

# 深圳突发强对流天气应对机制实例分析

唐滢<sup>1,2</sup> 兰红平<sup>1</sup> 郑群峰<sup>1</sup> 蔡伟源<sup>1</sup> 张超<sup>1</sup> 刘佳<sup>1</sup> 赖鑫<sup>1</sup> 陈训来<sup>1,2</sup> 陈元昭<sup>1,2</sup>

(1 深圳市气象台, 深圳 518040; 2 深圳南方强天气研究重点实验室, 深圳 518040)

**摘要:** 强对流天气突发性、局地性强, 持续时间短, 预报难度大, 灾害性极大。当前短临预报技术对雷雨大风、短时强降水等突发性强对流天气预报能力有限。深圳市气象局基于现有的短临预报技术, 同时借助气象现代化建设成果, 持续探索突发强对流天气的有效应对机制。本文以深圳市2021年第一次强对流天气过程为案例, 探讨突发强对流天气的有效应对防御机制。此次强对流天气过程历时短、雨强大、天气剧烈, 精准预报难度大, 且正值五一假期, 安全防范压力大。深圳市气象局采取“一体化风险研判、三级预警防线、分步精准发布”等措施, 有效解决了气象灾害预警信息传递“最后一公里”问题; 建立并完善强对流天气协同指挥和快速联防联动两项机制, 将气象灾害影响降至最低, 全市未发生因暴雨和大风造成的重大灾情及人员伤亡。

**关键词:** 强对流天气, 气象服务, 人工智能, 三级短临预警防线, 防御机制

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.06.013

## Case Analysis of the Response Mechanism to Abrupt Severe Convective Weather in Shenzhen

Tang Ying<sup>1,2</sup>, Lan hongping<sup>1</sup>, Zheng Qunfeng<sup>1</sup>, Cai Weiyuan<sup>1</sup>,  
Zhang Chao<sup>1</sup>, Liu Jia<sup>1</sup>, Lai Xin<sup>1</sup>, Chen Xunlai<sup>1,2</sup>, Chen Yuanzhao<sup>1,2</sup>

(1 Shenzhen Meteorology Bureau, Shenzhen 518040)

2 Shenzhen Key Laboratory of Severe Weather in South China, Shenzhen 518040)

**Abstract:** Severe convective weather tends to occur suddenly within a local range and its duration is relatively short. Thus, it is difficult to forecast such disastrous event. At present, the existing short-term forecasting technology has limited ability to forecast severe convective weather such as thunderstorms, gales and short-time severe rainfalls. Shenzhen Meteorological Bureau keeps on exploring effective response mechanisms to severe convective weather based on the existing short-term forecasting technology and meteorological modernization achievements. Here we take the first severe convective weather process of Shenzhen in 2021 as a case to discuss the effective response to and defense mechanism of abrupt severe convective weather. This severe convective weather event brought heavy rainfall but lasted for a short period of time, so it was difficult to provide accurate forecast. Moreover, it occurred during May Day Holiday and brought high pressure on safety precautions. Shenzhen Meteorological Bureau took measures such as “integrated risk judgment, three-level pre-warning defense line, and phased accurate release” to effectively solve the “last mile” problem of meteorological disaster warning information transmission. Two mechanisms of coordinated command and prompt joint defense have also been established and improved for minimizing the impact of meteorological disasters. There were no major disasters or casualties caused by heavy rainfall and gales during the severe convective weather process.

**Keywords:** severe convective weather, weather service, artificial intelligence (AI), three-level pre-warning defense line, defense mechanism

## 0 引言

2021年汛期以来, 我国各地灾害性强对流天气频

发, 4.30江苏南通冰雹和灾害性大风, 5.10湖北武汉大风, 5月14—15日江苏苏州盛泽、湖北武汉龙卷风, 5.22黑龙江富裕县沉船事故等, 都与强对流天气有关, 造成了重大的人员伤亡和经济损失。强对流天气主要包括雷暴大风、短时强降水、冰雹和龙卷等<sup>[1-2]</sup>, 其突发性、局地性强, 持续时间短, 预报难度大, 灾害性极大, 易对人民的生命财产安全造成较大的损失<sup>[3]</sup>。导致强对流天气的系统属于中小尺度天气系统, 很难在中长期预报中体现, 目前主要依靠短时临近预报技术。天气雷达和卫星云图是当前临近预报的主要

收稿日期: 2021年7月21日; 修回日期: 2022年2月14日  
第一作者: 唐滢(1994—), Email: 529070666@qq.com  
通信作者: 兰红平(1968—), Email: lhp@weather.sz.gov.cn  
资助信息: 国家重点研发计划政府间/港澳台重点专项项目(2019YFE0110100), 广东省气象局科学技术研究项目(GRMC2020M32), 国家自然科学基金项目(41975124), 广东省气象局科技创新团队项目(GRMCTD202104)

工具,近年基于人工智能的临近预报方法也得到了发展<sup>[4-6]</sup>,但2小时是基于雷达和卫星资料的外推方法以及基于人工智能的外推方法的预报时效上限。随着高分辨率数值模式和数据同化技术的发展,将雷达回波外推技术和高分辨率数值预报相结合<sup>[7-8]</sup>,可延长预报时效,扩展为0~6小时,但实际业务中可用预报和预警时效仍然不超过2小时<sup>[9]</sup>。

除了提高短临预报技术,各地气象部门也在不断探索台风、暴雨、强对流等各类灾害性天气的防御机制<sup>[10-12]</sup>。中央气象台建立了台风灾害影响预评估模型和暴雨灾害影响预评估模型,在灾害发生前、发生中和发生后向党中央、国务院、各级政府及有关部门提出灾害影响评估信息及相应的防灾减灾救灾决策建议,在2008年南方低温雨雪冰冻灾害以及北京奥运会气象服务等过程中有效释用,最大限度地发挥了服务效益<sup>[13]</sup>。在2020年广东龙舟水过程中,广东省气象台通过提供精细到区县和镇街的定量预报产品,为各地应急部门组织强降水及其次生灾害的防御和救助提供了精细的参考,省市县三级力量协同联动,为整个过程的防灾减灾救灾工作提供了有力支撑<sup>[14]</sup>。浙江省气象台在2015年的“灿鸿”台风和“苏迪罗”台风影响过程中,通过向政府和相关部门提供《气象信息内参》《重要气象报告》《呈阅件》“汇报PPT”和《气象灾害评估》等决策气象服务产品,有效提高了决策气象服务质量,减少了生命财产的损失<sup>[15]</sup>。北京城市气象研究院应用最优决策模型来辅助决策服务,在极端暴雨等重大灾害性天气过程中提供天气预报及预警的不确定性信息,以供公众及行业用户做各自的决策判断,从而更好地做出决策判断、降低灾害风险<sup>[16]</sup>。为了减少强对流等灾害性天气造成的损失,湖北省气象局自2011年汛期(5—9月)开始,每周召开一次决策气象服务会商,编写《湖北决策气象服务会商》材料和《湖北省气象局决策气象服务任务分工》材料,会商会对湖北省重大灾害性天气过程提前做出研判,且各个成员单位联动服务。该会商机制在2012年5月28—29日湖北省强降水天气过程、2015年6月1—2日湖北监利下击暴流事件等过程中都发挥了重要作用<sup>[17]</sup>。浙江省义乌市气象局针对强对流天气建立了“递进式”气象服务流程,从发现强对流天气出现苗头、跟踪监测、组织回事、向上级汇报、编辑预报服务产品等环节入手,依托短临天气监测预警业务平台、一键式预警发布平台等,建立了强对流跟踪预报服务流程,并在2013年5月29日浙江省义乌市强对流天气过程中得到了很好地应用,有效减少了灾害损失<sup>[18]</sup>。目

前针对台风、暴雨国省市县自上而下已有较为完善的应对机制和防御措施,但对于局地性、突发性较强的强对流天气的应对机制仍较少,气象灾害预警信息传递“最后一公里”问题仍亟需解决。

深圳地处华南沿海,雷暴大风、短时强降水、冰雹等强对流天气频发。第七次人口普查结果显示,目前深圳共有常住人口1756万人。和北京、上海等城市一样,深圳是国内人口、车辆、经济等密度最高的超大城市之一,市民日常生活和经济社会发展高度敏感于强对流天气过程<sup>[19]</sup>。为有效发挥气象防灾减灾第一道防线作用,深圳市气象局一直以来都在探索各类灾害性天气的应对和防御机制。在总结2018年超强台风“山竹”和2020年深圳近十年最强季风暴雨过程成功服务经验的基础上,提炼出了重大天气过程动态递进式决策服务“31631”模式<sup>[20]</sup>。经过一次次重大灾害性天气过程的复盘总结,深圳市气象局提炼出了突发强对流天气的应对防御机制。本文以“5月4日2021年深圳第一次强对流天气过程”为案例,来探讨突发强对流天气应对防御机制。

## 1 强对流过程概况

2021年5月4日白天到5日早晨,受冷空气伴随切变线南下影响,深圳市出现了7~9级雷雨大风和短时强降水,此次过程为2021年深圳第一次强对流天气过程,具有“影响范围广,持续时间短,风大雨急”的特点。

强对流主要影响时段为4日傍晚至夜间,5月4日08时至5日08时,记录到全市大雨局部暴雨降水(图1a),暴雨及以上区域主要出现在南山区。全市最大累计雨量69.1 mm(南山区粤海街道深圳湾体育中心站),期间最大1小时滑动雨量62.7 mm,出现在4日19:37—20:37的南山区粤海街道深圳湾体育中心站。随着飑线自西北向东南移动,宝安区燕罗街道、南山区粤海街道等多地出现了短时强降水(小时雨量 $\geq 20$  mm)天气(图1b),但飑线移速较快,持续时间只有1~2 h。全市共有9个站出现8级以上阵风(图2),最大阵风20.9 m/s(9级,龙岗区平湖街道平湖站)。

深圳市气象局于2021年5月4日17时25分在全市发布雷雨大风黄色预警;18时05分在全市发布暴雨黄色预警;21时30分取消暴雨和雷雨大风预警。预警期间,共接报36起灾情,灾情以积水为主,未接到人员伤亡报告,其中光明区凤凰街道龙大高速桥底积水50 cm;南山区积水较为严重,积水最深为滨海大道与科技南路交接处,积水超1 m。深圳机场受雷雨天气影响已取消航班87架次,积压航班82架次,21时起航班恢复正常。

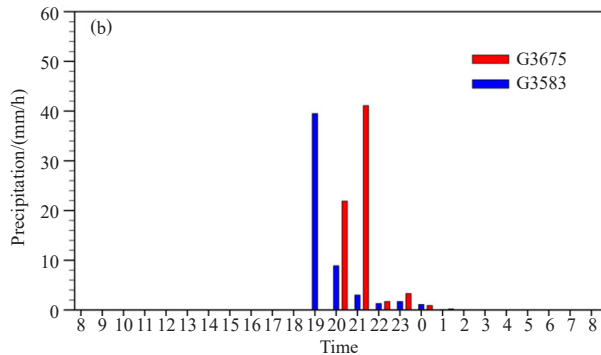
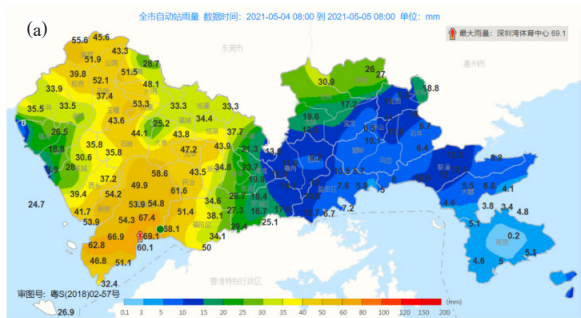


图1 2021年5月4日08时至5日08时 深圳市24小时累积降雨量 (a, 红色箭头为深圳湾体育公园站, 绿色实心圆为华侨城站); 南山区粤海街道深圳湾体育中心站 (G3675) 和宝安区燕罗街道老虎坑站 (G3583) 逐时降雨量 (b)

Fig. 1 24-hour cumulative rainfall in Shenzhen (a) (The red arrow represents Sports Park Station at Shenzhen Bay and the green solid circle denotes OCT station) and the hourly rainfall at Sports Part Station (G3675) at Shenzhen Bay, Yuehai Street, Nanshan District and Laohukeng Station (G3583), Yanluo Street, Bao'an District (b) from 08:00 of May 4 to 08:00 of 5 May 2021

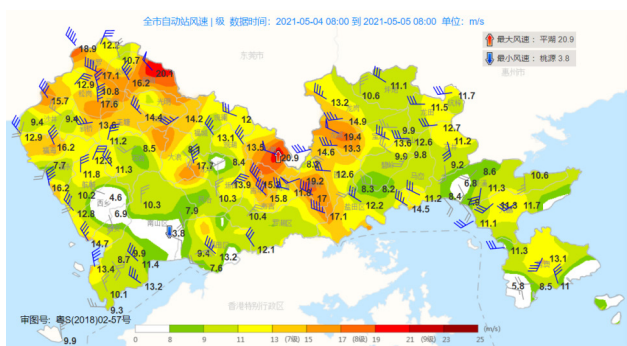


图2 2021年5月4日08时至5日08时深圳市日最大瞬时风 (蓝色风向杆为风速 $\geq 6$ 级)

Fig. 2 Daily maximum instantaneous wind speed from 08:00 of May 4 to 08:00 of 5 May 2021 (Blue wind shafts stand for the wind speed  $\geq$  wind scale 6)

## 2 气象服务成功经验

本轮强对流天气过程“影响范围广，持续时间短，风大雨急”，精准预报难度大，且正值五一假期，安全防范压力大。在各家数值模式中短期预报失败，且处于假期市民户外活动较多的情况下，深圳市气象局采取天气气候一体化风险研判、三级短临预警防线递进式滚动提示和预警、预警信息分步递进式靶向发布等措施，建立并完善强对流天气协同指挥和防灾部门快速联防联控两项机制，将气象灾害影响降至最低，全市未发生因暴雨和大风造成的重大灾情及人员伤亡。最终无论是防灾实效还是市民感受均好过预期。对此次强对流过程的预报服务回顾总结出以下几点成功经验。

### 2.1 建立天气气候一体化风险研判机制，基于自主研发的集合预报与人工智能短临预报技术提前研判形势

目前的短期预报技术，对中小尺度天气系统是否

会产生强对流天气的预报能力有限，但可以通过加强短临递进式服务和气候风险研判的方式，达到让防灾部门和防灾责任人更好地应对灾害性天气的目的。气候风险研判主要包括天气形势变化进入强对流多发季节、是否进入龙舟水有持续暴雨等，以便防灾部门提前做好防御工作准备，值班由非汛期状态转为汛期状态，天气来临前安全检查的重点行业或部门，防御周期长短人员安排等；短临递进式服务，让防灾部门按天气节奏，递进式的关注、启动响应、防御，提高防灾效率。深圳市气象局自2021年4月开始就开展月度气候新闻发布会和每周滚动订正预测工作，气象信息快报涵盖短期、中长期、延伸期预报和气候监测预测信息。在中长期预报业务中，据国家气候中心逐日南海季风监测资料显示4月纬向风指数逐渐由负值转为正值，4月第5候期间甚至短暂达到季风爆发的阈值，进入了华南前汛期形势，且深圳平均开汛时间在4月下旬前后。因此判断今年深圳天气形势将于5月起发生转变，由前期的干旱少雨转变为后期局地强对流频发的趋势。基于上述监测资料以及中长期集合预报、各家模式数值预报等产品，深圳市气象局预报团队研判五一假期后期西南季风显著增强，天气不稳定，因此深圳市气象局在4月26日月度气候新闻发布会和4月28日《气象信息快报》中均提示“五一假期后期天气不稳定，有雷阵雨”，并在随后的预报和决策服务信息中滚动订正，提醒注意防御短时强降雨和雷雨大风等强对流天气。

在短期预报业务中，常用的大尺度模式ECMWF、NCEP和GRAPES均未准确预报出此次强对流过程。几家模式预报切变线南压速度较实况严重滞后，且都预报强对流在华南沿海会立即减弱消散，对深圳

影响不大。从大尺度模式3日20时起报的结果来看(图3), ECMWF和NCEP模式预报的4日20时的切变线配合的强降雨落区均位于粤北, 未抵达华南沿海, 而实况切变线压到华南沿海地区, 且强度较预报偏强; GRAPES预报珠江口附近的降雨强度与范围与实况较为接近, 但粤东的降雨落区偏北, 并且对粤西沿海的降雨出现了漏报。中尺度模式在此次过程中预报效果也不佳, 从华东区域模式和华南区域模式在4日11时起报的结果来看(图4), 华东区域模式预报19时的降雨范围偏小, 落区偏北, 强度偏弱, 对粤西沿海的降雨出现了明显的漏报; 华南区域模式预报19时的降雨落区偏北, 但量级和实况较为接近。而早在5月2日傍晚时段, 受低层弱切变影响, 深圳局地出现了短时强降水, 此次局地短时强降水在前期各类数值模式预报中也均未准确体现。深圳市气象局预报团队针对5月2

日这次过程进行了分析研判, 此时实况资料显示, 副热带高压脊线北抬至 $13^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{N}$ , 对流层高层南亚高压西进至南海, 西南季风较前期显著增强, 因此判断深圳天气形势已发生转变, 由于前期旱少雨转变为后期局地强对流频发。再结合五一假期前(4月30日)“江苏沿江及以北地区遭受突发大风、冰雹等强对流天气袭击, 造成11人死亡, 102人受伤”这一惨痛教训, 深圳市气象局以深圳市气象灾害应急指挥部办公室名义印发了《关于做好近期强对流天气防御工作的通知》, 提醒市区各部门“未来3天我市天气不稳定……易发生短时强降水、短时大风等局地强对流天气。3—4日, 阴天间多云, 局部有(雷)阵雨……雷雨时伴有7~8级短时大风”“我市已处于强对流天气高发季, 天气变化剧烈”, 提醒各单位“强化思想认识、加强预警联动、突出风险防范、强化应急值守”。

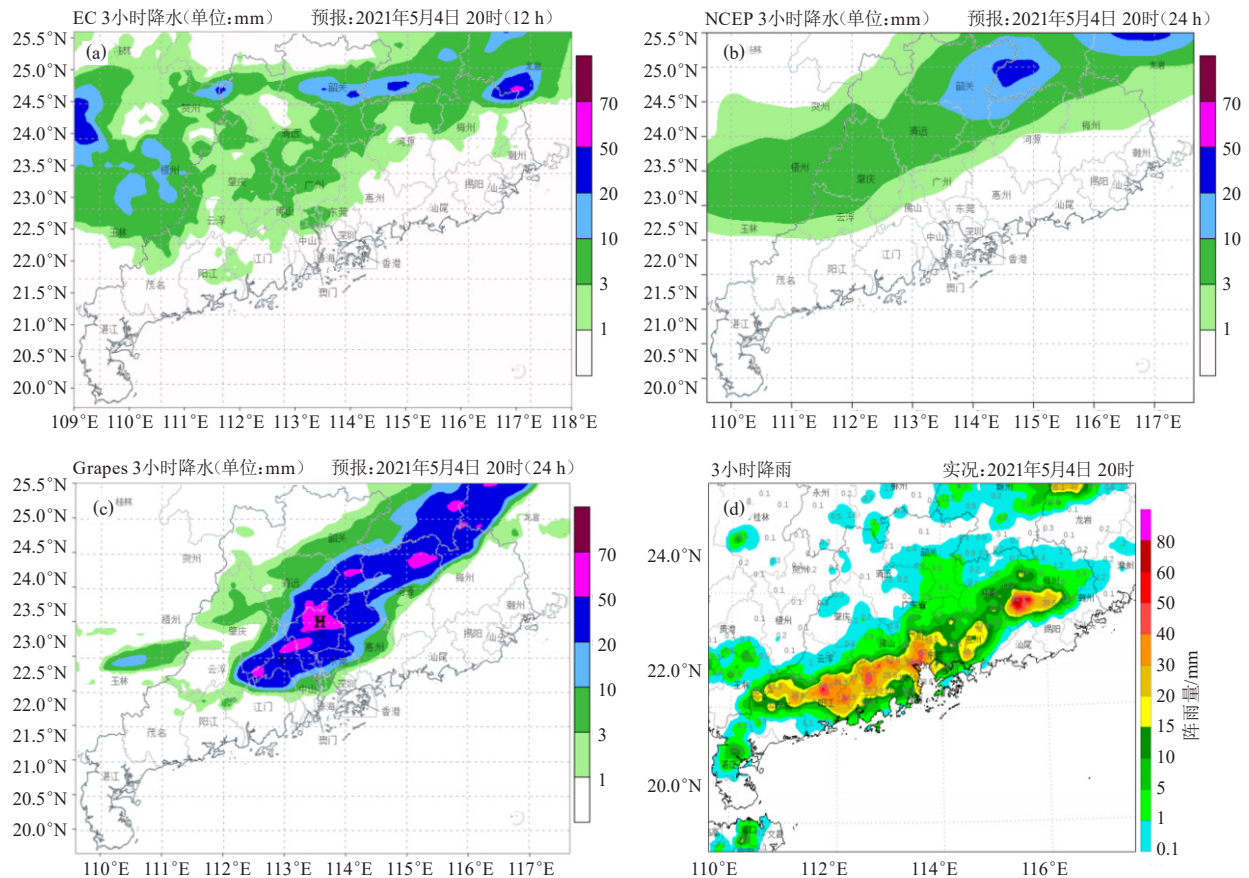


图3 ECMWF模式(a), NCEP模式(b), Grapes模式(c) 5月3日20时起报4日20时3小时累积雨量分布和 4日20时3小时累积雨量实况(d)分布

Fig. 3 3-hour cumulative rainfall distribution at 20:00 of 4 May forecasted by ECMWF model(a), NCEP model(b), Grapes model(c) at 20:00 of 3 May and the actual 3-hour cumulative rainfall distribution (d) at 20:00 of 4 May

在短临预报业务中, 深圳市气象局利用自主研发的“深圳市雷暴尺度集合预报系统”以及基于人工智能技术的“深圳市智能临近预报平台”弥补了大尺度

和中尺度模式的不足, 在当天临近时段及时、准确的发布了预警信息。深圳市雷暴尺度集合预报系统<sup>[21-22]</sup>采用WRF ARWv3.5.1预报模式; 双重网格嵌套, 外

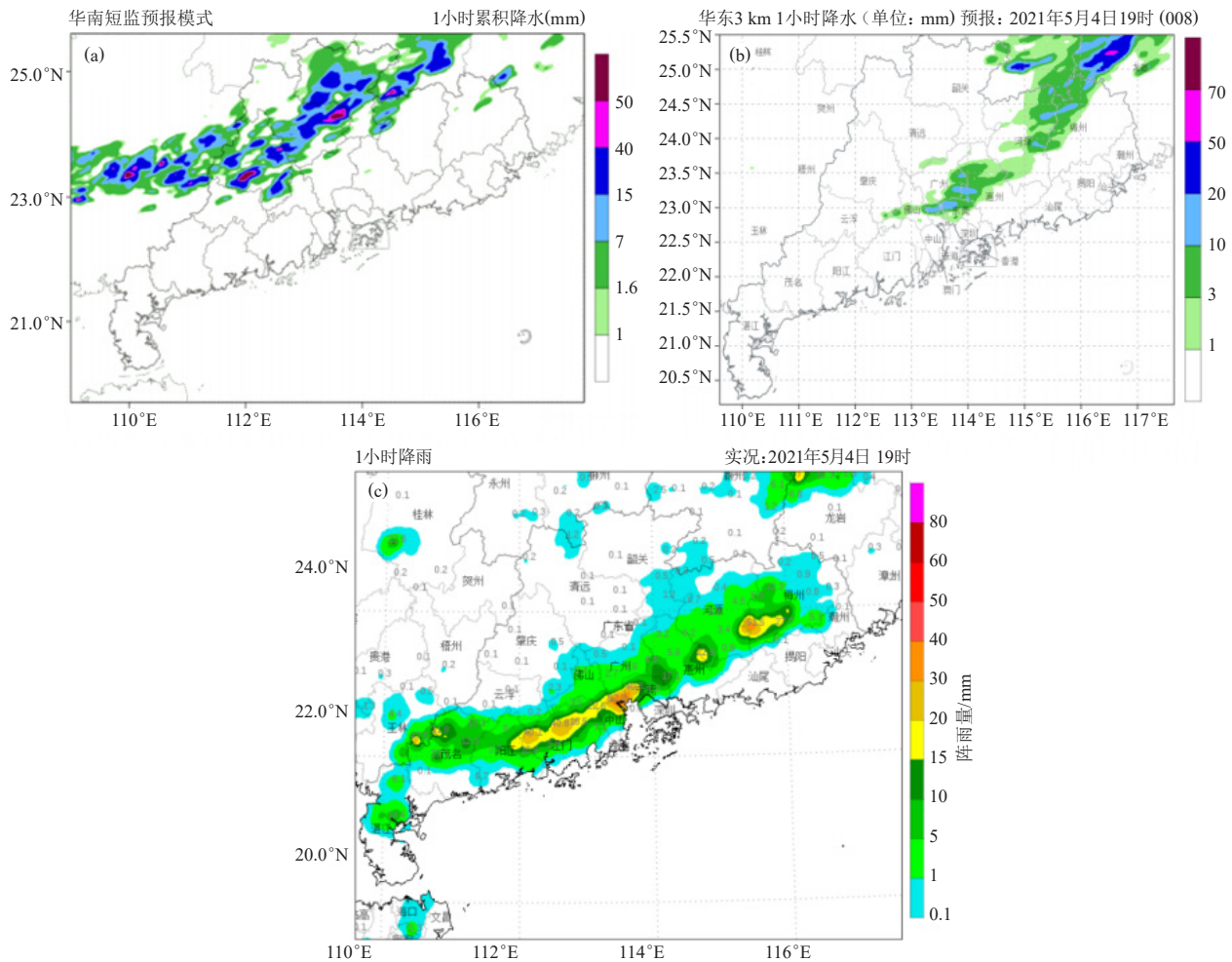


图4 华南3 km (Grapes\_gz\_3km) 模式 (a), 华东3 km模式4日11时起报19时雨量分布 (b) 和 4日19时雨量实况分布 (c)  
Fig. 4 Precipitation distribution at 19:00 of 4 May forecasted by South China 3 km model (Grapes\_gz\_3km) (a), East China 3 km model (b) at 11:00 of 4 May and the actual precipitation distribution at 19:00 of 4 May (c)

层和内层网格分辨率为12 km和4 km, 水平网格数分别为 $209 \times 177$ ,  $421 \times 361$ , 垂直层数51层; 初始场和边界条件采用欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 实时预报产品 ( $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ ) 和美国全球集合预报系统 (GEFS) p01~p10集合成员的实时预报产品 ( $1^\circ \times 1^\circ$ ); 利用ARPS5.3.2同化模块和云分析模块对广东11部多普勒雷达的径向风和反射率资料进行同化、预报; 采用不同初始场、边界条件和物理参数化方案组合形成了11个集合成员, 进行对流尺度预报。基于人工智能技术的“深圳市智能临近预报平台”利用广东省11部多普勒天气雷达反射率拼图资料, 基于卷积神经网络<sup>[23]</sup>、决策树模型<sup>[24]</sup>等AI技术进行未来2 h逐6 min、连续20帧雷达回波图的预测预报, 为强对流天气的短临预报提供支撑。4日上午强对流天气系统位于粤北地区逐渐南压, 深圳市气象局开始密切监测跟踪。“深圳市雷暴尺度集合预报系统”中的“M00”成

员以及“降雨概率匹配平均值”均于4日11时报出强对流将于当天19时起影响深圳 (图5), “深圳市智能临近预报平台”中各类人工智能算法16时的预报结果则是18时开始影响深圳 (图6)。4日下午16时, 飑线位于广东中部地区, 并伴随8~10级雷雨大风, 深圳上游的广州、肇庆和佛山等地最大小时雨强在30~40 mm。结合上述观测与预报结果, 深圳市气象局预报团队预判“强对流天气系统将于18时30分前后开始影响深圳市宝安、光明等地区, 并自西北向东南影响全市, 将带来20~30 mm/h的短时强降雨和8级短时大风”。于16时45分通过微信群、一键通等渠道向防灾部门和防灾责任人发布雷雨大风提示信息, 并电话通知应急、三防和水务部门。深圳市气象局于17时25分发布了深圳市历史首个全市雷雨大风黄色预警, 预警信号提前量为106分钟; 18时05分发布全市暴雨黄色预警, 信号提前量为100 min。20时40分深圳市规划和自然资源局

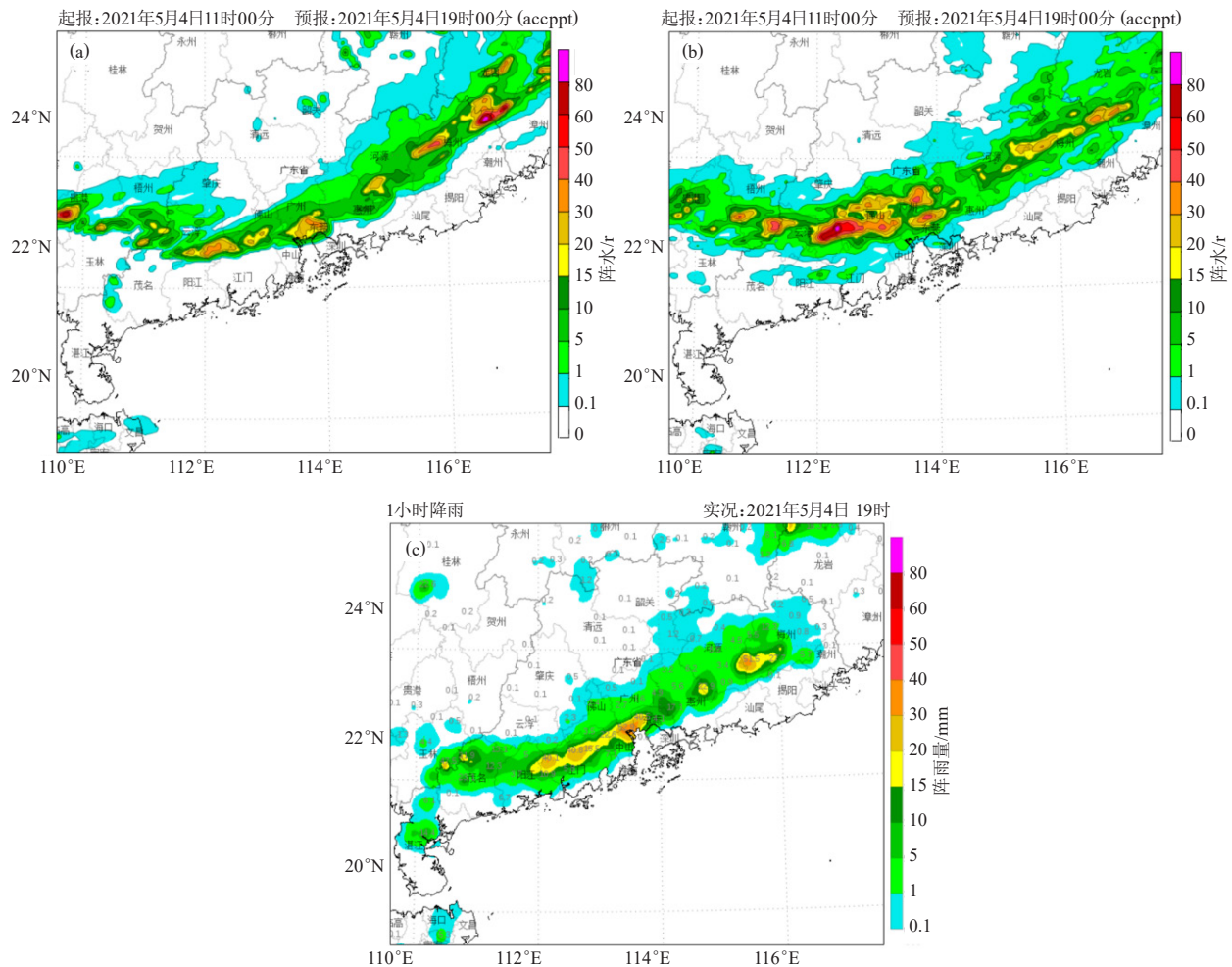


图5 深圳市雷暴尺度集合预报2021年5月4日11时 M00成员 (a), 降雨概率匹配平均值逐小时降雨预报结果 (b) 和 19时降雨实况 (c)  
Fig. 5 Thunderstorm-scale ensemble forecasting in Shenzhen at 11:00 of 4 May 2021 by M00 (a), hourly rainfall forecast of rainfall probability matching mean value (b) and the actual rainfall at 19:00

与深圳市气象局联合发布地质灾害气象风险预警2021年第1号。21时20分取消全市雷雨大风黄色和暴雨黄色预警信号。在此次强对流过程中，深圳市气象局自主研发的人工智能短临预报系统和雷暴尺度集合预报系统发挥了极大的作用。

## 2.2 建立三级短临预警防线递进式滚动提示和预警

深圳市气象局基于自主研发的“深圳市临近预报决策支持平台” (PONDS)，建立了“关注区、监视区、警戒区+责任区”三级监测预警防御圈 (图7)，将强对流天气监测区域扩大到150~200km，同时优化改进业务平台提示功能，对飊线等系统性强对流天气进入关注区并预判有可能影响本市时发布提示，随着强对流回波靠近，分级递进式发布预警提示、预警信号和实况监测预测信息。(1) 第一级预警防线，回波进入关注区 (距离深圳150~200 km)，自4日上午强对流位于粤北起，深圳市气象局就开始对强对流进行密

切监测跟踪。上午10时，飊线位于粤北地区，移速缓慢，韶关、清远等地最大小时雨强20~30 mm，并伴随8级左右雷雨大风，深圳市气象台于上午10时32分向市区防灾应急部门和防灾责任人发布当日提醒“强对流天气将于今晚影响深圳”。(2) 第二级预警防线，强回波进入监视区 (距离深圳约100~150km)。下午16时，飊线逐渐南移至广东中部地区，强度略有加强，深圳上游的广州、肇庆和云浮等地最大小时雨强在30~40 mm之间，并伴随8~10级雷雨大风。深圳市气象台提前2小时于16时45分提醒市委、市政府值班室和防灾应急部门“强对流云团将于18时30分前后开始影响我市，将带来短时强降雨和短时大风，稍后将发布雷雨大风黄色和分区暴雨黄色预警”，市领导收报后第一时间做出加强防御的批示。(3) 第三级预警防线，回波移近警戒区并预判将于稍后影响深圳。17时左右回波移至与深圳相邻的东莞，东莞北部出现6

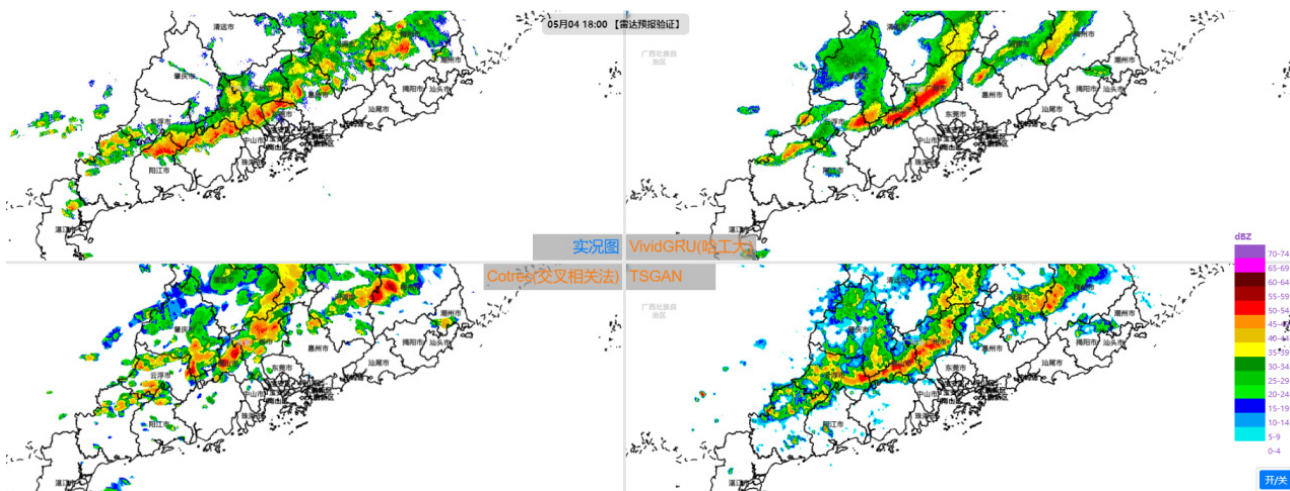


图6 深圳市智能临近预报平台2021年5月4日16时雷达回波预报18时结果

Fig. 6 Radar echo forecast for 18:00 of 4 May 2021 made by Shenzhen Smart Nowcasting Platform at 16:00 of 4 May 2021

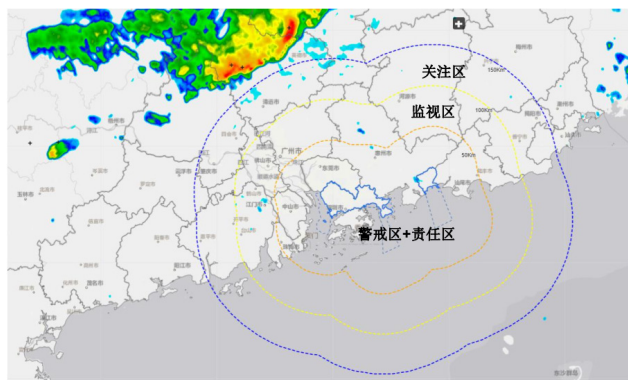


图7 深圳市气象局三级监测预警防御圈叠加2021年5月4日10时30分雷达回波图

Fig. 7 The composite image of three-level monitoring and early warning defense line of Shenzhen Meteorological Bureau and the radar echo at 10:30 of 4 May 2021

级左右大风，深圳市气象台于17时25分、18时05分发布雷雨大风黄色预警和黄色暴雨预警信号。18时45分强对流云团开始进入深圳辖区（责任区），出现短时强降雨和雷雨大风，深圳市气象局持续更新实况监测和预警决策信息，并通过电话、微信等渠道及时报告，助力防灾应急部门掌握最新情况联动指挥防御；影响过程结束后第一时间提供暴雨监测专报，小结此次过程风雨实况、预警情况及未来天气预测。此次过程中，PONDS平台自动识别到了飚线、短时强降水、短时大风和雷电等强对流天气，预报员基于这些强对流天气系统的识别结果，综合研判灾害风险即将影响的区域，实时通过微博、微信群、一键通、短信和电话等渠道向市区各级防灾责任部门、防灾责任人和公众发布强对流天气提示信息，做到了公众、决策服务信

息全覆盖，充分发挥了决策服务和公众服务的效益。

### 2.3 建立强对流天气防御协同指挥、防灾部门快速联防联动机制

2021年深圳市气象局组织修订了《深圳市气象灾害应急预案》，牵头成立了深圳市气象灾害应急指挥部。一是理顺与各专项应急指挥部职责分工。明确深圳市气象灾害应急指挥部负责雷雨大风等9类气象灾害防御的组织、协调和指导工作，市三防指挥部负责台风、暴雨、干旱。当雷雨大风及任一级别暴雨预警信号同时生效时，在市三防指挥部的统一领导下开展灾害防御工作。二是明确各成员单位职责划分。深圳市气象局作为成员单位负责气象灾害监测、预报和预警信息发布等工作，同时作为市气象灾害应急指挥部办公室发挥“统”的职责，市应急管理局负责统筹协调气象灾害防灾减灾救灾工作，重点发挥“救”的职责，其他各成员单位按照机构职能履职尽责，共同承担“防”的职责。三是明确属地防御管理原则。各区设立区气象灾害应急指挥部，负责组织和协调本行政区域气象灾害的防范和应对工作。

深圳市气象局于5月2日以深圳市气象灾害应急指挥部办公室名义印发了《关于做好近期强对流天气防御工作的通知》，提醒市区各部门未来3天天气不稳定，易发生短时强降水、短时大风等局地强对流天气，要求各单位务必加强预警联动和防御值守。通过发挥防灾部门快速联防联动防御机制作用，市区各部门积极联动，有效应对本次强对流天气过程。在5月4日强对流天气过程中，气象灾害应急指挥部和三防指挥部高效协同防御。深圳市气象局基于S波段和X波段雷达协同观测、自动站监测等多源实况资料，借助

“深圳市雷暴尺度集合预报系统”以及基于人工智能技术的“深圳市智能临近预报平台”等临近预报平台外推研判，于4日17时25分发布全市雷雨大风黄色预警信号，气象灾害应急指挥部办公室发布全市关注级应急响应；18时05分发布黄色暴雨预警信号，市三防指挥部办公室发布全市关注级应急响应，雷雨大风与暴雨预警信号同时生效时，由市三防指挥部统一领导开展灾害防御工作。同时共享预警防御指挥渠道，深圳市气象局和三防指挥部共享“应急一键通”平台、市区三防决策微信群等渠道，先后向5.3万名三防成员单位，市、区、街道、社区四级和重点企事业单位的防灾责任人发布预警服务图文信息共25条，实时对防灾部门和责任人递进式预警，实时联动。另外，深圳市气象局已实现智慧气象平台与市住房建设局建设工程智能监管平台、市建筑工程署指挥调度系统平台实时对接，基于此，深圳市气象局在此次强对流过程中为市住房建设局管辖的2622个工地、9207名责任人提供实时气象预警预报服务，预警信息直达建筑工地、交通工地、水务工地和海上工程的防灾责任人，确保工地人员有足够的时间启动预案和人员撤离。本次天气过程期间全市共出动人员14184人次，车辆3445车次，解救被困人员14人，切实发挥了气象防灾减灾第一道防线作用，有力保障了五一节日期间城市安全运行和人民群众生命财产安全。

#### 2.4 建立突发事件预警信息分步递进式靶向发布机制，实现雷雨大风预警短信市民（含外来人员）全覆盖

气象灾害预警信息传递的“最后一千米”问题一直以来都是各地气象部门关注的重点和难点。在深

圳，信息传递主要面临三个问题：一是面广量大，目前深圳共有常住人口1756万人，加上外来人员，通常需要覆盖2000多万人；二是时效极短，强对流天气过程生效很快，有效预警时间仅为1~2 h，在如此短时间内实现信息传递十分困难；三是局地性强，在深圳经常会出现“隔街有雨”现象，特别是短时强降水，通常只发生在10~100 km<sup>2</sup>内，这就需要信息服务具有极强的“靶向发布”能力。手机短信是解决上述问题的有效途径之一。自2002年起深圳市气象短信业务就已正式启动，当年定制用户超过10万，到了2010年气象短信定制数超250万；经过业务技术的不断提升，到2017年，全面提升了高级别预警信号全网发布效率，达到5000条/秒，实现了两小时内覆盖2000万人的模板，当年累积覆盖1.05亿人次。深圳市气象局和通信公司建立合作机制，创新应用微区域网格大数据智能分析技术，实现面向公众手机全网预警短信以街道为最小单元精准分区发布。在此次强对流过程中，突发预警短信也发挥了重要作用。深圳市突发事件预警信息发布中心基于“深圳市突发事件预警信息发布管理平台”，结合观测的飊线移动方向和移动速度以及临近预报平台的外推结果，首次根据研判的雷雨大风影响时间先后分5批次（17时25分，18时15分，19时11分，19时32分，20时02分）自西北向东南，向全市各区发布靶向预警短信，共发送2142万人次（图8），确保所有在深市民均可提前收到雷雨大风预警短信；同时也首次在这类生命史很短的强对流天气中利用户外电子显示屏发布提示信息，全市没有因暴雨和大风发生重大灾情及人员伤亡。受到了广大市民的一致好评。良好的公众服务效果也得益于平时的气象科普工

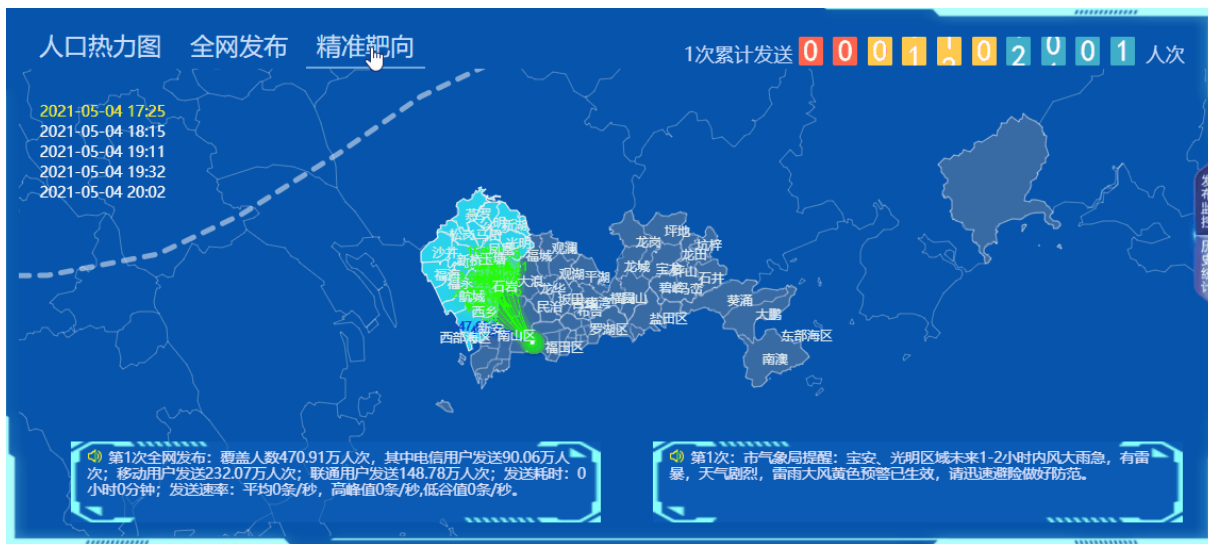


图8 深圳市突发事件预警信息发布管理平台

Fig.8 The Management Platform for Shenzhen Emergency Warning Information Release

作, 深圳市气象台借助深圳市气象局、深圳市天文台两个科普基地, 以及“深圳天气”微信、微博等平台, 进行广泛的科普宣传工作, 使得广大市民对气象灾害预警信号以及相关的防御措施等有一个基础的了解, 从而在面临灾害性天气时能够进行正确的防御。

### 3 总结与讨论

面对2021年深圳第一次强对流天气, 深圳市气象局依托现代化监测和研究成果, 发布了深圳市首个“雷雨大风”预警信号, 首次面向公众实现突发事件预警信息靶向精准发布。依托深圳市气象灾害应急指挥部、深圳市突发事件预警信息发布中心、微博和微信等平台, 实现了基于灾害风险影响的全流程全链条风险预警服务, 为各级防灾部门有效防御提供了支持, 为公众提供了有效的风险提示, 是一次较为成功的公众气象服务、决策气象服务过程。这次强对流过程, 由于天气系统较为明显, 是由一条显著的飢线自西北向东南移动影响深圳市, 预警预报服务效果较好。但也存在很多系统移向、生消趋势并不显著的强对流天气, 例如下击暴流和龙卷等, 局地性、突发性极强, 有效监测都十分困难, 提前预警更是难上加难。面对这类尺度小、突发性随机性强、变化快、预警时效短、风险高的强对流天气, 如何进一步提高和改善气象服务效果, 围绕强对流天气预警预报的“早、精、准”, 本文提出了以下几点建议和展望。

首先, 可以将强对流短临预报、分灾种强对流潜势预报和中长期集合预报相结合, 建立天气气候一体化机制, 同时建立三级预警防线递进式滚动提示和预警机制, 从而延长预警预报的时效。

其次, 实现从识别强对流单种风险向识别和研判强对流的综合风险的转变, 从重点识别某种强对流系统到广撒网识别风险影响区域的转变, 防范综合风险、系统风险和多种灾害叠加风险。例如在本次过程中, 深圳市气象局自主研发的PONDSD平台自动识别到了飢线、短时强降水、短时大风和雷电等强对流天气, 预报员基于这些强对流天气系统的识别结果, 综合研判灾害风险即将影响的区域, 通过“深圳市突发事件预警信息发布管理平台”向各区域群众分步递进式靶向发布预警信息。

最后, 加强强对流天气的应对要从建立和完善应对强对流灾害天气系统的预警业务链着手, 加强强对流天气系统综合风险的快速识别和研判, 预警产品快速编辑, 强对流天气预警的高效传播。近年来深圳市气象局持续开展预警信息发布技术研究和系统建设, 与“移动”“联通”和“电信”三大运营商共同构建了

预警信息发布系统, 目前已实现2小时内预警信息覆盖2400多万在深及来深漫游用户。但是强对流天气瞬息万变, 目前预警信息的发布过程, 只是在平台自动识别的基础上, 人工研判风险, 手动发布信息, 还无法满足针对特殊人群等服务对象的预警信息快速、精准发布的要求。未来还需要进一步加强预警信息精准靶向发布技术的研究, 实现“强对流系统识别, 灾害风险研判, 精准靶向发布”全自动流程, 在防范和应对突发强对流天气过程中做到“早, 精, 准, 快”。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] French M N, Krajewski W F, Cuykendall R R. Rainfall forecasting in space and time using a neural network. Journal of Hydrology, 1992, 137: 1-31.
- [5] Luk K C, Ball J E, Sharma A. A study of optimal model lag and spatial inputs to artificial neural network for rainfall forecasting. Journal of Hydrology, 2000, 227: 56-65.
- [6] 陈元昭, 林良勋, 王蕊, 等. 基于生成对抗网络GAN的人工智能临近预报方法研究. 大气科学学报, 2019, 42(2): 311-320.
- [7] Collier C G. The combined use of weather radar and mesoscale numerical weather model data for short-period weather forecasting. Hydrological Applications of Weather Radar, 1992, 602-612.
- [8] Golding B W. Nimrod: A system for generating automated very short range forecasts. Meteorological Applications, 1998, 5: 1-16.
- [9] 俞小鼎, 周小刚, 王明秀. 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.
- [10] 黎健. 美国的灾害应急管理及其对我国相关工作的启示. 自然灾害学报, 2006, 15(4): 33-38.
- [11] 张永恒, 孔祥一, 张立生, 等. 2018年我国灾害性天气及决策气象服务分析. 海洋气象学报, 2019, 39(4): 35-42.
- [12] 马清云, 李佳英, 王秀荣, 等. 基于模糊综合评价法的登陆台风灾害影响评估模型. 气象, 2008, 34(5): 20-25.
- [13] 薛建军, 王维国, 王秀荣, 等. 决策气象服务回顾与展望. 气象, 2010, 36(7): 69-74.
- [14] 王凤, 彭勇刚, 张华龙, 等. 2020年最强“龙舟水”天气的决策气象服务回顾. 广东气象, 2021, 43(2): 46-49.
- [15] 许浩恩, 张磊. 浙江省台风决策气象服务总结与探讨. 浙江气象, 2016, 37(2): 27-30.
- [16] 扈海波, 梁旭东, 王瑛, 等. 决策树模型辅助下灾害性天气的服务过程及决策分析——以北京“7.21”特大暴雨为个例. 气象, 2021, 47(10): 1182-1192.
- [17] 谢萍. 决策气象服务会商与联动服务分析. 安徽农业科技, 2017, 45(33): 227-229.
- [18] 赵贤产, 符仙月. 强对流天气预警的递进式服务探讨. 浙江气象, 2007, 35(3): 43-45.
- [19] 毛夏. 数字城市中的气象灾害预警对策. 自然灾害学报, 2005, 14(1): 110-115.
- [20] 王明洁, 王书欣, 陈元昭, 等. 深圳市重大天气过程的决策服务模式. 广东气象, 2021, 43(2): 61-65.
- [21] 江崑, 陈训来, 朱江山, 等. 深圳对流尺度集合预报系统在华南暴雨中的应用研究. 气象科技进展, 2019, 9(3): 124-131.
- [22] 王德立, 黄辉军, 陈训来, 等. 深圳对流尺度集合预报系统对台风降水预报的检验评估. 热带气象学报, 2020, 36(6): 759-771.
- [23] 陈训来, 刘军, 郑群峰, 等. 基于卷积门控循环单元神经网络的临近预报方法研究. 高原气象, 2021, 40(2): 411-423.
- [24] 陈训来, 陈元昭, 赵春阳, 等. 梯度提升决策树在雷达定量降水估测中的应用研究. 气象科技进展, 2019, 9(3): 132-137.