

2021年长兴四次冰雹过程对比分析

陆文涛¹, 全琦¹, 陶威^{2*}, 卢娟¹

¹长兴县气象局, 浙江 长兴

²湖州市气象局, 浙江 湖州

收稿日期: 2023年3月14日; 录用日期: 2023年5月3日; 发布日期: 2023年5月11日

摘要

用NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料与湖州、杭州多普勒雷达回波资料对四次冰雹天气形成的天气学机制和雷达回波特征进行了分析, 总结四次过程的相似点和不同点。结果表明, 2021年长兴四次冰雹过程一次为冷涡槽后型, 一次为副高边缘型, 两次为副高控制型; 四次冰雹过程当天均出现了 30°C 以上的较高气温, 表明热力条件好, 易形成不稳定层结; 四次冰雹过程CAPE $\geq 1000 \text{ J/kg}$ 以上, $K \geq 32^\circ\text{C}$ 、 $LI \leq -4^\circ\text{C}$ 、 $T(850\sim 500) \geq 26^\circ\text{C}$ 、 $WS \geq 12 \text{ m/s}$ 、 0°C 及 -20°C 层高度适宜; 极端大的K指数、整层大气可降水量、垂直风切变对大冰雹有预报意义; 四次冰雹过程反射率 $\geq 60 \text{ dBz}$, 回波顶高 $\geq 10 \text{ km}$, 50 dBz 回波伸展高度明显超过 -20°C 层高度, 总体来看反射率依然是预报冰雹最直观最便捷的指标; VIL的大小和冰雹直径没有明确的关系, 极端大的VIL对冰雹预报有意义; 5月14日过程有明显中气旋、BWER、TBSS、“V”型缺口、负ZDR、低KDP等超级单体和冰雹特征。

关键词

冰雹, 环流形势, 雷达回波, 超级单体

Comparative Analysis of Four Hail Events in Changxing in 2021

Wentao Lu¹, Qi Quan¹, Wei Tao^{2*}, Juan Lu¹

¹Changxing Meteorological Bureau, Changxing Zhejiang

²Huzhou Meteorological Bureau, Huzhou Zhejiang

Received: Mar. 14th, 2023; accepted: May 3rd, 2023; published: May 11th, 2023

Abstract

Using NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ reanalysis data and Huzhou and Hangzhou Doppler radar echo data, the

*通讯作者。

synoptic mechanism and radar echo characteristics of the four hail events were analyzed, and the similarities of the four processes were summarized and different points. The results show that one of the four hail events in Changxing in 2021 was the post-cold vortex type, one was the subtropical high edge type, and two were the subtropical high control type; the four hail events all had relatively high temperatures above 30°C on the same day, indicating that the thermal under good conditions, unstable stratification is easy to form; CAPE ≥ 1000 J/kg or more in the four hail processes, K $\geq 32^\circ\text{C}$, LI $\leq -4^\circ\text{C}$, T (850~500) $\geq 26^\circ\text{C}$, WS ≥ 12 m/s, 0°C and -20°C layer heights are suitable; the extremely large K index, the precipitable water in the whole layer of the atmosphere, and the vertical wind shear have forecast significance for large hail; the radar reflectivity of the four hail processes is ≥ 60 dBz, and the echo top height is ≥ 10 km, the extended height of the 50 dBz echo obviously exceeds the height of the -20°C layer. Overall, the reflectivity is still the most intuitive and convenient indicator for hail forecasting; there is no clear relationship between the size of the VIL and the diameter of the hailstone, and an extremely large VIL is meaningful for hail forecasting; on May 14, there were obvious supercell and hail features such as mesocyclone, BWER, TBSS, V notch, negative ZDR, and low KDP.

Keywords

Hail, Circulation Situation, Radar Echo, Supercell

Copyright © 2023 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

冰雹是强对流天气过程中伴随的灾害性天气, 具有发生时间短、影响范围小、来势迅猛等特点, 常伴随雷暴大风、短时强降水等灾害性天气[1]。根据《冰雹等级标准规范(GB/T 27957-2011)》, 直径超过 2 cm 的固态降水被称为大冰雹。大冰雹具有强致灾性, 会给农业、交通、通信、建筑等造成损害。国内外许多专家学者对冰雹的强对流天气特征已经有不少论述, 并取得了很多研究成果(Aydin and Singh [2]; 曹俊武[3]等; 孙丝雨[4]等); 朱乾根[5]等在理论上对强对流天气产生的机制与对流参数特点进行了系统性申述; 俞小鼎[6]等从多普勒雷达理论与应用实例对强对流天气的成因与特征进行了系统性的总结。根据历史资料统计, 长兴年平均冰雹日数 < 1 天。但近年来, 随着气候变化加剧和信息流通速度加快, 冰雹过程越来越多的出现在公众的视野。

2021 年长兴强对流天气多发且强度偏强, 出现了 5 月上中旬和 7 月上中旬两段强对流天气集中期。4 月 30 日、5 月 14 日、7 月 15 日、7 月 16 日四次强对流过程出现了冰雹, 其中 5 月 14 日冰雹过程冰雹直径达 3 cm, 一年四次冰雹过程在长兴站气象观测历史记录上也十分罕见。本文利用 NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料与湖州、杭州临安多普勒雷达回波资料(4 月 30 日、5 月 14 日为临安雷达资料, 7 月 15 日、7 月 16 日为湖州雷达资料), 对四次冰雹天气形成的天气学机制和雷达回波特征进行了分析, 总结四次过程的相似点和不同点, 以期今后冰雹的预报预警提供参考。

2. 实况

2021 年 4 月 30 日晚上 20 时 30 分起安徽中部生成多个对流单体, 呈东西向排列向东南方向移动, 23 时两个单体一个紧擦长兴东部从太湖上经过, 另一个单体从西部进入长兴境内, 依次经过泗安、林城、虹星桥、和平等乡镇, 经过泗安时协理员报告出现小冰雹, 还伴有 10 级阵风(27.4 m/s), 此次过程回波在

东移南压过程中强度变化不定, 给预报预警带来很大难度。

2021年5月14日下午15时30分安徽郎溪广德有多个对流单体生成发展并东移北抬, 16日30分回波单体进入长兴煤山境内, 并快速发展加强形成超级单体, 移动路径由东北向变为东略偏南方向, 一路经过煤山、水口、夹浦三个乡镇, 在煤山和水口局部地区出现直径3 cm的大冰雹, 击穿部分棚膜和一辆汽车车窗, 此次过程还伴随20 mm/h的短时强降水。此超级单体17时50分移出长兴, 进入太湖后继续东移, 在苏州形成龙卷。

2021年7月15日中午12时泗安北部、和平分别有单体生成少动, 13时20分原单体分别减弱消失, 林城、太湖街道先后生成新单体并发展加强, 林城单体向西移动经过泗安, 太湖街道单体向西北方向移动经过夹浦、水口、龙山街道, 泗安、水口协理员报告出现小冰雹。此次过程伴随7~8级雷雨大风, 其中龙山街道渚山村阵风达12级(33.2 m/s), 为今年长兴最强阵风。

2021年7月16日14时安吉和广德南部有零碎回波生成, 随后在北侧不断生成新单体向北传播, 15时40分靠近长兴南部, 16时形成一条东西向回波带向北扫过长兴西部、广德、郎溪, 长兴泗安、煤山受到影响, 其中泗安出现小冰雹和10级大风(27.4 m/s)。

可以看出(表1), 四次过程的相同点是: 小时雨强均不强, 最大也只有20 mm/左右, 且持续时间短。不同点是: 三次小冰雹过程均伴有10级及以上大风, 但大冰雹过程风力不大; 四次冰雹过程出现的时间不一, 三次出现在中午到下午, 一次出现在夜里, 除上午外其余时段均有出现。

Table 1. The actual situation of four hail events in Changxing in 2021

表 1. 2021 年长兴四次冰雹过程风雨实况

	冰雹直径(mm)	短时雨强(mm/h)	大风	发生时间
4月30日	5	无	10级	晚上
5月14日	30	20	7级	下午
7月15日	5-10	20	12级	中午
7月16日	5-10	15	10级	下午

3. 环流形势分析

从环流形势和天气背景分析, 2021年4月30日20时东北冷涡南落, 500、700 hPa有下滑槽东移南压, 我区为西北风; 850 hPa有曲率东移, 我区为西南风, 高低空风场辐合。当天最高气温达到了34℃, 低层暖湿空气抬升, 中上层干冷空气侵入, 造成不稳定层结, 触发对流性天气发生。随着低层转为偏西风, 回波在中高层西北风的引导下向东南方向移动, 影响长兴。这是一次冷涡槽后型的冰雹过程。

2021年5月14日副热带高压脊线位于20°N, 我区位于副高西北侧西南气流中, 08时700、850 hPa有暖性切变线东移北抬, 长兴出现小阵雨。14时500~850 hPa均为西南风, 表明我区处于强暖区中, 但风向风速辐合不明显。早晨的阵雨为底层带来高湿的环境, 当天的中午气温也快速升到了32℃左右, 底层高温高湿造成不稳定层结。925 hPa在安徽南部有风向辐合, 与对流单体生成位置对应, 是此次过程的触发系统。这是一次副高边缘型、暖区中的冰雹过程。

2021年7月15日我区位于588线控制范围内, 700~9250 hPa为偏南风且风速较小, 但当天最高气温达到38℃, 副高控制下的高温有利于热对流天气发生, 因此这是一次副高控制型的冰雹过程。

2021年7月16日也是副高控制型的冰雹过程, 形势与15日相近, 不再赘述。

可以看出(表2), 四次过程形势的相同点是: 对流发生当天气温较高, 最高气温都在30℃以上, 热力条件好。不同点是: 有三次过程是副高型, 且无冷空气参与, 一次过程是冷涡型, 有冷空气参与。

Table 2. Situation and actual situation of the four hail events in Changxing in 2021**表 2.** 2021 年长兴四次冰雹过程形势与实况

	形势分型	冷空气参与	当日最高气温(°C)	08时相对湿度
4月30日	冷涡槽后型	有	34.1	54%
5月14日	副高边缘型	无	31.7	100%
7月15日	副高控制型	无	38.0	69%
7月16日	副高控制型	无	34.5	75%

4. 环境场分析

研究表明,有利于强冰雹产生的三个关键因子是:1) $-30\sim-10^{\circ}\text{C}$ 之间的对流有效位能;2) 深层垂直风切变,通常用地面以上 6 km 高度和地面之间的风矢量差来表示,在暖季其值如超过 12 m/s 则属于中等以上强度,如果超过 20 m/s 则属于强的深层垂直风切变;3) 冰雹融化层到地面的高度。如果因子 1) 和因子 2) 都较大,而因子 3) 不是太高(即高度适宜),则强冰雹的潜势就比较大[7]。

从对流有效位能(CAPE)、K 指数等能量条件来看,四次过程 CAPE 均在 1000 J/kg 以上、K 均在 32°C 以上、LI 均小于 -4°C 。但 CAPE、K 与气温关系较大,夏季 CAPE 和 K 往往较高。特别是 7 月份的二次过程 CAPE 均超过 2000 J/kg,而 5 月份大冰雹过程 CAPE 却只有 1200 J/kg,因此用 CAPE 和 K 来预报冰雹过程还应在不同季节设置不同的阈值。在日常预报中当某个季节出现异常高的 CAPE 和 K 时应引起关注,如 5 月 14 日大冰雹过程 K 指数达到了 38°C ,在五月份显得尤其偏高。

强冰雹天气对湿度条件有一定要求,特别是低层的湿度条件。5 月 14 日大冰雹过程由于早晨降雨的影响,低层湿度条件好,从整层大气可降水量(APW)可以看出,当天 APW 明显较高,达到了 55 mm。而小冰雹过程则不需要太高的 APW,高 APW 也未必会产生大冰雹。说明高的整层大气可降水量对大冰雹产生有利。

较强的垂直风切变(WS)是维持较长时间的雷暴内强上升气流的环境因素之一。四次冰雹过程垂直风切变均属于中等强度,5 月 14 日大冰雹过程垂直风切变最大,达到 18 m/s。垂直风切变和 CAPE 对于冰雹的发生可能存在互补的关系。

适宜的 0°C 及 -20°C 层高度是产生冰雹的必要条件。4 月 30 日冰雹过程 0°C 及 -20°C 层高度均较低,这应该是本次过程在水汽条件不佳的情况下仍能产生小冰雹的原因。5 月 14 日大冰雹过程 0°C 及 -20°C 层高度相较 7 月份两次过程偏低不明显。由于表 3 中列举的是干球温度高度(DBZ),根据资料[7],湿球温度高度(WBZ)低于干球温度高度,经过订正估算后的 0°C 层高度位于 2.7~4.2 km 区间,基本符合文献关于 0°C 及 -20°C 层适宜高度的总结[8]。

Table 3. The physical parameters of the four hail events in Changxing in 2021**表 3.** 2021 年长兴四次冰雹过程各物理量参数

	对流有效位能 (J/kg)	K 指数 (°C)	抬升指数 (°C)	T (850~500) (°C)	整层大气可 降水量(mm)	垂直风切变 (m/s)	0°C 层高度 (km)	-20°C 层高度 (km)
4月30日	1000	32	-4	32	25	15	3.3	6.1
5月14日	1200	38	-4	26	55	18	4.5	7.5
7月15日	2700	36	-8	28	53	12	4.8	7.9
7月16日	2100	36	-8	30	50	15	4.6	8.1

5. 雷达回波特征分析

如表 4 所示, 冰雹粒子尺寸大, 回波反射率强。四次冰雹过程中回波最大基本反射率均在 60 dBz 以上, 两次过程在 65 dBz 以上。7 月 16 日冰雹过程 65 dBz 以上回波范围小, 持续时间短; 5 月 14 日大冰雹过程 65 dBz 以上回波范围大, 在长兴境内持续时间达 30 min。

垂直积分液态含水量(VIL)可以反映风暴发展强弱, 四次冰雹过程中除 4 月 30 日过程外 VIL 均在 45 kg/m² 以上。其中 7 月 15 日冰雹过程水口回波 VIL 超过 70 kg/m², 但泗安回波 VIL 仅 45 kg/m², 但两地冰雹大小并没有明显差异。通过以上数据可以得到冰雹过程的 VIL 存在阈值, 但 VIL 的大小和冰雹直径没有明确的关系。

Table 4. Radar echo characteristics of four hail events in Changxing in 2021

表 4. 2021 年长兴四次冰雹过程雷达回波特征

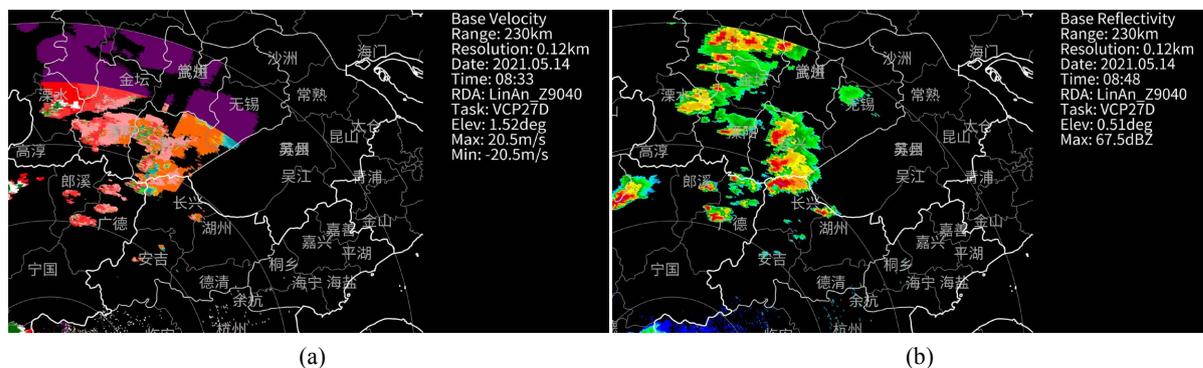
	最大反射率 (dBz)	最大垂直积分液态含水量 (kg/m ²)	回波顶高(km)	50 dBz回波伸展高度 (km)
4月30日	60	30	11	9
5月14日	65	70	16	13
7月15日	60	70	15	>6 km
7月16日	65	45	12	>6 km

冰雹云的上升气流强, 故回波顶高度往往较高。四次冰雹过程回波顶高均在 10 km 以上, 表明对流云体发展旺盛, 50 dBz 回波伸展高度均明显超过-20℃层高度, 有利于云中水滴凝结成冰雹(7 月份两次过程湖州雷达距离过近, 仰角不够测量回波高度)。

重点对 5 月 14 日大冰雹过程的超级单体分析其雷达回波特征。16 时 33 分在 1.5°仰角处观测到中气旋(见图 1(a)), 16 时 48 分在 0.5°仰角的出现有界弱回波区(BWER)和钩状回波(见图 1(b)), 这是超级单体的典型特征。16 时 48 分开始在连续多个时段观测到三体散射(TBSS)(见图 1(c))和“V”型缺口(见图 1(d)), 表明超级单体中含有大冰雹, “V”型缺口在整个影响长兴的过程中都可以观测到。

分析双偏振雷达中的一些参量, 从 ZDR 可以看出 16 时 48 分 0.5°和 1.5°仰角均存在明显的 ZDR 小于 0 dB 的区域, 表明大冰雹在超级单体中的位置, 在大冰雹区域的右侧是 ZDR 大值区, 表明该区域有大雨滴。同时次 KDP 图上, 冰雹区域对应 KDP 较小, 小于 1°/km, 大雨滴区域对应的 KDP 较大, 大于 3°/km。

分析该超级单体的移动路径。统计表明风暴单体越强右偏高空风越多, 成熟阶段右偏高空风 30° [9]。5 月 14 日大冰雹过程偏向引导气流右侧, 与 500 hPa 气流夹角 30°, 与 850 hPa 气流夹角 45°, 且进入太湖后, 右偏更加明显。



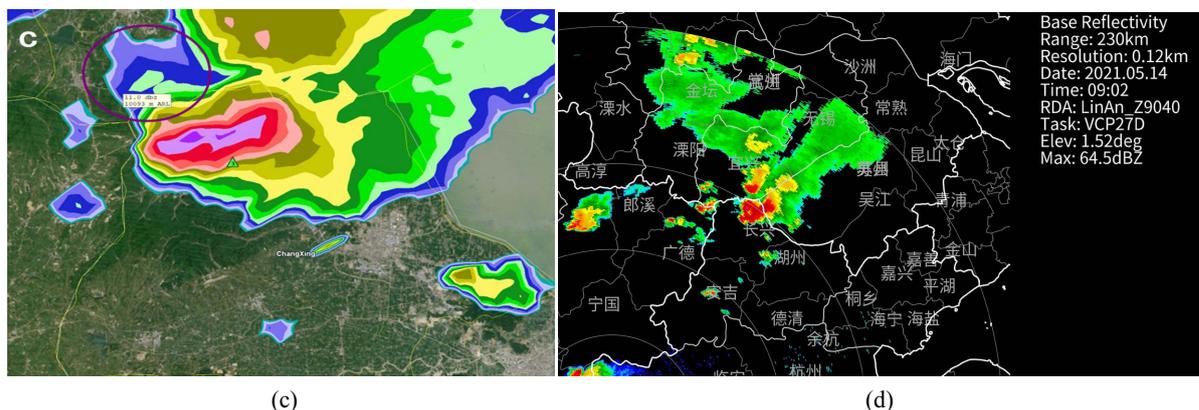


Figure 1. (a) Radar reflectivity factor on 0.5° elevation at 16:33; (b) Radar reflectivity factor on 0.5° elevation at 16:48; (c) Composited reflectivity factors at 16:48; (d) Radar reflectivity factor on 1.5° elevation at 17:02

图 1. (a) 16:33 1.5°仰角径向速度; (b) 16:48 0.5°仰角反射率因子; (c) 16:48 组合反射率; (d) 17:02 1.5°仰角反射率因子

6. 结论

1) 2021 年长兴四次冰雹过程一次为冷涡槽后型，一次为副高边缘型，两次为副高控制型；四次冰雹过程当天均出现了 30℃ 以上的较高气温，表明热力条件好，易形成不稳定层结。

2) 四次冰雹过程 CAPE ≥ 1000 J/kg 以上，K $\geq 32^\circ\text{C}$ 、LI $\leq -4^\circ\text{C}$ 、T(850~500) $\geq 26^\circ\text{C}$ ，WS ≥ 12 m/s，0℃及-20℃层高度适宜；极端大的 K 指数、整层大气可降水量、垂直风切变对大冰雹有预报意义，而 CAPE 和 K 在冰雹预报方面的应用应在不同季节设置不同的阈值。

3) 四次冰雹过程反射率 ≥ 60 dBz，回波顶高 ≥ 10 km，50 dBz 回波伸展高度明显超过-20℃层高度，总体来看反射率依然是预报冰雹最直观最便捷的指标；VIL 的大小和冰雹直径没有明确的关系，极端大的 VIL 对冰雹预报有意义；5 月 14 日过程有明显中气旋、BWER、TBSS、“V”型缺口、负 ZDR、低 KDP 等超级单体和冰雹特征。

基金项目

浙江省气象局预报员专项项目“FY-4A 和双偏振雷达在湖州冰雹过程中的应用”(2021YBY08)。

参考文献

- [1] 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分析[J]. 气象, 2016, 42(5): 567-577.
- [2] Aydin, K. and Singh, J. (2004) Cloud Ice Crystal Classification Using a 95GHz Polarimetric Radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **21**, 1679-1688. <https://doi.org/10.1175/JTECH1671.1>
- [3] 曹俊武, 刘黎平. 双偏振多普勒雷达识别冰雹区方法研究[J]. 气象, 2006, 32(6): 13-19.
- [4] 孙丝雨, 沈永梅, 霍苗, 等. 双线偏振雷达在一次强降水过程中的初步应用[J]. 暴雨灾害, 2013, 32(3): 249-255.
- [5] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 2008: 401-437.
- [6] 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: 130-180.
- [7] 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: 224-226.
- [8] 仇娟娟, 何立富. 苏沪浙地区短时强降水与冰雹天气分布及物理量特征对比分析[J]. 气象, 2013, 39(5): 577-584.
- [9] 陈秋萍, 陈齐川, 冯晋勤, 等. “2012.4.11”两个强降水超级单体特征分析[J]. 气象, 2015, 41(1): 25-33.