

曹艳察,郑永光,周晓敏,等,2026.2024 年 7 月 5 日山东菏泽龙卷灾害现场调查与中尺度特征[J].气象,52(2):174-189. Cao Y C,Zheng Y G,Zhou X M,et al,2026. Damage survey and mesoscale characteristics of the tornadoes in Heze of Shandong Province on 5 July 2024[J]. Meteor Mon,52(2):174-189(in Chinese).

## 2024 年 7 月 5 日山东菏泽龙卷灾害 现场调查与中尺度特征<sup>\*</sup>

曹艳察<sup>1</sup> 郑永光<sup>1</sup> 周晓敏<sup>1</sup> 王秀明<sup>2</sup> 孟宪贵<sup>3</sup> 张亚妮<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 国家气象中心,北京 100081

<sup>2</sup> 中国气象局气象干部培训学院,北京 100081

<sup>3</sup> 山东省气象台,济南 250031

**提 要:** 2024 年 7 月 5 日,受高空槽和黄淮气旋共同影响,山东省出现爆发性龙卷事件,在罕有龙卷发生的菏泽市,导致了较为严重的人员伤亡和财产损失。利用现场灾情调查、互联网视频和照片、ERA5 再分析数据、双偏振雷达观测等资料,详细分析了菏泽市东明县和鄄城县龙卷的发展演变过程、环境条件和中尺度特征。主要结论如下:综合评估,两地龙卷最大强度达强龙卷(相当于 EF2~EF3 级);其发生在黄淮气旋东北象限距中心约 50 km 处,具备整层水汽充沛、抬升凝结高度低、对流不稳定能量充足、强风暴相对螺旋度和强垂直风切变等有利于超级单体龙卷的环境特征,地面  $\beta$  中尺度辐合线和合适的冷池强度为龙卷母风暴的触发、发展以及近地面垂直涡度加强提供了有利条件。两地龙卷在同一超级单体母风暴西南—东北移动过程中先后形成,该超级单体强回波质心约为 5 km,具备深厚持久的中气旋和垂直倾斜结构特征,龙卷出现在超级单体钩状回波顶端,龙卷发生时段伴随中气旋尺度缩小、气旋性涡旋增强等信号。两地龙卷雷达均探测到龙卷涡旋特征和龙卷碎片特征,最早探测到龙卷涡旋特征的时刻比龙卷发生时间分别提前了 15 min 和 5 min,龙卷发生时段龙卷涡旋特征对应位置的相关系数迅速减小,最低值(0.46)出现时刻对应地面灾害最严重时段,可能是由水凝物粒子和强上升气流携带的大量碎片物质的混合,以及强上升气流造成的信噪比降低共同导致。龙卷消散后,相关系数低值特征仍维持了 15 min 以上。上述结论可为黄淮气旋龙卷监测和预警业务提供参考依据。

**关键词:** 龙卷,现场调查,黄淮气旋,超级单体,龙卷涡旋特征,龙卷碎片特征

**中图分类号:** P458,P445

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.022001

## Damage Survey and Mesoscale Characteristics of the Tornadoes in Heze of Shandong Province on 5 July 2024

CAO Yancha<sup>1</sup> ZHENG Yongguang<sup>1</sup> ZHOU Xiaomin<sup>1</sup> WANG Xiuming<sup>2</sup>

MENG Xiangui<sup>3</sup> ZHANG Yani<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Meteorological Centre, Beijing 100081

<sup>2</sup> CMA Training Centre, Beijing 100081

<sup>3</sup> Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031

**Abstract:** A documented tornado outbreak event occurred in Shandong Province on 5 July 2024, influenced by the upper-level trough and Huang-Huai cyclone. The event notably impacted Heze City, where tornadoes are rarely reported, and caused substantial casualties and property damages. This study analyzes the

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金气象联合基金项目(U2342204)、中国气象局重点创新团队(CMA2022ZD07)和中国气象局复盘总结专项项目(FPZJ2025-162)共同资助

2024 年 11 月 27 日收稿; 2025 年 8 月 21 日收修定稿

第一作者:曹艳察,主要从事强对流天气预报和研究. E-mail:caoych@cma.gov.cn

通讯作者:郑永光,主要从事强对流和强降水等中小尺度天气研究. E-mail:zhengyg@cma.gov.cn

development and evolution of tornadoes as well as their environmental conditions and mesoscale characteristics in Dongming and Juancheng counties of Heze City, based on disaster investigations, online video and photo evidences, ERA5 reanalysis data and dual-polarization radar observations. The main conclusions are as follows. According to the comprehensive assessment, the maximum force of the tornadoes in Dongming and Juancheng counties reached the degree of strong tornado (equivalent to level EF2–EF3). The tornadoes occurred at the location approximately 50 km northeast of the Huang-Huai cyclone center. The environment features conducive to the formation of supercell tornadoes included abundant water vapor, low lifting condensation level, sufficient convective instability energy, strong storm-relative helicity, and strong vertical wind shear. The surface meso- $\beta$  scale convergence line and appropriate cold pool intensity provided favorable conditions for the initiation and development of the supercell tornadic storm, strengthening the near-surface vertical vorticity. Both tornadoes originated from the same southwest-northeast moving supercell, characterized by a robust echo centroid near 5 km altitude, and a persistent, deep mesocyclone with a tilted vertical structure. The tornadoes appeared at the top of the hook echo of the supercell, and the period of tornado occurrence was accompanied by signals such as the reduction of mesocyclone scale and the enhancement of cyclonic vortex. The two radars both detected tornado vortex signature (TVS) and tornado debris signature (TDS), with the earliest detection of TVS being 15 min and 5 min ahead of the tornado occurrence time, respectively. During the process tornado, the correlation coefficient (CC) corresponding to the vortex features rapidly decreased. The lowest value (0.46) of CC appeared at the time when ground damage was most severe, which may be attributed to the mixing of hydrometeor particles and a large amount of debris carried by the strong updraft, as well as the reduction in signal-to-noise ratio caused by the intense updraft. After the tornado dissipated, the low CC value characteristic persisted for more than 15 min. These findings can enhance understanding of Huang-Huai cyclone-associated tornadoes and provide operational guidance for tornado monitoring and warning systems.

**Key words:** tornado, damage survey, Huang-Huai cyclone, supercell, tornado vortex signature (TVS), tornado debris signature (TDS)

## 引 言

龙卷又称龙卷风,是一类局地性、小尺度、突发性的强对流天气,破坏性极强。近10年来,我国多个强龙卷过程造成严重的人员伤亡和财产损失,如2016年6月23日江苏阜宁EF4级超强龙卷(Xue et al, 2016; 张小玲等, 2016; 郑永光等, 2016b), 2019年7月3日辽宁开原EF4级超强龙卷(张涛等, 2020; 郑永光等, 2020), 2024年4月27日广东广州EF3级强龙卷等。以往研究表明,山东龙卷事件多发生在高空槽、黄淮气旋或台风背景下(龚佃利等, 2024; 于怀征等, 2022; 谷山青等, 2022; 赵海军, 2022)。2024年7月5日14:00—21:00(北京时,下同),受高空槽和黄淮气旋的共同影响,山东菏泽、济宁、淄博、泰安、济南等地部分地区先后出现多个龙卷,此次爆发性龙卷事件造成多人伤亡、大量基础设

施损毁,其中,菏泽市东明县、鄄城县灾情影响最为严重。本次过程是在有利的环流背景下发生的一次爆发性龙卷事件,经气象部门灾情调查(以下简称灾调)确认,山东菏泽、济宁、淄博、泰安、济南等地共发生13个龙卷,通过雷达观测对比分析判断,先后在菏泽市东明县、鄄城县、郓城县和济宁市梁山县出现的4个强龙卷由同一个超级单体母风暴造成,在以往的龙卷过程中非常罕见。由于龙卷的时空尺度非常小,现有的气象业务观测体系难以实现对其的全面监测(郑永光等, 2016a; 2016b; 2017; 2018),因此,现场灾害调查仍然是分析和确认龙卷特性、影响范围和破坏程度等信息最直接的手段,根据灾损情况估计风速和判断龙卷定级强度(郑永光等, 2016b; 2018; 张涛等, 2020)。美国相对较早地形成了比较完整规范的龙卷和下击暴流所致风灾的调查体系(Fujita, 1971; 1974; 1978; Bunting and Smith, 1993; NOAA, 2003; Doswell III et al, 2009; Frelich and



Ostuno, 2012; Edwards et al, 2013), 目前美国应用于龙卷强度估计的标准是 EF 等级 (NOAA, 2003; Doswell III et al, 2009; Wind Science and Engineering Center, 2004)。我国也通过一系列的龙卷、极端大风事件 (Meng and Yao, 2014; Meng et al, 2016; 郑永光等, 2016a; 张涛等, 2020) 逐步建立了风灾调查体系和规范标准 [全国气象防灾减灾标准化技术委员会 (SAC/TC345), 2021]。该标准将龙卷强度等级共分为弱、中、强、超强 4 个等级, 与美国 EF 等级存在如下对应关系: 弱龙卷对应 EF0 级及其以下, 中等强度龙卷对应 EF1 级, 强龙卷对应 EF2、EF3 级, 超强龙卷对应 EF4 和 EF5 级。

近年来, 国内开展了针对热带气旋、冷涡背景下的龙卷环境特征统计研究 (黄先香等, 2024; 才奎志等, 2022), 但对于黄淮气旋背景下龙卷个例的研究仍较少, 特别是针对龙卷爆发事件的分析 (Wen et al, 2024)。基于龙卷灾害的现场调查结果和互联网视频照片、地面自动气象站、双偏振雷达等观测资料以及 ERA5  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  再分析资料, 本文详细分析了此次过程中灾情最严重的山东菏泽市东明县、鄆城县 2 个强龙卷的发展演变过程、环境条件和中尺度特征, 可进一步加深预报员对黄淮气旋背景下龙卷天气的认识, 以期提高龙卷监测和预报预警业务能力。

## 1 东明和鄆城龙卷灾害现场调查

2024 年 7 月 6—7 日, 现场调查组根据雷达资料显示的龙卷母风暴的中气旋特征演变过程和相关媒体报道, 重点对菏泽市东明县、鄆城县龙卷受灾严重区域进行了详细调查。现场调查方式包括: 近距离观察、测量、拍照取证建筑、植被等受损情形, 升空无人机拍摄俯视、远视、路径跟踪等视频, 询问龙卷目击人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。

### 1.1 东明县龙卷演变、强度和灾情分析

综合现场调查结果和龙卷探测分析, 东明县龙卷开始影响时间约为 14:20, 结束时间约为 14:35, 持续约 15 min, 龙卷大致自西南向东北移动, 路径长约 12 km, 最大灾损宽度约为 500 m (图 1), 最强等级为强龙卷 (相当于 EF3 级)。

#### 1.1.1 龙卷形成

龙卷漏斗云约 14:20 在东明县沙窝镇蔡坡村以北接地, 造成蔡坡村北一家塑料制品公司厂房严重损坏 (图 2a), 之后向东北方向移动, 造成沙窝镇沙河村大量民房受损 (图 2b)。在穿过东鱼河北支河道后, 造成高垌村东南部房屋受损及其东侧田地中



注: 文字框标注了龙卷经过的地点及对应时间。

图 1 2024 年 7 月 5 日山东东明县龙卷路径 (红色阴影)

Fig. 1 Path (red shaded) of the Dongming Tornado in Shandong Province on 5 July 2024

一座高压线塔从中部折断(图 2c)。根据灾情分析,龙卷在蔡坡村和沙河村造成多处房屋屋顶瓦片被吹走,其中沙河村有一处红砖石、灰泥巴垒起的老旧房屋倒塌(图 2b),属于强龙卷(相当于 EF2 级);高堎村附近的高压线塔倾倒(图 2c),属于强龙卷(相当于 EF3 级)。

#### 1.1.2 初期减弱

龙卷在向东北方向行进过程中,先后经过雷庄村和刘墙村,造成雷庄村以南大片蔬菜大棚受损(图 3a)及雷庄村东南部、刘墙村大部民房受损(图 3b),重者整个房顶被揭。穿过刘墙村后,龙卷

强度减弱,其所造成的灾损范围也有所减小(图 1),并向东北方向穿过东明湖公园及体育公园,造成东明湖周边直径约 10~20 cm 的树木倒伏或连根拔起(图 3c)。根据灾情分析,以上损毁情况属于中等强度龙卷(相当于 EF1 级)。因此,该阶段龙卷强度相对前期有所减弱。

#### 1.1.3 再度增强

龙卷在经过东明湖公园附近水面后继续向东北方向移动,在白寨小区西南侧的建筑工地再度加强,将工地中 9 座塔吊中的 6 座吹倒(图 4a,红色圆圈标注位置),多个水泥电线杆折断(图 4c),并将工地



图 2 2024 年 7 月 5 日山东东明县龙卷造成(a)蔡坡村北塑料制品公司厂房损毁,(b)沙河村民房倒塌,(c)高堎村附近高压线塔倾倒

Fig. 2 (a) The destruction of a plastic products factory building in the north of Caipo Village, (b) collapsed residential houses in Shahe Village, (c) toppled high-voltage transmission towers near Gaogu Village in Shandong Province caused by the Dongming Tornado on 5 July 2024



注:图 b 白色箭头指向正北,下同。

图 3 2024 年 7 月 5 日山东东明县龙卷造成(a)雷庄村蔬菜大棚大面积损毁,(b)刘墙村民房受损,(c)东明湖公园树木倒伏

Fig. 3 (a) The damaged vegetable greenhouses in Leizhuang Village, (b) damaged houses in Liuqiang Village, (c) fallen trees in Dongming Lake Park caused by the Dongming Tornado in Shandong Province on 5 July 2024





图 4 2024 年 7 月 5 日山东东明县龙卷造成(a~c)建筑工地,(d~f)白寨小区,  
(g,h)白寨小区西侧农贸市场的受灾情况

Fig. 4 The damage of (a—c) the construction site, (d—f) the Baizhai Community and (g, h) its western agricultural market caused by the Dongming Tornado in Shandong Province on 5 July 2024

中地磅(质量约为 10 t)掀翻到附近 3 m 左右的位置(图 4b)。据目击者描述,龙卷经过时,将装有工具的集装箱制成的简易房屋(质量约为 4 t)和多辆小汽车吹走 50~100 m,并造成 1 人身亡。根据以上损毁情况,判定龙卷强度为强龙卷(相当于 EF2 级)。

白寨小区有多个高层楼宇玻璃破碎,大量碎屑插入楼房保温层(图 4d),太阳能电池板被吹掉,部分居民家中电冰箱被吹出上百米。有居民反映,一

栋高楼的电梯间被强风吹变形导致电梯无法运行;小区北侧集装箱制成的简易房屋(质量约为 2 t)被大风吹走;小区多处围墙被吹倒(图 4e),小区北侧成片直径约为 40 cm 的大树被折断(图 4f),围墙倒塌方向和树木倒伏均呈明显的气旋性辐合状。白寨小区西侧农贸批发市场也遭受一定破坏,包括部分墙体严重受损(图 4g)、窗户玻璃破碎以及彩钢挡板受损(图 4h)等,1 名居民因灾死亡。根据上文所述的龙卷中心经过后的灾情,判定龙卷强度至少为强

龙卷(相当于 EF2 级)。

随后龙卷向东北方向移动,造成京广线以北恒通建材公司(图 5a)、泓润能源公司(图 5b)大量钢结构建筑受损,顶部彩钢瓦荡然无存,多处砖墙被吹倒,多个简易房被彻底损毁,十几棵直径约为 20~40 cm 的树木折断,呈辐合状。根据彩钢板工棚屋顶倾覆、砖墙倒塌等,判定龙卷强度为中等强度(相当于 EF1 级)。

#### 1.1.4 强度减弱

在将东明互通立交东南侧停车场板房全部吹走,并导致其北侧民房部分受损后,龙卷穿过荷宝高速,强度明显减弱,但仍在劲海化工厂造成一定损失,将其伸缩大门吹动近 50 m,同时,少量厂房屋顶彩钢板受损。14:35 前后,龙卷造成该厂东侧蔬菜大棚轻微受损后,减弱消散。

## 1.2 鄄城县龙卷路径及灾情分析

综合现场调查结果和龙卷探测分析,鄄城县龙卷影响开始时间约为 15:06,结束时间约为 15:18,持续时间约为 12 min,大致自西南向东北偏东方向移动,总路径约为 9 km(图 6),15:11 鄄城县临濮镇地面自动气象观测站测得最大阵风( $38.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。灾调显示,灾情较重的路径长约为 3 km,包括崔庄、柳园村和西王潭村,影响时长约为 6 min,最强等级为强龙卷(相当于 EF2 级)。

灾调组重点对受灾较严重的崔庄、柳园村和西王潭村进行了实地走访。崔庄出现硬木树木折断、树干扭曲(图 7),柳园村和西王潭村有多处红砖石、灰泥巴垒起的老旧房屋倒塌(图 8a,8d),混凝土框架结构的建筑门窗玻璃破碎(图 8c),以及钢结构建

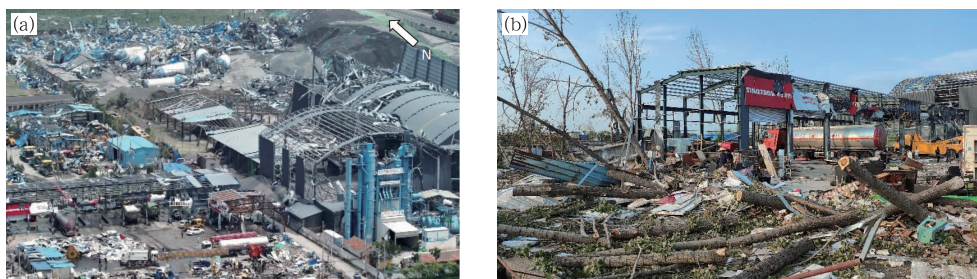


图 5 2024 年 7 月 5 日山东东明县龙卷经过(a)恒通建材公司、(b)泓润能源公司损毁情况  
Fig. 5 The damage of (a) Hengtong Building Materials Factory and (b) Hongrun Energy Company caused by the Dongming Tornado in Shandong Province on 5 July 2024



注:文字框标注了龙卷经过的地点及对应时间。

图 6 2024 年 7 月 5 日山东鄄城县龙卷路径(红线)  
Fig. 6 Path (red line) of the Juancheng Tornado in Shandong Province on 5 July 2024

筑受损,顶部彩钢瓦遭受严重破坏(图 8b)。根据灾害分析,非框架结构的砖混房屋倒塌和大片直径约 20~40 cm 的树木折断,均属于强龙卷(相当于 EF2 级)。



图 7 2024 年 7 月 5 日山东鄄城县龙卷造成崔庄树木受损

Fig. 7 The damaged trees in Cuizhuang Village caused by the Juancheng Tornado in Shandong Province on 5 July 2024





图 8 2024 年 7 月 5 日山东鄄城县龙卷造成(a~c)柳园村(a)房屋倒塌、  
(b)钢结构建筑损毁、(c)房屋受损,以及(d)西王潭村房屋损毁

Fig. 8 (a) Collapsed houses, (b) damaged steel structure buildings, (c) damaged houses in Liuyuan Village, and (d) collapsed houses in Xiwangtan Village caused by the Juancheng Tornado in Shandong Province on 5 July 2024

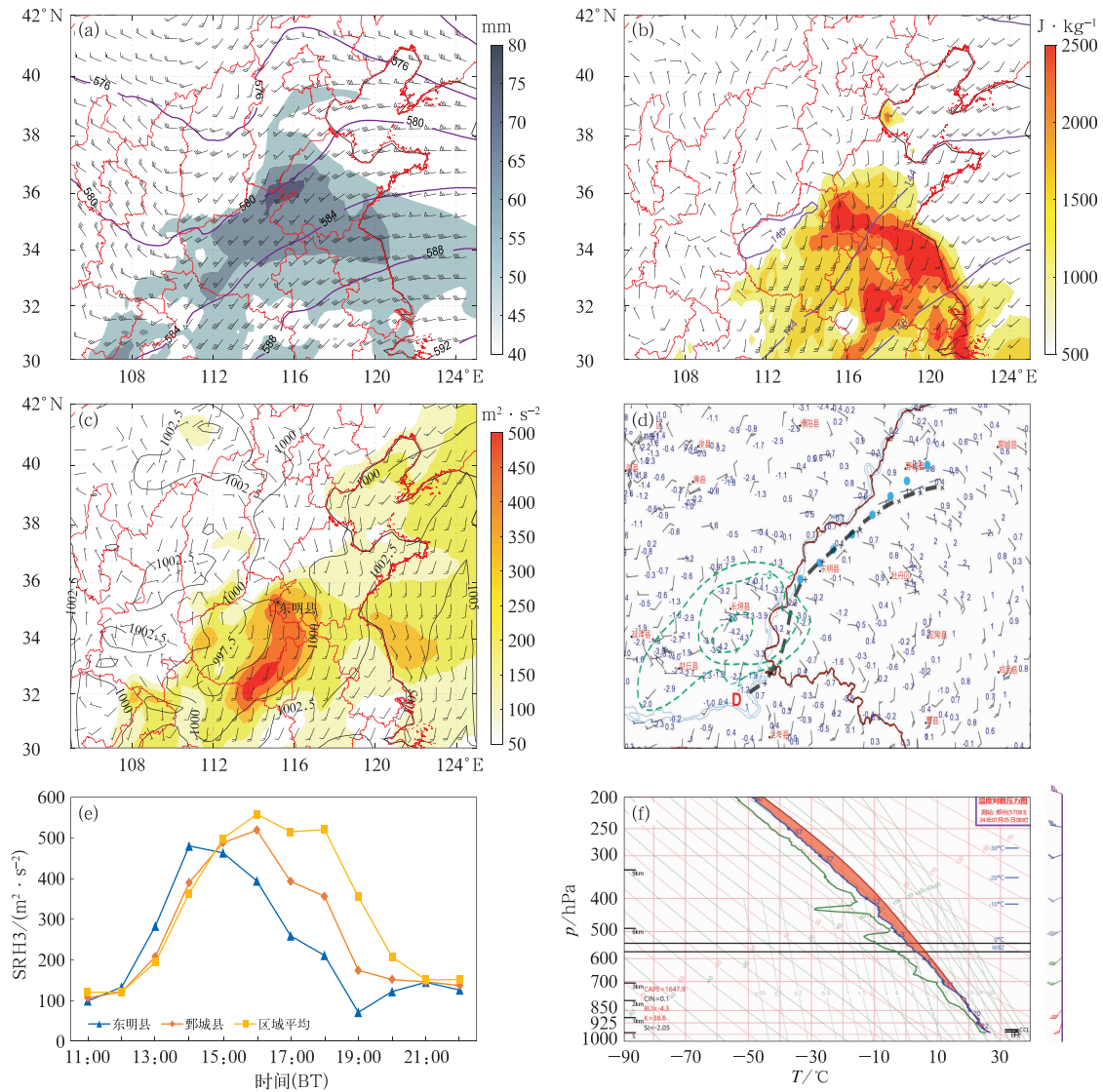
## 2 龙卷环境条件

2024 年 7 月 5 日 14:00, 500 hPa 高空槽东移配合黄淮气旋发展加强(图 9a, 9b), 山东西南部位于高空槽前和低空西南急流控制区, 菏泽水汽充沛, 大气湿度层结深厚, 垂直累积可降水量超过 65 mm (图 9a); 最优对流有效位能(BCAPE)基本维持在 1500~2500 J·kg<sup>-1</sup>(图 9b), 具备充足的不稳定能量条件; 龙卷发生地东明县附近在 925 hPa 及地面(图 9b~9d)均能分析出明显的水平切变辐合系统, 中低层急流的存在使得该地区 0~1 km 垂直风切变(SHR1)约为 10 m·s<sup>-1</sup>, 0~3 km 垂直风切变(SHR3)也接近 20 m·s<sup>-1</sup>; 因此, 较强的低层大气水平切变辐合与垂直风切变为龙卷母风暴的触发、发展以及中气旋的形成提供了较好的动力条件。

俞小鼎和郑永光(2020)研究表明, 风暴相对螺旋度(SRH)在衡量风暴旋转潜势时具有明确意义, 其大小取决于相对风暴气流流线方向的水平涡度。

Davies-Jones et al(1990)建议使用 0~3 km 垂直积分的风暴相对螺旋度(SRH3)来判识超级单体风暴中气旋的强度, 弱、中、强中气旋所对应的风暴相对螺旋度分别为 150~299 m<sup>2</sup>·s<sup>-2</sup>、300~449 m<sup>2</sup>·s<sup>-2</sup>、≥450 m<sup>2</sup>·s<sup>-2</sup>。本文利用 ERA5 数据计算了 SRH3, 结果表明, 14:00 河南东南部至山东西南部地区处于 SRH3≥300 m<sup>2</sup>·s<sup>-2</sup> 的高值区(图 9c), 东明县附近格点 SRH3 达 480 m<sup>2</sup>·s<sup>-2</sup>(图 9e), 且 SRH3 时序变化(图 9e)显示, 东明县和鄄城县龙卷发生前 2~3 h, SRH3 均呈现出明显上升趋势且最大数值达到 450 m<sup>2</sup>·s<sup>-2</sup> 以上, 龙卷发生后, SRH3 进入下降阶段, 菏泽附近区域平均的 SRH3 数值在龙卷高发的 14:00—19:00 均≥350 m<sup>2</sup>·s<sup>-2</sup>, 因此, 强的风暴相对螺旋度与龙卷区域对应较好, 这与对流系统上升气流导致水平涡管倾斜、拉伸, 造成垂直涡度增长, 有利于中气旋龙卷发生有关。

5 日 08:00 郑州站(距离东明县龙卷发生地约 120 km) T-lnp 图(图 9f)显示, 850 hPa 以下温度露点差在 2.5℃ 以下, 低层大气呈接近饱和的状



注:图 d 中蓝色圆点表示龙卷母风暴中气旋位置,黑色粗虚线表示地面风场辐合线,D 表示低压中心,绿色虚线分别表示  $-2$ 、 $-3$  和  $-4$  °C 变温等值线。

图 9 2024 年 7 月 5 日(a~d)14:00(a)500 hPa 高度场(等值线,单位:dagpm)、风场(风羽)与整层可降水量(填色),(b)850 hPa 高度场(等值线,单位:dagpm)、925 hPa 风场(风羽)与最优对流有效位能(填色),(c)地面气压场(等值线,单位:hPa)、10 m 风场(风羽)与 0~3 km 风暴相对螺旋度(填色),(d)地面自动气象站风场(风羽)及 1 h 变温(蓝色数字和绿色虚线),(e)11:00—22:00 东明县、鄄城县及菏泽附近区域平均 0~3 km 风暴相对螺旋度,(f)08:00 河南郑州站  $T-\ln p$  图

Fig. 9 (a) The 500 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm) and wind field (barb), vertically integrated precipitable water (colored), (b) the 850 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm), 925 hPa wind field (barb) and the best convective available potential energy (colored), (c) surface pressure field (contour, unit: hPa), 10 m wind field (barb) and 0-3 km storm relative helicity (colored), (d) automatic weather station wind field (barb) and 1 h variable temperature (blue numbers and green dashed lines) at 14:00 BT, (e) temporal variation of 0-3 km storm relative helicity in Dongming, Juancheng counties and average of the surrounding areas of Heze from 11:00 BT to 22:00 BT, and (f)  $T-\ln p$  chart at Zhengzhou Station in Henan Province at 08:00 BT 5 July 2024

态,抬升凝结高度很低,约为 279 m,对流抑制能量接近  $0\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,低层动力辐合抬升作用下易触发对流;该站地面抬升计算得到的对流有效位能(CAPE)达  $1648\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,表明大气条件不稳定充足,有利于对流系统的发展加强。此外,表 1 给出了基于 ERA5 数据计算的 14:00 东明县附近格点所对应的各类物理量参数具体数值,结果表明该区域具备有利于龙卷发生的环境条件。

14:00,东明县龙卷发生在黄淮气旋东偏北方向约 50 km 处,在龙卷发生前,沿龙卷母风暴移动方向上就已存在一条地面风场辐合线,龙卷母风暴中气旋移动路径与地面风场辐合线具有较好的对应关系(图 9d),同时,地面辐合线超前于龙卷发生,这表明地面辐合线加之低空急流左前方的辐合区为龙卷风暴的触发和发展提供了有利条件。Wurman et al

(2007)研究指出,龙卷生成前需要存在后侧下沉气流,下沉气流与环境之间形成的温度差异有利于近地面垂直涡度发展(Davies-Jones et al,2001),对龙卷的形成至关重要。但下沉气流到达地面后造成的冷池不能太强,否则会因负浮力增加,抑制近地面垂直涡度的加强。Markowski(2002)、Markowski and Richardson(2009)研究表明,冷池与环境大气的温度差通常小于  $4^{\circ}\text{C}$  时有利于龙卷的生成和维持。14:00,东明县上游地区对流风暴对应的地面 1 h 变温显示,对流风暴的下沉气流导致地面出现  $2\sim 4^{\circ}\text{C}$  的降温(图 9d),且追踪 14:00—20:00 的地面冷池和龙卷发生地的关系(图略),发现龙卷均出现在地面 1 h 变温  $2\sim 4^{\circ}\text{C}$  冷池的前侧,因此,合适的冷池强度为龙卷的形成提供了近地面垂直涡度加强的物理机制,有利于龙卷生成。

表 1 2024 年 7 月 5 日 14:00 山东东明县附近格点各物理量参数

Table 1 Parameters of grid points near Dongming County, Shandong Province at 14:00 BT 5 July 2024								
参数	$\text{DT}_{85}/^{\circ}\text{C}$	$\text{BCAPE}/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\text{SBCIN}/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\text{SBLCL}/\text{m}$	$\text{PWAT}/\text{mm}$	$\text{WBZ}_0/\text{m}$	$Z_0/\text{m}$	$Z_{20}/\text{m}$
数值	20.6	1782	12	442	65	5075	5224	8679
参数	$\text{SHR1}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\text{SHR3}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\text{SHR6}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\text{SRH1}/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2})$	$\text{SRH3}/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2})$	SCP	STP	SWEAT
数值	9	19	24	122	480	12	3.0	353

注:DT<sub>85</sub>为 850 hPa 和 500 hPa 温度差,BCAPE 为从最不稳定层抬升的对流有效位能,SBCIN 为从地面抬升气块的对流抑制能量,SBLCL 为地面抬升凝结高度,PWAT 为整层可降水量,WBZ<sub>0</sub> 为湿球 0℃ 层高度,Z<sub>0</sub> 为 0℃ 层高度,Z<sub>20</sub> 为 -20℃ 层高度,SHR1、SHR3、SHR6 分别为 0~1、0~3、0~6 km 垂直风切变,SRH1、SRH3 分别为 0~1、0~3 km 风暴相对螺旋度,SCP 为超级单体复合指数,STP 为强龙卷指数,SWEAT 为强天气威胁指数。

基于以上分析,给出了本次山东菏泽强龙卷过程的流型配置图(图 10)。龙卷发生在 500 hPa 高空槽前、925 hPa 西南急流顶端、地面黄淮气旋东偏北方向约 50 km 处,具备整层水汽充沛、抬升凝结

高度低、对流不稳定能量充足、中低层垂直风切变较大、强的风暴相对螺旋度等有利于超级单体龙卷的环境特征,地面 β 中尺度辐合线以及合适的冷池强度为龙卷母风暴的触发、发展以及近地面垂直涡度

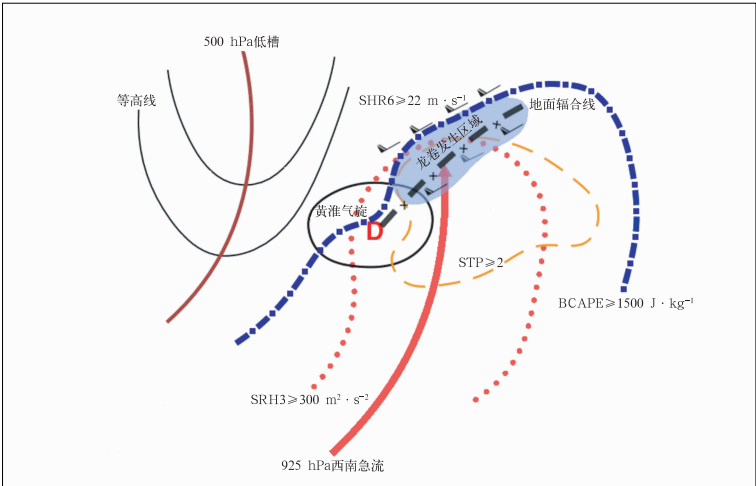


图 10 “7·5”山东菏泽强龙卷过程流型配置图

Fig. 10 Flow diagram of the strong tornado process in Heze of Shandong Province on 5 July 2024



的加强提供了有利条件。

### 3 龙卷超级单体母风暴中尺度特征

龙卷出现的具体时间和地点,与龙卷母风暴系统的发展演变及其内部的垂直涡度和速度场等结构特征密切相关,需要高时空精度的监测资料和高分辨率数值模式的支撑,这也是目前龙卷监测和临近预警业务的重点和难点问题。本部分将基于双偏振雷达(以下简称雷达)探测的反射率因子( $Z_H$ )、径向速度以及中气旋、龙卷涡旋特征(TVS)和龙卷残片特征(TDS)等信息,对东明县、鄄城县龙卷风暴的中尺度特征进行分析。

基于河南濮阳雷达  $1.5^\circ$  仰角探测的径向速度,人工识别定位东明县、鄄城县龙卷超级单体母风暴的中气旋路径(图 11),结果显示,该中气旋自 5 日 14:00 左右在河南长垣县和山东东明县交界处快速发展,以约  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的速度向东北方向移动,先后经过东明县和鄄城县。14:27,中气旋位于东明县境内,中心距离濮阳雷达约 52 km,旋转速度约为  $26.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,达到最强,之后其强度逐渐减弱,但在 14:50—15:01,即龙卷风暴经过东明县后进入鄄城县境内期间,中气旋再度加强,15:30 后逐渐减弱。现场调查显示,该超级单体风暴先后于 14:20—14:35 和 15:06—15:18 在东明县和鄄城县触地,造成多处龙卷灾害。

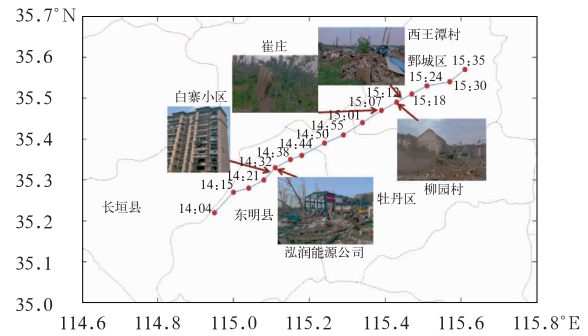
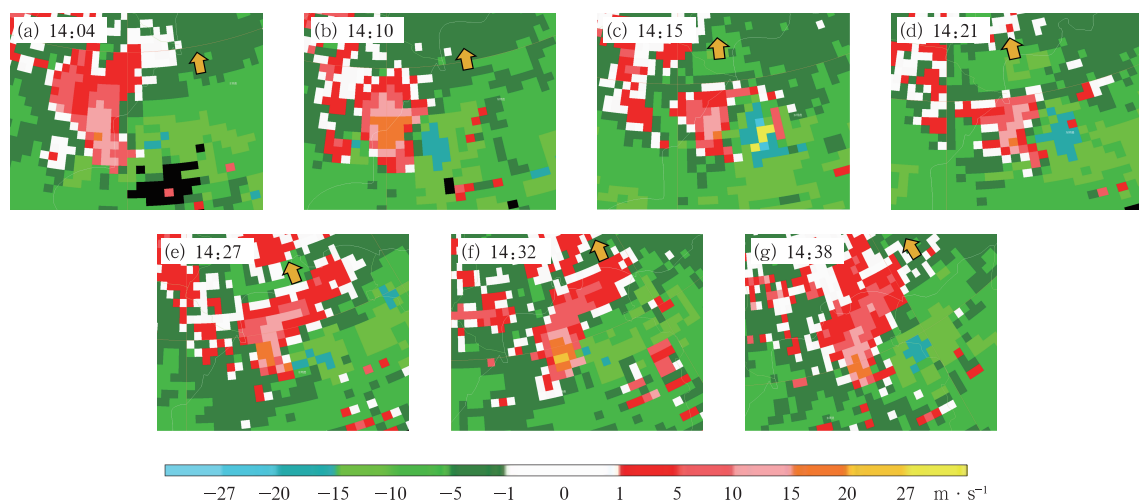


图 11 2024 年 7 月 5 日 14:14—15:35 山东东明县、鄄城县龙卷母风暴中气旋路径及重灾区灾情

Fig. 11 Mesocyclone path and the disaster situation in the severely affected areas by tornado events in Dongming and Juancheng of Shandong Province, from 14:14 BT to 15:35 BT 5 July 2024

#### 3.1 反射率因子和径向速度特征

濮阳雷达  $1.5^\circ$  仰角风暴相对径向速度显示,东明龙卷母风暴在 14:04 已出现气旋式环流特征,此时中气旋方位直径大于径向直径,呈椭圆形,位于东明县西南部;之后龙卷母风暴在向东北方向移动的过程中,中气旋方位直径和径向直径差别逐渐缩小,形状由椭圆形向圆形演变,强度逐渐加强(图 12a~12c);14:15 开始出现速度模糊(图 12c),此时,中气旋位于东明县沙窝镇境内;14:27—14:32(图 12e, 12f)是中气旋最为强盛的时段,地面灾害也最为严重,径向速度场上出现明显的 TVS,该时段中气旋



注:黄色箭头指向雷达所在方向,下同。

图 12 2024 年 7 月 5 日不同时刻河南濮阳雷达  $1.5^\circ$  仰角风暴相对径向速度  
Fig. 12 Evolution of the storm-relative radial velocity at  $1.5^\circ$  elevation of Puyang Radar from 14:04 BT to 14:38 BT 5 July 2024



位于东明县白寨小区和周边的建筑工地、弘润能源公司附近;14:38(图 12g),中气旋方位直径增大,强度有所减弱。

以东明龙卷最强时段为例分析龙卷超级单体母风暴特征。14:32,河南濮阳雷达  $0.5^\circ$  仰角  $Z_H$  (图 13a)显示,龙卷母风暴对应明显的钩状回波特征,龙卷出现在钩状回波顶端,最大回波强度超过 56 dBz;径向速度图(图 13b)对应明显的中气旋和 TVS,并出现速度模糊,经人工退模糊后,TVS 相邻像素点对应的正、负速度分别为  $17.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $-34.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,二者差值达  $51.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,雷达探测该 TVS 距离地面约 660 m 高度上,但结合现场灾调结果可知,与其对应的龙卷已触地,并产生了龙

卷灾害; $Z_H$  垂直剖面(图 13c)显示,龙卷母风暴回波顶高约为 15 km,强回波主体位于 10 km 以下,最大  $Z_H$  为 50~60 dBz,质心高度约为 5 km,相比朱君鉴等(2019)、谷山青等(2022)台风背景下的山东龙卷风暴发展高度要更高一些。从图 13c 中还可以看出,该风暴呈倾斜结构,自下而上向东偏北方向倾斜,径向速度剖面(图 13d)显示,中气旋径向切变区也呈同样的倾斜趋势,可能与中低层西南气流对风暴移动影响和垂直风切变方向有关。

对于鄆城龙卷,龙卷超级单体母风暴于 15:01 进入鄆城县境内,此时风暴相对径向速度场上已存在明显的中气旋特征,旋转速度约为  $19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (图 14a);15:01—15:12,在超级单体风暴自西南向

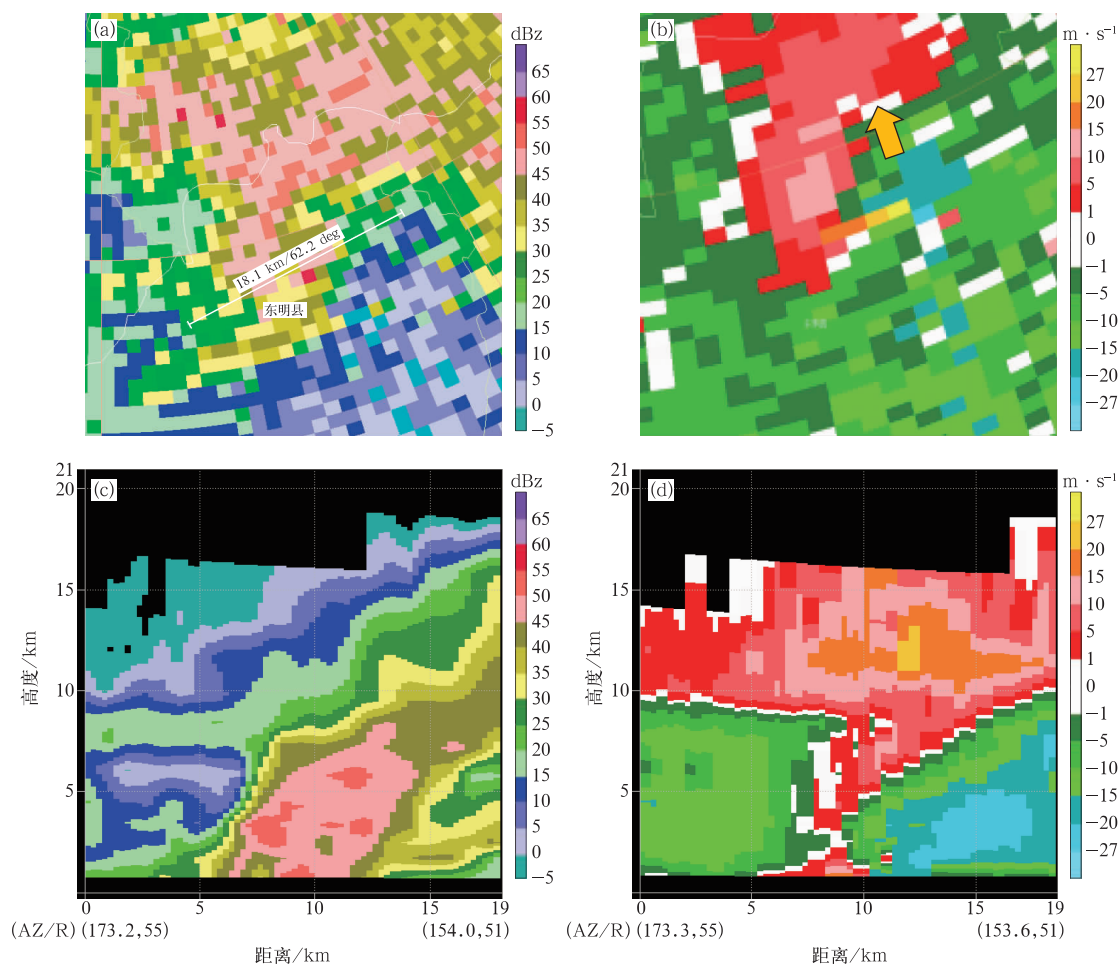


图 13 2024 年 7 月 5 日 14:32 河南濮阳雷达  $0.5^\circ$  仰角(a)  $Z_H$  和(b)径向速度,以及沿图 a 中直线的(c)  $Z_H$  和(d)径向速度垂直剖面

Fig. 13 (a)  $Z_H$  and (b) radial velocity at  $0.5^\circ$  elevation of Puyang Radar at 14:32 BT 5 July 2024, and (c, d) cross-sections of (c)  $Z_H$  and (d) radial velocity along the white solid line in Fig. 13a

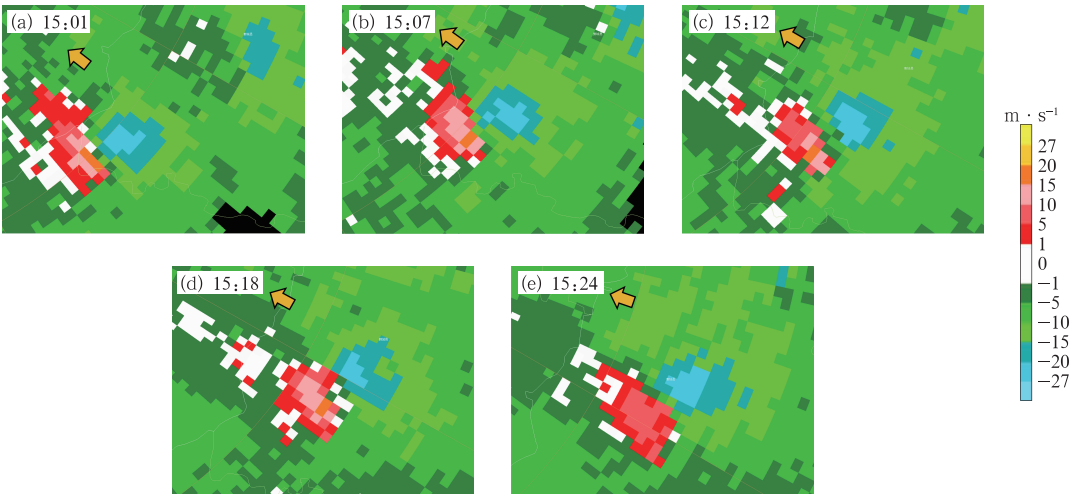


图 14 2024 年 7 月 5 日不同时刻河南濮阳雷达 1.5°仰角风暴相对径向速度  
Fig. 14 The evolution of the storm-relative radial velocity at 1.5° elevation of Puyang Radar from 15:01 BT to 15:24 BT 5 July 2024

东北方向快速移动过程中,中气旋逐渐加强,旋转速度逐渐由  $19\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  增长到  $21\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (图 14a~14c);15:12—15:18,中气旋处于最强盛阶段,0.5°仰角径向速度场出现 TVS(图略),TVS 对应的经纬度位置与柳园村和西王潭村吻合,灾调也显示上述两个村庄灾情相对更为严重;15:24 以后(图 14e),中气旋结构逐渐松散,强度趋于减弱。

3.2 龙卷涡旋特征

在东明龙卷发生前约 15 min,14:04 濮阳雷达开始探测到龙卷母风暴 TVS,14:04—14:44 连续多个时次体扫均识别出 TVS;鄄城龙卷发生前 5 min,15:01 雷达探测到 TVS。表 2 给出了东明龙卷过程中,基于濮阳雷达探测的 TVS 产品部分属性。在龙

卷发生前(14:20),TVS 最大切变呈现逐渐增强的趋势;与此同时,最大切变所在高度也随时间逐渐降低,说明近地面旋转不断增强;TVS 底高变化不大,逐渐从 0.9 km 降低为 0.7 km,平均值为 0.8 km,进一步分析表明,表中 8 次体扫 TVS 底高都是雷达 0.5°仰角能够探测到的最低高度,不同时次底高的差异主要由龙卷涡旋与雷达的距离不同所致。TVS 顶高在 4~5 km,平均为 4.5 km,TVS 的平均厚度为 3.7 km。鄄城龙卷风暴(表略)从 15:01 开始雷达探测到 TVS,至 15:18 共持续了 4 次体扫(TVS 平均底高为 0.75 km,平均顶高为 4.2 km,平均厚度为 3.5 km),最大切变为  $102.3\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ ,比东明龙卷略小一些。

表 2 2024 年 7 月 5 日山东东明县龙卷风暴 TVS 参数表  
Table 2 Characteristics of tornado vortex signature (TVS) of Dongming Tornado supercell in Shandong Province on July 5 2024

TVS 参数	14:04	14:10	14:15	14:21	14:27	14:32	14:38	14:44	平均值
顶高/km	5.0	4.9	4.5	4.5	4.4	4.3	4.1	4.0	4.5
底高/km	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.8
厚度/km	4.1	4.0	3.7	3.7	3.6	3.5	3.4	3.3	3.7
最大切变/ $10^{-3}\text{ s}^{-1}$	96.8	91.6	113.3	105.5	109.4	111.5	58.6	35.8	90.3
最大切变所在高度/km	5.0	4.9	3.4	4.5	3.3	1.6	1.6	0.7	3.1

3.3 双偏振量特征

通常可以通过双偏振雷达参量识别出龙卷碎片特征(TDS),Ryzhkov et al(2005)提出 TDS 是指龙

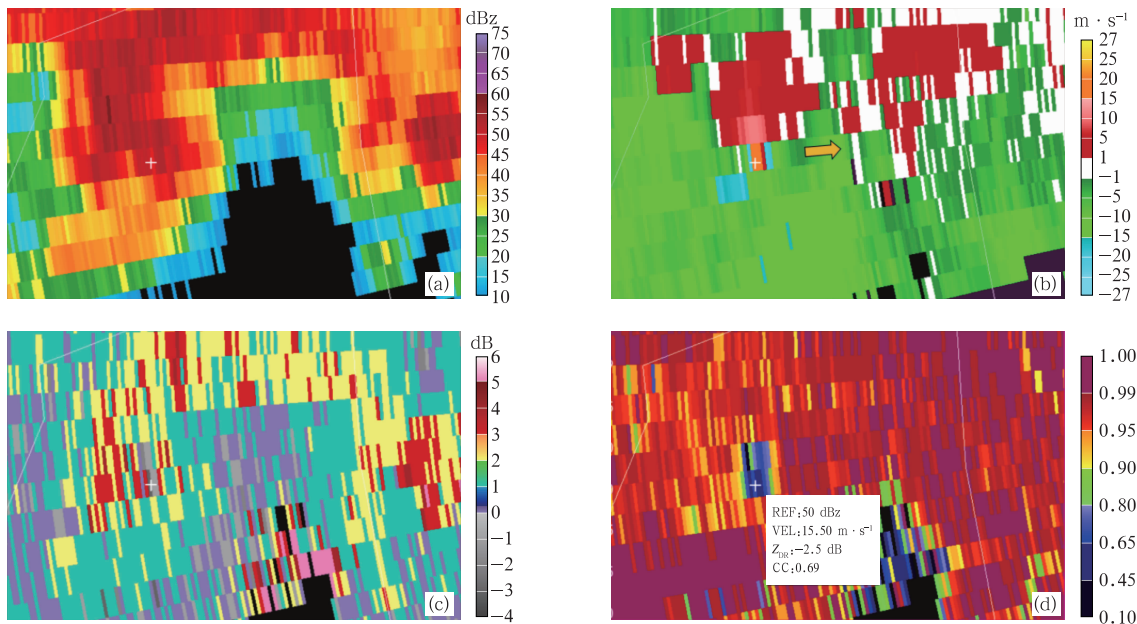
卷将地面上的杂物碎片等非气象目标物卷入空中,由于这些杂物碎片具有随机取向、不规则形状、大尺寸以及高介电常数等特性,因此会产生高的  $Z_H(>45\text{ dBz})$ 、低的差分反射率( $Z_{DR}<0.5\text{ dB}$ )以及异常

低的相关系数( $CC < 0.8$ )等特征。

单站雷达分析表明,东明和鄄城龙卷均有识别出龙卷碎片特征,而东明龙卷对应的 TDS 特征更为明显,因此,以东明龙卷为例分析本次过程的双偏振参数特征。图 15 是 7 月 5 日 14:31 济宁雷达  $0.5^\circ$  探测数据,白色十字用于标识各参数图中的同一位置,该处对应径向速度场上的 TVS,  $Z_H$  达到 50 dBz;图 15c 中白色十字附近区域  $Z_{DR}$  为  $-0.19$  dB,在其左右两侧的距离库  $Z_{DR}$  分别为  $-2.5$  dB 和  $3.6$  dB;而图 15d 中显示该区域相关系数  $CC$  最低值为 0.46,在其周围约 2 km 范围内,  $CC$  值都低于 0.7;该区域内  $Z_{DR}$  和  $CC$  值均明显低于周围,是由龙卷将地面的非气象目标物卷入空中造成的,表现出了典型的龙卷碎片特征。

图 16 列出了东明龙卷对应的  $CC$  随时间的变化。同一个时次从左至右三列白色十字所指相同位置,从 14:20 到 14:36,该位置上均显示清晰的正负速度对,对应东明龙卷 TVS,14:20(图 16b)TVS 位置对应的  $CC$  与周围数值相差很小,而从 14:25—14:31(图 16e,16h),TVS 位置对应的  $0.5^\circ$  仰角  $CC$  迅速减小,显著低于周边区域,最低值达到 0.46,并且  $CC$  低值区范围明显扩大,是该阶段对应地面灾害最为严重的时段。Ryzhkov et al(2005)指出龙卷

中强烈的上升气流卷起的轻质碎片(例如树叶和草)和气象粒子混合,可导致异常低的  $CC$  值。从东明龙卷发生后的灾调显示,14:30 左右,东明县白寨小区及其周边建筑工地、泓润能源公司等地有大量彩钢板、玻璃、树枝、树叶等碎片被卷入空中,会导致  $CC$  降低,与此同时,该位置对应龙卷涡旋中心(图 15b)强上升气流区,强湍流会导致雷达信噪比降低,  $CC$  也会随之降低(袁潮等,2022;张林等,2021),因此,东明龙卷最强时段对应明显低的  $CC$  特征(0.46,图 15d),可能是由水凝物粒子和强上升气流携带的大量树叶、玻璃等碎片物质的混合以及强上升气流造成的信噪比降低共同导致。从不同仰角  $CC$  的演变过程来看,从 14:20 龙卷形成至 14:31 龙卷最强阶段,同一个时次低仰角更早出现  $CC$  低值区,说明大量碎片由龙卷中的上升气流自近地面带入高空,且在 14:31,  $1.5^\circ$  仰角的  $CC$  低值区位于  $0.5^\circ$  仰角  $CC$  低值区的东北部,说明龙卷风暴中存在向东北倾斜的上升气流,这与图 13c 中表现出的风暴垂直结构相一致。14:36(图 16k)  $CC$  低值区范围相对上一个时次有所缩小,  $CC$  也有所增大(约 0.8 左右),对应着龙卷 TVS 强度呈减弱趋势,尽管灾调显示东明龙卷 14:35 逐渐消散,但  $CC$  的低值特征一直维持到 14:51(图略)之后。究其原因,龙



注:白色十字用于标识各参数图中的同一位置,下同。

图 15 2024 年 7 月 5 日 14:31 山东济宁雷达  $0.5^\circ$  仰角 (a)  $Z_H$ , (b) 径向速度, (c)  $Z_{DR}$ , (d)  $CC$

Fig. 15 (a)  $Z_H$ , (b) radial velocity, (c)  $Z_{DR}$ , and (d) correlation coefficient

at  $0.5^\circ$  elevation of Jining Radar in Shandong Province at 14:31 BT 5 July 2024



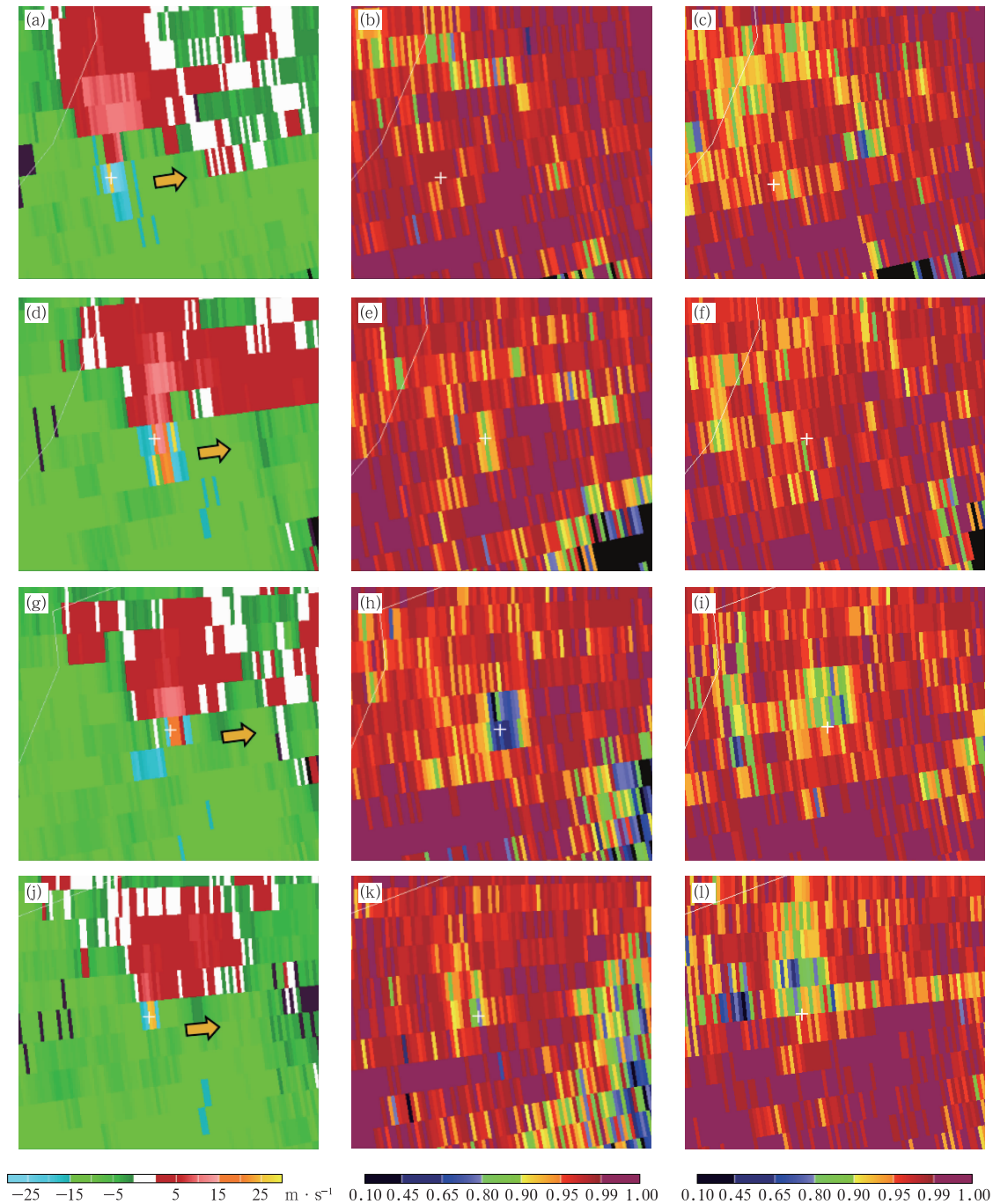


图 16 2024 年 7 月 5 日(a~c)14:20,(d~f)14:25,(g~i)14:31,(j~l)14:36 山东济宁雷达  
(a,d,g,j)0.5°仰角平均径向速度,(b,e,h,k)0.5°仰角 CC 和(c,f,i,l)1.5°仰角 CC  
Fig. 16 (a, d, g, j) Radial velocity and (b, e, h, k) correlation coefficient at 0.5° elevation,  
and (c, f, i, l) correlation coefficient at 1.5° elevation of Jining Radar in Shandong Province  
at (a—c) 14:20 BT, (d—f) 14:25 BT, (g—i) 14:31 BT, (j—l) 14:36 BT 5 July 2024

卷发生初期,地面杂物碎片在龙卷触地瞬间被卷入龙卷涡旋中,CC 下降很快,而龙卷减弱消散阶段,卷入龙卷涡旋的杂物下落过程很慢,因此 CC 低值特征仍会维持一段时间。

#### 4 结论和讨论

利用现场灾调、互联网视频和照片、ERA5 再分

析数据、地面自动站观测、双偏振雷达探测等资料,详细分析了 2024 年 7 月 5 日山东菏泽东明、鄆城强龙卷的发展演变过程、环境条件和龙卷超级单体母风暴中尺度特征,得到以下结论:

(1)灾调显示,东明龙卷自西南向东北方向行进约 12 km,发生时段为 14:20—14:35,整个生命史经历龙卷形成、初期减弱、后增强、再减弱的强度演变过程,灾损评估龙卷最大强度为强龙卷(相当于 EF3 级);鄆城龙卷发生时段为 15:06—15:18,自西南向北偏东行进约 9 km,灾损较重的路径长约 3 km,持续时间约 6 min,灾损评估龙卷最大强度为强龙卷(相当于 EF2 级)。

(2)龙卷发生在地面黄淮气旋东偏北方向约 50 km 处,具备整层水汽充沛、抬升凝结高度低、对流不稳定能量充足、中低层垂直风切变较大、强的风暴相对螺旋度等有利于超级单体龙卷形成和发展的环境特征,地面  $\beta$  中尺度辐合线以及  $2\sim 4^{\circ}\text{C}$  合适的冷池强度为龙卷母风暴的触发、发展以及近地面垂直涡度的加强提供了有利条件。

(3)东明龙卷和鄆城龙卷由同一个超级单体母风暴在自西南向东北移动的过程中先后形成的,该超级单体强回波质心高约 5 km,高于以往台风背景下的山东龙卷风暴的质心高度,风暴垂直方向上呈倾斜结构,自下而上向东偏北方向倾斜,伴随深厚持久的中气旋;龙卷出现在超级单体钩状回波顶端,龙卷发生阶段伴随中气旋尺度缩小、气旋性涡旋增强等信号,东明龙卷发生前 15 min,鄆城龙卷发生前 5 min,雷达探测识别出 TVS,且 TVS 底高均为雷达能够探测的最低高度,可见 TVS 产品是龙卷监测和预警的有效工具。

(4)两次龙卷发生时均对应 CC 的低值特征,东明龙卷更为明显,CC 最低值达 0.46,可能是由水凝物粒子和强上升气流携带的大量树叶、玻璃等碎片物质的混合以及强上升气流造成的信噪比降低共同导致。龙卷发生时段伴随 CC 的迅速减小,低值区范围明显扩大,最低值出现时刻对应地面灾害最严重的时段,龙卷消散后,CC 低值特征仍维持了 15 min 以上,说明杂物在空中停留了较长时间。

尽管本文针对此次山东菏泽龙卷的发展演变、环境条件以及超级单体母风暴特征开展了一系列的分析讨论,但受限于观测资料的种类、分辨率等因素,并未能给出菏泽龙卷形成和发展强度的直接物理机制,后续需要依靠百米级、分钟级的超高分辨率数值模拟结合观测资料开展深入分析,且本次爆发

性龙卷事件以及同个一超级单体先后造成多个龙卷的现象均属罕见,其成因机理值得进一步深入研究。

## 参考文献

- 才奎志,姚秀萍,孙晓巍,等,2022. 冷涡背景下辽宁龙卷气候特征和环境条件[J]. 气象学报,80(1):82-92. Cai K Z, Yao X P, Sun X W, et al, 2022. Climatic characteristics and environmental conditions of tornadoes in Liaoning under the background of cold vortex[J]. Acta Meteor Sin, 80(1):82-92(in Chinese).
- 龚佃利,朱君鉴,林曲凤,等,2024. 一次超级单体引发的秋季特大冰雹和龙卷雷达探测分析[J]. 气象,50(5):561-576. Gong D L, Zhu J J, Lin Q F, et al, 2024. Radar observation analysis of severe hailstorm and tornado caused by a supercell in autumn[J]. Meteor Mon, 50(5):561-576(in Chinese).
- 谷山青,王凤娇,孟宪贵,等,2022. 1814 号台风“摩羯”引发鲁北平原一次罕见龙卷特征[J]. 海洋气象学报,42(4):48-57. Gu S Q, Wang F J, Meng X G, et al, 2022. Characteristics of a rare tornado in the North Shandong Plain triggered by Typhoon Yagi (2018) [J]. J Marine Meteor, 42(4):48-57(in Chinese).
- 黄先香,白兰强,炎利军,等,2024. 热带气旋背景下广东龙卷气候特征和环境条件[J]. 气象学报,82(3):319-339. Huang X X, Bai L Q, Yan L J, et al, 2024. Climatic characteristics and environmental conditions of the tornado occurrences within tropical cyclones over Guangdong Province, China[J]. Acta Meteor Sin, 82(3):319-339(in Chinese).
- 全国气象防灾减灾标准化技术委员会(SAC/TC345), 2021. 龙卷风强度等级:GB/T 40243-2021 [S]. 北京:中国标准出版社. The National Technical Committee on Meteorological Disaster Prevention and Mitigation Standardization (SAC/TC 345), 2021. Tornado intensity scale: GB/T 40243-2021 [S]. Beijing: Standards Press of China(in Chinese).
- 于怀征,龚佃利,朱君鉴,等,2022. 日照一次 EF2 级龙卷的环境场及雷达特征[J]. 海洋气象学报,42(3):38-47. Yu H Z, Gong D L, Zhu J J, et al, 2022. Environmental field and radar characteristics of an EF2 scale tornado in Rizhao[J]. J Marine Meteor, 42(3):38-47(in Chinese).
- 俞小鼎,郑永光,2020. 中国当代强对流天气研究与业务进展[J]. 气象学报,78(3):391-418. Yu X D, Zheng Y G, 2020. Advances in severe convective weather research and operational service in China[J]. Acta Meteor Sin, 78(3):391-418(in Chinese).
- 袁潮,李得勤,杨磊,等,2022. 冷涡背景下一次微型超级单体龙卷的雷达特征和物理过程探究[J]. 气象学报,80(6):878-895. Yuan C, Li D Q, Yang L, et al, 2022. A case study on the radar characteristics and physical process involved in the genesis of a mini supercell tornado under the background of cold vortex[J]. Acta Meteor Sin, 80(6):878-895(in Chinese).
- 张林,李峰,冯婉悦,等,2021. 移动 X 波段双偏振雷达数据质量分析及偏差订正[J]. 气象,47(3):337-347. Zhang L, Li F, Feng W Y, et al, 2021. Research of data quality analysis and bias correction on mobile X-band dual-polarization weather radar [J]. Meteor Mon, 47(3):337-347(in Chinese).
- 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).
- 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).
- 赵海军, 2022. 山东一次台风龙卷过程灾调及环境和天气雷达特征分析[J]. 热带气象学报, 38(3): 343-352. Zhao H J, 2022. Damage survey, radar and environment analyses of a typhoon-induced tornado in Shandong[J]. J Trop Meteor, 38(3): 343-352 (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, 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).
- 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, 姚聘, 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).
- 朱君鉴, 蔡康龙, 龚佃利, 等, 2019. 登陆台风“摩羯”(1814)在山东引发龙卷的灾情调查与天气雷达识别[J]. 热带气象学报, 39(4): 21-34. Zhu J J, Cai K L, Gong D L, et al, 2019. Disaster investigation and weather radar identification of tornadoes in Shandong caused by landfalling Typhoon Yagi (2018)[J]. J Marine Meteor, 39(4): 21-34 (in Chinese).
- Bunting W F, Smith B E, 1993. A Guide for Conducting Convective Windstorm Surveys[M]. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Scientific Services Region.
- Davies-Jones R, Burgess D W, Foster M, 1990. Test of helicity as a tornado forecast parameter[C]//16th Conference on Severe Local Storms. Kananaskis Park, Alberta; AMC: 588-592.
- Davies-Jones R, Jeffrey Trapp R, Bluestein H B, 2001. Tornadoes and tornadic storms[M]//Doswell C A. Severe Convective Storms. Boston: American Meteorological Society: 167-221.
- 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(1/2/3): 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.
- Markowski P M, 2002. Hook echoes and rear-flank downdrafts: a review[J]. Mon Wea Rev, 130(4): 852-876.
- Markowski P M, Richardson Y P, 2009. Tornado genesis: our current understanding, forecasting considerations, and questions to guide future research[J]. Atmos Res, 93(1/2/3): 3-10.
- 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.
- NOAA, 2003. A guide to F-scale damage assessment[R/OL]. Norman; NWS. [http://www.weatheranswer.com/public/F-scale\\_Assessment\\_Guide\\_.pdf](http://www.weatheranswer.com/public/F-scale_Assessment_Guide_.pdf).
- Ryzhkov A V, Schuur T J, Burgess D W, et al, 2005. Polarimetric tornado detection[J]. J Appl Meteor Climatol, 44(5): 557-570.
- Wen J Y, Meng Z Y, Bai L Q, et al, 2024. A comparison between the only two documented tornado outbreak events in China: tropical cyclone versus extratropical cyclone environments[J]. Wea Forecasting, 39(4): 613-638.
- Wind Science and Engineering Center, 2004. A recommendation for an enhanced Fujita scale (EF-scale)[R]. Lubbock: Texas Tech University.
- Wurman J, Richardson Y, Alexander C, et al, 2007. Dual-Doppler analysis of winds and vorticity budget terms near a tornado[J]. Mon Wea Rev, 135(6): 2392-2405.
- Xue M, Zhao K, Wang M, et al, 2016. Recent significant tornadoes in China[J]. Adv Atmos Sci, 33(11): 1209-1217.

(本文责编:何晓欢)