

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.

“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*

郑永光¹ 田付友¹ 孟智勇² 薛明^{3,4} 姚 聘²
白兰强² 周晓霞¹ 毛 旭¹ 王明筠³

1 国家气象中心, 北京 100081

2 北京大学, 北京 100871

3 南京大学, 南京 210093

4 OU CAPS, Norman, OK 73072, USA

提 要: 2015 年 6 月 1 日 21:30 左右长江湖北监利段发生“东方之星”客轮翻沉特大事故。本文根据事发周边陆地区域现场天气调查结果, 结合卫星和雷达观测资料分析认为, 6 月 1 日 21:00—21:40 左右事发江段和周边区域发生了下击暴流导致的强烈大风灾害, 最强风力超过 12 级, 并具有空间分布不连续、多尺度和强灾害时空尺度小等特征。事发周边区域北部受中气旋影响陆地区域(顺星村、老台深水码头、四台村养猪场附近、新沟子养鸡场附近等)灾情较南部阵风锋及其后侧下击暴流影响的陆地区域更为显著。综合雷达观测资料和现场调查资料分析判断多数调查点灾害为显著微下击暴流所致, 其中老台深水码头有龙卷发生的可能。导致此次风灾的强对流风暴气流具有显著的多尺度性; 事发周边区域北部的四台村养猪场附近树林中同时发生了多条相邻的微下击暴流条迹, 呈现出辐散和辐合交替分布的特征, 展示了此次强对流风暴中大气运动的复杂分布特点。虽然下击暴流会伴随中小尺度的涡旋特征, 但此次现场调查发现的与下击暴流相联系的辐合特征水平尺度仅几十米, 远小于弓形回波两端的书挡涡旋或者中涡旋等几千米级的水平尺度。

关键词: 现场调查, 下击暴流, 龙卷, 涡旋, 多尺度

中图分类号: P442, P458

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.01.001

Survey and Multi-Scale Characteristics of Wind Damage Caused by Convective Storms in the Surrounding Area of the Capsizing Accident of Cruise Ship “Dongfangzhixing”

ZHENG Yongguang¹ TIAN Fuyou¹ MENG Zhiyong² XUE Ming^{3,4} YAO Dan²
BAI Lanqiang² ZHOU Xiaoxia¹ MAO Xu¹ WANG Mingjun³

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 Peking University, Beijing 100871

3 Nanjing University, Nanjing 210093

4 OU CAPS, Norman, OK 73072, USA

Abstract: The extraordinarily serious capsizing accident of the cruise ship, named Dongfangzhixing (Eastern Star), occurred at around 21:30 BT 1 June 2015, in the Jianli (Hubei Province) section of the Yangtze River. Based on the results of the wind damage survey with satellite and radar data analyses, this paper presents that the high wind damage was caused by downbursts and one likely tornado over the area surrounding the event occurring

* 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

2015 年 9 月 26 日收稿; 2015 年 11 月 20 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

site at around 21:00—21:40 BT 1 June, with the most intense Beaufort scale more than level 12, and the characteristics of discontinuous and multiscale spatial distribution and very small spatio-temporal scale of the most severe wind damage. The wind damage over the northern land part of the surrounding area (Shunxingcun, Laotai Deep Water Wharf, Sitaicun, Xingouzi) affected by one mesocyclone is more significant than the southern land part behind the gust front and microbursts. It is determined that one likely tornado occurred at Laotai Deep Water Wharf, and the wind damage at other sites was caused by microbursts based on the radar data and damage survey. The flows in the convective storm causing wind damage have obvious multiscale characteristics, and a number of microburst swathes simultaneously occurred at the woods of Sitaicun located in the northern part of the surrounding area, with alternate spatial distribution of divergence and convergence, displaying a feature of the complicated atmospheric motion in the convective storm. Although mesovortices occur within a microburst, the horizontal scale of convergence within the microburst found in this wind damage survey was only tens of meters and far less than the several-kilometer horizontal scale of bookend vortices or mesovortices within a bow echo.

Key words: damage survey, microburst, tornado, mesovortices, multiscale

引 言

2015年6月1日21:30时左右,载有454人的“东方之星”客轮在长江湖北监利段翻沉,导致442人遇难。这是长江航运史上从未出现过的极端突发事件。“东方之星”客轮船长和轮机长均称航行途中突遇龙卷风导致客轮瞬间翻沉。气象监测资料分析表明,6月1日20:00—22:00时左右,“东方之星”客轮翻沉事件发生江段及其附近区域出现了暴雨、雷电和大风等强对流天气;新一代天气雷达反射率因子和径向速度场分析表明这些区域存在线状对流、弓形回波、中气旋和下击暴流等特征。6月2—5和10—14日,中国气象局两次派出调查组赴湖北监利长江段两岸进行现场天气调查以辅助确定导致此次突发事件的天气成因。

现场天气调查是分析和确认无直接气象观测的中小尺度灾害性大风天气精细分布的最重要的直接手段。通过走访当事人、拍摄灾情照片和视频等可以确定大风天气的发生时间和地点、具体灾情、灾害路径长度和宽度、风向等,并估计最大风速和判断风灾的“藤田级别”或者“增强藤田级别”强度。20世纪70年代,Fujita等(1970)、Fujita(1974;1978)在美国开创性地开展了风灾调查工作,现已形成了较为规范完整的龙卷和下击暴流所致风灾的调查体系(Bunting et al,1993;Doswell,2003;Frelich et al,2012;Edwards et al,2013;Atkins et al,2014)。我国虽然已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(俞小鼎等,2008;王毅等,2012;周后福等,2014;范雯杰等,2015;郑媛媛等,2015;朱江山等,2015),并且从20世纪70年代起也有部分文献给出了龙卷风灾个例的调查结果(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、灾害损失等部分相关情况;最近,虽然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,包括详细的照片、时间、地点、风力强度、风向分布、龙卷路径、雷达资料分析等;但我国的强对流风暴所致风灾现场调查分析工作还明显存在不足。

Fujita(1981)总结了强对流风暴导致的三类灾害性大风:龙卷大风、直线大风和下击暴流导致大风(图1)。龙卷大风通常是高度辐合的旋转性风场(图1a),其路径相对狭窄;非辐散性直线大风通常发生在前进式阵风锋之后(如图1b右上侧图形中的大风非常接近直线大风);而下击暴流导致的大风通常是高度辐散的直线或者曲线型大风(图1b)。但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致的大风灾害。

大气运动的多尺度特征是地球大气的基本属性之一,但尺度划分的标准有多种;Fujita(1981)对此进行了总结,提出了一种基于地球特征尺度的5个尺度划分标准:大尺度(Meso,400~40000 km)、中尺度(Meso,4~400 km)、小尺度(Meso,40~4000 m)、微

尺度(Meso, 0.4~40 m)和极小尺度(Muso, 4~400 mm),并进一步把每一个尺度划分为 α 和 β 尺度。Fujita(1981)的这个尺度划分标准不同于目前得到较为广泛认可的 Orlandi(1975)尺度划分标准。Orlandi 尺度划分标准为: α 大尺度(Meso- α , 超过 10000 km)、 β 大尺度(Meso- β , 2000~10000 km)、 α

中尺度(Meso- α , 200~2000 km)、 β 中尺度(Meso- β , 20~200 km)、 γ 中尺度(Meso- γ , 2~20 km)、 α 小尺度(Micro- α , 200~2000 m)、 β 小尺度(Micro- β , 20~200 m)、 γ 小尺度(Micro- γ , 小于 20 m)。不同尺度划分标准的差异也表明了大气运动的复杂性和尺度划分的难度。

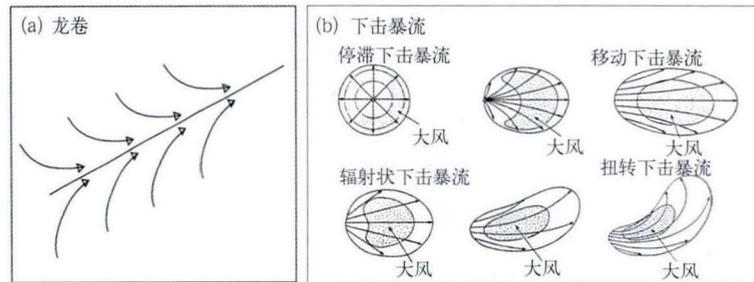


图 1 龙卷(a)和不同下击暴流(b)流型

(a)引自 Doswell(2003);(b)引自 Fujita(1985),引自 Bunting 等(1993)

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

(a) cited from Doswell (2003); (b) cited from Fujita (1985), through Bunting et al (1993)

本文的目的并非是仅仅通过此次现场天气调查来确定导致“东方之星”客轮翻沉事件的天气原因,这是因为要确定该事件的天气原因还需要综合多个方面的观测资料和数值模拟结果来综合分析。本文的目的是通过现场天气调查分析并结合其他气象观测资料来揭示此次导致大风天气的原因和大气运动的复杂性以及多尺度性,进一步理解龙卷定义的含义以及中气旋、下击暴流等与龙卷的关系,从而更深入认识该类极端天气事件及其预报难度,并为推进概率预报业务发展提供参考。

1 调查事实

1.1 调查概况

中国气象局调查组赴湖北监利调查组携带了智能手机(具有照相、录像、百度地图、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,并利用无人机对部分现场进行了航拍。“东方之星”客轮翻沉事发江段东岸位于湖北省监利县,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;滩涂分布有芦苇和小树林;多数农田种植玉米,部分农田闲置;农田及道路周边分布有树木和小树林;树种多为杨树,部分村庄中种

植有杉树。需要说明的是,由于江面已没有风灾痕迹,因此已不可能通过事后的现场调查对当时长江江面的风力强度进行直接估计;对于芦苇、玉米等的倒伏情况,由于芦苇抗倒伏能力强,玉米倒伏后经过几天的时间也会很快恢复,加之事发后现场管制等原因,现场调查没有发现芦苇倒伏的情况,但也发现和从部分村民处了解到部分区域玉米倒伏的情况。

如前所述,调查的基本目的是确认大风天气的发生时间和地点、具体灾情、路径长度和宽度、风向、风力等。但需要说明的是,树木折断的痕迹或者树木拔出的泥土的新鲜程度或者附近居民讲述的发生时间是确认大风天气是否为近期发生的重要根据。在确认风力大小时,还需要根据树木的材质、树冠的大小、根系的深浅、是否干枯、是否虫蛀、根部是否浸泡在水中等因素来综合判断,因此风力判断具有不确定性。房屋的受损情况,比如简易房的房顶或者房屋的瓦片受损情况等,也是判断风力大小的重要依据。

湖北省气候中心调查组首先于 6 月 2 日发现了图 2 中 02-1# 风灾现场;6 月 2—5 日,中国气象局调查组与湖北省气候中心调查组共同发现两处较大范围风灾现场,分别为湖南省华容县东山镇顺星村及周边区域(图 2a 中 03-1#)和湖北省监利县老台深水码头附近区域(图 2a 中 03-2#);6 月 10—14 日,中国气象局调查组再次对 6 月 1 日天气导致的

灾情进行了更全面细致的调查(图 2a),其中 6 月 13 日,调查组使用长江海事局无人机对老台深水码头(图 2a 中 03-2#)、四台村养猪场附近树林(图 2a 中 11-3#)等地点进行了航拍。整个调查过程发现主要风灾地点 19 处。此外,6 月 4 日,长江海事局也曾单独使用无人机对顺星村江堤防护林(图 2a 中 03-1#)进行了航拍。

总体来看,导致此次大风灾害的主导风向为西北偏西风;事发周边区域北部受中气旋影响陆地区域灾情较南部阵风锋及其后侧下击暴流影响的陆地区域(图 2c)更为显著。中气旋影响区域主要位于图 2 所给出区域的北部(图 2a 中椭圆标注区域),调查点 03-1#、03-2#、11-1#、11-3#、12-9# 等的调查结果显示有较大范围的房屋受损和树木拔出、折断以及倒伏等痕迹;而图 2 的中南部为受阵风锋及其后侧下击暴流大风影响区域,现场调查表明风灾点范围较小、分布较分散。

1.2 下击暴流所致风灾

湖南省华容县东山镇顺星村及其附近江堤防护林区域(图 2 中 03-1# 调查点)发现了大面积风灾现场。顺星村中房屋损失主要是迎风侧瓦片被大风吹落,附近一个化工厂的铁皮屋顶被掀翻、石棉瓦被吹落;顺星村中多处树木出现折断和倒伏,其中一株直径超过 50 cm 的杨树从底部折断(图 3a),离此树约 200 m 以东的一株直径约 20 cm 的杉树从中部折断(图 3b),因此估计最强风力超过 12 级;该处风灾路径长度约 500 m、宽度约 200 m。

通过航拍发现顺星村江堤防护林中大片树木倒伏,部分树木折断,估计最强风力 12 级左右;风灾路径长度约 1200 m、宽度约 300 m(图 3c),这是该次灾情调查中发现的最大范围树木倒伏区域。顺星村及其附近江堤防护林区域的树木倒向主要为东南偏东方向,主导风向为西北偏西风;树木倒伏主要呈现为直线型(图 3c),部分地点有辐散。因此,综合判断该区域受到风力强、影响范围较大的微下击暴流所致大风灾害。

湖北省监利县四台村养猪场附近树林(图 2 中 11-3#)出现了范围虽小于顺星村附近江堤防护林的风灾,但较后文给出的老台深水码头更大范围的树木倾倒、拔出和折断。该处主要风灾路径长度约 400 m、宽度约 100 m(图 4);该处较大风灾区域的周边也发现了多个较小面积的风灾点,包括该树林

北侧一条沟渠两侧的树木折断和倾倒(图 4c)以及玉米倒伏和其他一些小区域树木灾情(如图 2 中 11-6# 与 13-1# 调查点,照片未给出)。

该处树木的主要倒向仍为东南偏东方向,主导风向为西北偏西风;其中多株直径约 30 cm 的杨树被连根拔起,该树林中(图 4d)和其北侧沟渠(图未给出)的另一侧各有直径约 40 cm 的杨树被折断,估计最强风力超过 12 级。该树林附近的输电线被倾倒的大树砸断,根据附近码头(图 2 中 11-2#,距离此树林约 1 km)董先生提供的停电时间判断大风发生时间为 6 月 1 日 21 时多。四台村小学养猪场(图 2 中 11-1#,距离此树林约 800 m)也有多株直径约 30 cm 的大树被大风折断。据养猪场居民朱先生描述和现场勘查,6 月 1 日 21 时多,养猪场多座猪舍屋顶的瓦片被大风吹落、一座鸡舍的窗户玻璃被大风吹破等(照片未给出)。

该处树林及其周边区域风灾的分布特点是:风灾路径较宽、周边风灾点多、树木的倒向呈现明显的辐散和辐合交替分布(图 4a)、风力强等特点。结合同时段岳阳雷达观测的该区域附近上空径向速度场分布特征,再根据 Frelich 等(2012)给出的根据树木受损程度判断风力大小的实例,以及下击暴流风灾路径较宽(Fujita, 1981)的特点,综合判断该处有 EF1 级强度微下击暴流发生。

不仅该处树林中出现的辐散和辐合交替分布的树木倒伏、折断和拔出(图 4a),邻近该树林北侧的一条沟渠两侧也出现了呈辐散和辐合状树木倒伏、折断和拔出(图 4c)。这种交替分布的辐散和辐合图像与典型的下击暴流导致的树木倒伏图像(Wilson et al, 2001)有所不同,表明该处同时发生了多个相邻的微下击暴流条迹(burst swath),每一个微下击暴流条迹的水平宽度约 30 m,其形成原因值得对该对流系统中的下沉气流结构做进一步分析研究。

Davies-Jones 等(1978)给出了一次龙卷过程导致的麦田中小麦辐散和辐合交替分布倒伏的特征(图 5a),并提出可能是由浅薄的水平滚动涡旋(horizontal roll vortices)造成的,但这种辐合和辐散区的水平宽度仅为 1 m、长度仅为 7 m,尺度远小于四台村养猪场附近树林出现的类似特征。Fujita (1978)给出了现场调查得到的多个微下击暴流发生时的地面风场分布,表明距离邻近的不同微下击暴流的地面辐散流场之间会形成辐合流场(图 5b),但

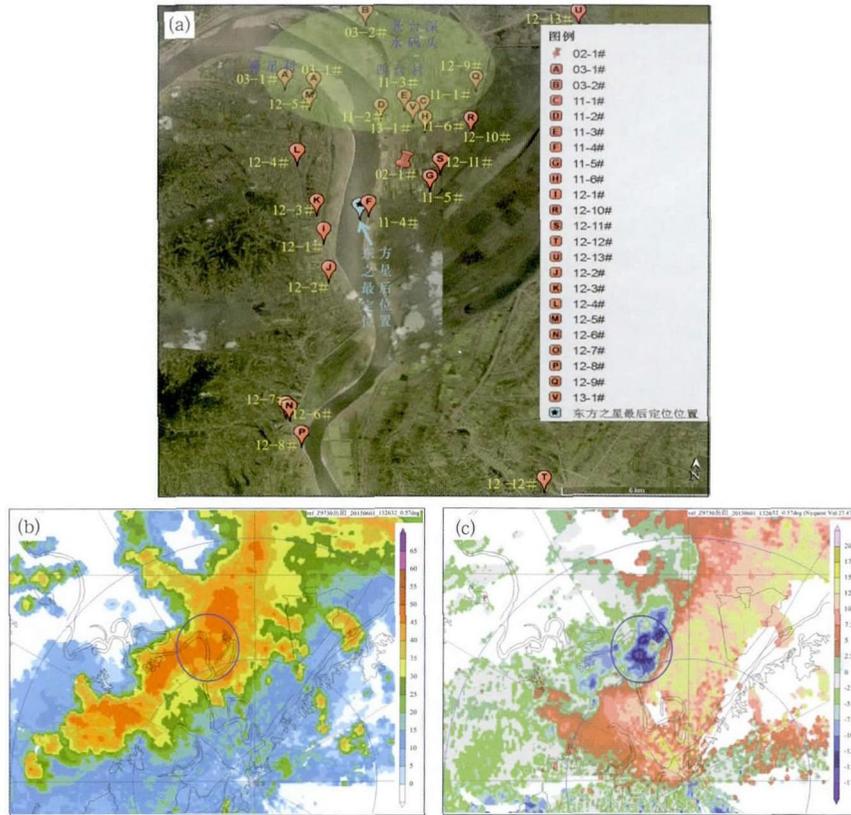


图 2 调查区域地貌和调查地点分布(a)、6月1日 21:26 时岳阳雷达 0.57°仰角反射率因子(单位: dBz, b)和平均径向速度(单位: $m \cdot s^{-1}$, c)
 (a 中调查地点按照日期和调查时间先后编号, 如 11-4# 表示 11 日第四个调查点, “东方之星”最后定位位置数据来自长江海事局; b 和 c 中蓝色粗实线椭圆为此次现场调查的重点关注区域, 灰色实折线为水域边界)

Fig. 2 Survey locations (a), reflectivity (b) and radial velocity (c) at 0.57° elevation of Yueyang radar at 21:26 BT 1 June 2015
 (In Fig. a, survey locations are labeled with date and survey sequence, such as 11-4# indicative of the 4th survey location on June 11; the data of the final locations of Ship “Dongfangzhixing” are from the Yangtze River Maritime Bureau; in Figs. b and c, the blue solid line ellipses denote the focus region of survey, the solid gray lines are the boundaries of waters)



图 3 湖南省华容县顺星村拍摄照片与标注的树木倒向
 [(a)和(b)为手机拍摄照片, (c)无人机航拍照片; 树木总体倒向为东南偏东]
 Fig. 3 Damage to trees at Shunxingcun, Huarong County, Hunan Province
 (Figs. a and b taken by a mobile phone, and Fig. c by a drone)

Fujita(1978)给出的这种辐合流场宽度(约几百米)要大于四台村养猪场附近树林的辐合流场宽度(约 30 m)。由于这种辐合特征的存在,如前所述,Fujita(1978)也指出,微下击暴流和龙卷、尤其是弱龙卷两者导致的风灾有时很难区分。

新沟子养鸡场附近树林(图 2 中 12-9#)位于湖北监利新洲围堤的靠近长江一侧,是调查发现的一个较大范围风灾现场(图未给出)。该风灾现场主要是较多树木倾倒、少量树木被拔出,未发现折断树木;风灾路径长度和宽度各约 200 m;在该地周边也发现了多个较小面积的风灾点(图未给出)。树木倒向仍主要为东南偏东方向,主导风向为西北偏西风;

少数树木的倒向为东北偏东方向,呈现出一定的辐散特征。由于该树林中出现了多处树木倒伏或拔出,有些树木的倒向之间存在弱辐合特征。树林中多株直径约 30 cm 的杨树被连根拔起,估计最强风力 12 级左右。据距离此树林以南约 2 km(图 2 中 12-10# 调查点)养蜂场贺先生描述 6 月 1 日晚大风把数十个蜂箱盖自围堤下吹到围堤上,导致大量蜜蜂死亡。综合风灾路径较宽、辐散型树木倒向等特征判断该处属于下击暴流导致的风灾地点,并存在多个微下击暴流条迹。树木倒向的弱辐合特征最大可能也是由近距离相邻的微下击暴流条迹所致的近地面辐散气流(图 5b)形成。



图 4 湖北省监利县四台村养猪场附近树林拍摄照片与标注的树木倒向
 [(a,c)无人机航拍照片,(b,d)手机拍摄照片]
 Fig. 4 Damage to trees at Sitaicun, Jianli County, Hubei Province
 (Figs. a and c taken by a drone, Figs. b, d by a cell phone)

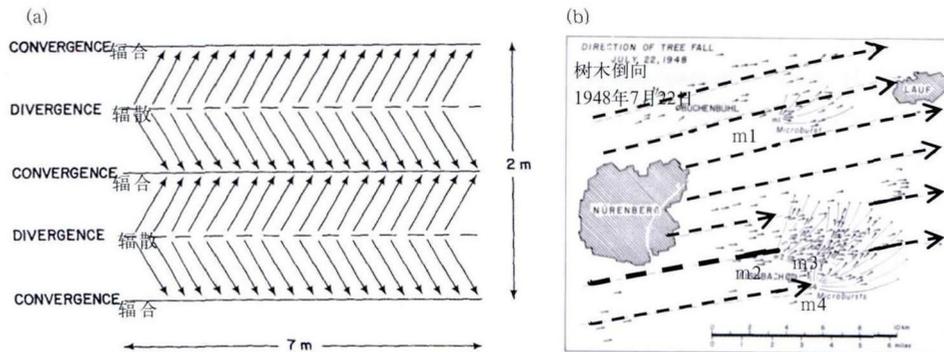


图 5 美国风灾现场调查得到的部分个例流场分布
 (a)龙卷过程导致麦田中小麦倒伏的辐合辐散流场,引自 Davies-Jones 等(1978);(b)1948 年 7 月 22 日美国一次下击暴流过程导致树木倒向分布所表征的两种尺度流场(虚线和实线;图中的 m1、m2、m3 和 m4 表示微下击暴流;引自 Fujita,1978)

Fig. 5 (a) Schematic convergence-divergence pattern in a wheat field caused by a tornado in USA (from Davies-Jones et al, 1978); (b) The scales of outflow fields depicted by tree fall on 22 July, 1948, four diverging patterns identified by m1, m2, m3, and m4 were microbursts (from Fujita, 1978)

除了以上调查点和老台深水码头外,其他调查点受大风灾害的面积相对较小且分布较零散。

11-4# 和 12-4# 调查点(图 2)是两个相对受灾树木较多的调查点,位于沉船事发区域南部、岳阳雷达观

测到的下击暴流影响区域,其中 11-4 # 调查点是离“东方之星”客轮最后定位位置最近的一个风灾点,直线距离仅约 400 m。11-4 # 调查点位于长江东岸的湖北省监利县,调查发现该处有十几棵树木倾倒或者折断,但分布比较分散,没有出现成片树木受灾,其中最大的折断树木为一棵直径约 30 cm 的大树,估计最强风力 12 级以上(图未给出)。12-4 # 调查点位于长江西岸的湖南省华容县,也发现了十几棵树木倾倒、折断或者拔出,其中有 3 棵树木被拔出,一棵直径约 20 cm 的大树折断,估计最强风力 12 级左右(图未给出)。树木主要倒向为东南方向,因此主导风向为西北风。结合岳阳雷达观测的 0.57° 仰角径向风场分布特征,根据树木的倒向为直线型或者辐散型为主的特征判断这些调查点的风灾为微下击暴流所致。

湖北省监利县老台深水码头附近树林(图 2 中 03-2 #)发现了较大范围的树木倾倒、拔出或者折断(图 6),树木受灾路径呈现出一定的曲率弯曲,长度约 300 m、宽度约 50 m。树木主要倒向仍为东南偏东方向,因此主导风向为西北偏西风,预示此地可能

遭受了下击暴流;但风灾路径两侧的倾倒树木呈现出部分辐合特征;其中多株直径约 30 cm 的杨树被连根拔起或折断,估计最强风力达 12 级以上。附近采沙场居民汤先生确认大风发生时间约为 6 月 1 日 21 时 20—35 分;据其讲述 6 月 1 日晚大风还导致沙场堆积的湿沙被大风剧烈扬起。

结合同时段岳阳雷达观测的老台深水码头附近区域上空 1.5° 和 2.4° 仰角径向速度场存在中气旋特征(图未给出)、 0.5° 仰角径向风场存在涡旋(图 2c 中蓝色椭圆内)特征,再根据 Frelich 等(2012)给出的根据树木受损程度判断风力大小的实例,以及龙卷风灾路径相对较窄(Fujita, 1981)和存在一定曲率的特点,综合判断该处在遭受下击暴流的同时有龙卷发生的可能,但缺乏龙卷漏斗云的直接目击证据。风灾路径长度较短这一特征表明该疑似龙卷持续时间很短,也表明了其时空尺度显著小于典型的龙卷尺度。其路径与内蒙古 1981 年发生的一次龙卷接地后的灾害路径长度接近(林大强等,1984),显著窄于和短于 2012 年 7 月 21 日北京一次龙卷的路径宽度和长度(Meng et al, 2014)。



图 6 湖北省监利县老台深水码头拍摄照片与标注的树木倒向

(a) 手机拍摄照片, (b) 无人机航拍照

Fig. 6 Damage to trees at Laotai Deep Water Wharf, Jianli County, Hubei Province

(a) taken by a mobile phone, (b) by a drone

2 下击暴流、龙卷与涡旋

此次现场调查既发现了微下击暴流导致的灾害,也发现了可能由龙卷导致的灾害。Fujita(1978)也指出两者导致的地面风灾有时很难区分,尤其是弱龙卷和微下击暴流很难仅从地面风灾来区分(Fujita, 1981)。Fujita(1974;1978)最早发现并命名了微下击暴流。下击暴流不等同于对流风暴中的下沉气流。在对流系统下沉气流区中形成的强灾害性

大风区称为下击暴流,其水平尺度通常为 1~400 km(American Meteorological Society,2013);其中,水平尺度小于 4 km、持续时间为 2~5 min 的强下沉气流区为微下击暴流(American Meteorological Society,2013);其最大强度可导致达 F3 级龙卷强度的强风灾害(Fujita et al, 1981)。雷达观测的反射率因子场上表现出的弓形回波特征就是对流系统中下击暴流所产生的结果(Fujita, 1978; Wilson et al, 2001)。

下击暴流是能够把水平涡度转换为垂直涡度的

非常强的下沉气流,并在近地面导致很强的风切变,通过与强上升气流等的相互作用,会在近地层产生和伴随小尺度的涡旋特征(Fujita,1978; Przybylinski, 1995; Weisman, 1993; 2001; Wilson et al, 2001; Bluestein, 2013; Xu et al, 2015),比如弓形回波两端的书挡涡旋(bookend vortex; Weisman, 1993),这些涡旋有可能会发展为气旋式或者反气旋式龙卷(Fujita, 1978; Przybylinski, 1995; Weisman, 2001),其最大强度可达 F4 或者 EF4 级(Wakimoto, 1983; Przybylinski, 1995; Agee

et al, 2009)。已有较多文献(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)给出了下击暴流或者弓形回波和龙卷同时导致灾害的个例或者气候分布特征。图 7a为 Fujita(1978)给出的美国一次大范围龙卷和下击暴流过程现场调查结果,该图也可在 Forbes 等(1983)和 Weisman(2001)的文献中查阅到。该次过程持续5个多小时,由一

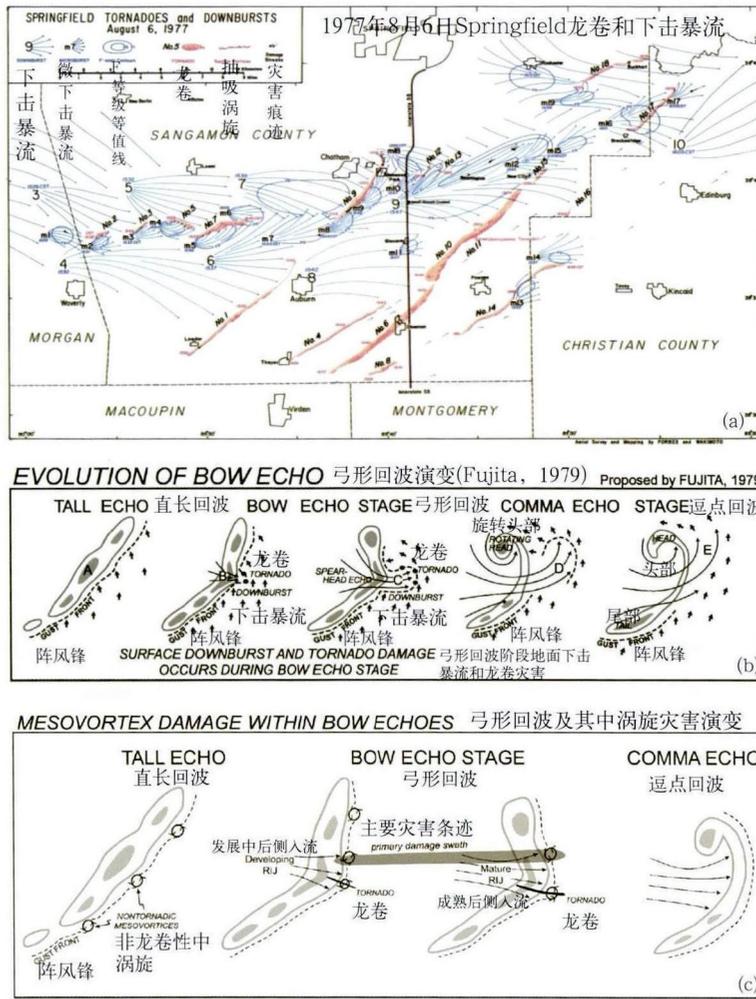


图 7 (a)1977 年 8 月 6 日美国 Springfield 一次大范围龙卷和下击暴流过程现场调查结果(引自 Fujita,1978);
 (b)Fujita(1979)给出的弓形回波演变过程(转引自 Atkins et al,2005);
 (c)Atkins 等(2005)给出的弓形回波及其中涡旋灾害演变

Fig. 7 (a) Eighteen tornadoes, 10 downbursts, and 17 microbursts are depicted in this map [One tornado (No. 11) was anticyclonic; apparently, eight tornadoes formed on the left side of microbursts; no traces of downbursts were found in the vicinity of other tornadoes; from Fujita, 1978];
 (b) Schematic diagram illustrating bow echo evolution (from Fujita, 1979);
 (c) Schematic model of damage produced by a bow echo observed on 10 June 2003 east of Saint Louis (from Atkins et al, 2005)

个孤立的对流单体发展为弓形回波,导致了一系列地面大风灾害;他们发现了 10 个下击暴流、17 个微下击暴流和 18 个龙卷,其中一个为反气旋式龙卷。图 7b 为 Fujita(1979)给出的经典弓形回波演变过程,包括直长回波、弓形回波和逗点回波三个阶段,弓形回波阶段是大风灾害最为严重的阶段,尤其弓形回波的顶点附近是大风最强的区域,并可能在弓形回波的左侧产生龙卷。图 7c 为 Atkins 等(2005)总结的 2003 年美国一次弓形回波演变过程,其与 Fujita 的经典弓形回波演变过程有所不同,该次过程伴随有多个 γ 中尺度涡旋和龙卷,龙卷发生在弓形回波的顶点附近或者右侧,最强风灾发生在弓形回波顶点左侧的中涡旋附近;Atkins 等(2005)认为弓形回波伴随的龙卷涡旋同普通 γ 中尺度涡旋的差异在于龙卷涡旋持续时间较长、地面以上 3 km 高度的涡旋强度较强,且在生成龙卷前其快速加深和增强;Wheatley 等(2006)给出了多个弓形回波的中涡旋导致强地面大风灾害个例。此次现场调查发现的微下击暴流所致的树木倒向辐合特征,如四台村养猪场附近树林和 11-4 # 调查点,其水平尺度很小,仅有几十米,远小于 Weisman(1993)定义的书挡涡旋与弓形回波伴随的 γ 中尺度涡旋的几千米水平尺度,因此还有待于将来应用更先进的高分辨率数值模拟等手段来确认是否属于涡旋。

美国气象学会(AMS)对龙卷的定义作了多次修订。1959 年 AMS 给出的龙卷定义为“从积雨云下垂的强烈旋转空气柱,且几乎总可以观测到漏斗状云或者管状云^①”(Huschke, 1959),2000 年修订的定义为“从积状云下垂或位于其下方的伸展至地面的强烈旋转空气柱,且经常(但并不总是)可看到漏斗状云^②”(Glickman, 2000),2013 年再次修订为“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^③”(American Meteorological Society, 2013);我国大气科学辞典编委会(1994)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”。因此,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/沙尘等。

由于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,是一种强烈的涡旋,但是目前还没有定量标准来判定达到怎样剧烈程度的涡旋就属于龙卷,因此 Doswell(2011)、Crowley(2015)、Smith(2015)对怎样识别和判断是否是龙卷提出了他们的观点,尤其漏斗云是否触地、水龙卷、陆龙卷(landspout)、阵风锋龙卷等的判定标准存在争议,具体可参见相关文献。例如, Doswell(2011)认为判断阵风锋龙卷是否属于龙卷的标准就是其涡旋环流是否扩展到对流云的底部,但 Agee(2014)认为阵风锋龙卷不符合 2013 年 AMS 最新修订的龙卷定义。

龙卷通常分为两类,一类为超级单体龙卷,另一类为非超级单体龙卷(Davies-Jones et al, 2001; Bluestein, 2013)。超级单体龙卷也称为中气旋龙卷,在美国约有 25% 的中气旋能够产生龙卷(Davies-Jones et al, 2001)。非超级单体龙卷也称为非中气旋龙卷,通常由辐合线上的中小尺度涡旋和快速发展对流风暴中的强上升气流共同作用形成(Wakimoto et al, 1989)。超级单体龙卷通常强度较强(Davies-Jones et al, 2001; Agee et al, 2009; Bluestein, 2013),但如前所述,与下击暴流相联系的气旋式或者反气旋式龙卷最大强度也可达 F4 或者 EF4 级(Wakimoto, 1983; Przybylinski, 1995; Agee et al, 2009)。Agee 等(2009)进一步将龙卷分为三类,分别为超级单体龙卷、线状对流龙卷和其他类型龙卷,其他类型龙卷包括陆龙卷、水龙卷、冷空气漏斗云(cold air funnel)、阵风锋龙卷、发生在热带气旋眼墙龙卷、反气旋式次级涡旋等,具体可参见文献 Agee 等(2009)。Agee(2014)根据 AMS 2013 年最新修订的龙卷定义,在其他类型龙卷中剔除了阵风锋龙卷、发生在热带气旋眼墙龙卷和反气旋式次级涡旋三种亚类型。Trapp 等(2005)对美国 1998—2000 年 3828 个龙卷进行分类统计表明,79% 由孤立对流风暴产生,18% 由线状对流产生,其他风暴类型产生的龙卷仅占 3%;而 Mulder 等(2015)对地处高纬度的英国龙卷统计表明,42% 由线状对流产生,28% 由孤立对流风暴产生;因此,美

①英文原文为“A violently rotating column of air, pendant from a cumulonimbus cloud, and nearly always observable as a funnel cloud or tuba”(Huschke, 1959)

②英文原文为“A violently rotating column of air, in contact with the ground, either pendant from a cumuliiform cloud or underneath a cumuliiform cloud, and often (but not always) visible as a funnel cloud”(Glickman, 2000)

③英文原文为“A rotating column of air, in contact with the surface, pendant from a cumuliiform cloud, and often visible as a funnel cloud and/or circulating debris/dust at the ground”(AMS, 2013)

国和英国龙卷的统计结果存在较大差异。

3 对流系统多尺度特征

大气运动的多尺度性是导致天气多样性的重要原因之一。强对流天气预报业务人员虽然对天气尺度系统和尺度系统的认识已经较为深入,但仍需提高对强对流风暴中气流多尺度性的认识,尤其是对小尺度特征的理解和认识。Fujita(1981)给出了4种尺度高压和气旋(图 8a 和 8b),分别为尺度达上千千米的大尺度(超过 400 km)反气旋和气旋、中尺度(4~400 km)中高压和中气旋、小尺度(40~4000 m)高压(与下击暴流相联系)和小尺度气旋(与龙卷相联系)、微尺度(不超过 40 m)高压(与下击暴流条迹

相联系)和微尺度气旋(如龙卷中的抽吸涡旋 suction vortex, 见图 8d); Agee 等(1976)和 Fujita(1981)都给出了龙卷涡旋中可存在多个抽吸涡旋的多尺度特征(图 8d); Fujita(1978)给出了 1948 年 7 月 22 日美国一次下击暴流过程导致树木倒向分布所表征的两种尺度流场(图 5b); Fujita 等(1981)通过 1980 年 7 月 16 日美国一系列下击暴流事件给出了与下击暴流相联系的 5 种尺度气流(图 8 c),包括尺度达几百千米的 β 大尺度下击暴流族(由影响范围为几百千米的一系列下击暴流群组成)、 α 中尺度(40~400 km)下击暴流群(由 2 个或者多个下击暴流组成)、 β 中尺度(4~40 km)下击暴流、 α 小尺度(400~4000 m)微下击暴流、 β 小尺度(40~400 m)下击暴流条迹,需要说明的是,这 5 种尺度与 Orlanski

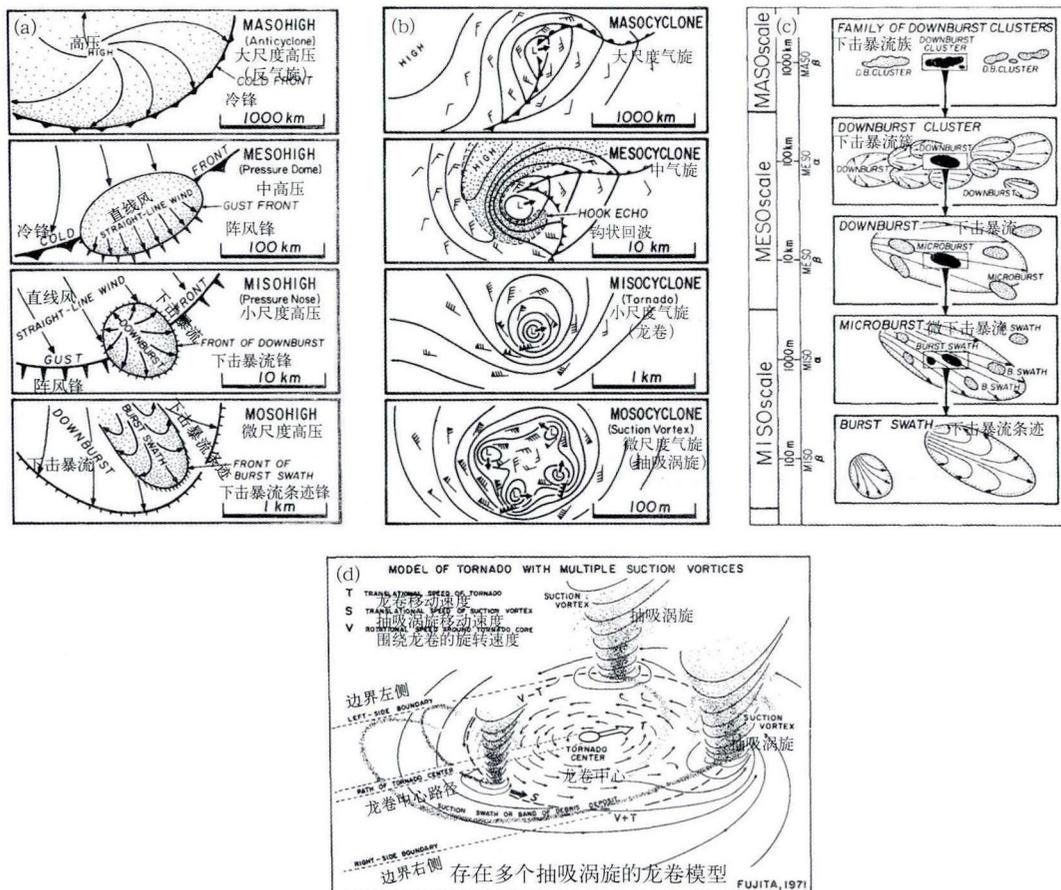


图 8 不同尺度高压(a)和气旋(b)、与下击暴流相联系的 5 种尺度气流(c)和存在多个抽吸涡旋的龙卷模型(d)(a、b 和 d 引自 Fujita,1981;c 引自 Fujita et al,1981)

Fig. 8 Schematic drawings showing the features of maso-, meso-, miso- and moso-highs (a) and cyclones (b) (from Fujita, 1981); five scales of downburst damage patterns (c), note that the definition of scales differs from those of Orlanski (1975) (from Fujita et al, 1981); and model of tornado with multiple suction vortices (d) (From Fujita, 1981)

(1975)的尺度定义有所不同;最近,Bluestein 等(2015)使用多种探测资料和现场照片分析了 2013 年 5 月 31 日美国 Oklahoma 州 El Reno 龙卷的多尺度特征,揭示了该次过程存在多个次级涡旋(sub-vortices)和一个阵风锋后侧强反气旋式龙卷等事实。Fujita 等(1981)、Agee 等(1976)和 Fujita(1981)通过多种资料分析和现场天气调查给出的大气运动尺度划分标准以及 Bluestein 等(2015)等分析给出的 El Reno 龙卷的多尺度特征清楚地表征了大气运动的多尺度性和复杂性,这也说明不能简单地使用大、中、小三个尺度来区分大气运动的尺度。

从 2015 年 6 月 1 日这次强对流天气过程来看,导致此次大风灾害的中尺度对流系统在 21:30 时静止卫星云图上表现为近似圆形的强对流云团(图未给出),直径约 250 km,达到 Fujita(1981)和 Orlanski(1975)定义的 α 中尺度。但从 21:26 时岳阳雷达观测的 0.57° 仰角反射率因子场(图 2b)来看,导致大风灾害的中尺度对流系统为一个长度约 180 km 的准线状对流系统,其大小为 Fujita(1981)定义的 α 中尺度和 Orlanski(1975)定义的 β 中尺度。21:26 时岳阳雷达观测的 0.57° 仰角径向速度大小超过 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的尺度约为 15 km(图 2c),为下击暴流区;而 2.5° 仰角上的中气旋(图未给出)直径仅约 5 km;下击暴流和中气旋的尺度都为 Fujita(1981)定义的 β 中尺度和 Orlanski(1975)定义的 γ 中尺度。21:26 时岳阳雷达观测的 0.57° 仰角径向速度场的下击暴流区还存在 3 个水平尺度不超过 4 km 的强风速中心,为微下击暴流,其尺度为 Fujita(1981)定义的 α 小尺度和 Orlanski(1975)定义的 γ 中尺度。从现场调查来看,大片庄稼倒伏、树木和房屋受灾区域的水平尺度为几十米到 1 km 左右,为微下击暴流导致的下击暴流条迹或者可能由龙卷导致的风灾痕迹,其尺度为 Fujita(1981)定义的小尺度和 Orlanski(1975)定义的小尺度;其中多个风力达 12 级或以上的调查点水平尺度仅为几十米,属于 Fujita(1981)定义的 β 小尺度和 Orlanski(1975)定义的 β 小尺度;尤其在四台村养猪场附近树林和新沟子养鸡场附近树林中发现多个宽度约 30 m 的微下击暴流条迹,属于 Fujita(1981)定义的 α 微尺度和 Orlanski(1975)定义的 β 小尺度。因此,结合静止卫星和雷达观测以及现场调查的分析结果充分展示了此次强对流天气过程的多尺度特征和大气运动的复杂性。

现场调查结果表明此次过程中强风灾害具有显著的空间分布不连续性和尺度微小等特征,尤其顺星村、老台深水码头、四台村养猪场附近树林和新沟子养鸡场附近树林的调查结果展示的这种特征最为显著。从此次过程的地面观测来看,湖北省监利县气象观测站(距客轮翻沉事件位置偏北约 10 km)观测到的最大瞬时风仅为 $9.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (5 级),而周边区域自动站观测到的最大瞬时风为 $16.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (7 级),位于监利县尺八镇(距客轮翻沉事件位置偏南约 15 km),与现场调查估计的多个风灾点的最强风力超过 12 级差异巨大,因此这也充分表明了此次强风灾害具有空间不连续性和小尺度的分布特点。需要指出的是,强对流天气过程不仅在空间上是多尺度的,在时间上也具有多尺度特征。Fujita(1986)给出了水平尺度和时间尺度之间的关系,水平尺度 40 m~4 km 的扰动仅存在 1~30 min(转引自张玉玲,1999)。本次现场调查得到的强风灾害点不连续空间分布特征正是强风时间上的小尺度特征在空间分布上的反映,其持续时间非常短,只有几分钟的时间尺度,相关文献可参见 Fujita(1981)、Agee 等(1976)、Fujita 等(1981)。对于这类由强对流风暴引起的达到或者超过 12 级的强风灾害,目前的数值模式和业务临近预报还不可能明确地给出针对某一地点或者格点的确定性预报,因此还需要深入研究该类天气的形成机理,并以对流可分辨的高分辨率数值预报为基础发展针对该类天气的概率预报技术以进一步提高对其的预报能力。

4 结 论

2015 年 6 月 1 日 21:30 时左右,长江湖北监利段发生“东方之星”客轮翻沉特大事故。同时段该区域存在一个直径约 250 km 近似圆形的 α 中尺度强对流云团,岳阳雷达 0.57° 仰角反射率因子场上为一个长度约 180 km 的准线状对流系统,该对流系统导致事发江段及其周边区域发生了强风灾害。

对事发周边陆地区域的现场天气调查共发现 19 处主要风灾地点;调查结果表明事发周边区域的北部陆地区域灾情较南部陆地区域更为显著,其中顺星村、老台深水码头、四台村养猪场附近树林和新沟子养鸡场附近树林等地是遭受风灾最为显著的 4 个地点,这些调查点风灾为典型微下击暴流所致,其中老台深水码头有龙卷发生的可能。

虽然下击暴流会伴随中小尺度的涡旋特征,但现场调查发现的由下击暴流所致的树木倒向辐合特征仅有几十米水平尺度,因此不同于书挡涡旋或者中涡旋。目前,龙卷漏斗云是否触地、水龙卷、陆龙卷(landspout)、阵风锋龙卷等的判定标准等还有争议。

现场调查获得的风灾分布具有空间分布不连续和多尺度等特征,强风灾害具有显著的小尺度时空分布特征,尤其顺星村、老台深水码头、四台村养猪场附近树林和新沟子养鸡场附近树林的调查结果展示的这种特征最为显著;值得注意的是,四台村养猪场附近树林中同时发生了多个相邻的微下击暴流条迹,呈现出辐散和辐合交替分布的特征,表明对流系统中的大气运动分布非常复杂。风灾的不连续分布特征是其时间上的小尺度特征(持续时间短)在空间分布上的反映。风灾的这种时空分布特征要求发展以对流可分辨的高分辨率数值预报为基础的概率预报技术以提高对该类天气的预报能力。

致谢: 特别感谢中国气象局、湖北省气象局、湖北省气象台和湖北省监利县气象局对现场调查的大力支持;感谢北京大学陶祖钰教授、国家气象中心毕宝贵、金荣花和张小玲研究员等给予指导;湖北省气象局陈波、湖北省气象台吴涛、湖北省气候中心刘敏、梁益问和王凯在现场调查过程中给予大力协助。

参考文献

- 大气科学辞典编委会. 1994. 大气科学辞典. 北京: 气象出版社, 398-398.
- 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.
- 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.
- 张玉玲. 1999. 中尺度大气动力学引论. 北京: 气象出版社, 7-8.
- 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.
- Agee E M. 2014. A revised tornado definition and changes in tornado taxonomy. Wea Forecasting, 29: 1256-1258.
- Agee E M, Snow J T, Clare P R. 1976. Multiple vortex features in the tornado cyclone and the occurrence of tornado families. Mon Wea Rev, 104: 552-563.
- 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, 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: Tornado genesis. Mon Wea Rev, 131: 2954-2967.
- Bluestein H B. 2013. Severe Convective Storms and Tornadoes: Observations and Dynamics. Berlin: Springer.
- Bluestein H B, Snyder J C, Houser J B. 2015. A multiscale overview of the El Reno, Oklahoma, tornadic supercell of 31 May 2013. Wea Forecasting, 30: 525-552.
- Bunting W F, Smith B E. 1993. A guide for conducting convective windstorm surveys. NOAA Tech Memo NWS SR-146, 44.
- Crowley D J, cited 2015. Is it a tornado? NWS Southern Region Tech. Attachment SR/SSD 96-39. <http://www.srh.noaa.gov/topics/attach/html/ssd96-39.htm>.
- Davies-Jones R P, Burgess D W, Lemon L R, et al. 1978. Interpretation of surface marks and debris patterns from the 24 May 1973 Union City, Oklahoma tornado. Mon Wea Rev, 106: 12-21.
- Davies-Jones R P, Trapp R J, and Bluestein H B. 2001. Tornadoes and tornadic storms. Severe Convective Storms, Meteor Monogr, 50: 167-221.
- Doswell C A III. 2003. A guide to F-scale damage assessment. NOAA/NWS, 94. <http://www.wdtb.noaa.gov/courses/ef-scale/lesson2/FinalNWSFscaleAssessmentGuide.pdf>.
- Doswell C A III. 2011. What is a tornado? <http://www.flame.org/~cdoswell/atornado/atornado.html>.
- 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.
- Frelch 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, Wakimoto R M. 1983. A concentrated outbreak of torna-

- does, downbursts and microbursts, and implications regarding vortex classification. *Mon Wea Rev*, 111:220-236.
- Forbes G S, and 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.
- 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. (Available online at <http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19780022828>).
- Fujita T T. 1979. Objectives, operation, and results of Project NIMROD. Preprints, 11th Conf on Severe Local Storms, Kansas City, Amer Meteor Soc, 259-266.
- Fujita T T. 1981. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales. *J Atmos Sci*, 38:1511-1534.
- Fujita T T. 1985. The downburst. SMRP Res paper No. 210. The University of Chicago, 122.
- Fujita T T. 1986. Mesoscale Classification: Their History and Their Application to Forecasting. *Mesoscale Meteorology and Forecasting*. Boston: Amer Meteor Soc, 18-35.
- 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.
- Glickman T S. 2000. *Glossary of Meteorology*. 2nd ed. Amer Meteor Soc, 855.
- Huschke R E. 1959. *Glossary of Meteorology*. 1st ed. Amer Meteor Soc, 638.
- 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.
- 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.
- Mulder K J, Schultz D M. 2015. Climatology, storm morphologies, and environments of tornadoes in the British Isles, 1980–2012. *Mon Wea Rev*, 143:2224-2240.
- Orlanski L. 1975. A rational subdivision of scale for atmospheric processes. *Bull Amer Meteor Soc*, 56:527-530.
- Przybylinski R W. 1995. The bow echo: Observations, numerical simulations, and severe weather detection methods. *Wea Forecasting*, 10:203-218.
- Smith R, cited. 2015. Non-supercell tornadoes: A review for forecasters. NWS Southern Region Tech. Attachment SSD96-8. <http://www.srh.noaa.gov/topics/attach/html/ssd96-8.htm>.
- 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.
- Wakimoto R M, Wilson J W. 1989. Non-supercell tornadoes. *Mon Wea Rev*, 117:1113-1140.
- Weisman M L. 1993. The genesis of severe, long-lived bow echoes. *J Atmos Sci*, 50:645-670.
- Weisman M L. 2001. Bow echoes: A tribute to T. T. Fujita. *Bull Amer Meteor Soc*, 82(1):97-116.
- Wheatley D M, Trapp R J, Atkins N T. 2006. Radar and damage analysis of severe bow echoes observed during BAMEX. *Mon Wea Rev*, 134(3):791-806.
- Wilson J W, Wakimoto R M. 2001. The discovery of the downburst: T. T. Fujita's contribution. *Bull Amer Meteor Soc*, 82(1):49-62.
- Xu X, Xue M, Wang Y. 2015. Mesovortices within the 8 May 2009 bow echo over the central United States: Analyses of the characteristics and evolution based on Doppler radar observations and a high-resolution model simulation. *Mon Wea Rev*, 143:2266-2290.