

doi: 10.12097/gbc.2023.11.034

邵慰慰, 杨志华, 吴瑞安, 郭长宝, 时红莲, 郁鹏飞, 麦希贤. 2025. 考虑滑坡活动性的金沙江上游白玉-巴塘段滑坡易发性评价[J]. 地质通报, 44(6): 1076-1086.

Shao Weiwei, Yang Zhihua, Wu Ruian, Guo Changbao, Shi Honglian, Yu Pengfei, Mai Ximao. 2025. Landslide susceptibility evaluation in the Baiyu-Batang section of upper Jinsha River considering landslide activity[J]. Geological Bulletin of China, 44(6): 1076-1086(in Chinese with English abstract).

考虑滑坡活动性的金沙江上游白玉-巴塘段滑坡易发性评价

邵慰慰^{1,2}, 杨志华^{1,3*}, 吴瑞安¹, 郭长宝¹, 时红莲², 郁鹏飞^{1,4}, 麦希贤^{1,2}

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 湖北 武汉 430074; 3. 资源与环境信息系
统国家重点实验室, 北京 100101; 4. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要:【研究目的】基于滑坡活动性, 优化滑坡样本, 提高滑坡易发性评价准确性。【研究方法】金沙江上游地形地貌复杂、构造活动强烈、滑坡灾害发育, 选取金沙江上游白玉-巴塘段为重点研究区, 采用遥感解译、InSAR 形变探测、野外调查等技术方法, 查明并分析了滑坡活动性。将滑坡划分为 A (活动性滑坡) 和 B (活动性滑坡+非活动性滑坡) 2 个数据集, 选用高程、坡度、坡向、工程地质岩组、到断裂距离、地震动峰值加速度、到河流距离、NDVI 八个因子指标, 采用加权信息量模型完成滑坡易发性评价。【研究结果】结果表明: 基于 A、B 数据集的 AUC 分别为 0.855 和 0.810, 说明取得了较好的滑坡易发性结果, 滑坡极高、高易发区主要集中分布于金沙江、降曲等河流沿岸的若干区域, 且明显沿水系线状分布, 中易发区主要分布于纵向谷岭之间的区域, 低易发区主要分布于地势平坦的区域。【结论】基于 A 数据集的滑坡易发性精度高于 B 数据集, 且极高、高易发区的识别有所提高, 考虑滑坡活动性可以有效提高滑坡易发性评价模型的准确率。滑坡活动性是滑坡易发性评价需要考虑的重要因素, 提出的研究思路 and 评价方法为推进高山峡谷地区的滑坡易发性研究提供了重要参考。

关键词: 滑坡易发性; 滑坡活动性; 金沙江; 加权信息量模型

创新点: 在滑坡样本的选取过程中, 考虑了滑坡活动性特征。

中图分类号: P642.22 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2025)06-1076-11

Landslide susceptibility evaluation in the Baiyu-Batang section of upper Jinsha River considering landslide activity

SHAO Weiwei^{1,2}, YANG Zhihua^{1,3*}, WU Ruian¹, GUO Changbao¹, SHI Honglian², YU Pengfei^{1,4},
MAI Ximao^{1,2}

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China; 3. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Beijing 100101, China; 4. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] This paper optimizes landslide samples based on landslide activity to improve the accuracy of landslide

收稿日期: 2023-11-25; 修订日期: 2024-01-13

资助项目: 资源与环境信息系统国家重点实验室开放基金项目《基于滑坡活动性差异特征的川藏铁路金沙江段滑坡易发性研究》、国家自然科学基金项目《融合斜坡先存形变的活动断裂带潜在地震滑坡危险性预测研究》(批准号: 42277180)、中国地质调查局项目《全国重大工程地质安全风险区划与综合评价》(编号: DD20221816)

作者简介: 邵慰慰(1997-), 男, 硕士, 地质工程专业, 从事地质灾害评价研究工作。E-mail: sww97222@163.com

* 通信作者: 杨志华(1982-), 男, 博士, 副研究员, 地质工程专业, 从事地质灾害评价研究工作。E-mail: yangzh99@163.com

susceptibility evaluation. **[Methods]** The terrain and landforms in the upper of Jinsha River are complex, with strong tectonic activity and the developed landslide disasters. The Baiyu-Batang section of the upper Jinsha River is selected as the key research area, and remote sensing interpretation, InSAR deformation detection, and field investigation techniques are used to identify and analyze landslide activity. All landslides were divided into two datasets: A (active landslides) and B (active landslides and inactive landslides). Eight factors, such as elevation, slope angle, slope direction, engineering geological units, distance to fault, seismic peak ground acceleration, distance to river and NDVI, were selected to complete the landslide susceptibility evaluation by weighted information model. **[Results]** The results show that the AUC based on A and B datasets are 0.855 and 0.810, respectively, indicating that satisfied landslide susceptibility results have been achieved. The very high and high landslide susceptibility is mainly distributed along the Jinsha River and Jiangqu River, and show an obvious band distribution trend along water systems. The middle landslide susceptibility is mainly distributed in the areas between the longitudinal valleys, and the low landslide susceptibility is mainly distributed in flat areas. **[Conclusions]** The accuracy of landslide susceptibility based on A dataset is higher than that of B dataset, and the identification ability of very high and high landslide susceptibility areas is relatively improved. So, landslide activity can effectively improve the landslide susceptibility accuracy, and is an important factor to be considered in the landslide susceptibility evaluation model. The proposed study ideas and methods provide an important reference for promoting landslide susceptibility evaluation in alpine gorge areas.

Key words: landslide susceptibility; landslide activity; Jinsha River; weighted information model

Highlights: In the selection process of landslide samples, the landslide activity characteristics were taken into consideration.

About the first author: SHAO Weiwei, male, born in 1997, master's degree, mainly engaged in geological hazard assessment; E-mail: sww97222@163.com

About the corresponding author: YANG Zhihua, male, born in 1982, Ph.D., associate researcher, mainly engaged in geological hazard assessment; E-mail: yangzh99@163.com

Fund support: Supported by the Opening Foundation of the State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, National Natural Science Foundation of China (No. 42277180), and China Geological Survey project (No. DD20221816)

青藏高原东缘是中国东西自然地理和地质环境的重要分界带,地形地貌和地质条件复杂,新构造运动强烈,活动断裂发育(王思敬等, 2002; 彭建兵等, 2004; 黄润秋等, 2007; 刘传正等, 2014; 张永双等, 2016)。金沙江上游地区河谷深切、岩体结构复杂,主要发育滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害类型,其中滑坡数量最多、分布最广、危害最大(杨志华等, 2018)。金沙江上游白玉-巴塘段发育一系列大型-巨型滑坡,部分滑坡引起堵江-溃决-洪水灾害链事件(徐则民等, 2011; 陈剑平等, 2016; Chen et al., 2018)。白格滑坡先后 2 次发生大型高位滑坡堰塞堵江事件,泄洪后给下游造成巨额的财产损失(许强等, 2018; Fan et al., 2019; Ouyang et al., 2019; Zhang et al., 2019; Mei et al., 2022); 沃达滑坡目前整体处于蠕滑变形阶段,若整体沿深层滑带失稳滑动,将可能产生滑坡-堵江-溃决-洪水的链式灾害(吴瑞安等, 2021)。

滑坡易发性评价是在已有滑坡调查数据、编目的基础上,采用地形地貌、地质构造、气象水文等因素的组合,评价斜坡体发生失稳、破坏的可能性(Brabb, 1985; 吴树仁等, 2009)。滑坡易发性评价已经发展出多种方法(兰恒星等, 2002; Guo et al.,

2015),常见的滑坡易发性评价模型有逻辑回归模型(殷坤龙等, 1987)、证据权模型(Ayalew et al., 2004; Xu et al., 2012)、信息量模型(许冲等, 2009; Lee et al., 2013; 薛强等, 2015)、层次分析模型(杨志华等, 2024)、频率比模型(Regmi et al., 2014; 李郎平等, 2017)、支持向量机模型(Yao et al., 2008; 黄发明等, 2018)、人工神经网络模型(Yilmaz et al., 2010)等,总体上可以分为定性评价和定量评价 2 类,定性评价主要为专家现场经验分析和因子图层叠加分析,定量评价主要指统计分析方法(Yang et al., 2015)。

目前的滑坡易发性研究多在评价模型、评价因子、因子权重之间寻找差异性及其更优解,考虑滑坡活动性、滑坡活动强度的滑坡易发性研究成果尚不丰富。自然界中的滑坡处于不同的活动状态,例如稳定状态、深层蠕滑状态、局部变形状态等,相较于非活动性滑坡(稳定滑坡),活动性滑坡更能反映当前的滑坡成灾背景,在同等内外动力作用下,活动性滑坡或具有类似成灾背景的斜坡更容易发生滑坡,滑坡易发性也更高。本文以金沙江上游白玉-巴塘段为研究区,在考虑滑坡活动性的基础上开展滑坡易发性评价研究,并检验、分析评价结果,研究思路和

评价方法可为推进高山峡谷地区的滑坡易发性研究提供参考,评价结果也为区内公路、铁路、水利水电设施的规划建设和防灾减灾提供了参考依据。

1 区域地质背景

研究区位于青藏高原东缘、横断山脉北部,是中国地势第二阶梯向第一阶梯的过渡地带,受金沙江河流走向的影响,地形整体上表现为北高南低、东高西低的特征。金沙江上游白玉-巴塘段(图 1)谷深坡陡,是典型的高山峡谷“V”型地貌,海拔介于 2472~6055 m 之间,最大高差约 3580 m,地形坡度一般为 25°~40°,部分大于 55°。

金沙江上游地质构造复杂,新构造运动强烈,褶皱断裂发育,其中白玉-巴塘段主要发育 NNE 向巴塘断裂和 NNW 向金沙江断裂带。区内岩性分布复杂,广泛发育区域变质岩和岩浆岩,主要出露地层有第四系、白垩系、三叠系、二叠系、泥盆系等,岩性有花岗岩、灰岩、砂岩、千枚岩、片麻岩等,第四系出露有现代河漫滩冲洪积砂、粉土、阶地冲洪积砾石等。

该区属青藏高原亚湿润气候,常年日照充足,年平均气温约为 6.5℃。区内降雨较少且集中,年最大降雨量为 828.8 mm,年最小降雨量为 291.5 mm,年平均降雨量约为 490 mm,主要集中在 5~9 月。由于地貌起伏程度大,植被生长呈垂直分带现象。

2 研究方法

2.1 研究思路

在滑坡易发性评价中,滑坡活动性是一个需要考虑的重要因素。基于此,提出了考虑滑坡活动性的滑坡易发性评价基本思路(图 2):①采用地质资料收集、遥感解译、野外调查等技术方法,分析滑坡发育特征,划分活动性滑坡和非活动性滑坡;②通过因子敏感性分析,建立评价因子指标体系,计算因子权重值、因子信息量;③计算滑坡易发性,对结果精度进行检验、分析,得到基于滑坡活动性的滑坡易发性评价结果。

2.2 加权信息量模型

信息量法是一种双变量的统计分析方法,它将专家选择滑坡评价因子的经验和 ArcGIS 的数据分

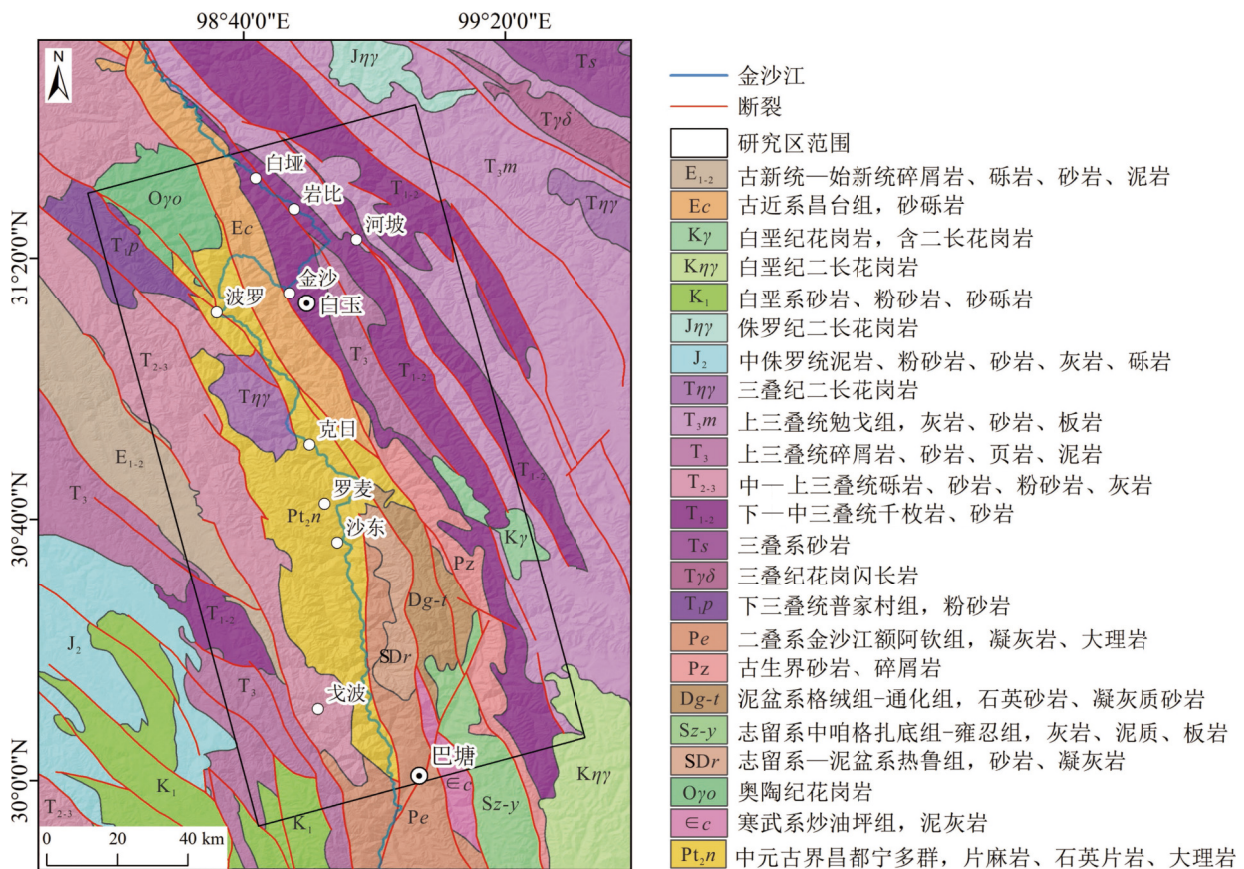


图 1 金沙江上游白玉-巴塘段地质背景

Fig. 1 Geological background in the Baiyu-Batang section of upper Jinsha River

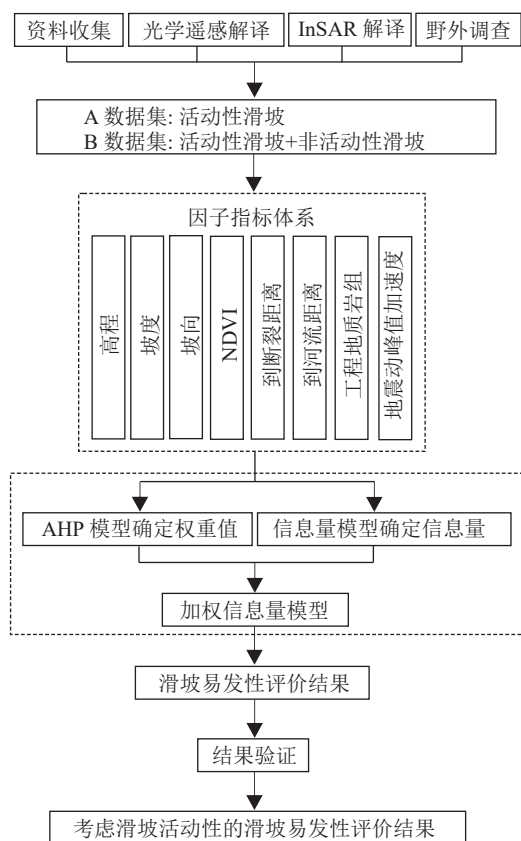


图 2 考虑滑坡活动性的滑坡易发性评价思路

Fig. 2 Idea of landslide susceptibility evaluation considering landslide activity

析能力结合到一起,用研究区已经发生滑坡的现实情况信息来反映地质体的稳定性。在信息量法中,滑坡易发性程度的高低与评价因子信息的数量和质量有关系。信息量的计算如公式(1)所示:

$$I_{Ai \rightarrow B} = \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} = \ln \frac{N_i \times S}{N \times S_i} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

式中: $I_{Ai \rightarrow B}$ 表示因子指标 A 在 i 状态显示滑坡(B)发生的信息量; N_i 表示分布在第 i 个影响因子分级中已发生滑坡的个数; N 表示研究区内滑坡总个数; S_i 表示第 i 个影响因子分级所占面积; S 表示研究区单元总面积。

因此,计算单个评价单元内总的信息量(公式 2):

$$I = \sum_{i=1}^n I_i = \sum_{i=1}^n \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (2)$$

式中: I 表示单个评价单元内的总信息量值; n 表示评价因子数。

将总的信息量作为滑坡易发性分区的评价指数,评价指数越大,滑坡发生的可能性越大。

层次分析法(AHP)是一种将定量与定性结合的多准则决策方法,可以有效地把专家意见量化并引入到决策程序中。其原理是:①通过构建层次结构模型,将评价因素分为若干层次,最高层为决策层,最下层为方案层,中间可以有一层或多层;②对目标有影响的评价因子做两两比较,构建判断矩阵;③计算矩阵最大特征值 $\lambda_{\max}$, 并进行一致性检验,在通过一致性检验后,得到评价因子的权重值。

在信息量模型的基础上,结合层次分析法,给每个因子赋予相应的权重(公式(3)),即加权信息量模型,从而进行滑坡易发性评价。

$$I = W_1 I_1 + W_2 I_2 + W_3 I_3 + \dots + W_i I_i \quad (3)$$

式中: I_i 为因子对滑坡易发性所提供的信息量; W_i 为相应的权重。

2.3 数据来源

滑坡数据主要来源于资料收集、遥感解译和野外调查,DEM 数据来源于地理空间数据云的 GDEM V3 (<https://www.gscloud.cn/sources/index?pid=1&rootid=1>),分辨率为 30 m×30 m,坡度、坡向提取于 DEM;地层岩性和活动断裂数据来源于 1:25 万地质图 (<http://geocloud.cgs.gov.cn>);地震动峰值加速度数据来自于《中国地震动参数区划图》(<https://www.gb18306.net/>),河流数据来自于中国 1:100 万地理基础数据和谷歌地球解译 (<https://www.webmap.cn/commres.do?method=dataDownload>);植被覆盖指数(NDVI)来自于 USGS 下载的 Landsat 8 遥感影像数据 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>),分辨率为 30 m×30 m。

3 滑坡发育基本特征

首先收集整理区域滑坡数据,例如自然资源部开展的 1:5 万、1:10 万地质灾害调查数据,然后开展光学遥感解译和 InSAR 形变探测,最后辅助野外调查核实,补充完善了区域滑坡数据集,共有滑坡 256 处(图 3)。根据滑坡发育特征,区分滑坡活动性,得到活动性滑坡 133 处(图 4),非活动性滑坡 123 处,将所有滑坡划分为 A(活动性滑坡)、B(活动性滑坡+非活动性滑坡)2 个滑坡数据集。

研究区滑坡总面积达 1380.65 km²,最大滑坡面积 6.99 km²。滑坡的发育和发生受活动断裂、地形地貌及地层岩性控制显著,具有沿金沙江、降曲等河流行性分布的特点,大型—巨型滑坡发生复活滑动后,会堵塞大江大河,形成堰塞湖,堰塞回水将会引

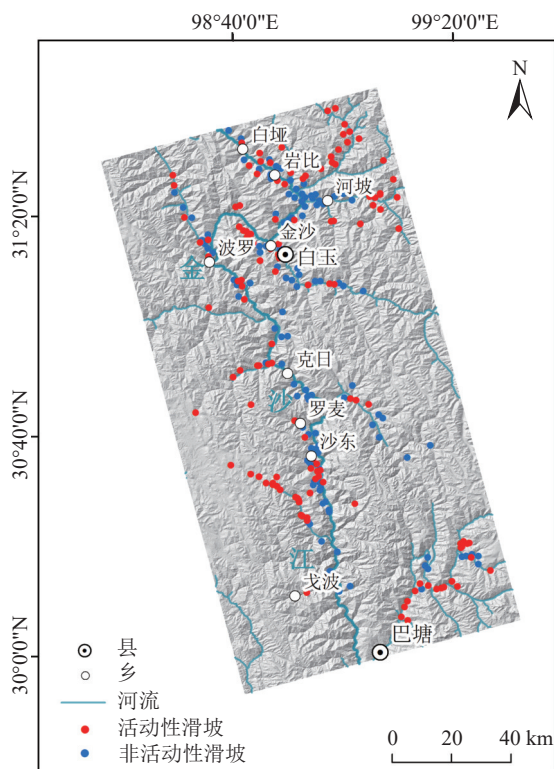


图3 金沙江上游白玉-巴塘段滑坡分布图

Fig. 3 Landslide distribution in the Baiyu-Batang section of upper Jinsha River

起上游部分滑坡失稳,造成严重的地质灾害事件。

4 因子敏感性分析

地形地貌对滑坡发育影响较大,选择高程、坡度和坡向3个因子来表征地形地貌对滑坡易发性的影响;采用工程地质岩组来表征地层岩性和岩体结构对滑坡易发性的影响;而由于活动断层引起地貌演化会造成断层附近的岩体破碎,所以选择到断裂的距离来表征构造活动对滑坡易发性的影响;选择地震动峰值加速度来表征历史地震活动对滑坡易发性的影响;选择到河流的距离来表征河流深切、河岸库岸对滑坡易发性的影响;NDVI为植被覆盖指数,用来表征陆面植被覆盖和植被生长状况对滑坡易发性的影响。综上所述,选择高程、坡度、坡向、工程地质岩组、到断裂距离、地震动峰值加速度(PGA)、到河流距离、植被覆盖指数(NDVI)8个因子指标(图5),建立滑坡易发性评价指标体系。

4.1 地形地貌

4.1.1 高程

高程对降雨量、植被覆盖率、人类工程活动等都有不同的影响。研究区高程分布在2472~6055 m之

间,因河流深切,形成了纵横交错的河谷地貌。将高程分为5个等级(图5-a):<3500 m、3500~4000 m、4000~4500 m、4500~5000 m、>5000 m。高程在3500 m以下时,A数据集有56个滑坡,占总滑坡比例42.11%,滑坡密度最高;B数据集有127个滑坡,占总滑坡比例49.61%,滑坡密度最高。所以,高程在3500 m以下是该区域最容易发生滑坡的区间。

4.1.2 坡度

坡度对滑坡的形成极关键,当坡度增加时,坡脚处的剪应力也会随之增高,即坡度大的斜坡更容易发生变形破坏。将坡度分为6级(图5-b):<10°、10°~20°、20°~30°、30°~40°、40°~50°、>50°。坡度在20°~30°区间内,A数据集有55个滑坡,占总滑坡比例41.35%,滑坡密度最大,即坡度在20°~30°区间内最有利于滑坡形成,位于各个坡度区间的滑坡密度差异较大,说明坡度具有较大的滑坡敏感性。B数据集在各个坡度区间内的滑坡分布情况与A数据集基本一致。

4.1.3 坡向

坡向不同的地表所接受太阳光的辐射不同,因此会影响地表的植被覆盖、风化、蒸发等,从而影响滑坡的发生。将坡向分为9类(图5-c):平面(无坡向)、N、NE、E、SE、S、SW、W、NW。A数据集坡向为S的滑坡密度最大,坡向S为优势坡向,产生滑坡的数量最多;B数据集坡向为E的滑坡密度最大,坡向E为优势坡向,其他坡向的滑坡数量和滑坡密度差异较小。

4.2 地层岩性

工程地质岩组是影响滑坡发生的内控因素,其类型和组成均影响着滑坡的稳定性。根据岩性组合与工程地质力学特性,将研究区的地层岩性划分为12类工程地质岩组(图5-d;表1)。其中,坚硬的厚层状砂岩岩组主要分布在高山地貌、断裂构造发育的地区,岩性以砂岩、灰岩为主。工程地质岩组的滑坡密度表明,坚硬的厚层状砂岩岩组具有最大的滑坡密度,其他类别的岩组相对较低,说明工程地质岩组具有较好的滑坡敏感性。

4.3 地质构造

活动构造带区域岩土体结构破碎,且易于风化,对滑坡的发生有一定的影响。研究区地质构造复杂,活动断裂发育,主要有金沙江断裂带、巴塘断裂等。将到断裂距离分为6个等级(图5-e):<0.5 km、0.5~1 km、1~2 km、2~5 km、5~10 km、>10 km。A数据集到断裂距离小于0.5 km区间内有45个滑坡,滑

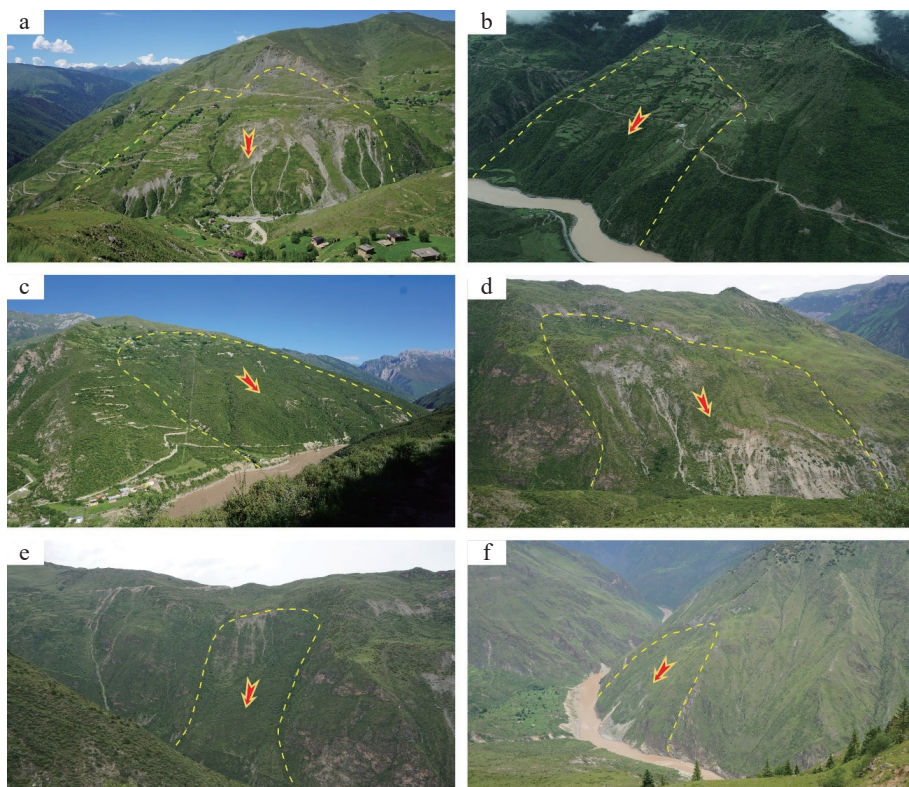


图4 金沙江上游典型活动性滑坡

Fig. 4 Typical active landslides in the upper Jinsha River

a—江达县探戈滑坡; b—江达县多绒滑坡; c—白玉县沙丁麦滑坡; d—贡觉县日娜2号滑坡; e—贡觉县日娜3号滑坡; f—白玉县然翁滑坡

坡密度最高; B数据集到断裂距离小于0.5 km的区间内有69个滑坡, 滑坡密度同样最高, 表明活动断裂对滑坡的发育分布有明显影响。

4.4 地震动峰值加速度

地震动峰值加速度(PGA)可以直接度量地震惯性力, 而地震惯性力可以引起地表破坏, 产生滑坡。将地震动峰值加速度分为3个等级(图5-f): 0.1 g、0.15 g、0.2 g。A数据集在0.2 g区间内有89个滑坡, 占总滑坡比例最多且滑坡密度最大; B数据集在0.2 g区间内有174个滑坡。可见在0.2 g范围内, 地震动峰值加速度对滑坡的发育分布影响显著。

4.5 河流

河流可以不断地对斜坡坡脚进行冲蚀、掏空, 从而导致斜坡失稳。将到河流距离分为7个等级(图5-g): <0.2 km、0.2~0.5 km、0.5~1 km、1~1.5 km、1.5~2 km、2~5 km、>5 km。A数据集在小于0.2 km区间内有20个滑坡, 滑坡密度最高, 表明距离河流越近, 河流的作用对滑坡影响越大, 滑坡失稳的概率越高。B数据集在0.2~0.5 km区间内有44个滑坡, 滑坡密度最高, 表明活动性滑坡距离河流更近。

4.6 植被

植被可以起到水土保持、护坡等作用, 但也会对滑坡的发生产生促进作用。例如, 茂密的植被可能会减少坡体的暴露面积, 从而减少坡体的自然排水, 增加坡体的含水量, 进而降低坡体的稳定性。将NVDI分为5级(图5-h): <0.2、0.2~0.4、0.4~0.6、0.6~0.8、>0.8。A数据集在0.6~0.8区间内有82个滑坡, 滑坡数量最多、密度最大; B数据集在0.6~0.8区间内有147个滑坡, 也是数量最多、密度最大; 2个数据集的滑坡分布情况基本一致。

5 滑坡易发性评价

5.1 因子权重值计算

按照层次分析法的原理, 将8个因子构建判断矩阵(表2), 确定各因子的权重值。经计算各个评价因子的权重为: 高程权重值 $W_e=0.060$, 坡度权重值 $W_{sl}=0.265$, 坡向权重值 $W_a=0.083$, 工程地质岩组权重值 $W_{gr}=0.134$, 到断裂距离权重值 $W_{fd}=0.168$, 地震动峰值加速度权重值 $W_{pga}=0.062$, 到河流距离权重值 $W_{rd}=0.121$, NDVI权重值 $W_{trd}=0.107$ 。判断矩阵

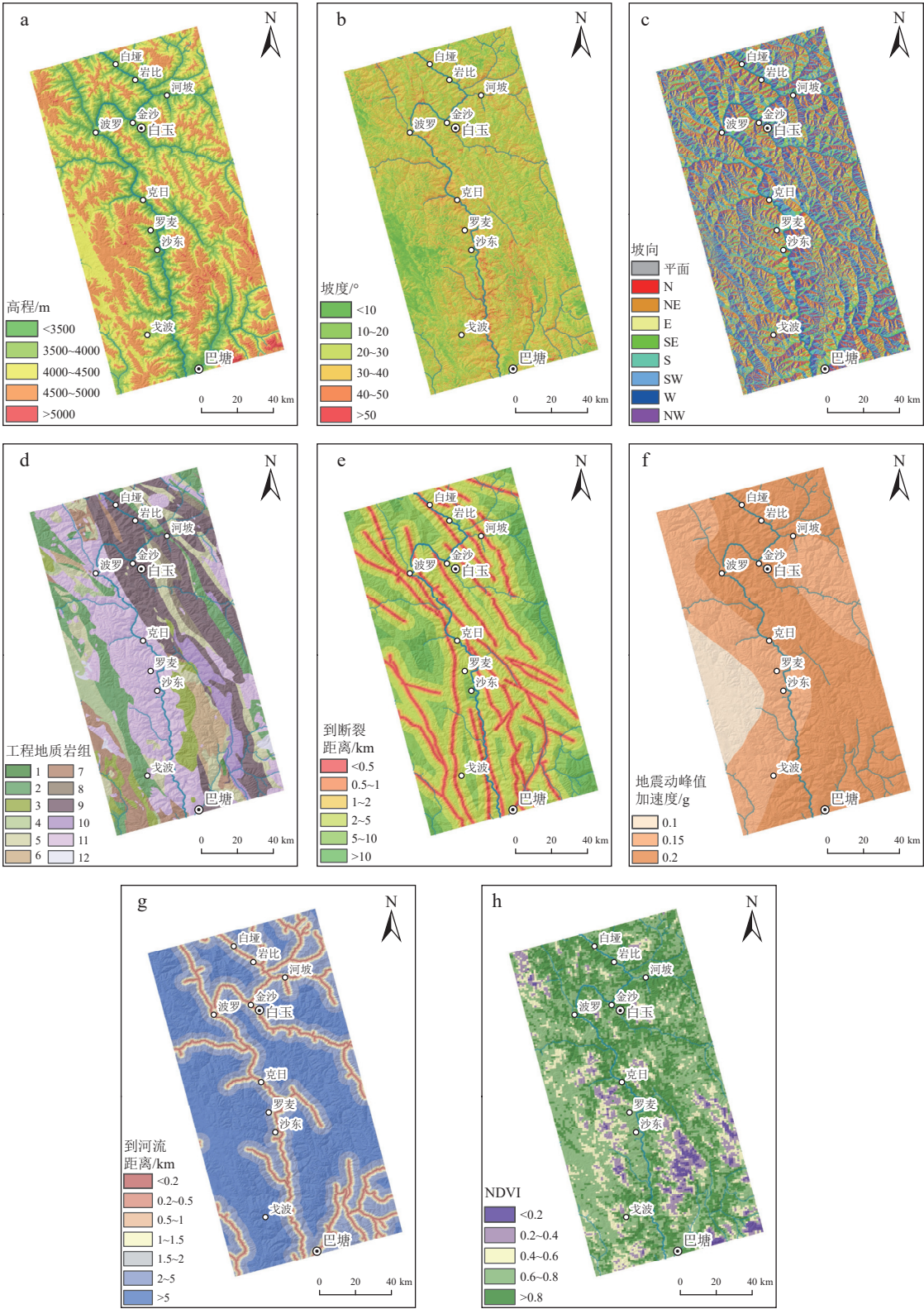


图 5 滑坡发育的影响因素

Fig. 5 Influencing factors of landslide development

a—高程; b—坡度; c—坡向; d—工程地质岩组(序号说明参考表 1); e—到断裂距离; f—地震动峰值加速度;
g—到河流距离; h—植被覆盖指数

表 1 金沙江上游白玉-巴塘段工程地质岩组

Table 1 Engineering geological units in the Baiyu-Batang section of upper Jinsha River

序号	工程地质岩组名称
1	坚硬的厚层状砂岩岩组
2	较坚硬—坚硬的中—厚层状砂岩夹砾岩、泥岩、板岩岩组
3	软硬相间的中—厚层状砂岩、泥岩夹灰岩、泥质灰岩及其互层岩组
4	软弱—较坚硬薄—中厚层状砂、泥岩及砾、泥岩互层岩组
5	坚硬的中—厚层状灰岩及白云岩岩组
6	较坚硬的薄—中厚层状灰岩、泥质灰岩岩组
7	软硬相间的中—厚层状灰岩、白云岩夹砂、泥岩、千枚岩、板岩岩组
8	较坚硬—坚硬的薄—中厚层状板岩、千枚岩与变质砂岩互层岩组
9	较弱—较坚硬的薄—中厚层状千枚岩、片岩夹灰岩、砂岩、火山岩岩组
10	坚硬的块状玄武岩为主的岩组
11	坚硬的块状花岗岩、安山岩、闪长岩岩组
12	软质散体结构岩组

表 2 评价因子判断矩阵

Table 2 Judgment matrix of evaluation factor

指标	高程	坡度	坡向	工程地质岩组	到断裂距离	PGA	到河流距离	NDVI
高程	1	1/4	1/2	1/2	1/2	1	1/2	1/2
坡度	4	1	3	2	2	4	2	3
坡向	2	1/3	1	1/2	1/2	1	1	1/2
工程地质岩组	2	1/2	2	1	1/2	2	1	2
到断裂距离	2	1/2	2	2	1	3	1	2
PGA	1	1/4	1	1/2	1/3	1	1/2	1/2
到河流距离	2	1/2	1	1	1	2	1	1
NDVI	2	1/3	2	1/2	1/2	2	1	1

最大特征值 $\lambda_{\max}=8.193$, 可以计算出 $CR=0.0195$, <0.1 , 所以该判断矩阵通过一致性检验, 该层次分析模型合理。

5.2 因子信息量计算

采用公式(1)计算各个评价因子的信息量值(表 3)。

5.3 评价结果与验证

根据滑坡易发性评价因子指标的权重值和信息量值, 进行加权叠加计算(公式(3)), 获取滑坡易发性加权信息量值, 计算过程如下:

表 3 评价因子信息量计算

Table 3 Information value table of evaluation factor

评价因子	分级	滑坡数量/个		滑坡面积/km ²		信息量值/I _i	
		A	B	A	B	A	B
高程/m	<3500	56	127	29.70	99.92	1.624	1.650
	3500~4000	58	109	19.45	65.47	0.520	0.546
	4000~4500	16	17	3.61	4.93	-1.652	-2.053
	4500~5000	3	3	0.22	0.28	-4.284	-4.789
	>5000	0	0	0	0	0	0
坡度/°	<10	3	3	0.63	0.67	-1.759	-1.580
	10~20	16	31	10.28	31.16	-0.096	-0.175
	20~30	55	106	25.27	79.66	0.298	0.259
	30~40	48	101	13.51	49.75	-0.104	0.013
	40~50	10	14	2.83	9.81	-0.296	-0.242
	>50	1	1	0.47	0.45	-0.047	-0.536
坡向	平面	0	0	0	0	0	0
	N	10	17	4.36	15.06	-0.024	0.027
	NE	18	33	14.35	37.01	0.659	0.420
	E	20	43	12.02	29.56	0.604	0.317
	SE	17	27	8.36	19.31	0.231	-0.119
	S	24	45	3.84	19.67	-0.597	-0.152
	SW	17	40	3.88	25.46	-0.670	0.025
	W	16	31	3.92	15.34	-0.525	-0.350
	NW	11	20	2.27	12.36	-1.085	-0.578
	1	1	2	0.05	0.81	-0.204	1.390
	2	5	12	0.62	5.37	-2.362	-1.389
	3	0	1	0	1.19	0	-1.976
工程地质岩组	4	0	0	0	0	0	0
	5	14	22	2.54	8.68	-0.884	-0.843
	6	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0
	8	4	5	0.64	2.08	-0.431	-0.433
	9	52	100	22.31	73.94	0.578	0.588
	10	6	13	1.88	6.52	-0.140	-0.086
	11	50	100	24.85	75.13	0.487	0.405
	12	1	1	0.03	0.03	-2.280	-3.468
到断层距离/km	<0.5	45	69	22.78	45.57	0.730	0.658
	0.5~1	24	67	7.83	43.23	0.302	0.289
	1~2	35	35	12.56	13.72	0.167	0.175
	2~5	10	49	3.56	36.78	-0.062	0.013
	5~10	8	21	2.71	16.03	-0.533	-0.481
	>10	11	15	4.27	14.29	-0.652	-0.563
地震动峰值加速度/g	0.1	8	8	0.37	0.36	-2.555	-3.744
	0.15	36	74	19.30	50.79	0.042	-0.179
	0.2	89	174	33.28	122.67	0.112	0.228
到河流距离/km	<0.2	20	20	6.57	6.56	0.854	0.841
	0.2~0.5	27	44	9.49	28.67	1.353	1.346
	0.5~1	26	65	8.68	42.59	1.212	1.293
	1~1.5	14	41	7.65	34.59	1.073	1.131
	1.5~2	11	26	7.32	23.34	0.846	0.773
	2~5	26	49	9.86	34.29	-0.349	-0.418
	>5	9	11	3.38	3.78	-2.855	-3.033
NDVI	<0.2	0	0	0	0	0	0
	0.2~0.4	0	0	0	0	0	0
	0.4~0.6	7	8	0.69	1.55	-2.347	-2.728
	0.6~0.8	82	147	37.11	105.53	0.422	0.279
	>0.8	44	101	15.12	66.68	-0.112	0.183

注: 工程地质岩组的分类参考表 1

$$I = W_e I_e + W_{sl} I_{sl} + W_a I_a + W_{gr} I_{gr} + W_{fd} I_{fd} + W_{pga} I_{pga} + W_{rd} I_{rd} + W_{trd} I_{trd} = 0.06 I_e + 0.265 I_{sl} + 0.083 I_a + 0.134 I_{gr} + 0.168 I_{fd} + 0.062 I_{pga} + 0.121 I_{rd} + 0.107 I_{trd} \quad (4)$$

采用 ROC 曲线检验评价结果的合理性。以滑坡易发性评价图为基础,创建随机点进行验证,验证点的数量为滑坡数据集的 70%,即 A、B 数据集各随机抽取 70% 的滑坡点,再各随机创建 70% 的非滑坡点,绘制 ROC 曲线(图 6)。A 数据集 ROC 曲线下的面积为 0.855, B 数据集 ROC 曲线下的面积为 0.810,说明评价结果具有较高的准确性,并且采用活动性滑坡数据完成的滑坡易发性准确度更高。

5.4 结果分析

信息量值越大,代表越容易发生滑坡。本次采用自然间断点分级法,将研究区滑坡易发性程度分为 4 个等级:极高易发、高易发、中易发和低易发(图 7)。极高、高易发区主要集中分布于金沙江、降曲等河流沿岸的若干区域,且明显沿水系线状分布,这些地区河流侵蚀作用强烈,为滑坡的发生提供了充分的条件;中易发区的分布无明显的线状分布特

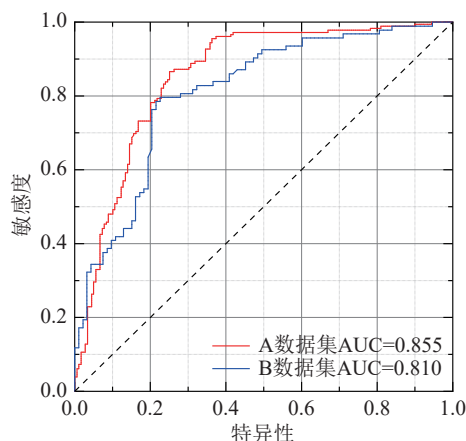


图 6 滑坡易发性评价结果的 ROC 曲线

Fig. 6 ROC curve of landslide susceptibility evaluation results

征,主要在纵向谷岭之间的区域,中易发区地形变化相对平缓,高差较小,滑坡威胁较小;低易发区主要分布于地势平坦的区域,其特点是地形平缓、高差小、坡度小,发生滑坡的概率较低。A 数据集的极高、高易发区灾害数量占 A 数据集滑坡数量的 97.75%, B 数据集的极高、高易发区灾害数量占 B 数据集滑坡数量的 95.70%(表 4),也验证了 A 数据集

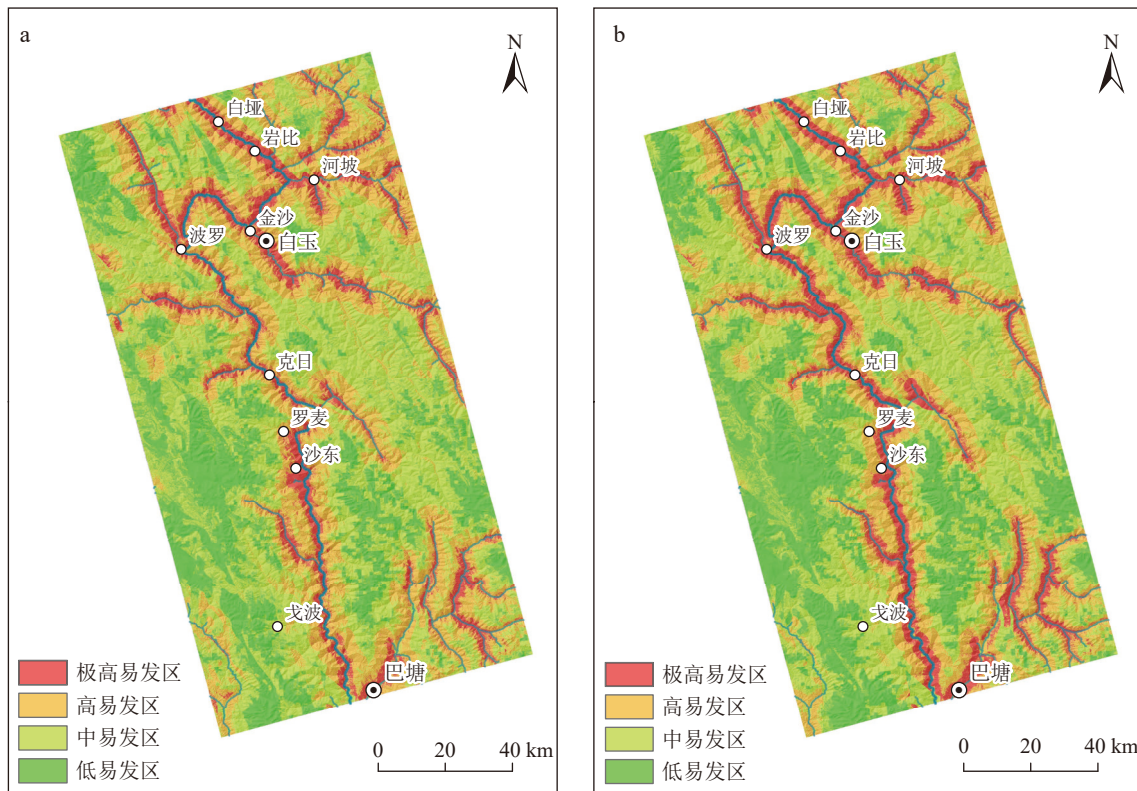


图 7 金沙江上游白玉-巴塘段滑坡易发性分布图

Fig. 7 Landslide susceptibility distribution in the Baiyu-Batang section of upper Jinsha River

a—A 数据集计算结果;b—B 数据集计算结果

表 4 滑坡易发性面积统计结果

Table 4 Statistical table of landslide susceptibility area

序号	滑坡易发性	面积/km ²		面积占比/%		滑坡数量/个		滑坡数量占比/%	
		A	B	A	B	A	B	A	B
1	极高易发	2187	2548	14.30%	16.67%	118	226	88.72%	88.28%
2	高易发	3639	3390	23.80%	22.17%	12	19	9.03%	7.42%
3	中易发	4765	4230	31.17%	27.66%	2	9	1.50%	3.52%
4	低易发	4696	5121	30.71%	33.50%	1	2	0.75%	0.78%

评价精度高于 B 数据集评价精度 4.5% 的结论。

6 结 论

(1)在复杂内外动力作用下,当前阶段的活性性滑坡和非活性性滑坡表征了滑坡易发性的差异性,非活性性滑坡反映了历史上的滑坡成灾背景,而活性性滑坡更能反映当前的滑坡成灾背景。基于此,提出了考虑滑坡活动性的滑坡易发性研究思路。

(2)采用提出的研究思路和评价方法,在金沙江上游白玉-巴塘段取得了较好的滑坡易发性评价结果,极高、高易发区主要集中分布在金沙江、降曲两岸,呈明显的线状分布,中易发区主要分布于纵向谷岭之间的区域,低易发区主要分布于地势平坦的区域。

(3)基于 A 滑坡数据集完成的滑坡易发性精度高于 B 滑坡数据集,且极高、高易发区的识别有所提高,表明考虑滑坡活动性可以有效提高滑坡易发性评价模型的准确率,滑坡活动性反映了现阶段地质环境因子的滑坡敏感性,是滑坡易发性评价需要考虑的重要因素。

(4)高山峡谷区活性性滑坡危险性大,复活滑动后形成链式灾害,威胁人民群众生命财产安全,所以活性性滑坡值得重点关注。同时,研究区极高、高易发区滑坡发生的可能性大,应特别注重滑坡的预测、防治工作。

References

Ayalew L, Yamagishi H, Ugawa N. 2004. Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan[J]. *Landslides*, 1(1): 73–81.

Brabb E E. 1985. Innovative approaches to landslide hazard and risk

mapping[C]//International Landslide Symposium Proceedings, Japan: 17–22.

Chen J P, Li H Z. 2016. Genetic mechanism and disasters features of complicated structural rock mass along the rapidly uplift section at the upstream of Jinsha River[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 46(4): 1153–1167(in Chinese with English abstract).

Chen J, Zhou W, Cui Z J, et al. 2018. Formation process of a large paleolandslide-dammed lake at Xuelongnang in the upper Jinsha River, SE Tibetan Plateau: constraints from OSL and ¹⁴C dating[J]. *Landslides*, 15(12): 2399–2412.

Fan X M, Xu Q. 2019. Successive landsliding and damming of the Jinsha River in eastern Tibet, China: Prime investigation, early warning, and emergency response[J]. *Landslides*, 16(5): 1003–1020.

Guo C B, Zhang Y S. 2015. Quantitative assessment of landslide susceptibility along the Xianshuihe fault zone, Tibetan Plateau, China[J]. *Geomorphology*, 248(Nova.1): 93–110.

Huang F M, Yin K L, Jiang S H, et al. 2018. Landslide susceptibility assessment based on clustering analysis and support vector machine[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 37(1): 156–167(in Chinese with English abstract).

Huang R Q. 2007. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(3): 433–454(in Chinese with English abstract).

Lan H X, Wang L J, Zhou C H. 2002. Study on GIS-aided model for analysis of landslide hazard[J]. *Journal of Engineering Geology*, 10(4): 421–427(in Chinese with English abstract).

Lee S W, Kim G, Yune C Y, et al. 2013. Development of landslide-risk assessment model for mountainous regions in Eastern Korea[J]. *Disaster Advances*, 6(6): 70–79.

Li L P, Lan H X, Guo C B, et al. 2017. Geohazard susceptibility assessment along the Sichuan-Tibet railway and its adjacent area using an improved frequency ratio method[J]. *Geoscience*, 31(5): 911–929(in Chinese with English abstract).

Liu C Z. 2014. Genetic types of landslide and debris flow disasters in China[J]. *Geological Review*, 60(4): 858–868(in Chinese with English abstract).

Mei S Y, Chen S S, Zhong Q M, et al. 2022. Detailed numerical modeling for breach hydrograph and morphology evolution during landslide dam breaching[J]. *Landslides*, 19(12): 2925–2949.

Ouyang C J, An H C, Zhou S, et al. 2019. Insights from the failure and dynamic characteristics of two sequential landslides at Baige village along the Jinsha River, China[J]. *Landslides*, 16(7): 1397–1414.

Peng J B, Ma R Y, Lu Q Z, et al. 2004. Geological hazards effects of uplift of qinghai-tibet plateau[J]. *Advance in Earth Sciences*, 19(3): 457–466(in Chinese with English abstract).

Regmi A D, Devkota K C, Yoshida K, et al. 2014. Application of frequency ratio, statistical index, and weights-of-evidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(2): 725–742.

Wang S J. 2002. Coupling of earth's endogenic and exogenic geological processes and origins on serious geological disasters[J]. *Journal of*

- Engineering Geology, 10(2): 115–117(in Chinese with English abstract).
- Wu R A, Ma H S, Zhang J C, et al. 2021. Developmental characteristics and damming river risk of the Woda landslide in the upper reaches of the Jinshajiang River[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 48(5): 120–128(in Chinese with English abstract).
- Wu S R, Shi J S, Zhang C S, et al. 2009. Preliminary discussion on technical guideline for geohazard risk assessment[J]. Geological Bulletin of China, 28(8): 995–1005(in Chinese with English abstract).
- Xu C, Dai F C, Yao X, et al. 2009. GIS-based landslide susceptibility assessment using analytical hierarchy process in Wenchuan earthquake region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 28(S2): 3978–3985(in Chinese with English abstract).
- Xu C, Xu X W, Lee Y H, et al. 2012. The 2010 Yushu earthquake triggered landslide hazard mapping using GIS and weight of evidence modeling[J]. Environmental Earth Sciences, 66(6): 1603–1616.
- Xu Q, Zheng G, Li W L, et al. 2018. Study on successive landslide damming events of Jinsha River in Baige village on October 11 and November 3[J]. Journal of Engineering Geology, 26(6): 1534–1551(in Chinese with English abstract).
- Xu Z M. 2011. Deposits of zhaizicun landslide-dammed lake along Jinsha River and its implication for the genesis of Xigeda formation[J]. Geological Review, 57(5): 675–686(in Chinese with English abstract).
- Xue Q, Zhang M X, Li L. 2015. Loess landslide susceptibility evaluation based on slope unit and information value method in Baota District, Yan'an[J]. Geological Bulletin of China, 34(11): 2108–2115(in Chinese with English abstract).
- Yang Z H, Guo C B, Wu R A, et al. 2024. Regional engineering geological condition evaluation in the Sichuan-Xizang traffic corridor[J]. Geological Bulletin of China, 43(9): 1650–1662(in Chinese with English abstract).
- Yang Z H, Lan H X, Gao X, et al. 2015. Urgent landslide susceptibility assessment in the 2013 Lushan earthquake-impacted area, Sichuan Province, China[J]. Natural Hazards, 75(3): 2467–2487.
- Yang Z H, Zhang Y S, Guo C B, et al. 2018. Sensitivity analysis on causative factors of geohazards in eastern margin of Tibetan Plateau[J]. Journal of Engineering Geology, 26(3): 673–683(in Chinese with English abstract).
- Yao X, Tham L G, Dai F C. 2008. Landslide susceptibility mapping based on support vector machine: A case study on natural slopes of Hong Kong, China[J]. Geomorphology, 101(4): 572–582.
- Yilmaz I. 2010. Comparison of landslide susceptibility mapping methodologies for Koyulhisar, Turkey: Conditional probability, logistic regression, artificial neural networks, and support vector machine[J]. Environmental Earth Science. 61(4): 821–836.
- Yin K L, Yan T Z. 1987. Distribution regularity of landslides and prediction of slope instability nearby Xunyang, Han River Valley[J]. Earth Science, 12(6): 631–638(in Chinese with English abstract).
- Zhang L, Xiao T, He J, et al. 2019. Erosion-based analysis of breaching of Baige landslide dams on the Jinsha River, China, in 2018[J]. Landslides, 16(10): 1965–1979.
- Zhang Y S, Guo C B, Yao X, et al. 2016. Research on the geohazard effect of active fault on the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Acta Geoscientia Sinica, 37(3): 277–286(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈剑平, 李会中. 2016. 金沙江上游快速升降河段复杂结构岩体灾变特征与机理[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 46(4): 1153–1167.
- 黄发明, 殷坤龙, 蒋水华, 等. 2018. 基于聚类分析和支持向量机的滑坡易发性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 37(1): 156–167.
- 黄润秋. 2007. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 26(3): 433–454.
- 兰恒星, 王苓涓, 周成虎. 2002. 地理信息系统支持下的滑坡灾害分析模型研究[J]. 工程地质学报, 10(4): 421–427.
- 李郎平, 兰恒星, 郭长宝, 等. 2017. 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, 31(5): 911–929.
- 刘传正. 2014. 中国崩塌滑坡泥石流灾害成因类型[J]. 地质论评, 60(4): 858–868.
- 彭建兵, 马润勇, 卢全中, 等. 2004. 青藏高原隆升的地质灾害效应[J]. 地球科学进展, 19(3): 457–466.
- 王思敬. 2002. 地球内外动力耦合作用与重大地质灾害的成因初探[J]. 工程地质学报, 10(2): 115–117.
- 吴瑞安, 马海善, 张俊才, 等. 2021. 金沙江上游沃达滑坡发育特征与堵江危险性分析[J]. 水文地质工程地质, 48(5): 120–128.
- 吴树仁, 石菊松, 张春山, 等. 2009. 地质灾害风险评估技术指南初论[J]. 地质通报, 28(8): 995–1005.
- 徐则民. 2011. 金沙江寨子村滑坡坝堰塞湖沉积及其对昔格达组地层成因的启示[J]. 地质论评, 57(5): 675–686.
- 许冲, 戴福初, 姚鑫, 等. 2009. 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, 28(S2): 3978–3985.
- 许强, 郑光, 李为乐, 等. 2018. 2018 年 10 月和 11 月金沙江白格两次滑坡-堰塞堵江事件分析研究[J]. 工程地质学报, 26(6): 1534–1551.
- 薛强, 张茂省, 李林. 2015. 基于斜坡单元与信息量法结合的宝塔区黄土滑坡易发性评价[J]. 地质通报, 34(11): 2108–2115.
- 杨志华, 张永双, 郭长宝, 等. 2018. 青藏高原东缘地质灾害影响因子敏感性分析[J]. 工程地质学报, 26(3): 673–683.
- 杨志华, 郭长宝, 吴瑞安, 等. 2024. 川西藏东交通廊道区域工程地质条件评价[J]. 地质通报, 43(9): 1650–1662.
- 殷坤龙, 晏同珍. 1987. 汉江河谷旬阳段区域滑坡规律及斜坡不稳定性预测[J]. 地球科学, 12(6): 631–638.
- 张永双, 郭长宝, 姚鑫, 等. 2016. 青藏高原东缘活动断裂地质灾害效应研究[J]. 地球学报, 37(3): 277–286.