李芳,刁秀广,魏鸣,2024.一次强冰雹超级单体风暴双偏振参量特征分析[J].气象,50(2):195-209. Li F,Diao X G,Wei M,2024. Characteristic analysis of dual-polarization parameters of a severe hail supercell storm[J]. Meteor Mon,50(2):195-209(in Chinese).

一次强冰雹超级单体风暴双偏振参量特征分析*

李 芳[1] 刁秀广[2] 魏 鸣[3]

1 山东省济宁市气象局,济宁 272000

2 山东省气象台,济南 250031

3 南京信息工程大学,南京 210044

提 要:利用济南 S 波段双偏振多普勒天气雷达资料、章丘探空和地面常规气象观测资料及灾情调查,对 2021 年 7 月 9 日发生在济南章丘的一次特大冰雹超级单体风暴双偏振和微物理结构特征进行了分析。结果表明:冷涡天气背景下,强的垂直风切变和强的对流有效位能,利于超级单体的形成与维持。阵风锋是风暴触发机制,也是风暴长时间维持机制。初始风暴由阵风锋触发,经过合并发展产生超级单体。成熟阶段,风暴西侧与阵风锋交汇区域不断激发新生单体,并与主体合并,风暴长时间维持。风暴顶强辐散是中气旋长时间维持和风暴顶高度较高的关键因子之一。特大冰雹阶段风暴底层右后有明显的入流缺口,其前侧有差分反射率(Z_{DR})弧,表现为少量大的液态粒子或小的湿冰粒子,入流缺口左侧强反射率因子区对应小的 Z_{DR} 和小的相关系数,为冰雹降落区。垂直结构上,强上升气流区一侧存在深厚的有界弱回波区,0℃层高度之下分布有 Z_{DR} 环,有界弱回波区内及上方存在 Z_{DR} 柱,且高度较高,含有少许偏大的液态或融化的小的冰相粒子。较高的 Z_{DR} 柱表明风暴内上升气流强盛且高度较高,利于风暴的发展与维持以及冰雹粒子的湿增长。

关键词:超级单体,强冰雹,差分反射率(Z_{DR})柱,差分相移率(K_{DP})柱

中图分类号:P407 **文献标志码**:A **DOI**:10.7519/j.issn.1000-0526.2023.100801

Characteristic Analysis of Dual-Polarization Parameters of a Severe Hail Supercell Storm

LI Fang[1] DIAO Xiuguang[2] WEI Ming[3]

1 Jining Meteorological Office of Shandong Province, Jining 272000

2 Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031

3 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: Using the Jinan S-band dual-polarization Doppler weather radar data, Zhangqiu sounding and ground conventional meteorological observation data and disaster investigation, this article analyzes the dual-polarization and microphysical structure characteristics of a hail supercell storm that occurred in Zhangqiu, Jinan on 9 July 2021. The results show that under the background of cold vortex weather, strong vertical wind shear and strong convective available potential energy were conducive to the formation and maintenance of supercell. The gust front was the trigger mechanism of the storm and the long-term maintenance mechanism of the storm. The initial storm was triggered by the gust front and it developed into a supercell through merging. In the mature stage, the intersection area between the west side of the storm and the

* 山东省自然科学基金项目(ZR2020MD053、ZR2022MD035、ZR2022MD072、ZR2023MD004)和山东省气象局科研项目(2021sdqxz09、2019sdqxz01、2019sdqxm19)共同资助

2022 年 9 月 15 日收稿; 2023 年 6 月 23 日收修定稿

第一作者:李芳,主要从事天气雷达应用研究. E-mail:lflifang_321@126.com

通讯作者:刁秀广,主要从事天气雷达应用研究. E-mail:radardxg@126.com

gust front continuously excited new cells, which merged with the main body, thus the storm maintained for a long time. The strong divergence of storm top was one of the key factors for the long-term maintenance of mesocyclone and the high height of storm top. In the super-large hail stage, there existed a clear inflow gap at the right rear of the storm bottom, and there was a differential reflectivity arc in front of it, manifested as a small amount of large liquid particles or small wet ice particles. The strong reflectivity factor area on the left side of the inflow gap corresponded to small differential reflectivity and small correlation coefficient, which was the hail falling area. In terms of the vertical structure, there was a deep bounded weak echo zone on the side of the strong updraft area, and a differential reflectivity ring was distributed below the height of the 0°C layer. There was a differential reflectivity column in the bounded weak echo zone and above it, and the height was higher with a little larger liquid or melting small ice particles. The higher differential reflectivity column indicates that the updraft in the storm is strong and high, which is benefitical to the development and maintenance of the storm and the wet growth of hail particles.

Key words: supercell, severe hail, Z_{DR} column, K_{DP} column

引 言

冰雹作为强对流风暴发展到强盛阶段的产物之一，具有突发性强、发展演变迅速、空间尺度小、破坏力强等特点，尤其是直径超过 2 cm 的大冰雹，其破坏力更强，是预报预警的重点和难点。天气雷达具有高时空分辨率的特点，是监测和预警冰雹的主要探测手段，但由于单偏振多普勒天气雷达只发射单一的水平线偏振电磁波，无法进一步对降水粒子的形状、相态等进行分析，对强对流风暴云物理特征的研究受到限制。自 Seliga and Bringi(1976)提出双线偏振雷达的理论以来，双偏振雷达探测技术不断完善，不仅可以探测到气象目标物基本反射率因子(Z_H)、平均径向速度(V)及速度谱宽(SW)等信息，还可以探测到差分反射率(Z_{DR})、差分相移率(K_{DP})、相关系数(CC)等双偏振参数，在研究云内粒子相态、识别冰雹云等方面有较好的应用价值。

大量研究表明，不同尺寸和不同相态的气象目标物对应不同的双偏振参数特征值，美国双偏振雷达操作课程(Dual-Polarization Radar Operations Course, Version 1109)中指出，冰雹(包括冰雹与雨滴的混合物)的 Z_{DR} 在 −2.0～6.0 dB，冰雹的 CC 小于纯降雨，雹雨混杂的 CC 在 0.70～0.96；雨滴的 Z_{DR} 值在 0.0～5.0 dB、CC 值＞0.97；地物杂波、昆虫、鸟类等非气象目标物的 Z_{DR} 值范围比冰雹 Z_{DR} 值范围大，但 CC 较小，基本小于 0.7。中外学者利用双偏振雷达对引起降雹的超级单体风暴开展了诸多研究，在理论研究(刘黎平等，1997；许焕斌和段英，2001；2002；李昭春等，2021；申高航等，2021；苏永彦和刘黎平，2022；Kumjian，2013a；2013b)、超级单体雹云模型(Kumjian and Ryzhkov，2008)、算法研究(Straka et al，2000；Ryzhkov et al，2005；曹俊武和刘黎平，2007；Park et al，2009；梅垚等，2018；王洪等，2016；夏凡等，2023a；2023b)、降雹单体双偏振特征(Hubbert et al，1998；张鸿发等，2001；江慧远等，2019；高丽等，2021；潘佳文等，2021；阮悦等，2022；梅垚等，2018；何清芳等，2022)、Z_{DR} 柱特征(刁秀广等，2021)等领域取得了一些研究成果。大量超级单体双偏振雷达观测发现，在风暴低层易出现 Z_{DR} 弧(Z_{DR}＞3 dB)，在风暴中层常出现 Z_{DR} 环或 CC 环，环境 0℃层高度以上通常出现 Z_{DR} 柱(Z_{DR}＞1 dB)和 K_{DP} 柱(K_{DP}＞0.75°·km^{-1})，Z_{DR} 柱的高度是判别风暴强度指标之一，K_{DP} 柱表明有丰富的液态雨或湿冰，是深厚对流上升气流特征的观测量度(Bringi et al，1996；Kumjian and Ryzhkov，2009；Hubbert et al，1998；Loney et al，2002；Romine et al，2008；刁秀广和郭飞燕，2021)。Hall et al(1980；1984)首先通过双偏振多普勒天气雷达观测到 Z_{DR} 柱的存在。Kumjian and Ryzhkov(2008)通过研究超级单体双偏振雷达回波特征表明，前侧下沉气流反射率因子高且 Z_{DR} 接近 0，其前侧有 Z_{DR} 的高值区即 Z_{DR} 弧，在上升气流和后侧下沉气流存在 Z_{DR} 柱、K_{DP} 柱和 CC 环。Kumjian et al(2014)通过对 42 个风暴的统计分析，认为强雹暴发展过程中，Z_{DR} 柱峰值高度要比反射率因子核超过 −20℃高度这一指标具有更大提前量，可提前 10～20 min 对冰雹进行预警。王洪等(2018)利用 S 波段双偏振雷达对华南超级单体风暴进行双偏振特征分析，表明大雹粒子的翻滚使冰雹区具有水平反射率因子高、差分反射率因子低的特

点,雨和冰晶粒子的混合导致了相关系数的下降。林文等(2020)对不同强度强对流云系 S 波段双偏振雷达观测分析表明,利用 K_{DP}"空洞"(CC 小于一定阈值时 K_{DP}不做计算)搭配 Z_H 高值可以定位云中的大冰雹区。潘佳文等(2020)利用双多普勒雷达风场反演结果证明了 Z_{DR} 柱可用于指示上升气流的存在。龚佃利等(2021)依据山东诸城成熟阶段雹云雷达回波形态、径向速度和三维风场的分析,给出雹云内主上升气流框架和具有成雹功能的"0 线"结构示意图,有助于理解"0 线"结构在大雹循环增长中的可能作用机理。刁秀广和郭飞燕(2021)利用青岛 S 波段双偏振雷达对一次雹暴的双偏振参量进行分析,得出低层强反射率因子核后侧径向上如果出现显著差分反射率因子负值区,可作为特大冰雹的识别依据。虽然 SA 双偏振雷达产品提供了基于模糊逻辑算法的水凝物分类产品(HC),但没有大冰雹的识别算法,需要针对性开展大冰雹双偏振特征研究。

本文基于济南 CINRAD/SAD 双偏振雷达资料,结合地面实况资料,对 2021 年 7 月 9 日发生在章丘特大冰雹的长寿命超级单体风暴从垂直结构和不同高度层(底层、中层、高层)进行双偏振参量特征分析,以期对该类超级单体风暴双偏振参量所反映的动力机制和云物理结构有更深入的认识,为进一步更好地利用双偏振雷达资料提升冰雹的预警能力提供参考。

1　天气实况及天气背景

1.1　天气实况

2021 年 7 月 9 日下午济南章丘出现一次极端强对流天气,冰雹持续时间约 1 h。章丘区双山街道东山花园 14:30(北京时,下同)开始降雹,最大冰雹直径达 68 mm 左右(图 1a),十分罕见,达到特大冰雹等级(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会,2012);章丘文祖镇中心小学附近 14:45 开始降雹,冰雹直径为 30 mm;章丘站周围 15:15 开始降雹,冰雹最大直径为 50 mm 左右(本站观测为 30 mm),14:30—15:30 为特大冰雹阶段。济南雷达、章丘探空及冰雹位置见图 1a,风暴距离雷达站约 75 km,14:13—14:48 向偏南方向移动,见图 1b 中带点曲线(14:02—14:59),风暴移动较为缓慢。

造成章丘特大冰雹的强风暴生命史超过 4 h,属于长寿命超级单体风暴(简称章丘超级单体风暴)。该超级单体在章丘移动缓慢且持续时间长,造成章丘站出现气温骤降(14:53—15:26,气温下降 9℃)、雷暴大风(15:16 风速达到 23.1 m·s^{-1})和短时强降水(15:00—16:00,降水量为 20.2 mm)。

1.2　天气形势与环境参数

7 月 9 日 08:00 影响系统为冷涡,200 hPa 山东章丘以西处在槽后西北气流区(图 2a,章丘站 200 hPa 温度为−49℃,风速为 16 m·s^{-1},风向为 268°),南侧有明显的急流区,槽后有明显的温度梯度,高层降温明显(章丘站 20:00 降温幅度约 5℃);500 hPa 和 850 hPa 山东基本处在槽后西北气流区,500 hPa 槽后温度梯度较小(图 2b),中层降温不明显(章丘站 20:00 气温无明显变化);低层 850 hPa 在山东西部有明显暖区,最高气温为 25℃(图 2c),低层温度上升(章丘站 20:00 气温升高 5℃);地面上,山东位于地面低压前部,以东南风为主(图略)。上层干冷、下层暖湿的垂直配置,易造成热力不稳定及能量累积,特别是午后低层气温进一步升高,不稳定程度和能量累积进一步增大,更利于强对流产生。从探空图 2d 可看出,低层较湿,不稳定能量强,环境温度曲线在 0℃层以下有两段接近于干绝热线,有利于下击暴流的发生。

由环境物理量(表 1)可以看出,7 月 9 日 08:00 850 hPa 与 500 hPa 温差(ΔT)较大,接近 30℃,具有强的热力不稳定;K 指数为 30℃,抬升指数(LI)为−6.3℃,0～6 km 垂直风切变(SHR)达到 20.4 m·s^{-1},利于高组织性风暴的产生与维持。使用章丘站 14:00 地面温度和露点温度进行订正,对流有效位能(CAPE)由 2334.6 J·kg^{-1} 增大到 4550 J·kg^{-1},说明随着地面温度的升高,对流能量进一步增强。俞小鼎(2014)针对冰雹融化层高度指出:相较于干球温度 0℃层,湿球温度 0℃层可更准确地指示冰雹融化层高度,尤其是当对流层中层存在明显干层时;冰雹融化层高度的高低是决定冰雹大小甚至降雹与否的主要因子之一,湿球温度 0°层高度作为冰雹融化层的近似高度,当冰雹融化层较高时,冰雹有可能在下落到地面之前融化。高晓梅等(2018)认为 3.0～3.9 km 的冰雹融化层高度是鲁中平原地区强冰雹发生比较适宜的高度。7 月 9 日 08:00 章丘探空站湿球 0°层高度较低(3.7 km),利于地面出现冰雹。

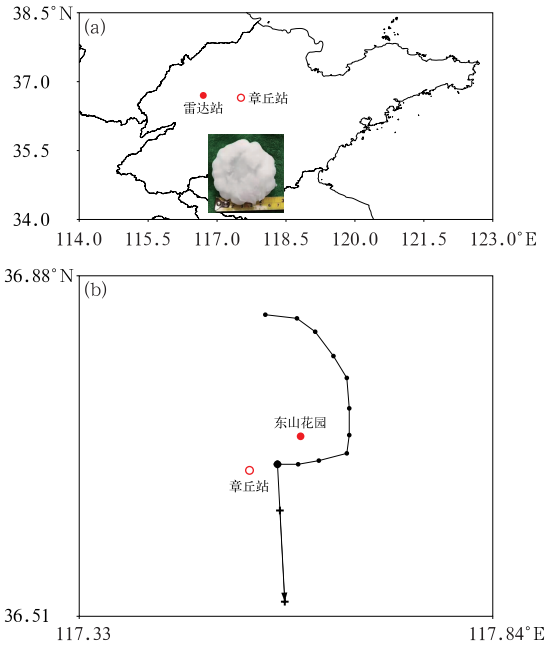


图 1 (a)相关观测设备站点分布及(b)风暴移动路径

Fig. 1 (a) Distribution of related observation equipment sites and (b) storm tracking information (STI)

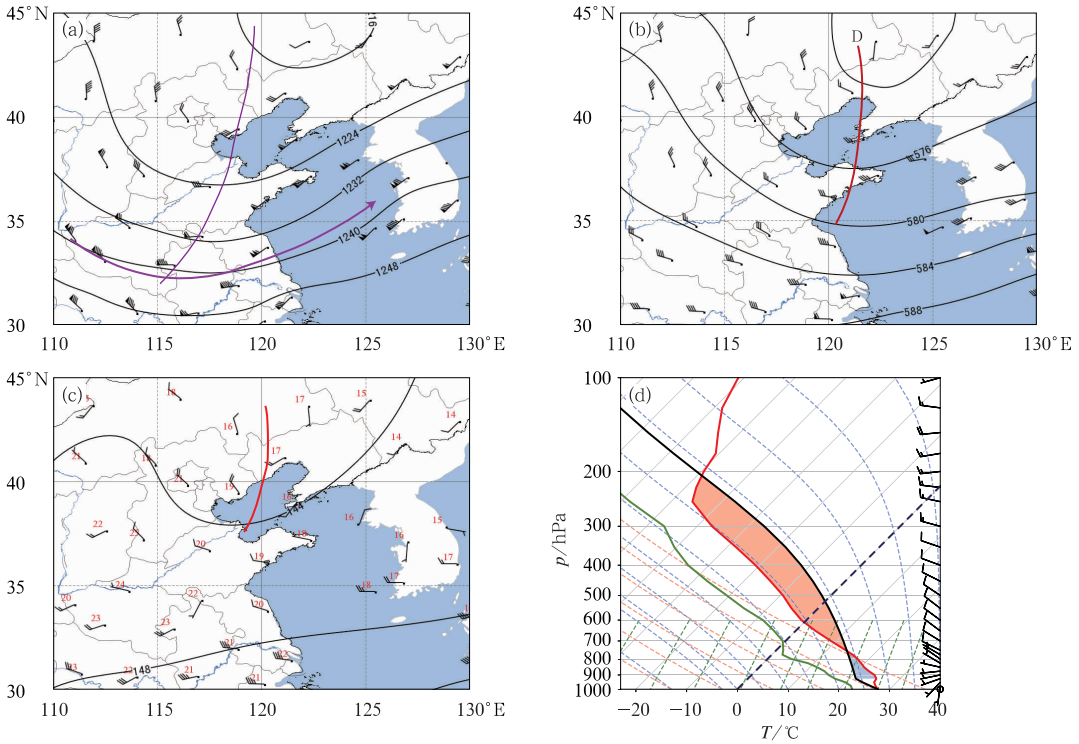
2 风暴演变特征

2.1 风暴演变

图 3 是风暴发展阶段和旺盛阶段组合反射率演变情况，白色圆圈为中气旋。

13:50—14:13 为风暴发展阶段，对流单体新生、合并发展演变为超级单体。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，单体 A 和 B 各自发展，而单体 B 发展较快(Z_{DR} 柱高度约 7 km)，在 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。13:50—14:13 单体基本向偏东方向移动，移动速度约为 25 km·h^{-1}。

风暴成熟阶段 14:13—17:23(中气旋维持阶段)产生多次合并，14:42—14:59 和 15:28—15:45 是两次明显合并发展阶段。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，其 Z_{DR} 柱高度约 7 km，阵风锋为主要触发机制。之后单体 C 发展，在 14:59 出现合并，合并之后出现 2 个中气



注：粗实线为槽线，黑色实线为等高线(单位：dagpm)，红色数字为气温(单位：℃)，风向杆为风向风速，粗箭头实线为急流轴。

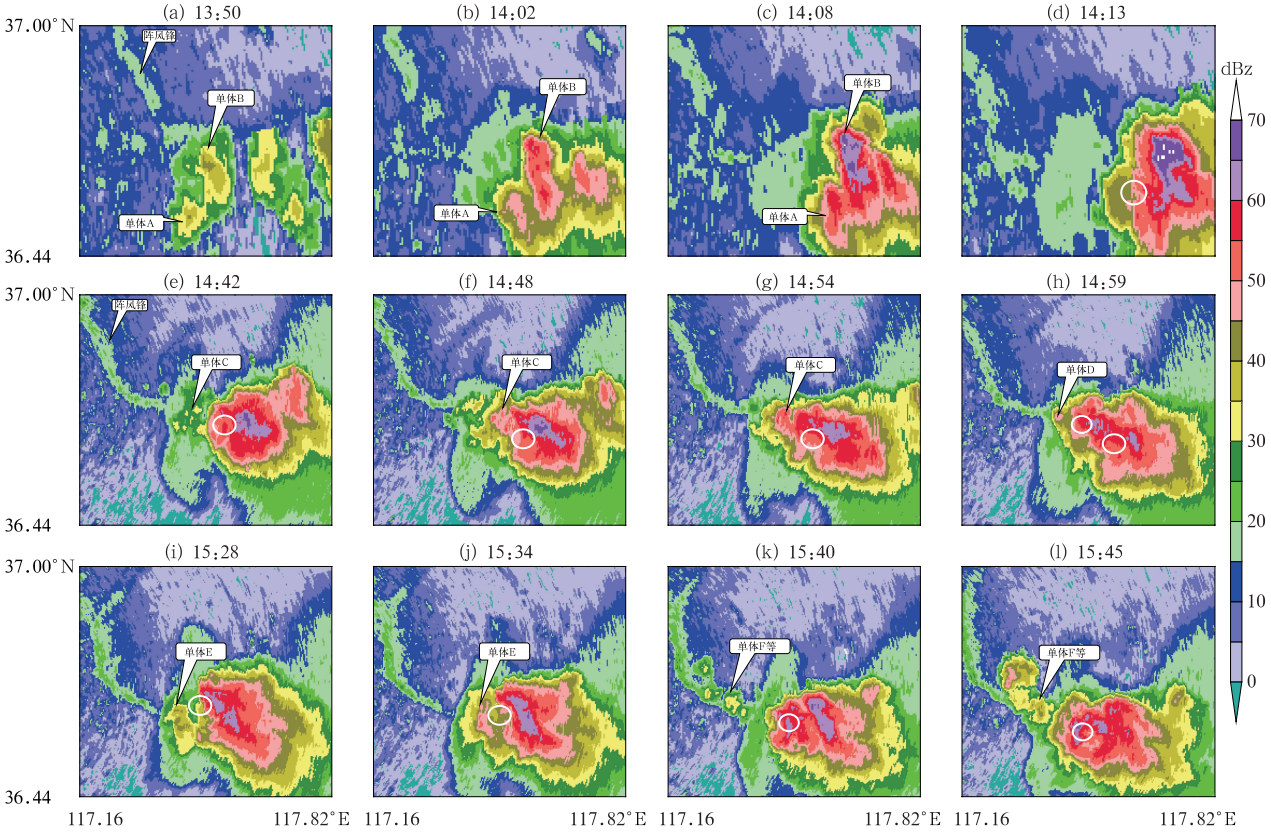
图 2 2021 年 7 月 9 日 08:00(a)200 hPa，(b)500 hPa 和(c)850 hPa 天气形势及(d)章丘站 T-ln$p$ 图

Fig. 2 Synoptic chart at (a) 200 hPa, (b) 500 hPa, (c) 850 hPa and (d) T-ln$p$ diagram at Zhangqiu Station at 08:00 BT 9 July 2021

表 1　2021 年 7 月 9 日 08:00 环境物理量

Table 1　Environmental physical parameters calculated by sounding data of Zhangqiu Station at 08:00 BT 9 July 2021

K 指数/℃	ΔT/℃	LI/℃	CAPE,CIN/(J·kg^{-1})	925 hPa 比湿/(g·kg^{-1})	0℃(湿球 0℃),−10℃,−20℃层/km	$SHR_{0\sim6}$,$SHR_{0\sim3}$/(m·s^{-1})
30	29.3	−6.3	2334.6,0	14.1	4.3(3.7),6.0,7.4	20.4,17.8



注:白色圆圈为中气旋。

图 3　2021 年 7 月 9 日 13:50—15:45 济南雷达组合反射率因子演变

Fig. 3　Evolution of composite reflectivity factor of Jinan Radar from 13:50 BT to 15:45 BT 9 July 2021

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(强中心位于中气旋东侧),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(15:28 单体 E 的 Z_{DR} 柱高度约 10 km),之后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”。

15:40 风暴西侧阵风锋上又出现多个新生单体(单体 F 等,Z_{DR} 柱高度约 7.3 km),新生单体发展,继续产生合并,导致风暴南压的同时向西发展,风暴整体移动缓慢,维持时间较长。14:13—17:23 中气旋阶段风暴基本向正南方向移动,移动的直线距离约 40 km。

新生单体初始时刻最大反射率因子为 30～40 dBz,都具有明显的 Z_{DR} 柱,而 CC 较大,K_{DP} 较小,新生单体内上升气流占主导地位,含有少许偏大的液态粒子。

导致风暴移动缓慢的主要因素是高空引导气流较弱和新生单体向西传播,两者共同作用,导致风暴南移且较为缓慢。500 hPa 章丘探空站风向风速分别是 298°、10.5 m·s^{-1},上游邢台探空站风向风速分别是 324°、9.2 m·s^{-1},引导气流偏弱。新生单体主要在风暴西侧与阵风锋交汇区域,风暴向西传播。

2.2 风暴参数演变

风暴参数包括最大反射率因子(Z_{Hmax})及所在高度(H)、基于单体的垂直累积液态含水量(C-VIL)、单体顶部高度(H_{top})、Z_{DR}柱(0℃层以上大于1 dB)高度,K_{DP}柱(0℃层以上大于0.75°·km^{-1})高度,以上除Z_{DR}柱和K_{DP}柱之外的参数可在风暴结构产品(62号)中直接读出,详见图4a。

章丘超级单体风暴初始于13:50,13:50—14:08为发展阶段,14:13—17:23为成熟阶段,18:04后减弱消散,持续时间4 h 14 min左右。发展阶段C-VIL由13:50的5 kg·m^{-2}迅速增大到14:08的67 kg·m^{-2},3个体扫跃增62 kg·m^{-2},对冰雹的发生有明显的指示作用。风暴初始时刻具有较高的Z_{DR}柱,之后随单体的发展而明显增高并维持在较高高度,K_{DP}柱滞后于Z_{DR}柱,高度也低于Z_{DR}柱。单体B初始时刻13:50 Z_{Hmax}为43 dBz,Z_{DR}柱高度为7 km,而K_{DP}较小,表明风暴触发区域的阵风锋附近具有强的上升气流,新生单体内上升气流占主导地位并含有少许大的液态粒子。13:56 Z_{Hmax}明显增大(最大为51 dBz),Z_{DR}柱高度明显增高(达到10.5 km),上升气流强度明显增强。

风暴在14:13—17:23出现中气旋,持续时间为190 min,占风暴生命期的75%。中气旋参数见图4b,中气旋顶高基本在6～8 km高度,最大旋转速度(出流中心与入流中心径向速度差除以2)基本在20 m·s^{-1}左右(平均值为19.6 m·s^{-1}),最大为25 m·s^{-1},中气旋厚度较厚且强度强。风暴顶最大径向速度差基本在50～60 m·s^{-1},平均为52.6 m·s^{-1},具有强的风暴顶辐散特征,其风暴顶幅散强度明显大于王一童等(2022)所统计分析的超级单体风暴顶辐散强度(平均为38 m·s^{-1}左右,多数在45 m·s^{-1}左右)。

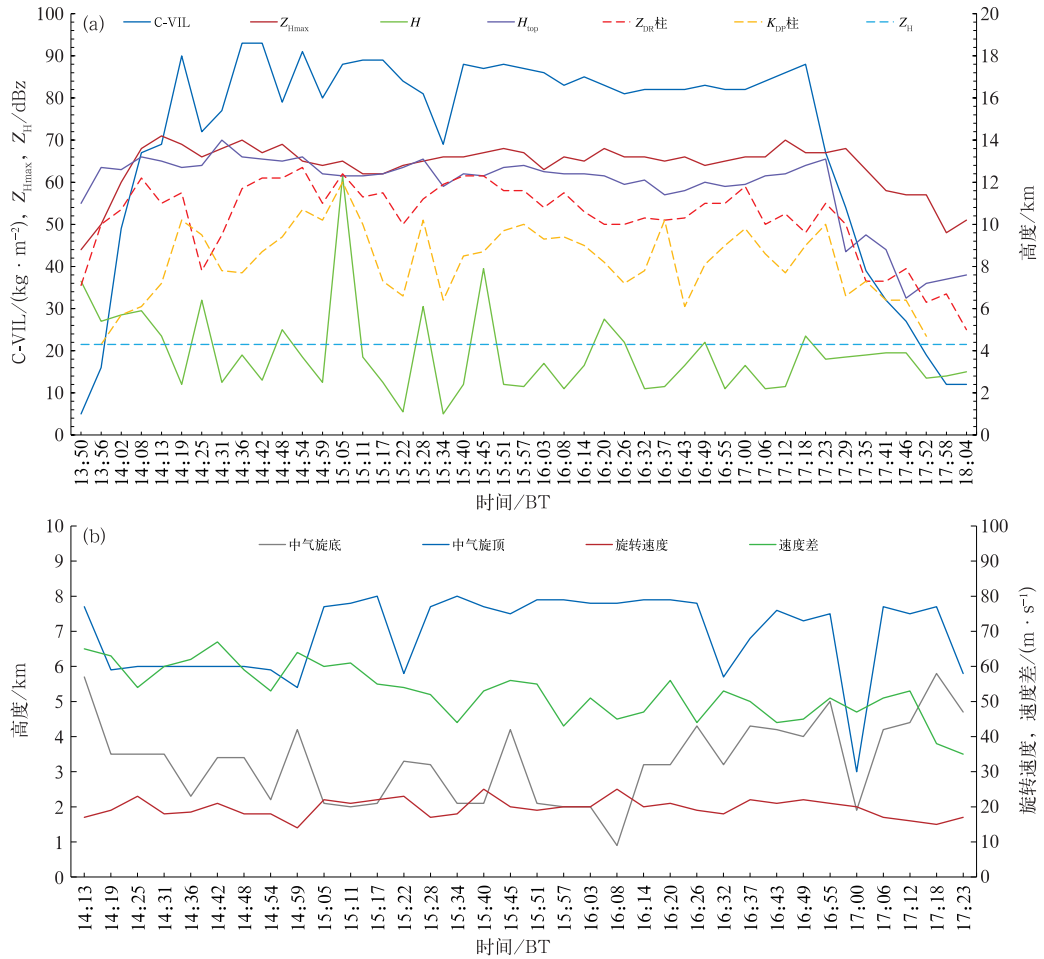


图4 2021年7月9日(a)13:50—18:04风暴参数和(b)14:13—17:23中气旋参数演变

Fig. 4 Evolution of (a) storm parameters from 13:50 to 18:04 BT and (b) mesocyclone parameters from 14:13 to 17:23 BT 9 July 2021

风暴成熟阶段(14:13—17:23,图 4a)Z_{Hmax}、C-VIL、H、H_{top}、Z_{DR}柱和 K_{DP}柱高度平均值分别为 66.2 dBz、82.7 kg·m^{-2}、3.7 km、12.3 km、11.0 km 和 8.7 km。风暴强度维持在 65 dBz 以上,顶高维持在 12 km 高度以上,C-VIL 维持在 80.0 kg·m^{-2}以上,Z_{DR}柱高度维持在 11.0 km(环境温度为−47℃层),K_{DP}柱高度在 8.7 km(环境温度为−30℃层)附近。

旺盛阶段(14:30—15:30 地面出现 50 mm 冰雹阶段,图 4a)Z_{Hmax}、C-VIL、H、H_{top}、Z_{DR}柱和 K_{DP}柱高度平均值分别为 65.5 dBz、85.8 kg·m^{-2}、4.7 km、12.8 km、11.4 km 和 9.1 km。风暴强中心高度略高于 0℃层高度,Z_{DR}柱高度维持在环境温度−48℃层上下,K_{DP}柱高度在−33℃层附近,风暴顶最大径向速度差的平均值为 58.8 m·s^{-1},辐散强度明显大于后期,更利于特大冰雹的出现。

章丘强风暴的主要特征:(1)Z_{DR}柱高度较高,旺盛阶段顶部在 11.4 km(−48℃层高度),国内外文献没有看到 Z_{DR}柱如此之高的个例,Snyder et al (2015)分析的个例中个别时次 Z_{DR}柱高度接近 10 km;表明章丘强风暴上升气流非常强盛,强上升气流区内环境温度−48℃层高度上还存在小的液态粒子,利于冰雹粒子的湿增长。(2)强回波高度较高,14:31—15:28 11 个体扫中有 8 个体扫在 13 km 左右高度上存在 55 dBz 以上强回波(图略),利于形成大的甚至特大冰雹粒子。(3)风暴反射率因子偏弱。刁秀广和郭飞燕(2021)、刁秀广等(2021)和刁秀广(2021)所分析的山东特大冰雹超级单体风暴强盛阶段 Z_{Hmax}平均在 70 dBz 以上,而章丘强风暴 Z_{Hmax}平均为 65.5 dBz,天气实况灾害较轻,推测大冰雹粒子密度较低是其原因之一,与南方强冰雹超级单体风暴强度(潘佳文等,2020;2021)对比也偏弱。(4)风暴顶辐散强度较强。风暴顶辐散强度越强,其“抽吸作用”越利于强上升气流的出现与维持,利于中气旋维持在较高高度和强回波悬垂及大冰雹增长,同时也是导致较高 Z_{DR}柱的关键因子之一。

由于探测模式原因,雷达探测到的风暴顶高低于实际高度。济南雷达 9.9°仰角在章丘上空探测到的高度在 13 km 左右,14.6°仰角无数据,只能将 9.9°仰角探测到的 30 dBz 以上的数据作为风暴顶高。FY-2H 在 14:30、15:00 和 15:30 探测到的云顶亮温分别为 221、219 和 218 K(图略),云顶温度基本在−55～−52℃(13.5～14.1 km),表明对流高度较高。

3　章丘超级单体风暴双偏振结构特征

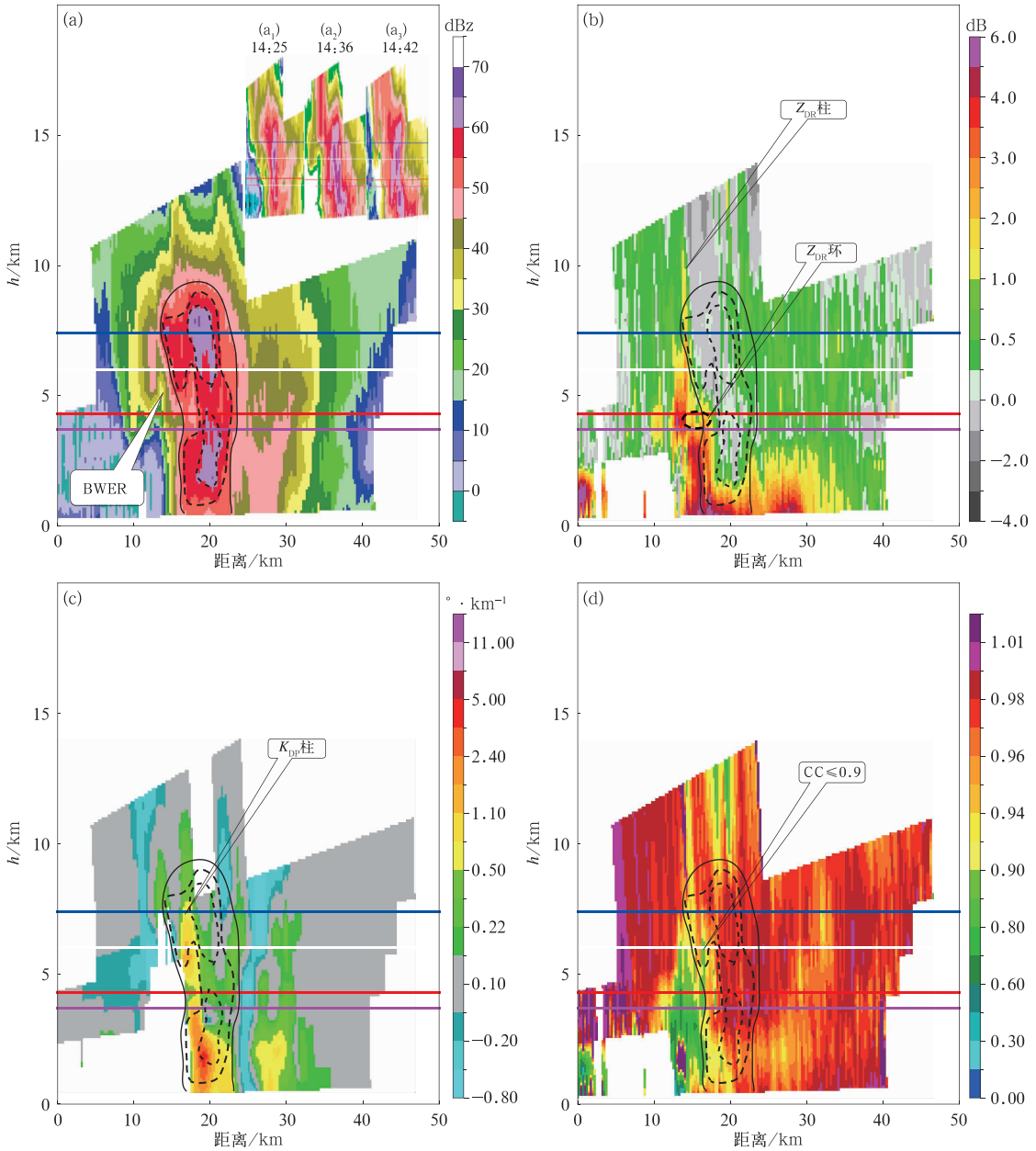
地面 14:30 之后出现强冰雹,选取 14:31 济南雷达观测数据进行分析。此时风暴 Z_{Hmax}、H_{top}、Z_{DR}柱高度和 K_{DP}柱高度分别为 68 dBz、13.3 km、9.5 km 和 7.8 km,Z_{DR}柱高度较高,在−37℃层高度,同时 8.6 km 高度(−30℃层)存在 65 dBz 以上反射率因子,表明风暴内部存在深厚的强上升气流区。

3.1　垂直结构特征

图 5a～5d 分别是 14:31 济南双偏振雷达水平极化反射率(Z_H)、差分反射率因子(Z_{DR})、差分相移率(K_{DP})和相关系数(CC)垂直剖面,剖面是从雷达站点沿 90°径向,穿过有界弱回波区(BWER)中心,点线从外至内依次是 50、55 和 60 dBz 反射率因子等值线,紫色、红色、白色和蓝色水平直线分别为08:00 湿球 0℃层(3.7 km)、0℃层(4.3 km)、−10℃层(6.0 km)和−20℃层(7.4 km)高度。

可以看出,风暴西侧(位于图 5 的左侧,下同)存在明显的 BWER,其正上方有 60 dBz 左右强回波悬垂。BWER 东侧为深厚的强回波墙,60 dBz 回波顶部达到 9.4 km(图 5a),≥60 dBz 回波厚度达到 5.1 km,风暴顶高 13.3 km(−51℃层),风暴发展强盛。差分反射率垂直剖面上 BWER 上方有 1 条清晰的 Z_{DR}>1 dB 大值区即 Z_{DR}柱(图 5b),顶部在 9.5 km(−37℃层),表明有很强的上升气流。Z_{DR}柱与风暴内强上升气流密切相关,对冰雹云的发展具有一定的预示性,强上升气流将包有水膜的冰粒子和(或)液态粒子带到环境 0℃层高度以上,导致 0℃层高度以上出现大的 Z_{DR}值(Kumjian et al, 2014;刁秀广等,2021)。0℃层高度以下弱回波区周围 Z_{DR}呈环状分布,即 Z_{DR}环,西侧为上升气流内的 Z_{DR}大值区,东侧为回波墙内冰相粒子下降到 0℃层高度开始出现明显的融化,出现大的液态粒子和小的融化的冰粒子。

差分相移率垂直剖面上强回波内存在 K_{DP}>0.75°·km^{-1}的大值区即 K_{DP}柱,顶部在 7.8 km,高于−20℃层高度(图 5c)。Z_{DR}柱与 K_{DP}柱分离,Z_{DR}柱在 55 dBz 强回波西侧,K_{DP}柱(在 60 dBz 回波柱体西侧)位于 Z_{DR}柱的东侧,Z_{DR}柱顶部高于 K_{DP}柱顶部。



注：紫色、红色、白色、蓝色直线分别为湿球 0℃层、0℃层、−10℃层和−20℃层高度。

图 5 2021 年 7 月 9 日 14:31 从济南雷达沿 90°径向(a)水平极化反射率因子 Z_H：(a_1)14:25、(a_2)14:36、(a_3)14:42；(b)差分反射率 Z_{DR}，(c)差分相移率 K_{DP}和(d)相关系数 CC 垂直剖面

Fig. 5 Vertical cross-sections of (a) Z_H at (a_1) 14:25 BT, (a_2) 14:36 BT, (a_3) 14:42 BT; (b) Z_{DR}, (c) K_{DP} and (d) CC along radial 90° Jinan Radar at 14:31 BT 9 July 2021

相关系数垂直剖面上(图 5d)，−10℃层高度上下与 Z_{DR}柱和 K_{DP}柱对应区域均存在 CC 小值区。Z_{DR}柱内 K_{DP}和 CC 都小，少许偏大的液态粒子和湿冰粒子共存。K_{DP}柱内 Z_{DR}和 CC 都小，一定数量小的液态粒子和干冰粒子共存。BWER 下方为强上升气流区，对应小的 CC，粒子相态较为复杂。可能是因为强盛的入流气流将非气象目标物吸入上升气流中，造成该部分取样体积内粒子形状和种类多样，造成 CC 值显著降级。

综合分析，湿球 0℃层高度以下，风暴 Z_{DR}和 K_{DP}明显增大而 CC 减小，冰相粒子下降到湿球 0℃层高度出现明显融化，一定浓度的液态粒子、融化的

冰雹粒子共存。在最低仰角,Z_H 减弱,Z_{DR}明显变得更大,CC 也变大,小的固态粒子融化程度更加彻底,融化后扁平程度更明显。湿球 0℃层高度以上,除 Z_{DR}柱和 K_{DP}柱外,其他区域 Z_{DR}和 K_{DP}较小,CC 较大,以相对较干冰相粒子为主,60 dBz 以上回波区含有高浓度或大的冰雹粒子,特别是 65 dBz 以上回波区,含有尺寸更大的冰雹粒子。−10℃层高度之上 Z_{DR}柱与 K_{DP}柱呈分离状态,K_{DP}柱位于 Z_{DR}柱的东侧、强回波墙西侧 55～60 dBz 区域,此种状态的主要原因是,中层上升气流区由于正的温度扰动及液态水的存在,冰粒子出现湿增长,同时有部分液态水“甩落脱离”冰粒子而导致邻近强回波区域偏大的 K_{DP}值(Rasmussen and Heymsfield,1987;Hubbert et al,1998;Loney et al,2002;Snyder et al,2013)。

图 5a 中增加了 14:25、14:36 和 14:42 时刻的 Z_H 垂直剖面,4 个体扫 Z_{DR}柱高度分别是 7.8、9.5、11.8 和 12.2 km(图 4a),明显有增高趋势,上升气流强度加强。14:25—14:36 BWER 上方存在较强的反射率因子悬垂,东侧回波墙强度明显增强、厚度明显增厚,风暴发展迅猛。14:31—14:36,−30℃层高度 65 dBz 以上强回波快速下降并发展,14:36 最大反射率因子达 71 dBz,高度为 3.8 km。14:42 回波墙强度有所减弱,但 60 dBz 以上强回波厚度并没有减少,依然维持旺盛状态。

BWER 上方的强回波悬垂含有丰富的相对干的冰相粒子及少量过冷却液态雨滴或(和)湿冰粒子,发展到一定程度后进入下降通道, 60 dBz 以上强回波厚度增厚,大的冰相粒子丰富,在有利的湿球 0℃层高度条件下,地面容易出现大冰雹甚至特大冰雹,小的冰粒子融化后在底层形成较大的液态粒子。超级单体风暴在这种不断循环的过程中维持,在地面不断产生冰雹天气。

3.2　水平结构特征

3.2.1　风暴底层特征

图 6a～6f 分别是 14:31 济南双偏振雷达 0.5°仰角 Z_H、V、Z_{DR}、CC、K_{DP}和粒子相态识别(HC)。图中叠加了中气旋(蓝色圆圈),其中心对应的高度约 1.0 km,蓝色实线为 50 dBz 等值线,蓝色虚线为 60 dBz 等值线。

强回波中心(图 6a,≥60 dBz)对应的 Z_{DR}在 0.0～4.6 dB,CC 在 0.75～0.96,K_{DP}基本为“空洞”区,当 CC 值低于 0.85 时,不对 K_{DP}进行计算。Z_{DR}大小取决于粒子的大小和形态,球形粒子 Z_{DR}为 0 dB。冰雹在下降过程中发生翻滚,呈现出近似于各向同性的球形粒子的特性,Z_{DR}接近 0 dB;融化程度较明显的小冰雹粒子,扁平状态明显,Z_{DR}较大。反射率因子大值区与 Z_{DR}小值区及小的 CC 是双偏振雷达识别大冰雹的典型双偏振特征。HC 产品上为“空洞”,是产品算法的自身缺陷。

强回波区(图 6a,50～60 dBz)基本对应大的 Z_{DR}和大的 K_{DP}(空洞区除外),偏小的 CC,Z_{DR}多在 2.0～6.0 dB,CC 多在 0.70～0.97,K_{DP}多在 0.75～2.4°·km^{-1},最大达 4.2°·km^{-1},该区域以混合相态的大粒子为主,即大的液态粒子和小的湿冰粒子,局部存在稍强的降水。HC 产品上为混有冰雹的大雨区。

风暴底层右后有明显的入流缺口,入流缺口周围及前侧区域相关系数差别较大,Z_{DR}较大(超过 4 dB 区域为 Z_{DR}弧),K_{DP}较小,底层上升气流区周围分布着少数呈扁平状的大粒子或非气象目标物粒子。

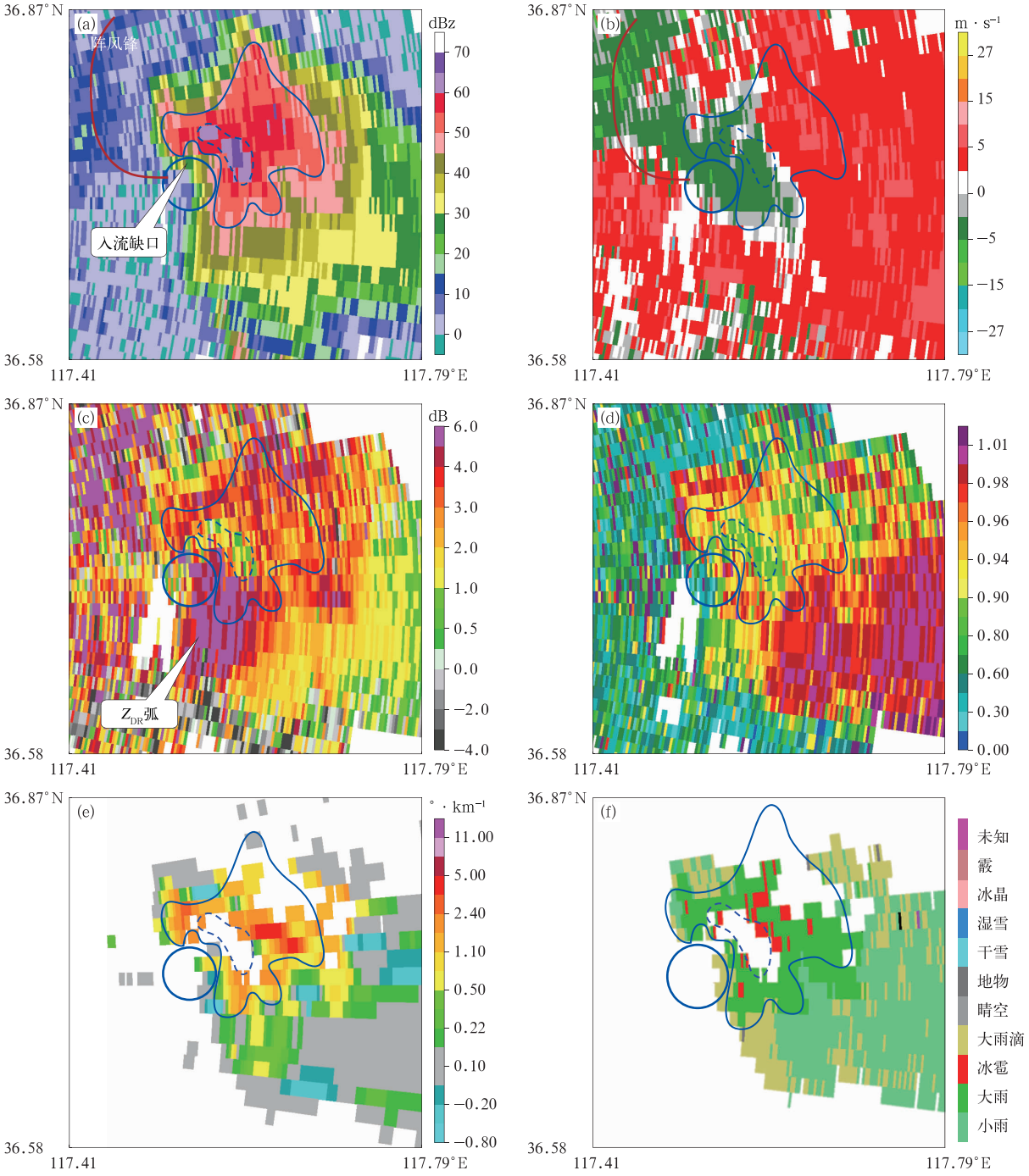
3.2.2　中层特征

图 7 分别是 14:31 济南双偏振雷达 4.3°仰角 Z_H、V、Z_{DR}、CC、K_{DP}和 HC。图中叠加了中气旋(蓝色圆圈),其中心对应的高度约 5.98 km,基本对应 08:00 时刻的−10℃层高度(6.0 km),蓝色实线为 50 dBz 等值线,蓝色虚线为 60 dBz 等值线。

中层(−10℃层附近)有明显的 BWER(最小 32 dBz),径向速度上有较强的气旋性旋转气流,旋转速度约 19 m·s^{-1},−10℃层附近气旋性旋转上升气流强盛(图 7b)。

BWER 附近存在 1.0～3.5 dB 的 Z_{DR}大值区即 Z_{DR}柱,0.75～1.5°·km^{-1}的 K_{DP}大值区即 K_{DP}柱。Z_{DR}柱对应 Z_H 在 32～62 dBz,CC 在 0.75～0.97,液态粒子与湿冰雹粒子共存。中气旋南侧存在两处 0.75～1.3°·km^{-1}的 K_{DP}柱,对应大的 Z_H(39～57 dBz)、小的 Z_{DR}(−2.1～0.7 dB)和偏小的 CC(0.79～0.99),小的液态粒子与干的冰雹粒子共存。强回波区(50～60 dBz)其他区域对应小的 Z_{DR}和 K_{DP}、大的 CC,以冰雹粒子或霰粒子为主。

图 7e 和 7f 的回波区内空洞区域有差异,主要



注：蓝色圆圈为中气旋，蓝色实线和蓝色虚线分别为 50 dBz 和 60 dBz 反射率因子等值线。

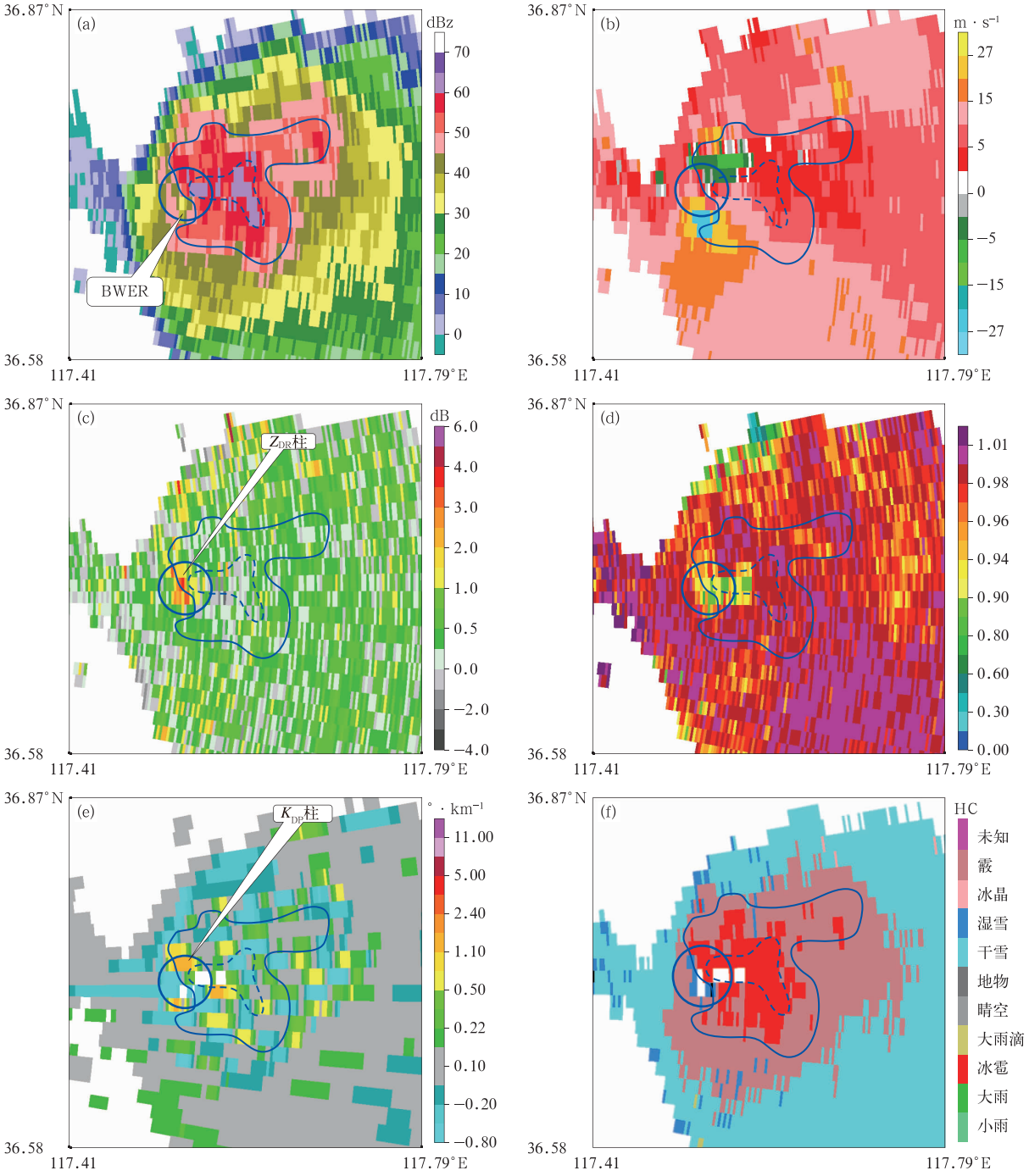
图 6 2021 年 7 月 9 日 14:31 济南雷达 0.5°仰角(a)Z_H，(b)V，(c)Z_{DR}，(d)CC，(e)K_{DP}和(f)粒子相态识别

Fig. 6 (a) Z_H, (b) base velocity (V), (c) Z_{DR}, (d) CC, (e) K_{DP}, (f) hydrometeor classification (HC) at 0.5° elevation from the Jinan Radar at 14:31 BT 9 July 2021

是 K_{DP}产品回波区内“空洞”(白色区域)有 2 种情况，一是 CC 小于 0.85 时不进行计算而显示为白色，二是 K_{DP}值小于 $-0.8°\cdot km^{-1}$时也显示为白色，K_{DP}值小于 $-0.8°\cdot km^{-1}$时 HC 产品不受影响。

3.2.3 高层特征

双偏振雷达 6.0°仰角(图略)中气旋中心对应的



注:蓝色圆圈为中气旋,蓝色实线和蓝色虚线分别为 50 dBz 和 60 dBz 反射率因子等值线。

图 7　2021 年 7 月 9 日 14:31 济南雷达 4.3°仰角(a)Z_H,(b)V,(c)Z_{DR},(d)CC,(e)K_{DP}和(f)粒子相态识别

Fig. 7　(a) Z_H, (b) V, (c) Z_{DR}, (d) CC, (e) K_{DP}, (f) hydrometeor classification at 4.3° elevation from the Jinan Radar at 14:31 BT 9 July 2021

高度约 8.2 km(接近 08:00 时−30℃层高度),最大反射率因子达到 70 dBz,强度超过底层和中层。Z_{DR}只有 3 个距离库在 1.0～2.4 dB,Z_{DR}柱高度达到−30℃层高度但面积较小,没有 K_{DP}大值区,CC 较大,高层以干冰雹粒子(存在大的冰雹)和霰粒子为主。径向速度图上气旋性旋转速度约 15 m·s^{-1},弱于下层。

4 双偏振特征示意图

基于前面的分析，给出章丘特大冰雹超级单体风暴水平和垂直方向双偏振特征示意图(图 8)。

章丘超级单体风暴底层(图 8a，1.0 km 左右)右后侧有明显的入流缺口，入流一侧(入流缺口及其前侧区域)对应有 Z_{DR} 弧(Z_{DR}＞4 dB)，以较大的粒子为主；60 dBz 以上强回波中心对应偏小的 Z_{DR} 和小的 CC，为冰雹区，位于入流缺口东侧；底层其他 50～60 dBz 强回波区域也具有大的 Z_{DR} 和偏小的 CC，以偏大的粒子(偏大的雨滴和小的湿冰粒子)为主；后侧反射率因子梯度大值区具有强的下沉气流(后侧下沉气流区)，并产生明显的阵风锋；前侧下沉气流偏弱，与底层入流在前侧形成辐合。

风暴中层(图 8b，6.0 km 左右)存在 BWER，其周围 Z_{DR} 柱、K_{DP} 柱和 CC 低值区同时存在，Z_{DR} 柱区域相对集中，K_{DP} 柱区域相对分散，Z_{DR} 柱与 K_{DP} 柱呈分离状态，Z_{DR} 柱基本处于 K_{DP} 柱西侧，强回波中心(≥60 dBz)位于 BWER 东侧。中层 Z_{DR} 柱、K_{DP} 柱和 CC 低值区基本处于低层入流缺口上方，为液态粒子或(和)湿的冰粒子集中区，Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱之外的区域为宽阔的固态粒子区(包含小-大的冰雹粒子、霰粒子等)。

章丘超级单体风暴底层双偏振特征，与 Kumjian and Ryzhkov(2008)、Kumjian et al(2010)所归纳的超级单体双偏振概念模型、潘佳文等(2021)所分析的闽南地区大冰雹超级单体及刁秀广和郭飞燕(2021)所归纳的诸城强冰雹超级单体概念模型基本类似：入流缺口周围及前侧入流区一侧存在明显的

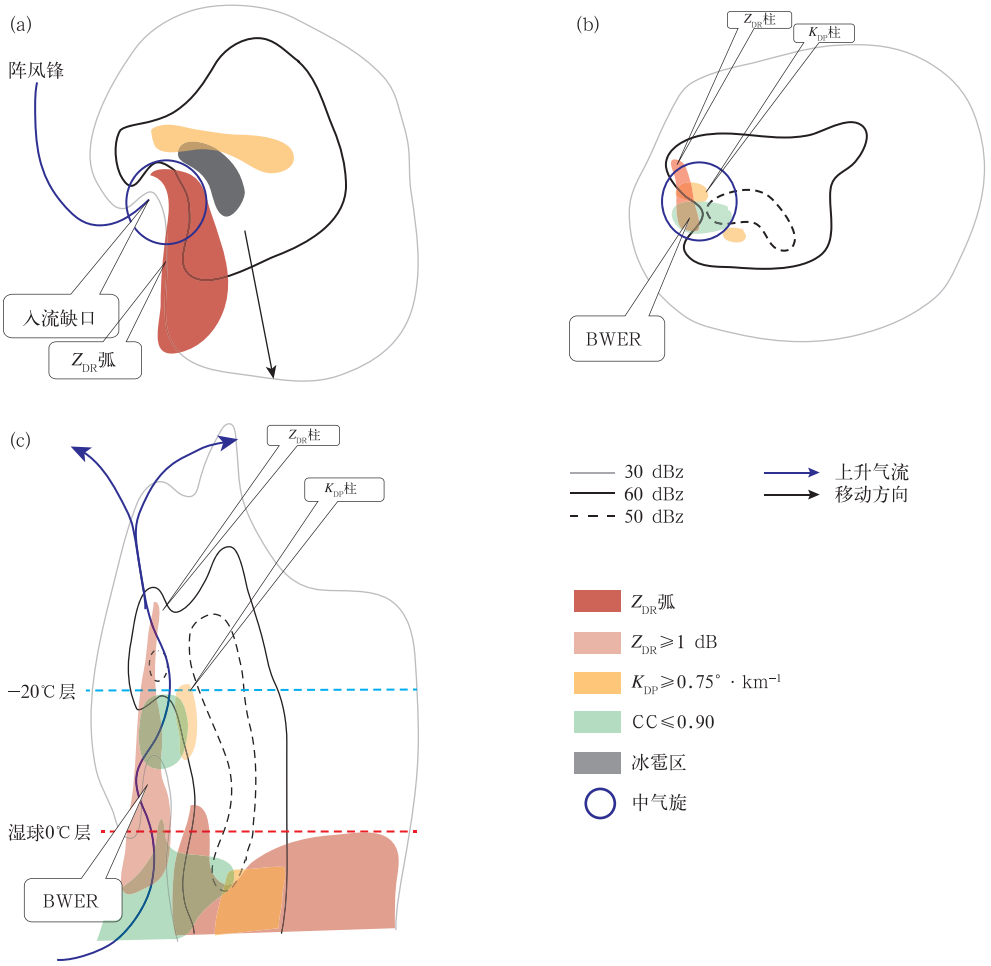


图 8 济南章丘特大冰雹超级单体偏振特征示意图
(a)底层，(b)中层，(c)垂直结构

Fig. 8 Polarization characteristics of supercell of Zhangqiu super hail in Jinan
(a) bottom layer, (b) middle layer, (c) vertical structure

Z_{DR}弧,强冰雹区位于入流缺口左侧区域,具有强的反射率因子、小的Z_{DR}和小的 CC。章丘超级单体风暴中层(约 6 km 高度)强上升气流(BWER)周围分布有Z_{DR}柱、K_{DP}柱和 CC 小值区,但形态结构与 Kumjian and Ryzhkov(2008)、Kumjian et al(2010)、潘佳文等(2021)、刁秀广和郭飞燕(2021)所归纳的不同,Z_{DR}柱和 CC 不是呈环状或半环状分布,但在较低的湿球 0℃层附近Z_{DR}呈半环状结构,Z_{DR}环高度较低。

垂直结构上(图 8c),风暴 BWER 一侧为强上升气流区,0℃层高度以下分布有Z_{DR}环,0℃层高度以上有较高的Z_{DR}柱,Z_{DR}环和Z_{DR}柱对应的K_{DP}较小,以少量偏大的液态粒子或小的湿冰粒子为主。BWER 东侧为深厚的强回波墙,50 dBz 以上反射率因子达到 10 km 高度以上,湿球 0℃层高度以上Z_{DR}、K_{DP}较小而 CC 较大,基本为相对干的冰相粒子,包括大、小冰雹粒子及霰粒子,湿球 0℃层高度以上约 9.5 km 的厚度内含有丰富的冰相粒子;湿球 0℃层高度以下出现融化,Z_{DR}和K_{DP}开始增大,下降到 1 km 高度时融化现象更加明显,大的液态雨滴、小的融化冰粒子及冰雹粒子共存。降水粒子下降过程中重力拖曳产生下沉气流,融化降温进一步加强下沉气流强度,等等,多种因素在地面出现下击暴流天气。

5　结　论

利用济南 S 波段双偏振雷达探测资料,定性分析了 2021 年 7 月 9 日章丘地区的一次特大冰雹超级单体风暴垂直结构及不同高度层双偏振特征,讨论了此次强风暴动力结构及云微物理特征,给出双偏振特征分布示意图,并与国内外超级单体风暴双偏振概念模型进行了对比,得出如下结论。

(1)章丘超级单体风暴产生在西北气流形势背景下,具有强的垂直风切变和强的对流有效位能。风暴历时较长(约 250 min),移动缓慢,中气旋持续时间约 190 min,且旋转强度较强。成熟阶段,风暴西侧与阵风锋交汇区域不断激发新生单体,并与主体回波合并,导致风暴长时间维持。风暴顶强辐散,利于强中气旋的维持和强回波悬垂,也是风暴维持较长时间的关键因子之一。弱的高空引导气流与新生单体向西传播,导致风暴南移且较为缓慢。

(2)章丘超级单体风暴成熟阶段风暴最大反射率因子、垂直累积液态含水量、风暴顶高、Z_{DR}柱和K_{DP}柱高度等参数较大或高度较高,特别是Z_{DR}柱顶部达到环境温度－47℃层高度,风暴内强上升气流高度较高,环境 0℃层高度之上较厚的厚度内含有液态粒子,利于冰雹粒子的湿增长。

(3)旺盛阶段垂直结构上,强上升气流区内存在较高的Z_{DR}柱,深厚强盛的上升气流区内含有少量偏大的液态粒子或小的湿冰粒子。BWER 东侧为深厚的强回波墙,湿球 0℃层高度以上基本为相对干的冰相粒子,包括大、小冰雹粒子及霰粒子,厚度约 9.5 km。湿球 0℃层高度以下开始出现融化,Z_{DR}和K_{DP}开始增大,下降到 1 km 高度时融化现象更加明显,大的液态雨滴、小的融化冰粒子及冰雹粒子共存。

(4)风暴底层(1.0 km 高度附近)右后侧有明显的入流缺口,入流缺口前侧区域存在 4 dB 以上Z_{DR}弧,CC 差别较大,K_{DP}较小,底层上升气流区周围分布有少数大的液态粒子或小的融化冰粒子或非气象目标物粒子。强回波中心(≥60 dBz)对应小的 CC,Z_{DR}偏小,为冰雹区。风暴中层(－10℃层附近)上升气流区内存在Z_{DR}柱和K_{DP}柱(强冰雹超级单体风暴共性),同时 CC 较小,Z_H较大,一定浓度的液态粒子与湿冰雹粒子共存;其他区域Z_{DR}和K_{DP}较小,CC 较大,主要表现为干冰雹粒子和霰粒子。

参考文献

曹俊武,刘黎平,2007. 双线偏振雷达判别降水粒子类型技术及其检验[J]. 高原气象,26(1):116-127. Cao J W,Liu L P,2007. The sensitivity study for classification of precipitation particle types based on dual-linear polarimetric radar[J]. Plateau Meteor,26(1):116-127(in Chinese).

刁秀广,2021. 2020 年 5 月 17 日和 6 月 1 日山东强冰雹风暴双极化特征分析[J]. 海洋气象学报,41(1):68-81. Diao X G,2021. Dual-polarization characteristics of severe hail storms in Shandong on 17 May and 1 June 2020[J]. J Marine Meteor,41(1):68-81(in Chinese).

刁秀广,郭飞燕,2021. 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,79(2):181-195. Diao X G,Guo F Y,2021. Analysis of polarimetric signatures in the supercell thunderstorm occurred in Zhucheng on 16 August 2019[J]. Acta Meteor Sin,79(2):181-195(in Chinese).

刁秀广,杨传凤,张骞,等,2021. 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,40(3):580-589. Diao X G,Yang C F,Zhang Q,et al,2021. Analysis on the evolution characteristics of storm parameters and Z_{DR} column for two long life supercells[J]. Plateau Meteor,40(3):580-589(in Chinese).

高丽,潘佳文,蒋璐璐,等,2021. 一次长生命史超级单体降雹演化机

制及双偏振雷达回波分析[J]. 气象,47(2):170-182. Gao L,Pan J W,Jiang L L,et al,2021. Analysis of evolution mechanism and characteristics of dual polarization radar echo of a hail caused by long-life supercell[J]. Meteor Mon,47(2):170-182(in Chinese).

高晓梅,俞小鼎,王令军,等,2018. 鲁中地区分类强对流天气环境参量特征分析[J]. 气象学报,76(2):196-212. Gao X M,Yu X D,Wang L J,et al,2018. Characteristics of environmental parameters for classified severe convective weather in central area of Shandong Province[J]. Acta Meteor Sin,76(2):196-212(in Chinese).

龚佃利,王洪,许焕斌,等,2021. 2019年8月16日山东诸城一次罕见强雹暴结构和大雹形成的观测分析[J]. 气象学报,79(4):674-688. Gong D L,Wang H,Xu H B,et al,2021. Observational analysis of a rare and severe hailstorm cloud structure and large hailstones formation on 16 August 2019 in Zhucheng,Shandong Province[J]. Acta Meteor Sin,79(4):674-688(in Chinese).

何清芳,林文,张深寿, 等,2022. 闽西南地区一次春季降雹过程的双偏振参量及降水粒子谱特征[J]. 气象,48(7):856-867. He Q F,Lin W,Zhang S S,et al,2022. Dual polarization parameters and precipitation particle spectrum characteristics of a spring hail event in southwestern Fujian[J]. Meteor Mon,48(7):856-867(in Chinese).

江慧远,魏鸣,张深寿,等,2019. 一次冬季冰雹的双偏振多普勒天气雷达回波分析[J]. 气象科学,39(6):755-762. Jiang H Y,Wei M,Zhang S S,et al,2019. An analysis on the dual polarization Doppler weather radar echo of winter hail[J]. J Meteor Sci,39(6):755-762(in Chinese).

李昭春,朱君鉴,张持岸,等,2021. 海南屯昌儋州台风雨带龙卷双偏振雷达探测分析[J]. 气象,47(9):1086-1098. Li Z C,Zhu J J,Zhang C A,et al,2021. Analysis of dual polarization radar detection of tornado typhoon rainband in Danzhou and Tunchang in Hainan Province[J]. Meteor Mon,47(9):1086-1098(in Chinese).

林文,张深寿,罗昌荣,等,2020. 不同强度强对流云系S波段双偏振雷达观测分析[J]. 气象,46(1):63-72. Lin W,Zhang S S,Luo C R,et al,2020. Observational analysis of different intensity sever convective clouds by S-band dual-polarization radar[J]. Meteor Mon,46(1):63-72(in Chinese).

刘黎平,王致君,徐宝祥,等,1997. 我国双线偏振雷达探测理论及应用研究[J]. 高原气象,16(1):99-104. Liu L P,Wang Z J,Xu B X,et al,1997. Study on theory and application of dual-polarization radar in China[J]. Plateau Meteor,16(1):99-104(in Chinese).

梅垚,胡志群,黄兴友,等,2018. 青藏高原对流云的偏振雷达观测研究[J]. 气象学报,76(6):1014-1028. Mei Y,Hu Z Q,Huang X Y,et al,2018. A study of convective clouds in the Tibetan Plateau based on dual polarimetric radar observations[J]. Acta Meteor Sin,76(6):1014-1028(in Chinese).

潘佳文,高丽,魏鸣,等,2021. 基于S波段双偏振雷达观测的雹暴偏振特征分析[J]. 气象学报,79(1):168-180. Pan J W,Gao L,Wei M,et al,2021. Analysis of the polarimetric characteristics of hail storm from S band dual polarization radar observations[J]. Acta Meteor Sin,79(1):168-180(in Chinese).

潘佳文,魏鸣,郭丽君,等,2020. 闽南地区大冰雹超级单体演变的双偏振特征分析[J]. 气象,46(12):1608-1620. Pan J W,Wei M,Guo L J,et al,2020. Dual-polarization radar characteristic analysis of the evolution of heavy hail supercell in Southern Fujian[J]. Meteor Mon,46(12):1608-1620(in Chinese).

阮悦,黄慧琳,魏鸣,等,2022. 福建冰雹云三维闪电及双偏振雷达回波特征分析[J]. 气象,48(4):442-451. Ruan Y,Huang H L,Wei M,et al,2022. Analysis of three dimensional lightning and dual-polarization radar echo characteristics of hail cloud over Fujian[J]. Meteor Mon,48(4):442-451(in Chinese).

申高航,高安春,李君,2021. 雨滴谱及双偏振雷达等资料在一次强降水过程中的应用[J]. 气象,47(6):737-745. Shen G H,Gao A C,Li J,2021. Application of raindrop spectrum and dual polarization radar data to a heavy rain process[J]. Meteor Mon,47(6):737-745(in Chinese).

苏永彦,刘黎平,2022. S波段双偏振雷达和X波段相控阵天气雷达中气旋识别结果对比[J]. 气象,48(2):229-244. Su Y Y,Liu L P,2022. Comparison of mesocyclone identification results between S-band dual polarization radar and X-band phased array weather radar[J]. Meteor Mon,48(2):229-244(in Chinese).

王洪,万齐林,尹金方,等,2016. 双线偏振雷达资料在数值模式中的应用:模拟器的构建[J]. 气象学报,74(2):229-243. Wang H,Wan Q L,Yin J F,et al,2016. Application of the dual-polarization radar data in numerical modeling studies: construction of the simulator[J]. Acta Meteor Sin,74(2):229-243(in Chinese).

王洪,吴乃庚,万齐林,等,2018. 一次华南超级单体风暴的S波段偏振雷达观测分析[J]. 气象学报,76(1):92-103. Wang H,Wu N G,Wan Q L,et al,2018. Analysis of S-band polarimetric radar observations of a hail-producing supercell[J]. Acta Meteor Sin,76(1):92-103(in Chinese).

王一童,王秀明,俞小鼎,2022. 产生致灾大风的超级单体回波特征[J]. 应用气象学报,33(2):180-191. Wang Y T,Wang X M,Yu X D,2022. Radar characteristics of straight-line damaging wind producing supercell storms[J]. J Appl Meteor Sci,33(2):180-191(in Chese).

夏凡,龚佃利,潘佳文,等,2023a. 双偏振雷达水凝物分类算法优化及在雹暴云的应用分析[J]. 气象,49(11):1343-1358. Xia F,Gong D L,Pan J W,et al,2023a. The hydrometeor classification optimum algorithm for polarimetric radar and its application for the hailstorm cloud[J]. Meteor Mon,49(11):1343-1358(in Chinese).

夏凡,吴炜,张乐坚, 等,2023b. 基于S波段双偏振雷达融化层识别算法的研究[J]. 气象,49(2):146-156. Xia F,Wu W,Zhang L J,et al,2023b. Study of designation algorithm of the melting layer based on S-band dual-polarization radar[J]. Meteor Mon,49(2):146-156(in Chinese).

许焕斌,段英,2001. 冰雹形成机制的研究并论人工雹胚与自然雹胚的"利益竞争"防雹假说[J]. 大气科学,25(2):277-288. Xu H B,

Duan Y,2001. The mechanism of hailstone's formation and the hail-suppression hypothesis:"beneficial competition"[J]. Chin J Atmos Sci,25(2):277-288(in Chinese).

许焕斌,段英,2002. 强对流(冰雹)云中水凝物的积累和云水的消耗[J]. 气象学报,60(5):575-584. Xu H B,Duan Y,2002. The accumulation of hydrometeor and depletion of cloud water in strongly convective cloud(hailstorm)[J]. Acta Meteor Sin,60(5):575-584(in Chinese).

俞小鼎,2014. 关于冰雹的融化层高度[J]. 气象,40(6):649-654. Yu X D,2014. A note on the melting level of hail[J]. Meteor Mon,40(6):649-654(in Chinese).

张鸿发,郄秀书,王致君,等,2001. 偏振雷达观测强对流雹暴云[J]. 大气科学,25(1):38-48. Zhang H F,Qie X S,Wang Z J,et al,2001. Polarization radar observations on hailstorms[J]. Chin J Atmos Sci,25(1):38-48(in Chinese).

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2012. GB/T 27957—2011 冰雹等级[S]. 北京:中国标准出版社:3. Inspection and Quarantine of the People's Republic of China,Standardization Administration,2012. GB/T 27957—2011 Grade of hail[S]. Beijing:China Standards Press:3(in Chinese).

Bringi V N,Liu L,Kennedy P C,et al,1996. Dual multiparameter radar observations of intense convective storms:the 24 June 1992 case study[J]. Meteor Atmos Phys,59(1):3-31.

Hall M P M,Cherry S M,Goddard J W F,et al,1980. Rain drop sizes and rainfall rate measured by dual-polarization radar[J]. Nature,285(5762):195-198.

Hall M P M,Goddard J W F,Cherry S M,1984. Identification of hydrometeors and other targets by dual-polarization radar[J]. Radio Sci,19(1):132-140.

Hubbert J,Bringi V N,Carey L D,et al,1998. CSU-CHILL polarimetric radar measurements from a severe hail storm in eastern Colorado[J]. J Appl Meteor,37(8):749-775.

Kumjian M R,2013a. Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part Ⅰ:description of the polarimetric radar variables[J]. J Operat Meteor,1(19):226-242.

Kumjian M R,2013b. Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part Ⅱ:Warm- and cold-season applications[J]. J Operat Meteor,1(20):243-264.

Kumjian M R,Khain A P,Benmoshe N,et al,2014. The anatomy and physics of Z_{DR} columns:investigating a polarimetric radar signature with a spectral bin microphysical model[J]. J Appl Meteor Climatol,53(7):1820-1843.

Kumjian M R,Ryzhkov A V,2008. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms[J]. J Appl Meteor Climatol,47(7):1940-1961.

Kumjian M R,Ryzhkov A V,2009. Storm-relative helicity revealed from polarimetric radar measurements[J]. J Atmos Sci,66(3):667-685.

Kumjian M R,Ryzhkov A V,Melnikov V M,et al,2010. Rapid-scan super-resolution observations of a cyclic supercell with a dual-polarization WSR-88D[J]. Mon Wea Rev,138(10):3762-3786.

Loney M L,Zrnić D S,Straka J M,et al,2002. Enhanced polarimetric radar signatures above the melting level in a supercell storm[J]. J Appl Meteor Climatol,41(12):1179-1194.

Park H S,Ryzhkov A V,Zrnić D S,et al,2009. The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR-88D:description and application to an MCS[J]. Wea Forecasting,24(3):730-748.

Rasmussen R M,Heymsfield A J,1987. Melting and shedding of graupel and hail. Part Ⅲ:investigation of the role of shed drops as hail embryos in the 1 August CCOPE severe storm[J]. J Atmos Sci,44(19):2783-2803.

Romine G S,Burgess D W,Wilhelmson R B,2008. A dual-polarization-radar-based assessment of the 8 May 2003 Oklahoma City area tornadic supercell[J]. Mon Wea Rev,136(8):2849-2870.

Ryzhkov A V,Schuur T J,Burgess D W,et al,2005. The joint polarization experiment:polarimetric rainfall measurements and hydrometeor classification[J]. Bull Amer Meteor Soc,86(6):809-824.

Seliga T A,Bringi V N,1976. Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation[J]. J Appl Meteor Climatol,15(1):69-76.

Snyder J C,Bluestein H B,Venkatesh V,et al,2013. Observations of polarimetric signatures in supercells by an X-band mobile Doppler radar[J]. Mon Wea Rev,141(1):3-29.

Snyder J C,Ryzhkov A V,Kumjian M R,et al,2015. A Z_{DR} column detection algorithm to examine convective storm updrafts[J]. Wea Forecasting,30(6):1819-1844.

Straka J M,Zrnic D S,Ryzhkov A V,2000. Bulk hydrometeor classification and quantification using polarimetric radar data:synthesis of relations[J]. J Appl Meteor,39(8):1341-1372.

Warning Decision Training Branch,2013. Dual-polarization radar operations course[EB/OL]. NOAA:142-157. https://training.weather.gov/wdtd/courses/dualpol/documents/DualPolOpsStudentGuide.pdf.

(本文责编:俞卫平)