

刘小艳, 索勇, 王瑾. 基于 CPAS 系统的贵州安顺市冰雹云识别指标研究[J]. 干旱气象, 2017, 35(4): 688-693, [LIU Xiaoyan, SUO Yong, WANG Jin. Study on Identification Index of Hail Cloud Based on CPAS System in Anshun of Guizhou[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(4): 688-693], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-04-0688

# 基于 CPAS 系统的贵州安顺市冰雹云识别指标研究

刘小艳<sup>1</sup>, 索勇<sup>1</sup>, 王瑾<sup>2</sup>

(1. 贵州省安顺市人工影响天气作业指挥中心, 贵州 安顺 561000;

2. 贵州省人工影响天气办公室, 贵州 贵阳 550081)

**摘要:**利用 2009—2015 年贵州安顺市 26 个冰雹个例资料, 基于 CPAS 系统统计分析了冰雹个例的回波强度、垂直累积液态水含量、45 dBZ 强回波顶高及强回波中心高度等特征参数及其时间变化, 并结合探空站 0 °C 层和 -20 °C 层高度, 综合归纳了安顺市冰雹云的识别指标。结果表明: 近 7 a 来, 安顺市冰雹天气发生在 3—6 月, 4 月最多, 6 月最少; 降雹前最大回波强度多在 45 dBZ 及以上, 3 月和 4 月的  $VIL_{max} \geq 15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 5 月和 6 月  $VIL_{max} \geq 25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ; 降雹日的 0 °C 层和 -20 °C 层平均高度均呈逐月增加趋势, -20 °C 层平均高度比 0 °C 层高 3.11 km; 45 dBZ 强回波顶高在 8 km 以上, 且与 0 °C、-20 °C 层高度差分别大于 2.3 km、0.2 km, 强回波中心高度与 0 °C 层的高度差大于 0 km 可作为该市冰雹预警指标。通过个例应用, 冰雹预警指标能够有效指导防雹作业。

**关键词:**安顺市; 冰雹; 特征参数; 识别指标

**文章编号:**1006-7639(2017)-04-0688-06 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-04-0688

**中图分类号:**P48

**文献标识码:**A

## 引言

贵州省地处西南地区喀斯特地貌中心区域, 自然灾害频发, 其中气象灾害造成的损失占自然灾害损失的 85% 以上, 冰雹是本省最主要的灾害性天气之一, 给当地农作物、房屋、通讯等造成严重影响。安顺市位于黔中之腹, 是贵州省冰雹多发中心之一, 人工防雹作业是气象防灾减灾行之有效的手段。近年来, 安顺市人工防雹作业主要使用的天气监测系统是贵州省局开发的短时临近预警系统, 随着业务的不断拓展, 该系统已渐渐不能满足业务需求。中国气象局人工影响天气中心研制开发了基于卫星遥感观测反演的云降水精细分析系统(CPAS), 该系统借助 GIS 信息集成技术有效管理海量数据, 实现多源数据的叠加、显示、查询、运算, 以及云和降水的实时精准分析、动态监测, 为人工影响天气提供一个多功能的云降水精细分析系统。目前, CPAS 正运用于贵州省人工影响天气业务中, 未来该系统将会推

广到市(州)级气象局人影业务中, 为了更好地适应业务发展需求, 寻找行之有效的人工防雹预警科学方法, 基于 CPAS 系统, 总结归纳安顺市降雹回波的类型、冰雹识别指标等是非常重要的手段之一, 目前这在贵州省内还是很少见的。

## 1 资料

利用 2009—2015 年贵州安顺市 51 个作业炮站冰雹发生前和发生时地面实况资料、贵阳站 08:00 (北京时, 下同)探空资料以及贵阳和兴义雷达站回波强度、垂直累积液态水含量(VIL)等资料, 共筛选出 26 个冰雹天气个例。

## 2 冰雹月分布特征

统计 2009—2015 年贵州安顺市冰雹个例发现(图 1), 近 7 a 安顺市降雹日数共 26 d, 冰雹最早出现月份是 3 月(2013 年 3 月 18 日西秀区刘官), 最晚结束月份是 6 月(2011 年 6 月 14 日镇宁县大

收稿日期:2016-10-26; 改回日期:2016-12-13

基金项目:贵州安顺市气象局科研项目“基于 CPAS 系统的安顺市雹云识别指标应用研究”、贵州省工程技术研究中心建设项目(黔科合 G [2013]4001 号)、中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2015M53)及贵州省气象局重大专项项目(黔科合 ZD [2011]04 号)共同资助

作者简介:刘小艳(1990—), 女, 助理工程师, 主要从事人工影响天气工作。E-mail:278785794@qq.com

山),雹期4个月,多发生在春季,且以4月最多。其中,3—5月降雹日数达23d,占总降雹日数的88.5%,而6月降雹日数仅为3d,占总数的11.5%。

通过降雹点的位置及雷达回波对比,发现26次冰雹过程可划分为32块降雹云团,其中单体雹云3个,多单体雹云23个。

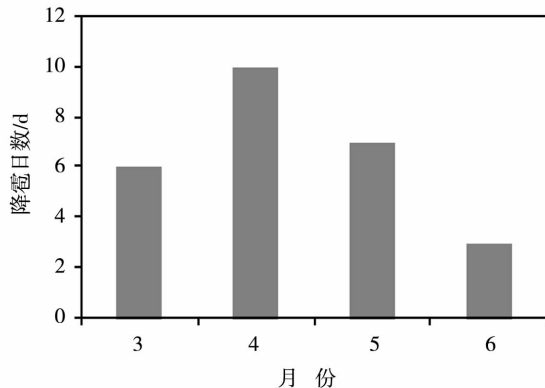


图1 2009—2015年贵州安顺市降雹日数月分布  
Fig. 1 The monthly distribution of hail days from 2009 to 2015 in Anshun of Guizhou Province

### 3 识别指标分析

#### 3.1 降雹前最大回波强度

从粒子对雷达波的散射原理可知,云中的过冷水滴和冰雹使得雷达的后向散射加强,因此,一般情况下普通雷雨云的回波强度小于冰雹云<sup>[1]</sup>。对贵州省安顺市2009—2015年26个冰雹个例中32块降雹云团降雹前30min最大回波强度统计(图2)发现,降雹前最大回波强度位于降雹云团的移动方向上,冰雹云最大回波强度在40~60dBZ之间,其中30块冰雹云(占93.8%)降雹前最大回波强度在50dBZ以上,21块冰雹云在60dBZ以上,可将最大回波强度大于40dBZ作为安顺市可能降雹的参考指标。实践表明:部分雷雨云降雹前最大回波强度也在40dBZ以上,因此,仅凭借降雹前30min最大回波强度不能完全区分雷雨云和冰雹云,必须对其他参量进行进一步分析。

#### 3.2 垂直累积液态水含量

垂直累积液态水含量表示将反射率因子数据转换成等价的液态水值,是假设所有反射率因子返回都是由液态水滴引起的经验导出关系,它表示降水云中单位面积垂直液态水的总量<sup>[2]</sup>。20世纪80年代末,美国WSR-88D多普勒雷达应用垂直液态水判别强降水和降水潜力,且有效识别了冰雹、暴雨

等强对流天气。近年来,国内也将VIL作为有效识别冰雹云的指标之一<sup>[3-8]</sup>。为了寻求贵州安顺市冰雹云VIL的变化规律,统计分析了2009—2015年32块降雹云团降雹前30minVIL的变化情况(表1),发现降雹前30min有6块冰雹云的VIL值持续增加,10块冰雹云VIL值先减小后增大,12块冰雹云VIL值先增大后减小,其余4块VIL值减小后保持不变,且30min内各雹块的VIL值变化时间不一致,表明降雹前VIL的变化并不能很好地识别安顺市的冰雹云。

另外,对32块降雹云团降雹前30minVIL<sub>max</sub>分布分析发现(表略),降雹前30min所有雹块的VIL<sub>max</sub>值在15~60kg·m<sup>-2</sup>之间,其中VIL<sub>max</sub><25kg·m<sup>-2</sup>有4个个例4块降雹云团,都出现在3月和4月,分别为2012-04-26、2013-03-31、2014-03-24、2014-04-05,尤其是2013-03-31和2014-04-05的VIL<sub>max</sub>仅为15kg·m<sup>-2</sup>,但还是造成了冰雹天气,其原因有待进一步研究;VIL<sub>max</sub>≥25kg·m<sup>-2</sup>有22个个例28块降雹云团,发生在3月和4月的有18块,而发生在5月和6月的有10块,其中有3个个例6块降雹云团的VIL<sub>max</sub>≥55kg·m<sup>-2</sup>,这3个个例中冰雹的直径相对较大,最大为35mm,且降雹点较多。如2014-03-30的4块雹云VIL<sub>max</sub>≥55kg·m<sup>-2</sup>,有13个降雹点,其中镇宁的大山、关岭的顶云受灾严重,冰雹直径在30mm以上。因此,可将3月和4月VIL<sub>max</sub>≥15kg·m<sup>-2</sup>,5月和6月VIL<sub>max</sub>≥25kg·m<sup>-2</sup>作为贵州安顺市冰雹云识别指标之一,其较新疆<sup>[7]</sup>、宁夏<sup>[8]</sup>等地的VIL雹云识别指标阈值偏低。

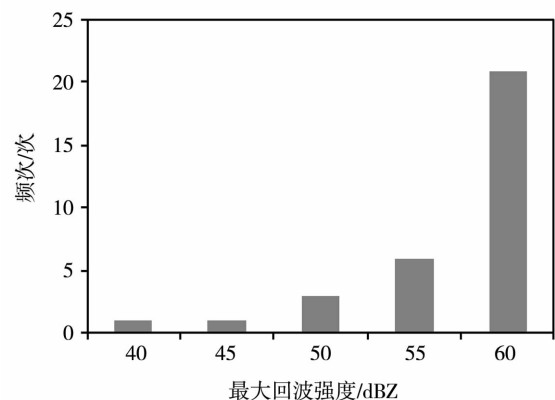


图2 贵州安顺市2009—2015年32块冰雹云降雹前30min最大回波强度出现频次  
Fig. 2 The occurrence frequency of maximum echo intensity for 32 blocks of hail cloud 30-minute before hail falling in Anshun of Guizhou Province during 2009-2015

表1 贵州安顺市 2009—2015 年 32 块冰雹云降雹前 30 min VIL 变化特征统计

Tab.1 Variation characteristics of VIL for 32 blocks of hail cloud 30 minutes before hail falling in Anshun of Guizhou Province from 2009 to 2015

变化特征	日期
持续增加	2011-04-15, 2011-05-01, 2012-04-12, 2012-04-22(1 块), 2014-06-03, 2015-05-07
先减后增	2009-04-11, 2011-06-14, 2012-04-22(2 块), 2012-04-28, 2013-04-23, 2015-05-06, 2015-05-17, 2015-05-19, 2015-06-10
先增后减	2011-05-21, 2012-04-26, 2013-03-18, 2013-04-29, 2014-03-24, 2014-03-25(2 块), 2014-03-30(4 块), 2014-05-09
减后不变	2013-03-30, 2014-04-05(2 块), 2015-04-29

### 3.3 45 dBZ 强回波顶高度

前文统计发现,降雹前贵州安顺市 32 块冰雹云最大回波强度均在 40 dBZ 以上,且 97% 的雹块最大回波强度在 45 dBZ 以上。SMITH 等<sup>[9]</sup>指出,云内最初冰雹增长为中数体积水汽凝结体的直径是 0.4~0.5 cm。根据这一结论,李金辉等<sup>[10]</sup>基于雨滴谱指数分布关系式和雷达气象方程,推导出冰雹云初期等效雷达反射率因子为 44 dBZ,这一结论与安顺市冰雹云降雹前最大回波强度在 45 dBZ 以上的统计事实接近。然而,当 CPAS 系统中的雷达组合反射率因子为 45 dBZ 时,仅说明该回波区由直径约为 0.4 cm 的中数体积水汽凝结体组成,并不能说是冰雹云,因此有必要研究其高度分布(图 3)。由图 3 可知,安顺市冰雹云 45 dBZ 雷达强回波分布在 4.5~12 km 高度,平均为 9.3 km,其中 8 km 以上的有 25 块,占 84%,且分布密集,降雹概率大,故将 45 dBZ 强回波顶对应的 8 km 及以上高度作为安顺市冰雹云识别指标之一。

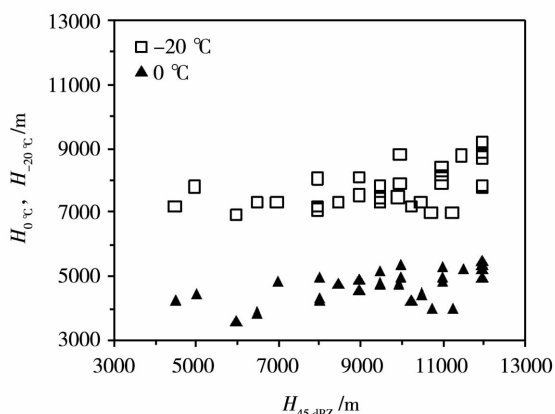


图3 贵州安顺市 32 块冰雹云 45 dBZ 强回波顶对应的高度及 0 °C、-20 °C 层高度分布

Fig.3 The height distribution of 45 dBZ radar echo for 32 blocks of hail cloud and 0 °C, -20 °C layers in Anshun of Guizhou Province

### 3.4 0 °C 层和 -20 °C 层高度

通常一定的环境温度场才能形成冰雹,合适的 0 °C 层和 -20 °C 层高度是冰雹形成的必要条件<sup>[11]</sup>。经统计(图 3),2009—2015 年 26 个降雹过程当日 08:00 贵阳站 0 °C 层高度集中分布在 4~5.5 km 之间,平均为 4.86 km,且 3—6 月降雹期间 0 °C 层高度呈逐月增加趋势,平均分别为 4.16 km、4.77 km、5.08 km、5.43 km,0 °C 层高度 4 km 以下的个例仅 2 个;降雹当日 08:00 安顺市 -20 °C 层高度平均为 7.97 km,较 0 °C 层高 3.11 km,且也呈逐月增加趋势,3—6 月平均分别为 7.09 km、7.59 km、8.28 km、8.91 km,说明伴随着夏季风的逐渐增强,大气对流活动逐渐旺盛。通过对比分析发现,降雹日和普通雷暴日的 0 °C、-20 °C 层高度差别不大,无法作为冰雹识别指标。

#### 3.4.1 典型高度差指标分析

研究发现<sup>[12]</sup>,在 0 °C 层以下出现 45 dBZ 的回波时,该强回波区由中数体积直径 0.4 cm 以上的大水滴组成,地面仅出现降雨;而在 0 °C 层以上出现 45 dBZ 的回波时,该强回波区则由中数体积直径 0.4 cm 以上的水粒子和冰粒子混合组成,45 dBZ 值出现越高,云内的上升气流越强,地面越易出现降雹。可见,45 dBZ 强回波顶对应的高度与 0 °C 层高度之差能够反映强回波区粒子的组成,且 45 dBZ 的回波高度决定地面降雹程度。因此,对 26 个个例 32 块降雹云团的 45 dBZ 强回波顶对应的高度与 0 °C、-20 °C 层高度进行减法运算(图 4a),看出所有冰雹云 45 dBZ 强回波顶对应的高度均在 0 °C 层以上,其中二者之差在 1.0 km 以下的有 2 块,分别是 2012 年 4 月 26 日的 550 m 和 2014 年 3 月 24 日的 210 m,其余 30 块均在 2.3 km 以上,占 94%,且分布密集,因此选择 45 dBZ 强回波顶高与 0 °C 层高度之差大于等于 2.3 km 作为安顺市冰雹预警指标

之一;与  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  层高度相比,冰雹云 45 dBZ 强回波顶对应的高度在  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  层以下的有 4 块,其余雹块二者之差超过 0.2 km,占 87.5%,说明 45 dBZ 强回波高度接近或者超过  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  层,降雹的可能性越大,因此可选择  $H_{45\text{ dBZ}} - H_{-20\text{ }^{\circ}\text{C}} > 0.2\text{ km}$  作为贵州安

顺市冰雹云识别指标参考条件。另外,对强回波中心高度与  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  层高度进行减法运算(图 4b),可以看到,30 块冰雹云强回波中心高度与  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  层高度之差超过 0 km,说明大部分冰雹云的强回波中心均在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  层以上,可将其作为安顺市冰雹云识别参考条件。

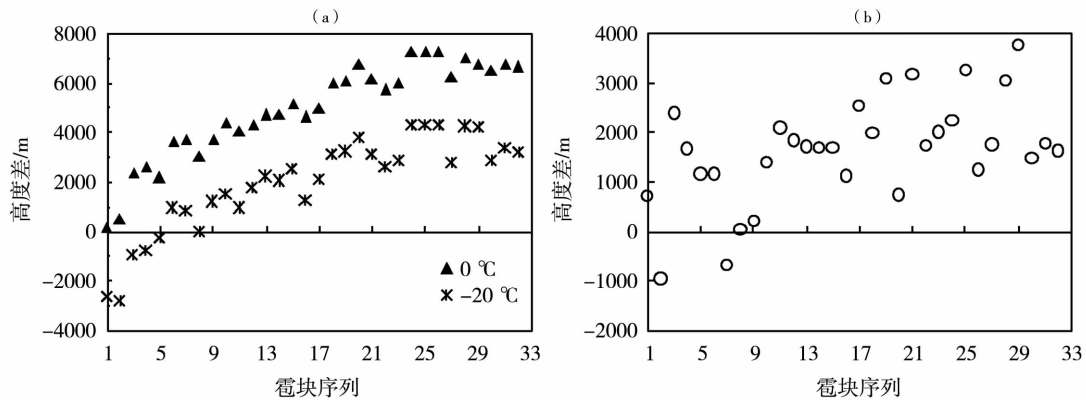


图4 冰雹云 45 dBZ 强回波顶对应的高度与  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  层高度差(a)及强回波中心高度与  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  层高度差(b)

Fig. 4 The differences between  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  layers height and strong echo top height with 45 dBZ of hail clouds (a) and between strong echo center height and  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  layer height (b)

## 4 识别指标个例应用

为了检验上述指标的预警作用,对 2016 年 4 月 12 日发生在贵州安顺市的一次冰雹天气过程进行分析。

### 4.1 天气实况

2016 年 4 月 12 日 15:55—19:29 贵州安顺市出现冰雹天气过程,降雹从西北部开始,逐渐向东南方向移动,冰雹主要出现在西秀区、普定县和紫云县,其中西秀区的鸡场、杨武、岩腊冰雹最大直径为 20 mm,造成农作物、通讯、房屋受损,直接经济损失约 1 000 万元,其余降雹点无灾损。

### 4.2 识别指标预警作用

12 日 08:00 贵阳站  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  层高度为 4 232.5 m,  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  层高度为 7 700.0 m,  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  层比  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  层高 3.47 km(高于多年平均的 3.11 km),预示当天有冰雹发生,指挥人员密切关注当天雷达回波变化。15:15,毕节市的纳雍、安顺市的普定一带出现对流云回波,回波强度为 45 dBZ,且 45 dBZ 强回波顶对应的高度为 5 km, VIL 为  $20\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ;15:25,回波强度增至 60 dBZ,45 dBZ 强回波顶高度升至 7.5 km, VIL 仍为  $20\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,45 dBZ 强回波中心高度与  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  层的高度差为 3.27 km,而与  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  层高度接近,强回波中心高度在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  层以上,满足前面

所有冰雹云预警指标,由于本次过程发展迅速,需要立即开展防雹作业。安顺市人工影响天气作业指挥中心通过语音指挥平台、电台、电话发出冰雹预警及作业指令,并及时向省人影办申请空域时间,各县(区)积极组织并抓住有利时机适时开展人工防雹作业。

### 4.3 防雹作业方案设计

准确识别冰雹云,掌握防雹作业时机、作业部位、作业方式等要素是人工防雹作业科学有效的决定性因素。雹云初期发展阶段作为防雹作业时机,本次天气系统向东南方向发展,且强回波中心应作为实施防雹作业部位。安顺市人影中心指挥人员根据 CPAS 系统雷达回波变化确定作业时机、作业次数以及作业用弹量。

### 4.4 作业效果

图 5 给出 2016 年 4 月 12 日 16:47—17:08 贵阳雷达站 2 块雹云的组合反射率。16:30—17:30, B 块雹云因没有空域时间无法作业,且雹云 B 发展迅速,回波面积、强度等迅速增加,导致西秀区的几个作业炮站降雹,冰雹直径为 20 mm,造成当地农作物、通讯、房屋受损;17:03,采用高炮对雹云 A 实施防雹作业,用弹量 40 发,作业后, A 块雹云回波强度、面积得到有效抑制。可见,利用前文的预警指标能够有效指导防雹作业。

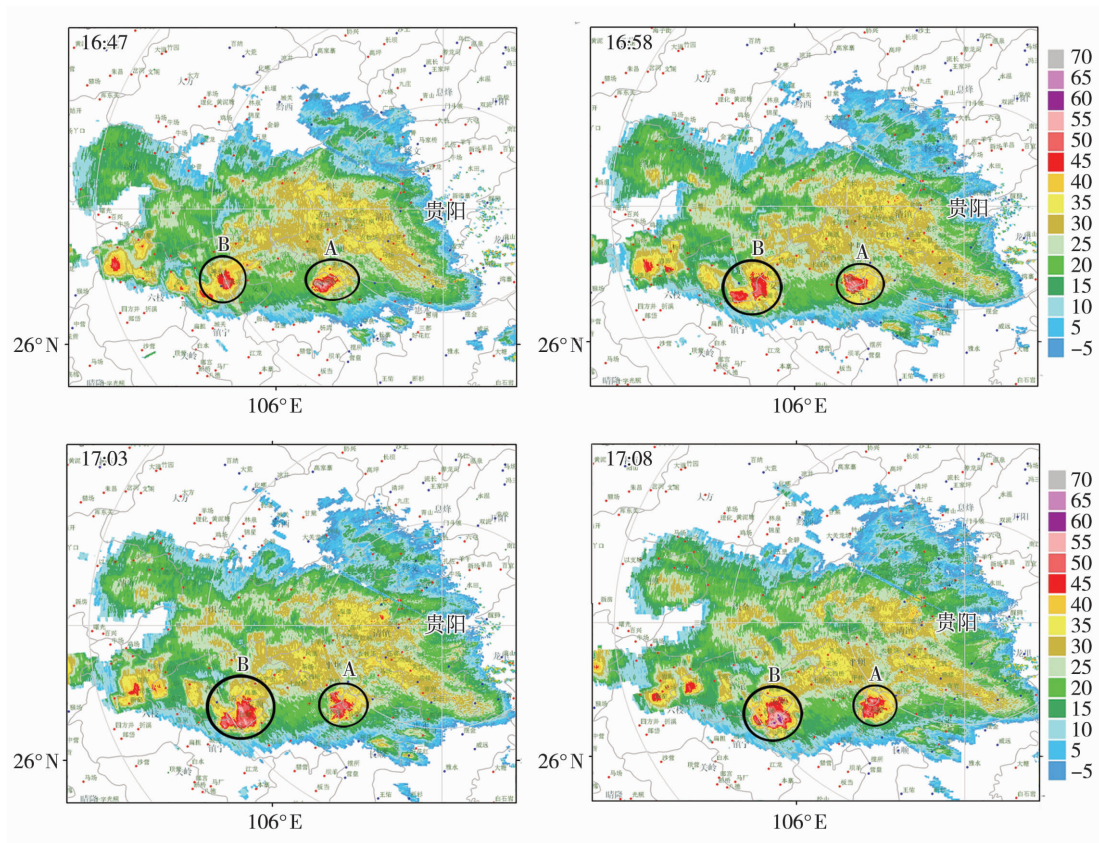


图5 2016年4月12日16:47、16:58、17:03和17:08贵阳雷达站2块雹云的组合反射率演变(单位: dBZ)

Fig. 5 The evolution of composited reflectivity factor for two blocks of hail cloud at 16:47 BST, 16:58 BST, 17:03 BST, 17:08 BST on 12 April 2016 in Guiyang radar station (Unit: dBZ)

## 5 结论

(1) 近7 a来,贵州安顺市26个冰雹天气过程降雹前雹块的最大回波强度在40 dBZ及以上,97%的雹块最大回波强度在45 dBZ以上,这与李金辉等<sup>[9]</sup>基于雨滴谱指数分布关系式和雷达气象方程,推导的冰雹云初期等效雷达反射率因子为44 dBZ较接近。

(2) 26个冰雹个例中大部分雹块的VIL相对偏低,3月和4月 $VIL_{max} \geq 15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,5月和6月 $VIL_{max} \geq 25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ;降雹日的0℃层和-20℃层平均高度呈逐月增加趋势,且-20℃层平均高度比0℃层高3.11 km。

(3) 45 dBZ雷达强回波顶高在8 km以上,且与0℃、-20℃层高度差分别大于2.3 km、0.2 km,强回波中心高度与0℃层高度差大于0 km,可作为贵州安顺市冰雹预警指标。

为了有效开展安顺市防雹作业,以上指标中只要符合其中一种,指挥员都应该立即发出预警信息,并密切关注回波各参量及其变化,经分析确定后适时开展人工防雹作业。然而,不同系统对雷达数据

分析有一定的差异,因此基于现有的系统作好本地雷达产品的分析应用非常必要。

## 参考文献

- [1] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕,等. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社,2004:1-10.
- [2] 俞小鼎,姚秀萍,熊延南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社,2005:187-188.
- [3] 曾庆华,刘建西,郭守峰,等. 凉山地区防雹作业雷达回波判据指标分析[J]. 高原山地气象研究,2012,32(4):55-60.
- [4] 李秀琳,贾金海. VIL产品在人工防雹中的应用[J]. 陕西气象,2008(3):13-15.
- [5] 熊伟,周明飞,周永永,等. 雷达资料对贵州春季冰雹云识别初探[J]. 贵州气象,2010,35(2):14-15.
- [6] 汤兴之. 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.
- [7] 张磊,张继东,热苏立·阿不拉,等. 南疆阿克苏冰雹天气的识别指标研究[J]. 干旱气象,2014,32(4):630-635.
- [8] 徐春阳,陆晓静,周虎,等. 多普勒天气雷达判别宁夏川区强对流天气的综合预报指标[J]. 干旱气象,2010,28(2):213-215.
- [9] SMITH P L, MYERS C G, ORVILLE H D. Radar reflectivity factor calculations in numerical cloud models using bulk parameterization of precipitation[J]. Journal of Applied Meteorology, 1975,14(9):1156-1165.

- [10] 李金辉,樊鹏. 冰雹云提前识别及预警研究[J]. 南京气象学院学报,2007,30(1):114-119.
- [11] 王若升,张彤,樊晓春,等. 甘肃平凉地区冰雹天气的气候特征和雷达回波分析[J]. 干旱气象,2013,31(2):374-377.
- [12] 樊鹏. 风暴剖面 45 dBZ 强回波在识别冰雹云中的作用[J]. 陕西气象,2009(6):12-13.

## Study on Identification Index of Hail Cloud Based on CPAS System in Anshun of Guizhou

LIU Xiaoyan<sup>1</sup>, SUO Yong<sup>1</sup>, WANG Jin<sup>2</sup>

(1. Anshun Weather Modification Operations Command Center of Guizhou Province, Anshun 561000, China;  
2. Weather Modification Office of Guizhou Province, Guiyang 550081, China)

**Abstract:** Based on the CPAS system, the characteristic parameters such as echo intensity, vertical liquid water content (VIL), height of 45 dBZ radar echo top, echo bottom and strong echo center for 26 hail cases in Anshun of Guizhou Province during 2009-2015 were analyzed. Combined with the height of 0 °C and -20 °C layers in Guiyang radiosonde station, the identification indicators of hail cloud in Anshun city were synthetically summarized. The results show that the hail weather processes occurred from March to June during 2009-2015 in Anshun of Guizhou Province, and the frequency of hail occurrence was the most in April and the least in June. The maximum echo intensity of most hail clouds in Anshun city was 45 dBZ and above before the falling of hail, and the value of VIL in March and April was more than  $15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , while that in May and June was greater than  $25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ . The average height of 0 °C and -20 °C layers on the day of the hailfall gradually increased from March to June, and the latter was 3.11 km higher than the former. The height of 45 dBZ strong echo of hail clouds was greater than 8 km, the height difference between strong echo center and 0 °C layer was greater than 0 km, and that between 45 dBZ strong echo top and 0 °C, -20 °C layers were greater than 2.3 km and 0.2 km, respectively, which could be taken as indicators for identification of the hail clouds. The early warning indicators could effectively guide the hail suppression operation by applying for a case.

**Key words:** Anshun of Guizhou Province; hail; characteristic parameter; recognition index