

蓝渝,张涛,郑永光,等. 2013. 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, 39 (7):901-910.

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^{*}

蓝 渝 张 涛 郑永光 毛冬艳 朱文剑 林隐静 张小玲

国家气象中心,北京 100081

提 要: 中尺度天气分析技术在对流性天气的短期预报业务中发挥了重要作用。文章介绍了国家气象中心正在发展和试运行的对流天气中尺度过程分析规范和支撑技术,旨在为中尺度对流天气的短时临近分析和预报提供技术方法,其客观技术支持为中国气象局强对流短临预报系统 SWAN、强对流天气综合监测技术和自动站资料快速客观分析技术等。文章以 2011 年 4 月 17 日强对流过程为例,介绍了如何利用多源观测资料(常规和非常规资料)快速识别和掌握强对流天气(短时强降水、雷暴大风、冰雹、龙卷等)实况,分析当前对流系统类型及其结构特征,判断未来影响对流系统发生、发展的中尺度环境条件,并综合考虑客观自动外推算法产品,最终指导预报员对未来 0~6 h 内的强对流天气影响区域进行短临预报预警。业务试验表明,对流天气中尺度过程分析技术可为强对流天气短临预报业务提供重要参考和依据。

关键词: 中尺度分析, 对流天气, 短临预报, 中尺度过程分析

中图分类号: P456

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.07.011

Advances of Mesoscale Convective Weather Analysis in NMC II : Mesoscale Nowcasting Analysis and Supporting Techniques

LAN Yu ZHANG Tao ZHENG Yongguang MAO Dongyan
ZHU Wenjian LIN Yinjing ZHANG Xiaoling

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Mesoscale convective analysis plays an important role in short-term severe convective weather forecasting. In this paper, the mesoscale nowcasting analysis and its related techniques being used in the National Meteorological Centre (NMC) are presented. The mesoscale nowcasting analysis is the second part of *Mesoscale Analysed Technical Specification*. A comprehensive analysis method combined with subjective nowcasting techniques and objective algorithm based on CMA Severe Weather Automatic Nowcasting system (SWAN) is used. The techniques of severe convective weather monitoring, and objective analyzing method of automatic observation station are also introduced. Taking the convective weather that occurred on 17 April 2011 as an example, we show how to quickly identify and acquire the actual severe convective weather events such as short-time severe precipitation, wind gusts, thunderstorm, hail and tornadoes, analyze the types and structural characteristics of the ongoing mesoscale convective system, judge the favorable mesoscale environments for the future development of the convective system and apply the objective identification, tracking and extrapolation products based on radar and satellite data, so as to guide the convective nowcasting in 0-6 h period. Tests in NMC show that the mesoscale nowcasting

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206003 和 GYHY201206004)及国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB430106)共同资助
2013 年 2 月 4 日收稿; 2013 年 6 月 3 日收修定稿
第一作者:蓝渝,主要从事中尺度天气分析和预报方法研究. Email: lanyu@cma.gov.cn

analysis can provide reliable references for severe convective weather nowcasting.

Key words: mesoscale weather analysis, severe convective weather, nowcasting, mesoscale nowcasting analysis

引 言

中尺度对流性天气(简称对流天气)多是在一定的大尺度环流背景下,由各种物理条件相互作用形成的中尺度对流天气系统造成的。中尺度对流系统的发生、发展及其变化机制比较复杂,需要关注大气中的瞬变系统和微小的变化(张小玲等,2012),因此对对流天气的预报,特别是针对 0~6 h(0~2 h 为重点)时段内的高时空分辨率的雷暴和强对流天气临近预报,是目前天气预报业务最具挑战性的难点之一(俞小鼎等,2012;郑永光等,2010)。

为配合国家级强对流天气预报业务的开展,2009 年起,国家气象中心强天气预报中心开展了中尺度对流天气分析技术的研发和业务试验工作(张小玲等,2010;2012)。其中,对流天气预报中的环境场条件分析技术主要依据“配料法”分析思路,针对对流天气发生发展的 4 个环境场条件(水汽、不稳定、抬升和垂直风切变)进行分析,为 6 h 以上的强对流天气短时和短期预报的业务提供技术指导。目前中尺度对流天气分析已成为强天气预报中心的核心业务之一,该技术也制定形成《中尺度天气分析业务技术规范(第一版)》向全国推广,在现代天气分析业务中发挥重要作用。2011—2012 年完善后的新版《中尺度天气分析业务技术规范》分为“对流天气环境场条件分析”和“对流天气中尺度过程分析”两篇,其中第一篇中尺度对流天气环境场条件分析已另文介绍,本文主要介绍“对流天气中尺度过程分析”及其支撑技术。

对于对流天气 0~6 h 短临预报而言,在技术手段上主要使用高分辨率的地面观测、雷达、云图和闪电定位等非非常规观测资料,对中尺度对流天气系统特征进行分析识别,配合客观分析和诊断技术产品,以及高分辨率的中尺度模式资料进行短临预报。近年来,针对暴雨、冰雹等强对流天气的中尺度短临分析技术的重要性越来越受到预报员的认可,但是受观测资料和天气分析平台支撑技术的局限,这些分析技术的使用主要以个例分析和总结为主(杨波等,2010;孙继松等,2011;张涛等,2012;方翀等,2012;

谌芸等,2012),尚缺乏系统性的分析技术介绍,在中尺度对流天气 0~6 h 短临业务预报中应用仍有很大不足。

为加强和提高中尺度对流天气短临分析和预报能力,2011—2012 年国家气象中心强天气预报中心在已有的中尺度天气环境场条件分析业务技术规范的基础上,发展了对流天气中尺度过程分析技术,并开展了业务试验,为 6 h 以内的短时临近对流天气分析预报业务提供技术指导和规范。为不断完善对流天气业务预报支撑技术,在强对流监测和客观诊断分析方面,发展完善了包括自动站资料质量控制技术、强对流信息提取和统计技术、直角坐标交叉相关雷达回波追踪(CTREC)技术、对流风暴识别追踪分析和临近预报(TITAN)技术、深对流云识别技术、中尺度对流系统(MCS)识别和追踪技术、闪电密度监测技术等为支撑的强对流天气的监测技术,实现了基于多源数据资料的我国强对流天气实时综合监测(郑永光等,2013),为强对流天气短时临近分析和预报提供了重要的技术保障。

1 对流天气中尺度过程分析

对流天气中尺度过程分析包括两方面:以预报员主观分析为主的对流天气系统类型、结构特征、边界层温湿条件及辐合线的识别和分析;以客观分析算法产品为辅助的中尺度动力、热力环境场条件的综合诊断分析。实际预报业务中,面对短临预报服务精细化要求高、时间紧迫等业务特点,除了预报员丰富的短临分析经验之外,合理完备的短临分析技术规范、高效的强对流客观监测和分析系统都是提高强对流天气短临预报业务水平的重要方面。

1.1 规范简介

“对流天气中尺度过程分析”是新版中尺度分析技术规范的第二篇,主要在短临时效内(0~6 h)依托加密的地面观测、雷达回波、卫星遥感图像以及闪电密度数据等资料,从最新时次的强对流天气实况入手,针对当前对流系统的结构特征及环境场(重点为边界层)对流条件(配料法)进行主观分析,并将分

析思路以综合分析图辅以文字描述的形式制成中尺度过程分析产品。在此基础上综合考虑客观自动外推算法产品,最终指导预报员对未来强对流天气影响区域进行短临预报预警。

本篇技术规范内容主要分为4个部分:(1)天气实况及对流系统类型识别:基于常规和非常规观测资料,快速分析掌握当前强对流天气实况以及分析区域内的中尺度对流系统;(2)中尺度对流系统特征分析:从雷达回波等实况观测资料入手,对中尺度对流系统的移动、传播以及内部三维结构特征进行分析;(3)中尺度环境场条件分析:利用最新时次的高时空分辨率地面实况和数值模式资料,分析中尺度环境场的水汽、不稳定、抬升和垂直风切变条件;(4)强对流天气短临预报落区分析:在主观分析基础上,辅助客观自动外推算法产品,对未来0~2 h强对流天气短临预报落区进行分析,最终形成对流天气中尺度过程分析产品。

1.2 天气实况及对流系统类型识别




临近预报业务中,对天气实况及对流系统的识别和分析,可辅助预报员快速有效地判断中尺度强对流天气系统的影响区域、发展强度及类型,是在短

临时效内开展强对流分析预报,特别是临近预警服务的重要前提。因此,掌握重点关注区域附近过去1~3 h内强对流天气实况,以及对当前中尺度对流系统(MCS)的形态及类型识别是对流天气中尺度过程分析的第一步。

强对流天气实况的识别对象包括过去1~3 h的短时强降水、雷暴大风、冰雹和龙卷等。在技术方法上,观测数据来源包括地面常规和加密观测资料、重要天气报、自动站资料和灾情直报等非常规地面观测资料,而中尺度对流系统的监测和识别则主要依赖于天气雷达回波或卫星云图,此外闪电定位观测以及地闪密度资料也可辅助对对流系统的发展演变的进行有效表征(李建华等,2006;冯桂力等,2006)。业务分析中,对分析时段内出现的短时强降水、对流性雷暴大风、冰雹、龙卷实况在综合分析图中进行标识(参考分析标准及标注符号见表1)。标识方法可手动绘制强天气阴影落区,或在出现强天气的站点上进行天气符号标识。为减少预报员工作量和提高可操作性,建议采用自动提取技术处理后生成的MICAPS站点强对流天气观测数据,方便在综合分析图中的调用和叠加。

表1 强对流天气实况分析标准及标识符号(适用于国家气象中心)

Table 1 Standards and symbols for different classes of severe weather (for NMC)

强天气类别	分析标准	标注符号
短时强降水	降水强度 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$	标注小时降水量值: 20(含)~30 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 降水数字颜色使用蓝色 30(含)~50 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 降水数字颜色使用紫色 $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 降水数字颜色使用红色
雷暴大风	地面风速 $\geq 17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	标注符号:  ,颜色:黄色
冰雹	/	标注符号:  ,颜色:蓝色
龙卷	/	标注符号:  ,颜色:红色

利用雷达组合反射率回波、卫星红外云顶亮温和闪电密度等观测资料,可较直观地反映当前中尺度对流系统的形态、强度和影响范围等实况信息。当在分析区域内有较强的对流系统发展时(参考分析标准见表2),应在综合分析图中通过绘制MCS影响区域或直接选择叠加组合反射率因子拼图、卫星红外云图或闪电密度填图数据对MCS进行标识。

图1是使用对流天气中尺度过程分析技术对2011年4月17日09—11时的强对流天气自动提取

表2 中尺度对流系统(MCS)分析建议标准(适用于国家气象中心)

Table 2 Standards for MCS in mesoscale nowcasting analysis (for NMC)

观测资料	分析标准
雷达组合反射率因子	回波强度大于40 dBz
红外云图云顶亮温	云顶亮温(TBB)低于 $-52 \text{ }^{\circ}\text{C}$
10 min 闪电密度	闪电密度高于20次/百千米 ²

数据以及 11:30 的雷达组合反射率因子,对过去 3 h 的强对流天气实况及最新时次对流系统形态和影响范围进行分析图标识。资料分析表明,过去 3 h 内,在广西东部与广东西部交接地区出现较大范围的短时强降水天气,并有 3 个站点出现了雷暴大风记录。强对流实况区域呈狭窄带状分布,多个站点的最强单小时降水达 50 mm 以上。雷达组合反射率因子显示,当前在广东西部存在一个反射率强度大于 65 dBz 的强回波中心,其对流活动发展旺盛,已发生的强对流天气实况是由此对流单体由广西向东偏南方向移动进入广东的路径上不断发展加强所造成的。未来系统可能继续向东偏南方向发展移动,对其下游地区造成影响。

1.3 中尺度对流系统(MCS)特征分析

不同类型的对流系统在其发生发展过程中所造成的对流性天气不尽相同,产生强冰雹、雷暴大风、短时强降水和龙卷等强对流天气的中尺度深厚湿对流系统在其空间结构上也存在其各自的特征。MCS 发生发展过程中,在获取已出现的对流天气实况的前提下,及时分析 MCS 主要的空间结构特征,对预报员快速掌握对流系统类型、强度,判断对流系统未来发展演变趋势、预期造成的强对流天气等关键信息而言显得至关重要,也为对流天气的短临预报预警服务提供了有力的依据。

MCS 结构特征可通过分析雷达回波、高分辨率卫星云图和闪电定位资料等非常规观测进行获取。预报员根据最新时次的雷达观测数据,综合分析雷达体扫回波的强度及径向速度反射率因子三维结构,并辅助各类回波分析产品,是判断 MCS 三维空间结构的最佳手段。

国内外大量的研究表明,造成短时强降水、冰雹或大冰雹(直径 \geq 时强降水)、雷暴大风、龙卷等分类强对流天气的对流系统,其在雷达三维观测资料中分别有以下几点主要的统计识别特征:

(1) 大于 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的短时强降水在发展旺盛且具备较高的垂直累积液态含水量(VIL)的 MCS 中较为常见。当雷达回波中显示 MCS 回波强度较强、强回波质心高度较低、对流系统移动缓慢等特征时,预报员需注意持续的对流性暴雨导致的暴洪等灾害性天气。

(2) 冰雹或大冰雹最基本的雷达回波特征是“高悬的强回波”(Johns et al, 1992; 俞小鼎等, 2006),即 50 dBz 以上的强回波扩展到环境大气 -20°C 等温线高度以上,同时 0°C 层的高度(指 0°C 层到地面距离)不超过 5 km。回波中心强度越大,高度越高,50 dBz 以上的强回波扩展到的高度越高,强冰雹可能性越大,预期的冰雹直径也越大。

(3) 雷暴大风天气,表征在 MCS 内部存在强烈的下沉气流,而其机制之一是雷暴周边相对干的空气被夹卷进入雷暴,导致雷暴下沉气流内雨滴迅速蒸发降冷而导致加强的向下加速度,这种对流层中层干空气的夹卷进入雷暴的过程在径向速度图上表现出中层径向辐合(Mid-Altitude Radial Convergence, MARC),即 MARC 特征(SCHMOCKER et al, 1996),在反射率因子垂直剖面图上表现为反射率因子高值核心下降。

(4) 产生龙卷的对流系统特征识别主要基于 MCS 中气旋的探测(Johns et al, 1992; Moller, 2001)。Trapp 等(2005)的统计表明,中气旋底越靠近地面,龙卷概率越高,当探测到中气旋底距离地面不超过 1 km 的情况下,龙卷发生概率约为 40%。

表 3 中列入了部分分类强对流天气的 MCS 雷达回波结构特征内容和参考值,可供预报员在短临分析业务中进行快速查询和参考。

以 2011 年 4 月 17 日强对流过程为例,使用雷达的体扫数据对强对流系统进行结构特征分析。图 2a 和 2b 分别为 4 月 17 日 13 时 00 分广州雷达垂直剖面以及 0.5° 仰角径向速度图。由图 2a 可见,对流系统的垂直结构显示出明显的倾斜结构,存在回波悬垂、有界弱回波区等特征,其强回波的质心高度达到 6 km 以上,综合判断当前的 MCS 结构呈现出有利于产生大冰雹的结构特征。而由图 2a 雷达径向速度场中可清晰地识别低层有中气旋和 MARC 的存在,预报员至此可判断当前强对流系统中存在超级单体结构,需特别关注其造成的强降水、风雹、龙卷等灾害的可能性。

1.4 MCS 中尺度环境场条件分析

MCS 的发展加强与所处中尺度环境场条件息息相关,对流性不稳定、一定的水汽和触发机制是中尺度对流系统产生、维持并加强的基本要素,风的垂

直切变是超级单体等组织化的强对流系统发生发展的重要因素。新版《中尺度天气分析业务技术规范》的第一篇“中尺度对流天气环境场分析”中,已对大气背景场下对流天气发生发展的必要和增强条件的相关分析方法进行了规范,并已另文介绍。但由于目前各类高空观测和遥测资料受到站点相对稀疏、观测频率不一等因素制约,因此对于当前正在发生发展的中尺度对流系统,基于常规观测资料的大气背景环境场分析在时空分辨率上通常较难以满足短

临分析和预报的需求。

本节介绍的“MCS 中尺度环境场条件分析”技术方法,重点关注当前 MCS 所处或下游地区中尺度范畴内的环境场(低层)对流条件配置情况及其最新变化,为预报员判断 MCS 的未来发展趋势提供依据。其在分析思路上与规范第一篇“中尺度对流天气环境场分析”的配料法一致,但在分析资料、分析目的、重点分析对象等方面的选择上各有侧重。

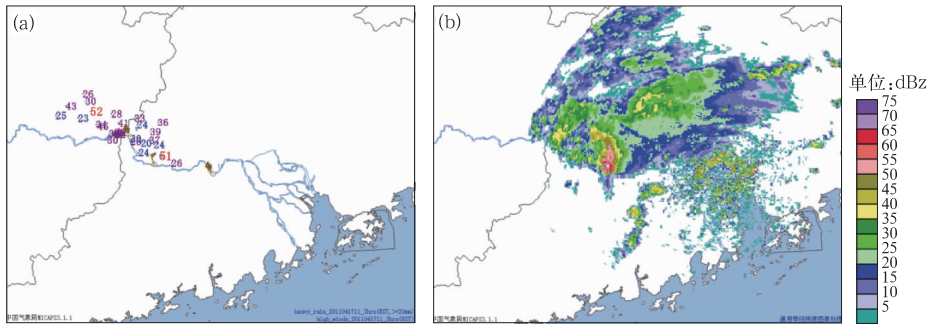


图 1 2011 年 4 月 17 日 09—11 时,3 h 强对流天气实况(a)和 11 时 30 分雷达组合反射率回波(b)

Fig. 1 The 3-h monitoring of the short-term heavy rainfall, wind gale and hail from 09:00 to 11:00 BT (a) and composite reflectivity diagrams of Guangzhou Radar at 11:30 BT (b) 17 April 2011

表 3 分类强对流天气的 MCS 雷达回波结构特征内容和参考值

Table 3 Brief introduction of radar reflectivity characteristics for different classes of severe weather

分析内容	有利条件或识别特征					
	短时强降水	冰雹或大冰雹	雷暴大风	龙卷		
雷达反射率因子及产品	强回波中心强度	>35 dBz	>45 dBz	>45 dBz	>40 dBz	
	回波顶高		>-20℃层高度			
	垂直累积液态含水量 (VIL)	>25 kg·m ⁻²	>40 kg·m ⁻² ; 一个体扫刷增 10 kg·m ⁻² , 达到 40 kg·m ⁻²	40 kg·m ⁻² 一个体扫刷减 10 kg·m ⁻²		
	特定回波时空特征	移动缓慢、列车效应	钩状回波、状回型缺口、低层反射率因子强梯度区、三体散射	弓形回波、线状对流、阵风锋、快速移动单体		
垂直剖面	强回波质心高度	<5 km	>-20℃层高度		<6 km	
	高悬的强回波区		回波悬垂、回波穹窿、有界弱回波区	强回波质心下降		
径向速度	中气旋特征	有利	有利	有利	有利	
	水平面或扫描仰角	辐合辐散	低层辐合	低层辐散、风暴顶辐散	低层辐散、中层径向辐合	TVS 特征
	大风速区			近地面		
垂直剖面	辐合辐散	低层辐合	低层辐合	低层辐散、中层径向辐合		

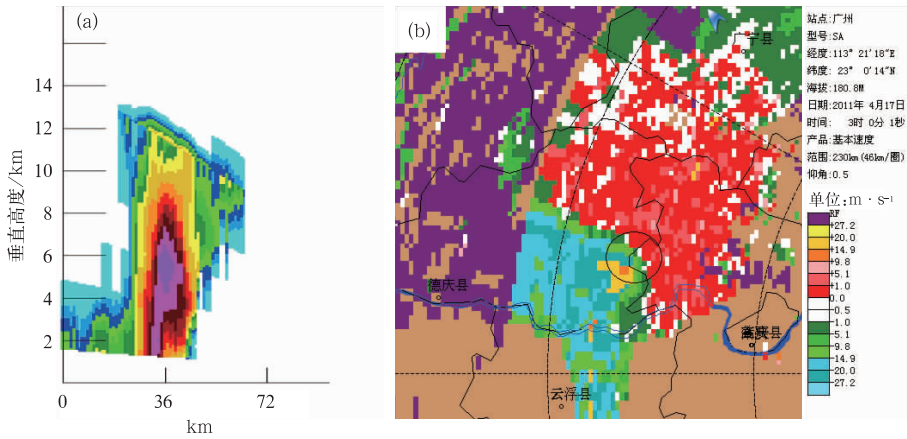


图 2 2011 年 4 月 17 日 13 时 00 分广州雷达垂直剖面(a)和 0.5°仰角径向速度图(b)

Fig. 2 The vertical cross section of radar reflectivity (a) and radar velocity diagram (b) of Guangzhou Radar at 13:00 BT 17 April 2011

1.4.1 地面分析

最新时次的地面加密自动站(尤其是高密度 10 min 区域自动站)的温、湿、压等要素观测数据可直观地为预报员提供近地面中尺度环境场的能量分布与配置信息,结合对天气现象、云状、云量等观测数据的分析,可辅助预报员判断 MCS 发展演变趋势以及可能影响的区域。在业务分析中,预报员可挑选不多于 2 个关键要素,选取分析阈值范围,运用地面要素客观分析技术,绘制客观分析等值线。例如在地势平坦的地区,间隔 1°C 或 2°C 分析等温度线和等露点温度线,或间隔 1 hPa 或 0.5 hPa 分析地面气压等。

地面加密自动站分析的另一个重要目的是分析判断中尺度环境场中的辐合抬升条件,即对包括锋面辐合、海风锋辐合、地形辐合线、雷暴流出边界等边界层辐合线的识别。大量研究表明(Wilson, et al, 1986; 俞樟孝等, 1985; 孙继松等, 2006; 俞小鼎, 2012),边界层辐合线导致的抬升运动往往是引起对流不稳定能量释放、对流系统新生和加强的重要原因之一。因此,对于边界层辐合线的主观分析和绘制,是中尺度对流过程短临业务中分析判断 MCS 生成、加强和消散的重要线索和依据之一。受观测资料的限制,中尺度辐合线的分析主要依赖对实况风场的分析,当地面风具有明显的风向气旋性切变或明显的风速辐合时分析地面辐合线(图 3)。

1.4.2 物理量诊断分析

预报员对地面加密观测数据的主观分析技术,可快速定性诊断 MCS 发生、发展的边界层环境场

条件,但对于包括地面、高空各层环境场条件的垂直结构综合诊断分析,则需要依赖于快速分析同化更新数值模式输出的动力、热力和综合诊断物理量参数产品。这部分的分析方法在新版规范第一篇“中尺度对流天气环境场分析”中已有详细介绍,本文不再赘述。

1.5 强对流天气短临预报落区分析

“对流天气中尺度过程分析”的最终目的与落脚点,就是在短临时效内为强对流天气影响区域的短临预报预警业务进行指导。通过 1.2—1.4 节的分析,预报员可快速掌握当前对流系统的实况、结构特征以及中尺度环境场条件,并对强对流系统的发展阶段以及未来发展和移动传播潜势提前进行估计和判断。在此基础上辅助参考各类客观自动算法产品,最终分析确定强对流天气的临近预报落区。

在目前业务中,强对流天气的定点、定时和定性(分类)的预警预报还存在一定困难。在中尺度过程分析中,预报员需要对高分辨率的实况观测和模式融合资料进行连续关注和精细化分析,捕捉利于强对流系统生消发展的特征信息进行综合判断。对于强对流短临落区预报分析技术方面,可关注以下几个着眼点:

(1) 通过地面加密观测的要素分析,应重点关注低层(近地面)具备利于 MCS 新生、维持和加强的环境场条件区域,例如低层高湿、高能区以及水汽输送较强的区域等。当 MCS 进入这类不稳定层结构较强区域时,需要重点考虑对流系统发展和加强的

可能性;而进入稳定区域时,雷暴则趋于减弱或消亡。

(2) 边界层辐合线是对流天气中尺度过程短临业务中分析判断 MCS 生成、加强和消散的重要线索和依据之一。当 MCS 移动至边界层辐合线附近时,需重点关注其发展加强的可能性,而有多辐合线交汇的区域更容易形成强烈的对流活动;当 MCS 与边界层辐合线相互远离时,对流系统往往趋于减弱或消亡。

(3) 分类的强对流天气预报(短时强降水、冰雹、雷暴大风、龙卷)是当前短临预报的难点,在短临时效内借助雷达反射率资料分析 MCS 的三维结构特征是有效的技术方法(1.3 节)。总体上,当 MCS 中强回波质心高度较低且垂直累积液态含水量较高时,以发生短时强降水天气为主;除水汽条件非常差的情况(例如整层可降水量小于 10 mm),在造成冰雹、雷暴大风等强对流天气的对流系统中,往往也会伴随短时强降水天气;冰雹和雷暴大风更倾向于出现在强回波质心高度较高的对流系统中,若 MCS 中观测到明显的有界回波、悬垂结构或较强的中层径向辐合,需注意出现大冰雹或灾害性大风的可能性;对龙卷预报预警的难度较高,应重点关注超级单体对流风暴中是否存在接近地面的中气旋特征。

(4) 基于多源观测资料的客观算法产品,例如对流系统的客观识别、追踪和外推产品(图 4 和图 5),可在一定程度上辅助预报员判断 MCS 的发展移动趋势,以及短临落区的分析、预警和预报。但目前的客观自动分析技术普遍对于 MCS 的新生、消亡的客观分析能力有限,在实际业务中应重点根据预报员主观的实况分析结论对预报预警落区进行订正。

1.6 对流天气中尺度过程分析示例

图 3 为使用对流天气中尺度过程分析方法生成的对流天气中尺度过程分析综合图。地面自动站风场观测表明在广东西部的 MCS 附近存在明显的地面辐合线。边界层持续的风场辐合,也为 MCS 的维持和发展提供有利的水汽辐合及动力抬升条件。MCS 右侧前方存在另一条地面风场辐合线,其位置处于高能区域,具备较好的对流发展潜势,随着当前 MCS 相向发展移动,有可能导致 MCS 进一步加强,或在该辐合线附近触发出新的对流系统,必须进行紧密监测和关注。

对流有效位能(CAPE,红色实线表示)是表征中尺度环境场热力不稳定条件重要的诊断物理量之一,图 3 中 CAPE 分布显示,未来 3 h 内广东西部地区仍处于不稳定能量的高值区域,其中 CAPE 大于 $1600 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的大值中心区域位于当前 MCS 移动方向右前方,随着 MCS 向东偏南方向发展移动,其始终处于不稳定能量大值区域,有利于 MCS 的持续发展和加强。

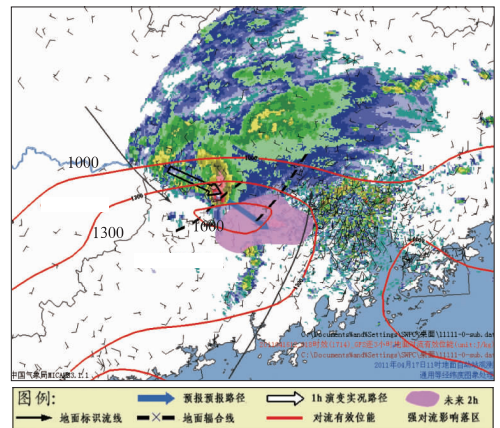


图 3 2011 年 4 月 17 日 11 时中尺度过程综合分析图

Fig. 3 Comprehensive analysis of mesoscale convective system at 11:00 BT 17 April 2011

综合考虑 MCS 进入广东珠三角平原地区有利于对流发展维持的地形因素,预计未来 0~2 h,当前的超级单体对流系统将向东偏南路径移动,强度维持或进一步加强,并可能为过境区域带来短时强降水、雷暴大风、大冰雹以及龙卷等强对流天气。同时 MCS 前侧可能触发新生对流系统,应密切关注。

2 强对流天气客观监测和分析支撑技术

对流天气中尺度过程分析和短临预报业务由于时间紧、任务急,方便快捷的多源观测资料客观产品能够在一定程度上为预报员判断 MCS 风暴环境以及 0~6 h 对流影响落区预报提供参考依据,从而有效地提高短临分析和预报的工作效率。因此,强对流天气的客观监测和分析支撑技术的发展是促进中尺度短临分析业务发展的重要方面。

基于多源观测资料的强对流监测和客观分析技术包括强对流天气监测和识别、雷达资料或静止卫

星资料的外推预报技术和 10 min 间隔的自动站资料快速客观分析技术。其中,应用较为广泛的算法包括自动站资料质量控制技术、强对流信息自动提取和统计技术、MCS 跟踪识别和外推技术、直角坐标交叉相关雷达回波追踪(CTREC)技术、强对流风

暴识别追踪分析和临近预报(TITAN)技术等(郑永光等,2013)。中国气象局开发的短时临近预报系统 SWAN 也是对流天气中尺度过程分析的重要工具。除了以郑永光等(2011)的客观分析诊断技术为基础生成的常规地面观测资料和探空资料诊断分析产品

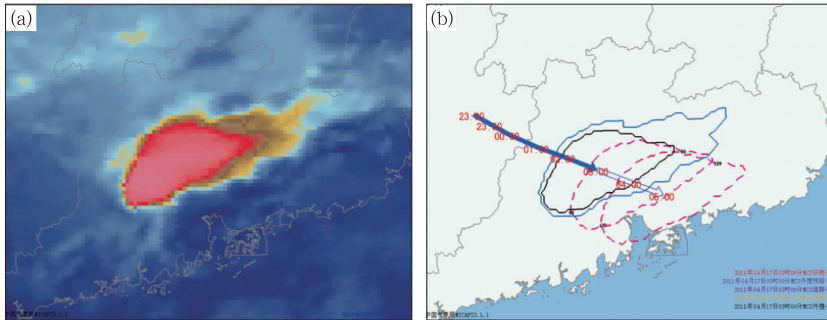


图 4 2011 年 4 月 17 日 11 时红外卫星云图(a),基于 -52°C TBB 识别的 MCS 追踪和外推预报产品(b)

(蓝色实心箭头:MCS 追踪路径,蓝色空心箭头:MCS 外推预报路径,蓝色实线:当前 TBB -32°C 边界,黑色实线:当前 TBB -52°C 边界,粉色虚线:MCS 1 h 和 2 h 的 TBB -52°C 外推预报边界)

Fig. 4 FY-2E infrared image (a) and MCS (TBB $\leq -52^{\circ}\text{C}$) identification, tracking and extrapolation forecast (b) at 11:00 BT 17 April 2011

[blue solid arrow: MCS track, blue hollow arrow: MCS extrapolation forecasting track, blue solid line: current TBB $\leq -32^{\circ}\text{C}$ boundary, black solid line: current TBB $\leq -52^{\circ}\text{C}$ boundary, pink dashed line: boundaries of 1 h and 2 h MCS (TBB $\leq -52^{\circ}\text{C}$) extrapolation prediction]

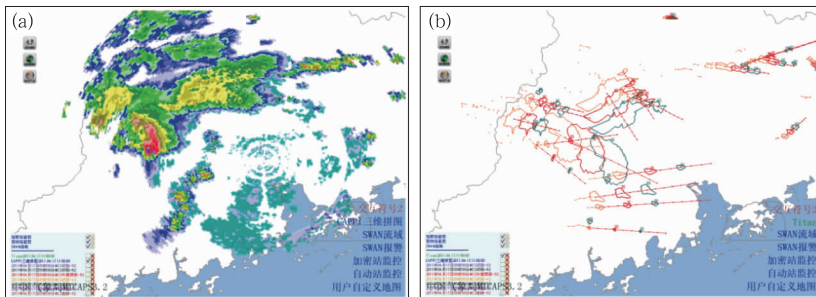


图 5 2011 年 4 月 17 日 11 时,雷达组合反射率回波(a), TITAN 追踪和外推产品(b)

(橙色实线:MCS (reflectivity ≥ 35 dBz) 过去路径,红色实线:MCS 外推预报路径,橙色闭合线:当前时刻 MCS 边界,红色闭合线:30 分钟的 MCS 外推预报边界,青色闭合线:60 分钟的 MCS 外推预报边界)

Fig. 5 Composite reflectivity diagram of Guangzhou Radar (a) and MCS identification, TITAN tracking and extrapolation forecast (b) at 11:00 BT 17 April 2011

[orange solid line: MCS (reflectivity ≥ 35 dBz) track; red solid line: MCS forecast track; orange closed line: current MCS boundary; red closed line: boundary of 30 min MCS extrapolation prediction; cyan closed line: boundary of 60 min MCS extrapolation prediction]

外,强天气预报中心建设的自动站资料快速客观分析技术主要针对华北区域的自动站资料,每10 min间隔分析一次,主要分析海平面气压、地面温度、露点和风场等物理量。在这里着重介绍两种在短临预报预警中运用比较广泛且具有代表性的客观预报方法,分别为MCS跟踪识别和外推技术(图4)和强对流风暴识别追踪分析和临近预报技术(图5)。

MCS跟踪识别和外推技术是指利用静止卫星红外云图中不同的TBB阈值(-32和-52℃等)识别不同强度MCS,监测MCS分布及其移动路径(郑永光等,2013)。其技术方法是:首先利用静止卫星IR1通道TBB资料识别MCS;然后利用面积重叠追踪算法追踪识别出的MCS,最终获得MCS的移速、移向和强度的演变趋势;可以通过更改识别阈值的方式,自动对不同强度的对流单体进行识别跟踪,并给出相对比较成功的趋势预报,该技术在没有雷达覆盖的区域也有相当的应用前景。

强对流风暴识别追踪分析和临近预报(TITAN)也是针对对流风暴的外推预报系统(Dixon et al,1993)。TITAN定义回波强度在35 dBz以上体积超过50 km³为一个对流风暴,对流风暴特征除质心坐标外,还有体积和投影面积,其特色是用一个椭圆或者多边形拟合其水平投影。风暴跟踪采用了数学中的最优化方法,并考虑了对流风暴的合并和分裂,其预报分为路径预报和对流风暴单体区域大小的预报,均采用了加权线性外推的方法。目前改进的TITAN算法(韩雷等,2007;郑永光等,2013)已在中国气象局开发的短时临近预报系统(SWAN)中进行了集成,是短临预报业务的常用技术之一,也是国家级强对流风暴监测的重要技术支撑。

对流天气中尺度过程分析客观支撑技术和产品,可为强对流短临分析业务提供重要的参考,但也存在一些局限性,例如对流系统的识别、追踪和外推技术对于雷暴的新生以及消亡的客观分析能力有限,外推分析技术只有在MCS处于较强的天气尺度强迫的情况下,才能得出可信度较高的预报结果(俞小鼎,2013;郑永光等,2013)。这些问题的解决需要进一步发展强对流天气监测、分析技术和临近预报方法。

3 结论和讨论

中尺度强对流天气预报,特别是短临时效内的

预报预警是发展精细化天气预报业务的难点之一。在我国目前的天气业务中,中尺度对流天气的分析预报能力仍有很大不足,其中一个重要的原因是缺乏针对短临时效内强对流天气系统的有效分析技术和规范。本文介绍了2011年以来国家气象中心强天气预报中心发展的对流天气中尺度过程分析规范和技术,得到以下结论:

(1) 利用高时空分辨率的非常规观测资料和强对流天气的自动提取技术,在短临时效内快速掌握强对流天气及其对流系统实况是中尺度过程分析的基础。

(2) 利用雷达体扫资料、高分辨率卫星云图和闪电定位资料等非常规观测资料,识别和分析对产生分类强对流天气具有指示或预警意义的MCS雷达回波结构特征,是预报员快速掌握对流系统类型和强度以及判断对流系统未来发展演变趋势的关键。

(3) 中尺度地面环境场分析包括判断边界层环境场的不稳定能量分布、边界层辐合线等信息,以及利用快速更新数值模式的动力、热力和综合诊断物理量参数产品,对地面及高空的中尺度环境条件进行定量综合诊断分析。

(4) 使用强对流系统自动识别、跟踪和外推产品能够为预报员在短时间内获取对流系统发展信息、构建预报思路、制作预报产品提供有力支撑。

2011年以来,强天气预报中心开展了对流天气中尺度过程分析业务试验,取得了较好的效果。对流天气中尺度过程分析技术和规范的应用时间还不长,为更好地满足短临预报预警的需要,在分类强对流天气的实况监测和自动追踪识别、特征物理量诊断的阈值区间、对流系统初生和消亡的识别和分析技术等诸多方面,仍有待继续发展和完善。

参考文献

- 湛芸,孙军,徐璐,等. 2012. 北京721特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考. 气象,38(10):1255-1266.
- 方翀,毛冬艳,张小雯,等. 2012. 2012年7月21日北京地区特大暴雨中尺度对流条件和特征初步分析. 气象,38(10):1278-1287.
- 冯桂力,鄒秀书,袁铁,等. 2006. 一次冷涡天气系统中雹暴过程的地闪特征分析. 气象学报,64(2):211-220.
- 韩雷,郑永光,王洪庆,等. 2007. 基于数学形态学的三维风暴体自动识别方法研究. 气象学报,65(5):805-814.
- 李建华,郭学良,肖稳安. 2006. 北京强雷暴的地闪活动与雷达回波和降水的关系. 南京气象学院学报,29(2):228-234.
- 陆汉城. 2004. 中尺度气象学原理和预报. 北京:气象出版社.

- 孙继松,王华,王令,等. 2006. 城市边界层过程在北京 2004 年 7 月 10 日局地暴雨过程中的作用. *大气科学*, 30(2):221-234.
- 杨波,孙继松,魏东. 2010. 北京奥运会开幕式期间的中尺度天气系统研究. *应用气象学报*, 21(2):164-170.
- 俞小鼎. 2012. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨成因分析. *气象*, 38: 1313-1329.
- 俞小鼎,姚秀萍,熊庭南,等. 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京:气象出版社.
- 俞小鼎,周小刚,王秀明. 2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进步. *气象学报*, 70(3):311-337.
- 俞樟孝,吴仁广,翟国庆,等. 1985. 浙江冰雹天气与边界层辐合的关系. *大气科学*, 9(3):268-275.
- 张涛,方翀,朱文剑,等. 2012. 2011 年 4 月 17 日广东强对流天气过程分析. *气象*, 38(7):814-818.
- 张小玲,谌芸,张涛. 2012. 对流天气预报中的环境场条件分析. *气象学报*, 70(4):642-654.
- 张小玲,张涛,刘鑫华,等. 2010. 中尺度天气的高空地面综合图分析. *气象*, 36(7):143-150.
- 郑永光,陈炯,沃伟峰,等. 2011. 改进的客观分析诊断图形软件. *气象*, 37(6):735-741.
- 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. *气象*, 39(2):234-240.
- 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. *气象*, 36(7):33-42.
- Dixon M, Wiener G. 1993. TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis and nowcasting-A radar-based methodology. *J Atmos Oceanic Technol*, 10(6):785-797.
- Johns R H, Doswell III C A. 1992. Severe local storms forecasting. *Wea Forecasting*, 7:588-612.
- Moller A R. 2001. Severe local storms forecasting. *Meteor Monogr. Amer Meteor Soc*, Boston, 50:433-480.
- Schmocker G. 1996. Forecasting the initial onset of damaging down burst winds associated with a mesoscale convective system (MCS) using the midaltitude radial convergence (MARC) signature. Preprints, 15th conf on Weather Analysis and forecasting. Norfolk, VA, Amer Meteor Soc, 306-311.
- Trapp R J, Stumpf G J, Manross K L. 2005. A reassessment of the percentage of tornadic mesocyclones. *Wea Forecasting*, 20: 680-687.
- Wilson J W, Schreiber W E. 1986. Initiation of convective storms by radar observed boundary layer convergent lines. *Mon Wea Rev*, 114, 2516-2536.