

郑永光,刘非凡,张恒进,2021. 中国龙卷研究进展[J]. 气象,47(11):1319-1335. Zheng Y G, Liu F F, Zhang H J, 2021. Advances in tornado research in China[J]. Meteor Mon,47(11):1319-1335(in Chinese).

中国龙卷研究进展*

郑永光^{1,2} 刘非凡² 张恒进²

1 国家气象中心,北京 100081

2 中国气象科学研究院,北京 100081

提 要:近年来,中国几个 EF3 级以上强龙卷导致了严重人员伤亡和重大经济损失。龙卷尺度非常小,发生频率非常低。中国虽然目前尚不具备业务预报龙卷能力,但随着新一代天气雷达及自动气象站的观测网、现场调查和数值模式的发展,龙卷研究取得了显著进展,对中国龙卷时空分布气候特征和有利的天气背景以及环境条件已有较为全面的了解,也认识到不同天气背景下有利于龙卷产生的环境条件不尽相同。龙卷风灾现场调查流程和分析技术已经较为完备,2016 年江苏阜宁 EF4 级龙卷等多个强龙卷都得到了详细规范的现场调查和分析,为减灾防灾提供了重要数据。对孕生龙卷的超级单体风暴中小尺度特征取得了较为深入的认识,如不太强的地面冷池、中气旋底高通常低于 1 km、强度与龙卷强度正相关、倾斜、龙卷碎片特征、下沉反射率因子核和部分龙卷的多涡旋特征等。使用精细云模式成功对江苏阜宁和北京通州龙卷分别进行了理想模拟,且使用 WRF(Weather Research and Forecasting)模式成功模拟出了 2005 年台风麦莎对流眼墙中的龙卷尺度涡旋和 2016 年阜宁龙卷的多涡旋结构。未来,仍然需要在龙卷探测技术、龙卷对流风暴精细地面要素分布和结构特征、龙卷涡旋和闪电活动特征等方面进行深入研究,更需要通过更高时空分辨率观测资料分析和极高分辨率的数值模拟获取龙卷发展的关键因素和机理,从而为提升龙卷的预报预警能力提供更为坚实的科学基础。

关键词: 龙卷,气候,环境条件,现场调查,中小尺度,数值模拟

中图分类号: P445,P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.11.002

Advances in Tornado Research in China

ZHENG Yongguang^{1,2} LIU Feifan² ZHANG Hengjin²

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: Several intense tornadoes (\geq EF3) in China in recent years resulted in heavy casualties and serious economic losses. Tornado has a very small scale, and its occurrence frequency in China is extremely low. At present, China still does not have the operational capability of forecasting tornadoes. However, with the development of observation networks of new-generation weather radar and surface automatic weather stations, damage survey and numerical weather prediction model, remarkable progress in tornado research in China has been made. The spatio-temporal and climatological characteristics, favorable synoptic backgrounds and environmental conditions for tornado in China have been understood more comprehensively, and it has also been found that the favorable environmental conditions for tornado in different synoptic backgrounds are somewhat different. The damage survey process and analysis technology of tornado disaster have been developed. The damage surveys and analyses of several intense tornadoes, such as the 2016 Funing, Jiangsu Province EF4 tornado, have been made in detail, which provide indispensable data for

* 国家重点研发计划(2018YFC1507504 和 2017YFC1502003)、国家自然科学基金面上项目(41375051)共同资助

2020 年 9 月 6 日收稿; 2021 年 4 月 15 日收修定稿

第一作者:郑永光,主要从事强对流和强降水天气研究. E-mail:zhengyg@cma.gov.cn

disaster prevention and mitigation. More understandings of meso- and micro-scale characteristics of tornadic convective storms have been got, including the findings of the storm cold pool with appropriate intensity, the bottom of the mesocyclone generally lower than the height of 1 km, the positive intensity correlation between tornado and its parent mesocyclone, slantwise mesocyclone, tornadic debris signature, descending reflectivity core, and multi-vortex structure of some tornadoes. Two tornadoes have successfully been ideally simulated using a fine-resolution cloud model, and the tornado-scale vortices in the convective eye wall of 2005 Typhoon Matsa and the multiple vortices of the 2016 Funing Tornado have been successfully simulated by the WRF (Weather Research and Forecasting) model. In future, we still need to further develop tornado detection technology, and to study fine surface meteorological element distribution and structure features, tornado vortex and lightning activity of tornadic convective storms. What's more, researches on the development mechanisms of tornado are more needed through finer-resolution observation data and higher-resolution numerical weather simulation so as to provide more scientific foundations for promoting the tornado forecasting and warning capability in China.

Key words: tornado, climatology, environmental condition, damage survey, meso- and micro-scale, numerical simulation

引 言

龙卷是地球大气中最为剧烈和最具有破坏性的天气现象。美国移动多普勒天气雷达观测到距地面 32 m 高度的龙卷最大风速达到 $135 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Wurman et al, 2007), 但直接观测龙卷风速几乎是不可能的, 因此, 通常使用不同的级别来估计龙卷强度。龙卷的基本特征是对流活动导致的从空中向下方伸展的强烈旋转空气柱, 其表现为可以观测到的漏斗云和/或旋转的碎片或沙尘等。美国气象学会 (AMS) 对龙卷的定义作了多次修订, 最近修订后定义为“从积状云下垂伸展至地面的强烈旋转空气柱, 且经常可看到漏斗状云和/或地面旋转的碎片/沙尘*”; 中国的《大气科学辞典》中给出的龙卷定义为“从积雨云中伸下的猛烈旋转的漏斗状云柱。它有时稍伸即隐, 有时悬挂空中或触及地面。”(《大气科学辞典》编委会, 1994)。龙卷通常分为两类: 一类为中气旋龙卷(也称为超级单体龙卷), 另一类为非中气旋龙卷(也称为非超级单体龙卷) (Davies-Jones et al, 2001; Bluestein, 2013; 郑永光等, 2017), 后者通常弱于前者。美国约有 25% 的中气旋能够产生龙卷 (Davies-Jones et al, 2001)。非中气旋龙卷也通常分为两类 (郑永光等, 2018a; 俞小鼎和郑永

光, 2020): 一类出现在飚线或者弓形回波前部的 γ 中尺度涡旋(又称为中涡旋)内, 这类龙卷通常比中气旋龙卷弱, 个别强度可以达到 EF3 级; 另一类通常出现在地面辐合切变线上, 这类辐合切变线上产生的瞬变涡旋遇到积雨云或浓积云中上升气流垂直拉伸涡度加强而形成龙卷 (Wakimoto and Wilson, 1989)。Agee and Jones (2009) 则将龙卷分为三类, 分别为超级单体龙卷、线状对流龙卷和其他类型龙卷, 其他类型龙卷包括陆龙卷 (landspout, 类似于水龙卷的陆地龙卷)、水龙卷 (waterspout)、冷空气漏斗云 (cold air funnel)、阵风锋龙卷 (gustnado)、热带气旋眼墙中的中涡旋、反气旋式次级涡旋等。但 Agee (2014) 根据 AMS 对龙卷的相关定义, 从龙卷分类中剔除了热带气旋眼墙中的中涡旋和阵风锋龙卷。

全球每年仅发生约 2 000 个龙卷, 发生概率非常低。美国每年龙卷可超过 1 200 个 (Brooks et al, 2003), 是发生频率最高的国家。F4/EF4 级及以上等级龙卷发生频率极低, 美国 1950—2011 年每年平均发生约 10 个这些等级的龙卷; 1925 年 3 月 18 日, 美国的一次强龙卷造成了 695 人死亡 (Wurman et al, 2007), 是迄今为止导致死亡人数最多的一次龙卷。

中国龙卷发生频率显著低于美国, 每年发生次

* 英文原文为“A rotating column of air, in contact with the surface, pendant from a cumuliform cloud, and often visible as a funnel cloud and/or circulating debris/dust at the ground”。来源自 AMS 网站 (<https://glossary.ametsoc.org/wiki/Tornado>)。

数仅大概为美国的十分之一(范雯杰和俞小鼎, 2015)。不过,2015年10月4日“彩虹”台风外围佛山 EF3 级龙卷、2016年6月23日江苏阜宁 EF4 级龙卷和2019年7月3日辽宁开原 EF4 级龙卷等强龙卷由于其极大的破坏性,导致了大量人员伤亡和严重经济损失。在俞小鼎和郑永光(2020)和郑永光(2020)的基础上,本文简述中国龙卷气候特征和环境条件研究进展,重点回顾和总结现场调查、龙卷中小尺度特征和数值模拟研究等方面进展,并给出未来工作展望。

1 气候特征

郑永光(2020)总结了 Yao et al(2015)、范雯杰和俞小鼎(2015)和 Chen et al(2018)分别给出的中国龙卷气候分布;中国每年发生约 100 个龙卷;龙卷主要发生在中国东部和部分中部平坦地区,其中江苏尤其是江苏北部是中国龙卷最多发的地区;但强龙卷基本发生在中国中东部,年均发生 EF1 或以上级龙卷 14.3 次(范雯杰和俞小鼎,2015;Chen et al, 2018)。需要指出的是,河北北部和内蒙古东南部同

辽宁交界附近区域也有一些龙卷发生;例如,2017年8月11日内蒙古赤峰市克什克腾旗和翁牛特旗 EF3 级龙卷导致 5 人死亡;青藏高原也有龙卷发生,但强度弱。中国尚未记录到 EF5 级龙卷;根据范雯杰和俞小鼎(2015)的统计结果和近年的龙卷发生情况,1951—2020 年共记录到 7 次 EF4 级龙卷(郑永光,2020)。

Bai et al(2020)调查了 2006—2018 年中国热带气旋(TC)龙卷的发生情况,共获得 64 次 TC 龙卷记录,平均每年约为 5 次;中国约三分之一的登陆 TC 有龙卷生成;TC 龙卷主要发生在距热带气旋中心 500 km 范围内,江苏和广东是中国 TC 龙卷发生频次最多的两个省份;中国的 TC 龙卷主要生成于 TC 中心的东北象限,少数生成于 TC 中心西侧。中国大多数 TC 龙卷生成于强度相对较弱的热带气旋(如热带低压、热带风暴)(郑媛媛等,2015;Bai et al, 2020)。不过,中国 TC 龙卷强度的气候分布特征还没有完全厘清,目前记录到的中国最强 TC 龙卷强度为 EF3 级。

通常 TC 龙卷发生在登陆 TC 的外雨带中。但美国的一些观测和飓风现场调查发现,TC 眼墙强烈

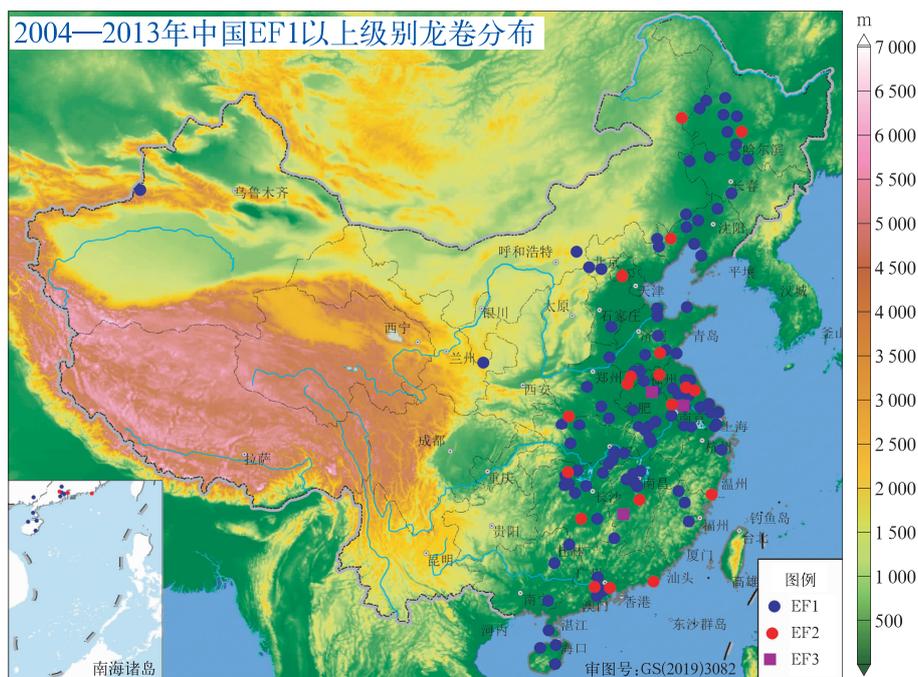


图 1 中国(未包括台湾)2004—2013 年 143 次 EF1 级以上龙卷分布
[填色为地形,根据范雯杰和俞小鼎(2015)相应图形改绘]

Fig. 1 The 143 tornadoes with intensities stronger than EF1 in China in 2004—2013
(color shaded: topography; modified from Fan and Yu, 2015)

对流中也存在着尺度约 1 km 的龙卷尺度涡旋,其移动非常快速(Wu et al, 2018), Agee and Jones (2009)把它们归类为第三类龙卷(其他类型龙卷),不过, Agee (2014)把这类涡旋剔除出了龙卷的范畴。Wu et al (2018)使用最高水平分辨率达 37 m 的 WRF 模式加大涡模拟,成功模拟出了 2005 年台风麦莎(Matsa)眼墙对流内边缘的龙卷尺度涡旋,证明这些涡旋在热带气旋中普遍存在。

2 天气背景和环境条件

有利于 F2/EF2 级及以上中气旋龙卷的环境条件不仅需要较大的对流有效位能(CAPE)和强的 0~6 km 垂直风切变(Brooks et al, 2003),还需要较高的 0~1 km 相对湿度(Doswell III and Evans, 2003)、较低的抬升凝结高度和较大的低层(0~1 km)垂直风切变(Craven and Brooks, 2004)。基于这些环境条件特征,Brooks et al (2003)利用美国环境预报中心(NCEP)再分析资料计算了全球龙卷年平均日数分布,从中可以看到,我国东北和广东这两个龙卷日数的高值区与前文给出的气候特征具有较好的一致性,但其给出的图中并没有体现江苏这个龙卷多发区,这表明江苏龙卷的环境条件与其研究所使用的环境条件存在差异,可能的差异原因下文进行分析。

郑永光(2020)总结了我国龙卷的天气背景和环境条件。虽然多种天气尺度背景有利龙卷发生(魏文秀和赵亚民, 1995; 王东海等, 2018),但梅雨、冷涡和 TC 是中国发生较多龙卷的天气背景,且这三种背景下龙卷发生条件存在显著差异(郑永光, 2020)。

梅雨背景下的强龙卷通常具备了中气旋龙卷所有有利条件,但不同个例的 CAPE 值差异较大,一些个例 CAPE 可达 $3000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,而有些个例仅超过 $1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (俞小鼎等, 2008; 郑媛媛等, 2009; 郑永光等, 2018b)。不过,需要注意 CAPE 计算的代表性问题。江苏龙卷多发生在梅雨背景下(吴芳芳等, 2013; 曾明剑等, 2016),此背景下的大气垂直减温率通常小于 Brooks et al (2003)计算龙卷日数所用数值(垂直减温率至少为 $6.5 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$),这是一个很大的垂直减温率数值(郑永光等, 2017),因此这很可能是 Brooks et al (2003)未能展示江苏是中国龙卷最主要高发区的原因。

冷涡背景下强龙卷的环境条件,除了较差的低层湿度条件和较高的抬升凝结高度是较不利的条件外(王秀明等, 2015; 郑永光等, 2020),其他有利中气

旋龙卷的条件通常都具备;但郑永光等(2020)指出辽宁开原龙卷发生前,对流风暴的前部先在开原及周边地区产生了降水,迅速改善了湿度条件。

如前所述,广东是中国龙卷的高发区之一,也是 TC 龙卷高发区之一,与 Brooks et al (2003)所给出的相应高发区基本一致。但据 2002—2012 年广东 62 次龙卷的统计结果(冯喆, 2016)显示,63% 的龙卷发生在前汛期 4—6 月,且大部分龙卷并非 TC 龙卷。因此,虽然广东龙卷的有利环境条件尚没有系统性的统计结果发表,但这很可能表明广东非 TC 龙卷大多符合 Brooks et al (2003)给出的龙卷发生条件。

TC 龙卷的环境条件除了较弱的 CAPE ($200 \sim 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$) 外(郑媛媛等, 2015),其他有利条件也都具备。由于台风背景下龙卷的环境条件与其他天气背景存在较明显差异,因此,龙卷也通常区分为台风龙卷和非台风龙卷,或者称为热带气旋龙卷和非热带气旋龙卷。由于 TC 背景下大气垂直减温率也通常较小,如前所述,Brooks et al (2003)使用的环境条件之一是大的垂直减温率,因此,其所给出的龙卷分布并不能反映 TC 龙卷分布。

弱垂直风切变的环境中也会产生超级单体龙卷,这比较罕见。郑艳等(2017)、王秀明和俞小鼎(2019)分别分析了 2016 年 6 月 5 日位于热带地区海南文昌的一次 EF2 级非台风龙卷过程。王秀明和俞小鼎(2019)认为其是非典型超级单体龙卷。这次龙卷过程发生在副热带高压边缘、500 hPa 槽前、850 hPa 切变线和地面热低压的南侧;虽然 0~1 km 和 0~6 km 垂直风切变非常弱,但由于海陆风效应而显著增大的 0~2 km 垂直风切变,极高的低层湿度和较低的抬升凝结高度,非常大的 CAPE 值(达 $2900 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)为龙卷风暴的生成提供了有利的环境条件。

非中气旋龙卷大多与飑线或者地面辐合切变线有关,所以这类非中气旋龙卷的天气背景和环境条件就是有利于出现这些对流风暴的背景和条件。刁秀广等(2014)分析发生在山东境内的 6 个非超级单体龙卷;这些非超级单体龙卷产生于 5 次天气过程,其中 4 次过程属于后倾槽结构,1 次是西北气流结构;低层大的湿度和 0~1 km 垂直风切变 $\geq 7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 是这些龙卷发生的有利条件。吴芳芳等(2019)分析了一次 2006 年发生在梅雨锋上的中尺度对流复合体,雷达探测显示其实是一条尺度在 150~200 km 的弓形飑线,该飑线前侧产生了 7 个非超级单体龙卷;其环境背景和条件包括:中层在副热带高压西北侧

和 500 hPa 东移的短波槽前,地面位于锋面气旋暖区内;有中等到强的对流有效位能、强的深层(0~6 km)和低层(0~1 km)风垂直切变。

3 现场灾害调查

3.1 概述

龙卷或者下击暴流导致的强对流风灾具有显著的多尺度特征(郑永光等,2016a),但强风灾害尺度非常小。虽然我国目前已经布设完成了较为完备的新一代多普勒天气雷达监测网和稠密的区域自动气象站网,但仍然难以全面监测该类天气,因此现场灾害调查是必要手段,能够为确定灾害的成因和强度,提供最重要和最为直接的证据(郑永光等,2017;2018a)。

Fujita(1971)提出了 Fujita 等级以估计龙卷、台风等的风速,现在美国已形成了比较完整规范的龙卷和下击暴流所致风灾强度等级和现场调查体系(Fujita et al,1970;Fujita,1978;1985;Bunting and Smith,1993;Doswell III and Evans,2003;Edwards et al,2013)。Fujita(1981)总结了强对流风暴导致的龙卷大风、直线大风*、下击暴流**所致大风共三类灾害性大风的表面流场特征:龙卷灾害路径相对狭窄,通常导致辐合旋转性风场;而下击暴流所致大风通常是辐散的直线或者曲线型大风(图 2a,2b)(郑永光等,2016a)。

通过灾害程度来评估风速存在较大不确定性,因此需要一定的等级来表征不同物体受灾程度所指

示的风速范围。目前得到较多应用的风速等级,包括常用的蒲福风级,主要应用于下击暴流和龙卷风灾估计的 T 等级、F 等级和 EF 等级,以及美国用于飓风风速估计的 S 等级(郑永光等,2016b)。F 等级目前仍是最为广泛被用来估计下击暴流、龙卷等的风速等级,而 EF 等级是改进的 F 等级。2019 年,中国的龙卷强度等级(姚聘等,2019)正式发布实施,其与 EF 等级具有对应关系。在此行业标准基础上,2021 年 5 月 21 日,国家市场监督管理总局国家标准化管理委员会发布了中华人民共和国国家标准 GB/T40243—2021《龙卷风强度等级》(中国气象局,2021),于 2021 年 12 月 1 日实施。

20 世纪 70 年代起,中国已有部分文献给出了龙卷风灾个例的调查结果(如:辽宁丹东市气象台,1975;杨起华等,1978;林大强等,1984;刁秀广等,2014),但这些调查工作相对比较简单,只有时间、地点、路径宽度、灾害损失等部分相关情况。中国第一次比较规范的龙卷灾情调查是 Meng and Yao(2014)对 2012 年 7 月 21 日下午北京特大暴雨期间发生在通州区张家湾的超级单体龙卷灾情的调查;其后,对 2015 年 6 月 1 日“东方之星”翻沉事件(郑永光等,2016a)、2015 年 10 月 4 日“彩虹”台风龙卷(Bai et al,2017)、2016 年江苏阜宁 EF4 级龙卷(郑永光等,2016b;Meng et al,2018)、2019 年辽宁开原 EF4 级龙卷(张涛等,2020)等都做了详细规范的现场调查。其中,Bai et al(2017)的灾情调查,分析非常深入、清晰和细致;除了使用灾害标识物详细估计龙卷强度外,还通过视频估计龙卷卷起碎片的旋转速度进而估计龙卷漏斗云附近的近地面风速。

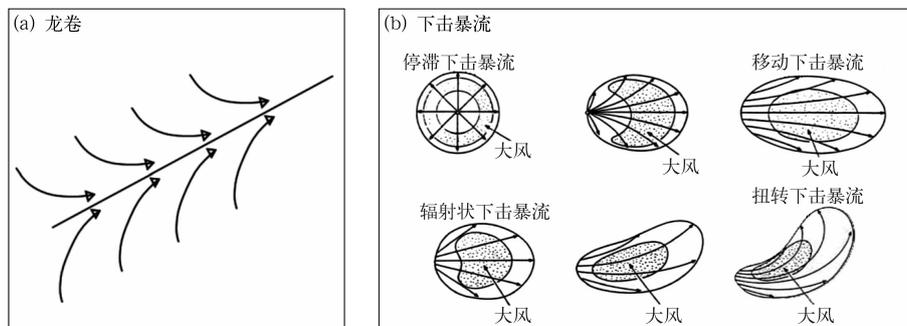


图 2 龙卷(a)和下击暴流(b)的不同地面流型(Fujita,1985;Doswell III,2003)

Fig. 2 Different surface flow patterns of tornado (a) and downburst (b) (Fujita, 1985; Doswell III, 2003)

* 直线大风不同于龙卷大风,指的是近地面气流无明显曲率,近似为直线。

** 下击暴流指的是强对流天气系统中产生的局部性强下沉气流,到达地面后会产生辐散型或直线型的灾害性大风。按照尺度的不同,下击暴流被分为微下击暴流和宏下击暴流。

3.2 调查步骤

由龙卷或者下击暴流等所致强风灾害调查,通常需要如下步骤:(1)利用政府、新闻媒体或者互联网等各种信息,初步确定已知灾情、地点和可能的灾害发生时间。(2)利用雷达、卫星和闪电等观测资料,确定可能导致灾害的中尺度天气系统,初步分析判断其导致风灾的可能强度和影响区域。(3)利用地面自动气象站观测风场和雷达观测径向风场,进一步综合判断明确风灾的可能强度、影响区域和可能成因,结合灾害情况综合确定现场调查的大致区域和调查路线以及调查计划、分工等。(4)准备现场调查所需交通工具和装备,这些装备包括智能手机(具有无线网络通信、照相、录像、百度地图、指南针、GPS定位等功能)、高清相机、GPS定位仪(指南针)、充电宝、携带多块电源和高清相机的无人机等;目前,无人机航拍已是现场调查的必要手段。(5)在现场调查过程中,除了进行相机和无人机拍摄、定位、确定照片和树木等的倒伏方向等重要工作外,还需要向相关人员调查和了解灾害相关情况、现场监控视频、环境条件状况等。(6)现场调查结束后,全面综合分析气象资料和现场调查资料,排除虚假信息,分析风灾成因,形成调查报告,给出最终调查结果和结论。

3.3 江苏阜宁和辽宁开原龙卷调查

2016年6月23日14:19—15:00左右(北京时,下同),江苏省盐城市阜宁县部分地区出现龙卷和冰雹,距离核心灾区6km的新沟镇自动站记录的瞬时极大风速为 $34.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (风力12级)(郑永光等,2016b)。2019年7月3日下午约17—18时,辽宁省开原市出现了龙卷、冰雹、短时强降水等强对流天气;多个龙卷视频资料、沈阳新一代天气雷达和FY-4A卫星可见光图像综合表明此次龙卷为一个孤立的超级单体龙卷(郑永光等,2020)。国家气象中心(中央气象台)派出专家会同多个单位专家对这两次龙卷事件都进行了详细现场天气调查(郑永光等,2016b;Meng et al,2018;张涛等,2020)。

现场调查发现江苏阜宁吴滩中心小学教师用手机拍摄的漏斗云视频(图3),从该视频可以清晰看到旋转的漏斗云和正在空中旋转的被卷到空中的地面物体碎片。结合该视频和雷达径向速度的中气旋和龙卷涡旋(TVS)结构(张小玲等,2016;郑永光等,

2018b;Meng et al,2018),确定本次灾害由超级单体龙卷造成。现场调查结果(郑永光等,2016b)表明,阜宁龙卷灾害区域(图3a)东西方向长度超过30 km,最大宽度约为4 km,最窄约为500 m。阜宁受灾区域大部为农村,受灾房屋多为砖木结构(屋墙为砖砌、屋顶为木材所制梁和檩),少部分受灾房屋为水泥砖砌和混凝土预制楼板结构;受灾树木多为杨树。阜宁灾区部分二层房屋的顶层完全被损毁(图3c),其为水泥砖砌和混凝土预制楼板结构,墙体中使用了较细的钢筋加固。根据EF等级,这些灾害可估计为EF4级灾害,对应于我国龙卷强度等级的四级。在灾害现场发现,被龙卷抛出的400~500 m重为1~2 t的空集装箱有明显的扭转痕迹,这为F4(甚至F5级)级灾害,但不能用来估计EF级别。因此,综合分析判断2016年江苏阜宁龙卷最大强度为四级(EF4级)(郑永光等,2016b)。

辽宁开原龙卷路径全程(图3d)长约为14 km,历时约30 min,最强达四级(EF4级)强度(图3f)(张涛等,2020)。开原龙卷漏斗云于17:15左右在开原市金钩子镇金英村北约1 km处开始形成(图3d);17:17接地(图3c);17:16—17:18,以EF2级强度自北向南方向穿过金英村、农田和高速公路;17:23左右,以EF3级进入并纵贯开原工业区北园,17:33进入工业园南区,在工业园南区中部达到最强四级(EF4级)强度;最后于17:47左右在瓜台子村南1.8 km附近区域消散(图3d)。龙卷自北向南穿过开原工业园南区中部的食堂,其为钢筋混凝土框架结构的二层小楼,框架由钢筋水泥的柱体和梁体构成,大部折断倒塌(图3f);因此,该处龙卷强度确定为四级(EF4级)。但此次龙卷最强灾害影响范围非常小,显著小于江苏阜宁四级(EF4级)龙卷。

4 中小尺度特征

龙卷尺度非常小,属于小尺度天气系统,其直径通常小于2 km。李峰等(2020)综述了近20年美国龙卷雷达探测研究进展,给出了雷达探测技术进步、龙卷对流风暴观测特征和基于雷达观测的龙卷发展机理研究成果等。但目前,地面观测网依然很难直接观测到龙卷本身的地面环流和其他气象要素特征(郑永光等,2017),业务多普勒天气雷达也不能直接探测龙卷。



图 3 2016 年江苏阜宁龙卷灾害路径(a),阜宁县吴滩中心小学教师手机拍摄的龙卷漏斗云视频截图(图中箭头表示龙卷旋转方向)(b),立新村受灾二层房屋(c) (郑永光等,2016b);2019 年辽宁开原龙卷路径和强度(d),头寨子村监控视频拍摄的初始龙卷(e),开原工业园南区钢筋混凝土框架结构食堂几乎被夷为平地(f)(张涛等,2020)

Fig. 3 Damage track (a), tornado tuba cloud photo taken in Wutan Primary School (arrow; the rotation direction) (b) and the two-story house with top-story collapsed in Lixin Village (c) of the 2016 Funing Tornado (Zheng et al,2016b); Tornado track (d), monitoring video in Touzhaizi Village (e), and reinforced concrete frame structure canteen flattened (f) of the 2019 Kaiyuan Tornado (Zhang et al, 2020)

4.1 龙卷风暴组织形态

龙卷可发生在不同组织形态的对流系统中。Trapp et al(2005)发现 1998—2000 年美国龙卷中 79%为单体结构、18%为准线状对流系统;Grams

et al(2012)则发现美国 2000—2008 年龙卷中约 70%的 EF2 级及以上龙卷的对流系统为孤立分散状组织形态;准线状对流系统产生的龙卷强度通常较弱(Trapp et al,2005)。目前,尚未有研究中国龙卷对流风暴组织形态的统计结果,但从已有中国个

例研究来看,孤立对流系统组织形态较多(如 2015 年“彩虹”台风龙卷、2016 江苏阜宁龙卷、2019 辽宁开原龙卷);也有一些线状对流组织形态,如台风螺旋雨带中的龙卷(郑媛媛等,2015)和部分非中气旋龙卷(刁秀广等,2014;吴芳芳等,2019)等;团状组织形态龙卷风暴也有一些个例,如 2003 年 7 月 8 日安徽无为 EF3 级龙卷(俞小鼎等,2006b)。

4.2 地面场特征

稠密的地面观测网虽然依然不可能观测龙卷环流本身(郑永光等,2017),但能够观测到龙卷的外围涡旋环流。包澄澜和赵刚然(1964)分析上海 1962 年和 1963 年的 3 次龙卷过程发现,地面存在 30~40 km 大小、持续约 3~4 h 的准静止的涡旋流场。黎清才和刘可先(1989)指出龙卷发生在地面中尺度辐合线中,但并非位于最大辐合中心附近;张一平等(2012)分析指出 2010 年 7 月 17 日和 19 日河南两次龙卷发生在地面 β 中尺度低压气旋的东南象限,距气旋中心约 50 km 处。王秀明和俞小鼎(2019)分析 2016 年 6 月 5 日海南文昌龙卷发现,龙卷风暴形成于前期风暴出流与海锋相遇的辐合线上,虽然该文没有指出地面存在小尺度涡旋流场,但从当时的地面观测能够分析出该特征。郑永光等(2018b;2020)指出,在 2016 年江苏阜宁 EF4 级龙卷和 2019 年辽宁开原 EF4 级龙卷过程中,地面自动站网也观测到了龙卷外围小尺度涡旋环流,但这并非是龙卷本身的涡旋环流。2013 年 7 月 7 日江苏高邮龙卷的地面流场具有类似特征(曾明剑等,2016)。

台风龙卷同样发生在辐合线或气旋性辐合区中(郑媛媛等,2015)。2015 年“彩虹”台风顺德和番禺龙卷发生前,在龙卷风暴移动方向上就已存在一条地面风场辐合线,龙卷移动路径与地面风场辐合线对应较好(朱文剑等,2016),并形成小尺度低涡环流(李彩玲等,2016;李兆慧等,2017)。黄先香等(2019)分析的 1804 号台风艾云尼产生的广州市南沙区横沥镇和佛山市南海区大沥镇龙卷,同样具有类似 2015 年“彩虹”台风龙卷的地面风场特征。

俞小鼎等(2006b)指出环境大气抬升凝结高度越低,表明低层相对湿度越大,下沉气流中的气块在低层大气被进一步蒸发降温的可能性就越小,越有利于强龙卷的形成。郑永光等(2018b;2020)指出 2016 年江苏阜宁 EF4 级龙卷和 2019 年辽宁开原 EF4 级龙卷过程,超级单体风暴不太强下沉气流导

致的冷流出(温度差小于 4°C)是其能够产生龙卷的重要机制。

4.3 中气旋和龙卷涡旋(TVS)特征

早期中国龙卷研究给出了一些龙卷风暴的中尺度特征,但这些研究受制于当时的观测能力,不能给出龙卷风暴的更多观测特征;由于当时没有径向速度观测,以判断中气旋或者中涡旋以及 TVS 等特征难度较大,因此难以判断其属于哪类龙卷。包澄澜和赵刚然(1964)指出上海 1962 年和 1963 年的 3 次龙卷并非发生在强烈的雷雨云的中心部分,而是在其右后方的边缘地区。蒋汝庚(1997)给出了 1995 年 4 月 19 日发生在广东番禺洪奇沥镇的反气旋龙卷的卫星云图和常规天气雷达回波,俞小鼎和郑永光(2020)根据文中的雷达回波判断此次龙卷应该是由超级单体产生。刘勇等(1998)给出了 1983 年 9 月 4 日发生陕西中部咸阳附近的一次龙卷的常规天气雷达反射率因子回波,龙卷出现在飏线尾部的一个明显的弓形回波中,俞小鼎和郑永光(2020)判断其可能由飏线或者弓形回波上的中涡旋发展而成,不过,也可能是在飏线阵风锋上产生的阵风锋龙卷。

目前,对非中气旋龙卷,由于业务多普勒天气雷达观测特征不够显著,还很难基于业务雷达探测资料做出有效预警。中气旋龙卷产生与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,其临近预警主要依据依然是业务多普勒天气雷达探测到的中气旋(俞小鼎等,2006a;2012;郑永光等,2015;2018a),或者经典超级单体存在的钩状回波特征(郑永光等,2018a)等,但如前所述,美国的统计表明,仅约有 25%、甚至更少的雷达探测到的中气旋会生成龙卷,但当中气旋底距离地面高度小于 1 km 时,龙卷的发生概率则约为 40%(Davies-Jones et al, 2001;俞小鼎等,2012;郑永光等,2018a)。多普勒天气雷达有时能够探测到的 TVS 特征是龙卷临近预警的另一重要依据(俞小鼎等,2012;郑永光等,2018a)。

吴芳芳等(2013)通过普查发现 2005—2009 年苏北地区共产生了 72 个超级单体,其中超级单体龙卷 13 个;虽然样本不够多,但作为粗略估计,苏北地区超级单体(中气旋)产生龙卷的概率约为 18.1%(俞小鼎和郑永光,2020);这 13 个龙卷超级单体中,中气旋最小直径分布在 2.0~4.2 km,其中最小直径小于 3.5 km 的占总数的 92%,且 77%的超级单体龙卷中气旋底高低于 1 km,郑媛媛等(2009)、朱

文剑等(2016)、张小玲等(2016)对多个龙卷个例的研究也发现其中气旋底高在 1 km 以下。

多普勒天气雷达能够给出龙卷超级单体的中气旋或 TVS 及其强度演变特征。较多研究显示,产生龙卷的超级单体,通常中层(3~6 km)中气旋先发展,然后向下发展,当中气旋底距离地面高度小于 1 km 时,产生龙卷的可能显著加大(郑媛媛等,2009;俞小鼎等,2012)。俞小鼎等(2006b)详细和深入地分析了 2003 年 7 月 8 日 23:20 发生在安徽无为的一次 EF3 级龙卷的多普勒天气雷达回波特征:产生该强龙卷的对流系统最初位于大片层状云降水区中的强对流雨带,演变成为一个团状的对流系统,龙卷产生在该系统南端的一个超级单体;23:29,雷达 0.5° 仰角径向速度图像呈现出一个强烈辐合式中气旋,包裹着一个更小尺度的 TVS。俞小鼎等(2008)利用徐州 SA 型多普勒天气雷达资料分析了 2005 年 7 月 30 日 11:30 安徽灵璧发生的一次由强降水超级单体导致的 EF3 级龙卷过程,发现低层回波形态层演变为“S”形、中层回波呈现为螺旋型时可形成龙卷。在龙卷出现前,有一个 TVS 出现在中气旋的中心,龙卷地点上空有很强的风暴顶辐散;该强降水超级单体风暴到达最强盛时,通过其前侧入流槽口和最强回波中心所做的垂直剖面显示出非常明显的与低层入流对应的弱回波区和位于其上的强回波悬垂,回波悬垂之内 50 dBz 的回波扩展至 9 km 以上,呈现出类似于典型雹暴的高质心回波结构。郑媛媛等(2009)对发生在安徽的 3 次 EF2 级以上的超级单体龙卷过程的环境和多普勒天气雷达回波特征进行了总结,并与超级单体强烈雹暴的环境和多普勒天气雷达回波特征做了对比分析。姚叶青等(2012)基于龙卷临近预警和安徽 6 次龙卷的雷达特征显示,TVS 底部达到雷达最低仰角探测高度的中气旋和随后的 TVS 是识别龙卷的主要依据,龙卷触地前中气旋的最大速度差增强,其强度与龙卷强度呈正相关。郑永光等(2018b)指出 2016 年江苏阜宁龙卷的则为一个 β 中尺度经典超级单体对流风暴,具有明显的钩状回波和穹隆结构特征,质心高,最大反射率因子超过 65 dBz;存在很强的中气旋和 TVS 特征,其底高低于 1 km,且自下向上并向东北方向倾斜,在高分辨率可见光图像上能够看到明显的旋转特征,后侧入流高度较高(约 8 km 高度)。Meng et al(2018)则指出 2016 年江苏阜宁 EF4 级龙卷最强盛时对应的低层中气旋的旋转速度达 $42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。产生 2019 年辽宁开原 EF4 级中气

旋龙卷的风暴为孤立的经典超级单体,具有典型的超级单体回波特征;雷达径向速度观测虽然存在一些质量问题,但依然可以判断存在 TVS 特征,中气旋旋转速度超过 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (郑永光等,2020);但受雷达径向速度质量的制约,难以分析更多中气旋和 TVS 的定量演变特征。

有些中气旋龙卷个例的超级单体在形成前对流风暴内部中低层已经有中涡旋形成,如 2016 年江苏阜宁 EF4 级龙卷(周海光,2018)和 2019 年辽宁开原 EF4 级龙卷的对流风暴演变和结构(郑永光等,2020);之后,对流风暴的中涡旋逐渐加强为中气旋形成超级单体。

通过一些龙卷个例研究发现,产生龙卷的中气旋在垂直方向具有倾斜的特征。2015 年“彩虹”台风龙卷超级单体中气旋随高度向西北方向倾斜(李兆慧等,2017);2016 年江苏阜宁龙卷超级单体中气旋自下向上并向东北方向倾斜(郑永光等,2018b;周海光,2018);2019 年辽宁开原 EF4 级中气旋龙卷超级单体随高度呈现出向对流层中层风场下风方(东南方向)倾斜的特征(郑永光等,2020),这可能是由大气强垂直风切变所致上升气流倾斜的结果。2013 年美国俄克拉何马州 El Reno 龙卷(Bluestein et al,2019)的中气旋具有随高度向北倾斜的特征。Yao et al(2018;2019b)和唐嘉蕙等(2019)分别对 2016 年江苏阜宁龙卷、2012 年北京通州张家湾龙卷、2015 年台风彩虹佛山 EF3 级龙卷进行模拟,结果都显示中气旋具有随高度倾斜的特征。

郑媛媛等(2015)分析和总结了台风龙卷的雷达回波特征,指出台风龙卷超级单体风暴具有很多与经典超级单体一致的特征,其他台风龙卷个例研究也得到了类似结果,如朱文剑等(2016)、李兆慧等(2017);但导致台风龙卷的风暴属于微超级单体风暴,中气旋水平尺度为 2~4 km;垂直涡度限制在海拔 4 km 以下;风暴单体的质心在 2 km 左右,风暴伸展到 5~7 km 海拔高度(郑媛媛等,2015)。对 2015 年“彩虹”台风龙卷,朱文剑等(2016)发现其中气旋在快速发展阶段表现出直径不断缩小,底高不断降低,形状逐渐由椭圆向圆形变化,归一化切变值不断增大等特征;李兆慧等(2017)指出在该台风龙卷发展过程中伴随着超级单体风暴顶和风暴底的逐渐下降、单体质心和最强回波高度的下降,中气旋的顶和底也随之逐渐下降;Zhao et al(2017)发现,其 TVS 主要位于距地面 1~3 km 的高度,中气旋最大旋转速度达 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。沈树勤(1990)初步分析了

台风龙卷的形成条件,认为主要与强对流中的涡度倾斜项有关,这已被其他研究认为是有利于形成中气旋的重要条件(Davies-Jones,1984)。Zhao et al (2017)使用双多普勒雷达反演风场揭示了低层水平涡度的垂直方向倾斜与随之的强上升气流拉伸是2015年“彩虹”台风龙卷中气旋加强的主要原因。

王秀明和俞小鼎(2019)认为2016年6月5日海南文昌龙卷属于非典型超级单体龙卷,俞小鼎和郑永光(2020)指出其是一种混合型龙卷,既具有超级单体龙卷特征,也具有非超级单体龙卷特征。该龙卷在形成过程中,中高层强中气旋位于6~9 km高空并向上发展,龙卷初始涡旋先于龙卷风暴出现,且比一般微气旋尺度大,与其上方深厚且强烈的上升气流叠置时,拉伸作用加强了垂直涡度,使得低层中气旋加强、直径减小,形成深厚的龙卷涡旋特征,伸展至更高的高度。这与郑艳等(2017)认为中气旋下降过程中形成龙卷不同。

4.4 龙卷碎片特征(TDS)和下沉反射率因子核(DRC)特征

双偏振多普勒天气雷达在法国、美国等国家已经实现业务化应用,且美国已有较多关于使用双偏振雷达观测龙卷的研究(郑永光等,2018a;李峰等,2020),中国已经开始了新一代天气雷达的双偏振业务化升级改造。2018年6月8日,1804号台风艾云尼螺旋雨带上的佛山市南海区大沥镇发生龙卷;在13:54前后,佛山气象局X波段双偏振多普勒天气雷达清楚地观测到了TDS特征(黄先香等,2019)。TDS特征是指异常小的差分反射率(Z_{DR})和低的相关系数(ρ_{HV})(Ryzhkov et al,2005),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。从图4可以看出(黄先香等,2019),在钩状回波区和龙卷风暴涡旋中心位置,探测到低 Z_{DR} 和低的 ρ_{HV} 特征, Z_{DR} 低值区的值大约为0.5, ρ_{HV} 低

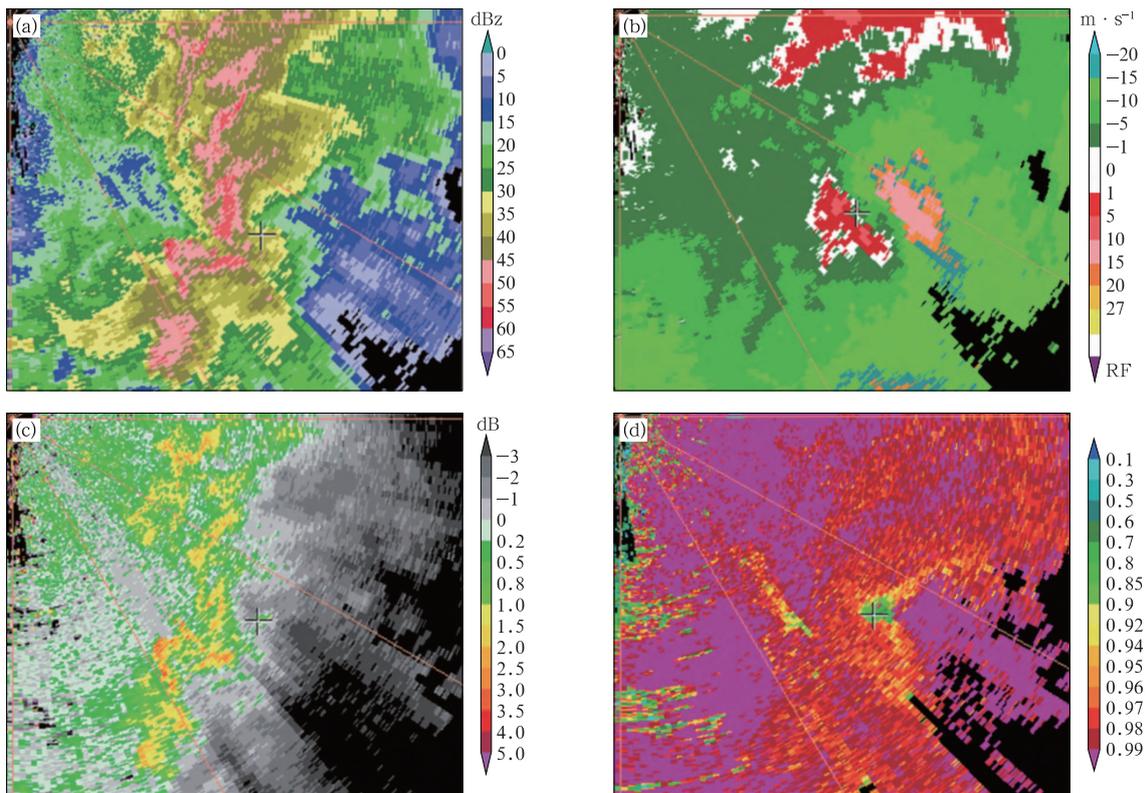


图4 2018年6月8日13:54佛山X波段雷达1.8°仰角反射率因子(a)、平均径向速度(b)、 Z_{DR} (c)和 ρ_{HV} (d) (“+”表示TDS位置;黄先香等,2019)

Fig. 4 Reflectivity (a), mean radial velocity (b), Z_{DR} (c) and ρ_{HV} (d) at 1.8° elevation from the X-band radar at Foshan at 13:54 BT 8 June 2018 (“+” denotes TDS; Huang et al,2019)

值区的值为 0.73,基本符合 Ryzhkov et al(2005)提出的识别 TDS 的指标量。Zhang et al(2021)分析了 2020 年 6 月 1 日珠江口一次水龙卷的 X 波段相控阵双偏振雷达观测,发现该龙卷也具有明显的 TDS 特征,但该龙卷位于水面上,不太可能有碎片卷入龙卷中,该 TDS 特征的形成原因可能与龙卷中的强上升气流相关,有待进一步分析研究。

王秀明和俞小鼎(2019)指出,在 2016 年 6 月 5 日海南龙卷发展过程中,15:15,过龙卷涡旋中心的径向速度剖面显示,在低层龙卷涡旋特征处,反射率因子图上从 4 km 左右高空伸下一狭长的(水平尺度为 1~2 km)、强度为 45 dBz 左右的及地回波;Rasmussen et al(2006)称之为 DRC,并认为其有可能是龙卷生成的先兆信号。虽然郑永光等(2020)没有给出 2019 年辽宁开原龙卷的 DRC 分析,但仔细分析沈阳雷达观测的该龙卷风暴反射率因子演变,也能够看到钩状回波形成前具有这种 DRC 特征。Yao et al(2019b)使用 Bryan 云模式成功模拟了 2012 年 7 月 21 日北京通州张家湾龙卷演变过程,也发现了这种 DRC 特征。Byko et al(2009)通过数值模拟发现 DRC 三种形成机制:由于中层气流“停滞”形成;通过降水形成,这些降水形成在最终与主上升气流合并的新上升气流中,例如与上升气流共同发生的中气旋“循环”过程;沿增强的低层垂直涡度最大值的轴下降形成。

4.5 龙卷涡旋

Agee et al(1976)和 Fujita(1981)发现龙卷母涡旋中可存在多个抽吸涡旋,Bluestein(2013)给出了龙卷多涡旋结构的详细照片和雷达观测,还有研究给出了一些龙卷个例的高时空分辨率雷达观测结果(Wurman,2002;Bluestein et al,2018)。由于中国布设的业务天气雷达观测分辨率的限制,尚未有文献给出中国龙卷的多涡旋结构研究,但李兆慧等(2017)、Bai et al(2017)和 Zhao et al(2017)都给出了 2015 年“彩虹”台风龙卷存在双漏斗云结构的视频,朱文剑等(2016)发现该次龙卷的低空还有一条近似水平的管状云围绕龙卷的主体涡旋在旋转;Yao et al(2019a)对 2018 年台风摩羯中的龙卷灾害现场调查发现部分龙卷存在着多涡旋结构。Yao et al(2018)使用 25 m 水平分辨率的 Bryan 云模式 CM1 成功模拟了 2016 年江苏阜宁龙卷,模拟结果显示存在双螺旋状涡度分布特征,但尚没有实测资

料来证实。

4.6 闪电活动特征

中国龙卷风暴的闪电活动特征尚缺乏系统性研究。利用闪电 VHF 辐射源高时空分辨率的三维观测资料,张义军等(2004)分析了美国产生龙卷的超级单体雷暴的闪电 VHF 辐射源的时空分布特征,发现风暴中存在闪电洞(即闪电空白区)或闪电环(即环状闪电空白区),其与强上升气流密切相关,闪电洞的直径可达 5~6 km,持续时间有时长达 20 多分钟,且出现在龙卷发生之前;在这些雷暴中主要以大量正地闪为主,正地闪的发生频数最大可达 6 次·min⁻¹,正地闪峰值有时出现在龙卷风发生之前、有时在之后。

2016 年江苏阜宁 EF4 级龙卷发生时,14—15 时,龙卷周边 20 km 内正地闪 72 次,负地闪 4 次,正地闪比例显著较高(张小玲等,2016),这可能与该次龙卷过程中伴随有冰雹天气相关,因为已有研究表明产生冰雹天气对流系统中由于有较多的冰相粒子因而会产生较高比例的正地闪(Carey and Rutledge,1998)。不过,2019 年辽宁开原龙卷虽然也有冰雹发生,但发生期间仅监测到少量地闪,正地闪比例也不显著;FY-4A LMI(闪电探测仪)观测到较多的闪电活动,这可能是因为 LMI 观测包含地闪、云闪或者云间闪的缘故(郑永光等,2020)。2015 年“彩虹”台风龙卷则没有观测到地闪,2018 年“摩羯”台风龙卷也几乎没有地闪发生。

以上给出的研究结果表明,中国龙卷对流风暴产生地闪数量多少和正负地闪分布特征可能同样与风暴中的冰相粒子分布密切相关,但对于张义军等(2004)分析的美国龙卷风暴中的精细闪电特征,尚未见到针对中国龙卷风暴的类似研究。

5 龙卷模拟和机理研究

数值模拟是研究龙卷形成、发展和消亡机制的必要手段。由于龙卷的形成和消亡的关键分别是近地面大气垂直涡度的显著加强和减弱,因此,这些涡度的变化机理是龙卷数值模拟研究关注的重点之一,比如下沉气流与冷池强度(Snook and Xue,2008;Schultz et al,2014;Mashiko,2016)、DRC(Byko et al,2009;Markowski et al,2018;Yao et al,2019b)、近地面摩擦(Schenkman et al,2012;Roberts et al,

2016; Roberts and Xue, 2017)等在龙卷生成过程中的作用机制研究等。

姚聃(2018)总结了龙卷数值模拟研究进展,指出龙卷数值模拟主要分为三类:第一类,针对简化的类龙卷涡旋进行模拟,不考虑母体风暴;第二类,基于理想化或者实测探空廓线,以水平均匀初始场来模拟强对流和龙卷过程;第三类,基于再分析资料和资料同化,进行接近实际大气的模拟。

第一类龙卷模拟采用计算流体力学数值模拟方法。这类模拟高度简化了龙卷的生成环境和母体对流风暴,仅关注类龙卷涡旋(tornado-like vortices)的生成和结构,其最主要的局限在于,模拟出的龙卷过程并不是在母体对流风暴中生成的(Rotunno, 2013; 姚聃, 2018)。

第二类龙卷模拟虽然基于探空廓线,但使用精细的云模式进行理想模拟,从而可以研究超级单体风暴和其中生成的龙卷的精细化结构和演变过程,这是其他两类模拟难以做到的。Yao et al(2018; 2019b)使用 Bryan 云模式分别成功理想模拟了 2016 年江苏阜宁 EF4 级龙卷和 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨期间通州张家湾 EF3 级龙卷演变,给出了模拟的这两次龙卷过程中龙卷涡旋的形成、发展和消亡过程,其采用的最高水平分辨率分别达 25 m 和 100 m,都采用均匀下垫面。

对阜宁龙卷模拟结果显示,龙卷生成信号首先出现在云底的气压扰动场中,然后垂直涡度在强上升气流的作用下向上和向下发展;当强下沉气流叠置在最强涡度中心时龙卷消亡(Yao et al, 2018)。对通州张家湾龙卷模拟发现,龙卷的生成包括三步:中层中气旋向下发展、近地面龙卷涡旋向上发展、漏斗云的向下发展;当强下沉气流切断了中层中气旋和近地面龙卷涡旋时,龙卷消亡(Yao et al, 2019b)。

第三类龙卷模拟可研究实际环境中超级单体风暴触发、演变以及龙卷或者龙卷母体涡旋的形成过程,如 Schenkman et al(2012)使用 100 m 水平分辨率成功模拟了一个类似于龙卷的涡旋。陈锋等(2019)对 2016 年阜宁龙卷模拟发现,虽然模拟的涡旋在强度和结构上与实况还有一定差距,但同化雷达反射率因子和径向速度后, WRF 模式在阜宁附近模拟出了明显的涡旋结构,且涡旋的发生发展过程、路径、地面小时极大风和降水等模拟,在与实况一致性方面均明显高于控制试验;还需指出的是,其研究中使用的 WRF 模式模拟水平分辨率是 3 km,

显著低于 Yao et al(2018; 2019b)的模拟,并不能模拟阜宁龙卷本身。唐嘉蕙等(2019)使用高分辨率(最高达 48 m) WRF 模式模拟出了 2015 年台风彩虹登陆后螺旋雨带中广东佛山强龙卷的类龙卷涡旋; Sun et al(2019)使用 49 m 水平分辨率 WRF 模式模拟出了 2016 年阜宁龙卷的多涡旋结构。

如前所述, Wu et al(2018)用 WRF 模式成功模拟了 2005 年位于海上的台风麦莎中的龙卷尺度涡旋。他们使用了 7 重嵌套网格,最外层水平分辨率为 27 km,最内层达 37 m;模式层顶为 50 hPa,垂直为 75 层,其中 2 km 高度以下 19 层;当格点距小于 1 km 时,使用大涡模拟替换边界层参数化。Wu et al(2018)没有给出这些涡旋的形成机理,但指出它们是强上升/下沉气流对,具有风速、位置和水平尺度骤然跃增的特点。Montgomery et al(2002)认为这些涡旋类似龙卷中的抽吸涡旋,其形成机理与 Kelvin-Helmholtz 不稳定相关。Wu et al(2018)的工作对龙卷的数值模拟研究具有很重要的借鉴价值。

需要说明的是,由于龙卷尺度太小,目前的业务数值预报尚不可能预报龙卷本身,但水平分辨率达 3 km 左右的对流可分辨数值模拟或预报可以给出龙卷母体涡旋——中气旋的特征。Kain et al(2008)发现对流可分辨数值预报的逐小时最大上升螺旋度(updraft helicity, UH)对中气旋具有好的预报指示意义;曹艳察等(2021)则发现 GRAPES_MESO 3 km 分辨率模式预报的 UH 对中国风雹预报也有很好的指示意义。

6 结论和展望

中国龙卷发生频率极低且尺度非常小,观测难度极大,但得益于中国观测站网、尤其是新一代天气雷达网,以及现场调查和数值模式等的发展进步,中国龙卷研究取得显著进展。总结中国龙卷研究发展历程,大致可分为两个阶段:约 2000 年之前的传统研究阶段,约 2000 年至目前伴随着新一代天气雷达网布设的发展阶段。取得的主要成果包括以下几个方面:

(1)获得了中国龙卷完整的气候特征和有利于龙卷发生的天气背景以及环境条件。梅雨、冷涡和 TC 是中国发生较多龙卷的天气背景,但不同背景下的龙卷环境条件存在较大差异。

(2)建立了较为完整的龙卷等风灾现场调查流程和分析技术。对 2015 年“东方之星”翻沉事件、2015 年“彩虹”台风龙卷、2016 年江苏阜宁 EF4 级龙卷、2019 年辽宁开原 EF4 级龙卷等都作了详细规范的现场调查和分析。

(3)龙卷对流风暴的中小尺度特征研究进展明显,获得了中国龙卷风暴的组织形态、地面要素场特征、中气旋和 TVS 特征以及龙卷涡旋特征等,尤其中气旋和 TVS 特征研究成果更为突出;发现龙卷风暴的地面冷池通常不太强,产生龙卷的超级单体的中气旋底高通常低于 1 km、强度与龙卷强度正相关、具有倾斜、TDS 和 DRC 等特征,部分龙卷具有显著的多涡旋特征等。

(4)使用精细云模式对龙卷成功进行了理想模拟,获得了龙卷发生发展的一些机理认识;使用 WRF 模式成功模拟了接近实际大气的 2005 年台风麦莎中的龙卷尺度涡旋和 2016 年阜宁龙卷的多涡旋结构。

中国龙卷研究在多个方面还存在很大不足,需要继续努力:

(1)由于中国龙卷发生频率极低,且受制于观测条件,因此历史龙卷记录存在不确定性。现场调查存在一定的难度和挑战,气象业务部门人员尚未普遍掌握,也缺乏类似美国的志愿者报告制度,从而难以对部分龙卷进行有效确认。因此,需要加强气象业务部门的现场调查能力和气象信息员队伍建设,实现更为可靠的龙卷观测和调查,从而建立一个较为完备的中国龙卷数据库(郑永光,2020),尤其是 EF2 级及以上强度的强龙卷数据库。

(2)中国龙卷对流风暴的组织形态、闪电活动和地面要素分布等特征尚未有系统性的研究成果,不同天气背景(梅雨、冷涡、TC 等)下的这些特征研究也存在很大不足。未来,随着更为密集的地面自动气象站网、更高分辨率的精细雷达观测和闪电定位系统的发展,龙卷风暴的精细地面要素分布、细致结构特征、龙卷涡旋和闪电活动特征等将会有更为深入的认识。非中气旋龙卷由于观测更为困难,其研究成果更为欠缺(郑永光,2020),包括气候分布、环境条件、结构特征和形成机理认识等。

(3)不同天气背景下,龙卷的环境条件存在较多差异,即使在类似的有利环境条件背景下,龙卷的形成概率也是极低的,因此,龙卷形成的关键机理和因素是什么,还未完全清楚。也就是说,形成龙卷风暴

的关键物理因子尚未完全清晰,比如梅雨背景下,有利于龙卷的环境条件通常涵盖了很大的地理范围,但通常产生龙卷的数目只有一个或者几个,因此,如何判识梅雨龙卷发生的关键条件?再如,登陆台风的螺旋雨带中可能会产生很多中气旋或者中涡旋,但发展为龙卷数目通常也仅有一个或者几个,那么形成台风龙卷的关键条件是什么?此外,现场调查表明 2016 年阜宁 EF4 龙卷的消亡过程是非常突然和短暂的,这种突然消亡的机制是什么?这些都是未来值得深入研究的方向。未来,通过更高时空分辨率观测资料分析和极高分辨率的数值模拟技术的发展,这些问题会逐步获得解答。

参考文献

- 包澄澜,赵刚然,1964. 上海地区龙卷风的初步分析[J]. 南京大学学报(自然科学版),8(1):166-190. Bao C L, Zhao G R, 1964. A preliminary analysis on the tornadoes occurring at Shanghai District[J]. J Nanjing Univ (Nat Sci), 8(1):166-190(in Chinese).
- 曹艳察,郑永光,盛杰,等,2021. 基于 GRAPES_3 km 模式的风雹概率预报技术[J]. 气象,47(9):1047-1061. Cao Y C, Zheng Y G, Sheng J, 2021. Severe convective wind and hail probabilistic forecasting method based on outputs of GRAPES_3 km model [J]. Meteor Mon, 47(9):1047-1061(in Chinese).
- 陈锋,董美莹,冀春晓,等,2019. 雷达资料同化对 2016 年 6 月 23 日阜宁龙卷模拟的改进[J]. 气象学报,77(3):405-426. Chen F, Dong M Y, Ji C X, et al, 2019. Improving the simulation of the tornado occurring in Funing on 23 June 2016 by using radar data assimilation[J]. Acta Meteor Sin, 77(3):405-426(in Chinese).
- 《大气科学辞典》编委会,1994. 大气科学辞典[M]. 北京:气象出版社. Editorial Board of Dictionary of Atmospheric Sciences, 1994. Dictionary of Atmospheric Sciences[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 刁秀广,万明波,高留喜,等,2014. 非超级单体龙卷风暴多普勒天气雷达产品特征及预警[J]. 气象,40(6):668-677. Diao X G, Wan M B, Gao L X, et al, 2014. Doppler radar product features and warning of non-supercell tornadic storms[J]. Meteor Mon, 40(6):668-677(in Chinese).
- 范雯杰,俞小鼎,2015. 中国龙卷的时空分布特征[J]. 气象,41(7):793-805. Fan W J, Yu X D, 2015. Characteristics of spatial-temporal distribution of tornadoes in China[J]. Meteor Mon, 41(7):793-805(in Chinese).
- 冯喆,2016. 广东龙卷特征及其预警方法初探[D]. 南京:南京信息工程大学. Feng Z, 2016. Features of tornado in Guangdong Province and the preliminary study of tornado early-warning methods[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).
- 黄先香,俞小鼎,炎利军,等,2019. 1804 号台风“艾云尼”龙卷分析[J]. 气象学报,77(4):645-661. Huang X X, Yu X D, Yan L J,

- et al, 2019. An analysis on tornadoes in Typhoon Ewiniar[J]. *Acta Meteor Sin*, 77(4):645-661(in Chinese).
- 蒋汝庚, 1997. 龙卷型强风暴——1995年4月19日洪奇沥龙卷风剖析[J]. *应用气象学报*, 8(4):492-497. Jiang R G, 1997. A tornado type severe storm—report of detailed analysis on Hongqili Tornado on 19 April 1995[J]. *J Appl Meteor Sci*, 8(4):492-497 (in Chinese).
- 李彩玲, 炎利军, 李兆慧, 等, 2016. 1522号台风“彩虹”外围佛山强龙卷特征分析[J]. *热带气象学报*, 32(3):416-424. Li C L, Yan L J, Li Z H, et al, 2016. Analysis of a tornado in outside-region of Typhoon Mujigae in 2015[J]. *J Trop Meteor*, 32(3):416-424(in Chinese).
- 李峰, 李柏, 唐晓文, 等, 2020. 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*, 46(2):245-256. Li F, Li B, Tang X W, et al, 2020. Advances in tornado detection in the United States in recent 20 years—inspiration to the study of tornadoes in China[J]. *Meteor Mon*, 46(2):245-256(in Chinese).
- 黎清才, 刘可先, 1989. 鲁中地区一种龙卷天气学条件的分析[J]. *气象*, 15(3):29-33. Li Q C, Liu K X, 1989. Analysis of synoptic conditions of a tornado in central Shandong Province[J]. *Meteor Mon*, 15(3):29-33(in Chinese).
- 李兆慧, 王东海, 麦雪湖, 等, 2017. 2015年10月4日佛山龙卷过程的观测分析[J]. *气象学报*, 75(2):288-313. Li Z H, Wang D H, Mai X H, et al, 2017. Observations of the tornado occurred at Foshan on 4 October 2015[J]. *Acta Meteor Sin*, 75(2):288-313 (in Chinese).
- 辽宁丹东市气象台, 1975. 一次龙卷风的调查分析[J]. *气象*, 1(8):12-13. Dandong Meteorological Observatory, Liaoning Province, 1975. Investigation and analysis of a tornado[J]. *Meteor Mon*, 1(8):12-13(in Chinese).
- 林大强, 刘汝贤, 刘宝利, 1984. 一次陆龙卷接地的调查[C]. *北方天气文集*. 北京: 北京大学出版社: 167-170. Lin D Q, Liu R X, Liu B L, 1984. Investigation on touching the ground of a landspout [C]. *J Northern Wea*, Peking University Press: 167-170 (in Chinese).
- 刘勇, 刘子臣, 马廷标, 等, 1998. 一次飚线过程中龙卷及飚锋生成的中尺度分析[J]. *大气科学*, 22(3):326-335. Liu Y, Liu Z C, Ma T B, et al, 1998. A meso-scale analysis of tornado and squall front forming in a squall line process[J]. *Chin J Atmos Sci*, 22(3):326-335(in Chinese).
- 沈树勤, 1990. 台风前部龙卷风的一般特征及其萌发条件的初步分析[J]. *气象*, 16(1):11-15. Shen S Q, 1990. Analysis of the general characteristics and genesis conditions of tornado in front of typhoon[J]. *Meteor Mon*, 16(1):11-15(in Chinese).
- 唐嘉蕙, 冉令坤, 沈新勇, 等, 2019. 广东佛山 EF3 级龙卷超级单体风暴高分辨率数值模拟[J]. *地球物理学报*, 62(11):4082-4097. Tang J H, Ran L K, Shen X Y, et al, 2019. High-resolution numerical simulation of the EF3 tornadic storm in Foshan City, Guangdong Province[J]. *Chin J Geophys*, 62(11):4082-4097 (in Chinese).
- 王东海, 李兆慧, 高枫亭, 等, 2018. 中国与欧美龙卷统计特征比较分析及研究进展[J]. *气象科技进展*, 8(2):8-23. Wang D H, Li Z H, Gao Z T, et al, 2018. A comparison of statistical characteristics and research progress of tornadoes in China to that in Europe and USA[J]. *Adv Meteor Sci Technol*, 8(2):8-23(in Chinese).
- 王秀明, 俞小鼎, 2019. 热带一次致灾龙卷形成物理过程研究[J]. *气象学报*, 77(3):387-404. Wang X M, Yu X D, 2019. A study on the physical process involved in the genesis of a severe tropical tornado[J]. *Acta Meteor Sin*, 77(3):387-404(in Chinese).
- 王秀明, 俞小鼎, 周小刚, 2015. 中国东北龙卷研究: 环境特征分析[J]. *气象学报*, 73(3):425-441. Wang X M, Yu X D, Zhou X G, 2015. Study of Northeast China tornadoes: the environmental characteristics[J]. *Acta Meteor Sin*, 73(3):425-441 (in Chinese).
- 魏文秀, 赵亚民, 1995. 中国龙卷风的若干特征[J]. *气象*, 21(5):36-40. Wei W X, Zhao Y M, 1995. Characteristics of tornadoes in China[J]. *Meteor Mon*, 21(5):36-40(in Chinese).
- 吴芳芳, 俞小鼎, 王慧, 等, 2019. 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*, 77(5):785-805. Wu F F, Yu X D, Wang H, et al, 2019. An observational study of multi-scale structural features of MCC on the coast of the Yellow Sea [J]. *Acta Meteor Sin*, 77(5):785-805(in Chinese).
- 吴芳芳, 俞小鼎, 张志刚, 等, 2013. 苏北地区超级单体风暴环境条件与雷达回波特征[J]. *气象学报*, 71(2):209-227. Wu F F, Yu X D, Zhang Z G, et al, 2013. A study of the environmental conditions and radar echo characteristics of the supercell-storms in northern Jiangsu[J]. *Acta Meteor Sin*, 71(2):209-227 (in Chinese).
- 杨起华, 陈才田, 吴沐良, 1978. 一次龙卷风的调查及浅析[J]. *气象*, 4(4):16-17. Yang Q H, Chen C T, Wu M L, 1978. Investigation and analysis of a tornado[J]. *Meteor Mon*, 4(4):16-17 (in Chinese).
- 姚眺, 2018. 龙卷数值模拟研究进展[J]. *气象科技进展*, 8(2):28-35. Yao D, 2018. Recent progresses in the numerical simulation of tornadoes[J]. *Adv Meteor Sci Technol*, 8(2):28-35 (in Chinese).
- 姚眺, 梁旭东, 孙继松, 等, 2019. 龙卷强度等级[M]. 北京: 气象出版社: 1-4. Yao D, Liang X D, Sun J S, et al, 2019. Tornado Intensity Scale[M]. Beijing: China Meteorological Press: 1-4 (in Chinese).
- 姚叶青, 郝莹, 张义军, 等, 2012. 安徽龙卷发生的环境条件和临近预警[J]. *高原气象*, 31(6):1721-1730. Yao Y Q, Hao Y, Zhang Y J, et al, 2012. Synoptic situation and pre-warning of Anhui tornado[J]. *Plateau Meteor*, 31(6):1721-1730(in Chinese).
- 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等, 2006a. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006a. Principle and Application of Doppler Weather Radar [M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 俞小鼎, 郑媛媛, 张爱民, 等, 2006b. 安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析[J]. *高原气象*, 25(5):914-924. Yu X D, Zheng Y Y, Zhang A M, et al, 2006b. The detection of a severe tornado event

- in Anhui with China new generation weather radar[J]. Plateau Meteor, 25(5):914-924(in Chinese).
- 俞小鼎,郑永光,2020. 中国当代强对流天气研究与业务进展[J]. 气象学报, 78(3):391-418. Yu X D, Zheng Y G, 2020. Advances in severe convective weather research and operational service in China[J]. Acta Meteor Sin, 78(3):391-418(in Chinese).
- 俞小鼎,郑媛媛,廖玉芳,等,2008. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究[J]. 大气科学, 32(3):508-522. Yu X D, Zheng Y Y, Liao Y F, et al, 2008. Observational investigation of a tornadic heavy precipitation supercell storm[J]. Chin J Atmos Sci, 32(3):508-522(in Chinese).
- 俞小鼎,周小刚,王秀明,2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报, 70(3):311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M, 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. Acta Meteor Sin, 70(3):311-337(in Chinese).
- 曾明剑,吴海英,王晓峰,等,2016. 梅雨期龙卷环境条件与典型龙卷对流风暴结构特征分析[J]. 气象, 42(3):280-293. Zeng M J, Wu H Y, Wang X F, et al, 2016. Analysis on environmental conditions and structural features of typical convective tornado storm in Meiyu period[J]. Meteor Mon, 42(3):280-293(in Chinese).
- 张涛,关良,郑永光,等,2020. 2019年7月3日辽宁开原龙卷灾害现场调查及其所揭示的龙卷演变过程[J]. 气象, 46(5):603-617. Zhang T, Guan L, Zheng Y G, et al, 2020. Damage survey of the 3 July 2019 Kaiyuan Tornado in Liaoning Province and its evolution revealed by disaster[J]. Meteor Mon, 46(5):603-617(in Chinese).
- 张小玲,杨波,朱文剑,等,2016. 2016年6月23日江苏阜宁 EF4 级龙卷天气分析[J]. 气象, 42(11):1304-1314. Zhang X L, Yang B, Zhu W J, et al, 2016. Analysis of the EF4 tornado in Funing County, Jiangsu Province on 23 June 2016[J]. Meteor Mon, 42(11):1304-1314(in Chinese).
- 张义军,孟青, Krehbiel P R, 等, 2004. 超级单体雷暴中闪电 VHF 辐射源的时空分布特征[J]. 科学通报, 49(5):499-505. Zhang Y J, Meng Q, Krehbiel P R, et al, 2004. Spatial and temporal characteristics of VHF radiation source produced by lightning in supercell thunderstorms[J]. Chin Sci Bull, 49(5):499-505(in Chinese).
- 张一平,俞小鼎,吴蓁,等,2012. 区域暴雨过程中两次龙卷风事件分析[J]. 气象学报, 70(5):961-973. Zhang Y P, Yu X D, Wu Z, et al, 2012. Analysis of the two tornado events during a process of regional torrential rain[J]. Acta Meteor Sin, 70(5):961-973(in Chinese).
- 郑艳,俞小鼎,任福民,等,2017. 海南一次超级单体引发的强烈龙卷过程观测分析[J]. 气象, 43(6):675-685. Zheng Y, Yu X D, Ren F M, et al, 2017. Analysis on a severe tornado process in Hainan triggered by supercell[J]. Meteor Mon, 43(6):675-685(in Chinese).
- 郑永光,2020. 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, 10(6):69-75. Zheng Y G, 2020. Review of climatology and favorable environmental conditions of tornado in China[J]. Adv Meteor Sci Technol, 10(6):69-75(in Chinese).
- 郑永光,蓝渝,曹艳察,等,2020. 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, 46(5):589-602. Zheng Y G, Lan Y, Cao Y C, et al, 2020. Environmental conditions, evolution and mechanisms of the EF4 tornado in Kaiyuan of Liaoning Province on 3 July 2019[J]. Meteor Mon, 46(5):589-602(in Chinese).
- 郑永光,陶祖钰,俞小鼎,2017. 强对流天气预报的一些基本问题[J]. 气象, 43(6):641-652. Zheng Y G, Tao Z Y, Yu X D, 2017. Some essential issues of severe convective weather forecasting[J]. Meteor Mon, 43(6):641-652(in Chinese).
- 郑永光,田付友,孟智勇,等,2016a. “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, 42(1):1-13. Zheng Y G, Tian F Y, Meng Z Y, et al, 2016a. Survey and multi-scale characteristics of wind damage caused by convective storms in the surrounding area of the capsizing accident of cruise ship “Dongfangzhixing”[J]. Meteor Mon, 42(1):1-13(in Chinese).
- 郑永光,朱文剑,姚聃,等,2016b. 风速等级标准与2016年6月23日阜宁龙卷强度估计[J]. 气象, 42(11):1289-1303. Zheng Y G, Zhu W J, Yao D, et al, 2016b. Wind speed scales and rating of the intensity of the 23 June 2016 tornado in Funing County, Jiangsu Province[J]. Meteor Mon, 42(11):1289-1303(in Chinese).
- 郑永光,田付友,周康辉,等,2018a. 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, 8(2):55-61. Zheng Y G, Tian F Y, Zhou K H, et al, 2018a. Forecasting techniques and damage survey of convectively driven high winds and tornadoes[J]. Adv Meteor Sci Technol, 8(2):55-61(in Chinese).
- 郑永光,朱文剑,田付友,2018b. 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, 8(2):44-54. Zheng Y G, Zhu W J, Tian F Y, 2018b. Environmental conditions, structures, and mechanisms of convective storms of 2015 “Oriental Star” capsizing event and 2016 Funing EF4 Tornado[J]. Adv Meteor Sci Technol, 8(2):44-54(in Chinese).
- 郑永光,周康辉,盛杰,等,2015. 强对流天气监测预报预警技术进展[J]. 应用气象学报, 26(6):641-657. Zheng Y G, Zhou K H, Sheng J, et al, 2015. Advances in techniques of monitoring, forecasting and warning of severe convective weather[J]. J Appl Meteor Sci, 26(6):641-657(in Chinese).
- 郑媛媛,张备,王啸华,等,2015. 台风龙卷的环境背景和雷达回波结构分析[J]. 气象, 41(8):942-952. Zheng Y Y, Zhang B, Wang X H, et al, 2015. Analysis of typhoon-tornado weather background and radar echo structure[J]. Meteor Mon, 41(8):942-952(in Chinese).
- 郑媛媛,朱红芳,方翔,等,2009. 强龙卷超级单体风暴特征分析与预警研究[J]. 高原气象, 28(3):617-625. Zheng Y Y, Zhu H F, Fang X, et al, 2009. Characteristic analysis and early-warning of tornado supercell storm[J]. Plateau Meteor, 28(3):617-625(in Chinese).

- 中国气象局, 2021. 龙卷风强度等级: GB/T 40243—2021[S]. 北京: 中国标准出版社. China Meteorological Administration, 2021. Grade of tornado intensity: GB/T 40243—2021 [S]. Beijing: China Standards Press(in Chinese).
- 周海光, 2018. “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, 61(9): 3617-3639. Zhou H G, 2018. Observations of 23 June 2016 EF4 tornado supercell thunderstorm mesoscale structure in Funing County, Jiangsu Province [J]. Chin J Geophys, 61(9): 3617-3639(in Chinese).
- 朱文剑, 盛杰, 郑永光, 等, 2016. 1522 号“彩虹”台风龙卷现场调查与中尺度特征分析[J]. 暴雨灾害, 35(5): 403-414. Zhu W J, Sheng J, Zheng Y G, et al, 2016. Damage survey and mesoscale features analysis on tornado in outer rain-band of Typhoon “Mujigae” on 4 October 2015[J]. Torr Rain Dis, 35(5): 403-414(in Chinese).
- Agee E M, 2014. A revised tornado definition and changes in tornado taxonomy[J]. Wea Forecasting, 29(5): 1256-1258.
- Agee E, Jones E, 2009. Proposed conceptual taxonomy for proper identification and classification of tornado events[J]. Wea Forecasting, 24(2): 609-617.
- Agee E M, Snow J T, Clare P R, 1976. Multiple vortex features in the tornado cyclone and the occurrence of tornado families[J]. Mon Wea Rev, 104(5): 552-563.
- Bai L Q, Meng Z Y, Huang L, et al, 2017. An integrated damage, visual, and radar analysis of the 2015 Foshan, Guangdong, EF3 tornado in China produced by the landfalling Typhoon Mujigae (2015)[J]. Bull Amer Meteor Soc, 98(12): 2619-2640.
- Bai L Q, Meng Z Y, Sueki K, et al, 2020. Climatology of tropical cyclone tornadoes in China from 2006 to 2018[J]. Sci China Earth Sci, 63(1): 37-51.
- Bluestein H B, 2013. Severe Convective Storms and Tornadoes: Observations and Dynamics[M]. Berlin Heidelberg: Springer.
- Bluestein H B, Thiem K J, Snyder J C, et al, 2018. The multiple-vortex structure of the El Reno, Oklahoma, tornado on 31 May 2013[J]. Mon Wea Rev, 146(8): 2483-2502.
- Bluestein H B, Thiem K J, Snyder J C, et al, 2019. Tornadogenesis and early tornado evolution in the El Reno, Oklahoma, supercell on 31 May 2013[J]. Mon Wea Rev, 147(6): 2045-2066.
- Brooks H E, Lee J W, Craven J P, 2003. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data[J]. Atmos Res, 67-68: 73-94.
- Bunting W F, Smith B E, 1993. A guide for conducting convective windstorm surveys[R]. NOAA technical memorandum NWS SR-146. Fort Worth, TX: NOAA
- Byko Z, Markowski P, Richardson Y, et al, 2009. Descending reflectivity cores in supercell thunderstorms observed by mobile radars and in a high-resolution numerical simulation[J]. Wea Forecasting, 24(1): 155-186.
- Carey L D, Rutledge S A, 1998. Electrical and multiparameter radar observations of a severe hailstorm[J]. J Geophys Res: Atmos, 103(D12): 13979-14000.
- Chen J Y, Cai X H, Wang H Y, et al, 2018. Tornado climatology of China[J]. Int J Climatol, 38(5): 2478-2489.
- Craven J P, Brooks H E, 2004. Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep, moist convection[J]. Natl Wea Dig, 28: 13-24.
- Davies-Jones R, 1984. Streamwise vorticity: the origin of updraft rotation in supercell storms[J]. J Atmos Sci, 41(20): 2991-3006.
- Davies-Jones R P, Trapp R J, Bluestein H B, 2001. Tornadoes and tornadic storms [M] // Doswell III C A. Severe Convective Storms. Boston, MA: American Meteorological Society: 167-221.
- Doswell III C A, 2003. A guide to F-scale damage assessment. NOAA/NWS[EB/OL]. [https://training.weather.gov/wdtd/courses/EF-scale/lesson2/Final NWS F-scale Assessment Guide. pdf](https://training.weather.gov/wdtd/courses/EF-scale/lesson2/Final%20NWS%20F-scale%20Assessment%20Guide.pdf).
- Doswell III C A, Evans J S, 2003. Proximity sounding analysis for derechos and supercells; an assessment of similarities and differences[J]. Atmos Res, 67-68: 117-133.
- Edwards R, LaDue J G, Ferree J T, et al, 2013. Tornado intensity estimation: past, present, and future[J]. Bull Amer Meteor Soc, 94(5): 641-653.
- Fujita T T, 1971. Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity[R]. SMRP Research Paper, Number 91, Chicago: The University of Chicago: 42.
- Fujita T T, 1978. Manual of downburst identification for Project NIMROD[R]. SMRP Research Paper 156, Chicago: The University of Chicago: 104.
- Fujita T T, 1981. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales[J]. J Atmos Sci, 38(8): 1511-1534.
- Fujita T T, 1985. The downburst, microburst and macroburst[R]. Satellite and Mesometeorology Research Project Res. Paper No. 210, Chicago: The University of Chicago, 122.
- Fujita T T, Bradbury D L, Van Thullenar C F, 1970. Palm Sunday tornadoes of April 11, 1965[J]. Mon Wea Rev, 98(1): 29-69.
- Grams J S, Thompson R L, Snively D V, et al, 2012. A climatology and comparison of parameters for significant tornado events in the United States[J]. Wea Forecasting, 27(1): 106-123.
- Kain J S, Weiss S J, Bright D R, et al, 2008. Some practical considerations regarding horizontal resolution in the first generation of operational convection-allowing NWP[J]. Wea Forecasting, 23(5): 931-952.
- Markowski P M, Hatlee T P, Richardson Y P, 2018. Tornadogenesis in the 12 May 2010 supercell thunderstorm intercepted by VORTEX2 near Clinton, Oklahoma [J]. Mon Wea Rev, 146(11): 3623-3650.
- Mashiko W, 2016. A numerical study of the 6 May 2012 Tsukuba City supercell tornado. Part II: mechanisms of tornadogenesis[J]. Mon Wea Rev, 144(9): 3077-3098.
- Meng Z Y, Bai L Q, Zhang M R, et al, 2018. The deadliest tornado (EF4) in the past 40 years in China[J]. Wea Forecasting, 33(3): 693-713.
- Meng Z Y, Yao D, 2014. 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*, 29(3):702-724.
- Montgomery M T, Vladimirov V A, Denissenko P V, 2002. An experimental study on hurricane mesovortices[J]. *J Fluid Mech*, 471:1-32.
- Rasmussen E N, Straka J M, Gilmore M S, et al, 2006. A preliminary survey of rear-flank descending reflectivity cores in supercell storms[J]. *Wea Forecasting*, 21(6):923-938.
- Roberts B, Xue M, 2017. The role of surface drag in mesocyclone intensification leading to tornadogenesis within an idealized supercell simulation[J]. *J Atmos Sci*, 74(9):3055-3077.
- Roberts B, Xue M, Schenkman A D, et al, 2016. The role of surface drag in tornadogenesis within an idealized supercell simulation [J]. *J Atmos Sci*, 73(9):3371-3395.
- Rotunno R, 2013. The fluid dynamics of tornadoes[J]. *Annu Rev Fluid Mech*, 45:59-84.
- Ryzhkov A V, Schuur T J, Burgess D W, et al, 2005. Polarimetric tornado detection[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 44(5):557-570.
- Schenkman A D, Xue M, Shapiro A, 2012. Tornadogenesis in a simulated mesovortex within a mesoscale convective system[J]. *J Atmos Sci*, 69(11):3372-3390.
- Schultz D M, Richardson Y P, Markowski P M, et al, 2014. Tornadoes in the central United States and the “clash of air masses” [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 95(11):1704-1712.
- Snook N, Xue M, 2008. Effects of microphysical drop size distribution on tornadogenesis in supercell thunderstorms[J]. *Geophys Res Lett*, 35(24):L24803.
- Sun Z Q, Xue M, Zhu K F, et al, 2019. Prediction of an EF4 supercell tornado in Funing, China: resolution dependency of simulated tornadoes and their structures[J]. *Atmos Res*, 229:175-189.
- Trapp R J, Tessendorf S A, Godfrey E S, et al, 2005. Tornadoes from squall lines and bow echoes. Part I: climatological distribution. *Wea Forecasting*, 20:23-34.
- Wakimoto R M, Wilson J W, 1989. Non-supercell tornadoes[J]. *Mon Wea Rev*, 117(6):1113-1140.
- Wu L G, Liu Q Y, Li Y B, 2018. Prevalence of tornado-scale vortices in the tropical cyclone eyewall[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 115(33):8307-8310.
- Wurman J, 2002. The multiple-vortex structure of a tornado[J]. *Wea Forecasting*, 17(3):473-505.
- Wurman J, Alexander C, Robinson P, et al, 2007. Low-level winds in tornadoes and potential catastrophic tornado impacts in urban areas[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 88(1):31-46.
- Yao D, Liang X D, Meng Q, et al, 2019a. Importance of identifying tropical cyclone tornadoes in typhoon warning and defense systems[J]. *Sci Bull*, 64(3):143-145.
- Yao D, Meng Z Y, Xue M, 2019b. Genesis, maintenance and demise of a simulated tornado and the evolution of its preceding descending reflectivity core (DRC)[J]. *Atmosphere*, 10(5):236.
- Yao D, Xue H L, Yin J F, et al, 2018. Investigation into the formation, structure, and evolution of an EF4 tornado in East China using a high-resolution numerical simulation[J]. *J Meteor Res*, 32(2):157-171.
- Yao Y Q, Yu X D, Zhang Y J, et al, 2015. Climate analysis of tornadoes in China[J]. *J Meteor Res*, 29(3):359-369.
- Zhang Y, Bai L Q, Meng Z Y, et al, 2021. Rapid-scan and polarimetric phased-array radar observations of a tornado in Pearl River Estuary[J]. *J Tropical Meteor*, 27, in press.
- Zhao K, Wang M J, Xue M, et al, 2017. Doppler radar analysis of a tornadic miniature supercell during the landfall of Typhoon Mujigae (2015) in South China[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 98(9):1821-1831.