

# 2021年7月11日河北省临西县龙卷灾害 现场调查与强度估计

刘瑾<sup>1,2,3</sup> 王丛梅<sup>1,2</sup> 赵奕安<sup>1,2</sup> 郭慧<sup>4</sup> 马道林<sup>1,2</sup> 王立新<sup>5</sup>

(1 河北省邢台市气象局, 邢台 054000; 2 中国气象局邢台大气环境野外科学试验基地, 邢台 054000;  
3 南京信息工程大学, 南京 210044; 4 重庆市綦江区气象局, 重庆 401420; 5 河北省临西县气象局, 临西 054900)

**摘要:** 2021年7月11日, 河北省邢台市临西县发生强风灾害, 根据现场灾害调查情况, 结合多普勒天气雷达探测资料, 确认此次强风灾害为龙卷所致。主要结果如下: 19:36—20:00 (北京时间) 龙卷自南向北行进约5.4 km, 持续时间<30 min, 致灾宽度为20~120 m; 龙卷强度在生命期的中期经过卢庄村时达到最强, 为EF2级强龙卷; 砖混结构的民房或墙体、彩钢板简易房等在龙卷袭击后损毁明显。

**关键词:** 龙卷, 现场灾害调查, 强度, 龙卷式涡旋特征 (TVS)

中图分类号: P4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2025.01.007

## On-Site Damage Survey and Intensity Rating for Tornado in Linxi County, Hebei Province on 11 July 2021

Liu Jin<sup>1,2,3</sup>, Wang Congmei<sup>1,2</sup>, Zhao Yi'an<sup>1,2</sup>, Guo Hui<sup>4</sup>, Ma Daolin<sup>1,2</sup>, Wang Lixin<sup>5</sup>

(1 Xingtai Meteorological Bureau of Hebei Province, Xingtai 054000; 2 Xingtai Atmospheric Environment Field Scientific  
Test Base of CMA, Xingtai 054000; 3 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044;  
4 Qijiang Meteorological Bureau, Chongqing 401420; 5 Linxi Meteorological Bureau of Hebei Province, Linxi 054900)

**Abstract:** On 11 July 2021, Linxi County of Xingtai City, Hebei Province experienced severe wind damage. The on-site damage survey, combined with the observation data from Doppler radar, proves that the wind damage was caused by a tornado. The results suggest that the tornado moved in the south-to-north direction during 19:36—20:00 BT, with a damage swath of 20-120 m wide and 5.4 km long. The intensity of the tornado reached its strongest level of EF2 in the intermediate phase of its life history when passing by Luzhuang Village. Civil buildings or walls with brick and concrete structures, as well as temporary buildings made of colored steel plates, were significantly damaged after the tornado attack.

**Keywords:** tornado, on-site damage survey, intensity, tornadic vortex signature (TVS)

### 0 引言

龙卷是一种发生概率低, 却最具破坏性的剧烈强对流天气现象。全球每年发生约2000个龙卷<sup>[1]</sup>, 美国是龙卷发生频率最高的国家, 每年龙卷可超过1200个<sup>[2]</sup>。中国龙卷每年发生约100个, 大多数发生在4—9月, 主要分布在中国东部和部分中部平坦地区, 包括江淮地区、两湖平原、华南地区、东北地区和华北地区东南部等<sup>[3]</sup>。从京津冀的龙卷发生频次分布来看<sup>[4]</sup>, 龙卷发生最多的区域有2个: 一是张家口坝上4县; 二

是京津冀东部, 特别是沧州、天津、唐山、秦皇岛等沿海地区, 而河北南部地区为龙卷少发区。1956年以来, 河北南部邢台、邯郸一带在20世纪80年代出现过2次EF2级龙卷<sup>[4-6]</sup>, 根据《中国气象灾害大典(河北卷)》记录, 20世纪90年代—21世纪第2个10年, 这一带未有EF2级及以上强度龙卷的记录<sup>[7]</sup>。有文献灾情记录和多普勒雷达探测资料分析的2009年7月20日河北承德龙卷<sup>[8]</sup>、2012年7月21日北京龙卷<sup>[9-10]</sup>、2021年7月1日张家口龙卷<sup>[11]</sup>均发生在京津冀的北部地区。

现场灾害调查是分析和确认龙卷和下击暴流等导致的灾害大风强度和精细分布的最重要且必需的手段, 通常采用空中灾害调查和地面灾害调查相结合的方式, 有的还增加卫星或高分辨率雷达探测资料综合分析龙卷路径及环流结构。随着无人机技术的发展和在气象领域的应用, 空中灾害调查由直升机调查方式转变为采用无人机航拍调查<sup>[12-15]</sup>。Marshall<sup>[12]</sup>根据灾害

收稿日期: 2023年12月23日; 修回日期: 2024年4月5日

第一作者: 刘瑾 (1985—), Email: liujinx@163.com

通信作者: 王丛梅 (1970—), Email: cmwang6565@163.com

资助信息: 河北省自然科学基金项目 (D2020108049); 河北省气象局科研开发项目 (23ZC21); 承德市基础研究项目 (202305B074)

调查,对1999年5月3日发生于美国俄克拉何马州摩尔市龙卷对房屋建筑的损坏进行F等级评估,指出建筑物损坏和龙卷强度相关,但不完全相关,建筑物建造质量差,可能导致对龙卷强度的高估。Burgess等<sup>[13]</sup>根据灾害调查,对2013年5月20日发生于俄克拉何马州摩尔市及周边地区龙卷对房屋建筑及其他物体的损坏进行了EF等级评估,指出50%的损坏为EF0级,其次为EF1级,最严重的EF5级损坏占比不足1%。Wakimoto等<sup>[14]</sup>根据灾害调查和高分辨率雷达探测资料,分析了2013年5月31日发生在俄克拉何马州艾尔雷诺的龙卷低层风场结构。在没有龙卷漏斗云照片作为证据时,可依据现场灾害调查来判别引起强风灾的原因是龙卷或是下击暴流或是直线型大风。龙卷灾害路径相对狭窄,通常导致辐合旋转风场,而下击暴流所导致的大风通常是辐散的直线或曲线型大风<sup>[9,15-19]</sup>。郑永光等<sup>[18]</sup>根据现场灾害调查和卫星、雷达观测资料分析指出,2015年6月1日长江湖北监利段“东方之星”客轮翻沉特大事故江段及周边区域主要发生了下击暴流,老台深水码头有龙卷发生可能。Meng等<sup>[9]</sup>指出根据现场灾害调查确认的风灾狭长破坏带以及沿这条破坏带多处出现地面风向辐合,是2012年7月21日北京强降雨过程中伴随的风灾由龙卷导致的有力证据。

2021年7月11日,位于河北省南部的邢台市临西县尖冢镇受强风影响,多个村庄出现大树折断或连根拔起、民房倒塌、人员被飞射物砸伤或划伤的情况;13—14日邢台市气象局派出调查组进行现场灾害

调查,确认此次强风灾害的天气成因、强度和灾害分布。此次现场灾害调查采用无人机航拍开展空中调查,采用相机拍照、手机拍照及定位、米尺测量、走访村民等进行地面调查,是在河北省南部首次开展的较为详细的龙卷灾害调查。文中基于2021年7月11日河北省邢台市临西县尖冢镇的强风致灾事件现场灾害调查及邯郸多普勒天气雷达探测资料,确认此次强风灾害为龙卷导致,并对龙卷强度演变特征进行了分析。

## 1 龙卷概况

2021年7月11日19:36—20:00(北京时间,下同)河北省邢台市临西县尖冢镇出现龙卷,影响多个村庄(图1)。自赵圈村南开始,龙卷沿西北方向经过赵圈村西、常圈村(外)西、卢庄村西南、童尖线(公路)和郝庄村(外)东。龙卷路径长约5.4 km,致灾宽度为20~120 m,经过上述地点时最强达到EF1~EF2,移动速度约为20 km/h(根据19:42—19:48邯郸多普勒天气雷达径向速度图像判断),持续时间<30 min。杜康云等<sup>[4]</sup>指出,京津冀有81.9%的龙卷发生在夏季,11:00—20:00为主要发生时段,而发生在京津冀地区的几次有详细时间记录的龙卷持续时间均在20~50 min<sup>[8-11,20]</sup>。此次龙卷发生时段、持续时间与京津冀地区历史上龙卷的主要发生时段和持续时间一致。同样是伴随强降雨过程<sup>[21]</sup>产生的龙卷,此次龙卷强度最强达到EF2级,强度低于2012年7月21日北京龙

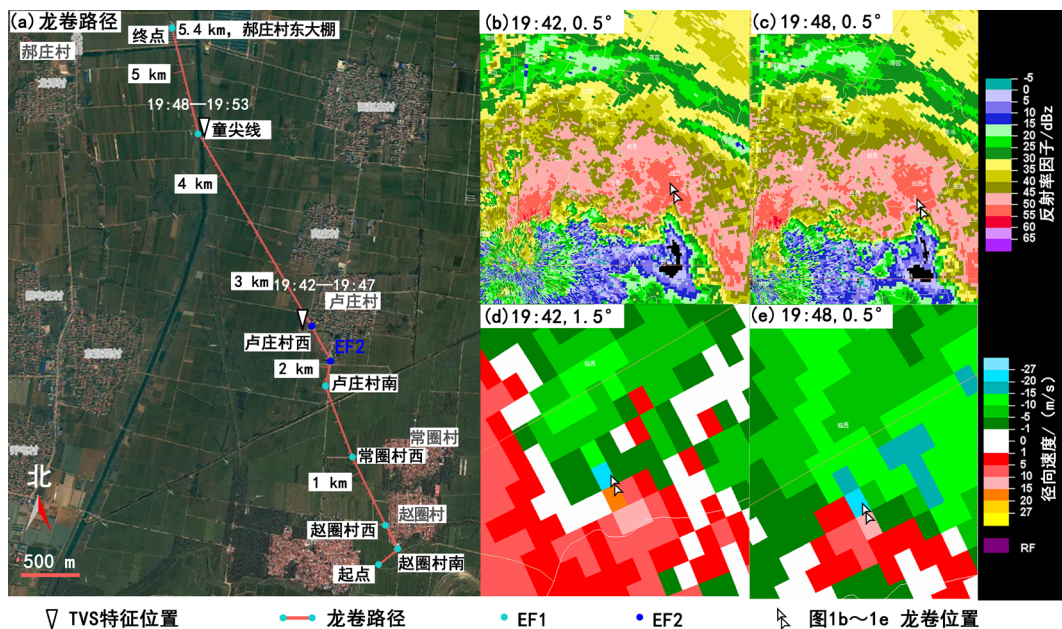


图1 2021年7月11日河北省临西县龙卷路径(a)及邯郸多普勒天气雷达反射率因子(b-c)和径向速度(d-e)  
Fig. 1 Path of tornado (a), and reflectivity factors (b-c) and radial velocity (d-e) from Handan Doppler Radar for tornado in Linxi County, Hebei Province on 11 July 2021

卷，路径相对较短，持续时间相当，说明2012年7月21日北京EF3级龙卷移动速度更快。

随着低涡北上影响河北省<sup>[21]</sup>，在其东北侧螺旋雨带中龙卷伴随强降雨出现（图1）。根据现场灾害调查和走访村民情况，结合邯郸多普勒天气雷达探测数据，风灾路径呈现狭长型，低涡螺旋雨带自南向北推进，在螺旋雨带进入临西县后的雷达径向速度图上有两个时次对应龙卷发生地出现龙卷式涡旋特征（TVS），为逆时针旋转的像素到像素的径向速度切变，TVS随时间自南向北移动，符合龙卷致灾特征，判断龙卷路径总体为自南向北方向（图1b—e）。如图1c所示，19:42最强切变出现在 $1.5^\circ$ 仰角、2.75 km高度，为40.5 m/s，对应于卢庄村西的位置；如图1e所示，19:48最强切变出现在 $0.5^\circ$ 仰角、1.28 km高度，为32.5 m/s，对应于童尖线出现树木损毁的位置。从这两个时次最强切变速度来看，均低于2012年7月21日EF3级北京龙卷对应的48.5 m/s的TVS切变速度<sup>[9]</sup>，超过了部分学者给出的利用美国WSR-88D和移动雷达探测龙卷TVS阈值<sup>[22-25]</sup>。从地面气象站观测数据来看，离龙卷发生时间最近的自动站观测到的极大风速仅为14.8 m/s（7级，2021年7月11日19:48）。

## 2 灾情和龙卷强度分析

### 2.1 赵圈村

从邯郸多普勒天气雷达（图略）探测来看，大风

影响赵圈村的时间为19:36之后。从赵圈村外西南方向的路边开始，如图2a中蓝色箭头所示，从路的南侧到路的北侧，均有树木倒伏或折断，而后影响赵圈村的西南部，赵圈村南出现彩钢厂房坍塌，村中树木倒伏或折断，房墙倒塌，房顶瓦片被卷飞。从树木倒伏方向和墙面倒塌方向可见大风呈现旋转特征。从灾损情况来看，在赵圈村的致灾宽度为40~80 m。从图2b可见，赵圈村一户人家（西户）的南侧院墙向南倒塌，西侧辅房的西墙倒塌，房顶部分瓦片被掀飞，而西侧辅房的另外三面墙、房屋前的树以及户外的水泥电线杆完好，其东户邻居仅西院墙向西倒塌，可见大风影响区域小且有旋转，符合龙卷致灾特征。图2c中坍塌的彩钢厂房可见钢架被扭曲的特征，图2d倒伏折断树木呈现交叉汇合的倒伏方向，符合龙卷大风致灾特征。龙卷经过赵圈村后，沿西北方向北上，经过常圈村外西部的铁塔附近。

### 2.2 常圈村

从图3可见，大风在常圈村外西部道路旁铁塔附近造成铁塔上部折断不见，树木和线杆折断或倾倒。如图3a所示，沿常圈村外路边南侧的树木和线杆向东倾倒，而道路北侧树林中的树木分散向北倾倒。图3b中道路北侧部分向北倾倒的树木呈交叉倒伏。图3c中铁塔下方的树木西侧枝干从主干向南折断，而旁边白色线杆向东倾倒，呈现辐合状，而此树木其他枝干未

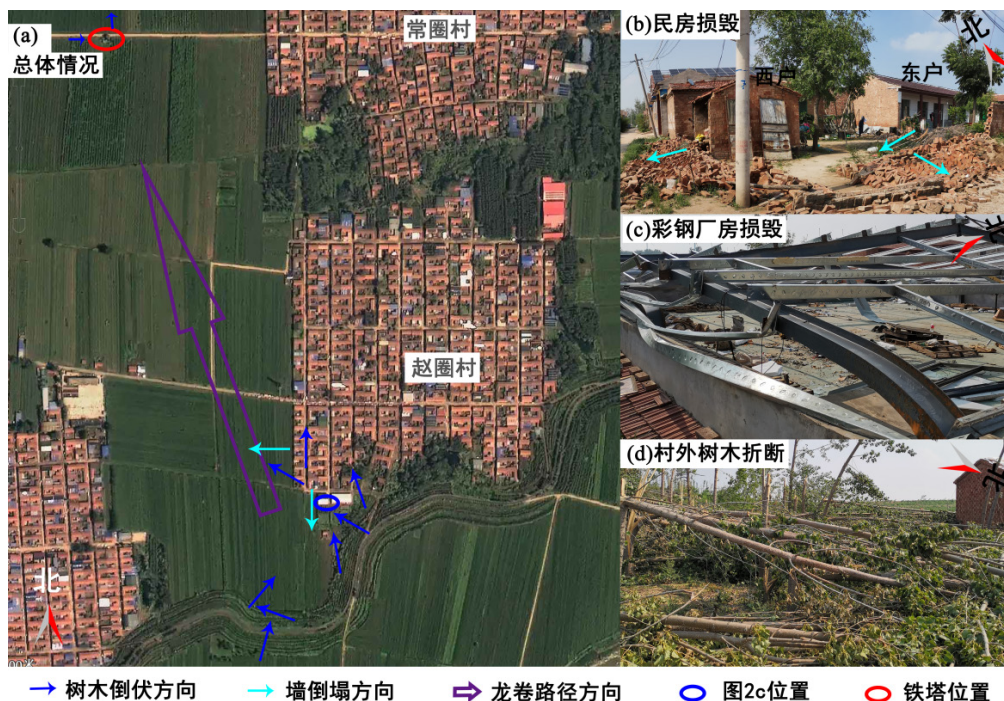


图2 2021年7月11日河北省临西县赵圈村龙卷灾损情况

Fig. 2 Tornado damage at Zhaoquan Village, Linxi County, Hebei Province on 11 July 2021



图3 2021年7月11日河北省临西县常圈村外龙卷灾损情况

Fig. 3 Tornado damage at the outskirts of Changquan Village, Linxi County, Hebei Province on 11 July 2021

受损。从常圈村外树木和线杆倒伏方向和分布、铁塔上部折断不见来看，符合龙卷致灾的旋转和小尺度特征，致灾宽度约为20 m。

### 2.3 卢庄村

从邯郸多普勒天气雷达探测（图1）来看，大风影响卢庄村的时间为19:42之后，在体扫时间为19:42—19:47的径向速度图上，卢庄村处可见逆时针旋转的像素到像素的径向速度切变，最大切变速度出现在1.5°仰角，为40.5 m/s，与当地供电部门给出的卢庄村停电时间为19:47吻合。由图4a可见，大风在卢庄村外南部引起两片树木成片倒伏，树木均呈现交叉倒伏特征，致灾宽度为20~50 m，符合龙卷大风致灾特征。龙卷大风经过卢庄村总体移动方向为自南向北，然而龙卷大风移动方向并非线性，进村前移动方向为北偏东方向，进村之后为西北方向，主要影响卢庄村的南部和西部，呈现正弦轨迹，此现象在其他龙卷路径中也存在<sup>[9]</sup>。卢庄村多条输电线路水泥电线杆折断，作者在13—14日即龙卷发生后的第3天和第4天开展的现场灾害调查，此时很多折断电杆已经被清理、不能辨别折断的方向，卢庄村南部尚有几根未被清理的水泥电线杆，根据无人机航拍视频可见为向北倾倒。根据临西县供电部门提供的信息，11日当晚就

开展了电力抢修复工作，卢庄村共有39根水泥电线杆折断，分布在卢庄村南部和中西部地区。图4c中直立的水泥电线杆是供电部门恢复供电新布设，此处旧电线杆在龙卷经过时被折断倒在地上，折断处可见数根被折断的钢筋。

图4b为卢庄村南部，可见多处彩钢厂房房顶被掀飞、玻璃破碎，瓦房的房顶瓦片被掀飞，损害严重的瓦房房顶只剩下梁檩等木质结构，村中间沿路边的多根水泥电线杆倾倒。图4c中的面包车，据村民描述当时被掀翻倒地后又被折断的水泥电线杆砸中，车后部可见明显的凹损。图4d所示原为一堵长约30 m的墙向南整面倒塌，而墙的外侧散落着从他处卷来的钢板、钢架和连根拔起的树干，符合龙卷致灾特征，卢庄村南部致灾宽度约为100 m。

卢庄村的西部，多家房墙倒塌、屋顶被不同程度掀飞、树木折断或倒伏，倒塌和倒伏方向呈现旋转特征。图4f为其中一家农户院中的场景，其屋顶瓦片被掀飞，院中树木上部被折断，且树上包裹悬挂着他处卷来的彩钢板，院内北侧墙壁向南倒塌，东侧墙壁向西倒塌，南侧墙壁向北倒塌，倒塌方向呈现辐合风的特征（箭头所示），符合龙卷中心强上升运动产生抽吸作用，使周围墙壁向龙卷中心倒塌的特征，而在该



图4 2021年7月11日河北省临西县卢庄村龙卷灾损情况

Fig. 4 Tornado damage at Luzhuang Village, Linxi County, Hebei Province on 11 July 2021

户的西侧人家的一间房屋整个房顶被完全掀飞，墙壁保留(图略)。卢庄村西部的致灾宽度约为100 m。

## 2.4 童尖线

龙卷大风在经过卢庄村西部后，沿西北方向移动(图5a)，从邯郸多普勒天气雷达探测来看，19:48—19:53，童尖线公路及路西河渠两旁树木折断或倒伏，树木倒伏方向呈现逆时针旋转特征，倒伏树木旁边的输电塔和风力发电杆及扇叶完好，符合龙卷大风旋转和小尺度特征(图5b)。童尖线公路附近的受灾宽度约为120 m，长度约为250 m。雷达径向速度图上最强切变出现在 $0.5^\circ$ 仰角，切变速度为32.5 m/s。童尖线公路旁河渠两侧树木呈交叉方向倒伏或折断，从图5c—d可见，有的树木被连根拔起，有的树木被折断，有的树皮被扭掉，树木被折断部位的木质部呈现丝缕状，图5e中几棵树交叉汇合折倒在一起，符合龙卷致灾特征。

## 2.5 郝庄村东

龙卷大风经过童尖线后，继续向西北方向移动，

穿过一条东西向的河渠，使河渠两侧出现树木倒伏折断，河渠北侧的郝庄村外东南的6座大棚全部倒塌，3个集装箱简易屋和其内物品朝向不同方向卷飞，1人受伤。而这6座大棚周边的风力发电杆和扇叶、输电线塔、庄稼则未受损。图6a中河渠南侧倒伏树木处受灾宽度约为10 m，而河渠北侧倒伏树木处受灾宽度约为20 m，河渠北侧大棚处受灾宽度约为100 m，河渠南北两侧的树木(图6e—f)呈现交叉倒伏特征。

图6a中A、B、C所示3处为彩钢板集装箱简易房。据村民描述，灾害发生时，简易房A中当时有1人，被卷飞起来，甩到其旁边西南侧的树上，抓住了树，而后从树上掉下来，腿部骨折，腿皮肤受损需植皮，简易房A飘移至其西侧8 m处(A1)，屋内物品被卷飞至西南方向30 m处河渠边上A2所示位置，其中被卷至A2处的物品中有一辆电动自行车；另外两个简易房B和C内当时没人，简易房B及其内物品被卷落在西北方向100 m远的B1处，其中包括重约25 kg的脚手架铁台子；简易房C被卷飞至北偏西方向约1.3 km远处的樊村

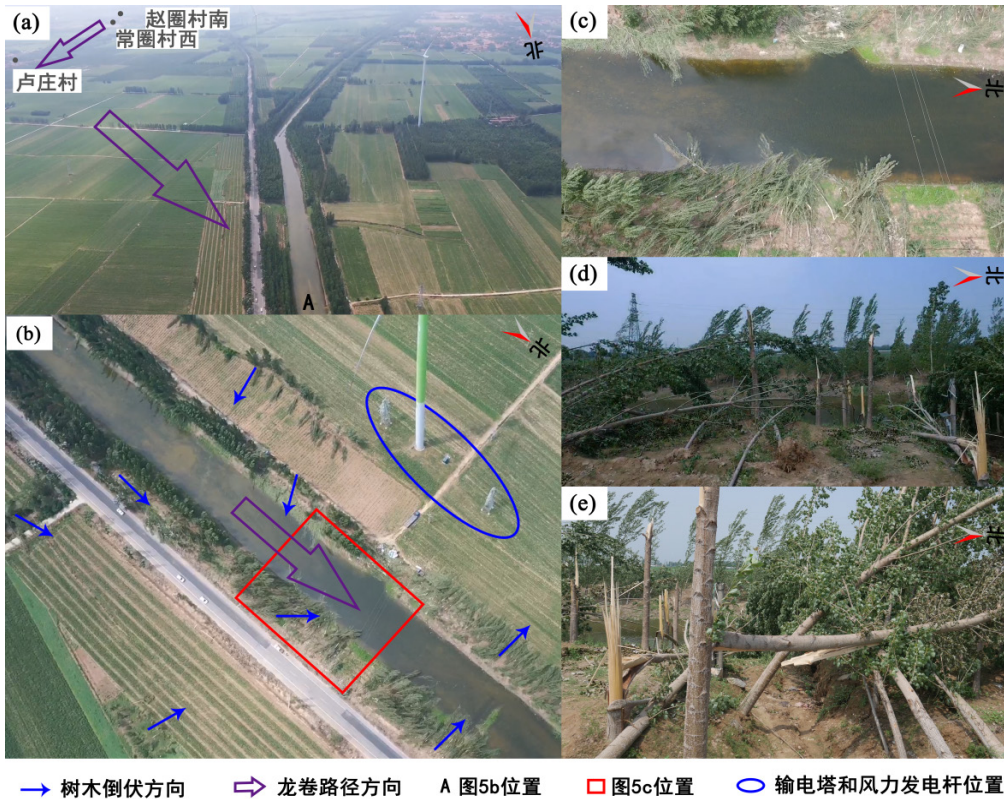


图5 2021年7月11日河北省临西县童尖线公路沿线龙卷灾损情况  
Fig. 5 Tornado damage along Tongjian Xian Road of Linxi County, Hebei Province on 11 July 2021

信用社门前(郝庄村北部的另一个村子), 而樊村未出现其他受损情况。

图6a中的6座大棚均为新建, 上面的棚膜和棉被均被卷飞不见, 其中南侧的4座大棚为拱棚, 东、北、西3个方向为钢筋混凝土柱柱和红砖构成的三面墙, 东、西墙长16 m, 北墙长100 m, 墙高3.5 m, 厚0.37 m。从最南端数第1座拱棚, 北侧墙面几乎向北全部倒塌, 东、西两侧墙完好, 从图6b—d可见折断的墙面和露出的钢筋。第2座拱棚为北侧墙面全部向北倒塌, 东、西两侧墙面全部向西倒塌, 倒塌方向具有旋转特征, 不同于直线型大风影响方向, 符合龙卷大风致灾特征。第3座和第4座拱棚均为北侧墙面几乎全部向北倒塌, 西侧墙面向西倒塌, 而东侧墙面完好, 符合龙卷旋转致灾特征。

## 2.6 龙卷路径灾害强度

表1为龙卷路径上不同地点的影响时间、最大强度以及定强依据。表中所给时间依据村庄停电时间、当地村民回忆及邯郸多普勒天气雷达图像等信息综合推测, 与实际时间可能存在一些偏差。本次龙卷生命周期 $<30$  min, 在经过卢庄村时强度最强, 最大强度达到EF2级, 对应龙卷强度等级国家标准<sup>[26]</sup>的强龙卷, 3秒钟平均阵风风速<sup>[27]</sup>最大估计在50~60 m/s, 经过其

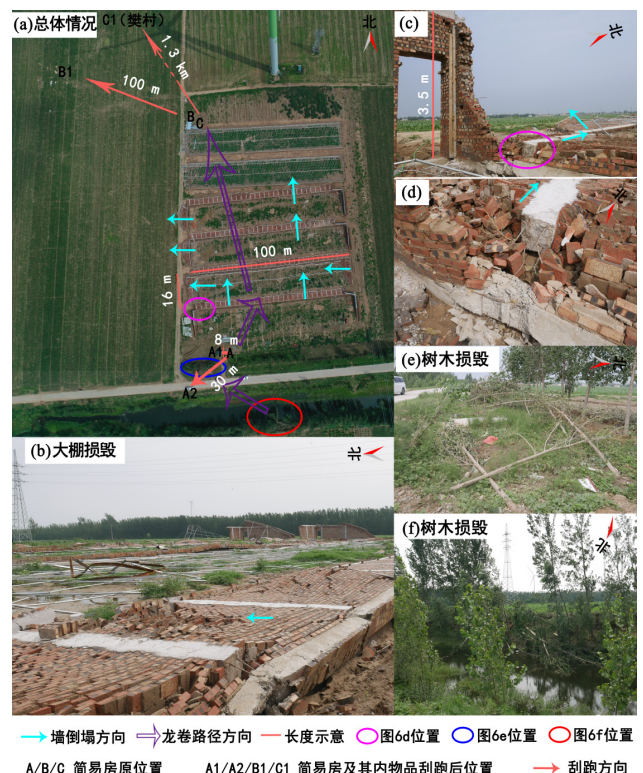


图6 2021年7月11日河北省临西县郝庄村外龙卷灾损情况  
Fig. 6 Tornado damage at the outskirts of Haozhuang Village, Linxi County, Hebei Province on 11 July 2021

表1 2021年7月11日河北省临西县龙卷不同阶段最大强度估计依据

Table 1 Intensity rating basis for different stages of tornado in Linxi County, Hebei Province on 11 July 2021

时间	地点	强度估计	3 s平均阵风风速估计/( m/s )	强度估计依据
约19:36—19:40	赵圈村	EF1/国标:中	39~49	硬木大树折断或连根拔起,民房墙塌,钢架厂房坍塌、钢架扭曲
约19:40—19:42	常圈村	EF1/国标:中	39~49	硬木大树折断,铁塔上部折断
约19:42—19:47	卢庄村	EF2/国标:强	50~60	硬木大树折断或连根拔起、部分被卷飞,民房墙塌、屋顶被掀飞吹走,面包车被刮翻,大量混凝土水泥电线杆被折断,铁板被刮飞
约19:47—19:53	童尖线	EF1/国标:中	39~49	硬木大树折断或连根拔起
约19:53—20:00	郝庄村东	EF1/国标:中	39~49	硬木大树折断,钢筋混凝土基柱的拱棚墙面倒塌,集装箱简易房、人、电动车、脚手架铁台子等被卷飞

他地点时最大强度为EF1级,对应龙卷强度等级国家标准的中等强度龙卷。

### 3 小结

文中详细分析总结了2021年7月11日河北省邢台市临西县强风灾害现场调查结果,确认了其龙卷所致,给出了龙卷的路径、强度和灾情演变,主要结果和结论如下。

1) 龙卷自南向北行进约5.4 km,生命期为19:36—20:00,持续时间<30 min,移动速度约为20 km/h,致灾宽度约为20~120 m。

2) 龙卷强度在生命期的中期经过卢庄村时达到最强,为EF2级,对应龙卷强度等级国家标准的强龙卷;而经过常圈村外和童尖线时受损的指示物以树木为主,未过居民区,与其他3个村可对比的指示物少,也可能造成强度估计偏小。

3) 建筑物的建设标准和质量与其受损程度密切相关,砖混结构的民房或墙体、彩钢板简易房等在EF2级强度的龙卷袭击后损毁明显,而砖混结构的民房在农村地区大量存在,彩钢板简易房在施工工地也经常应用。

河北省南部地区虽然龙卷发生频率不高,但未来仍需要加大防范应对龙卷等强风灾害的科普力度;另外,在房屋建设方面,在不大幅增加建设成本的情况下,可以考虑在民房或工棚中建设钢筋混凝土结构的小间安全屋提供应急避难场所。

致谢: 特别感谢河北省气象台裴宇杰高级工程师和张南高级工程师对此次现场灾害调查工作的指导和帮助。

#### 参考文献

- [1] 郑永光,刘非凡,张恒进. 中国龙卷研究进展[J]. 气象, 2021, 47(11): 1319-1335.
- [2] Brooks H E, Lee J W, Craven J P. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data[J]. Atmospheric Research, 2003, 67-68: 73-94.
- [3] 郑永光. 中国龙卷气候特征和环境条件研究进展综述[J]. 气象科技进展, 2020, 10(6): 69-75.
- [4] 杜康云,顾光芹,许启慧,等. 京津冀区域龙卷风灾害特征分析[J]. 气象科技, 2019, 47(1): 140-146.
- [5] 杜康云,顾光芹,杨铭,等. 基于核安全导则推荐方法的京津冀龙

- 卷风灾害评估[J]. 气象科技, 2020, 48(2): 299-306.
- [6] 赵亚民. 华北龙卷风群发生环境条件的分析[J]. 气象, 1990, 16(5): 36-38.
- [7] 温克刚,臧建升. 中国气象灾害大典(河北卷)[M]. 北京: 气象出版社, 2008.
- [8] 赵瑞金,郝雪明,杨向东,等. 2009年7月20日承德龙卷多普勒天气雷达特征[J]. 气象, 2010, 36(11): 68-76.
- [9] Meng Z Y, 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[J]. Weather and Forecasting, 2014, 29(3): 702-724.
- [10] 张琳娜,郭锐,何娜,等. “7·21”北京特大暴雨过程龙卷形成可能性探究[J]. 高原气象, 2015, 34(4): 1074-1083.
- [11] 姬雪帅,黄山江,张曦丹,等. 河北张家口一次超级单体龙卷雷达回波特征分析[J]. 气象科技, 2022, 50(4): 545-553.
- [12] Marshall T P. Tornado damage survey at Moore, Oklahoma[J]. Weather and Forecasting, 2002, 17(3): 582-598.
- [13] Burgess D, Ortega K, Stumpf G, et al. 20 May 2013 Moore, Oklahoma, tornado: Damage survey and analysis[J]. Weather and Forecasting, 2014, 29(5): 1229-1237.
- [14] Wakimoto R M, Atkins N T, Butler K M, et al. Aerial damage survey of the 2013 El Reno Tornado combined with mobile radar data[J]. Monthly Weather Review, 2016, 144(5): 1749-1776.
- [15] 李彩玲,谭浩波,蔡康龙,等. 2016—2020年中国龙卷过程和灾情特征[J]. 热带气象学报, 2021, 37(5/6): 733-747.
- [16] 郑永光,田付友,孟智勇,等. “东方之星”客轮沉没事件周边区域风灾现场调查与多尺度特征分析[J]. 气象, 2016, 42(1): 1-13.
- [17] Fujita T T. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1981, 38(8): 1511-1534.
- [18] 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[J]. 气象, 2016, 42(11): 1289-1303.
- [19] 张涛,关良,郑永光,等. 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, 2020, 46(5): 603-617.
- [20] 张军. 河北滦水的一次龙卷风[J]. 气象, 1981, 7(11): 32.
- [21] 张夕迪,胡艺,张芳,等. 华北地区两次低涡暴雨过程降水特征和成因对比分析[J]. 大气科学, 2023, 47(5): 1593-1610.
- [22] De Wayne Mitchell E, Vasiloff S V, Stumpf G J, et al. The National Severe Storms Laboratory tornado detection algorithm[J]. Weather and Forecasting, 1998, 13(2): 352-366.
- [23] Marquis J, Richardson Y, Markowski P, et al. Tornado maintenance investigated with high-resolution dual-Doppler and EnKF analysis[J]. Monthly Weather Review, 2012, 140(1): 3-27.
- [24] Kosiba K, Wurman J, Richardson Y, et al. Genesis of the Goshen County, Wyoming, tornado on 5 June 2009 during VORTEX2[J]. Monthly Weather Review, 2013, 141(4): 1157-1181.
- [25] Houser J L, Bluestein H B, Thiem K, et al. Additional evaluation of the spatiotemporal evolution of rotation during tornadogenesis using rapid-scan mobile radar observations[J]. Monthly Weather Review, 2022, 150(7): 1639-1666.
- [26] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 龙卷风强度等级(GB/T 40243—2021)[M]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [27] 范雯杰,俞小鼎. 中国龙卷的时空分布特征[J]. 气象, 2015, 41(7): 793-805.

(编辑: 郑秋红)