袁韬,唐明晖,陈伟,等.2024.南岭地区一次高架雷暴冰雹过程双偏振特征分析[J].暴雨灾害,43(3):332-341. YUAN Tao, TANG Minghui, CHEN Wei, et al. 2024. Dual polarization characteristics of an elevated thunderstorm hail event in the Nanling region [J]. Torrential Rain and Disasters,43(3):332-341 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-165

南岭地区一次高架雷暴冰雹过程双偏振特征分析

袁韬[1,3],唐明晖[2,3],陈伟[1],冯盼盼[4],杨湘婧[1],汤宇[5]

(1. 湖南省郴州市气象局,郴州 423000; 2. 湖南省气象台,长沙 410118; 3. 气象防灾减灾湖南重点实验室,长沙 410118;
4. 湖南省湘西自治州气象局,吉首 416000; 5.湖南省气象灾害防御技术中心,长沙 410053)

摘　要:2023年3月22—23日南岭地区郴州发生了一次高架雷暴冰雹过程,降雹范围广、冰雹直径达20 mm,在高架对流中鲜见。为增强对此类冰雹过程的预报预警能力,利用常规气象观测数据、SA波段双偏振雷达产品,对此次过程的天气形势、双偏振雷达回波特征进行分析,结果表明:(1) 此次过程发生在地面锋线北侧冷区内,属于典型的高架雷暴,降雹落区位于地面锋面北侧140 km处,20 mm直径大冰雹由超级单体风暴造成。(2) 导致郴州南部出现大冰雹的风暴可分为初生、发展跃增、降雹、减弱消亡阶段。风暴发展跃增阶段的强回波中心迅速增高且垂直累积液态水含量(VIL)跃增,差分反射率因子(Z_{DR})柱伸至0 ℃层以上4~5 km,上升气流强劲,有利于冰雹发展;降雹阶段强回波中心迅速降低,弱回波区(WER)消失,Z_{DR}柱高度明显下降,下降融化的冰雹表现为Z_{DR}和差分传播相移率(K_{DP})向着地面方向逐渐增大,K_{DP}足位置与降雹落区对应较好。(3) 大冰雹的三体散射(TBSS)特征表现为根部Z_{DR}值较大,随着径向距离增加,Z_{DR}值迅速减小,相关系数(CC)明显偏低;大冰雹的旁瓣回波特征表现为低Z_{DR}、低CC,以上双偏振特征为大冰雹预警的关键关注点。

关键词:高架雷暴;双偏振雷达;南岭;三体散射;Z_{DR}柱

中图法分类号: P412.25　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023-165

Dual polarization characteristics of an elevated thunderstorm hail event in the Nanling region

YUAN Tao[1,3], TANG Minghui[2,3], CHEN Wei[1], FENG Panpan[4], YANG Xiangjing[1], TANG Yu[5]

(1. *Chenzhou Meteorological Observatory of Hunan Province, Chenzhou* 423000; 2. *Hunan Meteorological Observatory, Changsha* 410118;
3. *Hunan Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Changsha* 410118; 4. *Meteorological Observatory of Xiangxi Autonomous Prefecture, Jishou* 416000; 5. *Hunan Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Changsha* 4100053)

Abstract: An elevated thunderstorm hail event occurred in Chenzhou and its vicinity in the Nanling region during March 22-23, 2023. A wide range of hail with diameters reaching up to 20 mm was reported, which was rare in elevated convection. In order to enhance the capability of forecasting and early warning of such hail events, this paper uses conventional meteorological observation data and SA-band dual-polarization radar products to analyze its weather conditions and dual-polarization radar echo characteristics. The results are as follows. (1) This event occurred in the cold area on the north side of the surface front, which was a typical elevated thunderstorm process. The hail-falling area was located 140 km to the north side of the surface front, and the large hail of 20 mm in diameter was caused by a supercell storm. (2) The storms that caused large hail in southern Chenzhou can be divided into four stages, which are the initial stage, the rapid development stage, the hail-falling stage, and the weakening stage. During the rapid development stage, the strong echo center increases rapidly and the vertical cumulative liquid water content (VIL) increases sharply. The differential reflectivity (Z_{DR}) column extends to 4~5km above the 0 ℃ layer. A stronger updraft provides favorable conditions for hail development. During the hail-falling stage, with the rapid decrease of the strong echo center, the weak echo region (WER) disappears, and the height of the Z_{DR} column decreases significantly. The values of Z_{DR} and specific dif-

收稿日期: 2023-08-03;**定稿日期:**2023-12-14

资助项目: 湖南省自然科学基金重大项目(2021JC0009); 湖南省气象局2022年重点课题(XQKJ22A003)

第一作者: 袁韬,主要从事气象预报预警服务工作。E-mail:779455383@qq.com

通信作者: 唐明晖,主要从事强对流天气预报预警技术研究。E-mail:3617176@qq.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

ferential phase (K_{DP}) gradually increase as the melting hail falls toward the ground. While the footprints of K_{DP} correspond well with the hail-falling region. (3) The three-body scattering (TBSS) characteristics of large hail showed that the Z_{DR} value at the root was large, which then decreased rapidly with the increase of radial distance, and the cross-correlation coefficient (CC) was significantly low. The sidelobal echo features of large hail indicate a low Z_{DR} and low CC signature. These dual polarization features are key concerns for the large hail warning.
Keywords: elevated thunderstorm; dual polarization radar; Nanling region; TBSS; Z_{DR} column

引　言

高架雷暴近地层为稳定的冷空气,西南暖湿气流沿锋面爬升至冷垫之上,由高空的辐合切变线等触发(Colman,1990;俞小鼎等,2016)。盛杰等(2014)统计高架雷暴空间分布发现,我国春季冷锋后高架雷暴天气过程主要发生在南方地区,且地形对高架雷暴的形成具有很大影响。高架雷暴造成的强对流天气以冰雹、短时强降水为主(苟阿宁等,2020),而冰雹、短时强降水的预报预警更多地是依赖于天气雷达,尤其随着我国双偏振雷达的逐渐升级,差分反射率因子(Z_{DR})、差分传播相移率(K_{DP})及相关系数(CC)等双偏振参量在降水粒子相态和冰雹大小识别能力等方面明显优于传统的单偏振雷达(刘黎平等,2016)。

近年来,国内外学者利用双偏振雷达在监测冰雹天气取得一定进展。Von Terzi等(2022)发现,Z_{DR}和K_{DP}在-10~-20 ℃等温线高度有周期性增强的特征,这可以指示冰雹云中冰晶的冰相增长及演变;Ryzhkov等(2019)指出双偏振雷达能够很好地指示风暴内部的微物理结构特征,比如水凝物的形状和尺度;何清芳等(2022)对闽西南春季降雹过程的双偏振参量和降水粒子谱特征进行研究,发现在对流单体降雹前,云体移动方向前部有Z_{DR}弧,内部K_{DP}柱发展高度较高;孙炜文等(2022)对水凝物相态演变进行了分析,发现通过双偏振特征变化可判断冰雹向强降水的转换。分析总结冰雹等强对流天气的双偏振雷达回波特征与形成机制,已成为提高各种强对流天气预警能力的重要手段,但以上研究主要集中在分析地面雷暴强对流个例,针对高架雷暴强对流个例的双偏振特征研究较为少见。

2023年3月22—23日南岭地区郴州出现了一次由高架雷暴引发的冰雹过程,高架雷暴一般以小冰雹和5~6级大风为主,较少出现8级以上大风(许爱华,2014),但这次高架雷暴出现了20 mm冰雹、8级雷暴大风,非常少见。因此,本文利用常规气象观测数据和郴州SA波段双偏振雷达产品,对本次高架雷暴冰雹过程的特征和天气形势、双偏振雷达回波特征进行研究,简要探讨了双偏振雷达在气象监测预警中的优势,以期为提高高架雷暴造成的冰雹等强对流天气的预警能力提供科学依据。

1 资料与天气实况

1.1 资料说明

采用的资料包括:(1) 国家气象中心提供的2023年3月22日20:00—3月23日20:00(北京时,下同)的常规高空、地面观测资料和地面398个区域自动气象观测站的加密观测资料,利用气压、温度、雨量和风向风速等气象要素分析此次强对流天气过程的特征和天气形势。(2) 湖南郴州的SA波段双偏振雷达(海拔高度为396 m)资料,观测模式为VCP21D,时空分辨率分别为6 min和250 m,用于分析双偏振雷达回波特征。

1.2 强对流实况

此次高架雷暴过程主要发生在2023年3月22日20:00—23日20:00,郴州11个县市区中有9个县市区出现冰雹天气,大部分冰雹直径为5~10 mm,汝城县最大冰雹直径达20 mm (图1),48站出现短时强降水,最大雨强为43.3 mm·h^{-1};8站出现雷暴大风,最大风速为19.6 m·s^{-1} (出现时间为2023年3月23日05:40)。由于本轮过程中冰雹影响范围最广,影响程度最为严重,因此本文着重对冰雹的双偏振特征进行分析。

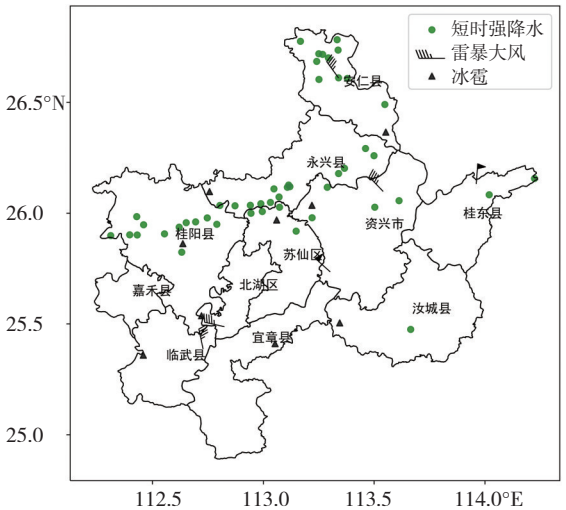


图1 2023年3月22日20:00—23日20:00郴州强对流天气实况

Fig. 1 Severe convective weather records in Chenzhou from 20:00 BT on 22 March to 20:00 BT on 23 March 2023

2 环流形势与环境条件

2.1 环流形势

22日20:00 (图2a),地面上锋面气旋引导冷空气

南下，锋面位于广东北部一带，湖南南部处于锋后冷气团中，地面冷空气对高架雷暴的产生具有冷垫作用(张一平等，2014)。500 hPa湖南南部受南支槽前西南急流控制，处于相对湿度(RH)≤40%的干舌之中；700 hPa湖南南部受西南急流控制，风速达18 m·s^{-1}；850 hPa切变线位于江苏南部至湖南西部，切变南侧的偏南暖湿气流沿冷垫向北输送，湖南南部处于水汽辐合区，比湿达14 g·kg^{-1}，低层水汽充足，与500 hPa的干舌形成了上层干冷、下层暖湿的垂直结构，利于降雹天气的发生(许爱华等，2013)；850 hPa气温为17 ℃，与地面存在明显的逆温，锋区明显，强的锋面逆温通常是高架雷暴的必要条件之一(Grant，1995)。23日08∶00(图2b)，地面冷空气不断补充南下，冷锋进一步南压至广东中北部一带，湖南受地面冷高压控制。500 hPa湖南南部仍受南支槽前西南急流控制；700 hPa的西南急流风速加大至24 m·s^{-1}；850 hPa湖南南部位于急流轴左侧西南气流风速辐合处，风速为10 m·s^{-1}，低层的暖湿气流维持沿冷垫爬升。

此次强对流天气过程地面为冷垫，低层有明显逆温层，低层层结较为稳定，逆温层以下冷空气层对高架雷暴具有抬升触发作用(吴乃庚等，2013；张一平等，2014)，冷空气不断南下促使暖湿气流沿冷垫爬升，850 hPa的切变线为对流的发展提供了动力抬升条件，降雹落区位于地面冷锋北侧约140 km，这与俞小鼎等(2012)提出的“高架雷暴发生在地面冷锋北侧”结论一致；且降雹落区与850 hPa切变线的位置对应较好，与吴乃庚等(2013)的结论一致。综上，此次强对流天气是一次典型的高架雷暴。

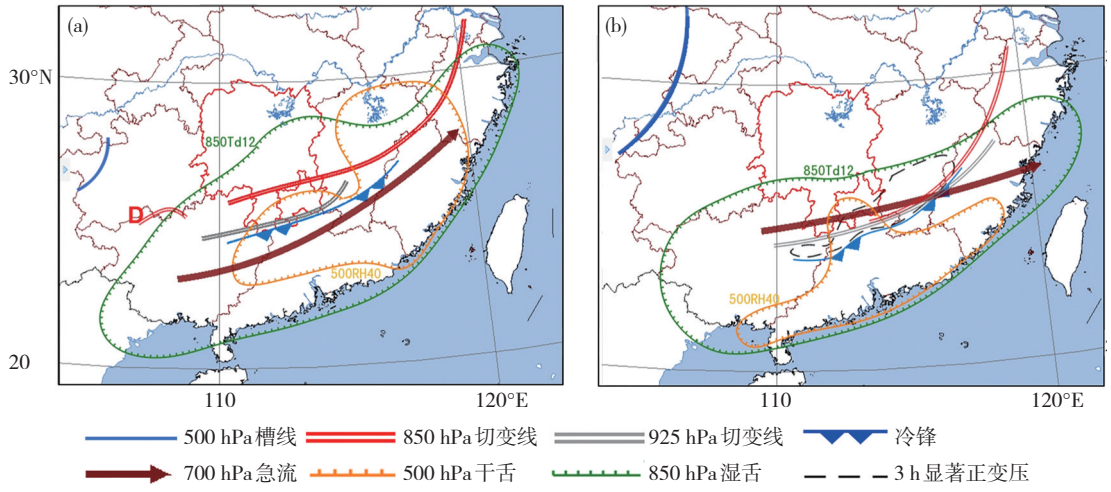


图2 2023年3月22日20∶00 (a)和23日08∶00 (b)南岭地区主要天气系统影响配置

Fig. 2 Configuration of major weather systems at (a) 20∶00 BT on 22 March and (b) 08∶00 BT on 23 March 2023 in the Nanling region

2.2 环境条件

由22日20∶00郴州站探空图(图3a)可见，925—850 hPa有明显的逆温层，有利于不稳定能量的储存。逆温层之上850 hPa—700 hPa之间假相当位温随高度增加而减小，存在位势不稳定(图3b)。地面冷空气南下促使低层暖湿气流沿冷垫向北缓慢爬升至逆温层以上，逆温层以上条件不稳定层结结合水汽构成适当大小的对流有效位能(CAPE)。将状态曲线抬升层订正至逆温层顶850 hPa，CAPE值由0.4 J·kg^{-1}增大至1 761.9 J·kg^{-1}，明显大于吴乃庚等(2013)和周明飞等(2017)分析高架雷暴冰雹过程中的CAPE值(87.2~724.3 J·kg^{-1})，说明此次过程的不稳定能量更大，更有利于大冰雹产生。抬升指数(LI)由9.08 ℃降至−5.31 ℃，对流发展条件明显得到改善。0—3 km、0—6 km垂直风切变分别为20.5 m·s^{-1}、33.9 m·s^{-1}，强垂直风切变有利于冰雹发展。700 hPa和500 hPa的温差达到了17 ℃，对流层中层较大的垂直温度递减率和干层也为高架雷暴的发生提供较好的热力和不稳定能量条件(胡萍等，2022)。当对流层中层存在明显干层时，湿球0 ℃层高度会明显低于干球0 ℃层，能更准确地指示冰雹融化层高度(俞小鼎，2014)，郴州上空干球0 ℃层高度为4.5 km，而湿球0 ℃高度仅为3.5 km，−20 ℃层高度为7.8 km，融化层高度有利于大冰雹形成和落地。

3 双偏振雷达特征分析

3.1 风暴演变特征

本次高架雷暴冰雹过程是由多个超级单体风暴、多单体风暴等造成的，其中郴州南部的大冰雹是由单单体风暴演变成的超级单体风暴所致，因此将重点分析3月23日03∶00—05∶00郴州南部的风暴演变特征。图4a为郴州雷达站位置、降雹位置及郴州地形分布。为了更直观表述风暴各参数的变化，图4b给出2023年3月23日04∶09—05∶22风暴的最大水平反射率因子(DBZM)、回波顶高(TOP)、质心高度(HT)和垂直

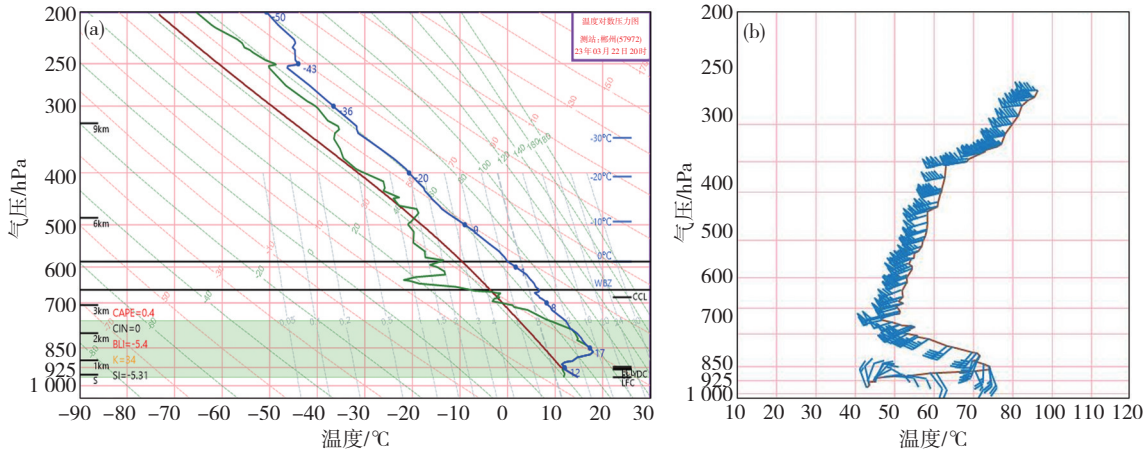


图3 2023年3月22日20:00状态曲线抬升层订正至逆温层顶850 hPa的郴州探空图(a)和垂直位温分析图(b)

Fig. 3 (a) Radiosonde map of Chenzhou with the state curve lifting layer being corrected to the top of the inversion layer at 850 hPa and (b) vertical potential temperature diagram at 20:00 BT on 22 March 2023

累积液态水含量(VIL)变化趋势。为进一步分析风暴的发展过程,图5给出了2023年3月23日03:00—05:00郴州南部双偏振天气雷达反射率因子和径向速度图。为了更好地识别不同时期风暴的特征,将风暴演变特征划分为四个阶段:单单体风暴回波强度中等(30 dBz≤DBZM < 55 dBz),TOP未发展到-20 ℃层高度的阶段定义为初生阶段(03:00—04:15);单单体风暴合并增强形成超级单体风暴,DBZM≥55 dBz,TOP达到-20 ℃层高度且VIL有激增现象(连续两个体扫内VIL的增幅≥20 kg·m^{-2})的阶段定义为发展跃增阶段(04:16—04:38);HT迅速下降,WER消失,冰雹降落的阶段定义为降雹阶段(04:39—05:16);超级单体风暴结构松散,DBZM降至50 dBz以下并持续降低直至风暴消失的阶段定义为减弱消亡阶段(05:17—05:28)。

结合图4b和图5可见,23日03:00起,郴州雷达站西南方向115 km附近对流开始发展,有若干单单体风暴形成。初生阶段中,03:52,临武境内单单体风暴A和单单体风暴B的反射率因子Z_H≥45 dBz的回波中心高度发展到5 km以上(图5a),Z_{DR}值在1~2 dB之间,CC值大于0.98,K_{DP}值大部分为1~3 °·km^{-1} (图略),此时单单体风暴内部均以液态水为主,之后单单体风暴回波强度在不断增大且往东北方向移动;进入宜章县(郴州雷达190°方向40 km处)后,04:16,单单体风暴A逐渐并入单单体风暴B,合并后的单单体风暴B在垂直方向伸展加强,进入发展跃增阶段。04:20,单单体风暴B的Z_H≥55 dBz强回波中心高度发展到6.5 km以上,且呈现出三体散射(TBSS)特征(图5b),TBSS可作为识别大冰雹的充分非必要条件(Lemon,1998),说明此时高空存在大冰雹。9.9°仰角(高度约8 km)上出现高空辐散特征,抽吸作用导致该处上升气流较强(图5g)。04:20—04:32,单单体风暴B的VIL值在两个体扫内跃增幅度达27 kg·m^{-2} (图4b),降雹风暴在发展成熟过程中VIL有明显跃增现象(刁秀广等,2008),说明冰雹云正在迅速发展。04:32,单单体风暴B已经发展成为超级单体风暴B,在4.3°仰角径向速度图上距离雷达44 km处出现“中气旋”(图5h),最大旋转速度达28 m·s^{-1},符合中等强气旋标准,中气旋有利于风暴结构维持并发展。04:37,超级单体风暴B最强回波达65 dBz,Z_H≥55 dBz的强回波中心发展到-20 ℃高度以上,有WER并伴随悬垂结构(图5c和8a),说明上升气流速度较强,且TBSS特征明显。虽然此时刻的径向速度图上(图5i)气旋的旋转速度减弱至15 m·s^{-1},但在其他冰雹回波特征明显的情况下,较弱的雷暴尺度涡旋也会使得冰雹的直径增加明显(俞小鼎等,2020)。

随着冰雹云中冰雹增多,上升气流无法再承载时会发生冰雹降落,HT迅速降低,WER消失。需要说明的是,本文定义的降雹阶段中冰雹并不是持续降落,超级单体风暴可能在该阶段初次降雹后再度发展并产生二次降雹。04:40左右,在宜章县内观测到尺寸不一的的小冰雹。04:43,超级单体风暴B强回波中心高度降至3 km (图4b),1.5°仰角上(图5d)强回波降雹区右侧白色圈内的弱回波对应着高层强回波区,说明该处仍存在WER,上升气流较强,且之后超级单体风暴B的最强回波继续维持在60 dBz以上,VIL维持在50 kg·m^{-2}左右。至05:05,超级单体风暴B最强回波达70 dBz,Z_H≥55 dBz的强回波仍发展到8 km以上,且在4.3°仰角上呈现出明显的旁瓣和TBSS特征(图5e),指示此时空中存在大冰雹。05:10左右,在汝城境内(郴州雷达124°方向60 km处)观测到大量直径10~20 mm的冰雹。05:17之后,超级单体风暴B进入减弱消亡阶段,结构开始松散(图5f),DBZM迅速降至50 dBz以下,TOP和HT均持续下降(图4b),之后回波

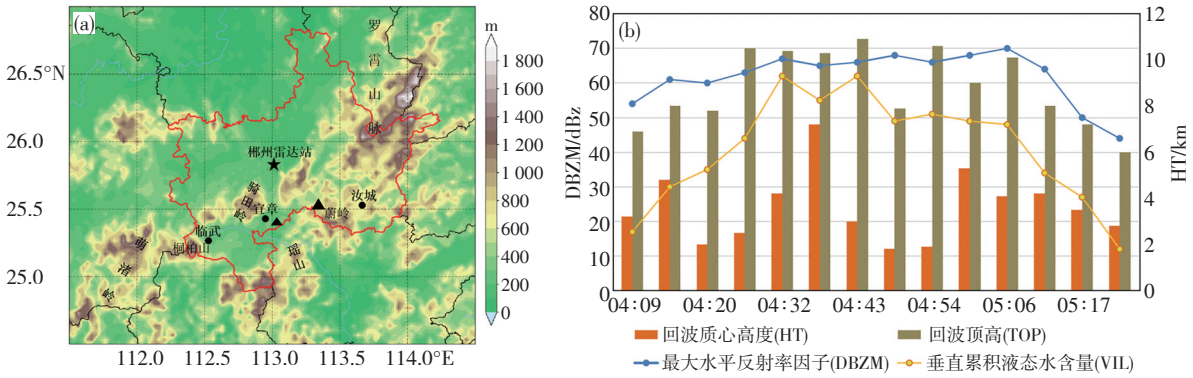


图4 2023年3月22日03:00—05:00郴州南部降雹位置(黑色三角形)和郴州地形(填色)图(a)、04:09—05:22风暴B的HT、TOP、DBZM、VIL随时间的变化(b)

Fig. 4 (a) The position of hail (black triangle) in southern Chenzhou from 03:00 BT to 05:00 BT and topography of Chenzhou (color-filled), (b) the changes of HT, TOP, DBZM and VIL of Storm B from 04:09 BT to 05:22 BT with time 22 on March 2023

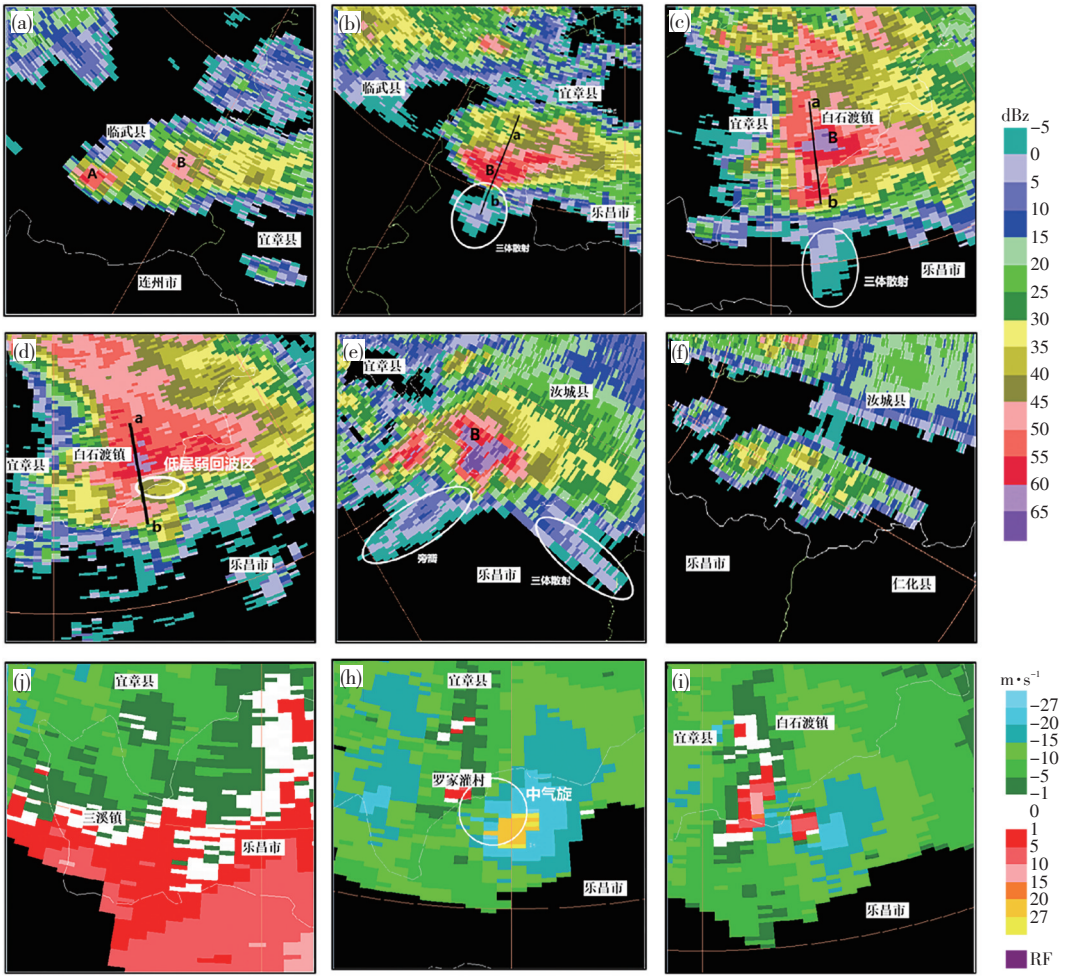


图5 2023年3月23日郴州03:52 3.4°仰角(a)、04:20 6.0°仰角(b)、04:37 6.0°仰角(c)、04:43 1.5°仰角(d)、05:05 4.3°仰角(e)、05:22 4.3°仰角(f)的双偏振雷达反射率因子和04:20 9.9°仰角(g)、04:32 4.3°仰角(h)、04:37 4.3°仰角(i)的径向速度图(图中A和B为单单体风暴所在的位置,图5b—d中黑色直线ab代表剖面图截取位置)

Fig. 5 The doppler radar reflectivity of (a) 3.4° elevation at 03:52, (b) 6.0° elevation at 04:20, (c) 6.0° elevation at 04:37, (d) 1.5° elevation at 04:43, (e) 4.3° elevation at 05:05, (f) 4.3° elevation at 05:22 and the radial velocity diagram of (g) 9.9° elevation at 04:20, (h) 4.3° elevation at 04:32, (i) 4.3° elevation at 04:37 of Chenzhou on 23 March 2023 (A and B are the locations of single storms, and the black line ab in Fig.5b–d represents the position of the vertical profile)

快速向偏东方向移动,于05:28消失。

由于初生阶段对流单体受骑田岭地形的遮挡导致低层回波信息无法被雷达探测,且减弱消亡阶段历时短,因此下文着重对发展跃增阶段、降雹阶段的双

偏振雷达产品预警特征做进一步分析。

3.2 风暴发展跃增阶段

单单体风暴B在垂直方向上发展速度加快进入发展跃增阶段,逐渐向超级单体风暴演变。为更好地分析风暴内部结构,沿雷达径向经过单单体风暴B最强中心(图5b中实线ab)作垂直剖面(图6)。可见04:20,Z_H≥45 dBz的较强回波发展到-20 ℃层高度以上,强回波中心组织结构紧密呈明显团状(图6a),单体右侧有明显的Z_{DR}柱。Z_{DR}>1 dB的大值区伸展高度高于融化层约3~4 km (图6b),说明该处的上升气流强劲,能将粒子输送到0 ℃层以上,Z_{DR}柱内足够的过冷水滴为冰雹生成提供了雹胚,且对应着该处CC值为0.94~0.95,较周边明显偏小(图6c),K_{DP}值为1~3 °·km^{-1}(图6d),说明该处存在大量过冷水滴和小冰粒等混合相态粒子,粒子含水量有所增大,冰雹处于湿增长中。

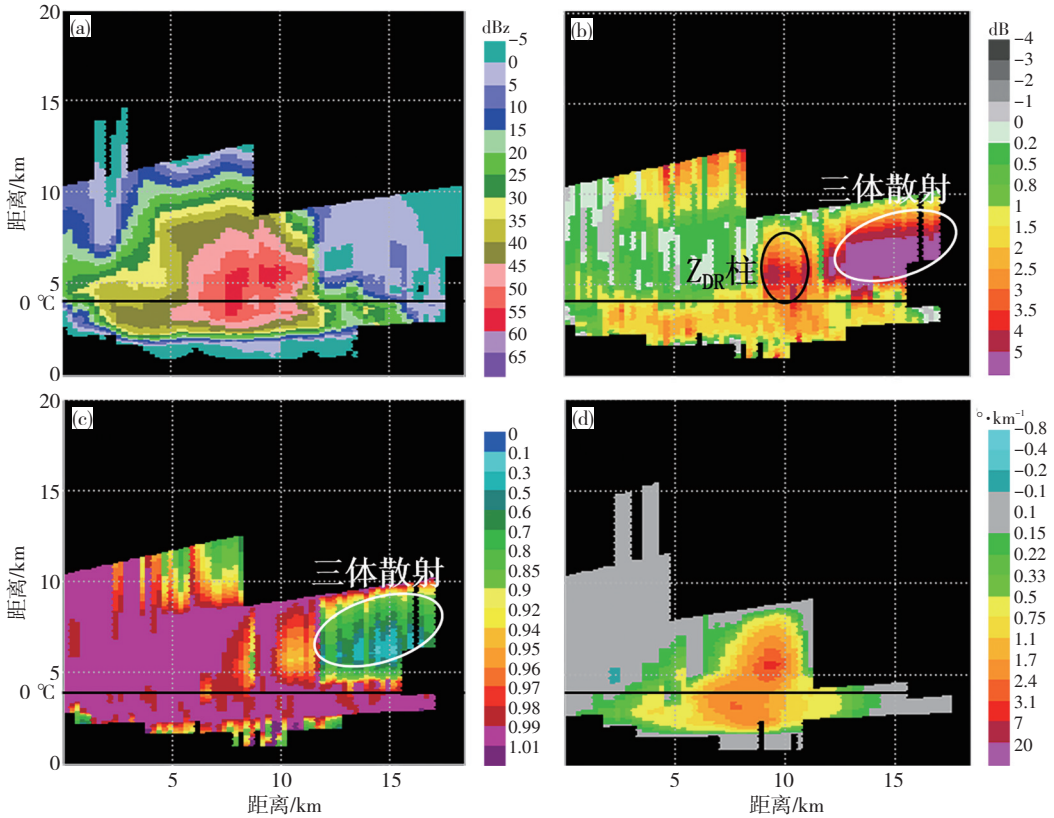


图6 2023年3月23日04:20沿图5b中实线ab所作的反射率因子Z_H(a)、差分反射率因子Z_{DR}(b)、相关系数CC (c)、差分传播相移率K_{DP}(d)的垂直剖面

Fig. 6 The vertical profile of the (a) Z_H, (b) Z_{DR}, (c) CC, and (d) K_{DP} along the solid line ab in Fig.5b at 04:20 BT on 23 March

04:37,6.0°仰角(高度约4.5 km)上超级单体风暴B强回波中心Z_H≥60 dBz (图7a),TBSS和旁瓣回波特征明显,Z_{DR}接近于0 (图7b),指示该处存在大冰雹。在冰雹区南侧存在Z_{DR}大值区,K_{DP}值为2~3 °·km^{-1}(图7c),CC值为0.9~0.96 (图7d),说明该处空中存在包裹水膜的冰粒子和大雨滴的混合态。

由于TBSS和旁瓣回波对大冰雹具有一定的指示意义(高丽等,2021),因此利用Z_{DR}和CC双偏振参量产品对此次冰雹过程中TBSS和旁瓣回波进行分析,图7给出了04:37的6.0°仰角上的双偏振参量产品,从中可见,Z_H高值区(≥60 dBz) (图7a、b)沿径向远处的TBSS所对应双偏振参量有明显特征,即在TBSS根部对应的Z_{DR}较大(>5dB) (图7b),随着径向距离增加Z_{DR}值迅速减小,而TBSS对应的CC则始终明显偏小(<0.8) (图7d);Z_H高值区(≥60 dBz)左侧的旁瓣对应的双偏振参量表现为低Z_{DR}(<0 dB) (图7b)、低CC (<0.9) (图7d)特征,这些特征与国内近几年双偏振雷达探测中发现的TBSS所对应的双偏振参量特征一致(高丽等,2021)。

沿雷达径向经过超级单体风暴B最强中心(如图5c实线ab所示)作垂直剖面(图8)得到,Z_H≥60 dBz的强回波最高发展到-20 ℃层高度(图8a),并呈现WER特征,WER区域对应着高于0 ℃层的Z_{DR}大值区,即Z_{DR}柱(图8b),Z_{DR}柱高度高于0 ℃层4~5 km,说明该处上升气流强。而低层CC<0.9的低值区(图8c),可能与较强的入流气流将昆虫等吸入有关。在整个发展跃增阶段,Z_{DR}柱特征明显,说明上升气流持续时间长,利于风暴持续发展。图8a中黑色圈标记的强回波Z_H>60 dBz区域对应图8b中的Z_{DR}<0,这是由于下落的冰雹由于翻滚近似球体,对应的CC值在0.92~0.96

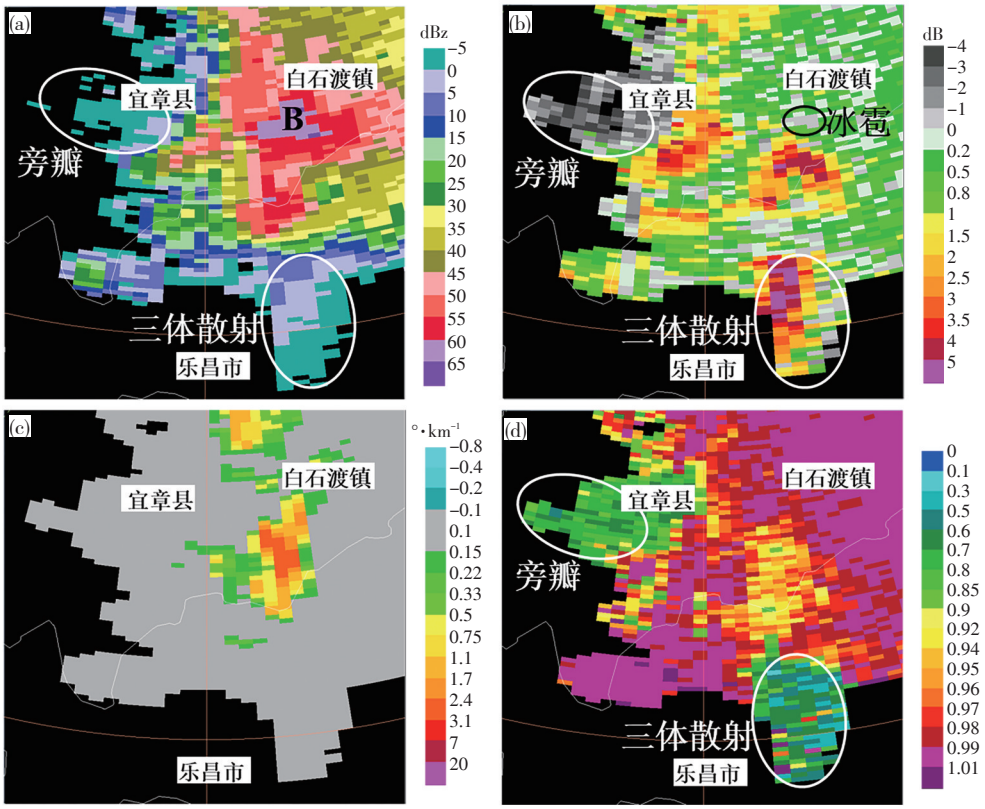


图7 2023年3月23日04:37 6.0°仰角反射率因子Z_H(a)、差分反射率因子Z_{DR}(b)、差分传播相移率K_{DP}(d)、相关系数CC(c)(图中B代表单单体风暴B,下同)

Fig. 7 The profile of (a) Z_H, (b) Z_{DR}, (c) CC, and (d) K_{DP} on 6.0° elevation at 04:37 BT on 23 March 2023 (B represents the single storm B, the same below)

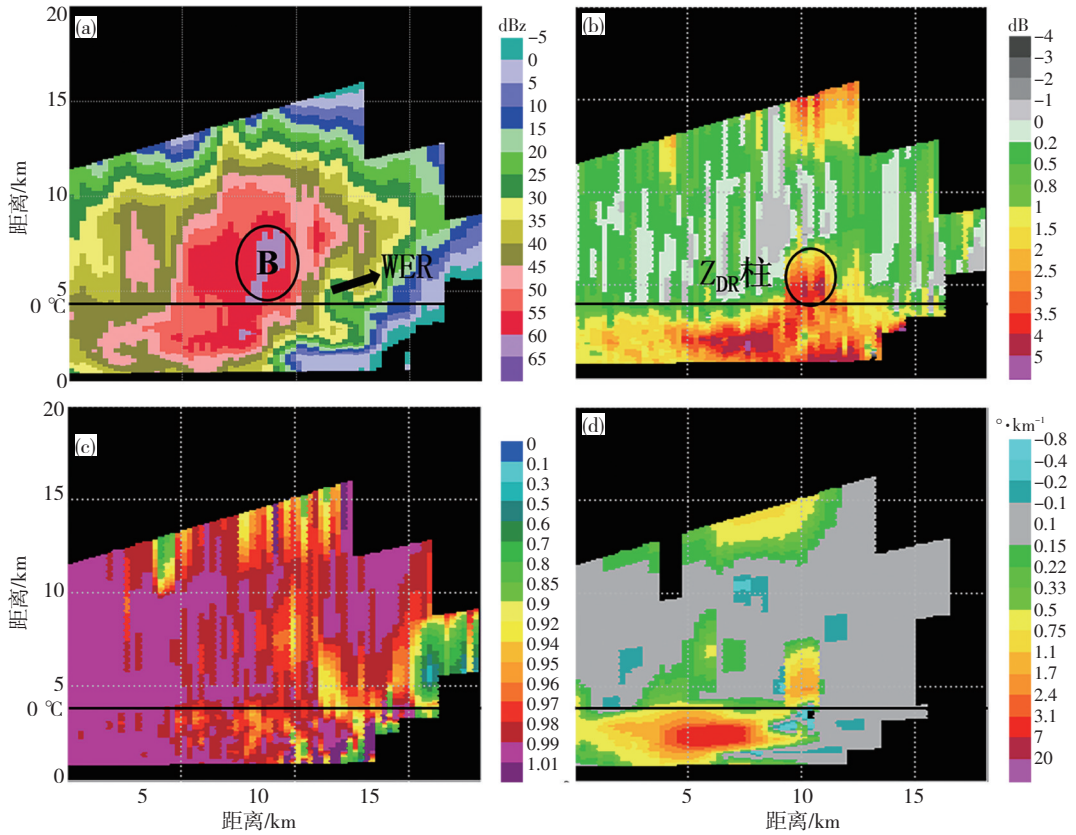


图8 2023年3月23日04:37沿图5c中实线ab所作的反射率因子Z_H(a)、差分反射率因子Z_{DR}(b)、相关系数CC(c)、差分传播相移率K_{DP}(d)

Fig. 8 The vertical profile of (a) Z_H, (b) Z_{DR}, (c) CC, and (d) K_{DP} along the solid line ab in Fig.5c at 04:37 BT on 23 March 2023

附近(图8c),K_{DP}为0 (图8d),表示该处存在大冰雹。而在该区域右侧的Z_{DR}值(图8b)和K_{DP}值(图8d)较大,CC为0.92~0.97 (图8c),是由于Z_{DR}柱内上升气流中的过冷水使得冰雹表面存在外包水膜现象,呈现出的扁平形状与大雨滴相似,因此具有较高的Z_{DR} (潘佳文等,2020)。

3.3 风暴降雹阶段

23日04:43,沿雷达径向经过超级单体风暴B最强中心(图5d实线ab处)作垂直剖面(图9)得到,超级单体风B的$Z_H \geq 60$ dBz的强回波中心高度最低降至2 km (图9a),Z_{DR}柱高度也明显下降,强回波中心的Z_{DR}接近于0 (图9b),CC在0.92 (图9c)附近,说明该处有翻滚降落的冰雹,因近似球形表现为高Z_H、低Z_{DR}的特征。图9b黑色圈所标记的地方为Z_{DR}洞,0 ℃层以下的Z_{DR}低值区被称为Z_{DR}洞(Wakimoto and Bringi,1988),Z_{DR}洞两侧的Z_{DR}增大,CC略增大为0.94~0.98 (图9c),这和强回波中心区的冰雹四周存在较多粒子尺寸小的湿冰雹以及冰雹融化形成的大雨滴有关。随着冰雹下落高度不断降低,冰雹外裹水膜融化加剧,在垂直方向上呈现出Z_{DR}和K_{DP}增大的特征,粒子降至地面为融化冰雹和液态雨滴的混合态。单体B右侧存在一个入流缺口,表现为Z_{DR}大值区($Z_{DR} > 3$ dB),即Z_{DR}弧(图9b),Z_{DR}弧与环境风暴相对螺旋度和低层切变有关(Matthew and Matthew,2021),说明该处仍有强垂直风切变,利于风暴维持。低层仰角上K_{DP}的显著增强区域对应Z_H大值区,被称为K_{DP}足(Romine,2007) (图9d),对应对流风暴内下沉气流的位置,粒子降落的拖曳作用使得下沉气流加强。

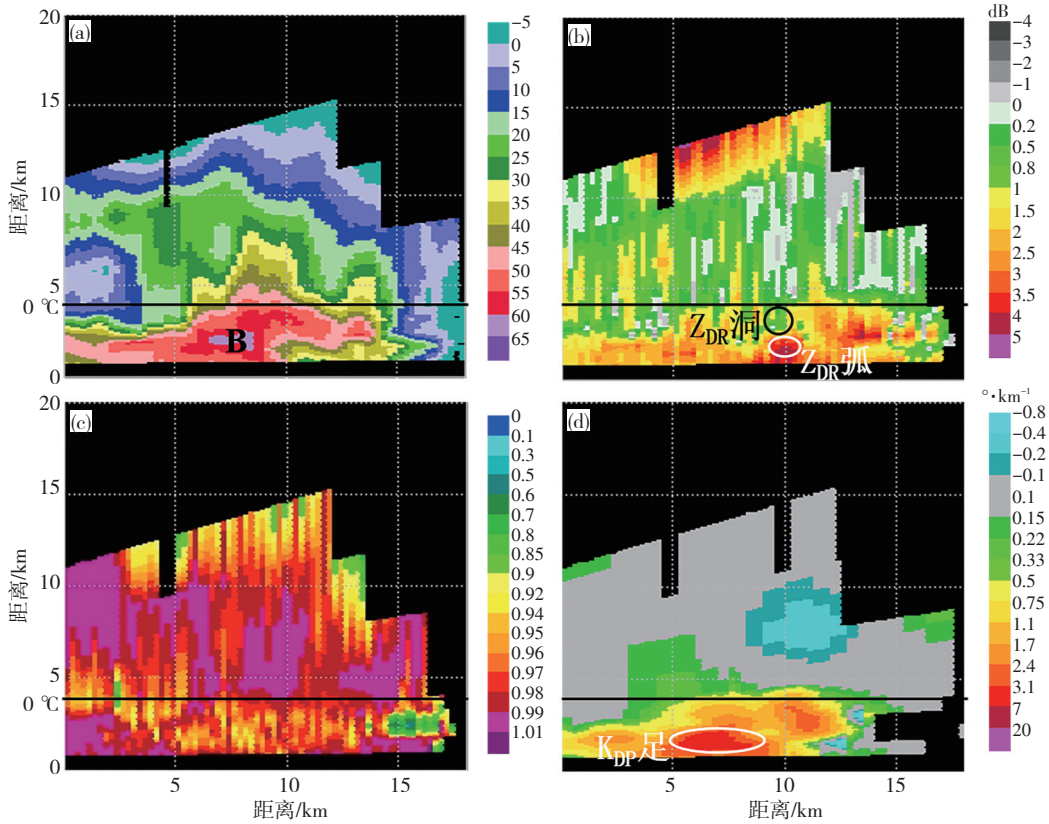


图9 2023年3月23日04:43沿图5d中实线ab所作的反射率因子Z_H(a)、差分反射率因子Z_{DR}(b)、相关系数CC (c)、差分传播相移率的K_{DP}(d)垂直剖面

Fig. 9 The vertical profile of (a) Z_H, (b) Z_{DR}, (c) CC, and (d) K_{DP} taken along the solid line ab in Fig.5d at 04:43 BT on 23 March 2023

超级单体风暴B初次降雹后继续发展,在之后移动路径上也产生了降雹。结合南岭北侧的地形(图4a)及雷达风廓线产品(图10)分析,3月23日03:00—05:00,1.5 km以下为一致偏北气流控制,850 hPa不断有弱波动影响,0~3 km垂直风切变最大达16 m·s^{-1},提供有利的动力条件,并且垂直风切变强有利于风暴的高度组织化和长生命史,因此此次冰雹天气过程风暴B的生命史长达约2.5 h。1.8 km以上表现为一致的西南暖湿气流,利于水汽输送。

超级单体风暴B东移至南岭山脉的蔚岭西侧进行爬坡运动,地形动力抬升作用使风暴进一步发展(付炜等,2018)。降雹落区为山背面一处山谷,山谷开口朝北呈喇叭口形状,低层偏北风在进入山谷后因地形收缩开始堆积,加强了低层气流辐合(罗菊英和谭江红,2019),有利于超级单体风暴B发展和维持。由于地面为冷垫,环境温度较低,使冰雹减少融化降落至地面。此外汝城降雹落区海拔高度约600 m,使得冰雹降至地面过程中融化程度相对更小一些。结合上述因素,汝城降落的冰雹最大直径约为20 mm,较上游宜章处直径约5 mm的冰雹更大。

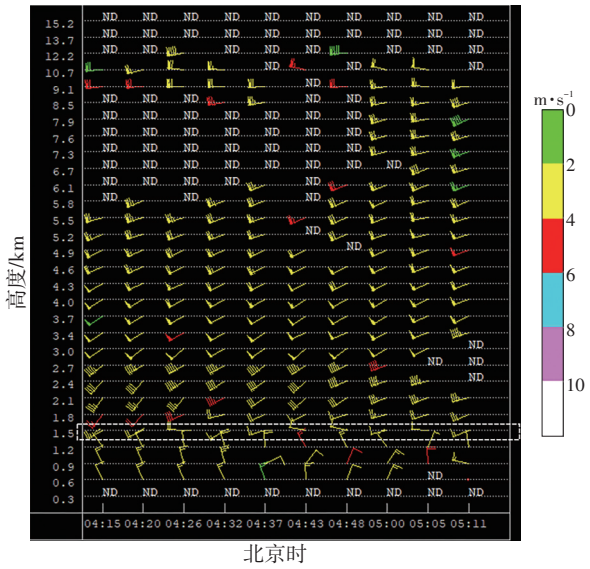


图10 2023年3月23日04:15—05:11郴州雷达风廓线产品(白色虚线框内为1.5 km即850 hPa高度上平均风向、风速随时间的变化)

Fig. 10 The wind profile products from Chenzhou radar at 04:15–05:11 BT on 23 March 2023 (the white dotted box illustrates the temporal variation of average wind direction and speed at the altitude of 1.5 km, specifically at 850 hPa)

4 结论与讨论

利用常规气象观测数据和郴州SA波段双偏振雷达产品,对2023年3月22—23日南岭地区一次高架雷暴冰雹过程进行研究,分析了高架雷暴冰雹过程的天气形势背景及风暴演变双偏振雷达回波特征,得出结论如下:

(1) 此次过程是一次典型高架雷暴,降雹落区发生在地面锋面北侧140 km处,与850 hPa切变线位置对应较好。925—850 hPa有明显逆温层,地面冷空气南下促使暖湿气流沿着冷垫向北缓慢爬升至逆温层以上,850 hPa切变线触发对流生成。较大的CAPE(1 761.9 J·kg^{-1})、强的深层垂直风切变、适当融化层高度有利于大冰雹生成且落地。

(2) 郴州南部地区降雹是由单单体风暴合并加强发展成超级单体风暴造成的,其演变可分为初生阶段、发展跃增阶段、降雹阶段和减弱消亡阶段。发展跃增阶段强回波中心迅速发展增高且VIL跃增,结合CC和K_{DP}参量可识别过冷水区冰雹正在进行湿增长,WER内的Z_{DR}柱长时间维持说明上升气流持续时间长,利于超级单体风暴B发展。降雹阶段强回波中心高度迅速下降,Z_{DR}柱高度明显下降,K_{DP}足与降雹落区相对应,粒子降落的拖曳作用使得下沉气流加强,结合Z_{DR}、K_{DP}和CC参量可识别出降落融化的冰雹及大雨滴等粒子相态。

(3) 发展跃增至降雹阶段中850 hPa不断有弱波动影响,且0~3 km垂直风切变强有利于超级单体风暴B长时间维持。超级单体风暴B本身的垂直上升运动与东移过程中地形强迫抬升作用相叠加,同时低层偏北气流因地形而收缩堆积使得低层气流辐合加强,均有利于风暴发展。

(4) Z_{DR}和CC参量可以更准确识别大冰雹的典型特征,尤其是识别TBSS和旁瓣回波。旁瓣回波表现出Z_{DR}值和CC值小的特征。TBSS表现为根部的Z_{DR}值较大(>5 dB),随着径向距离增加,Z_{DR}值迅速减小,CC明显偏低(<0.8)。

综上,Z_{DR}、K_{DP}和CC等双偏振参量及强对流单体回波所表现出来的Z_{DR}柱、Z_{DR}洞和K_{DP}足等特征对冰雹的发展演变具有较好指示意义,在预警预报工作中可以利用双偏振产品提高主观判断冰雹发生的准确率。但本文仅对本次高架雷暴冰雹过程的环流背景及双偏振雷达回波特征做分析,且以定性分析为主,关于南岭地形对冰雹发展的影响未做更深入研究,因此后续还需要探究更多高架雷暴冰雹过程中双偏振雷达回波特征分析,将南岭地区冰雹天气的雷达双偏振参量识别定量化,更好地应用到实际预报预警工作中去。

国家气象干部培训中心俞小鼎教授对本文撰写给予了环境条件分析和双偏振雷达回波特征分析等方面的技术指导,谨致谢忱。

参考文献(References):

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 hail–storm [J]. Plateau Meteorology,27(5):1131–1139 (in Chinese). doi: CNKI:SUN:GYQX.0.2008–05–023

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 Meteorology,40(3): 580–589 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2020.00034

付炜,叶成志,王东海,等.2018.一次南岭山脉前汛期强对流天气过程诊断分析[J].暴雨灾害,37(6):511–521. Fu W, Ye C Z, Wang D H, et al. 2018. Diagnostic analysis of a severe convective weather event in the Nanling Mountains during the pre–rainy season [J]. Torrential Rain and Disasters,37(6):511–521 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045. 2018.06.003

苟阿宁,高正旭,候静,等.2020.基于雷达和微波辐射计的湖北省冷季"高架雷暴"特征分析[J].热带气象学报,36(4):528–541. Gou A N, Gao Z X, Hou J, et al. 2020. Analysis of lightning and precipitation activities in three elevated convective events based on doppler radar and micro–wave radiometer in Hubei Province [J]. Journal of Tropical Meteorology, 36(4):528–541 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004–4965.2020.049

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 super–cell [J]. Meteorological Monthly,47(2):170–182 (in Chinese). doi:

10.7519/j.issn.1000-0526.2021.02.004

何清芳,林文,张深寿,等,2022.闽西南地区一次春季降雹过程的双偏振参量及降水粒子谱特征[J].气象,48(7):856-867. He Q F, Lin W, Zang S S, et al. 2022. Dual polarization parameters and precipitation particle spectrum characteristics of a spring hail event in southwestern Fujian [J]. Meteorological Monthly,48(7):856-867 (in Chinese). doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.050702

胡萍,刘玉林,杨群,等.2022. 2019年2月黔东北锋后冷区两次高架雷暴过程的对比分析[J].沙漠与绿洲气象,16(2):91-98. Hu P, Liu Y L, Yang Q, et al. 2022. Comparison and analysis of two elevated thunderstorms in the rear cold zone of the northeast front of Guizhou in February 2019 [J]. Desert and Oasis Meteorogy,16(2):91-98 (in Chinese). doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2022.02.013

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应用[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]. Advances in Meteorological Science and Technology,6(3):28-33 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2016.03.003

罗菊英,谭江红.2019.鄂西山区一次早春局地强冰雹过程分析[J].气象科技,47(6):976-985. Luo J Y, Tan J H. 2019. Analysis of a local strong hail process in early spring of 2017 in western Hubei mountain area [J]. Meteorological Science and Technology,47(6):976-985. (in Chinese). doi:CNKI:SUN:QXKJ.0.2019-06-013

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]. Meteorological Monthly,46(12):1608-1620 (inChinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2020.12.008

盛杰,毛冬艳,沈新勇,等.2014.我国春季冷锋后的高架雷暴特征分析[J].气象,40(9):1058-1065. Sheng J, Mao D Y, Shen X Y, et al. 2014. Analysis on characteristics of elevated thunderstorms behind cold fronts in China during Spring [J]. Meteorological Monthly,40(9):1058-1065 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.09.003

孙炜文,王璇,肖潇.2022.江西一次冰雹过程的S波段双偏振雷达回波特征分析[J].暴雨灾害,41(6):621-630. Sun W W, Wang X, Xiao X. 2022. Analysis on characteristics of S-band dual-polarization radar echo of a hail event in Jiangxi Province [J]. Torrential Rain and Disasters,41(6):621-630 (in Chinese). doi: 10.12406/byzh.2020-242

吴乃庚,林良勋,冯业荣,等.2013. 2012年初春华南"高架雷暴"天气过程成因分析[J].气象,39(4):410-417. Wu N G, Lin L X, Feng Y R, et al. 2013. Analysis on the causes of an elevated thunderstorm in early spring of South China [J]. Meteorological Monthly,39(4):410-417 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2013.04.002

许爱华,陈云辉,陈涛,等.2013.锋面北侧冷气团中连续降雹环境场特征及成因[J].应用气象学报,24(2):197-206. Xu A H, Chen Y H, Chen T, et al. 2013. Environmental field characteristics and origin of continuous hail in cold air mass on the north side of the front [J]. Journal of Applied Meteorological Science,24(2):197-206 (in Chinese). doi: 10.11898/1001-7313.20130208

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]. Meteorological Monthly,40(4):400-411 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.04.002

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 Meteorologica Sinica,70(3):311-337 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2012.030

俞小鼎.2014.关于冰雹的融化层高度[J].气象,40(6):649-654. Yu X D. 2014. A note on the melting level of hail [J]. Meteorological Monthly,40(6):649-654 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.06.001

俞小鼎,周小刚,王秀明.2016.中国冷季高架对流个例初步分析[J].气象学报,74(6):902-918. Yu X D, Zhou X G, Wang X M. 2016. A preliminary case study of elevated convection in China [J]. Acta Meteorologica Sinica:74(6):902-918 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2016.075

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:232. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al. 2020. Thunderstorms and severe convection approaching forecast [M]. Beijing:Meteorological Press:232 (in Chinese)

周明飞,万雪丽,罗喜平.2017.贵州静止锋冷区高架雷暴冰雹特征及其成因[J].热带地理,37(4):484-493. Zhou M F, Wan X L, Luo X P. 2017. Characteristics and causes of elevated thunderstorms which produce hail in the cold [J]. Tropical Geogarphy,37(4):484-493 (in Chinese). doi:10.13284/j.cnki.rddl.002957

张一平,俞小鼎,孙景兰,等.2014. 2012年早春河南一次高架雷暴天气成因分析[J].气象,40(1):48-58. Zhang Y P, Yu X D, Sun J L, et al. 2014. Analysis on weather causes of an elevated thunderstorm in Henan in early spring 2012 [J]. Meteorological Monthly,40(1):48-58 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.01.006

Colman B R. 1990. Thunderstorms above frontal surfaces in environments without positive CAPE. Part I: A Climatology [J]. Monthly Weather Review,118(5):1123. doi:10.1175/1520-0493(1990)1182.0.CO;2

Grant B N. 1995. Elevated cold-sector severe thunderstorms: a preliminary study [J]. Nation Weather Digest,19(4):25-31

Wilson M B, Broeke M S V D. 2021. An automated python algorithm to quantify ZDR arc and KDP-ZDR separation signatures in supercells [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,38(2):371-386. doi:10.1175/JTECH-D-20-0056.1

Romine G S, Burgess D W, Wilhelmson R B. 2007. A dual-polarization-radar-based assessment of the 8 May 2003 Oklahoma City area tornadic supercell [J]. Monthly Weather Review,136(8):2849. doi:10.1175/2008MWR2330.1

Ryzhkov A V, Zrnić D. 2019. Radar Polarimetry for Weather Observations [M]. Germany:Springer Press:269

Von T L, Dias N J, Ori D, et al. 2022. Ice microphysical processes in the dendritic growth layer: a statistical analysis combining multi-frequency and polarimetric Doppler cloud radar observations [J]. Atmospheric Chemistry and Physics,22(17):11795-11821. doi:10.5194/ACP-22-11795-2022

Wakimoto R A. 1988. Dual-polarization observations of microbursts associated with intense convection: The 20 July storm during the MIST project [J]. Monthly Weather Review,116(8):1521. doi:10.1175/1520-0493(1988)116<1521:DPOOMA>2.0.CO;2

(责任编辑　唐国瑛)