

Advances

in Meteorological Science and Technology

气象科技进展

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

No.3

2018年6月
第8卷 第3期



消亡



成熟



初生



强对流天气研究与业务

气象科技 **进展**
Advances in Met S&T



中国气象局气象干部培训学院 主办

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

名誉主编 丑纪范 中国气象局气象干部培训学院
主编 许小峰 中国气象局

副主编

王志强 中国气象局气象干部培训学院
肖子牛 中国科学院大气物理研究所
翟盘茂 中国气象科学研究院
罗云峰 中国气象局
李维京 国家气候中心
胡永云 北京大学
谈哲敏 南京大学
孙健 中国气象局公共气象服务中心
费建芳 国防科技大学
赵立成 国家气象信息中心
张鹏 国家卫星气象中心
管兆勇 南京信息工程大学
何建新 成都信息工程大学
黄建平 兰州大学
廖小平 中国科学院地理科学与资源研究所
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	郭虎	郭学良
李柏	李国平	倪允琪	曲晓波	任国玉
任小波	沈文海	王存忠	王卫丹	武炳义
杨修群	俞小鼎	张朝林	张庆云	赵平

编委 (按音序排名)

毕宝贵	陈镜明	陈云峰	陈振林	崔春光
崔讲学	董文杰	杜钧	封国林	何金海
何清	胡欣	胡跃文	姜彤	金飞飞
雷小途	李集明	李俊	李良福	李耀辉
李跃清	李忠明	梁旭东	刘晶森	刘黎平
刘立成	刘实	刘征宇	卢乃锰	陆日宇
罗兵	罗亚丽	马舒庆	马耀明	彭莹辉
浦一芬	宋燕	索渺清	汤绪	田红
万齐林	王斌	王斌(海外)	王东海	王元
王建林	王式功	王延青	王迎春	吴立广
王自发	卫晓莉	温敏	翁富忠	杨松
谢志辉	闫冠华	延晓冬	杨萍	杨大林
杨昭明	姚学祥	伊兰	翟武全	张广忠
张广俊	张立祥	张小玲	张跃堂	赵定真
周定文	周建华	周凌晔	周显信	朱晓蕾
朱小祥	朱玉洁	祝燕德	邹立尧	

编辑部

张萌 侯美亭 秦莲霞 冀文彬 江剑民
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://cmalibrary.cn/amst>
投稿系统: <http://qxkjjz.cbpt.cnki.net/EditorCN/Quit.aspx>
官方微博: <http://weibo.com/2115232930/profile>
印刷: 北京金吉士印刷有限责任公司

本期责任编辑: 张萌

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

定价: 30元



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

目次

第8卷 第3期 2018年6月

(强对流天气研究与业务专辑)

(本期特约编辑: 杜钧、郜吉东、张小玲)

1 许小峰: 主编语

研究论文

强对流天气研究与业务

研究进展

- 8 张小玲, 杨波, 盛杰, 田付友, 周康辉, 林隐静, 朱文剑, 曹艳察: 中国强对流天气预报业务发展
- 19 傅承浩, 郜吉东, 王云恒, 唐杰, 周长青, 叶成志, 庄照荣: 雷达资料同化在可致龙卷的强暴雨系统分析中的一些应用
- 38 张云济, 张福青: 集合资料同化方法在强雷暴天气预报中的应用
- 53 孔凡铀: 雷暴尺度天气集合数值预报研究
- 61 王啸华, 郑媛媛, 濮梅娟, 宗培书, 禹梁玉: 强天气综合报警追踪平台功能设计及龙卷预警中的应用

专题

- 70 解小寒, 王勇, 郭倩: 具有复杂地形适应能力的INCA短临预报系统介绍

科学观察

特写

- 6 本刊编辑部: 立足广东、面向全国、关注全球——记佛山市龙卷风研究中心成立5年的发展之路

主编语

2018年6月8日,佛山市气象台分别于11:50和13:05发布了两次龙卷警报。这是佛山首次发布独立的龙卷警报(以往都是在高级别的雷雨大风预警信号中顺带提醒公众注意龙卷等灾害),并将可能发生龙卷的区域精细预警到几个乡镇,同时将龙卷可能发生的时间初定在半小时以内。14:05南海区大沥镇发生了强度为EF1级的龙卷,发生地点位于第二次预警的区域内。15:05佛山市气象台解除龙卷警报。这次提前1小时准确预警的背后除了依托现代化的监测手段,也离不开佛山市龙卷风研究中心几年来对龙卷个例分析、研究积累的大量成果,为龙卷警报提供了关键技术支撑。这次龙卷预警的成功,从全国短时强对流天气监测预警能力提升的视角看,也具有开创性价值。

为更好地编辑与出版这两期有关龙卷和强对流天气的专辑,编辑部特别走访了佛山市龙卷风研究中心,较全面地了解到龙卷在中国造成的灾害,以及现有的监测业务体系和灾情调查流程等,充分了解了该中心立足广东、覆盖全国、关注全球业务和研究的格局(P6)。

关于强对流天气,我们在上一期着重介绍了有关龙卷的动力分析、统计特征、预报预警、数值模拟等方面的研究进展,但这仅是强对流天气系统中的一种类型。在强对流天气系统的家族中,还包括短时强降水、雷雨大风、冰雹、雷暴、飑线等多种天气系统,都是具有强大杀伤力的灾害性天气。由于其具有强度大、时空尺度小、难以监测和预报等特点,是天气预报科研与业务中的重点关注对象。国内外的气象学家通过发展能更好识别中小

尺度对流天气的雷达等遥感探测技术、临近预警技术、对流可分辨的快速更新同化数值分析预报技术,以及加强短时临近无缝隙的强对流预警等途径,不断推进强对流天气监测预报能力。我国也已经建立起包括实时监测、临近预警和短期潜势预报的强对流天气预报业务,初步实现对雷暴、短时强降水、雷暴大风和冰雹的监测预警以及72 h内的潜势预报。

本期,作为“龙卷预报与研究”专辑的延伸与拓展,我们将主题聚焦于“强对流天气研究与业务”,通过预报业务、数值模拟、预警等方面的文章,来全方位了解国内外在强对流天气监测预警方面取得的进展。其中,张小玲等(P8)介绍了我国强对流天气预报业务发展的进程;傅承浩等(P19)和张允济等(P38)分别就雷达资料同化和集合资料同化在强对流天气预报中的应用做了阐述;孔凡铀(P53)探讨了雷暴尺度天气集合数值预报所面临的科学问题、主要构造技术及研究现状等;王啸华等(P61)介绍了江苏省气象局自主建设的强天气综合报警追踪平台SWATCH及其在省市县三级气象台强对流预警中的应用;解小寒等(P70)介绍了奥地利国家气象局研发的具有复杂地形适应性的短临集成分析预报系统INCA。

最后,本期专辑作为上一期专辑的延续,依然由美国国家海洋和大气管理局的杜钧研究员、郇吉东研究员以及国家气象中心张小玲研究员担任责任编辑,承担策划、组稿和审稿等工作,对三位专家的辛勤付出再次表示由衷感谢!

许小峰

研究进展

- 77 李宇梅,狄靖月,许凤雯,张国平,王志:基于当日临界雨量的国家级地质灾害风险预警方法

短论

- 84 段中夏:一次豫北春季持续性大风天气的分析

往事钩沉

事件

- 88 气象史料挖掘与研究工程项目组:20世纪80年代人工智能在天气预报中的应用

科学观察

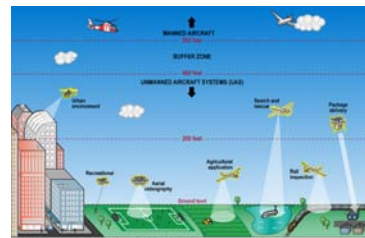
- 2 读图 数字 榜单

阅读

信息

P3

- 18 新书架
76 陈凤贵,徐秋彤,张莹莹:气象出版社生态环境类图书出版情况
92 高被引论文选编
94 编辑选编
96 涓流细雨
封3 媒体扫描



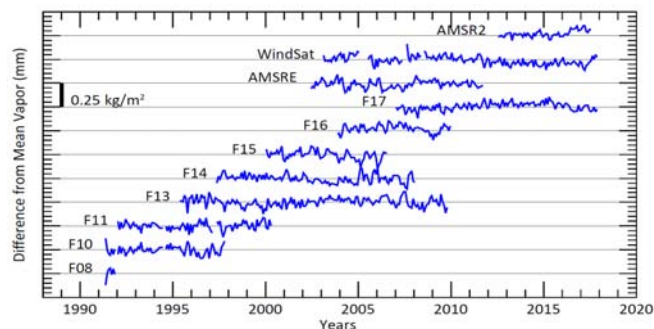
封3



数值预报模式比较：再分析数据加入

2018年4月召开的欧洲地球物理大会（EGU-2018）上，欧洲中期天气预报中心学者亮出了21世纪初以来各国主要天气预报模式预报性能的提升，指出过去10年主流模式预报时效提前了1.5 d左右。此外，在模式预报性能比较的图中，除了预报中心模式外，再分析数据指标也展示其中。

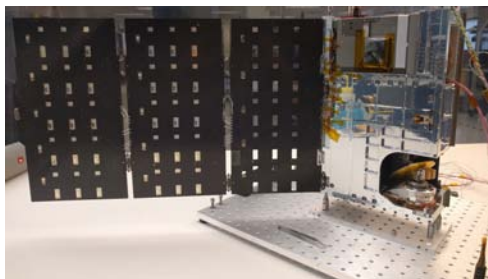
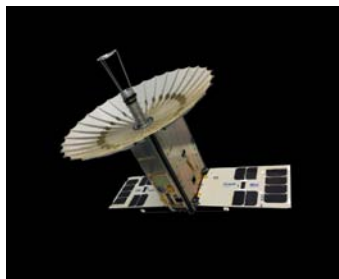
来源：EGU-2018



用卫星观测海洋降水

占地球表面大部分的海洋上的降水，是全球水循环的重要组成部分。海洋降水因测站稀少而更多地依靠卫星遥感观测，美国学者在研究中梳理了1988—2017年卫星微波图像获得的总可降水（TPW）数据，得到全球海洋可降水量每10年增加1.49%。图中给出不同单个卫星数据在50°S—50°N月平均TPW与所有卫星均值之间的差。该值越接近0，表明卫星遥感数据之间探测值吻合越好。

来源：Earth and Space Science



左：RainCube 6U立方体卫星和完全打开的天线 中：TEMPEST-D和打开的太阳能板
右：CubeRRT卫星和俄亥俄州立大学技术团队合影

NASA下一代地球观测技术：三件套亮相

NASA为下一代地球观测研发的3个小卫星探测系统，近期被送到国际空间站，并将被送入轨道开展试验。这些新技术，首先利用尺寸约4 in×4 in×4 in（1 in=25.4 mm）立方体盒子组成的立方体卫星，在地球轨道检验新技术对空间环境的适应性，检验后再搭乘较大卫星或星座，投入应用。3个系统分别是：1）RainCube，即位于立方体卫星上的小型雷达，重量刚刚超过26磅（1磅≈0.454 kg），是将主动雷达搭乘立方体卫星升空的第一次尝试；2）CubeRRT，即立方体卫星辐射计无线电频率干扰技术验证（CubeSat Radiometer Radio Frequency Interference Technology Validation）卫星，其功能是探测到频率干扰数据并在空中过滤掉；3）TEMPEST-D（Temporal Experiment for Storms and Tropical Systems Demonstration，风暴和热带系统时间试验展示）卫星，将验证最小型化的辐射计技术，可以每5~10 min给出风暴发展数据。

来源：NASA

数字

第1位

世界气象组织的第一位女性副主席日前产生。阿根廷气象局局长Celeste Saulo日前当选WMO副主席，成为这个国际组织的第一位女性副主席。

85%

美国科学基金委员会（NSF）最新出版的《科学和工程指标2018》的统计表明，气象在科学工程的不同领域中，研发的政府投入比例最大，达到85%，其次为物理（74%）和工业及制造工程（69%），而政治科学和政府（13%）与经济（8%）位于末尾。

4300个

世界卫生组织（WHO）最新发表了全球空气质量报告，据悉，WHO目前已经将108个国家的4300多个城市纳入其环境空气质量数据库，定期开展评估。

国际“强对流天气”主题被引频次最高的前10篇论文



机器人在美国阿拉斯加完成全自动探空气球观测，按照常规测站需求，自动化探空气球施放机器需要每12天装载一次

机器人承担探空观测

近日，机器人在争议中完成了探空气象的自动化施放。在阿拉斯加机场附近，施放程序启动后，软件先对货运汽车大小的设备进行自检和获取大气温度、湿度、气压数据。之后，托盘到位，喷气嘴向气球注入气体，仪器顶部窗口打开，气球携带探空仪顺利升空，仪器开始追踪。整个操作，只需在位于5 km之外的美国国家气象局（NWS）办公室里按下一个按钮，这套由芬兰维萨拉公司提供的设备，可以自动完成之后的所有操作。据悉，如果在美国所有探空站推广，需要仪器购置经费为120万美元，带来的效益是探空站每天节省大约8 h，而NWS全年减少支出约100万美元。

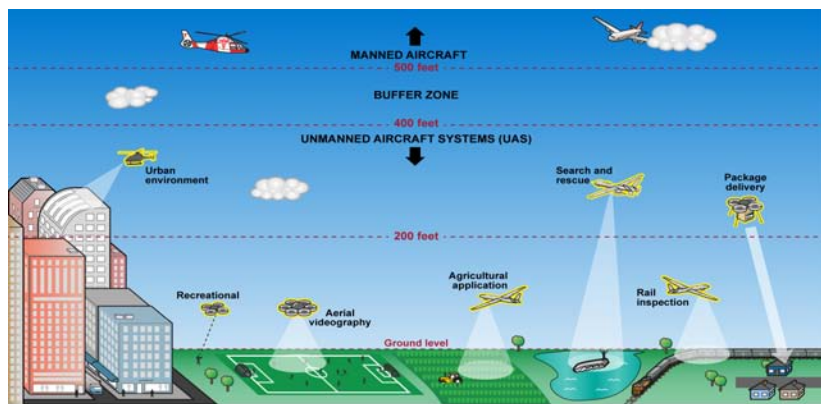
来源：NWS

排名	篇名	第一作者	来源	被引频次
1	A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes	Hong, SY	Monthly Weather Review, 2006, 134(9)	1934
2	Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations	Grell, GA	Monthly Weather Review, 1993, 121(3)	1145
3	Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century	Frich, P	Climate Research, 2002, 19(3)	881
4	Coupling of upper and lower tropospheric jet streaks and implications for the development of severe convective storms	Uccellini, LW	Monthly Weather Review, 1979, 107(6)	356
5	The critical success index as an indicator of warning skill	Schaefer, JT	Weather and Forecasting, 1990, 5(4)	346
6	A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters	Rasmussen, EN	Weather and Forecasting, 1998, 13(4)	338
7	Severe local storms forecasting	Johns, RH	Weather and Forecasting, 1992, 7(4)	296
8	The WSR-88D and the WSR-88D operational support facility	Crum, TD	Bulletin of the American Meteorological Society, 1993, 74(9)	283
9	The Advanced Regional Prediction System (ARPS), storm-scale numerical weather prediction and data assimilation	Xue, M	Meteorology and Atmospheric Physics, 2003, 82(1-4)	250
10	The storm cell identification and tracking algorithm: an enhanced WSR-88D algorithm	Johnson, JT	Weather and Forecasting, 1998, 13(2)	249

来源：SCI-E数据库

检索时间：2018年5月31日

李靖华 提供



Source: GAO illustration of National Aeronautics and Space Administration (NASA) information. 1. GAO-18-119

低空无人机管理：NASA方案

美国审计署（GAO）在最新发表的关于无人机与航空安全的分析报告中，引用了美国NASA就无人机系统的交通管理系统的概念模型，指出该机构目前正在与航空组织、其他政府机构和超过200个企业和学术机构协调，从2015年开始，分4个阶段完善这一系统。

来源：GAO

485种

国际鸟类联盟最新发表的《2018年世界鸟类状况》报告指出，气候变化对485种鸟构成威胁，包括因北极苔原迅速变暖导致冰雪栖息地缩小威胁到的“易危”的雪鸮鸟。

50%

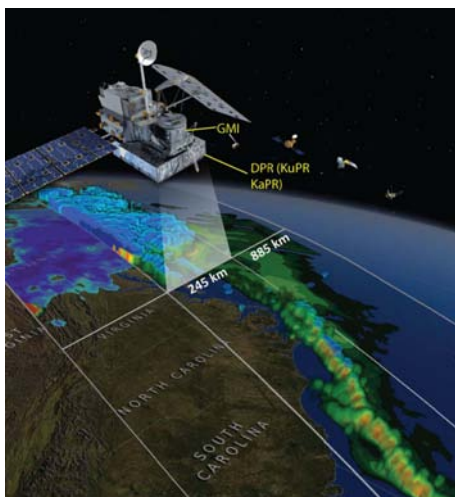
联合国世界海洋组织宣布，170多个国家政府达成协议，目前占全球排放总量2.3%的海运业碳排放，到2050年将减少到2008年水平的50%，长期目标是逐步完全不排放，协议还要求碳强度降低40%。

5倍

丹麦等国学者调查了过去145年来欧洲302座山峰的植物物种丰度变化，得出在这一时段大部分山峰物种丰度在加速提高，过去10年的物种丰度是50年前的5倍，与气候变暖速率呈正相关关系。

90%

美国飓风中心的统计表明，飓风导致的死亡人数中，有大约90%与水有关，其余8%与强风联系在一起。2017年美国多起强飓风，却没有人在风暴潮中死亡。



GPM造就的新平台

知名期刊《皇家气象学会季刊》(QJRM)最新发表了“降雨和降雪遥感”专辑,美国学者在专辑中发表论文,梳理了全球降水监测(GPM)卫星平台在这一主题领域做出的贡献。GPS核心观测在个例中分别用蓝色到紫色表示降雪,而用绿色到红色表示降雨,两个传感器GMI和DPR Ku的扫描宽度分别为885和245 km,且GMI的分辨率为6~26 km, DPR Ku的水平分辨率为5 km×5 km、垂直分辨率为250 m×250 m或500 m×500 m。

来源: QJRM



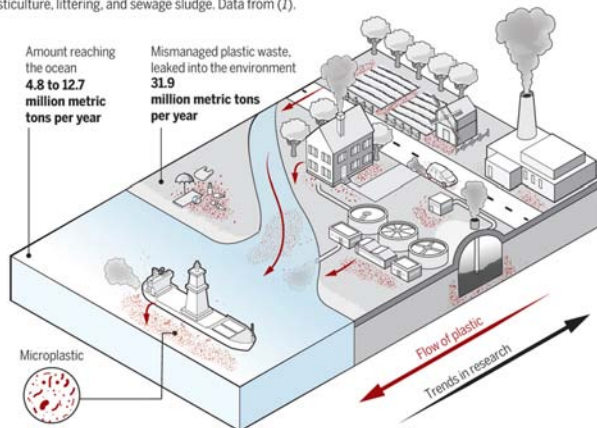
让气象站走上桌面

The MB&F公司与一家瑞士钟表公司合作,最新推出了钟表气象站。这个有着外星人造型、被称为第五元素的仪器,包含了一个温度计、一个气压计、一个湿度计以及一个钟表,每个部分都是UFO造型,可以合为一体,也能分开摆放。

来源: The MB&F

Microplastics everywhere

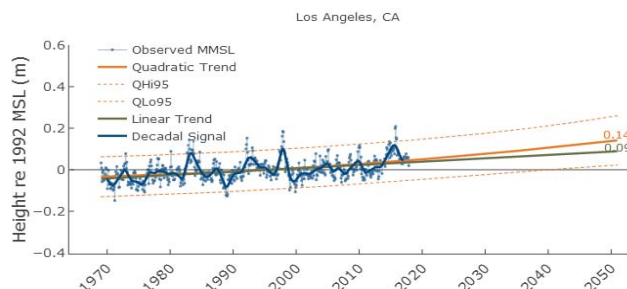
High amounts of microplastics have been found not just in the sea and on beaches, but also in rivers and soils around the world, demonstrating how pervasive this modern pollution is. Sources include leakage from landfills, plasticulture, littering, and sewage sludge. Data from (1).



废塑料污染研究: 从汇到源

塑料微粒对全球环境的污染,已经引起学界的极大重视,塑料微粒作为污染物不仅在海洋和沿海地区被发现,这类污染物还出现在河流和土壤中,堪称世界上分布最为广泛的污染。找寻和研究这些污染的来源,包括了填埋泄漏、丢弃和污水污泥等,是抑制塑料污染的开始。

来源: Science



海平面升高预测产品助你提前防备

美国弗吉尼亚海洋科学研究所(VIMS)最新研发了海平面升高预测交互产品,给出美国东部海湾和西海岸32个沿海区域过去海平面变化和现在到2050年海平面变化的预测值,该数据将每年更新一次,图为针对洛杉矶地区的预测结果。

来源: VIMS

数字

5.6GHz

澳大利亚通信和媒体机构建议无线互联网服务商将当前使用的3.6 GHz波段移到5.6 GHz,即澳大利亚气象局的天气雷达系统所用频段。澳气象局警告政府这一举动将威胁到天气雷达的准确性。

0.05mW/m²

美国学者放飞携带次声波麦克风的气球飞跃海洋,测得向上最大声能传播通量为0.05 mW/m²,表明高层大气可能被海洋生成的声波能量加热,每天达几K量级。

1400人

日本气象厅新建了一支1400名员工组成的应急队伍(JMA Emergency Task Team, JETT),在自然灾害发生时全天候在岗向地方政府部门提供撤离和应对的现场服务。

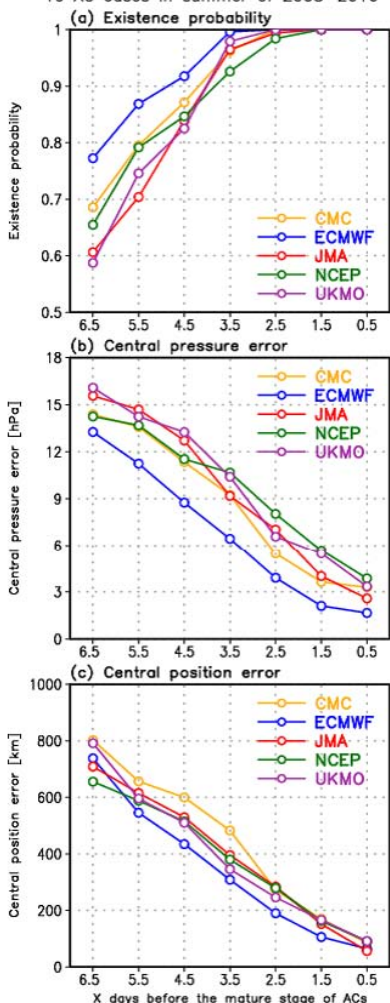
中国“强对流天气”主题被引频次最高的前10篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引频次
1	一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析	郑媛媛	气象学报, 2004, (3)	356
2	青藏高原—季风水汽输送“大三角扇型”影响域特征与中国区域旱涝异常的关系	徐祥德	气象学报, 2002, (3)	269
3	暴雨和中尺度气象学问题	丁一汇	气象学报, 1994, (3)	252
4	2008年1月中国南方低温雨雪冰冻天气特征及其天气动力学成因的初步分析	王东海	气象学报, 2008, (3)	233
5	暴雨和强对流天气的研究	陶诗言	大气科学, 1979, (3)	231
6	我国飊线发生条件的研究	丁一汇	大气科学, 1982, (1)	204
7	新一代天气雷达与强对流天气预警	俞小鼎	高原气象, 2005, (3)	201
8	雷暴与强对流临近天气预报技术进展	俞小鼎	气象学报, 2012, (3)	207
9	雷电研究的回顾和进展	张义军	应用气象学报, 2006, (6)	201
10	雷电灾害与监测预报	许小峰	气象, 2004, (12)	193

来源: CAJD数据库

检索时间: 2018年5月30日

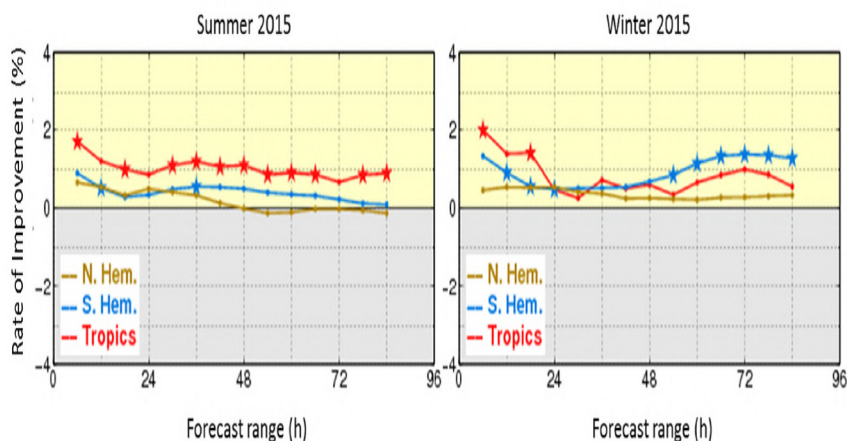
张萌 提供

Existence probability and forecast errors
10 AC cases in summer of 2008–2016

夏季北极气旋预报

日本和英国学者针对北半球最主要的预报中心对北极气旋的中期预报能力的研究中, 用2008—2016年夏季的10个极端北极气旋个例进行了评估。结果表明这些预报中心的业务集合预报系统, 在气旋成熟前的准确预报时效在2.5~4.5 d, 预报技巧低于北半球中纬度气旋预报。

来源: AGU



葵花卫星效益初现

2014年10月日本率先发射成功下一代地球静止卫星葵花-8, 2015年7月7日开始, 星上晴空辐射和大气运动向量等数据进入数值预报模式。这一改变带给预报模式的改进, 被日本气象厅(JMA)学者最新报道。结果显示葵花-8数据较大幅度提升了夏季热带和冬季南半球48 h以上的预报效果, 改进率分别达到和超过1%。

来源: JMA

2.5亿吨 美国中部每年产量超过2.5亿吨的玉米带地区, 不仅温度低于其他地区, 降水也偏多。最新的研究揭示, 这是玉米带巨大的蒸腾作用使然。

25所 由北京师范大学、中国海洋大学等25所高校共建的极地联合研究中心在北京师范大学成立, 该中心的主要研究方向包括极区环境监测与模拟、极地变化与全球效应等领域。

400个月 NOAA的统计表明, 如果以20世纪的平均气温为参考, 2018年4月成为从1984年12月以来连续第400个月气温高于参考值。

23.8m 新西兰气象和海洋机构布设在南大洋上的太阳能浮标站, 记录到23.8 m的浪高, 打破了之前19.4 m的纪录, 也超过了澳大利亚气象部门2012年获得的22.03 m的浪高极值。

立足广东、面向全国、关注全球

——记佛山市龙卷风研究中心成立5年的发展之路

■ 本刊编辑部

佛山市龙卷风研究中心在龙卷等中小尺度灾害性天气的监测预警及灾情调查方面开展了专门的研究探索工作。例如，与北京大学合作，初步建立了面向全国的龙卷及相关灾害调查的制度并完成了多次灾情调查。

龙卷是最猛烈的大气对流现象之一，其瞬间极大风速可超过140 m/s，能够带来巨大风灾。为了更好地编辑龙卷主题专辑，本刊编辑部于2018年5月访问了我国截至目前唯一的龙卷研究专门机构——佛山市龙卷风研究中心（以下简称龙卷中心），较为全面地了解到龙卷在中国所造成的灾害，并从龙卷中心研究人员的专业角度审视龙卷灾害，体会到龙卷中心研究人员为最终解决这一世界性预报难题所表现出坚定的信念和积极的作为。

龙卷中心由佛山市政府于2013年8月成立，目前有近10名科研、业务人员，从事龙卷等极端强对流天气的监测仪器装备建设和维护、监测预警业务、基础数据分析、数值预报模式的模拟，以及灾害调查等研究和业务工作，龙卷中心走过第一个5年，其立足广东、面向全国、关注全球业务和研究的格局已经初见端倪。

1 立足广东

据佛山市气象台统计，2006—2017年该市共出现20次龙卷，年均约2次；龙卷等强对流引发的风灾共造成45人死亡，446人受伤，直接经济损失严重。

由于龙卷属于小尺度天气系统，其时间、空间随机性较强，目前绝大多数的气象探测设备和探测系统都无法有效监测、追踪龙卷的发生发展。龙卷中心在常规观测资料的基础上，初步建立起三个层面的龙卷监测业务体系。

1.1 X波段双极化雷达监测网

2016年底，完成了4部X波段雷达的布设（图1）；2017年5月实现雷达组网观测，雷达采用快速扫描模式，包含2层低仰角，提供组合反射率拼图及风场产品，实现雷达产品1分钟传至预报员桌面。

1.2 建设加密自动气象观测站

截至2017年底已建成219个自动气象观测站，并有91个六要素站，监测要素包括风速、风向、气压、

温度、降水和湿度六要素，密度为4.3 km×4.3 km（图2）。

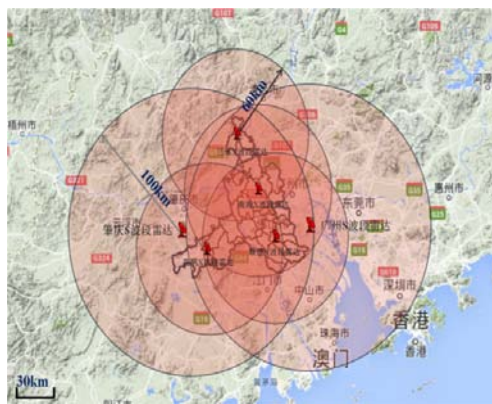
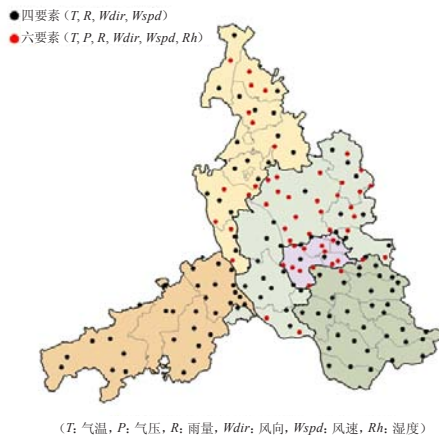


图1 佛山X波段组网雷达的位置分布



(T: 气温, P: 气压, R: 雨量, Wdir: 风向, Wspd: 风速, Rh: 湿度)

图2 佛山市自动气象观测站的分布

1.3 特种监测装备建设

建成了由53个能见度仪组成的能见度监测网，以及激光雷达、实景监控、大气电场仪、蓝天观测仪等一批专业监测设备。在龙卷历史频发地区，布设15个四向天气实景视频监控点，每个视频监控点安装4台网络高清摄像机，对监控点的周围360°进行实时监控。增加了风廓线雷达、微波辐射计等特种观测仪

器。2016年4月依托中国科学院大气物理研究所与佛山市气象局联合组建的强风暴与龙卷风联合实验室,在三水区国家气象观测站安装了国内第一台微压监测仪,监测强对流天气过程时重力波的演变。

龙卷中心完成龙卷及雷雨大风等灾害预警信息靶向发布系统,该系统整合了精细化网格预报、气象致灾影响模型产品(大风、强降水)、地理信息数据和部门数据,并与广东省突发事件预警信息发布系统、恶劣天气外呼系统和本地发布渠道(网站、微信、微博、气象电视门户、大喇叭、12121等)对接实现预警信息一键式靶向发布,预警信息直达灾害影响区域的村居和防灾责任人。

展望未来,龙卷中心还计划在“十三五”期间布设由54台微压计组成的探测网,通过测量微小压力、负压或差压来监测大气压的微弱变化,通过分析不同波长及波幅的变化,识别出强风暴天气来临前的气压信号,从而为潜在强风暴及龙卷的落区提供技术支持,为龙卷等强对流天气预警预报赢得更多时间(图3)。

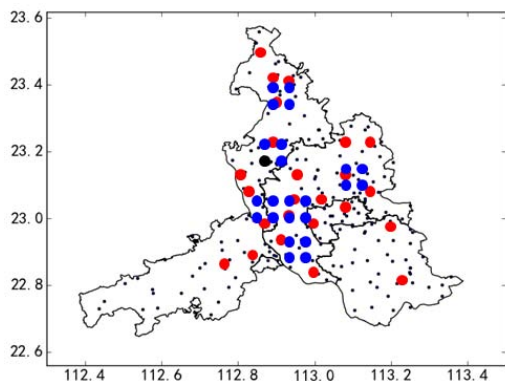


图3 佛山市微压计监测网布设图(红点为佛山近年来龙卷发生地点,蓝点为布设微压计的站点,黑点为已有站点)

2 面向全国

龙卷因其发生时间较短、生成和发展具有很大的随机性,因此龙卷监测是世界性的难题。对疑似龙卷的事件及时进行灾情调查,有助于第一时间确定灾害类型和程度,区分龙卷和雷雨大风等过程引起的风灾,确定龙卷的强度级别;尽可能完整地收集龙卷的个例信息(见本期封面图),有助于完善龙卷资料库,为后续科研工作提供宝贵资料。佛山市龙卷风研究中心在这方面开展了专门的研究探索工作。例如,与北京大学合作,初步建立了面向全国的龙卷及相关灾害调查的制度与流程(图4),完成了多次灾情调查。

在科研合作方面,龙卷中心联合中国气象科学研究院刘黎平研究员的科研团队和南京大学赵坤教授的科研团队在佛山开展夏季观测试验,分别利用国内先

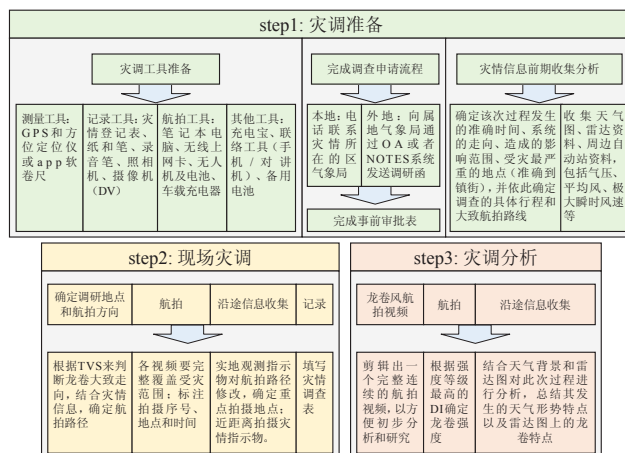


图4 灾情调查流程

进的X波段相控阵雷达及车载C波段双偏振雷达联合观测强对流天气过程,实现同平台使用,观测数据共享,发挥强对流天气的综合监测效益。

3 关注全球

龙卷中心成立后,为了提高中心技术人员科研业务水平,力争与国际先进水平接轨,中心先后与美国俄克拉荷马大学、美国国家强风暴实验室等开展学术交流,并多次邀请薛明教授、张大林教授、Robert Toomey等海外专家学者进行交流(图5)。研究中心还计划与中国气象局图书馆合作,共同建立“全球龙卷研究文献库”,捕捉和报道全球最新龙卷研究进展,面向更多研究者提供服务。



图5 龙卷中心邀请美国俄克拉荷马大学薛明(a)和马里兰大学张大林(b)做学术报告

致谢:佛山市龙卷风研究中心为本期提供封面素材和相关成果的文字介绍材料,特此感谢!

中国强对流天气预报业务发展

张小玲 杨波 盛杰 田付友 周康辉 林隐静 朱文剑 曹艳察

(国家气象中心, 中国气象局, 北京 100081)

摘要: 强对流天气具有空间尺度小、生命史短、天气剧烈并极易造成人员伤亡和财产损失的特点。近10年, 伴随着国家级强对流专业化预报中心的建设, 我国已经建立起包括实时监测、临近预警和短期潜势预报的强对流天气预报业务, 初步实现对雷暴、短时强降水、雷暴大风和冰雹的监测预警以及72 h内的潜势预报。但对龙卷等小尺度强对流天气尚不具备监测和预警能力。中国气象局正在开展龙卷预警试验, 将依赖于对流可分辨数值模式的发展以及高分辨率数值模式预报结果与多源观测资料的综合应用技术发展, 建立短时临近无缝隙预报技术, 提升致灾性强对流天气的短时临近预警能力和龙卷等小尺度强对流天气的监测能力。

关键词: 强对流, 预报, 监测, 预警

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.03.001

Development of Operations on Forecasting Severe Convective Weather in China

Zhang Xiaoling, Yang Bo, Sheng Jie, Tian Fuyou, Zhou Kanghui, Lin Yinjing, Zhu Wenjian, Cao Yancha

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

Abstract: Severe convective weather characterizes as the small scale, short life cycle, violent weather and easy to cause casualties and property loss. In recent ten years, since the national center for severe convective weather prediction being built, the severe convective weather monitoring, nowcasting and outlook operations, which include the monitoring in real time, warning in 0-2 h and prediction in 72 hours for thunderstorm, short-time heavy rainfall, thunderstorm high wind and hail, have been developed, but there is now little capability to monitor and warn the smaller-scale convective weather such as tornado. China Meteorological Administration is launching the tornado warning experiment to enhance the capabilities of monitoring and warning the the disastrously severe convective weather on smaller scale and very short time range like tornado, by developing the seamless-very short range forecasting techniques which relies on the convective-available numerical models and the compositive applications of numerical weather prediction outputs and multiple observation data.

Keywords: severe convective weather, forecast, monitoring, warning

0 引言

强对流天气具有空间尺度小、生命史短但造成灾害剧烈的特点。因此, 强对流天气预报是包括我国在内的众多国家天气预报业务技术攻克的重点。由于时空尺度小, 国内外业务技术发展的重心都聚焦于对流监测和短时临近预警技术的发展。国外发达国家均在致力于发展能更好识别中小尺度对流天气的雷达等遥感探测技术、临近预警技术和对流可分辨的快速更新同化数值分析预报技术, 并在此基础上发展短时临近无缝隙的强对流预警业务。

世界气象组织(WMO)2005年定义的临近预报(或者称为甚短时预报)为0~6 h的天气预报。

Wilson等将这一时效内的临近预报技术概括为3类: 在强度和尺度不变假设下的外推和基于过去强度和尺度变化趋势的外推、考虑风暴生消过程的概念模型专家系统以及数值模式预报技术^[1]。我国预报业务通常把0~2 h的天气预报称为临近预报, 因此本文仍然把0~2 h的预报称为临近预报, 2~12 h称为短时预报。

针对强对流天气系统的0~6 h预报, 各大气气象研究和业务中心主要基于雷达回波与卫星图像的简单外推以及实践经验, 发展了各种类型的短时临近预报(nowcasting)系统, 业务应用表明它们在0~1 h的预报中相当有效。如美国国家大气研究中心(NCAR)研发的Auto-Nowcaster、美国强风暴实验室(NSSL)

收稿日期: 2017年9月30日; 修回日期: 2018年2月26日

第一作者: 张小玲(1972—), Email: zhangxl@cma.gov.cn

资助信息: 科技部重大专项(2017YFC1502003); 国家重点基础研究发展计划(2013CB430106)

研发的WDSS-II和英国的GANDOLF等^[2-5]。

然而由于缺乏对强对流系统的发生、发展和消亡的物理机制描述，以外推为主的短时临近预报系统预报能力随预报时效增加迅速降低^[1]，尤其是对强对流系统发展、演变的预报。俞小鼎等在对国内外雷暴和强对流临近天气预报技术进行全面回顾后指出，临近预报系统应该建立在风暴尺度数值预报模式的集合预报基础上，采用适当的初值产生方法和模式不确定性处理方法，以及合适的数据同化技术^[6]。这一观点与陈葆德不谋而合，后者认为，采用数值模式预报强对流系统，虽然对动力与物理过程的描述存在着各种各样的不足，但对强对流系统活动的预报在原理上应该远优于简单的外推方法；鉴于强对流系统水平尺度较小、生命史较短的特点，模式初始时刻对当前对流系统的准确把握是关键^[7]。

美国1991年开始研究快速更新同化技术，1994年NCEP (National Centers of Environmental Prediction)

实现快速更新同化预报系统 (Rapid Update Cycle, RUC)，为强对流天气业务预报提供分析预报参考产品。2012年新一代的快速更新同化预报系统 (Repaired Refresh, RR) 取代原来的RUC系统 (<http://repairedrefresh.noaa.gov>)。更高分辨率 (3 km) 的RR系统 (High-Resolution Rapid Refresh, HRRR) 于2011年4月开始在NOAA/ESRL/GSD测试。

由于传统的外推预报技术与快速更新的数值模式预报技术在0~2和2 h以上各有优势，这两种技术的融合技术 (blending) 成为短时临近预报的重要发展方向，而据此建立无缝隙的强对流天气预报业务体系也已经成为发达国家提升强对流预警服务能力的业务建设方式。以美国为例，风暴预报中心 (SPC) 已建立了时间尺度从几个小时警戒到8天的强对流展望业务体系 (www.spc.noaa.gov)，并与地方气象部门的临近警告构成了无缝隙的预报业务体系 (图1)。

我国的临近预报在省及以下地方业务单位已经

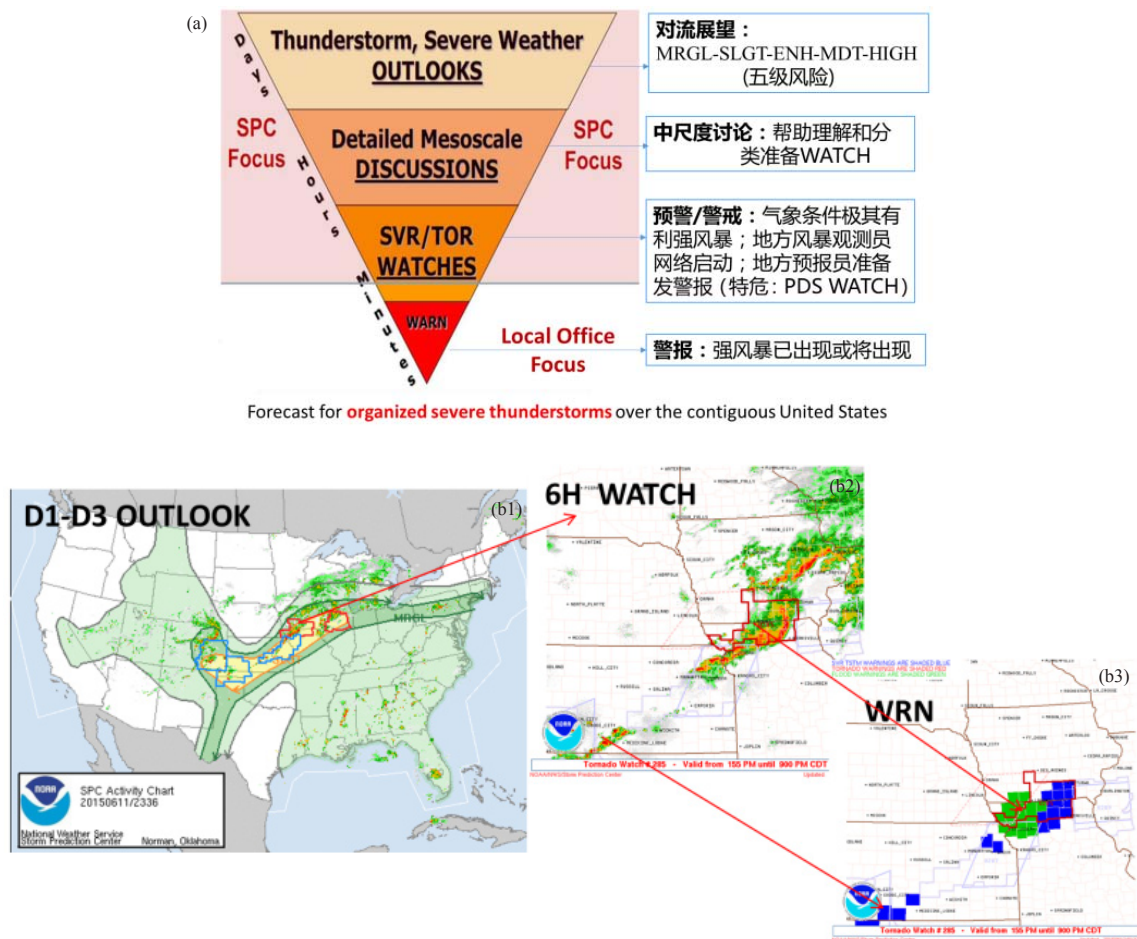


图1 美国强对流无缝隙预报体系 (a) 和预报产品示例 (b1~b3)
(b1、b2中阴影表示雷达回波, b3阴影表示预警区域)

Fig.1 (a) The seamless forecasting operations on severe convective weather in the United States; (b1-b3) Samples of products: the shades denote radar echo in b1 and b2, and warning area in b3

比较成熟，但国家级专业化强对流天气预报业务始于2009年，且以短期预报为主，尚未建立起成熟的短时预报业务。本文将从无缝隙业务角度，介绍我国强对流天气的实时监测、临近预警、短时和短期预报业务现状及未来发展。

1 成熟的实时监测和临近预警及短期潜势预报业务

在我国业务中，对流和强对流天气主要包括雷暴、小时雨量20 mm以上的短时强降水、8级或者 $17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的雷暴大风、直径5 mm以上的冰雹或者任何级别的龙卷等。本文中所指中国的强对流均以此为标准。

1.1 监测

随着业务观测体系的逐渐成熟，近年来我国的强对流监测能力逐步提高。2009年以来，国家级强对流天气预报业务单位强天气预报中心利用雷达、卫星、常规和非常规地面观测站等多源观测资料，通过发展自动站资料质量控制技术、强对流信息提取和统计技术、直角坐标交叉相关（CTREC）雷达回波追踪技术、雷暴识别追踪分析、深对流云识别技术、中尺度对流系统识别和追踪技术以及闪电密度监测技术等，建立起强对流天气综合监测业务系统^[8]。监测对象包括：雷暴、雷暴大风、冰雹、短时强降水以及对流云等。图2为强天气预报中心的强对流天气实时监测产品。该监测产品已经实现我国陆地和近海区域间隔1、3、6、12和24 h的雷暴、雷暴大风、冰雹、短时强降水分级监测。此外，利用闪电资料可监测中国及周边地区地闪总数及地闪密度。利用雷达资料还实时监测雷达回波及垂直液态水等多参量，实现基于雷达特

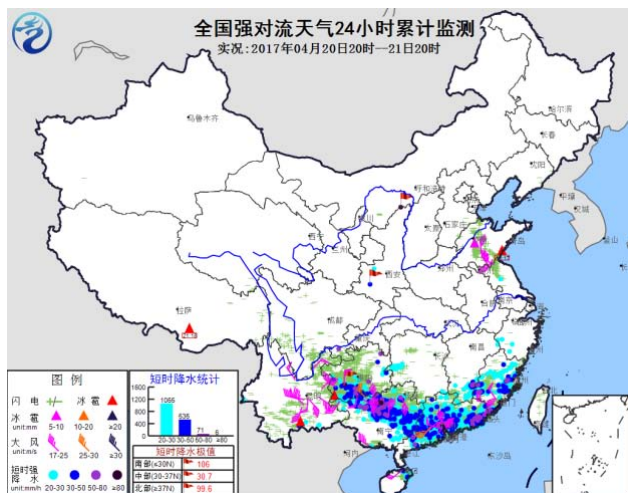


图2 2017年4月20日20时至21日20时24 h强对流天气监测
Fig. 2 24 h monitoring of severe convective weather ending at 20 BT on 21 April 2017

征量的冰雹指数、中气旋和龙卷涡旋特征（TVS）等的识别和自动报警。

由于中国地域广阔，西部大量地区既无地面测站也没有雷达观测，发展基于静止气象卫星和闪电的强对流云团识别、追踪技术对于监测雷达资料不能覆盖的西部和中西部山区的中尺度对流系统（MCS）的发生发展非常重要。费增平等根据我国中尺度对流天气的特点，在对MCS云团重新定义的基础上，发展了基于图像和时间序列分析技术的MCS自动识别和追踪技术^[9]。在此基础上，强天气预报中心基于FY-2E卫星的IR1通道亮温、闪电资料对MCS进行了多阈值的自动识别、追踪和外推，实时输出MCS的位置、最低亮温、平均亮温、面积、椭圆率、移动方向及速度等相关信息（图3），为预报员在实时监测时判断强对流天气的强度、类型，并进行及时的预警，提供了重要信息^[10]。

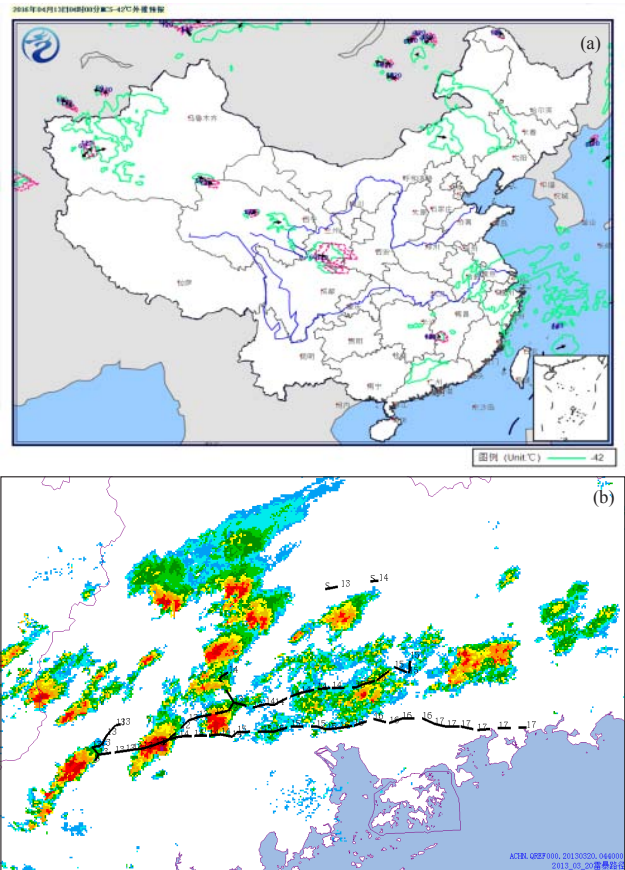


图3 基于卫星（a）、闪电（b）资料的中尺度对流系统识别
（a中绿线、红线分别表示识别60和120 min预报的MCS；
b中标值为识别的系统时间，阴影为雷达回波）

Fig. 3 Mesoscale convective system identification using the satellite (a) and lightning (b) data

1.2 临近预警

中国的临近预警业务主要由省、市、县三级气

象台站负责, 尤其面向公众的雷电、大风、冰雹、暴雨等强对流预警信号多由县或地市级气象部门发布。因此我国的强对流临近预警技术主要依赖以雷达回波为主的外推预报技术。利用雷达回波图像的直角坐标交叉相关 (CTREC) 技术在国内的强对流临近外推中被广泛应用^[11-13]。以降水为例, 降水具有高时空非连续性特征, 利用雷达回波外推技术和自动站雨量订正技术的临近预报方案具有高精度的时空分辨率, 准确性也较高, 众多学者在此领域做了大量的研究工作^[14-16]。图4是基于雷达回波外推技术TITAN和自动站雨量订正技术融合的逐10 min定量降水预报。近几年, 对快速发展的强对流系统的追踪效果更好的光流法也逐渐被使用^[17]。

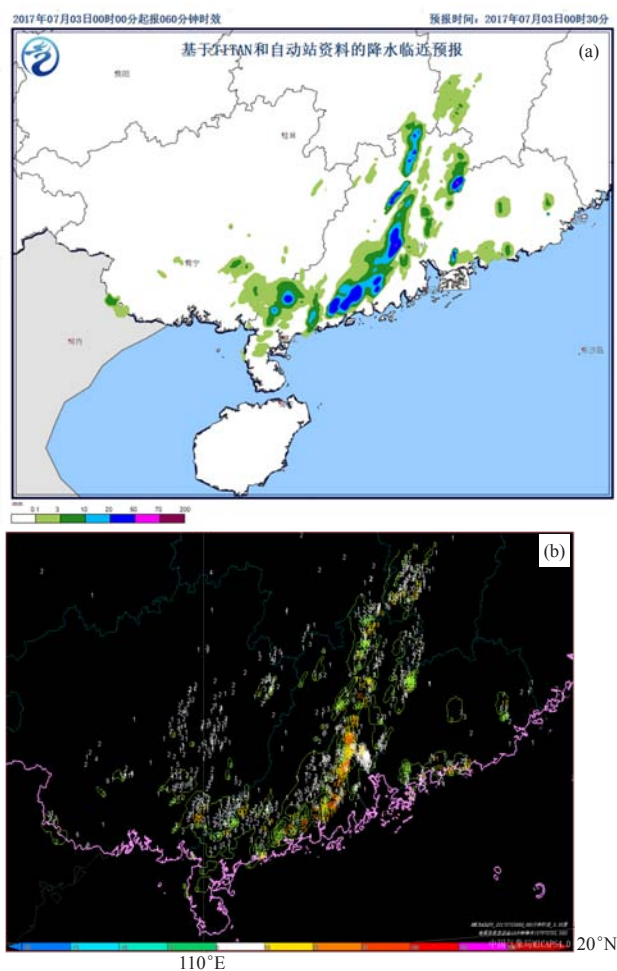


图4 雷达外推与自动站雨量订正融合方法起报的2017年7月3日00时00分起报060分钟时效 (a), 以及00—01时的1 h降水观测 (b) (等值线为定量降水预报, 彩色标值为降水观测值)
Fig. 4 (a) Forecast of 60-min accumulated precipitation by a fusion method of radar extrapolation started at 00 BT 3 July 2017; (b) Observation at automatic rain gauge (The contours in Fig. 4a denote forecasting values, the lines and values in Fig. 4b are forecasting and observation respectively)

2008 年国家气象中心和广东、湖北、安徽等十多个省 (市) 的气象部门联合研发我国自主知识产权的灾害天气短时临近预报系统 (Severe Weather Automatic Nowcast System, SWAN)。SWAN 系统在 MICAPS 平台基础上, 融合了数值模式产品和雷达、卫星、自动站等探测资料, 提供了大量的临近预报产品 (图5)。SWAN系统包括6大类产品和功能: 基于实况资料的探测和分析产品、外推预报产品、数值模式与雷达资料的融合预报产品、实时客观检验产品、灾害性天气综合自动报警, 以及预报预警制作和发布功能^[18]。各省在大力发展临近预警技术的同时, 也开发了多个对流风暴和降水短时临近预报系统, 比如香港的SWIRL和SWIRL-II、北京气象局发展的BJ-ANC系统、中国气象科学研究院的雷电临近预警系统、广东的GRAPES-SWIFT、湖北的MYNOS等^[19-23]。

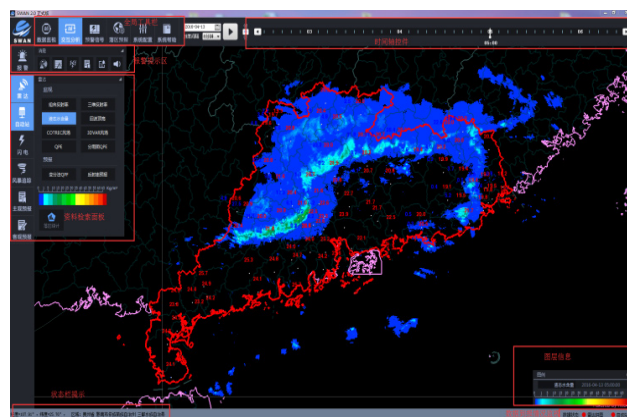


图5 SWAN系统客户端界面 (阴影为雷达资料反演液态水含量)

Fig. 5 SWAN client interface (The shade denotes vertical integrated liquid inverted from radar data)

1.3 短期潜势预报

强对流短期潜势预报是目前最为成熟的强对流天气预报业务。强天气预报中心在强对流多发的4—9月每天3次 (北京时06、11和18时) 发布未来24 h分类强对流 (雷暴、冰雹、雷暴大风和短时强降水) 落区和概率预报, 1次 (18时) 发布未来48和72 h的强对流落区预报。图6为2017年9月21日06时发布的当日08—12时强对流概率和落区预报。

Doswell等根据深厚对流发生必须满足对流不稳定、水汽和抬升条件, 提出了强对流的“配料法”预报方法^[24]。综合上述对流条件和组织化发展条件的强对流潜势预报方法也逐渐成为中国强对流天气预报的主要方法, 并据此发展了基于“配料法”的分类强对流客观预报方法^[25-29]。2016年5—8月雷暴和短时强降水的评估结果表明, 与预报员的主观预报相比, 72 h

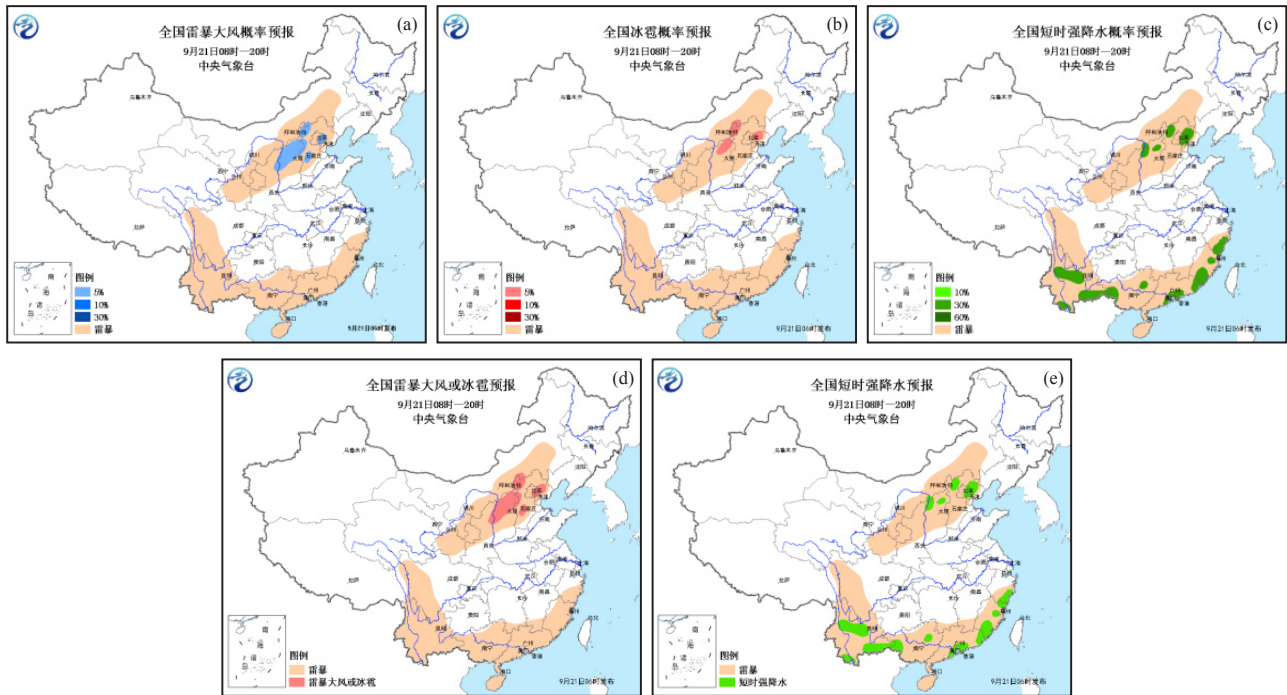


图6 2017年9月21日06时发布当日08—20时全国强对流天气概率和落区预报

Fig.6 Forecast for 12 h (08–20 BT) severe convective weather probability and location, issued at 06 BT on 21 September 2017

时效内的“配料法”客观预报概率在40%~60%的短时强降水预报具有较好的预报能力，雷暴预报也具有很好的参考意义（图7）。该方法可提供7天内逐3 h的

雷暴、短时强降水、冰雹和雷暴大风概率预报，其中雷暴、短时强降水预报能力最强。

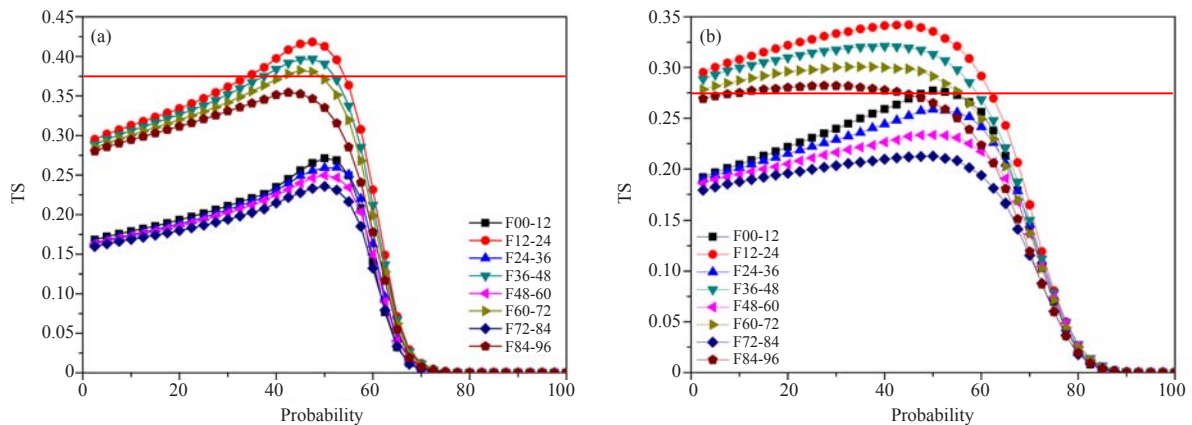


图7 2016年5—8月雷暴（a）和短时强降水（b）客观概率预报TS评分
（红色实线表示当年24 h时效内的主观预报TS平均）

Fig. 7 TS scores of the objective probability forecasting for thunderstorm (a) and short-time heavy rainfall (b) in May to August 2016. The red horizontally solide lines denote annual averaged TS scores of subjective forecasting in 24 hours valid time

2 高频滚动更新的0~12 h无缝隙监测预警业务发展

强对流的实时监测业务、临近预警和短期潜势预报业务在近几年虽然趋于成熟，但尚存在如下三个

瓶颈问题。一是中小尺度尤其小尺度灾害天气定量监测能力有限；业务中虽然实现了基于多源观测的强天气（闪电、冰雹、大风、短时强降水）实时监测和对流系统的识别追踪，但是对于龙卷、下击暴流等小尺

度灾害天气利用现有的雷达、卫星等遥感探测手段或稠密地面观测,尚难以捕捉。二是外推技术以基于单一数据源的线性外推为主,缺少对多源资料的综合应用,缺乏对物理机理的考虑,外推有效时间很难逾越1 h,也无法解决对流初生问题。三是业务中尺度模式对 β 中尺度及以下的对流系统的预报能力有限,对流可分辨的快速更新数值分析预报系统对强对流天气短时临近预警业务的支持不足。鉴于此,发展高频滚动更新的0~12 h无缝隙监测预警业务,尤其重点发展可更好监测初生对流和龙卷等小尺度强对流天气的监测技术、能更好挖掘多源观测资料和数值预报资料中的强对流发生、发展有效信息的人工智能大数据应用技术、对流可分辨数值模式及其应用技术,通过在我国中小尺度灾害天气影响严重地区开展龙卷等致灾性强对流天气的短时临近预警业务试验,以期在未来数年内对强对流天气的监测预警能力有大幅度的提升。

2.1 应用新遥感探测资料的强对流监测技术

2013年,美国完成了WSR-88D的双偏振升级改造工作。新一代双偏振雷达资料质量更好,可以识别降水类型,可以为龙卷预警服务提供更精细的龙卷路径图像。此外,通过高分辨率X波段雷达观测龙卷中的碎片产生的回波特征从而实现对强降水伴随的龙卷或夜间发生龙卷的识别。这对于识别我国与登陆台风或梅雨锋暴雨相伴的龙卷具有启发意义。

在我国,双偏振雷达的应用处于起步阶段,广东、北京、上海等发达省(市)开始布设双偏振雷达。中国气象局在新一代天气雷达系统发展中将双偏振雷达的布设和应用作为重要建设内容。国内的相关研究表明,双偏振雷达除可获取降水系统的水平偏振方向上的回波强度、径向速度、速度谱宽外,还可以探测到差分反射率因子、双程差示传播相移差、传播常数差、相关系数和线性退极化比等参量。对这些参数进行分析、反演,可以判断降水粒子的形状、尺寸大小、相态分布、空间取向以及降水类型等更为具体的气象信息,尤其对中尺度对流系统产生的强降水、冰雹有更好的识别能力^[30-35]。

2016年,日本、中国先后发射了新一代静止气象卫星Himawari-8/9和FY-4,两者都具备红外高光谱垂直探测能力,后者还具备闪电成像观测,对强对流天气监测预警具有里程碑意义^[36]。因此,在我国如何应用好这类具备垂直探测能力的静止气象卫星,发展相关的算法以更好地监测强对流尤其对流的初生,并综合雷达、自动站等观测资料发展利用多源观测资料的强对流自动报警技术和临近外推预报技术,对于提升

我国尤其中西部地区的强对流预警能力大有裨益。

2.2 对流可分辨数值模式的发展和應用

如何利用好越来越丰富的观测资料和对流可分辨数值分析预报系统,提升强对流天气短时临近预报能力是当前国际发展的趋势。主要表现为两种策略:一种是致力于发展雷达等高频观测资料的同化技术,缩短数值模式的适应调整(spin up)时间,发展具备快速更新同化能力的对流可分辨数值分析预报系统。另一类则是通过将临近外推预报技术与高分辨率数值模式的预报结果的权重融合技术,发挥临近外推预报与数值预报技术的各自优势,形成短时临近无缝隙预报。前者的极致代表为美国强风暴实验室牵头开展的“Warn-on-Forecast”项目。该项目从2010年开始,首先采用逐5 min快速更新同化雷达资料实时得到高分辨率的风场和反射率场,对NOAA灾害性天气试验基地春季试验中强雷暴预警提供帮助^[37-38]。最近几年,他们在美国业务对流可分辨集合预报系统HRRRE的基础上,通过逐15 min快速更新同化雷达资料,在灾害天气频发的特定区域内拟对有可能产生龙卷、大冰雹和局地极端大风的强雷暴系统,特别是超级单体的预警时效提前至60 min甚至更长^[39]。该系统作为重要测试应用系统之一,在2017年灾害天气中试基地(HWT)的春季试验中被测试应用(<http://www.nssl.noaa.gov/projects/wof/news-e/>)。

快速更新同化系统的研发已进行了20多年,其在美国已逐步成为强对流短时临近预报的重要工具且在许多领域得到了应用。许多中尺度天气系统本质上是不可进行“确定性”预报的,因此发展基于集合预报的短时临近概率预报是未来一个重要方向。对流可分辨的集合预报技术近几年在美国已经由研究逐步迈向业务应用试验。美国一些与大气科学相关的研究机构 and 高校均开始实时运行对流可分辨的集合预报系统。一些研究机构甚至开始试验快速更新同化的集合预报系统,如俄克拉荷马大学(OU)的风暴分析预报中心(CAPS)通过近几年一直在发展空间分辨率为3 km、23个成员的WRF-ARW风暴尺度集合预报模式(SSEF),范围涵盖全美(http://forecast.caps.ou.edu/SpringProgram2017_Plan-CAPS.pdf)。

对流可分辨模式虽然已经具备模拟中尺度对流系统的能力,但对强对流天气(如冰雹、龙卷、雷暴大风等)还缺少表达能力^[40]。因此,基于对流可分辨数值模式,将能更精细表征中尺度对流系统发生发展特征的动力、云物理等物理量与环境特征参数,综合发展龙卷、冰雹、雷暴大风的预报成为对流可分辨数值

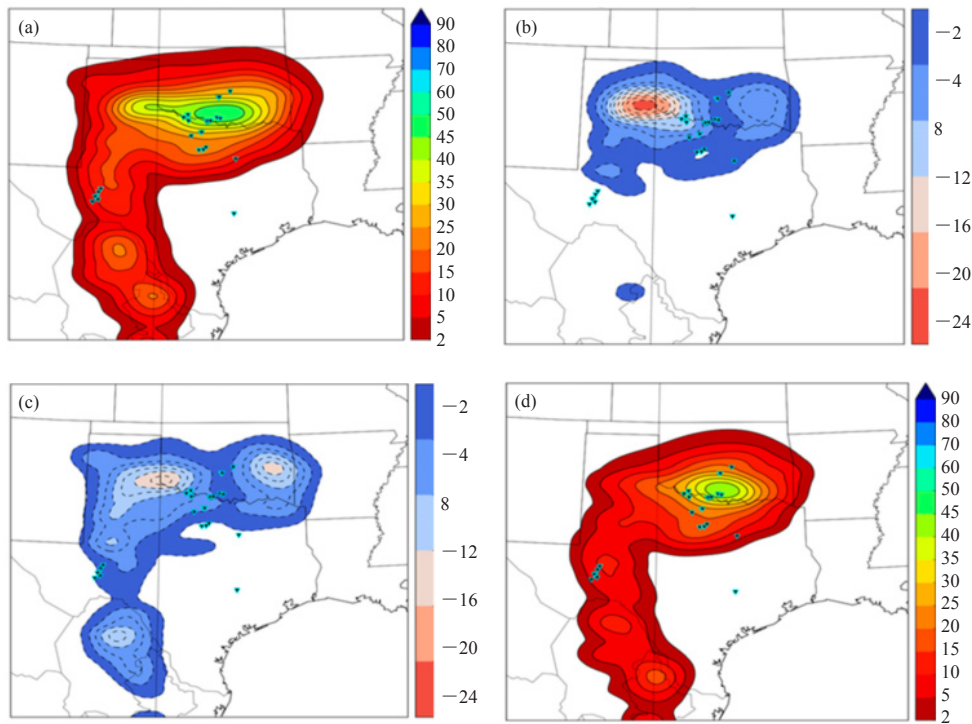


图8 综合上升气流风暴螺旋度 $UH \geq 25 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 和环境物理因子的龙卷邻域($\sigma=50 \text{ km}$)概率预报(绿色三角形表示龙卷位置)
(a) 仅考虑 UH , (b) 要求 $LCL < 1500 \text{ m}$ 并且 $SBCAPE/MUCAPE > 0.75$, (c) 要求 $STP \geq 1.0$, (d) 要求 $LCL < 1500$ 、 $SBCAPE/MUCAPE > 0.75$ 并且 $STP \geq 1.0$ ^[45]

Fig.8 Probability forecasting for neighborhood ($\sigma=50 \text{ km}$) tornado by synthetical consideration of updraft storm helicity ($UH \geq 25 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) and environmental physical factors (The green triangle denote location of tornado)

(a) only UH considered, (b) $LCL < 1500 \text{ m}$ and $SBCAPE/MUCAPE > 0.75$, (c) $STP \geq 1.0$, (d) $LCL < 1500$, $SBCAPE/MUCAPE > 0.75$ and $STP \geq 1.0$

模式的主要应用方式^[41-44]。图8为在美国强风暴实验室(NSSL)对流可分辨集合预报系统(CPMs)的输出结果上综合考虑对龙卷有很好表征意义的动力参数 UH 和环境条件发展的龙卷概率预报^[45]。

近几年,国内也开始大力发展对流可分辨的数值模式技术。2009年上海建立了基于ADAS资料同化系统和区域中尺度数值模式WRF的快速更新同化预报系统(SMB-WARR, Shanghai Meteorological Bureau-WRF ADAS Rapid Refresh System),系统水平分辨率3 km,垂直分辨率51层,预报区域覆盖华东,通过3年来的测试及优化,该系统在短时临近天气预报中发挥了越来越重要的作用^[7]。北京同化预报系统(BJ-RUC)亦采用WRF模式,3 km分辨率的预报区域主要覆盖北京及其周边地区,垂直分辨率均为37层,每隔3 h同化一次探空、地面、船舶观测资料以及北京地区的自动站和地基GPS PW可降水量观测资料,预报时效为18 h。其业务运行结果表明,3 km分辨率无论是降水时段、落区和雨量均较9 km分辨率有更好的预报效果,尤其是大量级降水的预报,但

系统对局地对流降水的预报能力仍然有限^[46-47]。广东省在GRAPES_Meso及三维变分同化基础上发展了快速更新同化预报系统(GRAPES-CHAF),该系统采用逐小时循环同化和每3 h间隔的滚动预报,预报时效为24 h,初步具备开展短时临近预报的能力^[48]。中国气象局数值预报中心利用我国新一代数值预报系统GRAPES模式及GRAPES-3Dvar建立了全国稠密资料快速更新同化分析预报系统(GRAPES-RAFS),系统每3 h启动一次预报,预报时效为24 h,具有一定短时临近预报能力^[49]。通过有效应用FY-2卫星资料、雷达组网拼图资料等改进优化GRAPES_Meso中的云初始场方案,该系统对短时临近时效的云预报以及强降水预报有了明显改进^[50]。通过对模式动力框架、边界层方案等优化调整,该系统对强降水和地面2 m温度的预报也有了明显改善^[51]。

随着快速更新同化的对流可分辨数值预报技术发展,基于数值模式的临近预报技术迅速发展,并与外推预报等传统短时临近预报方法结合,如美国近年发展的CoSPA(Consolidated Storm Prediction for

Aviation)。陈明轩等、刘莲等将引进的VDRAS改进，初步形成了一个适合于实时运行的、快速更新的雷达四维变分分析系统，将高时空分辨率雷达组网观测资料与对流尺度数值模式结合应用到京津冀地区强对流临近预报^[52-54]。2017年，北京在BJ-RUC和BJ-ANC基础上发展了RMAPS-IN (Rapid-Refresh Multi-scale Analysis and Prediction System—Integration) 系统，提供京津冀地区0~12 h的1 km空间分辨率、10 min快速更新循环的网格化分析和预报产品^[55]。

纵观近年来国内外在对流可分辨数值模式技术，尤其是快速更新同化技术的发展，我国在未来几年，如何更好利用中国气象局数值预报中心和东部发达地区区域中心发展的对流可分辨数值预报系统，借鉴美国风暴预报中心的技术发展思路，发展基于对流可分辨数值模式的强对流天气释用技术，是提升强对流短时预报能力的关键。

2.3 人工智能技术在强对流天气预报中的应用

受限于观测手段，目前我国业务观测系统仍然无法对龙卷、下击暴流甚至冰雹进行及时有效地监测，这很大程度上影响了我国的中小尺度对流天气的机理认识的深入，也在很大程度上制约了依赖于物理机理认识的对流可分辨的数值模式发展和强对流天气预报技术发展。因此，将当前国际先进的大数据和机器学习方法应用于强对流天气的预报中，挖掘多源观测资料和数值模式预报资料中尚未被认识的强对流发生发展的有效信息，则有望超越现有强对流天气预报方法。强对流天气预报过程中所使用的时空数据具有空间和时间上的稠密特性，可以抽象为时空数据的高维问题。针对这一问题，一种通用方法就是使用卷积神经网络(CNN)对高维空间数据建模，其中最具代表性的工作是Mathieu等提出的基于卷积神经网络的时空数据预测方法^[56]。Benjamin等创建了动态卷积

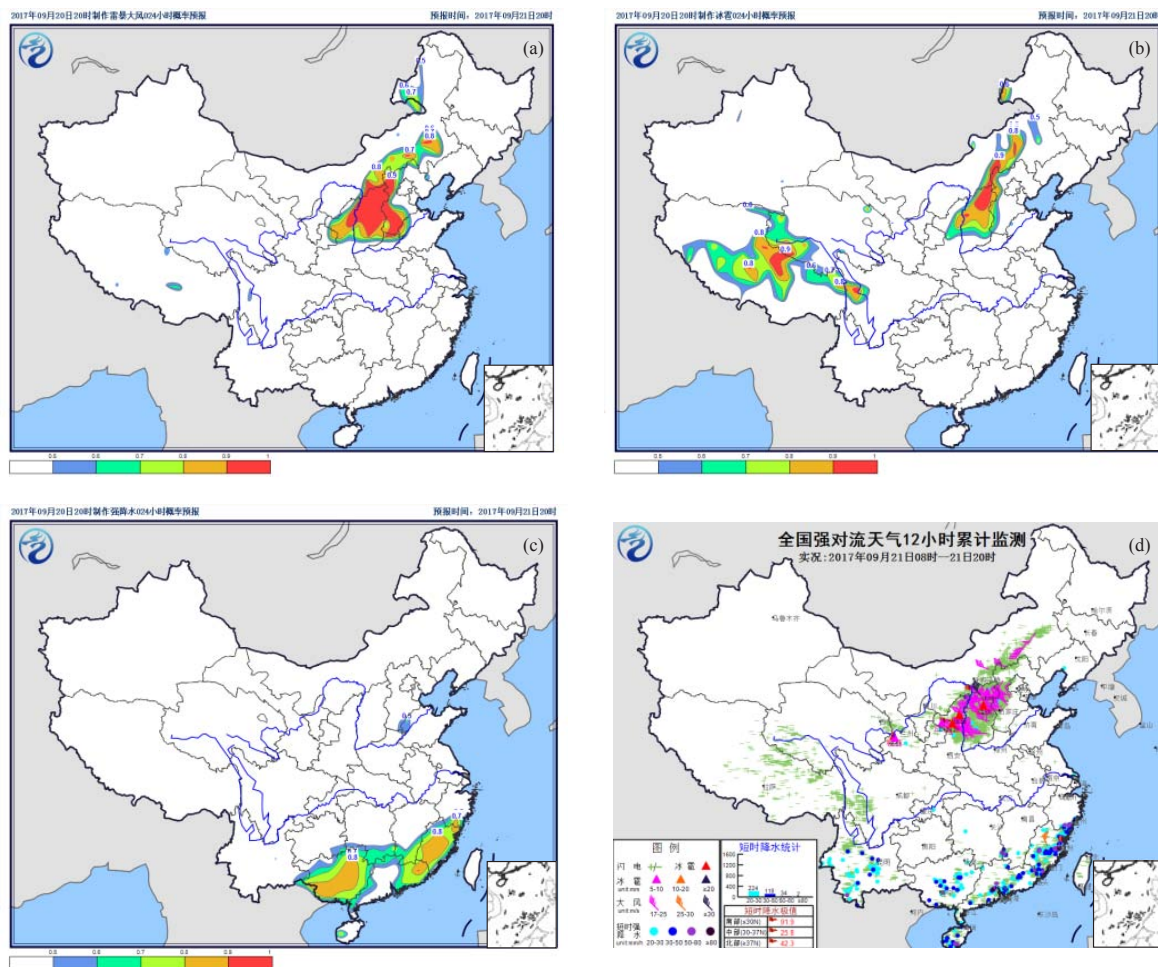


图9 基于深度学习方法的2017年9月21日14—20时强对流概率预报

(a) 雷暴大风预报, (b) 冰雹预报, (c) 短时强降水预报, (d) 实况观测

Fig. 9 Probability forecasting for 6 h (14–20 BT) severe convective weather on 21 September 2017 by Deep Learning method

网络 (Dynamic Convolutional Layer), 用以雷达回波外推的短时临近预报, 取得了比传统方法更好的效果^[57]。2015年香港天文台和香港科技大学的研发团队将深度学习中的最主流的卷积神经网络和长短时间记忆网络结合起来, 提出了卷积-长短时间记忆网络 (ConvLSTM), 是深度学习技术应用于短时临近定量降水预报问题的开创性工作^[58]。该方法现已被香港天文台应用于雷达回波外推。王舰锋等则将卷积神经网络 (CNN) 用于卫星云量计算^[59]。

Zhou等将卷积神经网络 (CNN) 应用于强对流的分类预报, 而且利用该方法研制的分类强对流概率预报产品已经成为强对流天气预报重要的业务参考产品 (图9)^[60]。

国内外研究新进展表明, 面向视频、图像序列等时空数据的深度学习技术已经在暴雨、强对流的短期预报和临近外推预警得到应用。若将其应用于充分挖掘雷达、卫星、自动站等多源观测资料和高分辨率数值模式预报资料的有效信息, 很有可能给强对流天气预报带来新的突破。

2.4 龙卷预警试验

龙卷是强对流天气中最为剧烈的一种天气, 破坏性极高。由于我国龙卷发生频率很低, 在龙卷多发地区如江苏、安徽等省, 具有一定的龙卷监测和预警

能力, 但尚未建立起龙卷的监测预警业务, 也迫切需要发展高度自动化的快速预警自动生成和发布平台。近几年, 龙卷等小尺度对流天气造成的灾害剧烈, 社会影响非常大, 如2015年长江监利段东方之星游轮翻沉致400多人死亡事件、台风彩虹登陆广东湛江期间广东佛山等地的龙卷致数十人伤亡事件、2016年江苏阜宁龙卷致数百人伤亡事件造成巨大的灾难和社会影响, 公众要求中国气象局开展龙卷预警预测的呼声前所未有的高涨。考虑到龙卷造成的严重灾害和龙卷高发区主要位于长江三角洲以及广东为主的华南地区^[61-62], 2017年国家气象中心联合江苏、安徽、广东、湖北和浙江五省开展龙卷预警业务试验, 以通过核心关键技术发展、包括社会观测在内的多源观测资料在业务中的有效应用、龙卷监测和临近预警业务流程和平台建设以及社会联防预警服务流程建设, 提升包括龙卷在内的破坏性对流大风等的预警能力。预警试验中, 国家级的试验对象扩展为龙卷等强致灾性强对流 (EF2以上龙卷、20 mm以上冰雹、10级以上大风、小时雨量超过50 mm或3 h雨量超过100 mm的局地极端强降水), 并重点发展支持上述致灾性强对流天气的监测和短时临近预警技术。图10为利用业务试验的对流可分辨3 km GRAPES_CR发展的对龙卷具有较好表征的上升螺旋度UH诊断产品。

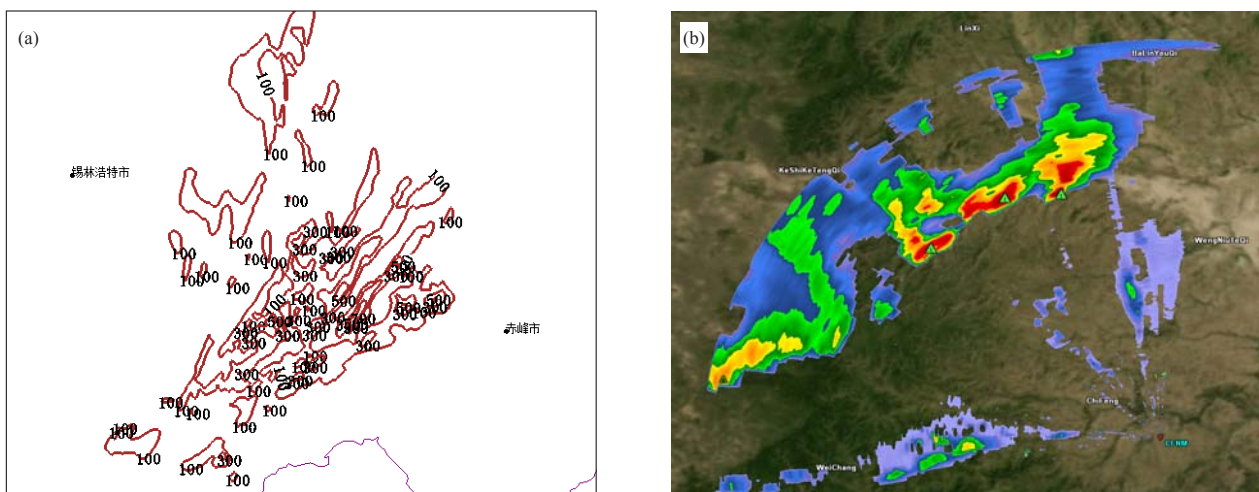


图10 GRAPES_CR模式2017年8月11日08时起报的16时 (北京时) 上升螺旋度UH (a) 和对应时间赤峰雷达回波 (b)
Fig.10 (a) The model GRAPES_CR forecasting for updraft storm helicity (UH) at 16 BT, the forecasting started at 08 BT on 11 August 2017; (b) the radar echo at Chifeng Radar Station at the same time

3 结论

中国的强对流天气在最近10年发展迅速, 已经建立起包括实时监测、临近预警和短期潜势预报的强对流天气预报业务, 初步实现对雷暴、短时强降水、雷暴大风和冰雹的监测预警以及72 h内的潜势预报。

但是, 强对流天气造成的灾害仍然是当前最为严重的一种气象灾害, 与强对流天气预警服务相应的实时监测和短时临近预警技术是当前强对流天气面临的重大挑战, 尤其是对于特别极端性的强对流天气 (如2016年6月23日江苏的龙卷、2017年5月7日的广州极

端暴雨等)强度预报。我国现有的业务观测系统和监测技术对中小尺度尤其龙卷、下击暴流等小尺度对流天气的定量监测能力有限。我国的临近预警主要依赖于基于雷达图像的外推技术,对多源资料的综合应用、物理机理的考虑尚显不足,外推有效时间很难逾越1 h,也尚未解决对流初生问题。我国对流可分辨的快速更新数值分析预报系统尚处于起步阶段。未来几年,伴随新一代双偏振雷达和FY-4卫星等遥感探测资料投入业务应用、快速更新数值分析预报技术的发展、能更好挖掘大数据有效信息的深度学习等人工智能技术在强对流天气预报中的应用,通过开展如龙卷预警试验这样的业务示范项目建设,逐步建立起实时监测与短时临近无缝隙衔接的监测预警业务,我国的强对流天气预报业务将有跨越式的发展,龙卷等强致灾性强对流天气的监测预警能力也将有所提升。

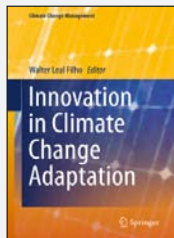
参考文献

- [1] Wilson J W, Feng Y R, Chen M, et al. Nowcasting challenges during the Beijing Olympics: Successes, failures, and implications for future nowcasting systems. *Weather and Forecasting*, 2010, 25(6): 1691-1714.
- [2] Muller C K, Saxen T, Roberts R, et al. NCAR auto-nowcast system. *Weather and Forecasting*, 2003, 18: 545-561.
- [3] Lakshmanan V, Smith T. The warning decision support system-integrated information. *Weather and Forecasting*, 2007, 22: 596-612.
- [4] Lakshmanan V, Rabin R, Brunner De V. Multiscale storm identification and forecast. *Journal Atmospheric Research*, 2003, 68: 367-380.
- [5] Stumpf G, Witt A, Mitchell E D, et al. The national severe storms laboratory mesocyclone detection algorithm for the WSR-88D. *Weather and Forecasting*, 1998, 13: 304-326.
- [6] 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展. *气象学报*, 2012, 70(3): 311-337.
- [7] 陈葆德, 王晓峰, 李泓. 快速更新同化预报的关键技术综述. *气象科技进展*, 2013, 3(20): 29-35.
- [8] 郑永光, 林隐静, 朱文剑, 等. 强对流天气综合监测业务系统建设. *气象*, 2013, 39(2): 234-240.
- [9] 费增平, 王洪庆, 张焱, 等. 基于静止卫星红外云图的MCS自动识别与追踪. *应用气象学报*, 2011, 22(1): 115-122.
- [10] 周康辉, 郑永光, 蓝渝. 基于闪电数据的雷暴识别、追踪与外推方法. *应用气象学报*, 2016, 27(2): 173-181.
- [11] 陈明轩, 王迎春, 俞小鼎. 交叉相关外推算法的改进及其在对流临近预报中的应用. *应用气象学报*, 2007, 18(5): 691-701.
- [12] 陈雷, 戴建华, 陶岚. 一种改进后的交叉相关法(COTREC)在降水临近预报中的应用. *热带气象学报*, 2009, 25(1): 117-122.
- [13] Liang Q, Feng Y, Deng W, et al. A composite approach of radar echo extrapolation based on TREC vectors in combination with model-predicted winds. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2010, 27(5): 1119-1130.
- [14] 张亚萍, 程明虎, 夏文梅, 等. 天气雷达回波运动场估测及在降水临近预报中的应用. *气象学报*, 2006, 64(5): 632-646.
- [15] 胡胜, 汪瑛, 陈荣, 等. "雨燕"中风暴算法在北京奥运天气预报示范项目中的应用及改进. *高原气象*, 2009, 28(6): 1434-1442.
- [16] 王改利, 刘黎平, 阮征, 等. 基于雷达回波拼图资料的风暴识别、跟踪及临近预报技术. *高原气象*, 2010, 29(6): 1546-1555.
- [17] 曹春燕, 陈元昭, 刘东华, 等. 光流法及其在临近预报中的应用. *气象学报*, 2015, 73(3): 471-480.
- [18] 胡胜. 临近预报系统(SWAN)产品特征及在2010年5月7日广州强对流过程中的应用. *广东气象*, 2011, 33(3): 11-15.
- [19] Li P-W, Wong W-K, Cheung P, et al. An overview of nowcasting development, application, and services in the Hong Kong Observatory. *Journal Meteorological Research*, 2014, 28(5): 859-876.
- [20] 陈明轩, 高峰, 孔荣, 等. 自动临近预报系统及其在北京奥运期间的应用. *应用气象学报*, 2010, 21(4): 395-404.
- [21] 吕伟涛, 张义军, 孟青, 等. 雷电临近预警方法和系统研发. *气象*, 2009, 35(5): 10-17.
- [22] 胡胜, 罗兵, 黄晓梅, 等. 临近预报系统(SWIFT)中风暴产品的设计及应用. *气象*, 2010, 36(1): 54-58.
- [23] 万玉发, 王志斌, 张家国, 等. 长江中游临近预报业务系统及其应用. *应用气象学报*, 2013, 24(4): 504-512.
- [24] Doswell C A III, Brooks H E, Maddox R A. Flash flood forecasting: an ingredients-based methodology. *Weather and Forecasting*, 1996, 11: 560-581.
- [25] 张小玲, 陶诗言, 孙建华. 基于"配料"的暴雨预报. *大气科学*, 2010, 34(4): 754-756.
- [26] 张小玲, 湛芸, 张涛. 对流天气预报中的环境场条件分析. *气象学报*, 2012, 70(4): 642-654.
- [27] 张涛, 蓝渝, 毛冬艳, 等. 国家级中尺度天气分析业务技术进展 I: 对流天气环境场分析业务技术规范的改进与产品集成系统支撑技术. *气象*, 2013, 39(7): 894-900.
- [28] 蓝渝, 张涛, 郑永光, 等. 国家级中尺度天气分析业务技术进展 II: 对流天气中尺度过程分析规范和支撑技术. *气象*, 2013, 39(7): 901-910.
- [29] 田付友, 郑永光, 张涛, 等. 短时强降水诊断物理量敏感性的点面对检验. *应用气象学报*, 2015, 26(4): 385-396.
- [30] 张杰, 田密, 朱克云, 等. 双偏振雷达基本产品和回波分析. *高原山地气象研究*, 2010, 30(2): 36-41.
- [31] 刘黎平, 胡志群, 吴翀. 双线偏振雷达和相控阵天气雷达技术的发展和运用. *气象科技进展*, 2016, 6(3): 28-33.
- [32] 刘黎平. 双线偏振多普勒天气雷达估测混合区降雨和降雹方法的理论研究. *大气科学*, 2002, 26(6): 762-772.
- [33] 杨忠林. 江淮梅雨期对流降水微物理特征的双偏振雷达观测研究. 南京大学硕士论文, 2016: 1-70.
- [34] 郭晓坤, 郭喜乐. 清远双偏振雷达偏振量产品的初步释用. *广东气象*, 2016, 38(5): 45-48.
- [35] Wu C, Liu L P, Wei M, et al. Statistics-based optimization of the polarimetric radar hydrometeor classification algorithm and its application for a squall line in South China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, 35, doi:10.1007/s00376-017-6241-0 (in press).
- [36] 张鹏, 郭强, 湛博洋, 等. 我国风云四号气象卫星与日本 Himawari-8/9 卫星比较分析. *气象科技进展*, 2016, 6(1): 72-75.
- [37] Calhoun K M, Smith T M, Kingfield D M, et al. Forecaster use and evaluation of realtime 3DVAR analyses during severe thunderstorm and tornado warning operations in the hazardous weather testbed. *Weather and Forecasting*, 2014, 29: 601-613.
- [38] Gao J, Smith T M, Stensrud D J, et al. A real time weather-adaptive 3DVAR analysis system for severe weather detections and warnings with automatic storm positioning capability. *Weather and Forecasting*, 2013, 28: 727-745.
- [39] Wheatley D M, Knopfmeier K H, Jones T A, et al. Storm-scale data assimilation and ensemble forecasting with the NSSL Experimental Warn-on-Forecast System. Part I: Radar data experiments. *Weather and Forecasting*, 2015, 30: 1795-1817, doi:10.1175/WAF-D-15-0043.1.
- [40] 郑永光, 薛明, 陶祖钰. 美国NOAA试验平台和春季预报试验概要. *气象*, 2015, 41(5): 598-612.
- [41] Clark A J, Weiss S J, Kain J S, et al. An overview of the 2010 hazardous weather testbed experimental forecast program spring experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93: 55-74.
- [42] Clark A J, Gao J, Marsh P T, et al. Tornado path length forecasts from 2011 using a 3-dimensional object identification algorithm applied to ensemble updraft the vorticity. *Weather Forecasting*, 2013, 28: 387-407.
- [43] Clark A J, Conigo M C. Lessons learned from 10 years of evaluating convection-allowing models in the HWT. The 2014 Warn-on-Forecast and High-Impact Weather Workshop, Norman OK. <https://www.nssl.noaa.gov/projects/wof/documents/workshop2014/>. 2014.

- [44] Jirak I. SPC ensemble applications: current status and future plans. 6th NCEP Ensemble User Workshop, College Park, MD. 2014.
- [45] Gallo B T, Clark A J, Dembex S R. Forecasting tornadoes using convection-permitting ensembles. *Weather and Forecasting*, 2016, 31: 273-295.
- [46] 范水勇, 陈敏, 仲跻芹, 等. 北京地区高分辨率快速循环同化预报系统性能检验和评估. *暴雨灾害*, 2009, 28(2): 119-125.
- [47] 陈敏, 范水勇, 郑杳芳, 等. 基于BJ-R U C系统的临近探空及其对强对流发生潜势预报的指示性能初探. *气象学报*, 2011, 69(1): 181-194.
- [48] 陈子通, 黄燕燕, 万齐林, 等. 快速更新循环同化预报系统的汛期试验与分析. *热带气象学报*, 2010, 26(1): 49-54.
- [49] 徐枝芳, 郝民, 朱立娟, 等. GRAPES-RAFS系统研发. *气象*, 2013, 39(4): 466-477.
- [50] 朱立娟, 龚建东, 黄丽萍, 等. GRAPES三维云初始场形成及在短临预报中的应用. *应用气象学报*, 2017, 28(1): 38-51.
- [51] 黄丽萍, 陈德辉, 邓莲堂, 等. GRAPES_Meso V4.0主要技术改进和预报效果检验. *应用气象学报*, 2017, 28(1): 25-37.
- [52] 陈明轩, 王迎春, 肖现, 等. 基于雷达资料四维变分同化和三维云模式对一次超级单体风暴发展维持热动力机制的模拟分析. *大气科学*, 2012, 36(5): 929-944.
- [53] 陈明轩, 高峰, 孙娟珍, 等. 基于VDRAS的快速更新雷达四维变分分析系统. *应用气象学报*, 2016, 27(3): 257-272.
- [54] 刘莲, 陈明轩, 王迎春. 基于雷达资料四维变分同化及云模式的中尺度对流系统数值临近预报试验. *气象学报*, 2016, 74(2): 213-228.
- [55] 冯子晏. 北京: 短时临近天气预报添“利器”. *中国气象报*, 2016-07-07(3).
- [56] Mathieu M, Couprie C, LeCun Y. Deep multi-scale video prediction beyond mean square error. In *International Conference on Learning Representations (ICLR)*, 2016.
- [57] Benjamin K, Lior W, Yehuda A. A dynamic convolutional layer for short range weather prediction. 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2015, doi:10.1109/CVPR.2015.7299117.2015.
- [58] Shi X, Chen Z, Wang H, et al. Convolutional LSTM network: A machine learning approach for precipitation nowcasting. In *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*, 2015.
- [59] 王舰锋. 基于卷积神经网络的卫星云量计算. *南京信息工程大学*, 2016: 1-65.
- [60] Zhou K. Forecasting different types of convective weather: a deep learning approach. *Weather and Forecasting*, 2018, 待发表.
- [61] 魏文秀, 赵亚民. 中国龙卷风的若干特征. *气象*, 1995, 21(5): 37-40.
- [62] 范雯杰, 俞小鼎. 中国龙卷的时空分布特征. *气象*, 2015, 41(7): 793-805.

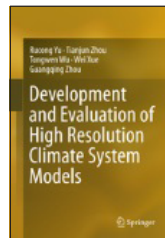
新书架 NEW BOOK

感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



Innovation in Climate Change Adaptation
《气候变化适应的创新》

编著者: Walter Leal Filho
出版者: Springer
出版年: 2016



Development and Evaluation of High Resolution Climate System Models
《高分辨率气候模式的开发与评估》

编著者: Rucong Yu 等
出版者: Springer
出版年: 2016



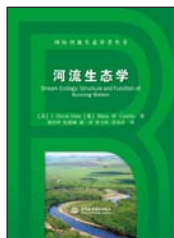
Climatic Changes Since 1700
《18世纪初以来的气候变化》

编著者: Stefan Brönnimann
出版者: Springer
出版年: 2015



Big Data Analysis: New Algorithms for a New Society
《大数据分析: 新社会新算法》

编著者: Nathalie Japkowicz 等
出版者: Springer
出版年: 2016



《河流生态学》

编著者: J. David Allan 等;
黄钰铃等译
出版者: 中国水利水电出版社
出版年: 2017



《北极地区发展报告 (2016)》

编著者: 刘惠荣
出版者: 社会科学文献出版社
出版年: 2017



《云时代下的气象信息化与管理》

编著者: 沈文海
出版者: 电子工业出版社
出版年: 2017



《大气化学实验教程》

编著者: 王体健
出版者: 南京大学出版社
出版年: 2017

雷达资料同化在可致龙卷的强暴雨系统分析中的一些应用

傅承浩^{1,3} 郜吉东² 王云恒^{2,3} 唐杰^{1,3} 周长青^{1,3} 叶成志¹ 庄照荣^{3,4}

(1 湖南省气象台, 长沙 410118; 2 美国国家强风暴实验室, 诺曼 73072, 美国;

3 美国俄克拉荷马大学中尺度气象合作研究所, 诺曼 OK 73072, 美国;

4 国家气象中心, 中国气象局, 北京 100081)

摘要: 近十几年来, 一直致力于开发一个适用于对流尺度的三维变分同化系统。在最近版本的系统中, 目标函数定义为包括背景项、观测项(包括常规观测、雷达径向风和反射率)和一些弱约束项。背景误差协方差矩阵的空间相关是通过递归滤波的方法来实现的。并且利用了背景误差协方差矩阵的平方根使目标函数的条件数减小, 从而加速了求解过程。在系统研发的初期阶段, 把重点放在对雷达径向风的分析上, 最近几年的研究延伸到了在变分框架内对反射率资料的同化上。在此基础上, 为NOAA的“基于数值模式的预警”研究课题发展了一个根据当前天气形势的演变, 动态定位分析区域的实时高频率(5 min)、高分辨率(1 km)风场分析系统。文中将给出几个实例分析。在NOAA 灾害性天气试验基地的初步评估中, 该实时系统得到了很好的评价。在结论部分将简要介绍两种新的资料同化方法: 集合三维变分同化、混合三维变分和卡尔曼同化方法。当前正在评估这些方法在对流尺度强风暴天气分析和预报中的应用。

关键词: 三维变分分析, 龙卷, 超级单体, 雷达资料同化

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.03.002

Applications of a Real Time Weather-Adaptive 3DVAR Analysis System in Detections and Warning of Tornado Related Severe Weather

Fu Chenghao^{1,3}, Gao Jidong², Wang Yunheng^{2,3}, Tang Jie^{1,3}, Zhou Changqing^{1,3}, Ye Chengzhi¹, Zhuang Zhaorong^{3,4}

(1 Hunan Meteorological Observatory, Changsha 410118; 2 NOAA/National Severe Storms Laboratory, Norman 73072, USA; 3 Cooperative Institute for Mesoscale Meteorological Studies/University of Oklahoma, Norman 73072, USA;

4 National Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: A three-dimensional variational data assimilation scheme (3DVAR) has been explored for convective scale NWP. In this scheme, a cost function is defined with a background term, an observation term, and a weak constraint term. The background error covariance matrix, though simple, is modeled by using a recursive filter. Furthermore, the square root of this matrix is used to precondition the minimization problem. In its earlier development, only radar radial velocity data could be assimilated. Recent developments include the capability to assimilate reflectivity directly in this 3DVAR framework. Based on this 3DVAR framework, a real-time, weather-adaptive analysis system has been developed for the NOAA Warn-on-Forecast (WoF) project to incorporate all available radar observations within a moveable analysis domain. The system has ability to automatically detect and analyze severe local hazardous weather events at 1 km horizontal resolution every 5 minutes in real time based on the current weather situation, and can identify strong circulations embedded in thunderstorms. The system performed very well within the NOAA Hazardous Weather Testbed Experimental Warning Program and received good evaluations from forecasters. Several real data cases are given in this paper. In the conclusion part, we shall briefly introduce two new methods – ensemble 3DVAR, and hybrid 3DVAR and EnKF schemes and discuss their potential applications for convective scale NWP.

Keywords: 3DVAR analysis, tornado, supercell, radar data assimilation

收稿日期: 2017 年 8 月 11 日; 修回日期: 2018 年 2 月 26 日
第一作者: 傅承浩(1974—), Email: Chenghaofu@hotmail.com
通信作者: 郜吉东(1965—), Email: Jidong.Gao@noaa.gov
资助信息: 美国 NOAA 和俄克拉荷马大学联合资助项目 (NA08OAR4320904); 中国气象局气象预报业务关键技术发展专项(YBGJXM 2017 1A-10); 国家自然科学基金(41305092); 国家国际科技合作专项(2011DFG23210)

0 引言

因为雷达径向风和数值模式风场之间是线性关系,同化雷达径向风到对流尺度的数值模式相对来说比较容易,尤其是在变分同化的框架内。在过去30年中,变分资料同化的应用无论是三维变分还是四维变分主要目的是用来初始化数值预报模式^[1-11]。但也有很多研究应用在雷达资料的反演过程中^[12-20]。在雷达资料同化的研究中,NCAR的Sun等^[12, 17]做了很多四维变分同化方面的工作。近年来,集合卡尔曼滤波也在雷达资料同化的应用中取得了很大的进展。本文主要是对作者近10年来在俄克拉荷马大学强风暴中心和NOAA强风暴实验室参与的三维变分研究以及在此基础上发展的集合变分同化系统和混合变分集合同化系统等作些简要的回顾和展望。

在雷达资料研究中,Gao等^[18]较早提出了一个利用两个以上雷达径向风场的分析方案。这个方案允许较灵活地同时应用雷达资料和其他与风场有关的资料,例如探空资料、地面站资料和VAD廓线等。这个方案还包括了两个弱约束:质量连续性方程和平滑算子。无论是在理想试验还是在实时观测数据的试验中,这个方案都得到了较好的结果。但是这个方案也有缺陷,特别是在确定约束项的最优权重过程中存在一些困难。因此,发展了一个更标准化的三维变分同化系统^[20]。在这个新系统中,递归滤波方法^[21]被用于模拟背景场误差矩阵。利用递归滤波可以很有效地把每个雷达资料同化到观测位置附近的模式格点上^[22]。同时能降低变分系统的条件数,从而使得数值求解收敛得更快些。对每个弱约束项最优权重的确定是通过各项相对误差的估计来实现。后来这个变分系统被应用到很多理想个例研究和实际观测个例的研究中,取得了较好的效果^[23-26]。

以上的研究工作主要集中在对雷达径向风资料的同化上,但如何有效地利用雷达反射率资料是一个较为困难的课题。首先需要发展一个能把反射率和数值模式水凝物变量联系起来的较准确的正向算子。因为这个问题和数值模式复杂的微物理过程有关,因而有很多不确定性。其次是反射率和数值模式水凝物变量有很强的非线性关系,这使得在变分问题中数值解的收敛性存在困难。由于这些困难的存在,早期的反射率同化方案选择利用反射率做云分析。Albers等^[27]发展了一个主要利用反射率的“局地分析和预报系统”。这个系统主要利用反射率来估计模式水凝物,包括雨水、雪和冰雹等,同时对云内水汽和温度做出调整。Zhang等^[28]对这个系统做了些改进,使它更

适合于对流尺度的暴雨系统。Hu等^[23-24]、Schenkman等^[26]利用此改进后的云分析系统同化反射率,并利用上述变分同化系统^[20]分析雷达径向风到一个适用于对流尺度的区域预报系统^[29-30]。结果显示该系统对短期强风暴,包含龙卷和冰雹等的超级单体有一定的预报能力。Hu等^[23-24]的研究表明反射率的同化对暴雨的发展很重要。但是,云分析方案包含很多关于水凝物和反射率之间的经验关系,因此存在很多不确定性。这些不确定性使得云分析在对流尺度的天气数值预报中有一定的局限^[31]。

Sun等^[6]较早意识到同时定量同化径向风和反射率的重要性。在他们发展的适合于对流尺度的四维变分同化系统中,对几种反射率的同化作了系统的比较。在理想实验的框架里,他们发现最好的反射率同化方案是把反射率转化为雨水混合同化,然后直接把雨水混合同化到对流尺度数值模式中去。但这一方案的缺点是忽视了反射率中冰相(包括雪、冰雹等)的贡献,从而在他们的模式只有关于暖雨的微物理过程。他们也尝试直接同化反射率,发现这样做会增加问题的非线性,使得四维变分问题的求解更加困难。集合卡尔曼滤波是另外一个很有前途的同化雷达反射率和径向风的方法^[32-39]。一般的结论是用此种方法同化雷达反射率和径向风资料能提高对流尺度的数值预报模式的预报水平。集合卡尔曼滤波同化雷达反射率资料主要的问题仍然是对流尺度模式的误差一般较大。因而和反射率有关的模式变量(如雨水、雪、冰雹等的混和比)的误差会通过协相关传播到该模式的其他变量(例如温度、水汽等),从而得到不合理的低层冷池分析结果^[38]。

在Gao等^[40]的研究中,与冰相微物理过程有关的对流尺度数值模式变量被引入进到三维变分的目标函数中。他们根据对流尺度数值模式的温度变量来决定雷达反射率的正向算子中水凝物(主要是雨、雪、冰雹等)的分类,这个研究使得在数值模式中对雷达反射率的同化更容易些。三维变分同化方法具有计算效率高、容易并行、编码简单等特性,所以比较适用于对流尺度的同化和预报系统。

这篇文章的主要目的是介绍一个基于三维变分同化的适用于对流尺度的雷达资料同化方法,特别是近几年来这个方法在实时分析和预报中的应用。

1 资料同化方法简介

1.1 目标函数的定义

正如上一节介绍的,Gao等发展了一个适用于对流尺度雷达资料同化的三维变分方案^[18-20, 23-24, 41-44]。不

同于大尺度的资料同化系统, 这个方案强调利用质量连续性方程^[18]、从适用于对流尺度的数值预报方程导出的气压诊断方程^[44]作为弱约束来建立模式变量之间的联系。从而在同化中对没有观测的变量, 例如垂直速度、温度等也做出一定程度的更新和改善。通过定义一个包括数值模式背景场项、雷达资料的观测项和弱约束项的目标函数, 然后通过应用数学上的下降算法(例如共轭梯度法)使目标函数极小化来求得同化分析结果。同化分析结果可用于初始化对流尺度的数值模式。目前这个三维变分同化系统已经被用来初始化ARPS模式和WRF模式。

三维变分同化的目标函数可写为以下形式,

$$J(\mathbf{x}) = J_B + J_O + J_C = \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^b)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^b) + \frac{1}{2}[\mathbf{H}(\mathbf{x}) - \mathbf{y}^o]^T \mathbf{R}^{-1}[\mathbf{H}(\mathbf{x}) - \mathbf{y}^o] + J_C(\mathbf{x}) \quad (1)$$

右边第一项定义分析场和模式背景场之间的距离。 $\mathbf{B}$ 是背景误差协方差矩阵。第二项是观测项, 代表分析变量和观测向量 $\mathbf{y}^o$ 之间的距离。在最初的研究中, $\mathbf{y}^o$ 只包含雷达径向风, 现在加入了雷达反射率和一些常规观测资料及风廓线资料等。关于雷达径向风和反射率的正向算子将在下文介绍。如果忽略观测资料之间的相关性, 观测误差的协方差矩阵 $\mathbf{R}$ 可以简化为对角阵, 只包含了与各个观测相对应的仪器误差和代表性误差。第三项, $J_C(\mathbf{x})$ 可以是包含质量连续性方程和数值模式方程在内的弱约束项。在目前的系统中, 分析变量包括风场的3个分量、位温、气压、水汽混合比和模式水凝物(包括云水、云、冰、雨、雪、冰雹的混合比)等。

1.2 径向风正向算子

在方程(1)右边第二项的观测项可包含任何观测资料, 侧重雷达资料的应用。根据Doviak等^[45], 径向风算子可用以下公式表示:

$$v_r = \frac{dh}{dr} w + \frac{ds}{dr} (u \sin \phi + v \cos \phi), \quad (2)$$

式中, v_r 代表雷达径向风, r 是雷达观测点与雷达位置的距离, h 是雷达观测点离地球表面的高度, s 是雷达射线投影到地面上的距离, ϕ 是雷达观测点的径向角。如果在径向风算子中也考虑雷达的射线宽度, 那么根据Rihan等^[46]的研究, 较复杂一点的径向风算子可表述为:

$$v_{r,e} = (\sum G v_r \Delta z) / (\sum G \Delta z), \quad (3)$$

式中, $v_{r,e}$ 是在某一高度角上的径向风, Δz 是数值模式的垂直格距, G 描述了与雷达射线宽度有关的放大率函数^[47]。

如果雷达径向风的观测误差为1或2 m/s^[48-49], 方程(1)中的第二项可改写为

$$J_{Ov_r} = \frac{1}{2} [H(v_{r,e}) - v_r^{ob}]^T \mathbf{R}_{v_r}^{-1} [H(v_{r,e}) - v_r^{ob}], \quad (4)$$

式中, $H(v_{r,e})$ 定义为把三维风场变量 u, v, w 投影到径向风方向的正向算子(式(2)或(3))和把径向风从模式格点投影到观测点上的三维线性插值算子。

1.3 反射率正向算子

早期的三维变分框架内, 不包含对反射率的直接同化, 反射率的分析是通过云分析来进行的^[23-24]。Gao等^[40]提出了一个在变分框架内直接同化反射率的方案。在这个方案中, 首先发展了一个利用数值模式的温度背景场来对模式的水凝物进行分类的正向反射率算子。根据Lin等^[50]、Gilmore等^[51]和Doswell等^[38]的研究, 反射率因子的正向算子可表述为雨、雪、冰雹混合比的函数如下:

$$Z_e = Z(q_r) + Z(q_s) + Z(q_h), \quad (5)$$

根据Smith等^[52]的研究, 雨水对反射率的贡献可表述为

$$Z(q_r) = 3.63 \times 10^9 (\rho q_r)^{1.75}, \quad (6)$$

ρ 是空气密度。如果气温低于0℃, 那么干雪对反射率的贡献可表述为,

$$Z(q_s) = 9.80 \times 10^8 (\rho q_s)^{1.75}, \quad (7)$$

如果气温高于0℃, 那么湿雪对反射率的贡献可表述为,

$$Z(q_s) = 4.26 \times 10^{11} (\rho q_s)^{1.75}, \quad (8)$$

根据Lin等^[50]和Gilmore等^[51]的研究, 冰雹对反射率的贡献为

$$Z(q_h) = 4.33 \times 10^{10} (\rho q_h)^{1.75}, \quad (9)$$

用式(5)~(9)把反射率同化到数值模式中去不是很理想, 存在着一定的缺陷。这是因为反射率是雨、雪、冰雹混合比三者的函数, 直接用以上公式可能引起数值解的欠定性。例如, 分析中可能导致在模式的低层产生雪的情况, 但实际上模式低层由于温度较高却只能有雨。为解决这个问题, 式(5)可被改进写成

$$Z_e = \begin{cases} Z(q_r) & T_b > 5^\circ\text{C} \\ Z(q_s) + Z(q_h) & T_b < -5^\circ\text{C} \\ \alpha Z(q_r) + (1-\alpha)[Z(q_s) + Z(q_h)] & -5^\circ\text{C} \leq T_b \leq 5^\circ\text{C} \end{cases}, \quad (10)$$

式中, α 随背景场温度的区间($T_b = -5^\circ\text{C}$ 和 $T_b = 5^\circ\text{C}$)在0~1变化, T_b 可从数值模式中得到。实际上用式(5)和(10)得到的反射率的因子大致相同。但在式(10)中, 隐含着不同种类水凝物对反射率因子的贡献可以根据模式提供的温度场有所区分。从而当把反射率同化到数值模式时, 使不同种类水凝物(雨、雪和冰雹的混合比)的分析结果更加合理。对反射率

因子方程 (10) 取对数就可计算反射率,

$$Z_{\text{dB}} = 10 \log_{10} Z_e, \quad (11)$$

这里, Z_{dB} 的单位是 dBz。所以目标函数 (1) 中第二项关于反射率的观测项可写为,

$$J_{\text{OZ}} = \frac{1}{2} [H(Z_{\text{dB}}) - Z_{\text{dB}}^{\text{ob}}]^T \mathbf{R}_Z^{-1} [H(Z_{\text{dB}}) - Z_{\text{dB}}^{\text{ob}}]. \quad (12)$$

类似于式 (4), 式 (12) 中的 $H(Z_{\text{dB}})$ 定义为用方程 (5) ~ (11) 把模式变量, 雨、雪和冰雹的混合比转化为反射率的非线性算子和把反射率从模式格点插值到雷达观测点上线性算子。

这种根据数值模式提供的温度场来确定水凝物对分射率贡献的正向算子使得对反射率的同化更精确, 一定程度上去掉了了解的不确定性。根据以前的对比试验, 用温度场来确定水凝物的正向算子使得同化的结果更好, 特别是对低层雨水的分析更合理。作者正在 NOAA 的“基于数值模式的预警”研究课题的资助下做进一步试验, 希望将来能把此方法应用到实际业务中。

1.4 目标函数中的弱约束项 J_c

在三维变分同化中, 一些能把模式变量联系起来的物理约束 (例如质量连续方程) 和模式方程以及其导出的相关公式可以作为弱约束结合到目标函数中。在目前的系统中, J_c 主要包括两个弱约束项即: 质量连续性方程和从 ARPS 模式导出的气压诊断方程。这里主要介绍前者, 后者可以使模式各个变量的分析更平衡^[44]。

在这个三维变分同化中, 3 个风场分量之间的平衡关系是通过一个滞弹性近似的质量连续性方程来实现的, 它的定义如下,

$$J_C = J_{MC} + J_{DP}, \quad (13)$$

$$J_{MC} = \frac{1}{2} \lambda_c (\bar{\rho} \partial u / \partial x + \bar{\rho} \partial v / \partial y + \bar{\rho} \partial w / \partial z)^2, \quad (14)$$

式中 $\bar{\rho}$ 是给定层的平均空气密度。 λ_c 是个权重系数, 它控制目标函数中这个约束项的相对重要性。一般取值是 $\lambda_c = 5.0 \times 10^{-4}$ 。这个值也可通过对分析方案的调试得到。 J_{DP} 定义气压诊断方程弱约束项^[44]。Gao 等^[18,20]发现这个弱约束建立了风场 3 个分量之间的紧密联系, 因而对垂直速度的分析非常有效。正如 Gao 等^[18]在研究中指出的, 在三维变分同化方案中把质量连续性方程作为弱约束而不是强约束^[53-55], 避免了在垂直方向上积分连续性方程引起的误差累积。所以垂直速度的分析相对来说能更准确些。

1.5 变量替换和条件化

为了使数值求解更快, 或者说使目标函数下降更快, 定义控制变量 $\mathbf{v}$, 使得 $\mathbf{C} = \sqrt{\mathbf{B}} \mathbf{v} = (\mathbf{x} - \mathbf{x}^b)$, 这样目

标函数 (式 1) 变为如下形式^[56-57]:

$$J_{\text{inc}}(\mathbf{v}) = \frac{1}{2} \mathbf{v}^T \mathbf{v} + \frac{1}{2} (\mathbf{H}\mathbf{C} - \mathbf{d})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{H}\mathbf{C} - \mathbf{d}) + J_c(\mathbf{v}), \quad (15)$$

式中 $\mathbf{H}$ 是 H 的线性化算子, $\mathbf{d} \equiv \mathbf{y}^o - H(\mathbf{x}^b)$ 。目标函数 J_{inc} 关于 $\mathbf{v}$ 的梯度和 Hessian 算子可从公式 (15) 导出,

$$\nabla J_{\text{inc}} = (\mathbf{I} + \mathbf{C}^T \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}\mathbf{C}) \mathbf{v} - \mathbf{C}^T \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{d} + \nabla J_c(\mathbf{v}), \quad (16)$$

$$\nabla^2 J_{\text{inc}} = \mathbf{I} + \mathbf{C}^T \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}\mathbf{C} + \nabla^2 J_c(\mathbf{v}), \quad (17)$$

式中, $\mathbf{I}$ 是单位矩阵。从式 (17) 中可看到, 从式 (1) 到 (15) 的变换使相对应于新控制变量 $\mathbf{v}$ 的本征值不可能是 1, 从而降低了条件数, 求解过程收敛会更快。

在式 (15) 中矩阵 $\mathbf{C}$ 可分解为

$$\mathbf{C} = \mathbf{D}\mathbf{F}\mathbf{L}, \quad (18)$$

式中, $\mathbf{D}$ 是背景标准误差的对角化矩阵, $\mathbf{L}$ 是一个放大的系数。从理论上来说, $\mathbf{F}$ 是一个对角元素是 1, 而非对角元素是背景协相关误差系数的矩阵; 但是这个矩阵维数巨大, 不可能用在数值求解过程中显示表示。Purser 等^[21]提出了一个利用对等空间递归滤波的方案来模拟 $\mathbf{F}$ 。一价的递归滤波定义如下

$$\begin{aligned} Y_i &= \alpha Y_{i-1} + (1 - \alpha) X_i \quad i = 1, \dots, n \\ Z_i &= \alpha Z_{i+1} + (1 - \alpha) Y_i \quad i = n, \dots, 1 \end{aligned} \quad (19)$$

X_i 是定义在格点 i 上的初始值, Y_i 是向前滤波后在格点 i 的值, Z_i 是向后滤波后在格点 i 的值, α 是按式 (20) 定义的系数^[58],

$$\begin{aligned} \alpha &= 1 + E - \sqrt{E(E+2)} \\ E &= 2N\Delta^2 / (4L^2) \end{aligned}, \quad (20)$$

式中, L 是水平相关尺度, Δ 是水平格距, N 是实施滤波的次数。这个递归滤波方法要求必须在正反两个方向各进行一次, 以保证位相误差为 0。这个递归滤波方法可分别应用在 x 、 y 、 z 这 3 个方向上。多尺度滤波可通过多次使用式 (19) 实现, 每次应用不同的系数 α 。Xie 等^[59-60]在他们的三维变分研究中证明使用多尺度滤波比单尺度滤波效果会更好。

2 几个实时个例分析

在上述三维变分的框架上, 发展了一个实时的可根据天气形势移动分析区域的分析系统。这个系统可用数值预报产品和实时收集的雷达资料进行分析^[41]。这个系统有以下优点: 1) 可用多个雷达的资料, 以及任何有关的常规数据; 2) 自动识别强天气可能发生的地点并提供有较高空间分辨率 (1 km) 和时间分辨率 (5 min) 的分析结果; 也可由预报员根据当前天气形势确定分析区域; 3) 这个系统能够帮助预报员估计超级单体中层中尺度气旋的强弱从而在发布强天气预警时提供参考和帮助。这个系统曾经被应用

到NOAA灾害性天气试验基地, 并得到预报员的好评^[61-62]。下面给出几个在美国产生强龙卷的灾害性天气试验个例和一个发生在湖南的强暴雨个例的分析结果。

2.1 2013年在俄克拉荷马州产生龙卷的一个超级单体

2013年5月20日, 一个产生了强龙卷的超级单体袭击了美国俄克拉荷马州穆尔市(MOORE)。这个龙卷后来被美国气象部门归类于5级——龙卷强度的最高级别。这个龙卷共造成了23个人死亡, 377个人受伤, 并摧毁了很多房屋(图1)。龙卷产生的瞬时最大风速达到了每小时340 km。龙卷的直径达2.1 km。根据事后收集的资料, 龙卷在当地时间14: 56从附近纽尔斯市开始形成, 在地面穿行了大约27 km, 大部分经过穆尔市并于当地时间15: 35离开地面。这个产生了龙卷的超级单体被附近的多普勒雷达网监测到, 其中包括有4个S波段的WSR-88D雷达, KTLX雷达离风暴系统最近, 观测了系统的中低层的结构; KFDR, KINX和KVNK离风暴较远, 主要观测到了风暴的高层结构。分析中的背景场是由美国环境预报中心(NCEP)的北美中尺度模式(NAM)提供的。在实时运行中, 水平方向的分辨率设为1 km格距, 模式区域共有 200×200 个格点。在垂直方向上有31层, 采用逐步递增的不等距格距, 平均格距是400 m。当天系统自动定位的分析中心位于(35.36°N , 97.18°W)。分析主要集中在三维风场以及由此导出的垂直涡度和



图1 2013年5月20日强龙卷袭击后的俄克拉荷马州穆尔市的住宅区

Fig. 1 Selected images of tornado damage area in Moore, Oklahoma on 20 May 2013

垂直速度上。

2013年5月20日早晨, 美国天气服务局暴雨预报中心发布了从密苏里州东南部到得克萨斯中北部的强天气预警。当地时间14: 00左右, 产生强龙卷的超级单体开始在雷达回波中显现。这个超级单体从出现到成熟发展得很快, 在不到一个小时内(14: 56), 在纽尔斯市产生了第一个龙卷(图2)。当年, 作者并没有在NOAA的强风暴试验基地每天实时运行分析系统, 但在预报的强天气系统可能性提高时, 分析系统会自动启动。系统在当地时间13: 00开始实时接收雷达数据。系统自动定位了靠近穆尔市的分析区域。图2和图3显示了分析得到的位于地面高度以上3 km, 从14: 00—15: 35的水平风场、垂直涡度和雷达反射率、以及相应的垂直剖面图。在这段时间内, 超级单体经历了从生成、发展到成熟的阶段。14: 00, 在分析区域的西边界出现了几个雷达回波较弱的普通暴雨单体(图2a和图3a)。产生了穆尔市龙卷的暴雨单体迅速加强, 仅仅25 min后, 演变成超级单体。在对地面高度以上3 km上空的风场分析表明存在一个很强的中尺度气旋(图2b和图3b)。虽然分析也表明在这个超级单体的北部和南部各存在较强的超级单体, 但它们都没产生龙卷(图2b和图2c)。穆尔市的龙卷在14: 56下沉接连地面, 在14: 55的分析表明在雷暴中心存在超强的旋转和上升运动(图2e和图3e)。最强的垂直速度达到20 m/s, 最强的垂直涡度达到 $0.015/\text{s}$ 。在近一个小时期间, 强大的气旋一直存在于超级单体内, 在垂直方向上延伸几千米。当地时间15: 20, 这个超级单体分裂, 强度减弱, 龙卷于15: 35时消散。为了验证分析是否合理, 把从当地时间14: 00—17: 00分析中得到的垂直涡旋度的轨迹和气象局事后统计得到的龙卷轨迹一起画在图4中。从图中看出, 三维变分分析的垂直涡旋度的轨迹前一段与龙卷造成损害的轨迹基本重合。三维变分的分析区域水平格距是1 km, 这样的分辨率虽不可能分辨龙卷, 但与龙卷紧密相关的中尺度气旋却能很清晰地被分析出来, 并且伴随龙卷的发生一直非常强大。对这个例中类似的超级单体的预报是个非常困难的事情, 因为这种超级单体在很短时间内快速加强并生成龙卷, 对预报员提前准确发布强天气预警具有很大挑战。但快速三维变分同化的分析产品可以迅速地实时计算出气流旋转的强度, 从而给预报员发布强天气预警提供及时帮助。

2.2 2011年在阿拉巴马州产生龙卷的多个超级单体

2011年4月27日, 在美国东南部几个州包括阿拉巴马、阿肯色、乔治亚、密西西比和田纳西等地暴发

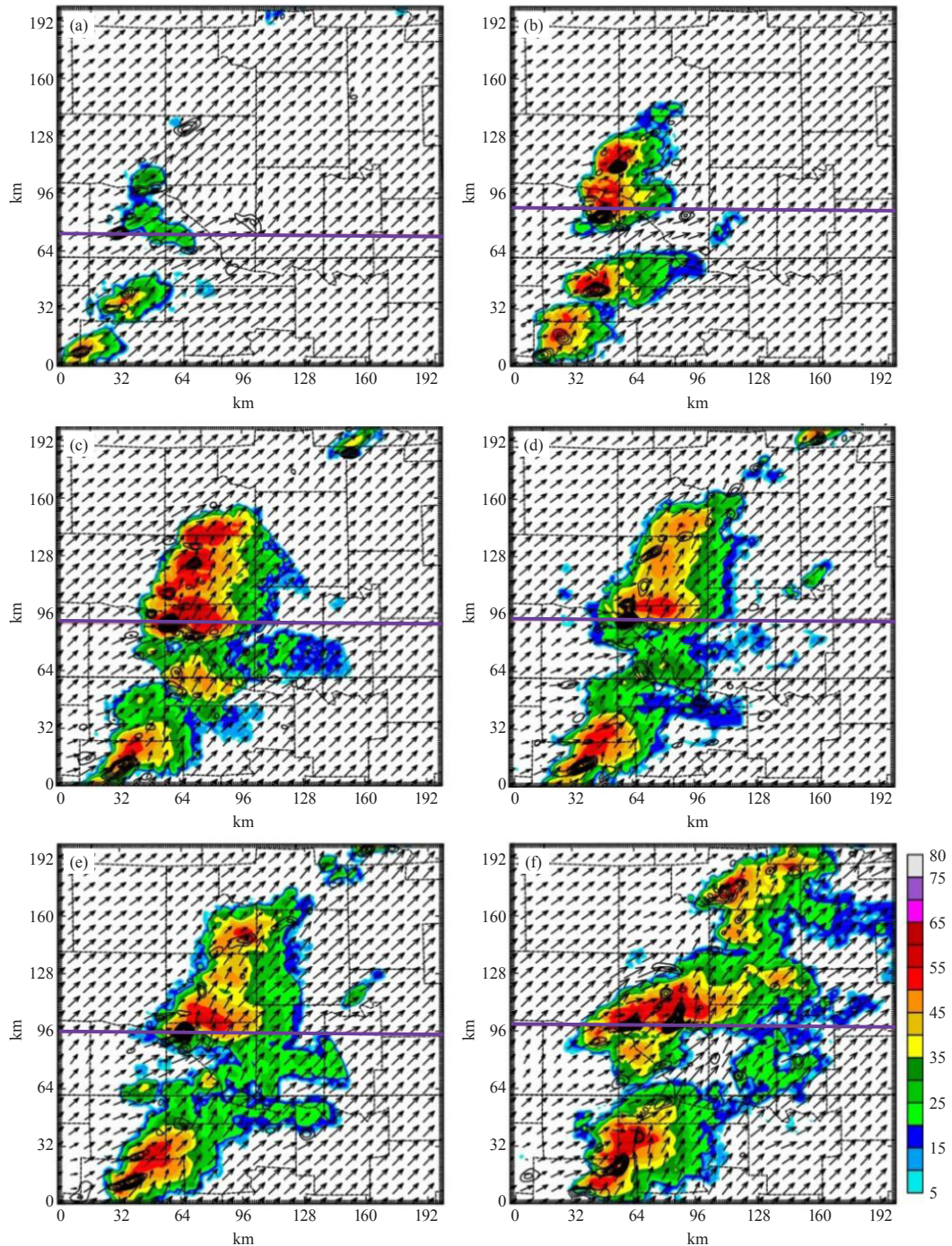


图2 分析得到的俄克拉荷马穆尔市地面以上3 km的多部雷达合成的反射率（彩色阴影区）、水平风场（风矢量）和垂直涡度（黑色等值线）（紫色实线表明图3垂直剖面图的位置）

（a）当地时间14: 00, （b）14: 20, （c）14: 45, （d）14: 50, （e）14: 55, （f）15: 00

Fig. 2 The synthesized reflectivity (color shaded) and analyzed horizontal wind fields (vectors), and vertical vorticity (black contours) at 3 km AGL at (a) 14:00, (b) 14:20, (c) 14:45, (d) 14:50, (e) 14:55, and (f) 15:00 CST, 20 May 2013 near Moore, Oklahoma. Maroon line denotes location of cross-sections for vertical slices in Fig. 3

了剧烈的灾害性天气事件，是美国历史上死亡人数最多，损失最惨重的天气事件之一（图5）。总共有292个龙卷报告，大约造成了60亿美元的经济损失，348个人丧失生命。其中阿拉巴马州的损失最严重，4个龙卷

被定性为5级（龙卷所能够造成破坏的最高级别）。仅在这个州就有238人死于这些龙卷造成的破坏。在该灾害事件发生的过程中，实时分析系统虽然在运行，但由于太多的超级单体，分析区域只覆盖了其中

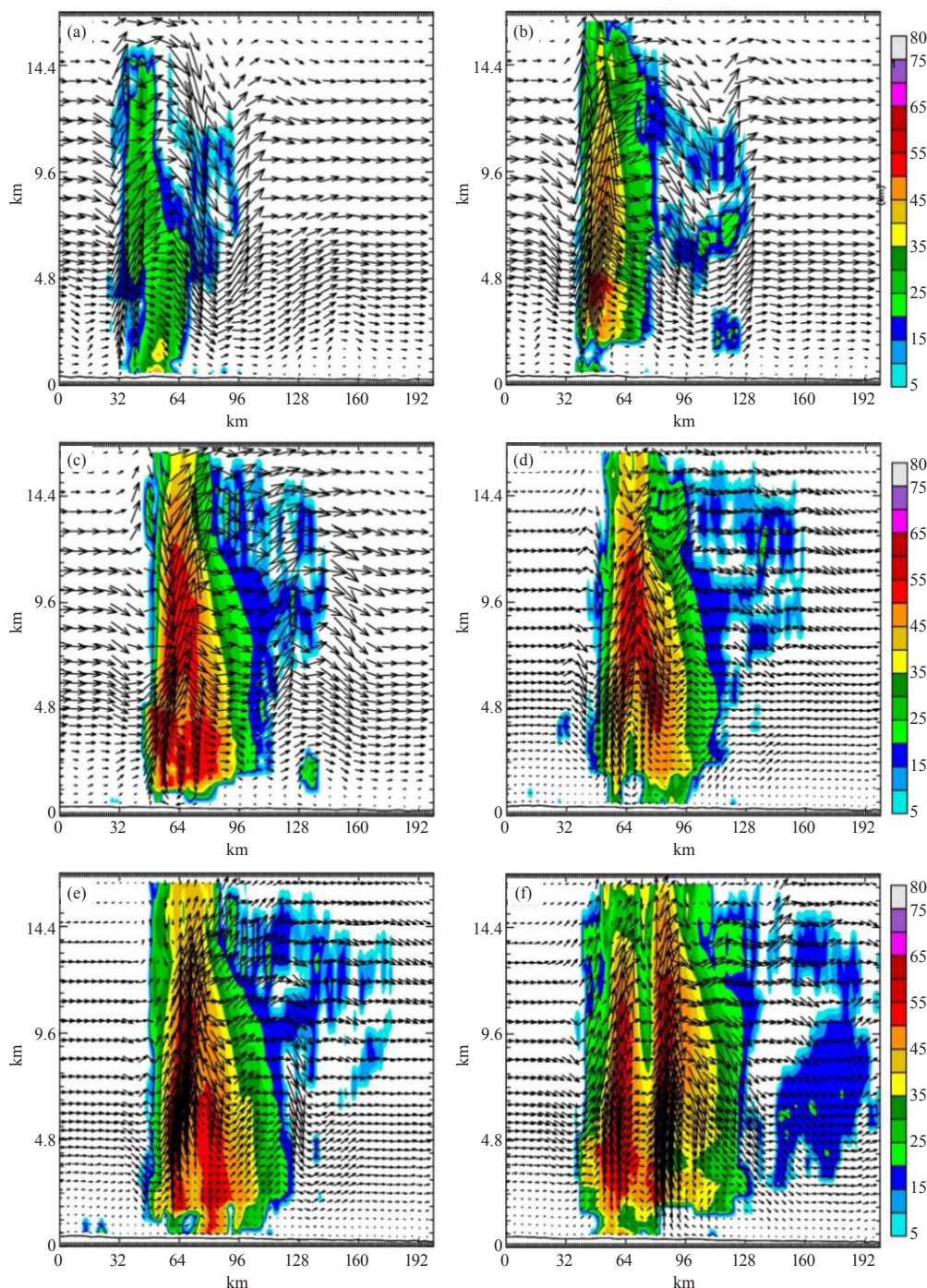


图3 图例说明同图2，是图2中相应位置的垂直剖面图

Fig. 3 Wind vectors and reflectivity (color shaded) through a vertical slice in Fig.2

的一小部分。模式格点数为 400×300 ，水平格距为1 km，垂直方向仍为不等距的31层。分析的中心位于 $(33.9^\circ\text{N}, 86.4^\circ\text{W})$ ，大约在伯明翰市西北80 km的地方。在这个分析区域，一共有7部WSR-88D的雷达资料被应用在分析中。分析区间是从当地时间17:00—18:30。图6显示了这段时间超级单体群从西南到东北方向移动。在分析区域中每个超级单体

都可能成为一个移动的“小炸弹”，产生龙卷，袭击沿路的建筑及其他目标。选择对其中一个超级单体在18时的风场进行较为详细的分析（图6中的黑色方框）。这个超级单体产生了级别为4级的龙卷，袭击了阿拉巴马州的多拉市（Dora）。在这个时刻，龙卷已经产生。图7a显示离地面1.5 km高度上的风场环流叠加在反射率的钩状回波上。在中层5 km高度上形

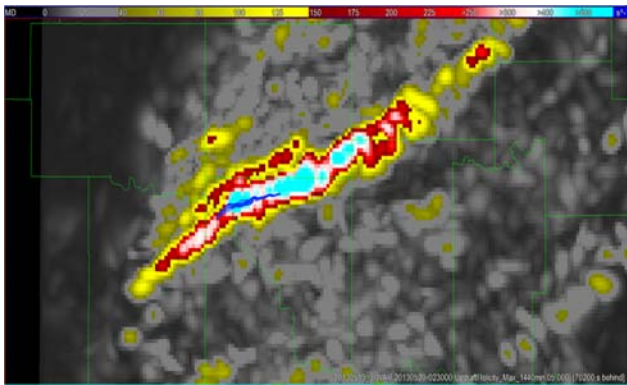


图4 由三维变分分析得到的俄克拉荷马州穆尔市地面到3 km的当地时间14:00—17:00的垂直涡旋度 (Helicity) (图中深蓝线是被龙卷破坏的轨迹图)

Fig. 4 3DVAR 0–3 km MSL updraft helicity accumulated over the period from 14:00 to 17:00 CST on 20 May 2013 in Central Oklahoma. The dark blue lines indicate tornado damage path as determined by the National Weather Service Forecast Office at Norman, Oklahoma



图5 2011年4月27日强龙卷袭击后的阿拉巴马州住宅区
Fig. 5 Selected images of tornado damage area in Alabama on 27 April 2011

成直径为8~10 km的闭合环流 (图7b), 在较高层 (10 km高度上) 风场的形势是伴随着旋转的向下风方向的辐散。在垂直剖面上存在着大的上升运动区, 与强反射率区域重合。最大上升速度达到20 m/s (图7d)。图8显示无论在低层、中层还是高层, 暴雨区域的强垂直涡度区和强垂直速度区相重合。表明在这种产生了龙卷的超级单体中存在着极强的与旋转相伴随的上升运动。但在垂直方向上最大涡度中心和最强上升中心不重合, 前者所在层次低于后者。在很多其他产生龙卷的超级单体的分析中也发现了类似现象。另外, 在风暴的上层存在重力波从风暴中心向风暴的下风方向的传播。把从三维变分分析得到的每个格点垂直方向上最大涡度和最大垂直速度做成一个风暴移动轨迹显示在图9中。在分析中得到的对应于超级单体的垂直涡

度中心和垂直速度中心的移动与美国天气服务局暴雨中心得到的龙卷的破坏痕迹相重合 (图10)。

2.3 2010年一个在得克萨斯州产生龙卷的超级单体

2010年4月20日, 一个产生了龙卷的超级单体袭击了得克萨斯州西北部区域, 这一区域又被称为得州刀把区。这个超级单体生成于当地时间17时, 终止于当地时间21时, 生命期大约为4 h。在这个超级单体的生命期内有2个龙卷生成, 美国气象局暴雨预报中心事后也有收集到关于冰雹和强阵风的报告 (图11), 幸运的是并无人员伤亡。这个风暴附近的3个WSR-88D的雷达KAMA、KLBB和KFDX实时观测到了这个风暴的演变。

这个超级单体是在得州和新墨西哥州边界形成的。在形成的最初两个小时内, 它的风场旋转不太强。但到当地时间接近19时, 风暴中的中尺度气旋突然加强。19:04, 第一个较弱龙卷形成, 之后风暴继续发展和加强。实时分析系统“跟踪了”这个风暴的演变。分析得到的水平风场、垂直涡度和反射率都表明风暴从19:30—20:00发展到顶峰 (图12)。在这半小时内, 地面以上3 km高度上的最大垂直涡度一直维持在 0.01 s^{-1} 左右。当地时间19:45和19:50, 由垂直涡度表征的中尺度气旋在垂直方向上延伸达到了10 km, 最强的涡度中心和强反射率区域相重合 (图13)。在风暴中心地面上空4 km处存在一个弱回波区和较强的低层入流区 (图13a、13c)。第二个龙卷于19:47生成 (NOAA暴雨中心的报告, 图11a)。从19:35到20:00的反射率演变可以看到勾状云逐渐锢囚或闭合的一个过程 (图14a~14f)。第二个龙卷刚好是在这个锢囚过程中形成的。在这个过程中, 这个超级单体也降下了很多冰雹。

2.4 2010年发生在湖南的一场大暴雨过程

北京时间2010年5月6日00:00—06:00, 湖南省中南部怀化、娄底等6个地区出现暴雨, 其中7个县级市出现大暴雨, 日最大降水出现在娄底新化为147.8 mm; 据区域气象观测站资料, 153乡镇自动气象站出现暴雨, 77乡镇自动气象站出现大暴雨。本次降水特点为突发性强、短时雨强大、强降水区呈狭长带状分布。此次过程造成娄底、怀化、长沙等8个市 (州) 27个县 (市、区) 336个乡镇272.35万人受灾, 因灾死亡11人, 失踪1人, 紧急转移人口6.01万人, 倒塌房屋9944间, 直接经济损失14.53亿元。

鉴于此次暴雨过程从6日当地时间02:00开始加强, 至08:00减弱, 因此主要分析这个时段的雷达资料。该时段的降水情况如图15显示。对湖南境内的

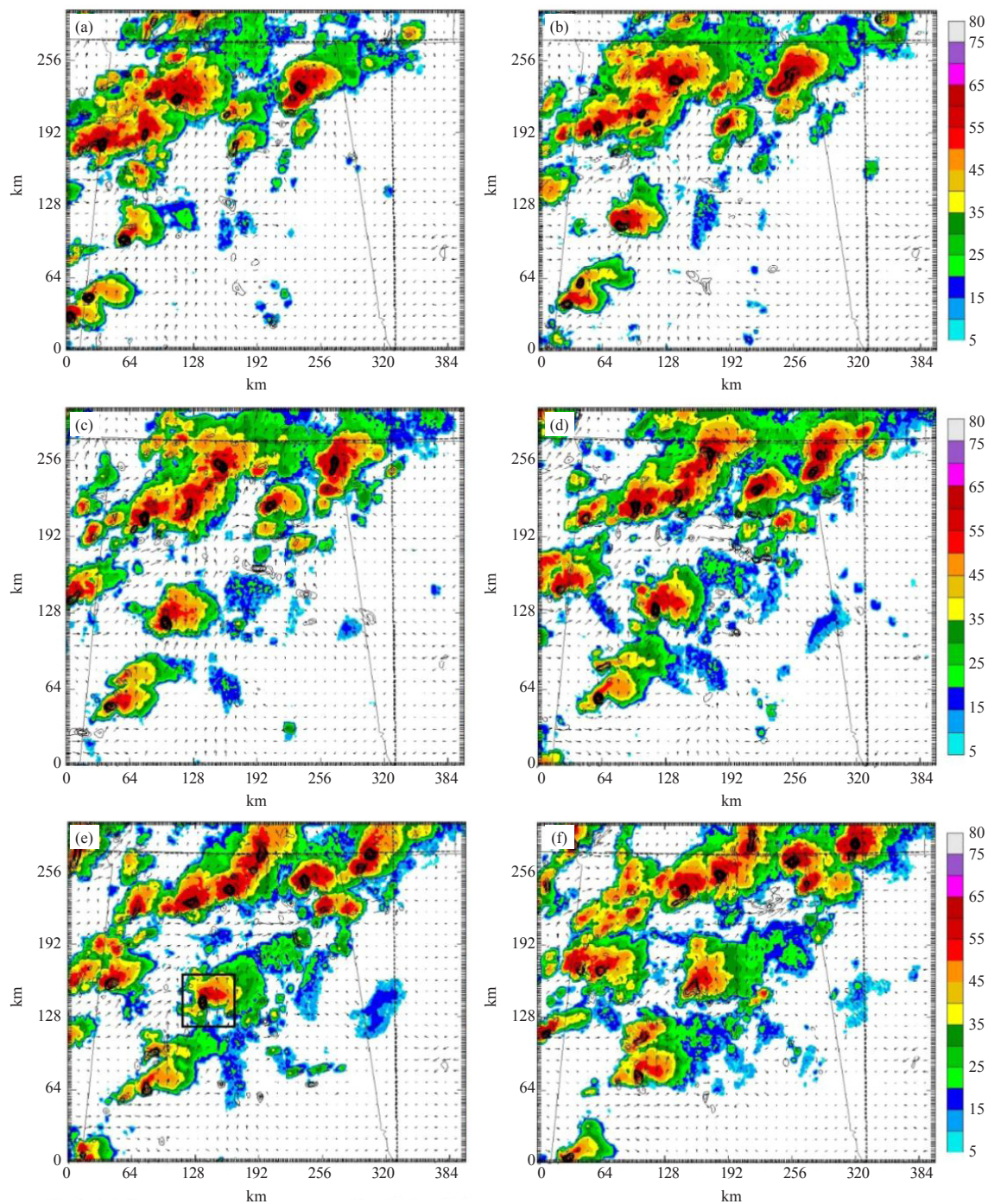


图6 阿拉巴马州在地面以上3 km的多部雷达合成的反射率（彩色阴影区）、水平风场（风矢量）和垂直涡度（黑色等值线）（图6e中的黑色小框是图7和图8的分析区域）

（a）当地时间17: 00, （b）17: 15, （c）17: 30, （d）17: 45, （e）18: 00, （f）18: 15

Fig. 6 The synthesized reflectivity (color shaded) and analyzed horizontal wind fields (vectors), and vertical vorticity (black contours) at 3 km AGL, at (a) 17:00, (b) 17:15, (c) 17:30, (d) 17:45, (e) 18:00, and (f) 18:15 CST, 27 April 2011 near North Alabama and nearby area. The small box in Fig. 6e is the domain shown in Fig. 7 and Fig. 8

两部多普勒雷达资料进行了三维变分分析，图16显示的是2010年5月6日暴雨过程的分析区域和雷达位置，这两部雷达分别是位于长沙的CINRAD/SA雷达和位于常德的CINRAD/SB雷达。同化的水平分辨率是

1 km，平均垂直分辨率为500 m。模式水平格点数为 403×403 ，垂直层数为25。

从同化后雷达回波和风场的图中可以看出(图17)，当地时间6日03时，在湖南中部地区出现从常德南部

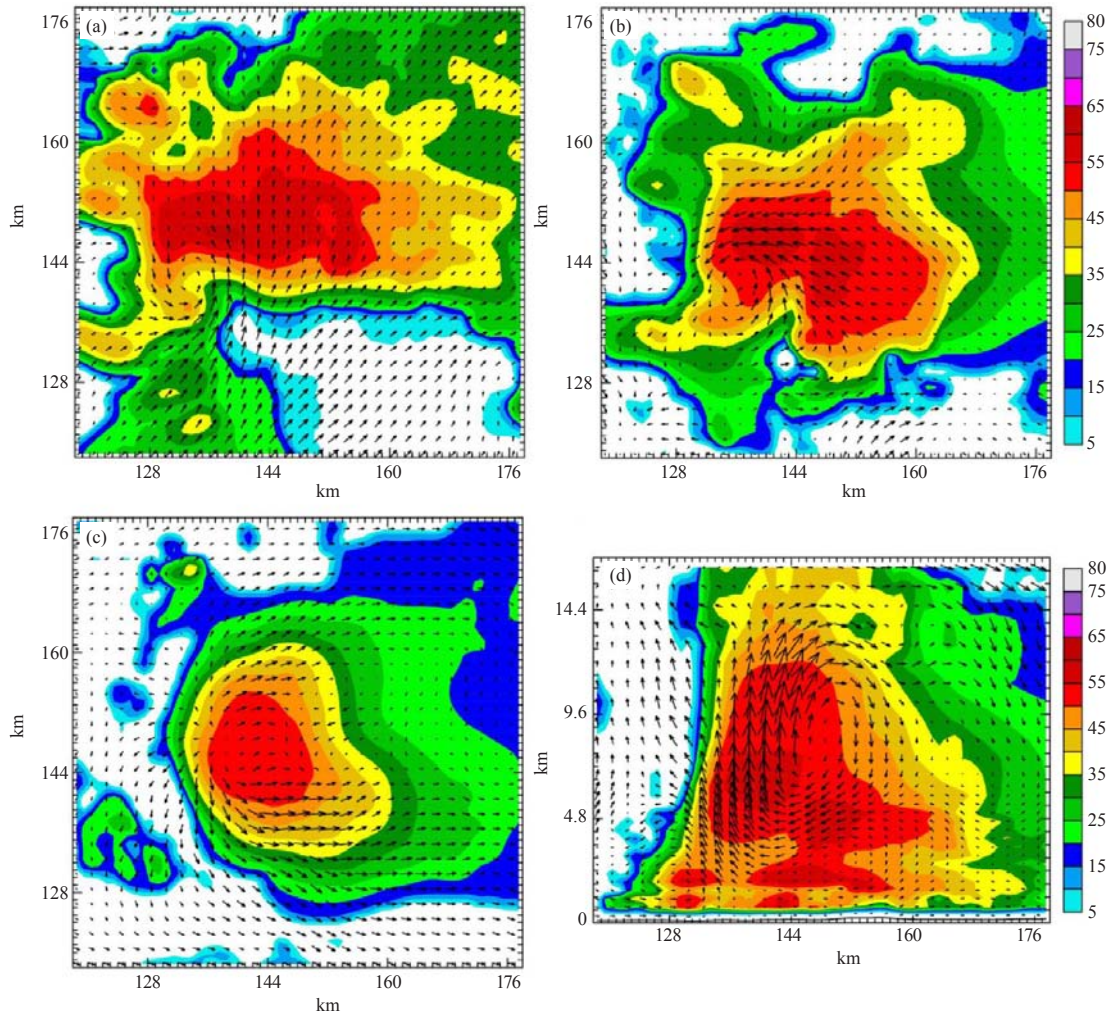


图7 从图6中放大的阿拉巴马州多拉市在地面以上的多部雷达合成的反射率（彩色阴影区，单位：dBZ）和水平风场（风矢量，单位：m/s）

（a）地面以上1.5 km，（b）地面以上5 km，（c）地面以上10 km，（d）从y=140 km的垂直剖面图

Fig. 7 The synthesized reflectivity (color shaded, unit: dBZ) and horizontal wind fields (vectors, unit: m/s) which were zoomed in from the box in Fig. 6e, at (a) 1.5 km AGL, (b) 5 km AGL, (c) 10 km AGL, (d) vertical profile at y=140 km, on 27 April 2011 near Cordova, Alabama

到益阳西南部和从湘西自治州东南部到怀化中东部两条回波带与娄底—湘潭中部—株洲西北部回波带汇合，呈“人”字型回波带（图17a）；04：00时回波北扩，强回波范围明显增大，>45 dBZ的回波连成线状，此时反射率因子达到最强，强回波仍然稳定在湘中一线；05：00—06：00时，回波持续北扩，同时在06：00衡阳北部地区又生成了新的东西向的回波带，但回波强度明显减弱（图17d）。07：00，湘中偏北位置的回波东移减弱，衡阳北部的回波仍然持续（图17e）；6日08：00后回波逐渐减弱（图17f）。

多普勒雷达径向速度无法直接反映风场信息，而同化雷达资料后的风场更为直观，并且包含更多中尺度信息：03：00出现了一个呈西北—东南向的弱辐合区，这预示着将有一个较强的中尺度对流系统发展

（图17a）。04：00这个辐合区更加明显，同时，在湘中强回波带对应的区域，风的流线有明显的气旋性弯曲且有风速上的辐合，为强降水的发展提供了有利的动力条件（图17b）。

需要说明的是，目前中国天气雷达主要是从美国引进并国产化的新一代多普勒雷达，因此从类型上来说与美国主力雷达系统没有太大差异。并且WRF，ARPS等模式都能直接处理国内的雷达资料。但国内雷达数据质量还不够好。造成质量问题的原因很多，首先在客观上来说，中国地形较为复杂，有些雷达选址不当就会导致挡角影响明显，往往会出现底层几个仰角没有有效观测数据。比如湖南省怀化雷达的挡角问题就比较明显。其次，雷达的生产工艺及安装后的系统参数定标不当，也会影响雷达数据质量，比如杂

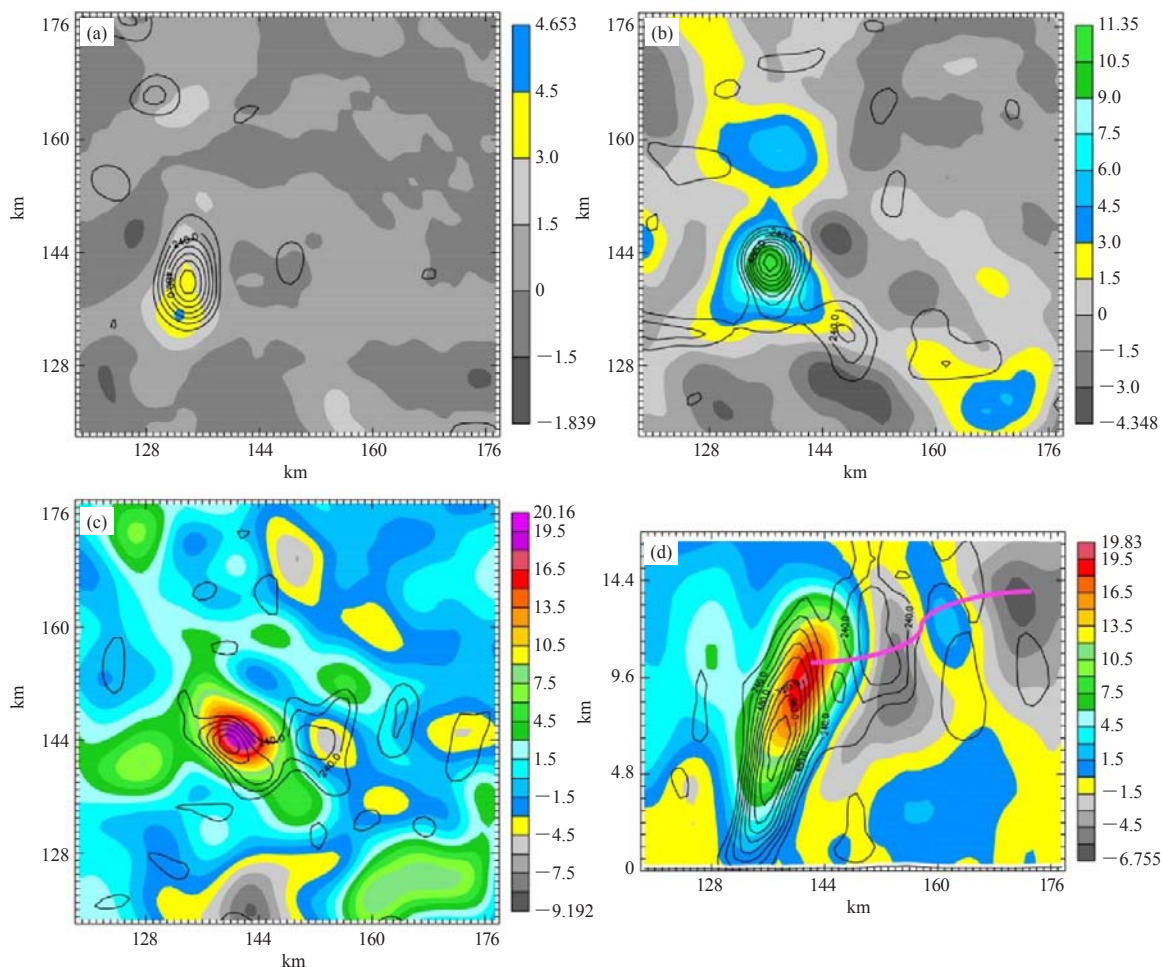


图8 图例说明同图7，图中彩色阴影区为垂直速度，黑色等值线为垂直涡度（粉色线表明重力波传播的位置）

Fig. 8 As same as in Fig. 7, color shaded is for vertical velocity and contours are for vertical vorticity (pink curve indicates the propagation of gravity waves)

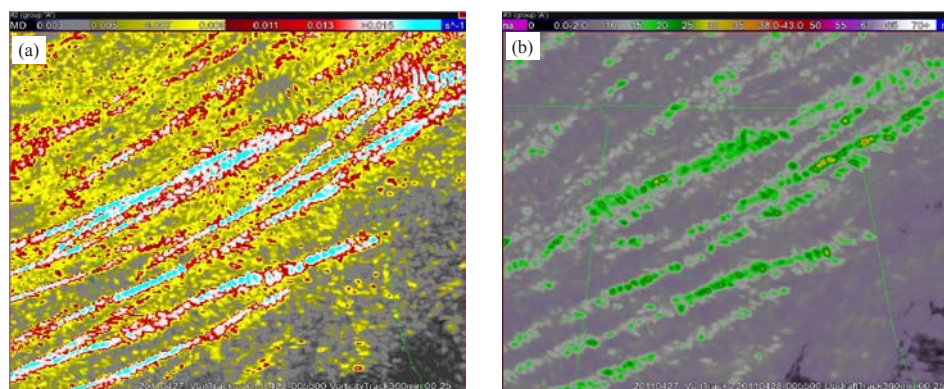


图9 阿拉巴马州中北部及其附近区域，由三维变分分析得到的垂直涡度（a）和垂直速度（b）

Fig. 9 The composite vertical vorticity and vertical velocity tracks derived from 3DVAR analyses at North and Central Alabama and nearby areas

波偏多，系统显示不清晰，有时对同一系统在两个相邻雷达的回波强度或径向速度有明显不同。由于国外雷达数据质量相对较好，因此国外的数值模式对国内的雷达数据往往水土不服，同化结果中，天气系统显

示不够清晰，杂波偏多，影响了同化后的预报效果，也不利于天气系统的分析。因此，同化国内雷达数据时要特别加强雷达质量控制。这些也是今后需要研究的课题。另外做的研究例子还不是很多，将来也应做

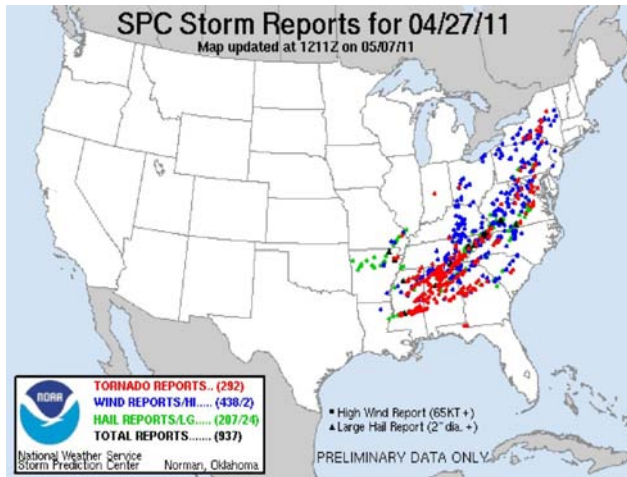


图10 2011年4月27日美国东南部的几个州发生的龙卷、冰雹和大风实况报告

Fig. 10 The storm report for tornadoes (red), hails (green) and damaging winds (blue) in southeastern U.S. on 27 April 2011, from NOAA/storm prediction center

些关于中国龙卷的例子。

3 结论与展望

在过去几年中，发展了一个基于三维变分的高分辨率（1 km）和高频率（每5 min）的实时分析系统。这个系统可根据天气实况确定分析区域，实时读取分析数据，并做出分析。在过去的一些研究和应用中作者对这个系统不断地完善。在这个三维变分同化中，对代价函数的定义只包含一个背景场、雷达径向风和—个弱约束项。其中的背景误差协方差矩阵是由简单的递归滤波来实现。最近几年在变分同化的框架

内增加了对反射率的同化，同时也引进了用集合扰动场来导出背景误差协方差矩阵，和引进更多观测资料项等，以便使分析更精确稳定，同时有能力对对流尺度的数值预报模式提供初始场。

本文介绍了基于三维变分的实时分析系统。这个系统在NOAA的强灾害天气试验基地进行了准业务运行。它能根据实时天气形势确定分析区域，并利用实时雷达观测数据和数值预报产品快速做出分析。特别是能实时估计出强风暴中尺度气旋环流的强度，从而给预报员发布强天气预警提供帮助。在试验时得到很多来试验基地访问的预报员的好评。文中典型超级单体和暴雨的分析个例表明这个系统能很好地模拟超级单体的发展和较准确地提供龙卷的预警。但这个分析系统也存在很多需要改进的地方。首先分析产品仍然滞后7~8 min，所以接收数据的时间需缩短，后处理的时间也需缩短。另外这个系统对于较弱的风暴分析不是很合理，还有待提高。

这个三维变分同化系统在其他对流尺度的分析和应用研究方面也发挥了很大作用（如Gao等^[63]；Stensrud等^[42]；Xue等^[64]；Schenkman等^[26]）。例如，在美国大气遥感工程研究中心（The Engineering Research Center for Collaborative Adaptive Sensing of the Atmosphere）建立的X波段雷达网的观测区域进行的高分辨率低层风场分析和超短期的预报^[63, 65]。从2008年以来，这个系统也被应用到NOAA灾害性天气试验基地春季预报试验阶段来为高分辨率WRF预报模式的确定性和集合预报提供初值。这个试验的分析预

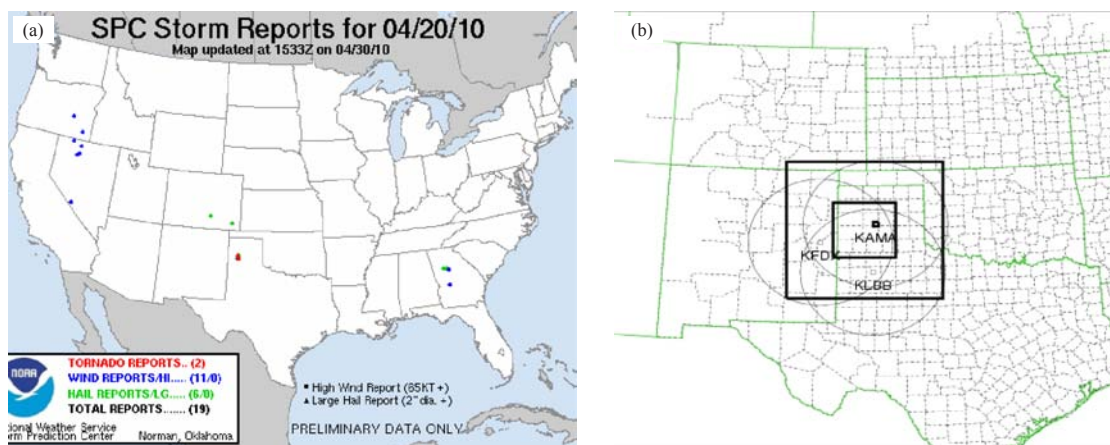


图11 (a) 2010年4月20日得克萨斯州刀把区的龙卷和冰雹实况报告；(b) 最内黑框为分析区域（200 km × 200 km）（外黑框用来确定所用雷达数目（500 × 500 km）；有3个WSD-88D雷达（代码分别是：KAMA、KFDX 和KLBB）被分析采用（美国气象学会提供））

Fig. 11 (a) Reports of the tornadic storm event in Texas Panhandle on 20 April 2010; (b) The 3 radars of WSD-88D: the KAMA, KFDX and KLBB (in black box of 500 × 500 km) used for analysis, and the analysis area (internal 200 km × 200 km) (courtesy of the American Meteorology Society)

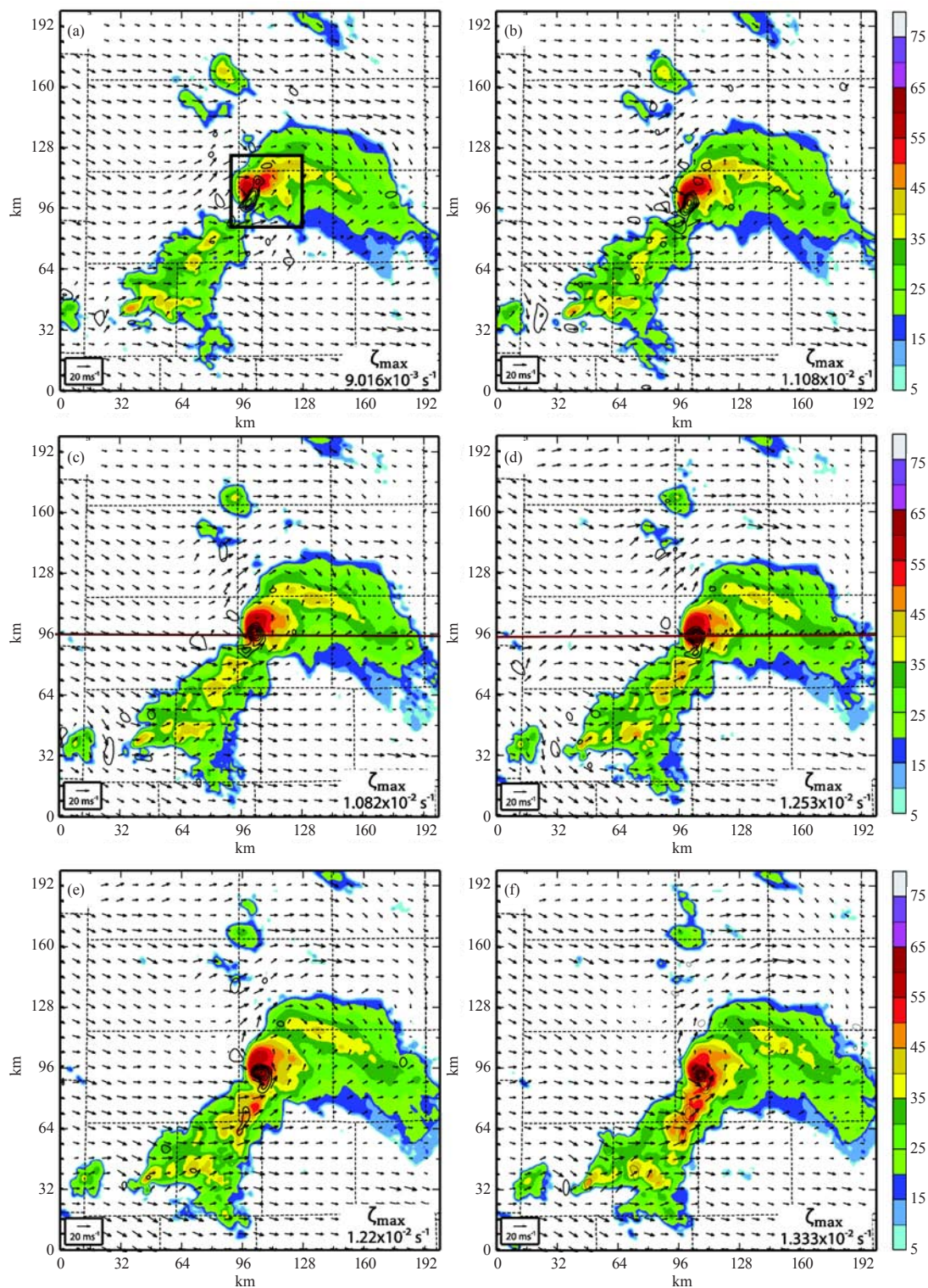


图12 2010年4月20日分析得到的得克萨斯州刀把区域在地面以上3 km的多部雷达合成的反射率（彩色阴影区）、水平风场（风矢量）和垂直涡度（黑色等值线）

（a）19: 35, （b）19: 40, （c）19: 45, （d）19: 50, （e）19: 55, （f）20: 00（以上均为当地时间，紫色实线表明图13中垂直剖面图的位置；图12a中小框为图14的分析区域（美国气象学会提供））

Fig. 12 The synthesized reflectivity (color shaded, dBZ), horizontal wind fields (vectors, m/s), and vertical vorticity (contour interval, $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) at 3 km AGL observed by 88D radars shown in Fig. 6b, at (a) 19:35, (b) 19:40, (c) 19:45, (d) 19:50, (e) 19:55, and (f) 20:00 CST, 20 April 2010 near Umbarger, Texas. Maroon line denotes location of cross-sections in Fig. 13.

Black box in Fig. 12a is the zoom-in area for Fig. 14 (courtesy of the American Meteorology Society)

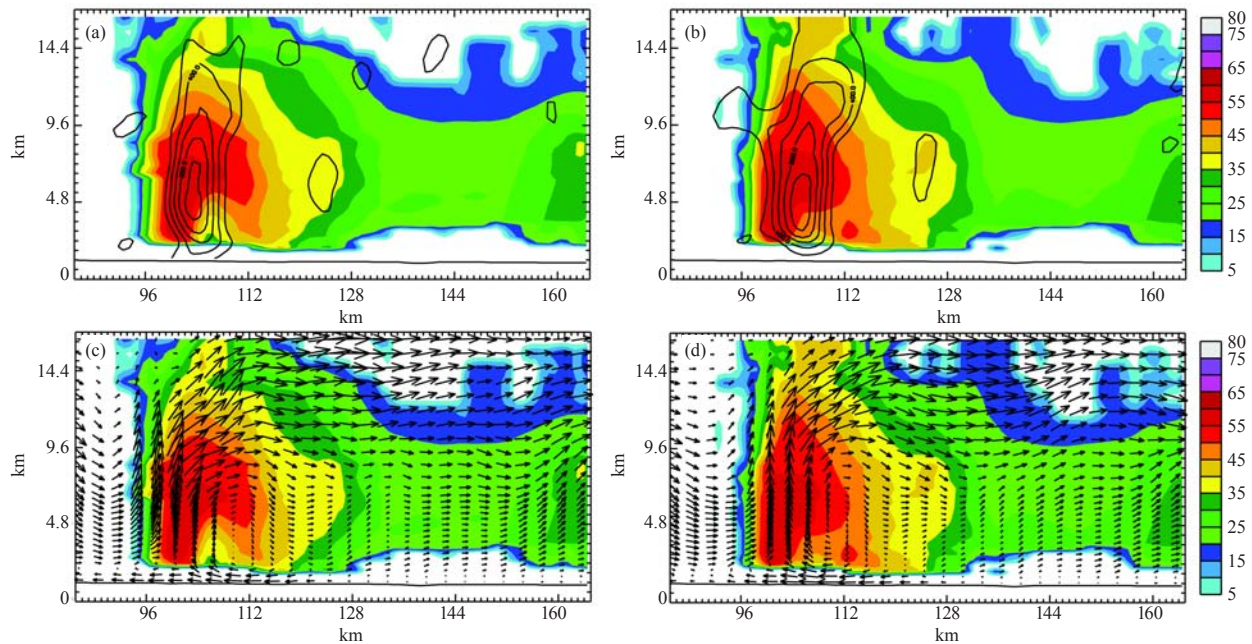


图13 图12中的两个时次的垂直剖面图

(a) 和 (b) 为垂直涡度 (黑色等值线) 叠加于反射率; (c) 和 (d) 为风矢量叠加于反射率 (美国气象学会提供)

Fig. 13 Vertical vorticity (black contours in a and b), wind vectors (in c and d), and reflectivity (color shaded) along a vertical slice indicated in Fig. 12, at 19:45 CST (left panel), and 19:50 CST (right panel), on 20 April 2010 near Umbarger, Texas. Between these two time levels, a tornado touched down (courtesy of the American Meteorology Society)

报区域覆盖全美大陆地区, 用到几乎所有WSR-88D雷达网提供的数据^[64, 66]。这个春季试验主要是为了用计算机和数值模式提高对灾害性强风暴天气的预报能力, 从而对NOAA暴雨预报中心的业务提供支撑。

但三维变分系统在理论上不是最优的方法, 存在着很多理论上的缺陷。例如不能引入观测资料的时间分布信息, 背景误差协方差矩阵不能随天气形势演变等。由于这些缺陷, 不少对流尺度的资料同化和预报的研究工作中也探索了运用集合卡尔曼滤波和四维变分同化的方法。但是这些方法各有优缺点^[67-68]。综合考虑各种因素, 例如现阶段对流尺度, 或对流尺度数值模式的准确性, 预报又必须及时发布 (时效性), 仍然认为用改进的三维变分同化方法对高分辨率数值预报提供初值仍然是一个方便、高效和实用的选择。首先可以加入一些平衡约束来使分析变量之间保持平衡, 同时也可把集合预报的信息引入到三维变分系统用来改进系统的误差协方差矩阵, 使之随流型的改变而变。Loren^[67]首先提出了将变分同化和集合卡尔曼滤波相结合的方法。在这个方法中, 变分同化系统可以是三维变分同化, 也可以是四维变分同化。

在最近几年出现了大量的混同化方面的研究, 大部分研究集中在对大尺度和中尺度天气的资料同化及数值预报方面^[9, 69-75]。对对流尺度的研究相对较少。

Gao等^[76]在他们的研究中证明混合三维变分和集合卡尔曼滤波方法在对流尺度的数值预报也很有用。把从集合预报中估计的背景误差协方差矩阵用在三维变分同化中可以有效地提高雷达资料同化的精度, 甚至在集合数量不太大的情况下也是如此。用理想数据的数值试验表明这个方法优于三维变分的同化方法。但在这个方法中必须同时使用三维变分和集合卡尔曼滤波。因为雷达资料分辨率高, 资料量巨大, 使得计算量巨大, 特别是对高分辨率的对流尺度的数值模式。为减少计算量, 同时利用变分和集合卡尔曼方法的优点, Gao等^[77]提出了采用集合变分同化的方法把雷达资料同化到对流尺度的数值模式中。集合变分同化的概念和方法首先在法国气象局和欧州中期数值预报中心使用^[78-79]。在这里Gao等^[77]利用增加alpha控制变量的方法^[67]来计算集合误差协方差矩阵。如果集合变分资料同化的核心框架用的是四维变分同化, 那么这个方法计算量也会很大。但是Gao等采用的是计算效率较高的三维变分同化方法, 同时这种方法不需运行集合卡尔曼滤波, 所以此方法在集合数量不是太大的情况下计算代价较小, 容易并行化。这种方法的优点是能够应用从集合预报中导出随时间和流型而变的集合误差背景场协方差矩阵, 所以较适用于对流尺度的雷达资料同化。现在作者正在集中精力调试这些方案,

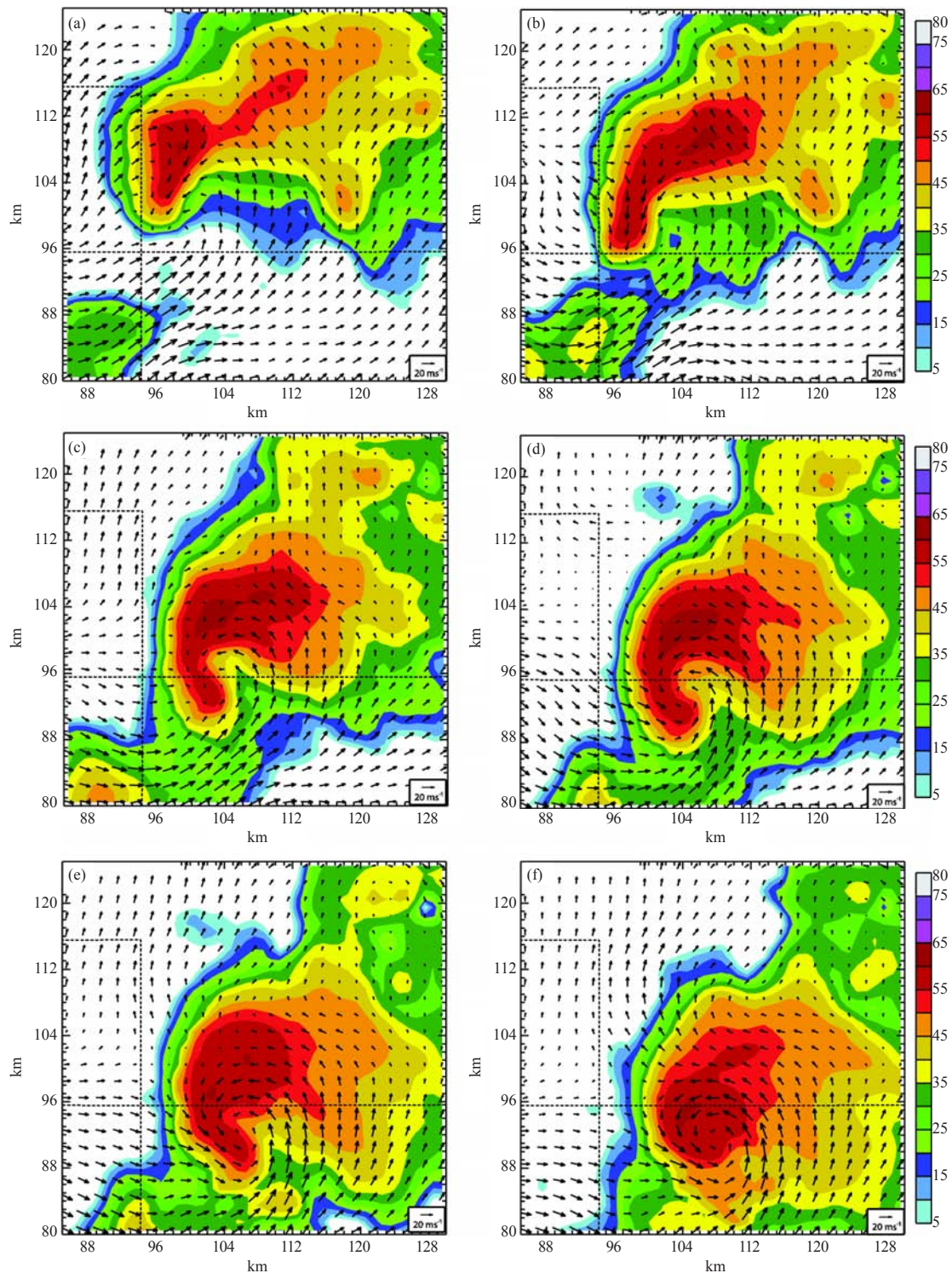


图14 图例说明同图12, 但分析区域为图12a中的被放大的黑边小框区域 (美国气象学会提供)

Fig. 14 As same as in Fig 12, but the analysis area is for the zoom-in area in Fig. 12a (courtesy of the American Meteorology Society)

希望将来能有效地应用到NOAA的灾害性天气试验基地的短期天气预报试验中, 能对基于这些预报的强风暴预警提供支撑。

说明和致谢: 本文有几位作者在过去几年中在俄

克拉荷马大学作访问学者时参与了此软件的研究与开发, 包括湖南省气象台傅承浩、唐杰、周长青, 以及国家气象中心庄照荣等。在研究过程中曾得到俄克拉荷马大学超级计算中心HenryNeeman博士和他的团队

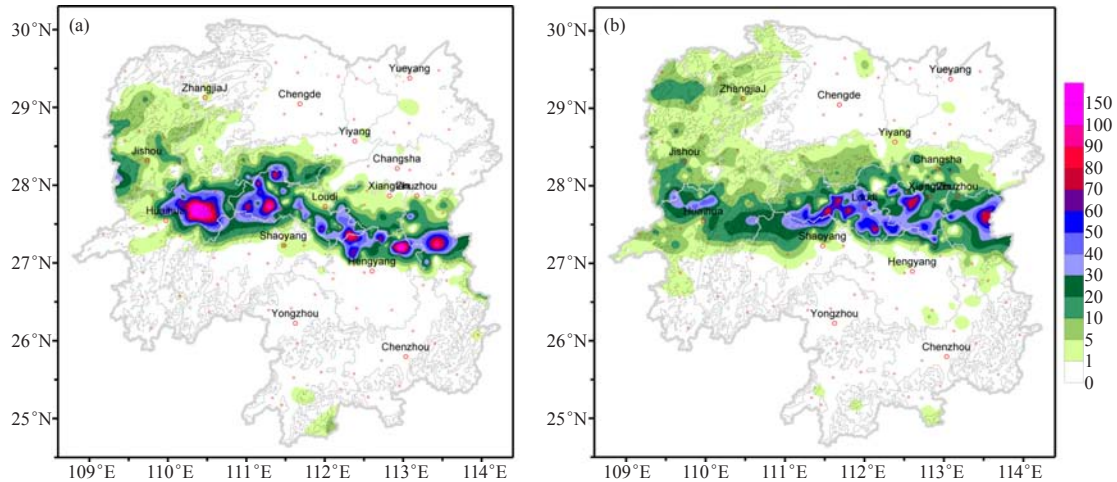


图15 2010年5月6日湖南省自动雨量站逐小时累积雨量图

(a) 02: 00—05: 00, (b) 05: 00—08: 00

Fig. 15 Precipitation observed by the surface rain gauge

(a) for 02:00 – 05:00 BT, (b) for 05:00 – 08:00 BT on 6 May 2010

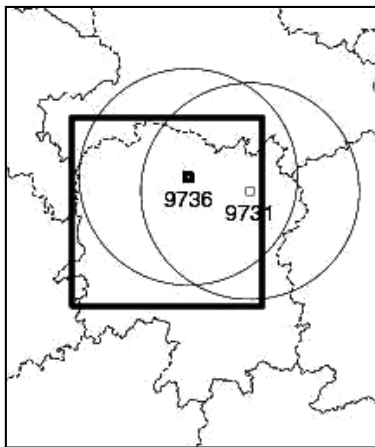


图16 2010年5月6日湖南暴雨过程的分析区域和雷达位置
(内黑框为分析区域)

Fig. 16 Positions of two radars (9731, 9736) and the analysis domain for Hunan heavy rain event on 6 May 2010 (The internal domain is the analysis domain in Hunan Province)

在计算机资源及应用方面的大力帮助。在此一并表示感谢!

参考文献

- [1] Lewis J, Derber J. The use of adjoint equations to solve a variational adjustment problem with advective constraints. *Tellus*, 1985, 37A: 307-322.
- [2] Le Dimet F, Talagrand O. Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations: theoretical aspects. *Tellus*, 1986, 38: 97-110.
- [3] Talagrand O, Courtier P. Variational assimilation of meteorological observations with adjoint vorticity equation. I: theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1987, 113: 1311-1328.
- [4] Thacker C, Long R. Fitting dynamics to data. *Journal of Geophysical Research*, 1988, 93: 1227-1240.
- [5] Daley R. *Atmospheric data analysis*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991: 457.
- [6] Sun J, Crook N A. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part I: model development and simulated data experiments. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1997, 54: 1642-1661.
- [7] Rabier F, Järvinen H, et al. The ECMWF operational implementation of 4D variational assimilation. Part I: experimental results with simplified physics. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2000, 126: 1143-1170.
- [8] Barker D, Huang W, Guo Y, et al. A three-dimensional (3DVAR) data assimilation system for use with MM5: implementation and initial results. *Monthly Weather Review*, 2004, 132: 897-914.
- [9] Barker D, Huang X, et al. The Weather research and forecasting model's community variational/ensemble data assimilation system: WRFDA. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012: 93, 831-843.
- [10] Xiao Q, Kuo Y H, Sun J, et al. Assimilation of Doppler radar observations with a regional 3DVAR system: impact of Doppler velocities on forecasts of a heavy rainfall case. *Journal of Applied Meteorology*, 2005, 44: 768-788.
- [11] Lewis J, Lakshminarayanan S, Dhall S. *Dynamic data assimilation: a least squares approach*. Cambridge University Press, 2006: 654.
- [12] Sun J, Flicker D, Lilly D. Recovery of three-dimensional wind and temperature fields from simulated Doppler radar data. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1991, 48: 876-890.
- [13] Xu Q, Qiu C. Simple adjoint methods for single-Doppler wind analysis with a strong constraint of mass conservation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1994, 11: 289-298.
- [14] Xu Q, Qiu C. Adjoint-method retrievals of low-altitude wind fields from single-Doppler reflectivity and radial-wind. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1995, 12: 1111-1119.
- [15] Xu Q, Gu H, Yang S. Simple adjoint method for three-dimensional wind retrievals from single-Doppler radar. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2001, 127: 1053-1067.
- [16] Qiu C, Xu Q. Least Squares Retrieval of Microburst Winds from Single-Doppler radar data. *Monthly Weather Review*, 1996, 124: 1132-1144.
- [17] Sun, J, Crook N A. Real-time low-level wind and temperature analysis using single WSR-88D data. *Weather and Forecasting*, 2001, 16: 117-132.
- [18] Gao J, Xue M, et al. A variational method for the analysis of three-dimensional wind fields from two Doppler radars. *Monthly*

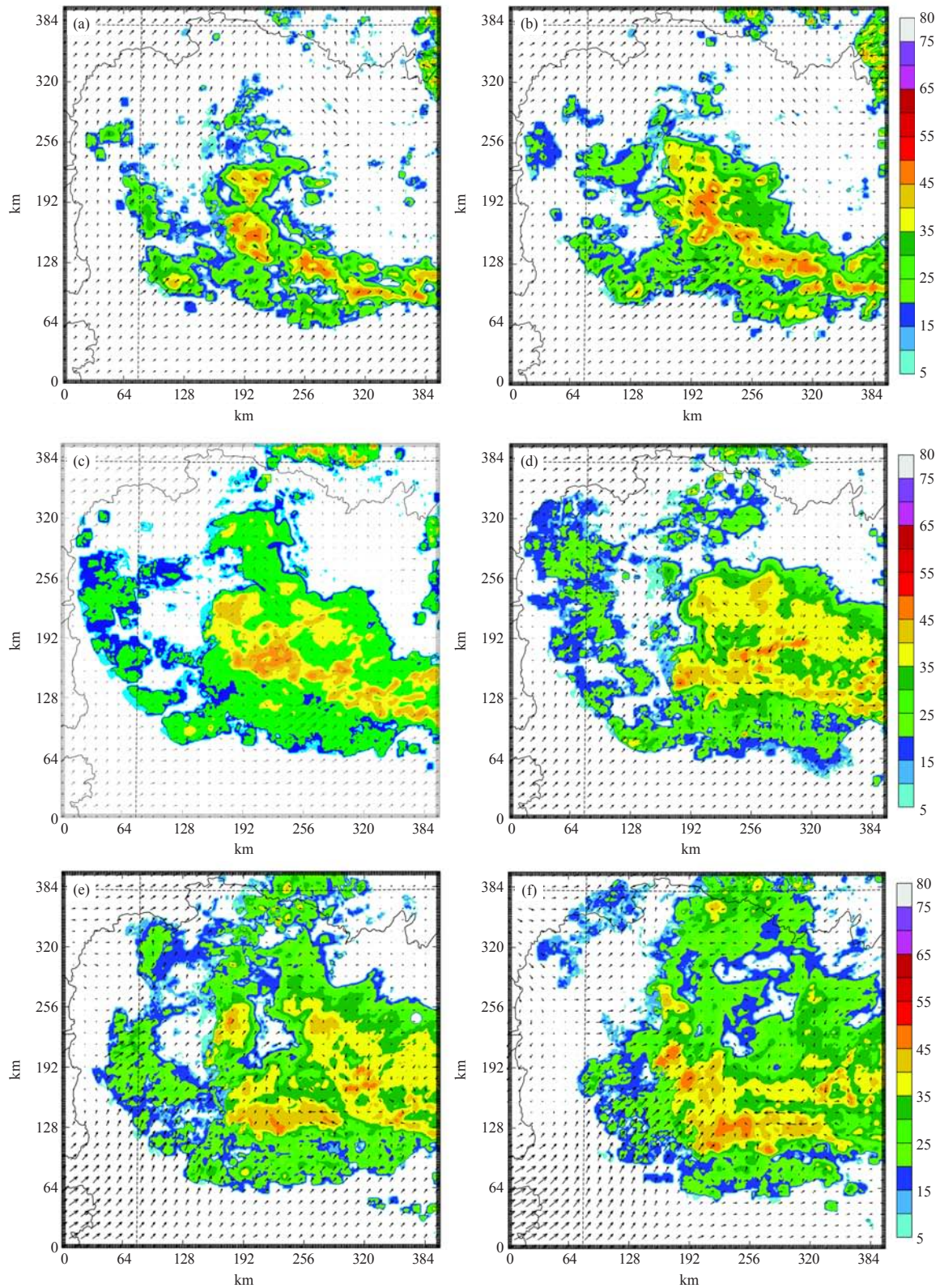


图17 2010年5月6日同化得到的3 km高度上的雷达回波和风场叠加

(a) 03: 00, (b) 04: 00, (c) 05: 00, (d) 06: 00, (e) 07: 00, (f) 08: 00

Fig. 17 The analyzed $u-v$ wind vector and reflectivity (colored) at $z=3$ km AGL for a local heavy rain and severe convective weather event occurred at central south of Hunan Province in China: at 03:00 (a), 04:00 (b), 05:00 (c), 06:00 (d), 07:00 (e), 08:00 (f) BT on 6 May 2010

- Weather Review, 1999, 127: 2128-2142.
- [19] Gao J, Xue M, et al. New development of a 3DVAR system for a nonhydrostatic NWP model. Preprint, 15th Conf. Numerical Weather Prediction and 19th Conf. on Weather Analysis and Forecasting, San Antonio, TX, American Meteorological Society, 2002, 339-341.
 - [20] Gao J, Xue M, et al. A three-dimensional variational data assimilation method with recursive filter for single-Doppler radar, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2004, 21: 457-469.
 - [21] Purser R J, Wu W, et al. Numerical aspects of the application of recursive filters to variational statistical analysis. Part I: Spatially homogeneous and isotropic Gaussian covariances. Monthly Weather Review, 2003, 131: 1524-1535.
 - [22] Wu W, Purser R J, Parrish D. Three-dimensional variational analysis with spatially inhomogeneous covariances. Monthly Weather Review, 2002, 130: 2905-2916.
 - [23] Hu M, Xue M, Brewster K. 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D Level-II data for the prediction of the fort worth tornadic thunderstorms. Part I: cloud analysis and its impact. Monthly Weather Review, 2006, 134: 675-698.
 - [24] Hu M, Xue M, Gao J, et al. 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D Level-II data for the prediction of the fort worth tornadic thunderstorms. Part II: impact of radial velocity analysis via 3DVAR. Monthly Weather Review, 2006, 134: 699-721.
 - [25] Gao J, Stensrud D, et al. Three-dimensional analyses of several thunderstorms observed during VORTEX2 field operations. 34th Conference on Radar Meteorology, Williamsburg, VA, 2009, Online publication.
 - [26] Schenkman A, Xue M, et al. The analysis and prediction of the 8-9 May 2007 Oklahoma tornadic mesoscale convective system by assimilating WSR-88D and CASA radar data using 3DVAR. Monthly Weather Review, 2011, 139: 224-246.
 - [27] Albers S, McGinley J, et al. The local analysis and prediction system (LAPS): analysis of clouds, precipitation and temperature. Weather and Forecasting, 1996, 11: 273-287.
 - [28] Zhang J, Carr F, Brewster K. ADAS cloud analysis. Preprints, 12th Conf on Numerical Weather Prediction, Phoenix, AZ, American Meteorological Society, 1998: 185-188.
 - [29] Xue M, Droegemeier K K, Wong V. The advanced regional prediction system (ARPS): a multiscale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. Part I: model dynamics and verification. Meteorology and Atmospheric Physics, 2000, 75: 161-193.
 - [30] Xue M, Wang D, et al. The advanced regional prediction system (ARPS), storm scale numerical weather prediction and data assimilation. Meteorology and Atmospheric Physics, 2003, 82: 139-170.
 - [31] Gao J, Ge G, et al. The relative importance of assimilating radial velocity and reflectivity data to storm-scale analysis and forecast. 23rd Conf Wea Anal Forecasting/19th Conf Num Wea Pred, Omaha, NB, American Meteorology Society, 2009, Paper 16A.3.
 - [32] Snyder C, Zhang F. Assimilation of simulated Doppler radar observations with an ensemble Kalman filter. Monthly Weather Review, 2003, 131: 1663-1677.
 - [33] Zhang F, Snyder C, Sun J. Impacts of initial estimate and observations on the convective-scale data assimilation with an ensemble Kalman filter. Monthly Weather Review, 2004, 132: 1238-1253.
 - [34] Tong M, Xue M. Ensemble Kalman filter assimilation of Doppler radar data with a compressible nonhydrostatic model: OSS experiments. Monthly Weather Review, 2005, 133: 1789-1807.
 - [35] Meng Z, Zhang F. Tests of an ensemble Kalman filter for mesoscale and regional-scale data assimilation. Part II: imperfect model experiments. Monthly Weather Review, 2007, 135: 1403-1423.
 - [36] Meng Z, Zhang F. Limited-area ensemble-based data assimilation. Monthly Weather Review, 2011, 139: 2025-2045.
 - [37] Gao J, Xue M, An efficient dual-resolution approach for ensemble data assimilation and tests with assimilated Doppler radar data. Monthly Weather Review, 2008, 136: 945-963.
 - [38] Dowell, D, Wicker L, et al. Ensemble Kalman filter assimilation of radar observations of the 8 May 2003 Oklahoma City supercell: influences of reflectivity observations on storm-scale analyses. Monthly Weather Review, 2011, 132: 1982-2005.
 - [39] Yussouf N, Mansell E R, et al. The ensemble Kalman filter analyses and forecasts of the 8 May 2003 Oklahoma city tornadic supercell storm using single- and double-moment microphysics schemes. Monthly Weather Review, 2013, 141: 3388-3412.
 - [40] Gao J, Stensrud D. Assimilation of reflectivity data in a convective-scale, cycled 3DVAR framework with hydrometeor classification. Journal of the Atmospheric Sciences, 2012, 69: 1054-1065.
 - [41] Gao J, Smith T, et al. A realtime weather-adaptive 3DVAR analysis system for severe weather detections and warnings with automatic storm positioning capability. Weather and Forecasting, 2013, 28: 727-745.
 - [42] Stensrud D, Gao J. Importance of horizontally inhomogeneous environmental initial conditions to ensemble storm-scale radar data assimilation and very short range forecasts. Monthly Weather Review, 2010, 138: 1250-1272.
 - [43] Ge G, Gao J, et al. Impacts of beam broadening and earth curvature in radar data assimilation. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2010, 27: 617-636.
 - [44] Ge G, Gao J, Xue M. Diagnostic pressure equation as a weak constraint in a storm-scale three dimensional variational radar data assimilation system. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2012, 29: 1075-1092.
 - [45] Doviak, R, Zrnic D. Doppler Radar and Weather Observations. 2nd ed. Academic Press, 1993: 562.
 - [46] Rihan F A, Collier C G, et al. Assimilation of Doppler radial winds into a 3D-Var system: errors and impact of radial velocities on the variational analysis and model forecasts. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2008, 134: 1701-1716.
 - [47] Wood V T, Brown R A. Effects of radar sampling on single-Doppler velocity signatures of mesocyclones and tornadoes. Weather and Forecasting, 1997, 12: 928-938.
 - [48] Doviak, R, Ray P, et al. Error estimation in wind fields derived from dual-Doppler radar measurement. Journal of Applied Meteorology, 1976, 15: 868-878.
 - [49] Miller L J, Sun J. Initialization and forecasting of thunderstorm: specification of radar measurement errors. Preprints, 31st Conf. on Radar Meteorology, Seattle, WA, American Meteorological Society, 2003: 146-149.
 - [50] Lin Y, Farley R D, Orville H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. Journal of Applied Meteorology, 1983, 22: 1065-1092.
 - [51] Gilmore M, Straka J, Rasmussen E. Precipitation and evolution sensitivity in simulated deep convective storms: comparisons between liquid-only and simple ice and liquid phase microphysics. Monthly Weather Review, 2004, 132: 1897-1916.
 - [52] Smith P, Myers C, Orville H. Radar reflectivity factor calculations in numerical cloud models using bulk parameterization of precipitation processes. Journal of Applied Meteorology, 1975, 14: 1156-1165.
 - [53] Sasaki Y. Some basic formalisms in numerical variational analysis. Monthly Weather Review, 1970, 98: 875-883.
 - [54] Sasaki Y. Numerical variational analysis formulated under the constraints as determined by longwave equations and a lowpass filter. Monthly Weather Review, 1970, 98: 884-898.
 - [55] Sasaki Y. Numerical variational analysis with weak constraint and application to surface analysis of severe storm gust. Monthly Weather Review, 1970, 98: 899-910.
 - [56] Courtier P, Thépaut J, et al. A strategy for operational implementation of 4D-Var, using an incremental approach. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1994, 120: 1367-1388.
 - [57] Courtier P. Dual formulation of four dimensional variational assimilation. Quarterly Journal of the Royal Meteorological

- Society, 1997, 123: 2449-2461.
- [58] Lorenc A. Iterative analysis using covariance functions and filters. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1992, 118: 569-591.
 - [59] Xie Y, Koch S E, et al. A sequential variational analysis approach for mesoscale data assimilation. Preprints, 21st Conf. on Weather Analysis and Forecasting/17th Conf on Numerical Weather Prediction, Washington, DC, American Meteorological Society, 2005, 15B.7. <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/93468.pdf>.
 - [60] Xie Y, Koch S E, et al. A Space and time multiscale analysis system: a sequential variational analysis approach. *Monthly Weather Review*, 2011, 139: 1224-1240.
 - [61] Smith T, Gao J, et al. Performance of a real-time 3DVAR analysis system in the hazardous weather testbed. *Weather and Forecasting*, 2014, 29: 63-77.
 - [62] Calhoun K, Smith T, et al. Forecaster use and evaluation of realtime 3DVAR analyses during severe thunderstorm and tornado warning operations in the hazardous weather testbed. *Weather and Forecasting*, 2014, 29: 601-613.
 - [63] Gao J, Brewster K, et al. Real-time, low-level wind analysis including CASA and WSR-88D radar data using the ARPS 3DVAR. 25th Conf Severe Local Storms, American Meteorological Society, 2010: 7B.4 (online publication).
 - [64] Xue M, Kong F, et al. CAPS realtime storm scale ensemble and high resolution forecasts for the NOAA hazardous weather testbed 2010 spring experiment. 25th Conf Severe Local Storms, American Meteorological Society, 2010: 7B.3.
 - [65] Brewster K, Thomas K, et al. A nowcasting system using full physics numerical weather prediction initialized with CASA and NEXRAD radar data. Preprints, 25th Conf Severe Local Storms, Denver, CO, American Meteorological Society, Denver, CO, 2010: 9.4.
 - [66] Kain J S, Xue M, Coniglio M C, et al. Assessing advances in the assimilation of radar data within a collaborative forecasting-research environment. *Weather and Forecasting*, 2010, 25: 1510-1521.
 - [67] Lorenc A. The potential of the ensemble Kalman filter for NWP: a comparison with 4DVar. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2003, 129: 3183-3204.
 - [68] Kalnay E, Li H, et al. 4-D-Var or ensemble Kalman filter? *Tellus*, 2007, 59: 758-773.
 - [69] Buehner M. Ensemble-derived stationary and flow-dependent background-error covariances: evaluation in a quasi-operational NWP setting. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2005, 131: 1013-1043.
 - [70] Buehner M, Houtekamer P, et al. Intercomparison of variational data assimilation and the ensemble Kalman filter for global deterministic NWP. Part I: description and single-observation experiments. *Monthly Weather Review*, 2010, 138: 1550-1566.
 - [71] Buehner M, Houtekamer P, et al. Intercomparison of variational data assimilation and the ensemble Kalman filter for global deterministic NWP. Part II: one-month experiments with real observations. *Monthly Weather Review*, 2010, 138: 1567-1586.
 - [72] Wang X, Barker D M, et al. A Hybrid ETKF-3DVAR data assimilation scheme for the WRF model. Part I: observing system simulation experiment. *Monthly Weather Review*, 2008, 136: 5116-5131.
 - [73] Wang X, Barker D M, et al. A Hybrid ETKF-3DVAR data assimilation scheme for the WRF model. Part II: real observation experiments. *Monthly Weather Review*, 2008, 136: 5116-5131.
 - [74] Wang X, Parrish D, et al. GSI 3DVar-based ensemble-variational hybrid data assimilation for NCEP global forecast system: single-resolution experiments. *Monthly Weather Review*, 2013, 141: 4098-4117.
 - [75] Zhang F, Zhang M, Poterjoy J. E3DVar: coupling an ensemble Kalman filter with three-dimensional variational data assimilation in a limited-area weather prediction model and comparison to E4DVar. *Monthly Weather Review*, 2013, 141: 900-917.
 - [76] Gao J, Stensrud D. Some observing system simulation experiments with a hybrid 3DENVAR system for storm scale radar data assimilation. *Monthly Weather Review*, 2014, 142: 3326-3346.
 - [77] Gao J, Fu C, et al. OSSEs for an Ensemble 3DVAR data assimilation system with radar observations of convective storms. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2016, 73: 2403-2426.
 - [78] Bonavita M, Isaksen L, Holm E. On the use of EDA background error variances in the ECMWF 4D-Var. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2012, 138: 1540-1559.
 - [79] Berre L, Pannekoek O, Desroziers G, et al. A variational assimilation ensemble and the spatial filtering of its error covariances: increase of sample size by local spatial averaging. *Proceedings of the ECMWF Workshop on flow-dependent aspects of data assimilation ECMWF*, 2007: 151-168.

集合资料同化方法在强雷暴天气预报中的应用

张云济 张福青

(美国宾夕法尼亚州立大学气象与大气科学系资料同化与可预报性先进技术研究中心, 宾夕法尼亚州 16802)

摘要: 对强雷暴的预报一直以来都是天气预报的重点和难点。先进的集合资料同化方法能够减小中小尺度数值天气预报的初始场中的误差, 以此提高对强雷暴天气的预报的准确程度。本文简要地介绍了集合资料同化方法的原理及其变体, 提高集合资料同化方法的分析场质量的多种方案, 不同观测平台的数据在强雷暴天气集合资料同化系统中的应用, 已经开始业务化或准业务化持续运行的一些着眼于强雷暴天气预报的集合资料同化系统, 强雷暴天气集合资料同化应用中目前面临的一些问题和未来可能的发展方向。

关键词: 资料同化, 集合卡尔曼滤波, 雷达资料, 强对流雷暴

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.03.003

A Review on the Ensemble-Based Data Assimilations for Severe Convective Storms

Zhang Yunji, Zhang Fuqing

(Center for Advanced Data Assimilation and Predictability Techniques, Department of Meteorology and Atmospheric Sciences, Pennsylvania State University, Pennsylvania 16802)

Abstract: Predicting severe convective storms has long been recognized as one of the most important aspects as well as one of the most difficult part of weather forecast. With advanced ensemble-based data assimilation techniques like ensemble Kalman filter, the uncertainties in initial conditions of storm-scale weather prediction can be significantly reduced, leading to an improved performance of severe weather forecast. This review paper will briefly introduce the concepts and variations of ensemble Kalman filter, schemes to improve filter performance at storm scales, applications of various conventional and in situ observational platforms in ensemble data assimilation, and focuses on the severe weather prediction systems as well as operational and quasi-operational storm-scale ensemble data assimilation and prediction systems, the issues and difficulties that encountered in current applications, and possible future directions.

Keywords: data assimilation, ensemble Kalman filter, radar data, severe convective storm

0 引言

对局地性的强对流天气系统的预报一直以来都是天气预报和预警的重要组成部分。一方面, 由于强雷暴天气系统会带来大风、强降水、闪电、冰雹和龙卷等灾害性天气现象并导致暴洪、滑坡和泥石流等次生灾害, 会对人类的生命和财产的安全造成巨大的威胁, 因此对强雷暴的预报一直是天气预报的重点之一; 另一方面, 由于强雷暴天气系统的时空尺度小(空间尺度约几到数十千米, 持续时间从几到几十分钟)、发展迅速(从对流出现之后通常仅数十分钟便发展成熟)、动力过程的非线性特征明显。因此对强雷暴的预报也一直是天气预报的难点之一。

最近几年, 由于2012年7月21日北京“7·21”特大

暴雨、2015年6月1日“东方之星”号客轮翻沉事故、2016年6月23日江苏盐城EF-4级龙卷等与强雷暴相关的气象灾害和灾难事故, 强雷暴的预报和预警也越来越多地受到民众的关注。然而, 目前对强对流的预报还有着比较显著的误差, 例如, 2010—2015年雷暴的6 h预报的空报率在70%左右, 漏报率在20%左右, 而相同预报时长内对短时强降水、雷暴大风和冰雹的空报率和漏报率都更高, 且不同强雷暴天气的空报率和漏报率都随着预报时长的增加而迅速增长^[1]。这一方面是由于对流性的天气系统中初始微小误差会随着湿对流过程的发展迅速增长, 使得其本性可预报性有一定的极限; 另一方面是由于目前用于强雷暴预报的数值模式中存在不可忽视的模式误差和初始场误差, 使得数值预报的结果不够准确^[2-3]。而为了减少初始场误差、更好地提高数值模式对强雷暴天气的预报水平, 通常会使用资料同化的方法对初始场进行改善。

除了早期的最优差值法(Optimum Interpolation,

收稿日期: 2017年10月17日; 修回日期: 2018年2月28日
第一作者: 张云济(1989—), Email: yuz31@psu.edu

OI)、逐步订正法(Successive Correction Method, SCM)和牛顿松弛逼近法(Nudging)以外,现在常见的资料同化方法主要有两类:一类是以变分方法为基础的变分资料同化方法,如三维变分方法(3-Dimensional Variational, 3DVar)和四维变分方法(4-Dimensional Variational, 4DVar);另一类是以蒙特卡罗法为基础的集合资料同化方法,如集合卡尔曼滤波(Ensemble Kalman Filter, EnKF)和粒子滤波(Particle Filter)^[4]。近年来也有将变分同化方法和集合同化方法相结合的混合(hybrid)资料同化方法,如集合三维变分方法(En3DVar)、集合四维变分方法(En4DVar)、四维集合变分方法(4DEnVar)等。

使用对流解析分辨率(convection-permitting resolution, 通常小于4 km^[5])对强雷暴预报的资料同化研究开始于20世纪80年代末到90年代初;由于多普勒天气雷达是唯一能够细致且高频率地对强雷暴的发生、发展和结构变化进行监测的气象观测平台,因此强雷暴资料同化研究中绝大部分都使用了雷达观测。最早期的研究工作均使用了4DVar方法,相较于3DVar方法,4DVar方法的方程和程序都更加复杂、运算量更大,但是借助切线性模式和伴随模式对时间的积分,能够通过同化雷达观测对全部的模式变量进行更新,并以此方法为基础发展出了“四维变分多普勒雷达分析系统”(4DVar Doppler Radar Analysis System, VDRAS)^[6-9]。VDRAS是一个被广泛使用的强雷暴资料同化系统;它能同化雷达反射率和径向风观测、激光雷达观测和高频率的地面观测,并生成高分辨率、高质量的分析场。有许多研究工作已经证明,VDRAS系统不仅能够改善雷暴附近边界层内的风场和热力场,还能够重建雷暴的整体三维结构^[10-11]。这一系统被很多业务预报单位和研究部门用于雷暴的短时临近预报,也被应用于西南季风试验(Southwest Monsoon Experiment, SoWMEX)等许多外场试验和诸如2000年悉尼夏季奥运会和2008年北京夏季奥运会这样的大型活动中^[12-17]。

相比之下,3DVar虽然已经被广泛地应用于全球到中尺度区域模式的常规资料同化系统之中,但是由于当时3DVar使用的背景误差协方差矩阵基于静力平衡的中大尺度天气信息生成,因此很难使用这样的3DVar系统同化雷达资料获得强雷暴尺度下的热力学结构^[18-19]。之后有研究工作专门针对雷达资料同化改进了3DVar的算法,在权重函数中额外增加了大气连续性、反射率守恒、水平平滑等约束条件,使得利用3DVar方法同化雷达观测改善强雷暴预报初始场成为了可能^[20-22]。此外,大多数模式在“冷启动”过程中

使用的初始场缺少水成物粒子,模式需要在积分开始后自行生成这些粒子(这一过程称为“起转过程”, spin-up);为了减少“起转过程”的耗时及其对正在发展的强雷暴天气的预报效果的影响,有研究设计了名为“云分析”(Cloud Analysis)的方案。这一方案首先将雷达观测的反射率与模式预报背景场相结合,反演出雨水、雪等降水粒子的含量;随后通过云微物理过程和热力学关系计算云水和云冰的含量;最后通过热力学关系、参考水的相态变化的潜热释放对温度廓线进行调整,以保证云分析方案生成的对流系统能够维持^[23]。因为这一方法使用雷达反射率观测,能够显著缩短模式起转过程,提高部分发展迅速的强雷暴天气的预报效果,与使用雷达径向风观测的3DVar同化系统相辅相成,因此也经常(和3DVar同化系统相结合)应用于强雷暴的研究和业务预报中^[24-25]。

强雷暴3DVar、4DVar雷达资料同化方法应用至今约有二十年,现在已经被广泛地用于强雷暴天气的科学研究、外场试验和业务预报之中。大量使用变分资料方法的同化研究改善了变分资料同化方法在雷暴尺度的应用,开拓了更多种类观测资料(如大气折射率观测和双偏振多普勒雷达的差分反射率 Z_{DR} 和差分传播相移 K_{DP} 观测)在强雷暴资料同化系统中的使用,增加了我们对强雷暴、龙卷等灾害天气的动力和热力过程的了解^[26-29]。除了研究工作之外,美国国家大气和海洋管理局(NOAA)的“高分辨率快速更新同化系统”(High-Resolution Rapid Refresh, HRRR; <https://rapidrefresh.noaa.gov/hrrr/>)使用水平分辨率为3 km的Weather Research and Forecasting(WRF)模式和基于3DVar的格点统计插值(Gridded Statistical Interpolation, GSI)资料同化系统,投入业务运行,用于辅助强雷暴的预报和预警至今已有十年,并已在2009年将模式区域扩大,覆盖全部美国本土;美国俄克拉荷马大学的雷暴分析预报中心(Center for Analysis and Prediction of Storms, CAPS)基于“先进区域预报系统”(Advanced Regional Prediction System, ARPS)开发的3DVar资料同化系统已经持续十余年为NOAA“灾害天气试验平台”(Hazardous Weather Testbed, HWT)的“春季试验”提供高分辨率的强雷暴分析和预报^[30-34]。

但是,变分资料同化方法有一大缺点:它所使用的背景误差协方差矩阵是各向同性的、不随天气形势演变,这可能会降低应用于变量空间梯度巨大的强雷暴天气系统时的准确性。与之相比,EnKF方法除了背景误差协方差随天气形势演变(flow-dependent)以外,还有着背景误差协方差随天气形势演变、不需

要4DVar方法中的切线性模式和伴随模式，能够提供集合预报和概率预报等诸多优势，因此受到了气象研究和业务预报领域越来越多的关注^[35]。此外与针对中尺度到天气尺度的天气系统的数值模拟和资料同化系统相比，针对强雷暴天气系统的模式水平分辨率通常较高（小于4 km），这样的对流解析（convection-permitting）分辨率能够开始以模式动力过程显式模拟对流结构，而不需要使用积云对流参数化方案；其资料同化系统所使用的数据除了地面站、探空气球等常规观测之外，往往还会使用天气雷达、气象卫星等时间或空间分辨率比常规观测高得多的遥感观测数据。因此，针对强雷暴天气系统的集合资料同化方法中也会使用一些特定的方案，以提高资料同化方法在这一应用中的准确程度。

为了提高未来我国对强雷暴预报和预警的水平，本文将对集合资料同化方法（主要是EnKF方法）在强雷暴天气分析和预报领域的应用加以介绍，以期增强气象研究、业务预报领域的从业人员对此的了解。

1 集合资料同化方法简介

1.1 集合卡尔曼滤波（EnKF）

集合卡尔曼滤波将蒙特卡罗法与卡尔曼滤波相结合，以集合预报所生成的样本协方差近似地对卡尔曼滤波中的协方差矩阵进行估计，以此避免了复杂的（对高维矩阵几乎不可行的）矩阵逆运算和对协方差矩阵进行积分的过程，使得卡尔曼滤波在高变量维度的大气数值模式中的应用成为了可能。EnKF在地球物理领域的成功应用最早出现于1994年^[36]。第一次在大气科学领域的应用出现于1998年Houtekamer等的工作，Snyder等于2003年第一次将其应用于理想化的区域模式中，Zhang等于2006年将其应用于非理想化的区域模式中^[37-39]。

对于原始的EnKF方法，其资料同化过程由以下方程完成^[38]：

$$\mathbf{x}^a = \mathbf{x}^f + \mathbf{K}(\mathbf{y}^o - \mathbf{H}\mathbf{x}^f),$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1},$$

上述式中： $\mathbf{x}^f$ 和 $\mathbf{x}^a$ 分别是某时刻数值模式的预报结果（背景场）和集合卡尔曼滤波对模式预报的更新结果（分析场）； $\mathbf{y}^o$ 是观测数据， $\mathbf{H}$ 是将背景场转换为模式对观测 $\mathbf{y}^o$ 预报结果的观测算子， $\mathbf{y}^o - \mathbf{H}\mathbf{x}^f$ 就是 $\mathbf{y}^o$ 观测对应处模式预报结果与观测之差，也被称为观测增量（increment）； $\mathbf{K}$ 是由背景误差协方差 $\mathbf{P}^f$ 和观测误差 $\mathbf{R}$ 共同决定的卡尔曼增益矩阵。因此，EnKF方法的更新过程，就是将观测增量按照一定的权重（卡尔曼增益矩阵）转换为更新向量（innovation），并将其加入背

景场中以生成分析场的过程。图1是一次集合EnKF资料同化过程的示意图。

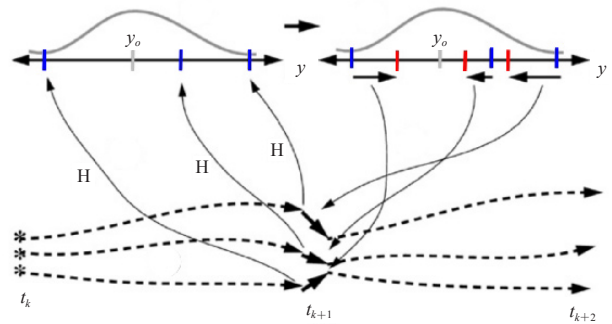


图1 集合卡尔曼滤波在 t_{k+1} 时的同化过程的示意图（ y_o 为观测数据，蓝色短竖线是集合预报提供的背景场，红色短竖线是资料同化之后各集合成员的分析场，不同蓝色短竖线和红色短竖线之间的水平箭头表示资料同化对背景场的改善^[40]）

Fig. 1 Schematic diagram of procedures of EnKF data assimilation at t_{k+1} (y_o indicates observations, blue vertical lines indicate ensemble background, red vertical lines indicate ensemble analysis after data assimilation, horizontal arrows between each pair of blue and red vertical lines indicate improvements of data assimilation^[40])

变分资料同化方法使用事先生成的、各向同性的背景误差协方差矩阵对目标函数进行最小化以获得分析场。对于3DVar方法，这意味着在不同的时间或天气背景条件下，同样的观测增量对分析结果的影响是不变的，且呈现同心圆的结构（图2a）；4DVar方法由于在目标函数中考虑了随时间的演变过程，因此能考虑一定的背景天气条件（图2b）。而EnKF资料同化与变分同化方法不同，它的背景误差协方差矩阵是随天气形势演变的（图2c），因此在中小尺度天气系统的资料同化应用中往往能够取得更加准确的分析结果。例如，在一个使用区域模式持续一个月的循环同化及预报试验中，4DVar方法分析场的预报误差几乎始终小于3DVar方法的分析场，EnKF方法分析场在36 h内的预报误差与4DVar方法相当，48~72 h的预报误差则明显小于4DVar方法和3DVar方法的分析场^[35]。

1.2 集合卡尔曼滤波的不同变体

在原始的EnKF中，观测本身被视作变量的一部分，并在同化观测之前先对观测进行扰动，以使EnKF保持一定的集合离散度^[37]。如果不对观测进行扰动，会持续性地低估分析场的误差协方差，可能导致滤波发散（filter divergence）。因为对观测进行随机扰动的这一过程，原始的EnKF通常也被称为随机（stochastic）EnKF^[43]。

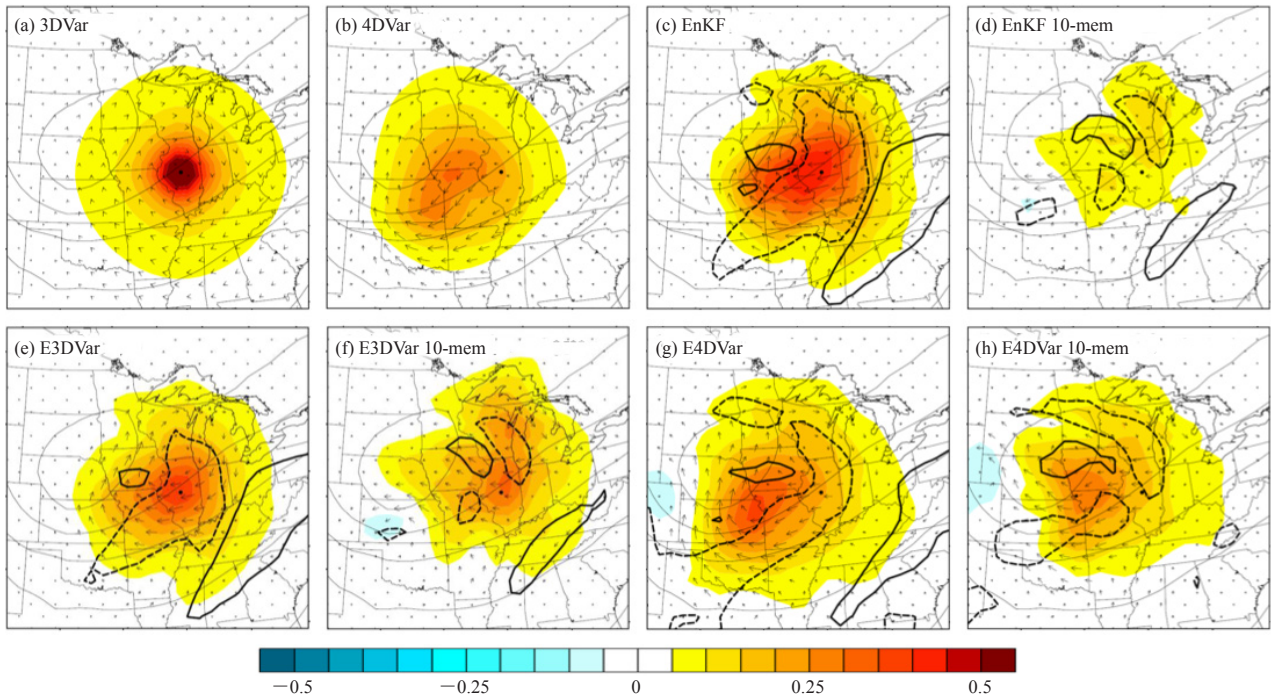


图2 使用3DVar (a), 4DVar (b), EnKF (c, d), En3DVar (e, f), En4DVar (g, h) 资料同化方法同化500 hPa高度场上观测增量为1 K的温度观测所得到的温度场(填色, 单位: K)、风场(矢量)和水汽场(粗等值线, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 实线为正, 虚线为负)更新向量

(c, e, g使用40个集成员; d, f, h使用10个集成员; 细实线为500 hPa位势高度场^[41-42])

Fig. 2 Innovations of temperature (shaded, unit: K), horizontal wind (vectors) and water vapor mixing ratio (thick black lines, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, solid lines indicate positive values and dashed lines indicate negative values) when assimilating synthetic temperature observation at 500 hPa with increment of 1 K by using 3DVar (a), 4DVar (b), EnKF (c, d), En3DVar (e, f), En4DVar (g, h) techniques (c, e, g for using 40 ensemble members, d, f, h for using 10 ensemble members, thin black lines indicate geopotential height at 500 hPa^[41-42])

如果不对观测进行扰动, 同时在其他步骤中对EnKF的方程进行订正, 这一类变体被称为确定(deterministic)EnKF, 如集合均方根滤波(Ensemble Square Root Filter, EnSRF)、集合调整卡尔曼滤波(Ensemble Adjustment Kalman Filter, EAKF)和集合变换卡尔曼滤波(Ensemble Transform Kalman Filter, ETKF)^[44-46]。例如, 这几种变体中最简单的一种——EnSRF, 通过调整卡尔曼增益矩阵, 考虑观测的不确定性, 弥补不扰动观测时对误差协方差矩阵的低估:

$$\tilde{\mathbf{K}} = \alpha \mathbf{K} = \left(1 + \sqrt{\frac{\mathbf{R}}{\mathbf{H} \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T + \mathbf{R}}} \right)^{-1} \mathbf{K}.$$

虽然EnSRF、EAKF和ETKF的分析场可能存在差异, 但是在不使用协方差局地化(covariance localization; 见1.4.1节)等方案的情况下, 这几种方法的分析场的样本误差协方差是相同的。

除了按照是否扰动观测将EnKF的变体分为随机和确定两类以外, 还可以按照观测的同化方法分为一

个接一个同化的顺序(sequential)同化方法和一次性求解一片观测对部分模式区域的影响的区域(local)同化方法。以上提到的数种EnKF变体均为顺序同化方法, 顺序同化方法的假设之一是不同空间和时间位置的观测误差是不相关的; 而区域同化方法的代表则是区域集合卡尔曼滤波(Local Ensemble Kalman Filter, LEKF)和区域集合变换卡尔曼滤波(Local Ensemble Transform Kalman Filter, LETKF)^[47-48]。与之前的多个顺序同化变体不同, 这两种变体都反其道而行之, 针对每个模式格点, 计算(一定范围内的)所有观测对该格点的影响, 以此获得每个模式格点的分析值。区域同化由于其设计思想的特点, 能够非常简单地对模式区域进行分块, 因此能够很容易地进行并行化处理, 也非常适合成片地对高密度的观测资料(如气象雷达的观测数据)进行同化, 但是研究表明不同的EnKF变体对强雷暴尺度下雷达资料的同化效果并没有明显的优劣^[49]。更多、更详细的EnKF的不同变体之间的相似性和差异也可以参阅Meng等和Houtekamer等的综述文章^[50-51]。

1.3 集合与变分相结合的资料同化方法

EnKF所使用的随天气形势演变的背景误差协方差使得它往往能够获得比变分方法更准确的分析场^[35]。而为了解决变分方法中使用的背景误差协方差的不足，将变分和集合两种方法的背景误差协方差矩阵相结合的混合资料同化方法应运而生，近年来也获得了越来越多的关注。

按照所使用的变分方法的不同，这一类混合资料同化方法有集合三维变分方法（En3DVar）和集合四维变分方法（En4DVar）两种。这一类方法在进行资料同化的过程中首先将变分方法的背景误差协方差矩阵和集合预报生成的背景误差协方差矩阵按照一定比例进行混合，再让变分方法使用混合后生成的新的背景误差协方差矩阵对目标函数进行最小化^[41-42]。由于新的背景误差协方差矩阵受到了集合背景误差协方差矩阵的部分影响，因此这一背景误差协方差矩阵的结构是随天气形势演变的（图2e和2g）。此外，由于EnKF需要使用集合对背景误差协方差矩阵进行估计，因此在集合成员数量较少时，会由于对背景误差概率分布的覆盖不足导致采样误差（sampling error），极大地降低EnKF的分析质量（图2d）；而使用混合同化方法则能在集合成员数量较少的情况下达到相同的分析质量（图2f和2h）。有使用区域模式的研究测试发现，在集合数量仅有EnKF方法一半的情况下，En3DVar生成的分析场即可达到和EnKF方法分析场相同的预报误差，而En4DVar方法的预报误差则始终小于En3DVar方法和EnKF方法的预报误差^[42]。目前也有一些工作将En3DVar方法应用于强雷暴天气预报中^[52-54]，但是这方面的研究还不多，结果也比较初步。

以En3DVar和EnKF方法为基础，有工作提出了三维变分集合（Ensemble of 3DVar, En3DA）方法^[55]。En3DA方法与En3DVar和EnKF方法基本结构类似；但是在进行同化更新的步骤时，En3DA方法使用En3DVar算法对每个集合成员进行更新，其背景误差协方差由除了该集合成员以外的剩余集合成员生成的集合协方差矩阵与变分背景误差协方差矩阵相混合，而通常的En3DVar和EnKF方法使用EnKF算法对每个集合成员进行更新。相较于En3DVar和EnKF方法，En3DA方法可在更新过程中对每个集合成员均提供隐含在变分背景误差协方差矩阵中的弱约束条件，也比传统EnKF方法的运算效率更高^[55]。与这一方法类似，欧洲中期天气预报中心（ECMWF）在其资料同化系统中使用了四维变分集合（Ensemble of 4DVar）方法；这一方法使用四维变分算法对集合预报的每个集

合成员进行更新^[56]。然而，由于这一方法需要消耗极大的运算资源，因此应用十分有限。

除了混合背景误差协方差矩阵的混合资料同化方法，还有一种被称为四维集合变分方法（4DEnVar）的资料同化方法。这种方法使用四维变分资料同化方法的时间窗内的集合预报结果，对背景误差协方差矩阵随着时间的演变进行近似的估计，获取初始场中微小变化对整个时间窗内预报结果（和与之相对应的不同时间、不同观测的观测增量）的影响，并使用这一估计取代原始的四维变分资料同化方法中伴随模式和切线性模式对同一影响的估计^[57]，避免了原始方法中对伴随模式和切线性模式进行迭代积分直至收敛的过程，能够极大地降低四维变分方法的运算量。由于4DEnVar的目标函数依旧是在一个时间窗内进行的最小化求解，因此4DEnVar的分析场的预报误差小于En3DVar方法，但是大于En4DVar方法^[57-58]。

1.4 提高分析场质量的方案

1.4.1 协方差局地化

集合卡尔曼滤波使用集合预报的样本协方差近似地对误差协方差矩阵进行估计。由于目前气象领域所使用的集合成员数量（一般约为几十到几百个）远远小于模式状态的维度（三维格点数量与每个格点变量的乘积，一般约为千万量级），有限的集合样本无法覆盖完整的概率分布所导致的采样误差使得样本协方差矩阵是严重不满秩的矩阵（被称为秩缺失）；在物理上，这一点的体现之一是由于样本数量有限导致在与某格点很远的距离上可能存在不真实的相关性。有研究发现，集合成员数量较小时出现的远距离虚假相关会随着集合成员数量的增加逐渐减弱并收敛（图3），但是该研究中达到收敛时的集合成员数（1280个集合成员）对于现有的中小尺度集合资料同化系统是不可行的^[59]。

为了解决秩缺失、剔除远距离的虚假协方差、提高集合卡尔曼滤波的分析质量，通常需要将每个观测的更新范围限定在一定的距离之内，这一方案被称为协方差局地化^[60]。使用协方差局地化之后，即使集合成员数量有限，也能够保证在观测附近区域的协方差矩阵的估计是近似正确的（图3b）。现在的绝大部分集合卡尔曼滤波应用都会使用特定形状的权重函数（如最常用的类似正态分布曲线的Gaspari-Cohn函数）对观测的影响进行处理，使得在距离观测位置越近的地方影响的程度越大，向外逐渐减小，直至到达截断距离（这一距离通常称为影响半径，radius of influence, ROI）时影响为0^[61]。

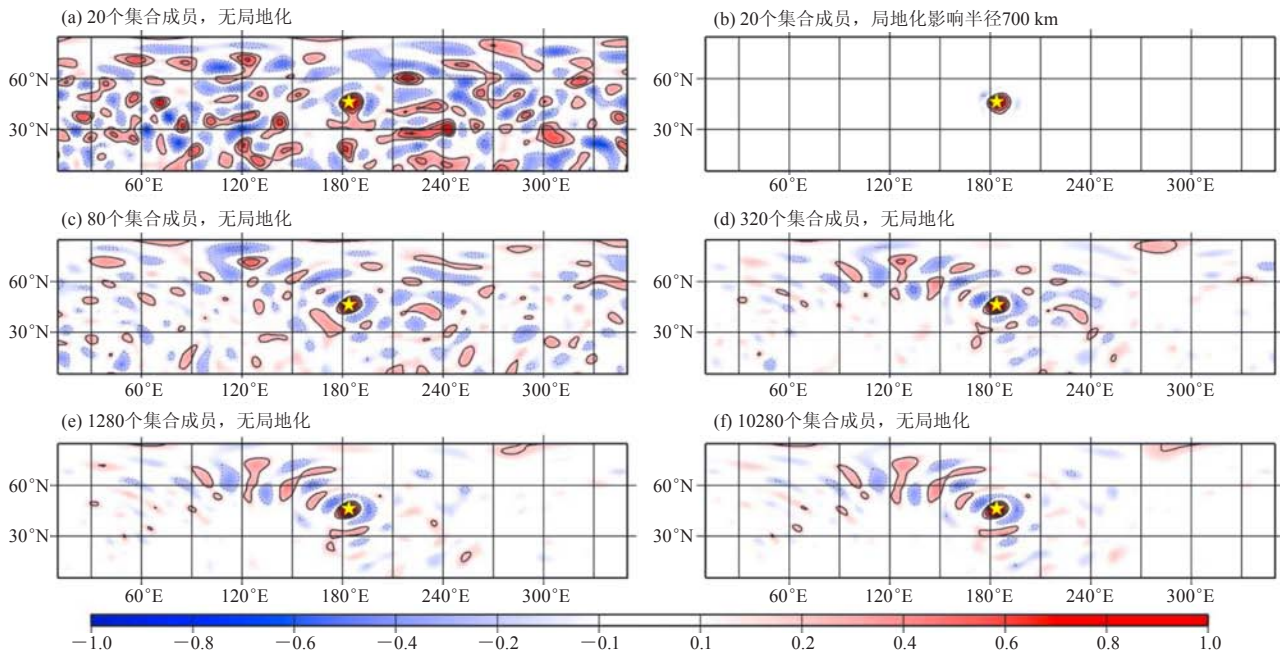


图3 基于全球集合预报计算的各模式格点与黄色星标格点的样本相关性

(a, c~f) 分别使用20、80、320、1280、10280个集合成员进行计算, 且未使用协方差局地化方案; (b) 使用20个集合成员进行计算, 并使用了影响半径为700 km的Gaspari-Cohn函数进行协方差局地化^[59]

Fig. 3 Sample correlation between model grids and yellow star grid based on an ensemble of global model forecast (a, c~f) for using 20, 80, 320, 1280 and 10280 ensemble members without localization, (b) for using 20 ensemble members with covariance localization of 700 km with Gaspari-Cohn function^[59]

协方差局地化方案在水平和垂直方向上所使用的影响半径会对分析场的精度产生影响, 不同尺度的天气系统、不同密度、不同位置和变量的观测资料、不同分辨率的模式设置通常都需要采用不同的影响半径。中尺度到天气尺度的资料同化系统通常对地面观测使用100~200 km的影响半径, 对无线电探空观测使用1000~2000 km的影响半径。针对强雷暴天气的集合资料同化系统通常都会使用雷达观测, 不同的研究工作中所使用的水平和垂直影响半径也有着较大的差异(表1)。Sobash and Stensrud使用3 km水平分辨率的理想模式, 经过一系列组合测试, 发现使用12~18 km的水平影响半径和3 km的垂直影响半径能够在他们所研究的个例中EnKF的分析场的误差达到最低^[85]。而另外一则使用1 km水平分辨率的试验^[95]中发现他们所测试的三种水平和垂直影响半径的组合对分析和预报的质量并没有很明显的差别, 并认为“选择一个‘最佳’的局地化截断距离用于卡尔曼滤波的不同变体之间的比较是很困难的”^[95]。

除了对每种观测平台分别设置固定的影响半径以外, 还有一种连续协方差局地化(successive covariance localization, SCL)方案^[107]。这一方法认为雷达观测中同时包含有不同尺度的大气信息, 因此可

以将雷达观测分为几组: 观测数量较少、分布较稀疏的观测组使用较长的影响半径, 以表征较大尺度的信息; 而观测数量越多、分布越密集的观测组使用的影响半径越小, 以改善更小尺度的信息。这一方法目前多用于空间尺度跨度较大、各尺度之间相互作用复杂的热带气旋预报中, 还用于同化地面雷达和机载雷达观测, 也有研究将其用于热带气旋预报中静止卫星红外亮温观测的同化, 而较少应用于强雷暴的分析和模拟^[100, 105, 107-117]。

1.4.2 增加集合离散度

集合资料同化方法的采样误差和秩缺失的另一个影响是集合样本的离散度(某变量以集合为维度变化的标准差或方差)会系统性地低于实际概率分布的离散度。此外, 根据EnKF的方程^[38]:

$$\mathbf{P}^a = (\mathbf{I} - \mathbf{KH})\mathbf{P}^f,$$

式中, $\mathbf{P}^a$ 和 $\mathbf{P}^f$ 分别是分析场和背景场的误差协方差矩阵, $\mathbf{I}$ 是所有元素都为1的单位矩阵, $\mathbf{K}$ 和 $\mathbf{H}$ 分别是卡尔曼增益矩阵和观测算子; 因为 $\mathbf{I} - \mathbf{KH}$ 中所有元素都一定不大于1, 因此 $\mathbf{P}^a$ 中所有元素一定不大于 $\mathbf{P}^f$ 。这意味着在EnKF方法中每次资料同化都会使得集合离散度变小。因此, 在EnKF方法中通常都会使用特殊的方案增加集合离散度, 避免滤波发散: 随着集合离散度不

表1 使用EnKF同化雷达观测进行强雷暴模拟研究和预报的研究工作的数值模式和EnKF相关参数设置 (“?” 表示参数数值不明, “Y” 表示使用加性噪音方案)

Table 1 Numerical model and EnKF system configurations for data assimilation studies of radar observations on severe convective storm analysis and predictions (“?” indicates unknown parameter settings, “Y” indicates application of additive noise)

文章作者年份	模式格距 (km)	同化间隔 (min)	集合成员数量	影响半径 (km)		膨胀 (%)	松弛	加性噪音
				水平	垂直			
Snyder等 (2003) ^[38]	2	5	50	4	4			
Dowell 等 (2004) ^[62]	2	4~5	50	6	6	5		
Zhang 等 (2004) ^[63]	2	5	50	4	4		0.5 RTPP	
Caya 等 (2005) ^[64]	2	5	100	7.3	7.3			
Tong 等 (2005) ^[65]	2	5	100	8	8	7 & 10		
Xue 等 (2006) ^[66]	1.5	5	40	6	6	7		
Gao 等 (2008) ^[67]	1~4	5	40	8	8			
Jung 等 (2008) ^[68]	2	5	40	6	6	15		
Tong 等 (2008) ^[69]	2	5	40	?	?			
Aksoy 等 (2009) ^[70]	2	2	50	5	4	5		
Dowell 等 (2009) ^[71]	1	6~8	50	6	6			Y
Jung 等 (2010) ^[72]	2	5	40	6	6	15		
Xue 等 (2010) ^[73]	1.5	5	80	4.5	4.5	7 & 20		
Yussouf 等 (2010) ^[74]	1	1	40	4	4			
Dong 等 (2011) ^[75]	2	5	40	6	6	5		
Dowell 等 (2011) ^[76]	1	1	50	6	6			Y
Snook 等 (2011) ^[77]	2	5	40	6	6	25		
Dawson 等 (2012) ^[78]	1	2	30	12	6			Y
Jung 等 (2012) ^[79]	1	5	60	6	6	15		Y
Marquis 等 (2012) ^[80]	0.5	2	50	6	6			Y
Potvin 等 (2012) ^[81]	0.6	2	40	6	3			Y
Thompson 等 (2012) ^[82]	0.5	2	45	6	3			Y
Yussouf 等 (2012) ^[83]	1	1	40	4	4			
Potvin 等 (2013) ^[84]	1	2	40	6	3			Y
Sobash 等 (2013) ^[85]	3	5	50	12~18	3			Y
Tanamachi 等 (2013) ^[86]	1	3	45	6	3			Y
Yussouf 等 (2013) ^[87]	2	3	45	12	6			Y
Calhoun 等 (2014) ^[88]	1	5	24	?	?			Y
Lange 等 (2014) ^[89]	2	5 & 20	50	8 & 32	1~6	5		
Marquis 等 (2014) ^[90]	0.5	2	50	6	6	适应		Y
Jones 等 (2015) ^[91]	3	5	36	18	6	适应		Y
Kerr 等 (2015) ^[92]	2		50	12	12			Y
Snook 等 (2015) ^[93]	2	5	40	6	6	3		
Sobash 等 (2015) ^[94]	3	5	50	12	3			
Thompson 等 (2015) ^[95]	1	2	45	6~12	3~6			Y
Wheatley 等 (2015) ^[96]	3	15	36	18	6	适应		Y
Yussouf 等 (2015) ^[97]	3	5	36	9	3			Y
Bick 等 (2016) ^[98]	2.8	5	40	32	32		0.95 RTPS	
Cintineo 等 (2016) ^[99]	4	5	50	8	8	适应		
Qiu 等 (2016) ^[100]	1	60	36	SCL	SCL		0.5 RTPP	
Snook 等 (2016) ^[101]	0.5	5	40	3	3		0.95 RTPS	
Yussouf 等 (2016) ^[102]	3	5	36	18	6	适应		Y
Supinie 等 (2016) ^[103]	1	5	40	6	6	3 & 20	0.9 RTPS	
Yokota 等 (2016) ^[104]	1.875	60	32	25	15	10~20		
Bao 等 (2017) ^[105]	1	6	60	SCL	SCL		0.8 RTPP	
Supinie 等 (2017) ^[106]	2	5	40	6	6	20	0.9 RTPS	

断减小, EnKF在分析过程中赋予背景场的权重越来越大、赋予观测的权重越来越小, 导致观测无法有效地改进背景场。

增加集合离散度的最直接方案是协方差膨胀 (covariance inflation)。这一方案在进行EnKF前或EnKF后将集合扰动 (集合成员相对集合平均的偏离) 乘以一个略大于1的数, 以此增加集合离散度和协方差。这一系数在循环同化的时间上和模式区域的空间上既可以是不变的也可以是变化的, 例如有些研究在雷达反射率较大和较小的区域分别使用不同的膨胀系数; 但是, 对于资料分布不均匀、存在资料稀疏区域的情况, 例如气象雷达的回波反射率和径向风速观测仅分布在降水区域、非降水区域没有观测存在, 使用空间不变的膨胀系数可能会使得资料稀疏区域的集合离散度持续增长, 导致模式积分不稳定^[65, 73, 103]。因此, Anderson提出了随时间和空间变化的适应性协方差膨胀方案, 这一方案利用集合离散度、观测误差和背景场相对观测的均方根误差计算每个格点应使用的膨胀系数, 以此在不同的观测分布和时间间隔的情况下均能获得质量较好、误差较小的分析场^[118]。有很多研究工作也使用了这一方案^[90-91, 96, 99]。

除了对协方差矩阵成倍地进行膨胀以外, 在雷暴尺度的集合资料同化系统中还经常会使用一种名为加性噪音 (additive noise) 的方案^[71]。这一方法在模式的部分格点 (通常是超出一定的雷达反射率阈值的强对流区域) 的风场和热力场增加经过平滑处理的扰动, 以此使得模式中的强雷暴系统在两次资料同化之间的短时集合预报中能够发展出更多的对流模态, 增加集合离散度。由于这一方法能显著地增加集合预报在对流区域的离散度, 又不会使得非对流区域离散度过度增加导致模式积分不稳定, 因此有很多强雷暴集合资料同化研究中使用了这一方案 (表1)。也有敏感性研究发现, 在选择增加加性噪音扰动的模式格点时, 除了以观测的雷达反射率作为阈值外, 同时再以雷达反射率的观测增量 (模式预报与观测的差异) 作为阈值的一部分, 能够更有针对性地增加集合离散度, 获得更好的同化效果^[94]。

另一种被称为协方差松弛 (covariance relaxation) 的方案也可以避免协方差的过度膨胀^[63]。这一方法将背景场的集合扰动和分析场的集合扰动按照一定的权重进行混合, 这样既能够保留EnKF所带来的更新内容, 也能减小EnKF所导致的集合离散度下降。除了对集合扰动进行混合 (被称为“背景扰动松弛”, relaxation-to-prior-perturbation, RTPP) 之外, Whitaker等还提出了“背景离散度松弛” (relaxation-

to-prior-spread, RTPS) 的方案, Ying等又在RTPS方案的基础上提出了“自适应协方差松弛” (adaptive covariance relaxation, ACR) 方案^[119-120]。有研究工作发现这些不同的协方差松弛和协方差膨胀方案能够对采样误差和模式误差中的不同来源的部分进行估计, 如何使用这些不同的方案, 或者将它们相结合以减小对强雷暴的分析和预报误差依旧是有待考察的问题^[119-120]。强雷暴集合资料同化应用中对不同的松弛和膨胀方案的使用可以参见表1。

2 集合资料同化方法在强雷暴预报中的应用

2.1 不同观测平台在集合资料同化方法中的应用

强雷暴天气的空间尺度较小, 其天气背景中可能有着较大的空间梯度; 与此同时, 针对强雷暴天气的数值模式的空间分辨率通常较高, 达到千米尺度。因此, 为了对强雷暴天气进行准确的模拟, 需要在资料同化系统中加入空间分辨率较高的观测资料, 以获得有着精细空间结构的初始场。目前强雷暴天气的集合资料同化系统中通常使用三种观测资料: 地面观测、天气雷达观测和卫星反演观测。

与同为常规观测的探空气球相比, 地面观测有着自动化程度高、建设成本和运行成本低的优点, 因此在世界上的很多地方已经建设起了水平间距约几十千米的高密度中尺度地面观测网。虽然地面站不像探空气球一样能直接对高空的大气状态进行观测, 但是通过集合资料同化系统随天气形势变化的背景误差协方差, 地面的观测同样可以对对流层中低层的模式预报加以改善; 此外, 由于地面站可以分布得较为密集、观测间隔很小, 因此可以对干线、飑锋、冷池等边界层内与对流触发和发展密切相关并且移动和变化十分迅速的边界特征进行连续而精确的观测, 并通过资料同化系统改善数值模式在天气尺度到中尺度范围内对这些结构的分析结果。已经有很多集合资料同化研究工作表明, 高频率的地面观测同化能够极大地改善模式对近地面和边界层内的风场的结构和水汽的垂直分布, 并因而提高对强雷暴 (包括龙卷强雷暴) 的对流触发、强度和降水分布的预报, 并且在强雷暴距离雷达较远时, 地面观测的同化能够极大地弥补雷达资料不足的影响^[75, 104, 121]。

多普勒天气雷达是强雷暴集合资料同化系统中使用最多的观测平台。由于雷达能够对强雷暴的风场和降水粒子结构进行高时空分辨率的扫描, 因此相较于主要观测天气尺度到中尺度环境信息的地面观测, 雷达观测能在雷暴尺度上提供更详细的雷暴内部结构信息。最早将EnKF应用于区域模式的工作就同化了人造

雷达观测^[38]。使用天气雷达观测进行资料同化至今已近十五年；早期的研究工作多使用初始条件水平各向同性、无地形、无辐射、无摩擦的理想模式，之后的研究工作所使用的模式开始考虑越来越多、越来越真实的物理过程，到现在很多研究工作已经开始使用诸如WRF-ARW这样复杂的中尺度模式。

由于多普勒雷达的径向风观测能够提供雷暴内部高分辨率的风场结构，反射率观测也能够间接提供雷暴内部各种降水粒子的分布，EnKF方法又能够通过背景误差协方差矩阵对雷达并未直接观测的温度和水汽等大气状况进行分析，因此使用EnKF方法同化雷达观测能够极大地改善对雷暴本身动力和热力结构的分析结果，并提高对强雷暴及其相关灾害的预报水平^[70, 76, 102]。目前使用EnKF方法同化雷达资料的研究工作主要有以下几类：

1) 改善对强雷暴天气的预报，如2011年4月27日美国阿拉巴马州的龙卷爆发、2012年5月6日日本关东平原的龙卷过程、2013年5月8日广东的暴雨过程、2013年5月31日美国俄克拉荷马州的龙卷和暴洪过程、2013年6月30日安徽的暴雨过程^[100, 102-104, 106]；

2) 借助对强雷暴更精确的预报结果，对闪电、冰雹等强雷暴灾害天气进行预报，并对暴雨、龙卷等强雷暴灾害天气的动力过程和可预报性进行分析^[80, 88, 100, 101]；

3) 探索强雷暴尺度下EnKF方法及相关的方案设计，如集合成员的数量、加性噪音的设计、局地化影响半径的敏感性和改进EnKF算法，如多分辨率EnKF方法^[67, 71, 85, 89, 94]；

4) 研究同化雷达资料的不同设置，如雷达观测的数量、覆盖程度、同化观测的分辨率、观测误差、观测算子、同化间隔和持续时长、模式中更新的变量、采用多参数云微物理参数化方案等对分析场质量的影响^[63, 65-67, 76-79, 82, 87, 89, 98]；

5) 探索额外的雷达观测数据，如雷达反射率和双偏振多普勒雷达的极化参量，或S波段和C波段多普勒天气雷达以外的其他雷达种类，如X波段CASA雷达和移动雷达、双偏振多普勒雷达、相控阵雷达，或地面观测、无线电探空观测、卫星观测等其他平台的观测与雷达观测同时同化对分析场质量的影响^[65-66, 68, 72, 74, 75, 77, 86, 90, 93, 103-104, 106]；

6) 不同资料同化方法之间的比较，如EnKF与4DVar和双多普勒雷达分析的比较，LETKF和EnSRF对雷达资料同化效果的比较^[64, 81, 84, 95]；

总的来说，现在使用EnKF方法同化天气雷达观测进行强雷暴天气的分析和预报已经成为了一个比较成熟且应用十分广泛的方法，虽然这一方法中还有着很多需要解决的问题（见2.3节）。

与多普勒天气雷达观测相比，气象卫星观测有着其独特的优势：天气雷达受地形和布网密度的限制会存在一些无法提供观测的地区，而气象卫星观测不存在这一问题；此外，天气雷达的观测对象通常是降水粒子，而对地表及大气的红外、可见光或微波波段的辐射进行观测的气象卫星则能够对还未形成降水的云系进行观测，因此能够比雷达更早地“看”到正在发展的云团。另一方面，当云层形成之后，气象卫星通常仅能观测到云顶以上的大气辐射，而云顶以下的雷暴结构和发展的过程则难以观测，这是气象卫星观测相较于天气雷达的缺点。

在区域模式中使用集合资料同化方法同化全天空温卫星辐射亮温（气象卫星的原始观测）的工作目前还比较初步。虽然已经有研究发现使用EnKF同化全天空红外辐射亮温能够改善热带气旋的分析和预报，但是强雷暴天气方面的研究还多停留在卫星反演数据或次级产品的同化应用：同化卫星反演的大气温度和水汽廓线能够改善大气的中尺度热力结构，并减小对强雷暴的对流触发和发展的预报误差；同化卫星反演的云水路径能够改善对强雷暴触发和分裂过程的预报；在雷达观测的基础上额外同化卫星反演的云顶温度或固态水路径和液态水路径虽然不能进一步改善对雷暴的分析结果，却能够减小之后的预报误差^[91, 92, 122-126]。虽然有工作使用模拟观测同时同化了雷达观测和静止卫星红外亮温观测，但是该研究所使用的模式分辨率依旧较低（4 km），对强雷暴天气预报应用的意义有限^[99]。最近作者使用EnKF同化GOES-16卫星上搭载的先进基线成像仪（Advanced Baseline Imager, ABI）的原始全天空卫星亮温观测，发现强雷暴的触发和中气旋、近地面涡旋等结构的预报均能够获得较大的改善^[127]。但是，与雷达相比，卫星观测在强雷暴集合资料同化系统中的应用，尤其是全天空卫星辐射亮温观测的同时同化，还面临着一些困难（2.3节）。

除了对观测数据进行同化并对数值模式中温度、湿度、风场等预报变量加以改善以外，集合资料同化系统还可以同时利用观测数据更新物理过程参数化方案中的参数，这一过程称为参数估计（parameter estimation）。不同的观测平台可用于不同参数化方案的参数估计：地面站和风廓线雷达的观测数据多用于改进边界层物理参数化方案的参数，天气雷达的反射率观测可用于改进云微物理参数化方案的参数^[69, 72, 83, 128-130]。在这些研究中，使用EnKF同时对大气状态和参数化方案的参数进行估计可显著改善对中尺度环境条件和雷暴发生、发展过程的预报结果^[69, 72, 83, 128-130]。

2.2 业务和准业务运行的强雷暴集合资料同化系统

随着高性能计算水平的不断发展和计算资源的不断提升,使用较大的模式区域和较精细的对流解析分辨率较长时间地持续性进行EnKF同化和集合预报成为了可能。以此为基础,有些研究机构和预报部门已经开始研发强雷暴集合资料同化系统,其中有些已经开始投入业务运行。

NOAA的HRRR模式于2014年开始使用En3DVar混合资料同化方法为3 km分辨率模式提供初始场;在目前运行的HRRR混合资料同化系统中,还使用了引言中介绍的云分析方案,对初始场中云和降水的分布进行调整。此外,HRRR模式还有一套基于EnKF方法的HRRRE (High-Resolution Rapid Refresh Ensemble) 系统,用于提供高分辨率的集合预报结果。使用HRRRE的集合预报结果作为初始场和边界条件,美国国家强雷暴实验室(National Severe Storm Laboratory, NSSL)开发了用于强雷暴预报的NEWS-e (NSSL Experimental WoF System for ensembles) 集合同化和预报系统,并已投入业务运行^[96, 126]。这一系统使用了单向嵌套的中尺度区域(水平分辨率15 km、覆盖美国本土)和雷暴尺度区域(水平分辨率3 km、可以任意设置位置)两重区域,以在运算资源和分析精度上取得平衡。这一系统的中尺度区域每小时同化一次常规地面站和中尺度地面站观测,而雷暴尺度区域则设置在强雷暴出现的地区,每15 min同化一次雷达观测,生成集合预报所用的初始场^[96]。

NOAA的“灾害天气试验平台”(HWT)自2000年开始每年都会开展针对强对流灾害天气预报的“春季试验”,在这一试验中促进业务预报部门与科研机构之间的双向交流,并根据当下最先进的数值模式和资料同化方法对强对流天气的预报效果和业务应用进行测试^[33]。在近几年的春季试验所使用的由科研机构提供的集合预报产品中,有部分预报的初始场由CAPS的EnKF资料同化系统分析生成^[34]。这一系统使用40个3 km分辨率的集合成员,用EnSRF算法以15 min间隔同化雷达观测,并且使用了MPI和OpenMP相结合的混合并行算法,通过一定的模式分区和观测分片算法,提高高密度的天气雷达和气象卫星观测数据的同化效率^[131]。

德国气象局(Deutsche Wetterdienst, DWD)针对德国及周边区域,为业务运行的对流解析模式——COSMO (Consortium for Small-Scale Modelling) 模式,开发了配套的KENDA (Kilometer-Scale Ensemble Data Assimilation) 集合资料同化系统^[132-133]。这一系

统以水平分辨率为2.8 km的COSMO-DE模式为基础,使用40个集合成员的LETKF方法,每隔1 h同化常规无线电探空和地面观测、风廓线观测和飞机航路观测。在业务运行的COSMO-KENDA系统中,雷达观测并没有被直接同化,而是使用潜热逼近法(latent heat nudging)同化雷达观测反演的降水率,以此改变模式的温度和水汽结构。由于德国的雷达布网比美国和中国密集得多,各雷达的扫描范围有着很大的重叠,能够提供垂直分辨率很高、质量很好的三维空间雷达观测,因此也有研究工作用复杂的前处理算法将雷达反射率观测稀疏化之后使用COSMO-KENDA进行同化,比使用潜热逼近法显著提高了降水预报的准确程度^[98]。

相较于美国,我国针对强雷暴预报的业务集合资料同化系统起步较晚。安徽省气象台以Zhang等^[107]和Qiu等^[100]的工作为基础,使用WRF数值模式和EnKF方法同化多普勒天气雷达观测,建立了实时区域分析和预报系统。该系统于2017年开始测试,并发现其预报结果能够极大地辅助业务预报。

2.3 尚待解决的问题

在使用EnKF方法同化雷达观测的研究中,经常会遇到模拟中出现虚假对流的问题。这通常是由于背景场水汽充足、不稳定性强,或雷达径向风的同化导致垂直速度的扰动被异常放大,使得模式在观测中并没有雷达回波的区域出现了强对流系统。为了解决这一问题,很多研究中通常会在降水反射率和(或)径向风之外,同时同化晴空回波^[65, 70, 76, 84, 87, 95, 97]。但是,这些研究中生成的晴空回波观测从0 dBz, 5~10 dBz不等(有部分研究并未说明其取值),大部分研究也并未说明对晴空回波的同化变量是雷达反射率因子(Z)还是常用对数因子(dBz),因此很难对不同研究工作中晴空回波的同化效果进行合理的比较和评价,应当有工作更深入地探索如何更高效地使用晴空回波同化遏止模式中虚假对流的出现。而如何将高密度的雷达观测进行稀疏化,以更高效地进行资料同化同时保持关键信息不丢失,同样是一个有待探讨的问题^[82]。

由于强雷暴集合资料同化系统通常会同化大量的雷达观测,根据顺序同化方法的原理,这会使得集合离散度在同化之后显著降低,因此需要额外注意维持集合离散度,避免滤波发散。有研究发现这些不同的方案相结合能够产生更好的同化效果,不少强雷暴集合资料同化研究中都使用了不止一种方案增加集合离散度^[79, 90-91, 96, 103, 106, 119]。但是,这几种方案中都需要设置参数,不同研究工作中这些参数的取值也有着十分

巨大的差异：协方差膨胀的比例从3%~25%不等，协方差松弛中背景场的比例从50%~95%不等^[63, 77, 93, 98, 100-101]。除了探索不同方案的组合使用对集合资料同化系统的影响以外，如何避免这些先验性的参数设置、自适应地对集合离散度进行处理，也需要更多的工作加以研究。

直接同化高时空分辨率的卫星辐射亮温观测是强雷暴集合资料同化未来的发展方向之一。但是，对卫星辐射亮温的直接同化还有着许多尚未解决的问题。首先，卫星辐射亮温观测有着有界性（最高不高于地面辐射亮温，最低不低于积云云顶亮温）、异方差性（观测误差随着亮温变化而变化）的特点且有着系统误差，这使得同化卫星辐射亮温时观测误差的设定变得相当困难。最近有研究设计了适应性观测误差膨胀（adaptive observation error inflation, AOEI）的方案，在观测增量增大时增加观测误差，并将这一方案应用于飓风个例上，获得了较好的效果^[122, 134]。但是，当背景场的云场情况和观测场的云场情况不匹配时（在其中一方是晴空而另一方是云区），由于云场不匹配导致的较大的观测增量会使得这一方案使用较大的观测误差，因而可能会不能有效地遏止虚假对流的发展、促进实际对流的触发。

其次，与天气雷达观测相比，气象卫星的辐射亮温观测与数值模式变量之间通过复杂的辐射传输模式相联系，它们之间的相关性也更为复杂。辐射亮温与冰相粒子有着较强的相关性，与水相粒子的相关性较弱，而与动力场的相关性更弱^[135]。这可能预示着针对不同环境、不同特点的个例进行资料同化的时候，需要将资料同化的更新变量进行限制。而且，由于卫星辐射亮温观测是整层大气向外辐射的累积结果，在垂直方向如何进行协方差局地化也是一个困难的问题。虽然有很多研究工作提供了不同的、各有优劣的垂直局地化方案，目前使用中尺度模式同化卫星红外辐射亮温的研究大部分都完全没有使用垂直局地化^[136-139]。但是，作者最近的一系列资料同化试验表明，针对强雷暴个例同化卫星红外辐射亮温观测时，因为水汽通道的辐射亮温和对流层低层温度场的相关性很弱，不使用垂直局地化方案时可能会使边界层内出现异常的温度扰动，导致强雷暴的预报误差增加。因此，如何更好地在垂直方向上对卫星辐射亮温的影响进行局地化目前依旧是一个尚未解决的问题。

3 结论

现在的资料同化方法主要有变分方法（3DVar和4DVar）和集合方法（EnKF）两类。与3DVar和4DVar

方法相比，基于蒙特卡罗方法的EnKF方法的背景误差协方差随天气形势演变，往往能够获得质量更高的分析场，有助于减小天气预报的误差。因此，近年来EnKF方法越来越多地应用于研究和业务预报领域，也有越来越多的人将其用于强雷暴天气的分析和预报中，并已经取得了一定的成功。

但是，目前的强雷暴集合资料同化系统及其所使用的附加方案中还有着许多参数，例如协方差膨胀的比例、协方差松弛的比例、加性噪音平滑的水平和垂直距离、不同观测平台和变量种类的观测数据的局地化影响半径和观测误差的设置等；有些研究工作经验性地对这些参数进行估计，而有些研究工作则通过敏感性试验确定能获得最小分析误差的参数数值。目前已经出现了一些自适应性的方案，如适应性协方差膨胀^[118]和适应性协方差松弛^[120]；随着对不同方案对集合资料同化的影响的研究的深入，未来的集合资料同化系统的参数将会有着更强的自适应性，减小人为选择的同化系统参数对资料同化分析场质量的影响^[118, 120]。

随着高性能计算资源的不断增长，集合资料同化系统会向着更高的模式分辨率、更复杂的参数化方案、更大的集合成员数量、更先进的资料同化方法、更多的遥感观测平台的方向发展，而强雷暴天气的集合资料同化研究会直接由此受益。更高的模式分辨率意味着强雷暴中更小尺度的动力结构能够被解析，对强雷暴的发生和发展的模拟与实况会真实^[140]。与之相匹配，模式的参数化方案，尤其是微物理过程和边界层过程的参数化方案，会因为更多的运算资源和更高的模式分辨率而相应地变得更加复杂，也更加适应对流性边界层和强雷暴天气的模拟预报。更大的集合成员数量意味着采样误差能够有所降低，集合资料同化系统对协方差膨胀、协方差松弛、加性噪音等方案的敏感性降低，这些方案中参数的设置对分析场质量的影响可能会减小。更先进的资料同化方法意味着混合资料同化方法和更先进的、不要求正态分布假设的粒子滤波方法有可能更广泛地应用于强雷暴天气预报之中，并进一步减小对集合成员数量的需求和采样误差对分析场质量的影响。更多的遥感观测平台意味着除了常规多普勒天气雷达以外，与天气雷达时空分辨率接近的静止卫星辐射亮温观测和观测间隔小于1 min的相控阵雷达观测可以一同加入资料同化系统中；卫星辐射亮温能够在雷达观测到降水粒子之前即观测到积云的出现，对对流触发和对流环境的分析有着重要意义；而相控阵雷达则有着极高的观测频率（小于1 min），有望改善部分发展十分迅速的强雷暴天气的

分析和预报。除了常规气象仪器之外, 智能手机所能提供的大量的地面气压观测和照片同样能够以集合资料同化方法进行同化, 并可能改善强雷暴的分析和预报^[141]。

正是由于有着不断发展、越来越先进的强雷暴集合资料同化系统, 最近几年不断有研究工作发现, 使用集合资料同化系统的分析场作为初始场进行集合预报, 能够很好地对强雷暴天气系统及其灾害进行预报^[78, 87, 97, 142]。以这些工作为基础, 美国国家强风暴实验室开展了以预报为基础进行灾害天气预警的Warn-on-Forecast (WoF) 计划, 以期在雷暴尺度使用集合资料同化方法同化雷达 (和卫星) 观测, 并以短期对流解析集合预报辅助和提高强雷暴天气的预报和预警, 最终取代现有的以观测为基础的Warn-on-Detection (WoD) 灾害天气预警方法^[143-144]。而上述那些强雷暴集合资料同化系统未来可能的发展方向, 则有望进一步提高对强雷暴的发生和发展的预报水平, 辅助防灾减灾工作的计划和开展。

参考文献

- [1] 唐文苑, 周庆亮, 刘鑫华, 等. 国家级强对流天气分类预报能力的检验. 天气预测, 2016, 8(5): 46-55.
- [2] Zhang Y, Zhang F, Stensrud D J, et al. Intrinsic predictability of the 20 May 2013 tornadic thunderstorm event in Oklahoma at storm scale. Monthly Weather Review, 2016, 144(4): 1273-1298.
- [3] Zhang Y, Zhang F, Stensrud D J, et al. Practical predictability of the 20 May 2013 tornadic thunderstorm event in Oklahoma: sensitivity to synoptic timing and topographical influence. Monthly Weather Review, 2015, 143(8): 2973-2997.
- [4] Talagrand O. Assimilation of observations, and introduction. Journal of the Meteorological Society of Japan, 1997, 75(1B): 191-209.
- [5] Kain J S, Weiss S J, Bright D R, et al. Some practical considerations regarding horizontal resolution in the first generation of operational convection-allowing NWP. Weather and Forecasting, 2008, 23(5): 931-952.
- [6] Sun J, Flicker D W, Lilly D K. Recovery of three-dimensional wind and temperature fields from simulated single-Doppler radar data. Journal of the Atmospheric Sciences, 1991, 48(6): 876-890.
- [7] Sun J, Crook A. Wind and thermodynamic retrieval from single-Doppler measurements of a gust front observed during Phoenix II. Monthly Weather Review, 1994, 122(6): 1075-1091.
- [8] Sun J, Crook N A. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part I: Model development and simulated data experiments. Journal of the Atmospheric Sciences, 1997, 54(12): 1642-1661.
- [9] Sun J, Crook N A. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part II: Retrieval experiments of an observed Florida convective storm. Journal of the Atmospheric Sciences, 1998, 55(5): 835-852.
- [10] Sun J, Crook N A. Real-time low-level wind and temperature analysis using single WSR-88D data. Weather and Forecasting, 2001, 16(1): 117-132.
- [11] Sun J. Initialization and numerical forecasting of a supercell storm observed during STEPS. Monthly Weather Review, 2005, 133(4): 793-813.
- [12] Mueller C, Saxen T, Roberts R, et al. NCAR auto-nowcast system. Weather and Forecasting, 2003, 18(4): 545-561.
- [13] Saxen T R, Mueller C K, Warner T T, et al. The operational mesogamma-scale analysis and forecast system of the US army test and evaluation command. Part IV: The White Sands Missile Range auto-nowcast system. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008, 47(4): 1123-1139.
- [14] Tai S L, Liou Y C, Sun J, et al. Precipitation forecasting using Doppler radar data, a cloud model with adjoint, and the Weather Research and Forecasting Model: Real case studies during SoWMEX in Taiwan. Weather and Forecasting, 2011, 26(6): 975-992.
- [15] Crook N A, Sun J. Assimilating radar, surface, and profiler data for the Sydney 2000 Forecast Demonstration Project. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(6): 888-898.
- [16] Crook N A, Sun J. Analysis and forecasting of the low-level wind during the Sydney 2000 Forecast Demonstration Project. Weather and Forecasting, 2004, 19(1): 151-167.
- [17] Sun J, Chen M, Wang Y. A frequent-updating analysis system based on radar, surface, and mesoscale model data for the Beijing 2008 forecast demonstration project. Weather and Forecasting, 2010, 25(6): 1715-1735.
- [18] Dance S L. Issues in high resolution limited area data assimilation for quantitative precipitation forecasting. Physica D, 2004, 196(1): 1-27.
- [19] Sun J. Convective-scale assimilation of radar data: progress and challenges. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2005, 131(8): 3439-3463.
- [20] Gao J, Xue M, Shapiro A, et al. A variational analysis for the retrieval of three-dimensional mesoscale wind fields from two Doppler radars. Monthly Weather Review, 1999, 127(9): 2128-2142.
- [21] Gao J, Xue M, Shapiro A, et al. A three-dimensional variational data analysis method with recursive filter for Doppler Radars. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2004, 21(3): 457-469.
- [22] Sun J, Wang H. WRF-ARW variational storm-scale data assimilation: current capabilities and future developments. Advances in Meteorology, 2013, 2013: 815910.
- [23] Hu M, Xue M, Brewster K. 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D level-II data for the prediction of the Fort Worth, Texas, tornadic thunderstorms. Part I: Cloud analysis and its impact. Monthly Weather Review, 2006, 134(2): 675-698.
- [24] Hu M, Xue M, Gao J, et al. 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D level-II data for the prediction of the Fort Worth, Texas, tornadic thunderstorms. Part II: Impact of radial velocity analysis via 3DVAR. Monthly Weather Review, 2006, 134(2): 699-721.
- [25] Auligné T, Lorenc A, Michel Y, et al. Toward a new cloud analysis and prediction system. Bulletin of the American Meteorological Society, 2011, 92(2): 207-210.
- [26] Sugimoto S, Crook N A, Sun J, et al. An examination of WRF 3DVAR radar data assimilation on its capability in retrieving unobserved variables and forecasting precipitation through observing system simulation experiments. Monthly Weather Review, 2009, 137(11): 4011-4029.
- [27] Gasperoni N A, Xue M, Palmer R D, et al. Sensitivity of convective initiation prediction to near-surface moisture when assimilating radar refractivity: Impact tests using OSSEs. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2013, 30(10): 2281-2302.
- [28] Li X, Mecikalski J R. Assimilation of the dual-polarization Doppler radar data for a convective storm with a warm-rain radar forward operator. Journal of Geophysical Research, 2010, 115(D16): 2105-2202.
- [29] Xue M, Hu M, Schenkman A D. Numerical prediction of the 8 May 2003 Oklahoma City tornadic supercell and embedded tornado using ARPS with the assimilation of WSR-88D data. Weather and Forecasting, 2014, 29(1): 39-62.
- [30] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR, 2008.
- [31] Powers J G, Klemp J B, Skamarock W C, et al. The weather research and forecasting (WRF) model: overview, system efforts, and future directions. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017, 98(8): 1717-1737.
- [32] Xue M, Wang D, Gao J, et al. The Advanced Regional Prediction System (ARPS), storm-scale numerical weather prediction and data assimilation. Meteorology and Atmospheric Physics, 2003, 82(1): 139-170.
- [33] Clark A J, Weiss S J, Kain J S, et al. An overview of the 2010

- hazardous weather testbed experimental forecast program spring experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(1): 55-74.
- [34] Gallo B T, Clark A J, Jirak I, et al. Breaking new ground in severe weather prediction: The 2015 NOAA/Hazardous weather testbed spring forecasting experiment. *Weather and Forecasting*, 2017, 32(4): 1541-1568.
- [35] Zhang M, Zhang F, Huang X-Y, et al. Intercomparison of an ensemble Kalman filter with three- and four-Dimensional variational data assimilation methods in a limited-area model over the month of June 2003. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(2): 566-572.
- [36] Evensen G. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(C5): 10143-10162.
- [37] Houdekamer P L, Mitchell H L. Data assimilation using an ensemble Kalman filter technique. *Monthly Weather Review*, 1998, 126(3): 796-811.
- [38] Snyder C, Zhang F. Assimilation of simulated Doppler radar observations with an ensemble Kalman filter. *Monthly Weather Review*, 2003, 131(8): 1663-1677.
- [39] Zhang F, Meng Z, Aksoy A. Tests of an ensemble Kalman filter for mesoscale and regional-scale data assimilation. Part I: Perfect model experiments. *Monthly Weather Review*, 2006, 134(2): 722-736.
- [40] Anderson J L. Exploring the need for localization in ensemble data assimilation using a hierarchical ensemble filter. *Physica D*, 2007, 230(1): 99-111.
- [41] Zhang M, Zhang F. En4DVar: coupling an ensemble Kalman filter with four-dimensional variational data assimilation in a limited-area weather prediction model. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(2): 587-600.
- [42] Zhang F, Zhang M, Poterjoy J. En3DVar: coupling an ensemble Kalman filter with three-dimensional variational data assimilation in a limited-area weather prediction model and comparison with En4DVar. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(3): 900-917.
- [43] Burgers G, Van Leeuwen P J, Evensen G. Analysis scheme in the ensemble Kalman filter. *Monthly Weather Review*, 1998, 126(6): 1719-1724.
- [44] Whitaker J S, Hamill T M. Ensemble data assimilation without perturbed observations. *Monthly Weather Review*, 2002, 130(7): 1913-1924.
- [45] Anderson J L. An ensemble adjustment Kalman filter for data assimilation. *Monthly Weather Review*, 2001, 129(12): 2884-2903.
- [46] Bishop C H, Etherton B J, Majumdar S J. Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. *Monthly Weather Review*, 2001, 129(3): 420-436.
- [47] Ott E, Hunt B T, Szunyogh I, et al. A local ensemble Kalman filter for atmospheric data assimilation. *Tellus A*, 2004, 56(5): 415-428.
- [48] Hunt B R, Kostelich E J, Szunyogh I. 2007. Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: a local ensemble transform Kalman filter. *Physica D*, 2007, 230(1-2): 112-126.
- [49] Thompson T E, Wicker L J, Wang X, et al. A comparison between the local ensemble transform Kalman filter and the ensemble square root filter for the assimilation of radar data in convective-scale models. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2015, 141(4): 1163-1176.
- [50] Meng Z, Zhang F. Limited-area ensemble-based data assimilation. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(7): 2025-2045.
- [51] Houdekamer P L, Zhang F. Review of the ensemble Kalman filter for atmospheric data assimilation. *Monthly Weather Review*, 2016, 144(12): 4489-4532.
- [52] Gao J, Xue M, Stensrud D J. The development of a hybrid EnKF-3DVAR algorithm for storm-scale data assimilation. *Advances in Meteorology*, 2013, 2013: 512656.
- [53] Gao J, Stensrud D J. Some observing system simulation experiments with a hybrid 3DVar system for storm-scale data assimilation. *Monthly Weather Review*, 2014, 142(9): 3326-3346.
- [54] Gao S, Huang D. Assimilating conventional and Doppler radar data with a hybrid approach to improve forecasting of a convective system. *Atmosphere*, 2017, 8(10): 188.
- [55] Gao J, Fu C, Stensrud D J, et al. OSSEs for an ensemble 3DVar data assimilation system with radar observations of convective storms. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2016, 73(6): 2403-2426.
- [56] Bonavita M, Isaksen L, Holm E. On the use of EDA background error variances in the ECMWF 4D-Var. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2012, 138 (8): 1540-1559.
- [57] Poterjoy J, Zhang F. Systematic comparison of four-dimensional data assimilation methods with and without the tangent linear model using hybrid background error covariance: En4DVar versus 4DVar. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(5): 1601-1621.
- [58] Poterjoy J, Zhang F. Comparison of hybrid four-dimensional data assimilation methods with and without the tangent linear and adjoint models for predicting the life cycle of hurricane Karl (2010). *Monthly Weather Review*, 2016, 144(4): 1449-1468.
- [59] Miyoshi T, Kondo K, Imamura T. The 10240-member ensemble Kalman filtering with an intermediate AGCM. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(14): 5264-5271.
- [60] Houdekamer P L, Mitchell H L. A sequential ensemble Kalman filter for atmospheric data assimilation. *Monthly Weather Review*, 2001, 129(1): 123-137.
- [61] Gaspari G, Cohn S E. Construction of correlation functions in two and three dimensions. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1999, 125(2): 723-757.
- [62] Dowell D C, Zhang F, Wicker L J, et al. Wind and temperature retrievals in the 17 May 1981 Arcadia, Oklahoma, supercell: Ensemble Kalman filter experiments. *Monthly Weather Review*, 2004, 132(8): 1982-2005.
- [63] Zhang F, Snyder C, Sun J. Impacts of initial estimate and observation availability on convective-scale data assimilation with an ensemble Kalman filter. *Monthly Weather Review*, 2004, 132(5): 1238-1253.
- [64] Caya A, Sun J, Snyder C. A comparison between the 4DVAR and the ensemble Kalman filter techniques for radar data assimilation. *Monthly Weather Review*, 2005, 133(11): 3081-3094.
- [65] Tong M, Xue M. Ensemble Kalman filter assimilation of Doppler radar data with a compressible nonhydrostatic model: OSS experiments. *Monthly Weather Review*, 2005, 133(7): 1789-1807.
- [66] Xue M, Tong M, Droegemeier K K. An OSSE framework based on the ensemble square root Kalman filter for evaluating the impact of data from radar networks on thunderstorm analysis and forecasting. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2006, 23(1): 46-66.
- [67] Gao J, Xue M. An efficient dual-resolution approach for ensemble data assimilation and tests with simulated Doppler radar data. *Monthly Weather Review*, 2008, 136(3): 945-963.
- [68] Jung Y, Xue M, Zhang G, et al. Assimilation of simulated polarimetric radar data for a convective storm using the ensemble Kalman filter. Part II: Impact of polarimetric data on storm analysis. *Monthly Weather Review*, 2008, 136(6): 2246-2260.
- [69] Tong M, Xue M. Simultaneous estimation of microphysical parameters and atmospheric state with simulated radar data and ensemble square root Kalman filter. Part I: Sensitivity analysis and parameter identifiability. *Monthly Weather Review*, 2008, 136(5): 1630-1648.
- [70] Aksoy A, Dowell D C, Snyder C. A multicase comparative assessment of the ensemble Kalman filter for assimilation of radar observations. Part I: Storm-scale analyses. *Monthly Weather Review*, 2009, 137(6): 1805-24.
- [71] Dowell D C, Wicker L J. Additive noise for storm-scale ensemble data assimilation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(5): 911-927.
- [72] Jung Y, Xue M, Zhang G. Simultaneous estimation of microphysical parameters and the atmospheric state using simulated polarimetric radar data and an ensemble Kalman filter in the presence of an observation operator error. *Monthly Weather Review*, 2010, 138(2): 539-562.
- [73] Xue M, Jung Y, Zhang G. State estimation of convective storms with a two-moment microphysics scheme and an ensemble Kalman filter: Experiments with simulated radar data. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2010, 136(648): 685-700.

- [74] Yussouf N, Stensrud D J. Impact of phased-array radar observations over a short assimilation period: observing system simulation experiments using an ensemble Kalman filter. *Monthly Weather Review*, 2010, 138(2): 517-538.
- [75] Dong J, Xue M, Droegemeier K. The analysis and impact of simulated high-resolution surface observations in addition to radar data for convective storms with an ensemble Kalman filter. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2011, 112(1-2): 41-61.
- [76] Dowell D C, Wicker L J, Snyder C. Ensemble Kalman filter assimilation of radar observations of the 8 May 2003 Oklahoma City supercell: influences of reflectivity observations on storm-scale analyses. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(1): 272-294.
- [77] Snook N, Xue M, Jung Y. Analysis of a tornadic mesoscale convective vortex based on ensemble Kalman filter assimilation of CASA X-band and WSR-88D radar data. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(11): 3446-3468.
- [78] Dawson II D T, Wicker L J, Mansell E R, et al. Impact of the environmental low-level wind profile on ensemble forecasts of the 4 May 2007 Greensburg, Kansas, tornadic storm and associated mesocyclones. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(2): 696-716.
- [79] Jung Y, Xue M, Tong M. Ensemble Kalman filter analyses of the 29-30 May 2004 Oklahoma tornadic thunderstorm using one-and two-moment bulk microphysics schemes, with verification against polarimetric radar data. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(5): 1457-1475.
- [80] Marquis J, Richardson Y, Markowski P, et al. Tornado maintenance investigated with high-resolution dual-Doppler and EnKF analysis. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(1): 3-27.
- [81] Potvin C K, Wicker L J. Comparison between dual-Doppler and EnKF storm-scale wind analyses: observing system simulation experiments with a supercell thunderstorm. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(12): 3972-3991.
- [82] Thompson T E, Wicker L J, Wang X. Impact from a volumetric radar-sampling operator for radial velocity observations within EnKF supercell assimilation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2012, 29(10): 1417-1427.
- [83] Yussouf N, Stensrud D J. Comparison of single-parameter and multiparameter ensembles for assimilation of radar observations using the ensemble Kalman filter. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(2): 562-586.
- [84] Potvin C K, Wicker L J, Biggerstaff M I, et al. Comparison between dual-Doppler and EnKF storm-scale wind analyses: the 29-30 May 2004 Geary, Oklahoma, supercell thunderstorm. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(5): 1612-1628.
- [85] Sobash R A, Stensrud D J. The impact of covariance localization for radar data on EnKF analyses of a developing MCS: observing system simulation experiments. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(11): 3691-3709.
- [86] Tanamachi R L, Wicker L J, Dowell D C, et al. EnKF assimilation of high-resolution, mobile Doppler radar data of the 4 May 2007 Greensburg, Kansas, supercell into a numerical cloud model. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(2): 625-648.
- [87] Yussouf N, Mansell E R, Wicker L J, et al. The ensemble Kalman filter analyses and forecasts of the 8 May 2003 Oklahoma City tornadic supercell storm using single-and double-moment microphysics schemes. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(10): 3388-3412.
- [88] Calhoun K M, Mansell E R, MacGorman D R, et al. Numerical simulations of lightning and storm charge of the 29-30 May 2004 Geary, Oklahoma, supercell thunderstorm using EnKF mobile radar data assimilation. *Monthly Weather Review*, 2014, 142(11): 3977-3997.
- [89] Lange H, Craig G C. The impact of data assimilation length scales on analysis and prediction of convective storms. *Monthly Weather Review*, 2014, 142(10): 3781-3808.
- [90] Marquis J, Richardson Y, Markowski P, et al. An investigation of the Goshen County, Wyoming, tornadic supercell of 5 June 2009 using EnKF assimilation of mobile mesonet and radar observations collected during VORTEX2. Part I: Experiment design and verification of the EnKF analyses. *Monthly Weather Review*, 2014, 142(2): 530-554.
- [91] Jones T A, Stensrud D, Wicker L, et al. Simultaneous radar and satellite data storm-scale assimilation using an ensemble Kalman filter approach for 24 May 2011. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(1): 165-194.
- [92] Kerr C A, Stensrud D J, Wang X. Assimilation of cloud-top temperature and radar observations of an idealized splitting supercell using an observing system simulation experiment. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(4): 1018-1034.
- [93] Snook N, Xue M, Jung Y. Multiscale EnKF assimilation of radar and conventional observations and ensemble forecasting for a tornadic mesoscale convective system. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(4): 1035-1057.
- [94] Sobash R A, Wicker L J. On the impact of additive noise in storm-scale EnKF experiments. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(8): 3067-3086.
- [95] Thompson T E, Wicker L J, Wang X, et al. A comparison between the local ensemble transform Kalman filter and the ensemble square root filter for the assimilation of radar data in convective-scale models. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2015, 141(689): 1163-1176.
- [96] Wheatley D M, Knopfmeier K H, Jones T A, et al. Storm-scale data assimilation and ensemble forecasting with the NSSL experimental warn-on-forecast system. Part I: Radar data experiments. *Weather and Forecasting*, 2015, 30(6): 1795-1817.
- [97] Yussouf N, Dowell D C, Wicker L J, et al. Storm-scale data assimilation and ensemble forecasts for the 27 April 2011 severe weather outbreak in Alabama. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(8): 3044-3066.
- [98] Bick T, Simmer C, Trömel S, et al. Assimilation of 3D radar reflectivities with an ensemble Kalman filter on the convective scale. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2016, 142(696): 1490-1504.
- [99] Cintineo R M, Otkin J A, Jones T A, et al. Assimilation of Synthetic GOES-R ABI infrared brightness temperatures and WSR-88D radar observations in a high-resolution OSSE. *Monthly Weather Review*, 2016, 144(9): 3159-3180.
- [100] Qiu X, Zhang F. Prediction and predictability of a catastrophic local extreme precipitation event through cloud-resolving ensemble analysis and forecasting with Doppler radar observations. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59(3): 518-532.
- [101] Snook N, Jung Y, Brotzge J, et al. Prediction and ensemble forecast verification of hail in the supercell storms of 20 May 2013. *Weather and Forecasting*, 2016, 31(3): 811-825.
- [102] Yussouf N, Kain J S, Clark A J. Short-term probabilistic forecasts of the 31 May 2013 Oklahoma tornado and flash flood event using a continuous-update-cycle storm-scale ensemble system. *Weather and Forecasting*, 2016, 31(3): 957-983.
- [103] Supinie T A, Jung Y, Xue M, et al. Impact of VORTEX2 observations on analyses and forecasts of the 5 June 2009 Goshen County, Wyoming, supercell. *Monthly Weather Review*, 2016, 144(1): 429-449.
- [104] Yokota S, Seko H, Kunii M, Yamauchi H, et al. The tornadic supercell on the Kanto Plain on 6 May 2012: polarimetric radar and surface data assimilation with EnKF and ensemble-based sensitivity analysis. *Monthly Weather Review*, 2016, 144(9): 3133-3157.
- [105] Bao X, Luo Y, Sun J, et al. Assimilating Doppler radar observations with an ensemble Kalman filter for convection-permitting prediction of convective development in a heavy rainfall event during the pre-summer rainy season of south China. *Science China Earth Sciences*, 2017, in print.
- [106] Supinie T A, Yussouf N, Jung Y, et al. Comparison of the analyses and forecasts of a tornadic supercell storm from assimilating phased array radar and WSR-88D observations. *Weather and Forecasting*, 2017, 32(8): 1379-1401.
- [107] Zhang F, Weng Y, Sippel J A, et al. Cloud-resolving hurricane initialization and prediction through assimilation of Doppler radar observations with an ensemble Kalman filter. *Monthly*

- Weather Review, 2009, 137(7): 2105-2125.
- [108] Weng Y, Zhang M, Zhang F. Advanced data assimilation for cloud-resolving hurricane initialization and prediction. *Computing in Science & Engineering*, 2011, 13(1): 40-49.
- [109] Zhu L, Wan Q, Shen X, et al. Prediction and predictability of high-impact Western Pacific landfalling Tropical Cyclone Vicente (2012) through convection-permitting ensemble assimilation of doppler radar velocity. *Monthly Weather Review*, 2016, 144(1): 21-43.
- [110] Yue J, Meng Z, Yu C K, et al. Impact of coastal radar observability on the forecast of the track and rainfall of Typhoon Morakot (2009) using WRF-based ensemble Kalman filter data assimilation. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, 34(1): 66-78.
- [111] Yue J, Meng Z. Impact of assimilating Taiwan's coastal radar radial velocity on forecasting Typhoon Morakot (2009) in southeastern China using a WRF-based EnKF. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(2): 315-327.
- [112] Weng Y, Zhang F. Assimilating airborne Doppler radar observations with an ensemble Kalman filter for convection-permitting hurricane initialization and prediction: Katrina (2005). *Monthly Weather Review*, 2012, 140(3): 841-859.
- [113] Sippel J A, Braun S A, Zhang F, et al. Ensemble Kalman filter assimilation of simulated HIWRAP Doppler velocity data in a hurricane. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(8): 2683-2704.
- [114] Poterjoy J, Zhang F, Weng Y. The effects of sampling errors on the EnKF assimilation of inner-core hurricane observations. *Monthly Weather Review*, 2014, 142(4): 1609-1630.
- [115] Sippel J A, Zhang F, Weng Y, et al. Ensemble Kalman filter assimilation of HIWRAP observations of Hurricane Karl (2010) from the unmanned Global Hawk aircraft. *Monthly Weather Review*, 2014, 142(12): 4559-4580.
- [116] Weng Y, Zhang F. Advances in convection-permitting tropical cyclone analysis and prediction through EnKF assimilation of reconnaissance aircraft observations. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2016, 94(4): 345-358.
- [117] Minamide M, Zhang F. Adaptive observation error inflation for assimilating all-sky satellite radiance. *Monthly Weather Review*, 2017, 145(3): 1063-1081.
- [118] Anderson J L. Spatially and temporally varying adaptive covariance inflation for ensemble filters. *Tellus A*, 2009, 61(1): 72-83.
- [119] Whitaker J S, Hamill T M. Evaluating methods to account for system errors in ensemble data assimilation. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(9): 3078-3089.
- [120] Ying Y, Zhang F. An adaptive covariance relaxation method for ensemble data assimilation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2015, 141(692): 2898-2906.
- [121] Sobash R A, Stensrud D J. Assimilating surface mesonet observations with the EnKF to improve ensemble forecasts of convection initiation on 29 May 2012. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(9): 3700-3725.
- [122] Zhang F, Minamide M, Clothiaux E E. Potential impacts of assimilating all-sky infrared satellite radiances from GOES-R on convection-permitting analysis and prediction of tropical cyclones. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(6): 2954-2963.
- [123] Jones T A, Stensrud D J. Assimilating AIRS temperature and mixing ratio profiles using an ensemble Kalman filter approach for convective-scale forecasts. *Weather and Forecasting*, 2012, 27(3): 541-564.
- [124] Jones T A, Stensrud D J, Minnis P, et al. Evaluation of a forward operator to assimilate cloud water path into WRF-DART. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(7): 2272-2289.
- [125] Jones TA, Stensrud DJ. Assimilating cloud water path as a function of model cloud microphysics in an idealized simulation. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(6): 2052-2081.
- [126] Jones T A, Knopfmeier K, Wheatley D, et al. Storm-scale data assimilation and ensemble forecasting with the NSSL experimental Warn-on-Forecast system. Part II: Combined radar and satellite data experiments. *Weather and Forecasting*, 2016, 31(1): 297-327.
- [127] Zhang Y, Zhang F, Stensrud D J. Assimilating all-sky infrared radiances from GOES-16 ABI using an ensemble Kalman filter for convection-allowing severe thunderstorms prediction. *Monthly Weather Review*, submitted.
- [128] Aksoy A, Zhang F, Nielsen-Gammon J W. Ensemble-based simultaneous state and parameter estimation with MM5. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(12): L12801.
- [129] Aksoy A, Zhang F, Nielson-Gammon J W. Ensemble-based simultaneous state and parameter estimation in a two-dimensional sea-breeze model. *Monthly Weather Review*, 2006, 134(10): 2951-2970.
- [130] Hu X-M, Zhang F, Nielson-Gammon J W. Ensemble-based simultaneous state and parameter estimation for treatment of mesoscale model error: A real-data study. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(8): L08802.
- [131] Wang Y, Jung Y, Supinie T A, et al. A hybrid MPI-OpenMP parallel algorithm and performance analysis for an ensemble square root filter designed for multiscale observations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2013, 30(7): 1382-1397.
- [132] Baldauf M, Seifert A, Förstner J, et al. Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model: description and sensitivities. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(12): 3887-3905.
- [133] Schraff C, Reich H, Rhodin A, et al. Kilometre-scale ensemble data assimilation for the COSMO model (KENDA). *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2016, 142(696): 1453-1472.
- [134] Geer A J, Bauer P. Observation errors in all-sky data assimilation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, 137(8): 2024-2037.
- [135] Zupanski D, Zupanski M, Grasso L D, et al. Assimilating synthetic GOES-R radiances in cloudy conditions using an ensemble-based method. *International Journal for Remote Sensing*, 2011, 32(24): 9637-9659.
- [136] Fertig E J, Hunt B R, Ott E, et al. Assimilating non-local observations with a local ensemble Kalman filter. *Tellus A*, 2007, 59(5): 19-30.
- [137] Capbell W, Bishop C H, Hodyss D. Vertical covariance localization for satellite radiances in ensemble Kalman filter. *Monthly Weather Review*, 2010, 138(1): 282-290.
- [138] Lei L, Whitaker J S. Model space localization is not always better than observation space localization for assimilation of satellite radiances. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(10): 3948-3955.
- [139] Lei L, Anderson J L, Whitaker J S. Localizing the impact of satellite radiance observations using a global group ensemble filter. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2016, 8(2): 719-734.
- [140] Bryan G H, Wyngaard J C, Fritsch J M. Resolution requirements for the simulation of deep moist convection. *Monthly Weather Review*, 2003, 131(10): 2394-2416.
- [141] Madaus L E, Mass C F. Evaluating smartphone pressure observations for mesoscale analyses and forecasts. *Weather and Forecasting*, 2017, 32(2): 511-531.
- [142] Aksoy A, Dowell D C, Snyder C. A multicaser comparative assessment of the ensemble Kalman filter for assimilation of radar observations. Part II: Short-range ensemble forecasts. *Monthly Weather Review*, 2010, 138(4): 1273-1292.
- [143] Stensrud D J, Wicker L J, Kelleher K E, et al. Convective-scale warn-on-forecast system: A vision for 2020. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(10): 1487-1499.
- [144] Stensrud D J, Wicker L J, Xue M, et al. Progress and challenges with Warn-on-Forecast. *Atmospheric Research*, 2013, 123(4): 2-16.

雷暴尺度天气集合数值预报研究

孔凡铀

(俄克拉荷马大学风暴分析和预报中心, 诺曼 73072, 美国)

摘要: 集合数值天气预报目前是全球中期业务数值预报的核心支柱, 在区域性短期天气预报中集合预报也已有广泛业务应用。中小尺度灾害性对流天气过程具有强烈非线性特征以及更为复杂的湿微物理过程, 加上极高的空间和时间分辨率要求, 其数值模式预报面临更大的不确定性及挑战。延展集合预报技术到雷暴天气尺度也就成为自然合理的选择。故此, 对雷暴尺度天气集合数值预报所面临的科学问题、主要构造技术、研究现状、仍存在的问题及挑战等做了力所能及的综述和讨论。

关键词: 集合预报, 雷暴, 数值预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.03.004

A Study of Storm-Scale Ensemble Forecast

Kong Fanyou

(Center for Analysis and Prediction of Storms, University of Oklahoma, Norman 73072, USA)

Abstract: Ensemble numerical weather prediction plays essential roles to medium-range weather forecast, and also becomes more popular in regional short-range weather forecast. Since hazardous convection weather systems have very high nonlinearity, complex moist microphysics processes, and very high temporal and spatial variation, the numerical prediction for such events are more challenged. It is thus more desire to employ ensemble technique to storm-scale weather prediction. This paper reviews key scientific questions, ensemble technique used, current status, main challenges and problems faced in storm-scale ensemble forecast.

Keywords: ensemble forecast, thunderstorm, numerical prediction

0 引言

现代气象预报的重要手段之一是运用建立在复杂数理基础上的数值天气模式以及各种常规和遥感技术获取的巨量观测资料通过大规模超级计算机产生的数值天气预报。由于大气运动及天气过程所固有的随机混沌特性, 任何微小的观测资料误差及模式本身误差所带来的不确定性均会导致基于单一数值模式的未来时段的天气预报产生偏差。预报的未来时效越长, 偏差就会越大。集合数值预报是提高天气过程可预报性的有效途径。集合数值预报技术就是同时运行若干个(通常是10~20个)略有不同的数值预报。各个预报可以是基于不同数值模式或是加上具有微小扰动的不同初始大气条件或是不同启动时间或同一模式不同的物理参数化配置等。最后通过对这些预报进行数学处理并提取出已计入各种由观测误差、分析误差、数值模式本身及物理参数化误差所带来的预报不确定性影响, 能更加准确描述未来天气过程的概率分布预报,

大幅提高数值天气预报的可靠性, 尤其是对各种突发灾害性天气过程的预报可靠性。

集合数值天气预报是目前世界各主要气象预报中心6~10 d全球中期业务数值预报的核心, 如欧洲中期天气预报中心(ECMWF), 美国国家海洋和大气管理局(NOAA)下属美国国家环境预报中心(NCEP)、日本气象厅(JMA)、英国气象局(UKMO)等^[1-4]。在区域性1~3 d短期天气预报中集合预报也已有广泛业务应用^[5-6], 如NCEP的短期集合预报系统(Short-Range Ensemble Forecast, SREF)^[7]。这些全球中期集合预报系统以及区域短期集合预报系统所用的水平网格距在十几到几十千米, 远不能分辨对流性天气过程, 预报模式一般采用积云参数化来处理大气对流运动与大尺度天气环流间的热力动力交互作用及降水过程。研究发现提高模式水平分辨率对提高降水预报准确性尤其有帮助^[8-10]。与天气尺度系统误差增长主要受斜压扰动控制不同, 对流尺度系统的误差增长还同时受到潜热及湿对流不稳定性控制。一方面, 准确预报预警与深对流过程相伴随的灾害性天气如龙卷、冰雹、雷电、洪水、大

收稿日期: 2017年10月17日; 修回日期: 2018年3月22日

第一作者: 孔凡铀(1957—), Email: fkong@ou.edu

风等是民生及经济的迫切需要。另一方面,由于中小尺度灾害性对流天气过程具有强烈非线性特征以及更为复杂的湿微物理过程,加上极高的空间时间分辨率要求,其数值模式预报面临更大的不确定性及挑战。延展集合预报技术到雷暴天气尺度也就成为自然合理的选择。这方面的研究始于约十几年前,在近几年开始逐渐得到强化,国际气象界对风暴尺度集合预报前景展现出极大兴趣^[11-13]。雷暴尺度集合预报一般指模式水平网格距不超过5 km的集合数值天气预报系统。在这样高的网格分辨率下,数值模式一般不再采用积云参数化方案,而是采用不同复杂程度的微物理方案直接显式处理云内微物理过程。文献中将3~5 km水平网格距预报系统又称为“对流许可”模式系统(convection-allowing model, CAM; 亦有用convection-permitting model),而把1 km及更高分辨率(几百米)预报系统称为“对流可分辨”(convection-resolving)。本文讨论涉及的主要是具有CAM分辨率的雷暴尺度集合预报系统。

欲开展雷暴尺度集合预报研究及评估其后续的业务部署,首先需要回答一系列科学问题,包括:1) 3~4 km网格距雷暴尺度集合数值预报相对于较粗网格(10~25 km网格距)短期集合预报及更高分辨率(1~2 km或更细)的单一确定性预报有何性价比优势;2) 如何优化设计雷暴尺度集合预报系统技术?这一问题又可分为适于雷暴尺度集合数值预报的初值扰动技术、适于雷暴尺度集合数值预报的侧边界扰动及下边界扰动、适合于雷暴尺度集合数值预报的模式物理过程参数化配置;3) 同化高密度观测资料如多普勒天气雷达资料对雷暴尺度集合数值预报的影响及价值;4) 适于雷暴尺度的最有效的集合同化技术;5) 最有效的集合预报后处理及集合预报产品,包括集合产品订正;6) 这类集合预报产品在对灾害性天气预报预警所具有的独特价值和影响。

1 雷暴尺度集合预报研究概览

对雷暴尺度集合数值预报的早期研究集中在采用积云模式在水平均匀理想大气廓线条件下利用人为在低层施加热泡激发对流云团,试图探讨不同扰动对应的误差增长形式^[14]。尽管该项研究未能完善,但较早提到了“雷暴尺度集合(storm-scale ensemble)”一词。Elmore等^[15-17]以业务粗网格模式预报中提取感兴趣格点上的模式大气廓线作为云模式水平均匀环境驱动一组云模式集合,探讨由云模式集合得到的雷暴的分布和生命史的长短特征是否能提供有用的强烈天气指引(severe-weather indicators)。一些学者^[18-19]采

用3 km网格距对不同 β 中尺度个例进行集合模拟,通过引入高斯分布随机误差源研究了不同微小误差在对流过程中的增长和传播特性,发现对流系统中的误差结构和传递有其独特性,在湿对流活动区域即使非常小的初始误差也会快速增长并污染短期确定性预报。Kong等^[11-12]较早尝试进行了用ARPS模式在完全数值天气预报框架下,并包含有多普勒天气雷达同化的一个实际龙卷雷暴个例的雷暴尺度集合预报试验。该研究采用了简单但经过改进的尺度滞后平均预报方法(SLAF)和有限的5个集合成员,通过24、6和3 km嵌套网格进行一系列集合预报数值模拟,发现各层分辨率网格上集合预报均优于单个确定性预报,但从对流系统结构及演变特征上,3 km网格要远优于两个较粗网格。此项研究还对模式误差增长以及雷达同化影响进行了探讨。

在集合预报系统的构建方法上,各种适用于已经发展相对成熟的全球中期集合预报系统的技术在理论上均可用于雷暴尺度集合预报系统。然而由于后者具有相对小的有限区域,可以通过降尺度从全球中期或区域短期集合预报获得初始扰动以及与之匹配的侧边界扰动。文献中用到的雷暴尺度集合系统构建方法主要有初始场及侧边界场扰动加单一模式单一物理参数化、单一初值和侧边界条件单一模式多物理参数化、单一初值和侧边界条件多模式多物理参数化、初值和侧边界扰动加单(或多)模式多物理的混合集合等。传统的时间滞后方法在雷暴尺度集合系统仍有应用,如ESRL的试验性高分辨快速更新预报(High Resolution Rapid Refresh, HRRR)时间滞后集合(HRRR-TLE)^[20]。随机扰动(stochastic perturbation)技术,包括随机物理过程扰动(SPPT、STTP)和随机动能后向散射扰动(SKEB)也开始应用到雷暴尺度集合研究中^[21-22]。随着近年来集合卡曼滤波分析与集合预报系统在全球中期集合预报业务系统中的有效应用,其在雷暴尺度集合预报系统的有效性研究也得到如NCAR、CAPS、NSSL等研究中心或实验室的日益重视。

美国俄克拉荷马大学风暴分析和预报中心(Center for Analysis and Prediction of Storms, CAPS)近年在雷暴尺度集合数值预报(Storm-Scale Ensemble Forecast, SSEF)领域进行了大量研发工作,从2007年开始与NOAA下设的风暴预报中心(Storm Prediction Center, SPC)及国家强风暴实验室(National Severe Storm Laboratory, NSSL)合作建立和试验跨美国范围3~4 km分辨率的雷暴

尺度集合数值预报。在中国与深圳市气象局于2013年合作建立开发了并业务运行华南区域4 km分辨率的雷暴尺度集合数值预报系统。2016年与重庆市气象局和重庆绿色智能技术研究院三方合作,建立起水平网格分辨率高达3 km跨西南范围的雷暴尺度快速同化分析集合预报系统(Storm-Scale Rapid Analysis and Forecasting System Ensemble, SSRAFS_ENS),逐3 h对实时雷达、卫星、及其他观测资料同化并运行11个成员的24 h雷暴尺度集合数值天气预报,以及每12 h运行11个成员、分辨率为(27 km×27 km)~(9 km×9 km)~(3 km×3 km)的全国范围嵌套网格96 h区域中尺度集合天气预报。

欧洲目前进入或近期计划进入业务运行的雷暴尺度集合数值预报系统包括英国UKMO的MOGREPS-UK (2.2 km格距,12个成员)^[23-24]、德国的COSMO-DE-EPS (2.8 km格距,20个成员)^[25]和法国气象局的AROME-EPS (计划2.5 km,12个成员)^[26]。

这里有必要专门对美国NOAA试验基地所涉及的雷暴尺度集合预报研究作一较详细综述。

1.1 NOAA 灾害性天气预报试验基地春季预报试验

美国NOAA灾害性天气预报试验基地(Hazardous Weather Testbed, HWT)春季预报试验(Spring Forecast Experiment, SFE)从2007年开始将雷暴尺度集合数值预报列为下一代对流灾害天气预报的主要试验产品依托,由CAPS在NOAA科学技术应用协作研究(Collaborative Science, Technology, and Application Research Program, CSTAR)项目资助下为HWT春季预报试验提供核心SSEF预报及产品。在2007年春季预报试验中,CAPS在全球首次实时运行基于WRF-ARW的4 km水平网格距10个成员的雷暴尺度集合预报,周一到周五每日产生前一日21 UTC起报的33 h集合预报,模式区域覆盖三分之二美国本土,采用51垂直层,采用由NCEP SREF扰动成员降尺度提供初值和边界场扰动加多物理参数化的混合集合^[27-28]。在2008年春季预报试验中首次加入了实时雷达数据同化,采用CAPS自己开发的ARPS三维变分(3DVAR)及云分析模块对模式区域内120部多普勒天气雷达径向风速和雷达回波反射率作实时同化^[29],预报启动时间改到00 UTC。2009年开始又加入WRF-NMM和ARPS模式动力框架,集合成员数增加到20个以上,模式覆盖区域扩大到四分之三美国本土,还首次在如此大范围运行了1 km水平网格距单一确定性预报(所用计算资源为20个4 km网格距集合成员预报的4倍多)^[30]。从2010年起CAPS SSEF模式区域扩大到全美国本土范

围^[31-32],集合成员数最高达到51个(2011年),预报时效逐步延长到36 h(2011年)、48 h(2013年)、60 h(2014年及以后)。从2015年开始,CAPS SSEF模式网格距由4 km减小到3 km。除一直运行基于三维变分与云分析同化的雷暴尺度集合预报,CAPS从2013年开始试验用自己发展的高效并行化集合卡曼滤波(EnKF)分析模块实时同化雷达及其他常规观测资料,自2016年又加入GSI同化与业务RAP相同常规观测数据流^[33-35]。

1.2 CLUE 超级集合

2007—2012年,CAPS是唯一运行并向HWT每年春季预报试验提供雷暴尺度集合预报产品的研究中心。SPC从2011年开始尝试利用EMC和NSSL等业务以及试验性全年运行的高分辨确定性预报来构建“雷暴尺度集合机会”(Storm-Scale Ensemble of Opportunity, SSEO)^[36]。随着对雷暴尺度集合研究日益重视及超算资源的普及,参与并向HWT春季预报试验提供雷暴尺度集合预报产品的机构自2013年大幅增加。例如到2015年就有来自CAPS、NSSL、NCAR、AFWA等机构贡献的多达6个集合约70个成员。这些集合由各机构独立设计,具有非常大的不可比性,亦给春季预报试验参与者造成使用上的困惑。

从2016年开始,HWT春季预报试验组织者将各研究中心所贡献的雷暴尺度集合数值预报统一纳入一个名为Community Leveraged Unified Ensemble (CLUE)的超级集合系统^[37],事先共同设定统一的模式网格、垂直层参数、WRF模式除可变化物理过程外的控制参数,以及统一的后处理产品集,按照欲研究解决的科学问题设计划分出若干子集合分由不同机构运行。CLUE的目的是借助“社区”力量通过有控制的预先设计的超级集合,为即将建立的业务化雷暴尺度集合系统提供设计上的决策指导。2016年CLUE超级集合有65个成员,由5个研究中心:CAPS(35)、NOAA国家强风暴实验室(NSSL,15)、美国国家大气研究中心(NCAR,10)、北达科他大学(UND,5)、NOAA地球系统研究实验室全球系统部(ESRL/GSD,1)所贡献,括号中为各中心贡献的集合成员数。2017年CLUE超级集合有79个成员,其中34个由CAPS所贡献。以2017年CLUE为例,总共79个成员的超级集合设计为9个子集合,欲研究和比较的问题包括:多模式核与单一模式核的比较;多物理参数化组合与单一物理组合;单一物理组合与单一物理加随机物理扰动;三维变分同化与集合卡曼滤波同化;不同微物理过程参数化影响;不同雷达分析技术影响等。

1.3 NOAA 水文气象试验基地突发洪水及强降水试验

CAPS从2016年开始为NOAA气象预报中心(WPC)组织的水文气象试验基地(Hydrometeorology Testbed, HMT)年度性夏季突发洪水及强降水试验(Flash Flood and Intensive Rainfall, FFaIR)设计并实时运行10~15个成员构成的3 km水平网格距雷暴尺度集合预报,提供概率匹配平均及邻域概率降水产品,包括雷暴尺度集合预报降水相对不同重现期(recurrence interval)不同累计时长的邻域概率^[38]。

2 雷暴尺度集合预报研究成果

在降水预报方面,Kong等^[30]发现多模式雷暴尺度集合可以显著提高基于SSEF的概率降水预报可靠性,且对于降水分布和模式雷达反射率分布采用概率匹配平均优于简单集合平均^[39]。Schwartz等^[40]发现将“邻域(neighborhood)”方法^[41]——即在一定影响半径内获取平均的集合概率的方法,与传统集合后处理相结合可以提高降水概率预报指导的可用性,强调对这类基于高分辨模式的邻域概率采用分维数技巧评分(Fraction Skill Score, FSS)。Wolff等^[42]也指出采用CRM高分辨率的预报虽然可以得到与真实对流系统更相似的结构分布以及更多的细节,却不一定能改善格点对格点尺度上的预报技能。只有借助适当的升尺度(或平滑)后处理手段获取比单个网格更大一些尺度上的邻域概率FSS才可达到更高预报技能。Schwartz等^[43]研究表明集合成员数超过20个以后继续增加并不一定能提高雷暴尺度集合预报质量,除非增加的成员可以有效展宽集合样本密度函数分布(PDF)尾段。

对CAPS历年SSEF预报检验显示雷达数据同化对前3~6 h降水预报有显著贡献,雷达资料平均正贡献可以延续12~18 h,甚至更长^[29, 44-46]。Clark等^[47-49]将CAPS春季预报试验的高分辨SSEF与需要加入积云参数化的较粗网格分辨率集合的降水预报作对比,证实SSEF在预报技能以及降水日变化特征方面明显优越于后者。更加具体研究分析表明,通过SSEF产生的定量降水预报及概率降水预报在预报评分方面要远好于采用较粗网格的NCEP业务化的SREF集合^[50-51]。Iyer等^[52]发现SSEF在定量降水预报及概率降水预报上的这种优势甚至可以延续到“第二日预报(Day-2)” (36~60 h)。Iyer等^[52]的研究还对比了2015年HWT春季预报试验的几组不同雷暴尺度集合预报0~60 h概率匹配平均定量降水预报评分(ETS)及概率降水预报评分(ROC面积),发现采用不同初值和侧

边界扰动与多物理参数化配置的混合集合(hybrid ensemble)加雷达数据同化具有最佳的表现。

Kain等^[53]分析CAPS 2011年春季预报试验SSEF数据发现雷暴尺度集合预报所得出的初始对流单体发生时间(Convection Initiation, CI)与实况之差呈现准高斯分布特征,且不存在系统性集合偏差,从而揭示SSEF能提供有用且仅需要最小程度订正的CI概率预报指导。同时,该研究也揭示出试图由SSEF用某种自动识别具体对流单体的努力本身还不具有足以预报潜在爆发性深对流活动的的能力,从而建议即便是借助拥有对流允许或对流可分辨的较高网格分辨率的雷暴尺度集合预报,今后CI预报问题也应当立足于对中尺度对流初始生成过程的预报而不是单个对流云体的形成和发展的预报(“For practical purpose, the convection initiation forecasting challenge should be framed in terms of the initiation of mesoscale convective events rather than the formation and growth of individual cumulonimbus clouds”, 摘自Kain等^[53])。

Clark等^[54-55]发现由雷暴尺度集合预报各成员输出的小时最大上升气流螺旋度(hourly maximum updraft helicity, UHmax)构建的总路径长度(total path lengths)与实际所发生龙卷风强烈度等级间有强相关性,从而可以作为龙卷发生强度预报的有效和高技能的重要预报因子。Coniglio等^[56]将2008年春季预报试验中的雷暴尺度集合预报数据与探空资料作比较,发现SSEF集合平均对发生对流前及雷暴周边环境大气的预报准确程度优于单一确定性预报,但具体成员可以存在不同程度的系统性偏差。

Beck等^[26]利用目前欧洲3个业务或准业务雷暴尺度集合预报系统(英国MOGREPS-UK、德国COSMO-DE-EPS和法国AROME-EPS)构建出范围重叠的两组多模式集合,通过对两年间共5个月的地面风、温、湿、降水预报检验,发现多模式集合通常获得比各单个集合系统较小些的均方根误差、较大的离散度、改善的ROC(或ROC面积)及Brier评分。不过Johnson等^[57-58]的研究也揭示出雷暴尺度集合预报结果存在按模式或物理参数化集群化(clustering)的问题,从而影响到集合概率预报的可靠度(reliability)。

Duda等^[22]的研究认为在雷暴尺度集合系统中加入随机动能后向散射(SKEB)与多物理参数化相结合可以减小集合平均的最小均方差误差、较平缓的秩直方图(rank histogram)、对降水概率预报有一定程度改善,SKEB也有助于提高中高层对流层各天气变量的离散度和改善近地面2 m温度、露点、10 m风的预报

概率,但对近地面量的离散度增加作用不明显。考虑到单一模式集合系统比多模式多物理集合系统有便于维护操作,以及更适合于连续循环更新EnKF同化与集合预报一体化系统的特点,Romine等^[21]利用NCAR运行的基于WRF模式的15 km嵌套3 km集合系统模拟研究了扰动侧边界条件、SKEB及随机物理参数扰动(SPPT)对雷暴尺度集合预报可靠度的影响。该集合系统在15 km网格采用每6 h EnKF循环更新同化,3 km网格直接采用15 km降尺度分析场。该研究发现采用SKEB、STTP等随机扰动技术以及增加侧边界扰动确实可以提高降水预报的集合可靠度以及某些集合评分,但同时会降低各单个成员的对模式大气相对探空廓线观测的确定性预报技能,尽管对集合平均技能影响不明显。

采用NSSL目前已业务化的基于雷达及雨量计观测资料制作的定量降水估计产品^[59]做为检验数据,Kong等^[51]对2010年CAPS春季预报试验的SSEF数据进行了检验评分,并与NCEP业务预报系列中的较粗网格分辨率的短期集合预报SREF以及12 km分辨率的北美中尺度预报(North American Mesoscale Forecast System, NAM)比较。图1是3 h累计降水预报的ETS

评分,值大为优。可以看到采用CAM高分辨率的雷暴尺度集合预报的概率匹配平均(SSEF_PM)要优于较粗网格分辨率的单一确定性业务预报NAM,也明显优于短期集合业务预报(SREF_PM),尤其在较强阈值范围。采用CAM高分辨率的雷暴尺度集合中的单一成员(ARW_CN)也显著优于业务NAM预报,以及在较强阈值范围优于SREF_EM。图中虚线(ARW_C0)为与ARW_CN成员完全相同但没有初始雷达数据同化的预报,其目的是比较同化雷达资料对降水预报的影响。从图1可以看到同化雷达数据对降水预报评分的明显提高,尤其在预报前3~6 h。对雷暴尺度集合预报与较粗网格分辨率业务化短期集合预报的降水概率预报的ROC评分同样显示出前者的明显优势^[51]。

图2是HWT 2010年春季预报试验中每日试验产品的一个样例。HWT春季预报试验每个试验日根据前一天SPC强对流天气展望(Day-1 Outlook)确定一个关注窗口区域。图2是5月19日试验日堪萨斯州俄克拉荷马州区域的逐6 h累计降水不同模式18 h预报产品及同时段(12—18 UTC)的观测降水,图中显示了雷暴尺度集合预报(SSEF)、NCEP业务化短期集合预报(SREF)及北美中尺度业务预报(NAM)的结果,其中集合预报分别显示了简单集合平均和概率匹配平均。可以看到SSEF概率匹配平均预报具有最接近实况的降水分布、结构及强度。SREF概率匹配平均预报呈现西北—东南雨带走向,中心位于堪萨斯州北部太偏西北且峰值较弱。NAM业务预报降水中心也偏西北,只是降水强度要高于SREF概率匹配平均。

2016年6月23—24日发生在西弗吉尼亚的暴发性洪水个例正值HMT 2016 FFaIR试验期间,CAPS为其运行15个成员构成的多模式(ARW和NMMB)多物理加初边界扰动的3 km网格距雷暴尺度集合预报,并提供实时雷暴尺度集合定量降水预报概率产品。该次暴发性洪水过程造成23人死亡,全州55个县有44个被宣布进入州紧急状态。在Maxwelton雨量站录得24 h 238 mm峰值雨量,麋鹿河(Elk River)水文站录得33.37 ft (1 ft=0.3048 m)纪录最高水位。图3显示雷暴尺度集合预报对这一极端天气个例可以提前24 h甚至48 h较好预报出强降水的主要落区范围及峰值强度。

3 仍存在的问题、挑战及未来方向

近十来年的雷暴尺度集合预报研究与实践取得了可称得上丰硕的成果,为数不少的业务准业务预报系统也已投入运行。然而若干重要科学问题仍然未能解决。归纳起来有:雷暴尺度集合预报集合离散度偏低、概率预报可靠度低、传统预报评分应用到高分辨

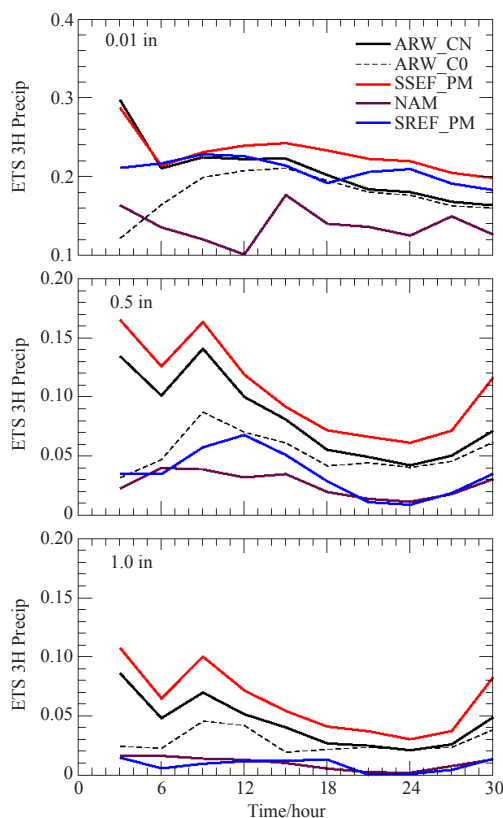


图1 2010年春季预报试验3 h累计降水ETS评分

Fig. 1 ETS scores for 3-hourly accumulated precipitation in 2010 HWT Spring Forecast Experiment

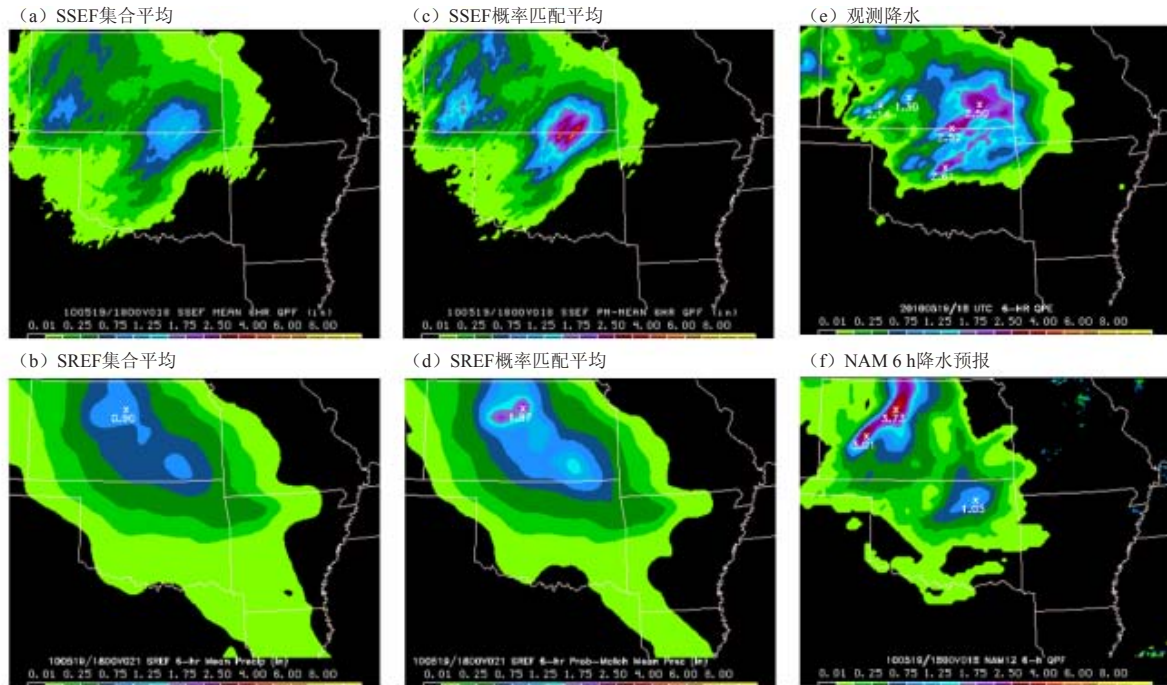


图2 2010年HWT春季预报试验6 h降水产品实例 (2010年5月19日00 UTC起报, 18 h预报12—18 UTC时段累计降水)
Fig. 2 Product example from 2010 HWT Spring Forecast Experiment: 6-hourly accumulative precipitation for 12–18 UTC, initiated at 00 UTC 19 May 2010

集合预报上的先天缺陷等。迄今为止各种研究中为提高雷暴尺度集合离散度的各种尝试, 如各类随机扰动 (SKEB, STTP, SPPT, 土壤层变量扰动)、各种同化技术 (3DVAR, cycling EnKF)、各种初始扰动 (降尺度、多尺度)、各种集合系统设计 (多模式、多物理、多物理参数) 均无法得到足够的与误差量级相匹配的预报集合离散度。邻域概念的应用对概率预报可靠度及概率评分有帮助, 但以牺牲空间尺度分辨率为代价。以对象导向 (object-oriented) 的预报检验可能弥补传统预报评分的不足, 但这类检验评分如何与预报员主观认知上的接纳有待研究。

另一突出问题是雷达数据同化对降水预报的正贡献在预报前几小时快速减退。这一方面要归于目前数值预报模式对雷暴单体的可预报性制约, 即模式初始对流单体系统在预报积分一开始即与实际大气对流的单体呈现不同的演变特征; 另一方面基于连续循环EnKF的雷暴尺度集合同化分析系统尚处于较初期阶段, 其有效性有待证实。HWT春季预报试验以及CLUE超级集合概念可能是有效借助各方力量合作解决尚存问题的发展方向。

需要说明的是, 本文并不是一个关于雷暴尺度集合预报研究及应用的完全性综述。许多十分重要的方面, 如雷暴尺度集合预报概率订正等未有涉及。

参考文献

- [1] Molteni F, Palmer T N. Predictability and finite - time instability of the northern winter circulation. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1993, 119(510): 269-298.
- [2] Toth Z, Kalnay E. Ensemble forecasting at NMC: the generation of perturbations. Bulletin of the American Meteorological Society, 1993, 74(12): 2317-2330.
- [3] Buizza R. Potential forecast skill of ensemble prediction, and spread and skill distributions of the ECMWF Ensemble Prediction System. Monthly Weather Review, 1997, 125(1): 99-119.
- [4] Kalnay E. Atmospheric modeling, data assimilation and predictability. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [5] Mullen S L, Baumhefner D P. Monte Carlo simulations of explosive cyclogenesis. Monthly Weather Review, 1994, 122(7): 1548-1567.
- [6] Hamill T M, Colucci S J. Verification of the Eta-RSM short-range ensemble forecasts. Monthly Weather Review, 1997, 125(6): 1312-1327.
- [7] Du J, Tracton M S. Implementation of a real-time short-range ensemble forecasting system at NCEP: an update. Preprints, 9th Conference on Mesoscale Processes, American Meteorological Society, 2001, 355-356.
- [8] Du J, Mullen S J, Sanders F. Short range ensemble forecasting of quantitative precipitation. Monthly Weather Review, 1997, 125(10): 2427-2459.
- [9] Stensrud D J, Bao J W, Warner T T. Using initial conditions and model physics in short-range ensemble simulations of mesoscale convective systems. Monthly Weather Review, 2000, 128(7): 2077-2107.
- [10] Mullen S L, Buizza R. The impact of horizontal resolution and ensemble size on probabilistic forecasts of precipitation by the ECMWF ensemble prediction system. Weather and Forecasting, 2002, 17(2): 173-191.
- [11] Kong F, Drogemeier K K, Hickmon N L. Multiresolution ensemble forecasts of an observed tornadic thunderstorm system. Part I: comparison of coarse- and fine-grid experiments. Monthly Weather Review, 2006, 134(3): 807-833.

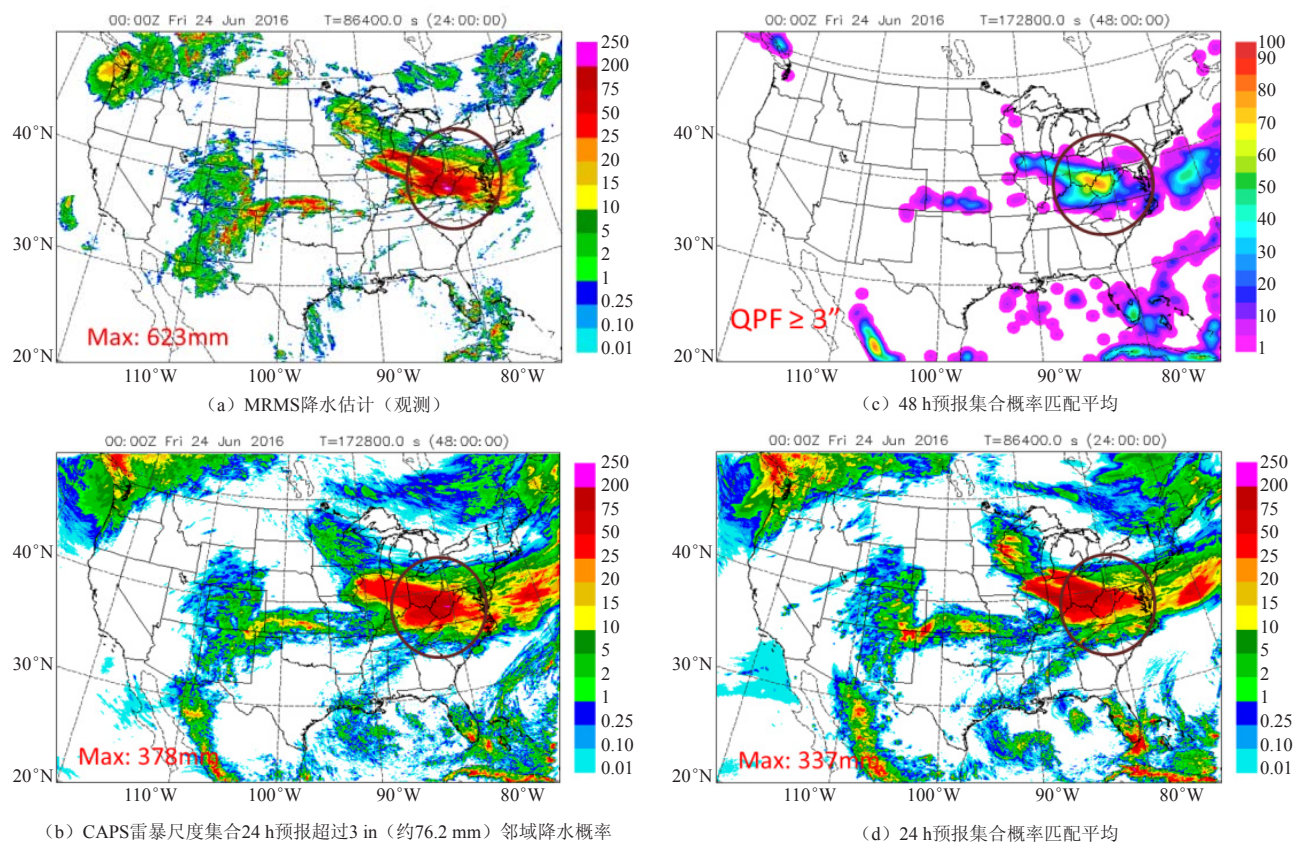


图3 2016年6月23日00 UTC到24日00 UTC 24 h累计降水
Fig. 3 24 h accumulated precipitation between 00 UTC 23 June to 00 UTC 24 June 2016

- [12] Kong F, Droegemeier K K, Hickmon N L. Multiresolution ensemble forecasts of an observed tornadic thunderstorm system. Part II: storm-scale experiments. *Monthly Weather Review*, 2007, 135(3): 759-782.
- [13] Clark A J, Weiss S J, Kain J S, et al. An overview of the 2010 hazardous weather testbed experimental forecast program spring experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(1): 55-74.
- [14] Sindic-Rancic G, Toth Z, Kalnay E. Storm-scale ensemble experiments with the ARPS model: preliminary results. *World Meteorological Organization-Publications-WMO* td, 1998: 5.56-5.57.
- [15] Elmore K L, Stensrud D J, Crawford K C. Ensemble cloud model applications to forecasting thunderstorms. *Journal of Applied Meteorology*, 2002, 41(4): 363-383.
- [16] Elmore K L, Stensrud D J, Crawford K C. Explicit cloud-scale models for operational forecasts: a note of caution. *Weather and Forecasting*, 2002, 17(4): 873-884.
- [17] Elmore K L, Weiss S J, Banacos P C. Operational ensemble cloud model forecasts: some preliminary results. *Weather and Forecasting*, 2003, 18(5): 953-964.
- [18] Walser A, Schar C. Predictability of precipitation in a cloud-resolving model. *Monthly Weather Review*, 2004, 132(2): 560-577.
- [19] Hohenegger C, Luthi D, Schar C. Predictability mysteries in cloud-resolving models. *Monthly Weather Review*, 2006, 134(8): 2095-2107.
- [20] Alexander C, Benjamin S G, Weygandt S S, et al. Time-lagged 3-km ensemble high-resolution rapid refresh (HRRR) forecasts for key convective storm, fire weather and wind energy events in 2013. 26th Conference on Weather Analysis and Forecasting/22nd Conference on Numerical Weather Prediction, 2014: 124.
- [21] Romine G S, Schwartz C S, Berner J, et al. Representing forecast error in a convection-permitting ensemble system. *Monthly Weather Review*, 2014, 142(12): 4519-4541.
- [22] Duda J D, Wang X, Kong F, et al. Impact of a stochastic kinetic energy backscatter scheme on warm season convection-allowing ensemble forecasts. *Monthly Weather Review*, 2016, 144(5): 1887-1908.
- [23] Tennant W. Improving initial condition perturbations for MOGREPS-UK. *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, 2015, 141(691): 2324-2336.
- [24] Golding B, Roberts N, Leoncin G, et al. MOGREPS-UK convection-permitting ensemble products for surface water flood forecasting: rationale and first results. *Journal of Hydrometeorology*, 2016, 17(5): 1383-1406.
- [25] Gebhardt C, Theis S E, Paulat M, et al. Uncertainties in COSMO-DE precipitation forecasts introduced by model perturbations and variation of lateral boundaries. *Atmospheric Research*, 2011, 100(2-3): 168-177.
- [26] Beck J, Bouttier F, Wiegand L, et al. Development and verification of two convection-allowing multi-model ensembles over Western Europe. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2016, 142(400): 2808-2826.
- [27] Kong F, Xue M, Bright D, et al. Preliminary analysis on the real-time storm-scale ensemble forecasts produced as a part of the NOAA hazardous weather testbed 2007 spring experiment. 22nd Conference on Weather Analysis and Forecasting/18th Conference on Numerical Weather Prediction, Salt Lake City, Utah, American Meteorological Society, 2007, CDROM 3B.2.
- [28] Xue M, Kong F, Weber D, et al. CAPS realtime storm-scale ensemble and high-resolution forecasts as part of the NOAA hazardous weather testbed 2007 spring experiment. 22nd Conference on Weather Analysis and Forecasting/18th Conference on Numerical Weather Prediction, American Meteorological

- Society, 2007, CDROM 3B.1.
- [29] Xue M, Kong F, Thomas K W, et al. CAPS realtime storm-scale ensemble and high-resolution forecasts as part of the NOAA hazardous weather testbed 2008 spring experiment. 24th Conference on Severe Local Storms, Savannah, GA, American Meteorological Society, 2008: 12.2.
 - [30] Kong F, Xue M, Thomas K W, et al. A real-time storm-scale ensemble forecast system: 2009 spring experiment. 23rd Conference on Weather Analysis and Forecasting/19th Conference on Numerical Weather Prediction, Omaha, Nebraska, American Meteorological Society, 2009: 16A.3.
 - [31] Kong F, Xue, Thomas K W, et al. Evaluation of CAPS multi-model storm-scale ensemble forecast for the NOAA HWT 2010 spring experiment. 25th Conference on Severe Local Storms, American Meteorological Society, 2010: P4.18.
 - [32] Xue M, Kong F, Thomas K W, et al. CAPS realtime storm scale ensemble and high resolution forecasts for the NOAA hazardous weather testbed 2010 spring experiment. 25th Conference on Severe Local Storms, American Meteorological Society, 2010: 7B.3.
 - [33] Jung Y, Xue M, Wang Y, et al. Multi-Scale ensemble Kalman filter data assimilation and forecasts in Central United States. WMO 6th Symposium on Data Assimilation, College Park, MD, , 2013.
 - [34] Jung Y, Zhao G, Xue M, et al. CAPS real-time continental US domain 3-km EnKF data assimilation and forecasts for the NOAA hazardous weather testbed spring forecasting experiment. WMO 7th symposium on Data Assimilation, Florianopolis, Brazil, 2017, <http://pocanga.cptec.inpe.br/inscricaoDas/program.xhtml#>
 - [35] Kong F, Xue M, Jung Y, et al. An overview of CAPS storm-scale ensemble forecast for the 2015 NOAA HWT spring forecasting experiment. 27th Conference On Weather Analysis and Forecasting/23rd Conference On Numerical Weather Prediction, 2015: 32.
 - [36] Jirak I L, Weiss S J, Melick C J. The SPC storm-scale ensemble of opportunity: overview and results from the 2012 hazardous weather testbed spring forecasting experiment. Preprints, 26th Conference on Severe Local Storms, Nashville, TN. American Meteorological Society, 2012: P9.137.
 - [37] Clark A J, Jirak I L, Dembek S R, et al. The community leveraged unified ensemble (CLUUE) in the 2016 NOAA/hazardous weather testbed spring forecasting experiment. Bulletin of the American Meteorological Society, 2018, in press.
 - [38] Brewster K, Kong F, Snook N, et al. 2017 CAPS storm-scale ensemble forecasts for the hydrometeorology testbed ffair experiment. 8th Conference on Transition of Research to Operations, AMS, Austin, Texas, 2018: 13A.5.
 - [39] 李俊, 杜钧, 陈超君. “频率匹配法”在集合降水预报中的应用研究. 气象, 2015, 41(6): 674-684.
 - [40] Schwartz C S, Kain J S, Weiss S J, et al. Toward improved convection-allowing ensembles: model physics sensitivities and optimizing probabilistic guidance with small ensemble membership. Weather and Forecasting, 2010, 25: 263-280.
 - [41] 杜钧, 李俊. 集合预报方法在暴雨研究和预报中的应用. 气象科技进展, 2014, 4(5): 6-20.
 - [42] Wolff J K, Harrold M, Fowle T, et al. Beyond the basics: evaluating model-based precipitation forecasts using traditional, spatial, and object-based methods. Weather and Forecasting, 2014, 29(6): 1451-1472.
 - [43] Schwartz C S, Romine G, Smith K, et al. Characterizing and optimizing precipitation forecasts from a convection-permitting ensemble initialized by a mesoscale ensemble Kalman filter. Weather and Forecasting, 2014, 29(6): 1295-1318.
 - [44] Kain J S, Xue M, Coniglio M C, et al. Assessing advances in the assimilation of radar data and other mesoscale observations within a collaborative forecasting-research environment. Weather and Forecasting, 2010, 25(5): 1510-1521.
 - [45] Xue M, Kong F, Thomas K W, et al. CAPS realtime multi-model convection-allowing ensemble and 1-km convection-resolving forecasts for the NOAA hazardous weather testbed 2009 spring experiment. 23rd Conference on Weather Analysis and Forecasting/19th Conference on Numerical Weather Prediction, Omaha, NB, American Meteorological Society, 2010: 16A.2.
 - [46] Xue M, Kong F, Thomas K W, et al. Prediction of convective storms at convection-resolving 1 km resolution over continental United States with radar data assimilation: an example case of 26 May 2008 and precipitation forecasts from spring 2009. Advances in Meteorology, 2013: 9.
 - [47] Clark A J, Gallus W A, Xue M, et al. A comparison of precipitation forecast skill between small convection-permitting and large convection-parameterizing ensembles. Weather and Forecasting, 2009, 24(4): 1121-1140.
 - [48] Clark A J, Gallus W A Jr., Xue M, et al. Growth of spread in convection-allowing and convection-parameterizing ensembles. Weather and Forecasting, 2010, 25(2): 594-612.
 - [49] Clark A J, Gallus W A Jr., Xue M, et al. Convection-allowing and convection-parameterizing ensemble forecasts of a mesoscale convective vortex and associated severe weather. Weather and Forecasting, 2010, 25(4): 1052-1081.
 - [50] Schwartz C, Kain J, Weiss S, et al. Next-day convection-allowing WRF model guidance: a second look at 2 km versus 4 km grid spacing. Monthly Weather Review, 2009, 137(10): 3351-3372.
 - [51] Kong F, Xue M, Brewster K, et al. Storm-scale ensemble forecasting for the NOAA Hazardous Weather Testbed. 6th European Conference on Severe Storms, 2011: 171.
 - [52] Iyer E R, Clark A J, Xue M, et al. A comparison of 36-60 hour precipitation forecasts from convection-allowing and convection-parameterizing ensembles. Weather and Forecasting, 2016, 31(2): 647-661.
 - [53] Kain J S, Coniglio M C, Correia J, et al. A feasibility study for probabilistic convection initiation forecasts based on explicit numerical guidance. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 94(8): 1213-1225.
 - [54] Clark A J, Kain J S, Marsh P T, et al. Forecasting tornado pathlengths using a three-dimensional object identification algorithm applied to convection-allowing forecasts. Weather and Forecasting, 2012, 27(5): 1090-1113.
 - [55] Clark A J, Gao J, Marsh P T, et al. Tornado pathlength forecasts from 2010 to 2011 using ensemble updraft helicity. Weather and Forecasting, 2013, 28(2): 387-404.
 - [56] Coniglio M C, Elmore K L, Kain J S, et al. Evaluation of WRF model output for severe-weather forecasting from the 2008 NOAA hazardous weather testbed spring experiment. Weather and Forecasting, 2010, 25(2): 408-427.
 - [57] Johnson A, Wang X, Xue M, et al. Hierarchical cluster analysis of a convection: allowing ensemble during the hazardous weather testbed 2009 spring experiment. Part II: ensemble clustering over the whole experiment period. Monthly Weather Review, 2011, 139(12): 3694-3710.
 - [58] Johnson A, Wang X, Kong F, et al. Hierarchical cluster analysis of a convection-allowing ensemble during the hazardous weather testbed 2009 spring experiment. Part I: development of the object-oriented cluster analysis method for precipitation fields. Monthly Weather Review, 2011, 139(12): 3673-3693.
 - [59] Zhang J, Howard K, Langston C, et al. National mosaic and multi-sensor QPE (NMQ) system: description, results, and future plans. Bulletin of the American Meteorological Society, 2011, 92(10): 1321-1338.

强天气综合报警追踪平台功能设计及龙卷预警中的应用

王啸华¹ 郑媛媛² 濮梅娟³ 宗培书¹ 禹梁玉¹

(1 江苏省气象台, 南京 210008; 2 江苏省气象科学研究所, 南京 210009; 3 江苏省气象局, 南京 210008)

摘要: 江苏省气象台通过建设强天气综合报警追踪平台 (Sever Weather Alert and Track CompreHensive platform, SWATCH), 将省市县三级气象台强对流预警的业务分工、业务流程、资料处理和预报技术进行了集成应用和软件化表达。通过SWATCH实现了多源资料显示应用、强对流天气客观识别和客观外推、省市县三级预警快速制作和实时联动、省市县三级业务行为记录分析等强天气综合报警追踪关键技术。同时, SWATCH整合处理当前短临业务中常用的PUP、SWAN等业务系统中风暴识别和外推相关的核心产品, 是结合江苏实际业务需求和业务场景的一次众创型省级业务平台试验。2015年开始SWATCH成为江苏省省市县三级气象台强对流预警主业务平台, 在2016年6月23日阜宁龙卷风等重大突发灾害天气的预警过程中发挥重要作用。

关键词: 强天气综合报警追踪, 强天气识别, 联动预警, 阜宁龙卷

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.03.005

Design of the Sever Weather Alert and Track CompreHensive Platform and Application in Tornado Warning

Wang Xiaohua¹, Zheng Yuanyuan², Pu Meijuan³, Zong Peishu¹, Yu Liangyu¹

(1 Jiangsu Provincial Observatory, Nanjing 210008 2 Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210009

3 Jiangsu Meteorological Bureau, Nanjing 210008)

Abstract: The Sever Weather Alert and Track Comprehensive platform (SWATCH) is constructed by integrating the assignments and processes of meteorological operations, and the data processing and forecasting technology of the strong convective early-warning among the observatories at three levels of the province, cities and counties in Jiangsu. The SWATCH is demonstrated by the vital technology of alerting and tracking severe weather, such as application and display of multi-source observation data, objectively identification and extrapolation of severe convective weather, rapid production and real-time linkage among three-level early-warnings in the province, cities, and counties. At the same time, SWATCH integrates the core products related to storm identification and extrapolation in PUP and SWAN which are commonly used in nowcasting. It is a breakthrough in the provincial-level operational platform that combines actual operational needs and operational scenarios in Jiangsu. Since 2015, SWATCH has become the main business platform for the strong convection weather warning at three-level meteorological stations in cities and counties in Jiangsu Province. And it has played an important role in operations on the early warning process of major sudden catastrophic weather, such as the Funing tornado on June 23 2016.

Keywords: sever weather alert and track comprehensive, identification of severe weather, linkage alerting, Funing tornado

0 引言

强对流预警是现代天气业务的一个重要方面, 2012年北京721特大暴雨、2015年湖北东方之星沉船

事件、2016年6月23日盐城阜宁EF4龙卷风等极端突发灾害天气带来重大的人员伤亡和社会财产损失。在强天气预警过程中, 预报员借助短临预报系统浏览分析最新观测资料, 提取强对流风暴信息, 制作发布强对流预警信息, 短临预报系统发挥着基础性的作用。国内应用较多的系统包括国家气象中心牵头研发的SWAN、广东省气象局的SWIFT、深圳市气象局的PONDS、上海市气象局NOCAWS、湖北省气象局的MYNOWS等短临预报系统。另外国家卫星气象中心

收稿日期: 2017年11月28日; 修回日期: 2018年3月8日

第一作者: 王啸华 (1981—), Email: njbocai@163.com

通信作者: 郑媛媛 (1963—), Email: zhengyy63@sina.com

资助信息: 华东区域气象科技协同创新基金合作项目

(QYHZ201605); 公益性行业科研专项

(GYHY201406004)

开发的SWAP、敏视达雷达有限公司的PUP、中国气象科学院研发的雷电信息处理系统分别是应用卫星、雷达和雷电资料预警强对流的专业平台^[1-4]。另一方面,当前国、省、市、县四级预报员都监测预警强对流天气,强天气业务预警过程中各级预报员的职责和分工还没有完全清晰,各地的情况也有较大差别。江苏省气象局2011年承担了天气业务省市县三级分工试点工作,2016年承担了强对流天气预警业务试点工作,根据江苏强对流预警需求特点调整了业务分工和业务流程,建设强天气综合报警追踪平台(Sever Weather Alert and Track Comprehensive Platform, SWATCH)。平台应用WEBGIS技术,实现多源资料显示应用、强对流天气客观识别和客观外推、省市县三级预警快速制作和实时联动、省市县三级业务行为记录分析等功能。SWATCH在2016年6月23日阜宁龙卷风等重大突发灾害天气的预警过程中发挥重要作用。

1 平台主要功能模块和结构关系

SWATCH 平台由多源资料采集处理模块、强对流分类识别和临近外推模块、主客观预警产品库、省市县三级预警交互制作模块、主界面框架模块、行为记录模块等6个功能模块组成(图1)。该平台快速处理多源观测资料,提取强对流风暴信息;集成暴雨雨团、径向大风速区、冰雹、龙卷等客观识别算法和SCIT^[5](The Strom Cell Identification and Tracking)、TITAN^[6](Thunderstrom Identification Tracking Analysis and Nowcasting)、TREC^[7](Tracking Radar Echoes by Correlation)等客观外推算法,实现强对流天气的分类识别和临近外推;识别和外推结果结合地理信息自动生成客观预警信息,并进行报警。平台主界面基于网络版MICAPS技术框架^[8-9],采用WEBGIS技术,面向江苏省市县三级气象台预报员,为各级预报员提供精细、及时的报警信息和便捷的主观分析工具,根据业务分工和流程,省市县级预报员可以参考客观报警信息进行灾害性天气预警快速制作。市县级预报员

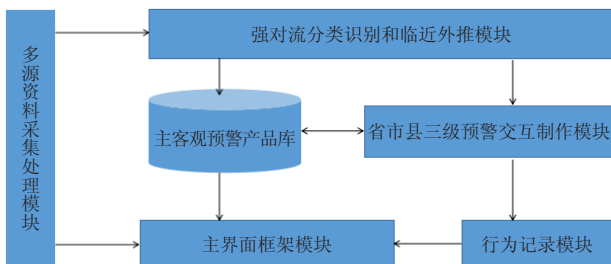


图1 SWATCH平台功能模块结构关系图
Fig. 1 Function module structure of the SWATCH

可确认、修改上级指导预警信息并通过平台向上级反馈,实现省市县三级预警快速制作、实时联动和省市县三级业务行为记录分析等功能。

2 多源资料采集处理

快速处理雷达、自动站、卫星、闪电定位仪、GPS、风廓线、探空等观测资料和SWAN系统产品、INCA^[10-11](奥地利国家气象局发展的一种融合多种资料的综合分析临近预报: Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis)预报产品等。处理结果直接供用户通过主用户界面浏览,同时为强对流分类识别模块集成的算法提供基础数据(表1)。

表1 多源资料信息表
Table 1 The multi-source data

资料类型	资料属性	提取信息
雷达	江苏和周边15部雷达, 6 min一次PUP产品	反射率、径向速度、风暴结构、风暴追踪产品、冰雹指数、中气旋、龙卷涡旋特征
自动站	江苏省内1882站5 min一次, 周边省份5400站10 min一次数据	雨量、瞬时极大风、气压、露点、地面物理量
卫星	30 min一次风云卫星数据	红外、可见光、TBB数据
闪电	10 min一次全国闪电数据	闪电密度
探空	江苏和周边8个探空站数据	探空物理量
SWAN	6 min一次客观输出产品	冰雹识别产品、QPE、QPF、TREC风场、TITAN产品
INCA数值预报	逐10 min滚动未来2 h逐10 min降水预报	雨量

3 强对流分类识别和临近外推

强对流分类识别和临近外推模块本地化集成应用了SWAN系统和江苏省气象局强对流创新团队研制的分类强对流客观识别算法,判别识别短时强降水、雷雨大风、冰雹、龙卷等4类灾害天气(表2)。识别结果通过客观外推算法,结合地理信息,形成精细化的临近预警信息。识别和外推结果一方面进入主客观预警产品库,供用户通过主界面框架浏览应用,另一方面进入省市县三级预警交互制作模块,提醒值班预报员,同时为快速制作发布主观临近预警提供基础参考。

表2 民分类强对流客观识别算法
Table 2 Objective identification methods for different severe weather

强对流类型	识别算法介绍
短时强降水	自动站1 h雨量 基于SWAN系统QPE产品的雨团
雷雨大风	自动站监测到的极大风、结合站点附近有闪电活动 雷达站周围50 km范围内雷达径向风大速区 中气旋中心20 km半径范围内的区域
冰雹	基于SWAN系统冰雹识别产品,结合探空及地面温度、变 压、散度、垂直风切变等本地指标消空
龙卷	基于中气旋和龙卷涡旋特征产品结合中气旋和龙卷涡旋特征 底高、持续时间及三维切变指标

3.1 分类强对流识别

短时强降水分为1 h降水量超过20、50和100 mm这3个等级。数据一是自动站10 min雨量资料，滑动计算过去1 h雨量；二是基于SWAN系统QPE产品的雨团识别。

冰雹识别基于2015年业务准入的SWAN冰雹识别产品^[12-13]，该产品较PUP系统冰雹指数产品在风暴单体的正确识别、消除超折射产生的冰雹虚警识别、冰雹大小的修正等方面有明显的改进，并提供了根据天气形势特征进行消空的接口。通过对江苏省2011—2015年逐日的识别结果进行回放检验，从冰雹概率、强冰雹概率、0℃层高度、-20℃层高度、 $T_{850}-T_{500}$ 、0℃层以下平均温度和冰雹大小等7个方面寻找建立本地化的春季（4—6月）和夏季（7—9月）消空指数组合，在不显著增加漏报率的情况下，获得最小的空报率。应用最优的消空指数组合，春季冰雹算法，命中率98.1%，漏报率1.85%，空报率74.79%，识别临界成果指数（CSI）由12.6%上升到24.98%；夏季冰雹算法，命中率93.1%，漏报率6.89%，空报率69.67%，识别临界成果指数（CSI）由10.39%上升到30.36%。

雷雨大风识别和预警一是基于自动站监测到的极大风、结合站点附近有闪电活动；二是雷达站周围50 km范围内，经过速度退模糊后 >20 m/s的雷达径向大风速区；三是识别雷达阵风锋，在阵风锋前10 km范围内已经或即将出现雷雨大风；四是基于近10年江苏雷雨大风天气中中气旋的底高、顶高、最大切变高度、直径、最大风切变等特征量获取雷雨大风识别阈值（表3）。识别达到阈值的中气旋，中气旋20 km半径范围内的区域，为雷雨大风区。

表3 2007—2016年雷雨大风和龙卷特征量统计阈值
Table 3 Feature threshold values of thunderstorm winds and tornadoes for 2007—2016

类别	底高/km	顶高/km	最大切变高度/km	直径/km	最大风切变/(m/s)/km
雷雨大风	2.5	5.2	3.5	5.0	17.7
龙卷	1.3	3.9	2.1	4.6	23.8

龙卷识别主要是针对西风带系统的超级单体龙卷。统计2007—2016年江苏龙卷天气中气旋的底高、顶高、最大切变高度、直径、最大风切变等特征量获取龙卷识别阈值。基于中气旋和龙卷涡旋特征产品阈值结合江苏龙卷时空分布特征统计规律，客观识别龙卷^[14-16]。

3.2 临近外推

临近外推模块集成了PUP产品的SCIT，SWAN系

统TITAN和本地化交叉相关TREC等客观外推算法。这3种外推方法分别针对风暴质心点、落区和场进行外推，针对识别的不同类型强对流天气选用合适的外推算法（表4），外推结果结合地理信息，形成精细化的客观临近预警信息。

表4 分类强对流外推算法

Table 4 Extrapolation algorithms for different severe weather

外推方法	外推类型	外推产品
SCIT	质心点	由关联风暴识别的冰雹、龙卷和部分雷雨大风应用风暴追踪信息SCIT进行外推； 由自动站识别到的大风、强降水关联到观测站点周边10 km范围内最近的风暴外推；
TITAN	落区	QPE强降水落区； 雷达径向速度大值区； 雷达阵风锋识别； 中气旋中心20 km半径范围内的区域；
TREC	场	由自动站识别到的大风、强降水关联到观测站点周边10 km范围内无识别风暴

4 主用户界面框架

4.1 主地图显示窗口

主地图显示窗口为用户提供主客观临近预警产品库中的各类临近预警信息的报警提醒，和多源资料的查看浏览。报警类型包括了雨强20、50和100 mm这3个等级的1 h降水；14、17和20 m/s 3个等级的阵风；100和50 m等级的低能见度；10 min内每平方千米闪电次数达到4次的强雷电；客观算法识别的冰雹、龙卷、雷达观测到的风暴、中气旋和45 dBz以上的强回波等14类报警图标，在主地图显示窗口显示红色图标表示当前时刻之前0.5 h内的报警信息，蓝色图标表示当前时刻之前0.5~3 h的报警信息。图层控制面板控制包括各类识别的强降水、自动站大风、闪电、强回波、中气旋、雷达径向大风速区、冰雹、龙卷、SCIT、TITAN风暴外推路径和主观、客观预警等信息的自动显示和报警（图2）。

4.2 风暴属性综合关联表

风暴属性关联表（图3），显示最近10 min内江苏及周边省（市）15部多普勒雷达PUP系统观测到的风暴属性及风暴当前位置雷达回波特征和地面物理量。包括：时间、雷达站、当前位置、风暴编号、中气旋识别、中气旋生命历史、中气旋顶高、中气旋底高、中气旋三维切变值；龙卷识别、龙卷涡旋特征、龙卷涡旋特征顶高、龙卷涡旋特征底高、龙卷涡旋特征三维切变值；冰雹识别、冰雹尺寸、冰雹概率、移向、移速、垂直积分液态水含量（VIL）、垂直积分液态水含量密度（VIL/h）、风暴所在处附近最大反射率、回波顶高、回波底高、风暴所在位置地面散度、1 h变压等26个字段属性。

实践中受到预报员的广泛欢迎。

5 省市县三级预警交互制作

5.1 江苏省市县三级短临预警业务流程

基于PWARFS每日08:00、20:00(北京时)输出0~12 h强对流潜势预报产品,省气象台在参考国家级及省级强对流潜势预报产品的基础上,应用最新的观测资料在一体化预报业务平台上制作发布指导产品。①中尺度分析产品每日09:00、12:00、15:00、21:00(北京时)发布4次,主要应用前一时次的探空及地面和卫星等实况资料以及11:00的PWAFS再分析资料;②短临预报精细化格点产品全天10 min滚动发布,时空分辨率分别为10 min和1 km,时效为0~2 h的预报场。市、县气象台基于指导产品开展服务。③当已经出现或预计2 h内将出现强对流灾害性天气时,实时基于SWATCH平台发布强对流预警落区和预警内容,发布面向省政府、相关部门和重要行业的预警信息;市气象台在3 min内确认或6 min内订正省台预警落区和预警内容,县气象台根据实际需求及时订正;市、县气象台通过发布预警信号等方式开展对外服务(图5,图中时间为北京时)。

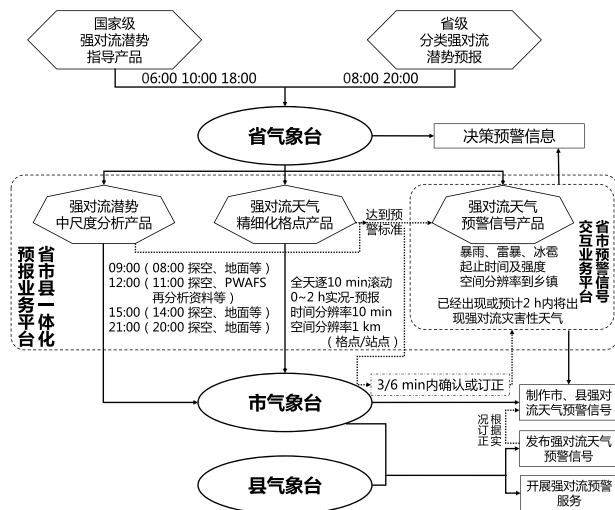


图5 省市县短临预警业务流程图

Fig. 5 The operation flow chart of the nowcasting at provincial, city and county observatories

5.2 临近预警制作

SWATCH平台作为江苏省市县一体化平台的重要组成部分,为省市县一体化的临近预警制作发布提供支撑。值班预报员收到报警提醒后,点击主地图窗口上预警制作按钮,进入预警制作界面(图6)。预警制作界面提供包括降水实况、降水预报、大风实况、大风预报、闪电分布、雷达拼图、地面物理量等信息的图层叠加控制。点击预警制作后,弹出浮动落区绘

制工具栏。落区绘制完成后自动弹出预报内容对话框,提供预报时效选择,以及强降水、雷电、雷雨大风、冰雹、龙卷等五类强对流天气不同强度等级的选项,根据绘制落区结合地理信息自动生成强对流主观预警文本(省级用户精确到区(县)、市级用户精细到乡(镇))。选择发布落区后,预报落区和预警文本在SWATCH主地图窗口显示并报警,生成图文结合的PDF预警文档在江苏预报业务一体化平台共享,同时录入预警数据库供其他专业服务平台调用。

5.3 主客观预警信息检索查询

点击指导预报可查询省市气象台制作发布的预警内容,在主地图显示窗口显示对应的蓝色半透明主观预报落区。点击客观预报,显示当前时刻基于地理信息结合风暴识别及外推结果生成的客观预警信息(图7,主地图上橙色区域,图中时间为北京时)。

6 用户行为和工作状态记录管理

SWATCH平台具备监控记录省、市级值班预报员的操作行为和工作状态功能。用户行为包括登录、报警区域设置、客观报警确认、主观联动预警信息确认、主观预警信息发布等。工作状态分为在线、离线、预警待确认、预警已确认等状态。登录用户可设置报警区域,过滤非关注区域的主客观报警。报警信息在确认后半小时内同类预警信息不再声音提示。平台支持监控记录实时显示和历史记录查询(图8),提高了省市联动效率,为优化强对流预警业务流程提供分析依据。

7 2016年6月23日阜宁EF4级龙卷过程应用

2016年6月23日14:19—15:30(北京时),盐城市阜宁县和射阳县发生了历史罕见的龙卷、雷暴大风、冰雹及短时强降水等极端天气,99人遇难,800余人受伤,损毁房屋8893户(30104间),经中国气象局江苏省阜宁县天气灾情实地调查专家组赴阜宁实地调查认定,龙卷强度最强为EF4级,最大风力超过17级。江苏省市县三级气象台依托SWATCH平台的强对流识别和外推功能,密切监测天气变化,实现了对雷雨大风、短时强降水、冰雹等强对流天气的提前预警和龙卷的第一时间客观识别;借助于其提供的省市县三级预警交互制作功能实现了省市县一体化的快速联动预警,提升了预警制作发布效率(图9,图中时间为北京时)。

7.1 龙卷客观识别和外推

14:00,在涟水的徐集镇和菱陵镇出现了相距很近风向相切的两个分别达到15.2和16.6 m/s的7级以上

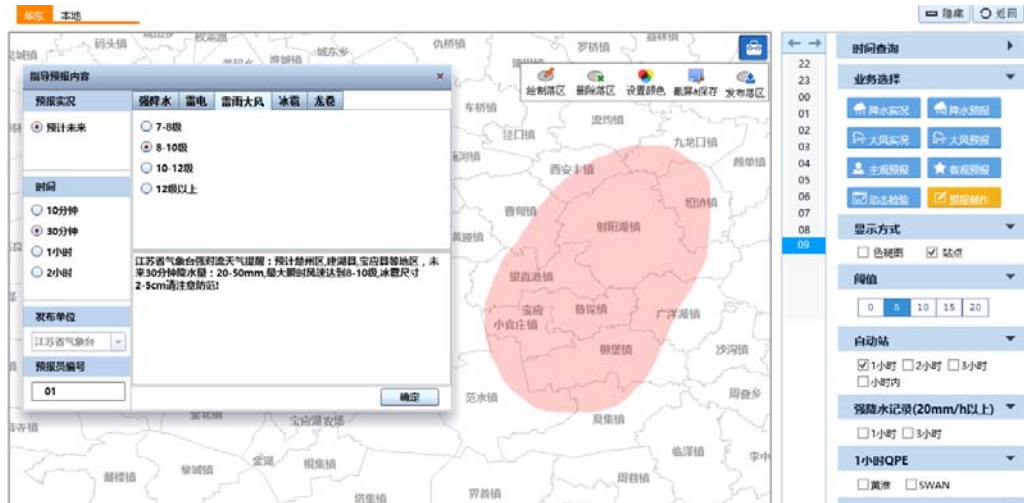


图6 预警制作
Fig. 6 Alert production

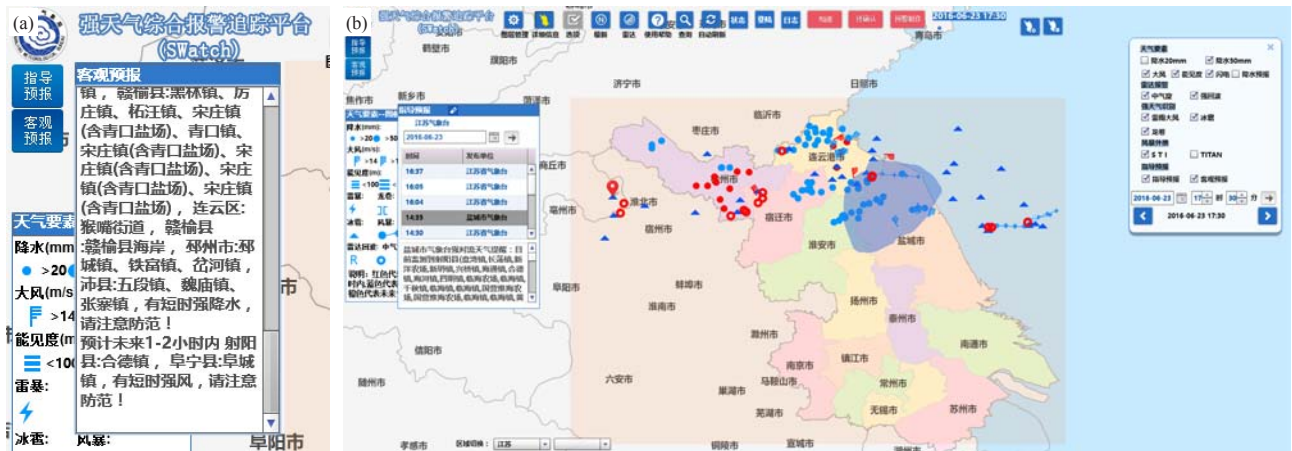


图7 SWATCH平台预警信息显示客观预报 (a) 和指导预报 (b)
Fig. 7 Information displayed in the SWATCH: (a) objective forecast, (b) subjective forecast

单位	时间	详情
宿迁市气象台	2016-06-23 15:03:39	登陆
宿迁市气象台	2016-06-23 15:03:26	市台确认
滨海县气象台	2016-06-23 14:43:30	登陆
盐城市气象台	2016-06-23 14:34:00	登陆
盐城市气象台	2016-06-23 14:32:07	市台确认
江苏省气象台	2016-06-23 14:32:07	省台确认
盐城市气象台	2016-06-23 14:32:07	已知
江苏省气象台	2016-06-23 14:32:07	省台确认
镇江市气象台	2016-06-23 13:57:19	登陆
宿迁市气象台	2016-06-23 13:37:02	登陆
赣榆县气象台	2016-06-23 13:23:05	市台确认
赣榆县气象台	2016-06-23 13:18:35	登陆
宿迁市气象台	2016-06-23 13:13:27	登陆
宿迁市气象台	2016-06-23 13:13:17	市台确认

图8 行为记录查询
Fig. 8 Inquiries of behavioral records



图9 2016年6月23日盐城中北部龙卷预警发布情况
Fig. 9 The warning issue of Yancheng tornado on 23 June 2016

大风站。据此发现有小尺度地面辐合系统过境, 中气旋有及地可能, 且在南集镇附近识别出多个中气旋和冰雹 (图10a)。

14: 26在阜宁的板湖镇和陈集镇识别出底高

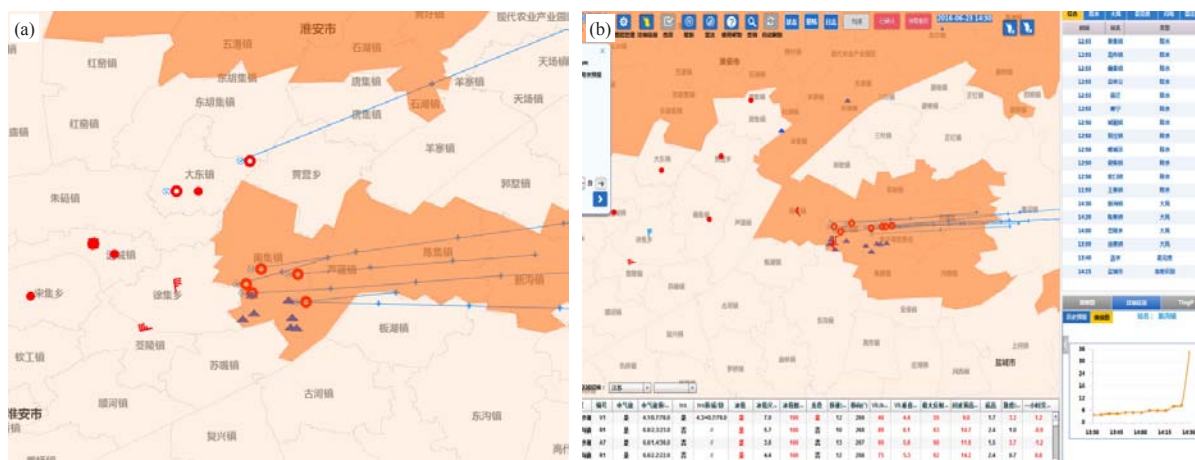


图10 SWATCH平台主用户界面：2016年6月23日14:00（北京时，a）和14:30（北京时，b）
Fig. 10 The main user interface of the SWATCH platform at 14:00 BT (a) and at 14:30 BT (b) on 23 June 2016

0.7 km，风切变达 $79 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 的中气旋，同时系统客观识别出龙卷。在识别龙卷位置北侧5 km陈集镇自动站监测到34.6 m/s大风。根据风暴路径外推可见射阳的合德镇、阜宁的海河镇、开发区、金湖管委会、新沟镇这条东西向的风暴路径上将受到影响（图10b）。

14:27，省台电话指导盐城市局，指出包括阜宁等地实况风很大且有旋转，要求指导阜宁将雷电黄色预警信号变更为雷电橙色预警信号，并且内容要包括龙卷。

7.2 省市县临近预警交互联动

14:30，省台利用SWATCH平台发布强对流天气预警提醒：“预计未来2 h灌云县，响水县，灌南县，

滨海县，射阳县，涟水县，阜宁县，楚州区，建湖县，降水量：50~70 mm，雷电强度：强，冰雹尺寸2~5 cm，最大瞬时风速达到20 m/s，龙卷强度：等级达到F2龙卷，请注意防范。（图11）”

14:35，盐城市气象台在省台临近预警的基础上进行了修改发布，“阜宁县（罗桥镇，益林镇，古河镇，东沟镇，陈良镇，板湖镇，沟墩镇，金沙湖管委会，阜宁县开发区，阜宁县开发区，新沟镇，陈集镇，芦蒲镇，阜城镇，阜城镇，郭墅镇，三灶镇，羊寨镇）预计未来2 h降水量：50~70 mm，雷电强度：强，最大瞬时风速达到24 m/s，冰雹尺寸2~5 mm以下，龙卷强度：等级达到F2龙卷，请注意防范！（图12）”

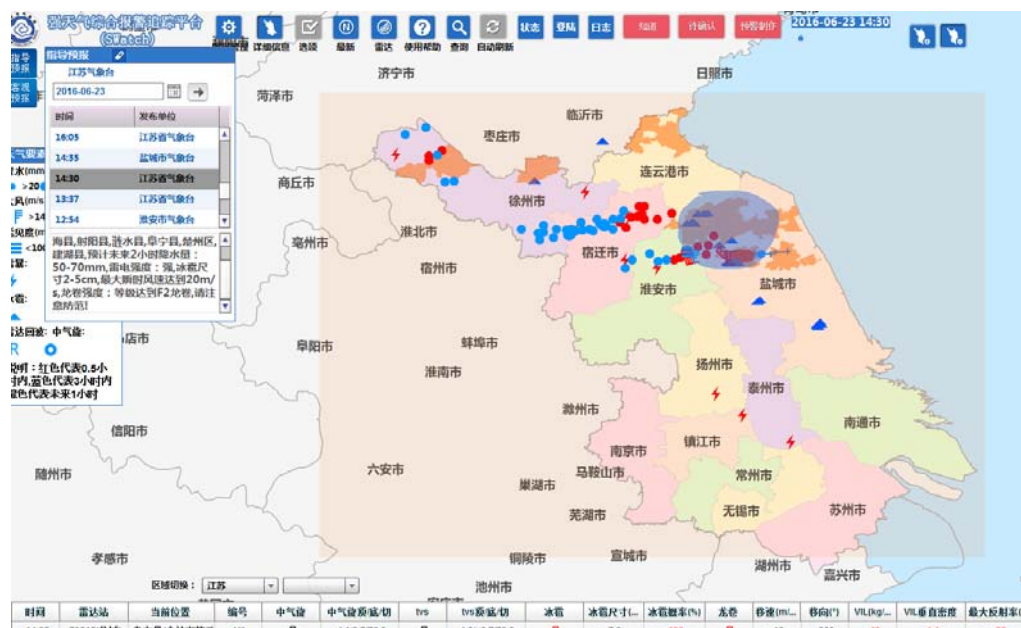


图11 2016年6月23日14:30（北京时）SWATCH平台主用户界面
Fig. 11 The main user interface of the SWATCH platform at 14:30 BT on 23 June 2016

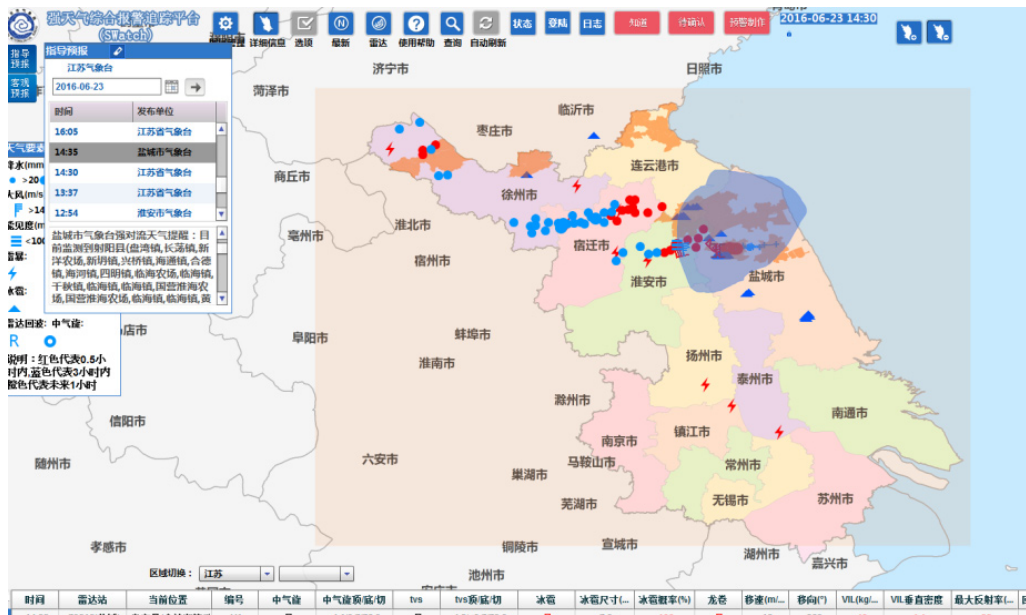


图12 2016年6月23日14: 35 (北京时) SWATCH平台主用户界面
Fig. 12 The main user interface of the SWATCH platform at 14:35 BT on 23 June 2016

14: 39, 阜宁县气象台变更雷暴橙色预警信号:

“我县已经出现强雷电并可能伴有10级以上阵风, 大部分地区将出现短时强降水、龙卷、冰雹等强对流天气, 请注意防范。”

7.3 省市县预警服务情况介绍

1) 对公众发布何种预警信号

由于龙卷的尺度小, 预报预警难度大, 目前江苏的预警信号体系里没有龙卷预警信号。

与强对流有关的主要时冰雹预警信号和雷暴预警信号。雷暴预警信号指发生雷电并伴有短时强降水或雷雨大风的强对流天气。“6·23”龙卷过程省市县对外服务用的是雷暴橙色预警信号, 同时在预警信号内容里明确发生龙卷可能。

2) 省市县三级气象台的分工

为避免对外预警信号不一致情况, 江苏省市县一体化强对流预警业务规定省气象台不对公众发布冰雹和雷暴预警信号, 但是要通过SWATCH平台指导市县气象局具体强对流的落区和强度。“6·23”龙卷过程中省气象台在监测到龙卷特征后第一时间通过SWATCH平台和电话对市县进行了指导, 同时在龙卷发生前通过江苏气象微博对公众开展了雷雨大风、短时强降水的服务。市县气象台根据省台指导立即升级发布包括龙卷信息的预警信号, 通过短信、微博、微信、网站、电视、广播向公众传播, 同时通过政务平台、微信群等多种渠道向市县领导和政府部门进行了情况报告。

3) 预警信号发布时效

中国气象局“6·23”灾情调查小组根据资料分析和灾情调查确定龙卷发生开始于14: 19, 即中气旋底高第一次下降到1 km以下的时候, 由于雷达中气旋产品是在体扫完成后才生成, 因此在14: 25预报员才能获得中气旋的底高信息, SWATCH平台14: 26分发出龙卷识别警报, 省气象台14: 27立即致电盐城气象台, 盐城气象台再致电阜宁气象台, 阜宁气象台根据指导14: 39升级预警信号。在此过程中有12 min的延迟, 主要是3个方面的时间, 首先是龙卷属于高影响、小概率天气, 盐城气象台内部需要简单研判再致电阜宁气象台; 第二是橙色和红色预警属于重大预警信号, 县局当班预报员无法立即决断, 需要请示局领导; 三是预警的制作发布操作。

4) 服务效果

从6月23日12: 37省台发布暴雨黄色预警信号开始, 省市县三级气象台过手机短信、网站、微博、微信、广播、电视、政务平台等多种渠道实时、滚动地开展强对流预警服务, 龙卷发生后及时升级发布预警信号。服务效果主要体现在以下3个方面: 第一, 提前2 h让公众了解到本地即将出现雷雨大风、短时强降水等强对流天气, 提醒群众尽量减少外出等户外活动; 第二, 发生龙卷后及时发布预警为下游地区群众躲避龙卷风赢得时间; 第三, 及时向政府报告相关情况, 为政府第一时间部署防灾、减灾和救援提供了宝贵时间。但是由于这次龙卷是一次强度为EF4级的超

强龙卷过程,被龙卷袭击的阜宁村庄大多是建筑质量较差的砖混结构房屋,村庄多为留守老人和儿童获取预警信息的能力相对较低,对龙卷风躲避知识匮乏等原因,虽然政府部门积极防御救助,还是造成了巨大的人民生命财产损失。

7.4 6月23日龙卷预警服务思考

回顾“6·23”龙卷过程,气象部门在监测预警能力和预警传播能力两个方面有较大提升空间。监测预警能力方面:龙卷监测预警技术一直是世界性的难题,需要通过建设相控阵雷达和双偏振雷达网来识别龙卷风暴尺度结构加强监测能力,对现有龙卷个例进行整编和分析研究,建立本地化的预警指标,同时需要建立扁平化的省直接到县的指导互动业务流程,给予省气象台在重大灾害天气时决断的权限。预警传播方面:与社会防灾、救援机构合作,引入专业传播手段,开展预警传播。业务系统增加一键制作和发布功能,尤其是直接对接乡村大喇叭,解决预警信息向村民传播难的问题。同时江苏省气象局计划在龙卷易发的扬州、淮安、盐城等地开展为村民发放龙卷预警收音机的试验工作。

8 结论

1) SWATCH 平台由多源资料采集处理模块、强对流分类识别和临近外推模块、主客观预警产品库、省市县三级预警交互制作模块、主界面框架模块、行为记录模块等6个功能模块组成。

2) 平台快速处理多源观测资料,提取强对流风暴信息;集成了暴雨雨团、径向大风速区、冰雹、龙卷等客观识别算法和SCIT、TITAN、TREC等客观外推算法,实现强对流天气的分类识别和临近外推。

3) 通过风暴属性综合关联表可快速识别出龙卷、冰雹和与中气旋相关的雷雨大风,了解风暴降水效率和未来移动路径。风暴属性综合关联表为用户直观、定量、综合掌握风暴的特征提供了关键参考,在

预报实践中受到预报员的广泛欢迎。

4) 平台融入江苏省市县三级一体化强对流预警业务流程,为各级预报员提供精细、及时的报警信息和便捷的主观分析工具,实现省市县三级预警快速制作、实时联动和省市县三级业务行为记录分析等功能。

5) 气象部门在监测预警能力和预警传播能力两个方面有较大提升空间,可以通过在监测手段、预警技术、业务流程、业务系统、预警发布等方面的改进,提升对龙卷等极端灾害天气的预警服务能力。

参考文献

- [1] 郑永光,林隐静,朱文剑,等.对流天气综合监测业务系统建设.气象,2013,39(2): 234-240.
- [2] 史柯.基于SWAN的山洪预警平台的研究与实现.成都:成都理工大学,2013.
- [3] 唐凯,李兴权. SWAN在黑龙江省短时临近预报中应用及产品检验.黑龙江气象,2012,29(2): 17-18.
- [4] 王红燕,周丹丹,王叶红. SWAN产品在“2012·7”沙澧河流域特大暴雨过程中的应用.暴雨灾害,2015,34(3): 239-248.
- [5] 王改利,刘黎平,阮征,等.基于雷达回波拼图资料的风暴识别、跟踪及临近预报技术.高原气象,2010,29(6): 1546-1555.
- [6] 周毓荃,潘留杰,张亚萍,等. TITAN系统的移植开发及个例应用.大气科学学报,2009, (6): 752-764.
- [7] 曾小团,梁巧倩,农孟松,等.交叉相关算法在强对流天气临近预报中的应用.气象,2010,36(1): 31-40.
- [8] 胡争光,郑卫江,高嵩,等.气象GIS网络平台关键技术研究与应用.应用气象学报,2014,25(3): 365-374.
- [9] 刘洲荣.基于MICAPS的二次开发平台建设.气象研究与应用,2016,37(S1): 126.
- [10] 颜琼丹,苏洵,韦庆华,等.一种基于多种资料融合技术的短时临近预报方法.气象研究与应用,2010,31(4): 49-52.
- [11] 程丛兰,陈明轩,王建捷,等.基于雷达外推临近预报和中尺度数值预报融合技术的短时定量降水预报试验.气象学报,2013,71(3): 397-415.
- [12] 吴林林,刘黎平,郑媛媛,等.基于SWAN的冰雹探测算法研究.高原气象,2014,33(3): 823-831.
- [13] 马洪波,陈长胜,牛立强,等.基于SWAN系统的新冰雹指数应用及检验.气象灾害防御,2016,23(2): 20-25.
- [14] 郑媛媛,张备,王啸华,等.台风龙卷的环境背景和雷达回波结构分析.气象,2015,41(8): 942-952.
- [15] 曾明剑,王桂臣,吴海英,等.基于中尺度数值模式的分类强对流天气预报方法研究.气象学报,2015,73 (5): 868-882.
- [16] 曾明剑,张备,吴海英,等.基于接近度概念的强对流天气预报方法研究.高原气象,2015,349(5): 1357-1368.

具有复杂地形适应能力的INCA短临预报系统介绍

解小寒¹ 王勇² 郭倩¹

(1 苏州市气象局, 苏州 215131; 2 奥地利气象局, Vienna 1190)

摘要: INCA是由奥地利国家气象局发展的具有复杂地形适应性的短临集成分析预报系统,也是世界天气研究计划预报示范项目INCA-CE推荐的短临业务系统,已经在十几个国家和地区得到广泛应用。INCA构建高分辨率系统地形、地表层指数和垂直坐标系,在分析中结合地面实况和遥感资料,一方面保证分析中实况信息得以准确保留,另外一方面利用遥感资料来提供基于实况插值的空间结构。INCA短临预报中使用了经典的相关运动矢量外推方法,并引入了地形影响方案。由于INCA系统实现了对山区地形的精细化描述,进而充分考虑了地形对要素场的影响,INCA在地形复杂的山区具有一定优势,在有着山洪地质灾害隐患的地区将能发挥较好的短临预警作用。INCA在强对流预报中发展了基于INCA分析场对流参数组合和卫星产品的决策算法来实现对流生消预报。还发展了一个雷暴大风物理参数化预报方案,主要基于雷达观测和短临预报来估算降水粒子载荷和负浮力,进而预报雷暴大风。对INCA分析和预报进行了验证检验,在短临时段对数值模式有明显提升,INCA对流算法对纯外推预报有所改进。

关键词: 短临集成分析预报系统, 复杂地形适应, 对流预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.03.006

Introduction to the INCA Nowcasting System with Complex Terrain Adaptability

Xie Xiaohan¹, Wang Yong², Guo Qian¹

(1 Suzhou Meteorological Bureau, Suzhou 215131 2 Central Institute for Meteorology and Geodynamics, Vienna 1190)

Abstract: This paper presents the INCA (Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis) system, which has been developed with complex terrain adaptability at the Austrian National Weather Service. As the proposed nowcasting system by WWRP/WMO Forecast Demonstration Project INCA-CE, it has been widely used in more than ten countries and regions in the world. INCA sets up high resolution system terrain, surface-layer index and vertical coordinates. The analysis part of the system combines surface station data with remote sensing data in such a way that the observations at the station locations are reproduced, whereas the remote sensing data define the spatial structure of meteorological variables through interpolation. The nowcasting part employs classical correlation-based motion vectors derived from previous consecutive analyses, and in the case of precipitation the nowcast includes an intensity-dependent elevation effect. Because the INCA system implements the fine description of the mountainous terrain and takes full account of the influence of terrain on the element fields, INCA has certain advantages in the mountainous area with complex topography. It can do well as a technical nowcasting and warning system in areas at risk of mountain torrents and geological disasters. INCA improves nowcasting of convective cells by using a decision algorithm which is based on a subset of the convective analysis fields, combined with satellite products. A physical approach of parameterizing gusts related to thunderstorms was developed. Intense downdrafts and convective outflow are partially determined by the amount of negative buoyancy and precipitation load, which are assessed from radar reflectivity observations and nowcasts. Cross validation of the analysis and verification of the nowcast are performed. Analysis quality is high and significant added value of the system compared to the NWP forecast is found in the first few hours of the nowcast. It is shown that the pure translational forecast of convective cells can be improved by using a decision algorithm of some key convective diagnostics, and the improvement is particularly evident in mountain areas.

Keyword: Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) system, complex terrain adaptability, forecast of convective cells

收稿日期: 2017年11月12日; 修回日期: 2018年4月9日
第一作者: 解小寒(1981—), Email: feng5252@hotmail.com

0 引言

随着时代发展, 公共安全、重大活动保障和社会日常生活对短临临近时段精细化天气预报和灾害性天

气预警的要求越来越高,对于降水、温度、风场、湿度、云量等多要素的精细化预报和强对流天气的短临预警提出了更高的要求。

我国幅员辽阔、强对流天气频发,突如其来的强天气经常导致重大人员伤亡和巨大经济损失。例如:2016年6月23日14时30分左右,江苏省盐城市阜宁县遭遇的强冰雹和龙卷双重灾害,截至6月26日09时,共造成99人死亡,846人受伤。另外,我国地形复杂,局地强天气在特定地形、地貌和地质情况下,还可能引发中小河流洪水、泥石流和滑坡等次生灾害。例如:2016年5月28日16时,广东江门台山市凤凰峡旅游区有游客在漂流过程中遇暴雨诱发山洪暴发被洪水冲走,随后确认事故造成8人死亡,10人受伤。

短临预报系统的设计和发展正是为了满足社会公众对短临精细化预报和强对流预警的需求。短临预报方法的基本思路是实时融合各种常规和非常规观测资料并结合数值模式预报,使用欧拉或者拉格朗日方法来模拟大气过程的持续性。大多数短临预报系统都聚焦于降水预报和对流天气。在强对流预报方面,很多短临系统主要利用风场(边界层辐合线理论)进行深对流的发生、发展进行预报,还有基于近地面温度的分析和临近预报来进行对流发展预报。例如世界知名的GANDOLF系统(英国)^[1]、ANC系统(美国NCAR)^[2-4]都具有预报对流演变、新生能力。GANDOLF系统将对流单体分为不同的发展阶段,基于风暴演变概念模型来预测对流活动的变化。ANC系统则基于已经存在的风暴、积云与(雷达观测、数值模式预报的风场)边界层辐合线的相互作用,预报对流单体的生消演变。Wilson等通过比对检验得到以下认识:1)如果系统能更好识别边界层辐合线并用于对流单体临近预报,将优于纯粹外推预报;2)超过1 h的短临对流预报,发现有利对流的边界层特征比通过卫星探测到积云活动更有指示意义。郑永光等^[5]经过调研分析国内外主流短临预报技术,认为目前临近预报技术的预报对象主要是对流风暴、雷电和降水,针对分类强对流天气的临近预报技术还存在较多不足;冰雹、雷暴大风、龙卷和短时强降水这些强对流天气的临近预报预警主要综合对流风暴和降水临近预报、强对流天气识别和实况观测进行。

INCA系统^[6-7]是由奥地利国家气象局发展的具有复杂地形适应性的短临集成分析预报系统,也是世界天气研究计划预报示范项目推荐的短临业务系统,已经在十几个国家和地区得到广泛应用。INCA系统在多源资料融合分析、复杂地形对短临天气预报的影

响,以及强对流预报等方面均有独到之处,本文针对INCA系统的设计思路及分析预报检验情况进行了详细介绍。

1 INCA系统

INCA是一个适应复杂地形的,多要素短临实时融合分析和预报系统(图1)。基于考虑复杂地形对实况分析和短临预报的影响,INCA构建了地形坐标系和地表、地形指数。INCA温度、湿度和风场的三维分析场以数值模式输出为初始场,然后结合地面观测实况对初始场进行订正。其他分析场则主要是通过融合遥感(雷达、卫星等)资料和地面实况资料得到的。各物理量场之间保持互相协调。在短临预报方面,INCA将实况分析与模式预报融合,并利用外推法和基于运动矢量误差理论的短时预报方法,给出温、湿、风、降水等多要素的预报。在对流预报中,利用分析场衍生的CAPE、CIN、LCL等多种对流参数,发展了一个基于关键对流参数组合和卫星产品的决策算法来实现对流预报。另外实现了基于雷达观测和短临预报来估算降水粒子载荷和负浮力进而预报雷暴大风。

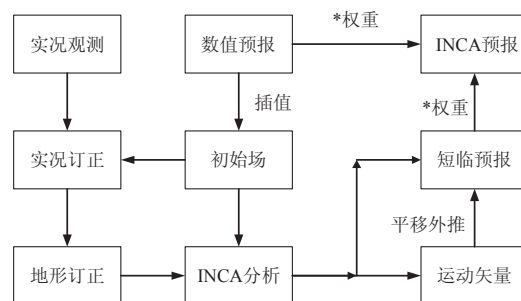


图1 INCA基本流程图

Fig. 1 The basic flow chart of INCA

1.1 INCA 地形坐标系和地形地表指数

INCA使用美国地质调查局的30"数字高程地形数据,通过双线性插值到间隔1 km的网格点。在三维物理场,INCA构建了一个Z坐标系,这里Z是相对山谷底部地表(valley floor surface, VFS)的高度(图2),VFS是一种空间上变化十分平缓的参照面,相比真实地形是平滑的,通过这样将实际地形分为基础地形和相对地形。具体方法是首先设定每个格点的最小海拔高度(在10 km半径范围内比对),最后的格点场通过一个滑动平均窗口来进行平滑得到。这样,如果是在平原地区,地表将和VFS保持一致。使用VFS作为参照面构建坐标系的主要目的在于方便将数值模式的三维物理量场在山谷地区向下插值到模式输出未能覆盖到的谷地低凹处,同时也为温度和降水垂直廓线的参数

化提供参考高度。垂直方向上层间距为200 m,共21层,这样包括了地表到以上4000 m高度的大气层。INCA还引入了一个无量纲的地表地形指数 I_{SFC} ,该指数用来表征局地地形对地表形态特征的贡献度,变化范围为0~1,在平原或者山谷盆地底部, $I_{\text{SFC}}=1$,在耸立突出的山峰和山脊这个指数就为0。该指数主要用于保证温度和湿度分析场的实况偏差订正限定在邻近地形特征相似的那些格点位置上,在INCA短临预报中也需要用到这个地形指数。

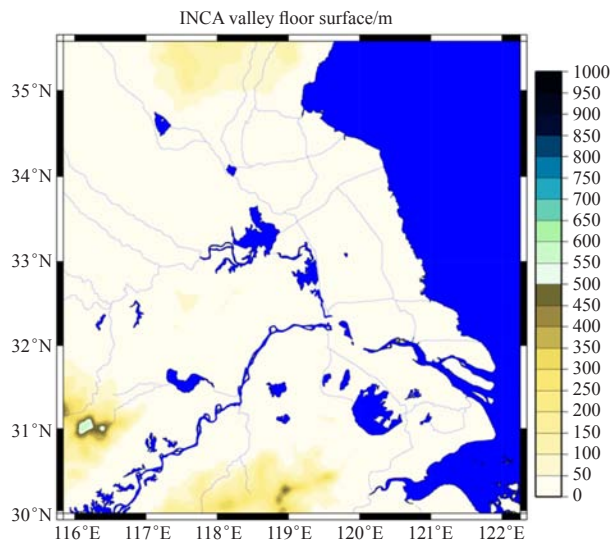


图2 江苏INCA使用的地表(以谷底为参照)

Fig. 2 Valley floor surface in the Jiangsu INCA domain

计算方法如下:对每个格点,以这个格点为中心取一个 7×7 格点的方框,计算范围内比中心点低的所有格点高度的平均值,然后跟这个格点本身的高度做比较。取这两者之差来衡量这个格点相对于周围的突出程度,这个指数被定义为一个高度差的分段线性函数,

$$I_{\text{SFC}}(i, j) = \max \{0, \min [1 - \frac{Z_{\text{H}}(i, j) - \overline{Z_{\text{H}}(i, j)} - Z_{\text{S}}}{Z_{\text{S}}}, 1] \}, \quad (1)$$

式中, Z_{S} 代表山谷或盆地等地形冷池的标准深度(在不同地区需经过交叉验证重新赋值)。

1.2 温度、湿度和风场分析

INCA温度和湿度的分析处理类似。以温度分析为例,首先将数值预报作为初始值,然后计算地面观测和初始场的误差,并在几何物理空间使用反距离权重法进行空间插值。将数值模式的温度插值到三维INCA格点场的时候,在山地会遇到一个问题:由于数值模式的分辨率较粗,模式预报输出可能不能包含山谷底层大气。因此,这里使用了一个经过修正(考虑了逆温等情况)的最不稳定层结温度梯度,将模式输出的边界低层部分向下延伸到低凹地表处。

INCA的风场同样以三维的数值预报场作为初始

场。INCA在这部分引入了一个转换因子将模式预报的低层风转化为10 m风。该转换因子为随地形变化的经验系数,同时也取决于使用的数值模式,以奥地利的情况为例,在平原和峡谷这个值平均是0.75,在地势突出的地方,可能增加到为0.9。另外存在的问题是,经过实况订正后插值得到的风场不满足质量守恒,但是数值模式直接输出风场又不适应高分辨率的INCA地形场。因此这里使用了一种迭代松弛算法来保证质量守恒。算法中考虑了地形起伏导致空气柱的压缩拉伸,及其对散度的影响。在松弛计算过程,实况站点附近的风矢量保持为观测值。值得一提的是INCA边界层辐合的计算也采用了类似的方法,算法中还充分考虑了山区地形导致的辐合。

1.3 降水分析

INCA降水分析主要依据地面站提供的定量观测和雷达提供的降水空间分布结构,同时考虑了地形的影响。INCA通过以下步骤来得到一个接近真实情况的降水分析场:1)站点插值,对不规则分布的站点数据用距离权重方法进行插值;2)雷达数据的气候订正,已经初步去除地物杂波的雷达数据由于距离衰减和地形阻挡等原因还存在误差,这些误差可以利用气候统计订正因子来得到一定程度的纠正;3)基于最新实况观测再对雷达数据进行校正,这部分主要是考虑雨量计的有限响应时间导致的滞后误差,降水受风场影响降落到地面时位置发生漂移等会导致雷达定位发生一定偏移的情况。对每个站点根据最佳匹配格点计算空间位移矢量,利用这个矢量场将雷达估测降水场进行适当位移,从而更加符合降水实况分布。4)将站点插值降水场与雷达估测降水场进行融合,一方面保证在站点位置上的降水量同站点实况保持一致,另一方面在雷达探测受局限的地区基本不考虑雷达估测降水场,而除此之外的区域,以雷达估测降水场为主。5)地形订正,这里考虑了地形起伏对降水分布的影响。6)最后将前面的合成降水分析场和地形导致的降水增量合并,合并中去除了会重复计算的情况,得到最终的降水分析场。

1.4 运动矢量外推方法及误差过滤

INCA的短临预报,主要是基于观测事实的外推并融合数值模式的预报。在降水方面,使用了相关技术对实况场进行连续分析,从而得到雨团的运动矢量,并订正误差。相关分析窗口的尺度为100 km。通过对比数值模式的500或700 hPa的风场从气象角度过滤掉虚假相关(意味着不可信的过高的平移速度),过滤算法如下:

$$|V_{\text{KORR}}| + |V_{\text{KORR}} - V_{\text{ALA}}| \leq |V_{\text{ALA}}| + 2\Delta, \quad (2)$$

式中, V_{KORR} 是由相关分析计算得到的运动矢量, V_{ALA} 是数值模式500或者700 hPa的风速矢量(选取最接近 V_{KORR} 的), Δ 规定了数值模式风速和运动矢量风速之间允许的偏差。

1.5 对流预报

短临预报的重点是对流预报。为了发展对流预报,必须考虑引入对流生消机制。众所周知,对流形成和增强主要考虑层结不稳定、水汽条件,以及触发抬升机制这三个条件。这三个条件一般是相互独立、各自发展的,只要这三个要素都能满足并且达到足够程度,就会有雷暴生成。而当这些条件不再满足,对流倾向于减弱。这也就是Doswell提出的基于构成要素的预报方法,即“配料法”。它要求首先确定预报的基本构成要素或者“配料”,这些构成要素一般是相对独立的基本气象要素。确定合适的构成要素后,还要给出相应阈值,只有当构成要素超过所给定的相应阈值才能判定对应的天气事件会发生。要注意的是,这些阈值往往是随着区域和季节变化的。

INCA使用配料法将预报员经验转化为对流算法。INCA每小时会生成10种对流参数的分析场(抬升凝结高度(LCL)、自由对流高度(LFC)、对流有效位能(CAPE)、对流抑制能量(CIN)、沙氏指数(SI)、抬升指数(LI)、对流触发温度差(DTTRIG)、相当位温、边界层辐合(CON),以及边界层湿度辐合(MOCON))。此外,INCA还结合了卫星资料来进行判别,包括可见光产品和云分类产品。

INCA经过测试最后确定了一套最行之有效的方案(表1)。表1中VIS(可见光产品)用来识别还未出现降水但是已经开始出现对流积云的区域,只有在这些地区未来才可能发生对流。CT(云分类产品)用于来排除虚假的对流区域,因为有些情况可以明显排除有对流云存在,例如卫星观测识别出来是陆面积雪、海冰积雪等情况。在对流增强判别条件里,降水量也必须超过设定阈值,避免有的情况是插值产生的微量降水被错误判别为对流加强。另外值得一提的是,国外很多气象学家都将水汽通量散度作为强对流天气的触发因子。如法国的Ducrocq等^[8]认为水汽通量辐合提供了低层抬升和被抬升空气潮湿程度的度量,可以用水汽通量辐合代替垂直速度确认低层抬升预报。美国Waldstreicher^[9]认为,湿度通量辐合有助于预报员识别强雷暴可能出现地区,有助于识别雷暴发展之前的低层强迫地区。因此INCA用水汽通量辐合

MOCON作为对流生消的一个重要判别标准。

表1 INCA对流临近预报算法的决策标准
Table 1 Decision criteria of convective nowcast algorithm in the INCA

产品	对流初生	对流增强	对流减弱
CAPE	>100 J/kg	>50 J/kg	<min(CAPE, 100 J/kg)
MOCON	>2×10 ⁻⁶ s ⁻¹	>2×10 ⁻⁶ s ⁻¹	<0.0 s ⁻¹
VIS	>0.5		
CT	≠[3, 4, 15, 16]	≠[3, 4, 15, 16]	
CIN	<200 J/kg	<200 J/kg	
DTTRIG	>-2 K	>-2 K	
RR		>0.2 mm/h	>0.0 mm/h

这样INCA将每个格点先判断分成可发生对流和不可能发生对流两种情况。对于每个可能发生对流的格点,再进行判别,是否满足对流初生、增强或者减弱的条件。这里给出INCA短临对流降水预报流程:1)降水分析场在一个时间步长内沿着计算出的运动矢量方向移动。2)如果完全满足表1中的对流生消条件,则新的格点使用模式设定的算法计算新的对流降水强度;不满足对流生消的格点将不作改变。3)修改后的场在接下来一个时间步长沿着运动矢量方向移动,对流降水强度在新的格点更新计算。4)在整个短临预报时效内重复这个过程。所有3种过程(对流初生、对流增强、对流减弱)的强度变化均采用一种随时间的高斯变化来进行模拟。

1.6 雷暴大风预报

雷暴大风预报是短临强对流预报的一个重要方面,而绝大多数雷暴大风是由雷暴内的强烈下沉气流所致。强烈下沉气流的产生主要受到降水粒子负载、浮力和垂直扰动气压梯度力等因素的影响^[8],其中前两项的影响较大。降水粒子负载总是导致向下的加速度,往往是导致雷暴内下沉气流的触发原因。浮力项可正可负,如果对流层中层或中上层存在明显干层,则由降水负载发动的下沉气流由于雷暴周边干空气的夹卷进入使得雨滴或冰雹迅速蒸发造成下沉气流降温,雷暴下沉气流内温度明显低于环境温度而产生向下的负浮力将导致下沉气流加速下降。INCA主要基于对雷暴大风环境条件的诊断分析,发展了基于雷达探测资料和INCA短临预报来计算降水粒子负载、负浮力这两项所代表的潜能,进而估算地面出流最大阵风的算法。虽然这种算法不能完全准确地模拟雷暴下沉气流和地面出流大风的整个物理动力机制,也很难直接预报出龙卷,但在雷暴大风预警防灾方面还是可以发挥积极作用。例如在6·23阜宁龙卷过程中,INCA系统14:06预报的在14:30盐城地区的极大风力和极

大风力中心落区虽然和实况（14：30左右阜宁县新沟镇等地出现12级大风，而阜宁龙卷经专家组判定等级为EF4级，风力超过17级）有偏差（图3），但提前二十多分钟便预警阜宁地区将受到8~11级雷暴大风的影响，另外在13：40就提前50 min预报阜宁地区将有7~9级雷雨大风，因此在雷暴大风预警防灾方面还是可以起到积极作用的。

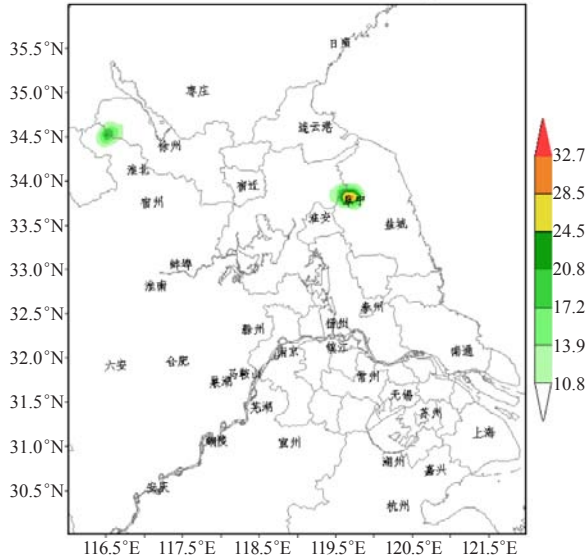


图3 2016年6月23日14：30苏州INCA对流阵风预报（起报时间14：06）

Fig. 3 The INCA forecast for Suzhou convective gusts at 14:30 BT on 23 June 2016 (Initial time was 14:06 BT 23 June 2016)

2 验证与检验

2.1 分析场检验

表2给出了INCA在江苏2016年夏季和冬季温度、风场、降水这几个要素的分析场交叉验证结果。以温度为例，平均温度偏差（Bias）接近于0，这不但是对所有站点的平均，对每个站点单独检验也是类似结果，多年平均的情况是这种偏差小于0.3℃。对于平均绝对误差（MAE）和均方误差（RMSE）来说，冬季往往比夏季高，这可能是因为冬季经常出现大气层结稳定或者逆温的情况。

表2 江苏INCA冬、夏季单月分析交叉验证结果

Table 2 Results of Jiangsu INCA analysis cross validation for a summer and a winter month

要素	夏季			冬季		
	Bias	MAE	RMSE	Bias	MAE	RMSE
$T/^\circ\text{C}$	0.0	1.0	1.5	0.0	1.2	1.9
$U/(\text{m/s})$	-0.1	1.2	1.6	0.1	1.1	1.7
$V/(\text{m/s})$	0.2	1.3	1.3	0.3	1.2	1.2
RR/mm	0.02	0.04	0.25	0.01	0.03	0.15

2.2 短临预报检验

相比数值模式预报，INCA在短临时段的预报效果有明显提升。这里给出了2017年江苏夏季INCA系统检验的结果：1）INCA在0~2 h的晴雨预报准确率平均为90.4%（图4），同期数值模式24 h晴雨预报准确率平均为75.7%。2）INCA在0~2 h的温度预报准确率平均为91.9%（图5），同期数值模式24 h的温度预报准确率平均约为82.8%。

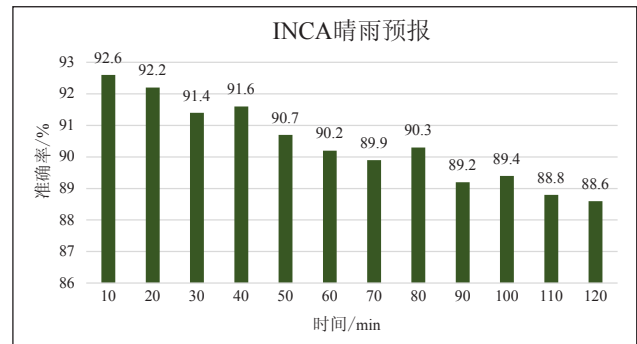


图4 江苏2017年夏季INCA（0~2 h）短临晴雨预报准确率

Fig. 4 The 0-2 hours accuracy rate of rainy and shine weather nowcasting by Jiangsu INCA for Summer 2017

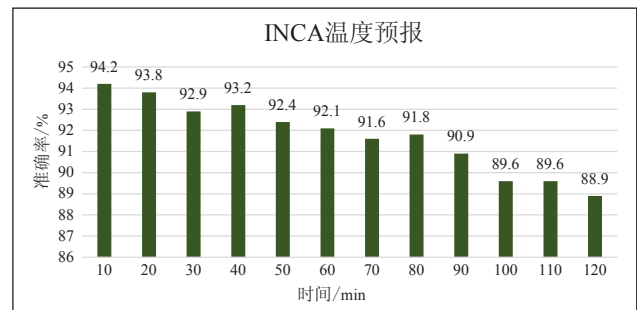


图5 江苏2017年夏季INCA（0~2 h）温度预报准确率

Fig. 5 The 0-2 hours accuracy rate of temperature nowcasting by Jiangsu INCA for Summer 2017

2.3 对流算法与纯外推短临降水预报对比检验

选取了4种短临降水预报方案来对比检验不同地形条件下对流降水算法以及几种数值模式性能，4种短临降水方案分别为：纯平移外推短临降水预报（TRANS），以及分别使用奥地利的ALADIN、AROME、ALARO等3种区域数值模式预报作为背景初始场的对流算法短临降水预报。试验区域选取东西地形差异明显的奥地利地区，奥地利东部为地形复杂的阿尔卑斯山区，西部为平原地区。共选取了奥地利地区15个雷暴个例。每个雷暴日短临降水预报的预报时效为6 h。根据地形特征将模式预报区域分为34块小区域。在模式预报时效内（6 h），计算各个区域的降水平均值，然后对4种短临预报进行比较。

图6 显示了4种短临降水预报的均方根误差对比结果。该均方根误差是各个短临预报在整个预报场的均方根误差平均值。总的来看,采用AROME背景的对流算法短临降水预报结果最差,这说明AROME模式还有待改进。而另外两种采用对流算法的短临预报(ALADIN和ALARO背景场)表现比较接近,

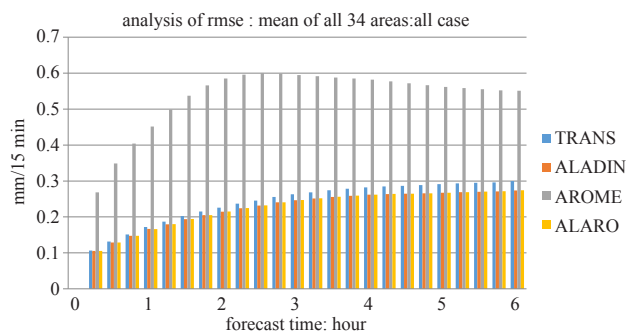


图6 4种短临预报的均方根误差(场平均)对比图
Fig. 6 RMSE of 4 precipitation nowcasts (a translational precipitation nowcasts, and 3 convective precipitation nowcasts with ALADIN background, AROME background and ALARO background respectively) for the whole forecast fields and all dates of the 15 investigated days

对流算法短临预报(ALADIN背景场)基本都表现较好,而6 h短临预报检验对比结果基本与之类似。

随后排除AROME方案,从34片区域中选取了2块区域,分布代表典型的阿尔卑斯地区(山区)和非阿尔卑斯地区(平原)来进行对比检验剩下的3个方案。检验结果表明,无论山区或平原地区,对流算法均优于平移算法的短临降水预报,特别是在山区表现更好一些,原因可能是INCA考虑了地形的影响,能够分析出山区地形导致的风场辐合。

3 结论

做为一套技术成熟并广泛应用的短临预报业务系统,INCA系统在实况分析技术、外推预报技术、融合数值预报技术以及对流概念模型预报技术等^[1-18]方面均有其独到之处。

INCA认为要做好短临预报,首先需要得到一个高分辨率高质量的实况分析场,而且必须考虑复杂地形(山脉峡谷)起伏对短临预报的影响。INCA因而构建了高分辨系统地形,地表层指数和垂直坐标系。通过综合地面自动站资料、遥感探测资料(雷达、卫星)、数值预报模式预报和高分辨率地形资料,一方面保证分析中实况信息得以准确保留,另外一方面利用遥感资料来提供基于实况插值的空间结构,进而实时提供高分辨率多要素互相协调的三维实况分析场。

并且几乎在各个时刻都优于采用平移算法的短临预报(TRANS)。图7给出了0~1 h对流算法短临预报(ALADIN背景场)与平移算法短临预报的相对均方根误差分布。低于100(%)的数值表示对流算法短临预报(ALADIN背景场)表现更佳,反之平移算法短临预报表现更好。由图7可见,0~1 h绝大多数地区

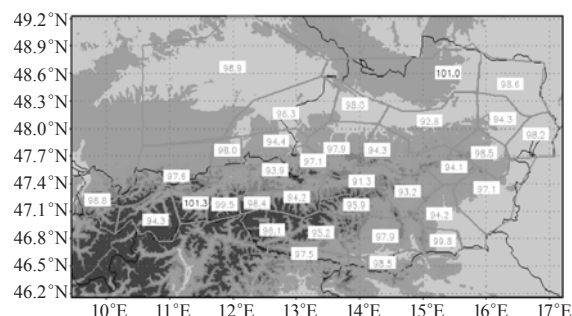


图7 0~1 h对流算法短临预报(基于ALADIN背景场)与平移算法短临预报的相对均方根误差分布,数值低于100(%)的地区表明对流算法预报效果更好,反之则平移算法更好

Fig. 7 Relative RMSE of the first hour convective precipitation nowcasts with ALADIN background compared to the translational precipitation nowcasts for all dates of the 15 investigated days. Those < 100 (%) denote that the convective nowcasts were better than that by the translational method on average, and vice versa

而在短临要素预报中INCA使用了外推方法融合数值模式预报,并引入了地形影响方案。经过验证和检验,INCA实况场分析质量良好,短临时段的预报对数值模式有明显提升,例如能够分析出山区地形导致的风场辐合,进而综合其他判定依据预报出地面辐合导致的对流触发和增强。总的来看,INCA系统设计适应地形复杂的山区,在山洪地质灾害隐患地区的短临预警上具有一定优势。

在短临对流预报方面,INCA首先基于精细化的温度、湿度、风场等实况分析场,提取生成了一系列的对流参数分析场。发现对于对流短临预报来说,最重要的几项对流参数是CAPE、CIN、水汽辐合和对流温度差等,同时还需要卫星产品来辅助判别对流单体的生消。在此基础上提出了一种基于高分辨的几项关键对流诊断量分析来进行短临对流预报的方法(类似配料法)。通过短临降水预报检验,使用这种基于关键对流参数组合和卫星产品的决策算法可以改进纯外推预报。此外INCA还基于对雷暴大风环境条件的诊断分析,发展了基于雷达探测资料和INCA短临预报来计算降水粒子负载、负浮力这两项所代表的潜能进而估算地面出流最大阵风的算法。虽然这种算法不能完全准确模拟雷暴下沉气流和地面出流大风的整个物

理动力机制, 但经过试用在雷暴大风预警防灾方面可以发挥积极作用。

参考文献

- [1] Pierce C E, Collier C G, Hardaker P J, et al. GANDOLF: a system for generating automated nowcasts of convective precipitation. *Meteorological Applications*, 2000, 8: 341-360.
- [2] Wilson J W, Crook N A, Mueller, et al. Nowcasting thunderstorms: a status report. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79: 2079-2099.
- [3] Cai H, Wilson J, Pinto J, et al. Developing NIWOT: a regional 1-6 hr short-term thunderstorm forecast system. *The Fifth International Conference on Mesoscale Meteorology and Typhoon*, Boulder, USA, Oct 31st-Nov 3rd, 2006.
- [4] Dixon M, Wiener G. TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting-A Radar-based Methodology. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1993, 10: 785-797.
- [5] 郑永光, 周康辉, 盛杰, 等. 强对流天气监测预报预警技术进展. *应用气象学报*, 2015, 26(6): 641-657.
- [6] Haiden T, Kann A, Wittmann C, et al. The Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) system and its validation over the eastern Alpine Region. *Weather and Forecasting*, 2011, 26: 166-183.
- [7] Steinheimer M, Haiden T. Improved nowcasting of precipitation based on convective analysis fields. *Advances in Geosciences*, 2007, 10: 125-131.
- [8] Ducrocq V, Tzanos D, Senesi S. Diagnostic tools using a mesoscale NWP model for the early warning of convection. *Meteorological Applications*, 1998, 5: 329-349.
- [9] Waldstreicher J S. Guide to utilizing moisture flux convergence as a predictor of convection. *National Weather Digest*, 1989, 14: 20-35.
- [10] 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展. *气象学报*, 2012, 70(3): 311-337.
- [11] Sun J, Crook N A. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part I: Model development and simulated data experiments. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1997, 54: 1642-1661.
- [12] Sun J, Crook N A. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part II: Retrieval experiments of an observed Florida convective storm. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1998, 55: 835-852.
- [13] Wolfson M M, Dupree W J, Rasmussen R, et al. Consolidated Storm Prediction for Aviation (CoSPA), AMS 13th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, New Orleans, LA, 2008.
- [14] 陈明轩, 俞小鼎, 谭晓光, 等. 对流天气临近预报技术的发展与研究进展. *应用气象学报*, 2004, 15(6): 754-766.
- [15] 韩雷, 王洪庆, 谭晓光, 等. 基于雷达数据的风暴体识别、追踪及预警的研究进展. *气象*, 2007, 33(1): 3-10.
- [16] 曾小团, 梁巧倩, 农孟松, 等. 交叉相关算法在强对流天气临近预报中的应用. *气象*, 2010, 36(1): 31-40.
- [17] 郑永光, 张小玲, 周庆亮, 等. 强对流天气短时临近预报业务技术进展与挑战. *气象*, 2010, 36(7): 33-42.
- [18] Li P W, Wong W K, Cheung P, et al. An overview of nowcasting development, applications, and services in the Hong Kong Observatory. *Journal of Meteorological Research*, 2014, 28(5): 859-876.

气象出版社生态环境类图书出版情况

■ 陈凤贵 徐秋彤 张莹莹

气象出版社坚持以气象图书服务国家建设、服务大众需求的理念, 在出版社成立后的几十年里组织出版了若干种生态环境相关主题的图书, 为推动生态环境建设发挥了积极作用。

20世纪90年代以来, 气象出版社共出版气象生态环境主题图书147种, 各年度出版的气象生态环境主题图书种数分布情况见图1。可以看出, 从1997年起, 此类图书的出版种数明显增加, 表明生态环境领域受到越来越多专家、学者的关注, 并开展了相关的技术研究。

根据图书用途、性质及表现形式等标准, 可以把这147种图书划分为专著、科普、教材、文集、译文、图集和其他7类。其中专著类图书占绝对多数, 达到105种, 占比达到71%, 侧面反映了生态环境研究项目多、成果多; 占比次之的是教材类图书, 为17%, 说明大中专院校使用的教材种类多, 生态环境教学用书选择余地较大; 科普类、文集类、译文类、图集类与其他都属于小众类, 占比均不超过

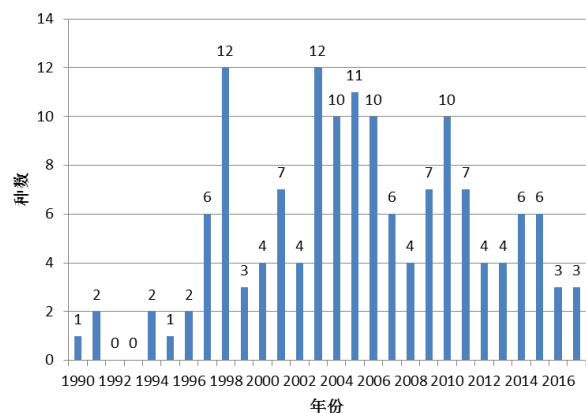


图1 1990—2017年出版气象生态环境主题图书的种数

5%。建议生态环境方面的科普等小众类图书加大创作力度、加快出版进度, 提高质量、增加数量, 为宣传、普及生态环境知识提供支持。

(作者单位: 气象出版社)

基于当日临界雨量的国家级地质灾害风险预警方法

李宇梅¹ 狄靖月¹ 许凤雯¹ 张国平² 王志²

(1 国家气象中心, 中国气象局, 北京100081; 2 中国气象局公共气象服务中心, 北京100081)

摘要: 降水是引发滑坡、崩塌、泥石流的主要诱因。通过全国地质灾害易发程度区划研究, 初步将全国划分为西北、东北、青藏高原、黄土高原、秦岭大巴山区、华北、云贵高原、中南和东南地区共9大预警分区。应用1950—2014年地质灾害历史灾情数据, 选取灾害当天降水量作为建模因子, 对其进行正态化处理后对地质灾害发生概率密度进行多项式、傅里叶和高斯拟合, 发现高斯拟合方法最优, 选取高斯拟合方法分区建立地质灾害概率预报方程, 并结合业务地质灾害风险预警等级划分, 制定地质灾害风险预警当日临界雨量阈值指标, 应用2015年4—10月172个地质灾害样本以及江西兴国和于都2015年5月17—21日降水诱发地质灾害过程对当日临界雨量指标进行预报检验, 结果表明当日临界雨量指标判别简单可行, 判定效果较好, 具有实际应用价值。

关键词: 当日临界雨量, 地质灾害, 高斯拟合, 风险区划, 个例检验

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.03.007

A Risk Warning Method Based on the Intraday Critical Precipitation for National Geological Disaster

Li Yumei¹, Di Jingyue¹, Xu Fengwen¹, Zhang Guoping², Wang Zhi²

(1 National Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

2 China Meteorological Administration Public Meteorological Service Centre, Beijing 100081)

Abstract: Landslides, debris-flows and collapses are caused by heavy precipitation frequently. A zonation for national geological disaster was carried out, and the 9 regions were divided so called as: the Northwestern China, Northeastern China, Tibetan Plateau, Loess Plateau, Qinba Mountain, Northern China, Yunnan-Guizhou Plateau, Central and South China and Southeastern China. The critically intraday precipitation for geological disaster in China was investigated based on the information of geological disasters in 1950-2014. Based on the Gaussian fitting method, the probability forecast model was adopted to describe probabilistic relation between precipitation and geological disaster. The intraday critical precipitation and forecast indexes of geological disaster were established with the geological disaster risk grades in business. And then this indexes were tested for 172 samples of geological disaster during April to October 2015 in China and samples of Xingguo and Yudu counties in Jiangxi Province during 17 May to 21 May 2015. The practical application has shown that the model has a good effect, the discriminant method of intraday critical precipitation indexes is effective and feasible.

Keywords: intraday critical precipitation, geological disaster, Gaussian fitting, risk division, sample inspection.

0 引言

我国是世界上地质灾害最为严重的国家之一, 每年因滑坡、崩塌和泥石流造成的死亡人数约占各类自然灾害死亡人数的四分之一。滑坡、崩塌和泥石

流分布范围广、灾害重, 在地质灾害高发区因灾损失已成为制约和威胁当地经济社会发展和人民生命财产安全的重要因素。据中国地质环境监测院统计, 2001—2014年滑坡、崩塌和泥石流发生数量年均约2.5万起, 约95%由自然因素引起, 主要为降水、地震、冰雪冻融, 每年造成死亡失踪人数约为900人、直接经济损失46亿元左右。降水是引发滑坡、崩塌和泥石流的最重要触发因素^[1-5], 在全球变暖的大背景下, 极端天气事件呈现增多的趋势^[6-7], 短时强降水、台风、暴雨等气象灾害引发的滑坡、崩塌和泥石流的危害性也有所加强^[8], 仅2013年造成的经济损失达101亿元。

一般来说, 在地质灾害易发地区前期降水较为充沛条件下, 下垫面含水量已明显增加, 如果当前再

收稿日期: 2016年12月22日; 修回日期: 2017年5月15日

第一作者: 李宇梅(1976—), Email: liyum@cma.gov.cn

通信作者: 狄靖月(1982—), Email: Dijy@cma.gov.cn

资助信息: 中国气象局气象标准预研项目(Y-2016-05);

国家气象中心预报员专项(Y201604); 中国气象

局预报员专项(CMAYBY2017-087); 国家自然

科学基金项目(41775111, 51509043); 国家气象

中心水文气象预报团队项目(2016—2017); 国家

重点研发计划(2016YFC0402702)

有暴雨,则爆发滑坡泥石流概率大大增加。美国学者对Cleveland Corral区域同一滑坡体的2次滑坡研究表明^[9]:深层缓慢下移变形的滑坡由持续降水(月降水)深层入渗引发,滑坡发生在降水时间几周或几个月后;浅层突发滑坡发生在2周明显降水期间,滑坡发生在降水后期,很少滞后,另外研究表明^[10]强降水(1或2 d内降水达到50~70 mm)是西雅图地区大部分滑坡发生的直接诱因。意大利学者^[11]对Ruinon区域滑坡研究发现:该区域年均降水为750 mm,其中低强度和短持续时间的降水事件(8~10 mm/d、持续几天),滑坡的加速不是很明显;短持续时间但是强度高的降水事件(10~15 mm/d、持续2~3 d)能引起滑坡的加速位移。韩国台风极端降水诱发密集山体滑坡事件^[12],如2002年Rusa台风诱发1500次滑坡,12 h雨量超过895 mm;2003年Maemi台风诱发1200次山体滑坡,日雨量最大为410 mm,小时雨强最大为89.5 mm。由于降水与地质灾害关系密切,通常将地质灾害预报简化为降水和地质灾害发生的简单判别关系,滑坡和泥石流的发生往往存在一个临界雨量值^[13],当达到临界雨量时,滑坡和泥石流存在多发和集中爆发的现象,普遍认为当前降水、前期降水、雨强及降水持续时间等都是主要建立地质灾害临界雨量方法的指标(因子)^[14-18],暴雨是90%滑坡、81%崩塌和全部泥石流的主要诱发因素^[19],其中当日强降水(≥ 50 mm)是最重要的因子,当日降水量阈值已成为预报泥石流、滑坡的主要指标^[20-22]。前期研究中对2010—2012年136个地质灾害事件进行分析,发现其中有102个地质灾害事件做到提前预警,降水主要发生在当天,能够引起人们足够的重视来采取临灾避让措施,避免了人员伤亡^[23]。同时,在气象部门降水预报业务中逐日降水预报是主要业务内容,目前地质灾害气象风险预警业务是发布当日未来24 h地质灾害气象风险预报,需要建立当日雨量阈值判断指标。目前有些省(市)已建立了本地当日雨量阈值判断指标,但是对全国区域的当日雨量指标阈值划分还没有系统化开展,且前期研究的24 h雨量阈值划分由于拟合方法的原因较为粗略。另外,我国地域辽阔,西部地区地形地质条件复杂,地形起伏巨大,加上南北气候差别大,区域性差异明显^[24],各地区降水触发地质灾害的雨量差异大^[25],需要进行地质灾害风险区划分,分区开展降水诱发地质灾害阈值研究。本文从实际预警服务需求出发,取当日降水量为因子分区建立基于当日降水量的地质灾害气象风险预报模型,建立与预警等级结合的当日降水雨量阈值指标,并对模型预报能力进行检验分析。

1 地质灾害气象风险分区

地质灾害发生需要有一定的重力下滑和物质条件,陡峭的地形为构成地质灾害的物质提供下滑能量条件,风化、破碎的岩石和植被碎屑,松散的土体构成地质灾害固体物质来源。山地高程高、高差明显、坡度大、地质构造复杂、断裂褶皱发育、岩层结构松散、易风化、节理发育的地质环境都是容易产生滑坡、崩塌和泥石流的有利内在条件^[26],降水、气温等气象因素是引发地质灾害的有利外在条件。在建立地质灾害与降水阈值研究中需要综合考量区域内不同地理地质内在条件下地质灾害发生的易发程度评价。目前较为普遍的地质灾害易发区划方法是采用下垫面环境信息量模型方法,提取研究区域的地理地质特征因子作为评价因子,来对地质灾害易发程度进行综合评价^[27-28],将大区域划分为若干个子区域,并认为子区域内的地质、地理和气候环境背景相似,在子区域建立地质灾害与降水阈值关系时可不考虑环境背景的差异。本文参考信息量方法来进行地质灾害易发程度综合评价,提取全国高程、高差、坡度、岩石类型、断层密度和植被类型6个地理地质环境因子,综合计算和分析全国区域的地质灾害潜在危险度,将地理地质特性用地质灾害潜在危险度来统一衡量。信息量法本质上属于统计分析方法,使用该方法进行地质灾害易发程度评价的具体研究过程可分为五个步骤:第一,建立适合的评价指标体系;第二,依据评价指标体系,分别计算各影响因子对地质灾害发生所提供的信息量值;第三,划分地质灾害易发程度评价单元;第四,计算每个评价单元内各影响因子对地质灾害发生提供的信息量总和;第五,根据各评价单元的信息量取值范围确定地质灾害易发程度等级。其中对于各影响因子对地质灾害发生所提供的信息量值主要是根据式(1)计算得出,具体如下:

$$I(X_i, H) = \ln \frac{N_i / N}{S_i / S}, \quad (1)$$

式中, S 为研究区总面积; N 为研究区所含有的地质灾害总面积; S_i 为研究区内含有评价因素 X_i 的面积数; N_i 为分布在因素 X_i 内特定类别内的地质灾害面积数。

对于单个评价单元内的总信息量值则是根据式(2)计算得到。

$$I_i = \sum_i^n I(X_i, H) = \sum_i^n \ln \frac{N_i / N}{S_i / S}, \quad (2)$$

式中, I_i 为评价单元总的信息量值; n 为参评因子数;其他参数同前。

将总的信息量值作为衡量单元网格影响地质灾害形成的综合指标,值越大说明所在区域背景条件孕育

地质灾害发生的易发程度就越大。根据得到的各个单元网格的总信息量值进行地质灾害易发程度的等级划分。 $I_i > 0$, $=0$, <0 分别说明该网格单元灾害发生概率大于、等于、小于区域平均灾害发生概率。

在地质灾害易发程度评价的基础上,依据中国地貌格局、地质环境特征和气候背景特征,将全国划分为9大环境相异的风险预警一级分区,分别为西北地区、东北地区、青藏高原区、黄土高原区、秦巴山区、华北地区、云贵高原区、中南地区、东南地区(图1)。

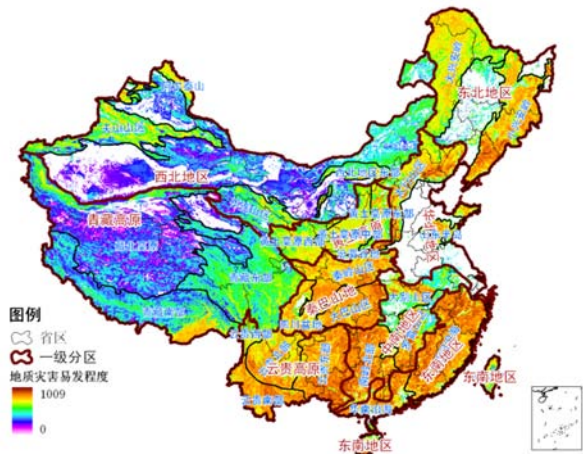


图1 全国地质灾害危险性评价和分区

Fig. 1 Assessment and zonations of geological disaster risk in China

2 基于当日降水量地质灾害预报模型建模

在降水诱发西南地区公路损毁预测技术研究中^[29],采取前15 d有效降水因子、当日降水因子和综合降水因子应用高斯拟合方法建立了三个降水因子与公路地质灾害损毁发生频次的预报模型,其中综合降水因子是前15 d有效降水因子和当日降水因子按拟合确定性系数进行不等权平均的计算结果,并进行个例检验,其验证表明加入当日降水量的综合降水因子的公路损毁模型效果好于基于前期有效降水和当日降水模型,但前期有效降水和当日降水的预报模型也具有预报能力。本文不局限于研究西南地区的降水导致公路地质灾害,而是关注全国整体区域受降水诱发的滑坡、崩塌和泥石流灾害,研究范围和灾害样本数大大增加,选取当日降水量作为因子,分区开展拟合研究,择优建立拟合方程。

2.1 资料

本文研究的灾害资料提取1950年1月至2015年10月全国地质灾害灾情信息。降水资料提取1950年1月至2015年10月逐日降水量资料。

在建立模型的资料统计中,以选择距离地质灾

害发生地点最近的气象站点为原则,基于泰森多边形法,将2487个国家气象站点分割成2487个泰森多边形,根据地质灾害点的经纬度信息,灾害点发生的位置处于哪个泰森多边形内,则以该多边形内的气象站点雨量作为该灾害点的降水量,选取对应发生日期日降水量信息,作为参与建模的降水因子。研究中使用1950—2014年历史地质灾害(来源于中国地质环境监测院)和降水数据资料用于建立预报模型,应用2015年地质灾害(其中全国检验的灾情来源于中国气象局灾情直报信息,个例检验灾情来源于中国地质环境监测院)和降水数据来进行预报模型效果检验。

2.2 地质灾害发生频次拟合

基于全国地质灾害风险分区区划信息,列出各分区的地质灾害的当日降水量,为了提高当日降水量数据的正态性,对当日降水量值进行开立方处理,形成分布较为集中的降水因子序列,取序列的最大值 R_{xmax} ,将序列分成50等份,根据降水因子及地质灾害发生的频次分布散点信息,采用高斯拟合、多项式拟合、傅里叶拟合对降水因子数据点集进行函数逼近拟合(图2)。

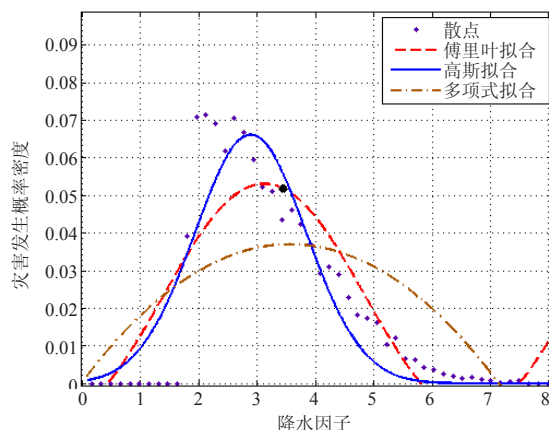


图2 降水因子与地质灾害发生频次的关系

Fig. 2 Frequency distribution of geological disaster with precipitation factor

从三组拟合曲线形态和拟合的各项指标上(表1)看,高斯拟合方法的确定系数最大,误差评价也均为最小,优于多项式拟合和傅立叶拟合。

表1 三种拟合曲线评价

Table 1 Comparison of curve-fitting among three fitting methods

拟合类型	误差平方和	确定系数(R^2)	调节确定系数	均方根误差
高斯拟合	0.00483	0.8403	0.8335	0.01014
傅里叶拟合	0.00770	0.7455	0.7289	0.01294
多项式拟合	0.01680	0.4449	0.4213	0.01891

因此选用高斯函数构建地质灾害发生概率密度分布函数,按式(3)对其进行积分可以得到地质灾害

发生概率预报方程:

$$Y = \int_0^x a e^{[-c^2(x-b)^2]}, \quad (3)$$

式中, Y 为地质灾害发生概率, x 为当日降水量的开立方值, a 、 b 、 c 均为参数, $a = \sigma^{-1}(2\pi)^{-0.5}$, b 为统计样本平均值, $c = 2^{0.5}\sigma$, σ 为样本序列的标准差(RMSE), 具体数值根据降水因子与地质灾害发生频次的散点分布情况而定。

2.3 分区建立地质灾害概率预报模型

假设在同一区域内, 发生地质灾害的其他潜在条

件都相似, 降水量成为唯一的决定因素, 这样只需统计降水因子与地质灾害的关系, 建立地质灾害概率预报方程。

对降水因子序列按西北地区、东北地区、青藏高原区、黄土高原区、秦岭大巴山区、华北地区、云贵高原区、中南地区、东南地区分为9个序列组, 通过高斯拟合构建概率密度函数, 计算出各区高斯概率密度拟合曲线(图3), 积分后得到各区地质灾害发生概率预报方程, 具体参数值详见表2。

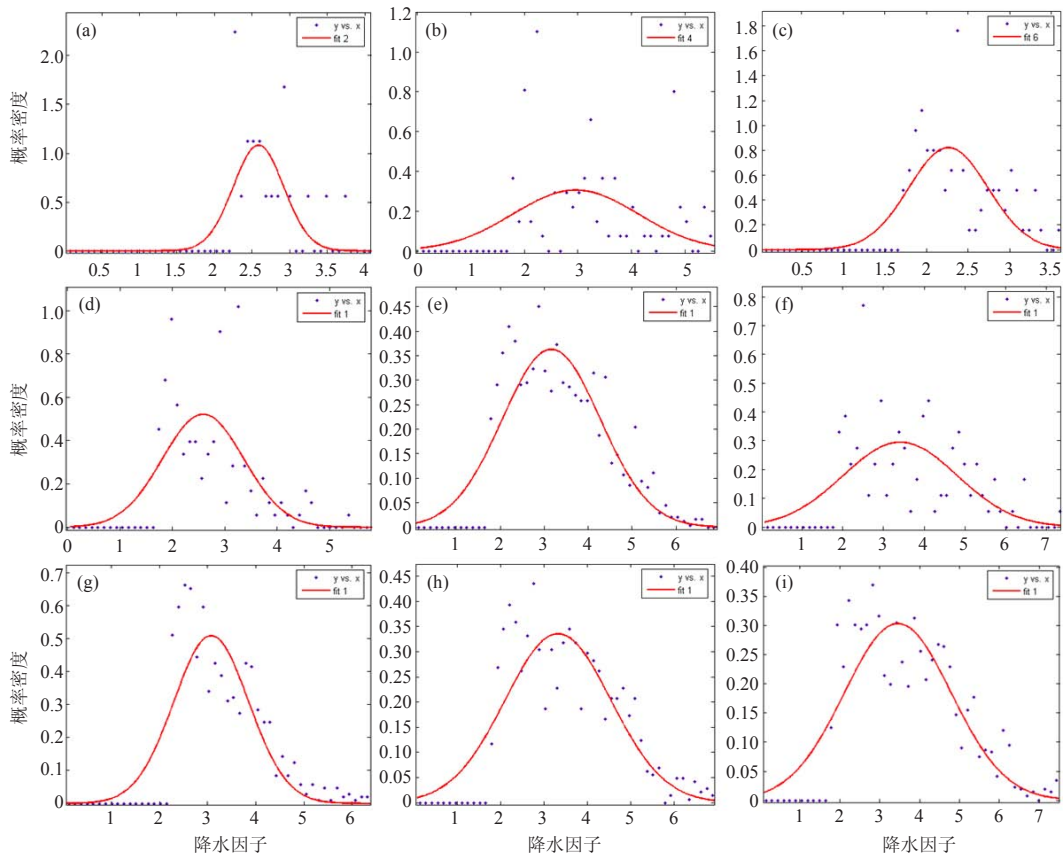


图3 分区地质灾害概率密度高斯拟合曲线图

(a) 西北地区, (b) 东北地区, (c) 青藏高原区, (d) 黄土高原区, (e) 秦岭大巴山区, (f) 华北地区, (g) 云贵高原区, (h) 中南地区, (i) 东南地区

Fig. 3 Fitting curves of probability density of geological disaster and precipitation factor in 9 regions: (a) Northwestern China, (b) Northeastern China, (c) Qinghai-Tibet Plateau, (d) Loess Plateau, (e) Qinling-Daba Mountains, (f) Northern China, (g) Yunnan-Guizhou Plateau, (h) Central and Southern China, (i) Southeastern China

目前国家级地质灾害气象风险预警分级为蓝、黄、橙、红四个等级, 根据拟合结果, 以25%、50%、75%、90%地质灾害发生概率对应的当日降水值作为地质灾害气象风险预警蓝、黄、橙、红临界当日雨量阈值, 详见表3。南方各区以及东北地区的橙色预警起报临界雨量为47.3~80.3 mm/d (大雨到暴雨); 东南地区的临界雨量达80.3 mm/d; 西北、黄土高原地区橙色预警临界雨量为24.3~29.5 mm/d (中雨

到大雨); 青藏高原地区橙色预警临界雨量最低, 只有17.8 mm/d (中雨)。在实际预警业务中, 通常对公众发布未来24 h的地质灾害气象风险预警, 因此, 结合最新24 h降水预报, 按表3临界雨量就可以判定某地的地质灾害气象风险预警等级, 预报员只需重点关注当日雨量预报来修正地质灾害气象风险预警级别, 操作简单快捷, 订正相对容易。并且, 当日发生降水时发布地质灾害气象风险预警, 容易引起足够的重视开

展群测群防、临灾避让等措施，因此该方法具有较高实际应用价值。

表2 概率拟合方程参数表

Table 2 Parameters of probability fitting equation for each of 9 regions

参数	西北	东北	青藏	黄土高原	秦岭大巴	华北	云贵	中南	东南
<i>a</i>	1.0810	0.3052	0.8207	0.5211	0.3626	0.2945	0.5079	0.3354	0.3032
<i>b</i>	2.5840	2.9590	2.2640	2.5850	3.1620	3.4090	3.0760	3.3200	3.4520
<i>c</i>	0.4766	1.6500	0.6741	1.0940	1.5820	1.9760	1.1030	1.7280	1.9000

3 风险预报方法检验

选取2015年收集全国4—10月共172个地质灾害案例作为检验样本，由于灾情案例没有具体发生经纬度及发生时刻，只有灾害发生日期和发生地所在县、市名，只能提取灾害所在地国家气象站当日降水量，分区按表3逐个判别预警级别来分析模型预报性能（表4）。在172个检验样本中发现有13个当日无雨、6个当日有微量降水（0.01 mm），约占样本数11%，在预警级别中判定为没有预报。分析表明模型在蓝色及其以上级别累计预报114次，占总发生次数的66.3%，黄、橙、红色预警占总发生次数的49.4%，检验结果表明模型预报在全国范围具有一定参考性，但这可能与国家站布设相对少，不能很好地代表地质灾害灾点降水以及模型没有考虑前期降水有关。

表3 地质灾害气象风险预警当日临界雨量（单位：mm）

Table 3 The intraday critical precipitation of early warning for various geological disaster risks (unit: mm)

名称	西北	东北	青藏	黄土高原	秦巴	华北	云贵	中南	东南
蓝色	13.5	12.2	7.4	7.2	13.9	15.0	16.7	15.3	16.5
黄色	18.1	31.6	11.8	17.2	31.3	39.0	29.3	35.3	40.7
橙色	24.3	71.5	17.8	29.5	58.6	78.7	47.3	68.0	80.3
红色	37.0	79.0	25.4	44.4	92.7	129.2	69.2	107.9	131.1

表4 地质灾害气象风险预警模型不同预警级别预报次数和比例

Table 4 Times and proportions of warning for 4 grades of geological disaster risks

名称	蓝色	黄色	橙色	红色
预报次数	29	31	24	30
比例/%	16.9	18.0	14.0	17.4

同时，为了更好验证模型应用效果，选取具有详细灾点经纬度和发生时间的地质灾害案例进行检验，选取的是东南预警分区2015年5月18—20日江西兴国和于都县降水诱发地质灾害过程对模型进行个例检验。

3.1 天气过程和地质灾害灾情

2015年5月17日20时—21日08时，江西中南部出现大到暴雨，局地大暴雨，江西兴国县、于都县过程累计雨量普遍在100 mm以上，兴国县中北部地区

降雨量达200~497 mm（图4），强降水主要集中在18—20日，其中18日夜间至19日白天降水最强，兴国县大部、于都北部出现大暴雨，于都葛坳乡降水量达198.7 mm，19日夜间至20日白天，兴国县大部、于都中北部出现暴雨，兴国县北部局地有大暴雨。受此次降水过程影响，江西兴国、于都县出现群发性崩塌、滑坡、泥石流灾害，通过实地灾害勘察和调研，共整理获取955条含经纬度信息和具体发生时间精确到小时的详细地质灾情，由于灾点很密，在同一自动站区域临近有多个地质灾害发生，因此按发生时刻提取距离灾点最近的自动站雨量数据作为灾点降水实况，对相同降水实况除重（只保留一个样本），最后整理形成过程共85站次当日雨量实况样本数据进行检验分析，其中17—21日逐日20时—次日20时出灾站数分别为12、29、28和16次（在图5中用点标出，表示该站点当天发生过地质灾害）。



图4 2015年5月17日20时—21日08时累计雨量（单位：mm）
Fig. 4 Accumulative rainfall for 20 BT on 17 May to 08 BT on 21 May 2015 (unit: mm)

3.2 地质灾害概率模型预报检验

以欧洲中心细网格EC预报降水（20时—次日20时）作为模型降水输入因子，根据基于当日雨量地质灾害概率预报模型，计算得出江西兴国、于都5月18日—21日各自动加密站地质灾害发生概率。

江西兴国和于都位于东南预警分区中，从表3可知，地质灾害发生概率25%、50%、75%和90%对应的当日雨量阈值为16.5、40.7、80.3和131.1 mm。从图5a可知，2015年5月17日夜間至18日白天，兴国县中东部、于都县北部地区地质灾害气象风险达到蓝色预警（发生概率25%），EC预报兴国县东南部、于都县北部有大雨，该区域地质灾害发生概率在35%~38%；

18日夜间至19日白天(图5b), EC降水预报增大, 兴国县、于都县北部有大雨, 该区域地质灾害发生概率在40%~52%, 局地达到黄色预警; 19日夜间至20日白天(图5c), EC降水预报出现暴雨区, 为过程最强, 暴雨区南压至于都县中南部, 兴国县南部也有大雨, 地质灾害发生概率为50%~75%高值区, 对应黄色和橙色预警; 20日夜间至21日白天(图5d), EC降水明显减弱, 普遍预报10~20 mm的中雨, 地质灾害发生概率也随之下降, 兴国县中东部、于都县北部地质灾害发生概率为25%~30%, 只预报蓝色预警。从

出灾站点的地质灾害发生概率预报来看, 17—21日逐日发生过地质灾害的自动站大部分预报地质灾害发生概率>25%, 18和19日能预报出>50%发生概率, 基于EC降水预报的地质灾害概率模型基本能提前做出客观预警指示。

3.3 地质灾害概率模型实况检验

实际上, 江西兴国和于都县的实况降水普遍比EC预报降水大一个量级, 甚至两个量级, EC过程预报降水普遍为中到大雨, 仅19日20时预报出于都有暴雨, 但与实况相比, 预报的暴雨区偏南, 且兴国实际

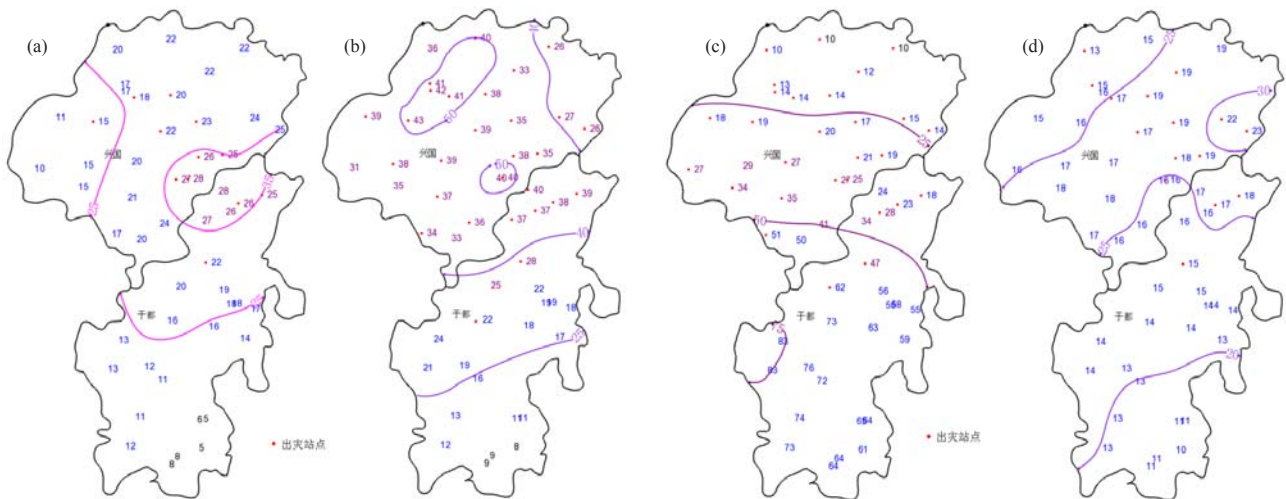


图5 自动站站点EC降水预报值(单位: mm)和地质灾害发生概率(单位: %)落区(线条)

(a) 5月17日20时—18日20时, (b) 5月18日20时—19日20时, (c) 5月19日20时—20日20时, (d) 5月20日20时—21日20时

Fig. 5 The EC model rainfall forecast for automatic stations (unit: mm) and probability distribution (unit: %) of geological disaster by the geological disaster model

(a) For 20 BT on 17 May to 20 BT on 18 May, (b) For 20 BT on 18 May to 20 BT on 19 May, (c) For 20 BT on 19 May to 20 BT on 20 May, (d) For 20 BT on 20 May to 20 BT on 21 May

的暴雨和大暴雨区仅预报出中到大雨。针对EC降水预报偏小, 模型概率预报值偏低, 需要进一步用实况降水来验证模型性能。选取5月17—21日逐日出灾站点的20日一次日20时降水实况输入模型计算发生概率, 统计不同预警级别的站数和比例(表5), 18日20时—20日20时降水最强, 出现灾害的站数最多。17日20时—18日20时, 兴国中北部出现大到暴雨, 于都北部局地暴雨, 其他地区小雨, 地质灾害集中在兴国中部和于都北部地区(图5a), 出灾站点黄色和橙色预警占总站数66.7%, 但降水量没有达到红色预警阈值, 没有红色预警, 且有2站次漏报; 18日20时—19日20时, 两地出现过程最强降水, 兴国大部、于都北部出现大暴雨, 降雨量一般有100~156 mm, 最大达234 mm, 兴国西南部、于都中南部有中到大雨, 地质灾害集中在兴国和于都北部地区(图5b), 计算的

地质灾害概率也集中在高值区, 出灾站点黄、橙、红三种预警比例达96.5%, 红色预警就占58.6%, 仅有1站次为蓝色预警, 没有漏报; 19日20时—20日20时, 兴国、于都中北部有大到暴雨, 兴国北部局地有大暴雨, 地质灾害集中在兴国和于都北部地区(图5c), 出灾站点黄、橙、红三种预警比例为71.4%, 橙色和红色预警比例有21.4%, 没有漏报; 20日20时—21日20时, 两地降水强度减弱, 兴国大部地区为小到中雨, 兴国东南部、于都北部有大雨, 于都中南部有暴雨, 地质灾害集中在兴国中东部和于都北部地区(图5d), 有8站次没有达到蓝色预警标准, 出现漏报。

此次过程降水实况模型检验效果较好, 有88.2%站次成功预报, 模型对暴雨、大暴雨较为敏感, 能够捕捉作24 h内所有暴雨诱发的地质灾害事件, 给予高等级地质灾害预警提示, 但对低于40.7 mm的日雨

表5 出灾站点实况降水地质灾害气象风险不同级别预警站数和比例

Table 5 Disastrous stations and proportions of warning for 4 grades of geological disaster risks

日期	无预警		蓝色		黄色		橙色		红色	
	站数	比例/%	站数	比例/%	站数	比例/%	站数	比例/%	站数	比例/%
5月17日20时—18日20时	2	16.7	2	16.7	7	58.3	1	8.3	0	0
5月18日20时—19日20时	0	0	1	3.5	3	10.3	8	27.6	17	58.6
5月19日20时—20日20时	0	0	8	28.6	14	50.0	3	10.7	3	10.7
5月20日20时—21日20时	8	50.0	8	50.0	0	0	0	0	0	0

量,尤其是小到中雨不敏感,容易漏掉这些当日降水较弱,但近期有强降水的灾害事件,21日漏报的8站次位于兴国县中北部,前3天都持续较强降水,18日漏报的2站次,经查也发现灾前2~3 d也出现明显降水。

4 结论和讨论

当日降水量经开立方处理后作为建模因子与地质灾害发生概率密度进行高斯拟合、傅里叶拟合和多项式拟合,结果表明高斯拟合效果最优,可选用高斯拟合方法建立地质灾害概率预报模型,分区构建当日临界雨量判据,通过预报检验,表明该方法指标易于判别,能捕捉南方地区暴雨、西北和黄土高原地区大雨引发的地质灾害事件,预报效果较好,具有实际应用价值。

但由于预报模型建模仅采用当日降水一个因子,没有考虑前期降水的影响,在检验中也发现大约有11%地质灾害样本是由前期降水引发。为了减少漏报率,后期预报研究中还应将考虑前期降水,建立有效降水和综合降水因子模型,对比分析当日降水、有效降水和综合降水因子模型,采用验证效果最好的模型。当日降水量是建立地质灾害气象预报方法最重要的因子,降雨型滑坡崩塌绝大多数由暴雨引发,降雨型泥石流的发生更是离不开当日发生强降水,当日降水因子与有效降水和综合降水因子相比,当日临界雨量判定方法具有无需计算因子值、判定更直观和简便,普适度高,有利于根据当日降水量快速判定地质灾害风险预警级别,特别适用于地方局地突发短时强降水而可能导致地质灾害的快速地质灾害气象风险预警服务,当地部门和民众可根据当前降水实况和当日临界雨量指标快速估计当前地质灾害气象风险高低,及时调整和采取临灾避让等措施。另外,全国地质灾害气象风险分区只划分为9大分区,还需要进一步细化分区,增加二级、三级乃至四级分区,探讨地质灾害易发度级别,将预报区域的内在地质灾害易发度与降水因子结合起来,共同判定地质灾害气象风险预警级别更为合理和全面。

参考文献

[1] 张友谊,胡卸文,朱海勇.滑坡与降雨关系研究展望.自然灾害学报,2007,16(1): 104-107.

- [2] 谭万沛,王城华.暴雨泥石流滑坡的区域预测与预报——以攀西地区为例.成都:四川科技出版社,1994.
- [3] 崔鹏,刘世建,谭万沛,等.中国泥石流监测预报现状与展望.自然灾害学报,2000,9(2): 10-15.
- [4] 魏永明,谢又予.降雨型泥石流(水石流)预报模型研究.自然灾害学报,1997,6(4): 48-54.
- [5] 高速,周平根,董颖,等.泥石流预测、预报技术方法的研究现状浅析.工程地质学报,2002,10(3): 279-283.
- [6] 杜予昱.影响中国极端天气气候事件变化的初探.南京:南京大学,2013: 39-48.
- [7] 杨小波,陈雨娟,刘芸芸.我国降水和气温的分级概率时空分布特征.应用气象学报,2011,22(5): 513-523.
- [8] Yun T, Chuan T. The influence of human activity and precipitation change on mid-long term evolution of landslide and debris flow disasters. Sciences in Cold and Arid Regions, 2013, 5(6): 715-721.
- [9] Jibson R W. The 2005 La Conchita, California, landslide. Landslides, 2006, 3: 73-78.
- [10] Chleborad A F. Preliminary evaluation of a precipitation threshold for anticipating the occurrence of landslides in the Seattle, Washington, Area. US Geological Survey Open-File Report, 2003.
- [11] Del Ventisette C, Casagli N, Fortuny-Guasch J, et al. Ruinon landslide (Valfurva, Italy) activity in relation to rainfall by means of GBInSAR monitoring. Landslides, 2012, 9: 497-509.
- [12] Chae B G, Kim M I. Suggestion of a method for landslide early warning using the change in the volumetric water content gradient due to rainfall infiltration. Environmental Earth Sciences, 2012, 66: 1973-1986.
- [13] 章国材.自然灾害风险评估与区划原理和方法.北京:气象出版社,2014.
- [14] 高速,周平根,董颖,等.泥石流预测、预报技术方法的研究现状浅析.工程地质学报,2002,10(3): 279-283.
- [15] 周明浪,邵新民,罗美芳.浙江温州滑坡地质灾害预警方法及应用.中国地质灾害与防治学报,2014,25(2): 90-96.
- [16] 薛群威,刘艳辉,唐灿.突发地质灾害气象预警统计模型与应用.吉林大学学报(地球科学版),2013,43(5): 1614-1621.
- [17] 谭万沛,韩庆玉.四川省泥石流预报的区域临界雨量指标研究.灾害学,1992,7(2): 37-42.
- [18] 姚令侃.用泥石流发生频率及暴雨频率推求临界雨量的探讨.水土保持学报,1988,2(4): 72-77.
- [19] 李媛,孟晖,董颖,等.中国地质灾害类型及其特征——基于全国县市地质灾害调查成果分析.中国地质灾害与防治学报,2004,15(2): 29-32.
- [20] 李慧琳,官焕盛,韩卫东.丹东地区地质灾害气象预警系统.气象与环境学报,2007,23(1): 12-16.
- [21] 李安泰,何宏让,张云.WRF模式对舟曲“0808”特大泥石流暴雨的数值模拟.气象与环境学报,2012,28(2): 54-59.
- [22] 伍宇明,兰恒星,高星,等.台风暴雨型滑坡降雨阈值曲线研究——以福建地区为例.工程地质学报,2014,22(2): 255-262.
- [23] 张国平,宋建洋,邵小路,等.近期我国大型地质灾害预报与避险案例分析.自然灾害学报,2015,24(3): 20-26.
- [24] 虞海燕,刘树华,赵娜,等.1951—2009年中国不同区域气温和降水量变化特征.气象与环境学报,2011,27(45): 1-2.
- [25] 张国平,徐晶,毕宝贵.滑坡和泥石流灾害与环境因子的关系.应用生态学报,2009,20(3): 653-658.
- [26] 马力,崔鹏,周国兵,等.地质灾害气象.北京:气象出版社,2009: 29-40.
- [27] 朱良峰,吴信才,殷坤龙,等.基于信息量模型的中国滑坡灾害风险区划研究.地球科学与环境学报,2004,26(3): 52-56.
- [28] 张国平.有效雨量和滑坡泥石流灾害概率模型.气象,2014,40(7): 886-889.
- [29] 狄靖月,王志,田华,等.降水引发的西南地区公路损毁风险预报方法.应用气象学报,2015,26(3): 268-277.

一次豫北春季持续性大风天气的分析

段中夏

(新乡市气象局, 新乡 453000)

摘要: 利用常规观测资料和NCEP再分析资料, 分析了2015年3月31日到4月1日豫北大风过程持续的原因。结果表明, 中高纬度冷空气的持续补充减缓了冷高压变性速度, 中低纬度的西南气流使暖低压不断发展, 形成对峙, 使豫北长时间处于变压梯度和气压梯度大值区中, 有利于豫北大风发展和维持。热力强迫的维持, 有利于高低纬的气压中心和变压中心的维持, 即有利于大风的维持。散度分布作用下产生的次级环流也有利于此次豫北大风的形成和维持。

关键词: 春季, 大风, 气压梯度, 散度

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.03.008

An Analysis of Persistent Spring Gale in the Northern Henan Province

Duan Zhongxia

(Xinxiang Meteorological Office, Xinxiang 453000)

Abstract: Based on the conventional observation data and NCEP reanalysis data, this article analyzes the reasons of a persistent gale happened in the northern Henan Province on 31 March and 1 April 2015. Results show that the cold high pressure was persisting in the cold airflow from high latitudes, while warm low pressure was developing quickly the southwest airflow from low latitudes, it keeps a strong pressure gradient in the northern Henan for a long time, and benefits of the development and persistence of a gale. The persistence of thermal force is conducive to the persistence of the pressure gradient and then to the persistence of high winds. The secondary circulation generated by the distribution of divergence is also conducive to the formation and persistence of the gale.

Keywords: spring, gale, pressure gradient, divergence

0 引言

由强冷空气造成的春季大风是河南的主要灾害性天气之一, 不仅对电力、通信设施及高层建筑施工等方面造成威胁, 还给农业生产等带来严重影响。长期以来, 由于大风的强危害性和频发性, 对春季大风成因的研究一直成为热点问题。Streten^[1]认为大风常常与较强的气压梯度有关; 吴海英等^[2]认为温度平流可以导致地面变压场和变压梯度增强, 进而成为促进地面大风出现的重要原因; 陈淑琴等^[3]、尹尽勇等^[4]、黄彬等^[5]发现动量下传在许多强风天气过程中起重要作用; 姚正毅等^[6]发现大风天气不仅受大尺度天气系统影响, 还受局地地形和下垫面性质影响; 杨忠恩等^[7]认为冷空气大风是高空急流、强冷平流、动量下传等共同作用的结果; 张华等^[8]对呼和浩特市一次春季大风进行分析发现对流层下层的暖平流输送是热力强迫因子, 高层辐散下沉、低层辐合上升是动力强迫因子; 田林生^[9]对东北大风成因分析认为冷锋和江淮气

旋配合在大风过程中起重要作用。

1 天气实况

2015年3月31日到4月1日, 豫北中部多站点出现了罕见的强度大、持续时间长的大风天气。此次过程, 豫北地区共有14个国家站出现了极大风速超过8级的长时间大风, 其中, 武陟和原阳站的极大风速最大值超过10级(图1), 维持极大风速8级以上的时间达20个小时以上(图2), 致使多地出现了较严重的灾情。



图1 豫北14个国家站的极大风速最大值

Fig. 1 The records of the maximum instantaneous wind speed at national stations in the northern Henan Province

收稿日期: 2017年2月16日; 修回日期: 2017年4月30日
作者: 段中夏 (1989—), Email: 791043440@qq.com

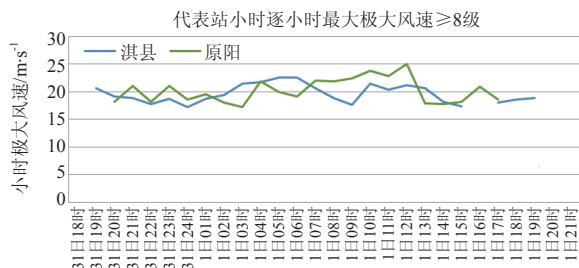


图2 代表站小时逐小时极大风速最大值

Fig. 2 Hourly maximum instantaneous wind speed at a representative station

2 环流背景分析

2.1 高纬冷槽和中低纬西南气流

过程前期, 500 hPa高原槽东移引起四川附近低层产生低涡, 其前部西南气流造成低层增温明显; 高纬有阶梯冷槽伸向东北地区, 冷空气不断向南输送。3月30日20时, 500和700 hPa高纬出现 -44 和 -28 °C的冷中心, 南接冷槽(图3a)。3月31日08时, 两冷槽向东南方向移动发展, 引发东北北部形成低涡, 并有一 -33 和 -21 °C的冷中心配合(图3a)。中低层河套北至东北南出现明显锋区, 赤峰和张家口两站850 hPa

的温度差达 12 °C, 较大的偏北风带来强冷平流, 并导致地面加压明显, 出现 $+4.9$ 的变压中心(图3b)。700 hPa重庆南有一暖中心, 东北西南向暖脊一直伸向豫北地区, 并伴有较强的暖平流输送到豫北(图3b), 造成中低层增温明显。3月31日20时, 冷槽继续向东南发展, 伴随高纬冷空气补充, 冷平流显著加强, 冷空气开始自北向南影响河南, 郑州站850 hPa以下由西南风转偏北风, 925 hPa东北风达 16 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 且位于低层温度及变温梯度大值区(表1)。4月1日08时, 河北南部转受冷空气影响, 郑州站925 hPa的24 h负变温达到 13 °C, 925 hPa东北风达 24 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (表1), 增加了近地面湍流交换和动量下传作用。中高纬冷槽东南移的同时, 中低纬度涡前西南气流发展, 黄淮南部进一步减压, 造成黄淮区域较长时间处于温度梯度大值区中。4月1日20时, 西南气流由南向北、由低空向高空发展, 925 hPa冷中心到达豫北, 豫北冷平流显著减弱, 大风逐渐减弱。

中高层高纬地区冷槽东南发展带来冷空气使中低层高压发展与中低纬度高层西南气流下形成的暖低压形成对峙, 导致系统移动缓慢, 使豫北较长时间处于

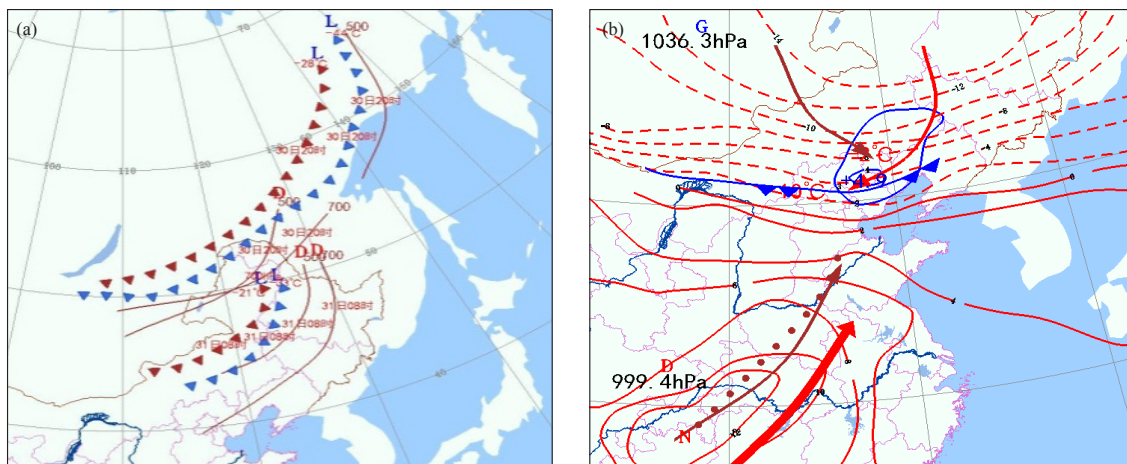


图3 500和700 hPa高度槽、温度槽演变 (a) 以及3月31日08时700、850 hPa和地面系统配置 (b)

.....850 hPa温度脊 700 hPa温度脊 L冷中心 D气旋中心 地面冷锋 700 hPa等温度线
槽线 850hPa显著气流 850hPa急流 700hPa显著气流

Fig. 3 (a) Variation of troughs in height and temperature at 500 and 700 hPa; (b) Configurations of the synoptic systems at 700, 850 hPa and surface at 08 BT on 31 March 2015

表1 探空代表站850和925 hPa 24 h变温及风速演变

Table 1 The 24 h-variations of temperature and wind-speed at 850 and 925 hPa at the representative sounding station

站点	3月31日20时				4月1日08时				4月1日20时			
	24 h/°C		风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$		24 h变温/°C		风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$		24 h变温/°C		风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	
	850 hPa	925 hPa	850 hPa	925 hPa	850 hPa	925 hPa	850 hPa	925 hPa	850 hPa	925 hPa	850 hPa	925 hPa
邢台	-8	-12	16	16	-15	-13	18	14	-7	-3	14	10
郑州	-3	-6	8	14	-2	-13	16	24	-8	-10	20	18
南阳	4	3	8	10	0	-10	16	18	-6	-14	16	20

温度梯度大值区，促使地面大风形成和维持。

2.2 地面高低压对峙的影响

前期暖低压位于四川盆地，中心气压达999.4 hPa，豫北地区受其东伸的倒槽控制；贝加尔湖南侧存在强冷高压，中心气压达1036.3 hPa；冷高压南侧华北地区存在一个东西向冷锋，锋后的正变压中心值达+4.9 hPa（图3b）。3月31日20时，随着冷高压向东南移动，豫北转受东路冷空气和冷锋影响，产生较大的正变压，正变压中心达+5.4 hPa。贝加尔湖冷高压的补充使其维持，并与四川盆地由于高空槽前减压作用和凝结潜热释放作用而形成的暖低压形成对峙，豫北地区处于较大的气压梯度区，华北及黄淮地区形成较强的变压和气压梯度，产生较强梯度风和变压风。贝加尔湖冷高压的补充，以及西南低压、倒槽向东北发展，造成黄淮流域气压和变压梯度进一步加强并维持。但随着冷高压向东南移动和暖低压北伸，北伸的倒槽逐渐隔断了冷高压与补充南下的冷空气的联系。20时，冷高压与高纬冷空气的联系近乎完全被隔断，由于无新冷空气补充，地面非绝热加热和降水的凝结潜热释放的作用导致冷高压迅速减弱，豫北转为负变压区，豫北地区的气压梯度迅速减小，变压风和梯度风大大减弱，地面风速迅速减小。

这次大风过程是一次伴随冷高压东移南下，冷锋移过豫北而造成的大风天气。高纬冷空气的扩散补充造成豫北地区维持较大的正变压，南支槽前西南气

流使四川低压倒槽不断发展，与北部高压形成对峙，导致豫北地区持续位于气压梯度大值区中。后期由于暖低压的北伸，切断了华北冷高压与高纬冷空气的联系，加之非绝热加热和降水引发的凝结潜热作用，导致变压风减小，而锋面南下导致豫北气压梯度减小，梯度风减弱，最终导致大风消失。

3 物理量诊断分析

3.1 热力强迫

冷暖平流的本质是密度平流，是准地转动力学中的热力强迫项，与地面变压密切相关。从NCEP再分析资料沿114°E的30°—50°N剖面可看出，前期豫北受暖平流影响，升温降压明显（图4a）。3月31日20时，随北部低层冷平流大值区南移，中心高度下降，强度增大到 $20 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C/s}$ 以上，影响区域也明显增大，并和低层风速大值区相对应，而33°N上空900 hPa附近出现了中心强度超过 $20 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C/s}$ 的暖平流区，低层的冷暖平流导致地面的变压和变压梯度增大，气压梯度也相应增大，有利于大风出现（图4b）。4月1日02时，冷平流大值区进一步南移至35°N，中心增大到 $40 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C/s}$ 以上，低纬暖平流维持并迅速增大，中心值超过 $70 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C/s}$ ，温度平流梯度进一步增加导致地面的变压、变压梯度、气压梯度进一步增加，大风继续维持并增强（图4c）。4月1日08时之后，虽然低层冷平流不再增加，但倒槽发展，南部暖平流显著加

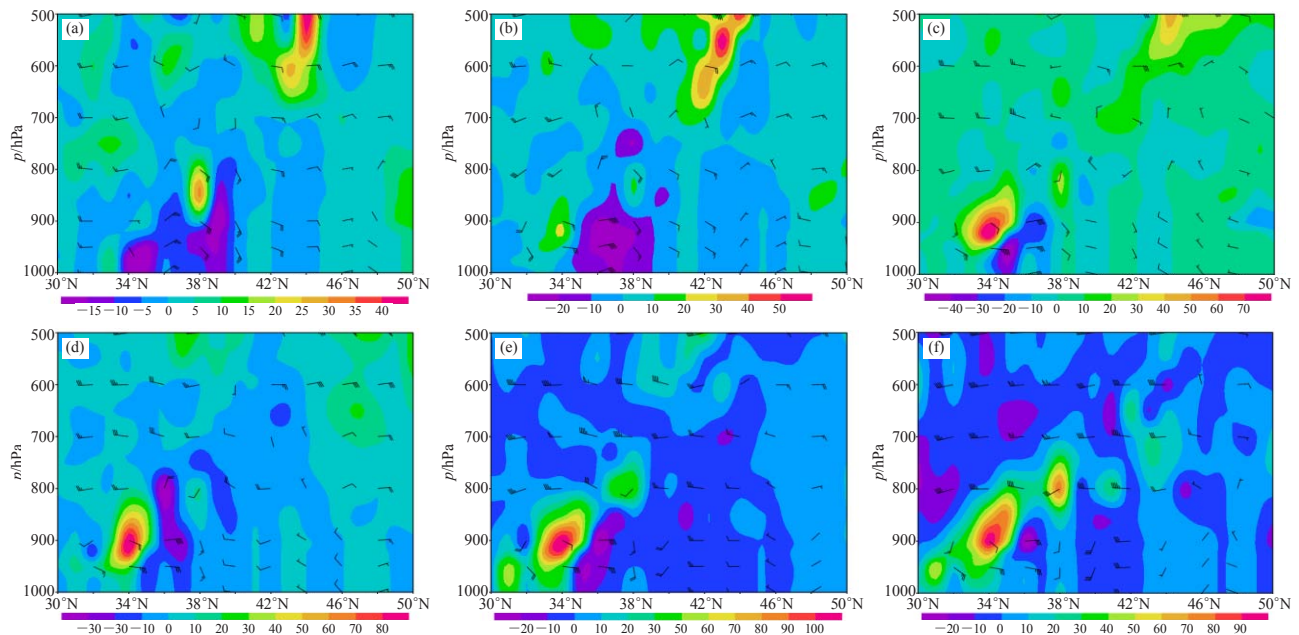


图4 2015年3月31日14时(a)、3月31日20时(b)、4月1日02时(c)、4月1日08时(d)、4月1日14时(e)、4月1日20时(f)温度平流(单位: $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C/s}$)和风的经向分量(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)与垂直速度(单位: $10^{-1} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)的合成矢量沿114°E的剖面

Fig. 4 The section profile of the temperature advection (unit: $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C/s}$) (shaded), of the compounded vectors of meridional wind (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and of the vertical velocity ($10^{-1} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) along 114°E: (a) at 14 BT on 31 March, (b) at 20 BT on 31 March, (c) at 02 BT on 1 April, (d) at 08 BT on 1 April, (e) at 14 BT on 1 April, (f) at 20 BT on 1 April 2015

强,维持了较大的温度平流和变压梯度,大风继续维持(图4d)。4月1日14时,北部冷平流继续减小且在低层冷平流大值区上空出现了暖平流大值区,但底层冷平流仍大于 $10 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C/s}$,南部暖平流中心继续增大到 $100 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C/s}$,仍存在较大的温度平流梯度,导致地面气压和变压梯度维持,大风维持(图4e)。随后,暖平流进一步发展,地面上方的密度平流减弱,根据气压倾向方程,增压和减压变慢,变压梯度减小,大风强度减弱。4月1日20时,豫北近地层由冷平流转为暖平流(图4f),低纬低层低涡倒槽导致暖平流由南向北、由低空向高空发展,豫北上空的整层密度平流也减弱,因此地面的气压差大大减弱,大风迅速减弱。

3.2 次级环流

散度分布可以较好地反映空气辐合辐散与垂直运动作用。豫北大风出现前期,河南地区受暖气团控

制,并在散度场上表现为较强的低层辐合区,而豫北上空附近800 hPa高度附近有强辐合辐散中心(图5a)。到3月31日20时,边界层出现辐散中心,且中心强度超过 $80 \times 10^{-5} \text{ /s}$ (图5b),促进豫北在近地面产生较大的偏北辐散风。此辐散中心上空还有一弱辐合中心(图5b),有利于垂直下沉运动的发展,有利于将高空具有较大动量的风带到地面引起大风。4月1日08时,近地面层的辐合中心也显著发展并北移,正负散度中心的数值均超过 $80 \times 10^{-5} \text{ /s}$,近地面散度风显著增加,800 hPa的一对散度中心也显著增加,致使中低层冷平流及高低空动量的垂直交换增强,正好对应于地面风速最大时间。冷平流、散度梯度及垂直交换作用在14时之后开始减弱,大风也是从14时之后减弱。

底层的辐散梯度大值区与大风的出现和维持有良好的正相关关系,垂直运动有利于动量向下输送,从

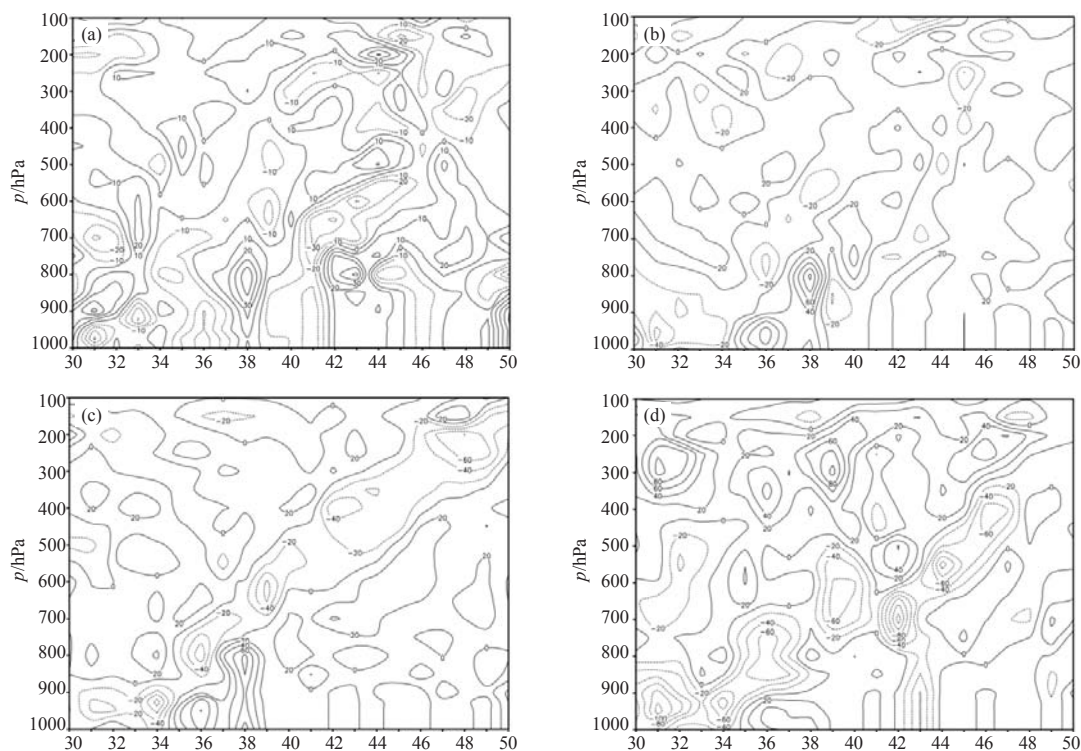


图5 2015年3月31日08时(a)、3月31日20时(b)、4月1日08时(c)、4月1日20时(d)沿114°E的散度剖面(单位: 10^{-5} /s)
Fig. 5 The section profile of the divergence (unit: 10^{-5} /s) along 114°E: (a) at 08 BT on 31 March, (b) at 20 BT on 31 March, (c) at 08 BT on 1 April, (d) at 20 BT on 1 April 2015

而有利于大风的发展维持。前期散度分布不仅造成了36°N附近的下沉运动造成散度风,还导致38°N附近产生上升运动,上升运动有利于绝热冷却,从而减慢了高纬冷空气的变性速度,而4月1日08时之后,上升支开始减弱,冷空气变性加快,间接影响了温度对比,从而影响了大风的发展和维持。

4 结论和讨论

此次大风具有强度强,影响时间长,影响区域主要集中于豫北等显著特点。以往大风过程的明显不同主要表现在大风区冷空气厚度较薄、斜压性较强。

1) 中高纬冷槽与中低纬西南气流导致中低空产生强烈的锋生作用,并引起地面冷高压与暖低压的相

(下转96页)

20世纪80年代人工智能在天气预报中的应用

气象史料挖掘与研究工程项目组^①

气象预报专家系统对灾害性天气预报的准确率普遍已达到当时值班预报员水平，少数省已接近优秀预报员水平，有些省还开展了落区和强度预报的工作，取得了比较明显的效果。

2016年3月9—15日，围棋世界冠军李世石与AlphaGo进行五番棋大战，结果AlphaGo以四比一取得完胜，举世哗然。与此同时，“人工智能”一词也再次风靡全球。人工智能（Artificial Intelligence, AI）最初是在1956年提出的。从那以后，研究者们发展了众多理论和原理，人工智能的概念也随之扩展。它是研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的一门新的技术科学。人工智能是计算机科学的一个分支，它企图了解智能的实质，并生产出一种新的能以人类智能相似的方式做出反应的智能机器，该领域的研究包括机器人、语言识别、图像识别、自然语言处理和专家系统等。

可见，专家系统（Expert System）也属于人工智能的一个分支。

20世纪80年代中后期，随着计算机技术在我国气象行业的应用，气象预报专家系统在我国气象业务中也曾流行一时，成为当时预报工作一道靓丽的风景线。

专家系统又称为基于知识的推理系统，是一个以知识为基础的计算机系统，其特点在于把人类专家在解决问题过程中使用的知识和经验分成事实与规则，以适当的形式存入计算机中，建立知识库，采用合适的控制系统和推理规则，按输入的原始数据进行推理、演绎，做出判断和决策，可起到人类专家的作用。气象预报专家系统就是把预报员成功的预报经验和计算机技术相结合的一种预报方法。它具有各种类型的预报知识（经验），可利用多种气象资料，增加了预报的客观性，为提高灾害性天气预报准确率，充分利用优秀预报员的经验和培养新预报员开辟了一条新的有效途径。

20世纪70年代末，中国科学院大气物理研究所的李吉顺等和吉林大学计算机系的刘力夫等合作研制出一个暴雨预报人工智能系统——“北京暴雨短期预报

专家系统”。他们利用联想式汉卡Lotus1-2-3在IBM PC/XT微机上完成了短时预报的专家知识库，进而构造了这个专家系统。它是国内首次运用人工智能建立预报专家系统。1984年在北方暴雨协作区的会议上对该系统做了演示和介绍，引起了大家的关注。

与其他预报方法比较，它具有如下特点：1）可以综合多个预报员的经验，避免个别经验的局限性；2）利用计算机能快速、准确地检索出与预报对象相似的天气过程；3）可容纳所有对预报有用的理论及新增加的探测资料；4）不排斥任何预报方法，相反，每一种预报方法都可为它增加新的内容。

此后，参加北方暴雨协作研究的北方各省（区、市）都很快归纳了自身的预报经验，制作具有本地区特点的预报知识库，建立了各自的“暴雨短期预报专家系统”^②。

同时1984年王耀生等也设计了“长江中下游地区暴雨预报专家系统”。

此外，江苏、广西、四川等省级气象局也相继积极研发适合本地区需求的各类预报专家系统。其中以江苏最为突出。

1981—1984年，江苏省气象局针对影响江苏的重要天气或天气系统，以预报经验为线索，应用天气学、动力气象学原理进行分型，全面系统地总结江淮气旋、西太平洋副热带高压、暴雨、台风、强对流天气、寒潮和连阴雨天气预报经验。1984年6—7月，省气象台决定在充分运用老预报员经验的基础上建立“天气预报专家系统”（链接）。开始研制的专家系统由“江淮气旋预报系统”“梅汛期暴雨短期预报系统”“台风预报系统”3个专家系统组成，先后在1984年11月至1985年6月投入业务应用。时任国家气象局副局长章基嘉了解到江苏省气象局研制的天气预报专家系统后，特意到江苏省气象台调研并对这一工

^① 陈云峰执笔。

^② http://www.iap.cas.cn/qt/zthd/qxsh/201402/t20140218_4033391.html。

作给予了高度重视和赞扬，章基嘉亲自撰写了《注意开展气象专家系统的开发工作》的公开信，刊登于《中国气象》杂志1985年第9期上，向全国气象部门推荐江苏的做法。公开信发表以后，20多个省（区、市）的兄弟单位都到江苏省气象台参观、交流^①。

随后，江苏省气象台研制的“天气预报专家系统”在南京通过了省级科技成果鉴定。“天气预报专家系统”课题组在会上详细报告了该系统的研制情况和实际应用情况，并在会上做了功能演示和质询，并介绍了1985年4—10月使用上述三个专家系统进行预报服务的成果和社会经济效益。与会专家一致认为，江苏省气象台研制的“天气预报专家系统”，经过1985年实际业务应用，表现出其预报能力和预报质量都优于主观经验预报，是国内第一个投入业务应用的“天气预报专家系统”，在全国省级气象业务系统中处于领先地位，具有推广和应用价值。专家们还指出，该系统的研制和投入业务使用标志着经验预报向系统化、条理化的方向发展，并逐步与客观、定量的方法相结合，是我国天气预报实现客观化、定量化的重要途径之一。预报员具有丰富的预报经验，是我国天气预报工作的一大优势。将丰富的预报经验加以深化，并与先进的计算机技术相结合，可以避免国外忽视预报员经验所走的弯路。

1985年12月6—10日，“人工智能-气象专家系统技术交流及科研协作会”在北京召开。在此次会上正式成立了气象预报专家系统协作组。全国10个省（区、市）和一些协作单位共20多人参加了会议。章基嘉副局长到会做了讲话。他强调：“数值预报是发展方向，一定要搞。目前世界各国都在深入地进一步改进数值预报模式，如果我们看不清这个潮流，差距会越来越大。但是，我们学习外国人的经验要根据国情，要有中国特色的预报方法。我国有一大批经验丰富的预报员，对他们的宝贵经验要珍惜，要总结继承，要推广，千万不能丢。在预报方法上要多样化，不能强求一致。”

会上北京工学院（现北京理工大学）人工智能所王遇科介绍了人工智能的发展趋势、气象专家系统的现状和前景，以及近代科学向综合发展的趋势。卫星气象中心王耀生详细讲解了气象专家系统的意义及知识库的整理方法。北京工学院人工智能所李红平同志也就知识库整理工作中出现的一些问题做了讲解。各省（区、市）代表做了本地区气象专家系统进展情况的汇报。卫星气象中心在会上做了暴雨预报专家系统

的演示。

这次会议之后气象专家系统的研制工作在全国大规模开展起来。王耀生和李红平也应邀到各地指导研发工作。一些地区气象台甚至县气象站也开始研发专家预报系统。如江苏的盐城、苏州、徐州和淮阴等市局研制了冰雹、连阴雨、汛期暴雨和洪泽湖大风等预报专家系统。

其中苏州市气象局的探索则更进了一步。在当时预报业务技术方面，天气图方法、数值预报方法和统计方法是三种基本方法。在此基础上通过计算机应用开发而发展起来的天气预报专家系统和模式输出产品应用（MOS）使天气预报向客观、定量化迈进了一大步。许多人认为，这两种客观预报方法中，前者是处理经验型的知识，后者是处理数值型的数据，二者结合比较困难。自1985年起，苏州市气象局开始从事这方面的探索。经过对MOS预报以及气象预报专家系统的探索和研究，通过一段时间的实践，在实施天气预报客观定量业务化系统时，形成了如下万案：使用在MOS试验中各种成功的方法构成业务值班系统，由它来发布每天常规的短期客观预报和定期的中期客观预报。使用包含着丰富专家知识的各种重大灾害性天气（如台风、寒潮、暴雨等）预报专家系统，构成重要天气的决策系统。决策系统的启用，根据值班系统的建议，也可以由值班员决定，由此决策日常预报业务。同时，在多年MOS预报试验研究的基础上，他们成功开发了“中期天气客观预报系统”。在这个系统中，大量地使用了专家系统的常用设计思路和技术，如推理、解释、信息反馈自适应等。使一个单纯的统计解释系统具备了一定的智能，从而使系统的实用性和灵活性大大增强。

1986年5月，作为率先引入专家系统的北方暴雨研究协作组在山东省泰安市召开“北方暴雨预报专家系统研讨会”，继续推动暴雨预报专家系统的研发工作。课题组的九省（市）代表在会上分别介绍了自己的专家系统，并在IBM-PC/XT微机上操作演示。山东、内蒙古、宁夏、新疆等省（区、市）的专家系统也在会上进行了交流，其中中科院大气物理研究所的“天气预报专家系统中知识表示方法的探讨”一文，受到普遍关注。1986年完成“暴雨专家系统”的北方省（区、市）有14个之多。

由卫星气象中心、北京工业学院人工智能所、中央气象台以及21个省（区、市）气象台组成的气象预报专家系统（简称专家系统）协作组，在成立一周年

^① 周曾奎口述访谈。

之际，于1986年10月在成都也召开了协作交流会，总结1986年的研制和试报情况，并讨论了今后研制的方向。

在这次会议上重点检验各省运用预报专家系统所取得的成效。根据会议收到的18篇论文，对各个省（区、市）统计结果表明：对短期暴雨（大雪）过程有无的预报，11个省（区、市）平均CSI为61.4%，普遍达到或高于值班预报员水平。其中，如四川省气象台：1986年5、6、9月，专家系统预报11次区域性暴雨，9次准确。安徽省气象台：1986年6—7月，出现区域性暴雨22次，专家系统报出18次。江西省气象台：1986年有5次重要暴雨过程，专家系统全部准确报出。

大家认为，通过一年的实践，人工智能气象预报专家系统确实有继承老预报员预报经验和发展客观定量方法的承上启下的作用，具有实用性。是提高我国灾害性天气预报水平的有效途径之一。它发挥了我国预报员有丰富预报经验的优势，在天气预报学科上开创了我国自己的道路，可解决预报业务中对灾害性天气预报缺少客观方法的实际问题。

除了暴雨预报专家系统取得明显成效外，江苏省气象局的江淮气旋预报专家系统也在业务运用中正式作为江苏省气象台对外发布气旋预报的客观指导预报依据。1985年4—6月（入梅前）共有11次江淮气旋过程，专家系统预报气旋的准确率为10/11，实际预报时效18~42 h。气旋暴雨预报准确率为6/10，气旋暴雨落区预报准确率为5/10。1986年4月的5次气旋过程都预先报出，时效12~36 h。专家系统预报江淮气旋的能力与日本传真图FSAS 24 h地面预报相比较，1985年4—6月，日本的FSAS准确率为8/11，漏报3次，在报出来的8次中有4次气旋迟报，比实际气旋出现的实况晚24~30 h。1986年4月，日本的FSAS准确率是5/7，空报2次，在报出来的5次中有2次气旋迟报，比实际气旋出现的实况晚24~36 h。从两者比较中可看到，专家系统对江淮气旋发生的预报能力达到了一定的水平，超过了一般经验预报水平，对日本传真图FSAS数值预告产品中江淮气旋系统的预报起到修正的作用。

同时，为准确及时地预报寒潮天气，江苏省气象局于1986年2—3月，在IBM PC/XT微机上又建立了“江苏省寒潮预报专家系统”“冰雹预报”2个专家系统。到1987年底，全省已建立预报专家系统21个，并设计通用框架，在全国处于前列。江苏省气象局在专家系统研发方面全面开花，成果丰硕。有20多个省（区、市）气象部门派人来江苏交流，还应其他

省（区、市）气象台要求于1986年4月在南京举办了“专家系统”的讲习研讨会。与会者来自全国15个省（区、市）气象台，共44人^①。随后，“专家系统”的研制和交流活动十分活跃，一度成为培训热点。各地把结合本地天气特点的各种天气预报专家系统通过培训方式向外推广，使之投入业务应用。

当时，在人工智能天气预报专家系统方面，美国也进行了初步探讨，但在技术水平、应用广度以及所取得的业务、经济效益等方面我国都处于世界领先地位。国家气象局还到江苏拍摄专家预报系统的电视专题片送往世界气象组织。

为了进一步推动这一技术的发展，1987年10月，在安徽省召开了“全国天气预报专家系统技术经验交流会”。会议收到技术材料和经验总结等共149份，其中大多数是暴雨、冰雹、大风、台风、寒潮等灾害性天气预报专家系统。章基嘉再次到会做了“积极开发应用天气预报专家系统”的讲话，全面总结了近5年来我国在天气预报工作中开发应用专家系统的经验和取得的成绩。并指出专家系统为继承和发扬我国预报员丰富的预报经验，实现预报业务现代化起着积极作用，同时还指出，对专家系统应该用其所长、避其所短。不要一哄而起、一哄而散，一定要坚持不懈，不断改进、提高，使其成为业务预报中的当家工具之一，并努力发展成为具有中国特色的一种主要预报方法。

1988年1月21—28日，气象预报专家系统第五次协作会议在南宁召开。会上，王耀生代表协作组做了工作小结，指出经过3年协作，已在气象部门广泛普及并取得了明显的经济效益和社会效益，得到气象界和人工智能界的认可，在世界上处于领先水平。但是，目前气象预报专家系统研制和业务应用只是一个良好的开端，今后将进入攻关阶段，要扩大知识面的收集利用，提高自动化程度和机器的学习能力，为预报专家系统业务化打下良好的基础。各省（区、市）代表交流了一年来气象预报专家系统试用情况，认为预报专家系统在预报准确率上，尤其是对暴雨预报，和过去相比有一定程度的提高，受到当地政府、防汛部门以及值班预报员的欢迎。经研究讨论，确定1989年协作组的工作重点是气象预报专家系统业务化及知识库的优化，并重新签定了3年协作协议书。

自1983年开始在天气预报领域引入专家系统以来至1989年，短短五年多的时间内已在全国气象台普及，大陆除西藏、海南外，都已建立了各种类型的气象预报专家系统，内容扩展到暴雨、大雪、大风、冰

① 周曾奎口述访谈。

链接：“天气预报专家系统”的组成

“天气预报专家系统”在总体结构上，一般都有6个子系统。1) 学习系统。主要用来获取新的知识，补充、修订原有知识，使其逐步完善。2) 知识库。主要用来分析、判别预报依据，控制推理决策系统。知识是专家系统的核心，是其预报效果好坏的关键。一般程序的好坏主要关系着工作时效，而知识的深度、广度则关系着预报质量。3) 数据库。记录和保存天气预报信息的系统。主要贮存的有逐日天气预报特征参数、天气实况，预报结果等。有的采用反映天气形势或天气过程特点的特征参数方法建立了历史个例库、天气档案库，有的还存有相应的初始场天气形势图等。4) 推理系统。根据知识进行逻辑判断的程序系统。在推理的方向上，大多数采用双向推理。对预报结果，有精确解和非精确解两种。前者得出的是“是”或“非”，后者得出的结论是可信度，这两种方法各有所长。精确解选用的判别条件值域一般较窄，容易出现空报、漏报现象。非精确解选用的判别条件值域一般较宽，保险系数较大，可以减少空、漏报现象，但是往往需要进行再判断，才能得出结论，然而这却有利于发挥预报人员的主观能动性。5) 输出解释系统。显示，打印出预报结果和预报理由，并能回答用户提出的问题，从而增强了专家系统的透明性。6) 预报信息采集系统。从常规的实时天气报文中自动采集预报信息（特征参数），识别高压、低压、低压槽、高压脊、切变线等天气图形的系统。

雹、连阴雨、寒潮等方面，并向地市、县级气象台站推广，地区台的普及率已达50%左右。

气象预报专家系统对灾害性天气预报的准确率普遍已达到当时值班预报员水平，少数省已接近优秀预报员水平，有些省还开展了落区和强度预报的工作，取得了比较明显的效果。其中比较突出的是在暴雨预报方面，如四川1986—1988年3年预报有暴雨的准确率79.6%、无暴雨的94.4%、大暴雨的71.9%，而且一般先于日常值班的预报。对一些重大灾害性天气的预报都比较成功，如1986年5月19日重庆市各区县的暴雨，1987年7月8—10日和17—21日川西特大暴雨，1988年7月1—2日、23—24日及8月25日的大范围大暴雨等。广西气象台1986、1987年两年预报较成功，1988年遇到了严重干旱、天气异常的情况，大范围暴雨日数和雨量只有常年平均的四至六成，但是暴雨预报专家系统的预报准确率仍然比较高，5—6月预报了4次大于10个站的暴雨过程，报对了3次，另一次预报大于10个站，实况出现了6个站的暴雨，没有漏报。安徽省气象台1986、1987年6—7月的暴雨预报准确率为74%以上，已接近本省优秀预报员水平。内蒙古、山东等气象台的暴雨预报准确率也在70%以上，山东省气象台还通过泰山气象传真广播，向全省发布24 h暴雨预报图。内蒙古、广西还将暴雨预报专家系统与其他预报方法按同一评分标准进行比较，结果表明，它对灾害性天气的预报能力优于其他方法。

1990年，气象预报专家系统还走出了国门。由辽宁省气象局副局长宋达人（团长）、沈阳中心气象台

副台长张廷治、吉林省气象台高级工程师王侠飞和江苏省气象台预报员耿慧组成的中国气象专家系统代表团于1990年10月19日至11月2日赴朝鲜人民民主共和国水文气象局讲学，系统地讲授了气象预报专家系统的基本知识、知识库、推理机、数据库，学习和解释部分，系统的建造和程序设计等方面的内容。

深入阅读

- 邓子风, 1986. 人工智能——气象专家系统技术交流及科研协作会议简介. 新疆气象, (2): 65-66.
- 江苏寒潮课题组, 1987. 江苏寒潮预报专家系统. 气象, (4): 31-35.
- 江苏省JCFES课题组, 1986. 江淮气旋预报专家系统. 气象, 12(11): 11-13.
- 李吉顺, 李鸿洲, 蔡晓虹, 等, 1985. 北京地区暴雨短期预报专家系统. 气象, 11(7): 10-13.
- 汪之义, 1987. 部分省(区)气象预报专家系统1968年业务试报简况. 气象, 13(1): 60.
- 王耀生, 1989. 气象预报专家系统在开拓中前进. 中国气象报, 1989-04-15(3).
- 王耀生, 1994. 人工智能、模式识别在气象领域应用现状与展望. 气象, 20(6): 9-14.
- 游景炎, 1986. 北方暴雨预报专家系统研讨会在泰安召开. 气象, 12(8): 38.
- 张宝元, 1988. 我国天气预报专家系统的现状及其展望. 气象, 14(5): 31-34.
- 周曾奎, 1986. 江苏省“天气预报专家系统”通过鉴定. 气象, 12(3): 19.
- 周山松, 1987. 气象专家系统的现状、问题和展望. 气象, 13(2): 41-43.
- 朱定真, 1986. 专家系统浅谈. 广西气象, (4): 22-25.

(执笔人单位: 中国气象局气象宣传与科普中心)

高被引论文选编

“强对流天气”主题

来源数据库：SCI-E和CAJD，检索时段：2016—2017年

多雷达、多传感器 (MRMS) 定量降水估计：初始业务能力——
Multi-radar multi-sensor (MRMS) quantitative precipitation estimation: Initial operating capabilities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2016, Vol. 97, No. 4.

近年来，计算机技术的飞速发展，使得高容量、多源数据的实时传输和集成成为可能。最近在美国国家环境预报中心 (NCEP) 实施的多雷达、多传感器 (MRMS) 系统，将来自美国和加拿大的180个业务天气雷达的数据，集成拼接到一个具有非常高的空间 (1 km) 和时间 (2 min) 分辨率的无缝隙国家三维雷达图像中。雷达数据可以与高分辨率的数值天气预报模式数据、卫星数据、雷电和雨量测量观测相结合，生成一套强天气和定量降水估计 (QPE) 产品。美国国家海洋和大气管理局强风暴实验室 (NOAA/NSSL) 的张健等概述了MRMS QPE产品的初始业务能力。MRMS QPE系统的初始业务能力包括了基于雷达、器测和大气环境、气候数据的1 km分辨率和2 min更新周期的定量降水估计和相关诊断产品的集合。

未来人为气候变化下的极端龙卷风事件——The realization of extreme tornadic storm events under future anthropogenic climate change. *Journal of Climate*, 2016, Vol. 29, No. 14.

美国伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校的Trapp等探讨了未来人为气候变化下极端龙卷风事件的可能变化。研究采用了假定全球变暖 (pseudo global warming, PGW)

方法。基于CMIP5数据，获得了模拟的1990—1999年5月和2090—2099年5月期间的平均三维大气状态。温度、相对湿度、气压和风的气候态变化差异，被添加到三个极端龙卷风事件的数值天气预报分析中，并使用这种调整后的大气状态作为高分辨率下WRF模式模拟的初始和边界条件，将这些模拟与控制试验 (CTRL) 相比较，以评估PGW效应。研究发现，与各CTRL试验中的超级单体对流的稳健发展相比，PGW下对流抑制 (CIN) 的增加和气块上升运动的减少共同导致了許多试验失败于触发对流。而那些对CIN和上升运动有充分匹配的试验，往往会产生比CTRL更强的对流上升气流，虽然这不符合在PGW下对流可用势能 (CAPE) 预计的更高水平。此外，增强上升气流的试验也倾向于加强垂直旋转。事实上，这种超级单体对流甚至出现在使用PGW下减少的环境风切变驱动的模式试验中。值得注意的是，在任何具有显著对流风暴的PGW试验中，对流形态都没有发生变化。

北美每小时同化和模式预报周期：快速更新——A North American hourly assimilation and model forecast cycle: the rapid refresh. *Monthly Weather Review*, 2016, Vol. 144, No. 4.

美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 的Benjamin等介绍了NOAA天气预报的一个重要组成部分——即美国国家环境预报中心 (NCEP) 的快速更新 (RAP) 系统，RAP是每小时更新的同化和预报系统，已在2012年取代了快速更

新循环 (RUC) 预报，成为一个新的区域分析和预报业务系统。至今，对每小时更新的同化和预报系统的需求继续增加，涉及更多的行业，包括航空、运输以及能源。同RUC相比，RAP的不同主要体现在以下三个方面：一个更大的地理区域 (覆盖北美)、使用WRF模式 (ARW版本) 取代了RUC预报模式、使用格点统计插值分析系统 (GSI) 替代了RUC的三维变分同化 (3DVar) 系统。作为RAP开发的一部分，对ARW模式 (特别是物理框架) 和GSI同化系统进行了修改，其中包括一些基于先前的模式以及与RUC一起开发的同化设计创新。还包括了利用无线电探空测风仪和飞机报表进行预报验证，而且飞机报表可以每小时进行验证。总的来说，RAP的预报相比RUC更为先进，从2012—2015年的RAP第3个版本，它的预报技巧持续增长。此外，RAP还可以提升对地表、高空预报的1~3 h内的持续性预报。

欧洲地面GNSS气象学的现状和前景——Review of the state of the art and future prospects of the ground-based GNSS meteorology in Europe. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, Vol. 9, No. 11.

全球导航卫星系统 (GNSS) 对定位、导航和时间这些传统概念的革命性的改变，已成为我们日常生活的一部分。除了这些著名的民用和商业应用外，GNSS现在已经是一种常备的大气观测系统，它可以准确地感知水汽，水汽是最丰富的温室气体，占大气变暖的60%~70%。在欧洲，GNSS在气象学中的应用大约在20年前就开始了，今天它在研究和应用上都已取得很好的发展。保加利亚索菲亚大学的Guerova等对欧洲GNSS气象学的现状进行了综述，讨论了利用GNSS反演对流层产品、GNSS对流层产品在天气预报及

气候监测中的应用等方面。介绍了利用业务数值天气预报(NWP)模式进行验证和影响研究的GNSS产品的使用情况,以及非常短的天气预报案例研究。GNSS的气候研究是一个新兴的研究领域,但迄今为止的研究仅限于与气候模式的比较和趋势的推导。在欧洲,超过15年的GNSS气象学已经使大气和测地学两个领域之间产生了杰出的合作。现在需要开发下一代GNSS对流层产品和应用,以提高天气预报和气候监测(特别是强天气事件监测)的质量。欧盟Horizon 2020项目已经开展这方面的工作(<http://gnss4swec.knmi.nl>)。

(以上由侯美亭选编)

贵州铜仁连续两次冰雹天气过程的对比分析——《干旱气象》2016年第34卷第1期

陈关清等利用地面加密自动站观测资料、多普勒雷达观测资料以及NCEP/NCAR再分析资料,对2013年3月19日和22日连续出现在贵州铜仁的2次冰雹天气过程的中尺度系统的发展演变及结构特征等进行分析。结果表明:1)高空槽后西北气流带动高层干冷空气南下,叠加在低层西南暖湿空气上形成不稳定层结,是冰雹发生的有利环流背景形势;2)中层干冷空气及地面冷空气侵入造成强烈位势不稳定是铜仁发生冰雹等强对流天气的重要环境条件;3)当K指数 $>38^{\circ}\text{C}$,SI指数 $<-1^{\circ}\text{C}$,强天气威胁指数超临界值,CAPE $>300\text{ J/kg}$ 时极有可能发生冰雹天气;当地面至400 hPa垂直风切变 $>5\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 时,利于雹暴系统发展加强;4)反射率因子 $>50\text{ dBz}$ 的强回波发展加强,且强回波伸展高度超过 -20°C 层高度,出现弱回波区或有界弱回波区,高强悬垂回波特征,径向速度场往往伴有逆风区或中等涡旋出现,是冰雹天气发生典型特征;5)垂直液态水

含量出现跃增达 25 kg/m^2 以上预示有冰雹发生,同时配合冰雹指数可作为冰雹预警的一个重要参考。

海南岛海风雷暴结构的数值模拟——《地球物理学报》2016年第59卷第1期

苏涛等利用高分辨率WRF模式对2012年7月20日发生在海南地区的一次海风雷暴过程进行模拟,探讨了海南岛复杂地形下海风雷暴的结构、发展演变过程及其触发机制。结果表明,海南岛北部向内陆传播的海风与南部受地形阻挡的海风相遇后会形成海风辐合带,辐合带能影响当地的散度和涡旋特征,为雷暴的发生发展提供有利的动力和热力学条件。海南岛受热带海洋的影响较大,当地的水汽条件和对流潜势长期保持着有利于对流发展的状态,自由对流高度始终处于较低的位置,一旦海风辐合带来的抬升运动克服对流抑制到达自由对流高度后,对流就能自主地发展起来,所以单纯的海风辐合也常常能触发当地的强雷暴。雷暴发生发展过程中对流参数存在明显的变化,其演变曲线的突变位置对雷暴的发生有一定的指示作用。海南岛的海风雷暴过程与当地的复杂地形密切相关,地形的动力阻挡作用影响着低层海风的辐合以及对流的发展。

海风雷暴的观测分析和数值模拟研究进展——《气象科技》2016年第44卷第1期

沿海地区经济相对繁荣,城市化水平较高,对天气和气候的依赖性强,突发性强对流天气所造成的灾害也会更加严重;同时沿海地区的强对流天气又与海风环流密切相关,因此沿海地区海风雷暴的研究受到了日益广泛的关注,成为了气象学和大气科学中的重要研究对象。在过去的半个多世纪中,海风雷暴的观测和模拟研究取得了大量

的研究成果。苏涛等通过对这些研究工作进行回顾和总结,系统地分析了国内外的研究现状,重点讨论了海风雷暴的结构和特征、发展演变过程、触发机制及其预报预警。最后对海风雷暴未来的研究方向进行了探讨,提出了一些有待于研究或需深入研究的问题,以利于今后更好地开展有关海风雷暴的工作,加深对其发生发展规律的认识,提高预报预警水平。

2013年北京地区一次强对流降水天气成因分析——《气象与环境科学》2016年第39卷第1期

耿建军等通过对2013年6月6日20时—7日20时北京地区出现的中到大雨、局地暴雨的天气过程的大尺度天气环流背景、物理量场、北京多普勒雷达产品和海风廓线探测数据、VDRAS反演物理量等多种资料详细分析,得出如下结论:

1)本次过程500 hPa北京处于从河套以东至长江中下游地区的低槽槽前,温度槽落后于高度槽,地面处于东高西低的形势场中。2)北京处于850 hPa θ_{se} 高能舌的前部,为对流性天气的出现提供了良好的能量条件。3)强回波在单点稳定少动或多个降水云团先后经过同一地区,造成该地区降水偏大。4)超低空急流加强,且风向由东南转为偏南,南风分量明显加大,有利于水汽的输送和辐合,有利于出现短时强降水。5)据VDRAS反演物理量场的分析,某地区较长时间处于扰动温度相对大值区($0.9\sim 1.2^{\circ}\text{C}$),与该区域降水较大相对应。强回波的合并与维持和其位于东南风和偏南风的辐合区中相关联。6)对EC、T639数值模式降水预报的检验表明,数值模式对明显大尺度系统影响的降水过程预报效果较好,EC对本次过程的预报能力优于T639。

(以上由张萌选编)

编辑选编

通过人为调节太阳辐射将全球变暖限制到1.5℃是否比2.0℃能降低火灾风险——Will fire danger be reduced by using solar radiation management to limit global warming to 1.5 °C compared to 2.0 °C? *Geophysical Research Letters*, 2018, Vol. 45, No. 8.

2016年签署的《巴黎气候变化协定》承诺将全球平均气温的上升限制到2.0℃（同前工业化时代相比），而且努力将变暖进一步限制到1.5℃。广泛认为这个目标的实现充满挑战，可能需要大量的行动，包括大幅度的减排、以及实施地球工程等减少到达地球的太阳辐射能量。英国气象局Hadley中心的Burton等评估了一个理论上的使用太阳辐射管理将全球平均气温限制到比工业化前上升幅度在1.5℃以内的解决方案（基于HadGEM2 - ES地球系统模式），并使用McArthur火灾危险指数评价了火灾风险的变化。结果表明，与将升温控制到2.0℃相比，将升温限制在1.5℃，使得在全球范围内，火灾风险在大部分地区都减少了。平均而言，火灾风险为“高”及以上的天数每年减少达30 d以上，虽然存在地区差异。比如，在某些地区（美国和亚洲的一些地区），火灾风险为“高”及以上的天数增加了31 d以上。本研究强调需要彻底了解升温到1.5℃对火灾的潜在影响途径，这种影响（同升温到2.0℃）可能并不总是积极的。

物种组成和土壤性质对预测山地森林碳水关系变化的综合影响——Integrating effects of species composition and soil properties to predict shifts in montane forest carbon-water relations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, in press.

据估计，在全球范围内，山地森林流域为40多亿人提供了水源。气

候变化正在导致一些山地森林区域的森林物种组成和生产力发生改变，而生物和环境因素的相互作用，使得难以预测气候变化下森林功能的变化，从而导致对陆地碳和水循环的不确定影响。为此，美国加州大学戴维斯分校的Maxwell等以加州内华达山脉为例，研究了树木的生理特征和森林碳水利用之间的联系，以找到山地森林生态系统中耦合碳水循环的主要不确定性来源。研究选取了一个1500 m海拔梯度的样带（代表了变化的气候条件和土壤特征），确定了九个优势种的内在水分利用效率（iWUE，定义为CO₂净同化与气孔导度的比值）。研究利用叶片尺度的碳和氧稳定同位素比值测量结合实地和遥感生产力指标，揭示出iWUE的变化主要取决于叶特征（能够解释24%的变异），其次是生产力（能够解释16%的变异）、气候（能够解释13%的变异）和土壤（能够解释12%的变异）。物种组成和土壤性质之间的重要交互被证明有助于预测森林碳水关系的变化。基于开始于20世纪50年代以及近年来不断加强的观测到的树木种类组成的变化，在整个区域的混合针叶林中，通过蒸腾作用的水分损失有所增加（从10%~60%不等）。

2005和2010年亚马孙雨林干旱事件之前的冠层生长的增强——Enhanced canopy growth precedes senescence in 2005 and 2010 Amazonian droughts. *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 211.

2005和2010年，亚马孙南部发生了前所未有的干旱，导致树木死亡和碳损失的急剧增加。为了更好地预测雨林对未来干旱的反应，有必要了解它在过去干旱事件中的行为。卫星可以为亚马孙森林提供持续观测。南京信息工程大学的刘毅等使用了一种被动微波植被含水量记录（植被光学厚度，VOD），以及多种水文气象观测、常规卫星植被测量数据，研究了2005和2010年干旱期间的热带雨林冠层动力学。研究发现，在这两年

的干旱开始阶段，即湿季—旱季的转变季节（5—7月），在亚马孙南部，VOD、叶面积指数（LAI）和增强型植被指数（EVI）出现了大规模的正异常。这些很可能是由于冠层生长的增强造成的。在旱季期间，降雨量的减少和辐射的增加可以被解释为正常旱季条件的提前到来，从而促进了新叶生长和生态系统的光合作用，野外观测也支持了这种假定。研究结果表明，在2005和2010年的干旱期峰值期（8—10月），降雨的进一步减少导致了水和热胁迫的增加，超过了雨林的耐受限度，导致了普遍存在的VOD负异常。2005年主要在西部地区观测到明显的VOD负异常，2010年主要发生在中东部地区。在这两个干旱年份中，具有显著VOD负异常的总面积是相当的，但2005年显著VOD负异常的平均幅度更大。这一发现与实地观测一致，表明2005年生物量碳吸收的减少比2010年要大。因此在解释亚马孙干旱的生态影响时，应考虑到在干旱引起的衰老过程之前的增强的冠层生长。

公路建设对源于LANDSAT数据的陆面能量平衡和局地气候的影响——Impact of highway construction on land surface energy balance and local climate derived from LANDSAT satellite data. *Science of the Total Environment*, 2018, Vol. 633.

公路的广泛建设对景观及其结构有重大影响。它们还能影响周围地区的气候和热通量。高速公路建设导致植被消失后，用于植物蒸散发（潜热通量）的太阳辐射能量减少，导致地表温度升高，改变了当地气候，增加了地表径流。为了研究高速公路影响的程度和空间范围，捷克南波希米亚大学的Nedbal评估了D8高速公路建设对太阳辐射能量分布（包括潜热、感热、地表热通量）以及有关的地表参数（地表温度和湿度）的影响。研究利用LANDSAT多光谱卫星图像和野外气象测量方法，对高速公路建设前后的地表功能参数和热收支

进行了计算。研究发现,四车道公路的建设,可以影响到公路轴线上垂直方向的90 m左右的景观表面的热平衡,也就是距其边缘的75 m的垂直距离。这意味着降温效果的降低,表示为潜热通量的减少,因为通常在夏季的一天,每千米的降雨量可以达到 43.7 m^3 。失去蒸发冷却能力的地表会导致地表温度上升高达 7°C 。

(以上由侯美亭选编)

“5.7”广州特大暴雨分析与研究——《气象》2018年第44卷第4期

2017年5月7日,广州市增城区新塘镇等地出现了小时雨量超过180 mm,3 h雨量超过330 mm的极端强降水事件,刷新多个雨量历史记录,引起社会各方面的极大关注。

《气象》在2018年第4期集中刊登了3篇文章,从不同视角分析了此次暴雨过程:田付友等综合使用多种观测资料对本次极端强降水的触发和发展时段的天气实况特征、环流背景及对流的触发和维持机制进行了详细的分析。伍志方等利用常规观测资料和广州天气雷达资料对此次暖区特大暴雨过程的天气尺度背景、中尺度系统演变和可预报性进行了详细分析,同时通过分析ECMWF集合预报中成功预报出广州周边地区出现局地强降水与预报了弱降水的成员间的差异,探讨影响本次大暴雨发生的关键触发因子。傅佩玲等利用双偏振雷达、二维雨滴谱仪、微波辐射计和风廓线雷达等多种新型探测资料,分析这次短时暴雨的演变过程和降水特征,并通过大气环境诊断和双多普勒雷达风场反演方法研究其维持机制。

北极地区春季降水呈现固态向液态转变的态势——《科学通报》2018年第63卷第12期

降水形态的变化可以影响地表的温度和反照率,对下垫面物质和能量平衡、陆地水文及生态系统均产生极大影响。韩微等基于美国阿拉斯加8站和加拿大11站日平均气温和固态、液态降水资料拟合的固-液态降水临

界气温,辨析了1961—2010年环北极地区253个站点的降水形态时空变化特征。结果表明:60°N以北地区,降雨量占总降水量的比值(rainfall to total precipitation ratio, RPR)随纬度升高而减小。RPR气候平均态在夏季最高,秋季、春季次之,冬季最小。在不同季节,RPR变化趋势存在明显的区域差异。在春季,RPR变化趋势较为一致,在北极大部分地区(82.46%站点)呈增加趋势,且有22.37%站点通过显著性水平检验,表明北极大部分地区春季降水在过去50多年间呈现由固态向液态转变的趋势。使用95%置信区间上限和下限临界温度对降水形态进行划分和趋势分析,其结果与使用最优解的计算结果一致。在北极冰雪开始消融的春夏季节转换期(3—7月),阿拉斯加、中西伯利亚和北欧部分地区存在明显的固态降水向液态降水转变的趋势,这一趋势可能正在对北极地-气相互作用施加着影响。

超强台风Soudelor (2015) 登陆前后局地强降水的动力过程分析——《中国科学(地球科学)》2018年第48卷第4期

潘劲松等基于中尺度站点观测、雷达图像、卫星红外云图和NCEP全球业务分析数据资料,详细分析了2015年13号台风Soudelor在华东地区尤其在浙江省沿海产生局地灾害性强降水的分布、强度、触发因子及相应的动力过程。这次台风降水过程可分为4个阶段:第一阶段由台风北侧外围环流偏东风分量与浙江沿海地形相互作用而产生;第二阶段的降水强度最强,累积降水最大,是台风内区主体环流与局地地形相互作用的结果;第三阶段是由于台风内区减弱,主要降水云带在台风东北侧发展而形成;第四阶段由于台风环流与中纬度系统相互作用,使得降水云带“北跳”至江苏省中东部,引起浙江省内的降水迅速减弱。定量计算表明,“地形效应”对局地台风降水增幅起确定性作用,其在台风总体降水中占比达50%

左右。台风登陆后结构变化引起水汽输送发生变化,进而引起台风局地降水云带发展的非对称分布,是造成台风强降水空间非对称分布的主要因子。对此个例分析表明,影响中国沿海灾害性强降水不仅与台风强度、结构及外围云带紧密相关,其降水强度会因为台风与沿海地形的复杂相互作用而增加,而其影响时间会因为由大尺度环流引导的弧线路径而延长。此次台风强降水过程的物理及动力分析可以用于指导对未来台风降水灾害的理解、预报及预防,尤其有益于由登陆台风与沿海地形相互作用引起的闪雨、山洪、泥石流及洪涝灾害的预报预警。

大气环流形势客观分型及其与中国降水的联系——《地球科学进展》2018年第33卷第4期

大气环流异常是造成天气和气候变化的直接原因。以往对大气环流形势和中国降水关系的研究绝大部分是在对大气环流形势进行主观分型和进一步诊断的基础上来研究两者的联系。相对于对大气环流形势的主观分析,客观分型方法采用的指标更一致、标准更统一,能够得到较多的大气环流类型,目前得到了较为广泛的应用。陈亮等利用欧洲中期数值天气预报中心提供的1979—2016年的再分析资料(ERA-Interim),通过选择逐日12 UTC的海平面气压、可降水量和700 hPa风速3个变量,应用倾斜旋转T模态主成分分析方法对中国区域内的大气环流进行了客观分型,并进一步分析了不同大气环流类型与中国区域降水之间的联系。结果表明,不同大气环流类型对中国区域降水趋势和降水量的影响不仅在空间上存在差异,而且在季节上也不尽相同。总体表现为大气环流类型对降水量大的区域和降水量多的月份影响较大,而对降水量小的区域和降水少的月份的影响较小。此外,与环流类型发生频次对中国降水的影响相比,大气环流类型发生频次不变的背景下降水强度变化对中国降水趋势的影响更加显著。

(以上由张萌选编)

《《涓流细雨》》 编辑 贾朋群

“This is the first time that we’ve used observations from multiple satellites in a thorough assessment of how freshwater availability is changing everywhere on Earth. A key goal was to distinguish shifts in terrestrial water storage caused by natural variability - wet periods and dry periods associated with El Niño and La Niña, for example - from trends related to climate change or human impacts, like pumping groundwater out of an aquifer faster than it is replenished. What we are witnessing is major hydrologic change. We see a distinctive pattern of the wet land areas of the world getting wetter - those are the high latitudes and the tropics - and the dry areas in between getting dryer.”

“这是我们第一次利用多个卫星的观测对地球上各地区淡水可用性如何变化进行的透彻估计，一个关键目标是从与气候变化或人类影响相关的，如从蓄水层抽取地下水速度高于补充的速度的趋势背景中辨别陆地水储存因自然变率——例如，厄尔尼诺和拉尼娜相关的干季和湿季——发生的改变。我们见证的是重要的水文变化。我们看到的特别态势是世界上位于高纬和热带的湿润土地区域变得更加湿润，这些区域之间的干旱地区则更加干”

——美国NASA科学家利用GRACE卫星2002—2016年的数据，跟踪全球34个地区的淡水变化趋势，形成的研究成果在Nature杂志上发表。项目组的首席研究者Matt Rodell及其研究团队成员表达了他们研究取得的结果。据悉，GRACE卫星的继任卫星GRACE Follow-On已于2018年5月升空。

“It’s doing this and currently we aren’t using that information to make predictions. We predicted, from the sound, the size of the tornado and the damaged path width matched almost spot on.”

“[龙卷]发出这样的声音，但目前我们还没有利用这一信息做预报。我们根据声音预报龙卷的范围和成灾路径宽度，和实况几乎完全一致。”

——2018年5月初，美国俄克拉荷马州立大学学者宣布，

他们成功地在龙卷形成前探测和预报了其路径。学者们指出，在龙卷真正开始旋转前数小时，会发射人类无法听到的次声波。研究团队将敏感的次声波扩音器置于封闭容器内并在四个方向上附加大型探测回路装置，这样的装置可以滤掉风噪音，只对龙卷次声波敏感而回避了更大的风暴系统。利用这一次声波开展监测和预测，研究团队在龙卷形成10分钟前确定了12英里以外的龙卷，研究负责人Brian Elbing如是说。

“As technology changes and people are getting their information in different ways, it’s now time for the hurricane center to really look and see how effective our products are and look toward the future.”

“技术的改变让人们获得信息的途径发生变化，目前是飓风中心考虑如何让我们的产品更有效和展望未来的时候了。”

——在美国新飓风季（6月1日开始）来临之际，美国飓风中心通过采用飞机和更多的卫星数据及模式改进，缩小了飓风预报的不确定性范围，将预报时效提高到72 h，使得民众的预警时间增加1 d。该中心预报专家Dan Brown表达了这一常规服务改进的意义和目标。

“This is a serious problem. This is the premier Earth-pointing instrument on the GOES platform. If they are not functioning fully it is a loss, a performance issue we have to address. The heat pipes that transport heat from the cryocooler to the external radiator do not seem to be working as intended right now.”

“这是一个严重问题。这是在GOES平台上指向地球的最重要仪器，如果无法完全发挥作用，这是一个损失，我们不得不面对这样一个性能问题。连接制冷设备和外部辐射计的导热管，目前看来并没有如设计的那样传输热量。”

——2018年3月1日升空的GOES-S（业务化后为GOES-17）卫星，升空还没有到3个月，星上关键仪器ABI就出现了制冷问题，无法保证其在60 K温度下开展工作，影响到该仪器16个频道中的13个红外和近红外频道，而3个可见光频道没有受到影响。NOAA卫星和信息局负责人Stephen Volz提到这个问题时，做了如上表述。

（上接87页）

向移动发展。随冷高压南下，高压前冷锋引起豫北地区出现东北大风。持续补充的冷空气减缓了冷高的变性速度，西南气流使暖低压不断发展，两系统对峙使豫北长时间处于变压梯度和气压梯度大值区中，有利于豫北大风发展和维持。

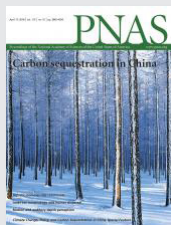
2) 温度平流可通过热力强迫作用影响地面变压场从而影响地面风速的大小；南北的冷暖平流加强时期与地面大风加强时期有良好对应关系，且低层冷平流增大，有利于地面气压的升高，同时产生较大的地面变压风。散度场可通过水平散度风和垂直动量交换，影响地面风速的大小。另外通过散度产生的次级环流还可以通过高纬度的上升支间接影响冷空气的维持，从而通过间接影响温度分布而影响风速。

参考文献

- [1] Streten N A. Some characteristics of strong wind periods in coastal east Antarctica. Journal of Applied Meteorology 1968, 7: 46-52.
- [2] 吴海英, 孙燕, 曾明剑, 等. 冷空气引发江苏近海强风形成和发展的物理过程探讨. 热带气象学报, 2007, 23(4): 388-394.
- [3] 陈淑琴, 黄辉. 舟山群岛一次低压大风过程的诊断分析. 气象, 2006, 32(1): 68-73.
- [4] 尹尽勇, 曹越男, 赵伟. 2010年4月27日莱州湾大风过程诊断分析. 气象, 2011, 37(7): 897-905.
- [5] 黄彬, 钱传海, 聂高臻, 等. 干侵入在黄河气旋爆发性发展中的作用. 气象, 2011, 37(12): 1534-1543.
- [6] 姚正毅, 王涛, 陈广庭, 等. 近40 a甘肃河西地区大风日数时空分布特征. 中国沙漠, 2006, 26(1): 65-70.
- [7] 杨忠恩, 陈淑琴, 黄辉. 舟山群岛冬半年灾害性大风的成因与预报. 应用气象学报, 2007, 18(1): 80-85.
- [8] 张华, 杨彩云. 一次大风型强寒潮天气过程分析. 内蒙古气象, 2007, (2): 17-18.
- [9] 田林生. 胜利油田近海东北大风及风暴潮分析预报. 海洋气象, 2002, (1): 73-80.

PNAS 2018年4月

该刊最新一期的内容，围绕中国学者在气候变化方面的研究展开，封面主题专栏的7篇文章，围绕“中国气候变化、政策和碳封存”展开。



《天气预报系统和解决方案市场》 2018年3月

这篇由美国调查机构完成的针对天气预报系统和解决方案市场的预测报告，给出2018—2025年按照预报时效（短期、中期和长期）预报元素类型、终端用户类型（企业和军事）等进行的预测。报告指出，2016年全球这一市场的规模达到了25.1亿美元，在预测时段内，市场规模的复合年增长率将为7.1%。



《展望海洋的未来》 2018年3月

以英国政府首席科学家名义发表的这份报告，由英国政府科学办公室推出。128页的报告历时1年完成，从海洋经济、海洋环境、海洋治理和海洋科学4个方面阐述了未来海洋发展趋势。



《变化》 2018年5月

美国气候变率和可预测性（US CLIVAR）项目这份最新出版物的主题，是“热带扩展”。5篇文章围绕这一主题，就最近热带地区扩展的量级、原因和影响展开讨论，提出一些紧迫的研究课题、标准化方法的思路、人类作用和不同区域扩展的变化及对海陆的影响等。

媒体扫描 贾朋群 编辑

MEDIA SCAN

《建立国家气候服务框架的步骤指南》 2018年5月

这份编号为1206的WMO出版物（报告的中文版），阐释了如何创建和开发功能性的国家气候服务框架，将其作为关键的协调机制，将必要的地方、国家、区域和全球利益相关方联合起来，以便成功打造与用户共同设计和联合制作的气候服务并提供给用户，同时将气候知识与国家和地方层面的落地行动有效衔接。



《地学通信》 2018年5月

这本封面看起来有点像儿童书籍的杂志，实际上是欧洲地球科学联盟（EGU）2018年新推出的两本科学杂志之一。该期刊执行开放获取政策，期刊对来稿的要求和风格与该联盟其他期刊一样，主要关注的是地球、行星和空间科学之间以及与社会科学和人文科学的交叉领域。EGU新创刊的另一本期刊，是《地球科学百科全书》。

《2018—2020年战略计划》 2018年4月

世界上历史最为悠久，规模和影响力最大的气象专业学会之一——英国皇家气象学会推出的这份战略计划，迎合了英国建立天气和气候学习型社会的理念，该计划通过确定未来3年的战略目标、优先领域和效果，引导社会向既定的目标迈进。



《发展中国家水文服务状况》 2018年6月

全球减灾机构GFDRR和世行最新发表的这份报告，瞄准发展中国家的水文服务，分6章给出了全面的评估和建议。

Advances in Meteorological Science and Technology (Bimonthly)

Vol.8 No.3, June, 2018

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-in-Chief

Wang Zhiqiang
 Xiao Ziniu
 Zhai Panmao
 Luo Yunfeng
 Li Weijing
 Hu Yongyun
 Tan Zheming
 Sun Jian
 Fei Jianfang
 Zhao Licheng
 Zhang Peng
 Guan Zhaoyong
 He Jianxin
 Huang Jianping
 Liao Xiaohan
 Jia Pengqun (executive)

Managing Editors

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

Editors

Bi Baogui, Bin Wang, Chen Jingming, Chen Yunfeng, Chen Zhenlin, Cui Chunguang, Cui Jiangxue, Dong Wenjie, Du Jun, Feng Guolin, He Jinhai, He Qing, Hu Xin, Hu Yuewen, Jiang Tong, Jin Feifei, Lei Xiaotu, Li Jiming, Li Jun, Li Liangfu, Li Yaohui, Li Yueqing, Li Zhongming, Liang Xudong, Liu Jingmiao, Liu Liping, Liu Licheng, Liu Shi, Liu Zhengyu, Lu Naimeng, Lu Riyu, Luo Bing, Luo Yali, Ma Shuqing, Ma Yaoming, Peng Yinghui, Pu Yifen, Song Yan, Suo Miaoqing, Tang Xu, Tian Hong, Wan Qilin, Wang Bin, Wang Donghai, Wang Jianlin, Wang Shigong, Wang Yanqing, Wang Yingchun, Wang Yuan, Wang Zifa, Wei Xiaoli, Wen Min, Weng Fuzhong, Wu Liguang, Xie Zhihui, Yan Guanhua, Yan Xiaodong, Yang Ping, Yang Song, Yang Zhaoxing, Yao Xuexiang, Yi Lan, Zhai Wuquan, Zhang Dalin, Zhang Guangjun, Zhang Lixiang, Zhang Xiaoling, Zhang Yuetang, Zhao Guangzhong, Zhou Dingwen, Zhou Jianhua, Zhou Lingxi, Zhou Xianxin, Zhu Dingzhen, Zhu Xiaoxiang, Zhu Yujie, Zhu Yande, Zou Liyao, Zou Xiaolei

Editorial office

Zhang Meng, Hou Meiting, Qin Lianxia, Ji Wenbin, Jiang Jianmin

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

Printed by

Beijing Jinjishi Printing Limited Liability Company

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

RMB 30.00

Main Contents

(Special Issue: Severe Weather Study and Its Operation)
 (Invited Editors: Du Jun, Gao Jidong, Zhang Xiaoling)

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

Article

- 8 Zhang Xiaoling, Yang Bo, Sheng Jie, Tian Fuyou, Zhou Kanghui, Lin Yinjing, Zhu Wenjian, Cao Yancha/ Development of Operations on Forecasting Severe Convective Weather in China
- 19 Fu Chenghao, Gao Jidong, Wang Yunheng, Tang Jie, Zhou Changqing, Ye Chengzhi, Zhuang Zhaorong/ Applications of a Real Time Weather-Adaptive 3DVAR Analysis System in Detections and Warning of Tornado Related Severe Weather
- 38 Zhang Yunji, Zhang Fuqing/ A Review on the Ensemble-Based Data Assimilations for Severe Convective Storms
- 53 Kong Fanyou/ A Study of Storm-Scale Ensemble Forecast
- 61 Wang Xiaohua, Zheng Yuanyuan, Pu Meijuan, Zong Peishu, Yu Liangyu/ Design of the Severe Weather Alert and Track Comprehensive Platform and Application in Tornado Warning
- 70 Xie Xiaohan, Wang Yong, Guo Qian/ Introduction to the INCA Nowcasting System with Complex Terrain Adaptability
- 77 Li Yumei, Di Jingyue, Xu Fengwen, Zhang Guoping, Wang Zhi/ A Risk Warning Method Based on the Intraday Critical Precipitation for National Geological Disaster
- 84 Duan Zhongxia/ An Analysis of Persistent Spring Gale in the Northern Henan Province

Survey

- 2 Picture/ Number/ Ranking

Feature

- 6 Editorial office/ Visiting the First Professional Center for Tornado Study

History

Event

- 88 The Group for Mining and Research on the Meteorological History/ Applications of AI in Weather Prediction in 1980s

Reading

Information

- 92 Selected Papers