暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

基于LLS监测数据的山区微地形落雷分布差异及影响因素分析

余田野 张科杰 贺姗

Distribution differences of lightning strikes and influencing factors in mountainous microtopography based on the monitoring data of LLS

YU Tianye，ZHANG Kejie，HE Shan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2025-119

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

基于GIS的安徽省雷电致灾危险性评估与区划

Assessment and zoning of lightning disaster-causing hazards in Anhui Province based on GIS

暴雨灾害. 2024, 43(6): 733-740 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-186

湖北省两套闪电定位网地闪数据的对比分析

Comparative analysis of cloud-ground flash data of two lightning location networks in Hubei Province

暴雨灾害. 2021, 40(6): 646-654 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.06.009

基于不同测站布局的闪电定位误差分析

Analysis of lightning localization errors based on different station layouts

暴雨灾害. 2024, 43(6): 741-748 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-216

斜拉索桥梁雷电暂态分布特性研究

Research on lightning transient distribution characteristics of cable-stayed bridges

暴雨灾害. 2023, 42(6): 731-738 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-148

基于改进层次分析法的湖北省雷电灾害风险区划

Risk zoning of lightning disaster in Hubei Province based on improved analytic hierarchy process

暴雨灾害. 2023, 42(1): 88-96 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-185

京津城际铁路沿线雷电活动特征及危险性评估

Assessment of dangerousness and characteristics on lightning along the Beijing-Tianjin intercity railway

暴雨灾害. 2025, 44(3): 332-339 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-016

关注微信公众号，获得更多资讯信息

余田野,张科杰,贺姗.2026.基于 LLS 监测数据的山区微地形落雷分布差异及影响因素分析[J].暴雨灾害,45(1):121−129. YU Tianye, ZHANG Kejie, HE Shan. 2026. Distribution differences of lightning strikes and influencing factors in mountainous microtopography based on the monitoring data of LLS [J]. Torrential Rain and Disasters,45(1):121−129 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025−119

基于 LLS 监测数据的山区微地形落雷分布差异及影响因素分析

余田野, 张科杰, 贺姗
(湖北省防雷中心, 武汉 430074)

摘　要: 为精细化研究山区不同位置的落雷分布差异, 首先提出了落雷系数和落雷密度系数的概念, 用其表征不同山区地形落雷密集程度 (频次和密度), 利用闪电击距理论, 推导了山顶、山腰和山谷 3 种微地形的落雷系数和落雷密度系数计算公式; 然后分析地形高度、山体坡度 2 个地理参数以及电流强度对山区微地形落雷分布的影响。最后基于近 10 a (2015—2024 年) 湖北大洪山地区极低频/低频 (Very Low Frequency /Low Frequency, VLF/LF) 雷电定位系统 (Lighting Location System, LLS) 闪电监测数据对公式进行了实例验证。结果表明: 山顶对闪电具有吸引作用, 导致其落雷系数、落雷密度系数均为最大, 山谷对闪电具有屏蔽作用, 其落雷系数、落雷密度系数最小, 山腰落雷系数、落雷密度系数介于两者之间; 地形高度越大, 不同微地形的落雷系数、落雷密度系数差异越小, 并逐渐趋于稳定; 随着山体坡度的增加, 不同微地形的落雷系数差异越大, 而落雷密度系数呈减小趋势; 电流强度越大, 不同微地形落雷系数、落雷密度系数差异越大。实例验证显示, 试验区山区微地形的落雷分布特征与上述结果吻合。本研究结果可为山区精细化雷电防护工程设计和雷电灾害风险评估等防雷提供参考。

关键词: 雷电定位系统; 山区微地形; 落雷系数; 落雷密度系数; 雷电密度
中图法分类号: P427.3　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2025−119

Distribution differences of lightning strikes and influencing factors in mountainous microtopography based on the monitoring data of LLS

YU Tianye, ZHANG Kejie, HE Shan

(*Lightning Protection Centre of Hubei Province*, *Wuhan* 430074)

Abstract: To examine lightning strike distribution differences across different mountainous terrains, this study proposes two parameters to characterize the frequency of lightning strikes (frequency and density) over various topography: the lightning strike coefficient and lightning density coefficient. Using the striking distance theory, the two formulas were derived for three microtopography types (mountain peak, mountainside and valley). The influence of terrain height, slope, and lightning current intensity on lightning distribution was systematically examined. Finally, the model was validated by using the very low frequency/low frequency (VLF/LF) lightning monitoring data from the Dahong Mountain area over the past decade (2015-2024). The results indicate that mountain peaks attract lightning discharges, exhibiting the highest lightning strike coefficient and lightning density coefficient, while valleys have a shielding effect, showing the lowest values, and mountainside lies intermediately. As terrain elevation increases, the differences in lightning strike coefficient and lightning density coefficient become smaller and gradually stabilizes. With increasing mountain slope, lightning strike coefficient has significant differences in different terrains, while the lightning density coefficient shows a decreasing trend. Higher lightning current intensities amplify the disparities in both lightning strike coefficient and lightning density coefficient. Empirical tests confirmed agreement between theoretical models and actual lightning distribution. These findings help to refine lightning protection strategies in terms of lightning protection engineering design and disaster risk assessment in mountainous areas.

Key words: LLS; mountainous microtopography; lightning strike coefficient; lightning density coefficient; lightning density

收稿日期: 2025−06−30; **定稿日期**: 2025−09−07
资助项目: 湖北省自然科学基金联合基金项目 (2023AFD106, 2022CFD123); 湖北省气象局科技发展基金项目 (2021Q10)
第一作者: 余田野, 主要从事雷电气候与灾害防御研究。E-mail: tiny_lei@163.com
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

引　言

雷电 (也称闪电) 是自然大气中发生的一种瞬态大电流、高电压放电并伴随有雷声的现象, 会对电力、通信、交通运输等行业造成不同程度的影响 (郄秀书等, 2013; 康龙等, 2022)。为此, 长期以来国内外学者对雷电现象开展了大量的观测和研究工作 (郑栋等, 2021; 曾颖婷等, 2024)。早期, 雷电活动规律的研究主要基于雷暴人工观测资料, 近年来, 随着闪电探测技术和手段的进步, 雷电定位系统 (Lightning Location System, LLS) 可实时监测闪电发生的时间、位置、电流强度和极性等参数, 为深入研究区域雷电的物理环境提供了可能。地闪频次、地闪密度等参数可用于雷电易发程度的分析、比较和预测, 也是雷电物理研究、雷电防护工程设计、雷电灾害风险评估中重要的基础数据 (王学良等, 2020; 鞠晓雨等, 2022)。我国自然环境复杂多样, 其中山地面积占陆地面积的 1/3 以上, 而山区雷电防护工作一直是电网规划、建设及维护中关注的重点。为此, 研究山区地形的落雷分布特征, 对深入了解闪电物理特性, 提升山区的雷电灾害防御能力具有重要意义。

在宏观大地形落雷分布的研究方面, 国外学者采用美国 1989—1999 年的闪电监测资料, 分析研究了闪电频次、闪电密度等参数的分布特征 (Richaro and Huffines, 2001); 有研究根据哥伦比亚多年闪电数据, 分析了电流强度的变化规律, 并通过网格法统计了地面落雷密度 (Herrera et al., 2018)。国内学者赵生昊等 (2020) 利用重庆市 2007—2016 年闪电监测及数字高程资料, 分析了闪电密度、强度与地形因素间的关系, 表明海拔高度、坡度对闪电密度影响较大; 余田野等 (2022) 采用网格法统计分析了湖北省闪电分布特征, 指出湖北省落雷分布具有明显的地域性, 存在两个地闪密度高值区。在微观地形落雷分布的研究方面, 司马文霞等 (2014) 通过采用 MATLAB 计算杆塔周围微观地形的雷电暴露面积, 对比了不同地形下输电线路的闪电绕击跳闸情况; 胡豪和陶鑫 (2020) 分析某条 500 kV 输电线路的雷电绕击造成的跳闸情况指出, 山体形状会显著影响山地地形的落雷密度分布。

上述研究中, 宏观大地形的落雷分布无法真实反映山顶、山谷等微地形之间的差异, 而针对微观地形落雷分布特征的研究较少, 仅在输电线路雷电绕击方面有所研究, 且未能考虑地形表面积的增益效果对落雷密度的影响等因素。为此, 本文提出了落雷系数和落雷密度系数两个参数, 推导了山顶、山腰和山谷 3 种微地形的落雷系数和落雷密度系数计算公式, 在此基础上分析了山区微地形落雷分布的影响因素及其差异, 最后利用近 10 a 的极低频/低频 (Very Low Frequency/Low Frequency, VLF/LF) LLS 监测数据对湖北大洪山地区进行了实例验证, 以期为加强山地雷电灾害防御工作提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 数据说明

本文使用的数据包括闪电监测数据和海拔高程数据, 具体如下。

(1) 闪电监测数据: 该数据来源于湖北省气象信息与技术保障中心 VLF/LF 雷电定位系统的地闪监测数据, 时间为 2015—2024 年, 数据参数包括闪电发生的时间、位置、电流强度、极性、高度、类型等。该系统水平定位精度优于 300 m、垂直定位精度优于 500 m, 时间精度优于 10^{-7} s, 组网后探测效率在 90%以上。为了提高数据质量, 本文剔除了电流强度绝对值小于 2 kA 和大于 300 kA 的数据。山区落雷密度是指地闪回击密度, 即单位时间内地闪回击频数与地形表面积之比。

(2) 海拔高程数据: 该数据来源于先进星载热发射以及反射辐射仪全球数字高程模型 (ASTER GDEM, DEM)。DEM 数据是美国航天局与日本经济产业省联合推出的全球地形电子数据, 其水平分辨率为 30 m, 垂直分辨率为 20 m (张朝忙等, 2012)。

1.2 研究方法

由于山地地形复杂多变, 如果对每一种地形情况都进行分析, 工作量非常巨大, 因此本文将山区微地形简化为基于闪电击距理论定义的山顶、山腰和山谷 3 种山体地形 (图 1), 其中山顶代表山区的最高部位, 包含山脊及其周边地形变化相对平缓的区域; 山腰代表山顶与山谷间的连接部分; 山谷是相邻山体之间低凹狭窄的位置。在山区微地形的模型建立及计算公式推导中, 山体两侧假设为相同的坡度 (胡豪和陶鑫, 2020)。本文在分析山区微地形的落雷分布差异时, 首先基于闪电击距理论, 推导山顶、山腰和山谷地形的落雷系数和落雷密度系数计算公式; 然后分析 3 种地形落雷分布的差异; 最后通过识别试验区的地形高程数据, 对不同地形的落雷参数分布特征进行实例检验。上述步骤中涉及的相关方法如下。

1.2.1 闪电击距的计算

在电气行业的几何模型中, 闪电下行先导是垂直于地面发展的, 由于梯级先导发展的不确定性, 当

先导与地面目标的距离等于闪电击距时, 才受到地面目标的影响而开始定向移动。闪电击距的大小与电流强度大小成正比, 电流强度越大, 闪电击距也就越大; 反之, 电流强度越小, 闪电击距也就越小。本文采用电气和电子工程师协会 (IEEE) 推荐的闪电击距公式 (中华人民共和国住房和城乡建设部和中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2010), 即

$$h_r = 10 \cdot I^{0.65} \tag{1}$$

式中, h_r 为雷闪的最后闪络距离, 即闪电击距 (单位: m); I 为电流强度 (单位: kA)。

1.2.2 落雷系数的计算

为反映山区微地形闪电频次分布差异, 本文提出了落雷系数的概念, 并将其定义为山区微地形空中引雷区域水平宽度与其地面投影宽度的比值。其物理意义是在相同气候条件下, 当投影面积相同时, 山区微地形与水平地面发生闪电频次存在差异。落雷系数越大, 表明山区微地形单位投影面积发生的云地闪电频次越多。通过分析山区微地形的闪电击距几何关系可以计算得到落雷系数的差异。图 1 给出不同地形切面图, 从中可见, 两侧山体的坡度均为 α, 不同地形的空中引雷区域水平宽度为 L_1 (单位: m)、地面投影宽度为 L_2 (单位: m), 闪电击距为 h_r。山顶地形的落雷系数 (k_1) 计算公式为

$$k_1 = \frac{L_1}{L_2} = \frac{L_2 + 2h_r \sin\alpha}{L_2} = 1 + \frac{2h_r}{L_2}\sin\alpha \tag{2}$$

同理, 由于山腰地形的 L_1 与 L_2 相等, 求得其落雷系数为 1, 为定值。山谷地形的 k_1 计算公式为

$$k_1 = \frac{L_1}{L_2} = \frac{\left(\frac{L_2}{2} - h_r \sin\alpha\right) \times 2}{L_2} = 1 - \frac{2h_r}{L_2}\sin\alpha \tag{3}$$

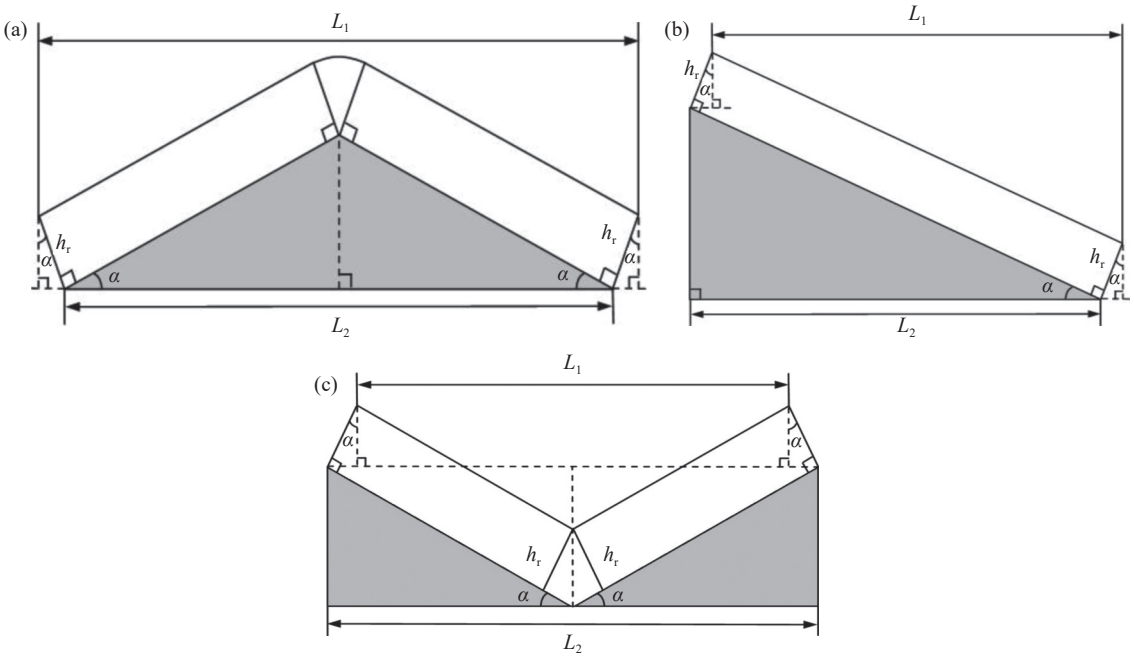


图 1 山顶 (a)、山腰 (b)、山谷 (c) 地形及其落雷系数计算参数切面图 (各参数含义见正文中研究方法)

Fig. 1 Schematic diagram of terrain and lightning coefficient calculation parameters for (a) mountain peak, (b) mountainside, and (c) valley (The meaning of each parameter can be found in the research methods section of the text)

1.2.3 落雷密度系数的计算

落雷密度是表征闪电活动强弱的重要参数, 传统算法没有考虑下垫面的影响, 主要通过分析单位地面投影面积的闪电频次而得到。为了能够在数值上反映山区微地形落雷密度分布的差异, 文中落雷密度特指山区落雷密度, 即单位地形表面积、单位时间的平均落雷次数。本文将落雷密度系数定义为在相同的投影面积条件下, 山区落雷密度与水平地面落雷密度的比值。其物理意义是在相同气候条件下, 不同山区微地形与水平地面落雷密度的差异, 值越大, 表明山区落雷密度受地形影响越大。山顶地形的落雷密度系数 (k_2) 计算公式为

$$k_2 = \frac{N_1}{N_2} = \frac{F_1}{S_1 \cdot N} \div \frac{F_2}{S_2 \cdot N} = \frac{F_1}{F_2} \cdot \frac{S_2}{S_1} = \frac{L_1}{L_2} \cdot \frac{S_2}{S_1} = \cos\alpha + \frac{2h_r}{L_2}\sin\alpha \cdot \cos\alpha \tag{4}$$

式中, N_1 为山顶地形的落雷密度 (单位: 次·(km^2·a)$^{-1}$); N_2 为山顶对应地面投影的落雷密度 (单位: 次·(km^2·a)$^{-1}$); F_1 为山顶地形的闪电频次; F_2 为山顶对应地面投影的闪电频次; S_1 为山顶地形的表面积 (单位: km^2); S_2

为山顶对应地面投影的面积(单位: km^2); N 为统计年数。

同理, 山腰地形的落雷密度系数 (k_2) 计算公式为

$$k_2 = \frac{N_1}{N_2} = \cos\alpha \tag{5}$$

山谷地形的落雷密度系数 (k_2) 计算公式为

$$k_2 = \frac{N_1}{N_2} = \cos\alpha - \frac{2h_r}{L_2}\sin\alpha\cdot\cos\alpha \tag{6}$$

1.2.4 山区微地形的识别

图 2 给出了基于试验区 DEM 数据提取山顶、山腰和山谷地形的技术流程。为研究不同山区微地形落雷分布的差异, 本文选取随州大洪山作为试验区(图 3 中蓝色矩形框所示), 该区域经纬度范围为(112.87°—113.12°E、31.30°—31.55°N), 方框的长度为 22.4 km、宽度为 14.3 km, 方框内平均海拔高度为 165 m、最高为 1 055 m。借助 ArcGIS 软件对试验区的 DEM 数据进行空间分析, 在识别提取等地形数据的基础上, 对山顶、山腰和山谷地形数据进行了二次筛选, 得到典型微地形数据见图 3。文中筛选山顶、山腰和山谷典型微地形的标准包括: (1) 山顶地形所属栅格海拔高度大于 650 m; (2) 600 m 等高线范围为山腰地形; (3) 山谷地形所属栅格海拔高度小于 300 m。

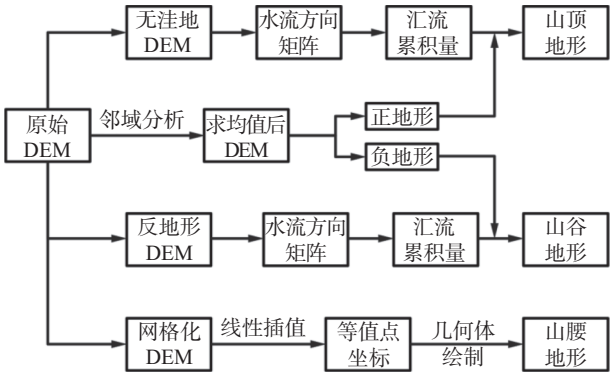


图 2 基于 DEM 提取山顶、山腰和山谷地形的技术流程

Fig. 2 Technical process for extracting the terrain of mountain peak, mountainside, and valley based on DEM

2 山区微地形落雷分布差异及影响因素

为了分析山区微地形落雷分布的差异, 分别统计山顶、山腰和山谷地形的落雷系数、落雷密度系数分布特征, 并对 3 种地形的落雷参数进行对比分析。根据公式可知, 影响山区微地形落雷分布的因素包括地形宽度、山体坡度和闪电击距。考虑到地形宽度与地形高度一一对应, 而高度数据更易于获取, 同时闪电击距可由电流强度计算得出, 因此文中重点分析了地形高度、山体坡度以及电流强度对落雷分布的影响。

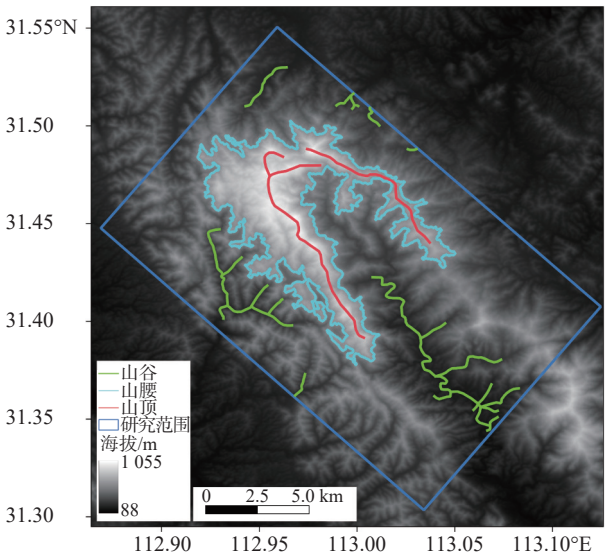


图 3 试验区海拔高度与典型微地形提取结果示意图

Fig. 3 Schematic diagram of altitude and typical microtopography extraction results in the experimental area

2.1 地形高度对落雷分布的影响

根据公式可知, 地形高度与山区地形的地面投影宽度正相关, 是影响空中引雷区域的关键指标, 即地形高度的差异导致了山区微地形的闪电频次存在差异。本节主要分析了相同山体坡度以及电流强度的条件下, 地形高度对落雷密度和落雷密度系数的影响规律。山体坡度取值为 30°; 电流强度采用湖北省近 10 a 闪电监测数据的历史平均值, 为 26 kA; 地形高度的取值范围为 100~1 000 m。图 4 给出了山区微地形落雷密度及落雷密度系数随地形高度的变化曲线。从图 4 可知, 山顶和山谷落雷密度曲线均呈对称分布, 这是因为在相同的山体坡度和地形高度下, 相对于山腰地形, 山顶、山谷地形与其差异的数值是相同的, 而正负符号相反。图 4a 显示, 山顶落雷密度均大于 1, 且随着地形高度增加呈减少趋势, 说明相较于水平地面, 由于山顶地形空中引雷范围的增加, 其单位地面投影范围发生的云地闪电频次更多, 且随着地形高度的增加, 这种差异逐渐减小。山腰地形的落雷系数为常数值 1, 说明山腰地形和水平地面的空中引雷范围相同。山谷地形的落雷系数随地形高度增加而增加, 且均小于 1, 说明相较于水平地面, 山谷地形的空中引雷区域偏小。上述分析表明, 山顶地形对闪电具有一定的吸引作用, 而山谷地形则具有一定的屏蔽作用, 且随着地形高度增加, 这种吸引或屏蔽作用不断减弱。

根据落雷密度的定义可知, 其数值大小除了受空中引雷范围的影响之外, 还与地形表面积有关, 且两者呈负相关。从图 4b 可知, 不同地形高度下, 山腰地形的落雷密度系数为常数, 值为 0.87, 这也说明

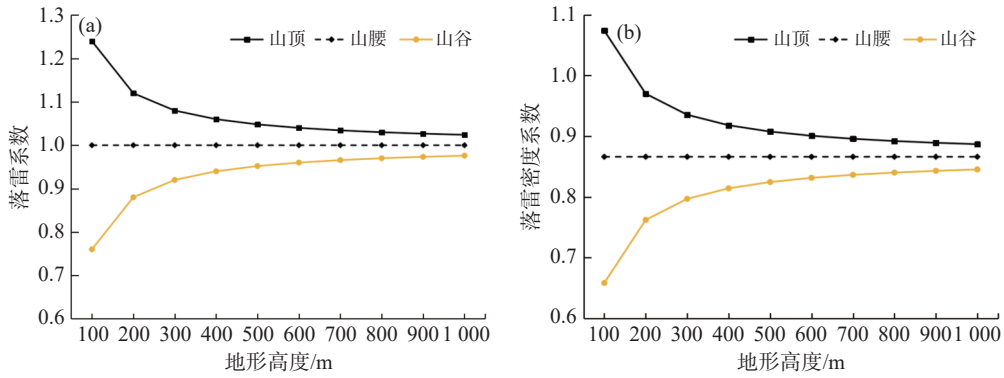


图 4 山区微地形落雷系数 (a)、落雷密度系数 (b) 随地形高度的变化

Fig. 4 The (a) lightning strike coefficient and (b) lightning density coefficient of mountainous microtopography vary with terrain elevation

受地形表面积增益效果的影响, 山腰地形的落雷密度是水平地面的 0.87 倍。山顶地形的落雷密度系数均大于山腰和山谷, 随着地形高度的增加, 山顶落雷密度系数呈减小趋势, 而山谷地形呈增加趋势。地形高度为 100 m 时, 山顶落雷密度系数最大为 1.07, 地形高度大于 200 m 后, 其落雷密度系数均小于 1。这说明地形高度较小时, 山顶地形空中引雷范围带来的增益效果起主导作用, 其落雷密度大于水平地面; 地形高度较大时, 表面积对山区落雷密度的影响加强, 空中引雷范围对闪电频次的影响减弱, 导致山顶地形落雷密度小于水平地面。不同地形高度条件下, 山腰地形的落雷密度系数大于山谷, 且均小于 1, 这说明在相同的气候条件, 山谷地形受表面积和空中引雷范围的影响最大, 导致山谷地形的落雷密度最小, 且小于水平地面。

2.2 山体坡度对落雷分布的影响

为分析不同坡度对落雷分布的影响, 选取相同山体水平投影宽度和电流强度, 其中山体水平投影宽度的取值为 100 m, 电流强度取值为 26 kA, 山体坡度取值范围为 10°~60°。图 5 给出了山区微地形落雷系数及落雷密度系数随山体坡度的变化曲线。从图 5a 可知, 不同山体坡度下, 山顶的落雷系数均明显大于山腰和山谷, 且山顶和山谷地形的落雷系数同样呈对称分布。山顶地形的落雷系数均大于 1, 而山谷则小于 1, 随着山体坡度的增加, 山顶地形落雷系数不断增加, 山谷落雷系数则不断减小。山体坡度为 10°时, 山顶地形落雷系数最小为 1.08, 当坡度增加到 60°时, 其落雷系数增加至 1.42, 增加了 31%。同样的, 山体坡度由 10°增加到 60°时, 山腰地形的落雷系数为定值 1, 而山谷地形的落雷系数由 0.92 减小至 0.58, 减少了 40%。造成上述结果的原因是随着山体坡度的增加, 闪电击中山区地形时的偏转角度也就越大, 对应的空中引雷范围的差异也越明显, 导致落雷系数的差异也就越大。这进一步说明山顶地形对闪电具有吸引作用, 山谷地形对闪电则具有屏蔽作用, 且这种吸引或屏蔽效能随着坡度增加而更加凸显。

从图 5b 可知, 不同山体坡度下, 山顶地形的落雷密度系数最大, 明显高于山腰和山谷地形, 山腰次之, 山谷最小。山体坡度由 10°增加到 20°时, 山顶地形的落雷密度系数缓慢增加, 由 1.07 增加至 1.09; 山体坡度在 20°~60°时, 其落雷密度系数随着坡度增加而逐渐减小, 落雷密度系数由 1.09 减小至 0.71, 减小达 35%。造成这一现象的主要原因是受到山顶地形空中引雷范围和地形表面积的共同作用, 随着山体

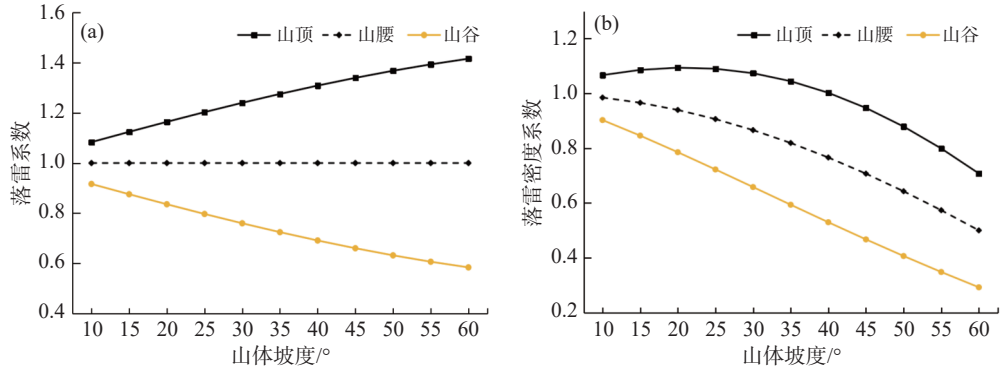


图 5 山区微地形落雷系数 (a)、落雷密度系数 (b) 随坡度的变化

Fig. 5 The (a) lightning strike coefficient and (b) lightning density coefficient of mountainous microtopography vary with slope

坡度增加，表面积增加的尺度也越大。山体坡度小于 40°时，山顶地形的落雷密度系数大于 1；当山体坡度大于 40°时，其落雷密度系数小于 1，这也说明受地形的影响，不同坡度山顶落雷密度与水平地面差异明显，山体坡度较小时，山顶地形空中引雷范围带来的闪电频次增益起主导作用，其落雷密度大于水平地面；山体坡度较大时，受表面积增加的影响，山顶地形的落雷密度偏小。山腰、山谷地形的落雷密度系数均小于 1，随着山体坡度的增加均呈减小趋势，且山谷地形的减小趋势更为明显，落雷密度系数由 10°时的 0.90 减小至 60°的 0.29，减小程度达 68%。这进一步说明在相同气候条件下，山腰、山谷地形的落雷密度均小于水平地面，其中山谷地形的落雷密度值最小，与水平地面的差异最明显。

2.3 电流强度对落雷分布的影响

电流强度也是雷电灾害防御工作中的重要基础数据。研究表明，雷电流累积概率具有明显的地域差异 (郄秀书等, 2013)，由式 (1) 可知，电流强度的不同导致闪电击距存在差异，闪电击距变化则导致空中引雷区域的改变，这也表明相同地形下电流强度的不同会引起闪电频次存在差异，导致落雷系数和落雷密度系数的差异。该节主要分析相同地形高度和山体坡度的条件下，电流强度差异对落雷系数和落雷密度系数的影响。山体水平投影宽度的取值为 100 m，山体坡度的取值为 30°，电流强度的取值范围为 2~200 kA (余田野等, 2022)。

图 6 给出了山区微地形落雷系数及落雷密度系数随电流强度的变化曲线。由图 6a 可知，山腰地形的落雷系数值为 1 是一个定值，山顶地形的落雷系数均大于 1，山谷则均小于 1，且山顶和山谷地形的落雷系数曲线同样呈对称分布，即山顶、山谷地形对闪电的吸引或者屏蔽作用具有相同强度。随着电流强度的增加，山顶地形的落雷系数呈增加趋势，山谷地形呈减小趋势，且与山腰地形落雷系数的差异也越来越大，其中山顶与山腰地形的落雷系数差值从 2 kA 时的 0.05 增加到 200 kA 时的 0.90，两者差值达到 18 倍。由图 6b 可知，电流强度对落雷密度系数的影响与落雷系数较为一致，即随着电流强度的增加，山腰地形的落雷密度系数值为 0.87，山顶地形的落雷密度系数呈增加趋势，山谷地形呈减小趋势，说明随着电流强度增加，山腰地形的落雷密度是水平地面的 0.87 倍，山顶和山谷地形与水平地面的差异越来越大。山顶地形的落雷系数、落雷密度系数与电流强度呈正相关，山谷地形则呈负相关，且均通过了 0.001 极显著水平检验。这也说明电流强度越大，不同山区地形的落雷系数与落雷密度系数差异也越大，也就是说中值电流越大的地区其不同地形的落雷密度差异也就越大。

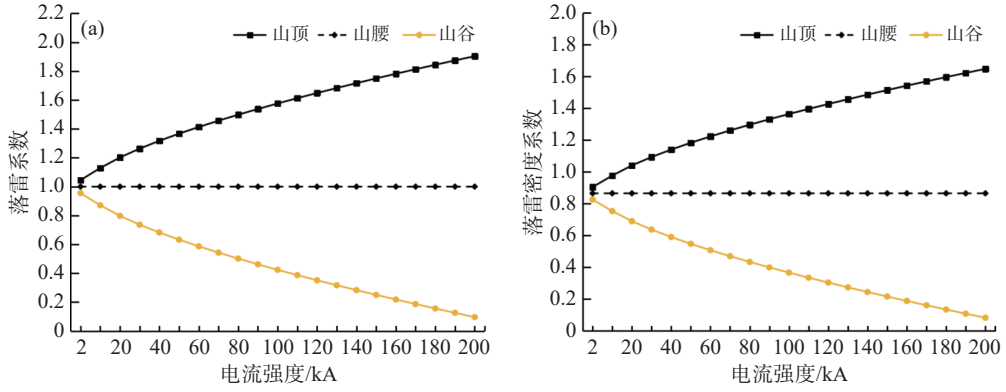


图 6 山区不同微地形落雷系数 (a)、落雷密度系数 (b) 随电流强度的变化

Fig. 6 The (a) lightning strike coefficient and (b) lightning density coefficient of mountainous microtopography vary with current intensity

2.4 山区微地形落雷分布实例验证

利用湖北省近 10 a 的闪电监测数据验证上文分析得到的山区微地形落雷分布的差异性。统计落雷密度时，往往需要根据特定的尺寸大小将研究区域进行网格划分，划分后的网格代表统计单元，划分网格的精细化程度将直接影响落雷密度值的大小，《基于雷电定位系统 (LLS) 的地闪密度总则》(国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会, 2022) 规定了统计单元的最小允许尺寸。国外学者 Herrera 等 (2018) 采用 3 km×3 km 公里网格统计分析了哥伦比亚地区的雷电特征。国内学者分析研究不同地区的闪电活动特征时，采用的网格存在差异。如余建华和刘海兵 (2020) 采用 2 km×2 km的网格，郭润霞等 (2018) 采用 0.02°×0.02°网格，王东方等 (2020)、余蓉等 (2021) 采用 2.5 km×2.5 km 的网格，余田野等 (2021, 2023) 采用 3 km×3 km 的网格。上述研究中统计落雷密度的网格宽度均在公里量级，无法精细化反映山区微地形落雷分布的差异。为此，司马文霞等 (2012) 采

用改进网格法统计分析试验区的落雷分布情况, 改进网格法是将网格进行更加精细的划分, 并根据小网格的中心点作为圆心, 以一定筛选半径形成的圆作为统计单元, 适用于需要精细划分小面积区域的闪电参数统计。文中改进网格法中的小网格大小设置为 30 m×30 m, 较传统网格的分辨率提升了 2 个量级, 筛选半径为 1 000 m (司马文霞等, 2014; 胡豪和陶鑫, 2020)。

利用改进网格法统计得到试验区的落雷密度分布见图 7。结合图 3 中地形图与落雷密度分布图可知, 由于地形差异, 试验区内各处的落雷密度均存在较大差异, 说明传统网格法不适用于山地微地形闪电参数的精细化研究。对比图 3 和图 7 同样可知, 试验区的落雷密度分布与地形具有较好的一致性, 如沿着山顶线及周边区域为落雷密度高值区, 沿着山谷狭长地带的一定范围为落雷密度低值区。为此, 通过对比山区微地形与落雷密度空间分布的相似性, 可验证理论计算结果的准确性, 说明文中计算公式在山区微地形落雷参数的分析中具有较好的适用性。

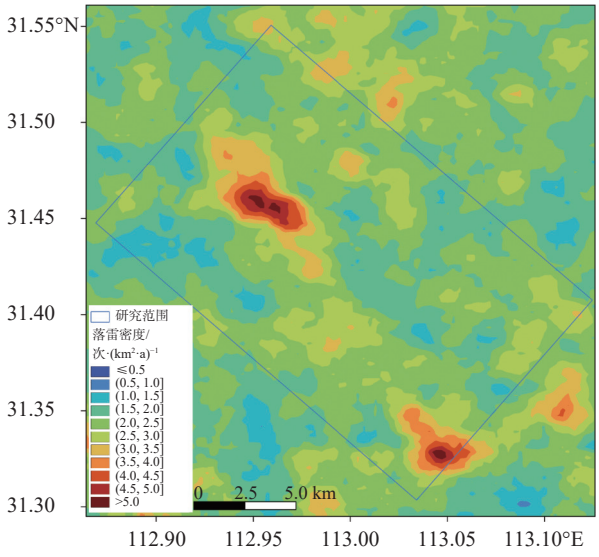


图 7 试验区落雷密度的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of lightning density in experimental area

落雷密度的空间分布图可直观显示山区微地形落雷分布的差异, 但其数值差异无法较好的展示。为了在数值上进一步验证落雷密度的差异, 根据图 3 给出的试验区山区微地形的提取结果以及近 10 a 的闪电监测数据, 采用箱线图统计分析并对比了山区微地形对应网格的落雷密度以及基于传统算法计算得到的密度值。箱线图可直观反映一组或多组数据分布的中心位置和散布范围, 其中, 每个箱体的长度代表一组数据的离散程度, 箱体越长, 对应的数据分布也越分散, 反之, 数据分布越集中。图 8 给出了基于地形表面积和投影面积 2 种算法得出的落雷密度分布箱线图, 其自上而下的节点分别为包含样本总数 90%、75%、50%、25%和 10%的落雷密度值。由图 8a 可知, 3 种山区微地形的落雷分布差异明显, 其中, 山谷地形落雷分布更加集中, 其组内方差也最小; 不同百分位节点的落雷密度值山顶地形均为最大, 山腰次之, 山谷最小。山顶、山腰和山谷地形对应网格的落雷密度均值分别为 2.90 次·(km²·a)⁻¹、2.36 次·(km²·a)⁻¹ 和 2.07 次·(km²·a)⁻¹, 其中, 山顶地形的落雷密度分别比山腰、山谷高 22.8%、40.1%。这表明不同山区微地形的落雷密度存在明显差异, 总体上山顶地形最大, 山腰次之, 山谷最小。由图 8b 可知, 山顶、山腰和山谷地形基于投影面积这一传统算法得到的密度均值分别为 3.82 次·(km²·a)⁻¹、3.11 次·(km²·a)⁻¹ 和 2.42 次·(km²·a)⁻¹, 与实际值差异较大, 且不同百分位节点的密度值均大于实际值, 其中山顶和山腰地形采用传统算法得出的落雷密度比实际均偏大 32%、山谷地形则偏大 17%。由此进一步说明, 受空中引雷范围和表面积的共同影响, 不同山区微地形的落雷密度存在着明显差异; 采用传统算法计算得到的落雷密度明显大于实际值, 传统算法不适用于山区地形。

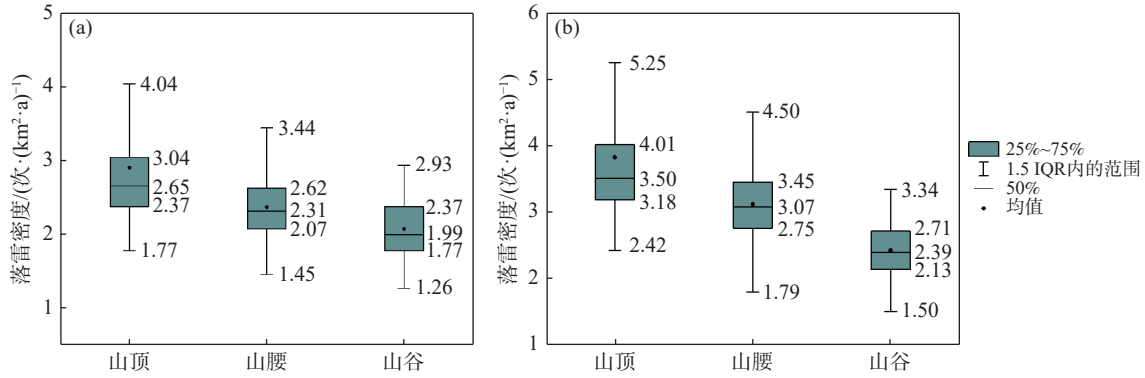


图 8 基于表面积 (a)、投影面积 (b) 的山区不同微地形落雷密度箱线图 (IQR 表示四分位距)

Fig. 8 Boxplot of lightning density in mountainous microtopography based on (a) surface area and (b) projected area (IQR indicates interquartile range)

3 结论与讨论

本文利用闪电击距理论推导了山顶、山腰和山谷 3 种微地形的落雷系数和落雷密度系数计算公式，探讨了山区不同微地形落雷分布的差异及其影响因素，并进一步利用湖北省雷电监测数据对试验区不同山区微地形的落雷分布进行验证，得到如下主要结论：

(1) 山区微地形落雷分布具有明显的差异性，山顶地形对闪电具有一定的吸引作用，而山谷则具有一定的屏蔽作用，从闪电频次、落雷密度上均表现为山顶地形最大，山腰次之，山谷最小的分布特征。

(2) 地形高度变化不影响山腰地形的落雷分布。随着地形高度的增加，受高空引雷范围和地形表面积的影响，山顶地形的落雷系数、落雷密度系数均呈减小趋势，而山谷地形则均呈增加趋势，并逐渐趋于稳定。

(3) 山腰地形的落雷系数为定值 1，山顶地形的落雷系数随着坡度增加不断增加，而山谷落雷系数则不断减小。随着坡度的增加，不同山区微地形的落雷密度系数总体呈减小趋势，其中，山谷的减小趋势最为明显。

(4) 电流强度变化对山区微地形的落雷分布影响较为一致。随着电流强度的增加，山腰地形的落雷系数、落雷密度系数均为定值，而山顶地形均呈增加趋势，山谷地形则均呈减小趋势，这说明大电流比例越多的区域，其山顶的闪电频次、落雷密度值也越大，而山谷则越小。

本文将山区微地形具体划分为山顶、山腰和山谷 3 种典型地形，这种简化地形具有一定的普适性，有利于获取更加精细的山区地形落雷参数分布特征。但需要指出的是，由于山区地形的极端复杂性，即使在相同地形内，其内部包含的坡度差异可能较大，难以充分刻画局部精细尺度的环境差异，且未能充分考虑海拔高度的影响。后续工作中将通过更加精细化的山区地形模型构建进行深入研究，同时选取更多的试验区开展验证分析，进一步揭示山区地形闪电参数的分布特征。

参考文献 (References)：

郭润霞,王迎春,张文龙,等.2018.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,34(3):393−400. Guo R X, Wang Y C, Zhang W L, et al. 2018. Analysis of lightning characteristics in Beijing based on VLF/LF 3D lightning location monitoring system [J]. Journal of Tropical Meteorology,34(3):393−400 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004−4965.2018.03.013

胡豪,陶鑫.2020.基于雷电定位系统的山区地形地闪密度差异研究[J].高压电器,56(10):190−196. Hu H, Tao X. 2020. Study on difference of ground flashover density in mountain terrain based on lightning location system [J]. High Voltage Apparatus,56(10):190−196 (in Chinese). doi:10.13296/j.1001−1609.hva.2020.10.030

鞠晓雨,王凯,朱浩.2022. 2011—2021 年安徽省闪电时空分布特征分析[J].沙漠与绿洲气象,16(5):110−117. Ju X Y, Wang K, Zhu H. 2022. Spatial and temporal distribution characteristics of lightning in Anhui during 2011-2021 [J]. Desert and Oasis Meteorology,16(5):110−117 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2022.05.015

康龙, 肖天贵, 假拉, 等.2022.拉萨-林芝铁路沿线主要气象灾害风险研究[J].高原山地气象研究,42(4):127−135. Kang L, Xiao T G, Jia L, et al. 2022. Risk research of main meteorological disasters along the Lhasa-Nyingchi railway [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,42(4):127−135 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2022.04.018

郄秀书,张其林,袁铁,等.2013.雷电物理学[M].北京:科学出版社:1-100. Qie X S, Zhang Q L, Yuan T, et al. 2013. Lightning physics [M]. Beijing: Science Press: 1-100 (in Chinese)

司马文霞,李永福,杨庆,等.2012.改进网格法及其在雷电参数统计中的应用[J].高电压技术,38(8):1834−1841. Sima W X, Li Y F, Yang Q, et al. 2012. Improved grid method and its application to statistics of lightning parameters [J]. High Voltage Engineering,38(8):1834−1841 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1003−6520.2012.08.004

司马文霞,郑皓元,杨庆,等.2014.复杂地形下输电线路绕击跳闸次数 3 维计算方法[J].高电压技术,40(3):662−668. Sima W X, Zheng H Y, Yang Q, et al. 2014. Three-dimensional method of calculating shielding failure flashover times of transmission line in complex terrain area [J]. High Voltage Engineering,40(3):662−668 (in Chinese). doi:10.13336/j.1003−6520.hve.2014.03.004

王东方,郄秀书,袁善锋,等.2020.北京地区的闪电时空分布特征及不同强度雷暴的贡献[J].大气科学,44(2):225−238. Wang D F, Qie X S, Yuan S F, et al. 2020. Spatial and temporal distribution of lightning activity and contribution of thunderstorms with different lightning-producing capabilities in Beijing metropolitan region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,44(2):225−238 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1904.19128

王学良, 余田野, 贺姗, 等.2020.区域海拔高度对云地闪电参数分布的影响[J].高电压技术,46(4):1206−1215. Wang X L, Yu T Y, He S, et al. 2020. Influence of regional altitude on the distribution of cloud-to-ground lightning parameters [J]. High Voltage Engineering,46(4):1206−1215 (in Chinese). doi:10.13336/j.1003−6520.hve.20200430012

余建华,刘海兵.2020.江西强雷电活动分布与地形及其土地利用的相关性[J].气象科技,48(6):898−902. Yu J H, Liu H B. 2020. Extreme lightning activity and its correlation to topography and land use type [J]. Meteorological science and technology,48(6):898−902 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.20190443

余蓉,杜牧云,晏紫淙,等.2021.湖北省两套闪电定位网地闪数据的对比分析[J].暴雨灾害,40(6):646−654. Yu R, Du M Y, Yan Z C, et al. 2021. Comparative analysis of cloud-ground flash data of two lightning location networks in Hubei Province [J]. Torrential Rain and Disasters,40(6):646−654 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2021.06.009

余田野,贺姗,张科杰,等.2023.基于改进层次分析法的湖北省雷电灾害

风险区划[J].暴雨灾害,42(1):88−96. Yu T Y, He S, Zhang K J, et al. 2023. Risk zoning of lightning disaster in Hubei province based on improved analytic hierarchy process [J]. Torrential Rain and Disasters,42(1):88−96 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−185

余田野,王学良,张科杰,等.2021. 2007—2019 年湖北省地闪分布特征及雷电强度等级划分[J].气象与环境学报,37(6):79−85. Yu T Y, Wang X L, Zhang K J, et al. 2021. The distribution characteristics of ground flash and classification of lightning intensity in Hubei province from 2007 to 2019 [J]. Journal of Meteorology and Environment,37(6):79−85 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673−503X.2021.06.010

余田野,徐达军,余彦龙,等.2022.湖北省地形特征对雷电参数的影响[J].气象科技,50(5):734−741. Yu T Y, Xu D J, Yu Y L, et al. 2022. Influence research of Topographic features on lightning parameters in Hubei province [J]. Meteorological Science and Technology,50(5):734−741 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.20210361

郑栋,张文娟,姚雯,等,2021.雷暴闪电活动特征研究进展[J].热带气象学报,37(3):289-297. Zheng D, Zhang W J, Yao W, et al. 2021. Research progress of lightning activity in thunderstorms [J]. Journal of Tropical Meteorology,37(3):289-297 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004−4965.2021.027

赵生昊,覃彬全,刘青松.2020.重庆市地形对雷电灾害主要致灾因子影响分析[J].气象科技,48(1):127−131. Zhao S H, Qin B Q, Liu Q S. 2020. Influence of topography on main lightning hazard factors in Chongqing [J]. Meteorological Science and Technology,48(1):127−131 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.20190052

张朝忙,刘庆生,刘高焕,等.2012. SRTM 3 与 ASTER GDEM 数据处理及应用进展[J].地理与地理信息科学,28(5):29−34. Zhang C M, Liu Q S, Liu G H, et al. 2012. Data processing and application progress of SRTM 3 and ASTEM GDEM [J]. Geography and GEO-Information Science,28(5):29−34 (in Chinese)

曾颖婷,顾佳莹,张若筠,等.2024.基于不同测站布局的闪电定位误差分析[J].暴雨灾害,43(6):741−748. Zeng Y T, Gu J Y, Zhang R Y, et al. 2024. Analysis of lightning localization errors based on different station layouts [J]. Torrential Rain and Disasters,43(6):741−748 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−216

中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.2010.建筑物防雷设计规范[S].北京:中国计划出版社:155-164. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of China,State General Administration of China for Quality Supervision and Inspection and Quarantine,2010. Code for design protection of structures against lightning [S]. Beijing:China Planning Press:155-164 (in Chinese)

国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.2022.基于雷电定位系统 (LLS) 的地闪密度总则[S]. 北京:中国标准出版社,1-5. State Administration for Market Regulation,Standardization Administration. 2022. Cloud-to-ground lightning density based on lightning location systems(LLS)-General principles [S]. Beijing,China: Standards Press of China: 1-5 (in Chinese)

Herrera J, Younes C, Porras L. 2018. Cloud-to-ground lightning activity in Colombia: A 14-year study using lightning location system data [J]. Atmospheric Research,203:164−174. doi:10.1016/j.atmosres.2017.12.009

Richaro E O, Huffines G R. 2001. Cloud-to-ground lightning in the United States: NLDN results in the first decade, 1989-1998 [J]. Monthly Weather Review,129(5):1179−1193. doi:10.1175/1520−0493(2001)129<1179:CTGLIT>2.0.CO;2

(责任编辑　杨　浩)