

易文军,石兴琼,何炳文,等.湘西北一次强冰雹天气雷达回波特征分析[J].陕西气象,2021(4):16-21.

文章编号:1006-4354(2021)04-0016-06

# 湘西北一次强冰雹天气雷达回波特征分析

易文军<sup>1</sup>,石兴琼<sup>2</sup>,何炳文<sup>3</sup>,梁可<sup>1</sup>

(1. 张家界市气象局,湖南张家界 427000;2. 石棉县气象局,四川石棉 625400;  
3. 常德市气象局,湖南常德 415000)

**摘要:**利用常规观测资料和张家界新一代多普勒雷达资料对2020年3月21日晚—22日凌晨发生在湘西北地区的冰雹天气过程进行了分析,结果表明:“上干下湿”喇叭口特征的不稳定层结,合适的0℃层与-20℃层高度,在地面冷空气和辐合线的触发机制下,利于冰雹、雷暴大风和短时强降雨等强对流天气的形成;此次冰雹天气是由典型的超级单体风暴对流发展造成,其主要特征表现为三体散射、旁瓣回波、悬垂回波以及风暴顶强辐散等;三体散射(TBSS)最强反射率因子达76 dBz,最大“长钉”长度47 km,“长钉”长度越长,冰雹直径越大,TBSS的出现,预示有大冰雹;旁瓣回波最大切向长度达46 km,其只显示在风暴核切向上反射率因子梯度大值区一侧,当风暴核径向外侧有真实回波而三体散射不清晰时,旁瓣回波可更好地预警冰雹;风暴体VIL密度 $\geq 4.0 \text{ g/m}^3$ 是湘西北大冰雹的有效预警指标。

**关键词:**冰雹;三体散射;旁瓣回波;VIL密度

**中图分类号:**P458.1212

**文献标识码:**A

湘西北山区是我国南方多雹灾地区,也是湖南省春季冰雹的易发区,由于其特殊的地形和气候特征,春季冰雹多发,雹灾较重。冰雹是一种具有突发性、范围小、持续时间短、破坏性强的灾害性天气,短时间内可以对农业、交通、电力、建筑和人民生命财产造成重大损失。近年来,国内外有关冰雹天气的研究已有很多重要成果。廖玉芳等<sup>[1]</sup>详细地讨论了我国S波段多普勒天气雷达三体散射的统计特征。朱敏华等<sup>[2]</sup>分析了强烈雹暴三体散射的多普勒天气雷达基本反射率因子的形成机制。汤兴芝等<sup>[3]</sup>归纳总结得出利用45 dBz雷达回波高度可较好地识别冰雹云。刘嘉慧敏等<sup>[4]</sup>通过商南地区一次强雹暴天气的环境条件和雷达回波结构特征分析,得出垂直积分液态含水量密度(VILD)跃增能更好地提前指示大冰雹。张昆等<sup>[5]</sup>对怀化地区近15年降雹时空分布以及环境参量特征分析总结,得出高架对流类是怀化

地区降雹最主要的天气形势,且多发生在2—3月的午后或傍晚,冰雹直径较小。鲍向东等<sup>[6]</sup>对河南省冰雹天气环境参量特征分析统计,得出一些适合河南地区的降雹参量阈值。刘兵等<sup>[7]</sup>对张家界多个冰雹个例进行了分析,给出了冰雹预警的几个实用指标。本文利用常规观测资料和张家界多普勒雷达监测资料,对2020年3月21日晚—22日凌晨(北京时,下同)湘西北冰雹天气个例开展研究,着重分析三体散射(TBSS)、旁瓣回波、垂直积分液态含水量(VIL)和VIL密度等特征,以为湘西北冰雹预警提供参考依据。

## 1 降雹实况和环流背景

### 1.1 降雹实况

2020年3月21日20时—22日02时湘西北地区出现了强冰雹天气过程,并伴有短时强降雨、雷暴大风天气,其具有移速快、局地性强、冰雹颗粒大小分布不均的特点(图1a)。桃源县沙坪镇

收稿日期:2021-03-15

作者简介:易文军(1985—),男,汉族,湖南张家界人,理学学士,工程师,从事短期、短临预报预警研究。

基金项目:湖南省气象局预报员专项(XQKJ18C012)

附近冰雹直径 45 mm,永顺县郎溪乡、沅陵县五强溪镇和桃源县竹园村冰雹直径 30 mm,持续时间 9~18 min。此外,永定区城区和慈利县高桥镇均出现直径小于 20 mm 的小冰雹,持续时间约 5~8 min。

## 1.2 环流背景

从 3 月 21 日 20 时环流背景形势场的综合分析(图 1b)可以看出,500 hPa 上有一短波槽位于四川中部一带,在 24 h 内将快速东移影响湘北地

区,850 hPa 上湘北至贵北一带存在南北风向的切变线,该切变线以南西南急流发展旺盛,急流核最大风速达 18 m/s。地面场上整个湘北地区受暖低压控制,鄂南一带有冷空气侵入暖低压,冷暖交汇加剧了不稳定能量的释放,此外,在 850 hPa 切变线附近有地面辐合线,有利于触发强对流天气。综合来看,湘西北地区在 21 日 20 时处于高温高湿场中,大气层结不稳定,在地面辐合线和冷空气的触发下,引发了此次强对流天气。

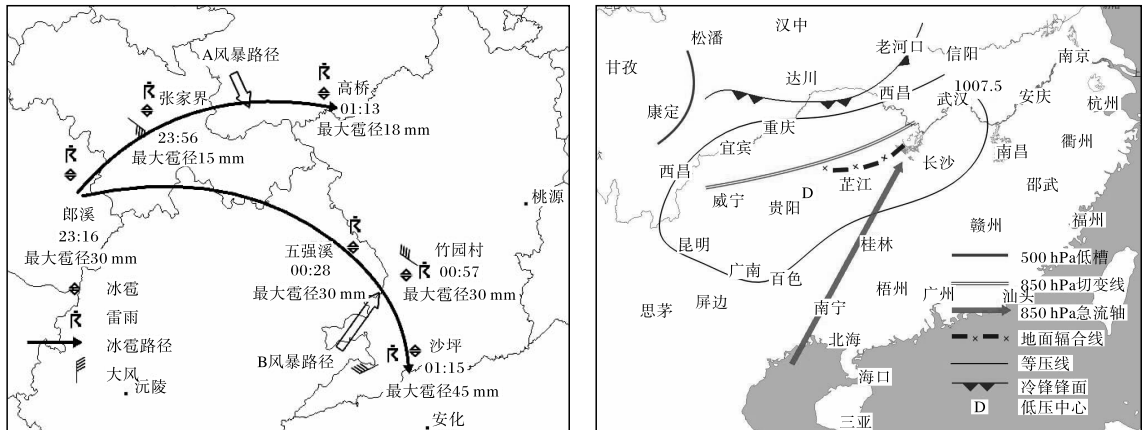


图 1 2020-03-21T20:00—22T08:00 强天气实况分布图(a)和 2020-03-21T20:00 环流背景综合分析(b)

图 2 为怀化、恩施 3 月 21 日 20 时的探空曲线。湘西北地区整层都是“上干下湿”的喇叭口层结特征,非常有利于强对流天气的发生。怀化站探空显示 CAPE 值 1 180 J/kg,K 指数 38.4 °C, SI 指数 -2.76 °C,0 °C 层高度 4.6 km,-20 °C 层高度 7.0 km,0~6 km 垂直风切达 18 m/s,700 hPa 以下为暖平流,中高层为冷平流,低层暖湿高层干冷,大气层结不稳定。恩施探空显示 CAPE 值 611.3 J/kg,K 指数 36.4 °C,SI 指数

-0.25 °C,0 °C 层高度 3.7 km,-20 °C 层高度 6.8 km,0~6 km 垂直风切达 30 m/s。综合来看,0~6 km 垂直风切变属于强垂直风切变,可以增强中层干冷空气的吸入,加强风暴中下沉气流和低层冷空气外流<sup>[8]</sup>。“上干下湿”的层结不稳定,0 °C 层高度约 4.2 km,-20 °C 层高度约 6.9 km,适宜湘西北地区冰雹天气发生。环境条件有利于超级单体风暴的形成和发展以及大冰雹和雷暴大风的产生。

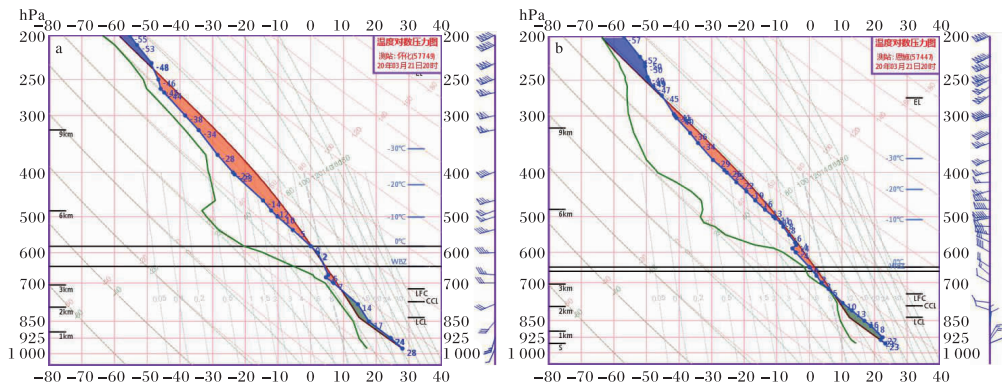


图 2 2020-03-21T20 温度对数压力图(a 怀化;b 恩施)

## 2 多普勒雷达特征

### 2.1 雷达回波演变

21日21:34永顺县大坝乡附近对流风暴开始发展,21:52最强反射率因子达63 dBz,回波顶高达11 km,从风暴开始发展到回波达到60 dBz用时仅18 min,可见该风暴发展非常迅速且强烈,在极短时间内发展成为超级单体风暴。21:52在2.4°、3.4°、4.3°仰角上均出现了三体散射“长

钉”(TBSS)(图3a),风暴发展到22:16,在3.4°和4.3°仰角上出现了旁瓣回波(图3b)。23:16,该超级单体风暴分裂为两个超级单体风暴A和B,A风暴位于永定区后坪镇附近,B风暴位于永顺县和沅陵县交界处。A、B风暴最大回波强度均超过60 dBz,且B风暴比A风暴更强盛。A、B风暴移动路径的区域内均出现了不同程度的冰雹,并伴有雷雨大风天气。

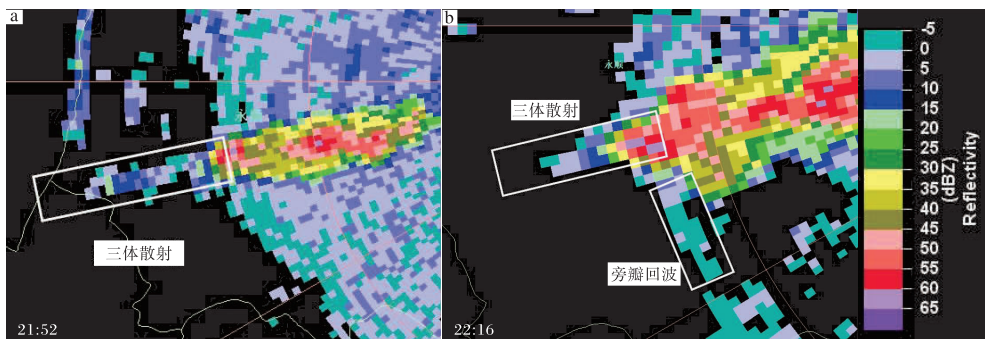


图3 2020-03-21张家界雷达反射率因子(单位为dBz;a 2.4°,b 3.4°)

A风暴东移过程中略有发展后便迅速减弱,23:34在永定城区南部发展到最强,地面在23:56左右出现小冰雹,持续时间约5~8 min,22日00:04该风暴减弱。A风暴减弱消散以后,一个体扫内,在其消散地附近又有多个小尺度强风暴对流发展,最强回波超过65 dBz,22日01:13左右在慈利县高桥镇附近出现小冰雹。降雹后,风暴减弱消散。分析A风暴东移减弱消散的原因,一是地形因素,A风暴轨迹区域多为峡谷平原,而非利于降雹的丘陵山地;其次是降雹天气系统偏南,中低层切变线和地面辐合线更靠近B风暴东移路径。

B风暴从主体风暴分裂以后继续东移发展加强。该风暴沿着沅陵县北部东移,22日00:28,B风暴迅速加强,在2.4°、3.4°、4.3°和6.0°仰角上均出现了三体散射“长钉”和旁瓣回波(图4a~图4d),TBSS和旁瓣回波呈现加强的趋势,且维持时间达47 min。从风暴径向速度图上看,在桃源县西南部还出现了强中气旋(图4d),核区直径约6 km,旋转速度 $\geq 27$  m/s。沅陵县五强溪附近冰雹直径达30 mm,桃源县沙坪镇附近冰雹直径达45 mm,并伴有7~9级大风。B风暴在22日

01:33左右移出桃源县。

### 2.2 三体散射(TBSS)

2.2.1 超级单体风暴分裂前 21:52,2.4°仰角上首次出现TBSS(图3a),而在6.0°仰角上并未看到TBSS(图略),说明此时冰雹云正在对流发展。随着超级单体风暴的不断发展,22:16,3.4°仰角上出现了明显的三体散射和旁瓣回波(图3b)。以 $\leq 15$  dBz反射率因子计算,“长钉”长度为14 km,最大反射率因子超过了60 dBz。23:10,超级单体风暴发展到最强盛阶段,6.0°仰角出现了强的三体散射,最大反射率因子达72 dBz,“长钉”长度达23 km。TBSS的长度越长,表明反射率因子核心越大,高反射率因子的区域面积也越大<sup>[1]</sup>。23:18左右永顺县郎溪乡出现了直径30 mm的大冰雹。由于冰雹落地较快,从发现TBSS到地面降雹时间间隔较短,这给冰雹预警增加了难度。

23:16,超级单体风暴分裂为两个超级单体风暴A、B,三体散射迅速消失,从首次出现TBSS特征到结束,三体散射持续时间达84 min。A风暴在东移过程中并未加强,在永定区南部出现直径小于20 mm冰雹后,其迅速减弱消散,而B风暴



继续保持超级单体结构东移。

2.2.2 超级单体风暴分裂后 B 风暴沿着沅陵县北部山区维持 70 dBz 的最强回波东移,22 日 00:28,2.4°~6.0°仰角均出现了三体散射,在风暴移动的右后侧还出现了旁瓣回波(图略),而在低仰角 0.5°和 1.5°上,由于风暴径向外侧存在大于 25 dBz 的真实回波,无法清晰监测到三体散射。B 风暴发展到此时,其超级单体风暴结构特征较分裂前更加明显和突出。

00:34,6.0°仰角上 TBSS 特征最清楚(图 4a)。以 $\leq 15$  dBz 反射率因子计算,“长钉”长度达 26 km,60 dBz 的回波高度达 9.1 km,在-30℃层高度以上,当 $\geq 50$  dBz 的回波高度超过-20℃层高度以上,有利于大冰雹的产生。00:52,2.4°~4.3°仰角上 TBSS 特征明显,6.0°仰角上“长钉”已经消失,只能看到旁瓣回波,此时 TBSS 特征最强盛,出现在 4.3°仰角上(图 4b),“长钉”长度达 32 km,60 dBz 的回波高度达 8.5 km。00:57,最强反射率因子达 74 dBz,在 3.4°仰角上 TBSS 特征最明显(图 4c),60 dBz 的回波高度达 8.7 km,“长钉”长度达 47 km,这是本次降雹过程出现的最长“长钉”,在湘西北地区十分罕见,表明强反射率因子面积和反射率因子核心均达到了最强盛时期。01:03,在 6.0°仰角径向速度图上出现了风暴顶强辐散(图略),正负

速度差值达 63 m/s。对比分析来看,“长钉”长度越长,冰雹直径越大。“长钉”特征随时间由高层向低层呈现,60 dBz 的回波高度也随时间降低,反映了一个典型强烈超级单体风暴降雹的过程。

在速度图上监测到一个深厚持久的强中气旋,该中气旋持续了约 58 min,00:52 在 3.4°仰角上中气旋显示最强(图 4d)。中气旋距离雷达约 90 km,核心区直径约 6 km,旋转速度 $\geq 27$  m/s,属于强中气旋。与此相应,00:50—01:30 在桃源县西南部多个乡镇出现了 7~9 级大风。

从 00:58 反射率因子剖面图(图 4e)可以看出,风暴呈现出典型的强烈超级单体风暴结构特征。反射率因子核强度超过了 70 dBz,回波顶高达 16 km;强回波区结构密实紧凑,大于 60 dBz 的反射率因子伸展高度达到 9 km,存在明显的回波穹窿和其上强大的悬垂回波;弱回波区右侧出现了回波墙以及狭长的反射率因子高值区,反射率高值区从 9 km 高度一直伸展到低层,表明地面即将出现冰雹。22 日 01:15 左右,桃源县西南部出现了直径 45 mm 的大冰雹。此外,三体散射造成的回波假象在图中强回波区的上部也清晰可见。综合以上分析来看,B 风暴呈现了一个典型的强烈超级单体风暴结构,受其影响多个乡镇造成了冰雹、雷雨大风和短时强降雨等灾害性天气。

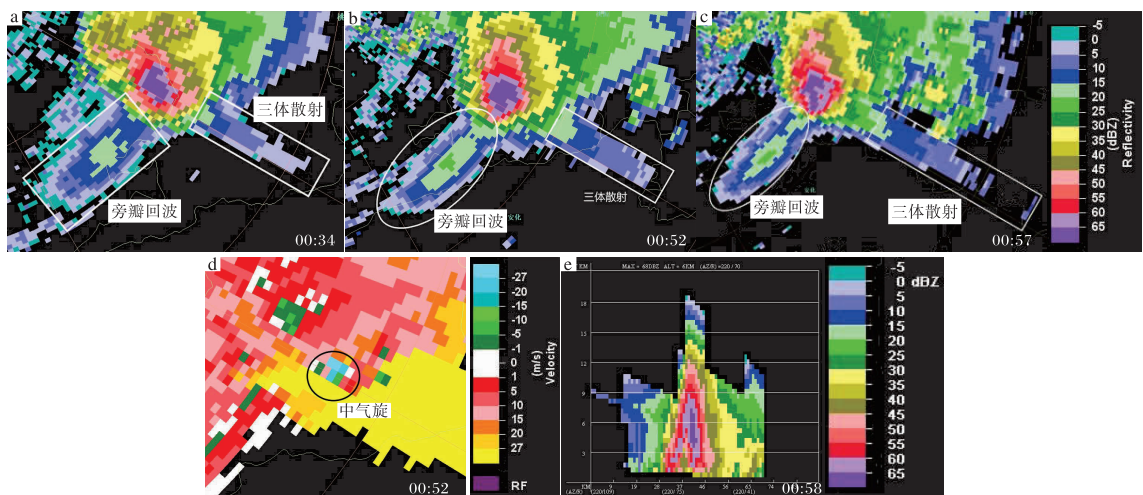


图4 2020-03-21 张家界雷达不同时刻不同仰角反射率因子(单位为 dBz;a 6.0°;b 4.3°;c 3.4°)、00:52 径向速度(单位为 m/s;d 3.4°;黑圆圈为中气旋)和 00:58 反射率因子垂直剖面(单位为 dBz;e)

### 2.3 旁瓣回波

旁瓣回波也是大冰雹的一个预警指标<sup>[9]</sup>。从表1可以看出:不同仰角上首次出现旁瓣回波的时间基本一致,高仰角上旁瓣回波持续时间比低仰角更短;旁瓣回波最大切向长度达46 km,最大径向宽度达17 km,其出现时最强反射率因子 $\geq 73$  dBz,表明风暴核反射率因子面积大,强雹暴对

流发展旺盛;旁瓣回波出现时的高度为1.9~11.5 km,表明旁瓣回波在每个层次均可出现。由于低仰角上强反射率因子径向外侧有真实回波存在,TBSS特征并不清晰,而旁瓣回波却很明显,这就为冰雹预警提供了另一个可供参考的特征指标,即在强反射率因子径向外侧有真实回波存在时,可以依据旁瓣回波发布冰雹预警。

表1 湘西北2020-03-22凌晨B风暴旁瓣回波特征统计

仰角	出现时间	最大切向长度/km	最大径向宽度/km	高度/km	最强反射率因子/dBz	是否伴有TBSS
0.5°	00:16—01:33	45	12	1.9~3.0	74	不清晰
1.5°	00:22—01:27	45	11	2.6~5.2	74	不清晰
2.4°	00:22—01:27	46	14	3.2~7.1	76	是
3.4°	00:22—01:09	37	17	4.0~8.4	76	是
4.3°	00:22—01:09	39	16	4.6~10.1	76	是
6.0°	00:22—00:57	36	16	6.1~11.5	73	是

### 2.4 垂直积分液态含水量(VIL)

垂直积分液态含水量(VIL)和VIL密度均是较好的冰雹预警指标。刘兵等<sup>[7]</sup>总结出湘西北大冰雹的VIL和VIL密度阈值分别为 $VIL \geq 43$  kg/m<sup>2</sup>,VIL密度 $\geq 4.0$  g/m<sup>3</sup>。图5给出了此次湘西北降雹过程中当 $VIL \geq 43$  kg/m<sup>2</sup>时的最大VIL变化曲线及对应的VIL密度变化曲线。可以看出,21日22:46 VIL达54 kg/m<sup>2</sup>,VIL密度为4.3 g/m<sup>3</sup>,22日00:57 VIL达68 kg/m<sup>2</sup>,VIL密度为5.2 g/m<sup>3</sup>,均满足湘西北大冰雹的预警指标,在之后18~32 min地面出现30~45 mm大冰雹。值得注意的是,21日23:58 VIL达

56 kg/m<sup>2</sup>,而VIL密度却仅为3.0 g/m<sup>3</sup>。超级单体风暴此时已减弱分裂为A、B两个风暴,地面亦无相应降雹报告,三体散射、旁瓣回波均未出现,说明冰雹预警不能仅看 $VIL \geq 43$  kg/m<sup>2</sup>这个指标,而要更加注重VIL密度 $\geq 4.0$  g/m<sup>3</sup>的判定指标。分析其原因,可能与雹胚成长有关。23:58的风暴顶高度达到了18.6 km,远超-40℃的高度,此时雹胚在充分增长之前就很快被强上升气流抬升到-40℃高度以上,而-40℃高度以上没有过冷水滴,不存在有利于冰雹增长的环境<sup>[10]</sup>,故而不会降冰雹。因此在实际业务工作中,尤其要关注VIL密度,它对大冰雹有更好的预警作用。

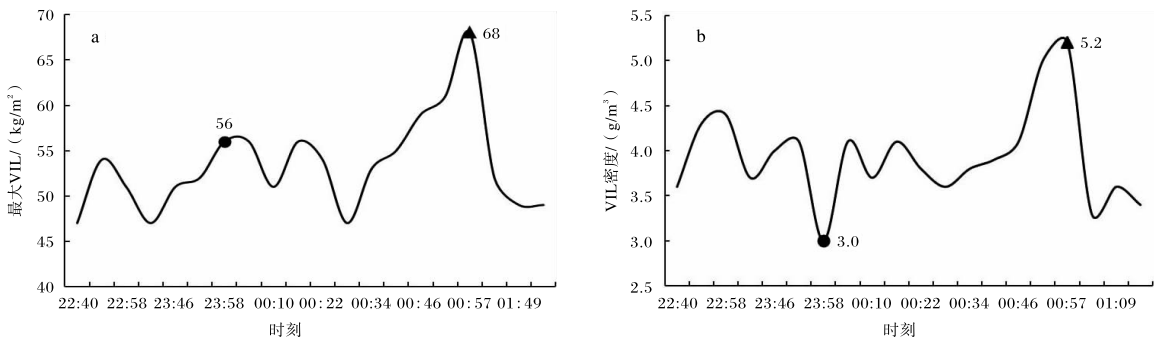


图5 2020-03-21—22湘西北最大VIL变化曲线(a)、VIL密度变化曲线(b)(黑圆点处表示VIL值虽很大但未降雹;黑三角处表示VIL和VIL密度最大值)

### 3 结论与讨论

(1)“上干下湿”的喇叭口层结特征,低层高温高湿和不稳定能量输送,配合适宜的  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  层高度  $4.2\text{ km}$ ,  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  层高度  $6.9\text{ km}$ ,在地面冷空气和辐合线的触发下,有利于冰雹、雷暴大风、短时强降雨等强对流天气的发生。此次降雹过程是典型的强超级单体风暴造成的,其具有明显的三体散射“长钉”、旁瓣回波等特征,以及较大的 VIL 和 VIL 密度,这些特征对冰雹天气有很好的预警作用。

(2)三体散射在不同仰角上均有出现,且持续时间长, TBSS 最强反射率因子  $\geq 63\text{ dBz}$ ,“长钉”长度达  $47\text{ km}$ ,在其后的  $12\sim 41\text{ min}$  内地面有大冰雹降落, TBSS 特征可作为判定大冰雹的预警指标。三体散射特征越明显,表明强反射率因子面积越大、反射率因子核心越大。

(3)旁瓣回波在不同仰角上比 TBSS 出现的时间更长、更清晰,旁瓣回波出现时的最强反射率因子  $\geq 60\text{ dBz}$ ,最大切向长度达  $46\text{ km}$ ,最大径向宽度达  $17\text{ km}$ 。旁瓣回波也是判定冰雹天气的预警指标,特别是当强反射率因子外侧有真实回波而 TBSS 特征不清晰时,旁瓣回波的预警作用更好。

(4)  $\text{VIL} \geq 43\text{ kg/m}^2$  和  $\text{VILD} \geq 4.0\text{ g/m}^3$  是冰雹天气的有效预警指标,当风暴对流厚度超过  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  高度时, VIL 密度能更好地判定冰雹。

### 参考文献:

- [1] 廖玉芳,俞小鼎,吴林林,等. 强雹暴的雷达三体散射统计与个例分析[J]. 高原气象, 2007, 26(4): 812-820.
- [2] 朱敏华,俞小鼎,夏峰,等. 强烈雹暴三体散射的多普勒天气雷达分析[J]. 应用气象学报, 2006, 17(2): 215-223.
- [3] 汤兴芝,黄兴友. 冰雹云的多普勒天气雷达识别参量及其预警作用[J]. 暴雨灾害, 2009, 28(3): 261-265.
- [4] 刘嘉慧敏,郑然,梁绵,等. 2018年陕西商洛一次罕见强雹暴环境条件及雷达特征分析[J]. 陕西气象, 2020(2): 1-11.
- [5] 张昆,王起唤,王强,等. 怀化近15年降雹时空分布及其环境参量特征分析[J]. 陕西气象, 2020(4): 26-29.
- [6] 鲍向东,王国安,王君,等. 河南省冰雹天气环境参量特征分析[J]. 陕西气象, 2019(4): 17-20.
- [7] 刘兵,戴泽军,胡振菊,等. 张家界多个例降雹过程对比分析[J]. 气象, 2009, 35(7): 23-32.
- [8] 周长青,徐冬英,徐靖宇,等. 2016年湖南春季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.
- [9] 何炳文,胡振菊,高伟,等. 湘西北地区强冰雹的多普勒天气雷达旁瓣回波统计分析[J]. 暴雨灾害, 2020, 39(3): 269-275.
- [10] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 多普勒天气雷达和原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社, 2006: 151-146.