

李皓, 邹书平, 黄钰, 等. 基于雷达特征参数的贵州中西部雹云单体跃增特征分析[J]. 中低纬山地气象, 2023, 47(3): 68 - 72.

基于雷达特征参数的 贵州中西部雹云单体跃增特征分析

李 皓^{1,2}, 邹书平¹, 黄 钰¹, 罗 雄¹, 张小娟¹, 文继芬¹

(1. 贵州省人工影响天气办公室, 贵州 贵阳 550081;

2. 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室, 北京 100081)

摘 要: 利用 2016—2019 年贵州省人工影响天气作业站点上报信息、市(州)的灾情快报, 以及毕节、贵阳、兴义 3 部新一代多普勒天气雷达资料等, 分析贵州中西部 7 个具有多阶跃增特征的雹云单体的雷达参数演变特征, 研究发现: (1) 二阶跃增冰雹云演变呈发展—跃增—降雹—减弱—再发展—跃增—降雹的趋势; (2) 降雹时刻, 雹云的最大反射率因子 (MaxREF)、45 dBz 回波高度 (H_{45dBz})、回波顶高 (H_{0dBz})、垂直累积液态水含量 (VIL) 平均值分别为 63.4 dBz、7.55 km、12.01 km、39.08 $kg \cdot m^{-2}$; 大冰雹对应的 MaxREF 和 VIL 较小冰雹更大, 大冰雹、小冰雹的 H_{45dBz} 差别不大, 大冰雹对应的 H_{0dBz} 反而小于小冰雹; (3) 冰雹发生前, MaxREF、 H_{45dBz} 、 H_{0dBz} 和 VIL 2 个体扫之间平均最大跃变分别为 5.89 dBz、2.19 km、2.82 km、17.5 $kg \cdot m^{-2}$, 跃变现象的出现比冰雹发生时刻平均提前 21.4、22.2、28、28.8 min, 可以作为冰雹发生前的重要判断依据。

关键词: 雹云单体; 雷达参数演变; 跃增特性

中图分类号: P426.64 **文献标识码:** A

Analysis of Transition Characteristics of Hail Cloud in Central and Western Guizhou Based on Radar Characteristic Parameters

LI Hao^{1,2}, ZOU Shuping¹, HUANG Yu¹, LUO Xiong¹, ZHANG Xiaojuan¹, WEN Jifen¹

(1. Weather Modification Office of Guizhou Province, Guiyang 550081, China

2. Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the information reported by weather modification stations in Guizhou Province from 2016 to 2019, the city (prefecture) disaster report, and the data of three new generation Doppler weather radars in Bijie, Guiyang and Xingyi, the evolution characteristics of radar parameters of seven hail cloud cells with multi-step growth characteristics were analyzed in the central and western Guizhou. The results show that: (1) the evolution of the second-order jump hail cloud showed a trend of development-jump increase-hail falling-attenuation-redevelopment-jump increase-hail; (2) The averages of maximum radar base reflectivity (MaxREF), the height of 45dBz (H_{45dBz}) and top of storm (H_{0dBz}), vertically integrated liquid (VIL) are 63.4 dBz, 7.55 km, 12.01 km, 39.08 $kg \cdot m^{-2}$; (3) During the occurrence of hail, the sudden-increase phenomenon of MaxREF, H_{45dBz} , H_{0dBz} and VIL between the two volume scan are 5.89 dBz, 2.19 km, 2.82 km, 17.5 $kg \cdot m^{-2}$ on average. This transition occurred 21.4, 22.2, 28 and 28.8 min earlier than the average time of hailstorm occurrence. Such phenomenon could be an important criterion of hail warning.

收稿日期: 2022-10-29

第一作者简介: 李皓 (1991—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事人工影响天气技术研究, E-mail: 364018660@qq.com。

通讯作者简介: 邹书平 (1967—), 男, 正高, 主要从事雷达探测、人工影响天气技术研究, E-mail: zsping99@qq.com。

资助项目: 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室开放课题 (2020Z007): 基于 X 波段相控阵雷达的雹云微物理特征分析 (2021Z00724); 中国气象局人工影响天气中心业务项目: FY3/4 卫星云特性产品在西南防雹增雨中的应用示范 (一期)。

Key words: hail cloud monomer; radar parameter evolution; transition characteristic

0 引言

冰雹灾害是贵州山区常见气象灾害之一^[1],提前识别冰雹云对防御雹灾十分重要。黄美元等^[2]将冰雹云生命演变史细分为发生、跃增、孕育、降雹和消亡5个阶段。跃增阶段是指降雹前几分钟或十几分钟,云体回波强度、高度迅速增长,达到最大的阶段。肖辉等^[3]研究表明,云的强回波顶高和强度出现剧烈增长是云内冰雹生成引起的,冰雹云的“跃增”现象可以作为降雹前的先兆特征。

随着多普勒天气雷达的广泛建设,多普勒雷达资料成为分析冰雹天气过程的重要资料。刘小艳等^[4]、张正国等^[5]、鲁德金等^[6]、许可等^[7]对当地冰雹云的回波强度、回波顶高、垂直累积液态水含量等雷达参数特征进行分析研究,提出了本地冰雹云识别指标。国内学者^[8-11]在分析冰雹天气过程时发现,降雹前垂直积分液态水含量(VIL)和垂直积分液态水含量密度具有明显的跃增现象,VIL跃增对冰雹短时临近预报有指示意义。刘治国等^[12]研究发现,冰雹云单体垂直积分液态水含量最大值(VIL_{max})存在爆发式增长及突然降低的现象,这是区别于雷雨云单体重要特征。冰雹云单体在首次降雹前4个资料时间间隔内 VIL_{max} 将出现2次爆发式增长现象,第1次不会降雹,维持1~2个资料时间间隔后,第2次出现时开始降雹。王莎等^[13]统计分析了冀东地区36个冰雹个例的多普勒雷达参数特征,发现冰雹发生过程中,2次体扫间最大基本反射率因子、ET、VIL平均最大跃变分别为7 dBz、6.7 km、 $17 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,跃变的出现比冰雹发生时刻平均提前39、30和25 min。邹书平等^[14]对2012年5月8日贵州降雹天气过程中出现的二阶跃增冰雹云进行了研究,发现30 dBz高度变化情况能够比较准确地反映冰雹云演变的特征。目前国内对冰雹云跃增特征个例研究较多^[15-17],但是缺少对多阶跃增冰雹云的系统性研究。

贵州的冰雹源地均分布在西部地区,冰雹分布呈现自西向东逐渐减少的趋势。本文利用2016—2019年毕节、贵阳、兴义3部多普勒雷达数据,对贵州中西部7个多阶跃增单体雹云进行分析,提取对冰雹天气有指示意义的雷达参量,建立贵州中西部冰雹云识别指标,并对指标进行初步检验,为提升

冰雹云监测预警技术提供参考。

1 资料与方法

收集整理2016—2019年贵州中西部人影作业站点上报和各市州灾情快报中的降雹信息,选取降雹时间、地点、冰雹粒径、降雹密度等信息完整的个例。定义同一块云,产生多次降雹,且相邻降雹过程时间间隔大于半小时的为多阶跃增冰雹云。根据定义筛选出具有多阶跃增单体降雹现象的冰雹过程7个,分别为:2016年4月2日、2016年4月12日、2017年5月22日、2018年3月13日、2018年3月18日、2018年4月4日和2019年3月4日。

采用毕节、贵阳、兴义3部新一代天气雷达(CINRAD/CD)基数据资料(体扫采用VCP2模式,由9层仰角 0.5° 、 1.5° 、 2.4° 、 3.4° 、 4.3° 、 6.0° 、 9.9° 、 14.6° 、 19.9° PPI组成的立体扫描数据,数据时间间隔为5~6 min),根据最大反射率因子(MaxREF)、45dBz回波高度($H_{45\text{dBz}}$)、回波顶高($H_{0\text{dBz}}$)、垂直累积液态水含量(VIL)等雷达参量进行冰雹特征识别。

2 结果与分析

2.1 雹云演变过程分析

7次冰雹过程均发生在春季(3—5月),具有多阶跃增特征的单体雹云样本共产生30次降雹,降雹时刻集中在17—20时,最大降雹粒径为20 mm,降雹粒径 $\geq 10 \text{ mm}$ 的样本有11个,降雹粒径 $< 10 \text{ mm}$ 的样本有19个。

为方便分析7次冰雹过程中冰雹云雷达回波特征参数的演变规律,对体扫时间计数进行处理,用“T-X-Y”表示,X为第X次降雹阶段,Y为降雹前第Y个雷达体扫,例如:T-1-0为第1次降雹阶段的降雹时次;T-1-6为第1次降雹阶段降雹前第6个雷达体扫。

统计分析发现:MaxREF、VIL、 $H_{45\text{dBz}}$ 、 $H_{0\text{dBz}}$ 的演变均呈现发展—跃增—降雹—减弱—再发展—跃增—降雹的趋势,VIL、 $H_{45\text{dBz}}$ 、 $H_{0\text{dBz}}$ 在降雹前有1个明显的极大值,而MaxREF则在降雹时达到最强。VIL、 $H_{45\text{dBz}}$ 、 $H_{0\text{dBz}}$ 的跃增现象更为明显,MaxREF的增长幅度较缓和。如图1所示。

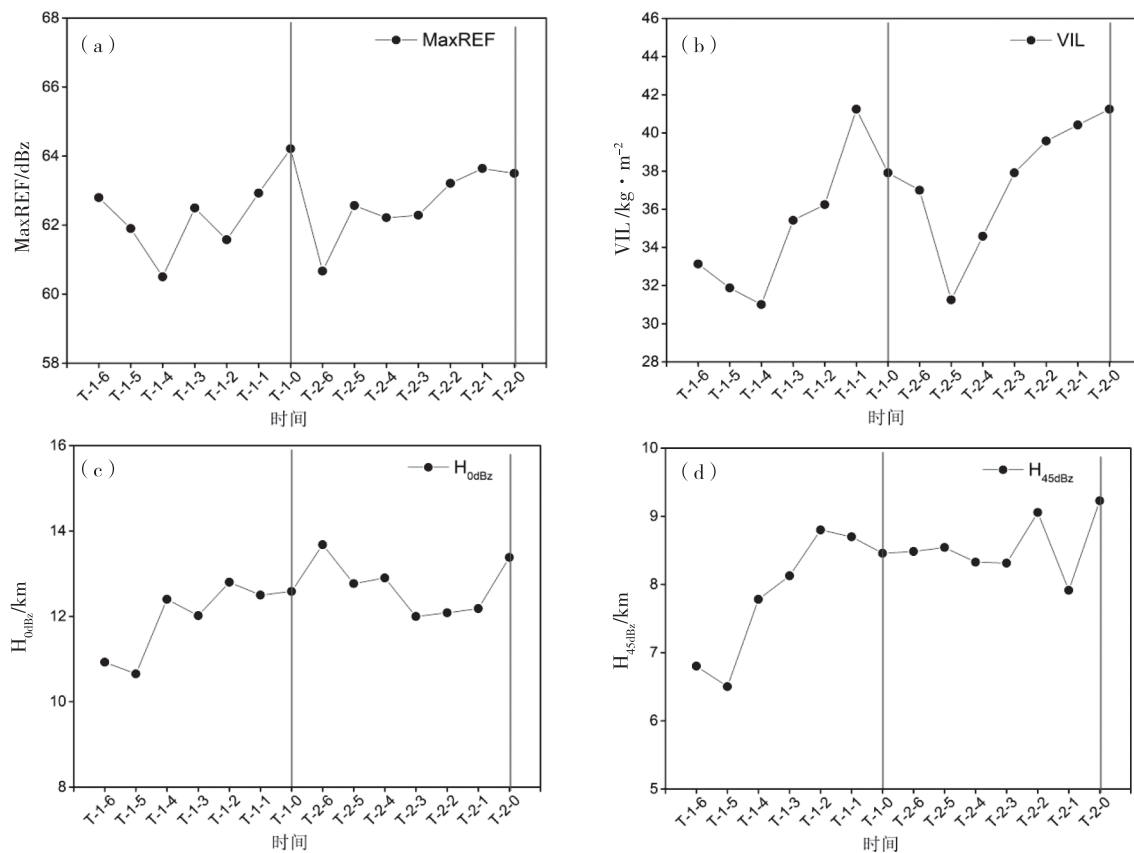


图 1 雷达参数平均值时序图(竖线为降雹时刻)

Fig. 1 Radar parameter variation (vertical line is hail time)

2.2 降雹时刻雷达参数分析

降雹时刻雷达特征参量值如表 1 所示。降雹时刻, MaxREF 取值范围为 52.0 ~ 80.5 dBz, 平均值为 63.4 dBz; VIL 取值范围为 22.5 ~ 72.5 kg·m⁻², 平均值为 39.08 kg·m⁻², 大部分集中在 30 ~ 50 kg·m⁻²; H_{45dBz} 取值范围为 5.4 ~ 13.4 km, 平均值为 7.55 km; H_{0dBz} 取值范围为 8.9 ~ 18.3 km, 平均值为 12.01 km。从探空资料来看, 7 次过程平均 0℃ 层高度为 4.59 km, 平均 -20℃ 层高度为 7.53 km, 每次过程中 H_{45dBz} 均在 0℃ 层以上, H_{0dBz} 均在 -20℃ 层以上。

将冰雹按照粒径大小分为大冰雹(粒径 ≥ 10 mm)和小冰雹(粒径 < 10 mm)。降雹时刻, 大冰雹对应的 MaxREF、VIL、H_{45dBz}、H_{0dBz} 平均值分别为: 65.59 dBz、43.18 kg·m⁻²、7.72 km、11.63 km, 小冰雹对应的雷达参数平均值分别为: 62.24 dBz、36.71 kg·m⁻²、7.46 km、12.23 km, 大冰雹对应的 MaxREF 和 VIL 较小冰雹更大, 大冰雹、小冰雹的 H_{45dBz} 差别不大, 大冰雹对应的 H_{0dBz} 反而小于小冰雹。分析结果与王莎等^[13] 的研究结论基本一致。

表 1 7 次冰雹过程降雹时刻雹云雷达参数表

Tab. 1 Hail cloud radar parameters at hail falling time of 7 hail processes

序号	日期	降雹时间	VIL/(kg·m ⁻²)	MaxREF/dBz	H _{45dBz} /km	H _{0dBz} /km	H _{0℃} /km	H _{-20℃} /km
1	2016 年 4 月 2 日	17 时 10 分	32.5	64.5	9.0	17.1	4.77	7.68
		17 时 16 分	57.5	63.0	11.9	17.0		
		18 时 19 分	32.5	63.5	7.0	12.9		
		18 时 24 分	37.5	62.0	9.3	17.0		
2	2016 年 4 月 12 日	16 时 05 分	47.5	62.5	7.8	10.7	4.76	7.94
		16 时 21 分	37.5	62.0	6.4	10.7		
		17 时 05 分	22.5	60.0	5.4	10.0		
		17 时 35 分	37.5	65.0	5.4	11.4		
		17 时 35 分	37.5	65.0	5.4	11.4		

续表 1

序号	日期	降雹时间	VIL/(kg·m ⁻²)	MaxREF/dBz	H _{45dBz} /km	H _{0dBz} /km	H _{0℃} /km	H _{-20℃} /km
2	2016 年 4 月 12 日	17 时 38 分	37.5	65.0	5.4	11.4		
		17 时 48 分	32.5	61.5	6.4	10.2		
		17 时 51 分	27.5	61.5	6.0	10.2		
3	2017 年 5 月 22 日	19 时 11 分	72.5	80.5	12.3	14.8	5.49	8.87
		20 时 27 分	72.5	67.5	13.4	18.3		
4	2018 年 3 月 13 日	15 时 43 分	22.5	52.0	7.2	10.8		
		16 时 34 分	32.5	58.0	9.1	11.0	4.30	6.94
		16 时 50 分	42.5	61.0	8.4	10.3		
5	2018 年 3 月 18 日	20 时 01 分	27.5	64.5	7.0	10.8	4.46	7.23
		20 时 38 分	37.5	67.5	8.0	11.6		
6	2018 年 4 月 4 日	17 时 40 分	42.5	61.5	6.1	11.3		
		17 时 40 分	42.5	61.5	6.1	11.3		
		17 时 56 分	52.5	63.5	6.2	11.8		
		18 时 05 分	37.5	62.5	7.4	13.0	4.50	7.20
		18 时 11 分	32.5	62.5	7.4	12.9		
		18 时 25 分	42.5	60.5	9.4	14.3		
		19 时 00 分	42.5	61.5	7.7	11.2		
		19 时 11 分	22.5	59.0	6.7	8.9		
7	2019 年 3 月 4 日	19 时 37 分	40.0	65.0	7.0	10.0		
		20 时 29 分	35.0	70.0	6.0	9.0	3.83	6.86
		20 时 35 分	35.0	70.0	5.8	9.0		

注:若降雹时刻无雷达回波数据,则取降雹前最临近时刻的雷达回波数据。

2.3 跃增阶段雷达参数分析

为进一步定量研究冰雹云跃增特征,定义相邻 2 个体扫的雷达参数最大变化量为跃增量,发生跃增到之后第 1 次降雹的时间差为跃增提前量。

统计分析 7 次天气过程的雷达特征参数发现,MaxREF 跃增量最大值达 15 dBz,最小值为 1.5 dBz,平均值为 5.89 dBz;跃增提前量最大为 14 个体扫,最小为降雹前 1 个体扫,平均值为 3.57 个体扫,约 21.4 min。VIL 跃增量最大值达 40 kg·m⁻²,最小值为 5 kg·m⁻²,平均值为 17.5 kg·m⁻²;跃增提前时间最大为 10 个体扫,最小值为 1 个体扫,平均值为 4.8 个体扫 28.8 min。H_{45dBz} 跃增量最大值达 3.5 km,最小值为 0.6 km,平均值为 2.19 km;跃增提前量最大为 7 个体扫,最小值为 1 个体扫,平均值为 3.7 个体扫(22.2 min)。H_{0dBz} 跃增量最大值达 6.4 km,最小值为 0.6 km,平均值为 2.82 km;跃增提前量最大为 13 个体扫,最小值为 1 个体扫,平均值为 4.67 个体扫(28 min)。

2.4 雹云识别指标检验

综合上述统计结果,将 7 次过程中雹云降雹时刻特征参数平均值以及跃增量平均值作为冰雹云的识别预警指标,详见表 2。

利用 2021 年 5 月 3 日冰雹天气过程,对识别预警指标进行了检验。5 月 3 日 15 时 39 分在织金生

成的对流单体,自西向东南方向移动,不断发展,18 时 45 分第 1 次产生降雹。提取雹云发展过程中各雷达特征参数的值,并逐体扫计算增幅,见表 3。从表中可以看出:17 时 58 分雹云 MaxREF、H_{45dBz}、H_{0dBz}、VIL 的值分别为:53 dBz、9 km、12 km、60 kg·m⁻²,均超过特征参数识别指标值,H_{45dBz} > -20℃ 层高度,直至产生降雹,雹云的雷达特征参数值都大于识别指标值,即依据雷达特征参数识别指标可提前 47 min 识别出冰雹云。对于跃增值来说仅是单参数达到指标:MaxREF 的增幅在 18 时 03 分达到指标,较降雹提前 42 min,H_{45dBz} 的增幅分别在 17 时 58 分、18 时 15 分达到指标,较降雹提前 47、20 min。综合来看,对于 5 月 3 日的冰雹过程,特征参数识别指标较特征参数跃增识别指标能更好地指示冰雹的发生。

表 2 雹云识别指标

Tab. 2 Hail cloud identification index		
特征参数	参数值	跃增量
MaxREF/dBz	52	5.89
VIL/(kg·m ⁻²)	30	17.5
H _{45dBz} /km	7.55	2.19
H _{0dBz} /km	8.9	2.82
相对回波高度	H _{45dBz} > H _{0℃}	-
高度	H _{0dBz} > H _{-20℃}	-

表 3 5 月 3 日雹云演变过程各雷达参数值及逐体扫增幅

Tab. 3 Radar parameter value and body by body sweep increase in hail processes on May 3

时间	MaxREF	H _{45dBz}	H _{0dBz}	VIL	ΔMaxREF	ΔH _{45dBz}	ΔVIL	H _{0℃}	H _{-20℃}
	/dBz	/km	/km	/(kg·m ⁻²)	/dBz	/km	/(kg·m ⁻²)	/km	/km
17 时 13 分	40	—	—	40	—	—	—	4.8	7.9
17 时 18 分	45	3.6	9	50	5	3.6	10	4.8	7.9
17 时 23 分	45	3.6	12	45	0	0.0	-5	4.8	7.9
17 时 29 分	50	7.8	12	50	5	4.2	5	4.8	7.9
17 时 35 分	50	7.0	12	55	0	-0.8	5	4.8	7.9
17 时 40 分	52	8.0	12	60	2	1.0	5	4.8	7.9
17 时 46 分	52	7.1	12	60	0	-0.9	0	4.8	7.9
17 时 52 分	55	6.2	12	60	3	-0.9	0	4.8	7.9
17 时 58 分	53	9.0	12	60	-2	2.8	0	4.8	7.9
18 时 03 分	61	11.0	12	65	8	2.0	5	4.8	7.9
18 时 09 分	62	9.1	12	70	1	-1.9	5	4.8	7.9
18 时 15 分	61	8.5	12	70	-1	-0.6	0	4.8	7.9
18 时 20 分	60	10.8	12	65	-1	2.3	-5	4.8	7.9
18 时 26 分	64	10.2	12	65	4	-0.6	0	4.8	7.9
18 时 32 分	65	10.0	12	70	1	-0.2	5	4.8	7.9
18 时 38 分	66	10.2	12	70	1	0.2	0	4.8	7.9

3 结论

(1) 二阶跃增冰雹云演变呈发展—跃增—降雹—减弱—再发展—跃增—降雹的趋势,雹云跃增特征与普通冰雹云跃增特征相似。

(2) 降雹时刻,最大反射率因子(MaxREF)、45dBz 回波高度(H_{45dBz})、回波顶高(H_{0dBz})、垂直累积液态含水量(VIL)平均值分别为 63.4 dBz、7.55 km、12.01 km、39.08 kg·m⁻²。

(3) 大冰雹对应的 MaxREF 和 VIL 较小冰雹更大,大冰雹、小冰雹的 H_{45dBz} 差别不大,大冰雹对应的 H_{0dBz} 反而小于小冰雹。

(4) 冰雹发生前,MaxREF、H_{45dBz}、H_{0dBz} 和 VIL 2 个体扫间平均最大跃变分别为:5.89 dBz、2.19 km、2.82 km、17.5 kg·m⁻²,平均跃变发生较降雹时刻提前的时间分别为:21.4、22.2、28.0、28.8 min,可以作为冰雹发生前的重要判断依据,其中 VIL 的跃增量最大,提前时间最长。

(5) 在 2021 年 5 月 3 日织金的冰雹过程中,基于降雹时刻参数值的雷达特征参数识别指标,较特征参数跃增识别指标能更好地指示冰雹的发生,但对于冰雹识别指标的完善和检验还有待更多的个例分析和验证。

参考文献

- [1] 万雪丽,周明飞,曾莉萍,等. 贵州春季强冰雹天气定量化概念模型研究及试应用分析[J]. 贵州气象,2017,41(2):1-7.
- [2] 黄美元,王昂生. 冰雹的物理特性[J]. 气象,1976,2(2):21-22.
- [3] 肖辉,吴玉霞,胡朝霞,等. 旬邑地区冰雹云的早期识别及数值模拟[J]. 高原气象,2002,21(2):159-166.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 鲁德金,陈钟荣,袁野,等. 安徽地区春夏季冰雹云雷达回波特征分析[J]. 气象,2015,41(9):1104-1110.
- [7] 许可,杜小玲,周文钰,等. 贵州一次暖区飑线大风与大冰雹的雷达结构特征分析[J]. 中低纬山地气象,2021,45(3):65-72.
- [8] 周永水,周明飞,原野. 多普勒雷达产品在贵州山区的降雹特征[J]. 贵州气象,2012,36(1):40-43.
- [9] 吴剑坤,俞小鼎. 强冰雹天气的多普勒天气雷达探测与预警技术综述[J]. 干旱气象,2009,27(3):197-205.
- [10] 曾妮,邓安,方鹏,等. 一次局地性强冰雹天气的环境背景及雷达产品特征分析[J]. 中低纬山地气象,2021,45(2):23-27.
- [11] 杨春艳,陈杨,孟庆怡,等. 黔西南一次中 β 尺度强对流天气分析[J]. 中低纬山地气象,2021,45(6):1-8.
- [12] 刘治国,陶健红,杨建才,等. 冰雹云和雷雨云单体 VIL 演变特征对比分析[J]. 高原气象,2008,27(6):1363-1374.
- [13] 王莎,沙勇,宋金妹,等. 冀东地区冰雹云多普勒雷达参数特征分析[J]. 气象,2019,45(5):713-722.
- [14] 邹书平,周丽娜,李丽丽,等. 一次典型二阶跃增的冰雹云回波特征分析[C]//中国气象学会年会论文集之人工影响天气研究与业务应用. 中国气象学会,2015.
- [15] 李丽丽,邹书平,杨哲,等. 贵州中部一次多单体冰雹天气的雷达回波特征[J]. 中低纬山地气象,2018,42(2):21-27.
- [16] 冯晋勤,俞小鼎,傅伟辉,等. 2010 年福建一次早春强降雹超级单体风暴对比分析[J]. 高原气象,2012,31(1):239-250.
- [17] 池再香,黄艳,杨海鹏. 贵州西部一次冰雹灾害天气强对流(雹)云演变分析[J]. 贵州气象,2010,34(2):10-12.