

杨湘婧,唐明晖,袁韬,等,2025. 基于双偏振雷达和 FY-4A 卫星资料的一次湖南秋季强冰雹预警特征分析[J]. 气象,51(1): 68-84. Yang X J, Tang M H, Yuan T, et al, 2025. Analysis on early warning characteristics of an autumn severe hail in Hunan Province based on dual-polarization radar and FY-4A satellite data[J]. Meteor Mon, 51(1): 68-84 (in Chinese).

基于双偏振雷达和 FY-4A 卫星资料的一次湖南 秋季强冰雹预警特征分析*

杨湘婧^{1,3} 唐明晖^{2,3} 袁 韬^{1,3} 兰明才^{2,3} 彭听听^{2,3}

1 湖南省郴州市气象局,郴州 423000

2 湖南省气象台,长沙 410118

3 气象防灾减灾湖南省重点实验室,长沙 410118

提 要: 为提升秋季冰雹监测预警能力,基于双偏振雷达和风云四号 A 星(FY-4A)资料,对 2023 年 11 月湖南一次罕见的秋季强冰雹过程进行分析,探讨其预警特征。研究发现:(1)强冰雹由超级单体风暴产生,在降雹阶段,强回波中心(水平反射率因子 $Z_H \geq 65$ dBz)底部接近地面,相关系数(CC) < 0.9 ,差分传播相移率(K_{DP})为空洞,差分反射率因子(Z_{DR})为 $-3 \sim 0$ dB,对应直径 ≥ 5 cm 的大冰雹降落,与实况吻合。(2) Z_{DR} 柱上升和下降可表征上升气流的加强和减弱, Z_{DR} 结合 CC 有助于识别三体散射(TBSS)和旁瓣特征。强回波面积和质心高度对超级单体风暴不同发展阶段有很好的指示作用,结合监测可使冰雹预警提前量达 12 min 以上。此次过程超级单体造成的 TBSS 长度达到罕见的 73 km, TBSS 的出现、风暴顶辐散呈明显减弱趋势较降雹时间提前 17 min 以上。(3)冰雹、雷暴大风发生区域与冰雹云黑体亮温(TBB)、云顶温度(CTT)、云顶高度(CTH)、云顶气压(CTP)梯度大值区对应较好。结合雷达分析冰雹云发展过程发现,可将 $TBB \leq -58^\circ\text{C}$, $CTT \leq -56^\circ\text{C}$, $CTH \geq 13$ km, $CTP \leq 180$ hPa 且 $TBB \leq -52^\circ\text{C}$ 面积持续增大作为 FY-4A 卫星秋季冰雹云特征参量的监测预警指标。(4)TBB 最大递减率发生时间较降雹时间提前 11 min 以上。 $13.3 \mu\text{m}$ 和 $10.8 \mu\text{m}$ 通道亮温差对冰雹云的发展和减弱反应最为敏感, $6.5 \mu\text{m}$ 和 $10.8 \mu\text{m}$ 通道亮温差则在单站对流监测指标中对冰雹过境前后较其他亮温差反应敏感。

关键词: 秋季冰雹,双偏振雷达,FY-4A 卫星,预警指标,超级单体,三体散射(TBSS)

中图分类号: P456, P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.111201

Analysis on Early Warning Characteristics of an Autumn Severe Hail in Hunan Province Based on Dual-Polarization Radar and FY-4A Satellite Data

YANG Xiangjing^{1,3} TANG Minghui^{2,3} YUAN Tao^{1,3} LAN Mingcai^{2,3} PENG Tingting^{2,3}

1 Chenzhou Meteorological Office of Hunan Province, Chenzhou 423000

2 Hunan Meteorological Observatory, Changsha 410118

3 Hunan Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Changsha 410118

Abstract: In order to improve the monitoring and early warning capabilities for autumn hail, based on the dual-polarization radar and FY-4A satellite data, this paper analyzed a rare autumn severe hail process that occurred in Hunan Province in November 2023, and discussed its early warning characteristics. The findings

* 湖南省自然科学基金重大项目(2021JC0009)、湖南省创新发展专项重点专项(CXFZ2023-ZDZX05)、湖南省气象局 2022 年重点课题(XQKJ22A003)和风云卫星应用先行计划(FY-APP-2022.0605)共同资助

2024 年 4 月 28 日收稿; 2024 年 12 月 3 日收修定稿

第一作者:杨湘婧,主要从事中短期和短时临近天气预报预警研究. E-mail: jh_yxj@163.com

通讯作者:唐明晖,主要从事强对流天气预报预警研究. E-mail: 3617176@qq.com

are as follows: (1) The severe hail process was produced by supercell hailstorms. In the hail stage, the bottom of the strong echo center with horizontal reflectivity factor $Z_H \geq 65$ dBz was close to the ground, the correlation coefficient (CC) was lower than 0.9, the specific differential phase (K_{DP}) was a cavity, and the differential reflectivity factor (Z_{DR}) was $-3-0$ dB. These corresponded to the condition for the fall of large hailstone with diameter ≥ 5 cm, and matched with the observation. The rise and fall of the Z_{DR} column can characterize the strengthening and weakening of updraft, and the Z_{DR} with CC can identify three body scatter signature (TBSS) and side lobe characteristics. (2) The area of strong echo and the height of centroid were good indicators for different development stages of supercell. Combined with monitoring, the lead time of early warning of hail can be improved by more than 12 min. During this severe hail process, the length of TBSS caused by the supercell reached 73 km which is rarely seen. The emergence of TBSS and the divergence of the storm top showed a significant weakening trend, which was 17 min more earlier than the occurrence time of hail. (3) Hail and thunderstorm gale appeared in areas with large gradients of hail cloud blackbody brightness temperature (TBB), cloud top temperature (CTT), cloud top height (CTH), and cloud top pressure (CTP). $TBB \leq -58^\circ\text{C}$, $CTT \leq -56^\circ\text{C}$, $CTH \geq 13$ km, $CTP \leq 180$ hPa and the continuous increase of $TBB \leq -52^\circ\text{C}$ area can be used as monitoring and early warning indicators of the characteristic parameters of autumn hail cloud by FY-4A satellite. (4) The TBB maximum lapse rate can provide at least 11 min of advance warning for impending hail. The brightness temperature difference of $13.3 \mu\text{m}$ and $10.8 \mu\text{m}$ channel is the most sensitive to the development and weakening of hail clouds. The brightness temperature difference of $6.5 \mu\text{m}$ and $10.8 \mu\text{m}$ channels is more sensitive to the related conditions before and after the hail passes through the hit area than other brightness temperature differences among the single-station convection monitoring indicators.

Key words: autumn hail, dual-polarization radar, FY-4A satellite, early warning indicator, supercell, three body scatter signature (TBSS)

引言

冰雹由于尺度小、生命史短、突发性强,是预报难度较大的一种灾害性天气,给农业生产和人民生命财产安全带来严重威胁。常规的气象资料很难全面揭示其演变过程,近年来,在探测手段和技术的不断发展下,多普勒雷达作为中小尺度灾害性天气的最有效监测手段,已在强对流天气预警预报业务上得到广泛应用。国内众多学者开展了大量基于雷达资料的冰雹云识别技术方法和预警指标研究:吴剑坤和俞小鼎(2009)指出高悬的强回波、低层的弱回波区、中高层的回波悬垂和有界弱回波区、中气旋均是强冰雹的主要雷达回波特征;汤兴芝和黄兴友(2009)通过分析宜昌52块强对流云发现利用45 dBz回波顶高可较好地识别冰雹云,当强回波高度达到7.6 km时预示有冰雹出现,其临界成功指数达86%;李德俊等(2011)找出了适合恩施山区强冰雹的雷达临近预警指标;李湘等(2015)对云南省

22次灾害性冰雹天气过程进行分型统计,得到春夏季联合预警指标。随着我国双偏振天气雷达网升级改造,差分反射率因子(Z_{DR})、差分传播相移率(K_{DP})、相关系数(CC)等新的双偏振变量能提供更加全面的冰雹状态信息,因此更有效提高了冰雹临近预报能力(刘黎平等,2016;刁秀广和郭飞燕,2021;潘佳文等,2021;吴举秀等,2022;李芳等,2024;龚佃利等,2024)。但是受地形及雷达观测组网等因素影响,一些冰雹过程由于不在雷达有效探测范围内,仍存在冰雹临近预警盲区。

卫星资料覆盖范围广,且随着第二代静止气象卫星的业务化应用,其高时空分辨率的多通道观测数据组合可更好地观测云的温度、微物理结构、相态等特征,能够对流云团的发生和发展演变进行更密集的跟踪监测(陆风等,2017;任素玲等,2020),同时由于卫星是利用云团中小粒子(云)特征进行监测预警,而云粒子特征总是要早于雨(冰)粒子的出现,因此应用卫星探测进行冰雹云早期识别和提前预警具有较好的潜力。国内不少学者运用卫星资料研究

冰雹云特征,例如张晰莹等(2004)选取 4 年 20 例产生冰雹的卫星云图进行分型分类,对冰雹云的空间尺度、时间尺度、云顶、云体形状、温度梯度等进行了详细的分析和探讨,提出了黑龙江地区产生冰雹的云图概念模型和冰雹的预报程序;张杰等(2004)利用 NOAA 卫星数据分析一次区域性冰雹云强对流天气发现,此次过程云顶温度最低值达到 -44°C ,并确定冰雹发生的云顶温度临界值为 -39.2°C ,云顶亮温为 221 K;王兆华等(2015)等针对冷涡系统引起的冰雹天气,发现冰雹多发生在冰雹云发展和成熟阶段,在黑体亮温中心温度小于 -30°C 的对流云中,黑体亮温梯度大于 $10^{\circ}\text{C}/0.05^{\circ}$ 的区域是冰雹易发区;徐小红等(2022)利用陕西、山东等地近十年降雹记录和极轨卫星数据定量分析冰雹云微物理特征,提取了卫星早期识别指标,并将指标应用于静止卫星风云四号 A 星(FY-4A)实现自动预警,平均提前约 2 h。

2023 年 11 月 9 日凌晨湖南中部地区发生了一次秋季强冰雹过程。由于过程前一天至强对流发生时均为阴雨天气,近地面层热力条件表现一般(地面 2 m 气温在 $17\sim 18^{\circ}\text{C}$),且秋季是湖南降雹最少的季节,仅为全年的 0.69%(李琼等,2022),因此本次强对流天气在短期预报时效出现漏报,在临近时段通过雷达、卫星资料开展短时临近预报预警。本文基于多普勒双偏振雷达和 FY-4A 卫星探测资料,对此次罕见的秋季强冰雹天气过程进行综合分析、探讨其预警特征,以期为该类型短期预报难度较大的冰雹天气预警提供科学参考依据。

1 资料来源

本文所用资料包括:国家卫星气象中心提供的 FY-4A 扫描辐射成像计(AGRI)的 L1 级多通道数据和 L2 级对流初生、云顶高度、云顶温度、云顶气压、云相态等云参数产品,空间分辨率为 4 km,时间分辨率为 5~15 min[由于 2023 年 8 月 15 日至 11 月 23 日 00:30—04:30(北京时,下同)时段 FY-4A 卫星暂停成像仪观测任务,下文分析资料时间从 11 月 9 日 04:30 开始];长沙 S 波段多普勒双偏振雷达(海拔为 622 m,下文简称长沙雷达)资料,空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 5~6 min;常规高空探测和地面观测产品;湖南省中尺度站观测数据;欧洲中期天气预报中心(ECMWF)逐 1 h、 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 再

分析资料(ERA5)以及灾害报告。

2 天气实况和环流背景

2.1 天气实况

2023 年 11 月 9 日 04:00—08:00 湖南中部长沙、湘潭、益阳、娄底等地出现强对流天气(图 1):最大冰雹直径达 5 cm,1 站次雷暴大风,50 站次短时强降水(雨强 $\geq 20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$)。有两条降雹风暴(最大组合反射率因子 $\geq 65\text{ dBz}$ 的对流风暴,以下简称风暴)移动路径:路径 I 为 04:00 从湘潭西北部向东北移至长沙南部,路径 II 为 05:23 从长沙西部自西向东移至中部,两条路径均从山区发展而后向东沿着山丘移动,持续时间达 1.5~2 h。路径 II 的降雹强度和范围强于路径 I,在长沙国家级气象观测站(下文简称长沙站)观测到 5 cm 直径的冰雹(06:33)和 10 级雷暴大风($24.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,06:41),由于发生在市区早高峰时段,对当地的建筑及交通等带来了严重影响。

2.2 环流背景和探空资料分析

8 日 20:00,湖南中部对应 500~200 hPa 高空

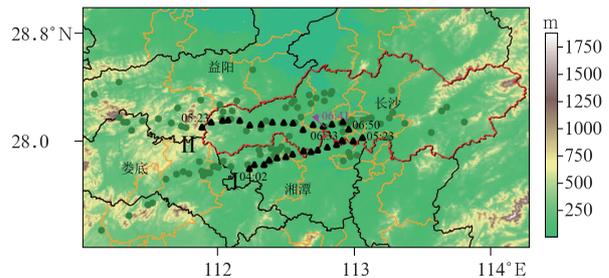


图 1 2023 年 11 月 9 日湖南省强对流过程 04:02—06:50 的两条降雹风暴(I 和 II)逐 5~6 min 移动路径(黑三角)、10 级雷暴大风站点(紫色风羽)、04:00—08:00 雨强 $\geq 20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 站点(绿点)的分布叠加地形高度(填色)

Fig. 1 The 5–6 min moving tracks (black triangle) of hailstorms I and II during the severe convective process in Hunan Province from 04:02 BT to 06:50 BT 9 November 2023, and the distribution of stations with scale 10 thunderstorm and gale (purple barb) and rainfall intensity $\geq 20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ (green dot) from 04:00 BT to 08:00 BT, overlaid with topographic height (colored)

槽前西南急流轴(图 2a)、700 hPa 西南急流轴左侧、850~925 hPa 偏南气流辐合区、地面暖倒槽内。贵州低层有一低涡,暖切从贵州北部延伸至湖南西部。此时,长沙整层受强盛西南气流影响(图 2b)。近地面逆温层的存在导致对流有效位能(CAPE)为零值,但上干下湿的大气层结,K 指数为 35.1℃,850 hPa 与 500 hPa 温度差(T_{85})为 24.5℃,对流抑制能量(CIN)为零值,抬升凝结高度(LCL)低,0~6 km 风切变为 $26.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,达到强垂直风切变强度(俞小鼎等,2020),600 hPa 起始下沉对流有效位能($D_{\text{CAPE}600}$)为 $867 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,湿球 0℃层(WBZ)、-10℃层、-20℃层高度分别为 3.67、5.97、7.25 km, WBZ 明显低于 0℃层高度(4.29 km),均有利于冰雹、雷暴大风和短时强降水天气的发生。随着低涡东移,贵州境内有中尺度对流系统生成并沿着切变线东移进入湖南,9 日 05:00 长沙站(图 2c)650 hPa

以下湿度接近饱和,400~300 hPa 转为干层,仍为上干下湿的大气层结, T_{85} 和 K 指数均较 8 日 20:00 增加且达到降雹前最大值,表明长沙热力不稳定加强。此时,湖南中北部上空为大片槽前盾状云系底部(图 2d),益阳南部已有一块正在发展的中尺度对流云团,云团位置与 925 hPa 切变线位置配合较好,且对应 850 hPa 切变线南侧西南急流辐合线顶部(图略),表明低层的水汽输送和辐合为云团的发展提供了水汽和动力条件。云团南界较为光滑且亮温梯度大,该云团在东移过程中发展为冰雹云,导致长沙出现了冰雹、雷暴大风,而强对流天气恰发生在冰雹云南侧亮温梯度最大的地方。湖南中部有明显地面中尺度辐合线(图略),辐合线位置与降雹风暴移动路径 II 较为一致,则表明地面辐合线为此强对流天气提供了触发条件。

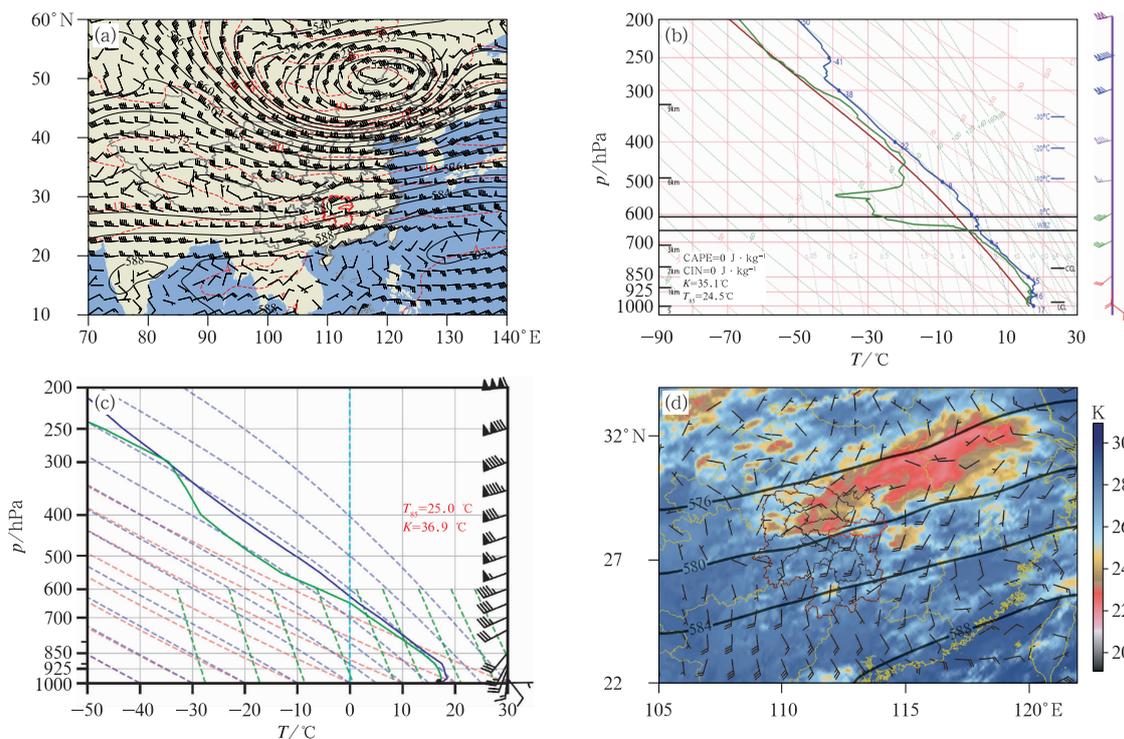


图 2 2023 年 11 月(a,b)8 日 20:00 的(a)500 hPa 位势高度场(黑色等值线,单位:dagpm)、温度场(红色等值线,单位:℃)叠加风场(风羽),(b)长沙站 $T-\ln p$ 图,(c,d)9 日 05:00 的(c)ERA5 长沙站 $T-\ln p$ 图和(d)FY-4A 通道 12 红外云图(填色)叠加 500 hPa 位势高度场(等值线,单位:dagpm)和 925 hPa 风场(风羽)

Fig. 2 (a) Geopotential height (black contour line, unit: dagpm), temperature (red contour line, unit: ℃) and wind (barb) at 500 hPa and (b) $T-\ln p$ diagram at Changsha Station at (a, b) 20:00 BT 8, (c) $T-\ln p$ diagram at Changsha Station from ERA5 and (d) FY-4A channel 12th infrared cloud image (colored), overlaid with 500 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm) and 925 hPa wind (barb) at (c, d) 05:00 BT on 9 November 2023

以上环流背景和物理量分析表明,此次过程为低空暖平流强迫背景下发生的强对流天气(许爱华等,2014),此次冰雹直径达到 5 cm,给预报预警带来一定挑战,下文利用长沙雷达和 FY-4A 卫星资料对这次罕见的秋季强冰雹过程进行冰雹预警特征指标分析。

3 雷达双偏振预警特征指标分析

3.1 风暴演变

路径 I 的冰雹是湖南湘潭境内生成的单单体风暴迅速发展为超级单体风暴所产生,虽有三体散射特征,但冰雹尺寸较小,而路径 II 的降雹风暴在长沙产生了 5 cm 冰雹,因此下文针对路径 II 的降雹风暴进行重点分析。

对流回波于 8 日 21:00 左右在贵州的低涡中心

附近初生,沿着暖切在槽前西西南气流引导下一直往偏东方向移动,很快发展成由多个分散的超级单体风暴组成的对流风暴群,在贵州产生了冰雹。对流风暴群于 9 日 01:00 左右进入湖南西部怀化,逐步演变为镶嵌着多个强单体风暴的呈东北—西南向的带状回波,回波方向与低层切变线位置较一致。在长沙产生强冰雹的降雹风暴于 04:43 首次被雷达识别出来,为对流风暴单体 X3,下文简称风暴 X3。为了更加清晰地反映其演变过程,下文用最大水平反射率因子(Z_{HMAX})、垂直累积液态水含量(VIL)、质心高度(HT)、回波顶高(TOP)、回波底高(BASE)及单体组合反射率的强回波($Z_H \geq 55$ dBz、 ≥ 60 dBz、 ≥ 65 dBz)面积(A_{55} , A_{60} , A_{65})的演变过程来分析(图 3)。

初始时刻风暴 X3 位于对流层中层, TOP、BASE 分别向上向下发展; 05:06 Z_{HMAX} 超过 55 dBz, HT 上升至 WBZ 高度以上, HT、VIL 6 min 分别跃

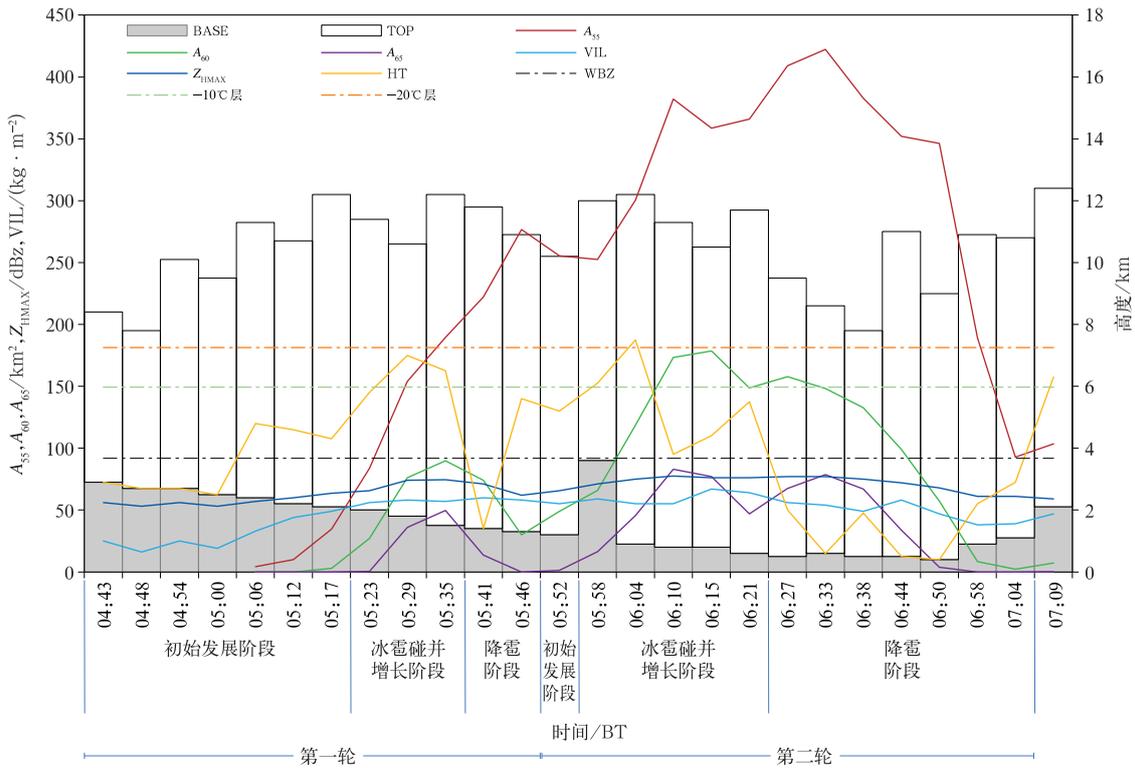


图 3 2023 年 11 月 9 日 04:43—07:09 长沙雷达风暴 X3 的最大水平反射率因子(Z_{HMAX})、垂直累积液态水含量(VIL)、强回波面积(A_{55} 、 A_{60} 、 A_{65})、质心高度(HT)、回波顶高(TOP)、回波底高(BASE)演变

Fig. 3 Evolution of maximum horizontal reflectivity factor (Z_{HMAX}), vertically integrated liquid water content (VIL), area of strong echo (A_{55} , A_{60} , A_{65}), centroid height (HT), echo top height (TOP), and echo base height (BASE) of the Changsha Radar of the storm X3 from 04:43 BT to 07:09 BT 9 November 2023

增 2.5 km 、 $14 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$; 05:17 HT 仍低于冰雹的有效增长层 -10°C 层高度 (5.97 km) (俞小鼎等, 2020), 仅有几个像素点超过 60 dBz (A_{60} 为 2.8 km^2), 此为初始发展阶段。05:23, Z_{HMAX} 开始超过 65 dBz ; 05:29 达 74 dBz (6 min 内增长迅速), 为整个生命史增长率最大, 且持续三个体扫达 70 dBz 以上 (至 05:41), A_{55} 、 A_{60} 均翻倍增长, A_{65} 达 35.9 km^2 , HT 达 7 km , 接近 -20°C 层高度 (7.25 km), 为冰雹的翻滚增长提供了有利条件 (Witt and Nelson, 1991; 曾智琳等, 2019), 此为冰雹第一个碰并增长阶段。05:41, HT 骤降至 1.4 km (6 min 下降 5.1 km), 对应 Z_{HMAX} 、 A_{60} 、 A_{65} 连续下降两个体扫 (至 05:46) 且 A_{65} 消失, 初步判断此时出现第一次降雹, 降雹时间为 5 min。HT 仅下降一个体扫后又在 6 min 内跃增至 5.97 km , 而 A_{55} 仍一直增长说明风暴 X3 短暂减弱后又继续发展, HT 和 A_{55} 配合可更早预示强回波的发展。05:58, Z_{HMAX} 、HT、 A_{60} 、 A_{65} 分别增至 71 dBz 、 6.1 km 、 65.8 km^2 、 16.3 km^2 , 表明冰雹又出现有效增长, 即开始第二轮冰雹碰并增长阶段。06:10, A_{55} 、 A_{60} 迅速上升且 Z_{HMAX} 、 A_{65} 均分别达到过程最强 77.5 dBz 、 82.9 km^2 , 但此时 HT 下降 3.7 km (6 min 内), 虽之后又上升两个体扫, 但均低于 -10°C 层高度, 说明风暴 X3 上升气流已开始减弱。06:27, HT 骤降至 2 km (6 min 内下降 3.5 km), 之后稳定低于 WBZ 高度且 A_{55} 、 A_{60} 、 A_{65} 均稳定下降, 表明此时风暴上升气流已减弱到无法承托大冰雹, 开始第二轮降雹阶段, 降雹时间达 37 min。07:04 之后 HT 虽然又有增长, 但 A_{55} 、 A_{60} 均较小且无 A_{65} , 之后并未出现冰雹。

分析风暴 X3 上述演变可知, 共出现两次降雹, 分别经历了两轮初始发展阶段 (04:43—05:17,

05:46—05:52)、冰雹碰并增长阶段 (05:23—05:35, 05:58—06:21)、降雹阶段 (05:41—05:46, 06:27—07:04), 其发展演变过程符合唐明晖等 (2023)、陈龙等 (2023) 对冰雹云的研究结果。此次过程风暴 X3 短暂减弱又迅速增强, 因而其生命史较长, 维持近 2 h。

3.2 雷达双偏振特征分析

由于第一轮冰雹碰并增长阶段 (05:23—05:35)、降雹阶段 (05:41—05:46) 以及第二轮的初始发展阶段 (05:46—05:52) 维持时间较短, 下文选取风暴 X3 第一轮的初始发展阶段 (04:43—05:17)、第二轮的冰雹碰并增长阶段 (05:58—06:21) 及降雹阶段 (06:27—07:04) 雷达偏振量的垂直结构进行分析, 以剖析风暴 X3 在不同演变阶段雷达偏振参数所体现出的特征和云物理机制。

3.2.1 第一轮初始发展阶段 (04:43—05:17)

初始发展阶段, 随着雨滴在上升过程中不断增长, Z_{H} 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 不断增大且往上发展。05:17, 风暴 X3 的 Z_{H} 最大达到 60 dBz (图 4a), 对应 $1.5^\circ \sim 3.3^\circ$ 仰角径向速度 V (距地 $4.7 \sim 8.7 \text{ km}$, 图 4b) 出现气旋性涡旋, 其最大转动速度达 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 可判为弱中气旋 (Andra, 1997), 中气旋的出现标志着超级单体的形成, 符合 Lemon and Doswell (1979) 提出的超级单体中气旋发展概念模式: 中气旋一般起源于中空 ($5 \sim 8 \text{ km}$)。

沿风暴 X3 最强回波中心径向方向 (图 4a 实线 ab) 作垂直剖面分析: $Z_{\text{H}} \geq 55 \text{ dBz}$ 的强回波发展至 -20°C 层高度 (图 5a), 满足雹胚发展条件; $\geq 1 \text{ dB}$ 的 Z_{DR} 柱伸展高度接近 -20°C 层, 说明上升气流十分强劲, 有利于液态水向上输送至负温区冻结形成

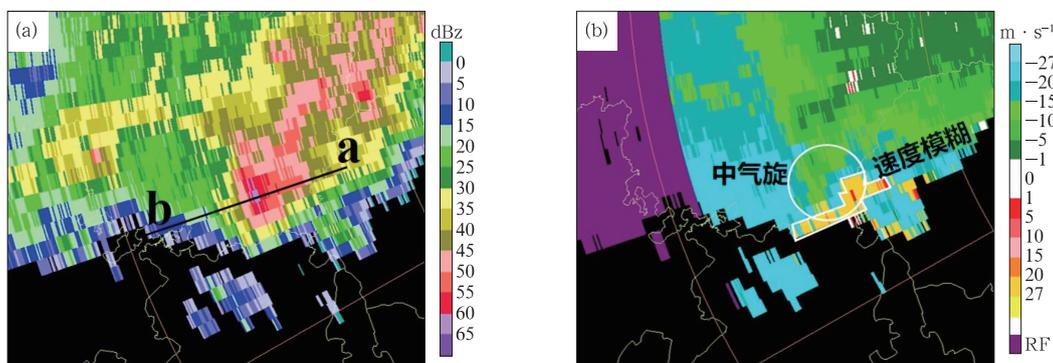
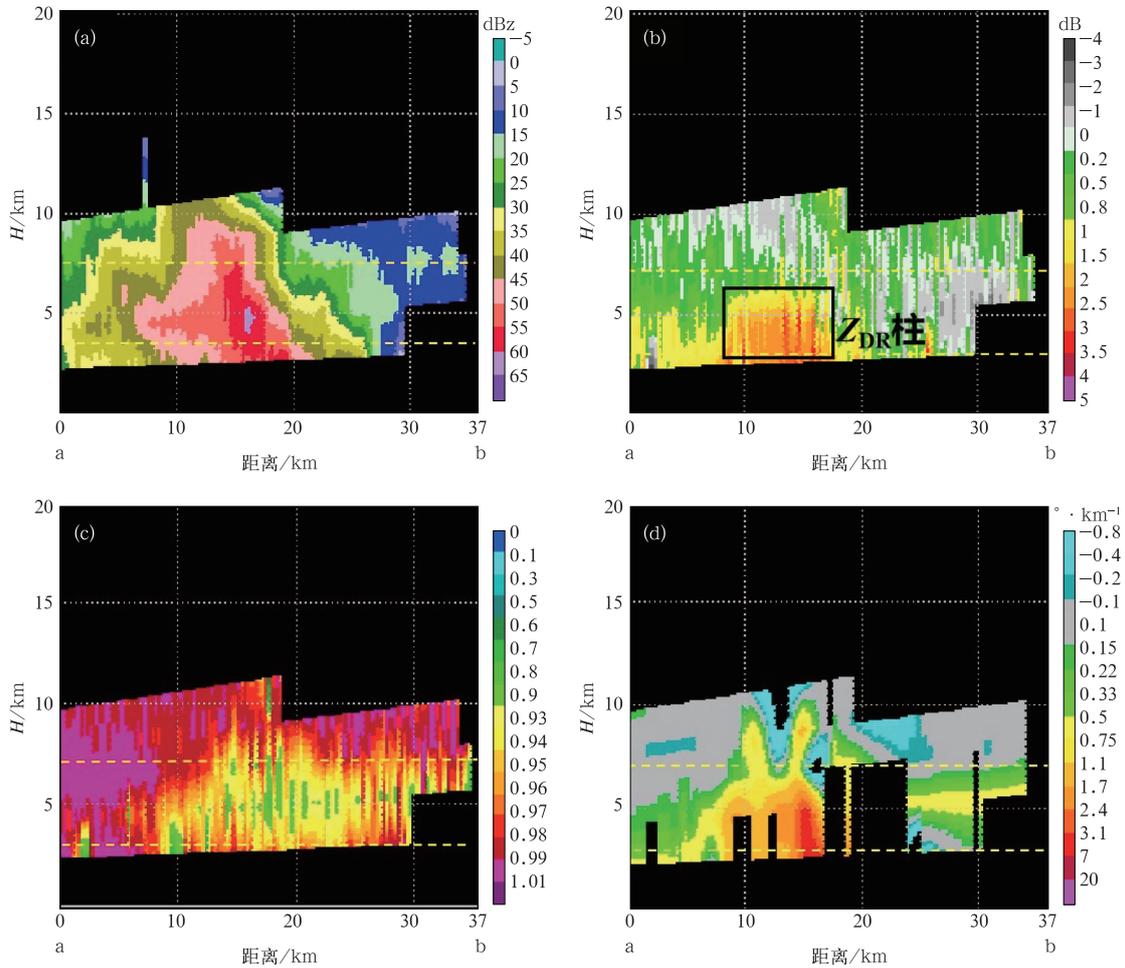


图4 2023年11月9日05:17长沙雷达 1.5° 仰角(a) Z_{H} 和(b) V

Fig. 4 (a) Z_{H} and (b) V at 1.5° elevation of Changsha Radar at 05:17 BT 9 November 2023



注:黄色虚线为 WBZ 和 -20°C 层高度。

图 5 2023 年 11 月 9 日 05:17 长沙雷达沿风暴 X3 最强回波中心径向方向(图 4a 实线 ab)的剖面
(a) Z_H , (b) Z_{DR} , (c) CC, (d) K_{DP}

Fig. 5 (a) Z_H , (b) Z_{DR} , (c) CC and (d) K_{DP} profiles of Changsha Radar along the radial direction of the storm X3 echo center (the solid line ab in Fig. 4a) at 05:17 BT 9 November 2023

雹胚(潘佳文等,2020)。强回波($Z_H \geq 55$ dBZ)区域对应的 Z_{DR} 为 $0.5 \sim 3.8$ dB(图 5b),CC 为 $0.88 \sim 0.95$ (图 5c), K_{DP} 为 $0.5 \sim 3.3^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$ (图 5d),说明该区域存在小冰雹和(大)雨滴和混合相态,冰雹正在进行湿增长。

3.2.2 第二轮冰雹碰并增长阶段(05:58—06:21)

随着风暴 X3 反射率因子进一步增强, Z_H 最大值超过 65 dBZ 且 A_{60} 、 A_{65} 逐步扩大。05:58, Z_H 最大达 71 dBZ, 4.3° 仰角反射率因子(图 6a)同时存在三体散射(TBSS)和旁瓣特征。廖玉芳等(2007)提出 TBSS 长度越长,降雹的尺寸可能越大。此时 TBSS 长度扩展至 24 km,说明空中的冰雹尺寸已明显增长。TBSS 根部的 Z_{DR} 有大值区(>5 dB),大

值区距冰雹核心的距离与冰雹核心距地高度相一致(6.7 km 左右),随着径向距离的增加, Z_{DR} 迅速减小接近于 0 dB(图 6c),TBSS 的 CC 则表现为明显偏小(<0.5)(图 6d),这与 Kumjian et al(2010)归纳的 TBSS 的偏振特征相符。强回波中心左侧的旁瓣对应的 $Z_{DR} < 0$ dB, $CC < 0.8$ 。

此时 4.3° 仰角上风暴 X3 径向速度最大旋转速度增至 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 6b),达中等强度中气旋标准(Andra,1997),中气旋持久存在(维持 41 min)且加强表明此时 X3 发展成熟。 9.9° 仰角(距地 14.4 km)存在强烈的速度辐散并出现速度模糊(图略),高层强烈辐散导致的抽吸作用使得上升气流加强,更有利于冰雹粒子的增长。

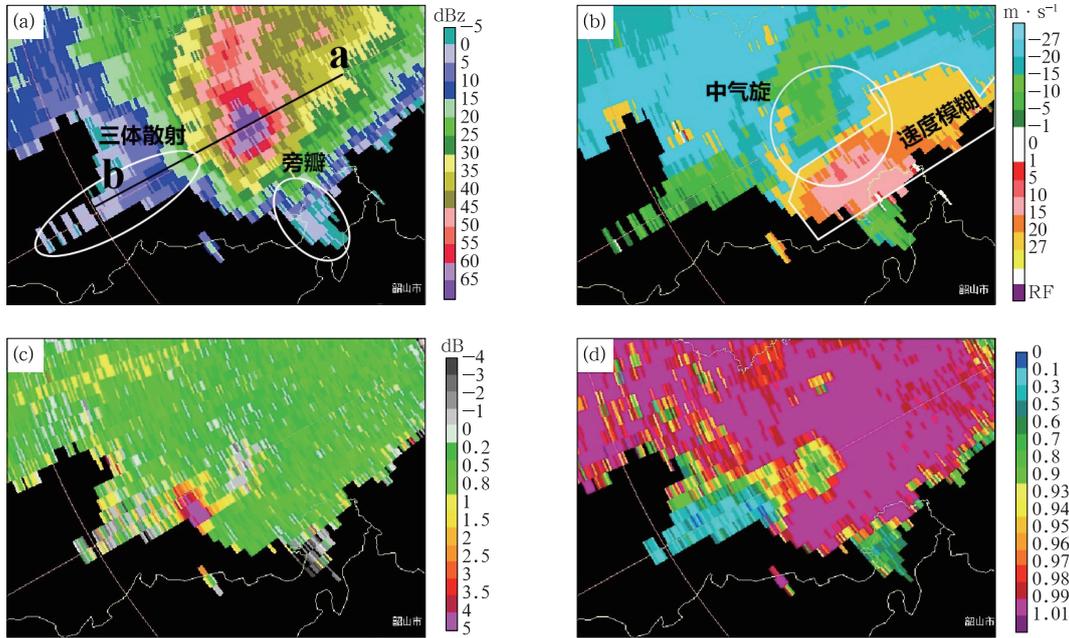


图 6 2023 年 11 月 9 日 05:58 长沙雷达 4.3°仰角风暴 X3 的 (a) Z_H 、(b) V 、(c) Z_{DR} 和 (d) CC

Fig. 6 (a) Z_H , (b) V , (c) Z_{DR} and (d) CC at 4.3° elevation of Changsha Radar of the storm X3 at 05:58 BT 9 November 2023

分析风暴 X3 最强回波径向方向的垂直剖面 (图 7a) 可知, 反射率因子自低往高向低层入流一侧倾斜, 并呈现高悬强回波和有界弱回波区 (BWER) 特征, $Z_H \geq 60$ dBz 的强回波高度发展至 -20°C 层高度以上, $Z_H \geq 65$ dBz 的强回波中心对应的 $Z_{DR} < 0$ dB (图 7b), $CC < 0.9$ (图 7c), K_{DP} 为空洞 (图 7d), 表明此时 -20°C 层高度附近已经出现直径 ≥ 5 cm 的强冰雹 (Kumjian, 2013)。强回波下方倾斜的 Z_{DR} 柱 (图 7b 黑框) 与 BWER 位置对应较好, 说明该区域上升气流强, 仍将液态水源源不断向上输送, 过冷水供应充足利于雹胚增长; Z_{DR} 柱中 $CC > 0.97$, $K_{DP} > 1.1^\circ \cdot \text{km}^{-1}$, 该区域以大粒雨滴为主。WBZ 附近距离雷达 15 km 处的强回波 ($Z_H \geq 60$ dBz, 图 7a 黑框 A) 对应的 Z_{DR} 为 2~4 dB, CC 为 0.90~0.96 且 $K_{DP} > 3^\circ \cdot \text{km}^{-1}$, 说明此区域存在 (大) 雨滴、融化小冰雹的混合体。

3.2.3 第二轮降雹阶段 (06:27—07:04)

06:33, 风暴 X3 的 Z_H 最大仍达 65 dBz 以上 (图 8), BWER 消失 (图 9a), 强回波柱仍呈倾斜状, 但中心高度整体降至 5 km 以下且底部接近地面, Z_{DR} 柱高度下降至 WBZ 以下 (图 9b), 表明此时以下沉气流为主, 正在降雹。A 区域 (图 9a 黑框 A) 强回波对应的 CC 为 0.90~0.96 (图 9c), K_{DP} 为异常大值 ($> 7^\circ \cdot \text{km}^{-1}$, 图 9d), Z_{DR} 随着高度降落由 0 dB

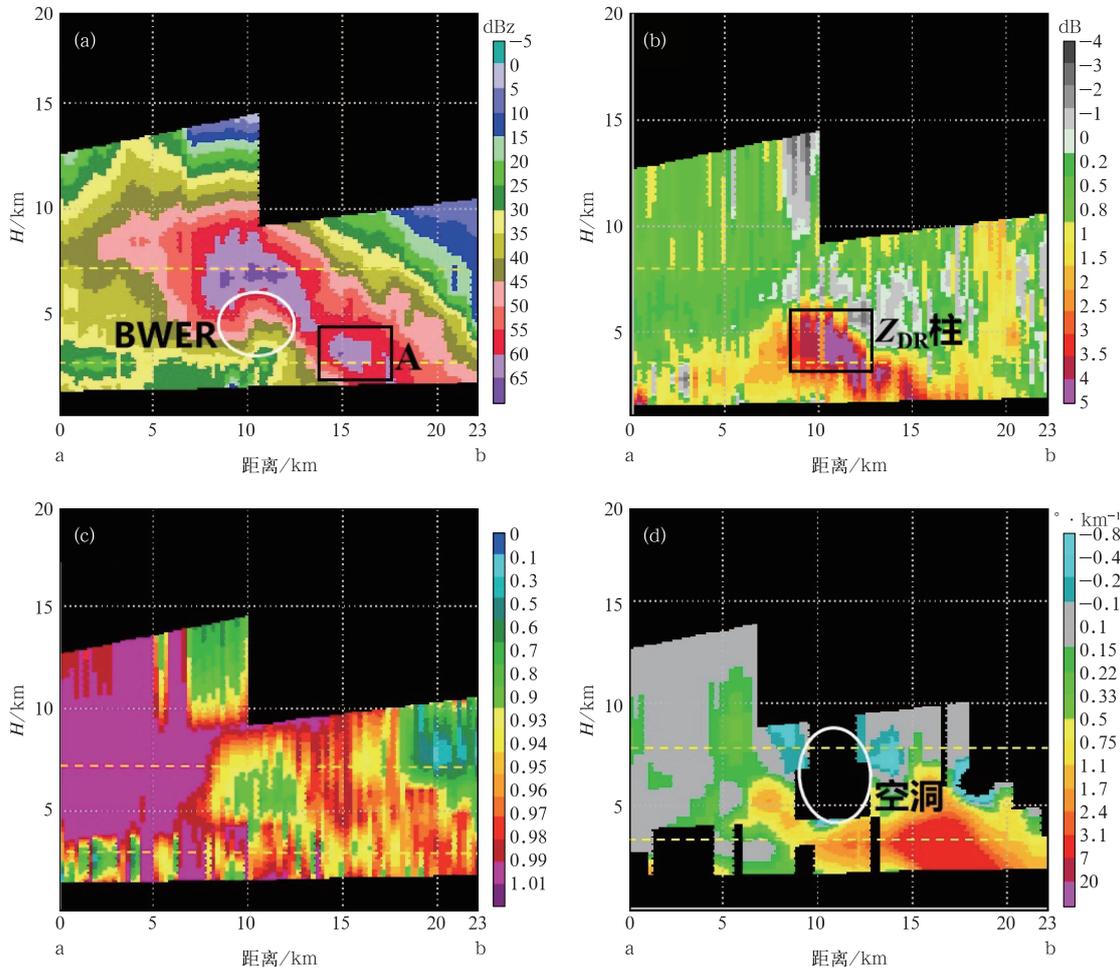
左右增大至 1.0~2.5 dB (图 9b), 说明该区域为大量融化的小冰雹和 (大) 雨滴混合相态, 小冰雹在降落过程中融化外包水膜呈现出的扁平形状, 这与大雨滴相似, 因此具有较高的 Z_{DR} 和 K_{DP} (潘佳文等, 2020)。而 B 区域 (图 9a 黑框 B) 强回波对应的 $CC < 0.9$, K_{DP} 为空洞, Z_{DR} 为 $-3 \sim 0$ dB, 说明该区域为直径 ≥ 5 cm 的强冰雹降落, 与实况吻合。

值得补充的是, 雷暴大风产生时段径向速度 (距离雷达 45 km 内, 距地 1 km 以下) 并未出现地面强风的雷达回波特征结构——低仰角径向速度大值区 (俞小鼎等, 2020; 王秀明等, 2023; 图略), 值仅为 $-5 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 究其原因可能是风暴移动方向刚好与径向垂直, 导致雷达无法探测到其真实风速, 针对雷暴大风天气监测预警时需特别注意风暴移动方向与雷达径向是否垂直。

3.3 雷达预警特征指标分析

3.3.1 强回波面积和质心高度

分析 A_{55} 、 A_{60} 、 A_{65} 和 HT 的发展趋势 (图 3) 可知: 当四者同时增长时, 表明超级单体处于冰雹旺盛发展阶段; 当四者同时减小时, 表明超级单体处于快速减弱阶段; 而当 A_{60} 和 A_{65} 减小但 A_{55} 仍在增长且 HT 同时跃增时, 表明超级单体又将继续发展; 当 HT 接近冰雹有效增长层且 A_{60} 已超过 27 km^2 时



注:黄色虚线为 WBZ 和 -20°C 层高度。

图 7 2023 年 11 月 9 日 05:58 长沙雷达沿风暴 X3 最强回波中心径向方向(图 6a 实线 ab)的剖面
(a) Z_H , (b) Z_{DR} , (c) CC, (d) K_{DP}

Fig. 7 (a) Z_H , (b) Z_{DR} , (c) CC and (d) K_{DP} profiles of Changsha Radar along the radial direction of the storm X3 echo center (the solid line ab of Fig. 6a) at 05:58 BT 9 November 2023

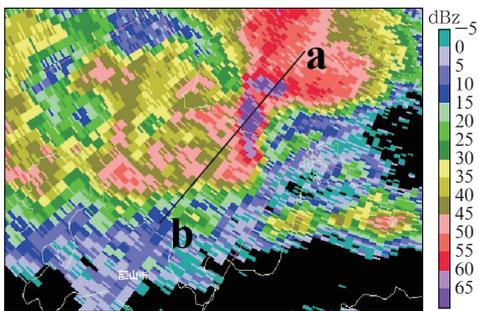


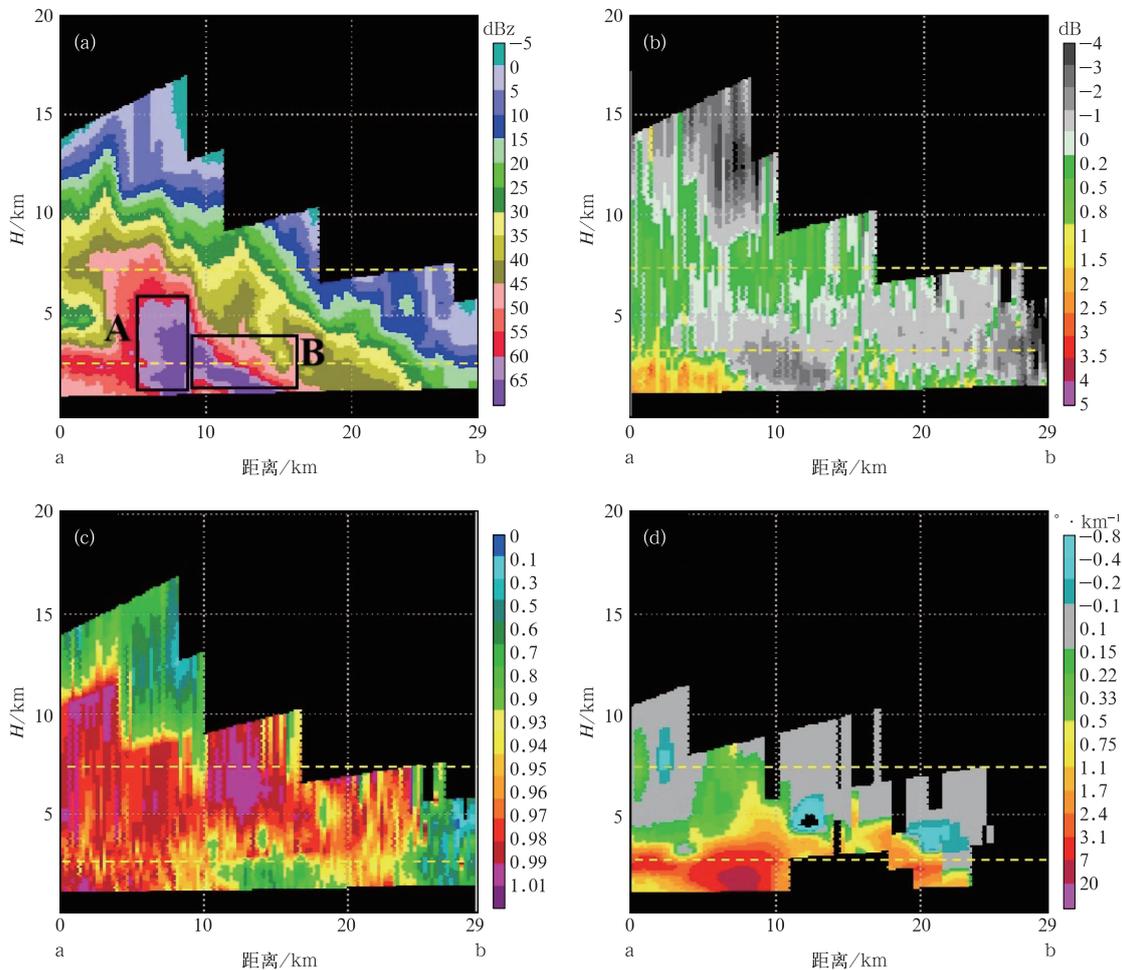
图 8 2023 年 11 月 9 日 06:33 长沙
雷达 0.5° 仰角 Z_H

Fig. 8 Z_H at 0.5° elevation of Changsha Radar at 06:33 BT 9 November 2023

(05:23, 05:46), 表明单体进入冰雹碰并增长阶段, 预报员若发布冰雹预警, 提前量分别可达 17 min、41 min; 当 HT 接近 -20°C 层高度且已出现 A_{65} 时 (05:29, 06:04), 提前量分别可达 12 min、23 min; 当 A_{55} 、 A_{60} 、 A_{65} 同时上升但 HT 出现明显下降 (6 min 降幅超过 3 km) 接近 WBZ 时 (06:10), 预示上升气流已明显减弱可能将出现降雹, 提前量仍可达 17 min。

3.3.2 TBSS

TBSS 可作为识别大冰雹的充分非必要条件 (Lemon, 1998)。05:23 风暴 X3 首次出现 TBSS; 06:27, TBSS 长度达 73 km (图 10), 大于廖玉芳等



注:黄色虚线为 WBZ 和 -20°C 层高度。

图 9 2023 年 11 月 9 日 06:33 长沙雷达沿风暴 X3 最强回波中心径向方向(图 8 实线 ab)的剖面
(a) Z_H , (b) Z_{DR} , (c) CC, (d) K_{DP}

Fig. 9 (a) Z_H , (b) Z_{DR} , (c) CC and (d) K_{DP} profiles of Changsha Radar along the radial direction of the storm X3 echo center (the solid line ab of Fig. 8) at 06:33 BT 9 November 2023



图 10 2023 年 11 月 9 日长沙雷达
06:27 4.3° 仰角 Z_H

Fig. 10 Z_H at 4.3° elevation of Changsha Radar at 06:27 BT 9 November 2023

值(69.7 km),十分罕见。之后 TBSS 一直持续到 06:50,总持续时间长达 1.5 h, TBSS 特征消失后 15 min, 降雹结束。过程期间 TBSS 出现的时间明显早于冰雹落地时间(提前量为 17~64 min),因此可关注中高层仰角的基本反射率因子演变,通过判断 TBSS 来提高冰雹预警的提前量。

3.3.3 Z_{DR} 、CC、 K_{DP}

由 3.2 节分析可知, Z_{DR} 、CC、 K_{DP} 配合 Z_H 可较好地识别相态粒子,对冰雹的不同阶段均有预警指示意义。 Z_{DR} 柱上升和下降可表征上升气流的加强和减弱;结合 Z_{DR} 和 CC 有助于识别 TBSS 和旁瓣特征。强对流监测预警时,可关注 Z_{DR} 的发展演变趋势,加强对多种双偏振参数的综合应用。

(2007)统计的冰雹个例中 499 个 TBSS 长度的最大

3.3.4 风暴顶辐散

此次过程冰雹发展和增长阶段风暴顶辐散和速度模糊特征明显,对应强上升气流的维持和加强(图略)。06:10 开始风暴顶辐散呈明显减弱趋势,预示上升气流开始减弱,较冰雹和雷暴大风出现时间提前 20~30 min,也可作为强对流监测的重要特征指标。

4 FY-4A 卫星资料预警特征指标分析

4.1 云参数产品

4.1.1 风暴 X3 不同发展阶段云参数产品演变特征

参照 3.1 节雷达分析风暴 X3 演变,选取 9 日 04:34、05:53、06:45 分别代表风暴 X3 的初始发展、冰雹碰并增长和降雹阶段来分析其对应的冰雹云在降雹前后的 FY-4A 云参数产品变化特征。

04:34,云相态产品显示位于益阳南部的对流云团为冰云(图 11a),此时云团中心黑体亮温(TBB)已达 -50.8°C (图 12a),云顶高度(CTH)为 12.6 km(图 12g),云顶温度(CTT)为 -52°C (图 12d),云顶气压(CTP)为 197 hPa(图略),同时对流初生监测产品监测到该对流云团云顶出现 -2°C 左右的负变温(图 11b),表明此对流云团正在旺盛发展。随着对流云团发展,TBB 和 CTT 逐渐降低,云体面积扩大,冰云面积和 $\text{TBB} \leq -52^{\circ}\text{C}$ 面积(A_{-52})同时扩大,云体南侧 TBB 梯度明显加大,CTH 升高,CTP 降低,至 05:53,云团中心 TBB 达 -59.8°C (图 12b),CTT 为 -56.6°C (图 12e),CTH 升至 13 km(图 12h),

CTP 为 180 hPa(图略),表明此时云团已出现深对流[通常 $\text{TBB} \leq -52^{\circ}\text{C}$ 反映的是大气中的深对流活动(陈国春等,2011)]形成冰雹云,TBB、CTT、CTH、CTP 梯度大值区均与降雹风暴路径 II 对应。06:19(图略),TBB、CTT、CTP 均降至最低,分别为 -63.1°C 、 -60.2°C 、169.5 hPa,CTH 达到最高为 13.4 km,与雷达探测到的回波顶高度相符,此时为此次过程对流发展最强时刻。随着冰雹发生,不稳定能量得以释放,冰雹云的 TBB、CTT、CTP 逐渐升高,CTH 逐渐降低,至 06:45,TBB(图 12c)、CTT(图 12f)、CTP(图略)分别升至 -58.6°C 、 -58.3°C 、175.7 hPa,CTH 降至 13 km(图 12i)。降雹结束后至 07:45,TBB、CTT、CTP 继续分别升至 -57°C 、 -54°C 、 -55°C 、 -53°C 、186~190 hPa,CTH 降至 13 km 以下,虽依然表现为深对流特征,但 A_{-52} 迅速减小(图略),对流云团仅产生了短时强降水。

4.1.2 云参数产品预警指标分析

分析对流云团中心 9 日 04:30—07:45 逐 5~15 min 云参数产品变化结合 3.1 节雷达分析的两轮冰雹演变阶段(图 13)发现, $\text{TBB} \leq -58^{\circ}\text{C}$, $\text{CTT} \leq -56^{\circ}\text{C}$, $\text{CTH} \geq 13 \text{ km}$, $\text{CTP} \leq 180 \text{ hPa}$ 且 A_{-52} 持续增大可作为秋季冰雹云 FY-4A 卫星云特征参量的监测预警指标。

4.2 多通道亮温对冰雹云监测预警指标分析

基于卫星数据预警对流初生的指标方法——SATCAST 由 Mecikalski and Bedka(2006)、Mecikalski et al(2008)首次提出,包括红外云顶亮温、红外云顶亮温的时间变化趋势、红外云顶亮温差等 8 个预警

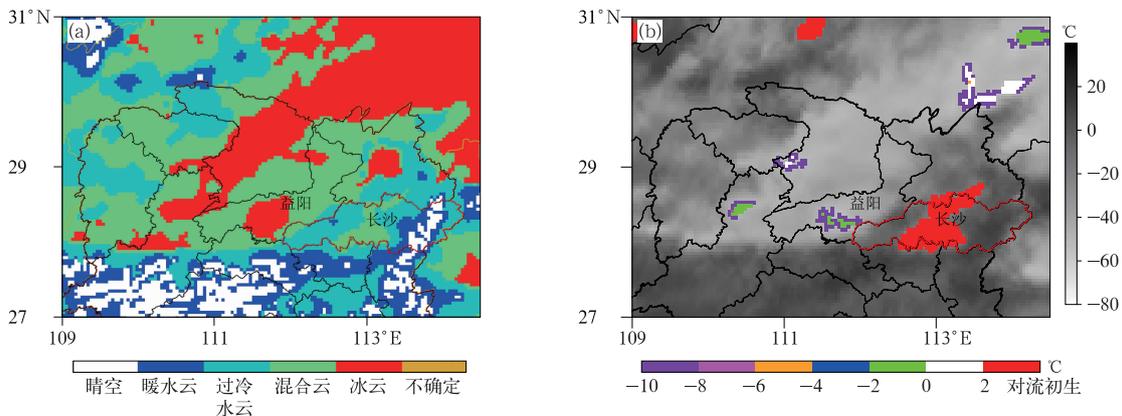
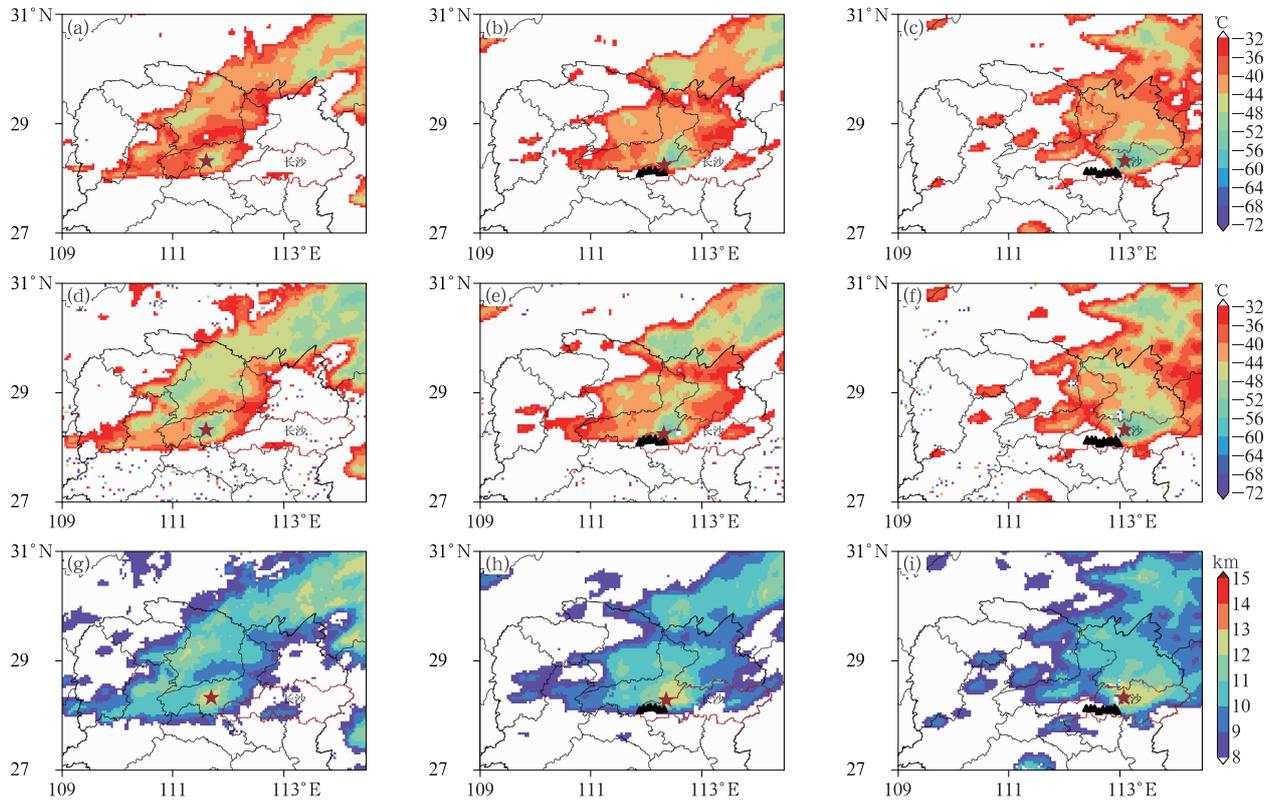


图 11 2023 年 11 月 9 日 04:34 FY-4A(a)云相态产品、(b)对流初生监测产品(彩色填色)叠加通道 12 红外云顶亮温(灰色填色)

Fig. 11 (a) Cloud phase and (b) convective initiation products of FY-4A (colored) overlaid with its channel 12th infrared cloud image (grey shaded) at 04:34 BT 9 November 2023



注:红色星号为对流云团中心,黑色三角形为该小时路径 II 的降雪风暴移动轨迹。

图 12 2023 年 11 月 9 日 FY-4A (a~c)通道 12 TBB,(d~f)CTT,(g~i)CTH
(a,d,g)04:34,(b,e,h)05:53,(c,f,i)06:45

Fig. 12 (a~c) The FY-4A channel 12th TBB, (d~f) cloud top temperature (CTT), (g~i) cloud top height (CTH) at (a, d, g) 04:34 BT, (b, e, h) 05:53 BT, (c, f, i) 06:45 BT 9 November 2023

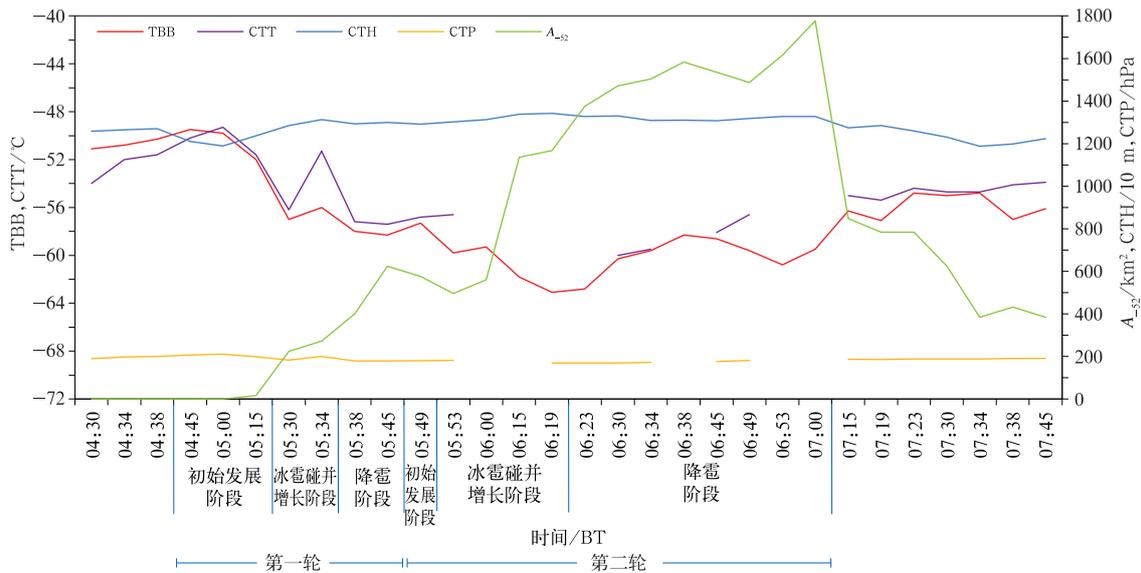


图 13 2023 年 11 月 9 日 04:30—07:45 对流云团中心 FY-4A 第 12 通道 TBB,CTT,CTH,CTP 和 $TBB \leq -52^{\circ}\text{C}$ 面积(A_{-52})变化

Fig. 13 Variations in the FY-4A channel 12th TBB, CTT, CTH, CTP and area of $TBB \leq -52^{\circ}\text{C}$ (A_{-52}) in the convective cloud center from 04:30 BT to 07:45 BT 9 November 2023

指标,经修订后这些预警指标在国内也得到了应用(刘京华等,2012;李五生等,2014;周鑫等,2019;张琪等,2021),但仍局限于对对流初生的预警,对冰雹云的预警研究较少。下文将利用 9 日 04:30—07:45 FY-4A 对流云团中心(图 14a)和长沙站附近(图 14b)的多通道亮温数据分析冰雹云发展演变特征和其与天气现象之间的关系,以提炼秋季冰雹云卫星监测预警指标。

4.2.1 通道 12 TBB

FY-4A AGRI 通道 12(中心波长 $10.8 \mu\text{m}$)位于大气窗区,通常用 TBB 阈值和时间变化来监测对流云发展(覃丹宇和方宗义,2014)。分析对流云团中心 TBB 演变(图 14a 红线)可知,06:19 以前 TBB 处于波动下降趋势,06:23 以后则稳定处于上升趋势,两次降雹开始时间(05:41 和 06:27)发生在 TBB 升高时(降雹云处于衰弱阶段),发生前 10 min TBB 有明显下降,其中 05:15—05:30 TBB 下降 5°C ,为此次过程递减率最强,表明 TBB 最大递减率发生时间比降雹时间至少提前 11 min。而长沙站上空 TBB(图 14b 红线)呈“上升—下降—上升—下降”特征,反映出有两个不同的对流云团移过该站。第一个下降时段为冰雹、雷暴大风、短时强降水混合强对流天气发生时段,第二个下降时段仅出现了短时强降水而其 TBB 值明显低于第一个时段,究其原因可能是混合强对流天气落区对应 TBB 梯度大值区,而短时强降水落区对应 TBB 大值区。其中 05:53—06:00 TBB 下降 13°C 为该站第一个下降时段递减率最强,06:30 TBB 达到最低值 -37.8°C ,TBB 最大递减率时间比降雹和雷暴大风发生时间提前 33 min 以上(该站降雹时间为 06:33,雷暴大风发生时间为 06:41)。以上分析均表明对流云团 TBB 快速下降之后,剧烈的天气才开始出现,TBB 最大递减率的发生较降雹时间提前 11 min 以上。

4.2.2 通道 13 与 12 亮温差(BTD₁₃₋₁₂)

FY-4A AGRI 通道 13(中心波长 $12.0 \mu\text{m}$)与通道 12 均为大气窗区,两通道亮温差 BTD₁₃₋₁₂(又称为分裂窗技术)可用于识别卷云和深对流云,负的差值可识别出高的薄卷云,而对流层上层的成熟积云则表现为微值,接近于或大于 0°C 表明对流垂直发展旺盛(马鹏辉等,2014)。分析对流云团中心 BTD₁₃₋₁₂(图 14a 中紫线)可知,04:34—05:38、

05:45—06:38 其值均从 -2°C 上升为正值($0 \sim 1^\circ\text{C}$),表明对流垂直发展旺盛;05:38—05:45、06:38—06:45 出现显著下降且达到负值表示对流明显减弱。以上两轮对流发展和减弱时段均与 3.1 节雷达资料分析的冰雹碰并增长和降雹阶段吻合。结合 TBB 分析结果来看,当 BTD₁₃₋₁₂ 接近于或大于 0°C 且 $\text{TBB} \leq -58^\circ\text{C}$ 表明对流云团已发展为成熟的冰雹云,7 min 内 BTD₁₃₋₁₂ 降为负值且降温幅度达 $2.3 \sim 3.8^\circ\text{C}$ 时,对应可能正在降雹。分析长沙站 BTD₁₃₋₁₂(图 14b 紫线)则无明显指示意义。

4.2.3 通道 9 与 12 亮温差(BTD₉₋₁₂)、通道 9 与 10 亮温差(BTD₉₋₁₀)、通道 14 与 12 亮温差(BTD₁₄₋₁₂)

FY-4A AGRI 通道 9 和通道 10 的中心波长分别为 $6.5 \mu\text{m}$ 、 $7.1 \mu\text{m}$,主要探测对流层高层和中层的水汽信息;通道 14 的中心波长为 $13.3 \mu\text{m}$,接收的辐射主要来自于对流层中下部,因此不同通道间亮温差 BTD₉₋₁₂、BTD₉₋₁₀、BTD₁₄₋₁₂ 均可用来识别云团的云顶高与对流层顶的相对位置:适当的负值代表一个可能的对流初生区域;接近于 0°C 为成熟积云或者积雨云,而正值区则表明云顶高已达到或超过对流层顶,或者上升到干燥的对流层上层空气中(覃丹宇和方宗义,2014;马鹏辉等,2014)。分析对流云团中心 BTD₉₋₁₂ 和 BTD₉₋₁₀ 演变(分别为图 14a 蓝线、黄线)可知,两种亮温差演变趋势较为一致且值相差不大,两轮对流发展和减弱时段与 BTD₁₃₋₁₂ 分析结果一致,其中第二轮变化幅度大于 BTD₁₃₋₁₂,BTD₉₋₁₂ 从 06:15 开始出现第二轮对流减弱,早于其他三种亮温差 $4 \sim 8$ min,较降雹开始时间提前 12 min。而对于 BTD₁₄₋₁₂(图 14a 绿线),初始发展和冰雹碰并增长阶段增幅近 11°C (05:34—06:23 从 -2.5°C 上升至 8.3°C);降雹阶段 05:30—05:34、06:23—06:30 降幅超 4°C ,分别提前降雹开始时间 11 min、4 min。增幅和降幅均为四种亮温差最大,表明其对强冰雹云团发展和减弱反应最为敏感,当亮温差降幅超过 4°C 时对预警降雹时间有提前量。

长沙站的三种亮温差均与 TBB 呈负相关(图 14b),06:34 达到最大为 -6°C 左右,比雷暴大风发生时间提前 7 min,但对冰雹预警无提前量。相比于 BTD₉₋₁₀ 和 BTD₁₄₋₁₂,BTD₉₋₁₂ 在雷暴大风和冰雹天气过境前后变化幅度最大,对单站强对流天气监测预警时可特别关注。

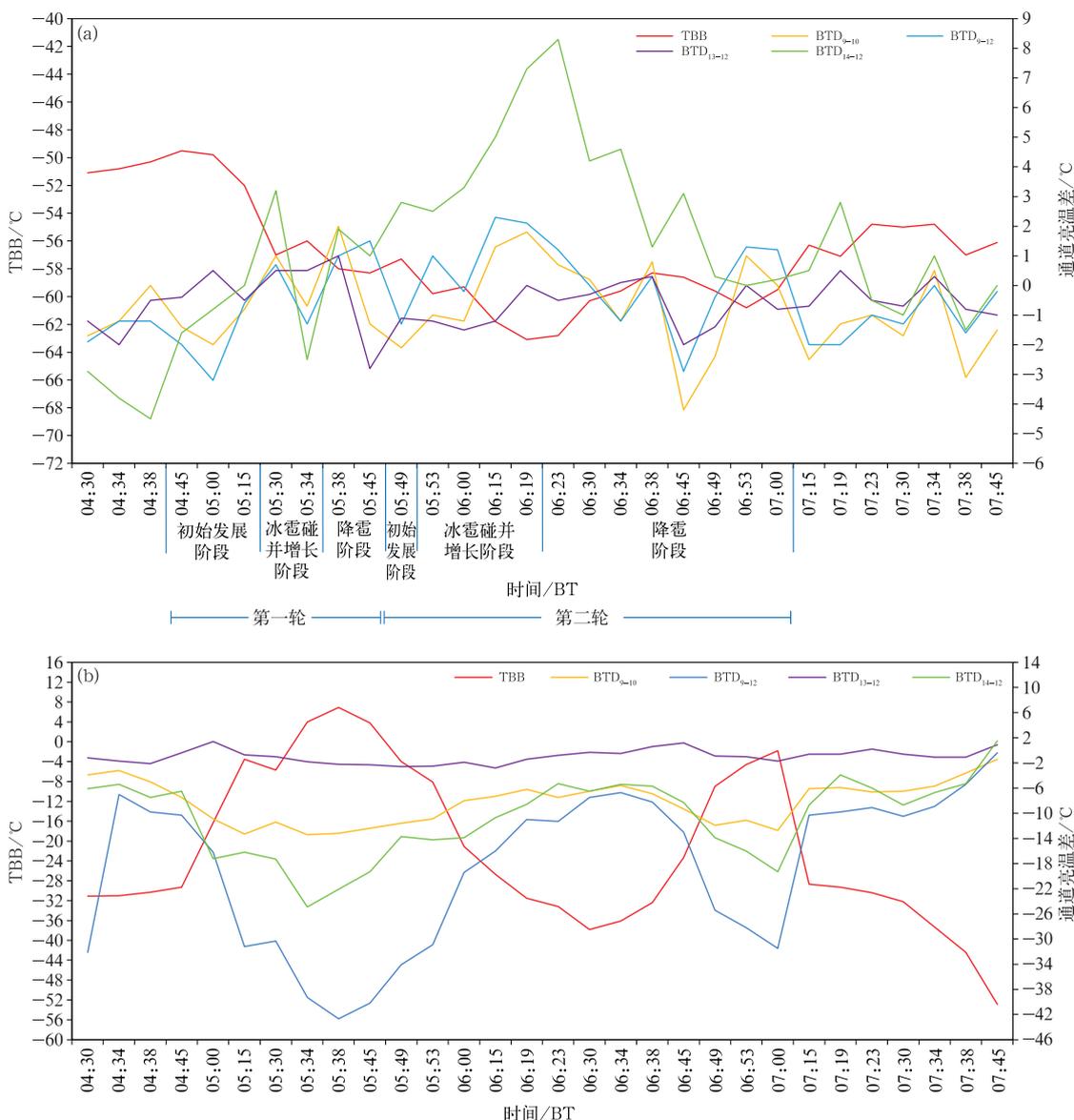


图 14 2023 年 11 月 9 日 04:30—07:45(a)对流云团中心和(b)长沙站的 FY-4A 通道 12 TBB 和多通道亮温差变化

Fig. 14 Variations of the FY-4A channel 12th TBB and the multi-channel TBB difference (a) in the convective cloud center and (b) at Xiangjiang New Area Station in Changsha City from 04:30 BT to 07:45 BT 9 November 2023

5 结论与讨论

本文基于双偏振雷达和 FY-4A 卫星探测资料,结合高空地面环流场和探空等资料,对湖南中部地区发生的一次罕见的发生在低空暖平流强迫背景下的秋季强冰雹过程进行综合分析,探讨其预警特征,发现如下:

(1)初始发展阶段出现中层中气旋,超级单体形

成,强回波区域($Z_H \geq 55$ dBz)发展至 -20°C 层高度,对应的 Z_{DR} 为 $0.5 \sim 3.8$ dB,CC为 $0.88 \sim 0.95$, K_{DP} 为 $0.5 \sim 3.3^\circ \cdot \text{km}^{-1}$,说明存在小冰雹和(大)雨滴的混合相态,冰雹正在进行湿增长;冰雹碰并增长阶段,高悬的强回波、BWER、持续发展的中气旋、强烈的高层辐散、TBSS 和旁瓣的维持发展,均预示着上升气流的加强维持以及冰雹粒子的增长,超级单体发展成熟, -20°C 层高度附近强回波中心($Z_H \geq 65$ dBz)对应 $Z_{DR} < 0$ dB,CC < 0.9 , K_{DP} 为空洞,表明

该区域已经出现直径 ≥ 5 cm 的强冰雹;降雹阶段,强回波中心($Z_H \geq 65$ dBz)高度整体降至 5 km 以下且底部接近地面, $CC < 0.9$ 、 K_{DP} 为空洞、 Z_{DR} 为 $-3 \sim 0$ dB,则对应为直径 ≥ 5 cm 的强冰雹落地。

(2) Z_{DR} 、 CC 、 K_{DP} 配合 Z_H 可较好地识别相态粒子, Z_{DR} 柱上升和下降可表征上升气流的加强和减弱,结合 Z_{DR} 和 CC 有助于识别 TBSS 和旁瓣特征。强回波面积和质心高度对超级单体风暴不同发展阶段有很好的指示作用,结合监测可使冰雹预警提前量达 12 min 以上。造成此次强冰雹的超级单体其 TBSS 长度达到罕见的 73 km, TBSS 的出现、风暴顶辐散呈明显减弱趋势较降雹时间提前 17 min 以上。

(3) 云相态和对流初生监测产品对冰雹云发展初期已有较好的识别能力。结合雷达分析冰雹云发展过程发现,冰雹发生前, TBB、CTT、CTP 降低, CTH 升高, A_{-52} 扩大,冰雹云南侧 TBB 亮温梯度明显加大。冰雹、雷暴大风发生区域与冰雹云南侧 TBB、CTT、CTH、CTP 梯度大值区对应较好。冰雹发生后, TBB、CTT、CTP 升高, CTH 降低、 A_{-52} 减小。 $TBB \leq -58^\circ\text{C}$, $CTT \leq -56^\circ\text{C}$, $CTH \geq 13$ km, $CTP \leq 180$ hPa 且 A_{-52} 持续增大可作为秋季冰雹云 FY-4A 卫星云特征参量的监测预警指标。

(4) TBB 最大递减率、 BTD_{9-12} 、 BTD_{9-10} 、 BTD_{14-12} 阈值和时间变化均可做为卫星多通道亮温资料冰雹监测预警指标:其中 TBB 最大递减率出现较降雹时间提前 11 min 以上, BTD_{14-12} 对冰雹云的发展和减弱反应最为敏感, BTD_{9-12} 则在单站对流监测指标中对冰雹过境前后较其余通道亮温差反应敏感。针对冰雹监测预警时,可多指标配合 TBB 阈值综合判断。

本文仅针对一次罕见的秋季强冰雹个例分析卫星和雷达预警指标,总结的指标仍不够深入全面且不具有广泛性,未来仍需收集更多的个例研究,为秋季强冰雹预报预警提供更为科学的指标参考。另外,本文针对卫星多通道亮温及云参数产品在冰雹预警中的作用进行探索性研究,卫星预警指标的分析讨论依赖于双偏振雷达特征判定的冰雹云不同阶段的结论,卫星资料主要做为雷达监测预警强对流天气的多源资料应用的补充,是星地观测资料在强对流天气监测预警中协同应用的一种尝试。对于受地形及雷达观测组网等因素影响的冰雹雷达监测预警盲区,卫星能更早捕捉到冰雹发生前对流云团的

发展,通过探讨冰雹发生前的卫星云参数演变特征,建立相关预警指标,可为预报员提供参考,有助于业务中冰雹预警方法准确性和时效性的提高。随着卫星技术的不断发展,相信将来会有更多的卫星监测对流产品能够补充运用到冰雹等强对流监测临近预报预警业务当中。

致谢: 本文全文结构、雷达以及卫星预警指标等方面的撰写得到南京信息工程大学陈渭民教授的技术指导,在此表示感谢!

参考文献

- 陈国春,郑永光,肖天贵,2011. 我国暖季深对流云分布与日变化特征分析[J]. 气象,37(1):75-84. Chen G C, Zheng Y G, Xiao T G, 2011. Distribution and spatiotemporal variations of deep convective clouds over China during the warm season[J]. Meteor Mon, 37(1):75-84(in Chinese).
- 陈龙,唐明晖,唐佳,等,2023. 湘东北一次降雹超级单体过程的双偏振雷达回波特征[J]. 暴雨灾害,42(2):211-222. Chen L, Tang M H, Tang J, et al, 2023. Dual-polarization radar echo characteristics of a hail supercell event in northeastern Hunan[J]. Torr Rain Dis, 42(2):211-222(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).
- 龚佃利,朱君鉴,林曲风,等,2024. 一次超级单体引发的秋季特大冰雹和龙卷雷达探测分析[J]. 气象,50(5):561-576. Gong D L, Zhu J J, Lin Q F, et al, 2024. Radar observation analysis of severe hailstorm and tornado caused by a supercell in autumn[J]. Meteor Mon, 50(5):561-576(in Chinese).
- 李德俊,唐仁茂,熊守权,等,2011. 强冰雹和短时强降雨天气雷达特征及临近预警[J]. 气象,37(4):474-480. Li D J, Tang R M, Xiong S Q, et al, 2011. Radar features and nowcasting of severe hail and short-time heavy rainfall[J]. Meteor Mon, 37(4):474-480(in Chinese).
- 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).
- 李琼,尚程鹏,唐林,等,2022. 1968—2017年湖南省冰雹时空分布特征[J]. 气象与环境科学,45(1):22-29. Li Q, Shang C P, Tang L, et al, 2022. Spatial-temporal distribution characteristics of hails in Hunan Province from 1968 to 2017[J]. Meteor Environ Sci, 45(1):22-29(in Chinese).
- 李五生,王洪庆,王玉,等,2014. 基于卫星资料的对流初生预报及效果评估[J]. 北京大学学报(自然科学版),50(5):819-824. Li W S, Wang H Q, Wang Y, et al, 2014. Convective initiation forecasting

- and statistical evaluation based on satellite data[J]. *Acta Sci Nat Univ Pekinensis*, 50(5):819-824(in Chinese).
- 李湘,张腾飞,胡娟,等,2015.云南冰雹灾害的多普勒雷达特征统计及预警指标[J]. *灾害学*, 30(3):88-93, 98. Li X, Zhang T F, Hu J, et al, 2015. Doppler radar statistical characteristics and early warning index of Yunnan hail disaster[J]. *J Catastrophol*, 30(3):88-93, 98(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).
- 刘京华,王彬,韩雷,等,2012.京津地区一次强对流天气的初生预警技术研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 48(1):42-46. Liu J H, Wang B, Han L, et al, 2012. Forecasting convective initiation of a convective weather event in Beijing-Tianjin Region[J]. *Acta Sci Nat Univ Pekinensis*, 48(1):42-46(in Chinese).
- 刘黎平,胡志群,吴翀,2016.双线偏振雷达和相控阵天气雷达技术的发展和應用[J]. *气象科技进展*, 6(3):28-33. Liu L P, Hu Z Q, Wu C, 2016. Development and application of dual linear polarization radar and phased-array radar[J]. *Adv Meteor Sci Technol*, 6(3):28-33(in Chinese).
- 陆风,张晓虎,陈博洋,等,2017.风云四号气象卫星成像特性及其应用前景[J]. *海洋气象学报*, 37(2):1-12. Lu F, Zhang X H, Chen B Y, et al, 2017. FY-4 geostationary meteorological satellite imaging characteristics and its application prospects[J]. *J Marine Meteor*, 37(2):1-12(in Chinese).
- 马鹏辉,杨燕军,张剑,2014.基于卫星云图的对流初生预测技术综述[J]. *气象与减灾研究*, 37(1):1-5. Ma P H, Yang Y J, Zhang J, 2014. Research summary of convective initiation prediction based on meteorological satellite images[J]. *Meteor Dis Reduct Res*, 37(1):1-5(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).
- 覃丹宇,方宗义,2014.利用静止气象卫星监测初生对流的研究进展[J]. *气象*, 40(1):7-17. Qin D Y, Fang Z Y, 2014. Research progress of geostationary satellite-based convective initiation[J]. *Meteor Mon*, 40(1):7-17(in Chinese).
- 任素玲,赵玮,曹冬杰,等,2020. FY-4A 白天对流风暴和闪电产品在华北强雷暴天气分析中的应用[J]. *海洋气象学报*, 40(1):33-46. Ren S L, Zhao W, Cao D J, et al, 2020. Application of FY-4A daytime convective storm and lightning products in analyzing severe thunderstorm weather in North China[J]. *J Mar Meteor*, 40(1):33-46(in Chinese).
- 唐明晖,陈龙,陈鹤,等,2023.基于双偏振雷达资料的洞庭湖区一次强对流过程的分阶段特征分析[J]. *暴雨灾害*, 42(6):692-703. Tang M H, Chen L, Chen H, et al, 2023. Staged characteristics analysis of a severe convection over the Dongting Lake Area based on dual-polarization Doppler weather radar data[J]. *Torr Rain Dis*, 42(6):692-703(in Chinese).
- 汤兴芝,黄兴友,2009.冰雹云的多普勒天气雷达识别参量及其预警作用[J]. *暴雨灾害*, 28(3):261-265. Tang X Z, Huang X Y, 2009. Doppler radar identification parameters and their effect on early warning of hail clouds[J]. *Torr Rain Dis*, 28(3):261-265(in Chinese).
- 王秀明,俞小鼎,费海燕,等,2023.下击暴流形成机理及监测预警研究进展[J]. *气象*, 49(2):129-145. Wang X M, Yu X D, Fei H Y, et al, 2023. A review of downburst genesis mechanism and warning[J]. *Meteor Mon*, 49(2):129-145(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 Agric Univ (Nat Sci Ed)*, 46(3):408-411(in Chinese).
- 吴剑坤,俞小鼎,2009.强冰雹天气的多普勒天气雷达探测与预警技术综述[J]. *干旱气象*, 27(3):197-206. Wu J K, Yu X D, 2009. Review of detection and warning methods for severe hail events by Doppler weather radars[J]. *J Arid Meteor*, 27(3):197-206(in Chinese).
- 吴举秀,潘佳文,魏鸣,等,2022.不同尺寸冰雹 S 波段双偏振雷达偏振量特征统计[J]. *热带气象学报*, 38(2):193-202. Wu J X, Pan J W, Wei M, et al, 2022. Statistical analysis of polarimetric characteristics of different size hails for S-band dual polarization radar[J]. *J Trop Meteor*, 38(2):193-202(in Chinese).
- 许爱华,孙继松,许东蓓,等,2014.中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J]. *气象*, 40(4):400-411. Xu A H, Sun J S, Xu D B, et al, 2014. Basic synoptic situation classification and element character of severe convection in China[J]. *Meteor Mon*, 40(4):400-411(in Chinese).
- 徐小红,余兴,刘贵华,等,2022.冰雹云卫星早期识别与自动预警[J]. *大气科学*, 46(1):98-110. Xu X H, Yu X, Liu G H, et al, 2022. Early identification and automatic warning of hail clouds by satellite[J]. *Chin J Atmos Sci*, 46(1):98-110(in Chinese).
- 俞小鼎,王秀明,李万莉,等,2020.雷暴与强对流临近预报[M].北京:气象出版社:57-58. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al, 2020. Prediction of Thunderstorms and Severe Convection[M]. Beijing:China Meteorological Press:57-58(in Chinese).
- 曾智琳,谌芸,朱克云,等,2019.广东省大冰雹事件的层结特征与融化效应[J]. *大气科学*, 43(3):598-617. Zeng Z L, Chen Y, Zhu K Y, et al, 2019. Characteristics of atmospheric stratification and melting effect of heavy hail events in Guangdong Province[J]. *Chin J Atmos Sci*, 43(3):598-617(in Chinese).
- 张杰,李文莉,康凤琴,等,2004.一次冰雹云演变过程的卫星遥感监

- 测与分析[J]. 高原气象, 23(6):758-763. Zhang J, Li W L, Kang F Q, et al, 2004. Analysis and satellite monitor of a developing process of hail cloud[J]. Plateau Meteor, 23(6):758-763(in Chinese).
- 张琪, 任景轩, 肖红茹, 等, 2021. 基于 FY-4A 卫星资料的四川盆地 MCC 初生和成熟阶段特征[J]. 大气科学, 45(4):863-873. Zhang Q, Ren J X, Xiao H R, et al, 2021. Characteristics of MCC from convective initiation to mature stage over the Sichuan Basin based on FY-4A satellite data[J]. Chin J Atmos Sci, 45(4):863-873(in Chinese).
- 张晰莹, 方丽娟, 景学义, 等, 2004. 黑龙江省产生冰雹的卫星云图特征[J]. 南京气象学院学报, 27(1):106-112. Zhang X Y, Fang L J, Jing X Y, et al, 2004. Characteristics of satellite images of hail clouds in Heilongjiang Province[J]. J Nanjing Inst Meteor, 27(1):106-112(in Chinese).
- 周鑫, 周顺武, 覃丹宇, 等, 2019. 利用 FY-2F 快速扫描资料分析对流初生阶段的云顶物理量特征[J]. 气象, 45(2):216-227. Zhou X, Zhou S W, Qin D Y, et al, 2019. Analysis of cloud top features during convective initiation using FY-2F satellite scan data[J]. Meteor Mon, 45(2):216-227(in Chinese).
- Andra Jr D L, 1997. The origin and evolution of the WSR-88D mesocyclone recognition nomogram[C]// Preprints, 28th Conf. on Radar Meteorology. Austin: Amer Meteor Soc:364-365.
- Kumjian M R, 2013. Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part III: artifacts[J]. J Operational Meteor, 1(21):265-274.
- Kumjian M R, Picca J, Ganson S, et al, 2010. Three-body scattering signatures in polarimetric radar data[R]. NOAA/NSSL:12.
- Lemon L R, 1998. The radar “three-body scatter spike”: an operational large-hail signature[J]. Wea Forecasting, 13(2):327-340.
- Lemon L R, Doswell III C A, 1979. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis[J]. Mon Wea Rev, 107(9):1184-1197.
- Mecikalski J R, Bedka K M, 2006. Forecasting convective initiation by monitoring the evolution of moving cumulus in daytime GOES imagery[J]. Mon Wea Rev, 134(1):49-78.
- Mecikalski J R, Bedka K M, Paech S J, et al, 2008. A statistical evaluation of GOES cloud-top properties for nowcasting convective initiation[J]. Mon Wea Rev, 136(12):4899-4914.
- Witt A, Nelson S P, 1991. The use of single-Doppler radar for estimating maximum hailstone size[J]. J Appl Meteor Climatol, 30(4):425-431.

(本文责编:戴洋)