中国地质灾害与防治学报
THE CHINESE JOURNAL OF GEOLOGICAL HAZARD AND CONTROL
中国科技核心期刊
《中国科学引用文数据库》来源期刊
Caj-cd规范获奖期刊

江西丘陵山区公路地质灾害危险性评价多耦合模型对比研究

张平平，何　书，李　滨

Comparative study of multi-coupling models for geohazard risk assessment along mountain highway in the hilly areas of Jiangxi Province

ZHANG Pingping, HE Shu, and LI Bin

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202309011

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202309011
张平平, 何书, 李滨. 江西丘陵山区公路地质灾害危险性评价多耦合模型对比研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(4): 135-145.
ZHANG Pingping, HE Shu, LI Bin. Comparative study of multi-coupling models for geohazard risk assessment along mountain highway in the hilly areas of Jiangxi Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(4): 135-145.

江西丘陵山区公路地质灾害危险性评价多耦合模型对比研究

张平平[1,3], 何　书[3], 李　滨[1,2]
（1. 中国地质科学院地质力学研究所，北京　100081；2. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室，北京　100081；3. 江西理工大学资源与环境工程学院，江西 赣州　341000）

摘要：山区公路沿线地质灾害发育，影响山区城镇居民交通出行和生命财产安全。危险性评价可以综合分析地质灾害孕灾环境和致灾因子的贡献特征，对于公路防灾减灾具有重要的指导作用。以江西省 S223 省道竹头坑子—渠坎下段为例，基于频率比（frequency ratio, FR），耦合熵指数（entropy index, EI）、层次分析法（analytic hierarchy process, AHP）及二者组合权（EI-AHP），构建 4 种地质灾害危险性评价模型；针对公路沿线地质环境与地质灾害发育特征，选取自然坡度、坡向、地形起伏度、坡面形态、切坡高度、切坡坡度、地层岩性、断层与斜坡的关系等 8 个评价因子作为危险性评价指标，以斜坡单元作为评价单元，采用 FR 量化评价因子，结合 AHP、EI 计算评价因子的主客观权重，依托 ArcGIS 平台得到基于 FR 的多耦合模型，绘制不同评价模型的公路沿线地质灾害危险性分区图。结果表明：FR、EI-FR、AHP-FR 及 EI-AHP-FR 4 个评价模型的 *AUC* 值分别为 0.746, 0.811, 0.836, 0.833，表明 AHP-FR 评价模型的预测精度最高，能有效对公路沿线地质灾害进行危险性评价；最终划分江西省 S223 省道竹头坑子—渠坎下段高危险区、较高危险区、中危险区、较低危险区、低危险区的面积依次为 0.295, 0.570, 1.509, 0.354, 1.732 km^2，分别占全区总面积的 6.66%、12.79%、33.86%、7.97%、38.71%。研究结果可为公路的安全建设和正常运营提供科学的地质参考依据。

关键词：公路地质灾害；频率比；熵指数；层次分析法；耦合模型；危险性评价
中图分类号：P694　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1003-8035(2024)04-0135-11

Comparative study of multi-coupling models for geohazard risk assessment along mountain highway in the hilly areas of Jiangxi Province

ZHANG Pingping[1,3], HE Shu[3], LI Bin[1,2]
（1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing*　100081, *China*; 2. *School Resources Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi*　341000, *China*; 3. *Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing*　100081, *China*）

Abstract: Geological hazards along mountain highways affect the transportation and safety of residents in mountainous towns.

收稿日期：2023-09-07；**修订日期：**2024-02-06　　**投稿网址：**https://www.zgdzzhyfzxb.com/
基金项目：流域性地质灾害链发育特征与风险评价(CD2C20230228)；高位滑坡碎屑流动力学软件模块研发 (300017000000180681)
第一作者：张平平(2001—)，女，江西南昌人，地质工程专业，硕士研究生，主要从事工程地质与地质灾害研究。
E-mail: 2393211031@qq.com
通讯作者：何　书(1978—)，男，贵州遵义人，地质工程专业，博士，副教授，主要从事地质灾害防治与环境地质方面研究与教学工作。
E-mail: 769844918@qq.com

Risk assessment comprehensively analyzes the contributing characteristics of the geological hazard-prone environment and triggering factors, which is crucial for highway disaster prevention and mitigation. Taking the lower section of the provincial highway Zhutoukengzi - Dukanxia road (S223) in Jiangxi Province as an example, four types of geologic hazard evaluation models were constructed based on frequency ratio (FR), coupled entropy index (EI), hierarchical analysis method (AHP) and the combination of the two (EI- AHP). For the development characteristics of the geological environment and geologic hazards along the highway, the natural slopes were selected and the geologic hazards are evaluated. AHP), to construct four kinds of geohazard risk evaluation models. For the geological environment and geohazard development characteristics along the highway, eight evaluation factors, such as natural slope, slope direction, topographic relief, slope morphology, slope cutting height, slope cutting gradient, stratigraphic lithology, and the relationship between faults and slopes were selected as the risk evaluation indexes, and the slope units were selected as the evaluation unit, and FR was used to quantify the evaluation factors, and AHP and EI were combined to calculate the evaluation factors. AHP and EI were used to calculate the subjective and objective weights of the evaluation factors, and the multi-coupling model based on FR was obtained by relying on the ArcGIS platform, and the geohazard hazard zoning maps along the highway with different evaluation models were drawn. The results show that the AUC values of the four evaluation models, FR, EI-FR, AHP-FR and EI-AHP-FR, are 0.746, 0.811, 0.836, 0.833, respectively, indicating that the AHP-FR evaluation model has the highest prediction accuracy and can effectively evaluate the risk of geologic hazards along the highway. The areas classified as high-risk, relatively high-risk, moderate-risk, relatively low-risk, and low-risk zones for the lower section of the Zhutoukengzi-Qukan road in Jiangxi Province were 0.295 km2, 0.570 km2, 1.509 km^2, 0.354 km^2, and 1.732 km^2, respectively, accounting for 6.66%, 12.79%, 33.86%, 7.97%, and 38.71% of the total area. This study provided a comprehensive zoning of potential geological hazards along the S223 road, offering scientific geological reference for the safe construction and operation of roads.

Keywords: highway geohazards; frequency ratio; entropy index; analytic hierarchy process; coupled modeling; risk assessment

0 引言

随着我国现代化进程的不断加快，公路里程数迅速增长，山区公路建设由于跨区范围大，地质环境变化复杂，加上人类不合理的工程活动，地质灾害发育频繁，严重威胁山区城镇居民安全。针对公路沿线开展地质灾害危险性评价，可为相关道路部门提供防治依据，有效减少社会经济损失。

目前，地质灾害危险性评价多采用 GIS、遥感和数学分析法，常用的方法有频率比法[1]、信息熵[2]、层次分析法[3]、信息量法[4]、模糊综合评判法[5]、证据权重法[6]、逻辑回归法[7]和人工神经网络法等[8]，国内外已有不少学者进行地质灾害危险性评价研究。刘丽娜等[9]采用 GIS 支持下的层次分析法（analytic hierarchy process, AHP）法对 2013 年芦山 7.0 级地震研究区滑坡灾害进行危险性评价；罗路广等[10]采用 GIS 支持下的 AHP-信息量模型对震后的九寨沟景区进行危险性评价；邢秋菊等[11]利用逻辑回归模型，结合 GIS 和 SPSS 软件进行空间分析和回归分析，生成滑坡概率分布图，对重庆市万州区滑坡灾害进行危险性评价。Leonardi 等[12]通过模糊评价方法对意大利市区“生命线”道路进行滑坡风险评估，在 MATLAB 环境下，将量子 GIS 地图获取的信息与模糊逻辑相结合，提出了一个简单的滑坡危险评估模型；Lee 等[13]利用 GIS 构建地质灾害空间数据库（SDB），将 SDB 应用于灾害评估技术，开发出地灾信息系统（GHIS），利用 GHIS 对韩国长兴地区进行了滑坡危险性评价。Zheng 等[14]采用三角模糊函数和层次分析法对成昆铁路沿线近 10 年地质灾害进行危险性评估，结果表明该方法相较于传统 AHP 在识别高危险区域更有效。

本文以江西省 S223 省道竹头坑子—渠坎下段为例，在查明研究区地质背景的基础上，选取 8 个影响因子构建危险性评价体系，采用 FR 量化地质灾害信息，选择耦合熵指数（entropy index, EI）、AHP 及组合赋权法确定权重，分别将 EI 和 AHP 所得权重耦合频率比（frequency ratio, FR），探讨主客观权重对地质灾害危险性评价的准确率。此外将 EI 和 AHP 权重进行组合赋权耦合 FR，构建了基于 FR 的多耦合评价模型。采用危险性预测检验以及灾害点覆盖率检验不同模型的预测准确率，选取最优模型进行研究区地质灾害危险性评

价，以期为研究区工程建设及防灾减灾提供技术支撑和科学参考。本文也可为类似山区公路的地质灾害危险性分区研究提供参考思路，有效减少工程建设加快带来的不利影响。

1　研究区背景

1.1　地质概况

江西省 S223 省道竹头坑子—渠坎下段北起黄麟乡，与国道 G323 接壤，南至白鹅乡，全长约 14.3 km，是连接于都县和会昌县的交通要道(图 1)。

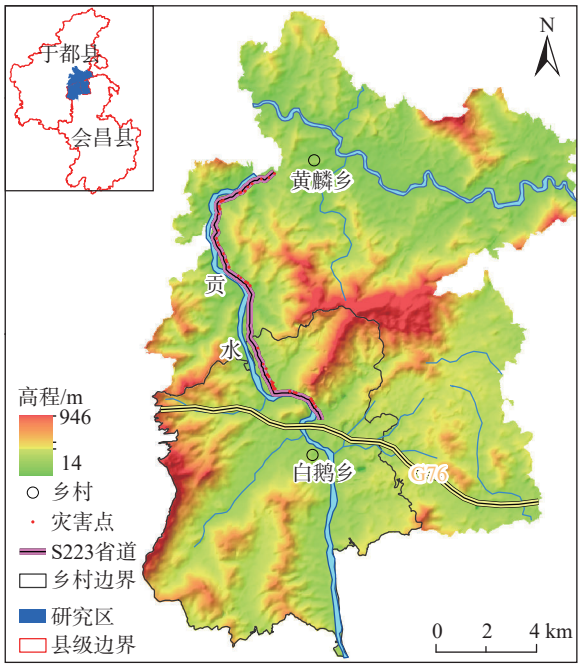


图 1　研究区地形地貌

Fig. 1　The geomorphology of the study area

研究区位于会昌县最北端，武夷山余脉西麓，南岭余脉北端，属中国北北东向构造第二隆起带与南岭东西向复杂构造带复合地区，被北东向和南东向两组断裂切割，以逆断裂为主，挤压构造活动强烈。区内地形地貌以山地、丘陵为主，整体为南北向延伸，海拔从北向南逐渐升高，山脉走向以西南方向为主，地貌单元呈小块及不规则长条带状。黄麟乡与白鹅乡地层包括第四系、新近系、侏罗系、三叠系、石炭系、泥盆系地层，其余地区可见少量震旦系和三叠系地层出露，岩浆岩侵入作用强烈，主要为侏罗系花岗岩(图 2)。研究区内地层较为单一，主要为新生代以来的新近系及第四系地层，地层岩性以松散堆积物、粉质黏土、灰岩、碎屑岩、变余砂岩夹千枚岩为主，斜坡表面多为岩石碎屑及残坡积等松散覆盖层，冲沟发育，风化作用强烈。

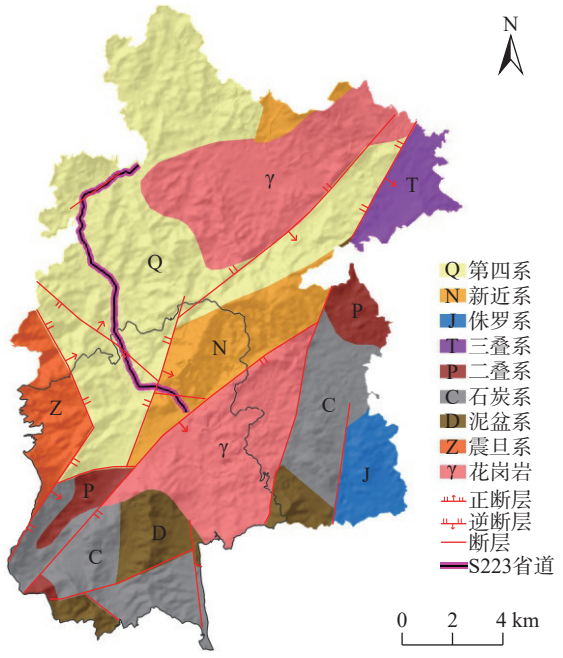


图 2　研究区地质构造图

Fig. 2　Geological and tectonic map of the study area

研究区气候属亚热带东南季风气候，降雨量丰富，主要水系为赣江一级支流贡水，与省道沿线近乎平行，长 17.45 km，流域面积约 2.97 km^2，河流量随季节变化明显，靠近水系一侧的斜坡受河流冲刷作用强烈，地下水类型主要为深部基岩裂隙水，受岩石风化程度和降雨影响。研究区属河谷地带，水系发达，人类工程活动频繁，切坡建房、人工采石、旅游扩建以及道路修建等工程活动，容易引起坡体应力失衡从而导致地质灾害的发生，亟需进行公路沿线危险性评价。

1.2　地质灾害分布

公路地质踏勘存在调查时间短、调查危险性高等特征，无人机技术能够直接获取区域内地质灾害地形特征、灾害点几何参数，有效减轻野外调查工作量[15]。在获取研究区地质概况、遥感数据、区域地质图的基础上，结合无人机拍摄对研究区开展为期半个月的野外地质调查。调查结果如下：研究区共发育 45 处地质灾害，其中滑坡 21 处，崩塌 24 处，分布特征呈南北两段式，南端以松树塘—梓坑村—渠坎下段为界，长约 3.7 km，灾害点数量 18 处；北端以竹头坑子—盐潭村—流坑村段为界，长达 6.7 km，灾害点数量 27 处；中间 3 km 地势平坦，地质灾害不发育。道路沿线两侧灾害点以土质坡、土石混合坡为主，少量岩质坡。土质坡表面被第四系松散沉积物覆盖，冲沟发育强烈，植被覆盖较少；岩质坡表面节理裂隙发育，岩体被切割破碎，多为散体状结构。

1.2.1 崩塌发育特征

道路两侧斜坡切坡高陡，崩塌发育类型以微小型为主，且多发生在斜坡顶部和中部。据野外地质调查统计，崩塌中有 19 处土质坡、3 处岩质坡、2 处岩土混合坡，大多数崩塌未进行工程治理。图 3(a)中崩塌切坡坡高约 10 m，崩塌体高度约 7.3 m，切坡坡度大于 60°，坡面岩体结构破碎，冲沟发育，风化程度较高，崩塌后坡面形成凹陷坑，块石呈散体状堆积于坑中，崩塌外围可见明显贯通裂缝，图中潜在不稳定坡体在降雨诱发下容易再次失稳。图 3(c)中岩质崩塌为无人机拍摄，坡度较陡，坡高约 30 m，上部岩体在重力作用下脱离山体崩落，图 3 中可见明显崩塌面，人工切坡后对坡脚采用锚杆和防护网进行加固。

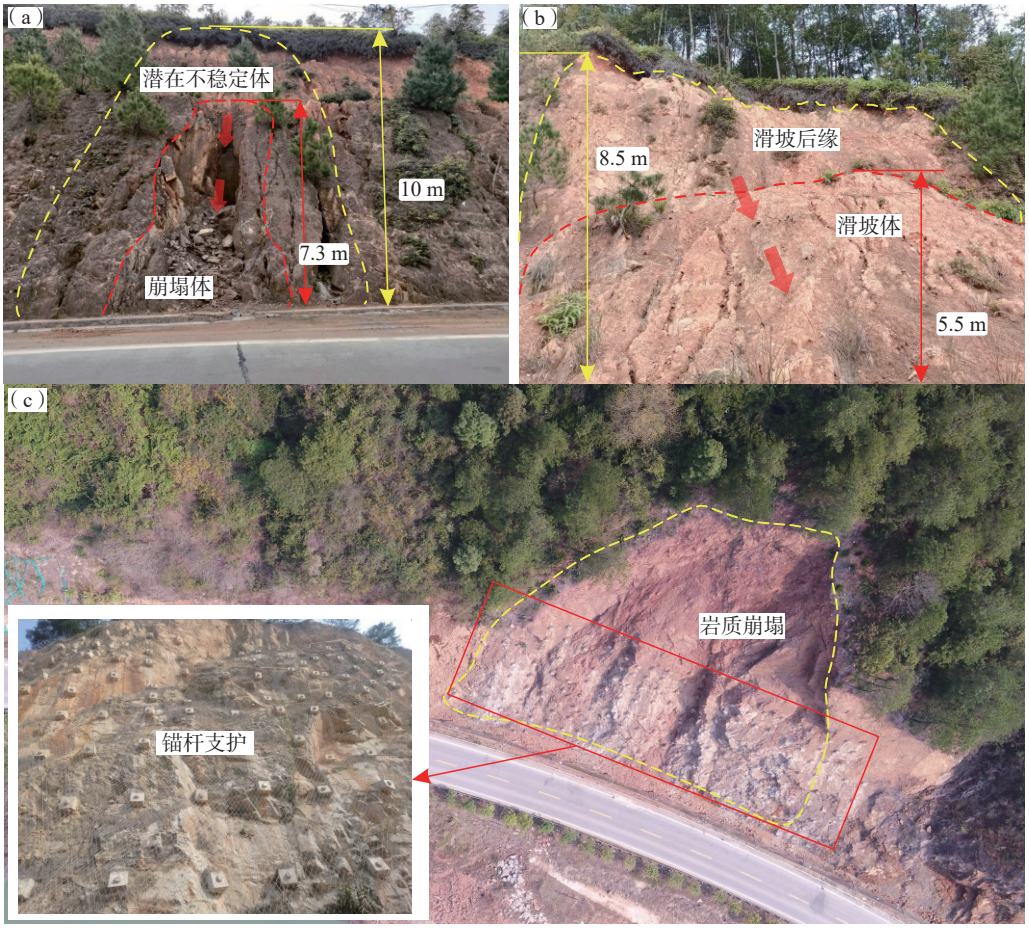


图 3 研究区地质灾害现场图

Fig. 3 Field map of geohazards in the study area

1.2.2 滑坡发育特征

滑坡一般发育于土质边坡之中，长度跨度范围较小，滑体堆积厚度 1 ~ 10 m，主要为粉质黏土。坡体平面形态以舌状、半圆形为主，表面冲沟发育，台阶后壁呈座椅状，受雨水冲刷作用，擦痕已不明显。据现场调查统计分析，滑坡中有 17 处土质坡、4 处岩土混合坡。图 3(b)中滑坡坡高约 8.5 m，滑坡体堆积高度 5.5 m，坡度约 54°，可见明显滑坡后缘，表面裂缝发育，在雨水入渗条件下土体吸水饱和，自重增加，黏聚力下降，抗剪强度降低，导致下滑力增大引起坡体失稳。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文数据来源包括：(1)30M 分辨率数字高程数据，用于 ArcGIS 平台提取自然坡度、坡向、地形起伏度等地形地貌特征信息，数据来源于地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)；(2)会昌县、于都县区域地质构造图，用于提取研究区地层岩性、断层与斜坡的关系，数据来源于 BIGMAP 官网(http://www.bigemap.com/)；(3)18 级高清卫星影像数据，用于省道的提取及斜坡单元的校正，来源于 BIGMAP 官网(http://www.bigemap.com/)；

(4)灾害点位置及发育特征，地质灾害点坡面形态、切坡坡度、切坡高度，用于建立 ArcGIS 地理空间数据库，数据来源于野外地质勘察记录和无人机影像数据。

2.2　评价方法

2.2.1　FR

FR 模型是一种利用 GIS技术对地质灾害及其影响因子之间敏感性评估的定量技术，揭示两者之间的相关性[16－17]，可以提取地质灾害信息与地质灾害影响因子之间的概率关系，具有简单、易操作等特点。本文采用 FR 研究地质灾害与评价因子之间的非线性关系，FR 计算公式为：

$$FR_{ij}=\frac{V_{ij}}{V}\Big/\frac{S_{ij}}{S} \tag{1}$$

式中：i——不同的评价因子；

j——评价因素分类等级；

S_{ij}——该评价因子不同等级所占栅格面积；

S——研究区栅格总面积；

V_{ij}——该因子等级对应的所有灾害点规模量；

V——研究区所有灾害点规模总量。

FR 大于 1 表明该影响因子属性区间有利于地质灾害发育，值越大表示对地质灾害发育的贡献也越大。

2.2.2　EI

信息论中熵是衡量事物无序性程度的概念，对模糊的信息概念进行量化即可得到准确的熵值，信息的不确定性越大，其可靠性越小，反之则越大[18]。熵指数(EI)是一种客观权重法，采用 EI 对地质灾害发育过程中某类影响因素的作用程度进行度量，能够消除危险性评价因子在量纲、性质等方面的差异[2]。首先建立地质灾害信息熵，运用 FR 将评价因子转化为无量纲数据进行比较，基于式(2)—(6)[19]得出不同评价因子的概率密度和信息系数，最后得出各评价因子的 EI 权重表征其对地质灾害的贡献程度，见式(7)。

$$P_{ij}=\frac{FR_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}FR_{ij}} \tag{2}$$

$$H_i=-\sum_{i=1}^{n}P_{ij}\log_2(P_{ij}) \tag{3}$$

$$H_{i\max}=\log_2 n \tag{4}$$

$$I_i=\frac{H_{i\max}-H_j}{H_{i\max}} \tag{5}$$

$$P_i=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}P_{ij} \tag{6}$$

$$W_i=I_i\cdot P_i \tag{7}$$

式中：P_{ij}——评价因子 j 在第 i 个样本中的的概率(i=1, 2, …, n; j=1, 2, …, m)；

H_i、$H_{i\max}$——熵值；

n——类数；

I_i——信息系数；

W_i——第 i 个评价因子的 EI 权重。

2.2.3　AHP

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是一种定性的分析决策方法，采用层层递进的思路对目标层进行求解，AHP 主要分为 3 步：首先建立层次分析系统结构[4]，例如：目标层次 A 包含了准则层次 B_1、B_2、B_3、……、B_i，准则层次 B 包含方案层次 C_{i1}、C_{i2}、C_{i3}、……、C_{ij}，其次构造判断矩阵：

$$B=[B_1\ \ B_2\ \ B_3\cdots B_i]$$

$$C_i=[C_{i1}\ \ C_{i2}\ \ C_{i3}\cdots C_{ij}]$$

式中：C_i——二级评价因子 C 对于一级评价因子 B_i 的相对重要程度。

矩阵的建立通过两两评价因子对研究区地质灾害影响重要程度进行比较，采用 1 ~ 9 标度法分别判断矩阵 A—B、B_1—C、B_2—C、……、B_i—C。最后求得矩阵的特征向量，计算最大特征根 $\lambda_{\max}$，定义一致性比率 CR 来检验矩阵的一致性，见式(8)，若 CR<0.1，则认为该判断矩阵符合一致性要求[20]。

$$CR=\frac{CI}{RI} \tag{8}$$

$$CI=\frac{\lambda_{\max}^{-n}}{n-1} \tag{9}$$

式中：CR——定义一致性比率；

CI——定义一致性指标；

RI——随机一致性指标；

$\lambda_{\max}$——最大特征根；

n——阶数。

2.2.4　组合赋权法

EI 依据模糊的信息概念得到熵值，该方法对样本依赖性大；AHP 采取专家打分方式，影响因素的相对重要性，具有强烈的人为主观性。为此，本文尝试融合主客观权重进行组合赋权，通过将主观经验和客观信息熵得到的权重值进行耦合，有效避免单一评价方法的偏差和不足[18]。首先将 EI 权重和 AHP 权重相互耦合，见式(10)，再利用归一法，见式(11)，得到各评价因子组合权重值。

$$W_i = (W_{si} \cdot W_{ci}) \tag{10}$$

$$W_z = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^{n} W_i} \tag{11}$$

式中：W_{si}——EI 确定的第 i 个评价因子的权重值；

W_{ci}——AHP 得到的第 i 个评价因子的权重值；

W_z——第 i 个评价因子的组合权重值。

3 危险性评价体系构建

3.1 评价单元选取

进行地质灾害危险性评价前，选择合适的制图单元能够有效提高评价效率，常见的地质灾害评价单元的主要有栅格单元、斜坡单元、地貌单元、地形学单元和均一条件单元 5 类[21]。研究区道路属于线性工程，建立缓冲区进行地质灾害危险性评价，由于缓冲区距离有限，有时难以将整个斜坡划分进来，斜坡单元作为地形单元之一，能够很好反映地质灾害地形地貌特征。选择斜坡单元作为评价单元，以斜坡单元内栅格数据的平均值作为评价指标值进行地质灾害危险性评价[22－23]。栅格处理单元大小设置为 20 m×20 m，将研究区共划分为 1 183 828 个栅格，基于 ArcGIS 水文分析法划分斜坡单元，得到研究区范围内的 79 个斜坡单元。

3.2 评价指标体系构建

评价指标以地质条件、自然条件和人类工程活动 3 方面为主，其中地质条件比重最大，包括地形地貌、地质构造 2 方面；自然条件从气象和植被 2 方面选取；人类工程活动主要考虑公路切坡对地质灾害的影响。通过有关学者对孕灾条件和变形机理的分析[24－25]，结合研究区野外踏勘记录，本文从地形地貌、切坡特征、地层岩性、地质构造 4 个方面选取了自然坡度、坡向、地形起伏度、坡面形态、切坡高度、切坡坡度、地层岩性、断层与斜坡的关系等 8 个评价因子。确定评价指标后将其导入 ArcGIS 中，以表格显示分区统计，将需要赋值的栅格以单元内的平均值作为该斜坡单元的评价指标值[18]，根据影响因子的自身要素与属性特点进行分类（表 1）。

表 1 地质灾害评价指标分级

Table 1 Evaluation index classification of geohazards

危险性评价因子		基于斜坡单元的评价因子分级				
地形地貌	自然坡度/(°)	<18	18 ~ 24	24 ~ 32	>32	—
	坡向/(°)	108 ~ 152	153 ~ 196	197 ~ 241	242 ~ 285	—
	地形起伏度/(°)	<12	12 ~ 24	24 ~ 36	>36	—
	坡面形态	平直坡	凸形坡	凹形坡	阶梯形坡	—
人类工程活动	切坡坡度/(°)	未切坡	<40	40 ~ 50	50 ~ 60	>60
	切坡高度/m	未切坡	<8	8 ~ 16	16 ~ 24	>24
地层岩性	地层岩组	松散堆积岩组	软硬互层岩组	较坚硬岩组	—	—
地质构造	断层与斜坡关系	未相交	断层与斜坡垂直	断层与斜坡斜交	断层与斜坡平行	—

3.3 评价因子分区

3.3.1 地形地貌

地形条件是地质灾害发育的基本控制因素，本文采用的地形地貌条件包括自然坡度、坡向、地形起伏度、剖面形态等。

自然坡度通过影响地表水径流和表层松散堆积物形态特征进而影响斜坡地质灾害发育。斜坡单元内原始坡度在 4.1° ~ 36.9°，灾害点主要发育于 15° ~ 30°，采用等间距将自然坡度划分为 4 类，分级图见图 4(a)。

不同坡向由于朝向不同，其日照时间显著差异[26]，影响坡面地表水径流、风化强度和植被发育程度，从而改变斜坡体的岩体力学特征和孔隙水压力的分布，实现对地质灾害的控制，一般向阳坡遭受风化程度更高。研究区灾害点发育的优势坡向为西南方向和西北方向，占灾害点总数的 88.9%，研究区坡向范围在 108° ~ 285°，等间距划分为 4 类，坡向分级图见图 4(b)。

地形起伏度反映了地表起伏变化程度，与地质灾害的孕育具有一定的相关性。研究区地形起伏度总体范围在 0 ~ 111 m 之间，随着地形起伏度的增加，灾害点数量呈现递增的趋势，但当地形起伏度达到一定的高度，灾害点数量反而开始下降，说明过高的地形起伏度不利于坡面松散堆积物的形成，难以堆积成较厚的滑坡体，研究区灾害点集中分布在 12 ~ 36 m，等间距划分为 4 类，地形起伏度分级图见图 4(c)。

剖面形态对研究区斜坡稳定性具有控制作用，在野外地质调查过程中，从斜坡的坡面形态可以大致判断其稳定性，研究区剖面形态可分为平直坡、凸形坡、凹形坡、阶梯形坡 4 类，其中凹形坡最稳定，凸形坡最危险，

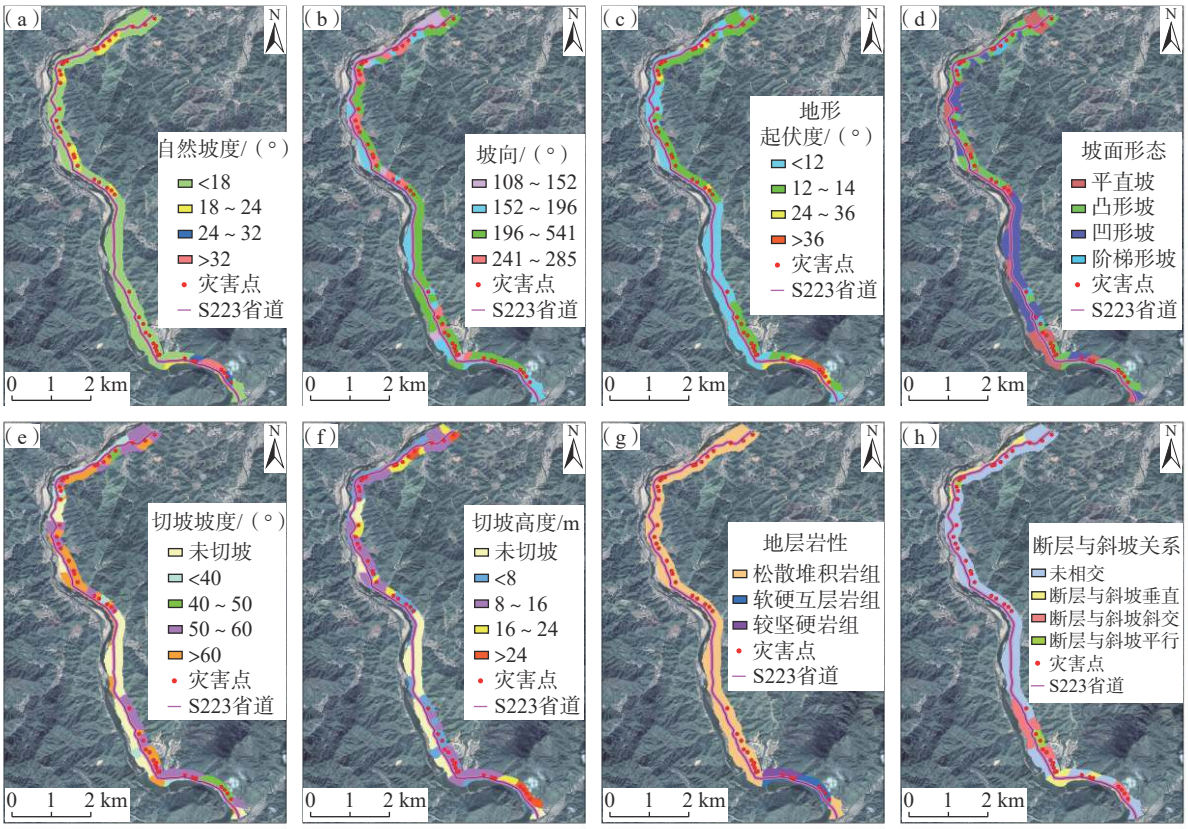


图 4　基于斜坡单元的评价因子重分类专题图

Fig. 4　Thematic map of reclassification of evaluation factors based on slope unit

剖面形态分级图见图 4(d)。

3.3.2　人类工程活动

公路切坡特征对公路地质灾害发育具有直接控制作用，切坡过程导致斜坡体内部应力重新分布[27]，进而引起斜坡变形破坏。研究区切坡坡度最陡达 70°，灾害点总体集中在 40° ~ 60°，平均坡度为 53.3°，等间距划分为 5 类，切坡坡度分级图见图 4(e)。

切坡高度越高，坡体安全系数越小，坡体自身稳定性越差。研究区灾害点切坡高度最高达 30 m，最低仅 5 m，平均坡高 13.86 m，随坡高的增加，灾害点数量呈现先增加后减少趋势，总体分布在 8 ~ 24 m，等间距分为 5 类，切坡高度分级图见图 4(f)。

3.3.3　地层岩性

地层岩性为地质灾害的发生提供物质基础。据研究区地质构造图显示，研究区地层主要为第四系和新近系，地层岩性主要为第四系松散堆积物和碎屑沉积物，岩性软弱，结构松散，风化作用强烈，易在斜坡表层形成较厚坡体堆积物，在降雨和太阳光照的作用下，坡体经过反复浸湿—晒干，发育大量冲沟和裂缝。按照地层岩性软弱程度划分为松散堆积区、软硬互层岩组区、较坚硬岩组区，地层岩组分级图见图 4(g)。

3.3.4　地质构造

地质构造控制着研究区地形地貌的发育，同时为崩塌、滑坡的形成提供了物质来源，张莹等[27]表明断裂对坡体的位移和变形有很大的影响，且断层活动导致岩体强度降低、结构破坏，造成斜坡裂缝和节理发育，为降雨入渗提供通道。野外踏勘查明区内断裂分布位置岩体结构破碎，在风化作用及雨水反复浸润—干燥作用下，基岩表层大部分风化成残破积，雨水入渗导致坡体吸水自重增加，黏聚力及摩擦系数降低，坡体达到极限平衡失稳下滑。根据研究区地质构造图将断层与斜坡的关系分为平行、斜交、垂直和未相交 4 类，基于 ArcGIS 平台对斜坡单元属性表进行赋值，根据斜坡与断层相交关系依次将其赋值为 1、2、3、4，断层与斜坡关系分级图见图 4(h)。

4　地质灾害危险性评价

4.1　地质灾害危险性分区

FR 模型是基于地质灾害历史数据和致灾因子数据的相关关系，进行多因子分析，揭示多因子综合作用下

地质灾害的空间分布。不考虑各评价因子对地质灾害危险性的贡献程度，直接计算地质灾害危险性值(H)，危险性值(H)越大，危险程度越高。

$$H = \sum_{i=1}^{n} FR_i \tag{12}$$

地质灾害的发生往往受到多个因子作用，每一个评价因子所起的作用、性质是不同的，FR 只简单考虑了单一影响因子内部的重要程度，而权重叠加的方法可以衡量评价因子之间的相对重要程度。利用 EI 和 AHP 得到评价因子的单一权重和组合权(表 2)，耦合 FR(表 3)，构建三种加权叠加模型，得到不同评价模型地质灾害危险性值 H。

$$H = \sum (W \cdot FR_i) \tag{13}$$

经归一化处理后使用自然断点法重分类为五类，由低到高依次为低、较低、中、较高、高危险区，得到研究区地质灾害危险性分区图(图 5)。从 4 种模型地质灾害危险性分区图来看，S223 省道竹头坑子—渠坎下段地质灾害危险性呈现“南、北部高，中部低”的分布特征，因为南北两端地形起伏度大、切坡坡度和切坡高度陡峻、岩体结构破碎，危险性高；而中部地区居民密集、地形起伏度低，地质灾害危险性低，分区结果与现场调查结果较为一致。

4.2 地质灾害危险性预测检验

使用危险性预测曲线进行模型效果检验(图 6)，当曲线越靠近左上角，模型的准确性越高，选用 *AUC* 值(曲线下与坐标轴围成的面积，取值范围为 0 至 1)对其进行量化，结果表明 AHP-FR 加权叠加模型 *AUC* 值最高，为 83.6%，其次是 AHP-EI-FR 加权叠加模型，为 83.3%，EI-FR 加权叠加模型为 81.1%，而单一使用 FR 的方法进行危险性评价模型 AUC 值最低，预测率仅为 74.6%。

使用已知灾害点分布数据对四种模型进行覆盖率检验(表 4)，若灾害点所处位置位于中危险、较高危险或高危险之中，则认为预测准确，否则认为预测失败。结果表明 4 种基于 FR 的多耦合模型预测准确率依次为 AHP-FR>AHP-EI-FR>EI-FR>FR，同危险率预测结果较吻合，其中，单一 FR 模型预测准确率最低，为 80%；EI-FR 和 AHP-EI-FR 两种耦合模型预测准确率一致，为 88.89%；AHP-FR 耦合模型的预报准确率最高，为

表 2 EI、AHP 及组合赋权权重值

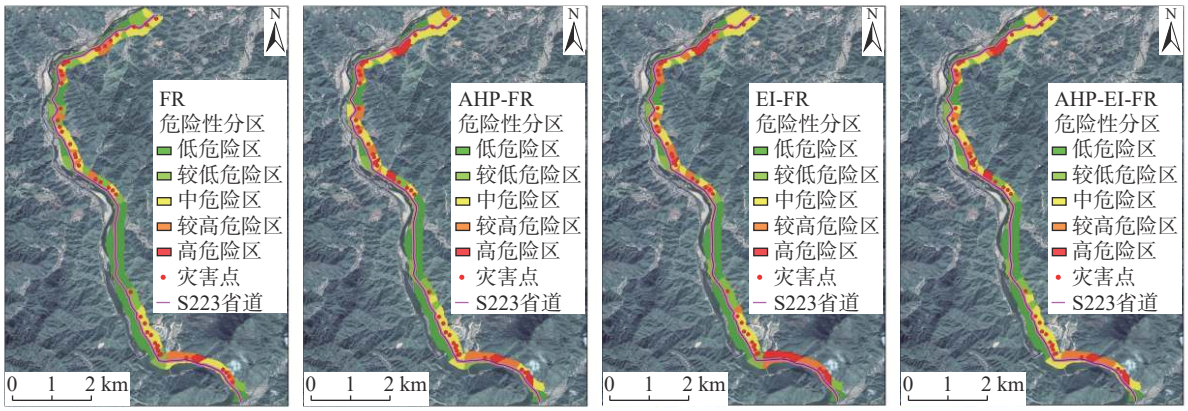
Table 2 Weight value of EI,AHP and combination of empowerment

评价因子	EI	AHP	EI-AHP
自然坡度	0.138	0.087	0.104
坡向	0.144	0.088	0.110
地形起伏度	0.120	0.085	0.088
坡面形态	0.100	0.118	0.103
切坡坡度	0.102	0.276	0.246
切坡高度	0.110	0.239	0.228
地层岩性	0.194	0.042	0.071
断层与斜坡关系	0.091	0.064	0.051

表 3 评价因子 *FR* 值

Table 3 Frequency ratio of evaluation factors

评价因子	评价因子分级	$\frac{S_{ij}}{S}$	$\frac{V_{ij}}{V}$	*FR*
自然坡度/(°)	<18	0.295 7	0.292 6	0.989
	18 ~ 24	0.123 3	0.375 3	3.045
	24 ~ 32	0.023 8	0.200 4	8.411
	>32	0.030 5	0.053 3	1.745
坡向/(°)	108 ~ 152	0.138 5	0.004 7	0.034
	152 ~ 196	0.261 5	0.078 8	0.302
	196 ~ 241	0.464 6	0.537 9	1.158
	241 ~ 285	0.135 4	0.378 5	2.795
地形起伏度/m	<12	0.507 0	0.073 0	0.144
	12 ~ 24	0.384 5	0.617 4	1.606
	24 ~ 36	0.078 0	0.256 3	3.284
	>36	0.030 5	0.053 3	1.745
坡面形态	平直坡	0.229 5	0.276 7	1.206
	凸形坡	0.372 6	0.513 2	1.377
	凹形坡	0.341 7	0.116 1	0.340
	阶梯形坡	0.056 2	0.094 0	1.674
切坡坡度/(°)	未切坡	0.274 5	0.027 4	0.100
	<40	0.115 0	0.028 1	0.244
	40 ~ 50	0.271 2	0.388 0	1.431
	50 ~ 60	0.281 0	0.474 7	1.689
	>60	0.058 3	0.081 8	1.402
切坡高度/m	未切坡	0.274 5	0.027 4	0.100
	<8	0.248 3	0.098 9	0.398
	8 ~ 16	0.319 5	0.497 7	1.558
	16 ~ 24	0.093 2	0.284 0	3.049
	>24	0.064 6	0.092 0	1.424
地层岩性	松散堆积岩组	0.070 2	0.071 2	1.014
	软硬互层岩组	0.040 6	0.237 3	5.847
	较坚硬岩组	0.857 7	0.691 5	0.806
断层与斜坡	未相交	0.726 4	0.638 8	0.879
	断层与斜坡垂直	0.124 2	0.182 5	1.469
	断层与斜坡斜交	0.116 6	0.113 2	0.970
	断层与斜坡平行	0.032 7	0.065 5	2.004



（a）FR　（b）AHP-FR　（c）EI-FR　（d）AHP-EI-FR

图 5　竹头坑子—渠坎下段沿线地质灾害危险性评价分区结果图

Fig. 5　Zoning results of geohazard evaluation along Zhutoukengzi - Dukanxia section

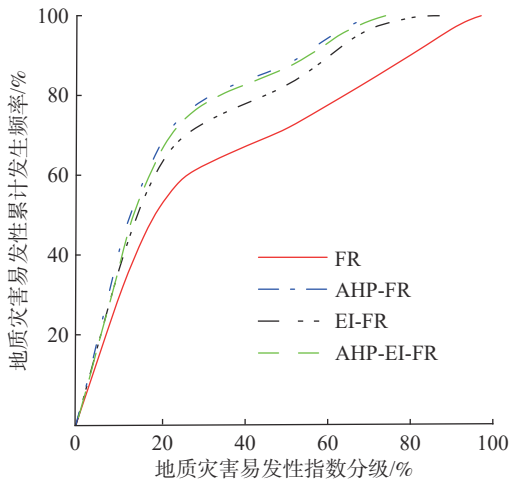


图 6　地质灾害预测率曲线

Fig. 6　Geohazard prediction rate curve

91.11%。因此，选用 AHP-FR 模型进行 S223 省道竹头坑子—渠坎下段危险性评价。

4.3　地质灾害危险性评价结果

上述结果表明，AHP-FR 模型的预测精度相对最高，AHP-EI-FR 次之，EI-FR 和 FR 方法的预测精度相对较低。因此，最终选用 AHP-FR 模型对研究区进行危险性评价，评价结果如下：

（1）高危险区面积为 0.295 km^2，占研究区总面积的 6.66%，发育灾害点数 7 处。零星散布于上坝子、早禾排、渠坎下等地，以及下沙角对岸公路段、白鹅峡对岸公路段。该区人类工程活动频繁，多处坡脚开挖建房，区域切坡坡度大于 55°，切坡高度大于25 m，剖面形态以凸形坡为主。

（2）较高危险区面积为 0.570 km^2，占研究区总面积的 12.79%，发育灾害点数 11 处。主要分布于和君小镇到渠坎下公路段，零星分布于燕潭村、寨头、大塘湖等地。该区域切坡坡度大于 45°，切坡高度 15 ~ 20 m，剖面形态以凸形坡和平直坡为主。

（3）中危险区面积为 1.509 km^2，占研究区总面积的 33.86%，发育灾害点数 23 处。主要分布于竹头坑子到燕潭村公路段，白沙到梓坑村，廖屋场到寨头零星分布。该区域工程切坡坡度 45°左右，切坡高度 10 ~ 20 m，剖面形态主要有平直坡、阶梯形坡，少量凸形坡。

（4）较低危险区面积为 0.354 km^2，占研究区总面积的 7.97%，发育灾害点数 2 处。主要分布于海螺形到河桂店靠近贡水一侧，零星分布于寨头公路段。该区域边坡低缓，切坡高度小于 10 m，地势相对平坦，剖面形态主要为平直坡和凹形坡。

（5）低危险区面积为 1.732 km^2，占研究区总面积的 38.71%，发育灾害点数 2 处。成片分布于研究区中段朱田村到大塘湖，该区域地势平坦，无大范围人工切坡，地

表 4　不同模型灾害点覆盖率检验

Table 4　Coverage test for different modeled disaster point

评价模型	低危险		较低危险		漏报率/%	中危险		较高危险		高危险		准确率/%
	灾害点	比例/%	灾害点	比例/%		灾害点	比例/%	灾害点	比例/%	灾害点	比例/%	
FR	2	4.44	7	15.56	20.00	26	57.78	8	17.78	2	4.44	80.00
AHP-FR	2	4.44	2	4.44	8.89	23	51.11	11	24.44	7	15.56	91.11
EI-FR	2	4.44	3	6.67	11.11	24	53.33	10	22.22	6	13.33	88.89
AHP-EI-FR	2	4.44	3	6.67	11.11	22	48.89	11	24.44	7	15.56	88.89

形起伏度较小。

5 结论

(1)通过无人机和地面调查,共记录地质灾害 45 处,其中滑坡 21 处,崩塌 24 处,规模均为小型。

(2)选取自然坡度、坡向、地形起伏度、坡面形态、切坡高度、切坡坡度、地层岩性、断层与斜坡的关系等 8 个评价因子构建地质灾害危险性评价指标体系。选取省道沿线 200 m 缓冲区作为评价范围,采用斜坡单元作为评价单元,经过卫星影像及无人机校正后将研究区划分为 79 个斜坡单元。

(3)基于斜坡单元计算评价因子 FR,采用 EI 和 AHP 确定单一权重和组合权,将权重耦合 FR 构建 3 种评价模型。评价结果表明,AHP-FR 的评价模型预测精度最高,*AUC* 值达到 0.836,AHP-EI-FR 的预测精度次之,*AUC* 值为 0.833,说明这 2 种评价模型均较为有效。

(4)最终选取 AHP-FR 模型对研究区进行地质灾害危险性评价:江西省 S223 省道竹头坑子—渠坎下高危险区、较高危险区、中危险区、较低危险区、低危险区面积依次为 0.295 , 0.570 , 1.509 , 0.354 , 1.732 km^2,分别占全区总面积的 6.66%、12.79%、33.86%、7.97%、38.71%。

参考文献(References):

[1] 于秀珍,牟瑞芳.雅康高速公路沿线地质灾害分布特征及影响因素分析[J].安全与环境学报,2022,22(2):876 − 884.[YU Xiuzhen, MU Ruifang. Distribution characteristics and influencing factors of geological disasters along Yakang expressway[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(2): 876 − 884.(in Chinese with English abstract)]

[2] 杨可明,郭海会,钱小丽,等.结合信息熵改进的证据权法与滑坡危险度区划[J].地理与地理信息科学,2013,29(3):104 − 108.[YANG Keming, GUO Haihui, QIAN Xiaoli, et al. Improving weights of evidence method based on entropy and zoning the landslide hazard[J]. Geography and Geo-Information Science, 2013, 29(3): 104 − 108.(in Chinese with English abstract)]

[3] 李焕彬,张春山,申俊峰,等.基于 GIS 的京藏高速公路京张段沿线地质灾害危险性评价[J].西部探矿工程,2018,30(10):4 − 8.[LI Huanbin, ZHANG Chunshan, SHEN Junfeng, et al. Risk assessment of geological hazards along Jing-Zang section of Jing-Zang expressway based on GIS[J]. West-China Exploration Engineering, 2018, 30(10): 4 − 8.(in Chinese with English abstract)]

[4] 徐文刚,余旭荣,年廷凯,等.基于 FLAC^{3D} 的三维边坡稳定性强度折减法计算效率改进算法及其应用[J].吉林大学学报(地球科学版),2021,51(5):1347 − 1355.[XU Wengang, YU Xurong, NIAN Tingkai, et al. Optimization and application of FLAC^{3D} strength-reduction computation in three-dimension slope stability analysis[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(5): 1347 − 1355.(in Chinese with English abstract)]

[5] 李晓婷,刘文龙.模糊综合评判法在甘肃陇南武都区石门乡泥石流危险性评价中的应用[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(4):71 − 76.[LI Xiaoting, LIU Wenlong. Application of fuzzy comprehensive evaluation method to debris flow risk evaluation in Shimen Township in Wudu District of Longnan City, Gansu Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4): 71 − 76.(in Chinese with English abstract)]

[6] 范强,巨能攀,向喜琼,等.证据权法在区域滑坡危险性评价中的应用——以贵州省为例[J].工程地质学报,2014,22(3):474 − 481.[FAN Qiang, JU Nengpan, XIANG Xiqiong, et al. Landslides hazards assessment with weights of evidence: A case study in Guizhou, China[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(3): 474 − 481.(in Chinese with English abstract)]

[7] PRADHAN B. Remote sensing and GIS-based landslide hazard analysis and cross-validation using multivariate logistic regression model on three test areas in Malaysia[J]. Advances in Space Research, 2010, 45(10): 1244 − 1256.

[8] 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)]

[9] 刘丽娜,许冲,徐锡伟,等.GIS 支持下基于 AHP 方法的 2013 年芦山地震区滑坡危险性评价[J].灾害学,2014,29(4):183 − 191.[LIU Lina, XU Chong, XU Xiwei, et al. GIS-based landslide hazard evaluation using AHP method in the 2013 Lushan earthquake region[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(4): 183 − 191.(in Chinese with English abstract)]

[10] 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)]

[11] 邢秋菊,赵纯勇,高克昌,等.基于 GIS 的滑坡危险性逻辑回归评价研究[J].地理与地理信息科学,2004,20(3):49 − 51.[XING Qiuju, ZHAO Chunyong, GAO Kechang, et

al. Logical regression analysis on the hazard of landslide based on GIS［J］. Geography and Geo-Information Science, 2004, 20(3): 49 − 51.（in Chinese with English abstract）］

［12］ LEONARDI G, PALAMARA R, SURACI F. A fuzzy methodology to evaluate the landslide risk in road lifelines［J］. Transportation Research Procedia, 2020, 45: 732 − 739.

［13］ LEE S, CHOI U. Development of GIS-based geological hazard information system and its application for landslide analysis in Korea［J］. Geosciences Journal, 2003, 7(3): 243 − 252.

［14］ ZHENG Qian, LYU Haimin, ZHOU Annan, et al. Risk assessment of geohazards along Cheng-Kun railway using fuzzy AHP incorporated into GIS［J］. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2021, 12(1): 1508 − 1531.

［15］ 张欢，巨能攀，陆渊，等. 基于无人机的滑坡地形快速重建与稳定性分析［J］. 水文地质工程地质，2021, 48(6): 171 − 179.［ZHANG Huan, JU Nengpan, LU Yuan, et al. Rapid remodeling of three-dimensional terrain and stability analyses of landslide based on UAV［J］. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(6): 171 − 179.（in Chinese）］

［16］ KHAN H, SHAFIQUE M, KHAN M A, et al. Landslide susceptibility assessment using Frequency Ratio, a case study of northern Pakistan［J］. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, 2019, 22(1): 11 − 24.

［17］ LEE S, PRADHAN B. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models［J］. Landslides, 2007, 4(1): 33 − 41.

［18］ 赵晓燕，谈树成，李永平. 基于斜坡单元与组合赋权法的东川区地质灾害危险性评价［J］. 云南大学学报(自然科学版)，2021, 43(2): 299 − 305.［ZHAO Xiaoyan, TAN Shucheng, LI Yongping. Risk assessment of geological hazards in Dongchuan District based on the methods of slope unit and combination weighting［J］. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2021, 43(2): 299 − 305.（in Chinese with English abstract）］

［19］ HONG Haoyuan, CHEN Wei, XU Chong, et al. Rainfall-induced landslide susceptibility assessment at the Chongren Area (China) using frequency ratio, certainty factor, and index of entropy[J]. Geocarto International, 2016: 1 − 16.

［20］ 杨志华，吴瑞安，郭长宝，等. 川西巴塘断裂带地质灾害效应与典型滑坡发育特征［J］. 中国地质，2022, 49(2): 355 − 368.［YANG Zhihua, WU Ruian, GUO Changbao, et al. Geo-hazard effects and typical landslide characteristics of the Batang fault zone in the western Sichuan［J］. Geology in China, 2022, 49(2): 355 − 368.（in Chinese with English abstract）］

［21］ 张曦，陈丽霞，徐勇，等. 两种斜坡单元划分方法对滑坡灾害易发性评价的对比研究［J］. 安全与环境工程，2018, 25(1): 12 − 17.［ZHANG Xi, CHEN Lixia, XU Yong, et al. Comparison of two methods for slope unit division in landslide susceptibility evaluation［J］. Safety and Environmental Engineering, 2018, 25(1): 12 − 17.（in Chinese with English abstract）］

［22］ 何书，鲜木斯艳·阿布迪克依木，胡萌，等. 基于自组织特征映射网络-随机森林模型的滑坡易发性评价 ——以江西大余县为例［J］. 中国地质灾害与防治学报，2022, 33(1): 132 − 140.［HE Shu, Abudikeyimu Xianmusiyan, HU Meng, et al. Evaluation on landslide susceptibility based on self-organizing feature map network and random forest model: A case study of Dayu County of Jiangxi Province［J］. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(1): 132 − 140.（in Chinese with English abstract）］

［23］ 周越，曾昭发，唐海燕，等. 公路勘察中滑坡体的地球物理特征与分析——以张榆线公路勘察为例［J］. 吉林大学学报(地球科学版)，2021, 51(2): 638 − 644.［ZHOU Yue, ZENG Zhaofa, TANG Haiyan, et al. Geophysical characteristics of landslide body in highway reconnaissance: A case study in highway prospecting of Zhangyu line［J］. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(2): 638 − 644.（in Chinese with English abstract）］

［24］ 谢洪波，刘正疆，文广超，等. 四川金川-小金公路沿线滑坡、崩塌影响因素分析［J］. 中国地质灾害与防治学报，2021, 32(1): 10 − 17.［XIE Hongbo, LIU Zhengjiang, WEN Guangchao, et al. Influencing factors of landslides and rockfalls along the Jinchuan-Xiaojin highway in Sichuan［J］. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(1): 10 − 17.（in Chinese with English abstract）］

［25］ 万佳威，丰成君，戚帮申，等. 河北省顺平县地质灾害发育特征及易发性评价［J］. 地质力学学报，2020, 26(4): 604 − 614.［WAN Jiawei, FENG Chengjun, QI Bangshen, et al. Characteristics and susceptibility evaluation of geohazard development in Shunping County, Hebei Province［J］. Journal of Geomechanics, 2020, 26(4): 604 − 614.（in Chinese with English abstract）］

［26］ 李明威，唐川，陈明，等. 汶川震区北川县泥石流流域崩滑体时空演变特征［J］. 水文地质工程地质，2020, 47(3): 182 − 190.［LI Mingwei, TANG Chuan, CHEN Ming, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of landslides in debris flow catchment in Beichuan County in the Wenchuan earthquake zone［J］. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(3): 182 − 190.（in Chinese with English abstract）］

［27］ 张莹，苏生瑞，李鹏. 断裂控制的滑坡机理研究 ——以柳家坡滑坡为例［J］. 工程地质学报，2015, 23(6): 1127 − 1137.［ZHANG Ying, SU Shengrui, LI Peng. Numericalsimulation on mechanism of fault: Controlled Liujiapolandslide［J］. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(6): 1127 − 1137.（in Chinese with English abstract）］