第45卷 第5期
2026年10月

高 原 气 象
PLATEAU METEOROLOGY

Vol. 45 No. 5
October, 2026

季靖骁，李兵，刘俊，等，2026. 青藏高原东南缘凉山地区雷电流幅值时空分布与概率模型研究[J]. 高原气象，45(5)：1247−1259. Ji Jingxiao，Li Bing，Liu Jun，et al.，2026. Spatiotemporal distribution and probabilistic model of lightning current amplitude in the Liangshan region，southeastern margin of the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteorology，45(5)：1247−1259. DOI：10. 7522/j. issn. 1000−0534. 2026. 00016. CSTR：32265. 14. gyqx. CN62−1061/P. 2026. 00016.

青藏高原东南缘凉山地区雷电流幅值时空分布与概率模型研究

季靖骁[1]，李 兵[2]，刘 俊[2]，杜泽东[3]，杨秀芹[1]，
柳一坤[1]，申道瑜[1]，邓惟文[1]

（1. 南京信息工程大学 水文与水资源工程学院，江苏 南京 210044；
2. 凉山彝族自治州气象局，四川 凉山 615000；
3. 中国三峡建工(集团)有限公司，四川 成都 610041）

摘要：利用凉山地区2010—2023年闪电定位系统数据，采用K-Means聚类对雷电活动进行分区，运用双正态混合及IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)累积概率模型统计分析，系统研究了地闪回击的频次密度与雷电流幅值的时空分布、统计特性及概率模型。结果表明：(1)凉山地区雷电活动呈现显著的频次强度空间负相关特征。雷电高频区集中于该地区中部，而强雷电事件则主要分布于西部的高海拔强闪区；(2)频次与强度在时间分布上存在非同步性。频次高峰出现在夏季午后，与热对流活动一致而强度最高的正回击则集中于2—3月的上午[09:00(北京时，下同)—11:00]；(3)雷电流幅值的对数概率密度普遍呈双峰结构，双正态混合模型拟合效果显著优于单正态模型，表明区域内雷电活动可能受到不同物理过程的共同影响；(4)IEEE累积概率模型比电力部门行业标准(DL/T620−1997)能更准确地描述本地雷电流幅值分布。本研究为各分区提供了一套精细化的IEEE模型参数，为实现区域化、差异化的精准防雷设计提供了直接的科学依据。

关键词：雷电频次；雷电流幅值；时空分布特征；概率分布模型；凉山地区

文章编号：1000−0534(2026)05−1247−13 **中图分类号**：P427. 3 **文献标识码**：A

DOI：10. 7522/j. issn. 1000−0534. 2026. 00016

CSTR: 32265. 14. gyqx. CN62−1061/P. 2026. 00016

1 引言

雷电作为一种剧烈的大气放电现象，是大气电学研究的核心课题(陈渭民，2003)，其产生的巨大能量和电磁脉冲对电力系统、航空航天、通信设施及人类生命财产安全构成严重威胁(陈家宏等，2016；Dwyer and Uman，2014)。据统计，全球平均闪电频率约为44次·s^{-1}，且陆地上的闪电活动远超海洋，陆海比约为10:1(Jiang et al.，2023)。中国地域辽阔，地形地貌复杂，从东部的平原到西部的青藏高原，巨大的海拔差异和多样的下垫面性质，共同塑造了雷电活动显著的区域异质性(宋敏敏和郑永光，2016；Liu et al.，2022)。

中国西南地区，特别是受亚洲季风和青藏高原大地形共同影响的区域，是全球雷电活动研究的天然实验室。已有研究表明，青藏高原的雷电活动时空分布特征与高原大地形的热力和动力作用密切相关(郄秀书等，2004)。安江浩等(2025)基于风云四号闪电成像仪数据的研究表明，青藏高原闪电频次存在显著的地域差异，傍晚和夜晚是闪电活动的

收稿日期：2025-11-28；**定稿日期**：2026-01-26
资助项目：白鹤滩水电站坝区雷电预测预警方法研究项目(JGGJ0424018)；国家自然科学基金项目(52209032)
作者简介：季靖骁(2002—)，男，河南洛阳人，硕士研究生，主要从事雷电监测预警及灾害机理研究. E-mail：Jijingxiao0517@qq. com
通信作者：杨秀芹(1981—)，女，山东聊城人，副教授，主要从事雷电监测预警及灾害机理研究. E-mail：young_sd@nuist. edu. cn
© Editorial Department of *Plateau Meteorology* (CC BY-NC-ND)

高发时段，且不同区域的闪电日变化特征存在明显差异。受地形和季风系统的共同影响，云贵高原的雷电活动呈现东高西低的分布格局（Yin et al.，2018），其中，作为典型复杂地形单元的四川盆地，其闪电活动特征已开展深入研究，揭示了其地理分布、时间分布受地形、水汽和垂直风切变等关键因素的显著影响（戚云彤和黄兴友，2023）。云南省的雷电活动则与海拔存在复杂的非线性关系，地闪活动在海拔2000 m附近达到峰值，雷电灾害与地闪次数、强度等致灾因子密切相关（刘平英等，2018；Yin et al.，2018）。在中国复杂地形区，雷暴地闪的密度和日变化特征与地形密切相关，高值区常常出现在山脉向平原的过渡地带（余蓉等，2021）。这些研究成果均表明地形在雷电活动时空分布中的重要作用。

国内学者围绕雷电参数已开展了大量的研究。早期的研究多基于ADTD（Advanced Direction and Time-of-arrival Detecting）闪电定位系统，不仅分析了雷电流幅值的时空分布，还对雷电流波头陡度等关键致灾参数的频率分布特征进行了深入探讨（李家启等，2010）。在与凉山地区相邻且地形同样复杂的云南省，已有研究利用新型监测数据，系统地揭示了雷电流幅值的时空分布特征，并提供了区域化的IEEE（Institute of Electrical and Electronics Engineers）模型拟合参数（刘平英等，2024）。然而，无论是国内电力部门行业标准还是国际通用的IEEE推荐模型，在应用于特定区域时都面临着适用性的挑战。标准的IEEE模型在拟合大电流事件（如雷电流幅值>110 kA）时，其计算值与实测值之间的相对误差会显著增大，难以满足高风险防护工程的精度要求，因此提出了对累积概率模型进行分段修订的改进思路（王学良等，2016）。

凉山地区是从青藏高原东南缘向四川盆地过渡的典型地形区，也是多种天气系统影响的交汇区，还是研究不同尺度动力、热力及微物理过程如何共同影响雷电活动的理想区域。以往的研究多集中于地形构成相对单一的高原或盆地区域，凉山地区处于复杂地形过渡地带，其雷电活动特征尚不明确。因此，本文利用2010—2023年凉山地区闪电定位系统（Lightning Location System，LLS）数据，系统刻画凉山地区雷电频次与强度之间的关系、雷电流幅值的时空分布特征，分析强度频次的解耦现象；对该区域进行精细化的雷电参数建模，并评估和优化现有工程应用模型，提供一套经过本地数据标定的雷电参数模型，以期为该区域的雷电灾害风险评估和输电线路等关键基础设施的防护设计提供科学依据。

2 数据来源与方法介绍

2.1 研究区概况

凉山彝族自治州位于四川省西南部，地处川西南横断山系与云贵高原的过渡地带，介于100°14′E—103°52′E，26°03′N—29°17′N，总面积约6.04万km^2。该区域地形复杂，总体呈现西北高、东南低的阶梯状地势，境内山脉纵横，岭谷相间，地貌以中山为主，占全州面积的78%。这种独特的地形地貌加之其亚热带高原季风气候背景，共同塑造了区域雷暴活动的复杂性与特殊性。

2.2 数据来源与质量控制

雷电数据来源于中国气象局在凉山地区布设的闪电定位系统（LLS），数据时段为2010年1月1日至2023年12月31日。该系统主要由ADTD型闪电定位仪组成，采用先进的时差和方向联合探测技术，能够实时、高精度地记录地闪回击的发生时间、经纬度、峰值电流幅值及极性等关键参数，闪电定位仪分布见图1。

为确保数据的权威性与可靠性，本文所用资料均经过中国气象局的统一汇交与质量控制。该系统在四川复杂地形区的地闪探测效率为70%~90%，中位定位精度优于1 km。系统内置的波形判别算法可有效区分云地闪，误判率较低。本研究在数据预处理中已对异常值和低于系统探测阈值的记录进行了剔除，以保证分析结果的科学性。

地形背景采用Copernicus DEM GLO-30数字表面模型（DSM）；水平参考为WGS84-G1150（EPSG：4326），高程（单位：m）为相对于EGM2008大地水准面（EPSG：3855）的正高。文中涉及的地图是基于中华人民共和国自然资源部地图技术审查中心标准地图服务系统下载的审图号为GS（2024）0650号的中国地图制作，底图无修改。

2.3 研究方法

2.3.1 雷电空间分布反相性计算与强雷电事件定义

将研究区划分为0.03°×0.03°（约3 km×3 km）的规则网格，在此基础上对各栅格统计的年平均雷电频次密度与总回击平均雷电流幅值进行标准化处理，以消除量纲差异并使其具有可比性。为定量分析雷电频次与幅值在空间分布上的反相关性，再将各栅格标准化后的频次（Z_{freq}）与标准化后的幅值（Z_{amp}）相减，得到空间差异指标（$D_{spatial}$）：

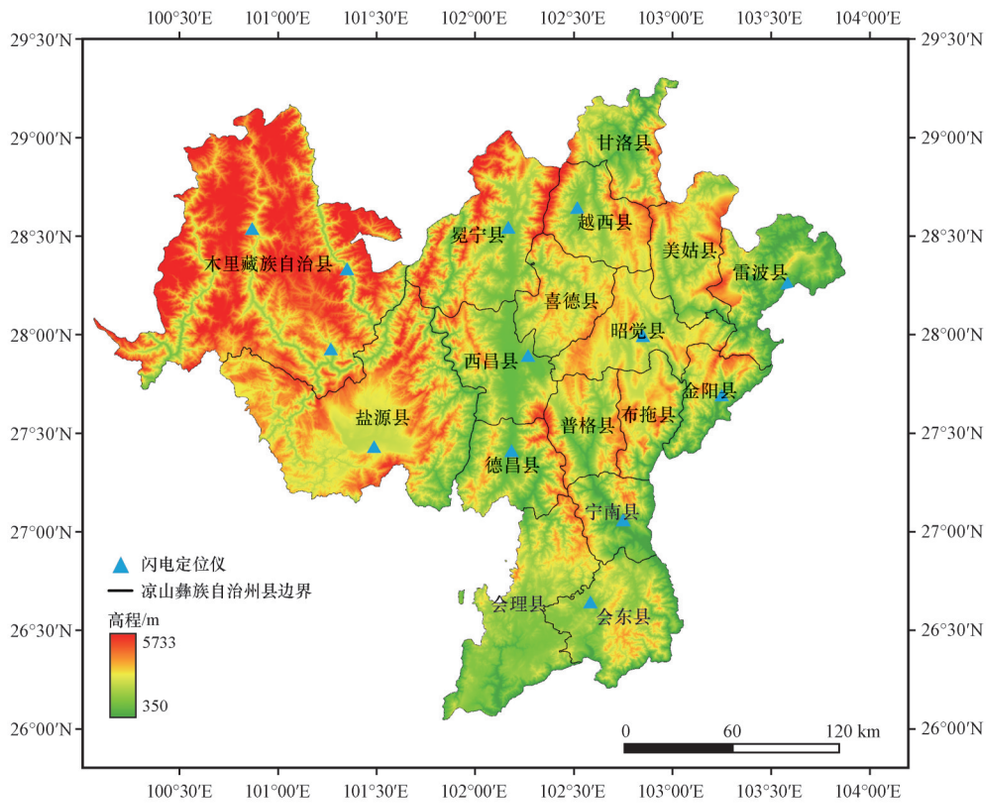


图 1　凉山地区闪电定位仪分布

Fig. 1　Distribution of the lightning location system in the Liangshan region

$$D_{\text{spatial}} = Z_{\text{freq}} - Z_{\text{amp}} \tag{1}$$

该指标的正值区域表示频次相对偏高而幅值相对偏低的高频低幅特征区；负值区域则相反，指示了低频高幅特征区。计算所有栅格 Z_{freq} 与 Z_{amp} 之间的皮尔逊相关系数，对二者空间相关性进行定量评估。

为综合评估雷电致灾风险的空间格局，进一步分析了强雷电事件的空间分布特征。计算研究时段内凉山地区回击雷电流幅值的第 90 百分位数作为强雷电阈值，计算得到本区域强雷电阈值为 45 kA，基于此阈值，统计每个网格的强雷电频次密度并绘制其空间分布。

2.3.2　雷电流幅值统计特征拟合

首先，对雷电流幅值 I 进行自然对数转换（x=ln$I$），采用单一正态分布模型和双正态混合模型对对数化后的数据 x 进行概率密度函数拟合，以探究其内在的统计结构。单一正态分布的概率密度函数为：

$$f(x;\ \mu,\sigma,A) = A\cdot\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \tag{2}$$

式中：μ 代表对数均值，即对数雷电流幅值的集中趋势；σ 代表对数标准差，反映了对数雷电流幅值的离散程度；A 为振幅，与总频数或总样本量相关，决定了拟合曲线的峰值高度。

当数据呈现多峰特征时，采用由两个正态分量叠加而成的双正态混合模型：

$$f(x;\ \mu_1,\sigma_1,A_1,\mu_2,\sigma_2,A_2) = A_1\cdot\frac{1}{\sigma_1\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} + A_2\cdot\frac{1}{\sigma_2\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{(x-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}} \tag{3}$$

式中：各变量意义同式(2)，下标 1 和 2 分别表示两个正态分量的参数。该模型能够更精确地捕捉由不同物理机制导致的复杂分布形态。

2.3.3　雷电流幅值累积概率分布模型

雷电流幅值累积概率分布表示雷电流幅值大于或等于某一特定值 I_0 的概率 $P(I\geqslant I_0)$，是雷电防护工程设计中的基石，直接关系到防护设备选型、绝缘配合以及系统失效风险的计算。

本文对比了电力部门行业标准（DL/T 620-1997）曲线与国际上的 IEEE 曲线，评估了现有标准在研究区的适用性，并提供一套基于本地实测数据且更为精确的工程应用参数。

电力部门行业标准（DL/T 620-1997）中推荐采用的雷电流幅值累积概率模型为对数线性关系。

$$\lg P = -I/c \tag{4}$$

式中：I为雷电流幅值（单位：kA）；c为常数，标准中建议的c值为88。

IEEE推荐采用式（5）的累积概率分布模型，以描述雷电流幅值超越概率，该模型在研究中被证实具有较好的拟合效果（Ma et al.，2025）。

$$P(I \geqslant I_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_0}{a}\right)^b} \tag{5}$$

式中：参数a为累积概率为50%时对应的雷电流幅值（单位：kA），反映了分布的中心或特征幅值，其值越大表示雷电流整体强度越高；参数b为曲线的形状参数，反映了分布的离散程度，IEEE推荐a取31 kA，b取2.6。本文采用Levenberg-Marquardt非线性拟合方法（Marquardt，1963），对IEEE推荐模型的参数a和b进行估计，并与电力部门行业标准（DL/T 620-1997）模型进行对比，以评估其在凉山地区的适用性（陈家宏等，2008）。

2.3.4 基于K-Means的雷电物理分区

为客观揭示雷电活动的空间格局，采用K-Means聚类算法构建了一套数据驱动的物理分区方案（潘健等，2017）。选取年平均雷电频次密度、平均高程（Digital Elevation Model，DEM）以及经纬度坐标作为核心特征变量进行聚类。为确保聚类结果的稳健性，首先对频次和DEM栅格进行高斯平滑以抑制噪声；再对所有特征进行标准化，以消除量纲影响；并对空间坐标赋予一定权重以增强分区的地理集聚性。

3 结果与分析

3.1 雷电流幅值与雷电频次的时空分布特征

3.1.1 雷电流幅值时间分布

由图2可以看出，凉山地区雷电流平均幅值的高值期集中在冬春过渡季，且正、负回击均表现出较高的平均幅值；4—10月雷电流幅值处于较低水平，负回击更为明显。从日变化看，高幅值雷电活动主要集中在21:00（北京时，下同）至次日10:00。正回击[图2（a）]的平均电流幅值在上午（09:00—11:00）较为突出，2—3月的这一时段是全年正回击强度最高的时段。负回击[图2（b）]也呈现类似特征，在11月和3月的上午（09:00—11:00）达到强度峰值。

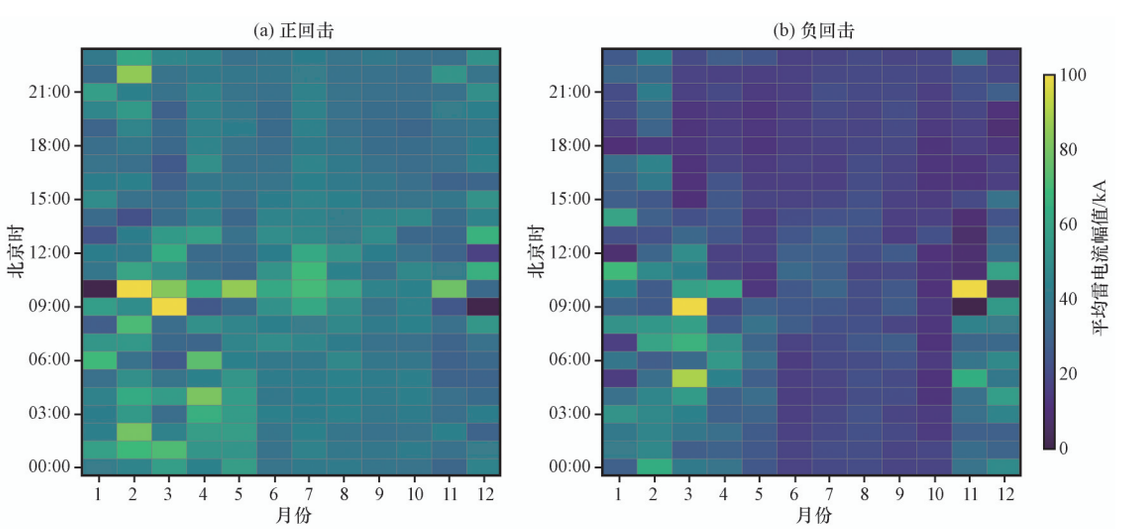


图2 凉山地区正回击（a）和负回击（b）雷电流幅值的月-时分布特征（单位：kA）

Fig. 2 Monthly-hourly distribution of positive (a) and negative (b) return stroke current amplitudes in the Liangshan region. Unit: kA

3.1.2 雷电空间分布特征

由图3可以看出，雷电活动主要集中于该地区中部至东北部，形成了以西昌、喜德、冕宁一线为核心雷电频次密度高值带，其年平均回击密度可超过2.5次·km^{-2}·a^{-1}。相比之下，西部地区雷电活动则相对稀疏，频次较低。

平均雷电流幅值的空间分布（图4）呈现出与雷电频次截然不同的格局。总回击与负回击的平均幅值[图4（a），（b）]在空间上相对均匀，未见极端高值中心。正回击的高电流幅值[图4（c）]主要分布在雷电频次密度较低的西部和南部；雷电频次密度最高的州域中部，其正回击强度反而是全州低值中心。

图5展示了标准化雷电频次与雷电流幅值差值的空间分布，定量揭示了二者的空间反相关系。图中红色区域表示高频低强区域，西部和南部的蓝色区为低频高强区域。全区雷电频次与幅值的空间相关系数为-0.58（P<0.01），表明两者存在极显著

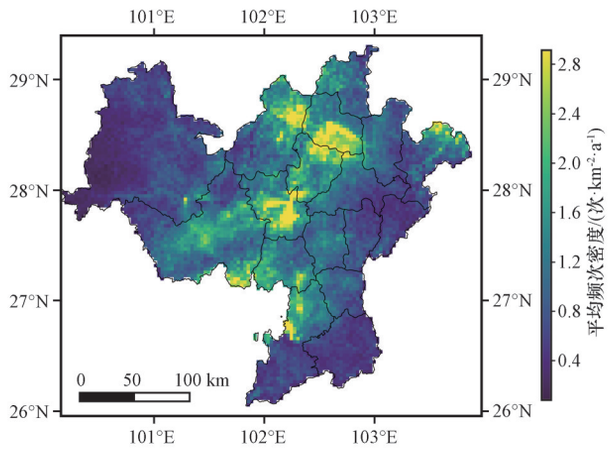


图3　2010—2023年凉山地区雷电平均频次密度的空间分布（单位：次·km^{-2}·a^{-1}）

Fig. 3　Spatial distribution multi-year average lightning flash density in the Liangshan region from 2010 to 2023. Unit: times·km^{-2}·a^{-1}

的负相关。

图6是强雷电频次密度的空间分布。从图6中可以看出，高值区主要集中于该地区中西部，形成一条跨越西昌、盐源、木里地区的强回击带。上述分析表明，凉山地区雷电活动的空间分布表现出极强的异质性，雷电频次与雷电流幅值呈现显著的空间负相关。

3.1.3　雷电分区统计特征

基于上述发现，为分析雷电频次强度的空间分异特征，采用K-Means聚类方法，将凉山地区划分为3个雷电特征区（图7），并结合分区的回击分布特征（表1）将其命名为中部高频核心区、西部高海拔强闪区和南部低海拔过渡区。

3个分区的特征差异明显，中部高频核心区以该地区近50%的面积贡献了超过60%的雷电次数，其年平均频次密度达1.39次·km^{-2}·a^{-1}，远超西部高海拔强闪区和南部低海拔过渡区，但其雷电强度在所有指标上均为3区最低。西部高海拔强闪区为低频高强区，构成了强雷电的主要风险源，该区域平均高程最高，雷电频次最低，但其雷电综合强度最强，总回击幅值均值和中位数均位列该地区第一。南部低海拔过渡区的正回击活动极为活跃，虽然其总回击强度不及西部，但其正回击4项指标（均值，中位数，占比，密度）均为该地区第一。

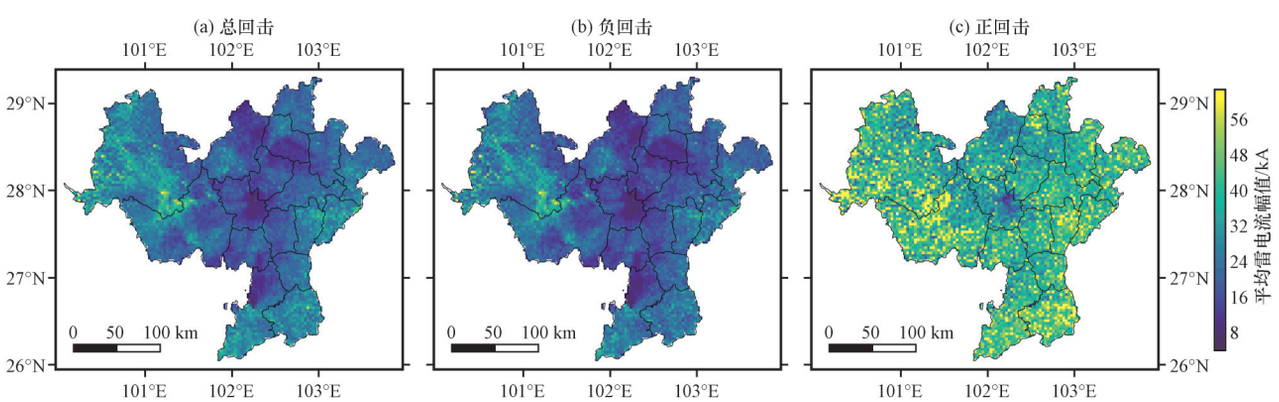


图4　2010—2023年凉山地区平均雷电流幅值的空间分布（单位：kA）

（a）总回击，（b）负回击，（c）正回击

Fig. 4　Spatial distribution of mean lightning current amplitude in the Liangshan region from 2010 to 2023. Unit: kA.

（a）total return stroke，（b）negative return stroke，（c）positive return stroke

3.2　雷电流幅值概率分布模型

3.2.1　雷电流幅值对数分布特征与拟合

对于总回击（图8）和负回击（图9），单一正态模型的拟合效果较差，无法捕捉数据中明显的双峰结构，双正态混合模型则与实际数据高度吻合，并通过了F检验，证明了其统计上的显著性。从图8（a）可以看出，总回击的双正态拟合结果表明其分布可分解为2个独立的对数正态分量，以7.85 kA为中心的低幅值分量频发区和以34.46 kA为中心的高幅值分量频发区。从图9可以看出，负回击的分布可分解为以7.77 kA和34.12 kA为中心的2个分量。正回击的单正态[图10（b）]拟合效果尚可，但双正态[图10（a）]模型仍能实现更优的拟合，识别出以29.37 kA和39.64 kA为中心的2个高幅值分量。

3.2.2　雷电流幅值累积概率分布特征

雷电流幅值的累积概率分布是雷电防护工程设计的核心依据。图11是凉山地区总回击、正回击和负回击的实测电流幅值累计概率分布曲线，并与电力部门行业标准（DL/T 620-1997）及IEEE推荐

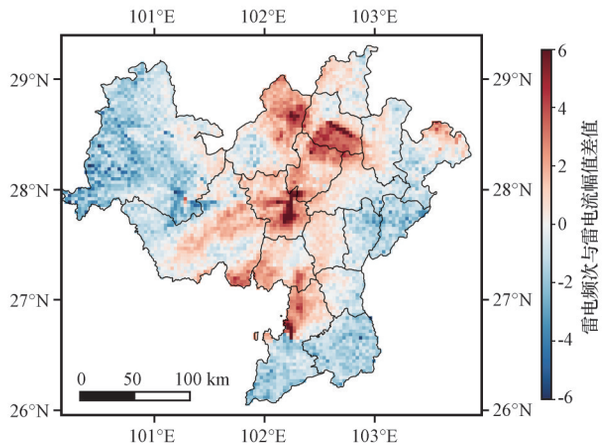


图5 2010—2023年凉山地区标准化年均雷电频次与雷电流幅值差值(频次减幅值)的空间分布

Fig. 5 Difference between normalized annual mean lightning frequency and current amplitude (frequency minus amplitude) in the Liangshan region from 2010 to 2023

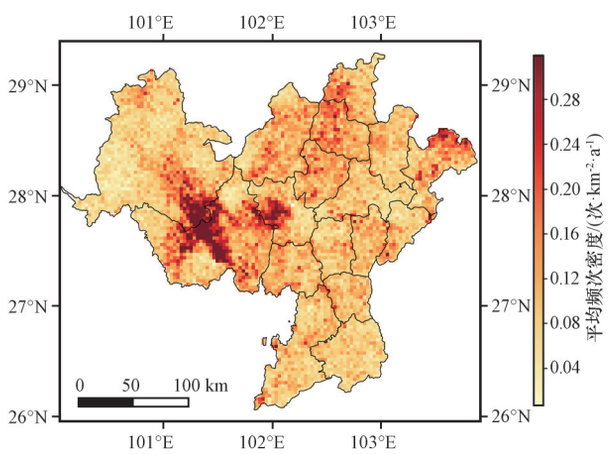


图6 2010—2023年凉山地区强雷电平均频次密度空间分布特征(单位:次·km^{-2}·a^{-1})

Fig. 6 Spatial distribution of the mean frequency density of strong lightning in the Liangshan region from 2010 to 2023. Unit: times·km^{-2}·a^{-1}

模型进行了对比。从图11中的实测数据可以看出,凉山地区雷电流幅值主要集中在中小强度区间。总回击电流幅值超过30 kA和50 kA的累计概率分别为22.2%和8.3%,这意味着91.7%的雷电回击电流幅值在50 kA以下。正回击的累计概率曲线更为平缓,雷电流幅值分布范围更广,出现大电流的概率更高。相比之下,负回击的雷电流幅值分布更为集中,这种差异在高幅值区段尤为明显。将实测曲线与推荐模型对比可以发现,本区域的雷电流分布与IEEE推荐模型的趋势更为接近,而与电力部门行业标准曲线差异较大。在曲线的起始阶段(0~40 kA),实测曲线与IEEE推荐曲线均呈现外凸的形态,而推荐曲线则为内凹,形态差异显著。电力

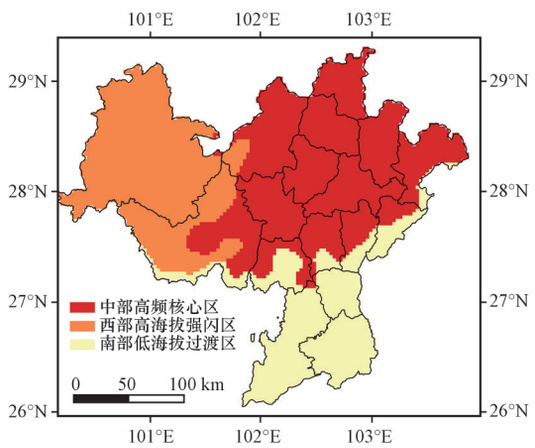


图7 基于雷电频次与地形的K-Means物理分区

Fig. 7 K-Means physical partitioning based on lightning frequency and terrain

部门行业标准曲线在整个幅值区间内均高估了中小电流的发生概率,同时低估了大电流的发生概率,可能导致防护设计偏于保守或裕度不足。

对比发现,本研究基于IEEE模型采用非线性拟合方法,对凉山地区及各分区的总回击、正回击和负回击数据进行了拟合,求解出了一套完整、区域化的参数,即雷电流幅值参数a和形状参数b(图12)。拟合结果(表2)显示,模型在所有分区和所有回击类型上均表现出优异的拟合效果,决定系数R^2均在0.977以上,证明了IEEE模型对本区域雷电数据的强大适用性。

参数a直观反映了雷电流的整体强度水平。西部高海拔强闪区和南部低海拔过渡区的总回击和负回击参数a值显著高于中部高频核心区,定量证实了西部和南部雷电强度更高的事实。尤其是正回击,南部低海拔过渡区的a值最高,表明该区域的正回击整体强度最强。形状参数b反映了概率分布曲线的陡峭程度,其值越小,曲线越平缓,表明大电流事件的发生概率相对更高。西部高海拔强闪区的总回击和负回击参数b值为全区最低,这与该区域低频高强的特征完全吻合,表明该区域发生极端大电流事件的风险更高。

4 讨论

本研究揭示的凉山地区雷电活动频次强度空间分异特征,可能与不同尺度、不同生命史的雷暴系统在该地区的共存与相互作用有关,为理解复杂地形区的雷电物理过程提供了新的视角。

凉山地区中部和东北部夏季午后的高频次、低强度雷电活动,其特征与受局地热力作用驱动的暖

表 1　各物理分区雷电与地形参数统计特征表

Table 1　Statistical characteristics of lightning and terrain parameters for each physical partition

	凉山地区总体	中部高频核心区	西部高海拔强闪区	南部低海拔过渡区
面积占比/%	100. 00	47. 00	30. 70	22. 30
平均高程/m	2638. 80	2472. 60	3325. 80	2044. 10
总回击数/次	900875. 00	552370. 00	175943. 00	172562. 00
平均频次密度/(次·km^{-2}·a^{-1})	1. 07	1. 39	0. 68	0. 92
总回击幅值均值/kA	20. 39	18. 10	26. 48	21. 51
总回击幅值中位数/kA	10. 30	9. 30	13. 90	11. 80
正回击幅值均值/kA	40. 60	38. 17	42. 99	44. 02
正回击幅值中位数/kA	33. 40	31. 60	33. 22	37. 46
负回击幅值均值/kA	18. 66	16. 59	24. 84	19. 15
负回击幅值中位数/kA	9. 50	8. 80	12. 30	10. 40
正回击占比/%	7. 87	6. 98	9. 06	9. 47
强正回击密度/[次·(1000km^2)$^{-1}$·a^{-1}]	8. 40	8. 41	7. 88	9. 09

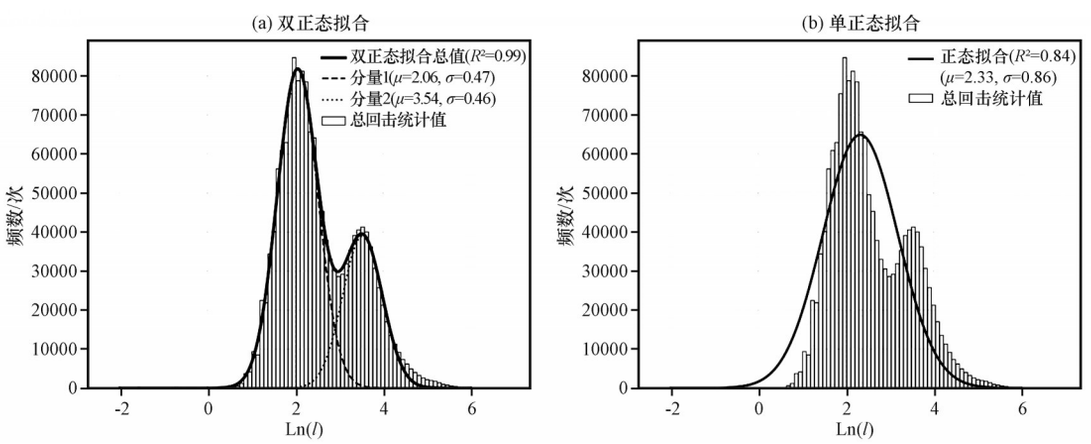


图 8　凉山地区总回击雷电流幅值对数分布

Fig. 8　Log-normal distribution of total return stroke current amplitude in the Liangshan region

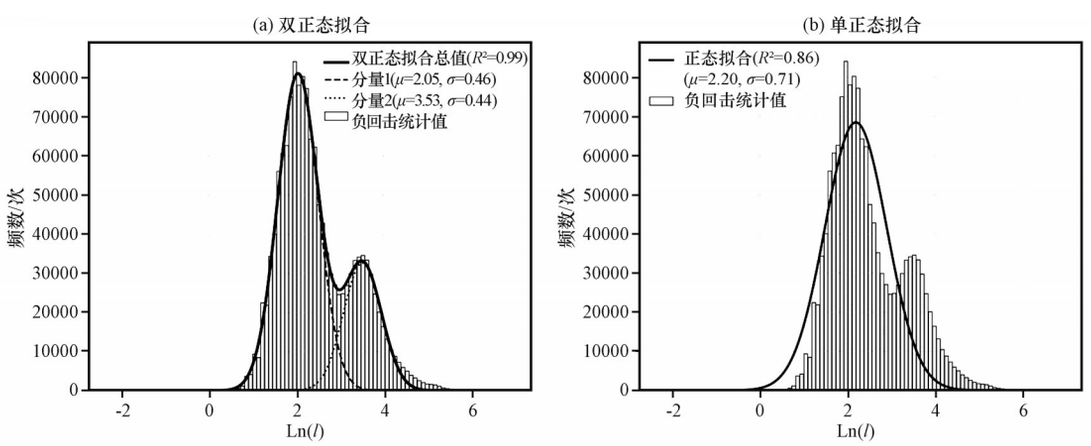


图 9　凉山地区负回击雷电流幅值对数分布

Fig. 9　Log-normal distribution of negative return stroke current amplitude in the Liangshan region

季单体雷暴高度吻合。这类雷暴生命史短，垂直发展有限，主要由日间地面加热和不稳定能量累积触发。从气象场角度分析，郭媛媛等(2024)基于中国南方地区的统计研究表明，当对流有效位能

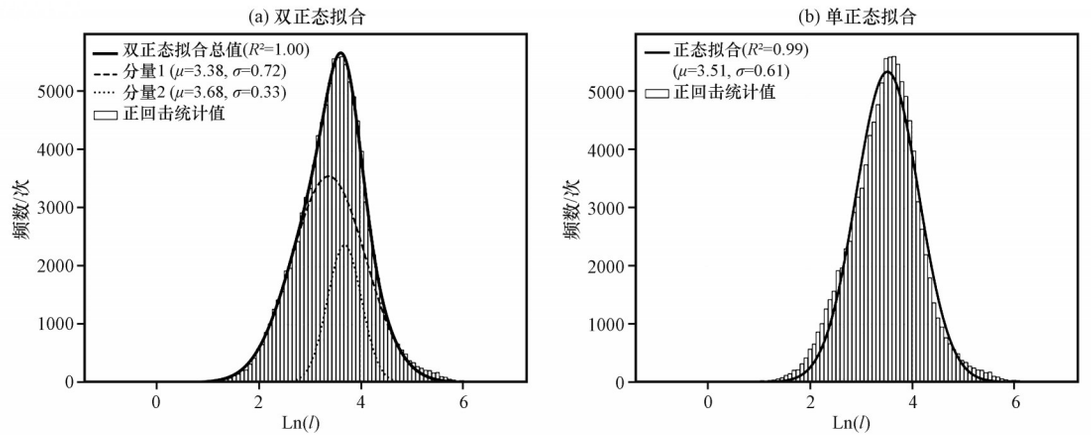


图10 凉山地区正回击雷电流幅值对数分布

Fig. 10 Log-normal distribution of positive return stroke current amplitude in the Liangshan region

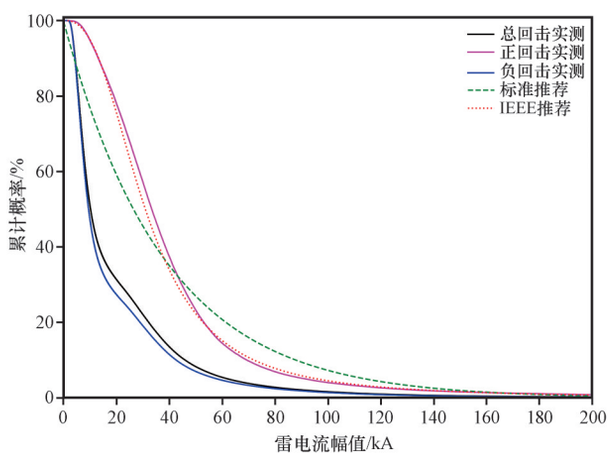


图11 凉山地区雷电流幅值累计概率分布对比

Fig. 11 Comparison of cumulative probability distributions of lightning current amplitude in the Liangshan region

(CAPE)和K指数同为正异常时，地闪密度显著增大；然而，若中层风切变较弱，对流难以组织化发展，多表现为孤立的普通单体，其电荷分离效率相对有限，因此呈现高频次但低幅值的雷电特征。周筠君等(1999)的研究进一步指出，当雷达强回波(25 dBz)高度超过−10 ℃层高度越大时，地闪频数和强度均越高，这从对流发展深度的角度解释了中部高频核心区相对较低的雷电强度。

而在西部和南部，观测到的低频次、高强度雷电模式，特别是春、秋季及夜间(21:00—23:00)的强正回击事件，强烈指向了由更大尺度的天气系统(如高原涡、西南涡)所驱动的有组织对流系统(Yan et al., 2022)。这类系统能够形成垂直发展更为深厚、结构更为复杂的超级单体或中尺度对流系统(Mesoscale Convective System, MCS)，其强烈的动力抬升和深厚的冰相区为产生大电流回击提供了物理条件。杨波等(2019)对华南江南地区春季雷暴的经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析揭示，该区域雷暴活动的主模态对应着深厚西南槽前、上干下湿的水汽层结和上冷下暖的温度层结，这种位势不稳定环境为大范围强雷暴的发生提供了热力和动力条件。郭媛媛等(2024)的研究还证实，中低层湿度差的增大有利于闪电活动的发生，而这种层结特征恰恰是春秋季节青藏高原东南缘的典型环境条件。何娜等(2023)对北京地区雷暴阵风锋触发对流的研究进一步证实，高CAPE低对流抑制能量(Convective Inhibition, CIN)的热力条件配合高层干冷空气侵入所形成的上干下湿、上冷下暖层结结构，是对流触发的关键环境场特征。庞波等(2023)基于福建省雷暴日的EOF分析也表明，雷暴活动的空间分布与地形起伏和海陆距离密切相关，山区地形和特殊的大气环流共同导致了闪电活动的区域差异。

雷暴的电荷结构，特别是下部正电荷区(Lower Positive Charge Center, LPCC)的强度和位置，对地闪的极性起着至关重要的作用。尽管通常认为LPCC与正地闪的发生有关，但在某些特殊条件下，如青藏高原的雷暴中，一个异常强大的LPCC也可能因促进云内放电而抑制正地闪的产生(Qie et al., 2005)。北京地区的研究也发现了类似的高频区与高强度区不一致的现象，并将其归因于山前地带对雷暴的触发作用(郭润霞等，2018)。这种跨区域的相似性表明，地形与天气系统的相互作用是塑造雷电“频次−强度”空间格局的关键。

本研究中观测到的雷电流幅值对数概率密度呈双峰分布，这为前述局地热对流和有组织对流两类过程的共存提供了理论依据(郄秀书等，2001)。

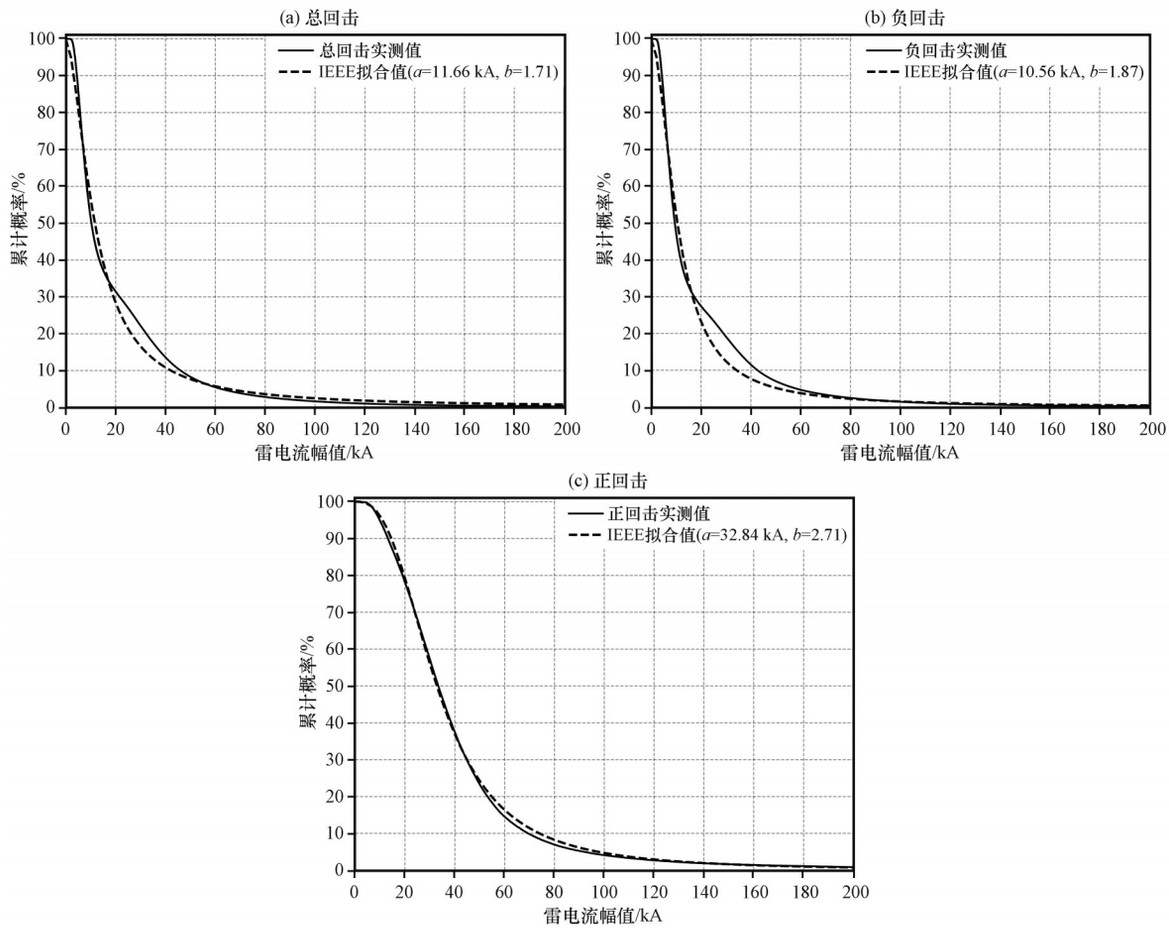


图 12　凉山地区雷电流幅值累积概率拟合曲线

(a)总回击, (b)负回击, (c)正回击

Fig. 12　Fitted cumulative probability distribution curves for lightning current amplitude in the Liangshan region.

(a) total return stroke, (b) negative return stroke, (c) positive return stroke

表 2　凉山地区各分区雷电流幅值拟合曲线参数

Table 2　Parameters of the fitted curves for lightning current amplitude in different physical partitions of the Liangshan region

分区	回击类型	幅值中位数 (a)/kA	形状参数 (b)	决定系数 (R^2)
凉山地区	总回击	11. 6	1. 71	0. 979
	正回击	32. 8	2. 71	0. 998
	负回击	10. 5	1. 87	0. 978
中部高频核心区	总回击	10. 3	1. 89	0. 978
	正回击	31. 0	2. 61	0. 998
	负回击	9. 4	2. 11	0. 980
西部高海拔强闪区	总回击	15. 3	1. 53	0. 986
	正回击	33. 2	2. 64	0. 999
	负回击	13. 9	1. 57	0. 983
南部低海拔过渡区	总回击	13. 3	1. 67	0. 981
	正回击	36. 8	3. 15	0. 997
	负回击	11. 8	1. 80	0. 978

一个以低幅值为中心的峰, 对应着数量众多但强度较弱的局地热对流雷暴; 而另一个以高幅值为中心的峰, 则代表了数量较少但强度极高的有组织对流雷暴。这与曾楚英等(1991)早期基于海拔和纬度对雷电流参数的经典分析相呼应, 即不同的地理和气候背景决定了雷电的基本参数。

这些发现对于雷电风险评估与防护实践具有重要的指导意义。目前, 许多风险评估仍主要依赖于地闪密度等频次指标(袁湘玲等, 2017), 而本研究明确指出, “高频”区域并非“高危”区域的全部。仅基于频次的风险评估方法, 可能会高估中部地区因雷电造成的破坏性, 同时严重低估西部和南部地区因极端强电流事件所带来的“点状”高风险。因此, 本研究的结果支持在进行风险评估时, 应从单一的频次维度转向频次和强度相结合的双参数框架(张新科等, 2022)。同时, 本研究提供的基于本地数据拟合的 IEEE 模型参数, 相较于通用电力部

门行业标准，能为本地化的工程设计提供更为精准的计算依据。刘刚等(2013)的研究表明，在地形地貌、土壤电阻率等存在差异的地区，雷电流幅值的概率分布对输电线路的跳闸率有直接影响，这进一步凸显了本研究提供的区域化参数在精准防雷工程中的价值。

本研究仍存在一些局限性，首先，观测到的雷电流幅值双峰分布虽然与不同对流模态的假设相吻合，但仅基于气候统计分析难以排除其他可能的解释，如MCS内部结构差异或雷暴生命史阶段效应，后续研究需结合雷达、卫星等多源观测对典型个例进行深入诊断。此外，本研究主要从气候统计角度进行分析，对于具体场景研究不足，且LLS系统对特定弱回击的探测效率存在一定问题。未来应进一步致力于将本研究的发现与具体的应用场景结合。一方面，可以结合气象雷达、卫星遥感和高分辨率数值模拟等手段，对典型雷暴个例进行深入的物理过程诊断，以验证本研究提出的双模态物理机制假说。另一方面，应将研究成果转化为更精细化的雷电灾害风险地图和临近预警工具(熊宇等，2015)，服务于电力、通信、交通等关键领域。

5 结论

基于2010—2023年闪电定位系统数据，结合K-Means物理分区方法，系统地揭示了青藏高原东南缘凉山地区雷电活动的时空分布规律与概率统计特征，为区域雷电防护工程提供了精细化的科学依据。主要结论如下：

(1) 凉山地区雷电活动存在显著的频次强度空间分异现象。雷电高发区(>1.39次·km^{-2}·a^{-1})集中于该地区中部的高频核心区，而强雷电事件则主要分布在西部的高海拔强闪区，两者空间分布呈显著负相关。

(2) 雷电活动的强度与频次在时间分布上也表现出不一致性。雷电频次在夏季午后达到高峰，与热对流活动规律吻合；而强度最高的正回击事件则集中发生在2—3月的上午(09:00—11:00)，表明其可能由不同于局地热对流的大尺度天气系统驱动。

(3) 雷电流幅值的对数概率密度普遍呈现双峰结构，双正态混合模型的拟合效果显著优于单正态模型，揭示了凉山地区可能存在两种物理成因不同的主导雷暴类型：一种是高频低强型，另一种是低频高强型，与K-Means物理分区的结论高度吻合，其具体物理成因有待结合个例分析进一步验证。

(4) 在工程应用方面，IEEE推荐的累积概率模型比电力部门行业标准(DL/T 620-1997)能更准确地描述凉山地区的雷电流幅值分布。基于本地数据，为各分区拟合了一套精细化的IEEE模型参数，为实现区域化、差异化的精准防雷设计提供了直接的科学依据。

参考文献(References)：

Dwyer J R, Uman M A, 2014. The physics of lightning[J]. Physics Reports, 534(4): 147−241. DOI: 10. 1016/j. physrep. 2013. 09. 004.

Jiang Ruijiao, Zhang Guoping, Wang Shudong, et al., 2023. Characteristics of cloud-to-ground lightning (CG) and differences between +CG and-CG strokes in China regarding the China National Lightning Detection Network[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 23(12): 3747−3759. DOI: 10. 5194/nhess−23−3747−2023.

Liu Yinping, Jiang Yuhui, Gao Qisen, et al., 2022. Characteristic analysis of lightning activities on the Yungui Plateau using ground-based remote sensing[J]. Frontiers in Environmental Science, 10: 949271. DOI: 10. 3389/fenvs. 2022. 949271.

Ma Yutang, Shu Hongchun, Xiao Changxin, et al., 2025. Lightning current distribution of the first and subsequent strokes based on the lightning location system: survey in Yunnan power grid[J]. Atmosphere, 16(1): 15. DOI: 10. 3390/atmos16010015.

Marquardt D W, 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters[J]. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 11(2): 431−441. DOI: 10. 1137/0111030.

Qie Xiushu, Zhang Tinglong, Chen Chengpin, et al., 2005. The lower positive charge center and its effect on lightning discharges on the Tibetan Plateau[J]. Geophysical Research Letters, 32(5): L05814. DOI: 10. 1029/2004gl022162.

Yan Zhitao, Zhou Yunjun, Hui Lei, 2022. Comparative analysis of two types of summer thunderstorms with different potential vorticity characteristics in the Nagqu region of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Frontiers in Earth Science, 10: 985846.

Yin Liyun, Wang Haoyue, Jin Wenjie, et al., 2018. Lightning activity characteristics under complex topography in low latitude plateau of China[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 16(5): 6349−6367. DOI: 10. 15666/aeer/1605_63496367.

安江浩，陈生，胡泽勇，2025. 2019−2023年夏季青藏高原闪电时空分布特征研究[J]. 高原气象，44(6)：1464−1472. An Jianghao, Chen Sheng, Hu Zeyong, 2025. Study on temporal and spatial

distribution characteristics of lightning on Qinghai-Xizang Plateau in summer 2019−2023[J]. Plateau Meteorology, 44(6): 1464−1472. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000−0534. 2025. 00039.

陈家宏，童雪芳，谷山强，等，2008. 雷电定位系统测量的雷电流幅值分布特征[J]. 高电压技术，34(9)：1893−1897. Chen Jiahong, Tong Xuefang, Gu Shanqiang, et al., 2008. Distribution characteristics of lightning current magnitude measured by lightning location system[J]. High Voltage Engineering, 34(9): 1893−1897. DOI: 10. 13336/j. 1003−6520. hve. 2008. 09. 020.

陈家宏，赵淳，谷山强，等，2016. 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，42(11)：3361−3375. Chen Jiahong, Zhao Chun, Gu Shanqiang, et al., 2016. Present status and development trend of lightning detection and protection technology of power grid in China[J]. High Voltage Engineering, 42(11): 3361−3375. DOI: 10. 13336/j. 1003−6520. hve. 20161031001.

陈渭民，2003. 雷电学原理[M]. 北京：气象出版社 . Chen Weimin, 2003. Principles of lightning science[M]. Beijing: China Meteorological Press.

DL/T 620−1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S]. DL/T 620−1997 Overvoltage protection and insulation coordination for AC electrical installations[S].

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 Runxia, Wang Yingchun, Zhang Wenlong, 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. DOI: 10. 16032/j. issn. 1004−4965. 2018. 03. 013.

郭媛媛，沈艳，许永芳，2024. 中国南方地区夏季地闪和降水协同变化的特征及气象要素分析[J]. 热带气象学报，40(3)：373−388. Guo Yuanyuan, Shen Yan, Xu Yongfang, 2024. Co-variability between the summer cloud-to-ground lightning and precipitation over South China and their possible connections with meteorological parameters[J]. Journal of Tropical Meteorology, 40(3): 373−388. DOI: 10. 16032/j. issn. 1004−4965. 2024. 034.

何娜，俞小鼎，丁青兰，等，2023. 北京地区雷暴阵风锋触发对流新生的环境场特征分析[J]. 高原气象，42(5)：1285−1297. He Na, Yu Xiaoding, Ding Qinglan, et al., 2023. Analysis of environmental field characteristics of convective initiation triggered by thunderstorm gust fronts in Beijing area[J]. Plateau Meteorology, 42(5): 1285−1297. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000−0534. 2022. 00054.

李家启，李博，申双和，等，2010. 基于ADTD系统的雷电流波头陡度频率分布特征[J]. 气象科技，38(6)：741−745. Li Jiaqi, Li Bo, Shen Shuanghe, et al., 2010. Distribution characteristics of lightning current wave-head gradient based on ADTD system[J]. Meteorological Science and Technology, 38(6): 741−745. DOI: 10. 19517/j. 1671−6345. 2010. 06. 016.

刘刚，唐军，孙雷雷，等，2013. 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，39(1)：17−23. Liu Gang, Tang Jun, Sun Leilei, et al., 2013. Influence of the distribution of lightning current amplitude in different landforms on the transmission-line's tripping operation[J]. High Voltage Engineering, 39(1): 17−23. DOI: 10. 3969/j. issn. 1003−6520. 2013. 01. 003.

刘平英，吴永斌，姚雯，等，2024. 云南省雷电流幅值时空变化特征及累积概率分布[J]. 灾害学，39(4)：24−32. Liu Pingying, Wu Yongbin, Yao Wen, et al., 2024. The spatiotemporal variation characteristics and cumulative probability distribution of lightning current amplitude in Yunnan Province[J]. Journal of Catastrophology, 39(4): 24−32.

刘平英，杨宗凯，胡颖，等，2018. 2016年云南省雷电灾害分布与致灾因素相关性分析[J]. 灾害学，33(1)：130−135，151. Liu Pingying, Yang Zongkai, Hu Ying, et al., 2018. Analysis on lightning disaster distribution characteristics and its corresponding causation of 2016 in Yunnan[J]. Journal of Catastrophology, 33(1): 130−135, 151. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000−811X. 2018. 01. 023.

潘健，毕硕本，沈香，等，2017. 江苏省雷电强度等级空间分布及其与土地利用类型的关系[J]. 江苏农业科学，45(8)：219−223. Pan Jian, Bi Shuoben, Shen Xiang, et al., 2017. Spatial distribution of lightning intensity grades in Jiangsu Province and its relationship with land use types[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 45(8): 219−223. DOI: 10. 15889/j. issn. 1002−1302. 2017. 08. 061.

庞波，朱彪，赖辉煌，等，2023. 基于闪电监测数据的台站雷暴日统计检验及其演变特征研究[J]. 高原气象，42(6)：1604−1614. Pang Bo, Zhu Biao, Lai Huihuang, et al., 2023. A statistical test of station thunderstorm days based on lightning location system and its evolution characteristics[J]. Plateau Meteorology, 42(6): 1604−1614. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000−0534. 2023. 00013.

戚云彤，黄兴友，2023. 四川盆地闪电活动特征及其影响因素的分析[J]. 气候变化研究快报，12(6)：1107−1121. Qi Yuntong, Huang Xingyou, 2023. The influence of special topography on lightning activity in Sichuan Basin[J]. Climate Change Research Letters, 12(6): 1107−1121. DOI: 10. 12677/CCRL. 2023. 126114.

郄秀书，余晔，王怀斌，等，2001. 中国内陆高原地闪特征的统计分析[J]. 高原气象，20(4)：395−401. Qie Xiushu, Yu Ye, Wang Huaibin, et al., 2001. Analyses on some features of ground flashes in Chinese inland plateau[J]. Plateau Meteorology, 20(4): 395−401.

郄秀书，袁铁，谢毅然，等，2004. 青藏高原闪电活动的时空分布特征[J]. 地球物理学报，47(6)：997−1002. Qie Xiushu, Yuan Tie, Xie Yiran, et al., 2004. Spatial and temporal distribution of lightning activities over the Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal Geophysics, 47(6): 997−1002.

宋敏敏，郑永光，2016. 我国中东部3−9月云−地闪电密度和强度分布特征[J]. 热带气象学报，32(3)：322−333. Song Minmin,

Zheng Yongguang, 2016. Distribution of cloud-to-ground lightning density and intensity during March-September over central and Eastern China[J]. Journal of Tropical Meteorology, 32(3): 322−333. DOI: 10. 16032/j. issn. 1004−4965. 2016. 03. 004.

王学良, 张科杰, 余田野, 等, 2016. 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, 44(6): 1037−1042. Wang Xueliang, Zhang Kejie, Yu Tianye, et al., 2016. Characteristics of probability distribution for lightning peak current and segment revision for cumulative probability[J]. Meteorological Science and Technology, 44(6): 1037−1042. DOI: 10. 19517/j. 1671−6345. 2016. 06. 028.

熊宇, 苟阿宁, 阮羚, 2015. 雷电临近预报方法在输电线路雷击预警中的应用初探[J]. 暴雨灾害, 34(3): 275−280. Xiong Yu, Gou Aning, Ruan Ling, 2015. Tentative discussion on the application of lighting nowcasting method to transmission lines[J]. Torrential Rain and Disasters, 34(3): 275−280. DOI: 10. 3969/j. issn. 1004−9045. 2015. 03. 011.

杨波, 王园香, 蔡雪薇, 2019. 我国华南江南春季雷暴气候特征分析[J]. 热带气象学报, 35(4): 470−479. Yang Bo, Wang Yuanxiang, Cai Xuewei, 2019. Analysis on the climatological characteristics of thunderstorms in the south and southeast of China in spring[J]. Journal of Tropical Meteorology, 35(4): 470−479. DOI: 10. 16032/j. issn. 1004−4965. 2019. 043.

余蓉, 张小玲, 杜牧云, 等, 2021. 华中地区不同地形下的雷暴地闪特征分析[J]. 热带气象学报, 37(3): 329−340. Yu Rong, Zhang Xiaoling, Du Muyun, et al., 2021. Analysis of characteristics of cloud-to-ground lightning activity of thunderstorms over different topography in Central China[J]. Journal of Tropical Meteorology, 37(3): 329−340. DOI: 10. 16032/j. issn. 1004−4965. 2021. 031.

袁湘玲, 周倩, 王振会, 等, 2017. 雷电灾害风险分级方法研究[J]. 灾害学, 32(1): 26−31. Yuan Xiangling, Zhou Qian, Wang Zhenhui, et al., 2017. A study on the lightning disaster risk grading methods[J]. Journal of Catastrophology, 32(1): 26−31. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000−811X. 2017. 01. 006.

曾楚英, 谷定燮, 陈志述, 等, 1991. 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, 17(2): 70−76. Zeng Chuying, Gu Dingxie, Chen Zhishu, et al., 1991. A statistic analysis between the parameters of lightning current and altitude latitude[J]. High Voltage Engineering, 17(2): 70−76. DOI: 10. 13336/j. 1003−6520. hve. 1991. 02. 019.

张新科, 何跃, 程译萱, 等, 2022. 重庆地区复杂地形影响下地闪活动特征分析[J]. 热带气象学报, 38(5): 694−703. Zhang Xinke, He Yue, Cheng Yixuan, et al., 2022. Characteristics of cloud-to-ground lightning activities under influence of complex terrain in Chongqing[J]. Journal of Tropical Meteorology, 38(5): 694−703. DOI: 10. 16032/j. issn. 1004−4965. 2022. 063.

周筠君, 郄秀书, 张义军, 等, 1999. 地闪与对流性天气系统中降水关系的分析[J]. 气象学报, 57(1): 103−111. Zhou Yunjun, Qie Xiushu, Zhang Yijun, et al., 1999. The relationship between cloud to ground lightning and precipitation in the convective weather[J]. Acta Meteorologica Sinica, 57(1): 103−111.

Spatiotemporal distribution and probabilistic model of lightning current amplitude in the Liangshan region, southeastern margin of the Qinghai-Xizang Plateau

Ji Jingxiao[1], Li Bing[2], Liu Jun[2], Du Zedong[3], Yang Xiuqin[1], Liu Yikun[1], Shen Daoyu[1], Deng Weiwen[1]

(1. *School of Hydrology and Water Resources, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044, *Jiangsu, China*;

2. *Liangshan Yi Autonomous Prefecture Meteorological Observatory, Liangshan* 615000, *Sichuan, China*;

3. *China Three Gorges Construction Engineering Corporation, Chengdu* 610041, *Sichuan, China*)

Abstract: Using lightning location system data collected in the Liangshan region from 2010 to 2023, this study applied K-means clustering to delineate lightning-activity zones and employed a two-component Gaussian mixture model and the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) cumulative probability model for statistical analysis. The spatiotemporal distributions, statistical characteristics, and probability models of the frequency density and current amplitude of cloud-to-ground lightning return strokes were systematically investigated. The results show that: (1) lightning activity in the Liangshan region exhibits a significant negative spatial correlation between frequency and current amplitude. High-frequency lightning is concentrated in the central part of the region, whereas strong lightning events occur mainly in the western high-altitude strong-lightning zone; (2) the temporal variations in lightning frequency and current amplitude are asynchronous. Lightning frequency peaks on summer afternoons, consistent with thermally driven convection, whereas the highest-amplitude positive return strokes occur mainly between 09:00 (Beijing time, the same as after) and 11:00 in February and March; (3) the logarithmic probability density of lightning current amplitude generally exhibits a bimodal structure, and the two-component Gaussian mixture model provides a markedly better fit than the single Gaussian model, indicating that lightning activity in the region may be influenced by different physical processes; (4) the IEEE cumulative probability model describes the local distribution of lightning current amplitude more accurately than the Chinese electric power industry standard DL/T 620-1997. This study provides a refined set of IEEE model parameters for each physical zone, offering a direct scientific basis for regionalized and differentiated lightning-protection design.

Key words: lightning frequency; lightning current amplitude; spatiotemporal distribution characteristics; probability distribution model; Liangshan region