

宁夏六盘山区一次局地特大冰雹的雷达观测特征

余文梅^{1, 2, 4} 陈豫英^{1, 2, 3} 马国涛^{1, 2, 4} 牛建军^{1, 2, 4} 杨苑^{1, 2, 5} 李向栋^{1, 2, 4}

1 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室, 银川 750002

2 宁夏气象防灾减灾重点实验室, 银川 750002

3 宁夏气象台, 银川 750002

4 宁夏固原市气象局, 固原 756000

5 宁夏中卫市气象局, 中卫 755000

提 要: 基于固原 C 波段多普勒天气雷达和 X 波段双偏振雷达观测资料, 结合 ERA5 逐时再分析、Himawari-8、常规气象观测等多源资料, 对 2021 年 7 月 12 日宁夏六盘山区一次局地特大冰雹(直径 ≥ 5 cm)的成因和雷达观测特征进行分析。结果表明: 多单体风暴合并发展形成的超级单体导致此次特大冰雹出现。六盘山区中尺度地面辐合线、中尺度气旋和局地环流是中尺度对流系统主要触发、增强系统, 同时也影响其移动方向。大冰雹出现时, C 波段雷达反射率因子(Z) ≥ 65 dBZ、三体散射长钉(TBSS)长度 ≥ 20 km、垂直累积液态水含量(VIL) ≥ 40 kg $\cdot$ m⁻²; X 波段雷达低层水平反射率因子(Z_H)高值区的相关系数(CC) < 0.8 , 中高层 Z_H 高值区的差分反射率因子(Z_{DR})和差分传播相移率(K_{DP})为负值、CC < 0.8 。特大冰雹出现时, C 波段雷达 $Z \geq 70$ dBZ、TBSS 长度 ≥ 30 km、VIL ≥ 50 kg $\cdot$ m⁻²; X 波段雷达低层 Z_H 高值区的 CC < 0.6 , CC < 0.5 的区域形成的“空洞”有助于识别空中特大冰雹所在区域及高度。有界弱回波区附近的 Z_{DR} 柱和 CC 环可指示超级单体中高层强上升气流的位置, Z_H 和双偏振参量特征对不同尺寸冰雹的识别和预警具有很好的指示意义。

关键词: 特大冰雹, 雷达观测特征, 超级单体, 双偏振参量, 六盘山

中图分类号: P458, P446 **文献标志码:** A **DOI:** 2024.122703

Radar Observation Characteristics of a Local Outsize Hail in Liupan Mountains, Ningxia

YU Wenmei^{1,2,4} CHEN Yuying^{1,2,3*} MA Guotao^{1,2,4} Niu Jianjun^{1,2,4} YANG Yuan^{1,2,5} LI Xiangdong^{1,2,4}

1 Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, CMA, Yinchuan 750002

2 Ningxia Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Yinchuan 750002

*宁夏自然科学基金(2024AAC03414)、宁夏重点研发计划(2024BEG02034)、宁夏科技创新领军人才(2021GKLRX05)、宁夏智能数字预报技术研究与应用科技创新团队(2024CXDT006)和中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室开放研究项目(CAMF-202315)共同资助

第一作者: 余文梅, 主要从事短期天气预报和灾害性天气监测预警.E-mail: nxywm123@163.com

通讯作者: 陈豫英, 主要从事灾害性天气预报方法研究.E-mail: chenyy@sina.com

Abstract: Based on the observation data of Guyuan C-band Doppler weather radar and X-band dual polarization radar, combined with ERA5 hourly reanalysis, Himawari-8 satellite, automatic weather station and conventional observation data, the causation and radar observation characteristics of a local outsize hail (diameter ≥ 5 cm) event which occurred in Liupan Mountains area of Ningxia on 12 July 2021 is analyzed. The results show that: The supercell storm formed by the merger and development of multicell storm caused the occurrence of outsize hail. The mesoscale ground convergence line, mesoscale cyclone and local circulation in Liupan Mountains area were the main triggering and enhancing systems of mesoscale convective systems (MCS), and also affected the movement direction of MCS. When the large hail occurred, the C-band radar reflectivity factor (Z) ≥ 65 dBz, three-body scatter spike (TBSS) length ≥ 20 km, vertically integrated liquid water content (VIL) ≥ 40 kg·m⁻². The cross-correlation coefficient (CC) in the high-value area of the low layer horizontal reflectivity (Z_H) of X-band radar was less than 0.8, and the differential reflectivity (Z_{DR}) and specific differential phase (K_{DP}) of the mid to high layer Z_H high-value area were negative and $CC < 0.8$. When the outsize hail occurred, $Z \geq 70$ dBz, TBSS length ≥ 30 km, VIL ≥ 50 kg·m⁻² for the C-band radar. CC in the low layer Z_H high-value area of the X-band radar was less than 0.6 and the "hole" formed in the area with $CC < 0.5$ helped to identify the area and altitude of outsize hail in the air. Z_{DR} columns and CC rings near the bounded weak echo zone could indicate the position of strong updrafts in the middle and upper layers of supercell. Z_H and dual polarization parameter characteristics had good indicative significance for the identification and warning of different sizes hail.

Key words: outsize hail, radar observation characteristic, supercell storm, dual polarization parameter, Liupan Mountains

引言

六盘山位于宁夏南部固原市境内, 是一条近似南北走向的狭长山脉, 山势高峻, 地形复杂, 是宁夏冰雹中心区 (杨侃等, 2012)。研究发现, 六盘山区多以中小冰雹 (直径 <2 cm) 为主, 大冰雹 (2 cm $\leq$ 直径 <5 cm) 比较少见, 特大冰雹 (直径 ≥ 5 cm) 更是罕见 (汤兴芝等, 2023)。冰雹是中小尺度系统的产物, 具有生命史短、局地性、突发性、致灾性强等特点, 因此冰雹的预报预警一直是天气预报业务中的难点。

近年来, 许多气象学者在冰雹等强对流天气发展机制研究 (孙继松等, 2006; 杨军等, 2017; 刘一玮等, 2011; 黄晓龙和高丽, 2016; 吕晓娜, 2017) 的基础上, 对冰雹的雷达回波特征进行了一定研究。常规天气雷达上, 大冰雹的产生与强反射率因子的伸展高度有

关, 反射率因子越大, 伸展相对高度越高, 大冰雹发生的可能性和最大冰雹直径越大 (Witt et al, 1998); 此外, 冰雹发生前垂直累积液态水含量 (VIL) 有明显跃增现象, 并且冰雹尺寸与 VIL 的大小和三体散射长钉 (TBSS) 的长度呈正相关 (Edwards and Thompson, 1998; 刁秀广等, 2008; 陈圣劼等, 2022)。

相较常规天气雷达, 双偏振雷达通过水平和垂直两个方向的偏振电磁波, 可获取水凝物的相态、形状、空间取向、密度分布等多种偏振参数 (张培昌等, 2018), 其中由差分反射率因子 (Z_{DR}) 推断水凝物尺寸分布 (Seliga and Bringi, 1976), 差分传播相移率 (K_{DP}) 估测降雨强度 (Sachidananda and Zrnić, 1987), 相关系数 (CC) 判别混合水凝物相态 (Balakrishnan and Zrnić, 1990)。在我国, 双偏振雷达的应用研究工作也取得一定成果。刁秀广和郭飞燕 (2021)、刁秀广等 (2021; 2022)、张羽等 (2023)、潘佳文等 (2020) 和高丽等 (2021) 利用双偏振雷达研究发现, 冰雹区具有水平反射率因子 (Z_H) 大、 Z_{DR} 小、CC 小的特征; Z_{DR} 柱相比降雹, 尤其大冰雹具有一定提前量; 对于特大冰雹, 由于共振散射和附加的后向散射位相差会导致双极化参数出现一些奇异现象, 如 Z_{DR} 为负值、CC 降级。自 2020 年 7 月起, 宁夏陆续开始建设 X 波段双偏振雷达, 由于投入使用时间不长, 还未在短临预报业务的应用中进行深入的分析总结, 因此需要研究其特征量在强对流天气中的特征, 从而进一步提升灾害性天气临近预报预警能力。

天气雷达观测范围较小, 而气象卫星能提供大范围全天候的观测信息, 近年来成为强对流天气的重要监测工具。静止气象卫星葵花-8 (以下简称 “H8”) 具有高时空分辨率的特点, 能够在 10 min 内完成全盘扫描, 红外通道空间分辨率可达 2 km, 应用其可提前预判夏季初生对流的发生, 进一步提高冰雹的临近预报准确率 (郭巍等, 2018)。

本文利用常规探测、雷达、卫星等多源观测资料, 对 2021 年 7 月 12 日宁夏六盘山区局地特大冰雹天气的成因和雷达观测特征进行分析, 以期提升宁夏冰雹预报预警能力提供技术支撑。

1 资料和天气实况

1.1 资料

本文所用资料包括: (1) 欧洲中期数值预报中心 (ECMWF) 提供的空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 、间隔 1 h 的 ERA5 再分析资料; (2) H8 静止卫星红外通道数据 (中心波长为 $10.4 \mu\text{m}$), 其时空分辨为 $2 \text{ km} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$; (3) 国家气象信息中心下发的常规观测和探空资料; (4) 宁夏气象信息中心提供的逐 5 min、10 min 和 1 h 的自动气象观测站资料; (5) 固原逐 6 min C 波段雷达资料和逐 5 min X 波段双偏振雷达资料, 其中 C 波段雷达位于固原市境内的六盘山上 (海拔高度为 2853 m), 探测范围 150 km, X 波段双偏振雷达位于固原市彭阳县 (海拔高度为 1758 m), 探测范围 120 km。

文中所用时间均为北京时。

1.2 天气实况

2021 年 7 月 12 日午后, 在华北冷涡影响下, 宁夏固原市有多个对流单体迅速发展, 在向南移动过程中合并发展为超级单体风暴, 造成局地特大冰雹。如表 1 所示, 12 日 14:30 原州区开城镇出现最大直径为 1.5 cm 的冰雹; 之后风暴沿六盘山东侧向南移动, 15:10 泾源县开始降雹, 15:35—16:10 出现大冰雹, 其中 15:50—16:10 泾源县泾河源镇和新民乡出现直径为 5 cm 的特大冰雹, 并伴有最大风速为 $24 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的雷暴大风。

表 1 2021 年 7 月 12 日宁夏固原冰雹实况

Table 1 Hail situation in Guyuan, Ningxia on 12 July 2021

开始时间	发生地点	冰雹直径/cm	最大冰雹直径/cm	冰雹持续时间/min
14:30	原州区开城镇	0.5~1.5	1.5	18
15:10	泾源县黄花乡	1.0~1.5	1.5	10
15:35	泾源县香水镇、泾河源镇	1.0~3.5	3.5	15
15:50	泾源县泾河源镇、新民乡	1.5~5.0	5.0	10
16:00	泾源县新民乡	1.5~5.0	5.0	10

2 触发强对流的环境场条件

2.1 不稳定层结和水汽条件

12 日 08:00, 500 hPa 宁夏六盘山区位于华北冷涡后部的西北气流中, 处于 -6°C 温度槽中, 低层 700 hPa 为偏北风, 处于暖舌中 (图略), 形成上冷下暖的不稳定层结, 有利于对流触发。

08:00 甘肃崆峒站探空显示 (图 1b), 对流有效位能 (CAPE)、沙氏指数 (SI) 和最有利抬升指数 (BLI) 分别为 $16.3 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 -0.28°C 、 -0.9°C , 700 hPa 与 500 hPa 温差为 19.4°C , 具有一定的热力不稳定。700 hPa 以下风随高度顺转, 有暖平流, 700~300 hPa 风随高度逆转, 有冷平流, 指示大气层结将更加不稳定。近地面层有较厚的逆温层, 有利于不稳定能量的储存和积累。逆温层顶至 600 hPa 环境温度直减率达到了干绝热递减率, 当近地面剧烈辐射增温, 逆温层消失后, 易产生强对流。采用崆峒站 14:00 地面温度 (31.0°C)、露点温度 (14.0°C) 进行订正 (图略), CAPE、BLI 分别增大至 $1719 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 -3.9°C , 说明随着地面温度升高, 大气层结不稳定明显增强。此外, 午后冰雹发生区的低层相对湿度为 50%~80% (见 2.2 节图 3), 有利于对流的发生发展。

环境大气中, 适宜的 0°C 和 -20°C 层高度对大冰雹的形成至关重要 (孙继松等, 2014)。08:00, 0°C 、 -20°C 和湿球 0°C 层高度分别为 4.8、7.9 和 4.5 km, 高度适宜, 湿球 0°C 层距地约 2.6 km, 这对大冰雹的出现很有利 (Miller, 1972)。同时, 850~500 hPa 垂直风切变强, 为 $22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 1a), 有利于高度组织化风暴的产生和维持。

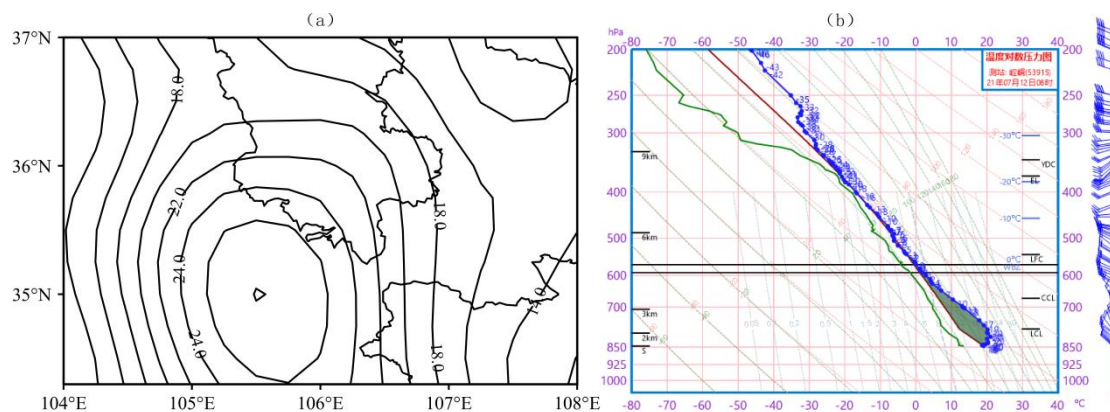


图 1 2021 年 7 月 12 日 08:00 (a) 850~500 hPa 垂直风切变 (单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 和 (b) 崆峒站探空

Fig.1 (a) The vertical wind shear of 850—500 hPa and (b) T - $\ln p$ of Kongtong Station at 08:00 BT 12 July

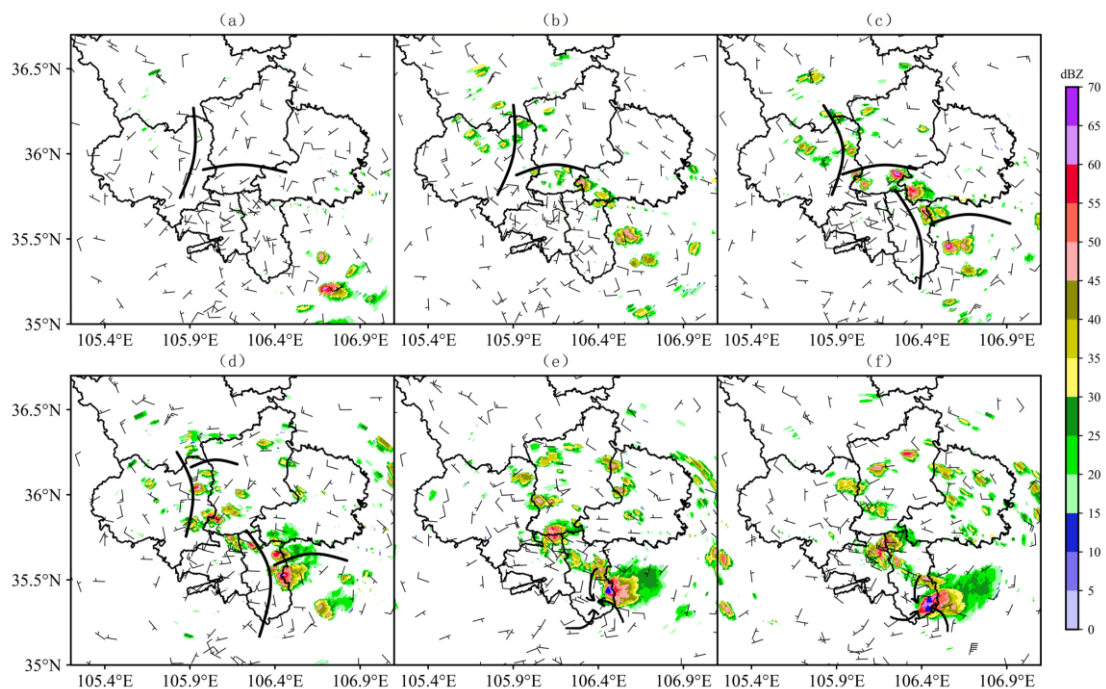
2021

2.2 抬升触发和发展机制

研究表明地形的热力、动力作用可形成局地中尺度切变 (气旋) 和环流, 在有利的天气环流背景下, 对强对流的触发和发展有明显影响 (孙继松等, 2006; 刘一玮等, 2011; 王珏等, 2008; 尉英华等, 2018)。以下将着重分析六盘山区地面中尺度系统和局地环流对强对流的触发和发展作用。

2.2.1 地面中尺度辐合系统

12 日 13:00—14:20 西吉县东部、原州区南部长时间存在地面中尺度辐合线 (图 2a~2c), 由于近地面层到 600 hPa 为干绝热, 低层中层很不稳定, 辐合线附近被抬升的暖空气加速上升, 触发了对流 (图 2b)。14:15—15:15 对流风暴向东南方向移动过程中, 泾源县“人”字型辐合线使其合并加强 (图 2c~2d)。15:25—16:00 泾源南部长时间存在中尺度气旋 (图 2e~2f), 其中偏东风、偏南风风速最大分别为 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 期间对流风暴并未一直向东南方向移动, 而是出现了向西南折, 即对流风暴向中尺度气旋形成的强辐合区移动, 并强烈发展 (图 2e~2f), 造成泾源大冰雹的产生。由此看出, 地面中尺度辐合系统对此次对流的触发、发展以及移动方向有重要作用, 这与吕晓娜 (2017) 的研究结果一致。



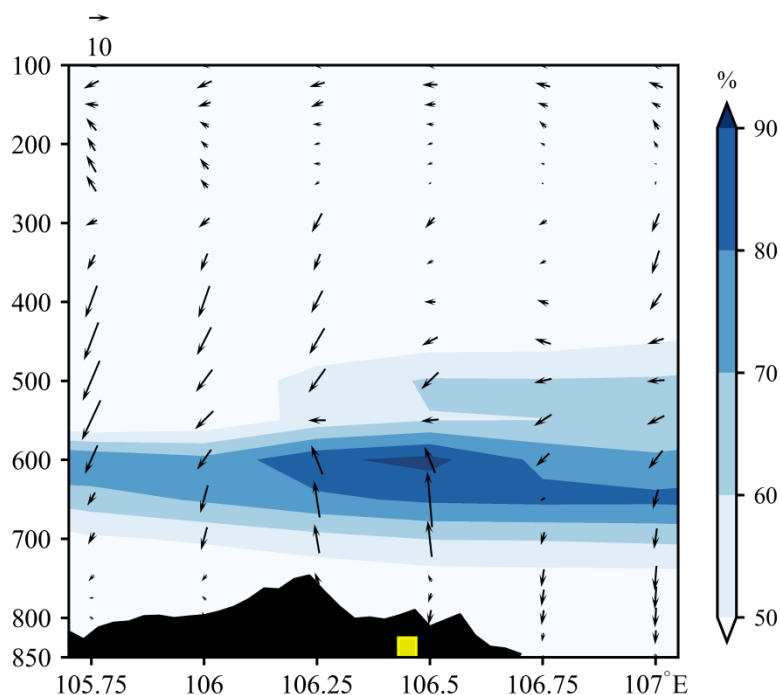
注：黑色粗线为地面辐合线，箭头为气流方向，三角形为大冰雹区。

图 2 2021 年 7 月 12 日 (a) 13:00、(b) 14:00、(c) 14:20、(d) 14:55、(e) 15:25 和 (f) 15:50 地面风场 (单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 及 (a) 13:02、(b) 14:12、(c) 14:29、(d) 15:10、(e) 15:39、(f) 15:57 固原 C 波段雷达组合反射率因子 (填色)

Fig.2 The surface wind field (vector) at (a) 13:00 BT, (b) 14:00 BT, (c) 14:20 BT, (d) 14:55 BT, (e) 15:25 BT, (f) 15:50 BT overlaid by radar composite reflectivity factor of Guyuan C-band Radar (colored) at (a) 13:02 BT, (b) 14:12 BT, (c) 14:29 BT, (d) 15:10 BT, (e) 15:39 BT, (f) 15:57 BT 12 July 2021

2.2.2 局地环流

特大冰雹发生前 (图略) 和发生时 (图 3) 泾源县南部近地面层到 600 hPa 附近存在局地环流。局地环流的上升支位于六盘山东侧 ($106.25^{\circ}\text{E}\sim 106.5^{\circ}\text{E}$), 下沉支在六盘山西侧 ($105.75^{\circ}\text{E}\sim 106^{\circ}\text{E}$), 特大冰雹发生在环流的上升支。此外, 特大冰雹发生地的东侧 ($106.75^{\circ}\text{E}\sim 107^{\circ}\text{E}$) 存在较强的下沉气流 (图 3), 不利于对流风暴继续向东南发展, 而局地环流产生的上升运动对于对流风暴发展很有利, 这可能是 15:00—16:00 对流风暴合并发展过程中并未一直向东南方向移动而是向西南折的另一个原因。因此, 局地环流不仅有利于对流风暴的发展, 并且对其移动方向有一定指示作用。



注：黄色方框为特大冰雹区，黑色阴影为地形。

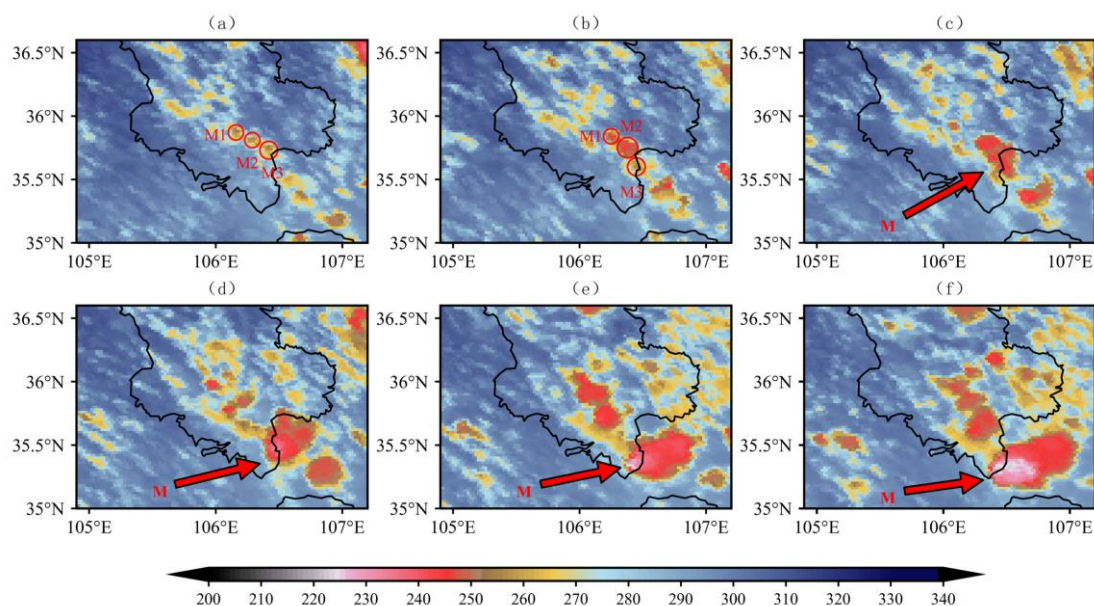
图 3 2021 年 7 月 12 日 16:00 沿 35.5°N 的 u-100w 环流和相对湿度（填色）剖面

Fig.3 Cross-section of u-100w and relative humidity (colored) along 35.5°N at 16:00 BT12 July 2021

3 卫星和雷达观测特征分析

3.1 卫星云图特征

从红外云图演变（图 4）可知，14:00 固原市中部有 M1、M2、M3 3 个 γ 中尺度对流系统（MCS）生成（图 4a）。MCS 向东南方向移动过程中迅速发展，14:20—14:50 云顶亮温（TBB）最低维持在 245 K（图 4b~4c），造成了原州区开城镇的冰雹。14:50—15:50 M1、M2、M3 合并形成 β 中尺度 MCS（M）并强烈发展（图 4c~4e），其间 M 向西南折，TBB 进一步降低，15:10 为 235 K，15:40 TBB 降至 227 K，此时泾源出现大冰雹。15:50—16:10 M 转向东南移动，其上风方出现明显冷“V”型，TBB 降至 222 K（图 4e~4f），泾源南部出现特大冰雹，且冰雹出现在冷“V”型处。因此， γ 尺度 MCS 以及合并形成的 β 尺度 MCS 是此次冰雹天气的直接影响系统；TBB 越低冰雹尺寸越大，TBB $\leq$ 245 K 时，出现冰雹，这与张杰等（2004）研究结果相似，即 TBB $\leq$ 227 K、TBB $\leq$ 222 K 时，分别出现大冰雹和特大冰雹；大冰雹出现在云团上风方冷“V”型处。



注：红色圆圈 M1、M2、M3 和 M 均代表中尺度对流系统，红色箭头指示 M 的位置。

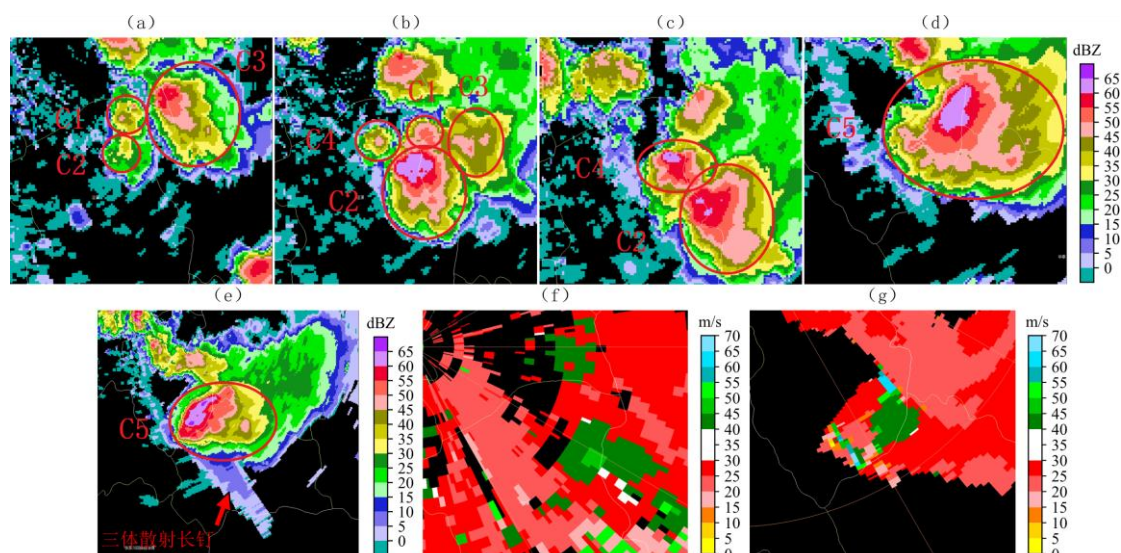
图 4 2021 年 7 月 12 日 H8 TBB 演变（填色）

Fig.4 The TBB (colored) evolution of H8 on 12 July 2021

3.2 C 波段雷达观测特征

3.2.1 强冰雹雷达回波演变

从雷达回波演变来看，14:47—15:04 泾源“人”字型地面辐合线附近有 C1、C2、C3、C4 多个对流单体生成并发展（图 2c，2d，5a，5b），14:53—15:51 多个对流单体向东南移动过程中逐渐合并加强形成对流单体 C5（图 5b~5d），期间单体向泾源南部地面中尺度气旋移动（图 2e~2f），泾源香水镇和泾河源镇出现大冰雹时，反射率因子（Z）为 67 dBZ（图 6g）。由于地面中尺度气旋和局地环流作用，C5 强烈发展，15:57 Z 达 70 dBZ（图 6g）。15:51 和 15:57 0.5°仰角上（图略），有“V”型入流缺口出现，且先后在 6.0°仰角（图 6c）、2.4°仰角（图略）出现有界弱回波区（BWER）。16:14 泾源位于风暴后侧，降雹结束。径向速度场上，15:04 C2 的中低层已经出现最大旋转速度为 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的中尺度涡旋（图 5f）；15:45 距雷达约 41 km，随着 C2 与其他单体合并为 C5，4.3°仰角中尺度涡旋旋转速度增大至 $13.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ （图略），说明 C5 中层存在一弱中气旋（俞小鼎等，2006）。15:51—16:14，0.5°~6.0°仰角（图 5g）均有中气旋存在，最大旋转速度增大到 $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，且 0.5°~6.0°仰角中气旋略向东北方向倾斜，随着中气旋的发展冰雹直径增大，泾源出现特大冰雹。由此看出，多个对流单体合并发展为超级单体，中尺度涡旋逐渐加强形成中气旋，中气旋的形成和加强维持了对流风暴的发展，为特大冰雹的形成提供了一支很强的上升气流；此外，大冰雹出现时 $Z \geq 65 \text{ dBZ}$ ，特大冰雹出现时 $Z \geq 70 \text{ dBZ}$ 。



注：红色圆圈代表对流单体位置，C1~C5 为单体编号。

图 5 2021 年 7 月 12 日固原 C 波段雷达 (a~d) 组合反射率因子, (f) 0.5°仰角、(g) 4.3°仰角径向速度

Fig.5 (a~d) Composite reflectivity factor, (f) 0.5° elevation and (g) 4.3° elevation radial velocity of

Guyuan C-band Radar on 12 July 2021

3.2.2 电暴结构演变特征

反射率因子垂直剖面图 (图 6d~6f) 显示, 随着风暴发展加强, 15:51 有明显的 BWER 和回波悬垂结构形成, 50 dBz、55 dBz 伸展高度明显升高, 由 14:29 的 8 km、6.6 km 升高至 15:51 的 10.7 km、9.7 km, 其中 15:39 和 15:51 55 dBz 伸展高度都高于 -20 °C 高度, 这对大冰雹的形成十分有利 (Witt et al, 1998)。

从风暴参数演变来看 (图 6g), 14:00 原州区南部的对流单体触发后 (图 2b) 迅速发展, 14:29 风暴的最大回波强度、单体顶部高度、回波顶高增大至 66 dBz、6.7 km、11.5 km, 降雹后单体顶部高度和回波顶高降低, 最大回波强度维持一个体扫后也开始降低。随着泾源对流单体合并发展, 上述特征量均呈波动增大, 降雹后最大回波强度和单体顶部高度都有所降低, 但回波顶高反应并不明显。风暴加强形成超级单体后, 15:57 三者分别增大至 70 dBz、11.1 km、16.8 km, 之后都有所下降, 其中单体顶部高度下降最明显。由此可见, 降雹后最大回波强度和单体顶部高度下降, 回波顶高持续增大或维持意味着风暴的发展加强或维持。

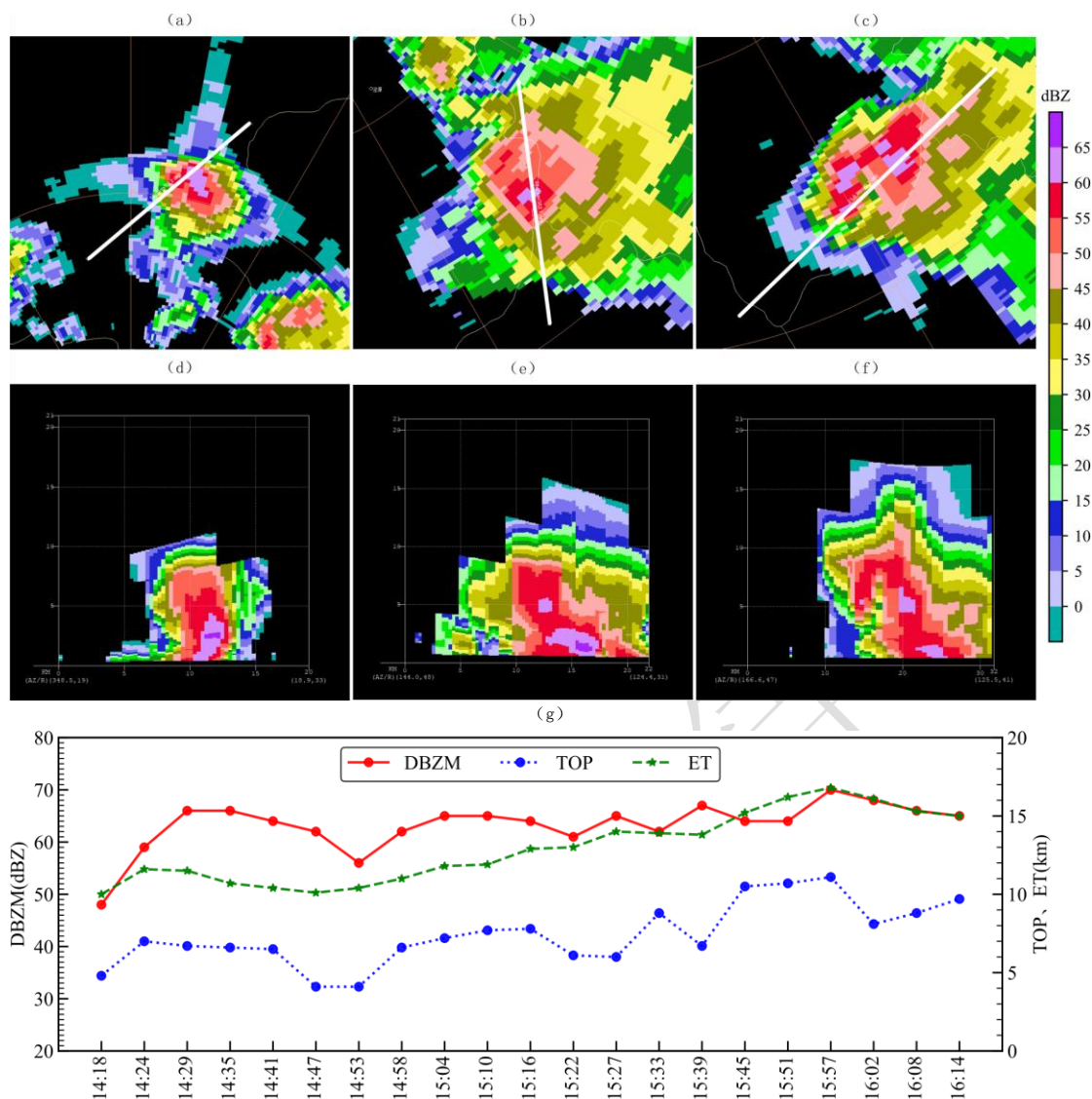


图 6 2021 年 7 月 12 日固原 C 波段雷达 (a~c) 6.0°仰角反射率因子和 (d~f) 反射率因子分别沿 (a~c) 白线的垂直剖面, (g) 风暴参数演变

Fig.6 (a-c) 6.0° elevation reflectivity factor and (d-f) cross-section of reflectivity factor along the white line in Fig.6a - 6c, (g) evolution of hailstorms parameters of Guyuan C-band Radar on 12 July 2021

3.2.3 垂直累积液态水含量和三体散射特征

俞小鼎等 (2006) 研究指出, 持续高的 VIL 可能与超级单体风暴有关; 一旦临界值被确定, 可用于判别带有大冰雹的风暴。结合冰雹实况、VIL 和 TBSS 的变化来看 (表 1, 表 2), 原州区开城镇、泾源县黄花乡、泾源县香水镇和泾河源镇、泾源县泾河源镇和新民乡的最大冰雹直径分别为 1.5、1.5、3.5、5.0 cm, 对应 TBSS 最大长度分别为 18.1、16.6、21.2、38.2 km, 其先出现在中层, 后随着降雹其高度降低; 对应最大 VIL 分别为 37、39、46、54 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 降雹前 VIL 分别跃增 14、6、8、17 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 除开城镇降雹后 VIL 明显降低, 其余地方降雹后 VIL 仍有增长。由此看出, 降雹前期有明显的 VIL 跃增现象, 降雹后冰雹尺寸增大过程中 VIL 也会增大, 但其增量不及降雹前; 大冰雹与长度 ≥ 20 km 的 TBSS 和

≥40 kg·m⁻² 的 VIL 有较好的对应关系, 特大冰雹与长度≥30 km 的 TBSS 和≥50 kg·m⁻² 的 VIL 高值关系密切。

表 2 2021 年 7 月 12 日宁夏固原 VIL 和 TBSS 统计
Table 2 VIL and TBSS statistics in Guyuan, Ningxia on 12 July 2021

时间	地点	VIL / (kg m ⁻²)	TBSS 最大长度/km	TBSS 最大长度所 在仰角/°
14:24	原州区开城镇	23	7.2	4.3
14:29	原州区开城镇	37	14.5	4.3
14:35	原州区开城镇	29	18.1	1.5
14:41	原州区开城镇	21	13.8	1.5
14:47	原州区开城镇	12	7.0	1.5
15:04	泾源县黄花乡	30	14.5	4.3
15:10	泾源县黄花乡	36	16.3	2.4
15:16	泾源县黄花乡	39	16.6	2.4
15:22	泾源县黄花乡	29	13.4	1.5
15:27	泾源县香水镇	33	—	—
15:33	泾源县香水镇	41	—	—
15:39	泾源县香水镇、泾河源镇	46	21.2	6.0
15:45	泾源县香水镇、泾河源镇	34	—	—
15:51	泾源县泾河源镇、新民乡	51	26.7	6.0
15:57	泾源县泾河源镇、新民乡	54	38.2	6.0
16:02	泾源县新民乡	54	33.0	6.0
16:08	泾源县新民乡	44	26.8	4.3

注: “—” 表示由于回波遮挡等原因未观测到 TBSS。

3.3 X 波段双偏振雷达观测特征

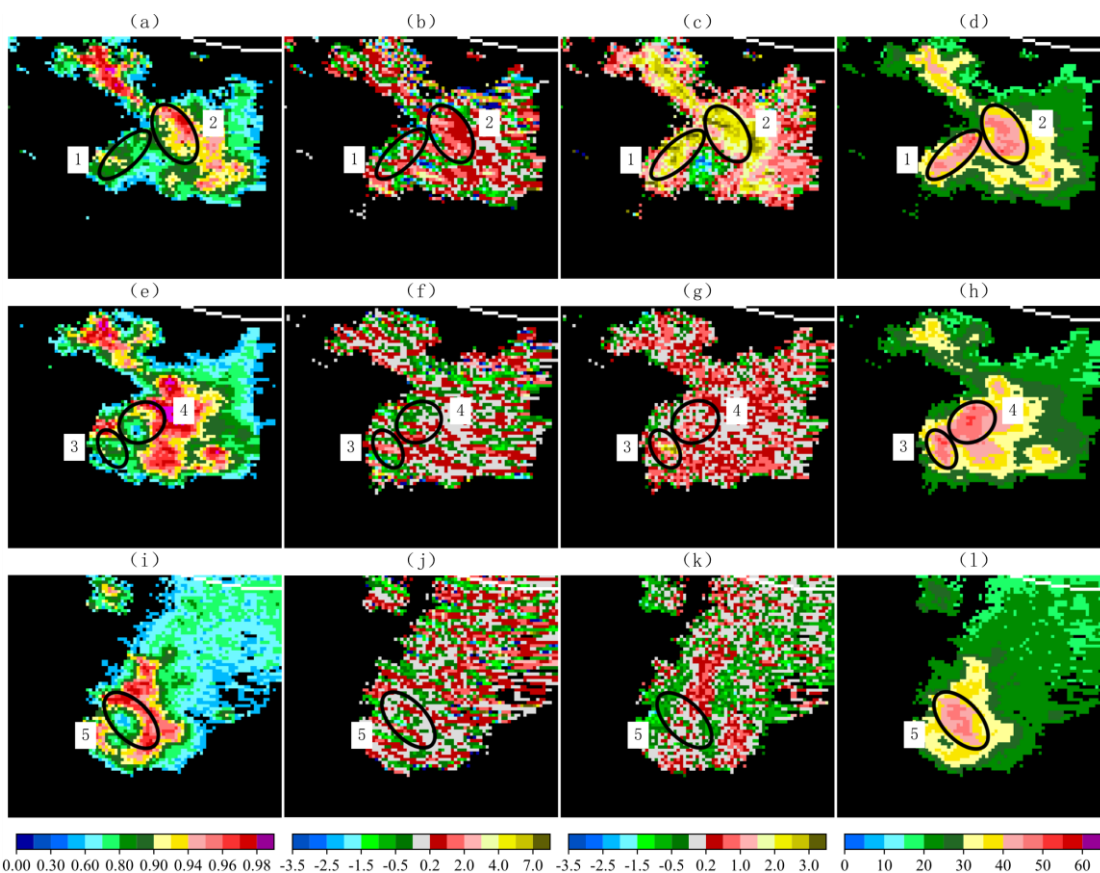
相较于仅使用水平反射率因子 (Z_H) 进行冰雹的识别, 综合运用 Z_H 、差分反射率因子 (Z_{DR}) 和相关系数 (CC), 可更为准确地识别出冰雹在对流单体中的位置及其相态特征 (Picca and Ryzhkov, 2012)。下面选取 15:54 不同仰角的双偏振参量和 15:49 双偏振参量剖面对此次特大冰雹进行分析。

低层 0.5°仰角上, 1、2 处 Z_H 最大值为 50 dBz (图 7d), 距地 0.8 km 左右。回波南侧有明显入流缺口, 入流缺口附近 Z_{DR} 为明显负值区 (图 7c), 且存在一个 CC 显著降低区域, 最低为 0.55 (图 7a), 这可能是由于低层入流区的强上升气流将雨滴带入高层, 低层入流区附近水凝物含量降低后返回信号的信噪比也随之下降, 造成入流区附近 CC 值显著降低, 形成 CC 谷 (Ryzhkov et al, 2005)。因此, 通过识别低层 CC 谷可以判断单体的入流区, 有利于进一步了解整个雹暴流场结构。1 处高 Z_H 对应的 CC 较低 (图 7a), 为 0.70~0.92, 差分传播相移率 (K_{DP}) 为-0.6~2.0 °·km⁻¹ (图 7b), 而 Z_{DR} 较高, 为 1.6~4.0 dB (图 7c), 表明此处可能伴有雨滴和未完全融化而在外包裹有一层水膜的大冰雹。2 处高 Z_H 对应的 CC 为 0.90~0.98 (图 7a), K_{DP} 为 0.2~3.0 °·km⁻¹ (图 7b), Z_{DR} 为 1.5~4.0 dB (图 7c), 由于水凝物散射特性因雷达波长而异, 且 X 波段有明显的共振散射影响, 融化的小冰雹也可

产生较大的 Z_{DR} 和正的 K_{DP} (Ryzhkov and Zrnich, 2019)。因此, 此处可能有雨滴、大雨滴或者融化的小冰雹存在。

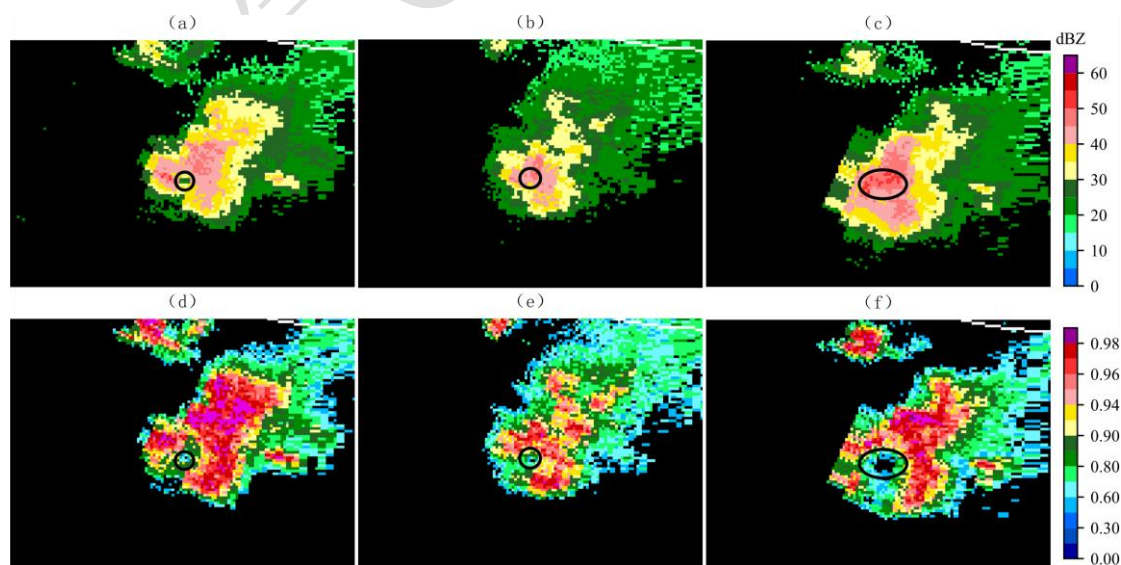
中层 2.4° 仰角上, 4 处有明显的半环形 CC 低值区 (图 7e), 同样 15:49 4.3° 仰角也有半环形 CC 低值区 (图 8d), 其围绕在 BWER 外围 (图 8a, 8d), 且主要位于 BWER 的东北部, 环形或半环形 CC 低值区称作 CC 环 (Kumjian and Ryzhkov, 2008; Snyder et al, 2013)。强上升气流将液相粒子、冰相粒子等多种相态粒子带到高空, 不同相态粒子的尺寸、形状、介电常数都存在差异, 使得 CC 显著降低, 从而形成 CC 环, CC 环在气旋性涡度影响下环绕在上升气流周边, 是超级单体中层的重要偏振特征 (Kumjian and Ryzhkov, 2008)。因此, CC 环可用于指示超级单体中层强上升气流位置。3 处、4 处 Z_H 最大为 53 dBz (图 7h), 距地高度约 3.1~3.3 km (与当日 08:00 的环境 0°C 层高度大致相当, 高于湿球 0°C 层高度)。3 处 Z_H 大值区对应的 Z_{DR} 为 0.2~4.0 dB (图 7g), CC 和 K_{DP} 分别为 0.7~0.9 (图 7e)、 $-1.0\sim 3.0^\circ\cdot\text{km}^{-1}$ (图 7f), 说明此处有水膜包裹的大冰雹、小冰雹或雨滴混合。4 处 Z_H 大值区对应的 Z_{DR} 、 K_{DP} 分别为 $-0.2\sim 1.0$ dB (图 7g)、 $-1.0\sim 0.0^\circ\cdot\text{km}^{-1}$ (图 7f), CC 主要为 0.50~0.93, CC<0.5 的区域出现了缺值 (图 7e), 形成 CC “空洞”, 并且在融化层高度之上的 3.4° 仰角 (图略)、 4.3° 仰角 (图 8c, 8f) 都观测到高 Z_H 处有 CC “空洞”; 同时 1.5° 仰角 4 处对应的 CC 降至 0.55 (图略)。CC “空洞” 最先出现在 15:49 的高层, 4.3° 仰角的 CC “空洞” 被半环形 CC 环包裹, 且对应着 BWER (图 8a, 8d), 6.0° 仰角的 CC “空洞” 也对应着高 Z_H (图 8b, 8e)。CC “空洞” 的出现意味着有特大冰雹存在 (Picca and Ryzhkov, 2012), 且代表了特别强的上升气流 (Kumjian and Ryzhkov, 2008)。15:59 中层 2.4° 仰角上 CC “空洞” 范围进一步扩大 (图略); 对应低层 0.5° 仰角上, CC 降至 0.6 以下, 且出现了 CC “空洞” (图略), 表明中层特大冰雹数量增多, 且已下落至近地面。这种特征有助于识别空中特大冰雹所在区域及高度。

高层 6.0° 仰角上, 5 处有 CC 环 (图 7i), 对应的 Z_H 最大为 49 dBz (图 7l), 距地高度 7.8 km 左右。 Z_H 高值区对应的 Z_{DR} 、 K_{DP} 接近于 0, 且存在负值, 最低值分别为 -0.5 dB (图 7k)、 $-2.0^\circ\cdot\text{km}^{-1}$ (图 7j), CC 低至 0.5 (图 7i), K_{DP} 最低值处对应着 CC 低值, 表明有大冰雹和特大冰雹存在。



注：数字代表主要关注区域的位置编号，黑色圆圈代表其范围。

图 7 2021 年 7 月 12 日 15:54 固原 X 波段雷达 (a~d) 0.5°、(e~h) 2.4°和 (i~l) 6.0°仰角的 (a, e, i) 相关系数、(b, f, j) 差分传播相移率、(c, g, k) 差分反射率因子和 (d, h, l) 水平反射率因子
Fig.7 (a-d) 0.5°, (e-h) 2.4°, (i-l) 6.0° elevation (a, e, i) CC, (b, f, j) K_{DP} , (c, g, k) Z_{DR} , (d, h, l) Z_H of Guyuan X-band Radar at 15:54 BT 12 July 2021



注：黑色圆圈代表主要关注区域。

图 8 2021 年 7 月 12 日固原 X 波段雷达 (a~c) 水平反射率因子和 (d~f) 相关系数

Fig.8 (a~c) Z_H , (d~f) CC of Guyuan X-band Radar on 12 July 2021

强上升气流有利于冰雹的产生，长时间停留在具有过冷云（雨）滴的冻云中是冰雹尺寸增长的主要方式（许焕斌，2012）。 Z_{DR} 柱指正值的 Z_{DR} 延伸到融化层高度以上的区域，是表征上升气流的典型双偏振特征（Ryzhkov et al, 1994）。 Z_{DR} 柱高度与上升气流存在正相关，可判别风暴强度（Ryzhkov et al, 1994; Kumjian et al, 2014）。如图 9 所示，15:49 45 dBz 以上强回波发展高度达到 8 km，有明显的 BWER 和回波悬垂结构； Z_{DR} 柱位于 BWER 附近，与 BWER 不完全重合， Z_{DR} 柱伸展高度为 7.2 km，即伸展至 -10°C 层以上。研究表明， $-10\sim-20^{\circ}\text{C}$ 是有利于冰雹湿增长的关键区域（Dennis and Musil, 1973），结合 Z_{DR} 柱高度，说明此处可能含有大量的大过冷水滴并伴随各种不同大小被雨水包裹的冰雹（Kumjian and Ryzhkov, 2008），大的过冷水滴冻结成较大直径的雹胚，可促成短时间内形成冰雹（刘春文等，2021）。

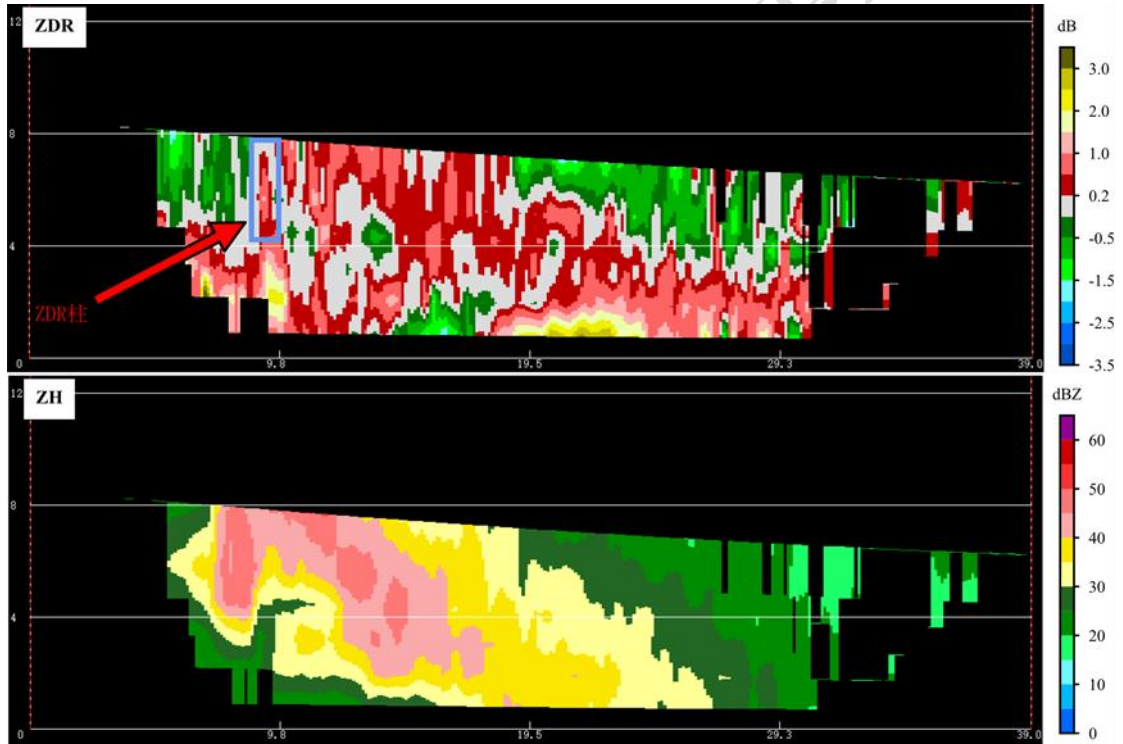


图 9 2021 年 7 月 12 日 15:49 沿固原 X 波段雷达有界弱回波区的 (a) 水平反射率因子和 (b) 差分反射率因子垂直剖面

Fig.9 Cross-section of (a) Z_H and (b) Z_{DR} along BWER of Guyuan X-band Radar at 15:49 BT 12 July 2021

4 结论与讨论

本文利用 ERA5 再分析、雷达、卫星等多源资料，对 2021 年 7 月 12 日宁夏六盘山区突发局地特大冰雹天气的成因及雷达观测特征进行了详细分析，得到以下主要结论：

(1) 此次冰雹发生在华北冷涡背景下，中层的冷平流叠加在低层暖舌上，低层环境温

度直减率达到干绝热递减率, 大气层结不稳定性强, 低层较厚的逆温层积蓄不稳定能量, 进一步加强层结不稳定性, 适宜的 0°C 和 -20°C 层高度为冰雹的产生提供了有利环境条件。六盘山区地面中尺度辐合线、中尺度气旋和局地环流一方面触发了 γ 尺度 MCS, 并使其发展合并成 β 尺度 MCS, 产生特大冰雹, 另一方面地面中尺度辐合线、中尺度气旋和局地环流对 MCS 移动方向有一定指示作用。

(2) TBB 越低冰雹尺寸越大, $\text{TBB} \leq 227\text{ K}$ 、 $\text{TBB} \leq 222\text{ K}$ 时, 分别出现大冰雹和特大冰雹; 大冰雹出现在云团上风方冷“V”型处。

(3) C 波段雷达观测显示, 多单体风暴合并发展形成的超级单体导致此次特大冰雹出现, 强反射率因子、明显的 TBSS 和 VIL 异常大值可作为大冰雹预警的重要依据。大冰雹出现时, $Z \geq 65\text{ dBz}$ 、TBSS 长度 $\geq 20\text{ km}$ 、 $\text{VIL} \geq 40\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$; 特大冰雹出现时, $Z \geq 70\text{ dBz}$ 、TBSS 长度 $\geq 30\text{ km}$ 、 $\text{VIL} \geq 50\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

(4) X 波段雷达观测显示, 大冰雹出现时, 低层 Z_{H} 高值区的 $\text{CC} < 0.8$; 中高层, Z_{H} 高值区的 Z_{DR} 、 K_{DP} 为负值, 且 $\text{CC} < 0.8$; 特大冰雹出现时, 低层 Z_{H} 高值区的 $\text{CC} < 0.6$, $\text{CC} < 0.5$ 的区域形成的“空洞”有助于识别空中特大冰雹所在区域及高度。 Z_{DR} 柱位于 BWER 附近, CC 环位于 BWER 的东北部, Z_{DR} 柱和 CC 环可用于指示超级单体中高层强上升气流的位置。 Z_{H} 和双偏振参量特征对不同尺寸冰雹的识别和预警具有很好的指示意义。

需要指出的是, 本文仅为一次特大冰雹过程的雷达观测特征分析, 未来仍需通过更多的类似个例开展研究, 例如针对不同冰雹尺寸进行 C 波段雷达和 X 波段双偏振雷达特征的定量分析, 为两种雷达在冰雹临近监测预警中的业务应用提供参考。

参考文献:

陈圣劼, 刘梅, 杨梦兮, 等, 2022. 江苏“4·30”强风雹成因及双偏振雷达特征分析[J]. 气象科学, 42(5): 638-649. Chen S J, Liu M, Yang M X, et al, 2022. Analysis on causes of '4.30' severe gales and hails event and associated characteristics of dual-polarization radar echoes over Jiangsu[J]. J Meteor Sci, 42(5): 638-649 (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).

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, 张蓐, 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, 李芳, 万夫敬, 2022. 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, 33(4): 414-428. Diao X G, Li F, Wan F J, 2022. Comparative analysis on dual polarization features of two severe hail supercells[J]. J Appl Meteor Sci, 33(4): 414-428 (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).

郭巍, 崔林丽, 顾问, 等, 2018. 基于葵花 8 卫星的上海市夏季对流初生预报研究[J]. 气象, 44(9): 1229-1236. Guo W, Cui L L, Gu W, et al, 2018. Summer convective initiation forecasting in Shanghai based on Himawari-8 Satellite[J]. Meteor Mon, 44(9): 1229-1236 (in Chinese).

黄晓龙, 高丽, 2016. 2014 年 3.19 台州冰雹过程中尺度分析[J]. 气象, 42(6): 696-708. Huang X L, Gao L, 2016. Mesoanalysis of a hail process in Taizhou on 19 March 2014[J]. Meteor Mon, 42(6): 696-708 (in Chinese).

刘春文, 郭学良, 段玮, 等, 2021. 云南一次典型降雹过程的冰雹微物理形成机理数值模拟研究[J]. 大气科学, 45(5): 965-980. Liu C W, Guo X L, Duan W, et al, 2021. Numerical simulation on the microphysical formation mechanism of a typical hailstorm process in Yunnan, Southwestern China[J]. Chin J Atmos Sci, 45(5): 965-980 (in Chinese).

刘一玮, 寿绍文, 解以扬, 等, 2011. 热力不均匀场对一次冰雹天气影响的诊断分析[J]. 高原气象, 30(1): 226-234. Liu Y W, Shou S W, Xie Y Y, 2011. Diagnostic analysis of the effect of thermal inhomogeneous field on the hail[J]. Plateau Meteor, 30(1): 226-234 (in Chinese).

吕晓娜, 2017. 河南一次强对流天气潜势、触发与演变分析[J]. 高原气象, 36(1): 195-206. Lü X N, 2017. Potential trend, trigger and evolution analysis of a thunderstorm case in Henan[J]. Plateau Meteor, 36(1): 195-206 (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).

孙继松, 石增云, 王令, 2006. 地形对夏季冰雹事件时空分布的影响研究[J]. 气候与环境研究, 11(1): 76-84. Sun J S, Shi Z Y, Wang L, 2006. A study on topography impacting on distribution of hail events[J]. Climatic Environ Res, 11(1): 76-84 (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 Severe Convective Weather Forecast—Severe Convective Weather Forecast Manual of China[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).

汤兴芝, 黄治勇, 张荣, 等, 2023. 2010—2020 年全国冰雹灾害事件时空分布特征[J]. 暴雨灾害, 42(2): 223-231. Tang X Z, Huang Z Y, Zhang R, et al, 2023. Temporal and spatial distribution characteristics of hail disaster events in China from 2010 to 2020[J]. Torr Rain Dis, 42(2): 223-231 (in Chinese).

王珏, 沈新勇, 寿绍文, 等, 2008. 06·6 福建大暴雨的数值模拟及复杂地形影响试验[J]. 南京气象学院学报, 31(4): 546-554. Wang J, Shen X Y, Shou S W, et al, 2008. Numerical simulation and analysis of influence of complex topography on a Fujian rainstorm[J]. J Nanjing Inst Meteor, 31(4): 546-554 (in Chinese).

王兆华, 邹大伟, 王建波, 2015. 冷涡背景下局地冰雹云图特征分析[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 46(3): 408-411. Wang Z H, Zou D W, Wang J B, 2015. Analysis on characteristics of the hail in the satellite cloud map under a background of cold vortex[J]. J Shandong Agr Univ (Nat Sci Ed), 46(3): 408-411 (in Chinese).

尉英华, 陈宏, 张楠, 等, 2018. 冷涡影响下一次冰雹强对流天气中尺度特征及形成机制[J]. 干旱气象, 36(1): 27-33. Wei Y H,
 Chen H, Zhang N, et al, 2018. Analysis on meso-scale characteristics and cause of a severe convective hailstorm weather under cold
 vortex background[J]. J Arid Meteor, 36(1): 27-33 (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
 Application[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
 杨军, 张磊, 李宝东, 等, 2017. 太行山东麓一次强对流降雹过程中的地形强迫[J]. 大气科学学报, 40(2): 253-262. Yang J, Zhang
 L, Li B D, et al, 2017. The orographic impact of a severe convection over the Taihang Mountains[J]. Trans Atmos Sci, 40(2): 253-262 (in
 Chinese).
 杨侃, 桑建人, 李艳春, 等, 2012. 宁夏 50a 冰雹气候特征[J]. 干旱气象, 30(4): 609-614. Yang K, Sang J R, Li Y C, et al, 2012.
 Analysis of climatic and extreme features of hail in Ningxia in recent 50 years[J]. J Arid Meteor, 30(4): 609-614 (in Chinese).
 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等, 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al,
 2006. Principle and Operational Application of Doppler Weather Radar[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
 张杰, 张强, 康凤琴, 等, 2004. 西北地区东部冰雹云的卫星光谱特征和遥感监测模型[J]. 高原气象, 23(6): 743-748. Zhang J,
 Zhang Q, Kang F Q, et al, 2004. Satellite spectrum character of hail cloud and pattern of remote sensing monitor in east of northwest
 China[J]. Plateau Meteor, 23(6): 743-748 (in Chinese).
 张培昌, 魏鸣, 黄兴友, 等, 2018. 双线偏振多普勒天气雷达探测原理与应用[M]. 北京: 气象出版社. Zhang P C, Wei M, Huang X
 Y, et al, 2018. Principle and Application of Dual-Linear Polarization Doppler Weather Radar[M]. Beijing: China Meteorological Press (in
 Chinese).
 张羽, 陈炳洪, 曾琳, 等, 2023. 基于 X 波段双偏振相控阵雷达的超级单体风暴观测分析[J]. 热带气象学报, 39(2): 218-229.
 Zhang Y, Chen B H, Zeng L, et al, 2023. X-band dual-polarization phased-array radar observations of a supercell[J]. J Trop Meteor,
 39(2): 218-229 (in Chinese).
 Balakrishnan N, Zrnić D S, 1990. Use of polarization to characterize precipitation and discriminate large hail[J]. J Atmos Sci, 47(13):
 1525-1540.
 Dennis A S, Musil D J, 1973. Calculations of hailstone growth and trajectories in a simple cloud model[J]. J Atmos Sci, 30(2): 278-
 288.
 Edwards R, Thompson R L, 1998. Nationwide comparisons of hail size with WSR-88D vertically integrated liquid water and derived
 thermodynamic sounding data[J]. Wea Forecasting, 13(2): 277-285.
 Kumjian M R, Ryzhkov A V, 2008. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms[J]. J Appl Meteor Clim, 47(7): 1940-1961.
 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.
 Miller R C, 1972. Notes on analysis and severe-storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central[R]. Air
 Weather Service, Scott Air Force Base, IL.
 Picca J, Ryzhkov A, 2012. A dual-wavelength polarimetric analysis of the 16 May 2010 Oklahoma city extreme hailstorm[J]. Mon
 Wea Rev, 140(4): 1385-1403.

408 Ryzhkov A V, Zhuravlyov V B, Rybakova N A, 1994. Preliminary results of X-band polarization radar studies of clouds and
409 precipitation[J]. J Atmos Oceanic Technol, 11(1): 132-139.

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

412 Ryzhkov A V, Zmic D S, 2019. Radar Polarimetry for Weather Observations[M]. Cham: Springer.

413 Sachidananda M, Zrnić D S, 1987. Rain rate estimates from differential polarization measurements[J]. J Atmos Ocean Technol, 4(4):
414 588-598.

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

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

419 Witt A, Eilts M D, Stumpf G J, et al, 1998. An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D[J]. Wea Forecasting, 13(2): 286-
420 303.