

区域海拔高度对云地闪电参数分布的影响

王学良, 余田野, 贺 珊, 张科杰
(湖北省防雷中心, 武汉 430074)

摘 要: 为进一步研究雷电参数随海拔高度的分布特征, 为雷电防护工程设计和雷击风险评估提供参考, 根据湖北省雷电定位系统(lightning location system, LLS)2007 年 1 月至 2017 年 12 月监测资料, 采用数理统计方法, 对不同海拔高度的频次、极性、雷电流幅值和波前陡度等参数进行了统计分析。结果表明: 负地闪和总地闪频次随海拔高度增加呈线性减少, 海拔 2 700 m 的地闪频次约是 300 m 处的 1/3, 正地闪频次随海拔高度变化大致呈“V”字形, 海拔 800 m 处相对最少。海拔在 800~2 700 m 时, 正地闪比例随海拔高度增加而明显增加, 2 700 m 处的正地闪比例约是 800 m 处的 3.7 倍。负地闪和总地闪中值雷电流幅值随海拔高度变化大致呈“V”字形, 海拔 1 500 m 时, 负地闪和总地闪中值雷电流幅值相对最小。海拔 1 200~1 700 m 的高山, 负地闪和总地闪 ≤ 20 kA 的小雷电流幅值比例较高, 是海拔 200 m 处的 2 倍以上; 海拔 1 500 m 以上的高山地区, 大于 100 kA 大雷电流幅值平均比例大于低山丘陵和平原地区。正地闪、负地闪和总地闪平均雷电流波前陡度随高度增加呈自然对数减少。上述研究表明: 海拔 1 500 m 以上的中高山地区的大雷电流幅值所引起的反击概率大于岗地和平原地区, 在 1 200~1 700 m 的高山地区, 小雷电流绕击相对较高。相对于中高山地区, 低山丘陵和平原地区的雷电电磁感应的危害性相对较大。

关键词: 海拔高度; 云地闪; 雷电参数; 闪电频次; 雷电流幅值; 波前陡度; 绕击; 分布特征

Influence of Regional Altitude on the Distribution of Cloud-to-ground Lightning Parameters

WANG Xueliang, YU Tianye, HE Shan, ZHANG Kejie
(Lightning Protection Center of Hubei Province, Wuhan 430074, China)

Abstract: To further investigate the distribution characteristics of lightning parameters with altitude, and provide references for the design of lightning protection engineering and lightning risk assessment, the parameters such as frequency, polarity, amplitude of lightning current and gradient of wave front at different altitudes were analyzed by a mathematical statistics method based on the data monitored by lightning location system (LLS) in Hubei province from January 2007 to December 2017. The results show that the frequency of negative cloud-to-ground(CG) lightning and total CG lightning decreases linearly with increasing height, the frequency of CG lightning at the altitude of 2 700 m is about 1/3 that at 300 m, and the frequency of positive CG lightning roughly presents a trend of “V shape” with altitude, and a relative minimum occurs at the altitude of 800 m. At the altitude of 800~2 700 m, the proportion of positive CG lightning increases significantly with altitude, and the positive CG lightning ratio at 2 700 m is about 3.7 times that at 800 m. The amplitude of negative CG lightning and total CG lightning median current present a trend of roughly “V shape” with altitude, and when the altitude is 1 500 m, negative CG lightning and total CG lightning median current amplitude are relatively minimal. In the high mountains with altitude of 1 200~1 700 m, negative CG lightning and total CG lightning less than or equal to 20 kA have a higher proportion of the current amplitude, which is more than twice the altitude of 200 m. Over 1 500 m above sea level, the average ratio of lightning current amplitude larger than that of 100 kA is greater than that of low hill and plain area. The average gradient of wave front for positive CG lightning, negative CG lightning and total CG lightning decreases with natural logarithm as the height increases. According to the above research, the probability of counter attack caused by the large lightning current in the middle and high mountain areas above 1 500 m is higher than that in the hills and plains, while in the high mountain area of 1 200~1 700 m, the small lightning current is relatively high. Compared with the middle and high mountains, the lightning electromagnetic induction in the low hills and plains are relatively harmful.

Key words: altitude; cloud-to-ground lightning; lightning parameters; lightning frequency; lightning current amplitude; gradient of wave front; shielding failure; distribution characteristics

0 引言

雷电(也称闪电)是雷暴天气中发生的一种长距离瞬时放电现象。云对地闪电常常会对地面建筑物、森林、电力和电子设备、航空、航天、通信等产生破坏作用,甚至威胁人的生命^[1]。为此,长期以来,国内外学者对雷电现象进行了大量的观测和试验研究工作^[2-3]。随着科学技术的发展,高速摄像、记录示波器、雷电定位仪等现代化测量技术用于雷电观测,尤其是20世纪80年代,我国成功研制了雷电定位系统(lightning location system, LLS),并在我国电力和气象部门得到广泛应用^[4-7]。由于LLS能实时监测并显示云对地放电(地闪)的时间、位置、雷电流幅值和极性、回击次数等参数^[8]。这些参数是雷电防护工程设计、雷电灾害风险评估以及雷电物理研究的基础数据。我国幅员辽阔,地形复杂,气候多样,而雷电活动有着强烈的地域关系,并受地形的影响^[9-10]。因此,研究不同地区、不同海拔对雷电参数分布的影响,对进一步研究雷电物理特性,提高雷电灾害防御能力具有重要意义。

20世纪40—60年代,前苏联、美国、秘鲁等国学者在输电线上通过磁钢棒的测量,得出雷电流幅值随海拔高度的增加而减少的结论,但在秘鲁海拔4400 m高山测得的雷电流比平原还要大^[11-12]。20世纪70年代,由美国科学家M. A. Uman和E. P. Krider提出并实现了现代雷电监测定位技术^[13-14]。随着雷电监测技术的发展和成熟,目前我国已建成的LLS能实时监测并显示地闪的时间、位置、极性、强度和陡度等雷电参数,为进一步研究不同区域、不同时间内雷电参数的分布规律提供了前所未有的条件^[5,15-16]。由于雷电活动参数的分布与天气气候条件、地形地貌、土壤电阻率等多种因素有关,因此,国内外学者对雷电参数地域分布特征做了大量研究工作。国外学者根据美国1989—1999年共10年雷电监测资料,分析了闪电频次、雷电流幅值和闪电密度等雷电参数变化特征^[17]。Mazarakis N等利用雷电定位系统资料,分析了希腊2003—2006年5月至9月闪电活动特征,指出闪电密度与海拔高度呈正相关^[18]。澳大利亚学者通过研究澳大利亚闪电活动频次和密度空间分布特征发现,闪电(云地闪和云闪)密度与地理纬度密切相关,从16°S到40°S,其闪电密度减少大约10倍^[19]。国内学者曾楚英等在综合国内外雷电观测资料的基础上,分析了雷电参

数与海拔高度、地理纬度的关系^[9]。孙萍根据浙江西部输电线路中用磁钢棒实测到的雷击数据进行统计分析,得出该线路的雷电流幅值累积概率分布计算式及其他雷电参数,认为平原段实测雷电流幅值比山丘稍大^[3]。王学良等根据湖北省LLS监测到的雷电资料,统计分析了湖北地区云地闪频次、地闪密度、雷电流幅值和雷电流波前陡度等雷电参数的时空分布特征^[20-23]。李永福等分析了国内某地区2007—2010年LLS资料,揭示了正闪和负闪雷电流幅值均随着海拔的增加有所降低;负地闪密度随海拔的上升有大幅下降,正地闪密度随海拔的上升却有较大增加^[24]。刘海兵等分析了2004—2015年江西省LLS监测地闪资料,结果显示,正负闪电平均雷电流幅值随海拔高度的增加而增加,地闪密度随海拔高度的增加而减少^[25]。张金波等研究了山区复杂地形对雷电感应过电压的影响,结果表明,感应过电压幅值明显受山体地形坡度的影响,感应过电压幅值不仅与线路所在位置处的地形坡度有关,还受到其他地形坡度的影响^[26]。上述文献虽然对雷电流参数分布与海拔高度的关系作了一些研究,但得出的结论差异较大,尤其是雷电流幅值和地闪密度随海拔高度的变化,文献之间常出现完全相反的结论。为此,在湖北西部选取一定区域,作为本文研究区域范围。根据湖北省第2代雷电定位系统(advanced direction finding on time difference, ADTD)2007年1月至2017年12月监测的资料^[27],基于ArcGIS软件,获得了所选区域内的每个地闪的海拔高度,统计分析了该区域内的云地闪频次、极性、雷电流幅值强度和雷电流波前陡度等雷电参数随海拔高度变化特征,为进一步研究雷电活动分布规律及其防护措施提供参考。

1 资料来源与统计方法

1.1 资料来源

本文研究区域范围为:30.3°N~32.3°N, 110.0°E~112.5°E(图1中方框所示)。该区域西部属鄂西山区,大部分地区海拔在1000 m以上,最高峰神农架主峰神农顶海拔高达3105.4 m,东部多为江汉平原和少量的鄂北丘陵岗地,大部分地面海拔为20~100 m^[28]。该区域内山区植被覆盖较高,植被类型主要为常绿阔叶林、落叶阔叶林和常绿落叶混交林,年平均气温为15.0~17.0℃,年平均降水量为1000 mm左右,年平均相对湿度为76%~80%^[28-29]。

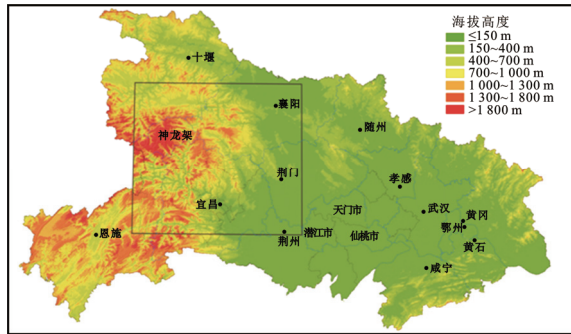


图1 湖北省及研究区域海拔高度示意图

Fig.1 Schematic diagram of altitude of Hubei province and study area

湖北省 ADTD 雷电定位系统于 2006 年建成, 包含 13 个探测子站^[7]。该系统是由中科院空间科学与应用研究中心研制, 主要用于探测云地闪, 单站探测范围约为 150 km, 时间精度优于 10^{-7} s, 组网后网内理论定位精度优于 300 m, 雷电流幅值和波前陡度值, 采用多站信号强度归一化(100 km)处理方法, 雷电流幅值和波前陡度值网内相对误差小于 15%^[30-32]。该系统可以给出云地闪电发生的时间、位置、强度、陡度、极性 etc 参数。采用湖北省 ADTD 雷电定位系统 2007-01-01—2017-12-31 监测的云地闪电资料, 提取研究区域内的闪电频次、雷电流幅值、陡度等雷电参数所对应的经纬度及其海拔高度。本文采用的海拔高度数据来源于最新的先进星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型(ASTER GDEM)。ASTER GDEM 是美国航天局(NASA)与日本经济产业省(METI)共同推出的全球电子地形数据, 其覆盖范围为南北纬 83° 之间的所有陆地区域, 垂直精度达 20 m, 水平精度达 30 m^[33-34]。

1.2 统计方法

海拔高度和地理纬度是影响雷电流幅值的重要因子^[9,24]。因此, 在统计分析之前, 根据文献^[9], 式(1)给出了不同纬度雷电流幅值修订计算式, 将研究区域内的已添加海拔信息的雷电流幅值统一修订为 30°N 的雷电流幅值, 即

$$I_{30} = I \times 10^{-10.67 \times 10^{-3} (30 - \lambda)} \quad (1)$$

式中: I_{30} 为修订到 30°N 后的雷电流幅值, kA; I 为修订前的雷电流幅值, kA; λ 为地闪点的纬度。

按照间隔 100 m 分别统计研究区域内 <100 m、[100 m, 200 m)、[200 m, 300 m)、[300 m, 400 m)、…、[2 900 m, 3 000 m)、 $\geq 3 000$ m 不同海拔高度区间的年、月的正地闪、负地闪、总地闪频次、雷电流幅

值和波前陡度。不同海拔的年、月平均雷电流幅值、波前陡度, 分别由相应期间的雷电流幅值绝对值、波前陡度总和与其对应的闪电频次总和之比求得。为提高地闪资料的定位精度和质量, 统计资料时, 去掉 2 站监测定位数据, 即只统计 ≥ 3 站的监测定位数据, 并剔除地闪雷电流幅值绝对值 ≤ 5 kA 和 ≥ 500 kA, 同时剔除雷电流波前陡度绝对值等于 0 和 ≥ 500 kA/ μs 的数据, 即雷电流幅值统计的上限为其绝对值小于 500 kA, 下限为绝对值大于 5 kA, 雷电流波前陡度统计上限为绝对值小于 500 kA/ μs , 下限为大于 0 kA/ μs 。根据文献^[35]提出的地闪密度可直接用 LLS 测量的落雷频次除受雷面积得到。本文结合研究区域的高程栅格数据, 计算得出不同高程区间内的正、负地闪和总地闪的单位面积的频次。统计结果表明, 在研究区域内海拔 $\geq 2 800$ m 各高度段的地闪频次较少, 不能真实代表统计规律, 因此, 本文研究的海拔高度区间为 100~2 700 m, 共 27 个海拔高度区间。

2 结果与分析

2.1 海拔对地闪频次和极性分布影响

2.1.1 海拔对地闪频次影响

统计显示, 2007—2017 年研究区域内的总地闪(正地闪+负地闪)频次为 904 031 次, 其中正地闪为 35 895 次, 占总地闪频次的 3.97%, 负地闪占总地闪频次的 96.03%。统计 2007—2017 年不同海拔范围内的正地闪、负地闪和总地闪年平均单位面积的闪电频次, 结果如图 2 所示。从图 2(a)可以看出, 海拔高度在 100~300 m 时, 负地闪频次呈弱的增加趋势, 频次由 1.77 次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$)增加至 1.81 次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$)。海拔高度由 300 m 上升到 2 700 m 时, 负地闪频次由 1.81 次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$)减少至 0.55 次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$)。负地闪频次随海拔高度变化趋势与文献^[24]研究结论基本一致。

由于负地闪占总地闪频次的 96% 以上, 因此, 总地闪频次随海拔高度变化与负地闪变化趋势基本相同。海拔高度为 100~300 m 时, 总地闪频次由 1.84 次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$)增加至 1.88 次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$)。海拔高度由 300 m 上升到 2 700 m 时, 总地闪频次由 1.88 次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$)减少至 0.63 次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$)。由此可见, 低海拔地区的负地闪和总地闪频次明显比高海拔地区高, 海拔 2 700 m 的地闪频次约是 300 m 处的 1/3, 与文献^[24]得出的结论一致。

经拟合, 负地闪和总地闪频次随高度变化均呈线性关系, 其表达式分别为:

$$D_n = -0.000\ 48h + 1.826\ 23 \quad (2)$$

$$D_t = -0.004\ 7h + 1.880\ 57 \quad (3)$$

式中: D_n 和 D_t 分别表示负地闪以及总地闪频次, 次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$); h 为海拔高度, m。统计分析表明, 负地闪和总地闪频次随海拔高度的增加呈明显线性减少趋势, 其相关系数分别为 0.974 2 和 0.971 2, 信度达到 0.001 极显著相关水平^[36]。

造成上述结果的原因可能与大气中的气溶胶含量有关。观测表明, 气溶胶主要集中在 5 km 高度以下的对流层中, 特别集中在 2~3 km。气溶胶浓度从地面随海拔高度呈指数减少^[37]。大气中气溶胶浓度的升高有助于云凝结核数量的增多, 最终将产生更多的雷电^[1]。因此, 负地闪和总地闪频次随高度的增加而明显减少。

从图 2(b)可以看出, 正地闪频次随海拔高度变化大致呈“V 字形”。即海拔在 100~800 m 时, 正地闪频次随海拔高度增加呈明显减少趋势, 在 800~2 700 m 时, 正地闪频次随海拔高度增加而呈波动式增加趋势。海拔在 800 m 时, 正地闪频次相对最小, 为 0.47 次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$)。造成上述结果的原因可能与地理气候和雷暴电荷分布有关, 由于正电荷大多数分布在雷暴云的上部^[37], 因此, 在海拔 800 m 以上地区, 随着海拔的增高, 雷暴云上部的正电荷区离地面的距离相对减小, 有利于正电荷对地放电, 正地闪比例相对增加。海拔在 800 m 以下地区, 正地闪频次随海拔高度变化的原因有待进一步研究。

2.1.2 海拔对正地闪比例影响

图 3 给出了 2007—2017 年正地闪占总地闪比例与海拔高度关系图。如图 3 所示, 海拔在 800 m 时, 正地闪比例最小为 3.43%。海拔在 800 m 以下, 正地闪比例随海拔高度增加呈减少趋势; 海拔在 800~2 700 m 时, 正地闪比例随海拔高度增加而明显增加, 正地闪比例从 3.43% 增加到 12.6%, 约是 800 m 处的 3.7 倍。经多项式拟合得出正地闪比例与海拔高度的关系式为

$$P = 2 \times 10^{-6} h^2 - 2.98 \times 10^{-3} h + 4.384 \quad (4)$$

式中, P 为正地闪比例, %。正地闪比例与海拔高度的相关系数为 0.983 6, 达到 0.001 的显著相关水平。正地闪比例随海拔高度变化趋势与文献^[38]研究结果一致。在海拔 800 m 以上地区, 随着海拔的增高, 雷暴云上部的正电荷区离地面的距离相对减

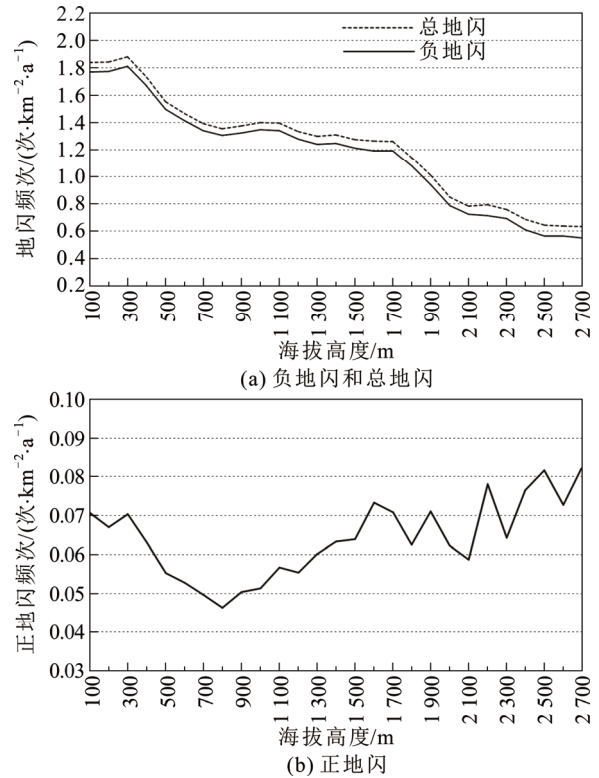


图 2 2007—2017 年地闪频次随海拔高度变化
Fig.2 Frequency of CG lightning varies with altitude from 2007 to 2017

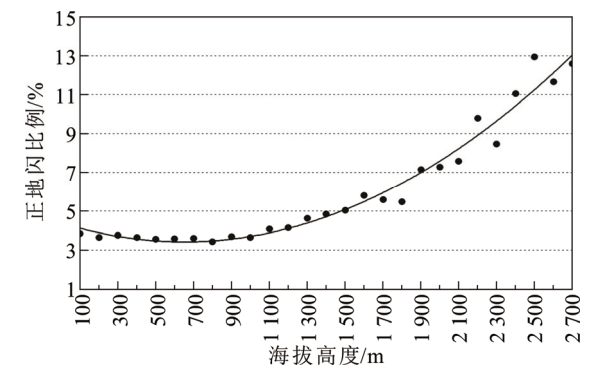


图 3 2007—2017 年正地闪比例随海拔高度变化
Fig.3 Proportion of positive CG lightning varies with altitude from 2007 to 2017

小, 有利于正电荷对地放电, 正地闪比例相对增加。

2.2 海拔对雷电流幅值分布影响

2.2.1 海拔对中值雷电流幅值影响

统计 2007—2017 年不同海拔区间的正地闪、负地闪和总地闪的中值雷电流幅值变化特征, 结果如图 4 所示。从图 4(a)可见, 负地闪和总地闪中值雷电流幅值随海拔高度变化大致呈“V 字形”。海拔从 100 m 增加至 1 500 m 时, 负地闪和总地闪中值

雷电流幅值呈下降趋势, 分别从 34.77 kA 和 34.96 kA, 减少至 31.45 kA 和 31.98 kA。在 1 500~2 700 m 时, 负地闪和总地闪中值雷电流幅值呈波动式增加趋势, 负地闪从 1 500 m 的 31.45 kA 增加至 34.42 kA, 总地闪从 31.98 kA 增加至 35.45 kA。说明海拔在 100~1 500 m 时, 负地闪和总地闪中值雷电流幅值呈下降趋势, 海拔在 1 500~2 700 m, 负地闪和总地闪中值雷电流幅值随海拔高度增加而明显增加。图 4(a)显示, 负地闪和总地闪中值雷电流幅值随海拔高度变化的趋势基本一致, 其原因是负地闪占总地闪 96%以上, 正地闪平均雷电流幅值比负地闪大 12.7 kA^[39], 致使总地闪中值雷电流幅值变化趋势与负地闪一致, 且比负地闪强度大。从图 4(b)可知, 随海拔高度增加, 正地闪中值雷电流幅值呈弱的上升趋势, 这与文献[25-26]研究结论基本一致。

造成上述现象的主要原因是: 在海拔 1 500 m 以下, 是平原与山区的过渡地段, 而山区相对于平原地区海拔高度较高且土壤电阻率较大, 雷暴云底离地高度比平原地区要低, 在云中大量电荷形成之前就已达到空气的临界击穿强度, 且在土壤电阻率较大地区, 发生较大雷电流幅值的概率较小, 由于大多雷雨云的下部带负电荷^[11,37,40], 因此, 海拔 1 500 m 以下, 负地闪和总地闪中值雷电流幅值随高度的增加而减少, 说明海拔 1 500 m 以下, 雷暴云底离地高度和土壤电阻对负地闪雷电流幅值的影响占主导地位。当海拔在 1 500 m 以上时, 随着海拔高度的增加, 受城市工业、人类活动和汽车等排放的烟尘减少, 空气中带电离子相对减少, 使得高海拔地区雷雨云对地击穿的雷电流幅值强度相对增大^[38]。对于正地闪来说, 由于海拔高度变化相对于云砧下部正电荷离地面的高度差异相对较小, 正地闪强度受到海拔高度影响较小, 主要受空气中带电离子相对减少的影响。因此, 正地闪、负地闪和总地闪中值雷电流幅值随海拔高度的增加而增加。也就是说, 空气中带电离子多少可能是影响正地闪和海拔 1 500 m 以上的负地闪电的雷电流幅值的主要因素。

2.2.2 海拔对不同雷电流幅值比例影响

根据建筑物防雷设计规范有关规定, 第 3 类建筑物防雷设计直击雷防御的最小雷电流幅值约为 16 kA, 最大值约为 100 kA。因此, 本文采用 ≤ 20 kA 代表小雷电流幅值, >100 kA 代表大雷电流幅值。当雷电流幅值小于最小值时, 雷电有可能穿过接闪

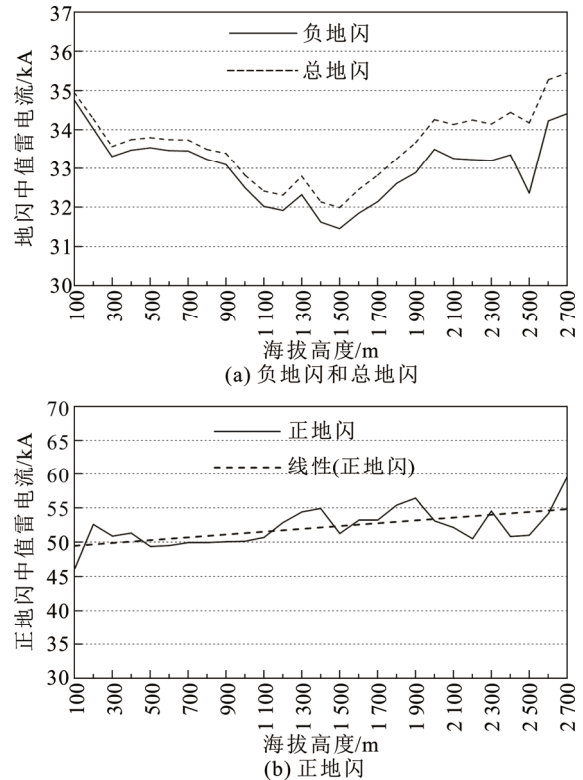


图 4 中值雷电流幅值随海拔高度变化

Fig.4 Amplitude of lightning median current varies with altitude

器击于被保护的物体而发生绕击; 当雷电流幅值大于最大值时, 雷击电流流过防雷装置时, 对被保护的物体或有联系的金属物发生反击^[41]。因此, 研究小雷电流幅值和大电流幅值随海拔高度变化规律, 对雷电防护工程设计具有一定参考价值。

1) 海拔对小雷电流幅值比例分布影响

图 5 给出了 2007—2017 年负地闪、总地闪和正地闪小雷电流幅值(≤ 20 kA)比例随海拔高度变化曲线。从图 5(a)可见, 海拔在 200~1 500 m, 负地闪和总地闪小雷电流幅值百分比随海拔高度增加而明显增加, 海拔在 1 500~2 500 m, 随海拔高度增加呈波浪式减少。统计显示, 海拔为 200 m 时, 负地闪和总地闪雷电流幅值 ≤ 20 kA 的比例均为 5.2%, 当海拔升高至 1 500 m 时, 其比例分别增加到 13.6% 和 13.1%, 即海拔 1 500 m 处的负地闪和总地闪的小雷电流幅值的比例是海拔 200 m 处的 2.5 倍以上。海拔在 1 200~1 700 m 的高山^[28], 负地闪和总地闪的小雷电流幅值比例较高, 为 11% 左右, 是 200 m 处的 2 倍以上。由此可见, 海拔在 1 200~1 700 m 的高山地区, 小雷电流绕击率较高。

图 5(b)显示, 正地闪小雷电流幅值比例随海拔

高度增加而减少。当海拔由 100 m 升高到 500 m 时, 小雷电流幅值比例随海拔高度增加急剧减少, 从 14.2% 减少到 4.0%, 海拔在 500~2 700 m 时, 小雷电流幅值比例随高度增加而呈波浪式减少, 海拔在 1 500 m 以上的高山地区, 小雷电流幅值比例下降到 3.5% 左右, 海拔在 2 500 m 及以上, 小雷电流幅值比例减少至 0。由此说明, 海拔在 1 500 m 以上的高山地区, 正地闪 ≤ 20 kA 的小雷电流幅值发生概率相对较小, 产生的绕击概率也相对较小。

2) 海拔对大雷电流幅值比例分布影响

图 6 给出了负地闪和总地闪大雷电流幅值 (>100 kA) 比例随海拔高度分布曲线。由图 6 可见, 海拔在 100~500 m 时, 负地闪和总地闪大雷电流幅值比例随海拔增加呈下降趋势, 海拔在 500~2 700 m, 负地闪和总地闪大雷电流幅值比例随海拔高度增加而呈波动式增加。其主要原因是随海拔高度增加, 空气中带电离子相对较少, 雷雨云对地击穿的雷电流幅值强度相对增大, 因此, 负地闪和总地闪大雷电流幅值比例随海拔高度的增加而呈波动式增加。统计表明, 海拔 800 m 以下低山丘陵及平原地区的负地闪和总地闪大雷电流幅值平均比例分别为 1.6% 和 2.0%, 海拔在 1 500 m 以上的高山地区, 其负地闪和总地闪大雷电流幅值平均比例分别为 2.0% 和 2.8%。可见, 海拔 1 500 m 以上的高山地区的大雷电流幅值比例大于低山丘陵和平原地区^[28]。统计表明, 正地闪大雷电流幅值比例随海拔高度变化规律不明显, 没有明显的增加和减少趋势。上述分析表明, 海拔 1 500 m 以上的高山地区, 由大雷电流幅值雷引起的反击概率大于低山丘陵和平原。

2.3 海拔对雷电流陡度分布的影响

2.3.1 海拔对雷电流陡度影响

雷电所造成的危害程度主要受雷电流幅值及其波前陡度的影响。在雷电流幅值相同的情况下, 波前陡度越大, 其上升时间越短, 从而引起高电势差和强电磁感应所造成的危害也越大。因此, 在雷电防护工作中, 研究雷电流波前陡度分布特征具有重要意义^[26,42]。统计 2007—2017 年正地闪、负地闪和总地闪平均雷电流波前陡度, 分析其随海拔高度变化特征(图 7 所示)。由图 7 可以看出, 正地闪、负地闪和总地闪平均雷电流波前陡度随海拔高度增加呈明显的下降趋势, 经拟合其表达式分别为:

$$Y_p = -2.774 4 \ln h + 28.415 1 \quad (5)$$

$$Y_n = -2.243 3 \ln h + 23.722 8 \quad (6)$$

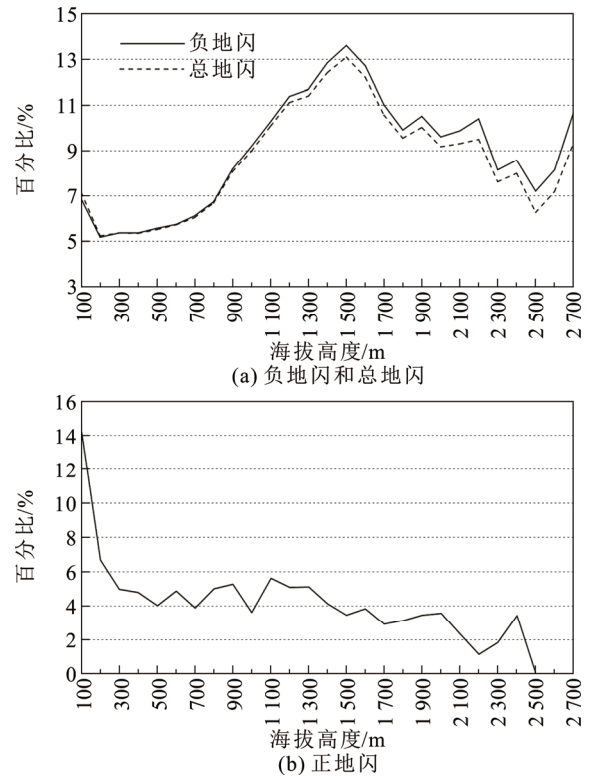


图 5 2007—2017 年小雷电流幅值 (≤ 20 kA) 比例随海拔高度变化

Fig.5 Proportion of small lightning current amplitude (≤ 20 kA) varies with altitude from 2007 to 2017

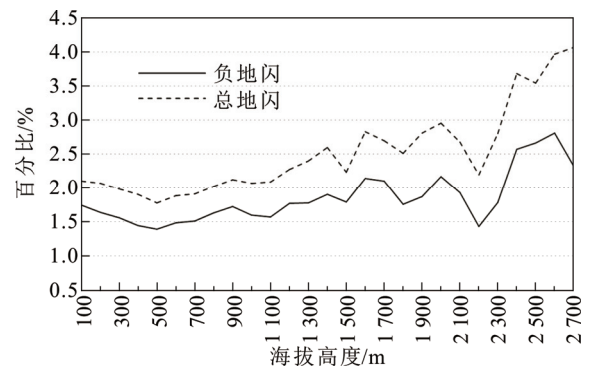


图 6 2007—2017 年负地闪和总地闪大雷电流幅值 (>100 kA) 比例随海拔高度变化

Fig.6 Proportion of large lightning current amplitude (> 100 kA) varies with altitude from 2007 to 2017

$$Y_t = -2.248 0 \ln h + 23.806 2 \quad (7)$$

式中: Y_p 、 Y_n 和 Y_t 分别代表正地闪、负地闪和总地闪平均雷电流波前陡度, kA/ μ s。统计表明, 正地闪、负地闪和总地闪平均雷电流波前陡度随高度变化的相关系数分别为 0.980 3、0.993 4 和 0.993 5。由此说明, 正地闪、负地闪和总地闪平均雷电流波前陡

度随高度增加呈自然对数减少, 并达到 0.001 显著相关水平。

图 7 中的负地闪和总地闪平均雷电流波前陡度随海拔高度变化几乎相同, 正地闪平均雷电流波前陡度在各海拔高度上均大于负地闪和总地闪的平均波前陡度。统计表明, 2007—2017 年正地闪、负地闪和总地闪平均雷电流波前陡度分别为 $11.5 \text{ kA}/\mu\text{s}$ 、 $10.3 \text{ kA}/\mu\text{s}$ 和 $10.4 \text{ kA}/\mu\text{s}$, 正地闪比负地闪和总地闪高 $1 \text{ kA}/\mu\text{s}$ 以上。低海拔地区的正地闪、负地闪和总地闪平均雷电流波前陡度明显高于高海拔地区, 当海拔高度从 100 m 升高至 2700 m 时, 正地闪平均雷电流波前陡度从 $14 \text{ kA}/\mu\text{s}$ 左右降低至 $6.5 \text{ kA}/\mu\text{s}$, 负地闪和总地闪从 $12.7 \text{ kA}/\mu\text{s}$ 降低至 $6.2 \text{ kA}/\mu\text{s}$ 左右, 也就是说, 海拔高度为 100 m 的地区, 正地闪、负地闪和总地闪平均雷电流波前陡度是海拔 2700 m 处的 2 倍以上。由此可见, 低海拔的平原地区因雷电流波前陡度较大, 从而引起的高电势差和强电磁感应的危害大于高海拔的山区。

2.3.2 海拔对大陡度雷电流分布影响

由于正地闪、负地闪和总地闪平均雷电流波前陡度随海拔高度增加而减少, 因此, 相对于低海拔地区, 高海拔地区出现大的雷电流波前陡度概率相对较小。统计不同雷电流波前陡度比例随海拔高度分布表明, 海拔高度 $\leq 1000 \text{ m}$ 地区, 负地闪和总地闪平均雷电流波前陡度 $>20 \text{ kA}/\mu\text{s}$ 的比例均 $\leq 1\%$, 在海拔高度 $>2500 \text{ m}$ 地区, 其比例均 $<0.3\%$; 在海拔高度 $>1300 \text{ m}$ 地区, 正地闪平均雷电流波前陡度 $>20 \text{ kA}/\mu\text{s}$ 的比例 $<2\%$ 。为此, 本文将平均雷电流波前陡度 $>20 \text{ kA}/\mu\text{s}$ 代表大陡度雷电流, 并统计正地闪、负地闪和总地闪平均雷电流波前陡度 $>20 \text{ kA}/\mu\text{s}$ (大陡度雷电流) 的比例随海拔高度变化(见图 8)。由图 8 可看出, 正地闪、负地闪和总地闪平均大陡度雷电流的比例随海拔高度增加而减少, 其中海拔 $<700 \text{ m}$ 的低山丘陵或平原地区, 正地闪、负地闪和总地闪大陡度雷电流的比例随海拔高度增加而快速减少; 负地闪和总地闪大陡度雷电流比例随海拔高度变化趋势基本相同, 在海拔 1500 m 以下, 正地闪大陡度雷电流比例明显大于负地闪和总地闪。统计表明, 海拔在 $100\sim 1500 \text{ m}$, 正地闪大陡度雷电流比例平均为 11.8% , 负地闪和总地闪分别为 4.2% 和 4.5% , 正地闪大陡度雷电流比例是负地闪和总地闪的 2.6 倍以上; 海拔在 $1500\sim 2700 \text{ m}$, 正地闪、负地闪和总地闪大陡度雷电流比例平均 $<1\%$ 。上述

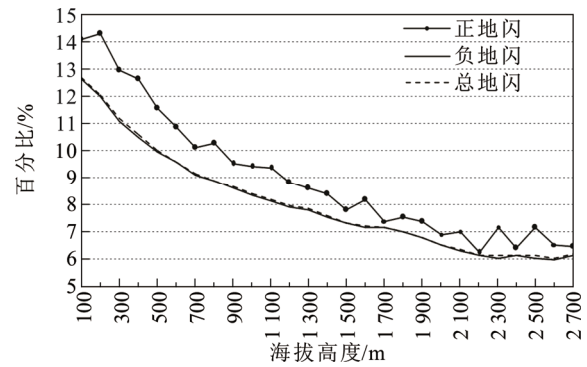


图 7 2007—2017 年正、负和总地闪平均雷电流波前陡度随海拔高度变化

Fig.7 Average gradient of wave front for positive CG lightning, negative CG lightning and total CG lightning varies with altitude from 2007 to 2017

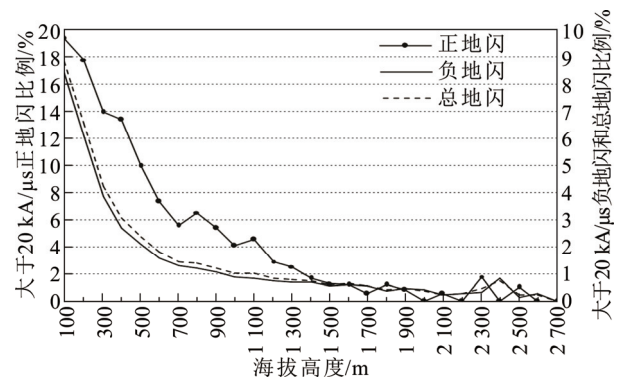


图 8 2007—2017 年正、负和总地闪平均雷电流波前陡度 $>20 \text{ kA}/\mu\text{s}$ 的比例随海拔高度变化

Fig.8 Proportion of the average gradient of wave front for positive CG lightning, negative CG lightning and total CG lightning greater than $20 \text{ kA}/\mu\text{s}$ varies with altitude from 2007 to 2017

分析表明, 海拔 1500 m 以下, 正地闪、负地闪和总地闪大陡度雷电流比例明显高于 1500 m 以上地区。因此, 在海拔 1500 m 以下地区, 大陡度雷电流而引起的高电势差和强电磁感应所造成的危害大于海拔 1500 m 以上地区, 尤其 700 m 以下的低山丘陵或平原地区, 大陡度雷电流引起的高电势差和强电磁感应的危害性大于高山地区。

3 结论

根据湖北省 2007—2017 年 LLS 监测得到的相关资料, 经统计分析得出如下结论:

1) 负地闪和总地闪频次随海拔高度增加呈线

性减少, 并达到 0.001 显著相关水平, 低海拔地区的负地闪和总地闪频次明显比高海拔地区高, 海拔 2 700 m 的地闪频次约是 300 m 处的 1/3。正地闪频次随海拔高度变化大致呈“V 字形”, 海拔在 800 m 时, 正地闪频次相对最小。

2) 海拔在 800 m 以下, 正地闪比例随海拔高度增加呈减少趋势, 海拔在 800 m 时, 正地闪比例最小, 海拔在 800~2 700 m 时, 正地闪比例随海拔高度增加明显增加, 正地闪比例从 3.43% 增加到 12.6%, 约为 800 m 处的 3.7 倍。

3) 负地闪和总地闪中值雷电流幅值随着海拔高度变化大致呈“V 字形”。海拔在 1 500 m 时, 负地闪和总地闪中值雷电流幅值相对最小, 海拔在 100~1 500 m 时, 负地闪和总地闪中值雷电流幅值与海拔高度呈明显线性减少趋势, 而海拔在 1 500~2 700 m, 呈明显线性增加趋势。正地闪中值雷电流幅值与海拔高度呈线性增加关系。

4) 海拔在 1 200~1 700 m 的高山, 负地闪和总地闪 ≤ 20 kA 的小雷电流幅值的比例较高, 是海拔 200 m 处的 2 倍以上; 海拔在 1 500 m 以上的高山地区, 正地闪的小雷电流幅值发生概率相对较小, 产生的绕击概率也相对较小。海拔 1 500 m 以上的高山地区, 大于 100 kA 大雷电流幅值平均比例大于低山丘陵和平原地区。因此, 在 1 200~1 700 m 的高山地区, 小雷电流绕击率较高, 海拔 1 500 m 以上的高山地区的大雷电流幅值所引起的反击概率大于低山丘陵和平原地区,

5) 正地闪、负地闪和总地闪平均雷电流波前陡度随高度增加呈自然对数减少, 平均大陡度雷电流的比例随海拔高度增加而减少。因此, 低山丘陵和平原地区的雷电电磁感应危害性大于中高山区。

6) 由于 LLS 监测得到的雷电流产生的电场实际上包含了地面、树木、山体和建筑物的反射波, 因此, 统计分析的雷电流幅值和波前陡度可能与实际值有一定误差, 但得出的雷电流幅值和陡度的趋势还是可信的。因雷电的发生发展与天气系统、地理气候、地形条件等有密切关系, 雷击大地的地闪密度、雷电流幅值强度和波前陡度等雷电参数与雷雨云电荷分布、地理纬度、海拔高度、空气密度和空气湿度有关, 且雷电对地放电具有随机性和复杂性。因此, 雷电相关参数尤其是雷电流波前陡度随海拔高度变化的物理机制还有待进一步观测和试验研究。

参考文献 References

- [1] 鄒秀书, 张其林, 袁 铁, 等. 雷电物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 1-229.
QIE Xiushu, ZHANG Qilin, YUAN Tie, et al. Lightning physics[M]. Beijing, China: Science Press, 2013: 1-229.
- [2] 付茂金, 阮小飞, 王州龙, 等. 高速铁路通信信号综合防雷技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 1-8.
FU Maojin, RUAN Xiaofei, WANG Zhoulong, et al. Integrated lightning protection technology for high speed railway communication signal[M]. Beijing, China: Science Press, 2014: 1-8.
- [3] 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.
SUN Ping. Statistical analysis on lightning current amplitude measurement on 220 kV Xin-Hang line[J]. Electric Power, 2000, 33(3): 72-75.
- [4] 何金良, 曾 嵘. 配电线路雷电防护[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 1-26.
HE Jinliang, ZENG Rong. Lightning protection for distribution lines[M]. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2013: 1-26.
- [5] 谷山强, 王 剑, 冯万兴, 等. 电网雷电监测数据统计与挖掘分析[J]. 高电压技术, 2016, 42(11): 3383-3391.
GU Shanqiang, WANG Jian, FENG Wanxing, et al. Statistical and mining analysis of lightning detection data in power grid[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11): 3383-3391.
- [6] 张义军, 周秀骥. 雷电研究的回顾和进展[J]. 应用气象学报, 2006, 17(6): 829-834.
ZHANG Yijun, ZHOU Xiuji. Review and progress of lightning research[J]. Journal of Applied Meteorology Science, 2006, 17(6): 829-834.
- [7] 秦建峰, 刘梦雨, 吴 昊. ADTD 雷电探测系统典型故障分析[J]. 气象科技, 2012, 40(2): 180-184.
QIN Jianfeng, LIU Mengyu, WU Hao. Typical fault analysis of ADTD lightning detection system[J]. Meteorological Science and Technology, 2012, 40(2): 180-184.
- [8] 陈家宏, 赵 淳, 谷山强, 等. 我国电网雷电监测与防护技术现状及发展趋势[J]. 高电压技术, 2016, 42(11): 3361-3375.
CHEN Jiahong, ZHAO Chun, GU Shanqiang, et al. Present status and development trend of lightning detection and protection technology of power grid in China[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11): 3361-3375.
- [9] 曾楚英, 谷定燮, 陈志述, 等. 雷电流参数与海拔高度、地理纬度关系的统计分析[J]. 高电压技术, 1991, 17(2): 70-76.
ZENG Chuying, GU Dingxie, CHEN Zhishu, et al. A statistical analysis between the parameters of lightning current and altitude latitude[J]. High Voltage Engineering, 1991, 17(2): 70-76.
- [10] 童杭伟, 范国武, 王海涛. 浙江省雷电活动的特点及其与地形和气候的关系[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 99-100.
TONG Hangwei, FAN Guowei, WANG Haitao. Lightning activity characteristics in Zhejiang and its relation with terrain and climate[J]. Power Systems Technology, 2008, 32(11): 99-100.
- [11] COLDE R H. 雷电(上卷)[M]. 周诗健, 孙景群, 译. 北京: 电力工业出版社, 1982: 235-250.
COLDE R H. Lightning(Volume 1)[M]. ZHOU Shijian, SUN Jingqun, translated. Beijing, China: Electric Power Industry Press, 1982: 235-250.
- [12] 刘 继. 电气装置的过电压保护[M]. 北京: 电力工业出版社,

- 1982: 19-35.
LIU Ji. Overvoltage protection in electrical device[M]. Beijing, China: Power Industry Press, 1982: 19-35.
- [13] UMAN M A. The electromagnetic radiation from a finite antenna[J]. American Journal of Physics, 1975, 43(1): 33-38.
- [14] KRIDER E P, NOGGLE R C, UMAN M A. A gated, wide band magnetic direction finder for lightning return strokes[J]. Journal of Applied Meteorology, 1976, 15(3): 301-306.
- [15] 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): 611-620.
ZHANG Yijun, MENG Qing, MA Ming, et al. Development of lightning detection technology with application of lightning data[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(5): 611-620.
- [16] 陶汉涛, 冯万兴, 谷山强, 等. 基于云计算的雷电监测预警与防护平台构建[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3784-3791.
TAO Hantao, FENG Wanxing, GU Shanqiang, et al. Construction of lightning monitoring, warning and protection platform based on cloud computing[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3784-3791.
- [17] RICHARD E O, HUFFINES G R. Cloud-to-ground lightning in the United States: NLDN results in the first decade, 1989—1998[J]. Monthly Weather Review, 2001, 129(5): 1179-1193.
- [18] MAZARAKIS N, KOTRON V, LAGOUVARDOS K, et al. Storms and lightning activity in Greece during the warm periods of 2003—2006[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008, 46(12): 3089-3098.
- [19] KULESHOV Y, MACKERRAS D, DARVENIZA M. Spatial distribution and frequency of lightning activity and lightning flash density maps for Australia[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2006, 111(D19): 19105-19119.
- [20] 王学良, 刘学春, 黄小彦, 等. 湖北地区云地闪电时空分布特征分析[J]. 气象, 2010, 36(10): 91-96.
WANG Xueliang, LIU Xuechun, HUANG Xiaoyan, et al. Analysis of the spatial and temporal distribution characteristics of the cloud-ground lightning in Hubei area[J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(10): 91-96.
- [21] 王学良, 张科杰, 余田野, 等. 基于 LLS 的雷电流波头时间分布特征[J]. 气象科技, 2016, 44(2): 313-318.
WANG Xueliang, ZHANG Kejie, YU Tianye, et al. Temporal characteristics of lightning current wave-front time based on LLS[J]. Meteorological Science and Technology, 2016, 44(2): 313-318.
- [22] 王学良, 张科杰, 余田野, 等. 基于 LLS 的雷电流波头陡度时间和概率分布特征[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(2): 114-118.
WANG Xueliang, ZHANG Kejie, YU Tianye, et al. Temporal and probability distribution characteristics of wave front gradient for lightning current based on LLS[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2016, 35(2): 114-118.
- [23] 王学良, 张科杰, 余田野, 等. 雷电流幅值概率分布特征及累积概率分段修订[J]. 气象科技, 2016, 44(6): 1037-1042.
WANG Xueliang, ZHANG Kejie, YU Tianye, et al. Characteristics of probability distribution for lightning peak current and segment revision for cumulative probability[J]. Meteorological Science and Technology, 2016, 44(6): 1037-1042.
- [24] 李永福, 司马文霞, 陈林, 等. 基于雷电定位数据的雷电流参数随海拔变化规律[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1634-1641.
LI Yongfu, SIMA Wenxia, CHEN Lin, et al. Law between parameters of lightning current and elevation based on lightning detection data[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1634-1641.
- [25] 刘海兵, 张云峰, 李玉塔. 江西闪电特征海拔高度影响分析[J]. 气象科技, 2017, 45(2): 342-348.
LIU Haibing, ZHANG Yunfeng, LI Yuta. Influence analysis of different altitudes on lightning characteristics in Jiangxi province[J]. Meteorological Science and Technology, 2017, 45(2): 342-348.
- [26] 张金波, 彭晓宇, 王磊, 等. 复杂地形下架空线雷电感应过电压特性仿真研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3708-3714.
ZHANG Jinbo, PENG Xiaoyu, WANG Lei, et al. Simulation study of lightning induced voltages characteristics on overhead lines over complex mountainous terrain[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3708-3714.
- [27] 王学良, 张科杰, 张义军, 等. 雷电定位系统与人工观测雷暴日数统计比较[J]. 应用气象学报, 2014, 25(6): 741-750.
WANG Xueliang, ZHANG Kejie, ZHANG Yijun, et al. Comparison of the number of thunderstorm days from lightning location system and artificial observations[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2014, 25(6): 741-750.
- [28] 李娟文, 朱俊林, 梅惠. 湖北地理[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2015: 12-21.
LI Juanwen, ZHU Junlin, MEI Hui. Hubei geography[M]. Beijing, China: Beijing Normal University Press, 2015: 12-21.
- [29] 乔盛西. 湖北气候志[M]. 武汉: 湖北人民出版社, 1989: 23-129.
QIAO Shengxi. Climateography of Hubei province[M]. Wuhan, China: Hubei People's Press, 1989: 23-129.
- [30] 田芳, 肖稳安, 冯民学, 等. 闪电定位仪观测结果的修订分析[J]. 华东电力, 2008, 36(6): 38-42.
TIAN Fang, XIAO Wen'an, FENG Minxue, et al. Amendment and analysis of observation data for lightning positioning devices[J]. East China Electric Power, 2008, 36(6): 38-42.
- [31] 曾庆峰, 张其林, 赖鑫, 等. 深圳市闪电定位资料误差分析及其优化[J]. 气象科技, 2015, 43(3): 530-536.
ZENG Qingfeng, ZHANG Qilin, LAI Xin, et al. Error analysis and correction of lightning location data in Shenzhen[J]. Meteorological Science and Technology, 2015, 43(3): 530-536.
- [32] 中国科学院空间科学与应用研究中心. ADTD 雷电探测仪用户手册[R]. 北京: 中国科学院, 2004.
National Space Science Center. User manual of ADTD lightning detector[R]. Beijing, China: Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [33] 康晓伟, 冯钟葵. ASTER GDEM 数据介绍与程序读取[J]. 遥感应用, 2011(6): 69-72.
KANG Xiaowei, FENG Zhongkui. An introduction to ASTER GDEM and procedure reading[J]. Remote Sensing Information, 2011(6): 69-72.
- [34] 张朝忙, 刘庆生, 刘高焕, 等. SRTM 3 与 ASTER GDEM 数据处理与应用进展[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(5): 29-34.
ZHANG Chaomang, LIU Qingsheng, LIU Gaohuan, et al. Data processing and application progress of SRTM 3 and ASTER GDEM[J]. Geography and Geo-Information Science, 2012, 28(5): 29-34.
- [35] SUZUKI M, KATAGIRI N, ISHIKAWA K. Establishment of estimation lightning density method with lightning location system data[C]// IEEE Power Engineering Society-1999 Winter Meeting. New York, USA: IEEE, 1998: 1322-1326.
- [36] 丁士晟. 多元分析方法及其在应用[M]. 长春: 吉林人民出版社, 1981: 155-165.
DING Shisheng. Multivariate analysis method and its application[M]. Changchun, China: Jilin People's Publishing Group, 1981: 155-165.
- [37] 陈谓民. 雷电学原理[M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 2009: 97-100.

CHEN Weimin. Principles of lightning[M]. 2nd ed. Beijing, China: Meteorological Press, 2009: 97-100.

- [38] 李家启. 基于 LLS 的雷电流参数随海拔变化特征分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(7): 127-132.

LI Jiaqi. Characteristics analysis of lightning current parameters changing with elevation based on the lightning location system(LLS)[J]. Journal of Southwest University(Natural Science Edition), 2013, 35(7): 127-132.

- [39] 王学良, 张科杰, 余田野, 等. 湖北地区云地闪电频次及雷电流幅值时间分布特征[J]. 电磁避雷器, 2017(3): 1-9.

WANG Xueliang, ZHANG Kejie, YU Tianye, et al. The time distribution characteristics on frequency and peak current of cloud-to-ground lightning in Hubei province[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(3): 1-9.

- [40] 刘 刚, 唐 军, 孙雷雷, 等. 不同地形地貌的雷电流幅值概率分布对输电线路雷击跳闸的影响[J]. 高电压技术, 2013, 39(1): 17-23.

LIU Gang, TANG Jun, SUN Leilei, et al. Influence of the distribution of lightning current amplitude in different landforms on the transmission-line's tripping operation[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(1): 17-23.

- [41] 建筑物防雷设计规范: GB 50057—2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011: 80-161.

Code for design protection of structures against lightning: GB 50057—2010[S]. Beijing, China: China Planning Press, 2011: 80-161.

- [42] 王巨丰, 齐 冲, 车谄颖, 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): 106-110.

WANG Jufeng, QI Chong, CHE Yiyang, et al. Probability distribution on measuring parameters of the lightning supreme steepness and lightning peak current in the transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(3): 106-110.



WANG Xueliang

Professor

Corresponding author

王学良(通信作者)

1962—, 男, 教授级高工

主要从事雷电气候和雷电防护技术与方法研究

E-mail: wxlhbfl@163.com



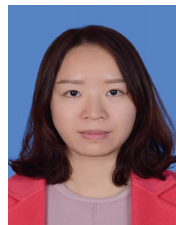
YU Tianye

余田野

1988—, 男, 硕士生

主要从事雷电气候和灾害研究

E-mail: tiny_lei@163.com



HE Shan

贺 珊

1987—, 女, 工程师

主要从事雷电气候和雷电灾害风险研究

E-mail: 1256650699@qq.com

收稿日期 2019-02-15 修回日期 2019-12-30 编辑 卫李静