

# 苏州市雷电灾害致灾因子危险性区域差异研究

徐沈<sup>1</sup> 王金虎<sup>2,3,4</sup> 王宇豪<sup>2</sup> 周纬昕<sup>2</sup> 许俊辉<sup>2</sup>

(1 南通气象科技有限公司, 南通 226001; 2 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044;

3 中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029;

4 南京信大安全应急管理研究院, 南京 210044)

**摘要:** 近年来, 苏州市雷电灾害频发, 对苏州市雷电灾害的风险区域差异化分级可为雷电灾害防御提供参考。基于2016—2020年苏州市三维闪电定位系统资料、高程数据 (DEM) 和土壤电导率数据进行归一化处理形成1 km × 1 km的栅格数据, 选取地闪密度、地闪强度、土壤电导率、海拔高度、地形起伏度5个指标分析苏州市雷电灾害致灾因子危险性, 基于标准差分级法对致灾因子危险性结果进行风险区域等级划分。结果表明: 高风险集中在常熟市的东北部, 太仓市西北部; 次高风险分布在虎丘区东部、吴中区东部和南部; 中等危险分布于姑苏区北部; 次低和低危险集中在昆山市和吴江区东部以及太湖地区 (吴中区西部)。

**关键词:** 苏州市, 雷电灾害, 致灾因子, 危险性, 区域差异

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.05.010

## Regional Differentiation of Risks from Lightning Disaster-Causing Factors in Suzhou City

Xu Shen<sup>1</sup>, Wang Jinhui<sup>2,3,4</sup>, Wang Yuhao<sup>2</sup>, Zhou Weixin<sup>2</sup>, Xu Junhui<sup>2</sup>

(1 Nantong Meteorological Technology Co., Ltd., Nantong 226001; 2 Collaborative Innovation Center on Forecast and

Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044;

3 Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese

Academy of Sciences, Beijing 100029; 4 Nanjing Xinda Institute of Safety and Emergency Management, Nanjing 210044)

**Abstract:** In recent years, lightning disasters have occurred frequently in Suzhou. The regional differentiation classification of lightning disaster risk in Suzhou can provide reference for lightning disaster prevention. Based on the three-dimensional lightning location system data, elevation data (DEM) and soil conductivity data of Suzhou City from 2016 to 2020, the grid data of 1 km × 1 km was formed by normalization processing. The five indexes of ground flash density, ground flash intensity, soil conductivity, altitude and topographic relief were selected to conduct risk analysis for the lightning disaster-causing factors in Suzhou City. The standard deviation classification method was used to classify the risk area of disaster-causing factors. The results show that the high risk is concentrated in the northeast of Changshu City and the northwest of Taicang City; the sub-high risk is distributed in the east of Huqiu District as well as the east and south of Wuzhong District; the medium risk is distributed in the north of Gusu District; the sub-low and low risks are concentrated in Kunshan City, the eastern Wujiang District and the Taihu Lake area (western Wuzhong District).

**Keywords:** Suzhou City, lightning disaster, disaster-causing factors, risk, regional differentiation

## 0 引言

雷电灾害是指对流动云中电能对物体作用或形成电流辐射击中物体从而造成损失的现象<sup>[1]</sup>。在2019年联合国减灾大会上公布雷电灾害为世界十大严重自然灾害之一<sup>[2]</sup>。据统计, 我国平均每年因雷电造成人员伤亡

亡达3000~4000人, 造成的经济损失高达50亿~100亿元, 对雷电灾害的防治工作刻不容缓<sup>[3]</sup>。

早期关于雷电的研究主要基于人工观测获得的雷暴日资料<sup>[4-6]</sup>, 随着闪电定位系统的普及, 闪电定位资料逐渐被广泛使用。王学良等<sup>[7]</sup>通过闪电定位资料利用二元法计算出年雷暴日数, 与人工观测雷暴日数相比, 平均差异为7.4%; 陈绿文等<sup>[8]</sup>对比分析了闪电定位资料与人工引雷观测结果, 发现相比于雷暴日数, 地闪密度与地闪强度更能准确系统地表征区域受灾严重性。雷电的危险性评估与风险区划是重要的风险管理手段, 有利于区域性防灾减灾工作的规划和开展。

收稿日期: 2022年3月25日; 修回日期: 2022年9月6日

第一作者: 徐沈(1984—), Email: 442526765@qq.com

通信作者: 王金虎(1987—), Email: goldtigerwang@nuist.edu.cn

资助信息: 国家自然科学基金项目(41905026); 江苏省自然

科学基金资助项目(BK20170945); 南京信息

工程大学人才启动基金资助项目(2016r028)

近年来,众多气象学者利用风险评估分析在雷电灾害领域取得了诸多成果,如刘垚等<sup>[9]</sup>利用GIS空间分析技术与概率统计方法相结合,以地闪密度和地闪强度的叠置作为雷电风险的主要评价指标,形成杭州市雷电灾害致灾危险性区划;程萌等<sup>[10]</sup>统筹考虑雷电灾害形成的致灾、孕灾、承灾和防灾相关因素,建立了菏泽市雷电灾害区划模型;陈柳彤等<sup>[11]</sup>根据闪电定位数据选取危险性指标,并融合人口、GDP、防护能力以及城镇化率4个指标分析承灾体易损性,计算雷电灾害风险指数,得到河北省雷电灾害风险区划;吴彬等<sup>[12]</sup>利用内江市闪电定位资料,对雷电灾害危险性、脆弱性、暴露性进行综合评估;方文海等<sup>[13]</sup>建立灰类白化权重函数分析模型,确定雷电灾害风险指标,对珠海高新区雷电灾害风险进行了评估;张琨等<sup>[14]</sup>以全国灾害普查技术方案为标准建立了四川省雷电灾害风险评估模型。以上研究多利用GIS空间分析技术叠加相应指标得到灾害风险区划图,但指标权重的确定、指标的选取没有统一的标准。

苏州地区经济较发达,人口稠密,因此一旦发生雷电危害造成的经济损失和社会影响较大。苏州古城历史悠久,其作为江南地区文化中心,是五千多年的中国农耕文化土壤,三千年的吴文化根基,两千五百年的春秋故都,古建筑极易遭受雷电灾害的侵袭<sup>[15]</sup>。掌握该地区的雷电发生规律,对区域风险差异化分级,可以为防雷工作人员保护古建筑群、制定防雷设计方案提供参考。本文以风险评估技术规范计算危险性指数,用层次分析法确定指标权重,对苏州市雷电灾害危险性风险的区域差异进行划分,为苏州市雷电灾害防御提供参考。

## 1 资料与方法

资料与方法的选取主要依据2018年出台的《雷电灾害风险评估技术规范》(QX/T 85—2018)<sup>[16]</sup>。

### 1.1 资料

地闪数据源于2016—2020年中国气象局闪电探测网ADTD资料。ADTD型闪电定位系统由中国科学院研发,组网后的雷电探测系统定位精度理论上可达0.5°,探测效率可达80%~90%,雷电强度、陡度值测量误差小于15%,落雷位置精度小于500 m。经质量控制后的数据主要包括雷电发生的时间、强度、位置、电荷能量等,每隔6 min可记录1次雷电发生信息<sup>[17-18]</sup>。

地理信息数据包括苏州地区1:100万行政区划矢量数据。遥感数据包括数字高程(DEM)、土壤电导率等栅格数据。具体来源如表1所示。

表1 雷电灾害危险性评估数据来源

Table 1 Data source of lightning disaster risk assessment

数据来源	数据类型
全国基础地理数据库 ( <a href="https://www.webmap.cn/">https://www.webmap.cn/</a> )	地理信息数据(行政区划)
中国气象数据网 ( <a href="http://data.cma.cn/">http://data.cma.cn/</a> )	ADTD资料
地理空间数据云 ( <a href="https://www.gscloud.cn/">https://www.gscloud.cn/</a> )	数字高程(DEM)
南京土壤所 ( <a href="http://vdb3.soil.csdn.cn/">http://vdb3.soil.csdn.cn/</a> )	土壤电导率

## 1.2 方法

### 1.2.1 技术路线

如图1可知,根据雷电风险评估标准,闪电定位资料取值范围在2~200 kA,经过数据预处理得到的结果与遥感数据结合,层次分析法确定权重,通过栅格化叠加,最终得到雷电灾害危险性风险差异分区图。

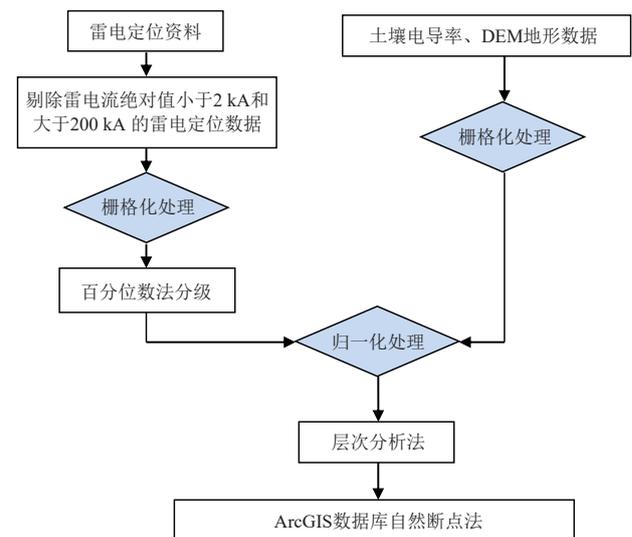


图1 技术路线

Fig. 1 Technical route

### 1.2.2 数据归一化

数据归一化旨在消除数据之间量纲差异,把有量纲的数据变为无量纲,利于后续图层叠加,公式如下:

$$D_{ij} = 0.5 + 0.5 \times \frac{A_{ij} - \min_i}{\max_i - \min_i}, \quad (1)$$

式中,  $D_{ij}$  是  $j$  站(格)点第  $i$  个指标的归一化值,  $A_{ij}$  是  $j$  站(格)点第  $i$  个指标值,  $\min_i$  和  $\max_i$  分别是第  $i$  个指标值中的最小值和最大值。

### 1.2.3 风险分级方法

自然断点法可以减少同一级中差异,增级间差异,利用统计公式确定聚类的方法。本文对雷电灾害危险性各指标采用自然断点法分级,计算公式如下:

$$SSD_{i-j} = \sum_{k=1}^j (A[k] - \text{mean}_{i-j})^2, \quad (1 \leq i < j \leq N) \quad (2)$$

式中,  $SSD$ 代表自然断点法的每一级的数值,  $A$ 是一个数组(数组长度为 $N$ ),  $mean_{i,j}$ 是每个等级中的平均值, 自然断点法数值可由ArcGIS分级工具计算得到。

为了明确雷电灾害危险性的等级特征, 采用《第一次全国自然灾害综合风险普查技术规范》(FXPC/QX P-04)<sup>[19]</sup>中的标准差分级方法对危险性划分为5个等级, 计算方法如表2所示。

表2 雷电灾害危险性分级划分标准  
Table 2 Classification criteria for lightning disaster risk

危险性等级	划分标准
低危险	危险性指数 < 平均值 - 1σ
次低危险	平均值 - 1σ ≤ 危险性指数 < 平均值 - 0.5σ
中等危险	平均值 - 0.5σ ≤ 危险性指数 < 平均值 + 0.5σ
次高危险	平均值 + 0.5σ ≤ 危险性指数 < 平均值 + 1σ
高危险	危险性指数 ≥ 平均值 + 1σ

注: 平均值为研究区域非零危险性指数的均值, σ为研究区域非零危险性指数标准差。

### 1.2.4 雷电灾害评估指标

1) 地闪密度: 单位面积、单位时间的平均雷击点个数(个/km<sup>2</sup>)。利用ArcGIS建立格网工具, 将苏州地区划分为1 km×1 km格网, 统计每个格网内雷击发生次数, 除以资料年限得到每个格网中地闪密度, 接着对每个格网插值处理, 最后归一化得到地闪密度栅格数据。

2) 地闪强度: 利用百分位数法对雷电流幅值分级(表3), 将分级后数据加权平均得到强度。在建立的1 km×1 km格网中, 统计各格网内不同等级雷电流幅值强度的雷击发生次数并进行归一化处理, 按照公式(3)计算各网格内的地闪强度, 形成地闪强度栅格数据。

表3 雷电流幅值等级  
Table 3 Lightning current amplitude level

百分位数(P)区间	60%	60%~80%	80%~90%	90%~95%	≥95%
强度等级	1级	2级	3级	4级	5级

$$L_n = \sum_{i=1}^5 \left( \frac{i}{15} \times F_i \right), \quad (3)$$

式中,  $L_n$ 为地闪强度,  $F_i$ 为第 $i$ 级闪电。

致灾危险性指数计算公式如下:

$$RH = (L_d \times wd + L_n \times wn) \times (S_c \times ws + E_h \times we + T_r \times wt), \quad (4)$$

式中,  $RH$ 为致灾危险性指数,  $L_d$ 为地闪密度,  $wd$ 为地闪密度权重,  $L_n$ 为地闪强度,  $wn$ 为地闪强度权重,  $S_c$ 为土壤电导率,  $ws$ 为土壤电导率权重,  $E_h$ 为海拔高度,  $we$ 为海拔高度权重,  $T_r$ 为地形起伏,  $wt$ 为地形起伏权重。

### 1.2.5 指标权重

致灾因子指标的权重由Delphi法(专家打分)与

AHP法(层次分析)<sup>[20]</sup>共同确定, 按照《C-07 全国气象灾害综合风险普查技术规范—雷电》5.2.3规定的方法进行权重分配。具体指标权重如表4所示。

表4 苏州市雷电灾害致灾因子指标权重  
Table 4 Index weight of lightning disaster-causing factors in Suzhou City

准则层		指标层	
风险因子	权重	指标	权重
致灾因子	1	地闪密度	0.316
		地闪强度	0.214
		高程	0.189
		地形起伏	0.127
		土壤电导率	0.154

## 2 结果与分析

地闪密度分布结果(图2a)表明, 2016—2020年年平均地闪次数较多集中于常熟市东部、太仓市西北部、吴中区东北部和吴江区西部, 低值区主要分布在张家港市和昆山市的东南部。

相较于地闪密度, 地闪强度(图2b)高值分布更为集中且与地闪密度空间分布趋势较为一致。高值区集中在常熟市东部、太仓市西北部; 次高值分布在虎丘区和吴中区中部; 低值区集中在吴江区、昆山市和张家港市。

苏州地区高程如图3a所示, 结果表明苏州地区整体地势较为平坦, 高程变化不大, 最高值326 m, 分布在吴中区中部, 并且地形起伏度较低(图3b), 因此, 海拔高度与地形起伏度对苏州地区雷电灾害风险差异性的影响较小。

土壤电导率是表征土壤导电能力强弱的指标之一, 与接地电阻呈负相关关系, 接地电阻越小, 越有利于雷电流疏散入地, 即电导率值越大, 雷电灾害带来的破坏性就越小。图4所示的结果表明, 土壤电导率的高值区主要分布在苏州市中部和西部, 如张家港市北部、姑苏区、虎丘区、相城区, 低值区主要集中在吴中区。

综合所有致灾因素, 得到致灾因子危险性区域分布如图5所示。结果表明, 高危险区集中在常熟市的东北部, 太仓市北部; 次高危险区分布在虎丘区和吴中区东部、常熟市东南部、太仓市东部、姑苏区和昆山市北部、吴江区西部和吴中区南部; 低值区集中在吴中区西部、吴江区中部和西南部, 即太湖地区。

## 3 结论

参照《全国气象灾害风险评估技术规范(雷电)》构建了苏州市雷电灾害危险性致灾因子评估体系, 并形成区域分布图, 得出结论如下。

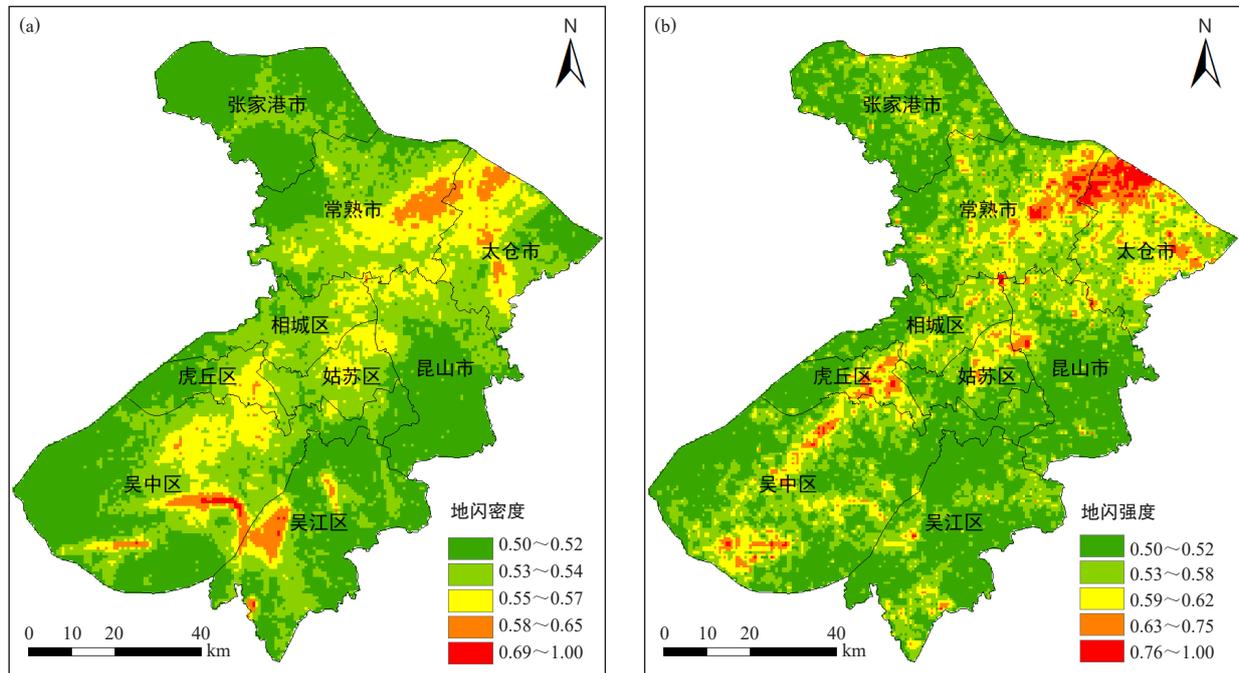


图2 苏州市地闪密度 (a) 和地闪强度 (b) 分布  
 Fig. 2 Distribution of ground lightning density (a) and ground lightning intensity (b) in Suzhou City

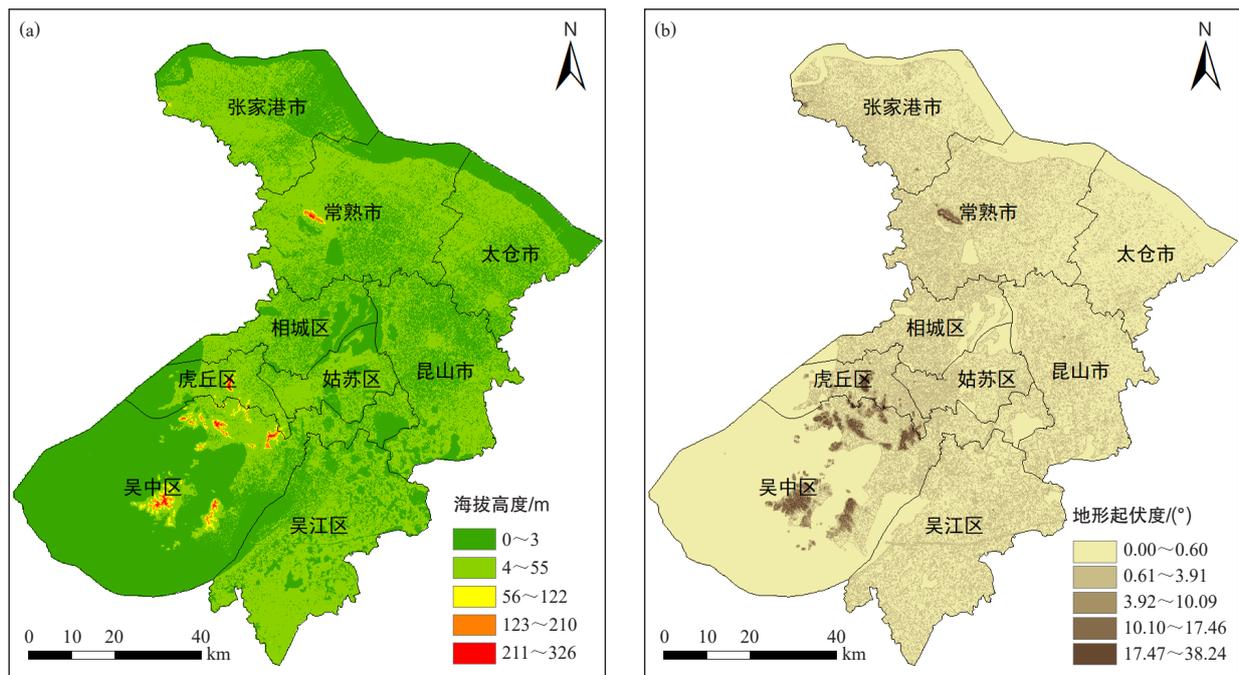


图3 苏州市高程 (a) 和地形起伏度 (b) 分布  
 Fig. 3 Distribution of elevation (a) and topographic relief (b) in Suzhou city

1) 从层次分析法得到的指标权重可知地闪密度、地闪强度对苏州市雷电灾害致灾因子危险性影响最大。

2) 通过ADTD资料计算得到的地闪密度与地闪强度分布趋势较为一致，高值区集中在常熟市东部、太

仓市西北部，太湖地区地闪密度较低，但地闪强度值较高。

3) 综合地闪强度、地闪密度、海拔高度、地形起伏度、土壤电导率5个指标得到苏州市雷电灾害危险性区域分布：危险性高值区集中在苏州市的东北

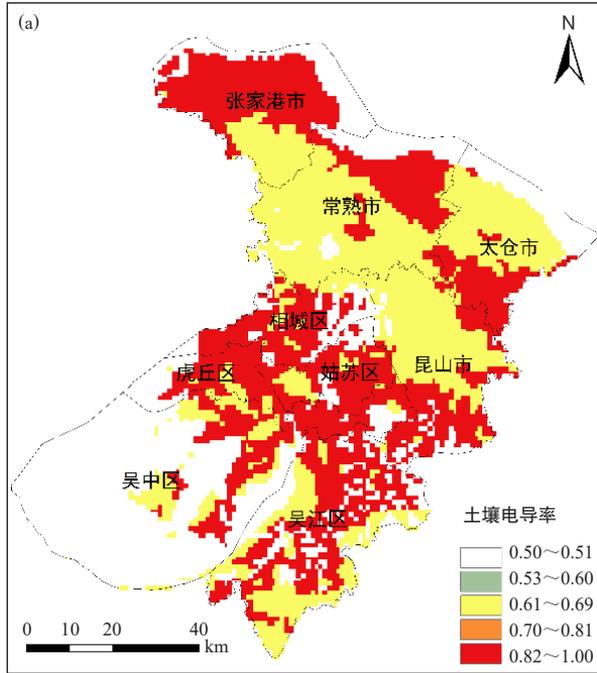


图4 苏州市土壤电导率分布  
Fig. 4 Soil conductivity distribution in Suzhou city

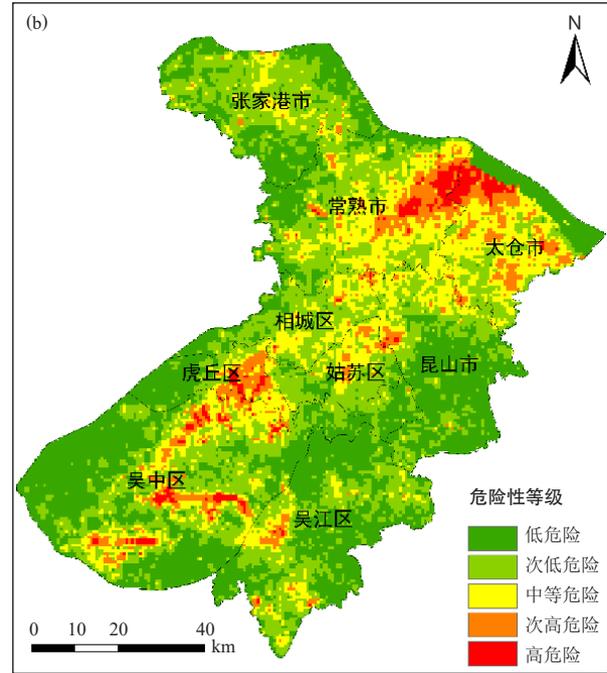


图5 苏州市致灾因子危险性等级区域分布  
Fig. 5 Risk zoning of disaster-causing factors in Suzhou city

部，如常熟市东北部、太仓市东部、虎丘区和吴中区中部，这些地区需对雷电灾害重点防御；中等危险区位于苏州市中部地区如相城区和姑苏区；低值区集中于苏州市西部和东部，如吴江区和昆山市、太湖地区（吴中区西南部）。

由于雷电的形成是较为复杂的过程，本文仅从致灾因子角度探索了雷电发生的危险性，未来需考虑雷电对人口、社会经济的影响，进一步使区域差异结果与实际更加吻合。

#### 参考文献

[1] 陈渭民. 雷电学原理. 北京: 气象出版社, 2003.  
 [2] 朱涯, 鲁韦坤, 余凌翔, 等. 玉溪市雷电灾害风险区划研究. 中国农业资源与区划, 2017, 38(11): 159-164.  
 [3] Jin C L, Shu Y, Han Z Q, et al. Lightning disaster risk zoning in Jiangsu Province of China based on the analytic hierarchy process and entropy weight method. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 943000.  
 [4] 刘梅, 魏建苏, 俞剑蔚, 等. 近57年江苏省雷暴日时空分布气候特征. *气象科学*, 2009, 29(6): 827-832.  
 [5] 刘梅, 魏建苏, 俞剑蔚. 近57年江苏省雷暴变化趋势特征分析. *热带气象学报*, 2010, 26(2): 227-234.  
 [6] 朱飙, 王振会, 李春华, 等. 江苏雷暴时空变化的气候特征分析. *气象科学*, 2009, 29(6): 849-852.  
 [7] 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. *应用气象学报*, 2014, 25(6): 741-750.

[8] 陈绿文, 张义军, 吕伟涛, 等. 闪电定位资料与人工引雷观测结果的对比分析. *高电压技术*, 2009, 35(8): 1896-1902.  
 [9] 刘焱, 缪启龙, 刘淼, 等. 杭州市雷电活动特征及雷电灾害区划. *气象与减灾研究*, 2011(4): 62-67.  
 [10] 程萌, 陈楠. 菏泽市雷电灾害风险区划. *中国农学通报*, 2016, 32(27): 156-160.  
 [11] 陈柳彤, 龙爽, 俞海洋, 等. 河北省雷电灾害风险区划研究. *灾害学*, 2019, 34(3): 189-195.  
 [12] 吴彬, 徐祥峰. 内江市雷电灾害风险评估与区划. *高原山地气象研究*, 2021, 41(3): 115-120.  
 [13] 方文海, 黄凯敏, 尤金, 等. 试点区域雷电灾害风险评估的方法与应用. *广东气象*, 2021, 43(6): 57-60.  
 [14] 张琨, 余海蓉, 卜俊伟. 四川省雷电灾害风险致灾性评估研究. *农业灾害研究*, 2021, 11(4): 130-131.  
 [15] 程彬, 汤小红. 江苏省苏州市吴江区主要气象灾害分析及防灾减灾措施. *北京农业*, 2015(18): 99-100.  
 [16] 中国气象局. 雷电灾害风险评估技术规范 (QX/T 85-2018). 北京: 气象出版社, 2018.  
 [17] Fan R, Zhang C L, Xiao W A, et al. Design and Implementation of lightning analysis software based on lightning location system data. *Meteorological and Environmental Research*, 2020, 11(1): 21-23.  
 [18] Hou A X, Zhou F C, Deng F B, et al. Lightning disaster in Hainan in recent 10 years and its evaluation on lightning location performance. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2022, 43(2): 80-86.  
 [19] 李涛, 陶辉, 陈金雨. 中巴经济走廊极端低温事件风险评估. *气候变化研究进展*, 2022, 18(3): 343-354.  
 [20] 程丽丹. 层次分析法和GIS技术在河南省雷电灾害风险区划中的应用. *南京信息工程大学学报 (自然科学版)*, 2019, 11(2): 234-240.