

文章编号:1673-8411 (2015) 04-0038-07

广西冰雹云闪电变化特征分析及其防雷应用

韦增岸, 何飞, 邹光源, 张正国, 程鹏, 刘丽君

(广西人工影响天气办公室, 南宁 530022)

摘要:利用广西 2006—2011 年 4—6 月 17 个降雹样本资料和以降雹点为中心半径 50km 范围内闪电监测定位网探测到的所有闪电数据对广西冰雹云闪电变化特征进行分析,结果显示:广西地区冰雹发生前的短时间内负闪频数远大于正闪频数,正负闪强度的比值大多都在 1.5 以上,而正负闪陡度的比值相差不大,5min 闪电频次峰值都在 5 次以上,降雹前峰值出现明显跃增,降雹出现在闪电密度最大中心的下风方右侧,闪电变化分析结果在广西地区人工防雷作业中有一定的指导作用。

关键词:闪电;闪电变化特征;冰雹云;人工防雷;广西

中图分类号:P458.1+21.2

文献标识码:A

Characteristic analysis on lightning variation of hail cloud and its application in artificial hail suppression in Guangxi

Wei zeng-an, He fei, Zou guang-yuan, Zhang Zheng-guo, Cheng peng, Liu li-jun

(Guangxi Weather Modification Office, Nanning Guangxi,530022)

Abstract: Based on 17 hail samples gathered in Guangxi in 2006–2011 between April and June and all the lighting data, which were detected by lightning monitoring network with hail dropping points centered within a 50 km radius, the characteristics of lightning variation of cloud hail were analyzed. The results show that: before the hail occurring, the negative lightning frequency is much higher than the positive one in a short time. The most intensity ratios of positive to negative lightning are above 1.5, while the difference in the steepness ratios are not significant. The peak values of lightning frequency are all more than 5 times within 5-minute, and increase suddenly before the hail falling. Hail appears on the right side of downwind of the strongest lightning center. The above findings of the lightning characteristics are meaningful for artificial hail suppression in Guangxi.

Key words: lightning; lightning variation characteristics; hail cloud; artificial hail suppression; Guangxi

1 引言

冰雹天气过程由于其强烈的对流必然产生大量的大气放电现象,因此对强对流天气过程尤其是冰雹天气闪电活动的研究已越来越受到国内外的关

注,尤其是近年来随着国内闪电探测技术和设备的进一步应用和推广,国内利用闪电定位系统结合天气资料、雷达探测资料对冰雹天气过程进行了大量的研究分析^{[1]–[9]},闪电资料在冰雹预测识别方面得到了较好的应用,如冯桂力^{[1]–[2]}、李照荣^[3]、李国昌

收稿日期:2014-10-18

作者简介:韦增岸(1986-),本科,工程师,从事人工影响天气业务工作。

[4]、李永果^[5]和黄彦彬^[7]等等分别对我国山东、甘肃和青海高原地区冰雹云的闪电活动发展演变特征进行了分析研究,发现闪电频数、闪电强度及其时间序列分布特征和闪电空间分布特征在冰雹降雹时间、冰雹云移动路线和降雹落区等方面都能起到一定的预报预警作用,如较为普遍的是在降雹前出现闪电频数“跃增”和峰值,可作为判别冰雹云和预测降雹时间的指标等等。

冰雹灾害是广西地区高发的气象灾害之一,尤其是在广西的西北山区,冰雹给当地的农业生产和人民生命财产造成了巨大损失。因此提前预报识别冰雹云,及时开展人工消雹防雷作业,最大限度的减小冰雹灾害造成的损失十分重要。随着广西闪电定位监测网的布设,为广西冰雹云的预报识别提供了一项新的有利的技术条件,但由于气候条件、地域差

异等原因,各地的冰雹云闪电变化特征并不完全相同,预测判别指标不一。本文主要利用本地闪电监测资料,分析总结广西冰雹云的闪电时空变化特征和统计特征,找出适合本地使用的冰雹云预测识别指标,供灾害天气预报预警和人工消雹防雷作业指挥参考和指导。

2 资料和方法

2.1 闪电定位资料

广西闪电监测定位网由南方电网超高压局出资与广西电力调度中心合作共同建设,广西全网共计 12 个探测站,站址为:桂林、贺州、河池、柳州、百色、大化、贵港、南宁、玉林、梧州、北海、崇左,可以用于探广西范围内云地闪电的经纬度、强度、陡度、电荷、能量和误差,定位方式有二站振幅、三站混合、四站算法。本文选取 2006 年-2011 年 5 月的闪电定位探

表 1 首次闪电时间及正负闪比例

日期	降雹点	首次闪电距降雹时间(时:分:秒)	负闪比例(%)	正闪比例(%)	正负闪频数比
2006.04.12	宜山	1:20:35	98.6	1.4	0.01
2006.04.12	忻城	2:58:22	100.0	0.0	0.00
2006.05.02	金秀	2:47:34	96.4	3.6	0.04
2006.05.06	德保	1:58:17	0.0	100.0	/
2007.04.17	南丹	6:00:54	92.3	7.7	0.08
2007.04.22	都安	1:54:21	12.3	87.7	7.13
2007.04.22	田林	2:40:35	100.0	0.0	0.00
2008.05.24	巴马	5:32:07	94.2	5.8	0.06
2008.06.24	靖西	2:43:32	97.3	2.7	0.03
2010.04.01	田东	3:56:23	76.5	23.5	0.31
2010.04.07	贺州	0:57:52	96.6	3.4	0.04
2010.05.06	隆林	1:56:34	100.0	0.0	0.00
2010.05.09	德保	1:48:57	99.8	0.2	0.00
2010.05.09	天等	8:00:41	89.0	11.0	0.12
2011.05.01	钟山	3:48:17	98.8	1.2	0.01
2011.05.02	百色	1:12:05	100.0	0.0	0.00
2011.05.02	凤山	2:01:26	100.0	0.0	0.00

测数据主要来源于广西境内的探测站,部分利用了周边贵州、湖南等省的探测站,

文中所用闪电资料为以降雹点为中心半径 50km 范围内探测到的所有闪电数据,由于部分资料缺失,本文主要分析正负闪、强度、陡度等物理量。

正负闪:由地向云释放正电荷的闪电为正闪,反之则为负闪。

强度:指闪电回击电流波形的峰值,单位:kA。

陡度:指闪电回击放电过程中单位时间内电流变化的最大值,它反映了闪电回击放电最剧烈时的状况,单位:kA/s。

2.2 冰雹样本资料

一个中尺度强风暴的典型水平尺度约为 25~250 km,冰雹的发生一般是区域性的,文中选取 2006 年至 2011 年 4-6 月广西范围之内冰雹云样本,在以降雹点为中心半径 50km 范围内有可用闪

表 2 闪电强度与陡度 & 首次正闪、正闪强度最大值与降雹时间差

降雹点	平均负闪强度 (kA)	平均正闪强度 (kA)	平均负闪陡度 (kA/μs)	平均正闪陡度 (kA/μs)	T-t (时:分:秒))	T-tm (时:分:秒))
宜山	-13.6	25.6	-10.0	6.6	0:01:33	0:01:33
忻城	-9.0	/	-8.6	/	/	/
金秀	-13.6	37.0	-15.0	11.9	0:28:41	0:28:41
德保	/	53.1	/	13.0	1:58:17	1:25:31
南丹	-8.8	34.9	-7.0	8.5	0:33:37	0:07:09
都安	-6.0	35.3	-6.7	8.9	1:40:22	0:12:01
田林	-10.6	/	-9.5	/	/	/
巴马	-42.9	76.8	-8.9	10.8	1:27:24	0:40:23
靖西	-56.0	52.9	-10.2	16.0	0:43:52	0:32:18
田东	-29.6	34.3	-8.1	8.0	0:55:19	0:37:56
贺州	-27.1	10.5	-9.3	4.5	0:44:55	0:44:55
隆林	-3.2	/	-8.3	/	/	/
德保	-38.4	72.3	-8.7	10.9	1:02:23	1:02:23
天等	-37.6	64.6	-10.6	11.2	5:30:23	2:58:12
钟山	-42.9	19.5	-12.7	8.3	0:15:35	0:15:35
百色	-40.0	/	-10.6	/	/	/
凤山	-55.4	/	-15.5	/	/	/
降雹点	-27.2	43.1	-10.0	9.9		

电资料的前提下,共筛选到 17 个产生地面降雹的对流单体资料样本(每一次降雹过程为一个样本),其中 4 月份 7 个,5 月份 9 个,6 月份 1 个,所有降雹以气象站记录为准,灾情报告为参考。

2.3 分析方法

利用统计分析方法找出冰雹云在闪电定位资料上的变化特征和判别指标,参考灾害性天气落区预报检验方法对判别指标进行 TS 评分。

TS 评分: $TS=NA/(NA+NB+NC)\times 100\%$,

漏报率: $PO=NC/(NA+NC)\times 100\%$,

式中 NA 为预报正确次数,NB 为空报次数,NC 为漏报次数,由于本文只选取了冰雹云样本,未选取非冰雹对流云样本进行对比,因此缺少空报次数。

3 冰雹云闪电变化特征

3.1 正负闪比例的变化

Beasley^[10]曾经对不同作者在不同地区利用各种方法对正闪电的发生比例进行总结和比较,发现闪电正负极性比例具有明显的地域变化,且差异很大,从 0~100 不等。表 1 给出了 2006 年至 2011 年广西地区的 17 次降雹前正负闪电的百分比情况。从表 1 可以看出,除去负闪数据为零的 1 个样本,在剩余 16 个样本中,降雹前的负闪占总闪的比例最小为

都安 12.3%,其余样本的负闪比均在 76%以上,有 5 个样本的负闪比达到了 100%。17 个样本中有 15 个样本在冰雹发生前的短时间内负闪频数远大于正闪频数,正负闪频数比值>1 的只有 2 个样本(包括负闪数为零的样本)。大多数样本的闪电都发生在降雹前几个小时内,由表 1,首次闪电发生在降雹前 3h 内的有 12 个样本,这说明,发生闪电后的 3 个小时内降雹的可能性比较大。

3.2 闪电强度和陡度的变化

统计分析 17 个样本的闪电强度资料发现,负闪强度(指绝对值,下同)的平均值最大为靖西的 56.0 kA,最小为隆安的 3.2kA,17 个样本若排除一个负闪数为零的样本,剩余 16 个样本负闪平均强度为 27.2kA。正闪强度平均值最大为巴马的 76.8kA,最小为贺州的 10.5kA,17 个样本中若排除 5 个正闪数为零的样本,则剩余 12 个样本正闪平均强度为 43.1kA。正负闪平均强度的比值约为 1.58,即占总闪数极少的正闪却有很高的电流强度。从单个样本来看,除去正闪或负闪数为零的 6 个样本,剩余 11 个样本的正负闪强度比值绝大多数在 1.0 以上,最大比值达到 5.58,如表 2。

由表 2,大多数情况下,冰雹直径增加或者说冰雹成长时,正负闪平均强度比不是同步增大,而是呈

现不规则分布。这可能与正负闪数及其变化有关[11]。由正负闪比例分布特征可以看到,降雹过程中绝大多数是负闪,正闪数相对较少,而且冰雹成长期间负闪数的增加超过正闪数的增加;尽管正闪强度普遍强于负闪强度,但由于正闪数偏少,因此不足以抵消负闪数偏多的影响,从而造成大多数时正负闪强度比的变化不能和冰雹直径的变化同步。

积雨云中正负电荷的分布非常复杂^[11],但总体而言,云体的上部以正电荷为主,下部以负电荷为主,而雹粒常附着在积雨云的上部,也即与正电荷密切相关。依据冰雹的成长理论,积雨云发展得越高时,云上部形成冰雹的可能性及其直径就越大,生成的正电荷就越多。当云内对流增强,闪电活动增多,尤其是正闪的出现及其电流强度的增强,对冰雹的出现有一定的指示作用。

除去 5 个正闪为零的样本,表 2 给出了其余 12 个样本正闪及其强度最大值与降雹的出现时间差,其中 t 为首次出现正闪的时刻, t_m 为正闪强度最大值的出现时刻, T 为降雹时刻。由表 2,冰雹云出现首次正闪后,最早为宜山在 2min 内出现降雹,绝大多数都在正闪后 2h 内出现降雹。整体上正闪后平均在 32min 内出现正闪强度最大值,出现正闪强度最大值后平均在 46 分钟内出现降雹。倘若再剔除特例样本天等,其余 11 个样本中,降雹落后于首次正闪平均时间、正闪强度最大值落后于首次正闪平均时间、降雹落后于正闪强度最大值平均时间分别为 54min、20min、34min。不是每个样本都有正闪数,故正闪强度最大值的出现时间也就不能应用于所有冰雹云,也就无法因此判断所有样本总体降雹时间。

分析闪电陡度发现,闪电陡度与闪电强度有一定的弱相关性,总体上电流强度越大,其放电过程中单位时间内电流变化值就越大,即陡度越大,也就是闪电回击放电越剧烈,释放能量越多。如表 2 中,17 个样本中,负闪陡度(指绝对值,下同)的平均值最大为凤山的 $15.5\text{kA}/\mu\text{s}$,最小为都安的 $6.7\text{kA}/\mu\text{s}$,17 个样本排除一个负闪数为零的样本,其余 16 个样本的负闪平均陡度为 $10.0\text{kA}/\mu\text{s}$ 。正闪陡度平均值最大为金秀的 $11.9\text{kA}/\mu\text{s}$,最小为贺州的 $4.5\text{kA}/\mu\text{s}$,17 个样本若排除 5 个正闪数为零的样本,则剩余 12 个样本的正闪平均陡度为 $9.9\text{kA}/\mu\text{s}$ 。正负闪平均陡度

的比值约为 0.99,可见,冰雹云正负闪的平均陡度非常接近。从单个样本来看,除去正闪或负闪数为零的 6 个样本,剩余 11 个样本的正负陡度比值分布在 0.65 至 1.57 之间,差幅不大。从正负闪的陡度分布可以看出,正闪的陡度变化幅度较大,造成陡度分布时高时低,而负闪陡度变化幅度较小,因而分布较正闪更均匀,从而造成正负闪的平均陡度非常接近。

3.3 闪电频次的变化

文中对闪电频次的计算是指一次闪电发生时刻的前后 2.5min 内所有闪电总数,即 5min 闪电频次。范广平^[12]曾研究得出闪电发生的频数与降雹关系密切的结论。

由于天气类型和地理条件的限制,广西地区冰雹云闪电频次普遍较低。从收集到的样本记录看,降雹前 5 min 闪电频次峰值全部都在 5 次以上,有 14 个样本 5 min 闪电频次峰值都在 10 次以上,最高为 5 月 9 日的天等达到了 61 次/5min。绝大多数样本的 5 min 闪电频次分布在峰值前 80 分钟之内。除天等之外,其余样本均在 5 min 闪电频次达到峰值后的 78 分钟之内出现降雹,有 10 个样本在 5 min 闪电频次达到峰值后的 30 分钟左右出现降雹。倘若剔除特例样本天等,其余 16 个样本,降雹落后于 5 min 闪电频次峰值的平均时间为 30min,这与降雹落后于正闪强度最大值平均时间 34min 非常接近。

故每个样本取峰值前 60 分钟及峰值后 30 分钟的 5 min 闪电频次制作成时间序列,对 17 个样本对应的 5min 闪电频次时间序列求平均值,得到冰雹云 5 min 闪电频次平均值时间序列,绘制成 5 min 闪电频次时间序列变化曲线图(图 1)。

由图 1,广西冰雹云 5 min 闪电频次的发展总体上可分成三个阶段:第一,距 5 min 闪电频次峰值 50 分钟之前,这是初步发展阶段,闪电活动较弱,5 min

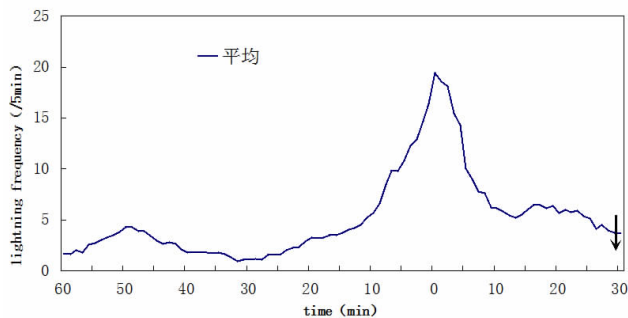


图 1 平均 5min 闪电频次变化

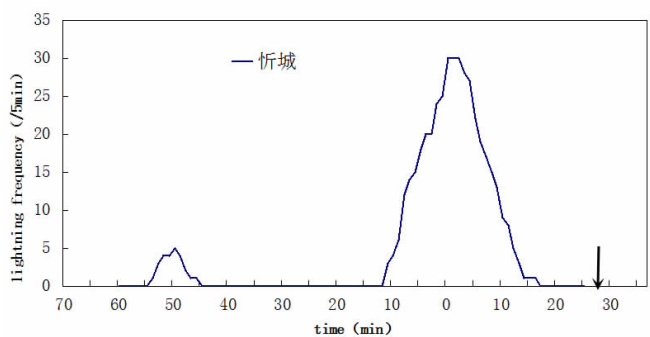


图2 忻城 5min 闪电频次变化

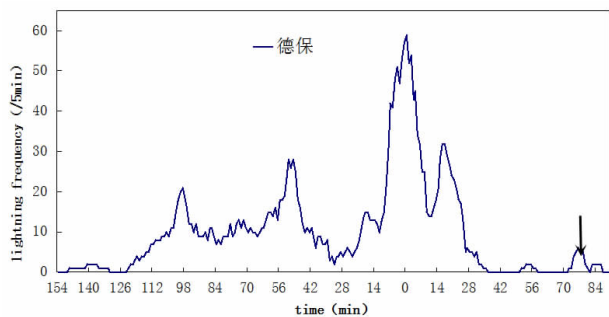


图3 德保 5min 闪电频次变化

闪电频次基本都在 5 次以下;第二,距 5 min 闪电频次峰值 50 分钟至 10 分钟之间,这是平稳发展阶段,闪电活动进入低谷后期略有加强,5 min 闪电频次从 1~6 次不等;第三,距 5 min 闪电频次峰值 10 分钟之内,这是跃增发展阶段,闪电活动呈现爆发式增长,5 min 闪电频次最大值达到了 19.8,该阶段 5 min 闪电频次的增长主要是冰雹云对流活动增加直接导致的云地闪电活动增强的结果,这一跃增特征是识别冰雹云的重要指示;第四,5 min 闪电频次峰值之后的 30 分钟之内,这是衰减阶段,闪电活动急剧减弱并维持在较低水平,绝大多数降雹发生在这一阶段,图中向下箭头为平均降雹时刻。

由于冰雹云生成发展的天气背景和地理环境不尽相同,从样本的单独变化来看,多数样本在上述整体变化特征的基础上,还具有多样性和独特性特点。其中比较有代表性的两种类型:①双峰型,如图 2 中忻城的闪电频次变化,闪电活动在初步发展后进入沉睡期,之后陡然进入跃增阶段,闪电频次达到峰值迅速回落之后出现降雹,整个过程非常快;②多峰型,如图 3 德保的闪电频次变化,闪电频次先分别达到两个或以上的次大峰值,然后闪电频次跃增达到最大峰值,闪电频次在回落过程中又出现一个或多个次大峰值,闪电活动趋于平稳才出现降雹。

分析还发现,降雹直径与 5 min 闪电频次峰值有一定的正相关关系,如图 4,总体上来说,闪电频次峰值的增大,意味着冰雹直径的同步增大。弱雹云冰雹直径 $d < 10\text{mm}$ 的,5 min 闪电频次峰值平均为 13.4 次;中等强度雹云冰雹直径为 $10 \leq d \leq 40\text{mm}$ 的,5 min 闪电频次峰值平均为 20.6 次;强雹云冰雹直径为 $d > 40\text{mm}$ 的,5 min 闪电频次峰值平均为 35.5 次。可见,5 min 闪电频次峰值的大小,在一定程度上

可预示雹云的强弱和降雹直径的大小。

3.4 闪电密度的变化

文中闪电密度指一次冰雹过程 $1^\circ \times 1^\circ$ 范围内所有闪电次数之和。从 17 个样本的闪电分布图来看,整体上闪电成带状分布,且呈现自西北向东南发展的大趋势,闪电的发展路径可反映广西地区冰雹云的发展移动路径。闪电密度最大的达到了 566 次,最小的也有 29 次,绝大多数在 50~200 次之间。在冰雹云发展移动路径上(图 5、6 中箭头指示),闪电密度最大的地方并不是降雹位置,降雹出现在闪电密度最大中心的下风方右侧,按照图示的冰雹云发展移动路径,密度最强中心在位置上先于降雹区域,两者相差平均约 25km。

4 在防雷作业中的应用

4.1 冰雹云闪电识别指标

根据广西冰雹云闪电变化特征分析结果,选取当 5min 闪电频次 ≥ 5 次且在此后的 10 分钟内出现增长趋势并有闪电频次峰值 ≥ 10 次,作为广西地区识别冰雹云的指标。

用该指标对收集到的样本进行检验,利用准确率(TS)和漏报率(PO)进行统计分析,TS 值为 82.4%,PO 值为 17.6%,如果阈值偏高,漏报率升高,TS 值降低;阈值选择偏低,则造成空报率升高,虽然

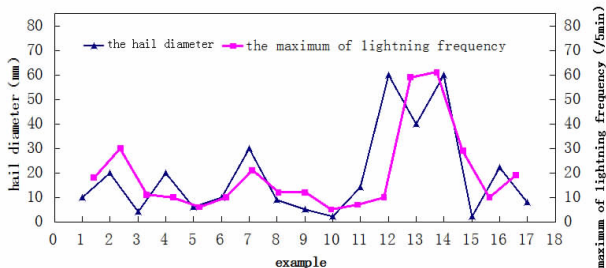


图4 降雹直径与 5min 闪电频次峰值

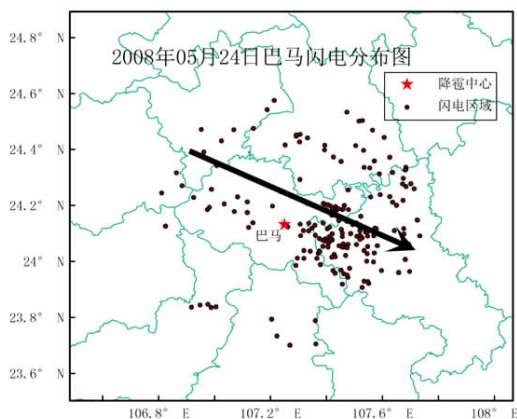


图5 巴马闪电分布图

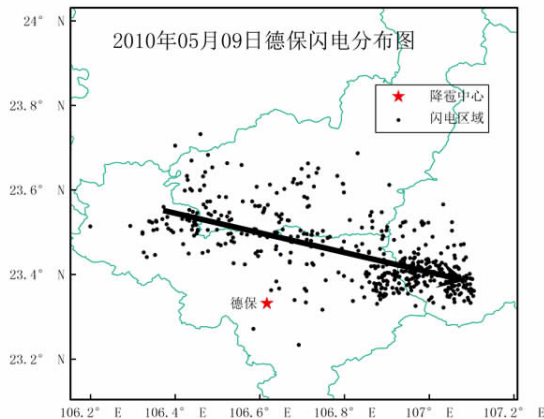


图6 德保闪电分布图

本文未收集无冰雹强对流降水样本对空报率进行检验,但实际中必然也会导致TS降低。因此在实际业务应用中,为了降低上述识别指标在实际防雷作业应用中的漏报率和空报率,应结合广西冰雹发生的环境背景和特点^[12-18],灵活应用冰雹云识别指标。

4.2 降雹预警时间和作业方位

通过对广西地区冰雹云闪电变化特征和降雹时间分析,发现降雹时间平均落后于5 min 闪电频次峰值30min,在实际应用中,5 min 闪电频次峰值需要与下一个5 min 闪电频次作比较才可得出结论,这就导致确定5 min 闪电频次峰值已滞后了3.5min,故实际降雹预警时间提前约26.5min。

根据广西冰雹云闪电密度变化特征分析结果,在冰雹云发展移动路径上,降雹出现在闪电密度最大中心的下风方右侧相距约20km处,这可为广西地区防雷作业提供参考依据,实际工作中还应结合雷达回波强度、VIL含量等资料作出判断^[19-20]。

4.3 作业用弹量

由文中对广西地区冰雹云5 min 闪电频次的分析可知,5 min 闪电频次 ≥ 5 次意味着闪电开始发展,频次达到10次雹云已经开始生长。广西地区冰雹云5 min 闪电频次的峰值一般都在10次以上。一般来说,强雹云对流活动旺盛回波强VIL值高,相对作业用弹量也多些。张正国^[22]对广西地区冰雹云的VIL变化特征作了分析,认为广西冰雹生长区对应的VIL值在30~35 kg/m²之间。王艳兰^[21]认为如果一块VIL ≥ 35 kg/m²强对流单体回波为1个像素,该像素对应的风暴顶高度为8.0 km,回波顶高度为10 km, -5℃层高度为5.5 km,则计算得出火箭用

弹量为6.3枚。应用王艳兰^[21]张正国^[22]的研究结论进行估算,5 min 闪电频次峰值 ≥ 10 次的雹云用弹量约为6枚或以上,5 min 闪电频次峰值 < 10 次的,可根据实际情况考虑用弹量。

5 结论与讨论

(1) 广西地区冰雹发生前的短时间内负闪频数远大于正闪频数,正闪大多出现在降雹前的两个2h内,正闪强度最大值出现时间平均比降雹时间提前约34min。

(2) 为数不多的正闪却具有比负闪高得多的电流强度,正负闪强度的比值大多都在1.5以上,而正负闪陡度的比值相差不大。

(3) 5min 闪电频次峰值都在5次以上,峰值的大小可反映雹云的强弱及降雹直径的大小。

(4) 5min 闪电频次 ≥ 5 次且在此后的10分钟内出现增长趋势并有闪电频次峰值 ≥ 10 次,可作为广西地区识别冰雹云的闪电指标。利用该指标判别降雹时间具备一定的时间提前量,平均可提前约26.5min,为人工防雷作业提前预警。

(5) 闪电密度绝大多数在50~200次/1° \times 1°之间,闪电的发展路径可反映广西地区冰雹云的发展移动路径,降雹出现在闪电密度最大中心的下风方右侧相距约25km。

(6) 5min 闪电频次峰值 ≥ 10 次的典型冰雹云,防雷作业在6枚可取得较好效果。

文中仅统计分析了闪电频数、强度和陡度等特征物理量的分布及演变特征,但对雷暴成长的天气学环境、CAPE等物理量和地形对冰雹和闪电生命

史的影响作用没有被深入探讨和分析,而这些因素对冰雹和闪电的生消演变有密切的影响。因此,今后需加强相关研究。

参考文献

- [1] 冯桂力,边道相,等.冰雹云形成发展与闪电演变特征分析[J].气象,2002,27(3).
- [2] 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).
- [3] 李照荣,付双喜,等.冰雹云中闪电特征观测研究[J].热带气象学报,2005,21(6).
- [4] 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).
- [5] 李永果,马丽,等.冰雹云系发展演变与其地闪的相关性分析[J].气象科技,2008,36(3).
- [6] 支树林,娄桂杰.江西冰雹天气期间的闪电活动特征[J].气象与减灾研究,2009,32(3).
- [7] 黄彦彬,王振会.利用SD型闪电频数识别高原雷雨云和冰雹云.南京气象学院学报,2001,24(2).
- [8] 郑玉江.SD型闪电计数器辅助XDR-21天气雷达识别冰雹云初探[J].新疆农垦科技,2010,5.
- [9] 堽静,郭三刚,何生存.天气雷达和闪电定位仪在青海东部冰雹云监测中的应用[J].青海科技,2005,3.
- [10] Beasley w Positive cloud-to-ground lightning observations [J]. Journal of Geophysical Research, 1985, 90 (D4): 6131—6138.
- [11] 支树林,娄桂杰,等.江西冰雹天气期间的闪电活动特征[J].气象与减灾研,2009,32(3).
- [12] 李照荣,张强,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).
- [13] 邹光源.广西积云人工增雨防雹的个例数值研究[J].气象,2007,33(12).
- [14] 刘丽君,程鹏.广西冰雹云的预测和识别[J].气象研究与应用,2009,30(S1).
- [15] 孙莹,寿绍文,等.广西地区一次强冰雹过程形成机制分析[J].高原气象,2008,27(3).
- [16] 张瑞波,刘丽君.雷电探测资料在人工影响天气作业中的应用[J].气象研究与应用,2008,29(4).
- [17] 姚胜芳,黄治逢,等.广西冰雹的活动特点[J].热带地理,2008,28(2).
- [18] 姚胜芳,黄治逢,等.广西冰雹气候统计分析及减灾对策.[J].气象研究与应用,2007,28(4).
- [19] 范广平,王建,等.雷达与闪电定位资料在高炮人工防雹中的应用.[J].气象,2002,28(4).
- [20] 郑传新.人工增雨作业中闪电定位仪与雷达的综合应用.[J].广西气象,2003,24(1).
- [21] 王艳兰,王丽荣,汤达章,等.利用多普勒天气雷达估算对流云火箭增雨防雹用弹量的方案[J].气象科学,2008,28(4): 426—430.
- [22] 张正国,汤达章,邹光源,刘丽君,等.VIL产品在广西冰雹云识别和人工防雹中的应用[J].热带地理,2012,32(1).
- [23] 彭锦荣,曾庆硕,卢炳源.番禺区雷灾事故与雷暴日数、闪电定位数据的对比分析[J].广东气象,2012,(2).
- [24] 钟晨,张羽,高建秋,林俊君,等.双偏振多普勒天气雷达在冰雹识别中的应用[J].广东气象,2014,(4).
- [25] 朱永兵,张曙.一次大冰雹过程的多普勒雷达回波特征[J].广东气象,2005,(2).
- [26] 林奕峰,陈文泉,林伟旺.揭阳市雷电闪电密度地理分布特征分析[J].气象研究与应用,2008,29(3).
- [27] 赖雨薇,黄磊,周惠文.多普勒雷达产品对南宁冰雹天气的应用分析[J].气象研究与应用,2014,35(4).
- [28] 陈有龙,郭冬艳,李凡.海南闪电监测定位系统资料检验和分析[J].气象研究与应用,2010,31(1).