

徂徕山林场雷击森林火险区划模型研究

张岩岩^{1*}, 李 霏¹, 刘 杰^{2#}

¹济宁市气象局, 山东 济宁

²日照市气象局, 山东 日照

收稿日期: 2024年10月1日; 录用日期: 2024年10月28日; 发布日期: 2024年11月6日

摘 要

为了研究徂徕山林场的雷击森林火险区划, 利用地理信息系统(GIS)将致灾因子、孕灾环境、承灾体暴露度和脆弱性四个方面15个指标进行计算和处理, 采用层次分析法(AHP)确定各指标的权重指数, 构建雷击森林火险区划模型, 分析了雷击森林火险区划在徂徕山林场的分布。结果显示: 徂徕山雷击森林火险区划高风险和较高风险区域主要集中在太平顶林区、王庄林区南部、光华寺林区大部等区域; 中等风险区域主要集中在茶石峪林区大部、锦罗林区大部、王庄林区北部、太平顶林区西部、光华寺林区北部; 较低或低风险区域主要分布在徂徕林区、大寺林区、黄石崖林区、庙子林区、王庄林区东北部局部、锦罗林区北部局部和东南部局部区域。

关键词

徂徕山, 雷击, 森林火险, 区划模型

Study on the Forest Fire Risk Zoning Model for Lightning Strike in Culai Mountain Forest Farm

Yanyan Zhang^{1*}, Fei Li¹, Jie Liu^{2#}

¹Jining Meteorological Bureau, Jining Shandong

²Rizhao Meteorological Bureau, Rizhao Shandong

Received: Oct. 1st, 2024; accepted: Oct. 28th, 2024; published: Nov. 6th, 2024

Abstract

In order to study the lightning forest fire risk zoning of Culai Mountain Forest Farm, a geographic

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 张岩岩, 李霏, 刘杰. 徂徕山林场雷击森林火险区划模型研究[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(6): 1539-1547. DOI: 10.12677/ccrl.2024.136165

information system (GIS) was used to calculate and process 15 indicators from four aspects: Disaster causing factors, disaster pregnant environment, exposure of disaster bearing bodies, and vulnerability. The Analytic Hierarchy Process (AHP) was used to determine the weight index of each indicator, and a lightning forest fire risk zoning model was constructed. The distribution of lightning forest fire risk zoning in Culai Mountain Forest Farm was analyzed. The results show that the high-risk and high-risk areas of lightning forest fire hazard zoning in Culai Mountain are mainly concentrated in the Taipingding Forest Area, the southern part of Wangzhuang Forest Area, and most of Guanghua Temple Forest Area; The medium risk areas are mainly concentrated in the majority of Chashiyu Forest Region, Jinluo Forest Region, the northern part of Wangzhuang Forest Region, the western part of Taipingding Forest Region, and the northern part of Guanghuasi Forest Region; Low or low-risk areas are mainly distributed in the Sorai Forest Region, Dasi Forest Region, Huangshiya Forest Region, Miaozi Forest Region, parts of the northeast of Wangzhuang Forest Region, parts of the north and southeast of Jinluo Forest Region.

Keywords

Culai Mountain, Lightning Strike, Forest Fire Insurance, Zoning Model

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

森林作为陆地生态系统的主体,影响着局地的生态环境和气候事件,在缓解温室效应、涵养水源、维护生物平衡等具有不可替代的作用。但是森林资源容易受到自然灾害的影响,其中森林火灾是森林生态系统的重要影响因子[1],雷击又是引起森林火灾的重要诱因之一[2],加强对雷击引发森林火险的技术研究,具有重要的现实意义。翟杰休、周长明、臧桐汝[3]-[5]等研究了雷击火灾的时空分布特征及发生规律,陈亮、李威、张吉利[6]-[8]等分析了雷击火灾气象因素的影响,王金荣、彭欢、孙瑜[9]-[11]等基于 Logistic、MaxEnt 等模型预测了大兴安岭森林雷击火灾的发生概率。

国内外学者对森林火险区划做了大量的研究,目前利用遥感和地理信息技术也开始应用于火险区划[12]。LY/T 1063-2008《全国森林火险区划等级》将树种燃烧类型、人口密度、气象因子、路网密度将森林火灾危险性等级分为 3 级。该标准采用的火险区划评估方法未考虑雷击导致的森林火险,没有考虑孕灾环境和承灾体脆弱性作用下的雷击森林火险等级,其区划等级结果未能体现雷击火灾的特征属性。

本文从灾害学理论着手,将致灾因子、孕灾环境、承灾体暴露度和脆弱性四个方面作为雷击森林火险的影响因子,结合现行的森林火险区划标准体现的致灾要素,生成雷击森林火险区划模型,对掌握雷击森林火险区划的动态变化特征、进而为林火的预防和灭火指挥提供决策支持具有重要的现实意义。

文章中构建的基于层次分析法(AHP)和地理信息系统(GIS)的雷击森林火险区划模型,初次应用于徂徕山林场进行雷击森林火险的灾害区划研究,期待为雷击森林火灾空间预测和区划评价提供新的探索途径。

2. 应用区概况

徂徕山林场位于山东省中部,是国家级森林公园,地理范围为东经 117°16'~117°20',北纬 36°02'~36°07'。徂徕山地形复杂,群峰叠翠,沟壑幽深,总体地势表现为南坡较陡,北坡较缓,中间平;地处暖温带大陆

性季风气候区，四季分明，季风气候明显，年平均气温为 13.9℃；降雨主要集中在 6~9 月份，近年平均降水量达到 718.4 mm，由于降雨多集中在夏秋之间，故形成徂徕山冬春少雨多风、蒸发量大、干旱气候持续时间较长的气候特点；徂徕山林场总面积 9000 公顷，森林覆盖率 87.4%，植被总覆盖率在 98% 左右，重点区域森林郁闭度高达 0.8 以上，主要由人工林、温性针叶林、落叶阔叶林等类型组成。

3. 研究方法

3.1. 数据来源

(1) 雷电数据：闪电定位资料来源于山东省 2007~2022 年闪电定位系统监测资料。结合雷达资料，对闪电定位资料进行质量控制，剔除雷电流幅值为 0~2 kA 和 200 kA 以上的数值，建立闪电资料数据库，数据内容包含年、月、日、时、分、秒、0.1 微秒、纬度、经度、强度等信息；该数据仅包含地闪数据。雷电灾害数据来源于 2000~2020 年中国气象局雷电防护管理办公室与中国气象学会雷电防护研究会编印的《全国雷电灾害汇编》。

(2) 气象数据：人工观测气象资料来源于山东省气象局 1967~2013 年 123 个气象观测站。徂徕山防火期气温、降水资料来源于山东省气候中心 1991~2020 年地面观测站(济南站、莱芜站、泰山站、新泰站、泗水站、宁阳站、东平站、曲阜站、平邑站、费城站、汶上站)。

(3) 山东省人口密度、GDP 密度数据来源于山东省统计局统计年鉴。

(4) 徂徕山森林调查数据来源于泰山风景名胜区管理委员会。

(5) 基于地理空间数据云 DEM 数字高程数据，下载徂徕山林场 90 M 分辨率数字高程产品，获取海拔高度、地形起伏等数据。

(6) 基础底图行政边界采用中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心的行政区划边界数据。

以上数据利用 excle2007 和 ArcGIS 10.8 进行数据整理统计和分析处理。

3.2. 研究方法

3.2.1. 数据归一化处理

为确保参与栅格分析的计算指标没有量纲差异，将有量纲的数值经过变换，转化为无量纲的数值，其计算公式如下：

$$D_i = \frac{A_i - \min_i}{\max_i - \min_i} \quad (1)$$

式中： D_i 是第 i 个指标的归一化值； A_i 是第 i 个指标值； $\max_i$ 、 $\min_i$ 分别是第 i 个指标值中的最大值和最小值。

3.2.2. 自然间断点法

自然间断点法是 ArcGIS 中一种地图分级算法。该算法认为数据本身有断点，可利用数据这一特点进行分级。算法原理是一个小聚类，聚类结束条件是组间方差最大、组内方差最小。计算方法如下：

$$SSD_{i-j} = \sum_{k=i}^j A[k]^2 - \frac{\left(\sum_{k=i}^j A[k]\right)^2}{j-i+1} \quad (1 \leq i < j \leq N) \quad (2)$$

式中：SSD 是方差； i 、 j 是第 i 、 j 个元素； A 是长度为 N 的数组； k 是 i 、 j 中间的数，表示 A 组中的第 k 个元素。

3.2.3. 百分位数法

将徂徕山林场区域划分为 $0.001^{\circ} \times 0.001^{\circ}$ 的网格, 利用百分位数法统计分析雷电流强度, 统计各网格内不同雷电流幅值等级的雷击频次, 并进行归一化处理。雷电流幅值划分为 5 个等级, 详见表 1。

Table 1. Lightning current amplitude level
表 1. 雷电流幅值等级

等级	百分位数(P)区间
1 级	$P \leq 60\%$
2 级	$60\% < P \leq 80\%$
3 级	$80\% < P \leq 90\%$
4 级	$90\% < P \leq 95\%$
5 级	$P > 95\%$

按照式(3)计算各网格内的地闪强度, 形成 $0.001^{\circ} \times 0.001^{\circ}$ 的雷电强度栅格数据。

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

式中: L_n 是雷电强度; i 是雷电流幅值等级; F_i 是雷电流幅值为 i 等级的雷击频次的归一化值。

3.2.4. 层次分析法确定指标权重

综合考虑了自然、社会、经济以及防灾减灾能力等方面的因素, 将雷击森林火险区划所包含的因子分层, 将雷击森林火险指数设为最高层, 致灾因子、孕灾环境、承灾体暴露度和承灾体脆弱性作为实现区划采取的指标因子设为中间层, 将具体的雷电、气象、地理等数据作为解决雷击森林火险区划模型的方案设为最底层。

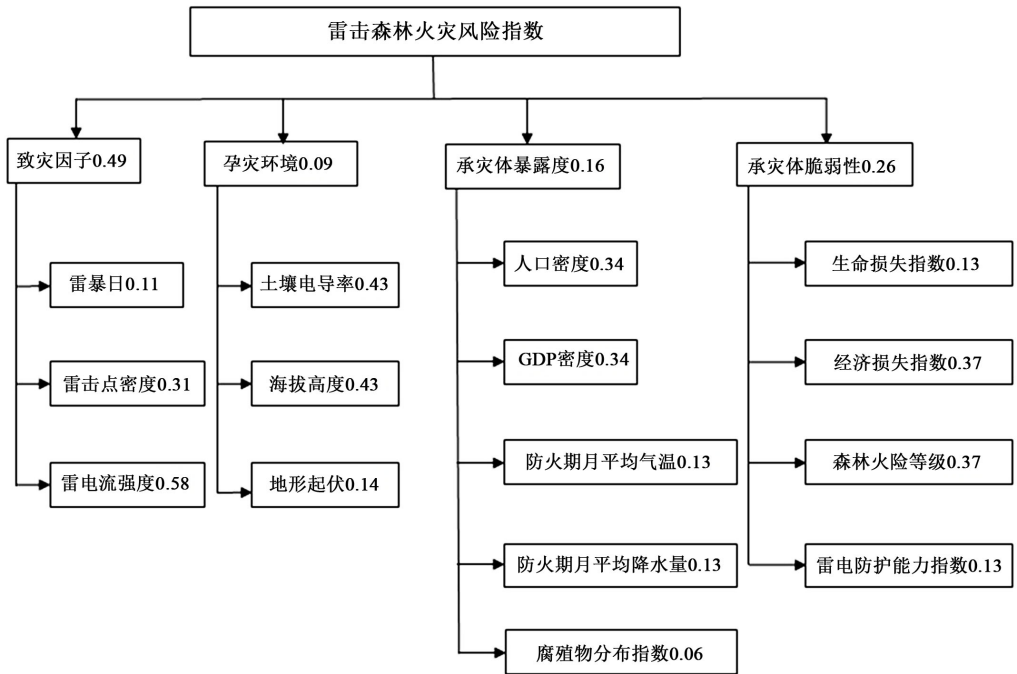


Figure 1. Index weight distribution scheme of lightning forest fire risk zoning model based on AHP
图 1. 基于 AHP 的雷击森林火险区划模型的指标权重分配方案

图 1 的雷击森林火险指数的层次模型建立了 5 个判断矩阵, 分别是 A-B 二阶矩阵、B1-C1 三阶矩阵、B2-C2 三阶矩阵、B3-C3 五阶矩阵、B4-C4 四阶矩阵。利用一致矩阵法, 将上下层之间的所有因素两两比较, 采用相对尺度, 尽量减少性质不同因素之间的比较, 提高比较的精准度。

利用和法计算判断矩阵的标准化特征向量值、计算最大特征值 $\lambda_{\max}$, 利用公式 $C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$ 作为一致性检验指标, 一致性比率为 $C.R. = \frac{C.I.}{R.I.}$, 当 $C.R. < 0.1$ 时, 认为判断矩阵通过一致性检验, 归一化后的标准化特征向量即为指数权重。

致灾因子 B1-C1 层(表 2)、孕灾环境 B2-C2 层(表 3)、承灾体暴露度 B3-C3(表 4)、承灾体脆弱性 B4-C4(表 5)、雷击森林火险指数 A-B 层(表 6)的判断矩阵标准化特征向量及其一致性检验结果显示, 一致性比率 $C.R. < 0.1$, 表明以上判断矩阵通过一致性检验。

Table 2. B1-C1 layer judgment matrix normalized eigenvector and its consistency test results

表 2. B1-C1 层判断矩阵标准化特征向量及其一致性检验结果

B1-C1 层指标	标准化特征向量	一致性检验结果
雷暴日	0.11	$\lambda_{\max} = 2.9832$
雷击点密度	0.31	C.I. = 0.084
雷电流强度	0.58	R.I. = 0.58
		C.R. = 0.0144 (<0.1)

Table 3. B2-C2 layer judgment matrix normalized eigenvector and its consistency test results

表 3. B2-C2 层判断矩阵标准化特征向量及其一致性检验结果

B2-C2 层指标	标准化特征向量	一致性检验结果
土壤电导率	0.43	$\lambda_{\max} = 2.9933$
海拔高度	0.43	C.I. = 0.033
地形起伏	0.14	R.I. = 0.58
		C.R. = 0.0058 (<0.1)

Table 4. B3-C3 layer judgment matrix normalized eigenvector and its consistency test results

表 4. B3-C3 层判断矩阵标准化特征向量及其一致性检验结果

B3-C3 层指标	标准化特征向量	一致性检验结果
人口密度	0.34	
GDP 密度	0.34	$\lambda_{\max} = 4.8780$
防火期月平均气温	0.13	C.I. = 0.0305
防火期月平均降水量	0.13	R.I. = 1.12
腐殖物分布指数	0.06	C.R. = 0.0272 (<0.1)

Table 5. B4-C4 layer judgment matrix normalized eigenvector and its consistency test results

表 5. B4-C4 层判断矩阵标准化特征向量及其一致性检验结果

B4-C4 层指标	标准化特征向量	一致性检验结果
生命损失指数	0.13	$\lambda_{\max} = 3.9945$
经济损失指数	0.37	C.I. = 0.018
森林火险等级	0.37	R.I. = 0.9
雷电防护能力指数	0.13	C.R. = 0.0020 (<0.1)

Table 6. A-B layer judgment matrix normalized eigenvector and its consistency test results
表 6. A-B 层判断矩阵标准化特征向量及其一致性检验结果

A-B 层指标	标准化特征向量	一致性检验结果
致灾因子	0.49	$\lambda_{\max} = 4.0094$
孕灾环境	0.09	C.I. = 0.0031
承灾体暴露度	0.16	R.I. = 0.9
承灾体脆弱性	0.26	C.R. = 0.0035 (<0.1)

3.3. 雷击森林火险区划模型构建方案

本文将致灾因子(雷暴日、雷击点密度、雷电强度)、孕灾环境(土壤电导率、海拔高度、地形起伏)、承灾体暴露度(人口密度、GDP 密度、防火期月平均气温、防火期月平均降水量、腐殖物分布指数)和承灾体脆弱性(生命损失指数、经济损失指数、森林火险指数、雷电防护能力指数)作为雷击森林火灾的主要影响因子进行研究分析,建立徂徕山林场雷击森林火险区划模型。

(1) 致灾因子。雷击点密度和雷电强度是诱发雷击森林火灾的直接因素;雷暴日表征了不同地区雷电活动的频繁程度。雷击点密度是指单位面积、单位时间的平均雷击点个数;雷电强度是指地闪放电的雷电流幅值。固定区域内的落雷次数越多,雷击火险的风险越高;地闪强度值越高,造成的灾害损失程度越大。将雷暴日、雷击点密度、雷电强度按照加权权重(0.11, 0.31, 0.58)进行风险计算,形成致灾因子分布图(图 2)。

(2) 孕灾环境。土壤电导率可以反映不同土壤条件下对防雷接地设计的影响程度;海拔高度除了影响气温和降水,其自身形成的不同植被带会产生不同的森林火灾特点;地形起伏影响森林火灾的发生、蔓延及火势强度。根据南京土壤所根据第二次全国土地调查(2007~2009)结果制作发行的中国 1:100 万土壤栅格数据,生成山东省土壤电导率栅格数据;根据地理信息系统数据完成海拔高度和地形起伏分布图的绘制。将土壤电导率、海拔高度、地形起伏按照加权权重(0.43, 0.43, 0.14)进行风险计算,形成致灾因子分布图(图 3)。

(3) 承灾体暴露度。人口密度和 GDP 密度反映了森林场域人员活动频繁程度,影响火灾的发生及严重程度;防火期月平均气温和降水量将影响森林火灾的发展趋势,改变火灾发生环境;对徂徕山 46 个典型森林群落的标准地进行了腐殖物分布情况调查。分析人口密度、GDP 密度、防火期月平均气温、防火期月平均降水量、腐殖物分布指数的徂徕山林场域分布,按照加权权重(0.34, 0.34, 0.13, 0.13, 0.06)进行风险计算,形成承灾体暴露度分布图(图 4)。

(4) 承灾体脆弱性。对山东省 2000 年~2020 年雷电灾害数据进行了整理,统计了徂徕山林场及附近雷电灾害造成的人员伤亡和经济损失情况;统计分析了对大寺、黄石崖、太平顶等 9 处林区的森林面积及其占比,确定了高、易发、一般三个森林火险等级,将高火险区和易发火险区界定为高危火险区范围,结合森林面积和森林火险等级确定徂徕山林场火险指数;将土地利用数据按照建设用地、农用地、未利用地赋值归一化处理。分析生命损失指数、经济损失指数、森林火险指数、防护能力指数的徂徕山林场域分布,按照加权权重(0.13, 0.37, 0.37, 0.13)进行风险计算,形成脆弱性分布图(图 5)。

4. 结果分析

在 ArcGIS 环境下将徂徕山林场划分为 $0.001^{\circ} \times 0.001^{\circ}$ 的网格,对致灾因子、孕灾环境、承灾体暴露度、承灾体脆弱性按照加权权重(0.49, 0.09, 0.16, 0.26)进行风险计算,其计算公式如下:

$$LDRI = 0.49RH + 0.09RB + 0.16RE + 0.26RF \quad (4)$$

式中:

$$RH = 0.11Lt + 0.31Ld + 0.58Ln \quad (5)$$

$$RB = 0.43Sc + 0.43Eh + 0.14Tr \quad (6)$$

$$RE = 0.34Pd + 0.34Gd + 0.13Wt + 0.13(1 - Ap) + 0.06Hd \quad (7)$$

$$RF = 0.13Ci + 0.37Mi + 0.37Fr + 0.13(1 - Pc) \quad (8)$$

其中：LDRI 是雷击森林火险指数；RH 是致灾因子指数；RB 是孕灾环境指数；RE 是承灾体暴露度指数；RF 是承灾体脆弱性指数；Lt 是雷暴日；Ld 是雷击点密度；Ln 是雷电强度；Sc 是土壤电导率；Eh 是海拔高度；Tr 是地形起伏；Pd 是人口密度；Gd 是 GDP 密度；Wt 是防火期月平均气温；Ap 是防火期月平均降水量；Hd 是腐殖物分布指数；Mi 是经济损失指数；Ci 是生命损失指数；Fr 是森林火险指数；Pc 是防护能力指数。

将致灾因子、孕灾环境、承灾体暴露度、脆弱性作为雷击森林火险的区划依据，基于 GIS 搭建空间分析模型，按照对应权重分别计算每个因子的等级区划，再根据计算公式(4)对各影响因子进行叠加处理，按照自然间断点法对徂徕山林场进行雷击森林火险区划，见图 6。

通过图 6 可以看出，徂徕山的雷击森林火险区域差异性较大。高风险和较高风险区域主要集中在太平顶林区、王庄林区南部、光华寺林区大部等区域；中等风险区域主要集中在茶石峪林区大部、锦罗林区大部、王庄林区北部、太平顶林区西部、光华寺林区北部；较低或低风险区域主要分布在徂徕林区、大寺林区、黄石崖林区、庙子林区、王庄林区东北部局部、锦罗林区北部局部和东南部局部区域。

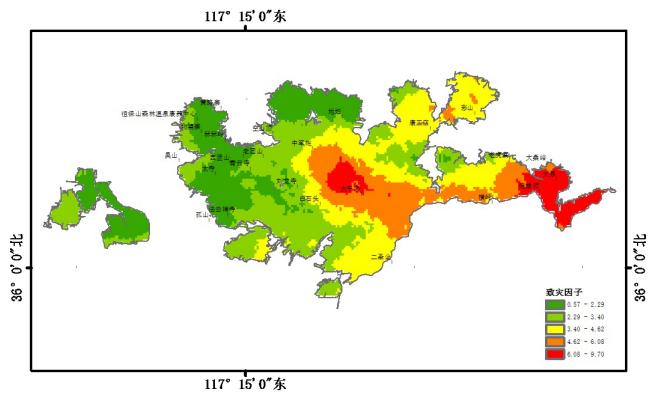


Figure 2. Distribution map of disaster causing factors in Culai Mountain forest farm
图 2. 徂徕山林场致灾因子等级分布图

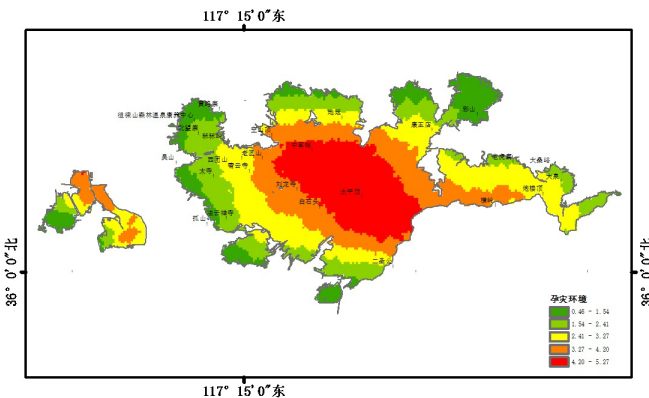


Figure 3. Distribution map of disaster prone environment levels in Culai Mountain forest farm
图 3. 徂徕山林场孕灾环境等级分布图

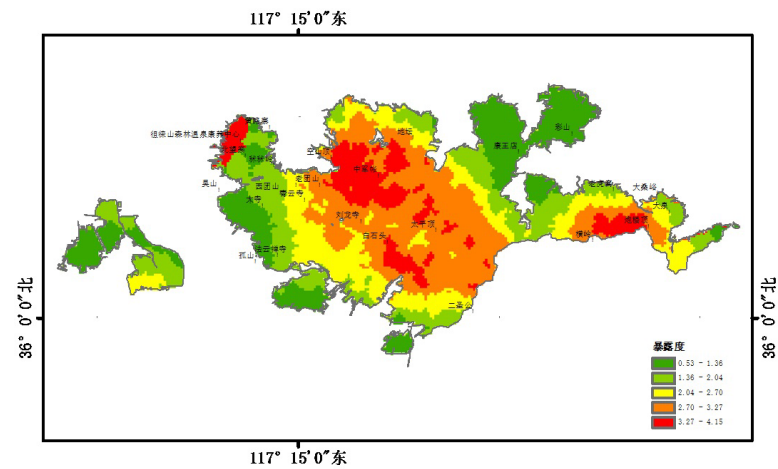


Figure 4. Distribution map of exposure levels of disaster affected bodies in Culai Mountain forest farm
图 4. 徂徕山林场承灾体暴露度等级分布图

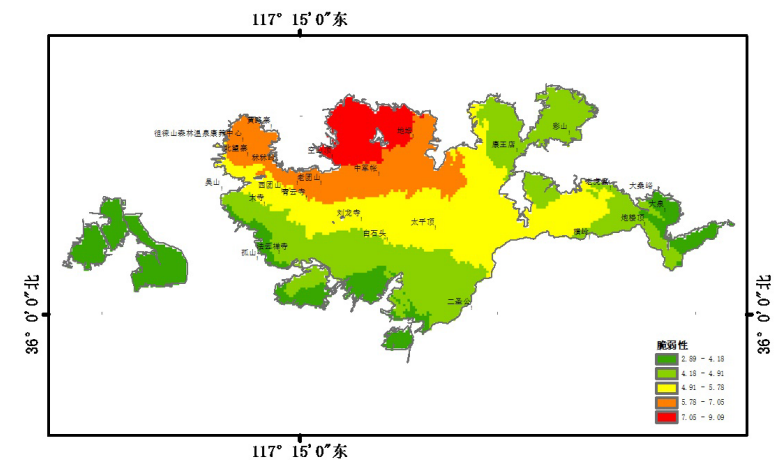


Figure 5. Distribution map of vulnerability levels of disaster bearing bodies in Culai Mountain forest farm
图 5. 徂徕山林场承灾体脆弱性等级分布

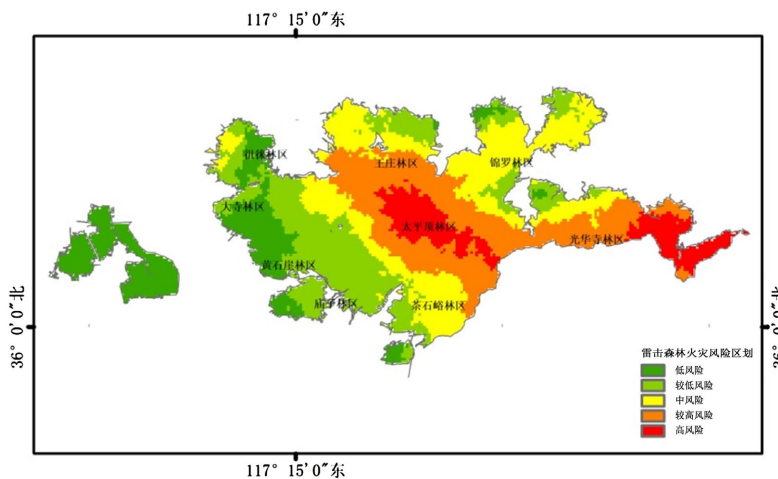


Figure 6. Distribution map of forest fire risk zoning caused by lightning strikes in Culai Mountain
图 6. 徂徕山雷击森林火险区划分布图

5. 结论

本文利用闪电定位系统监测数据、气象数据、森林调查数据及人文数据、地形数据等,对森林雷击火灾的多个影响因子进行分析,并利用层次分析模型,对影响因子进行权重划分,将致灾因子、孕灾环境、承灾体暴露度、脆弱性作为雷击森林火险的区划依据,基于 GIS 进行空间建模,得到徂徕山林场的雷击森林火险区划结果。

(1) 基于森林雷击火险区划的研究在徂徕山国家森林公园尚属首次。该研究应用 GIS 建模功能,结合森林雷击火灾原因、特点和地形特征,提出了一套符合实际的森林雷击火险区划方法,建立的雷击引发火险计算模型可以对相关工作提供技术支持,为今后林场防护雷击火灾研究提供借鉴。

(2) 经过 GIS 计算处理的徂徕山雷击森林火险区划较高以上风险区域主要集中在太平顶林区、王庄林区南部、光华寺林区大部等区域;在雷电活动高发季节,除了要对中高风险区域靶向式巡护、开展人工增雨作业的同时,要对浏览徂徕山国家森林公园所经路段游客做好安全疏导,保护游人安全。

(3) 雷击森林火灾的影响因素多样,不同的影响因子将影响雷击森林火灾区划模型的精准度。在后期的延伸研究中,将继续拓展不同影响因子数据样本的获取途径,进一步丰富影响因子的内容,提升区划模型的精确率,为科学评估雷击森林火险动态变化提供科学依据。

参考文献

- [1] 张颖,丁昱菲.我国森林灾害的空间分布分析[J].北京林业大学学报,2019,41(3):68-79.
- [2] 张宏民,乔艺骞,唐珑坪,等.模拟雷击明火点燃松针燃料的实验研究[J].工程热物理学报,2022,43(3):840-845.
- [3] 翟杰休,李勇,张博,等.世界主要林火多发国家的森林火灾与雷击火概况分析[J].亚热带资源与环境学报,2022,17(4):72-79.
- [4] 周长明,陈亮,陆明明,等.高纬度林场干雷暴与雷击火时空分布特征及其相关分析[J].广西林业科学,2022,51(4):520-526.
- [5] 臧桐汝,舒立福,王明玉,等.黑龙江大兴安岭林场雷击火时空分布及驱动因素分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2022,50(12):64-76.
- [6] 陈亮,吕东波,张伟淇,等.黑龙江省一次闪电定位数据分析与雷击火发生环境研究[J].环境科学与管理,2020,45(1):65-68.
- [7] 李威,陈林涛,赵瑞廷,等.根河林场雷击火分布特征及气象因素影响分析[J].内蒙古林业调查设计,2021,44(5):35-39.
- [8] 张吉利,毕武,王晓红,等.雷击火发生的影响因子与预测研究进展[J].应用生态学报,2013,24(9):2674-2684.
- [9] 王金荣,史明昌,姜恩来,等.基于 GIS 的黑龙江大兴安岭森林雷击火发生概率预测模型[J].安徽农业大学学报,2015,42(5):769-774.
- [10] 彭欢,史明昌,孙瑜,等.基于 Logistic 的大兴安岭雷击火预测模型[J].东北林业大学学报,2014,42(7):166-169.
- [11] 孙瑜,史明昌,彭欢,等.基于 MAXENT 模型的黑龙江大兴安岭森林雷击火火险预测[J].应用生态学报,2014,25(4):1100-1106.
- [12] 殷继艳,贾晓丽,郭亚娇,等.三亚市森林火险评价与区划[J].消防科学与技术,2021,40(1):8-12.