

崔春光,杜牧云,肖艳姣,等,2021.强对流天气资料同化和临近预报技术研究[J].气象,47(8):901-918. Cui C G, Du M Y, Xiao Y J, et al, 2021. Study on the technique of data assimilation and nowcasting of severe convective weather[J]. Meteor Mon, 47(8):901-918(in Chinese).

强对流天气资料同化和临近预报技术研究*

崔春光 杜牧云 肖艳姣 赖安伟 李红莉 王志斌 王 珏 孙玉婷
王俊超 冷 亮 王 斌 张 文 彭菊香 马鹤翟 康兆萍

中国气象局武汉暴雨研究所暴雨监测预警湖北省重点实验室,武汉 430205

提 要: 强对流天气的精准预报依然具有极大难度和挑战性。为了提高强天气监测预报服务能力,“灾害性天气资料同化与临近预报系统开发”研究共开展了以下工作:研发了新的中气旋和龙卷涡旋特征识别算法,并在十几个龙卷风实例中成功地识别出龙卷涡旋特征;从多普勒天气雷达体扫数据中提取了诸多参数(超过 20 个),开展分类强对流天气(下击暴流、龙卷、冰雹和短时强降水)自动识别预警技术研究。快速更新循环预报系统可以有效地提高模式初值的质量,非常适合于短时天气预报应用。为进一步提高强雷暴预报的精度,提出了一种新的基于雷达反演水汽的“伪水汽”同化方法,以更好地初始化对流尺度的数值天气模式。旨在克服目前中尺度数值模式在对流尺度定量降水短时预报方面的不足,弥补基于“外推”的临近预报技术在 2 h 以上定量降水预报能力快速下降的缺陷而研发的融合技术具有提高短时临近降水预报能力的潜力。

关键词: 强对流天气,资料同化,临近预报

中图分类号: P456, P413

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.08.001

Study on the Technique of Data Assimilation and Nowcasting of Severe Convective Weather

CUI Chunguang DU Muyun XIAO Yanjiao LAI Anwei LI Hongli WANG Zhibin
WANG Jue SUN Yuting WANG Junchao LENG Liang WANG Bin
ZHANG Wen PENG Juxiang MA Hedi KANG Zhaoping

Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205

Abstract: It is still extremely difficult and challenging for accurate prediction of convective weather systems. In order to improve the service ability in severe weather monitoring and prediction, the following studies have been carried out recently. The feature recognition algorithms for new mesocyclone and tornado vortex are developed and proved to be successful in identifying tornado vortex characteristics in more than a dozen tornado cases. Extracted from Doppler radar volume scan data, more than twenty parameters are used in the study on the automatic recognition and warning technology of classified severe convective weather (downburst, tornado, hail and short-time intense precipitation). Rapidly updating cycle forecast system can effectively improve the quality of model initial values, which is very suitable for short-time forecast application. For the sake of improving severe thunderstorm prediction, a novel pseudo-observation and assimilation approach involving water vapor mass mixing ratio is proposed to better initialize numerical weather prediction (NWP) at convection-resolving scales. The blending technology, which is expected to

* 国家重点研发计划(2016YFE0109400)和国家自然科学基金项目(41620104009)共同资助

2020 年 8 月 3 日收稿; 2021 年 3 月 2 日收修定稿

第一作者:崔春光,主要从事数值预报与资料同化研究. E-mail:cgcu@whhr.com.cn

overcome the deficiency of the short-time quantitative precipitation forecast (QPF) by a mesoscale NWP model at convective scales and the rapidly descending skill of rainfall forecast based on radar extrapolation method beyond the first few hours, is under development, and it would have potential in enhancing the ability of rainfall forecast within the nowcasting period.

Key words: severe convective weather, data assimilation, nowcast

引 言

在我国,强对流天气(短时强降水、雷雨大风、冰雹、龙卷)常导致重大人员伤亡和财产损失,受到社会的广泛关注。例如:2015年6月1日,“东方之星”客轮突遇飚线伴有的下击暴流袭击后翻沉,共计造成442人遇难;2016年6月23日,江苏省盐城市阜宁、射阳等地突发龙卷风、冰雹等强对流灾害,因灾死亡99人,受伤近850人;2018年7月18日,甘肃临夏遭遇多年未遇短时强降水天气,随即引发洪水、泥石流等自然灾害,共造成13人死亡,3人失踪。

强对流天气具有突发性和局地性强、尺度小、生命史短、灾害严重等特点,因此一直是天气预报业务中的重点和难点。国家防灾减灾、重大社会活动和精细化天气预报的大众化需求都对此类灾害性天气的临近预报提出了更高的客观要求。国外众多国家均建立了自己的短时临近预报系统,其中包括:美国MDL(Meteorological Development Lab)的SCAN预报系统(Smith et al, 1998);NSSL(National Severe Storms Laboratory)开发的WDSS(Eilts et al, 1996)和WDSS II系统(Lakshmanan et al, 2007);NCAR(National Center for Atmospheric Research)发展的ANC临近预报系统(Wilson et al, 1998)以及与数值预报相融合的NIWOT系统(Cai et al, 2006);FAA(Federal Airline Administration)联合多家单位建立的航空风暴预报系统CoSPA(Wolfson et al, 2008);英国的NIMROD(Golding, 1998)和GANDOLF(Pierce et al, 2000)预报系统;加拿大的MAPLE和CARDS预报系统(Fox et al, 2004);澳大利亚的STEPS系统(Bowler et al, 2006);法国的SIGOONS系统(Brovelli et al, 2005);日本的VSRF系统;奥地利的INCA系统(Haiden et al, 2011)等。国内方面,香港天文台最早开始建设SWIRLS(“小涡旋”)系统(Li et al, 2000)进行短时临近预报;广东省气象局建立的

GRAPES-SWIFT系统(胡胜等, 2010);湖北省气象局的MYNOS临近预报系统(万玉发等, 2013);上海市气象局的NoCAWS系统;北京的BJ-ANC系统(陈明轩等, 2010)等;中国气象局从2007年开始组织建设SWAN强天气临近预报业务系统,目前已发展到SWAN2.0以上版本(韩丰和沃伟峰, 2018),前期版本也已完成全国推广(郑永光等, 2010)。上述国内的临近预报系统在实际气象服务保障中发挥了重要的作用,取得了不错的服务效果。

我国强对流天气短时临近预报业务开始较晚,尽管已经取得了巨大进展,但与国外先进水平相比还存在一定差距(郑永光等, 2010)。作为一种中小尺度天气,强对流天气系统很难被常规气象观测网捕捉到。我国气象观测系统尤其在进入21世纪取得了长足发展,建立了地基、空基和天基相结合,门类比较齐全,布局基本合理的综合气象观测系统(行鸿彦等, 2017)。加上全国200多个站点的新一代雷达数据(高玉春, 2017),大幅增加了实况观测对于气象要素的精细空间分布刻画能力。近些年,得益于大气探测能力的大幅提升,多源资料融合分析系统快速发展(崔春光等, 2011;彭菊香等, 2011;韩帅等, 2018;师春香等, 2019),融合了常规、雷达、卫星、闪电、GNSS/MET水汽、飞机、船舶等多源实况观测资料,能实时提供包括地面常规要素、三维云量、天气现象、洋面风、海表温度等多种网格实况分析产品,为网格预报模型建立、实况信息更新和预报产品检验提供了基础条件。2009年,国家气象中心强天气预报中心利用常规地面观测资料、重要天气报告(WS报)、自动站资料、地闪定位资料、雷达反射率因子资料(包括全国拼图和单站雷达基数据资料)、静止卫星红外和水汽通道资料等,实现了对我国及其周边地区不同类别强对流天气的不同时段、不同强度的实时监测(郑永光等, 2010; 2011; 2013; 何立富等, 2011)。国家级强对流天气综合业务支撑平台的建设则对加强我国强对流预报技术研发与成果应用起到了重要的支持作用(杨波等, 2017)。当前,无缝隙精细化网格气象预报已经逐渐成为国际主流趋

势,并被视为未来几十年科学界指导方针的重要指标。我国的无缝隙精细化网格预报业务技术自 2014 年开始发展并也取得了长足的进展(金荣花等,2019)。

就目前而言,我国现有的天气预报业务对中小尺度强对流天气的预报手段还相对匮乏,与发达国家仍存在一定差距。当前预报业务部门对于强对流天气的预报能力还有很大不足,因此如何提高强对流天气的分析技术水平和预报能力,仍是当前现代天气预报业务所面临的重要挑战之一。国内中小尺度资料同化技术研究起步较晚,还未能将各种资料进行有效的综合应用;而且受模式本身物理过程方案以及分辨率的局限,对强对流天气过程的描述能力也有限。因此,借鉴和吸收国外最新成果,建立自动、客观、实用的无时间缝隙强对流灾害性天气临近预报系统,进而提高监测预报服务能力显得十分必要。目前,国内分类强对流天气监测预警多以基于雷达观测的主观概念模型预报技术为主,有限时间内主观判断难度大,迫切需要研发自动且客观的分类强对流天气预警技术,并克服资料质量问题的影响。到目前,国家临近预报业务,主要通过外推预报风暴位置、雷达回波强度和雷达定量降水。由于没有考虑其演变和生消,随着外推时间的延长(超过 1 h),预报效果快速下降。稠密、多源观测资料(雷达、卫星、自动站等)的融合分析,以及高分辨率的快速更新循环同化数值天气预报是解决强对流天气临

近预报的重要手段(潘昉等,2018;杨璐等,2019;张涵斌等,2020)。通过混合 Blending 技术将外推预报和高分辨率的数值天气预报相结合是目前提高临近预报能力的可行方法(程丛兰等,2019)。

为此,中国气象局武汉暴雨研究所建立了分类强对流天气预警系统,提供 0~3 h 雷达外推预报产品;提高了多源稠密观测资料在 LAPS(Local Analysis and Prediction System)系统(Albers et al,1996;李红莉等,2009)中的融合同化效果,为模式提供最优初值,建立高分辨率的快速更新循环同化数值天气预报系统,提供每 15 min 更新一次的 1~3 km 分辨率的中尺度分析场和 0~12 h 的临近预报产品;形成了强对流天气 0~12 h 客观预报支撑技术体系。

1 项目介绍

“灾害性天气资料同化与临近预报系统开发”(项目编号:2016YFE0109400)是 2016 年中国气象局武汉暴雨研究所获批的科技部国家重点研发计划的政府间国际科技创新合作重点专项。项目研究内容包括与美国海洋和大气管理局(NOAA)的地球系统研究实验室(ESRL)和强风暴实验室(NSSL)合作,开展分类强对流天气识别预警技术、我国多源稠密观测资料数据融合技术、外推预报和高分辨率数值天气预报混合技术这三个方面的研究,具体内容详见图 1。

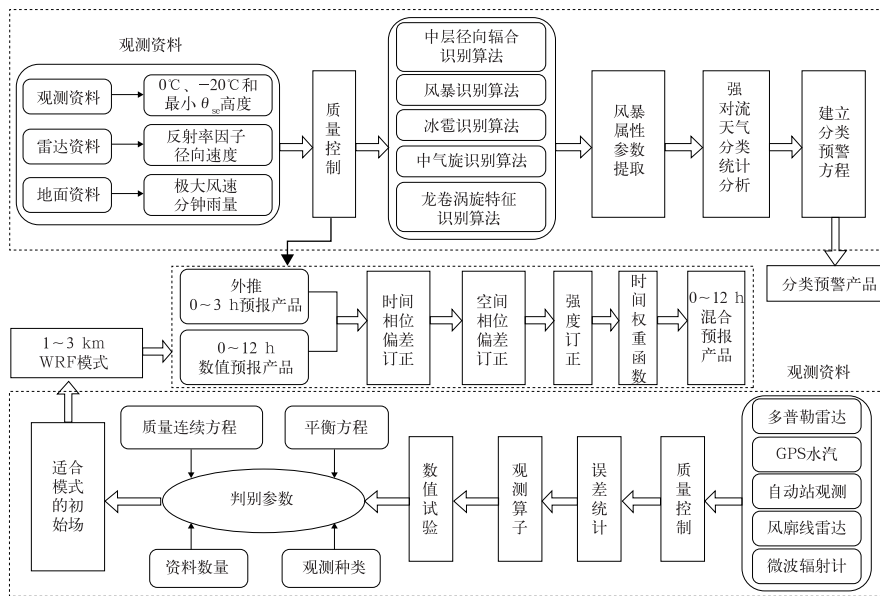


图 1 主要研究内容框图

Fig. 1 Overview of main contents of the research program

目前,依托该项目完成了改进的雷达径向速度质量控制、分类强对流天气识别预警、多源观测资料融合和快速更新循环同化预报以及定量降水外推预报和数值预报的混合等技术研究。重点开展了改进的变分同化技术和多源稠密观测资料融合技术研发,包括构建新的观测算子,实现了双偏振雷达资料的变分同化,有效提高了模式初值的准确度及其预报效果;在基于雷达观测识别深对流云的基础上,根据模式背景场的信息构造“伪水汽”观测同化,改善对流尺度系统的水汽条件,减弱模式 spin-up 问题;针对梅雨锋降水,改进温度调整方案,提高对梅雨锋上对流系统的模拟能力;研究了基于稠密观测资料融合分析的 LAPS 各要素平衡关系和模式热启动技术,改进了模式 0~6 h 降水临近预报效果;研究了 LAPS 和 WRF 模式(Weather Research and Forecasting Model)的耦合技术。基于上述研究成果,建立了灾害性天气 0~12 h 临近预报系统,包括分类强对流天气识别预警、多源观测资料融合同化和快速更新循环预报等 3 个子系统。

2 研究成果简介

2.1 分类强对流天气识别预警技术

2.1.1 改进雷达定量降水估计技术和定量降水外推预报方法

武汉暴雨研究所研发的雷达定量降水估测(QPE)算法已在 SWAN 系统中业务运行多年(吕晓娜等,2013;王红燕等,2015)。本项目主要通过针对层状云降水对混合反射率因子进行 VPR(reflectivity vertical profile)订正,得到近地面的反射率因子用于 Z-R 关系拟合和降水率的计算来改进雷达定量降水估计。其中,使用 2005—2007 年 11 次降水过程的武汉雷达体扫数据,采用现有层状云和对流云降水回波自动分离技术分离出层状云降水回波,采用近距离垂直分层(垂直分辨率为 0.25 km)平均方法建立每个体扫下层状云降水回波的平均视在 VPR。通过统计分析后发现,最大反射率因子(Z_{\max})所在高度 h_p 之上 1 km(h_{p+1})和之下 0.75 km($h_{p-0.75}$)是反射率因子垂直梯度大值区,而且这两个区间的反射率因子垂直梯度的大小与 Z_{\max} 呈线性关系(图 2a)。由此建立了层状云降水的动态气候 VPR 模型(图 2b),其中, α 和 β 为反射率因子变化

斜率, h_p 则由雷达观测识别出来。使用两次层状云降水个例进行初步效果评估,结果表明:经 VPR 订正后层状降水雷达 QPE 的平均相对误差率从 28% 下降到 23%。

SWAN 系统最早使用 COTREC(continuity of tracking radar echo by correlation)方法(Li et al, 1995)进行定量降水外推预报,该方法对变化平缓的层状云降水系统能够取得较准确的运动矢量场,从而得到有效的外推预报。但对于变化较快的强对流降水系统,COTREC 方法得到的运动矢量场的质量降低,跟踪失败的情况显著增加。光流是空间运动物体在观测面上投影像素运动的瞬时速度。光流法就是利用图像序列中像素强度数据的时域变化和相关性来确定各像素运动位置的研究方法。本项目提出一种改进的光流法(王志斌等,2017)进行强对流回波的外推预报,以此来改进定量降水的外推预报效果。首先,对比分析全局最优约束的 HS(Horn and Schunck,1981)光流方法和局部最优约束的 LK(Lucas and Kanade,1981)光流方法后发现,HS 方法很难满足全局最优条件,而 LK 方法虽然容易满足局部最优条件,但难以使全场的图像数据完全满足最优条件。改进的光流法将上述两种方法通过一个能量函数有机结合起来,并加入高阶平滑项。求解方程得到流场结构后,再运用九点滑动平均得到运动矢量场,最后采用 Semi-Lagrange 方法进行外推预报。初步评估结果表明,基于改进光流法的外推预报效果优于 HS 和 LK 方法。其中,30 min 外推的击中率(POD)比 HS 和 LK 方法分别高 12% 和 9%;成功指数(CSI)也比 HS 和 LK 方法分别高 7% 和 5%;虚警率(FAR)则均比 HS 和 LK 方法低 5% 左右。

为了满足业务运行需求,利用共享内存方式并行处理,并基于 Fork/Join 框架进行编程,通过将整个计算任务分割成若干子任务,再汇总每个子任务计算结果的方式显著缩短了运行时间,其加速比可达 5.05(王志斌等,2019)。目前,改进的雷达定量降水估计和定量降水外推预报算法已投入业务运行,可提供每 6 min 滚动更新的 0~3 h 的逐小时定量降水格点预报产品和强降水($>20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)格点预报,格点分辨率为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 。

2.1.2 分类强对流天气关键参量自动提取及其统计特征研究

雷达径向速度模糊问题是阻碍其广度和深度应

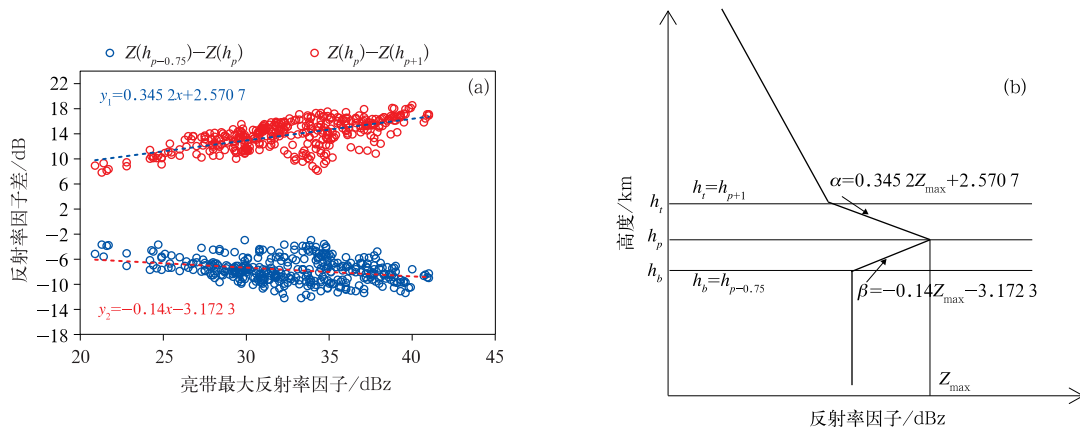


图 2 层状云降水的 VPR 订正

(a)最大反射率因子拟合结果,(b)层状云降水动态气候 VPR 模型

Fig. 2 The VPR correction for stratiform precipitation

(a) fitting result of maximum reflectivity, (b) dynamic climate VPR model of stratiform precipitation

用的重要原因,下击暴流和龙卷的识别预警更是离不开径向速度资料的使用,因此,对径向速度进行有效的退模糊处理是资料应用的关键。

武汉暴雨研究所自主研发了一套全自动速度退模糊算法(肖艳姣等,2012),并在我国新一代天气雷达建设业务软件系统(ROSE)中业务运行。但在本项目研究过程中发现,存在剧烈方位切变的情况下,该算法难以有效区分速度模糊和风切变,从而导致了不适当的速度退模糊及其扩展(图 3b),影响了对中气旋和龙卷涡旋特征的准确识别。为此,针对显著速度模糊和强风切变等情况调整了原算法中初始参考径向的搜索方法,改变多轮退模糊过程中多参量动态变化的阈值变化顺序,并改进了第二轮退模

糊过程中的参考速度搜索方法,从而实现了改进的速度退模糊算法(图 3c),批量个例检验结果显示,对存在剧烈切变的速度模糊区的退模糊效果有显著提高。

以改进的速度退模糊算法为基础,进一步开发了风暴识别追踪、冰雹指数、中层径向辐合特征和中气旋识别,下击暴流预报和识别(肖艳姣等,2021)等算法,综合上述算法,完成了风暴单体 20 多个特征参量(详见表 1)的自动提取。基于大量下击暴流、龙卷和冰雹历史个例,统计分析了产生这三种灾害天气的风暴单体的雷达特征量,为建立分类强天气识别预警方法奠定基础。

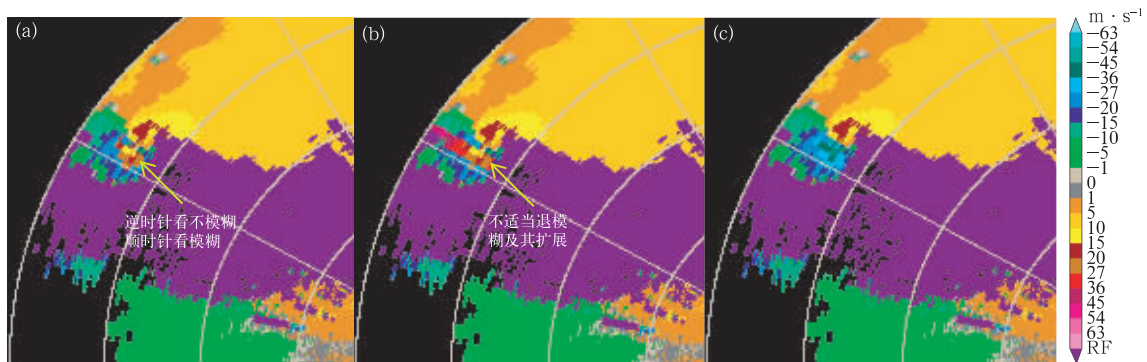


图 3 2016 年 6 月 23 日 14:25(北京时间,下同)盐城雷达 1.4°仰角的径向速度

(a)未退模糊,(b)原速度退模糊算法,(c)改进的速度退模糊算法

Fig. 3 The PPI of radial velocity for Yancheng Radar site at elevation 1.4° at 14:25 BT 23 June 2016

(a) raw data, (b) original de-aliasing algorithm, (c) advanced de-aliasing algorithm

表 1 风暴单体的部分属性特征参量

编号	参量名称	单位	参量说明
1	ZMAX	dBz	最大反射率因子
2	HZMAX	km	最大反射率因子所在高度
3	ZTH	dBz	最小环境位温高度附近的最大反射率因子
4	ZATH	dBz	最小环境位温高度以上的最大反射率因子
5	VIL	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	基于单体的垂直累积液态水含量
6	VILD	$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	VIL 密度
7	STH	km	风暴顶高度
8	SHI	$\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	强冰雹指数
9	MS	$\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	移动速度
10	MRV	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	中气旋旋转速度
11	IMARC	$10^{-4} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$	垂直积分中层径向辐合值
12	DVOR	10^{-4} s^{-1}	最大方位涡度
13	CM16	10^{-4} s^{-1}	1~6 km 最大径向辐合值
14	MRC	10^{-4} s^{-1}	最大径向辐合值
15	MARV01	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1 km 以下最大绝对径向速度
16	DIV01	10^{-4} s^{-1}	1 km 以下最大径向辐散值
17	DVTH	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	最小环境位温高度附近的径向上的最大径向速度差
18	CMTH	10^{-4} s^{-1}	最小环境位温高度附近的最大径向辐合值
19	POSH	%	强冰雹概率
20	MRD7	10^{-4} s^{-1}	7 km 以上的最大径向辐散值
21	MD	km	中气旋直径
22	MDAS	10^{-4} s^{-1}	中气旋最大差分方位切变
23	MRV1	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	中气旋最低层旋转速度
24	MRV2	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	中气旋第二层旋转速度
25	MDAS1	10^{-4} s^{-1}	中气旋最低层差分方位切变
26	MDAS2	10^{-4} s^{-1}	中气旋第二层差分方位切变

2.1.3 建立分类强对流天气预警方法

以下击暴流为例,利用湖北省的雷达体扫数据和地面大风测站资料,对 2010—2016 年湖北省下击暴流大风天气过程的雷达特征参量进行统计分析。将大风发生前 6 min 距离站点 10 km 范围内的风暴均作为统计样本。考虑到研究目的在于寻找地面下击暴流大风发生的雷达先兆因子,故把匹配到地面大风的风暴单体前 1 h 的雷达特征参量都进行统计。为了有效地分析径向速度因子的影响,选取的单体位于雷达站 10~150 km 范围内风暴单体的雷达特征参量。通过对产生下击暴流和非下击暴流的风暴单体的雷达特征量进行对比分析,选出 9 个分布特征差异较大的风暴单体雷达特征量,统计产生下击暴流的各雷达特征量的隶属函数(式 1)和权重,使用模糊逻辑法建立了下击暴流预警方程。

对流性大风单体的雷达特征量 x 的隶属函数 $F(x)$ 见式(1):

$$F(x) = \begin{cases} 0 & x \leq T_L \\ \frac{x - T_L}{T_U - T_L} & T_L < x < T_U \\ 1 & x \geq T_U \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_L 和 T_U 分别为下限、上限临界值。

以雷达特征量作为输入变量,基于模糊逻辑的下击暴流预警概率方程为:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n F(x_i)W(x_i)}{\sum_{i=1}^n W(x_i)} \quad (2)$$

式中: P 为下击暴流发生的概率, $F(x_i)$ 和 $W(x_i)$ 分别为雷达特征量 x_i 的隶属函数和权重。当 P 大于预设阈值(缺省值为 50)时认为将有下击暴流发生。此外,当 1 km 以下有显著的径向辐散特征(径向辐散值大于 $40 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)或有大风核(径向速度大于 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)存在时也会触发下击暴流大风预警。图 4 给基于单站雷达观测的分类强对流天气识别产品。有关该算法更详细的描述见肖艳姣等(2021)。

与下击暴流类似,本项目同样给出了中气旋产生龙卷的 3 个判断标准,以此实现了超级单体龙卷的识别;综合使用最大反射率因子、垂直积分液态水含量及其密度与冰雹概率等 4 个特征参量建立了冰雹识别方法。建立的分类强对流天气识别预警系统

可提供逐 6 min 的分类强对流天气识别产品,包括:风暴单体的位置,移动方向和速度,下击暴流、龙卷和冰雹的发生概率及其位置等。利用 2019 年的下击暴流、龙卷和冰雹个例对该系统开展批量测试评估,结果表明其性能稳定,识别效果良好。

2.2 我国多源稠密观测数据融合技术

2.2.1 稠密观测资料质量分析、控制及检验评估

多源稠密观测资料是采用不同手段,从不同角度,具有不同特征的大气观测。为了充分利用这些资料开展数据融合分析,开展多源资料的特征分析和质量控制研究至关重要。为此,项目组主要开展了 GPS/MET、微波辐射计、风廓线雷达等观测资料的质量控制及检验评估。针对多源观测资料各自特点,采取相应的对比方法进行质量控制,以满足 LAPS 系统数据融合的精度要求。

依托建立的 GPS/MET (Global Positioning System Meteorology) 自动解算与反演系统,在 GPS/PWV 解算过程中,利用本地化模型的大气加权平均温度 $T_m = 0.7765T_s + 53.7754$ 替代常数 $T_m = 0.15$,并基于数据统计分析结果,剔除 0~160 mm

范围外的 GPS/PWV 数据。以探空 RS/PWV 为参考的 GPS/PWV 评估结果表明,使用本地化模型的大气加权平均温度提高了 GPS/PWV 反演数据的精度(付志康等,2017)。

在微波辐射计资料质量分析及评估方面:(1)将无线电探空资料代入辐射传输模式(MWCLD),模拟“晴空无云”条件下各通道亮温,与武汉 MP-3000A 型地基微波辐射计的亮温观测值对比后发现,两者的相关系数很高,偏差很小。(2)对同址 GPS 无线电探空和微波辐射计观测的气象要素进行了对比分析,发现二者的温度和水汽密度廓线具有很好的正相关,相对湿度廓线的正相关系数受天气影响明显;二者的观测结果具有系统偏差,在无降水时较小,有降水时较大。有降水时,微波辐射计反演的亮温偏高,可降水量明显偏大。(3)对比分析了武汉站高时、空分辨率(3 h、30 m)的探空资料和地基微波辐射计资料,结果表明:降水对两种设备的温度廓线和水汽密度廓线的相关性无明显影响,但对相对湿度廓线的相关性有较为明显的影响,其相关性在有降水时好于无降水时;整体上,微波辐射计的廓线误差在降水时大于无降水时,其温度、相对湿度和水汽密度廓线的平均偏差均值分别在 1.0~2.5℃,6%~15%和 0.08~1.75 g·m⁻³,对应的均方差均值分别在 1.3~1.6℃,14%~17%和 1.28~1.85 g·m⁻³。另外,将不同高度上微波辐射计和探空的资料进行点对点对比发现,降水会严重破坏两种资料的正相关性,导致大部分高度上的廓线呈负相关,同时也明显增加温度和水汽密度的平均偏差和均方差。

对于风廓线雷达观测,采用多高斯拟合方法对其观测的原始数据功率谱中经常出现的多谱峰情况进行判断,选取合理的谱峰作为大气湍流回波计算风速,避免了降水粒子等因素对速度的影响,从而得到更为合理的大气风场。

2.2.2 LAPS 融合同化技术改进和云分析技术研究

在 LAPS 系统中研发了变分法订正的雷达反射率因子数据(Li and Xu,2017)、FY-2E 卫星辐射数据(李红莉等,2016)、FY-4A 温湿度廓线产品、反演的三维 GPS 层析水汽密度数据的同化技术,并建立了能同化雷达、风云卫星、GPS 水汽、风廓线雷达、探空、地面等多源稠密观测资料的华中区域 3 km 逐小时资料融合分析系统(李红莉和王志斌,

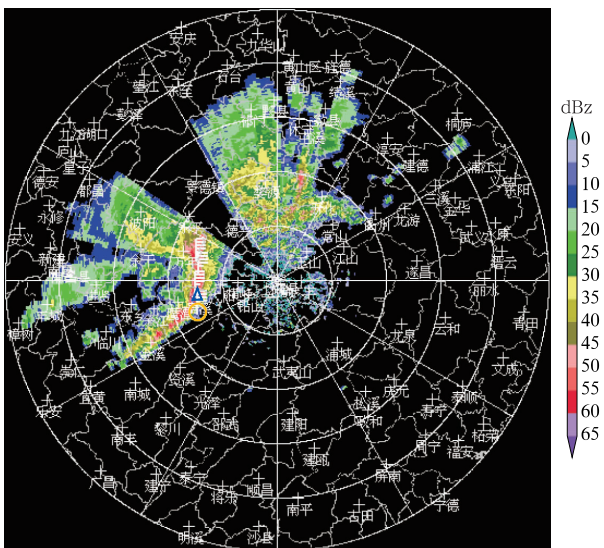


图 4 基于单站雷达观测的分类强对流天气识别产品

(风杆表示下击暴流大风,黄色圆圈表示中等强度中气旋,蓝色三角形表示冰雹)

Fig. 4 The classified severe convective weather products based on single-station radar data

(wind shaft; downburst, yellow circle; moderate mesocyclone, blue triangles; hail)

2017)。该系统融合了 115 部雷达基数据,可提供接近实况并满足业务需求的高时空分辨率分析产品。

评估表明,LAPS 云分析产品较接近实况。由图 5 可知,2016 年 6 月 28 日 09 时,1 h 实况降水雨区位于长江中游,且存在数个降水中心,分别位于安徽东南部—浙江北部、鄂皖赣交界大别山地区、浙江南部、湖南北部洞庭湖西侧、湘黔渝交界区域(图 5a),LAPS 较好地分析出这 5 个降水中心对应的云顶高度超过 10 km 的云团(图 5c),与葵花 8 卫星观测的稳定云带中的云团位置及云顶高度(图 5b)较为一致。由于 LAPS 云分析方案是基于背景场的湿度诊断初估云量,再结合雷达、卫星等观测修订云分析(李红莉等,2016),与卫星对云区的观测反演有所不同,故虽然两者对强降水云区的分析较为接近,但在弱降水云区仍存在较大差异。

2.3 外推预报和高分辨率数值天气预报混合技术

2.3.1 快速更新循环同化预报

针对 3D-Var 方法直接同化雷达反射率时无法改善对流系统中的水汽问题,在雷达反射率观测识别深对流云的基础上,进一步调整模式的相对湿度场,将对流降水柱内抬升凝结高度至回波顶高之间的水汽置为饱和(即相对湿度为 100%),并降低层状云降水和虚假对流区的相对湿度,然后根据模式背景场信息构造“伪水汽”观测并开展同化(具体算法详见赖安伟等,2021),从而改善对流尺度系统的水汽条件,减弱模式 spin-up 问题(Lai et al,2019)。ADAS 云分析技术中云内温度调整对对流发展有促进作用(Hu et al,2006),为此,利用对流云湿绝热温度调整方案调整后的云内温度作为“伪云内温

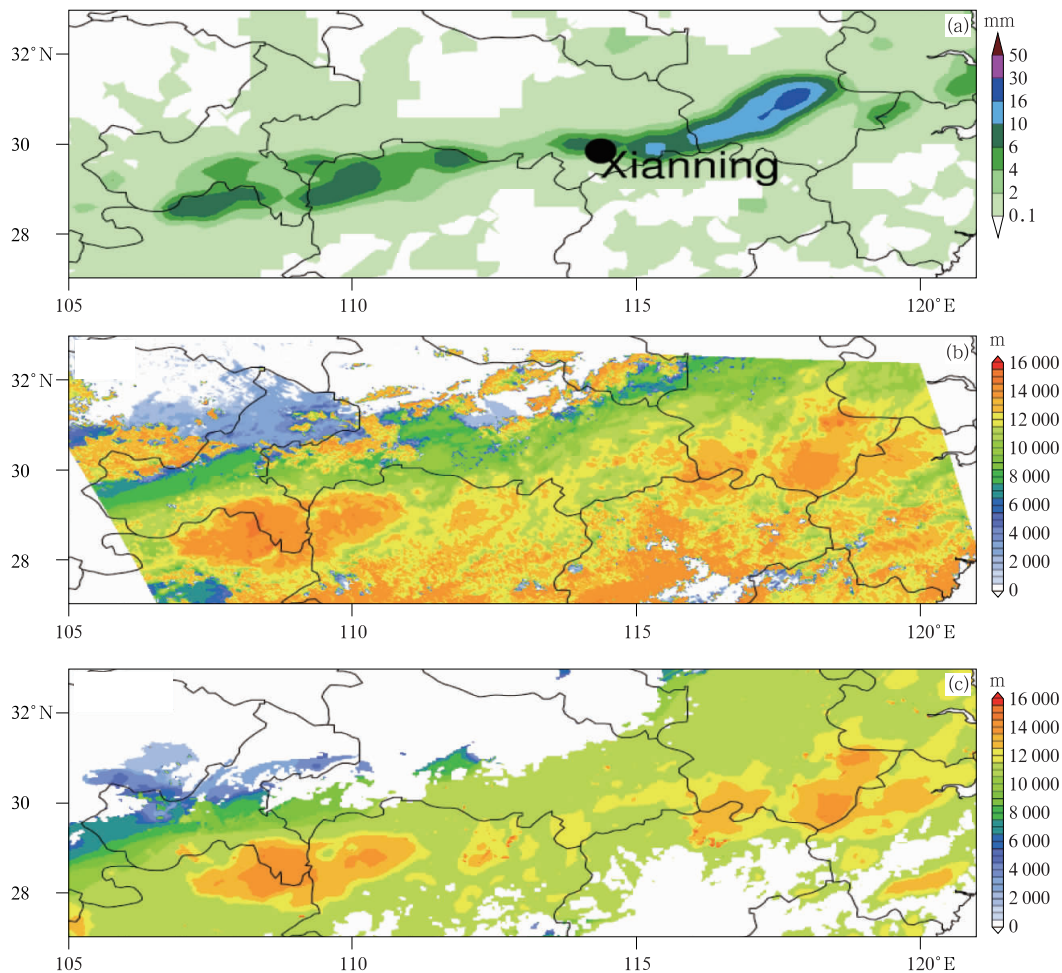


图 5 2016 年 6 月 28 日 09 时实况降水(a)以及葵花 8 卫星(b)和 LAPS(c)的云顶高
Fig. 5 The observed precipitation (a) and the cloud tops by Himawari-8 Satellite (b) and LAPS (c) at 09:00 BT 28 June 2016

度”观测,对 2016 年 6 月 23 日江苏省阜宁龙卷个例开展了“伪水汽”和“伪云内温度”同化试验,结果表明该方法提高了对梅雨锋上强对流系统的模拟能力(图 6)。

针对梅雨锋上环境水汽条件充沛,“伪水汽”方案调整水汽幅度较弱,对流系统模拟发展缓慢,维持

时间较短等问题,融合了云分析系统中的层状云凝结潜热和对流云湿绝热温度调整方案,将融合两种温度方案后获得的调整温度作为“观测值”,并与雷达径向风和反射率因子一起同化,改善了梅雨锋的 0~3 h 降水预报(Lai et al,2020)。

研发了 LAPS 系统和 WRF 模式的耦合技术,

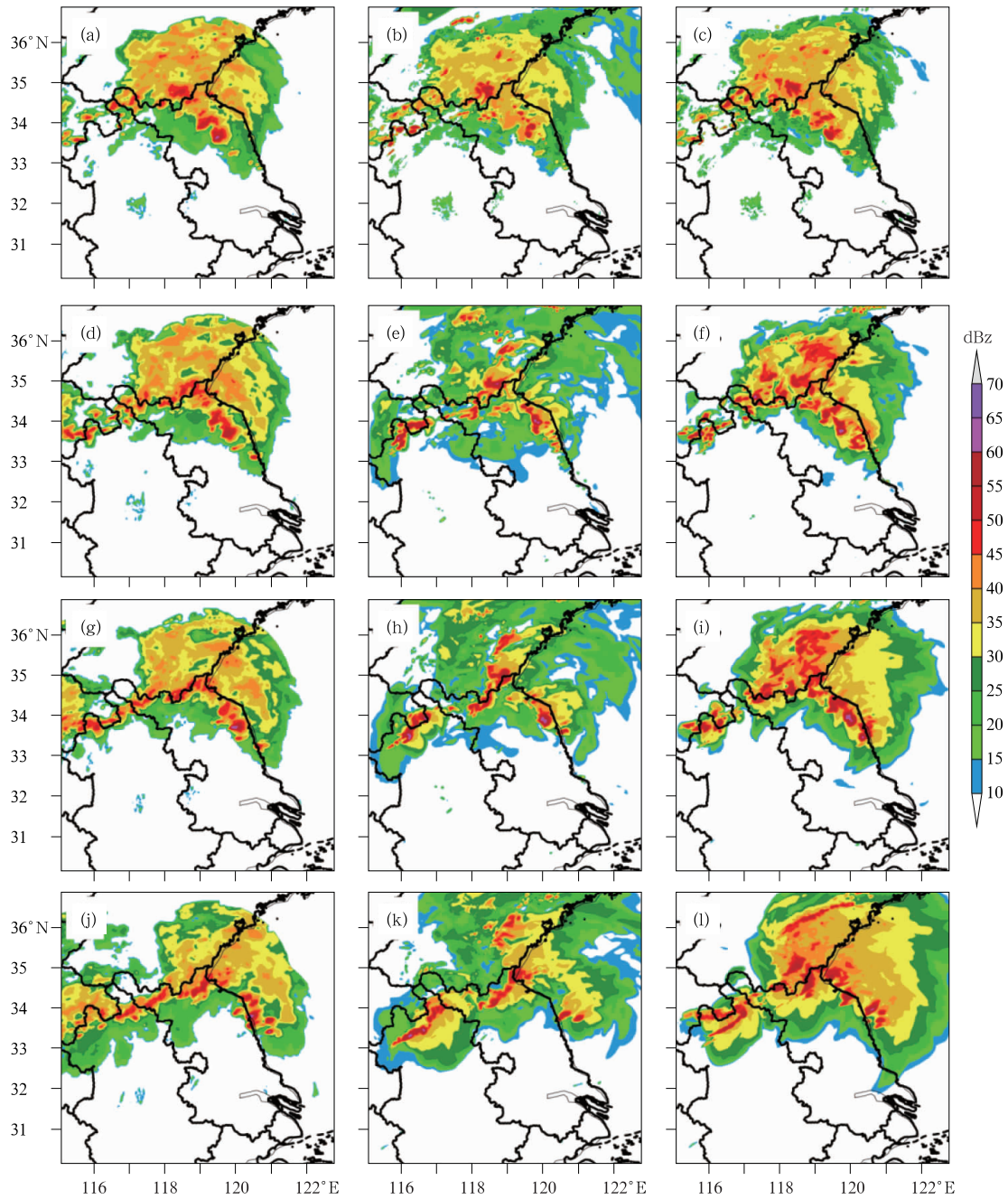


图 6 2016 年 6 月 23 日两组同化试验结果对比

(a,d,g,j)观测实况,(b,e,h,k)只同化雷达数据,(c,f,i,l)同化雷达、“伪水汽”和“伪云内温度”

Fig. 6 The comparison of two assimilation experiments on 23 June 2016

(a, d, g, j) observations, (b, e, h, k) only radar data assimilated,

(c, f, i, l) radar, pseudo water vapor and temperature in cloud assimilated

利用暴雨天气过程开展了数值模拟试验,检验了观测资料同化对暴雨预报的影响。开展了基于融合稠密观测资料的 LAPS 云分析的模式热启动技术和 LAPS 各要素平衡关系等研究,评估了平衡前后模式初值对预报的影响,结果表明,可缓解模式 spin-up 问题,提高模式 0~6 h 的强对流预报效果。以上述研究为支撑,完成了基于实时稠密观测资料(雷达、卫星、GPS 水汽、探空、地面等)融合的逐时更新循环同化预报系统的建设。相较于目前华中区域实时运行的快速更新循环同化预报系统(HRRR),逐时更新循环同化预报系统(EXPRUC)的 0~6 h 降水预报评分更高(图 7)。

2.3.2 模式降水预报校正方法研究

借鉴 RAPIDS(real-time acceleration platform for integrated data science)的技术思路,开展了数值降水预报落区和强度校正方法研究。

对于数值预报降水位相采用两步校正法。即:第一步,先用快速傅里叶变换 FFT 法,保证雨带整体位移偏差得到修正;第二步,用多尺度光流变分法,使雨带的走向和小范围降水区得到合理调整,使得快速更新循环预报的降水落区和实况更加吻合。

强度订正则是通过调整模式降水预报使其逐步向定量估测降水场逼近来完成的。统计可知模式预报降水和雷达估测降水均满足韦布尔分布,且两个降

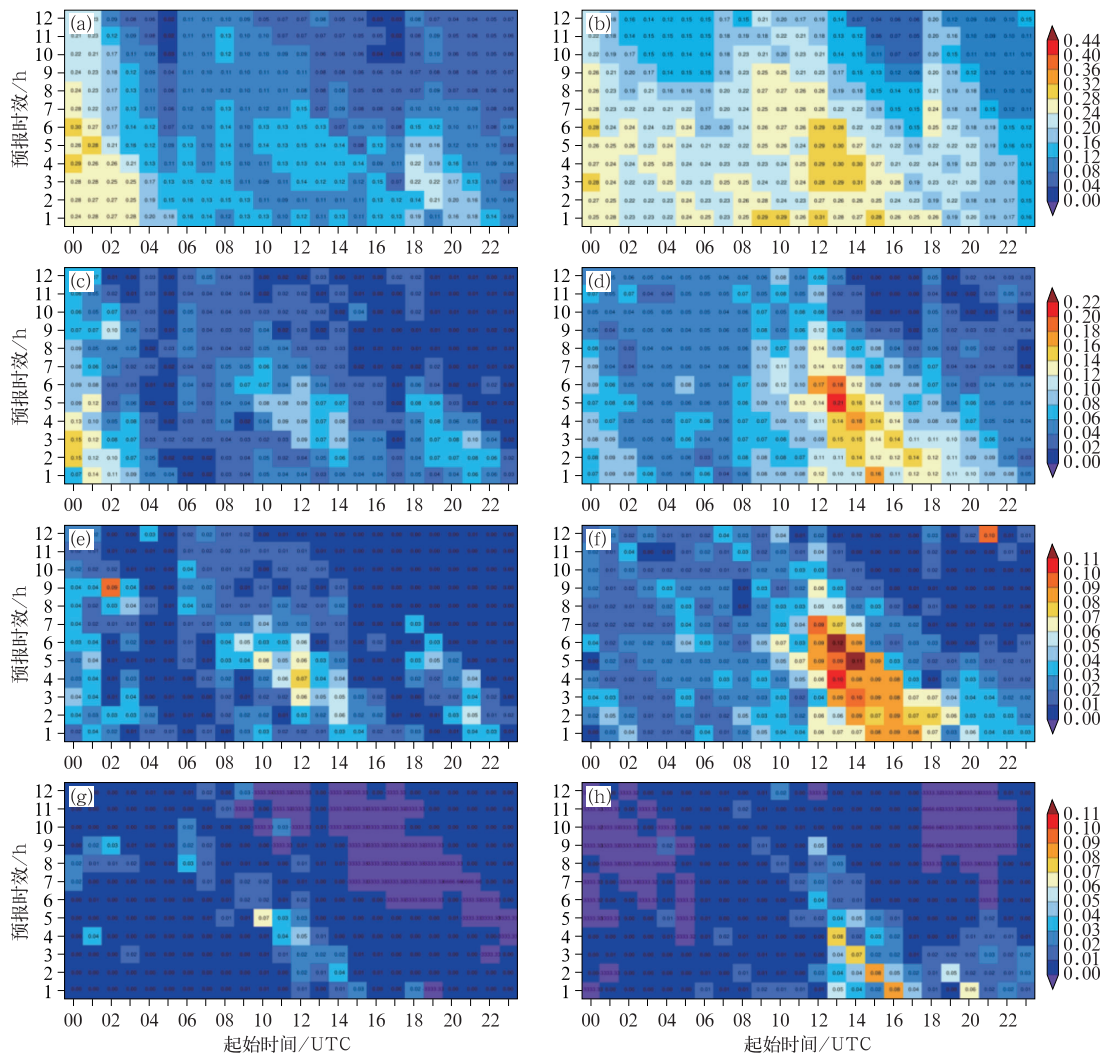


图 7 HRRR(a,c,e,g)和 EXPRUC(b,d,f,h)模式系统 0~6 h

(a,b)1 mm,(c,d)5 mm,(e,f)10 mm 和(g,h)20 mm 不同量级降水预报的 TS 评分

Fig. 7 The TS scores of 0-6 h precipitation forecast of HRRR (a, c, e, g) and EXPRUC (b, d, f, h) models at different levels: (a, b) 1 mm, (c, d) 5 mm, (e, f) 10 mm, (g, h) 20 mm

水场的概率密度分布函数相同。通过多样本运算求解可得到韦布尔分布的参数 α 和 β 。值得注意的是,对于不同的降水个例以及降水过程的不同时次,韦布尔分布参数都有所不同,每次强度调整的具体情况也不尽相同,以此来保证每次的调整都合理有效。

2.3.3 雷达外推预报和数值天气预报混合技术研究

混合方法的实质是“取长补短”,混合前期取临近预报的“长”补数值预报的“短”,混合后期则是取数值预报的“长”补临近预报的“短”,以求在 0~6 h 内取得较好的预报效果(见下式),其中,混合权重的分配是问题的关键。

$$R_{\text{blending}}(t) = W(t) \times R_{\text{model}} + [1 - W(t)] \times R_{\text{radar}} \quad (1 \leq t \leq 6) \quad (3)$$

本项目采用正切动态权重融合法,正切曲线的两个端点根据降水的天气类型和预报员的天气变化经验给定,结合不同降水系统的空间尺度,在不同情况下取不同的权重(杨丹丹等,2010):

$$W_m(t) = \alpha + \frac{(\beta - \alpha)}{2} \times \{1 + \tanh[\gamma(t - 3)]\} \quad (1 \leq t \leq 6) \quad (4)$$

式中: α 和 β 分别是 $t = 1$ (当前时次) 和 $t = 6$ (未来 6 h) 的数值模式权重, α 和 β 的取值根据预报员的天气变化经验、雷达气候学、对流系统的强弱等确定, γ

代表在融合时段中间部分 W 的斜率,通过调节 γ 值来确定权重曲线的变化快慢, γ 和 α 值根据降水系统类型和降水过程快慢等确定。在业务应用前,需要开展大量历史个例试验,通过统计分析与对比检验得到适合于本地应用的参数设置;或者通过大量个例的检验结果建立本地化参数库,针对不同天气系统配置不同的参数。

考虑到局地的强对流系统,1 h 内外推预报的效果较好,因此,混合前 1 h 内的融合权重保持不变,即混合前 1 h 内数值预报权重保持 α 值不变;外推预报随时间延长预报效果急剧下降,6 h 后已不具备参考价值,因此,第 6 小时数值预报权重 β 取 1。根据天气系统类型和雷达资料的谱空间相关性等进一步确定 γ 和 α 值。当前已实现了基于雷达的定量降水外推预报和校正后的数值模式定量降水预报的混合服务产品。经检验,强回波 1 h(2 h) 临近预报结果和雷达监测实况之间的总体相关性达到 50%(30%) 左右,而对于大范围强降水可达 70%(60%) 左右。

基于上述研究内容及其成果,完成了强对流天气 0~12 h 临近预报系统的建设,并配套建设了预报产品网页显示平台,方便预报员实时查阅各类预报产品(表 2)。该系统已于 2019 年投入业务试运行。

表 2 0~12 h 临近预报系统产品列表

Table 2 Product list of the 0-12 h nowcasting system

系统	产品名称
	天气实况产品:过去 1、3、6、12、24 h 降水,近 10 min 降水,08—08 时降水,20—20 时降水,瞬时风速,当前时次最大风速,当前时次极大风速,24 h 最大风速,24 h 极大风速,云图
分类强对流天气识别预警子系统	雷达产品:组合反射率因子、垂直积分液态水含量、回波顶高、三维拼图(剖面)、QPE、QPF 灾害天气识别与预报产品:下击暴流概率、冰雹概率、超级单体龙卷、中气旋、短时强降水识别及 0~2 h 预报、风暴、闪电
多源资料融合分析子系统	雷达组合反射率分析、地面温度分析、地面相对湿度分析、地面气压分析、平均海平面气压分析、地面风分析、总云量分析、云底高度分析、云顶高度分析、高空温度场分析、高空相对湿度场分析、高空风场分析、整层可降水量分析、对流有效位能分析
快速更新循环预报子系统	累积降水量预报(15 min、1 h、3 h、6 h、12 h)、1 km 高度雷达反射率预报、4 km 高度雷达反射率预报

3 应用检验

3.1 个例介绍

2020 年 5 月 4—5 日,受高空低槽东移影响,重

庆、湖北、湖南、江西一带自西向东发生大范围的冰雹、大风天气,491 个区域自动站出现 8 级以上大风,极大风速的最大值超过 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,27 个乡镇出现冰雹,最大冰雹直径超过 5 cm。图 8 为 5 月 4 日 09 时至 5 日 08 时的逐小时冰雹大风分布(同一站点多次出现大风的仅保留风速最大的时次,极大风

速相同时则保留最早的时次)。

3.2 效果检验分析

3.2.1 分类强对流天气识别预警子系统

结合分类强对流天气识别预警子系统的冰雹识别产品,以强冰雹概率(POSH) $\geq 50\%$ 作为大冰雹的识别标准,对此次强对流天气过程的冰雹识别情况进行了评估。冰雹落区来源于中国气象局灾情报告和网路报道,其中,为了尽可能保证冰雹落区的客观真实性,仅选取灾情描述中明确有冰雹发生或伴有冰雹天气的记录,落雹地点精确到乡镇。由于大部分冰雹灾情没有具体的发生时间,故选取灾情发生时段内与受灾点距离最近的对流单体的识别情况开展检验。检验结果如图 8 中所示,约 81.5%的乡

镇点识别出了冰雹天气,识别成功率较高。

与冰雹检验相似,以大风预警指数 $\geq 50\%$ 为检验标准,利用区域自动站的小时极大风数据开展大风识别预警检验。其中,当飏线系统上任意单体达到大风标准,飏线影响范围内的大风站点均被认为预警正确;且剔除了受阵风锋影响或大风站点附近没有明显对流回波的站点。预警时效为初次大风预警与站点出现大风实况的时间差。表 3 给出了区域内 10 部天气雷达的大风预警产品检验结果,可以看出 95%的站点在大风发生前,临近预报系统均成功发布预警,预警时效为 4~63 min 不等。其中,从大风预警时刻较实况的提前量(预警时效)来看,飏线系统影响的站点相对较长,而分散性对流单体或发展较快的对流系统对应站点相对较短。

表 3 10 部雷达大风识别预警检验结果

雷达站号	正确站点数/个	预警时效/min	漏报站点数/个	主要影响系统
Z9230	7	17	0	单体和超级单体
Z9270	30	5	11	分散性对流
Z9718	7	38	0	单体和超级单体
Z9722	12	4	0	分散性对流
Z9716	5	40	3	分散性对流
Z9731	123	26	0	飏线
Z9739	23	43	0	飏线
Z9744	16	62	0	超级单体和飏线
Z9791	54	63	5	飏线
Z9795	100	56	0	超级单体和飏线

综上所述,基于华中区域业务天气雷达监测网和地面加密观测网,灾害性天气 0~12 h 临近预报系统在此次强对流过程中成功识别出了大部分冰雹,并多次提前预警了地面大风,取得了不错的服务效果。

3.2.2 快速更新循环预报子系统

搭建的小时更新的快速更新循环预报子系统对此次强对流天气过程进行了较好的预报指示。图 9 为预报系统 2020 年 5 月 5 日 00 时起报未来 3 h 内的上升螺旋度预报路径。从图中不难看出,高分辨率快速更新循环预报系统通过高频同化实时资料能较好地描述此次强对流天气过程,多个实况大风站点正好对应水平风场的大风区($>17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),而冰雹的落区也位于对冰雹生成具有较好指示意义的上升螺旋度的大值区内。

如图 10 所示,从不同降水预报结果的对比中可以看到,数值模式(图 10b)对此次降水过程的整体

预报效果较好,成功地预报出位于鄂东北和鄂东南的两块主降水区,降水量级也与实况(图 10a)接近;但湖南东北部的降水预报明显弱于实况,而在江汉平原地区也存在一定的空报和漏报。基于雷达外推的降水估计结果(图 10c)有效改善了江汉平原地区的漏报,但是量级仍偏低,除此之外,湖南东北部的降水明显增强,向实况靠近;而鄂东北和鄂东南这两个主要降水区的降水强度与实况也更加吻合。混合预报结果(图 10d)则有效结合了上述两者的预报结果,除了改善模式空报和漏报等问题,对于雷达外推的部分高估问题也有所抑制,总体预报效果最优。预报检验结果(表略)也验证了该结论,即:混合预报的 TS 评分、ETS 评分和 POD 都要高于模式预报和雷达外推结果。

3.2.3 多源资料融合分析子系统

图 11 为多源资料融合分析子系统在此次飏线过程发生前的大气环境场分析结果,从图中不难看

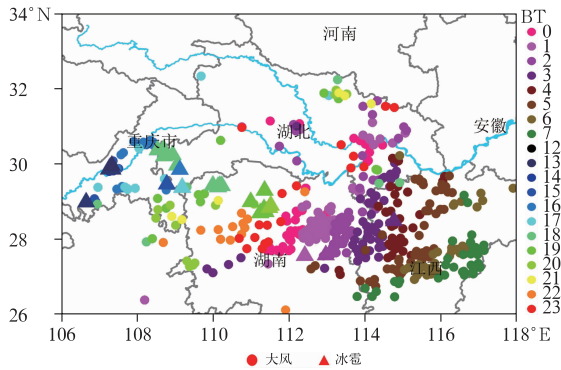


图 8 2020 年 5 月 4 日 09 时至 5 日 08 时
冰雹、大风的时空分布

Fig. 8 Spatial and temporal distribution of hail and gale from 09:00 BT 4 to 08:00 BT 5 May 2020

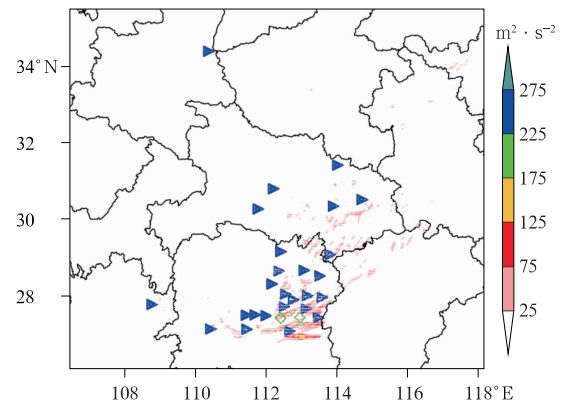


图 9 2020 年 5 月 5 日 00 时预报未来 3 h 内
的 2~5 km 上升螺旋度预报路径
(蓝色三角:大风站点,绿色矩形:冰雹落区,
彩色阴影:2~5 km 上升螺旋度预报路径)

Fig. 9 The forecast of 2~5 km rising helicity path within 3 h starting from 00:00 BT 5 May 2020 (blue triangle: strong wind site, green rectangle: hail area, colored: 2~5 km rising helicity path forecast)

出,湖南、江西等地的 $\Delta\theta_{se(500-850)}$ (850~500 hPa 的假相当位温差) 普遍小于 -12°C , 对流有效位能 (CAPE) 则超过 $2000\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, 这说明大气具有较强的对流不稳定性。尽管最大 CAPE 值与 Bryan and Morrison(2012) 给出的中纬度飏线典型 CAPE

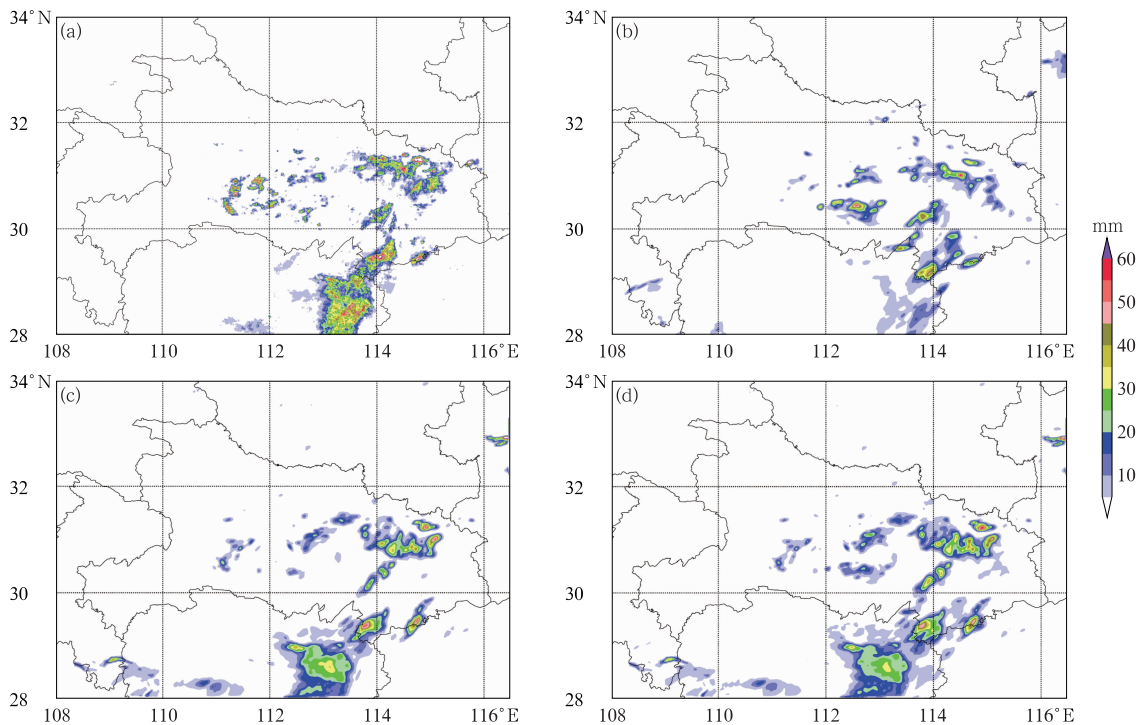


图 10 2020 年 5 月 5 日 02 时起报 1 h 降水量结果对比
(a) 实况, (b) 模式预报, (c) 雷达 QPF, (d) 混合预报

Fig. 10 Comparison of 1 h precipitation forecast results starting from 02:00 BT 5 May 2020 (a) observation, (b) NWP forecast, (c) radar QPF, (d) blending forecast

值 ($4200\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$) 相比偏小, 但仍超过了国内研究得到的飏线 CAPE 值, 例如: 潘玉洁等 (2008) 研究

的飏线 CAPE 值为 $1601\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, Meng and Zhang (2012) 给出的我国 2007—2009 年间伴随热带气旋

的飚线平均 CAPE 值($1548 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)。本次飚线的形成很可能还与较强的垂直风切变密切相关。已有研究表明,在中尺度对流云团组织成飚线的过程中垂直风切变经常起着重要作用(杨晓霞等,2007; Yamasaki,2009)。在 18 时,湖南境内出现 $1000 \sim 500 \text{ hPa}$ 垂直风切变大于 $4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 的大值中心,大于孙虎林等(2011)研究的黄淮区域飚线的平均垂直风切变($1.41 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$),而与陈云辉等(2019)

得到的江西强飚线的研究结果($24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)相接近。这种强垂直切变能够增强中层干冷空气的吸入,加强风暴中的下沉气流和低层冷空气外流。

由雷达反射率因子逐小时演变(图略)和地面瞬时大风的站点数统计(图 8)可以判断,5 日 01 时飚线已发展成熟,强回波呈明显的弓形(如图 12 中等值线所示)。在南北向的对流强回波带(简称“C 区”)后方存在层云强回波区(简称“S 区”),在 S 区

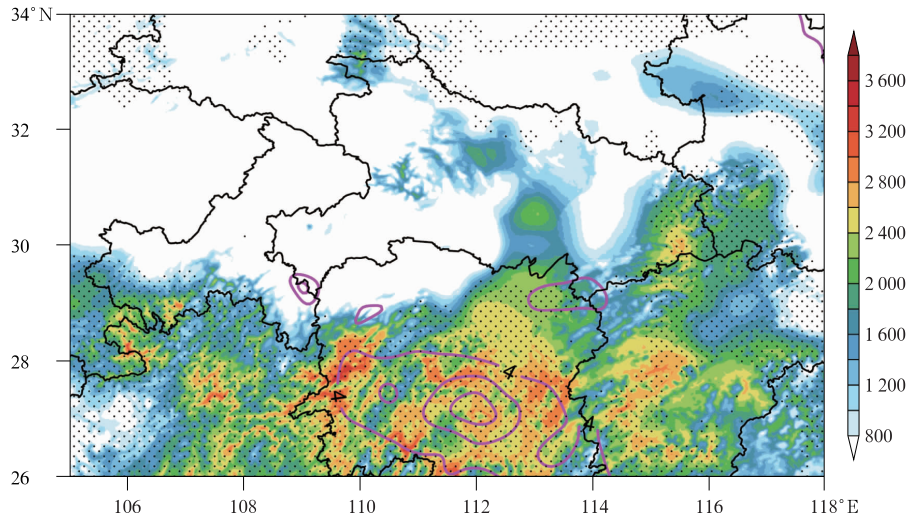


图 11 2020 年 5 月 4 日 18 时融合分析子系统分析的环境场大气对流参数
(填色:CAPE,单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$;等值线: $1000 \sim 500 \text{ hPa}$ 垂直风切变,
 $> 4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$;点区: $\Delta\theta_{se(500-850)} \leq -12^\circ\text{C}$ 的区域)

Fig. 11 Ambient atmospheric convection parameters analyzed by the fusion analysis subsystem at 18:00 BT 4 May 2020
(colored: CAPE, unit: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$; contour: $1000 \sim 500 \text{ hPa}$ vertical wind shear, $> 4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$;
dotted: the region with $\Delta\theta_{se(500-850)} \leq -12^\circ\text{C}$)

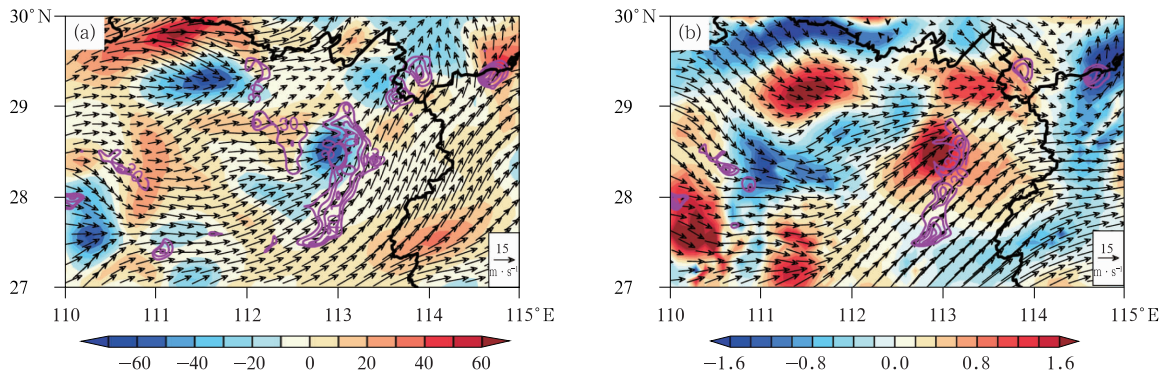


图 12 2020 年 5 月 5 日 01 时(a)700 hPa 的水平风(箭头)、雷达反射率(等值线, $\geq 30 \text{ dBz}$)及散度(填色,单位: 10^{-5} s^{-1});
(b)同图 12a,但为 600 hPa,填色为垂直速度(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(雷达数据已在 LAPS 融合模块中由极坐标格式转换为 p 坐标系下的三维网格数据)

Fig. 12 (a) Composite of horizontal wind (arrow), divergence (colored, unit: 10^{-5} s^{-1}) and
radar reflectivity (contour, $\geq 30 \text{ dBz}$) at 01:00 BT 5 May 2020;

(b) same as Fig. 12a, except for 600 hPa and vertical velocity (colored, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(The radar data are three-dimensional Cartesian gridded data in
constant pressure coordinates processed by the fusion module of LAPS)

和C区之间有弱回波过渡带(简称“T区”)。由700 hPa和600 hPa的水平风场、散度场和垂直速度场(图12)可以看出,C区和T区存在明显的辐合上升运动(散度 $< -20 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,上升速度 $> 0.6 \text{ m} \cdot \text{ s}^{-1}$);S区则以辐散下沉运动为主(散度 $> 20 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,下沉速度 $< -0.4 \text{ m} \cdot \text{ s}^{-1}$)。尽管强回波区与辐合区和强上升区并不完全一致,但仍可以看出,强回波区北段存在明显的辐合上升运动(上升速度约为 $1.6 \text{ m} \cdot \text{ s}^{-1}$),而强回波南段的上升运动并不明显,这可能与成熟阶段大雨滴向下的拖曳作用有关(Houze,2014)。对流区存在下沉气流在以往的外场试验中也被证实,如:Tridon et al(2019)利用ARM(atmospheric radiation measurement)试验中风廓线雷达的探测数据揭示了飑线过境时对流区上升、下沉气流共存的现象。上述结构特征与孙虎林等(2011)的研究对比发现,飑线中低层散度和垂直速度的垂直分布特征较为一致,均显示S区的整个中低层为下沉运动,低层存在明显辐散;而C区为上升运动区;主要的不同在于:T区在本次飑线过程中为上升气流控制,这一差异值得后期进一步探讨。

4 结论与讨论

中国气象局武汉暴雨研究所重点围绕灾害性天气的资料同化与临近预报开展了分类强对流天气识别预警技术,多源稠密观测资料数据融合技术以及外推预报和高分辨率数值天气预报混合技术这三个方面的研究,并从中实现了雷达径向速度质量控制算法改进、雷达QPE的VPR订正、对流尺度模式的“伪水汽”同化、LAPS与WRF的耦合等一系列的技术方法,取得了较丰富的研究成果,并以此为基础搭建了强对流天气0~12 h临近预报系统。该系统已于2019年投入业务试运行,取得了积极的效果反馈。

虽然取得了一定的研究成果,但强对流天气的精准预报预警仍有待开展多方面的研究和探索:

(1)利用更长历时的灾害性天气资料开展统计分析和特征提取以改进相关的识别预警算法,提高实际应用效果;探索运用新的技术手段(如:大数据、人工智能等)开展相关研究,寻求更大的技术突破。

(2)深入开展新型探测资料(如双偏振雷达、相控阵雷达等)同化技术的研究,发挥资料探测优势以

改进高分辨率数值模式的模拟和预报效果。

(3)组织开展更加全面有效的强对流天气观测试验,深入理解其发生发展的机制机理,从而改进模式的微物理参数化方案,增强模式对此类天气系统的模拟与预报能力。

参考文献

- 陈明轩,高峰,孔荣,等,2010.自动临近预报系统及其在北京奥运期间的应用[J].应用气象学报,21(4):395-404. Chen M X, Gao F, Kong R, et al, 2010. Introduction of auto-nowcasting system for convective storm and its performance in Beijing Olympics meteorological service[J]. J Appl Meteor Sci, 21(4):395-404(in Chinese).
- 陈云辉,许爱华,许彬,等,2019.江西一次极端雷暴大风过程的中尺度特征与成因分析[J].暴雨灾害,38(2):126-134. Chen Y H, Xu A H, Xu B, et al, 2019. Analysis on mesoscale characteristics and causes of an extreme thunderstorm gale event in Jiangxi[J]. Torr Rain Dis, 38(2):126-134(in Chinese).
- 程丛兰,陈敏,陈明轩,等,2019.临近预报的两种高时空分辨率定量降水预报融合算法的对比试验[J].气象学报,77(4):701-714. Cheng C L, Chen M, Chen M X, et al, 2019. Comparative experiments on two high spatiotemporal resolution blending algorithms for quantitative precipitation nowcasting[J]. Acta Meteor Sin, 77(4):701-714(in Chinese).
- 崔春光,倪允琪,李红莉,等,2011.中国南方暴雨野外试验中尺度气象分析场的建立及其质量评估[J].气象学报,69(1):26-40. Cui C G, Ni Y Q, Li H L, et al, 2011. The establishment and quality evaluation of the meso-scale analysis field based on the southern China torrential rainfall experiment[J]. Acta Meteor Sin, 69(1):26-40(in Chinese).
- 付志康,万蓉,于胜杰,等,2017.湖北地基GPS大气可降水量变化特征分析及应用[J].气象科学,37(4):553-560. Fu Z K, Wan R, Yu S J, et al, 2017. Analysis and application of ground-based GPS precipitable water vapor characteristics[J]. J Meteor Sci, 37(4):553-560(in Chinese).
- 高玉春,2017.气象业务发展对新一代天气雷达技术性能提升的要求[J].气象科技进展,7(3):16-21. Gao Y C, 2017. Requirements of meteorological operational development for the technical performance improvement of CINRAD[J]. Adv Meteor Sci Technol, 7(3):16-21(in Chinese).
- 韩丰,沃伟峰,2018. SWAN2.0系统的设计与实现[J].应用气象学报,29(1):25-34. Han F, Wo W F, 2018. Design and implementation of SWAN2.0 platform[J]. J Appl Meteor Sci, 29(1):25-34(in Chinese).
- 韩帅,师春香,姜志伟,等,2018. CMA高分辨率陆面数据同化系统(HRCLDAS-V1.0)研发及进展[J].气象科技进展,8(1):102-108,116. Han S, Shi C X, Jiang Z W, et al, 2018. Development and progress of high resolution CMA land surface data assimilation system[J]. Adv Meteor Sci Technol, 8(1):102-108,116(in Chinese).

- 何立富,周庆亮,湛芸,等,2011.国家级强对流潜势预报业务进展与检验评估[J].气象,37(7):777-784. He L F, Zhou Q L, Chen Y, et al, 2011. Introduction and examination of potential forecast for strong convective weather at national level[J]. Meteor Mon, 37(7):777-784(in Chinese).
- 胡胜,罗兵,黄晓梅,等,2010.临近预报系统(SWIFT)中风暴产品的设计及应用[J].气象,36(1):54-58. Hu S, Luo B, Huang X M, et al, 2010. Storm series algorithms in the SWIFT and application in the second FDP trial[J]. Meteor Mon, 36(1):54-58(in Chinese).
- 金荣花,代刊,赵瑞霞,等,2019.我国无缝隙精细化网格天气预报技术进展与挑战[J].气象,45(4):445-457. Jin R H, Dai K, Zhao R X, et al, 2019. Progress and challenge of seamless fine gridded weather forecasting technology in China[J]. Meteor Mon, 45(4):445-457(in Chinese).
- 赖安伟,马鹤翟,崔春光,等,2021.雷达反射率伪观测同化技术在一次飑线过程中的应用研究[J].气象,47(8):932-952. Lai A W, Ma H D, Cui C G, et al, 2021. A squall line case study of assimilating the radar data, pseudo-observation for convective-scale numerical model in a 3DVAR framework[J]. Meteor Mon, 47(8):932-952(in Chinese).
- 李红莉,崔春光,王志斌,2009. LAPS的设计原理、模块功能与产品应用[J].暴雨灾害,28(1):64-70. Li H L, Cui C G, Wang Z B, 2009. Scientific designs, functions and applications of LAPS[J]. Torr Rain Dis, 28(1):64-70(in Chinese).
- 李红莉,崔春光,徐祥德,等,2016.风云静止卫星资料在一次暴雨云分析中的应用[J].热带气象学报,32(1):52-61. Li H L, Cui C G, Xu X D, et al, 2016. Application of FY stationary satellite data in the cloud analysis of a heavy rainfall[J]. J Trop Meteor, 32(1):52-61(in Chinese).
- 李红莉,王志斌,2017.华中区域LRUC系统的构建与试验[J].气象科学,37(2):195-204. Li H L, Wang Z B, 2017. Establishment and evaluation of LRUC in central China[J]. J Meteor Sci, 37(2):195-204(in Chinese).
- 吕晓娜,牛淑贞,袁春风,等,2013. SWAN中定量降水估测和预报产品的检验与误差分析[J].暴雨灾害,32(2):142-150. Lü X N, Niu S Z, Yuan C F, et al, 2013. Verification and error analysis of quantitative precipitation estimation and forecast products in SWAN[J]. Torr Rain Dis, 32(2):142-150(in Chinese).
- 潘旸,谷军霞,宇婧婧,等,2018.中国区域高分辨率多源降水观测产品的融合方法试验[J].气象学报,76(5):755-766. Pan Y, Gu J X, Yu J J, et al, 2018. Test of merging methods for multi-source observed precipitation products at high resolution over China[J]. Acta Meteor Sin, 76(5):755-766(in Chinese).
- 潘玉洁,赵坤,潘益农,2008.一次强飑线内强降水超级单体风暴的单多普勒雷达分析[J].气象学报,66(4):621-636. Pan Y J, Zhao K, Pan Y N, 2008. Single-Doppler radar observation of a heavy precipitation supercell on a severe squall line[J]. Acta Meteor Sin, 66(4):621-636(in Chinese).
- 彭菊香,李红莉,崔春光,2011.华中区域LAPS中尺度分析场的检验与评估[J].气象,37(2):170-175. Peng J X, Li H L, Cui C G, 2011. Verification and evaluation of LAPS analysis field in central China[J]. Meteor Mon, 37(2):170-175(in Chinese).
- 师春香,潘旸,谷军霞,等,2019.多源气象数据融合格点实况产品研制进展[J].气象学报,77(4):774-783. Shi C X, Pang Y, Gu J X, et al, 2019. A review of multi-source meteorological data fusion products[J]. Acta Meteor Sin, 77(4):774-783(in Chinese).
- 孙虎林,罗亚丽,张人禾,等,2011.2009年6月3—4日黄淮地区强飑线成熟阶段特征分析[J].大气科学,35(1):105-120. Sun H L, Luo Y L, Zhang R H, et al, 2011. Analysis on the mature-stage features of the severe squall line occurring over the Yellow River and Huaihe River basins during 3—4 June 2009[J]. Chin J Atmos Sci, 35(1):105-120(in Chinese).
- 万玉发,王志斌,张家国,等,2013.长江中游临近预报业务系统(MYNOS)及其应用[J].应用气象学报,24(4):504-512. Wan Y F, Wang Z B, Zhang J G, et al, 2013. Nowcasting & warning operational system in the middle reaches of the Yangtze with its implementation[J]. J Appl Meteor Sci, 24(4):504-512(in Chinese).
- 王红燕,周丹丹,王叶红,2015. SWAN产品在“2012·7”沙澧河流域特大暴雨过程中的应用[J].暴雨灾害,34(3):239-248. Wang H Y, Zhou D D, Wang Y H, 2015. Application of SWAN products on “2012·7” extraordinary rainstorm in Shali River basin[J]. Torr Rain Dis, 34(3):239-248(in Chinese).
- 王志斌,肖艳姣,吴涛,2017.基于改进光流法的雷达图像运动估计[J].计算机技术与发展,27(12):170-175. Wang Z B, Xiao Y J, Wu T, 2017. Motion estimation for radar image based on improved optical flow method[J]. Comput Technol Dev, 27(12):170-175(in Chinese).
- 王志斌,肖艳姣,吴涛,等,2019.改进变分光流法并行算法实现[J].计算机应用与软件,36(1):105-110. Wang Z B, Xiao Y J, Wu T, et al, 2019. Implementation of improved variational optical flow parallel algorithm[J]. Comput Appl Softw, 36(1):105-110(in Chinese).
- 肖艳姣,万玉发,王珏,等,2012.一种自动多普勒雷达速度退模糊算法研究[J].高原气象,31(4):1119-1128. Xiao Y J, Wan Y F, Wang J, et al, 2012. Study of an automated Doppler radar velocity dealiasing algorithm[J]. Plateau Meteor, 31(4):1119-1128(in Chinese).
- 肖艳姣,王珏,王志斌,2021.一种下击暴流预报和识别算法[J].气象,47(8):919-931. Xiao Y J, Wang J, Wang Z B, 2021. An automatic recognition algorithm of mesocyclone and tornado vortex characteristics[J]. Meteor Mon, 47(8):919-931(in Chinese).
- 行鸿彦,张金玉,徐伟,2017.地面自动气象观测的技术发展与展望[J].电子测量与仪器学报,31(10):1534-1542. Xing H Y, Zhang J Y, Xu W, 2017. Development and prospect of automatic meteorological observation technology on the ground[J]. J Electron Meas Instrum, 31(10):1534-1542(in Chinese).
- 杨波,郑永光,蓝渝,等,2017.国家级强对流天气综合业务支撑体系建设[J].气象,43(7):845-855. Yang B, Zheng Y G, Lan Y, et al, 2017. Development and construction of the supporting platform for national severe convective weather forecasting and

- service[J]. Meteor Mon, 43(7):845-855(in Chinese).
- 杨丹丹,申双和,邵玲玲,等,2010. 雷达资料和数值模式产品融合技术研究[J]. 气象, 36(8):53-60. Yang D D, Shen S H, Shao L L, et al, 2010. A study on blending radar and numerical weather prediction model products[J]. Meteor Mon, 36(8):53-60(in Chinese).
- 杨璐,陈敏,陈明轩,等,2019. 高时空分辨率三维风场在强对流天气临近预报中的融合应用研究[J]. 气象学报, 77(2):243-255. Yang L, Chen M, Chen M X, et al, 2019. Fusion of 3D high temporal and spatial resolution wind field and its application in nowcasting of severe convective weather[J]. Acta Meteor Sin, 77(2):243-255(in Chinese).
- 杨晓霞,李春虎,杨成芳,等,2007. 山东省 2006 年 4 月 28 日飑线天气过程分析[J]. 气象, 33(1):74-80. Yang X X, Li C H, Yang C F, et al, 2007. Analysis of a squall line event on 28 April 2006 in Shandong Province[J]. Meteor Mon, 33(1):74-80(in Chinese).
- 张涵斌,李玉焕,陈敏,等,2020. 集合变分混合同化方案在快速循环同化系统中的应用研究[J]. 大气科学, 44(6):1349-1363. Zhang H B, Li Y H, Chen M, et al, 2020. Implementation of hybrid En-3DVAR assimilation scheme in rapid cycling assimilation system[J]. Chin J Atmos Sci, 44(6):1349-1363(in Chinese).
- 郑永光,陈炯,沃伟峰,等,2011. 改进的客观分析诊断图形软件[J]. 气象, 37(6):735-741. Zheng Y G, Chen J, Wo W F, et al, 2011. Updated objective analysis and graphic software[J]. Meteor Mon, 37(6):735-741(in Chinese).
- 郑永光,林隐静,朱文剑,等,2013. 强对流天气综合监测业务系统建设[J]. 气象, 39(2):234-240. Zheng Y G, Lin Y J, Zhu W J, et al, 2013. Operational system of severe convective weather comprehensive monitoring[J]. Meteor Mon, 39(2):234-240(in Chinese).
- 郑永光,张小玲,周庆亮,等,2010. 强对流天气短时临近预报业务技术进展与挑战[J]. 气象, 36(7):33-42. Zheng Y G, Zhang X L, Zhou Q L, et al, 2010. Review on severe convective weather short-term forecasting and nowcasting[J]. Meteor Mon, 36(7):33-42(in Chinese).
- Albers S C, McGinley J A, Birkenheuer D L, et al, 1996. The local analysis and prediction system (LAPS): analyses of clouds, precipitation, and temperature[J]. Wea Forecasting, 11(3):273-287.
- Bowler N E, Pierce C E, Seed A W, 2006. STEPS: a probabilistic precipitation forecasting scheme which merges an extrapolation nowcast with downscaled NWP[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 132(620):2127-2155.
- Brovelli P, S en esi S, Arbogast E, et al, 2005. Nowcasting thunderstorms with SGOONS—a significant weather object oriented nowcasting system[R]. Toulouse: World Meteorological Organization Symposium on Nowcasting and Very Short Term Forecasting.
- Bryan G H, Morrison H, 2012. Sensitivity of a simulated squall line to horizontal resolution and parameterization of microphysics[J]. Mon Wea Rev, 140(1):202-225.
- Cai H, Wilson J W, Pinto J, et al, 2006. Developing NIWOT: a regional 1—6 hr short-term thunderstorm forecast [presentation][C]// Proceedings of the 5th International Conference on Mesoscale Meteorology and Typhoon. Boulder: University Corporation for Atmospheric Research (UCAR); National Center for Atmospheric Research (NCAR); Earth Observing Laboratory (EOL).
- Eilts M D, Johnson J T, Mitchell E D, et al, 1996. Severe weather warning decision support system[C]// Proceedings of the 18th Conference on Severe Local Storms. San Francisco: Amer Meteor Soc, 536-540.
- Fox N I, Webb R, Belly J, et al, 2004. The impact of advanced nowcasting systems on severe weather warning during the Sydney 2000 forecast demonstration project: 3 November 2000[J]. Wea Forecasting, 19(1):97-114.
- Golding B W, 1998. Nimrod: a system for generating automated very short range forecasts[J]. Meteor Appl, 5(1):1-16.
- Haiden T, Kann A, Wittmann C, et al, 2011. The integrated nowcasting through comprehensive analysis (inCA) system and its validation over the eastern Alpine region[J]. Wea Forecasting, 26(2):166-183.
- Horn B K P, Schunck B G, 1981. Determining optical flow[J]. Artif Intell, 17(1/2/3):185-203.
- Houze R A Jr, 2014. Cloud Dynamics[M]. New York: Academic Press.
- Hu M, Xue M, Brewster K, 2006. 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[J]. Mon Wea Rev, 134(2):675-698.
- Lai A W, Gao J D, Koch S E, et al, 2019. Assimilation of radar radial velocity, reflectivity, and pseudo-water vapor for convective-scale NWP in a variational framework[J]. Mon Wea Rev, 147(8):2877-2900.
- Lai A W, Min J Z, Gao J D, et al, 2020. Assimilation of radar data, pseudo water vapor, and potential temperature in a 3Dvar framework for improving precipitation forecast of severe weather events[J]. Atmosphere, 11(2):182.
- Lakshmanan V, Smith T, Stumpf G, et al, 2007. The warning decision support system-integrated information[J]. Wea Forecasting, 22(3):596-612.
- Li H L, Xu X D, 2017. Application of a three-dimensional variational method for radar reflectivity data correction in a mudslide-inducing rainstorm simulation[J]. Adv Atmos Sci, 34(4):469-481.
- Li L, Schmid W, Joss J, 1995. Nowcasting of motion and growth of precipitation with radar over a complex orography[J]. J Appl Meteor Climatol, 34(6):1286-1300.
- Li P W, Wong W K, Chan K Y, et al, 2000. SWIRLS—an evolving nowcasting system[R]. Technical Note, No. 100, Hong Kong: Hong Kong Observatory.
- Lucas B D, Kanade T, 1981. An iterative image registration technique with an application to stereo vision[C]// Proceedings of the 7th

- International Joint Conference on Artificial Intelligence, Vancouver; Morgan Kaufmann Publishers Inc; 674-679.
- Meng Z Y, Zhang Y J, 2012. On the squall lines preceding landfalling tropical cyclones in China[J]. *Mon Wea Rev*, 140(2): 445-470.
- Pierce C E, Hardaker P J, Collier C G, et al, 2000. GANDOLF: a system for generating automated nowcasts of convective precipitation[J]. *Meteor Appl*, 7(4): 341-360.
- Smith S B, Graziano T, Lane R, et al, 1998. The system for convection analysis and nowcasting (SCAN)[C]// Preprints 16th Conference on Weather Analysis and Forecasting, 14th International Conference on Interactive Information and Processing Systems. Phoenix; Amer Meteor Soc: J22-J24.
- Tridon F, Planche C, Mroz K, et al, 2019. On the realism of the rain microphysics representation of a squall line in the WRF model. Part I; evaluation with multifrequency cloud radar Doppler spectra observations[J]. *Mon Wea Rev*, 147(8): 2787-2810.
- Wilson J W, Crook N A, Mueller C K, et al, 1998. Nowcasting thunderstorms: a status report[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 79(10): 2079-2100.
- Wolfson M M, Dupree W J, Rasmussen R M, et al, 2008. Consolidated storm prediction for aviation (CoSPA) [C] // Proceedings of 2008 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference. Bethesda; IEEE.
- Yamasaki M, 2009. A study of the mesoscale convective system under vertical shear flow in the latently unstable atmosphere with north-south asymmetry[J]. *J Meteor Soc Japan*, 87(2): 245-262.