

文章编号: 1673-8411(2019)02-0016-06

一次低涡型冰雹天气的环境条件和中尺度特征分析

钱卓蕾¹, 杨祥珠¹, 钱月平¹, 周弘媛², 季丹丹²

(1. 绍兴市气象台, 浙江 绍兴 312000; 2. 柯桥区气象局, 浙江 绍兴 312030)

摘要: 利用常规天气观测、多普勒天气雷达、自动气象站和NCEP $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 格点再分析资料, 研究在绍兴发生的一次典型低涡型冰雹天气过程环境场和中尺度特征, 结果表明: 此次冰雹天气出现在西北冷涡的右前方, 中高层的干侵入激发了对流不稳定; 中尺度辐合线出现在对流风暴的前沿, 是由冷池出流与外界暖湿气流交汇而形成, 为强对流的发展提供了近地面辐合抬升条件; 本次过程先后有三个明显的强单体风暴产生, 回波核心区高度均扩展到 -20°C 层以上, 符合弱回波区、悬垂回波和中低层径向辐合的强对流风暴结构, 还具有标志大冰雹的三体散射特征(TBSS)。在降雹前最大反射率因子(DBZM)及其所在高度(DBZM HT)的突降和垂直累积液态水含量(VIL)的突增可作为判断降雹的指标。

关键词: 冰雹; 低涡; 中尺度切变线; 干侵入; TBSS

中图分类号: DH

文献标识码: A

Environmental Conditions and Mesoscale Characteristics of a Low Vortex Hail Weather

Qian Zhuolei¹, Yang Xiangzhu¹, Qian Yueping¹, Zhou Hongyuan², Ji Dandan²

(1. Shaoxing Meteorological Observatory, Shaoxing Zhejiang 312000;

2. Kejiao District Meteorological Service, Shaoxing Zhejiang 312030)

Abstract: Based on data from conventional weather observation, Doppler weather radar, and automatic weather station, as well as NCEP $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ reanalysis data, the environmental field and mesoscale characteristics of a typical low vortex hail weather process in Shaoxing are studied. The results show that the hail weather appears in the right front of the northwest cold eddy, and the dry intrusion of the middle and upper levels stimulates convective instability. Mesoscale convergence line appears at the front of convective storm, which is formed by the convergence of cold pool outflow and warm-humid air flow outside, which provides the condition of near-surface convergence and uplift for the development of strong convection. There are three distinct strong monomer storms in this process and the echo core area all extends above -20°C , which conforms to the structure of strong convective storms in weak echo area, suspended echo and radial convergence in the middle and lower layers. It also has the characteristics of three-body scattering (TBSS), which marks the large hail. The sudden drop of maximum reflectance factor (DBZM) and its height (DBZM HT) as well as the sudden increase of vertically integrated liquid water content (VIL) before hail fall can be used as indicators to judge hail.

Keywords: hail; low eddy; mesoscale shear line; dry intrusion; TBSS

引言

冰雹往往具有历时短, 灾害重的特点, 预报技术难度大。近年来, 全国各地对冰雹个例研究

越来越多, 对其形成机制有了更深的认识。冰雹是中尺度对流活动发展的结果, 热力不稳定决定对流发展的强度, 而动力作用对触发对流及决定风暴类型起重要作用^[1-2]; 地形和下垫面物理过

收稿日期: 2018-12-10

基金项目: 中国气象局预报员专项 CMAYBY2018-031

作者简介: 钱卓蕾(1985-), 女, 硕士, 副高级工程师, 主要从事天气预报和气候研究。E-mail: qianzl@mail.iap.ac.cn

程对于冰雹的落区和强度都有重要影响^[3-5]; 冷池与周边高能区形成中尺度能量锋, 诱发次级环流使雹云得以发展维持^[6]; 冰雹的研究中常采用探空资料分析环境参数特征^[7-8]; 金米娜等^[9]对一次江西冰雹天气的分析表明, 对流层中低层强热力不稳定和强动力不稳定为冰雹生成和增长提供了不稳定机制; 冰雹的发生需要较强的垂直温度梯度, 上干下湿的层结配合对流层低层垂直切变带来的动力抬升作用, 易形成降雹^[10-12]; 多普勒雷达是探测冰雹的重要手段, 许多专家对降雹时的反射率因子、垂直累积液态水含量等变化特征也做了许多研究工作^[13-15]。

以上研究结果在提高冰雹的潜势预报分析有很大的指导作用, 但预报冰雹仍是技术难点。2017年6月30日18~22时绍兴自西南向东北遭受了一次冰雹天气的袭击。降雹范围较大, 嵊州、诸暨、柯桥、越城都出现雹区, 降雹时间为十几分钟, 冰雹直径2~3cm。本文以这次降雹过程为例, 研究降雹过程发生发展和演变的环境背景、中尺度条件以及雷达回波特征, 探讨冰雹天气的预报着眼点, 为以后类似的冰雹天气预测预警提供有益的参考。

1 资料来源

文中所用资料为绍兴市地面、高空等常规气象观测资料, 卫星、雷达、自动站等非常规观测资料, 以及NCEP1.0°X1.0°的再分析资料。

2 环境场分析

2.1 高空形势分析

6月30日08时(图1(a)), 500hPa长江中游地区为一个低涡控制, 低涡在12小时内稳定少动(图1(b)), 低涡东西宽约10个纬距, 中心在110°E附近, 闭合低涡中心较深厚, 从850hPa一直延伸到500hPa; 此时西太平洋副高中心强度维持在592gpm, 位置较稳定, 阻挡上游低涡的东移。低涡底部盛行偏西气流, 与副高西北侧的西南气流在30°N附近形成一范围较广的气流汇合区。浙江上空处于低涡的右前方暖区内, 距离低涡中心10个经距, 雹区出现在冷涡的东南象限。从700到200hPa, 120°E、30°N附近及上游地区都是西南气流, 暖区强并发展深厚, 中低层31~33°N、110~120°E形成一条东南~西南风的切变线, 切变线的南侧有一支不断加强的中低层暖湿气流输送带。700百帕的西南急流中心最大风速达20m·s⁻¹, 为对流发生提供了水汽和能

量。从24小时变温分析, 500hPa图上浙江西部为-1°C负变温区, 表明中高层有冷空气侵入。在低涡前部广阔范围内, 盛行辐合上升气流, 中低层暖湿气流输送带加暖式切变, 遇中高层的干冷空气和正涡度平流的触发, 导致冰雹强对流天气。

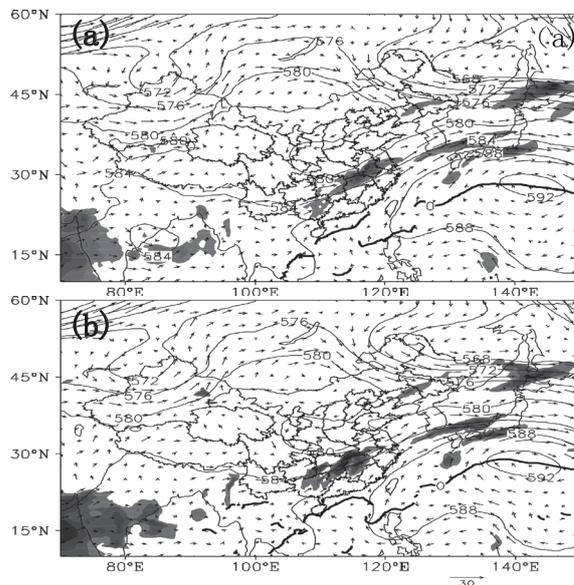


图1 500hPa 位势高度场和850hPa 风场配置((a)、30日08时; (b)、30日20时)(阴影代表850hPa 风速 ≥ 12 m·s⁻¹)

2.2 地面中尺度特征分析

利用自动站网逐小时的加密资料, 对地面温湿风等气象要素进行中尺度分析, 揭示冰雹天气近地面的中尺度特征。

6月30日18时(图2(a)), 金华地区有雷暴发展, 1.5hPa的1小时正变压中心位于金华与义乌交界, 正变压中心对应-3°C负变温中心, 负变温中心稍落后, 对应冷池所在位置, 强的出流与外侧较湿的东风气流相互作用在下游诸暨西部-磐安一带形成中尺度辐合线, 表明此时强对流发生的中尺度动力条件已经具备, 而中尺度辐合线附近站点的气温达到了30~32°C左右, 有较大的不稳定能量, 近地面的热力条件也已经具备。在金华境内的原有单体前方磐安附近新生对流单体, 中尺度辐合线的存在使得对流风暴快速发展并逐渐向东北方向移动进入嵊州境内, 实况在18:20~18:40, 嵊州贵门和崇仁镇附近出现了2~3cm冰雹、大风和短时强降水。19时(图2(b)), 正变压中心移动至上一时次中尺度辐合线的位置, 中心强度加强至2hPa, 负变温中心也加强至-5°C。冷池前沿的出流与前沿暖湿的东南气流汇合, 使得中尺度辐合线移动至柯桥至诸暨一带。对流风暴主体在19时后进入诸暨境内, 在诸暨造成了大范围的8~10级雷雨大风和局地冰雹天气。20时(图2(c)), 雷暴高压中心

(正变压中心)位置和强度基本不变,其东北部新生一个1.2hPa的正变压中心,负变温中心移动至绍兴中部,中尺度辐合线仍然位于柯桥~诸暨,19~20时内位置稳定少动,对流系统移动方向与辐合线北段走向基本一致,受辐合带沿线气

流的扰动上升作用,风暴持续发展,强度加强,使得辐合线附近均出现了冰雹、大风和短时强降水。地面辐合线往往出现在对流风暴的前沿,因此中尺度辐合线的出现对对流风暴的走向、冰雹及大风天气的预报具有预警指示意义。

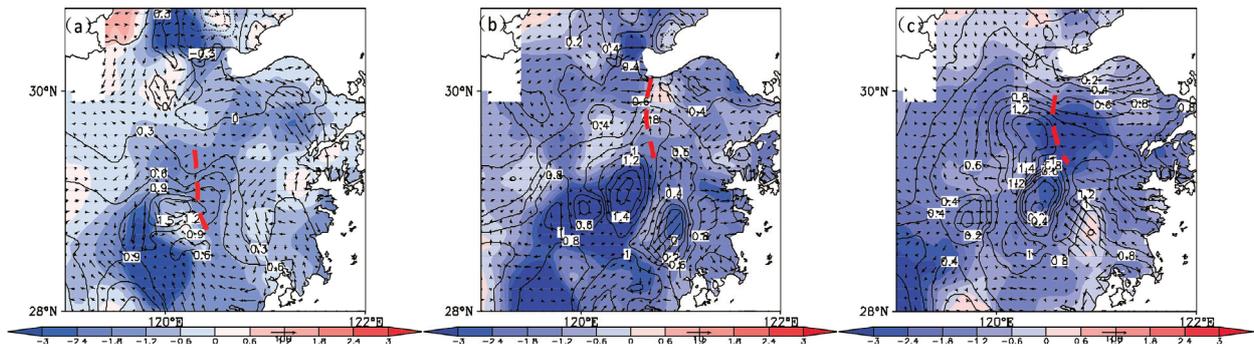


图2 6月30日18时~19时自动站风场、温度场(填色区)和一小时变压场(等值线)
(a): 30日18时, (b): 30日19时, (c): 30日20时

3 对流风暴演变和结构特征

2017年6月30日降冰雹过程主要发生在17时至21时,先后产生3个强单体(图3),第一阶段,17~20时,单体A首先在磐安生成,在西南气流作用下,向东北方向移动并发展,穿过东阳进入嵊州境内,造成嵊州市贵门、崇仁、富润等乡镇的冰雹和大风。第二阶段:20~21时,富阳地区的带状回波进入诸暨境内后,分裂为两个单体B和C,分别造成诸暨市陶朱街道、柯桥福全镇和绍兴城区的冰雹和大风。

第一阶段:对流单体A于17:30前后在磐安县境内生成,17:58,单体A移动至东阳境内,并迅速发展成强风暴,最大反射率因子超过65dBz,垂直剖面图上明显的悬垂回波和弱回波区,VIL中心值首次超过 $70\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,已经具备降大冰雹的潜势;18:26,单体A进入嵊州(图4), $1.5\text{--}6.0^\circ$ 仰角上反射率因子核心区值均在60dBz以上, $2.4\text{--}3.4^\circ$ 仰角还有指示空中大冰雹区的三体散射长钉特征回波,TBSS长钉的最大长度约15 km,从沿雷达径向 230° 所作的反射率因子垂直剖面图上可见,60dBz强回波高度伸展至10km附近,位于 -20°C 层以上,最大反射率因子达65dBz,60dBz以上的强反射率出现在4km以上,超过 0°C 层高度,6~9km之间有明显的钉状回波。在速度场上, 0.5° 和 1.5° 仰角出现气旋性辐合,其中 0.5° 仰角上气旋性辐合最明显,沿着雷达方向,左侧入流中心风速达到 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,而 2.4° 和 3.4° 仰角上对应有辐散,反映在对流风暴中层有气旋结构形成,VIL中心值 $68\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,随后嵊州贵

门附近出现冰雹。下一体扫,18:32分,TBSS特征仍维持, 0.5° 仰角上的入流中心风速进一步加大,出现速度模糊,退模糊后,速度值为 $28\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,气旋性辐合进一步发展, 1.5° 仰角入流中心也出现速度模糊。18:37,TBSS特征消失,回波中心值降低为55dBz,低层气旋式辐合也减弱,VIL中心值迅速降低至 $58\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,风暴A减弱;18:54(图略),对流风暴在东北移动过程中获得二次加强,最大反射率因子超过65dBz, $2.4\text{--}3.4^\circ$ 仰角再次出现TBSS特征,反射率因子剖面图上呈现3km以下的弱回波区WER结构和其上的悬垂回波,核心区($>65\text{dBz}$)从9km高度($>-20^\circ\text{C}$ 层高度7.5km)一直扩展到3km。 0.5° 仰角上有明显气旋性辐合结构,出流中心风速出现速度模糊,真实速度值达到 $28\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,此时VIL中心值达到 $65\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,观测到嵊州崇仁、富润出现了大冰雹。TBSS特征一直持续到19:10,回波再一次减弱,降雹基本结束。

第二阶段:位于东阳的另一狭长回波带向下游移动,19:49,带状回波进入诸暨南部。20:06,回波带分裂成两个单体,左侧单体B移动方向偏西北,右侧单体C仍东北向移动。20:23(图略),单体B移动至诸暨西北部(254.0° , 134.4km),最大反射率因子超过65dBz, $2.4\text{--}3.4^\circ$ 仰角出现TBSS特征,钉状回波长度较短,垂直剖面上可见60dBz的强反射率出现在5~8km之间, 0.5° 仰角上出现类似中气旋的结构,入流中心速度值达到 $-24\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,出流中心速度值为7m/s,表明这是一个发展旺盛的超级单体,随后20:25,诸暨陶朱街道出现冰雹。单体B出现

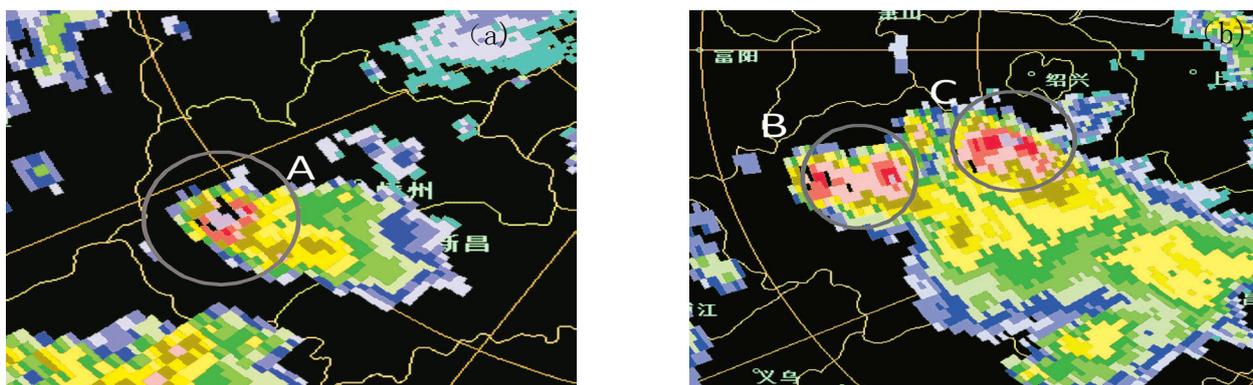


图 3 2017 年 6 月 30 日 18:54 (a) 和 20:28 (b) 反射率因子图 (仰角 1.5°) (白色圆圈代表强单体)

TBSS特征的持续时间短, 两个体扫后, 20:32, TBSS特征就不明显了, 回波强度明显减弱, 因而降雹时间短。单体C在东北移动过程中, 强度较稳定, 最大反射率因子始终在65dBz以上, 20:39 (图略), 单体C移入柯桥, $1.5\text{--}2.4^\circ$ 仰角出现钩状回波, $2.4\text{--}4.3^\circ$ 仰角上都出现了明显的三体

散射特征, 钉状回波最长达30km, 垂直剖面图上60dBz以上的强反射率从3km向上一直延伸到9km附近, 在 0°C 层和 -20°C 层之上。速度图上 0.5 到 1.5° 有较大范围逆风区, 表明存在低层辐合, 2.4 和 3.4° 仰角有明显的辐散结构, VIL中心值 $58\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 下一体扫, 迅速增大至 $70\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 20:40-20:55,

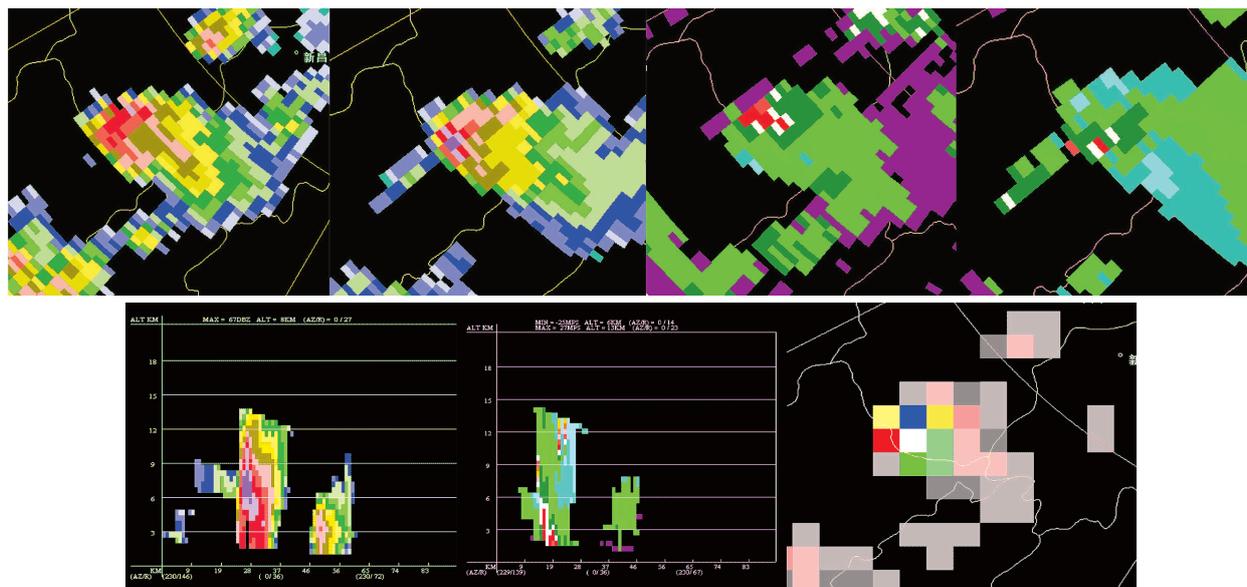


图 4 2017 年 6 月 30 日 18:26 反射率因子 (1.5° 、 3.4° 仰角)、径向速度 (0.5° 、 2.4° 仰角) 及其垂直剖面、VIL 分布

柯桥福全镇、绍兴城西地区陆续出现冰雹, 此后单体继续北上, TBSS和低层强辐合、高层强辐散的特征一直持续到21:01, 城北、齐贤镇相继出现冰雹。

4 风暴属性时间序列分析

分析三个强风暴全过程的最大反射率因子和最大反射率因子高度随时间的演变 (图 5) 可以发现降雹期间, 最大反射率因子 (DBZM) ≥ 60 dBz, 最大反射率因子高度 (DBZM HT) 基本 ≥ 4.5 km。降冰雹前 10-15min 内最大反射率因子及其高

度都出现降低的现象。对于单体 A, 出现降雹的大致起始时间为 18:00 和 18:55, 17:53-17:58, DBZM 和 DBZM HT 分别从 65dBz 和 6.9km 减少到 63dBz 和 4.5km, 18:48-18:54, DBZM 和 DBZM HT 分别从 68dBz 和 8.8km 减少到 66dBz 和 6.8km; 对于单体 B, 出现降雹的大致起始时间为 20:26。20:17-20:23, DBZM 和 DBZM HT 分别从 63dBz 和 2km 降低到 61dBz 和 6.8km。对于单体 C, 出现冰雹的大致起始时间为 20:40 和 20:58, 20:34-20:39, DBZM 和 DBZM HT 分别从 72dBz 和 6.2km 减小到 70dBz 和 6.0km, 20:50-20:56, DBZM 和 DBZM HT 分别从 67dBz 和 5.9km 减小到 65dBz 和

5.7km。以上说明降雹是发生在衰减期的。这次雹暴的最大反射率因子及其所在高度的演变特征和降雹前DBZM和DBZM HT降低的现象与冰雹的发生有很好的相关性,能为临近预报提供参考依据。

图5也给出了风暴VIL随时间的演变,可以发现降雹前10~15min内VIL都会出现急速跃增。对于A,17:42~17:53,风暴的VIL核心值一直低于 $50\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,17:58,VIL急增至 $70\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,并维持 $65\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上的VIL值长达6个体扫,之后减弱至 $60\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 以下,而到了18:48,再次跃增至 $68\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,下一体扫增至 $70\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。对于B,20:12~20:17,VIL值由 $53\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 升至 $58\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,20:17~20:23,VIL值由 $58\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 跃增至 $68\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,之后迅速降低至 $55\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 之下。对于C,20:28之前VIL中心值 $<55\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,20:34增大至 $58\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,20:39急增至 $70\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,但只维持一个体扫,20:50~20:56,再次突增,VIL中心值达到 $68\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,21:12开始,迅速减小至 $55\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 以下。可见VIL的变化,尤其是突然急增的特性,也可作为判断降雹的指标之一。

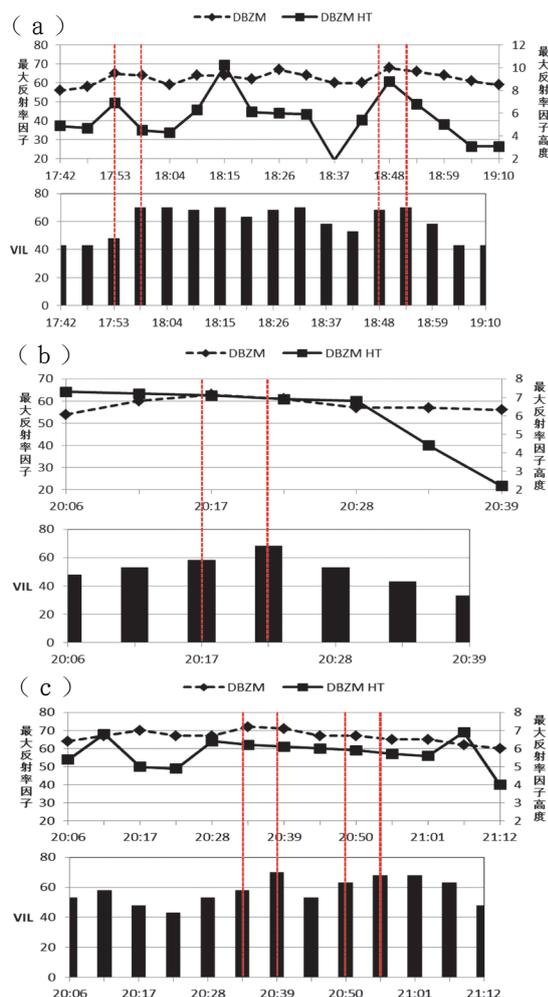


图5 2017年6月30日风暴A(a)、B(b)、C(c)最大反射率因子、最大反射率因子高度和VIL演变趋势

5 结论

通过对“6.30”低涡型冰雹天气过程的环流背景、物理量场、对流参数以及多普勒雷达产品的分析,得到以下结论:

(1)此次冰雹天气出现在西北冷涡的右前方,距离冷涡大约10个经距,中高层的干冷空气侵入和低层的增湿回暖激发了对流不稳定。低层切变线的存在为冰雹的发生提供了大尺度动力条件,而700hPa西南急流一方面提供了建立不稳定层结的低层暖湿条件,另一方面,为降雹提供了充足的水汽。

(2)地面中尺度辐合线在冰雹天气过程中起到抬升触发作用。地面辐合线往往出现在对流风暴的前沿,由雷暴高压和冷池的出流与外界暖湿气流相互作用而形成,对对流风暴的走向、冰雹及大风天气的预报具有预警指示意义。

(3)该过程中先后产生3个较明显的强单体,三个单体均具有强烈对流风暴的典型回波特征:反射率因子图上的悬垂结构、弱回波区和中小层辐合结构,还具有标志大冰雹的三体散射长钉特征回波。强单体的最大反射率因子和最大反射率因子高度在随时间演变过程中有几次跃增和同步,且在降雹前都出现了降低的现象,说明降雹发生在单体的衰减期。出现冰雹时,VIL通常会出现跃增,降雹结束后,VIL迅速递减,这种特性对于判断冰雹发生非常有效。

参考文献:

- [1] 张凌云,刘蕾,王艺,等.一次冰雹天气的数值模拟及地形敏感性试验[J].气象研究与应用,2018,39(2):33-40.
- [2] 周长青,徐冬英,徐靖宇,等.2016年春季湖南一次连续冰雹天气过程个例分析[J].气象研究与应用,2017,38(4):22-26.
- [3] 孙继松,石增云,王令.地形对夏季冰雹事件时空分布的影响研究[J].气候与环境研究,2006,11(1):76-83.
- [4] 杨军,张磊,李宝东,等.太行山东麓一次强对流降雹过程中的地形强迫[J].大气科学学报,2017,40(2):253-262.
- [5] 王华,孙继松.下垫面物理过程在一次北京地区强冰雹天气中的作用[J].气象,2008,34(3):16-21.
- [6] 尉英华,陈宏,张楠,等.冷涡影响下一次冰雹强对流天气中尺度特征及形成机制[J].干旱气象,2018,36(1):27-33.
- [7] 周后福,邱明燕,张爱民,等.基于稳定度和能量指标作强对流天气的短时预报指标分析[J].高原气象,2006,25(4):716-722.
- [8] 雷蕾,孙继松,魏东.利用探空资料判别北京地区夏季强对流的天气类别[J].气象,2011,37(2):136-141.

(下转第85页)

日数 7.1d; 夏季多光照且雨量充足, 年日照时数平均为 1470.8h。

(2) 马山人体的舒适期长, 全年有 9 个月(1-5 月及 9-12 月) BCMI 处于 4-6 级之间, 总天数达 276d, 属一类气候适宜区。4 月、10 月、11 月为 5 级, 人体感觉“最为舒适”, 主要时段为 3 月 16 日至 5 月 1 日和 10 月 5 日至 11 月 24 日; 2 月、3 月、12 月为 4 级, 人体感觉“偏凉, 大部分人舒适”; 5 月、6 月、9 月为 6 级, 人体感觉“偏热, 大部分人舒适”。

(3) 人居环境舒适月数适中, 舒适期为 6 个月(3-5 月、8-10 月), 主要时段为 3 月 17-23 日、3 月 27 日至 6 月 5 日和 9 月 12 日至 11 月 20 日。

(4) 马山全年 12 个月均适宜旅游度假, “特别适宜”的月份高达 8 个(4 月、10 月、11 月 HCI 值均超过 86, 10 月 HCI 值高达 89), 主要时段为 2 月 6 日至 5 月 25 日和 9 月 9 日至 12 月 25 日, “很适宜”的月份有 4 个(1 月、6 月、7 月、8 月)。

(5) 综合 BCMI、THI、WEI 和 HCI 等 4 个指数的舒适性评估, 最为适宜旅游度假的时段有两个, 分别为 3 月 27 日至 5 月 1 日和 10 月 5 日至 11 月 20 日, 其余时段的旅游适宜性需要进一步探讨。最为适宜旅游度假时段可为马山合理开发特色旅游产业提供参考, 也可帮助游客选择适合的出行时间。

参考文献:

- [1] Terjung W H. Physiologic climates of the conterminous: a bioclimatic classification 29(3): [J]. Annals of The Association of American Geographers, 1996, 5(1): 141-179.
- [2] Oliver J E. Climate and man's environment: An Introduction to applied climatology [M]. John

Wiley & Sons Inc, 1978.

- [3] Mieczkowski Z. The tourism climatic index: A method of evaluating world climates for tourism EJ3 [J]. The Canadian Geographer, 1985, 29(3): 220-233.
- [4] Mantao Tang. Comparing the “Tourism Climate Index” and “Holiday Climate Index” in Major European Urban Destinations [M]. University of Waterloo, 2013.
- [5] 胡桂萍. 丽水市旅游气候舒适度分析 [J]. 气象科技, 2015, 43(4): 769-774.
- [6] 王凯, 高媛, 刘敏, 等. 利川市旅游气候适宜性的评价和比较 [J]. 气象科技进展, 2018, 8(5): 103-106.
- [7] 刘子豪, 黄建武, 孔德亚, 等. 近 50 年武汉市人体舒适度指数变化特征分析 [J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2018, 41(5): 64-69.
- [8] 龙亚萍, 李立华. 四川省山地旅游气候资源评价 [J]. 山地学报, 2018, 36(1): 116-124.
- [9] 李艳兰, 周美丽. 西江流域旅游气候舒适度的时空变化特征分析 [J]. 气象研究与应用, 2014, 35(3): 65-70.
- [10] 杨银华, 徐苏佩, 柳继尧. 内江市东兴区旅游气候资源的评价及开发利用 [J]. 气象研究与应用, 2016, 37(4): 77-81.
- [11] 叶小丽, 韦佩琼, 覃茹芊. 广西巴马县近十年旅游舒适度分析 [J]. 气象研究与应用, 2012, 33(S2): 84-85+89.
- [12] 邓雅倩, 林确略, 彭武坚, 等. 大容山国家森林公园旅游气候舒适度评价 [J]. 气象研究与应用, 2015, 36(3): 45-49.
- [13] 王艺, 蓝求, 张凌云, 等. 近 30 年柳州市旅游气候舒适度评价 [J]. 气象研究与应用, 2018, 39(2): 48-51+145.
- [14] 黎大美, 何珊. 贺州市人居环境气候舒适度特征分析 [J]. 气象研究与应用, 2017, 38(1): 117-121.
- [15] 黄冬梅, 卢丽莉, 黄章帆. 凤山县气候特征及其适宜性评价 [J]. 气象研究与应用, 2015, 36(3): 50-52.
- [16] 黎馨, 葛意活, 吴蒨茵, 等. 贺州市旅游气候资源评估分析 [J]. 气象研究与应用, 2018, 39(2): 52-55+67.
- [17] GB/T 27963-2011, 人居环境气候舒适度评价 [S]. 2015, 36(3): 50-52.
- [18] 吴兑, 邓雪娇. 环境气象学与特种气象预报 [M]. 北京: 气象出版社, 2001: 162-179.

(上接第 20 页)

- [9] 金米娜, 陈云辉, 许爱华, 等. 2013 年 3 月 19 日江西省冰雹天气成因分析 [J]. 暴雨灾害, 2013, 32(2): 158-166.
- [10] 邝美清, 蒋宗孝, 张家斌, 等. 2013 年 3 月 20 日三明市大范围冰雹过程分析 [J]. 广东气象, 2014, 36(5): 36-40.
- [11] 袁红松, 廖忠辉, 彭辉志, 等. 湘潭市一次冰雹天气过程分析 [J]. 贵州气象, 2014, 38(6): 30-33.
- [12] 王晓玲, 龙利民, 王珊珊. 一次春季冰雹过程的成

因分析 [J]. 暴雨灾害, 2010, 29(2): 160-165.

- [13] 张晓红, 柴化全, 黄春生, 等. 一次超级单体风暴的天气学成因及多普勒雷达回波特征研究 [J]. 气象科学, 2006, 26(4): 392-399.
- [14] 陈关清, 方标. 贵州铜仁暴雨和冰雹雷达回波特征对比分析. 气象研究与应用. 2015, 36(1): 72-75.
- [15] 张正国, 邹光源, 刘丽君, 等. 雷达回波顶高 (ET) 产品在广西冰雹云识别中的应用研究 [J]. 气象研究与应用, 2014, 35(4): 89-92.