

刁秀广,孟宪贵,朱晓清,等.2024年7月5日山东龙卷爆发事件雷达观测特征[J].海洋气象学报,2025,45(2):14-27.
DIAO Xiuguang, MENG Xiangui, ZHU Xiaoqing, et al. Radar observation characteristics of tornado outbreak events in Shandong on 5 July 2024[J]. Journal of Marine Meteorology, 2025, 45(2): 14-27. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20241031001. (in Chinese)

2024年7月5日山东龙卷爆发事件雷达观测特征

刁秀广^{1,2}, 孟宪贵^{1,2}, 朱晓清^{1,2}, 韩永清^{1,2}

(1.山东省气象防灾减灾重点实验室, 山东 济南 250031; 2.山东省气象台, 山东 济南 250031)

摘要 基于新一代天气雷达探测资料,结合探空、地面实况资料、灾情调查报告及ERA5资料,对2024年7月5日山东爆发性龙卷天气的环境物理量、风暴演变、龙卷风暴低层小尺度涡旋及双偏振特征进行分析。结果表明:温带气旋形势下,爆发性龙卷都出现在地面低压中心的东或东北方,低空急流较强,大的低空垂直风切变、风暴相对螺旋度和能量螺旋度指数是龙卷爆发的关键环境因子。6个龙卷产生在地面强的3 h负变压区内偏东风气流附近。准线性对流系统内的超级单体或弓形回波,或者线性对流系统前侧暖区新生发展起来的强风暴是爆发性龙卷的直接缔造者,强涡旋中心的快速下降或低层局部径向风的迅速增大,是小尺度龙卷涡旋产生的前兆。8个中气旋龙卷风暴低层中气旋旋转速度在 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,1个非中气旋龙卷由弓形回波诱发,其后部入流为 $42\sim 45\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。东明龙卷破坏性最强,母体风暴上升气流最强,低层龙卷碎片宽度约为2 km,顶部高度达9 km左右,呈分散状态,最大宽度约为4 km。

关键词 龙卷爆发;小尺度涡旋;龙卷碎片特征

中图分类号: P445.1; P458.3 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2025)02-0014-14

DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20241031001

Radar observation characteristics of tornado outbreak events in Shandong on 5 July 2024

DIAO Xiuguang^{1,2}, MENG Xiangui^{1,2}, ZHU Xiaoqing^{1,2}, HAN Yongqing^{1,2}

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China; 2. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China)

Abstract Using CINRAD data, sounding data, data of automatic meteorological observing stations, disaster investigation reports and ERA5 data, the environmental physical quantities, storm evolution, low-level small-scale vortex and dual-polarization characteristics of the outbreak tornado events in Shandong on 5 July 2024 are analyzed. The results show that under the extratropical cyclone situation, outbreak tornadoes are generated east or northeast of the ground low-pressure center, and the low-level jet is strong. Strong vertical wind shear at low altitudes, storm relative helicity and large energy helicity index are the key environmental factors for tornado outbreak. Six tornadoes are generated near the strong 3-h negative pressure change zone with the easterly airflow on the ground. The supercells/bow echoes within quasi-linear convective systems or the newly developed supercell storms in the warm zone in front of linear convective systems are efficient in producing tornadoes. The rapid decrease of the strong vortex center or the rapid increase of the partial radial velocity in the low level is a precursor to the generation of small-

收稿日期: 2024-10-31; 修回日期: 2025-01-09

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2022MD035, ZR2022MD088)

第一作者: 刁秀广, radardxg@126.com。

scale tornadic vortices. Eight mesocyclone tornadoes are characterized by strong mesocyclones with the rotation speed exceeding $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ in the low level, and one non-mesocyclone tornado is induced by bow echo with rear inflow jet of $42\text{--}45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The tornado in Dongming County is the most damaging and lethal tornado, whose parent storm has the strongest updrafts. The width of the low-level tornadic debris signature (TDS) is about 2 km, and the top of the TDS reaches about 9 km, showing a dispersed state with the maximum width of about 4 km.

Keywords tornado outbreak; small-scale vortex; tornadic debris signature (TDS)

0 引言

美国气象学会将龙卷爆发定义为“特定天气尺度系统下出现多个龙卷”,但并没有指出龙卷的个数。事实上,龙卷爆发没有一个通用的定义,可以根据给定研究项目的要求进行调整^[1]。Pautz等^[2]将龙卷爆发分为小(6~10次龙卷)、中(11~20次龙卷)和大(20次以上龙卷)3类,Galway^[3]分析龙卷爆发气候特点时选取10个龙卷为龙卷爆发最低标准。Hagemeyer^[4]分析了美国佛罗里达半岛龙卷爆发特征,选取标准是4 h内至少有4个龙卷产生,结果表明爆发性龙卷占比仅为3.6%,但爆发性龙卷致人死亡数占有所有龙卷的61%,致灾性非常严重。Tochimoto等^[5]综合分析产生龙卷爆发和非龙卷爆发的温带气旋之间的差异,发现龙卷爆发的温带气旋对流有效位能(convective available potential energy, CAPE)和风暴相对螺旋度(storm relative helicity, SRH)明显更大,并且这些参数在暖区具有显著值的区域更宽阔,较大的CAPE是由于大量的低空水汽,而较大的SRH是由于更强的低空偏南风。Anderson-Frey等^[6]分析了2003—2015年美国134次龙卷爆发过程(共5 343次龙卷)和9 389次孤立龙卷临近环境参数空间分布,发现在特定地理区域爆发的龙卷往往具有比同一地理区域孤立龙卷具有更大的0~1 km风暴相对螺旋度和0~6 km垂直风切变,而且龙卷爆发在春季更容易产生。研究^[7-9]表明,龙卷爆发常见的对流系统是准线性对流系统(quasi-linear convective system, QLCS),镶嵌在其内的超级单体往往会产生长路径或强度较强的爆发性龙卷,超级单体中气旋高度下降并且旋转速度增大,对龙卷有指示意义,同时QLCS内的弓形结构、中涡旋(mesovortices)等也会诱发多个龙卷。

中国龙卷为发生概率极低的小尺度天气系统,观测和预报都非常困难,每年发生约100个龙卷,主

要发生在中国东部和部分中部平坦地区^[10-11]。广东和江苏是中国龙卷频发地区,黄先香等^[12]分析表明,近62年(1961—2022年)广东共有225个龙卷记录,自2006年以来,多源观测资料较齐备,龙卷年均发生约6个;龙卷数量逐年波动很大,共有13年龙卷个数在7个以上,其中2008年最高,达17个。徐芬等^[13]对江苏龙卷时空分布特征分析表明,2006—2018年江苏共记录到27个龙卷日发生龙卷41次,年均3.2次,7月最多,15个龙卷日产生25个龙卷。

龙卷爆发事件在国内极其少见,白兰强等^[14]对中国热带气旋龙卷的气候统计分析(2006—2018年)认为,中国现代气象史上的首次龙卷爆发事件发生于2018年第14号台风“摩羯”期间,至少有11个龙卷生成。刁秀广等^[15]对2018年台风“摩羯”龙卷做了分析,低层高湿、强的低层垂直风切变和大的风暴相对螺旋度是关键环境物理量。温璐璐等^[16]对台风“凤凰”(2008年第8号台风,在江苏北部地区产生5个龙卷)和“摩羯”两次多发龙卷天气的分析表明,“凤凰”外围龙卷主要产生于云带后侧雷暴,龙卷风暴具有后向传播特征,“摩羯”外围龙卷主要产生于云带前端强雷暴,持续时间较长,伴有持久的中气旋。2024年7月5日14:20—20:40(北京时间,下同),山东西南部和山东中部地区6 h左右至少产生9个龙卷(初步调查),造成多人伤亡和严重经济损失。山东近几年还发生过2次类似极端天气事件,一次是2018年台风“摩羯”在江苏北部及山东诱发12个龙卷,尤其是山东滨州和东营一带密集诱发7个龙卷,有多篇研究^[15-19]利用多源资料,多角度对龙卷灾情调查、环境条件、风暴特征、中气旋、龙卷涡旋特征等进行分析。2021年7月11日19:00—12日14:00,东北方向移动的温带气旋在山东产生10个龙卷,目前为止,仅有1篇论文^[20]对高唐EF3级龙卷的雷达双偏振特征进行过相关分

析。7 年内山东有 3 次龙卷爆发事件,国内其他地区还没有相关记录,因此对龙卷爆发进行多角度细致研究与分析非常必要。

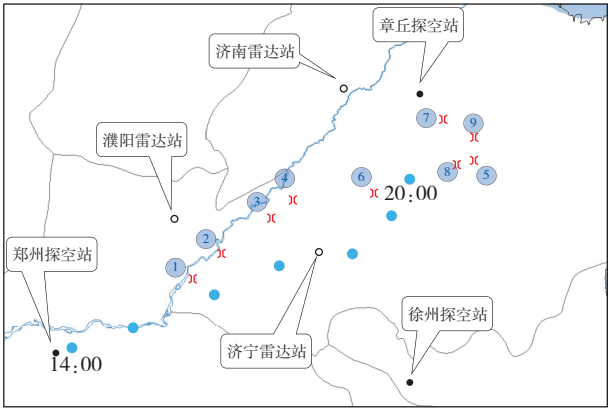
1 龙卷实况与环境物理量

1.1 龙卷实况

受温带气旋影响,2024 年 7 月 5 日下午至夜间,山东菏泽、济宁、泰安、淄博、济南等地先后至少出现 9 个龙卷。龙卷出现地点及地面低压中心见图 1,龙卷出现时间及等级见表 1,序号是根据龙卷出现时间先后顺序进行排列的。1 号龙卷出现在 5 日 14:20 左右,9 号龙卷出现在 20:40 左右。1 号龙卷强度达到 EF3 级,破坏性最为严重,在东明北部造成多人伤亡和房屋破坏等严重经济损失。

龙卷均出现在地面低压中心的东侧或东北侧(图 1),8 号龙卷出现在 20 时地面低压中心东侧,其他 8 个龙卷均出现在地面低压中心东北侧。龙卷

距离低压中心 40~200 km(图 1),8 号龙卷距离低压中心最近。



蓝色实心圆—地面低压中心, 从左至右对应时刻分别为14:00、15:00、16:00、17:00、18:00、19:00、20:00; X—龙卷位置; 圆圈内数字—根据出现时间先后顺序排列的龙卷序号。

图 1 2024 年 7 月 5 日地面低压中心与龙卷位置
Fig.1 Path of ground low-pressure centers and location of tornadoes on 5 July 2024

表 1 2024 年 7 月 5 日龙卷时间、地点及强度等级
Table 1 Time, location and intensity scale of tornadoes on 5 July 2024

序号	时间	地点	简称	主要破坏情况	最大宽度/m	龙卷强度	EF 分级
1	14:20—14:40	菏泽市东明县	东明龙卷	输电铁塔折断,电线杆折断,车辆吹翻,房屋、构筑物破坏,大树折断	550	强	EF3
2	15:10—15:20	菏泽市鄄城县	鄄城龙卷	大树折断,房屋倒塌	300	强	EF2
3	16:10—16:25	菏泽市郓城县	郓城龙卷	输电铁塔倒塌,电线杆折断,彩钢棚揭顶,树木倒伏	800	强	EF3
4	16:40—17:00	济宁市梁山县	梁山龙卷	房顶揭瓦,大树折断,输电铁塔倒塌	1 000	强	EF3
5	17:55—18:00	淄博市沂源县大张庄镇	沂源龙卷 I	电线杆折断,树木折断,房顶揭瓦	300	中	EF1
6	18:45—19:05	泰安市宁阳县	宁阳龙卷	输电铁塔倒塌,电线杆折断,车辆吹翻,房顶揭瓦,大树倒伏	650	强	EF3
7	19:42 左右	济南市莱芜区	莱芜龙卷	房顶受损,树木倒伏	50	弱	EF0
8	20:15 左右	济南市钢城区	钢城龙卷	房顶揭瓦,树木倒伏,电线杆受损	200	中	EF1
9	20:40 左右	淄博市沂源县南麻镇	沂源龙卷 II	房顶揭瓦,树木折断	150	中	EF1

注:“龙卷强度”根据 GB/T 40243—2021《龙卷风强度等级》^[21]划分。

1.2 环境物理量

利用郑州和徐州探空资料(位置见图 1)计算了环境物理量,详见表 2。郑州探空站位于东明上游,两地相距约 130 km,08 时资料对东明一带龙卷(1—4 号龙卷)具有一定代表性。徐州探空站处于宁阳及沂源一带上游,与宁阳相距约 170 km,与沂源相距约 215 km,14 时资料对宁阳和沂源等龙卷(5—9 号龙卷)具有一定代表性。章丘探空站位于龙卷地下游区域,资料代表性较差,未计算。同时使用

ERA5 资料计算龙卷地临近(1 h 之内)环境参数,主要包括 CAPE、0~1 km 和 0~3 km 垂直风切变(SHR)、SRH(3 km 高度)及能量螺旋度指数(energy helicity index,EHI),见表 3。

由表 2 和表 3 可以看出,龙卷发生地上游地区具有较小的 850 hPa 与 500 hPa 温差(Δt)和最大抬升指数(best lifting index,BLI),中等强度或以上 CAPE 和 SHR。临近时次龙卷地具有较强低层 SHR、SRH 及大的 EHI。

表 2 2024 年 7 月 5 日郑州和徐州探空环境物理量

Table 2 Environmental physical parameters at Zhengzhou and Xuzhou sounding stations on 5 July 2024

时刻	地点	$\Delta t/^{\circ}\text{C}$	$\text{BLI}/^{\circ}\text{C}$	$\text{CAPE}/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\text{SHR}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$			850 hPa 风场		700 hPa 风场		抬升凝结高度/m
					0~1 km	0~3 km	0~6 km	风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	风向/ $(^{\circ})$	风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	风向/ $(^{\circ})$	
08:00	郑州	24	-4.3	1 647	9	8	18	12	214	10	243	280
08:00	徐州	24	-3.7	87	13	13	17	14	244	13	235	340
14:00	徐州	21	-4.9	2 369	7	18	19	12	207	20	227	1 440
20:00	徐州	26	-5.3	1 652	17	24	22	22	216	27	241	1 400

表 3 基于 ERA5 资料计算的环境物理量

Table 3 Environmental physical parameters based on ERA5 data

时刻	地点	$\text{CAPE}/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\text{SHR}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$		$\text{SRH}/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2})$	EHI
			0~1 km	0~3 km		
14:00	东明	2 600	11	19	380	6.2
15:00	鄄城	2 400	13	21	450	6.7
16:00	郓城	1 800	13	23	490	5.5
16:00	梁山	1 600	13	22	530	5.3
17:00	沂源	1 400	11	21	480	4.2
18:00	宁阳	580	16	22	780	2.8
19:00	莱芜	450	18	22	920	2.6
20:00	钢城—沂源	460	19	23	950	2.7

龙卷爆发期间 CAPE 差异较大。08:00, 郑州探空资料订正到 14:00—16:00, 东明至梁山一带的 CAPE 较强, 为 $2\,100\sim3\,340\,\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。14:00, 徐州探空资料订正到 17:00, 沂源和宁阳具有中等强度 CAPE (分别为 $1\,100\,\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1\,300\,\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$) , 7—9 号龙卷地有明显降水, 未做订正。临近时次 1—5 号龙卷地具有中等或以上强度 CAPE, 6—9 号龙卷地 CAPE 较弱。

低空西南急流加强, 低空垂直风切变明显增大。南部区域 850 hPa 14:00—20:00 偏南风急流由 $12\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 迅速增加到 $22\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 700 hPa 偏南风急流由 $20\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加到 $27\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (徐州探空)。济宁雷达风廓线 (VAD wind profile, VWP) 显示, 14:00—17:00, 1.5 km 偏南风急流由 $12\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 迅速增加到 $21\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图略), 0~1 km SHR 由 $12\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加到 $20\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 0~3 km SHR 由 $20\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加到 $25\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。利用濮阳雷达径向速度数据计算 14:00 东明上游地区 (河南封丘至长垣一带) 低层 SHR, 0~1 km 约为 $12\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 0~3 km 约为 $21\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。ERA5 临近数据表明, 0~1 km SHR 不小于 $11\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 0~3 km SHR 不小于 $19\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 与雷达数据计算的 SHR 基本相当。

龙卷爆发期间具有较强 SRH 和较大 EHI。SRH 为 $380\sim950\,\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$, EHI 为 $2.6\sim6.7$, CAPE 在 18:00 之后明显减弱, 而 SRH 明显增大, 对应的 EHI 减小, 同时龙卷强度平均而言也减弱。低 CAPE 情况下, 较高的 SRH 和 SHR 仍然利于龙卷产生。

低空急流的迅速加强与维持, 利于低层垂直风切变和风暴相对螺旋度的迅速增大、暖湿气流的输送及对流能量和不稳定度的累积, 与龙卷爆发有直接关系。

2 雷达回波与龙卷风暴演变

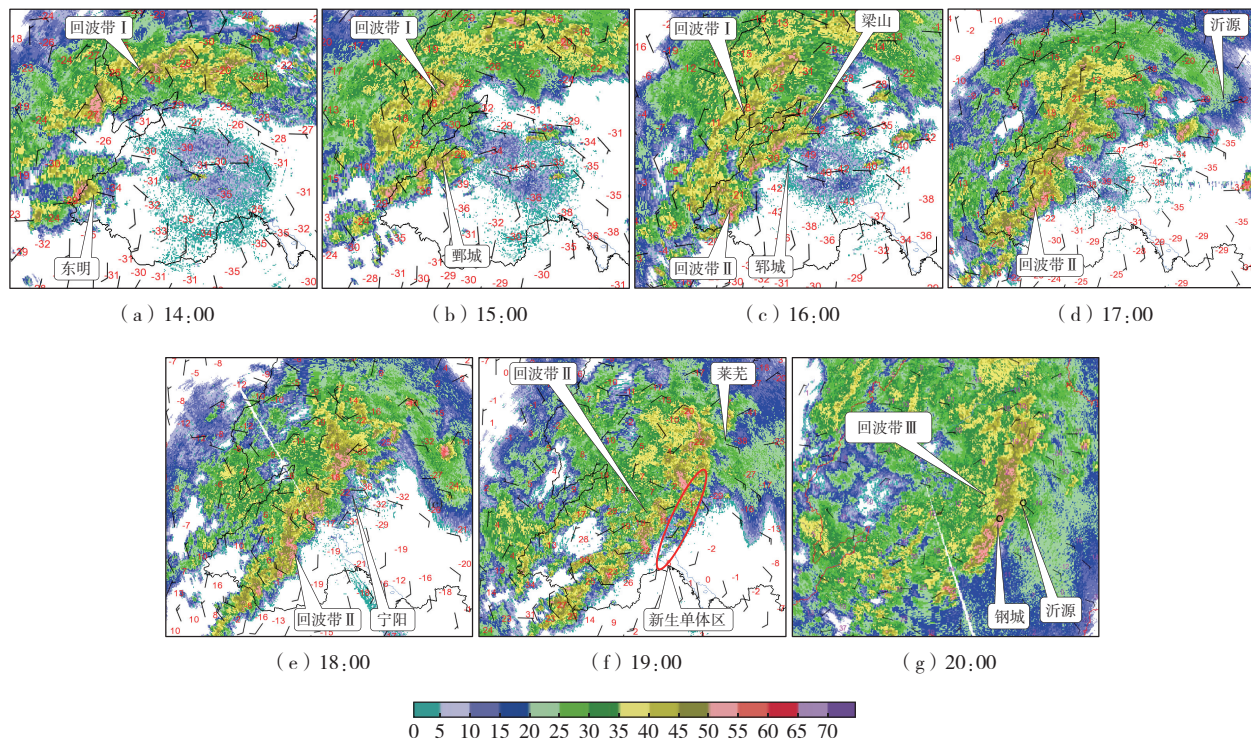
2.1 雷达回波演变

图 2 是 7 月 5 日 14:00—20:00 雷达反射率因子与国家级气象观测站地面风场、3 h 变压叠加图。可以看出, 回波演变主要表现为线状对流系统的演变。14:00—16:00 (图 2a—c), 回波带 I 逐渐减弱, 同时回波带 I 西段的前侧不断有对流新生、发展, 逐渐演变为带状回波 II。18:20 左右 (图略), 回波带 II 东移过程中, 其中段前侧 (济宁至莱芜一带) 又有带状分布的新单体产生、发展、加强。19:30 左右 (图略), 回波带 II 合并到新生回波带, 形成回波带 III。17:00—20:00 (图 2d—g), 带状回波长度维持在 $350\sim400\,\text{km}$, 准线性特征更加明显, 表现为 QLCS。

14:00—16:00 (图 2a—c), 龙卷附近站点东明、鄄城、郓城和梁山一带基本为偏东风气流, 龙卷前 3 h 变压分别为 -3.4 、 -2.8 、 -4.9 和 $-4.2\,\text{hPa}$ 。17:00 (图 2d), 沂源站为偏东风气流, 但 3 h 负变压较弱, 为 $-2.2\,\text{hPa}$ 。18:00—19:00 (图 2e—f), 宁阳和莱芜站为偏东风, 3 h 变压分别为 -3.6 和 $-3.8\,\text{hPa}$ 。20:00 (图 2g), 沂源站 3 h 变压进一步减弱, 仅为 $-1.4\,\text{hPa}$ 。1—4 号龙卷和 6—7 号龙卷产生在地面偏东风气流的强负变压区内, 强的负变压区内辐合上升气流强度更强, 利于风暴的维持与发展。

2.2 龙卷风暴演变

为进一步了解龙卷风暴特征, 分析了 9 个龙卷风暴在龙卷产生前后的风暴形态 (图 3)、风暴参数与中气旋参数演变特征 (图 4)。风暴参数包括最大反射率因子 (DBZM) 及所在高度 (HT) 和风暴顶高 (TOP), 中气旋参数包括最大旋转速度及所在高度。



色阶—雷达反射率因子, 单位为dBZ; 风矢—风场, 风速单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; 红色数字—3 h变压, 单位为hPa; f中红色圈—新生单体区。

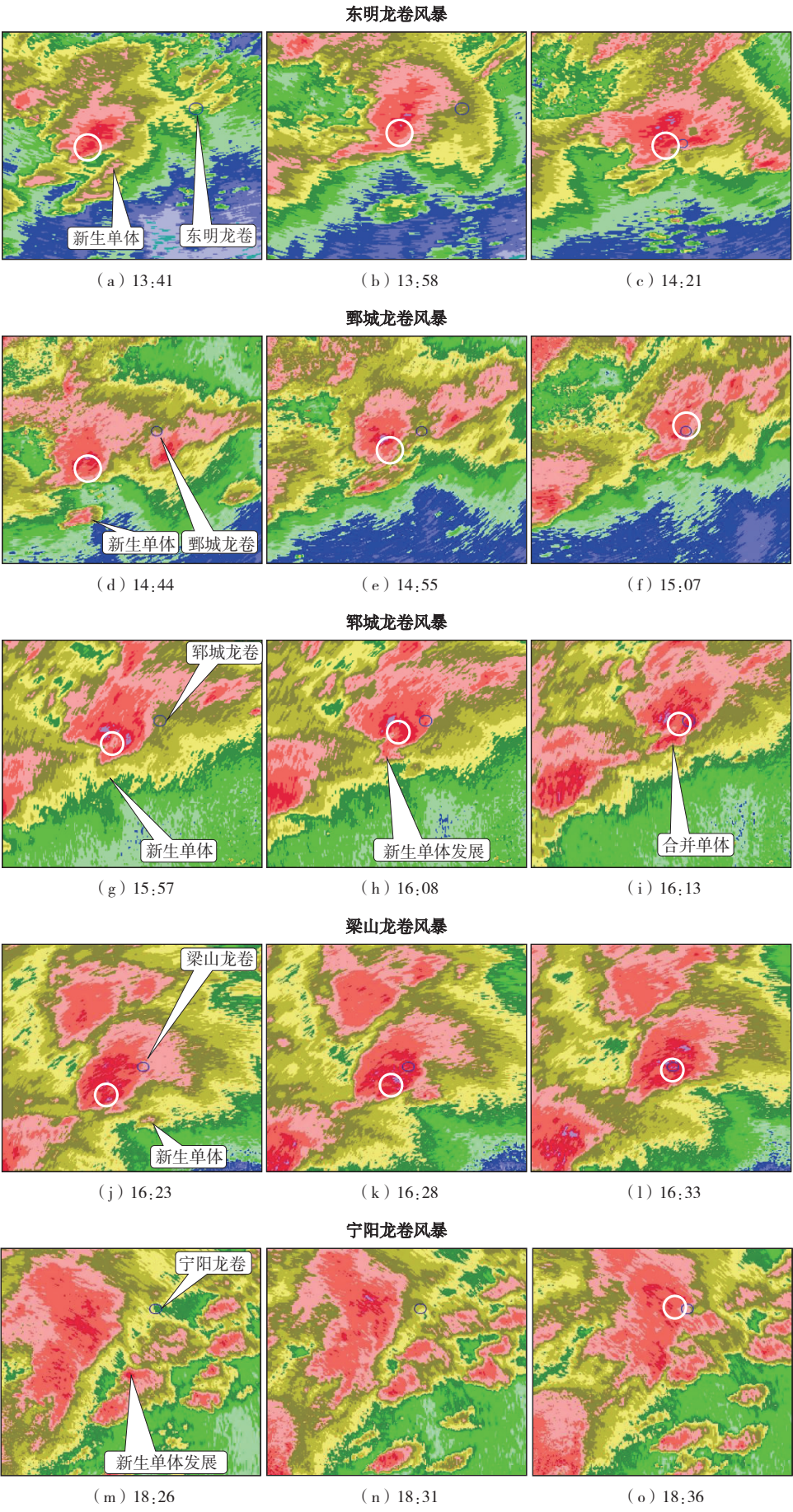
图2 2024年7月5日雷达反射率因子与地面风场及3 h变压
Fig.2 Reflectivity, surface wind field and 3-h pressure change on 5 July 2024

东明龙卷风暴在东偏北方向移动过程中其右后侧有多个对流单体新生、发展(图3a), 13:47开始合并(图略), 13:58基本合为一体(图3b), 14:21又有新生单体产生(图3c), 在龙卷期间未合并。鄄城龙卷风暴(图3d—f)与东明龙卷风暴类似, 有多个单体并入。郓城龙卷风暴(图3g—i)在15:52右后侧有弱的对流触发, 15:57新生单体迅速发展并与主单体靠近, 16:03合并完成。梁山龙卷风暴在16:23右侧有新生单体产生, 16:33完成合并(图3j—l)。2—4号龙卷风暴前侧均有弱于龙卷风暴的对流影响, 龙卷产生前期有明显降水。宁阳龙卷风暴处在QLCS之内, 右侧有多个对流新生、发展, 18:36新生对流基本与主风暴靠近(图3m—o), 18:42完成合并(图略)。沂源龙卷风暴I基本为相对孤立的超级单体风暴(图3p), 莱芜龙卷(图3q)和钢城龙卷(图3r)发生在QLCS内, 前后回波形态基本没有明显变化。沂源龙卷II由QLCS内的弓形回波诱发, 龙卷产生在弓形回波头部的内侧, 后侧入流急流缺口非常明显(图3s—u)。

5个龙卷风暴(1—4号和6号)具有合并特征, 合并后风暴强度并没有明显的发展, 但中气旋旋转速度都得到了加强(图4)。14:04—14:10, 东明龙卷风暴由

$18.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 $22.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 之后维持在 $21.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, 龙卷产生时最大旋转速度高度表现为快速下降特征(图4a)。鄄城龙卷风暴合并的同时最大旋转速度增大到 $25.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 同时最大旋转速度高度有所下降, 3 min之后诱发龙卷(图4b)。16:03, 郓城龙卷风暴合并后最大旋转速度由 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 同时最大旋转速度高度下降中诱发龙卷(图4c)。梁山龙卷风暴合并3个体扫后最大旋转速度增大到 $26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 但最大旋转速度高度没有下降特征(图4d)。宁阳龙卷风暴合并的同时最大旋转速度增大到 $22.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 龙卷产生前最大旋转速度高度有所下降(图4f)。

5号龙卷风暴强度最强(图4e), 在龙卷产生前DBZM为66~72 dBZ, 龙卷产生在风暴减弱阶段, 中气旋旋转速度一直较大, 在龙卷产生前8 min最大旋转速度高度呈现明显下降特征(4.2 km下降至2.1 km)。风暴强度最弱的是9号龙卷风暴(图4i), DBZM约为52 dBZ, TOP约为7 km, 维持时间也较短, 没有中气旋出现, 只在低层 0.5° 和 1.5° 仰角出现浅薄的气旋性涡旋, 龙卷产生前 1.5° 仰角(2.8~3.0 km高度)弓形回波后侧最大入流在 $42 \sim 45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略)。



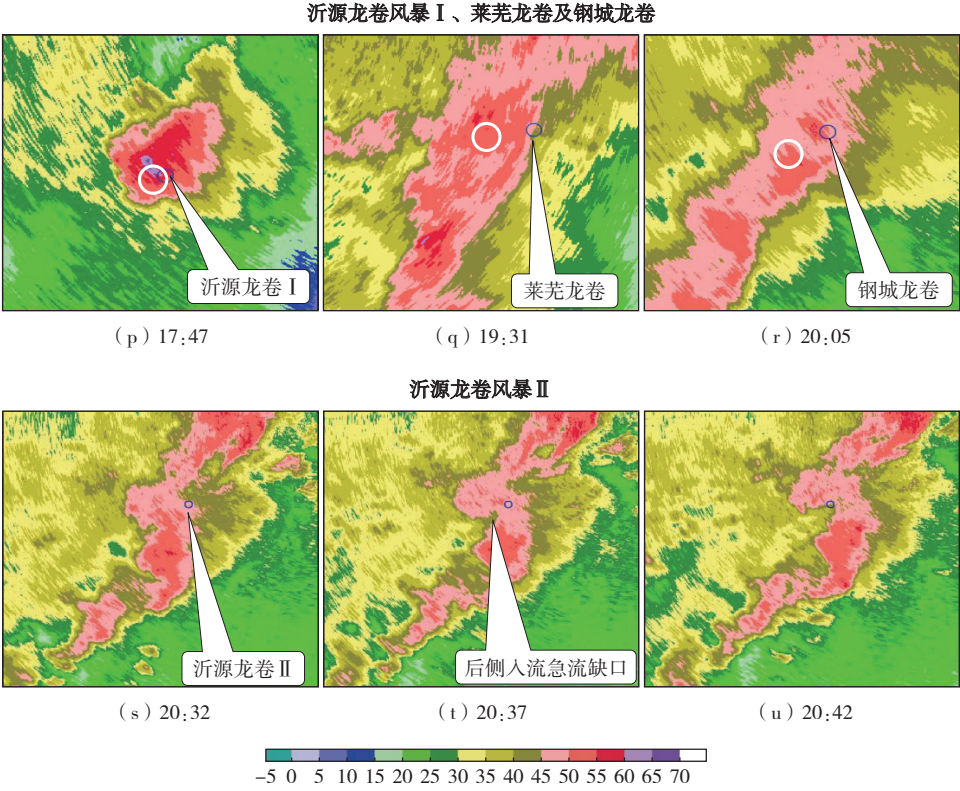
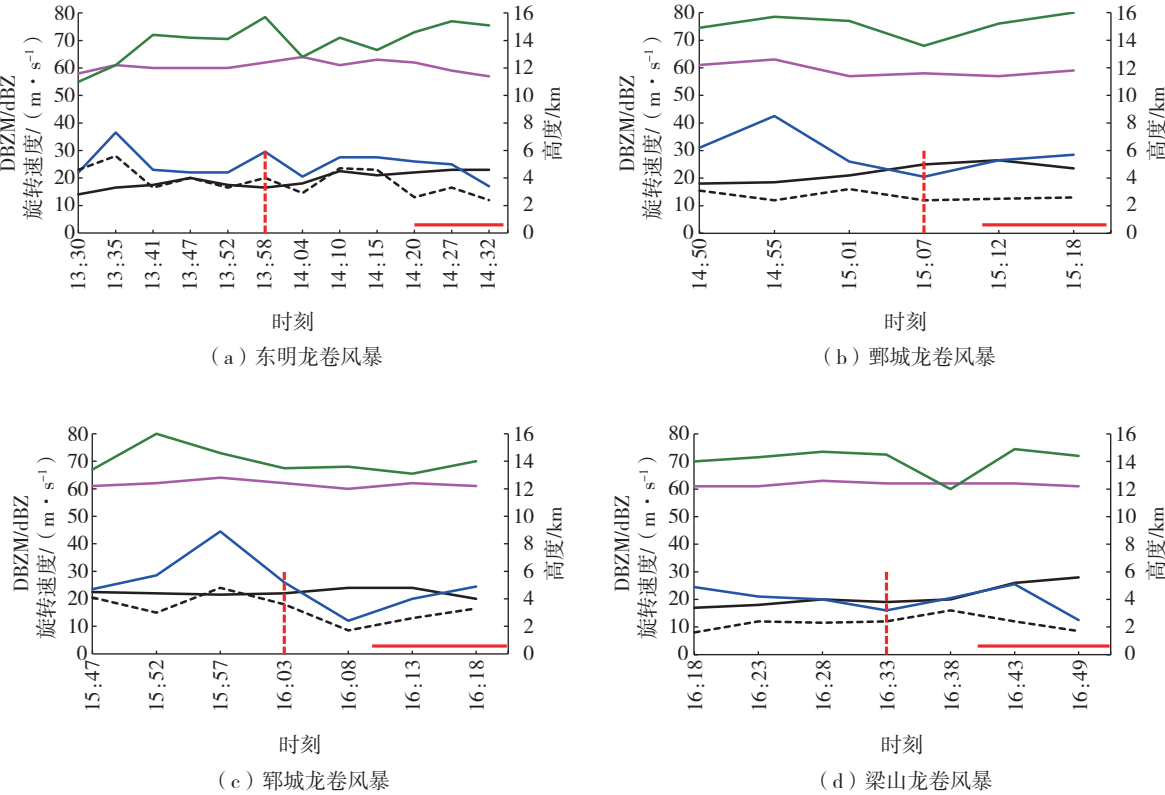


图 3 2024 年 7 月 5 日雷达组合反射率产品
Fig.3 Composite reflectivity on 5 July 2024



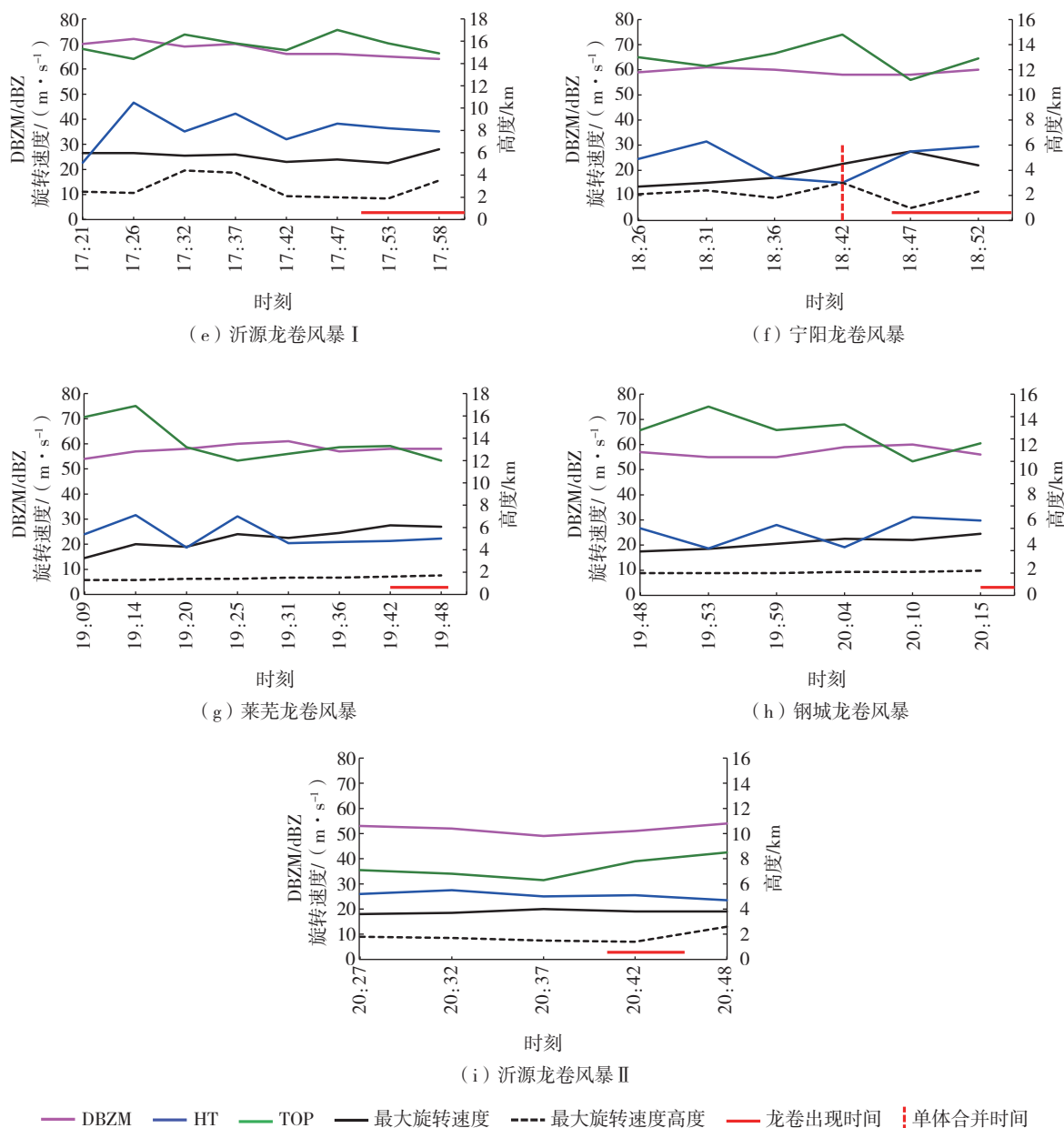


图4 2024年7月5日龙卷风暴参数

Fig. 4 Parameters of tornado storms on 5 July 2024

由旋转速度看,5号龙卷风暴旋转强度最大($23 \sim 28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),9号龙卷风暴旋转强度最弱($18 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。除9号龙卷风暴之外,其他8个在龙卷产生阶段旋转速度均超过 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。最大旋转速度高度基本在4 km之下,处在风暴低层。7号(图4g)、8号(图4h)和9号(图4i)龙卷风暴最大旋转速度基本在风暴底层(0.5° 仰角)。

3 龙卷风暴低层涡旋强度特征

1—4号和6号龙卷距离濮阳雷达或济宁雷达

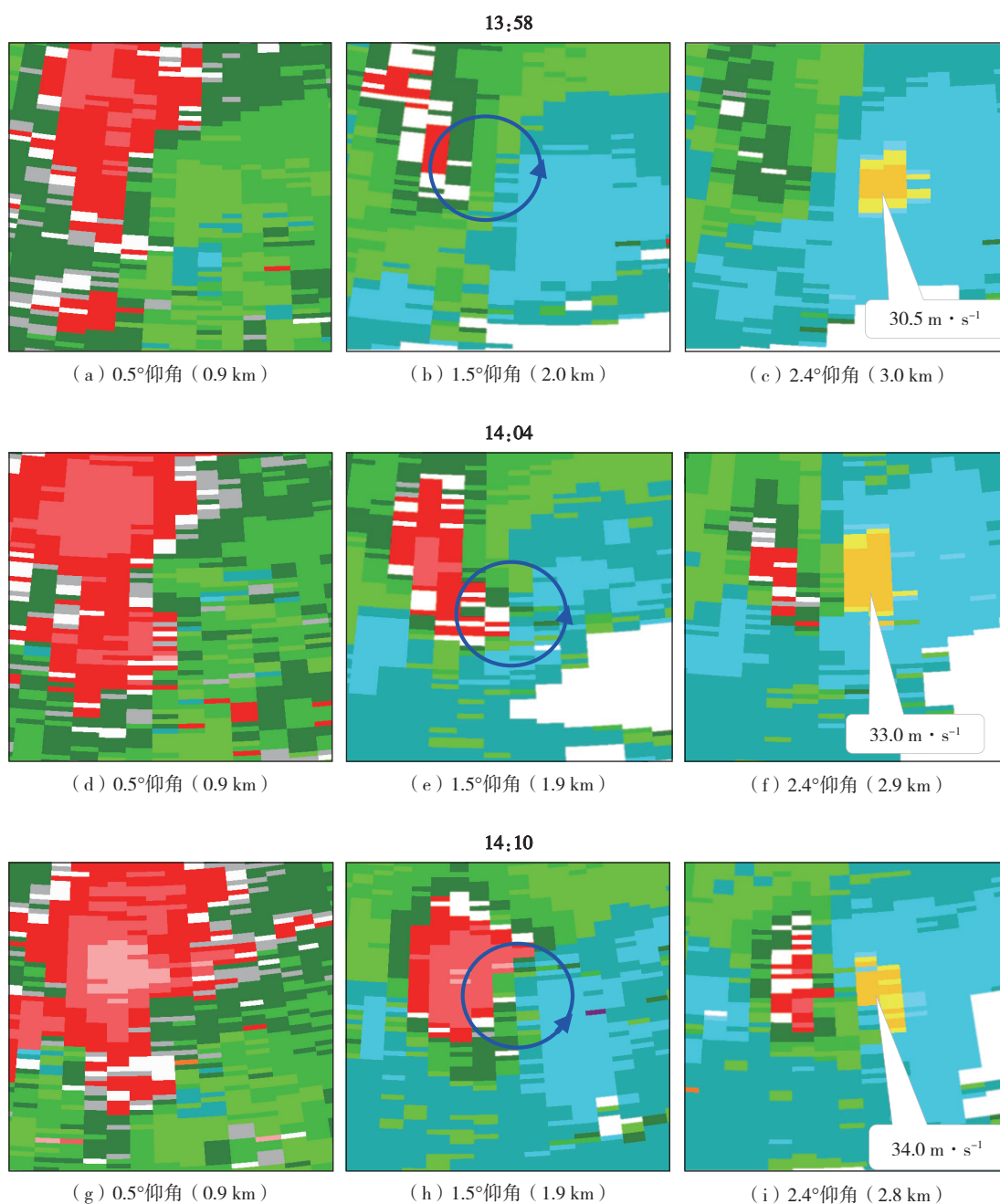
较近,可探测到低层1 km高度以下小尺度涡旋,因此仅对1—4号和6号龙卷进行分析。小尺度涡旋强度用同一距离圈上2个相邻数据库(径向分辨率为250 m)的最大速度差(ΔV)表示。新一代天气雷达通过识别龙卷涡旋特征(tornadic vortex signature, TVS)进行龙卷预警^[22-23],但强度较弱的龙卷可能不会出现TVS,仅在浅薄的低层出现大的 ΔV ^[24-25]。

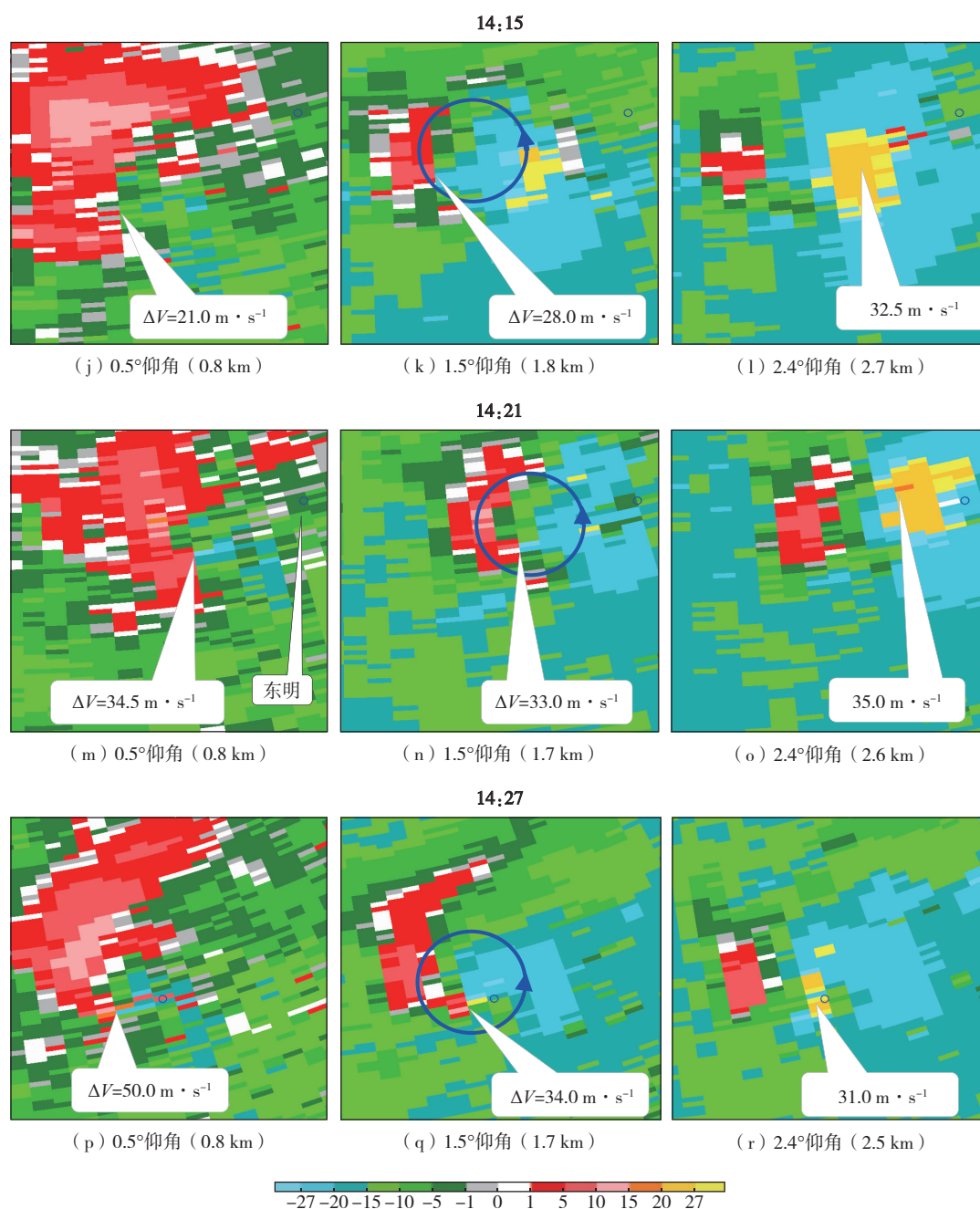
3.1 东明龙卷涡旋演变

图5是2024年7月5日濮阳雷达13:58—14:27,6个体扫 0.5° 、 1.5° 和 2.4° 仰角平均径向速度。 2.4° 仰

角(2.5~3.0 km 高度)存在明显的气旋性涡旋,负速度区出现明显的速度模糊(实际径向速度为 $30.5\sim 34.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),13:58—14:27,6 个体扫旋转速度分别是 14.5 、 19.5 、 20.0 、 20.5 、 21.5 、 $19.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,13:58—14:04 旋转强度增加较为明显,之后基本维持在 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。 1.5° 仰角(1.7~2.0 km 高度)13:58—14:27,6 个体扫旋转速度分别是 12.0 、 14.5 、 17.5 、 19.0 、 19.5 、 $20.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,14:04 之后旋转强度明显加强。14:10 开始, ΔV 迅速增大,切变明显增强,14:10、14:15、14:21、14:27 的 ΔV 分别为 30.0 、 28.0 、 33.0 、 $39.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,龙卷

形成时(14:20) ΔV 达到 $33\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。 0.5° 仰角(0.8 km 高度左右),13:58—14:27,6 个体扫旋转速度分别是 11.0 、 12.0 、 10.0 、 14.0 、 18.0 、 $25.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,14:10—14:15, 旋转强度明显加强。13:58—14:10, ΔV 较小(小于 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),14:15 开始迅速增大,14:15、14:21、14:27 的 ΔV 分别为 21.0 、 34.5 、 $50.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,龙卷形成时(14:20) ΔV 达到 $34.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由此看出,低仰角旋转速度的增强滞后于上一仰角, 0.5° 仰角涡旋切变的增大也滞后于 1.5° 仰角,风暴涡旋强度具有明显“下传”特征。





色阶—径向速度, 单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; b、e、h、k、n、q中蓝色带箭头圆圈—1.5°仰角气旋性涡旋。

图5 2024年7月5日濮阳雷达平均径向速度

Fig.5 Mean radial velocity of Puyang radar on 5 July 2024

3.2 龙卷风暴低层涡旋强度与龙卷强度

图6是1—4号和6号龙卷发生前与维持期间0.5°和1.5°仰角 ΔV 的变化情况,1—2号龙卷为濮阳雷达,3—4和6号龙卷为济宁雷达。

东明龙卷发生在14:20—14:40,最大强度为EF3级,底层高度为0.8 km,14:15—14:21底层 ΔV 明显增大,由 $21.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 $34.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,14:27和14:32的 ΔV 分别为 $50.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $54.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图6a)。

发生在15:10—15:20,最大强度为EF2级,底层高度为0.8 km,15:01—15:07底层 ΔV 明显增大,由 $17.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 $31.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,15:12时 ΔV 达到最大,为 $36.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图6b)。郓城龙卷发生在16:10—16:25,最大强度为EF3级,底层高度为0.8 km,15:57—16:03两层 ΔV 明显减小,之后又迅速增大,底层 ΔV 由 $24.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 $45.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,16:13达到最强,为 $50.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图6c)。梁山龙卷发生在16:40—

17:00,最大强度为 EF3 级,底层高度为 0.7 km。龙卷初始时底层涡旋强度明显增强, ΔV 由 16:38 的 $16.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增大到 16:43 的 $22.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,16:54 时底层 ΔV 达到最大,其值为 $50.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 1.5° 仰角 (约 1.6 km 高度) 除 16:54 之

外,其他时次 ΔV 均大于底层 (图 6d)。宁阳龙卷发生在 18:45—19:05,最大强度为 EF3 级,底层高度为 0.9 km。龙卷初始前两层 ΔV 明显减小,之后又迅速增大,底层 ΔV 由 $16.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增大到 $45.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 6e)。

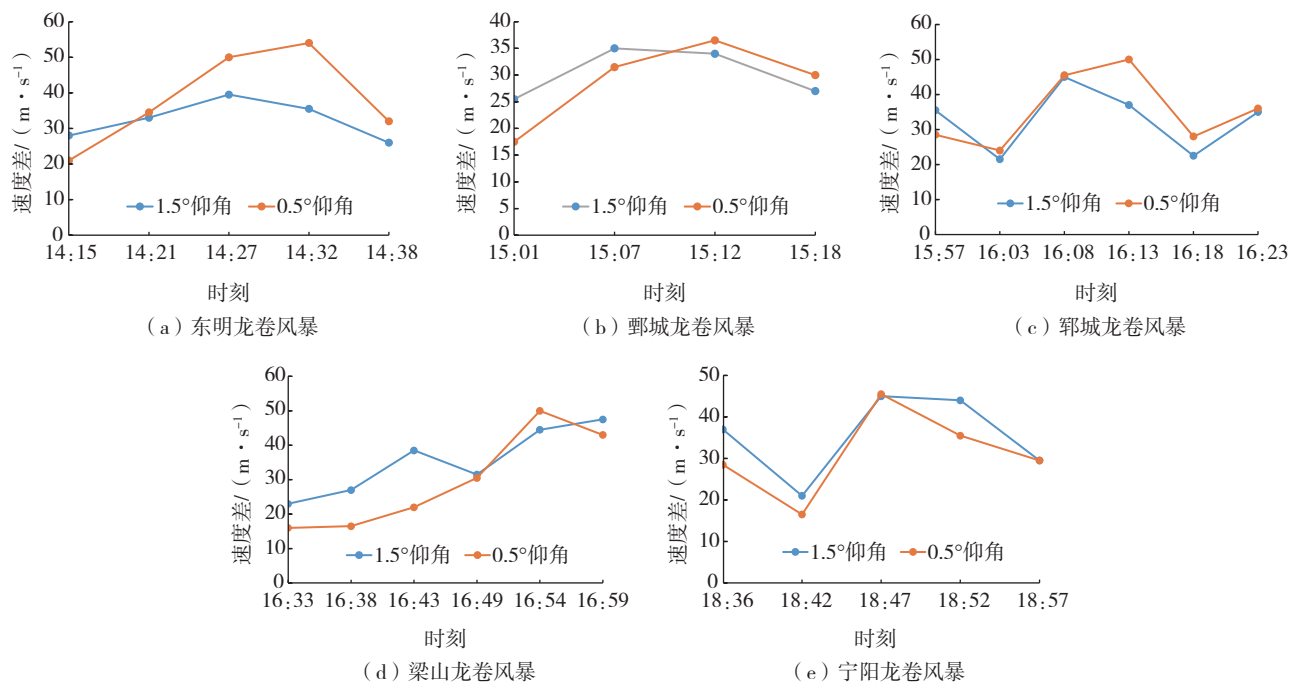


图 6 2024 年 7 月 5 日龙卷涡旋低层最大径向速度差

Fig.6 The maximum difference of radial velocity in the low level of tornadic vortex on 5 July 2024

综合分析发现,5 次龙卷在产生之前底层涡旋 (1 km 以下) ΔV 均小于上一层,因此,从预警角度看,风暴底层 1 km 高度之上的最大径向速度差的大小更具有预警意义。5 次龙卷中的 4 个 EF3 级龙卷涡旋底层 $\Delta V \geq 45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,其中东明、郓城和梁山龙卷涡旋底层 $\Delta V \geq 50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,1 个 EF2 级龙卷涡旋底层 ΔV 为 $35 \sim 45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,小尺度涡旋底层 (1 km 以下) 最大径向速度差的大小与龙卷强度密切相关。

4 龙卷碎片特征

龙卷会导致地面构筑物、树木、农作物等的破坏而产生各种各样的碎片,最典型的双偏振参量特征是相关系数 (C_c) 异常小,Ryzhkov 等^[26]、Bodine 等^[27]将 C_c 阈值定为 0.8,而美国预警决策培训部的双偏振雷达操作课程中指出,降雨中混有非常小的碎片, C_c 为 0.90~0.95,大的、多样性碎片 C_c 小于 0.8。参考美国预警决策培训部的双偏振雷达操作课程,将涡旋中心区域相关系数 C_c 小于 0.9 作为龙卷碎片的主要特征,同时对应的水平极化反射率因子 (Z_H) 大于 30 dBZ。

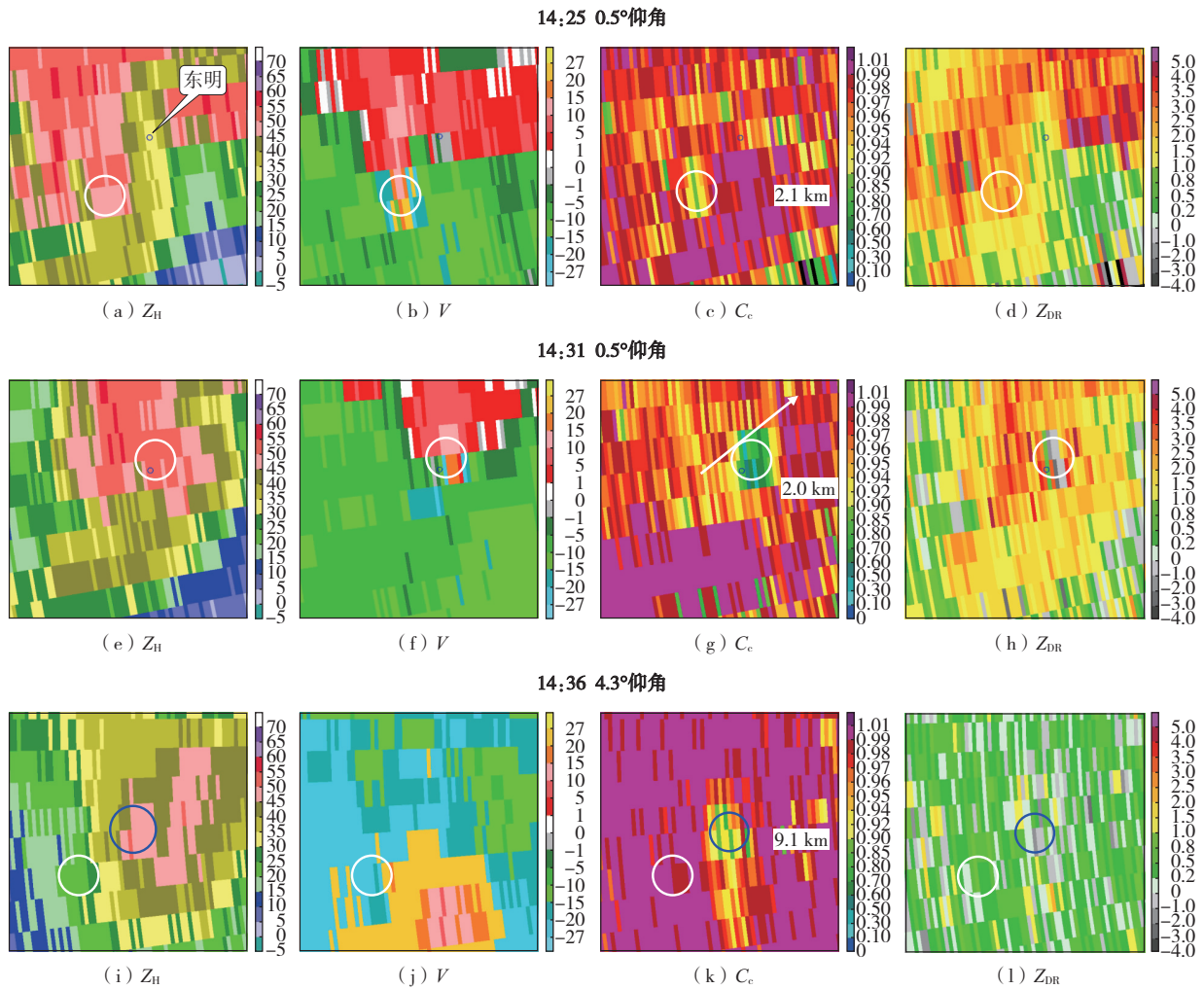
图 7 是东明龙卷风暴 14:25、14:31 这 2 个时次 0.5° 仰角和 14:36 时次 4.3° 仰角水平极化反射率因子 (Z_H)、平均径向速度 (V)、相关系数 (C_c) 和差分反射率 (Z_{DR})。白色圆圈为 0.5° 仰角强涡旋中心,对应高度约为 2.0 km, 4.3° 仰角 C_c 小值区对应的高度约为 9.1 km (-23°C)。

东明龙卷风暴 0.5° 仰角在 14:25 (图 7a—c)、14:31 (图 7e—g) 和 14:36 (图略) 小尺度涡旋中心连续 3 个体扫 C_c 分别有 2、17 和 4 个距离库小于 0.9,3 个体扫 C_c 最小值分别为 0.88、0.38 和 0.79, C_c 小于 0.9 的距离库对应的 Z_H 为 47~54 dBZ,对应的 Z_{DR} 为 $-2.5 \sim 3.3$ dB (图 7d、h)。14:31, Z_{DR} 负值区更加明显,表明龙卷产生约 5 min 后在 2.0 km 高度有较小范围的龙卷碎片特征 (tornadic debris signature, TDS)。14:31 径向上 TDS 范围约为 2 km,范围明显增大,14:36 又明显减小。14:36 (图 7i—l), C_c 小于 0.9 (蓝色圆圈区域,最小 0.79) 的距离库出现在底层涡旋中心的右前侧且较为分散,TDS 最大宽度约为 4 km,高度约为 9.1 km,对应的 Z_H 为 43~47 dBZ,对应的 Z_{DR} 为 $-1.2 \sim 1.3$ dB。龙卷风暴的主上升气流

非常强盛,龙卷碎片可上升到9 km左右的高度。

同样,对另外4个龙卷风暴的 C_e 特征也进行了分析(图略)。鄄城龙卷在 0.5° 仰角(1.3 km高度)15:11和15:17连续2个体扫 C_e 各有3个距离库小于0.9,1.5°及以上仰角均未出现。鄆城龙卷在 0.5° 仰角(高度为0.8 km)16:13和16:23的2个体扫 C_e 各有5个距离库小于0.9,1.5°仰角(1.7 km高度)及以上仰角均未出现。梁山龙卷16:54、16:59和17:04连续3个

体扫 0.5° 仰角(高度约0.8 km)分别有13、21和4个距离库 C_e 小于0.9,径向上TDS最大范围约为2 km,1.5°仰角(对应高度约1.8 km)仅在16:59有3个距离库 C_e 小于0.9,其他时次均未出现。宁阳龙卷在18:47、18:52和18:57连续3个体扫 0.5° 仰角(1.0~1.2 km高度) C_e 分别有8、18和6个距离库小于0.9,TDS最大范围约为2 km,18:52和18:57连续2个体扫在 3.3° 仰角(4.7~5.3 km高度)出现 C_e 低值区。



a、e、i 中色阶— Z_H , 单位为 dBZ; b、f、j 中色阶— V , 单位为 $m \cdot s^{-1}$; c、g、k 中色阶— C_e ; d、h、l 中色阶— Z_{DR} , 单位为 dB; 白色圆圈— 0.5° 仰角强涡旋中心; 蓝色圆圈— C_e 小于 0.9; g 中白色箭头—单体移动方向。

图7 2024年7月5日济宁雷达 Z_H 、 V 、 C_e 和 Z_{DR}
Fig.7 Z_H , V , C_e and Z_{DR} of Jining radar on 5 July 2024

5个龙卷中有4个EF3级、1个EF2级,TDS存在明显差别。东明、宁阳和梁山3个EF3级龙卷底层TDS范围大致相当,但上升高度差异明显,东明龙卷TDS高度约为9 km,梁山龙卷TDS高度约为2 km,宁阳龙卷TDS高度约为5 km,鄆城EF3级龙卷TDS范围与高度明显小于其他3个EF3级龙卷。

同样强度的龙卷产生的TDS底层范围及TDS上升高度差异明显,为什么会出现明显差异?下面从风暴上升气流强度角度进行分析。

利用济宁双偏振雷达资料,分析龙卷风暴强盛时次TOP、 Z_{DR} 柱高度和风暴顶辐散强度(表4)。0℃层高度之上 $Z_{DR} \geq 1$ dB的区域为 Z_{DR} 柱, Z_{DR} 柱

由液态雨滴(或过冷却雨滴)和(或)湿的冰相粒子组成, Z_{DR} 柱的高度与上升气流强度密切相关,是上升气流强度的重要度量^[28-32],风暴顶辐散强度用风暴顶最大径向速度差表示。

表 4 龙卷风暴参数值
Table 4 Parameters of tornado storms

龙卷序号	时刻	TOP/km	Z_{DR} 柱高度/km	风暴顶辐散强度/($m \cdot s^{-1}$)	TDS 宽度/km	TDS 高度/km
1(EF3)	14:36	16.5	8.2	58.0	2	9.1
2(EF2)	15:17	15.5	8.4	42.5	小于 1	1.3
3(EF3)	16:13	13.6	7.7	42.0	小于 1	0.8
4(EF3)	16:59	12.8	7.4	52.5	2	1.8
6(EF3)	18:52	12.9	6.8	37.0	2	5.3

东明龙卷 TOP 和 Z_{DR} 柱高度较高,风暴顶辐散强度较强,表明风暴上升气流强度较强,从而可将龙卷碎片带至更高的高度。宁阳龙卷风暴上升气流强度明显弱于东明龙卷风暴,TDS 高度明显低于东明龙卷。

2—4 号龙卷风暴的上升气流强度弱于东明龙卷风暴,而强于宁阳龙卷风暴,但 2—4 号龙卷 TDS 高度较低,解释可能有 2 种情况:一是龙卷漏斗云倾斜明显,地面碎片距离强上升气流区有一定距离,较少碎片进入到强上升气流内;二是碎片“属性”明显不同。由于没有龙卷整体完整视频或图片材料,第一种情况无法证实。通过灾情调查分析,2—4 号龙卷在地面破坏的主要是树木,房屋或构筑物破坏程度较轻,碎片可能以树叶、树枝为主,龙卷产生前出现明显降雨,碎片“湿”而“重”,导致上升高度较低。由灾情调查的龙卷最大破坏范围来看,1、3、4、6 号这 4 个 EF3 级龙卷最大破坏范围分别在 550、800、1 000、650 m,TDS 底层范围也应该与龙卷最大破坏范围相对应,而实际是 3 号龙卷 TDS 范围最小,最大可能是 3 号龙卷破坏物的“属性”更“湿重”。

5 结论与讨论

(1)龙卷产生之前低空急流明显加强,低空 SHR 明显增大。低空急流的迅速加强与维持,利于低层 SHR 和 SRH 的迅速增大、暖湿气流的输送及对流能量和不稳定度的累积,SRH 和 EHI 都较大。6 个龙卷产生在地面强的 3 h 负变压区内偏东风气流附近,强的负变压区内辐合上升气流强度更强,利于风暴的发展。

(2)QLCS 内的超级单体风暴或弓形回波及线性对流系统前侧触发的多单体风暴簇或相对孤立的超级单体风暴是龙卷爆发的直接缔造者。4 个龙卷为线状对流系统前侧多单体风暴簇中的超级单体诱发,1 个为 QLCS 前侧相对孤立的超级单体诱发,4 个发生在 QLCS 内,其中 1 个为弓形回波诱发。多单体风

暴簇中的超级单体具有明显的合并特征,合并前后风暴强度变化不明显,而风暴旋转强度有增强现象。除弓形回波外,其他 8 个风暴产生龙卷时都具有强的旋转强度,旋转速度都在 $20 m \cdot s^{-1}$ 以上,弓形回波低层后部入流较强,为 $42 \sim 45 m \cdot s^{-1}$ 。

(3)龙卷阶段风暴底层(1 km 高度之下)具有较强的小尺度涡旋特征,小尺度涡旋底层最大径向速度差的大小与龙卷强度密切相关。4 个 EF3 级龙卷涡旋底层 $\Delta V \geq 45 m \cdot s^{-1}$,东明龙卷 ΔV 最强,达到 $54 m \cdot s^{-1}$ 。

(4)龙卷碎片特征存在明显差异。东明、梁山与宁阳 3 个 EF3 级龙卷底层 TDS 范围较大且大致相当,郓城 EF3 和鄄城 EF2 级龙卷碎片范围明显较小。东明龙卷风暴 TDS 高度最高,达 9 km 左右,宁阳龙卷风暴次之,为 5 km 左右,其他 3 个龙卷 TDS 高度较低。东明龙卷风暴上升气流强度最强,可将龙卷碎片带至较高高度。郓城、梁山与鄄城龙卷风暴上升气流强度均强于宁阳龙卷风暴,但 TDS 高度明显低于宁阳龙卷。同等强度龙卷 TDS 范围及上升高度存在显著差异,具体原因有待今后进一步分析。

从预报预警角度来讲,温带气旋形势环境下,地面低压中心东部区域是重点关注区域,关键环境因子是南部低空急流的演变,低空急流的明显增大利于低层 SHR 和 SRH 的迅速增大;雷达监测中,密切关注风暴演变,特别是准线性对流系统及其前侧暖区多单体风暴簇或相对孤立的超级单体,中气旋底部的快速下降或低层局部径向风的迅速增大,是小尺度龙卷涡旋产生的前兆。导致龙卷爆发的温带气旋与未产生龙卷的温带气旋在形势配置、环境物理量、风暴演变等方面有何异同,更需要进一步深入细致分析。

参考文献:

[1] ĆWIK P, McPHERSON R A, BROOKS H E. What is a

- tornado outbreak? : perspectives through time[J]. Bull Amer Meteor Soc, 2021, 102(4): E817-E835.
- [2] PAUTZ M E, National Severe Storms Forecast Center of United States, Weather Bureau of United States, et al. Severe local storm occurrences 1955–1967[M]. Silver Spring, Maryland.: Environmental Science Services Administration, Weather Bureau, 1969.
- [3] GALWAY J G. Some climatological aspects of tornado outbreaks[J]. Mon Wea Rev, 1977, 105(4): 477-484.
- [4] HAGEMeyer B C. Peninsular Florida tornado outbreaks[J]. Wea Forecasting, 1997, 12(3): 399-427.
- [5] TOCHIMOTO E, NIINO H. Structural and environmental characteristics of extratropical cyclones that cause tornado outbreaks in the warm sector: a composite study[J]. Mon Wea Rev, 2016, 144(3): 945-969.
- [6] ANDERSON-FREY A K, RICHARDSON Y P, DEAN A R, et al. Near-storm environments of outbreak and isolated tornadoes[J]. Wea Forecasting, 2018, 33(5): 1397-1412.
- [7] SCHUMACHER P N, BOUSTEAD J M. Mesocyclone evolution associated with varying shear profiles during the 24 June 2003 tornado outbreak[J]. Wea Forecasting, 2011, 26(6): 808-827.
- [8] KNUPP K R, MURPHY T A, COLEMAN T A, et al. Meteorological overview of the devastating 27 April 2011 tornado outbreak[J]. Bull Amer Meteor Soc, 2014, 95(7): 1041-1062.
- [9] CHASTEEN M B, KOCH S E. Multiscale aspects of the 26–27 April 2011 tornado outbreak. Part I: outbreak chronology and environmental evolution[J]. Mon Wea Rev, 2022, 150(2): 309-335.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 黄先香, 炎利军, 白兰强, 等. 广东龙卷时空分布及其母体风暴雷达观测特征[J]. 气象, 2024, 50(7): 804-817.
- [13] 徐芬, 郑媛媛, 孙康远. 江苏龙卷时空分布及风暴形态特征[J]. 气象, 2021, 47(5): 517-528.
- [14] 白兰强, 孟智勇, SUEKI K, 等. 中国热带气旋龙卷的气候统计特征(2006—2018)[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(5): 619-634.
- [15] 刁秀广, 孟宪贵, 张立, 等. 台风“摩羯”与“温比亚”环流中龙卷小尺度涡旋特征及可预警性分析[J]. 海洋气象学报, 2019, 39(3): 19-28.
- [16] 温璐璐, 韩锐, 张吉荣. 中国东部沿海地区两次登陆台风多发龙卷天气雷达特征对比分析[J]. 气象与环境学报, 2022, 38(6): 29-38.
- [17] 朱君鉴, 蔡康龙, 龚佃利, 等. 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]. 海洋气象学报, 2019, 39(4): 21-34.
- [18] 朱义青, 王庆华. 台风“摩羯”螺旋雨带中衍生龙卷的非超级单体特征[J]. 干旱气象, 2020, 38(2): 263-270.
- [19] 谷山青, 王凤娇, 孟宪贵, 等. 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, 2022, 42(4): 48-57.
- [20] 黄秀韶, 朱君鉴, 刁秀广, 等. 山东高唐 EF3 级龙卷 S 波段双偏振雷达探测特征[J]. 气象科技, 2023, 51(3): 397-408.
- [21] 中国气象科学研究院, 国家气象中心, 佛山市龙卷风研究中心. 龙卷风强度等级: GB/T 40243—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [22] DE WAYNE MITCHELL E, VASILOFF S V, STUMPF G J, et al. The national severe storms laboratory tornado detection algorithm[J]. Wea Forecasting, 1998, 13(2): 352-366.
- [23] 郑媛媛, 朱红芳, 方翔, 等. 强龙卷超级单体风暴特征分析与预警研究[J]. 高原气象, 2009, 28(3): 617-625.
- [24] 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, 40(6): 668-677.
- [25] 谷山青, 王凤娇, 魏振东, 等. 黄河三角洲一次非中气旋龙卷观测分析[J]. 海洋气象学报, 2023, 43(3): 59-70.
- [26] RYZHKOV A V, SCHUUR T J, BURGESS D W, et al. Polarimetric tornado detection[J]. J Appl Meteor, 2005, 44(5): 557-570.
- [27] BODINE D J, KUMJIAN M R, PALMER R D, et al. Tornado damage estimation using polarimetric radar[J]. Wea Forecasting, 2013, 28(1): 139-158.
- [28] CONWAY J W, ZRNIĆ D S. A study of embryo production and hail growth using dual-Doppler and multiparameter radars[J]. Mon Wea Rev, 1993, 121(9): 2511-2528.
- [29] KUMJIAN M R, GANSON S M, RYZHKOV A V. Freezing of raindrops in deep convective updrafts: a microphysical and polarimetric model[J]. J Atmos Sci, 2012, 69(12): 3471-3490.
- [30] 刁秀广, 郭飞燕. 2019年8月16日诸城超级单体风暴双偏振参量结构特征分析[J]. 气象学报, 2021, 79(2): 181-195.
- [31] 刁秀广, 李芳, 万夫敬. 两次强冰雹超级单体风暴双偏振特征对比[J]. 应用气象学报, 2022, 33(4): 414-428.
- [32] 刁秀广. 强冰雹和强降水超级单体风暴双偏振特征差异性[J]. 海洋气象学报, 2024, 44(3): 23-36.