

基于层次分析法的广西平桂区地质灾害特征及风险性评价

陆铭禹¹ 余何^{1,2*} 李继金³ 江思义⁴ 慕志盈¹ 罗文江¹

1. 桂林理工大学地球科学学院 广西 桂林 541006

2. 贺州学院地质实验室 广西 贺州 542899

3. 广西智新技术咨询服务有限责任公司 广西 贺州 542800

4. 广西壮族自治区地质环境监测站 广西 南宁 530029

摘要: 本文基于层次分析法,以广西平桂区为研究对象,总结了平桂区地质灾害的形成条件、类型分布与发育规律,并通过野外调查、层次分析和矩阵分析,构建了“易发性-危险性”评价体系,并提出了分区分类的防治对策。研究表明,平桂区地质灾害以崩塌、滑坡、岩溶地面塌陷为主,其中90%以上为小型灾害,空间分布受地形地貌、地层岩性、地质构造及人类工程活动的显著影响;平桂区可划分为高易发区、中等易发区、低易发区和非易发区4个不同等级易发区及其12个亚区和高风险区、中风险区、低风险区等3个不同等级的风险区,实现了对平桂区灾害风险的量化与空间化表达。本研究不仅为平桂区地质灾害精准防控提供了科学依据,也为类似地质条件区域的灾害风险管理提供了参考。

关键词: 地质灾害特征; 层次分析法; 风险性评价; 易发性分区; 防治对策

0 前言

地质灾害作为全球山区发展面临的重大环境挑战,其形成机理与风险管控始终是地学领域的重要课题。随着气候变化背景下极端降雨事件频发,以及人类工程活动持续加剧,广西平桂区的地质灾害呈现出突发性增强、链生性凸显的新特征,迫切需要开展更加精细化的区域风险评价研究。

在理论方法层面,国内外研究已形成相对完整的体系。从QuynhDuyBui对滑坡灾害的研究^[1],到杨圣桑团队对滑坡动态的敏感性评估^[2],再到蒙晓等人探索的乡镇尺度风险评价框架^[3],研究方法正从宏观区划向精准管控深化。特别是针对岩溶地区的地质灾害研究,已逐步揭示地下水动态与地面塌陷的耦合机制,为灾害防治提供了重要理论基础。选择广西贺州市平桂区作为研究对象具有典型意义,该区地处桂粤湘三省交界,既是产业转移的重要承载区,又面临复杂地质环境与频繁人类活动的双重

压力。多期构造运动塑造了丰富的地貌格局,灰岩与碎屑岩广泛分布,强烈的风化作用与充沛的降雨为灾害发育提供了条件。据统计,区内已发现399处灾害点,其中93.2%为小型灾害,呈现出“规模小、分布广、危害大”的显著特点^[4]。

但是在当前研究多局限于单点排查,缺乏对区域灾害规律的系统梳理,难以满足全域防灾减灾的需求。针对广西平桂区相对于已有区域或类似岩溶区研究,本文以层次分析法为基础创新性地根据当地不同地质灾害因子来构建风险矩阵,利用“易发性-危险性-风险性”三级评价体系,通过综合运用GIS空间分析,旨在实现从隐患识别到风险管控的跨越。本研究致力于为平桂区地质灾害防治提供科学依据,关注灾害形成的自然机理,注重人类活动的影响评估,并为类似地质条件区域的风险管理提供参考^[5]。

1 研究区地质灾害特征

1.1 研究区地质环境条件

平桂区地质灾害的发育受多重地质环境因素控制,其形成机制是地形地貌、地层岩性、地质构造及地下水等要素长期耦合作用的结果。该区经历多期构造运动,形成了构造侵蚀地貌、岩溶地貌等多样化的地貌单元^[6]。区内北部位于萌渚岭与大桂山之间,地表切割强烈、地形破碎;南部受大桂山控制,呈现南高北低的地势格局。这种地形分异直接控制了灾害的空间分布特征。区内各地貌发育的情况见表1、图1。

项目基金: 贺州市科学研究与计划开发计划项目(贺科技2024143、贺科技2024141、贺科技2024104)资助。

第一作者简介: 陆铭禹(2002年—),男,汉族,硕士研究生,主要从事工程地质与地质灾害评价方面研究。
E-mail:1436112592@qq.com

通信作者简介: 余何(1983年—),男,汉族,博士,副研究员,主要从事矿床地质与工程地质方面研究。
E-mail:yuhe@hzxy.edu.cn。

表1平桂区各地貌单元内地质灾害发育情况

地貌单元划分		分布情况		地质灾害发育情况		
		总面积(km ²)	在区内比例(%)	灾害点数量(处)	占灾害总数比例(%)	面密度(处/km ²)
构造 侵蚀 地貌(I)	中低山峰脊峡谷(I ₁)	539.37	26.68	98	24.56	0.182
	低山垄脊谷地(I ₂)	553.98	27.40	110	27.57	0.199
	丘陵垣丘宽谷(I ₃)	96.83	4.79	5	1.25	0.052
侵蚀剥蚀地 貌(II)	低中山隆丘谷地 (II ₁)	220.61	10.91	10	2.51	0.045
构造 溶蚀 地貌 (III)	峰丛洼地谷地(III ₁)	84.26	4.17	23	5.76	0.273
	峰林谷地(III ₂)	141.81	7.01	33	8.27	0.233
	残丘坡地(III ₃)	87.65	4.33	4	1.00	0.046
	孤峰平原(III ₄)	102.35	5.06	33	8.27	0.322
	丘陵垄岗谷地(III ₅)	29.71	1.47	3	0.75	0.101
侵蚀 堆积地(IV)	河谷阶地(IV ₁)	134.76	6.66	67	16.79	0.497
	洪积岗丘坡地(IV ₂)	30.67	1.52	13	3.26	0.424
合计		2022	100	399	100	0.197

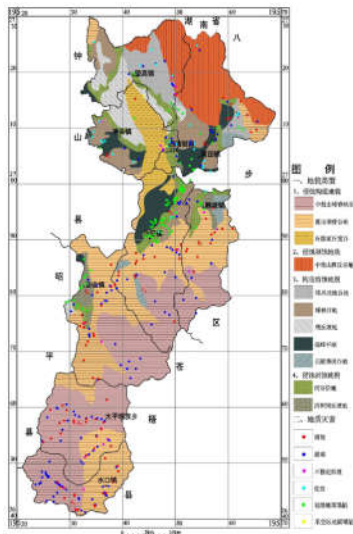


图1平桂区不同地貌区地质灾害发育分布图

区内地层岩性主要有灰岩、碎屑岩和侵入岩等，这些岩石强度较高，稳定性相对较好，不容易发生崩塌和滑坡，但是在地质灾害的形成条件里，这些岩石经历过风化作用和裂隙切割后，强度会相对于之前明显下降，为后面可能发生的滑坡、崩塌和不稳定斜坡等地质灾害埋下了隐患^[7]。区内的碎屑岩和侵入岩容易风化后形成厚度较大的残坡积土层，很容易风化导致岩性强度降低形成滑坡、崩塌和不稳定斜坡等地质灾害。

区内地质构造对地质灾害的控制和影响主要表象为斜坡的风化卸荷作用和地质灾害沿构造带线性展布。其中区内的控制斜坡风化卸荷中断裂、向斜轴等构造带降低坡体完整性，易风化形成松散层，区内灾害多沿构造带线状分布。区内的控制岩溶裂隙发育中断层、褶皱轴部裂隙发育，利于溶蚀，溶洞、泉群多沿构造带分布，岩溶裂隙改变坡体结构，成为地质灾害的部分形成条件^[8]。

基于地层岩性、赋存条件及水动力特征，平桂区地下水可划分为松散岩类孔隙水、碎屑岩类裂隙孔隙水、碳酸盐岩岩溶水、基岩裂隙水四大类，其动态变化与作用机制是诱发或控制平桂区地质灾害的关键因素^[9]。区内降雨量普遍较大，降雨入渗转化的临时性地下水，沿岩土界面、强弱风化界面及层面面渗流，易在其土地形成软弱夹层，降雨与地下水耦合作用，诱发地质灾害^[10]。

1.2 研究区地质灾害类型及其特征

在平桂区现状发育的阶段内，地质灾害类型主要有滑坡、不稳定斜坡、崩塌、危岩、岩溶地面塌陷5种类型(表2)。

表2平桂区已发生地质灾害一览表

灾种	滑坡	不稳定斜坡	崩塌	危岩	岩溶地面塌陷	合计
数量	94	18	156	31	98	399
比例	23.6%	4.5%	39.1%	7.8%	24.6%	100%

由表2可知,平桂区内地质灾害以崩塌、岩溶地面塌陷和滑坡为主,次为危岩和不稳定斜坡。其主要特征如下:

① 崩塌,呈现“山区集中、沿线聚集”的特征,水口镇、大平瑶族乡、沙田镇等山区乡镇崩塌数量最多,这些区域居民多依山建房,大量削坡形成高陡边坡,同时山区公路切坡段长,进一步增加了崩塌发生概率^[11]。地貌上,中低山峰脊峡谷、低山垄脊谷地等基岩裸露或土层较薄的区域,崩塌更为密集,而岩溶峰林谷地、孤峰平原等地形相对平缓区域,因坡体坡度小,崩塌较少出现。

② 岩溶地面塌陷,在平桂区具有显著的“区域聚集性”,以沙田镇为核心分布区,该镇的岩溶平原、河谷阶地地带,塌陷数量占全区总量的六成以上,且多呈片状或带状分布。这些区域地表为第四系土层覆盖,地下灰岩岩溶发育,地下水活动频繁,是塌陷形成的理想条件。除沙田镇外,黄田镇、公会镇等乡镇的岩溶区也有少量塌陷分布,但多呈零散状^[12]。

③ 滑坡,在平桂区内发育数量较多,其形成与人类活动及自然条件的叠加作用密切相关。人工因素是主要诱因,居民建房或公路修建时的削坡行为,会破坏坡体原有的应力平衡,形成高陡临空面,一旦遭遇暴雨,雨水入渗会软化坡体土层、增加坡体自重,最终引发“牵引式”滑动,主要分布在南部水口乡、大平瑶族乡等区域^[13]。

④ 区内危岩和不稳定斜坡在已发生地质灾害中占比较少,但潜在风险突出,其形成以人工因素为主导。危岩多分布在山体中上部,部分直接位于居民点上方的陡崖处,一旦崩落会直接冲击下方房屋,主要分布在平桂区羊头镇西北部、黄田镇西部、望高镇西部等孤立灰岩分布区。不稳定斜坡主要由于山区村庄屋后切坡形成,部分村庄几乎每栋房屋后方都存在此类隐患,如大平瑶族乡、鹅塘镇、望高镇等地。此外,公路沿线,尤其是穿越山区的公路切坡段,也分布有较多不稳定斜坡^[14]。

2 地质灾害风险性评价

根据地质结构体可能发生地质灾害的程度,将贺州市平桂区内的地质灾害划分为易发性和危险性。易发性反映区域内地质灾害活动程度的高低,危险性是以易发性为基础,结合社会属性来体现灾害易发程度、破坏程度及对人民生命和财产威胁程度的指标。

2.1 评价方法

层次分析法(AHP)在地质灾害风险性评价中应用广泛^[15]。采用层次分析法有如下优点:一是适用于离散模型,尤其适用于无结构特性的系统评价以及多目标、多准则、多时期的系统评价;二是步骤简单明确,容易被了解和掌握;三是结合专家打分法,更加直观、简便。

层次分析法部分对判断矩阵的构建过程步骤如下:

1. 根据研究区地质环境条件,并参考经验和规范,筛选出评价因子,再通过专家打分法确定研究区地质灾害易发性分区评价因子。

2. 用地质调查成果,通过MapGIS按各因子的影响程度大小对研究区进行分区,分区按影响程度大小最多分4类区,最少分2类区,并对区按因子的影响程度由小到大赋单因子评价价值($Y_i = 0、1、2、3$),把打分结果对各区进行参数赋属性。

3 利用层次分析法确定各因子权重值(W_i)。

4. 在GIS平台上进行多因素“叠加分析(overlay)”,将平桂区按各参评因素划分为地质灾害易发性各异的多个分区。

5. 依据各分区单因素评价得分及各因素权重值,采用加权的方法计算各分区地质灾害易发性综合评价价值(R)。公式如下:

$$R = \sum_{i=1}^n W_i Y_i$$

式中: R ——易发性指数; W_i ——各影响因子的权重值; Y_i ——对应影响因子的判别分值。

利用MapGIS空间分析功能,将各因子的分区图按因子的权重进行叠加,得到叠加后研究区的易发性指数,将得到的易发性指数合理分为4段,利用MapGIS属性赋参数,将4段值分别赋予4种不同颜色,实现可视化,得到易发性分区图,并进行地质灾害易发分区。

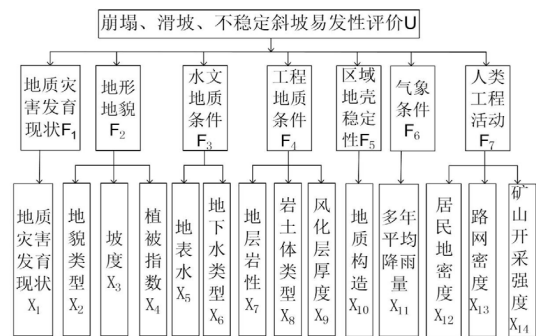


图2崩塌、滑坡、不稳定斜坡易发性分区评价指标体系

通过该公式实现易发性的定量化表达。易发性分区可视化与划分借助MapGIS空间分析功能,将各评价因子分区图按其权重进行叠加运算,获取研究区全域的易发性指数。随后将易发性指数合理划分为4个等级,通过MapGIS属性参数赋值功能为各等级赋予差异化颜色以实现可视化表达,最终生成平桂区地质灾害易发性分区图,完成易发性分区的精准划分^[17]。

对于地质灾害而言,危害度体现灾害自然属性,是

灾害规模与发生频率的函数。易损度体现灾害社会属性，是载体包括人口、财产、经济、环境的函数。风险度作为灾害自然属性与社会属性的综合表征，即危害度与易损度的乘积，其数字表达式为：

$$\text{risk (风险度)} = \text{hazard (危害度)} \times \text{vulnerability (易损度)}。$$

地质灾害风险评估主要在GIS平台完成，基于危害度与易损度的分区赋值结果，通过矩阵叠加运算，最终生成风险性分区^[16]。

2.2 风险矩阵构建

根据崩塌、滑坡、不稳定斜坡易发性的影响因素，采用层次分析法（AHP）体现各因素间影响强弱，并通过逐项对各层因子与上一层目标的相对重要性进行两两比较，形成标度值（表3）。对各目标层进行相对重要性

排序并赋权重（ W_i ），构建崩塌、滑坡、不稳定斜坡易发性分区因子判别矩阵（表4）。对判别矩阵进行一致性检验，根据公式计算 $R = 0.001 < 0.1$ ，说明赋权重（ W_i ）是合理的。

表3 判断矩阵的标度及含义

标度	含义
1	表示两个因素相比，具有相同重要性
3	表示两个因素相比，前者比后者稍重要
5	表示两个因素相比，前者比后者明显重要
7	表示两个因素相比，前者比后者强烈重要
9	表示两个因素相比，前者比后者极端重要
2、4、6、8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若因素i与因素j的重要性之比为 a_{ij} ，那么因素j与因素i的重要性之比 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

表4 崩塌、滑坡、不稳定斜坡易发性分区因子判别矩阵

目标层 U	地质灾害发育现状 F_1	地形地貌 F_2	水文地质条件 F_3	工程地质条件 F_4	区域地壳稳定性 F_5	气象条件 F_6	人类工程活动 F_7	权重 W_i
地质灾害发育现状 F_1	1	2	3	3	2	4	1	0.26
地形地貌 F_2	1/2	1	3/2	3/2	1	1	1/2	0.12
水文地质条件 F_3	1/3	2/3	1	1	2/3	1	1/3	0.08
工程地质条件 F_4	1/3	2/3	1	1	2/3	1	1/3	0.08
区域地壳稳定性 F_5	1/2	1	3/2	3/2	1	3/2	1/2	0.12
气象条件 F_6	1/4	1	1	1	2/3	1	1/4	0.08
人类工程活动 F_7	1	2	3	3	2	4	1	0.26

2.3 易发区风险性评价

基于层次分析、风险矩阵分析，并结合平桂区野外调查情况评价结果，将平桂区划分为高易发区、中等易发区、低易发区和非易发区4个不同等级及其12个亚区（图2），各区特征及评价如下：

高易发区（A区）：包括 A_1 、 A_2 、 A_3 共3个亚区，总面积为742.85 km^2 ，占调查区总面积的36.74%。其中， A_1 高易发区面积184.82 km^2 ，发育地质灾害57处，发育密度0.308处/ km^2 ， A_2 高易发区面积249.00 km^2 ，发育地质灾害157处，发育密度0.631处/ km^2 ， A_3 高易发区面积309.03 km^2 ，发育地质灾害110处，发育密度0.309处/ km^2 。

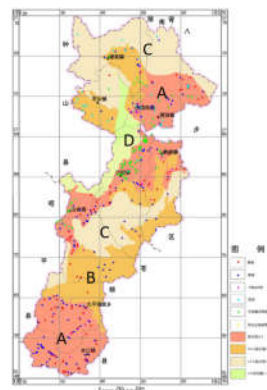


图3 平桂区地质灾害易发程度分区图

中等易发区(B区):包括B₁、B₂、B₃、B₄共4个亚区,总面积为536.02km²,占调查区总面积的26.51%。其中,B₁中等易发区面积92.80km²,发育地质灾害24处,发育密度0.258处/km²,B₂中等易发区面积70.78km²,发育地质灾害12处,发育密度0.170处/km²,B₃中等易发区面积76.78km²,发育地质灾害9处,发育密度0.117处/km²,B₄中等易发区面积295.65km²,发育地质灾害20处、发育密度0.068处/km²。

低易发区(C区):包括C₁、C₂、C₃、C₄共4个地质灾害低易发亚区,总面积为698.35km²,占调查区总面积的34.54%。其中,C₁低易发区面积370.55km²,发育地质灾害8处,发育密度0.022处/km²,C₂低易发区面积87.39km²,发育地质灾害0处,C₃低易发区面积215.8km²,发育地质灾害2处,发育密度0.009处/km²,C₄低易发区面积24.61km²,发育地质灾害0处。

非易发区(D区):包括D₁共1个地质灾害非易发亚区,总面积为44.79km²,占调查区总面积的2.21%,未有地质灾害发育。

2.4 危险区风险性评价

危险性分区是考虑确定有地质灾害情况下,致灾程度大小的分区^[18]。以易发区为基础,根据风险评价模型($R=H \times V$),对危险度(易发程度)计算结果与易损性分区赋值结果进行矩阵叠加计算(图3),根据计算结果将平桂区风险性划分为高风险区(A区)、中风险区(B区)、低风险区(C区)三个级别^[18],各分区分布情况见图4。



图4 地质灾害风险矩阵叠加图

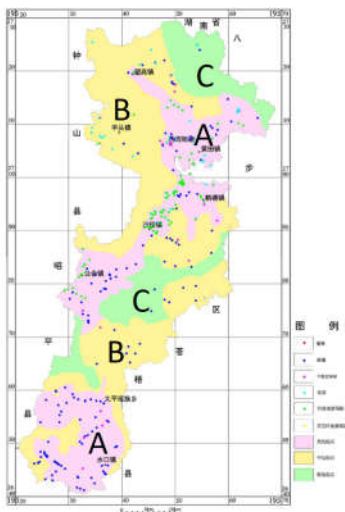


图5 平桂区地质灾害危险性评价分区图

平桂区三个危险区的特征及评价如下:

高风险区(A区):包含望高-公会高风险区(I1)和水口高风险区(I2),该分布面积约712.92km²,约占工作区面积的35.26%,主要分布于西湾街道、黄田镇、沙田镇、太平瑶族乡、水口镇等地。该区地貌特征为低山丘陵地貌区,为地质灾害高易发区,区内现有共有地质灾害215处,其中崩塌85处,滑坡46处,6处不稳定斜坡,岩溶地面塌陷65处,危岩12处,1处采空地面塌陷,承灾对象主要为居民区、行政办公区、商业区、医疗区及教育用地,威胁道路主要为207国道、323国道、201省道、203省道、305省道、桂梧高速公路、广贺高速公路、贵广高速铁路、洛湛铁路。

中危险区(B区):包含望高-沙田中风险区(II1)、鹅塘-沙田中风险区(II2)、鹅塘-公会中风险区(II3)和大平中风险区(II4),该分布面积约960.44km²,约占工作区面积的47.50%,主要分布于望高镇、羊头镇、鹅塘镇、公会镇、太平瑶族乡等地,区内现有地质灾害180处,其中崩塌69处,滑坡48处,不稳定斜坡11处,危岩18处,岩溶地面塌陷33处,采空地面塌陷1处,承灾对象主要为乡镇居民楼、工业用地及物流仓储用地,威胁道路主要为湘桂铁路、南友高速公路以及乡镇道路。

危险区(C区):包含姑婆山低风险区(I)、沙田-公会低风险区(III2)、大平低风险区(II3),该分布面积约348.63km²,约占工作区面积的17.24%,主要分布在公会镇东北部,黄田镇北西姑婆山一带、太平瑶族乡北部等地区,区内现有地质灾害4处,其中崩塌2处,危岩1处,滑坡1处,承灾对象主要为分散农户区、农业生产用地,威胁道路主要乡道、村道及机耕道。

3 防治对策

平桂区地质灾害以滑坡、崩塌、岩溶地面塌陷等类型为主,其发育受地形地貌、地层岩性、地质构造及地下水动态等多重因素控制,与人类工程活动共同加剧了灾害风险。因此,防治工作需坚持“分区分类、精准施策”的原则,突出工程治理与生态修复相结合、监测预警与风险管理相协调的综合思路。

在具体防治策略上,应基于易发性和危险性分区结果,对不同类型灾害采取差异化措施。对于地质因子划分的高易发区及高风险区,防治措施应侧重于严格的工程治理、专业监测预警和受威胁居民的搬迁避让;对于中易发区和中风险区,则应强化以群测群防为主的监测体系和合理的工程防护;对于低易发区和低风险区,重点则在于地质灾害危险性评估、防灾知识宣传和生态保护。通过这种“分区分类、精准施策”的修改,使防治

对策从前文的定量评价结果中有机衍生,增强方案的科学性和可操作性。

对于分布广泛且与人类活动密切相关的滑坡灾害,重点在于规范边坡工程行为,加强坡体支护与排水设施建设,同时利用监测技术对高风险区进行动态跟踪。崩塌灾害多发生于陡峭边坡,需结合清坡、固岩与防护网工程,减少崩落物对居民点和交通线的威胁。岩溶地面塌陷的防治则核心在于调控地下水动态,通过水位监测与物探手段识别潜在土洞,对已塌陷区域采取回填与生态修复措施。此外,不稳定斜坡和危岩的防控需注重裂缝加固与隔离保护,降低其突发性威胁。

通过层次分析法、风险矩阵等工具,量化评价因子权重,明确不同区域的防控优先级。在管理层面,应将地质灾害防治纳入区域发展规划,与乡村振兴、生态保护等政策相结合,推动高风险区居民搬迁避让与产业布局优化。同时,加强基层防灾能力建设,完善群测群防网络,提升公众风险意识与自救能力。未来研究可进一步聚焦降雨与灾害的动态耦合机制,优化预警模型参数,探索生态工程与传统治理措施的协同效应,从而构建“人防+技防+工程防”的多维防控体系。

4 结语

本研究以广西贺州市平桂区为研究对象,以基于层次分析法系统开展了地质灾害特征分析及风险性评价,取得以下成果:

① 研究显示,该地区地质灾害类型以崩塌、岩溶地面塌陷和滑坡为主,其中规模较小的灾害点占比超过90%。

② 基于野外实地调查、层次分析及矩阵分析,将平桂区精准划分为高、中、低、非等4个不同级别的易发区及其12个地亚区,和高风险区、中风险区、低风险区等3个不同等级的风险区,实现了对平桂区灾害风险的量化与空间化表达。

③ 基于上述评价结果,研究提出了“分区分类、精准施策”的防治对策框架。

参考文献:

[1] Bui D Q, Ha H, Hoang T, et al. Deep neural network-based landslide hazard assessment and infrastructure exposure mapping: a case study of National Highway 279, Bac Kan province, Vietnam[J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2025, 10(12): 564-564.

[2] 杨圣桑, 郭攀, 贾贺, 等. 时频分析与机器学习模型耦合的滑坡动态敏感性评估[J]. 遥感技术与应用, 2025, 40(03):

636-646.

[3] 蒙晓, 李永红, 陈建平, 等. 乡镇(街道)滑坡地质灾害风险性评价方法研究——以安康市石泉县城关镇为例[J/OL]. 中国水土保持科学(中英文), 1-21[2025-12-08].

[4] 李智毅. 中国地质灾害的成因和活动特点[J]. 地质灾害与防治, 1990, (04): 24-30.

[5] 王自高. 西南水利水电工程地质灾害问题与预防措施研究[M]. 中国水利水电出版社: 201308: 277.

[6] 翟建平. 矿山开采区周边的地质灾害风险性评价研究[J]. 世界有色金属, 2020, (12): 226-227.

[7] 江思义, 刘昶, 邹仁辉, 等. 基于GIS的贺州市平桂区地质灾害气象预警研究[J]. 资源信息与工程, 2022, 37(05): 79-82.

[8] 尤永春, 郭改梅, 郭鹏程, 等. 基于层次分析法的废弃矿山生态环境评价模式研究——以兴宁市铁山嶂金属矿山为例[J/OL]. 矿产勘查, 1-7.

[9] 邹仁辉, 江思义, 黄翊, 等. 地质灾害专业监测有效预报案例分析——以贺州市平桂区水口镇水车村禄冲一组滑坡为例[J]. 资源信息与工程, 2024, 39(04): 113-117.

[10] Sajwan A, Mhaski S, Ramana V G. Modelling rainfall-induced seepage, internal erosion, and slope instability via a deterministic multi-phase SPH framework[J]. Computational Particle Mechanics, 2025, (prepublish): 1-25.

[11] 李勇峰, 杨志波, 刘玉山, 等. 高速公路建设用地的地质灾害危险性评估的理论与实践初探[J]. 湖北地矿, 2002, (04): 186-190.

[12] 闫昊, 袁立群, 殷志伟, 等. 地震作用下滑坡灾害研究综述[J]. 内江科技, 2025, 46(09): 91-92+95.

[13] 殷霞, 季皓宇, 贾利娟, 等. 持续极端暴雨影响下高陡边坡失稳及滑坡治理[J/OL]. 中国钨业, 1-14[2025-12-08].

[14] 舒黔, 陈治安. 不稳定斜坡稳定性及防治策略探究[J]. 石材, 2025, (09): 46-48+51.

[15] 何德顺, 江思义, 邹仁辉, 等. 桂东北平桂区松木滑坡稳定性分析及防治技术研究[J]. 西部探矿工程, 2025, 37(07): 13-15.

[16] 吴敏. 基于AHP和综合指数法的地质灾害风险评价——以泉州市洛江区为例[J]. 能源与环境, 2025, (05): 107-111.

[17] 曹攀, 陈婕, 齐小帅, 等. 多种机器学习模型的花岗岩区崩塌滑坡易发性评价[J/OL]. 安全与环境学报, 1-15[2025-12-08].

[18] 王小浩, 王梦瑶, 王滔, 等. 基于加权综合指数法集镇地质灾害易发性评价研究——以袁家庄街道为例[J]. 地下水, 2025, 47(05): 137-140.