 2013, 24(2): 230-239.
- [18] 陈娇娜, 李国平, 黄文诗, 等. 华西秋雨天气过程中GPS遥感水汽总量演变特征. *应用气象学报*, 2009, 20(6): 753-760.
- [19] 姚建群, 丁金才, 王坚捍, 等. 用GPS可降水量资料对一次大一暴雨过程的分析. *气象*, 2005, 31(4): 48-52.
- [20] 袁招洪, 丁金才, 陈永林. 中尺度数值预报模式预报水汽与GPS观测的比较研究. *大气科学*, 2004, 28(3): 433-440.
- [21] 袁招洪. GPS可降水量资料应用于MM5模式的变分同化试验. *气象学报*, 2005, 63(4): 391-404.
- [22] 楚艳丽, 郭英华, 张朝林, 等. 地基GPS水汽资料在北京“7·10”暴雨过程研究中的应用. *气象*, 2007, 33(12): 16-22.
- [23] 张朝林, 陈敏. “00.7”北京特大暴雨模拟中气象资料同化作用的评估. *气象学报*, 2005, 63(6): 922-932.
- [24] 丁金才, 袁招洪, 杨引明, 等. GPS/PWV资料三维变分同化改进MM5降水预报连续试验的评估. *气象*, 2007, 33(6): 11-18.
- [25] 陈敏, 范水勇, 仲跻芹. 全球定位系统的可降水量资料在北京地区快速更新循环系统中的同化试验. *气象学报*, 2010, 68(4): 450-463.
- [26] 李红莉, 万蓉, 谢有才. 利用LAPS系统同化地基GPS水汽资料的应用研究. *热带气象学报*, 2010, 26(6): 702-709.
- [27] 曹云昌, 陈永奇, 李炳华, 等. 利用地基GPS测量大气水汽廓线的方法. *气象科技*, 2006, 34(3): 241-245.
- [28] 宋淑丽, 朱文耀, 程宗颐, 等. GPS信号斜路径方向水汽含量的计算方法. *天文学报*, 2004, 45(3): 338-345.
- [29] 毕研盟, 毛节奏, 李成才, 等. 利用GPS的倾斜路径观测暴雨过程中的水汽空间分布. *大气科学*, 2006, 30(6): 1169-1176.
- [30] 宋淑丽, 朱文耀, 丁金才, 等. 上海GPS层析水汽三维分布改善数值预报湿度场. *科学通报*, 2005, 50(20): 2271-2277.
- [31] 张双成, 叶世榕, 万蓉, 等. 基于Kalman滤波的断层扫描初步层析水汽折射率分布. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2008, 33(8): 797-799.
- [32] 万蓉, 郑国光, 于胜杰, 等. 基于观测约束的地基GPS三维水汽层析技术研究. *气象学报*, 2013, 71(2): 318-331.
- [33] 毕研盟, 毛节奏, 毛辉. 海南GPS网探测对流层水汽廓线的试验研究. *应用气象学报*, 2008, 19(4): 412-419.
- [34] 李佳英. 利用高分辨率中尺度模式和地基GPS资料构造高时空分辨率的大气湿度廓线. 北京: 中国气象科学研究院, 2006.
- [35] 刘红燕. 三年地基微波辐射计观测温度廓线的精度分析. *气象学报*, 2011, 69(4): 719-728.
- [36] 刘红燕, 王迎春, 王京丽, 等. 由地基微波辐射计测量得到的北京地区水汽特性的初步分析. *大气科学*, 2009, 33(2): 388-396.
- [37] 刘建忠, 何晖, 张蕾. 不同时次地基微波辐射计反演产品评估. *气象科技*, 2012, 40(3): 332-339.
- [38] 徐桂荣, 孙振添, 李武阶, 等. 地基微波辐射计与GPS无线电探空和GPS/MET的观测对比分析. *暴雨灾害*, 2010, 29(4): 315-321.
- [39] 张文刚, 徐桂荣, 廖可文, 等. 降水对地基微波辐射计反演误差的影响. *暴雨灾害*, 2013, 32(1): 70-76.
- [40] 潘旭光. 地基微波辐射计资料的质量控制方法及其应用研究. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
- [41] Liljegren J C, Clothiaux E E, Mace G G, et al. A new retrieval for cloud liquid water path using a ground-based microwave radiometer and measurements of cloud temperature. *J Geoph Res*, 2001, 106: 14485-14500.
- [42] 黄建平, 何敏, 阎虹如, 等. 利用地基微波辐射计反演兰州地区

- 液态云水路径和可降水量的初步研究. 大气科学, 2012, 34(3): 548-558.
- [43] 金德镇, 雷恒池, 谷淑芳, 等. 机载微波辐射计测云中液态含水量. 气象学报, 2004, 62(6): 868-874.
- [44] 张志红, 周毓荃. 一次降水过程云液态水和降水演变特征的综合观测分析. 气象, 2010, 36(3): 83-89.
- [45] 李铁林, 刘金华, 刘艳华, 等. 利用双频微波辐射计测空中水汽和云液水含量的个例分析. 气象, 2007, 33(12): 62-69.
- [46] 唐仁茂, 李德俊, 向玉春, 等. 地基微波辐射计对咸宁一次冰雹天气过程的监测分析. 气象学报, 2012, 70(4): 806-813.
- [47] 敖雪, 王振会, 徐桂荣, 等. 地基微波辐射计资料在降水分析中的应用. 暴雨灾害, 2011, 30(4): 358-365.
- [48] 王叶红, 赖宏伟, 赵玉春. 地基微波辐射计资料同化对一次特大暴雨过程影响的数值试验研究. 暴雨灾害, 2010, 29(3): 201-207.
- [49] Wu L, Zhou X H, Wang F R. Primary analysis of the comparison test of wind profilers Made in China. International Conference on Information Science and Technology (ICIST 2011), 2011, Nanjing, China.
- [50] 邓闯, 阮征, 魏鸣, 等. 风廓线雷达测风精度评估. 应用气象学报, 2012, 23(5): 528-533.
- [51] 吴志根, 徐同, 丁若洋, 等. 上海组网边界层风廓线雷达与宝山二次雷达测风数据比较分析. 气象, 2013, 39(3): 370-376.
- [52] 万蓉, 周志敏, 崔春光, 等. 风廓线雷达资料与探空资料的对比分析. 暴雨灾害, 2011, 30(2): 130-136.
- [53] 惠建新, 吴蕾, 高玉春, 等. 基于极大似然算法的风廓线雷达谱矩估计. 气象科技, 2012, 40(1): 9-14.
- [54] 何平, 李柏, 吴蕾, 等. 确定风廓线雷达功率谱噪声功率方法. 应用气象学报, 2013, 24(3): 297-303.
- [55] 阮征, 葛润生, 吴志根. 风廓线仪探测降水云体结构方法的研究. 应用气象学报, 2002, 13(3): 330-338.
- [56] 董保举, 付志嘉, 李明, 等. 风廓线雷达资料在暴雨天气过程特征分析中的应用. 气象科技, 2012, 40(1): 74-78.
- [57] 阮征, 何平, 葛润生. 风廓线雷达对大气折射率结构常数的探测研究. 大气科学, 2008, 32(1): 133-140.
- [58] 孙继松, 杨波. 地形与城市环流共同作用下的中尺度暴雨. 大气科学, 2008, 32(6): 1352-1364.
- [59] 张文龙, 崔晓鹏, 王迎春, 等. 对流层低层偏东风对北京局地暴雨的作用. 大气科学, 2013, 37(4): 829-840.
- [60] 王丛梅, 吴智杰, 刘瑾, 等. 城市短时强降雨中尺度观测特征分析. 气象科技, 2011, 39(6): 678-684.
- [61] 丁青兰, 王令, 卞素芬. 北京局地降水云中地形和边界层辐合线的作用. 气象科技, 2009, 37(2): 152-155.
- [62] 古红萍, 马舒庆, 王迎春, 等. 边界层风廓线雷达资料在北京夏季强降水天气分析中的作用. 气象科技, 2008, 36(3): 300-304.
- [63] 周志敏, 万蓉, 崔春光, 等. 风廓线雷达资料在一次冰雹过程分析中的应用. 暴雨灾害, 2010, 29(3): 251-256.
- [64] 黄钰, 阮征, 葛润生, 等. 2010年夏季北京零度层亮带特征统计. 气象, 2013, 39(6): 704-709.
- [65] 何平, 马颖, 阮征, 等. 晴空热对流泡的风廓线雷达探测研究. 气象学报, 2010, 68(2): 264-269.
- [66] 张朝林, 王迎春. 北京地区风廓线仪布网方案的数值研究. 气象学报, 2002, 60(6): 786-791.
- [67] 刘淑媛, 郑永光, 陶祖钰. 利用风廓线雷达资料分析低空急流与暴雨的关系. 热带气象学报, 2003, 19(3): 285-290.
- [68] 曹春燕, 江崑, 孙向明. 一次大暴雨过程低空急流脉动与强降水关系分析. 气象, 2006, 32(6): 102-106.
- [69] 金巍, 曲岩, 姚秀萍, 等. 一次大暴雨过程中低空急流演变与强降水的关系. 气象, 2007, 33(12): 31-38.
- [70] 张京英, 漆梁波, 王庆华. 用雷达风廓线产品分析一次暴雨与高低空急流的关系. 气象, 2005, 31(12): 41-45.
- [71] 杨波, 魏东. 二次开发风廓线探空资料及其在天气预报中的应用. 气象科技, 2010, 38(4): 413-419.
- [72] 王丽荣, 胡志群, 匡顺四. 应用雷达产品计算风暴相对螺旋度. 气象, 2006, 32(4): 45-51.
- [73] 古红萍. 风廓线雷达资料在北京夏季强降水天气中的分析和应用及数值模拟. 北京: 中国气象科学研究院, 2007.
- [74] 黄伟, 张沛源, 葛润生. 风廓线雷达估测雨滴谱参数. 气象科技, 2002, 30(6): 234-238.
- [75] 吴志根, 杨礼敏, 王勤典, 等. 移动X波段双线偏振多普勒气象雷达及其关键技术分析. 气象, 2010, 36(8): 126-133.
- [76] 魏洪峰, 薛振刚. 双偏振多普勒天气雷达差分反射率因子的测量误差. 气象科技, 2008, 36(2): 223-227.
- [77] 肖艳姣, 王斌, 陈晓辉, 等. 移动X波段双偏振多普勒天气雷达差分相位数据质量控制. 高原气象, 2012, 31(1): 223-230.
- [78] 曹俊武, 刘黎平, 陈晓辉, 等. 3836C波段双线偏振多普勒雷达及其在一次降水过程中的应用研究. 应用气象学报, 2006, 17(2): 192-201.
- [79] 梁海河, 徐宝祥, 刘黎平, 等. 双偏振天气雷达同时收发模式的一种改进方法. 大气科学, 2006, 30(4): 635-644.
- [80] 何宇翔, 吕达仁, 肖辉, 等. X波段雷达双线极化雷达反射率的衰减订正. 大气科学, 2009, 33(5): 1027-1037.
- [81] Brangi V N. Correcting C-band radar reflectivity and differential reflectivity data for rain attenuation: A self-consistent method with constraints. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2001, 39 (9): 1906-1915.
- [82] 胡志群, 刘黎平, 楚荣忠, 等. X波段双线偏振雷达不同衰减订正方法对比及其对降水估测影响研究. 气象学报, 2008, 66(2): 251-261.
- [83] Brangi V N, Chandrasekar V. Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [84] Park S G, Brangi V N, Chandrasekar V, et al. Correction of radar reflectivity and differential reflectivity for rain attenuation at X band. Part I, Theoretical and empirical basis. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2005, 22 (11): 1621-1632.
- [85] 毕永恒, 刘锦丽, 段树, 等. X波段双线偏振气象雷达反射率的衰减订正. 大气科学, 2012, 36(3): 495-506.
- [86] 顾震潮. 云雾降水物理基础. 北京: 科学出版社, 1980.
- [87] 何宇翔, 肖辉, 吕达仁. 利用极化雷达分析层状云中水凝物粒子性状分布. 大气科学, 2010, 34(1): 23-34.
- [88] 程周杰, 刘宪勋, 朱亚平. 双偏振雷达对一次水凝物相态演变过程的分析. 应用气象学报, 2009, 20(5): 594-601.
- [89] 曹俊武, 刘黎平, 陈晓辉, 等. 3836C波段双线偏振多普勒雷达及其在一次降水过程中的应用研究. 应用气象学报, 2006, 17(2): 192-201.
- [90] 仲凌志, 刘黎平, 葛润生. 毫米波测云雷达的特点及其研究现状与展望. 地球科学进展, 2009, 24(4): 383-391.
- [91] 仲凌志, 刘黎平, 葛润生, 等. 毫米波测云雷达的系统定标和探测能力研究. 气象学报, 2011, 69(2): 352-362.
- [92] 刘黎平, 仲凌志, 江源, 等. 毫米波测云雷达系统及其外场试验结果初步分析. 气象科技, 2009, 37(5): 567-571.
- [93] 宋立雪, 魏鸣, 宋继堂. 毫米波多普勒雷达RHI退速度模糊研究. 气象科技, 2012, 40(4): 542-547.
- [94] 彭亮, 陈洪滨, 李柏. 3mm多普勒云雷达测量反演云内空气垂直速度的研究. 大气科学, 2012, 36(1): 1-10.
- [95] 王德旺, 刘黎平, 仲凌志, 等. 毫米波雷达资料融化层亮带特征的分析及识别. 气象, 2012, 38(6): 712-721.
- [96] 孙晓光, 刘宪勋, 贺宏兵, 等. 毫米波测云雷达融化层自动识别技术. 气象, 2011, 37(6): 720-726.
- [97] 陶诗言, 周秀骥, 等. 20世纪中国学术大典——大气科学. 福州: 福建教育出版社, 2002.
- [98] 倪允琪, 张人禾, 刘黎平, 等. 中国南方暴雨野外科学试验(SCHeREX). 北京: 气象出版社, 2013.
- [99] 魏东, 孙继松, 雷蕾, 等. 用微波辐射计和风廓线资料构建探空资料的定量应用可靠性分析. 气候与环境研究, 2011, 16(6): 697-706.
- [100] 魏东, 孙继松, 雷蕾, 等. 三种探空资料在各类强对流天气中的应用对比分析. 气象, 2011, 37(4): 412-422.
- [101] 汪小康, 王晓芳, 崔春光, 等. 用新型探测资料分析武汉一次短时强降水过程的中尺度对流系统. 暴雨灾害, 2012, 31(4): 321-327.
- [102] 郭彪, 段雨, 杨波, 等. 0679香山局地大暴雨的中小尺度天气分析. 应用气象学报, 2008, 19(3): 265-275.
- [103] 方翀, 毛冬艳, 张小雯, 等. 2012年7月21日北京地区特大暴雨中尺度对流条件和特征初步分析. 气象, 2012, 38(10): 1278-1287.
- [104] 王令, 王国荣, 孙秀忠, 等. 应用多种探测资料对比分析两次突发性局地强降水. 气象, 2012, 38(3): 281-290.
- [105] 郑祚芳, 刘红燕, 张秀丽. 局地强对流天气分析中非常规探测资料应用. 气象科技, 2009, 37(2): 243-247.

# 暴雨中尺度过程研究进展

赵玉春

(中国气象局武汉暴雨研究所 暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430074)

**摘要:** 对暴雨中尺度过程的几个重要方面进行了简要回顾, 主要包括: (1) 暴雨对流系统的组织特征和分类, 以及不同组织类型对流系统的结构及其形成机制, 尤其是新对流单体再生和层状降水形成的原因; (2) 暴雨对流系统的启动机制、组织和维持机理; (3) 地形对暴雨对流系统发生发展和降水效率的影响及其内在的物理机制, 线性理论的局限性以及地形影响的复杂性和非线性; (4) 暴雨对流系统的日变化特征、区域性差异及其不同的形成机制等。最后对有待深入研究的主要科学问题进行了简要的讨论。

**关键词:** 暴雨, 对流, 地形, 日变化

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.02.004

## Research Progress on Mesoscale Processes of Heavy Rain

Zhao Yuchun

(Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430074)

**Abstract:** A preliminary review is conducted on the mesoscale processes of heavy rain, mainly including: (1) the organizational features and classification of heavy-rain-producing convective system, the structure and formation mechanism of different convective systems, especially the cause of new convective cell regeneration and stratiform precipitation formation; (2) the initiation, organization and maintenance mechanism of heavy-rain-producing convective system; (3) the effects of the topography on the initiation and development of heavy-rain-producing convective system and its precipitation efficiency, the related internal physical principles, the limitation of topographical linear theory and the nonlinearity and complexity of topographical effects; (4) the diurnal features, regional differences and its different formation mechanisms of heavy-rain-producing convective system. Lastly, the main scientific issues needed to be further investigated are discussed.

**Keywords:** heavy rain, convection, topography, diurnal variation

### 1 引言

目前, 我国乃至世界各国气象预报中心的暴雨业务预报水平仍比较低, 远不能满足暴雨洪涝防灾减灾的需求。数值模式的定时、定点和定量预报水平在很大程度上决定了暴雨业务预报水平, 而目前数值模式(无论是全球模式还是区域模式)对暴雨, 尤其是对流暴雨的定时、定点和定量的预报能力有限, 归根结底是因为数值模式还不能较为准确地预报出引发暴雨的中尺度对流系统发生发展过程。数值模式要准确地预报出对流暴雨, 必须准确地预报出暴雨中尺度对流系统的启动、组织、发展和维持等过程。然而, 由于大气运动的复杂性和非线性, 暴雨对流系统的多尺

度特征, 加之复杂地形和具有日变化的大气辐射过程的影响, 暴雨中尺度对流系统的启动、组织、发展和维持等物理机制极为复杂, 气象学家们对暴雨中尺度对流系统发生发展物理机制上的认识还远不能满足数值预报模式发展的需要, 即数值预报模式还不能准确地科学地刻画出暴雨中尺度对流系统的启动、组织、发展和维持等复杂的物理过程。因此, 有必要加深暴雨中尺度过程研究。暴雨中尺度过程涉及暴雨中尺度对流系统的启动、组织、发展、维持和消亡等过程, 下面主要从暴雨对流系统的组织结构与分类, 暴雨对流系统的启动、组织和维持, 地形对暴雨对流系统的影响, 暴雨对流系统的日变化及其形成机制等进行简要的回顾, 并提出有待进一步研究的主要科学问题。有必要指出的是, 台风暴雨有其特殊性, 故本文主要内容暂不包括台风暴雨。

### 2 暴雨对流系统的组织结构与分类

业务预报与研究中发现, 引发暴雨的中尺度对流

收稿日期: 2013年9月30日; 修回日期: 2014年1月20日  
第一作者: 赵玉春(1972-), Email: zhaoych@cma.gov.cn  
资助信息: 公益性气象行业专项(GYHY201206003, GYHY201106003); 国家自然科学基金项目(41075038, 40930951)

系统 (MCS) 在雷达回波图像上呈现出一定的组织结构形态, 可分为线状和非线状, 其中线状的MCS具有明显的组织结构特征, 在雷达回波图像上往往表现出线状结构, 而非线状的MCS组织结构不明显, 其在雷达图像上往往表现为混合性降水回波, 或者无组织结构的对流单体嵌套在层状降水回波中。对于线状MCS, 国外气象学家根据雷达回波图像上对流降水回波和层状降水回波的组织特征、对流单体的产生以及单体移动的方向等, 将其分为层状前导MCS (LS)、尾随层状MCS (TS) 和平行层状MCS (PS) (图1)<sup>[1-2]</sup>; 之后, 又有学者定义了两类准静止的MCS, 即后向建立MCS (BB) 和邻接层状MCS (TL/AS)<sup>[3-5]</sup>。王晓芳等<sup>[6]</sup>对长江流域暴雨中尺度对流系统通过雷达图像的统计分析发现, 我国长江流域夏季除了国外提出的TS、LS、PS、BB、TL/AS等线状对流系统外, 还存在着一些新的线状对流系统, 如嵌套线状MCS (EL) 等。Zheng等<sup>[7]</sup>通过研究我国中东部地区的MCS, 认为除了TS、LS、PS和EL几种类型的线状对流系统外, 弓状回波 (BE) 和无层状降水的对流线 (NS) 也属于线状对流系统。

目前, 已有一些理论和物理图像提出来解释不同类型线状对流系统形成的原因。Smith等<sup>[8]</sup>观测分析和数值模拟的结果表明, TS MCS的尾随层状降水的形成是中高层对流系统前部到尾部的上升气流对水物质输送的结果。Parker等<sup>[9]</sup>认为中高层切变对于对流系统上升支的倾斜和LS MCS的结构有着重要的作用, 前导层状降水的出现有利于对流系统的维持, 因为对流线前部降水区的入流由于抬升以及蒸发和融化的垂直

分布使得该区域变得不稳定。Parker<sup>[10]</sup>进一步指出, PS MCS的后向建立和平行于对流线降水的发展很大程度上是由环境风垂直切变造成的, 高层平行于对流线的气流对水物质的输送是平行层状降水形成的重要原因。最近的数值模拟研究发现, 不同类型线状对流系统的形成和传播主要与风垂直切变、平均气流、地面冷池和重力波等因子有关, 其中垂直和平行于对流线的低层风垂直切变在很大程度上决定线状对流系统的组织结构形态, 而对流降水系统形成的地面冷池和产生的重力波是激发新的对流单体的主要动力机制, 因而对流系统的传播方向在很大程度上由这两个因子共同决定, 而中低层的平均气流的方向决定单体的移动方向, 层状降水回波的形成则与高空气流对冰相粒子的平流输送和老的对流单体减弱为层状降水有关。

### 3 暴雨对流系统的启动、组织和维持

关于对流降水的启动, 大量研究揭示了大气中多种动力效应在对流降水启动中的重要作用。如天气尺度强迫<sup>[11]</sup>、重力波<sup>[12-13]</sup>、重力流<sup>[14]</sup>、海陆风<sup>[15]</sup>、低层中尺度切变线和辐合线<sup>[16]</sup>、冷边界出流<sup>[17]</sup>和对流流出边界<sup>[18]</sup>等。地形的动力和热力效应在对流的触发中也扮演着重要的角色, 如地形重力波和山脉背风波<sup>[19]</sup>、地面非均匀性诱生的热力环流<sup>[20]</sup>、背风坡辐合<sup>[21]</sup>、地形阻挡急流<sup>[22]</sup>等。

对于具有明显组织化特征的长生命史的中尺度对流系统, 国外也提出了天气尺度急流<sup>[23]</sup>、水平风切变不稳定<sup>[24]</sup>、干空气侵入<sup>[25]</sup>、辐射与对流相互作用<sup>[26]</sup>、垂直风切变<sup>[27]</sup>、冷池<sup>[28]</sup>以及惯性重力波<sup>[29]</sup>等机制来进行解释。

近年来的研究发现, 我国暴雨中尺度对流系统与北美发现的线性对流系统的组织特征存在着一定的差异<sup>[30]</sup>, 这意味着该地区对流系统的发展可能存在着不同的组织机制<sup>[31]</sup>, 国外现有的理论和研究成果并不能照搬来解释我国夏季对流降水的组织和形成机制, 暴雨中尺度对流系统 (尤其是梅雨锋上和华南暖区的暴雨中尺度对流系统) 的组织、维持和传播机制还有待深入研究<sup>[32]</sup>。

### 4 地形对暴雨对流系统的影响

我国属暴雨频发和多发地区, 暴雨引发的自然灾害往往给我国国民经济和人民生命财产安全带来严重的威胁和损失。有关暴雨研究表明, 暴雨尤其是 (特) 大暴雨的发生, 往往与局地及周边地形有着密切的关系<sup>[33]</sup>。高大地形, 如青藏高原等在引发降水的大气扰动, 如背风气旋及其强降水形成中的作用受到了气象学家的广泛关注, 并取得了大量科

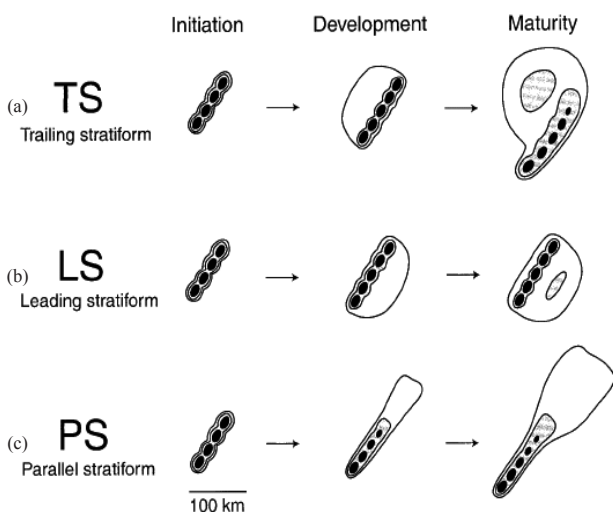


图1 三种线状中尺度对流系统理想生命周期的回波示意图<sup>[1]</sup>, 位相间的近似时间间隔为TS: 3~4h (a), LS: 2~3h (b), PS: 2~3h (c), 阴影级别对应20, 40, 50dBz

研成果<sup>[34]</sup>。近年来,中小尺度地形对天气气候的影响也逐渐受到重视<sup>[35]</sup>。国外开展了多项与地形有关的野外观测计划,如TAMEX<sup>[36]</sup>、COAST<sup>[37]</sup>、MAP<sup>[38]</sup>、CALJET<sup>[39]</sup>、IMPROVE<sup>[40]</sup>以及COPS<sup>[41]</sup>计划等,并取得了大量研究成果。

山脉动力强迫抬升形成降水自然是气象学家首先关注的科学问题。在估计山脉迎风坡降水方面,早期提出的简单线性模型<sup>[42]</sup>可以用来解释和预测地形降水,模型中降水率的大小主要由水汽混合比、正交于山脉的风速大小和地形梯度决定。之后,这种模型又得到了进一步的推广<sup>[43]</sup>,考虑了云微物理过程中云水—雨水的转化时间、雨水下落时间对地形降水的影响。有关地形降水问题可以归纳为三个方面:一支流向山脉的潮湿大尺度气流;中尺度地形强迫对大尺度气流的抬升;以及凝结物质向降水粒子的转换。地形阻滞效应限制了该模型的应用<sup>[44-45]</sup>。除了动力直接抬升作用之外,地形还可从多个方面对降水造成影响,如喇叭口地形动力辐合产生的地形性垂直气流增强降水<sup>[46]</sup>;山脉下坡风对降水的抑制和背风坡气旋对降水的增强<sup>[47]</sup>;地形下垫面的摩擦差异造成的差动平流对降水系统的影响<sup>[48]</sup>;地形产生的山脉波或惯性重力波对降水分布的调整<sup>[49]</sup>,山脉波又可被大气边界层所吸收<sup>[50]</sup>;山脉对对流层低层大气阻挡形成的山前辐合和绕流对降水系统的影响<sup>[51]</sup>,而地形阻滞气流由地形无量纲参数 $Nh/U$ 、水平地形特征比和罗斯贝形变半径 $Nh/f$ 所决定<sup>[52]</sup>,还受到稳定度不均匀分布的影响;复杂地形造成的大气低层绕流形成的多支气流辐合<sup>[53]</sup>;地形对大气边界层的拖曳等<sup>[54]</sup>。地形还对热带气旋的移动路径造成影响<sup>[55]</sup>。

地形的热力效应及其日变化对降水有着重要的影响。首先,地形高度在太阳辐射作用下可以形成显著的热力差异(地形造成的加热梯度),它可以驱动热力环流,而这种热力环流在适当的水汽条件下可以触发对流诱发降水<sup>[56]</sup>,并和降水天气系统相互作用影响降水的强度和分布<sup>[57]</sup>。一般而言,在弱的层结和弱风下地面净辐射增加的时候,热力直接力管环流或者热岛环流在山脉上发展,伴随着上坡气流在山上辐合<sup>[58]</sup>。地形上空太阳辐射的日变化引起地形热力环流的日变化,可以形成上坡风、下坡风和山谷风,其日变化具有明显的非对称性,可能与重力波的形成有关<sup>[59]</sup>,并可以诱发峡谷、山坡或者山顶的降雨<sup>[60]</sup>,同时山坡、峡谷风/环流降水粒子融化和蒸发可以增强下坡/峡谷气流<sup>[61]</sup>,峡谷加热中心的补偿下沉又可进一步加大峡谷—平原的温差对比。不仅如此,加热山脉上空气压扰动可以驱动水平辐合和山脉上坡风,来维持对流和降水(图2),而气压扰动又受到山脉入流层结气流、对流边界层(CBL)顶的高度和其空间变化、CBL内的温度变化以及穿透湿对流的影响<sup>[62]</sup>,当山脉尺度足够大( $\geq 100\text{km}$ )的时候,热力气流又受到科氏力的影响<sup>[63]</sup>,地形山脉波还存在着日变化<sup>[64]</sup>,这使得问题更加复杂化。其次,地形表面的属性差异在太阳辐射及其日变化作用下也强迫出热力环流,进而影响局地天气气候。海陆分布差异形成的海陆风环流是中尺度研究的经典主题<sup>[65]</sup>,海陆风环流形成后又和地形相互作用来触发对流形成降水,如果对流深厚,降水诱发的下沉支将冷空气引入到边界层中,产生更为复杂的情形<sup>[66]</sup>。类似于海陆风的中尺度环流也可以由地面不均匀性来强迫,如麦收区和临近的植被

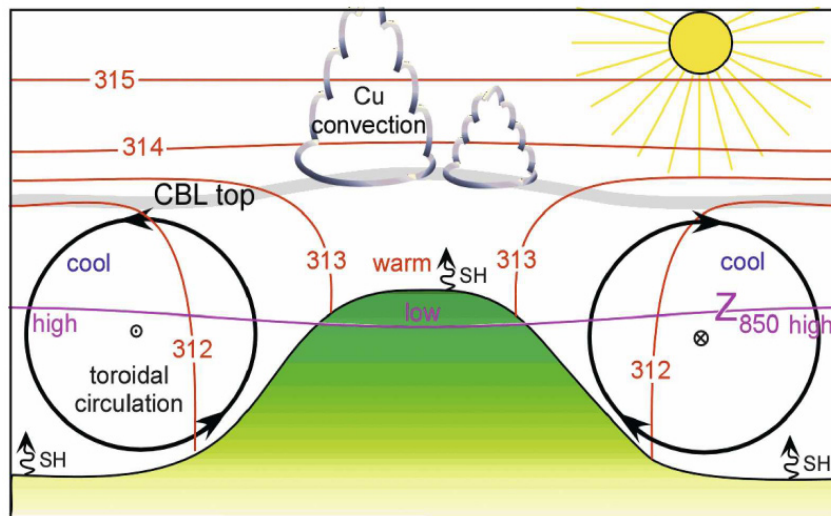


图2 静风条件下加热山脉上空热力强迫环流的示意图<sup>[62]</sup>  
(图中红线为等熵线,紫线为850hPa等压面高度,灰线为对流边界层顶,SH为地面热通量)

区<sup>[67]</sup>，伐林区和林盖区<sup>[68]</sup>，干盐湖面和非盐湖面以及城市区和农村间<sup>[69]</sup>形成的下垫面差异形成的热力环流（陆面风）及其日变化可影响局地降水气候特征，这已得到观测和数值模拟结果的证实，同时，这种陆面风还可以和海陆风相互作用影响局地降水<sup>[70]</sup>。

国外大量研究表明，地形对云物理过程的改变是其影响降水强度和分布的一种重要机制，这主要包括地形云的播撒效应，即高层有非地形扰动形成的大尺度降水云，山脉在底层的抬升形成云盖，当从高层云中下落的降水经过地形云的时候，它们会积聚（通过碰并或者结晶过程）附加的水汽，山坡的降水得到增强<sup>[71]</sup>，它的极端使用情形是地形触发的深对流云能够描述成一个播撒云（如下落的结晶粒子）和一个云水供给区（如云的低层暖区）<sup>[72]</sup>，下落水物质的云水析出毫无疑问是地形降水的一个重要的过程，但它可能来自不同的环境。其次，地形可引起云中液态水分布以及降水粒子增长方式的改变<sup>[73]</sup>。地形降水中结晶过程在降水粒子增长过程中起到重要作用，即迎风坡前上升运动形成的过冷水滴能自身结合成降水粒子在迎风坡下落形成降水<sup>[74]</sup>，而这种降水过程又很大程度上受到低层大气热力学特征和上游风状况的影响，尤其是低层气流遇到山脉时是否受到阻滞<sup>[75]</sup>。研究发现，阿尔卑斯地形区受到和未受到地形阻滞的低层大气微物理过程存在着明显差异，不稳定未受阻滞情形下，低层气流地形抬升参与的降水增强，而稳定阻滞的情形下，低地形区的降水过程不能加到背景层状降水中而受到限制（图3）<sup>[12]</sup>。结晶过程可以使粒子变得更重，缩短了地形上升运动诱发新的云液态水粒子和到达地面形成降水之间的时间，因而地形降水分布对粒子下落轨迹非常敏感<sup>[76]</sup>。同时，低层雨滴的碰并

过程有利于地形生成的凝结物快速下落。结晶过程在 $0^{\circ}\text{C}$ 层以上重要，而碰并过程在 $0^{\circ}\text{C}$ 层以下更为重要。地形诱发的山脉波还可以调节云液态水和雪的混合比来影响降水的分布<sup>[77]</sup>。

地形降水的形成还受到天气背景和中尺度环境场的影响。研究发现，有利于美国地形出现强降水<sup>[78]</sup>的天气尺度环境为：一个弱的500hPa短波槽在长波槽内向北旋转并靠近风险区；弱的东南至南东南风出现在地形的对流层高层；缓慢移动或静止的极锋位于风险区南侧；高湿区层次深厚等。同时还发现了有利的中尺度环境：风险区西侧午后加热和风暴区东侧冷平流共同加强厚度和气压梯度；一个狭窄的条件不稳定带以及不寻常的湿空气在极锋后向南和向西运动；空气团在700hPa存在着逆温等。有利于阿尔卑斯山的强地形降水<sup>[79]</sup>的天气和中尺度环境为：一个条件或位势不稳定的气流流向山脉；非常潮湿的低空急流（LLJ）；陡峭的山脉有助于释放条件不稳定；对流层高层有深槽或者高位涡（PV）异常带向风险区靠近；对流层高空准静止的高气压脊使对流系统准静止或者减缓它靠近风险区的进程。东亚地区地形强降水<sup>[27]</sup>的主要影响因子为：（1）条件或潜在不稳定环境；（2）一支非常湿的低空急流；（3）准定常的天气系统使影响该区域对流系统变慢；（4）陡峭的山脉（山脉的几何形状）；（5）入流气流的降水率；（6）强天气系统在地形区强迫出强的上升气流。

近年来，中小尺度地形对对流降水的作用成为国内外气象学家研究的热点。研究表明，当不稳定的气团流向山脉时，会有对流云嵌套在层状地形云中发展，降水量、降水强度以及降水效率很大程度上受到上游对流动力学的影响<sup>[80]</sup>。山脉对对流的触发也得到

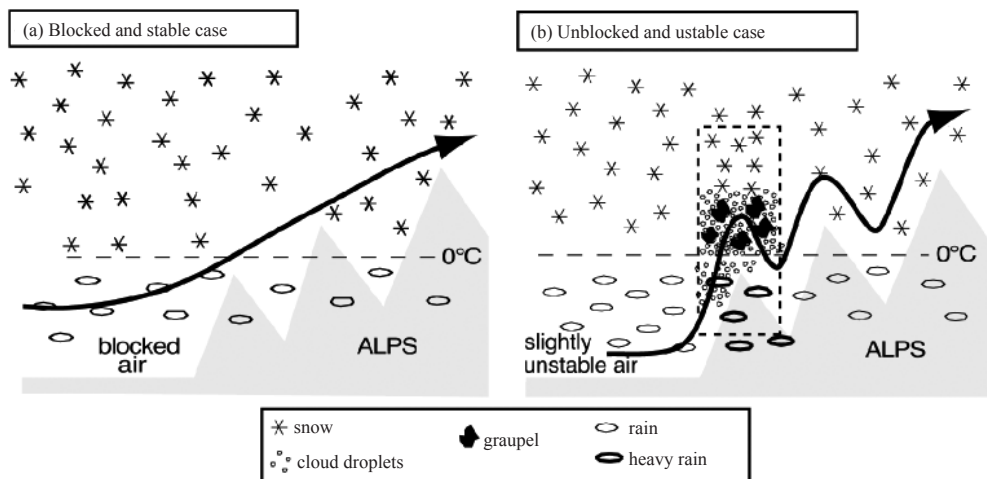


图3 稳定阻滞（a）和不稳定无阻滞（b）气流内的地形降水机制示意图<sup>[12]</sup>  
（图b中虚框指示了嵌套的对流阵雨的位置，图中显示了每一种情形下水物质的类型）

雷达探测资料的证实<sup>[81]</sup>。相对小的山脉通过云的播撒效应来增强降水。地形通过激发出中尺度波动（中尺度重力波、山脉波、背风波等）来触发对流或影响下游降水天气<sup>[82]</sup>。地形细胞状对流受到地形云盖内的静力不稳定度、山脉宽度、气块的云内反弹时间、不稳定云盖厚度以及环境风切变的影响<sup>[83]</sup>，云中不稳定和云周围强稳定的干空气有利于组织化对流发展<sup>[84]</sup>。小尺度山脉和峡谷激发的饱和背风波位相决定对流能否触发，一旦对流触发，水平浮力梯度生成的环流将雨带排列与气流方向平行，雨带生成的位置对大尺度气流条件和小地形相对于云前沿的位置非常敏感<sup>[85]</sup>。狭窄的山脊可以通过迎风坡上升、背风坡下沉和重力波来调整降水的强度和分布<sup>[86]</sup>。地形如何作用于MCS及其引发降水，还受到环境气流的层结稳定度、风垂直切变、风的大小、大气水汽含量、CAPE，以及山脉高度、宽度和形状等多方面因素的影响，不同属性的过山气流形成的MCS具有不同的活动特征<sup>[87]</sup>。

最近复杂中小尺度地形对降水影响的研究中发现，东亚季风天气背景和大气垂直廓线下局地中小尺度地形对对流降水的影响与国外的研究结果并不完全一致，单一的地形动力参数不能完全决定地形对流降水的模态<sup>[88]</sup>。同时，在天气系统发展的不同阶段，地形相对于对流暴雨系统的位置不同，地形对暴雨对流系统的影响存在着差异<sup>[89]</sup>。风垂直切变对对流降水的分布影响很大，对流层中低层的风垂直切变在很大程度上决定地形对流降水的组织模态<sup>[90]</sup>。因此，地形对暴雨对流系统的影响还值得进一步研究。

## 5 暴雨对流系统的日变化和形成机制

降水日变化是地球大气最主要的振荡现象之一<sup>[91]</sup>，它的形成往往与大气中的各种日变化现象相联系，如温度、相对湿度、水汽（大气可降水量）<sup>[92]</sup>、大气行星边界层<sup>[93]</sup>、低空急流（LLJ）<sup>[94]</sup>、层积云<sup>[95]</sup>、近地面流场<sup>[96]</sup>、对流<sup>[97]</sup>、城市热岛<sup>[98]</sup>，甚至大尺度季风环流<sup>[99]</sup>的日变化等。对流降水也存在明显的日变化。目前大气数值预报模式对降水日变化的模拟水平还很低，尤其是夏季对流降水日变化的模拟。对流降水日变化也一直是大气科学领域研究的焦点之一。一方面，人们对对流降水日变化的形成机理还没有完全弄清，尤其是具有复杂地形分布的陆地上的对流降水<sup>[100]</sup>；另一方面，对流降水日变化的模拟在很大程度上已成为制约数值天气预报模式精细化预报水平提高的瓶颈之一，因为模式对太阳辐射加热强迫诱生的大气热力动力因子的日变化造成的对流降水启动的时间、地点及降水强度模拟的准确与否，直接影响模

式对降水落时、落区预报的好坏。对降水日变化尤其是对流降水日变化模拟的好坏，已成为衡量一个数值预报模式和气候模式性能以及相关模式物理方案好坏的重要途径和方式之一<sup>[101]</sup>。

我国是对流暴雨灾害频发的地区之一，尤其是当东亚夏季风爆发后向北推进的时候，极为频繁的对流活动往往造成强烈的降水，给我国尤其是东部地区造成洪涝灾害<sup>[102]</sup>，而我国自主研发的数值模式对该流域对流强降水的模拟和预报水平还很低<sup>[103]</sup>，这在很大程度上归咎于对流降水，尤其是大气日变化造成的对流降水启动与否，以及启动时间和地点在模式中不能得到很好地模拟和预报。以往的研究揭示了降水存在日变化的事实，并指出了地面辐射加热差异造成的午后至傍晚的对流爆发可以解释该时段降水极大值的形成，而清晨降水极大值的形成与夜间LLJ的增强有关<sup>[104]</sup>，也有研究认为LLJ的增强是对流降水释放大量凝结潜热反馈的结果，而不是夜间降水极大值的原因<sup>[105]</sup>，可能由其他原因造成。Yu等<sup>[106]</sup>研究发现，中国中东部在午后具有降水峰值，而青藏高原及其东侧邻近地区的降水峰值在午夜。Zhou等<sup>[100]</sup>通过观测研究进一步揭示了长江中下游地区降水日变化具有两个峰值，分别发生在午后和清晨，不同于青藏高原东侧的午夜降水峰值。郑永光等<sup>[107]</sup>对我国中尺度对流系统的统计研究也得到类似的结果。Yu等<sup>[108]</sup>认为，这一地区午后降水峰值往往由生命期较短（小于3h）的对流活动造成，而夜间至清晨降水峰值由生命史长（大于6h）的对流系统的活动有关。最近，Chen等<sup>[109]</sup>的研究结果指出长江流域夜间降水峰值是大尺度强迫与青藏高原地形共同作用的结果。但是这些研究大多通过气候分析获得，对于这一地区对流降水日变化形成的内在物理机制方面的研究还有待充分展开。

在对流降水日变化方面，国内外气象学家已开展了大量研究。研究发现，海洋上降水峰值大多出现在夜间至清晨<sup>[110]</sup>，而陆地上大多地区的降水峰值出现在午后至傍晚<sup>[111]</sup>。同时，海洋上的降水日变化存在着区域差异。例如东大西洋的降水峰值出现在午后<sup>[112]</sup>；西太平洋的深对流在06:00—09:00（地方时，以下简称LST）增强至最大<sup>[113]</sup>，暖池上空有组织的对流在黎明前达到峰值<sup>[114]</sup>；中东太平洋热带辐合区（ITCZ）的降水峰值发生在早晨；东太平洋热带地区的降水在午后有最大值，黎明附近出现次大值<sup>[115]</sup>；南太平洋区的降水最大值出现在午后<sup>[116]</sup>等。陆地上的日降水模态也存在着明显的空间变化，其日变化振幅往往比海洋上要大得多。沿着喜马拉雅山南面山脚尼泊尔境内的

降水主要出现在夜间<sup>[117]</sup>；美国东南部的40%的降水主要集中在白天时段的14:00—19:00LST；美洲中部大陆上存在夜间降水峰值；南美内陆降水最大值出现在18:00LST附近<sup>[118]</sup>；哥伦比亚的日降水峰值发生在午后，而科罗拉多的日降水最大值出现在午夜<sup>[119]</sup>；青藏高原及其东侧地区的日最大降水倾向于出现在夜间至清晨<sup>[106]</sup>等。另外，海洋岛屿、沿海岸地区、内陆地区的降水日变化模态也存在明显差异。

有关海洋和陆地上降水日变化及其不同模态和空间变率的成因，已提出多种物理机制来对其加以解释。对于海洋上的降水日变化，提出的主要物理机制有：（1）云辐射加热差异机制，即云和周围无云区间辐射加热差异的动力结果在水平散度场内产生的日变化可以调整对流<sup>[120]</sup>。（2）云辐射垂直稳定度机制，即对流云毯高空部分的短波辐射吸收增加云区的静力稳定度，减弱垂直运动，从而导致午后海洋降水的最小值；相反，夜间的长波冷却减小稳定度，导致对流增强<sup>[121]</sup>。（3）云辐射相对湿度机制，即夜间长波冷却充分地增加每一个地方的相对湿度，导致卷入效应减小，云的发展在夜间得到增强<sup>[122]</sup>。（4）海面温度日变化机制，即由于海洋表面层存在日变化，其午后最大值造成洋面上新对流的生成，由于局地湿静力能的消耗和海洋上短波通量的遮盖，使得第二天在对流尾流区出现对流极小值<sup>[123]</sup>。（5）大气气压潮机制，即认为大气气压潮可能是低层辐合和降水的日调整因子<sup>[124]</sup>，但受到质疑<sup>[125]</sup>。这些机制很难解释陆地上对流降水日变化模态和空间差异。

陆地上对流降水日变化的形成机制极为复杂。海陆风环流是沿岸陆地和水域上的对流降水日变化的驱动因子<sup>[126]</sup>，海陆风与局地热力环流相互作用后可调节局地降水日变化，如巴西北部的降水日变化受到海陆风和山谷风环流的影响<sup>[127]</sup>。高大山脉地区的日对流降水系统形成后有规律地向下游移动，可引起下游地区夜间降水极大值。如落基山地形峰在午后形成对流降水最大值，向东传播造成密西西比河—俄亥俄州峡谷清晨降水最大值<sup>[128]</sup>，这种传播系统在南美安第斯山、中国喜马拉雅山以及非洲的埃塞俄比亚高原等地也存在<sup>[129]</sup>。也有研究认为山脉地形区白天加热形成的混合边界层激发的重力波传播可以解释离岸地区的日对流降水（图4）<sup>[128]</sup>，也关注了重力波对日变化强迫的响应<sup>[130]</sup>。另外大量研究发现，具有不同加热属性的地表在白天和晚上加热差异强迫的边界层力管环流可能是一些地区降水日变化形成的重要原因，如干盐湖与非盐湖面<sup>[131]</sup>、陆水面和土壤湿度梯度<sup>[132]</sup>、植被覆盖

对比<sup>[133]</sup>，以及城区与乡村对比<sup>[134]</sup>等。局地山脉地形高度不均匀性造成的地面加热高度差异驱动的热力环流，如山坡力管环流在白天产生上坡气流，晚上产生下坡气流，这种局地热力环流产生降水日变化<sup>[135]</sup>。

## 6 讨论

（1）暴雨对流系统的组织和维持机理是一个值得深入探索的课题。目前，数值预报模式对暴雨中尺度对流系统的组织结构模态几乎没有模拟能力，而对流系统中对流和层状降水分布的差异，直接造成大气加热场的不同，从而影响中小尺度过程向天气和次天气尺度系统的反馈过程，导致天气尺度背景模拟和预报存在偏差，最终造成暴雨落区甚至整个雨带存在着明显偏差。其次，数值模式对暴雨MCS的维持时间的模拟和预报往往存在着明显的偏差。因此，有必要加强对流暴雨系统的组织结构形态及其形成和维持机制的研究，为数值模式准确模拟出对流系统的组织结构模态提供相关科学线索。

（2）对流降水的启动在中尺度数值模式预报中至关重要，因为对流降水的启动预报正确与否直接影响到暴雨的定时定点预报。但是目前数值模式对对流降水的启动预报能力还很低，这直接影响到对流暴雨的预报准确率。因此有必要开展对流启动的观测试验和研究，深入认识我国不同地域对流启动的主要物理机制，为改进数值模式的对流降水启动模拟和预报提供科学支撑。

（3）复杂地形对引发暴雨的MCS的影响还有待深入研究。由于天气尺度气流具有重要的时空变化，而真实地形是三维不规则的，这使得地形对降水的影响更加具有多样性、复杂性和非线性；另外，地形作用在数值预报模式中描述的好坏，在很大程度上决定了复杂地形区定量降水预报的好坏。因此，地形研究

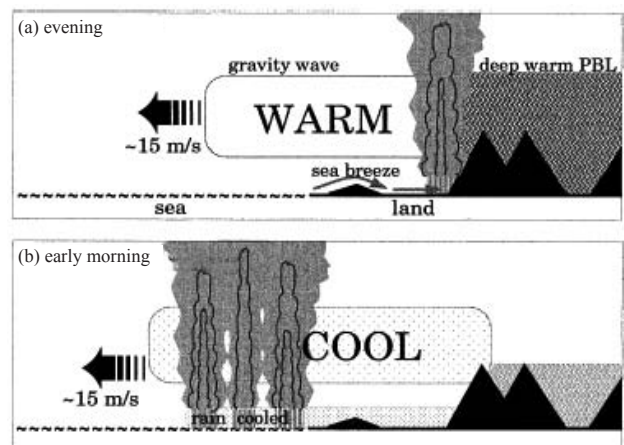


图4 山脉地形区混合层激发的日重力波及其相关的深对流示意图<sup>[128]</sup>

对于提高暴雨预报具有举足轻重的作用, 有关对地形扰动及其引发降水机制的认识必须继续走向深入。复杂地形分布在不同天气尺度背景和不同热力学属性的气流下具有什么样的动力学性质, 又具有什么样的热力作用, 在什么样的天气尺度和中尺度环境场下复杂地形容易在局地触发对流形成暴雨, 不同的环境场下地形作用又有何差异, 复杂地形的动力、热力效应对我国不同区域MCS的形成、发展、移动、气流结构、云微物理过程及降雨效率产生什么样的影响? 这些都是地形研究中要弄清楚的科学问题。

(4) 我国地处东亚季风区, 既受到海陆热力差异和东亚季风的影响, 又受到青藏高原大地形的影响, 降水日变化特征显著, 不同地域降水日变化存在着明显的差异, 现有的降水日变化形成物理机制对于解释我国不同地区对流降水日变化还有待大量研究和观测验证, 因为不同尺度和高度的地形的动力和热力效应在日对流降水的形成中究竟具有什么作用, 两者的相对重要性如何, 这些都不是十分清楚。数值模式对高原大地形影响下的对流降水日变化的预报能力还很弱, 因而有必要加强对对流降水尤其是对流暴雨的日变化特征及其形成机制研究, 为数值模式的改进提供依据。

#### 参考文献

- [1] Parker M D, Johnson R H. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems. *Mon Wea Rev*, 2000, 128: 3413-3436.
- [2] French A J, Parker M D. The initiation and evolution of multiple modes of convection with a meso-alpha-scale region. *Wea Forecasting*, 2008, 23: 1221-1252.
- [3] Schumacher R S, Johnson R H. Organization and environmental properties of extreme-rain-producing mesoscale convective systems. *Mon Wea Rev*, 2005, 133: 961-976.
- [4] Schumacher R S, Johnson R H. Quasi-stationary, extreme-rain-producing convective systems associated with midlevel cyclonic circulations. *Wea Forecasting*, 2009, 24: 555-574.
- [5] Schumacher R S. Mechanism for quasi-stationary behavior in simulated heavy-rain-producing convective system. *J Atmos Sci*, 2009, 66: 1543-1568.
- [6] 王晓芳, 崔春光. 长江中下游地区梅雨期线状中尺度对流系统分析 I: 组织类型特征. *气象学报*, 2012, 70(5): 909-923.
- [7] Zheng L L, Sun J H, Zhang X L, et al. Organizational modes of mesoscale convective systems over central East China. *Wea Forecasting*, 2013, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/WAF-D-12-00088.1>.
- [8] Smith A N, McFarquhar G M, Rauber R M, et al. Microphysical and thermodynamic structure and evolution of the trailing stratiform regions of mesoscale convective systems during BAMEX. Part I: Observation. *Mon Wea Rev*, 2009, 137: 1165-1185.
- [9] Parker M D, Johnson R H. Simulated convective lines with leading precipitation. Part II: Evolution and Maintenance. *J Atmos Sci*, 2004, 61: 1656-1673.
- [10] Parker M D. Simulated convective lines with parallel stratiform precipitation. Part I: An Archetype for convection in along-line shear. *J Atmos Sci*, 2007, 64: 267-288.
- [11] Maddox R A, Canova F, Hoxit L R. Meteorological characteristics of flash flood events over the western United States. *Mon Wea Rev*, 1980, 108: 1866-1877.
- [12] Socorro M, Houze R A. Air motions and precipitation growth in Alpine storms. *Q J R Meteorol Soc*, 2003, 129: 345-371.
- [13] Socorro M, Smull B F, Houze R A et al. Cross-barrier flow during orographic precipitation events: Results from MAP and IMPROVE. *J Atmos Sci*, 2005, 62: 3580-3598.
- [14] Moncrieff W M, Liu C H. Convection initiation by density currents: Role of convergence, shear, and dynamical organization. *Mon Wea Rev*, 1999, 127: 2455-2464.
- [15] Mori S, Hamada J I, Tauhid Y I, et al. Diurnal land-sea rainfall peak migration over Sumatera Island, Indonesian Maritime Continent, observed by TRMM satellite and intensive rawinsonde soundings. *Mon Wea Rev*, 2004, 132: 2021-2039.
- [16] Kenichi U, Saneyuki T. Nighttime precipitation induced by a synoptic-scale convergence in the central Tibetan Plateau. *J of Meteor Soc Japan*, 2009, 87(3): 459-472.
- [17] Tompkins M A. Organization of tropical convection in low vertical wind shears: The role of cold pools. *J Atmos Sci*, 2001, 58: 1650-1672.
- [18] Weckwerth T M, Wakimoto R M. The initiation and organization of convective cells atop a cold-air outflow boundary. *Mon Wea Rev*, 1992, 120: 2169-2187.
- [19] Roger F R, Snider J B, Coen J L. Influences of storm-embedded orographic gravity waves on cloud liquid water and precipitation. *J Appl Meteor*, 2000, 39: 733-759.
- [20] Souza E P, Renno N O, Maria A F, et al. Convective circulations induced by surface heterogeneities. *J Atmos Sci*, 2000, 57: 2915-2922.
- [21] Cosma S, Richard E, Miniscloux F. The role of small orographic features in the spatial distribution of precipitation. *Quart J Meteor Soc*, 2002, 128: 75-92.
- [22] Lin Y L, Chiao S. Some common ingredients for heavy orographic rainfall. *Wea Forecasting*, 2001, 16: 633-660.
- [23] Kaplan L M, Zack W J, Wong V C, et al. The interactive role of subsynoptic scale jet streak and planetary boundary layer processes in organizing an isolated convective complex. *Mon Wea Rev*, 1984, 112: 2212-2238.
- [24] Moore G W K. The Organization of convection in narrow cold-frontal rainbands. *J Atmos Sci*, 1985, 42(17): 1777-1791.
- [25] Yoneyama K, Fujitani T. The behavior of dry westerly air associated with convection observed during the TOGACOARE R/V Natsushima cruise. *J Meteor Soc Japan*, 1995, 73: 291-304.
- [26] Tompkins A M, Craig G C. Radiative-convective equilibrium in a three-dimensional cloud ensemble model. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1998, 124: 2073-2097.
- [27] LeMone M A, Zipser E J, Trier S B. The role of environmental shear and thermodynamic conditions in determining the structure and evolution of mesoscale convective systems during TOGA COARE. *J Atmos Sci*, 1998, 55: 3493-3518.
- [28] Romero R, Doswell III C A, Riosalido R. Observations and fine-grid simulations of a convective outbreak in northeastern Spain: Importance of diurnal forcing and convective cold pools. *Mon Wea Rev*, 2001, 129: 2157-2182.
- [29] Liu C H, Moncrieff M M. Effects of convectively generated gravity waves and rotation on the organization of convection. *J Atmos Sci*, 2004, 61: 2218-2227.
- [30] 刘黎平, 阮征, 覃丹宇. 长江流域梅雨锋暴雨过程的中尺度结构个例分析. *中国科学D辑: 地球科学*, 2004, 34 (12): 1193-1201.
- [31] 胡伯威. 梅雨锋上MCS的发展、传播以及与低层“湿度锋”相关联的CISK惯性重力波. *大气科学*, 2005, 29(6): 845-853.
- [32] 赵玉春. 梅雨锋对引发暴雨的中尺度对流系统发生发展影响的研究. *大气科学*, 2011, 35(1): 81-94.
- [33] 陶诗言. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社. 1980.
- [34] 叶笃正, 高由禧. 青藏高原气象学. 北京: 科学出版社. 1979, 279.
- [35] 孙继松. 气流的垂直分布对地形雨落区的影响. *高原气象*, 2005, 24(1): 62-68.
- [36] Lin Y L. Orographic effects on airflow and mesoscale weather systems over Taiwan. *TAO*, 1993, 4: 381-420.
- [37] Bond N A, Mass C F, Smull B F, et al. The Coastal Observation and Simulation with Topography (COAST), experiment. *Bull Amer Meteor Soc*, 1997, 78: 1941-1955.

- [38] Bougeault P, Binder P, Buzzi A, et al. The MAP special observing period. *Bull Amer Meteor Soc*, 2001, 82: 433-462.
- [39] Paul J N, Ralph F M, White A B, et al. The statistical relationship between upslope flow and rainfall in California's coastal mountains: Observations during CALJET. *Mon Wea Rev*, 2002, 130(6): 1468-1492.
- [40] Mark T S, Hobbs P V, Mass C F, et al. Improvement of microphysical parameterization through observational verification experiment. *Bull Amer Meteor Soc*, 2003, 84(12): 1807-1926.
- [41] Volker W, Behrendt A, Bauer H-S, et al. The convective and orographically induced precipitation study: A research and development project of the World Weather Program for Improving Quantitative Precipitation Forecasting in low-mountain regions. *Bull Amer Meteor Soc*, 2008, 89(10): 1477-1486.
- [42] Smith R B. The influence of mountains on the atmosphere. *Advances in Geophysics*, Academic Press, 1979, 21: 87-230.
- [43] Smith R B, Barstad I. A linear theory of orographic precipitation. *J Atmos Sci*, 2004, 61 (12): 1377-1391.
- [44] 赵玉春, 许小峰, 崔春光. 川西高原东坡地形对流暴雨的研究. *气候与环境研究*, 2012, 17(5): 607-616.
- [45] Zhao Y C. Numerical investigation of a localized extremely heavy rainfall event in complex topographic area during midsummer. *Atmospheric Research*, 2012, 113: 22-39.
- [46] 赵玉春, 李泽椿, 肖子牛, 等. 一次热带系统北上引发华南大暴雨的诊断分析和数值研究. *气象学报*, 2007, 65(4): 561-577.
- [47] Speranza A, Buzzi A, Trevison A, et al. A theory of deep cyclogenesis in the lee of the Alps: Part II: Effects of the finite topographic slope and height. *J Atmos Sci*, 1986, 43(23): 2826-2837.
- [48] Smith R B. A differential advection model of orographic rain. *Mon Wea Rev*, 1982, 110: 306-308.
- [49] Koch S E, Zhang F, Kaplan M L. Numerical simulations of a gravity wave event over CCOPE. Part III: The role of a mountain-plains solenoid in the generation of the second wave episode. *Mon Wea Rev*, 2001, 129: 909-933.
- [50] Jiang Q, Doyle J M, Smith R B. Interaction between trapped waves and boundary layers. *J Atmos Sci*, 2006, 63: 617-633.
- [51] Pierrehumbert R T, Wyman B. Upstream effects of mesoscale mountains. *J Atmos Sci*, 1985, 42: 977-1003.
- [52] Patrick A R, Durran D R. Estimating topographic blocking using a Froude number when the static stability is nonuniform. *J Atmos Sci*, 2008, 65(3): 1035-1048.
- [53] 孙健, 赵平, 周秀骥. 一次华南暴雨的中尺度结构及复杂地形的影响. *气象学报*, 2002, 60(3): 333-342.
- [54] Steeneveld G J, Holtslag A A M, Nappo C J. Exploring the possible role of small-scale terrain drag on stable boundary layers over land. *J Appl Meteor Clim*, 2008, 47:2518-2530.
- [55] Yang M J, Zhang D L, Huang H L. A modeling study of typhoon Nari (2001) at landfall. Part I: Topographic effects. *J Atmos Sci*, 2008, 65(10): 3095-3115.
- [56] Crook N A, Tucker D F. Flow over heated terrain. Part I. Linear theory and idealized numerical simulations. *Mon Wea Rev*, 2005, 133: 2552-2564.
- [57] Yang Y, Chen Y L. Effects of Terrain heights and sizes on island-scale circulations and rainfall for the island of Hawaii during HaRP. *Mon Wea Rev*, 2008, 136: 120-146.
- [58] Banta R M. Daytime boundary layer evolution over mountainous terrain. Part I: Observations of the dry circulations. *Mon Wea Rev*, 1984, 112: 340-356.
- [59] Ohata T, Higuchi K, Ikegami K. Mountain-valley wind system in the Khumbu Himal, East Nepal. *J Meteor Soc Jap*, 1981, 59: 753-762.
- [60] Matthias S, Bousquet O, Houze JR R A, et al. Airflow within major Alpine river valleys under heavy rainfall. *Q J R Meteor Soc*, 2003, 129: 411-431.
- [61] Gabriele R, Zardi D. Mechanisms of up-valley winds. *J Atmos Sci*, 2004, 61: 3097-3111.
- [62] Bart G, Miao Q, Demko J C. Pressure perturbations and upslope flow over a heated, isolated mountain. *Mon Wea Rev*, 2008, 136: 4272-4288.
- [63] Reiter E R, Tang M. Plateau effects on diurnal circulation patterns. *Mon Wea Rev*, 1984, 112: 638-651.
- [64] Jiang Q, Doyle J D. On the diurnal variation of mountain waves. *J Atmos Sci*, 2008, 65: 1360-1377.
- [65] Rotunno R. On the linear theory of the land and sea breeze. *J Atmos Sci*, 1983, 40: 1999-2009.
- [66] Saito K, Keenan T, Holland G, et al. Numerical simulation of the diurnal evolution of tropical island convection over the Maritime Continent. *Mon Wea Rev*, 2001, 129: 378-400.
- [67] Cutrin E, Martin D W, Rabin R. Enhancement of cumulus clouds over deforested lands in Amazonia. *Bull Amer Meteor Soc*, 1995, 76: 1801-1805.
- [68] Daran L R, Warner T T, Chen F, et al. Mechanisms for diurnal boundary layer circulations in the Great Basin desert. *Mon Wea Rev*, 2002, 130: 921-938.
- [69] Baik J J, Kim Y H, Chun H Y. Dry and moist convection forced by an urban heat island. *J Appl Meteor*, 2001, 40: 1462-1475.
- [70] Yukitaka O, 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.
- [71] Robichaud A J, Austin G L. On the modeling of warm orographic rain by the seederfeeder mechanism. *Q J R Meteor Soc*, 1988, 114: 967-988.
- [72] Browning K A, Hill F F, Pardoe C W. Structure and mechanism of precipitation and the effect of orography in a wintertime warm sector. *Q J R Meteorol Soc*, 1974, 100: 309-330.
- [73] Hobbs P V, Easter R C, Fraser A B. A theoretical study of the flow of air and fallout of solid precipitation over mountainous terrain. Part II: Microphysics. *J Atmos Sci*, 1973, 30: 813-823.
- [74] Hobbs P V. The nature of winter clouds and precipitation in the Cascade Mountains and their modification by artificial seeding. Part I. Natural conditions. *J Appl Meteor*, 1975, 14: 783-804.
- [75] Grossman R L, Durran D R. Interaction of low-level flow with the Western Ghats Mountains and offshore convection in the summer monsoon. *Mon Wea Rev*, 1984, 112: 652-672.
- [76] Lascaux F, Richard E, Pinty J P. Numerical simulations of three different MAP IOPs and the associated microphysical processes. *Q J R Meteor Soc*, 2006, 132: 1907-1926.
- [77] Matthew F G, Smull B, Mass C. Multiscale mountain waves influencing a major orographic precipitation event. *J Atmos Sci*, 2007, 64: 711-737.
- [78] Maddox R A, Canova F, Hoxit L R. Meteorological characteristics of flash flood events over the western United States. *Mon Wea Rev*, 1980, 108: 1866-1877.
- [79] Buzzi A, Foschini L. Mesoscale meteorological features associated with heavy precipitation in the southern Alpine region. *Meteor Atmos Phys*, 2000, 72: 131-146.
- [80] Oliver F, Christoph S. Embedded cellular convection in moist flow past topography. *J Atmos Sci*, 2005, 62: 2810-2828.
- [81] Yuter S E, Houze R A. Microphysical modes of precipitation growth determined by S-band vertically pointing radar in orographic precipitation during MAP. *Q J Meteor Soc*, 2003, 129: 455-476.
- [82] Andrea B, Tartaglione N, Malguzzi P. Numerical simulation of the 1994 Piedmont flood: Role of orography and moist processes. *Mon Wea Rev*, 1998, 126: 2369-2383.
- [83] Kirshbaum D J, Durran D R. Factors governing cellular convection in orographic precipitation. *J Atmos Sci*, 2004, 61:682-698.
- [84] Kirshbaum D J, Durran D R. Factors governing banded convection in orographic precipitation. *J Atmos Sci*, 2005, 62:3758-3774.
- [85] Kirshbaum D J, Bryan G H, Rotunno R. The triggering of orographic rainbands by small-scale topography. *J Atmos Sci*, 2007, 64: 1530-1549.
- [86] Jiang Q. Precipitation over multiscale terrain. *Tellus*, 2007, 59A: 321-335.
- [87] Chen S H, Lin Y L. Orographic effects on a conditionally unstable flow over an idealized three-dimensional mesoscale mountain. *Meteor Atmos Phys*, 2005, 88: 1-21.

- [88] 赵玉春, 王叶红, 崔春光. 大对流有效位能和条件不稳定下地形对流降水的三维理想数值研究, 气象学报, 2011, 69(5), 782-798.
- [89] 赵玉春, 许小峰, 崔春光. 中尺度地形对梅雨锋暴雨影响的个案研究. 高原气象, 2012, 31(5), 1268-1282.
- [90] Zhao Y C, Wang Y H. Impacts of vertical wind shear on mesoscale topographical convective precipitation. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(5): 509-529.
- [91] Dai A. Global precipitation and thunderstorm frequencies. Part II: Diurnal variations. J Climate, 2001, 14:1112-1128.
- [92] Tian B, Soden B J, Wu X. Diurnal cycle of convection, clouds, and water vapor in the tropical upper troposphere: Satellites versus a general circulation model, J Geophys Res, 2004, 109, D10101, doi:10.1029/2003JD004117.
- [93] 陈炯, 王建捷. 北京地区夏季边界层结构日变化的高分辨率数值模拟对比. 应用气象学报, 2006, 17(4): 403-411.
- [94] Nicolini M, Waldron K M, Paegle J. Diurnal oscillations of low-level jets, vertical motion, and precipitation: A model case study. Mon Wea Rev, 1993, 121: 2588-2610.
- [95] 李昉英, 字如聪, 徐幼平, 等. 中国南方地区层状云的形成和日变化特征分析. 气象学报, 2003, 61(6): 733-743.
- [96] 刘新, 吴国雄, 李伟平. 夏季青藏高原加热和环流场的日变化. 地球科学进展, 2006, 21(12):1273-1282.
- [97] Tsakraklides G, Evans J L. Global and regional diurnal variations of organized convection. J Climate, 2003, 16: 1562-1572.
- [98] 张佳华, 侯英雨, 李贵才, 等. 北京城市及周边热岛日变化及季节特征的卫星遥感研究与影响因子分析. 中国科学D辑: 地球科学, 2005, 35(增刊I): 187-194.
- [99] Keenan T D, McBride J, Holland G, et al. Diurnal variations during the Australia Monsoon Experiment (AMEX) phase II. Mon Wea Rev, 1989, 117: 2535-2547.
- [100] Zhou T, Yu R, Chen H, et al. Summer precipitation frequency, intensity, and diurnal cycle over China: A comparison of satellite data with rain gauge observations. J Climate, 2008, 21: 3997-4010.
- [101] 黄安宇, 张耀存, 朱坚. 物理过程参数化方案对中国夏季降水日变化模拟的影响. 地球科学进展, 2008, 23(11): 1274-1284.
- [102] 孙建华, 赵思雄. 1998年夏季长江流域梅雨期环流演变的特殊性探讨. 气候与环境研究, 2003, 8(3): 291-306.
- [103] 吴秋霞, 史历, 翁永辉, 等. AREMS/973模式系统对2004年中国汛期降水实时预报检验. 大气科学, 2007, 31(2): 298-310.
- [104] Uccellini L W. On the role of upper tropospheric jet streaks and leeside cyclogenesis in the development of low-level jets in the Great Plains. Mon Wea Rev, 1980, 108: 1689-1696.
- [105] Chen C, Tao W K, Lin P L, et al. The intensification of the low-level jet during the development of mesoscale convective systems on a Mei-Yu front. Mon Wea Rev, 1998, 126(2): 349-371.
- [106] Yu R, Zhou T, Xiong A, et al. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China. Geophys Res Lett, 2007, 34, L01704, doi: 10.1029/2006GL028129.
- [107] 郑永光, 陈炯, 朱佩君. 中国及周边地区夏季中尺度对流系统分布及其日变化特征. 地球科学进展, 2008, 53(4): 471-481.
- [108] Yu R, Xu Y, Zhou T, et al. Relation between rainfall duration and diurnal variation in the warm season precipitation over central eastern China. Geophys Res Lett, 2007, 34, L13703, doi: 10.1029/2007GL030315.
- [109] Chen H, Yu R, Li J, et al. Why nocturnal long-duration rainfall presents an eastward-delayed diurnal phase of rainfall down the Yangtze River valley. J Climate, 2010, 23(4): 905-917.
- [110] Gray W M, Jacobson Jr R W. Diurnal variation of deep cumulus convection. Mon Wea Rev, 1977, 105: 1171-1188.
- [111] Kousky V E. Diurnal rainfall variation in Northeast Brazil. Mon Wea Rev, 1980, 108: 488-498.
- [112] Reed R J, Jaffe K D. Diurnal variation of summer convection over West Africa and the tropical eastern Atlantic during 1974 and 1978. Mon Wea Rev, 1981, 109: 2527-2534.
- [113] Murakami M. Analysis of the deep convective activity over the western Pacific and southeast Asia. Part I: Diurnal variation. J Meteor Soc Japan, 1983, 61: 60-76.
- [114] Mapes B E, Houze Jr R A. Cloud clusters and superclusters over the oceanic warm pool. Mon Wea Rev, 1993, 121: 1398-1415.
- [115] Augustine J A. The diurnal variation of large-scale inferred rainfall over the tropical Pacific Ocean during 1979. Mon Wea Rev, 1984, 112: 1745-1751.
- [116] Albright M D. Diurnal variation of deep convection and inferred precipitation in the central tropical Pacific during January-February 1979. Mon Wea Rev, 1985, 113: 1663-1680.
- [117] Bhatt B C, Nakamura K. Characteristics of monsoon rainfall around the Himalayas revealed by TRMM precipitation radar. Mon Wea Rev, 2005, 133: 149-165.
- [118] Dai A, Giorgi F, Trenberth K E. Observed and model simulated precipitation diurnal cycle over the contiguous United States. J Geophys Res, 1999, 104: 6377-6402.
- [119] Germán P, Mesa O J, Salazar L, et al. The diurnal cycle of precipitation in the tropical Andes of Colombia. Mon Wea Rev, 2005, 133: 228-240.
- [120] Randall D A, Harshvardhan, Dazlich D A. Diurnal variability of the hydrologic cycle in a general circulation model. J Atmos Sci, 1991, 48: 40-62.
- [121] Webster P J, Stephens G L. Tropical upper-tropospheric extended clouds: Inferences from Winter MONEX. J Atmos Sci, 1980, 37: 1521-1541.
- [122] Tao W K, Lang S, Simpson J, et al. Mechanisms of cloud-radiation interaction in the tropics and midlatitudes. J Atmos Sci, 1996, 53: 2624-265.
- [123] Chen S S, Houze Jr R A. Diurnal variation and lifecycle of deep convective systems over the tropical Pacific warm pool. Quart J Roy Meteor Soc, 1997, 123: 357-388.
- [124] Brier G W, Simpson J. Tropical cloudiness and rainfall related to pressure and tidal variations. Quart J Roy Meteor Soc, 1969, 95: 120-147.
- [125] Lindzen R. Effect of daily variations of cumulonimbus activity on the atmospheric semidiurnal tide. Mon Wea Rev, 1978, 106: 526-533.
- [126] Simpson J E. Diurnal changes in sea-breeze direction. J Appl Meteor, 1996, 35: 1166-1169.
- [127] Kousky V E. Diurnal rainfall variation in Northeast Brazil. Mon Wea Rev, 1980, 108: 488-498.
- [128] Mapes B E, Warner T T, Xu M. Diurnal patterns of rainfall in northwestern South America. Part III: Diurnal gravity waves and nocturnal convection offshore. Mon Wea Rev, 2003, 131: 830-844.
- [129] Yang S, Smith E A. Mechanisms for diurnal variability of global tropical rainfall observed from TRMM. J Climate, 2006, 19: 5190-5225.
- [130] Clark J H E. Gravity Waves Driven by diurnal fluctuations in mesoscale heating. J Atmos Sci, 1999, 56: 769-783.
- [131] Daran L R, Warner T T, Chen F, et al. Mechanisms for diurnal boundary layer circulations in the Great Basin Desert. Mon Wea Rev, 2002, 130: 921-938.
- [132] Wai M M K, Smith E A. Linking boundary circulations and surface processes during FIFE 89. Part II: Maintenance of secondary circulation. J Atmos Sci, 1998, 55: 1260-1276.
- [133] Rabin R M, Stadler S, Wetzel P J, et al. Observed effects of landscape variability on convective clouds. Bull Amer Meteor Soc, 1990, 71: 272-280.
- [134] Justin A W C. The sensitivity of thermally driven mountain flows to land cover change. Ph.D Dissertation, Department of Meteorology, the University of Utah, 2006.
- [135] Chen Y L, Nash A J. Diurnal variation of surface airflow and rainfall frequencies on the island of Hawaii. Mon Wea Rev, 1994, 122:34-56.

# 美国国家强风暴实验室定量降水估算系统简介

王斌<sup>1</sup> 张健<sup>2</sup>

(1 中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉 430074; 2 美国国家强风暴实验室, 美国)

**摘要:** 介绍了美国国家强风暴实验室 (NSSL) 研究开发的定量降水估算系统——全国拼图和多途径定量降水估算系统。对该系统的基本情况、各种产品模块和涉及的算法技术等进行了详细介绍, 也简单介绍了该系统的评估结果、应用效益和今后需要开展进一步研究的技术挑战。

**关键词:** 美国国家强风暴实验室, 定量降水估算, 天气雷达

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.02.005

## An Introduction to Quantitative Precipitation Estimation System in National Severe Storms Laboratory

Wang Bin<sup>1</sup>, Zhang Jian<sup>2</sup>

(1 Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430074 2 National Severe Storms Laboratory, USA)

**Abstract:** The National Mosaic and Multi-sensor QPE (NMQ) system, developed and operated by the National Severe Storms Laboratory, is introduced in detail. This paper presents an overview of the NMQ system, and its main components. Some algorithms and techniques related to each module of the system are described. In addition, some evaluation results, applications and future technological challenges are mentioned simply.

**Keywords:** NSSL, QPE, weather radar

### 1 引言

美国国家强风暴实验室 (National Severe Storms Laboratory, NSSL), 是美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 直属的七个实验室之一。该实验室位于美国中部的俄克拉荷马州诺曼市 (Norman City, Oklahoma State), 主要致力于强烈天气的预警和预报研究。NSSL在科学研究和技术开发上主要涉及3个研究方向, 分别为气象雷达研究和开发、灾害天气研究以及水文气象研究, 其中水文气象研究主要包括定量降水估算技术开发和洪水、泥石流等预测预警技术开发。本文即对NSSL近几年研究开发的定量降水估算 (QPE) 系统进行介绍。

### 2 全国拼图和多途径定量降水估算系统概况

作为NSSL进行定量降水估算实时运行和评估的综合技术集成平台, 全国拼图和多途径定量降水估算系统 (National Mosaic and Multi-sensor QPE system,

简称NMQ系统) 于2006年开始准业务运行<sup>[1]</sup>。NMQ系统以美国天气局业务雷达CRAFT数据网络为基础<sup>[2]</sup>, 融合不同观测网络的数据, 形成: (1) 高分辨率的全国多途径探测定量降水估算 (QPE) 产品, 应用于突发性洪水、大范围洪水的预警和水资源管理等; (2) 高分辨率全国3D网格化雷达反射率产品, 应用于资料同化、数值预报模式检验以及航空气象产品开发等。该系统集成了美国140部WSR-88D雷达和加拿大31部C波段天气雷达的基数据。此外, NMQ系统使用快速循环更新 (RUC) 模式分析场和水文气象自动化数据系统 (HADS) 等产品用于QPE计算和评估。

NMQ系统是完全自动化和实时运行的。该系统生成高分辨率3D反射率拼图格点数据 (31个垂直层) 和一系列强天气和QPE产品, 区域为美国大陆和加拿大南部, 时间分辨率为2.5min, 空间分辨率1km。目前, 该系统还保存了3年的产品归档文件。系统产品提供给政府部门、大学、研究机构和私人单位, 实时地用于各种气象、航空和水文气象需求。此外, NMQ系统有一个基于WEB网页形式的评估工具箱, 集成了许多业务化的QPE产品, 如雷达、雨量计和卫星QPE等, 与NMQ产品进行比较, 还可以实时地与独立雨量计数据进行比较。该WEB形式的评估系统也对美国天

收稿日期: 2013年9月30日; 修回日期: 2014年2月17日  
 第一作者: 王斌 (1972—), Email: wangbin@whihr.com.cn  
 资助信息: 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201006042; GYHY20130604)

气象局预报员和公众开放使用。经多年发展，NMQ系统已成为一个获得广泛应用的雷达资料和QPE产品的服务和试验平台，在促进科研和业务的融合上发挥了良好的作用。

### 3 NMQ系统模块构成及主要技术

NMQ系统由4个模块构成，采用分布式计算设计（服务器节点数40），系统框架和运行流程如图1所示<sup>[1]</sup>。该系统运行中使用了多个数据来源，包括美国天气局雷达基数据（level-2），加拿大天气雷达网资料，RUC模式小时分析产品，闪电资料，HADS，区域雨量计网等。四个模块分别为单雷达处理、3D和2D雷达拼图、新一代QPE<sup>[3]</sup>和误差评估。

#### 3.1 单雷达数据处理模块

该模块基于单部雷达数据进行相应的处理，以此作为后续模块运行的基础。主要的数据处理包括反射率数据质量控制（QC），垂直反射率廓线（VPR）生成，单雷达直角坐标网格转换，以及单雷达混合扫描反射率（SHSR）生成。

##### 3.1.1 反射率数据质量控制

单雷达数据的质量控制（QC）包括前处理、神经网络算法和后处理，能够基本去除非降水回波，如晴空回波、生物回波（鸟、蝙蝠和昆虫）、太阳干扰、地面杂波、电子干扰和异常传输回波（AP）等。神经网络QC方法基于反射率数据的3D空间特征<sup>[4-5]</sup>，例如强度、梯度、纹理和雷达回波厚度等，经过人机交互的训练优化过程，建立起降水回波和非降水回波的识别机制。为更好地发挥神经网络的功能，雷达数据需要进行前处理和后处理，尽量减少观测质量差的数据对QC的干扰，以及对QC后的数据进一步做出过滤和判断，去除一些特定的难以简单去除的非降水回

波。在前处理中，首先去除那些雷达库数据中受到明显遮挡或太接近地物的数据（例如高于地面不到50m的库数据）。基于雷达扫描模式和气象环境数据，利用时间和空间图像过滤器和启发式判断法<sup>[6]</sup>，去除特定的非降水回波，如斑点、太阳干扰、晴空回波、生物回波等。例如，通过比较两个连续的雷达体扫数据中大于某个强度的回波总面积，如果发现两者的差值超出了设定的阈值（突然增大），那么就认为第二个体扫有误，数据将被忽略。

NMQ系统针对不同类型雷达采用的质控方法也有差别，以保证有良好质量的反射率数据生成拼图格点数据。例如，针对加拿大C波段雷达开发了一个统计式的杂波去除模块，以移除低仰角回波的固定地物杂波<sup>[7]</sup>。

##### 3.1.2 单雷达直角坐标网格转换

经过质量控制后，雷达数据从初始的球坐标系插值到直角坐标系统中，雷达站为坐标中心点，投影方式为等距圆柱地图投影。对于WSR-88D雷达，直角坐标网格水平范围从460（海岸雷达）~300km（内陆雷达）；水平分辨率为0.01°（大约1km×1km）；垂直方向31层，海拔高度从500m~18km。插值方法在方位—距离平面采用最近邻居法，在仰角方向采用指数权重法<sup>[8-9]</sup>。坐标转换时在雷达体扫的最低和最高仰角处，当网格点位置超过（低于或高于）波束宽度一半时，则不做外推插值。

##### 3.1.3 垂直反射率廓线生成

垂直反射率廓线（VPR）由质控后的极坐标数据反演而来，在雷达较近的距离区间内，对一个环形区域的雷达体扫所有仰角数据进行各高度上的平均，获得VPR<sup>[10]</sup>。VPR在判别暖性降水过程时很有作用，可以生成更准确的QPE产品<sup>[11]</sup>。不同降水方案类型的VPR如图2所示<sup>[1]</sup>。对流降水的VPR显示最大反射率位于抬升凝结高度（大约1.5km，由探空计算而来），表明大雨滴在云中出現碰并增长。该高度之下反射率随高度降低而减少，表明雨滴在蒸发<sup>[1]</sup>。暖性降水VPR显示反射率随着高度降低而逐渐增加，表明云中有大量中等大小的雨滴在潮湿环境中持续增长<sup>[11]</sup>。图2b显示层状降水VPR曲线的亮带特征明显。在冷季层状降水中，雷达QPE经常表现出明显的高估，这是因为即使最低仰角的雷达波束也常处于亮带区域，获得的是被高估的反射率值。当雷达波束在相对更远距离位于亮带区域高度以上，由于是云中冰粒子区，获得的是被低估的反射率值，因此导致低估降水。在NMQ系统中，订正由于回波亮带造成的QPE误差方法见文

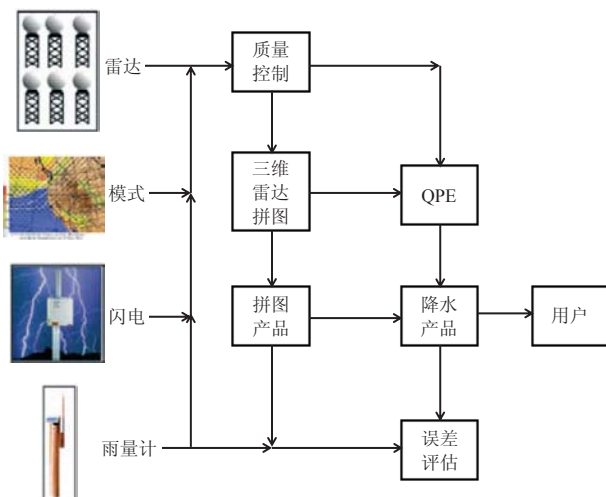


图1 NMQ系统构成框架和运行流程图

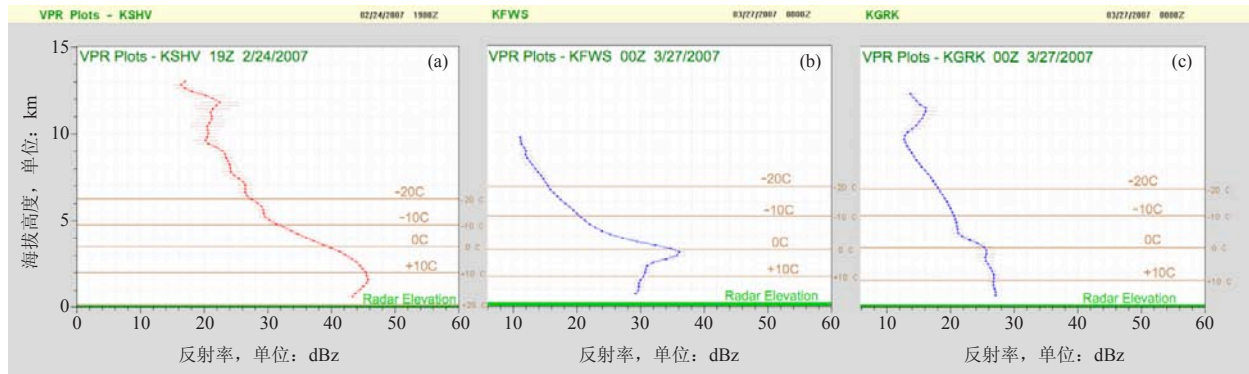


图2 不同降水类型的VPR曲线图(水平线代表环境气温,单位:°C)

(a) 对流降水; (b) 层状降水; (c) 暖性降水

献[12],且实现了实时运行。

在冬季融化层回波亮带高度较低,尤其在山地,容易被地形遮挡,导致WSR-88D雷达无法探测到亮带底,使得VPR的计算有很大误差。要获得冬季层状降水(雪)正确的VPR,还需要配合使用其他探测手段对雷达VPR进行订正。Wen等<sup>[13]</sup>、Qi等<sup>[14]</sup>尝试使用TRMM卫星的PR雷达反演的VPR,将其转换为S波段雷达VPR,并与地基雷达VPR相融合,获得新的雷达VPR。经过大量个例检验表明该方法能有效地减少雷达QPE高估的现象。Qi等<sup>[15]</sup>还将这种方法应用到中尺度对流系统(MCS)的VPR订正中,改善了雷达定量估算MCS大范围降雨的误差。

### 3.1.4 单雷达混合扫描反射率

单部雷达反射率数据经过QC后,将能够有效获取的最低海拔高度上雷达反射率库数据构成一个二维的混合扫描反射率场,即“Single radar Hybrid Scan Reflectivity (SHSR)”<sup>[16-17]</sup>。因为雷达波束高度随距离增加而增大,而且波束遮挡程度和地形高度也随空间而变化,因此SHSR场在不同地点的波束高度也不同。通常因为反射率的垂直变化,SHSR中某一个雷达库的高度越高,则单雷达反演的QPE准确度就越低。

## 3.2 三维反射率拼图和强天气产品

多部雷达的独立三维直角坐标网格反射率数据通过合并最终形成反射率三维拼图,该产品覆盖美国大陆和加拿大南部。拼图区域为130°—60°W,北纬20°—55°N。网格为等距圆柱地图投影,分辨率为0.01°×0.01°。东西方向的分辨率在南部边界大约为1.045km,北部边界大约为0.638km。南北方向的分辨率大约为1.112km。当某一个网格单元有多部雷达都能有效观测时,则采用指数距离加权平均<sup>[8]</sup>。NMQ系统可以灵活地集成不同雷达网的数据。目前的实时数据除美国WSR-88D雷达外,还有31部加拿大雷达、2

部TDWR雷达和1部电视台雷达。目前正在研究如何将移动雷达观测数据也纳入NMQ系统中,例如CASA雷达网<sup>[18]</sup>。

NMQ系统还生成一系列强天气产品,包括强烈冰雹概率(POSH)<sup>[19]</sup>,最大期望冰雹尺寸(直径)(MEHS)<sup>[19]</sup>,18dBz回波顶(ETP),垂直积分液态水(VIL)<sup>[20]</sup>,VIL密度(VILD)<sup>[21]</sup>等。所有产品都结合三维拼图数据和RUC系统的三维温度分析场数据进行计算。

## 3.3 新一代QPE产品

NMQ系统的关键组成部分就是新一代QPE产品,简称Q2<sup>[3]</sup>,它包括降水类型自动分类和多途径QPE产品,时间跨度从瞬时雨强到72h累积雨量。多途径QPE产品包括单纯基于雷达QPE、经过雨量计订正的雷达QPE、单纯基于雨量计QPE、基于雨量计、地形和降水气候分布的QPE。

### 3.3.1 混合扫描反射率拼图

基于单雷达SHSR,经过组合而成HSR拼图。HSR拼图由SHSR加权获得,具体公式为:

$$HSR = \frac{\sum_i W_L^i \times W_H^i \times SHSR^i}{\sum_i W_L^i \times W_H^i} \quad (1)$$

$$W_L = e^{\left(-\frac{d^2}{L^2}\right)} \quad (2)$$

$$W_H = e^{\left(-\frac{h}{H^2}\right)} \quad (3)$$

其中, $W_L$ 为水平权重函数, $W_H$ 为垂直权重函数, $i$ 表示雷达标识号。水平权重函数中变量 $d$ 表示格点与雷达之间的距离,垂直权重函数中变量 $h$ 表示SHSR库所在的海拔高度。 $L$ 和 $H$ 分别为水平和垂直方向的尺度因子。因为两部雷达由于标定问题、波束采样特征不同而造成在同一位置上的观测会出现不同。NMQ系统使用的插值方法与最近邻居法相比,能够保证QPE场的

水平连续性，而后者在插值与两部雷达成等距离的中间位置回波时会有反射率值不连续现象的出现。

### 3.3.2 降水类型的分类

雷达估算降水的准确性非常依赖于Z-R关系的正确与否。即使降水时间、地点都一样，Z-R关系的不同也会导致QPE的误差。目前WSR-88D雷达业务降雨估算算法中，使用的是单一Z-R关系，范围为230km×230km<sup>[17]</sup>。在同一降水事件中，在单雷达观测范围内，多种降水类型的同时存在是经常出现的现象。如果只采用单一的Z-R关系，QPE的误差就难以避免。因此若要较好地解决此类问题，就有必要采用自动化的降雨分类算法，采用组合式的Z-R关系来估算降水。NMQ系统的降水分类算法包括一系列的物理判断依据，针对每个网格点，总共分为5种降水类型而进行识别，包括层状降水，对流降水，暖性降水，降雹和降雪。算法流程如图3所示<sup>[1]</sup>。

在相对温暖和潮湿的环境中，降水强度很高，往往造成突发性洪水，这种降水类型即为暖性降水（或热带降水）。由于这种类型降水效率很高，常用的Z-R关系倾向于低估降雨量，所以需要针对这一降水类型，采用不同的Z-R关系，而使用的前提就是能够正确识别。NMQ系统的暖性降水识别的做法是检查每部雷达生成的小时平均VPR曲线，如果在冻结层高度以下的VPR斜率为负（即反射率随高度降低而增大），即判断为暖性降水<sup>[11]</sup>。如果回波强度大于设定阈值（缺省为30dBz），且地面气温大于10℃，雷达观测范围无降雪或降雹，则该处回波被标识为暖性降水。与该回波位置相邻并且超过强度阈值的回波也都被标识为暖性降水。

对流降水的分类条件为（1）垂直方向上任何高度上只要出现回波强度大于50dBz；（2）-10℃所在高度上回波强度大于30dBz；（3）在最近的5min内，

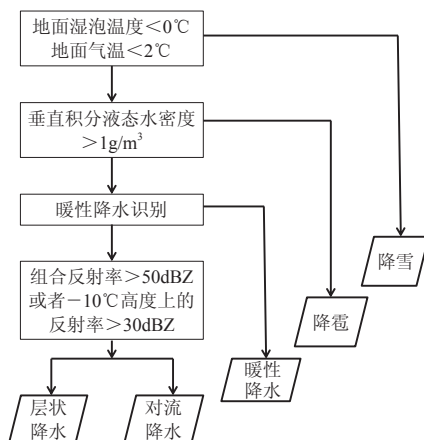


图3 NMQ系统降水分类算法

有一个或多个云对地闪电发生。上述条件有一项成立即可<sup>[10]</sup>。经过暖性和对流降水识别后，如果某一处回波既不是这两类降水，也不是降雪或降雹，那么就是层状降水。在分类识别时使用到的温度廓线来自于RUC小时分析数据。

### 3.3.3 单纯基于雷达 QPE

经过降水分类后，单纯基于雷达QPE相应分别采用4种Z-R关系。公式分别为：

$$\text{对流降水}^{[17]}: Z=300R^{1.4} \quad (4)$$

$$\text{层状降水}^{[22]}: Z=200R^{1.6} \quad (5)$$

$$\text{暖性降水}^{[23]}: Z=230R^{1.25} \quad (6)$$

$$\text{地面降雪}^{[24]}: Z=75R^{2.0} \quad (7)$$

式中，Z为反射率因子，单位为 $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$ ，R为降雨率或雪水当量，单位为 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。为了避免雷达QPE不合理地过高估计降雨率，系统对降水估算设定了回波强度的截取值，超过截取值的回波强度人为将其减少到等于截取值。其中对流降水的截取值为53dBz；如果有降雹发生时，则截取值为49dBz。对于暖性降水，截取值为50dBz。降雨率每隔2.5min计算一次，1和3h累积雨量每隔5min计算1次，使用2.5min降水进行累积。1h累积雨量则用来直接计算6、12、24、48和72h累积雨量。

### 3.3.4 经过雨量计订正的雷达 QPE

NMQ系统计算经过雨量计订正的雷达QPE的方法为：第一步计算雷达QPE对应每一个雨量计所在点的误差；第二步将误差插值到雷达QPE整个区域，得出每个雷达回波像素点上的QPE误差<sup>[25]</sup>。该方法的关键为插值权重系数的计算，NMQ系统采用的是距离反比权重计算方法<sup>[26]</sup>，但为了避免由于雨量点的稀疏导致远距离的雨量点权重较高这一现象，进行了一定的修正，即人为地将误差分布调整为正态分布，减少远距离雨量点的误差在订正时权重过高的现象。具体做法是在权重计算时引进了一个修正因子

$$\alpha = \sum_{i=1}^n e^{\frac{-d_i^2}{(D/2)^2}} \quad (8)$$

其中D表示误差计算的影响半径，n为在某一个雷达回波像素点周围影响半径D范围内的雨量点个数， $d_i$ 为雷达像素点与第i个雨量点之间的距离。如果 $\alpha$ 大于1，则表示在该范围内有足够的雨量点用于误差的插值。如果 $\alpha$ 小于1，则每一个权重系数都要乘以 $\alpha$ 。权重计算时距离的指数和影响半径的确定采用了交叉检验的最小二乘法进行计算<sup>[1]</sup>。在订正雷达QPE时还对雨量计数据进行了质量控制，避免异常高或低的雨量计数据影响误差分布的正确计算。

### 3.3.5 QPE 产品在山地区域的订正

在复杂地形里, 雷达QPE的准确性受限于几个因素, 如波束遮挡和波束越顶<sup>[27]</sup>、垂直反射率廓线变化<sup>[28-29]</sup>, 以及地形增强降雨作用等<sup>[30]</sup>。这些因素对山地冬季层状降水的影响更大, 因为云顶高度较低, 雷达波束的最低有效仰角容易受地形遮挡。为解决这一难题, NMQ系统采用了一种山地订正方法用于计算该区域的QPE产品<sup>[31]</sup>。该方法基于实时雨量计观测, 以及当地降水气候分布数据集<sup>[32]</sup>。该数据集是将山地上的降水、温度、数字化高程模型和复杂气候特征等多种因素集成在一起, 经过分析后得到连续的、数字网格化的关于降水的月、年和过程的气候分布。NMQ系统在订正时, 首先将山地降水月分布数据降尺度到小时雨量分布, 然后计算每个雨量点上实时小时雨量与气候分布降尺度后的小时雨量之比, 再将这个比值插值到NMQ系统的QPE网格上, 权重计算为距离平方反比法, 最后将插值后的比值分布场乘以降尺度的山地降水气候小时雨量分布场, 即得到经过订正的QPE产品。这种订正方法在那些雨量点稀疏或降水局地性很强的区域, 适用性还不高, 因为实际降水与气候分布之间的差异太大, 导致订正的误差比较大。

为了解决这一问题, Zhang等<sup>[33]</sup>针对美国西部复杂地形区域业务雷达QPE误差来源进行分析, 并开发出一个新的雷达QPE方法。新雷达QPE方案包括去除降水回波, 构建无缝隙混合扫描反射率场, 应用VPR订正反射率, 采用可调整的Z-R关系式计算降雨率等步骤。新的雷达QPE方法经过2005—2006年冬季6个月数据的检验, 结果表明相比目前的业务雷达QPE, 准确度提升明显, 误差降低43%, 均方根误差降低30%, 降水产品的空间连续性也更好。Cao等<sup>[34]</sup>统计了美国西部山区11年的由TRMM卫星降水雷达(PR)观测反演的美国西部山区降水垂直结构特征, 研究发现: 在山地区域, 降水类型是决定VPR特征最显著的因素; VPR的形状也影响到地面降雨强度; VPR特征存在季节依赖性, 春季和秋季具有很相似的特征; VPR特征的空间变化显示地形对垂直结构有作用。结果也说明VPR订正方法有助于改善复杂地形上的降水估算。Qi等<sup>[35]</sup>开发了一个新算法, 使用S波段降水廓线雷达(S-PROF), 计算出两套降雨垂直廓线作为参考标准, 一个针对海岸山地区域, 另一个针对锡拉山脉。使用降水廓线雷达VPR用来订正WSR-88D雷达QPE, 经测试表明对误差改善明显。

目前面临的最大问题是在典型山地的迎风坡上, 雷达QPE的误差还是难以显著降低, 这是因为业务雷达无法观测到局地降水增强现象, 导致雷达QPE的低

估。因此在这些区域增加探测设备的空间密度来提高QPE的准确度是解决上述问题的可能途径之一。

### 3.4 NMQ 系统评估和应用

NMQ系统一个非常有特色的模块就是进行实时数据显示和产品评估检验, 即NMQ检验系统(QVS)。该系统可以实时显示所有的产品(网址: <http://nmq.ou.edu>), 包括图形和地理信息(行政边界、雷达站、距离圈、地形、气象业务部门预警范围等)。QVS中用来检验QPE产品的数据包括各种雨量计观测网, 如美国天气局水文气象自动数据系统HADS、社区辅助降水(雪、冰雹)观测点、中尺度雨量站网Mesonet等。评估统计量包括QPE产品与独立雨量计观测数据之间的雨量比值、相关系数、均方根误差等, 这些量都是实时计算的。此外, 一些美国天气局下发的业务QPE产品也能在QVS中与NMQ系统的QPE产品进行相互比较, 如Stage II、Stage IV等<sup>[36]</sup>。通过多种QPE产品之间的对比, 以及QPE产品与独立雨量计观测数据的检验, 可以更好地了解QPE误差的不确定性, 以及不同类型的QPE产品的误差表现差异, 这为融合多种产品形成优化的多途径QPE产品提供了一种便捷的技术手段。Chen等<sup>[37]</sup>对比统计了2009年12月—2010年11月期间Q2产品与美国天气局业务雷达QPE产品Stage II和Stage IV的差异。结果表明Q2的雷达QPE产品的日降水量与Stage II的同类产品相比年平均偏差>8%, 但Stage II的随机误差更高。日降水量的均方根误差Stage II为4.5mm, Q2为1.1mm, 相关系数Stage II为0.20, Q2为0.73。Q2的降水分类和可调整的Z-R关系算法有效地减少了一些地区的误差, 如美国阿帕拉契山脉东部地区。

QVS中还归档保存了近3年的NMQ系统的主要产品, 以供用户下载使用。目前NMQ系统的用户包括政府部门、大学科研机构 and 私人单位, 如3D雷达反射率拼图产品在NCEP中用于RUC模式的数据同化, 显著提高了0~6h定量降水的预报准确率<sup>[38]</sup>。3D雷达反射率拼图产品在航空结冰威胁预警中也得到使用<sup>[39]</sup>。

### 3.5 NMQ 系统中的双偏振雷达产品

自2010年以来, 美国开展了WSR-88D雷达网的双偏振功能全面升级。以NSSL为主的科研团队开发出一系列的双偏振雷达资料应用产品, 并在2012年开始准业务运行。目前NMQ系统上也集成了一些双偏振雷达产品实时运行。这些产品包括: (1) QC后的4个仰角的双偏振基数据; (2) 降水粒子分类<sup>[40]</sup>, 共分为8种, 有小一中雨、暴雨、雨雹混合、大雨滴、湿雪、干雪、冰晶和霰; (3) 双偏振雷达QPE<sup>[41]</sup>, 包括雨强

和1h、24h累积雨量。这些产品在QVS系统经过充分评估后将被整合到新一代NMQ系统中。

#### 4 结论

美国国家强风暴实验室开发并运行的全国拼图和多途径定量降水估算系统经过多年发展,已实现高时空分辨率的雷达三维拼图和定量降水估算产品实时运行,与常规的业务雷达QPE相比,也有明显的改善,在科研和业务应用上取得了良好的效益。目前存在的待解决的问题主要包括反射率质量控制的进一步改进,如何完善业务雷达网无法覆盖区域的拼图方法,在山地地区如何实时订正由于垂直反射率廓线变化导致的QPE误差,如何结合双偏振雷达技术,进一步完善降水分类方法和更好地选择合适的Z-R关系等。这些问题的解决将成为NMQ系统未来研发计划的重点目标。

#### 参考文献

- [1] Zhang J, et al. National Mosaic and Multi-Sensor QPE (NMQ) System: Description, results, and future plans. *Bull Amer Meteor Soc*, 2011, 92: 1321-1338.
- [2] Kelleher K E, et al. A supplement to project CRAFT: A Real-Time Delivery System for Nexrad Level Via The Internet. *Bull Amer Meteor Soc*, 2007, 88: s5-s9.
- [3] Vasiloff S V, et al. Improving QPE and very short term QPF: An initiative for a community-wide integrated approach. *Bull Amer Meteor Soc*, 2007, 88: 1899-1911.
- [4] Lakshmanan V, Fritz A, Smith T, et al. An Automated technique to quality control radar reflectivity data. *J Appl Meteor Climatol*, 2007, 46: 288-305.
- [5] Lakshmanan V, Zhang J, Howard K. A technique to censor biological echoes in radar reflectivity data. *J Appl Meteor Climatol*, 2010, 49: 453-462.
- [6] Zhang J, Wang S, Clarke B. WSR-88D reflectivity quality control using horizontal and vertical reflectivity structure. 11<sup>th</sup> Conf on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Hyannis, MA. *Amer Meteor Soc*, 2004.
- [7] Lakshmanan V, Zhang J, Hondl K, et al. A statistical approach to mitigating persistent clutter in radar reflectivity data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2012, 5(2): 652-662.
- [8] Zhang J, Howard K, Gourley J J. Constructing three-dimensional multiple-radar reflectivity mosaics: Examples of convective storms and stratiform rain echoes. *J Atmos Oceanic Technol*, 2005, 22: 30-42.
- [9] Lakshmanan V, Smith T, Hondl K, et al. A real-time, three-dimensional, rapidly updating, heterogeneous radar merger technique for reflectivity, velocity, and derived products. *Wea Forecasting*, 2006, 21: 802-823.
- [10] Zhang J, Langston C, Howard K. Brightband identification based on vertical profiles of reflectivity from the WSR-88D. *J Atmos Oceanic Technol*, 2008, 25: 1859-1872.
- [11] Xu X Y, Howard K, Zhang J. An automated radar technique for the identification of tropical precipitation. *J Hydrometeorol*, 2008, 9: 885-902.
- [12] Zhang J, Qi Y C. A real-time algorithm for the correction of brightband effects in radar-derived QPE. *J Hydrometeorol*, 2010, 11: 1157-1171.
- [13] Wen Y X, Cao Q, Kirstetter P E, et al. Incorporating NASA spaceborne radar data into NOAA national mosaic QPE system for improved precipitation measurement: A physically based VPR identification and enhancement method. *J Hydrometeorol*, 2013, 14: 1293-1307.
- [14] Qi Y C, Zhang J. Correction of radar QPE errors associated with low and partially observed brightband layers. *J Hydrometeorol*, 2013, 14: 1933-1943.
- [15] Qi Y C, Zhang J, Cao Q, et al. Correction of radar QPE errors for nonuniform VPRs in mesoscale convective systems using TRMM observations. *J Hydrometeorol*, 2013, 14: 1672-1682.
- [16] O'Bannon T. Using a 'terrain-based' hybrid scan to improve WSR-88D precipitation estimates. 28th Conf on Radar Meteorology, Austin, TX. *Amer Meteor Soc*, 1997.
- [17] Fulton R A, Breidenbach J P, Seo D J, et al. The WSR-88D rainfall algorithm. *Wea Forecasting*, 1998, 13: 377-395.
- [18] McLaughlin D J, et al. Distributed Collaborative Adaptive Sensing (DCAS) for improved detection, understanding and prediction of atmospheric hazards. Proc Ninth Symp on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans, and Land Surface (IOAS-AOLS), San Diego, CA. *Amer Meteor Soc*, 2005.
- [19] Witt A, Eilts M D, Stumpf G J, et al. An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D. *Wea Forecasting*, 1998, 13: 286-303.
- [20] Greene D R, Clark R A. Vertically integrated liquid water: A new analysis tool. *Mon Wea Rev*, 1972, 100: 548-552.
- [21] Amburn S A, Wolf P L. VIL density as a hail indicator. *Wea Forecasting*, 1997, 12: 473-478.
- [22] Marshall J S, Hirschfeld W, Gunn K L S. Advances in radar weather. *Adv Geoph*, 1955, 2: 1-56.
- [23] Rosenfeld D, Wolff D B, Atlas D. General probability-matched relations between radar reflectivity and rain rate. *J Appl Meteorol*, 1993, 32: 50-72.
- [24] Radar Operations Center. Guidance on selecting Z-R relationships. 1999. [http://www.roc.noaa.gov/ops/z2r\\_osf5.asp](http://www.roc.noaa.gov/ops/z2r_osf5.asp)
- [25] Ware E C. Corrections to radar-estimated precipitation using observed rain gauge data. New York: Cornell University, 2005.
- [26] Simanton J R, Osborn H B. Reciprocal distance estimate of point rainfall. *J Hydraul Div Amer Soc Civ Eng*, 1980, 106: 1242-1246.
- [27] Maddox R A, Zhang J, Gourley J J, et al. Weather radar coverage over the contiguous United States. *Wea Forecasting*, 2002, 17: 927-934.
- [28] Joss J, Waldvogel A. Precipitation measurements and hydrology. In: Atlas D. *Radar in meteorology*. *Amer Meteor Soc*, 1990.
- [29] Germann U, Joss J. Mesobeta profiles to extrapolate radar precipitation measurements above the alps to the ground level. *J Appl Meteorol*, 2002, 41: 542-557.
- [30] Kitchen M, Brown R, Davies A G. Real-time correction of weather radar data for the effects of bright band, range and orographic growth in widespread precipitation. *QJR Meteorol Soc*, 1994, 120: 1231-1254.
- [31] Schaake J, Henkel A, Cong S. Application of PRISM climatologies for hydrologic modeling and forecasting in the western U.S. 18<sup>th</sup> Conf on Hydrology, Seattle, WA. *Amer Meteor Soc*, 2004.
- [32] Daly C, Neilson R P, Phillips D L. A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. *J Appl Meteorol*, 1994, 33: 140-158.
- [33] Zhang J, Qi Y C, Kingsmill D, et al. Radar-based quantitative precipitation estimation for the cool season in complex terrain: case studies from the NOAA hydrometeorology testbed. *J Hydrometeorol*, 2012, 13: 1836-1854.
- [34] Cao Q, Hong Y, Gourley J J, et al. Statistical and physical analysis of the vertical structure of precipitation in the mountainous west region of the united states using 11+ years of spaceborne observations from TRMM precipitation radar. *J Appl Meteor Climatol*, 2013, 52: 408-424.
- [35] Qi Y C, Zhang J, Kaney B, et al. Improving WSR-88D Radar QPE for Orographic Precipitation Using Profiler Observations. *J Hydrometeorol*, 2014, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JHM-D-13-0131.1>
- [36] Lin Y, Mitchell K E. The NCEP stage II/IV hourly precipitation analyses: Development and applications. 19<sup>th</sup> Conf on Hydrology, San Diego, CA. *Amer Meteor Soc*, 2005.
- [37] Chen S, et al. Evaluation and uncertainty estimation of NOAA/NSSL next-generation national mosaic quantitative precipitation estimation product (q2) over the continental united states. *J Hydrometeorol*, 2013, 14: 1308-1322.
- [38] Weygandt S S, Benjamin S G, Brown J M. Radar reflectivity-based initialization of precipitation systems using a diabatic digital filter. 33<sup>rd</sup> Int Radar Conf, Carins QLD, Australia. *Amer Meteor Soc*, 2007.

- [39] Serke D, McDonough F, Politovich M K. Analysis of 3-D NEXRAD mosaic reflectivity data collocated with research aircraft and satellite data: Implications on in-flight icing. 13<sup>th</sup> Conf on Aviation, Range and Aerospace Meteorology, New Orleans, LA. Amer Meteor Soc, 2008.
- [40] Vivekanandan J, Ellis S M, Oye R, et al. Cloud microphysics

- retrieval using S-band dual-polarization radar measurements. Bull Amer Meteor Soc, 1999, 80: 381-388.
- [41] Ryzhkov A V, Schuur T J, Burgess D W, et al. The joint polarization experiment: Polarimetric rainfall measurements and hydrometeor classification. Bull Amer Meteor Soc, 2005, 86: 809-824.

## 编辑走台站：广西气象之声

### 本刊编辑部

【编者按】2014年4月初，恰逢今年华南前汛期首次大范围强对流天气过程发生后，编辑部的3位编辑应邀走访了广西中东部的4个地级气象局、2个县级局和2个观测站。所到之处，尽览基层气象工作人员坚守自己的岗位，尽职尽责。他们也坦然谈到气象现代化事业建设，亮出了自己的观点和看法。我们在这里编辑、整理，与读者一起思考。

——“目前的气象类期刊不少，论文产量颇丰，但是我们很难看到针对某些特定的高影响天气的理论和经验性的研究，这类研究其实更具有启发性，也是实际业务工作中更需要的。”

from 地局首席预报员

——“推动基层的科研，不仅可行而且很必要。我们建议，气象系统应该组织一些针对基层业务难点的科研课题，联合县、地局业务人员开展针对性强的研究，并在业务预报中随时进行验证。这样的研究还能系列给出基层预报能力提高的主要科学问题，吸引更多的科学家开展有效地促进业务进步的研究。”

from 县气象局局长

——“就此次前汛期强降水过程来说，各种模式的预测虽然大都给出了降水区，但是24h以上的预报，往往给出雨区和时间“插花”（各不相同）的结果而且雨量预报不足。我们希望专家能够指导我们，不断认识各种模式针对不同类型的过程其预测能力的差别，当然，更期待模式与本地地形和观测数据更多的融合，能力不断改进。”

from 地局预报员

——“2014年3月末，两广地区前汛期这场暴雨，雨量之大，几乎所有模式48h都没预报出来。我们认为这种暖区强降水一直是业务预报的难点，希望中国局能够组织专家开展科技攻关，让我们依靠自己的模式或手段，能够比较从容地开展预报服务。”

from 地局气象台台长



——“我们提出的‘无缝隙’理念，目前在地面探测上通过密集自动气象站初步获得实现，但这也带来了挑战。一方面目前的自动探测仪器，需要解决，如，防水技术，从而减轻维护仪器的负担和减少缺测率；另一方面，我们期待加密的观测记录能在预报业务中获得充分的利用，体现“无缝隙”资料的价值和尽快带来预报的‘无缝隙’。”

from 观测站站长、地局气象台台长

——“现在业务上精细化预报，还需要研究成果的支撑，例如，要给出每个6h预报结果，模式就要从目前的形势预报，向针对天气过程量化预报倾斜，而且不仅仅是第一个6h，还要给出之后若干时间段内的天气转化或新过程的预报结果。”

from 地局主管业务局长

——“地市局的预报员工作很繁忙，几乎每个值班人员都要同时负责好几个岗位的工作，但是他们却忙而不乱，每天需要完成的工作都规范的记录在一个本子上。我来体验基层预报工作，最想了解当地汛期气候特征，希望能多经历几次让当地预报员最为头疼的暖区降水和台风登陆过程，和这里的预报员合作把收获总结出来。”

from 中央气象台到广西地局交流的年轻预报员

# 流域水文气象耦合的洪水预报研究及应用进展

彭涛<sup>1</sup> 沈铁元<sup>1</sup> 高玉芳<sup>2</sup> 胡跃文<sup>3</sup>

(1 中国气象局武汉暴雨研究所 暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430074; 2 江苏省农业气象重点实验室/应用气象学院, 南京信息工程大学, 南京 210044; 3 贵州省气象服务中心, 贵阳 550002)

**摘要:** 洪水预报在防洪减灾中具有重要的理论意义和现实意义。论文从流域暴雨的定量降水估算与预报、流域洪水预报水文模型、流域水文气象耦合、流域洪水实时预报系统研发及业务应用等方面回顾了国内外流域水文气象耦合的洪水预报研究与实践的进展, 并从洪水预报与气象预报的集成耦合、有物理基础的分布式水文模拟、洪水风险灾害评价等展望了流域洪水灾害预报的一些关键技术和问题。

**关键词:** 暴雨洪水, 洪水预报, 水文气象耦合

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.02.006

## Research and Application Progress on Basin Hydro-Meteorology Coupling Flood Forecasting

Peng Tao<sup>1</sup>, Shen Tiejuan<sup>1</sup>, Gao Yufang<sup>2</sup>, Hu Yuewen<sup>3</sup>

1 Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430074

2 Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology/College of Applied Meteorology, Nanjing University of information Science and Technology, Nanjing 210044

3 Guizhou Province Meteorological Service Center, Guiyang 550002

**Abstract:** Flood forecasting has an important theoretical and practical significance in flood control and disaster mitigation. Research and application progress on Basin hydro-meteorology coupling flood forecasting both at home and abroad is reviewed from the radar and numerical model of quantitative precipitation estimation and forecast technology, hydrological model for basin flood forecasting, hydrology-meteorological coupling technology, and real-time flood forecasting system. Finally, some key technologies and problems of flood disaster prediction from the integration and coupling for flood forecast and weather forecast, physically based distributed hydrological model and flood disaster evaluation are proposed.

**Keywords:** storm flood, flood forecasting, hydrological and meteorological coupling

### 1 引言

我国的洪涝灾害从出现频率、影响范围到造成的损失都是世界最为严重的国家之一。据统计, 在过去的2000多年中, 中国发生的有史料可查的重大洪水灾害就达1600余次<sup>[1-2]</sup>。20世纪50年代以来, 长江流域(包括江淮地区)的历次大洪水(如1954、1969、1975、1991、1993、1994、1995、1996、1998、2003、2007、2010和2011年)都给国家造成了巨大损

失。新中国成立以来, 经过40多年的治理, 全国江河流域的防洪形势有了重大改观。近年来, 随着人口的持续增长和经济的迅猛发展, 我国洪涝损失具有逐年增大的趋势。如何对洪水进行科学而准确的预报, 一直是人类长期面临的历史课题。

洪水预报追求的是高精度和预见期长, 要得到高精度和长预见期预报, 必须从提高降雨估算精度开始, 结合降雨预报, 采取流域降雨径流模型和河道洪水演算模型的途径来实现。

早在30多年前, 陈金荣等<sup>[3]</sup>从长江流域防洪的丰富实践中, 对水文气象预报已作了精辟而深刻的论述, 指出气象预报同水文预报的结合为防洪和水库调度等工作, 带来巨大的优越性和必要性, 是水文预报发展的必然趋势。文中阐述的基本思想在水文气象预报技术已有许多新的发展和进步的今天, 仍然具有指

收稿日期: 2013年9月24日; 修回日期: 2014年1月16日  
第一作者: 彭涛(1980—), Email: pt\_mail@sohu.com  
资助信息: 国家自然科学基金(41205086, 41105077); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306056, GYHY201306059); 江苏省自然科学基金面上项目(BK2012859)

导意义。

20世纪90年代以来,随着计算机网络、GIS、遥感、数值天气预报等现代技术在水文预报领域的推广应用,以及水文理论和方法的不断发展,当前基于雷达和数值模式的定量降水估算与预报技术、基于DEM的分布式水文模型研发、基于水文气象耦合的洪水预报、洪水实时预报系统的研发等正成为当前流域暴雨洪水预报技术研究和发展的方向。在此从流域暴雨的定量降水估算与预报、流域洪水预报模型、流域水文气象耦合、流域洪水实时预报系统研发及业务应用等几个方面围绕“水文气象耦合的洪水预报”这一核心对国内外相关研究及实践进展进行详细的回顾。

## 2 流域暴雨的定量降水估算与预报

洪水灾害产生的直接原因是定量级的降水,面雨量是一切洪水预报模型的输入场,所以,面雨量估算以及预报也成为目前国内外的一个研究热点。国内外专家做了大量的有益探索,如以泰森多边形法、Kriging插值为代表的实况插值法等,在此笔者将简要回顾基于雷达等遥感手段的定量降水估算以及基于数值模式的定量降水预报方面的进展<sup>[4]</sup>。

### 2.1 基于卫星、雷达等遥感手段的定量降水估算

利用卫星遥感资料估算降水,具有覆盖范围广、获得资料容易的优点,但是其空间分辨率不高,星下点的最高分辨率也只有5km,能从静止卫星收到的资料时间间隔一般是1h一幅图,另外所利用的卫星遥感资料主要反映的是云的情况,它与具体到某一点、某一小区域的降水无必然联系,缺乏一定的理论依据,但是随着静止卫星时空分辨率的提高,也逐步引起了专家学者的关注。

雷达等遥感估算降水有时空分辨率高的优点,可以比较客观地反映降水量相对大小的分布趋势。目前在天气雷达资料的面雨量估算以及融合技术方面,欧美国处于领先水平。如英国天气雷达网自20世纪70年代开始兴建,在80年代迅速发展,1993年基本达到目前的状态,主要由英国气象局管理的13部天气雷达组成的雷达监测网常年连续运行,以5min间隔实时提供2km×2km分辨率的降水率资料,以及每30min提供一次基于雷达观测资料外推制作的6h逐时和累计降水预报资料。美国自80年代后期开始建设新一代天气雷达网。用于全国布网的新一代雷达系统(WSR88D)是具有高质量定量降水探测能力的现代多普勒天气雷达。至1997年底,新雷达已在全国安装了165部,覆盖了全美国,能够提供时段小至5min和空间分辨率小于1km<sup>2</sup>的雨量估计值<sup>[5-6]</sup>。

我国从20世纪60年代开始布设天气雷达,目前我国建成了由172部新一代多普勒天气雷达组成的雷达观测网,实现6min一次的数据实时传输和拼图联网,加强暴雨等突发性灾害天气的监测预警服务。从80年代起开始研究雷达测雨和卫星测雨,并取得了很大的进展,如1998年淮河水利委员会与南京大学合作,以淮河为试验基地,利用安徽阜阳和合肥多普勒雷达在淮河流域的支流济、史、灌河流域进行试验研究。中国气象局和水利部联合进行的“淮河黄河流域暴雨洪水监测预报系统”试验项目中,对雷达和雨量计联合测量实时降水进行了业务试运行。此外就雷达估测降水方法而言,主要包括:Z-R关系法、平均校准法、卡尔曼滤波校准法、最优插值法、卡尔曼滤波和最优插值联合校准法等。国内大量学者对此也展开了大量研究:万玉发等<sup>[7]</sup>提出了一种基于准同雨团样本概念雷达与雨量计的实时同步结合的降雨估算新技术。尹忠海等<sup>[8]</sup>根据卡尔曼滤波校准方法估算区域降水量的原理,利用野外观测资料对一次降水过程进行了试验研究,结果表明卡尔曼滤波校准方法能提高雷达定量估算区域降水量的精度。李建通等<sup>[9]</sup>将最优插值法引进雷达测雨领域,并通过数值模拟和实测资料分析证明了该法在测定区域降水量方面的较好效果。刘晓阳等<sup>[10]</sup>用最优插值方法获得雷达雨量计联合估测的梅山水库集水区降水分布。张亚萍等<sup>[11]</sup>也在开展了大量雷达估测降雨的研究工作,并取得了较大的进展。

### 2.2 基于数值模式的定量降水预报

数值天气预报(NWP)是目前定量降雨预报最行之有效的一种方法。数值天气预报模式研究开始于50年前,目前国际上比较先进的数值天气预报模式有ECMWF(欧洲中期预报中心)的全球模式,NCEP(美国国家环境预报中心)的Eta模式、WRF、美国宾夕法尼亚州立大学和美国大气研究中心联合开发的中尺度数值预报模式MM5,以及日本全球模式、亚洲区域模式、日本区域模式等<sup>[12]</sup>。

我国的数值预报研究始于20世纪70年代,多以引进吸收国外模式为主。如张玉玲等发展的有限区域分析预报系统(LAFS),国家气象中心引进欧洲气象中心T639发展的T213等。另外,Eta、MM5、WRF等模式被我国学者引进并开展了大量应用研究<sup>[12-13]</sup>。我国自行研发的模式有:周晓平的5层细网格原始方程降水预报模式、宇如聪等发展的AREM,以及中国气象科学研究院在借鉴美国MM5和WRF的基础上研究开发的天气模式GRAPES。目前我国NWP整体水平与欧美等发达国家还存在一定的差距。目前我国QPF预

报水平逐年提升、空间分辨率越来越高,有限区域细网格业务化模式网格距已达10km左右。随着中国气象局精细化预报服务工作的开展,七大区域中心已建立了高分辨率的区域精细化预报业务系统,如华中区域气象中心由中国气象局武汉暴雨研究所(以下简称“暴雨所”)基于WRF模式搭建的3km×3km格距的区域精细化预报系统;王晨稀等<sup>[14]</sup>开展了我国集合预报的先例,探讨NWM的不确定性;李俊等<sup>[15]</sup>探讨了集合预报方法在山洪预报中应用。

### 3 流域洪水预报模型

流域洪水预报主要方法有两大类:一是以历史数据为基础的统计预报,该方法利用输入(一般指降雨量或上游干支流来水)与输出(一般指流域控制断面流量)资料,建立某种数学关系;然后就可由新的输入推测输出。这种模型只关心模拟的精度,而不考虑输入输出之间的物理因果关系。二是以水文模型为核心的定量洪水预报,该方法建立气象与水文因子的关系,依据气象要素进行水文预报。基于水文模型的洪水预报可分为概念性水文模型和分布式水文模型,概念性模型是以水文现象的物理概念作为基础进行模拟,对下渗、蒸发、产汇流等物理现象进行了合理概念化,具有一定的物理基础,因此,在近几年里发展很快,在实际应用中得到了大量的使用。很多流域水文模型都属于概念性水文模型,如由Craford和Linsley提出的斯坦福模型,美国天气局Sitten提出的API模型,国内由赵人俊教授提出的新安江模型,意大利Todini提出的Arno模型等<sup>[16]</sup>。这些模型目前仍然是主流的洪水预报模型,在一定时期内还会继续发挥作用。从20世纪90年代中期以来,随着卫星遥感、数字雷达测雨技术以GIS技术的完善和高速发展并进入科技领域,分布式水文模型作为一类新的流域水文模型得到了快速发展,成为近20年来水文建模领域的热点、是水文模型的发展趋势和研究前沿<sup>[16-17]</sup>。

美国国家海洋和大气管理局(NOAA)于2000年9月开始主持实施“国际分布水文模型比较计划(DMIP)”,提出了全分布水文模型和半分布水文模型共12个,分析了概念性水文模型与分布水文模型的差别<sup>[18]</sup>。分布式流域水文模型最显著的特点是与DEM的结合,以偏微分方程控制基于物理过程的水文循环时空变化,能更好地考虑到降水和下垫面的空间变异,更好地利用GIS和遥感信息模拟降水径流响应,并能与气象模式结合延长洪水预见期。分布式水文模型的研究可以认为起始于1969年Freeze等发表的《一个具有物理基础数值模拟的水文响应模型的蓝

图》的文章<sup>[19]</sup>,该文提出了分布式水文物理模型的基本概念和框架。被认为是第一个真正的分布式水文物理模型是SHE(Système Hydrologique Européen)。该模型由英国、法国和丹麦的科学家于1976年开始联合研制,于1982年正式发表。伴随着SHE的问世,分布式水文模型的研究得到了长足的发展,自20世纪90年代以来,国内外在水文模型模拟研究方面取得了新的进展,目前分布式水文模型的理论和技术已趋于成熟,国外代表性成果包括TOPMODEL(Topography Based Hydrological Model)、SWAT(Soil and Water Assessment Tool)、VIC(Variable Infiltration Capacity)等模型,可以说在对不同尺度、不同环境、不同需求的模拟应用中各有优势或缺陷<sup>[17-18]</sup>。

国内分布式水文模型的研究起步较晚。20世纪90年代以来,随着GIS软件的迅速发展,在国家自然科学基金的支持下,我国一些学者进行了探索性的研究工作。尽管起步较晚,但也取得了较大的进展。沈晓东等<sup>[20]</sup>在研究降雨时空与下垫面自然地理参数空间分布的不均匀性对径流过程影响的基础上,提出了一种在GIS支持下的动态分布降雨径流流域模型,实现了基于栅格DEM的坡面产汇流与河道汇流的数值模拟;郭生练等<sup>[21]</sup>建立了一个基于DEM的分布式流域水文物理模型,用来模拟小流域的降雨径流时空变化过程;任立良等<sup>[22]</sup>在数字高程模型(DEM)的基础上,进行子流域集水单元勾画、河网生成、河网与子流域编码及河网结构拓扑关系建立,然后在每一集水单元上建立数字产流模型,再根据河网结构拓扑关系建立数字河网汇流模型(马斯京根法),从而建成数字水文模型;郑红星等<sup>[23]</sup>提出了模块化结构的流域分布式水循环模拟系统(HIMS)等。

## 4 流域水文气象耦合关键技术

### 4.1 流域水文气象耦合的降水降尺度技术

数值天气预报模式与流域水文模型在时间空间分辨率存在的差异制约了天气预报模式预报结果在水文预报中应用的进一步发展。立足于在水文预报中充分地利用天气预报及气象信息这一目的,建立定量降水估算、定量降水预报(QPE/QPF)与水文模型(HM)之间的结合,其首要任务就是解决降水信息场与水文模型时间和空间尺度上的匹配问题,缩小两者的尺度差异,寻找水文气象结合的契机。目前这方面的研究工作目前已开始得到了相关学者的重视:刘勇等<sup>[24]</sup>充分利用降水量空间统计分析的结果,通过在模型中引入坡度、坡向变量,对祁连山中东部地区降水量空间变化模式进行尺度下移,得到了该地区具

有多尺度特性的高空间分辨率降水量的分析模型；此外，数值模式的自嵌套技术以及多模式的互嵌套技术开始用于提高模式空间分辨率<sup>[25]</sup>。为了有效地提高定量降水估算预报产品在水文预报中的应用，武汉暴雨所等单位从“雷达资料同化+模式嵌套+高分辨的区域数值模式+动力释用技术”的角度全面、系统地开展降尺度方法研究：在观测降水上基于新一代多普勒雷达探测技术和雨量计实测资料，采用卡尔曼滤波、最优插值、变分、统计权重等多种校正方法，研发了高分辨的定量降水估算校正新技术；在数值模式预报降水上通过资料同化、模式嵌套、动力释用等技术缩小了天气模式与水文模型网格尺度的差异<sup>[26]</sup>，建立了华中区域精细化数值预报系统（图1），发展了实时洪水预报中水文气象耦合的降尺度技术。

#### 4.2 雷达定量降水估算（QPE）与洪水预报的耦合

确切地掌握降雨量的空间分布，是使用分布式水文模型的重要先决条件。雷达测雨可直接测得降雨的空间分布，提供流域或区域的面雨量，并具有实时跟踪暴雨中心走向和暴雨空间变化的能力。雷达估算降水有时空分辨率高的优点，可以比较客观地反映降水量相对大小的分布趋势。

为了将雷达测雨资料用于洪水预报预警，国外学者首先展开了相关研究<sup>[5-6]</sup>。如美国已经建立了由多探测器降水估算技术和人机交互雨量订正技术共同构成的定量估算降水业务应用系统，并和水文预报模型结合，应用在山洪指导系统（FFGS）和美国天气局河流预报系统（NWSRFS）中。英国气象局开发了雷达资料实时处理和多部雷达联网工作，实现资料的实时质量控制，结合雷达和卫星资料，进行了气象和水文服务的短时定量降水预报，利用水文雷达系统（HYRAD）集成了雷达-雨量计估算面雨量和流域雷达降水预报的研究成果，用实时雷达和雨量计资料计算流域面雨量并进行未来两小时的流域面平均雨量预报，将计算和预报数据以时间序列的形式存入RFFS数

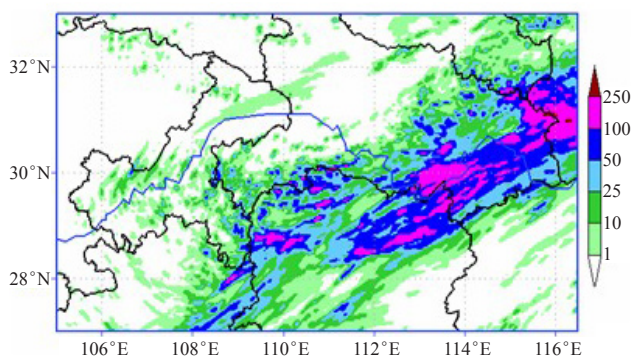


图1 3km分辨率的华中区域数值模式降水预报系统

据库用于河流预报。RFFS与HYRAD共同组成了实时降水与河流预报系统，目前已经在泰晤士流域等几个洪水预报警报中心进行日常业务应用。意大利博洛尼亚（Bologna）大学开发的RAIN-MUSIC软件，能实现多源降雨信息同化和数据融合，可以作为利用雷达和卫星提供一个为得到足够准确的降雨监测预报和面雨量估算值的最好途径，该功能模块已纳入欧洲洪水预报系统（EFFORTS）中，显著提高了降雨估算的质量。

此外，国内有关学者也开始了定量降水估算和洪水预报耦合技术的研究探讨：刘黎平等<sup>[27]</sup>成功地应用天气雷达估算降雨技术来进行水文预报，提高了预报的精度；刘晓阳等<sup>[28]</sup>利用雷达估测降雨对史灌河流域进行了径流模拟；Ren等<sup>[29]</sup>、Chen等<sup>[30]</sup>利用雷达降雨资料对水文过程进行了模拟研究；李致家等<sup>[31]</sup>对从实时洪水预报的角度出发，将雷达遥感数据与水文模型进行耦合对准河史灌河流域蒋家集站进行洪水预报；武汉暴雨所联合武汉大学<sup>[32-33]</sup>通过输入不同的降雨量估算结果（常规插值法得到面降雨量、雷达资料联合地面雨量站估算得到的降雨量）对比分析利用雷达资料联合雨量站估算得到的降雨量对洪水预报结果的影响，试验表明，综合平均确定性系数、预报洪峰流量合格率、峰现时差三个评价指标可以看出使用校准后的雷达降雨结果作为水文模型的输入总体洪水模拟水平是最优的。并基于水文模型，引进增长繁殖模方法对雷达QPE初值进行扰动，得到不同的QPE产品，从而输入水文模型，分析降水误差信息对洪水预报中径流模拟的影响，结果表明降水初始场经过随机扰动之后输出结果与未扰动的输出结果的相对误差有所增大，其中洪峰流量增大5%、洪量增大8%，即模型输入误差在经过模型的传递后有增大的趋势，而且峰现时间大部分会呈现滞后现象。

#### 4.3 模式预报降水（QPF）与洪水预报的耦合

预见期内的降水量直接影响着洪水预报的精度，预见期愈长，预见期内的降雨对预报值影响愈大，为此预见期内的降雨与洪水预报耦合技术也逐步受到了广大水文和气象科技工作者的关注。目前随着数值预报理论与方法的飞跃发展，数值预报现正成为暴雨预报实现定点、定时和定量的科学手段，为水文模型预见期降水的预报提供了强有力的支撑。

目前定量降水预报（QPF）应用于水文预报模型是被水文气象学界普遍认同的发展方向之一，也是目前研究的热点难点。对于预见期降雨与洪水预报耦合的研究国外相关学者以及国家气象中心、长江委、黄河委和武汉大学已开展过相关试验和调研：美国国家

气象中心(NMC)基于数值模式预报降水开发了一系列洪水量化预报法<sup>[34]</sup>;杨文发等<sup>[35]</sup>考虑预见期内的降水预报信息,采用降水预报与洪水预报耦合的方法,对1998年汛期发生在长江上游三峡区间的一次暴雨洪水过程进行了预报试验;王庆斋等<sup>[36]</sup>利用小浪底—花园口之间的暴雨洪水过程开展了洪水预报耦合技术研究;李超群等<sup>[37]</sup>基于短期定量降水预报产品开展了清江隔河岩洪水预报的研究;郭靖等<sup>[38]</sup>耦合MM5气象模式和VIC分布式水文模型构建了汉江流域水文气象耦合模型,并对丹江口以上流域开展模拟试验;Bao等<sup>[39]</sup>以淮河息县流域为试验流域,以CMC、CMA、ECWMF、UKMO、NCEP五个气象中心的TIGGE降水以及地面雨量计观测降水驱动新安江水文模型,在2007年7月的息县流域超警洪水预报中进行试验研究。崔春光等<sup>[40]</sup>、彭涛等<sup>[41]</sup>开展了定量降水预报及其集合预报产品与水文预报耦合的预报试验,结果表明考虑预见期内的降雨相对于未考虑预见期降雨对洪水预报结果提高具有明显的优势,能延长水文预见期,提高水文预报精度,约40%(图2);将降水集合预报

产品引入水文预报领域,拓展了水文不确定性预报的新方法,能将单一的确定性预报转化为可能发生范围的预报,获取更多的水文预报信息,提高了水文预报结果的可靠性,能更好地满足防洪减灾对风险信息的需求。

## 5 流域洪水实时预报系统研发及业务应用进展

洪水预报系统(flood forecasting system)是在计算机上实现洪水预报联机作业的运行系统,它靠快速、准确地收集、存储和处理水情、雨情,通过各种专业数学模型进行洪水预报,从而及时、准确地作出洪水流量过程的预报,提高了洪水预报的时效性和精确度。

在国外,最早将水情信息处理与洪水预报计算机制作直接联为一体的系统是从研制水文自动遥测洪水警报、预报系统开始的。从20世纪50年代开始,日本、美国、法国、英国等相继在本国的河流研制出水文自动测报系统,并先后具有自动化洪水预报、自动警报功能。80年代后,这种技术走向成熟和普及。

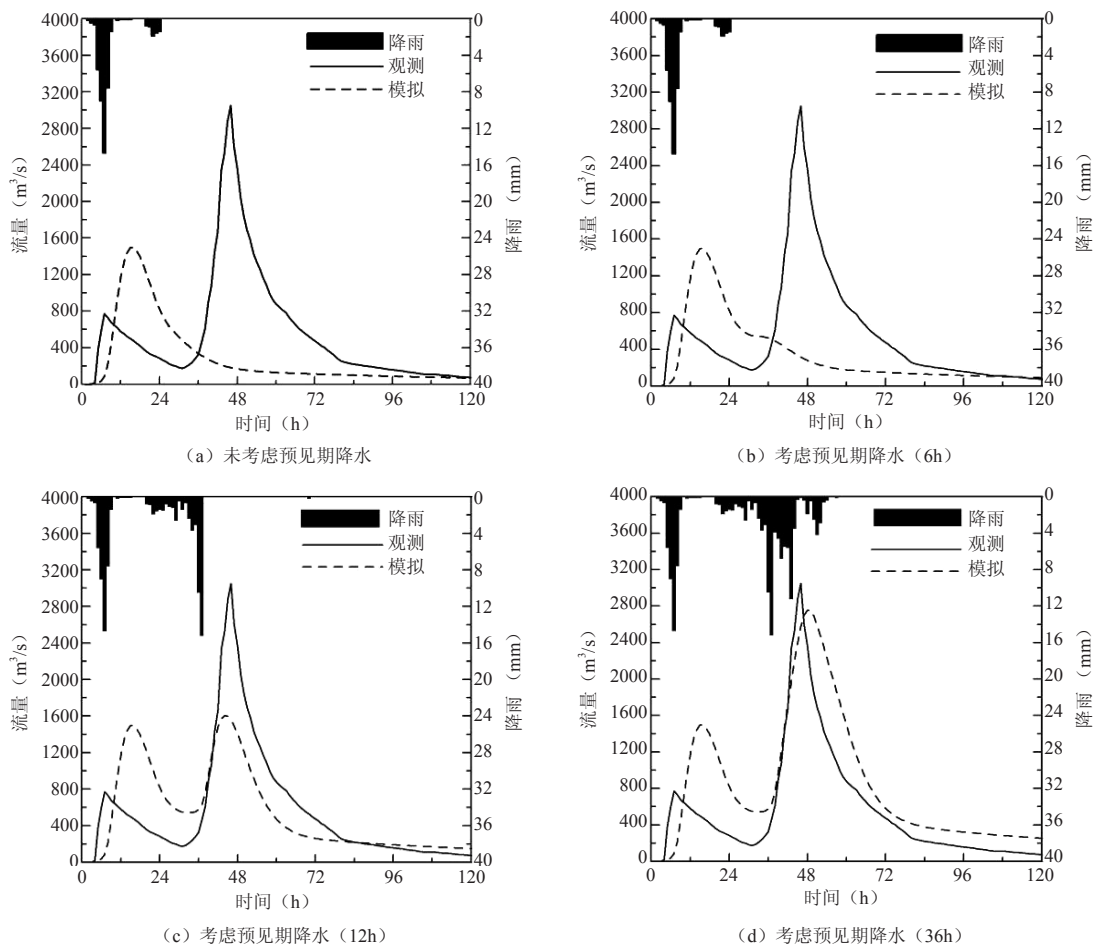


图2 定量降水预报与水文模型耦合的洪水预报

1989年,美国天气局在河流预报系统(NWSRFS)第5版上安装了交互式预报程序(IFP),揭开了新一代洪水预报系统研制的序幕。该系统采用完全模块化的结构,预报算法独立于计算机系统,利用图形交互处理技术对洪水预报数学模型的计算结果进行人工干预,从而得到可以发布和实行河系连续预报的成果,保证了河系预报作业的连续性。至今,该系统已建成包含28个常用的预报模型的预报模型库,用户可任意选择所需模型用于构建预报方案,并在全美13个河流预报中心广泛使用。欧洲洪水预报系统(EFFS)在2003年3月于鹿特丹举行的题为“欧洲洪水预报的进步”的国际会议上进行了首次展示,目前改进后的系统可耦合雷达降水估算和有限区域数值天气预报模式,建立暴雨预报和洪水预报耦合的一体化模型<sup>[42-43]</sup>。

在我国,最早投入运行的洪水预报系统就是1985年从美国SM公司引进的ALERT软件系统。在消化吸收的基础上,我国开发了各流域的数以百计的洪水预报系统,至20世纪90年代中期,我国从无到有基本上普及了洪水预报系统,实现了以电脑作业替代手工作业。1992年,在中美双边洪水预报学术讨论会上,美国天气局河流预报系统(NWSRFS)第五版受到国内水文预报界的重视。当前,洪水预报系统研制进展较快,已开发了具有中国特色的专家交互式洪水预报系统。水利部水文局开发的“中国洪水预报系统”(CNFFS)和长江委水文局开发的“WIS水文预报平台”(WISHFS)便是代表性的成果。中国洪水预报系统采用C/S结构,以全国统一的实时水情数据库为依托,以地理信息系统为平台,能方便地构建五类洪水预报方案,具有标准的、通用的预报模型方法库,可任意选择多模型、多方法制定预报方案,具有人工和自动优选结合的模型率定功能,具有定时预报和人机交互预报功能,可干预任何信息源和预报过程,具有全面完善的系统管理功能等,已在25个流域机构和省(直辖市、自治区)的水文部门推广应用<sup>[43-44]</sup>。

随着现代气象业务的发展,国家气象中心、武汉暴雨所等单位立足于基于定量降雨估算(QPE)、定量降雨预报(QPF)、集合降水预报技术、开展水文预报模型和水文气象耦合的实时洪水预报技术研发,设计研发了融合多源降水信息的小流域分布式水文物理模型,流域水文气象实时预报系统,并实现了与气象信息综合分析处理系统(MICAPS)有机融合,成功应用于三峡库区、淮河王家坝、清江水布垭等12个流域以及国家山洪地质灾害防治气象保障工程项目中<sup>[45-46]</sup>。

## 6 展望

暴雨洪涝灾害一直是威胁人类生存和发展的最严重的自然灾害之一。然而当前客观条件正在悄然发生一些变化,如新一代天气雷达网的建成、雷达卫星估算降雨技术的发展脚步加快、定量降雨预报准确率的不断提高、水文模型构建技术的不断创新、地理信息技术的逐渐成熟、网络通信与计算机技术的飞速发展等,都给我国洪水预警预报技术发展提供了一个很坚实的基础和发展机遇,但是同时也面临着问题与挑战。笔者认为,为了进一步推动我国流域洪水预报技术的发展与应用,需在以下几个方面着重开展研究。

(1) 加强洪水预报与气象预报的集成耦合的技术研究,充分利用雷达探测技术以及中尺度暴雨预报技术来描述水文输入资料(降雨等)的时空变异性,并通过开展降尺度方法研究,逐步缩小气象与水文之间在时空尺度差异性问题的。

(2) 加强有物理基础的分布式水文模拟技术的应用研究。利用GIS技术,根据DEM自动提取各种水文地形特征,自动生成河网,进行流域产汇流和河道汇流计算;利用数字遥感数据提供基础性的流域下垫面信息,修正模型参数和状态变量值;在气象预报预报产品的基础上,利用分布式水文模型,进行洪水预报水文模拟计算,提高洪水预报精度。

(3) 暴雨洪水灾害是涉及自然、社会、经济等众多因素,为达到有效的抗洪救灾的目的,应加强洪水风险灾害评价技术的研究,准确合理的构建洪水灾害评价指标体系和洪水灾害风险评估模型,减少洪水灾害损失。

### 参考文献

- [1] 长江水利委员会. 水文预报方法(第二版). 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [2] 国家科委全国重大自然灾害综合研究组. 中国重大自然灾害及减灾对策(总论). 北京: 科学出版社, 1994.
- [3] 陈金荣, 罗伯昆. 对水文气象预报的认识和实践. 人民长江, 1982(6): 52-59.
- [4] 彭涛, 张利平, 沈铁元, 等. 现代水文气象预报技术研究进展. 人民黄河, 2010, 32(9): 29-32.
- [5] 杨扬, 张建云, 戚建国, 等. 雷达测雨及其在水文应用中的回顾及展望. 水科学进展, 2003, 11(1): 92-98.
- [6] Hudlow M D. 下一代天气雷达在水文中的初步应用和未来方向//第二次中美水文情报预报研讨会论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 1995.
- [7] 万玉发, 吴翠红, 金鸿祥. 基于准同雨团样本概念雷达和雨量计的实时同步结合方法. 气象学报, 2008, 66(1): 262-273.
- [8] 尹忠海, 张沛源. 利用卡尔曼滤波校准方法估算区域降水量. 应用气象学报, 2005, 16(2): 213-219.
- [9] 李建通, 杨维生. 提高最优插值法测量区域降水量精度的探讨. 大气科学, 2000, 24(2): 263-270.
- [10] 刘晓阳, 毛节泰, 李纪人. 雷达联合雨量计估测降水模拟水库入库流量. 水利学报, 2002(4): 51-55.
- [11] 张亚萍, 程明虎, 等. 天气雷达回波运动场估测及其在降水临近预报中的应用. 气象学报, 2006, 64(5): 631-646.

- [12] 宇如聪, 薛纪善, 徐幼平. AREMS中尺度暴雨数值预报模式系统. 北京: 气象出版社, 2004.
- [13] 徐幼平. 载水数值模式的实时预报试验. 应用气象学报, 1996(7): 257-266.
- [14] 王晨稀, 端义宏. 短期集合预报技术在梅雨降水预报中的试验研究. 应用气象学报, 2003, 14(1): 69-78.
- [15] 李俊, 廖移山, 张兵, 等. 集合数值预报方法在山洪预报中的初步应用. 高原气象, 2007, 23(4): 854-861.
- [16] 郭太英. 基于DEM的分布式水文模型的研究与应用. 大连: 大连理工大学, 2005.
- [17] 芮孝芳, 黄国如. 分布式水文模型现状与未来. 水利水电科技进展, 2004, 24(2): 55-58.
- [18] 贾仰文, 王浩, 倪广恒, 等. 分布式流域水文模型原理与实践. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [19] Freeze R A, Hanlan R L. Blueprint for a physical-based, digitally simulated, hydrologic response model. Journal of Hydrology, 1969, 9: 237-258.
- [20] 沈晓东, 王腊春. 基于栅格数据的流域降雨径流模型. 地理学报, 1995, 50(3): 264-271.
- [21] 郭生练, 熊立华, 杨井, 等. 基于DEM的分布式流域水文物理模型. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33(6): 1-5.
- [22] 任立良, 刘新仁. 流域数字水文模型研究. 河海大学学报(自然科学版), 2000, 28(4): 1-7.
- [23] 郑红星, 刘昌明, 王中根, 等. 黄河典型流域分布式水文过程模拟. 地理研究, 2004, 23(4): 447-454.
- [24] 刘勇, 邹松兵. 祁连山地区高分辨率气温降水量分布模型. 兰州大学学报(S), 2006, 42(1): 7-12.
- [25] 邓伟涛. 利用CAM-RegCM嵌套模式预测我国夏季降水异常. 南京: 南京信息工程大学, 2008.
- [26] 殷志远, 赖安伟, 公颖, 等. 气象水文耦合中降尺度方法研究进展. 暴雨灾害, 2010, 29(1): 89-95.
- [27] 刘黎平, 钱永甫, 王致君. 双线偏振雷达在水文预报领域的应用—实时水文预报系统的研制. 高原气象, 1996, 15(4): 508-514.
- [28] 刘晓阳, 毛节泰, 等. 雷达估测降水模拟史灌河流域径流. 北京大学学报(S), 2002, 38(3): 342-349.
- [29] Ren L L, Li C H, Wang M R. Application of radar-measured rain data in hydrological processes modeling during intensified observation period of HUBEX. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, 20(2): 205-212.
- [30] Chen Y B, Hu J Q, Yu J. A flash flood forecast model for the Three Gorges Basin using GIS and remote sensing data. In: Weather Radar Information and Distributed Hydrological Modeling. Proceedings of symposium HS03 held during IUGG2003 at Sapporo, July 2003. IAHS Publ, 2003.
- [31] 李致家, 刘金涛, 等. 雷达估测降雨与水文模型的耦合在洪水预报中的应用. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(6): 601-606.
- [32] 彭涛, 宋星原, 殷志远, 等. 雷达定量估算降水在水文模式汛期洪水预报中的应用试验. 气象, 2010, 36(12): 50-55.
- [33] 张利平, 张晓琳, 徐霞, 等. 基于水文模型的雷达监测降雨量误差传递研究. 水文, 2012, 32(1): 13-17.
- [34] 《长江防洪系统实时调度研究》编辑委员会. 长江防洪系统实时调度研究. 北京: 中国水利电力出版社, 1997.
- [35] 杨文发, 李春龙. 降水预报与洪水预报耦合应用初探. 水资源调查, 2003, 24(1): 38-40.
- [36] 王庆斋等. 黄河小花间暴雨洪水预报耦合技术研究. 人民黄河, 2003, 25(2): 17-19.
- [37] 李超群, 郭生练, 张洪刚. 基于短期定量降水预报的隔河岩洪水预报研究. 水电能源科学, 2006, 24(4): 31-35.
- [38] 郭靖, 郭生练, 张俊, 等. 汉江流域未来降水径流预测分析研究. 水文, 2009, 29(5): 18-22.
- [39] Bao H J, Zhao L N, He Y. Coupling ensemble weather predictions based on TIGGE database with Grid-XINANJIANG model for flood forecast. Advances in Geosciences, 2011, 29(6): 61-67.
- [40] 崔春光, 彭涛, 沈铁元, 等. 定量降水预报与水文模型耦合的中小流域汛期洪水预报试验. 气象, 2010, 36(12): 56-61.
- [41] 彭涛, 李俊, 殷志远, 等. 基于集合降水预报产品的汛期洪水预报试验. 暴雨灾害, 2010, 29(3): 274-278.
- [42] “欧洲洪水预测系统”计划简介. 水利电力科技. 2003, 29(1): 43.
- [43] 陈捍华, 李培蕾. 流域洪水预报系统及其关键问题研究. 水利科技与经济, 2005, 11(2): 93-96.
- [44] 刘志雨. 我国洪水预报技术研究进展与展望. 中国防汛抗旱, 2009(5): 13-16.
- [45] Peng T, Wei, C Z, Ye J T, et al. Basin hydrometeorology real-time forecast system. Information Computing and Applications, 2012, CCIS307: 665-671.
- [46] 彭涛, 位承志, 叶金桃, 等. 汉江丹江口流域水文气象预报系统. 应用气象学报, 2014, 25(1): 112-119.

## 《全国基层气象台站简史》(套书)全部出版

白凌燕

在2014年新春到来之际, 由全国各基层气象台站五千余人参与编写、历时五年、总字数达二千四百多万字的《全国基层气象台站简史》(31本)已全部面市。《全国基层气象台站简史》每省一本, 开篇是全省气象台站概况(包括: 部门概述、本省天气气候特点及气象灾害防御情况、省级主要气象业务以及全省基层气象台站的类型分布及概况等), 之后分为两个层次写每个地市级气象事业的发展变化。首层是地级市的气象台站概况(包括: 市级气象工作基本情况和主要业务范围); 第二层是地市级及本市所辖各个区县级气象台站的历史

沿革、气象业务与服务、法规建设、气象文化建设、台站建设等情况, 同时配有大量台站面貌变化对比以及现代化建设现状的图片。此书纵观新中国成立60年来气象事业的发展历史; 横观不同地区、不同地域、不同天气条件下气象业务的发展状况; 总览新中国气象事业的管理体制、机构设置及人员队伍的发展变化以及气象法律法规逐步建立健全的发展过程, 是一套具有留存价值的史料图书。

(作者单位: 气象出版社)



# 太行山脉影响下的华北暴雨分型

闫冠华<sup>1</sup> 李泽椿<sup>2</sup> 李巧萍<sup>3</sup>

(1 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081; 2 国家气象中心, 中国气象局, 北京 100081;

3 国家气候中心, 中国气象局, 北京 100081)

**摘要:** 基于中国台站逐日降水观测资料, 对华北地区1951—2010年夏季暴雨过程进行了分析, 根据太行山脉地形特征及暴雨落区、强度及移动等特征, 结合暴雨天气预报经验, 对太行山影响下华北地区夏季暴雨进行了分型, 将华北暴雨分为太行山以东暴雨型、太行山以西暴雨型、太行山区暴雨型、太行山两侧暴雨型和过山时减弱暴雨型五种形态, 挑选和确定了各种分型暴雨的典型个例库。分析表明太行山以东暴雨型出现概率最高, 不同形态暴雨的主要影响天气系统也各不相同。

**关键词:** 华北, 暴雨, 分型, 太行山脉

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.02.007

## Torrential Rains' Patterns in North China on the Impact of Taihang Mountains

Yan Guanhua<sup>1</sup>, Li Zechun<sup>2</sup>, Li Qiaoping<sup>3</sup>

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

2 National Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081

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

**Abstract:** Using daily precipitation observations from Chinese weather stations, the processes of summer torrential rains from 1951 to 2010 in North China are analyzed. In accordance with the location, intensity and movement of rainstorms in Taihang Mountains, the summer torrential rains in North China are divided into five types: rainstorm to the east of Taihang, rainstorm to the west of Taihang, rainstorm over Taihang, rainstorm on both sides of Taihang, and rainstorm weakening when crossing Taihang. The analysis shows that the "rainstorm to the east of Taihang" occurs most frequently. Weather system patterns differ in their rainstorm types.

**Keywords:** North China, torrential rain, pattern, Taihang Mountains

### 1 引言

暴雨是在有利的环境背景下的各种中尺度天气系统相互作用的产物, 而地形对暴雨的强度和落区有着不可忽视的作用。陶诗言<sup>[1]</sup>指出, 暴雨与地形有密切的关系, 夏季我国各地大到暴雨日频数分布和雨量分布都受到地形的影响。号称华北屋脊的太行山地形对华北地区的气候具有重要影响<sup>[2-3]</sup>。华北夏季降水气候特征分析表明, 太行山脉以西和以东两个分区域在水汽收支、降水量级和暴雨频次特征均有较大差异, 山脉以东区域的暴雨发生频次明显高于山脉以西<sup>[4]</sup>。在对华北夏季暴雨预报中发现, 华北暴雨天气过程围绕

太行山脉从暴雨落区、移动及强度特征具有不同的形态及规律, 不同形态下暴雨过程的主要影响系统、天气形势和特征有一定差异。以往研究中对华北夏季暴雨的分型一般是按照主要影响天气系统划分的, 如台风暴雨<sup>[5]</sup>、低涡暴雨、暖切变暴雨等<sup>[6]</sup>。本文根据太行山脉地形特征及暴雨落区、强度及移动等特征对华北暴雨进行分类, 从地形影响的角度研究不同分型典型暴雨特征, 为华北暴雨天气预报提供理论基础和预报着眼点。

### 2 资料和暴雨分型方法

分析中使用了1951—2010年中国740台站降水逐日观测资料和NCEP/NCAR一日4次再分析资料, 本文的华北地区指定为30°—45°N、105°—125°E范围。

对1951—2010年发生在华北地区的暴雨个例进行统计, 按照暴雨落区相对于太行山的位置、暴雨落区和强中心的移动两个原则对太行山脉影响下华北暴雨

收稿日期: 2014年2月12日; 修回日期: 2014年2月20日  
第一作者: 闫冠华(1967—), Email: yangh@cma.gov.cn  
资助信息: 国家重点基础研究发展规划(973计划)(2013CB430204); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306065)。

进行分型。

### 3 暴雨分型结果

依照上述分型原则，华北暴雨可以分为太行山以东暴雨型、太行山以西暴雨型、太行山区暴雨型、太行山两侧暴雨型和过山时减弱暴雨型等五种型态。

#### 3.1 太行山以东暴雨型

天气过程中暴雨落区位于太行山东侧的河北、北京、天津、河南北部，暴雨区域仅出现在太行山东侧。

此种型态又根据实际情况可以分为以下两种类型。

(1) 太行山以东暴雨A型(图1a)。太行山东侧暴雨，雨区随太行山以西天气系统自西向东移动，越过南北向太行山脉后，随着地形的急聚下降，系统加强并形成暴雨，且仅在太行山东侧及以东地区达到暴雨降水量级。这种型态定义为太行山以东暴雨A型，以下简称“以东A型”或“过山后加强型”。

(2) 太行山以东暴雨B型(图1b)。太行山东侧暴雨，暴雨在太行山以东形成并随着天气系统在太行山东侧移动，且仅在太行山东侧及其以东地区形成暴雨。这种型态定义为太行山以东暴雨B型，以下简称“以东B型”。由于此种型态下暴雨过程中，不同于华北常态的西来系统，常伴有近地层东风，天气系统

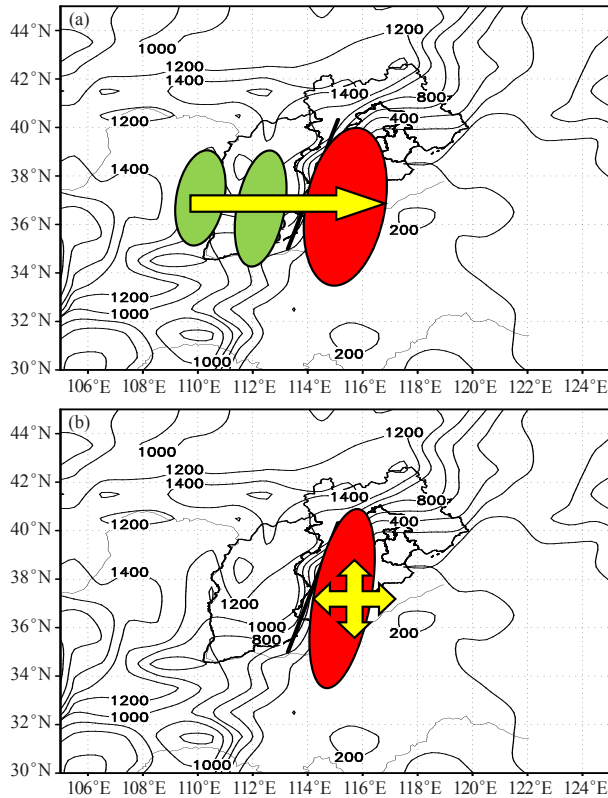


图1 太行山以东暴雨型 (a) 以东A型; (b) 以东B型  
(黑色斜线为太行山脊, 红色阴影区为暴雨区, 其他阴影区为普通降水区, 下同)

有时偏西向移动，如把天气系统以及伴随的降水中心向偏西方向移动现象定义为“回流天气”，则有这种现象的华北暴雨可称作“回流型暴雨”，太行山以东暴雨B型除少量至太行山东南发展向西北发展外多为“回流型暴雨”。

#### 3.2 太行山以西暴雨型

天气过程中暴雨落区位于太行山西侧的山西、内蒙古南部和陕西北部，暴雨没有越过太行山而是消失或在太行山西侧以一定的形式运动。这种型态定义为太行山以西暴雨型，简称“以西型”(图2)。

#### 3.3 太行山区暴雨型

天气过程中暴雨落区仅出现在太行山区，暴雨区位于太行山南北向脊线附近或东西两侧山区内。这种型态定义为太行山区暴雨型，简称“山区型”(图3)。

#### 3.4 太行山两侧暴雨型

天气过程中暴雨区同时出现在太行山两侧，太行山区降水相对较弱，没有达到暴雨量级。这种型态定义为太行山两侧暴雨型，简称“两侧型”(图4)。

#### 3.5 过山时减弱暴雨型

天气过程中暴雨落区自太行山西部(图5a)向东移动，翻越太行山时降水量级降低而达不到暴雨标准(图5b)，系统过山后再次加强形成暴雨(图5c)。这种型态定义为过山时减弱暴雨型，简称“过山时减弱型”。

## 4 典型个例及天气学特征

按照暴雨分型给出的暴雨形态和分型原则，普查了1951—2010年6月1日—8月31日台站逐日降水资料，挑选出符合分型原则的典型个例，剖析不同型态下暴雨过程中环流形势及演变特征，研究不同分型暴雨天气系统的高、中、低空及地面配置。分析发现，太行山以东暴雨型出现频次最高，过程降水量大；太行山区暴雨型出现范围小、持续时间短。不同型态

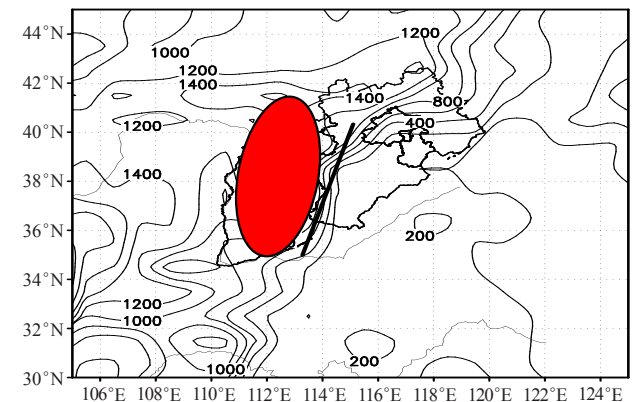


图2 太行山以西暴雨型

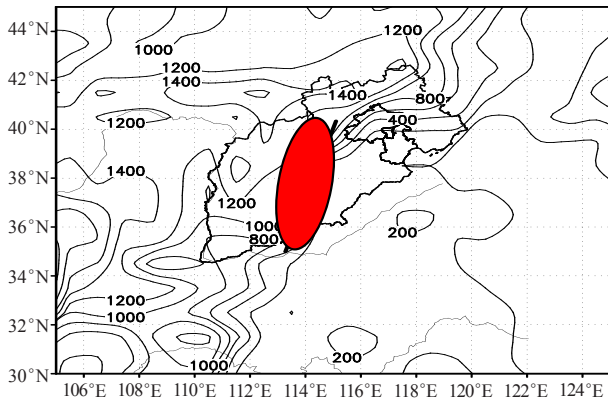


图3 太行山区暴雨型

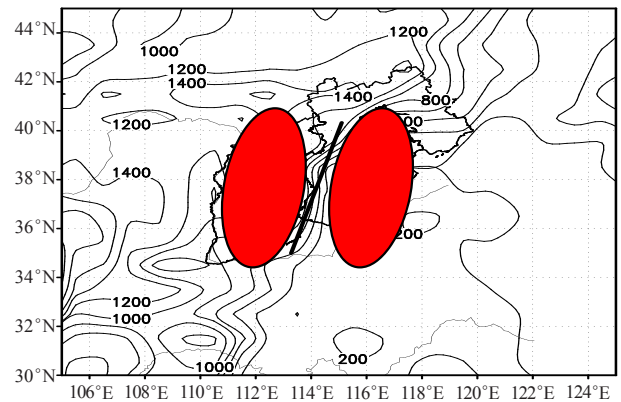


图4 太行山两侧暴雨型示意图

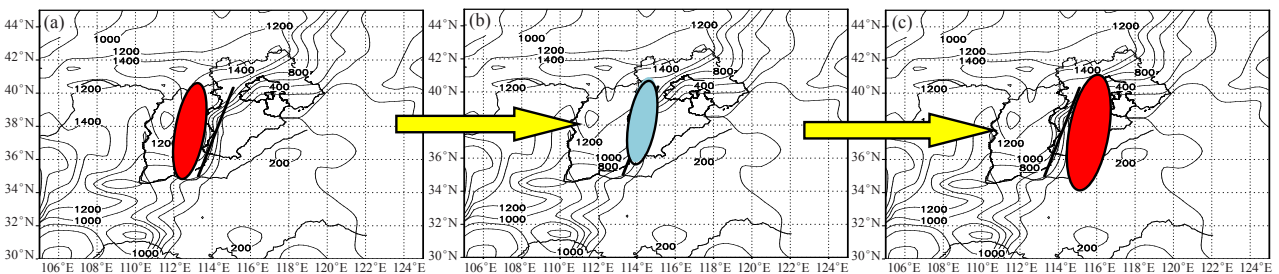


图5 过山时减弱暴雨型

暴雨的主要影响天气系统及配置也各不相同，以太行山以东暴雨型A类为例，重点分析了2000年8月7—9日、2007年6月29—30日等多个个例，得到的天气系统配置特征如下：副热带高压位置偏东偏南，西北地区有冷槽或低涡东移；低层切变线、急流等系统在越过太行山后增强；地面太行东侧的河北有中尺度的辐合线或切变线存在，与中尺度辐合线或切变线相伴的偏东气流受太行山的阻挡而爬升。而太行山以西暴雨型（如1958年7月16—17日、2010年8月17—18日等）一般出现在副高位置偏西偏北，588dagpm线控制着105°E以东的地区，脊线在32°N，西风槽东移受阻，山西大部分地区不稳定能量大，地面中尺度系统和地形的强迫抬升的背景下。

#### 参考文献

- [1] 陶诗言. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980.
- [2] 范广洲, 吕世华. 地形对华北地区夏季降水影响的数值模拟研究. 高原气象, 1999, 18(4): 659-667.
- [3] 王劲峰. 人地关系演进及其调控—全球变化、自然灾害、人类活动中国典型区研究. 北京: 科学出版社, 1995.
- [4] 闫冠华. 太行山脉影响下的华北暴雨研究. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [5] 边清河, 丁治英, 吴明月, 等. 华北地区台风暴雨的统计特征分析. 气象, 2005, 31(3): 61-65.
- [6] 孙建华, 张小玲, 卫捷, 等. 20世纪90年代华北大暴雨过程特征的分析研究. 气候与环境研究, 2005, 10(3): 492-506.

# 降尺度技术的应用研究进展

陈超君<sup>1</sup> 王钦<sup>2</sup>

(1 中国气象局武汉暴雨研究所 暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430074;

2 中国民航飞行学院广汉分院气象台, 德阳 618307)

**摘要:** 大量数值预报产品的应用表明, 尽管许多数值预报产品的参考价值很高, 但预报的结果总存在一些误差, 数值模式精细化预报准确性和可靠性至今仍存在不少问题。基于现有条件, 对数值预报产品进行降尺度将成为精细化预报方法研究的一个热点。降尺度技术作为一种新的精细化预报途径, 已成为一个重要的研究领域。为此, 本文对降尺度技术的概念、该技术中各个方法的优缺点进行了概述, 归纳了该技术在国内外的研究进展, 为降尺度技术在数值模式中的应用研究提供参考。

**关键词:** 精细化预报, 数值模式, 降尺度

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.02.008

## Recent Advances on the Application for the Downscaling Technology

Chen Chaojun<sup>1</sup>, Wang Qin<sup>2</sup>

(1 Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China

Meteorological Administration, Wuhan 430074 2 Civil Aviation Flight University of China, Deyang 618307)

**Abstract:** A great number of applications of NWP (Numerical Weather Prediction) products show that, although many NWP products have a high reference value, the prediction results always have some deviations. Moreover, problems about the accuracy and predictability of the fine forecasting by numerical models still exist so far. Conducting the downscaling interpretation to the NWP product will be a hot spot in the fine forecasting research. Downscaling techniques, as a new way to fine forecasting, have become an important field for study. In this paper, the concept for downscaling techniques, the technology advantages and disadvantages of each method are outlined. Technology in the domestic and foreign research progress in the application of numerical models is summed up for reference.

**Keywords:** fine forecast, numerical model, downscaling

### 1 引言

随着经济的发展和人民生活水平的不断提高, 人们对气象预报的种类和精度要求越来越高<sup>[1]</sup>。中国气象局因此提出了气象预报要向精细化方向发展的战略思想。所谓精细化, 其“精”是指预报质量, 预报要精确, 准确率要高, 要出精品。其“细”, 是指天气预报内容的细化程度, 即提高预报产品的时间、空间、量级的分辨率。制作“定时、定点、定量”的客观精细化预报将成为天气预报发展的必然。

数值预报由于其明确的物理机制, 被认为是精细

化天气预报的发展方向。随着观测手段的日益丰富和计算机水平的飞速提高, 数值模式在天气预报业务中得到了越来越广泛的应用<sup>[2]</sup>。但大量数值预报产品的应用表明, 尽管许多数值预报产品的参考价值很高, 但由于数值预报结果受模式初始场、边界条件、物理过程、地形、植被及模式本身的设计等诸多方面的影响, 预报模式描述的毕竟是模式大气, 而非真实大气, 还有模式的可预报性问题等, 所以数值模式发展还存在一定的不足, 模式许多方面还不够完善, 因此数值模式输出产品不可避免地会存在一定的误差<sup>[2]</sup>。如何有效消除模式产品误差是提高模式预报水平的一个重要方面, 对数值预报产品的释用起到重要的决策作用。

目前气候模式(GCM)对大尺度环流场的预报还是不错的, 但是GCM的空间精度仍然比较粗糙<sup>[3]</sup>,

收稿日期: 2013年9月30日; 修回日期: 2013年12月27日  
第一作者: 陈超君(1985—), Email: lvcha-52314@163.com  
资助信息: 国家自然科学基金(41275107); 湖北省气象科技发展基金(2014Q04); 水利部公益性行业科研专项(201201063)

很难捕捉到区域或是局地上的大气物理过程,因而目前还不适合用于区域或是局地天气预报。由于模式都是通过参数化方案对云等进行预报的,这种预报对局地地形有很大的依赖性,加上大部分模式都是日本、欧洲或是美洲等国家研发的,对其他地区的参数化方案,考虑得可能不是很精确,从而使得这些模式在其他国家地区的预报效果并不那么理想<sup>[4]</sup>。现在主要有两种方法可以弥补数值模式预报的不足,一是发展更高分辨率的数值模式;二是降尺度法。但要想通过增加模式时空分辨率,改进动力模式本身的各个环节,改善模式的物理过程和参数化方案来提高预报准确率是很难的,为了弥补这种缺陷,降尺度将是目前更为可选的方法,它能在现有模式的基础上改善预报结果,提高预报技巧,减少改进模式成本。

在目前的天气预报基础上,如何利用数值预报产品的精度,在时间尺度、空间尺度和量级上做进一步的细化,且细化后的气象要素预报产品的准确率要达到可以对外发布的水平,这是基层台站精细化预报面临的主要问题,数值预报产品的统计降尺度释用课题也由此应运而生。而我国对于降尺度技术的应用介绍较少<sup>[1,5]</sup>,尤其是该方法在短期天气预报中的应用有限。本文就降尺度技术的应用研究情况及其价值进行简述。

## 2 降尺度技术简介

现有应用的降尺度法有动力降尺度法、统计降尺度法、统计与动力相结合的降尺度法<sup>[6,7]</sup>。动力降尺度方法多用于气候预测<sup>[8]</sup>,即利用与气候模式耦合的区域气候模式(RCM)来预估区域未来气候变化情景。目前动力降尺度方法还应用于区域风能资源评价<sup>[9,10]</sup>研究方面。该方法基于物理定律的初值,具有物理意义明确,可不受观测资料的影响,能应用于很多地方,也可应用于不同分辨率的优点;其缺点是计算量大、费机时,没有利用或没有充分利用已有的实况历史资料。目前来看,动力降尺度<sup>[11-13]</sup>主要有两个发展方向:一种是提高GCM的水平分辨率,这无疑会大大增加计算量;另一个方向是在低分辨率GCM中嵌套高分辨率有限区域模式(LAM),这是一个有生命力的发展方向。但是LAM的边值条件的确定,与GCM的嵌套技术以及局地模式系统性误差的减少都是难点,此外该方法的计算量也较大,相比之下,统计降尺度计算量小而易于操作。

统计降尺度也称经验降尺度<sup>[14]</sup>,是由大尺度气候信息获取小尺度气候信息的有力工具,它可视为是与动力降尺度平行的降尺度方法,或者可被看做是动力降尺度的补充。它能由模式输出资料与气象要素之间

的统计关系,建立要素预报模型,做出对要素的定量预报。该方法的基本原理在于采用统计经验的方法,利用观测资料建立预报因子与预报要素之间的线性或非线形统计关系,建立要素预报模型,做出对要素的定量预报,并用独立的观测资料检验这种关系,最后再把这种关系应用于模式输出资料来对变量进行预报。文献[6]系统介绍了统计降尺度的原理与建模等相关问题。统计降尺度方法利用了大量的实况资料,有计算效率高、能输出较高分辨率或站点尺度的气象要素等优点,所以能弥补动力降尺度的一些不足,却没有利用或没有充分利用已掌握的物理知识。目前来看,统计与动力相结合的降尺度法在实际业务中更为适用。

目前对数值预报产品的统计降尺度释用方法主要有模式输出统计(Model Output Statistical, MOS)法、完全预报法(Perfect Prognostic Method, PP)、卡尔曼滤波(Kalman Filter)和人工神经网络等方法。MOS的优点是在建立在统计学多元线性回归模型的基础上,预报方程中自动考虑了数值预报的系统误差和局地气候,同时大量引用了其他方法难以引用的物理量场作为预报因子<sup>[15]</sup>(如垂直速度、假相当位温,涡度等物理意义明确、预报信息量较大的因子)。但常规MOS方法中大多采用统计回归方法和确定的建模途径,这些方法对样本充分、变化较为平稳的预报目标的释用效果较好,同时建立MOS预报模型需要大量的数值预报产品的历史资料,因而MOS预报模型受到历史资料样本的限制;数值模式产品的变化,使得MOS预报模型的统计学基础也随之改变,使常规的MOS预报无法适应数值预报模式的变化。PP法<sup>[16]</sup>要求模式预报是完全正确的,即预报的精度完全依赖模式预报的质量。卡尔曼滤波最早由卡尔曼于1960年提出<sup>[15]</sup>,该方法通过处理一系列带有误差的实际测量数据而得到所需要的物理参数的最佳估算值。根据这一基本思想,用以处理一系列带有误差的预报值而得到预报值的最佳估算值,这对提高预报精度具有重要现实意义。该方法具有适应性强、受数值预报模式更新的影响较小、所需样本资料少等优点,得到气象工作者的重视。但该方法一般只适用于线性系统,而大部分系统都是非线性的,同时还要选择物理意义清楚,相关系数高的因子。神经网络法则缺乏可信的物理过程。所以针对降尺度的适用性问题,发展独立于模式和历史样本资料的降尺度技术,将成为降尺度技术更好地应用于数值预报的一种有效方法。

### 3 降尺度研究现状与进展

截至目前,学者们已将多种统计方法和人工智能技术应用于气象要素的降尺度研究。统计降尺度工作始于20世纪90年代<sup>[4]</sup>,在近十几年的发展过程中,降尺度取得了一系列成就,在气候和水文方面已发展成相当完善的领域。Wilby等<sup>[17-19]</sup>对降尺度方法的应用做了较为详细的介绍。回顾了目前气候上的降尺度技术,主要有4种方法:回归的方法,基于天气(环流)的方法,随机天气发生器和有限区域气候模式。对几个降水模式应用降尺度方法试验,对比表明基于环流的降尺度方法对目前的观测和降水的预报性能最好。Fowler等<sup>[20]</sup>也回顾了水文模型中降尺度技术近来的方法,分别介绍了降尺度的概念、新方法,对比了不同的研究方法对水文模式效果的影响。一直以来,欧洲和北美国家对降尺度研究与应用较多,得出的结论大多是某种统计降尺度在某地区适用,不具有普遍性,为了寻找更好、更普遍的降尺度方法,学者们也对不同降尺度方法进行了较详细的对比研究<sup>[21-26]</sup>,如Murphy<sup>[23]</sup>分别评估了统计降尺度和动力降尺度对局地气候的预报技巧。尽管统计方法对夏季温度的预报比较好,动力方法对冬季降水估计稍微好些,但总的来说,动力和统计方法对局地温度和降水预报性能相当。文中认为通过提高代表性的物理过程和增加模式分辨率有助于提高动力降尺度的预报效果,而提高统计降尺度预报效果则需要有更长时间序列的可靠观测资料和更多有预报意义的变量。Schoof等<sup>[25]</sup>对比了神经网络和回归方法对温度和降水的降尺度预报效果。Ramirez等<sup>[26]</sup>基于线性和非线性的降尺度方法,使用人工神经网络和多元线性回归建立了巴西东南部的观测降水和天气尺度环流的诊断方程,并将建立的诊断方程应用于Eta模式的输出,对降水进行预报,并对人工神经网络和多元线性回归方法的预报性能进行了评估。除对温度和降水的降尺度研究外,目前降尺度方法已开始应用于更多的气象要素预报中。如Salameh等<sup>[27]</sup>对法国南部近地面风进行了统计降尺度研究,该研究通过统计的方法,对大尺度的高层大气和近地面大气场进行调整,从而将近地面风的预报降尺度应用到法国南部各个气象站点的预报中,结果表明这种方法对风速预报有一定的改进作用。

降尺度方法作为一种新的精细化预报途径,国内近几年也开始了该方面的研究。2001年起中央气象台就发展建立了以模式直接输出(DMO)、模式输出统计(MOS)、神经网络和综合集成等统计释用技术为基础的客观要素预报方法,通过业务预报的

实践检验发现,统计释用的方法对现在的业务数值预报结果有明显改进能力。刘永和等<sup>[28]</sup>对气象中的统计降尺度方法做了详细的综述,同时认为统计降尺度是解决由低分辨率气象模式输出到流域尺度转换的手段之一,是未来提高天气预报准备率的主要发展趋势。朱宏伟等<sup>[14]</sup>同时结合区域气候中统计降尺度方法的应用进展、研究热点和发展趋势对降尺度方法概念、原理和应用研究做了详细综述。针对降尺度的优点及适用性,学者们也做了许多研究工作,主要是关于对未来降水和温度预报方面的研究<sup>[29-31]</sup>。范丽军等<sup>[6]</sup>将降尺度模拟的中国区域1和7月气温及月降水量结果与区域气候模式模拟结果进行比较发现,将统计降尺度方法应用于我国气温预测是可行的。赵芳芳等<sup>[32]</sup>的研究中对这方面做了重点分析,同时还应用降尺度模型SDSM(Statistical Downscaling Model)对气温做了详细预报。前面研究都主要是针对未来区域气候或未来温度、降水方面的应用,对于降尺度方法在中尺度短期天气预报中的应用较少,主要就李江萍等<sup>[5]</sup>在系统论述统计降尺度法的基本原理、一般步骤的基础上,初步探讨了统计降尺度法在中期天气预报方面的应用。吴建秋等<sup>[1]</sup>利用 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 再分析资料以及自动站的气温观测资料,采用线性回归和卡尔曼滤波相结合的方法,对南京地区进行温度预报,预报结果表明:用该统计降尺度方法对南京地区温度进行预报的方法是可行的,可得到精度较高且稳定的预报结果,其预报结果具有较好的使用价值和参考价值。王辉赞等<sup>[33]</sup>利用卡尔曼滤波的降尺度方法,对T106数值预报产品进行了预报优化。通过T106数值预报资料建立预报模型,其后通过独立样本对副高面积指数和脊线指数进行预报。结果表明,卡尔曼滤波方法能对预报对象提供更准确、有效的跟踪和描述,较其他统计预报方法的自适应能力更强。

### 4 总结与展望

(1) 精细化、量化是未来天气预报技术发展的主要方向,预报的时间分辨率由现在的以天为单位到小时为单位,空间分辨率由现在的以县行政区域为单位的几十、上百千米区域到以镇为单位的几千米区域。而实现这种预报业务的精细化,主要依赖于高分辨率的数值模式:要提高精细化预报质量,就必须大力发展数值预报产品的降尺度释用技术。

(2) 对数值模式预报产品进行降尺度释用,得到本地区天气要素的预报已是国际上通行的做法,其技术方法主要有:MOS、PP和卡尔曼滤波等。这些降尺度技术,能够根据模式输出资料与气象要素之间的

统计关系, 建立要素预报模型, 做出对要素的定量预报。但这些方法对模式及历史资料的依赖性较强, 所以发展独立于模式和历史样本资料的降尺度技术, 使其具有更广的普遍性, 对提供定时、定点、定量的预报是非常必要的。

(3) 基于具有明确物理意义和可靠观测资料模型的降尺度技术将会有更好的发展前景。它能在现有模式的基础上改善模式预报结果, 减少改进模式的成本, 提高预报技巧, 不失为一条提高预报能力的捷径。这与正面发展模式并不矛盾, 通常数值模式预报结果越精确, 降尺度后的效果越理想。

(4) 精细化预报作为气象服务的一个重要组成部分, 如何将气象预报精细化到乡镇, 对乡镇进行及时准确的天气预报是摆在气象学家面前的一个更为迫切的任务。它的准确性和可靠性都对国民经济和社会各部门趋利避害, 对人们的日常生活各个方面有着非常重要的意义。因此, 采用有效的降尺度技术, 改进和发展适合自身的模式后处理技术, 对完善数值模式预报系统和提高模式预报准确率是非常必要的研究工作。

目前, 在数值预报业务中, 天气学、统计学和动力学等预报方法都扮演着重要角色。如何将这些方法相互结合、发挥各自优势形成新的预报技术, 是非常值得探讨的重要科学问题。近年来国内外数值模式后处理的发展已经取得了丰硕的成果, 但很多问题还有待解决, 这些方面的研究都有待进一步加强。

#### 参考文献

- [1] 吴建秋, 郭品文. 基于统计降尺度技术的精细化温度预报. 中国科技信息, 2009, 12: 44-48.
- [2] 陈敏, 王迎春, 仲跻芹, 等. 北京地区中尺度数值业务预报的客观检验. 应用气象学报, 2003, 14(5): 522-532.
- [3] Coulibaly P, Dibike Y B, Anctil F. Downscaling precipitation and temperature with temporal neural networks. Journal of Hydrometeorology, 2005, 6(4): 483-496.
- [4] 任丽娜, 翟宇梅, 王力维. 多模式集合在统计降尺度应用上的研究进展. 科学技术与工程, 2011, 11(29): 7185-7194.
- [5] 李江萍, 王式功. 统计降尺度法在数值预报产品释用中的应用. 气象, 2008, 34(6): 41-45.
- [6] 范丽军, 符淙斌, 陈德亮. 统计降尺度法对未来区域气候变化情景预估的研究进展. 地球科学进展, 2005, 20(3): 320-329.
- [7] 殷志远, 赖安伟, 公颖, 等. 气象水文耦合中的降尺度方法研究进展. 暴雨灾害, 2010, 29(1): 89-95.
- [8] 陈丽娟, 李维京, 张培群, 等. 降尺度技术在月降水预报中的应用. 应用气象学报, 2003, 14(6): 648-655.
- [9] 吴琼, 贺志明, 聂秋生, 等. 动力降尺度法对鄱阳湖区风能资源模拟效果分析. 资源科学, 2012, 34(12): 2337-2346.
- [10] 李艳, 汤剑平, 王元, 等. 区域风能资源评价分析的动力降尺度研究. 气候与环境研究, 2009, 14(2): 192-200.
- [11] Reborra N, Ferraris L, von Hardenberg J, et al. RainFARM: Rainfall downscaling by a filtered autoregressive model. Journal of Hydrometeorology, 2006, 7(4): 724-738.
- [12] Wu P L, Lin P L, Juang H M H. Local mean bias correction in a regional model downscaling: A case study of the South China Sea summer monsoon of 1998. Monthly Weather Review, 2009, 137(9): 2869-2892.
- [13] Branković Č, Matjačić B, Ivatek-Šahdan S, et al. Downscaling of ECMWF ensemble forecasts for cases of severe weather: Ensemble statistics and cluster analysis. Monthly Weather Review, 2008, 136(9): 3323-3342.
- [14] 朱宏伟, 杨森, 赵旭喆, 等. 区域气候变化统计降尺度研究进展. 生态学报, 2011, 31(9): 2602-2609.
- [15] 薛志磊, 张书余. 气温预报方法研究及其应用进展综述. 干旱气象, 2012, 30(3): 451-458.
- [16] Klein W H, Lewis F. Computer forecasts of maximum and minimum temperatures. Journal of Applied Meteorology, 1970, 9(3): 350-359.
- [17] Wilby R L, Dawson C W, Barrow E M. SDSM-A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. Environmental Modelling and Software with Environment Data News, 2002, 17(2): 145-157.
- [18] Wilby R L, Hay L E, Gutowski W J, et al. Hydrological responses to dynamically and statistically downscaled climate model output. Geophysical Research Letters, 2000, 27(8): 1199-1202.
- [19] Wilby R L, Wigley T M L. Downscaling general circulation model output: A review of methods and limitations. Progress in Physical Geography, 1997, 21(4): 530-548.
- [20] Fowler H J, Blenkinsop S, Tebaldi C. Linking climate change modelling to impacts studies: Recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. International Journal of Climatology, 2007, 27(12): 1547-1578.
- [21] Zorita E, von Storch H. The Analog method as a simple statistical downscaling technique: Comparison with more complicated methods. Journal of Climate, 1999, 12(8): 2474-2489.
- [22] Gutmann E D, Rasmussen R M, Liu C, et al. A Comparison of statistical and dynamical downscaling of winter precipitation over complex terrain. Journal of Climate, 2011, 25(1): 262-281.
- [23] Murphy J. An evaluation of statistical and dynamical techniques for downscaling local climate. Journal of Climate, 1999, 12(8): 2256-2284.
- [24] Wood A W, Leung L R, Sridhar V, et al. Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. Climatic Change, 2004, 62(1-3): 189-216.
- [25] Schoof J T, Pryor S C. Downscaling temperature and precipitation: A comparison of regression-based methods and artificial neural networks. International Journal of Climatology, 2001, 21(7): 773-790.
- [26] Ramírez M C, Ferreira N J, Velho H F C. Linear and nonlinear statistical downscaling for rainfall forecasting over southeastern Brazil. Weather and Forecasting, 2006, 21(6): 969-989.
- [27] Salameh T, Drobinski P, Vrac M, et al. Statistical downscaling of near-surface wind over complex terrain in southern France. Meteorology and Atmospheric Physics, 2008, 103(1-4): 253-265.
- [28] 刘永和, 郭维栋, 冯锦明, 等. 气象资料的统计降尺度方法综述. 地球科学进展, 2011, 26(8): 837-847.
- [29] 范丽军. 统计降尺度方法集合预估华东气温的初步研究. 高原气象, 2010, 29(2): 392-402.
- [30] 魏凤英, 黄嘉佑. 我国东部夏季降水量统计降尺度的可预测性研究. 热带气象学报, 2010, 26(4): 483-488.
- [31] 高红霞, 汤剑平. 黄河源区未来地面气温变化的统计降尺度分析. 南京大学学报(自然科学), 2010, 46(6): 631-641.
- [32] 赵芳芳, 徐宗学. 黄河源区未来地面气温变化的统计降尺度分析. 高原气象, 2008, 27(1): 153-161.
- [33] 王辉赞, 张韧, 王彦磊, 等. 基于 Kalman 滤波的副热带高压数值预报误差修正. 热带气象学报, 2006, 22(6): 661-666.

# 我国面雨量研究及业务应用进展

高琦<sup>1, 2</sup> 徐明<sup>1</sup> 李武阶<sup>2, 3</sup> 彭涛<sup>1</sup>

(1 中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉 430074; 2 武汉中心气象台, 武汉 430074;

3 华中区域数值天气预报中心, 武汉 430074)

**摘要:** 面雨量是防汛部门在洪水预报与水库调度中一个非常重要的参数, 是洪水预报中最重要的预报对象。介绍了国内外水文气象学者在面雨量的插值与估算方法和面雨量预报方法方面的研究及业务实践进展, 为各地结合自身流域特点, 开展面雨量预报业务及研究提供参考。

**关键词:** 面雨量、估算方法、监测与预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.02.009

## Researches and Applications on Area Precipitation in China

Gao Qi<sup>1, 2</sup>, Xu Ming<sup>1</sup>, Li Wujie<sup>2, 3</sup>, Peng Tao<sup>1</sup>

(1 Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430074 2 Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074 3 Wuhan Regional Numerical Weather Prediction Centers, Wuhan 430074)

**Abstract:** Area precipitation is a very important parameter in flood forecasting and reservoir operation. It is also the most important forecast object in the flood forecast. This article introduces the researches and applications on interpolation, estimation and forecast methods of area precipitation in the researches by hydrometeorological scholars from at home and abroad.

**Keywords:** area precipitation, interpolation, estimation, forecast

### 1 引言

面雨量是一个经典的水文学概念, 它是指某一时段内一定面积上的平均雨量, 因其能够客观反映降水对确定流域的影响, 因而成为防汛部门分析水情、进行洪水预报的重要参数。准确的流域面雨量预报, 可为流域的防汛抗洪、水库调度及蓄水发电、城市供水、水资源科学利用等提供可靠的决策依据。关于面雨量的研究, 国内学者开展了一系列的工作。目前主要关注的是面雨量的插值与估算方法、面雨量分布及演变特征, 以及面雨量预报方法研究等几个方面。本文拟就面雨量研究的若干进展做简要综述, 为相关科研和业务人员提供参考。

### 2 依靠站点雨量数据计算面雨量的插值方法研究

目前水文气象业务中面雨量的计算主要依靠“点一面”转换来实现, 即: 利用一定的插值方法, 把流域内有限的气象、水文站的“点”雨量数据形成能够有效表征一段时间内流域降水整体水平的“面”

雨量数据。由于地面气象站的空间分布不均匀, 人们发展出了多种针对站点降水观测资料的空间插值方法来计算面雨量。简单的插值方法只根据待插值点(栅格中心)相对样本点(站点)的位置和样本值(雨量观测)来计算, 复杂的函数插值方法和统计插值方法还可以将高程、地形等影响降雨的因素考虑进来, 以改善插值效果。

常用的面雨量插值方法有泰森多边形法、算术平均法、等值线法、反距离加权法和逐步格点订正法等。算术平均法<sup>[1]</sup>, 算法简单易行, 但它只能在流域面积小, 流域内地形起伏不大, 且测站多而分布较均匀时采用。泰森多边形法<sup>[2]</sup>的优点是考虑到各雨量测站的权重, 且当测站固定不变时, 各测站的权重也不变, 而在以往的业务试验中存在无法根据站点变化自动更新站点权重的问题。徐晶等<sup>[3]</sup>通过解决了程序计算环绕各雨量站的多边形面积问题, 克服了这个技术难点, 实现了面雨量计算程序自动化, 能适应不同流域的站点变化。目前, 泰森多边形法是我国七大江河面雨量监测中规定使用的方法。反距离加权法<sup>[4]</sup>可以看作是泰森多边形插值法的一种拓展。它认为距离待估点越近的测站, 其贡献越大, 距离越远, 则贡献越小, 到了一定距离之外就没有贡献。这种插值方法在计算权重时可以取距离的一次方, 也可以取二次、多

收稿日期: 2013年10月8号; 修回日期: 2014年2月25日

第一作者: 高琦(1980-), Email: qiqi\_166@hotmail.com

资助信息: 公益性行业气象专项(GYHY201106003, GYHY201206028, GYHY201306059)

次幂, 距离幂次数越大, 距离的影响就越大。决定站点参与计算与否的距离半径越大, 插值结果越平滑, 反之变化越大。反距离加权法简单易行, 计算量小, 可自动化运行, 目前仍广泛应用于气象、水文业务中。等值线法<sup>[5]</sup>的思路是, 先根据流域内各测站实测的雨量资料绘出等雨量线, 然后用求积仪或其他方法求各相邻两等雨量线间的面积, 再分别乘以各相邻两等雨量线雨深的平均值, 即得该面积上的降水总量。等值线能反映降水的地区分布和地形对降水的影响, 但它要求流域内雨量测站多而且分布均匀, 而且每次降水过程中等雨量线的走向不同, 导致各相邻两等雨量线间的面积也不同, 这样使得绘算工作繁琐。因此应用受到限制, 适于分析较典型的致洪暴雨过程。逐步格点订正法, 包括Barnes客观分析法<sup>[6]</sup>和Cressman客观分析法<sup>[7]</sup>。采用迭代算法进行连续矫正, 通过每一步用插值得到的格点场来反算样本点的雨量, 再利用其与观测值的误差再用来矫正格点场的插值。该方法的缺点是涉及流域外资料, 计算较麻烦, 效果却不一定理想。目前, 美国国家气象局河流预报中心使用的插值方法除了算术平均、等雨量线分析、泰森多边形、距离加权法外, 还使用指标站法进行面雨量插值, 即在该国一些地区(主要是山区), 利用基于气候研究基础上预先确定的站权重来计算流域平均降水面雨量。此外, 面雨量的插值方法还包括细网格雨量法<sup>[8]</sup>、地理统计方法<sup>[9]</sup>以及基于函数插值的最优插值<sup>[10]</sup>和薄板平滑样条插值法<sup>[11]</sup>等。

文中提到的方法各有其优点, 同时也存在各自的局限性。面雨量计算的结果, 既受到插值方法的影响, 也受地形、台站分布及站网密度的制约。方慈安等<sup>[12]</sup>, 对利用泰森多边形法、逐步订正网格法、算术平均法计算的1998—2000年湖南省5个流域的面雨量进行了对比, 结果显示: 各种算法平均值的差异不大, 而逐日差异较大。李武阶等<sup>[13]</sup>利用算数平均法、泰森多边形法、等值线法对1960—1990年发生在三峡区间的60次降雨过程的面雨量进行计算, 结果表明: 选取同样站点的情况下, 泰森多边形法计算的面雨量较算术平均法及等值线法高; 同种方法计算的气象站点面雨量结果高于水文站点; 而在站网密度大的地区, 同一过程不同方法算出的面雨量差小。郁淑华<sup>[14]</sup>对比了等值线法、泰森多边形法及算术平均法计算的面雨量结果, 得到了气象上算术平均法接近等值线法, 因而优于泰森多边形法的结论, 同时算术平均法、泰森多边形法的计算结果比等值线法偏高。由于面雨量无法测得真值, 关于各种插值方法比较的试

验, 往往反映的是某特定流域特定时期的平均状况, 在实际工作中还应结合具体流域的实际情况、业务化可操作性以及水文服务的具体需求进行选择。

### 3 基于遥感新观测技术面雨量估算方法研究

国内外学者在100多年的历史中对面雨量估算技术做了大量的研究工作, 但如何准确估算面雨量始终是一个科学难题。随着气象学、数学、水文学、遥感等学科技术的发展, 流域面雨量的估算技术也有了长足的发展, 利用卫星、雷达等遥感技术估测降水和高密度自动气象站降水资料的结合应用, 已成为面雨量估算技术的主要趋势<sup>[15]</sup>。

近年来, 雷达、卫星等新观测手段越来越多地应用于降水监测和预报。如美国国家气象局河流预报中心利用MAPX网格技术, 即利用区域内4km×4km WSR-88D 雷达形成的1h降水估计产品基础上再通过算术平均法估算该区域面雨量。雷达、卫星估测降水的基本原理都是根据云团对电磁波的反射特征来推算云团的可降水量。由于电磁波的空间连续性, 用雷达、卫星可估算出高空间分辨率的降水场, 这是传统的雨量计观测所无法比拟的。但由于雷达、卫星是通过间接方式估算降水的, 按一定的关系式换算的结果与雨量计观测相比往往有较大的出入, 因此还需要与传统的常规观测相结合, 经过校正后才能成为符合实际情况的估计降水产品。具体做法可将雷达、卫星估计降水与地面雨量观测资料进行融合, 得到时空连续的面雨量分析场<sup>[16]</sup>。

#### 3.1 基于雷达估算面雨量方法研究

雷达估计降水与雨量计观测资料进行融合的较直接的方法, 就是将雨量计降水和对对应位置的雷达像素反演降水的比率拟合合成曲面, 利用此曲面来修正整个雷达反演的降水场<sup>[17]</sup>。地理统计中的协同克里金方法是融合雷达估计降水和雨量计观测资料的另一常用方法<sup>[18]</sup>。此外还有其他各种模型, 如考虑了降水的持续性, 又可实时校正雷达估计降水应用的卡尔曼滤波模型<sup>[19]</sup>, 应用回归方法(包括一般线性回归、岭回归和稳健回归)的统计模型<sup>[20]</sup>, 并基于GIS开发的业务系统<sup>[21]</sup>, 以及针对所研究流域只被部分雨区覆盖时估算降水场的多变量统计模型<sup>[22]</sup>等。

雷达本身的探测误差以及不同的降水类型, 雷达气象方程中各参数的不同, 不同天气系统、不同地点, 都对对应着不同的Z-I关系(即反射因子—雨强关系), 使得利用雷达来估算降水在某些时候误差很大。国内许多学者及工程技术人员围绕相关问题展开了大量研究: 万玉发等<sup>[23]</sup>根据雨量计与其垂直上空雷

达的小时累计量之间存在的符合幂律的相关性，提出了一种基于准同雨团样本概念雷达与雨量计实时同步结合的降水估算新技术；戴铁丕等<sup>[24]</sup>利用平均校准方法校准雷达估测降水，并提出了“平均订正因子校准法”的新思路，这种方法具有简便、校准后区域总降水量较准确等优点；赵坤等<sup>[25]</sup>、李致家等<sup>[26]</sup>对传统卡尔曼滤波方法进行了改进，运用少量雨量计对雷达估测降水进行校正，并将处理的数据作为水文模型的输入，取得了较好的效果；刘晓阳等<sup>[27]</sup>用最优插值方法获得雷达雨量计联合估测的梅山水库集水区降水分布。

### 3.2 基于卫星估算面雨量方法研究

卫星估计降水是像素化的图像，因此原则上可直接用于面雨量的估算。但由于卫星对雨区识别的准确性较高，而对降水量估计的准确性较低，在用于面雨量估算时，一般需要经过地面观测资料订正或融合。在高原、海洋等地面雨量观测不足的地区，单纯用雨量观测修正也有困难。这时就有必要借助其他来源的资料，如数值预报产品作为第一猜测场，来进行资料融合。Grimes等<sup>[28]</sup>采用协同克里金方法结合卫星和地面观测资料进行面雨量计算；王登炎等<sup>[29]</sup>用变分法结合卫星估计降水和数值预报产品进行面雨量预报；师春香等<sup>[30]</sup>用人工神经网络方法，徐晶等<sup>[31]</sup>用最优化方法，刘洪鹏等<sup>[32]</sup>用反距离权重法，潘永地等<sup>[33]</sup>则利用气象卫星水汽通道资料修正地面观测资料的插值结果，再计算流域面雨量，以及直接利用卫星估计降水产品估算面雨量<sup>[34]</sup>的尝试，等等。这些工作为卫星估计降水资料用于面雨量的估算提供了多种行之有效的方法。

比较而言，卫星估计降水监测范围较广，适合于大范围降水场的估计，而地面雷达估计降水准确性较高，适合于中小流域。将两者的优势结合起来，联合卫星和雷达可对大流域的面雨量进行估算。例如我国“八五”期间所构建的利用雷达网和卫星联合估算长江流域大范围降水的LARORAS系统<sup>[35]</sup>，对防汛抗洪和大型水库工程建设具有重大应用价值；阿迈德·迪狄安·迪阿罗等<sup>[36]</sup>联合卫星和雷达重构淮河流域大范围的降水场，用精度更高的雷达估计降水来订正卫星估计降水，所得结果的精度高于单独使用卫星估算结果的精度；基于CINRAD和卫星的淮河流域致洪暴雨综合定量估测及预警系统<sup>[37]</sup>，在2003年淮河流域洪灾期间气象服务中取得明显效果。

随着遥感技术和计算技术的发展，综合运用地面气象站（特别是自动气象站）降水观测和卫星、雷达估测降水资料进行快速同化、融合得出降水场已成为

可能，这方面的研究越来越受到重视，具有广阔的业务应用前景。

## 4 模式预报降水(QPF)在洪水(面雨量)预报方面的应用

近些年来，随着观数值预报理论和方法的发展，数值预报正成为暴雨预报实现定点、定时和定量的科学手段，为水文模型预见期降水的预报提供了强有力的支撑。预见期内的降水量直接影响着洪水预报的精度，预见期愈长，预见期内的降雨对预报值影响愈大<sup>[38]</sup>。

面雨量是水文上重要的参数，是水文预报模型中最重要的预报对象，是一切洪水预报模型的输入场。李才媛等<sup>[39]</sup>、熊秋芬等<sup>[40]</sup>分别利用T213、MAPS模式产品进行面雨量预报，并对结果进行检验；朱红芳等<sup>[41]</sup>利用我国新一代数值预报模式GRAPES输出的降水预报制作了2005年7—9月淮河流域的面雨量预报，并对其与预报员制作的面雨量预报和面雨量实况进行了对比分析；张玉琴等<sup>[42]</sup>通过分析检验2007—2009年5—10月T213德国(Gem)日本(Jap)模式在雅砻江流域各区的面雨量，了解各模式在雅砻江流域的预报效果，再采用多元回归集成预报流域各区间的面雨量，在此基础上，将集成预报面雨量与二滩电站的入库流量进行分析比较。

尽管以上的研究已明显提高了洪水预报精度，但定量降水预报(QPF)精细化及准确率离水文预报的需求还是有较大的差距<sup>[43]</sup>。如在水文预报中，要求QPF的空间和时间分辨率分别达到10km和1h，QPF准确度也要达到10%以上，而目前的QPF还远没有达到这些要求。可喜的是这方面的研究工作目前已开始得到了相关学者的重视：刘勇等<sup>[44]</sup>充分利用降水量间统计分析的结果，通过在模型中引入坡度、坡向变量，对祁连山中东部地区降水量空间变化模式进行尺度下移，得到了该地区具有多尺度特性的高空间分辨率降水量的分析模型。此外，数值模式的自嵌套技术以及多模式的互嵌套技术开始用于提高模式空间分辨率<sup>[45-46]</sup>。

## 5 总结与展望

流域面雨量监测与预报业务是目前气象部门的业务工作之一，推进流域面雨量业务发展，一是要加强降水天气过程的机理研究，加深对天气系统之间的内在联系及演变规律的认识；二是通过增大观测密度，改善观测手段，提高面雨量检测的空间及时间精度，提供实时滚动面雨量监测产品，从而为洪峰预报提供第一手资料；三是加强对数值预报产品的开发及客观

释用技术, 提高定量降水预报产品的准确率及预报时效, 进而提高面雨量预报的准确性和时效; 四是结合洪峰及洪涝灾害对流域面雨量特征进行研究, 确定流域灾害面雨量临界值, 实现面雨量临界预警; 五是通过开展流域延伸期、中长期面雨量预报, 为流域水库调度、蓄水等决策提供参考; 六是进行流域面雨量检验方法研究工作, 以期建立起包含流域界定和选择的代表站、地理信息、面雨量计算、预报、检验评定、资料库、服务等内容组成的完整的面雨量预报业务系统, 也会把面雨量预报业务系统提高到一个更高水平, 为抵御特大洪水、防灾减灾提供更加优质的气象服务。

### 参考文献

- [1] 王铭才. 大气科学常用公式. 北京: 气象出版社, 1994.
- [2] Thiessen A H. Precipitation for large areas. *Monthly Weather Review*, 1911, 39: 1082-1084.
- [3] 徐晶, 林建, 姚学祥, 等. 七大江河流域面雨量计算方法及应用. *气象*, 2001, 27(11): 13-16.
- [4] Bedient P B, Huber W C. *Hydrology and Floodplain Analysis* (2nd Ed). MA: Addison-Vesley Reading, 1992.
- [5] 丁一汇. 现代天气学中的诊断分析方法. 北京: 气象出版社, 1984.
- [6] Barnes S L. Mesoscale objective analysis using weighted time-series observations. Norman: National Severe Storms Laboratory, NOAA Tech Memo ERL NSSL-62, OK 73069, 1973: 60.
- [7] Cressman G P. An operational objective analysis system. *Monthly Weather Review*, 1959, 87: 367-374.
- [8] 单九生, 张瑛, 周建雄. 细网格推算流域面雨量方法应用浅析. *江西气象科技*, 2001, 24(2): 11-14.
- [9] Cressie N A C. *Statistics for Spatial Data* (Revised Edition). New York: J Wiley, 1993.
- [10] Pardo-Igúzquiza E. Comparison of geostatistical methods for estimating the areal average climatological rainfall mean using data on precipitation and topography. *Int J Climate*, 1998, 18: 1031-1047.
- [11] Hutchinson M F. Interpolation of rainfall with thin plate smoothing splines-Part 1: Two dimensional smoothing of data with short range correlation. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1998, 2: 139-151.
- [12] 方慈安, 潘志祥, 叶成志, 等. 几种流域面雨量计算方法的比较. *气象*, 2003, 29(7): 23-26.
- [13] 李武阶, 王仁乔, 郑启松. 几种面雨量计算方法在气象和水文上的应用比较. *暴雨灾害*, 2000, 10: 62-67.
- [14] 郁淑华. 面雨量计算方法的比较分析. *四川气象*, 2001, 21(3): 3-5.
- [15] 徐晶, 姚学祥. 雨量估算技术综述. *气象*, 2007, 33(7): 15-21.
- [16] Collier C G. Development in radar and remote-sensing methods for measuring and forecasting rainfall. *Phil Tram R Soc Lord A*, 2002, 360: 1345-1361.
- [17] Wood S J, Jones D A, Moore R J. Static and dynamic calibration of radar data for hydrological use. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2000, 4(4): 545-554.
- [18] Seo D J, Krajewski W T, Bowles D S. Stochastic interpolation of rainfall data from rain gauges and radar using Cokriging. 1. Design of experiments. *Water Resources Research*. 1990, 26(3): 469-477.
- [19] Pack E B. Space-time calibration of radar rainfall data. *App1 Statist*, 2001, 50: 221-241.
- [20] SoKol Z. The use of radar and gauge measurements to estimate areal precipitation for several Czech river basins. *Stud Geophys Geod*, 2003, 47: 587-604.
- [21] 何健, 王春林, 毛夏, 等. 利用雷达回波与GIS技术反演面雨量研究. *气象科技*, 2006, 34 (3): 336-339.
- [22] Seo D J. Real-time estimation of rainfall fields using radar rainfall and rain gage data. *Journal of Hydrology*, 1998, 208: 37-52.
- [23] 万玉发, 吴翠红, 金鸿祥. 基于准同雨团样本概念雷达和雨量计的实时同步结合方法. *气象学报*, 2008(1): 262-273.
- [24] 戴铁丕, 傅德胜. 天气雷达一雨量计网联合探测区域降水量的精度. *南京气象学院学报*, 1990(4): 592-597.
- [25] 赵坤, 葛文忠, 李致家. 在雷达测雨和洪水预报中自适应卡尔曼滤波法的应用. *高原气象*, 2005(6): 956-965.
- [26] 李致家, 刘金涛, 葛文忠. 雷达估测降水与水文模型的耦合在洪水预报中的应用. *河海大学学报: 自然科学版*, 2004(6): 601-606.
- [27] 刘晓阳, 毛节泰, 李纪人. 雷达联合雨量计估测降水模拟水库入库流量. *水利学报*, 2002(4): 51-55.
- [28] Grimes D I F, Pardo-Igúzquiza E, Bonifacio R. Optimal area rainfall estimation using rain gauges and satellite data. *Journal of Hydrology*, 1999, 222: 93-108.
- [29] 王登炎, 李德俊, 金琪. 变分法和卫星云图模式识别在强降水面雨量预报中的应用. *气象*, 2003, 29 (3): 2 0-22.
- [30] 师春香, 卢乃锰, 张文建. 卫星面降水估计人工神经网络方法. *气候与环境研究*, 2001, 6: 467-471.
- [31] 徐晶, 毕宝贵. 卫星估计降水量产品的优化处理区检验. *气象*, 2005, 31(2): 27-31.
- [32] 刘洪鹏, 刘文. 省域卫星估测降水的资料融合技术及精度分析. *山东气象*, 2003, 23(4): 22-24.
- [33] 潘永地, 姚益平. 地面雨量计结合卫星水汽通道资料估算面降水量. *气象*, 2005, 30(9): 28-30.
- [34] 杨扬, 戚建国. 数字卫星云图估算面雨量的应用试验. *气象*, 1995, 21 (3): 35-39.
- [35] 万玉发, 张家国, 杨洪平, 等. 联合雷达网和卫星定量监测与预报长江流域大范围降水. *应用气象学报*, 1998, 9 (1): 94-103.
- [36] 阿迈德·迪狄安·迪阿罗, 刘晓阳, 毛节泰, 等. 卫星雷达联合重构大尺度流域降水场. *高原气象*, 2004, 23: 11-17.
- [37] 张爱民, 郑媛媛, 郑兰芝, 等. 基于CINRAD和卫星的淮河流域致洪暴雨综合定量估测及预警研究. *热带气象学报*, 2006, 22 (1): 96-100.
- [38] 崔春光, 彭涛, 殷志远, 等. 暴雨洪涝预报研究的若干进展. *气象科技进展*, 2011, 1(2): 32-37.
- [39] 李才媛, 宋清翠, 金琪. 短期强降水面雨量预报与T213产品的天气学释用. *气象*, 2003, 29(3): 27-31.
- [40] 熊秋芬, 王丽, 郑启松, 等. 三峡区间面雨量预报方法及其预报试验. *气象*, 2000, 26(10): 19-23.
- [41] 朱红芳, 王东勇, 朱鹏飞, 等. GRAPES模式在淮河流域面雨量预报中的应用. *气象*, 2007, 33(3): 76-82.
- [42] 张玉琴, 吴朝野, 何国平, 等. 基于数值预报产品的面雨量分析与检验. *高原山地气象研究*, 2011, 31(3): 60-64.
- [43] 宗志平, 代刊, 蒋星. 定量降水预报技术研究进展. *气象科技进展*, 2012, 2(5): 29-35.
- [44] 刘勇, 邹松兵. 祁连山地区高分辨率气温降水量分布模型. *兰州大学学报(s)*, 2006, 42(1): 7-12.
- [45] 沈愈. EOF迭代降尺度方案及其在华东梅汛期降水预测中的应用. *高原气象*, 2008, 27: 52-63.
- [46] 邓伟涛. 利用CAM-RegCM嵌套模式预测我国夏季降水异常. 南京: 南京信息工程大学, 2008.

# “中国暴雨”主题文献计量分析

李婧华 郑秋红

## 一、数据来源及统计方法

本文利用中国知网学术期刊网络出版总库（以下简称CAJD）和ISI Web of Science平台SCI-E数据库，检索统计国内外有关“中国暴雨”主题文献。在CAJD数据库中，采用检索式为主题=暴雨，学科限定为大气科学类，检索命中文献10181篇（检索日期为2014年3月14日）。在SCI-E数据库中，年限选择所有年，采用检索式为TS=(rainstorm\* OR "hard rain" OR "storm rainfall" OR "torrential rain" OR cloudburst OR gush OR "rain gush" OR "rain gust" OR "thunderstorm rain" OR downpour) AND (China OR Chinese)，文献类型选择研究论文和综述，在获得初步检索结果的基础上再利用Web of Science学科类别进行精炼检索和文献筛选，得到精确检索论文173篇（检索日期为2014年3月11日）。

## 二、结果统计及分析

### 1. 论文数量年度变化情况

CAJD数据库能够检索到最早的该主题文章是1935年发表在《气象杂志》上的《二十四年八月份全国天气概况》一文，文中提到“华北一带，暴雨沛降，雨量反比长江流域为多”，这是我国学者对暴

雨省级业务单位和省级科研期刊中，均有较多暴雨文章产出，说明了暴雨研究在我国基础广泛，且备受重视。

雨的早期记载。而对暴雨研究最早的文献是1960年北京大学的陈受钧发表在《北京大学学报（自然科学）》中的《1956年6月东亚上空的风和温度》一文，文中讨论了一次江淮流域暴雨时对流层上层流场和温度场的变化。而SCI-E数据库检索到最早关于“中国暴雨”的科技论文为1982年丁一汇发表在*Archives for Meteorology Geophysics and Bioclimatology Series B: Theoretical and Applied Climatology*中的*A Relationship Between Planetary-Waves and Persistent Rainstorms and Thunderstorms in China*一文。

暴雨一直以来都是我国学者研究的热点领域。从图1可以看出，我国关于暴雨的研究大致分为3个阶段，第一阶段是1971—1981年，此期间国内关于暴雨主题文献平均每年的发文量均小于100篇；第二阶段是1982—2005年，这一阶段，国内关于暴雨的研究在平稳中增长；第三阶段是2006—2013年，2006年暴雨主题论文数量发生飞跃，这一

年发表了506篇论文，此后论文数量稳步快速增长。SCI-E数据库中，1980年代每年发表“中国暴雨”主题文献小于2篇，大部分年代为0或1篇；进入1990年后，该主题文献每年产出虽仍低于每年10篇，但收录年份开始连续，基本每年都有该主题文献收录；2008年以后，SCI-E中“中国暴雨”论文开始逐渐增多，每年SCI-E数据库收录文献数量大于10篇，并且随时间平稳增加，2013年该主题发表文献32篇。

### 2. 国家和机构的产出和影响力分析

从SCI-E数据库的检索结果可以看出，国外“中国暴雨”产出的173篇文献中，中国产出159篇，遥遥领先其他国家/地区。美国在该领域产出29篇，位列第2。而其他国家和地区在该领域文献产出均低于20篇。可以看出，我国在该领域的研究产出量虽大，但是国际合作和影响力还有较大差距。

表2给出了“中国暴雨”主题文献产出较多的机构。可以看出，国内研究暴雨的机构主要有“三大阵营”：中国气象局及其下属的各省市气象局、中科院大气物理研究所和以南京信息工程大学、南京大学为首的高校系统。中国气象局作为我国重要的气象科研和业务单位，以938篇产出位列第一。高校系统中，南京信息工程大学产出633篇，排名第二。大气所以317篇位列第三。此外，广西气象台、陕西省

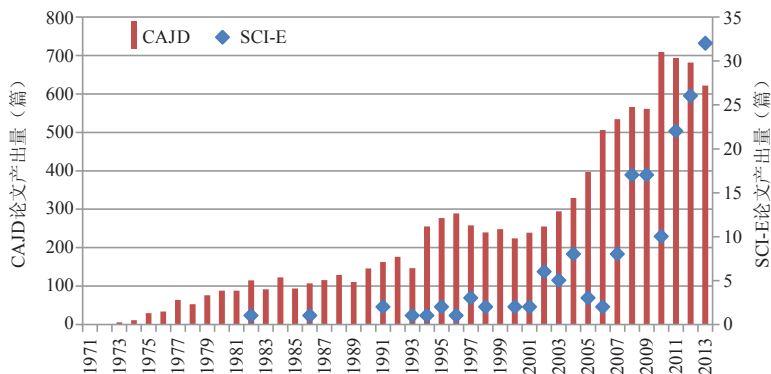


图1 1970—2013年“中国暴雨”主题文献年代分布

表1 国际“中国暴雨”主题文献产出及影响的国家/地区分布

国家/地区	产出	总被引次数	篇均被引次数
中国	159	1012	6.17
美国	29	362	11.68
加拿大	11	144	12
德国	5	179	35.8
荷兰	5	27	5.4
日本	4	26	6.5
挪威	3	3	1
澳大利亚	2	51	25.5
比利时	2	37	18.5
瑞典	2	8	4
中国台湾	2	1	0.5

气象台等省级业务单位也有较多产出,说明暴雨研究在我国具有广泛研究基础。国际上研究该领域的主要机构,绝大多数为中国的机构。产出最多的是中国科学院,显示出其不俗的研究实力,中国气象局紧随其后。产出“中国暴雨”主题较多的国外机构有美国马里兰大学和加拿大多伦多大学,这两个机构产出的文献多由华裔科学家参与。

### 3. 论文高产期刊和学者分析

表3给出了刊载“中国暴雨”领域文献较多的期刊。国外刊载该主题最多的杂志是*Catena*、*Journal of Tropical Meteorology*和*Natural Hazards*,刊载量均为10篇。国内刊载该主题最多的期刊是《气象》,刊载量为1055篇,是排名第2的《气象研究与应用》刊载量的约2倍。此外,《陕西气象》等行业内部期刊也位列其中,说明了省级单位对暴雨研究的重视。表4给出发表“中国暴雨”主题文献最多的作者。

### 4. 热门文献和研究热点

SCI-E和CAJD被引频次最高的热门文献在P3, P5页榜单给出。从CAJD数据库的检索结果可以看出,数值模拟、诊断分析等方向的暴雨研究论文产出较多。台风、湿位涡、中尺度对流系统和副热带高压等是该领域研究的热点内容。

表2 “中国暴雨”主题文献产出较多的机构

SCI-E数据库		CAJD数据库	
机构	产出(篇)	机构	产出(篇)
中国科学院	68	中国气象局	938
中国气象局	24	南京信息工程大学	633
南京大学	12	中国科学院大气物理研究所	317
南京信息工程大学	9	南京大学	220
马里兰大学	8	武汉暴雨研究所	181
成都理工大学	7	解放军理工大学	150
解放军理工大学	7	北京大学	143
北京师范大学	6	广西气象台	140
清华大学	6	陕西省气象台	136
多伦多大学	6	兰州大学	130
华东师范大学	4	武汉市中心气象台	124
西北农林科技大学	4	成都高原气象研究所	115
北京大学	4	四川省气象台	106
四川大学	4	浙江省气象局	87

表3 刊载“中国暴雨”主题文献较多的期刊

SCI-E数据库		CAJD数据库	
期刊	刊载量(篇)	期刊	刊载量(篇)
<i>Catena</i>	10	气象	1055
<i>Journal of Tropical Meteorology</i>	10	气象研究与应用	513
<i>Natural Hazards</i>	10	气象科技	320
<i>Advances in Atmospheric Sciences</i>	9	暴雨灾害	314
<i>Hydrological Processes</i>	8	陕西气象	301
<i>Journal of Hydrology</i>	6	安徽农业科学	278
<i>Chinese Journal of Geophysics</i>	5	高原气象	268
<i>Disaster Advances</i>	5	大气科学学报	265
<i>Environmental Earth Sciences</i>	5	气象科学	264

表4 “中国暴雨”主题文献高产作者

SCI-E数据库		CAJD数据库	
作者	产出(篇)	作者	产出(篇)
Xu JX	6	赵思雄	59
Yang YH	5	沈桐立	49
Luk SH	4	寿绍文	48
Wang J	4	丁治英	44
Xu SY	4	寿绍文	40
Xu YP	4	高守亭	37

## 三、结论

从文献产出量可以看出,暴雨研究一直是我国气象领域的研究热点,国内该主题文献产出数量逐年稳步增长,2006年之后,有关暴雨研究的文章平均每年发表超过500篇。我国研究暴雨的机构分布广泛,气象局系统、高校和中科院都有“不俗表现”。值得注意的是,省级业务单位和省级科研期刊中,均有较多暴雨文章产出,说明了暴雨研究在我国基础广泛,且备受重

视。但因本文检索主题限定为“中国暴雨”,所以在SCI-E数据库检索结果中,高产作者无一例外是中国学者或华裔,中国机构及其主办的期刊在榜单中也占有相当的优势。但这并不能代表我国在暴雨研究领域的真实水平,我们还应正视与欧美发达国家之间不小的差距。

(作者单位:中国气象局气象干部培训学院)

## 《暴雨灾害》特色化办刊纪略

■ 王银平

武汉暴雨研究所2002年成立伊始，就一直谋求创办一份公开发行的学术期刊。2006年初，湖北省气象局以新一轮气象业务技术体制改革为契机，向国家新闻出版行政部门申请将《湖北气象》更名为《暴雨灾害》。2007年《暴雨灾害》正式面向国内外公开出版发行。



《暴雨灾害》创刊号封面

最初，宇如聪研究员在接受主编一职时，不仅提出了“高起点、高质量、高标准”的办刊要求，还动员各位编委为如何将《暴雨灾害》办成品牌期刊建言献策。中国工程院院士李泽椿认为，《暴雨灾害》一定要办出自己的特色，不与其他气象类核心期刊盲目攀比，要面向基层气象台站、面向气象基础业务，在选题策划上将暴雨理论研究同暴雨监测预报业务与服务有机地结合起来，脚踏实地走好每一步，在争取较高论文引用率上下功夫。倪允琪教授指出，《暴雨灾害》应从创刊号开始，立足于全国、立足于创核心期刊，在抓论文选题、抓栏目设计、抓稿件质量上动脑筋、下真功，不断办出特色，办出水准，办出影响和知名度。

随着《暴雨灾害》创刊号出版，如何在最短的时间找到最新的稿件将其尽快发表，成为摆在编辑部面前的头等大事。编辑部别无选



编辑部别无选择，将用心为气象科研和气象科研人员服务作为突破口，编辑们密切跟踪在研科技项目，努力做气象科研人员的“贴心人”、“及时雨”。

择，将用心为气象科研和气象科研人员服务作为突破口，编辑们密切跟踪在研科技项目，努力做气象科研人员的“贴心人”、“及时雨”。2007年10月，有一项中国气象局新技术重点推广项目结题在即，从中剥离出来的10多篇论文亟待公开发表，项目组负责人与多家刊物联系未果，便“心急火燎”找到《暴雨灾害》编辑部；编辑部了解情况后，明知时间紧、任务重，果断承接此项出版任务。为取信科研人员，编辑部全员双休日和节假日加班加点，终于赶在年底最后一期《暴雨灾害》上将该项目所属14篇论文如数发表。

2008年初，全国数值预报发展与应用研讨会在武汉召开。会议期间，宇如聪召集与会编委和在汉编委听取《暴雨灾害》创刊一年来的工作汇报之后，就同类学术期刊激烈竞争环境下《暴雨灾害》如何发展进行了反复讨论，并提出具体应对措施。

此次会议后，《暴雨灾害》开始以“求新求快”为基本办刊思路，努力追求特色化办刊和办刊特色化。在办刊实践中，编辑部密切关注各地暴雨事件或其他极端灾害性天气事件，主动向当地科研或业务人员约稿，并尽快将其发表。针对2008年初我国南方地区发生的罕见低温雨雪冰冻灾害，编辑部分头采取“人盯人”约稿战术，设法与作者谈合作、交朋友、话情谊，以此打动作者，所约3篇与冰雪天气灾害有关的研究论文均在当年《暴雨灾害》第二期以“冰雪天气研究”

栏目推出。2008年北京奥运会开幕之前，编辑部主动向北京一位资深专家约稿，提前发表1篇有关北京奥运期间冰雹灾害风险评估的研究论文。这些特色稿件的发表，使《暴雨灾害》杂志的特色逐渐显现。

2011年，《暴雨灾害》向中国科学技术信息研究所提交了《〈暴雨灾害〉入编“中国科技核心期刊”申请报告》。7月29日，由湖北省科技情报局副局长、省科技信息研究院副院长汪少敏研究员牵线联络的省内科技期刊出版界5位知名专家应邀来到武汉暴雨所，对《暴雨灾害》出版质量、选题组稿、装帧设计、特色凝练以及影响评价指标等进行全面会诊。专家们虽然对该刊给出了“无论在出版定位与论文学术质量上，还是在编辑校对和装帧印刷质量上，都达到较高水平”的正面评价，但同时指出了存在于该刊中的各种问题，并着眼加快《暴雨灾害》发展、提升办刊质量、扩大学术影响力，给出多条颇有见地的建议。其中包括：坚持走“开放办刊”之路，着眼期刊做强做大，立足气象学科发展前沿，及时了解国内国际期刊发展和本学科专业发展动态，与时俱进，推进期刊现代化、国际化、规范化、标准化；进一步提高稿件编校质量，确保发表的每篇论文格式规范、图表清晰、语言简练，同时增加英文信息容量，提高英文质量；切实发挥编委作用，发动编委为刊物撰写或推荐稿件；密切关注本学科国家重点科研项目和相关学术会议，克服一切困难和畏难情绪，不遗余力争

取高质量稿件；扩大对外宣传，加强与同类期刊合作与交流，学习借鉴国内核心期刊的经验和做法，重点围绕刊物的影响因子和被引频次两项指标抓策划、挖选题，不断提高刊物的学术影响力。

出乎意料的是，从当年中国科学技术信息研究所主持召开的中国科技论文统计结果发布会上传出佳音，经过多项学术指标综合评定及同行专家评议推荐，《暴雨灾害》杂志被收录为“中国科技论文统计源期刊”（中国科技核心期刊），从而一次申报成功。到2010年，《暴雨灾害》

影响因子为1.744，学科影响指标达0.90，已高出大气科学（气象学）类期刊平均学科影响指标（0.74）。

考虑到“核心期刊”评比实行动态管理，为了保住“核心期刊”的荣誉，暴雨所于2012年11月2日在武昌组织了第二次《暴雨灾害》出版专家审读会诊。此次会诊审读会上，出版专家们毫不隐讳地指出了一年来《暴雨灾害》出版中存在的问题，如载文量减少、篇均引文率下降、文献引用期刊中高端期刊偏少、本单位和本省作者发文所占比例偏大、参考文献半衰期太短、

“灾害”特色不明显等。同时，给出若干建议：适应现代办刊环境，争取在“核心期刊”中排名靠前；进一步发挥编委会的作用，切实让编委履行职责，多承担一些任务；依靠主办单位领导和专家力量，设法组织好稿源；不断凝练刊物特色，重视选题策划，继续关注各地不同类型暴雨研究成果，增加山洪、滑坡、泥石流等暴雨次生灾害与防灾减灾对策研究选题，将刊物的“暴雨特色”与“灾害特色”有机结合，同时凸显。

（作者单位：中国气象局武汉暴雨研究所）

## 新书架

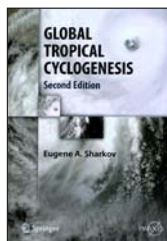
### NEW BOOK

感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



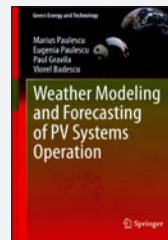
Operational Weather Forecasting  
《业务天气预报》

编著者：Peter Inness等  
出版者：Wiley-Blackwell  
出版年：2013



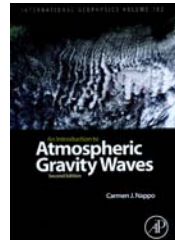
Global Tropical Cyclogenesis  
(Second Edition)  
《全球热带气旋之发展形成》  
(第二版)

编著者：Eugene A. Sharkov  
出版者：Springer  
出版年：2012



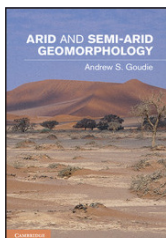
Weather Modeling and Forecasting  
of PV Systems Operation  
《用于光伏系统操作的天气  
模拟及预测》

编著者：Marius Paulescu等  
出版者：Springer  
出版年：2013



An Introduction to  
Atmospheric Gravity Waves  
《大气重力波概论》

编著者：Carmen J. Nappo  
出版者：Academic Press  
出版年：2013



Arid and Semi-Arid Geomorphology  
《干旱和半干旱地貌学》

编著者：Andrew S. Goudie  
出版者：Cambridge University Press  
出版年：2013



气象服务效益评估技术与方法：  
理论与实证研究

编著者：李廉水等  
出版者：科学出版社  
出版年：2013



气候变化再审视：非政府国际  
气候变化研究组报告

编著者：(美)C.D. 伊狄梭等主  
编：张志强等译  
出版者：科学出版社  
出版年：2013



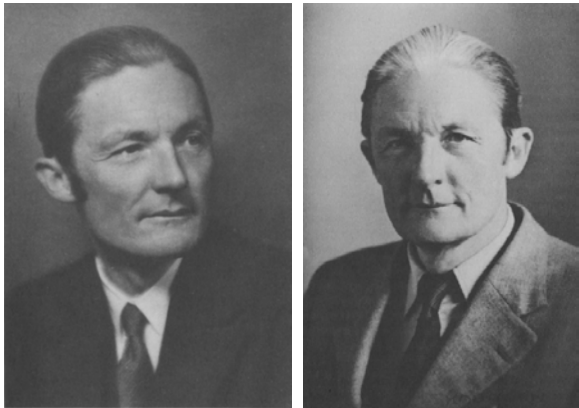
ENSO与海洋环境和中国  
气候异常

编著者：陈永利等  
出版者：科学出版社  
出版年：2013

# 伯杰龙及其在天气学分析和高空气象学的贡献

■ 叶鑫欣 焦艳 傅刚

瑞典气象学家伯杰龙 (Tor Harold Percival Bergeron, 1891.8.15—1977.6.13) 是挪威学派的重要成员之一, 在大气科学诸多分支领域均有开创性贡献。他的研究工作同时涉及气团分类、锋面理论和降水物理学等方面, 他总结的气团分析方法是天气预报的重要分析手段之一。



T. 伯杰龙 (左: 摄于卑尔根工作时期, 右: 摄于20世纪30年代初)

## 一、伯杰龙与天气学分析

伯杰龙出生在英国萨里城郊的戈德斯通, 成长在一个富有艺术气息的家庭中, 父亲经营邮票生意, 母亲是歌手及声乐教师。少年时代的伯杰龙对天气现象和云观测有浓厚的兴趣, 并养成记“天气日志”的习惯, 几乎每个夏天都会到位于挪威边境的Ånn (63°20'N, 12°30'E, 海拔560m) 进行观测, 在那里他观测到了当时的云图中从未提及的山脉背风波云系 (lee-wave clouds)。

1910—1916年, 伯杰龙在斯德哥尔摩大学学习数学和物理。遵照Ekholm的建议<sup>①</sup>他非常努力地学习物理。尽管如此, 他仍然保持着对气象学的热爱, 经常到气象学会学习分析天气图。根据大量的观测数据, 伯杰龙发现两个气团之间往往存在明显的边界, 并认为气团之间的性质差异是源地不同导致的, 一定存在某种更为保守的性质, 可以表征气团的“纯净程度”, 认为大气能见度可用来跟踪气团移动、混合等过程。

1918年秋, 伯杰龙在瑞典见到了J.皮叶克尼斯和索尔伯格, 次年被Sandström推荐到卑尔根气象学院学习, 与那里的气象学家们成为挚友。他在1919年11月18日的



伯杰龙发现两个气团之间往往存在明显的边界, 一定存在某种更为保守的性质, 可以表征气团的“纯净程度”。

天气图上首次发现了“锢囚”现象和“锢囚锋”, 而后从理论方面完善了极锋、锋面气旋等理论, 并从观测事实角度验证了有关理想模型的合理性, 而且构思出了天气图上沿用至今的冷暖锋的标记方法。1919年末, 他前往斯德哥尔摩的瑞典气象水文学会任初级气象学家一职, 直到1922年5月回到卑尔根, 并在挪威气象学会天气预报部门工作至1929年。1923年春季, 他在卑尔根专门开设天气图分析课程, 这也是之后系统化的气象教学的开端。1926年, 他与德国气象学家G. Schinze<sup>②</sup>的堂妹Elfriede Schinze结为夫妇。这期间, 他还先后到德国莱比锡大学 (1923—1925年) 和奥斯陆大学 (1925—1928年) 深造, 并于1928年获得奥斯陆大学博士学位。伯杰龙曾游历多国并撰写著作, 致力于传播挪威学派的天气学分析方法; 期间提出了冷云降水机制, 即后来为人们熟知的魏格纳—伯杰龙—芬代森降水过程 (the Wegener-Bergeron-Findeisen process)。

伯杰龙具有过人的语言天赋, 掌握七种语言, 因而成为挪威学派科学家中传道授业的主要贡献者, 曾到马耳他、前苏联等地讲学。1930年9—12月和1931年12月—1932年10月, 他两次前往莫斯科指导天气分析, 讲座内容由他和两名俄国天气学家S. P. Chromow 及B. L. Dzerdzyevsky共同整理成俄语版。

1936年, 伯杰龙回到斯德哥尔摩, 在瑞典气象水文研究所 (SMHI) 工作 (1936—1947年), 并于1942年起担任首席气象科学家。尽管当时瑞典气象学界对挪威学派的理念抱有排斥, 通过讲座和天气图分析课程, 伯杰龙仍推动了天气学分析方法在瑞典的普及。不仅如此, 他非常关注斯德哥尔摩广播发布的气象预报, 常常直接向预报部门阐述他的意见。在此期间他还担任世界气象组织 (WMO) 天气学委员会委员职务, 在云和降水分类工作中做出了贡献。

1945年第二次世界大战结束时, 瑞典军事和航空领域面临巨大的气象人才需求, SMHI随即开设了天气学分析培训课程。不久后, 瑞典政府开始重视气象学教学, 诸多高校开设了气象学专业, 伯杰龙也于1947年被

① N. Ekholm (1848—1923年), 瑞典气象学家、极地探险家, 1914—1918年主要负责瑞典气象学会, 他是伯杰龙母亲的一位朋友。

② G. Schinze当时在挪威气象服务部门工作, 以天气图分析认真著称, 曾提出一套天气图工作流程。



晚年致力于Pluvius降水研究计划的伯杰龙（摄于1969年）

聘为乌普萨拉大学天气学系教授及系主任，进行了热带气象学和极地气象的研究。1953年，他主持了Pluvius降水研究计划，负责项目实施直到晚年，保持着清晰、敏锐的思维和良好的记忆力。同年9—10月，他参与了国际教科文组织技术援助计划（The UNESCO Technical Aid Program），到摩洛哥和南斯拉夫进行天气学分析教学。1961年从乌普萨拉大学退休后，年近七旬的伯杰龙仍在气象学院继续着研究工作。1976年秋，伯杰龙在85岁生日后不久便罹患胰腺癌，1977年6月13日逝世于瑞典乌普萨拉，是最后一位辞世的挪威气象学派的核心人物。

## 二、伯杰龙与高空气象学

除了天气学分析，伯杰龙在高空气象学方面的工作也极大地推动了近代天气预报的发展。1923—1925年在莱比锡学习期间，伯杰龙首先针对1923年9—14日北欧地区气旋进行了详细分析，用他所说的“间接高空气象学”方法（indirect aerology）揭示出气旋发展过程中大气的结构变化和降水云系的形成，并指出气流辐合不仅可以存在于风场，也能以风速切变为特征，成为首篇应用挪威学派理论和方法分析天气过程个例的文章。由于全文以德语撰写，这项工作未能引起关注。遵照作者要求，这篇文章没有出版英文译本，主要内容以及文中经典天气图被收录在《动力气象学和天气预报》（*Dynamic Meteorology and Weather Forecasting*）一书的第17卷。

1915年，飞机最先在荷兰城市乌得勒支地区被应用于气象观测。伯杰龙随即利用这类高空观测数据研究了锋面和相关云系，然而当时他对高空气象学的兴趣并没有得到挪威学派其他科学家的认同。1935年，随着一系列飞行计划在瑞典菲利普斯塔德（Filipstad）和挪威内斯

比恩（Nesbyen）相继实施，大量观测分析使“间接高空气象学”方法趋于成熟，该方法即通过分析地面观测数据、云的状态和移动判断高空气流情况，弥补高空观测稀少问题。在那时无线电探空技术尚未广泛应用于业务预报，“间接高空气象学”恰恰指导人们将云观测与地面天气图相结合，推断出三维空间内的物理过程。在挪威空军的帮助下，高空直接气象观测设备逐渐增多，垂直大气观测得以实现。

## 三、论文专著

伯杰龙在天气学分析方面的重要成果集中呈现在他的博士学位论文中，包括锋生机制、气团分类等多个问题，文中的许多概念都被后来的气象学教科书采用，重要理念收录在*Ground Plan of a Dynamic Climatology*一书中。伯杰龙在文中强调了高空气象分析的重要性，而高空观测与地面系统的配置恰恰在这之后的十多年中成为气象学研究和天气预报的重点之一。他认为，天气变化是与不同性质的气团活动，尤其是锋面气旋活动相联系的。考虑到冷暖空气变化的热力学过程，他将气团系统地划分了类别，按源地分为赤道、热带、近极地、极地气团，按最终的热力层结和湿度特点分为海洋性、大陆性气团。为确定气团类别，他给出一些观测指标，包括大气能见度、天空颜色等，希望通过分析中、小尺度的观测数据反映大尺度的天气变化。伯杰龙还分析了锋生锋消的运动学、动力学机制，根据降水类型、云系分布和大气能见度，利用“间接高空气象学”分析方法确定出气团的热力结构，并指出了变形场中的锋生锋消过程，认为当两个垂直尺度足够大的气团发生相对运动、交界区域变窄时锋生，当辐散运动占主导时锋消。该过程与湍流、辐射导致的能量交换也有关系，中性点是确定锋生位置、时间的关键要素。他认为这种流型多出现在半永久性高低压系统之间，并解释了锋生区的平均季节变化。

伯杰龙对论文写作要求苛刻，许多文章未曾发表。尽管如此，他的讲稿仍被作为天气学教科书的基础资料，经同事整理后以俄、英、德等语言出版。在数值预报产品广泛应用的今天，人们仍然可以通过他的著述认识天气学分析和预报的基本方法。这些著作无疑在传播挪威学派理念的过程中发挥了重要作用。

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

## 编辑选编

### IPCC第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论——《气候变化研究进展》2014年第10卷第1期

秦大河等撰文指出, IPCC第五次评估报告(AR5)第一工作组(WGI)报告的亮点结论,是过去7年全世界气候变化科学研究成果凝练出来的精华。20世纪50年代以来全球气候变暖的一半以上是人类活动造成的。1971年以来人为排放温室气体产生热量的93%进入了海洋,海洋还吸收了大约30%人为排放的CO<sub>2</sub>,导致海表水pH值下降了0.1,等等。与AR4相比,AR5从多层面、多视角证实了近百年全球气候变暖的事实。人类活动影响气候系统的证据更多、更强,在海洋变暖、水循环变化、冰冻圈退缩、海平面上升以及极端气候事件变化等诸多方面,提供了人为因素导致气候变暖的新证据,进一步确认人类活动影响是造成20世纪中叶以来气候变暖的主要原因(概率>95%)。采用全球耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)的模式,预估未来全球气候变暖仍将持续,21世纪末全球平均地表温度在1986—2005年的基础上将升高0.3~4.8℃。限制气候变化需要大幅度持续减少温室气体排放。如果将1861—1880年以来人为CO<sub>2</sub>累积排放控制在1000 GtC,那么人类有超过66%的可能性把未来升温幅度控制在2℃以内(相对1861—1880年)。

### 全球气候变化研究与科学数据——《地球科学进展》2014年第29卷第1期

吴国雄等在阐明气候系统和科学数据关系的基础上,提出气候变化研究应该重视地球系统研究对科学数据的需求。在回顾我国近10年来全球变化研究概况的基础上,指出了观测资料和数据再分析产品在全球变化研究中的重要性,并进一

步总结了国外气象数据共享情况,最后对我国地球系统科学数据共享中心今后的发展提出了几点建议。

目前国际上主要的气象数据发布机构集中在欧洲、美国、亚洲等地区,其中发达国家把对政府拥有和政府资助生产的数据采用“完全开放”的共享政策作为一个国家进入信息时代以来的基本国策,而且用法律的手段给予保障。欧洲气象数据主要集中在欧洲中期天气预测中心和英国气象局哈德莱中心2个机构,欧洲中期天气预测中心拥有45年(1957年中期至2002年中期)的同化数据(ERA 40),同化了包括航海观测、飞机观测、高空探测以及卫星资料在内的观测资料,英国气象局哈德莱中心主要共享了海表温度和海冰资料、海平面气压资料和全球海洋分析等资料。美国主要的气象数据共享机构有国家海洋和大气管理局(NOAA)、国家航空航天局(NASA)和国家环境预报中心(NCEP),除了再分析资料共享外,还包括降水、气溶胶、云等观测资料。日本气象数据共享机构主要是日本气象厅,其拥有日本25年再分析资料数据集(JRA 25),它是日本气象厅与电力工业中心研究所联合研制的高质量全球再分析气象数据,提供了从1979年1月起每6小时和逐月的分析数据。不论是欧洲、美国还是日本,他们都拥有具有自己特色、自己品牌的精品科学数据,这样才能在世界上成为具有影响力、被国际科学界乐于使用的科学数据。

### 北京将开展人工消减雾霾科学试验——《中国科技信息》2014年第1期

北京将开展人工消减雾霾科学试验,为大气污染防治提供气象科学依据。12月17日在全市气象现代化工作会议上,北京市副市长林克庆透露,目前北京气象观测站都面临高层建筑阻挡等环境影响。今后两年,将新增气象自动观测站200个以上,人工气象观测站全部达到国家

基准站标准。林克庆介绍,北京气象观测环境保护不力,全市一半以上国家气象观测站遭受不同程度破坏,5个台站因环境破坏被迫迁建;全市仅有的2部天气雷达因附近新建高楼被阻挡;全市唯一的国家基准气候站,也因附近高层建筑严重影响探测环境,作用难以发挥。林克庆同时指出,首都气象预报预警核心科技水平难以满足精细化预报需求,明显落后于发达国家和先进地区。

### 2013年1月京津冀地区强雾霾频发成因初探——《环境科学与技术》2014年第1期

孟晓艳等基于2001—2013年的气象观测数据和环境空气质量监测数据,针对京津冀地区1月同期的雾霾天数、能见度、环境空气污染物浓度等展开分析,结果表明:2013年1月京津冀地区平均雾霾天数发生了21.7d;污染物浓度超标严重,高浓度的颗粒物成为强雾霾频发的重要原因,PM<sub>10</sub>月均浓度为0.317mg/m<sup>3</sup>,PM<sub>2.5</sub>为0.219mg/m<sup>3</sup>;1月份京津冀地区气象要素表现为地面风速小、相对湿度高、大气层结稳定,更加促进大气污染物累积,并有利于颗粒物吸湿增长,致使空气质量恶化,强雾霾事件频发。

### 数值模式延伸期可预报分量提取及预报技术研究——《中国科学:地球科学》2014年第44卷第2期

王启光等针对延伸期尺度的可预报分量,借鉴了CNOP相关算法,形成了在数值模式中提取可预报分量的实用方法和预报技术。从模式预报误差增长的角度将模式变量分为可预报分量和不可预报的混沌分量,将可预报分量定义为在预报时段内误差增长较慢的分量。基于现有的国家气候中心月动力延伸预报业务模式,建立了针对可预报分量的数值模式。同时结合历史资料有用信息,对数值模式的可预报分量,在历史资料的可预报分量中寻找相似场,降低了相似判断过程

中变量的维数,进一步对可预报分量的预报误差进行订正。对混沌分量利用历史资料,通过集合预报方法得出其期望值和方差。数值试验结果表明,该方法能有效提高10~30天延伸期数值模式大气环流场的预报技巧,具有良好的业务应用前景。

### 中国历史时期气候变化影响及其应对的启示——《地球科学进展》2014年第29卷第1期

葛全胜等撰文指出气候变化的社会影响是当前全球变暖影响研究的一个重要领域。以古鉴今,历史上应对气候变化的经验和教训可以为现代人类应对以全球变暖为突出标志的气候变化挑战提供宝贵的借鉴。总结中国历史气候变化对社会影响研究领域的成果,归纳得到了历史时期气候变化对中国社会发展影响的若干认识及其对适应未来气候变化的启示。主要结论是:历史气候变化影响的总体特征是“冷抑暖扬”,但影响与响应存在区域差异;社会经济的衰落与百年尺度的气候由暖转冷呈现同期性,与暖期相伴的社会快速发展会增加社会对资源、环境需求的压力,导致社会脆弱性加大;历史上应对气候变化策略因时、因地、因主体而异;而以政府为主导的主动因地制宜适应是应对气候变化的有效策略。

### 黑河流域高分辨率区域气候模式建立及其对降水模拟验证——《科学通报》2014年第59卷第7期

熊喆等以中国科学院大气物理研究所东亚区域气候—环境重点实验室研制的区域环境集成系统模式为基础,采用黑河流域观测和遥感数据对模式中地形高度、植被类型、饱和土壤水势、饱和土壤导水率、田间持水量和萎点含水量、土壤孔隙度和土壤水势参数 $b$ 等重要参数进行重新率定,进行模式本地化,建立适合黑河流域高分辨率区域气候模式,并且利用该模式对黑河流域进行了2000年连续积分模拟,重点考察了区域气候模式在水

平分率为3km条件下对黑河流域降水模拟能力。结果表明:模式能够较好地模拟出黑河流域降水的年、季节空间分布特征和不同区域降水年变化。对于不同区域来说,上游地区模式模拟降水较观测偏多,中游和下游地区较观测偏少,降水偏差在-39.9%~9.06%之间,与IPCC 2001报告中在区域尺度105~106km<sup>2</sup>上降水偏差为±50%较为一致;模式模拟黑河流域上游、中游和下游地区平均降水与观测之间对应的相关系数分别为0.8123, 0.5064和0.7033,都通过99%置信度检验。其中黑河流域上游地区模拟最好,相关系数达到0.8123;该研究表明采用黑河流域高分辨率区域气候模式进行动力降尺度后,弥补了黑河流域观测站点少的缺陷,为水文模型评估与实现对流域水资源精细化管理和决策支持提供科学数据。

### 毫米波云雷达功率谱密度数据的检验和在弱降水滴谱反演中的应用研究——《大气科学》2014年第38卷第2期

刘黎平等撰文首先利用数值模拟的方法,分析了利用毫米波云雷达功率谱密度反演雨滴谱时,降水粒子米散射效应、空气湍流、空气上升速度等对雨滴谱和液态水含量等参数反演的影响;建立了功率谱密度处理及其直接反演雨滴谱、液态水含量、降水强度和空气上升速度的方法;并利用2012年7月在云南腾冲观测的二次弱降水数据,采用毫米波雷达和Ku波段微降水雷达观测的回波强度、径向速度垂直廓线以及780m高度上的功率谱密度对比的方法,以及毫米波云雷达观测的780m高度上功率谱密度、回波强度与地面雨滴谱计算得到的这些量的对比方法,分析了毫米波雷达数据的可靠性;并将780m高度上毫米波雷达反演的雨滴谱与地面雨滴谱数据进行了对比,分析了毫米波雷达反演的雨滴谱的准确性;分析了毫米波雷达回波强度偏弱的原因,讨论了该高度以下降水对毫米波雷达衰减的影响。结果表明:空气湍

流对弱降水微物理参数反演影响不大,而空气上升速度和米散射效应均对反演结果有一定影响;毫米波雷达观测到的径向速度和功率谱密度与微降水雷达比较一致,回波强度的垂直廓线的形状与微降水雷达也比较一致,但毫米波雷达观测的回波强度偏弱;与雨滴谱计算值相比,毫米波雷达观测的低层的回波强度也偏弱,天线上的积水是造成毫米波雷达回波强度变弱的主要原因。毫米波雷达观测的低层的功率谱密度与地面雨滴谱观测的数据形状比较一致,但有一定的位移。毫米波雷达反演的雨滴谱与地面观测的谱型和粒子大小也比较一致。这些结果初步验证了毫米波雷达观测的功率谱密度及其反演方法的可靠性。

### 2012年7月21日北京特大暴雨过程的水汽输送特征——《气象》2014年第40卷第2期

王婧羽等撰文利用NCEP再分析资料,根据水汽收支方程计算2012年7月21日北京特大暴雨时期华北东北部暴雨区域的水汽收支情况并分析水汽输送特征。得到以下结论:经向水汽输送在此次暴雨过程中起主要作用,暴雨区内水汽主要来源于中、低层(500hPa以下)的南边界。暴雨区内水汽的辐合与暴雨发生的时间和空间具有较好一致性,在低层水汽的辐合起主要作用,中高层水汽垂直输送作用更为显著。HYSPLIT后向轨迹模拟得到的结果显示根据水汽源地划分影响此次暴雨过程水汽输送路径主要有:从孟加拉湾、南海地区处于中低层直接北上的西南路径,以及中层以下从我国东部海域(黄海、东海为主)进入内陆之后北折向东北偏北方向运动的L形高湿路径;同时高层沿着西风带西北路径的干空气输送也对此次强降水有重要影响。三者中从东部海域到达暴雨区的水汽贡献率最大,而孟加拉湾、南海的水汽输送对于此次强降水起到了明显的增强作用。

**极化雷达降水遥感综述**——An overview of the remote sensing of precipitation with polarimetric radar. *Progress in Physical Geography*, 2014, Vol. 38, No. 1.

降水雷达遥感的最新研究进展主要包括极化雷达的发展,极化雷达具有在水平和垂直两个偏振态方向上的传送能力,从而可以提供目标降水粒子的更多信息。研究证明,偏振雷达不仅可以提高数据质量和对降水预测能力,而且提高了对降水粒子的特性描述,因此极化雷达在气象监测和预报方面具有很大潜力。世界各地的气象部门正在认识到这项先进技术的潜力,并且正在积极地改良他们的雷达网络、向偏振雷达升级,以提高雷达对降水的监测能力。就此,英国布里斯托大学的Islam等在参阅最新的关于这个主题的大量同行评议文章的基础上,撰写了有关降水遥感的这种新技术的综述文章,介绍了极化雷达观测的总体研究情况,强调了偏振信号的本质特征及其与降水粒子形状、大小和分布的关系,并对极化雷达信号在气象中的潜在研究和应用进行了讨论。

**ASCAT土壤湿度同化对区域降水预报的影响:基于奥地利的个例研究**——Impact of ASCAT soil moisture assimilation on regional precipitation forecasts: a case study for Austria. *Monthly Weather Review*, 2014, Vol. 142, No. 4.

奥地利中央气象与地球动力学研究所(ZAMG)使用一种简化的扩展卡尔曼滤波方法,在区域预报模式(ALADIN-Austria)中同化了来自MetOp系列卫星上搭载的先进散射计(ASCAT)的土壤湿度数据,以提高降水预报能力。逐点偏差校正方法被应用到ASCAT数据以及数据提供者提供的质量标记数据中。本项ASCAT同化个例的研究时段为一个月(2009年7月),区域为中欧。同化试验的预报结果和

由ZAMG运行的ALADIN业务化版本(奥地利气象局提供)的控制模拟进行了对比,并使用实测数据对预报进行了进一步验证。对于高影响天气下的单日个案研究而言,该方法对降水预报质量的改进结果表明:1)基于一站的实测数据,与业务化分析相比,同化ASCAT土壤湿度数据后,土壤湿度分析效果得到了提升;2)卫星数据的逐点偏差校正有利于预报质量的提高;3)研究时段内,平原上的对流性降水预报有所改善,而在山区并无明显改善。

**基于Budyko假设检测海河流域径流量下降主导原因的归因分析**——Attribution analysis based on the Budyko hypothesis for detecting the dominant cause of runoff decline in Haihe basin. *Journal of Hydrology*, 2014, Vol. 510.

气候变化和局地人类活动引起了土地利用/土地覆盖、降水和气温等因素的强烈变化,这又会严重影响流域水文过程。因而,理解流域水文过程如何响应这些变化显得十分必要。观测显示,在过去50年(1956—2005年)间,中国北方海河流域的径流存在显著下降趋势。为了探究径流下降的原因,清华大学的徐翔宇等首先利用一个基于Budyko假设的水—能量平衡方程(Choudhury-Yang方程),从理论上推导了“径流弹性(elasticity of runoff)”。根据局地气候条件(以干燥指数 $E_0/P$ 表示, $E_0$ 为年平均潜在蒸散, $P$ 为年均降水)和景观条件(以参数 $n$ 表示,主要与土壤特性、地形和植被有关),选择海河流域的33个山区集水区计算了径流弹性,并继续分析了33个流域在过去50年中的年径流量断点,在断点处将整个研究时段分为两个子时段(时段1:断点之前,时段2:断点之后)。然后,研究将两个子时段之间的径流变化归因于气候变异和土地利用/覆盖变化的影响。在Choudhury-Yang方程中,气候变化

由 $P$ 和 $E_0$ 的变化表示,土地利用/土地覆盖变化由参数 $n$ 表示。时段1到时段2的年径流变化即代表了流域水文对降水、潜在蒸散和土地利用/覆盖变化的响应。基于径流弹性,进一步计算了径流变化,发现33个集水区的平均年径流量从时段1(91.4 mm)到时段2(48.4 mm)下降了43.0 mm。气候变化和土地利用/覆盖变化对径流减少的影响分别平均为26.9%和73.1%。气候变化的影响主要是由于降水的减少,土地利用/覆盖变化的影响主要是由于植被的增加。植被增加主要是由于过去30年水土保持战略中的植树造林,气候变化特别是温度升高也是部分原因。基于历史水文气候数据估计径流的气候弹性,这种方法可以用来预测没有受到人类活动直接影响的未来气候情景下的流域径流变化。

**台湾台北对流层顶特征的月观测趋势**——Trends in monthly tropopause characteristics observed over Taipei, Taiwan. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2014, Vol. 71, No. 4.

使用30年(1981—2010年)的探空数据,台湾“中研院”环境变化研究中心的Raman等分析了台北(25°01'N, 121°27'E)上空温度最低点对流层顶(cold-point tropopause, CPT)的月趋势变化。研究利用了多元回归分析抑制自然变率的影响,如准两年振荡(QBO)、ENSO、太阳活动周期和火山爆发。基于连续时间序列,观测到统计意义上不显著的升温和CPT高度的下降。但是,使用单独月时间序列估算的趋势显示了一些新的特征,如在夏季的几个月中,CPT温度出现了显著增加(约0.03°C/a),CPT高度出现了显著下降(约4.7 m/a)。在夏季的台北上空,观测到对流层上层的升温速率有所加强,其连同平流层下层被抑制的冷却速率,可能共同导致了夏季对流层顶的升温趋势。研究也检测了对流层顶的趋势

和平流层下层臭氧之间可能存在的关系。使用NCEP-气候预测系统再分析(CFSR)数据估算的季节和空间变化趋势,揭示了CPT温度趋势的空间异质性。对流层顶特征月趋势的初步检测表明,采用连续时间序列进行的对流层顶的趋势估计可能不完全代表个别月份或季节的长期变化。

**印度灌溉对大气水分收支的影响**—Effects of Irrigation in India on the Atmospheric Water Budget. *Journal of Hydrometeorology*, 2014, in press.

荷兰瓦赫宁根大学及研究中心的Tuinenburg等使用3个区域气候模式(HIRHAM, HadRM, RAMS)和1个全球气候模式(ECHAM)模拟了印度大规模的灌溉对大气水分收支的影响,所有模拟都分为灌溉运行和非灌溉自然运行两种方式。基于通用的灌溉分布地图,全年的灌溉被表现为在不考虑水分利用率的情形下,通过增加水分到土壤以控制土壤湿度在土壤最大蓄水能力的90%。由于灌溉,所有模式中蒸发都有所增加,但是由于大气中水汽辐合的强烈下降,导致降水减少。研究使用了一种水分追踪方案,以确定蒸发的水分通过大气输送从而在哪里产生了降水。研究发现,恒河流域蒸发的水分有多达35%又循环到恒河流域内。但是,由于进入恒河流域的水汽辐合的减少,恒河流域的降水总量有所下降。尽管蒸发的水分有相当一部分又回到流域内,但由于灌溉引起的大尺度风格局的变化,使得降水从印度和尼泊尔东部地区向印度和巴基斯坦的北部和西部地区转移。在这些降水增加的区域,降水相对增加比例要大于降水减少区域的降水相对减少比例。研究得出结论:1)灌溉对降水的直接影响是小的,并且各模式之间是不均匀的;2)蒸发增加(例如,由于灌溉)后,高达35%的蒸发水分又循环到流域内;3)

大规模灌溉的主导影响将是大规模大气流动的改变,即减少了印度东部的降水,增加了印度西部和北部的降水。

**西伯利亚东北部沿森林—苔原过渡带的植物对气候变化的响应**—Plant response to climate change along the forest-tundra ecotone in northeastern Siberia. *Global Change Biology*, 2013, Vol. 19, No. 11.

为应对21世纪的气候变化,俄罗斯北方地区(泰加林)的生物群系很可能会急剧缩减,且向北转移,但目前很少有研究探讨沿北方地区北缘的植物对气候变化的响应。通过利用卫星获得的归一化植被指数(NDVI)、树木年轮宽度测量和气候数据,美国伍兹霍尔研究中心的Berner等量化了西伯利亚东北部Kolyma河流域(所占面积约为657000km<sup>2</sup>)的苔原灌丛和Cajander落叶松林的气候动态、植物生长趋势及其与气候之间的关系。1938—2009年,研究区域的夏季平均温度( $T_s$ )增加了1.0°C,虽然生长年(定义为 $t-1$ 年的9月到 $t$ 年的8月)降水量或气候湿润指数(CMI)并无明显趋势( $P>0.05$ )。在占流域面积20%的以灌木为主的寒冷区域,夏季平均NDVI在1982—2010年间显著上升。占流域面积56%的寒冷区域的NDVI与 $T_s$ 呈现显著正相关( $P<0.05$ ),相关系数 $r$ 为 $0.52\pm 0.09$ (平均值±标准偏差);而在占流域面积9%的区域(主要为温暖区域),NDVI与CMI呈现显著正相关( $P<0.05$ ,  $r=0.45\pm 0.06$ )。对9个地点的落叶松年轮宽度的测量显示,在1938—2007年间,每年(即高频)的生长变化与6月温度( $r=0.40$ )和前一年夏天的CMI( $r=0.40$ )呈现显著正相关( $P<0.05$ )。20世纪中期以后,断面积年度增量(basal area increment, BAI)出现了一个无法解释的数十年(即低频)的下降,然而,在NDVI记录上,平均BAI却并没有明显变化趋势( $P>0.05$ ),平均BAI与NDVI存在显著相关( $r=0.44$ ,

$P<0.05$ , 1982—2007年)。卫星和树木年轮分析表明,低温和有限的水分供应都会抑制植物的生长,气候变暖会促进植物生长。未来气候变化对北极俄罗斯地区树线附近区域的森林的影响很可能是由于温度和湿度的转变造成的,这意味着预测这个地区未来的森林分布和生产力,应该考虑到能量和水分限制交互作用的影响。

**过去30年间栽培品种、管理和气候变化对华北平原冬小麦产量的相对贡献**—Contributions of cultivars, management and climate change to winter wheat yield in the North China Plain in the past three decades. *European Journal of Agronomy*, 2014, Vol. 52.

中国科学院地理所的肖登攀等使用华北平原4个站点1980—2009年的田间试验数据,结合作物模型(APSIM-Wheat模型),分离了作物品种更新、施肥管理、气候变化及各气候变量等因子对冬小麦产量变化的相对贡献。研究发现,1981—2009年间,品种更新对华北平原冬小麦产量增加的贡献为12.2%~22.6%,肥料贡献为2.1%~3.6%,气候变化贡献为-3.0%~3.0%。不过,气候变化对华北平原南部的雨养小麦的产量贡献为-15.0%,其中,温度升高贡献为-12.0%~-9.0%,辐射变化贡献为-12.0%~-3.0%;而温度升高对华北平原北部冬小麦产量增加带来的贡献与南部恰好相反,为3.0%~6.0%。降水变化对冬小麦产量的影响较小,因为降水没有明显的变化趋势。研究认为,过去30年间,品种更新和农事管理是小麦产量增长的主导原因,然而,气候变化对某些区域的产量影响是相当大的,总体上,气候变化影响估计占到了实测产量趋势的-23.8%~25.0%。

## 第80页评刊

来信截至 2014年3月31日

### @干部学院读者

2014年第1期P53关于湖北颯线文章中，图2的分析明显不妥，气流与反气流之间不存在辐合线（图3），4.1的文字表述也有错；图4a还没有MCC这个系统，分析不对；4.3中鄱西的三个单体往西南方运动合并，在图5a中没有这个现象；结论的第一段表述文中没有证据。

### 回复（from 作者）

1.图2中850hPa中分析过于简要，只是突出了重点影响系统，低层大气受地形影响，河套到渤海湾一带仅分析了主要槽线，对华北的低压仅做了标识，川西高原地形风做了忽略。2.辐合线是指鄂西北南部偏西风与豫西南偏东气流之间的辐合，以及江汉平原的气旋性辐合。没有提及气旋与反气旋间的辐合问题。3.两个对流体一个位于四川东北部（水平尺度大一些），另一个在重庆北部的对流体（水平尺度小一点）。4.三个强回波区分别位于：安康以南、平利东偏北位置、竹溪南部。5.结论的第一段表述源于3.2系统演变分析、归纳。

本文的一些问题，一是分析描述问题的科学性不足，如地面辐合线表述欠周密；二是插图绘制的准确性不够，如图1、图4和图5没有准确表达文字描述的内容。作为一名基层作者，通过专家—编辑—读者—作者这种反馈机制，提高了分析认知大气科学机理的能力，体会到了在撰写学术文章中切需做到细致、周密、准确和科学表述。一点粗浅认识，希望与基层同仁共勉。再次感谢读者给出的疑问和建议，利于我等在今后的分析研究中不断改进、提高。限于水平，不当之处请予指正！谢谢！

### @何日有太白

很喜欢贵刊的《基层气象现代化》这一栏目，诚如许小峰局长所言，气象现代化的实现与否，关键在于基础能力和水平。作为一个民航基层预报员对此深有体会。

民航气象属于专业气象的一种，因其行业特点，用户对其气象产品的需求侧重点与地方气象存在一定的差异。具体来说，在现有条件下，立足于民航分局一级气象台站，相关气象用户对短时临近预报的准确性有较高的要求。限于现有预报手段，提前一天或多个小时做出精确判断有一定难度。但是如果能有效利用多普勒雷达卫星云图等非常规资料，在2个小时的时间尺度内，还是能对雷雨及其伴随的危险天气发出有效的预警。所以，我希望贵刊能多刊出一些关于多普勒雷达卫星云图等非常规资料实际运用的文章，帮助像我一样的基层预报员迅速提高临近预报预警能力，从而提高民航基层气象服务水平的目的。

### 点评（from 编辑部）

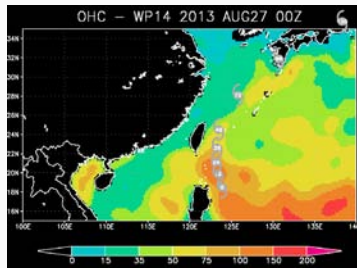
民航的定点和航线预报很有特点，你们报准了，机场延误可能就少些，如能总结出最主要的制约预报的科学问题，欢迎通过本刊交流。

### @夏旭东0

在1401期读图栏目中，指出台风海燕可能是海洋蓄力的喷发所引起的，但是海燕的加强并不是完全依靠强大的海温层，从某种角度上来讲，海燕的生成过程是大气环流和海温共同作用的结果。图中201315康妮形成时的海洋热含量OHC可以明显看出在西菲律宾海和赤道附近海域（黑潮范围）OHC明显较高，而这一带恰好是西环副高西侧环流和印度洋水汽通道的必经之处，这恰好能为此处的TC提供良好的“生产”条件。在海燕生成的时候，并不是此处海温最高的时候，使其最终变强的，还有参与整个水汽运输的大气环流。

### 回复（from 编辑部）

这条有关台风海燕，来自Science杂志的研究信息，其实是从更长时间尺度，即气候变化的角度审视如此强TC的成因，而非针对某次台风过程的分析。这样的分析可以让我们警惕，以后的海上风暴有可能会随着海温增高，其量级也走高。另外，如您所言，TC的强度，特别是TC的突然增强，也远非海洋温度一个因子在起作用，各种机制待更加深入的研究。



### @中国气象爱好者

配色上，小处来说，杂志内页上页眉处“气象科技进展”的logo不够鲜艳；大处来说，有些地方色彩过多，譬如目录页上同时有褐红、大红、浅蓝和黑色，渐变色使用的不够，让杂志的精致度受到影响；有些地方的色彩没有起到区分作用，譬如“研究进展”文章的一级标题是褐红色，“专题”的一级标题是蓝色，我猜想编辑想用这个让读者区分内容大块，但很显然效果不足。格式上，第一，可爱字体可以适当使用，但使用太多，尤其是在严肃的论文里使用则有损观感。譬如论文里的“摘要”“关键词”都使用了可爱字体，窃以为没有太大必要；第二，杂志奇数页页眉上的“progress 研究进展”等字体过大，且使用了衬体，有喧宾夺主之感；第三，各级标题和正文之间的空格不够大，但标题序号和标题文字之间空格太大，标题滥用加粗黑体字，有凌乱之感。杂志既然要考虑传播度，应该在格式上向时政、财经期刊的格式靠拢，让读者能迅速捕捉到标题。

### 回复（from 编辑部）

美术设计是本刊的一个弱点，由于编辑部没有专业的美编，所以创刊时的版式设计方案都是由气象背景的编委和编辑共同商议后定下，并沿用至今的。由于对设计专业知识缺乏了解，难免忽略了字体、字号、行间距和配色等细节带给读者的阅读舒适感。希望在版式设计方面有才能的读者能够提出系统、具体的改进意见，如被采纳，将在2015年新的一卷中实现。

### @pingking\_ld

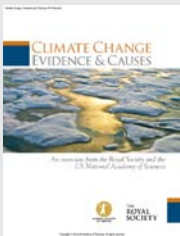
通过研读《城市精细天气预报的理论和技术研究进展》中的城市群的发展对大雾分布的影响，使我回想起曾有人提出为什么沈阳城区的大雾要比观象台（沈阳的国家观测站，站号：54342，位于沈阳的东陵区，属于郊区）出现的次数少，且浓度小。从文中可以得知，由于城市的热岛效应，减少了沈阳城区的昼夜温差，进而增加了暖湿空气冷却凝结饱和的难度。沈阳观象台（54342）夜间的温度有时往往比北部长春和哈尔滨的温度还要低，这主要是由于夜间观象台受东部长白山山脉的影响，在长白山地区往往因地形作用会形成长白山高压，由于长白山高压的作用，夜间沈阳观象台风小时会吹偏东风，偏东风将长白山山脉的冷空气吹向观象台，这就导致了沈阳观象台的温度在吹偏东风时要比其他观测站低，这加大了观象台的昼夜温差，进而增加了暖湿空气的冷却凝结，从而提高了大雾的形成概率。

### 点评（from 编辑部）

欢迎你将在业务工作中的思考凝练成文，向“基层气象现代化”栏目投稿。

## 《气候变化：证据和原因》 2014年2月

这本由美国科学院和皇家学会（英国国家科学院）共同发表的出版物，给出清晰的证据说明人类正在引起气候发生变化，同时回答了有关气候变化科学的各种各样的关键问题。出版物由英美顶尖气候科学家执笔撰写，试图向决策者、政策制定者、教育工作者和个人，提供一个简约、易懂的参考文件，就经常被问及的问题给出权威的信息。2014年2月27日，美国科学院在华盛顿召开了同一主题的研讨会。

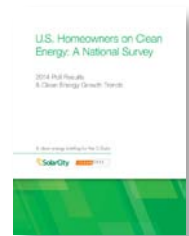


## UNISDR: 《2014—2015年 工作计划》 2014年1月

这份年初发表的工作计划，副标题是：实现战略框架的成果。2015年3月UNISDR将召开世界减少灾害风险会议，这份计划书也围绕这次会议展开，同时优先执行《2005—2015年冰库行动框架（HFA）——加强国家和社区的抗灾能力》。报告具体描述了两年期计划的5个方面：减少风险的国际合作、对公共政策和投资者提供风险预警、减少城市风险和增强应变能力、气候应对能力和风险敏感的商业投资。

## 《科学世界》 2014年3期

这本众所周知的科普杂志，本期特别策划了“统计——决策的数学工具”封面报告专题。在阐述统计在各个领域发挥的作用时，介绍了气象学家对地球的平均气温未来变化的推测。专题推出的系列文章，让读者全面了解和体会这种“数字游戏”在支持决策、找寻规律和预测未来中可以发挥出的巨大效能。



## 《美国户主对清洁能源的 看法：国家调查》 2014年3月10日

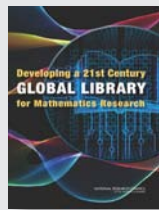
由SolarCity和Clean Edge共同开展的调查的主要目的，是认识美国的清洁能源市场和消费者的潜力，不同于以往针对绿色消费的调查，这份报告是美国首次针对户主就广泛的清洁能源技术的选择和态度进行的调研。调查结果是基于美国各地1418个随机选择的调查问卷分析得到，问卷的内容包括了可再生能源、能源效率、清洁交通、能源储备以及其他相关领域的问题。

## 媒体扫描

### MEDIA SCAN

## 《GEO2011—2013年进展 报告》 2014年1月

在这份于2014年1月15—17日地球观测组织（GEO）全会和部长会议期间发表的报告中，GEO秘书处主任特意在序言处用“前锋”（forward）替代了序（foreword），并解释说前者代表了GEO的经历和其对未来的展望。这份报告代表来自全球几百个机构的数千位专家的创新性工作，跨越了农业、生物多样性、气候、灾害、生态、能源、健康、水和天气等九个重要领域。未来，GEO将继续专注于让人类和技术能力确保其数据、信息和服务让世界各地受益。

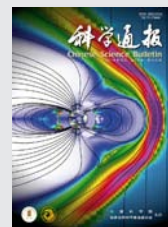


## 《开发数学研究21世纪全球 图书馆》 2014年3月

美国科学院出版社的这份出版物，在题目中可以看出，“全球图书馆”呼之欲出。实际上，包括数学在内的很多学科，一方面其进步在很多程度上靠知识的积累；另一方面，基于互联网的数字文献资源获取目前已经成熟和有效。这些都为全球图书馆概念的形成和实际的建构打下基础。数学作为自然学科的先行者，为其打造的世界图书馆也一定会和数学在各领域的应用一样，扩散开来。

## 《气候状态2014》 2014年

这份由澳大利亚气象局和CSIRO共同完成的报告，是每2年出版一期的系列报告的第3份，报告探讨了澳大利亚气候长期变化趋势。报告指出，该国自1910年以来升温达到0.9°C，极端天气的频率有所改变，热浪更多、极寒较少。该国的降水自1900年以来略微增加，变化呈现出区域的不同。四面临海的澳大利亚人最为关切的海平面变化，该报告指出，1880—2012年，全球平均海平面提高了225mm。



## 《科学通报》 2014年2月

地球大气现象主要是太阳光辐射引起的，而地球磁层内的“空间天气”现象则主要受太阳风的驱动。本期的一篇地球物理领域的研究，瞄准太阳风向地球磁层，特别是磁尾等离子片的能量与粒子输运过程是磁层物理的关键问题，介绍了一个对典型太阳风及IMF（行星际磁场）条件下的模拟研究。研究还根据IMF南北向时尾瓣磁场的Y和Z分量的不同分布，简单解释了不同太阳风条件下不同的粒子注入效率，以及向阳面磁重联及重联后磁力线尾向运动的过程，并解释了磁尾横断面的粒子热压力、电流密度的分布特征。本期封面图，显示的是IMF北向时，昼夜子午面内磁场投影与粒子密度分布情况。

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

**Honorary Editor** Chou Jifan, CMA Training Centre

**Editor-in-Chief** Xu Xiaofeng, CMA

### Associate Editors

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

### Managing Editors

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

### Editors

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

### Overseas Editors

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

### Editorial office

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

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

### Printed by

Beijing Baochang Color Printing Limited Corporation

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

## Main Contents

### (Special Issue: Heavy Rain Research)

- 1 Xu Xiaofeng/ Message from the Editor-in-Chief  
Article
- 6 Cui Chunguang, Lin Chunze, Wang Xiaofang, et al/ Review of the Study on Heavy Rain in the Middle Reaches of the Yangtze River Since 2000
- 16 Wang Xiaofang, Xu Xiaofeng, Cui Chunguang, et al/ An Introduction to the Results of the Research on Mesoscale Convective Systems during the Rainy Season in the Yangtze River: A Key Project of the National Natural Science Foundation of China (40930951)
- 24 Wan Rong/ Research Progress of the Unconventional Observing Technology and the Data Used in the Study of Rainstorm in China
- 36 Zhao Yuchun/ Research Progress on Mesoscale Processes of Heavy Rain
- 45 Wang Bin, Zhang Jian/ An Introduction to Quantitative Precipitation Estimation System in National Severe Storms Laboratory
- 52 Peng Tao, Shen Tieyuan, Gao Yufang, et al/ Research and Application Progress on Basin Hydro-Meteorology Coupling Flood Forecasting
- 59 Yan Guanhua, Li Zechun, Li Qiaoping/ Torrential Rains' Patterns in North China on the Impact of Taihang Mountains
- 62 Chen Chaojun, Wang Qin/ Recent Advances on the Application for the Downscaling Technology
- 66 Gao Qi, Xu Ming, Li Wujie, et al/ Researches and Applications on Area Precipitation in China

### Survey

- 2 Picture/ Number/ Ranking

### Feature

- 70 Li Jinghua, Zheng Qihong/ A Bibliometrical Analysis of China Rainstorm Research
- 72 Wang Yinping/ On *Torrential Rain and Disasters* Magazine

### History

#### People

- 74 Ye Xinxin, Jiao Yan, Fu Gang/ Tor Harold Percival Bergeron

### Reading

#### Information

- 51 Eyes on Weather Stations by Editors: Guangxi
- 73 New Publication
- 76 Selected Papers