

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[J]. 气象, 2010, 36(7): 33-42.

强对流天气短时临近预报业务技术进展与挑战^{*1}

郑永光 张小玲 周庆亮 端义宏 谌 芸 何立富

国家气象中心, 北京 100081

提 要: 强对流天气短时临近预报业务是国家防灾减灾、重大社会活动和精细化天气预报的迫切需要。虽然我国强对流天气短时临近预报业务已经取得了巨大进展, 但与国外先进水平相比还有不少差距。本文总结了近年国内外强对流天气短时临近预报业务现状、技术进展、目前国内的技术支撑状况和所面临的挑战, 并提出了相应的应对措施。目前强对流天气短时临近预报技术仍然主要是外推预报技术、数值预报技术和概念模型预报技术等, 但快速更新循环的高时空分辨率数值模式预报和新一代静止气象卫星资料将在强对流天气短时临近预报中发挥重要作用。强对流天气监测、分析和机理研究是强对流天气短时临近预报的重要基础; 先进的外推预报方法同快速更新循环的高时空分辨率数值模式预报以及二者的融合是未来强对流天气短时临近预报的重要发展方向。

关键词: 强对流, 短时临近预报, 进展, 挑战

Review on Severe Convective Weather Short-Term Forecasting and Nowcasting

ZHENG Yongguang ZHANG Xiaoling ZHOU Qingliang

DUAN Yihong CHEN Yun HE Lifu

National Meteorological Center, Beijing 100081

Abstract: The short-term forecasting and nowcasting of severe convective weather is to meet the demands of national preventing and mitigating disasters, major social activities, and fine weather service. Although great progresses in the short-term forecasting and nowcasting of severe convective weather were made in China in recent years, there are still many gaps between China and developed countries. The current development of technique and operation status on the short-term forecasting and nowcasting of severe convective weather are reviewed. The challenges in China are summarized and the corresponding measures are proposed. Currently, the main techniques on the short-term forecasting and nowcasting of severe convective weather can be classified as three types: the extrapolation forecast, numerical model forecast, and the knowledge-based forecast technique. However, the rapid updated cycle of numerical model forecast and the data of the next generation of geostationary meteorological satellites will play important roles in the short-term forecasting and nowcasting of severe convective weather. The surveillances, analyses, and mechanism research of the convective weather are the foundation of the short-term forecasting and nowcasting. The advanced extrapolation forecast, the rapid updated cycle of numerical model forecast, and their blending forecast are the important development directions of the short-term forecasting and nowcasting in future.

Key words: severe convection, short-term forecasting and nowcasting, progress, challenge

引 言

雷暴是最普通的对流天气。强对流天气一般是

指雷雨大风、冰雹、龙卷、短时强降水等天气, 该类天气具有突发性和局地性强、生命史短、灾害重等特点, 是天气预报业务中的难点。但国家防灾减灾、重大社会活动(如 2008 年北京奥运会、2009 年 60 周

* 公益性行业(气象科研专项)GYHY200906003、GYHY200906004 资助
2010 年 1 月 12 日收稿; 2010 年 1 月 20 日收修定稿
第一作者: 郑永光, 主要从事强对流天气研究. Email: zhengyg@cma.gov.cn

年国庆气象保障等)和精细化天气预报的需要都对强对流天气的短时临近预报业务提出了更高的要求。一般来说,短时预报是指 0~12 小时以内的天气预报,临近预报是 0~2 小时的天气预报;WMO(世界气象组织)2005 年定义的临近预报则拓展为 0~6 小时的天气预报。

我国强对流天气频发,常常导致重大人员伤亡和财产损失。比如,2005 年 6 月 10 日下午,黑龙江宁安市沙兰镇沙兰河上游山区突降暴雨,导致包括 103 名学生、2 名幼儿在内共 117 人遇难;2009 年 6 月 3、5 和 14 日华东连续出现强对流天气,11 月 9 日我国南方出现罕见强对流天气。据统计,2001—2007 年强对流灾害所造成的直接经济损失每年均在 110 亿元以上,占气象灾害全部损失的 6%~15%;2009 年强对流天气则是我国第 3 大气象灾害,仅次于干旱和暴雨洪涝^①。

我国强对流天气地理分布十分不均匀,并且具有显著的季节和日变化特征。强对流天气主要发生在暖季(4—9 月)。虽然华南、云南和青藏高原等地是我国的雷暴高发区,但冰雹最多的区域主要在青藏高原、云贵高原以及其他的山地。不过,大冰雹则主要分布在我国东部地区;雷雨大风、龙卷强对流天气则主要发生在华东和华中等的平原区域;因此这些区域是强对流天气预报的重点关注区域。

由于导致强对流天气的系统属于中小尺度天气系统,很难被常规气象观测网捕捉到,因此非常规观测资料(自动站、雷达、卫星、雷电、GPS、风廓线雷达等)及其融合、同化数据和中小尺度数值模式数据是进行强对流天气短时和临近预报的主要资料基础。

目前美国、英国、加拿大、澳大利亚、法国、日本和韩国等国家都建立了自己的强对流天气短时临近预报系统和业务;香港天文台、中国气象局也各自建立了自己的强对流天气短时临近预报系统,国内各级台站也开展了相应的预报业务。

1 强对流天气短时临近预报系统和业务现状

1.1 国外短时临近预报系统和业务现状

美国 Meteorological Development Lab(MDL, 气象开发实验室)发展了 SCAN(The System for Convection Analysis and Nowcasting)预报系统^[1],进行雷暴和强雷暴 0~3 h 预报;美国 NSSL(Na-

tional Severe Storms Laboratory)开发的 WDSS II (Warning Decision Support System-Integrated Information)^[2]强对流天气预报系统已经应用国家级强对流天气预报中心 SPC(强风暴预报中心),该系统是在只能使用单雷达资料的 WDSS^[3]系统上发展起来的,主要使用多部雷达产品进行风暴单体的识别、追踪以及冰雹、龙卷和破坏性大风的识别和追踪,能够进行 0~1 h 强对流天气预报;美国国家大气科学研究中心(NCAR, the National Center for Atmospheric Research)发展 ANC(Auto-Nowcaster, 临近预报系统)^[4]进行 0~2 h 临近预报,NCAR 还发展了专家预报系统 ANC 和数值预报输出相融合的 Niwot 系统^[5]进行 0~6 h 格点反射率因子预报。ANC 系统中使用基于雷达资料的 TITAN (Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting)算法^[6]进行雷暴的识别、追踪、分析和 1 h 内的临近外推预报,该系统同时使用常规资料、自动站资料、雷达资料、卫星资料和数值模式资料来监测边界层辐合线,并进行边界层辐合线的预报。NCAR 还发展了一个多普勒雷达资料变分同化分析系统(VDRAS)^[7-8],它利用一个云尺度数值模式和它的伴随模式对雷达数据进行四维变分同化分析,获取大气的三维风场和温度场。

美国 FAA(联邦航空管理局)把 MIT Lincoln 实验室(MIT LL)、NCAR Research Applications 实验室(RAL)、NOAA Earth Systems Research 实验室(ESRL) Global Systems Division (GSD) 和 NASA 联合起来建立了统一的航空风暴预报系统 CoSPA(the Consolidated Storm Prediction for Aviation)^[9]。演示原型版 CoSPA 系统在 2008 年夏季已开始试运行,正式版计划 2013 年业务运行。CoSPA 系统提供 0~6 h 预报,0~2 h 使用启发式外推预报(the heuristic extrapolation forecast)^[10-12], 2~6 h 使用基于外推预报和 High Resolution Rapid Refresh (HRRR)^[13]模式预报的融合预报算法。

英国的 NIMROD (Nowcasting and Initialisation for Modelling Using Regional Observation Data System)^[14]和 GANDOLF (Generating Advanced Nowcasts for Deployment in Operational Landsurface Flood forecasts)^[15]预报系统融合了基于雷达等资料的外推预报与中尺度模式预报,将预报时效提高到 6 小时,空间分辨率可达 2 km;加拿大建立了 MAPLE 预报系统进行 0~8 h 降水预报、CARDS 系

统^[16]进行 0~1 h 雷暴预报;澳大利亚建立了 STEPS(Short Term Ensemble Prediction System) 预报系统进行 0~6 h 降水预报、TIFS 系统进行 0~6 h 雷暴预报;法国建立的 SIGOONS 系统^[17]进行 0~4 h 雷暴、降水、雾和风的预报;日本建立了 VS-RF(Very Short-Range Forecast)系统进行 0~6 h 降水预报,韩国移植了该系统并应用到其业务中。

在这些强对流天气短时临近预报系统中,美国的 WDSS、ANC 和 TITAN,英国的 Gandolf 和加拿大的 CARDS 系统参加了 2000 年悉尼奥运会的 FDP(Forecast Demonstration Project)项目^[18-19]。美国的 Niwot、澳大利亚的 STEPS 和 TIFS、加拿大的 CARDS 系统还参加了 2008 年北京奥运会的 FDP 项目^[20]。后文介绍的国内短时临近预报系统中香港的 SWIRLS、广东的 GRAPES-SWIFT^[21]和北京-NCAR 联合开发的 BJ-ANC 都参加了 2008 年北京奥运会的 FDP 项目。这些先进的强对流天气临近预报系统参加奥运会期间的世界天气研究计划(WWRP) FDP 项目试验极大地推动了临近预报技术的发展。

美国 SPC 作为其国家级强对流天气预报中心进行时间尺度从几十分钟到 8 天的强对流天气(龙卷、冰雹和对流性大风)的展望和警戒预报,美国地方气象局进行 2 h 内的临近警告预报,这种有效协作的强对流天气预报流程见图 1。2000 年,美国爆发性洪水预报提前时间为 43 min;2005 年提前时间为 54 min,预报准确率为 90%。2004—2006 年龙卷风预报提前时间平均为 12.5 min,预报准确率平均为 76%。

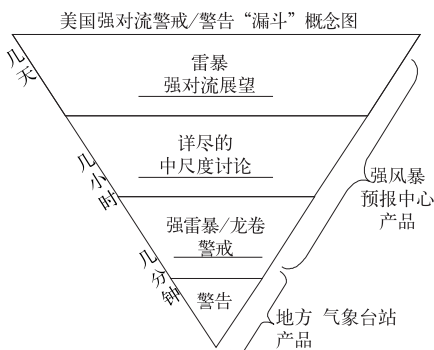


图 1 美国强天气预报业务分工图

Fig. 1 The convective weather watch/warning funnel concept in USA

1.2 国内短时临近预报系统和业务现状

国内各级气象台站不同程度地开展了短时临近

预报业务。国内从 2004 年开始逐步开展了强对流天气的短时临近预报业务,但至今尚未形成比较完善的业务。目前的业务产品还不能区分短时强降水、雷雨大风和冰雹等各类强对流天气;对龙卷的实时监测和预报也有较大的困难,很难预报该类天气;目前也没有统一的强对流天气预报产品检验和质量评定办法。因此目前国内还没有强对流天气预报准确率 and 提前时间的数据。

国家气象中心开展的强对流天气短时预报产品包括暴雨(6 小时定量降水业务)和 1 天 3 次的强对流 12 小时预报指导产品(每日 05、10、16 时发布)。各省及下级气象台站也开展了强对流天气的短时预报(定时发布,如广东 1 天 3 次,05, 11, 17 时)和临近预报业务(不定时发布),同时针对强对流天气的强度发布不同级别的预警信号。

2009 年 3 月国家气象中心成立强天气预报中心,专门负责强对流天气预报,以带动全国的强对流天气预报业务发展和预报技术研发。这是国内首个组建的专门强对流天气预报队伍,也带动了国内部分省市组建了专门的强对流天气预报部门。

香港天文台从 20 世纪 90 年代就开始建设“小涡旋”SWIRLS((Short-range Warning of Intense Rainstorms in Localized Systems)^[22]系统进行降水的短时临近预报,目前该系统已经发展到 2.0 版本,能够进行风暴追踪和预报以及冰雹、雷雨大风、短时强降水、闪电、降水概率等的预报。

广东省气象局建立了短时临近预报系统 GRAPES-SWIFT (Severe Weather Integrated Forecasting Tools),其核心技术建立在 GRAPES 数值预报模式提供的高分辨率数值预报产品、新一代多普勒天气雷达探测资料、自动气象站和风云气象卫星资料等基础上;湖北省气象局建立了 MY-NOS 临近预报系统;上海市气象局也建立了 No-CAWS 临近预报系统进行雷达回波和闪电活动的外推预报。

北京市气象局从奥运保障出发,从 2004 年开始引进并建设和本地化美国 NCAR 的 ANC 短时临近预报系统(称为 BJ-ANC)。该系统在 2008 年北京奥运会气象保障和日常业务预报中发挥了重要作用。BJ-ANC 包含多种算法和模块,其中对流临近预报以雷达资料为主,6 分钟左右更新一次。但 BJ-ANC 也存在一些问题需要进一步改进,比如缺少分类强对流天气(冰雹、雷雨大风、闪电等)预警产品;

大部分预报产品的时效仅为 1 小时等^[23]。

中国气象局从 2007 年底开始大力建设强对流天气临近预报业务系统 SWAN。目前 SWAN 1.0 已经基本建设完成并全国推广,2.0 版本正在开发中。

SWAN 1.0 系统以中国气象局业务平台 MI-CAPS 3.0 为基础开发完成,其主要功能如下:灾害性天气显示和报警,二维和三维雷达拼图,雷达定量估测降水,区域追踪(TREC)及回波外推预报,降水 0~1 小时的外推预报,每 6 分钟风暴单体识别和 30、60 分钟的外推预报等。SWAN 2.0 版本着重开发和引入以下模块:引入高时空分辨率的中尺度数值模式预报数据;强对流天气分类识别和预报技术;卫星资料在强对流云团快速识别和云团对流特征参数分析中的应用技术;LAPS 快速融合和分析系统生成的基本要素三维分析场和云分析算法等。

SWAN 1.0 系统在上海世博会 WENS 第一次演练中表现稳定,并在 2009 年第十一届全运会气象保障工作中发挥了重要作用。

2 强对流天气短时临近预报技术

2.1 国内外短时临近预报技术进展

如前所述,强对流天气短时临近预报所依靠的主要资料是各种非常规观测资料、高时空分辨率的中尺度数值模式数据以及这些数据的融合分析数据等。非常规观测资料主要来自自动站、雷达、卫星、闪电定位、GPS/MET、风廓线雷达等的观测。因此,强对流天气短时临近预报技术就是根据这些观测资料的特性、数值模式资料的有效性和特点、强对流天气的物理特征和机理综合开发完成,比如定量降水预报技术就是主要根据自动站降水资料、雷达资料和数值模式资料来开发完成。

陈明轩等^[24]对国内外对流天气临近预报技术的发展与研究进展进行了综述,韩雷等^[25]综述了基于雷达数据的风暴体识别、追踪及预警的研究进展。总体来看,强对流天气短时临近预报技术主要包括雷暴识别追踪和外推预报技术、数值预报技术和以分析观测资料为主的概念模型预报技术等^[4, 24]。

雷暴识别追踪和外推预报技术可以分为三大类:持续性预报法、交叉相关法和单体质心法。其中,持续性预报法目前已经被后两者取代^[25]。Rinehart^[26]1978 年提出的 TREC 算法(Tracking Radar Echoes by Correlation)是交叉相关法的代

表;Li^[27]在 TREC 的基础上提出了 COTREC(Continuity of TREC Vectors)算法;最近,曾小团等对 GRAPES-SWIFT 临近预报系统的雷达回波交叉相关外推算法进行了评估^[28]。单体质心法的代表是在业务上被广泛应用的 TITAN^[6]和 SCIT(Storm Cell Identification and Tracking)^[29]算法。2003 年,Lakshmanan^[30]提出了一种使用了 K 均值聚类方法的新风暴识别方法,这种方法可以根据需要进行不同尺度的风暴识别、追踪和预警。外推预报技术在国内外强对流天气短时临近预报系统中获得了广泛的应用,但其缺点是预报时效较短,准确率不是很高^[4, 24]。最近,兰红平等给出了一种基于模式识别的云团边界识别和相关追踪技术^[31];胡胜等给出了临近预报系统 GRAPES-SWIFT 中的风暴产品的设计,包括风暴识别、风暴追踪和风暴预报^[32];Meyer 等使用 3D 闪电资料和常规雷达、极化雷达资料来改进雷暴的追踪和临近预报技术^[33]。

概念模型预报技术主要是通过综合分析多种中小尺度观测资料,包括雷达和气象卫星资料等,在此基础上建立雷暴发生、发展和消亡的概念模型,特别是边界层辐合线和强对流的密切关系等,再结合数值模式分析预报和其他外推技术的结果,最终建立雷暴临近预报的专家系统,比如 NCAR 的 ANC 预报系统^[4, 24]。

精细数值天气预报技术是未来强对流天气短时临近预报的重要发展方向。利用多普勒天气雷达资料和其他中小尺度观测资料进行数值模式初始化来预报雷暴的发生、发展和消亡已经取得了重要进展^[34]。

RUC(Rapid Update Cycle)快速更新数值模式是美国 NCEP 业务数值预报的重要模式之一,它提供高时空分辨率的中尺度天气分析产品和短期数值预报产品^[34]。RUC 基于 3 维变分同化技术,每小时同化更新一次,水平分辨率 13 km,地理范围覆盖了整个美国大陆区域。Rapid Refresh(RR)是美国下一代的 1 h 快速循环更新数值模式,NCEP 计划 2010 年年中替代现有的 RUC 快速更新数值模式。RR 模式水平分辨率同 RUC 一致;RR 使用的模式是 WRF-ARW 模式,不同于 RUC 模式;RR 模式不再使用 3 维变分同化,使用的是 GSI(Gridpoint Statistical Interpolation,格点统计插值)技术;RR 模式覆盖的地理区域为整个北美大陆,大于 RUC 模式^[34]。

RR 模式同 RUC 模式物理特性是相似的,预报

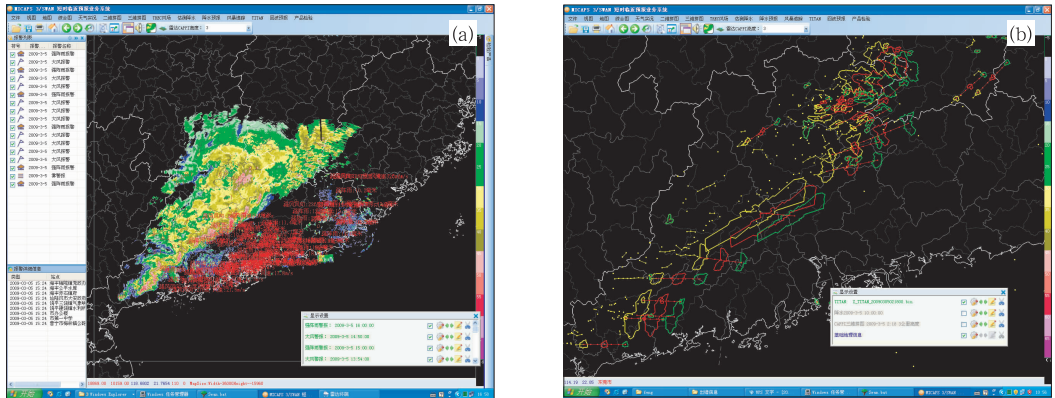


图 2 中国气象局强对流天气短时临近预报系统 SWAN 1.0
 (a)灾害天气实时报警页面; (b) 风暴路径预报(TITAN)

Fig. 2 The short-term forecasting and nowcasting system SWAN 1.0 of China Meteorological Administration
 (a) Disastrousweather warning interface; (b) Storm tracks and forecasts by TITAN algorithm

对流发生发展的环境是适宜的^[34],但它们都不能直接预报强对流的生消,因此美国正在发展更高时空分辨率、同化更多非常规资料的高分辨率快速更新循环数值预报系统 HRRR(High-Resolution Rapid Refresh)^[13,34]来直接预报对流风暴。HRRR 基于 WRF 模式,目前水平分辨率 3 km,1 h 快速更新,12 h 预报,同化了 GOES 卫星和 METAR 的云观测以及雷达反射率因子资料、闪电资料等,未来还要把化学过程加入到模式中。HRRR 目前正在业务试验,它为 CoSPA 系统提供数值模式预报结果,它在 CoSPA 系统中同外推预报相融合提供 2~6 h 对流预报。图 3 为 CoSPA 系统中融合预报准确性同其他预报结果的对比以及未来的发展^[9,34]。

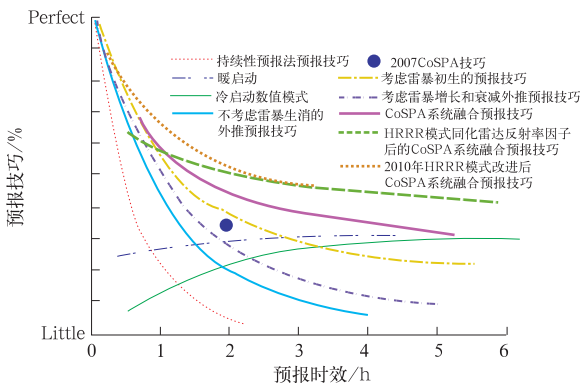


图 3 各种短时临近预报方法预报技巧的定性评估^[9,34]
 Fig. 3 Improving forecast performance at longer lead times will involve the use of highly capable numerical models and blending techniques

由于气象卫星能够观测云,而一般的气象业务雷达只能测雨,因此气象卫星通常能够早于雷达探测到积云对流。Roberts 和 Rutledge^[35]联合使用 GOES-8 静止卫星和 WSR-88D 雷达资料来预报对

流风暴的初生和增长。我国目前 FY2 静止气象卫星携带的扫描辐射计有 5 个通道,包括 1 个可见光通道和 4 个红外通道,星下点分辨率分别为 1 km 和 5 km。欧洲的第二代静止气象卫星 MSG(Meteosat Second Generation)携带的扫描辐射计 SEVIRI(Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager)共有 12 个通道,其中 2 个可见光通道和 10 个红外通道,星下点分辨率分别为 1 km 和 3 km,可以实现 15 分钟循环扫描^[36]。欧洲的第三代静止气象卫星 MTG 将在 2016 年业务化。通过分析静止气象卫星获得的多通道资料可以获取对流活动各个发展阶段特征:第 1 阶段,对流发生前的大气状况,通过卫星资料可以反演 K 指数、抬升指数来反映大气的稳定度状态;第 2 阶段,对流初生(CI)阶段,静止卫星资料可以探测到大气中较小尺度的积云对流活动状况;第 3 阶段,对流成熟阶段,静止卫星高分辨率可见光资料可以反映云顶的纹理特征,通过分析红外和水汽通道可以获取对系统的上冲云顶特征和对流云的微物理特征^[36]。

强对流天气短时临近预报的检验是促进强对流天气短时临近预报技术发展的重要方面。除了使用相关系数、探测概率(POD)、虚假警报比(FAR)和临界成功指数(CSI,即 TS 评分)、ETS(Gilbert Skill Score)评分等来衡量强对流天气短时临近预报的好坏,近年来也发展了许多新的空间检验方法,对此 Brown 进行了综述^[37]。这些新的空间检验方法主要有四类^[37]:第一类为邻域空间检验方法(Neighborhood methods),也称为模糊检验^[38-41];第二类为尺度分离检验方法;第三类为场变形(Field deformation)检验方法,例如文献^[42];第四类为基于对象

或者特征(Object/Feature-based)的检验方法。

2.2 目前国内短时临近预报业务技术支持

2009 年国家气象中心利用常规观测资料、WS (重要天气报告)报、自动站、闪电、静止卫星红外资料(红外 1 通道和水汽通道)和云分类资料实现了全国强对流天气的实时监测。该监测系统可以监测雷暴、冰雹、龙卷、大风、短时强降水和深对流云的最近 1、3、6、12 和 24 小时的分布,是时间滑动监测;可以进行月、旬、候等强对流天气分布监测;也可以设置为任意时次、任意天数的强对流实况监测。图 4 为该系

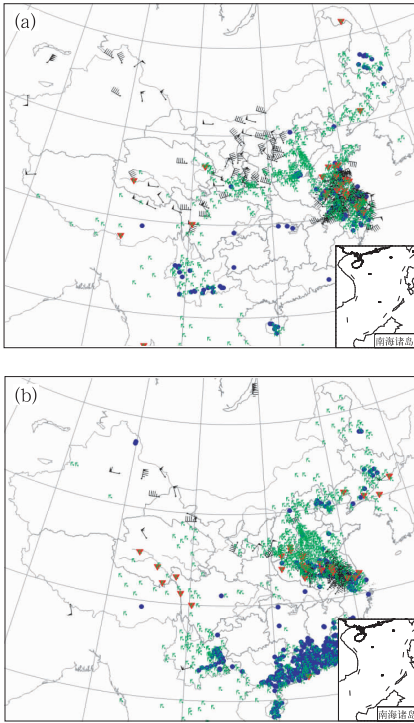


图 4 强对流天气监测系统获得的强对流天气分布,包括雷暴(绿色雷暴符号)、大风(黑色风羽)、冰雹(红色倒三角)和短时强降水(≥ 20 mm/h,蓝色圆点)
 (a) 2009 年 6 月 5 日 00UTC 至 6 日 00 UTC
 (b) 2009 年 6 月 14 日 00UTC 至 15 日 00 UTC
 Fig. 4 The severe convective weather distribution monitored by the monitoring software of National Meteorological Center of China (Green symbols denote thunderstorms, black barbs high winds, red triangles hail, and blue dots heavy rainfall ≥ 20 mm/h)

2009 年国家气象中心在强对流天气预报业务中试行了中尺度天气的综合天气图分析方法,并建立了一套中尺度天气图综合分析规范。中尺度天气的天气图综合分析主要利用探空资料和数值预报资

料,分析强对流天气发生发展的环境场条件,包括地面分析和高空综合图分析。地面分析包括气压、风、温度、湿度、对流天气现象和各类边界线(锋)的分析。在高空分析中重点分析风、温度、湿度、变温和变高的分布,并将不同等压面上最能反映水汽、抬升、不稳定和垂直风切变状况的特征系统和特征线绘制成一张综合图,以更直观的方式反映产生中尺度深厚对流系统发生发展潜势的高低空配置环境场条件。国家气象中心一年的业务试验表明,中尺度天气的天气图综合分析已经成为强对流天气短时和潜势预报的重要依据^[43]。

国家气象中心的中尺度天气分析业务试验也推动了 MICAPS 3.0 强对流专业版的开发。MICAPS 3.0 强对流专业版中实现了对强对流天气的中尺度分析工具箱功能(见图 5)。使用该工具箱可方便快捷地实现强对流天气的天气分析,并将分析结果以数据和图形两种方式存储到文件,便于调用、显示和进行天气总结^[43]。

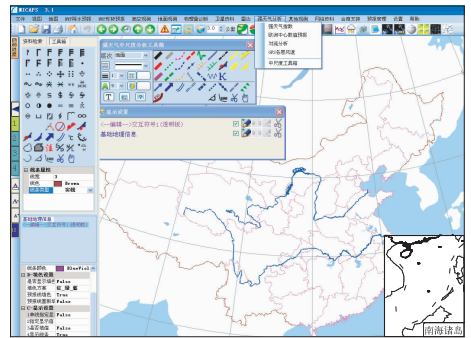


图 5 MICAPS 3 中的中尺度天气图分析工具箱界面

Fig 5 The mesoscale analysis toolbox in MICAPS 3 system

国家气象中心和北京大学联合移植和发展了雷暴识别、追踪和临近预报算法 TITAN^[6],该算法已经成为 SWAN 临近预报系统中雷暴预报的重要算法模块(图 2b)。新的 TITAN 算法从风暴识别、追踪和预警三个方面,对目前临近预报中普遍使用的 SCIT 和 TITAN 方法进行了改进。新算法利用数学形态学方法解决了风暴虚假合并和风暴簇分离问题;利用序贯蒙特卡洛方法实现了风暴序列追踪,有效地解决了风暴的分裂、合并问题;使用光流法计算得到的回波运动矢量辅助风暴的追踪和预警;实际资料试验表明,新算法的评价指标都有所提高^[44-46]。

如前所述,广东省气象局的 GRAPES_SWIFT 短时临近预报系统是建立在我国自主研发模式 GRAPES 基础上的。GRAPES 可提供分辨率达 12 km 的数值预报产品。GRAPES 的 3DVAR 变分同

化系统可同化地面观测资料、探空资料、船舶资料、飞机报文、卫星资料、和雷达 VAD 风场资料等^[21]。

中国气象局北京城市气象研究所在美国的 WRF 模式基础上开发完成了 BJ_RUC 快速更新数值模式系统^[47],取得了较好预报效果,是北京气象台强对流天气短时临近预报的重要技术支撑系统。该系统同化了来自全球观测系统的资料(包括地面常规/加密观测、高空常规/加密观测、飞机报、船舶/浮标报等)和北京地区区域观测资料(包括自动站观测和 GPS 可降水量观测),未同化雷达资料;系统采用三层嵌套,水平分辨率分别为 27 km、9 km、3 km;3 h 快速更新预报循环;1 h 预报间隔;实现了探空预报和高精度回波预报。

中国气象科学研究院、中国气象局武汉暴雨研究所在美国 LAPS(The Local Analysis and Prediction System)系统基础上利用常规观测资料和各种非常规观测资料建立了中尺度天气分析预报系统——“中尺度灾害天气分析与预报系统(RAFS)”。该平台也具有快速循环和滚动预报功能,水平分辨率 14 km,时间分辨 3 h。该系统在中国气象科学研究院主持的国家重点基础研究项目“我国南方致洪暴雨监测与预测的理论和研究方法研究”的四大中尺度天气野外试验基地和中央气象台天气会商中应用,目前正在进一步完善系统并推广应用。

国家气象中心联合广州热带海洋气象研究所和上海中心气象台基于中国气象局自主研发模式 GRAPES 建立了 GRAPES-RUC 快速更新循环预报系统,该系统采用三维变分同化技术,具备雷达 VAD 风、飞机报告、卫星云导风、自动气象站、GPS/MET 等 5 类稠密非常规资料的同化能力,系统每小时同化分析 1 次资料,每天 8 次预报,每 3 小时 1 次。自 2005 年起,针对北京 2008 的奥运气象服务,国家气象中心发展了区域中尺度集合预报系统 WRF_EPS。这些数值预报系统的建立进一步加强了我国强对流天气短时临近预报业务的技术支撑能力。

3 我国强对流天气短时临近预报面临的挑战和应对措施

3.1 挑战

虽然我国强对流天气短时临近预报业务已经取得了巨大进展,但与国外先进水平相比,差距主要表现在以下几个方面:1)业务起步晚,发展缓慢,不成熟;2)业务分工尚不太明确,未形成国家与地方上下

有效协作和规范的业务预报流程和布局;3)专业化的预报队伍未完全在全国业务预报中建立起来;4)我国幅员辽阔,强对流天气的发生发展(尤其是触发机制)千差万别,给预报带来较大困难;5)面向强对流天气预报的应用研究和基础研究严重缺失。

我国强对流天气短时临近预报业务发展面临的挑战主要包括:1)强对流天气的监测技术需要进一步提高;2)大力发展快速同化更新的数值预报和集合数值预报支撑技术;3)进一步完善强对流天气短时临近预报业务流程和预报平台;4)需要大力发展强对流天气预报检验技术;5)强对流天气机理研究和气候时空分布特征分析需要进一步加强。

强对流天气监测技术方面的挑战主要表现在以下几个方面:1)强对流天气观测资料问题,包括资料(特别是自动站和雷达资料)的质量控制、资料的时效性、中尺度观测网资料共享以及强对流天气的目击报告制度等问题;2)强对流天气的监测和识别技术,即如何更有效利用遥测资料(包括雷达、卫星、闪电定位仪等)识别强对流天气以弥补常规站网观测不足与强对流天气局地性强的矛盾;3)探空观测资料是监测大气稳定性和垂直风切变的最基本资料,但目前其时空分辨率远远不能满足强对流天气分析的需要,并且站网东密西疏,西藏、新疆、内蒙古等天气上游地区存在着大量的资料空白区;因此如何利用极轨卫星观测资料和数值模式资料弥补该资料的不足是未来强对流天气预报需要面对一个重要方面。

强对流天气预报支撑技术面临的挑战包括:1)中尺度天气诊断分析技术方面,包括如何利用遥感探测资料(卫星、雷达、风廓线仪、闪电定位仪等)进行强对流天气识别和外推技术(包括积云识别、边界层辐合线识别、对流风暴识别、深对流云识别等)、多资料的快速同化和融合技术和强对流发生的各类条件(水汽、抬升、不稳定、垂直风切变)的客观定量诊断分析技术;2)中尺度数值预报技术方面,具有快速同化能力的高分辨率中尺度数值模式、云模式的发展和业务化以及中尺度集合预报技术的发展是强对流天气短时预报的关键;3)短时临近预报技术方面,特别是强对流天气外推预报与数值预报融合的短时临近预报技术已经成为目前提高中尺度天气短时临近预报质量和预报时效的重要支撑技术;国家级的短时预报技术尚处于探索阶段,应结合我国高分辨率中尺度数值模式(GRAPES-RUC 等)输出产品和非常规观测资料(天气雷达、卫星)进一步开展这方面的研究工作;4)对强对流天气的分类(冰雹、

雷雨大风、短时强降水等)预报技术支撑能力明显不足;5)预警预报产品分发方面需要进一步改进和完善现有预警发布手段、途径等,以提高其有效性和及时性。

短时临近预报平台和系统的支撑则体现在如何实现强大的诊断分析功能和产品快速制作、发布功能,需要进一步完善和建立专业化的强对流天气短时临近预报平台。

受资料条件的限制,我国对强对流天气(飑线、线状对流等)发生发展的规律和机理研究明显落后于国外先进水平,中小尺度天气系统的物理结构及其发生发展过程和机理尚不清楚。强对流天气概念模型主要是天气尺度的系统配置,缺乏强对流天气中尺度概念模型。

在业务预报流程方面,最大的挑战来自于各级台站的有效协作与分工,在全国逐步建立有效合作的强对流天气展望(Outlook)、警戒(Watch)和警告(Warning)预报业务。此外,发展科学的强对流天气预报检验方法,尽可能地获取强对流发生的事实(有效利用灾情直报系统、气象信息员)才有可能科学定量评估我国的短时临近预报业务。

3.2 应对措施

针对目前我国强对流天气短时临近预报面临的挑战,提出以下应对措施:

(1) 进一步加强监测能力建设。要求各常规地面站点观测的重要天气报告(WS报)及时上传国家气象信息中心;针对探空观测时空分辨率较低的问题,加强利用各种非常规观测获得的大气垂直分布(比如飞机 AMDAR(航空器气象资料下传)资料、雷达 VAD 风廓线、风廓线雷达获得的垂直风廓线、极轨卫星获得的垂直温湿分布等);加强自动气象站维护,发展适合于自动站气象资料的质量控制方案;加强 GPS/MET 站点建设;加快并完善国家雷电定位网建设,推进云闪定位网建设;在雷达网不能覆盖的关键区域适当增加雷达站点,结合各种观测资料进一步完善各种雷达产品;加快风廓线雷达的布网工作,建立垂直风廓线资料在强对流天气临近预报中的应用技术储备;加强研究下一代气象卫星资料在强对流天气短时临近预报中应用,建立技术储备。加强各种非常规资料的快速收集、质量控制、分析和信息分发。加强与航空气象部门、非气象部门等的气象资料(比如电力部门的闪电定位资料、国土测绘部门的 GPS/MET 资料等)共享。

(2) 进一步加强中尺度天气分析,实现资料的

客观诊断分析和人工分析相结合。建立各种非常规资料的中尺度分析技术储备;大力发展和改进快速融合各种资料的中尺度分析系统;根据高时空分辨率的中尺度分析系统和数据模式模拟结果发展强对流天气的中尺度诊断分析、诊断预报方法和技术。中尺度天气分析不仅仅是加强对常规地面和探空资料以及自动站资料的分析,也应当加强包括雷达反射率因子和径向速度资料、雷达 VAD 风廓线、卫星资料、风廓线雷达资料、GPS/MET 反演获得的水汽资料等各种非常规资料分析。将各种探空分析技术扩展应用到各种非常规资料。

(3) 进一步完善强对流天气临近外推预报方法。虽然强对流天气临近外推预报方法相对比较成熟,但目前的大多数外推预报算法没有考虑对流系统的生消、且预报时效较短、预报准确率不高、没有分类强对流天气预报。因此需要在雷达数据质量控制与雷达资料识别强对流天气基础上,进一步改进各种外推算法,并进行外推算法的集成。这包括 TREC 算法的改进和定量降水临近预报算法改进,尤其加强短时强降水的临近预报;进一步改进 SCIT 和 TITAN 算法,在算法中结合其他资料(比如自动站资料、卫星资料、数值模式资料等)增加雷暴的初生、增长、衰减和消亡预报;发展和完善闪电临近预报算法;改进雷雨大风和冰雹的临近预报算法。

(4) 大力加强短时临近预报技术的研发。大力发展外推预报与数值预报相融合的短时临近预报技术是 2~6 h 短时预报的重要方法。重点发展以下几种融合方法:1) NIWOT 融合方法,预报值为雷达外延和数值模式预报结果的加权平均;其中权重系数根据外延预报和模式预报精度与预报时间的统计关系进行确定。2) NIWOT 趋势法,利用模式预报的降水区域和强度变化趋势信息,对雷达外延的降水范围和强度进行订正,以获取最终的预报。3) ARMOR (Adjustment of Rain from Models with Radar data) 方法,首先利用当前雷达观测分析模式预报的降水位置和强度误差,并导出误差的时间变化趋势;然后利用估计的误差趋势,对模式预报的降水和强度误差进行修正。

利用具有快速同化能力的高分辨率中尺度数值模式输出产品进行强对流天气 6~12 h 统计一动力释用预报技术,进一步发展物理量诊断技术,开展多指数信号集成技术研发。

(5) 大力发展各种非常规资料(雷达资料、卫星资料、风廓线资料、GPS/MET 水汽资料等)的同化技术,进一步完善和建立具有高时空分辨率的快速

更新循环数值预报系统;加强区域集合数值预报支撑技术研发。

(6) 加强强对流天气预报检验技术研发。在强对流天气监测产品基础上,除了开发传统的探测概率、虚假警报比和 TS 评分等检验方法外,大力发展新的空间检验方法。

(7) 加强关键区域强对流天气发生发展的机理研究,尤其是强对流天气的触发机制和雷雨大风、冰雹等发展演变规律研究;分析各地不同类型强对流天气发生发展的气候规律和特征;进一步加强预报员强对流天气短时临近预报技术总结。

(8) 完善强对流天气短时临近预报平台,实现集约化发展。在 MICAPS 3.0 和 SWAN 系统基础上,集中人力物力,根据强对流天气预报业务的高时效性、高局地性特点和需求,建立具有强大中尺度交互分析功能和预报产品加工功能的方便快捷的强对流天气短时临近预报系统。

4 总 结

本文总结了近年来国内外强对流天气短时临近预报业务的现状和技术进展及未来的发展方向,分析了国内强对流天气短时临近预报同先进水平的差距以及存在的问题,并提出了相应的应对措施。

从当前的技术进展来看,强对流天气监测、强对流天气机理研究和中尺度天气分析是强对流天气短时临近预报的重要基础;先进的外推预报方法同快速更新循环的高时空分辨率数值模式预报以及二者的融合是强对流天气短时临近预报的发展方向;合理、可靠的强对流天气预报检验方法是促进强对流天气短时临近预报业务和技术发展的重要方面;方便快捷功能强大的预报系统是强对流天气短时临近预报业务和技术进步的保证。

由于强对流天气短时临近预报牵涉到从监测、分析、数值预报到预报业务平台等气象业务的各个方面,因此建立完备的强对流天气短时临近预报系统和业务也是一个非常复杂和重要的系统工程。

参考文献

- [1] Smith S B, Graziano T, Lane R, et al. The System for Convection Analysis and Nowcasting (SCAN). Preprints 16th Conf. on Weather Analysis and Forecasting, 14th International Conf. on Interactive Information and Processing Systems, 1998. Phoenix, Amer. Meteor. Soc. : J22-J24.
- [2] Lakshmanan V, Smith T, Stumpf G J, et al. The warning decision support system-integrated information[J]. Weather and Forecasting, 2007, 22 (3): 596-612.
- [3] Eilts M D, Johnson J T, Mitchell E D, et al. Severe weather warning decision support system[C]. 18th Conf. on Severe Local Storms, Amer. Meteor. Soc., San Fransisco, CA, 1996, 536-540.
- [4] Wilson J W, Crook N A, Mueller, et al. Nowcasting thunderstorms : a status report [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1998, 79 : 2079-2099.
- [5] Cai H, Wilson J, Pinto J, et al. Developing NIWOT: a regional 1-6 hr short-term thunderstorm forecast system[C]. The Fifth International Conference on Mesoscale Meteorology and Typhoon, Boulder, USA, Oct 31st—Nov. 3rd, 2006.
- [6] Dixon M, and Wiener G. TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting—A Radar-based Methodology[J]. J Atmos Oceanic Technol, 1993, 10: 785-797.
- [7] 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 [J]. J Atmos Sci, 1997, 54 : 1642-1661.
- [8] 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 [J]. J Atmos Sci, 1998, 55 : 835-852.
- [9] 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.
- [10] Dupree W J, Wolfson M M, Johnson Jr R J, et al. FAA Tactical Weather Forecasting in the United States National Airspace, Proceedings from the World Weather Research Symposium on Nowcasting and Very Short Term Forecasts. Toulouse, France. 2005.
- [11] Dupree W J, Robinson M, DeLaura R, et al. Echo Tops Forecast Generation and Evaluation of Air Traffic Flow Management Needs in the National Airspace System[C], AMS 12th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Atlanta, GA. 2006.
- [12] Wolfson M M. and Clark D. Advanced aviation weather[J]. Forecasts, Lincoln Laboratory Journal, 2006, 16(1): 31-58.
- [13] Benjamin S G, Smirnova T G, Weygandt S S, et al. The HRRR 3-km storm resolving, radar-initialized, hourly updated forecasts for air traffic management. AMS Aviation, Range and Aerospace Meteorology Special Symposium on Weather-Air Traffic Management Integration, Phoenix AZ. 2009
- [14] Golding B W. Nimrod: A system for generating automated very short range forecasts [J]. Meteor Appl, 1998, 5: 1216.
- [15] Pierce C E, Collier C G, Hardaker P J, et al. GANDOLF: a system for generating automated nowcasts of convective precipitation[J]. Met Apps, 2000, 7: 341-360.
- [16] Fox N I, Webb R, Belly J, et al. The impact of advanced nowcasting systems on severe weather warning during the Sydney 2000 Forecast Demonstration Project: 3 November

- 2000[J]. *Weather and Forecasting*, 2004, 19: 97-114.
- [17] Brovelli P, S n si S, Arbogast E, et al. Nowcasting thunderstorms with SIGOONS-a significant weather object oriented nowcasting system. World Meteorological Organization Symposium on Nowcasting and Very Short Term Forecasting. France Toulouse, 2005.
- [18] Keenan T, Wilson J, Joe P, et al. The World Weather Research Program (WWRP) Sydney 2000 Forecast Demonstration Project : Overview. Preprints 30th International Conference on Radar Meteorology, Munich, Germany , 2001.
- [19] Keenan T, Joe P, Wilson J, et al. The Sydney 2000 World Weather Research Program Forecast Demonstration Project; Overview and current status[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2003,84: 1041-1054.
- [20] Wang Jianjie, Keenan T, Joe P, et al. The implementation of Beijing 2008 World Weather Research Programme Forecast Demonstration Project; Overview and impacts of Nowcast Demonstration. World Meteorological Organization Symposium on Nowcasting and Very Short Term Forecasting. Whistler, Canada. 2009.
- [21] 冯业荣, 曾沁, 梁巧倩, 等. 综合临近预报系统“雨燕”(GRAPES-SWIFT)的研究开发[C]. 第二十一届粤港澳气象科技研讨会. 香港. 2007.
- [22] Li P W, Wong W K, Chan K Y, et al. SWIRLS ——An Evolving Nowcasting System. Technical Note, No. 100. Hong Kong Observatory, 2000.
- [23] Chen Mingxuan, Gao F, Kong R, et al. A System for Nowcasting Convective Storm in Support of 2008 Olympics. World Meteorological Organization Symposium on Nowcasting and Very Short Term Forecasting. Whistler, Canada, 2009.
- [24] 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[J]. *应用气象学报*, 2004, 15(6): 754-766.
- [25] 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[J]. *气象*, 2007, 33(1): 3-10.
- [26] Rinehart R E, Garvey E T, Three 2 dimensional storm motion detection by conventional weather radar[J]. *Nature*, 1978, 273: 287-289.
- [27] Li L, Schmid W, Joss J. Nowcasting of motion and growth of precipitation with radar over a complex orography [J]. *J Appl Meteorol*, 1995, 34: 1286-1300.
- [28] 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[J]. *气象*, 2010, 36(1): 31-40.
- [29] Johnson J T, MacKeen P L, Witt A, et al. The storm cell identification and tracking algorithm: An enhanced WSR-88D algorithm[J]. *Weather and Forecasting*, 1998, 13: 263-276.
- [30] Lakshmanan V. Multiscale storm identification and forecast [J]. *Atmospheric Research*, 2003, 67: 367-380.
- [31] 兰红平, 孙向明, 梁碧玲, 等. 雷暴云团自动识别和边界相关追踪技术研究[J]. *气象*, 2009, 35(7):101-111.
- [32] 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[J]. *气象*, 2010, 36(1):54-58.
- [33] Meyer V, H ller H, Betz H D. Improved Tracking and Nowcasting Techniques for Thunderstorm Hazards Using 3D Lightning Data and Conventional and Polarimetric Radar Data. World Meteorological Organization Symposium on Nowcasting and Very Short Term Forecasting. Whistler, Canada, 2009.
- [34] Benjamin S G, Hu M, Weygandt S, et al. Integrated assimilation of radar/sat/METAR cloud data for initial hydrometeor/divergence to improve hourly updated short-range forecasts from RUC/RR/HRRR. World Meteorological Organization Symposium on Nowcasting and Very Short Term Forecasting. Whistler, Canada, 2009.
- [35] Roberts R D, and Rutledge S. Nowcasting storm initiation and growth using GOES-8 and WSR-88D data[J]. *Weather and Forecasting*, 2003, 18(4): 562-584.
- [36] Marianne K nig. Satellite Nowcasting Applications. World Meteorological Organization Symposium on Nowcasting and Very Short Term Forecasting. Whistler, Canada. 2009.
- [37] Brown B. Verification methods for spatial forecasts. World Meteorological Organization Symposium on Nowcasting and Very Short Term Forecasting. Whistler, Canada. 2009.
- [38] Atger F. Verification of intense precipitation forecasts from single models and ensemble prediction systems[J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2001, 8: 401-417.
- [39] Roberts N M, Lean H W. Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events[J]. *Mon Wea Revi*, 2008, 136(1): 78-96.
- [40] Ebert E E. Fuzzy verification of high-resolution gridded forecasts: a review and proposed framework[J]. *Meteorol. Appl.*, 2008, 15: 51-64.
- [41] Marsigli C, Montani A, Paccagnella T. A spatial verification method applied to the evaluation of high-resolution ensemble forecasts[J]. *Meteorol Appl* 2008, 15: 127-145.
- [42] Keil C, Craig G C. A displacement and amplitude score employing an optical flow technique [J]. *Wea Forecasting*, 2009, 24 (5): 1297-1308.
- [43] 张小玲, 张涛, 刘鑫华, 等. 利用高空地面资料的中尺度天气主观分析技术[J]. *气象*, 2010, 36(7):143-150.
- [44] 韩雷, 郑永光, 王洪庆, 等. 基于数学形态学的三维风暴体自动识别方法研究[J]. *气象学报*, 2007, 65(5): 805-814.
- [45] Han L, Fu S X, Yang G. A stochastic method for convective storm identification, tracking and nowcasting[J]. *Progress in Natural Science*. 2008, 18, 1557-1563.
- [46] 韩雷. 基于三维雷达数据的风暴自动识别、追踪和预警研究. 北京大学博士毕业论文[M]. 2008: 42-85.
- [47] 陈敏, 范水勇, 陈明轩. BJ-RUC 系统模式探空及其在对流预报中的应用. 2009 年第一届首席预报员高级研讨班. 长春. 2009.