

蔡康龙,俞小鼎,李彩玲,等,2021.2019年广西临桂微下击暴流和广东湛江龙卷现场灾情调查对比分析[J].气象,47(2):230-241. Cai K L, Yu X D, Li C L, et al, 2021. Comparative analysis of damage survey of microburst in Lingui of Guangxi and tornado in Zhanjiang of Guangdong in 2019[J]. Meteor Mon, 47(2): 230-241(in Chinese).

2019 年广西临桂微下击暴流和广东湛江 龙卷现场灾情调查对比分析^{*}

蔡康龙^{1,2} 俞小鼎³ 李彩玲¹ 黄先香^{1,2}
炎利军¹ 何秋蕊¹ 麦文强¹ 陈志芳¹

1 广东省佛山市气象局/佛山市龙卷风研究中心,佛山 528315

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081

3 中国气象局气象干部培训学院,北京 100081

提 要: 2019年3月21日21:13广西桂林市临桂区国家气象观测站测得 $60.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的瞬时极大风速,2019年4月13日14:11广东湛江市徐闻县下属和安镇政府自动气象站测得 $50.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的瞬时极大风速,两地均出现比较明显的风灾。通过分析监控视频、无人机航拍资料、现场勘察和走访目击者,获得如下结论:21:09—21:14临桂国家气象观测站及周边区域的风灾过程是一次EF2级微下击暴流,时间尺度大于6 min,空间尺度约为 $1.6\text{ km}\times 2.0\text{ km}$,属于 α 小尺度(400~4000 m)微下击暴流,其中包含7个 β 小尺度(40~400 m)微下击暴流;灾害现场呈现出受灾区域的纵横比小、灾情不连续和树木倒向有明显辐散的特征。14:09—14:15广东湛江徐闻的风灾过程是一次EF3级的强龙卷,持续时间约为7 min,龙卷路径长约为3.2 km,宽约为30~280 m,监控视频显示在龙卷发生地附近出现了持续时间极短的旋转性大风。相对于临桂微下击暴流,龙卷灾害现场具有风灾破坏带纵横比大、灾情连续和多处树木倒向呈现辐合的特征。

关键词: 微下击暴流,龙卷,现场调查,灾害特征

中图分类号: P445, P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.02.009

Comparative Analysis of Damage Survey of Microburst in Lingui of Guangxi and Tornado in Zhanjiang of Guangdong in 2019

CAI Kanglong^{1,2} YU Xiaoding³ LI Cailing¹ HUANG Xianxiang^{1,2}
YAN Lijun¹ HE Qiurui¹ MAI Wenqiang¹ CHEN Zhifang¹

1 Foshan Tornado Research Centre/Foshan Meteorological Office of Guangdong Province, Foshan 528315

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

Abstract: On 21 March 2019, an instantaneous maximum wind speed of $60.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ was recorded at 21:13 BT by national observation station in Lingui District, Guangxi. On 13 April 2019, an instantaneous maximum wind speed of $50.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ was recorded at 14:11 BT by observation station in He'an Town, Guangdong Province. Significant wind damages were observed at the two places. By analyzing surveillance video, drone aerial data, site survey and visiting witnesses, the following conclusions were obtained. The wind damage which occurred at Lingui National Station and its surrounding area from 21:09 BT to 21:14 BT

^{*} 广东省科技厅社会发展科技协同创新体系建设专项(2019B020208015)、灾害天气国家重点实验室开放课题(2020LASW-A03, 2018LASW-B18)和佛山市气象局科技项目(201906)共同资助

2019年9月6日收稿; 2020年11月23日收修定稿

第一作者:蔡康龙,主要从事天气雷达的数据处理和灾害调查分析. E-mail:35642480@qq.com

was a EF2 microburst lasting at least 6 minutes and affecting $1.6 \text{ km} \times 2.0 \text{ km}$. It belonged to micro- α scale microburst and contained seven micro- β scale embedded. The damage area was featured with small aspect ratio, discontinuous spatial distribution and divergent wind pattern. The wind damage that occurred in Xuwen of Guangdong Province from 14:09 BT to 14:15 BT was a EF3 tornado which lasted for 7 minutes. The damage path was about 3.2 km long and 30–280 m wide. The surveillance video showed that there was a rotational wind tunnel existing shortly near the damage site. Compared with Lingui microburst, the damage area has larger aspect ratio, more continuous spatial distribution and convergent wind pattern.

Key words: microburst, tornado, damage survey, damage characteristic

引言

龙卷和下击暴流等致灾对流性大风通常影响时间短,造成的灾害重。目前我国已经建立了比较完备的气象业务观测体系,但由于受业务雷达时空分辨率的局限性和地面气象观测站分布不均的制约,单凭这些资料难以准确评估风灾类型和对风灾强度定级;当风灾发生在大雨和漆黑的夜晚,没有目击者及相关拍摄视频时,情况更是如此。所以现场灾害调查是分析龙卷和下击暴流等中小尺度致灾性大风灾情特征精细分布的重要手段(郑永光等,2016b)。

继 Fujita(1971;1981)的开创性工作之后,美国广泛开展了龙卷和下击暴流的灾害调查,以分析推断龙卷和下击暴流地面灾情特征(Doswell III and Burgess, 1988; Doswell III, 2003; Marshall, 2002; Wakimoto et al, 2003)。在中国,俞小鼎等(2006a; 2006b; 2008)分别对2003年7月8日和2005年7月30日发生在安徽的龙卷以及2003年6月6日发生在安徽的下击暴流过程的多普勒天气雷达回波特征和

天气背景进行了详细分析。Meng and Yao(2014)对2012年7月21日北京特大暴雨期间发生在通州区的EF3级龙卷做了规范的灾情调查和多普勒天气雷达回波分析,这种规范的龙卷灾情调查在中国尚属首次。Meng et al(2016)和郑永光等(2016a)对2015年6月1日发生在湖北监利的下击暴流导致“东方之星”游轮倾覆事件的灾情调查做了总结分析。Bai et al(2017)和李兆慧等(2017)对2015年10月4日发生在广东顺德的台风彩虹外围雨带EF3级龙卷的灾情调查和多普勒天气雷达回波特征进行了阐述。郑艳等(2017)结合拍摄龙卷形成过程的监控视频对2016年6月5日的海南文昌龙卷进行灾情分析。郑永光等(2018)介绍了龙卷和下击暴流灾情调查的基本原则和规范,并通过实例加以说明。张一平等(2019)对2017年7月6日河南周口龙卷进行现场调查,根据树木扭断及辐合状倒伏的灾情特征及视频资料可以快速判断风灾类型。黄先香等(2019)利用灾情调查资料,总结了2018年全国龙卷的明显灾情特征。

如图1所示,从地面灾情特征可以区分灾情是

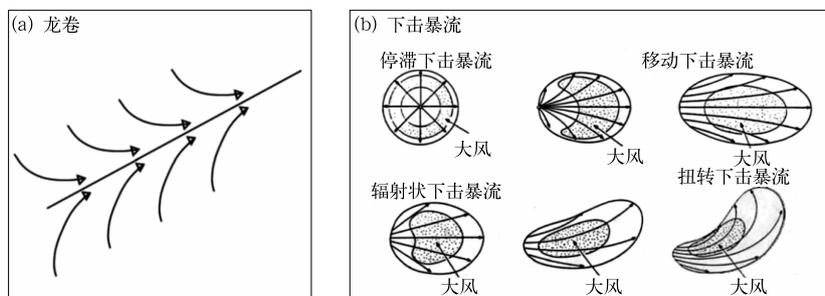


图1 龙卷(a)和不同下击暴流(b)流形

[图1a引自 Doswell III(2003),图1b引自 Fujita(1985)]

Fig. 1 Tornado (a) and downburst (b) flow patterns

[Fig. 1a cited from Doswell III (2003), Fig. 1b cited from Fujita (1985)]

由龙卷或者下击暴流所致,龙卷破坏带一般狭长,破坏带中会有明显辐合状树木倒伏;而下击暴流造成破坏区域一般比较宽,树木倒伏方向则是明显辐散特征。值得注意的是,下击暴流的不确定性比龙卷大,主要是因为下击暴流往往发生在多个尺度,同时会伴随小尺度涡旋,同一区域会受多个下击暴流和涡旋影响,从而导致复杂地面灾情。

Fujita(1971)在对龙卷进行灾害调查总结基础上,提出藤田等级(F等级),但是藤田等级在风速范围识别方面并不考虑建筑结构的质量,会高估结构质量差的建筑的风速等级;当风灾路径中没有破坏指示物(DI)时会造成低估的情况(McDonald, 2001)。由于这些局限的存在,美国得克萨斯技术大学通过对F等级的完善,在2004年提出了改进的藤田等级(EF等级),包括从EF0~EF5的6个等级,其中EF0等级最低,EF5是最高风速和破坏等级。EF等级包含了更多不同结构的破坏指标,风速估计值也对应进行了修正(Doswell III et al, 2009; Texas Tech University, 2004),因此EF等级(WSEC, 2006)得到广泛应用。我国龙卷强度定级标准已于2019年8月1日实施(姚聘等, 2019; 以下简称行标),本文将使用包含飞射物(指被风卷起并抛落至距原地一定距离外的人或物体)的简化EF等级标准(范雯杰和俞小鼎, 2015)和《龙卷强度等级》(中国气象局, 2019)对风灾风力强度进行评估。针对龙卷灾情制定的F级或EF级标准同样适用于下击暴流及其伴随的直线型对流大风的灾情等级确定。

2019年3月21日21时前后广西桂林市临桂区国家气象观测站(以下简称临桂站)测得 $60.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (17级)的瞬时风速,刷新了广西气象观测站测量到的最大瞬时风记录(也刷新了除台风外我国气象观测站测得的最大对流性阵风记录),同时伴有短时强降水、雷电、冰雹等强对流天气(以下简称临桂个例)。2019年4月13日14时左右广东湛江市徐闻县下属和安镇镇政府自动气象站(以下简称和安站)测得 $50.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (15级)的瞬时风速,并伴有短时强降水等强对流天气(以下简称徐闻个例)。两地风灾发生后,佛山市龙卷风研究中心立即汇同当地气象局组成灾害调查组对这两次风灾进行了详细的现场灾情调查。本文通过分析现场灾情调查资料,总结两次风灾现场的特征并确定灾害影响范围、风力等级强度评估和风灾类型(龙卷或下击暴流),

并同“东方之星”翻沉事件和江苏阜宁龙卷的现场调查结果(郑永光等, 2016a; 2016b)进行对比分析,为今后开展龙卷和下击暴流等致灾对流大风灾害现场调研提供借鉴经验。

1 灾情调查和个例概况

1.1 灾害调查概况

自2015年10月4日佛山EF3级强龙卷(麦雪湖等, 2015; 李彩玲等, 2016; 朱文剑等, 2016)过程起,佛山市龙卷风研究中心灾害调查组(以下简称灾调组)开始使用无人机进行空中大范围航拍以全面了解风灾特征。2016年5月至2019年7月,该灾调组已经在全国范围内对龙卷、下击暴流等风灾进行了36次灾害调查。主要使用的调查工具包括:大疆无人机(配备10块电池)、手持云台相机、智能手机(具有拍摄、GPS定位、高德地图和指南针等功能)和软卷尺。

灾调组在灾害现场一般分两个小组开展调查,第一小组主要负责无人机航拍,现场勘查取证;第二小组主要负责分析天气形势,收集当地气象部门监测资料,汇总影像资料和现场走访目击者。灾情调查过程还需收集灾情的细节信息,比如:树木倒伏和折断要考虑树木是否健康,是否有病虫害,树冠大小和根系深浅等因素,进而判断EF等级(Jim and Liu, 1997)。

1.2 临桂个例概况

现场灾情调查区域包括临桂站、桂林师范专科学校临桂校区(以下简称师专)和桂林医学院临桂校区的范围,大风造成了大量树木(主要有桂花树、小叶桉树、樟树和构树,都属于硬木)被连根拔起和折断、房顶(其中28间材料为铁皮,45间材料为木棉瓦或者瓦片)受损、三个地方的砖墙(使用砂浆砌合)倒塌等灾害。风灾区域南北方向长度约达1.8 km,东西方向长度约为1.6 km,除了草地、植被稀疏的小山坡外,其他区域受灾比较明显。由于此次风灾发生在晚上,缺少可直接判断风灾类型的目击者和相关手机拍摄资料。

1.3 徐闻个例概况

现场灾情调查区域包括金鸡村、卫生院宿舍、镇

政府、中心小学和陈村等。明显的灾害主要有集装箱(尺寸规格为 2.2 m×1.8 m×1.6 m,由现场吊车估重为 2 t)被吹离距原位置 35 m 处,多处水泥电线杆折断,铁制路灯和金属旗杆弯曲,树木被连根拔起和扭断,窗户玻璃破碎,以及围墙倒塌等。风灾路径长度约为 3.2 km,路径方向是西北偏北向东南偏南,路径的最大宽度为 230 m。折断的树木主要有小叶榄仁和樟树,都属于硬木。徐闻个例中湛江的 SA 型多普勒天气雷达反射率因子强度较强,有明显勾状回波特征,径向速度场有强中气旋,表明是由超级单体风暴引起的对流性大风(龙卷或下击暴流),但缺少可直接判断风灾类型的照片和视频。

2 监控视频分析

2.1 临桂个例监控视频分析

灾调组获得临桂个例中的临桂区观测站东北角监控摄像机(简称监控 1)向西北拍摄和观测场西南角监控摄像机(简称监控 2)向北拍摄的两个监控视频。由于受 17 级大风(阵风)影响导致临桂区观测站监控断电,监控视频只录制到当天 21:12:50,与

临桂站测量到的最大瞬时风速时间对应。从监控 1 的视频(时间段是 21:09:00—21:12:50)分析,21:09 前监控画面左上侧可以清晰看到双配电箱、百叶箱和风塔(图 2a 中的蓝色方框),随后风速急剧增大,降雨增强(图 2b 中白色条迹是雨滴运动轨迹),画面中的双配电箱和风塔逐渐变模糊(图 2b 中蓝色方框)。从监控视频拍摄内容和与临桂站值班人员采访内容可判断风灾前后的监控镜头拍摄方向基本一致。根据在视频中雨水在风中的方向,可以判断监控 1 该时间段风向基本是西北偏北(图 2b 中红色箭头)。而从监控 2 的视频(时间段与监控 1 的一样)中可知,在 21:09 前可以清楚看到临桂站正南方向师专建筑的灯光(图 2c 中的蓝色方框),随后逐渐不可辨认(图 2d 中的蓝色方框),根据雨滴运动的轨迹(图 2d 中白色条迹)可以判断出监控 2 该时间段风向基本是西北偏北(图 2d 中红色箭头),这跟临桂站的风向数据基本一致。通常龙卷经过前后会出现风向反转和旋转(Meng and Yao, 2014),而且这个风向的转变往往发生在十几秒内,然而这两个视频都没有因风向反转而出现持续性的雨滴拍打监控镜头的画面,故初步推断龙卷影响此观测场的概率较低。

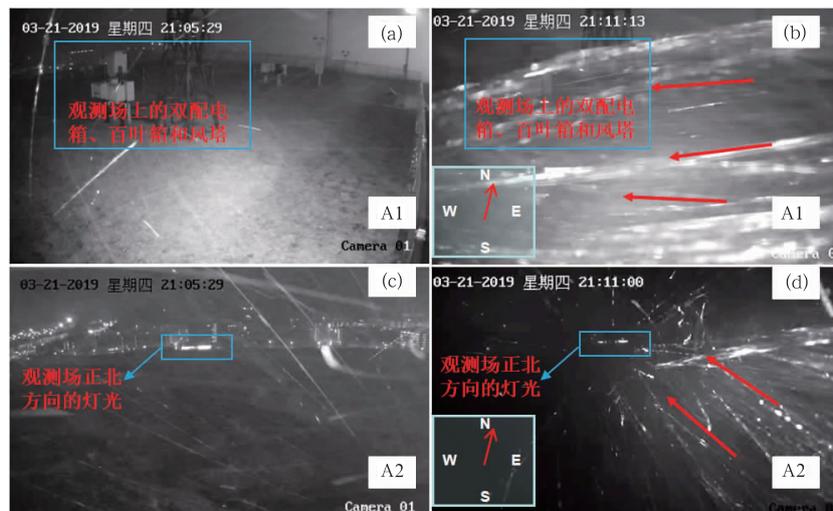


图 2 临桂个例风灾前(a,c)、风灾过程中(b,d)监控 1(a,b)和监控 2(c,d)的视频截图

(红色箭头表示根据雨水判断的风向,蓝色方框表示参照物所在的位置)

Fig. 2 Video screenshots of surveillance camera 1 (a, b) and surveillance camera 2 (c, d) before wind disaster (a, c), and in the process of wind disaster (b, d) in Lingui Case

(Red arrow indicates the wind direction according to the rain, and blue box indicates the position of the reference object)

2.2 徐闻个例监控视频分析

在湛江徐闻收集到和安镇邮政局(简称邮政局)的 2 个监控视频(具体位置见图 7 中所示)。从视频中可以判断大风影响此拍摄区域(长度约为 25 m)的时间约为 14:12:03—14:12:15,期间能清楚观察到逆时针的涡旋,图 3a 是 14:12:05 出现的涡旋。在图 3b 中,白色虚线圈起来区域分别表示大风影响前三轮车和电动车所在位置,白色箭头是根据邮政局监控视频画出的移动路径及移动方向,这表明地面出现了旋转风。监控内容中的涡旋与阜宁吴滩中心小学老师拍摄视频中的局部漏斗云(郑永光等,2016a)都不能直接说明是龙卷,需结合其他资料分析判断。

2.3 监控视频对比分析

临桂个例在几分钟时间内风向基本不变,而徐闻个例在十几秒时间内看到涡旋和旋转风。临桂站瞬时风大于 $17.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,持续时间达 6 min (21:09—21:14),期间风向变化不明显,与视频监控一致;而徐闻个例中监控视频显示大风只持续 13 s 左右,持续时间比临桂个例短得多,期间风向变化剧烈。初步判断是临桂个例为微下击暴流,而徐闻个例为龙卷所致大风,下文将结合地面灾害调查资料进一步详细分析和确认。

3 受灾情况分析

3.1 临桂个例

调查组进行了详细的现场灾情调研,走访了

图 4 中临桂区观测站、小山头、师专、桂林医学院等风灾现场,手机拍摄约 400 张照片及录制 12 段视频;航拍了图 4 中全部区域,共 18 个 4 K 高清视频,时长约为 80 min。

3.1.1 风灾及纵横比小的破坏带

从图 4 可见,受灾区域以临桂区秧塘村南部为起点,向南影响到店头和师专,向东南方向影响到飞虎山的西北边和桂林医学院的东面,影响区域有秧塘村、算垵村、店头村、小山头村、师专、桂林医学院和临桂站,该区域包括小树林、草地、村庄房屋群、校区、滩涂和山坡,大风在遇到高楼和飞虎山后,破坏痕迹不再明显。受灾区域长约为 1.6 km(图 4 中蓝色虚线),宽约为 2.0 km(图 4 中的红色虚线),纵横比(图 4 中蓝色虚线与红色虚线长度的比值)为 0.8,纵横比小。图 4 中的白色箭头为树木倒伏方向,黄色箭头为根据树木倒伏方向画出的大致流场。由图 4 可见,该受灾区域树木倒伏方向以东南到东南偏南方向倒伏为主,出现明显的辐散特征,其尺度属于 α 小尺度(400~4000 m)(在图 4 中以红字 M 标注),大的辐散场 M 中包含了至少 7 个 β 小尺度(40~400 m)的辐散破坏带(图 4 中以红字 m1~m7 标注)。

3.1.2 地面风的分析

图 4 中的位置 A 约有十棵直径为 20~40 cm 的构树一致向东南偏南方向倒伏(图 5a),同时与位置 B 向东南偏东方向折断的直径约为 25 cm 的构树(图 5b)均成辐散状,判断此处灾害等级达到 EF1。

临桂站东侧(图 4 中的 m2)出现了较大范围的树木倾倒、折断和铁皮顶砂浆砖墙结构鸡舍倒塌。该处主要风灾路径长度约为 200 m、宽度约为 110 m,树木倾倒集中在水泥路右侧(图 6a 中白色箭头代表

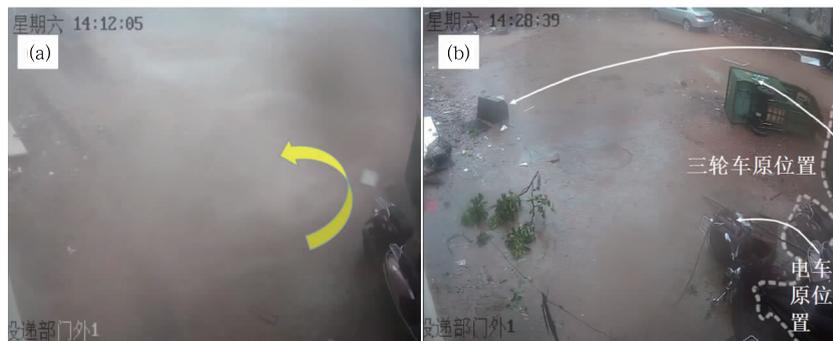


图 3 徐闻个例邮政局后门监控视频拍摄的旋转性大风视频截图(a,箭头表示大风旋转方向)和旋转性大风过后视频截图(b)

Fig. 3 Rotational wind photo captured by surveillance camera in the Post Office back door (a) and photo after the rotational wind (b) in Xuwen Case

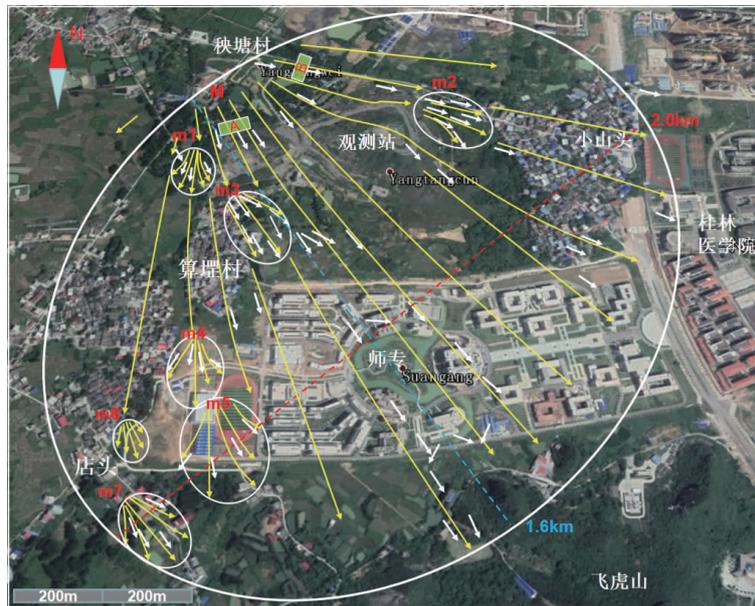


图 4 2019 年 3 月 21 日临桂区风灾后树木倒向分布所表征的两种尺度流场
 (M 表示 α 小尺度微下击暴流, m1~m7 表示 β 小尺度微下击暴流; 白色箭头是根据树木倒向判断出来的风向;
 黄色带箭头线表示大致的流场; 白色椭圆表示该微下击暴流影响的大致范围)

Fig. 4 The picture of two flow fields characterized by the direction of tree falling distribution after wind damage in Lingui District on 21 March 2019
 (M is micro- α scale microburst, m1-m7 are micro- β scale microbursts;
 white arrow is the direction of the wind judged by the direction of fallen trees;
 yellow arrowhead line represents the approximate flow field;
 white ellipse indicates the approximate extent of the impact of the microburst)

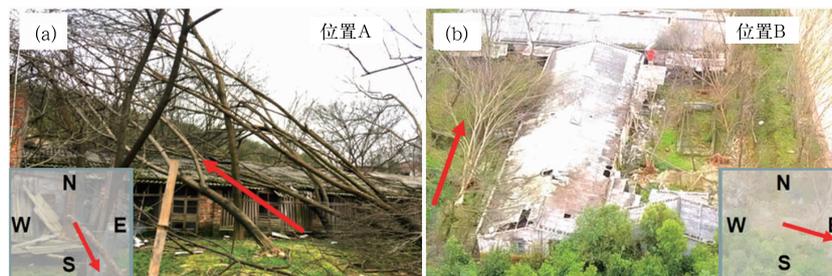


图 5 临桂区秧塘村南部位置 A(a)和位置 B(b)树木倒向
 (图 5a 是手机拍摄照片, 位置 A 处的构树向东南偏南方向倾倒;
 图 5b 是无人机航拍照片, 位置 B 处构树向东南偏东方向折断)

Fig. 5 The direction of tree fall in postions A and B in the south of Yangtang Village in Lingui District
 (Fig. 5a is taken by a mobile phone, the fallen tree in south-southeast direction at position A,
 Fig. 5b is an aerial photograph of the UAV, the snapped tree in east-southeast at position B)

树木倒向), 铁皮屋掀顶(图 6a 中红框所示位置)。该处树木主要倒向是东南偏东方向, 主导风向为西北偏西风; 其中多株直径大于 30 cm 的樟树被连根拔起(图 6b, 对应于图 6a 中蓝框所示位置), 其倒向为辐散状。水泥路左侧的鸡舍(图 6c)倒塌, 顶部铁皮被吹散落于东南方向约 10 m 远处。由于此鸡舍

砖墙是使用是砂浆进行彻合, 抗风能力不如水泥墙, 由此判断此处的灾害等级为 EF2, 对应的最大风速大致范围为 $50 \sim 60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。此区域受灾路径较宽, 树木倒向呈辐散状, 判断出此处是 EF2 级别的微下击暴流。其他几个微下击暴流破坏带内树木倒向都有较为明显的辐散特征, 强度等级为 EF1~EF2,

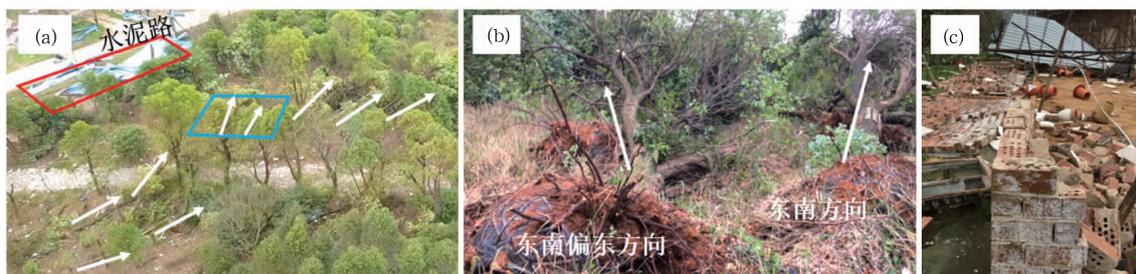


图 6 临桂区观测站东边无人机拍摄(a)和手机拍摄(b,c)的树木倒伏
(a,b;白色箭头为树木的倒向)和鸡舍倒塌(c)照片

Fig. 6 The photos of the fallen trees (a, b, white arrow is the direction of the fallen trees) and chicken house collapse (c) by a drone (a), and mobile phones (b, c) at the east of Lingui Observation Station

具体灾情细节不再赘述。

综合以上分析判断,临桂个例受灾区域纵横比小,风灾路径宽,风灾点多且不连续,树林倒向有明显辐散的特征,是一次尺度范围在 2.0 km 以内的微下击暴流过程,微下击暴流内部包含多个 β 小尺度辐散破坏带,灾情等级为 EF2 级(行标三级)。Fujita and Byers (1977)、Fujita and Wakimoto (1981)对下击暴流定义条件之一是地面水平风速大于 $17.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,本次过程中自动站瞬时风数据满足此条件的时间段为 21:09—21:14,持续了约 6 min,考虑临桂区观测站只是整个风灾区域局部,由此判断本次过程的下击暴流时间尺度应该大于 6 min。

3.2 徐闻个例

灾调组走访了图 7 中的金鸡村南部、和安镇和陈家村北部等风灾现场,手机拍摄约 500 张照片和录制 36 段视频;航拍了图 7 中全部区域,共 24 个 4 K 高清视频,时长约为 100 min。灾调小组发现了两个明显特征可证明此次灾害是龙卷造成,分别是狭窄的破坏带和多处的树木辐合状倒伏。

3.2.1 风灾及纵横比大的破坏带

狭窄的破坏带长约为 3.2 km,宽约为 30~280 m(图 7 中红色阴影部分),纵横比大于 11(比临桂个例风灾区域的纵横比大得多),龙卷破坏路径的方向是西北向东南偏南,该方向与天气雷达资料的中气旋移动方向相符。由雷达资料可估计出龙卷移动速度约为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,结合邮政局的视频监控所处位置(图 7 中紫色三角所示位置)以及从该监控视频内容判断龙卷经过此监控区域的时间,估算此段龙卷破坏路径时间段约为 14:09—14:15。在其生

命周期早期阶段(图 7a 所示位置附近),龙卷趋于平稳,风速不强,影响范围较窄,破坏指示物主要是树枝折断(对应于图 7a 所示位置和表 1 中位置 1 和位置 2,表 1 中左侧小图是图 7 龙卷破坏带的缩略图,其英文字母所示位置与图 7 中英文字母相对应,标有阿拉伯数字的颜色区域表示各个灾害指示物(damage indicator, DI)的位置,对应的 EF 级别是 EF0(行标一级)。其 EF 等级评估细节见表 1,表 1 中包括 DI、损毁级别(degrees of damage, DOD)、灾害描述和 EF 等级。随后龙卷以正弦曲线轨迹经过海面到达金鸡村的西南侧,影响范围变大,风力增加,造成成片树木主树干折断(图 7b 所示,表 1 中的位置 b;树木主要是木麻黄,属于硬木),树干直径为 20~50 cm,此 DI 满足较多、较粗树木被折断的 EF2 级(行标三级)要求(郑永光,2016a),因此图 7b 所示的 DI 达到 EF2 级别(行标三级)。此外,表 1 中位置 b 和位置 c 的树木倒向都呈辐合状(图 7b 所示对应的黄色椭圆范围内的红色箭头和图 7c 绿色椭圆范围内的红色箭头,这些箭头的方向是根据树木倒向所画)。在龙卷从图 7c 移动到图 7d 过程中,在其移动方向的右侧影响范围明显变小,主要原因是航拍发现地面以鱼塘为主,树木和简易建筑很少,留下的痕迹不明显,并不能说明龙卷在此区域减弱。

龙卷接着以约 165° 方位穿过和安镇,造成多根水泥电线杆折断(图 7d,表 1 中位置 d;等级为 EF3,行标三级),再往南造成多间瓦房顶超过 20% 面积的破损(图 7e,表 1 中位置 e;等级为 EF1,行标二级)。当龙卷到达邮政局监控位置,此监控位置正处于图 8a 中集装箱移动前后位置的中间,但由于监控视频拍摄角度较低,监控没有拍摄到集装箱,根据多个当地居民描述得知,集装箱原位置在图 8a 中红色

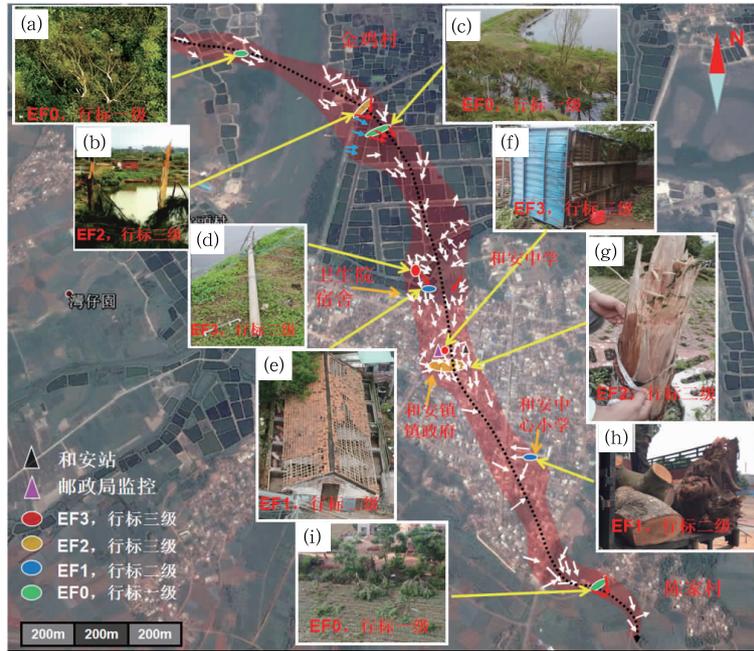


图 7 徐闻个例龙卷灾害路径(黑色虚线)、破坏带(红色阴影)在卫星地图上的位置(红色阴影内的白色、蓝色和红色箭头表示树木倒向,不同颜色椭圆表示不同 EF 等级,紫色三角表示邮政局后门监控位置;图 7a、7c、7d、7e 和 7i 是无人机航照片,其他灾情图由手机拍摄;图 7a 拍摄于金鸡村东侧,图 7b 和 7c 拍摄于金鸡村南侧,图 7d 和 7e 拍摄于卫生院宿舍附近,图 7f 和 7g 拍摄于和安镇镇政府,图 7h 拍摄于和安中心小学,图 7i 拍摄于陈家村西侧)

Fig. 7 The tornado track (black dotted line) and damage swath (red shadow) on a satellite image obtained from Google Earth in Xuwen Case (White, blue and red arrows in the red shadow indicate the failed trees, ellipses of different colors represent different EF rating, purple triangle indicates the location of surveillance video at the backdoor of the post office; Figs. 7a, 7c, 7d, 7e and 7i were taken by a drone, and other damage photos are taken by mobile phones; Fig. 7a was taken in the east of Jinji Village, Figs. 7b and 7c were taken in the south of Jinji Village, Figs. 7d and 7e were taken near the dormitory of the hospital, Figs. 7f and 7g were taken in Heanzhen Town Government, Fig. 7h was taken in Hean Primary School and Fig. 7i was taken in the west of Chenjia Village)

表 1 徐闻个例 21 处龙卷破坏灾情的详细 EF 等级表

Table 1 Details of the EF rating of tornado damage at the 21 positions in Xuwen Case

| 位置 | 序号 | DI | DOD | 破坏描述 | EF 等级及对应瞬时风速/($m \cdot s^{-1}$) | 行标及对应瞬时风速/($m \cdot s^{-1}$) |
|----|-----------------------|-----|-----|----------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| | b, g | | 4 | 较多的较大树干折断 | EF2(50~60) | 三级(50~74) |
| | 3, 4, 5, 9, h, 11, 12 | 硬木 | 3 | 连根拔起 | EF1(39~49) | 二级(39~49) |
| | 1, 2, a, c, i | | 2 | 树枝折断 | EF0(29~38) | 一级(≤ 38) |
| | d | 电线杆 | 5 | 水泥电线杆折断 | EF3(61~73) | 三级(5~74) |
| | 10 | | 2 | 小于 20% 屋顶受损 | EF0(29~38) | 一级(≤ 38) |
| | 7 | | 3 | 玻璃窗破碎 | EF1(39~49) | 二级(39~49) |
| | e, 8 | 房屋 | 4 | 大于 20% 屋顶受损 | EF1(39~49) | 二级(39~49) |
| | 6 | | 7 | 结构差外墙倒塌 | EF2(50~60) | 三级(50~74) |
| | f | 飞射物 | 6 | 两吨铁制集装箱卷离 30 m | EF3(61~73) | 三级(50~74) |

注:小写英文字母表示对应图 7 中的灾情实景图,阿拉伯数字则为省略的灾情实景图。

Note: Lowercase English letters of the serial number represents the disaster photos in Fig. 7, arabic numerals are omitted disaster photos.

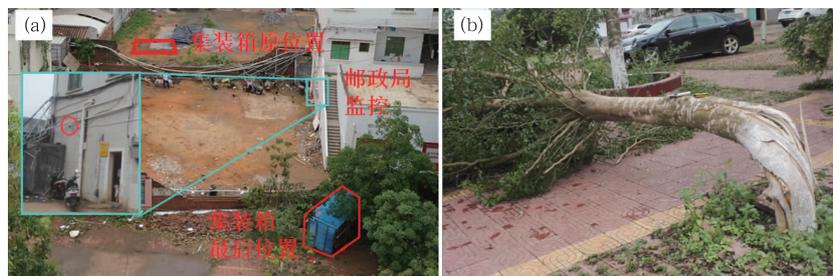


图 8 徐闻个例邮政局后门监控视频位置、集装箱灾情前后位置对比(a)和安镇镇政府扭曲倒伏的树木(b)

Fig. 8 Location of surveillance camera at the backdoor of the post office, location comparison of containers before and after damage (a), twisted and fallen trees in the Hean Town Government (b) in Xuwen Case

梯形处,集装箱原位置的四周留下用红砖垫高的底座,经测量底座长度与集装箱的长宽相符;居民还描述了虽然当时风声非常大,但是很快就平静了,周围一片狼藉,集装箱被吹走(图 7f,图 8a 所示为集装箱最后位置,表 1 中位置 f;等级为 EF3,行标三级)和围墙倒塌。龙卷到达和安镇镇政府广场,造成 5 颗树木被折断(图 7g,表 1 中位置 g;等级 EF2,行标三级),此区域还有树木的主树干被扭曲(图 8b)和大量辐合状倒伏的树木(图略)。随后,龙卷向东南方向移动经过和安中心小学西南校区,造成直径约为 80 cm 的非洲楝(硬木)被连根拔起(图 7h,表 1 中的位置 h;等级为 EF1,行标二级),期间的灾害都比较零散,直到在陈家村出现数量比较多的树木倒伏(图 7i,表 1 中位置 i;等级为 EF0,行标一级)。最后龙卷破坏痕迹消失,也许是出现跳跃或者再次升起(Fujita and Smith, 2013)。

3.2.2 地面风的分析

龙卷的灾情特征除了狭长破坏带之外,还会出现辐合状倒伏的树木,所以近地面风的辐合是龙卷另一个重要的特征。在金鸡村南边的倒伏树木呈现辐合状(图 7b 所示位置两个红色箭头,沿龙卷前进方向右侧和左侧的红色箭头分别对应于图 9a 和 9b),图 9a 是在龙卷中心路径(图 7 黑色虚线)约 25 m 处向东南偏东折断的树,再往南的树木折断方向也是东南偏南为主(图 7 中蓝色箭头,箭头方向代表折断方向或者倒伏方向,其对应实景图未给出),而图 9b 是距龙卷中心路径约 30 m 处向西南偏南折断的树。

在卫生院宿舍东北侧也出现明显树木辐合状倒伏(图 7d 所示位置附近两个红色箭头,沿龙卷前进

方向右侧和左侧的红色箭头分别对应于图 9c 和 9d),图 9c 所示位置虽然由于位于鱼塘边树木较少,但是可看到瓦片房顶的瓦片散落方向与树木倒伏的东南方向较为一致,而图 9d 则是多棵向西南方向倒伏的树木。由于航拍高度较高,从航拍视频中截取单个 DI 的图片分辨率不高,故将能清晰识别的树木倒伏方向标于图 7,以箭头表示。从图 7 可知,在和安中学西面、和安镇政府和陈家村西面都呈现出树木倒伏或者折断辐合状的特征。

3.3 个例对比分析

微下击暴流和龙卷的风灾特征区别在于风灾路径纵横比大小和树木倒向辐散或者辐合。“东方之星”翻沉事件中微下击暴流的风灾特征与临桂个例相似,都具有路径较宽、辐散状树木倒向和空间分布不连续性等特征。“东方之星”翻沉事件的微下击暴流强度是 EF1,该强度对应的灾害为杨树(软木)折断(郑永光等, 2016a);而临桂个例的强度是 EF2,该强度对应的灾害为鸡舍砖墙倒塌。江苏阜宁龙卷的灾情特征与徐闻个例相似,都具有路径长,辐合状树木倒向等特征。江苏阜宁龙卷强度为 EF4(行标四级),该强度对应的灾害是二层钢筋混凝土房屋完全被毁(郑永光等, 2016b);徐闻龙卷的强度为 EF3(行标三级),该强度对应的灾害是两吨重的铁制集装箱被卷离原地 30 m 远。与郑永光等(2016b)评估风灾强度的方法类似,本文在风灾强度估计中合理地考虑受灾指标物的具体情况,如临桂区观测站东侧附近鸡舍砖墙的材质和徐闻和安镇镇政府广场的折断树木的数量和粗细等。



图 9 徐闻个例金鸡村南侧(a,b;图 7b 附近位置红色箭头)和卫生院宿舍东北侧(c,d;图 7d 附近位置红色箭头)树木辐合状倒向图
(a)东南偏东方向折断和倒伏的树,(b)西南偏南倒向的树,
(c)东南倒向的树,(d)西南倒向的树

Fig. 9 Photos of the convergent tree-fall pattern in the south of Jinji Village
(a, b; the red arrows in Fig. 7b) and northeast of health center dormitory
(c, d; the red arrows in the Fig. 7d) in Xuwen Case

(a) the fallen trees in east-southeast direction, (b) the fallen trees in south-southwest direction,
(c) the fallen trees in southeast direction, (d) the fallen trees in southwest direction

4 结论与讨论

通过现场调查和事后分析临桂个例和徐闻个例的风灾现场资料,得出以下结论:

(1)引起临桂 17 级大风是一次尺度范围 2 km 以内,时间尺度大于 6 min,强度等级为 EF2 级的微下击暴流过程,微下击暴流内部包含多个 β 小尺度辐散破坏带。

(2)引起徐闻 15 级大风是一次路径长度为 3.2 km,宽约为 30~280 m,持续时间约为 7 min,强度等级为 EF3 级(行标三级)的强龙卷过程。

(3)从监控视频和观测站数据可判断微下击暴流过程大风持续时间相对长一些(约 6 min),风向变化不明显;龙卷过程旋转大风持续时间极短(13 s 内),风向突变明显。

(4)从风灾现场分析可见微下击暴流过程具有树木倒向呈辐散状,受灾范围纵横比小,风灾分布不连续的特征;龙卷过程具有树木倒向沿龙卷前进路径呈辐合状,受灾范围具有纵横比值大、风灾分布连续的特征。

需要指出的是,以上对于下击暴流和龙卷的调查并没有充分使用多普勒天气雷达资料。即便在多普勒天气雷达观测不能覆盖的区域,通过上述调查完全可以确定风灾的等级和性质(即确认是下击暴流还是龙卷)。实际上,2019 年 3 月 21 日广西临桂下击暴流发生在距离桂林 SB 型多普勒天气雷达 50 km 以内,低层径向速度呈现强烈辐散特征,仅凭雷达回波特征就基本上可以确认是下击暴流,只是无法给出灾情级别。2019 年 4 月 13 日湛江龙卷发生地距离湛江 SA 型多普勒天气雷达也不远,雷达回波上呈现明显中气旋,龙卷发生在中气旋之中,结合灾情调查可以进一步确认此次过程为龙卷。关于上述两个例子的天气背景和多普勒天气雷达回波特征,将有论文进一步分析。

致谢:感谢广西壮族自治区桂林市气象局和广东省湛江市徐闻县气象局在现场灾情调查过程给予的大力支持和协助。

参考文献

- 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).
- 黄先香, 炎利军, 蔡康龙, 等, 2019. 2018 年中国龙卷活动特征[J]. 气象科技进展, 9(1): 50-55. Huang X X, Yan L J, Cai K L, et al, 2019. Characteristics of tornado of China in 2018[J]. Adv Meteor Sci Technol, 9(1): 50-55(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).
- 麦雪湖, 炎利军, 李兆慧, 2015. 2015 年 10 月 4 日佛山强龙卷风灾过程浅析[J]. 广东气象, 37(6): 6-8. Mai X H, Yan L J, Li Z H, 2015. Preliminary analysis of an intense tornado in Foshan on October 4, 2015[J]. Guangdong Meteor, 37(6): 6-8(in Chinese).
- 姚聘, 梁旭东, 孙继松, 等, 2019. 龙卷强度等级: QX/T 478—2019[S]. 北京: 气象出版社: 1-4. Yao D, Liang X D, Sun J S, et al, 2019. Tornado intensity scale: QX/T 478—2019[S]. Beijing: China Meteorological Press: 1-4(in Chinese).
- 俞小鼎, 张爱民, 郑媛媛, 等, 2006a. 一次系列下击暴流事件的多普勒天气雷达分析[J]. 应用气象学报, 17(4): 385-393. Yu X D, Zhang A M, Zheng Y Y, et al, 2006a. Doppler radar analysis on a series of downburst events[J]. J Appl Meteor Sci, 17(4): 385-393(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).
- 张一平, 牛淑贞, 郑世林, 等, 2019. “07·06”周口龙卷现场调查和可预警性综合分析[J]. 气象, 45(8): 1135-1148. Zhang Y P, Niu S Z, Zheng S L, et al, 2019. Investigation and warning practicability analysis of the 6 July 2017 tornado in Zhoukou City[J]. Meteor Mon, 45(8): 1135-1148(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, 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, 姚聘, 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, 2018. 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, 2018. Forecasting techniques and damage survey of convectively driven high winds and tornadoes[J]. Adv Meteor Sci Technol, 8(2): 55-61(in Chinese).
- 中国气象局, 2019. 龙卷强度等级: QX/T 478—2019[S]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration, 2019. Standard of tonardo intensity: QX/T 478—2019[S]. Beijing: China Meteorological Press(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).
- 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.
- Doswell III C A, 2003. A guide to F-scale damage assessment[R/OL]. NOAA/NWS; 94. <http://training.weather.gov/wdtd/courses/EF-scale/lesson2/FinalNWSF-scaleAssessmentGuide.pdf>.
- Doswell III C A, Brooks H E, Dotzek N, 2009. On the implementation of the enhanced Fujita scale in the USA[J]. Atmos Res, 93(1/2/3): 554-563.
- Doswell III C A, Burgess D W, 1988. On some issues of United States tornado climatology[J]. Mon Wea Rev, 116(2): 495-501.
- Fujita T T, 1971. Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity[R]. SMRP Research Paper 91: 42.
- 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[R]. SMRP Res paper No. 210: 122.
- Fujita T T, Byers H R, 1977. Spearhead echo and downbursts in the crash of an airliner[J]. Mon Wea Rev, 105(2): 129-146.
- Fujita T T, Smith B E, 2013. Aerial survey and photography of tornado and microburst damage[M]// Church C, Burgess D, Doswell C, et al. The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards. Washington D. C.: AGU: 479-493.
- Fujita T T, Wakimoto R M, 1981. Five scales of airflow associated with a series of downbursts on 16 July 1980[J]. Mon Wea Rev,

- 109(7):1438-1456.
- Jim C Y, Liu H H T, 1997. Storm damage on urban trees in Guangzhou, China[J]. *Landsc Urban Plan*[J], 38(1/2):45-59.
- Marshall T P, 2002. Tornado Damage Survey at Moore, Oklahoma [J]. *Wea Forecasting*, 17(3):582-598.
- McDonald J R, 2001. T. Theodore Fujita: his contribution to tornado knowledge through damage documentation and the Fujita Scale [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 82(1):63-72.
- 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.
- Meng Z Y, Yao D, Bai L Q, et al, 2016. Wind estimation around the shipwreck of Oriental Star based on field damage surveys and radar observations[J]. *Sci Bull*, 61(4):330-337.
- Texas Tech University, 2004. A Recommendation for an Enhanced Fujita Scale[R/OL]. <http://www.spc.noaa.gov/faq/tornado/ef-ttu.pdf>.
- Wakimoto R M, Murphey H V, Dowell D C, et al, 2003. The Keller-ville Tornado during VORTEX: Damage survey and Doppler radar analyses[J]. *Mon Wea Rev*, 131(10):2197-2221.
- WSEC, 2006. A recommendation for an enhanced Fujita scale (EF-scale)[R/OL]. Lubbock: Texas Tech University: 95. <http://www.depts.ttu.edu/nwi/Pubs/Fscale/EFScale.pdf>.