

文章编号: 2096-1618(2025)01-0079-06

江西春季一次大冰雹的雷达回波特征分析

田 白¹, 郑劲光², 马中元³, 董 玲², 岳 旭¹

(1. 江西省气象服务中心 江西 南昌 330096; 2. 江西省抚州市气象局, 江西 抚州 344000; 3. 江西省气象科学研究所, 江西 南昌 330096)

摘要:为更好地做好冰雹天气的监测预警工作,使用 MICAPS 天气图、雷达拼图、雷达 PUP 产品等资料,采用天气学和雷达气象学原理与研究方法,对 2021 年 3 月 30–31 日江西大冰雹过程进行分析。结果表明:(1)500 hPa 低槽、850 hPa 西南急流、925 hPa 切变线和地面倒槽等天气系统,以及大气层结具有“上干下湿”有利条件。(2) ≥ 5 cm 的大冰雹回波系统有孤立超级单体和回波带上超级单体两种。其共同特征是:回波强度 ≥ 60 dBZ,并有 65 dBZ 以上的回波核;60 dBZ 强回波面积 ≥ 100 km²;30 ~ 60 dBZ 强回波梯度(最密集区域距离) ≤ 7 km 和具有云砧回波。(3)垂直积分液态水含量(VIL)达到 60 kg/m²;径向速度 V0.5° 仰角具有正负速度对;反射率因子垂直剖面(RCS)有悬挂、穹窿、回波墙等特殊回波结构;径向速度垂直剖面(VCS)具有辐合型气旋结构。(4)超级单体在 3 km 等高平面显示(CAPPI)上,反射率因子都在 60 dBZ 以上,有 65 dBZ 回波核,风场处于辐合型气旋性环流中。上述研究结果有助于大冰雹天气雷达回波特征的认识和应用。

关键词:大冰雹;超级单体;回波特征

中图分类号:P446

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2025.01.012

0 引言

2021 年 3 月 30–31 日,江西中部及北部自西向东出现冰雹天气过程,局地出现大冰雹。江西冰雹天气年年发生,但大冰雹天气不多。大冰雹的发生会产生较严重的灾情,尤其是在人口密集的城镇,因此,做好大冰雹的监测预警十分重要和必要。根据国家标准,直径 >50 mm 为特大冰雹,20 ~ 50 mm 为大冰雹,5 ~ 20 mm 为冰雹。此次冰雹过程为大冰雹过程。

多普勒天气雷达是强对流天气的有效监测工具^[1–2]。冰雹天气的日变化明显,午后至夜间出现冰雹的可能性高于其他时段;降雹的天气形势分为:冷涡型、低槽型、横槽型、西北气流型、小范围型^[3–4]。冰雹天气发生在辐合线、切变线、500 hPa 低槽附近^[5–8]。冰雹云雷达回波强度 ≥ 55 dBZ,两个体扫间反射率因子和风暴顶高有明显跃变,这种跃变现象可以作为冰雹发生前的重要判断依据^[9–10]。经典超级单体具有钩状回波、“V”型缺口、穹窿回波和回波墙等特征,VIL 值达到 60 kg·m⁻²,中低层径向速度图上呈现中气旋结构或气旋性辐合气流结构。这些都是超级单体风暴发展和维持的特征^[11]。冰雹预报着眼点可以根据雷达回波特征

来把握,分为超级单体冰雹回波和飚线回波带两种,回波强度 >60 dBZ,径向速度图上有逆风区、辐合区等特征出现^[12–14]。应用两部多普勒雷达基数据,反演风场能揭示回波内部环流结构^[15]。超级单体流场结构:风暴移向前沿,低层气旋性气流进入风暴后倾斜上升,到达风暴顶后,气流沿反气旋性方向逐渐向下形成下沉气流^[16]。冰雹最大回波强度超过 60 dBZ,回波顶高 >9 km,最高可达 11 ~ 12 km,液态含水量 45 ~ 50 kg/m²,具有中气旋、三体散射、旁瓣假回波等回波特征;密集降雹的落区上空具有 -60 °C TBB 冷中心^[20–23]。

1 资料与方法

冰雹照片及视频来源于微信群、信息员反馈、当地冰雹灾情调查报告等渠道,并通过雷达回波进行验证。天气图使用 MICAPS 操作平台进行中尺度天气系统分析,地面要素来源于江西气象信息内网平台。雷达拼图资料来源于江西雷达拼图查询平台(江西省气象信息中心、江西省气象科学研究所,2012 年联合开发),底图审图号:GS(2021)6375 号。单部雷达 PUP 产品来源于南昌、宜春 SA 多普勒天气雷达基数据反演。双多风场(两部多普勒雷达基数据联合反演风场)软件来源于中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室研制的“多型天气雷达分析显示平台”。本文时间均为北京时。

收稿日期:2023-09-13

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项资助项目(A类-XDA19040202);国家自然科学基金资助项目(41975001);江西省科学技术厅 2021 年省级科技计划资助项目(20212ABC03A29)

通信作者:郑劲光. Email: zjg7304@126.com

2 冰雹实况与天气系统配置

2.1 冰雹实况

2021年3月30–31日,南昌局地冰雹直径 ≥ 10 cm,江西多地出现直径 ≥ 2 cm的冰雹,其严重程度在江西冰雹历史上罕见(图1)。产生大冰雹的超级单体生成于湖南东部,经过江西铜鼓、宜丰、高安、奉新、南昌、进贤等地,造成较大面积冰雹灾害,南昌特大冰雹造成小区大片樟树林树枝打断、汽车玻璃被击穿等。

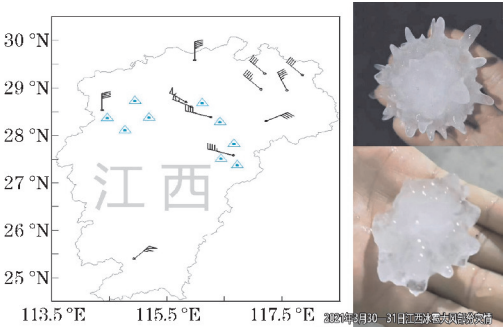


图1 2021年3月30–31日江西部分冰雹大风实况图

2.2 天气系统配置

2021年3月30日20时,500 hPa低槽移动前方,江西有西南急流(长沙26 m/s、南昌30 m/s;700 hPa长沙23 m/s、南昌20 m/s;850 hPa长沙14 m/s)(图2a)。三层西南急流在江西北部汇合。汇合区上空200 hPa有辐散分流区,925 hPa江西中北部有明显东南气流

(南昌东南风12 m/s)。低层东南气流把东海水汽输送至江西与西南急流、北部偏东急流产生剧烈辐合;同时,在垂直方向上随高度增加东南风顺转为西南风,有明显的暖平流输送,为江西北部及中部大冰雹天气的发生创造了条件。低层暖湿,850 hPa芷江—长沙—南昌比湿达15 g/kg,北部沿江地区安庆—汉口—宜昌比湿10 g/kg,形成明显的湿度锋区。从700 hPa开始大气湿度明显变干,500 hPa湖南中部有明显干区,“上干下湿”大气层结为此次大冰雹天气提供了有利条件。

2021年3月30日20时,干冷空气从500 hPa侵入江西上空,长沙干区东移,南昌T-Td从30日晚20时的8℃,增加至31日08时22℃,24 h负变温达-1.7℃(图2b)。中层急流强盛,600 hPa西南急流达28 m/s,500 hPa达30 m/s,与底层偏东风构成较强的垂直风切变(南昌20时0~5 km的风垂直切变超过30 m/s)。同时,SI指数异常偏小为-5.94℃,K指数从35℃增至39.1℃,对流有效位能CAPE中等,经过订正南昌CAPE值为848.5 J/kg。925 hPa有暖脊发展并伸向赣北赣中,南昌850 hPa与500 hPa温差达28℃。850 hPa南昌露点温度Td=16℃,比湿为14 g/kg,500 hPa高度Td=-18℃,比湿0.8 g/kg。可见,高层干冷空气叠置在低层暖湿气流之上,以及强的温度垂直梯度为强对流的发生提供了热力不稳定条件。

2021年31日02时,地面图上在中国西南地区贵阳附近有热低压发展,地面倒槽从桂北经湘中南部地区伸向赣东北地区,08时地面倒槽发展加强,江西处倒槽辐合暖区中,有利于强对流天气的发展(图2c)。

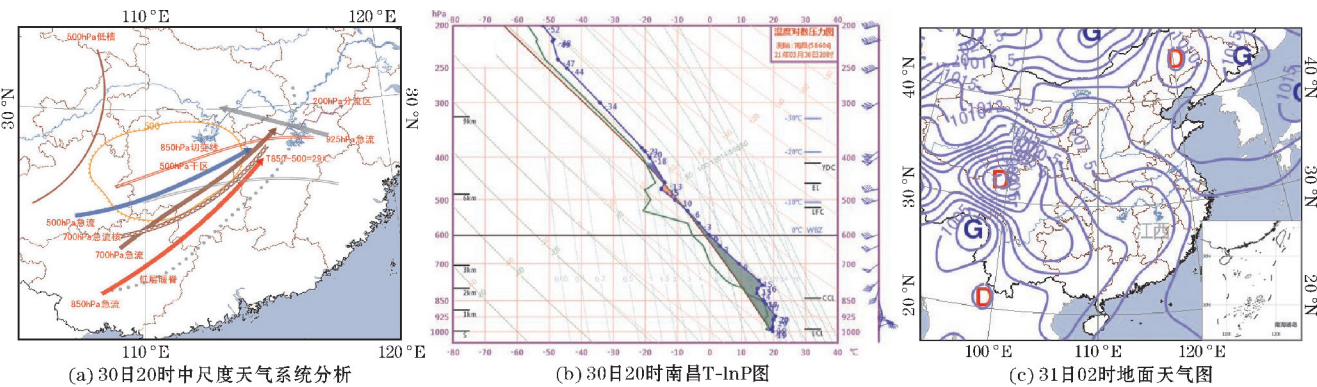


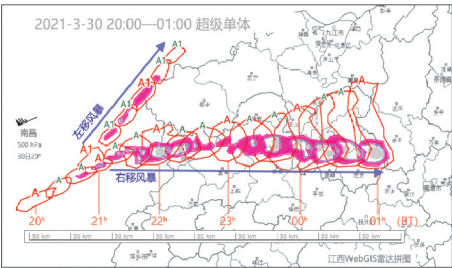
图2 2021年3月30–31日中尺度天气系统分析、T-lnP、地面天气图

3 雷达回波特征

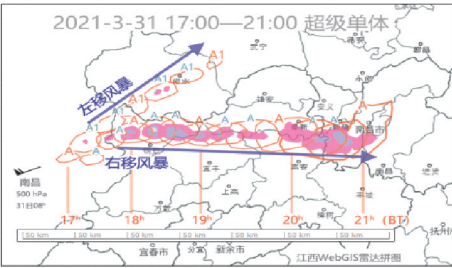
3.1 两次超级单体分裂后移动路径回波廓线特征

超级单体风暴的移动路径通常随着气流、风向以及地形的变化而改变,除此外,超级单体风暴的移动还

与自身发展演变规律相关。造成冰雹的超级单体风暴,自西向东共出现16次(可能冰雹资料有遗漏)。在这16次超级单体中,有2次超级单体风暴最为强烈,回波强度大,移动距离远,维持时间长。3月30日20时(图3a)和3月31日17时(图3b)的超级单体风暴,都经历初生→合并→发展→壮大→分裂(左移和右移风暴),其中右移风暴进入江西境内后,快速发展加强为强超级单体,造成沿途多地出现冰雹天气。



(a)30 日 20:00—01:00



(b)31 日 17:00—21:00

图 3 2021 年 3 月 30—31 日 江西两次超级单体回波分裂后回波移动路径廓线演变图

3.2 16 次超级单体冰雹典型回波特征

2022 年 3 月 30—31 日,江西有多处超级单体风暴,在雷达拼图上的回波形态特征比较典型,有孤立超级单体(图 4a~f,图 4k),也有在雷暴回波带上(或飢线回波带)的超级单体(图 4g~j,图 4l~p),这两种回波形态是江西冰雹(雷暴大风)等强对流天气的主要回波系统。超级单体 CR 强度 60~70 dBZ,60 dBZ 回波面积较大,呈椭圆形形态。发展旺盛时(南昌大冰雹)呈现“盾”形超级单体回波形态(图 4e、f),强回波中心超过 70 dBZ 且 70 dBZ 回波面积都很大,“盾”形呈南—北走向。嵌在雷暴回波带(飢线回波带)中的超级单体风暴,较孤立超级单体风暴弱一个量级(5 dBZ)。在同一个时刻,超级单体会同时出现多处(2 个以上)。雷达回波特征是分析识别冰雹回波的基础,掌握这些变化多端的回波特征,从中提取共性的回波要素是实现计算机自动识别的关键。

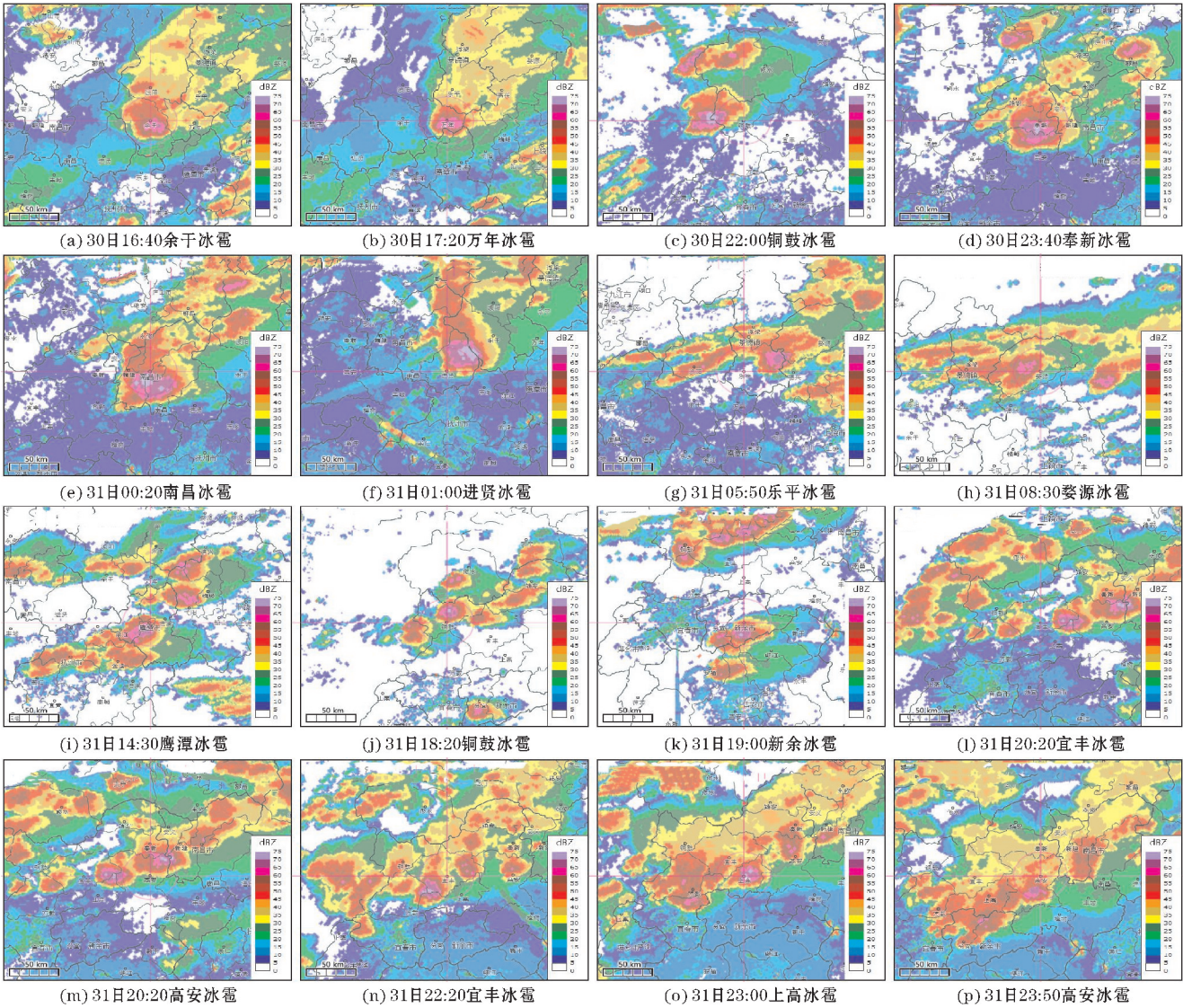


图 4 2021 年 3 月 30—31 日 江西 16 次超级单体冰雹典型回波特征(组合反射率 CR)

3.3 超级单体回波参数统计特征

2021年3月30–31日,从16次冰雹回波中提取回波要素,主要有:组合反射率(dBZ)、60 dBZ强回波面积、强回波梯度(30~60 dBZ回波距离)和回波形态。回波识别参数显示(表1):超级单体冰雹回波强度最大77 dBZ,最小65 dBZ,平均70 dBZ,可见冰雹回

波的强度要足够大,尤其是大冰雹回波。超级单体强回波面积最大750 km²,最小112 km²,平均237 km²,≥100 km²的超级单体都产生较大冰雹。超级单体强回波梯度最大7 km,最小1 km,平均2.9 km,产生冰雹回波的强回波梯度都≤7 km。回波形态描述分为:超级单体、雷暴回波带上超级单体两种。

表1 2021年3月30–31日江西16次超级单体冰雹回波参数统计表

序号	日期	时刻	地点	回波强度/dBZ	60 dBZ 强回波面积/km ²	强回波梯度/(dBZ/km)	回波形态描述
1	3月30日	16:40	余干	66	166	1	超级单体
2	3月30日	17:20	万年	66	119	1	超级单体
3	3月30日	22:00	铜鼓	77	269	1	超级单体
4	3月30日	23:40	奉新	66	190	4	超级单体
5	3月31日	00:20	南昌	75	750	3.2	超级单体
6	3月31日	01:00	进贤	75	622	1.4	超级单体
7	3月31日	05:50	乐平	68	116	2.2	带上超级单体
8	3月31日	08:30	婺源	65	128	7	带上超级单体
9	3月31日	14:30	鹰潭	66	154	3	带上超级单体
10	3月31日	18:20	铜鼓	70	137	2.8	带上超级单体
11	3月31日	19:00	新余	71	147	5.1	超级单体
12	3月31日	20:20	宜丰	71	241	2.2	带上超级单体
13	3月31日	20:20	高安	71	219	2.8	带上超级单体
14	3月31日	22:20	宜丰	73	224	4	带上超级单体
15	3月31日	23:00	上高	72	195	4	带上超级单体
16	3月31日	23:50	高安	68	112	1.4	带上超级单体
回波参数最大值				77	750	7	超级单体7次
回波参数平均值				70	237	2.9	带上超级单体9次
回波参数最小值				65	112	1	比例:7/9

3.4 单部雷达 PUP 产品和双多风场特征

从16次冰雹回波中选取铜鼓(22:08)、奉新(23:43)这2次冰雹回波进行PUP分析。垂直积分液态水含量(vertical integrated liquid,VIL)对冰雹回波有较好的表达能力。VIL参数越大,表示越利于冰雹的形成。据统计^[17–19],江西出现直径≥2 cm的冰雹,雷达VIL最大值≥60 kg/m²;早春季节一些小冰雹VIL值会小一点,但都在35 kg/m²以上。这个最小值在短时强降水和雷暴大风回波中很难看到。因此,VIL是识别冰雹回波的显著指标之一,如三体散射回波一样。除此外,VIL≥60 kg/m²的面积要足够大,大部分冰雹在10×10 km²。VIL值愈大、VIL面积愈大,出现大冰雹的概率愈高(图5a~b)。径向速度R0.5°最明显的特征就是具有正负速度对。根据正负速度位置不同,主要有:左负右正辐散型环流(图5c~d)。反射率因子垂直剖面(RCS)具有回波墙、悬挂回波、穹隆回波、旁瓣回波等特征,最为显著的特征是50 dBZ强回波顶

在8 km以上(图5e~f)。径向速度垂直剖面(VCS),最为显著的特征是冰雹回波具有径向辐散型(左正右负)气旋性结构(图5g~h)。这个特征在江西雷暴大风、短时强降水回波中是不具备的^[12,17–19]。双多风场是一种基于两部以上多普勒雷达的风场获取方法^[16]。从16次冰雹中提取6次超级单体3 km等高平面显示(CAPPI)进行描述。反射率因子都在60 dBZ以上,中心都有65 dBZ回波核(图6a,b,c,e,f),只有婺源冰雹稍弱为60 dBZ(图6d)。超级单体强回波面积都较大,60 dBZ面积≥100 km²。超级单体为单一孤立的回波(出现7次),雷暴回波带和回波群体中超级单体(出现9次)。

3000 m高度是超级单体回波内部风场结构重要层,反映风暴中上升运动状态。6次超级单体3000 m高度上的风场都处于辐合型气旋性环流,有利于超级单体冰雹回波的发展壮大。辐合上升气流并非在强回波中心,而是在强回波中心的一侧。有时会在强回波周围出现辐合型环流,为新的对流发展创造条件。

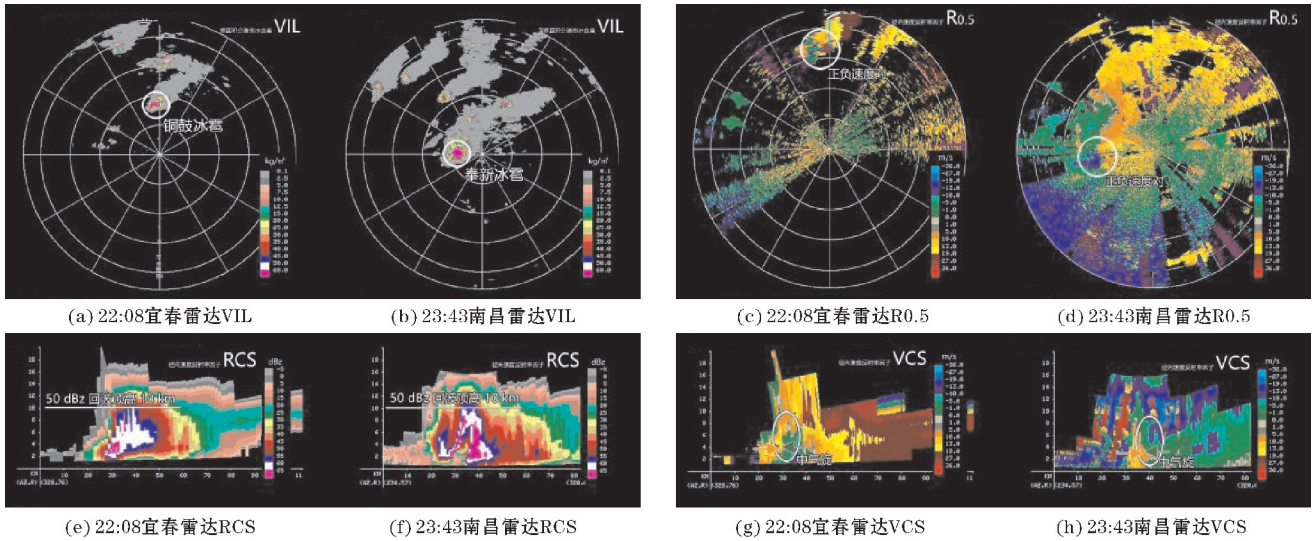


图 5 2021 年 3 月 30 日 宜春、南昌 SA 雷达 VIL、R0.5、RCS、VCS 产品特点

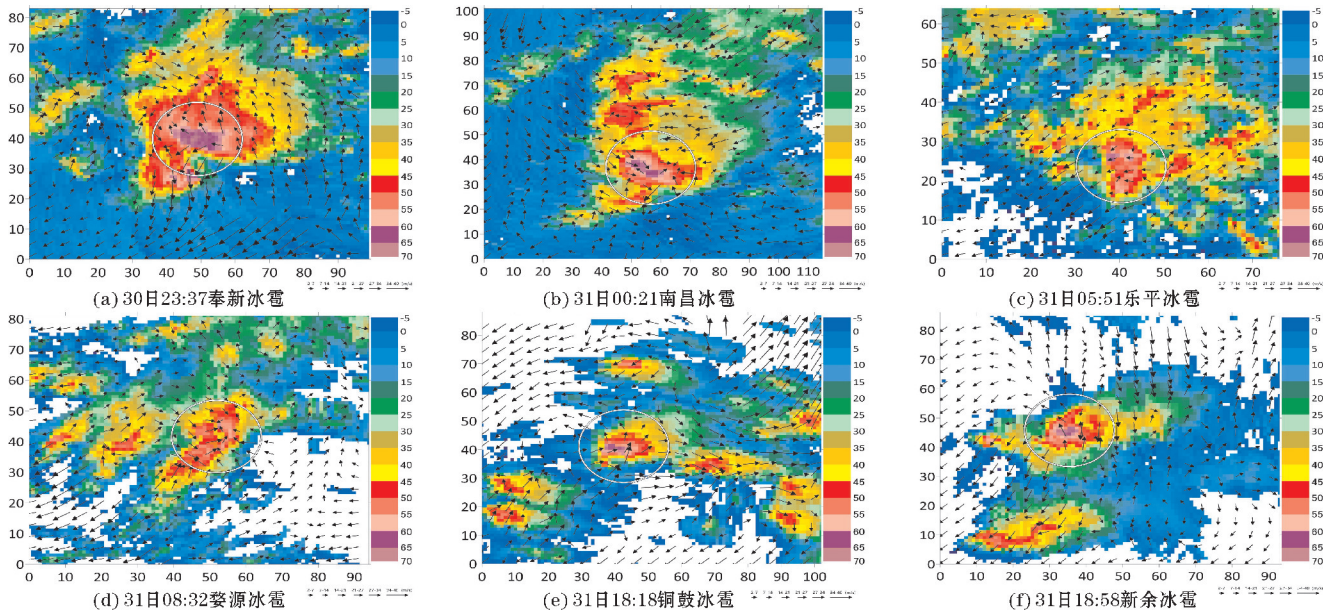


图 6 2021 年 3 月 30–31 日江西冰雹超级单体 3000 m CAPPI 双多风场特征

4 结论与讨论

(1)低空西南急流、地面倒槽和低层切变线以及“上干下湿”大气层结为本次江西春季大冰雹天气的影响系统和环境条件。此次过程没有明显冷空气入侵的情况下,冰雹天气可以发生在中低层切变线附近,是较为少见的“暖区”强对流型天气背景。

(2)2021 年 3 月 30–31 日,江西连续两天出现冰雹天气,局地出现 直径 ≥ 5 cm 的大冰雹。冰雹回波系统主要有孤立超级单体和雷暴回波带上超级单体回波。这些超级单体强度 ≥ 60 dBZ,并有 ≥ 65 dBZ的回波核;60 dBZ强回波面积都 ≥ 100 km²;30~60 dBZ强回波梯度(最密集区域) ≤ 7 km;有云砧形成的前伸回波。超级单体在3 km等高平面显示 CAPPI 上,反射率因子都在60 dBZ以上,中心都有65 dBZ回波核。超级单体3000 m高度上的风场都处于辐合型气旋性环流。

(3)冰雹过程中雷达探测的垂直积分液态水含量(VIL)维持不低于50 kg/m²、径向速度R0.5具有正负速度对、反射率因子垂直剖面(RCS)具有悬挂、穹窿等特殊回波结构、径向速度垂直剖面(VCS)具有辐散型气旋结构。

冰雹云的识别一直是气象研究的课题之一,利用雷达回波特征来识别冰雹是最简单、最快捷和最实用的方法。这些特征如何实现计算机自动识别,有待于进一步研究和开发。

致谢:感谢 2020 年江西省气象局面上项目(抚州市强对流天气分类预报指标研究)对本文的资助

参考文献:

[1] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社,2006.

[2] 俞小鼎,王秀明,李万莉,等. 雷暴与强对流临近预报[M]. 北京:气象出版社,2020.

- [3] 赵文慧,姚展予,贾烁,等. 1961–2015 年中国地区冰雹持续时间的时空分布特征及影响因子研究[J]. 大气科学, 2019, 43(3): 539–551.
- [4] 王培涛,王凤娇,张婷婷. 山东滨州地区冰雹天气分型和预报方法研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(3): 33–40.
- [5] 曾智琳,湛芸,朱克云,等. 广东省大冰雹事件的层结特征与融化效应[J]. 大气科学, 2019, 43(3): 598–617.
- [6] 张小娟,陶玥,刘国强,等. 一次冰雹天气过程的云系发展演变及云物理特征研究[J]. 气象, 2019, 45(3): 415–425.
- [7] 黄玉霞,王宝鉴,王研峰,等. 1974–2013 年甘肃冰雹日数的变化特征[J]. 气象, 2017, 43(4): 450–459.
- [8] 丁小剑,唐明晖,陈德桥. 两次冰雹过程多普勒天气雷达产品的对比分析[J]. 气象与环境科学, 2010, 33(2): 42–47.
- [9] 王研峰,黄武斌,王聚杰,等. 一次甘肃天水强冰雹的雷达回波特征及成因分析[J]. 高原气象, 2019, 38(2): 368–376.
- [10] 王莎,沙勇,宋金妹,等. 冀东地区冰雹云多普勒雷达参数特征分析[J]. 气象, 2019, 45(5): 713–722.
- [11] 覃靖,潘海,刘蕾. 柳州“4·09”致灾冰雹的超级单体风暴过程分析[J]. 气象, 2017, 43(6): 745–755.
- [12] 陈鲍发,马中元. 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, 2019, 42(2): 104–114.
- [13] 刘艳杰,周玉都,马庚雪. 河北廊坊冰雹天气特征统计分析[J]. 气象与环境科学, 2018, 41(1): 110–117.
- [14] 张磊,张继樞. 一次局地强冰雹的多普勒雷达回波特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2013, 7(4): 26–30.
- [15] 徐芬,郑媛媛,肖卉,等. 江苏沿江地区一次强冰雹天气的中尺度特征分析[J]. 气象, 2016, 42(5): 567–577.
- [16] 韩颂雨,罗昌荣,魏鸣,等. 三雷达、双雷达反演降雹超级单体风暴三维风场结构特征研究[J]. 气象学报, 2017, 75(5): 757–770.
- [17] 黄中根,马中元,湛芸,等. 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, 2022, 45(5): 39–48.
- [18] 段和平,马中元,陈鲍发,等. 江西两次强降雹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.
- [19] 刘懿枢,马中元,魏鸣,等. 一次副高控制龙卷雷达回波特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2023, 17(3): 35–43.
- [20] 冯爽,娄小芬,陈列. 2019 年浙江省一次春季强对流天气及雷达回波特征分析[J]. 科技通报, 2020, 36(11): 8–16.
- [21] 张晓冬,庞古乾,林镇国. 佛山两次龙卷过程的物理量和雷达资料对比分析[J]. 科技通报, 2017, 33(10): 46–52.
- [22] 王忠东,曹楚. 一次局部雹灾的天气学成因及多普勒雷达回波特征分析[J]. 科技通报, 2010, 26(1): 51–62.
- [23] 赵璐,赵放,楼小芬. 一次初春强冰雹天气过程分析[J]. 科技通报, 2017, 33(10): 40–45.

Analysis of Radar Echo Characteristics of a Large Hailstorm in Spring in Jiangxi Province

TIAN Bai¹, ZHENG Jingguang², MA Zhongyuan³, DONG Ling², YUE Xu¹

(1. Jiangxi Meteorological Service Center, Nanchang 330096, China; 2. Fuzhou Meteorological Bureau of Jiangxi, Fuzhou 344000, China; 3. Jiangxi Provincial Institute of Meteorological Sciences, Nanchang 330096, China)

Abstract: To better monitor and warn of hail weather, MICAPS weather maps, radar puzzles, radar PUP products, and other data were used. The principles and research methods of weather science and radar meteorology were adopted to analyze the process of severe hail in Jiangxi from March 30 to 31, 2021. The results showed that: (1) Weather systems such as 500 hPa low trough, 850 hPa southwest jet, 925 hPa shear line, and ground inversion troughs, as well as atmospheric stratification, have favorable conditions for “upper dry and lower wet” conditions. (2) There are two types of large hail echo systems with a diameter of ≥ 5 cm: isolated supercell and supercell on the echo band. Its common feature is that the echo intensity is ≥ 60 dBZ, and there are echo nuclei above 65 dBZ; 60 dBZ strong echo area ≥ 100 km²; 30–60 dBZ strong echo gradient (distance from the densest area) ≤ 7 km and with cloud anvil echoes. (3) Vertical integrated liquid water content (VIL) reaches 60 kg/m²; The radial velocity V0.5° has positive and negative velocity pairs at an elevation angle; The reflectivity factor vertical profile (RCS) has special echo structures such as suspension, dome, and echo wall; The radial velocity vertical profile (VCS) has a convergent cyclone structure. (4) On the 3 km contour plane display (CAPPI), the reflectivity factor of the supercell is above 60 dBZ, with a 65 dBZ echo core, and the wind field is in a converging cyclonic circulation. The above research results contribute to the understanding and application of radar echo characteristics in heavy hail weather.

Keywords: large hail; super monomer; echo characteristics