中国龙卷研究进展

郑永光<sup>1,2</sup>刘菲凡<sup>2</sup> 张恒进<sup>2</sup> 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 气雷达等观测网、现场调查和数值模式等的发展,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认识,也认识主不同天气背 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2本2经交为完备, 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见场评查。"分析,为减灾防 灾提供了不可缺少的数据。对孕生龙卷的超级单体风暴中小人产产行取得了较为深入认识, 如不太强的地面冷池,中气旋底高通常低于1 km、强度与大卷飞度、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。使早精细云读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(Advanced We ther Research and Forecast) 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、龙卷对加、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细致深入环究,更需要让此更高时空分辨率观测资料分析和极高 下素 口机理,从而为提升龙卷的预报预警能力提供更 分辨率的数值模拟获取龙卷发展的关 为坚实的科学基础。

关键词:龙卷,气候,环境气体,现场调查,小尺度,数值模拟

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

<sup>\*</sup>国家重点研发计划(2018YFC1507504和2017YFC1502003)、国家自然科学基金面上项目(41375051)和中国工程科技中长期发展战略研究领域战略研究项目(2019-ZCQ-06)共同资助。 2020年9月6日收稿: 2021年月日收修定稿

# Advances in Tornado Research in China

ZHENG Yongguang<sup>1, 2</sup> LIU Feifan<sup>2</sup> ZHANG Hengjin<sup>2</sup>
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-goveration weather radar and surface automatic weather stations, damage survey and numeric ' weather rediction model, remarkable progress in tornado research in China has been made. The patiotemporal and climatological characteristics, favorable synoptic backgrounds and en commental conditions for tornado in China have been understood more comprehensively, and j mas also been found that the favorable environmental conditions for tornado in different sy ptic backgrounds are somewhat different. The damage survey process and analysis technology of tornado disaster have been developed. The damage surveys and analyse or everal intense tornadoes, such as the 2016 Funing, Jiangsu Province EF4 tornado, have been note in detail, which provide indispensable data for disaster prevention and mitig tion. More un erstandings of meso- and micro-scale characteristics of tornadic convective so its have been got, including the findings of the storm cold pool with appropriate intensit, if 15 m of the mesocyclone generally lower than the height of 1 km, the positive intensity ice reation between tornado and its parent mesocyclone, slantwise mesocyclone, to me and bris signature, descending reflectivity core, and multi-vortex structure of some torna oes fwo tonadoes have successfully been ideally simulated using a fine-resolution chull 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 WKT (Act anced Weather Research and Forecast) 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 conditions, damage survey, meso- and micro-scale,

numerical simulation

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 m/s (Wurman et al, 2007),但直接观测龙卷风 速几乎不可能,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,最近修订的定义为"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<sup>1</sup>" (American Meteorological Society, 2020);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; 俞小星和天永元 2020): 一 类非中气旋龙卷出现在飑线或者弓形回波前部的γ中尺度涡旋(又称、中涡版)内。这类龙 卷通常比中气旋龙卷弱,个别的可以达到 EF3 级;另一类非中气旋通声出现在地面辐合切 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升、小小升气流呈直拉伸涡度加 强而形成龙卷(Wakimoto and Wilson, 1989)。Agee and Joner (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,其他之型龙芯包活陆龙卷(landspout, 类似于水龙卷的陆地龙卷)、水龙卷(waterspout)、冷空气漏入云(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 American Meteorological Society(2013)龙卷定、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 2000 个龙兰," 生 战 圣非常低。美国每年龙卷可超过 1200 个(Brooks et al, 2003),是发生频率最高的 4之。, 《Er4 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 每 及 1 龙卷; 1925 年 3 月 18 日,美国的一次强龙卷 造成了 695 人死亡(Wurnar et 1, 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着众于美灵。每年发生次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EF43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,导致了大量人玩忘亡和严重经济损失。俞小鼎和郑永光(2020)综述了中国强对流研究和业务进展,虽然包括了龙卷研究进展,但受篇幅所限,未能给出更为全面的龙卷研究进展; 而郑永光(2020)只是回顾了中国龙卷气候特征和环境条件研究进展。因此,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

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>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".

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(图 1);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;比如,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)。

白兰强等(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 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,少数生成与 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; 白兰强等,2020)。不过,中国 TC 龙卷强度的气候分布特征还没有完全清楚,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应风现场调查发现, TC 眼墙强烈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 t 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) 使用最高示于分辨率达 37 m 的 WRF (Advanced Weather Research and Forecast) 模式加大涡 朝水(功填振出了 2005 年台风麦莎 (Matsa) 眼墙对流内边缘的龙卷尺度涡旋, 证明这些涡旋下热带气旋中普遍存在。



图 1 中国(未包括台弯)2004-2013 年 143 次 EF1 级以上龙卷分布图(彩色填充为地形,范雯杰和俞小鼎, 2015)

Fig. 1 The 143 tornado with intensities stronger than EF1 in China in 2004-2013 (Color shaded: topography; Fan and Yu, 2015)

# 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 NCEP(美国环境预报中心)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,东北和广东这两个中国的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Brooks et al (2003)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 Brooks et al (2003)

郑永光(2020)总结了中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 J/kg 左右,而有些个例仅超过 1000 J/kg(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)计算龙卷日数所用垂直减温率至少为 6.5 ℃/km 这个数值,该 数值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,马 Broks et al (2003)所给出的相应高发区基本一致。但据 2002-2012 年亡去 62 次龙塔的统计结果(冯 喆,2016)显示,63%的龙卷发生在前汛期 4-6 月,且大部分关键并非 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,亿这次句涉表明广东非 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 (200~1000 J/kg) 外(郑媛媛等, 2015),其它有 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,或者补入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,太前所述, Erooks et al (2003)使用的环境条件之 一是大的垂直减温率,因此,Brocks val (2003)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之会产生建发起处态卷,这比较罕见。郑艳等(2017)、王秀明和俞小鼎(2019)分别分子了2016年6.45日位于热带地区的海南文昌一次 EF2 级非台风龙卷过程。王秀明和俞小鼎、2019) 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、500hPa 槽前、850hPa 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变定,非常大的 CAPE 值(达 2900 J/kg)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≥7 m/s 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

### 2.1 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 等级来估计龙卷、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, 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<sup>2</sup>和下击暴流<sup>3</sup>所致大风太三美灾乏性大风的地 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,因此需要一次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,包括常用改革福风级,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 2美国男子飓风风速估计的 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去暴流、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(姚聃等,2019)正式发布实施, 其与 EF 等级具有对应关系。



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)

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

<sup>3</sup>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,下击暴流分为微下击暴流和宏下击暴流。

<sup>2</sup>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。

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)都作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,还通过使用视频估计龙卷卷起 碎片的旋转速度来估计龙卷漏斗云附近的近地面风速。

#### 2.2 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、CAS 定位等为能)高清相 机、GPS 定位仪(指南针)、携带多块电源和高清相机的无人机、充电玉等;目前,无人机 航拍已是现场调查的必要手段。(5)现场调查过程中,除了进行,因机和无人机,施照或者录像、 定位、确定照片和树木等的倒伏方向等重要工作外,还需要向语关入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,全面约合分析气象资料和现 场调查资料,排除虚假或者不准确信息,分析风灾成因,形成调查报告,给出最终调查结果 和结论。

#### 2.3 江苏阜宁和辽宁开原龙卷调了

2016年6月23日14: 19-15: 07 元1、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,距离核心文区6km的新沟镇自动站记录的瞬时极大风速为34.6 m/s(风力12级)(郑永光等,20 obv。2、19 年7月3日下午约17-18时,辽宁省开原市出现了龙卷、冰雹、短时强降水穿压对流天气;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:宗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(中央气象合)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,2010、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),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 4 km,最窄约 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 完全损毁(图 3d),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 场发现的被龙卷抛出了 400~500 m 左右重约 1~2 t 的空集装箱,具有明显的扭转痕迹,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 3b)长约 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 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 3b);17:17 接地(图 3e);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 3b)。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)。但该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。





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)(c)、立新村受灾二层房屋(d)(郑永光等,2016b);2019 年辽宁开原龙卷路径 和强度(b)、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 by one teacher in Wutan Primary School (Arrow denotes

the rotation direction) (c) and the two-story house with top-story collapsed in Lixin Village (d) of the 2016 Funing tornado (Zheng et al, 2016b); tornado track (b), monitoring video in Touzhaizi Village (e), and reinforced concrete frame structure canteen flattened (f) of the 2019 Kaiyuan tornado (Zhang et al, 2020)

# 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2km(American Meteorological Society, 2020)。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。

## 4.1 龙卷风暴组织形态



#### 4.2 地面场特征

稠密的地面见则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 到龙卷的外围涡放轧流。包澄澜和赵刚然(1964)分析上海1962年和1963年的三次龙卷过 程发现,地面存在30~4.2 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风锋相遇的辐合线上,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,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号台风艾云尼中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冷的可能性就越小,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出流(温度差小于4℃)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,也难以判断中气旋或者中涡旋以及 TVS 等特征,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 年的三次龙卷并非发生在强烈的雷雨云的中心部份,而是在其右后方的边缘地区。蒋汝庚(1997)给出了 1995 年 4 月 19 日发生在广东番禺法奇运镇命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)根据文户记雷达回波为新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 日发星速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,龙卷出现在飑线灵至,你一个明显的弓形回波中,俞小鼎和郑永光(2020)判断其可能由飑线或者弓形回沾上的户泻减发展而成;不过,也可能是在飑线阵风锋上产生的阵风锋龙卷。

目前,非中气旋龙卷由于业务多普勒天气雷达观测特征不该显著,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中气旋底高都相关,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走些3.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),或子圣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 矣 的方计表明 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、距离的面壳小于1km时,龙卷的发生概率则约为40% (Davies-Jones et al, 2001; 前小鼎等,212 郑永光等,2018a)。多普勒天气雷达有时能 够探测到的TVS特征是步传流近预警的方一重要依据(俞小鼎等,2012;郑永光等,2018a)。

吴芳芳等(2013) 普查"规 2.05 2009 年苏北地区共发生 72 个超级单体,其中超级单体龙卷 13 起;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,真中最小直径小于 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)等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 9 km 以上,呈现出类似于典型電暴的 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8km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 m/s。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; 下达径向速度观 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,注起, 30 m/s (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 "17 vS 约定 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,在4号已经有中涡旋形成,如 2016 年江苏阜宁 EF4 级龙卷(周海光,2018)和 2019 年记,开京1-F4 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 新加强为长气旋形成超级单体。

一些龙卷个例研究发现,产生龙卷的中气旋在垂直方向具与倾斜的特征。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向东北方向倾斜(郑永大等,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回过流层中层风场下风方(东南方向)倾 斜的特征(郑永光等,2020),这可定是中大气强垂直风切变所致上升气流倾斜的结果。2013 年美国俄克拉荷马州 El Reno 龙卷(Plesce et al, 2019)的中气旋具有随高度向北倾斜的特 征。Yao et al (2018,2019)和唐嘉豪等(2)19)分别对2016 年江苏阜宁龙卷、2012 年北 京通州张家湾龙卷、2015 年47区彩虹佛LEF3 级龙卷的模拟结果都显示,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 具有很多与经典起致单体一致的特征,其他台风龙卷个例研究也得到了类似结果,如朱文剑 等(2016)、李兆急至(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)。朱文剑等(2016)发现2015年彩虹台风龙卷的中气 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2015年彩虹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)分析2015年彩虹台风龙卷超级单体发现,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 m s<sup>-1</sup>。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入反射率(Z<sub>DR</sub>)和低的相关系数(ρ<sub>HV</sub>)(Ryzhkov et al, 2005),这是因为龙卷所致的矿片、寸志大处于米散射区、且有随机取向的缘故。从图4可以看出(黄先香等,2019)、态物次区波区和龙卷风暴涡旋中心位置,探测到低 Z<sub>DR</sub>和低的 ρ<sub>HV</sub>特征,Z<sub>DR</sub>低值区的值大约 > 0.5, ρ<sub>HV</sub>低值区的值为 0.73,基本符合 Ryzhkov et al (2005)提出的识别 TDS,和朱示量。Zha.g et al (2021)分析了 2020年6月1日珠江口一次水龙卷的X波段相打阵双属拒雷达观测,发现该龙卷也具有明显的 TDS 特征,但该龙卷位于水面上,不太可能有运片卷、方卷中,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 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,在低层龙卷涡旋舟石公,反射率因子图上从4km左右高空伸下一狭长的(水平尺度1~2km)、强度45 4Bz左右%及地回波;Rasmussen et al (2006)称之为DRC,并认为其有可能是龙类主,放无兆信号、虽然郑永光等(2020)没有给出 2019年辽宁开原龙卷的DRC分析,但了把了Lapara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在这种DFC存在Yao Yao et al (2019b)使用 Bryan 云模式成功模拟了 2012年7月21日北京运州张家湾二卷演变过程,也发现了这种DRC特征。Byko et al (2009)通过数值模扎 安克在三种 DFC 形成机制:由于中层气流"停滞"形成;通过降水形成,这些降水形成在最长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。



图 4 2018 年 6 月 8 日 13:54(北京时)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<sub>DR</sub>(c) 和 ρ<sub>HV</sub>(d)("+"表示 TDS 位置) (黄先香等, 2019)

Fig. 4 Reflectivity (a), mean radial velocity (b), differential reflectivity (c) and copular cross-correlation coefficient (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)

## 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,但实地急等(2017)、Bai et al (2017)和 Zhao et al (2017)都给出了 2015年彩虹台风龙卷写正双漏头云结构的视频,朱文剑等(2016)发现该次龙卷的低空还有一条近似东天的管状云围绕龙卷的主体涡旋在旋转;Yao et al (2019a)对 2018年摩羯台风中的龙卷次争见了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 ry n 云漠式、M1 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、乏系 充性研究。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(200、水、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,发现风星中存在这世症(是闪闪电空白区)或闪电环(即环状闪电空白区), 其与强上升气流密切相关,对广阔的直径可达 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;在式空气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,正地闪峰值有时出现在龙卷风发生之前、有时在之后。

2016 年江苏早产 EF4 级龙卷发生时的 14-15 时,龙卷周边 20 km 内正地闪 72 次,负地 闪 4 次,正地闪比深地着较高(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,因为己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3类:第一类 龙卷模拟针对简化的类龙卷涡旋进行模拟,不考虑母体风暴;第二类龙卷模拟基于理想化或 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;第三类龙卷模拟基于再分析 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 遵执 些以做到的。 Yao et al (2018; 2019b)使用 Bryan 云模式分别成功理想模拟了 2016 5 6 月 23 日工苏阜宁 EF4 级龙卷和 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨期间通州张家湾 2F3 纪龙 《演变,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。如 m 五次 Yao et al 2018; 2019b) 给出了模拟的这两次龙卷过程中龙卷涡旋的形成、发展口消之过程。

Yao et al (2018)对 2016 年江苏阜宁龙卷模拟结果显示 龙卷主头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口下发展;当强下沉气流叠置 在最强涡度中心时龙卷消亡。Yao et al (2019b、模拟 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨期间通 州张家湾龙卷发现,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 和漏斗云的向下发展;当强下沉气流灯断了中层中气旋和近地面龙卷涡旋时龙卷消亡。

第三类龙卷模拟可研究实际到意识起波单体风暴触发、演变以及龙卷或者龙卷母体涡旋的形成过程,如 Schenkman et al 00,00 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 o 4 23 日阜宁龙卷模拟发现,虽然模拟的涡旋在强度和结构上与实况还有一定差距,但同化制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与实况一致性方面均明显高于控制试验。还需指出的是,陈锋等(2019)使用的WRF模式模拟水平分辨率大飞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(2012、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27km,最内层达37m;模式层顶为50hPa,垂直75层,其中2km高度以下19层;当格点距小于1km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者预报可以给出龙卷母体涡旋一中气旋的特 征,比如 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)对中气旋具有很好的预报指示意义;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总结和展望

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、尤其新一代天气雷达网、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2个阶段:约2000年之前的传统研究阶段与约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1015年"东方之 星"翻沉事件、2015年彩虹台风龙卷、2016年江苏阜宁 EF4级次卷、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,获得了中国之卷风暴的组织形态、 地面要素场特征、中气旋和 TVS 特征以及龙卷涡旋、征季,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沉通常下去。产生龙卷的超级单体 的中气旋底高通常低于1km、强度与龙卷强度正和关、只有侧斜、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之,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有 4 大小 2, 需头继续努力: (1) 由于中国龙卷发生步 4 元 1 元 则于观测条件,
- (1) 由于中国龙卷发生频率起去, 鱼、同于观测条件, 因此历史龙卷记录存在不确定性。现场调查存在一定的对方才, 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, 武、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无忧调查, 以而难以对部分龙卷进行有效确认。因此, 需要加强调查, 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 级及以上层度的强龙卷数据库。
- (2) 中国先举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1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1 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?这些都是未来值得努力的方向。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

- 白兰强, 孟智勇, Sueki K, 等, 2020. 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, 50(5): 619-634. 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.
- 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): 168-192 (in Chinese).
- 曹艳察,郑永光,盛杰,等,2021. 基于 GRAPES\_3km 模式的风雹概 承预计技入UJ. 气象待 发表. Cao Y C, Zheng Y G, Sheng J, 2021. Severe convective wine are had probabilistic forecasting method based on outputs of GRAPES\_3km model/JJ. M. eo. Mon, in press (in Chinese).
- 陈锋, 董美莹, 冀春晓, 等, 2019. 雷达资料同化对 2016年6月 23 日本 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 1, 201». Exproving the simulation of the tornado occurring in Funing on 23 June 2016 by using L dar 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1.1 北京: 气象出版社.Editorial Board of Dictionary of Atmospheric Science,17.4. Dictionary of Atmospheric Sciences[M].Beijing: China Meteorological Press: 1-1.4. art/ini/ese).
- 刁秀广,万明波,高留喜,等,201、大味,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, a W n A B, Gao L X, et al, 2014. Doppler radar product features and warning of tor supercel' 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. Charac e istics 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. 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 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[R]. 北方天代文系 北京大学出版 社, 5: 167-170. Lin D Q, Liu R X, Liu B L, 1984. Investigation on teaching the ground of a landspout[J]. J Northern Wea, Peking University Press, 5: 167-170 (in the see).
- 刘勇, 刘子臣, 马廷标, 等, 1998. 一次飑线过程中龙卷及飑华上, 6的中尺度分析. 大气科学, 22(3): 326 335. Liu Y, Liu Z C, Ma T B, et al, 1998. A m, so-scale analysis of tornado and squall front forming in a aquall line process. Chinese J Atmos Sc., 22(3): 326 335 (in Chinese).
- 沈树勤, 1990. 台风前部龙卷风的一般特征及关范发条件的初步分析[J]. 气象, 16(1): 11-15. Shen S Q, 1990. Analysis of the general character stics 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, 2015 广 Gall 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): 40% 4/ gang J H, Ran L K, Shen X Y, et al. 2019. High-resolution numeric cosimulation of the EF3 tornadic storm in Foshan city, Guangdong Province[J]. Chin J G on ys 62(11): 6082-4097 (in Chinese).
- 王东海,李兆慧,高枞-,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 characteristic and research progress of tornadoes in China to that in Europe and USA[J]. Adv Meteor Science mol, 8(2): 8-23 (in Chinese).
- 王秀明, 俞小鼎, 2019. 杰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 torandoes: 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).
- 姚聃, 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).
- 姚聘, 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 P, 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查[J]. 高原气象, 31(6): 1721-1730. Yao Y Q, Hao Y, Zhang Y J, et al, 2012. Synoptic stuation and pre-variant of Anhui tornado[J]. Plateau Meteor, 31(6): 1721-1730 (in Chines ).
- 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等, 2006a. 多普勒天气雷达原理与血气应用[M]. 元京: 气象出版 社: 1-314. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006a. Print ple and Application of Doppler Weather Radar[M]. Beijing: China Meteorological Press: 1 314 (m.C.mese).
- 俞小鼎, 郑媛媛, 张爱民, 等, 2006b. 安徽一次强烈龙卷的多言勒天气雷达分析[J]. 高原气 象, 25(5): 914-924. Yu X D, Zheng Y Y, Zheng 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 [ 太子, F天/ 研究与业务进展[J]. 气象学报, 78(3): 391-418. Yu X D, Zheng Y G, 2020. Ad an a sine evere convective weather research and operational service in China[J]. Acta Lateor Sin, 8 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): 508-5.2. Yr X D, Z. og Y Y, Liao Y F, et al, 2008. Observational investigation of a tornadic eavy precipitation supercell storm[J]. Chin J Atmos Sci, 32(3): 508-522 (in Chinese).
- 俞小鼎, 周小刚, 1997, 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]. 气象科技进员 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 级强力卷彩成条件、演变特 征和机理[J]. 气象, 46(5): 589-602. Zheng Y G, Lan Y, Cao Locettal, 2020. Environmental conditions, evolution and mechanisms of the EF4 torn do in Kasyuan of Liaoning Province on 3 July 2019[J]. Meteor Mon, 46(5): 589-602 (in Chines
- 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 c h nese).
- 郑永光,田付友,孟智勇,等,2016a. "东文之星"落车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) 4-1. Zhe ig Y G, Tian F Y, Meng Z Y, et al. 2016a. Survey and multi-scale characteristic for with damage caused by convective storms in the surrounding area of the crossizing a citle it of cruise ship "Dongfangzhixing"[J]. Meteor Mon, 42(1): 1-13 (in Chine c)
- 郑永光, 朱文剑, 姚聃, 玺, 7016b. 学 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 in ensity 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).
- 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"Mujig re"on 4 October 2015[J]. Torr Rain Dis, 35(5): 403-414 (in Chinese).
- Agee E, Jones E, 2009. Proposed conceptual taxonomy for proper identific tic , 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 there ornado cyclone and the occurrence of tornado families[J]. Mon Wea Rev, 104(5:557-567.
- Agee E M, 2014. A revised tornado definition and change in tornado taxonomy[J]. Wea Forecasting, 29(5): 1256-1258.
- American Meteorological Society 待补
- AmericanMeteorologicalSociety,(2020-11-02).Tornado[EB/OL].<a href="http://glossary.ametsoc.org/wiki/tornad\_">http://glossary.ametsoc.org/wiki/tornad\_</a>
- Bai L Q, Meng Z Y, Huang L, et al, 1017 An i Itegrated damage, visual, and radar analysis of the 2015 Foshan, Guangdong, El et an e in China produced by the landfalling typhoon Mujigae (2015)[J]. Bull A ner Mete or Sec. 8(12): 2619-2640.
- Bluestein H B, 2013. Severe Concective Storms and Tornadoes: Observations and Dynamics[M]. Berlin Heidelberg: a painter.
- Bluestein H B, Thi m K J, Snyder J C, et al, 2018. The multiple-vortex structure of the El Reno, Oklahoma, ton do on 31 May 2013[J]. Mon Wea Rev, 146(8): 2483-2502.
- Bluestein H B, Thic n K 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/FinalNWSF-scaleAssessmentGui de.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, Bradbury D L, Van Thullenar C F, 1970. Palm Sunday tornad es of April 11, 1965[J]. Mon Wea Rev, 98(1): 29-69.
- Fujita T T, 1971. Proposed characterization of tornadoes and hurric nes be are and intensity[R]. SMRP Research Paper, Number 91, Chicago: The University of chicago: 42.
- Fujita T T, 1978. Manual of downburst identification for P ojec NP (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 man burst[R]. Satellite and Mesometeorology Research Project Res. paper No. 210 Clicago: The University of Chicago, 122.
- Grams J S, Thompson R L, Snively V t a, 012. A climatology and comparison of parameters for significant tornado events in 56, n c, States[J]. Wea Forecasting, 27(1): 106-123.
- Kain J S, Weiss S J, Bright D R, et al, 2018 S me practical considerations regarding horizontal resolution in the first generation of operational convection-allowing NWP[J]. Wea Forecasting, 23(5): 134-9-12.
- Markowski P M, Hitlee T F, Richardson Y P, 2018. Tornadogenesis in the 12 May 2010 supercell thunderstorm in ercepted 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, 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.

- 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.
- 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 squar lines and be v echoes. Part I: climatological distribution. Wea Forecasting, 20: 23–34
- Wakimoto R M, Wilson J W, 1989. Non-supercell tornadoes[J]. Mo. Java Rev, 117(6): 1113-1140.
- Wu L G, Liu Q Y, Li Y B, 2018. Prevalence of tornado- cale vort ces 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]. D L Amer Meteor Soc, 88(1): 31-46.
- Yao D, Liang X D, Meng Q, et al, 2019: Le ortance of identifying tropical cyclone tornadoes in typhoon warning and defense si der. U<sub>1</sub>. 5 ci Bull, 64(3): 143-145.
- Yao D, Meng Z Y, Xue M, 2019b. (pp. s), aintenance and demise of a simulated tornado and the evolution of its preceding descend in re-lectivity core (DRC)[J]. Atmosphere, 10(5): 236.
- Yao D, Xue H L, Yin J F, *ca*<sup>1</sup>, 2°18. Investigation into the formation, structure, and evolution of an EF4 tornado in Lass Cana Usa via high-resolution numerical simulation[J]. J Meteor Res, 32(2): 157-17
- Yao Y Q, Yu X D, Z ang 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.