

我国强对流天气监测和预报业务

毛冬艳

(国家气象中心, 中国气象局, 北京 100081)

摘要: 总结了近几年我国强对流天气业务的主要进展, 重点介绍推动强对流天气业务发展的技术支撑, 包括新的监测资料的应用、数值预报模式的发展、主要技术方法的研发和专业化业务系统的建设, 分析了目前存在的问题和面临的挑战, 并提出全国强对流业务的未来发展和主要任务。

关键词: 强对流, 监测, 预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2012.05.003

The Monitoring and Forecasting Operation of Severe Convective Weather in China

Mao Dongyan

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

Abstract: The paper reviews the main progress of the severe convective weather operation in recent years, with the emphasis on the technical support, which includes the application of new observation data, the development of numerical forecast model, the research of the main technical methods and the construction of the special operation systems. The paper also analyses the existing problems and challenges, shows the future development and puts forward the main task of the severe convection operation.

Keywords: severe convection, monitoring, forecasting

1 引言

强对流天气是我国主要的灾害性天气之一。强对流会引发剧烈的天气现象, 如狂风、冰雹、强雷电和短时强降雨等, 对城市和农村安全具有高的影响力和大的破坏性。因此, 做好强对流天气的监测分析和预报预警非常重要。

由于强对流天气生命史短, 局地性强, 因此预报难度大。到目前为止, 强对流天气的预报准确率仍然相对较低^[1]。

2 我国强对流天气业务进展

我国强对流天气主要包括短时强降水、雷暴、大风、冰雹和龙卷等。其中, 短时强降水一般指1h降水量达到或超过20mm的降水过程; 雷暴大风是指伴有雷暴且风速达到或超过 $17.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (8级) 的对流性大风。这些与美国风暴预报中心的强对流天气的定义^[2]有一定的差异。

多年以来, 强对流天气业务一直是短期天气预报的一部分。2003年, 中央气象台正式发布强对流天气24h落区预报; 2007年3月, 下发全国24h内12h间隔强

对流天气落区预报。2009年4月, 随着国家级强对流天气专业化中心的建立, 开始下发强对流天气潜势预报产品, 产品的精细化水平逐步提高^[3]。近些年, 我国强对流天气业务取得了一定的进展, 主要包括以下四个方面。

2.1 全国强对流专业化业务体系初步建立

发展专业化的业务技术体系是天气业务由“传统”向“现代”转变的客观要求^[4]。为提高天气预报准确率和精细化水平, 根据我国灾害性天气的特点, 2009年3月, 国家气象中心组建了强天气预报中心, 并开展强对流落区潜势预报业务^[5], 标志着强对流天气业务向专业化的方向发展, 并以此带动全国强对流精细化预报业务体系的建设。之后, 部分省级气象台站逐步设置了针对强对流天气的专门岗位, 主要职责是在国家级强对流潜势预报的基础上, 结合本地天气气候特点, 制作更加精细的强对流短时临近预报。专业化中心的成立和专业化岗位的设置体现了以国家和省级为重点的预报业务指导流程。与此同时, 市级、县级也逐步完善了强对流天气预警信号发布的业务流程。到目前为止, 全国已经初步建立了业务流程清晰、岗位职责明确的强对流业务体系。

2.2 强对流天气监测和短临预报业务迅速发展

新的监测手段促进了强对流天气监测业务的迅速

收稿日期: 2012年5月28日; 修回日期: 2012年6月15日
作者: 毛冬艳 (1975—), Email: maody@cma.gov.cn
资助信息: 公益性行业 (气象) 科研专项 “强对流天气短期概率预报技术研究” (GYHY201206004)

发展。1998年,具有多普勒测速功能的新一代天气雷达开始建设。截止到2012年6月,全国已布设了160多部多普勒天气雷达,有效地改善了对强对流天气的监测预警能力^[6-8]。近些年来,我国气象卫星探测技术不断发展,目前使用风云二号D星和E星组成双星业务系统,对我国和周边地区的天气系统进行了有效的监测。每年6—8月可以每15min获取一幅云图^[9]。2012年汛期,还启动了风云二号F星的区域加密观测,针对重点区域可以实现每6min一次的卫星加密观测,大大提高了对中小尺度天气系统的监视能力。不仅如此,风廓线雷达^[10-12]、分钟雨量^[13]、GPS水汽^[14]以及微波辐射计等资料也在强对流天气的监测分析中发挥了越来越重要的作用。

监测能力的迅速发展也促进了强对流天气短时临近预报能力的提升。我国从2004年开始逐步开展强对流天气的短时临近预报业务^[15]。国家级主要发布未来6~12h的短时指导预报,省级及地方气象台站在定时发布短时预报的基础上,重点开展临近预报业务,并根据强对流天气的种类、影响范围以及强度等发布相应的预警信号。

2.3 中尺度天气分析业务在全国稳步推进

中尺度天气分析是结合强对流天气特点、适应强对流业务专业化发展的一项新的天气分析内容。相对于常规的天气分析而言,中尺度分析更加注重强对流天气发生发展的天气系统的配置和各种物理条件的综合分析,目前已经成为强对流天气业务的重要内容之一。2009年,国家气象中心试验性开展中尺度天气分析业务;2010年,制定《中尺度天气分析技术规范》(以下简称《规范》),并通过预报司向全国推广;2011年,针对《规范》进行进一步的改进完善,一方面简化高空分析的内容,同时增加了针对有限区域的中尺度天气系统分析的技术规范,更适合省级及以下台站充分利用高时空分辨率的观测资料,开展更加精细的本地区强对流天气过程的分析。

2.4 强对流业务产品的精细化程度不断提高

强对流专业化业务体系的建立,促进了业务产品的精细化水平不断提高。目前,国家级初步建立了集监测、分析、预报、检验等为一体的较为完整的强对流天气业务产品体系,实现了基于多源观测资料的不同类别、不同时间段的强对流天气客观监测;开展了强天气中尺度分析业务以及针对较强天气过程的中尺度系统滚动分析业务试验;实现了由原来单一的强对流天气预报向短时强降水、雷雨大风和冰雹的分类强对流潜势预报的转化;预报时效从24h延长至72h;预报产品由确定性预报逐渐向分类概率预报(图1)发

展;尝试开展了基于TS评分的强天气落区预报检验和概率预报检验。省级及地方气象台站在强对流天气监测的实时性、准确性方面不断提高,在短临预报预警方面,逐渐由原来概述性的强对流天气向不同种类(雷电、短时强降水、雷暴大风、冰雹等)转变,对强对流天气的强度也由原来的定性预报向量化转变,更加注重在预报准确率基础上的精细化程度的提高。

随着近几年强对流天气业务的专业化发展,预报准确率和精细化水平有所提高,特别是对于区域性

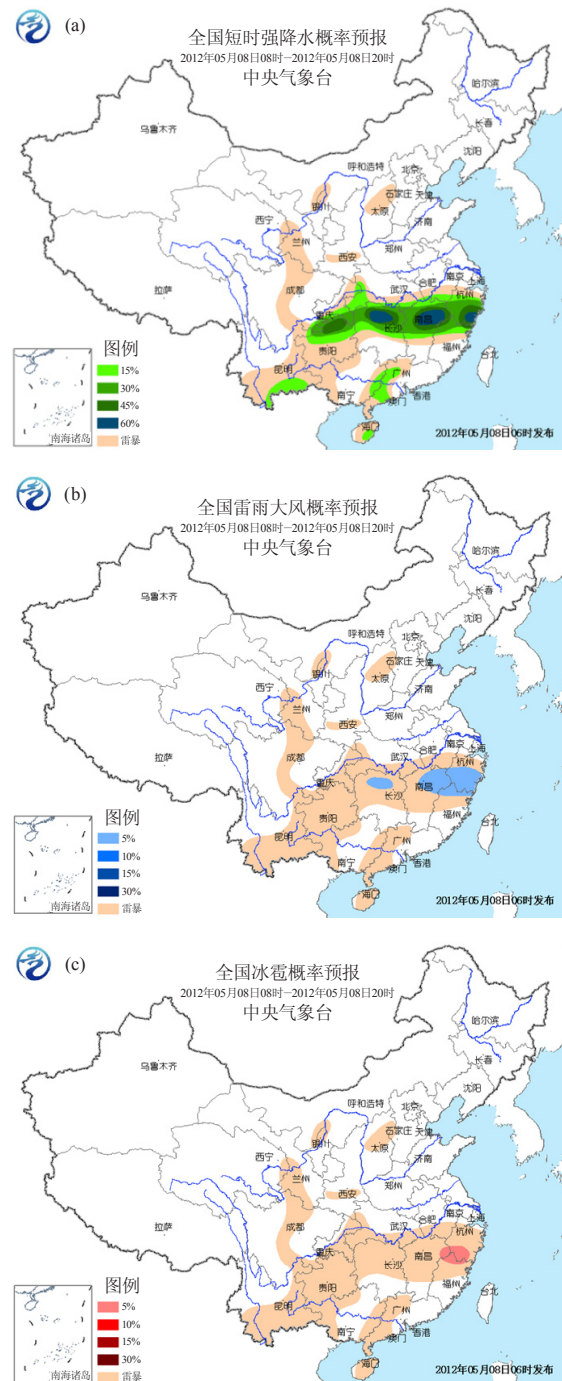


图1 2012年5月8日08—20时全国分类强对流概率预报试验产品 (a) 短时强降水, (b) 雷雨大风, (c) 冰雹

的强对流天气过程，预报能力有所提升。以2012年4月10—13日我国南方地区一次较大范围的飊线过程为例，中央气象台提前3d预报出了此次强对流天气过程，并随着时效的临近不断进行订正，24h内对于强对流天气类型和落区进一步精细化，整个过程预报较为准确。广东省最新的统计数据^①表明，广东省对中小尺度突发灾害性天气监测率达80%，强对流天气预报准确率达70%。

3 强对流天气业务发展的技术支撑

随着气象现代化建设不断推进，综合气象观测能力明显增强，数值预报预测能力逐步完善，基于灾害性天气发生发展的动力、热力条件诊断分析技术和数值预报产品解释应用技术不断发展，网络通信与计算机技术飞速发展等，都给我国强对流天气业务发展提供了坚实的基础和良好的发展机遇。

3.1 新的监测资料的应用

3.1.1 新一代天气雷达资料的应用

新一代天气雷达网的建设，大大促进了雷达资料在强对流天气业务中的应用。2003年，中国气象局气象干部培训学院（原中国气象局培训中心）编写了《多普勒天气雷达原理与业务应用》，详细介绍了多普勒天气雷达在探测和预警冰雹、龙卷、灾害性大风、短时暴雨、暴洪等强对流天气方面的业务应用^[16]。近些年来，针对每年发生的较强的强对流天气过程，一些气象学家也综合应用多普勒雷达资料进行了全面的分析总结，如2002年5月27日安徽北部一次典型超级单体风暴造成的强对流天气^[17]、2004年7月10日北京短时强降水^[18, 19]和7月12日上海飊线引发的灾害性大风过程^[20, 21]、2005年3月22日广东一次罕见的强飊线过程^[22]、2009年6月3, 5和14日淮河中下游三

次飊线过程^[23]等，得出了一些有益的结论，并应用于强对流天气的监测和预报，特别是短时临近预报预警中。俞小鼎等^[24]在借鉴美国强对流主观识别技术和客观算法的基础上，总结提炼了有利于我国强对流天气发生发展的环境条件以及雷达特征，并给出了建议使用的雷达产品（表1），为实际业务应用提供了较好的参考。

3.1.2 卫星资料的应用

随着气象卫星定量遥感探测能力的增强，卫星探测资料在中尺度对流系统（MCS）方面的研究更加深入。一方面，利用卫星资料对MCS的特征进行了统计分析，包括中国及邻近地区^[25]、华南^[26]、华北^[27]和青藏高原^[28]等地的中尺度对流云团的特征，以及南方地区的中尺度对流复合体（MCC）的特征，其中，南方地区MCC的研究表明，其平均生命史为18h，最长22h，最短11h，90%以上发生于北京时间18—05时，具有显著的夜发性^[29]。另一方面，基于静止卫星红外云图MCS判断标准的修订，结合我国天气特点和卫星云图的分辨率，定义了MCS云团的识别判据，发展了MCS的识别与追踪方法^[30]，在强对流天气的短时临近预报中具有很好的指导作用。

3.2 数值预报模式的发展

数值预报的发展及应用对天气业务现代化发展的推动是根本性的^[4]。强对流天气业务的发展离不开全球数值预报和区域中尺度数值预报模式的发展，同时也得益于中尺度集合预报和快速更新循环同化（RUC）技术的发展。

3.2.1 中尺度集合预报

由于观测、分析同化方法、模式过程和计算都存在误差，时效愈长、尺度愈小，预报不确定性愈大。

表1 建议的常规产品列表^[16]

| 名称 | 缩写 | 标识号 | 内容 | 分辨率 |
|--------------|-----|-----|---|----------|
| 反射率因子 | R | 19 | 0.5, 1.5, 2.4, 3.5, 4.3, 6.0, 9.9, 14.6, 19.5 | 1°×1km |
| 反射率因子 | R | 20 | 0.5 | 1°×2km |
| 径向速度 | V | 27 | 0.5, 1.5, 2.4, 3.5, 4.3, 6.0, 9.9, 14.6, 19.5 | 1°×1km |
| 径向速度 | V | 26 | 0.5 | 1°×0.5km |
| 相对风暴径向速度图 | SRM | 56 | 0.5, 1.5, 2.4, 3.5, 4.3, 6.0, 9.9, 14.6, 19.5 | 1°×1km |
| 组合反射率因子 | CR | 37 | | 1km×1km |
| 分层组合反射率因子最大值 | LRM | 65 | 显示中间层的最大反射率因子，中间层的底部定义为-20℃等温线高度，顶为底以上3km的高度，主要用来判断强冰雹的区域 | 4km×4km |
| 垂直累积液态水量 | VIL | 57 | | 4km×4km |
| 风暴路径信息 | STI | 58 | | |
| 冰雹指数 | HI | 59 | | |
| 中气旋 | M | 60 | | |
| 龙卷涡旋特征 | TVS | 61 | | |
| 速度方位显示风廓线 | VWP | 48 | | 0.3km |
| 1h累积雨量 | OHP | 78 | | 1°×2km |
| 3h累积雨量 | THP | 79 | | 1°×2km |

① 引自广东省气象局局长许永铨在2012年全省气象工作会议上的工作报告

因此,集合预报是一种必然的选择,不仅对气候预测、延伸预报是如此,对于短期天气预报,特别是灾害性天气短期预报亦是如此^[31]。

集合预报从20世纪90年代兴起,1992年集合预报系统在美国国家环境预报中心(NCEP)和欧洲中期天气预报中心(ECMWF)投入业务运行以来,集合预报系统在发达国家数值预报业务体系中占据了非常重要的位置。我国是世界上较早开展集合预报系统研发的国家之一。自2004年中国气象局国家气象中心承担世界气象组织天气研究计划(WMO/WWRP)“2008年北京奥运会中尺度集合预报研究开发项目”(简称B08RDP)以来,根据我国数值预报业务需求和集合预报技术发展特点,研究了我国区域中尺度模式预报误差快速增长特点,地形地貌细致特征和综合观测资料分布特点对误差增长幅度的影响,研制了与全球集合预报系统嵌套的多预报初始值、多物理过程的基于WRF的区域中尺度集合预报业务系统。该系统于2010年开始准业务运行。

目前,系统共有集合成员15个,每天12时(世界时,下同)运行1次,预报时效60h,产品空间分辨率 $0.15^{\circ} \times 0.15^{\circ}$,时间间隔3h,主要包括风、温、湿、位势高度、降水等多要素、多层次的集合平均、离散度、概率等,其中,强天气威胁指数(图2)、集合动力因子等产品为强对流天气预报提供了较好的参考^[32]。

3.2.2 RUC 系统

RUC系统的建立是为了充分利用高时空分辨率的观测资料,为数值模式提供高质量的初始场,同时,在高分辨率数值模式的基础上进行精细的数值预报,为预报员做短时、临近、精细化预报提供更加丰富的数值预报产品。

RUC同化技术在国外发展较早。1994年美国NCEP已有水平分辨率为60km,3h更新周期的业务

RUC系统。我国虽然在这方面起步较晚,但发展迅速。为做好2008年北京奥运会气象服务,北京城市气象研究所建立了一个基于WRF三维变分同化和WRF模式、具有同化多种中小尺度观测资料的RUC同化预报系统(BJ-RUC),提供的临近探空对北京地区强对流潜势预报具有一定的指示作用^[33]。目前国家气象中心准业务运行的GRAPES-RUC系统是在原广州热带海洋气象研究所的GRAPES-CHAF基础上吸收新版GRAPES-Meso模式与区域GRAPES-3DVar,并优化初始化部分开发建立的。该系统于2010年4月起投入准业务试验。

GRAPES-RUC系统预报模式水平分辨率为 $0.15^{\circ} \times 0.15^{\circ}$,预报范围覆盖了整个中国区域,每天00和12时两次冷启动,可以实现逐时或每3h一次同化分析,每3h做一次24h预报。通过对2009年汛期连续3个月的不同循环更新频次RUC对比试验的检验,从TS评分和预报偏差B值看,无论逐时或3h周期同化,GRAPES-RUC同化预报系统比业务预报效果有明显的改进^[34]。

3.3 主要技术方法的研发

专业化业务的发展离不开专业化技术方法的有力支撑。近年来,逐步建立了强对流天气监测和短临预报、中尺度分析、短期预报等一系列的技术方法,并不断进行改进完善,为业务发展提供了技术支持。

3.3.1 基于多源资料的强对流天气监测和临近预报技术

在SWAN监测技术的基础上,综合利用卫星、雷达、地闪和稠密区域自动站资料,建立了较为完善地基于多源观测资料、多类型、多时段的实时强对流天气监测技术。图3为2012年4月一次强对流天气过程的强对流天气分布图。在对自动站大风和降水资料、地闪资料进行质量控制的基础上,发展了包括雷暴、冰雹、大风以及短时强降水的强对流信息提取和统计技

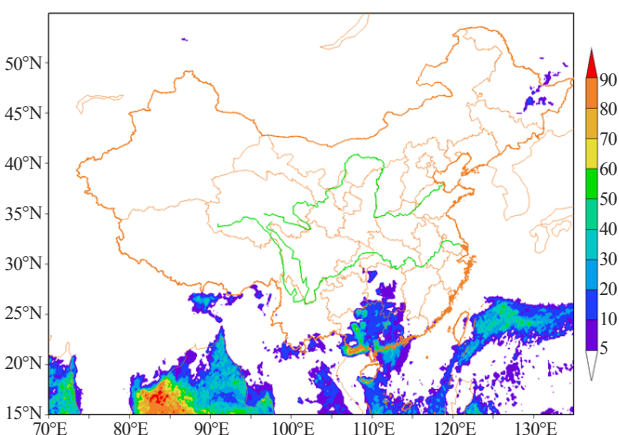


图2 2011年6月2日20时起报,未来36~39h强天气威胁指数概率预报

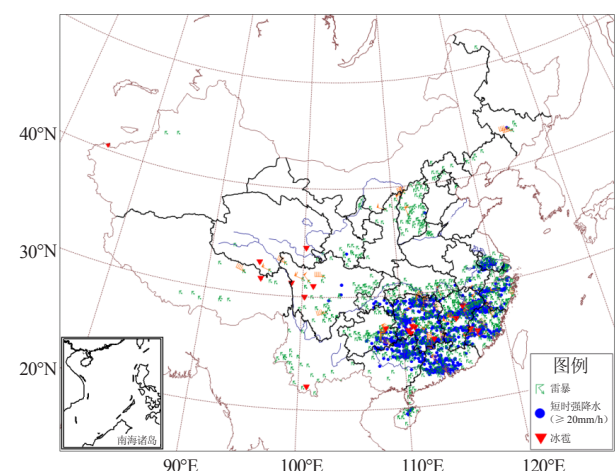


图3 2012年4月10日08时—13日20时全国强对流天气监测图

术^[15]；开发了地闪监测技术，通过地闪密度反映雷暴系统的强弱；改进了基于雷达资料的CTREC和TITAN算法，降低了对雷暴单体识别的错误率；研发了基于风云卫星的深对流云提取技术和MCS的识别追踪和外推预报技术。

3.3.2 中尺度天气诊断分析技术

中尺度天气的天气图分析已经成为强对流天气潜势预报的重要依据^[35]，而中尺度客观分析技术为中尺度天气分析业务的开展提供了重要的技术支持。利用Cressman逐步订正法实现了对探空资料、常规地面观测和加密自动站资料的快速客观分析和诊断，其中，探空资料分析2次/d，常规地面观测分析8次/d，加密自动站资料分析1次/h，一定区域（如京津冀地区）的加密自动站资料1次/10min，分析内容除了常规要素以外，主要包括与水汽、抬升和稳定度条件相关的物理量参数。开展了基于数值预报模式（如T639，EC，NCEP等）的强对流天气物理量参数的诊断，并在全面调研美国风暴预报中心（SPC）构建的强对流参数的基础上，结合我国强对流天气特点，对冰雹指数等综合参数进行引进与试用。

3.3.3 分类强对流客观预报技术

决定对流产生和组织结构的环境因素包括大气层结的稳定性、风的垂直切变、水汽条件和抬升（触发）机制。结合我国强对流天气特点，加强了对于雷暴生成、加强和消散的概念模型的认识与理解，总结了有利于强冰雹、雷暴大风、龙卷以及对流性暴雨等不同类别的强对流天气发生发展的环境条件^[8]。分类强对流客观预报技术就是在充分考虑各类对流天气产生的环境条件的基础上，综合利用物理量的统计特征和预报员的实践经验，选取对某一类强对流天气预报具有指示意义的物理参数作为预报因子进行预报，即“配料法”^[36]的技术思路。分类强对流客观预报技术自2011年汛期在国家气象中心投入业务试验，为预报员提供了直接的强对流预报产品，在强对流的预报中发挥了一定的作用。但对于不同地区、不同季节，该方法的预报能力还存在较大的差异，仍需在检验的基础上做进一步的改进与完善。

3.4 专业化业务系统的建设

在强对流天气业务向专业化方向发展的同时，业务系统的研发也由原来的综合性逐渐向专业化方向转变。近年来，在气象信息综合分析处理系统3.0（MICAPS 3.0）的基础上开发了结合强对流天气业务特点的专业化版本，开发了灾害性天气短时临近预报系统（SWAN），这些系统的研发推广对全国强对流天气业务的开展起到了很好的推动作用。

3.4.1 MICAPS 强天气专业化版本

1996年，开发了MICAPS 1.0；2007年，完成MICAPS 3.0的系统升级；2008年，MICAPS 3.0系统在中央气象台和省级气象台推广应用^[3]。结合强对流天气业务的特点，在MICAPS 3.0的基础上，增加了非常规观测资料的显示分析，包括雷达主要PUP产品、雷达基数据、卫星GPF数据、卫星AWX格式数据、GPS水汽、闪电定位、AMDAR资料、风廓线资料等的显示分析；增加了中尺度天气分析功能，不仅定义了每一类中尺度天气符号，同时也提供了便捷的基于高空、地面观测的多种要素的客观分析和变化场计算；改进了T-logP图制作，增加了大量基于探空资料的物理参数计算，目前可计算的参数有50多种，并增加了风矢端图、高空风分析和多种物理量的垂直分析，提供了在探空图上的交互订正功能^[37]。

3.4.2 SWAN 系统

2008年，中国气象局启动灾害性天气短时临近预报系统开发。SWAN系统在MICAPS系统的基础上，融合了数值模式产品和雷达、卫星、自动站等探测资料，提供了丰富的产品和功能，主要包括六大类，分别为基于实况资料的探测和分析产品、外推预报产品、数值模式与雷达资料的融合预报产品、实时客观检验产品、灾害性天气综合自动报警，以及预报预警制作和发布功能^[38]。在系统的开发过程中，研发了多项监测预报技术方法，包括三维雷达拼图技术^[39]、COTREC（改进的交叉相关法）^[40]、风暴识别技术^[41]、TITAN（风暴识别、追踪、分析和临近预报系统）^[42]等。目前，SWAN系统已经在全国气象台投入了业务应用，并在强对流天气的短临预报中发挥了越来越重要的作用。图4给出了SWAN部分功能的界面。

4 问题与挑战

近年来，虽然全国强对流天气监测和预报业务取得了一定的进展，但由于我国强对流天气业务的专业

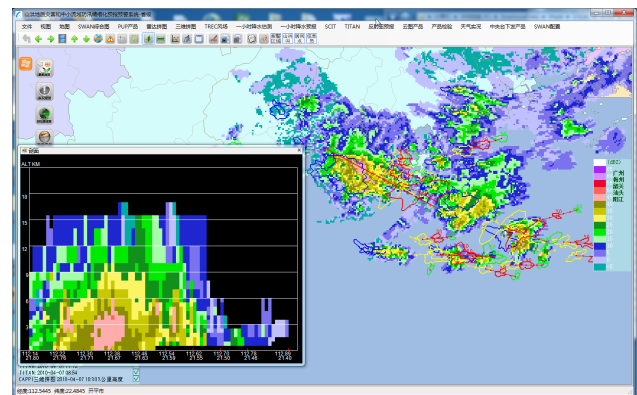


图4 SWAN系统区域雷达拼图、雷达回波剖面 and TITAN 算法产品界面

化发展还处于起步阶段，与美国等强对流预报技术发达的国家相比，在很多方面还存在一定的差距，面临着严峻的挑战。因此，从整体上提高我国强对流天气业务的监测预报水平，仍是一项长远的任务。目前存在的主要问题包括以下几个方面。

4.1 分类的强对流天气精细化预报基础还比较薄弱

分类的强对流天气预报是强对流预报精细化所必须面临和解决的问题。美国SPC基于多年的强对流天气实况和高分辨率的再分析资料，对不同类别的强对流天气、特别是龙卷天气的物理量阈值进行了详细的统计分析，这些结果对实际业务具有很好的参考价值。同时，基于强对流天气发生发展的物理机制，构建了适用于不同类别强对流天气预报的综合参数，并在集合预报的基础上研发了强对流天气的概率预报技术。相对而言，目前我国对不同类别的强对流天气演变特征及形成机理还缺乏深入系统的认识，分类的强对流天气的客观预报方法的研发刚刚起步，业务试用的基于“配料法”的客观预报产品仍需不断进行检验评估与改进。同时，针对强对流天气的短时预报方法尚在研发中，目前还没有比较有效的技术方法解决未来2~12h短时预报时效内的预报问题。

4.2 以中尺度数值模式为基础的业务技术支撑不足

数值预报是天气预报的基础，中尺度数值预报则对强对流天气预报非常重要。SPC于2001年5月开始在业务中使用短期集合预报（SREF），经过十余年的业务应用，SREF已经成为SPC业务的重要参考。同时，RUC系统也不断改进，2012年5月，RAP取代了1994年开始在业务中使用的RUC，成为NOAA下一代逐小时更新的同化/模式系统。相比较而言，我国现有的中尺度数值预报模式在预报性能、产品时效等方面还有很多有待改进之处，同时基于GRAPES的区域集合预报系统尚未业务化，相应地以中尺度数值模式为基础的强对流业务产品研发受到一定限制，适合强对流天气预报的客观产品不多。

4.3 科学规范的强对流预报检验业务尚未开展

检验是天气预报业务的重要环节之一，既可以对预报进行实时的评定评估，同时也能及时发现预报中的问题，促进预报能力的不断提高。SPC对各类预报的检验业务非常完善，对于分类概率预报，主要采用以Brier评分和可靠性曲线为主的概率预报检验；对于警戒状态信息（即Watch），分析百分之几的警戒包含有强天气的发生，百分之几的强天气发生在警戒区中。对于地方台站发布的预警信息，一般用预警准确率、虚警率和提前时间来表示，如对于龙卷，2010年，龙卷的预警准确率为72%、虚警率为74%，提前

发布时间为14min。我国由于强对流天气业务起步比较晚，且其检验与一般的降水预报检验在技术方法等方面存在很大的不同之处，因此，到目前为止，无论是强对流天气的落区预报，还是预警信号的发布，都还没有建立全国统一规范的检验标准，检验业务尚未开展。这也是强对流天气业务发展亟待解决的主要问题之一。

4.4 强对流天气业务系统还不健全

专业化的业务系统是现代天气业务专业化发展的重要支撑。SPC根据强对流天气特点和业务需要，开发了专门针对强对流天气分析预报的业务系统。人机交互的探空分析诊断系统（NSHARP）能够提供实况高空观测、数值预报资料、点预报和飞机探空报文资料的分析和诊断，具有丰富的显示功能和人机交互功能，是强对流天气预报不可或缺的有力工具。综合地面观测和RAP的客观分析系统（SFCOA）能够提供逐小时、40km分辨率的三维要素场，为强对流天气诊断分析提供支持。目前，我国强对流天气主要业务系统的专业化程度相对还比较低，与实际业务需求还有一定的差距，MICAPS强对流专业版本在探空资料分析、集合预报产品的显示分析、基于常规和非常规观测资料、灾情资料和预警信号等信息的综合监测等方面仍有很大的提升空间，SWAN等短时临近预报业务系统仍需结合不同地区的特点进行本地化的改进与完善。

5 未来发展

结合我国实际，未来全国强对流天气业务发展的思路为围绕提高预报准确率的核心要求，以多源资料融合技术、高分辨率数值预报产品和强天气快速诊断分析为基础，以动力和统计相结合的数值预报产品释用技术、集合数值预报技术和强对流天气概念模型为技术支撑，国家级重点发展分类强对流概率预报指导产品，省级重点发展短时临近预报指导产品，省级以下业务部门重点为强对流天气实时监测和临近预报预警，扎实地推进全国强对流天气业务的发展。未来几年的重点任务如下。

5.1 加强强对流天气监测和短临预报技术研发

完善基于SWAN系统和多源观测资料融合的强对流天气监测技术；研发基于自动站雨量与瞬时风速、闪电和雷达拼图等资料的5~10min时间间隔的全国强对流天气监测产品；改进基于雷达的TITAN算法和基于卫星资料的MCS临近预报算法；发展基于强对流天气监测、临近预报算法、中尺度数值模式以及“配料法”的强对流天气短时预报技术。

5.2 改进中尺度天气分析

加强对中尺度系统的空间结构、要素配置和物理过程演变的认识和理解；进一步完善基于高空、地面和数值模式产品的中尺度天气高空地面综合图分析；发展针对重点区域、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；开发基于GRAPES-RUC的高时空分辨率的客观综合分析产品；修订《中尺度天气分析技术规范》。

5.3 提高强对流天气预报的精细化水平

利用SWAN系统技术，加强预报员对高分辨率快速分析预报产品的分析和应用；完善和发展基于多种资料的灾害性天气发生、发展的动力、热力特征物理参数客观诊断分析技术；增强对中尺度天气系统及其特征物理量的综合分析能力，总结提炼不同区域、不同季节、不同类别强对流天气的概念模型、特征物理量及其阈值；逐步发展基于集合预报的强对流天气概率预报技术，正式开展基于集合预报的分类强对流天气概率预报业务。

5.4 稳步推进强对流预报的检验业务

制定针对强对流预警信号的检验规范，开展强对流预警信号检验业务；制定针对强对流天气短时和短期潜势落区预报的评分技术，开展强对流落区预报的检验业务；试验开展强对流天气过程检验，提高对重大强对流天气过程预报能力的定量化评估；尝试使用网格化的多源资料进行对流和强对流预报评分；针对强对流概率预报业务试验，发展概率预报评分技术。

致谢：本文得到国家气象中心端义宏主任的悉心指导，国家气象中心郑永光、金荣花、谌芸、张涛、盛杰、曹莉和中国气象局数值预报中心邓国、郝民等给予了热情帮助，广东省气象局伍志芳提供了相关素材，在此一并深表感谢！

参考文献

- [1] 章国材. 强对流天气分析与预报. 北京: 气象出版社, 2011.
- [2] 周庆亮. 美国强对流预报主观产品现状分析. 气象, 2010, 36(11): 95-99.
- [3] 端义宏. 中央气象台天气预报服务业务的过去、现在和将来. 气象, 2010, 36(7): 5-11.
- [4] 矫梅燕. 天气业务的现代化发展. 气象, 2010, 36(7): 1-4.
- [5] 何立富, 周庆亮, 谌芸, 等. 国家级强对流潜势预报业务进展与检验评估. 气象, 2011, 37(7): 777-784.
- [6] 俞小鼎. 新一代天气雷达与强对流天气预警. 高原气象, 2005, 24(3): 456-464.
- [7] 许小峰. 中国新一代多普勒天气雷达网的建设与技术应用. 中国工程科学, 2003, 5(6): 7-14.
- [8] 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展. 气象学报, 2012, 70(3): 311-337.
- [9] 杨军, 许健民, 董超华. 风云气象卫星40年: 国际背景下的发展足迹. 气象科技进展, 2011, 1(1): 6-13.
- [10] 古红萍, 马舒庆, 王迎春. 边界层风廓线雷达资料在北京夏季强降水天气分析中的应用. 气象科技, 2008, 36(3): 300-303.
- [11] 杨引明, 陶祖钰. 上海LAP-3000边界层风廓线雷达在强对流天气预报中的应用初探. 成都信息工程学院学报, 2003, 18(2): 155-160.
- [12] 林中庆, 曹亚平, 赵小伟. 风廓线雷达资料在一次强对流天气过程中的应用. 气象研究与应用, 2011, 32(3): 19-22.
- [13] 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.
- [14] 叶其欣, 杨露华, 丁金才, 等. GPS/PWV资料在强对流天气系统中的特征分析. 暴雨灾害, 2008, 27(2): 141-148.
- [15] 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.
- [16] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京: 气象出版社, 2006.
- [17] 郑媛媛, 俞小鼎, 方翀, 等. 一次超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析. 气象学报, 2004, 62(3): 317-328.
- [18] 毛冬艳, 乔林, 陈涛, 等. 2004年7月10日北京暴雨的中尺度分析. 气象, 2005, 31(5): 42-46.
- [19] 孙继松, 王华, 王令, 等. 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, 2006, 30(2): 221-234.
- [20] 张芳华, 陈涛, 周庆亮, 等. 2004年7月12日上海飊线天气过程分析. 气象, 2005, 31(5): 47-51.
- [21] 刘淑媛, 孙健, 杨引明. 上海2004年7月12日飊线系统中尺度分析研究. 气象学报, 2007, 65(1): 84-93.
- [22] 谢健标, 林良勋, 颜文胜, 等. 广东2005年“3·22”强飊线天气过程分析. 应用气象学报, 2007, 18(3): 321-329.
- [23] 曲晓波, 王建捷, 杨晓霞, 等. 2009年6月淮河中下游三次飊线过程的对比分析. 气象, 2010, 36(7): 151-159.
- [24] 俞小鼎. 强对流天气的多普勒天气雷达探测和预警. 气象科技进展, 2011, 1(3): 31-41.
- [25] 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.
- [26] 江吉喜, 叶慧明, 陈美珍. 华南地区中尺度对流性云团. 应用气象学报, 1990, 1(3): 232-240.
- [27] 郑新江, 赵亚民. 华北强对流云团的活动及其天气特征. 应用气象学报, 1992, 3(增刊): 88-92.
- [28] 江吉喜, 范梅珠. 夏季青藏高原上的对流云和中尺度对流系统. 大气科学, 2002, 26(2): 263-270.
- [29] 项续康, 江吉喜. 中国南方地区的中尺度对流复合体. 应用气象学报, 1995, 6(1): 9-17.
- [30] 费增娉, 王洪庆, 张焱, 等. 基于静止卫星红外云图的MCS自动识别与追踪. 应用气象学报, 2011, 22(1): 115-122.
- [31] 章国材. 中短期天气集合预报问题. 气象, 2004, 30(4): 3-5.
- [32] 邓国, 龚建东, 邓莲堂, 等. 国家级区域集合预报系统研发和性能检验. 应用气象学报, 2010, 21(5): 513-523.
- [33] 陈敏, 范水勇, 郑祚芳, 等. 基于BJ-RUC系统的临近探空及其对强对流发生潜势预报的指示性能初探. 气象学报, 2011, 69(1): 181-194.
- [34] 郝民, 徐枝芳, 陶士伟, 等. GRAPES RUC系统模拟研究及应用试验. 高原气象, 2001, 30(6): 1573-1583.
- [35] 张小玲, 张涛, 刘鑫华, 等. 中尺度天气的高空地面综合图分析. 气象, 2010, 36(7): 143-150.
- [36] Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A. Flash flood forecasting: An ingredients based methodology. Wea Forecasting, 1996, 11(4): 560-581.
- [37] 李月安, 曹莉, 高嵩, 等. MICAPS预报业务平台现状与发展. 气象, 2010, 36(7): 50-55.
- [38] 胡胜, 孙广凤, 郑永光, 等. 临近预报系统(SWAN)产品特征及在2010年5月7日广州强对流过程中的应用. 广东气象, 2011, 33(3): 11-16.
- [39] 肖艳皎, 刘黎平. 新一代天气雷达网资料的三维格点化及拼图方法研究. 气象学报, 2006, 64(5): 647-657.
- [40] 陈雷, 戴建华, 陶岚. 一种改进后的交叉相关法(COTREC)在降水临近预报中的应用. 热带气象学报, 2009, 25(1): 118-122.
- [41] 胡胜, 顾松山, 庄旭东, 等. 风暴的多普勒雷达自动识别. 气象学报, 2006, 64(6): 796-808.
- [42] 韩雷, 王洪庆, 谭晓光, 等. 基于雷达数据的风暴体识别、追踪及预警的研究进展. 气象, 2007, 33(1): 3-10.