

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.

doi:10.11898/1001-7313.20150601

强对流天气监测预报预警技术进展

郑永光* 周康辉 盛杰 林隐静 田付友 唐文苑 蓝渝 朱文剑

(国家气象中心,北京 100081)

摘 要

强对流天气预报业务包括监测、分析、预报、预警和检验等方面。对流初生识别、对流系统强度识别和对流天气类型识别等监测技术取得新进展,综合多源资料的监测技术已应用于中国气象局中央气象台业务。对流系统的触发、发展和维持机制等获得了新认识,我国不同类型强对流天气及其环境条件统计气候特征、分析规范及相应业务产品等为业务预报提供了必要基础和技术支撑。光流法、多尺度追踪技术以及应用模糊逻辑方法的临近预报技术等有明显进展,融合短时预报技术得到广泛应用,对流可分辨高分辨率数值(集合)预报及其后处理产品预报试验取得了显著成效,基于数值(集合)预报应用模糊逻辑方法的分类强对流天气短期预报技术为业务预报提供了技术支撑。强对流天气综合监测和多尺度自适应临近预报技术、多尺度分析技术以及融合短时预报技术、发展并应用模糊逻辑等方法的、基于高分辨率数值(集合)模式的区分不同强度等级和极端性的分类强对流天气精细化(概率)预报技术等是未来发展的主要方向。

关键词: 强对流; 监测; 高分辨率数值预报; 概率

引 言

气象学中,对流指的是大气中由浮力产生的垂直运动所导致的热力输送,强对流天气通常指的是由深厚湿对流(DMC)产生的包括冰雹、大风、龙卷、强降水等的各种灾害性天气^[1],具有突发性、生命史短、局地性强、易致灾等特点。对流天气通常伴随雷电活动,但部分对流天气系统并没有雷电活动,因此,Doswell 建议使用 DMC 替代雷暴这个经常用来指代对流活动的术语^[1-2]。

目前国际上对强对流天气的定义尚没有统一标准。中国气象局中央气象台定义的强对流天气指的是出现直径 5 mm 及以上的冰雹、任何级别的龙卷、17 m/s(或者 8 级)及以上的雷暴大风或 20 mm/h 及以上的短时强降水等任意一种或几种天气。美国风暴预报中心(SPC)定义的强对流天气则指的是出现直径 25 mm 及以上的冰雹(以前定义中直径为

19 mm 及以上)、26 m/s 及以上的雷暴大风或任何级别的龙卷等任意一种或几种天气;而直径 51 mm 及以上的冰雹、EF2 级及以上龙卷或 33 m/s 及以上的雷暴大风等一种或几种天气则定义为重大强对流天气。

我国目前还没有重大强对流天气的定义标准,而美国 SPC 并未将短时强降水(或对流性暴雨)定义为强对流天气。但 Doswell^[1]将达到或超过 20~25 mm/h(没有严格标准)的强降水归类为强对流天气,并将达到或超过 50 mm/h 的强降水归类为极端强对流天气^[1,3];短时强降水天气与易于致灾的暴洪关系密切。气候统计得到的我国短时强降水发生频率^[4]也表明,达到或超过 50 mm/h 的强降水是发生频率非常低的极端天气。

气候统计是强对流天气预报的必要基础性工作之一。美国强对流天气气候统计开展早且比较完整,不仅给出了雷暴、闪电、中尺度对流复合体等的气候特征,还给出了比较完整的不同强度冰雹、龙

2015-08-11 收到,2015-09-06 收到再改稿。

资助项目:国家重点基础研究发展计划(2013CB430106),国家自然科学基金项目(41375051),公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406002)

* email: zhengyg@cma.gov.cn

卷、雷暴大风、小时降水量不小于 25 mm 等强对流天气的气候特征^[1,5]。我国的雷暴、冰雹气候特征统计工作开展较早且较完整,最近也利用 1981—2010 年资料给出了较为完整的雷暴、短时强降水、冰雹、雷暴大风、龙卷等的气候特征^[4,6-7];我国的闪电分布气候特征也分别由卫星观测和地基闪电定位资料获得^[8-9];基于静止卫星资料、雷达资料的我国中尺度对流系统(MCS)、对流风暴、飑线等分布的气候特征也有较多研究^[10-16]。强对流天气是小概率事件,重大或极端性强对流天气的发生概率更低,因此,非常有必要进一步分析完善我国不同等级的强对流天气和基于非常规观测资料的对流活动及其环境条件分布的气候特征,为不同强度和极端强对流天气预报预警提供气候基础信息。

强对流天气预报工作包括监测、分析、预报和预警几个方面。观测为强对流天气和系统结构特征、发展规律、气候特征分析和预报预警提供数据基础;监测则基于观测数据对强对流天气现象发生、发展变化及其相关天气条件进行识别和监视,而分析是在观测和监测数据基础上进行预警、预报的必要手段和过程。一般来讲,短期预报是 0~3 d 的天气预报,短时预报是指 0~12 h 的天气预报。世界气象组织(WMO)2005 年定义的临近预报(或称为甚短时预报)为 0~6 h 的天气预报,现已得到了广泛认可^[3,17-18];不过我国预报业务通常将 0~2 h 的天气预报称为临近预报^[3],因此,本文仍将 0~2 h 的预报称为临近预报,2~12 h 称为短时预报。不同尺度天气系统可预报性不同,因此,不同时效的强对流天气预报关注点不同,使用的技术方法也不同。

美国 SPC 已建立了时间尺度从几小时警戒到 8 d 强对流展望的完整业务产品体系。我国国家级专业化强对流天气预报业务始于 2009 年,已开发建设了基于多源资料的分类强对流天气实况监测系统、中尺度天气分析规范和系统平台、分类客观预报系统等,并发布分类强对流天气预报产品^[19-22]。但强对流天气预报,尤其分类强对流天气及其强度的短时预报在当前和可预见的未来仍然是业务天气预报的难点之一。本文在总结强对流天气监测、分析、预报和预警技术进展基础上给出未来工作展望,以期能够对强对流天气预报技术的发展提供参考。

1 强对流天气监测技术

强对流天气监测既包括天气实况的监测,也包

括强对流天气系统的监测,其依赖的观测资料主要包括常规观测、重要天气报告、灾情直报、自动气象站观测、闪电观测、卫星观测和雷达观测等。地球静止气象卫星资料具有很高的时间分辨率和地理分布稳定性,因此,较极轨卫星气象星资料更常用于强对流天气监测。

1.1 强对流天气现象监测

不同观测资料具有不同特点,基于这些资料,中国气象局国家气象中心建设了应用于实际业务的国家级强对流天气综合监测系统^[19-20]。该系统不仅监测不同类型强对流天气现象实况,还监测闪电密度、不同强度 MCS 和对流风暴的识别和追踪等,并进行必要的质量控制。

常规地面观测虽能够给出较可靠的观测结果,但时空分辨率低。重要天气报告虽能够弥补常规观测时间分辨率不足的问题,但空间分辨率依然有限。自动气象站观测能够给出连续的雨量、大风等监测,但缺乏可靠的天气现象观测。自动气象站小时雨量观测能够监测短时强降水天气,而分钟雨量监测能够更进一步提供和反映不同性质的 MCS 特征,如飑线、梅雨锋对流、热带对流系统等^[23]。

目前我国的地闪定位系统能够提供连续的高时空分辨率的地闪监测,但其不足是尚未对我国大陆区域实现完全覆盖,对海洋区域的覆盖面积仅为近海区域,范围有限;同时目前还不能监测对流系统中发生更为频繁和具有提前指示对流发展的云闪信息。将于 2016 年底前后发射的我国 FY-4 号气象卫星的闪电成像仪将能够提供覆盖我国及周边区域的高时空分辨率的闪电监测资料,能够与地闪监测互相补充,将极大提高我国的闪电监测能力。美国 GOES-R 卫星将在 2016 年发射,也将搭载闪电定位仪 GLM(geostationary lightning mapper)。

由于时空分辨率高和较好的三维空间覆盖性,多普勒天气雷达资料不仅用于定量降水估测,也是目前强对流风暴和天气(尤其是冰雹、雷暴大风和龙卷)监测及临近预警的最重要资料。如强冰雹的雷达反射率因子特征是悬垂强回波,中层径向速度辐合和弓形回波是指示雷暴大风天气的重要雷达观测特征等^[1,3]。基于多普勒天气雷达资料中的这些特征,强冰雹、中气旋、龙卷涡旋特征等的识别算法逐步得到了发展和完善^[24]。最近李国翠等^[25-26]和张秉祥等^[27]基于雷达三维组网数据利用模糊逻辑方法分别开发了雷暴大风和冰雹的自动识别算法;

Rossi 等^[28]使用芬兰闪电和雷达资料利用模糊逻辑方法将追踪的对流风暴强度划分为弱、中、强和剧烈 4 类;胡胜等^[29]统计了广东大冰雹风暴单体的多普勒天气雷达特征。

双偏振多普勒天气雷达观测资料能够提高降水粒子形态的识别能力^[30-31],以有效提高定量降水估测精度和冰雹的识别率,如判断冰雹在落地之前是否完全融化还是部分融化^[32]等。美国、法国等已完成多普勒天气雷达业务网的双偏振改造升级。

1.2 强对流天气系统监测

闪电是对流活动的一种反映,因此,其与对流性强降水、冰雹和雷暴大风等强对流天气关系密切,如郑栋等^[33]发现北京地区的闪电(包括地闪和云闪)活动与对流活动区降水量的相关系数达到 0.826,冰雹、雷暴大风天气过程中通常伴有较高比例的正地闪活动^[34];在对流系统快速发展阶段,闪电频数还存在明显的跃增现象^[35],Schultz 等^[36]发展完善了一个闪电跃增算法监测和识别是普通对流还是强对流。

美国已发展了全国范围三维雷达反射率因子拼图及降水估测系统^[37],其 WDSS-II 系统可提供美国大陆整个区域的冰雹识别、风暴追踪和降水估测等产品的拼图^[38]。法国发展了全国范围的低层三维风场和反射率因子、水平风切变识别和拼图技术^[39-40];目前我国还缺乏类似美国和法国这些产品的全国拼图业务系统和产品。

我国 FY-4 号气象卫星、美国 GOES-R 卫星、欧洲 MTG 卫星通道数将增加到 15 个左右,能够实现分钟级的快速扫描,时空分辨率大幅提高,不仅能够监测大气中的云系和 MCS 信息,还能够获取晴空大气温湿廓线以监测对流的发生条件。通过这些监测资料不仅可以识别、追踪 MCS,还可以分析对流活动不同发展阶段的特征:对流发生前的大气稳定度状态^[41];对流初生(CI)阶段的积云对流状态^[42-43];对流成熟阶段的纹理特征、上冲云顶特征和微物理特征等^[44]。Wisconsin 大学发展了结合卫星观测的云顶冷却率和光学厚度的 CI 识别算法,可以提前于雷达观测获得对流风暴信息^[45-47];Merk 等^[48]综合了 SATCAST(Satellite Convection Analysis and Tracking)的 5 个红外通道识别标准和 Cb-TRAM (Thunderstorm-Cb-Tracking an Monitoring)^[49]中的高分辨率可见光通道标准并使用光流法获取时间变化特征等改进 CI 识别算法;关于 CI

的最近研究进展可参见文献[50]。Mecikalski 等^[51]还定量讨论了高层卷云对对流云观测的影响,Senf 等^[52]使用 MSG 卫星资料分析了对流风暴的云顶亮温、云顶冷却率和云顶粒子尺度的演变特征以及与垂直运动的关系。使用多通道的观测资料还可以识别 MCS 的其他云顶特征,如上冲云顶特征等^[53-55]。美国 GOES-R 卫星资料试验场及其试验产品的概况可参见 Goodman 等^[56]、Ralph 等^[57]和郑永光等^[58]研究成果。

风廓线雷达、GPS(Global Positioning System, 全球定位系统)水汽反演和微波辐射计等能够分别提供高时间分辨率的晴空大气垂直风廓线、大气可降水量、温湿廓线等资料,这些资料虽然难以直接监测强对流系统和天气,但可监测强对流天气发生发展的前期条件,已在强对流天气分析预报中初步展示出了重要作用^[59-60]。但我国风廓线雷达和微波辐射计等观测尚未形成全国性的业务化网络。

2 强对流天气机理和分析技术

强对流天气分析的物理基础是强对流天气发生发展的物理机理。强对流天气分析在天气形势分析基础上应用配料法进行分析,是对强对流天气的物理条件和结构特征进行分析,包括天气尺度环境条件和中尺度机理、配置与结构分析等。Johns 等^[61]、Doswell^[1]、俞小鼎等^[3]系统总结了 DMC 和不同类型强对流天气(冰雹、雷暴大风、短时强降水和龙卷)发生发展的环境条件、中尺度结构和特征,这些条件和结构特征是目前进行强对流天气预报的物理基础,其中,基于雷达和卫星资料等的强对流天气系统中尺度结构和特征也是强对流天气监测的重要内容。

2.1 强对流天气机理

强对流天气系统的中小尺度结构和发展机理研究仍是当前强对流天气研究中的难点问题,尤其是触发和发展加强机制以及小尺度的结构特征仍有待进一步研究。边界层辐合线(锋面、阵风锋、干线、海陆风辐合线等)、地形和海陆分布(山脉抬升、上坡风等)、重力波^[3,62]等是对流活动的重要触发机制。最近研究也表明,对流系统消散后残留的边界层冷池^[63]、下垫面摩擦作用产生的水平涡度^[16,64-65]等对对流系统的发展起了重要的触发和维持作用。需要说明的是,由海陆分布或地形分布导致的边界层辐合线(如海风锋)通常比较浅薄,需要与大尺度的上

升运动或大气低层垂直风切变或适当的大气热力条件相配合才能有利于对流系统的发展和维持。Wilson等^[66]发现,当大气边界层的风向与辐合线移动方向相反,而边界层以上的风向与辐合线移动方向相同,则对流易于垂直向上发展,有利于其加强和维持。Chen等^[16]发现存在向岸低空急流时,沿珠江三角洲海岸线的海陆摩擦差异可明显增加沿岸的对流发生频率,这样的对流高频带在多年的小时强降水资料统计上也有明显反映^[4]。

高架雷暴或高架对流是由边界层以上空气抬升触发的对流。美国20世纪90年代以来对其已有较多研究,如Corfidi等^[67]、Wilson等^[68]、Horgan等^[69]。近年来我国也有一些关于高架雷暴的研究,如许爱华等^[70]、盛杰等^[71]、张一平等^[72]。盛杰等^[71]的结果表明,我国高架雷暴伴随较多的强对流天气是冰雹和短时强降水天气。Wilson等^[68]发现2002年美国IHOP试验期间高架雷暴大多由600~900 hPa的辐合和汇流触发;盛杰等^[71]给出的我国高架雷暴生成条件是850 hPa和700 hPa的相对湿度超过70%及850 hPa切变线、700 hPa不低于18 m/s的急流、500 hPa西风槽、700 hPa与500 hPa温差超过16℃等。

短时强降水天气可以由大陆型对流或热带型对流产生,这两种不同的对流产生的雨强有很大差异。热带型对流是高降水效率的系统,其雷达回波强度为45~50 dBZ左右,但雨强可达80 mm/h以上,极易导致灾害。需要注意的是,热带型对流不仅发生在热带海洋,只要发生对流的环境条件达到或接近热带海洋大气条件就可能发生。据统计,大气中可降水量达到60 mm,则接近20 mm/h以上短时强降水天气发生的充分条件;达到70 mm,则是目前大气环境中非常极端的水汽条件^[73],这时大气非常暖湿,极易发生热带型对流性强降水,如2007年7月18日济南极端强降水^[3]和2012年7月21日北京和河北极端强降水。

绝大多数雷暴大风是由对流系统内强烈下沉气流(下击暴流)所导致^[61]。需要说明的是,对流系统内强烈下沉气流的产生机制较复杂,通常对流层中层或以上有明显干层、对流层中下层大气较大温度递减率的环境条件下易于导致强下沉气流;但高原地区低层大气存在干层时($T-\ln P$ 图上呈倒V形的温湿廓线)的对流活动也能够导致强下沉气流^[61],有时甚至会产生干下击暴流;在对流层大气较湿的

情况下,强降水的拖曳和蒸发作用也会导致强下沉气流(湿下击暴流),加以动量下传作用,是强降水时常伴随大风的直接原因。由于产生大冰雹的环境条件要求有较大的对流有效位能与合适的零度层高度,因此,要求环境大气有较大的温度递减率,这既有利于强上升气流,也有利于强下沉气流。此外,云中冰相粒子尤其是雪片粒子^[74-75]在下落过程中融化、升华吸收环境大气大量热量也非常有利于加强下沉气流,这些因素是大冰雹天气通常伴随大风天气的重要原因,且这类大风通常强于强降水所伴随的大风。

龙卷是诸多强对流天气现象中突发性相对更强、生命史相对更短、预报预警难度更大的一种强对流天气现象。龙卷通常分为两类:超级单体龙卷和非超级单体龙卷^[76]。Agee等^[77-78]进一步将龙卷分为超级单体龙卷、线状对流龙卷和其他类型龙卷3类。通常超级单体龙卷强度较强^[77],但仅有约25%的超级单体能够产生龙卷^[1];非超级单体龙卷通常由辐合线上的中小尺度涡旋和快速发展对流风暴中的强上升气流共同作用形成^[76];与下击暴流相联系的弓形回波会生成中小尺度的中涡旋(mesovortices)^[79],也能够发展为强度达F4或者EF4级的气旋式或反气旋式龙卷^[77]。目前仅对超级单体龙卷有可能进行有效预警^[3]。F2级及以上超级单体龙卷要求有利于超级单体风暴的环境条件是一定的对流有效位能和强的0~6 km垂直风切变,还包括低的抬升凝结高度和较大的低层(0~1 km)垂直风切变^[80]。王秀明等^[81]给出的我国东北龙卷发生环境条件与此存在差异,主要是湿层高度偏低。对于非超级单体龙卷,重点关注边界层辐合线上是否有利于小尺度涡旋发展的条件,包括强水平风切变、波动状弯曲、两个边界的碰撞点和快速发展的对流风暴的低层环流场^[76]以及弓形回波附近的 γ 中尺度涡旋^[79]等区域。

中纬度飏线系统常导致大范围冰雹、雷暴大风天气,是当前强对流天气业务预报中的关注重点,且相关研究较多,但其维持机理尚未完全清楚。Rotunno等^[82]和Weisman等^[83]通过云模式的理想数值模拟试验和对已有观测研究的再分析,认为近地面冷池和低层环境垂直风切变相互作用是飏线发展、维持的动力和热动力机制,提出了描述飏线发展传播的RKW(Rotunno-Klemp-Weisman)理论。Wilson等^[68]分析发现,2002年美国IHOP(Interna-

tional H2O Project) 试验期间对流系统冷池导致的阵风锋是影响对流系统演变的主要机制, Corfidi^[84] 提出相对于阵风锋的气流是决定对流系统传播的决定性因素之一。使用 RKW 理论分析华北一次飑线发展过程中低层垂直风切变和冷池的相互作用机理^[85] 表明, 低层 0~3 km 风切变对飑线的发展维持最为重要。也有研究^[86-87] 表明, RKW 理论提出的冷池和垂直风切变相互作用是超级单体维持的重要因素。RKW 理论也受到较多争议, 主要原因是较多强雷暴大风个例显示, 环境垂直风切变明显弱于 RKW 理论的最优条件^[2]。Coniglio 等^[88] 对一次飑线分析表明, 该个例垂直风切变较 0~3 km 垂直风切变更重要。

2.2 强对流天气分析技术

美国在 20 世纪 70—80 年代给出了强对流天气的天气尺度和风暴尺度分析技术。中国气象局国家气象中心 2010 年制定了《中尺度天气分析技术规范》并向全国推广, 该规范以配料法的思路指导强对流天气分析, 但内容按照不同的等压面组织。2013 年向全国推广的新版《中尺度天气分析技术规范》完全按照配料法的思路组织雷暴和不同类型强对流天气的分析技术, 并简化了地面和高空分析, 增加了探空 T - $\ln P$ 图分析、基于非常规资料和中尺度数值预报的中尺度系统、结构和发生条件分析等, 具体参见文献^[21, 22]。需要说明的是, 《中尺度天气分析技术规范》指的是针对中尺度天气进行分析的技术规范, 目前该规范中的中尺度天气指强对流天气。

基于该分析技术规范, 中国气象局国家气象中心开展了强对流天气的人工分析业务, 开发了相应的探空和数值预报(包括 T639 全球模式和 GRAPES_MESO 区域模式等) 客观分析诊断技术和基于网络的业务支撑系统, 配置了分类强对流天气环境条件的综合分析图; 也发展了针对重点区域、重点时段的基于快速分析预报资料和多源观测资料的中尺度滚动分析技术和业务产品。美国的 HWT(灾害天气试验平台) 正在探索如何将对流可分辨的高分辨率数值模式预报产品(水平分辨率达 4 km 或更高) 应用于强对流预报业务中^[58, 89]; 中国气象局国家气象中心在 2014 年暖季试验中, 初步试验了南京大学 4 km 分辨率的 WRF 和中国气象局数值预报中心 3 km GRAPES_CR 相关预报产品; 漆梁波^[90] 则基于一次冰雹个例, 探索如何使用对流可分

辨的高分辨率数值模式预报产品分析强对流天气。

3 强对流天气预报预警和检验技术

3.1 临近预报技术

目前不同国家和地区已经开发了多个对流风暴和降水短时临近预报系统, 如美国的 ANC(AutoNowcaster)^[91] 和 CoSPA(Consolidated Storm Prediction for Aviation)^[92]、澳大利亚与英国共同开发的 STEPS(Short-Term Ensemble Prediction System)^[93-94]、加拿大的 MAPLE、奥地利的 INCA^[95]、瑞士的 COALITION^[96]、香港的 SWIRL 和 SWIRL-II^[97]、北京气象局发展的 BJ-ANC 系统^[98]、中国气象科学研究所的雷电临近预警系统^[99]、中国气象局的 SWAN、广东的 GRAPES-SWIFT、湖北的 MYNOS^[100] 等(还可参见文献^[3, 19, 101-102])。

对流风暴和降水的 0~2 h 临近预报技术主要包括外推预报、经验预报(或称为专家预报, 如美国 ANC 系统^[91]、瑞士的 COALITION 系统^[96])、统计预报^[93, 103-104]、概率预报^[102, 105-110] 等方法。Wilson 等^[17] 认为 2020 年前 0~2 h 临近预报技术仍主要为外推预报和经验预报。

基于天气雷达或静止卫星资料的外推技术可分为基于区域的外推预报方法和基于对象的外推预报方法。基于区域的外推预报方法的代表是 TREC^[111] 和光流法^[112-114], 基于对象的外推预报技术的代表性方法是 SCIT^[115-116] 和 TITAN^[117-118] 等。

RDT(rapid developing thunderstorms)^[119]、Cb-TRAM^[49] 等是基于静止卫星资料的类似 SCIT 的对流系统识别、追踪和外推预报技术; Hering 等^[116] 在 RDT 技术基础上发展了基于雷达资料的 TRT 临近预报技术。由于静止卫星能够观测积云, 因此, 静止卫星在识别和临近预报 CI 方面较目前的业务多普勒天气雷达具有优势。Walker 等^[120] 基于卫星资料和大气运动矢量发展了基于对象的 0~2 h CI 外推预报技术; Mecikalski 等^[110] 联合使用卫星资料和快速更新 RAP 模式资料发展了 0~1 h CI 概率预报技术。

基于闪电数据的雷暴识别、追踪与外推预报算法也已有较多工作^[99, 121-123]。Bonelli 等^[121]、吕伟涛等^[99] 分别使用了闪电与雷达数据实现半小时或更长时间的外推预报; 周康辉等^① 仅基于地闪数据, 利用密度极大值快速搜索聚类算法实现了雷暴的识别、追踪与外推预报。

①周康辉, 郑永光, 蓝渝, 等. 基于闪电数据的雷暴识别、追踪与外推预报方法. 应用气象学报, 2016, 待发表.

光流法是计算机视觉图形学中获取两幅图像间场位移的一种传统的重要方法,其移动矢量一直是计算机视觉研究中的一个热点问题;最近已应用于对流风暴和降水临近预报技术中获取移动矢量,如香港的 SWIRL 系统中的 ROVER(Real-time Optical flow by Variational methods for Echoes of Radar)技术^[113]。Ruzanski 等^[124]发展的基于区域的外推预报方法应用空间核函数方法估计雷达反射率因子的平流矢量,其估计的矢量类似于光流法得到的平流矢量。除了对 TREC 矢量使用质量守恒约束并用变分法获得移动矢量外^[111,125-126],CoSPA^[92]追踪 3 种尺度(单体尺度、多单体尺度、天气尺度)天气系统的移动矢量;Wang 等^[127]使用多尺度追踪方法获取了不同尺度的 TREC 矢量并得到 1 个综合平流矢量;也有研究将 TREC 矢量同数值预报的对流风暴引导层风矢量相融合获取平流矢量^[111]。

不同尺度天气系统的可预报性不同、外推预报时效不同^[93,128],这是外推临近预报需要考虑的重要方面。Germann 等^[111]、Radhakrishna 等^[129]、Surcel 等^[130]基于雷达资料具体分析不同尺度降水系统的外推可预报性;Germann 等^[111]给出了不同降水强度天气系统外推预报的技巧评分,展示了不同尺度降水系统的不同外推可预报性;Radhakrishna 等^[129]发现对于 250 km 以上尺度的降水系统外推预报时效可达 2 h 左右;Surcel 等^[130]分析得到了 MAPLE 系统对 β 中尺度降水系统的外推预报时效也大约为 2 h。

不同尺度天气系统的外推可预报性不同是因为外推预报技术不能够预报系统生消。基于卫星资料的 CI 临近预报能够进一步提高对流风暴的临近预报时效。COALITION^[96]是一个专家预报系统,它利用雷达、卫星、数值预报等多源资料以及闪电气候特征、地形等因素并采用类似模糊逻辑的方法给出不同预报方法的权重和阈值,综合给出未来 60 min 雷暴临近预报,其中,包含基于卫星资料的 CI 预报技术;美国 ANC 系统中使用边界层辐合线和模糊逻辑技术综合天气系统的生消等因素使其临近预报时效达 2 h^[17,68,91];美国 CWF(Convective Weather Forecast)临近预报算法^[131]综合应用卫星、雷达、地面观测和数值预报资料识别和追踪对流天气系统的初生、发展和消亡等,其预报时效可达 2 h。

目前同化了雷达资料的对流尺度高分辨率数值(集合)模式水平分辨率为 1~4 km,称为对流可分辨(convection allowing)模式,具有预报对流系统生消的一定能力,在对流风暴和降水临近预报中已得到较广泛关注^[18,130,132-133]。Weisman 等^[134]指出,尽管无法描述对流尺度(格距 1 km 以下)的细节,采用 4 km 分辨率和无对流参数化方案的模式能很好地描述与中纬度飏线系统相联系的中尺度对流结构;其主要原因是 4 km 分辨率模式数据已能够较好地刻画出对飏线系统发展非常重要的冷池强度和大小。

需要说明的是,由于资料传输和准备、计算时效等原因,目前及可预见的未来几年内 0~1 h 时效高分辨率数值预报在实际业务中的可用性较低。Migliorini 等^[133]评估发现 1.5 km 水平分辨率的英国气象局统一模式(Unified Model, UM)集合预报系统还不能改进 1 h 时效的降水预报技巧。但 Stensrud 等^[132]预计同化了雷达等高时空分辨率观测资料的对流尺度 Warn-on-Forecast(基于数值预报的预警)数值预报系统在 2020 年左右将能够提供 90 min 预报时效的强对流预警信息。

由于临近预报具有一定的不确定性,因此,概率预报技术也在临近预报中得到了较为广泛的应用。如加拿大 MAPLE 系统基于外推预报和任一点邻域空间分布的分级降水临近概率预报技术^[105],Megenhardt 等^[106]、Kober 等^[108]也使用了这一临近概率预报技术;美国 NOAA 基于雷达、闪电、卫星、降水、NAM(北美中尺度模式)数值预报等资料使用统计回归方法发展了 0~3 h 累积定量降水临近概率预报技术^[107];Mecikalski 等^[110]使用 Logistic 回归和人工智能 Random Forest(随机森林)等方法发展了基于卫星资料和数值模式资料的 CI 临近概率预报技术。

总体来看,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。如前所述,基于自动气象站、天气和风廓线雷达等观测资料和高分辨率数值预报资料,应用不同类型强对流天气发生发展环境条件和中尺

度机理的对流天气分析和预报产品,可在临近预报技术和业务中发挥重要作用^[3,19,58,90]。

3.2 短时预报技术

由于外推预报时效仅为 1~2 h,强对流天气的短时预报更多依赖于快速更新的数值模式系统或高时空分辨率中尺度数值模式集合预报系统。快速更新高时空分辨率中尺度数值模式,如美国的 HRRR 和 RAP、英国的 UM、法国的 AROME (Application of Research to Operations at Mesoscale Model)、德国的 COSMO-DE (德国气象局小尺度模式联合体)、我国的 BJ_RUC 和 GRAPES_RAFS 等^[3,19,90,135]。高分辨率中尺度数值模式集合预报系统,如美国 CAPS 的风暴尺度集合预报 SSEF (Storm Scale Ensemble Forecast System)、美国 SPC 的 SSEO (Storm-Scale Ensemble of Opportunity)、英国的 UM 集合预报系统等。美国 CAPS SSEF 采用不同的初始场扰动和物理方案扰动,水平格距为 4 km,对超级单体、飑线等具有一定的可预报性;美国 SPC 的 SSEO 是 7 个成员的水平分辨率 1 km 对流可分辨数值模式预报组成的集合预报。

目前,客观降水短时预报技术的主要思路是将外推预报和高分辨率数值预报结果相融合^[3,17,128];1~3 h 预报需要融合雷达外推和数值预报,3~6 h 预报以数值预报为主^[3],而 6~12 h 几乎完全依赖于数值预报或利用统计等后处理手段对其订正和释用。英国的 NIMROD (Nowcasting and Initialization for Modeling Using Regional Observation Data System) 系统^[136]是最先应用融合预报技术的短时临近预报系统。

目前针对雷达回波和降水外推预报与数值预报相融合的预报方法主要有 3 类:加权平均法^[136]、趋势调整法^[17]和 ARMOR (Adjustment of Rain from Models with Radar data) 方法^[3,19,114,137]。加权平均法^[136],预报值为雷达外推和数值模式预报结果的加权平均,其权重系数根据外推预报和模式预报精度与预报时间的统计关系确定。趋势调整法^[17],利用模式预报的降水区域和强度变化趋势信息,对雷达外推的降水范围和强度进行订正,以获取最终的预报。ARMOR 方法^[3,19,114,137],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。其中,加权平均法和 ARMOR 方法以及这两种方法的结合得

到了较为广泛的应用,如 STEPS^[94]、加拿大的 MAPLE^[137]、美国的 NIWOT^[17] 和 CoSPA^[92]、奥地利的 INCA 系统^[95]、香港的 RAPIDS^[114]、程丛兰等^[114]针对京津冀的融合预报试验等。Wang 等^[138]通过多尺度追踪方法获得的外推预报和 ARPS (Advanced Regional Prediction System) 模式预报使用加权平均法和趋势调整法进行 0~2 h 融合预报对流风暴试验,发现 0~50 min 外推预报优于 ARPS 模式预报,50~120 min 融合预报显著优于外推预报和 ARPS 模式预报。STEPS^[94] 系统通过加权平均技术融合临近预报与降尺度的数值模式预报生成短时概率降水预报产品。Kober 等^[108]、Scheufele 等^[109]则将基于雷达资料的临近概率降水预报和基于德国对流尺度高分辨率或时间滞后集合数值模式预报的概率预报加权平均融合,生成短时概率降水预报产品。

已有研究^[18,89,132,139-140]表明,同化经过严格控制的多普勒天气雷达反射率因子和径向速度资料,数值模式(集合)预报可明显提高对流风暴和定量降水的预报水平。Kain 等^[139]评估了美国 CAPS 同化了雷达资料的高分辨率数值模式的预报性能,结果表明:其 0~6 h 预报性能高于未同化雷达资料的数值预报,尤其 3~6 h 预报性能改进最为显著;Surcel 等^[130]基于 MAPLE 的外推预报和美国 CAPS 的 SSEF 系统集合预报给出了不同尺度降水天气系统的可预报性,结果表明:SSEF 系统对不同尺度天气系统的可预报性明显优于其他数值预报,且对 0~6 h 时效 γ 中尺度和 β 中尺度降水系统具有一定的可预报性,但存在系统性偏差。

虽然可以通过外推预报与数值预报相融合的预报技术进行定量降水和对流风暴的短时(概率)预报,但目前还没有直接针对冰雹、龙卷、雷暴大风等天气的融合短时预报技术,这些天气的短时预报主要依赖高分辨率数值预报资料的对流天气环境条件分析和基于中小尺度机理的客观预报产品,也就是依赖对流可分辨的高分辨率数值模式(包括集合预报系统)产品后处理。雷蕾等^[141]基于中尺度数值模式快速循环系统(BJ_RUC)进行了强对流天气分类概率预报试验,其使用的就是 BJ_RUC 模式快速更新预报的不同类型强对流天气的环境条件参数。如前所述,美国正在探索从对流风暴的中尺度结构和发展机理方面如何应用对流可分辨的高分辨率数值模式(集合)预报产品进行强对流分类预报^[58,89]。

为了获取尺度小、变化快的天气系统在模式中的反映, Kain 等^[140]从模式预报的每个时间步的物理量场输出逐小时时段内的每 1 个格点的物理量最大值, 由此生成的二维格点场称为逐时最大场。美国 SPC 春季试验发现, 有 6 个逐时最大场与模式中对流风暴强度关系密切, 是模式中风暴强度的直接表征: 最大上升气流、3~6 km 高度之间的最大下沉气流速度、表征对流强度的地面上空 1 km 高度的最大反射率因子、最大上升气流螺旋度、最大地面 10 m 风速、最大垂直积分霰^[89]。

但目前使用对流可分辨的高分辨率数值模式进行对流性降水短时预报还面临较多挑战, Sun 等^[18]提出的挑战包括对流性降水天气系统的可预报性研究、中尺度观测网的改进、资料同化技术和快速更新数值模式的改进等。漆梁波^[90]提出高分辨率模式预报产品业务应用中的可能问题, 包括高分辨率模式的性能问题、正确认识模式的分辨率问题、高分辨率模式产品的系统误差和适用性问题、快速同化更新技术问题等。此外, 从美国 SPC 春季试验结果看, 目前对流可分辨的高分辨率数值模式能够直接预报并通过后处理预报分类强对流天气的能力较为有限, 还不能完全满足预报业务需求。

3.3 短期预报技术

强对流天气的短期预报主要从其发生发展机理和所依赖的环境条件出发, 根据不同的诊断物理量对不同强度强对流天气的指示意义, 进行分类强对流天气预报^[1, 6, 61, 141-143], 也就是现在广泛应用的配料法。但需要说明的是, 由于受对流天气时空尺度较小、分布较不连续的特点和可预报性的限制, 还不能完全做出类似温度等要素预报的强对流短期预报, 因此, 概率预报或危险等级预报是短期强对流预报的发展方向, 如前所述, 美国 SPC 已经开展了分类强对流天气的危险等级预报和短期概率预报业务。不同类型强对流天气及其发生发展所需环境条件的气候分布特征是制作分类强对流预报的重要基础工作, 已开展了大量研究^[73, 143-144]。

由于强对流天气的发生发展需要多方面的物理条件, 且不同类型强对流天气的不同物理量统计结果表明, 不可能找到一个完全明确的、单一物理量阈值表征该类天气发生发展的物理条件^[73, 144], 因此, 类似模糊逻辑这些能够综合应用代表不同物理条件的多个物理量的技术方法, 是当前强对流天气预报技术研究的重要方面。如李耀东等^[145]利用综合指

标叠套方法开展了强对流天气落区预报试验, Lakshmanan 等^[146]通过遗传算法实现了自动短时临近预报系统中的物理量自动选择, 并成功应用于雷暴天气的预报。

应用模糊逻辑方法的分类强对流天气预报技术, 一般基于探空资料或数值模式预报资料, 通过挑选对不同强度强对流天气具有指示意义的物理量、根据历史个例的统计结果分别构建独立隶属函数, 并赋予不同物理量不同的权重, 给出最终的综合预报结果。需要指出的是, 模糊逻辑方法只是一种数学处理方法, 配料法才是物理基础, 即首先要正确选取能够代表强对流天气发生发展物理条件的天气学要素和物理量; 其次才是通过客观的统计分析方法, 合理构建模糊逻辑中各成员的隶属函数。基于该方法, Lin 等^[147]、Kuk 等^[148]分别构建了中国台湾北部、韩国的雷电客观预报技术。雷蕾等^[141]基于 BJ-RUC 的强对流天气分类概率预报试验应用的就是模糊逻辑方法。

基于集合数值预报的强对流短期(概率)预报技术是当前预报技术的重要发展方向。美国 SPC 经历了十几年的发展已建立了比较完整的、基于多尺度数值集合预报的强对流分类预报产品体系。美国 NCEP 的全球集合预报系统 GEFS (Global Ensemble Forecast System) 主要为 SPC 3~8 d 的对流天气预报提供数值预报依据^[149]。美国 NCEP 短期集合预报系统 SREF (Short Range Ensemble Forecast) 是目前支持 SPC 强对流短期预报业务的最重要的模式, 其产品主要有各种强对流指数的联合概率和各种分类强对流指数的阈值概率产品。

3.4 预报检验技术

预报检验是天气预报业务和技术发展的重要一环, 其目的是给出预报与实况之间一致性和差异程度及可能原因。不同的预报检验需求所要求的检验技术不同, 常规与非常规的观测资料是天气预报检验的基础, 目前强对流天气预报检验面临的一个难点是地面观测实况资料的匮乏。

传统的强对流天气确定性预报检验方法是基于站点观测或目击者报告的、通过二维列联表计算得到的检验指标, 如 TS 评分、命中率、虚警率等, 美国 SPC 采用直观的预报检验图形展示这些检验指标之间的关系^[150]。但这些指标对于极端天气预报来说有明显的缺陷, 当事件发生概率偏低时, TS 评分、命中率等指标趋近于零。除了这些传统检验指标

外,Casati 等^[151]总结了不同的预报检验方法,包括空间检验方法^[152]、概率预报和集合预报检验方法、极端事件检验方法等。Brown^[153]将空间检验方法总结为 4 类:第 1 类为邻域空间检验方法(也称为模糊检验),第 2 类为尺度分离检验方法,第 3 类为场变形信息(度量预报场与实况场之间总体的变形、位移或相位误差等)检验,第 4 类为基于对象或者特征检验方法。

强对流天气空间分布通常具有分散性、不连续性等特点,即局地性特点,且通常持续时间短,因此,传统的点对点检验方法易于导致双重惩罚,尤其对于高时空分辨率的数值预报或者临近预警。目前基于邻域(一定的半径范围)的检验方法^[154]在降水和强对流天气预报检验中得到了较为广泛的应用,该方法为空间检验方法的一种^[151,153-154],又称为模糊检验方法。美国 SPC^[150,155-156]和中国气象局国家气象中心强天气预报中心^[157]对主观确定性预报产品的检验主要采用点对点(即评分站点上的预报与对应的半径 40 km 圆内出现的实况对比)的 TS 评分方法,检验指标为 TS 评分、漏报率、空报率等。

基于对象或者特征的强对流预报检验也是空间检验方法的一种,目前已得到了较为广泛的应用。Davis 等^[158]首先发展了对于模式降水预报的对象检验方法,检验的属性包括强度、面积、质心、夹角、长短轴比、曲率等,并发展了 MODE 软件包。戴建华等^[159]采用对比预报与实际的强对流天气目标之强度、面积、空间距离、形态和相似度等评价指标,建立包括格点型、站点型和概率型的强对流预报检验方法、预报检验指标调整与合成方法,以实现对流短临预报的综合检验和评价。

概率预报和集合预报检验不同于确定性预报检验,包括 Brier 评分、Brier 技巧评分、可靠性、可分辨性、等级直方图(Rank histogram)、ROC(接收者操作特征)检验^[151]等。

美国开发试验平台中心(DTC)开发了数值模式测试、检验、评价工具箱 MET(Model Evaluation Tools),该工具箱可以提供确定性预报检验、概率预报检验和基于对象的检验等技术方法,MET 工具箱包含了 MODE 软件包^[57]。

4 未来展望

除了常规地面观测和重要天气报外,经过质量控制的目击者或气象信息员报告将是提供更高时空

分辨率强对流天气实况监测的重要直接来源,而经过质量控制的互联网提供的强对流天气信息将是天气实况监测有力补充。未来我国布网建设的双偏振多普勒天气雷达观测能够进一步提高对对流系统中降水粒子的相态识别能力,从而提高对冰雹天气的监测能力和定量降水估测精度;而目前正在试验的相控阵多普勒天气雷达展示出的快速扫描能力,也将在未来提供更高时空分辨率的雷达资料进一步提高监测强对流天气系统的精细结构的能力。下一代静止气象卫星的更多通道观测资料和闪电观测资料、地基全闪(包括云闪和地闪)定位网的发展和建设将进一步提高对初生对流的监测能力。目前的遥感观测网对晴空大气状态探测能力存在较大不足,下一代静止气象卫星和微波辐射计探测的垂直温湿廓线资料、风廓线雷达探测的垂直风廓线资料等高时空分辨率晴空大气(组网)探测资料结合飞机 AMDAR(航空器气象资料下传)资料、雷达 VAD 风廓线资料将提供更多用于分析预报强对流天气发生发展前期条件的探测数据。

目前我国地面自动气象站观测网、多普勒天气雷达网虽已在强对流天气研究和业务中发挥了极其重要的作用,但极小部分数据质量存在一些问题,需要综合应用包括闪电、卫星观测等的多源探测资料进一步提高这些资料的质量水平,并需要进一步发挥稠密地面自动气象站网在地面湿度和风场观测方面的优势。我国还需要大力发展基于多普勒天气雷达数据的、全国三维数据和导出产品拼图业务系统和产品,以提高对全国强对流天气的监测能力。目前我国综合多源观测资料的分类强对流天气和对流风暴的强度监测(如文献[28])还存在较大不足,尤其冰雹和雷暴大风监测更多依靠常规观测站和重要天气报资料,需要充分利用雷达、目击或气象信息员、自动气象站、闪电等多源观测资料进行短时强降水、冰雹、雷暴大风等天气和对流风暴的质量控制和分强度等级综合判识,以提高强对流监测的时空分辨率和可靠性,并生成高质量的综合监测格点数据。此外,在对流天气和对流风暴的极端性(包括极端强度、持续时间和空间分布等)监测方面也需要结合历史气候资料开发相应的技术和产品为该类天气的预报预警提供监测数据基础。

认识强对流天气的系统结构和发生发展规律是强对流天气分析预报预警的物理基础。目前对强对流天气发生发展机理的认识逐渐从 β 中尺度向 γ 中

尺度甚至小尺度发展,如已经认识到尺度只有几公里的中涡旋在弓形回波系统中对地面大风和非中气旋龙卷产生的重要作用^[65,79]。由于强对流天气的发生发展受到较多中小尺度复杂因素的影响,如地形分布、地面摩擦^[16,64-65]、消亡对流的残留冷池^[63]等,因此,需要充分认识到强对流天气发生发展精细机理和不同尺度系统之间相互作用的复杂性。目前,对我国不同类型中尺度系统的空间结构、要素配置和物理演变过程的精细规律认识和理解还存在较多不足,极端性强对流天气、强飚线、弱天气强迫下和复杂地形区域强对流天气等的触发和维持机制研究需要进一步加强和深入;综合多源观测资料的中尺度滚动分析技术和业务产品有待进一步深入和发展,如基于风廓线雷达观测产品的分析技术、针对强飚线和极端性强对流天气的分析产品等;基于对流可分辨的高分辨率数值模式的客观综合分析产品有待进一步试验和研究,如基于该类模式预报产品判识对流系统和对流天气的类型和强度等级等,以进一步修订和完善《中尺度天气分析技术规范》。

强对流临近预报外推技术虽已较成熟,但目前对流系统的生消和发展预报还存在较大不足。在分类强对流天气和对流风暴综合监测技术基础上,利用模糊逻辑或随机森林等方法发展和完善基于多源资料的多尺度(多阈值)自适应对流天气系统的综合识别、追踪和外推(概率)预报技术是分类强对流天气识别和分等级临近预报技术发展的主要方向,结合高分辨率数值预报等其他资料发展完善对流系统的初生、增长、衰减和消亡的概率预报技术是临近预报发展的重要方面。新一代静止气象卫星的快速扫描多通道资料、闪电成像仪观测资料结合高时空分辨率的地面自动气象站等其他观测资料,在对流初生临近预报方面将发挥重要作用。

基于高分辨率数值预报以及融合预报技术的强对流天气的短时预报技术虽取得了一定进展,但还仅处于试验阶段。虽然对流可分辨的高分辨率数值模式及其快速更新同化技术已取得重大进展,但并非仅仅提高数值模式分辨率和发展同化技术就能够提高模式的预报能力,还需要考虑不同尺度天气系统的可预报性、模式框架本身性能的改进、不同物理过程的参数化等方面的问题以进一步改进这些模式的预报性能。对流可分辨的高分辨率数值(集合)预报的应用需要针对不同尺度天气系统的可预报性开展相关工作,也需要采用类似美国 Testbed 的运

行机制对这些预报产品进行业务应用试验和评估。发展多源资料的同化技术、提高高分辨率数值模式的(集合)预报水平是分类强对流天气短时(概率)预报技术的模式基础^[18,58];发展调整模式预报对流系统相位的多尺度分析技术、加权平均法与 ARMOR 法相结合的融合预报技术是短时预报技术发展的重要方面。

分类强对流天气短期预报的准确率在稳步增长^[155-156],但不同等级的强对流天气以及具有高影响性的极端强对流天气(如强飚线或超级单体导致的大冰雹和极端雷暴大风天气、极端短时强降水天气)预报的精细化方面还存在较大不足。因此,需要在强对流天气发生发展机理基础上,利用更高分辨率的监测和分析资料,结合历史个例综合统计不同强度和极端强度的分类强对流天气的多物理量分布和结构特征,应用模糊逻辑等方法,利用高分辨率数值(集合)预报,发展不同等级的分类强对流天气概率预报和风险等级预报技术,包括极端性强对流天气的预报技术。虽然时效越长预报结果的不确定性越大,但美国 SPC 的业务预报表明,在全球集合预报系统基础上发展 3~8 d 的中期强对流天气概率预报具有一定可行性。不过需要指出的是,预报时效越长,所能够预报的天气系统尺度越大、预报的精细化程度和准确率相对越低。

在强对流天气客观预报技术基础上,通过强对流天气分析,发挥预报员对于强对流天气物理规律和数值模式预报性能的认识和主观能动性,不断提高预报准确率和精细化水平是强对流天气业务预报发展的持续追求。中国气象局国家气象中心已提出在提高天气预报准确率基础上,逐步发展天气影响预报。强对流天气业务预报更需要关注和提高类似 2009 年 6 月 3 日河南强对流天气、2012 年 7 月 21 日北京极端强降水、2015 年 4 月 28 日江苏和上海等极端性强对流天气的预报水平及其造成的影响预报。此外,方便快捷、功能强大的网络综合应用业务平台和交互综合应用业务平台是提高强对流天气业务预报水平的重要方面。

强对流天气预报传统检验,如基于站点观测的 TS 评分、空报率等虽存在较多缺陷,但依然是检验技术的重要方面。在综合多源资料的强对流天气实况站点和格点监测产品数据基础上,需要继续完善现有的基于邻域(一定的半径范围)的强对流天气检验技术,如重新评估定义适用于我国的评分站覆盖

区域的半径大小。对于短时临近预报,更需要综合应用基于对象的空间检验技术,实现对对流预报落区形态、位移及强度的定量检验,给出强对流预报的综合检验和评价。发展和完善强对流天气或罕见天气事件预报技巧检验也是检验技术发展的重要方向,如 Hitchens 等^[156]发展了相对于基于天气实况的业务完美(practically perfect)预报的对流天气预报技巧检验技术。不同尺度天气系统的不同时效可预报性不同,因此,对于不同时效的预报所采用的检验方法也应不同。

5 小结

强对流天气监测和机理研究是其预报的基础,而分析是预报的必要手段和过程。目前强对流天气监测、预报、预警技术和业务水平已较文献^[3,19]给出的技术水平显著提升。对流系统强度识别、对流初生和天气类型识别等监测技术取得新进展,基于多源资料的综合监测技术已应用于中国气象局中央气象台业务。弓形回波上中涡旋、对流系统触发和发展机制等方面获得了新认识,分类强对流天气及其环境条件的统计气候特征及其分析规范与业务网站产品等为我国业务预报提供了基础和技术支撑。基于光流法和多尺度追踪技术以及综合应用气候、地形等因素和多源资料的临近(概率)预报技术等进展显著;加权平均法与 ARMOR 方法的融合短时预报技术得到了广泛应用,对流可分辨的高分辨率数值(集合)预报及其后处理技术的短时(概率)预报试验和基于数值(集合)预报应用逻辑方法的分类强对流天气短期预报技术取得了显著成效;概率和集合预报检验、模糊检验方法和基于对象的检验等技术方法和软件为评价业务预报和数值预报提供了有力的工具。

质量控制技术、基于新探测资料的监测产品开发和基于多源资料的综合监测技术是强对流天气监测技术发展完善的主要内容。强对流天气发生发展精细机理和不同尺度系统之间的相互作用有待进一步深入研究,需要进行不同强度等级、分类强对流天气的高时空分辨率多物理量与结构特征统计和发展基于对流可分辨的高分辨率数值预报的客观综合分析产品,以进一步完善强对流天气分析规范和技术。

不同尺度天气系统的不同可预报性决定了不同时效的强对流天气预报技术不同。基于多源资料的

多尺度自适应临近预报技术、发展完善利用模糊逻辑等方法的基于对流可分辨的高分辨率数值(集合)预报的(概率)预报技术和进一步发展融合预报技术仍是未来发展不同强度等级、分类强对流天气包括极端天气的精细化(概率)预报技术的主要内容;对流可分辨的高分辨率数值(集合)预报是发展强对流天气精细化(概率)预报的重要核心技术支撑;概率预报技术、极端性强对流天气的监测分析和预报预警技术是未来发展的重要方面;而影响预报是强对流天气预报的重要延伸,预报检验技术是发展强对流天气预报技术不可或缺的内容。需要指出的是,对流系统的初生、发展、衰减和消亡预报以及对流天气的精细化预报(包括时空分布、强度和极端性等)依然是强对流预报的难点,由强对流天气系统的尺度和结构特点所决定。

致谢:感谢北京大学陶祖钰教授、中国气象局干部培训学院俞小鼎教授、国家气象中心金荣花研究员提供了建议,感谢国家气象中心刘鑫华、周晓霞、方翀等提供了相关素材。

参考文献

- [1] Doswell III C A. Severe Convective Storms. Meteor Monogr, Amer Meteor Soc, 2001, 28(50): 1-525.
- [2] Markowski P, Richardson Y. Mesoscale Meteorology in Mid-latitudes. John Wiley & Sons Ltd, 2010: 245-260.
- [3] 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 雷暴与强对流临近天气预报技术进步. 气象学报, 2012, 70(3): 311-337.
- [4] Chen J, Zheng Y, Zhang X, et al. Distribution and diurnal variation of warm-season short-duration heavy rainfall in relation to the MCSs in China. *J Meteor Res*, 2013, 27(6): 868-888.
- [5] Hitchens N M, Brooks H E, Schumacher R S. Spatial and temporal characteristics of heavy hourly rainfall in the United States. *Mon Wea Rev*, 2013, 141: 4564-4575.
- [6] 孙继松, 戴建华, 何立富, 等. 强对流天气预报的基本原理和技术方法. 北京: 气象出版社, 2014.
- [7] 范雯杰, 俞小鼎. 中国龙卷的时空分布特征. 气象, 2015, 41(7): 793-805.
- [8] 马明, 陶善昌, 祝宝友, 等. 卫星观测的中国及周边地区闪电密度的气候分布. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(4): 298-306.
- [9] 王娟, 湛芸. 2009—2012 年中国闪电分布特征分析. 气象, 2015, 41(2): 160-170.
- [10] 马禹, 王旭, 陶祖钰. 中国及其邻近地区中尺度对流系统的普查和时空分布特征. 自然科学进展, 1997, 7(6): 701-706.
- [11] Zheng Y, Chen J, Zhu P. Climatological distribution and diurnal variation of mesoscale convective systems over China and its vicinity during summer. *Chin Sci Bull*, 2008, 53: 1574-1586.
- [12] 韩雷, 俞小鼎, 郑永光, 等. 京津及邻近地区暖季强对流风暴

- 的气候分布特征. 科学通报, 2009, 54(11): 1585-1590.
- [13] Chen M, Wang Y, Gao F, et al. Diurnal evolution and distribution of warm-season convective storms in different prevailing wind regimes over contiguous North China. *J Geophys Res Atmos*, 2014, 119: 2742-2763.
- [14] Meng Z, Yan D, Zhang Y. General features of squall lines in east China. *Mon Wea Rev*, 2013, 141: 1629-1647.
- [15] Zheng L, Sun J, Zhang X, et al. Organizational modes of mesoscale convective systems over central east China. *Wea Forecasting*, 2013, 28: 1081-1098.
- [16] Chen X, Zhao K, Xue M. Spatial and temporal characteristics of warm season convection over Pearl River Delta Region, China based on three years of operational radar data. *J Geophys Res Atmos*, 2014, doi: 10.1002/2014JD021965.
- [17] Wilson J W, Feng Y, Chen M, et al. Nowcasting challenges during the Beijing Olympics: Successes, failures, and implications for future nowcasting systems. *Wea Forecasting*, 2010, 25: 1691-1714.
- [18] Sun J, Xue M, Wilson J W, et al. Use of NWP for nowcasting convective precipitation: Recent progress and challenges. *Bull Amer Meteor Soc*, 2014, 95: 409-426.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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改进与产品集成系统支撑技术. 气象, 2013, 39(7): 894-900.
- [22] 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.
- [23] 盛杰, 张小雯, 孙军, 等. 三种不同天气系统强降水过程中分钟雨量的对比分析. 气象, 2012, 38(10): 1161-1169.
- [24] Elizaga F, Conejo S, Martin F. Automatic identification of mesocyclones and significant wind structures in Doppler radar images. *Atmos Res*, 2007, 83(2): 405-414.
- [25] 李国翠, 刘黎平, 张秉祥, 等. 基于雷达三维组网数据的对流性地面大风自动识别. 气象学报, 2013, 71(6): 1160-1171.
- [26] 李国翠, 刘黎平, 连志鸾, 等. 利用雷达回波三维拼图资料识别雷暴大风统计研究. 气象学报, 2014, 72(1): 168-181.
- [27] 张秉祥, 李国翠, 刘黎平, 等. 基于模糊逻辑的冰雹天气雷达识别算法. 应用气象学报, 2014, 25(4): 414-426.
- [28] Rossi P J, Hasu V, Koistinen J, et al. Analysis of a statistically initialized fuzzy logic scheme for classifying the severity of convective storms in Finland. *Meteor Appl*, 2014, 21: 656-674.
- [29] 胡胜, 罗聪, 张羽, 等. 广东大冰雹风暴单体的多普勒天气雷达特征. 应用气象学报, 2015, 26(1): 57-65.
- [30] Park H, Ryzhkov A V, Zrnich D S, et al. The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR-88D: Description and application to an MCS. *Wea Forecasting*, 2009, 24: 730-748.
- [31] Al-Sakka H, Boumahmoud A A, Fradon B, et al. A new fuzzy logic hydrometeor classification scheme applied to the French X-, C-, and S-band polarimetric radars. *J Appl Meteor Climatol*, 2013, 52(10): 2328-2344.
- [32] Heinselman P L, Ryzhkov A V. Validation of polarimetric hail detection. *Wea Forecasting*, 2006, 21(5): 839-850.
- [33] 郑栋, 张义军, 孟青, 等. 北京地区雷暴过程闪电与地面降水的相关关系. 应用气象学报, 2010, 21(3): 287-297.
- [34] Carey L D, Rutledge S A. Electrical and multiparameter radar observations of a severe hailstorm. *J Geophys Res Atmos*, 1998, 103(D12): 13979-14000.
- [35] Williams E, Boldi B, Matlin A, et al. The behavior of total lightning activity in severe Florida thunderstorms. *Atmos Res*, 1999, 51(3): 245-265.
- [36] Schultz C J, Petersen W A, Carey L D. Preliminary development and evaluation of lightning jump algorithms for the real-time detection of severe weather. *J Appl Meteor Climatol*, 2009, 48: 2543-2563.
- [37] Zhang J, Howard K, Langston C, et al. National Mosaic and Multi-Sensor QPE (NMQ) system: Description, results, and future plans. *Bull Amer Meteor Soc*, 2011, 92: 1321-1338.
- [38] Lakshmanan V, Smith T, Stumpf G, et al. The Warning Decision Support System-Integrated Information. *Wea Forecasting*, 2007, 22: 596-612.
- [39] Augros C, Tabary P, Anquez A, et al. Development of a nationwide, low-level wind shear mosaic in France. *Wea Forecasting*, 2013, 28(5): 1241-1260.
- [40] Bousquet O, Tabary P. Development of a nationwide real-time 3-D wind and reflectivity radar composite in France. *Quart J R Meteor Soc*, 2014, 140: 611-625.
- [41] Schmit T J, Li J, Ackerman S J, et al. High spectral and temporal resolution infrared measurements from geostationary orbit. *J Atmos Oceanic Technol*, 2009, 26: 2273-2292.
- [42] Roberts R D, Rutledge S. Nowcasting storm initiation and growth using GOES-8 and WSR-88D data. *Wea Forecasting*, 2003, 18(4): 562-584.
- [43] Mecikalski J R, Bedka K M. Forecasting convective initiation by monitoring the evolution of moving cumulus in daytime GOES imagery. *Mon Wea Rev*, 2006, 134(1): 49-78.
- [44] Marianne K. Satellite Nowcasting Applications// World Meteorological Organization Symposium on Nowcasting and Very Short Term Forecasting. Whistler, Canada, 2009.
- [45] Sieglaff J M, Cronic L M, Feltz W F, et al. Nowcasting convective storm initiation using satellite-based box-averaged cloud-top cooling and cloud-type trends. *J Appl Meteor Climatol*, 2011, 50(1): 110-126.
- [46] Sieglaff J M, Cronic L M, Feltz W F. Improving satellite-based convective cloud growth monitoring with visible optical depth retrievals. *J Appl Meteor Climatol*, 2014, 53(2): 506-520.
- [47] Hartung D C, Sieglaff J M, Cronic L M, et al. An intercomparison of UW cloud-top cooling rates with WSR-88D radar

- data. *Wea Forecasting*, 2013, 28(2): 463-480.
- [48] Merk D, Zinner T. Detection of convective initiation using Meteosat SEVIRI; implementation in and verification with the tracking and nowcasting algorithm Cb-TRAM. *Atmos Meas Tech Discuss*, 2013, 6: 1771-1813.
- [49] Zinner T, Mannstein H, Tafferner A. Cb-TRAM; Tracking and monitoring severe convection from onset over rapid development to mature phase using multi-channel Meteosat-8 SEVIRI data. *Meteor Atmos Phys*, 2008, 101: 191-210.
- [50] 覃丹宇, 方宗义. 利用静止气象卫星监测初生对流的研究进展. *气象*, 2014, 40(1): 7-17.
- [51] Mecikalski J R, Minnis P, Palikonda R. Use of satellite derived cloud properties to quantify growing cumulus beneath cirrus clouds. *Atmos Res*, 2013, 120: 192-201.
- [52] Senf F, Dietzsch F, Hünnerbein A, et al. Characterization of initiation and growth of selected severe convective storms over central Europe with MSG-SEVIRI. *J Appl Meteor Climatol*, 2015, 54(1): 207-224.
- [53] Setvák M, Rabin R M, Doswell C A, et al. Satellite observations of convective storm tops in the 1.6, 3.7 and 3.9 μm spectral bands. *Atmos Res*, 2003, 67: 607-627.
- [54] Bedka K, Brunner J, Dworak R, et al. Objective satellite-based detection of overshooting tops using infrared window channel brightness temperature gradients. *J Appl Meteor Climatol*, 2010, 49(2): 181-202.
- [55] Bedka K M. Overshooting cloud top detections using MSG SEVIRI infrared brightness temperatures and their relationship to severe weather over Europe. *Atmos Res*, 2011, 99(2): 175-189.
- [56] Goodman S J, Gurka J, DeMaria M, et al. The GOES-R proving ground: Accelerating user readiness for the next-generation geostationary environmental satellite system. *Bull Amer Meteor Soc*, 2012, 93: 1029-1040.
- [57] Ralph F M, Intrieri J, Andra Jr D, et al. The emergence of weather-related test beds linking research and forecasting operations. *Bull Amer Meteor Soc*, 2013, 94: 1187-1211.
- [58] 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): 568-582.
- [59] 魏东, 孙继松, 雷蕾, 等. 用微波辐射计和风廓线资料构建探空资料的定量应用可靠性分析. *气候与环境研究*, 2012, 16(6): 697-706.
- [60] 张振东, 魏鸣, 王皓. 用 GPS 水汽监测资料分析一次强对流性降水过程. *气象科学*, 2013, 33(5): 492-499.
- [61] Johns R H, Doswell III C A. Severe local storms forecasting. *Wea Forecasting*, 1992, 7: 588-612.
- [62] 席宝珠, 俞小鼎, 孙力, 等. 我国阵风锋类型与产生机制分析及其主观识别方法. *气象*, 2015, 41(2): 133-142.
- [63] Luo Y, Gong Y, Zhang D L. Initiation and organizational modes of an extreme-rain-producing mesoscale convective system along a mei-yu front in East China. *Mon Wea Rev*, 2014, 142: 203-221.
- [64] 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. *Wea Forecasting*, 2014, 29: 39-62.
- [65] Xu X, Xue M, Wang Y. Mesovortices within the 8 May 2009 bow echo over central US: Analyses of the characteristics and evolution based on Doppler radar observations and a high-resolution model simulation. *Mon Wea Rev*, 2015, 143(6): 226-230.
- [66] Wilson J W, Mueller C K. Nowcasts of thunderstorm initiation and evolution. *Wea Forecasting*, 1993, 8(1): 113-131.
- [67] Corfidi S F, Corfidi S J, Schultz D M. Elevated convection and castellanus: Ambiguities, significance, and questions. *Wea Forecasting*, 2008, 23(6): 1280-1303.
- [68] Wilson J W, Roberts R D. Summary of convective storm initiation and evolution during IHOP: Observational and modeling perspective. *Mon Wea Rev*, 2006, 134(1): 23-47.
- [69] Horgan K L, Schultz D M, Hales Jr J E, et al. A five-year climatology of elevated severe convective storms in the United States east of the Rocky Mountains. *Wea Forecasting*, 2007, 22(5): 1031-1044.
- [70] 许爱华, 陈云辉, 陈涛, 等. 锋面北侧冷气团中连续降雹环境场特征及成因. *应用气象学报*, 2013, 24(2): 197-206.
- [71] 盛杰, 毛冬艳, 沈新勇, 等. 我国春季冷锋后的高架雷暴特征分析. *气象*, 2014, 40(9): 1058-1065.
- [72] 张一平, 俞小鼎, 孙景兰, 等. 2012 年早春河南一次高架雷暴天气成因分析. *气象*, 2014, 40(1): 48-58.
- [73] Tian F, Zheng Y, Zhang T, et al. Statistical characteristics of environmental parameters for warm season short-duration heavy rainfall over central and eastern China. *J Meteor Res*, 2015, 29(3): 370-384.
- [74] Wakimoto R M, Kessinger C J, Kingsmill D E. Kinematic, thermodynamic, and visual structure of low-reflectivity microbursts. *Mon Wea Rev*, 1994, 122: 72-92.
- [75] Wilson J W, Wakimoto R M. The discovery of the downburst: T. T. Fujita's contribution. *Bull Amer Meteor Soc*, 2001, 82(1): 49-62.
- [76] Wakimoto R M, Wilson J W. Non-supercell tornadoes. *Mon Wea Rev*, 1989, 117: 1113-1140.
- [77] Agee E, Jones E. Proposed conceptual taxonomy for proper identification and classification of tornado events. *Wea Forecasting*, 2009, 24: 609-617.
- [78] Agee E M. A Revised tornado definition and changes in tornado taxonomy. *Wea Forecasting*, 2014, 29: 1256-1258.
- [79] Atkins N T, Bouchard C S, Przybylinski R W, et al. Damaging surface wind mechanisms within the 10 June 2003 Saint Louis bow echo during BAMEX. *Mon Wea Rev*, 2005, 133(8): 2275-2296.
- [80] Grams J S, Thompson R L, Snively D V, et al. A climatology and comparison of parameters for significant tornado events in the United States. *Wea Forecasting*, 2012, 27: 106-123.
- [81] 王秀明, 俞小鼎, 周小刚. 中国东北龙卷研究: 环境特征分析. *气象学报*, 2015, 73(3): 425-441.

- [82] Rotunno R, Klemp J B, Weisman M L. A theory for strong, long-lived squall lines. *J Atmos Sci*, 1988, 45(3): 463-485.
- [83] Weisman M L, Klemp J B, Rotunno R. Structure and evolution of numerically simulated squall lines. *J Atmos Sci*, 1988, 45(14): 1990-2013.
- [84] Corfidi S F. Cold pools and MCS propagation: Forecasting the motion of downwind-developing MCSs. *Wea Forecasting*, 2003, 18(6): 997-1017.
- [85] 陈明轩, 王迎春. 低层垂直风切变和冷池相互作用影响华北地区一次飑线过程发展维持的数值模拟. *气象学报*, 2012, 70(3): 371-386.
- [86] Bluestein H B. On the decay of supercells through a "downscale transition": Visual documentation. *Mon Wea Rev*, 2008, 136: 4013-4028.
- [87] Davenport C E, Parker M D. Observations of the 9 June 2009 dissipating supercell from VORTEX2. *Wea Forecasting*, 2015, 30: 368-388.
- [88] Coniglio M C, Corfidi S F, Kain J S. Views on applying RKW theory: An illustration using the 8 May 2009 derecho-producing convective system. *Mon Wea Rev*, 2012, 140: 1023-1043.
- [89] Clark A J, Weiss S J, Kain J S, et al. An overview of the 2010 Hazardous Weather Testbed Experimental Forecast Program Spring Experiment. *Bull Amer Meteor Soc*, 2012, 93: 55-74.
- [90] 漆梁波. 高分辨率数值模式在强对流天气预警中的业务应用进展. *气象*, 2015, 41(6): 661-673.
- [91] Mueller C, Saxen T, Roberts R, et al. NCAR Auto-Nowcast System. *Wea Forecasting*, 2003, 18: 545-561.
- [92] Pinto J, Dupree W, Weygandt S, et al. Advances in the Collaborative Storm Prediction for Aviation (CoSPA). Preprints, 14th Conf Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Atlanta, GA, Amer Meteor Soc, 2010.
- [93] Seed A W. A dynamic and spatial scaling approach to advection forecasting. *J Appl Meteor*, 2003, 42: 381-388.
- [94] Bowler N E, Pierce C E, Seed A W. STEPS: A probabilistic precipitation forecasting scheme which merges an extrapolation nowcast with downscaled NWP. *Quart J R Meteor Soc*, 2006, 132: 2127-2155.
- [95] Haiden T, Kann A, Wittmann C, et al. The integrated nowcasting through comprehensive analysis (INCA) system and its validation over the Eastern Alpine region. *Wea Forecasting*, 2011, 26(2): 166-183.
- [96] Nisi L, Ambrosetti P, Clementi L. Nowcasting severe convection in the Alpine region: The COALITION approach. *Quart J R Meteor Soc*, 2014, 140: 1684-1699.
- [97] Li P W, Wong W K, Cheung P, et al. An overview of nowcasting development, applications, and services in the Hong Kong Observatory. *J Meteor Res*, 2014, 28(5): 859-876.
- [98] Chen M, 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. Canada, 2009.
- [99] 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.
- [100] 万玉发, 王志斌, 张家国, 等. 长江中游临近预报业务系统(MYNOS)及其应用. *应用气象学报*, 2013, 24(4): 504-512.
- [101] 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.
- [102] Dance S, Ebert E, Scurrah D. Thunderstorm strike probability nowcasting. *J Atmos Oceanic Technol*, 2010, 27: 79-93.
- [103] Fox N I, Wikle C K. A Bayesian quantitative precipitation nowcast scheme. *Wea Forecasting*, 2005, 20: 264-275.
- [104] Xu K, Wikle C K, Fox N I. A kernel-based spatiotemporal dynamical model for nowcasting weather radar reflectivities. *J Amer Stat Soc*, 2005, 100: 1134-1144.
- [105] Germann U, Zawadzki I. Scale dependence of the predictability of precipitation from continental radar images. Part II: Probability forecasts. *J Appl Meteor Climatol*, 2004, 43(1): 74-89.
- [106] Megenhardt D L, Mueller C, Trier S, et al. NCWF-2 Probabilistic Forecasts. Preprints, 11th Conf on Aviation, Range, and Aerospace. Amer Meteor Soc, 2004.
- [107] Sokol Z, Kitzmiller D, Pesice P, et al. Operational 0-3 h probabilistic quantitative precipitation forecasts: Recent performance and potential enhancements. *Atmos Res*, 2009, 92(3): 318-330.
- [108] Kober K, Craig G C, Keil C, et al. Blending a probabilistic nowcasting method with a high-resolution numerical weather prediction ensemble for convective precipitation forecasts. *Quart J R Meteor Soc*, 2012, 138(664): 755-768.
- [109] Scheufele K, Kober K, Craig G C, et al. Combining probabilistic precipitation forecasts from a nowcasting technique with a time-lagged ensemble. *Meteor Appl*, 2014, 21(2): 230-240.
- [110] Mecikalski J R, Williams J K, Jewett C P, et al. Probabilistic 0-1 hour convective initiation nowcasts that combine geostationary satellite observations and numerical weather prediction model data. *J Appl Meteor Climatol*, 2015, 54, doi: 10.1175/JAMC-D-14-0129.1.
- [111] Germann U, Zawadzki I. Scale-dependence of the predictability of precipitation from continental radar images. Part I: Description of the methodology. *Mon Wea Rev*, 2002, 130(12): 2859-2873.
- [112] Bowler N E H, Pierce C E, Seed A W. Development of a precipitation nowcasting algorithm based upon optical flow techniques. *J Hydrol*, 2004, 288(1): 74-91.
- [113] Cheung P, Yeung H Y. Application of Optical-flow Technique to Significant Convection Nowcast for Terminal Areas in Hong Kong. The 3rd WMO International Symposium on Nowcasting and Very Short-Range Forecasting (WSN12), 2012: 6-10.
- [114] 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.
- [115] Johnson J T, MacKeen P L, Witt A, et al. The storm cell identification and tracking algorithm; An enhanced WSR-88D algorithm. *Wea Forecasting*, 1998, 13(2):263-276.
- [116] Hering A, S en esi S, Ambrosetti P, et al. Nowcasting Thunderstorms in Complex Cases Using Radar Data. WMO Symposium on Nowcasting and Very Short Range Forecasting, 2005.
- [117] Dixon M, Wiener G. TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting—a radar-based methodology. *J Atmos Oceanic Technol*, 1993, 10:785-797.
- [118] 韩雷, 郑永光, 王洪庆, 等. 基于数学形态学的三维风暴识别方法研究. *气象学报*, 2007, 65(5):805-814.
- [119] Auton es F. Algorithm Theoretical Basis Document for Rapid Development Thunder Storms// Nowcasting Satellite Application Facility (NWC-SAF) Report Issue 2 Rev. 3, Météo France, 2012.
- [120] Walker J R, MacKenzie Jr W M, Mecikalski J R, et al. An enhanced geostationary satellite-based convective initiation algorithm for 0–2-h nowcasting with object tracking. *J Appl Meteor Climatol*, 2012, 51:1931-1949.
- [121] Bonelli P, Marcacci P. Thunderstorm nowcasting by means of lightning and radar data: Algorithms and applications in northern Italy. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 2008, 8(5):1187-1198.
- [122] Kohn M, Galanti E, Price C, et al. Nowcasting thunderstorms in the Mediterranean region using lightning data. *Atmos Res*, 2011, 100(4):489-502.
- [123] 侯荣涛, 朱斌, 冯民学, 等. 基于DBSCAN聚类算法的闪电临近预报模型. *计算机应用*, 2012, 32(3):847-851.
- [124] Ruzanski E, Chandrasekar V, Wang Y. The CASA nowcasting system. *J Atmos Oceanic Technol*, 2011, 28:640-655.
- [125] Li L W, Schmid W, Joss J. Nowcasting of motion and growth of precipitation with radar over a complex orography. *J Appl Meteor*, 1995, 34:1286-1299.
- [126] Laroche S, Zawadzki I. A variational analysis method for retrieval of three-dimensional wind field from single-Doppler radar data. *J Atmos Sci*, 1994, 51:2664-2682.
- [127] Wang G, Wong W, Liu L, et al. Application of multi-scale tracking radar echoes scheme in quantitative precipitation nowcasting. *Adv Atmos Sci*, 2013, 30(2):448-460.
- [128] Wilson J W, Crook N A, Mueller C K, et al. Nowcasting thunderstorms: A status report. *Bull Amer Meteor Soc*, 1998, 79:2079-2099.
- [129] Radhakrishna B, Zawadzki I, Fabry F. Predictability of precipitation from continental radar images. Part V: Growth and decay. *J Atmos Sci*, 2012, 69(11):3336-3349.
- [130] Surcel M, Zawadzki I, Yau M K. A study on the scale dependence of the predictability of precipitation patterns. *J Atmos Sci*, 2015, 72:216-235.
- [131] Wolfson M M, Clark D A. Advanced aviation weather forecasts. *Lincoln Lab J*, 2006, 16(1):31-58.
- [132] Stensrud D J, Wicker L J, Kelleher K E, et al. Convective-scale warn-on-forecast system: A vision for 2020. *Bull Amer Meteor Soc*, 2009, 90(10):1487-1499.
- [133] Migliorini S, Dixon M, Bannister R, et al. Ensemble prediction for nowcasting with a convection-permitting model-I: Description of the system and the impact of radar-derived surface precipitation rates. *Tellus A*, 2011, 63(3):468-496.
- [134] Weisman M L, Skamarock W C, Klemp J B. The resolution dependence of explicitly modeled convective systems. *Mon Wea Rev*, 1997, 125:527-548.
- [135] 李泽椿, 毕宝贵, 金荣花, 等. 近10年中国现代天气预报的发展与应用. *气象学报*, 2014, 72(6):1069-1078.
- [136] Golding B W. Nimrod: A system for generating automated very short range forecasts. *Meteor Appl*, 1998, 5(1):1-16.
- [137] DuFran Z, Carpenter Jr R, Shaw B. Improved Precipitation Nowcasting Algorithm Using a High-resolution NWP Model and National Radar Mosaic. 34th Conference on Radar Meteorology, 2009.
- [138] Wang G, Wong W, Hong Y, et al. Improvement of forecast skill for severe weather by merging radar-based extrapolation and storm-scale NWP corrected forecast. *Atmos Res*, 2015, 154:14-24.
- [139] 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. *Wea Forecasting*, 2010, 25:1510-1521.
- [140] Kain J S, Dembek S R, Weiss S J, et al. Extracting unique information from high-resolution forecast models: Monitoring selected fields and phenomena every time step. *Wea Forecasting*, 2010, 25:1536-1542.
- [141] 雷蕾, 孙继松, 王国荣, 等. 基于中尺度数值模式快速循环系统的强对流天气分类概率预报试验. *气象学报*, 2012, 70(4):752-765.
- [142] 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.
- [143] Taszarek M, Kolendowicz L. Sounding-derived parameters associated with tornado occurrence in Poland and universal tornadic index. *Atmos Res*, 2013, 134:186-197.
- [144] 樊李苗, 俞小鼎. 中国短时强对流天气的若干环境参数特征分析. *高原气象*, 2013, 32(1):156-165.
- [145] 李耀东, 高守亭, 刘健文. 对流能量计算及强对流天气落区预报技术研究. *应用气象学报*, 2004, 15(1):10-20.
- [146] Lakshmanan V, Crockett J, Sperow K, et al. Tuning auto now-caster automatically. *Wea Forecasting*, 2012, 27:1568-1579.
- [147] Lin P, Chang P, Jou J, et al. Objective prediction of warm season afternoon thunderstorms in Northern Taiwan using a fuzzy logic approach. *Wea Forecasting*, 2012, 27:1178-1197.
- [148] Kuk B, Kim H, Ha J, et al. A fuzzy logic method for lightning prediction using thermodynamic and kinematic parameters from radio sounding observations in South Korea. *Wea*

- Forecasting, 2012, 27(1): 205-217.
- [149] Bright D R, Weiss S J, Levit J J, et al. The Evolution of Multi-scale Ensemble Guidance in the Prediction of Convective and Severe Convective Storms at the Storm Prediction Center. Preprints, 24th Conf Severe Local Storms, 2008.
- [150] Roebber P J. Visualizing multiple measures of forecast quality. *Wea Forecasting*, 2009, 24(2): 601-608.
- [151] Casati B, Wilson L J, Stephenson D B, et al. Forecast verification: Current status and future directions. *Meteor Appl*, 2008, 15(1): 3-18.
- [152] Ebert E E, McBride J L. Verification of precipitation in weather systems: Determination of systematic errors. *J Hydrol*, 2000, 239: 179-202.
- [153] Brown B. Verification Methods for Spatial Forecasts// World Meteorological Organization Symposium on Nowcasting and Very Short Term Forecasting. Canada, 2009.
- [154] Ebert E E. Neighborhood verification: A strategy for rewarding close forecasts. *Wea Forecasting*, 2009, 24(6): 1498-1510.
- [155] Hitchens N M, Brooks H E. Evaluation of the Storm Prediction Center's day 1 convective outlooks. *Wea Forecasting*, 2012, 27: 1580-1585.
- [156] Hitchens N M, Brooks H E, Kay M P. Objective limits on forecasting skill of rare events. *Wea Forecasting*, 2013, 28: 525-534.
- [157] 田付友, 郑永光, 张涛, 等. 短时强降水诊断物理量敏感性的点对点检验. *应用气象学报*, 2015, 26(4): 385-396.
- [158] Davis C A, Brown B G, Bullock R, et al. The method for object-based diagnostic evaluation (MODE) applied to numerical forecasts from the 2005 NSSL/SPC Spring Program. *Wea Forecasting*, 2009, 24(5): 1252-1267.
- [159] 戴建华, 茅懋, 邵玲玲, 等. 强对流天气预报检验新方法在上海的应用尝试. *气象科技进展*, 2013, 3(3): 40-45.

Advances in Techniques of Monitoring, Forecasting and Warning of Severe Convective Weather

Zheng Yongguang Zhou Kanghui Sheng Jie Lin Yinjing
Tian Fuyou Tang Wenyuan Lan Yu Zhu Wenjian

(*National Meteorological Center, Beijing 100081*)

Abstract

Significant progresses are made in monitoring, analyses, forecasting and warning techniques of severe convective weather. Techniques of thunderstorm-intensity determination using lightning jump algorithm, convection initiation identification based on geostationary satellite data, convective weather identification based on dual polarization Doppler weather radar data are developed, comprehensively monitoring techniques of convective weather and systems based on multi-source data are applied in Central Meteorological Office of China. Mesovortices within bow echo systems closely related to damaging winds, trigger, developing and maintaining mechanisms of convective systems are better understood; statistical climatological characteristics of different types of severe convective weather and their environmental conditions, the mesoscale weather analysis specification and corresponding operational website products are providing necessary foundations and technical supports for operational forecasting of severe convective weather in China. Optical flow method, multi-scale tracking technique, and comprehensive nowcasting techniques using fuzzy logic method based on climatology, topography, and multi-source data are advanced; weighted-average method and ARMOR (Adjustment of Rain from Models with Radar data) blending short-term forecasting techniques are widely applied; convection-allowing high resolution NWP (ensemble) forecasts and their post-processing products are getting tested in forecasting testbed; short-range forecasting techniques of different types of severe convective weather using fuzzy logic method based on NWP (ensemble) forecasts are providing supports for the operational forecasting. Comprehensively monitoring and multi-scale self-adaptive nowcasting techniques based on multi-source data, improved techniques of convective weather analyses, development of multi-scale analysis technique and combination technique between weighted-average and ARMOR blending short-term forecasting, and improved techniques of (probabilistic) forecasting different types of convective weather with different intensities or extreme using fuzzy logic method based on convection-allowing NWP forecasts should mainly be developed for convective weather forecasting and warning in the future.

Key words: severe convective weather; monitoring; convection-allowing NWP; probability