

# 中国强对流天气预报业务发展

张小玲 杨波 盛杰 田付友 周康辉 林隐静 朱文剑 曹艳察  
(国家气象中心, 中国气象局, 北京 100081)

**摘要:** 强对流天气具有空间尺度小、生命史短、天气剧烈并极易造成人员伤亡和财产损失的特点。近10年, 伴随着国家级强对流专业化预报中心的建设, 我国已经建立起包括实时监测、临近预警和短期潜势预报的强对流天气预报业务, 初步实现对雷暴、短时强降水、雷暴大风和冰雹的监测预警以及72 h内的潜势预报。但对龙卷等小尺度强对流天气尚不具备监测和预警能力。中国气象局正在开展龙卷预警试验, 将依赖于对流可分辨数值模式的发展以及高分辨率数值模式预报结果与多源观测资料的综合应用技术发展, 建立短时临近无缝隙预报技术, 提升致灾性强对流天气的短时临近预警能力和龙卷等小尺度强对流天气的监测能力。

**关键词:** 强对流, 预报, 监测, 预警

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.03.001

## Development of Operations on Forecasting Severe Convective Weather in China

Zhang Xiaoling, Yang Bo, Sheng Jie, Tian Fuyou, Zhou Kanghui, Lin Yinjing, Zhu Wenjian, Cao Yancha  
(National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

**Abstract:** Severe convective weather characterizes as the small scale, short life cycle, violent weather and easy to cause casualties and property loss. In recent ten years, since the national center for severe convective weather prediction being built, the severe convective weather monitoring, nowcasting and outlook operations, which include the monitoring in real time, warning in 0-2 h and prediction in 72 hours for thunderstorm, short-time heavy rainfall, thunderstorm high wind and hail, have been developed, but there is now little capability to monitor and warn the smaller-scale convective weather such as tornado. China Meteorological Administration is launching the tornado warning experiment to enhance the capabilities of monitoring and warning the the disastrously severe convective weather on smaller scale and very short time range like tornado, by developing the seamless-very short range forecasting techniques which relies on the convective-available numerical models and the compositive applications of numerical weather prediction outputs and multiple observation data.

**Keywords:** severe convective weather, forecast, monitoring, warning

### 0 引言

强对流天气具有空间尺度小、生命史短但造成灾害剧烈的特点。因此, 强对流天气预报是包括我国在内的众多国家天气预报业务技术攻克的重点。由于时空尺度小, 国内外业务技术发展的重心都聚焦于对流监测和短时临近预警技术的发展。国外发达国家均在致力于发展能更好识别中小尺度对流天气的雷达等遥感探测技术、临近预警技术和对流可分辨的快速更新同化数值分析预报技术, 并在此基础上发展短时临近无缝隙的强对流预警业务。

世界气象组织(WMO)2005年定义的临近预报(或者称为甚短时预报)为0~6 h的天气预报。Wilson等将这一时效内的临近预报技术概括为3类: 在强度和尺度不变假设下的外推和基于过去强度和尺度变化趋势的外推、考虑风暴生消过程的概念模型专家系统以及数值模式预报技术<sup>[1]</sup>。我国预报业务通常把0~2 h的天气预报称为临近预报, 因此本文仍然把0~2 h的预报称为临近预报, 2~12 h称为短时预报。

针对强对流天气系统的0~6 h预报, 各大气象研究和业务中心主要基于雷达回波与卫星图像的简单外推以及实践经验, 发展了各种类型的短时临近预报(nowcasting)系统, 业务应用表明它们在0~1 h的预报中相当有效。如美国国家大气研究中心(NCAR)研发的Auto-Nowcaster、美国强风暴实验室(NSSL)

收稿日期: 2017年9月30日; 修回日期: 2018年2月26日  
第一作者: 张小玲(1972—), Email: zhangxl@cma.gov.cn  
资助信息: 科技部重大专项(2017YFC1502003); 国家重点基础研究发展计划(2013CB430106)

研发的WDSS-II和英国的GANDOLF等<sup>[2-5]</sup>。

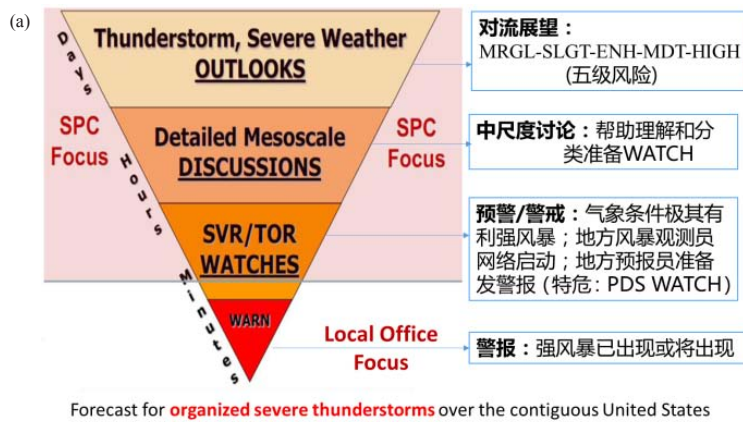
然而由于缺乏对强对流系统的发生、发展和消亡的物理机制描述，以外推为主的短时临近预报系统预报能力随预报时效增加迅速降低<sup>[1]</sup>，尤其是对强对流系统发展、演变的预报。俞小鼎等在对国内外雷暴和强对流临近天气预报技术进行全面回顾后指出，临近预报系统应该建立在风暴尺度数值预报模式的集合预报基础上，采用适当的初值产生方法和模式不确定性处理方法，以及合适的的数据同化技术<sup>[6]</sup>。这一观点与陈葆德不谋而合，后者认为，采用数值模式预报强对流系统，虽然对动力与物理过程的描述存在着各种各样的不足，但对强对流系统活动的预报在原理上应该远优于简单的外推方法；鉴于强对流系统水平尺度较小、生命史较短的特点，模式初始时刻对当前对流系统的准确把握是关键<sup>[7]</sup>。

美国1991年开始研究快速更新同化技术，1994年NCEP (National Centers of Environmental Prediction)

实现快速更新同化预报系统 (Rapid Update Cycle, RUC)，为强对流天气业务预报提供分析预报参考产品。2012年新一代的快速更新同化预报系统 (Repaid Refresh, RR) 取代原来的RUC系统 (<http://repaidrefresh.noaa.gov>)。更高分辨率 (3 km) 的RR系统 (High-Resolution Rapid Refresh, HRRR) 于2011年4月开始在NOAA/ESRL/GSD测试。

由于传统的外推预报技术与快速更新的数值模式预报技术在0~2和2 h以上各有优势，这两种技术的融合技术 (blending) 成为短时临近预报的重要发展方向，而据此建立无缝隙的强对流天气预报业务体系也已经成为发达国家提升强对流预警服务能力的业务建设方式。以美国为例，风暴预报中心 (SPC) 已建立了时间尺度从几个小时警戒到8天的强对流展望业务体系 ([www.spc.noaa.gov](http://www.spc.noaa.gov))，并与地方气象部门的临近警告构成了无缝隙的预报业务体系 (图1)。

我国的临近预报在省及以下地方业务单位已经



Forecast for **organized severe thunderstorms** over the contiguous United States

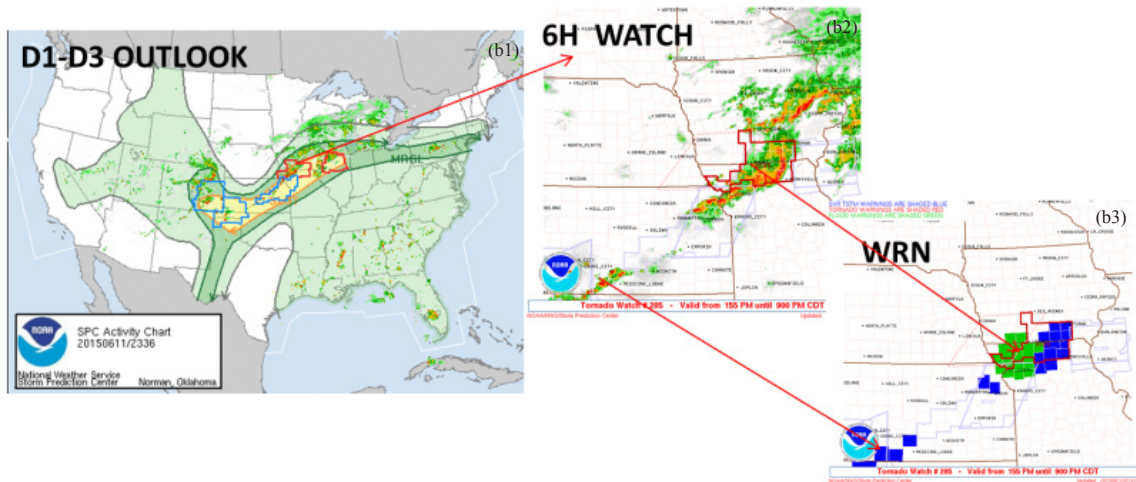


图1 美国强对流无缝隙预报体系 (a) 和预报产品示例 (b1~b3) (b1、b2中阴影表示雷达回波, b3阴影表示预警区域)

Fig.1 (a) The seamless forecasting operations on severe convective weather in the United States; (b1~b3) Samples of products: the shades denote radar echo in b1 and b2, and warning area in b3

比较成熟，但国家级专业化强对流天气预报业务始于2009年，且以短期预报为主，尚未建立起成熟的短时预报业务。本文将从无缝隙业务角度，介绍我国强对流天气的实时监测、临近预警、短时和短期预报业务现状及未来发展。

## 1 成熟的实时监测和临近预警及短期潜势预报业务

在我国业务中，对流和强对流天气主要包括雷暴、小时雨量20 mm以上的短时强降水、8级或者 $17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的雷暴大风、直径5 mm以上的冰雹或者任何级别的龙卷等。本文中所指中国的强对流均以此为标准。

### 1.1 监测

随着业务观测体系的逐渐成熟，近年来我国的强对流监测能力逐步提高。2009年以来，国家级强对流天气预报业务单位强天气预报中心利用雷达、卫星、常规和非常规地面观测站等多源观测资料，通过发展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（CTREC）雷达回波追踪技术、雷暴识别追踪分析、深对流云识别技术、中尺度对流系统识别和追踪技术以及闪电密度监测技术等，建立起强对流天气综合监测业务系统<sup>[8]</sup>。监测对象包括：雷暴、雷暴大风、冰雹、短时强降水以及对流云等。图2为强天气预报中心的强对流天气实时监测产品。该监测产品已经实现我国陆地和近海区域间隔1、3、6、12和24 h的雷暴、雷暴大风、冰雹、短时强降水分级监测。此外，利用闪电资料可监测中国及周边地区地闪总数及地闪密度。利用雷达资料还实时监测雷达回波及垂直液态水等多参量，实现基于雷达特

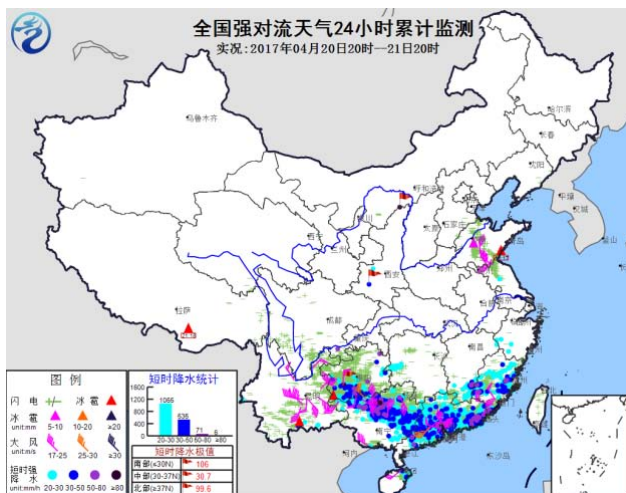


图2 2017年4月20日20时至21日20时24 h强对流天气监测  
Fig. 2 24 h monitoring of severe convective weather ending at 20 BT on 21 April 2017

征量的冰雹指数、中气旋和龙卷涡旋特征（TVS）等的识别和自动报警。

由于中国地域广阔，西部大量地区既无地面测站也没有雷达观测，发展基于静止气象卫星和闪电的强对流云团识别、追踪技术对于监测雷达资料不能覆盖的西部和中西部山区的中尺度对流系统（MCS）的发生发展非常重要。费增平等根据我国中尺度对流天气的特点，在对MCS云团重新定义的基础上，发展了基于图像和时间序列分析技术的MCS自动识别和追踪技术<sup>[9]</sup>。在此基础上，强天气预报中心基于FY-2E卫星的IR1通道亮温、闪电资料对MCS进行了多阈值的自动识别、追踪和外推，实时输出MCS的位置、最低亮温、平均亮温、面积、椭圆率、移动方向及速度等相关信息（图3），为预报员在实时监测时判断强对流天气的强度、类型，并进行及时的预警，提供了重要信息<sup>[10]</sup>。

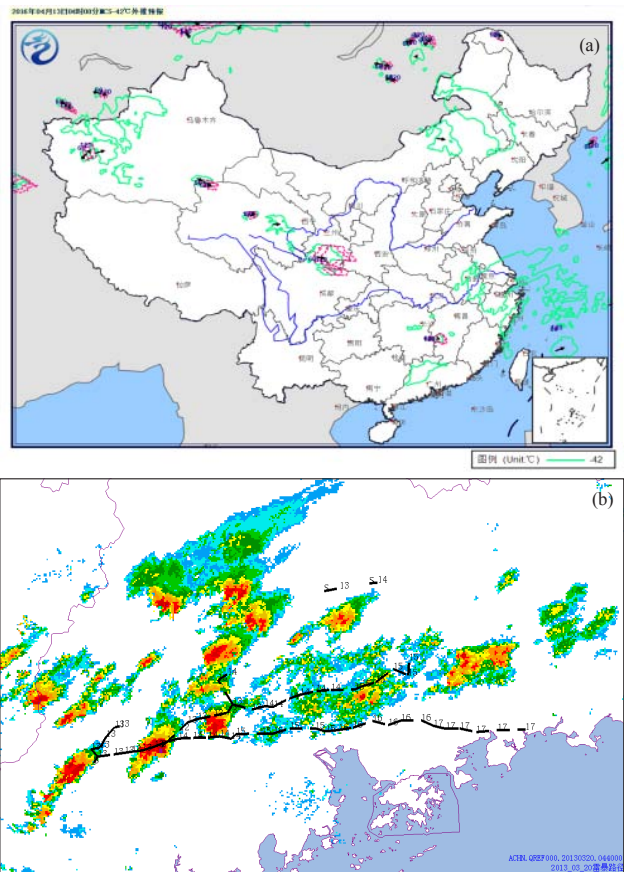


图3 基于卫星（a）、闪电（b）资料的中尺度对流系统识别  
（a中绿线、红线分别表示识别60和120 min预报的MCS；  
b中标值为识别的系统时间，阴影为雷达回波）

Fig. 3 Mesoscale convective system identification using the satellite (a) and lightning (b) data

### 1.2 临近预警

中国的临近预警业务主要由省、市、县三级气

象台站负责, 尤其面向公众的雷电、大风、冰雹、暴雨等强对流预警信号多由县或地市级气象部门发布。因此我国的强对流临近预警技术主要依赖以雷达回波为主的外推预报技术。利用雷达回波图像的直角坐标交叉相关 (CTREC) 技术在国内的强对流临近外推中被广泛应用<sup>[11-13]</sup>。以降水为例, 降水具有高时空非连续性特征, 利用雷达回波外推技术和自动站雨量订正技术的临近预报方案具有高精度的时空分辨率, 准确性也较高, 众多学者在此领域做了大量的研究工作<sup>[14-16]</sup>。图4是基于雷达回波外推技术TITAN和自动站雨量订正技术融合的逐10 min定量降水预报。近几年, 对快速发展的强对流系统的追踪效果更好的光流法也逐渐被使用<sup>[17]</sup>。

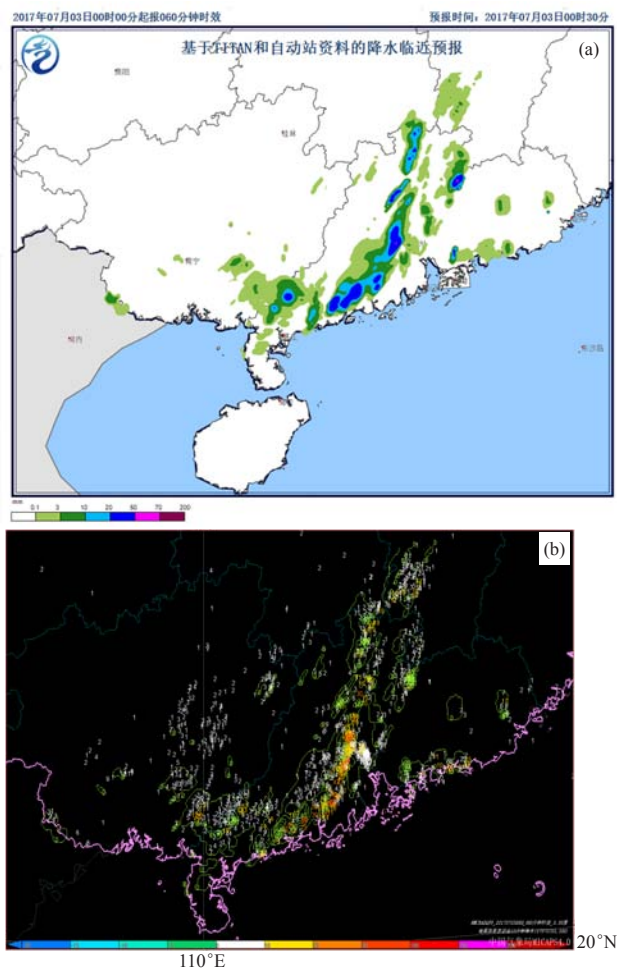


图4 雷达外推与自动站雨量订正融合方法起报的2017年7月3日00时00分起报060分钟时效 (a), 以及00—01时的1 h降水观测 (b) (等值线为定量降水预报, 彩色标值为降水观测值)  
Fig. 4 (a) Forecast of 60-min accumulated precipitation by a fusion method of radar extrapolation started at 00 BT 3 July 2017; (b) Observation at automatic rain gauge (The contours in Fig. 4a denote forecasting values, the lines and values in Fig. 4b are forecasting and observation respectively)

2008年, 国家气象中心和广东、湖北、安徽等十多个省(市)的气象部门联合研发我国自主知识产权的灾害天气短时临近预报系统 (Severe Weather Automatic Nowcast System, SWAN)。SWAN系统在MICAPS平台基础上, 融合了数值模式产品和雷达、卫星、自动站等探测资料, 提供了大量的临近预报产品 (图5)。SWAN系统包括6大类产品和功能: 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<sup>[18]</sup>。各省在大力发展临近预警技术的同时, 也开发了多个对流风暴和降水短时临近预报系统, 比如香港的SWIRL和SWIRL-II、北京气象局发展的BJ-ANC系统、中国气象科学研究所的雷电临近预警系统、广东的GRAPES-SWIFT、湖北的MYNOS等<sup>[19-23]</sup>。

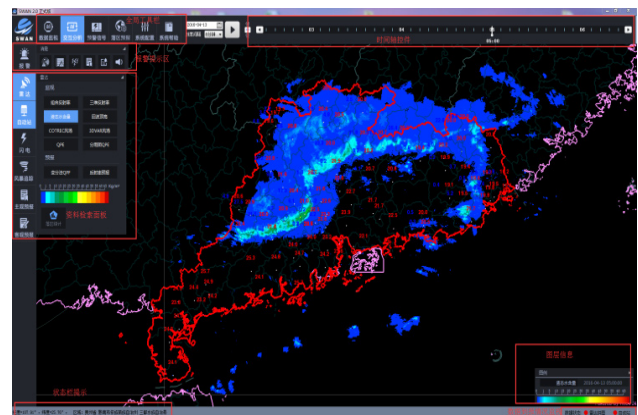


图5 SWAN系统客户端界面 (阴影为雷达资料反演液态水含量)

Fig. 5 SWAN client interface (The shade denotes vertical integrated liquid inverted from radar data)

### 1.3 短期潜势预报

强对流短期潜势预报是目前最为成熟的强对流天气预报业务。强天气预报中心在强对流多发的4—9月每天3次 (北京时06、11和18时) 发布未来24 h分类强对流 (雷暴、冰雹、雷暴大风和短时强降水) 落区和概率预报, 1次 (18时) 发布未来48和72 h的强对流落区预报。图6为2017年9月21日06时发布的当日08—12时强对流概率和落区预报。

Doswell等根据深厚对流发生必须满足对流不稳定、水汽和抬升条件, 提出了强对流的“配料法”预报方法<sup>[24]</sup>。综合上述对流条件和组织化发展条件的强对流潜势预报方法也逐渐成为中国强对流天气预报的主要方法, 并据此发展了基于“配料法”的分类强对流客观预报方法<sup>[25-29]</sup>。2016年5—8月雷暴和短时强降水的评估结果表明, 与预报员的主观预报相比, 72 h

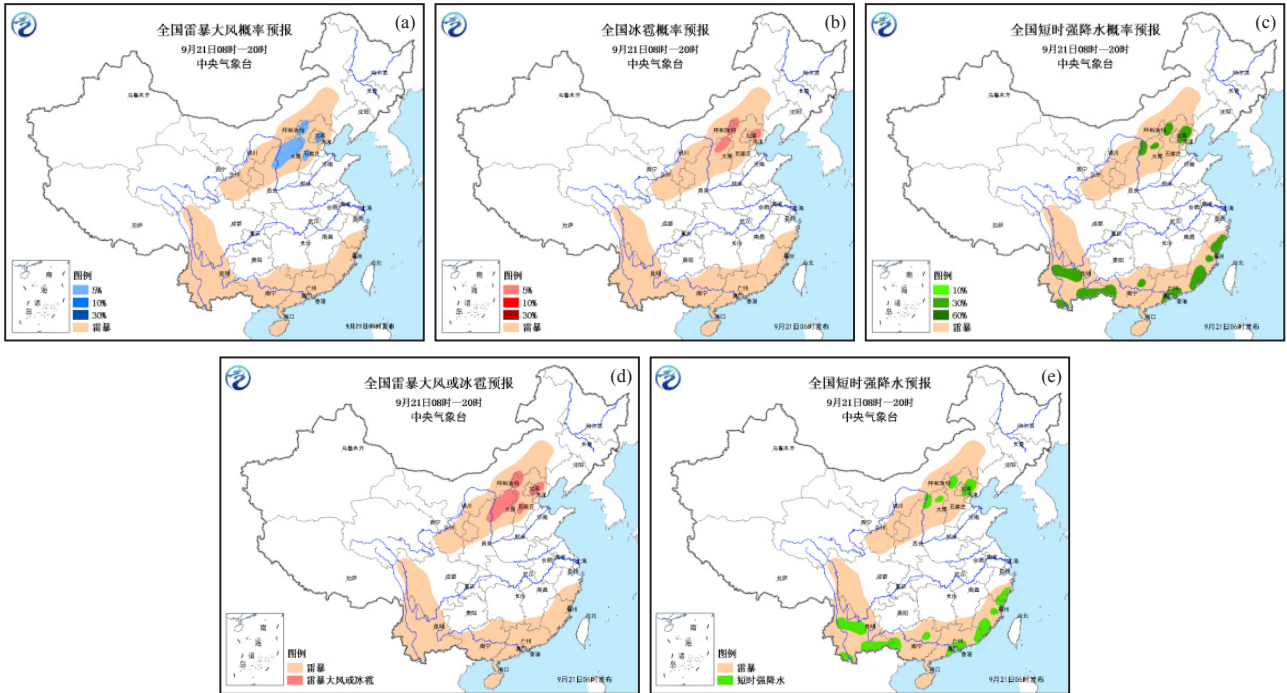


图6 2017年9月21日06时发布当日08—20时全国强对流天气概率和落区预报

Fig.6 Forecast for 12 h (08–20 BT) severe convective weather probability and location, issued at 06 BT on 21 September 2017

时效内的“配料法”客观预报概率在40%~60%的短时强降水预报具有较好的预报能力，雷暴预报也具有很好的参考意义（图7）。该方法可提供7天内逐3 h的

雷暴、短时强降水、冰雹和雷暴大风概率预报，其中雷暴、短时强降水预报能力最强。

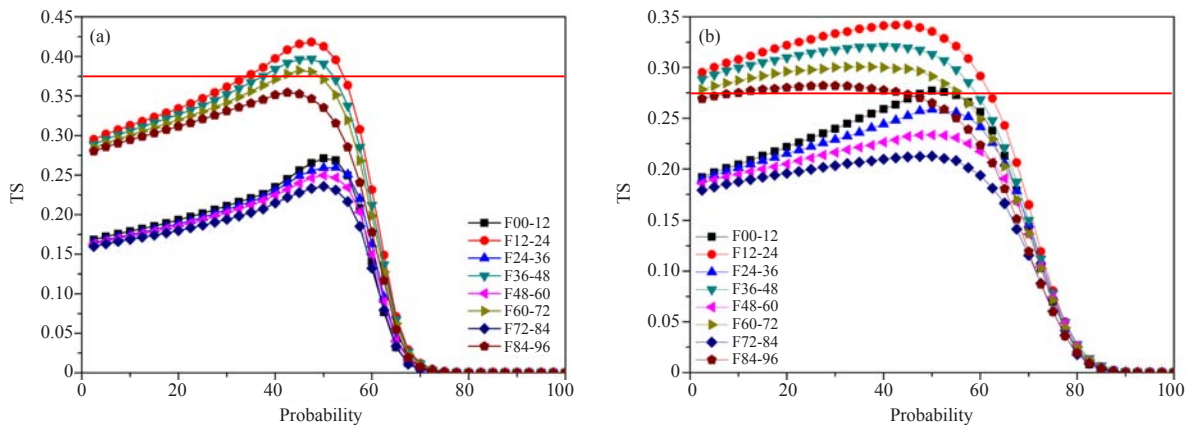


图7 2016年5—8月雷暴 (a) 和短时强降水 (b) 客观概率预报TS评分  
(红色实线表示当年24 h时效内的主观预报TS平均)

Fig. 7 TS scores of the objective probability forecasting for thunderstorm (a) and short-time heavy rainfall (b) in May to August 2016. The red horizontally solide lines denote annual averaged TS scores of subjective forecasting in 24 hours valid time

## 2 高频滚动更新的0~12 h无缝隙监测预警业务发展

强对流的实时监测业务、临近预警和短期潜势预报业务在近几年虽然趋于成熟，但尚存在如下三个

瓶颈问题。一是中小尺度尤其小尺度灾害天气定量监测能力有限；业务中虽然实现了基于多源观测的强天气（闪电、冰雹、大风、短时强降水）实时监测和对流系统的识别追踪，但是对于龙卷、下击暴流等小尺

度灾害天气利用现有的雷达、卫星等遥感探测手段或稠密地面观测,尚难以捕捉。二是外推技术以基于单一数据源的线性外推为主,缺少对多源资料的综合应用,缺乏对物理机理的考虑,外推有效时间很难逾越1 h,也无法解决对流初生问题。三是业务中尺度模式对 $\beta$ 中尺度及以下的对流系统的预报能力有限,对流可分辨的快速更新数值分析预报系统对强对流天气短时临近预警业务的支持不足。鉴于此,发展高频滚动更新的0~12 h无缝隙监测预警业务,尤其重点发展可更好监测初生对流和龙卷等小尺度强对流天气的监测技术、能更好挖掘多源观测资料和数值预报资料中的强对流发生、发展有效信息的人工智能大数据应用技术、对流可分辨数值模式及其应用技术,通过在我国中小尺度灾害天气影响严重地区开展龙卷等致灾性强对流天气的短时临近预警业务试验,以期在未来数年内对强对流天气的监测预警能力有大幅度的提升。

## 2.1 应用新遥感探测资料的强对流监测技术

2013年,美国完成了WSR-88D的双偏振升级改造工作。新一代双偏振雷达资料质量更好,可以识别降水类型,可以为龙卷预警服务提供更精细的龙卷路径图像。此外,通过高分辨率X波段雷达观测龙卷中的碎片产生的回波特征从而实现了对强降水伴随的龙卷或夜间发生龙卷的识别。这对于识别我国与登陆台风或梅雨锋暴雨相伴的龙卷具有启发意义。

在我国,双偏振雷达的应用处于起步阶段,广东、北京、上海等发达省(市)开始布设双偏振雷达。中国气象局在新一代天气雷达系统发展中将双偏振雷达的布设和应用作为重要建设内容。国内的相关研究表明,双偏振雷达除可获取降水系统的水平偏振方向上的回波强度、径向速度、速度谱宽外,还可以探测到差分反射率因子、双程差示传播相移差、传播常数差、相关系数和线性退极化比等参量。对这些参数进行分析、反演,可以判断降水粒子的形状、尺寸大小、相态分布、空间取向以及降水类型等更为具体的气象信息,尤其对中尺度对流系统产生的强降水、冰雹有更好的识别能力<sup>[30-35]</sup>。

2016年,日本、中国先后发射了新一代静止气象卫星Himawari-8/9和FY-4,两者都具备红外高光谱垂直探测能力,后者还具备闪电成像观测,对强对流天气监测预警具有里程碑意义<sup>[36]</sup>。因此,在我国如何用好这类具备垂直探测能力的静止气象卫星,发展相关的算法以更好地监测强对流尤其对流的初生,并结合雷达、自动站等观测资料发展利用多源观测资料的强对流自动报警技术和临近外推预报技术,对于提升

我国尤其是中西部地区的强对流预警能力大有裨益。

## 2.2 对流可分辨数值模式的发展和應用

如何利用好越来越丰富的观测资料和对流可分辨数值分析预报系统,提升强对流天气短时临近预报能力是当前国际发展的趋势。主要表现为两种策略:一种是致力于发展雷达等高频观测资料的同化技术,缩短数值模式的适应调整(spun up)时间,发展具备快速更新同化能力的对流可分辨数值分析预报系统。另一类则是通过将临近外推预报技术与高分辨率数值模式的预报结果的权重融合技术,发挥临近外推预报与数值预报技术的各自优势,形成短时临近无缝隙预报。前者的极致代表为美国强风暴实验室牵头开展的“Warn-on-Forecast”项目。该项目从2010年开始,首先采用逐5 min快速更新同化雷达资料实时得到高分辨率的风场和反射率场,对NOAA灾害性天气试验基地春季试验中强雷暴预警提供帮助<sup>[37-38]</sup>。最近几年,他们在美国业务对流可分辨集合预报系统HRRRE的基础上,通过逐15 min快速更新同化雷达资料,在灾害天气频发的特定区域内拟对有可能产生龙卷、大冰雹和局地极端大风的强雷暴系统,特别是超级单体的预警时效提前至60 min甚至更长<sup>[39]</sup>。该系统作为重要测试应用系统之一,在2017年灾害天气中试基地(HWT)的春季试验中被测试应用(<http://www.nssl.noaa.gov/projects/wof/news-e/>)。

快速更新同化系统的研发已进行了20多年,其在美国已逐步成为强对流短时临近预报的重要工具且在许多领域得到了应用。许多中尺度天气系统本质上是不可进行“确定性”预报的,因此发展基于集合预报的短时临近概率预报是未来一个重要方向。对流可分辨的集合预报技术近几年在美国已经由研究逐步迈向业务应用试验。美国一些与大气科学相关的研究机构 and 高校均开始实时运行对流可分辨的集合预报系统。一些研究机构甚至开始试验快速更新同化的集合预报系统,如俄克拉荷马大学(OU)的风暴分析预报中心(CAPS)通过近几年一直在发展空间分辨率为3 km、23个成员的WRF-ARW风暴尺度集合预报模式(SSEF),范围涵盖全美([http://forecast.caps.ou.edu/SpringProgram2017\\_Plan-CAPS.pdf](http://forecast.caps.ou.edu/SpringProgram2017_Plan-CAPS.pdf))。

对流可分辨模式虽然已经具备模拟中尺度对流系统的能力,但对强对流天气(如冰雹、龙卷、雷暴大风等)还缺少表达能力<sup>[40]</sup>。因此,基于对流可分辨数值模式,将能更精细表征中尺度对流系统发生发展特征的动力、云物理等物理量与环境特征参数,综合发展龙卷、冰雹、雷暴大风的预报成为对流可分辨数值

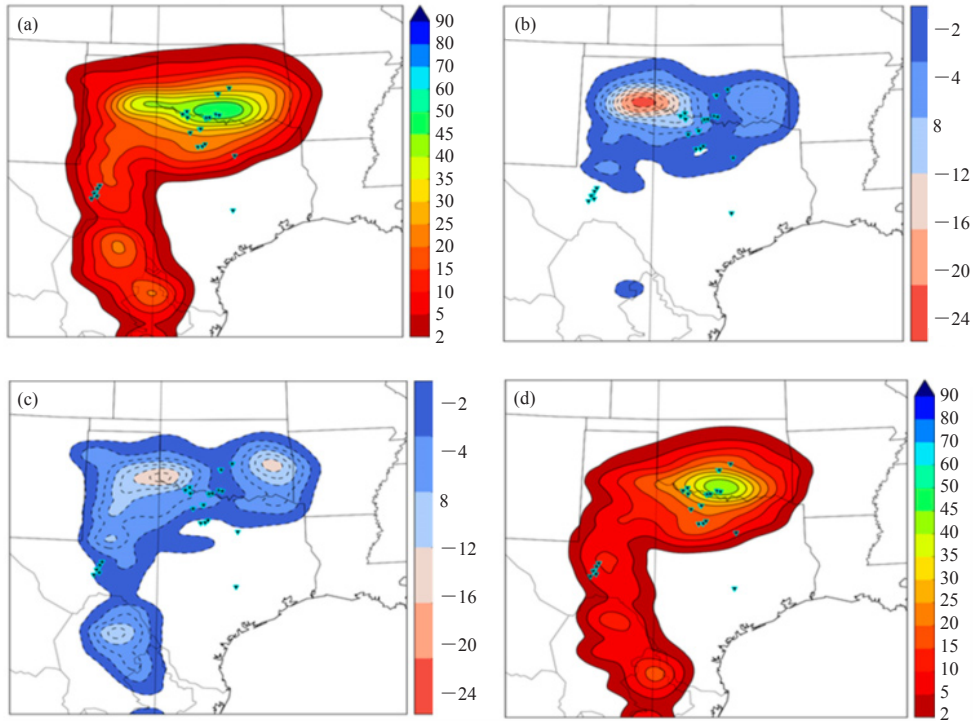


图8 综合上升气流风暴螺旋度 $UH \geq 25 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 和环境物理因子的龙卷邻域 ( $\sigma=50 \text{ km}$ ) 概率预报 (绿色三角形表示龙卷位置)  
(a) 仅考虑 $UH$ , (b) 要求 $LCL < 1500 \text{ m}$ 并且 $SBCAPE/MUCAPE > 0.75$ , (c) 要求 $STP \geq 1.0$ , (d) 要求 $LCL < 1500$ 、 $SBCAPE/MUCAPE > 0.75$ 并且 $STP \geq 1.0$ <sup>[45]</sup>

Fig.8 Probability forecasting for neighborhood ( $\sigma=50 \text{ km}$ ) tornado by synthetical consideration of updraft storm helicity ( $UH \geq 25 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ) and environmental physical factors (The green triangle denote location of tornado)

(a) only  $UH$  considered, (b)  $LCL < 1500 \text{ m}$  and  $SBCAPE/MUCAPE > 0.75$ , (c)  $STP \geq 1.0$ , (d)  $LCL < 1500$ ,  $SBCAPE/MUCAPE > 0.75$  and  $STP \geq 1.0$

模式的主要应用方式<sup>[41-44]</sup>。图8为在美国强风暴实验室(NSSL)对流可分辨集合预报系统(CPMs)的输出结果上综合考虑对龙卷有很好表征意义的动力参数 $UH$ 和环境条件发展的龙卷概率预报<sup>[45]</sup>。

近几年,国内也开始大力发展对流可分辨的数值模式技术。2009年上海建立了基于ADAS资料同化系统和区域中尺度数值模式WRF的快速更新同化预报系统(SMB-WARR, Shanghai Meteorological Bureau-WRF ADAS Rapid Refresh System),系统水平分辨率3 km,垂直分辨率51层,预报区域覆盖华东,通过3年来的测试及优化,该系统在短时临近天气预报中发挥了越来越重要的作用<sup>[7]</sup>。北京同化预报系统(BJ-RUC)亦采用WRF模式,3 km分辨率的预报区域主要覆盖北京及其周边地区,垂直分辨率均为37层,每隔3 h同化一次探空、地面、船舶观测资料以及北京地区的自动站和地基GPS PW可降水量观测资料,预报时效为18 h。其业务运行结果表明,3 km分辨率无论是降水时段、落区和雨量均较9 km分辨率有更好的预报效果,尤其是大量级降水的预报,但

系统对局地对流降水的预报能力仍然有限<sup>[46-47]</sup>。广东省在GRAPES\_Meso及三维变分同化基础上发展了快速更新同化预报系统(GRAPES-CHAF),该系统采用逐小时循环同化和每3 h间隔的滚动预报,预报时效为24 h,初步具备开展短时临近预报的能力<sup>[48]</sup>。中国气象局数值预报中心利用我国新一代数值预报系统GRAPES模式及GRAPES-3Dvar建立了全国稠密资料快速更新同化分析预报系统(GRAPES-RAFS),系统每3 h启动一次预报,预报时效为24 h,具有一定短时临近预报能力<sup>[49]</sup>。通过有效应用FY-2卫星资料、雷达组网拼图资料等改进优化GRAPES\_Meso中的云初始场方案,该系统对短时临近时效的云预报以及强降水预报有了明显改进<sup>[50]</sup>。通过对模式动力框架、边界层方案等优化调整,该系统对强降水和地面2 m温度的预报也有了明显改善<sup>[51]</sup>。

随着快速更新同化的对流可分辨数值预报技术发展,基于数值模式的临近预报技术迅速发展,并与外推预报等传统短时临近预报方法结合,如美国近年发展的CoSPA(Consolidated Storm Prediction for

Aviation)。陈明轩等、刘莲等将引进的VDRAS改进，初步形成了一个适合于实时运行的、快速更新的雷达四维变分分析系统，将高时空分辨率雷达组网观测资料与对流尺度数值模式结合应用到京津冀地区强对流临近预报<sup>[52-54]</sup>。2017年，北京在BJ-RUC和BJ-ANC基础上发展了RMAPS-IN (Rapid-Refresh Multi-scale Analysis and Prediction System—Integration) 系统，提供京津冀地区0~12 h的1 km空间分辨率、10 min快速更新循环的网格化分析和预报产品<sup>[55]</sup>。

纵观近年来国内外在对流可分辨数值模式技术，尤其是快速更新同化技术的发展，我国在未来几年，如何更好利用中国气象局数值预报中心和东部发达地区区域中心发展的对流可分辨数值预报系统，借鉴美国风暴预报中心的技术发展思路，发展基于对流可分辨数值模式的强对流天气释用技术，是提升强对流短时预报能力的关键。

### 2.3 人工智能技术在强对流天气预报中的应用

受限于观测手段，目前我国业务观测系统仍然无法对龙卷、下击暴流甚至冰雹进行及时有效地监测，这很大程度上影响了我国的中小尺度对流天气的机理认识的深入，也在很大程度上制约了依赖于物理机理认识的对流可分辨的数值模式发展和强对流天气预报技术发展。因此，将当前国际先进的大数据和机器学习方法应用于强对流天气的预报中，挖掘多源观测资料和数值模式预报资料中尚未被认识的强对流发生发展的有效信息，则有望超越现有强对流天气预报方法。强对流天气预报过程中所使用的时空数据具有空间和时间上的稠密特性，可以抽象为时空数据的高维问题。针对这一问题，一种通用方法就是使用卷积神经网络 (CNN) 对高维空间数据建模，其中最具有代表性的工作是Mathieu等提出的基于卷积神经网络的时空数据预测方法<sup>[56]</sup>。Benjamin等创建了动态卷积

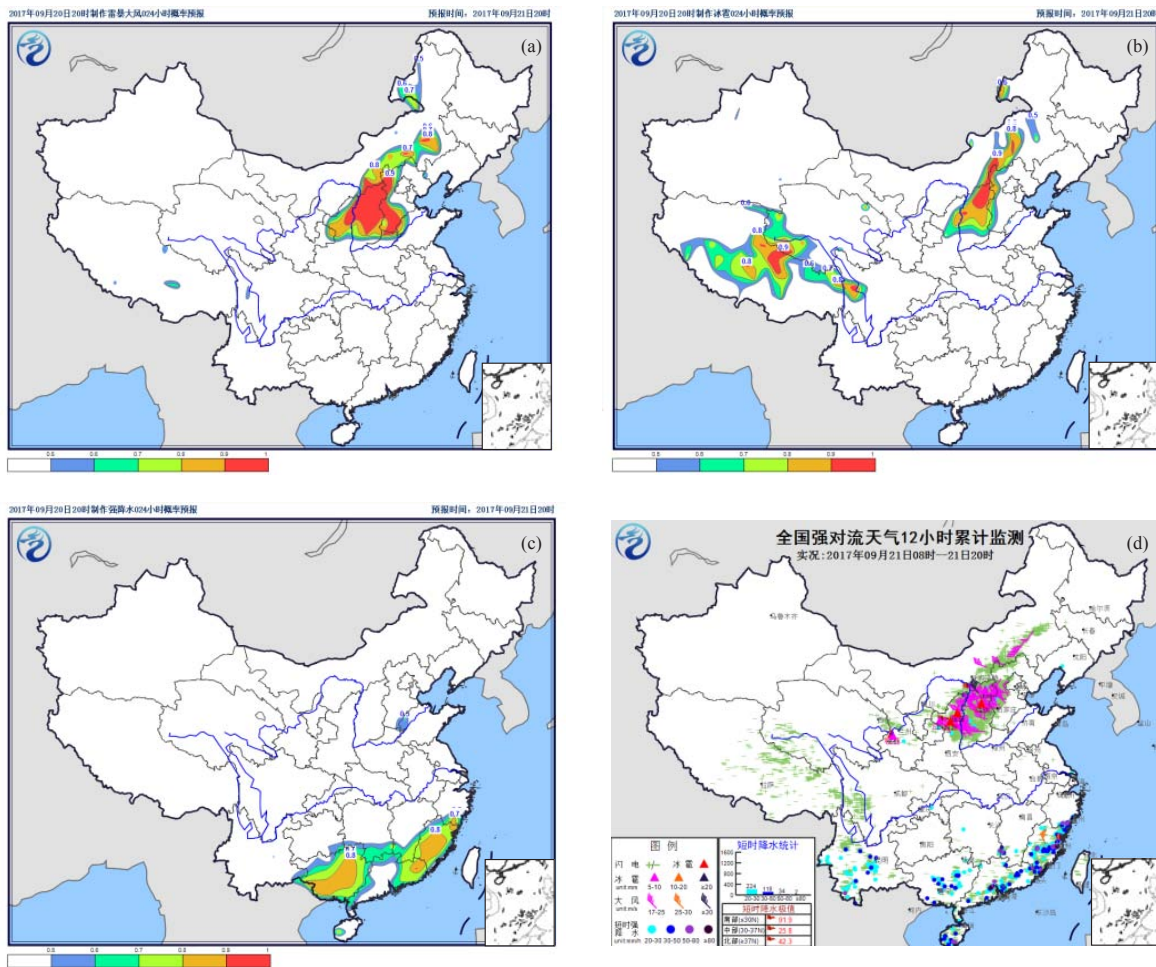


图9 基于深度学习方法的2017年9月21日14—20时强对流概率预报

(a) 雷暴大风预报, (b) 冰雹预报, (c) 短时强降水预报, (d) 实况观测

Fig. 9 Probability forecasting for 6 h (14–20 BT) severe convective weather on 21 September 2017 by Deep Learning method

网络 (Dynamic Convolutional Layer), 用以雷达回波外推的短时临近预报, 取得了比传统方法更好的效果<sup>[57]</sup>。2015年香港天文台和香港科技大学的研发团队将深度学习中的最主流的卷积神经网络和长短时间记忆网络结合起来, 提出了卷积-长短时间记忆网络 (ConvLSTM), 是深度学习技术应用于短时临近定量降水预报问题的开创性工作<sup>[58]</sup>。该方法现已被香港天文台应用于雷达回波外推。王舰锋等则将卷积神经网络 (CNN) 用于卫星云量计算<sup>[59]</sup>。

Zhou等将卷积神经网络 (CNN) 应用于强对流的分类预报, 而且利用该方法研制的分类强对流概率预报产品已经成为强对流天气预报重要的业务参考产品 (图9)<sup>[60]</sup>。

国内外研究新进展表明, 面向视频、图像序列等时空数据的深度学习技术已经在暴雨、强对流的短期预报和临近外推预警得到应用。若将其应用于充分挖掘雷达、卫星、自动站等多源观测资料和高分辨率数值模式预报资料的有效信息, 很有可能给强对流天气预报带来新的突破。

## 2.4 龙卷预警试验

龙卷是强对流天气中最为剧烈的一种天气, 破坏性极高。由于我国龙卷发生频率很低, 在龙卷多发地区如江苏、安徽等省, 具有一定的龙卷监测和预警

能力, 但尚未建立起龙卷的监测预警业务, 也迫切需要发展高度自动化的快速预警自动生成和发布平台。近几年, 龙卷等小尺度对流天气造成的灾害剧烈, 社会影响非常大, 如2015年长江监利段东方之星游轮翻沉致400多人死亡事件、台风彩虹登陆广东湛江期间广东佛山等地的龙卷致数十人伤亡事件、2016年江苏阜宁龙卷致数百人伤亡事件造成巨大的灾难和社会影响, 公众要求中国气象局开展龙卷预警预测的呼声前所未有的高涨。考虑到龙卷造成的严重灾害和龙卷高发区主要位于长江三角洲以及广东为主的华南地区<sup>[61-62]</sup>, 2017年国家气象中心联合江苏、安徽、广东、湖北和浙江五省开展龙卷预警业务试验, 以通过核心关键技术发展、包括社会观测在内的多源观测资料在业务中的有效应用、龙卷监测和临近预警业务流程和平台建设以及社会联防预警服务流程建设, 提升包括龙卷在内的破坏性对流大风等的预警能力。预警试验中, 国家级的试验对象扩展为龙卷等强致灾性强对流 (EF2以上龙卷、20 mm以上冰雹、10级以上大风、小时雨量超过50 mm或3 h雨量超过100 mm的局地极端强降水), 并重点发展支持上述致灾性强对流天气的监测和短时临近预警技术。图10为利用业务试验的对流可分辨3 km GRAPES\_CR发展的对龙卷具有较好表征的上升螺旋度UH诊断产品。

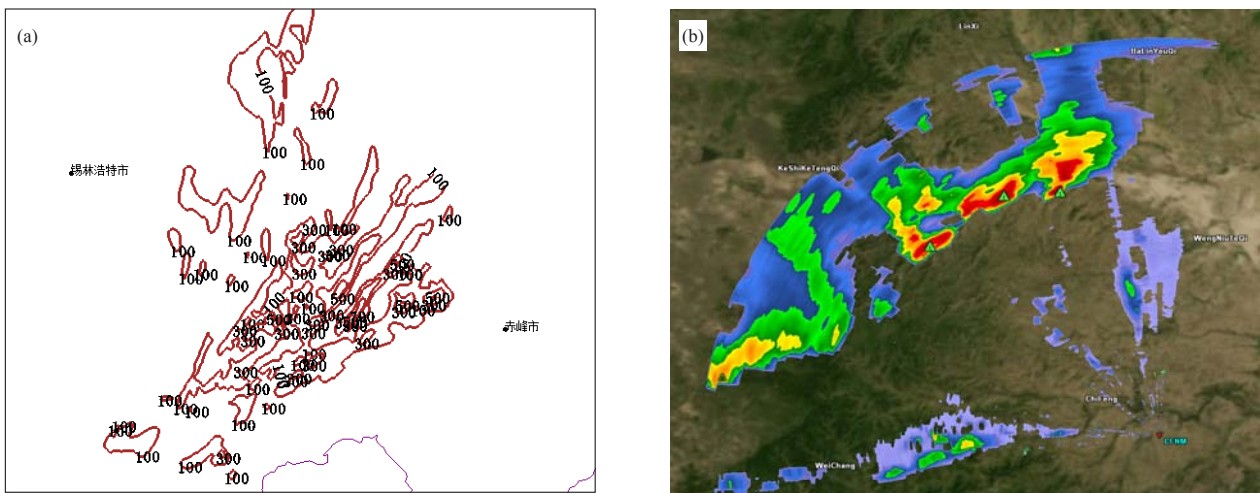


图10 GRAPES\_CR模式2017年8月11日08时起报的16时 (北京时) 上升螺旋度UH (a) 和对应时间赤峰雷达回波 (b)  
Fig.10 (a) The model GRAPES\_CR forecasting for updraft storm helicity (UH) at 16 BT, the forecasting started at 08 BT on 11 August 2017; (b) the radar echo at Chifeng Radar Station at the same time

## 3 结论

中国的强对流天气在最近10年发展迅速, 已经建立起包括实时监测、临近预警和短期潜势预报的强对流天气预报业务, 初步实现对雷暴、短时强降水、雷暴大风和冰雹的监测预警以及72 h内的潜势预报。

但是, 强对流天气造成的灾害仍然是当前最为严重的一种气象灾害, 与强对流天气预警服务相应的实时监测和短时临近预警技术是当前强对流天气面临的巨大挑战, 尤其是对于特别极端性的强对流天气 (如2016年6月23日江苏的龙卷、2017年5月7日的广州极

端暴雨等)强度预报。我国现有的业务观测系统和监测技术对中小尺度尤其龙卷、下击暴流等小尺度对流天气的定量监测能力有限。我国的临近预警主要依赖于基于雷达图像的外推技术,对多源资料的综合应用、物理机理的考虑尚显不足,外推有效时间很难逾越1 h,也尚未解决对流初生问题。我国对流可分辨的快速更新数值分析预报系统尚处于起步阶段。未来几年,伴随新一代双偏振雷达和FY-4卫星等遥感探测资料投入业务应用、快速更新数值分析预报技术的发展、能更好挖掘大数据有效信息的深度学习等人工智能技术在强对流天气预报中的应用,通过开展如龙卷预警试验这样的业务示范项目建设,逐步建立起实时监测与短时临近无缝衔接的监测预警业务,我国的强对流天气预报业务将有跨越式的发展,龙卷等强致灾性强对流天气的监测预警能力也将有所提升。

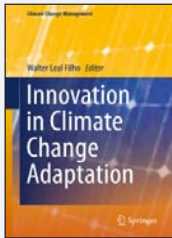
### 参考文献

- [1] Wilson J W, Feng Y R, Chen M, et al. Nowcasting challenges during the Beijing Olympics: Successes, failures, and implications for future nowcasting systems. *Weather and Forecasting*, 2010, 25(6): 1691-1714.
- [2] Muller C K, Saxen T, Roberts R, et al. NCAR auto-nowcast system. *Weather and Forecasting*, 2003, 18: 545-561.
- [3] Lakshmanan V, Smith T. The warning decision support system-integrated information. *Weather and Forecasting*, 2007, 22: 596-612.
- [4] Lakshmanan V, Rabin R, Brunner De V. Multiscale storm identification and forecast. *Journal Atmospheric Research*, 2003, 68: 367-380.
- [5] Stumpf G, Witt A, Mitchell E D, et al. The national severe storms laboratory mesocyclone detection algorithm for the WSR-88D. *Weather and Forecasting*, 1998, 13: 304-326.
- [6] 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.
- [7] 陈葆德, 王晓峰, 李泓. 快速更新同化预报的关键技术综述. *气象科技进展*, 2013, 3(20): 29-35.
- [8] 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.
- [9] 费增平, 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.
- [10] 周康辉, 郑永光, 蓝渝. 基于闪电数据的雷暴识别、追踪与外推方法. *应用气象学报*, 2016, 27(2): 173-181.
- [11] 陈明轩, 王迎春, 俞小鼎. 交叉相关外推算法的改进及其在对流临近预报中的应用. *应用气象学报*, 2007, 18(5): 691-701.
- [12] 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): 117-122.
- [13] Liang Q, Feng Y, Deng W, et al. A composite approach of radar echo extrapolation based on TREC vectors in combination with model-predicted winds. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2010, 27(5): 1119-1130.
- [14] 张亚萍, 程明虎, 夏文梅, 等. 天气雷达回波运动场估测及在降水临近预报中的应用. *气象学报*, 2006, 64(5): 632-646.
- [15] 胡胜, 汪瑛, 陈荣, 等. "雨燕"中风暴算法在北京奥运天气预报示范项目中的应用及改进. *高原气象*, 2009, 28(6): 1434-1442.
- [16] 王改利, 刘黎平, 阮征, 等. 基于雷达回波拼图资料的风暴识别、跟踪及临近预报技术. *高原气象*, 2010, 29(6): 1546-1555.
- [17] 曹春燕, 陈元昭, 刘东华, 等. 光流法及其在临近预报中的应用. *气象学报*, 2015, 73(3): 471-480.
- [18] 胡胜. 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): 11-15.
- [19] Li P-W, Wong W-K, Cheung P, et al. An overview of nowcasting development, application, and services in the Hong Kong Observatory. *Journal Meteorological Research*, 2014, 28(5): 859-876.
- [20] 陈明轩, 高峰, 孔荣, 等. 自动临近预报系统及其在北京奥运期间的应用. *应用气象学报*, 2010, 21(4): 395-404.
- [21] 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.
- [22] 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. *气象*, 2010, 36(1): 54-58.
- [23] 万玉发, 王志斌, 张家国, 等. 长江中游临近预报业务系统及其应用. *应用气象学报*, 2013, 24(4): 504-512.
- [24] Doswell C A III, Brooks H E, Maddox R A. Flash flood forecasting: an ingredients-based methodology. *Weather and Forecasting*, 1996, 11: 560-581.
- [25] 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.
- [26] 张小玲, 湛芸, 张涛. 对流天气预报中的环境场条件分析. *气象学报*, 2012, 70(4): 642-654.
- [27] 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的改进与产品集成系统支撑技术. *气象*, 2013, 39(7): 894-900.
- [28] 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.
- [29] 田付友, 郑永光, 张涛, 等. 短时强降水诊断物理量敏感性的点面对面检验. *应用气象学报*, 2015, 26(4): 385-396.
- [30] 张杰, 田密, 朱克云, 等. 双偏振雷达基本产品和回波分析. *高原山地气象研究*, 2010, 30(2): 36-41.
- [31] 刘黎平, 胡志群, 吴翀. 双线偏振雷达和相控阵天气雷达技术的发展和运用. *气象科技进展*, 2016, 6(3): 28-33.
- [32] 刘黎平. 双线偏振多普勒天气雷达估测混合区降雨和降雹方法的理论研究. *大气科学*, 2002, 26(6): 762-772.
- [33] 杨忠林. 江淮梅雨期对流降水微物理特征的双偏振雷达观测研究. 南京大学硕士论文, 2016: 1-70.
- [34] 郭晓坤, 郭喜乐. 清远双偏振雷达偏振量产品的初步释用. *广东气象*, 2016, 38(5): 45-48.
- [35] Wu C, Liu L P, Wei M, et al. Statistics-based optimization of the polarimetric radar hydrometeor classification algorithm and its application for a squall line in South China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, 35, doi:10.1007/s00376-017-6241-0(in press).
- [36] 张鹏, 郭强, 湛博洋, 等. 我国风云四号气象卫星与日本 Himawari-8/9 卫星比较分析. *气象科技进展*, 2016, 6(1): 72-75.
- [37] Calhoun K M, Smith T M, Kingfield D M, et al. Forecaster use and evaluation of realtime 3DVAR analyses during severe thunderstorm and tornado warning operations in the hazardous weather testbed. *Weather and Forecasting*, 2014, 29: 601-613.
- [38] Gao J, Smith T M, Stensrud D J, et al. A real time weather-adaptive 3DVAR analysis system for severe weather detections and warnings with automatic storm positioning capability. *Weather and Forecasting*, 2013, 28: 727-745.
- [39] Wheatley D M, Knopfmeier K H, Jones T A, et al. Storm-scale data assimilation and ensemble forecasting with the NSSL Experimental Warn-on-Forecast System. Part I: Radar data experiments. *Weather and Forecasting*, 2015, 30: 1795-1817, doi:10.1175/WAF-D-15-0043.1.
- [40] 郑永光, 薛明, 陶钰钰. 美国NOAA试验平台和春季预报试验概要. *气象*, 2015, 41(5): 598-612.
- [41] Clark A J, Weiss S J, Kain J S, et al. An overview of the 2010 hazardous weather testbed experimental forecast program spring experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93: 55-74.
- [42] Clark A J, Gao J, Marsh P T, et al. Tornado path length forecasts from 2011 using a 3-dimensional object identification algorithm applied to ensemble updraft the vorticity. *Weather Forecasting*, 2013, 28: 387-407.
- [43] Clark A J, Conigo M C. Lessons learned from 10 years of evaluating convection-allowing models in the HWT. The 2014 Warn-on-Forecast and High-Impact Weather Workshop, Norman OK. <https://www.nssl.noaa.gov/projects/wof/documents/workshop2014/>. 2014.

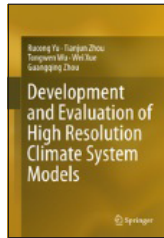
- [44] Jirak I. SPC ensemble applications: current status and future plans. 6th NCEP Ensemble User Workshop, College Park, MD, 2014.
- [45] Gallo B T, Clark A J, Dembex S R. Forecasting tornadoes using convection-permitting ensembles. *Weather and Forecasting*, 2016, 31: 273-295.
- [46] 范水勇, 陈敏, 仲跻芹, 等. 北京地区高分辨率快速循环同化预报系统性能检验和评估. *暴雨灾害*, 2009, 28(2): 119-125.
- [47] 陈敏, 范水勇, 郑柞芳, 等. 基于BJ-R U C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.
- [48] 陈子通, 黄燕燕, 万齐林, 等. 快速更新循环同化预报系统的汛期试验与分析. *热带气象学报*, 2010, 26(1): 49-54.
- [49] 徐枝芳, 郝民, 朱立娟, 等. GRAPES-RAFS系统研发. *气象*, 2013, 39(4): 466-477.
- [50] 朱立娟, 龚建东, 黄丽萍, 等. GRAPES三维云初始场形成及在短临预报中的应用. *应用气象学报*, 2017, 28(1): 38-51.
- [51] 黄丽萍, 陈德辉, 邓莲堂, 等. GRAPES\_Meso V4.0主要技术改进和预报效果检验. *应用气象学报*, 2017, 28(1): 25-37.
- [52] 陈明轩, 王迎春, 肖现, 等. 基于雷达资料四维变分同化和三维云模式对一次超级单体风暴发展维持热动力机制的模拟分析. *大气科学*, 2012, 36(5): 929-944.
- [53] 陈明轩, 高峰, 孙娟珍, 等. 基于VDRAS的快速更新雷达四维变分分析系统. *应用气象学报*, 2016, 27(3): 257-272.
- [54] 刘莲, 陈明轩, 王迎春. 基于雷达资料四维变分同化及云模式的中尺度对流系统数值临近预报试验. *气象学报*, 2016, 74(2): 213-228.
- [55] 冯子晏. 北京: 短时临近天气预报添“利器”. *中国气象报*, 2016-07-07(3).
- [56] Mathieu M, Couprie C, LeCun Y. Deep multi-scale video prediction beyond mean square error. In *International Conference on Learning Representations (ICLR)*, 2016.
- [57] Benjamin K, Lior W, Yehuda A. A dynamic convolutional layer for short range weather prediction. 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2015, doi:10.1109/CVPR.2015.7299117.2015.
- [58] Shi X, Chen Z, Wang H, et al. Convolutional LSTM network: A machine learning approach for precipitation nowcasting. In *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*, 2015.
- [59] 王舰锋. 基于卷积神经网络的卫星云量计算. *南京信息工程大学*, 2016: 1-65.
- [60] Zhou K. Forecasting different types of convective weather: a deep learning approach. *Weather and Forecasting*, 2018, 待发表.
- [61] 魏文秀, 赵亚民. 中国龙卷风的若干特征. *气象*, 1995, 21(5): 37-40.
- [62] 范雯杰, 俞小鼎. 中国龙卷的时空分布特征. *气象*, 2015, 41(7): 793-805.

## 新书架 NEW BOOK

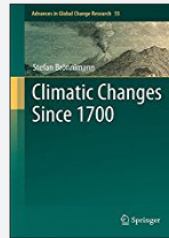
 感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



**Innovation in Climate Change Adaptation**  
《气候变化适应的创新》  
编著者: Walter Leal Filho  
出版者: Springer  
出版年: 2016



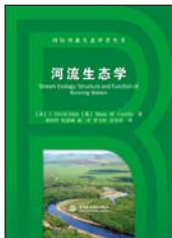
**Development and Evaluation of High Resolution Climate System Models**  
《高分辨率气候模式的开发与评估》  
编著者: Rucong Yu 等  
出版者: Springer  
出版年: 2016



**Climatic Changes Since 1700**  
《18世纪初以来的气候变化》  
编著者: Stefan Brönnimann  
出版者: Springer  
出版年: 2015



**Big Data Analysis: New Algorithms for a New Society**  
《大数据分析: 新社会新算法》  
编著者: Nathalie Japkowicz等  
出版者: Springer  
出版年: 2016



**《河流生态学》**  
编著者: J. David Allan等;  
黄钰铃等译  
出版者: 中国水利水电出版社  
出版年: 2017



**《北极地区发展报告 (2016)》**  
编著者: 刘惠荣  
出版者: 社会科学文献出版社  
出版年: 2017



**《云时代下的气象信息化与管理》**  
编著者: 沈文海  
出版者: 电子工业出版社  
出版年: 2017



**《大气化学实验教程》**  
编著者: 王体健  
出版者: 南京大学出版社  
出版年: 2017