

遵义市播州区春季一次大冰雹天气成因分析

肖雨霞^{1*}, 张艳梅^{2#}, 罗阳欢³, 吴新星⁴, 刁金粉⁴, 申俊初⁴

¹遵义市红花区气象局, 贵州 遵义

²贵州省气象台, 贵州 贵阳

³贵州省气候中心, 贵州 贵阳

⁴遵义市播州区气象局, 贵州 遵义

收稿日期: 2024年3月12日; 录用日期: 2024年5月24日; 发布日期: 2024年5月31日

摘要

利用遵义市多普勒雷达资料和播州区国家基本站及乡镇区域站等资料, 通过数理统计、天气学分析等方法分析大冰雹天气成因。结果表明: 此次大冰雹天气过程由高空槽、低层切变及地面冷空气共同影响造成的; 整层大气上干冷下暖湿, 具有较大温度递减率和对流有效位能, 层结不稳定, 垂直风切变较强。大冰雹雷达回波的中心强度在60 dBz以上, 最大回波强度出现时间比降雹时间提前24 min, 最大回波顶高比降雹时间提前12 min; 冰雹云顶高12~15 km, 垂直发展旺盛; 降雹发生在垂直积分液态水含量(VIL)呈跃增期间。大冰雹对流风暴单体雷达回波PPI图上具有低层钩状回波, 中高层回波悬垂, 三体散射等典型冰雹云回波特征。为进一步做好冰雹短临预报预警服务, 除了关注典型冰雹云雷达回波特征外, 可将最大回波强度、垂直积分液态水含量(VIL)、回波顶高、冰雹报警指数及45 dBz强回波面积等作为冰雹发生判断依据, 本文研究成果为做好播州区冰雹灾害性天气预警及气象服务工作提供参考。

关键词

对流风暴单体, 大冰雹, 雷达回波特征, 播州区

Analysis of the Causes of a Large Hailstorm in Spring in Bozhou District, Zunyi City

Yuxia Xiao^{1*}, Yanmei Zhang^{2#}, Yanghuan Luo³, Xinxing Wu⁴, Jinfen Diao⁴, Junchu Shen⁴

¹Honghuagang Meteorological Bureau, Zunyi Guizhou

²Guizhou Meteorological Observatory, Guiyang Guizhou

³Guizhou Climate Center, Guiyang Guizhou

⁴Bozhou Meteorological Bureau, Zunyi Guizhou

Received: Mar. 12th, 2024; accepted: May. 24th, 2024; published: May. 31st, 2024

文章引用: 肖雨霞, 张艳梅, 罗阳欢, 吴新星, 刁金粉, 申俊初. 遵义市播州区春季一次大冰雹天气成因分析[J]. 自然科学, 2024, 12(3): 648-656. DOI: 10.12677/ojns.2024.123075

Abstract

Using the Doppler radar data of Zunyi City and the data of national basic stations and township regional stations in Bozhou District, the causes of large hail weather were analyzed through mathematical statistics, synoptic analysis and other methods. The results show that the large hail weather process was caused by the combined influence of high-altitude troughs, low-level shear and cold ground air; The entire atmosphere is dry and cold at the top and warm and humid at the bottom, with a large temperature lapse rate and convective effective potential energy, and the stratification is unstable. The vertical wind shear is strong. The central intensity of the large hail radar echo is above 60 dBz, the maximum echo intensity occurs 24 minutes earlier than the hail time, and the maximum echo top height is 12 minutes earlier than the hail time; the hail cloud top is 12 to 15 km high, and the vertical development is strong; Hail occurs during periods of sharp increase in vertically integrated liquid water content (VIL). The single radar echo PPI map of a large hail convective storm has typical hail cloud echo characteristics such as low-level hook echo, mid- and high-level echo overhang, and three-body scattering. In order to further provide short-term hail forecast and warning services, in addition to paying attention to typical hail cloud radar echo characteristics, the maximum echo intensity, vertical integrated liquid water content (VIL), echo top height, hail alarm index and 45 dBz intensity The echo area is used as the basis for judging the occurrence of hail. The research results of this article provide reference for the disastrous weather warning and meteorological services of hail in Bozhou District.

Keywords

Convection Storm Cell, Large Hail, Radar Echo Characteristics, Bozhou District

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

春季作为冰雹发生的高发季节,尤其是在西南地区,地形复杂、气候多样,冰雹天气更加突出。遵义市播州区位于贵州省北部,大娄山脉东支中段与乌江中段北岸之间,地处中亚热带季风性湿润气候区,特殊地理环境和山地地形特征,导致冰雹多发频发。大冰雹是指直径介于 20~50 mm 的冰雹,具有很强的突发性和破坏力,给农业、建筑、交通、电力等行业带来巨大经济损失[1]。故而对于冰雹预测预警研究是提升防灾减灾能力的迫切需求,早在 20 世纪 70 年代,国内外学者就开始对冰雹进行研究[2] [3],姚展予等[1]对冰雹形成机理和增长过程研究进展,指出雹云的发展依赖于水汽条件、动力不稳定条件、风垂直切变等关键因子。汤兴芝等[4]研究指出异常高的 VIL 常指示强冰雹,VIL 的跃增和陡降则与冰雹的增长和下降有关,VIL 的增长期也可以产生降雹。雷蕾等[5]研究指出当雷达回波存在中低层弱回波区(WER)和中高层回波悬垂、强烈风暴顶辐散、三体散射、有界弱回波区(BWER),将表明有大冰雹存在。曾勇等[6]研究贵州一次多单体冰雹天气指出偏北路径冰雹云单体属于“跃增型”增长,偏南路径冰雹云单体属于“递增型”增长。李皓等[7]分析贵州中西部 7 个具有多阶跃增特征的雹云单体的雷达参数演变特征,表明二阶跃增冰雹云演变呈发展-跃增-降雹-减弱-再发展-跃增-降雹的趋势。另外,诸多研究学者利用激光雨滴谱仪、微波辐射计、激光云高仪和雷达资料等多源数据对冰雹天气过程观测特征进行大量分析和研究[8]-[21],一致认为冰雹天气发生前,水汽缓慢持续积累,呈上层干冷低层暖湿现象,

垂直累计液态水含量跃增显著，具有较大垂直积分液态水含量。

2023年5月5日，播州区出现大冰雹天气过程，并伴有10级大风天气过程，全区共7个乡镇出现冰雹，最大冰雹直径达40 mm，是播州区有气象记录以来，出现直径最大的一次冰雹天气。本文通过对此次大冰雹天气过程进行分析，分析雷达产品回波特征，探讨其成因，旨在为冰雹短临预报预警服务提供参考，减少冰雹灾害对社会经济的影响。

2. 资料与方法

所使用资料主要包括2023年5月5日冰雹信息、MICAPS高空和地面填图、地面观测站分钟级常规气象要素、贵阳和重庆探空资料，遵义C波段多普勒天气雷达(站号：Z9852)资料。利用遵义市雷达资料和播州区国家基本站及乡镇区域站资料，通过数理统计、天气学分析方法分析此次降雹过程天气学原因、雷达回波产品特征和参数发展态势。

3. 天气实况

2023年5月5日19~23时(北京时，下同)，遵义市播州区出现了强对流天气，主要影响播州区团溪镇、铁厂镇、主城区、龙坪镇等乡镇，共7个乡镇出现冰雹天气(表1)，其中团溪镇、铁厂镇出现大冰雹，最大冰雹直径达40 mm；此次过程并伴有短时强降水和大风，主城区出现41.2 mm/h的短时强降水，团溪镇出现极大风速28.5 m/s。据播州区应急管理局统计，该次强对流天气过程导致播州区因风雹灾害受灾，造成直接经济损失合计2166.32万元。

Table 1. Live statistics of hail weather in Bozhou District, Zunyi City

表1. 遵义市播州区冰雹天气实况统计表

降雹地区	降雹开始时间	降雹结束时间	最大直径(mm)	降雹密度(粒/m ²)
龙坪镇	20:50	20:53	5	25
团溪镇	20:50	20:53	25	50
铁厂镇	20:56	21:06	40	50
平正乡	21:35	21:39	10	40
枫香镇	21:50	21:53	5	20
主城区	22:15	22:22	5	30
乐山镇	22:18	22:28	5	50

4. 环流形势分析

水汽条件、热力不稳定条件、垂直风切变和抬升机制等关键因子是强对流天气发生、发展的重要条件。5日20时500 hPa高空图(图1)显示，500 hPa高空槽位于四川中北部，播州区位于高空槽底部，播州处于槽前西南气流影响；700 hPa受西南气流控制，低涡位于四川东北部，播州区受切变南侧西南气流控制；850 hPa低涡中心位于重庆中部，切变位于播州区中东部，播州区受暖脊控制；850 hPa与500 hPa温差达到32℃，温度递减率较大，500 hPa比湿3 g/kg，700 hPa比湿11 g/kg，850 hPa比湿15 g/kg，整层上干下湿，有利于触发对流不稳定能量的释放。地面上播州区受热低压控制，有利于不稳定能量的集聚，地面辐合线位于贵州中部一线，冷空气从偏东路径入侵播州；在地面辐合线附近触发了对流云团的生成。

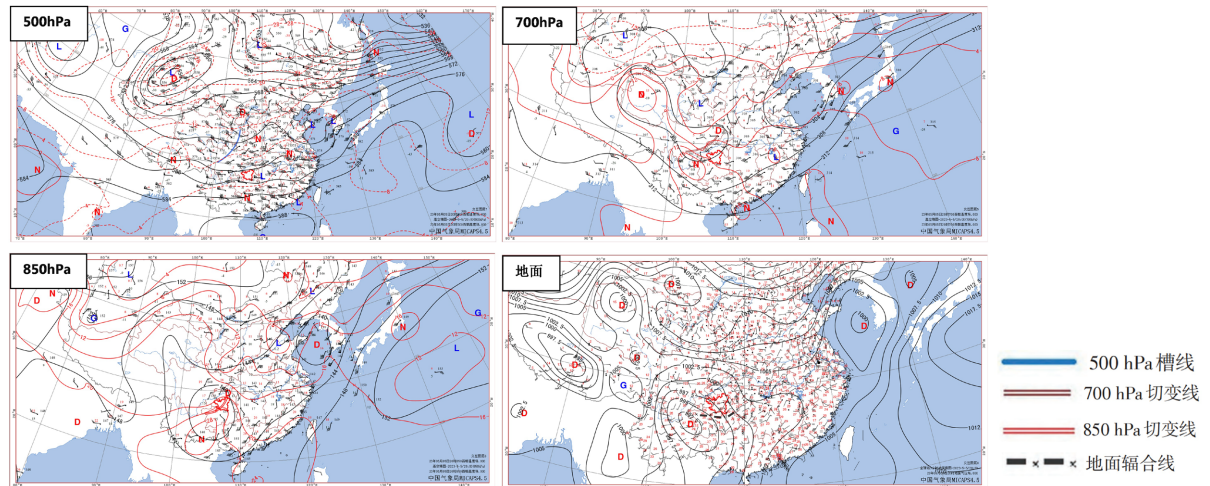


Figure 1. Weather circulation situation map at 20:00 on May 5, 2023

图 1. 2023 年 5 月 5 日 20 时天气环流形势图

从播州区北部的重庆站和南部的贵阳站的探空图资料可知(图 2),5 月 5 日 20 时两站都呈现喇叭口结构,有利于出现雷暴大风,重庆、贵阳对流有效位能 CAPE 分别为 606.4 J/kg、755 J/kg,表明两地大气层结均处于不稳定状态,两个探空站 0°C 层高度在 5 km 左右,-20°C 层高度在 8 km 左右,0°C 层高度和-20°C 层高度适宜,有利于冰雹天气产生。重庆站 0~3 km 垂直风切变为 13.1 m/s,0~6 km 垂直风切变为 24.5 m/s;贵阳站 0~3 km 垂直风切变为 21.2 m/s,0~6 km 垂直风切变为 33.9 m/s;两个临近探空站 0~3 km 和 0~6 km 的垂直风切变较大,较强的垂直风切变,有利于冰雹云的发展和维持,也有利于雷暴大风的形成[4] [8]。

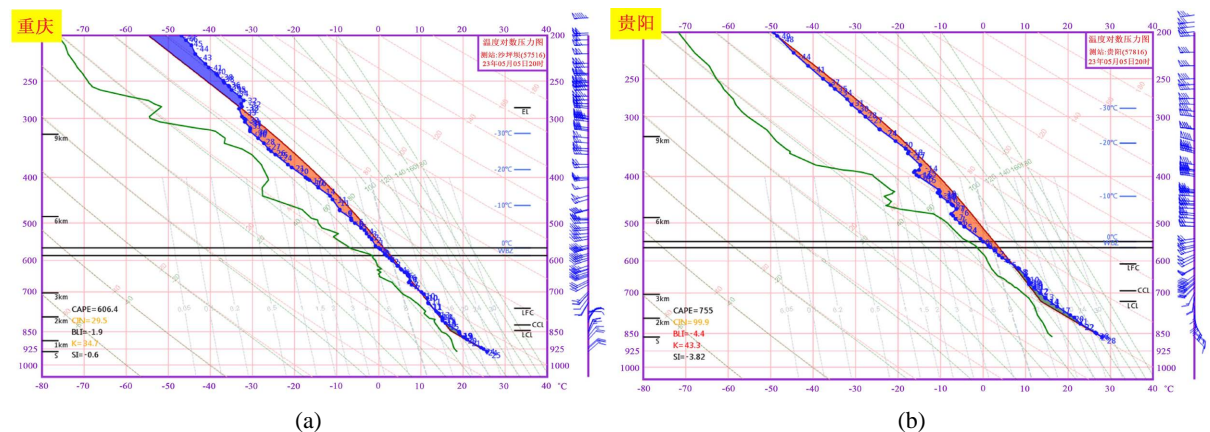


Figure 2. 20:00 sounding chart of Chongqing Station and Guiyang Station on May 5, 2023

图 2. 2023 年 5 月 5 日重庆站和贵阳站 20 时探空图

综上所述,此次大冰雹过程主要是由于高空槽、低空切变线和地面辐合线的环流形势下,地面前期受热低压控制,气温高,能量高,受冷空气入侵影响,温度直减率增大,中低层垂直风切变大,为冰雹云的发展依赖于水汽条件、动力不稳定条件、风垂直切变等关键因子[1]。有利于冰雹和雷暴大风天气出现[22]。

5. 雷达回波特征分析

图 3 为 5 月 5 日播州区冰雹路径及发生时间,该次过程主要有 2 条降雹路径。对流风暴单体(A)自西

向东偏南移动路径, 20:50~20:53 在龙坪镇和团溪镇降雹, 20:56~21:06 在铁厂镇降雹。对流风暴单体(B)自西向东移动路径, 21:35~21:39 平正乡降雹, 21:50~21:53 枫香镇降雹, 22:15~22:22 主城区降雹。对流风暴单体(C)导致乐山镇出现小冰雹天气, 降雹时间 22:18~22:28。

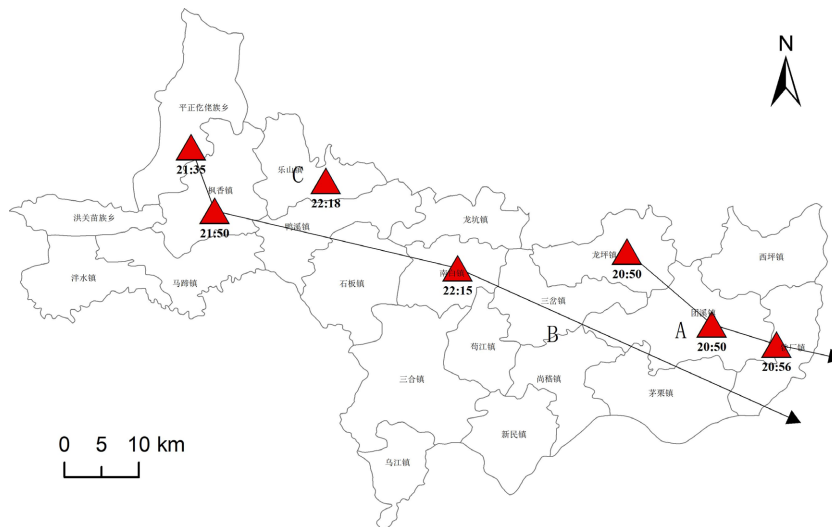


Figure 3. Hail path and occurrence time in Bozhou District on May 5, 2023 (Δ is the location and time of hail occurrence)

图 3. 播州区 2023 年 5 月 5 日冰雹路径及发生时间(Δ 为冰雹发生位置及时间)

5.1. 雷达产品参数特征分析

为更好的研究冰雹的雷达回波特征, 根据对流风暴单体天气造成的影响强度及降雹落区范围, 着重分析对流风暴单体(A)和(B)的雷达回波特征。图 4 为对流风暴单体(A)雷达参数特征。对流单体回波最大反射率因子为 61.5 dBz, 回波顶高达 15.3 km; 降雹期间(20:0 至 21:6)最大回波强度、垂直积分液态水含量(VIL)和回波顶高(TOPS)均呈增长趋势, 其中最大回波强度增长相对较缓, 垂直积分液态水含量(VIL)跃增显著, 最强达到 $56.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, VIL 跃增后一个体扫左右时间出现降雹, 这与刁秀广等[23]研究结论“5 月份降雹单体降雹时间滞后于 VIL 跃增后的体扫时间, 时间差较小”一致。最大回波强度出现时间比降雹时间提前 24 min, 最大回波顶高比降雹时间提前 12 min。统计发现, 对流风暴单体(A)回波的中心强度为 60~62 dBz; 降雹期间冰雹报警指数均 $\geq 4 \text{ min}$; 冰雹云顶高 12~15 km, 垂直发展旺盛。垂直积分液态水含量(VIL)呈跃增型增长, 这与邹书平等研究冰雹云回波单体的跃增特性一致[25]。随着冰雹云的不断发展和增强, 雷达回波面积逐渐扩大, 并呈现出强度增加的趋势, 该对流风暴单体降雹时段 45 dBz 的强回波面积 $\geq 360 \text{ km}^2$ 。

对流风暴单体(B)雷达产品参数(如图 5)所示, 最大回波强度 63 dBz, 回波顶高达 13.9 km; 最大回波强度和最大回波顶高出现时间均比降雹时间提前 13 min。可以看到, 降雹期间(21:35 至 22:30), 正好对应最大回波强度和垂直积分液态水含量(VIL)的“v”型分布, 考虑原因一是垂直积分液态水含量(VIL)呈波动变化; 二是不排除存在雷达静锥区影响的可能性, 播州主城区距离遵义雷达 17 km 左右, 俞小鼎等[24]指出雷达静锥区使得距雷达 40 km 以内的垂直积分液态水含量(VIL)值被过低估计。垂直积分液态水含量(VIL)波动明显, 相对而言, 回波顶高(TOPS)平稳起伏不大。另统计发现, 冰雹云回波的中心强度为 46~63 dBz; 降雹期间冰雹报警指数均 $\leq 4 \text{ min}$; 冰雹云顶高 8~12 km。垂直积分液态水含量(VIL)跃增显著, 最强达到 $43.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 呈波动性增长, 这与邹书平等研究冰雹云回波单体的跃增特性一致[25]。随着

冰雹云的不断发展和增强, 雷达回波面积逐渐扩大, 并呈现出强度增加的趋势, 该对流风暴单体降雹时段 45 dBz 的强回波面积 $< 300 \text{ km}^2$ 。

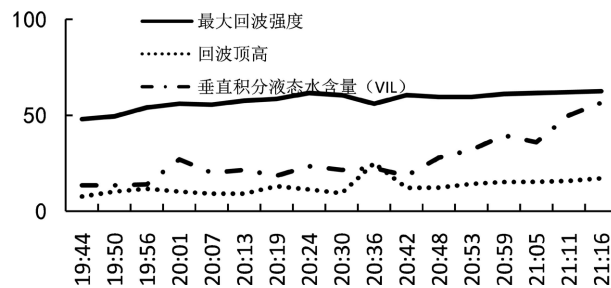


Figure 4. Convective storm cell (A) radar product parameters

图 4. 对流风暴单体(A)雷达产品参数

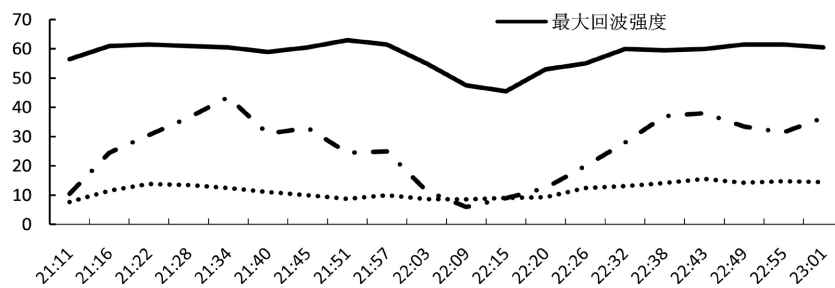


Figure 5. Convective storm cell (B) radar product parameters

图 5. 对流风暴单体(B)雷达产品参数

5.2. 冰雹云典型雷达回波特征分析

(图 6(a))为遵义雷达组合反射率因子图, 在 4.3° 仰角上, 对流风暴单体(A) 19:33 播州区马蹄镇与金沙接壤处开始发展, 回波最大强度 32 dBz, 随后不断发展加强并向西移动; 19:50 低层强回波开始接地, 西移到鸭溪、石板等乡镇, 45 dBz 的强回波垂直高度伸展到 5km 附近, 垂直发展旺盛; 20:42 从 2.4° 仰角看到明显的三体散射长钉, 持续 29 min。孙炜文等[8]研究指出三体散射现象在中高层 4.5~5.0 km 出现, 持续时间达 30 min, 对应中高层长时间存在大冰雹。实况显示 8 min 后, 播州区东部龙坪镇和团溪镇降雹。20:59 铁厂附近 0.5° 仰角出现钩状回波(图 6(b))。做反射率因子垂直剖面图 20:59 (图 6(c)) 55 dBz 的强回波垂直发展到 8 km 以上, 回波悬垂明显; 说明地面有雷暴大风和冰雹天气[3] [4]; 杨静等[26]研究表明与高反射率因子回波悬垂相联系的是强烈的上升。从径向速度图上(图 6(d))来看, 20:24 播州区东部地区附近大面积大风速区域, 持续到 21:28, 大风速区持续 64 min, 最大风速 28 m/s, 20:59 在东部乡镇有中气旋, 团溪镇附近径向速度剖面图上(图 6(e))可以看出, 在低层是辐散高层辐合高低空配置, 有利于大风发生, 团溪镇 21:03 出现 10 级大风(28.5 m/s)。

对流风暴单体(B)5 月 5 日 20:53 在仁怀市南部开始发展起来积云对流回波, 最大回波强度 40.5 dBz, 随后不断发展加强并向西移动; 21:16 进入播州区西部, 21:34 低层强回波开始接地, 此时对流风暴单体西移到播州区西部平正乡一带, 45 dBz 的强回波面积发展到 240 km^2 左右, 且 45 dBz 的强回波垂直高度发展到 9 km 附近, 垂直发展旺盛; 21:57 开始看到三体散射现象, 持续时间维持 24 min, 期间对流风暴单体(B)西移到主城区一带, 主城区出现短时强降水及冰雹天气; 主城区附近考虑到受雷达静锥区影响, 整体回波强度减弱。从组合反射率产品分析, 21:34 剖面图上(图 6(f)) 45 dBz 的强回波垂直发展到 10 km, 且回波悬垂, 垂直上升运动明显, 有利于降雹。

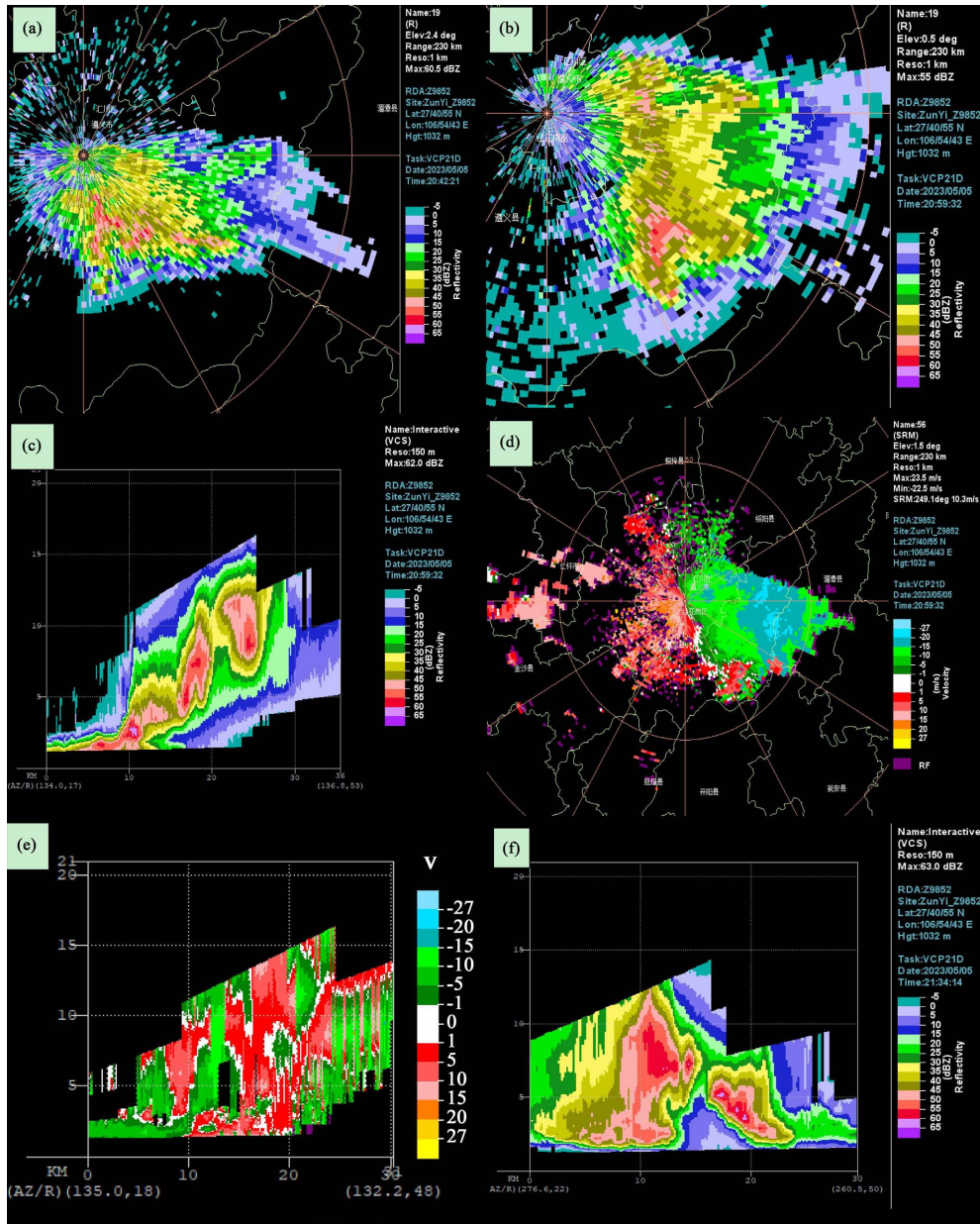


Figure 6. Zunyi radar product echo chart on May 5, 2023
 图 6. 2023 年 5 月 5 日遵义雷达产品回波图

6. 结论

利用遵义市多普勒雷达资料,对 2023 年 5 月 5 日遵义市播州区出现的大冰雹天气过程进行分析,重点分析雷达回波产品特征,探讨此次大冰雹形成原因,得出以下结论。

1) 遵义市播州区此次大冰雹天气出现在高空槽、低空切变线和地面辐合线的有利的环流形势下,地面前期受热低压控制,能量高,受冷空气入侵影响,温度直减率增大,中低层垂直风切变大,有利于冰雹和雷暴大风天气出现。

2) 对流风暴单体降冰雹时段,雷达最大回波强度和最大回波顶高出现时间均比降雹时间提前 13 min; 雷达回波的中心强度在 46~63 dBz; 垂直积分液态水含量(VIL)波动明显; 冰雹云顶高 8~12 km; 垂直累

计液态水含量(VIL)呈波动性增长。另外,降大冰雹时段雷达回波的中心强度均在 60 dBz 以上,最大回波强度出现时间比降雹时间提前 24 min,最大回波顶高比降雹时间提前 12 min;冰雹云顶高 12~15 km,垂直发展旺盛;垂直累计液态水含量(VIL)呈跃增性增长。

3) 对流风暴单体冰雹报警指标均 ≤ 4 in,且 45 dBz 的强回波面积 $< 300 \text{ km}^2$,考虑直径 $< 20 \text{ mm}$ 冰雹;大冰雹报警指标均 ≥ 4 in,且 45 dBz 的强回波面积 $\geq 360 \text{ km}^2$,可作为判识大冰雹指标。

4) 该次冰雹过程对流风暴单体雷达回波图上具有典型的冰雹回波特征,低层钩状回波,中高层回波悬垂,三体散射等;速度图上大风速区长时间维持、中气旋等特征;强回波发展到 0°C 和 -20°C 层高度,有利于雷暴大风、冰雹等强对流天气。

7. 讨论

利用冰雹个例分析不排除存在偶然性,因此,在雷达产品未来的业务应用中,还需采用双偏振雷达、多普勒雷达等多种资料对更多冰雹个例进行分析总结,以期对冰雹天气监测预警业务服务提供更多技术支撑。

基金项目

遵义市气象局科研业务登记项目(zyqxky【2023】7号)。

参考文献

- [1] 姚展予,屠琦,安琳,等.冰雹形成过程及人工防雷研究综述[J].气象学报,2022,80(6):835-863.
- [2] 林彤,邓佩云,周楠,等.六盘山一次灾害性冰雹天气过程分析[J].宁夏工程技术,2023,22(4):302-311.
- [3] Moller, A.R., Doswell, C.A., Foster, M.P., et al. (1994) The Operational Recognition of Supercell Thunderstorm Environments and Storm Structure. *Weather and Forecasting*, 9, 327-347.
[https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1994\)009<0327:TOROST>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1994)009<0327:TOROST>2.0.CO;2)
- [4] 汤兴芝,俞小鼎,姚瑶,等.华东一次极端冰雹天气过程雷达回波特征的比较分析[J].高原气象,2023,42(4):1078-1092.
- [5] 雷蕾,孙继松,乔林,等.一次超级单体雹暴的中尺度对流特征和形成条件分析[J].气象科技进展,2019,9(5):16-23.
- [6] 曾勇,万雪丽,李丽丽,等.一次多单体冰雹天气过程的雷达回波与闪电特征分析[J].暴雨灾害,2020,39(3):250-258.
- [7] 李皓,邹书平,黄钰,等.基于雷达特征参数的贵州中西部雹云单体跃增特征分析[J].中低纬山地气象,2023,47(3):68-72.
- [8] 孙炜文,王璇,肖潇.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,2022,41(6):621-630.
- [9] 陆秋霖,李秀昌,林确略,等.玉林市 2023 年 3 月 25 日冰雹过程双偏振雷达特征分析[J].气象研究与应用,2023,44(3):84-89.
- [10] 邱雯婷,马中元,彭维明,等.2021-03-31 婺源冰雹雷达回波特征分析[J].气象水文海洋仪器,2022,40(1):15-19.
- [11] 段和平,马中元,陈鲍发,等.江西两次强降雨过程的雷达回波特征对比分析[J].沙漠与绿洲气象,2023,17(2):137-145.
- [12] 宋薇,邱晓滨,王兆宇,等.一次冰雹过程的多源资料观测特征分析[J].暴雨灾害,2024(1):1-10.
- [13] 耿琼,冯亮亮,李培民.寻甸县罕见双雹灾害特征分析——基于 T-LnP 图和 X 波段双线偏振雷达[J].云南地理环境研究,2023,35(6):54-65.
- [14] 许可,杜小玲,周文钰,等.贵州一次暖区爬线大风与大冰雹的雷达结构特征分析[J].中低纬山地气象,2021,45(3):65-72.
- [15] 李丽丽,邹书平,杨哲,等.贵州中部一次多单体冰雹天气的雷达回波特征[J].中低纬山地气象,2018,42(2):21-27.
- [16] 党张利,李化泉.六盘山区一次冰雹天气过程分析[J].宁夏工程技术,2022,21(3):240-245.

- [17] 孙贞, 徐天洋, 黄树华. 山东半岛一次冰雹天气的雷达特征分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2022, 52(10): 15-25.
- [18] 金春荣, 马洪波, 李义兰. 2019年初夏延边州一次大范围冰雹天气分析[J]. 气象灾害防御, 2020, 27(1): 5-8.
- [19] 彭力, 赵强, 陈小婷, 等. 关中北部一次冰雹天气不同雷达特征对比分析[J]. 陕西气象, 2021(6): 1-8.
- [20] 周明飞, 杜小玲, 罗敬, 等. 贵州“5.15”极端风雹天气过程的环境场和雷达回波特征[J]. 暴雨灾害, 2022, 41(2): 158-166.
- [21] 窦慧敏, 曹楚, 潘雯菁. 温州“4·24”一次冰雹天气特征分析[J]. 浙江气象, 2022, 43(1): 1-9.
- [22] 俞小鼎, 王秀明, 李万莉, 等. 雷暴和强对流临近预报[M]. 北京: 气象出版社, 2020.
- [23] 刁秀广, 朱君鉴, 黄秀韶, 等. VIL 和 VIL 密度在冰雹云判据中的应用[J]. 高原气象, 2008, 27(5): 1131-1139.
- [24] 邹书平, 李丽丽, 常履福, 等. 贵州山区强冰雹云单体演变特征分析[J]. 贵州气象, 2016, 40(2): 15-19.
- [25] 俞小鼎, 姚秀萍, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [26] 杨静, 姚秀萍, 李彦霖, 等. 云贵高原东北部一次罕见冰雹超级单体结构特征与发展分析[J]. 高原气象, 2023, 42(2): 374-385.