

文章编号: 2096-1618(2022)02-0208-07

# 贵州地区强对流天气防雹雷达回波特征研究

田涵元, 王福增, 王秋淞, 段伟  
(成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225)

**摘要:**冰雹是一种常见的天气灾害,所以科学检验防雹效果成为重要工作。利用贵州威宁县2019年4-8月3次典型强对流天气,实行人工防雹前后的雷达数据回波差别研究,降雹前后雷达反射率因子、强回波区域强度及垂直累计液态水含量、垂直累计液态水含量密度的变化关系。结果表明:兔街站6月14日17:40,防雹作业前雷达反射率达到峰值60.2 dBz,防雹作业20分钟,雷达反射率下降至28.1 dBz,人工防雹控制了VIL及VILD的增长,防雹效果很好。嘎基站4月27日20:53,防雹作业前雷达反射率峰值达62.4 dBz,防雹作业22分钟雷达反射率下降至38.6 dBz,防雹前期VIL达31.61 kg/m<sup>2</sup>,在防雹作业后VIL与VILD迅速减小,有效遏制对流云单体形成冰雹。炉山站8月13日14:25,防雹作业前雷达反射率峰值达61.3 dBz,防雹作业27分钟后雷达反射率下降至44.4 dBz,防雹作业前VIL达24.37 kg/m<sup>2</sup>,防雹作业后虽然控制了VIL及VILD增长,但雷达反射率在防雹作业后并未立即迅速减小,对流云单体形成冰雹,防雹作业效果不理想。通过防雹前后雷达回波参数、VIL及VILD的变化与实际变化情况变化检验防雹效果,为选择防雹时机、弹药量的使用等提供参考价值。

**关键词:**强对流天气;人工防雹;反射率因子;垂直累计液态水含量;强回波区域

**中图分类号:**P482

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2022.02.015

## 0 引言

开展人工防雹作业,主要采用雷达探测做出判断并指挥作业。广泛使用防雹弹、少量使用防雹火箭,中国的催化作业规模居世界之首<sup>[1]</sup>。冰雹作为灾害性天气,采取防范具有重要意义,如何高效率地进行人工防雹是气象科学研究的重点。2013年8月1日,12:50开始,昭通市的昭阳、鲁甸、彝良3县区共开展人工防雹作业43点次,共发射防雹弹1316发,作业后效果明显,人工防雹作业后均未出现冰雹灾害,而防区外多地出现冰雹灾害<sup>[2]</sup>。阿克苏地区2个试验区每年出现40~50次雷雨云,较易产生冰雹天气的雷雨云次数接近50%,对于消雹作业区域没有发生降雹而非作业区发生了降雹<sup>[3]</sup>。人工防雹作业可有效防范冰雹灾害天气。

21世纪以来,许多的气象工作者从物理量场、环流背景及多普勒天气雷达产品等方面对冰雹天气进行了研究。李淑玲等<sup>[4]</sup>分析了一次弓形回波的多普勒雷达资料,此次过程伴随着冰雹、大风的发生,认为当雷达回波强度>50 dB,垂直液态水的体积>35 kg/m<sup>2</sup>时会有利于冰雹的产生;高帆等<sup>[5]</sup>利用CINRAD/SA多普勒天气雷达资料分析了一次弓形回波演变特征,认为垂直累积的液态水体积和单体强中心高度的同步

增长和快速减小对冰雹、大风的预报有一定的提前量。

防雹效果检验是一个世界性难题,学者们总结了一些防雹效果检验方法,如地面降雹的强度和质量统计法、回波强度和顶高的分析法、受灾面积统计法等<sup>[6-7]</sup>,这些方法很难排除自然过程的影响,存在不确定性因素,因此说服力不强。

利用雷达数据资料对贵州3个地区进行防雹作业前、后雷达数据回波差别分析研究,对比3地垂直液态水含量、垂直累积液态水含量密度及雷达反射率进行综合分析<sup>[8-9]</sup>,可以更加精确地分析判断人工防雹的效果好坏。对防雹时间的选取,增强防雹效果有更好的参考价值。

## 1 数据与方法

### 1.1 雷达数据选择

在2019年春夏两季中的人工防雹天气过程中,选取3次具有代表性的防雹过程。兔街站6月14日17:24时位于东面的对流云逐渐流动至兔街镇,10分钟内强回波区域面积迅速增加,雷达回波强度于17:40达到顶峰60.2 dBz。17:38时进行了一次防雹作业,防雹作业21分钟,雷达反射率下降至28.1 dBz。4月27日20:26嘎基地区均在强对云的覆盖之中,前4个体扫,强回波区域面积较大且中心强度高于45 dBz,强回

波区域中心强度不断增加,20:50进行防雷作业,随着水汽加速凝结成雨滴,20:53强回波区域强度增加至峰值62.4 dBz,防雷作业 22 分钟后回波强度缓慢下降至 38.6 dBz,强回波区域面积减小。炉山站 8 月 13 日炉山区域在 13:52 受位于东面强对流云扩散影响,逐步由东向西形成强回波区域,防雷作业前 4 个体扫时间内,雷达反射率由13:58时的21.2 dBz发展至14:15的

54.1 dBz,14:13,强回波区域中心强度突破50 dBz,14:23进行防雷作业,防雷作业后 2 个体扫时间内,强回波区域中心强度高于55 dBz,冰雹灾害发生,防雷作业 27 分钟后雷达反射率下降至44.4 dBz。其中分别是防雷出现小雨、防雷后出现强降雨、防雷后出现冰雹大风的过程,具体人工防雷数据如表 1 所示。

表 1 防雷作业数据统计

序号	日期	防雷作业时间	站点	作业前天气	作业后天气
1	2019-06-14	17:38-17:40	兔街	无雨	小雨
2	2019-04-27	20:50-20:52	嘎基	小雨	大雨
3	2019-08-13	14:23-14:24	炉山	无雨	冰雹大风

注:雷达记录时间比防雷记录时间早 8 小时。

2 雷达回波特征分析

2.1 兔街站 6 月 14 日防雷前后雷达回波特征分析

在 2019 年 6 月 14 日(春夏交替),贵州省威宁县

兔街镇出现了强对流天气,此次对流天气主要过程为对流云受赫章县强对流云影响快速扩散,具体表现为在兔街站点时,对流云迅速发生、增强,在人工防雷后云体整体继续向东面移动,本次人工防雷总计发射 116 发高炮炮弹,作业后出现小雨,兔街防雷区域从对流云发生到消退过程,雷达回波图如图 1 所示。

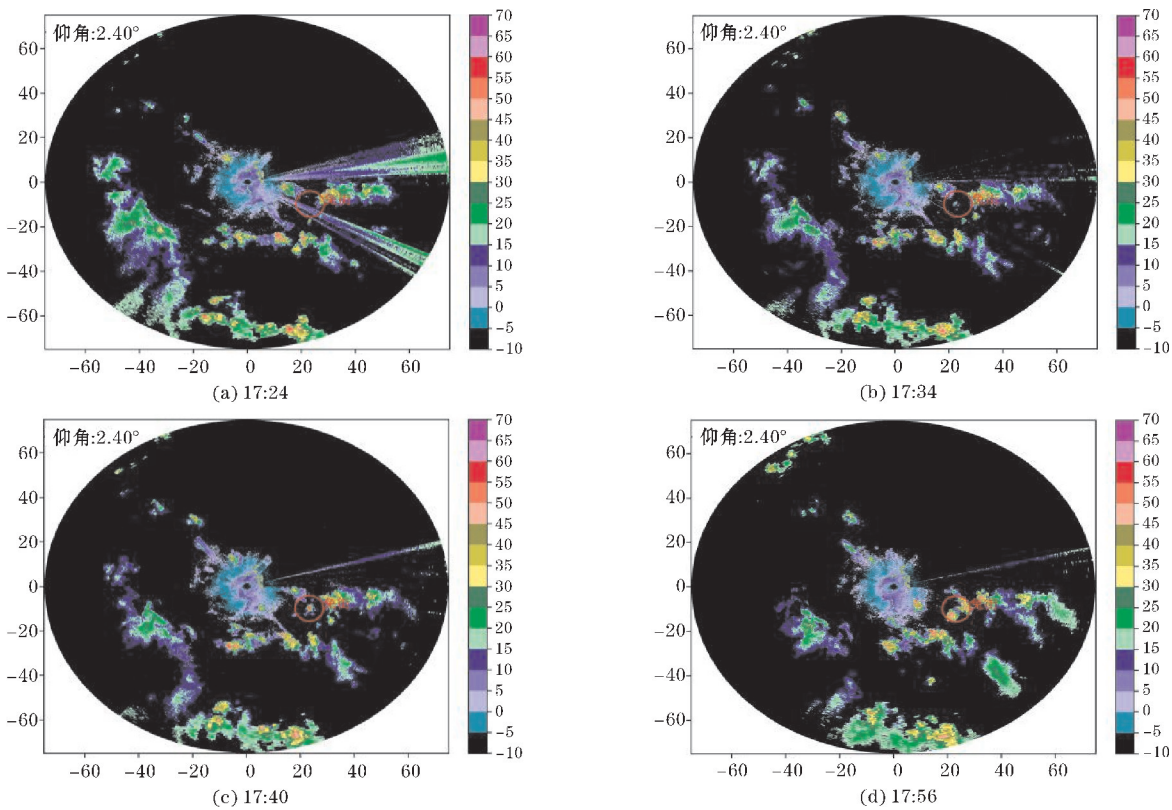


图 1 兔街站回波图

如标记点所示,17:24 位于东面的对流云逐渐流动至兔街镇,并在 17:34 出现强回波区域,10 分钟内强回波区域面积迅速增加,且强回波中心区域强度不断增加,突破50 dBz阈值,此时极易发生冰雹灾害。在17:38

开始进行防雷作业,防雷作业一个体扫后强回波区域出现明显分裂现象,17:56,在随后 3 个体扫时间中强回波区域强度不断减弱,兔街镇区域对流云向东面移动,分析防雷前后强回波区域可得雷达特征如图 2 所示。

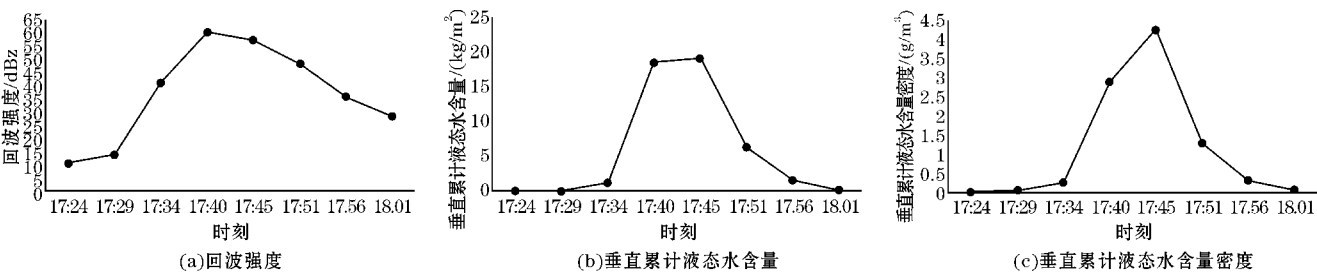


图2 兔街站防雹前回波特征时序图

在防雹时刻 3 个体扫前,VIL 从零值逐渐增加至  $1.14\text{ kg/m}^2$ ,在防雹前一个体扫时间内,垂直累计液态水含量跃增到 $18.47\text{ kg/m}^2$ ,其中增量为 $17.33\text{ kg/m}^2$ ,VIL 跃增的主要原因是在防雹前一个体扫中回波顶高的增加与对流云中降水粒子浓度增加,在进行人工防雹后,遏制了 VIL 的进一步增大,有效地阻止了冰块继续吸收水分而形成冰雹。随着降雨与对流云的移动,VIL 迅速下降至趋于零值。

VILD 与 VIL 整体变化趋势相似,在 VIL 跃增时,回波顶高的增加使 VILD 增加减缓,在进行人工防雹后,回波顶高减小,VILD 随之增加。在强回波区域中心强度达到峰值时,回波顶高为 $8.5\text{ km}$ ,防雹作业 5 个体扫后,回波顶高降至 $6.4\text{ km}$ 。

强回波区域中心强度:在防雹 3 个体扫前雷强回波区域反射率从很小值迅速攀升至 $60.2\text{ dBz}$ ,说明在出现反射率峰值前 20 分钟左右,兔街本地的云体强度较弱,随着周围强对流云的迅速移动至兔街镇,空气中的降水粒子的大小数量快速增加,在进行人工防雹后,

碘化银催化形成的冰晶迅速液化或凝结部分水分,同时,反射率达到峰值,空气中的降水粒子数量和大小也达到峰值,防雹后整体的反射率因子呈减少趋势,主要原因是对流云持续向东移动,使兔街整体的云体强度减弱,此外,防雹后雨滴降落形成小雨也是强回波区域云体中降水粒子减少的重要原因。

2.2 嘎基站 4 月 27 日防雹前后雷达回波特征分析

2019 年 4 月 27 日(春季),贵州省嘎基村及附近地区出现大面积强对流云(对流云中心位置位于赫章县罗州镇附近),嘎基地区位于强对流云的西面边缘,受对流云整体流动的影响,嘎基地区多次出现高浓度降水粒子,为防止出现冰雹灾害,威宁县人工影响天气作业组立即在嘎基村进行人工防雹作业,此次防雹共发射 14 枚 R-火箭,防雹前嘎基地区为小雨天气,作业后出现强降雨,嘎基站防雹区域雷达回波图如图 3 所示。

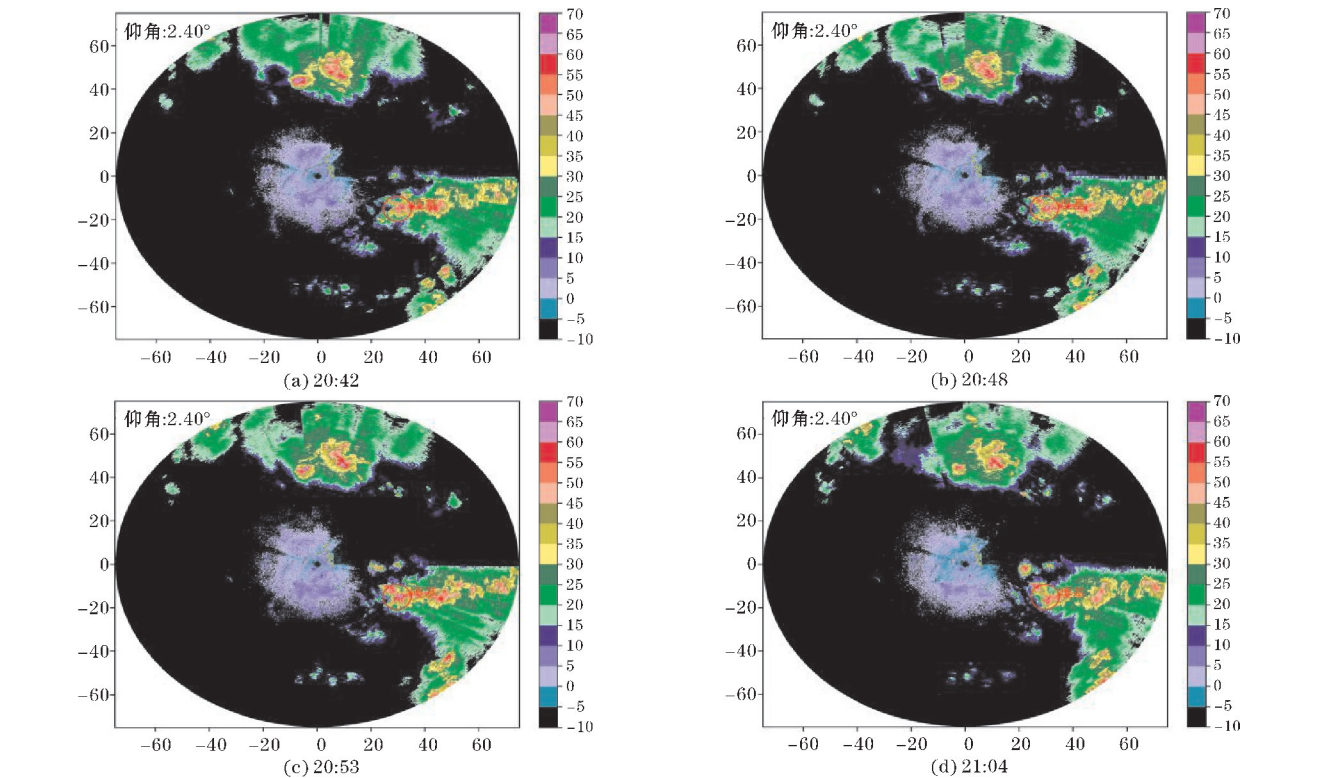


图3 嘎基站回波图



在 20:26 嘎基地区均在强对云的覆盖中,强回波区域面积较大且中心强度高于 45 dBz,防雷前 4 个体扫间,强回波区域中心强度不断增加,出现冰雹的概率增加。20:50 进行防雷作业,随着水汽加速凝结成雨

滴,强回波区域强度增加至峰值,21:04,防雷作业后一个体扫时间后,强回波区域中心强度减弱,强回波区域面积减小,分析防雷前后强回波区域可得雷达特征如图 4 所示。

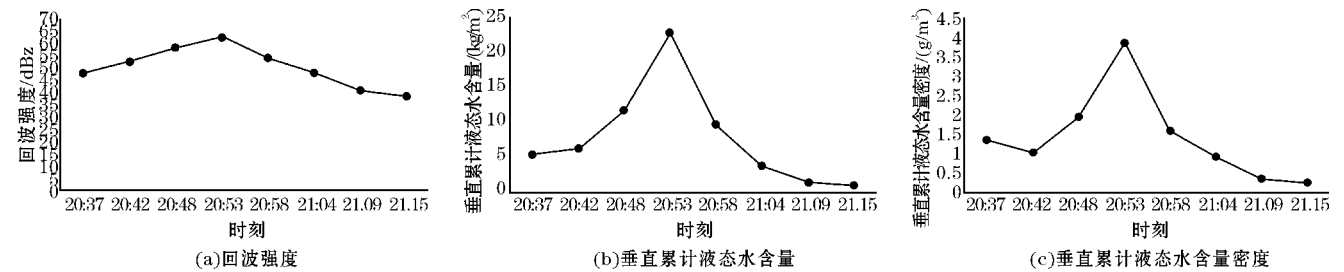


图 4 嘎基站防雷前后回波特征时序图

VIL 与快速形成的对流云不同的是,本次防雷前期嘎基地区的 VIL 经历了较长时间的发展,在防雷较长时间前,VIL 在 5 ~ 30 kg/m<sup>2</sup> 波动,在防雷时刻 3 个体扫前,垂直累计液态水含量达到区间最小值 7.69 kg/m<sup>2</sup>,在防雷时刻前 2 个体扫范围内,垂直累计液态水含量跃增到 31.61 kg/m<sup>2</sup>,其中增量达到 23.92 kg/m<sup>2</sup>,防雷后,随着强降雨过程垂直累计液态水含量不断下降,在强降雨持续半小时后垂直累计液态水含量减小至 1.5 kg/m<sup>2</sup>。

VILD 由于整个防雷前后过程中,回波顶高最大值达到 8.6 km,在防雷作业 5 个体扫时间后,回波顶高降低为 3.86 km,VILD 与 VIL 整体发展趋势一致。其中 VILD 在防雷后达到最大值 3.85 g/m<sup>3</sup>。

强回波区域中心强度,在防雷作业前后,强回波区域雷达反射率普遍较大,防雷前嘎基区域长时间处于高反射率状态,主要是对流云已经经历较长发展阶段,逐步趋于成熟。防雷作业后主要是因为对流云体积庞大,

有不断的水分从对流云核心区域流向嘎基区域。在防雷前期为小雨天气,说明对流云中降水粒子在不断地对外流出,同时,强回波区域中心反射率在不断增大,则表明在对流云中水分凝结成降水粒子的速度大于因降雨而流失水滴的速度。在防雷后,空气中水蒸气被碘化银催化形成雨滴和细小冰晶,进一步增大了对流云中降水粒子的浓度。防雷后出现明显的强降雨,随着对流云中的降水粒子降落速度大于云体中新形成的降水粒子的速度,强回波区域中心强度逐渐减弱。

2.3 炉山站 8 月 13 日防雷前后雷达回波特征分析

在 2019 年 8 月 13 日(盛夏),贵州省威宁炉山镇及附近乡镇大面积出现强对流云,立即开展人工防雷作业,共发射 151 发高炮炮弹及一枚火箭弹,作业后出现冰雹大风,此次炉山区域对流云发展到出现冰雹至冰雹消散过程雷达回波图如图 5 所示。

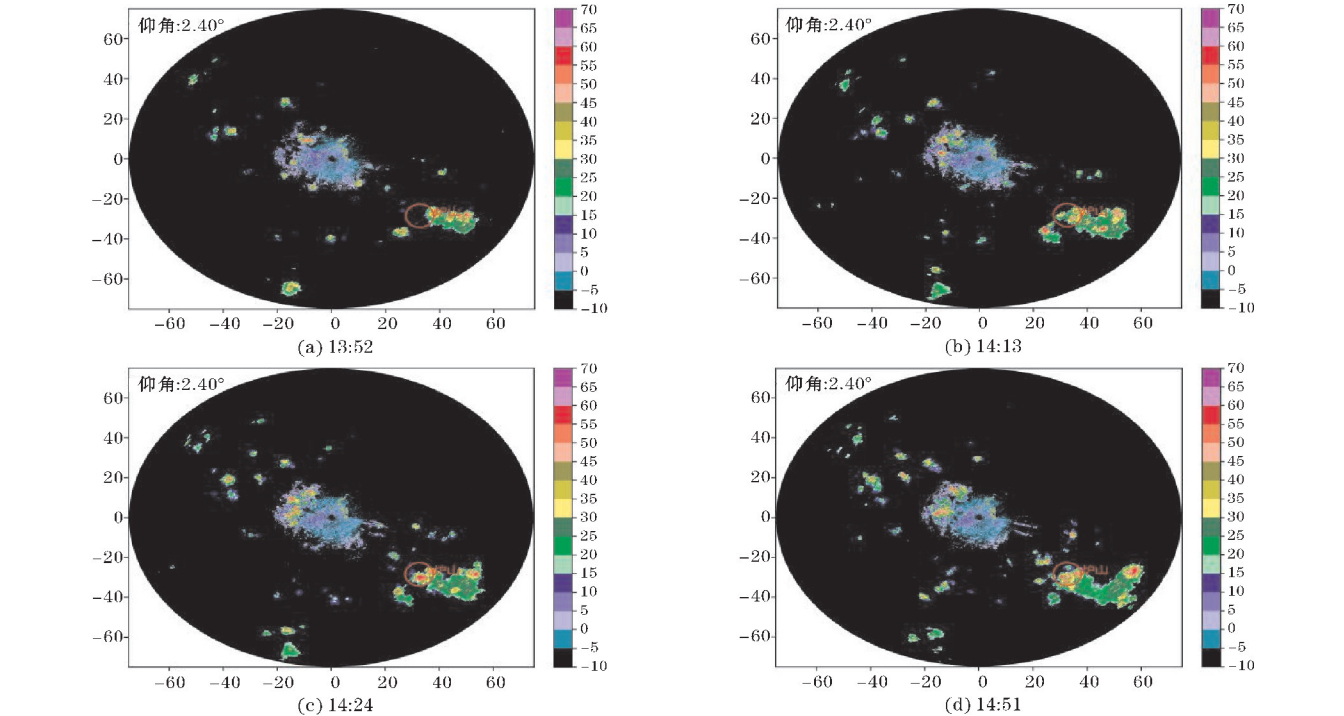


图 5 炉山站回波图

如标记点所示,炉山区域在 13:52 受位于东面强对流云扩散影响,逐步由东向西形成强回波区域,防雹作业前 4 个体扫时间内,强回波区域面积不断扩张,14:13,强回波区域中心强度突破50 dBz,此时已达到发生冰雹的反射率阈值。14:23进行防雹作业,防雹作

业后 2 个体扫时间内,强回波区域中心强度高于 55 dBz,冰雹灾害发生。随着降雹过程的持续发生,强回波区域的反射率整体减弱。分析防雹前后强回波区域可得雷达特征,如图 6 所示。

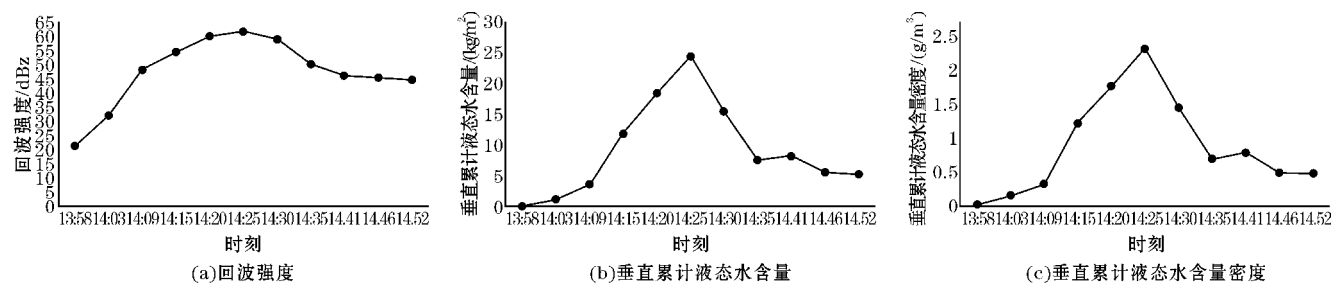


图 6 炉山站防雹前后回波特征时序图

VIL 从前面 5 个体扫时刻开始,逐渐由0 kg/m<sup>2</sup>缓慢增加到3.54 kg/m<sup>2</sup>,在前 3 个体扫中 VIL 跃增到 24.37 kg/m<sup>2</sup>,其中增量达到了20.83 kg/m<sup>2</sup>。VIL 的发展大致经历了 3 个阶段:初生逐步发展、跃增、消亡。其中在防雹前两个体扫时间内,雷达反射率逐步增加,而 VIL 出现了大幅度的跃增,其中主要原因是在前两个体扫时间内,强回波区域与回波高度明显增强,且在对流单体中,存在高浓度降水粒子或大颗粒降水粒子使雷达反射率增大,进一步促进 VIL 的增加。在实行人工防雹后,与雷达反射率因子缓慢下降的不同是,VIL 快速下降,其主要原因是人工防雹后较大雹粒降落形成冰雹,而碘化银催化形成的水滴或者微小冰晶不能形成雹胚,导致对流云整体降水粒子直径减小,VIL 快速减小。

VILD 变化趋势与 VIL 变化趋势十分相近,其中与垂直累计液态水含量同时达到峰值,其最大值为 2.14 g/m<sup>3</sup>。VILD 不仅与雷达反射率和 VIL 有关,与回波顶高也密切相关,在降水粒子达到最大量时,回波顶高约为7.7 km,在对流单体初步发展及后期趋于稳定时,回波顶高约为4 km。

强回波区域中心强度,在防雹前期,强回波区域反射率逐渐增加,在发射防雹后达到最大值61.3 dBz,在随后的一个体扫时间内,强回波区域反射率缓慢减小,在随后的两个体扫时间内快速减小,之后便趋于一个稳定的值(40 dBz左右),并在强对流天气趋于结束时快速减少至零。由强回波区域中心强度反射率因子可以得出,在此次人工防雹作业前后,强对流云中的降水粒子的总量经历了逐步上升、缓慢下降、快速下降、趋于平缓的 4 个过程。其中对应着水蒸气被上升的气流抬升并不断积累,人工防雹释放的碘化银催化形成水滴或者冰晶使降水粒子增加并达到峰值,随后由于雹

胚的壮大导致降雹,但在此期间空气中丰富的水分持续为雹胚提供发展所需的条件,所以前期的降雹过程中,雷达放射率缓慢下降,当空气中的水分不足以为雹胚提供水分时,此时降雹将导致降水粒子出现一个较大幅度的衰减<sup>[10]</sup>,最后降雹结束,对流云中的降水粒子维持在一个稳定的区间直到云体消散。

3 防雹效果评价与评估体系

3.1 防雹过程评价

兔街站 6 月 14 日防雹过程前无雨,防雹作业后小雨,防雹作业后雷达放射率因子逐步减小,有效控制了 VIL、VILD 的增长及在防雹后两个体扫中,VIL 与 VILD 迅速减小,有效遏制了对流云单体形成冰雹,作业效果好。

嘎基站 4 月 27 日防雹作业前无雨,防雹作业后出现强降雨,防雹前期 VIL 达到31.61 kg/m<sup>2</sup>,此时对流云极易产生降雹,防雹作业后有效控制了 VIL、VILD 的增长及在防雹后两个体扫中,VIL 与 VILD 迅速减小,雷达反射率逐渐减小,有效遏制了对流云单体形成冰雹,作业效果好。

炉山站 8 月 13 日防雹作业前无雨,防雹作业后出现冰雹大风,防雹前期 VIL 达到24.37 kg/m<sup>2</sup>,雷达反射率达到61.3 dBz,此时对流云极易产生降雹,防雹作业后及时控制了 VIL 及 VILD 的增长,但雷达反射率在防雹后并未立即迅速减小,还维持在一个较高的数据,使对流云单体形成冰雹,作业效果不理想。

3.2 防雹评估参考体系

在进行完人工防雹作业后,以下 4 个因素可以客

观评价防雷作业效果:

防雷作业后与防雷作业前天气情况对比,防雷后未出现降雹是人工防雷的第一检验标准。

防雷后雷达反射率及垂直累计液态水是否降到安全标准,一般当雷达反射率低于50 dBz,垂直累计液态水含量低于20 kg/m<sup>2</sup>时不会降雹。

防雷后雷达反射率、垂直累计液态水含量、垂直累计液态水含量密度是否明显下降或者快速下降,受对流云流动影响,防雷后可能出现防雷区域对流云增强,检验防雷后较短时间内是否出现雷达反射率、垂直累计液态水含量等明显下降也是检验防雷效果的重要特征<sup>[11]</sup>。

防雷作业后是否出现回波顶高下降、强回波区域面积减小及强回波中心区域是否减弱等。

### 3.3 防雷效果影响因素

在对强对流云体实行人工防雷作业时,对防雷效果存在影响的因素如下:

人工防雷的范围与时间选择。在8月13日炉山的防雷过程中进行人工防雷作业时,垂直累计液态水含量已经达到24.37 kg/m<sup>2</sup>,此时对流云单体降雹概率增加。在冰雹云发展初期或垂直累计液态水含量跃增前期进行防雷作业才能有效遏制冰雹云发展。

季节特点的影响。相比于其他季节,在盛夏时,由于地表温度高,近地层存在大量的湿热空气,当高空存在冷空气时,极易产生强对流天气,为冰雹形成创造了条件。所以在夏季做防雷作业时,更应该做到迅捷、全面,同时夏季的进行人工防雷作业的条件(如雷达反射率50 dBz)应该降低<sup>[12]</sup>。

对流单体流动性及形成速度的影响。在进行人工防雷作业时,需要充分考虑防雷的具体时间及具体位置,避免因时间地点的选择错误导致降雹,从炉山站防雷效果分析,防雷时机抓得有些晚,在防雷作业时可能已经形成冰雹,使作业后产生降雹。

对流云体的强度,在云体趋于成熟前,无法准确判断是否为降雹单体或非降雹单体,人工防雷作业时根据对流云单体的发展,及时更新和完善防雷策略。

## 4 结论

利用贵州威宁县2019年4-8月中3次典型强对流天气实行人工防雷作业前后的雷达数据研究,分析得出主要结论如下:

(1)贵州3个地区的防雷作业均预测并选择在雷达回波强度达到峰值的前2~3分钟进行人工防雷作

业,其中兔街站和嘎基站防雷作业效果好,防雷作业20分钟VIL、VILD、回波强度等参数均下降至正常,炉山站防雷作业效果差。

(2)兔街站人工防雷总计发射116发高炮炮弹,嘎基站防雷共发射14枚R-火箭,炉山站共发射151发高炮炮弹及一枚火箭弹。就弹药量的使用上炉山站更多,但防雷作业后该地对流云单体形成冰雹,防雷效果并不理想

(3)影响人工防雷的主要因素是防雷时间和范围的选择,在垂直累计液态水达到20 kg/m<sup>2</sup>前进行防雷作业,防雷效果更好。

(4)防雷效果与对流云单体的特点与季节有密切关系,防雷作业需因地制宜,区域联防作业,才能做到更加有效地防灾减灾。

## 参考文献:

- [1] 李大山. 人工影响天气现状与展望[M]. 北京: 气象出版社, 2002.
- [2] 李红梅, 尹丽云, 金文杰, 等. 昭通一次强对流天气过程及人工防雷效果分析[C]. 北京: 大气水资源开发利用与气象防灾减灾, 2014.
- [3] 王志新, 王飞. 阿克苏地区东部三县近十年防雷效果检验分析[J]. 农业气象, 2018, 38(2): 57.
- [4] 李淑玲, 臧传花. 一次弓形回波的多普勒雷达资料分析[J]. 山东气象, 2007, 27(3): 14-16.
- [5] 高帆, 胡鹏, 李瑞, 等. 一次弓形回波演变特征分析[J]. 山东气象, 2012, 32(4): 14-16.
- [6] 王雨曾, 郁青. 多物理参量检验防雷效果的研究[J]. 气象, 1995, 21(10): 3-8.
- [7] 章澄昌. 当前国外人工增雨防雷作业的效果评估[J]. 气象, 1998, 24(10): 3-8.
- [8] 曾勇, 李丽丽, 李迪, 等. 贵州一次典型冰雹云单体回波多阶跃增特征分析[J]. 防灾科技学院学报, 2019, 21(3): 56-65.
- [9] 刁秀广, 朱君鉴, 黄秀韶, 等. VIL和VIL密度在冰雹云判据中的应用[J]. 高原气象, 2008(5): 1131-1139.
- [10] V S Inyukhin, V S Makitov, S A Kushchev. Radar Studies of Formation and Development of Hail Cores in Severe Convective Clouds[J]. Russian Meteorology and Hydrology. 2017(42): 471-476.
- [11] 曹巧莲. 临汾CINRAD/CC雷达冰雹预警VIL指标研究[A]. 雷达气象学委员会、中国气象局气象探测中心第31届中国气象学会年会 S1

气象雷达探测技术研究与应用[C]. 雷达气象学委员会、中国气象局气象探测中心: 中国气象学会, 2014.

[12] 曹水, 邹书平, 曾勇, 等. 一次冰雹云天气过程不同波段雷达回波对比分析[J]. 中低纬山地气象, 2020, 44(2): 66–70.

Difference of Radar Echo Characteristics before and after a Hail  
Suppression in Severe Convective Weather in Guizhou

TIAN Hanyuan, WANG Fuzeng, WANG Qiusong, DUAN Wei  
(College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** Hail is a common weather disaster, so scientific test of hail suppression effect has become an important work. Based on three typical severe convective weather events in Weining County of Guizhou Province from April to August in 2019, the radar data echo difference before and after hail suppression is studied, and the radar reflectivity factor and strong echo area intensity before and after hail suppression are obtained. The calculation of vertical cumulative liquid water content and vertical cumulative liquid water content density and the change relationship before and after hail suppression are realized through the algorithm. The results show that: at 17:40 on June 14, the radar reflectivity of Tujie station reaches the peak value of 60.2 dBz before hail suppression operation, and drops to 28.1 dBz after 20 minutes of hail suppression operation. The artificial hail suppression controls the growth of VIL and VILD, and the hail suppression effect is great. At 20:53 on April 27, the radar reflectivity of Gaji station reached the peak value of 62.4 dBz before hail suppression operation. After 22 minutes of hail suppression operation, the radar reflectivity dropped to 38.6 dBz, and the VIL reached 31.61 kg/m<sup>2</sup> in the early stage of hail suppression. After hail suppression operation, VIL and VILD decreased rapidly, effectively curbing the formation of Hail by convective cloud cells. At 14:25 pm on August 13, Lushan station's radar reflectivity reached a peak value of 61.3 dBz before hail suppression operation. After 27 minutes of hail suppression operation, the radar reflectivity dropped to 44.4 dBz, and VIL reached 24.37 kg/m<sup>2</sup> before hail suppression operation. Although the growth of VIL and VILD was controlled after hail suppression operation, the radar reflectivity did not decrease rapidly after hail suppression operation, and the convective cloud monomer formed hail, the hail suppression effect is not ideal. Through the changes of radar echo parameters, VIL and VILD before and after hail suppression and the actual situation, the hail suppression effect is tested, which provides reference value for the selection of hail suppression time and the use of ammunition.

**Keywords:** severe convective weather; hail suppression; reflectivity factor; VIL; strong echo region