

郑永光, 朱文剑, 姚聃, 等. 2016. 风速等级标准与 2016 年 6 月 23 日阜宁龙卷强度估计. 气象, 42(11):1289-1303.

风速等级标准与 2016 年 6 月 23 日 阜宁龙卷强度估计^{* 1}

郑永光¹ 朱文剑¹ 姚 聃² 孟智勇³ 薛 明^{4,5}
赵 坤⁴ 伍志方⁶ 王啸华⁷ 郑媛媛⁸

1 国家气象中心, 北京 100081

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 北京大学, 北京 100871

4 南京大学, 南京 210093

5 OU CAPS, Norman, OK 73072, USA

6 广东省气象台, 广州 510080

7 江苏省气象台, 南京 210008

8 江苏省气象科学研究所, 南京 210008

提 要: 文章回顾了不同的风速等级标准, 对导致重大人员伤亡的 2016 年 6 月 23 日江苏省盐城市阜宁县龙卷灾害和 2015 年 6 月 1 日导致“东方之星”客轮翻沉事件的下击暴流灾害进行了较详细的强度评估, 探讨了已有等级标准存在的问题, 给出了未来工作展望。基于详细的现场调查资料, 评估江苏阜宁龙卷为 EF4 级, 而导致“东方之星”客轮翻沉事件的下击暴流仅为 EF1 级; 对这两个典型灾害个例的强度估计展示了 EF 等级与 F 等级之间的差异; 但阜宁龙卷导致的每一个受灾点的灾害等级还需要进一步详细评估。由于建筑物结构、植被自身状况、相应环境和致灾机制的复杂性, 风灾强度估计必然存在一定的不确定性, 且龙卷由于其复杂涡旋动力结构、气压空间分布和卷起的飞射碎片作用等因素使得强度估计的不确定性较下击暴流更大。提高风速等级评估的客观性、普适性、准确性、一致性和便捷性是评估工作的必然需求。未来还需发展综合考虑强度分布、路径长度和宽度、持续时间和移动速度等的风灾等级标准, 从而为全面评估下击暴流或者龙卷的致灾性提供基础。

关键词: 强度, 等级, 龙卷, 下击暴流, 现场调查

中图分类号: P425, P445

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.11.001

Wind Speed Scales and Rating of the Intensity of the 23 June 2016 Tornado in Funing County, Jiangsu Province

ZHENG Yongguang¹ ZHU Wenjian¹ YAO Dan² MENG Zhiyong³ XUE Ming^{4,5}
ZHAO Kun⁴ WU Zhifang⁶ WANG Xiaohua⁷ ZHENG Yuanyuan⁸

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

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

3 Peking University, Beijing 100871

4 Nanjing University, Nanjing 210093

5 OU CAPS, Norman, OK 73072, USA

6 Guangdong Meteorological Observatory, Guangzhou 510080

7 Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008

8 Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210008

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB430106)、国家自然科学基金项目(41375051)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406002)共同资助

2016 年 9 月 19 日收稿; 2016 年 10 月 14 日收修定稿

第一作者: 郑永光, 主要从事强对流天气研究. Email: zhengyg@cma.gov.cn

Abstract: This paper reviews the existing different types of wind speed scales, and rates in detail the intensity of the tornado causing heavy casualties on June 23, 2016 in Funing County of Jiangsu Province, and the intensity of the downburst on June 1, 2015, causing the “Dongfangzhixing (Eastern Star)” cruise ship overturn. Furthermore, issues of the existing wind speed scales are discussed, and future work is presented. Based on detailed damage survey data, the Funing tornado intensity is rated EF4, and the downburst causing the cruise ship overturn is only EF1. Also, the intensity rating of the two catastrophic events clearly shows the differences between EF-scale and F-scale. However, the damage at each site caused by the Funing tornado still need further rate. Due to the structure and conditions of different buildings and vegetation, the corresponding environments and the complexity of the mechanism causing damage, there must be an amount of uncertainties in the tornado or downburst intensity rating. Tornado intensity rating has more uncertainties than downburst because of the complex vortex structure and spatial distribution of air pressure of tornado, and impacts of wind-driven debris caused by tornado. Improving objectivity, applicability, accuracy, consistency, and convenience of wind speed scale is an inevitable demand of future work for intensity rating of tornado or downburst. Comprehensive wind damage scale in future also need be developed to integrate intensity distribution, path length and width, movement speeds and duration, so as to provide the basis for rating comprehensive impacts of tornado or downburst.

Key words: intensity, scale, tornado, downburst, damage survey

引 言

2016年6月23日,江苏省盐城市阜宁县和射阳县发生由龙卷导致的特大灾害,导致99人死亡、800多人受伤,大量基础设施损毁;24—27日,中国气象局派出调查组赴江苏阜宁进行现场天气调查以确定导致此次特大灾害的天气成因、强度和灾害分布。龙卷是小概率事件,达到或者超过F4(EF4)级的龙卷发生概率更低。全球每年大约发生2000多个龙卷。美国是龙卷发生频率最高的国家,每年可超过1200个,其中1950—2011年每年平均发生超过10个F4(EF4)和F5(EF5)级的龙卷。范雯杰等(2015)统计我国1961—2010年共记录到EF4级龙卷4次,未记录到EF5级龙卷;其中1969年8月29日EF4级龙卷导致河北霸县和天津市150人死亡,1977年4月16日湖北安陆等地EF3级龙卷造成118人死亡,1978年4月14日陕西省乾县EF3级龙卷造成84人死亡。

由于龙卷的时空尺度小,因此几乎没有气象观测站直接观测到龙卷,更不可能观测到龙卷中的最强风速以及风场水平分布;如果强龙卷直接袭击气象测站,其观测设备几乎肯定会被摧毁。对于发生

在距离业务多普勒天气雷达站点100 km以内的超级单体龙卷,雷达通常能够观测到中气旋或者龙卷式涡旋特征(Tornadic Vortex Signature, TVS)结构,但由于雷达观测资料的时空分辨率等的制约,尚不能用这些观测估计地面风速来得到龙卷强度(Doswell et al, 2009);虽然美国车载移动多普勒天气雷达观测到了部分强龙卷个例的近地面风速分布,但目前与可预见的将来还不可能用其来对龙卷进行业务化观测。因此,现场天气调查仍是分析和确认龙卷和下击暴流等导致的灾害性大风强度和精细分布的最重要必需手段。通过航拍和现场拍摄灾情照片与视频、走访目击者等可以确定灾害发生的时间和地点、灾情、风向、灾害路径长度和宽度等,并可给出灾害持续时间、估计不同地点的最大风速和风灾级别。

Fujita于1971年提出了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, 1974; 1978; Bunting et al, 1993; Doswell, 2003; Doswell et al, 2009; Frelich et al, 2012; Edwards et al, 2013; Atkins et al, 2014)。Fujita(1981)总结了强对流风暴导致的龙卷大风、直线大风¹和下击暴流²所致大风共三

¹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。

²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。

类灾害性大风的的地面流场特征: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。Fujita (1981)也指出,仅从地面灾害调查来看,有时很难区分是弱龙卷还是直线大风或者下击暴流所导致的大风灾害。

我国从 20 世纪 70 年代起就有文献给出了龙卷风灾调查结果(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、灾害损失等部分情况;Meng 等(2014)给出了 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨期间发生的一次龙卷过程的详细调查结果;2015 年 6 月 1 日下击暴流导致“东方之星”客轮翻沉使得 442 人遇难,中国气象局派出调查组赴事发长江两岸进行了现场天气调查(郑永光等,2016;Meng et al, 2016),郑永光等(2016)和 Meng 等(2016)分别基于现场调查结果给出了风灾的多尺度特征和风速估计;朱文剑等(2016)详细分析了 2015 年 10 月 4 日“彩虹”台风龙卷的风灾特征和雷达资料特征。此外,我国也有较多关于龙卷气候特征、环境条件和雷达资料特征等的研究工作(俞小鼎等,2008;王毅等,2012;李改琴等,2014;周后福等,2014;范雯杰等,2015;郑媛媛等,2015;朱江山等,2015;Yao et al, 2015;陈元昭等,2016;Xue et al, 2016;曾明剑等,2016)。但总体来看,我国对龙卷的研究还不够深入,如已有龙卷强度等级标准对我国的适用性、龙卷的生成和发展机制等,最近,郑永光等(2015)对包括龙卷天气在内的强对流天气机理、监测和预报技术等进行了综述。

本文首先回顾国际上已有的风速等级标准,然后基于现场天气调查结果评估 2016 年江苏阜宁龙卷和 2015 年“东方之星”翻沉事件周边区域的风灾强度,从而进一步探讨这些等级标准存在的问题,并对未来工作进行展望,以加深对风灾强度等级估计的认识,为未来发展适合我国国情的风灾等级以及相关调查和评估工作提供参考。

1 风速等级

如前所述,由于气象观测的局限性,目前很难直接对小尺度风灾的风速大小给出定量观测,因此,现场天气调查仍是目前确定小尺度风灾强度的主要手段。通过现场调查确定风灾强度可以满足公众和相

关研究人员的了解风灾强度的需求,可以了解风速与建筑物结构性能的关系,并可以从气候角度了解和评估龙卷和下击暴流等导致的小尺度风灾给公众和基础设施所带来的风险。但由于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。

1.1 蒲福风级

最早的规范估计风速的等级是蒲福风级,又称为 B 等级,由英国人弗朗西斯·蒲福(Francis Beaufort)于 1805 年综合前人的工作成果,根据风对海面的影响程度而定出的风速等级,19 世纪 50 年代蒲福风级应用于风对陆地物体的影响程度估计。蒲福风级也是我国日常天气预报中使用的风速等级。最初的蒲福风级总共 13 个等级,为 0~12 级;12 级风速为 $32.7 \sim 36.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。1946 年,蒲福风级扩展为 18 个等级,最大为 17 级($56.1 \sim 61.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),但 13~17 级主要用于估计热带气旋风速。

蒲福风级与风速有以下经验关系:

$$v = 0.836 B^{3/2}$$

式中, v 为地面 10 m 风速,单位 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; B 为蒲福风级。

1.2 T 等级

T 等级又称为 TORRO 等级,由蒲福风级扩展而来,是英国人 G. Terence Meaden 于 1972—1975 年设计,专门用来评估龙卷强度的风速等级,但 T 等级也可以用于任何风速估计(Elsom et al, 2001),包括下击暴流、热带气旋、温带气旋等。T 等级主要应用于英国和部分欧洲国家。目前的 T 等级将风速共划分为 11 个级别,分别为 T0 至 T10;不过,T 等级是开放的,未来也可能会根据需要增加新的级别。T0 风速为蒲福风级 8 级,平均为 $18.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (蒲福 8 级风速范围为 $17.2 \sim 20.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$);T10 风速为 $121 \sim 134 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;两个级别之间的平均风速差为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

T 等级与风速和蒲福风级分别有以下关系:

$$v = 2.365 (T + 4)^{3/2}$$

$$T = B/2 - 4$$

式中, v 为地面 10 m 处 3 s 平均阵风风速,单位 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; T 为 T 等级; B 为蒲福风级。

1.3 F 等级

Fujita 在美国(Fujita et al, 1970)开创性地开展

了现场天气调查工作,他通过 1968—1970 年的龙卷观测试验于 1971 年提出了藤田(Fujita)等级(Fujita, 1971),又称为藤田-皮尔森(Fujita-Pearson)等级或者 F 等级,用来估计龙卷和台风等导致的风灾强度。20 世纪 70 年代初,F 等级被美国天气局采用作为估计龙卷强度的官方标准。需要指出的是,Fujita (1971)也基于龙卷影响面积提出了从小到大不同尺度龙卷的划分标准,并根据龙卷强度和尺度来综合判定龙卷的致灾性。F 等级和 T 等级两者是分别独立提出的用于估计龙卷强度的风速等级。F 等级在除了英国以外的世界各地得到了广泛使用。

Fujita(1971)最初提出的 F 等级共有 13 个级别,分别为 0 至 12 级。F0 起始风速为 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (蒲福风级 8 级),F1 起始风速为 $33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (蒲福风级 12 级),F12 起始风速为声速 $330 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (1 马赫);两个级别之间的平均风速差为 $21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。目前,仅 F0~F5 级用于龙卷、下击暴流等导致的风灾强度估计。从理论上分析,龙卷导致的最大极端地面风速可以达到或者可能超过 F5 级(Fiedler et al, 1986;Fiedler, 1998),但目前尚没有实际地面观测来证实,不过多普勒天气雷达观测到一些强龙卷个例距地面 100 m 高度以下的最大风速可超过 $120 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,可达 $140 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Bluestein et al, 1993;Wurman et al, 2007)。

F 等级与蒲福风级、马赫数³的关系如图 1。F 等级与风速有以下关系:

$$v = 6.3(F + 2)^{3/2}$$

式中, v 为地面 10 m 最快 1/4 mile(约 400 m,1 mile $\approx 1.6 \text{ km}$)平均风速⁴,单位 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; F 为 F 等级。

T 等级与 F 等级有近似两倍的关系(Dotzek et al, 2003; Meaden et al, 2007; Feuerstein et al, 2011),被 Meaden 称为 TF 等级(Meaden, 2004),即:

$$T = F \times 2$$

式中, T 为 T 等级, F 为 F 等级。

综合 Fujita(1971;1981)工作,确定风速 F 等级的标准如表 1。对于龙卷而言,F0 和 F1 级龙卷属于相对较弱的龙卷;F2 至 F3 级龙卷则属于强(strong)龙卷;F4 和 F5 级龙卷则属于猛烈(violent)龙卷;而 F3~F5 级龙卷又属于强烈(intense)龙卷,F2~F5

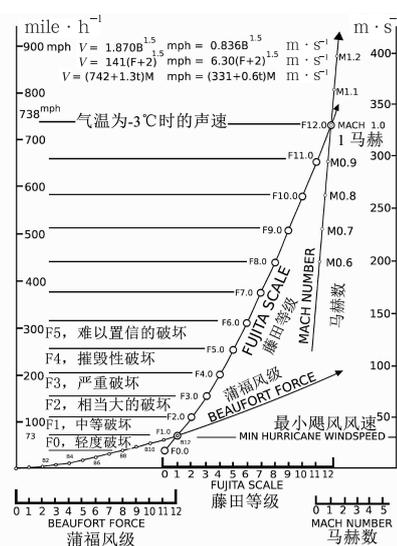


图 1 F 等级与蒲福风级、马赫数关系曲线(Fujita, 1971)

Fig. 1 Relationship of F-scale with Beaufort wind scale and Mach number (Adapted from Fujita, 1971)

级龙卷又称为有重大影响的(significant)龙卷。需要指出的是,美国在灾害调查发现的沥青路面被剥掉(scouring)这一灾害现象(Doswell, 2003)通常被认为是至少 F2 级龙卷的灾害标识,但在 F 等级中并未列出。

1.4 EF 等级

虽然 F 等级得到了广泛应用,但使用 F 等级进行风速估计也存在很多问题。比如 F 等级没有进行过校准,尤其对 F3~F5 级的龙卷风速存在明显的高估(Doswell et al, 2009)、低等级的龙卷风速存在低估,无法估计没有灾害标识物(DI)区域(比如空旷地带)的致灾风速等级,主要的 DI 是结构良好的框架房屋等。因此,美国得克萨斯技术大学(TTU)风科学和工程中心(Wind Science and Engineering Center)联合多个部门专家从 2000 年起对 F 等级进行修订,称为改进的藤田等级,又称为 EF 等级(表 2)。

EF 等级主要调整了 F 等级每一级别龙卷所对应的风速上下限,并采用了 28 类 DI,且每一类 DI 给出了多个灾害等级(DoD);DI 4(双倍宽的结构房屋)

³ 马赫数是流体力学中表示物体速度与声速的比值,是一个无量纲数。1 马赫即为 1 倍音速。

⁴ Fujita (1971) 在 F 等级中定义的风速指的是“最快 1/4 mile(约 400 m)”平均风速。对于风速 60 mph ($26.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $1 \text{ mph} = \text{mile} \cdot \text{h}^{-1}$),“最快 1/4 mile”平均风速对应于 15 s 平均值;对于风速 200 mph ($88.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),“最快 1/4 mile”平均风速对应于 4.5 s 平均值。美国的标准地面风速指的是 1 min 平均值,而我国一般指的是 2 min 平均值。

表 1 F 等级风速标准

Table 1 Fujita wind speed scale

F 等级	最快 1/4 mile(约 400 m) 平均风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	可能的灾害
F0	18~32	轻度破坏。对电视天线和烟囱造成一些破坏;刮断树木细枝;刮倒浅根树;毁坏商店招牌。
F1	33~49	中等破坏。刮掉屋顶表层;窗户破坏;活动房屋被吹离地基或掀翻;一些树被连根拔起或者折断;行驶的汽车被推离路面。
F2	50~69	相当大的破坏。刮走结构房屋的屋顶;摧毁活动住房;掀翻火车车厢;连根拔起或者折断大树;产生轻的飞射物;汽车被吹离公路。
F3	70~92	严重破坏。结构良好或者坚固房屋的屋顶被刮走和部分墙壁倒塌;一些农村建筑物被彻底摧毁;掀翻火车;森林中大多数树木被连根拔起或者折断或者夷平;汽车被卷离地并被抛起。
F4	93~116	摧毁性破坏。整个框架结构房屋被夷平成碎片;钢结构被严重破坏;基础不牢的建筑物被刮走一段距离;汽车或者火车被抛向空中一段距离,产生大的飞射物。
F5	117~142	异乎寻常、难以置信的破坏。结实的框架结构房屋被从地基抛起,并被破坏;钢筋混凝土结构被严重破坏;产生汽车大小的飞射物,抛射距离超过 100 m;树木树叶被剥光和被剥皮 ⁵ ;出现难以置信的现象。
F6~F12	143~330	无法想象的或者不可思议的破坏。

表 2 F 等级与 EF 等级风速对比

Table 2 Comparison of F-scale and EF-scale wind speeds

F 等级	F 等级		EF 等级	EF 等级	
	最快 1/4 mile(约 400 m) 平均风速/ mph	最快 1/4 mile(约 400 m) 平均风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$		3 s 平均阵风 风速/ mph	3 s 平均阵风 风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
F0	40~72	18~32	EF0	65~85	29~37
F1	73~112	33~49	EF1	86~110	38~49
F2	113~157	50~69	EF2	111~135	50~60
F3	158~207	70~92	EF3	136~165	61~73
F4	208~260	93~116	EF4	166~200	74~90
F5	261~318	117~142	EF5	>200	>90

的灾害等级最多,有 12 个 DoD;DI 25 和 26(通讯塔、路灯杆和电线杆等)的 DoD 最少,只有 3 个 DoD (Wind Science and Engineering Center, 2006)。EF 等级的 DI 以各类不同建筑结构的房屋或建筑物为主,共有 23 类;树木划分为硬木(hard wood,又叫做阔叶木)和软木(soft wood,又叫做针叶木)两类 DI;其他 DI 还包括电线杆、电力线铁塔、通讯铁塔等。EF 等级中去除了 F 等级中有关飞射物的 DI,也未把沥青路面被剥掉这一灾害现象列为 DI 和 DoD。还与 F 等级不同的是,EF 等级中的风速为地面 10 m 处 3 s 平均阵风风速。

不同于 B 等级、T 等级和 F 等级,EF 等级是完全基于灾害程度确定的风速等级,其不同的级别与风速没有明确的数学关系式,且不同级别风速和灾害标识物 DoD 的关系只是经验性的,并非是客观

的,尤其对于高等级的风速估计(Wind Science and Engineering Center, 2006)。虽然 EF 等级是对 F 等级的改进,但 EF 等级估计的风速与 F 等级估计的风速依然具有很好的线性相关关系,如图 2(Wind Science and Engineering Center, 2006)。

2007 年美国官方开始采用 EF 等级标准,目前已有加拿大(Sills et al, 2014)、法国、日本等国也采用了该等级标准,并根据当地的 DI 对其进行了修正。由于 EF 等级具有如此多的 DI,每一类 DI 又有多个 DoD,因此范雯杰等(2015)对 EF 等级的 DI 和 DoD 进行了归纳和总结,给出了一个简化的 EF 等级标准。但需要说明的是,范雯杰等(2015)把 Wind Science and Engineering Center 未列入 EF 等级标准的 F 等级 DI(如飞射物)列入了其归纳简化的 EF 等级标准中。

⁵Fujita 于 1971 年提出的 F 等级中把“树木树叶被剥光和被剥皮”列为 F4 级,但 Fujita 在 1981 年发表的论文中把此灾害标识列为 F5 级。T 等级则把树木被剥皮的不同程度分别确定为 T7~T11 级(大致为 F3~F5 级)(Feuerstein et al, 2011)。

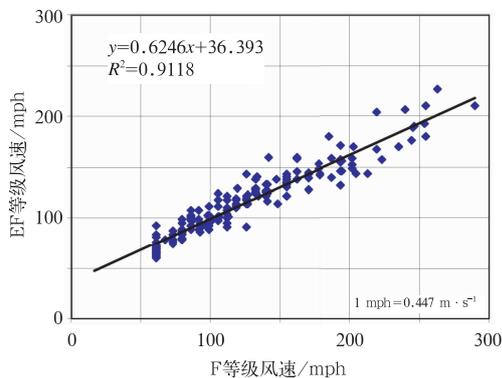


图 2 F 等级与 EF 等级风速相关曲线
(Wind Science and Engineering Center, 2006)

Fig. 2 Correlation between F-scale
and EF-scale wind speeds
(Adapted from Wind Science and
Engineering Center, 2006)

1.5 S 等级

萨菲尔-辛普森(Saffir-Simpson)飓风风速等级,又称为 S 或者 SS 等级,是专门用来估计飓风风速的等级。S 等级于 1971 年开始提出,1974 年后在美国得到广泛应用;最近的修订是在 2012 年。S 等级不同于我国的热带气旋等级,其使用的是 1 min 平均风速(我国热带气旋等级采用的是 2 min 平均风速),共有 5 个等级,分别为 1 到 5 级,1 级最弱,5 级最强;S1 级风速为 $33 \sim 42.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,与我国的台风级热带气旋风速阈值标准相当,其起始风速与 F1 级相同;S5 级风速不低于 $70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,其起始风速与 F3 级相同,接近 EF4 级,大大高于我国的超强台风级热带气旋风速阈值标准($51 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,蒲福风级 16 级)。

S 等级与风速有以下近似关系:

$$v \approx 1.825 (S + 6)^{3/2}$$

式中, v 为地面 10 m 处 1 min 平均风速,单位 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;S 为 S 等级。

2 F 和 EF 等级估计实例

如前所述,2015 年 6 月 1 日由下击暴流导致的“东方之星”翻沉事件(郑永光等,2016;Meng et al, 2016)和 2016 年 6 月 23 日阜宁严重龙卷灾害都造成了巨大的社会影响,都有翔实的现场调查资料;由于 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 等级虽然尚未得到广泛采用,但其是对 F 等级的改进,因此本文主要采用 F 等

级和 EF 等级两种标准来对这两个典型实例进行强度等级估计,同时也将辅以已有文献中部分实例图片进行补充说明。对比分析这两种等级标准的估计结果还可以进一步展示它们之间的具体差异。此外,由于 T 等级与 F 等级有近似两倍的关系,因此估计得到了 F 等级,也就近似确定了 T 等级。

2.1 现场调查概况

中国气象局调查组赴湖北监利(郑永光等, 2016;Meng et al, 2016)和江苏阜宁都携带了智能手机(具有照相、录像、地图、指南针、GPS 定位等功能)、相机、GPS 定位仪和无线网络通信等装备,在现场拍摄调查的同时与周边居民进行了交流调查,并使用无人机对现场进行了航拍。

“东方之星”客轮翻沉事发江段东岸为湖北省监利县,西岸为湖南省华容县;该江段周边陆地区域包括农田和滩涂,植被种类较多。整个调查过程发现主要风灾地点 19 处,但除顺星村(风灾路径长度约 1200 m、宽度约 300 m)外的其他地点的受灾面积(不超过 $4 \times 10^4 \text{ m}^2$)都较小。这次调查使用了无人机仅对老台深水码头和四台村养猪场附近树林等部分受灾地点进行了航拍(郑永光等,2016)。

2016 年 6 月 23 日阜宁龙卷灾害区域(图 3a)东西方向长度超过 30 km,最大宽度约 4 km,最窄约 500 m,远远超过 2015 年 6 月 1 日“东方之星”客轮翻沉事件周边区域的受灾面积。阜宁受灾区域大部为农村,也有几个工厂受灾;灾区人烟较稠密,河网密布;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。这次调查使用了多架无人机对阜宁整个受灾区域进行了全面航拍。

在阜宁灾害调查过程中,调查组在阜宁县吴滩中心小学(图 3b 和 3c)发现了该学校多位教师用手机拍摄的漏斗云视频(图 3b),视频中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(图 3b 中灰色小块状分布即为碎片)。结合该视频和江苏盐城新一代多普勒雷达径向速度资料分析的中气旋和 TVS 结构(张小玲等,2016),可以完全确定这次灾害由超级单体龙卷造成。这是因为根据美国气象学会 2013 年修订的龙卷定义就是“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”(American Meteorological Society, 2013)。但需要

说明的是,由于该龙卷漏斗云尺度较大,吴滩中心小学教师拍摄的视频不可能给出类似 2015 年 10 月 4 日广东“彩虹”台风龙卷视频(朱文剑等,2016)的漏斗云全貌。

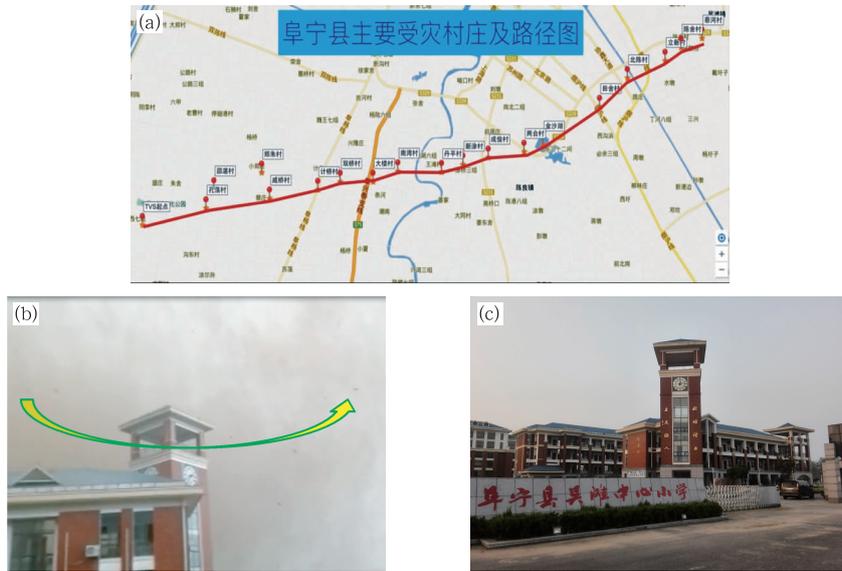


图 3 阜宁龙卷灾害路径(a)、阜宁县吴滩中心小学教师手机拍摄的龙卷漏斗云视频截图(图中箭头表示龙卷旋转方向)(b)和调查组拍摄的阜宁县吴滩中心小学(c)

Fig. 3 Damage track (a), tornado tuba cloud photo taken by one teacher in Wutan Primary School (b) and photo of Wutan Primary School (c)

2.2 F 和 EF 等级估计

F0 和 EF0 级风速会导致轻度破坏(表 1 和表 2),通常会导致树枝折断(图 4a 和 4b),一般不会对结实的房屋导致明显的损坏。对于屋顶的屋瓦被大

风吹动,但未被完全吹离原位置(图 4c),属于 F0 级灾害(F Feuerstein et al, 2011),但未达到 EF0 级;这是因为 EF0 的起始风速较 F0 级高的缘故。但如果少量(少于 20%)屋瓦被吹离原位置或者掉落地面,则为 F1 级和 EF0 级灾害。



图 4 F0 或者 EF0 级灾害

(a)湖南岳阳顺星村树枝折断;(b)江苏阜宁计桥村树枝折断;(c)湖北监利四台村被大风吹动的屋瓦(其中图 a 和 c 为 2015 年 6 月 1 日灾害;图 b 为 2016 年 6 月 23 日灾害;图 a 和 b 都为 F0 和 EF0 级灾害,图 c 为 F0 级灾害,但不是 EF0 级灾害)

Fig. 4 F0 or EF0 damage

- (a) broken tree branches at Shunxing Village, Yueyang County, Hunan Province;
- (b) broken tree branches at Jiqiao Village, Fuzhen County, Jiangsu Province;
- (c) slightly displaced tiles at Sitai Village, Jianli County, Hubei Province

(Figs. a and b occurred on 1 June 2015, and Fig. b occurred on 23 June 2016.

Figs. a and b belong to F0 and EF0 damage; and Fig. c belongs to F0 damage, but it is not EF0 damage)

F1 和 EF1 级灾害属于中等程度破坏。一些树被连根拔起或者折断、屋顶的屋瓦被刮掉都属于 F1 级灾害(图 5)。软木类树木(松树、杨树、杉树、柏树等)折断和硬木类(橡树、枫树、桦树、白蜡树)树木被连根拔起属于 EF1 级灾害,如 2015 年 6 月 1 日湖北监利四台村附近水渠两侧(图 5a)和顺星村附近(图略)杨树折断、2016 年 6 月 23 日江苏阜宁板湖文化公园附近村庄杨树折断(图 5b)。不少于 20% 屋顶屋瓦被刮掉属于 F1 级和 EF1 级灾害,如图 5c 和 5d 中为 2016 年 6 月 23 日阜宁龙卷所致;而在 2015 年 6 月 1 日长江监利段两岸村庄中发现部分房屋的少量屋瓦(图略)被吹掉,未超过 20%,因此这些房屋灾害等级估计为 F1 级,未达到 EF1 级。

F2 和 EF2 级灾害属于相当大的破坏,主要灾害标识为刮走房屋的屋顶或者折断大树(图 6)。图 6a 房屋右侧部分的屋顶被刮掉,既为 F2 级又为 EF2 级灾害。从 F 等级来看,森林中大多数树木被连根拔起或者折断或者夷平为 F3 级,图 6b 和 6c 符合这个标准;但从 EF 等级的 DI 和 DoD 标准来看,使得软木类树木折断的 3 s 平均风速下限为 88 mph ($39 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),属于 EF1 级;上限为 128 mph ($57 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),则属于 EF2 级。使得硬木类树木折断的 3 s 平均风速下限为 93 mph ($41 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),仍属于 EF1 级;上限为 134 mph ($59 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),属于 EF2 级。因此,必须是较多的较大树木折断才可能估计较高的风速,才能够达到 EF2 级灾害强度(图 6b 和 6c)。



图 5 F1 和 EF1 级灾害

(a)湖北监利四台村附近水渠两侧杨树;(b)江苏阜宁板湖文化公园附近村庄杨树;
(c)江苏阜宁王滩村房屋屋瓦被刮掉;(d)江苏阜宁计桥村房屋屋瓦被刮掉(无人机拍摄)
(图 a 为 2015 年 6 月 1 日灾害;图 b、c 和 d 为 2016 年 6 月 23 日灾害)

Fig. 5 F1 and EF1 damage

(a) snapped aspens at Sitai Village, Jianli County, Hubei Province;
(b) snapped aspens near Banhu Cultural Park, Funing County, Jiangsu Province;
(c) completely untiled roofs at Wangtan Village, Funing County, Jiangsu Province;
(d) partially untiled roofs at Jiqiao Village, Funing County, Jiangsu Province
(Fig. a occurred on 1 June 2015, and Figs. b, c and d on 23 June 2016)



图 6 江苏阜宁 2016 年 6 月 23 日 F2 或 EF2 级灾害

(a)王滩村被部分刮掉屋顶以及掀掉屋瓦的房屋;

(b)王滩村被大风吹断的大树;(c)板湖附近被大风吹断的大杨树

Fig. 6 F2 or EF2 damage on 23 June 2016 in Funing County, Jiangsu Province

(a) roof structure partly destroyed at Wangtan Village; (b) snapped large

aspens at Wangtan Village; (c) snapped large aspens near Banhu Village

F3 和 EF3 级灾害属于严重破坏,主要的灾害标识是结构良好的房屋屋顶被刮走和部分墙壁倒

塌。图 7a 和 7b 为被龙卷损毁的计桥幼儿园,图 7c 为王滩村附近损毁的房屋,从中可以看到屋顶被完

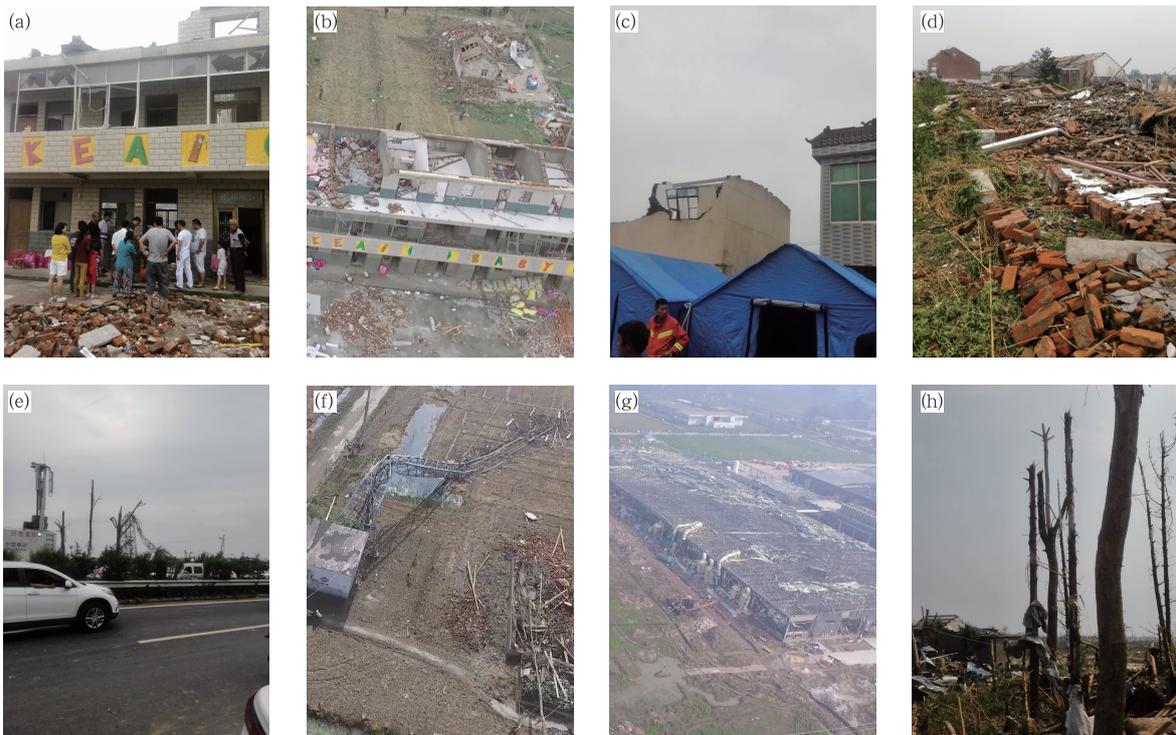


图 7 江苏阜宁 2016 年 6 月 23 日 F3 或 EF3 级灾害

(a)计桥村幼儿园(手机拍摄);(b)同图 a,但为无人机航拍;(c)王滩村损毁的房屋;

(d)王滩村完全倒塌的房屋;(e)计桥村扭曲倒塌的通信塔;(f)丹平村扭曲倒塌的电力塔(无人机航拍);

(g)北陈村附近被损坏的厂房(无人机航拍);(h)北陈村树叶被剥光和被剥皮的树木

Fig. 7 F3 or EF3 damage on 23 June 2016 in Funing County, Jiangsu Province

(a) partly destroyed kindergarten at Jiqiao Village (taken by a cell phone); (b) same as Fig. a, but taken by a drone;

(c) partly destroyed house at Wangtan Village; (d) completely destroyed houses at Wangtan Village;

(e) twisted and collapsed free-standing truss tower at Jiqiao Village; (f) twisted and collapsed metal

truss tower at Danping Village (taken by a drone); (g) destroyed industrial facilities

at Beichen Village (taken by a drone); (h) debarked aspens at Beichen Village

全刮走,第三层部分墙壁倒塌,符合 F3 和 EF3 级灾害标识特征。但需要指出的是,图 7a、7b 和 7c 中的房屋建筑结构比美国结构良好的房屋(EF 等级中的 DI 2)更结实,因此,致灾风速应当属于 EF3 级风速范围的高端。图 7d 为王滩村完全倒塌的房屋,属于砖木结构,但砖砌的屋墙未使用水泥,因此不如美国使用了水泥和砖砌墙的结构良好的房屋结实。美国结构良好的房屋完全倒塌属于 F4 和 EF4 级灾害标识,但根据 Fujita 于 1992 年提出的 F 等级估计矩阵(Fujita, 1992),应当降低一个 F 级别,因此图 7d 中灾害应估计为 F3 和 EF3 级强度。通讯塔和电力线塔(图 7e 和 7f)未归入 F 等级灾害标识;但从 EF 等级来看,完全倒塌的通讯塔或者电力线塔为 EF3 级强度;对于 T 等级,这属于 T6 级强度,相当于 F3 级强度(Feuerstein et al, 2011)。从图 7e 和 7f 还可以看到,倒塌的通讯塔和电力线塔都有明显的扭曲。图 7g 为北陈村附近被破坏的厂房,从 EF 等级标准来看,属于 DI 21 的 DoD 7,为 EF3 级强度。阜宁龙卷灾害调查也发现北陈村部分树木树叶被剥光和被剥皮的现象,从 F 等级来看,树木树叶被剥光和被剥皮(图 7h)属于 F5 级,但从 EF 等级的风速标准

来估计则仅为 EF3 级;对于 T 等级,这属于 T8~T9 级强度,相当于 F4 级强度(Feuerstein et al, 2011)。但需要说明的是,图 7h 中的树木只是上半部树皮部分被剥掉,并非整棵树完全被剥光。

F4 和 EF4 级灾害为摧毁性破坏,主要灾害标识是整个结构良好的房屋被夷平成为碎片。如前所述,由于多数阜宁灾区的受灾房屋结构不如美国结构良好的房屋结实,因此阜宁灾区中被龙卷夷平的房屋多数应被评估为 F3 级和 EF3 级灾害。但阜宁也有多座水泥砖砌和混凝土预制楼板结构二层房屋(图 8a 和 8b)的顶层完全被毁,这种房屋的墙体中并使用了较细的钢筋加固(图 8b),外墙体加贴了瓷砖,是类似美国的二层 Townhouse(EF 等级中的 DI 5)的结构,但由于阜宁的房屋未使用木质结构,因此应比后者更结实;这类阜宁的房屋也有点类似美国的初中或者高中学校的二层教学楼结构(EF 等级中的 DI 16),但房屋长度比 DI 16 小得多,估计结实程度略差。根据 EF 等级中 DI 5 和 DI 16 中,顶层完全坍塌和损毁的 DoD 风速为 133~186 mph(59~83 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),估计导致图 8a 和 8b 灾害的风速为 170~175 mph(75~78 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)左右,为 EF4 级。

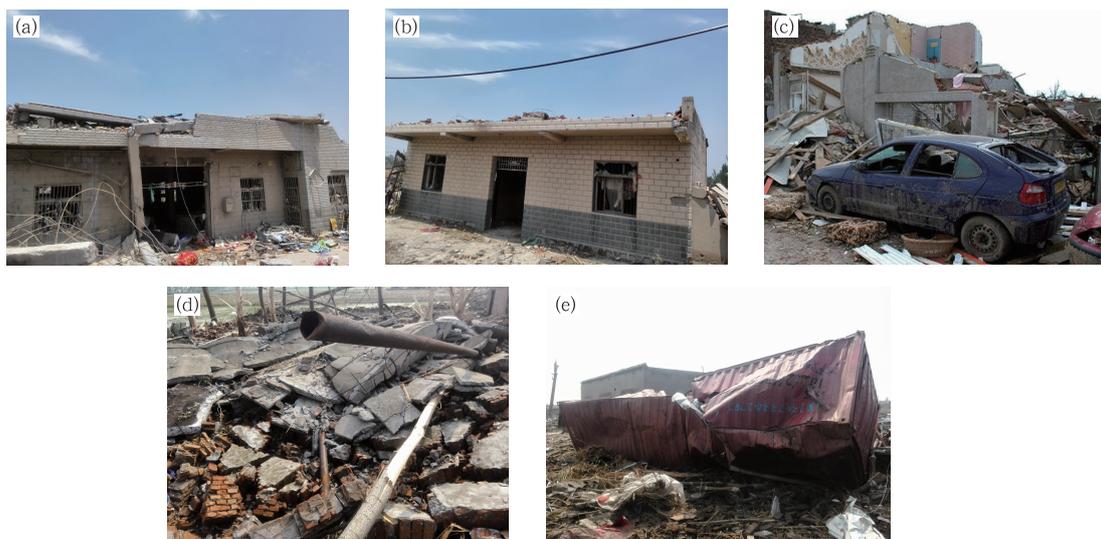


图 8 F4 或 EF4 级灾害(其中图 a、b、d 和 e 为 2016 年 6 月 23 日江苏阜宁灾害)

(a) 立新村受灾二层房屋;(b) 立新村另一受灾二层房屋;

(c) 2008 年 8 月 3 日法国一次龙卷导致的 F4 级灾害(Feuerstein et al, 2011);

(d) 蔡河村损毁的水塔;(e) 北陈村发现的被龙卷抛出 400~500 m 左右的空集装箱

Fig. 8 F4 or EF4 damage (Figs a, b, d, and e occurred on 23 June 2016 in Funing County, Jiangsu Province)

(a) top-story collapsed two-story house at Lixin Village (taken by a cell phone);

(b) same as Fig. a, but for another two-story house; (c) F4 damage caused by a tornado on

3 August 2008 in France (Feuerstein et al, 2011); (d) completely destroyed water tower at Caihe Village;

(e) twisted empty container thrown over 400—500 m away at Beichen Village

使用加拿大补充的 EF 等级的 C-3(砖和/或石结构教堂)和 C-4(结实的砖石房屋)DI 的 DoD 标准(Sills et al, 2014)来估计图 8a 和 8b 也为 EF4 级灾害。图 8c 为法国一次龙卷导致的类似图 8a 和 8b 房屋结构的 F4 级灾害(Feuerstein et al, 2011)实况,从中可看到该房屋使用了木质结构,因此其并不比图 8a 和 8b 中使用水泥预制板的房屋更结实。图 8d 为阜宁蔡河村完全倒塌的水塔,其结构为水泥砖砌和外立面全部涂抹水泥,并使用了细钢筋加固,因此判断该水塔应该与美国结构良好的房屋结实程度相近,因此也估计其为 F4 级和 EF4 级灾害。图 8e 为在北陈村发现的被龙卷抛出 400~500 m 左右空集装箱,重约 1~2 t,具有明显的扭转痕迹,如此大的飞射物为 F4(甚至 F5 级)(Doswell, 2003)和 T8 级灾害(Feuerstein et al, 2011),但如 1.4 部分所述,由于

工程人员难以估计此类灾害的风速,这未被归入 EF 等级灾害标识(Wind Science and Engineering Center, 2006),所以不能用来估计 EF 级别。

如前所述,我国尚未记录到 F5 或者 EF5 级龙卷,因此无法给出我国的相应实例。F5 或者 EF5 级灾害标识主要是结实的框架结构房屋被从地基彻底吹走(图 9a);导致图 9a 灾害的龙卷发生在 1999 年 5 月 3 日美国 Oklahoma 州,移动多普勒雷达观测到距离地面 32 m 高度的最大风速可达 $135 \pm 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Wurman et al, 2007)。从 F 等级来看,美国的评级实践中通常把完全被剥光树皮的树木(图 9b)作为 F5 级的灾害标识(Feuerstein et al, 2011),但从 EF 等级来看,则仅为 EF3 级;对于 T 等级,则属于 T10~T11 级强度(Feuerstein et al, 2011)。



图 9 F5 或 EF5 级灾害(取自 Feuerstein et al, 2011)

(a)1999 年 5 月 3 日美国 Oklahoma 州 Moore 龙卷导致的仅剩地基的房屋;(b)完全被剥皮的树木

Fig. 9 F5 or EF5 damage (Feuerstein et al, 2011)

(a) buildings blown away from foundation, seen on 3 May 1999 in Oklahoma State of the United States; (b) completely debarked solitaire tree ruins

2.3 阜宁龙卷导致的难以置信现象

调查组在阜宁现场调查过程中还发现了一些龙卷导致的难以置信现象,这些现象目前尚不能根据已有的风速等级标准进行评级或者估计风速。比如在调查过程中,调查组询问阜宁吴滩镇救灾负责人得知,有一根水泥制的电线杆被龙卷拔出,被卷走不知下落,这种现象在美国的强龙卷灾害现场调查中也曾发现过(Doswell, 2003);在北陈村调查时发现有一段电力线在强风的作用下由拇指粗紧密缠绕状态变成蓬松的缠绕状态(图 10a);大楼村多棵杨树的树干在龙卷强风及其切变作用下变成了蓬松的片状状态(图 10b);立新村(该村有如图 8a 和 8b 多座二层水泥砖砌楼房的顶层完全被毁,评估为 EF4 级

灾害)停在河道里的水泥制小船被大风吹翻倒扣在河岸边(图 10c),这可能表明龙卷导致的贴近地面的风速也非常高,也可能与龙卷风暴中的气压低、上升运动强相关,这似乎与美国龙卷灾害调查中发现的沥青路面被剥掉这种现象的形成机制类似(Doswell, 2003)。1764 年的德国 Woldegk F5 级龙卷把一个仅突出地面 0.3 m 高的橡树树桩完全拔了出来(Feuerstein et al, 2011)。2011 年 4 月 27 日美国龙卷大爆发期间,发生在 Mississippi 州 Philadelphia 附近的一个 EF5 级龙卷不仅把大片路面剥掉,更是剥掉了多块深度达 0.5 m 的草地(Knupp et al, 2014)。

需要指出的是,在对阜宁龙卷进行灾害调查的过程中,调查组发现了大量被扭曲呈麻花状的树木

和彩钢板残骸、一座信号塔(图 7e)和多座电力塔(图 7f),其旋转性风场特征已不仅仅体现在多个灾害指示物所组成的整体倒伏或损毁方向,而是集中

展现于灾害物个体的受损情况,其旋转之强烈在国内龙卷风灾调查中亦十分罕见。



图 10 江苏阜宁 2016 年 6 月 23 日龙卷导致的难以置信现象
(a)北陈村被强风导致的蓬松状电线;(b)大楼村呈片状的杨树主干;
(c)立新村被强风吹到河岸倒扣的水泥制小船

Fig. 10 Incredible damage on 23 June 2016 in Funing County, Jiangsu Province

(a) fluffy electric line caused by violent winds at Beichen Village;

(b) flaked aspen trunk at Dalou Village;

(c) completely capsized cement boat thrown from water to a bank at Lixin Village

3 讨论和展望

如前所述,要估计龙卷、下击暴流等导致的大风风速等级,由于直接测量这些小尺度风速不具有可行性,因此需要详细的地面现场调查资料来进行分析受灾房屋的结构、树木的状况和灾害程度等,从而估计最大可能风速。虽然蒲福风级、F 等级、T 等级与风速有明确的数学关系,而 EF 等级与风速没有明确的数学关系,但在实践中,由于缺少龙卷和下击暴流等的直接测风数据,因此基于灾害程度来估计这些风灾的强度等级是必不可少的。需要强调的是,既然是根据灾害程度进行估计,必然存在不确定性,而且由于建筑结构和植被等不同灾害标识物的差异和致灾机制的复杂性,这种不确定性还可能会比较大。因此,虽然 F 等级、T 等级和 EF 等级中不同级别的风速范围并没有重叠,其精确度看似为 1 mph 或者 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,但实践中对风速的估计误差是要远大于这个数值。Fujita 在 1992 年就已经意识到不同的建筑物结构,导致其相同程度损坏的风速是不同的,因此 Fujita 提出了一个共有 6 级的基于灾害程度的 F 等级,加以配合建筑物结构的结实程度来估计风灾的 F 等级(Fujita, 1992)。Frelich 等

(2012)也明确指出 EF 等级中关于树木灾害的 DoD 并不能完全满足风灾强度等级估计需要,实际工作中需要综合更多的树木本身和环境等因素来进行评估判断。

由于蒲福风级、F 等级、T 等级与风速的 $3/2$ 方的线性关系并没有明确的物理含义,因此 Dotzek (2009)提出了一个新的风速等级——E 等级。E 等级由具有明确物理含义的质量通量密度、能量密度(压力)或者能量通量密度导出(Dotzek, 2009)。但如前所述,基于灾害程度的风速估计必然存在较大误差,因此即使采用 E 等级,其估计误差同样不会比其他等级标准的估计减小。目前,E 等级尚未得到实际应用。

虽然 EF5 级风速范围显著低于 F 等级中的 F5 级,但 Doswell 等(2009)根据移动雷达测得的距地表 100 m 内的最大龙卷风速达到或者超过 $140 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 这一事实,认为强龙卷会有可能产生 F5 级上限 $142 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 这样的极端地面风速。在美国的龙卷等级评估实践中,确实也会根据移动雷达测得的风速来调整龙卷的 EF 等级,比如美国 Oklahoma 州 El Reno/Piedmont 2011 年 5 月 24 日龙卷强度的估计(Edwards et al, 2013)。未来如何更好地使用雷达资料来客观估计龙卷强度,仍将是一个难题。

虽然 EF 等级已经具有较多种类的灾害标识物和灾害等级,但由于不同国家的建筑物结构不同,还有一些灾害标识用来估计风速存在困难,比如大的抛射物、水泥电线杆、电力线、水塔等这些灾害标识物并未列入 EF 等级中,因此 EF 等级还需要不同的国家根据具体情况进行修改补充完善,增加具有代表性的灾害标识物,比如加拿大(Sills et al, 2014)就对其进行了补充。因此,我国气象部门也需要联合多个专业部门在已有风速等级基础上制定适合我国国情的风速等级标准。

Doswell 等(2009)提出估计龙卷强度的等级标准要具有广泛应用性、准确性和一致性。广泛应用性能够保证在世界上任一个国家都能适用,因此需要不同国家工程和气象专家的广泛参与;准确性是保证强度估计可靠性的基础,因此需要等级标准增加客观性、减少经验性,但这也是最难于实现的任务;一致性能够使得能够对龙卷强度进行气候特征、长时期变化分析,也使得发生在不同国家或者地区的龙卷能够进行强度对比。但由于灾害标识物的差异性和致灾机制的复杂性,这些要求都会使得龙卷强度等级标准是一个非常复杂的系统,因此其本身就可能不具有便利性、简捷性等特点以方便具体实施,但我们可以制作简单方便的软件系统或者手机 APP 软件,以用于具体评估过程中,从而提高可操作性。

通常人们用最大强度来表示下击暴流或者龙卷的强度,并未使用平均强度,例如前文评估 2016 年 6 月 23 日阜宁龙卷强度为 EF4 级,表示其达到的最大强度为 EF4 级,但事实上其造成更多的灾害为 EF1、EF2 或者 EF3 级(图 5、图 6 和图 7)。人们也已经意识到下击暴流或者龙卷的强度仅是其致灾性的一个方面(Forbes et al, 2001),比如 Fujita (1971)就综合考虑龙卷的强度和尺度来评估龙卷的致灾性,核电厂厂址选择的龙卷评估(国家核安全局,1991)、Thompson 等(1998)和 Agee 等(2014)设计的龙卷灾害指数都是既考虑了龙卷强度又考虑了路径长度和宽度。事实上,下击暴流或者龙卷的持续时间和移速不同,其致灾性也不同。因此,基于翔实的现场调查和无人机航拍资料,下一步还需要对 2016 年 6 月 23 日阜宁龙卷导致的灾害进行更详细的评估,给出每一个受灾点的灾害等级,从而给出阜宁龙卷的强度空间分布特征,并评估其总体致灾性。

通常超级单体龙卷强度较强(Davies-Jones

et al, 2001; Agee et al, 2009; Bluestein, 2013),而下击暴流最大强度仅可达 F3 级(Fujita et al, 1981)。已有较多文献(如 Fujita, 1978; Forbes et al, 1983; Wakimoto, 1983; Kessinger et al, 1988; Forbes et al, 2001; Davies-Jones et al, 2001; Wilson et al, 2001; Bluestein et al, 2003; Atkins et al, 2005; Trapp et al, 2005; Agee et al, 2009)给出了下击暴流和龙卷同时导致灾害的个例或者气候分布特征。Fujita(1978)在美国一次大范围龙卷和下击暴流过程现场调查中发现了 10 个下击暴流、17 个微下击暴流和 18 个龙卷。因此,龙卷灾害经常同时伴随下击暴流灾害,从而我们也需要进一步分析阜宁龙卷中是否存在下击暴流灾害及其灾害强度。

与下击暴流显著不同的是,龙卷旋转性非常强,中心气压低,与环境之间的气压梯度大,水平风速大,垂直上升运动也非常强(与水平风速同量级),风水平切变大;而且龙卷中会产生多个抽吸涡旋(Fujita, 1981),而抽吸涡旋的风速可达母体涡旋的 1.3~2 倍(Fiedler et al, 1986; Fiedler, 1998)。由于龙卷涡旋对建筑物的动力作用以及建筑物内部与龙卷之间气压梯度力的作用,加之在空中旋转飞射的物体残骸碎片作用和建筑物本身结构的复杂性,因此龙卷的致灾机制较下击暴流更为复杂,其强度估计也存在更大的不确定性。

4 结 论

本文系统总结了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。蒲福风级、T 等级、F 等级和 S 等级都与风速有一个明确的数学关系,但 EF 等级是完全基于灾害的等级,其与风速没有明确的数学关系。还需要指出的是,这些风速等级中所使用的平均风速有所不同:T 等级和 EF 等级为 3 s 平均风速,F 等级为最快 1/4 mile(约 400 m)平均风速,S 等级为 1 min 平均风速。

通过现场调查资料分析估计,2016 年 6 月 23 日江苏阜宁龙卷强度为 EF4 级,这是我国自 1961 年以来的第五个 EF4 级龙卷;而 2015 年 6 月 1 日导致“东方之星”客轮翻沉事件的下击暴流强度仅为 EF1 级。EF4 级龙卷在我国非常罕见,EF5 级龙卷在我国尚未记录到。阜宁龙卷也导致了一些令人难

以置信的现象。通过这两个灾害实例对比分析了 EF 等级与 F 等级的估计结果,进一步展示了这两种等级标准之间的差异。

翔实的现场调查依然是估计下击暴流或者龙卷强度的主要手段,而无人机航拍能够提供更大视角范围的灾害状况资料,已经成为现场调查不可缺少的重要工具。由于灾害标识物结构和致灾机制的复杂性,风灾强度的估计必然存在一定的不确定性,尤其龙卷强度的估计较下击暴流有更大的不确定性。如何应用业务天气或者移动雷达资料来客观估计龙卷强度仍是未来的一项艰巨任务。

目前的风灾强度等级仍需进一步完善;增加灾害标识物和灾害等级,提高其客观性、普适性、准确性、一致性和便捷性是风灾评估工作的必然需求。但要全面评估下击暴流或者龙卷的致灾性,需要综合考虑强度、路径长度和宽度、持续时间和移动速度等更多因素。因此,未来需要详细评估 2016 年 6 月 23 日阜宁龙卷导致的每一个受灾点的灾害等级,并结合其他致灾因素来评估其总体致灾性。

致 谢: 特别感谢中国气象局、江苏省气象局、江苏省气象台、江苏省阜宁县气象局、广东省佛山市龙卷预警中心等单位对现场调查的大力支持。感谢国家气象中心毕宝贵研究员、金荣花研究员和张小玲研究员、中国气象局干部培训学院俞小鼎教授、中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室梁旭东研究员等给予大力指导和支持;感谢江苏省气象局杨金彪对现场调查的指导帮助;感谢广东省佛山市龙卷预警中心李兆慧、北京大学白兰强和张慕容、南京大学孙世玮、邹万峰和王明筠在现场调查中做出的重要贡献;感谢中国气象报社贾静渐给予现场调查的协助。

参考文献

陈元昭,俞小鼎,陈训来,等. 2016. 2015 年 5 月华南一次龙卷过程观测分析. *应用气象学报*, 27(3): 334-341.

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. *气象*, 40(6): 668-677.

范雯杰,俞小鼎. 2015. 中国龙卷的时空分布特征. *气象*, 41(7): 793-805.

国家核安全局政策法规处. 1992. 核电厂厂址选择的极端气象事件 (HAF0112)(不包括热带气旋). 北京: 中国法制出版社, 272-276, 764-771.

李改琴,许庆娥,吴丽敏,等. 2014. 一次龙卷风天气的特征分析. *气象*, 40(5): 628-636.

辽宁丹东市气象台. 1975. 一次龙卷风的调查分析. *气象*, 1(8): 12-13.

林大强,刘汝贤,刘宝利. 1984. 一次陆龙卷接地的调查. *北方天气文集*, 5: 167-170.

王毅,郑媛媛,张晓美,等. 2012. 夏季安徽槽前形势下龙卷和非龙卷型强对流天气的环境条件对比研究. *气象*, 38(12): 1473-1481.

杨起华,陈才田,吴沐良. 1978. 一次龙卷风的调查及浅析. *气象*, 4(4): 16-17.

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. *大气科学*, 32(3): 508-522.

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. *气象*, 42(3): 280-293.

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. *气象*, 42(11): 1304-1314.

郑永光,田付友,孟智勇,等. 2016. “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. *气象*, 42(1): 1-13.

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. *应用气象学报*, 26(6): 641-657.

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. *气象*, 41(8): 942-952.

周后福,刁秀广,夏文梅,等. 2014. 江淮地区龙卷超级单体风暴及其环境参数分析. *气象学报*, 72(2): 306-317.

朱江山,刘娟,边智,等. 2015. 一次龙卷生成中风暴单体合并和涡旋特征的雷达观测研究. *气象*, 41(2): 182-191.

朱文剑,盛杰,郑永光,等. 2016. 1522 号台风“彩虹”龙卷现场调查与中尺度特征分析. *暴雨灾害*, 2016, 35(5): 403-414.

Agee E, Childs S. 2014. Adjustments in tornado counts, F-scale intensity, and path width for assessing significant tornado destruction. *J Appl Meteor Climat*, 53(6): 1494-1505.

Agee E, Jones E. 2009. Proposed conceptual taxonomy for proper identification and classification of tornado events. *Wea Forecasting*, 24: 609-617.

American Meteorological Society. 2013. Tornado. Glossary of Meteorology. <http://glossary.ametsoc.org/wiki/tornado>.

Atkins N T, Bouchard C S, Przybylinski R W, et al. 2005. Damaging surface wind mechanisms within the 10 June 2003 Saint Louis bow echo during BAMEX. *Mon Wea Rev*, 133(8): 2275-2296.

Atkins N T, Butler K M, Flynn K R, et al. 2014. An integrated damage, visual, and radar analysis of the 2013 Moore, Oklahoma, EF5 tornado. *Bull Amer Meteor Soc*, 95: 1549-1561.

Bluestein H B. 2013. *Severe Convective Storms and Tornadoes: Observations and Dynamics*. Springer-Praxis.

Bluestein H B, Ladue J G, Stein H, et al. 1993. Doppler radar wind spectra of supercell tornadoes. *Mon Wea Rev*, 121: 2200-2222.

Bluestein H B, Weiss C C, Pazmany A L. 2003. Mobile Doppler radar observations of a tornado in a supercell near Bassett, Nebraska, on 5 June 1999. Part I: Tornadogenesis. *Mon Wea Rev*, 131: 2954-2967.

Bunting W F, Smith B E. 1993. A guide for conducting convective windstorm surveys. NOAA Tech Memo NWS SR-146, 44.

Davies-Jones R, Trapp R J, Bluestein H B. 2001. Tornadoes and tornadic storms. *Severe Convective Storms*, Meteor Monogr, No. 50, Amer Meteor Soc: 167-221.

Doswell C A. 2003. A guide to F-scale damage assessment. NOAA/NWS, 94. <http://www.wdtb.noaa.gov/courses/ef-scale/les->

- son2/FinalNWSFscaleAssessmentGuide.pdf.
- Doswell C A, Brooks H E, Dotzek N. 2009. On the implementation of the enhanced Fujita scale in the USA. *Atmos Res*, 93:554-563.
- Dotzek N. 2009. Derivation of physically motivated wind speed scales. *Atmos Res*, 93:564-574.
- Dotzek N, Grieser J, Brooks H E. 2003. Statistical modeling of tornado intensity distributions. *Atmos Res*, 67/68(3):163-187.
- Edwards R, LaDue J G, Ferree J T, et al. 2013. Tornado intensity estimation: Past, present, and future. *Bull Amer Meteor Soc*, 94: 641-653.
- Elsom D M, Meaden G T, Reynolds D J, et al. 2001. Advances in tornado and storm research in the United Kingdom and Europe: The role of the Tornado and Storm Research Organisation. *Atmos Res*, 56(1-4):19-29.
- Feuerstein B, Groenemeijer P, Dirksen E et al. 2011. Towards an improved wind speed scale and damage description adapted for Central Europe. *Atmos Res*, 100:547-564.
- Fiedler B H. 1998. Wind-speed limits in numerically simulated tornadoes with suction vortices. *Quart J Roy Meteor Soc*, 124:2377-2392.
- Fiedler B H, Rotunno R. 1986. A theory for the maximum wind speeds in tornado-like vortices. *J Atmos Sci*, 43(21):2328-2340.
- Frelich L E, Ostuno E J. 2012. Estimating wind speeds of convective storms from tree damage. *Electronic J Severe Storms Meteor*, 7(9):1-19.
- Forbes G S, Bluestein H B. 2001. Tornadoes, tornadic thunderstorms, and photogrammetry: A review of the contributions by T T Fujita. *Bull Amer Meteor Soc*, 82:73-96.
- Forbes G S, Wakimoto R M. 1983. A concentrated outbreak of tornadoes, downbursts and microbursts, and implications regarding vortex classification. *Mon Wea Rev*, 111:220-236.
- Fujita T T. 1971. Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity. SMRP Research Paper, vol. 91. University of Chicago. 42pp.
- Fujita T T. 1974. Jumbo tornado outbreak of 3 April 1974. *Weatherwise*, 27:116-126.
- Fujita T T. 1978. Manual of downburst identification for Project NIMROD. SMRP Research Paper 156, University of Chicago, 104. <http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19780022828>.
- Fujita T T. 1981. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales. *J Atmos Sci*, 38:1511-1534.
- Fujita T T. 1992. *Mystery of Severe Storms*. Chicago: Chicago University Press, 298.
- Fujita T T, Bradbury D L, Van Thullenar C F. 1970. Palm Sunday tornadoes of April 11, 1965. *Mon Wea Rev*, 98:29-69.
- Fujita T T, Wakimoto R M. 1981. Five scales of airflow associated with a series of downbursts on 16 July 1980. *Mon Wea Rev*, 109:1438-1456.
- Kessinger C J, Parsons D B, Wilson J W. 1988. Observations of a storm containing mesocyclones, downbursts, and horizontal vortex circulations. *Mon Wea Rev*, 116:1959-1982.
- Knupp K R, Murphy T A, Coleman T A, et al. 2014. Meteorological overview of the devastating 27 April 2011 tornado outbreak. *Bull Amer Meteor Soc*, 95:1041-1062.
- Meaden G T. 2004. Wind speed scales: Beaufort, T-scale and Fujita's scale theoretical basis behind the scales. http://www.torro.org.uk/ECSS_Slide_Show/2004%20SPAIN%20ECSS%20Post-FINAL%20slide%20show.html.
- Meaden G T, Kochev S, Kolendowicz L, et al. 2007. Comparing the theoretical versions of the Beaufort scale, the T-Scale and the Fujita scale. *Atmos Res*, 83(2/3/4):446-449.
- Meng Z, 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. *Wea Forecasting*, 29:702-724.
- Meng Z, Yao D, Bai L, et al. 2016. Wind estimation around the shipwreck of Oriental Star based on field damage surveys and radar observations. *Sci Bull*, 61(4):330-337.
- Sills D M L, McCarthy P J, Kopp G A. 2014. Implementation and application of the EF-scale in Canada, 27th Conference on Severe Local Storms, Madison, WI.
- Thompson R L, Vescio M D. 1998. The destruction potential index-A method for comparing tornado days. Preprints, 19th Conf on Severe Local Storms, Minneapolis, MN, Amer Meteor Soc, 280-282.
- 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. 1983. The west bend, Wisconsin storm of 4 April 1981: A problem in operational meteorology. *J Climate Appl Meteor*, 22(1):181-189.
- Wilson J W, and Wakimoto R M. 2001. The discovery of the downburst: T. T. Fujita's contribution. *Bull Amer Meteor Soc*, 82(1): 49-62.
- Wind Science and Engineering Center. 2006. A recommendation for an enhanced Fujita scale (EF scale). Wind Science and Engineering Center Rep, Texas Tech University, Lubbock, TX, 95. <http://www.spc.noaa.gov/faq/tornado/ef-ttu.pdf>.
- Wurman J, Alexander C, Robinson P, et al. 2007. Low-level winds in tornadoes and potential catastrophic tornado impacts in urban areas. *Bull Amer Meteor Soc*, 88(1):31-46.
- Xue M, Zhao K, Wang M, et al. 2016. Recent significant tornadoes in China. *Adv Atmos Sci*, 33(11):1209-1217.
- Yao Y, Yu X, Zhang Y, et al. 2015. Climate analysis of tornadoes in China. *J Meteor Res*, 29(3):359-369.