

王福侠,薛学武,杨吕玉慈,等,2024.一次长生命史超级单体风暴双偏振参量结构及演变特征[J].气象,50(10):1216-1230.
Wang F X, Xue X W, Yang L Y C, et al, 2024. Dual-polarization parameter structure and evolution characteristics of a long-life supercell storm[J]. Meteor Mon, 50(10):1216-1230(in Chinese).

一次长生命史超级单体风暴双偏振参量 结构及演变特征*

王福侠^{1,2} 薛学武³ 杨吕玉慈¹ 裴宇杰¹

1 河北省气象台,石家庄 050021

2 河北省气象与生态环境重点实验室,石家庄 050021

3 河北省人工影响天气中心,石家庄 050021

提 要: 利用石家庄新乐 S 波段双偏振多普勒天气雷达探测资料和常规气象观测资料,以及区域自动气象站观测资料,对 2020 年 6 月 25 日造成河北中部大冰雹的长生命史超级单体风暴双偏振参量结构演变特征进行了分析。结果表明:超级单体风暴产生在强热力不稳定和强的垂直风切变环境下。冰雹增长过程中超级单体风暴低层强回波中心大冰雹与强降水共存,反射率因子超过 65 dBz,对应较小的差分反射率因子(Z_{DR})和相关系数(CC),超级单体风暴左侧前后强回波区为弱降雨和少量融化的小冰雹,反射率因子在 50~55 dBz, Z_{DR} 、CC 和差分传播相移率(K_{DP})较大。超级单体风暴中层的 Z_{DR} 柱、CC 低值区、 K_{DP} 柱位于有界弱回波区左右两侧,左侧 CC 低值区位于强回波中心,由于存在混合相态且结构差异较大,CC 更小;右侧 K_{DP} 柱更强,位于有界弱回波区内。高层狭窄的 Z_{DR} 柱位于强回波中心右侧边缘,CC 低值区位于强回波中心。在中高层有界弱回波区和强回波中心区域存在强的上升气流。在大冰雹下落过程中, Z_{DR} 洞扩展到最低仰角且宽度加大,这可作为大冰雹即将落地的判据。低层 Z_{DR} 弧加强表明低层旋转加强。虽然强回波中心对应的 CC 低值区、 Z_{DR} 柱高度迅速下降且强度明显减弱,但一直存在,表明较强上升气流一直存在,因此超级单体能够长时间维持。

关键词: 超级单体,双偏振参量, Z_{DR} 柱,CC 低值区

中图分类号: P412, P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.031801

Dual-Polarization Parameter Structure and Evolution Characteristics of a Long-Life Supercell Storm

WANG Fuxia^{1,2} XUE Xuewu³ YANG Lüyuci¹ PEI Yujie¹

1 Hebei Meteorological Observatory, Shijiazhuang 050021

2 Hebei Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment, Shijiazhuang 050021

3 Weather Modification Center of Hebei Province, Shijiazhuang 050021

Abstract: Based on the detection data of S-band dual-polarization Doppler weather radar in Xinle of Shijiazhuang, Hebei Province, the conventional meteorological observation data and the regional automatic weather station observation data, this article analyzes the evolution characteristics of dual-polarization parameter structure of long-life supercell storm that caused large hail in central Hebei on 25 June 2020. The results show that the supercell storm occurred in an environment of strong thermal instability and strong vertical wind shear. With the process of hail growth, large hails coexisted with severe precipitation

* 中国气象局创新发展专项(CXFZ2024J025、CXFZ2023J012)、河北省科技厅重点研发计划社会公共事业创新专项(23375401D)、河北省气象局暴雨强对流野外观测和灾害性天气机理创新团队共同资助

2023 年 8 月 8 日收稿; 2024 年 8 月 13 日收修定稿

第一作者:王福侠,主要从事灾害性天气预报研究. E-mail:554661990@qq.com

in the strong low-level echo center of the supercell storm, and the reflectivity factor exceeded 65 dBz, corresponding to small differential reflectivity factor (Z_{DR}) and correlation coefficient (CC). Weak rainfall and a small amount of melted hails were located in the strong echo area on the left side of the supercell storm. The reflectivity factor was between 50 dBz and 55 dBz, and Z_{DR} , CC and the specific differential phase (K_{DP}) were larger. The Z_{DR} column, CC low value area and K_{DP} column in the middle layer of the supercell storm were located on the left and right sides of the bounded weak echo area, and the left CC low value area was in the center of the strong echo. The CC was smaller due to the existence of mixed phases of precipitation and the larger structural differences. The right K_{DP} column was stronger and located within bounded weak echo area. The narrow Z_{DR} column in the upper layer was located on the right edge of the strong echo center, and the CC low value area was in the strong echo center. There was a strong updraft in the strong echo center area and the bounded weak echo area in the middle and upper layers. The Z_{DR} hole expanded to the lowest elevation angle and the width increased during the falling process of large hails. This can be used as the criterion for judging the imminent landing of large hail. The low-level Z_{DR} arc intensification indicated that rotation intensifies in the low level. Although the height of the Z_{DR} column and CC low value area in the strong echo center dropped rapidly and the intensity was obviously weakened, they existed all the time, indicating that the strong updraft was there all the time, which supported the long time maintenance of the supercell.

Key words: supercell, dual-polarization parameter, Z_{DR} column, CC low value area

引 言

冰雹是强对流天气的主要灾害之一。强对流天气的短期预报主要参考基于环境条件和物理要素的分类潜势预报结果(孙继松等,2014;俞小鼎和郑永光,2020),基于数值预报模式和对流参数指标构建的分类强对流天气概率预报也逐步在业务中应用(曾明剑等,2015;雷蕾等,2012),从2010—2015年中央气象台强对流24 h分类预报检验结果来看,冰雹和雷暴大风的TS评分基本在0.05以下,预报能力远低于短时强降水(唐文苑等,2017)。

从20世纪80年代末开始,随着多普勒天气雷达网的布设,国内气象部门陆续开展了强对流天气临近预报预警业务。相关学者利用雷达观测资料对冰雹的观测特征进行了大量研究,直径2 cm以上强冰雹的雷达特征较为一致:很高的反射率因子、高悬的强回波(俞小鼎等,2005;胡胜等,2015)、异常大的垂直累积液态水含量值(俞小鼎等,2005;刁秀广等,2008;刘治国等,2008)、弱回波区和有界弱回波区(俞小鼎等,2005)、三体散射(Lemon,1998;俞小鼎等,2005;廖玉芳等,2007;胡胜等,2015),到目前为止天气雷达仍然是强对流临近预警的主要工具(俞小鼎等,2012;俞小鼎和郑永光,2020;孙继松,

2023)。

造成强冰雹的对流风暴类型有超级单体风暴、多单体风暴和脉冲风暴等几种(王昂生和黄美元,1978)。美国90%以上的超级单体风暴会导致强冰雹、龙卷和雷暴大风(Doswell III,2001)。对发生在中国的224例超级单体风暴事件的统计分析(Yu et al,2012)表明,导致强冰雹、龙卷或雷暴大风的概率在80%以上。研究发现雹云中只有10%能发展成超级单体风暴,但冰雹灾害的80%是超级单体造成的,因此对于冰雹的研究应抓住超级单体风暴(许焕斌,2012;俞小鼎等,2024)。

相较于常规天气雷达,双偏振雷达可以发射水平和垂直两个方向的偏振电磁波,除获得水平反射率因子(Z_H)和基本径向速度(V)等常规探测参量外,还能得到差分反射率因子(Z_{DR})、相关系数(CC)、差分传播相移率(K_{DP})等偏振参量,可以识别降水系统内水凝物粒子种类、相态和大小,能够更精细地判断冰雹的大小。研究发现超级单体风暴还有一些独特的双偏振特征,在超级单体风暴低层前侧入流区反射率因子梯度大的部位往往会出现 Z_{DR} 弧(Kumjian and Ryzhkov,2008;Kumjian,2013b;刁秀广和郭飞燕,2021;王洪等,2018),而风暴中层强上升气流区周围会出现环状或半环状 Z_{DR} 环和CC环(Kumjian et al,2010;Kumjian and Ryzhkov,

2008; Kumjian, 2013a; 刁秀广和郭飞燕, 2021; 潘佳文等, 2020b), 0°C 层高度以上通常会出现 Z_{DR} 柱或 K_{DP} 柱, 在多数情况下 Z_{DR} 柱或 K_{DP} 柱是分离的 (Snyder et al, 2013; Kumjian and Ryzhkov, 2008; Kumjian et al, 2010; 刁秀广和郭飞燕, 2021)。 Z_{DR} 柱与强上升气流区相对应, 其高度与上升气流存在正相关关系, 并可以作为判别风暴强度的指标之一 (Conway and Zrníc, 1993; Ryzhkov et al, 1994; Kumjian et al, 2014; 刁秀广和郭飞燕, 2021; 刁秀广等, 2021; 潘佳文等, 2020b; 王洪等, 2018; 龚佃利等, 2021)。 0°C 层高度以上 K_{DP} 大值区的出现表明有丰富的液态水和(或)湿冰存在, 因此, K_{DP} 柱可作为深厚对流上升气流特性的观测量度 (Hubbert et al, 1998; Loney et al, 2002; van Lier-Walqui et al, 2016)。 由于雷暴和雷达的相对位置以及雷暴后侧的降水等原因, 即使雷暴中含有冰雹粒子, 有时并不一定能够观测到三体散射 (胡胜等, 2015), 但是双偏振雷达中 Z_{DR} 和 CC 产品上的三体散射更加明显 (潘佳文等, 2020b; 陶岚等, 2019; 高丽等, 2021; 龚佃利等, 2021)。

河北石家庄新乐雷达 2018 年升级为双偏振雷达 (CINRAD/SAD)。 基于该雷达探测资料, 对 2020 年 6 月 25 日造成大冰雹的长生命史超级单体双偏振参量特征进行详细分析, 了解该类超级单体风暴的双偏振参量结构演变特征, 以为为大冰雹的精细预警提供一些参考。

1 天气实况及天气背景

1.1 天气实况

2020 年 6 月 25 日 14:00—23:00 (北京时, 下同) 河北保定、沧州、衡水部分地区遭受强冰雹、雷暴大风等强对流天气袭击 (图 1), 造成严重经济损失。 造成以上地区强对流天气的强风暴属于长生命史超级单体风暴, 该风暴于 12:48 在山西灵丘生成, 21:48 在山东乐陵减弱消散, 历时 9 h, 先后在河北保定、沧州、衡水等下辖的 12 个县 (区、市) 出现冰雹天气, 受灾最为严重的保定蠡县、沧州肃宁冰雹持续了约 1 h 12 min (17:54—19:06), 肃宁气象站观测到冰雹直径 3.5 cm, 网络报道两地冰雹大如鸡蛋; 另外, 沧州东光气象站也观测到直径 3.2 cm 的较大冰雹。 降雹时保定清苑、沧州肃宁和献县伴有 8 级

以上大风, 最大风力 $24.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (献县段村镇), 多地伴有短时强降水, 最大降水强度 $34.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (沧州泊头万寨)。 受风雹影响, 沧州肃宁直接经济损失 3390.19 万元, 农作物成灾面积 3051.8 hm^2 。 风暴路径及雷达站分布见图 1。

1.2 天气背景和环境参数

2020 年 6 月 25 日 08:00 (图 2), 蒙古国上空有冷涡, 中心位于乌兰巴托和我国二连浩特之间, 500 hPa 冷涡槽线南端位于内蒙古呼和浩特与河北

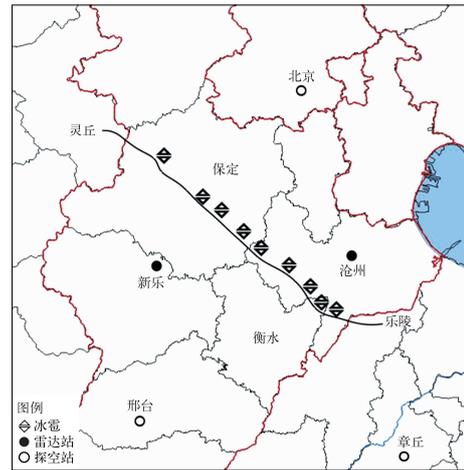
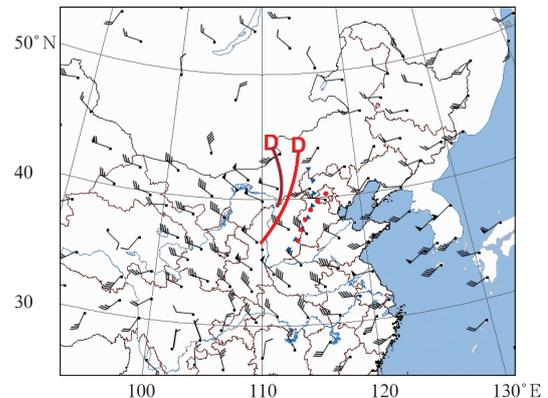


图 1 2020 年 6 月 25 日风暴路径 (黑线) 及雷达站分布
Fig. 1 Storm track (black line) on 25 June 2020 and distribution of radar station



注: 棕色实线为 500 hPa 槽线, 红色实线为 850 hPa 槽线, 蓝色三角线为 500 hPa 温度槽, 红色点线为 850 hPa 温度脊。

图 2 2020 年 6 月 25 日 08:00 500 hPa 风场 (风羽) 和天气形势配置
Fig. 2 Configuration of 500 hPa wind field (barb) and synoptic situation at 08:00 BT 25 June 2020

张家口之间,在河北东部经山东到安徽有一个长波槽,河北中南部受槽后西北气流控制。850 hPa 冷涡槽线从呼和浩特经山西北部到陕西延安附近。河北中南部 500 hPa 冷温槽叠加在 850 hPa 温度脊之上,上冷下暖,存在热力不稳定。20:00 低涡系统东移,河北中南部 500 hPa 西北风加大形成急流,垂直风切变加强,有利于强对流组织化加强。

在冰雹区域南北两侧有 3 个探空站,分别是北京、河北邢台、山东章丘(图 1)。分析北京 25 日 14:00 和 20:00,邢台和章丘 20:00 探空数据(表 1),850 hPa 和 500 hPa 温差($\Delta T_{850-500}$)在 26.3~28.3°C,500 hPa 温度露点差在 23.4°C 及以上(北京 20:00 除外),邢台、章丘超过 30°C,850 hPa 温度露点差在 3.5°C 及以下,抬升指数(LI)都小于等于-3.7°C,河北中南部处于较强的条件不稳定环境中。20:00,北京、邢台、章丘 500 hPa 风速加大到 21~24 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;0~6 km 风矢量差(W_{sr})加大到 25.0~29.8 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,达到强垂直风切变标准;对流有效位能(CAPE)达到 1017 $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 及以上,抬升

凝结高度(LCL)较高在 1.4 km 及以上(北京 20:00 除外),对流抑制能量(CIN)较小,都在 66.0 $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下,以上环境参数达到或超过了强对流的阈值(俞小鼎等,2012;俞小鼎和郑永光,2020;孙继松等,2014),有利于强对流发展。25 日 13:00 对流在山西灵丘北部地面中尺度辐合线附近触发,沿引导气流向东南方向移动,在强的对流不稳定和强垂直风切变环境下发展演变为超级单体风暴。

2 风暴参量演变特征

造成蠡县、肃宁大冰雹的单体 6 月 25 日 12:48 在山西灵丘北部生成,沿引导气流向东南方向移动,13:48 进入河北保定涞源,16:24 东移到保定易县南部发展为超级单体风暴,20:48 东移到沧州东光东部减弱为多单体强风暴,21:12 进入山东德州宁津,21:48 在乐陵减弱消散,生命史长达 9 h,移动速度约 35 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

表 1 2020 年 6 月 25 日 3 个探空站环境参数

Table 1 Environmental physical variables of three radiosonde stations on 25 June 2020

| 探空站 | 时间 /BT | $\Delta T_{850-500}$ /°C | LI /°C | W_{sr} /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | CAPE /($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$) | CIN /($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$) | LCL /km | 500 hPa 风速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 500 hPa(850 hPa) 温度露点差 /°C | 0°C(湿球 0°C), -10°C -20°C, -30°C 层高度 /km |
|-----|--------|--------------------------|--------|--|---|--|---------|--|----------------------------|---|
| 北京 | 14:00 | 27.2 | -5.0 | 16.8 | 1587.9 | 0.0 | 1.6 | 15 | 23.4(3.5) | 3.8(3.3), 5.3, 6.7, 8.0 |
| 北京 | 20:00 | 26.3 | -3.7 | 25.6 | 1017.2 | 24.3 | 1.1 | 23 | 10.9(0.9) | 3.7(3.5), 5.2, 6.7, 8.1 |
| 邢台 | 20:00 | 28.3 | -6.7 | 25.0 | 2026.3 | 54.2 | 1.4 | 21 | 30.6(3.2) | 4.2(3.8), 5.9, 7.4, 8.6 |
| 章丘 | 20:00 | 27.8 | -4.5 | 29.8 | 1260.8 | 65.2 | 1.4 | 24 | 40.6(3.4) | 4.2(3.5), 5.8, 7.3, 8.6 |

25 日 13:30 后多单体风暴迅速发展,14:06—20:42(超过风暴生命期的 2/3)基于单体的垂直累积液态含水量(VIL)均超过 60 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$,14:06—21:12 风暴最大反射率因子(Z_M)都在 63 dBz 以上(图 3)。16:24—20:42 为超级单体风暴,持续 4 h 18 min,约占风暴生命期的 1/2,风暴的 Z_M 、VIL 平均值分别为 74.8 dBz 和 66.3 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$,最大值分别为 81 dBz 和 82 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$,中气旋底高和顶高平均值分别为 3.9 km 和 6.7 km,最大值分别为 6 km 和 8 km,最小值为 1.4 km 和 4.5 km,平均厚度为 2.8 km,最强切变高度平均值为 5.5 km,18:06—18:24 中气旋厚度超过 4.5 km,18:12 中气旋最为深厚,达到 6.5 km,最强切变位于中层,高度为 4.1 km,进入成熟阶段(图 3)。17:54—20:30 蠡县、肃宁、东光大冰雹持续期间一直伴有明显三体散射(TBSS)和旁瓣回波,部分时次观测到有界弱回波

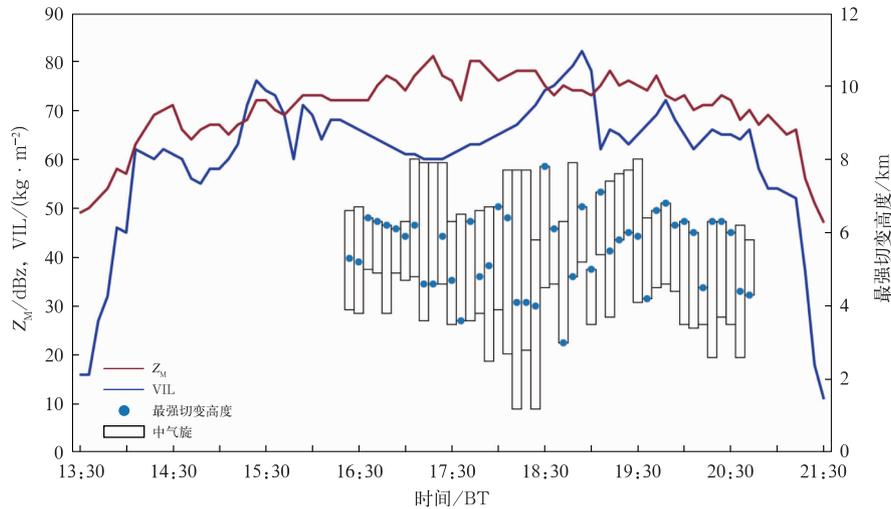
区(BWER)。

3 大冰雹增长过程中超级单体风暴双偏振参量结构特征

据媒体报道,蠡县、肃宁冰雹有鸡蛋大小,蠡县距离石家庄新乐雷达站更近(80~90 km),18:12 超级单体位于蠡县北部,风暴中心距离雷达 86 km,中气旋最深厚处于成熟阶段,BWER 厚约 5 km,上升气流强烈, Z_M 、风暴顶高、VIL 分别为 78 dBz、9.4 km 和 67 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (表略),此时大冰雹还没有下降,选取这一时刻分析大冰雹增长过程中的雷达特征。

3.1 低层特征

图 4 是 6 月 25 日 18:12 新乐双偏振雷达 0.5° 仰角产品。中气旋中心距离雷达站 86 km,距离地



注:柱顶和底分别为中气旋的顶和底。

图 3 2020 年 6 月 25 日 13:30—21:30 单体风暴特征参量随时间的演变

Fig. 3 Temporal evolution of cell storm structure parameters from 13:30 BT to 21:30 BT 25 June 2020

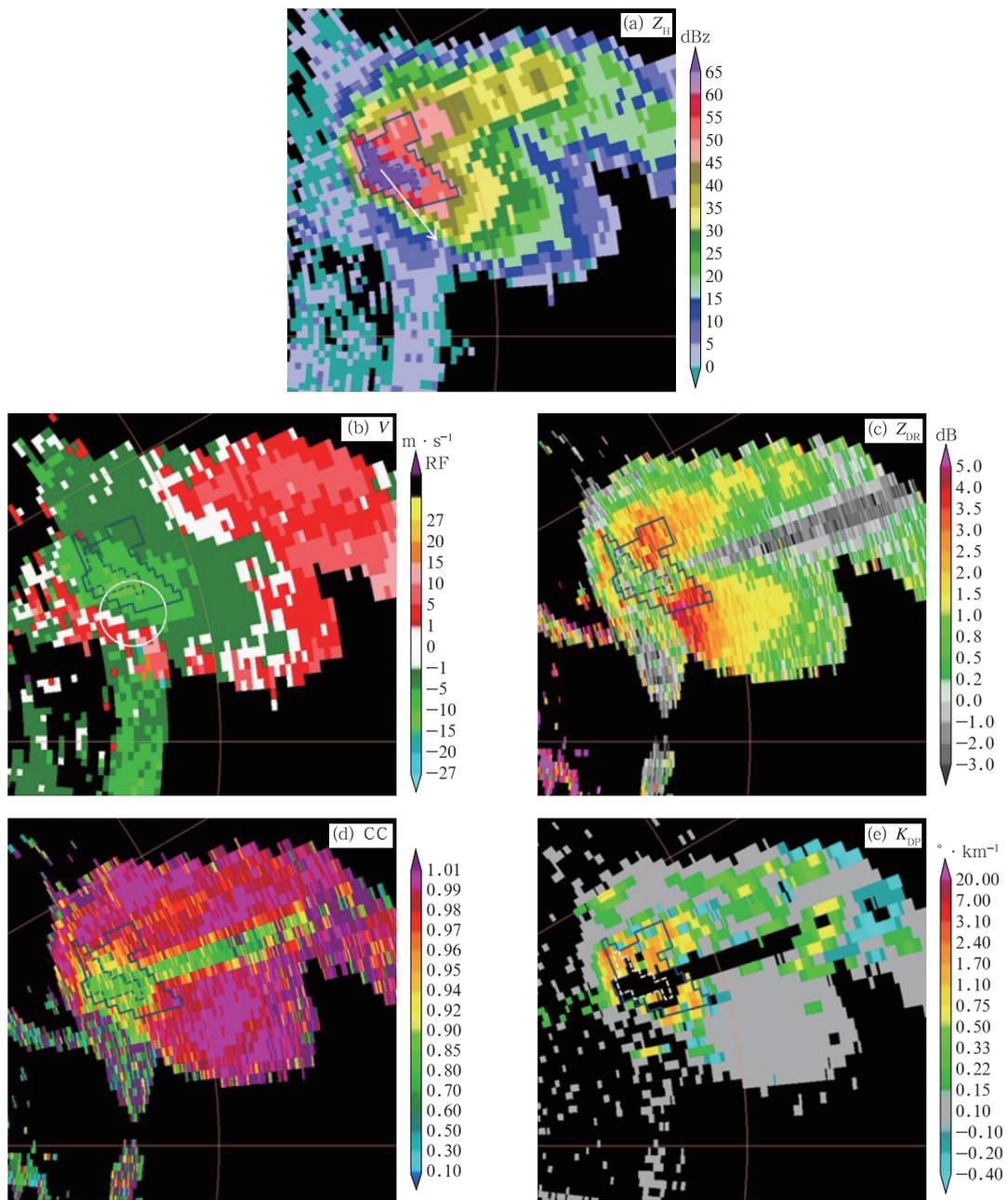
面约 1.3 km。由图可见,超级单体风暴低层 50 dBz 以上回波区长约 15 km,宽约 10 km,最大 Z_H 达到 74 dBz,有明显的旁瓣回波,右侧(相对于风暴运动方向,下同) Z_H 梯度很大,中气旋位于超级单体右前侧,呈气旋式旋转,超级单体风暴右侧边缘有明显辐合流场,存在上升气流,将粒子携带到高层。强回波中心($Z_H \geq 65$ dBz,下同)对应小的 Z_{DR} ($-2.5 \sim 1.3$ dB),有明显的负值区,强回波中心的 CC 差异大,后侧,CC 较大(0.92~0.97), K_{DP} 超过 $1^\circ \cdot \text{km}^{-1}$,其影响的区域站 18:00—18:20 逐 5 min 降水量都在 6 mm 以上,最大为 12.8 mm,降水强度较大,因此推断有较大冰雹(直径 2~5 cm,下同)并伴随强降水。其他区域 CC 较小(0.66~0.90), K_{DP} 不显示,最小 Z_{DR} 和最小 CC 位置基本重合,可以推断强回波中心有大冰雹(直径 5 cm 以上,下同)。超级单体风暴左后侧强回波区($50 \text{ dBz} \leq Z_H < 65$ dBz,下同)对应的 Z_H 大部分在 55 dBz 以下, Z_{DR} 较大(1.3~4.7 dB),CC 较大(0.96~0.99), K_{DP} 较大($0.7 \sim 1.9^\circ \cdot \text{km}^{-1}$),受其影响的区域站 18:00—18:15 逐 5 min 降水量都在 1.3 mm 以下,降水强度不大,由此可以推断此区域以弱降水为主,伴有少量的大雨滴和融化的小冰雹(直径 1~2 cm,下同)。超级单体左前侧强回波区 Z_H 大部分在 55 dBz 以下, K_{DP} ($0.7 \sim 1.9^\circ \cdot \text{km}^{-1}$)与左后侧相当,但 Z_{DR} ($2.8 \sim 5.4$ dB)和 CC(0.97~0.99)更大一些,受其

影响的区域站 18:10—18:20 的 10 min 降水量只有 0.3 mm,由此可以推断为融化的小冰雹。

在图 4c 中方位角 74° 附近,距离雷达 95~134 km 存在明显的径向 Z_{DR} 负值区(最小值在 $-5 \sim -4$ dB),研究表明这种现象是强冰雹导致的电磁波衰减造成的(Ryzhkov, 2007; 刁秀广等, 2021),因此这一现象也可以作为强冰雹的判断依据。对应区域 CC 为明显的小值区($CC \leq 0.90$),这种现象是强回波核径向上非均匀波束充塞所致。

3.2 中层特征

图 5 为 6 月 25 日 18:12 新乐双偏振雷达 3.3° 仰角产品,图 5f 在 Z_H 上叠加了 Z_{DR} 柱、 K_{DP} 柱以及 CC 低值区轮廓线。中气旋中心距离雷达站 85 km,距离地面约 5.4 km,略高于北京 -10°C 层。由图可见,超级单体风暴中层 50 dBz 以上回波区长约 20 km,宽约 12 km,最大 Z_H 达到 78 dBz,有明显的旁瓣回波,中气旋位于超级单体右侧,呈气旋式旋转,中气旋内部有明显的 BWER($46 \text{ dBz} \leq Z_H \leq 55$ dBz;图 5a, 5b 中黑色实线),表明存在强烈上升气流。BWER(图 5c 中黑色点线)左侧和右侧出现 Z_{DR} 柱($Z_{DR} \geq 2$ dB;图 5c, 5f 中黑色实线), Z_{DR} 柱内 Z_{DR} 最大值为 3.75 dB,位于 BWER 左侧的强回波中心;CC 低值区($CC \leq 0.70$;图 5d, 5f 中白色实线)和 K_{DP} 柱($K_{DP} \geq 1^\circ \cdot \text{km}^{-1}$;图 5e, 5f 中绿色实线)



注:蓝色实线为 50 dBz 等值线,蓝色和白色虚线为 65 dBz 等值线,图 a 中白色箭头代表风暴移动方向,图 b 中白色圆圈所示为中气旋。

图 4 2020 年 6 月 25 日 18:12 新乐雷达 0.5° 仰角各探测参量
 Fig. 4 Detection parameters at 0.5° elevation of Xinle Radar at 18:12 BT 25 June 2020

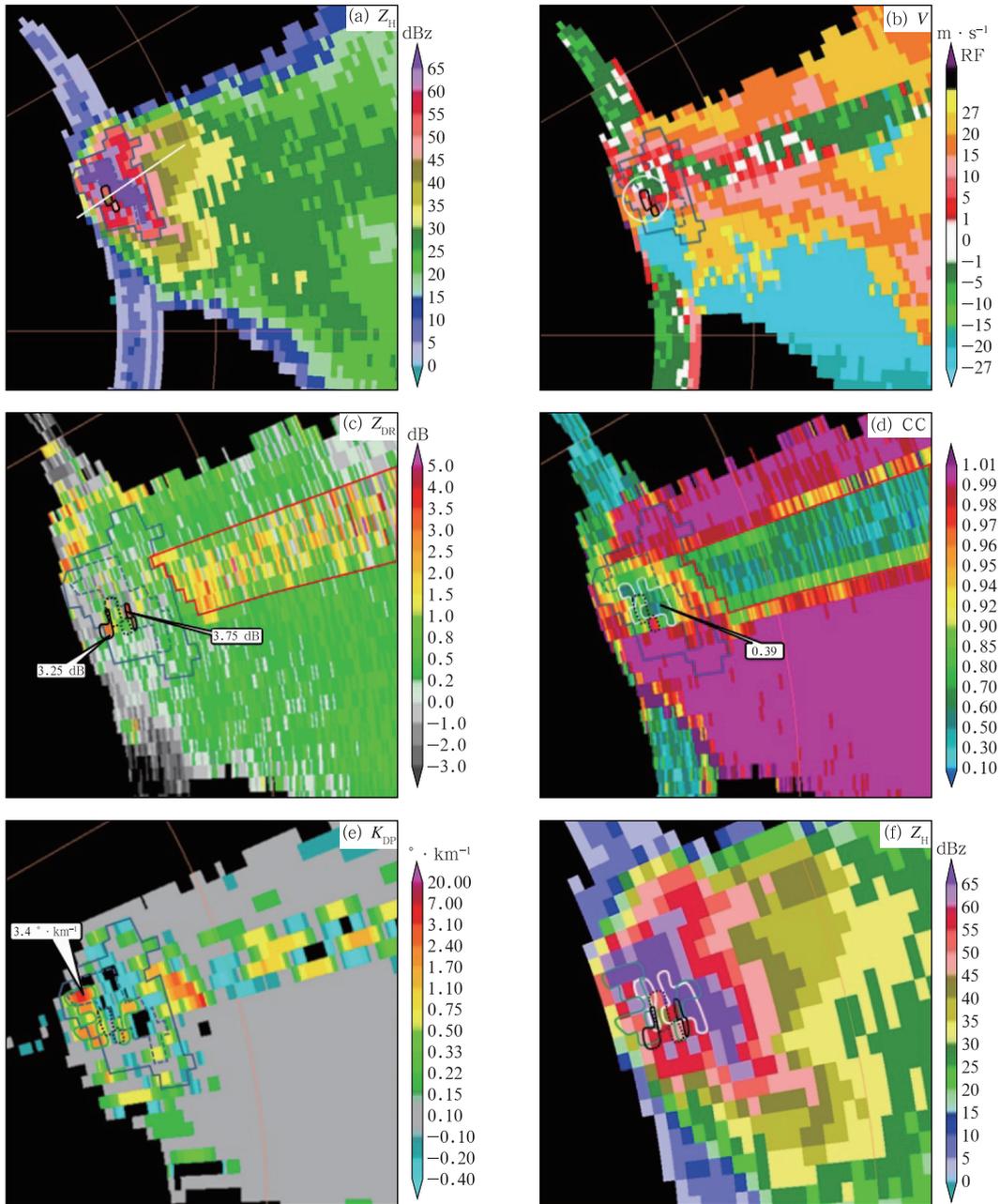
位于 BWER 两侧,另外,在强回波中心 Z_{DR} 柱的东侧和北侧还存在 Z_{DR} 柱($Z_{DR} \geq 1$ dB)。从 Z_{DR} 柱、CC 低值区和 K_{DP} 柱的分布和范围(图 5f)可见, Z_{DR} 柱范围最小,位于超级单体的前侧,CC 低值区和 K_{DP} 柱的范围较大,更偏于超级单体的后侧,CC 低值区在强回波中心更清楚, K_{DP} 柱在右侧强回波区更明显。

超级单体中气旋内部有强烈上升气流,上升气

流携带粒子到 -10°C 以上高空,最强上升气流区粒子减少,反射率减小,形成 BWER。 Z_{DR} 柱的形成与强烈的上升气流有密切的关系(Kumjian et al, 2014),由于上升气流具有正的温度扰动,冰相粒子沿着上升气流周边下落部分或全部融化,水的介电常数约是冰的 27 倍,因此探测体积内的介电常数明显增大,而 Z_{DR} 对介电常数非常敏感,最终导致上升

气流附近 Z_{DR} 增大,在 BWER 边缘形成 Z_{DR} 柱(王洪等,2018)。另外,上升气流中存在大量液态水,在上升气流边缘下落的霰或冰雹经历湿增长,导致 Z_{DR} 增大(Kumjian et al,2010)。也有学者认为 Z_{DR} 柱内大雨滴的来源可能是暖云降水的碰撞与合并过程

(Tuttle et al,1989),或者是从反射率因子悬垂回波融化的冰相粒子掉到低层入流区并重新卷入上升气流(Loney et al,2002),因此 Z_{DR} 柱内大雨滴、冰雹、霰等冰相粒子共存(王洪等,2018;潘佳文等,2020a;2020b;刁秀广等,2021)。



注:蓝色实线、虚线分别为 50 dBz、65 dBz 等值线;图 f 为图 a 局部放大;图 a 中白色直线为图 7 剖面位置;图 b 中白色圆圈所示为中气旋;图 a、b 中黑色实线、图 c~f 中黑色点线所示为 BWER;图 c、d 中红色实线所示为 TBSS;图 c、f 中黑色实线为 Z_{DR} 柱;图 d、f 中白色实线所示为 CC 低值区;图 e、f 中绿色实线所示为 K_{DP} 柱。

图 5 2020 年 6 月 25 日 18:12 新乐雷达 3.3° 仰角各探测参量

Fig. 5 Detection parameters at 3.3° elevation of Xinle Radar at 18:12 BT 25 June 2020

由图 5 可见,强回波中心 CC 低值区在 0.70 以下, Z_{DR} 存在明显负值区,说明存在大冰雹,部分区域和 Z_{DR} 柱重叠, Z_{DR} 柱内冰雹、大雨滴共存,粒子为混合相态,CC 下降,下降程度和两种相态粒子所占比例有关,所占比例相当时,CC 下降最明显。强回波中心 Z_{DR} 柱区域 CC 为 0.39~0.50,说明此区域大雨滴明显多于其他强中心区域。超级单体的前侧和后侧强回波区, Z_H 大部分在 50~60 dBz,CC 较大(0.98~0.99), Z_{DR} 较小(-1.0~0.8 dB), K_{DP} 较小(-0.8~0.1 °·km⁻¹),因此为干的小冰雹或霰。强回波中心内 CC 较小(0.39~0.92), Z_{DR} 差异较大,存在明显的负值区,最小为-2.5 dB,也有小区域出现 Z_{DR} 柱,大部分区域 K_{DP} 较小(-0.8~0.1 °·km⁻¹),但 K_{DP} 柱区域则超过 1 °·km⁻¹,表明有大的干冰雹和少量融化的较大冰雹。在右侧 K_{DP} 柱的强回波区, Z_{DR} 较小(大多在-1.0~0.5 dB),CC 较大(0.85~0.98),说明此处为融化的冰雹。

在 Z_{DR} 和 CC 产品上有清楚的 TBSS(图 5c,5d 中红色实线内区域),在强回波区的后侧 CC 很小(0.10~0.90),同时 Z_{DR} 在靠近风暴强回波区有较大值(1.0~3.5 dB),说明该区域为 TBSS(Hubbert and Bringi, 2000; Kumjian et al, 2010; 杨吉等, 2020; 刁秀广和郭飞燕, 2021; 陶岚等, 2019),在 Z_H 产品上由于靠近强回波区还存在较大范围的 35~45 dBz 回波区, TBSS 仍位于云体内部,无法识别 TBSS,因此通过 Z_{DR} 和 CC 产品能更早、更准确地识别 TBSS,可以为大冰雹预警提供信息(潘佳文等, 2020b; 高丽等, 2021)。

3.3 高层特征

图 6 为 6 月 25 日 18:12 新乐双偏振雷达 6.0° 仰角产品。中气旋中心距离雷达站 82 km, 距离地面约 9.2 km, 位于大冰雹有效增长层之上近 1 km。由图可见,超级单体风暴高层 50 dBz 及以上强回波区长约 15 km, 宽约 9 km, 最大 Z_H 达到 71.5 dBz, 超级单体风暴仍有旁瓣回波。中气旋位于超级单体右侧, 呈气旋式旋转。BWER 尺度减小, 仍然存在较强的上升气流, 强回波中心对应较小的 Z_{DR} (-0.5~0.8 dB) 和 K_{DP} (-0.2~0.3 °·km⁻¹), CC 为 0.93~0.98, 高层 CC 低值区(≤0.95)为较大的干冰雹, 其他区域为小的干冰雹。在 Z_{DR} 、CC 和 Z_H 上有明显的 TBSS(图 6a, 6c, 6d 中白色实线内区域), 靠近风暴强回波区一侧为高 Z_{DR} 和低 CC, 远离

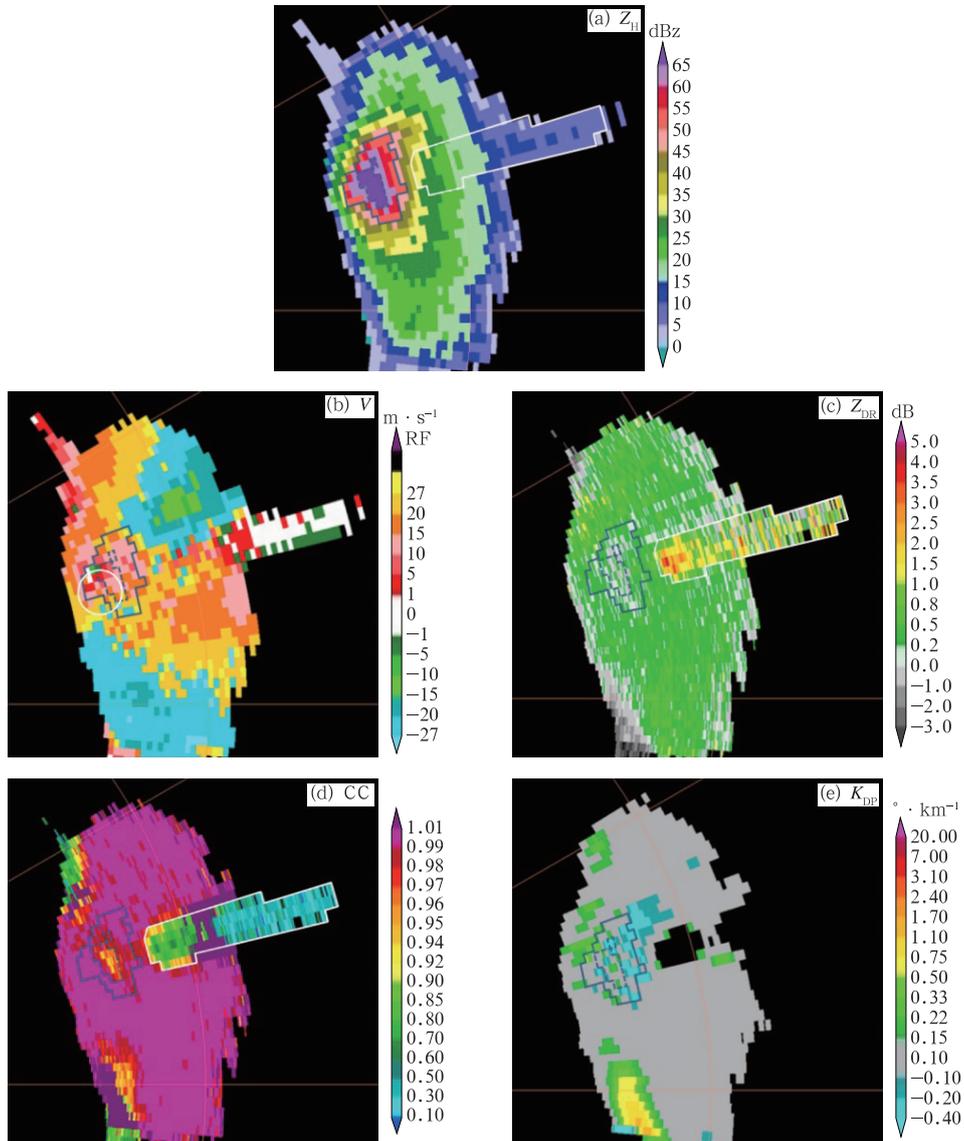
风暴一侧 Z_{DR} 减小为负值且 CC 更小, 也可表明高层有较大冰雹。

3.4 大冰雹增长过程中的垂直结构特征

图 7 为 6 月 25 日 18:12 新乐双偏振雷达的垂直剖面(图 5a 中白色直线为剖面位置), 反射率因子 65 dBz 顶高达到 10 km, 接近 -40℃ 层高度, 5 km 高度附近 BWER(≤50 dBz) 宽度约 2 km, 顶部高度约 8 km, BWER 深厚宽广, 风暴发展旺盛。在 0℃ 层和 -20℃ 层间 Z_{DR} (≥2 dB) 柱对称分布在 BWER 两侧, 厚约 3 km, 在 -20℃ 层之上 Z_{DR} (≥1 dB) 柱迅速变窄, 顶部高度约 8.5 km, 超过 -30℃ 层高度, 说明上升气流非常强盛(潘佳文等, 2020a; 2000b; 刁秀广等, 2021)。强回波中心 CC 低值区(≤0.70)的顶高超过 -20℃ 层, 最小值为 0.35, 说明粒子形态和构成比较复杂。 K_{DP} 柱(≥1 °·km⁻¹) 主要位于 BWER 和强回波中心边缘, 顶高超过 Z_{DR} 柱, 也表明上升气流非常强盛。由此可见, 在 BWER 以及强回波中心区存在强盛的上升气流, 从图 7b 可以看出在 BWER 及其西侧有清楚的辐合风场, 5 km 以下为风向辐合, 之上为风速辐合, 为强上升气流提供了动力条件, 同时, 在强回波区 5 km 以下出现弱辐散, 超级单体左侧出现下沉气流。

3.5 大冰雹增长过程中的粒子分布特征

超级单体内辐合风场高度达到 10 km(图 7b), 6.0° 仰角(9.2 km) 观测到 BWER(图 6a), 因此强上升气流可以到 10 km 附近, 超过有效增长层顶, 0℃ 之上强回波中心的冰相粒子能够循环增长形成大冰雹。由图 7 分析粒子分布特征, 强回波中心的 CC 较小(0~0.90), Z_{DR} 较小(0.8 dB 以下) 有明显的负值区, K_{DP} 存在较小区域(0.1 °·km⁻¹ 以下), 因此有大的干冰雹。由于上升气流有正的扰动温度, 在强烈上升气流边缘下落的冰相粒子融化, 在 BWER 两侧形成 Z_{DR} 柱(图 7c), 强回波中心 Z_{DR} 柱区域, Z_{DR} 较大(1.0~3.5 dB), CC 较小(0.60~0.80), K_{DP} 较大(0.5~1.7 °·km⁻¹), 有较大的融化冰雹或大雨滴。因此, 强回波中心这个区域相态复杂, CC 值下降到 0.50 以下。西侧悬垂回波区域 CC 最大(≥0.99), Z_{DR} 较小(0~0.5 dB), K_{DP} 较小(-0.20~0.15 °·km⁻¹), 说明是小的干冰雹。东侧强回波区 Z_{DR} 较小(0~0.8 dB), K_{DP} 较小(-0.40~0.75 °·km⁻¹), 高层 CC 较大(0.96~0.98), 是小



注:蓝色实线、虚线分别为 50 dBz、65 dBz 等值线,图 b 中白色圆圈所示为中气旋,图 a,c,d 中白色实线所示为 TBSS。

图 6 2020 年 6 月 25 日 18:12 新乐雷达 6.0° 仰角各探测参量
Fig. 6 Detection parameters at 6.0° elevation of Xinle Radar at 18:12 BT 25 June 2020

的干冰雹,随着冰雹下落,融化或者湿增长导致低层 CC 减小。 0°C 层以下强回波中心 Z_{DR} 负值区在 2.5 km 附近,说明大冰雹还没有落地。

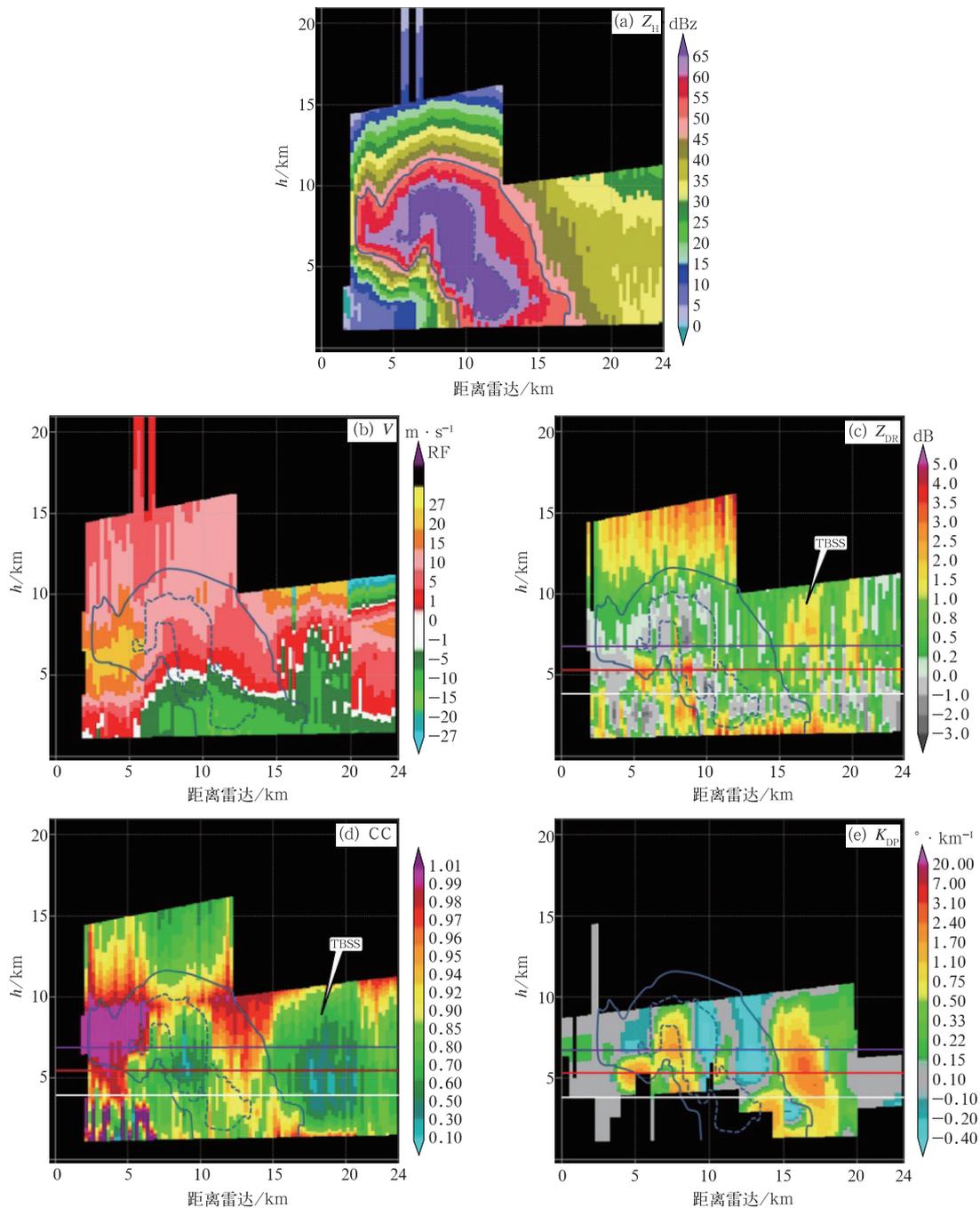
4 大冰雹下降过程中双偏振参量及粒子分布演变特征

据网络报道,蠡县和肃宁冰雹大如鸡蛋,蠡县气象站未观测到冰雹,肃宁气象站 6 月 25 日 18:46 观测到直径 3.5 cm 的较大冰雹,为了分析较大冰雹降落至地面前后 Z_{DR} 柱、 Z_{DR} 弧、CC 低值区、TBSS 和粒

子分布演变特征,选取 18:24、18:36 和 18:48 的 Z_{H} 、 Z_{DR} 和 CC 垂直剖面进行分析(图 8a₁、8a₂、8a₃ 中白色直线为剖面位置)。

4.1 大冰雹降落至地面前双偏振参量和粒子分布特征

由图 8 可见,6 月 25 日 18:24 强回波中心 -10°C 层之上区域 CC 较小(≤ 0.90), Z_{DR} 大部分较小(≤ 1 dB),且存在明显负值区,有干的大冰雹,而在 Z_{DR} 柱内 Z_{DR} 较大(1~2 dB),存在混合相态,CC 降低到 0.6,有融化的较大冰雹。在 -10°C 层以



注:蓝色实线、虚线分别为 50 dBz、65 dBz 等值线,图 c~e 中白色、红色、紫色直线分别为 0°C、-10°C、-20°C 层高度。

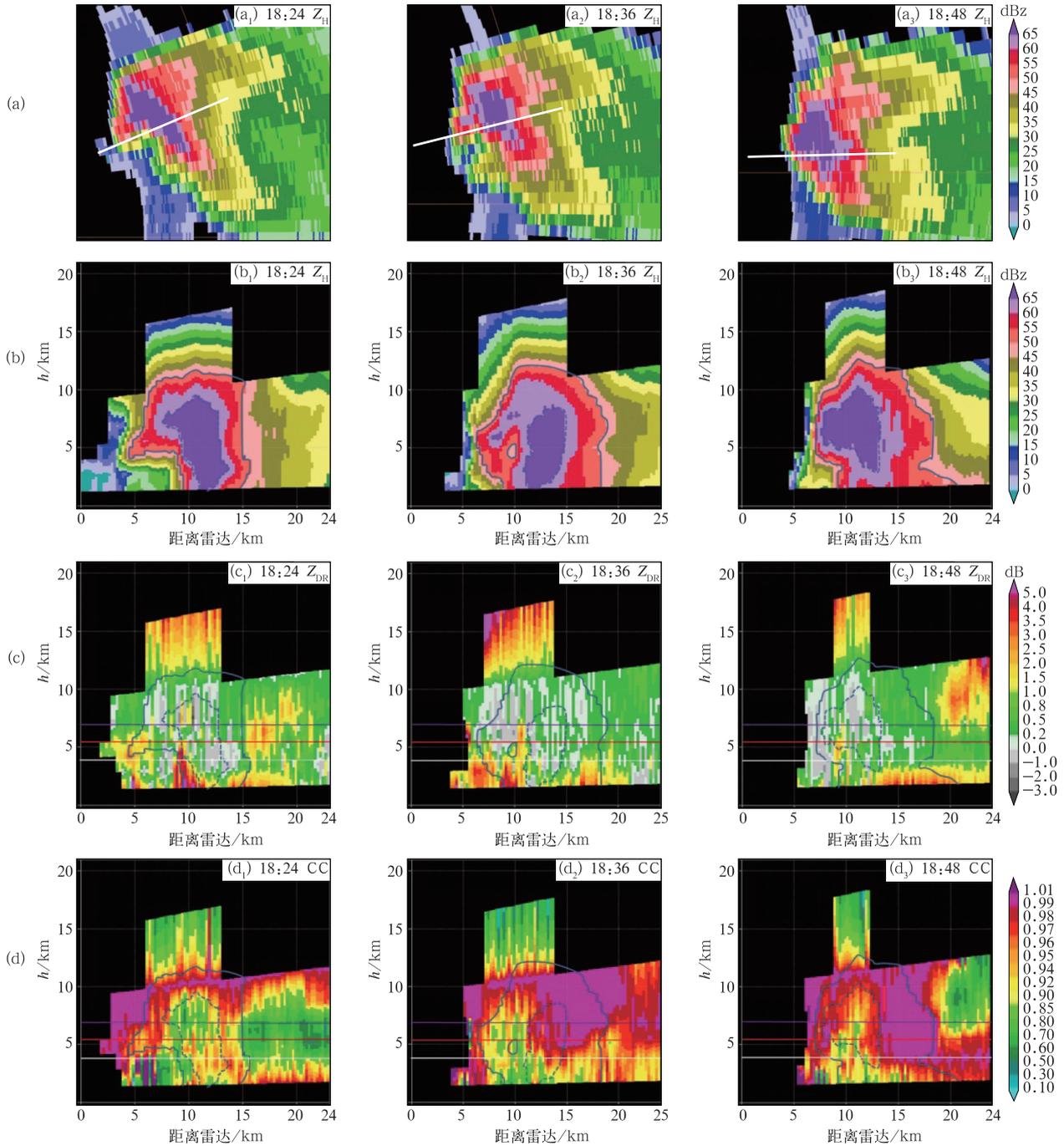
图 7 2020 年 6 月 25 日 18:12 新乐雷达各探测参量沿图 5a 直线垂直剖面
 Fig. 7 Detection parameters of Xinle Radar of vertical profile along the white line in Fig. 5a at 18:12 BT 25 June 2020

下到地面 2.5 km 以上的强回波中心 CC 较大(0.90~0.98), Z_{DR} 较小(≤ 1 dB),且有明显负值区,表明有较大的干冰雹,2.5 km 以下 Z_{DR} 较大(1~4 dB),说明大冰雹还未落地。与 18:12 相比,18:24 BWER 坍塌,演变成弱回波区,强回波中心顶高略有下降,

底高降至最低仰角,0°C 层和 -20°C 层之间 Z_{DR} 柱对称程度明显降低,西侧 Z_{DR} 柱的 Z_{DR} 值减小,东侧 Z_{DR} 柱高度下降到 -10°C 层,CC 低值区西侧消失,说明大粒子下降,中层上升气流减弱。-20°C 层之上 Z_{DR} 柱(≥ 1 dB)和 CC 低值区位于强回波中心,

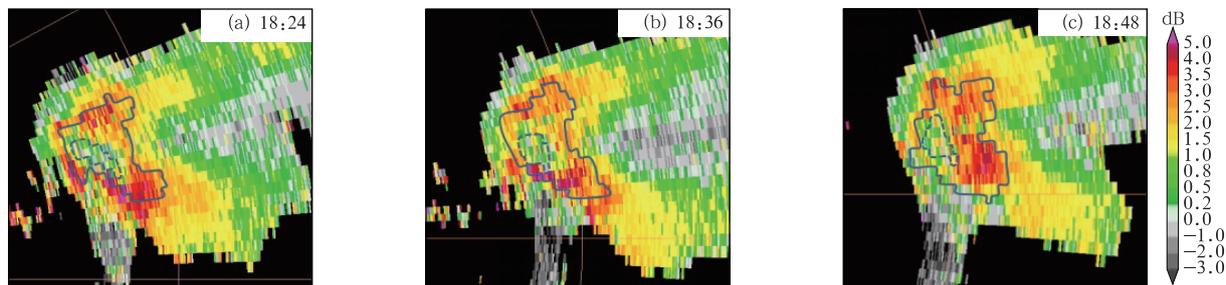
Z_{DR} 柱高度略上升,宽度加大,因此在 -20°C 以上强回波中心靠近弱回波区一侧仍存在强盛的上升气流。 0°C 层以下弱回波区靠近强回波中心一侧下落的冰雹融化, Z_{DR} 值迅速增加,在 0.5° 仰角观测到

Z_{DR} 弧(图 9a),超级单体的 Z_{DR} 弧与低层风暴相对螺旋度的大小存在正相关关系,林文等(2020)对超级单体、普通降雹单体和非降雹强对流双偏振特征的对比分析也印证了此种观点。



注:蓝色实线、虚线分别为 50 dBz、65 dBz 等值线;图 a 中白色直线为剖面位置;
图 c、d 中白色、红色、紫色直线分别为 0°C 、 -10°C 、 -20°C 层高度。

图 8 2020 年 6 月 25 日新乐雷达 2.4° 仰角不同时间 (a) Z_H 平面和 (b~d) Z_H 、 Z_{DR} 、CC 垂直剖面
Fig. 8 (a) Plane figures of Z_H , (b~d) vertical profile of Z_H , Z_{DR} and CC of different times along the white lines in Fig. 8a at 2.4° elevation of Xinle Radar on 25 June 2020



注:蓝色实线、虚线分别为 50 dBZ、65 dBZ 等值线。

图 9 2020 年 6 月 25 日新乐雷达 0.5°仰角 Z_{DR}

Fig.9 Z_{DR} at 0.5° elevation of Xinle Radar on 25 June 2020

4.2 大冰雹降落至地面时双偏振参量和粒子分布特征

6 月 25 日 18:36 在超级单体左侧辐散高度上升到 7 km 处(图略),下沉气流加强,超级单体左侧强回波中心和强回波区以下沉气流为主。由图 8 可见, -10°C 以上强回波中心对应 Z_{DR} 负值区和 CC 大值区(≥ 0.99),说明是小冰雹, 0°C 层以下的强回波中心对应清楚的 Z_{DR} 洞, Z_{DR} 洞负值区下降到了最低仰角, CC 较小($0.80 \sim 0.96$),表明大冰雹已经降到了最低层或地面。随着大冰雹的下降,强回波中心顶高继续下降。 Z_{DR} 柱位于弱回波区靠近强回波中心一侧,顶高下降到 -20°C 层高度,说明上升气流位于弱回波区,强度虽然减弱但仍比较强盛。 0°C 层以下弱回波区靠近强回波中心一侧下落的冰雹融化, Z_{DR} 值仍然较大,在 0.5° 仰角 Z_{DR} 弧更加清晰(图 9b),说明低层的旋转加强。

4.3 大冰雹降落至地面后双偏振参量和粒子分布特征

6 月 25 日 18:48 大冰雹下降到地面后,强回波中心底高和顶高都明显升高, Z_{DR} 柱仍然存在,位于超级单体的右侧,但 Z_{DR} 值明显减小, 0°C 层以上强回波中心内又出现低于 0.90 的 CC 低值区,说明仍然存在弱上升气流。由于低层融化的冰雹粒子迅速减少, 0.5° 仰角 Z_{DR} 弧变窄, Z_{DR} 值也明显减小(图 9c)。左侧强回波区 0°C 层以上 Z_{DR} 较小($\leq 0.8 \text{ dB}$), CC 较大(≥ 0.99),是小冰雹,下落融化导致 0.5° 仰角强回波区 Z_{DR} 加大(图 9c)。

4.4 大冰雹下降至地面前后 TBSS 和 Z_{DR} 的演变特征

6 月 25 日 18:12—18:24 在中高层 Z_{DR} 和 CC

产品上可以看到清楚的 TBSS, 18:24 TBSS 顶高下降(图 7c, 7d, 图 8c₁, 8d₁), 18:30—18:42 中高层 TBSS 消失(图 8c₂, 8d₂), 18:48 在高层再次观测到 TBSS(图 8c₃, 8d₃)。 18:18—18:42 最低层(0.5° 仰角) Z_{DR} 弧明显加强(图 9a, 9b), 表明在冰雹下降过程中, 超级单体风暴低层一直保持较强的螺旋度, 有利于超级单体的维持或发展。 18:48 肃宁测站降下大冰雹(3.5 cm)后, 在超级单体右侧仍然能观测到 Z_{DR} 柱和 CC 低值区, 说明弱回波区靠近强回波中心一侧始终存在上升气流区, 强回波中心顶高和底高又开始上升, 超级单体再次发展。

因此, 根据强回波中心 Z_{DR} 和 CC 大小、高度的演变, 可以更精细判断冰雹的大小以及大冰雹的下降过程, 可以将 Z_{DR} 洞和 CC 低值区下降到最低仰角作为大冰雹即将触地的依据。

5 超级单体风暴双偏振参量特征示意图

图 10a~10c 分别是超级单体风暴低层(0.5° 仰角)、中层(3.3° 仰角)和高层(6.0° 仰角)雷达双偏振参量典型特征示意图。从低层到高层超级单体向右倾斜, 低层超级单体右侧(入流区一侧)有狭长的 Z_{DR} 弧包裹在强回波中心的边缘, 强回波中心为大冰雹区域并伴有较强降水, 因此 Z_{DR} 和 CC 都较小, 超级单体左侧的前后侧下沉气流区, 从靠近到远离强回波中心 Z_H 减小($55 \text{ dBZ} \rightarrow 30 \text{ dBZ}$), Z_{DR} 减小($5 \text{ dB} \rightarrow 0.2 \text{ dB}$), K_{DP} 减小($3.1^{\circ} \cdot \text{km}^{-1} \rightarrow 0.1^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$), CC 增大($0.90 \rightarrow 0.99$), 依次为融化的小冰雹、浓度不高的大雨滴和小雨滴。中层在 BWER 的两侧有 Z_{DR} 柱、CC 低值区和 K_{DP} 柱, 左侧 Z_{DR} 柱、CC 低值区和 K_{DP} 柱位于强回波中心, 左侧 CC 低值区范围更大, 混合相态和大的冰相粒子导致 CC 迅速减小, 出

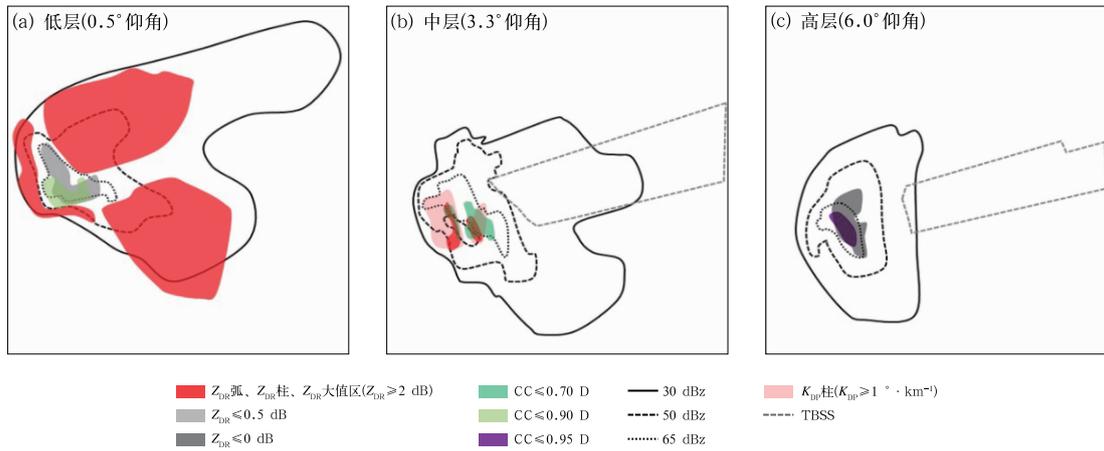


图 10 超级单体风暴不同高度双偏振参量特征示意图

Fig. 10 Schematic diagram of dual polarization parameters characteristics at different heights of supercell storm

现了 CC 最小值, Z_{DR} 柱、CC 低值区和 K_{DP} 柱部分重叠, 因此, 强回波中心为大冰雹和融化的较大冰雹, 右侧的 K_{DP} 柱范围更大, K_{DP} 值也更高, 右侧融化程度更高一些。高层强回波中心为较大的干冰雹, Z_{DR} 以负值为主, 仍然有 CC 低值区, 但高于 0.90。与山东诸城大冰雹超级单体双偏振特征相似(刁秀广等, 2021), 但 K_{DP} 柱的宽度明显大于山东超级单体, 因此没有明显的 K_{DP} 柱和 Z_{DR} 柱分离现象, 而是 Z_{DR} 柱偏在 K_{DP} 柱东侧(图 7c, 7e)。

6 结 论

(1) 超级单体风暴产生在上干冷、下暖湿的强热力不稳定和强的垂直风切变环境下, BWER 清晰, 中气旋深厚, 持续时间超过 4 h, TBSS 和旁瓣回波持续 2 h 以上, 属于长生命史超级单体风暴。

(2) 超级单体风暴低层强回波中心 Z_H 超过 65 dBz, 对应小的 Z_{DR} 和小的 CC, K_{DP} 大范围不显示, 小范围较大, 大冰雹与强降水共存。超级单体风暴左侧前后强回波区 Z_H 在 50~55 dBz, 对应大的 Z_{DR} 、较大的 CC 和较大的 K_{DP} , 为融化的小冰雹和少量的大雨滴。强回波中心右侧有清楚的 Z_{DR} 弧包裹, 对应小的 Z_H 、大的 CC 和较大的 K_{DP} , 融化明显, 有少量的大雨滴。

(3) 超级单体风暴中层 Z_{DR} 柱、CC 低值区、 K_{DP} 柱位于 BWER 左右两侧, 左侧 CC 低值区更强, 右侧 K_{DP} 柱更强, 在 BWER 和强回波中心有强的上升气流, 强回波中心对应小的 Z_{DR} , 但 Z_{DR} 柱、 K_{DP} 柱也

位于其中, 存在混合相态且结构差异较大, CC 更小, 为大的干冰雹和融化冰雹。超级单体的前侧和后侧强回波区 Z_{DR} 和 K_{DP} 较小, CC 大, 为小的干冰雹或霰。

(4) 超级单体风暴高层强回波中心 Z_{DR} 和 K_{DP} 较小, CC 较大, 为较大的干冰雹。中高层 Z_{DR} 和 CC 产品比 Z_H 产品的 TBSS 更清晰, 可以作为大冰雹识别的特征。

(5) 大冰雹下降过程中, Z_{DR} 柱高度下降, 强度减弱, 尤其是强回波中心的 CC 低值区高度迅速下降, 强度明显减弱, 同时低层 Z_{DR} 弧加强, 大冰雹下降到最低仰角时, Z_{DR} 洞扩展到最低仰角, 因此可以利用 Z_{DR} 和 CC 大小和高度的演变监测大冰雹的下降过程, Z_{DR} 洞和 CC 低值区下降到最低仰角可以作为大冰雹即将触地的依据。

(6) 在大冰雹下降过程中超级单体右侧弱回波区 Z_{DR} 柱、CC 低值区减弱但一直存在, 且低层 Z_{DR} 弧加强, 中层旋转减弱, 低层旋转加强, 说明强上升气流一直存在, 超级单体能够长时间维持。

参 考 文 献

- 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).
- 刁秀广,朱君鉴,黄秀韶,等,2008. VIL 和 VIL 密度在冰雹云判据中的应用[J]. 高原气象, 27(5):1131-1139. Diao X G, Zhu J J, Huang X S, et al, 2008. Application of VIL and VIL density in warning criteria for hailstorm[J]. Plateau Meteor, 27(5):1131-1139(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).
- 龚佃利,朱君鉴,王俊,等,2021. 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, 41(3):40-51. Gong D L, Zhu J J, Wang J, et al, 2021. Dual-polarization radar observational analysis of a severe hailstorm in Shandong Province on 1 June 2020[J]. J Marine Meteor, 41(3):40-51(in Chinese).
- 胡胜,罗聪,张羽,等,2015. 广东大冰雹风暴单体的多普勒天气雷达特征[J]. 应用气象学报, 26(1):57-65. Hu S, Luo C, Zhang Y, et al, 2015. Doppler radar features of severe hailstorms in Guangdong Province[J]. J Appl Meteor Sci, 26(1):57-65(in Chinese).
- 雷蕾,孙继松,王国荣,等,2012. 基于中尺度数值模式快速循环系统的强对流天气分类概率预报试验[J]. 气象学报, 70(4):752-765. Lei L, Sun J S, Wang G R, et al, 2012. An experimental study of the summer convective weather categorical probability forecast based on the rapid updated cycle system for the Beijing Area (BJ-RUC)[J]. Acta Meteor Sin, 70(4):752-765(in Chinese).
- 廖玉芳,俞小鼎,吴林林,等,2007. 强雹暴的雷达三体散射统计与个例分析[J]. 高原气象, 26(4):812-820. Liao Y F, Yu X D, Wu L L, et al, 2007. Statistic and case studies on radar three body scattering of severe hailstorm[J]. Plateau Meteor, 26(4):812-820(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 severe convective clouds by S-band dual-polarization radar[J]. Meteor Mon, 46(1):63-72(in Chinese).
- 刘治国,俞小鼎,陶健红,等,2008. 青藏高原东北侧雹云单体最大垂直累积液态含水量的演变特征及其在降雹定时判断中的应用[J]. 气象学报, 66(4):609-620. Liu Z G, Yu X D, Tao J H, et al, 2008. Vertically integrated liquid water content characters of hail cells in the northeast Tibetan Plateau and its application in estimation of hail-shooting time[J]. Acta Meteor Sin, 66(4):609-620(in Chinese).
- 潘佳文,蒋璐璐,魏鸣,等,2020a. 一次强降水超级单体的双偏振雷达观测分析[J]. 气象学报, 78(1):86-100. Pan J W, Jiang L L, Wei M, et al, 2020a. Analysis of a high precipitation supercell based on dual polarization radar observations[J]. Acta Meteor Sin, 78(1):86-100(in Chinese).
- 潘佳文,魏鸣,郭丽君,等,2020b. 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, 2020b. Dual-polarization radar characteristic analysis of the evolution of heavy hail supercell in Southern Fujian[J]. Meteor Mon, 46(12):1608-1620(in Chinese).
- 孙继松,2023. 与直线型对流大风相关的强风暴形态结构和热动力学过程[J]. 气象, 49(1):1-11. Sun J S, 2023. The pattern structure and thermodynamic and dynamic processes of severe storms associated with linear convective gales[J]. Meteor Mon, 49(1):1-11(in Chinese).
- 孙继松,戴建华,何立富,等,2014. 强对流天气预报的基本原理与技术方法——中国强对流天气预报手册[M]. 北京:气象出版社. Sun J S, Dai J H, He L F, et al, 2014. Basic Principles and Technical Methods of Strong Convective Weather Forecast; China's Strong Convective Weather Forecast Manual[M]. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese).
- 唐文苑,周庆亮,刘鑫华,等,2017. 国家级强对流天气分类预报检验分析[J]. 气象, 43(1):67-76. Tang W Y, Zhou Q L, Liu X H, et al, 2017. Analysis on verification of national severe convective weather categorical forecasts[J]. Meteor Mon, 43(1):67-76(in Chinese).
- 陶岚,管理,孙敏,等,2019. 双线偏振多普勒雷达对一次降雹超级单体发展减弱阶段的演变分析[J]. 气象科学, 39(5):685-697. Tao L, Guan L, Sun M, et al, 2019. Evolution analysis of a hail-producing supercell using dual polarization Doppler radar[J]. J Meteor Sci, 39(5):685-697(in Chinese).
- 王昂生,黄美元,1978. 冰雹和防雹研究述评[J]. 大气科学, 2(1):76-84. Wang A S, Huang M Y, 1978. Review of hail and hail prevention research[J]. Sci Atmos Sin, 2(1):76-84(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).
- 许焕斌,2012. 强对流云物理及其应用[M]. 北京:气象出版社. Xu H B, 2012. The Physics of Severe Convective Storms and Its Applications[M]. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese).
- 杨吉,郑媛媛,徐芬,2020. 江淮地区一次冰雹过程的双线偏振雷达观测分析[J]. 气象学报, 78(4):568-579. Yang J, Zheng Y Y, Xu F, 2020. An analysis of a hail case over the Yangtze and Huai River Basin based on dual-polarization radar observations[J]. Acta Meteor Sin, 78(4):568-579(in Chinese).
- 俞小鼎,费海燕,王秀明,2024. 2024 年 2 月 17—23 日中国大范围强寒潮雨雪冰冻强对流过程涉及的若干问题[J]. 气象, 50(9):1033-1042. Yu X D, Fei H Y, Wang X M, 2024. Some issues concerning the large area rainstorm, snowstorm, sleet, freezing rain and severe convection event over China from 17 to 23 February 2024[J]. Meteor Mon, 50(9):1033-1042(in Chinese).
- 俞小鼎,王迎春,陈明轩,等,2005. 新一代天气雷达与强对流天气预警[J]. 高原气象, 24(3):456-464. Yu X D, Wang Y C, Chen M X, et al, 2005. Severe convective weather warnings and its improvement with the introduction of the NEXRAD[J]. Plateau Meteor, 24(3):456-464(in Chinese).
- 俞小鼎,郑永光,2020. 中国当代强对流天气研究与业务进展[J]. 气象学报, 78(3):391-418. Yu X D, Zheng Y G, 2020. Advances in severe convective weather research and operational service in China[J]. Acta Meteor Sin, 78(3):391-418(in Chinese).

- 俞小鼎,周小刚,王秀明,2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报,70(3):311-337. Yu X D,Zhou X G,Wang X M,2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. Acta Meteor Sin,70(3):311-337(in Chinese).
- 曾明剑,王桂臣,吴海英,等,2015. 基于中尺度数值模式的分类强对流天气预报方法研究[J]. 气象学报,73(5):868-882. Zeng M J,Wang G C,Wu H Y,et al,2015. Study of the forecasting method for the classified severe convection weather based on a meso-scale numerical model[J]. Acta Meteor Sin,73(5):868-882(in Chinese).
- Conway J W,Zrnić D S,1993. A study of embryo production and hail growth using dual-Doppler and multiparameter radars[J]. Mon Wea Rev,121(9):2511-2528.
- Doswell III C A,2001. Severe Convective Storms[M]. Boston:American Meteorological Society:1-26.
- 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 Climatol,37(8):749-775.
- Hubbert J C,Bringi V N,2000. The effects of three-body scattering on differential reflectivity signatures[J]. J Atmos Ocean Technol,17(1):51-61.
- Kumjian M R,2013a. Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part I: description of the polarimetric radar variables[J]. J Operational 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 Operational Meteor,1(20):243-264.
- 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,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.
- 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.
- Lemon L R,1998. The radar "three-body scatter spike": an operational large-hail signature[J]. Wea Forecasting,13(2):327-340.
- 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.
- Ryzhkov A V,2007. The impact of beam broadening on the quality of radar polarimetric data[J]. J Atmos Ocean Technol,24(5):729-744.
- Ryzhkov A V,Zhuravlyov V B,Rybakova N A,1994. Preliminary results of X-band polarization radar studies of clouds and precipitation[J]. J Atmos Ocean Technol,11(1):132-139.
- 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.
- Tuttle J D,Bringi V N,Orville H D,et al,1989. Multiparameter radar study of a microburst:comparison with model results[J]. J Atmos Sci,46(5):601-620.
- van Lier-Walqui M,Fridlind A M,Ackerman A S,et al,2016. On polarimetric radar signatures of deep convection for model evaluation: columns of specific differential phase observed during MC3E[J]. Mon Wea Rev,144(2):737-758.
- Yu X D,Wang X M,Zhao J,et al,2012. Investigation of supercells in China:environmental and storm characteristic[C]//Proceedings of the 26th Conference on Severe Local Storms. Nashville: American Meteorological Society.

(本文责编:何晓欢)