

张涛,关良,郑永光,等,2020.2019年7月3日辽宁开原龙卷灾害现场调查及其所揭示的龙卷演变过程[J].气象,46(5):603-617. Zhang T, Guan L, Zheng Y G, et al, 2020. Damage survey of the 3 July 2019 Kaiyuan tornado in Liaoning Province and its evolution revealed by disaster[J]. Meteor Mon, 46(5):603-617 (in Chinese).

2019年7月3日辽宁开原龙卷灾害现场调查及其所揭示的龙卷演变过程*

张涛¹ 关良¹ 郑永光¹ 陈传雷² 才奎志² 李得勤³
崔胜权⁴ 吴云⁵ 张小玲¹ 杨波¹ 蓝渝¹

1 国家气象中心,北京 100081

2 辽宁省气象灾害监测预警中心,沈阳 110052

3 沈阳中心气象台,沈阳 110052

4 铁岭市气象局,辽宁铁岭 112600

5 开原市气象局,辽宁开原 112300

提 要: 2019年7月3日,辽宁省铁岭开原市发生了一次具有详细视频记录的强龙卷灾害。基于详细的现场调查和视频资料,得出了该次龙卷的生命史、发生时间、路径、灾害宽度和强度分布,发现龙卷强度的减弱或加强变化与密集高楼和空旷田野区等下垫面状况明显相关联。综合评估本次龙卷最大强度为中国龙卷强度等级的四级(相当于美国的EF4级),但四级灾害点分布范围非常小,灾害分布宽度和EF4级灾害点范围都显著小于2016年江苏阜宁EF4级龙卷。钢筋混凝土框架结构的居民小区楼房在至少EF3级强度的龙卷风袭击后保持主体结构完好,而大型钢架厂房对龙卷灾害的防御能力远差于居民小区。强龙卷所经地区多为旷野和厂房,受影响人员较少,且龙卷发生时视野极佳,这是该次龙卷没有造成更大灾情的重要原因。由于下垫面状况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。

关键词: 开原,龙卷,强度,现场调查

中图分类号: P445, P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.05.002

Damage Survey of the 3 July 2019 Kaiyuan Tornado in Liaoning Province and Its Evolution Revealed by Disaster

ZHANG Tao¹ GUAN Liang¹ ZHENG Yongguang¹ CHEN Chuanlei² CAI Kuizhi² LI Deqin³
CUI Shengquan⁴ WU Yun⁵ ZHANG Xiaoling¹ YANG Bo¹ LAN Yu¹

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 Liaoning Meteorological Disaster Monitoring and Warning Center, Shenyang 110052

3 Shenyang Central Meteorological Observatory, Shenyang 110052

4 Tieling Meteorological Office, Liaoning, Tieling 112600

5 Kaiyuan Meteorological Station, Liaoning, Kaiyuan 112300

Abstract: On July 3, 2019, a violent tornado, which was recorded by video in detail, occurred in Kaiyuan City, Tieling, Liaoning Province. Based on the detailed damage survey and video data, this paper presents the lifecycle, occurrence time, path, disaster width and intensity distribution of the tornado. It is found

* 国家重点研发计划(2018YFC1507504,2017YFC1502003)和国家自然科学基金项目(41375051)共同资助

2019年8月15日收稿; 2019年12月23日收修定稿

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

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

that the weakening or strengthening of the tornado intensity was significantly related to the underlying surface conditions of dense high buildings and open field areas. According to the comprehensive assessment, the maximum intensity of this tornado is Level 4 (equivalent to EF4 in the United States), but the distribution range of the Level 4 disaster was very small, and the disaster distribution width and the range of Level 4 disaster were significantly smaller than the EF4 tornado in Funing, Jiangsu Province in 2016. The main structure of residential buildings with reinforced concrete frame structure remained almost intact after striking of the tornado with EF3 intensity at least, while the defense ability of large-scale steel frame plant to tornado disaster was far worse than that of residential buildings. The areas through which the powerful tornado passed are mostly wilderness and factories. Fewer people were affected and there were good views when the tornado occurred, which is an important reason why the tornado did not cause more serious disasters. Due to the complexity of underlying surface conditions and disaster mechanism, there must be some uncertainty in the estimation of the tornado strength.

Key words: Kaiyuan, tornado, intensity, damage survey

引 言

2019年7月3日约17—18时(北京时,下同),辽宁省铁岭的开原市发生了一次强龙卷过程(简称开原龙卷),最终导致7人死亡(第7人为后期抢救无效去世)、190余人受伤、9900余人受灾、大量基础设施损毁,造成了严重的社会和经济影响。

近年来,我国有多个强龙卷造成了严重的人员伤亡和社会经济损失,比如2015年“彩虹”台风龙卷(朱文剑等,2016)、2016年6月23日江苏阜宁EF4级龙卷(Xue et al, 2016; 张小玲等, 2016; 郑永光等, 2016b)等,其中又以阜宁龙卷造成的损失最为严重。与之前龙卷过程不同的是,此次龙卷过程有大量的目击者和当地交警部门的视频或者照片等证据,并且开原市气象局(距离龙卷路径最近约2 km)工作人员也对其进行了观测和记录。

由于雷暴大风和龙卷等极端强对流天气、尤其是极端大风的时空尺度非常小,目前我国的气象业务观测体系仍然难以对其全面监测(郑永光等, 2016a; 2016b; 2017; 2018),现场天气调查依然是分析和确认这些灾害性大风天气及其所致灾害精细分布最重要的直接手段,从而确定其具体发生时间和地点、灾情、灾害路径长度和宽度、风向等,并根据风速等级标准估计风速和判断风灾强度(郑永光等, 2016a; 2016b; 2018)。

Fujita(1971)最早提出了Fujita等级来估计龙卷、热带气旋等的风速,目前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, 1971; 1974; 1978; Bunting and Smith, 1993; Doswell III, 2003; Doswell III et al, 2009; Frelich and Ostuno, 2012; Edwards et al, 2013; Atkins et al, 2014)。我国也逐步建立起风灾现场调查体系,如2012年7月21日北京一次龙卷过程(Meng and Yao, 2014)、2015年6月1日“东方之星”客轮翻沉事件(Meng et al, 2016; 郑永光等, 2016a)、2015年10月4日“彩虹”台风龙卷(朱文剑等, 2016)、2016年6月23日江苏阜宁EF4级龙卷(Xue et al, 2016; 郑永光等, 2016b)等的详细调查结果;佛山市龙卷风研究中心还给出了2018年中国龙卷活动情况(黄先香等, 2019)等。

目前较多应用的风速等级(郑永光等, 2016b)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(Meaden, 2004; Meaden et al, 2007)、F等级和EF等级(Wind Science and Engineering Center, 2004)以及美国用于飓风风速估计的S等级。这些风速等级都不是我国制定的。目前,中国气象科学研究院和国家气象中心共同完成了中华人民共和国气象行业标准——龙卷强度等级(中国气象局, 2019),已于2019年4月28日发布,8月1日实施;该龙卷强度等级共分四个等级,四级最强,与美国EF等级存在如下对应关系:一级对应EF0级及其以下;二级对应EF1级;三级对应EF2和EF3级;四级对应EF4和EF5级。

东北地区虽然龙卷发生频率要少于江淮、广东等地,但也是我国的龙卷多发区之一(范雯杰和俞小鼎, 2015);东北地区有详细记录的龙卷个例非常罕见,因此非常值得对此次开原龙卷过程的现场调查

结果和龙卷发生发展演变过程进行详细分析,获取其时空分布和强度,为更进一步的研究工作提供基础资料和参考依据。

1 概 况

开原龙卷发生在东北冷涡西南侧槽后,由一个孤立超级单体造成(郑永光等,2020)。龙卷发生后,国家气象中心立即派出专家会同中国气象科学研究院、辽宁省气象局相关部门、南京大学和佛山市龙卷风研究中心人员共同进行了现场调查。现场调查方式为近距离观察、测量、拍照取证建筑、植被等受损情形,利用无人机拍摄俯视、远视、路径跟踪等视频,分别测量路径上严重受损宽度和明显受损宽度,询问龙卷目击人员或灾情现场相关人员。调查工具主要有量尺、相机、无人机、手机地理信息软件等。

综合灾情现场、监控视频、停电情况等信息分析:开原龙卷漏斗云 17:15 左右在开原市金钩子镇金英村北约 1 km 处开始形成,17:17 接地;17:16—17:18 以 EF2 级强度自北向南方向穿过金英村,此后过清水河经约 2.5 km 平坦农田,从许富路与京哈高速交叉口附近向东穿过高速;17:23 左右,以 EF3 级进入并纵贯开原工业区北园,期间近距离擦过中国石油化工集团开原油库储油罐,其后 10 min 自北向南以至少 EF2 级强度先后穿过“天成郡·馨萱兰苑”小区、义和村、“尚品铭城”小区进入工业园南区(由开原气象局所拍龙卷视频时间确定此时约为 17:33),在工业园南区中部达到最强强度,中国龙卷强度等级的四级(相当于美国的 EF4 级);其后穿越工业园南区后擦过榆树堡村东侧,以 EF3 级强度扫过瓜台子村西部;最后在瓜台子村南 1.8 km、清水沟子村北 200 m 附近区域消散;根据龙卷到工业园南区的时间和其移动速度,推测龙卷的消散时间约为 17:47 左右(图 1)。

龙卷路径全程长约 14 km,郊区穿行两个村庄,擦过一个村庄,城区路径主要在开原市西部人员相对稀少地区,穿行两个小区一个城中村,擦过一个小区,历时约 30 min,评估在 17:33 前后龙卷路径 8 km 处的开原工业园南区内达到最强的 EF4 级强度。大部分路径的明显毁损宽度约 200~400 m,严重毁损宽度一般在 50~100 m;显著小于 2016 年江苏阜宁 EF4 级龙卷的最大达 4 km 的灾害路径宽度(郑永光等,2016b)。



图 1 开原龙卷路径和强度

(标注为 G1 的黄色实线表示京哈高速公路)

Fig. 1 Path and intensity of the Kaiyuan tornado

(Yellow solid line marked G1

indicates Beijing—Harbin Expressway)

2 龙卷演变、强度和灾情分析

2.1 金英村北侧龙卷形成

据开原交警大队提供的头寨子村监控视频(图 2),上部漏斗云明显下探时间是 17:15:50 左右(图 2a),下部黄色尘卷出现时间是 17:16:36 左右(图 2b),两者开始相接而形成视觉上完整柱状时间是 17:17:07 左右(图 2c);金英村停电时间在 17:16;龙卷对地面造成最初损毁的位置在金英村以北 1 km 处(图 3),龙卷从该处到达金英村至少需要 1~2 min。综合以上信息分析,龙卷涡旋生成时间早于上部漏斗云与下部尘卷相接的时间 17:17,此时龙卷已经加强。黄色尘卷向上发展是龙卷涡旋将金英村碎屑和黄土上卷的结果,龙卷涡旋形成的时间在更早的漏斗云下探出云体的 17:15 左右,由于当时龙卷下垫面为低矮植被的田野,没有足够多的黄色卷起碎屑物,因此在监控视频上未见近地面黄色尘卷柱。这是中国的龙卷研究中极为罕见的视频资料,虽然 2015 年“彩虹”台风龙卷也有较多视频资料,但并未观测到龙卷的形成过程(朱文剑等,2016)。



图 2 头寨子村监控视频显示龙卷形成过程

Fig. 2 The monitoring video of Touzhaizi Village showing the formation process of tornado



图 3 无人机航拍金英村及北侧龙卷建筑和植被损毁情况及轨迹

(红色箭头线表示龙卷移动路径及方向,黄色双向箭头线表示路径上植被建筑等有明显损毁的宽度,下同)

Fig. 3 Tornado damage and track of buildings and vegetation in Jinying Village and its north side

(Red arrow line indicates the path and direction of tornado movement, and yellow bidirectional arrow line indicates the width of obvious damage to vegetation and buildings on the path, the same below)

根据灾情分析,龙卷在金英村的强度至少为 EF2 级。金英村存在大量院墙倒塌,大树折断,民住房顶损毁(图 3,图 4)。龙卷在金英村内由北向南穿行约 750 m,明显毁损宽度约 300~400 m,严重毁损宽度约 60~90 m(图 3),调查发现龙卷造成该村居民 1 人身亡。

2.2 快速增强:清河穿越点至京哈高速穿越点

龙卷过金英村后进入清河水面(宽约 180 m),再向南至京哈高速穿越点之间途径约 2.5 km 的空

旷农田,在靠近穿越点的龙卷路径外围 100 m 处有硬木大树折断(图 5),强度为 EF2 级,推测此时龙卷中心附近已达到强度 EF3 级。加之,在过京哈高速公路后立即造成了至少 EF3 级灾情,推测在此过程中龙卷明显增强。

2.3 首度加强为 EF3:京哈高速穿越口东

龙卷在许富路与京哈高速公路交叉口附近自西北向东南穿越京哈高速公路进入开原城区。据目击者描述当时京哈高速公路上有两辆大货车被吹翻下



图 4 金英村民房及大树损毁情况

Fig. 4 Damage of houses and trees in Jinying Village

高速。根据高速东侧道路两侧损毁程度可确定龙卷强度达 EF3 级,最严重损毁宽度约 30~40 m。开原工业园北区最西北角钢架厂房倒塌,但未发现有监

控视频拍摄到龙卷进入工业园过程,根据工业园断电时间推测龙卷进入工业园北区大约在 17:23。龙卷从金英村北至工业园区约 4 km,历时约 6 min,推测其前期移动速度为 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右,比平均移速(约 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)明显偏快。需要说明的是断电也可由外部输电设备损毁导致,因此断电时间与龙卷影响时间可能存在差异,由此推断的龙卷速度会有误差。综合几个节点的分析,龙卷移动速度介于 $20 \sim 40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,但表现出生命史前期在旷野中移动较快、进入北工业园的中期后明显变慢的特点。

根据钢架厂房全部倒塌、钢架扭曲(图 6a,6b)及硬木大树树皮剥落树叶剥光、树干扭曲情况(图 6c,6d),此处龙卷强度至少达 EF3 级。这类 EF3 级



图 5 龙卷路径(a)及外围大树折断(b)

Fig. 5 Tornado path (a) and broken trees (b)



图 6 龙卷路径(a)及钢架厂房(b)和硬木大树(c,d)损毁情况

Fig. 6 Tornado path (a), damaged steel-frame plant (b) and big hardwood trees (c, d)

的灾害在 2016 年江苏阜宁 EF4 级龙卷现场调查中有许多类似灾情(郑永光等, 2016b)。

2.4 重创与幸运: 工业园北区

工业园北区多家重型机械工厂严重损毁, 开原起重机工程机械厂、开原矿山起重机械部件厂等的大型钢架厂房几乎被夷为平地, 钢架全部垮塌和扭曲, 钢柱底座 6 根 2 cm 直径钢筋断裂拔起(图 7a, 7b, 7c), 因此, 龙卷强度至少达 EF3 级。这类 EF3 级的灾害同样在阜宁 EF4 级龙卷现场调查中发现多处类似灾情(郑永光等, 2016b)。

龙卷从中国石油化工集团开原油库储油罐西侧擦过南行, 储油罐离龙卷最近距离仅 100 m(图 7d),

幸运的是龙卷并没有显著影响到储油罐, 也没有影响到位于其南侧的开原亨泰精细化工厂。

2.5 强度减弱: 居民小区间隔着城中村

龙卷经过开原工业园北区后袭击的第一个小区是“天成郡·馨萱兰苑”, 该小区由 25 栋坚固的钢筋混凝土框架结构高楼紧邻组成, 楼层大多在 10~20 层, 楼间距离南北一般不到 30 m, 东西甚至不到 10 m。由于高楼抗风能力强, 小区的密集高楼对龙卷强度有削弱作用, 但楼间缝隙又存在狭管效应, 因而小区内龙卷强度定级存在疑点和困难。从龙卷中心经过的楼房窗户玻璃全毁, 墙皮脱落, 楼间有大树折断等灾情可判定龙卷强度至少为 EF2 级(图 8)。



图 7 大型钢架厂房全毁(a, b, c)和距离龙卷路径中心 100 m 储油罐(d)

Fig. 7 Completely destroyed large steel-frame plant (a, b, c) and oil storage tank 100 m away from the center of tornado path (d)



图 8 龙卷进入天成郡·馨萱兰苑小区及所致灾害

(a) 龙卷北向南进入小区(红圈内是工业园北区最南端全毁厂房), (b) 小区最南面楼房向北视角
Fig. 8 Tornado's entering into the "Tianchengjun Xinxuanlanyuan" Community and the resulting disasters
(a) tornado into the community from north to south (red circle shows the totally destroyed plant building at the southernmost end of the North Industrial District),
(b) northward perspective of the southernmost building of the community

天成郡·馨萱兰苑小区南侧的马路后是城中村义和村,义和村三面被密集高楼小区包围,其东面是瑞福居,南面是尚品铭城。周围林立的高楼一定程度上削弱了龙卷,但由于正处于龙卷路径上,义和村仍然受到了严重破坏,存在电杆、树木折断以及民居等损毁情况(图 9)。另据当地村民讲述,该村有一村民被卷出 30 多米身亡。综合灾情可确定义和村龙卷强度至少为 EF2~EF3 级。

龙卷过义和村南马路后进入尚品铭城小区,这是龙卷经过的最大、最密和最后的小区。小区南北长约 560 m,东西宽约 250 m,由 58 栋坚固的 10 层左右钢筋混凝土框架结构高楼组成,各楼东西相距仅数米,南北相距 20 m 左右。小区内玻璃被毁坏,轻物高空飞舞扎进墙面,硬木大树折断,院墙全倒(图 10),可确定强度为 EF2 至 EF3 级,但从小区内小汽车被卷飞的情况可以确定为 F3 或 EF3 级强度(图 10)。

从目击者录制的龙卷从天成郡·馨萱兰苑小区纵贯义和村到达尚品铭城小区北部的全过程视频来看,视频中龙卷较清晰准确的两个位置相距 600 m,其移动历时 100 s,可推算龙卷在此路段的移动速度约为 $22 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,较其生命史前期明显偏慢。

2.6 最强阶段:工业园南区

龙卷经过尚品铭城小区后进入了开原工业园南区的大片空旷地带。没有了密集高楼的摩擦消弱作用,此后进入生命史中后期的龙卷强度得以快速发展并进一步增强。龙卷进入旷野 500 m 后,到达了本次龙卷灾调的关键地点建筑——斯麦特电梯有限

公司(原天翔钢厂)的食堂及其南侧办公室(图 11),此两处建筑均为钢筋混凝土框架结构房屋。

分析食堂灾前的顶视和平视照片(图 12a,12b)以及灾后受损情况(图 12c,12d 和图 13)后可知:食堂为钢筋混凝土框架结构的二层小楼,分为中心内部和外围两部分,食堂中心主体部分东西宽约 41 m,南北宽约 25 m,根据食堂各部位建筑倒伏情况的照片(图 13),龙卷风自北向南穿过主体正中,整个食堂大部被夷为平地,仅东西两面站立少量立柱。食堂框架由钢筋水泥的柱体和梁体构成,大部折断倒塌,柱体粗细不同,一般内有 4~9 根钢筋,钢筋直径约 15~25 mm 不等,水泥柱体直径约 20~40 cm 不等(图 12c,12d)。类似灾害可在如 2013 年 5 月美国俄克拉何马州 Moore 发生的龙卷(Burgess et al, 2014)、2016 年江苏阜宁 EF4 级龙卷(郑永光等,2016b)中见到。

因此,根据此处建筑结构及损毁情况,该处龙卷强度确定为 EF4 级。



图 9 龙卷穿过义和村,擦过瑞福居小区,移向尚品铭城
Fig. 9 The tornado's passing through Yihe Village, skimming Ruifu Community and moving to Shangpin Mingcheng Community



图 10 龙卷进入尚品铭城小区所致灾害
Fig. 10 The disaster caused by the tornado entering Shangpin Mingcheng Community



图 11 龙卷进入开原工业园南区大片空旷地带(a)和离龙卷路径在 700 m 外最近的高楼小区(b)(红圈为食堂,黄框为办公室)

Fig. 11 The tornado's entering large open area in south area of Kaiyuan Industrial District (a) and the nearest high buildings 700 m away from the tornado path (b) (red circle; canteen, yellow frame; office)

2.7 维持至少 EF3 级:工业园南区的南部

龙卷穿过斯麦特电梯有限公司南面道路后,继续南行纵贯工业园南区的南部各厂区,在经过标准化工业厂房(图 14)后向东南方向穿越西环路,到达旧车拆车厂南侧小树林(图 15)。

从标准化工业厂房内的损毁差异情况以及其东侧树木倒伏的方向,可以清晰看出龙卷中心的路径。龙卷经过之处厂房全毁,钢架全倒并扭曲,50 cm 直径硬木大树折断,龙卷外围厂房严重损毁但钢架并未倒塌(图 15)。经测量,受损最重的厂房框架由 1 cm 厚、50 cm 宽钢板的制成(图 16)。

从西环路穿越点到小树林的灾情来看(图 15),西环路东侧有大型货车倾覆和移位,西环路沿线 40~50 cm 直径电线杆全部折断倒地(图中大量电线杆已被重新架好),处于龙卷中心外围约 50~60 m 的旧车拆车厂内厂房全毁。

旧车拆车厂南面小树林附近灾情(图 17)可见其厂南墙(约 30 cm 厚水泥砖墙)全部倒塌,旧车拆车厂内大型货车倾覆并翻滚出墙。此处严重损毁宽度为 30~50 m,明显损毁宽度为 300 m 左右。

综合上述灾情,可评估标准化工业厂房至小树林路段的龙卷强度至少为 EF3 级。



图 12 图 11 中食堂灾前顶视(a)及平视照片(b),灾后钢筋混凝土框架结构几乎被夷为平地(c,d)
Fig. 12 Top view (a) and horizontal view (b) of canteen in Fig. 11 before disaster, and reinforced concrete frame structure almost flattened after disaster (c, d)

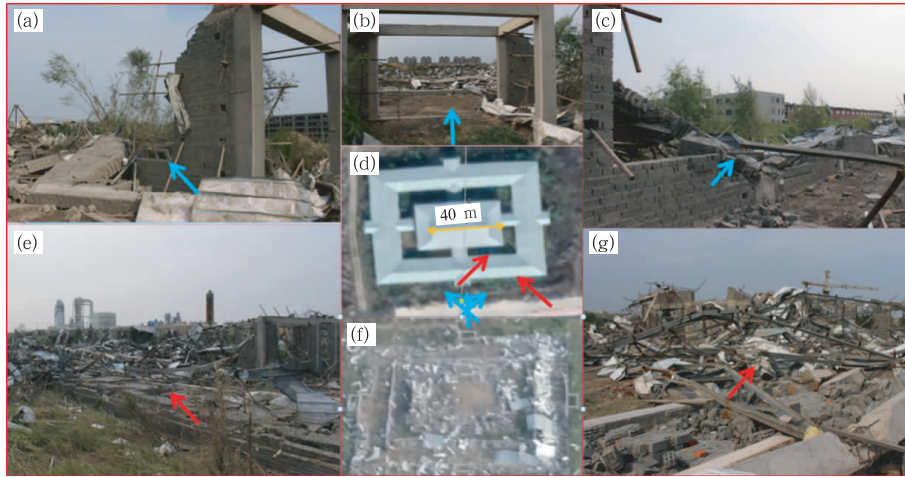


图 13 损毁情况推测龙卷从食堂正中通过四周照片(a~c,e,g),
(视角按照红蓝色箭头、方向与图 13d 对应)和(d)灾前,(f)灾后顶视图

Fig. 13 The tornado's passing through the center of canteen (a-c, e, g)
(photos and perspectives around the tornado correspond to those in Fig. 13d

following red and blue arrows and directions), top view (d) before disaster and (f) after disaster

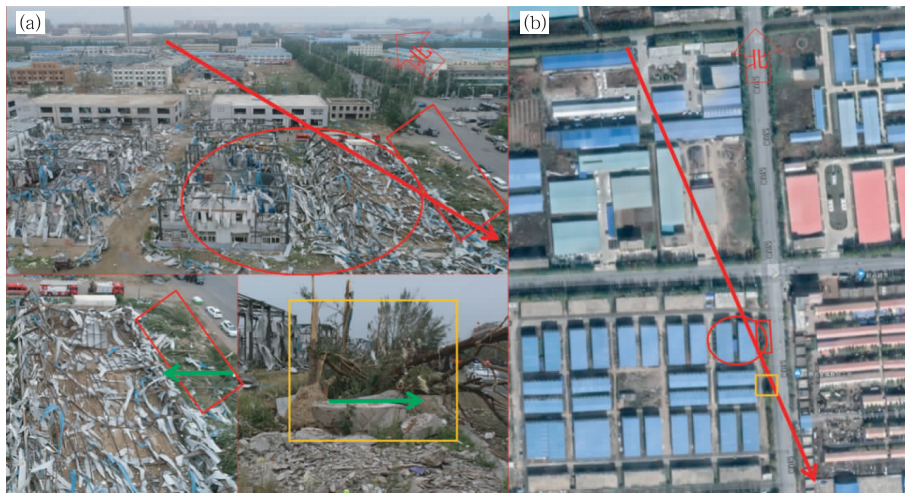


图 14 工业园南区南部(a)灾后,(b)灾前照片

(图 14a,14b 红圈、黄框、红框相对应,绿色箭头表示树木的倒伏方向)

Fig. 14 Southern part of South Industrial District

(a) photo after disaster, (b) photo before disaster

(Red circle, yellow frame and red frame in Figs. 14a and 14b are corresponding,
green arrow indicates the direction of tree lodging)

2.8 最后阶段—从 EF3 到消散:瓜台子村

龙卷自旧车拆车厂南面小树林开始向南离开城区,重新进入农田,但已进入其生命史的末期。龙卷先重新向西略折回西环路以西,再向南从榆树堡村(该村未出现严重灾情)东面擦过,在经过约 2.4 km

的农田后到达受灾的最南部村庄——瓜台子村(图 18)。

龙卷自北向南从瓜台子村西部穿过。龙卷路径中心外围有 50 cm 直径大树被连根拔起或折断,路径中心区域大树树叶全被吹光、树干折断或被连根拔起(图 19)。



图 15 龙卷穿越西环路到达旧车拆车厂南侧小树林

(a) 航拍灾情, (b) 灾前顶视图

Fig. 15 The tornado's passing through the West Ring Road to the grove to the south of garage

(a) aerial photo of disaster, (b) top view before disaster

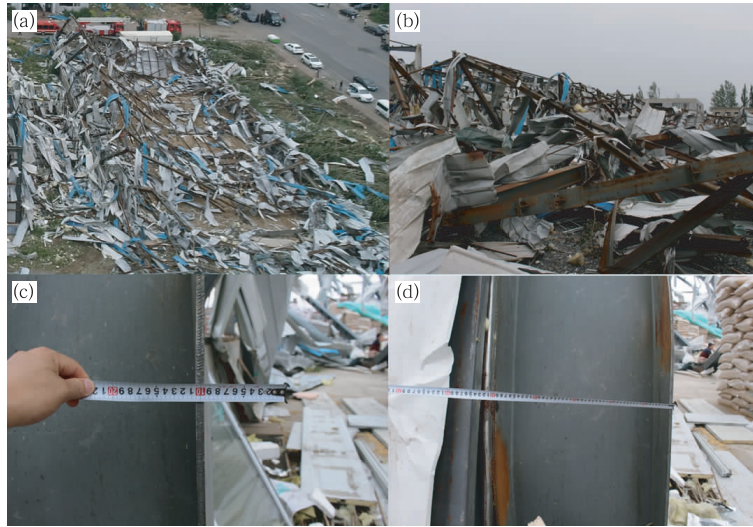


图 16 标准化工业厂房损毁照片(a,b)及其钢柱(c,d)

Fig. 16 Photos of damaged standardized industrial plant (a, b) and steel columns (c, d)

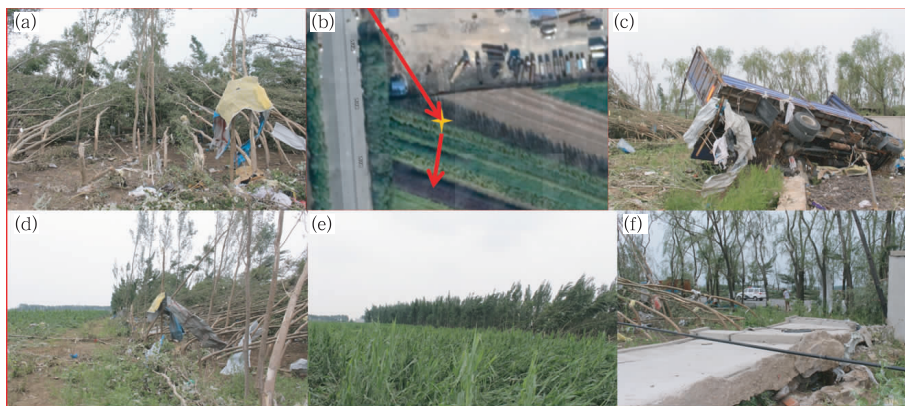


图 17 小树林(a,d,e)及倒塌的旧车拆车厂南墙(c,f), 及灾前顶视图(b, 十字星位置对应图 17a)

Fig. 17 The grove (a, d, e) and south wall of collapsed car dismantling plant (c, f), top view before disaster (b, cross-star position corresponds to Fig. 17a)



图 18 龙卷在拆车厂以南行经的田野

(a)灾后航拍图,(b)灾前顶视图

Fig. 18 The field where the tornado's passing through south of the garage

(a) aerial photo after disaster, (b) top view before disaster

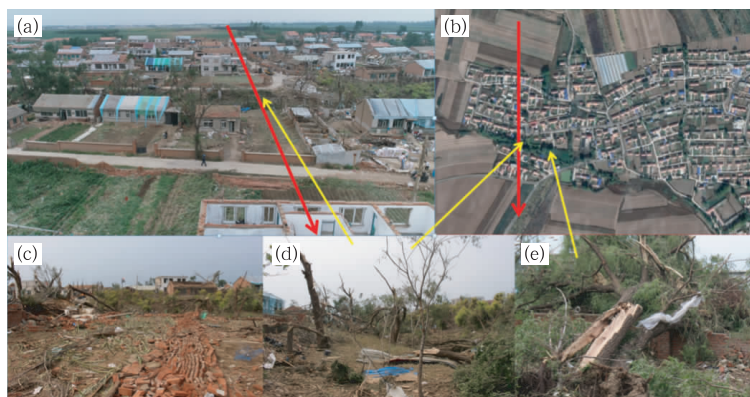


图 19 龙卷经过瓜台子村西部

(a)灾后航拍,(b)灾前顶视图,

(c,d,e)大树损毁情况(对应图 19a,19b 黄色箭头所指位置)

Fig. 19 The tornado's passing through the west of Guataizi Village

(a) aerial photo after disaster, (b) top view before disaster,

(c, d, e) damaged trees (correspond to the position indicated by the yellow arrows in Figs. 19a, 19b)

路径上有砖混厚水泥墙的二层民居严重受损(图 20),其整块钢筋混凝土屋顶(厚度为 10~15 cm)被掀飞至 30 m 外,其院墙、拖拉机库全部倒塌。其一个半米见方的水泥砖混院墙门柱全部倒塌,另一个严重受损。院内菜地里,粗约 1~2 cm 的茄子和辣椒茎秆被从近地面根部处整齐削光,幸运的是屋主当时并不在家。综合整个瓜台子村的灾情,评估

龙卷在该村的强度维持 EF3 级。

龙卷从瓜台子村西南部继续南行进入农田,据目击村民讲述,龙卷在经过瓜台子村南面小山包后不久消失。无人机航拍的地面植被损毁轨迹在清水沟子村北约 200 m 处水塘附近消失(图 21)。清水沟子村未有灾情报道,至此龙卷消亡,龙卷从 EF3 级到消散经过的路径总计 1.8 km 左右。



图 20 瓜台子村民居损毁情况

(a) 灾后航拍(部分已修复,红圈为被掀飞的钢筋水泥屋顶,黄框为院墙门),
 (b) 灾前顶视, (c) 被掀飞屋顶, (d) 黄框对应的院墙门柱, (e) 茄子和辣椒杆残余

Fig. 20 Damage of houses in Guataizi Village

(a) aerial photo after disaster (Some houses have been repaired, red circle is the lifted reinforced concrete roof, and yellow frame is the gate of courtyard wall),
 (b) top before disaster, (c) the lifted roof, (d) the gate column of courtyard wall corresponding to the yellow frame, (e) eggplant and pepper rod residues



图 21 龙卷消亡前路径

(a) 灾前顶视, (b, c) 灾后航拍
 (红圈为村民描述的小山包, 黄色十字星为对面损毁追踪的终点)

Fig. 21 Path before the tornado demise

(a) top view before disaster, (b, c) aerial photo after disaster

(Red circle is the hill described by villagers, and yellow cross-star is the end of the damage tracking on the opposite side)

2.9 龙卷全路径灾情强度小结

表 1 给出了龙卷路径上各代表地点的时间、强

度以及定强依据。表中所给时间主要依据监控视频以及停电时间等信息综合推测(未标注下划线的时

间), 部分时间根据速度估算, 必然会存在一些误差

(标注下划线的的时间)。

表1 龙卷不同阶段强度估计依据

Table 1 Strength estimation basis of tornado at different stages

时间/BT	地点	强度	定强依据
约 17:17	金英村	EF2+	大树折断,民房掀顶、墙塌
约 17:23	工业园北区	EF3+	树干剥皮、扭曲, 钢架结构厂房全毁
约 17:26	馨香兰苑	EF2+	墙皮剥落、大树折断
约 17:28	义和村	EF2+	民房掀顶、墙塌
约 17:30	尚品铭城	EF2+	墙皮剥落、大树折断
约 17:33	工业园南区	EF4	钢混框架结构二层房屋全毁 大片树木折断、枝叶卷光、
约 17:47	瓜台子村	EF3	民房房顶整体掀飞、墙塌、 半米粗砖砌门柱全塌

3 讨论

结合视频和灾情照片资料,本文主要集中于本次开原龙卷的灾情本身及与周边下垫面状况的分析。视频资料分析不仅能反映龙卷生成的过程,还可以揭示龙卷尺度上风力、风向变化的一些特点和规律,这有待进一步的分析研究,有助于理解龙卷灾害机制和发生发展机理,也对未来的龙卷灾调有极大的帮助。下一步工作计划围绕视频与灾调现场的相互关系展开,更进一步的工作将分析中尺度气象要素背景场对龙卷演变的影响。

本次开原龙卷的最大强度达到中国龙卷强度等级的四级(EF4级),但最强的灾害影响范围尺度非常小,只有一个地点,显著小于美国的EF4级龙卷个例,如2013年5月美国俄克拉何马州Moore发生的龙卷,EF4级灾害长度达10 km以上、最大宽度达500 m左右(Burgess et al, 2014);也显著小于2016年江苏阜宁EF4级龙卷,其导致阜宁多座水泥砖砌和混凝土预制楼板结构二层房屋顶层完全被毁,达到EF4级强度(郑永光等, 2016b)。灾害路径宽度也同样小于前述这些龙卷的相应宽度:本次龙卷灾害路径最大宽度仅约为400 m,而2013年5月Moore龙卷的最大宽度约为1.7 km(Burgess et al, 2014),而阜宁龙卷更达4 km左右(郑永光等, 2016b)。

对于龙卷中心经过的水稻、玉米及蔬菜等兼具各种低矮植被的损毁情况差异较大,且有时并不显著,远不如房屋、树木、墙体、电线杆、车辆等损毁情况显眼。此类损毁程度其与龙卷强度之间的关系,存在一定的认识空白。影响龙卷强度变化的不仅是路径上的下垫面粗糙度,应该还与外围周边一定范

围内的下垫面粗糙度有关。因此,除了龙卷强度本身的因素外,下垫面状况的复杂性,也就是下垫面的建筑结构和植被等不同灾害标识物之间的差异(郑永光等, 2016b),也必然使得该龙卷的强度估计存在一定的不确定性。

本次开原龙卷造成死亡7人,190余人受伤,大量厂房和村庄民居全毁的严重灾情。但考虑到其在村庄和城区穿行的距离接近7 km,强度至少在EF3级以上的事实,开原龙卷并没有造成更严重灾情,以下部分因素至关重要:1)龙卷所经地面大部以厂区、旷野为主。2)龙卷所经的居民小区多为钢混框架楼房,抗风能力强,且多存在入住率较低的情况。龙卷所经的村庄影响房屋总体数量不多,且很多户居民外出未归。3)开原龙卷对流风暴为晴空背景下发展的一个孤立超级单体(郑永光等, 2020),龙卷来临前虽有一些降水但没有大范围的云层覆盖和降雨发生,发生时段在日落之前,因此能见度极佳,龙卷早在远处就已清晰可辨,对民众来说有较足够的预警提醒时间。4)龙卷袭击厂区的时间正值下班以后,原本在厂房中工作的大多数人员已经或正在离开厂房。5)厂区内不少受损严重的厂房因停工或本身作为仓库等原因当时并无工作人员。

本次开原龙卷是一次强龙卷中心穿行城市密集坚固高楼组成的居民小区的过程,这类情况在国内较为罕见,开原龙卷又穿行城中村、工业园厂房和旷野等不同下垫面,产生了大量复杂灾情信息;从资料的完整性看,除基本的气象观测资料外,开原龙卷的目击和视频资料极为丰富,并且这些视频资料可以与下垫面和相关灾情匹配;此外,由于开原龙卷具有发生时间在日间和天气背景为晴空下的超级单体这两个特点,因而目击和视频中的背景能见度很高,龙卷主体结构清晰度极高。综合这些因素,开原龙卷具有较高的进一步研究价值。

最后,值得注意的是,从部分龙卷相关的视频可以看出,很多公众仍然缺乏对龙卷及其危害的认知。例如从头寨子村监控视频中的一名群众(图2d中左下角穿蓝衣者)的行为分析,其先是缓慢行走,然后发现了龙卷,但抬头在看了几秒后表现得无动于衷,继续低头缓慢踱步,完全一副对龙卷视而不见的状态。而事实上龙卷如果移向偏西 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 的话,就将在大约10 min左右到达他所处的位置。另外一些视频显示出拍摄者在龙卷逼近甚至到达时并未及时躲避龙卷路径,而仅仅依赖于身处的建筑物来庇

护。如果当时建筑物不能抵抗龙卷风,则造成的灾情难以估量。这些都表明,未来仍然需要加大对龙卷等灾害性天气的科普力度。

4 结 论

本文详细分析总结了整个开原龙卷现场调查结果,给出了其路径、强度和灾情演变,获得了其生命史,得到如下一些结论。

(1)开原龙卷自北向南行进约 14 km,生命史从 17:17—17:47,历时约 30 min,其速度在进城前较快进城后变慢;在其生命史的中后期同时位于空旷地区的开原工业园南区中部时达到最强强度,为中国龙卷强度等级四级(相当于 EF4 级),但该强度的灾害分布范围很小,只位于这一个地点。

(2)钢筋混凝土框架结构的居民小区楼房能在至少 EF3 级强度的龙卷风袭击后保持主体结构完好,外墙完好,但玻璃全损,房顶明显损毁。此外,该类楼房密集的居民小区可将至少 EF3 级龙卷的灾害损失强度减弱为 EF2 级左右。

(3)在被龙卷中心袭击后,钢筋混凝土框架结构的部分高层厂房其非承重砖混外墙被破坏出大洞,远不如居民小区楼房坚固。这表明强龙卷下此类建筑物内靠近外墙的区域仍是极不安全的。

(4)大型钢架厂房对龙卷灾害的防御能力远差于居民小区,面对 EF3 级龙卷几乎没有任何抵抗力。处于 EF3 级龙卷中心的钢架厂房会被完全摧毁框架全部倒塌扭曲,龙卷中心外围几十米处的类似厂房顶墙全毁,但框架整体基本完好。

致谢: 特别感谢辽宁省气象局、广东省佛山市龙卷风研究中心等单位对现场调查的大力支持。感谢南京大学薛明教授和赵坤教授、中国气象局气象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和孙继松研究员以及姚聃博士、江苏省气象科学研究所郑媛媛研究员、上海中心气象台戴建华研究员、广东省气象台伍志方研究员等给予的大力指导和支持。

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 activity in China in 2018[J]. Adv Meteor Sci Technol, 9(1): 50-55(in Chinese).

张小玲, 杨波, 朱文剑, 等, 2016. 2016 年 6 月 23 日江苏阜宁 EF4 级龙卷天气分析[J]. 气象, 42(11): 1304-1314. Zhang X L, Yang B, Zhu W J, et al, 2016. Analysis of the EF4 tornado in Funing County, Jiangsu Province on 23 June 2016[J]. Meteor Mon, 42(11): 1304-1314(in Chinese).

郑永光, 蓝渝, 曹艳察, 等, 2020. 2019 年 7 月 3 日辽宁开原 EF4 级强龙卷形成条件、演变特征和机理[J]. 气象, 46(5): 589-602. Zheng Y G, Lan Y, Cao Y C, et al, 2020. Environmental conditions, evolution and mechanisms of the EF4 tornado in Kaiyuan of Liaoning Province on 3 July 2019[J]. Meteor Mon, 46(5): 589-602(in Chinese).

郑永光, 陶祖钰, 俞小鼎, 2017. 强对流天气预报的一些基本问题[J]. 气象, 43(6): 641-652. Zheng Y G, Tao Z Y, Yu X D, 2017. Some essential issues of severe convective weather forecasting[J]. Meteor Mon, 43(6): 641-652(in 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, 姚聃, 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: 中国气象出版社: 1-4. China Meteorological Administration, 2019. Tornado intensity scale: QX/T 478-2019[S]. Beijing: China Meteorological Press: 1-4(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]. Torrent Rain Dis, 35(5): 403-414(in Chinese).

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[J]. Bull Amer Meteor Soc, 95(10): 1549-1561.

Bunting W F, Smith B E, 1993. A guide for conducting convective windstorm surveys[M]. NOAA Technical Memorandum NWS SR-146, United States Department of Commerce.

Burgess D, Ortega K, Stumpf G, et al, 2014. 20 May 2013 Moore,

- Oklahoma, tornado: damage survey and analysis[J]. *Wea Forecasting*, 29(5):1229-1237.
- Doswell III C A, 2003. A guide to F-scale damage assessment[EB/OL]. NOAA/NWS, 94. <http://www.wlnpp.org/wxlgyx.org/manuals/FINALN~1.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(1-3):554-563.
- Edwards R, LaDue J G, Ferree J T, et al, 2013. Tornado intensity estimation: past, present, and future[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 94(5):641-653.
- Frelich L E, Ostuno E J, 2012. Estimating wind speeds of convective storms from tree damage[J]. *Electronic J Severe Storms Meteor*, 7(9):1-19.
- Fujita T T, 1971. Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity[D]. Chicago: The University of Chicago.
- Fujita T T, 1974. Jumbo tornado outbreak of 3 April 1974 [J]. *Weatherwise*, 27(3):116-126.
- Fujita T T, 1978. Manual of downburst identification for project NIMROD[D]. Chicago: The University of Chicago.
- Meaden G T, 2004. Wind speed scales: Beaufort, T-scale and Fujita's scale theoretical basis behind the scales[EB/OL]. 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[J]. *Atmos Res*, 83(2-4):446-449.
- 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.
- Wind Science and Engineering Center, 2004. A recommendation for an enhanced Fujita scale (EF-scale)[EB/OL]. Wind Science and Engineering Center Report, Texas Tech University, Lubbock, TX. <http://www.spc.noaa.gov/faq/tornado/ef-ttu.pdf>.
- Xue M, Zhao K, Wang M J, et al, 2016. Recent significant tornadoes in China[J]. *Adv Atmos Sci*, 33(11):1209-1217.