

李家启,王劲松,申双和,等. 基于 ADTD 系统监测的雷电流幅值累积概率特征分析[J]. 气象,2011,37(2):226-231.

# 基于 ADTD 系统监测的雷电流幅值累积概率特征分析<sup>\*1</sup>

李家启<sup>1,2</sup> 王劲松<sup>3</sup> 申双和<sup>1</sup> 李 博<sup>1</sup> 陈 宏<sup>2</sup> 林 涛<sup>2</sup>

1 南京信息工程大学, 南京 210044

2 重庆市防雷中心, 重庆 401147

3 国家卫星气象中心, 北京 100081

**提 要:** 雷电流幅值累积概率分布是雷电活动规律的重要指标。通过对 ADTD 闪电定位系统监测的雷电资料的数理统计分析,采用 IEEE 工作组和《DL/T620-1997》推荐的公式对比分析了重庆地区的雷电流幅值累积概率的拟合效果。结果表明:雷电流幅值累积概率分布特征随极性存在显著差异,雷击大地密度随雷电流幅值不同而差异较大;同时,采用 IEEE 工作组推荐的公式拟合 ADTD 系统监测的雷电流幅值累积概率分布效果最佳,与 IEEE 推荐的雷电流幅值概率分布特征吻合;而采用《DL/T620-1997》中累积概率分布公式拟合,其结果与之采用概率分布特征差异较大;在此基础上获得了重庆地区的雷电流幅值累积概率分布公式,为防雷减灾活动提供了理论依据。

**关键词:** ADTD 系统, 雷电流幅值, 累积概率

## Analysis of the Cumulative Probability of Lightning Current Amplitudes Based on the Statistical Data Obtained from the ADTD System

LI Jiaqi<sup>1,2</sup> WANG Jingsong<sup>3</sup> SHEN Shuanghe<sup>1</sup> LI Bo<sup>1</sup> CHEN Hong<sup>2</sup> LIN Tao<sup>2</sup>

1 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Lightning Protection Center of Chongqing, Chongqing 401147

3 National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081

**Abstract:** The cumulative probability of lightning current amplitudes is one of the most significant parameters of lightning flash. Here presented are the statistical data of the first-stroke current of lightning flash, collected by LLS (Lightning Location System) of ADTD type. Negative first strokes have traditionally been considered to produce the worst stress on the earth. The positive strokes have about the same median current value as the negative first strokes and longer fronts, thus producing less stress. However, their duration is longer than that of the negative strokes. Therefore, we estimate the first-stroke current distribution in Chongqing using the empirical equations from the IEEE standards and the DL/T standards, respectively. It is found that the first-stroke current distribution is changed with the polarity and the density of lightning stroke is different with the intensity of lightning current. The LLS-inferred peak current distribution estimate equation according to the Task Force recommendations into IEEE standards is effective, because the results according to the Task Force recommendations into IEEE standards fit more suitably to the statistical data than those according to the power team recommendations into DL/T standards.

**Key words:** ADTD system, lightning current amplitudes, the cumulative probability

\* 公益行业专项(GYHY(QX)2007-6-22-4),重庆市科技攻关项目(重庆市轻轨防雷技术研究),中国气象局软科学课题(应急救援防雷安全技术研究)共同资助

2010 年 1 月 6 日收稿; 2010 年 3 月 19 日收修定稿

第一作者:李家启,主要从事雷电科学与防护技术研究. Email: cqljq@126.com

## 引 言

雷电流幅值是一个极其重要的雷电参数,是建筑物防雷类别划分的标准,是雷电灾害风险评估、防雷工程设计施工中的重要基础数据。Kohlrausch (1888)最早对雷电流幅值进行估算,Popolansky (1972)在雷电流幅值分布特征研究时发现,雷电流分布服从正态分布,Berger(1975)等采用磁钢棒的测量 101 次负极性和 26 次正极性进行了雷电流幅值的累积频率分布特征分析,Anderson 等根据磁钢棒法测得的 338 组数据分析提出的雷电流幅值累积概率分布公式,得到 IEEE 工作组和 CIGER 认可和推荐<sup>[1-5]</sup>。

孙萍<sup>[6]</sup>对浙江省西部 220 kV 新安江-杭州输电线路 I 回路在 27a 中用磁钢棒实测到的全部雷击数据(716 次)作了数据统计分析,得出该线路雷电流幅值累积概率分布公式  $\lg P_T = -I/88$ ,并被电力行业规程《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》(DL/T620-1997)采用。王巨丰等<sup>[7]</sup>对用磁带法进行输电线路雷电参数实测共采集 156 个数据进行分析,提出雷电流幅值累积概率分布特征。陈家宏等<sup>[8]</sup>采用 IEEE 推荐的表达形式对雷电流幅值统计的累积概率进行回归拟合,得到了各自的累积概率分布特征。

近年来,闪电定位系统的建立和运用,有力地促进了雷电活动特征研究工作<sup>[9-18]</sup>,给采取海量资料分别就正闪和负闪雷电流幅值累积概率分布特征研究提供了可能。雷电流幅值累积概率特征是雷电活动规律的重要反映指标,《建筑物防雷设计规范》(GB50057-94)指出:建筑物防雷设计,应该在认真调查地理、地质、土壤、气象、环境等条件和雷电活动规律以及被保护物的特点等的基础上,详细研究防雷装置的形式及其布置。因此,开展重庆地区的雷电流幅值累积概率特征分析研究,对于及时掌握当地雷电活动规律,开展雷电灾害风险区划,有效地采取合理的雷电防护措施具有积极的指导作用。

## 1 资料来源与方法

ADTD 闪电定位系统主要用来探测云地闪,并且能区分正负极性,目前对气象、航天、航空、通讯、

林业、电力、建筑等国防和国民经济的许多领域都有着广泛的应用。为提高雷电定位精度,同时扩大探测范围,综合考虑站址位置、站间距离、场站通讯条件及场址背景条件等方面。重庆市建成的第二代雷电监测网由一个主站(市区),四个子站(酉阳、城口、云阳、石柱)组成,且与陕西省安康,四川省达州、遂宁、自贡,贵州省赤水、道真,湖北省恩施、巴东、神农架等地的雷电监测站点联网,覆盖了重庆市所辖行政区域。该雷电监测网的钟频最高能到 16 MHz,这使每个闪电回击的处理时间在 1 ms 左右。中心数据处理站对接收到的闪电回击数据实时进行交汇处理,给出每个闪电回击的准确位置、强度等参数。同时该网实现了对地闪时间、位置(经度、纬度)、雷电流峰值和极性的自动监测<sup>[19-20]</sup>。

本文采用 ADTD 闪电定位系统系统 2006—2009 年监测资料,这期间共探测到 927671 个地闪(三站定位资料)。每个闪电资料包括的信息有时间、位置( $^{\circ}\text{N}$ 、 $^{\circ}\text{E}$ )、极性(正、负)、强度、陡度等参数。为分析雷电流幅值累积概率特征,分别对闪电定位系统的雷电流幅值频率进行数理统计(雷电流幅值间隔取 0.1 kA),并采用 IEEE 和《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》(DL/T620-1997)推荐的雷电流幅值累积概率公式分别进行拟合,并对其效果进行对比分析。

## 2 雷电流幅值累积概率分析

### 2.1 雷电流幅值分布特征

#### (1) 雷电流幅值极性

表 1 给出了 2006—2009 年闪电的年平均特征。从中看出闪电中的绝大部分为负闪,占闪电总数 96.42%,正闪仅占 3.58%;但是正闪平均雷电流幅值(59.6 kA)明显大于负闪(39.4 kA)。这与文献<sup>[20]</sup>结论中一致。

表 1 闪电极性分布特征

闪电总频数	正闪		负闪	
	频数(比例)	平均强度/kA	频数(比例)	平均强度/kA
927671	33240 (3.58%)	59.6	894431 (96.42%)	39.4

#### (2) 雷电流幅值密度分布

在 2006—2009 年中发生的 33240 次正闪中,最

大雷电流幅值为 399.3 kA, 主要分布范围为 15~72 kA, 该幅值范围内的正闪次数占到全部正闪次数的 71.0%, 而幅值为 44.4~44.5 kA 的正闪频数最高, 达到 134 次, 占全部正闪次数的 0.4%。正闪雷

电流幅值分布虽然相对集中, 但在强度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”型变化。

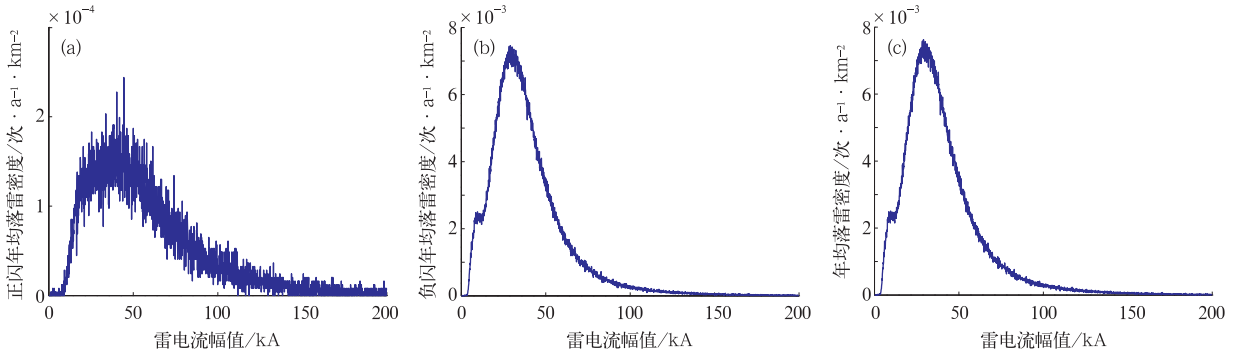


图 1 正闪雷电流幅值的密度分布曲线(a), 负闪雷电流幅值密度分布曲线(b)和正闪+负闪雷电流幅值密度分布(c)

Fig. 1 The density distributions of lightning current amplitudes:

(a) the positive stroke, the negative stroke (b) and (c) the positive+negative strokes

894431 次负闪平均雷电流幅值为 39.4 kA, 最大幅值为 399.8 kA, 主要分布范围是 8~59 kA, 该幅值范围内负闪次数占到全部负闪次数的 84.9%, 与正闪相比, 负闪相对更集中。幅值为 28.6~28.7 kA 的负闪频次最高, 达到 4784 次, 占全部负闪次数的 0.5%。

从总体情况看, 雷电流幅值总体分布特征与负闪及其相似, 雷电流幅值在 20~40 kA 范围内落雷密度比较大, 而在 40 kA 以后呈现逐渐减少趋势。

## 2.2 正、负极性雷电流幅值累积概率统计分布特征

对 2006—2009 年正、负极性地闪进行雷电流幅值的频次进行统计(间隔为 0.1 kA), 可以发现, 不同极性雷电流幅值累积概率曲线差异较大, 正极性闪电雷电流幅值累积概率曲线的陡度小, 负极性闪电雷电流幅值比正极性更加集中, 正极性闪电出现大幅值的概率比负极性大(见图 2)。而正负极性闪电集中后的累积概率曲线与负极性闪电雷电流幅值曲线非常接近。分析其主要原因是正极性闪电的比率仅占 3.58%, 故对集中正负闪电后累积概率曲线影响很小。这与陈家宏等<sup>[22-24]</sup>结论一致。

## 2.3 正、负极性雷电流幅值累积概率分布拟合

IEEE 工作组和 CIGER 推荐使用的雷电流幅

值累积概率表达式分别为  $P_C(>I_P) = 1/[1 + (\frac{I_P}{31})^{2.6}]$  和  $P_C(>I_P) = 1/[1 + (\frac{I_P}{12})^{2.7}]$ , 综合其特点, 可归纳为如下雷电流幅值累积概率表达式<sup>[1-3, 5, 8]</sup>:

$$P_C(>I_P) = 1/[1 + (\frac{I_P}{a})^b] \quad (1)$$

其中  $P_C$  为雷电流幅值大于  $I_P$  的累积概率。  $I_P$  为雷电流幅值(kA)。

而我国电力行业规程《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》(DL/T 620-1997)推荐采用  $\lg P_I = -I/88$ 。即

$$\lg P = -I/c \quad (2)$$

因此, 分别根据式(1)、式(2)对 2006—2009 年正闪、负闪雷电流幅值进行拟合, 并得到相应的累积概率表达式。

### (1) 正闪

采用式(1)和式(2)对正闪进行拟合, 分别得到式(3)、式(4)。从图 3a 可以看出, 按照 IEEE 或者 CIGER 推荐公式形式拟合公式(3)更符合雷电流幅值统计特征。

$$P_+(>I_P) = 1/[1 + (\frac{I_P}{49.7})^{2.843}] \quad (3)$$

$$\lg P_+ = -I/125.13 \quad (4)$$

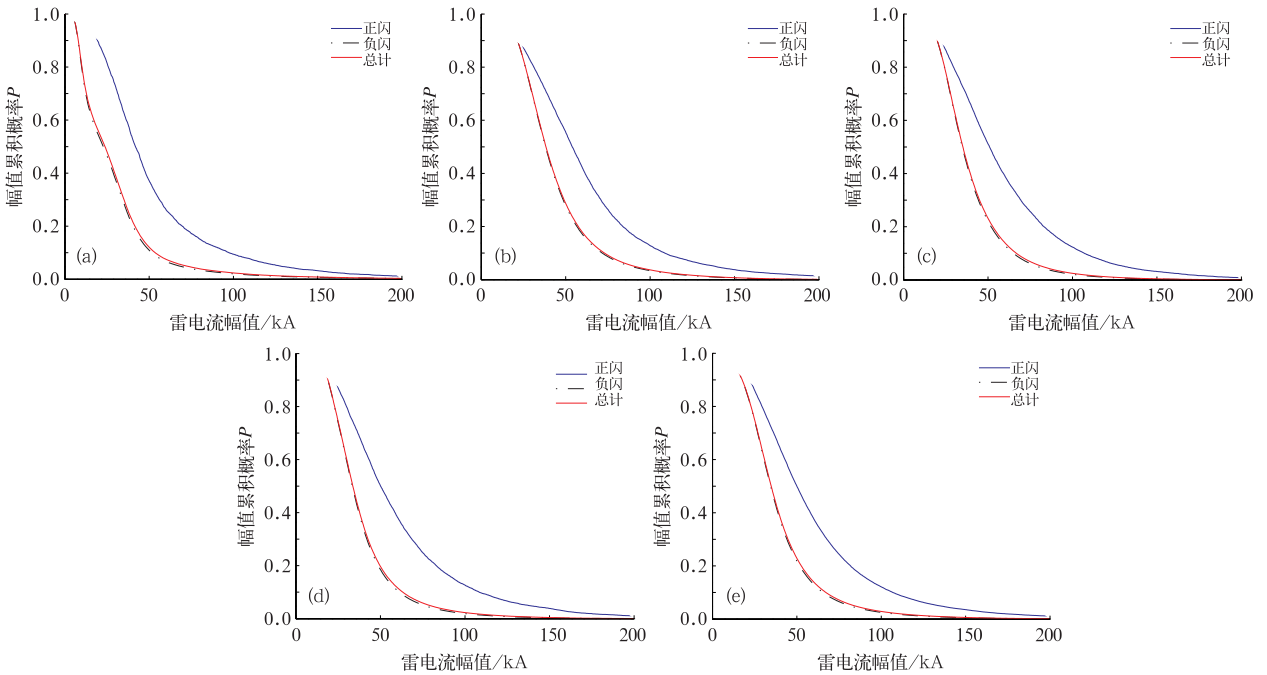


图 2 雷电流幅值累积概率分布图

(a) 2006 年; (b) 2007 年; (c) 2008 年; (d) 2009 年; (e) 2006—2009 年

Fig. 2 The cumulative probability of lightning current amplitudes for years 2006 (a), 2007 (b), 2008 (c), 2009 (d) and 2006—2009 (e)

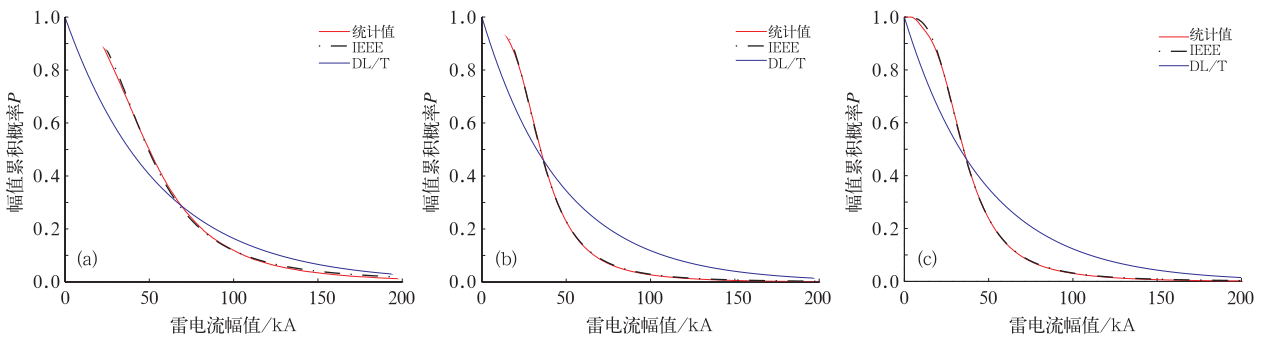


图 3 雷电流幅值的统计与拟合图

(a) 正闪; (b) 负闪; (c) 正闪+负闪

Fig. 3 The statistics and fitting formulae of the lightning current amplitudes: (a) the positive stroke, (b) the negative stroke and (c) the positive+negative strokes

(2) 负闪

采用式(1)和式(2)对负闪进行拟合,分别得到式(5)、式(6)。从图 3b 可以看出,按照 IEEE 或者 CIGER 推荐公式形式拟合公式(5)更符合雷电流幅值统计特征。

$$P_{-} (> I_p) = 1/[1 + (\frac{I_p}{34.36})^{3.374}] \quad (5)$$

$$\lg P_{-} = -I/106.03 \quad (6)$$

(3) 正闪+负闪

采用式(1)和式(2)对正闪+负闪进行拟合,分别得到式(7)、式(8)。从图 3c 可以看出,按照 IEEE 或者 CIGER 推荐公式形式拟合公式(7)更符合雷电流幅值统计特征。

$$P(> I_p) = 1/[1 + (\frac{I_p}{34.75})^{3.314}] \quad (7)$$

$$\lg P = -I/108.03 \quad (8)$$

从图 4 可以看出,我国电力线路雷电防护中使用的雷电参数与 IEEE 推荐的比较:雷电流幅值的中值与 IEEE 推荐的基本相同,高幅值区的雷电流幅值概率大于 IEEE 推荐使用的,低幅值区的概率又低于 IEEE 推荐使用的.而重庆地区闪电定位监测的地闪资料统计分析来看,地闪的低幅值区域的概率远大于 IEEE 推荐使用的,而高幅值区域概率又低于 IEEE 推荐使用的(见图 4 和表 2)。

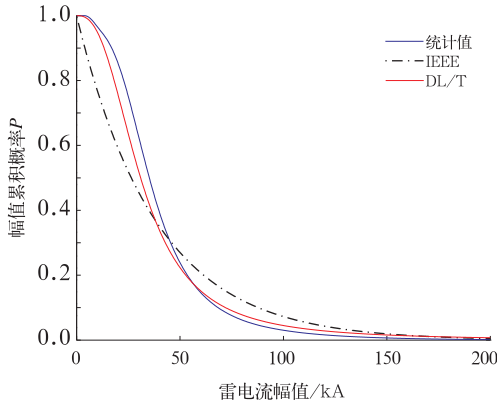


图 4 雷电流幅值统计图与 IEEE、DL/T 效果比较

Fig. 4 Comparative study among the effects of IEEE, DL/T and the statistics of lightning current amplitudes

表 2 国内外雷电流幅值累积概率比对照表

Table 2 The comparison of the cumulative probability of lightning current amplitudes at home and abroad

概率 $P_C/\%$	CIGER( $I_P$ )	IEEE( $I_P$ )	DL/T620( $I_P$ )	重庆( $I_P$ )
98	4	6.9	0.8	9
95	7	9.99	1.96	13.3
80	20	18.2	8.5	22.8
50	34	31	26.5	34.9
12	70	66.7	81	63.3
5	90	96.2	114.5	84.5
2.5	100	126.9	141	104.7

### 3 结论与讨论

(1) 雷电流幅值累积概率分布特征随极性存在显著差异,正极性雷电流幅值累积概率曲线的陡度小,负极性闪电雷电流幅值比正极性更加集中。

(2) 雷击大地密度随雷电流幅值不同而差异较大,正极性幅值范围在 15~72 kA 雷击大地密度较高,而负闪雷电流幅值范围集中在 8~59 kA。

(3) 采用 IEEE 工作组推荐的公式拟合 ADTD

系统监测的雷电流幅值累积概率分布效果最佳,与 IEEE 推荐的雷电流幅值概率分布特征吻合;而采用《DL/T620-1997》中累积概率分布公式拟合,其结果与之采用概率分布特征差异较大。

(4) 不同地区的雷电流幅值累积概率表达式不同,重庆地区的雷电流幅值累积概率公式中,表示正闪可用式(3),负闪用式(5),正闪+负闪采用式(7)表示。

(5) 从重庆地区闪电定位监测的地闪资料统计分析来看,地闪的低幅值区域的概率远大于国外的,而高幅值区域又低于 IEEE,与 DL/T620 结论也不一致,采用该标准应该根据各地实际情况,而不应该盲目直接照搬,在项目建设中应当根据当地闪电系统监测资料进行雷电灾害风险评估,选取合适雷电参数。

### 参考文献

- [1] Golde R H. 雷电[M]. 北京:电力工业出版社, 1982.
- [2] Anderson R B, Eriksson A J. Lightning parameters for engineering application[J]. Electra, 1980, (69): 65-102.
- [3] Lightning and Insulator Subcommittee of the T & D Committee. Parameters of lightning strokes: A review[J]. IEEE Trans Power Delivery, 2005; 20(1).
- [4] Working Group on Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines. IEEE working report: Estimating lightning performance of transmission lines II 2updates to analytical models[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3): 1254-1267.
- [5] William A. Chisholm, Senior Member, IEEE and Kenneth L. Cummins, Senior Member, IEEE. Lightning Parameters: A Review, Applications and Extensions. 2005/2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition.
- [6] 孙萍. 220 kV 新杭线雷电流幅值实测结果的统计分析[J]. 中国电力, 2000, 33(3): 72-75.
- [7] 王巨丰, 齐冲, 车治颖, 等. 雷电流最大陡度及幅值的频率分布[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(3): 106-109.
- [8] 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): 1893-1897.
- [9] 冯桂力, 边道相, 刘洪鹏. 冰雹云形成发展与闪演变特征[J]. 气象, 2001, 27(3): 33-37.
- [10] 许小峰. 雷电灾害与监测[J]. 气象, 2004, 30(12): 17-21.
- [11] 陈绍东, 王孝波, 李斌, 等. 标准雷电波形的频谱分析及其应用[J]. 气象, 2006, 32(10): 11-19.
- [12] 林建, 曲晓波. 中国雷电事件的时空分布[J]. 气象, 2008, 34(11): 22-30.
- [13] 吴翠红, 左申正, 万玉发. 闪电定位系统布网方案设计的技术探讨[J]. 气象, 2002, 28(6): 11-15.

- [14] 刘恒毅,董万胜,王涛,等. 闪电电场变化波形时域特征分析及放电类型识别[J]. 气象,2009,35(3):49-59.
- [15] 冯桂力,王俊,牟容,等. 一次中尺度雷暴大风过程的闪电特征分析[J]. 气象,2010,36(4):68-74.
- [16] 王学良,刘学春,黄小彦,等. 湖北地区云地闪电特征分析[J]. 气象,2010,36(10):91-96.
- [17] 李家启,李博,申双和,等. 基于 ADTD 系统的雷电流波头陡度频率分布特征[J]. 气象科技,2010,38(6):741-745.
- [18] 刘恒毅,董万胜,王涛,等. 闪电电场变化波形时域特征分析及放电类型识别[J]. 气象,2009,35(3):45-49.
- [19] 张义军,孟青,马明,等. 闪电探测技术发展和资料应用[J]. 应用气象学报,2006,17(5):611-622.
- [20] 张文娟,孟青,吕伟涛,等. 时间差闪电监测网的误差分析和布局优化[J]. 应用气象学报,2009,17(5):402-410.
- [21] 冯桂力,陈文选,刘诗军,等. 山东地区的闪电特征分析[J]. 应用气象学报,2002,13(3):678-681.
- [22] 国网武汉高压研究院. 福建省雷电参数研究[R]. 武汉:国网武汉高压研究院. 2006.
- [23] 国网武汉高压研究院. 区域雷电分布及线路落雷密度研究[R]. 武汉:国网武汉高压研究院. 2007.
- [24] 陈家宏,冯万兴,王海涛,等. 雷电参数统计方法[J]. 高电压技术,2007,33(10):6-10.
- [25] 郭虎,熊亚军. 北京市雷电灾害易损性分析、评估及易损度区划[J]. 应用气象学报,2008,19(1):35-40.

## 征稿简则

- 1 《气象》主要刊登气象科学研究领域的综合评述及研究论文;天气、气候诊断分析与预报技术;气象业务技术及业务现代化建设经验;气象灾害的规律及防灾减灾决策;公共气象服务和专业气象服务技术方法;气象科技信息动态等。
- 2 来稿注意事项
  - 2.1 来稿务必论点明确,数据可靠,文字精炼。文章的书写顺序为:中文题目(不超过 20 个汉字)、作者姓名、单位名称、邮政编码、中文提要(200~300 字)、关键词(3~8 个);英文题目、作者姓名、单位名称、邮政编码、英文提要及英文关键词;引言;正文;结论和讨论;致谢;参考文献。文章首页页脚处附作者信息,即姓名、从事专业工作和研究方向、Email 等。
  - 2.2 正文标题用阿拉伯数字连续编号,不同层次数字间用圆点间隔,如“1”,“1.2”,“2.1.3”等。标题左顶格,在数字编号后空一格再写标题,末尾不加标点符号。
  - 2.3 基金资助的研究项目,请注明省部级以上基金名称和项目编号。
  - 2.4 文稿的单位制采用《中华人民共和国法定计量单位》。图、表中量和单位间用“/”隔开,表示物理量的符号用斜体表示,并注意文种、大小写、正斜体、上下角码等。
  - 2.5 科技术语和名词应使用全国自然科学名词审定委员会公布的名词。
  - 2.6 文稿只附必要的图表。图、表要求准确,清晰,美观。在文中相应的位置插入图、表。图、表附相应的中英文图题、表题。附表请使用三线表。
  - 2.7 参考文献按在文内出现顺序连续编码。在期刊上发表的文献书写格式为:[序号] 作者姓名(列出前 3 位). 题名[J]. 期刊名,年,卷(期):页码。在专著、教科书上发表的文献书写次序为:[序号] 作者姓名. 译者姓名. 文题名. 书名[M]. 出版地:出版社,出版年:页码。
- 3 请勿一稿两投。本刊一般不退稿,若 6 个月内未见刊用通知,可自行处理。
- 4 本刊收取发表费,并付稿酬,所付稿酬包含纸质版、数字版稿酬和刊物内容网络服务报酬等。凡不同意将其稿件纳入此两种版本进行交流者,请书面说明。
- 5 通讯地址:北京市中关村南大街 46 号《气象》编辑部 邮政编码:100081  
网上投稿地址: <http://219.234.83.5>  
电话:(010)68407936 58993789 68407336 Email:qixiang@cams.cma.gov.cn