

郑永光,杨波,周康辉,等.龙卷监测预报预警技术进展[J].海洋气象学报,2025,45(2):1-13.
ZHENG Yongguang, YANG Bo, ZHOU Kanghui, et al. Advances in monitoring, forecasting and early warning technology of tornado [J]. Journal of Marine Meteorology, 2025, 45(2): 1-13. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20241220001. (in Chinese)

龙卷监测预报预警技术进展

郑永光^{1,2}, 杨波^{1,2}, 周康辉^{1,2}, 蓝渝^{1,2}, 盛杰^{1,2}, 曹艳察^{1,2}, 田付友^{1,2}, 周晓敏^{1,2}

(1. 国家气象中心, 北京 100081; 2. 中国气象局水文气象重点开放实验室, 北京 100081)

摘要 强对流天气预报业务是业务预报的难点之一, 而龙卷监测预报预警则是强对流天气预报业务的难点。文中简要总结美国、欧洲和中国龙卷监测预报业务的发展历程, 重点总结中气旋龙卷的监测和短期短时临近预报技术进展。龙卷时空尺度小, 短期短时预报时效只能预报其有利环境条件和中尺度形成机制, 强龙卷指数和最大上升气流螺旋度分别是短期和短时预报龙卷的特征物理量。中气旋龙卷监测依赖于双偏振多普勒天气雷达观测的龙卷涡旋特征和双偏振量演变特征, 这些特征可以监测龙卷的形成和消散。准线状对流系统产生的龙卷依然很难直接判识和预警, 但该类风暴的中涡旋与龙卷关系较为密切, 已发展了利用垂直风切变和雷达双偏振量特征判识该类风暴中涡旋发展的技术方法。使用物理方法、随机森林或深度学习的龙卷监测识别和临近预报技术能力显著提升。龙卷监测预报预警能力当前依然存在很大不足, 未来仍需要更多探测手段帮助提升监测识别能力、深化机理认识、发展超高分辨率数值模式和人工智能技术提升预报预警能力, 更要发挥预报员的主观能动性和关键作用。

关键词 龙卷; 中气旋; 环境条件; 监测; 预报预警; 雷达; 高分辨率数值预报; 机器学习

中图分类号: P445; P456 **文献标志码**: A **文章编号**: 2096-3599(2025)02-0001-13

DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20241220001

Advances in monitoring, forecasting and early warning technology of tornado

ZHENG Yongguang^{1,2}, YANG Bo^{1,2}, ZHOU Kanghui^{1,2}, LAN Yu^{1,2}, SHENG Jie^{1,2},
CAO Yanca^{1,2}, TIAN Fuyou^{1,2}, ZHOU Xiaomin^{1,2}

(1. National Meteorological Center, Beijing 100081, China; 2. China Meteorological Administration Key Open Laboratory of Hydrology and Meteorology, Beijing 100081, China)

Abstract Severe convective weather forecasting is one of the challenging tasks in forecasting operations, with the monitoring, forecasting and early warning of tornado being particularly difficult within this field. This paper briefly summarizes the history of tornado monitoring and forecasting operations in the United States, Europe and China, focusing on the advances in the monitoring, short-range and short-term forecasting and early warning technology of mesocyclone tornadoes. Tornadoes are of a small spatiotemporal scale, and short-range and short-term forecasting can only predict their favorable environmental conditions and mesoscale formation mechanisms, respectively. The significant tornado parameter (STP) and the maximum updraft helicity (UH) are the effective physical variables for short-

收稿日期: 2024-12-20; 修回日期: 2025-02-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2342204); 中国气象局强对流天气重点创新团队项目(CMA2022ZD07)

第一作者: 郑永光, zhengyg@cma.gov.cn。

range and short-term forecasting of tornadoes, respectively. The monitoring of mesocyclone tornadoes relies on the tornadic vortex signatures and polarimetric observations from dual-polarization Doppler weather radar, which can monitor the formation and dissipation of tornadoes. It is still difficult to directly identify the tornadoes produced by quasi-linear convective systems, but the relationship between mesovortices and tornadoes in such storms is relatively close, and technical methods have been developed to use vertical wind shear and radar dual-polarization characteristics to identify the development of mesovortices in such storms. The ability to identify and forecast tornadoes using physical laws, random forests, or deep learning methods has significantly improved, while there are still significant shortcomings in the monitoring, forecasting and early warning capabilities of tornadoes. In future, we need to improve monitoring and identification capabilities with more observing or detecting methods, deepen understanding of mechanisms, develop ultra-high resolution numerical weather prediction models and artificial intelligence methods to enhance forecasting and early warning capabilities. It is even more crucial to fully leverage the subjective initiative and pivotal role of forecasters.

Keywords tornado; mesocyclone; environmental condition; monitoring; forecasting and early warning; radar; high-resolution numerical weather prediction; machine learning

0 引言

龙卷为地球大气中最为剧烈的灾害性天气,其最强地表阵风风速可达 $125 \sim 140 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[1-3]。中国龙卷虽然发生频率显著低于美国,但一旦发生强龙卷,极易造成严重人员伤亡和经济损失,例如 2016 年 6 月 23 日江苏阜宁超强龙卷(相当于 EF4 级)、2019 年 7 月 3 日辽宁开原超强龙卷(相当于 EF4 级)、2024 年 7 月 5 日山东菏泽东明强龙卷(相当于 EF3 级)等。

龙卷也称为龙卷风,通常分为中气旋龙卷(超级单体龙卷)和非中气旋龙卷(非超级单体龙卷)两类;大部分 EF2 及以上级别龙卷由超级单体风暴产生。近年来,随着中尺度气象学的发展,龙卷时空分布特征、形成机制和预报预警方法研究以及灾害现场调查技术等取得了明显进展^[3-9]。

中气旋龙卷能够较好被监测预报预警。由于产生非中气旋龙卷对流风暴的环境条件和雷暴观测特征与不产生龙卷的类似对流风暴差异并不显著,因此,几乎没有预报预警非中气旋龙卷的能力^[3,10-11]。

美国是世界上受龙卷影响最严重的国家,平均每年发生约 1 200 个龙卷^[12],最近 10 年平均每年发生约 1 400 个龙卷^[13]。美国是最早开始龙卷观测和预报的国家,美国人 Finley 于 1884—1886 年开始龙卷预报,但此后至 1950 年左右,龙卷预报被禁止。1952 年 3 月,美国国家天气局开始正式对公众发布龙卷预报^[14];20 世纪 80 年代,美国多个部门联合

研制了新一代多普勒天气雷达 WSR-88D^[15],于 2014 年完成了新一代多普勒天气雷达的双偏振升级,天气雷达探测能力的发展极大地深化了对龙卷机理的认识,同时提升了业务预报预警能力。

欧洲龙卷发生频率显著低于美国,平均每年发生 232 个龙卷^[12]。由于龙卷发生频率低,在 21 世纪初之前,欧洲国家普遍不重视龙卷预报预警业务^[16];但到 2006 年,大多数欧洲国家已经建立了龙卷监测预报预警业务^[17]。

中国平均每年发生约 100 个龙卷^[18-20],其中文献[18]的估计为 85 个,文献[19]的估计为 108 个,远低于美国,也比欧洲少得多。佛山市龙卷风研究中心记录到中国 2018—2023 年共发生 210 个龙卷,平均每年为 35 个^[21],远低于前述文献中的龙卷数目,很可能被明显低估,应该与很多弱龙卷因为未致灾或灾害太弱而没有记录到有关。

中国龙卷预报预警技术的发展可大致分为 2 个主要阶段^[3]:2000 年之前的无龙卷业务预报预警能力阶段和 2000 年之后的龙卷业务预报预警逐步发展阶段。2000 年之前,由于受限于业务探测能力和对龙卷认识的不足,中国完全没有龙卷预报预警能力。2000 年之后,随着中国新一代天气雷达网布设的完善和对龙卷认识的逐步深入,龙卷监测预报预警能力逐步提升。2009 年,中国气象局国家气象中心(中央气象台)成立强天气预报中心,此后,针对龙卷等的强对流天气预报业务能力逐步加强^[7];2013 年,佛山市气象局成立了龙卷风研究中心;

2017—2019年,中国气象局进行了为期3年的龙卷监测预警试验业务,探索建立相关的业务技术体系和预警服务体系^[22];2021年,中国气象局出台了《龙卷风监测预报预警能力建设专项工作方案(2021—2025年)》,进一步加快了龙卷预报预警能力提升;2022年7月20日,中央气象台和江苏省各级气象台成功预报预警江苏北部3个龙卷^[23]。

中央气象台“强天气监测和分析综合业务平台”和中国气象局灾害性天气短时临近预报系统(SWAN 3.0)构成了完整的国家级包括龙卷等强对流天气监测、分析、预报和检验等业务的综合支撑体系,能够给出这些天气的环境条件、监测识别和短期短时预报等客观产品,这2个业务平台通过中国气象局业务内网辐射各级天气预报业务部门^[7,22,24-26]。

龙卷监测预报预警包括提前1~3 d的短期预报(美国称为“展望”)、提前2~12 h的短时预报(美国称为“警戒”)和提前0~2 h的监测与临近预警。不同的预报时效,使用的技术方法不同^[24]。

此文简要给出龙卷形成机理,主要总结龙卷主客观监测识别和预报预警技术进展,并展望未来发展。龙卷机理是预报预警的基础,且预报业务中通常首先关注短期预报时效是否会出现有利于龙卷发展的环境条件,其次在短期预报基础上进一步做好短时和监测临近预警。因此,文中第1节给出龙卷形成机理和短期短时预报技术进展,第2节综述监测和临近预警技术进展,第3节阐述总结和展望。

1 龙卷形成机理和短期短时预报技术

龙卷短期和短时预报技术的基础分别是该类天气的有利环境条件和中小尺度的形成机制。

1.1 龙卷形成机理

EF2及以上级别中气旋龙卷的有利环境条件包括一定的对流有效位能(convective available potential energy, CAPE)、强的0~6 km垂直风切变、低的抬升凝结高度(较高的相对湿度、较小的对流抑制能量)和较大的低层(0~1 km)垂直风切变等^[10,27-29]。但热带气旋(台风)产生的中气旋龙卷环境大气的CAPE值一般小于其他天气系统背景的龙卷^[30-31]。

非中气旋龙卷通常由辐合线上的中小尺度涡旋和对流风暴强上升气流共同作用形成,辐合线一般具

有较强的水平风切变和垂直涡度,而垂直风切变弱于中气旋龙卷^[32]。2021年8月10日在山东黄河三角洲发生了3个弱的非中气旋龙卷,0~6 km垂直风切变较强,但0~1 km低层垂直风切变非常弱^[33]。飏线或弓形回波的下击暴流会形成 γ 中尺度中涡旋^[34],有时候能够发展为强度达F4或者EF4级的龙卷^[10],但这类强龙卷的形成概率极低;美国有15%~25%的龙卷由准线状对流系统产生^[13]。

超级单体出流气流对中气旋龙卷的生成至关重要,其观测证据是龙卷发生发展在超级单体风暴的壁云附近,而壁云的形成是超级单体的入流气流和出流气流混合作用的结果^[35];超级单体有利于龙卷生成的冷池与周边地表气温差通常小于4℃^[10,36-38]。

以前的研究^[37,39]将中气旋龙卷的产生分为3个阶段:阶段1为中气旋形成,阶段2为地表垂直涡度形成,阶段3为近地表垂直涡度集中和增强从而生成龙卷。最近有研究^[8]进一步将中气旋龙卷的形成为4个阶段,即中气旋的形成,由下沉气流斜压产生的水平涡度扭转方向形成涡旋小块,涡旋小块组织成一个对称涡旋且垂直拉伸增强,在地表摩擦作用下生成龙卷。

中国发生较多龙卷的天气尺度背景是梅雨期环流形势、冷涡和台风^[3],因为这些背景下易于具备前述有利的中气旋龙卷的环境条件,尤其是存在中层和低空急流(即强的中层和低层垂直风切变)。此外,除了2018年的登陆台风“摩羯”在山东造成至少11个龙卷的爆发事件^[40]外,温带气旋也多次导致龙卷多发。如2006年梅雨期间,7月3日傍晚至4日凌晨,江苏一次锋面气旋的暖区飏线产生了7个龙卷^[41];2021年7月11日山东聊城^[42]和2024年7月5日山东中南部均受黄淮气旋影响,各有13个龙卷爆发。2006年7月3日龙卷过程是由梅雨期间高低空急流与锋面气旋共同作用导致的,由飏线中的中涡旋形成了强度不太强的7个龙卷^[41]。

梅雨期天气背景的中气旋龙卷通常具备所有有利于形成龙卷的环境条件,而冷涡背景通常低层湿度较低,台风龙卷的环境条件则具有通常不超过1000 J·kg⁻¹的较低CAPE^[3,11,20,30-31]。但需要注意的是,有利于形成龙卷的环境水汽条件会通过对流风暴前部的降水或冷池前沿的阵风锋辐合得到改善,大气低层垂直风切变条件也会出现具有中尺度

演变特征的增强^[20]。

1.2 龙卷短期短时预报技术

美国和中国都已经建立了比较完整的基于多尺度数值集合预报的强对流天气分类预报产品体系^[11]。由于龙卷天气时空分布尺度小和可预报性低,目前的数值模式在短期短时预报时效内还不能直接预报龙卷。因此,龙卷的短期短时预报主要基于数值天气预报资料,从前述的发生发展机理和所依赖的环境条件出发,综合多个对该类天气有指示意义的诊断物理量来进行^[3,25,29,43-45]。

Thompson 等^[46-47]提出了强龙卷指数(significant tornado parameter, STP),它结合了有效入流层风垂直切变和有效入流层风暴相对螺旋度(storm relative helicity, SRH)、CAPE、对流抑制能量(convective inhibition, CIN)和抬升凝结高度等物理量;STP 值越大,则龙卷发生概率越高。

环境大气的 SRH 一直被认为是超单体中层旋转发展的来源,因为环境大气的顺流涡度流向风暴并垂直倾斜从而产生旋转上升气流^[48]。在地面以上 0~500 m 高度的环境大气顺流涡度是区分龙卷和非龙卷环境的有效物理量^[49-51],因此,Cofer 等^[51]使用距地高度 0~500 m 的 SRH 替换 STP 公式中的有效入流层 SRH,可以将 STP 指示龙卷的准确率提升 8%;这是因为,数值模拟发现超级单体的低层中气旋(low-level mesocyclone, LLM)发展与距地高度 0~500 m 的环境大气顺流涡度密切相关^[50,52],但也有研究^[53-54]认为很多超级单体 LLM 的形成是下沉气流出流边界斜压生成的顺流涡度流向上倾斜到风暴所致。虽然具有 LLM 的超级单体并不一定有龙卷的发生,但在大多数观测到龙卷的超级单体中,LLM 的形成先于龙卷^[55]。

中国多个龙卷个例(如 2023 年 9 月 19 日苏北龙卷、2024 年 7 月 5 日山东群发龙卷等)都表明 STP 能很好地识别有利于龙卷形成的环境条件。在有利的环境条件下,有时并没有龙卷发生,有时仅有单个龙卷,有时会出现龙卷爆发的情况,因此,依靠环境条件来预报龙卷准确率很低,但这能够为龙卷的临近预警提供基础。已有研究^[11]给出的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来表征该类天气发生发展的物理条件,因此模糊逻辑、机器学习等能够综合应用多物理量的技术方法是龙卷短

期和短时预报技术研究的重要方面。Nowotarski 等^[56]使用自组织映射(self-organizing map, SOM)方法来区分龙卷和非龙卷的近风暴环境条件特征;国家气象中心强天气预报中心基于中国气象局中尺度模式(China Meteorological Administration MESOScale model, CMA-MESO)水平分辨率 3 km 数值预报数据,已初步开发了使用深度学习方法的龙卷短时预报技术,正在测试评估改进中。

龙卷短时预报更多依赖于快速更新或者集合的高时空分辨率数值模式系统预报。龙卷短时预报的主要依据是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”高分辨率(集合)数值预报产品后处理。已有很多国家都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^[57]。为了获取尺度小、变化快的天气系统在模式中的反映,Kain 等^[58]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一个格点的物理量最大值,称为逐时最大场,发现可能与龙卷关系密切的物理量有最大上升气流、最大上升气流螺旋度(updraft helicity, UH)等。UH 是表征对流风暴中上升运动和中低层旋转强度的一个物理量。Gallo 等^[59]使用 4 km 水平格距的对流可分辨模式集合预报 UH 结合气候频率,实现了龙卷概率预报;Gallo 等^[60]进一步将 UH 与 STP 相结合来改进龙卷概率预报。利用中国 GRAPES_3 km(即 CMA-MESO)水平分辨率 3 km 模式预报数据计算的 UH 值,曹艳察等^[61]发展了达到一定阈值的 UH 格点概率预报技术,从而得到了能够表征包括龙卷等的对流性大风和冰雹概率预报产品。不过,即使通过 UH 阈值能够成功预报中气旋,龙卷的发生概率也最多只有 26%左右^[56]。虽然基于高分辨率数值(集合)预报的龙卷短时预报技术取得了重大进展,但还有非常多的工作需要开展以提高其预报性能,比如模式分辨率的提升、模式框架本身性能的改进、不同微物理过程的改进、资料同化技术、龙卷精细化预报等多个方面^[3,11,24]。

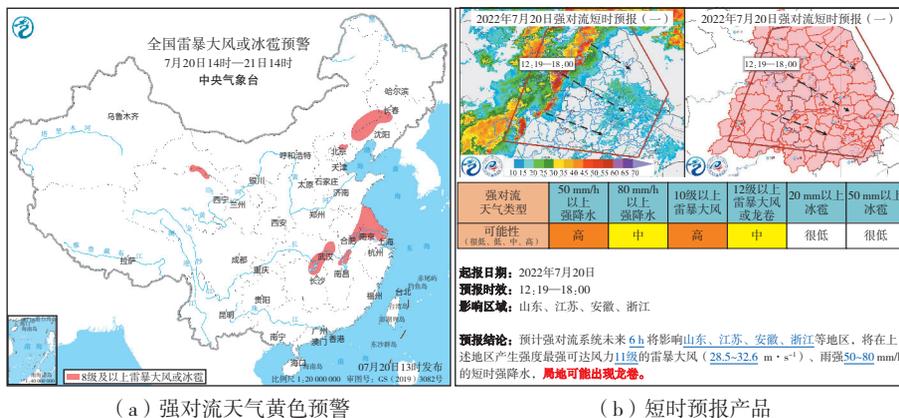
美国“基于预报的预警系统”(Warn-on-Forecast System, WoFS)是指基于高分辨率数值预报的预警发布系统,“基于预报的预警”的目的是实现从“基于探测的预警”的转变以延长龙卷、强雷暴和

山洪预警的提前时间^[62]。WoFS 基于 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式,基准版本水平分辨率为 3 km,预报时效为 3 h 或 6 h;水平分辨率 1 km 的原型 WoFS 系统正在测试。WoFS 预报龙卷的方法是通过预报场的 UH 不低于 $60 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 来识别旋转风暴^[62-63]。美国强风暴实验室 (National Severe Storms Laboratory, NSSL) 正在研发的 FACETs (Forecasting a Continuum of Environmental Threats; 网址为 <https://www.nssl.noaa.gov/projects/facets/>)^[64-65],是下一代的灾害性天气预报系统,旨在将灾害性天气信息从确定性产品转变为灾害概率性信息流,其预报龙卷、大冰雹和局地强降水等灾害性天气的概率,这些预报产品由 WoFS 系统提供;FACETs 系统将预报信息同社会影响、人的心理行为和经济效益等方面相结合,将预报信息转化为同用户直接相关的问题,用于提供短时和临近预报时效之间的灾害性天气预报信息。

Sun 等^[66]指出数值预报模式若要预报龙卷需达到百米级分辨率。基于 WRF 模式及其四维变分数据同化 (4D-Variational Data Assimilation, 简记为“4D-Var”) 框架,北京城市气象研究院秦睿等研发了集合四维变分数据同化 (Ensemble 4D-Var, En4D-Var) 分析预报、嵌套追踪、降尺度预报技术,构建了

超高分辨率短时临近集合数值预报系统,最高空间分辨率达 43 m,直接追踪和短时临近预报中国中东部可能出现的龙卷涡旋本身^①;2024 年实时运行试验表明具有一定的龙卷预报准确率,但还需要经过大量龙卷个例检验;基于超高分辨率数值预报的龙卷短时预报还存在一定的空报率,虽然龙卷的可预报性有限^[67],但需要持续提高数值模式能力以不断接近最大可预报性。

2022 年 7 月 20 日,江苏共发生 4 个龙卷^[23],分别为 08:30 (北京时,下同) 左右宿迁市沭阳县 EF1 级龙卷、12:20 左右连云港市海州区和灌云县 EF2 级龙卷、12:50 左右盐城市响水县 EF3 级龙卷、12:50 左右淮安市淮阴区 EF1 级龙卷。在 7 月 18—20 日中国气象局每日早间预报会商中,中央气象台和江苏省气象台对 7 月 20 日白天江苏中东部地区具备出现龙卷的有利环境条件的预报意见一致,均认为有龙卷出现的可能。7 月 20 日,中央气象台于 06 时发布强对流天气蓝色预警,13 时升级发布强对流天气黄色预警 (图 1a),并在 12:19 对气象部门内部发布强对流天气短时预报 (图 1b),中央气象台黄色预警和短时预报都明确指出了龙卷发生的可能;江苏省各级气象台也都及时发布了龙卷预报和预警信号,取得了很好的预报成效。



b 中色阶—雷达反射率因子, 单位为 dBZ, 红色区域框—未来 6 h 风雹预报落区, 浅红色区域—未来 6 h 风雹预报落区内所有覆盖的县 (市、区), 黑色虚箭头线—对流系统移动方向。

图 1 2022 年 7 月 20 日中央气象台发布的强对流天气黄色预警和短时预报产品
 Fig.1 Yellow alert and short-term forecasting for severe convective weather issued by National Meteorological Center of China on 20 July 2022

①资料来源于国家气象中心组织的 6 月以来龙卷过程成因分析和短临预警技术交流暨 2024 年天气预报中试基地第 7 期联合会商, 作者为秦睿、程月星、陈明轩, 题目为《龙卷可分辨尺度短临集合数值预报系统——技术实现与试验运行》。

2 龙卷监测和临近预警技术

龙卷监测和临近预警主要依据高时空分辨率的多普勒天气雷达资料,大量研究^[15,68-70]表明双偏振天气雷达观测能够进一步提升对龙卷的监测和临近预警能力。由于业务多普勒天气雷达对非中气旋龙卷的观测特征不够显著,一般很难基于业务天气雷达探测资料对该类龙卷做出有效监测识别。

2.1 龙卷监测技术

虽然天气雷达能够监测识别龙卷,但龙卷本身属于小尺度天气现象,天气雷达并不能直接观测龙卷,所以通过目击者报告、互联网视频、社会监控视频和现场调查等手段一定程度上能够弥补天气雷达监测龙卷的不足。不过,这些资料也存在一些短板,如互联网视频资料需要作甄别和质量控制才能够使用,而现场调查手段只能灾后进行。

现场调查是确定龙卷等小尺度极端天气灾害成因、强度和时空分布等的必要手段^[10-11],并为机理研究提供必要的基础资料。龙卷大风与非龙卷大风(直线大风或下击暴流)的灾害分布特征显著不同,龙卷灾害路径较为狭窄,为辐合旋转性风场,致灾机制更为复杂;而直线大风或下击暴流导致的树木或杆状物的倒伏常常呈现为辐散状的直线或者曲线流型,但地面灾害和天气雷达观测特征通常都难以区分弱龙卷和微下击暴流^[3-6,71]。

由产生龙卷的对流风暴组织形态来看,美国龙卷中79%为单体结构(包括孤立单体和多单体等风暴),18%为准线状对流系统^[72]。美国正在实施的PERiLS(Propagation, Evolution, and Rotation in Linear Storms)项目通过研究准线状对流系统的龙卷事件以提升对此类龙卷的预报能力^[13]。已有个例研究表明,中国龙卷对流风暴组织形态也以非线状对流系统的组织形态较为多见(如2015年台风“彩虹”龙卷、2016年江苏阜宁龙卷、2019年辽宁开原龙卷、2024年山东菏泽龙卷等),准线状对流风暴和团状对流风暴组织形态也有一些个例^[3]。

多普勒天气雷达探测到的中气旋、中气旋底高、龙卷涡旋特征(tornadic vortex signature, TVS)、双偏振雷达观测的龙卷残片特征(tornadic debris signature, TDS)等是龙卷监测的最主要依据^[3,11,25,29,68,73];钩状回波、有界弱回波区(bounded

weak echo region, BWER)、差分反射率因子 Z_{DR} 柱(正 Z_{DR} 柱或负 Z_{DR} 柱)、 Z_{DR} 弧和 Z_{DR} 环^[69]、低相关系数(ρ_{hv})、差分相移率(K_{DP})柱等也都属于判断超级单体或龙卷的参考依据^[74-75],有助于识别龙卷;Rasmussen等^[76]认为下沉反射率因子核(descending reflectivity core, DRC)是龙卷生成的先兆信号之一。研究^[3,77-78]发现有些龙卷涡旋会发生倾斜,但这并不一定表示龙卷会减弱或消亡。

TDS是指异常小的 Z_{DR} 和低的 ρ_{hv} ^[68],这是因为龙卷所致的碎片尺寸较大、处于米散射区且有随机取向的缘故。Skow等^[79]研发了使用与径向速度涡旋对或辐合区相对应的 ρ_{hv} 最小值自动识别TDS算法,并要求雷达反射率因子不低于20 dBZ。

双偏振雷达观测量的变化对中气旋龙卷演变具有很好的指示性。Loeffler等^[70]发现在超级单体中存在大气低层增强的 Z_{DR} (即 Z_{DR} 弧)^[69]和 K_{DP} 区域(即 K_{DP} 足)^[80]的分离;统计对比龙卷和非龙卷超级单体,发现这种分离距离很接近,但分离方向存在明显差异,龙卷超级单体的这种分离方向更接近正交于风暴移动方向,而非龙卷超级单体则更接近平行。Yuan等^[81]分析了2021年5月14日江苏盛泽龙卷超级单体的双偏振雷达参量,发现该风暴钩状回波区域表现出更低的 Z_{DR} ;在龙卷生成过程中, Z_{DR} 弧和 K_{DP} 足之间距离更大。McKeown等^[82]使用相控阵X波段雷达观测分析了美国俄克拉荷马州的一次龙卷过程,发现在龙卷消亡时,TVS强度快速减弱,TVS相对风暴的移动更向前,钩状回波的 Z_{DR} 、粒子大小、 K_{DP} 和粒子数浓度的中值都有很大的增加。French等^[73]以及Segall等^[83]分别对36个超级单体龙卷的TVS和双偏振量进行了统计;French等^[73]发现表征龙卷消亡的雷达观测特征包括TVS强度减弱、TVS相对风暴向后移动、TVS与中层上升气流之间大的距离位移等;Segall等^[83]发现超级单体龙卷消散前钩状回波的 K_{DP} 中值和粒子数浓度增加、 Z_{DR} 弧的最大值和 Z_{DR} - K_{DP} 分离方向角减小。

准线状对流系统的中涡旋虽然形成龙卷的概率较低,但其依然与龙卷发生关系极为密切,准确判识中涡旋有助于提升对准线状对流系统龙卷的监测预警能力。如前所述,2006年梅雨期间颍线上的中涡旋形成了7个龙卷^[41];2018年台风“摩羯”形成的龙卷也具有明显的小尺度涡旋特征^[84-86]。美国国家天气

局开发了“配料法”来判识中涡旋^[87-88],该方法结合了环境和雷达观测信息,包括准线状对流系统的冷池同环境低层垂直风切变大致平衡或风切变略占主导地位,垂直于风暴长轴的 0~3 km 垂直风切变为 $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 及以上,风暴存在冷出流涌或弓状特征。产生龙卷的中涡旋比没有产生龙卷的中涡旋往往更强、更深厚、生命史更长^[89-90],而且具有后方和前方入流槽口、阵风锋尖点、弓形回波等反射率因子特征。Kuster 等^[91]进一步统计和总结分析了准线状对流系统中 167 个中涡旋的双偏振雷达观测特征,包括:(1)约 95% 的中涡旋的 K_{DP} 数值减小先于其形成,并为后者发展的位置提供了初步指示;(2)中层 K_{DP} 核是一个潜在有用的前兆特征,且导致大风或龙卷的中涡旋 K_{DP} 核更强;(3)导致大风或龙卷的中涡旋的低层 K_{DP} 核和速度谱宽增强区域的强度更强。

美国统计表明仅约有 26%、甚至更少的雷达探测到的中气旋会生成龙卷,不过当中气旋底部距离雷达高度小于 1 km 时,龙卷的发生概率则约为 40%^[1,11,29,55]。中国苏北地区超级单体(中气旋)产生龙卷的概率约为 18%^[7]。中气旋龙卷产生同中气旋强度和底高都相关,而与中气旋底高的相关程度更高^[11,24,29,55];美国业务发布龙卷警报的主要依据是:在有利于龙卷的环境条件下,探测到强中气旋,或探测到中等以上强度中气旋,并且其底高距离雷达的高度不超过 1 km,以及出现 TVS 和 TDS 等^[73]。美国的移动 X 波段多普勒雷达在龙卷研究中发挥了重要作用,其观测到的最大龙卷速度达 $135 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[2,92];中国正在布设的 X 波段双偏振(相控阵)多普勒天气雷达也已经在龙卷监测中发挥了重要作用^[23,33,93-94]。

由于多普勒天气雷达的中气旋和 TVS 产品本身存在误识别,加之大多数中气旋并不会产生龙卷,因此只基于这些特征的龙卷预警存在较高的虚警率^[3],故如前所述,需要使用更多的双偏振雷达观测测量来提高龙卷的监测识别和预警准确率。同时需要指出的是,有些中气旋龙卷个例在超级单体形成前的对流风暴内部中低层已经有中涡旋形成^[95-96];如前所述,还有一些龙卷个例的中气旋在垂直方向具有明显倾斜特征,这并不意味着龙卷一定会减弱或消亡^[78,95-97]。

利用多普勒天气雷达的径向速度和反射率因子

等观测,Smith 等^[98-99]、Gibbs 等^[100]、Sessa 等^[101]分别应用模糊逻辑或机器学习等方法使用美国龙卷的雷达观测对流风暴模态、峰值低层旋转速度和近风暴环境数据(Gibbs 等^[100]未使用近风暴环境数据)等来判识龙卷灾害等级、强龙卷、最强风速等;肖艳姣等^[102-103]进一步改进了中气旋识别算法,统计分析了 2003—2018 年中国 33 个超级单体龙卷个例的龙卷涡旋特征,归纳了龙卷中气旋旋转速度和最大方位涡度切变的边界函数,使用模糊逻辑方法研发了超级单体龙卷识别算法(图 2),2021 年已集成到 SWAN 3.0 中。French 等^[104]则尝试使用 Z_{DR} 柱的面积来估计龙卷强度。Sandmæl 等^[105]基于雷达反射率因子、径向速度、速度谱宽、双偏振量以及识别产品等多个单站天气雷达变量数据,使用随机森林技术发展了新的龙卷识别算法 TORP (tornado probability algorithm),该算法在持续改进中,2024 年引入新的预报因子训练了新的随机森林模型进行测试^[106]。Xie 等^[107]使用单站天气雷达最低 3 层仰角的反射率因子、径向速度和谱宽数据,发展了卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)与 Transformer 技术相结合的深度学习龙卷识别模型 MTI-Net (Multi-Scale Task Interaction Networks for Multi-Task Learning),CNN 使用空间注意力单元模块提取局部细节,Transformer 通过注意力机制增强全局连接,该模型的龙卷识别产品准确率高于其他算法,该算法已集成于 SWAN 3.0^[26]。

2.2 龙卷临近预警技术

除了基于雷达资料和监测识别产品进行龙卷客观和主观临近外推预报外,目前主要是综合应用卫星、雷达、闪电、高分辨率数值模式等多源数据和机器学习等方法来进行龙卷临近预报预警,但依然面临着需要进一步提高龙卷临近预警准确率和精度、降低空报率,以及如何预报龙卷强度等问题。

Lagerquist 等^[108]使用卷积神经网络、格点雷达数据和快速更新数值预报数据来进行未来 1 h 的龙卷预报,临界成功指数(critical success index, CSI)评分达 0.3。Cintineo 等^[109]基于卫星、雷达、闪电、高分辨率数值模式预报等多源数据,发展了使用贝叶斯模型的强对流风暴概率 0~1 h 临近预报子系统(ProbSevere v2.0),其中包括大冰雹概率预报(ProbHail)、大风概率预报(ProbWind)和龙卷概率

预报(ProbTor)3个模型,其已成为美国临近预报系统 MRMS (Multi-Radar/Multi-Sensor System) 的一部分。MRMS 具有多个自动运行算法,能够快速、智能地集成来自多个雷达、地面和高空观测、闪电探测系

统以及卫星和数值预报的数据流;众多基于多传感器观测数据的二维产品(如旋转风暴路径、雷达径向风场的方位切变等)为龙卷、冰雹、大风等识别预警提供指导产品^[110]。

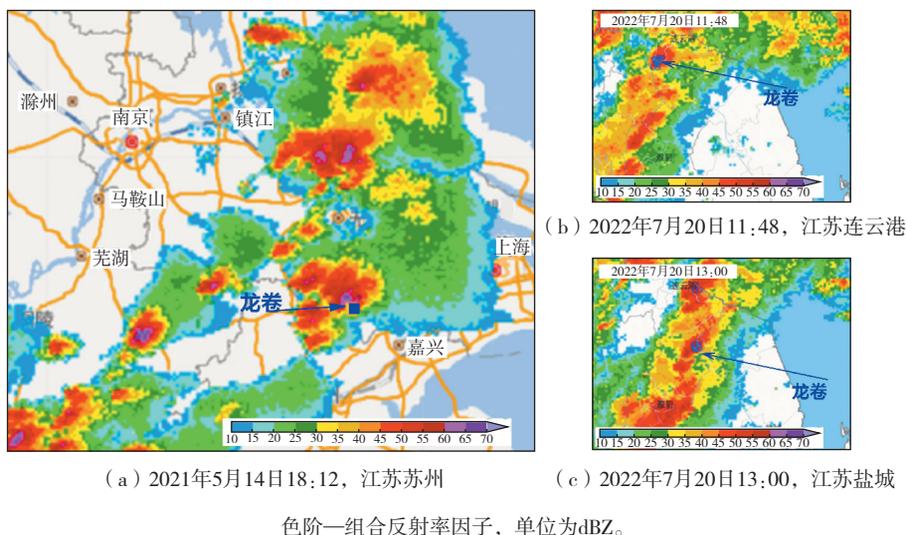


图2 龙卷识别产品叠加雷达组合反射率因子

Fig.2 Tornado identification products and composite radar reflectivity

临近预报模型(NowcastNet)^[111]采用近6年的美国雷达资料完成模型训练,可以逐10 min生成未来3 h的降水预报,具有良好的预报性能^[111-112];其核心是端到端建模降水物理过程的神经演变算子,融合深度学习方法与物理规律;提出的对流尺度生成网络,以中尺度演变网络预测结果为条件,通过概率生成模型预报对流生消过程^[26]。该模型的业务化版本是中国气象局人工智能临近预报系统“风雷”1.0版(CMA-AIM-Nowcast-Fenglei v1.0)。“风雷”1.0版使用中国7年雷达资料重新训练完成,每6 min生成空间分辨率为1 km、时间间隔为6 min的未来3 h雷达反射率因子预报。该模型已集成于SWAN 3.0,其虽然不直接预报龙卷,但通过与龙卷识别产品相结合,能够有效提升龙卷预警能力^[26]。

3 总结和展望

此文简要回顾了美国、欧洲和中国龙卷环境条件、机理和预报预警业务发展历史,总结了中气旋龙卷监测和短期短时临近预报技术的主要进展,主要结论如下。

(1) 龙卷短期预报基于其有利环境条件,短时预报基于其形成的中尺度机制,监测临近预报主要

依据多普勒(双偏振)天气雷达观测的结构特征。目前,只能监测和预报预警中气旋龙卷。

(2) 中国发生较多龙卷的天气尺度背景是梅雨期环流形势、冷涡和台风,但不同的环流背景下有利于龙卷的环境条件存在很大差异。中国龙卷爆发事件很少,温带气旋和登陆台风是有利于龙卷爆发的天气形势。对流风暴前部的降水或冷池前沿的阵风锋辐合、大气低层风场的中尺度时间演变加强会改善环境条件,利于形成龙卷。

(3) 短期短时预报时效并不能直接预报龙卷;龙卷短时预报依赖于高分辨率或超高分辨率数值预报。短期和短时预报中气旋龙卷的物理量分别是STP和最大UH;UH和STP相结合使用可以提升龙卷预报准确率。

(4) 中气旋龙卷的雷达观测特征包括中气旋、中气旋底高、TVS、DRC、TDS、钩状回波、BWER、 Z_{DR} 柱、 Z_{DR} 弧、 Z_{DR} 环、低 ρ_{hv} 、 K_{DP} 柱等。美国仅约有26%的中气旋会生成龙卷;中气旋底高距雷达高度小于1 km时,发生龙卷的概率升高至约40%。美国20%左右的龙卷由准线状对流系统产生,通过垂直风切变和雷达双偏振量特征可有效判识准线状对流系统的中涡旋,但还难以直接判识该类龙卷。产生龙卷

的超级单体中的 Z_{DR} 弧同 K_{DP} 足的分离方向更接近正交于风暴移动方向。同时,总结了能够表征龙卷消散的雷达观测 TVS 和双偏振量演变特征。

(5) 基于单站天气雷达的反射率因子、径向速度、速度谱宽、双偏振量和识别产品等多个变量,应用物理方法、随机森林或深度学习的龙卷监测识别算法的准确率显著提升;使用多源观测资料和数值预报资料应用贝叶斯模型或深度学习的龙卷临近预报技术能力也明显提高。

由于龙卷尺度小、生命史短,各国现有的气象观测网依然难以完全捕捉龙卷,龙卷监测预报预警技术仍存在诸多挑战,如监测识别和预报预警的空报率和漏报率高、预警提前时间短等,因此对未来展望如下。

(1) 加强龙卷监测能力。除了继续完善包括 X 波段天气雷达、风廓线雷达、垂直温湿廓线等的加密气象观测网之外,还需要加强社会观测、气象信息员资料收集、互联网视频资料应用等,利用好社会监控视频、各种遥感资料以及无人机航拍资料等,提升龙卷监测能力和灾害现场调查能力。

(2) 开展龙卷精细科学观测试验研究,利用多源精密观测和超高分辨率数值模拟手段深入研究龙卷形成和强度加强的精细规律机理,以进一步获取龙卷监测预报预警特征物理量。

(3) 发展多源精细资料同化技术和超高分辨率数值模式,进一步提升数值模式预报龙卷的能力;综合利用多源观测和高分辨率数值预报资料,应用物理规律、机器学习、深度生成模型^[113-114]和大模型等技术,持续提升龙卷短时临近预报预警的精准度;发展龙卷强度预报预警技术等。

(4) 发挥预报员主观能动性。在深入认识龙卷机理和特征规律基础上,发挥预报员在业务预报中的关键作用,提升对类似 2016 年江苏阜宁 EF4 级龙卷的强龙卷监测和预报预警能力。

参考文献:

- [1] DAVIES-JONES R, TRAPP R J, BLUESTEIN H B. Tornadoes and tornadic storms[M]//DOSWELL C A III. Severe convective storms. Boston, MA: American Meteorological Society, 2001:167-221.
- [2] BLUESTEIN H B, SNYDER J C, HOUSER J B. A multiscale overview of the El Reno, Oklahoma, tornadic supercell of 31 May 2013[J]. Wea Forecasting, 2015, 30(3):525-552.
- [3] 郑永光,刘非凡,张恒进.中国龙卷研究进展[J].气象, 2021,47(11):1319-1335.
- [4] MENG Z Y, YAO D. Damage survey, radar, and environment analyses on the first-ever documented tornado in Beijing during the heavy rainfall event of 21 July 2012 [J]. Wea Forecasting, 2014, 29(3):702-724.
- [5] 郑永光,田付友,孟智勇,等.“东方之星”客轮翻沉事件周边区域风灾现场调查与多尺度特征分析[J]. 气象, 2016, 42(1):1-13.
- [6] 郑永光,朱文剑,姚聃,等.风速等级标准与 2016 年 6 月 23 日阜宁龙卷强度估计[J].气象, 2016, 42(11): 1289-1303.
- [7] 俞小鼎,郑永光.中国当代强对流天气研究与业务进展 [J]. 气象学报, 2020, 78(3):391-418.
- [8] FISCHER J, DAHL J M, COFFER B E, et al. Supercell tornadogenesis: recent progress in our state of understanding[J]. Bull Amer Meteor Soc, 2024, 105(7): E1084-E1097.
- [9] ROTUNNO R, BLUESTEIN H B. Recent developments in tornado theory and observations [J]. Rep Prog Phys, 2024, 87(11):114801.
- [10] 郑永光,陶祖钰,俞小鼎.强对流天气预报的一些基本问题[J].气象, 2017, 43(6):641-652.
- [11] 郑永光,田付友,周康辉,等.雷暴大风与龙卷的预报预警和灾害现场调查[J].气象科技进展, 2018, 8(2): 55-61.
- [12] TASZAREK M, ALLEN J T, GROENEMEIJER P, et al. Severe convective storms across Europe and the United States. Part I: climatology of lightning, large hail, severe wind, and tornadoes [J]. J Climate, 2020, 33(23): 10239-10261.
- [13] KOSIBA K A, LYZA A W, TRAPP R J, et al. The Propagation, Evolution, and Rotation in Linear Storms (PERiLS) project[J]. Bull Amer Meteor Soc, 2024, 105(10):E1768-E1799.
- [14] GALWAY J G. The evolution of severe thunderstorm criteria within the weather service[J]. Wea Forecasting, 1989, 4(4):585-592.
- [15] 李峰,李柏,唐晓文,等.近 20 年美国龙卷探测研究进展:对我国龙卷风研究的启示[J].气象, 2020, 46(2): 245-256.
- [16] DOSWELL C A III. Societal impacts of severe thunderstorms and tornadoes: lessons learned and implications for Europe [J]. Atmos Res, 2003, 67/68:135-152.

- [17] RAUHALA J, SCHULTZ D M. Severe thunderstorm and tornado warnings in Europe [J]. *Atmos Res*, 2009, 93 (1/2/3):369-380.
- [18] 范雯杰,俞小鼎.中国龙卷的时空分布特征[J].*气象*, 2015,41(7):793-805.
- [19] CHEN J Y, CAI X H, WANG H Y, et al. Tornado climatology of China[J]. *Int J Climatol*, 2018, 38(5):2478-2489.
- [20] 郑永光.中国龙卷气候特征和环境条件研究进展综述[J].*气象科技进展*, 2020,10(6):69-75.
- [21] 张晶晶,黄先香,蔡康龙,等.2023年中国龙卷活动及灾情特征[J].*气象科技进展*, 2024,14(1):15-24.
- [22] 张小玲,杨波,盛杰,等.中国强对流天气预报业务发展[J].*气象科技进展*, 2018,8(3):8-18.
- [23] 王易,郑媛媛,蓝渝,等.2022年7月20日江苏淮北龙卷天气过程分析[M]//中国气象局.全国高影响天气监测预报服务技术复盘:2022年,北京:气象出版社, 2023:201-220.
- [24] 郑永光,周康辉,盛杰,等.强对流天气监测预报预警技术进展[J].*应用气象学报*, 2015,26(6):641-657.
- [25] 杨波,郑永光,蓝渝,等.国家级强对流天气综合业务支撑体系建设[J].*气象*, 2017,43(7):845-855.
- [26] 周康辉,郑永光,杨波,等.强对流天气客观临近预报技术进展和展望[J/OL].*气象学报*, (2024-09-06) [2024-12-20]. <http://qxxb.cmsjournal.net/article/doi/10.11676/qxxb2025.20240106>.
- [27] BROOKS H E, LEE J W, CRAVEN J P. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data[J]. *Atmos Res*, 2003,67/68:73-94.
- [28] 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[J]. *Wea Forecasting*, 2012,27(1):106-123.
- [29] 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[J].*气象学报*, 2012,70(3):311-337.
- [30] McCAUL E W Jr. Buoyancy and shear characteristics of hurricane-tornado environments [J]. *Mon Wea Rev*, 1991,119(8):1954-1978.
- [31] 郑媛媛,张备,王啸华,等.台风龙卷的环境背景和雷达回波结构分析[J].*气象*, 2015,41(8):942-952.
- [32] BLUESTEIN H B. Severe convective storms and tornadoes: observations and dynamics [M]. Berlin: Springer, 2013:307-360.
- [33] 谷山青,王凤娇,魏振东,等.黄河三角洲一次非中气旋龙卷观测分析[J].*海洋气象学报*, 2023,43(3):59-70.
- [34] 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[J]. *Mon Wea Rev*, 2005,133(8):2275-2296.
- [35] DOSWELL C A III, BURGESS D W. Tornadoes and tornadic storms; a review of conceptual models[M/OL]//CHURCH C R, BURGESS D W, DOSWELL C A III, et al. The tornado: its structure, dynamics, prediction, and hazards. Washington: American Geophysical Union, 1993: 161-172 [2024-12-01]. http://www.weatheranswer.com/public/Tornado_formation_4.pdf.
- [36] MARKOWSKI P M, STRAKA J M, RASMUSSEN E N. Direct surface thermodynamic observations within the rear-flank downdrafts of nontornadic and tornadic supercells[J]. *Mon Wea Rev*, 2002,130(7):1692-1721.
- [37] MARKOWSKI P, RICHARDSON Y. What we know and don't know about tornado formation [J]. *Phys Today*, 2014,67(9):26-31.
- [38] SCHULTZ D M, RICHARDSON Y P, MARKOWSKI P M, et al. Tornadoes in the central United States and the "clash of air masses" [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2014, 95(11):1704-1712.
- [39] DAVIES-JONES R. A review of supercell and tornado dynamics[J]. *Atmos Res*, 2015,158/159:274-291.
- [40] 白兰强,孟智勇,SUEKI K,等.中国热带气旋龙卷的气候统计特征(2006~2018)[J].*中国科学:地球科学*, 2020,50(5):619-634.
- [41] 吴芳芳,俞小鼎,王慧,等.一次黄海之滨中尺度对流复合体多尺度结构特征观测研究[J].*气象学报*, 2019, 77(5):785-805.
- [42] WEN J Y, MENG Z Y, BAI L Q, et al. A comparison between the only two documented tornado outbreak events in China: tropical cyclone versus extratropical cyclone environments[J]. *Wea Forecasting*, 2024,39(4):613-638.
- [43] 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[J].*气象*, 2013,39(7):894-900.
- [44] 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[J].*气象*, 2013,39(7):901-910.
- [45] 田付友,郑永光,孙建华,等.融合物理解与模糊逻辑的分类强对流客观短期预报系统:(1)系统构成[J].*气象*, 2024,50(5):521-531.

- [46] THOMPSON R L, EDWARDS R, HART J A, et al. Close proximity soundings within supercell environments obtained from the rapid update cycle [J]. *Wea Forecasting*, 2003, 18(6):1243-1261.
- [47] THOMPSON R L, EDWARDS R, MEAD C M. An update to the supercell composite and significant tornado parameters [C/OL]//Preprints, 22nd conference on severe local storms. Hyannis, MA: American Meteorological Society, 2004; P8.1[2024-12-01]. <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/82100.pdf>.
- [48] DAVIES-JONES R. Streamwise vorticity: the origin of updraft rotation in supercell storms [J]. *J Atmos Sci*, 1984, 41(20):2991-3006.
- [49] COFFER B E, PARKER M D. Is there a “tipping point” between simulated nontornadic and tornadic supercells in VORTEX2 environments? [J]. *Mon Wea Rev*, 2018, 146(8):2667-2693.
- [50] COFFER B E, PARKER M D, THOMPSON R L, et al. Using near-ground storm relative helicity in supercell tornado forecasting [J]. *Wea Forecasting*, 2019, 34(5):1417-1435.
- [51] COFFER B E, TASZAREK M, PARKER M D. Near-ground wind profiles of tornadic and nontornadic environments in the United States and Europe from ERA5 reanalyses [J]. *Wea Forecasting*, 2020, 35(6):2621-2638.
- [52] COFFER B E, PARKER M D, PETERS J M, et al. Supercell low-level mesocyclones: origins of inflow and vorticity [J]. *Mon Wea Rev*, 2023, 151(9):2205-2232.
- [53] ORF L, WILHELMSON R, LEE B, et al. Evolution of a long-track violent tornado within a simulated supercell [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2017, 98(1):45-68.
- [54] FINLEY C A, ELMORE M, ORF L, et al. Impact of the streamwise vorticity current on low-level mesocyclone development in a simulated supercell [J]. *Geophys Res Lett*, 2023, 50(1):e2022GL100005.
- [55] TRAPP R J, STUMPF G J, MANROSS K L. A reassessment of the percentage of tornadic mesocyclones [J]. *Wea Forecasting*, 2005, 20(4):680-687.
- [56] NOWOTARSKI C J, JONES E A. Multivariate self-organizing map approach to classifying supercell tornado environments using near-storm, low-level wind and thermodynamic profiles [J]. *Wea Forecasting*, 2018, 33(3):661-670.
- [57] 郑永光, 薛明, 陶祖钰. 美国 NOAA 试验平台和春季预报试验概要 [J]. *气象*, 2015, 41(5):598-612.
- [58] 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 [J]. *Wea Forecasting*, 2010, 25(5):1536-1542.
- [59] GALLO B T, CLARK A J, SMITH B T, et al. Blended probabilistic tornado forecasts: combining climatological frequencies with NSSL – WRF ensemble forecasts [J]. *Wea Forecasting*, 2018, 33(2):443-460.
- [60] GALLO B T, CLARK A J, SMITH B T, et al. Incorporating UH occurrence time to ensemble-derived tornado probabilities [J]. *Wea Forecasting*, 2019, 34(1):151-164.
- [61] 曹艳察, 郑永光, 盛杰, 等. 基于 GRAPES_3 km 模式输出的风雹概率预报技术研究 [J]. *气象*, 2021, 47(9):1047-1061.
- [62] HEINSELMAN P, BURKE P, WICKER L J, et al. Warn-on-forecast system: from vision to reality [J]. *Wea Forecasting*, 2024, 39(1):75-95.
- [63] KERR C A, MATILLA B C, WANG Y P, et al. Results from a pseudo-real-time next-generation 1-km warn-on-forecast system prototype [J]. *Wea Forecasting*, 2023, 38(2):307-319.
- [64] ROTHFUSZ L P, SCHNEIDER R, NOVAK D, et al. FACETs: a proposed next-generation paradigm for high-impact weather forecasting [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2018, 99(10):2025-2043.
- [65] TRUJILLO-FALCÓN J E, REEDY J, KLOCKOW-McCLAIN K E, et al. Creating a communication framework for FACETs: how probabilistic hazard information affected warning operations in NOAA’s hazardous weather testbed [J]. *Wea Climate Soc*, 2022, 14(3):881-892.
- [66] SUN Z Q, XUE M, ZHU K F, et al. Prediction of an EF4 supercell tornado in Funing, China: resolution dependency of simulated tornadoes and their structures [J]. *Atmos Res*, 2019, 229:175-189.
- [67] MARKOWSKI P M. What is the intrinsic predictability of tornadic supercell thunderstorms? [J]. *Mon Wea Rev*, 2020, 148(8):3157-3180.
- [68] RYZHKOV A V, SCHUUR T J, BURGESS D W, et al. Polarimetric tornado detection [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 2005, 44(5):557-570.
- [69] KUMJIAN M R, RYZHKOV A V. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 2008, 47(7):1940-1961.
- [70] LOEFFLER S D, KUMJIAN M R, JUREWICZ M, et al.

- Differentiating between tornadic and nontornadic supercells using polarimetric radar signatures of hydrometeor size sorting[J]. *Geophys Res Lett*, 2020, 47(12):e2020GL088242.
- [71] FUJITA T T. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales [J]. *J Atmos Sci*, 1981, 38(8):1511-1534.
- [72] TRAPP R J, TESSENDORF S A, GODFREY E S, et al. Tornadoes from squall lines and bow echoes. Part I: climatological distribution [J]. *Wea Forecasting*, 2005, 20(1):23-34.
- [73] FRENCH M M, KINGFIELD D M. Dissipation characteristics of tornadic vortex signatures associated with long-duration tornadoes [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 2019, 58(2):317-339.
- [74] WAKIMOTO R M, WIENHOFF Z, BLUESTEIN H B, et al. The dodge city tornadoes on 24 May 2016: damage survey, photogrammetric analysis combined with mobile polarimetric radar data [J]. *Mon Wea Rev*, 2018, 146(11):3735-3771.
- [75] WAKIMOTO R M, WIENHOFF Z, BLUESTEIN H B, et al. Mobile radar observations of the evolving debris field compared with a damage survey of the Shawnee, Oklahoma, tornado of 19 May 2013 [J]. *Mon Wea Rev*, 2020, 148(5):1779-1803.
- [76] RASMUSSEN E N, STRAKA J M, GILMORE M S, et al. A preliminary survey of rear-flank descending reflectivity cores in supercell storms [J]. *Wea Forecasting*, 2006, 21(6):923-938.
- [77] FRENCH M M, BLUESTEIN H B, POPSTEFANIJA I, et al. Mobile, phased-array, Doppler radar observations of tornadoes at X band [J]. *Mon Wea Rev*, 2014, 142(3):1010-1036.
- [78] BLUESTEIN H B, THIEM K J, SNYDER J C, et al. Tornadogenesis and early tornado evolution in the El Reno, Oklahoma, supercell on 31 May 2013 [J]. *Mon Wea Rev*, 2019, 147(6):2045-2066.
- [79] SKOW K D, COGIL C. A high-resolution aerial survey and radar analysis of quasi-linear convective system surface vortex damage paths from 31 August 2014 [J]. *Wea Forecasting*, 2017, 32(2):441-467.
- [80] ROMINE G S, BURGESS D W, WILHELMSON R B. A dual-polarization-radar-based assessment of the 8 May 2003 Oklahoma City area tornadic supercell [J]. *Mon Wea Rev*, 2008, 136(8):2849-2870.
- [81] YUAN C, BAI Y, SUN P F, et al. Microphysical insights into a tornadic supercell from dual-polarization radar observations in Jiangsu, China on 14 May 2021 [J]. *J Meteor Res*, 2024, 38(2):303-320.
- [82] McKEOWN K E, FRENCH M M, TUFTEDAL K S, et al. Rapid-scan and polarimetric radar observations of the dissipation of a violent tornado on 9 May 2016 near Sulphur, Oklahoma [J]. *Mon Wea Rev*, 2020, 148(9):3951-3971.
- [83] SEGALL J H, FRENCH M M, KINGFIELD D M, et al. Storm-scale polarimetric radar signatures associated with tornado dissipation in supercells [J]. *Wea Forecasting*, 2022, 37(1):3-21.
- [84] 刁秀广, 孟宪贵, 张立, 等. 台风“摩羯”与“温比亚”环流中龙卷小尺度涡旋特征及可预警性分析 [J]. *海洋气象学报*, 2019, 39(3):19-28.
- [85] 朱君鉴, 蔡康龙, 龚佃利, 等. 登陆台风“摩羯”(1814)在山东引发龙卷的灾情调查与天气雷达识别 [J]. *海洋气象学报*, 2019, 39(4):21-34.
- [86] 谷山青, 王凤娇, 孟宪贵, 等. 1814号台风“摩羯”引发鲁北平原一次罕见龙卷特征 [J]. *海洋气象学报*, 2022, 42(4):48-57.
- [87] SCHAUMANN J S, PRZYBYLINSKI R W. Operational application of 0–3 km bulk shear vectors in assessing quasi-linear convective system mesovortex and tornado potential [C/OL]//26th conference on severe local storms. Nashville, TN: American Meteorology Society, 2012 [2024-12-01]. <https://ams.confex.com/ams/26SLS/webprogram/Paper212008.html>.
- [88] GIBBS J G. Evaluating precursor signals for QLCS tornado and higher impact straight-line wind events [J]. *J Operational Meteor*, 2021, 9(5):62-75.
- [89] ATKINS N T, ARNOTT J M, PRZYBYLINSKI R W, et al. Vortex structure and evolution within bow echoes. Part I: single-Doppler and damage analysis of the 29 June 1998 derecho [J]. *Mon Wea Rev*, 2004, 132(9):2224-2242.
- [90] DAVIS J M, PARKER M D. Radar climatology of tornadic and nontornadic vortices in high-shear, low-CAPE environments in the mid-Atlantic and southeastern United States [J]. *Wea Forecasting*, 2014, 29(4):828-853.
- [91] KUSTER C M, SHERBURN K D, MAHALE V N, et al. Radar signatures associated with quasi-linear convective system mesovortices [J]. *Wea Forecasting*, 2024, 39(8):1143-1161.

- [92] WURMAN J, ALEXANDER C, ROBINSON P, et al. Low-level winds in tornadoes and potential catastrophic tornado impacts in urban areas[J]. Bull Amer Meteor Soc, 2007, 88(1):31-46.
- [93] 黄先香, 俞小鼎, 炎利军, 等. 1804号台风“艾云尼”龙卷分析[J]. 气象学报, 2019, 77(4):645-661.
- [94] 植江玲, 白兰强, 黄先香, 等. 2022年6月19日广东佛山龙卷的双极化相控阵雷达特征[J]. 热带气象学报, 2024, 40(2):297-312.
- [95] 周海光. “6·23”江苏阜宁 EF4级龙卷超级单体风暴中尺度结构研究[J]. 地球物理学报, 2018, 61(9):3617-3639.
- [96] 郑永光, 蓝渝, 曹艳察, 等. 2019年7月3日辽宁开原 EF4级强龙卷形成条件、演变特征和机理[J]. 气象, 2020, 46(5):589-602.
- [97] 郑永光, 朱文剑, 田付友. 2015年“东方之星”翻沉事件和2016年阜宁 EF4级龙卷对流风暴环境条件、结构特征和机理[J]. 气象科技进展, 2018, 8(2):44-54.
- [98] SMITH B T, THOMPSON R L, DEAN A R, et al. Diagnosing the conditional probability of tornado damage rating using environmental and radar attributes[J]. Wea Forecasting, 2015, 30(4):914-932.
- [99] SMITH B T, THOMPSON R L, SPEHEGER D A, et al. WSR-88D tornado intensity estimates. Part I: real-time probabilities of peak tornado wind speeds[J]. Wea Forecasting, 2020, 35(6):2479-2492.
- [100] GIBBS J G, BOWERS B R. Techniques and thresholds of significance for using WSR-88D velocity data to anticipate significant tornadoes[J]. J Oper Meteor, 2019, 7(9):117-137.
- [101] SESSA M, TRAPP R. Environmental and radar-derived predictors of tornado intensity within ongoing convective storms[J]. J Oper Meteor, 2023, 11(5):49-71.
- [102] 肖艳姣, 李中华, 王志斌, 等. 一种龙卷涡旋特征自动识别算法; 202010861316.5[P]. 2023-11-21.
- [103] 肖艳姣, 王珏, 王志斌, 等. 双偏振天气雷达精细化探测技术对2021年两个龙卷风暴识别能力的影响分析[J]. 暴雨灾害, 2022, 41(2):130-141.
- [104] FRENCH M M, KINGFIELD D M. Tornado formation and intensity prediction using polarimetric radar estimates of updraft area[J]. Wea Forecasting, 2021, 36(6):2211-2231.
- [105] SANDMÆL T N, SMITH B R, REINHART A E, et al. The tornado probability algorithm: a probabilistic machine learning tornadic circulation detection algorithm[J]. Wea Forecasting, 2023, 38(3):445-466.
- [106] SANDMÆL T N. The current state and future of CIWRO/NSSL's machine learning-based tornado probability algorithm: A34A-02[R/OL]. (2024-12-11) [2024-12-20]. <https://agu.confex.com/agu/agu24/meetingapp.cgi/Paper/1531656>.
- [107] XIE J Y, ZHOU K H, CHEN H N, et al. Multi-task learning for tornado identification using Doppler radar data[J]. Geophys Res Lett, 2024, 51(11):e2024GL108809.
- [108] LAGERQUIST R, McGOVERN A, HOMEYER C R, et al. Deep learning on three-dimensional multiscale data for next-hour tornado prediction[J]. Mon Wea Rev, 2020, 148(7):2837-2861.
- [109] CINTINEO J L, PAVOLONIS M J, SIEGLAFF J M, et al. NOAA ProbSevere v2.0: ProbHail, ProbWind, and ProbTor[J]. Wea Forecasting, 2020, 35(4):1523-1543.
- [110] SMITH T M, LAKSHMANAN V, STUMPF G J, et al. Multi-radar multi-sensor (MRMS) severe weather and aviation products: initial operating capabilities[J]. Bull Amer Meteor Soc, 2016, 97(9):1617-1630.
- [111] ZHANG Y C, LONG M S, CHEN K Y, et al. Skilful nowcasting of extreme precipitation with NowcastNet[J]. Nature, 2023, 619(7970):526-532.
- [112] DAS P, POSCH A, BARBER N, et al. Hybrid physics-AI outperforms numerical weather prediction for extreme precipitation nowcasting[J]. Npj Clim Atmos Sci, 2024, 7(1):282.
- [113] RAVURI S, LENC K, WILLSON M, et al. Skilful precipitation nowcasting using deep generative models of radar[J]. Nature, 2021, 597(7878):672-677.
- [114] PRICE I, SANCHEZ-GONZALEZ A, ALET F, et al. Probabilistic weather forecasting with machine learning[J]. Nature, 2025, 637(8044):84-90.