

文章编号: 1004-4051(2024)S1-0223-07

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20240581

# 基于地理信息系统(GIS)的地质灾害评价现状

张蓝兮<sup>1</sup>, 鲁军景<sup>2,3</sup>, 彭纪超<sup>4</sup>

(1. 河北工程大学地球科学与工程学院, 河北 邯郸 056038;

2. 河北省科学院地理科学研究所, 河北 石家庄 050021;

3. 河北省地理信息开发应用技术创新中心, 河北 石家庄 050021;

4. 贵州省黔西南州自然资源局, 贵州 兴义 562400)

**摘要:** 近年来, 地理信息系统(GIS)已成为评估和管理地质灾害风险的关键工具。地质灾害危险性评价是识别、分析和预测地质灾害潜在威胁的过程, 它对于防灾减灾策略的制定和执行至关重要。本文基于 GIS 的地质灾害危险性评价方法的研究现状, 探讨了其发展趋势。首先, 从国内和国外两个方面回顾了 GIS 技术在地质灾害管理中的应用历史, 分析了基于 GIS 的地质灾害调查。其次, 探讨了地质易发性评价、危险性评价、易损性评价、地质灾害风险性之间的关系, 详细分析了易发性和危险性评价的主要评价方法、计算逻辑、优缺点、应用场景和主要评价指标, 对地质灾害易损性和风险性进行分析并指出目前主要几种分级类型, 并指出了地质灾害评价过程的问题及未来的发展方向。

**关键词:** 地理信息系统(GIS); 地质灾害; 危险性评价; 风险性评价; 易损性评价

**中图分类号:** TU459<sup>+</sup>.2 **文献标识码:** A

## Current status of geological disaster assessment based on Geographic Information Systems (GIS)

ZHANG Lanxi<sup>1</sup>, LU Junjing<sup>2,3</sup>, PENG Jichao<sup>4</sup>

(1. School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. Institute of Geographical Sciences, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China;

3. Hebei Technology Innovation Center for Geographic Information Application, Shijiazhuang 050021, China;

4. Natural Resources Bureau of Qianxinan Prefecture, Guizhou Province, Xingyi 562400, China)

**Abstract:** In recent years, Geographic Information Systems (GIS) have become an essential tool for the assessment and management of geological disaster risks. The evaluation of geological disaster risk involves the identification, analysis, and prediction of potential threats posed by geological events, which is vital for the development and implementation of disaster prevention and mitigation strategies. This paper provides an overview of the current research on methodologies for evaluating the risk of geological disasters based on GIS and discusses future trends in this field. It begins with a review of the history of GIS applications in geological disaster management from both domestic and international perspectives, followed by an analysis of GIS-based geological disaster surveys. This paper then delves into the relationships between geological hazard susceptibility assessment, hazard assessment,

收稿日期: 2024-04-15 责任编辑: 刘硕

第一作者简介: 张蓝兮(2002—), 女, 汉族, 河北秦皇岛人, 主要从事地理信息系统应用方面的研究, E-mail: 1431918704@qq.com。

通讯作者简介: 鲁军景(1989—), 女, 汉族, 河北邯郸人, 硕士, 助理研究员, 主要从事生态遥感和 3S 技术应用方面的研究, E-mail: junjing2@sina.com。

引用格式: 张蓝兮, 鲁军景, 彭纪超. 基于地理信息系统(GIS)的地质灾害评价现状[J]. 中国矿业, 2024, 33(S1): 223-229.

ZHANG Lanxi, LU Junjing, PENG Jichao. Current status of geological disaster assessment based on Geographic Information Systems (GIS)[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(S1): 223-229.

vulnerability assessment, and geological disaster risk. It thoroughly examines the main evaluation methods, computational logic, advantages and disadvantages, application scenarios, and key evaluation indicators for susceptibility and hazard assessments. Furthermore, it analyzes geological disaster vulnerability and risk, highlighting the current main types of classification. The paper also identifies issues in the process of geological disaster assessment and points out directions for future development.

**Keywords:** Geographic Information Systems (GIS); geological disasters; hazard assessment; risk assessment; vulnerability assessment

## 0 引言

地质灾害通常指自然因素或者人为活动引发的危害人民生命和财产安全的山体崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷、地裂缝、地面沉降等与地质作用有关的灾害。据统计,2023年我国共发生地质灾害3666起,虽然地质灾害死亡失踪人数连年下降,但形势依然严峻。传统的地质灾害研究方法受限于数据获取与处理的能力,难以对地质灾害进行全面、深入的分析 and 预测。

地理信息系统(Geographic Information Systems, GIS)作为现代信息技术与地理学结合的产物,具备快速更新和共享数据、及时发布信息,及强大的可视化功能等特点,已经在多个领域得以体现。尤其在地质灾害领域,GIS在预测和评估地质灾害风险、应对紧急情况下的灾害排查以及持续的动态监控等方面显示出极高的效率和效果,不仅极大地提升了地质灾害防治工作的效率和准确性,更有助于为社会经济提供有力保障,促进地质灾害风险的有效管理和控制<sup>[1]</sup>。

## 1 GIS 应用于地质灾害的发展历程

### 1.1 国外发展历程

20世纪60年代,地质灾害研究从单纯的描述和定性分析转向更系统和更科学的方向,60年代,加拿大学者首次提出GIS,并且对加拿大地理信息系统(CGIS)进行规划和开发,为世界上首个计算机处理GIS的出现奠定了基础<sup>[2]</sup>;70年代开始,从更为宏观的角度对地质灾害进行区域性的综合研究,并提出了相应的防治措施<sup>[3]</sup>;进入80年代后,GIS以其强大的空间数据管理和分析能力,为地质灾害的空间分布、影响因素分析和风险评估提供了支持。研究者们利用GIS对地质灾害数据进行处理和分析,实现了地质灾害信息的可视化表达和空间查询<sup>[4]</sup>;到了90年代,地质灾害研究在理论、方法和技术上都取得了更为显著的突破,地质灾害研究逐渐从定性分析向定量、空间化和系统化方向发展。在信息技术高速发展的21世纪,先进方法被引入到地质灾害评价中,进一步提高了评价的精度和效率<sup>[5-7]</sup>。

### 1.2 国内发展历程

20世纪90年代,我国学者开始将GIS应用于地

质灾害研究中,1994年,中国GIS协会成立,GIS在地质灾害研究中的作用不断加强。早期地质灾害的研究主要集中于地质灾害现象的初步描述、分类和成因分析上。21世纪以来,地质灾害研究开始向数字化、智能化和精细化方向发展,实现了从传统方法与GIS技术结合到机器学习算法应用,再到多方法集成与智能化的时代<sup>[8]</sup>。

## 2 地质灾害评价分类

地质灾害的评价主要包括易发性评价、危险性评价、易损性评价、地质灾害风险性(图1)。地质灾害的易发性是某一地区地质灾害发生的难易程度,这主要取决于地质灾害的形成条件组合<sup>[9]</sup>,易发性与地质灾害发生的可能成正相关<sup>[10]</sup>;地质灾害危险性是一个地区在一定时期内可能发生地质灾害的规模、频次、密度、可能产生的危害范围和危害强度的综合反映,危险性可以分为历史灾害危险性和潜在灾害危险性<sup>[11]</sup>。易发性和危险性主要关注地质灾害的自然属性;易损性评价是受灾体在地质灾害发生时的抵抗能力和破坏程度<sup>[11]</sup>,易损性评价有助于分析对地质灾害的抗御能力;地质灾害风险性可以理解为地质灾害发生并导致一定损失水平的可能性,它是灾害自然属性和社会经济属性的结合统一体<sup>[12-13]</sup>。风险性通常通过危险性和易损性的乘积来表达,综合考虑了灾害的发生概率和潜在的破坏能力,以及受灾体对灾害的抵抗能力和恢复能力,易损性评价和风险性更多地考虑了人类社会对地质灾害的应对能力。

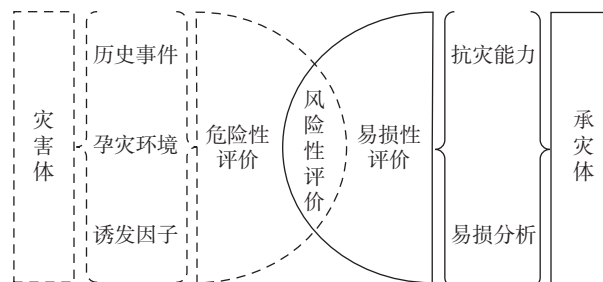


图1 地质灾害危险性、易损性和风险性关系

Fig. 1 Relation of geological hazard, vulnerability and risk assessment

(资料来源:文献[12])

### 3 地质灾害评价方法

#### 3.1 地质灾害易发性和危险性评价方法

在地质灾害预测中, 可以分为定性评价和定量评价两类。定性评价主要依赖于专家经验和判断, 通过对地质灾害的原因、影响因素、发生频率等进行分析, 确定地质灾害的潜在危险性。定量评价则是通过建立数学模型, 对地质灾害的潜在危险性进

行量化, 从而得到精确的风险评估结果, 不同评价方法的算法及基本逻辑、优缺点、适用范围和主要评价参数见表 1。

地质灾害易发性评价主要针对某一地区地质灾害发生的难易程度, 分为低易发区、较低易发区、中易发区、较高易发区和高易发区<sup>[24]</sup>。地质灾害危险性评价主要针对某一研究区地质灾害的危险性高低,

表 1 地质灾害易发性评价和风险性评价指标及方法

Table 1 Geological hazard susceptibility evaluation and risk evaluation indicators and methods

评价方法	算法及逻辑	优点	缺点	易发性评价主要指标	危险性评价主要指标
信息量模型	将各种影响区域稳定性的实际测量值转化为对应的信息量值。根据信息量的大小来评判这些影响因素与研究对象之间的紧密程度	综合考量多, 结果准确、定量化程度高、灵活性强、高效便捷	权值确定主观、权值确定主观、依赖详细调查	地质构造、坡度、坡向、土地利用、地层岩性、水以及坡体结构 <sup>[44]</sup>	地形地貌、动力地质、岩组、岸坡结构、地层、构造、地面变形、植被、结构面组合、裂隙、降雨、地震、水体、河流动力作用、人类工程活动 <sup>[45]</sup>
逻辑回归模型	建立一个因变量与众多独立变量间的复杂回归联系, 进而能估算特定区域内某事件发生的可能性	模型简单、易于解释、计算效率高	对非线性关系不敏感、偏差大	高程、工程岩组、水系、起伏度、坡度、坡向沟谷密度、断层、道路 <sup>[46]</sup>	坡度、坡向、山脊山谷、岩性、坡体结构、软弱夹层、断层影响范围、水系影响范围、土地利用 <sup>[47]</sup>
随机森林	它属于集成学习中 bagging(自举汇聚法)的一种。随机森林由多个决策树组成, 每个决策树都是独立并行建立的	准确性高、抗噪能力强、易于理解和实现	计算量大、对高维稀疏数据处理能力有限	高程、归一化植被指数、斜坡结构、断裂距离、坡度、岩土体类型、土地利用类型、路网距离、河网距离 <sup>[48]</sup>	坡度、坡向、坡高、坡形和河流密度、降水不均系数和降水多年变化趋势、土地覆被类型指标和植被、地层岩性、断层线密度 <sup>[49]</sup>
确定性系数(CF)	能评估各种因素对地质灾害发生的影响程度。使用 CF, 可以对影响灾害发生的因素的不同取值范围进行敏感度分析假设特定灾种与特定地质灾害影响因子分别为 D(Disaster) 和 F(Factor)。	模型简单、可适应不同比例尺的区域和不同类型的数据	对数据的依赖性强、难以处理非线性关系	距河网、路网、断裂的距离、土地利用类型、岩土体类型、高程、地貌类型、坡度、坡向、剖面曲率 <sup>[50]</sup>	高程、岩性、与河流、构造线、铁路、公路的距离、地形地貌、坡度、年均降雨量、坡向 <sup>[51]</sup>
频率比法	频率比法首先按照一定规则将 F 划分成 n 种类型或 n 个等级	计算简便、直观易懂	忽略地质复杂性、结果粗略	高程、震动峰值加速度、断裂密度、降水量与植被指数、地质岩组、坡度、曲率、道路距离、坡向、水系距离、起伏度 <sup>[52]</sup>	高程、降雨、道路和河流间距、坡向、归一化植被指数、坡度、岩性、平剖面曲率 <sup>[53]</sup>
层次分析法	通过专家估计, 两两影响因子之间的关系构造矩阵	系统性强、定性与定量相结合、灵活性强	主观性较强、计算过程复杂	坡度、断层、河流、坡向、岩性、公路、高程 <sup>[54]</sup>	人类活动影响、岩性、植被覆盖率、岩体结构、降斜坡坡度、降雨强度、区域稳定性 <sup>[55]</sup>
人工神经网络	每个神经元接收来自前一层神经元的输入, 这些输入被赋予不同的权重, 然后对所有加权的输入求和	能处理非线性关系, 通过大量数据训练得到高精度模型	模型复杂, 训练时间长, 易陷局部最优	径流强度指数、高程、水系距离、坡度、斜坡结构、坡向、地层岩性、断层距离、地形湿度指数、道路距离 <sup>[56]</sup>	坡度、坡高、岩性、岸坡结构类型、软弱夹层状况、河流地质作用、构造复杂程度、已有灾情、降雨、地震、人类工程活动、植被覆盖率 <sup>[57]</sup>
证据权方法	以贝叶斯概率统计为基础, 假设影响因子间是互相独立的, 既考虑到正权重又考虑到负权重	操作简便、受主观因素影响小	数据依赖性强	坡度、地震烈度、岩性、高程、坡向、河流、断层、公路 <sup>[58]</sup>	高程、坡度、坡向、与水系距离、峰值加速度(PGA)、与震中距离、岩性与断裂距离 <sup>[59]</sup>

续表 1

评价方法	算法及逻辑	优点	缺点	易发性评价主要指标	危险性评价主要指标
机器学习	使用相同的训练数据集来培养多个独立的分类器,并将它们有效地结合以形成一个具有更高准确性的集成分类器(Adaboost)	预警准确,实时性强、数据驱动,泛化能力好	数据依赖,训练成本高、模型复杂度影响效率	岩性、河流、地震烈度、坡度、高程、公路、坡向、断层 <sup>[28]</sup>	年最大 10 mm、湿度指数、农田生产潜力、1 h 和 6 h 暴雨均值、高程、到河距离、人口密度、归一化差值植被指数、年降雨量均值和年暴雨天数、GDP <sup>[29]</sup>
模糊综合评判	将总体评价目标细分为若干子目标。对每个子目标进行模糊综合评价,以子目标作为评价因素,对总体评价目标进行二级或多级模糊综合评价	能处理模糊性和不确定性、适用于多因素综合评价	权重设定可能带有主观性,影响评价结果	地震烈度、岩性、河流切割密度、地形、灾害分布密度、断裂构造密度、多年平均降雨量、地貌、人类工程活动 <sup>[31]</sup>	滑坡前缘、滑体、滑坡后缘、岩性、残坡积土厚度、人工切坡 <sup>[32]</sup>
因子分析法	减少分析中使用的变量数量(降维),确定各变量的相对重要性(权重),并解决多重共线性问题	能提取关键影响因素,简化问题。	因子数量难确定、受样本质量影响大	降雨强度、坡度、地形起伏度、断层距离、地层岩性、植被覆盖、坡向 <sup>[33]</sup>	地形、工程与水文地质条件、地质构造、地灾与潜在地灾、地貌、人类工程活动情况、岩性 <sup>[34]</sup>
权的最小平方方法	确定各级评价因子的权重,并以 2 级评价因子为例详细介绍计算过程	客观确定权重、减少主观偏差、评价准确性高	对异常值敏感,可能受数据质量影响	地灾破坏程度、地下水特征、坡度、流域相对高差、降雨强度、地表水 <sup>[35]</sup>	风化程度、基岩岩性、岸坡结构、与断层距离、植被覆盖率、植被覆盖率、坡向、平均坡度、坡高、人类工程活动、正常蓄水浸没比 <sup>[36]</sup>
支持向量机	建立在统计学习理论中的结构风险最小化原则上。旨在不仅最小化训练误差,也最小化模型的泛化误差,从而在未知数据上表现更好	对小样本数据分类效果好、适用于高维数据	对参数和核函数选择敏感,模型训练时间长	高程、坡向、距河网-路网距离、岩土体类型、坡度、距断裂距离、地貌类型、剖面曲率、土地利用类型 <sup>[37]</sup>	坡向、高程、降雨、坡度、岩土体及植被覆盖指标 <sup>[37]</sup>
主成分分析法	降维思想、线性变换、方差最大化原则、相关性分析和数据重构等	简化数据结构、便于解释和可视化	可能忽略次要因素、对异常值敏感	河流、断层、高程、坡向、地层岩性、坡度、公路 <sup>[38]</sup>	历史灾害规模、程度、频次,地质条件、地形地貌、气候条件、水文条件、植被条件、人为条件、岩土岩体、危害对象、损失 <sup>[39]</sup>

划分为低危险、较低危险、中危险、较高危险、高危险 5 类<sup>[37]</sup>,或者分为低风险区、中风险区、高风险区和极高风险区 4 个等级。

### 3.2 地质灾害易损性评价

地质灾害易损性评价是指对地质灾害可能造成的承灾体(如人口、财产和基础设施等)的破坏和损失程度进行评估和预测的过程,主要可分为人口、经济、社会、生态易损性等多方面考虑(表 2)。易损性评价是地质灾害风险评价中的重要环节,它综合考虑了承灾体的类型、分布、价值以及其对地质灾害的抵御能力等因素,可将易损性可分为低易损性、中低易损性、中易损性、中高易损性、高易损性 5 类,或者分为高易损区、中易损区和低易损区<sup>[40]</sup>。

### 3.3 地质灾害风险评价

地质灾害风险性评价模型主要包括三方面内容:

表 2 易损性评价分类及主要指标

Table 2 Vulnerability assessment classification and main index

分类	主要指标
社会易损性	人口密度、人口构成、人口增长率、人口素质
经济易损性	GDP、个人收入、银行存款、
物质易损性	道路、桥梁、各种建筑、设备、材料、旅游基础设施
资源环境易损性	土壤、空气、淡水、林地、草地、矿产、生物资源、景观密度

资料来源:文献[13]和文献[40]。

一是对地质灾害发生的概率,即危险性;二是对灾害对人类、社会及环境等造成的损失进行估计,即易损性;三是在地质灾害发生时,系统及其组成部分(包括人和设施)预测、应对、恢复和适应的能力,即抗灾能力。这种能力的高低,直接决定了在地质灾害面前,保障人民的生命和财产安全的能力。通过以



- [ 14 ] 王佳佳, 殷坤龙, 肖莉丽. 基于 GIS 和信息量的滑坡灾害易发性评价: 以三峡库区万州区为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(4): 797-808.  
WANG Jiajia, YIN Kunlong, XIAO Lili. Landslide susceptibility assessment based on GIS and weighted information value: a case study of Wanzhou District, Three Gorges Reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(4): 797-808.
- [ 15 ] 阮沈勇, 黄润秋. 基于 GIS 的信息量法模型在地质灾害危险性区划中的应用[J]. 成都理工大学学报, 2001, 28(1): 89-92.  
RUAN Shenyong, HUANG Runqiu. Application Of GIS-based information model on assessment of geological hazards risk[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001, 28(1): 89-92.
- [ 16 ] 樊芷吟, 苟晓峰, 秦明月, 等. 基于信息量模型与 Logistic 回归模型耦合的地质灾害易发性评价[J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 340-347.  
FAN Zhiyin, GOU Xiaofeng, QIN Mingyue, et al. Information and logistic regression models based coupling analysis for susceptibility of geological hazards[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(2): 340-347.
- [ 17 ] 刘艺梁, 殷坤龙, 刘斌. 逻辑回归和人工神经网络模型在滑坡灾害空间预测中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(5): 92-96.  
LIU Yiliang, YIN Kunlong, LIU Bin. Application of logistic regression and artificial neural networks in spatial assessment of landslide hazards[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(5): 92-96.
- [ 18 ] 吴润泽, 胡旭东, 梅红波, 等. 基于随机森林的滑坡空间易发性评价: 以三峡库区湖北段为例[J]. 地球科学, 2021, 46(1): 321-330.  
WU Runze, HU Xudong, MEI Hongbo, et al. Spatial susceptibility assessment of landslides based on random forest a case study from Hubei section in the three gorges reservoir area[J]. Earth Science, 2021, 46(1): 321-330.
- [ 19 ] 周保, 隋嘉, 孙皓, 等. 基于多源遥感数据的青海省地质灾害评价[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(4): 231-240.  
ZHOU Bao, SUI Jia, SUN Hao, et al. Evaluation of geological disasters in Qinghai Province based on multi-source remote sensing data[J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(4): 231-240.
- [ 20 ] 李远远, 梅红波, 任晓杰, 等. 基于确定性系数和支持向量机的地质灾害易发性评价[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(12): 1699-1709.  
LI Yuanyuan, MEI Hongbo, REN Xiaojie, et al. Geological disaster susceptibility evaluation based on certainty factor and support vector machine[J]. Journal of Geo-information Science, 2018, 20(12): 1699-1709.
- [ 21 ] 王卫东, 陈燕平, 钟晟. 应用 CF 和 Logistic 回归模型编制滑坡危险性区划图[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(4): 1127-1132.  
WANG Weidong, CHEN Yanping, ZHONG Sheng. Landslides susceptibility mapped with CF and Logistic regression model[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, 40(4): 1127-1132.
- [ 22 ] 李郎平, 兰恒星, 郭长宝, 等. 基于改进频率比法的川藏铁路沿线及邻区地质灾害易发性分区评价[J]. 现代地质, 2017, 31(5): 911-929.  
LI Langping, LAN Hengxing, GUO Changbao, et al. Geohazard susceptibility assessment along the Sichuan-Tibet railway and its adjacent area using an improved frequency ratio method[J]. Geoscience, 2017, 31(5): 911-929.
- [ 23 ] 刘杰, 武震. 基于 GIS 的白龙江流域舟曲: 武都段的滑坡危险性评价[J]. 地震工程学报, 2020, 42(6): 1723-1734.  
LIU Jie, WU Zhen. Landslide risk assessment of the Zhouqu-Wudu section of Bailong river basin based on geographic information system[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(6): 1723-1734.
- [ 24 ] 许冲, 戴福初, 姚鑫, 等. GIS 支持下基于层次分析法的汶川地震区滑坡易发性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S2): 3978-3985.  
XU Chong, DAI Fuchu, YAO Xin, et al. GIS-based landslide susceptibility assessment using analytical hierarchy process in Wenchuan earthquake region Chinese[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering 2009, 28(S2): 3978-3985.
- [ 25 ] 褚洪斌, 母海东, 王金哲. 层次分析法在太行山区地质灾害危险性分区中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(3): 125-129.  
CHU Hongbin, MU Haidong, WANG Jinzhe. Application of analytic hierarchy process on zoning hazard degree of geologic disaster in Taihang Mountain Region[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14(3): 125-129.
- [ 26 ] 周超, 殷坤龙, 曹颖, 等. 基于集成学习与径向神经网络耦合模型的三峡库区滑坡易发性评价[J]. 地球科学, 2020, 45(6): 1865-1876.  
ZHOU Chao, YIN Kunlong, CAO Ying, et al. Landslide susceptibility assessment by applying the coupling method of radial basis Neural Network and Adaboost: a case study from the three gorges reservoir area[J]. Earth Science, 2020, 45(6): 1865-1876.
- [ 27 ] 向喜琼, 黄润秋. 基于 GIS 的人工神经网络模型在地质灾害危险性区划中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11(3): 23-27.  
XIANG Xiqiong, HUANG Runqiu. Application of GIS-based artificial Neural Networks on assessment of geohazards risk[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2000, 11(3): 23-27.
- [ 28 ] 许冲, 戴福初, 徐锡伟. 基于 GIS 平台与证据权的地震滑坡易发性评价[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2011, 36(6): 1155-1164.  
XU Chong, DAI Fuchu, XU Xiwei. Earthquake triggered landslide susceptibility evaluation based on GIS platform and Weight-of-Evidence modeling[J]. Earth Science, 2011, 36(6): 1155-1164.
- [ 29 ] 杨华阳, 许向宁, 杨鸿发. 基于证据权法的九寨沟地震滑坡危险性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(3): 20-29.  
YANG Huayang, XU Xiangning, YANG Hongfa. The Jiuzhaigou coseismic landslide hazard assessment based on weight of evidence method[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(3): 20-29.
- [ 30 ] 方然可, 刘艳辉, 黄志全. 基于机器学习的区域滑坡危险性评价方法综述[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(4): 1-8.

- FANG Ranke, LIU Yanhui, HUANG Zhiqian. A review of the methods of regional landslide hazard assessment based on machine learning[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(4): 1-8.
- [ 31 ] 王哲, 易发成, 陈廷方. 基于模糊综合评判的绵阳市地质灾害易发性评价[J]. *科技导报*, 2012, 30(31): 53-60.
- WANG Zhe, YI Facheng, CHEN Yanfang. Geo-hazard susceptibility evaluation of Mianyang City based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Science & Technology Review*, 2012, 30(31): 53-60.
- [ 32 ] 郑乾墙. 滑坡危险性的模糊综合评判[J]. *江西地质*, 1999, 13(4): 299-303.
- ZHENG Qianqiang. Fuzzy multidisciplinary assessment of landslide danger[J]. *Jiangxi Geology*, 1999, 13(4): 299-303.
- [ 33 ] 孟祥瑞, 裴向军, 刘清华, 等. GIS支持下基于因子分析法的都汶路沿线地质灾害易发性评价[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2016, 27(3): 106-115.
- MENG Xiangrui, PEI Xiangjun, LIU Qinghua, et al. GIS-Based susceptibility assessment of geological hazards along the road from Dujiangyan to Wenchuan by factor analysis[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2016, 27(3): 106-115.
- [ 34 ] 黄镇逢. 基于地质数据库的城市区域性活动断裂带危险性评价[J]. *西部探矿工程*, 2023, 35(10): 24-27.
- HUANG Zhenfeng. Risk assessment of urban regional active fault zones based on geological database[J]. *West-china Exploration Engineering*, 2023, 35(10): 24-27.
- [ 35 ] 王念秦, 姚勇. 基于模糊数学和权的最小平方方法的泥石流易发性评价方法[J]. *灾害学*, 2008, 23(2): 5-9.
- WANG Nianqin, YAO Yong. Method of debris-flow proneness evaluation based on fuzzy mathematics and least-square method[J]. *Journal of Catastrophology*, 2008, 23(2): 5-9.
- [ 36 ] 刘攀, 阮云凯, 陈剑平, 等. 金沙江奔子栏库区达日开发区滑坡危险性评价[J]. *路基工程*, 2016(6): 25-29.
- LIU Pan, RUAN Yunkai, CHEN Jianping, et al. Hazard assessment on landslide in Dari development zone in Benzilan Reservoir Area along Jinsha River[J]. *Subgrade Engineering*, 2016(6): 25-29.
- [ 37 ] 傅文杰. GIS支持下基于支持向量机的滑坡危险性评价[J]. *地理科学*, 2008, 28(6): 838-841.
- FU Wenjie. Landslide hazard evaluation based on GIS and SVM[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28(6): 838-841.
- [ 38 ] 连志鹏, 徐勇, 付圣, 等. 采用多模型融合方法评价滑坡灾害易发性: 以湖北省五峰县为例[J]. *地质科技通报*, 2020, 39(3): 178-186.
- LIAN Zhipeng, XU Yong, FU Sheng, et al. Landslide susceptibility assessment based on multi-model fusion method: a case study in Wufeng County, Hubei province[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2020, 39(3): 178-186.
- [ 39 ] 范文, 刘雪梅, 高德彬, 等. 主成分分析法在地质灾害危险性综合评价中的应用[J]. *西安工程学院学报*, 2001, 23(4): 53-57.
- FAN Wen, LIU Xuemei, GAO Debin, et al. The application of principal components analysis in synthetical estimation of geological hazard[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2001, 23(4): 53-57.
- [ 40 ] 张晓东. 基于遥感和GIS的宁夏盐池县地质灾害风险评价研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- [ 41 ] 杨大学. 基于GIS的杭州市富阳区地质灾害风险评价[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2023.

\*\*\*\*\*

(上接第 222 页)

- [ 6 ] 高广伟. 中国矿山救护工作改革与发展[J]. *煤矿安全*, 2020, 51(10): 18-23.
- GAO Guangwei. Reform and development of mine rescue work in China[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(10): 18-23.
- [ 7 ] 于永政, 朱大浦, 王浩, 等. 基于事故后果分析的煤矿应急演练平台设计[J]. *工业安全与环保*, 2023, 49(4): 55-58.
- YU Yongzheng, ZHU Dafu, WANG Hao, et al. Design of coal mine emergency drill platform based on accident consequence analysis[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2023, 49(4): 55-58.
- [ 8 ] 刘海涛, 熊浩浩, 郝传波, 等. 演化博弈下煤矿事故的应急救援能力建设及仿真分析[J]. *黑龙江科技大学学报*, 2021, 31(5): 554-561.
- LIU Haitao, XIONG Haohao, HAO Chuanbo, et al. Construction and simulation analysis of emergency rescue capability for coal mine accidents under evolutionary game theory[J]. *Journal of Heilongjiang University of Science and Technology*, 2021, 31(5): 554-561.
- [ 9 ] 刘庆修, 田宏亮, 田东庄, 等. 载人救援提升装备卷扬系统建模与仿真研究[J]. *煤矿机械*, 2022, 43(1): 38-41.
- LIU Qingxiu, TIAN Hongliang, WANG Dongzhuang, et al. Modeling and simulation research on the hoisting system of manned rescue equipment[J]. *Coal Mine Machinery*, 2022, 43(1): 38-41.
- [ 10 ] 朱兴林, 罗明华, 张海峰, 等. 基于自监督学习方法 SwAV 实现煤矿场景目标检测[J]. *自动化与仪器仪表*, 2023(4): 39-42, 48.
- ZHU Xinglin, LUO Minghua, ZHANG Haifeng, et al. Implementation of coal mine scene object detection based on self supervised learning method SwAV[J]. *Automation & Instrumentation*, 2023(4): 39-42, 48.
- [ 11 ] 段碧英, 柴肇云, 辛子朋, 等. 基于改进 A\* 算法的矿用机器人救援路径规划及仿真分析[J]. *太原理工大学学报*, 2024, 55(2): 231-241.
- DUAN Biying, CHAI Zhaoyun, XIN Zipeng, et al. Planning and simulation analysis of rescue path for mining robots based on improved A\* algorithm[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2024, 55(2): 231-241.
- [ 12 ] WEN H, LIU S, ZHENG X, et al. The digital twins for mine site rescue environment: application framework and key technologies[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024(186): 176-188.
- [ 13 ] LI M, ZHU H, YOU S, et al. Efficient laser-based 3D SLAM for coal mine rescue robots[J]. *IEEE Access*, 2019(7): 14124-14138.