

田白,马中元,陈鲍发,等,2023. 2022 年 3 月 14 日江西及周边地区冰雹回波特征分析[J]. 气象,49(12):1521-1531. Tian B, Ma Z Y, Chen B F, et al, 2023. Analysis of hail echo characteristics in Jiangxi and surrounding areas on 14 March 2022[J]. Meteor Mon, 49(12):1521-1531(in Chinese).

2022 年 3 月 14 日江西及周边地区 冰雹回波特征分析^{*}

田 白¹ 马中元² 陈鲍发³ 段和平⁴ 刘懿枢⁵ 岳 旭¹

1 江西省气象服务中心,南昌 330096

2 江西省气象科学研究所,南昌 330046

3 江西省景德镇市气象局,景德镇 333000

4 江西省气象灾害防御技术中心,南昌 330046

5 江西省鹰潭市气象局,鹰潭 335001

提 要: 为更好地开展对江西冰雹天气的监测预警工作,使用 MICAPS 数据、自动站数据、雷达拼图数据、雷达 PUP 产品数据、双多普勒雷达反演风场数据、冰雹灾情照片视频和微信冰雹信息反馈等资料,采用天气学、雷达气象学等原理与方法,对 2022 年 3 月 14 日江西及周边省份冰雹回波特征进行分析,结果表明:3 月 14 日,江西及周边省份多地出现冰雹,20 个区域站出现 $\geq 17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风,24 个区域站出现 $\geq 50.0 \text{ mm}$ 的降水,且雷暴大风和冷空气大风混合出现。200 hPa 高空流出区、500 hPa 南支槽和风速切变、850 hPa 低涡和切变线、地面辐合线和西南倒槽是冰雹天气主要系统;南昌订正后较大的 CAPE、较强逆温层、中层干区和低层湿区为冰雹天气发生提供了环境条件。冰雹以超级单体回波为主,有时孤立存在,有时存在于回波群、回波带之中;回波强度 $\geq 60 \text{ dBz}$,强回波面积最小 $\geq 18 \text{ km}^2$,最大 $\geq 180 \text{ km}^2$;30~60 dBz 强回波梯度距离 $\leq 6 \text{ km}$,具有明显的云砧前伸回波;冰雹回波生命史多数在 2 h 以上。在冰雹回波识别中,垂直积分液态水含量(VIL)是一个很重要的特征。江西冰雹单部雷达 VIL 在 35~60 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$,雷达拼图上 VIL 为 35~50 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在冰雹回波 2.5 km CAPPI 图上,冰雹回波强度均 $\geq 60 \text{ dBz}$,最大可达 65 dBz;在双多普勒雷达反演风场上多数回波中心具有中涡旋结构、侧面辐合风场、南北风场辐合等特征;有些个例风场比较凌乱。上述分析结果为江西冰雹天气的监测预警提供了分析依据。

关键词: 冰雹天气,超级单体,强回波面积,双多普勒雷达反演风场

中图分类号: P412, P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.040101

Analysis of Hail Echo Characteristics in Jiangxi and Surrounding Areas on 14 March 2022

TIAN Bai¹ MA Zhongyuan² CHEN Baofa³ DUAN Heping⁴ LIU Yishu⁵ YUE Xu¹

1 Jiangxi Meteorological Service Center, Nanchang 330096

2 Jiangxi Institute of Meteorological Sciences, Nanchang 330046

3 Jingdezhen Meteorological Office of Jiangxi Province, Jingdezhen 333000

4 Jiangxi Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Nanchang 330046

5 Yingtan Meteorological Office of Jiangxi Province, Yingtan 335001

Abstract: In order to better carry out the monitoring and early warning of hail weather in Jiangxi Province,

^{*} 中国科学院战略性先导科技专项(A类-XDA19040202)、国家自然科学基金项目(41975001、41675029)和江西省科学技术厅 2021 年省级科技计划项目(20212ABC03A29)共同资助

2022 年 12 月 22 日收稿; 2023 年 8 月 29 日收修定稿

第一作者:田白,主要从事气象信息服务和灾害防御技术研究. E-mail:13970911139@139.com

通讯作者:马中元,主要从事短时临近天气预报和预报技术研究. E-mail:mazhongyuan1@163.com

using MICAPS data, automatic weather station data, radar mosaic data, radar PUP product data, dual-Doppler radar retrieved wind field data, hail disaster photos and videos, and WeChat hail information feedback, as well as principles and methods such as meteorology and radar meteorology, this paper analyzes the characteristics of the hail echoes in Jiangxi and surrounding regions on 14 March 2022. The results show that hails occurred in many places in Jiangxi and surrounding regions, with strong winds of $\geq 17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ occurring at 20 regional stations, precipitation $\geq 50.0 \text{ mm}$ occurring at 24 regional stations, and the mixture of thunderstorm gales and cold air. The main impact systems of the hail weather were the 200 hPa outflow zone, the 500 hPa south branch trough and wind speed shear, the 850 hPa low vortex and shear line, the surface convergence line, and the southwest inverted trough. After the correction the larger CAPE value, the stronger inversion layer, the mid-level dry region, and the lower-level wet zone provided ambient conditions for the occurrence of hail weather in Nanchang. Hailstones are mainly composed of supercell echoes, which were sometimes isolated, and sometimes in echo groups and bands. Echo intensity was $\geq 60 \text{ dBz}$. The minimum strong echo area was $\geq 18 \text{ km}^2$, and the maximum $\geq 180 \text{ km}^2$. The strong echo gradient at a distance of 30–60 dBz was $\leq 6 \text{ km}$, with obvious cloud anvil forward echo. The life spans of hail echoes were mostly more than 2 hours. In hail echo identification, the vertically integrated liquid (VIL) was a very important feature. The VIL of a single radar of Jiangxi hail was between 35–60 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, and the VIL on the radar mosaic was 35–50 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$. On the CAPPI map of 2.5 km of hail echo, the hail echo intensity was $\geq 60 \text{ dBz}$, with a maximum of 65 dBz. Most echo centers of dual Doppler radar retrieved wind field had the characteristics of medium vortex structure, lateral convergence wind field, and convergence of north south wind field. Some individual wind fields were relatively messy. The above analysis results could provide an analytical basis for monitoring and early warning of hail weather in Jiangxi.

Key words: hail weather, supercell, strong echo area, dual Doppler radar retrieved wind field

引 言

2022 年 2—10 月,江西天气过程出现较多且复杂,如大雪、冰雹、大暴雨、雷暴大风、混合型大风、雷击、汛期连续性大暴雨、城市内涝、副热带高压边缘局地冰雹和高温、干旱天气等等。3 月 14 日,江西及周边地区(湖南、湖北、安徽、浙江等)出现冰雹,其范围较广、站数较多,但雹径大多都 $\leq 2 \text{ cm}$,过程以中等超级单体或微型超级单体影响为主。

国内外学者对冰雹天气研究颇多,例如:超级单体反射率因子垂直剖面呈现出典型的有界弱回波区(穹窿)、回波悬垂和回波墙。最大的回波强度出现在沿着回波墙的一个竖直的狭长区域,其值超过 70 dBz (郑媛媛等,2004)。超级单体内有一个垂直涡度约为 $8 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的龙卷式涡旋(tornadic vortex signature, TVS),高层悬挂回波下是有界弱回波区(bounded weak echo region, BWER)。超级单体的类型主要有经典超级单体、强降水超级单体以

及强降水超级单体组成的复合风暴(吴芳芳等,2010;2013)。超级单体在雷达速度图上表现出明显的中气旋特征,反射率因子图存在钩状回波,相应的垂直剖面具有回波悬垂、三体散射等特征(汤兴芝等,2022);垂直积分液态水含量(vertical integrated liquid, VIL)突增时,可以预示降雹开始;当回波强度 $\geq 50 \text{ dBz}$ 时,回波出现合并现象,强回波水平尺度较大,具有“指状”或“弓状”等回波结构,而当 VIL 超过 50 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,最易发生强对流天气(李浚河等,2016;杨淑华等,2014;敖泽建等,2017;马中元等,2009b;尹丽云等,2021)。飑线移动前方不断产生具有“前伸”、TBSS 和假象回波结构的超级单体回波群,这些超级单体是产生冰雹灾害的主要回波系统(马中元等,2014)。局地冰雹回波产品特征包括:中心强度达到 60~65 dBz,回波顶 ET 达到 9~12 km, VIL 达到 40~60 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。冰雹主要有三种回波形式:带上超级单体、带上强单体和超级单体(陈鲍发和马中元,2019)。在雷达拼图回波上,副热带高压边缘局地热雷雨发展、合并形成回波短带,或

是弓形回波带等短带回波,雷暴大风就发生在回波短带凸出部位前沿(高建平等,2019;郑丽君等,2022;段和平等,2021;Keene and Schumacher, 2013;马中元等,2009a;2011;夏文梅等,2021;黄中根等,2022)。回波产生初期为局地对流单体回波,通过不断新生单体和单体合并等方式,形成南北走向的回波短带,这种合并形成的回波短带发展旺盛时,会产生多站冰雹和雷暴大风天气。对 2022 年 3 月 14 日江西及周边地区冰雹天气进行分析,旨在为江西冰雹天气的监测预警提供更多分析依据。

1 资料来源

天气图资料来源于气象信息综合处理系统(MICAPS),地面气象站资料来源于江西气象信息内网平台;雷达回波资料来源于江西 WebGIS 雷达拼图平台[审图号:GS(2021)6375 号,底图无修改];单部雷达 PUP 产品来源于江西及周边雷达基数据;雷达风场反演使用中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室的“多型天气雷达显示分析平台”反演软件;灾情照片通过微信群、信息员、调查报告等渠道收集并利用雷达回波特征进行验证。

2 天气实况

2022 年 3 月 14 日,江西及周边地区出现入春以来首场冰雹天气过程,江西多地出现冰雹。由于冰雹天气尺度小,很难被记录到,因此大部分冰雹信息是通过当地信息员反馈和微信视频、照片得到,只有江西安义站(老观测站)记录到冰雹(图略)。这些信息和照片经过雷达回波强度、面积、梯度等对比分析确认。在一些人烟稀少的地方,难免存在漏记录冰雹的现象。也就是说由于观测的限制,一些地方冰雹没有被记录到。14 日 08:00(北京时,下同)至 15 日 08:00,江西 20 个区域站出现 $\geq 17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风天气,其中各有 2 个站出现 $\geq 20.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $\geq 24.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风天气。14 日 08:00 至 15 日 08:00,江西 24 个区域站出现 $\geq 50.0 \text{ mm}$ 的降水,其中,4 个站出现 $\geq 70.0 \text{ mm}$ 的降水。

3 月 14 日,锋前暖区的雷暴大风和锋后冷空气大风混合比较明显。14:00(图 1a),长江河谷九江口无冷空气活动,锋前暖区多地出现冰雹和雷暴大风天气。16:00(图 1b),随着冷空气的南压,冰雹和雷暴大风天气有所南压,九江口开始出现冷空气大

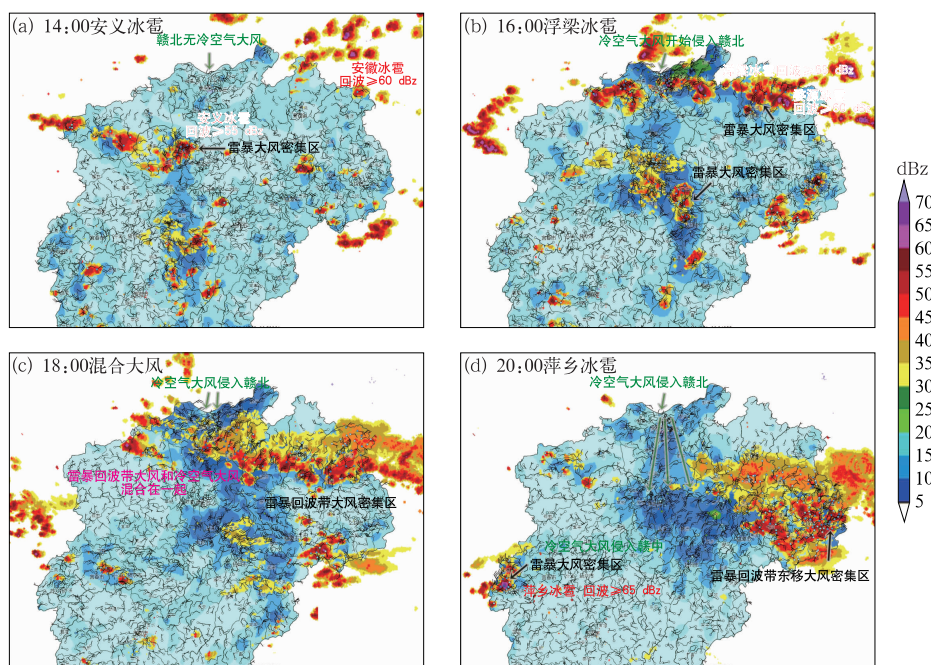


图 1 2022 年 3 月 14 日江西雷达拼图组合反射率产品(填色)与极大风速(风羽)叠加图

Fig. 1 Overlay of Jiangxi radar puzzle CR product (colored) and maximum wind speed (barb) on 14 March 2022

风。18:00(图 1c),冷空气继续南下,但风力不大,冷空气大风侵入与赣北雷暴回波带大风混合。20:00(图 1d),雷暴回波带东移并减弱,冷空气大风沿赣江灌入赣北赣中,萍乡又有冰雹回波发展。

江西温度锋区形成原因较多且复杂,主要包括两种情况:一种是西南气流强盛,午后太阳辐射增温,江西北部有小股冷空气南下或北部有较大面积降水时,在江西北部会形成较大尺度温度锋区;另一种是在西南气流中和午后增温情况下,暖区出现热雷雨,有时发展旺盛,造成地面较强降水时,降水冷却降温而形成尺度较小的温度锋区。温度锋区有利于对流回波的不断产生和回波系统的维持。

2022年3月14日10:00—22:00,江西闪电较密集,闪电维持时间长达12 h(图 2)。闪电维持时间里出现6次高峰,正好对应13:00—20:00的江西冰雹过程:①修水,②安义、浮梁,③浮梁,④婺源,⑤玉山,⑥萍乡。16:00左右闪电进入最高峰(10 min 闪电次数超过300次),而52次·(10 min)⁻¹是这次过程闪电次数均值,冰雹回波的闪电次数均超过均值。负闪次数与总闪次数基本一致,正闪次数较少。

3 天气形势与探空数据分析

由2022年3月14日08:00中尺度天气系统分析图(图 3a)可见,500 hPa高空低槽呈阶梯状,分别

在湖北西北部、赣西边界各有一个短波槽,槽前安徽中部至赣西北有一个温度槽,冷温槽超前于高度槽有利于强天气的发生。地面冷锋呈东西向,位于长江中下游附近,锋面附近的浙江、江苏、安徽、湖北中南部、江西北部500 hPa为显著干区($T - T_d \geq 27^\circ\text{C}$),与700 hPa江南大范围湿区在赣北交汇,在赣北形成显著“上干下湿”的结构。同时赣北低层为暖中心,与500 hPa冷槽在赣北重叠。20:00(图 3b),冷锋南压、湿区东移,500 hPa低槽移入赣东北,与位于赣东北上空的700 hPa、850 hPa切变线相交或重叠,0~6 km垂直风切变明显加大至 $16.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,有利于冰雹等强对流天气发生。

由14日08:00南昌探空(图 3c)可见,中层500~600 hPa有显著干层,与700 hPa附近及以下的水汽饱和区形成典型“喇叭口”结构,850 hPa和500 hPa温差为 27.4°C ,地面露点温度为 18°C ,对流有效位能(CAPE)达 $211.6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,对流抑制位能(CIN)为 $229.9 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,最大抬升指数(BLI)为 -3.1°C ,K指数为 37.4°C ,沙氏指数为 -2.18°C ,表明层结处在极不稳定状态,上下层温差大,低层水汽条件好并伴有一定强度的不稳定能量。冰雹融化层高度(湿球温度 0°C 到地面的高度)为3449 m, 0°C 层为3509 m, -20°C 层为7052 m,各指标有利于冰雹形成。20:00(图 3d),随着地面冷锋的南压,中低层切变线南压,午后冰雹能量释放,湿区东移和抬升,冰雹天气逐渐结束。

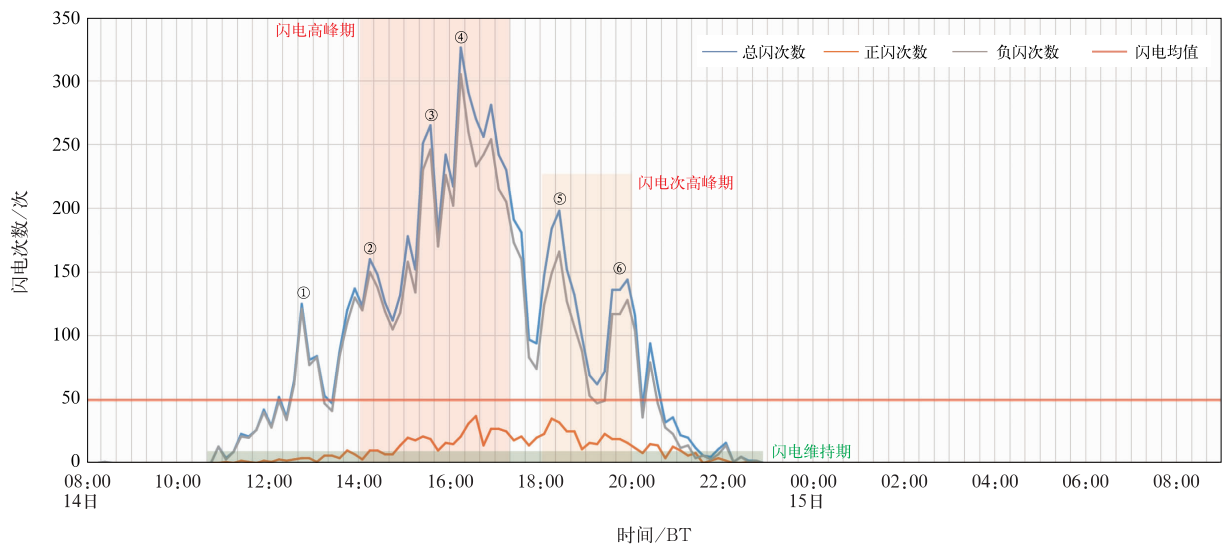


图2 2022年3月14—15日江西省10 min闪电次数分布

Fig. 2 Distribution of 10-min lightning frequency in Jiangxi Province from 14 to 15 March 2022

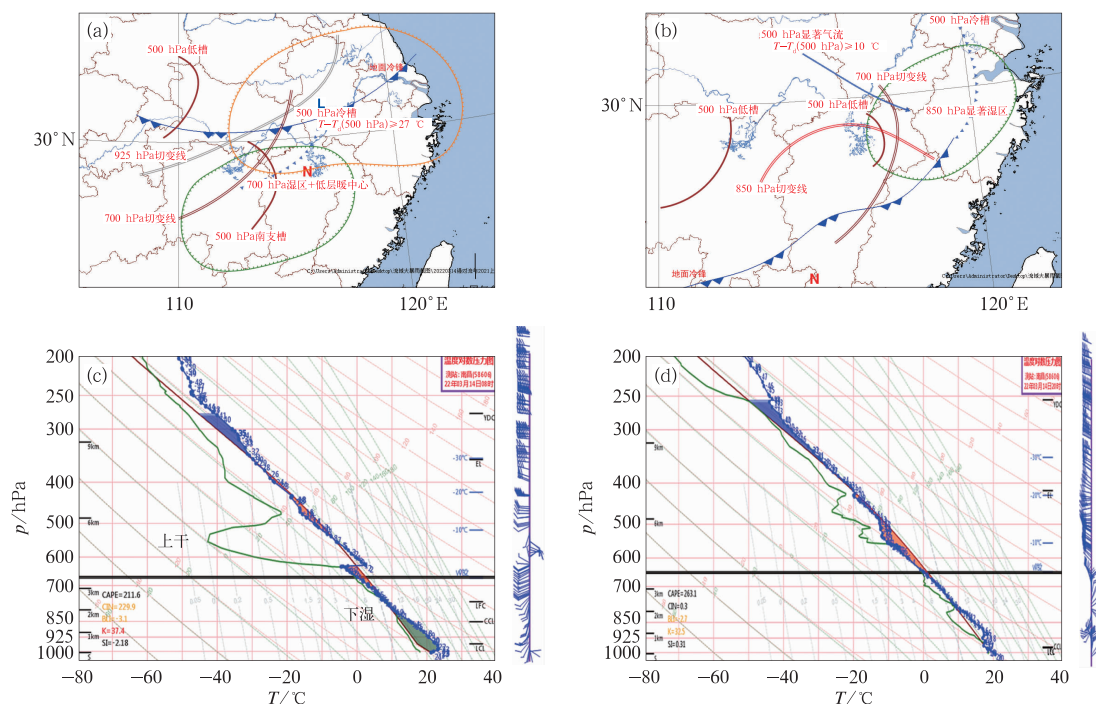


图 3 2022 年 3 月 14 日 (a,c)08:00 和 (b,d)20:00 (a,b) 中尺度天气系统与 (c,d) 南昌探空

Fig. 3 (a, b) Synoptic system analysis and (c, d) Nanchang $T\text{-}\ln p$ at (a, c) 08:00 BT and (b, d) 20:00 BT 14 March 2022

4 雷达拼图回波特征

4.1 16 次冰雹回波特征

2022 年 3 月 14 日,江西及周边地区出现了一次较大范围冰雹天气过程。针对此次过程的 16 次冰雹信息,截取江西及周边 24 部雷达拼图回波特征(图 4)进行分析。

江西冰雹主要以超级单体为主,其主要特征包括:存在 ≥ 60 dBz 的回波,有些典型超级单体中心还有 ≥ 65 dBz 的回波核(图 4a,4b,4d,4e,4h,4j,4l,4n,4p),最强可达 73 dBz(图 4g,4m),最小值为 61 dBz,平均值为 66 dBz。60 dBz 回波面积平均值为 63 km^2 ,最大为 184 km^2 (图 4b),最小(微型超级单体)为 18 km^2 (图 4c);65 dBz 回波面积平均值为 17 km^2 ,最大为 51 km^2 (图 4b),最小为 0 km^2 (图 4c);70 dBz 回波面积平均值为 1 km^2 ,最大为 12 km^2 (图 4b),最小为 0 km^2 (图 4c)。30~60 dBz 强回波梯度距离最大值为 5.66 km,最小值为 1 km,平均值为 3 km。云砧前伸回波,回波中心 30 dBz 线的面积直径与到回波边缘 10 dBz 之间距离的比

值,最大为 1:3.23,最小为 0,均值为 1:1。

4.2 安义冰雹回波演变

2022 年 3 月 14 日 13:40—13:50,江西安义站(老观测站)观测到直径 $\leq 2 \text{ cm}$ 的冰雹(图略)。冰雹维持时间较短(2 个雷达拼图时间 $\leq 20 \text{ min}$),回波形态由强回波单体演变为微型超级单体;经历了回波单体合并,单体发展加强形成微型超级单体,降雹后回波迅速减弱等阶段。13:00(图 5a),在江西的西北部(修水—安义),有一条对流单体排列不连续的雷暴回波带,带上至少存在 5~7 个 45 dBz 及以上强度的对流单体,其中在修水县城附近的强回波中识别出微型超级单体,回波强度 ≥ 60 dBz,强回波面积达到 34 km^2 ,修水县溪口镇出现冰雹。安义西北侧是正在发展中的强回波,强度达到 55 dBz。整条回波带上空被西北偏西气流覆盖,云砧回波朝偏东方向伸展。13:10(图 5b),修水识别出 2 处强回波,一处处在边界上,回波强度 ≥ 60 dBz,强回波面积只有 23 km^2 ,有可能出现冰雹(无信息可证);另一处在修水县城附近溪口镇,为上个时次冰雹的继续,回波强度 ≥ 60 dBz,强回波面积达到 37 km^2 。13:20(图 5c),识别出来的 2 处强回波维持少变(冰

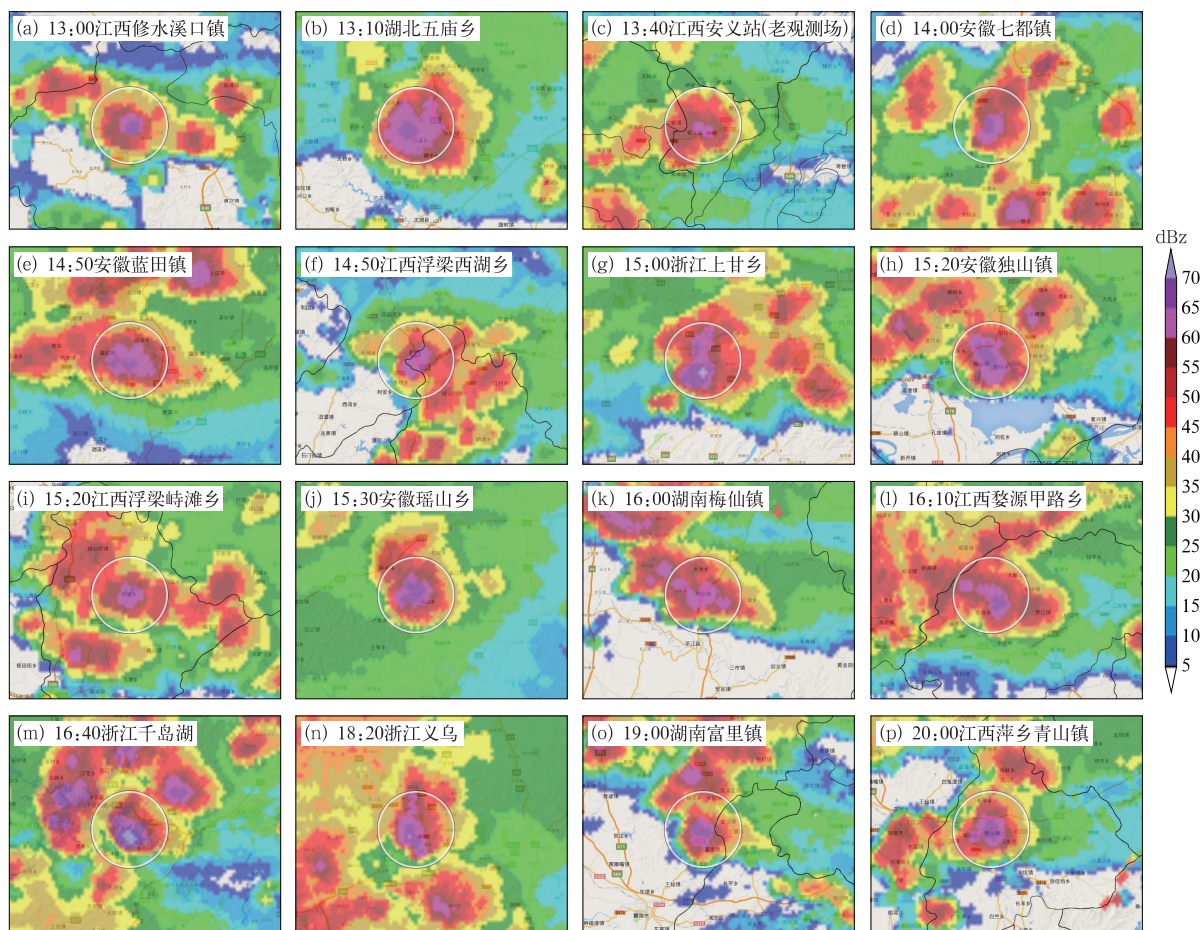


图4 2022年3月14日江西及周边地区冰雹雷达拼图组合反射率回波特征

Fig. 4 Composite reflectively echo characteristics of the hail radar mosaic in Jiangxi and surrounding areas on 14 March 2022

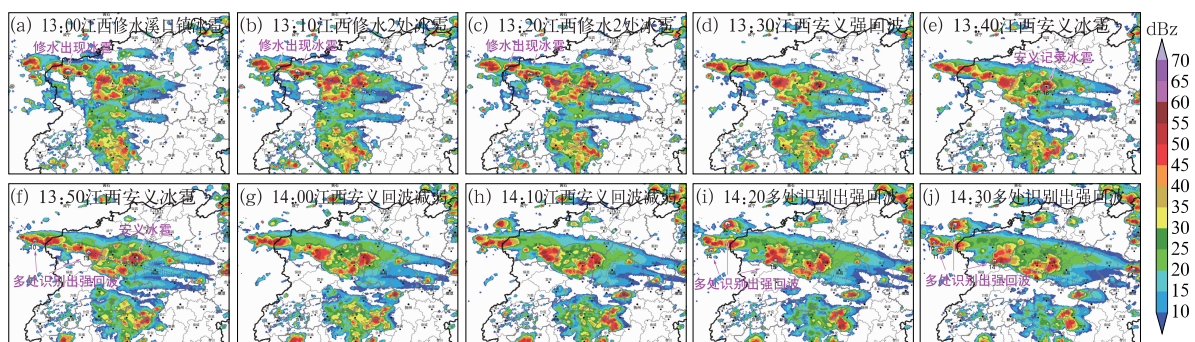


图5 2022年3月14日江西安义冰雹回波演变

Fig. 5 Evolution of hail echo at Anyi Station in Jiangxi Province on 14 March 2022

雹维持), 回波强度 ≥ 60 dBZ, 强回波面积分别达到 15 km^2 、 24 km^2 , 比上个时次有所减小。13:30(图5d), 修水县冰雹结束, 回波强度下降到 ≤ 55 dBZ, 但回波带保持近似东西走向, 这与850 hPa和700 hPa切变线

位置相关, 云砧前伸回波也与200 hPa和100 hPa风向一致。此时安义受55 dBZ强回波单体影响。13:40(图5e), 安义县城强回波发展成为微型超级单体, 回波强度 ≥ 60 dBZ, 强回波面积达到 18 km^2 ,

江西安义站(老观测站)记录到冰雹,从照片上看,冰雹直径 ≤ 2 cm。13:50(图 5f),安义冰雹回波强度保持在 60 dBz,强回波面积减小到 10 km²,安义县冰雹停止。回波带上其他地方分别出现强回波,但没有冰雹信息。14:00—14:10(图 5g, 5h),回波带上回波强度有所减弱,在 55 dBz 内,冰雹回波移出安义县。14:20—14:30(图 5i, 5j),回波带上西端(修水县境内、湖南境内)又有多个微型超级单体发展,对于是否出现冰雹尚无信息论证。

由上可见,3 月 14 日冰雹在回波识别时存在以下特点:回波强度均 ≥ 60 dBz,强盛时超过 60 dBz;强回波面积的大小关系到是否降冰雹,此次修水 2 次冰雹和安义冰雹的强回波面积分别为 34、24、18 km²,最小为 18 km²。说明江西 3 月冰雹起点比较低,在有利天气形势和环境条件下,非常容易形成冰雹。根据回波强度、强回波面积对冰雹生成进行判断比较快捷实用,在短时临近预报中还需考虑利用强回波梯度和云砧回波的伸展比值等做综合分析。

4.3 雷达组合反射率回波强度分析

2022 年 3 月 14 日,由江西及周边地区 16 次冰雹雷达回波组合反射率 10 min 间隔的最大反射率值(图 6)可见,冰雹发生在 60 dBz 及以上回波中,有些回波可以达到 65 dBz 或 70 dBz,最大为 73 dBz;冰雹回波的生命史多数在 2 h 左右,少数为 3 h,其中一次达 4 h,没有出现 5 h 生命史;以产生冰雹基

准时间为中心,之前出现 ≥ 60 dBz 回波较少,之后则较多,说明冰雹出现后能维持数小时;冰雹的回波强度都有缓慢上升和下降的过程,尤其是 2 h 生命史的冰雹回波,上升和下降曲线比较密集。

由此可见,此次江西冰雹以超级单体回波为主,超级单体回波有时孤立存在,有时又存在于回波群、回波带之中。超级单体回波强度 ≥ 60 dBz,有时 ≥ 70 dBz;强回波(≥ 60 dBz)面积较大,均在 ≥ 18 km²及以上,最大可达 180 km²及以上;都具有强回波梯度,30~60 dBz 距离 ≤ 6 km;回波发展高度都超过 12 km,具有明显的云砧回波结构,当周围有其他回波产生时,云砧回波往往被遮挡。冰雹发生在 ≥ 60 dBz 回波中,生命史多数在 2 h 以上,冰雹产生之前的回波强度较少出现 ≥ 60 dBz,之后出现 ≥ 60 dBz 回波较多,冰雹回波的强度值都有缓慢上升和下降的过程。

5 雷达 PUP 产品特征

5.1 部分 PUP 参数

雷达 PUP 参数是识别冰雹回波的重要指标与特征,列举 2022 年 3 月 14 日 6 次个例(主要为江西范围的冰雹)PUP 产品,统计参数的最大值、最小值和平均值(表 1),这些指标对识别和判断江西冰雹回波有重要意义。

表 1 中组合反射率平均值均大于等于 60 dBz,

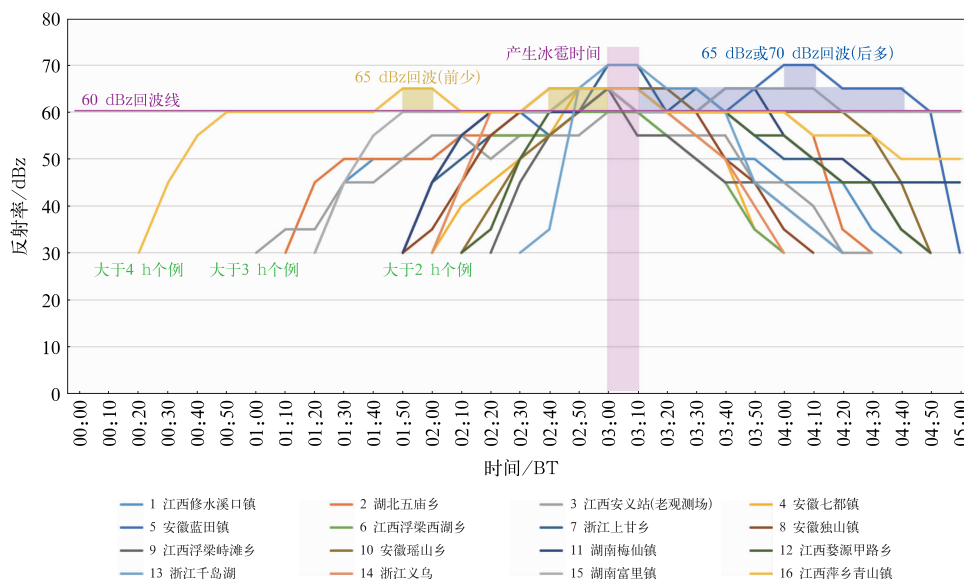


图 6 2022 年 3 月 14 日江西冰雹个例 10 min 回波强度演变

Fig. 6 The evolution of 10-min echo intensity of hail in Jiangxi Province on 14 March 2022

ET 都在 9 km 以上,VIL 平均值为 $60\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,基本径向速度处于 $-19\sim19\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,这些参数有利于识别冰雹回波。

5.2 垂直积分液态水含量(VIL)

在冰雹回波识别中,VIL 的大小反映了回波中是

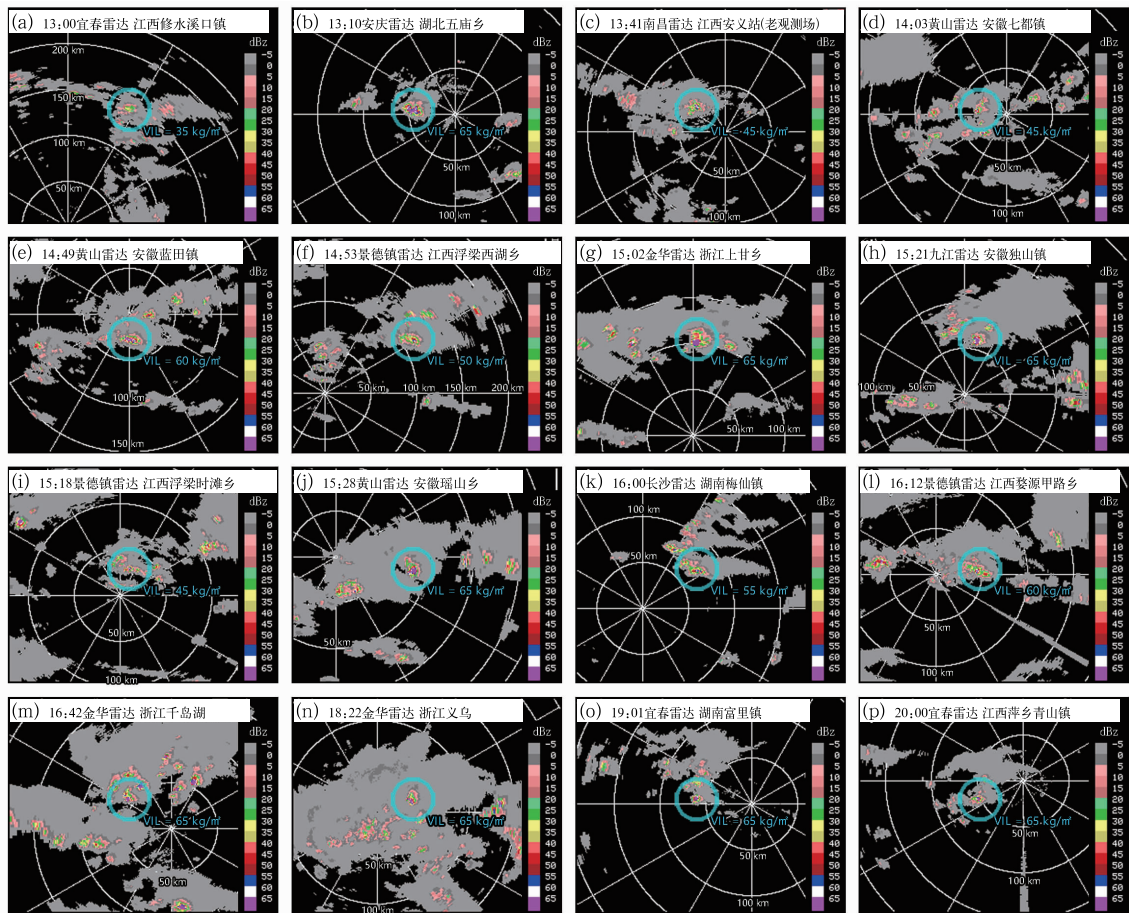
否存在冰雹颗粒,江西冰雹回波基本为 $35\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\leq\text{VIL}<60\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,且具有较大面积。VIL 大小(强度和面积)代表着不同冰雹的大小。一般来说, $\text{VIL}\geq60\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,伴随较大冰雹(直径 $\geq5\text{ cm}$); $35\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\leq\text{VIL}<45\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,冰雹较小(直径 $\leq2\text{ cm}$);而 $45\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\leq\text{VIL}<60\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,冰雹直径适中(图7)。江

表 1 2022 年 3 月 14 日部分冰雹雷达 PUP 参数统计

Table 1 Statistical table of radar PUP parameters of some hails on 14 March 2022

雷达站	时间/BT	CR/ dBz	ET/ km	VIL/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	V0.5/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	RCS/ dBz	60 dBz/ km	VCS/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	冰雹落区
南昌	13:41	60	9	60	10	60	5.0	10	安义(老观测站)
景德镇	14:41	65	10	60	-19	65	6.2	-19	浮梁西湖乡
景德镇	14:47	65	9	60	-10	60	5.8	-10	浮梁经公桥
景德镇	15:12	65	11	60	-10	65	5.6	-10	浮梁峙滩乡
安庆	14:58	65	10	60	19	65	6.3	19	安徽华亭镇
黄山	15:00	60	10	60	-13	60	6.0	-13	浙江上甘乡
最大值		65	11	60	19	65	6.3	19	
最小值		60	9	60	-19	60	5.0	-19	
平均值		63.3	9.8	60	-3.8	62.5	5.8	-3.8	

注:CR:组合反射率,ET:回波顶,VIL:垂直积分液态水含量,V0.5:0.5°仰角基本速度,RCS:反射率因子垂直剖面的最大值,60 dBz:回波顶高度,VCS:径向速度垂直剖面最大值。



注:圆圈:超级单体。

图 7 2022 年 3 月 14 日江西及周边地区冰雹个例垂直积分液态水含量回波特征

Fig. 7 Echo characteristic of vertically integrated liquid water content for hail in Jiangxi and surrounding areas on 14 March 2022

西很少存在冰雹 $VIL < 35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的个例。

5.3 反射率因子垂直剖面(RCS)

通过 RCS 可观测冰雹回波的垂直结构(图 8)。16 次冰雹的垂直回波除第一次回波(修水溪口镇)为 55 dBz 外,其余 15 次回波中心反射率因子都达到 60 dBz 以上,有多次回波强度达到 65 dBz。55 dBz 回波顶高大多数在 6 km 以上,最高达 8.8 km(浙江上甘乡),最低为 4 km(安徽七都镇),平均为 6.1 km。有多处冰雹回波伴有“虚假旁瓣尖顶回波”,这时冰雹的强散射使雷达电磁波的旁瓣探测到回波。多数冰雹回波没有出现悬挂、穹窿等回波结构,表现为直上直下的强回波墙,个别回波可以分析出悬挂、回波墙等特征。这次冰雹过程垂直结构特征并不明显,主要与发展并不十分旺盛(只产生一些小冰雹)和早春热对流偏弱等因素有关。从图 8 可见,只有少部分超级单体具有中气旋结构,大部分超级单体中气旋结构并不明显。

综上所述,在冰雹回波识别中,VIL 是一个很重要的特征。江西冰雹单部雷达 VIL 在 $35 \sim 65 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (多为 $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$);雷达拼图上 VIL 基本 $\geq 35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,并且 VIL 需要具有一定面积。雷达拼

图的 VIL 为多站平均值,比单部雷达 VIL 偏弱;回波强度均在 $\geq 55 \text{ dBz}$ 及以上,甚至达到 65 dBz;55 dBz 回波顶高大多数在 6 km 以上,平均为 6.1 km;冰雹回波伴有“虚假旁瓣尖顶回波”,多数冰雹回波没有出现悬挂、穹窿等回波结构,反射率因子表现为直上直下强回波墙。

6 冰雹回波双多普勒雷达风场分析

2022 年 3 月 14 日,江西及周边地区 16 次冰雹收集到 10 次双多普勒雷达反演风场图片(图 9)。这 10 次双多普勒雷达风场(每 500 m 一层)图中,2.5 km 等高平面显示 CAPPI 高度比较有代表性。13:10(图 9a),湖北五庙乡冰雹回波强度达 65 dBz,回波中心具有中涡旋结构;13:41(图 9b),江西安义站(老观测站)冰雹回波强度达 65 dBz,回波中心侧面具有辐合风场,中涡旋结构不明显;14:03(图 9c),安徽七都镇冰雹回波强度达 60 dBz,回波存在于南北风场辐合气流之中;14:49(图 9d),安徽蓝田镇冰雹回波强度达 65 dBz,回波中心具有弱中涡旋结构;14:53(图 9e),江西浮梁西湖乡冰雹回波强度达 60 dBz,回波中心具有弱中涡旋结构;15:02(图 9f),

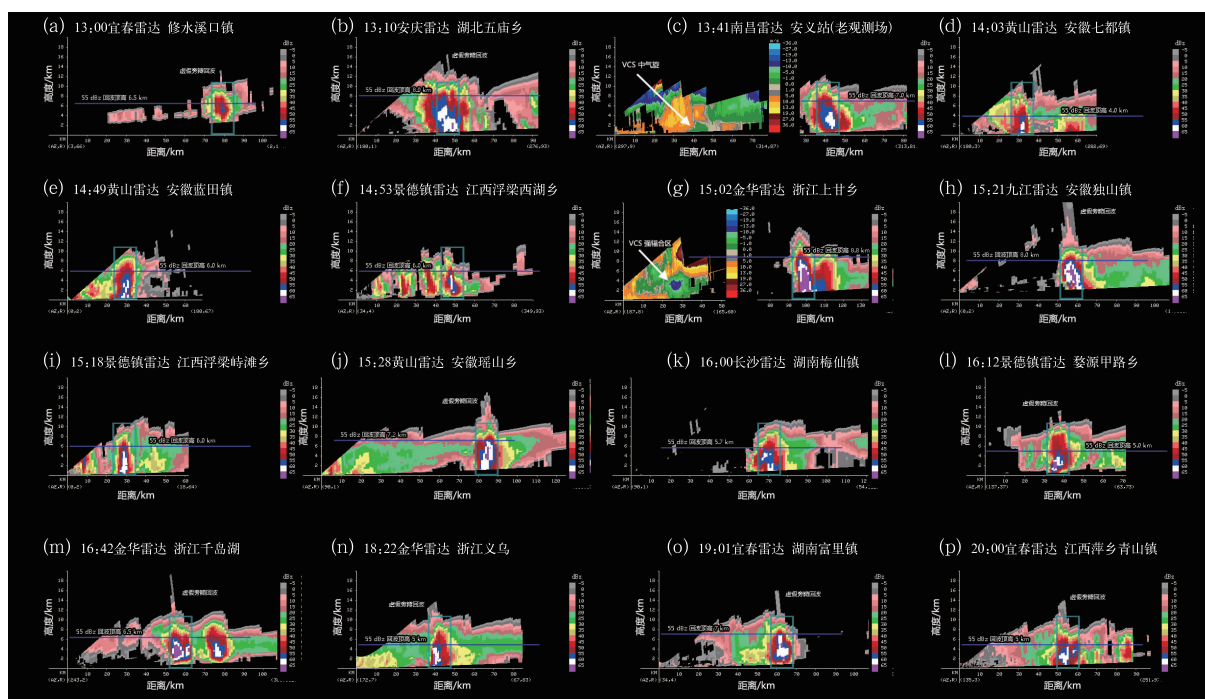


图 8 2022 年 3 月 14 日江西及周边地区冰雹个例反射率因子垂直剖面回波特征

Fig. 8 Echo characteristic of reflectivity factor vertical profile for hail in Jiangxi and surrounding areas on 14 March 2022

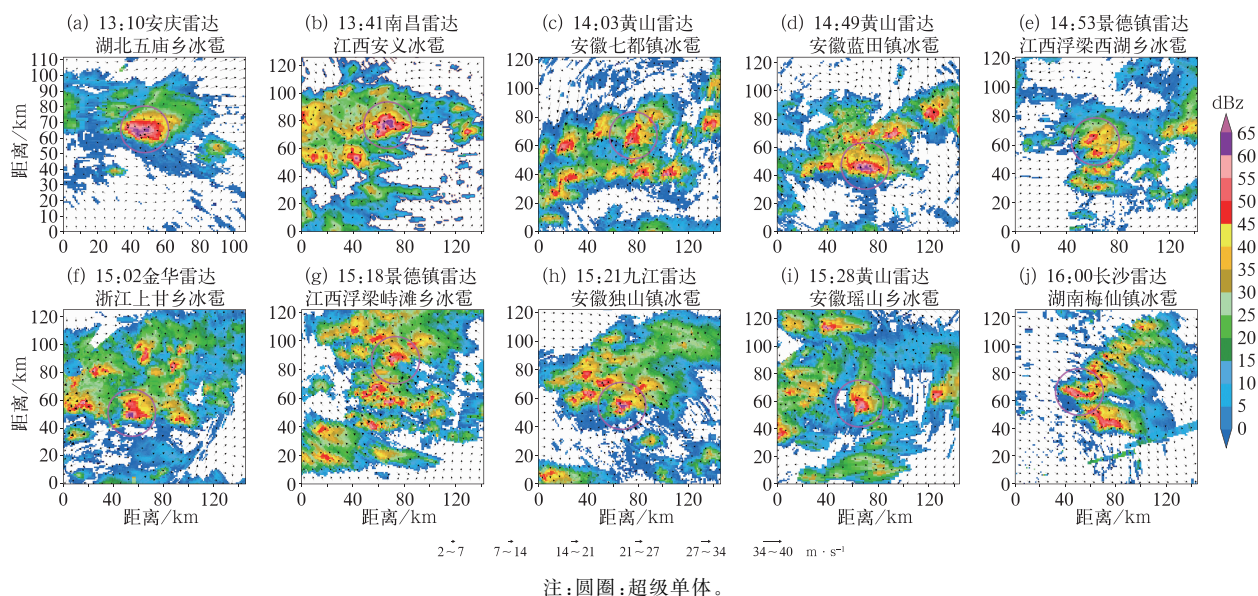


图 9 2022 年 3 月 14 日江西及周边地区 10 次冰雹个例双多普勒雷达反演风场(风矢)和反射率因子(填色)特征
Fig. 9 Characteristic of double multiple wind field (wind vector) and reflectivity factor (colored) for 10 hailstorms in Jiangxi and the surrounding areas on 14 March 2022

浙江上甘乡冰雹回波强度达 65 dBz, 回波中心侧面具有弱中涡旋结构; 15:18(图 9g), 江西浮梁峙滩乡冰雹回波强度达 60 dBz, 回波区具有辐合风场结构; 15:21(图 9h), 安徽独山镇冰雹回波强度达 65 dBz, 回波区有中涡旋风场结构; 15:28(图 9i), 安徽瑶山乡冰雹回波强度达 60 dBz, 回波区风场较凌乱; 16:00(图 9j), 湖南梅仙镇冰雹回波强度达 60 dBz, 回波中心移动前方有较弱的辐合。

由图 9 可见, 冰雹回波双多普勒雷达反演风场和 2.5 km CAPPI 图上, 冰雹回波强度都 ≥ 60 dBz, 最大可达 65 dBz; 多数回波中心具有中涡旋结构、侧面辐合风场、南北风场辐合等特征; 个别风场比较凌乱。

7 结论与讨论

2022 年 3 月 14 日, 江西及周边地区出现入春以来首场冰雹天气过程。江西多地出现冰雹, 有 20 个区域站出现 $\geq 17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风天气, 24 个区域站出现 $\geq 50.0 \text{ mm}$ 的降水。锋前暖区的雷暴大风和锋后冷空气大风混合(同时出现)比较明显。200 hPa 为一致的偏西气流, 高空出流明显; 500 hPa 南支槽前江西中北部形成较强的风速切变; 850 hPa 有低涡、切变线, 无急流; 地面的辐合线、西南倒槽、地面增温明显, 有冷空气活动。在南昌探空图上:

CAPE 较大, 经过订正后达到 $1320 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$; 630 hPa 存在较强逆温层; 650~470 hPa 为较干区, 650 hPa 以下为湿区; 0~6 km 垂直风切变较弱。

江西冰雹以超级单体回波为主, 超级单体回波有时孤立存在, 有时存在于回波群、回波带之中。超级单体回波强度 ≥ 60 dBz, 有时 ≥ 70 dBz; ≥ 60 dBz 的回波面积较大, 均在 18 km^2 及以上, 最大可在 180 km^2 及以上。

江西冰雹单部雷达 VIL 在 $35 \sim 65 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (多为 $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$); 雷达拼图上 VIL 基本在 $35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 及以上。RCS 上, 回波强度均在 55 dBz 及以上, 甚至达到 65 dBz; 55 dBz 回波顶高大多数在 6 km 以上, 平均为 6.1 km; 冰雹回波伴有“虚假旁瓣尖顶回波”, 多数冰雹回波没有出现悬挂、穹窿等回波结构, 反射率因子表现为直上直下强回波墙。

冰雹回波双多普勒雷达反演风场和 2.5 km CAPPI 图上, 回波强度均在 60 dBz 及以上, 最大可达 65 dBz; 多数回波中心具有中涡旋结构、侧面辐合风场、南北风场辐合等特征; 个别风场比较凌乱。

2022 年 3 月 14 日江西及周边地区冰雹范围比较广, 涉及多个省份, 重要特征均由超级单体(弱超级单体)产生。在江南 3 月春季, 微型超级单体常常产生直径 $\leq 2 \text{ cm}$ 的冰雹, 与经典超级单体相比较, 回波识别难度更大, 有待于更多个例的检验和探索。

参考文献

- 敖泽建,傅朝,蒋友严,等,2017.甘南高原“4·15”冰雹天气的多普勒雷达特征分析[J].沙漠与绿洲气象,11(2):27-33. Ao Z J, Fu Z, Jiang Y Y, et al, 2017. Analysis of Doppler radar characteristics of “4·15” hail in Gannan Plateau[J]. Desert Oasis Meteorol, 11(2): 27-33 (in Chinese).
- 陈鲍发,马中元,2019.江西局地冰雹 WebGIS 雷达拼图回波特征分析[J].气象与环境科学,42(2):104-114. Chen B F, Ma Z Y, 2019. Echo characteristic analysis of WebGIS radar mosaic on hailstone in Jiangxi[J]. Meteor Environ Sci, 42(2): 104-114 (in Chinese).
- 段和平,马中元,湛芸,等,2021.江西5月飑线天气雷达回波特征分析[J].沙漠与绿洲气象,15(6):75-82. Duan H P, Ma Z Y, Chen Y, et al, 2021. Radar echo characteristics of squall line weather in Jiangxi in May[J]. Desert Oasis Meteorol, 15(6): 75-82 (in Chinese).
- 高建平,马中元,吴才明,等,2019.2017年8月江西上高雷暴大风雷达回波特征分析[J].沙漠与绿洲气象,13(2):55-62. Gao J P, Ma Z Y, Wu C M, et al, 2019. Radar echo characteristics of high thunderstorm gale in Jiangxi Province in August 2017[J]. Desert Oasis Meteorol, 13(2): 55-62 (in Chinese).
- 黄中根,马中元,湛芸,等,2022.江西两次超级单体风暴雷达回波特征分析[J].气象与环境科学,45(5):39-48. Huang Z G, Ma Z Y, Chen Y, et al, 2022. Analysis of radar echo characteristics of two supercell storms in Jiangxi Province[J]. Meteor Environ Sci, 45(5): 39-48 (in Chinese).
- 李浚河,耿建军,张浙妍,等,2016.2013年北京地区一次强对流天气过程分析[J].沙漠与绿洲气象,10(2):25-30. Li J H, Geng J J, Zhang X Y, et al, 2016. Analysis of one severe convective weather process with hails in 2013 in Beijing[J]. Desert Oasis Meteorol, 10(2): 25-30 (in Chinese).
- 马中元,苏俐敏,湛芸,等,2014.一次强飑线及飑前中小尺度系统特征分析[J].气象,40(8):916-929. Ma Z Y, Su L M, Chen Y, et al, 2014. Characteristics of mesoscale and microscale systems during a severe squall line process[J]. Meteor Mon, 40(8): 916-929 (in Chinese).
- 马中元,许爱华,陈云辉,等,2009a.江西灾害性强雷电天气的雷达回波特征[J].自然灾害学报,18(5):16-23. Ma Z Y, Xu A H, Chen Y H, et al, 2009a. Radar echo characteristics of disastrous strong thunder and lightning weather in Jiangxi[J]. J Nat Disasters, 18(5): 16-23 (in Chinese).
- 马中元,许爱华,贺志明,等,2009b.九江地区一次无降水致灾大风天气过程分析[J].气象与减灾研究,32(3):52-56. Ma Z Y, Xu A H, He Z M, et al, 2009b. Analysis of a rainless damaging strong wind process[J]. Meteorol Disaster Reduct Res, 32(3): 52-56 (in Chinese).
- 马中元,叶小峰,张瑛,等,2011.江西三类致灾大风天气活动与回波特征分析[J].气象,37(9):1108-1117. Ma Z Y, Ye X F, Zhang Y, et al, 2011. Analysis on three types of hazard wind activities and echo characteristics in Jiangxi[J]. Meteor Mon, 37(9): 1108-1117 (in Chinese).
- 汤兴芝,俞小鼎,熊秋芬,等,2022.鄂西南冬末一次罕见的强冰雹过程分析[J].气象,48(5):618-632. Tang X Z, Yu X D, Xiong Q F, et al, 2022. Analysis of a rare severe hailstorm event in Southwest Hubei at the end of winter[J]. Meteor Mon, 48(5): 618-632 (in Chinese).
- 吴芳芳,俞小鼎,王慧,等,2010.一次强降水超级单体风暴多普勒天气雷达特征[J].大气科学学报,33(3):285-298. Wu F F, Yu X D, Wang H, et al, 2010. A HP supercell case study with the data of Doppler weather radar detection[J]. Trans Atmos Sci, 33(3): 285-298 (in Chinese).
- 吴芳芳,俞小鼎,张志刚,等,2013.苏北地区超级单体风暴环境条件与雷达回波特征[J].气象学报,71(2):209-227. Wu F F, Yu X D, Zhang Z G, et al, 2013. A study of the environmental conditions and radar echo characteristics of the supercell-storms in northern Jiangsu[J]. Acta Meteor Sin, 71(2): 209-227 (in Chinese).
- 夏文梅,马中元,慕瑞琪,等,2021.江西副高边缘雷暴大风雷达拼图回波特征分析.大气科学学报,44(5):717-726. Xia W M, Ma Z Y, Mu R Q, et al, 2021. Analysis of characteristics of mesoscale thunderstorm gale echo on the edge of subtropical high[J]. Trans Atmos Sci, 44(5): 717-726 (in Chinese).
- 杨淑华,梁进秋,张玉芳,等,2014.冰雹天气的多普勒雷达特征统计分析[J].自然灾害学报,23(3):101-106. Yang S H, Liang J Q, Zhang Y F, et al, 2014. Statistical characteristics analysis of Doppler radar of hail weathers[J]. J Nat Disasters, 23(3): 101-106 (in Chinese).
- 尹丽云,梅寒,张腾飞,等,2021.云南中部一次出现多个超级单体雹暴的强对流过程环境场和雷达回波特征[J].气象,47(4):424-438. Yin L Y, Mei H, Zhang T F, et al, 2021. Environmental conditions and radar characteristics of a severe convective hailstorm with multiple supercells in Central Yunnan Province[J]. Meteor Mon, 47(4): 424-438 (in Chinese).
- 郑丽君,马中元,黄京平,等,2022.江西东部走廊地形对边界层风场及天气的影响[J].沙漠与绿洲气象,16(3):30-37. Zheng L J, Ma Z Y, Huang J P, et al, 2022. Influence of topography of Jiangxi eastern corridor on boundary layer wind field and weather[J]. Desert Oasis Meteorol, 16(3): 30-37 (in Chinese).
- 郑媛媛,俞小鼎,方翀,等,2004.一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析[J].气象学报,62(3):317-328. Zheng Y Y, Yu X D, Fang C, et al, 2004. Analysis of a strong classic supercell storm with Doppler weather radar data[J]. Acta Meteor Sin, 62(3): 317-328 (in Chinese).
- Keene K M, Schumacher R S, 2013. The bow and arrow mesoscale convective structure[J]. Mon Wea Rev, 141(5): 1648-1672.

(本文责编:王婷波 何晓欢)