朱浩,程向阳,田红,等.2024.基于GIS的安徽省雷电致灾危险性评估与区划[J].暴雨灾害,43(6):733-740. ZHU Hao, CHENG Xiangyang, TIAN Hong, et al. 2024. Assessment and zoning of lightning disaster-causing hazards in Anhui Province based on GIS [J]. Torrential Rain and Disasters,43(6):733-740. (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-186

基于GIS的安徽省雷电致灾危险性评估与区划

朱浩[1],程向阳[1],田红[2],鞠晓雨[3],邱阳阳[1]

(1. 安徽省气象灾害防御技术中心,合肥 230031;2. 安徽省气候中心,合肥 230031;3. 淮河流域气象中心,合肥 230031)

摘　要:致灾危险性评估是雷电灾害风险普查的关键环节。根据2020年开始的全国气象灾害综合风险普查的技术路线,基于2010—2020年安徽省闪电定位、2000—2020年历史灾情、数字地形高程和土壤电导率资料,参照《全国气象灾害调查与风险评估技术规范(雷电)》构建安徽省雷电致灾危险性区划模型,利用层次分析法确定各指标权重后计算雷电致灾危险性指数,结合GIS技术完成雷电致灾危险性区划。结果表明:(1) 雷击密度和雷电流幅值分布与地形地貌密切相关,海拔高度和地形起伏度对雷电致灾危险性具有正向驱动作用。(2) 雷电灾害孕灾高和较高敏感区主要位于山区、沿江和淮河流域局部地区。(3) 雷电致灾高危险区位于沿江大部及皖南山区部分地区;较高危险区位于皖南山区、江淮之间和沿江江南的部分地区;较低和低危险区位于皖北地区和江淮之间的平原和丘陵部分地区。结合历史灾情数据对比检验,区划结果与实际灾情分布基本吻合,可为安徽省的雷电灾害防御工作提供参考。

关键词:雷电灾害;雷电流幅值;孕灾环境敏感性;GIS技术;致灾危险性区划

中图法分类号: P429　　**文献标志码:**A　　**DOI:**10.12406/byzh.2023-186

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

ZHU Hao[1], CHENG Xiangyang[1], TIAN Hong[2], JU Xiaoyu[3], QIU Yangyang[1]

(1. *Anhui Meteorological Disaster Prevention Center, Hefei* 230031; 2. *Anhui Climate Center, Hefei* 230031;
3. *Huai River Basin Meteorological Center*, *Hefei* 230031)

Abstract: The assessment of lightning disaster-causing hazards is the key to risk survey of lightning disasters. Following the technical route of the national meteorological disasters comprehensive risk survey since 2020, and based on the lightning location data from 2010 to 2020, lightning disaster data from 2000 to 2020, digital elevation data, and soil conductivity data in Anhui Province, a model diagram of disaster-causing hazard zoning was constructed according to "Specification for meteorological disasters investigation and risk assessment: Lightning". The Analytic Hierarchy Process was used to determine the weight of each index, and the lightning disaster-causing hazard index was then calculated. The zoning of lightning disaster-causing hazards in Anhui Province was completed by combining with GIS technology. The results are as follows. (1) The distributions of lightning strike density and lightning peak current amplitude are closely related to the topography. The altitude and terrain have a positive driving effect on the lightning disaster-causing hazard. (2) The high and relatively high sensitivity of lightning disaster-pregnant areas are mainly located in mountainous regions, along the Yangtze River, and parts of the Huai River basin. (3) The areas of high lightning disasters are mainly located in most regions along the Yangtze River and southern mountainous regions in Anhui Province. The areas of relatively high lightning disasters are mainly located in the southern mountainous region, between the Yangtze River and Huai River, and parts of the Jiangnan region. The areas of low and relatively low lightning disasters are mainly located in the plain and hilly areas in the northern Anhui region and the Jiang-huai region. By comparing the zoning results with historical disaster data, it is found that the distribution of lightning disaster-causing hazard zoning agrees well with the true distribution of disaster, which can provide a reference for future lightning disaster prevention in Anhui Province.

Key words: lightning disaster; amplitude of lightning current; sensitivity of disaster-pregnant environment; GIS technology; zoning of lightning disaster-causing hazards

收稿日期: 2023-09-01;**定稿日期:**2023-11-29

资助项目: 安徽省重点研究与开发计划项目标准化专项(202004h07020001);安徽省气象局新技术集成项目(AHXJ201905)

第一作者: 朱浩,主要从事雷电灾害防御技术研究。E-mail:zhuhao-201@163.com

通信作者: 程向阳,主要从事雷电防护和气象标准化研究。E-mail:1733943328@qq.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

引 言

雷电灾害是“国际减灾十年”公布的最严重的十种自然灾害之一(费蕾蕾等,2017)。近年来,全球气候变暖,极端天气多发,导致雷电活动愈加频繁(Seeley and Romps, 2015; Osmar and Iara, 2020)。根据《第一次全国自然灾害综合风险普查实施方案(修订版)》的要求,雷电被列为全国自然灾害综合风险普查的气象灾害十大灾种之一。致灾危险性评估与区划作为雷电灾害风险普查的关键环节(中国气象局,2021),可为有效制定危险性分区管理措施、开展雷电灾害防御工作提供理论依据。

近年来,为减少雷击事故、明确雷电防护重点区域,很多学者开展了雷电灾害风险评估和区划研究,并形成了诸多成果。陈柳彤等(2019)利用闪电定位、地理信息和社会经济数据,通过构建致灾因子危险性和承灾体易损性因子,利用自然断点法完成河北省雷电灾害风险区划。王延慧等(2019)利用地闪资料、灾情数据、社会经济资料和地理信息数据,选取10类影响因子建立新疆地区雷电灾害区划模型,采用层次分析法和加权综合评价法计算雷电灾害风险指数后完成区划。余田野等(2023)综合利用气象、地理信息、人口经济和历史灾情数据,基于层次分析法构建雷电灾害风险区划模型,在湖北地区应用效果良好。2017年,气象行业标准《雷电灾害风险区划技术指南》(中国气象局,2017)发布后,为我国各地区开展雷电灾害风险区划提供技术参考。以上研究均将地形因素列入雷电灾害孕灾环境,说明地形条件对雷电灾害风险的影响不可忽视。研究表明,地闪和雷电灾害的发生与地形因素关系密切(Dissing and Verbyla,2003;胡豪和陶鑫,2020;王学良等,2020),地形因素会影响雷暴过程产生的地闪分布,如地势起伏度高、空旷区域中孤立建筑等对象更容易成为雷击对象(郭秀峰等,2013;Jiang et al.,2020)。以往相关研究成果多侧重于风险评估和区划方法,而涉及雷电致灾危险性评估和区划以及地形因素的影响,目前相关研究和报道较少。

安徽省位于我国中东部地区,地形地貌大致可划分为淮北平原、江淮丘陵、皖西大别山区、沿江平原、皖南山区5个自然区域(孙慧敏等,2016),气候上属于暖温带与亚热带的过渡区。受气候条件和地理因素的影响,安徽境内雷电大风等强对流活动频繁(吴瑞姣等,2013),地闪分布特征地域差异明显(王凯等,2022)。近年来安徽地区雷电灾害频发,成为影响人员生命安全的主要气象灾害之一,如2022年的“南陵县广场雷击事件”造成2人死亡、2人重伤。已有研究对安徽省雷电活动规律总结和雷电灾害个例分析较多(王凯等,2022),但涉及雷电致灾危险性分析和区划的研究较少。本文基于2020—2022年安徽省第一次气象灾害综合风险普查结果,利用安徽省闪电定位、历史灾情、数字地形高程及土壤电导率等多源资料,定量化分析地形因素对于雷电参数分布的影响,在此基础上综合致灾因子和孕灾环境构建雷电致灾危险性区划模型,基于GIS完成安徽省雷电致灾危险性区划,以期为保障雷电灾害风险区划结果的准确性、开展气象灾害综合风险普查和灾害防御工作提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 资料说明

1.1.1 闪电定位资料

地闪数据来自于2010—2020年安徽省ADTD闪电定位系统,该系统探测效率可达90%,理论定位精度优于300 m (王凯等,2022;余田野等,2023)。为提高地闪数据的质量,本次研究按照《雷电灾害风险区划技术指南》(中国气象局,2017)中的质量控制方法,剔除了雷电流幅值绝对值超过200 kA和小于2 kA的数据。

1.1.2 历史灾情资料

历史灾情数据来自于2000—2020年安徽省气象局收集的雷电灾害案例、气象灾害管理系统、全国防雷减灾综合管理服务平台和中国气象学会雷电委员会主编的《全国雷电灾害汇编年鉴》。由于雷电灾情数据精确度有限,本次研究以安徽省105个区、县(市)行政区为最小研究单元对发生雷电灾害频次进行统计。

1.1.3 地理信息资料

数字高程数据来自航天飞机雷达测图计划SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) (万杰等,2015),分辨率为30 m。土壤电导率资料来自中国科学院南京土壤研究所根据第二次全国土地调查结果制作的中国土壤格网数据,分辨率为1 km。行政区划图选用国务院第一次全国自然灾害综合风险普查办公室制作的安徽省行政区划图。

1.2 技术路线与方法

1.2.1 技术路线

根据2021年中国气象局发布的《全国气象灾害综合风险普查技术规范》中的《雷电灾害调查与风险评估技术规范》(以下简称“规范2021”)与《雷电灾害风险区划技术指南》(中国气象局,2017),综合考虑致灾因子和孕灾环境,选取雷击密度、地闪强度、海拔高度、地形起伏度、土壤电导率作为指标构建安徽省雷电致灾危险性区划模型(图1)。通过计算雷电致灾危险性指数,在ArcGIS平台中利用自然断点法,将致灾危险

性划分为高、较高、较低和低4个等级，得到雷电致灾危险性区划。同时，在致灾危险性分析中，采用数理统计和相关性分析海拔高度和地形起伏度对雷电参数分布的影响。

1.2.2 评估指标确定

按照“规范2021”的要求，涉及雷电致灾危险性评估和区划的5类指标中，海拔高度E_h和土壤电导率S_c直接利用数字高程和土壤电导率栅格数据。雷击密度、地闪强度和地形起伏度3个指标处理方法分述如下：

(1) 雷击密度L_d。以3 km×3 km为单位网格大小，对质控后的闪电定位数据进行统计处理，按式(1)计算得到网格内的雷击密度L_d

$$L_d=N/(S\cdot Y) \tag{1}$$

式中，L_d为雷击密度，N为单位网格内的雷击频数，S为网格面积，取9 km^2；Y为资料年限，取11。

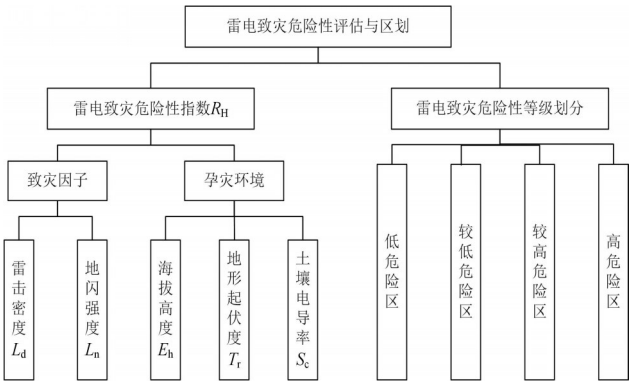


图1 雷电致灾危险性区划

Fig. 1 Model diagram of lightning disaster-causing hazards zoning

(2) 地闪强度L_n。按照百分位数法(中国气象局，2017)对安徽省的雷电流幅值进行等级划分，结果见表1。

表1 2010—2020年安徽省地闪雷电流幅值等级划分

Table 1 Classification of lightning current amplitude in Anhui Province during 2010-2020

等级	百分位数(P)区间	雷电流幅值F/kA
1级	$P\leqslant 60\%$	$F\leqslant 33.906$
2级	$60\%<P\leqslant 80\%$	$33.906<F\leqslant 46.001$
3级	$80\%<P\leqslant 90\%$	$46.001<F\leqslant 60.694$
4级	$90\%<P\leqslant 95\%$	$60.694<F\leqslant 78.693$
5级	$P>95\%$	$F>78.693$

统计3 km×3 km网格内不同雷电流幅值等级的雷击频次，按下式计算地闪强度L_n

$$L_n=\sum_{i=1}^{5}\left(\frac{i}{15}\times F_i\right) \tag{2}$$

式中，L_n为地闪强度，F_i为单位网格内雷电流幅值为第i等级的地闪频次归一化值。

(3) 地形起伏度T_r。根据“规范2021”和相关研究成果(王延慧等，2019；周明薇等，2022；余田野等，2023)，地形起伏度可采用高程标准差表示，处理方法为在ArcGIS平台中对数字高程作邻域分析，计算以目标栅格为中心、大小为3×3单元栅格正方形范围内的高程标准差(中国气象局，2021)，得到安徽省地形起伏度。

1.2.3 评估指标归一化处理

在雷电致灾危险性评估中，为消除各指标的量纲差异，对各评价指标作归一化处理。方法为

$$D_i=0.5+0.5\times\frac{x_i-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}} \tag{3}$$

式中，D_i为第i个评价指标的归一化值，x_i为第i个评价指标值，$x_{\min}$为评价指标中的最小值，$x_{\max}$为评价指标中的最大值。

1.2.4 致灾危险性指数计算

致灾危险性是自然灾害本身危险程度的反映，通常考虑灾害的发生频次和强度两个因素，灾害发生频次越高、强度越大，致灾危险性越高(唐为安等，2023)。按“规范2021”的要求，定义雷电致灾危险性指数R_H，计算公式如下

$$R_H=\left(L_d\times w_{ld}+L_n\times w_{ln}\right)\times\left(S_c\times w_{sc}+E_h\times w_{eh}+T_r\times w_{tr}\right) \tag{4}$$

式中，R_H为雷电致灾危险性指数，L_d、L_n、S_c、E_h、T_r分别为经归一化处理后的雷击密度、地闪强度、土壤电导率、海拔高程和地形起伏度，w_{ld}、w_{ln}、w_{sc}、w_{eh}、w_{tr}为各指标的权重系数，采用层次分析法(analytical hierarchy process，AHP)确定，结果见表2。

表2 安徽省雷电致灾危险性区划指标体系及权重分配

Table 2 Index system and weighted distribution for zoning of lightning disaster-causing hazard in Anhui Province

指标	名称	权重系数
二级指标	致灾因子	0.675 7
	孕灾环境	0.324 3
三级指标	雷击密度L_d	0.316 5
	地闪强度L_n	0.359 2
	海拔高度E_h	0.126 7
	地形起伏T_r	0.144 0
	土壤电导率S_c	0.053 6

1.2.5 致灾危险性区划

利用ArcGIS平台中的栅格计算器(Raster Calculator)按式(4)计算雷电致灾危险性指数，采用自然断点法(中国气象局，2017)，将致灾危险性划分为高、较

高、较低和低4个等级，得到安徽省雷电致灾危险性区划。

2 结果分析

2.1 雷电致灾危险性分析

2.1.1 致灾因子

(1)雷击密度。雷击密度是雷电防护设计、灾害风险评估中考虑的重要因子，也是衡量区域雷电活动多少的参数。图2给出了安徽省年平均雷击密度的空间分布。可以看出，雷击密度自北向南呈现增加的趋势，皖北绝大部分地区的雷击密度不超过2个/(km²·a)，江淮之间大部分地区的雷击密度值为0～3个/(km²·a)，东部的天长市和来安县雷击较多。安徽省雷击密度高值区主要位于大别山区、沿江江南东部、西部及南部，局部地区雷击密度值超过5个/(km²·a)。

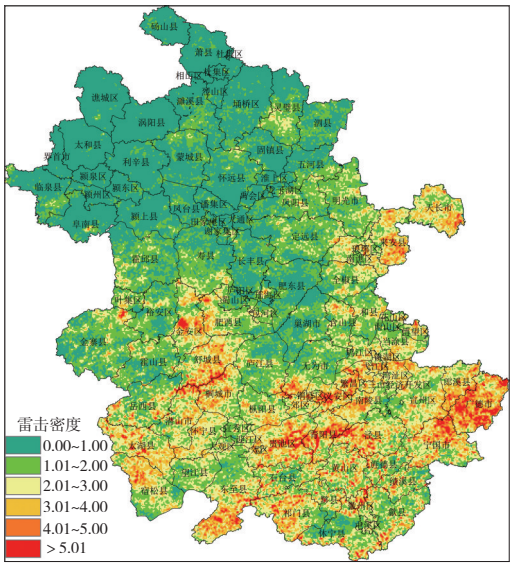


图2 2010—2020年安徽省年平均雷击密度(单位：个/(km²·a))分布

Fig. 2 Distribution of annual lightning strike density in Anhui Province during 2010–2020 (unit: flash/(km²·a))

为探究地形因素对于雷击密度分布的差异性影响，依据海拔高度对地形的划分标准(赵生昊等，2020)和1.2.2中的处理方法得到安徽省海拔高度和地形起伏度分布，以雷击密度的划分网格在ArcGIS平台Spatial Analyst中“提取分析”工具提取对应的海拔高度与地形起伏度，统计不同海拔高度与地形起伏度区间对应的雷击密度平均值。以网格为单位按50 m为区间大小统计海拔高度对应的雷击密度值并分析二者的变化趋势，结果见图3。可以看出，安徽省雷击密度L_d随着海拔高度E_h的变化呈现正相关的趋势。在海拔0～150 m内，L_d随着E_h增大呈现较为明显的增加趋势。海拔150～1 050 m范围内，随着E_h增大L_d变化不明显，雷击密度值在3个/(km²·a)上下浮动。海拔1 000 m以上高山地区，L_d变化幅度较大，尤其在1 300 m以上区域随E_h增大呈现明显的增加趋势。经拟合，雷击密度L_d与海拔高度E_h变化呈线性正相关，相关系数为0.78，通过0.001显著性水平检验。表明海拔高度E_h对雷电致灾危险性具有正向驱动作用。

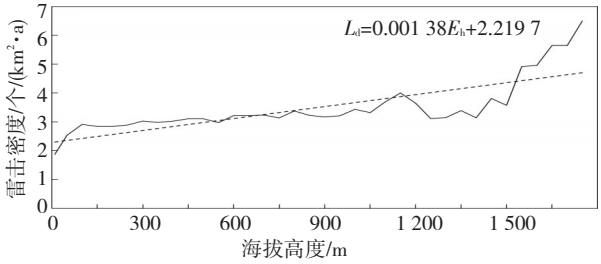


图3 2010—2020年安徽省雷击密度(L_d)随海拔高度(E_h)的变化

Fig. 3 Variation of lightning strike density (L_d) with altitude (E_h) in Anhui Province during 2010–2020

以网格为单位按10 m为区间大小统计地形起伏度T_r对应的雷击密度值，分析二者的变化趋势，结果见图4。可以看出，T_r在0～80 m内，随着地形起伏T_r的增加，雷击密度L_d呈现增加的趋势。T_r超过80 m时，雷击密度L_d随着地形起伏度T_r的增加变化起伏不定。经拟合，雷击密度L_d与地形起伏度T_r变化呈线性正相关，相关系数为0.49，通过0.05显著性水平检验。表明地形起伏度T_r对雷电致灾危险性具有正向驱动作用。

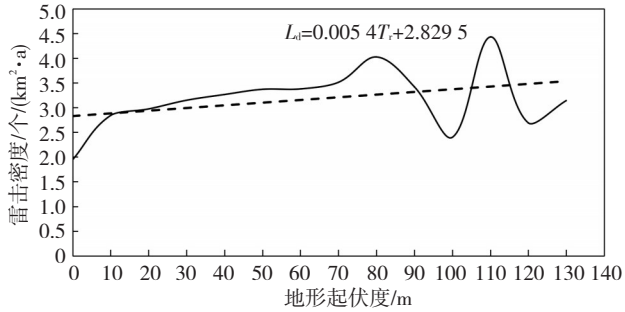


图4 2010—2020年安徽省雷击密度(L_d)随地形起伏度(T_r)的变化

Fig. 4 Variation of lightning strike density (L_d) with terrain (T_r) in Anhui Province during 2010–2020

安徽省高山地区雷击密度值明显大于平原和丘陵地带，这与费蕾蕾等(2017)、胡亚男等(2022)、王凯等(2022)的研究结论相近。大别山区作为长江与淮河水系的分水岭，皖南山区周边的水阳江、青弋江、新安江等水系众多，为雷暴生成提供了丰富的水汽条件。皖西大别山脉间分布断陷盆地、皖南山脉之间谷地丛生，地形起伏明显，受地形抬升影响容易形成上升气流，为局地雷暴的生成提供动力条件(王瑾婷等，2017)。同时，山体地形容易造成雷暴过境时地面电场的畸变，导致位于山顶或地势起伏变化大的建筑物更容易接闪(郭秀峰等，2013；Zhang et al.，2017)，

增大了区域的雷击密度。

(2)地闪强度。地闪强度是表征雷电致灾危险性的重要指标。根据式(2)，地闪强度由雷电流幅值及雷击频数综合判定。雷电流幅值是雷电防护工作中关注的关键参数，也是开展防雷工程设计、选取雷电防护产品材质和规格的重要依据。由于雷电流幅值属于系统间接测量且易受环境影响，海量的雷电流幅值数据在空间范围分布往往无规律可循。大量的研究表明，自然界正地闪数量要少于负地闪，但正地闪雷电流幅值平均值比负地闪大，对于防护能力相同的承灾体，正地闪的破坏力和致灾能力更强。对于雷暴过程而言，产生正地闪比例高的雷暴系统往往致灾能力更强(Kotroni and Lagouvardos，2008)。地形和气候特征差异往往导致正负地闪分布具有明显的地域特征。经统计安徽地区11 a的地闪数据发现，负地闪雷电流幅值集中程度比正地闪要高，负地闪雷电流幅值主要集中在0～80 kA (图5a)，出现雷电流幅值100 kA以上的负地闪比例仅为2.14%。正地闪雷电流幅值分布相对分散(图5b)，出现雷电流幅值100 kA以上的正地闪比例为6.75%。

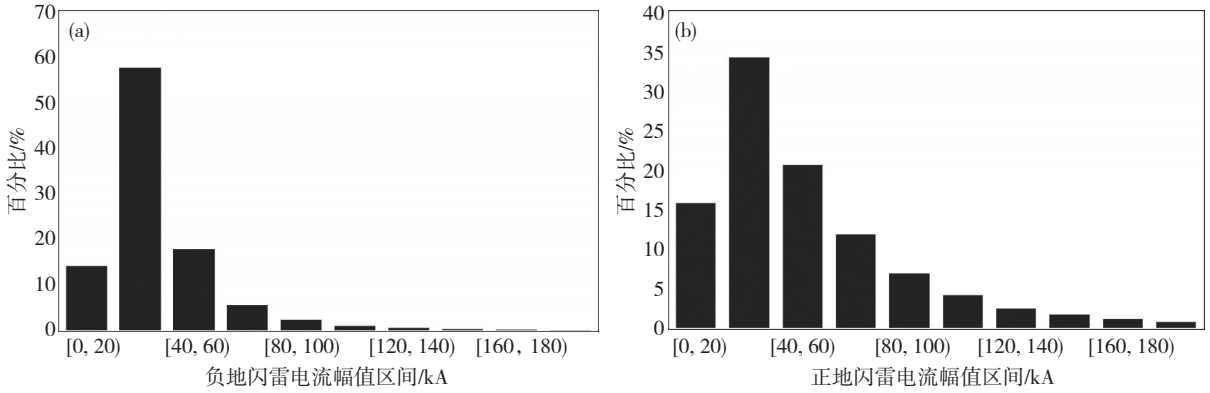


图5 2010—2020年安徽省负地闪(a)和正地闪(b)雷电流幅值区间分布

Fig. 5 Distribution for the peak current amplitude of (a) negative and (b) positive lightning flashes in Anhui province during 2010–2020

为分析地形因素对地闪极性和雷电流幅值分布的差异性影响，综合考虑海拔高度和地形起伏度，选取皖南山区、大别山区和除山区以外的平原(包括丘陵地带)对地闪频数、极性和雷电流幅值进行统计，结果见表3。

表3 2010—2020年安徽省皖南山区、大别山区和平原地带地闪参数统计

Table 3 Statistics of lightning parameters in southern mountainous areas, Dabie Mountain and plain in Anhui Province during 2010–2020

参数	参数		
	正地闪占总闪比例/%	正地闪雷电流幅值平均值/kA	负地闪雷电流幅值平均值/kA
皖南山区	4.680 7	49.036 2	35.527 3
大别山区	4.722 9	38.739 8	32.346 7
平原地区	5.927 9	65.031 6	47.974 8

可以看出，地闪极性、雷电流幅值分布受地形影响差异较大。山区正地闪占总闪的比例要明显少于平原地区，究其原因来看，主要与产生地闪的雷暴系统差异有关。淮北平原和江北地区产生闪电的对流系统主要以MCS为主(吴瑞姣等，2019)，以飑线为代表的中尺度对流过程往往产生地闪数量较多，且在成熟期和消散时期会产生一定数量的正地闪(Detwiler and Kennedy，2020)。皖南山区和大别山区除了飑线系统外，局地雷暴、雷雨大风过程也会产生地闪，但数量较少，很多局地强对流过程产生的地闪频数不足百次(Miller and Mote，2018)。受强度和对流能量影响，局地雷暴、雷雨大风过程产生地闪频数和正地闪数量均远远少于MCS(王凯等，2022)。皖南山区和大别山区正负地闪的雷电流幅值平均值要小于平原地区，其原因可能是皖南山区和大别山区以花岗岩地貌为主，土壤电阻率要高于平原地区。相关研究表明，区域的土壤电阻率与雷电流幅值存在负相关性(刘刚等，2013)。此外，山区雷暴云离地的高度比平原低，云中大量电荷形成之前已达到空气的临界击穿强度提前放电，所以山区出现高幅值雷电流的可能性要比平原小。根据公式(2)对网格内的地闪强度L_n计算后，在ArcGIS进行绘图得到安徽省地闪强度的空间分布(图6)。可以看出，安徽省地闪强度值介于0.5～0.9，总体呈现“南高北低”的分布特征。皖北地区地闪强度要低于淮河以南和皖南山区。皖北大部分地区地闪强度<0.55，江淮地区大部分区域地闪强度为0.55~0.63，沿江江南部分地区地闪强度>0.8。沿江江南的宣城、池州、安庆和芜湖绝大部分地区为地闪强度高值区，地闪强度>0.635。

2.1.2 *孕灾环境*

致灾危险性由致灾因子与孕灾环境共同决定。

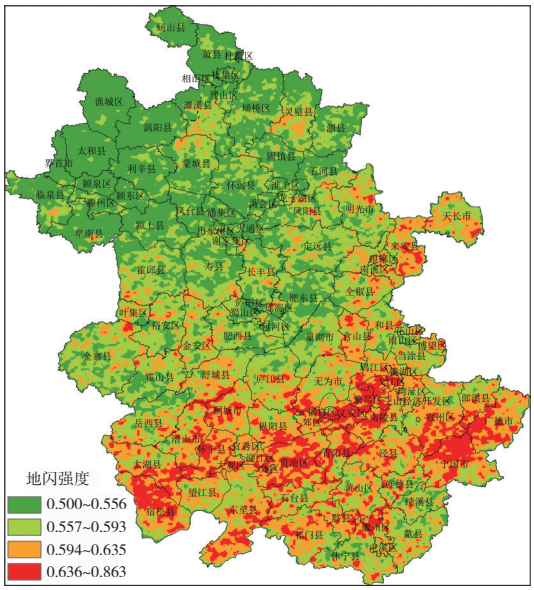


图6 2010—2020年安徽省地闪强度的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of lightning intensity in Anhui Province during 2010–2020

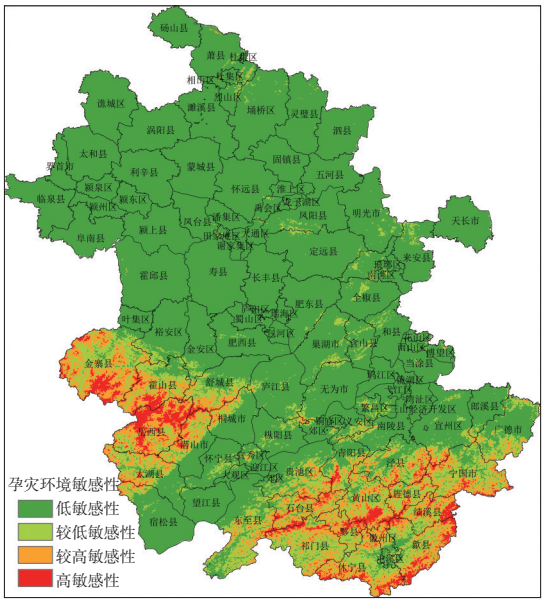


图7 2010—2020年安徽省雷电灾害孕灾环境敏感性区划

Fig. 7 The zoning of sensitivity of lightning disaster-pregnant environment in Anhui Province during 2010–2020

根据“规范2021”要求，雷电灾害孕灾环境主要考虑海拔高度E_h、地形起伏度T_r和土壤电导率S_c。根据式(4)，结合AHP法确定在孕灾环境敏感性层级下E_h、T_r和S_c的权重分别为0.390 7、0.444 0和0.165 3。海拔高度E_h和地形起伏度T_r的权重相差不大，但都高于土壤电导率S_c权重两倍以上。这与余田野等(2023)对于湖北地区的雷电灾害风险区划研究结论相近，说明地形因素对于雷电灾害孕灾环境敏感性影响较大。图7为安徽省雷电灾害孕灾环境敏感性区划结果，可以看出孕灾环境敏感性呈现西部大别山区、皖南山区和沿江流域高，中北部平原地区低的分布特征。由于地形因素对雷电致灾危险性的正向驱动作用，皖西大别山区和皖南山区海拔高度和地形起伏度较大，为孕灾环境高和较高敏感区。同时因水域的高电导率特性(姚年鹏等，2022)，沿江和淮河流域局部地区的孕灾敏感性也较高。

2.2 致灾危险性评估与区划

根据“规范2021”要求，按式(4)及表2确定的权重系数计算安徽省雷电致灾危险性指数，利用自然断点法将致灾危险性划分为低危险区、较低危险区、较高危险区、高危险区4个等级(图8a)。可以看出，雷电致灾危险性等级总体呈现“南高北低”的分布特征：高危险区位于沿江大部及皖南山区部分地区；较高危险区

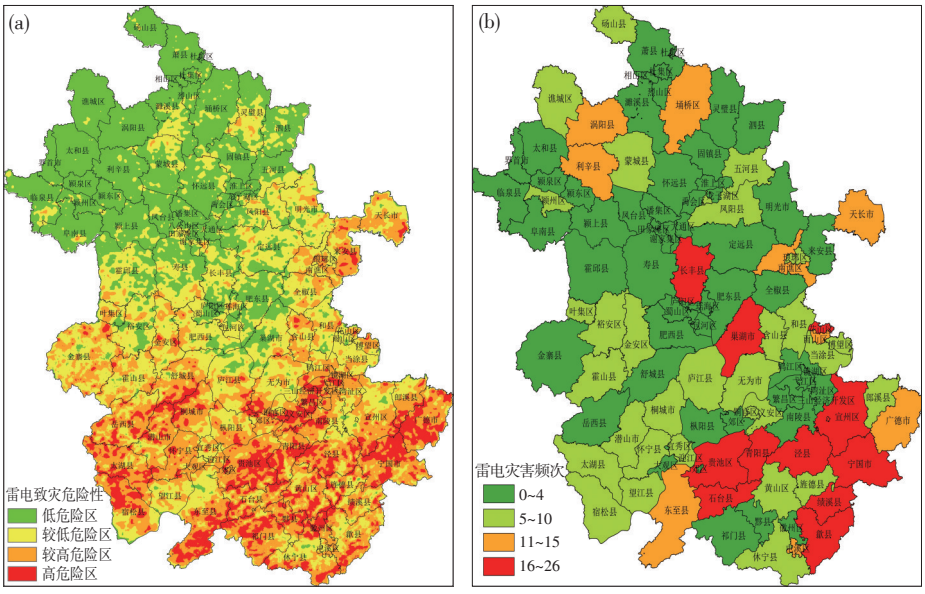


图8 2010—2020年安徽省雷电致灾危险性区划(a)和2000—2020年雷电灾害频次的空间分布(b)

Fig. 8 The zoning of (a) lightning disaster-causing hazards in Anhui Province during 2010–2020, and (b) frequency spatial distribution distribution of lightning disasters in Anhui Province during 2000–2020

主要位于皖南山区、江淮之间和沿江江南的部分区域；低和较低危险区主要位于皖北地区和江淮之间的平原和丘陵区域。

考虑到致灾强度大小对气象灾害损失严重程度的贡献更大(唐为安等，2023)，为了验证区划结果的合理性，利用2000—2020年安徽省雷电灾害历史灾情数据，按照县(区)行政单元统计雷电灾害频次，结果见图8b。可以看出，安徽省雷电灾害分布呈现“南多北少”的特征，皖南山区和沿江地区为雷电灾害多发区。安徽省雷电致灾危险性区划结果与实际灾情分布吻合度较好，本次研究中选择评价指标的权重及区划模型较为合理。

3 结论与讨论

利用安徽省ADTD闪电定位、历史灾情、数字地形高程和土壤电导率等资料，分析地形因素对雷击密度和雷电流幅值分布的影响，综合考虑致灾因子和孕灾环境构建雷电致灾危险性区划模型，对安徽省雷电致灾危险性进行区划，并利用历史灾情数据进行验证。得到主要结论如下：

(1) 选取雷击密度、地闪强度、海拔高度、地形起伏度和土壤电导率5个参数作为雷电致灾危险性评估指标，通过计算雷电致灾危险性指数，基于ArcGIS平台采用自然断点法将安徽省雷电致灾危险性划分为4级。

(2) 雷击密度与海拔高度、地形起伏度的变化呈显著正相关，海拔高度和地形起伏度对雷电致灾危险性具有正向驱动作用。安徽省雷电灾害孕灾环境高和较高敏感区主要位于皖西大别山区、皖南山区、沿江和淮河流域局部地区。

(3) 安徽省雷电致灾危险性总体呈现“北低南高”的分布特征。沿江大部及皖南山区部分地区为致灾高危险区，较高危险区主要位于皖南山区、江淮之间和沿江江南的部分区域，皖北平原和江淮之间的部分区域为较低和低危险区。区划结果与实际灾情分布较为吻合。

致灾危险性是灾害风险评估和区划的重要组成部分。本文基于GIS完成的雷电致灾危险性区划可为安徽省气象灾害风险普查专项工作及雷电灾害风险评估业务提供技术支撑，也可为“十四五”雷电灾害防御规划、农村雷电灾害防御示范工程选址等工作提供参考。因综合防灾减灾资源等资料获取受限，地形因素对于承灾体脆弱性特别是雷电防护水平和能力的影响分析尚未涉及。后续将对雷电致灾危险性评估中指标选取及权重确定环节进行优化完善，并进一步结合承灾体(人口、GDP、旅游景区和易燃易爆场所等)信息完成雷电灾害风险区划研究。

参考文献(References)：

陈柳彤,龙爽,俞海洋,等.2019.河北省雷电灾害风险区划研究[J].灾害学,34(3):189-195. Chen L T, Long S, Yu H Y, et al. 2019. Research on risk zoning of lightning disaster in Hebei Province [J]. Journal of Catastrophology,34(3):189-195 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn. 1000-811X.2019.03.035

费蕾蕾,毕新慧,刘永林,等.2017.香港地区地闪时空分布特征及其影响因素[J].热带气象学报,33(5):617-626. Fei L L, Bi X H, Liu Y L, et al. 2017. Temporol and spatial distribution characteristics of cloud-to-ground lightning activity in Hong Kong and related impact factors [J]. Journal of Tropical Meteorology,33(5):617-626 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2017.05.005

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 [J]. High Voltage Apparatus,56(10):190-196 (in Chinese). doi:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.10.030

胡亚男,陶世银,龚梅竹,等.2022.高原复杂地理参数对雷电活动的影响分析[J].干旱区地理,45(3):746-753. Hu Y N, Tao S Y, Gong M Z, et al. 2022. Influence analysis of geographic parameters on lightning in plateau [J]. Arid Land Geography,45(3):746-753 (in Chinese). doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2021.284

郭秀峰,谭永波,郭凤霞,等.2013.建筑物尖端对于大气电场畸变影响的数值计算[J].应用气象学报,24(2):189-196. Guo X F, Tan Y B, Guo F X, et al. 2013. Numerical simulation of effects of building tip on atmospheric electric field distortion [J]. Journal of Applied Meteorological Science,24(2):189-196 (in Chinese). doi:10.11898/1001-7313.20130207

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 G, Tang J, Sun L L, 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 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1003-6520.2013.01.003

孙慧敏,唐磊,杨松,等.2016.基于SRTM - DEM的安徽省地貌分类研究[J]. 水利与建筑工程学报,14(5):189-192. Sun H M, Tang L, Yang S, et al. 2016. Geomorphology classification of Anhui Province based on digital elevation model in shuttle radar topography mission data format [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering,14(5):189-192 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.05.036

唐为安,田红,严小静,等.2023.基于地形订正技术的安徽冰雹灾害风险区划[J].暴雨灾害,42(5):606-612. Tang W A, Tian H, Yan X J, et al. 2023. Risk zoning of hail disaster in Anhui Province based on terrain correction technology [J]. Torrential Rain and Disasters,42(5):606-612 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-021

万杰,廖静娟,许涛,等.2015.基于ICESat/CLAS高度计数据的SRTM数据精度评估—以青藏高原地区为例[J].国土资源遥感,27(1):100-105. Wan J, Liao J J, Xu T, et al. 2015. Accuracy evaluation of SRTM data based on ICESat/CLAS altimeter data: A case study in the Tibetan Plateau [J]. Remote Sensing for Land and Resources,27(1):100-105 (in

Chinese). doi:10.6046/gtzyyg.2015.01.16

王瑾婷,丁治英,赵向军,等.2017.大别山地形对江淮飑线发展变化及组织结构的影响研究[J] .气象科学,37(5):639-651. Wang J T, Ding Z Y, Zhao X J, et al. 2017. Study of the orographic effects of the Dabie mountain on the development and structure of squall line [J]. Journal of the Meteorological Sciences,37(5):639-651 (in Chinese). doi:10.3969/2017jms.0006

王凯,鞠晓雨,邱阳阳,等.2022. 2011 – 2019年安徽南部山区与北部平原闪电分布特征[J].气象与环境学报,38(4):110-117. Wang K, Ju X Y, Qiu Y Y, et al. 2022. Distribution characteristics of lightning in southern mountain areas and northern plains of Anhui province [J]. Journal of Meteorology and Environment,38(4):110-117 (in Chinese). doi:10.3969/j.issm.1673-503X. 2022.04.013

吴瑞姣,陶玮,周昆,等.2019.江淮灾害性大风飑线的特征分析[J].气象,45(2):155-165. Wu R J, Tao W, Zhou K, et al. 2019. General features of squall lines with disastrous gale in the Yangtze-Huaihe Area [J]. Meteorological Monthly,45(2):155-165 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.02.002

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

王延慧,张建涛,周斌,等.2019.基于ArcGIS的新疆雷电灾害风险区划研究[J].沙漠与绿洲气象,13(6):96-104. Wang Y H, Zhang J T, Zhou B, et al. 2019. A study of lightning disaster risk zoning in Xinjiang based on ArcGIS [J]. Desert and Oasis Meteorology,13(6):96-104 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2019.06.012

姚年鹏,侯文豪,张其林,等.2022.地面电导率、地球曲率和电离层对远距离闪电定位的影响[J].电瓷避雷器,(2):31-38. Yao N P, Hou W H, Zhang Q L, et al. 2022. Influences of ground conductivity, earth curvature and ionosphere on long-distance lightning locating [J]. Insulators and Surge Arresters,(2):31-38 (in Chinese). doi:10.16188/j.isa.1003-8337.2022.02.005

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

中国气象局.2017.雷电灾害风险区划技术指南[S].北京:气象出版社:5-12. China Meteorological Administration. 2017. Technical guidelines for lightning disaster risk zoning [S]. Beijing: China Meteorological Press:5-12 (in Chinese)

中国气象局.2021.全国气象灾害综合风险普查技术规范:雷电灾害调查与风险评估技术规范(评估与区划类)[S].中国气象局全国气象灾害综合风险普查领导小组办公室:1-13. China Meteorological Administration. 2021. Technical specification for national meteorological disaster comprehensive risk survey: technical specification for lightning disaster investigation and risk assessment (assessment and zoning)[S]. Office of the Leading Group for the National Comprehensive Meteorological Disaster Risk Survey of the China Meteorological Administration:1-13 (in Chinese)

中国气象局.2021.全国气象灾害综合风险普查技术规范:雷电灾害调查与风险评估技术规范(灾害调查类)[S].中国气象局全国气象灾害综合风险普查领导小组办公室:1-16. China Meteorological Administration. 2021. Technical specification for national meteorological disaster comprehensive risk survey: technical specification for lightning disaster investigation and risk assessment (disaster investigation) [S]. Office of the Leading Group for the National Comprehensive Meteorological Disaster Risk Survey of the China Meteorological Administration:1-16 (in Chinese)

周明薇,刘越屿,黄浩,等.2022.基于DEM数据的长沙地区地形因子与地闪活动关系研究[J].气象与环境学报,38(6):106-111. Zhou M W, Liu Y Y, Huang H, et al. 2022. Relationship between terrain factors and ground lightning activity in Changsha area based on DEM data [J]. Journal of Meteorology and Environment,38(6):106-111 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2022.06.013

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

Detwiler A G, Kennedy P. 2020. In situ observations of microphysics, electric fields, and lightning in the trailing stratiform region of a mesoscale convective system [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125(23):1-19. doi:10.1029/2020JD032865

Dissing D, Verbyla D L. 2003. Spatial patterns of lightning strikes in interior Alaska and their relations to elevation and vegetation [J]. Canadian Journal of Forest Research,33(5):770-782

Jiang R J, Lyu W T, Wu B, et al. 2020. Simulation of cloud-to-ground lightning strikes to structures based on an improved stochastic lightning model [J]. Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial Physics,203. doi:10.1016/j.jastp.2020.105274

Kotroni V, Lagouvardos K. 2008. Lightning occurrence in relation with elevation, terrain slope, and vegetation cover in the Mediterranean [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres,113(113):6089-6098. D21118. doi:10.1029/2008JD010605

Miller P W, Mote T L. 2018. Characterizing severe weather potential in synoptically weakly forced thunderstorm environments [J]. Natural Hazards & Earth System Sciences,18(4):1261-1277. doi:10.5194/nhess-18-1261-2018

Osmar P J, Iara R C A P. 2020. Lightning changes in response to global warming in Rio de Janeiro, Brazil [J]. American Journal of Climate Change,9:266-273. doi:10.4236/ajcc.2020. 93017

Seeley J T, Romps D M. 2015. The effect of global warming on severe thunderstorms in the United States [J]. Journal of Climate,28(6):2443-2458. doi:10.1175/JCLI-D-14-00382.1

Zhang C X, Lyu W T, Chen L W, et al. 2017. Infuence of the Canton Tower on the cloud-to-ground lightning in its vicinity [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres,122(11):5943-5954. doi:10.1002/2016JD026229

(责任编辑 何明琼)