

# 基于矩阵判别法的江西省上犹县崩岗危险性评价

张晶鑫<sup>1,2,3</sup>, 程冬兵<sup>1</sup>, 郭飞<sup>3</sup>, 赵元凌<sup>2</sup>, 沈盛或<sup>2</sup>, 刘烈浓<sup>4</sup>

(1.长江水利委员会汉江流域治理保护中心, 湖北 武汉 430010; 2.长江水利委员会长江科学院, 湖北 武汉 430010; 3.三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 4.上犹县水利局, 江西 上犹 341200)

**摘要:** [目的] 调查和研究江西省上犹县崩岗特征, 并对其危险性进行评价, 为该区崩岗治理优先级决策提供数据支撑和科学依据。[方法] 江西省上犹县为研究区, 在全面调查崩岗及其危害特征的基础上, 根据崩岗危险发生“三要素”原理, 选择崩岗规模、发育状态等作为崩岗主体危险潜能指标, 选择房屋、道路、耕园地等危害受体并结合危害距离作为危害程度指标, 构建基于矩阵判别法的崩岗危险性评价指标体系, 探讨基于矩阵判别法评价崩岗危险性的准确性。[结果] ①上犹县共有崩岗 227 个, 其中已治理崩岗 25 个, 未治理崩岗 202 个, 发育状态以活跃型为主, 规模以大型居多, 形态类型以瓢形为主, 崩岗危害对象以耕园地为主, 危害距离以小于 10 m 为主。②上犹县内, 无、小、中、大、极大 5 个危险等级的崩岗占崩岗数量的比例分别为 47.5%, 14.9%, 15.8%, 14.9% 和 6.9%, 现场复核验证准确度达到 80%。③在上犹县, 大和极大危险等级的崩岗主要分布于营前镇与水岩乡, 少部分位于梅水乡与黄埠镇, 需优先治理。[结论] 矩阵判别法具有较好的准确性, 且指标易获取, 方法易操作, 适用于对崩岗危险性的评价。

**关键词:** 崩岗; 调查; 危险性; 矩阵判别法; 江西省上犹县

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2025)01-0158-10

中图分类号: P694, S157.1

**文献参数:** 张晶鑫, 程冬兵, 郭飞, 等. 基于矩阵判别法的江西省上犹县崩岗危险性评价[J]. 水土保持通报, 2025, 45(1): 158-167. Zhang Jingxin, Cheng Dongbing, Guo Fei, et al. Risk evaluation of Benggang in Shangyou County, Jiangxi Province based on matrix discriminant method [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(1): 158-167. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.017; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.01.017.

## Risk evaluation of Benggang in Shangyou County, Jiangxi Province based on matrix discriminant method

Zhang Jingxin<sup>1,2,3</sup>, Cheng Dongbing<sup>1</sup>, Guo Fei<sup>3</sup>, Zhao Yuanling<sup>2</sup>, Shen Shengyu<sup>2</sup>, Liu Lienong<sup>4</sup>

(1. Hanjiang River Basin Management and Protection Center of Yangtze River Water

Resources Commission, Wuhan, Hubei 430010, China; 2. Changjiang River Scientific Research Institute,

Wuhan, Hubei 430010, China; 3. Key Laboratory of Geological Hazards in the Three Gorges Reservoir Area,

Ministry of Education, Yichang, Hubei 443003, China; 4. Shangyou County Water Conservancy Bureau, Shangyou, Jiangxi 341200)

**Abstract:** [Objective] The distribution characteristics of Benggang in Shangyou County, Jiangxi Province was analyzed, and its risk was evaluated, so as to provide data support and scientific basis for priority decision-making of Benggang governance. [Methods] Shangyou County, Jiangxi Province was taken as the research area. Based on the comprehensive investigation of Benggang and its hazard characteristics, according to the principle of three elements of Benggang risk, the scale and development status of Benggang were selected as the main risk potential indicators of the main body of Benggang. Hazard receptors such as houses, roads, and farmland were selected and combined with the hazard distance as the hazard degree index. The risk evaluation index system of Benggang based on the matrix discriminant method was constructed to explore the accuracy of this method in evaluating the Benggang risk. [Results] ① There were 227 Benggang in Shangyou County, of which 25 had been controlled and 202 had not been controlled. The type of

收稿日期: 2024-08-08

修回日期: 2024-11-15

采用日期: 2024-11-18

资助项目: 国家自然科学基金项目“不同降雨情景下赣南花岗岩区崩岗侵蚀易发性空间预测研究”(42107489); 水利部重大科技项目“水土流失综合治理智能管理模型研发”(CKSD2022735/TB)

第一作者: 张晶鑫(2000—), 女(汉族), 湖北省襄阳市人, 硕士研究生, 研究方向为崩岗防治。Email: 1792978848@qq.com。

通信作者: 程冬兵(1979—), 男(汉族), 江西省乐平市人, 博士, 正高级工程师, 主要从事水土保持研究。Email: xiao2005zhu@163.com。

development status was mostly active, scale was mostly large, morphological type was mainly dipper, hazard object was mainly farmland, and hazard distance was mainly less than 10 m. ② In Shangyou County, the proportions of the five risk levels of no, small, medium, large, and great to the number of Benggang was 47.5%, 14.9%, 15.8%, 14.9% and 6.9%, respectively, and the accuracy of on-site verification reached 80%. ③ The Benggang of large and extremely dangerous levels in Shangyou County was mainly distributed in Yingqian Town and Shuiyan Township, and a small part was located in Meishui Township and Huangbu Town, which needs priority treatment. [Conclusion] The matrix discriminant method proposed in this study is accurate and the indicators are easy to obtain. The method is easy to operate and is applicable to the evaluation of the risk of Benggang.

**Keywords:** Benggang; investigation; risk; matrix discriminant method; Shangyou County, Jiangxi Province

崩岗是中国南方水土流失的一种特殊类型,广泛分布于南方红壤区<sup>[1]</sup>,具有爆发性强、发展速度快、侵蚀量大等特点<sup>[2]</sup>,威胁着南方红壤区的生态安全、防洪与人居安全、粮食安全、国土安全,对地方生态与社会经济可持续发展造成了影响<sup>[3-4]</sup>。近几十年来众多单位与学者围绕崩岗的发展过程<sup>[5-6]</sup>、侵蚀机理<sup>[7-8]</sup>及治理措施等<sup>[9-10]</sup>方面开展了大量研究和实践工作,为崩岗的防治提供了重要的理论依据和技术指导。由于崩岗点多面广,相比一般的水土流失更具威胁性和危害性,致使其治理难度大,且治理成本非常高,据第一次全国水利普查江西省水土保持情况普查数据,江西省水土流失总面积  $2.65 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占该省土地总面积的 15.87%,占该省山地面积的 26.34%,在南方红壤区八省中居第 3 位。其中江西省有崩岗 4.81 万处,崩岗面积 206.75  $\text{km}^2$ ,占该省水土流失总面积的 0.78%,是中国崩岗侵蚀最严重的省份之一,在南方崩岗侵蚀区具有典型代表性<sup>[11]</sup>。根据目前国家对崩岗治理的投入水平,短期内全面治理不太符合当前国情。因此,通过科学的研判方法,按照轻重缓急的原则,采取分步实施、分类施策,是当前崩岗治理规划安排的必然选择和迫切需求。近年来,以程冬兵<sup>[12]</sup>、郭飞等<sup>[13-14]</sup>为代表的学者通过相关因子分析,探索提出多种评估方法,开展了较多关于区域上的崩岗易发性<sup>[15-16]</sup>及风险等级评价<sup>[17-18]</sup>的研究,提出了一些关于评价指标和评价方法的建议,对指导区域预防崩岗发生具有参考意义。然而从危险性角度对崩岗个体的研究却鲜有报道,崩岗危险性是指具有一定潜在危险的崩岗因为崩塌及水流挟沙对下游受体可能造成的危害程度<sup>[19]</sup>。若能以解决现有崩岗治理优先级排序为切入点,通过开展崩岗危险性评价,在查明崩岗潜在危害和危害程度的基础上,结合数学方法建立评价模型,客观评价崩岗危险性,依据崩岗危险性等级确定崩岗治理优先级,分步实施,对规避或减轻区域崩岗引发的各种生态问题和灾害具有重要意义<sup>[20-21]</sup>。因此,本文以南方崩岗典型区域江西省上犹县为研究

区,在上犹县崩岗进行全面调查的基础上,探讨基于矩阵判别法评价崩岗危险性的适用性和准确性,为崩岗危险性评价方法和上犹县崩岗治理的分步实施提供科学参考。

## 1 研究区概况

上犹县位于江西省赣州市西部,赣江上游,东邻赣州市南康区,南连崇义县,西接湖南省桂东县,北界吉安市遂川县。辖 6 镇 8 乡,131 个行政村 16 个居委会,全县总面积 1 543  $\text{km}^2$ 。县内地貌东北、西北、西南为山地,东南部为丘陵、河谷盆地;地势西北高东南低;岩石类型多以花岗岩、花岗斑岩为主;气候为亚热带湿润季风气候区,温和湿润,年平均气温为 19.0  $^{\circ}\text{C}$ ,年平均降雨量为 1 448.1 mm,降雨量主要集中于 3—9 月;植被类型为亚热带常绿阔叶林,虽然森林覆盖率高,但生态系统较为薄弱,生态环境质量有待提高。在自然条件和人为不合理扰动双重作用下,上犹县是南方红壤区崩岗高易发区,区内崩岗普遍发育。

## 2 崩岗调查与研究方法

### 2.1 崩岗调查

在 2005 年崩岗调查数据库的基础上,依据程冬兵<sup>[1]</sup>提出的崩岗调查内容与方法,对上犹县崩岗进行了全面详细调查。采取人工现场调查和无人机航拍相结合,辅助必要的查阅历史资料等多种方法,详细调查上犹县崩岗数量、规模形态、发育状态、危险特征等内容和指标。经调查,上犹县现有崩岗 227 个(部分为崩岗群),其中已治理崩岗 25 个,未治理崩岗 202 个(本文中如未特别说明,崩岗均为未治理崩岗)。

### 2.2 研究方法

鉴于崩岗与崩塌有一定的相似性,尤其是表象特征、危险危害等方面,而崩塌危险性评价较为成熟,有专门的技术标准<sup>[22]</sup>,为崩岗危险性评价提供了重要参考。其中矩阵判别法是崩塌危险性评价最为普遍

采取的方法。矩阵判别法也叫风险矩阵法,是风险评价中较为常用的一种方法,是通过定义后果和可能性的范围,对风险进行展示和排序的工具<sup>[23]</sup>。其优点在于能够把复杂的问题流程化、规范化,且评价过程简洁明了,易于掌握,适用范围广<sup>[24]</sup>。本文根据实际现场调查情况,以崩岗危险性评价为切入点,围绕崩岗主体危险潜能、受体危害程度和危害距离等崩岗危害发生三要素,充分尊重自然禀赋条件,提出崩岗危险性评价方法。具体评价过程为基于矩阵判别法原理,针对崩岗特征复杂、危险性影响因素众多等特点,依据专家的经验与知识,以确定多种相关指标的重要性,作出相应划分,并筛选典型的崩岗及危害特征指标,结合崩岗主体的潜在危险等级和受体的危害程度评价,综合研判崩岗的危险等级,以此作划分崩岗治

理优先级和制定相应的管控措施依据。

2.2.1 崩岗潜在危险分级 崩岗自身规模大小及发育状态等要素,对崩岗潜在危险性至关重要。相对稳定型崩岗基本已停止发育,因此不具备潜在危险性,而较大规模同时又处于活跃中期的崩岗,潜在危险性非常大;当崩岗现状未过分水岭时,同时其所在山体规模较大时,随着时间的推移,崩岗将整个山体崩穿的潜力越大,潜在危险性等级也会随之提高。因此,崩岗潜在危险分级主要根据崩岗规模、发育状态、发育山体规模、是否过分水岭等要素,按无、小、中等、大、极大共 5 级划分。例如,如果崩岗规模是评价指标之一,可以根据崩岗规模的小型、中型、大型给出不同的等级,并对应着崩岗不同的发育状态,所处山体规模等相关指标进行评级(表 1)。

表 1 崩岗的潜在危害性分级

Table 1 Potential hazard classification of Benggang

潜在危险分级	发育状态					未过分水岭	发育山体规模		
	相对稳定型	活动型			小型		中型	大型	
		初期	中期	晚期					
崩岗规模	小型	无	小	中等	小	在原分级基础上提升一级	在原分级基础上降低一级	保持原分级	在原分级基础上提升一级
	中型	无	中等	大	中等				
	大型	无	大	极大	大				

2.2.2 崩岗危害程度分级 危害程度通常从经济损失、可能造成伤亡及环境影响等方面考虑,本文基于实际情况设置危害对象与危害距离两个指标。根据力学原理,同等作用下,距离越短,危害程度越大。崩岗危害对象包括房屋、道路、农田等,在一定的危害距离内,危害对象是房屋和道路时,危害程度相对较高,由于耕园地相对于房屋道路等,对居民的生命及财产安全的重要性相对偏低,因此在同样的危害距离内,危害程度会偏低。因此,崩岗危害程度分级主要根据危害对象重要性、危害距离,按无、小、中等、大、极大共 5 级划分(表 2)。

表 2 崩岗的危害程度分级

Table 2 Hazard degree classification of Benggang

危害程度分级		危害距离/m				
		0~10	10~20	20~30	30~100	>100
危害对象	房屋	极大	大	中等	小	无
	道路	大	大	中等	小	无
	耕园地	大	中等	小	无	无
	水利设施	大	中等	小	无	无
	其他	中等	小	无	无	无

2.2.3 崩岗危险等级 危险性等级评价主要从崩岗主体的潜在危险等级和受体的危害程度两方面进行

综合评估,由高到低分为极大、大、中、小、无共 5 个等级。潜在危险等级越高,危害程度越大,则崩岗危险等级越大;相反,崩岗危险等级则越小(如表 3 所示)。最后通过矩阵判别法进行危险评价,并制定相应等级标准进行比较与叠加,综合研判崩岗的危险等级。

表 3 崩岗的危险性分级

Table 3 Risk classification of Benggang

危险等级	危害程度				
	无	小	中等	大	极大
潜在危险	无	无	无	无	无
	小	无	小	小	小
	中等	无	小	中等	中等
	大	无	小	中等	大
	极大	无	小	中等	大

## 3 结果与分析

### 3.1 上犹县崩岗及其危害特征

#### 3.1.1 上犹县崩岗特征

(1) 崩岗特征。根据《南方红壤丘陵区水土流失综合治理技术标准(SL 657—2014)》崩岗规模划分标

准<sup>[25]</sup>,从崩岗规模、崩岗形态、发育状态等方面对崩岗特征进行分析(表 4)。在崩岗规模方面,该区崩岗以大型为主,且主要分布在水岩乡与营前镇,大型崩岗数量占研究区现有崩岗总量的 48%,其次为中型与小型,分别占总量的 36.6%与 15.4%。在崩岗形态方面,上犹县崩岗形态类型齐全,以瓢形崩岗为主,占研究区现有崩岗总量的 48.5%,其次为条形与混合形崩岗,分别占崩岗总量的 21.3%,12.9%;最后为弧形与爪形崩岗,分别占崩岗总量的 7.4%,4.5%。此外还有部分崩穿严重难以细分的崩岗群,占崩岗总量的 5.4%。其中,条形崩岗规模都偏小,瓢形与混合形多为大规模崩岗。在崩岗发育状态方面,上犹县崩岗总体上较为活跃。活跃型崩岗有 158 个,占崩岗总数的 78.2%。根据活跃型崩岗的发育情况及距分水岭距离等,将其分为初期、中期、晚期 3 类。不同阶段的崩岗活跃程度不同,初期崩岗可能只是地表的微小变化;而中期崩岗的侵蚀力逐渐由水蚀转化为重力,此时的崩岗危险性较高,更易发生较为突然的崩塌事件;晚期崩岗可能已经形成了较大的侵蚀区域,也具有一定的危险性。上犹县处于发育中期的崩岗较多,危害性较大,共有 87 个,占活跃型崩岗总量的 55.1%;其次为初期与晚期,分别占活跃型崩岗总量的 25.3%与 19.6%。在是否过分水岭的崩岗分类中,以未过分水岭崩岗为主,占崩岗数量的 76.2%。此外,崩岗所在山体规模的大小,对崩岗的潜在危险性至关重要,山体规模越大,代表崩岗随着时间及其自身规模的发展演变,其将整个山体崩穿的可能性越大,易造成更严重的水土流失和生态破坏,因此潜在危险等级越高。而小型崩岗虽然单体规模较小,但如果数量众多,其累积影响也不容忽视。据现场调查情况,上犹县崩岗所在山体规模大小处于  $1.00 \times 10^4 \sim 1.00 \times 10^6 \text{ m}^2$  范围内,均值为  $1.00 \times 10^5 \text{ m}^2$ ,据此将其分为小型(山体面积  $< 7.00 \times 10^4 \text{ m}^2$ )、中型( $7.00 \times 10^4 \text{ m}^2 \leq \text{山体面积} < 1.60 \times 10^5 \text{ m}^2$ )、大型(山体面积  $> 1.60 \times 10^5 \text{ m}^2$ ) 3 类。其中以小型规模为主,占总量的 54.5%,其次分别为中型与大型规模,分别占总数量的 28.7%与 16.8%。

(2) 崩岗空间分布特征。江西省赣州市是中国南方红壤区崩岗侵蚀的典型区域,而上犹县为赣州市崩岗侵蚀较为严重的典型县<sup>[26-27]</sup>(图 1)。据调查,上犹县崩岗主要分布于中部地势较低的营前镇与水岩乡,分别占崩岗总量的 40.53%和 32.16%,两镇的高程主要处于 200~300 m 范围内,坡度处于  $7.61^\circ \sim 14.5^\circ$  范围内,地形起伏度小于 46 m,土地利用类型为有林地,降雨量在 1 700~1 800 mm 范围内(图 2),适

宜崩岗的发育,因此营前镇与水岩乡的崩岗群分布较多,且分布较为集中连片;少部分分布于社溪镇、东山镇、梅水乡等乡镇的低海拔处;由于上犹县西北部海拔较高,农业耕作、森林砍伐等不合理的人为活动相对较少,因此在多山地的五指峰乡、双溪乡等乡镇,无崩岗分布。根据调查,上犹县崩岗主要分布在岩性为花岗岩,土壤为红壤,坡度在  $10^\circ \sim 30^\circ$ ,高程在 300 m 以下,起伏度 0~150 m,土地利用类型为林地的地块内,与江西省以及南方红壤区崩岗分布<sup>[11]</sup>是一致的,具典型代表性。

表 4 上犹县崩岗的特征

Fig.4 Characteristics of Benggang in Shangyou County

特征种类	划分类别	数量/个	所占比例/%
崩岗规模	小型	31	15.4
	中型	74	36.6
	大型	97	48.0
崩岗形态	崩岗群	11	5.4
	弧形	15	7.4
	条形	43	21.3
	混合形	26	12.9
	爪形	9	4.5
	瓢形	98	48.5
发育状态	稳定	44	21.8
	活跃	158	78.2
活跃型崩岗	初期	40	25.3
	中期	87	55.1
	晚期	31	19.6
所在山体规模	小型	110	54.5
	中型	58	28.7
	大型	34	16.8
是否过分水岭	已过分水岭	154	76.2
	未过分水岭	48	23.8

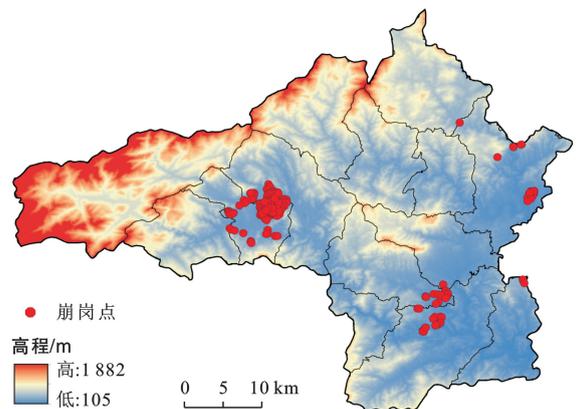


图 1 上犹县崩岗点的分布

Fig.1 Distribution of Benggang points in Shangyou County

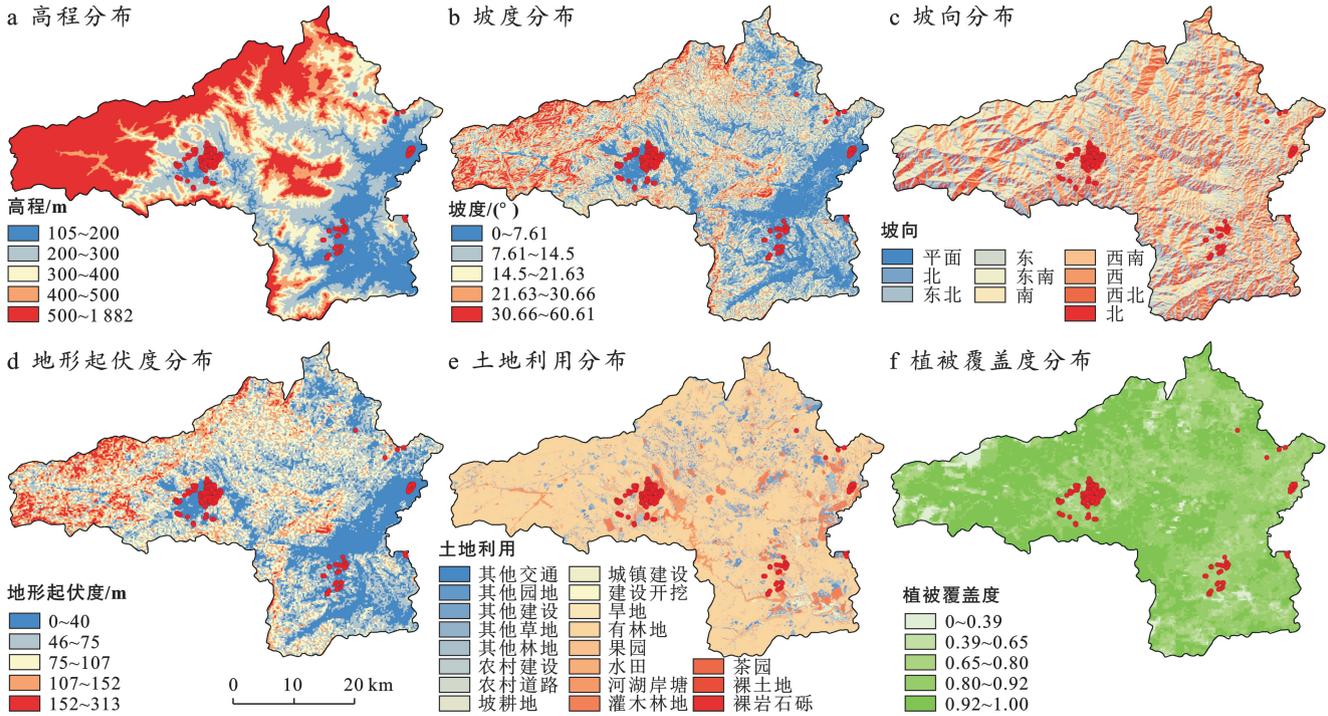
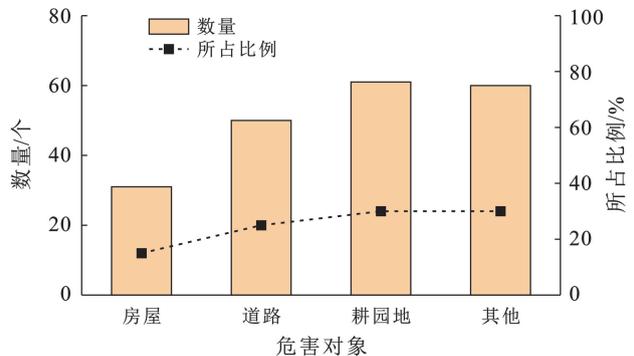


图 2 上犹县崩岗点自然要素空间分布特征

Fig.2 Spatial distribution characteristics of natural factors at Benggang point in Shangyou County

3.1.2 上犹县崩岗危害特征 崩岗崩塌造成的水流泥沙会向周围扩散,易毁坏基本农田,导致耕地面积减少,且崩岗侵蚀导致土壤结构破坏,土壤肥力与涵养水源能力下降,使水资源的可利用率降低,土地生产力遭到破坏,恶化耕作条件,危及粮食安全。此外,崩岗侵蚀冲毁桥梁、道路、房屋,严重危及群众生命和财产的安全;威胁公共财产安全,基础设施破坏,制约和阻碍当地区域经济的发展,给人民生活带来不便。据调查,该区崩岗危害对象主要为房屋、道路、耕园地、其他 4 类(图 3)。其中,危害对象以耕园地为,占崩岗危害对象总量的 30%;而道路与房屋相对较少,分别占 25%与 15%。此外,根据现场调查发现,崩岗的危害距离最远不超过 100 m。将 100 m 内的危害距离等间距划分(图 4),可知崩岗危害对象主要分布在小于 10 m 的范围内,占总量的 31%,其次为 11~20 m 的危害距离内,比例为 21%。将崩岗危害程度用 1(无),2(小),3(中),4(大),5(极大)表示(如图 5 所示)。分析可知危害距离与危害程度成反比,危害距离越近则危害程度越高;在给危害对象进行分级的基础上,危害对象与危害程度成正比,危害对象为道路与房屋时,危害程度较高;由散点图可知,危害距离较为集中的分布在距崩岗 40 m 以内的范围,超过 60 m 后分布较为零散;4 类危害对象所占比例则较为均衡。在距崩岗 0~20 m 的危害距离内,房屋、道路与耕园地相对较多,距离大于 20 m 后,对象逐渐

减少,这与其分布区域有一定的联系,上犹县较多崩岗分布于低海拔的山地之中,危害对象仅为山地中的植被及山路,距离居民点相对较远。而部分山区居民在建造自家的房屋时,通常会在山脚下或者山区比较平缓的区域开挖出一块地基修建房屋,此过程会对山体进行切坡,打破山体原有的固定性,在强降雨等条件的作用下,会容易形成崩岗。

图 3 上犹县崩岗危害对象数量比例分布  
Fig.3 Distribution of number proportion of Benggang hazard objects at Shangyou County

### 3.2 上犹县崩岗危险性特征

3.2.1 崩岗潜在危险特征 上犹县无、小、中等、大、极大等潜在危险等级的崩岗个数分别为 40, 20, 33, 45 和 64 个,其所占崩岗的数量比值分别为 19.8%, 9.9%, 16.3%, 22.3%, 31.7%(表 5)。潜在危险等级越低,说明崩岗自身的潜在危险转化为真正危险的可

能性越低,潜在危险等级越高,说明其转化为真正危险的可能性越高。上犹县超过 50%的崩岗转化为真正危险的可能性较高,且主要分布于营前镇与水岩乡,少部分位于东山镇与黄埠镇;其次为无潜在危险的崩岗,主要分布于社溪镇;潜在危险较小与中等级别的崩岗,主要分布于梅水、东山等崩岗相对较少的乡镇。

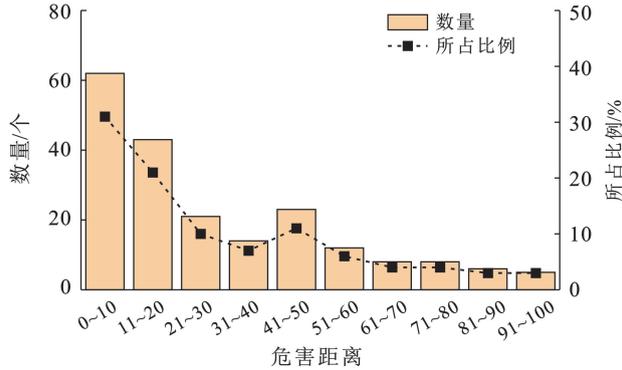


图 4 上犹县崩岗距危害对象距离数量比例分布  
Fig.4 Distribution of distance between Benggang and hazard objects at Shangyou County

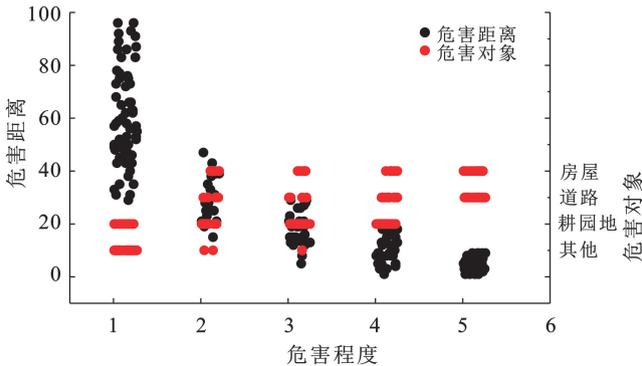


图 5 上犹县崩岗危害距离与对象数量分布  
Fig.5 Distribution of hazard distance and object number of Benggang at Shangyou County

3.2.2 崩岗危害程度特征 上犹县崩岗无、小、中、大、极大危害程度的崩岗个数分别为 68, 20, 34, 39 和 41 个,其所占崩岗的数量比值分别为 33.7%, 9.9%, 16.8%, 19.3%, 20.3%(表 5)。其中大于极大危害程度的崩岗主要分布于水岩乡与营前镇,少数分布于东山镇、梅水乡等,油石镇无,说明在水岩、营前等乡镇,危害对象以房屋、道路等居多,且距崩岗较近,易对居民的生命及财产造成威胁;该县处于无危害程度的崩岗数量最多,说明多数崩岗处于离居民点较远的山地中,危害程度较小。5 种危害程度中,小、中、大、极大这 4 种危害程度的态势分布及崩岗数量差异不大。

3.2.3 崩岗危险等级特征 上犹县无、小、中、大、极大等 5 个危险等级的崩岗个数分别为 96, 30, 32, 30 和 14 个,其所占崩岗的数量比值分别为 47.5%, 14.9%, 15.8%, 14.9%, 6.9%(表 5)。根据其中大于

极大危险等级的崩岗主要分布于营前镇与水岩乡,少部分位于梅水乡与黄埠镇;无危险的崩岗数量较多,营前、水岩、社溪、东山等乡镇都有分布;此外,社溪镇崩岗相对较少,且危险等级多为无危险与小危险;而黄埠镇的崩岗虽少但危险性较高。由于上犹县崩岗分布较为集中且崩岗区植被覆盖率较高,部分崩岗已进入发育晚期或相对稳定状态,且 30.69%的崩岗距危害受体较远,故无危险崩岗数量相对较多。处于发育中期的崩岗数量虽所占比例较大,自身潜在危险较大,但多处于距居民点较远的山地中,危害程度相对较低,因此处于极大危险等级的崩岗数量相对较少。

表 5 上犹县崩岗危险性特征统计  
Table 5 Statistics of Benggang risk characteristics at Shangyou County

危险性特征		危险性等级				
		无	小	中	大	极大
潜在危险	数量/个	40	20	33	45	64
	比例/%	19.8	9.9	16.3	22.3	31.7
危害程度	数量/个	68	20	34	39	41
	比例/%	33.7	9.9	16.8	19.3	20.3
危险等级	数量/个	96	30	32	30	14
	比例/%	47.5	14.9	15.8	14.9	6.9

矩阵散点图是一种可视化技术,用于展示多个变量直接的关系。通常有多个散点图排列成矩阵的形式,显示两个变量直接的相关性。由图 6 可以看出,上犹县崩岗的危害程度与潜在危险等级和危险等级存在正相关的线性相关关系,当潜在危险等级与危害程度升高时,危险等级都随之升高,证明危险等级通过潜在危险与危害程度二者表现出来是合理的。

根据危险等级结果与分析,研究区危害对象以耕园地为主,但在危险性分级中,道路与房屋对于大与极大两个危险等级影响较大(如图 7a 所示),耕园地与其他两类,对于较高级别的危险性等级影响相对较小。在发育状态方面,处于活跃初期的崩岗,相对崩塌量较小,危害程度有限,危险等级多处于中等阶段;处于活跃型中期的崩岗,危险性等级较高;而活跃晚期的崩岗虽处于崩岗发育后期,但仍有一定规模的崩塌出现,因此也具有一定的危险性,仍存在大与中等的危险等级(如图 7b 所示)。从危险距离方面,危害对象处于 10 m 以内的,以极大与大两个危险等级为主,随着距离变大,危险等级逐渐递减,30 m 以外的崩岗危险性则以无危险等级为主(如图 7c 所示)。从崩岗规模来看,极大与大危险等级主要分布于大型崩岗与中型崩岗,而小型崩岗虽然单体规模较小,但如果数量众多,其累积影响也不容忽视;而在山体规模

之中,则未体现明显规律(如图 7d—7e 所示);从过分水岭情况来看,危险等级较高的崩岗主要集中在未过

分水岭的情况之中,过分水岭后,崩岗多趋于稳定,危险性较低(如图 7f 所示)。

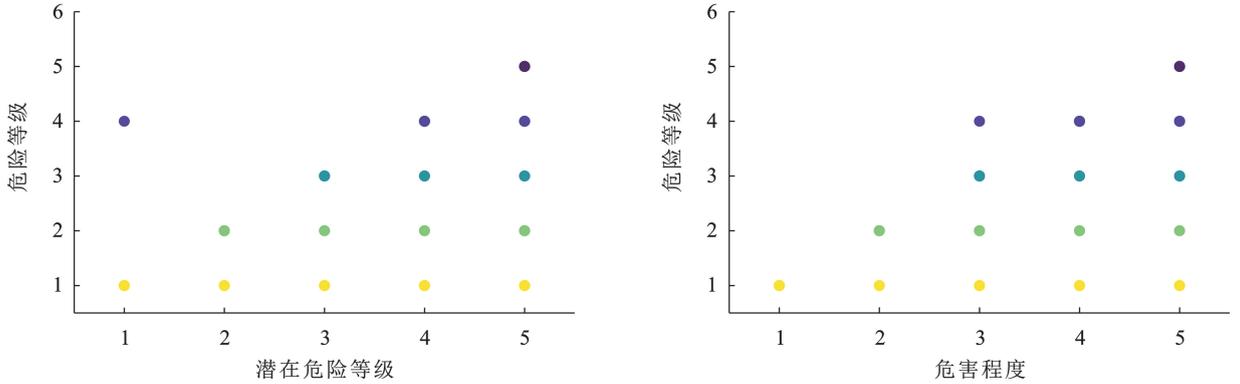


图 6 上犹县崩岗危险性矩阵散点图

Fig.6 Scatter plot of Benggang risk at Shangyou County

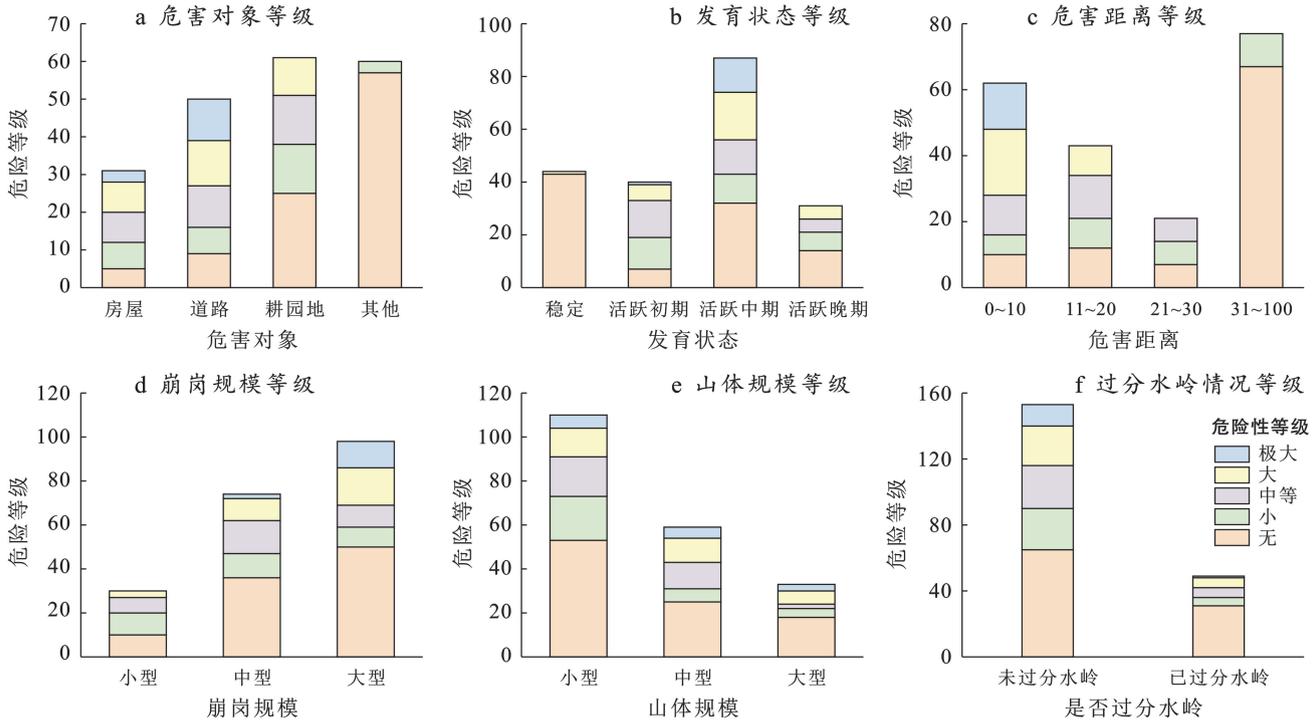


图 7 上犹县崩岗特征危险性差异分析

Fig.7 Risk difference analysis of Benggang characteristics at Shangyou County

3.2.4 现场复检验证 为进一步验证评价结果的准确性,随机抽取研究区 5% 的典型崩岗,综合多年从事水土保持工作的县水利局技术人员及当地居民意愿,对崩岗危险性等进行现场复核。结果显示基于矩阵判别法计算的崩岗危险性评价精度在 80% 以上(表 6),充分说明该方法对崩岗的危险性评价是可行的,该方法具有较好的适用性和准确性,而且指标易获取,方法易操作。

## 4 结论

(1) 上犹县共有崩岗 227 个(部分为崩岗群),其中已治理崩岗 25 个,未治理崩岗 202 个,所处山

体规模以小型为主。上犹县崩岗分布较为集中,超过 70% 的崩岗主要分布在营前镇、水岩乡两个乡镇,且以大型崩岗居多,崩岗形态类型齐全,以瓢形为主,占总量的 48.5%。未治理崩岗中,活跃型崩岗较多,占总数的 78%,其中 55% 的崩岗处于发育中期,危害潜力较大,22% 的崩岗已达到相对稳定状态并停止发育。

(2) 上犹县崩岗危害对象以耕园地为主,占崩岗危害对象总量的 30%;危害距离以小于 10 m 为主,占总数量的 31%;在 0~20 m 的危害距离中,危害对象以道路和耕园地为主。危害距离超过 20 m 后,相应数量逐渐减少,最远危害距离不超过 100 m。

表 6 上犹县典型崩岗复核验证统计结果

Table 6 Typical Benggang review verification statistical results at Shangyou County

崩岗点	地理坐标	崩岗规模	形态	发育状态	是否过分水岭	山体规模	危害对象	危害距离	判别结果	复核结果
1	114.320 98E, 25.933 64N	中型	条形	活跃初期	否	小型	房屋	3	中等	大
2	114.601 91E, 25.856 15N	大型	瓢形	活跃中期	是	小型	耕园地	8	大	大
3	114.305 52E, 25.936 93N	小型	瓢形	活跃中期	是	中型	房屋	28	中等	中等
4	114.601 19E, 25.857 91N	大型	混合形	活跃中期	是	小型	道路	1	极大	大
5	114.501 47E, 25.805 09N	大型	瓢形	活跃晚期	是	小型	房屋	31	小	小
6	114.312 29E, 25.959 58N	大型	弧形	活跃中期	是	小型	道路	12	大	大
7	114.316 08E, 25.947 89N	小型	条形	活跃初期	否	小型	道路	6	中等	中等
8	114.316 40E, 25.950 37N	大型	混合形	活跃中期	是	小型	道路	23	极大	极大
9	114.317 08E, 25.949 04N	中型	瓢形	活跃中期	否	小型	耕园地	1	大	大
10	114.308 99E, 25.947 19N	大型	混合形	活跃晚期	是	小型	耕园地	3	大	大

(3) 上犹县崩岗危险等级分级中,无、小、中、大、极大等 5 个危险等级的崩岗个数分别占总量的 47.5%, 14.9%, 15.8%, 14.9%, 6.9%。其中大和极大危险等级的崩岗主要分布于营前镇与水岩乡,少部分位于梅水乡与黄埠镇,需优先治理。

(4) 基于研究区崩岗及其危害特征分析,根据崩岗危险发生“三要素”原理,选择崩岗规模、发育状态等作为崩岗主体危险潜能指标,选择房屋、道路、农田等危害受体并结合危害距离作为危害程度指标,构建基于矩阵判别法的崩岗危险性评价指标体系。基于该方法进行的上犹县崩岗危险性评价研究准确度达到 80%,说明该方法对崩岗危险性评价是可行的。

## 5 研究展望

本文提出的基于矩阵判别法的崩岗危险性评价方法综合了崩岗现状研判与未来研判的双重需求,其评价结果对指导规划崩岗治理优先级依据更加充分。但仍然存在以下问题,需要进一步探究。

(1) 评价方法的可推广性。由于本文主要是基于上犹县范围内进行的危险性评价,考虑到实际调查工作中指标的适宜性与可获取性,筛选出崩岗现状危险相关指标,包括崩岗自身规模、发育状态、危害对象等;未来危险相关指标,包括山体规模、是否过分水岭等。针对上犹区域,所获研究结果较好,但在其他崩岗区域,所需的评价指标是否齐全,或是崩岗发育条件和表象特征规律存在差异,都有可能造成结果出现偏差。因此,该方法需要扩大研究范围进一步开展准确性验证,对评价方法进行优化。

(2) 研究结果定量化。近 10 a 来,随着深度学习理论和遥感技术的发展,数据驱动模型等<sup>[28-29]</sup>定量分析的方法应用较为广泛,具有大数据处理优势和较为准确的分类与预测能力,但不足之处在于结果可解释

性较低,科学性与稳定性不可预计<sup>[30]</sup>。而本文提出的崩岗危险性评价方法,科学依据充分,判别过程简单清晰,逻辑性强,但未能实现结果定量化。为克服本研究方法的不足,后期还将选择适合的数据驱动模型进行评价研究,定性与定量相结合,提出更多适用不同情景需求下崩岗危险性评价方法。

(3) 由于崩岗本身的发育状态会随着时间和环境条件变化,导致崩岗危险性也随之改变,因此需要持续的监测来对其危险性相关要素进行更新,并根据新的数据和信息重新研判其危险性,可能的情况下,也可以通过相关影响因素趋势分析,对崩岗危险性进行预测。

## 参考文献 (References)

- [1] 程冬兵,张晶鑫,郭飞,等.南方崩岗调查内容与与方法探讨[J].中国水利,2024(6):68-72.  
Cheng Dongbing, Zhang Jingxin, Guo Fei, et al. Discussion on the content and method of slope collapse investigation in Southern China [J]. China Water Resources, 2024(6):68-72.
- [2] 程冬兵,李定强,胡建民,等.崩岗侵蚀风险评估及分类防控关键技术研究[M].北京:科学出版社,2018.  
Cheng Dongbing, Li Dingqiang, Hu Jianmin, et al. Research on key technologies of collapse erosion risk assessment and classification prevention and control [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [3] 冯舒悦,王军光,文慧,等.赣南崩岗侵蚀区不同部位土壤抗剪强度及影响因素研究[J].土壤学报,2020,57(1):71-83.  
Feng Shuyue, Wang Jinguang, Wen Hui, et al. Soil shear strength of collapsing erosion area in South Jiangxi of China relative to position of the soil and its influencing factors [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020,57(1):71-83.
- [4] 郭飞,张晶鑫,山宏盼,等.不同栅格分辨率下赣州市石城

- 县崩岗易发性评价研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2024,46(2):63-70.
- Guo Fei, Zhang Jingxin, Shan Hongpan, et al. Evaluation of the susceptibility to Benggang in Shicheng County, Ganzhou City under different raster cell resolutions [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2024,46(2):63-70.
- [5] 邓羽松.南方花岗岩区崩岗特性、分布与地理环境因素研究[D].湖北 武汉:华中农业大学,2018.
- Deng Yusong. Characteristics, distribution and geographical, environmental factors of collapsing gully in granite region of Southern China [D]. Wuhan, Hubei: Hua Zhong Agricultural University, 2018.
- [6] Wei Yujie, Liu Zheng, Wu Xinliang, et al. Can Benggang be regarded as gully erosion? [J]. CATENA, 2021,207:105648.
- [7] 冯春杰,邓羽松,何溢钧,等.基于主成分—聚类分析的崩岗侵蚀强度评价[J].水土保持研究,2019,26(1):41-46.
- Feng Chunjie, Deng Yusong, He Yijun, et al. Evaluation of collapse erosion intensity based on principal component and cluster analysis [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(1):41-46.
- [8] 倪世民.崩岗区花岗岩红壤坡面侵蚀机制与形态演变特征[D].湖北 武汉:华中农业大学,2023.
- Ni Shimin. Slope erosion mechanism and morphological evolution characteristics of granite red soils in Benggang areas [D]. Wuhan, HuBei: Hua Zhong Agricultural University, 2023.
- [9] 刘洪鹄,谢浩,钱峰.南方崩岗侵蚀机理及治理浅见[J].人民长江,2019,50(2):30-34.
- Liu Honghu, Xie Hao, Qian Feng. Mechanism of hillock collapsing erosion in Southern China and its control suggestions [J]. Yangtze River, 2019,50(2):30-34.
- [10] 呼倩,黄炎和,林金石,等.生态优先的崩岗治理主体合作博弈及利益共享研究:基于福建省安溪县的案例分析[J].现代农业,2023(3):100-106.
- Hu Qian, Huang Yanhe, Lin Jinshi, et al. Study on cooperative game and benefit sharing of ecological priority for collapse management subjects: Based on the analysis of Anxi County, Fujian Province [J]. Modern Agriculture, 2023(3):100-106.
- [11] 程冬兵,赵元凌,张平仓,等.基于双变量熵信息法的江西省崩岗侵蚀风险评估[J].长江科学院院报,2019,36(2):27-32.
- Cheng Dongbing, Zhao Yuanling, Zhang Pingcang, et al. Risk assessment of collapse gully erosion in Jiangxi Province based on bivariate statistical analysis of entropy information [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019,36(2):27-32.
- [12] 程冬兵,赵元凌,张平仓,等.基于 Logistic 模型的江西省崩岗侵蚀风险评估[J].中国水土保持科学,2017,15(6):106-116.
- Cheng Dongbing, Zhao Yuanling, Zhang Pingcang, et al. On the risk assessment of collapse gully erosion in Jiangxi Province based on Logistic model [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017,15(6):106-116.
- [13] 郭飞,蒋广辉,黄晓虎,等.环境因子组合和负样本选取策略对花岗岩区崩岗易发性评价的影响[J].农业工程学报,2024,40(1):191-200.
- Guo Fei, Jiang Guanghui, Huang Xiaohu, et al. Impact of environmental factor combinations and negative sample selection on Benggang susceptibility assessment in granite areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024,40(1):191-200.
- [14] 郭飞,赖鹏,陈洋,等.不同环境因子联接方法对崩岗易发性评价的影响[J].水土保持通报,2022,42(5):123-130.
- Guo Fei, Lai Peng, Chen Yang, et al. Influence of different environmental factor connection methods on Benggang susceptibility assessment [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(5):123-130.
- [15] 季翔,黄炎和,林金石,等.基于生态位适宜度的南方花岗岩区崩岗发生敏感性评价方法[J].中国农业大学学报,2017,22(10):159-168.
- Ji Xiang, Huang Yanhe, Lin Jinshi, et al. Sensitivity assessment method of collapsed gully occurrence in granite region of South China based on niche-fitness [J]. Journal of China Agricultural University, 2017,22(10):159-168.
- [16] 李翠漫,许贵林,卢远.广西桂东南区域崩岗关键影响因素及敏感性研究[J].长江科学院院报,2020,37(3):131-136.
- Li Cuiman, Xu Guilin, Lu Yuan. Key influencing factors and susceptibility of collapse gully in Southeast Guangxi, China [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020,37(3):131-136.
- [17] 林小慧,黄炎和,林金石,等.基于 DPSIR 模型的崩岗侵蚀风险评价及时空特征[J].农业工程学报,2023,39(18):123-131.
- Lin Xiaohui, Huang Yanhe, Lin Jinshi, et al. Risk assessment and spatial-temporal characteristics of Benggang erosion based on DPSIR model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023,39(18):123-131.
- [18] 管家琳,黄炎和,林金石,等.基于信息量模型与随机森林模型的崩岗风险对比评估[J].山地学报,2021,39(4):539-551.
- Guan Jialin, Huang Yanhe, Lin Jinshi, et al. Compari-

- sions between Benggang risk assessments based on information model and random forest model [J]. Mountain Research, 2021,39(4):539-551.
- [19] 程冬兵,张晶鑫,郭飞,等.基于易发性和危险性评价的崩岗防治策略[J].中国水利,2024(16):69-72.  
Cheng Dongbing, Zhang Jingxin, Guo Fei, et al. Strategies for Benggang prevention and control based on susceptibility and harmfulness assessments [J]. China Water Resources, 2024(16):69-72.
- [20] 王天河,赖桂林,李坤,等.月度防控视角下韩江下游城镇地质灾害危险性评价[J].人民长江,2024,55(7):98-107.  
Wang Tianhe, Lai Guilin, Li Kun, et al. Risk assessment on geological hazards in urban areas of lower reaches of Hanjiang River from perspective of monthly prevention and control [J]. Yangtze River, 2024, 55(7):98-107.
- [21] Tacconi Stefanelli C, Casagli N, Catani F. Landslide damming hazard susceptibility maps: A new GIS-based procedure for risk management [J]. Landslides, 2020, 17(7):1635-1648.
- [22] 北京市市场监督管理局.地质灾害危险性评估技术规范:DB11/T 893—2021[S].北京:北京市市场监督管理局,2021.  
Beijing Municipal Bureau of Market Supervision and Administration. Technical specification for geological disaster risk assessment: DB11/T 893—2021 [S]. Beijing: Beijing Municipal Bureau of Market Supervision and Administration, 2021.
- [23] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.风险管理风险评估技术:GB/T 27921—2011[S].北京:中国标准出版社,2012.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Management Committee. Risk management risk assessment techniques: GB/T 27921—2011 [S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2012.
- [24] 刘丽娜,常煦坤,王柏仲.基于风险矩阵法的油田外浮顶罐风险管控研究[J].化工安全与环境,2023,36(11):23-25.  
Liu Lina, Chang Xukun, Wang B Z. Research on risk management and control of external floating roof tank in oilfield based on risk matrix method [J]. Chemical Safety & Environment, 2023,36(11):23-25.
- [25] 张平仓,程冬兵.《南方红壤丘陵区水土流失综合治理技术标准》应用指南[M].北京:中国水利水电出版社,2014.  
Zhang Pingcang, Cheng Dongbing. Application Guide-line of “Technical Standard for Comprehensive Control of Soil and Water Loss in Red Soil Hilly Area of Southern China” [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2014.
- [26] 廖凯涛,刘艳,刘荃,等.赣州市崩岗侵蚀分布特征与影响因子分析[J].水土保持研究,2021,28(6):126-130.  
Liao Kaitao, Liu Yan, Liu Quan, et al. Distribution characteristics and driving factors of Benggang erosion in Ganzhou City [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(6):126-130.
- [27] 袁芳,胡松,文慧,等.江西省崩岗现状及治理对策[J].中国水利,2023(10):56-58.  
Yuan Fang, Hu Song, Wen Hui, et al. Current situation and control measures of landslides in Jiangxi Province [J]. China Water Resources, 2023(10):56-58.
- [28] 刘福臻,王灵,肖东升,等.基于模糊综合评判法的宁南县滑坡易发性评价[J].自然灾害学报,2021,30(5):237-246.  
Liu Fuzhen, Wang Ling, Xiao Dongsheng, et al. Evaluation of landslide susceptibility in Ningnan County based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. Journal of Natural Disasters, 2021,30(5):237-246.
- [29] 陈力,丁雨淋,朱庆,等.基于元学习的广域范围滑坡易发性小样本预测[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(8):1367-1376.  
Chen Li, Ding Yulin, Zhu Qing, et al. Few-shot prediction of landslide susceptibility based on meta-learning paradigm [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024,49(8):1367-1376.
- [30] 王小巍,陈砚桥,金家善,等.数据与知识双驱动的备件需求模糊预测模型[J].国防科技大学学报,2024,46(2):205-214.  
Wang Xiaowei, Chen Yanqiao, Jin Jiashan, et al. Spare parts demand fuzzy prediction model driven by data and knowledge [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2024,46(2):205-214.