

文章编号:2096 - 5389(2020)06 - 0044 - 07

贵州中西部冰雹云闪电活动特征及 对降雹指示作用研究

曾 勇^{1,2}, 张淑霞², 罗 雄¹, 邹书平¹, 黄 钰², 周丽娜¹

(1. 贵州省人工影响天气办公室, 贵州 贵阳 550082; 2. 贵州省气象灾害防御技术中心, 贵州 贵阳 550082)

摘 要:利用 VLF/LF 三维闪电监测资料、CINRAD/CD 雷达资料和地面降雹观测资料,对贵州中西部冰雹云闪电特征进行分析。结果表明:高原台地威宁平均 POP 和 Z 值均高于斜坡过渡带区域,两者平均 POP 值均高于贵州 10 a(2006—2015 年)平均 POP 统计特征值。斜坡过渡带区域内总闪峰值平均为 22 次/5 min,威宁总闪峰值平均为 13 次/5 min。斜坡过渡带区域 $2\sigma_{LFCR}$ 闪电跳跃信号和闪电频次峰值提前量平均为 20 min 和 13 min,威宁 $2\sigma_{LFCR}$ 闪电跳跃信号和闪电频次峰值提前量平均为 33.7 min 和 29 min。 $2\sigma_{LFCR}$ 闪电跳跃信号指示降雹优于闪电频次峰值信号,在实际中可以综合利用闪电 $2\sigma_{LFCR}$ 跳跃信号与峰值信号识别降雹。

关键词:冰雹云;闪电频次;闪电跃增事件; $LFCR$ 跳跃信号

中图分类号:P427.32 **文献标识码:**B

Study on the Characteristics of Hail Cloud and Lightning Activity in the Middle and West of Guizhou Province and its Indicating Effect on Hail

ZENG Yong^{1,2}, ZHANG Shuxia², LUO Xiong¹, ZOU Shuping¹, HUANG Yu², ZHOU Lina¹

(1. The Weather Modification Office of Guizhou Province, Guiyang 550082, China;

2. Guizhou Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Guiyang 550082, China)

Abstract: By using VLF/LF three - dimensional lightning monitoring data, CINRAD/CD radar data and ground hail observation data, the characteristics of hail cloud lightning in central and Western Guizhou were analyzed. The results show that the average POP and Z values of Weining plateau platform are higher than those of slope transition zone, and the average POP values of both are higher than the 10a average POP statistical characteristic values of Guizhou from 2006 to 2015. The average peak value of total lightning in the slope transition area is 22 fl/(5 min), and the average peak value of total lightning in Weining is 13 fl/(5 min). The average of $2\sigma_{LFCR}$ lightning jump signal and peak advance of lightning frequency in slope transition zone is 20 min and 13 min, and the average of $2\sigma_{LFCR}$ lightning jump signal and peak advance of lightning frequency in Weining is 33.7 min and 29 min. The $2\sigma_{LFCR}$ lightning jump signal is better than the peak signal of lightning frequency. In practice, the $2\sigma_{LFCR}$ lightning jump signal and the peak signal can be used to identify hail.

Key words: hail cloud; lightning frequency; lightning jump event; $LFCR$ jump signal

收稿日期:2020 - 01 - 13

第一作者简介:曾勇(1986—),男,硕士,工程师,主要从事云雾物理与大气电学研究,E-mail:120200859@qq.com。

资助项目:中国气象局云雾物理环境重点实验室开放课题(2018Z01602):贵州冰雹云回波移动特征及形成机理研究;贵州省气象局科研业务项目(黔气科登[2019]09-09号):云贵高原斜坡过渡带区域冰雹云闪电特征观测研究;贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2019]2387号):雹胚形成演变微物理环境条件观测与模拟试验研究。

0 引言

冰雹是贵州春季主要的气象灾害之一,常给工农业生产带来巨大的经济损失,具有局地性强、发展速度快、灾害强的特点^[1]。闪电是强对流天气发展过程中伴随的放电现象,在冰雹天气过程中尤为突出。闪电资料在时间上较雷达资料更为实时,在探测范围内不受高山或建筑物的干扰,可以作为天气雷达进入探测盲区后有效资料补充。因此,针对冰雹天气过程闪电资料进行分析研究,获得闪电信息对降雹的指示作用对冰雹的监测预警预报具有重要意义。

早期关于闪电与对流降水的研究是分开的,闪电研究人员关注的是闪电,对流降水研究人员只关心降水。随着关于雷暴起电的非感应起电机制的深入研究,霰、雹粒等大冰相粒子群的存在为非感应起电提供物质基础得到证实,因此闪电与对流降水关系的研究得到广泛开展^[2]。国外研究者针对强风暴过程闪电特征进行观测研究,发现产生较大冰雹的雷暴正地闪发生频次较高,正地闪主要集中在降雹阶段,当闪电从负极性地闪转为正极性地闪时,将会产生大冰雹、大风等灾害性天气,正地闪信息可作为指示强对流天气发生的“指示器”^[3-6]。然而,国外也有研究表明冰雹云地闪频数远低于那些仅产生降水的风暴,冰雹云地闪频数一般不超过 2 次/min,而暴雨过程却可以达到 12 次/min^[7]。所以,单纯使用正地闪发生频次高低来识别冰雹云具有很大程度不确定性。鉴于此,研究者利用完整地闪跃增信息对冰雹事件的提前识别进行了检验,主要基于 2σ 闪电跃增法得到了地闪跃增相对于降雹的超前时间,能够有效识别降雹^[8]。

我国在上世纪 60 年代便研制了闪电计数器并用于冰雹云与雷雨云的观测试验,得到了冰雹云与

雷雨云闪电频数的差别并应用于人工防雷作业^[9]。针对中国西北与内陆高原地区冰雹云闪电特征研究表明,冰雹云发展演变过程伴随较高的正地闪比例,闪电每 5 min 变化在降雹前出现跃增并伴随闪电频数峰值^[10-15]。曾勇等^[16]、黄钰等^[17]对贵州地区闪电发生对冰雹、暴雨指示作用初步研究表明:闪电可以作为强对流发生指示器。国内研究主要基于对降雹前闪电峰值时间的统计进而获得峰值时间提前量,然而峰值时间提前量是闪电经历跃增后的结果,对闪电初始跃增信号没有进行深度挖掘,得到相对于峰值时间提前量更长的闪电跳跃预警信号。

本文研究切入点为基于 VLF/LF 全闪资料对发生在云贵高原台地威宁及斜坡过渡带冰雹过程闪电特征进行详细分析,挖掘总闪跳跃信号与峰值信号并分析闪电跃增事件与降雹的响应时间定量关系,为冰雹云降雹识别和人工防雷作业提供支撑。

1 资料来源与分析方法

1.1 资料来源

研究过程资料主要涉及冰雹过程闪电探测资料、雷达资料及降雹观测资料。闪电探测资料主要采用贵州省 VLF/LF 三维闪电监测网自 2016—2019 年探测资料。VLF/LF 三维闪电监测系统采用基于宽带网络通讯技术与多站 TOA 时间差定位算法,实现闪电 VLF/LF 辐射源的时间、位置、高度、强度及极性等主要参数的三维定位,提高了定位精度与探测效率,能够全面探测云闪、地闪及闪电高度^[18-19],主要特征参数见表 1。雷达资料采用贵阳、毕节、都匀、六盘水和昭通新一代天气雷达探测资料,降雹观测资料来自地面天气报文及市县人影作业站点观测记录。考虑闪电资料、雷达资料及地面观测资料完整性,对云贵高原台地威宁筛选冰雹个例 21 个,云贵高原斜坡过渡带筛选冰雹个例 13 个。

表 1 VLF/LF 三维闪电监测系统主要特征参数

Tab. 1 Main characteristic parameters of VLF/LF 3D lightning monitoring system

定位算法	探测产品	探测闪电类型	探测精度
时间到达	闪电时间、经度、纬度、强度、陡度、	正云闪、负云闪	水平位置误差小于 300 m
TOA 算法	高度、电荷、能量	正地闪、负地闪	高度位置误差小于 500 m

1.2 分析方法

本研究主要采用统计方法和 2σ 闪电跃增法,对降雹区域冰雹云闪电频次时间变化与闪电跃增信息进行统计和计算。在对降雹区域闪电活动特征进行分析之前,对区域内闪电数据进行筛选,闪

电资料的取值范围为降雹区域整个冰雹云区,剔除不属于降雹区域内闪电数据,保证分析数据的可靠性。闪电数据筛选原则为:综合冰雹发生时间地点信息和冰雹过程雷达回波资料,根据雷达回波发生发展过程对流云团区域范围筛选闪电数据,主要利

用云降水精细化分析系统(CPAS),剔除不属于降雹区域闪电数据。为了便于分析,将总闪、地闪、云闪分别记为 TL、CG、IC。正闪比记为 POP, $POP = (+CG/CG) \times 100\%$, +CG 表示正地闪;负闪比记为 NOP, $NOP = (-CG/CG) \times 100\%$, -CG 表示负地闪;云闪比记为 IOP, $IOP = (IC/TL) \times 100\%$;云闪与地闪的值定义为 Z 值, $Z = IC/CG$ 。

基于 Schultz 等^[20]提出的 2σ 闪电跃增法对闪电跳跃信号进行提取分析, 2σ 闪电跃增法计算如下:

①首先对降雹区域范围内相邻时次闪电数据进行滑动平均处理,消除个别噪声数据的干扰。

$$LF_{avg}(t_i) = \frac{LF_{i1}(t_1) + LF_{i2}(t_2)}{2} \quad (1)$$

式中 LF_{avg} (Lightning Frequency) 为闪电频次滑动平均值,单位为次 $\cdot \text{min}^{-1}$, LF_{i1} 和 LF_{i2} 分别为 t_1 和 t_2 时次内对应的闪电总频次, LF_{avg} 单位为次 $\cdot \text{min}^{-1}$ 。

②对 LF_{avg} 进行微分处理,求解获得各时次的闪电频次变化率 $LFCR$ (Lightning Frequency Change Rate),单位为次 $\cdot \text{min}^{-2}$ 。

$$LFCR = \frac{d}{dt} LF_{avg}(t_{i+1}) = \frac{LF_{avg}(t_{i+1}) - LF_{avg}(t_i)}{t_{i+1} - t_i} \quad (2)$$

③建立闪电跳跃预警信号识别机制。基于(1)式与(2)式计算结果,求解总体 $LFCR$ 的标准偏差 σ_{LFCR} ,利用各时次的 $LFCR$ 值与 $2\sigma_{LFCR}$ 值进行比对,大于 $2\sigma_{LFCR}$ 的点被记录为闪电跳跃预警信号,结合降雹观测记录时间,得到闪电跳跃信号的提前量,

这就是 2σ 判别机制。

2 冰雹云闪电活动特征分析

2.1 冰雹云闪电统计特征分析

冰雹云闪电特征具有典型的地域特性,因此本文对高原台地威宁与斜坡过渡带区域冰雹过程闪电特征进行统计分析,表 2 给出了 2018 年 3 月 13 日发生在云贵高原斜坡过渡带一次大范围致灾冰雹过程闪电统计特征。从表 2 可以得出:①12 个降雹区域内总闪频次在 35 ~ 473 次之间,地闪频次在 19 ~ 343 次之间,冰雹过程总闪和地闪频次变化范围大,同时注意到冰雹直径大小不能以闪电发生频数来衡量,闪电频数低也能产生 10 mm 以上降雹,因此不能用总闪频数多少来识别和判别冰雹云。②12 个降雹区域平均 POP、NOP 和 IOP 值分别为 19.58%、80.42%、30%,而正地闪占总地闪平均值为 19.58%,高于贵州省 2006—2015 年正地闪占总地闪比例平均值 4.02%^[21](该统计值由 ADTD-1 二维闪电定位系统提供),是其 4.87 倍,说明冰雹天气过程较其它类型雷暴天气具有较高的正地闪比例,但此正闪比例远低于国内冯桂力等^[22]、陈哲彰等^[23]研究给出的山东地区和京津冀地区冰雹过程正闪比例。③从表 2 中 Z 值分布看,Z 值在 0.13 ~ 0.91 之间,平均值为 0.51,低于 0.5 的占 67%,说明整个冰雹过程地闪发生总体占优,但个别降雹区域(晴隆)的 Z 值大于 1,云闪频数超过地闪频数,而且产生 15 mm 的大冰雹,因此将云闪和地闪数据结合起来分析冰雹云中闪电特征更能反映闪电信息对冰雹的指示作用。

表 2 斜坡过渡带区域 12 个冰雹过程闪电统计特征

Tab. 2 Lightning statistical characteristics of 12 hail processes in the transition zone of slope

降雹地点	总闪/次	地闪/次	云闪/次	POP/%	NOP/%	Z 值	雷暴持续时间/h	最大雹径/mm
安龙县	35	19	16	15.79	84.21	0.84	1.9	10
大方县*	444	393	51	2.54	97.46	0.13	3.2	10
平坝县	207	154	53	5.19	94.81	0.34	1.2	5
普定县	208	161	47	9.32	90.68	0.29	2.4	7
黔西县	382	321	61	6.54	93.46	0.19	3.3	12
清镇市	224	160	64	7.50	92.50	0.40	2.3	5
晴隆县	96	39	57	69.23	30.77	1.46	2.3	15
水城	91	56	35	39.29	60.71	0.63	2.5	16
兴仁县*	157	82	75	57.32	42.68	0.91	3.5	12
织金县	473	343	130	11.08	88.92	0.38	3.2	5
龙里县	70	57	13	3.51	96.49	0.23	1.3	5
贵阳城区	68	52	16	7.69	92.31	0.31	2.2	16

*表示过程含有二次降雹。

按照同样统计方法,表 3 给出了高原台地威宁 21 次冰雹过程闪电统计特征。闪电平均 POP 为 37.32%,Z 值平均为 0.76,均高于斜坡过渡带区域范围平均 POP 和 Z 值,Z 值大于 0.5 的个例为 11

个,占总个例的 52.4%,且冰雹最大直径均为 8 mm 以上,说明冰雹过程云闪频数与冰雹大小存在一定联系,其机理在后续将开展研究。

表 3 威宁 2016—2019 年 21 次冰雹过程闪电统计特征

Tab. 3 Lightning statistical characteristics of 21 hailstorms in Weining from 2016 to 2019

降雹日期	降雹地点	总闪/次	地闪/次	云闪/次	POP/%	NOP/%	Z	最大雹径/mm
2016-04-11	观风海	357	298	59	2.68	97.32	0.2	5
2016-04-12	得磨	38	31	7	6.45	93.55	0.23	5
2016-06-04	新发	172	111	61	66.67	33.33	0.55	10
2016-06-04	小海	136	104	32	47.12	52.88	0.31	6
2016-06-06	小海	65	42	23	19.05	80.95	0.55	8
2016-06-06	羊街	118	86	32	8.14	91.86	0.37	5
2016-07-10	小海	73	41	32	58.54	41.46	0.78	8
2016-07-16	羊街	70	57	13	17.54	82.46	0.23	10
2017-05-05	开嘎	30	20	10	5	95	0.5	10
2018-03-12	幺站	39	16	23	93.75	6.25	1.44	8
2018-03-13	金钟	52	32	20	81.25	18.75	0.63	15
2018-03-13	石板河	79	68	11	19.12	80.88	0.16	5
2018-03-30	羊街	47	32	15	25	75	0.47	5
2018-05-08	幺站	178	91	87	9.89	90.11	0.96	8
2018-05-17	松山	87	50	37	2	98	0.74	8
2018-06-27	石门	43	15	28	80	20	1.87	10
2018-06-28	牛棚	212	68	144	50	50	2.12	8
2018-07-22	龙场	273	196	77	4.08	95.92	0.39	5
2019-04-11	汤郎	84	65	19	73.85	26.15	0.29	15
2019-06-11	城关	40	18	22	50	50	1.22	10
2019-06-14	秀水	32	11	21	63.64	36.36	1.91	8

2.2 冰雹云跃增事件分析

基于斜坡过渡带降雹区域筛选闪电(地闪和云闪)数据,对 12 次冰雹过程闪电发生按照每 5 min 间隔进行统计,得到闪电发生的时序变化,见图 1。因篇幅所限,图 1 仅给出 4 次过程闪电时序变化。从图 1 可以明显观察到降雹区域在降雹之前总闪均发生跃增,无论闪电频次发生高与低,总闪变化趋势从缓慢增加到跃增出现一个峰值,且峰值均提前于降雹时间,在出现总闪峰值之后一段时间范围内出现降雹,降雹后闪电发生急剧较少。12 次冰雹个例总闪每 5 min 闪电频次平均为 22 次。大方县、清镇市、兴仁县、织金县、贵阳城区 5 个降雹区域总闪频次变化出现二次跃增现象,其中大方县和兴仁县在二次跃增后产生二次降雹。

2.3 冰雹云闪电跳跃信号分析

上述对冰雹云跃增特性及闪电频次峰值提前量进行了分析,闪电频次峰值是闪电经历“跃增”事件后的结果,为了获取闪电的初始跃增信号,基于 2σ 闪电跃增法,对斜坡过渡带区域 12 次冰雹过程闪电的跳跃信号进行提取分析,提取结果见图 2(仅给出 4 例)。

从图 2 可以观察到,闪电 LF_{CR} 信号均呈现出脉冲波动形式起伏振荡变化,结合 2σ 闪电跳跃信号判别机制,12 次冰雹过程闪电均出现跳跃信号,基于闪电跳跃信号提取结果,对 12 个降雹区域 LF_{CR} 跳跃信号提前量和闪电每 5 min 变化峰值时间提前量进行计算和统计,结果表明: $2\sigma_{LF_{CR}}$ 跳跃信号时间提前量均大于闪电频次峰值时间提前量,两者之差最大值达 28 min,也就是说利用 $2\sigma_{LF_{CR}}$ 跳跃信号能够超前于闪电峰值时间提前 28 min 预警降雹。12 个降雹区域 $2\sigma_{LF_{CR}}$ 跳跃信号时间提前量平均值为 20 min,而闪电频次峰值时间提前量平均值为 13 min,所以利用 $2\sigma_{LF_{CR}}$ 跳跃信号提前预警降雹优于闪电峰值时间。

同样利用统计和 2σ 闪电跃增法对威宁 2016—2019 年 21 次冰雹过程闪电时序变化和 LF_{CR} 信号进行提取,提取结果见图 3,因篇幅限制,文中仅给出 2 次冰雹过程闪电时序变化与闪电 LF_{CR} 信号提取结果,图中左图为冰雹过程闪电时序变化,降雹日期及地点在图中给出,右图为对应冰雹过程的 LF_{CR} 提取结果。

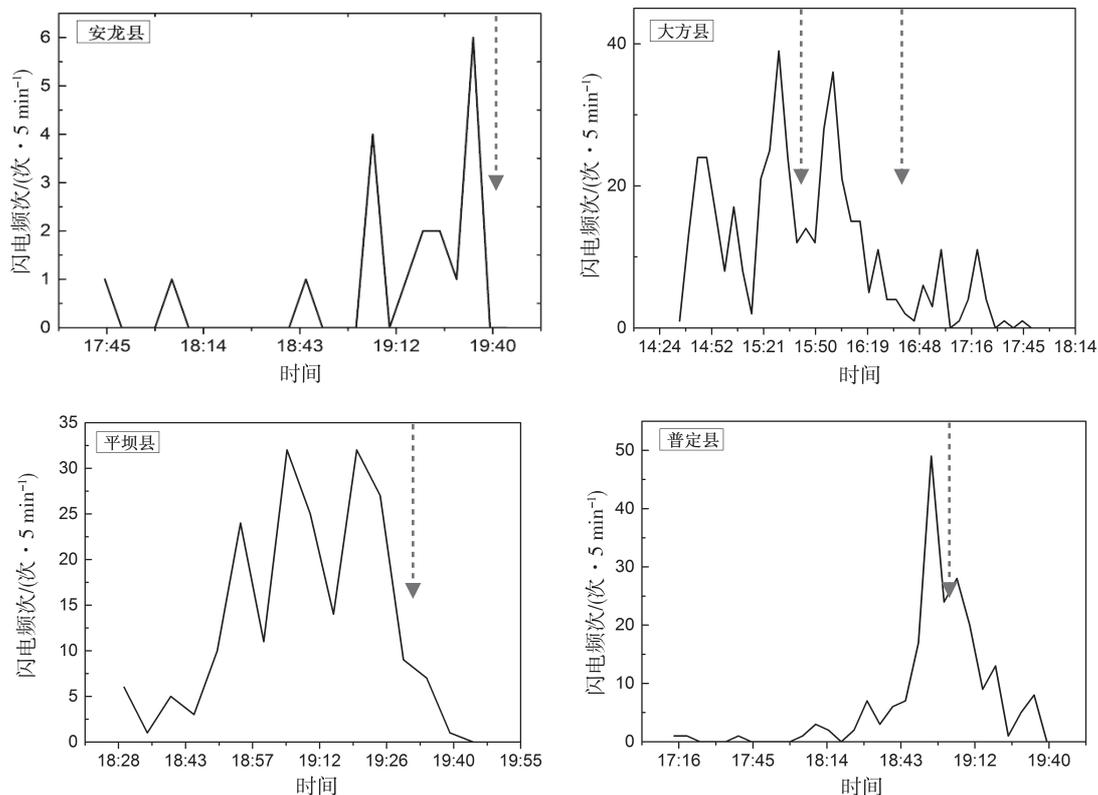


图 1 斜坡过渡带区域冰雹过程总闪每 5 min 时序变化(箭头线标识降雹时间)

Fig. 1 Time series change of total lightning per 5 min in hailstorm process in slope transition zone (Arrow line indicates hailfall time)

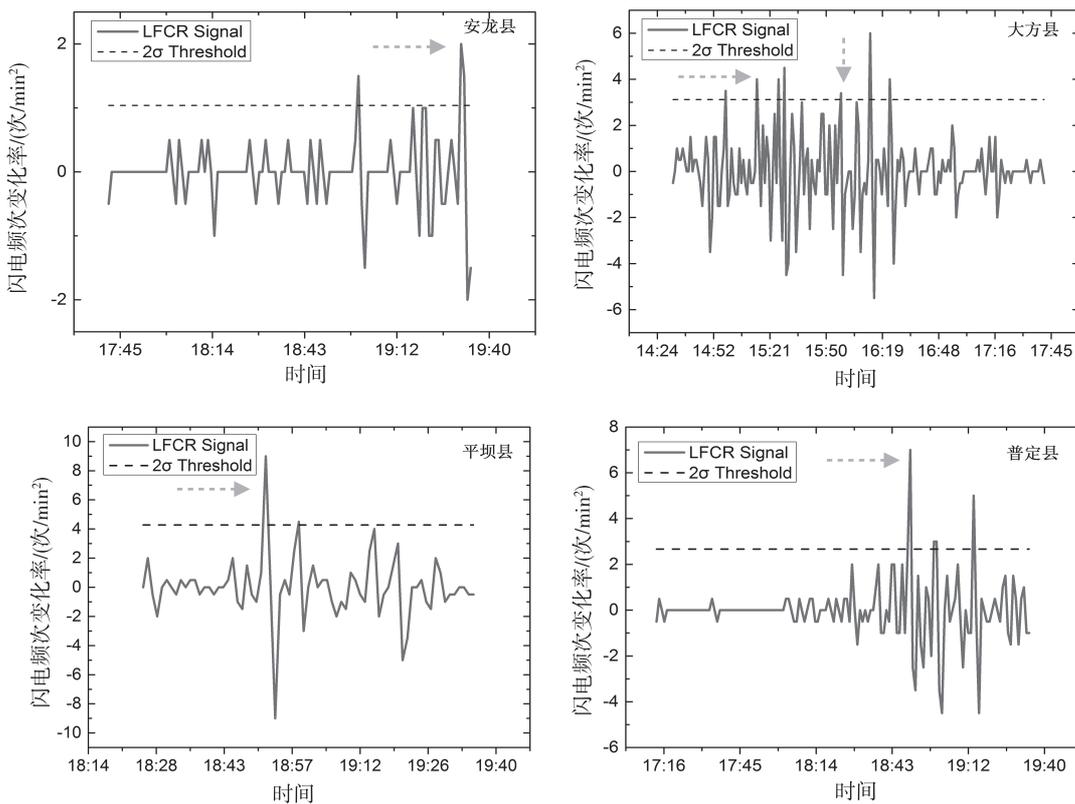


图 2 降雹区域闪电 LFCR 跳跃信号提取结果(箭头指示 LFCR 跳跃信号)

Fig. 2 The extraction result lightning LFCR jump signal in hail area (The arrow indicates LFCR jump signal)

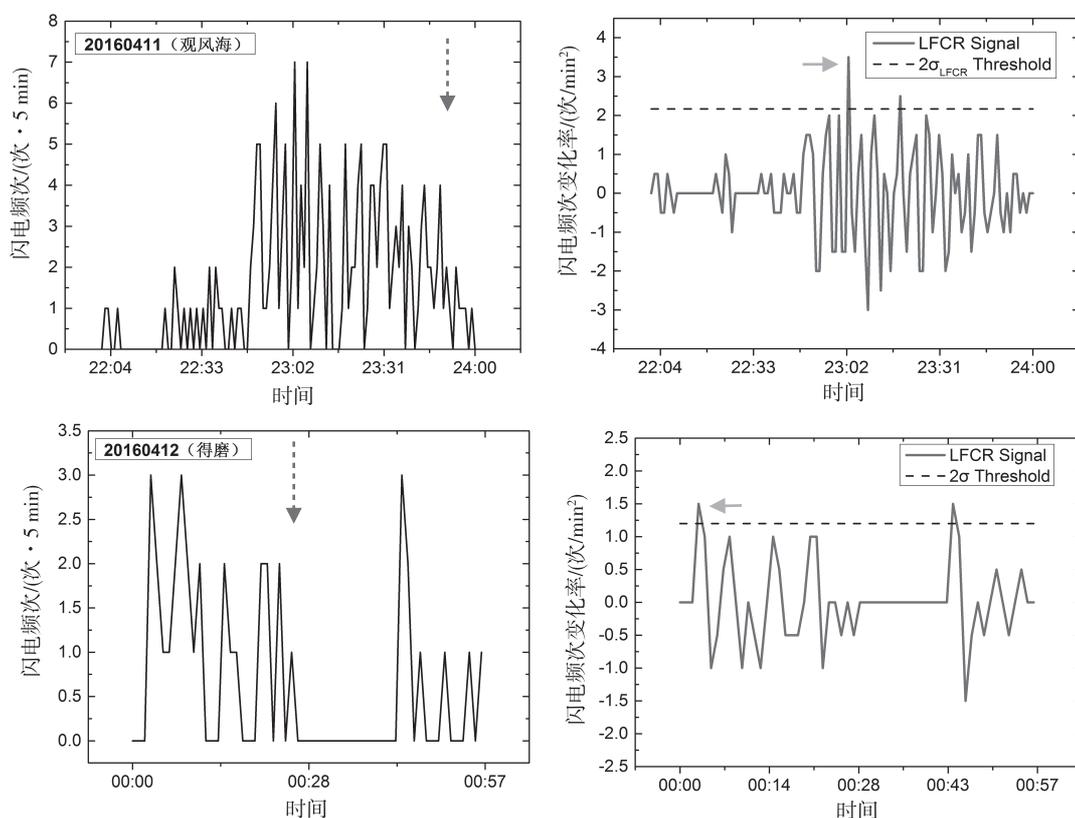


图3 降雹过程闪电时序变化(左)与 $LFCR$ 信号(右)提取结果
(竖线箭头指示降雹时间,箭头指示 $LFCR$ 跳跃信号)

Fig. 3 The extraction result of lightning time series change (left) and $LFCR$ signal (right) in Hail Process
(Vertical arrow indicates hail time, arrow indicates $LFCR$ jump signal)

通过对威宁 21 次冰雹过程闪电时序变化与 $LFCR$ 信号提取结果可知,在降雹前闪电均呈现出跃增现象,不同冰雹过程闪电的跃增幅度不等,且在跃增前期闪电频次表现出波动发生现象,闪电频次峰值范围在 3 ~ 45 次/(5 min) 之间,平均为 13 次/(5 min)。闪电峰值提前量变化范围为 4 ~ 79 min,平均为 29 min, $LFCR$ 提前量变化范围为 5 ~ 86 min,平均为 33.7 min, $LFCR$ 提前量超前于峰值提前量为 4.7 min,说明利用 $LFCR$ 信号能够提前于峰值信号对降雹进行识别,在实际冰雹云监测预警和人工防雷作业中可以综合利用两者信息进行降雹识别。与前述对斜坡过渡带区域范围内冰雹过程闪电峰值提前量和 $LFCR$ 提前量相比,威宁峰值时间提前量超前斜坡过渡带 16 min, $LFCR$ 超前斜坡过渡带 13.7 min,即高原台地与斜坡过渡带区域闪电峰值与 $LFCR$ 信号存在差异性,这可能与不同区域范围内闪电活动特征存在差异相关,在下一步研究中将从动力—微物理—电过程对两个区域内闪电特征进行分析,进而揭示不同区域内冰雹云闪电特征的差异性形成机理。

3 结论与讨论

①云贵高原斜坡过渡带与高原台地威宁冰雹过程闪电特征存在一定异同,威宁平均 POP 和 Z 值均高于斜坡过渡带区域,但两个区域平均 POP 值均高于贵州 10 a (2006—2015 年) 平均正地闪气候特征值 4.02%,说明冰雹过程较其它冰雹过程具有较高正地闪比例。

②云贵高原斜坡过渡带和高原台地冰雹过程闪电频次在降雹之前均经历闪电跃增事件,在降雹后闪电频次陡降或出现二次增长并出现二次降雹,间接表明电对冰相粒子的依赖性。

③斜坡过渡带区域 12 个降雹个例 $2\sigma_{LFCR}$ 跳跃信号提前量平均值为 20 min,闪电频次峰值时间提前量平均值为 13 min,高原台地 $2\sigma_{LFCR}$ 跳跃信号平均为 33.7 min,闪电峰值时间提前平均为 29 min,高原台地威宁闪电峰值提前量与 $2\sigma_{LFCR}$ 跳跃信号均超前于斜坡过渡带区域,在实际中可以综合利用两者信息对降雹进行检测。

本文虽然对贵州中西部地区冰雹云闪电特征

进行了初步研究,但分析个例和闪电信息挖掘还不够,需要在今后研究中不断深入分析,提取对贵州冰雹云识别及降雹具有指示意义的闪电参量,为冰雹云识别和人工防雹作业提供技术支撑。

参考文献

- [1] 王瑾,刘黎平. 基于GIS的贵州省冰雹分布与地形因子关系分析[J]. 应用气象学报,2008,19(5):627-634.
- [2] Jayaratne, E. R., C. P. Saunders, and J. Hallett. Laboratory studies of the charging of soft-hail during ice crystal interactions [J]. Quart J Roy Meteorol Soc, 1983, 109(46): 609-630.
- [3] MacGorman D R, Burgess D W. Positive cloud-to-ground lightning in tornadic storms and hailstorms [J]. Monthly Weather Review [J], 1994, 122(8): 1671-1697.
- [4] Reap R M, MacGorman D R. Cloud-to-ground lightning: Climatological characteristics and relationships to model fields, radar observations, and severe local storms [J]. Monthly Weather Review, 1989, 117(3): 518-535.
- [5] Branick M L, Doswell III C A. An observation of the relationship between supercell structure and lightning ground strike polarity [J]. Weather Forecasting, 1992, 7(1): 143-149.
- [6] Carey L D., W. and K. M. Buffalo. Environmental control of cloud-to-ground lightning polarity in severe storms [J]. Mon Wea Rea, 2007, 135(4): 1327-1353.
- [7] Soula S, Seity Y, Feral L, et al. Cloud-to-ground lightning activity in hail-bearing storms [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2004, 109(D2), DOI: 10.1029/2003jd003669.
- [8] Schultz C J, Peterson W A, Carey L D. Lightning and severe weather: a comparison between total and cloud-to-ground lightning trends. Wea Forecasting, 2011, 26(5): 744-755.
- [9] 叶宗秀,陈倩,郭昌明,等. 冰雹云的闪电频数特征及其在防雹中的应用[J]. 高原气象, 1982, 11(2): 53-56.
- [10] 郗秀书,刘欣生,张广庶,等. 甘肃中川地区雷暴的地闪特征[J]. 气象学报, 1998, 56(3): 57-67.
- [11] 周筠君,张义军,郗秀书,等. 陇东地区冰雹云系发展演变与其地闪的关系[J]. 高原气象, 1999, 18(2): 111-119.
- [12] 李国昌,李照荣,李宝梓. 冰雹过程中闪电演变和雷达回波特征的综合分析[J]. 干旱气象, 2005, 23(3): 26-33.
- [13] 李照荣,付双喜,李宝梓,等. 冰雹云中闪电特征观测研究[J]. 热带气象学报, 2005, 21(6): 588-595.
- [14] 李照荣,张强,陈添宇,等. 一次强冰雹暴雨天气过程闪电特征分析[J]. 干旱区研究, 2007, 24(3): 321-327.
- [15] 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): 373-377.
- [16] 曾勇,黄钰,李丽丽,等. 贵阳4月5日冰雹天气过程闪电频次变化特征分析[J]. 中低纬山地气象, 2018, 42(3): 80-82.
- [17] 黄钰,曾勇,周苑,等. 一次强对流天气过程的闪电与雷达回波特征分析[J]. 中低纬山地气象, 2018, 42(4): 37-42.
- [18] 郭润霞,王迎春,张文龙,等. 基于VLF/LF三维闪电监测定位系统的北京闪电特征分析[J]. 热带气象学报, 2018, 34(3): 393-400.
- [19] 马启明. VLF/LF三维闪电监测定位系统的研制及初步试验结果[C]//中国气象局武汉暴雨研究所、湖北气象学会. 暴雨新型探测资料应用技术研讨会论文集. 武汉:中国气象局武汉暴雨研究所, 2011: 1.
- [20] Schultz C J, Petersen W A, Carey L D. Preliminary development and evaluation of lightning jump algorithms for the real-time detection of severe weather [J]. J Appl Meteorol Clim, 2009, 48(12): 2543-2563.
- [21] 吴安坤,李艳,张淑霞,等. 贵州省闪电活动时空分布特征分析[J]. 防灾科技学院学报, 2017, 19(1): 56-62.
- [22] 冯桂力,郗秀书,吴书君. 山东地区冰雹云的闪电活动特征[J]. 大气科学, 2008, 32(2): 289-299.
- [23] 陈哲彰. 冰雹与雷暴大风的云对地闪电特征[J]. 气象学报, 1995, 53(3): 367-374.
- [14] 李菲,张明军,李小飞,等. 1962—2011年来宁夏不同等级降水的变化特征[J]. 生态学杂志, 2013, 32(8): 2154-2162.
- [15] 吴昊旻,杨羨敏,姜燕敏. 浙江省夏秋季降水量时空分布特征及趋势演变规律[J]. 中国农业气象, 2011, 32(3): 326-330.
- [16] 薛根元,袁晓玉,杨阳. 浙江省夏季降水型及气候变化[J]. 气象科学, 2002, 22(2): 183-190.
- [17] 袁晓玉,施能,顾骏强. 浙江省秋季降水趋势及早涝年特征[J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(5): 677-684.
- [18] 施能,王永波,马丽. 浙江省夏季降水的区域特征[J]. 科技通报, 2001, 17(5): 10-15.
- [19] 顾骏强,施能,薛根元. 近40 a浙江省降水量、雨日的气候变化[J]. 应用气象学报, 2002, 13(3): 322-329.
- [20] 严小冬,孙翔,杨春艳,等. 贵州近50 a来夏季不同等级强降水事件特征研究[J]. 中低纬山地气象, 2018(2): 1-6
- [21] 孔德璇,杨春艳,刘莉娟,等. 近40 a贵州主汛期降水时空变化及其异常年低频特征分析[J]. 中低纬山地气象, 2018(5): 14-19.

(上接第43页)

- [6] Weihong Qian, Jiaolan Fu, Zhongwei Yan. Decrease of light rain events in summer associated with a warming environment in China during 1961-2005 [J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(11).
- [7] 宁亮,钱永甫. 中国年和季各等级日降水量的变化趋势分析[J]. 高原气象, 2008, 27(5): 1010-1020.
- [8] 彭贵芬,刘瑜. 云南各量级雨日的气候特征及变化[J]. 高原气象, 2009, 28(1): 214-219.
- [9] 朱坚,张耀存,黄丹青. 全球变暖情景下中国东部地区不同等级降水变化特征分析[J]. 高原气象, 2009, 28(4): 889-896.
- [10] 符娇兰,林祥,钱维宏. 中国夏季分级雨日的时空特征[J]. 热带气象学报, 2008, 24(4): 367-373.
- [11] 陈晓燕,尚可政,王式功,等. 近50 a中国不同强度降水日数时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2010, 27(5): 766-772.
- [12] 王小玲,翟盘茂. 1957—2004年中国不同强度级别降水的变化趋势特征[J]. 热带气象学报, 2008, 24(5): 459-466.
- [13] 李邦东,周旭,赵中军,等. 近50 a中国东北地区不同类型和等级降水事件变化特征[J]. 高原气象, 2013, 32(5): 1414-1424.