

刁秀广.冷涡背景下两次强风暴演变双偏振雷达观测特征[J].海洋气象学报,2024,44(3):1-10.
DIAOXiuguang. Evolution characteristics of two severe storms under the background of cold vortex from dual-polarization radar observations [J]. Journal of Marine Meteorology, 2024, 44(3): 1-10. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20230612002. (in Chinese)

冷涡背景下两次强风暴演变双偏振雷达观测特征

刁秀广^{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 基于济南S波段双偏振多普勒天气雷达探测数据,结合探空和地面实况资料,对2021年6月30日飑线和7月9日超级单体2次强风暴演变双偏振特征进行分析。结果表明:(1)2次强风暴都发生在冷涡背景形势下,触发机制和风暴形态结构有差异,超级单体风暴为阵风锋触发,飑线为弱冷锋触发。(2)新生对流不断激发、合并、发展,导致两次强风暴维持较长时间。(3)超级单体风暴的新生单体触发区域在风暴右侧与阵风锋交汇区域,引导风暴向右传播,风暴右侧是关键区域;飑线左侧前方不断有对流激发,引导风暴快速传播与移动并演变为弓形回波,飑线左侧前方是关键区域。(4)新生单体初始时刻(30~44 dBZ)差分反射率(Z_{DR})柱高度在-10℃高度附近,含有少许中等大小雨滴,随着单体迅速发展, Z_{DR} 柱可伸展到-20℃层甚至更高的高度,会出现少许大的雨滴或小的湿冰粒子。(5)合并发展主要表现为 Z_{DR} 柱的合并,即上升气流区的合并,合并后 Z_{DR} 柱宽度或高度增加, Z_{DR} 和 K_{DP} 值增大,强上升气流区内液态粒子大小和浓度会明显增大,可出现直径5 mm以上的特大雨滴,或者等效于特大雨滴湿冰粒子。

关键词 对流激发;单体合并;双偏振特征;微物理特征

中图分类号: P412.25 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2024)03-0000-00

DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20230612002

Evolution characteristics of two severe storms under the background of cold vortex from dual-polarization radar observations

DIAOXiuguang^{1,2}

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

Abstract Based on the S-band dual-polarization Doppler weather radar data in Jinan, sounding data and surface meteorological observations, the dual-polarization characteristics of the evolution of two severe storms, namely the squall line on 30 June and the supercell on 9 July 2021, are analyzed. The results are outlined below. (1) The two severe storms both occur in the background situation of cold vortex, and their trigger mechanisms and morphological structures are different. The supercell storm is triggered by the gust front on 9 July, while the strong squall line is triggered by the weak cold front on 30 June. (2) The continuous stimulating, merging and developing of new convective cells result in the two severe storms lasting for a long time. (3) The stimulation of new cells in the intersection area of the gust front and the

收稿日期:2023-06-12;修回日期:2023-08-03

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2022MD035, ZR2022MD088, ZR2023MD001);山东省气象局科研项目(2019sdqzx01)

第一作者简介:刁秀广,男,研究员级高级工程师,主要从事天气雷达应用研究,radardxg@126.com。

right side of supercell causes the storm to propagate rightward, so the right side of the supercell storm is the key area. The continuous stimulation of convective cells ahead of the east side of the strong squall line guides the storm to rapidly propagate, move forward, and evolve into bow echoes, so the key area is the front of the squall line's left side. (4) At the initial moment of the new cells (30–44 dBZ), the differential reflectivity (Z_{DR}) columns can reach the height of $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, containing a few medium sized raindrops. With the rapid development of new cells, Z_{DR} columns can extend to the height of $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ or even higher, containing a small amount of large liquid raindrops or small melted ice particles. (5) The main characteristic of the cell merging is the merging of Z_{DR} columns, that is, the merging of the updraft zones. After merging, the width or height of Z_{DR} columns and the values of Z_{DR} and K_{DP} increase, and the size and concentration of liquid particles in the strong updraft zone grow larger obviously. There are extra-large raindrops with the diameter exceeding 5 mm or melted ice particles equivalent to extra-large raindrops inside Z_{DR} columns.

Keywords stimulating of convection; merging of cell; dual-polarization characteristics; microphysical characteristics

引言

天气雷达观测与分析表明,单体合并是超级单体和飏线等强风暴演变发展的主要特征之一^[1-5]。超级单体风暴成熟阶段具有有界弱回波区、中气旋、低层入流缺口等特征^[6-9],飏线旺盛阶段具有强的前侧倾斜上升气流、中层径向辐合特征,部分具有后部入流急流的飏线会出现明显的弓形结构等^[10-14]。近年来,随着双偏振多普勒天气雷达的应用,对超级单体和飏线等强风暴的偏振特征和微物理特征有了进一步认识。超级单体风暴强上升气流区周围不仅具有差分反射率(Z_{DR})柱、差分相移率(K_{DP})柱,还分布有相关系数(C_C)环、 Z_{DR} 环等,低层入流一侧还具有 Z_{DR} 弧等偏振特征^[15-20],飏线前沿具有较高的水平极化反射率因子(Z_H)柱、 Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱等特征^[21-23]。这些双偏振参量特征,对应不同的动力和微物理形成机制, Z_{DR} 柱由液态雨滴和(或)湿冰粒子组成,与强上升气流区相对应, Z_{DR} 柱的高度与上升气流存在正相关关系^[24-28]。低层垂直风切变筛选作用,导致风暴低层上升气流一侧出现大的液态粒子或小的湿冰粒子即 Z_{DR} 弧^[29-31]。 K_{DP} 柱由较高浓度的液态雨滴和(或)湿冰粒子组成,可作为深厚对流上升气流特性的观测量度^[25,32-34]。郭飞燕等^[23]对山东一次飏线的双偏振特征分析表明,前侧新生发展中的单体以少许偏大的液态粒子为主,与主体回波合并发展, Z_{DR} 柱高度增高、宽度增大, K_{DP} 柱高度明显增高,上升气流强度明显发展。王俊等^[35]对一次拖曳型飏线的滴谱特征分析表明,飏线

发展阶段雨滴谱具有大陆性对流云降水的特征,减弱阶段雨滴谱具有典型的海洋性对流云降水的特征,飏线演变过程中前期冷云过程有重要影响,而后期暖云过程起主导作用。黄秀韶等^[36]对强降水风暴演变特征分析表明,新生单体与主体回波合并后上升气流明显加强,风暴顶高、强回波区顶高和 K_{DP} 柱明显增高,特别是在风暴底层 K_{DP} 值明显增大。

国内外对超级单体和飏线等强风暴成熟阶段双偏振典型特征分析个例较多,但其演变过程的双偏振特征分析个例较少。2021年6月30日下午和7月9日下午山东出现两次明显的强对流天气,前者影响系统为飏线,以灾害性大风为主,后者为相对孤立、移动缓慢的超级单体风暴,以强冰雹为主,最大冰雹直径为68 mm^[28]。2次强对流均出现在冷涡形势背景下。对流单体微物理过程及风场结构各有什么演变特征,有没有明显差异,开展相关研究与分析,对揭示超级单体和飏线等强风暴发生、发展过程中其微物理过程及风场结构变化特征,及强对流天气临近预警具有重要意义。利用济南S波段双偏振多普勒天气雷达探测资料,结合天气实况,对2次强对流过程风暴演变双偏振参量、微物理特征及流场结构演变进行分析,期望对该类强对流风暴外推与临近预警有一定帮助。

1 资料与方法

(1)常规观测资料主要是08时探空数据,分析对应天气形势及相关环境物理量。(2)非常规观测资料主要是地面区域气象观测站观测数据和济南

SA 双偏振雷达探测资料,分析天气实况变化及对流风暴水平和垂直偏振结构特征。雷达数据径向分辨率为 250 m,体扫间隔 6 min。双偏振参量主要有水平极化反射率因子(Z_H)、差分反射率(Z_{DR})、差分相移率(K_{DP})和相关系数(C_C)等。 Z_{DR} 柱为环境 0 °C 层之上 $Z_{DR} \geq 1$ dB 区域, K_{DP} 柱为环境 0 °C 层之上 $K_{DP} \geq 1$ ($^{\circ}$)·km⁻¹区域。6月30日强风暴分析区域(德州临邑至禹城一带)距离雷达约 50 km,7月9日强风暴分析区域(济南章丘)距离雷达约 70 km。

液态粒子大小分为:小粒子($d \leq 1$ mm)、中等粒子($1 \text{ mm} < d \leq 3$ mm)、大粒子($3 \text{ mm} < d \leq 5$ mm)和特大粒子($d > 5$ mm)。依据 Straka 等^[37]研究成果,参考美国预警决策培训处双极化雷达操作课程^[38],1 mm 雨滴对应 Z_{DR} 约为 1.1 dB,3 mm 雨滴对应 Z_{DR} 约为 3.4 dB,5 mm 雨滴对应 Z_{DR} 约为 5.5 dB。因此小粒子的 Z_{DR} 基本小于 1.0 dB,中等粒子的 Z_{DR} 为 1.0~3.4 dB,大粒子的 Z_{DR} 为 3.5~5.4 dB,特大粒子的 $Z_{DR} \geq 5.5$ dB。

2 天气实况与天气背景

2.1 天气实况

2021年7月9日14:30—15:30,山东济南章丘出现强对流天气,冰雹持续时间约1h,最大冰雹直径为68 mm,同时伴有7~9级阵风和短时强降水天气,极大风速为 $23.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (15:16 出现在章丘国家级地面气象观测站,以下简称“国家站”),最大降水量为 52.6 mm (区域气象观测站,以下简称“区域站”)。此次强对流为移动较慢的超级单体风暴所导致。

2021年6月30日下午至夜间,山东大部地区(半岛除外)出现雷暴大风天气,局地伴有短时强降水和冰雹。13:00—21:00 有 57 个国家站和 460 个区域站出现 $17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上阵风天气,出现 10 级以上大风的站点共 83 个(国家站 9 个),最大风速为 $39.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,15:19 出现在章丘国家站。147 个站点(国家站 13 个)出现 20.0 mm 以上降水。分析区域(德州临邑至禹城一带)附近最大瞬时风速为 $25.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,14:00 出现在齐河县安头区域站。

2.2 天气背景与环境物理量

7月9日08:00,500 hPa 冷涡中心位于 123.2°E 、 45.9°N 附近,山东位于 500 hPa 和 700 hPa 高空槽后

的西北气流区,850 hPa 在山东西部有明显的暖脊,地面上位于低压前部,以东南风为主。6月30日08:00,500 hPa 冷涡中心位于 109.4°E 、 48.2°N 附近,山东上空 850 hPa 之上为槽后西北气流,地面辐合线(弱冷锋)位于河北沧州至赵县一带。2次强对流均受冷涡影响,强对流区 700 hPa 之上均为西北气流。

7月9日08:00 低层风向随高度顺转,地面为东南风,925 hPa 转为西南风,700 hPa 以上为西北风。6月30日08:00 低层风向随高度顺转,由东南风转为西南风,850 hPa 以上转为西北风。2次过程低层风向垂直变化基本一致,风向顺转;均存在明显的干层,整层比湿积分基本相当;具有大的 600 hPa 为起点的下沉对流有效位能(downdraft convective available potential energy, DCAPE) (简记为“DCAPE₆₀₀”)和大的 850 hPa 与 500 hPa 温差(Δt),具有强的 0~6 km 垂直风切变(简记为“SHR₆”)、0~3 km 垂直风切变(简记为“SHR₃”)和较小的抬升指数(lifting index, LI),订正后的对流有效位能(convective available potential energy, CAPE)较强,在 $4000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上(表 1)。

2次过程主要差别表现为:6月30日干层强度(400 hPa 与 700 hPa 温度露点差平均值)和 500 hPa 风速更大。章丘站干层强度达到 39°C ,中层空气非常干燥,更利于降水蒸发效应与地面冷池的产生,从而诱发更强的下沉气流及风暴触发与风暴快速移动。6月30日章丘站 500 hPa 风速为 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,引导气流更强,风暴平移速度更快。7月9日 CAPE 订正数据是订正到 14:00 章丘站,气温与露点温度分别为 33°C 和 23°C ;6月30日 CAPE 订正数据是订正到 12:00 临邑—高唐一带,气温与露点温度分别为 33°C 和 23°C 。

3 2021年7月9日超级单体风暴演变特征

章丘超级单体风暴 13:50 生成于章丘西北部,发展迅速,2个体扫后强度达到 60 dBZ,之后一直维持在 60 dBZ 以上。地面强冰雹 14:30 开始出现,之后断断续续,15:30 基本结束。17:23 之后风暴开始逐渐减弱,18:04 后减弱消散,风暴持续时间为 4 h 14 min 左右。风暴强盛阶段基本向南移动,移动速度约为 $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,移动缓慢。下面分 2 个阶段(发展阶段和旺盛阶段)进行分析。

3.1 发展阶段

图1是13:50—14:13连续5个体扫组合反射率(图1a)和不同高度相对风暴径向速度(图1b)与差分反射率 Z_{DR} (图1c)演变情况。相对风暴径向速度

选取各层辐合强度或旋转强度较大的层次,蓝色圆圈为气旋性环流区,白色圆圈为中气旋,蓝色方框区为径向辐合区,相对风暴径向速度与 Z_{DR} 图上辐合上升区对应的高度分别是4.0、4.2、4.3、5.6和5.7 km。

表1 章丘国家站环境物理量

Table 1 Environmental physical parameters at Zhangqiunational meteorological station

日期	时次	K/°C	$\Delta t/°C$	LI/°C	CAPE /(J·kg ⁻¹)	DCAPE ₆₀₀ /(J·kg ⁻¹)	SHR ₆ /(m·s ⁻¹)	SHR ₃ /(m·s ⁻¹)	500 hPa 风速 /(m·s ⁻¹)	风向 /(°)	干层强度 /°C	整层比湿积分 /(g·kg ⁻¹)
20210709	08	30	29	-6.3	2 330(4 550*)	1171	20	17	10.5	298	13	3 206
20210630	08	29	27	-5.5	1 751(4 374*)	1155	23	14	15.0	283	39	3319

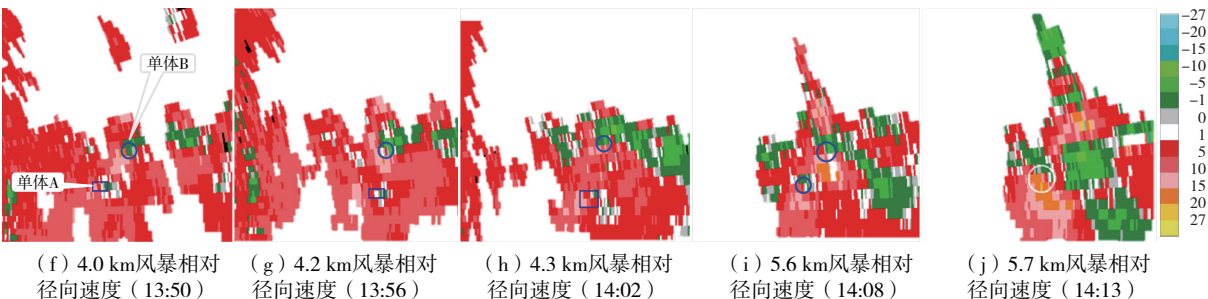
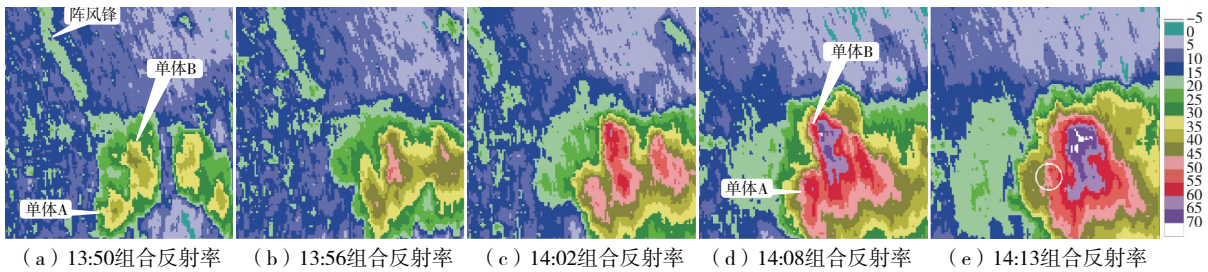
注:“*”表示订正后的CAPE数据。

13:50,章丘西北部有多个对流单体新生,由前期雷暴产生的阵风锋触发(图1a),其中西侧两个单体A和B各自发展,而单体B发展较快,14:13两者合并,且出现中气旋,形成超级单体,14:30开始出现强冰雹。

由相对风暴径向速度可以看出,单体A在13:50—14:02表现为明显径向辐合特征,14:08转变为气旋性辐合流场,单体B一直对应气旋性辐合流场;两单体合并后,风暴强度发展,5.6 km高度上单体B气旋性辐合迅速减弱,由气旋性旋转转变为反气旋性旋转(图1b,14:08—14:13),而单体A的气旋性辐合迅速加强,达到中气旋标准并持续,14:08相对风暴径向速度差约15 m·s⁻¹,14:13相对风暴径向速度差达到26 m·s⁻¹(图1b)。辐合上升区周围 Z_{DR} 存在1 dB以上的大值区(图1c),辐合上升气

流区存在直径1 mm以上的液态粒子或小的湿冰粒子。

进一步分析(表2)表明,单体合并之前单体A弱于单体B,单体A强度、强中心高度、顶高、 Z_{DR} 柱、 K_{DP} 柱和低层 K_{DP} 都小于单体B,单体B内部上升气流强度强于单体A。单体A在前3个体扫不存在 K_{DP} 柱,单体B在前2个体扫没有 K_{DP} 柱, Z_{DR} 小于3.5 dB, Z_{DR} 柱内有稀疏的中等粒子。随着风暴发展,风暴低层(基本在0.5°和1.5°仰角) K_{DP} 逐渐增大,降水强度也随之增大。风暴强度发展到50 dBZ以上时, Z_{DR} 柱高度明显增高,上升气流强度进一步增强,上升气流内液态水含量增大,个别距离库CC较小,大的液态粒子与冰相粒子共存。单体合并后 Z_{DR} 柱高度达到11 km,上升气流强度进一步加强, Z_{DR} 达到6.1 dB,有特大粒子或等效的湿冰粒子。



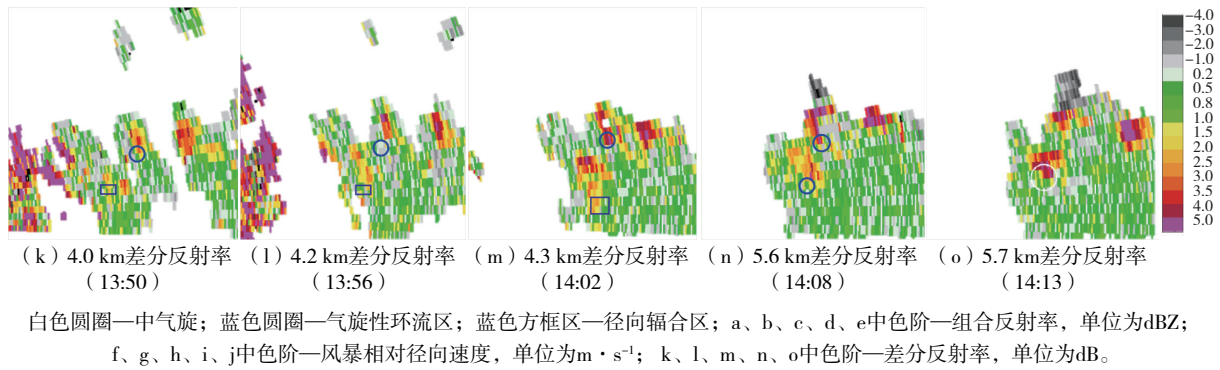


图1 2021年7月9日13:50—14:13对流风暴演变特征

Fig.1 Evolution characteristics of convective storm from 13:50 BJT to 14:13 BJT 9 July 2021

表2 对流单体偏振参数

Table 2 Dual-polarization parameters of convective cells

时次	单体 A							单体 B						
	强度 /dBZ	强中心高度 /km	顶高 /km	Z_{DR} 柱 /km	最大 Z_{DR} /dB	K_{DP} 柱 /km	低层 K_{DP} / $[(^{\circ}) \cdot km^{-1}]$	强度 /dBZ	强中心高度 /km	顶高 /km	Z_{DR} 柱 /km	最大 Z_{DR} /dB	K_{DP} 柱 /km	低层 K_{DP} / $[(^{\circ}) \cdot km^{-1}]$
13:50	41	6.9	8.2	6.2	2.1	无	0.1	42	7.5	11.7	7.1	2.6	无	0.3
13:56	45	3.0	8.7	6.5	2.0	无	1.1	51	6.6	12.1	9.6	2.5	无	1.5
14:02	50	5.3	10.2	8.2	3.3	无	1.7	62	5.7	13.0	10.8	4.6	5.7	3.1
14:08	61	4.3	15.4	9.4	4.8	5.6	2.2	71	8.0	15.1	10.8	5.6	8.2	3.5
14:13 (合并后)	72	4.7	15	11.4	6.1	7.6	4.1							

3.2 旺盛阶段

风暴旺盛阶段经过多次合并、发展,图2是14:42—14:59和15:28—15:45两次合并演变。14:42,超级单体风暴西侧与阵风锋交接区域出现新的对流单体C,阵风锋为主要触发机制。之后单体C发展,14:59出现合并,合并之后出现2个中气旋,同时西侧又出现新的单体D(后续自行消散)。新生单体发展区上升气流迅速加强发展为中气旋,原中气旋(东侧)在14:59之后迅速减弱,强上升气流区向新生区域“传播”。合并之前,原超级单体强度是减弱趋势,合并之后风暴西侧得到发展并持续,15:05—15:17最大反射率因子在65 dBZ以上,同时风暴移动出现明显偏西分量。

15:28—15:45阶段合并特征与14:42—14:59阶段基本类似,风暴西侧与阵风锋交汇区域出现新生对流单体E并发展,与原超级单体合并发展,强上升气流区向新生单体区域“过度”。

垂直双偏振结构仅分析14:42—14:59的演变特征。图3是14:42—14:59连续4个体扫 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 和 CC 垂直剖面。14:59剖面沿 91° 径向,其他3个体扫剖面都是沿 90° 径向(图2中白色直线)。蓝色实线、虚线依次是45 dBZ和55 dBZ反射

率因子等值线,白色虚线是25 dBZ反射率因子等值线,红色、白色和蓝色水平直线分别是环境 $0^{\circ}C$ (4.3 km)、 $-10^{\circ}C$ (6.0 km)和 $-20^{\circ}C$ (7.4 km)层高度。

14:42—14:54,新生单体C发展迅速(图3a—c),强度由30~33 dBZ发展到55~57 dBZ。 Z_{DR} 柱高度及宽度明显增加,14:42—14:48(图3e、f)由 $-10^{\circ}C$ 层迅速增高到 $-47^{\circ}C$ 层高度(11 km左右),14:54(图3g)达到12 km,上升气流强度发展迅速。 Z_{DR} 柱内液态粒子随着增大,14:42(图3e、i、m) Z_{DR} 在1.0~2.1 dB, K_{DP} 较小, CC 较大,含有稀疏的中等大小液态粒子;14:48(图3f、j、n) Z_{DR} 在1.0~3.3 dB, K_{DP} 较小, CC 有所减小,含有稀疏的中等大小的液态粒子或小的湿冰粒子;14:54(图3g、k、o) Z_{DR} 在1.0~4.5 dB, K_{DP} 有所增大 $[0.5 \sim 0.9 (^{\circ}) \cdot km^{-1}]$, CC 明显减小(最小为0.85),液态粒子浓度有所增大,有大的液态粒子及冰相粒子出现。新生单体发展过程中, $0^{\circ}C$ 层高度之上、 Z_{DR} 柱之外的区域表现为霰、冰晶等冰相粒子。

14:42—14:54,风暴主体一直维持较高的 Z_{DR} 柱(11~12 km左右),同时50 dBZ左右的强回波也维持在较高高度(13 km左右),表明风暴主体上升气流强劲,发展旺盛。

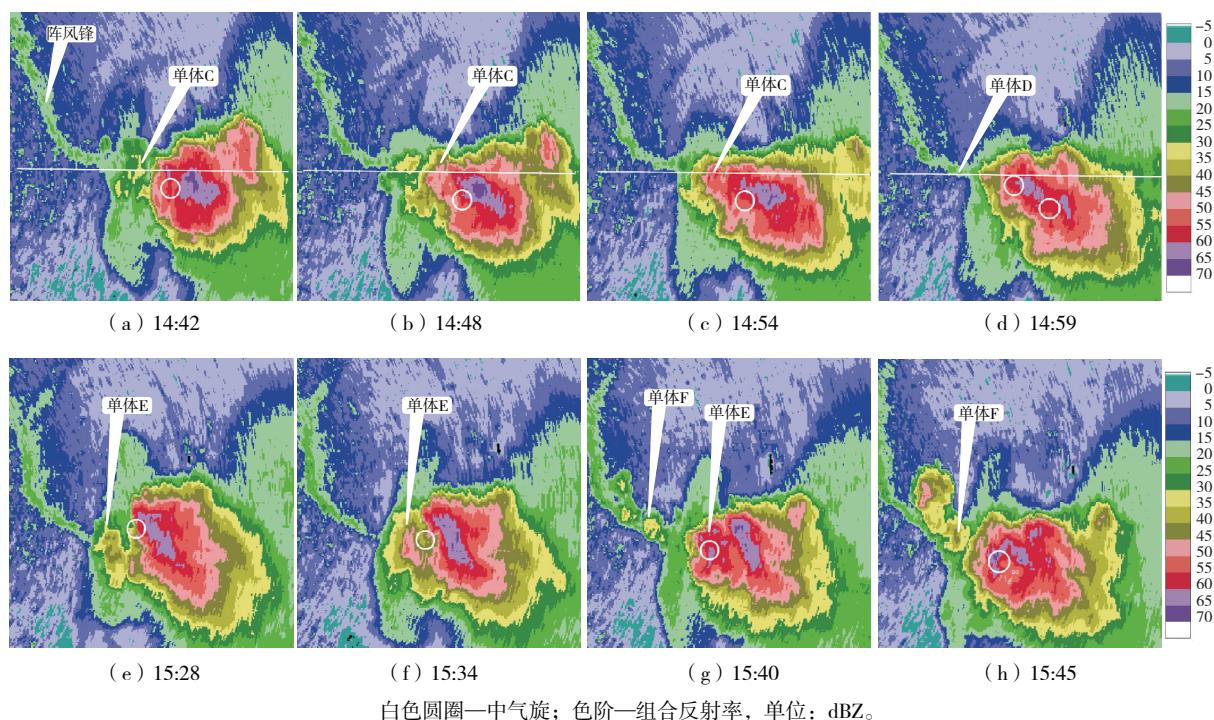


图2 2021年7月9日济南雷达组合反射率演变特征

Fig.2 Evolution characteristics of composite reflectivity from Jinan radar on 9 July 2021

14:59(图3d),单体C与超级单体主回波产生合并,55 dBZ以上回波区明显发展,最大为62 dBZ(略高于 -20°C 层), Z_{DR} 柱基本合为一体(Z_{DR} 柱最大为5.2 dB), K_{DP} 柱明显增高,表明强上升气流区出现合并,风暴强度得到明显发展。 K_{DP} 柱高度和宽度增大,风暴内液态含水量迅速增加,为强降水的出现提供丰富的“粒子源”,同时降水重力拖曳利于下击暴流的激发。

4 2021年6月30日飏线特征

4.1 飏线演变

30日11:30前后,河北衡水西部有对流产生,之后向东南方向移动发展,12:30前后影响山东德州武城一带,风暴触发、移动与地面辐合线(弱冷锋)对应较好。影响山东后,东部不断有对流产生、发展,逐渐演变为松散的带状回波(图4a)。13:11—13:29(图4a—d),东部区域经过合并、发展,逐渐连为一体,发展为排列紧密的强回波带。13:11,带状回波东部前侧有新生对流单体A和B产生,由地面弱冷锋(图4i)触发;13:17,单体A发展并与东部强单体开始合并,单体B发展,同时出现单体C;13:23,单体A合并后迅速发展,单体C与

其西侧强单体合并后迅速发展,单体B自身发展;13:29,单体B两侧开始合并,同时前侧又有新生单体触发(单体D和E)。之后,通过合并、发展,东部区域发展更加旺盛,13:40(图4e)强度达到65~70 dBZ,地面有强冰雹出现,同时底层径向速度出现速度模糊,地面开始出现大风天气,13:40—14:00(图4h)临邑南部至禹城一带有9站出现 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上大风,最大为 $25.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,同时出现气温骤降,10 min最大降温 10.5°C ,地面冷池强度较强。强的地面冷池流出对雷暴新生与演变,及风暴快速移动具有重要作用^[39-40]。

14:15前后,飏线左侧前端又出现明显的新生单体群(图4f),由地面弱冷锋(图4j)触发,之后快速发展并与主体回波合并,演变成弓形回波(图4g)。15:00—16:00影响区域有13个自动气象站产生10级以上大风天气,其中章丘国家站最大,为 $39.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (15:19出现)。

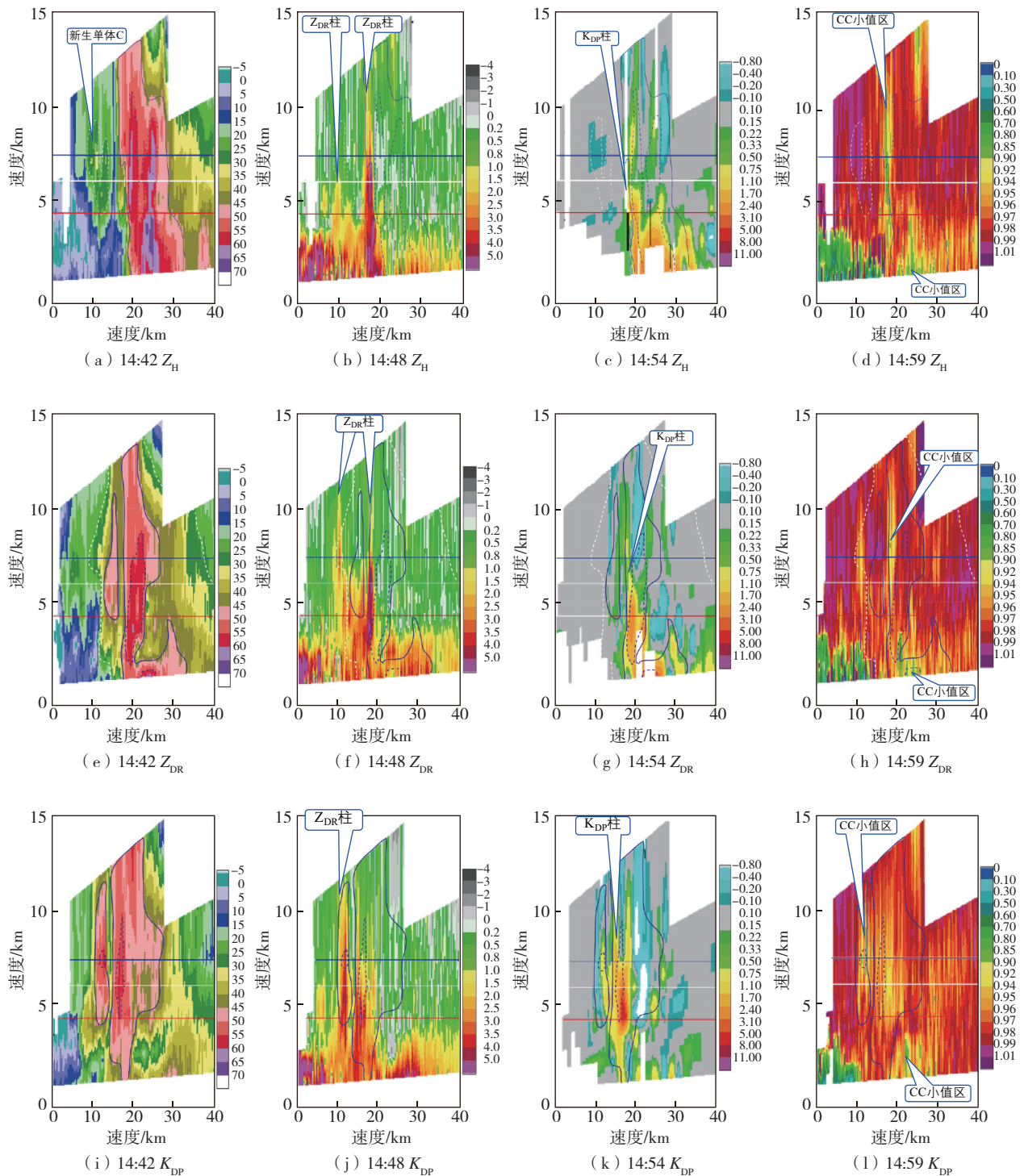
4.2 垂直剖面特征

仅对图4中新生单体A、B、C的发展与合并进行分析。图5是13:11—13:29连续4个体扫 Z_{H} 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 和CC垂直剖面。剖面方向见图4中白色直线,13:11和13:17均通过新生单体,位置没有变

化,13:11 和 13:17 均基本为东西方向。蓝色虚线、实线依次是 30 dBZ 和 50 dBZ 反射率因子等值线,红色、白色和蓝色水平直线分别是环境 0 °C (4.2 km)、-10 °C (6.1 km) 和 -20 °C (7.4 km) 层高度。

单体 A 发展与合并:13:11 最大强度 45.5 dBZ,对应 Z_{DR} 柱高度在 -20 °C 层, Z_{DR} 大值为 3.2 dB, K_{DP} 较小,CC 较大,有稀疏的中等粒子;13:17 与其东侧

强单体出现合并, Z_{DR} 柱合并,高度有所增高, Z_{DR} 大值为 4.8 dB, K_{DP} 有所增大,液态粒子浓度有所增大,出现少量大粒子;13:23 合并后发展,最大强度超过 60 dBZ, Z_{DR} 柱维持在 -20 °C 层高度, Z_{DR} 柱内最大 Z_{DR} 为 5.5 dB, K_{DP} 柱在 -10 °C 层高度,上升气流内液态粒子浓度明显增大同时出现直径 5 mm 以上特大粒子或等效的湿冰粒子。



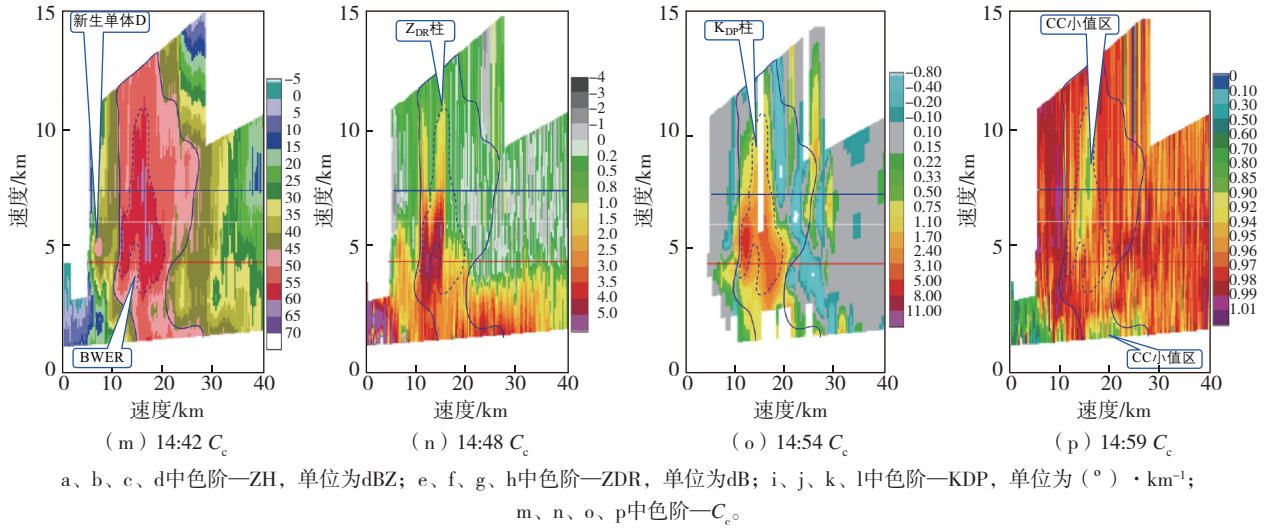


图3 2021年7月9日偏振量 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 和 C_c 垂直剖面
Fig.3 Vertical cross section of Z_H , Z_{DR} , K_{DP} and C_c from Jinan radar on 9 July 2021

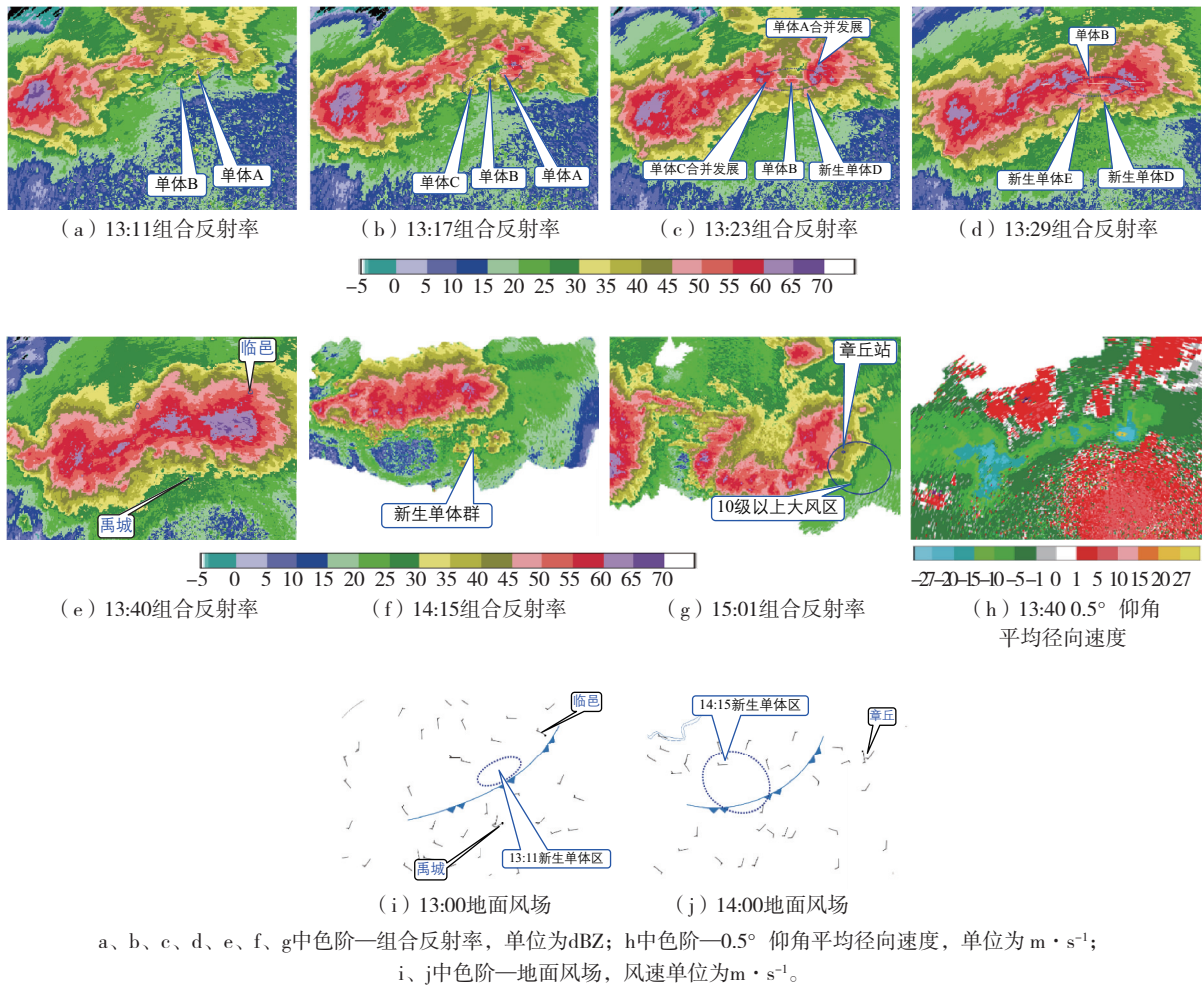
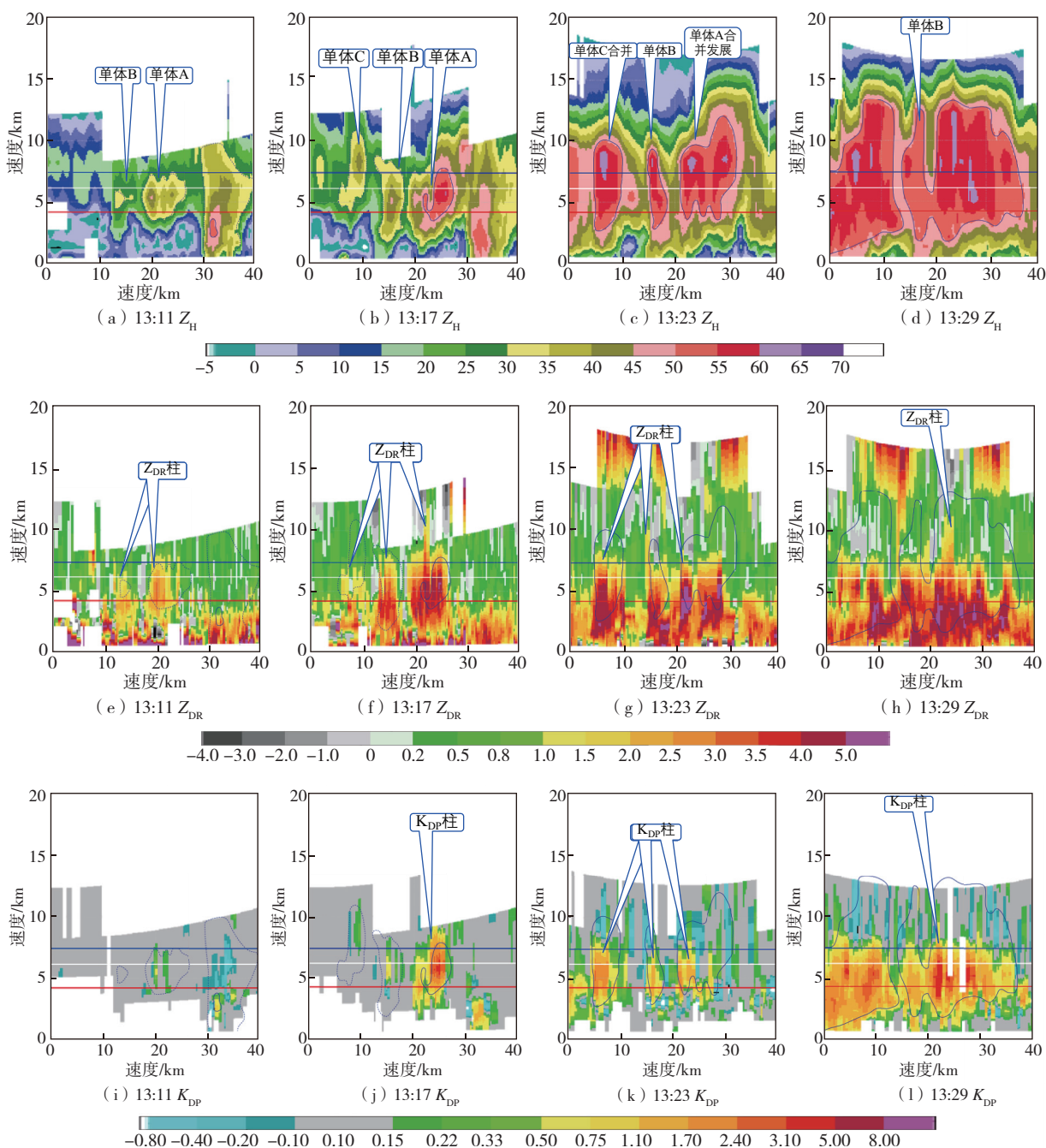


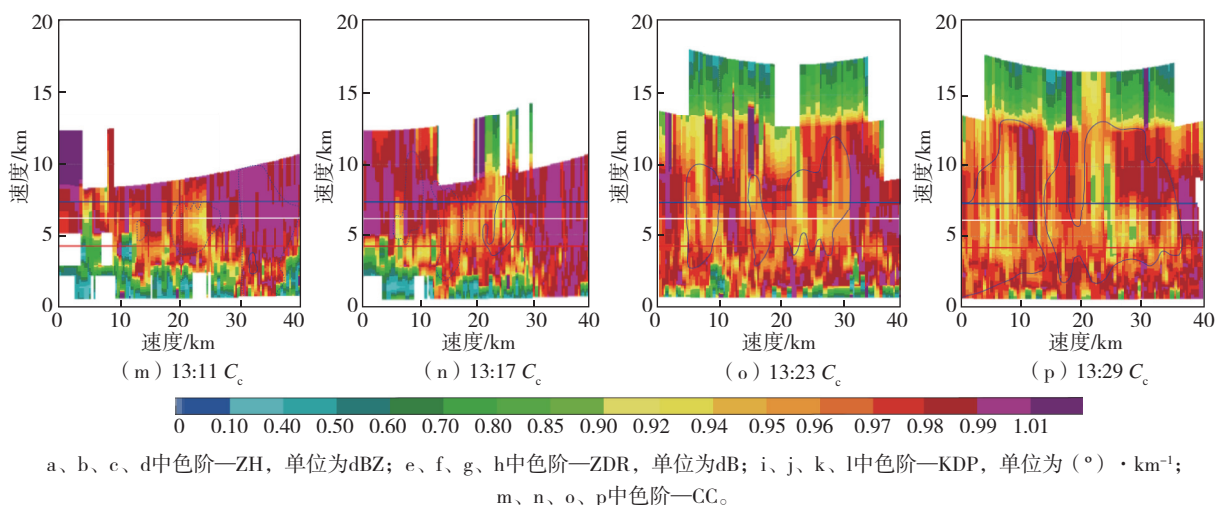
图4 2021年6月30日济南雷达组合反射率因子、0.5°仰角平均径向速度和地面风场
Fig.4 Composite reflectivity and mean radial velocity at 0.5° elevation from Jinan radar, and surface wind on 30 June 2021

单体 C 发展与合并: 13:17 初始时刻最大强度为 43.5 dBZ, Z_{DR} 柱在 $-20 \sim -10$ °C 层之间, $Z_{DR} < 2$ dB, K_{DP} 较小, CC 较大, 有稀疏的中等大小液态粒子; 13:23 与其西侧单体合并, Z_{DR} 柱增高到 -20 °C 层, $Z_{DR} < 3$ dB, K_{DP} 稍有增大, 上升气流强度进一步增强, 内部液态粒子浓度稍有增大。

单体 B 发展与合并: 13:11 初始时刻最大强度为 33 dBZ, Z_{DR} 柱高度在 -10 °C 层, $Z_{DR} < 2$ dB, K_{DP} 较小, CC 较大, 上升气流区出现稀疏的中等大小粒子; 13:17—13:23 强度明显发展, Z_{DR} 柱上升到 -20 °C

层高度以上, Z_{DR} 值显增大(最大为 4.1 dB), K_{DP} 有所增大[$0.5 \sim 1.2$ ($^{\circ}$) \cdot km $^{-1}$], CC 较大, 上升气流强度加强, 内部液态粒子浓度有所增大, 且有大粒子出现; 13:29, 东西两侧通过单体 B 实现合并, 强度又进一步增强, Z_{DR} 柱基本合为一体, Z_{DR} 柱基本在 -20 °C 层高度, 局部达到 10.7 km (-45 °C 层), 东西向强上升气流区长度较长且深厚; 强上升气流区内 K_{DP} 最大为 4.6 ($^{\circ}$) \cdot km $^{-1}$, Z_{DR} 最大为 5.8 dB, 液态粒子浓度明显增大, 并出现特大粒子或等效的湿冰粒子, 少数距离库 CC 小于 0.92, 有冰雹粒子干扰。



图5 2021年6月30日济南雷达 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 和 C_C 垂直剖面Fig.5 Vertical cross section of Z_H , Z_{DR} , K_{DP} and C_C from Jinan radar on 30 June 2021

5 结论

利用S波段双偏振多普勒天气雷达探测资料,分析了2021年7月9日和2021年6月30日2次强对流风暴演变特征,同时分析了双偏振特征及云微物理特征的异同性,得出如下结论:

(1)2次强对流风暴都发生在冷涡背景形势下,环境参数基本相当,具有大的深层垂直风切变和强的对流有效位能,大的850 hPa与500 hPa温差,主要差别是6月30日环境湿度更小,500 hPa引导气流较强。两次强对流风暴触发机制有差异,7月9日超级单体风暴为阵风锋触发,6月30日强风暴为地面中尺度辐合线-弱冷锋触发。

(2)2次强风暴生命史较长,共同特征是新生对流不断激发、发展、合并,导致强风暴维持时间较长。7月9日超级单体风暴触发区域或强上升气流区在风暴西侧与阵风锋交汇区域,即风暴右侧(风暴来向为参考)是关键区域,而6月30日飚线左侧前方不断有对流激发,引导风暴快速传播与移动并演变为弓形回波,即风暴左侧前方(风暴来向为参考)是关键区域。

(3)2次强风暴移动速度差别明显。7月9日超级单体风暴移动缓慢,成熟阶段,其西侧与阵风锋交汇区域不断激发新对流单体,向西传播明显,500 hPa引导气流偏弱,平流速度也小,从而导致风暴缓慢南移。6月30日飚线移动较快,风暴前侧区域不断激发新生对流单体,导致风暴前向传播,同时500

hPa引导气流较强,平流速度大,从而导致风暴快速南移。

(4)新生单体双偏振特征存在共性:都存在明显的 Z_{DR} 柱。初始时刻(30~44 dBZ) Z_{DR} 柱高度在-10℃高度附近,而 K_{DP} 较小、 C_C 较大,含有稀疏的中等大小雨滴。随着单体迅速发展, Z_{DR} 柱可伸展到-20℃层甚至更高高度, Z_{DR} 柱内 Z_{DR} 大值可达到3.0~5.0 dB之间,液态粒子直径在3~5 mm之间或者有等效效果的湿冰粒子。对流单体初始时刻具有较强的上升气流,之后上升气流强度迅速加强,在环境-20℃层甚至更高高度上粒子可以以液态或湿冰粒子形式存在。

(5)单体合并发展典型特征主要表现为 Z_{DR} 柱的合并,即上升气流区的合并。合并后强度增强, Z_{DR} 柱宽度或高度增加, Z_{DR} 值增大,同时 K_{DP} 也增大,强上升气流区内液态粒子大小和浓度会明显增大。 Z_{DR} 柱内 Z_{DR} 大值可达5.5 dB以上,存在直径5 mm以上特大雨滴,或者等效于5 mm以上雨滴的湿冰粒子。上升气流区的更迭,导致风暴不断更新与传播,维持风暴发展与持续。

参考文献:

- [1] WESTCOTT N E. Merging of convective clouds: cloud initiation, bridging, and subsequent growth [J]. Mon Wea Rev, 1994, 122(5): 780-790.
- [2] LEE B D, JEWETT B F, WILHELMSON R B. The 19 April 1996 Illinois tornado outbreak. Part II: cell

- mergers and associated tornado incidence [J]. *Wea Forecasting*, 2006, 21(4): 449-464.
- [3] DIAO X G, ZHU J J, LIU Z H. Analysis of three supercell storms with Doppler weather radar data [J]. *Acta Meteor Sinica*, 2011, 25(2): 211-223.
- [4] 侯淑梅, 闵锦忠, 刁秀广, 等. 飊线发展过程中回波合并的特征分析[J]. *大气科学学报*, 2018, 41(3): 367-376.
- [5] 刁秀广, 刘畅, 万明波, 等. 山东3次大暴雨过程云街雷达回波特征及其作用分析[J]. *气象*, 2020, 46(2): 179-188.
- [6] MOLLER A R, DOSWELL C A III, FOSTER M P, et al. The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures [J]. *Wea Forecasting*, 1994, 9(3): 327-347.
- [7] 俞小鼎. 强对流天气的多普勒天气雷达探测和预警[J]. *气象科技进展*, 2011, 1(3): 31-41.
- [8] 张婷婷, 王培涛, 王凤娇. 一次长寿命超级单体风暴雷达回波特征分析[J]. *海洋气象学报*, 2017, 37(1): 98-103.
- [9] 王一童, 王秀明, 俞小鼎. 产生致灾大风的超级单体回波特征[J]. *应用气象学报*, 2022, 33(2): 180-191.
- [10] GRADY R L, VERLINDE J. Triple-Doppler analysis of a discretely propagating, long-lived, high plains squall line [J]. *J Atmos Sci*, 1997, 54(23): 2729-2748.
- [11] 刁秀广, 孟宪贵, 万明波, 等. 源于飊线前期和强降雨带后期的弓形回波雷达产品特征及预警[J]. *高原气象*, 2015, 34(5): 1486-1494.
- [12] 王俊. 线状中尺度对流系统的多普勒雷达统计特征分析[J]. *海洋气象学报*, 2017, 37(4): 25-33.
- [13] 龚佃利, 庞华基, 王俊, 等. 2006年4月28日山东强飊线过程中尺度结构和动力机制分析[J]. *海洋气象学报*, 2019, 39(3): 64-73.
- [14] 万夫敬, 孙继松, 孙敏, 等. 山东半岛海风锋在一次飊线系统演变过程中的作用[J]. *气象学报*, 2021, 79(5): 717-731.
- [15] KUMJIAN M R, RYZHKOV A V. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 2008, 47(7): 1940-1961.
- [16] KUMJIAN M R. Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part II: warm- and cold-season applications [J]. *J Operational Meteor*, 2013, 1(20): 243-264.
- [17] 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.
- [18] 刁秀广, 杨传凤, 张骞, 等. 二次长寿命超级单体风暴参数与 Z_{DR} 柱演变特征分析[J]. *高原气象*, 2021, 40(3): 580-589.
- [19] 龚佃利, 朱君鉴, 王俊, 等. 2020年6月1日山东强雹暴过程双偏振雷达观测分析[J]. *海洋气象学报*, 2021, 41(3): 40-51.
- [20] 黄秀韶, 李芳, 刁秀广. 一次强降水超级单体风暴双偏振参量特征分析[J]. *气象科技*, 2022, 50(6): 830-841.
- [21] 刘黎平, 牟容, 许小永, 等. 一次飊线过程的动力和微物理结构及滴谱变化对降水估测的影响研究[J]. *气象学报*, 2007, 65(4): 601-611.
- [22] WANG H, KONG F Y, WU N G, et al. An investigation into microphysical structure of a squall line in South China observed with a polarimetric radar and a disdrometer [J]. *Atmos Res*, 2019, 226: 171-180.
- [23] 郭飞燕, 刁秀广, 马艳, 等. 山东一次飊线双偏振结构与地面降水滴谱特征分析[J]. *气象学报*, 2023, 81(2): 328-339.
- [24] CONWAY J W, ZRNI 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.
- [25] HUBBERT J, BRINGI V N, CAREY L D, et al. CSU-CHILL polarimetric radar measurements from a severe hail storm in eastern Colorado [J]. *J Appl Meteor*, 1998, 37(8): 749-775.
- [26] KUMJIAN M R, RYZHKOV A V, MELNIKOV V M, et al. Rapid-scan super-resolution observations of a cyclic supercell with a dual-polarization WSR-88D [J]. *Mon Weather Rev*, 2010, 138(10): 3762-3786.
- [27] KUMJIAN M R, KHAIN A P, BENMOSHE N, et al. The anatomy and physics of Z_{DR} columns: investigating a polarimetric radar signature with a spectral bin microphysical model [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 2014, 53(7): 1820-1843.
- [28] 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.
- [29] DAWSON D T II, MANSELL E R, JUNG Y, et al. Low-level Z_{DR} signatures in supercell forward flanks: the role of size sorting and melting of hail [J]. *J Atmos Sci*, 2014, 71(1): 276-299. [LinkOut]
- [30] DAWSON D T II, MANSELL E R, KUMJIAN M R. Does wind shear cause hydrometeor size sorting? [J]. *J Atmos Sci*, 2015, 72(1): 340-348. [LinkOut]

- [31] Van Den Broeke Matthew S. Polarimetric variability of classic supercell storms as a function of environment[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 2016, 55(9):1907-1925.
- [32] BRINGI V N, LIU L, KENNEDY P C, et al. Dual multiparameter radar observations of intense convective storms: the 24 June 1992 case study[J]. *Meteor Atmos Phys*, 1996, 59(1):3-31.
- [33] VAN LIER-WALQUI M, FRIDLIND A M, ACKERMAN A S, et al. On polarimetric radar signatures of deep convection for model evaluation: columns of specific differential phase observed during MC3E [J]. *Mon Weather Rev*, 2016, 144(2):737-758.
- [34] 郭飞燕,刁秀广,褚颖佳,等.两次极端强降水风暴双偏振参量特征对比分析[J].*干旱气象*, 2023, 41(1):103-113, 122.
- [35] 王俊,刘畅.一次拖曳型飏线过程雨滴谱演变特征研究[J].*海洋气象学报*, 2019, 39(2):43-57.
- [36] 黄秀韶,刁秀广,韩永清,等.一次强降水风暴回波合并前后双偏振特征分析[J].*气象科学*, 2022, 42(3):410-419.
- [37] STRAKA J M, ZRNI D S, RYZHKOV A V. Bulk hydrometeor classification and quantification using polarimetric radar data: synthesis of relations[J]. *J Appl Meteor*, 2000, 39(8):1341-1372.
- [38] Warning Decision Training Branch. Dual-polarization radaroperations course [EB/OL]. (2011-09-01) [2023-06-12]. <https://training.weather.gov/wdtd/courses/dualpol/documents/DualPolOpsStudentGuide.pdf>.
- [39] 侯淑梅,郭俊建,郭庆利,等.对流风暴的移动和演变对下游地区对流降水影响的个例分析[J].*海洋气象学报*, 2021, 41(2):58-69.
- [40] 许长义,章丽娜,肖现,等.冷涡背景下华北平原一次弓形回波致灾大风过程分析[J].*气象学报*, 2023, 81(1):40-57.