

李家启, 申双和, 夏佰成, 等. 基于 ADTD 系统的闪电频次分布特征分析[J]. 热带气象学报, 2011, 27(5): 710-716.

文章编号: 1004-4965(2011)05-0710-07

## 基于 ADTD 系统的闪电频次分布特征分析

李家启<sup>1,2</sup>, 申双和<sup>2</sup>, 夏佰成<sup>1</sup>, 向波<sup>1</sup>, 李博<sup>2</sup>, 任艳<sup>1</sup>

(1. 重庆市气象局, 重庆 410047; 2. 南京信息工程大学应用气象学院, 江苏 南京 210044)

**摘 要:** 闪电频次是反映雷电活动强弱特征的重要参数。在统计分析重庆市 ADTD 系统地闪监测资料的基础上, 重点分析闪电频次的极性、幅值、雷电流波头陡度和时间分布特征, 同时利用 GIS 软件获取地闪点的高程属性, 初步分析了其空间分布特征。结果表明: 闪电频次随极性、雷电流幅值和陡度不同而差异显著; 闪电雷电流幅值和陡度的频次呈现对数正态分布; 闪电频次的月际分布特征表现为正闪集中在 4—7 月, 负闪集中在 7—8 月; 日际分布特征表现为闪电频次主要集中在 03:00—07:00 和 15:00—19:00; 在高度空间分布上闪电发生频次最高地区为海拔 300~500 m 的区域, 以后呈现随高度上升而呈递减趋势; 在纬度分布中, 高频区域分布在 28.9~30.3 °N, 次高频地区为 30.7~31.5 °N 之间; 经度分布特征来看, 呈现双峰双谷 (两个峰值区分别为 105.9~106.9 °E、108.1~109.1 °E); 高幅值区域正负闪频次比值高于低幅值区域; 闪电频次较高地方集中在重庆市东北部、东南部和西部等地。在此基础上获得了重庆地区的雷电流幅值和陡度频次分布表达式, 为雷电防护提供了重要的理论基础。

**关 键 词:** ADTD 系统; 闪电频次; 分布特征

中图分类号: P427.32.1

文献标识码: A

Doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2011.05.012

## 1 引 言

雷电是自然界中极为壮观的声、光、电现象, 它会发出划破长夜的闪电和震耳欲聋的霹雳声, 而且会给人类生产活动带来很大影响。雷电引起的森林火灾启发了远古人类对火的发现和利用, 雷电促使有机物的合成在地球生命起源中占有重要地位。在现代生活中, 雷电仍然会对人畜的生命安全以及航空、通讯、电力、建筑、旅游等许多部门产生危害, 因此雷电活动规律及其防护问题一直为人们所关注<sup>[1]</sup>。

1970 年代, Nishino、Noggle 和 Proctor 等科学家开始采用高频、甚高频、低频技术的天线定位系统测量闪电位置。近年来闪电定位系统的建立, 为闪电研究提供了基础。闪电定位系统监测

具有范围大、测量自动化程度高的特点, 其提供的雷电参数可分析闪电频次分布特征, 掌握雷电活动规律, 为制定防雷减灾规划提供有效依据。国内外许多研究都获得较成功的应用<sup>[2-9]</sup>。张敏峰等<sup>[10]</sup>利用 1997—1998 年广东地区地闪资料, 分析了地闪的雷电流强度、回击数的气候概率分布特征以及雷电参数的日变化及其空间分布的气候规律; 冯桂力等<sup>[11]</sup>利用 1998—2000 年山东地区雷电探测网获取的云对地闪电资料, 从闪电的日变化、强度、密度和极性等方面研究了山东地区的雷电分布特征; 李照荣等<sup>[12]</sup>利用 2000—2002 年兰州地区的闪电定位系统监测资料, 分析了兰州周边地区地闪频次日分布和月分布特征。虽然目前国内对闪电频次时空分布特征有一些研究, 但尚未见到同时包括闪电频次的雷电流幅值、波头陡度等分布特征的研究。本文拟利用 ADTD 闪

收稿日期: 2010-01-19; 修订日期: 2010-04-12

基金项目: 公益性行业科研专项 (GYHY (QX) 2007-6-22-4) 资助

通讯作者: 李家启, 男, 重庆市人, 高级工程师, 在读博士研究生, 主要从事雷电灾害调查鉴定、风险评估和防雷技术开发与应用。

E-mail: cqljq@126.com

电定位系统提供的 2006—2008 年重庆市闪电观测资料对其闪电频次特征进行分析，研究闪电活动规律，为开展防雷减灾工作提供参考依据。

### 2 资料来源与方法

重庆市建成的 ADTD 闪电定位系统由一个主站（市区），四个子站（酉阳、城口、云阳、石柱）组成，该雷电监测网的钟频最高为 16 MHz，这使每个闪电回击的处理时间在 1 ms 左右，实现了对地闪时间、位置（经度、纬度）、雷电流峰值和极性的自动监测。ARCGIS 3D Analyst 是一个能为三维可视化、三维分析以及表面生成提供高级工具的扩展模块，可用其创建动态三维模型和交互式地图，从而达到地理数据更好的可视化和分析处理的目的。

本文采用 2006—2008 年 ADTD 闪电定位系统监测到的 285 347 次地闪资料，运用数理统计、回归分析等方法分析闪电频次的极性、幅值、波头陡度和时间分布特征，利用 ARCGIS 3D Analyst 软件模块获取地闪点高程数据，初步研究了闪电空间分布特征。

### 3 闪电频次的时间分布特征

#### 3.1 闪电频次月分布

从 2006—2008 年重庆闪电频次分布特征来看，雷电活动覆盖全年 12 个月，4—9 月闪电频次较集中，占全年的 98.7%(图 1)。尤以 7、8 月为甚，分别占全年闪电频次的 30.6%和 27.4%，而 1、12 月频次不足 10 次，其主要原因是汛期对流性天气旺盛，闪电频次相对较高；非汛期对流性天气减弱，则闪电频次少。全年每月基本都是负闪明显多于正闪(除 12 月外)，其中，3 月正负闪比达到 1: 2，相对较大；正负闪频次比例大于 1: 10 的还有 1、2、10 和 11 月。闪电最频繁的 7、8 月正负闪比例分别为 1: 40 和 1: 55。

#### 3.2 闪电频次日分布

正闪和负闪频次的日变化特征显著，都存在两个频次较高时期：03:00—07:00 和 15:00—19:00(图 2)。正闪的高频发生时段主要在 00:00—07:00，每小时的发生频次在 5%~7%，19:00—

22:00 是正闪相对不易发生时段，每小时发生频次均不足 3%。负闪从 01:00—10:00，发生频次逐步下降，10:00—12:00 维持低频次状态，12:00 开始发生频次陡然升高，至 16:00 达到 7.0%，17:00 时开始负闪在高频状态下逐步下降，20:00 为相对低频，达到 3.3%，然后又逐步回升至 01:00 的情况，达到 6.1%。

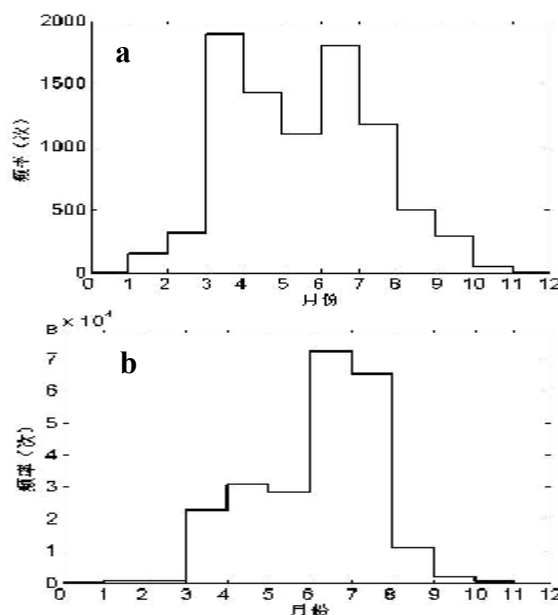


图 1 正闪(a)和负闪(b)频次月变化分布

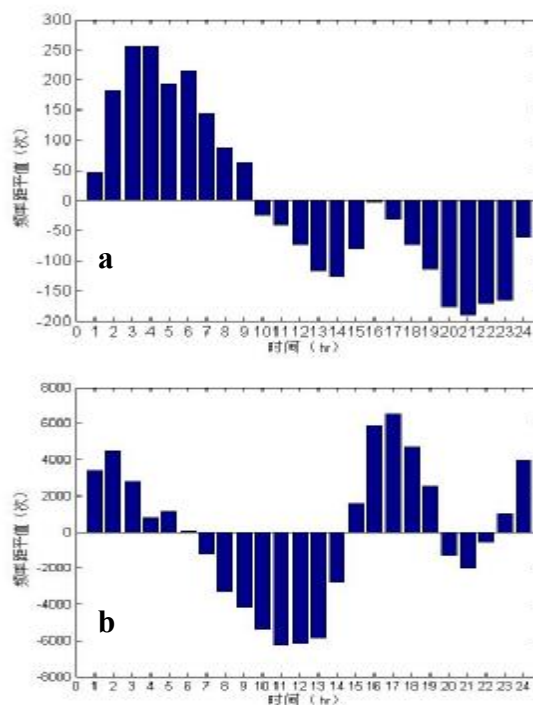


图 2 正闪(a)和负闪(b)频次距平日变化趋势

总体而言, 22:00—次日 4:00 及 14:00—18:00 是负闪最易发生的时段, 09:00—12:00 相对不易产生负闪, 4 小时发生频次均不足 2%。闪电总频次与负闪频次变化特征基本一致。这种分布特征原因主要是重庆地区下界面复杂, 多河流和山地, 受太阳日照作用, 下午地面温度较高, 利于水汽蒸发和云团抬升, 且该地区云雾多, 晚上云顶辐射冷却快, 导致云团上冷下暖, 空气垂直运动加剧, 易导致局地对流性天气产生。

#### 4 闪电频次的雷电流幅值分布特征

2006—2008 年共发生正闪 26 158 次, 平均雷电流幅值 60.4 kA, 最大为 455.7 kA。主要分布范围是 15~72 kA, 该幅值范围的正闪频次占全部正闪频次的 70.8%, 幅值为 38 kA 附近的正闪频次最多, 达到 440 次, 占全部正闪频次的 1.7%。正闪雷电流幅值分布虽然相对集中, 但在幅值的各个区间均有较大波动, 即在大的分布特征下, 呈现小的“波浪”形变化(图 3a)。

在 259 189 次负闪中, 其平均雷电流幅值为 -40.2 kA, 最大为 -498.3 kA。主要分布幅值范围是 -8~-59 kA, 该幅值范围的负闪频次占全部负闪频次的 84.1%, 与正闪频次的雷电流幅值分布范围相比, 负闪频次相对更集中(图 3b)。幅值为 -28 kA 附近的负闪频次最多, 达到 18 013 次, 占全部负闪频次 2.6%。

正闪和负闪合并后的频次分布特点与负闪极其相似(图 3c), 其主要原因是由于闪电中负闪占主导, 而正闪仅占总体闪电的 5%左右。

通过比较分析, 采用 IEEE 工作组推荐公式的拟合效果(图 4)好于《DL/T620—1997》推荐的, 与 IEEE 推荐的雷电流幅值概率分布特征非常吻合<sup>[13]</sup>, 同时雷电流幅值频次分布呈近似对数正态分布。雷电流幅值概率表达式为,

$$\text{正闪: } P_+( > I_P ) = 1 / [ 1 + ( \frac{I_P}{49.5} )^{2.842} ] \quad (1)$$

$$\text{负闪: } P_-( > I_P ) = 1 / [ 1 + ( \frac{I_P}{34.64} )^{3.297} ] \quad (2)$$

$$\text{正闪+负闪: } P( > I_P ) = 1 / [ 1 + ( \frac{I_P}{35.02} )^{3.246} ] \quad (3)$$

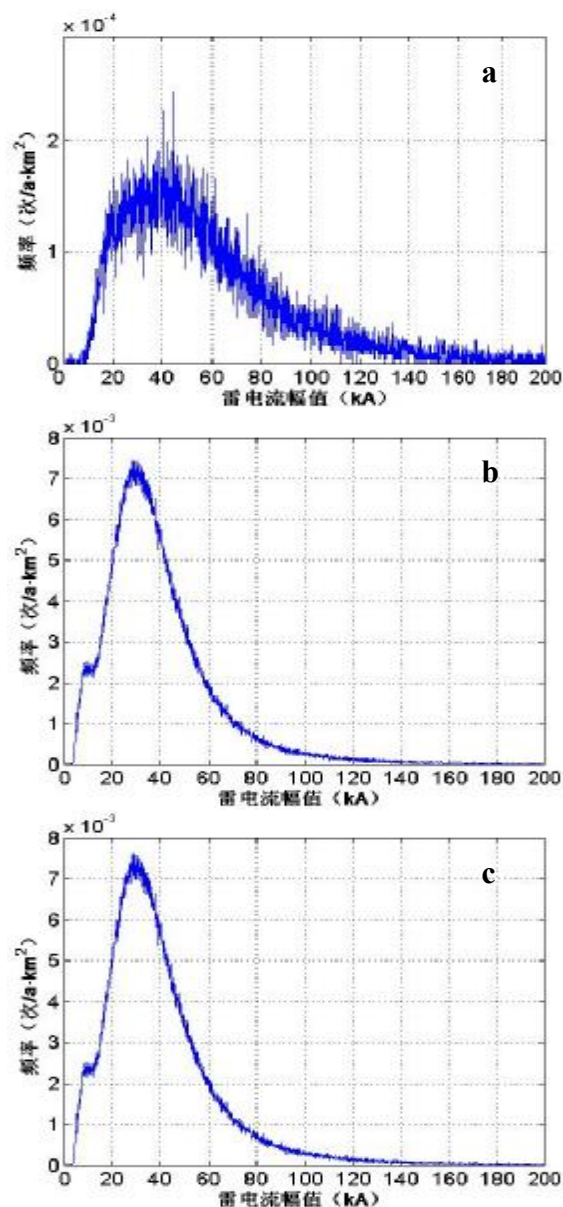


图3 正闪(a)、负闪(b)和正闪+负闪(c)频次的雷电流幅值分布曲线

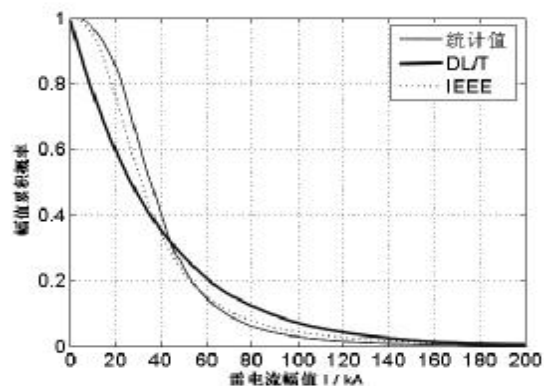


图4 雷电流幅值累积概率分布曲线与 IEEE、DL/T 效果比较

## 5 闪电频次的雷电流波头陡度分布

在 2006—2008 年闪电中，正闪平均陡度为 12.7 kA/μs，最大陡度 307.7 kA/μs。陡度主要分布范围是 3~20 kA/μs，该范围强度的正闪频次占全部正闪频次的 87.1%，陡度为 8 kA/μs 附近的正闪频次最多，占全部正闪频次的 8.8%(图 5a)。负闪平均陡度为 12.0 kA/μs，最大陡度 466.8 kA/μs，主要分布在 3~25 kA/μs。该范围陡度的负闪频次占全部负闪频次的 97.1%，与正闪陡度相比，负闪陡度更集中。陡度为 9 kA/μs 附近的负闪频次最多，占全部负闪频次的 9.5%(图 5b)。

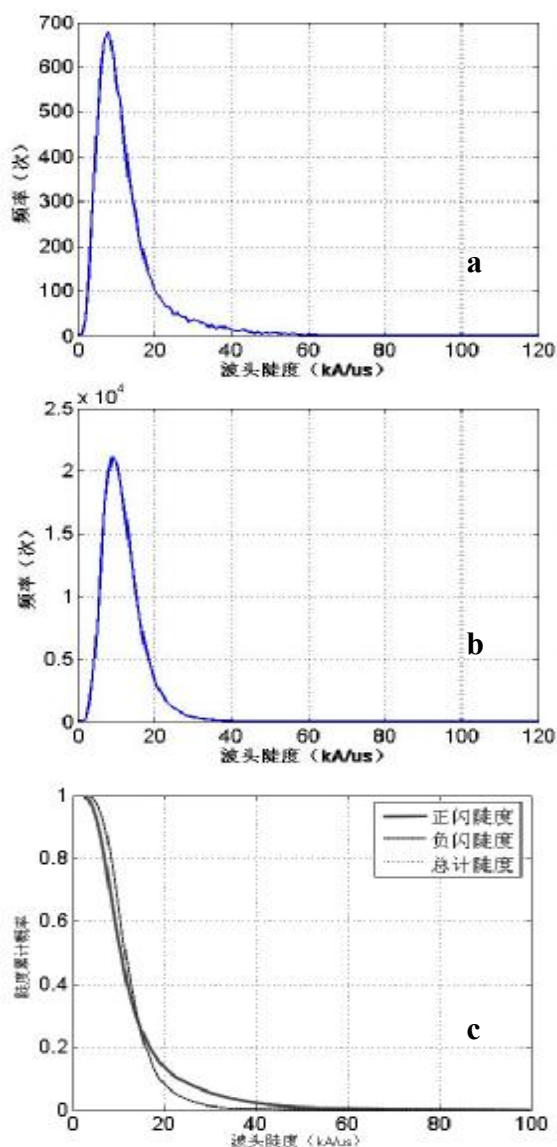


图 5 正闪(a)、负闪(b)和闪电(c)频次的陡度分布曲线

根据雷电流幅值与陡度相关性<sup>[14]</sup>，雷电流波头陡度频率分布也呈现对数正态分布，采用 IEEE 工作组推荐的拟合公式得到陡度累积概率的表达式为，

$$\text{正闪: } P_+( > I_p ) = 1 / [ 1 + ( \frac{I_p}{10.75} )^{3.011} ] \quad (4)$$

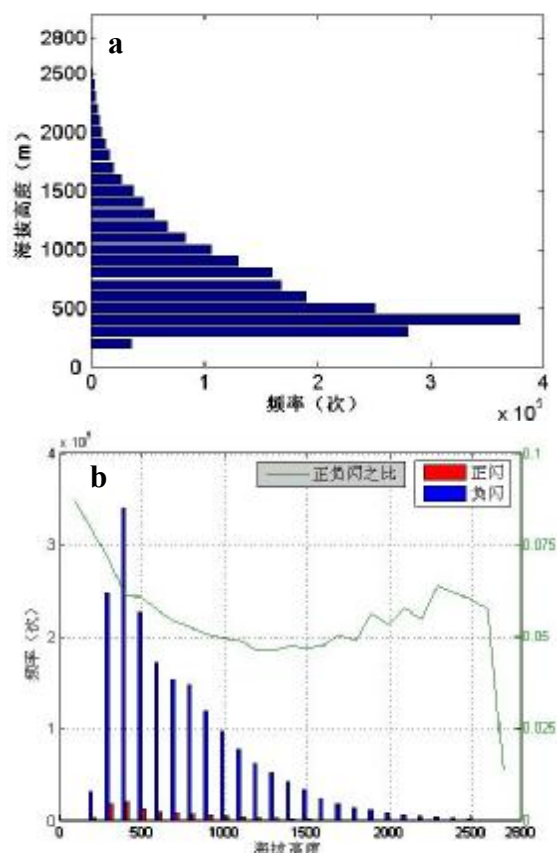
$$\text{负闪: } P_-( > I_p ) = 1 / [ 1 + ( \frac{I_p}{11.33} )^{4.177} ] \quad (5)$$

$$\text{正闪+负闪: } P( > I_p ) = 1 / [ 1 + ( \frac{I_p}{11.31} )^{4.126} ] \quad (6)$$

## 6 闪电频次的空间分布

### 6.1 闪电频次的海拔高度分布

根据获取的地闪点高度信息对闪电数据分类后可知，该区域闪电发生频次最高地区为海拔 300~500 m 的区域，而海拔 600~800 m 的地区为雷电发生频次的次高区(图 6a)，其海拔高度在 800 m 以上，呈逐步递减趋势。闪电频次在海拔高 400 m 时达到最大值，随着高度的增加呈减少趋势。而雷电流强度在 100 kA 以上(图 6c)时，正闪比例明显高于 100 kA 以下(图 6b)正闪所占比例。



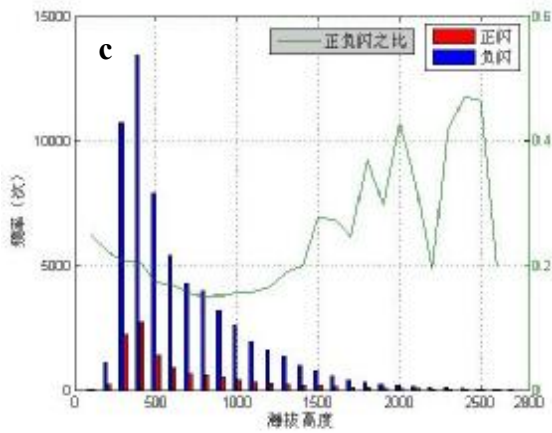


图6 闪电频次海拔高度分布(a)和0~100 kA(b)、100~200 kA(c)的闪电频次海拔高度分布特征

6.2 闪电频次的纬度分布

闪电频次的纬度分布(图7a)中, 高值区域分布在28.9~30.3°N, 次高频地区为31.2~31.5°N和30.7~30.8°N。闪电频次无论何种强度, 所在高频区域基本一致, 只是强度在100 kA以上(图7c)的正闪所占比例明显比100 kA以下(图7b)的大。

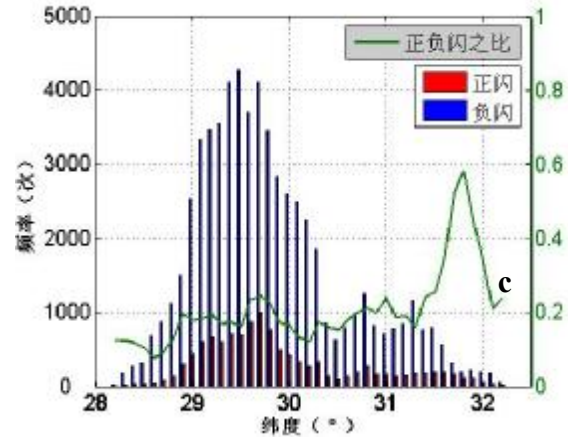
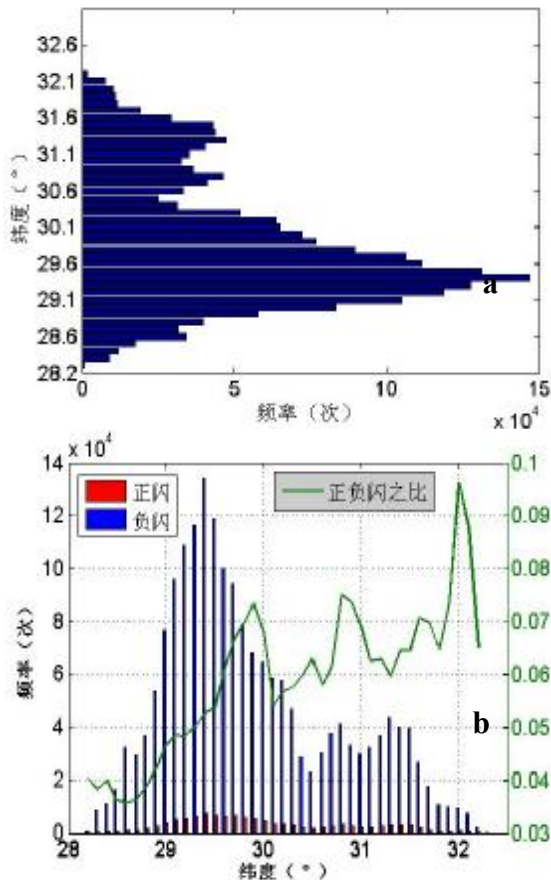
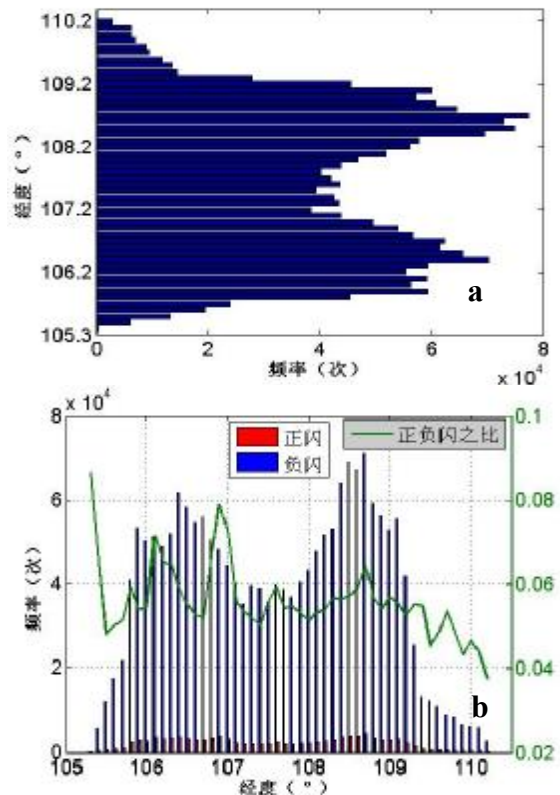


图7 闪电频次的纬度分布(a)和0~100 kA(b)、100~200 kA(c)的闪电频次的纬度分布特征

6.3 闪电频次的经度分布

闪电频次的经度分布特征呈现双峰双谷(图8a)。两个峰值区在105.9~106.9°E, 108.1~109.1°E。在低幅值(0~100 kA)区间(图8b), 闪电频次高值区集中在108.5~108.7°E, 其次的区域为106.4~106.6°E; 在高幅值(100~200 kA)区间(图8c), 闪电频次高值区集中在106.4~106.6°E, 其次的区域为108.4~108.7°E, 同时其正负闪频次比例明显高于低幅值区域的比例。



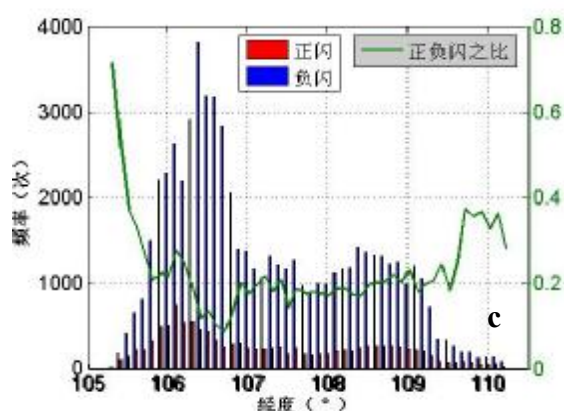


图 8 同图 7, 但为经度分布

#### 6.4 闪电频次的区域分布特征

闪电频次的统计方法不同结论也不相同。若以各区县行政区域分布统计分析, 闪电频次最高是彭水, 可达 15 114 次/a, 其次为开县、江津、涪陵和酉阳, 闪电频次均大于  $1 \times 10^4$  次/a。若以各区县单位面积的闪电频次(即雷电密度)来看, 沙坪坝区最高, 达到 6.3 次/(a·km<sup>2</sup>); 其次是大足、璧山、荣昌和渝中区等, 均大于 5 次/(a·km<sup>2</sup>); 再次是铜梁、双桥、合川、北碚、江北、九龙坡和永川等, 都在 4 次/(a·km<sup>2</sup>)以上。单位面积闪电频次较少的区县是奉节、巫山、巫溪和城口(均位于重庆市东北部), 不足 2 次/(a·km<sup>2</sup>), 尤其是城口仅 0.9 次/(a·km<sup>2</sup>)。

若以 5 km×5 km 为单位面积统计(图 9), 重庆市闪电密度最高的区域主要位于荣昌、大足、璧山、涪陵、彭水以及主城六区等地, 2006—2008 年每年每 25 km<sup>2</sup> 雷电密度最大值依次为 365、544 和 331 次, 分别位于江津区永兴镇, 沙坪坝区土主镇、中梁镇、回龙坝镇的三镇交界地区和涪陵区龙塘乡及白涛镇。三年平均每 25 km<sup>2</sup> 最大值为 225 次, 位于大足县三驱镇。若以 1 km×1 km 为单位面积统计(图略), 2006—2008 年每年每 km<sup>2</sup> 闪电密度最大值依次是 25、43 和 37 次, 分别位于巴南天星寺镇、彭水靛水乡和石柱鱼池镇。三年平均每 km<sup>2</sup> 的最大值为 17 次, 位于彭水县靛水

乡。

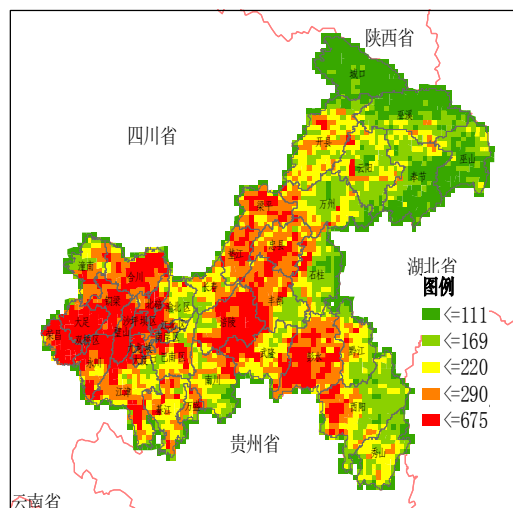


图 9 2006—2008 年闪电频次密度区域分布

## 7 结 论

(1) 闪电发生频次总是春夏季节大于秋冬季, 负闪发生频次远高于正闪; 一天中的闪电高发期为 03:00—07:00 和 15:00—19:00, 这与重庆的山地气候有关。

(2) 正闪较高频次集中在雷电流幅值为 15~72 kA, 占全部正闪频次的 70.8%; 而负闪集中在 8~59 kA, 占全部负闪频次的 84.1%。

(3) 正闪较高频次陡度主要分布范围是 3~20 kA/μs, 占全部正闪频次的 87.1%; 而负闪较高频次陡度主要分布范围是 3~25 kA/μs, 占全部负闪频次的 97.1%。

(4) 闪电发生频次最高地区为海拔 300~500 m 的区域, 随着海拔高度的增加呈现逐步递减趋势。闪电频次的纬度分布是高值区域分布在 28.9~30.3 °N, 次高频地区为 31.2~31.5 °N 和 30.7~30.8 °N。闪电频次的经度分布特征呈双峰双谷, 两个峰值区的经度为 105.9~106.9 °E 和 108.1~109.1 °E。

(5) 正负闪电频次比例在高幅值区域明显大于低幅值区域的比例。

## 参 考 文 献:

- [1] 李家启, 李良福. 雷电灾害典型案例分析[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [2] TAYLOR W L. A VHF technique for space time mapping of lightning discharge progresses[J]. J Geophys Res, 1978, 83: 3 575-3 583.
- [3] GERHARD D, WOLFGANG S, RAKOV V A. Lightning characteristics based on data from the Austrian Lightning Locating System[J]. IEEE Transactions on Elect-romagnetic Compatibility, 1998, 40(4): 452-464.
- [4] RICHARD E O, GARY R H. Cloud-to-ground lightning in the United States: NLDN results in the first decade, 1989—98[J]. American Meteorological Society, 2001(5): 1 179-1 193.
- [5] 易燕明, 杨兆礼, 万齐林, 等. 近 50 年广东省闪电、雷暴时空变化特征的研究[J]. 热带气象学报, 2006, 22 ( 5 ) : 539-546.
- [6] 王义耕, 陈渭民, 刘洁. TRMM 卫星观测到的华南地区的闪电时空分布特征[J]. 热带气象学报, 2009, 25 ( 2 ) : 227-233.
- [7] 林开平, 林宗桂, 易燕明, 等. 各类云系的闪电时空分布特征[J]. 热带气象学报, 2005, 21 ( 4 ) : 383-392.
- [8] 蔡晓云, 宛霞, 郭虎. 北京地区闪电定位资料的应用分析[J]. 气象科技, 2001, 19(4): 33-38.
- [9] 李南, 魏鸣, 姚叶青. 安徽闪电与雷达资料的相关分析及机理初探[J]. 热带气象学报, 2006, 22 ( 3 ) : 265-272.
- [10] 张敏峰, 刘欣生, 张义军. 广东地区雷电活动的气候分布特征[J]. 热带气象学报, 2000, 16(1): 46-53.
- [11] 冯桂力, 陈文选, 刘诗军, 等. 山东地区闪电的特征分析[J]. 应用气象学报, 2002, 13(3): 347-355.
- [12] 李照荣, 陈添宇, 康凤琴, 等. 兰州周边地闪分布特征[J]. 干旱气象, 2004, 22(2): 45-50.
- [13] 陈家宏, 童雪芳, 谷山强, 等. 雷电定位系统测量的雷电流幅值分布特征[J]. 高电压技术, 2008, 34 ( 9 ) : 1 893-1 897.
- [14] 孙萍, 吴璞三, 周照宗, 等. 雷电流陡度与幅值的相关性初探[J]. 浙江电力, 2007 ( 1 ) : 4-5.

## ANALYSIS OF LIGHTNING FREQUENCY DISTRIBUTION CHARACTERISTICS BASED ON ADTD SYSTEM

LI Jia-qi<sup>1,2</sup>, SHEN Shuang-he<sup>2</sup>, XIA Bai-cheng<sup>1</sup>,  
XIANG Bo<sup>1</sup>, LI Bo<sup>2</sup>, REN Yan<sup>1</sup>

(1. Chongqing Meteorological Bureau, Chongqing 401147, China;

2. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China )

**Abstract:** Lightning frequency is an important parameter to reflect the strength characteristics of lightning activities. This paper focuses on analysis of time distribution characteristics of lightning frequency based on the statistical analysis of ground flash monitoring data by Chongqing ADTD system. Simultaneously, this paper obtains the height property of ground flash point by GIS software and analyzes its space distribution characteristics. The results indicate that the lightning frequency is obviously different associated with different lightning polarities, lightning current amplitudes and gradient; the frequency of lightning current amplitude and gradient is log-normal distribution; the monthly characteristics of lightning frequency are that the positive flashes are dominated from April to July and negative flashes from July to August; the daily characteristics are that the lightning frequency is concentrated in 03:00—07:00 h and 15:00—19:00 h; in the space distribution, the region which has highest frequency is the area 300~500 m above sea level, and then the frequency is decreased with the increase of the height; in the latitude distribution, the high value region is in 28.9~30.3 °N and the second high value region is in 30.7~31.5 °N; in the longitude distribution, the characteristics show double peaks and double valleys(the longitudes of two peak values regions are in 105.9~106.9 °E and in 108.1~109.1 °E); in high amplitude region, the ratio of the positive and negative flashes is higher than that in low amplitude region; the regions which have high lightning frequency are concentrated in northeast, southwest and west Chongqing. Based on above, we obtain the expression of lightning current amplitude and gradient frequency in Chongqing. It offers important theory basis for lightning protection.

**Key words:** ADTD system; lightning frequency; distribution characteristic