2022年3月14日江西及周边地区冰雹回波特征分析¹

田白1 马中元2 陈鲍发3 段和平4 刘懿枢5 岳旭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;
 景德镇市气象局,江西 景德镇 333000; 4. 江西省气象灾害防御技术中心,南昌 330046;
 5. 鹰潭市气象局,江西 鹰潭 335001

摘要: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 日江西及周边省冰雹回波特征进行分析,结果表明、① 3 月 14 日, 江西及周边省多地出现冰雹,20 个区域站出现≥17.2 m/s 的大风,24 个区域站出现≥50.0 mm 隆水,且雷 暴大风和冷空气大风混合出现。② 200 hPa 高空出流区、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 CAPE 值订正后较大、较强递温层、中层干区和低 层湿区为冰雹天气发生提供了环境条件。③ 冰雹以超级单体(supercel1)回波为主,有时孤立存在,有 时在回波群、回波带之中;回波强度≥60 dBz;强回波面积最小≥18 km²,最大≥180 km²;30~60 dBz 距 离强回波梯度≤6 km,具有明显的云砧前伸回波;冰雹回波生命史多数为2 小时以上。④ 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 kg/m² 之间,雷达拼 图上 VIL 35~50 kg/m²。⑤ 冰雹回波 2.5 km 的 CAPPI 图上,冰雹回波强度都≥60 dBz,最大可达 65 dBz; 双多风场(双多普勒雷达反演风场 dual-Doppler wind field)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; 双多风场

Analysis of hail echo characteristics in Jiangxi and surrounding areas on March 14, 2022

Tian Bai¹ Ma Zhongyuan² Chen Baofa³ Duan Heping⁴ LIU Yishu⁵ Yue Xu¹

Jiangxi Meteorological Service Center Nanchang 330096, China;

2. Jiangxi Institute of meteorological science, Nanchang 330046, China;

3. Jingdezhen Meteorological Bureau, Jingdezhen, Jiangxi 333000, China;

4. Jiangxi Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Nanchang 330046, China;

5. Yingtan Meteorological Bureau, Yingtan, Jiangxi 335001, China

Abstract: In order to better carry out the monitoring and early warning of hail weather in Jiangxi Province, using MICAPS data, automatic station data, radar mosaic data, radar PUP product data, dual multiple wind field data, hail disaster photos and videos, and WeChat hail information feedback, and using principles and methods such as meteorology and radar meteorology, the characteristics of the echo of hail in Jiangxi and surrounding provinces on March 14, 2022 were analyzed. The results showed that: (1) March 14, Hailstones have occurred in many

基金项目: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)、国家自然科学基金项目 (41675029)、江西省科学技术厅 2021 年省级科技计划项目"江西省 03 专项及 56 项目"(20212ABC03A29)共同资助.

第一作者:田白(1971-),男,大学,高级工程师,从事气象信息服务和灾害防御技术研究. E-mail: 13970911139@139.com. 通信作者:马中元(1954-),男,大学,高级工程师,从事短临天气预报和预报技术研究. E-mail: mazhongyuan1@163.com. 电话: 18970011353

places in Jiangxi and surrounding provinces, with strong winds of ≥ 17.2 m/s occurring at 20 regional stations, and precipitation of ≥50.0 mm occurring at 24 regional stations, with thunderstorm gales and cold air gales mixed The main systems of hail weather are the 200 hPa high altitude 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 of the CAPE value in Nanchang, the larger and stronger inversion layer, the middle dry region, and the lower wet region provide environmental conditions for the occurrence of hail weather Hailstones are mainly composed of supercell echoes, sometimes isolated, and sometimes in echo groups and bands; Echo intensity ≥ 60 dBz; The minimum strong echo area is ≥ 18 km², and the maximum is $\geq 180 \text{ km}^2$; The strong echo gradient at a distance of 30 to 60 dBz is $\leq 6 \text{ km}$, with obvious cloud anvil forward echo; The life history of hail echoes is mostly more than 2 hours. (4) In hail echo recognition, the vertically integrated liquid water content VIL is a very important feature. The VIL of a single Jiangxi hail radar is between 35 and 60 kg/m², and the VIL on the radar mosaic is 35 to 50 kg/m². (5) On the CAPPI map of 2.5 km of hail echo, the hail echo intensity is ≥ 60 dBz, with a maximum of 65 dBz; Most echo centers on the dual Doppler wind field (dual Doppler radar retrieved wind field) have characteristics such as mid vortex structure, lateral convergence wind field, and convergence of north south wind field; Some individual wind farms are relatively messy. The above analysis results provide an analytical basis for monitoring and early warning of hail weather in Jiangxi.

Key words: Hail weather; supercell; Strong echo area; Double wind field

2022年2-10月,江西天气过程出现较多且复杂。2月的大雪;3月的冰雹;4月大暴雨、雷暴大风、混合型大风;5月雷击事件;6月汛期连续性大暴雨、城市内涝;7-8月的两次副高边缘局地冰雹和8-10月的高温、干旱天气等等。3月14日,江西及周边(湖南、湖北、安徽、浙江等省)冰雹范围比较广,站数较多,但雹径大多都≤2 cm,以中等超级单体或微型超级单体影响为主。

国内外专家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)。超级单体其内有一个垂直涡度约为 8×10⁻²s⁻¹的龙卷式涡旋特征(tornadic vortex signature, TVS),高层悬挂回波下面是 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 在雷达速度图上反映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;垂直积分液态水含量 VIL 突增时,可以预示降雹开始;当回 波强度≥50 dBz、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,以及 VIL 超过 50 kg/m²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, 2009a)。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:中心强度达到 60~65 dBz、回波顶 ET 达到 9~12 km、垂 直积分液态含水量 VIL 达到 40~60 kg•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, 副高边缘局地热雷雨 发展、合并形成回波短带,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,2009b,2011;夏文梅等,2021;黄中根等,2022)。回波产生初期是局地对流 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。上述研究成果对提高江西冰雹天 气的预警预报能力有指导意义。

本文使用 MICAPS 天气图、江西气象自动站资料、江西 WebGIS 雷达拼图资料、单部雷达 PUP 产品和灾情调查反馈照片等资料,对 2022 年 3 月 14 日江西及周边省冰雹天气进行分析, 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 MICAPS 平台、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); 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"多型天气雷达显示分析平台"反演软件(胡志群等,2019—2022); 灾情照片来源 于微信群、信息员、调查报告等渠道并通过雷达回波特征进行验证。全文插图使用 Photoshop 软件拼制组图(节省版面篇幅)。全文使用北京时间(BT)。

2 天气实况

冰雹实况 2022年3月14日,江西及周边省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。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,只有安义(老观测站)记录到冰雹(图略)。这些信息和照片需经过雷达回波强度、面积、梯度等因素进行对比分析后确定。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。极大风速 3月14日08时—3月15日08时,江西20站(区域站)出现≥17.2 m/s的大风天气(2站(区域站)≥20.8 m/s,2站(区域站)≥24.5 m/s的大风天气)。**累计雨量** 3月14日08时—3月15日08时,江西24站(区域站)出现≥50.0 mm 降水(4站(区域站)出现≥70.0 mm 降水)。

混合大风 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,这时,九江口开始出现冷空气大风。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在一起。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;这时,萍乡又有冰雹回波发展。

温度锋区 江西温度锋区形成原因较多且复杂,主要有两种情况: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。

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



图 1 2022 年 3 月 14 日江西雷达拼图 CR 产品与极大风速叠加图 (a) 14:00 安义冰雹 (b) 16:00 浮梁冰雹 (c) 18:00 混合大风 (d) 20:00 萍乡冰雹 Figure 1 Overlay of Jiangxi Radar Puzzle CR Product and Maximum Wind Speed on March 14, 2022 (a) 14:00 Anyi Hail (b) 16:00 Fuliang Hail (c) 18:00 Mixed Strong Wind (d) 20:00 Pingxiang Hail





```
Figure 2 Distribution of Lightning Frequency in Jiangxi Province from March 14 to 15, 2022
```

3 天气形势与探空数据分析

2022年3月14日08时中尺度天气系统分析图(图3a),可以看到500 hPa高空低槽 呈阶梯状,分别在湖北西北部、赣西边界有一短波槽,槽前安徽中部至赣西北有一温度槽, 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-Td ≥ 27℃), 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 时中尺度分析(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 m/s,有利于冰雹等强对流天气发生。

南昌探空图 08 时(**图 3c**),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 27.4℃,地面露点18℃,CAPE 达 211.6 J/kg、CIN 为 229.9 J/kg,最大抬升指数(BLI)-3.1℃,K指数 37.4℃,沙氏指数-2.18℃,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℃到地面的高度)3449 m、0℃层 3509 m、-20℃层 7052 m,各指标有利于冰雹形成。20 时(**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 3 2022 年 3 月 14 日 (a, c) 08 时和 (b, d) 20 时中尺度天气系统与南昌 (58606) 探空图 Figure 3 The Mesoscale Weather System and the Sounding Map of Nanchang (58606) at 08:00 (a, c) and 20:00 (b, d)

on March 14, 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一次较大范围冰雹天气过程。通过分析,找到 16 处冰雹信息并通过雷达回波验证。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回波特征为主,主要特征包括:存在≥60 dBz 的回波强度, 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 66 dBz。60 dBz 回波面积平均 值为 63 km²,最大 184 km² (图 4b),最小(微型超级单体)为 18 km² (图 4c)。65 dBz 回波面积平均值为 17 km²,最大 51 km²(**图 4b**),最小 0 km²(**图 4c**);70 dBz 回波面积 平均值为 1 km²,最大 12 km²(**图 4b**),最小 0 km²(**图 4c**)。30~60 dBz 强回波梯度最大 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 直径东到回波边缘 10 dBz 之间距离的比值,最大为 1 : 3.23,最小为 0,均值为 1 : 1。



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

Figure 4: Characteristics of the combined reflectivity echoes of the hail radar mosaic in Jiangxi and surrounding areas on March 14, 2022

4.2 安义冰雹回波演变

2022年3月14日13:40—13:50, 江西安义县(老观测站)观测到冰雹直径 <2 cm 的 冰雹(**图略**)。冰雹维持时间较短(两个雷达拼图时间 <20 分钟),回波形态是强回波单 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~安义一线),有一条对流回波单体排列不连续的雷暴回波带,带上至少有 5~7 个≥45 dBz 强度的对流单体,其中修水县城附近强回波被识别出微型超级单体,回波强度≥60 dBz,强回波面积达到 34 km²,修水溪口镇出现冰雹。安义西北侧是正在发展中的强回波,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,一处在边界上,强回波≥60 dBz,强回波面积只有23 km²,有可能出现冰雹(没有信息论证);另一处在修水县城附近溪口镇,是上个时次冰雹的继续,回波强度≥60 dBz,强回波面积达到37 km²。

13:20(**图 5c**),识别出来的2处强回波维持少变(冰雹维持),回波强度≥60 dBz,强回波面积分别达到15 km²、24 km²,这与前个时次弱有减小。13:30(**图 5d**),修水冰雹结束,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。这时,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 km²,安义(老观测站)记录到冰雹,从冰雹照片上看,冰雹直径≤2 cm。13:50 (**图 5f**),安义冰雹回波强度保 60 dBz,强回波面积减小到 10 km²,安义冰雹停止。回波 带上其它地方分别出现强回波,但没有冰雹信息。

14:00—14:10(图 5g,图 5h),回波带上回波强度有所减弱,在 55 dBz 内。安义冰雹 回波移出安义县。14:20—14:30(图 5i,图 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,是否出现冰雹?尚无信息论证。



图 5 2022 年 3 月 14 日江西安义(老观测站)冰雹回波演变

(a) 13:00 江西修水溪口镇冰雹
(b) 13:10 江西修水 2 处冰雹
(c) 13:20 江西修水 2 处冰雹

(d) 13:30 江西安义强回波 (e) 13:40 江西安义冰雹 (f) 13:50 江西安义冰雹 (g) 14:00 江西安义回波减弱

(h) 14:10 江西安义回波减弱 (i) 14:20 多处识别出强回波 (j) 14:30 多处识别出强回波

Figure 5 Evolution of Hail Echo at Anyi (Old Observatory) in Jiangxi Province on March 14, 2022

(a) 13:00 Hail in Xikou Town, Xiushui, Jiangxi (b) 13:10 Hail in 2 places in Xiushui, Jiangxi (c) 13:20 Hail in 2 places in Xiushui, Jiangxi (d) 13:30 Strong echo in Anyi, Jiangxi (e) 13:40 Hail in Anyi, Jiangxi (f) 13:50 Hail in Anyi, Jiangxi (g) 14:00 Echo weakening in Anyi, Jiangxi
(h) 14:10 Echo attenuation in Anyi, Jiangxi (i) 14:20 Strong echoes identified at multiple locations

(j) 14:30 Strong echoes identified at multiple locations

可见,3月14日冰雹在回波识别时存在以下特点:回波强度都≥60 dBz,强盛时超过60 dBz;强回波面积的大小关系是否能降冰雹,此次修水2次冰雹、安义冰雹强回波面积分别为34 km²、24 km²、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、强回波面积两个参数进行判断比较快捷实用,在短时临近预报中还需考虑强回波梯度和云砧回波的伸展比值等因素做综合分析。

4.3 雷达回波组合反射率回波强度分析

2022年3月14日,16次冰雹回波组合反射率CR值,以产生冰雹时间为基准对齐,根据前3后2(共5小时),统计雷达拼图上10分钟间隔的冰雹回波最大dBz值(**图6**)。可见如下特点:①冰雹回波发生在≥60 dBz回波中,有些回波可以达到65或70 dBz,最大为73 dBz;②冰雹回波的生命史多数为2小时左右,少数为3小时,有一次时间长度4小时,没有出现5小时生命史;③以产生冰雹基准时间为中心,之前出现≥60 dBz回波较少,之后出现≥60 dBz回波较多;说明冰雹出现后能维持数小时;④冰雹回波的 dBz值都有缓慢上升和缓慢下降的过程,尤其是2小时生命史的冰雹回波,上升和下降曲线比较密集。



图 6 2022 年 3 月 14 日 16 次冰雹个例回波强度(dBz) 5 小时演变曲线图 Figure 6 5-hour Evolution Curve of Echo Intensity (dBz) of 16 Hailstorms on March 14, 2022

由此可见,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,有时在回波群、 回波带之中;超级单体回波强度≥60 dBz,有时≥70 dBz。超级单体强回波(≥60 dBz)面 积较大,都≥18 km²,最大可以≥180 km²。超级单体都具有强回波梯度,30~60 dBz 距离 都≤6 km。超级单体回波发展高度都超过12 km,具有明显的云砧回波结构,当周围有其它 回波产生时,云砧回波往往被遮挡。冰雹回波发生在≥60 dBz 回波中,生命史多数为2 小 时以上,产生冰雹之前回波强度较少出现≥60 dBz,之后出现≥60 dBz 回波较多,冰雹回 波的 dBz 值都有缓慢上升和缓慢下降的过程。

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,常用的有组合反射率 CR、回波顶 ET、 垂直积分液态水含量 VIL、基本速度 V0.5、反射率因子垂直剖面 RCS、径向速度垂直剖面 VCS 等,列举 6 次个例(主要在江西范围的冰雹)PUP 产品,统计出最大值、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。

Table 1 Statistical Table of PUP Parameters of Some Hail Radar on March 14, 2022										
雪汁开	站	时间	CR/	ET/	VIL/	VO. 5/	RCS	60dBz/	VCS/	圣惠转页
田区均	号	/BT	dBz	km	$kg \bullet m^{-2}$	$\mathbf{m}^{\bullet} \mathbf{s}^{^{-1}}$	dBz	km	$\mathbf{m}^{\bullet} \mathbf{s}^{^{-1}}$	小包格区
南昌	9791	13:41	60	9	60	10	60	5	10	安义 (老观测站)
景德镇	9798	14:41	65	10	60	-19	65	6.2	-19	浮梁西湖乡
景德镇	9798	14:47	65	9	60	-10	60	5.8	-10	浮梁经公桥
景德镇	9798	15:12	65	11	60	-10	65	5.6	-10	浮梁峙滩乡
安庆	9556	14:58	65	10	60	19	65	6.3	19	安徽华亭镇
黄山	9559	15:00	60	10	60	-13	60	6	-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	-19	
	平均值		63.3	9.8	60.0	-3.8	62.5	5.8	-3.8	

表 1 2022 年 3 月 14 日部分冰雹雷达 PUP 参数统计表

注: ① CR 组合反射率, ② ET 回波顶, ③ VIL 垂直积分液态水含量, ④ V0.5 基本速度 0.5° 仰角

⑤ RCS 反射率因子垂直剖面的最大值,⑥ 60 dBz 回波顶高度,⑦ VCS 径向速度垂直剖面最大值

表1中组合反射率平均值都大于 60 dBz,回波顶顶高都在9 km 以上,垂直积分液态水 含量平均值在 60 kg/m²,基本径向速度处于-19~19 m/s 之间。这些参数对识别冰雹回波起 到很好的作用。

5.2 垂直积分液态水含量(VIL)

在冰雹回波识别中,垂直积分液态水含量 VIL 值的大小反映了回波中是否存在冰雹颗粒,江西冰雹回波 VIL 基本上在 \geq 35~60 kg/m²区间,并且具有较大面积。VIL 大小(强度和面积)代表着不同冰雹的大小。一般 VIL \geq 60 kg/m²,都伴随较大直径的冰雹(直径 \geq 5 cm); VIL \geq 35 kg/m²~ \leq 45 kg/m²,冰雹直径较小(直径 \leq 2 cm);而 VIL \geq 45 kg/m²~ \leq 60 kg/m²,冰雹直径适中(**图7**)。江西冰雹 VIL \leq 35 kg/m²的个例几乎没有。



图 7 2022 年 3 月 14 日 16 次冰雹个例垂直积分液态水含量 VIL 回波特征

(a) 13:00 江西修水溪口镇冰雹
(b) 13:10 湖北五庙乡冰雹
(c) 13:41 江西安义冰雹
(d) 14:03 安徽七都镇冰雹
(e) 14:49 安徽蓝田镇冰雹
(f) 14:53 江西浮梁西湖乡冰雹
(g) 15:02 浙江上甘乡冰雹
(h) 15:21 安徽独山镇冰雹
(i) 15:18 江西浮梁峙滩乡冰雹
(j) 15:28 安徽瑶山乡冰雹
(k) 16:00 湖南梅仙镇冰雹
(1) 16:12 江西婺源甲路乡冰雹
(m) 16:42 浙江千岛湖冰雹
(n) 18:22 浙江义乌冰雹
(o) 19:01 湖南富里镇冰雹
(p) 20:00 江西萍乡青山镇

Figure 7 VIL echo characteristics of vertically integrated liquid water content in 16 hail cases on March 14, 2022

(a) 13:00 Hail in Xikou Town, Xiushui, Jiangxi Province (b) 13:10 Hail in Wumiao Township, Hubei Province
(c) 13:41 Hail in Anyi, Jiangxi Province (d) 14:03 Hail in Qidu Town, Anhui Province
(e) 14:49 Hail in Lantian Town, Anhui Province (f) 14:53 Hail in Xihu Township, Fuliang County, Jiangxi Province
(g) 15:02 Hail in Shanggan Township, Zhejiang Province (h) 15:21 Hail in Dushan Town, Anhui Province

- (i) 15:18 Hail in Zhitan Township, Fuliang, Jiangxi (j) 15:28 Hail in Yaoshan Township, Anhui
- (k) 16:00 Hail in Meixian Town, Hunan (1) 16:12 Hail in Jialu Township, Wuyuan, Jiangxi

(m) 16:42 Hail in Qiandao Lake, Zhejiang (n) 18:22 Hail in Yiwu, Zhejiang

第9页共13页

(o) 19:01 Hail in Fuli Town, Hunan (p) 20:00 Hail in Qingshan Town, Pingxiang, Jiangxi

5.3 反射率因子垂直剖面(RCS)

通过对冰雹回波做反射率因子垂直剖面 RCS,能够看出冰雹回波的垂直结构(图8)。 16 处冰雹的垂直回波除第一处回波(修水溪口镇)55 dBz 外,其余15 处回波中心强度反射 率因子都达到60 dBz 以上,有多处回波强度达到65 dBz。55 dBz 回波顶高大多数在6 km 以上,最高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",这是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回波特征并不明显,主要与回波发展并不 十分旺盛(只产生一些小冰雹)和3月早春热对流偏弱等因素有关。从径向速度垂直剖面 VCS 图上看只有少部分超级单体具有中气旋结构(图8c1,图8g1)注:在图8中有小图, 大部分超级单体中气旋结构并不明显,多数为上正下负或上负下正速度场结构。

综上所述,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 35~65 kg/m²之间(多为 60 kg/m²);雷达拼图上 VIL 基本≥35 kg/m², 并且 VIL 需要具有一定面积。雷达拼图 VIL 是多站平均值,要比单部雷达 VIL 产品偏弱。江 西冰雹回波反射率因子垂直剖面 RCS,回波强度都≥55 dBz,甚至达到 65 dBz;55 dBz 回 波顶高大多数在 6 km 以上,平均 6.1 km;冰雹回波伴有"虚假旁瓣尖项回波",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。



图 8 2022 年 3 月 14 日 16 次冰雹个例反射率因子垂直剖面 RCS 回波特征

(a) 13:00 江西修水溪口镇冰雹
 (b) 13:10 湖北五庙乡冰雹
 (c) 13:41 江西安义冰雹
 (d) 14:03 安徽七都镇冰雹
 (e) 14:49 安徽蓝田镇冰雹
 (f) 14:53 江西浮梁西湖乡冰雹
 (g) 15:02 浙江上甘乡冰雹
 (h) 15:21 安徽独山镇冰雹
 (i) 15:18 江西浮梁峙滩乡冰雹
 (j) 15:28 安徽瑶山乡冰雹
 (k) 16:00 湖南梅仙镇冰雹
 (1) 16:12 江西婺源甲路乡冰雹
 (m) 16:42 浙江千岛湖冰雹
 (n) 18:22 浙江义乌冰雹
 (o) 19:01 湖南富里镇冰雹
 (p) 20:00 江西萍乡青山镇
 Figure 8 RCS Echo Characteristics of Vertical Profile Reflectance Factor for 16 Hailstorms on March 14, 2022
 (a) 13:00 Hail in Xikou Town, Xiushui, Jiangxi
 (b) 13:10 Hail in Wumiao Township, Hubei
 (c) 13:41 Hail in Anyi, Jiangxi
 (d) 14:03 Hail in Qidu Town, Anhui

(e) 14:49 Hail in Lantian Town, Anhui (f) 14:53 Hail in Xihu Township, Fuliang, Jiangxi (g) 15:02 Hail in Shanggan

第10页共13页

Township, Zhejiang (h) 15:21 Hail in Dushan Town, Anhui

- (i) 15:18 Hail in Zhitan Township, Fuliang, Jiangxi (j) 15:28 Hail in Yaoshan Township, Anhui (k) 16:00 Hail in Meixian Town, Hunan (l) 16:12 Hail in Jialu Township, Wuyuan, Jiangxi
- (m) 16:42 Hail in Qiandao Lake, Zhejiang (n) 18:22 Hail in Yiwu, Zhejiang (o) 19:01 Hail in Fuli Town, Hunan (p) 20:00 Hail in Qingshan Town, Pingxiang, Jiangxi

6 冰雹回波双多风场分析

2022年3月14日,江西及周边地区16次冰雹回波收集到10次双多普勒雷达反演风场 图片(图9)。这10次双多风场(每500m一层)图片中,2.5km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65dBz,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65dBz,回波中心侧面具 有辐合风场,中涡旋结构并不明显;14:03(图9c),安徽七都镇冰雹回波强度60dBz,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65dBz,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65dBz,回波中 心具有弱中涡旋结构;15:02(图9f),浙江上甘乡冰雹回波强度65dBz,回波中心侧面具 有弱中涡旋结构;15:18(图9g),江西浮梁诗滩乡冰雹回波强度60dBz,回波区具有辐合 风场结构;15:31(图9h),安徽独山镇冰雹回波强度65dBz,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60dBz,回波区风场较凌乱;16:00(图9j), 湖南梅仙镇冰雹回波强度60dBz,回波中心移动前方有较弱的辐合。

由此可见,冰雹回波双多风场和 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。



图 9 2022 年 3 月 14 日 10 次冰雹个例双多风场特征

(a) 13:10 安庆雷达 湖北五庙乡冰雹 (b) 13:41 南昌雷达 江西安义老观测站冰雹 (c) 14:03 黄山雷达 安徽七都镇冰雹
 (d) 14:49 黄山雷达 安徽蓝田镇冰雹 (e) 14:53 景德镇雷达 浮梁西湖乡冰雹

(f) 15:02 金华雷达 浙江上甘乡冰雹 (g) 15:18 景德镇雷达 浮梁峙滩乡冰雹 (h) 15:21 九江雷达 安徽独山镇冰雹
 (i) 15:28 黄山雷达 安徽瑶山乡冰雹 (j) 16:00 长沙雷达 湖南梅仙镇冰雹

Figure 9 Characteristics of Double Multiple Wind Fields for 10 Hailstorms on March 14, 2022

(a) 13:10 Anqing radar Hail in Wumiao Township, Hubei (b) 13:41 Nanchang radar Hail at the Old Observation Station in Anyi, Jiangxi (c) 14:03 Mount Huangshan radar Hail in Qidu Town, Anhui (d) 14:49 Mount Huangshan Radar Hail in Lantian Town, Anhui Province (e) 14:53 Jingdezhen Radar Hail in Xihu Township, Fuliang, Jiangxi Province (f) 15:02 Jinhua Radar Hail in Shanggan Township, Zhejiang (g) 15:18 Jingdezhen Radar Hail in Fuliang Zhitan Township

(h) 15:21 Jiujiang Radar Hail in Dushan Town, Anhui Province(i) 15:28 Mount Huangshan Radar Hail in Yaoshan Township,Anhui (j) 16:00 Changsha Radar Hail in Meixian Town, Hunan

7 结论与讨论

① 2022 年 3 月 14 日,江西及周边省出现入春以来首场冰雹天气过程,江西多地出现冰雹,江西有 20 站(区域站)出现≥17.2 m/s的大风天气;24 站(区域站)出现≥50.0 mm 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。天气图特点: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 低涡、切变线,无急流;地面的地面辐合线、西南倒槽、地面增温明显、有冷空气活动。南昌 T-1nP 图上:CAPE 值较大,经过订正后达到 1320 J/kg;630 hPa 存在较强逆温层;650~470 hPa 之间是较干区,650 hPa 以下是湿区;⑤0~6 km 垂直风切变较弱。

② 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,有时在回波群、回波带 之中;超级单体回波强度≥60 dBz,有时≥70 dBz。超级单体强回波(≥60 dBz)面积较大, 都≥18 km²,最大可以≥180 km²。

③ 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 35~65 kg/m²之间(多为 60 kg/m²); 雷达拼图上 VIL 基本≥35 kg/m²,并且 VIL 需要具有一定面积。江西冰雹回波反射率因子垂直剖面 RCS,回波强度都≥55 dBz,甚至达 到 65 dBz; 55 dBz 回波顶高大多数在 6 km 以上,平均 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。

④ 冰雹回波双多风场和 2.5 km CAPP1 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。

2022 年 3 月 14 日冰雹范围比较广,涉及多个省份,重要特征均由超级单体(弱超级单体)回波产生。在江南 3 月春季, 微型超级单体常常产生直径 ≤2 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,蒋友产,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,谌芸,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,谌芸,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, 张淅妍, 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,许爱华,贺志明,等,2009a. 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, 2009a. Analysis of a rainless damaging strong wind process[J]. Meteorol Disaster Reduct Res, 32(3): 52-56 (in Chinese).
- 马中元,许爱华,陈云辉,等,2009b. 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, 2009b. 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,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).
- 马中元,苏俐敏,谌芸,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).
- 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 Y, et al, 2014. Statistical characteristics analysis of Doppler radar of hail weathers[J]. J Nat Disasters, 23(3): 101-106 (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.