

基于生态位模型的地质灾害风险评价

张云, 资锋, 郭杰华, 曹运江, 段九龄, 郭志刚, 唐龙

Geological disaster risk assessment based on ecological niche model: A case study of Longhui County, Shaoyang City

ZHANG Yun, ZI Feng, GUO Jiehua, CAO Yunjiang, DUAN Jiuling, GUO Zhigang, and TANG Long

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202308054>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

崩塌滑坡地质灾害风险排序方法研究

A study of the risk ranking method of landslides and collapses

解明礼, 巨能攀, 刘蕴琨, 刘秀伟, 赵伟华, 张成强 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 184–192

考虑基质吸力作用的Newmark改进模型在地震滑坡风险评价中的应用

Application of Newmark improved model considering matrix suction in earthquake landslide risk assessment

冯卫, 唐亚明, 赵法锁, 陈新建 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 154–160

隧道施工期岩爆危险性评价的属性识别模型及工程应用

Attribute recognition model of fatalness assessment of rockburst in tunnel construction and its application

何怡帆, 李天斌, 曹海洋 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 102–111

基于数值模拟的耳阳河流域泥石流灾害危险性评价

Debris flow hazard assessment of the Eryang River watershed based on numerical simulation

侯圣山, 曹鹏, 陈亮, 冯振, 王立朝, 李昂, 刘军友, 李阳光, 郑浩 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 143–151

基于时空维度耦合的地质灾害发育程度评价研究

A study of the evaluation of geo-hazards development degree based on time-space coupling

曲雪妍, 李媛, 房浩, 杨旭东, 谢振桦, 尹春荣, 张艳玲, 佟彬 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 137–145

基于广播RTK边缘计算的北斗高精度地质灾害监测系统及应用分析

The Beidou high precision geological disaster monitoring system based on RTK edge calculation and its application analysis

朱真, 江思义, 刘小明, 李志宇 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 176–183



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202308054

张云, 资锋, 郭杰华, 等. 基于生态位模型的地质灾害风险评价——以邵阳市隆回县为例 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(1): 190-201.

ZHANG Yun, ZI Feng, GUO Jiehua, et al. Geological disaster risk assessment based on ecological niche model: A case study of Longhui County, Shaoyang City[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(1): 190-201.

基于生态位模型的地质灾害风险评价 ——以邵阳市隆回县为例

张云^{1,2}, 资锋¹, 郭杰华³, 曹运江¹, 段九龄³, 郭志刚³, 唐龙¹

(1. 湖南科技大学地球科学与空间信息工程学院, 湖南湘潭 411201; 2. 四川省地质工程勘察院集团有限公司, 四川成都 610072; 3. 湖南省自然资源调查所, 湖南长沙 410007)

摘要: 地质灾害风险评价是地质灾害防治的重要手段。针对湖南省邵阳市隆回县城镇化建设引发的大量崩滑流地质灾害, 为采取有效的防治措施, 从地形地貌、地质构造、岩土工程地质、人类工程活动等致灾因素方面选取 13 个评价因子, 采用最大熵物种分布模型(MaxEnt 模型)建立地质灾害危险性评价模型。从人口分布、经济背景、环境资源开发、防灾减灾能力等方面选取 7 个评价因子, 利用系统聚类分析模型建立地质灾害易损性评价模型。综合两者的评价结果, 构建研究区地质灾害风险评价模型, 并将研究区划分为极低风险区、低风险区、中风险区、高风险区、极高风险区。研究表明: (1)在危险性评价中最大熵物种分布模型 ROC 的 AUC 值为 0.918, 表明模型在研究区地质灾害危险性预测中适用性较好; (2)陡坎、年平均降雨量、坡度、岩土体建造是影响研究区地质灾害发育主要的评价因子; (3)极高-高风险区面积为 194.70 km², 占研究区总面积的 6.80%, 现有减灾能力条件下极高-高风险区的面积降低了 30.38%, 减灾效果较好, 为隆回县地质灾害风险提供一种新的评价方法, 并为政府的风险管理策略提供理论参考。

关键词: 地质灾害; 最大熵物种分布模型; 系统聚类分析模型; 危险性; 易损性; 风险评价

中图分类号: P642; X43

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)01-0190-12

Geological disaster risk assessment based on ecological niche model: A case study of Longhui County, Shaoyang City

ZHANG Yun^{1,2}, ZI Feng¹, GUO Jiehua³, CAO Yunjiang¹, DUAN Jiuling³, GUO Zhigang³, TANG Long¹

(1. School of Earth Sciences and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China; 2. Sichuan Institute of Geological Engineering Investigation Group Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610072, China; 3. Hunan Province Nature Resources Investigation Institute, Changsha, Hunan 410007, China)

Abstract: Geological disaster risk assessment is crucial for the prevention and control of geological disasters. This study focuses on the significant number of geological disasters induced by urbanization construction in Longhui County, aiming to propose effective preventive and control measures. The study considered various disaster-

收稿日期: 2023-08-28; 修订日期: 2024-01-19

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(4100222); 湖南省自然科学基金项目(2020JJ4295); 湖南省自然资源厅地质灾害调查项目(湘地调 2022-77); 四川省地矿局科技创新项目(SCDKZCKJXM-2022055); 四川省自然资源厅科研项目(KJ-2023-31)

第一作者: 张云(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事地质灾害调查、评价与防治研究。E-mail: zyun404215@163.com

通讯作者: 资锋(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事地质灾害与地质环境研究。E-mail: zifeng@hnust.edu.cn

inducing factors and selected 13 assessment criteria from topography and geomorphology, geological structure, engineering geology of geotechnical bodies, and human engineering activities. The MaxEnt model is employed to establish the geological disaster hazard assessment model, while 7 assessment factors are selected from population distribution, economic background, environmental resources development, disaster prevention, and mitigation capacity. The systematic cluster analysis model was then utilized to establish a geological disaster vulnerability assessment model. The results of both assessments were integrated to construct a comprehensive geological disaster risk assessment model for the region, classifying areas into extremely low risk, low risk, medium risk, high risk, and extremely high risk. The result show that the *AUC* value of the MaxEnt model in the hazard assessment is 0.918, indicating its strong applicability in predicting the geological disaster hazard risk in the study area. Steep canyon, average annual rainfall, slope, and geotechnical construction are identified as the main factors influencing the development of geological disasters in the study area. The area classified as extremely high to high risk covers is 194.70 km², accounting for 6.80% of the total area. Under existing disaster reduction capacity, the area with extremely high to high risk has been reduced by 30.38%, reflecting a positive impact on disaster reduction. This study introduces a novel method for the risk assessment of geological disasters in Longhui County and provides a theoretical basis for the government's risk management strategy.

Keywords: geological disasters; MaxEnt model; systematic cluster analysis model; hazard; vulnerability; risk assessment

据自然资源部发布的数据统计,2018—2022年全国共发生地质灾害27418起,造成603人死亡,69人失踪,直接经济损失达139.6亿元。随着我国对地质灾害防治体系的构建完善,地质灾害预测准确性增加,全国地质灾害发生的数量及造成的损失有一定的减少^[1],但因地域跨度大、孕灾地质背景条件复杂、成灾模式多样等原因^[2-3],对地质灾害的防治提出了更高的要求。因此开展地质灾害风险评价,识别预测地质灾害隐患变得尤为重要。

20世纪30年代国外学者提出风险评价概念,并于1970年首次对地质灾害进行风险评价研究^[4]。随后相关研究者开展了一系列关于地质灾害风险评价的研究。如Özdemir等^[5]对土耳其某城区崩滑流灾害进行实地调查,结合GIS的三维分析功能进行地质灾害风险评价;Yalcin等^[6]基于GIS平台采用频率比法、层次分析法、双变量统计和逻辑回归模型对土耳其特拉布宗进行滑坡风险评价;Youssef等^[7]采用多元自适应回归样条(multivariate adaptive regression splines, MARS)、人工神经网络(artificial neural network, ANN)、随机森林(random forest, RF)、支持向量机(support vector machine, SVM)等7种机器学习算法对沙特阿拉伯地区进行滑坡风险评价。国内虽然在风险评价项目上起步较晚,但在理论和实践上取得了丰硕的成果,特别是针对中国南方城市地质灾害频发问题,相关学者进行了一系列的地质灾害风险评价研究。张

钟远等^[8]以镇康县为研究区,采用多种评价模型对比进行滑坡易发性评价研究;刘宝生等^[9]以江苏南京为研究区,采用信息量模型和层次分析模型结合4种不同降雨强度工况进行地质灾害风险评价;张群等^[10]以泸水市为研究区,针对西南山区特有分布特征进行地质灾害风险评价;陈水满等^[11]选取11个影响因子,基于人工神经网络模型对福建省南平市进行滑坡危险性评价。这些成果极大地促进了地质灾害风险评价的发展,但大部分研究仅得出风险区划结果^[12],并未从减灾能力大小的角度去分析对风险区划结果的影响。随着3S技术、信息全球化的不断发展,进行风险评价的方法和手段不断丰富和成熟。国内外学者逐渐将传统的评价模型,如专家打分法、信息量模型、模糊数学法等,向数理统计方法与机器学习模型相结合转变^[13]。虽然与传统的地质灾害定性评价方法相对比,现行的评价方法有一定的改进和提升,但准确率高、操作简单的评价模型应用较少。

最大熵物种分布模型是由Phillips等^[14]提出并开发,因样本量要求低、运算结果较稳定,操作简单、可避免模型过拟合等特点^[15],现被广泛运用于生态领域。与证据权模型、模糊数学模型、层次分析模型等相比,最大熵物种分布模型不需要高精度地定位、大量的调查以及对环境变量进行权重计算,国内外已有学者将最大熵物种分布模型运用于滑坡易发性评价中^[16-18]。

因此,以邵阳市隆回县为研究区,依托隆回县第一

次全国自然灾害综合风险普查项目和隆回县 1:10 000 地质灾害调查与风险评价项目,综合考虑研究区致灾因素的影响,采用最大熵物种分布模型和系统聚类分析模型分别进行地质灾害危险性评价和易损性评价,结合两者的评价结果进行地质灾害风险评价研究,以此为政府相关部门制定土地利用及重点防治区域划分提供理论基础,并为相似县域城市提供一种新的风险评价模型。

1 研究区概况

隆回县是典型的南方丘陵区,人口众多,经济较发达,位于湖南省邵阳市西北部,地处北东向雪峰山脉东麓与东西向白马山-龙山脉结合部,地势西北高东南低,平均坡度超过 20°。县域总面积 2 867.71 km²,属中亚热带季风湿润气候,全县多年年均降雨量 1 312.5 mm,降雨量分布不均,由东南向西北递增。隆回县水系发育,主要属资水上游水系,相对高差大,溪河众多,植被覆盖率较高。县内断层构造发育强烈,地层发育较全,自上元古界至新生界第四系都有出露,岩浆岩分布面积较广,大面积分布于隆回县北部。新构造运动不甚强烈,主要表现为以上升为主的间歇性不均匀抬升运动。隆回县地质地貌条件复杂,地层岩性差异大,斜坡形态和结构多变,是崩滑流塌地质灾害多发区之一。据湖南省隆回县 1:10 000 地质灾害调查和风险评价项目统计,隆回县目前现存地质灾害隐患点 222 处,其中滑坡 199 处,崩塌 12 处,泥石流 5 处,地

面塌陷 6 处(图 1),分别占灾害点总数的 89.64%、5.41%、2.25%、2.70%。由于研究区滑坡灾害占比较大,发育显著,其他 3 种灾害发育的数量相对较少,因此主要考虑滑坡灾害对研究区的影响,在选取评价指标时也主要考虑了对滑坡灾害影响相关的指标。随着沪昆高铁、怀邵衡铁路等一批重要交通工程的建设,以及新建矿山、企业等人类活动加剧,将产生大量的人工开挖斜坡,从而引发斜坡失稳等环境地质问题。

2 生态位模型原理

2.1 最大熵物种分布模型

最大熵物种分布模型是一种基于信息量和统计学的机器学习模型,它将样本的分布表示为一个概率分布,并为样本所在区域指定一个非负值^[14, 19]。具体计算原理是:将研究区划分为若干个单元, $\pi(x)$ 表示每个单元灾害发生的概率分布值,将相应变量存在或者不存在表示为 y ,那么 $\pi(x)$ 为条件概率 $P(x|y)=1$,通过贝叶斯原理,灾害点分布概率可表示为:

$$P(y=1|x) = \frac{P(x|y=1)P(y=1)}{P(x)} \quad (1)$$

式中: $P(y=1|x)$ ——地点 x 发生灾害的概率;

$P(x)$ ——研究区内任意位置发生概率;

$P(x|y=1)$ ——在灾害分布条件下地点 x 处发生灾害的概率;

$P(y=1)$ ——研究区内灾害发生总体概率。

又因为 $P(x) = \frac{1}{|x|}$,则式(1)可表示为:

$$P(y=1|x) = \pi(x)P(y=1)|x| \quad (2)$$

最大熵物种分布模型属于由特征集导出的吉布斯分布族 $P(f_1, \dots, f_n)$,吉布斯分布是由特征权重向量参数化的指数分布 $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_n)$,定义为:

$$q_\lambda(X) = \frac{\exp\left[\sum_{i=1}^n \lambda_i f_i(x)\right]}{Z_\lambda} \quad (3)$$

式中, Z_λ 是归一化常数,确保 $q_\lambda(X)$ 在研究区内概率和为 1,因此最大熵物种分布模型在 q_λ 处的 x 值由 x 点的特征值决定,并且只对 X 处的环境变量有影响,为避免过度拟合,模型利用正则化 I_2 找到最接近约束条件下分布。

为了找到一个很好拟合数据的吉布斯分布,用正则法参数去权衡最大化对数似然和正则化之间的差异,表示为:

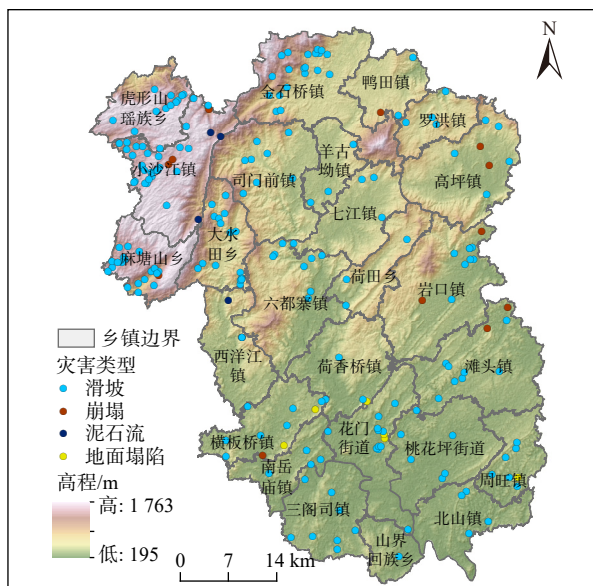


图 1 研究区地质灾害分布图

Fig. 1 Geological disasters distribution map of the study area

$$N = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n \ln[q_{\lambda}(x_i)] - \sum_{j=1}^n \beta_j |\lambda_j| \quad (4)$$

式中: N ——吉布斯分布差异值;

m ——研究区事件发生次数,正则化参数 β_j 表示特征 f_j 和 $x_1, \dots, x_m$ 的误差界宽度。

2.2 系统聚类分析

系统聚类分析法又称谱系分析、层次聚类分析,是一种多变量方法。是将给定变量的一组受试组分配到不同数量的组中,其中相同的受试者被放在相似的组中,检测数据之间的差异和相似之处^[13, 20]。计算步骤如下:

选取变量组及样品组,构成原始数据矩阵,其表达式为:

$$X = [x_{ij}]_{n \times m} \quad (5)$$

式中: x_{ij} ——第 i 个样品组中第 j 个观测指标。

准备好原始数据矩阵后,要对其进行数据变换处理,较常见的方法有规格化变换、对数化变换、标准化变换,在实际运用中常选择标准化变换。其变换公式为:

$$x_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{S_j} \quad (6)$$

式中: $\bar{x}_j$ ——第 j 个观测指标均值;

S_j ——所有样品组中第 j 个观测指标数据之和。

数据变换处理之后,构建相似系数矩阵 $Q = [\cos \theta_{ik}]_{n \times n}$, 其中相似系数表达式为:

$$\cos \theta_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij} x_{kj}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n x_{ij}^2} \sqrt{\sum_{j=1}^n x_{kj}^2}} \quad (7)$$

最后对相似系数矩阵 $Q = [\cos \theta_{ik}]_{n \times n}$, 采用逐步聚类法,将所有样品组及变量组聚类完成,选取合适的分类方案,绘制谱系图。

3 地质灾害危险性评价

3.1 评价因子选取与处理

对研究区实地调查得知,隆回县地质灾害的发生主要是由斜坡自身基础条件和外部环境因素共同作用引起,结合《县(市)地质灾害调查与区划基本要求》、《湖南省 1:10 000 地质灾害调查和风险评价技术要求(运行)》等技术规范,综合分析地质灾害发生的孕灾条件,选取高程、坡度、坡向、岩土体类型、

剖面曲率、平面曲率、归一化植被指数(NDVI)、距陡坎的距离、距河流的距离、距断层的距离等 10 个环境变量及距道路的距离、居民点密度、年平均降雨量等 3 个诱发变量作为危险性评价因子,根据《中国地震动参数区划图》显示,隆回县地震动峰值加速度为 0.05 g,相当于 6 度地震烈度区,属于弱震区,地壳整体属于湘中南较稳定-稳定区,因此暂不考虑地震对研究区地质灾害的影响。利用 ArcGIS 软件对所选评价因子按 30 m×30 m 像元进行重采样,投影坐标统一为 CGCS2000_3_Degree_GK_Zone_37,生成如图 2 所示的 13 个图层,最后将所有图层转为 ASC 格式用于建模。为保证所选灾害点数据自相关性最低,对灾害点按照空间筛除法进行采样,将满足要求的 222 个灾害点数据保存为 CSV 格式^[17]。在 MaxEnt 3.4.4 软件中输入转换格式后的数据,选用交叉验证法,设置最大迭代次数 500 次,模型随机运行多次,取多次的均值,以保证得到的结果相对稳定,结果以 Logistic 格式、ASC II 类型输出,其余参数选择默认值^[21]。

3.2 评价结果分析

3.2.1 最大熵物种分布模型的验证

通过最大熵物种分布模型对研究区地质灾害潜在地理位置分布进行模拟,得到其 ROC 特征曲线, AUC 在 0.9 以上时具有高准确性, AUC 在 0.7~0.9 时具有较高准确性, AUC 在 0.5~0.7 时具有较低准确性, AUC 低于 0.5 时无判断价值^[22],由图 3 可看出,训练结果和测试结果的 AUC 平均值分别为 0.918 和 0.893,预测效果总体达到了较高准确性,表明最大熵物种分布模型在预测地质灾害分布与环境变量之间的关系时具有较高准确性。

3.2.2 环境变量的贡献率及重要性

模型自带的刀切法检验模块提供了所考虑变量函数的替代估计值,通过依次排除每个变量,利用剩下的变量来构建模型,以确定模型中最重要的变量,并校准模型的 3 个参数^[23-24]。采用刀切法测试不同变量在研究区预测中的贡献率及重要性,根据贡献率排名前 4 的环境变量分别是:陡坎、年平均降雨量、坡度、岩土体类型,前 4 个环境变量的贡献率总和为 82.5,表明在该地区对地质灾害的发生具有较大影响。由图 4 可知,所有环境变量的贡献率均大于 0,平面曲率和距断层的距离对该地区地质灾害的发育影响较小。

3.2.3 危险性分区特征

根据研究区自身情况,将研究区地质灾害模拟结果,按照自然断点法分为极低危险区、低危险区、中

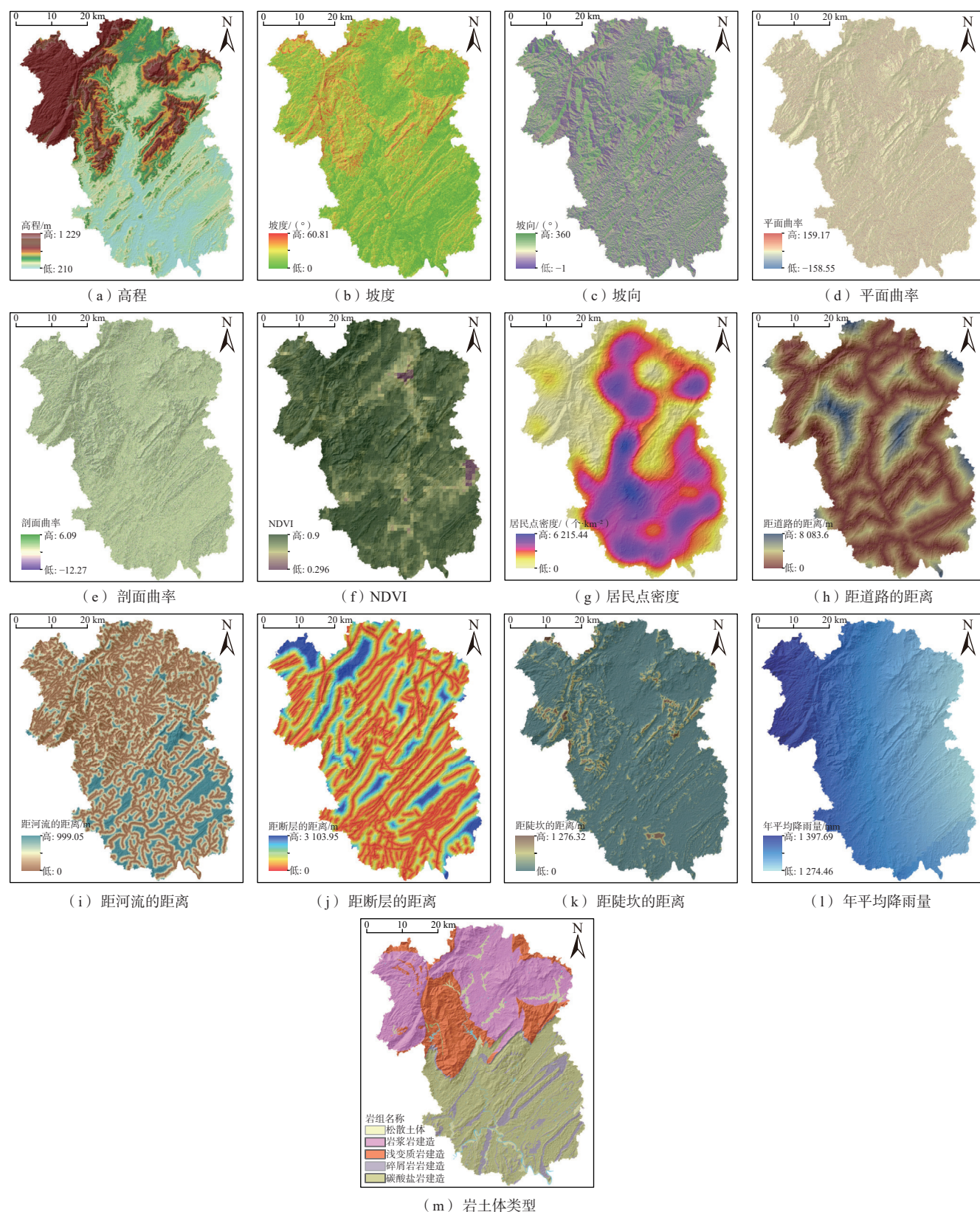


图 2 研究区环境变量图层

Fig. 2 Environment variable layer in the study area

危险区、高危险区、极高危险区 5 类(图 5)。通过统计危险性分区结果可知(表 1), 极高危险区主要分布

在西部、西北与北部的山区地质环境条件脆弱, 海拔较高、坡度较大、基础建设相对落后的岩浆岩和浅变

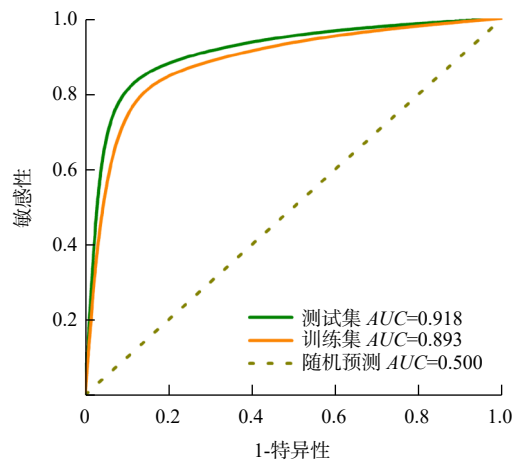


图3 模型精度验证 ROC 曲线
Fig. 3 Model accuracy validation ROC curve

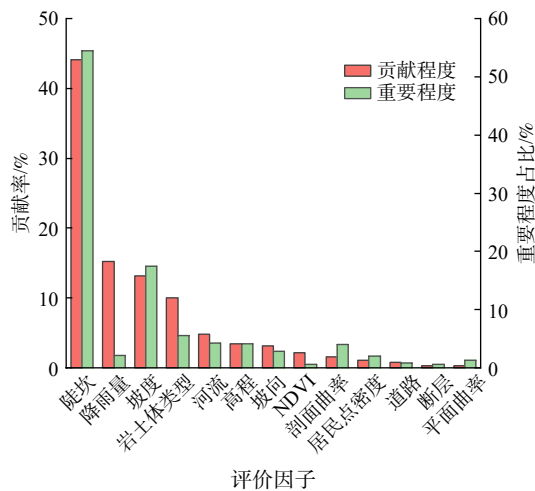


图4 环境变量贡献率和重要性占比
Fig. 4 Contribution ratios and importance shares of environmental variables

质岩地区; 高危险区主要分布在低山区、人类工程活动强烈、水系发育、距陡坎较近的碎屑岩地区; 中危险区主要分布在高危险区附近; 低危险区主要分布在人类工程活动较少、植被发育的准平原和南方丘陵地区; 极低危险区主要分布在植被覆盖率较高、人类工程活动少的高海拔地区。

4 地质灾害易损性评价

4.1 评价因子选取

在现有易损性研究中, 评价因子的一般选取物质易损性、经济易损性、社会易损性、生态环境易损性、制度易损性等 5 个方面^[25]。根据隆回县自然地理条件、社会经济状况、数据的可获得性等因素, 结合湖南省 2022 年统计年鉴, 选取人口密度、GDP 密度、耕地密度、工业矿区密度、灾害点密度、道路密度、减灾

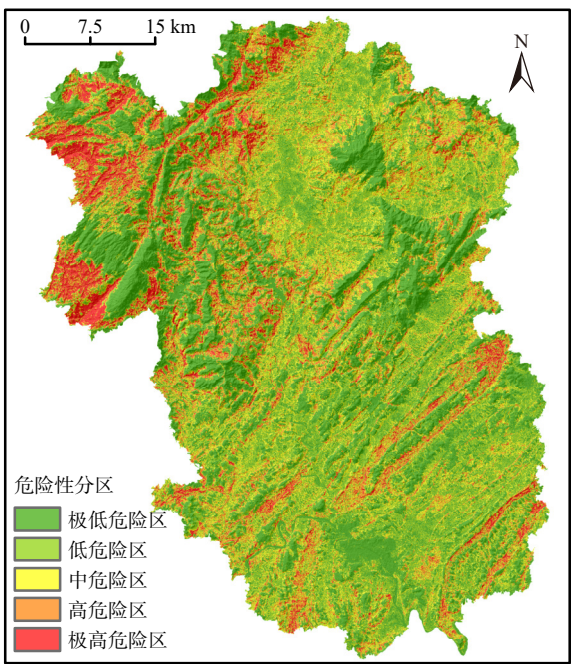


图5 研究区地质灾害危险分区
Fig. 5 Geological disaster zoning in the study area

表1 地质灾害危险性分区统计表

Table 1 Geological disaster zoning statistics						
危险性等级	栅格数量/个	各等级面积/km ²	面积占比/%	灾害点数量/个	灾害点占比/%	灾积比
极低	1 102 959	996.103	34.74	14	6.31	0.182
低	867 889	781.100	27.24	14	6.31	0.232
中	619 650	557.685	19.45	24	10.81	0.556
高	375 322	337.790	11.78	65	29.28	2.486
极高	216 697	195.027	6.80	105	47.30	6.955

能力大小等 7 个因子作为此次地质灾害易损性评价因子(表 2)。

(1)人口密度(H_1): 随着风险评价体系的不断成熟, 单一的由人口密度来衡量该地区的易损性不够全面, 参照现有研究成果^[11, 26-27] 从受教育程度、年龄结构、实际人口密度、人口分布等方面对人口密度进行优化。具体计算如下:

$$H_1 = 1/3(a + b + c)m \tag{8}$$

式中: H_1 ——优化后的人口密度;
 a ——65 岁年龄以上的老人和 14 岁以下的儿童占比;
 b ——接受高中(包括高中)以上教育人口占比;
 c ——农村人口占比;
 m ——实际人口密度。

(2)GDP 密度(H_2): H_2 =总 GDP/区域总面积。主要指地质灾害发生对经济造成的最大可能损失。

(3)耕地密度(H_3): H_3 =该地区总耕地面积/该区域

表 2 研究区各乡镇易损性评价因子

Table 2 Vulnerability assessment factors for each town in the study area

乡镇	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	H_7
虎形山瑶族乡	140.845	10.842	0.181	0.000 11	0.125	2.132	弱
鸭田镇	286.955	16.813	0.273	0.003 54	0.040	2.688	弱
罗洪镇	289.877	12.231	0.299	0.000 17	0.062	1.806	弱
羊古坳镇	426.478	31.142	0.323	0.000 86	0.049	2.830	弱
南岳庙镇	356.873	12.500	0.276	0.001 66	0.044	2.391	弱
七江镇	401.064	8.535	0.287	0.001 34	0.038	2.856	较弱
小沙江镇	131.465	12.821	0.128	0.000 11	0.223	2.341	较弱
麻塘山乡	133.450	14.412	0.146	0.000 21	0.243	2.638	较弱
大水田乡	98.898	12.522	0.104	0.000 68	0.170	2.438	较弱
荷田乡	262.137	10.598	0.178	0.000 95	0.037	1.755	较弱
西洋江镇	315.639	8.607	0.212	0.004 96	0.030	1.737	较弱
北山镇	263.664	11.747	0.284	0.005 15	0.040	2.312	较弱
山界回族乡	362.163	28.278	0.325	0.000 03	0.021	1.558	较弱
金石桥镇	271.976	3.877	0.227	0.004 90	0.100	2.202	中
司门前镇	271.812	4.369	0.215	0.005 60	0.048	2.213	中
高坪镇	361.363	3.150	0.286	0.002 73	0.044	2.068	中
六都寨镇	289.302	3.977	0.198	0.009 43	0.049	2.501	中
横板桥镇	376.186	7.177	0.294	0.009 98	0.112	2.590	中
荷香桥镇	378.725	5.631	0.272	0.007 27	0.024	1.803	中
滩头镇	309.045	3.666	0.305	0.007 70	0.057	2.587	较强
岩口镇	240.378	3.597	0.217	0.003 77	0.051	1.990	较强
周旺镇	297.469	14.647	0.286	0.012 44	0.093	2.925	较强
三阁司镇	423.705	9.555	0.318	0.008 44	0.076	3.120	较强
桃花坪街道	1 043.569	2.392	0.274	0.096 96	0.042	2.631	强
花门街道	955.751	2.863	0.336	0.123 86	0.107	2.554	强

总面积。耕地影响着隆回县经济收入,发生地质灾害时,耕地面积越大,研究区遭受损失的可能性越大。

(4)工业矿区密度(H_4): H_4 =该地区工业矿区的总面积/该区域总面积。工业是隆回县经济收入的一大主要产业,发生地质灾害时,工业矿区的面积越大,其造成的损失可能越大。

(5)灾害点密度(H_5): H_5 =该地区发生灾害点总个数/该区域总面积。灾害点密度越大,研究区遭受损失的可能性越大。

(6)道路密度(H_6): H_6 =该地区道路总长度/该地区总面积。道路主要反映该地区地质灾害发生时,抢险救援的速度。

(7)减灾能力大小(H_7):主要反映各乡镇在现有条件下防灾减灾能力。由灾害管理(应急预案、风险评估、资金投入)、防灾备灾(物资储备、医疗保障)、自救互救(专业和志愿者队伍、公众避险、转移安置)方面构成,其指标权重依据《第一次全国自然灾害综合风险普查评估指标权重制定技术规范》得到(表 3)。基于确定的指标体系和权重,采用优劣解距离法,应

用评估软件系统,并按照表 4 所示划分为 5 级,得到区域乡镇(街道)自然灾害减灾能力。

表 3 乡镇(街道)减灾能力评估指标权重

Table 3 Weights of indicators for assessing the disaster reduction capacity of towns (streets)

一级指标	一级指标权重	二级指标	二级指标权重
灾害管理能力	0.4	队伍管理能力	0.34
		风险评估能力	0.33
		财政投入能力	0.33
灾害备灾能力	0.3	物资储备能力	0.60
		医疗保障能力	0.40
自救转移能力	0.3	自救互救能力	0.34
		公众避险能力	0.33
		转移安置能力	0.33

4.2 易损性评价结果

在 SPSS 软件中通过构建数据矩阵、数据标准化等处理后采用系统聚类分析法得到聚类结果(图 6、图 7),并结合研究区实地情况,在 ArcGIS 软件中利用自然间断点法将其划分为极低易损性、低易损性、中易损性、高易损性、极高易损性 5 类分区(图 7)。通

表 4 乡镇(街道)减灾能力等级

Table 4 Disaster reduction capacity levels of towns (streets)

减灾能力指数值	$[\mu+1.5\delta, 1]$	$[\mu+0.5\delta, \mu+1.5\delta)$	$[\mu-0.5\delta, \mu+0.5\delta)$	$[\mu-1.5\delta, \mu-0.5\delta)$	$[0, \mu-1.5\delta)$
等级	强	较强	中	较弱	弱

注: μ ——评估区域乡镇(街道)减灾能力指数的均值; δ ——评估区域乡镇(街道)减灾能力指数的标准差。

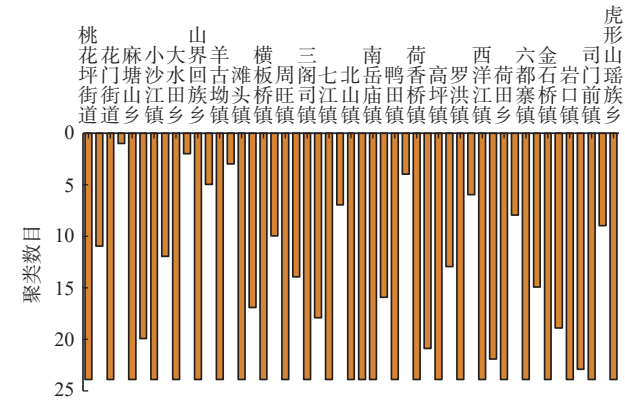


图 6 系统聚类分析结果冰柱图

Fig. 6 Icicle diagram of the systematic cluster analysis

过易损性评价结果可知,在不考虑减灾能力的情况下,极高易损区面积为 263.731 km²,占隆回县总面积的 9.2%,主要分布在:桃花坪街道、花门街道;高易损区面积为 794.806 km²,占隆回县总面积的 27.72%,主要分布在:横板桥镇、三阁司镇、周旺镇、滩头镇、小沙江镇、麻塘山乡、大水田乡;中易损区面积为 107.860 km²,占隆回县总面积的 3.76%,主要分布在:羊古坳镇、山界回族乡;低易损区面积为 545.614 km²,占隆回县总面积的 19.03%,主要分布在:鸭田镇、七江镇、岩口镇、南岳庙镇、北山镇;极低易损区面积为 1 155.699 km²,占隆回县总面积的 40.30%,主要分布在:虎形山瑶族乡、金石桥镇、司门前镇、六都寨镇、西洋江镇、金香桥、罗洪镇、高坪镇、荷田乡。造成这种分布的原因是:桃花坪街道、花门街道作为隆回县的行政中心(注:桃洪镇为隆回县原行政中心,2019 年拆分为桃花坪街道和花门街道),人口密度、工业矿区密度、耕地密度、灾害点密度均较大;滩头镇、周旺镇、三阁司镇、横板桥镇因在县城附近,易损性也较高,小沙江镇、麻塘山乡、大水田乡虽未在县城附近,GDP 密度、耕地密度等相对较小,但海拔较高,地质条件复杂,故灾害点密度为控制这些地区易损性的主要因素,易损性也表现较高;再次是羊古坳镇、山界回族乡,虽人口密度、灾害点密度等都较低,但地理条件优越、大力发展经济,GDP 密度是控制这些地区易损性的主要因素,易损性表现为中;鸭田镇、七江镇、岩

口镇、南岳庙镇、北山镇等镇大部分位于丘陵-小起伏低山,地质条件相对较好,人口密度、灾害点密度、GDP 密度等相对都较低,故在易损性上表现为低;虎形山瑶族乡、金石桥镇、司门前镇、六都寨镇、西洋江镇、金香桥、罗洪镇、高坪镇、荷田乡等乡镇人口密度、耕地密度、GDP 密度等均较低,因此在易损性上表现为极低。

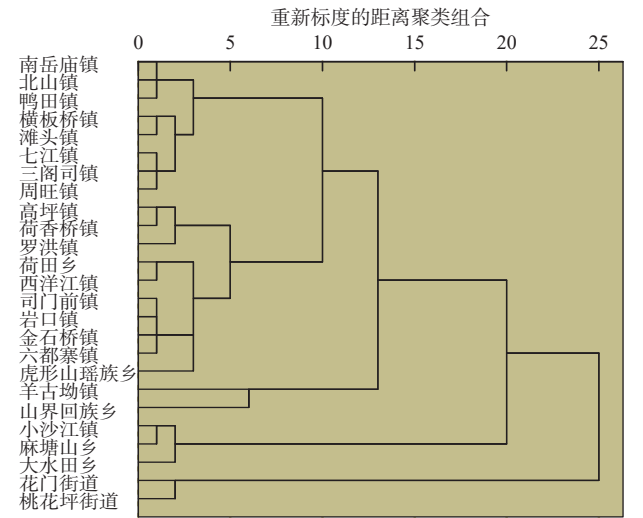


图 7 系统聚类分析结果树状图

Fig. 7 Tree diagram of the systematic cluster analysis

乡镇(街道)自然灾害减灾能力越强,灾害管理、防灾备灾、自救互救能力越强,在一定范围内自然灾害对建筑物、人员、交通设施等的威胁越小。由图 8 可知,在考虑现有减灾能力条件下,高易损区面积有较大幅度的减少,面积占比降低了 24.85%;除极高易损区外,其他各区面积均有一定幅度的减少,而极高易损区因人类工程活动强烈、人口密度远大于其他乡镇(街道),现有灾害管理、防灾备灾、自救互救能力仍不能满足地质灾害对范围内乡镇(街道)造成的影响,因此在减灾能力强的条件下,面积占比下降不显著。根据原始数据分析结果,减灾能力较弱的乡镇(街道),一方面未开展乡镇(街道)风险评估,辖区内没有自然灾害应急预案、风险地图等;另一方面,主要是物资储备较少,乡镇防灾减灾演练、培训次数较少,导致减灾能力减弱。因此,建议隆回县加强应急救援

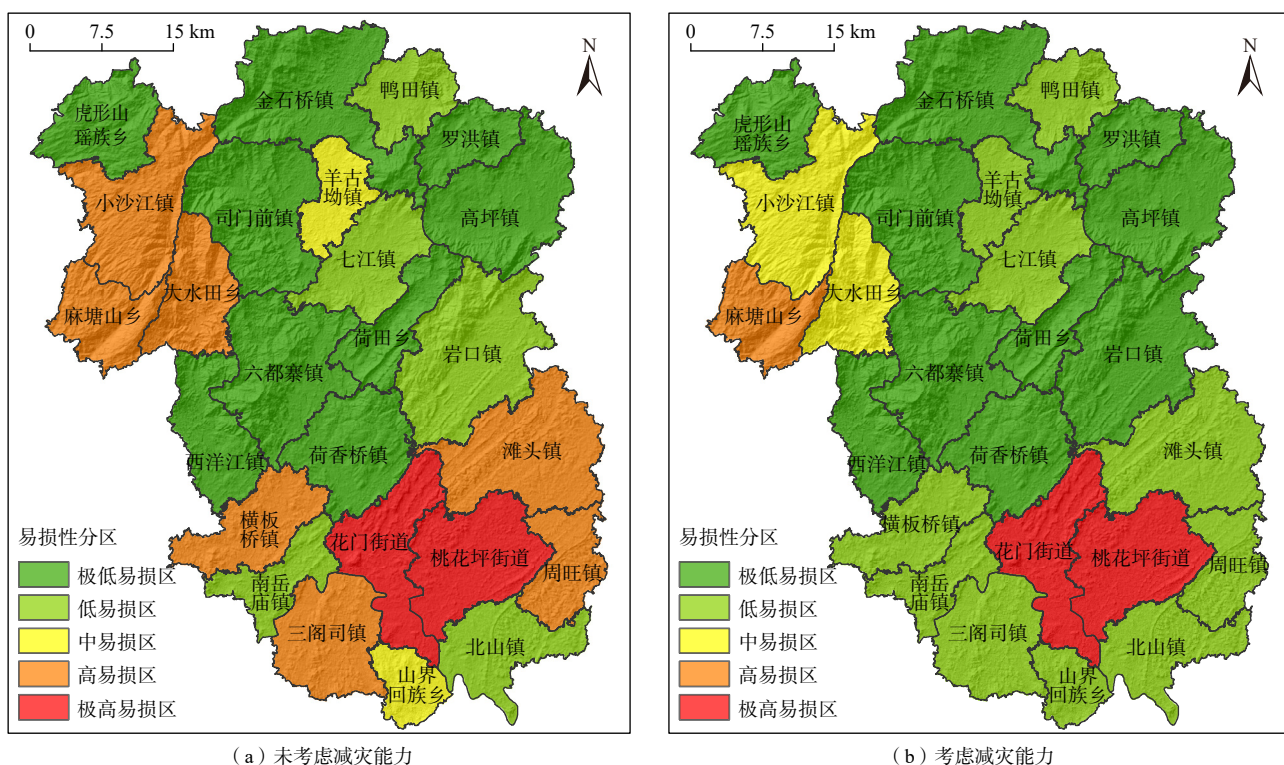


图 8 研究区地质灾害易损性分区结果

Fig. 8 Geologic disaster vulnerability zoning in the study area

的资金和人员投入力度,增强群众灾害防范意识、应急避险能力及监测预警储备。

5 地质灾害风险评价

5.1 风险区划的分析

根据风险评价的定义^[4,12],采用风险评价矩阵进行地质灾害风险分析,根据不同危险性和易损性级别组合结果,地质灾害风险被划分为 5 个级别:极高风险、高风险、中度风险、低风险以及极低风险(图 9)。通过研究区风险评价结果可知,未考虑减灾能力大小时,极高风险区面积占比为 3.91%,高风险区面积占比为 5.86%,中风险区面积占比为 12.16%,低风险区面积占比为 29.09%,极低风险区面积占比为 48.99%,极高-高风险区主要分布在西北部海拔较高的小沙江镇、麻塘山乡、大水田乡、南部经济较发达、断层较发育的花门街道、桃花坪街道中部及西北部、横板桥镇、周旺镇、三阁司镇等附近;中风险区主要分布在极高、高风险区附近的南岳庙镇、北山镇、横板桥镇中东部、经济较发达的羊古坳镇等地。极低-低风险区主要分布在地势相对较平坦、坡度较小、人类工程活动较小、经济不太发达的中部、东北部等乡镇。考虑减灾能力大小时,极高风险区面积为 62.00 km²,占

隆回县总面积的 2.16%,高风险区面积为 132.69 km²,占隆回县总面积的 4.63%,中风险区面积为 323.23 km²,占隆回县总面积的 11.29%,低风险区面积为 940.10 km²,占隆回县总面积的 32.82%,极低风险区面积为 1 406.24 km²,占隆回县总面积的 49.10%。根据风险评价的结果,建议政府相关部门在极高-高风险区进行生产活动时,需要对现有地质灾害隐患点进行治理防护,并加强该区域监测预警储备,增强群众灾害防范意识、应急避险能力。

5.2 减灾能力大小效益分析

从图 10 可以看出,与未考虑减灾能力相比,研究区内极低风险区面积保持稳定,减灾能力的存在使得中风险区、高风险区、极高风险区风险值降低,低风险区有一定的增加,且呈现出减灾能力越强风险区面积减少越大的趋势,中风险区面积由开始的 348.42 km²降为 323.23 km²,面积在原有基础上降低了 7.23%;高风险区面积由开始的 167.73 km²降为 132.69 km²,面积在原有基础上降低了 20.89%;极高风险区面积由开始的 111.91 km²降为 62.00 km²,面积在原有基础上降低了 44.60%。通过对原始数据分析得知,减灾能力越强的区域其经济基础较好,且拥有较完善的自然灾害应急预案、物资储备较充足、防灾减灾演练次数相对较

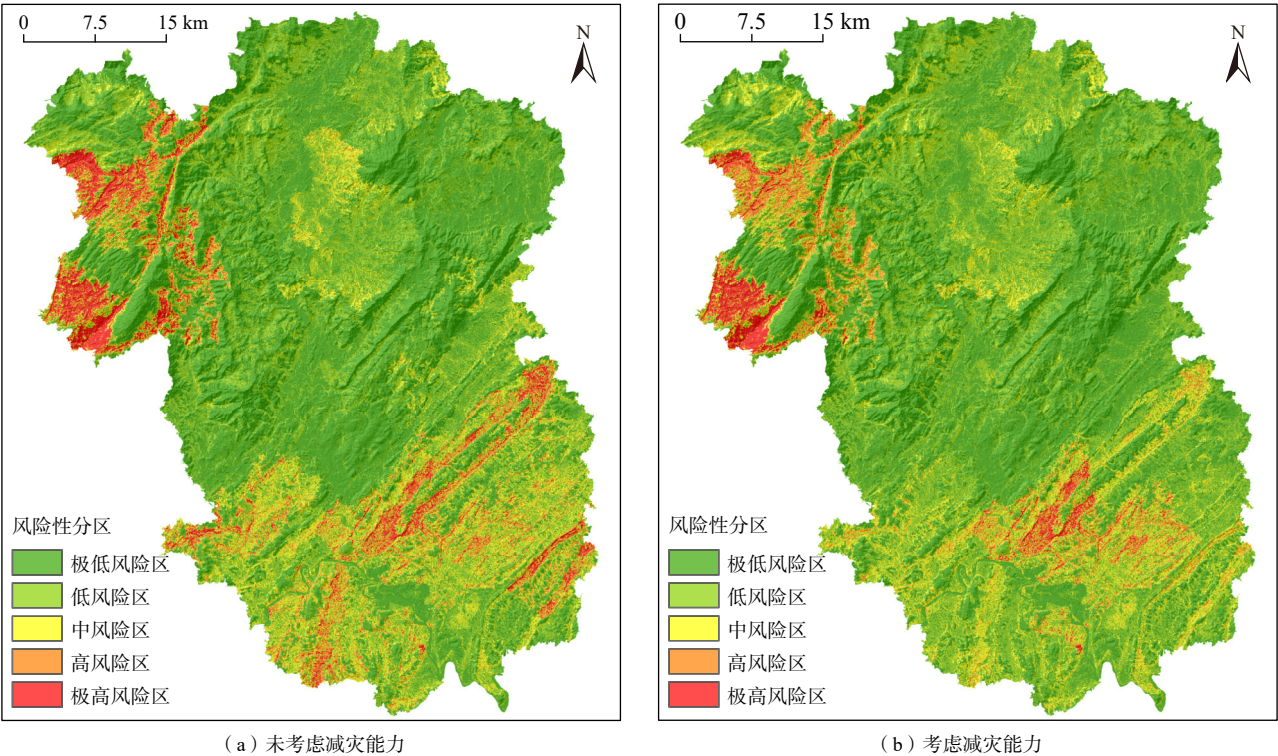


图9 研究区地质灾害风险评价结果

Fig. 9 Geologic disaster risk assessment in the study area

多等减灾措施,减灾能力效果显著,有利于地质灾害风险防治。

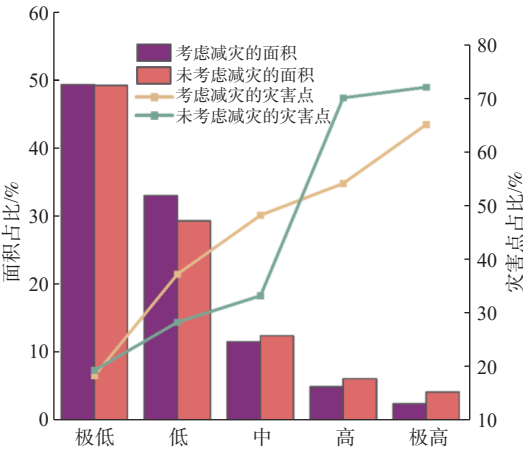


图10 减灾能力对风险分区的影响

Fig. 10 Impact of hazard mitigation capacity on risk partitioning

6 结论

(1)在地质灾害危险性评价中引入最大熵物种分布模型, AUC 值为 0.918, 表明模型在预测地质灾害分布与环境变量之间的关系时具有较高准确性,可客观反映隆回县地质灾害危险性分布特征。

(2)通过刀切法识别出陡坎、年平均降雨量、坡度、岩土体建造是研究区贡献率较大的评价因子,是影响研究区地质灾害发育重要的环境变量。

(3)研究区被划分为 5 个风险区,极高风险区面积为 62.00 km², 占隆回县总面积为 2.16%,高风险区面积为 132.69 km², 占隆回县总面积的 4.63%,中风险区面积为 323.23 km², 占隆回县总面积的 11.29%,低风险区面积为 940.10 km², 占隆回县总面积的 32.82%,极低风险区面积为 1 406.24 km², 占隆回县总面积的 49.10%。现有减灾能力条件下极高-高风险区的面积降低了 30.38%,减灾效果较好。

参考文献 (References) :

[1] SHU Bo, CHEN Yang, AMANI-BENI M, et al. Spatial distribution and influencing factors of mountainous geological disasters in Southwest China: A fine-scale multi-type assessment[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 1049333.

[2] 铁永波,孙强,徐勇,等.南方山地丘陵区典型地质灾害成因机制与风险评价[J]. *中国地质调查*, 2022, 9(4): 1-9. [TIE Yongbo, SUN Qiang, XU Yong, et al. Genetic mechanism and risk assessment of typical geological hazards in mountainous and hilly areas of South

- China[J]. Geological Survey of China, 2022, 9(4): 1 – 9. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 解明礼, 巨能攀, 刘蕴琨, 等. 崩塌滑坡地质灾害风险排序方法研究 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 184 – 192. [XIE Mingli, JU Nengpan, LIU Yunkun, et al. A study of the risk ranking method of landslides and collapses[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 184 – 192. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 姬怡微, 李成, 高帅, 等. 陕西省韩城市地质灾害风险评估 [J]. 灾害学, 2018, 33(3): 194 – 200. [JI Yiwei, LI Cheng, GAO Shuai, et al. Risk assessment of geological hazards of Hancheng City in Shaanxi Province[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(3): 194 – 200. (in Chinese with English abstract)]
- [5] ÖZDEMİR A, DELIKANLI M. A geotechnical investigation of the retrogressive Yaka Landslide and the debris flow threatening the town of Yaka (Isparta, SW Turkey) [J]. Natural Hazards, 2009, 49(1): 113 – 136.
- [6] YALCIN A, REIS S, AYDINOGLU A C, et al. A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey[J]. CATENA, 2011, 85(3): 274 – 287.
- [7] YOUSSEF A M, POURGHASEMI H R. Landslide susceptibility mapping using machine learning algorithms and comparison of their performance at Abha Basin, Asir Region, Saudi Arabia[J]. Geoscience Frontiers, 2021, 12(2): 639 – 655.
- [8] 张钟远, 邓明国, 徐世光, 等. 镇康县滑坡易发性评价模型对比研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(1): 157 – 171. [ZHANG Zhongyuan, DENG Mingguo, XU Shiguang, et al. Comparison of landslide susceptibility assessment models in Zhenkang County, Yunnan Province, China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(1): 157 – 171. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 刘宝生, 陈刚, 程刚建. 江苏南京地质灾害风险评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(4): 97 – 104. [LIU Baosheng, CHEN Gang, CHENG Gangjian. Risk assessment of geological disasters in Nanjing, Jiangsu Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(4): 97 – 104. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 张群, 易靖松, 张勇, 等. 西南山区县域单元的地质灾害风险评价——以怒江流域泸水市为例 [J]. 自然灾害学报, 2022, 31(5): 212 – 221. [ZHANG Qun, YI Jingsong, ZHANG Yong, et al. Geohazard risk assessment about county units in southwest mountainous areas of China: Take Lushui County of Nujiang River Basin as an example[J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(5): 212 – 221. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 陈水满, 赵辉龙, 许震, 等. 基于人工神经网络模型的福建南平市滑坡危险性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(2): 133 – 140. [CHEN Shuiman, ZHAO Huilong, XU Zhen, et al. Landslide risk assessment in Nanping City based on artificial neural networks model[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(2): 133 – 140. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 罗路广, 裴向军, 谷虎, 等. 基于 GIS 的“8.8”九寨沟地震景区地质灾害风险评价 [J]. 自然灾害学报, 2020, 29(3): 193 – 202. [LUO Luguang, PEI Xiangjun, GU Hu, et al. Risk assessment of geohazards induced by “8.8” earthquake based on GIS in Jiuzhaigou scenic area[J]. Journal of Natural Disasters, 2020, 29(3): 193 – 202. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 李冠宇, 李鹏, 郭敏, 等. 基于聚类分析法的地质灾害风险评价——以韩城市为例 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(25): 10629 – 10638. [LI Guanyu, LI Peng, GUO Min, et al. Application of cluster analysis method in geological hazard risk assessment: A case study of Hancheng City[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(25): 10629 – 10638. (in Chinese with English abstract)]
- [14] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4): 231 – 259.
- [15] TAFESSE B, BEKELE T, DEMISSEW S, et al. Conservation implications of mapping the potential distribution of an Ethiopian endemic versatile medicinal plant, *Echinops kebericho* Mesfin[J]. Ecology and Evolution, 2023, 13(5): e10061.
- [16] 刘凡, 邓亚虹, 慕焕东, 等. 基于最大熵-无限边坡模型的降雨诱发浅层黄土滑坡稳定性评价方法研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 146 – 158. [LIU Fan, DENG Yahong, MU Huandong, et al. A study of the stability evaluation method of rainfall-induced shallow loess landslides based on the Maxent-Sinmap slope model[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023,

- 50(5): 146 – 158. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 万洋, 郭捷, 马凤山, 等. 基于最大熵模型的中尼交通廊道滑坡易发性分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(2): 88 – 95. [WAN Yang, GUO Jie, MA Fengshan, et al. Landslide susceptibility assessment based on MaxEnt model of along Sino-Nepal traffic corridor[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(2): 88 – 95. (in Chinese with English abstract)]
- [18] BOUSSOUF S, FERNÁNDEZ T, HART A B. Landslide susceptibility mapping using maximum entropy (MaxEnt) and geographically weighted logistic regression (GWLR) models in the Río Aguas catchment (Almería, SE Spain) [J]. *Natural Hazards*, 2023, 117(1): 207 – 235.
- [19] MEMARIAN H, ABDI BASTAMI S, AKBARI M, et al. An integrative approach of the physical-based stability index mapping with the maximum entropy stochastic model for risk analysis of mass movements[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2023, 25(3): 2808 – 2830.
- [20] ALI N, CHEN Jian, FU Xiaodong, et al. Classification of reservoir quality using unsupervised machine learning and cluster analysis: Example from kadanwari gas field, SE Pakistan[J]. *Geosystems and Geoenvironment*, 2023, 2(1): 100123.
- [21] 李芳菲, 李丽, 吴巩胜, 等. 基于最大熵模型的青海祁连山雪豹生境适宜性评价 [J]. 生态学报, 2023, 43(6): 2202 – 2209. [LI Fangfei, LI Li, WU Gongsheng, et al. Habitat suitability assessment of *Panthera uncia* in Qilian Mountains of Qinghai based on MAXENT modeling[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(6): 2202 – 2209. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 陈立华, 李立丰, 吴福, 等. 基于 GIS 与信息量法的北流市地质灾害易发性评价 [J]. 地球与环境, 2020, 48(4): 471 – 479. [CHEN Lihua, LI Lifeng, WU Fu, et al. Evaluation of the geological hazard vulnerability in the Beiliu City based on GIS and information value model[J]. *Earth and Environment*, 2020, 48(4): 471 – 479. (in Chinese with English abstract)]
- [23] CONVERTINO M, TROCCOLI A, CATANI F. Detecting fingerprints of landslide drivers: A MaxEnt model[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2013, 118(3): 1367 – 1386.
- [24] RUSK J, MAHARJAN A, TIWARI P, et al. Multi-hazard susceptibility and exposure assessment of the Hindu Kush Himalaya[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 804: 150039.
- [25] 石莉莉, 乔建平. 基于 GIS 和贡献权重迭加方法的区域滑坡灾害易损性评价 [J]. 灾害学, 2009, 24(3): 46 – 50. [SHI Lili, QIAO Jianping. Vulnerability evaluation on regional landslides based on GIS and contribution weight superposition approach[J]. *Journal of Catastrophology*, 2009, 24(3): 46 – 50. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 周超, 常鸣, 徐璐, 等. 贵州省典型城镇矿山地质灾害风险评价 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(11): 1782 – 1791. [ZHOU Chao, CHANG Ming, XU Lu, et al. Risk assessment of typical urban mine geological disasters in Guizhou Province[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1782 – 1791. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 李玲玲, 刘劲松, 李智, 等. 人口密度随机森林模型优化实验研究 [J]. 地理学报, 2023, 78(5): 1304 – 1320. [LI Lingling, LIU Jinsong, LI Zhi, et al. Experimental study of population density using an optimized random forest model[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(5): 1304 – 1320. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 王支农