山东科学
SHANDONG SCIENCE
第 39 卷 第 5 期 2026 年 10 月出版
Vol.39 No.5 Oct.2026
DOI:10.3976/j.issn.1002-4026.2025131
【环境与生态】

豫东北三次龙卷环流背景、环境条件和雷达特征分析

马慧妍
(濮阳市气象局,河南 濮阳 457000)

摘要:为深入认识河南龙卷形成机理,提高龙卷监测预警业务精准性,利用常规气象探测资料、ERA5 再分析资料、多普勒雷达等资料,对河南省东北部 3 次龙卷过程的环流背景、环境条件和雷达特征进行对比分析,凝练了本地龙卷预报预警指标。结果表明:(1)3 次龙卷均发生于 6—7 月豫东北濮阳市平原地区,“22·6”及“23·7”龙卷出现于中午前后,“09·7”龙卷发生在傍晚,“09·7”“23·7”龙卷伴随区域性短时强降水,“22·6”龙卷伴有局地短时强降水和小冰雹。(2) 3 次龙卷过程虽均产生于东北冷涡背景下,但不同于高空冷平流强迫型“22·6”龙卷,“09·7”和“23·7”龙卷属于暖平流强迫型;三者均有地面辐合线或中尺度气旋为其提供动力条件。(3)3 次龙卷过程低抬升凝结高度和强低层垂直风切变,“09·7”“23·7”龙卷近地面湿层厚、低层垂直风切变更强;而“22·6”龙卷干层明显且湿球零度层低,850 和 500 hPa 温差最大。(4) 3 次龙卷的对流母体在产生龙卷前均呈现回波中心增强并向弓形/钩状/涡旋状转型的特征,速度图上低层气旋性辐合与中层旋转上升共存,“22·6”龙卷回波强度最强,但涡旋特征弱且结构浅薄;“09·7”龙卷涡旋强度及旋转厚度最深厚型,速度切变最强;“23·7”龙卷回波强度最弱且 TVS 值最低,但垂直厚度较深厚。本研究为龙卷灾害性天气的预报预警服务提供参考依据。

关键词:龙卷;豫东北;环流背景;环境条件;雷达特征
中图分类号:P445　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1002-4026(2026)05-0105-09
开放科学(资源服务)标志码(OSID):

Analysis of the synoptic background, environmental conditions, and radar characteristics of three tornadic circulations in Northeastern Henan

MA Huiyan
(Puyang Meteorological Bureau, Puyang 457000, China)

Abstract: To gain an in-depth understanding of the formation mechanisms of tornadoes in Henan and enhance the accuracy of tornado monitoring and early warning operations, this study comparatively analyzes the synoptic background, environmental conditions, and radar characteristics of three tornado events in northeastern Henan Province using conventional meteorological observations, ERA5 reanalysis data, and Doppler radar data, and summarizes local tornado forecasting and warning indicators. The results show that: (1) All three tornadoes occurred over the plain areas of Puyang

收稿日期:2025-10-29　**修回日期**:2026-05-13
基金项目:中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点实验室应用技术研究基金(KF202446)
作者简介:马慧妍(1982—),女,本科,工程师,研究方向为短期气象预报预警服务。E-mail:25239692@qq.com

City in northeastern Henan during the period from June to July. The "22 · 6" and "23 · 7" tornadoes occurred around midday, whereas the "09 · 7" tornado occurred in the evening. The "09 · 7" and "23 · 7" events were accompanied by regional short-duration heavy rainfall, whereas the "22 · 6" tornado featured localized short-duration heavy rainfall and minor hail. (2) Although all three events developed under the influence of the Northeast China Cold Vortex, unlike the upper-level cold advection-forced "22 · 6" tornado, the "09 · 7" and "23 · 7" tornadoes were warm advection-forced. Surface convergence lines or mesoscale cyclones provided dynamic forcing for all events. (3) All three events exhibited low lifting condensation levels and strong low-level vertical wind shear. The "09 · 7" and "23 · 7" tornadoes featured thicker near-surface moisture layers and stronger low-level wind shear, whereas the "22 · 6" event showed a pronounced dry layer, a lower wet-bulb zero level, and the greatest temperature difference between 850 and 500 hPa. (4) Prior to tornadogenesis, the parent convective systems of all three events showed enhanced echo centers and evolved into bow-shaped, hook-shaped, or vortex-like structures. Velocity fields exhibited the coexistence of low-level cyclonic convergence and mid-level rotational ascent. The "22 · 6" event had the strongest echo intensity but weak vortex signatures and a shallow structure; the "09 · 7" tornado had the strongest vortex intensity and deepest rotational thickness; the "23 · 7" event had the weakest echo intensity and lowest tornado vortex signature value (potentially radar-limited), but a greater vertical depth. This study provides a reference for forecasting and warning services for tornadic severe weather.

Key words : tornado; Northeast Henan; synoptic background; environmental conditions; radar characteristics

龙卷属于小概率事件,常在不稳定的天气条件下产生,其基本特征是由对流活动产生的从空中向下延伸的强烈旋转的空气柱,表现为可观测到的漏斗云或旋转的碎片、尘土等,具有突发性强、生命史短的特点,提前预报预警龙卷天气难度较大[1-6]。

随着地面区域气象站的增多及新一代天气雷达的布网,国内学者对龙卷天气的研究逐渐增多,郑媛媛等[7]发现台风龙卷发生在弱对流有效位能及强低空风垂直切变的环境条件下,主要发生在台风外围的螺旋雨带上。王秀明等[8]对中国东北龙卷的环境特征进行分析,研究表明龙卷多发生在东北冷涡背景下,龙卷风暴主要由干线及其伴随的强边界层辐合触发。俞小鼎等[9]利用多普勒雷达数据对龙卷过程进行研究,指出伴随龙卷天气的发生,多普勒雷达上基本能够观察到中气旋或小尺度强切变特征。

依照龙卷与中气旋的关系可将龙卷分为超级单体龙卷和非超级单体龙卷[10-11],超级单体龙卷常发生在持久深厚的中气旋内部;非超级单体龙卷则产生于伴有明显风切变的出流边界、地面辐合线等热力边界附近[12]。研究表明,龙卷超级单体的中气旋通常形成于对流层中层,而后向上和向下扩展,因此初期低层的垂直涡度较弱,很难依靠上升气流的拉伸形成龙卷强度的涡旋,因此,通常认为低层中气旋对龙卷的形成非常重要[13]。非超级单体龙卷可分为两类,一类出现在飑线或弓形回波前端的 γ 中尺度涡旋内,另一类起源于边界层上的小涡旋。非超级单体龙卷常生成于近地面不同性质气团形成的边界层水平风切变辐合线上[14]。

豫东北平原地区是河南地区龙卷高发地带,由于其突发性强,且具有显著的局地性和致灾性,近年来成为研究的热点和难点[15-17],2008 年濮阳新一代天气雷达业务运行以来成功监测到 3 次龙卷过程,本文通过分析这 3 次龙卷过程的环流背景、环境条件以及雷达监测特征等,归纳 3 次过程的共性和差异,探讨其成因,评价雷达客观预警产品的能力,凝练关键因子和预报预警指标,从而加深对豫东北地区龙卷的认识,为今后该类灾害性天气的预报预警服务提供参考依据。

1 研究资料和方法

本文所使用的资料包括:(1) 2009 年 7 月 16 日(以下简称 09 · 7)、2022 年 6 月 13 日(以下简称 22 · 6)及 2023 年 7 月 29 日(以下简称 23 · 7)常规地面和高空观测资料[18],数据来源于河南省气象局气象大数据平台(内部网站),用以分析 3 次龙卷过程的天气实况特征和探空环境条件;(2)欧洲第五代全球大气再分析资料 ERA5[19],数据来源于欧洲中期数值预报中心(https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-pressure-levels?tab=overview),空间分辨率 0.25°×0.25°,时间分辨率 1 h,用以分析环流背景分析;

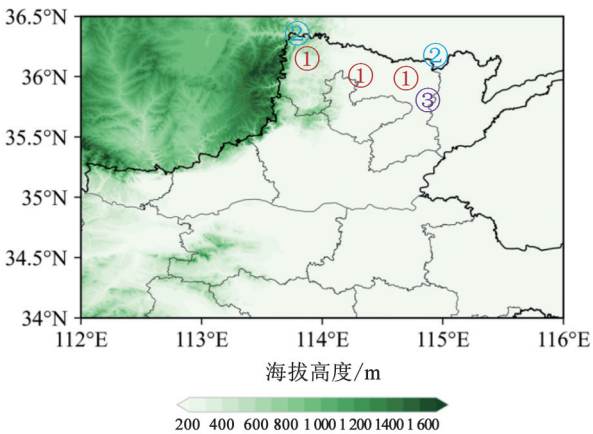
(3)濮阳多普勒雷达产品,数据来源于河南省气象局气象大数据平台,用以分析龙卷的雷达特征及预警指标。

2　龙卷过程实况

“09・7”龙卷过程:2009 年 7 月 16 日 18:00—18:30,河南东北部濮阳市濮阳县子岸乡、五星乡的 8 个村庄自西南向东北出现龙卷(图 1 编号①),风向呈现出气旋性旋转特征,最大风速 30 m/s 左右。此次龙卷过程期间,还出现了区域性短时强降水,其中濮阳市濮阳县城关站 19 时小时雨量达 22.7 mm,本次过程造成重大损失,农作物受灾面积 918 hm^2,受灾人口 13 007 人,直接经济损失约 1 100 万元。

“22・6”龙卷过程:2022 年 6 月 13 日 13 时 48 分至 54 分河南东北部濮阳市濮阳县再次出现龙卷天气,此次龙卷主要出现于庆祖镇濮渠路两侧张贾村附近(图 1 编号②),影响长度约 1 000 m,宽度 300 m 左右。龙卷过程前 10~15 min,伴有局地冰雹和短时强降水,其中冰雹最大直径 1 cm,最大小时雨强达 31.2 mm,该过程造成 200 余棵树木折断,输电线路 5 根水泥线杆折断以及若干设施农业大棚受损。

“23・7”龙卷过程:2023 年 7 月 29 日中午前后河南东北部濮阳市南乐县先后出现两个龙卷,第一个龙卷影响范围小,持续时间短,发生于 11:47—11:50,主要影响南乐县产业区傅谭路与发展大道交界处北 50 m 附近,影响长度约 1 000 m,宽度 100 m 左右,持续时间仅 4 min;第二个龙卷影响范围大,持续时间较长,于 11:30—12:00时影响南乐县西邵乡侯古宁甫、寺庄乡王洪店、东寺庄至南渠头庄一线(图 1 编号③),影响长度 7 000~8 000 m,宽度 100 m 左右,持续时间 10 min 左右。此次过程导致 5 744 人受灾,农作物及蔬菜受灾面积约 337.44 hm^2,直接经济损失约 684.026 8 万元。



注:序号①②③分别代表“09・7”“22・6”“23・7”3 次龙卷过程。

图 1　豫北 3 次龙卷路径分布图

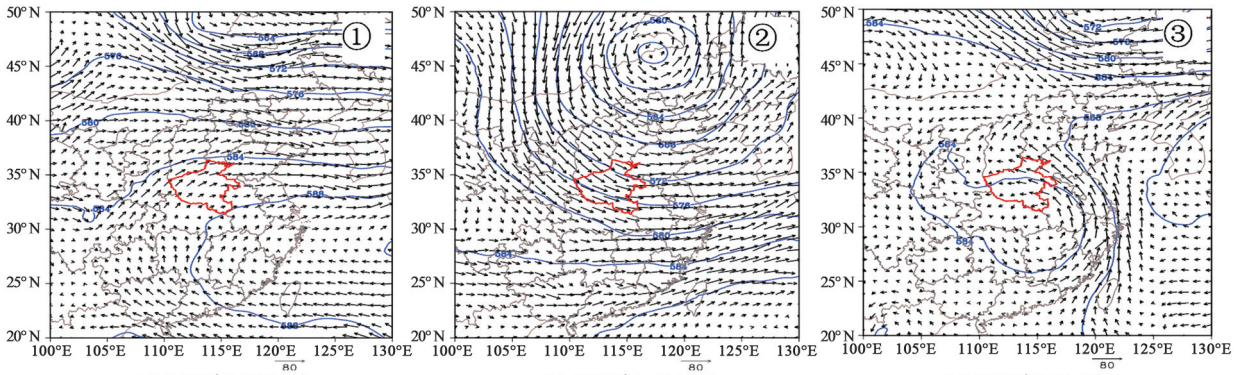
Fig.1　Distribution map of tornado tracks in northern Henan

从发生时间来看,3 次龙卷过程均发生在夏季,即 6—7 月,“22・6”和“23・7”两次龙卷过程发生在中午前后,“09・7”龙卷过程发生于傍晚前后;从龙卷天气实况来看,“09・7”和“23・7”龙卷过程均伴随区域性短时强降水,22・6”龙卷过程则伴有局地短时强降水和冰雹;从发生地区来看,均出现在豫东北濮阳市的平原地区。

3　环流形势及环境条件

3.1　环流形势

图 2 为基于 ERA5 再分析数据的 3 次龙卷天气过程的 500 hPa 环流形势图,结合表 1 可知,3 次龙卷过程高纬度均存在东北冷涡,其后部低槽带动冷空气南下提供了高空冷平流作用。“09・7”过程(图 2a)和“23・7”过程(图 2c)豫东北均在副高边缘,且低层有西南或东南低空急流配合,输送大量能量和水汽,属于暖平流强迫型,有利于不稳定层结的形成和维持。与此同时,近地层(图略)存在切变辐合形势,地面有辐合线,为其提供了低空辐合条件;“22・6”过程高低层一致的西北气流(图 2b),属于高空冷平流强迫型;温度场存在上冷下暖的层结叠置,地面上存在中尺度气旋,也同样提供了不稳定和动力条件。



(a) 2009年7月16日 (b) 2022年6月13日 (c) 2023年7月29日

图 2 3 次龙卷过程 500 hPa 环流形势图

Fig.2 Circulation patterns at 500 hPa for the three tornado events

表 1 3 次龙卷过程的天气形势和影响系统

Table 1 Synoptic weather conditions and influencing systems of the three tornado events

龙卷过程	等压面天气形势				
	500 hPa	700 hPa	850 hPa	925 hPa	地面
“09·7”过程	东北冷涡、副高	副高边沿西南急流出口	暖切变线南侧西南急流出口	西南急流出口	地面辐合线
“22·6”过程	东北冷涡	东北冷涡底部西北气流	东北冷涡底部西北气流	东北冷涡底部西北气流	地面中尺度气旋
“23·7”过程	东北冷涡、台风残涡倒槽、副高	东南急流出口	残涡倒槽	残涡倒槽	地面辐合线

3.2 环境条件

考虑到濮阳没有探空站,选取距离濮阳在 200 km 内的郑州探空站观测作为参考,并利用对流前夕(2009 年 7 月 16 日 17 时、2022 年 6 月 13 日 13 时、2023 年 7 月 29 日 11 时)濮阳站地面温度及露点对当日 08 时的郑州站探空进行订正。具体订正方法为:假定早上到午后大气温湿层结变化主要发生在近地面,其之上层结温湿状况不变,气块具有对流发生前的濮阳站地面最高温度和露点温度。基于表 2 分析可知,“09·7”过程和“23·7”过程抬升凝结高度(lifting condensation level,LCL)均低于 500 m,且近地面存在近饱和层结,表现为较低的 LCL,且 0~1 km 垂直风切变达到 10 m/s 以上,对龙卷多发季节多发区来说,极有利于龙卷的出现;“22·6”过程近地面湿度条件较差,但 0~6 km 风切变较大,850 hPa 与 500 hPa 之间的温度差 ΔT_{85} 异常大,有利于多单体强风暴或超级单体的出现,LCL 高度和 0~1 km 垂直风切变恰好达到西风带龙卷出现阈值,仍有可能出现龙卷。

表 2 3 次龙卷发生前的环境物理量

Table 2 Environmental physical quantities 1 h before the occurrence of the three tornadoe events

龙卷过程	地面露点温度/℃	地面气温/℃	ΔT_{85}/℃	LCL/m	0~6 km 风切变/(m·s^{-1})	0~1 km 风切变/(m·s^{-1})
“09·7”过程	29	32	24	492	11.3	10.8
“22·6”过程	14.3	32.7	35.2	1 000	18.2	8.2
“23·7”过程	26	26	20.3	112	6.6	10.2

4　雷达特征

龙卷是局地突发的小尺度剧烈灾害天气,雷达是监测龙卷的有效手段[20-21],以下分别对 3 次龙卷风暴的多普勒雷达特征进行分析。

4.1　反射率因子

“09・7”过程:濮阳雷达 1.5°仰角反射率因子显示,2009 年 9 月 7 日 17:00 左右,濮阳雷达站西南侧 30 km附近有一最大强度约 55 dBZ 的较强回波短带,在自西南向东北向移动过程中逐渐向弓形发展,18 时左右形成弓形回波,中心强度约 60 dBZ,伴随出现短时强降水。18:05 (图 3a) 1.5°仰角反射率因子产品显示,弓形回波西端回波显著增强且呈气旋性弯曲,并于 18:17 (图 3b)发展为明显的钩状回波,而其东部回波表现为伸向东南方向的较弱大片层状云回波结构。西端显著钩状回波特征于 18:23 (图 3c)和 18:29 (图 3d)维持,其内侧表现为弱回波区,龙卷生成于钩状回波弱回波区附近。

“22・6”过程:濮阳雷达 1.5°仰角反射率因子显示,2022 年 6 月 13 日 13:30—13:36(图 3e~3f),雷达站东南侧有非规则的块状强回波向偏北方向移动并加强,中心强度达 55 dBZ。13:42(图 3g),55 dBZ 以上的强回波面积显著增大,中心强度超过 60 dBZ,西南侧逐渐出现钩状特征,此时局地出现小冰雹;13:48(图 3h),55 dBZ以上的强回波面积进一步扩大,中心强度维持,整体呈现涡旋状结构,西侧气旋性弯曲更加明显,东侧为弱的层积混合云回波,预示此时对流系统发展至成熟阶段,地面观测到龙卷。之后 1~2 个体扫,回波逐渐减弱并缓慢东移,造成局地短时强降水。

“23・7”过程:濮阳多普勒雷达 1.5°仰角反射率因子显示,2023 年 7 月 29 日 11:00(图 3i)濮阳开始受台风外围螺旋雨带影响,回波中心强度为 45~50 dBZ,主要表现为层积混合云回波特征,结构较为松散,逐渐自东南向西北移动;11:30(图 3j)螺旋云带主体东侧夹杂强度达 50~55 dBZ 的小回波开始影响南乐县;12:00—12:06(图 3k~3l),南乐县西北侧中心强度达到 55 dBZ 左右的较强小回波段逐渐呈现出向北/东北侧凸起的弓形特征,在此阶段,实况出现龙卷天气。

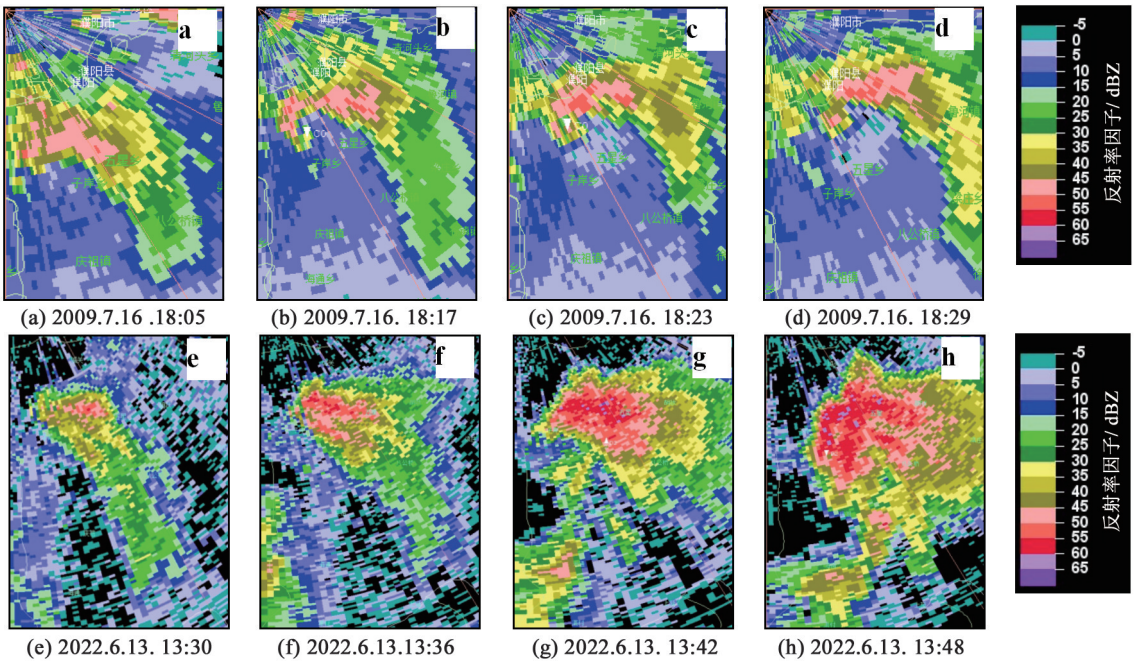
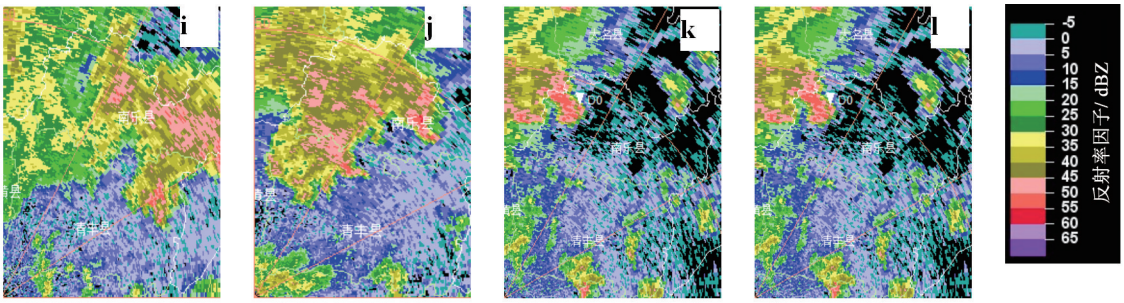


图 3　3 次龙卷过程雷达反射率因子图

Fig.3　Radar reflectivity factor maps of three tornado events

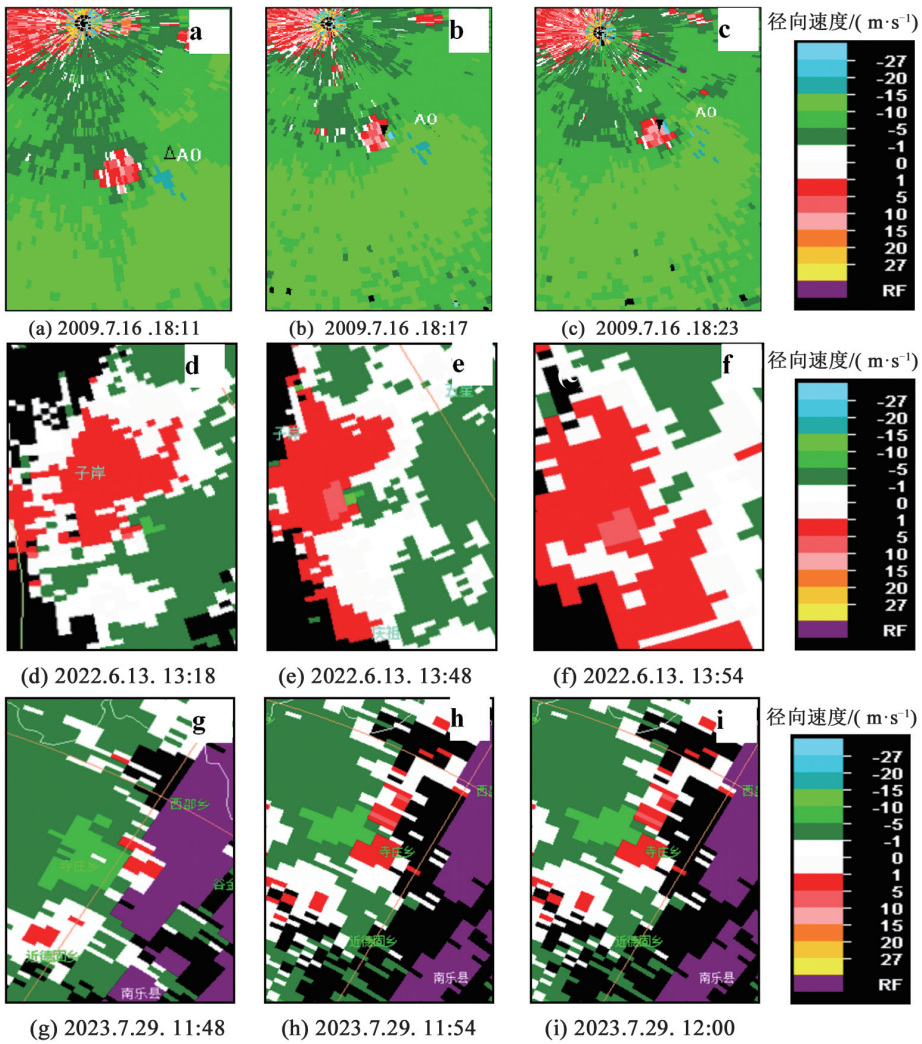


(i) 2023.7.29. 11:00 (j) 2023.7.29. 11:30 (k) 2023.7.29. 12:00 (l) 2023.7.29. 12:30

图 3(续)

4.2 径向速度

“09·7”过程:濮阳新一代天气雷达 1.5°仰角径向速度显示,2009 年 7 月 16 日 17:47 在距雷达站西南方向 20 km 附近大片负速度区中出现了小范围的正速度区,18:11(图 4a)正负速度对呈现出 γ 中尺度气旋式辐合涡旋特征,最大入流达 17 m/s,最大出流 13 m/s。18:17(图 4b)最大入流增至 23 m/s,且正负速度中心更加靠近,表现出小尺度的龙卷涡旋特征(tornadic vortex signature, TVS)。18:23(图 4c)最大入流达 27 m/s,最大出流为13 m/s,相邻像素之间的最大速度差为 40 m/s,龙卷达到强盛阶段,也是主要灾害发生时刻。龙卷涡旋特征继续维持 2 个体扫后逐渐消失,随后系统也逐渐减弱东移。



(a) 2009.7.16 .18:11 (b) 2009.7.16 .18:17 (c) 2009.7.16 .18:23

(d) 2022.6.13. 13:18 (e) 2022.6.13. 13:48 (f) 2022.6.13. 13:54

(g) 2023.7.29. 11:48 (h) 2023.7.29. 11:54 (i) 2023.7.29. 12:00

图 4 3 次龙卷过程雷达径向速度图

Fig.4 Radar radial velocity maps for the three tornadic events

“22·6”过程:濮阳新一代天气雷达 1.5°仰角径向速度显示,2022 年 6 月 13 日 13:18(图 4d)雷达站东南侧出现明显的正负速度对,最大入流达 8 m/s,最大出流为 7 m/s。13:48(图 4e),入流和出流速度迅速增至 18 m/s 和 13 m/s,最大像素之间切变值达到 31 m/s,实况出现龙卷。13:54(图 4f)正负速度中心强度均有所减弱,其间距离也逐渐增大,旋转速度明显减小。

“23·7”过程:濮阳新一代天气雷达 1.5°仰角径向速度显示,2023 年 7 月 29 日 11:42(图略)左右,雷达站的东北侧开始出现具有气旋式切变的速度对,11:48(图 4g)最大入流速度和最大出流速度分别为8 m/s与 3 m/s,像素至像素最大切变达到 11 m/s。11:54(图 4h)强风暴气旋式切变有所加强,到 12:00 (图 4i)最大出流和最大入流速度分别增至 13 m/s 与 8 m/s,像素到像素的最大速度差增大到 21 m/s,对应雷达上有 TVS 存在。

4.3　龙卷涡旋特征

3 次过程中,濮阳雷达均识别出龙卷涡旋特征,其属性表显示(表 3):“09·7”过程中,连续 3 个体扫识别出 TVS,其底高 0.1~0.4 km,而伸展高度达到 3~4 km,厚度为 2.6~4 km,表明中低层存在深厚的涡旋系统;最大径向速度差达到 37~54 m/s,最强切变值达到 10^{-1}量级,均位于 0.5 km 以下,表明近地面存在强的气旋式涡旋。“22·6”过程中,仅一个体扫识别到 TVS,其底高和顶高分别 0.4 和1.6 km,厚度仅为 1.2 km,表明低层存在浅薄的涡旋;最大径向速度差达到 38 m/s,最强切变值也达到 10^{-1}量级,均出现在 0.8 km 高度处,说明中低层存在较强的气旋性涡旋。“23·7”过程中,连续 2 个体扫识别出 TVS,底高 0.6~0.7 km,顶伸展至 2.1~2.3 km,厚度达 1.5~1.7 km,说明中低层有较浅薄的涡旋存在;最大径向速度差仅为 20 m/s 左右,最强切变值也仅达到 10^{-2}量级,高度出现在 1.4~1.5 km。

对比而言,第三次最强切变强度仅为前两次的三分之一左右,高度且较前两次明显偏高,一方面可能由于螺旋雨带上的涡旋尺度小,旋转程度弱导致;另一方面考虑到探测到 TVS 距离雷达站较远,波束展宽也会导致对最大入流和出流速度的探测偏弱,弱估了其旋转潜势;另外,波束中心高度随距雷达距离而增加也可能相应导致无法探测到低层的强旋转。因此,虽然雷达对龙卷的最佳监测距离在 20~100 km[22],但是对于螺旋雨带上的微型涡旋结构,其探测能力也会大大降低导致弱估其影响。

表 3　3 次龙卷 TVS 特征

Table 3　TVS characteristics of the three tornado events

特征量	2009 年 7 月 16 日			2022 年 6 月 13 日	2023 年 7 月 29 日	
	18:17	18:23	18:29	13:48	12:00	12:06
方位/(°)(距离/km)	159(17)	151(16)	147(15)	164(23)	22(45)	16(47)
底高/km(顶高/km)	0.2(2.8)	0.4(3.8)	0.1(4.1)	0.4(1.6)	0.6(2.1)	0.7(2.3)
厚度/km	2.6	3.4	4.0	1.2	1.5	1.7
最大镜像速度差/($m \cdot s^{-1}$)(高度/km)	37(0.2)	42(0.4)	54(0.1)	38(0.8)	22(1.4)	18.5(1.5)
最强切变/($10^{-3}s^{-1}$)(高度/km))	123(0.2)	154(0.4)	215(0.1)	167.3(0.8)	51.5(1.4)	43.9(1.5)

综上,3 次过程中,产生龙卷前雷达均表现出中心强度增强,结构向弓形/钩状/涡旋状发展的特征,速度图上对应气旋性切变增强,并识别出 TVS 特征。但 3 次过程也存在差异,“09·7”过程中的钩状回波最典型,且连续 3 个体扫识别出低层存在深厚且强的 TVS,此次过程造成的灾害也最为强烈;“22·6”过程虽中心回波强度最强且强回波范围最大,但是速度图上涡旋尺度小,TVS 底虽然不太高,但是最为浅薄,持续时间也最短,因此虽然伴随局地小冰雹和短时强降水出现;“23·7”过程中风暴中心强度也不强,且强回波尺寸最小,结构最不典型,但速度图上仍有气旋性速度对出现,并识别到连续 2 个体扫存在 TVS,最大切变值显著小

于前两次过程,最强切变的高度也相对较高,但可能由于波束展宽可能导致对其旋转速度产生低估。

5 结论与讨论

本文利用常规气象探测资料、ERA5 再分析资料、多普勒雷达等资料,对河南省东北部 3 次龙卷过程的环流背景、环境条件和雷达特征进行对比分析,得出了以下结论:

(1)豫东北地区 3 次龙卷过程均发生在夏季 6—7 月平原地区,“22·6”和“23·7”两次龙卷过程发生在中午前后,“09·7”龙卷过程发生在傍晚。“09·7”和“23·7”龙卷过程伴随区域性短时强降水,“22·6”龙卷过程则伴有局地短时强降水和冰雹。

(2)3 次龙卷过程均发生在东北冷涡背景下,但“09·7”龙卷还发生在副高边缘,“23·7”龙卷受台风螺旋雨带影响,两者低层均有偏南低空急流配合,输送水汽和能量,属于暖平流强迫型;“22·6”龙卷对应高低层为一致的西北气流,属于冷平流强迫型。地面辐合线或中尺度气旋为 3 次龙卷生成提供了近地面动力条件。

(3)环境条件上,3 次龙卷过程均体现出低 LCL 和大 0~1 km 垂直风切变的特征,其中“09·7”过程和“23·7”过程近地面近饱和层结厚,LCL 均低于 500 m,0~1 km 垂直风切变达到 10 m/s 以上,有利于龙卷和短时强降水的出现;“22·6”过程整层层结较干,ΔT_{85} 和 0~6 km 垂直风切变大,湿球 0 ℃ 高度(wet bulb zero,WBZ)低,有利于风雹和局地短时强降水。

(4)雷达特征上,3 次过程龙卷出现前均表现出中心强度增强并向弓形/钩状/涡旋状发展的特征,速度图上对应低层气旋性辐合与中层旋转上升共存。“09·7”过程的强风暴中心强度最弱,但钩状回波最典型,连续 3 个体扫识别出低层存在深厚的 TVS,致灾性最强;“22·6”过程的回波中心强度最强且范围最大,但速度涡旋尺度小,TVS 最浅薄,持续时间最短,致灾性最弱;“23·7”过程风暴中心强度稍弱,TVS 最弱,且最强切变的高度较高,但可能由于波束展宽可能导致对其旋转速度产生低估,实际其仍造成较强灾害。

本文仅针对豫东北地区 3 次龙卷过程进行分析,样本量有限,后续将积累更多龙卷案例,结合更高时空分辨率资料,进一步细化不同类型龙卷的环境阈值和雷达预警指标,为该区域龙卷精准预报预警提供更有力的支撑。

参考文献:

[1]郑永光, 曹艳察, 周晓敏. 龙卷发生环境与机理及灾情调查研究进展[J]. 气象学报, 2025, 83(4): 990-1006. DOI:10.11676/qxxb2025.20240228.

[2]姚叶青, 郝莹, 张义军, 等. 安徽龙卷发生的环境条件和临近预警[J]. 高原气象, 2012, 31(6): 1721-1730.

[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. DOI:10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.012.

[4]袁潮, 杨文艳, 李得勤, 等. 1971—2020 年辽宁龙卷的气候特征及环境条件分析[J]. 气象, 2023, 49(11): 1285-1298. DOI:10.7519/j.issn.1000-0526.2023.032601.

[5]黄先香, 白兰强, 炎利军, 等. 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, 2024, 82(3): 319-339. DOI:10.11676/qxxb2024.20230125.

[6]王晨曦, 郑栋, 张义军, 等. 0427 广州强龙卷超级单体雹暴结构与闪电特征[J]. 应用气象学报, 2025, 36(5): 618-629. DOI:10.11898/1001-7313.20250510.

[7]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[J]. 气象, 2015(8): 942-952. DOI:10.7519/j.issn.1000-0526.2015.08.003.

[8]王秀明, 俞小鼎, 周小刚. 中国东北龙卷研究: 环境特征分析[J]. 气象学报, 2015, 73(3): 425-441. DOI:10.11676/qxxb2015.031.

[9]俞小鼎, 郑媛媛, 廖玉芳, 等. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究[J]. 大气科学, 2008, 32(3): 508-522.

[10]Davies-Jones R, Trapp R J, Bluestein H B. Tornadoes and tornadic storms[M]//Severe Convective Storms. Boston, MA: Springer, 2001: 167-221. DOI:10.1007/978-1-935704-06-5_5.

[11]陈雪娇, 花家嘉, 裴宇杰, 等. 2021 年保定清苑 EF2 级龙卷 S 和 X 波段雷达特征[J]. 应用气象学报, 2024, 35(5): 564-576. DOI:10.11898/1001-7313.20240505.

[12]管理, 尹春光, 朱家恺, 等. 一次强龙卷风暴的精细化结构演变分析[J]. 热带气象学报, 2025, 41(3): 336-346. DOI:10.16032/j.issn.1004-4965.2025.030.

[13]俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.

[14]Wakimoto R M, Wilson J W. Non-supercell tornadoes[J]. Monthly Weather Review, 1989, 117(6): 1113-1140. DOI:10.1175/1520-0493(1989)117<1113: nst>2.0.co;2.

[15]李改琴, 许庆娥, 吴丽敏, 等. 一次龙卷风天气的特征分析[J]. 气象, 2014(5): 628-636. DOI:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.05.014.

[16]张一平, 梁俊平, 牛淑贞, 等. 豫东龙卷的环境条件和雷达监测预警分析[J]. 高原气象, 2020, 39(5): 1089-1101. DOI:10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00101.

[17]杨慧, 张一平, 崔丽曼, 等. 河南一次伴有龙卷的多阶段强对流天气形成机制分析[J]. 暴雨 灾害, 2024, 43(3): 299-312. DOI:10.12406/byzh.2023-217.

[18]河南省气象局气象大数据中心. 常规地面和高空观测资料[DB/OL]. [2025-08-27].http://10.69.64.50:8088/cmadaas.

[19] 欧洲中期数值预报中心. 第五代全球大气再分析资料 ERA5 再分析资料[DB/OL]. [2025-08-27].https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-pressure-levels? tab=overview.

[20]蔡康龙, 黄先香, 戴春容, 等. 2020 年 8 月 9 日黑龙江绥化龙卷灾情调查与天气雷达识别[J]. 热带气象学报, 2021, 37(S1): 792-800. DOI:10.16032/j.issn.1004-4965.2021.073.

[21]刁秀广, 万明波, 高留喜, 等. 非超级单体龙卷风暴多普勒天气雷达产品特征及预警[J]. 气象, 2014(6): 668-677. DOI:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.06.003.

[22]姚叶青, 郝莹, 张义军, 等. 安徽龙卷发生的环境条件和临近预警[J]. 高原气象, 2012, 31(6): 1721-1730.