

# 雷暴大风与龙卷的预报预警和灾害现场调查

郑永光 田付友 周康辉 朱文剑  
(国家气象中心, 中国气象局, 北京 100081)

**摘要:** 近年来强雷暴大风与龙卷导致的灾害事件引发广泛关注。在总结雷暴大风和龙卷机理、短期预报技术和天气形势特征基础上, 给出了这两类天气的监测和短时临近预报预警技术, 最后简要总结了灾后现场调查工作和风灾强度评估方法。雷暴大风多数是由对流风暴内强烈下沉气流产生; 而龙卷一类由中气旋产生, 另一类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。但归根结底, 巨大的静力不稳定能量是产生强雷暴大风与龙卷(热带气旋龙卷除外)的必要条件。新一代天气雷达观测是雷暴大风与龙卷的监测和临近预警主要手段。自动气象站观测风场能够相当程度上监测大风天气, 地球静止气象卫星和自动气象站变压、变温等观测资料也能够辅助监测雷暴大风天气, 但龙卷监测尚无法直接使用这两类资料。对这两类天气所致灾害的现场调查工作依然必不可少。快速更新或者集合的高时空分辨率数值模式预报及其后处理是这两类天气短时预报的主要途径。

**关键词:** 雷暴大风, 下击暴流, 龙卷, 监测, 预报预警, 现场调查

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.02.006

## Forecasting Techniques and Damage Survey of Convectively Driven High Winds and Tornadoes

Zheng Yongguang, Tian Fuyou, Zhou Kanghui, Zhu Wenjian  
(National Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

**Abstract:** In recent years, the disasters, which were caused by convectively driven high winds and tornadoes, attracted more attention in China. This paper firstly summarizes the mechanisms, short-range forecasting techniques and synoptic situations of convectively driven high winds and tornadoes, then presents techniques of monitoring and warning on them, finally gives brief summary of damage survey and wind estimation methodology for them. Most of convectively driven high winds are caused by strong rear downdrafts of convective storms. However, one type of tornadoes was generated from mesocyclones, another type of tornadoes was caused by the combining effect of mesovortices and strong updrafts of convective storms in convergence line. Massive convective available potential energy is one of the necessary conditions favorable for convectively driven high winds and tornadoes (except for tropical cyclone tornadoes). Monitoring and warning convectively driven high winds and tornadoes depend on the observations by new generation weather radar network. Observational winds from automatic weather station (AWS) can monitor convectively driven high winds to a great extent, and observations from geostationary meteorological satellites and pressure tendency and temperature tendency from AWS are also useful to monitor convectively driven high winds, but these data cannot directly be used to monitor tornadoes. Damage survey for the disasters caused by these two types of weather is still necessary. Short-term forecasting these two types of weather depends mainly upon a rapid update high-resolution (ensemble) numerical model and post-processing.

**Keywords:** convectively driven high winds, downburst, tornado, monitoring, forecasting and warning, damage survey

### 0 引言

极端强对流大风事件由于其突发性和预报难度大易于导致重大经济损失和人员伤亡, 近年来其导致的灾害尤其突出, 如2015年6月1日21:30左右强下击暴流导致的雷暴大风使“东方之星”客轮翻沉四百多人

遇难<sup>[1-2]</sup>、2016年6月23日14:00—15:00江苏省盐城市阜宁县EF4级(最大阵风风速的下限值为74 m/s)龙卷造成98人死亡和800多人受伤<sup>[3-4]</sup>、2016年4月13日凌晨强飚线导致的雷暴大风(现场调查估计地面大风为11级)使广东东莞龙门吊倾倒致18人遇难、2016年6月4日下午强飚线雷暴大风使四川广元白龙湖游船翻沉造成13人死亡和2人失踪。2015年“东方之星”客轮翻沉事件是长江航运史上从未发生过的极端事件<sup>[1]</sup>。我国从未记录到过EF5级龙卷, 2016年阜宁EF4级龙卷事件是1950年以来我国第6个、江苏省第2个

收稿日期: 2017年8月14日; 修回日期: 2018年1月14日  
第一作者: 郑永光(1974—), Email: zhengyg@cma.gov.cn  
资助信息: 国家自然科学基金项目(41375051); 国家重点研发计划(2017YFC1502003)

EF4级龙卷<sup>[3, 5-6]</sup>。虽然雷暴大风和龙卷的形成机理<sup>[7-9]</sup>显著不同,但这些事件都具有很强的突发性,都是发生概率极低的极端天气事件。

Fujita和Wakimoto<sup>[10]</sup>总结了强对流风暴导致的3类灾害性大风:龙卷大风、直线大风和下击暴流大风。雷暴大风指的是由强对流风暴导致的非龙卷大风。龙卷大风通常是高度辐合的旋转性风场,其路径一般相对比较狭窄;非辐散性直线大风通常发生在前进式阵风锋之后;而下击暴流大风通常是具有明显辐散特征直线或者曲线型大风。

对2015年“东方之星”客轮翻沉事件和2016年阜宁EF4级龙卷事件的风灾现场调查都表明,强风灾害具有显著的小尺度时空分布特征<sup>[1, 3]</sup>。现场调查估计2015年“东方之星”客轮翻沉事件中地面最大风速达12级以上( $>32.6\text{ m/s}$ ),而该次事件自动气象站监测到的最大瞬时风速仅为 $16.4\text{ m/s}$ <sup>[1]</sup>;现场调查估计2016年阜宁EF4级龙卷其最大瞬时风速下限值为 $74\text{ m/s}$ ,远大于自动气象站监测到的最大瞬时风速 $34.6\text{ m/s}$ (12级)<sup>[3]</sup>。因此,目前我国虽然已经布设完成了较为完备的气象业务观测体系,但仍然难以全面监测该类极端强对流天气,因此对地面大风等灾害天气的现场调查工作依然必不可少。

虽然我国强对流天气国家级预报业务和各级气象台短时临近预报业务起步晚于美国等国家,但目前我国已经布设完成了覆盖全国的新一代多普勒天气雷达网、发射了多颗风云2号业务和风云4号试验地球静止气象卫星、布设了较为完备的地面自动气象观测站网等,也将在“十三五”期间对93部SA和10部CA新一代天气雷达进行双偏振技术升级,并建设形成由282部雷达组成的全国风廓线雷达业务网<sup>[11]</sup>。同时开发建设了基于多源资料的分类强对流天气实况监测系统、中尺度天气分析规范和分析工具、分类客观预报系统、灾害性天气短时临近预报系统(SWAN)和强对流天气综合业务支撑平台等,并实时发布分类强对流天气预报和预警产品<sup>[12-17]</sup>。但雷暴大风和龙卷预报仍然是业务天气预报的难点和重点之一,因此非常有必要综合利用观测和数值预报等多源资料,尤其新型观测和高分辨率数值预报资料进一步加强和提高该类天气事件的预报预警能力。本文将首先总结雷暴大风和龙卷机理及其短期预报技术,然后给出其监测和短时临近预报预警技术,再对该类天气事件的灾害现场调查工作进行简要总结,以期能够对该类天气的业务预报预警工作提供借鉴和参考。

## 1 雷暴大风与龙卷的机理和短期预报

雷暴大风与龙卷的短期预报是做好其短时临近预警的重要基础。绝大多数雷暴大风是由对流风暴内强烈下沉气流(下击暴流)所导致<sup>[18]</sup>,只有极少数雷暴大风是由对流风暴的强烈入流气流导致。通常对流层中层或以上有明显干层、对流层中下层大气较大垂直减温率的环境条件下易导致对流风暴的强下沉气流,这种环境条件下计算的下沉对流有效位能(DCAPE)通常都较大,比如2015年导致“东方之星”翻沉的下击暴流就具有明显的对流层中层干层特征(温度露点差最大达 $36^{\circ}\text{C}$ )<sup>[9]</sup>;但是较高海拔地区的大气低层存在干层时( $T\text{-log}p$ 图上呈现倒V形的温湿廓线分布)的对流风暴也能够导致强下沉气流<sup>[17]</sup>,甚至会产生干下击暴流;在对流层大气都较湿的情况下,强降水的拖曳和蒸发作用也会导致强下沉气流(湿下击暴流),加之动量交换作用,是强降水也时常伴随大风的直接原因。由于产生大冰雹的环境条件要求有较大的对流有效位能、较强的中层垂直风切变和合适的湿球零度层高度,因此要求环境大气有较大的温度递减率,这既有利于强上升气流,也有利于强下沉气流;并且云中冰相粒子在下落过程中融化、升华吸收大量环境大气热量会非常有利于加强下沉气流<sup>[19-20]</sup>,这些因素都是大冰雹天气通常伴随大风天气的重要原因。有研究认为 $850\text{ hPa}$ 与 $700\text{ hPa}$ 之间较大的垂直减温率更有利于雷暴大风天气<sup>[21]</sup>。根据这些环境条件,一些研究定义了不同的雷暴大风指数或者下击暴流指数<sup>[22-27]</sup>。

从天气形势来看,我国的雷暴大风天气易发生在春季和夏初大气斜压性较强、温度直减率较大的天气背景下,比如春季西风槽和冷锋、春末夏初北方冷涡(尤其冷涡的西南象限)、水汽云图上的暗区等背景下发展起来的强对流风暴,如2006年4月28日山东(西风槽和冷锋影响)、2009年6月3日河南(冷涡影响)、2013年3月19日江南和华南(西风槽和冷锋影响)、2015年6月1日“东方之星”客轮翻沉事件(冷涡影响)、2016年6月30日山东、2018年3月4日江西等雷暴大风个例等,这是因为在这些天气形势下对流层大气中层通常会存在干层和垂直减温率较大的缘故。

龙卷通常分为两类,一类为中气旋龙卷,另一类为非中气旋龙卷<sup>[8, 28-29]</sup>。通常中气旋龙卷强度较强<sup>[8, 30]</sup>,但仅约25%甚至更少的雷达探测到的中气旋会生成龙卷<sup>[8, 31-32]</sup>。目前只有对中气旋龙卷有可能进行有效预警<sup>[7-8, 28]</sup>。EF2级及以上中气旋龙卷除了要求有利于超级单体风暴的环境条件一定的对流有效位能和强的 $0\sim 6\text{ km}$ 垂直风切变外,还包括低的抬升凝结高度和

较大的低层(0~1 km)垂直风切变<sup>[7-8, 33-35]</sup>, 比如, 2016年阜宁EF4级龙卷事件就具备了所有以上这些有利于中气旋龙卷的有利环境条件<sup>[9]</sup>。不过, 热带气旋中产生中气旋龙卷环境大气的CAPE值一般较小<sup>[8, 36-37]</sup>。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<sup>[27]</sup>, 通常辐合线具有较强的水平风切变和垂直涡度, 而垂直风切变一般较弱<sup>[9, 28, 38]</sup>; 与下击暴流相联系的弓形回波会生成小尺度的中涡旋(mesovortices)<sup>[39]</sup>也能够发展为强度可达F4或者EF4级的龙卷<sup>[29]</sup>, 因此, 产生龙卷的爬线多为弓型回波或者波动型线状回波(LEWP)<sup>[9, 28]</sup>。对流风暴的出流气流对龙卷的生成至关重要, 其观测证据是龙卷发生发展在超级单体风暴的壁云(wall cloud)附近, 而壁云的形成是超级单体的入流气流和出流气流混合作用的结果<sup>[40]</sup>。对流风暴的冷出流与环境之间形成的地表大气温度差需要有一个平衡点(sweet spot)才有利于龙卷生成<sup>[41]</sup>, 这个温度差通常小于4℃<sup>[8, 28, 42]</sup>。

从天气形势来看, 我国龙卷易发生在暴雨或者台风这样的天气背景下, 比如2012年7月21日北京通州(暴雨背景)、2015年10月4日广东佛山(彩虹台中)、2016年6月23日江苏阜宁(暴雨背景)等龙卷个例, 这是因为在这样的天气形势下经常会存在低空急流(即低空垂直风切变较大)和较低的抬升凝结高度的缘故。

由于受该类天气时空尺度较小、分布不连续的特点和可预报性的限制, 目前的数值模式在短期预报时效内还不能直接做出雷暴大风和龙卷预报。因此, 雷暴大风和龙卷的短期预报主要基于数值天气预报资料, 从其发生发展机理和所依赖的环境条件出发, 根据不同的诊断物理量对该类天气的指示意义来进行<sup>[7-8, 13, 15, 17]</sup>, 也就是现在广泛应用的“配料法”。

由于雷暴大风和龙卷的发生发展需要多个方面的物理条件, 且较多研究给出的物理量统计结果表明不可能找到一个完全明确的单一物理量阈值来表征该类天气发生发展的物理条件<sup>[43-44]</sup>, 因此类似模糊逻辑和机器学习等这些能够综合应用代表不同物理条件的多个物理量的技术方法是当前强对流天气预报技术研究的重要方面。应用模糊逻辑方法的雷暴大风或者龙卷预报技术一般基于探空资料或者数值模式预报资料, 通过挑选对不同类型强对流天气具有指示意义的物理量, 根据历史个例的统计结果分别来构建独立隶属函数, 并赋予不同物理量不同的权重来给出最终的综合预报结果。因此, 其发生发展所需环境条件的气

候分布特征是制作分类强对流预报的必要基础工作, 目前已有一些研究工作<sup>[40-41]</sup>。基于集合数值预报的强对流短期(概率)预报技术是当前预报技术的重要发展方向。美国SPC已经建立了比较完整的基于多尺度数值集合预报的强对流分类预报产品体系, 而NCEP的区域短期集合预报系统(Short Range Ensemble Forecast, SREF)和全球集合预报系统(GEFS, Global Ensemble Forecast System)分别为SPC 1~3 d和SPC 3~8 d的对流天气短期预报和中期展望提供数值预报依据<sup>[45-47]</sup>。

但目前不同等级的雷暴大风和极端雷暴大风天气预报以及预报精细化方面还存在较大不足。而我国龙卷由于发生频率远低于美国<sup>[3, 6]</sup>, 其短期预报难度则更大, 我国现有业务中尚没有龙卷的主客观短期预报产品。因此, 需要综合利用多源观测资料和高分辨率数值(集合)预报资料, 在综合统计不同强度和极端强度的多物理量分布特征的基础上, 应用模糊逻辑或者机器学习等方法进一步提升该类天气的(概率)预报准确率和精细化水平。

## 2 雷暴大风与龙卷的监测和短时临近预报预警

雷暴大风与龙卷的监测和临近预警主要依赖新一代天气雷达网。自动气象站观测风场能够相当程度上监测雷暴大风, 但如引言中所述, 由于强风灾害具有显著的小尺度时空分布特征<sup>[1, 3]</sup>, 因此目前的自动气象站网还几乎无法监测到雷暴大风过程中的最大风速分布。龙卷监测就更为困难, 除了依靠雷达资料外, 更多依靠的是目击者报告、互联网资料、灾害现场调查或者其他部门(如交通部门等)的视频监控等。

中层径向速度辐合(MARC)<sup>[7, 48]</sup>、强反射率因子核心下降<sup>[49]</sup>、后侧入流槽口<sup>[50]</sup>和弓形回波<sup>[7]</sup>等是指雷暴大风天气的重要雷达观测特征。当对流风暴周边干空气被夹卷进入风暴内部后, 导致其下沉气流内雨滴迅速蒸发使下沉气流降温而导致加强的向下加速度, 这种对流层中层干空气的夹卷进入对流风暴的过程在径向速度图上表现为MARC特征和反射率因子图上的后侧入流槽口。利用MARC预警雷暴大风的提前时间约为10~30 min。在有利于雷暴大风的环境条件下, 中气旋可以更有效地将环境干空气夹卷进入下沉气流内导致雨滴、冰物质蒸发或者升华大气降温形成向下加速度从而加强下沉气流使得地面风速进一步增加<sup>[7]</sup>。当对流风暴距离雷达站较近(约70 km以内)时, 若雷达观测的0.5°仰角径向速度场有超过20 m/s左右以上的风速大值区需要关注地面雷暴大风的可能

性<sup>①</sup>，如2015年6月1日“东方之星”客轮翻沉事件过程中0.5°仰角径向速度场有超过19 m/s的风速大值区。移动越快的对流风暴其产生雷暴大风的可能性和强度越大，据估计，12 m/s左右以上的移速有可能产生8级左右地面大风，19 m/s左右以上的移速可能产生10级左右地面大风<sup>①</sup>。如果天气雷达上能够观测到明显的阵风锋，则可能表明对流风暴的冷池强度较大，其产生较大地面风速的可能性也较大。不仅地面自动气象站的风场能够监测地面大风，地面自动气象站监测的强3 h变压<sup>①</sup>或者强变温也能够监测对流风暴冷池的强度从而可辅助监测雷暴大风天气。地球静止气象卫星对雷暴大风天气也有一定的监测能力，如前所述的水汽图像的暗区中发展的对流云、具有上冲云顶的对流云、呈现“胡萝卜”或者尖锥状的对流云系产生雷暴大风的可能性较大等。未来，利用风云4号卫星提供的垂直探测资料计算雷暴大风指数结合其他监测资料能够更好地监测和临近预警雷暴大风天气<sup>[26]</sup>。

多普勒天气雷达探测到的中气旋是目前龙卷临近预警主要依据<sup>[7, 17]</sup>，但如前所述，美国的统计表明仅约有25%甚至更少的雷达探测到的中气旋会生成龙卷，但当中气旋底距离地面高度小于1 km时，龙卷的发生概率则约为40%<sup>[7, 31]</sup>。目前美国业务发布龙卷警报的依据主要是：在有利于龙卷的环境条件下，探测到强中气旋或中等以上强度中气旋，并且其底高不超过1 km<sup>[7]</sup>。美国的移动X波段多普勒雷达（DOW）在龙卷研究中发挥了重要作用，其观测到的最大龙卷风速达135 m/s。2016年6月23日江苏阜宁龙卷发生时，江苏省气象台根据这些依据指导阜宁县气象台在14:39时发布的雷暴橙色预警信号中明确指出将有龙卷发生。美国基于中气旋的龙卷警报平均提前时间约为10~20 min。但由于多普勒天气雷达的中气旋产品本身就存在很多误识别，再加之大多数中气旋并不会产生龙卷，因此基于中气旋的龙卷预警存在很高的虚警率。多普勒天气雷达有时能够探测到的龙卷涡旋特征（TVS）是龙卷临近预警的另一重要依据<sup>[7, 17]</sup>，但对当时当地的龙卷已经几乎没有预警提前时间，不过可以对龙卷移动方向的下游地区具有提前临近预警作用。由于部分产生龙卷的经典超级单体存在明显的钩状回波，因此这也是龙卷预警的参考依据之一，比如2016年6月23日产生江苏阜宁龙卷的经典超级单体就具有非常明显的钩状回波特征<sup>[4, 9]</sup>。目前的地球静止气象卫星和自动气象站网观测资料还不可能在龙卷监测和临近预警中发挥直接作用，但我国将在“重大自然

灾害监测预警与防范”重点专项支持下发展龙卷探测雷达，以期能够提高龙卷等小尺度涡旋的探测能力。

双偏振天气雷达观测资料能够提高降水粒子形态的识别能力<sup>[51-52]</sup>和识别龙卷所破坏物体的碎片被卷入龙卷中所导致的双偏振雷达观测特征（TDS）<sup>[53]</sup>，能够提高冰雹粒子的识别率和判断冰雹在落地之前是否完全融化还是部分融化等<sup>[54]</sup>，从而有助于监测龙卷以及与冰雹天气相伴随的雷暴大风天气，但这些双偏振雷达必须具有较高的空间分辨能力才可能探测这些小尺度的天气系统。此外，基于多普勒天气雷达资料中的这些特征，中气旋、雷暴大风等的自动识别算法也得到了发展和完善<sup>[55-56]</sup>。

由于临近预报最长时效仅为1~2 h，因此雷暴大风与龙卷的短时预报更多依赖于快速更新或者集合的高时空分辨率数值模式系统预报。目前这些天气的短时预报的主要依据是高分辨率数值预报资料的对流天气环境条件分析和基于中小尺度机理的客观预报产品，也就是依赖“对流可分辨”高分辨率（集合）数值预报产品后处理。目前，已有很多国家都在探索从对流风暴的中尺度结构和发展机理方面如何应用“对流可分辨”的高分辨率数值模式（集合）预报产品进行强对流分类预报<sup>[15, 57]</sup>，如美国Oklahoma大学的风暴分析与预报中心（CAPS）风暴尺度集合预报SSEF产品<sup>[52]</sup>、美国的强风暴预报中心（SPC）<sup>[15]</sup>和我国中央气象台强天气预报中心发展了多模式集合的预报产品等。为了获取尺度小、变化快的天气系统在模式中的反映，Kain等<sup>[58]</sup>从模式预报的每个时间步的物理量场输出逐小时时段内的每一个格点的物理量最大值，称为逐时最大场。他们发现可能与雷暴大风和龙卷关系密切的物理量有：最大上升气流、3~6 km高度之间的最大下沉气流速度、表征对流强度的地面上空1 km高度的最大反射率因子、最大上升气流螺旋度、最大地面10 m风速等<sup>[52]</sup>。但需要指出的是，虽然基于高分辨率数值（集合）预报的强对流天气的短时预报技术取得了一定进展，但还有非常多的工作需要开展以提高其预报性能，比如模式框架本身性能的改进、不同微物理过程的改进、资料同化技术、不同类型强对流天气的精细化预报等多个方面<sup>[15]</sup>。

### 3 雷暴大风与龙卷灾害现场调查

如前所述，目前我国的气象业务观测体系仍然难以全面监测雷暴大风和龙卷等极端强对流天气，尤其是极端大风风速，因此，现场天气调查依然是分析和确认这些灾害性大风天气精细分布的最重要的直接手

① 郑媛媛, 2017. 雷暴大风和龙卷短临预报预警. 2017年强对流天气汛前预报技术准备会。

段,从而确定大风的具体发生时间和地点、灾情、灾害路径长度和宽度、风向等,并可根据风速等级标准估计风速和判断风灾强度。现场调查的主要装备包括智能手机、相机、GPS定位仪、无线网络通信和无人机等,目前,无人机在现场调查中发挥了重要的无可替代作用。美国也有人提出使用双偏振天气雷达观测到的TDS特征来估计龙卷灾害分布<sup>[59]</sup>,但这需要这些雷达观测具有较现有业务雷达高得多的空间分辨率。通过现场调查确定风灾强度可以满足人们和科研人员了解风灾强度的需求,可以获得风速与相关设施结构性能的关系,并可从气候上评估龙卷和下击暴流等导致的小尺度风灾给人们和基础设施所带来的风险。但由于灾害标识物(DI)的复杂性,通过灾害程度来评估风速必然有较大不确定性,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,比如已广泛应用的“藤田等级”(F等级)或者“改进的藤田等级”(EF等级)。

Fujita开创性地开展了风灾调查工作<sup>[60]</sup>,并于1971年提出了F等级<sup>[61]</sup>,用来估计龙卷和台风等导致的风灾强度。F等级在1970年代初被美国天气局采用作为估计龙卷强度的官方标准。到目前,F等级已得到了广泛应用,但也存在一些问题,比如并没有进行过校准,对F3—F5级风速存在明显的高估、低等级风速存在低估,其DI种类较少、主要是结构良好的框架房屋等。因此,美国得克萨斯技术大学风科学和工程中心联合多个部门专家对F等级进行了修订,称为EF等级<sup>[62]</sup>。EF等级主要调整了F等级每一级别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)。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;树木分为硬木和软木两类DI;其它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。2007年美国气象局开始采用EF等级作为估计龙卷强度的等级标准,目前还有加拿大、法国等国采用了该等级标准,并根据当地DI情况对其进行了修正,而我国的龙卷强度等级标准正在制定中。还需指出的是,F等级的风速为地面10 m高度处最快1/4 mile(约400 m)平均风速,EF等级的风速为地面10 m高度处3 s平均阵风风速,二者有所不同<sup>[3]</sup>。

美国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<sup>[63-65]</sup>。近年来,我国的风灾调查体系也已逐步建立,如Meng等<sup>[66]</sup>详细调查了2012年7月21日北京特大暴雨期间发生的一次龙卷所致灾害

情况,中国气象局组织北京大学、南京大学等单位联合调查了2015年6月1日“东方之星”客轮翻沉事件、2015年10月4日彩虹台风中的佛山龙卷、2016年6月23日江苏阜宁龙卷等重大强对流天气灾害情况<sup>[1-3,67]</sup>。

有研究使用F等级和EF等级详细估计了2015年6月1日“东方之星”客轮翻沉事件和2016年6月23日江苏阜宁龙卷的现场灾害情况<sup>[3]</sup>,本文仅以F1和EF1级灾害评估为例说明二者的异同,此外,F1和EF1级风灾在我国发生频率相对较高,从而可为地方气象部门的相关工作提供一定参考。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1)。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1a)和顺星村附近(图未给出)杨树折断等。不少于20%屋顶屋瓦被刮掉属于F1级和EF1级灾害,如图1b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(图未给出)被吹掉,未超过20%,因此这些房屋灾害等级可估计为F1级,但未达到EF1级<sup>[3]</sup>。



图1 F1和EF1级灾害<sup>[3]</sup>

(a) 2015年6月1日湖北监利四台村附近水渠两侧折断的杨树; (b) 无人机拍摄的2016年6月23日江苏阜宁计桥村被刮掉屋瓦的房屋

Fig. 1 F1 and EF1 damages<sup>[3]</sup>

(a) Snapped aspens occurred on 1 June 2015 at Sitai Village, Jianli County, Hubei Province; (b) Partially untiled roofs by storm occurred on 23 June 2016 at Jiqiao Village, Funing County, Jiangsu Province

## 4 结论

强雷暴大风与龙卷具有非常强的致灾性,近年来我国该类灾害事件引发广泛关注。本文系统总结了雷暴大风与龙卷的监测和预报预警技术以及大风灾害现场调查和估计方法。

1) 雷暴大风天气多与对流层大气存在干层和较大垂直减温率有关,EF2级及以上中气旋龙卷通常要

求有一定的对流有效位能、强的垂直风切变（0~6 km）、低的抬升凝结高度和较大的低层（0~1 km）垂直风切变。目前雷暴大风的短期预报主要基于数值预报和“配料法”，但我国现有业务中尚没有龙卷的主客观短期预报产品。

2) 除了自动气象站观测的地面风场外，指示雷暴大风天气的雷达观测特征包括中层径向速度辐合、雷达低仰角观测到的大径向速度区、强反射率因子核心下降、后侧入流槽口和弓形回波等；对流风暴的快速移动也能够指示雷暴大风天气。目前我国龙卷临近预警主要依据是中气旋和TVS特征以及低层钩状回波特征等。目前的地球静止气象卫星和自动气象站风场、变压、变温等观测资料能够辅助监测雷暴大风天气，但还不可能直接监测龙卷。

3) 雷暴大风与龙卷的短时预报主要依赖快速更新或者集合的高时空分辨率数值模式系统预报及其后处理，但还有非常多的工作需要开展以提高其预报性能。

4) 现场天气调查工作依然是分析和确认雷暴大风和龙卷大风精细分布的最重要的直接手段，但风速估计具有较大的不确定性。目前使用的最为广泛的风速等级标准是F等级和EF等级，美国、加拿大、法国等国已采用了EF等级。我国的风灾调查体系也已逐步建立，并正在发展自己的龙卷强度等级标准。

#### 参考文献

- [1] 郑永光, 田付友, 孟智勇, 等. “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, 2016, 42(1): 1-13.
- [2] Meng Z, Yao D, Bai L, et al. Wind estimation around the shipwreck of Oriental Star based on field damage surveys and radar observations. Science Bulletin, 2016, 61(4): 330-337.
- [3] 郑永光, 朱文剑, 姚聃, 等. 风速等级标准与2016年6月23日阜宁龙卷强度估计. 气象, 2016, 42(11): 1289-1303.
- [4] 张小玲, 杨波, 朱文剑, 等. 2016年6月23日江苏阜宁EF4级龙卷天气分析. 气象, 2016, 42(11): 1304-1314.
- [5] Xue M, Zhao K, Wang M, et al. Recent significant tornadoes in China. Advances in Atmospheric Sciences, 2016, 33(11): 1209-1217.
- [6] 范雯杰, 俞小鼎. 中国龙卷的时空分布特征. 气象, 2015, 41(7): 793-805.
- [7] 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展. 气象学报, 2012, 70(3): 311-337.
- [8] 郑永光, 陶祖钰, 俞小鼎. 强对流天气预报的一些基本问题. 气象, 2017, 43(6): 641-652.
- [9] 郑永光, 朱文剑, 田付友. 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. 气象科技进展, 2018, 8(2): 44-54.
- [10] Fujita T T, Wakimoto R M. Five scales of airflow associated with a series of downbursts on 16 July 1980. Monthly Weather Review, 1981, 109(7): 1438-1456.
- [11] 高玉春. 气象业务发展对新一代天气雷达技术性能提升的要求. 气象科技进展, 2017, 7(3): 16-21.
- [12] 郑永光, 张小玲, 周庆亮, 等. 强对流天气短时临近预报业务技术进展与挑战. 气象, 2010, 36(7): 33-42.
- [13] 郑永光, 林隐静, 朱文剑, 等. 强对流天气综合监测业务系统建设. 气象, 2013, 39(2): 234-240.
- [14] 张涛, 蓝渝, 毛冬艳, 等. 国家级中尺度天气分析业务技术进展 I: 对流天气环境场分析业务技术规范改进与产品集成系统支撑技术. 气象, 2013, 39(7): 894-900.
- [15] 蓝渝, 张涛, 郑永光, 等. 国家级中尺度天气分析业务技术进展 II: 对流天气中尺度过程分析规范和支撑技术. 气象, 2013, 39(7): 901-910.
- [16] 郑永光, 周康辉, 盛杰, 等. 强对流天气监测预报预警技术进展. 应用气象学报, 2015, 26(6): 641-657.
- [17] 杨波, 郑永光, 蓝渝, 等. 国家级强对流天气综合业务支撑体系建设. 气象, 2017, 43(7): 845-855.
- [18] Johns R H, Doswell III C A. Severe local storms forecasting. Weather and Forecasting, 1992, 7(4): 588-612.
- [19] Wakimoto R M, Kessinger C J, Kingsmill D E. Kinematic, thermodynamic, and visual structure of low-reflectivity microbursts. Monthly Weather Review, 1994, 122(1): 72-92.
- [20] Wilson J W, Wakimoto R M. The discovery of the downburst: T. T. Fujita's contribution. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, 82(1): 49-62.
- [21] Ellrod G P. Environmental conditions associated with the Dallas microburst storm determined from satellite soundings. Weather and Forecasting, 1989, 4(4): 469-484.
- [22] McCann D W. WINDEX: a new index for forecasting microburst potential. Weather and Forecasting, 1994, 9(4): 532-541.
- [23] Atkins N T, Wakimoto R M. Wet microburst activity over the southeastern United States: implications for forecasting. Weather and Forecasting, 1991, 6(4): 470-482.
- [24] Ellrod G P. Experimental microburst image products derived from GOES sounder data. Preprints, 16th Conference on Weather Analysis and Forecasting, Phoenix, AZ, American Meteorological Society, 1998, 16: 43-45.
- [25] Pryor K L, Ellrod G P. Recent improvements to the GOES microburst products. Weather and Forecasting, 2004, 19: 582-594.
- [26] Pryor K L, Ellrod G P. WMSI: a new index for forecasting wet microburst severity. Electronic Journal of Operational Meteorology, 2004.
- [27] Pryor K L. Progress and developments of downburst prediction applications of GOES. Weather and Forecasting, 2015, 30(5): 1182-1200.
- [28] Wakimoto R M, Wilson J W. Non-supercell tornadoes. Monthly Weather Review, 1989, 117(6): 1113-1140.
- [29] Markowski P, Richardson Y. Mesoscale Meteorology in Midlatitudes. Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 2010: 245-260.
- [30] Agee E, Jones E. Proposed conceptual taxonomy for proper identification and classification of tornado events. Weather and Forecasting, 2009, 24(2): 609-617.
- [31] Davies-Jones R, Trapp R J, Bluestein H B. Tornadoes and tornadic storms. Severe Convective Storms. Meteor Monogr, American Meteorological Society, 2001, 28(50): 167-221.
- [32] Trapp R J, Stumpf G J, Manross K L. A reassessment of the percentage of tornadic mesocyclones. Weather and Forecasting, 2005, 20(4): 680-687.
- [33] Brooks H E, Lee J W, Craven J P. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data. Atmospheric Research, 2003, 67: 73-94.
- [34] Craven J P, Brooks H E. Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep moist convection. National Weather Digest, 2004, 28(1): 13-24.
- [35] Grams J S, Thompson R L, Snively D V, et al. A climatology and comparison of parameters for significant tornado events in the United States. Weather and Forecasting, 2012, 27(1): 106-123.
- [36] McCaul E W. Buoyancy and shear characteristics of hurricane-tornado environments. Monthly Weather Review, 1991, 119(8): 1954-1978.
- [37] 郑媛媛, 张备, 王啸华, 等. 台风龙卷的环境背景和雷达回波结构分析. 气象, 2015, 41(8): 942-952.
- [38] Bluestein H B. Severe Convective Storms and Tornadoes: Observations and Dynamics. Heidelberg: Springer-Praxis, 2013: 307-360.
- [39] Atkins N T, Bouchard C S, Przybylinski R W, et al. Damaging surface wind mechanisms within the 10 June 2003 Saint Louis bow echo during BAMEX. Monthly Weather Review, 2005, 133(8):

- 2275-2296.
- [40] Doswell C A, Burgess D W. Tornadoes and tornadic storms: a review of conceptual models. *The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards*. Washington DC: American Geophysical Union, 1993: 161-172.
- [41] Schultz D M, Richardson Y P, Markowski P M, et al. Tornadoes in the Central United States and the "Clash of Air Masses". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, 95(11): 1704-1712.
- [42] Markowski P M, Straka J M, Rasmussen E N. Direct surface thermodynamic observations within the rear-flank downdrafts of nontornadic and tornadic supercells. *Monthly Weather Review*, 2002, 130(7): 1692-1721.
- [43] 樊李苗, 俞小鼎. 中国短时强对流天气的若干环境参数特征分析. *高原气象*, 2013, 32(1): 156-165.
- [44] Tian F, Zheng Y, Zhang T, et al. Statistical characteristics of environmental parameters for warm season short-duration heavy rainfall over central and eastern China. *Journal of Meteorological Research*, 2015, 29(3): 370-384.
- [45] Bright D R, Weiss S J, Levit J J, et al. The evolution of multi-scale ensemble guidance in the prediction of convective and severe convective storms at the Storm Prediction Center. Preprints, 24th Conference Severe Local Storms, Savannah GA, 2008.
- [46] Guyer J L, Bright D R. Utility of SPC short-range ensemble forecast (SREF) guidance for forecasting the development of severe convection. Preprints, 24th Conference Severe Local Storms, Savannah GA, 2008.
- [47] Du J, Dimego G, Toth Z, et al. NCEP short-range ensemble forecast (SREF) system upgrade in 2009. 19th Conference on NWP and 23rd Conference on WAF, 2009.
- [48] Schmocker G K, Przybylinski R W, Lin Y J. Forecasting the initial onset of damaging downburst winds associated with a mesoscale convective system (MCS) using the mid-altitude radial convergence (MARC) signature. Preprints, 15th Conference on Weather Analysis and Forecasting, Norfolk, American Meteorological Society, 1996: 306-311.
- [49] Roberts R D, Wilson J W. A proposed microburst nowcasting procedure using single-Doppler radar. *Journal of Applied Meteorology*, 1989, 28(4): 285-303.
- [50] Przybylinski R W. The bow echo: observations, numerical simulations, and severe weather detection methods. *Weather and Forecasting*, 1995, 10(2): 203-218.
- [51] Park H, Ryzhkov A V, Zrnich D S, et al. The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR-88D: description and application to an MCS. *Weather and Forecasting*, 2009, 24(3): 730-748.
- [52] Al-Sakka H, Boumahmoud A A, Fradon B, et al. A new fuzzy logic hydrometeor classification scheme applied to the French X-, C-, and S-band polarimetric radars. *Journal Applied Meteorology and Climatology*, 2013, 52(10): 2328-2344.
- [53] Ryzhkov A, Schuur T J, Burgess D W, et al. Polarimetric tornado detection. *Journal of Applied Meteorology*, 2005, 44(5): 557-570.
- [54] Heinselman P L, Ryzhkov A V. Validation of polarimetric hail detection. *Weather and Forecasting*, 2006, 21(5): 839-850.
- [55] Elizaga F, Conejo S, Martín F. Automatic identification of mesocyclones and significant wind structures in Doppler radar images. *Atmospheric Research*, 2007, 83(2): 405-414.
- [56] 李国翠, 刘黎平, 张秉祥, 等. 基于雷达三维组网数据的对流性地面大风自动识别. *气象学报*, 2013, 71(6): 1160-1171.
- [57] 郑永光, 薛明, 陶祖钰. 美国NOAA试验平台和春季预报试验概要. *气象*, 2015, 41(5): 568-582.
- [58] Kain J S, Dembek S R, Weiss S J, et al. Extracting unique information from high-resolution forecast models: monitoring selected fields and phenomena every time step. *Weather and Forecasting*, 2010, 25(5): 1536-1542.
- [59] Bodine D J, Kumjian M R, Palmer R D, et al. Tornado damage estimation using polarimetric radar. *Weather and Forecasting*, 2013, 28(1): 139-158.
- [60] Fujita T T, Bradbury D L, van Thullenar C F. Palm sunday tornadoes of April 11, 1965. *Monthly Weather Review*, 1970, 98(1): 29-69.
- [61] Fujita T T. Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity. SMRP Research Paper, University of Chicago, 1971, 91: 42.
- [62] McDonald J R, Mehta K C. A recommendation for an enhanced Fujita scale (EF-scale). Wind Science and Engineering Center, Texas Tech University, 2006.
- [63] Bunting W F, and Smith B E. A guide for conducting convective windstorm surveys. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Scientific Services Region, 1993.
- [64] Doswell C A. A guide to F-scale damage assessment. US Dept. of Commerce, NOAA/NWS, 2003.
- [65] Edwards R, LaDue J G, Ferree J T, et al. Tornado intensity estimation: past, present, and future. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94(5): 641-653.
- [66] Meng Z, Yao D. Damage survey, radar, and environment analyses on the first-ever documented tornado in Beijing during the heavy rainfall event of 21 July 2012. *Weather and Forecasting*, 2014, 29(3): 702-724.
- [67] 朱文剑, 盛杰, 郑永光, 等. 1522号“彩虹”台风龙卷现场调查与中尺度特征分析. *暴雨灾害*, 2016, 35(5): 403-414.