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

基于滑坡破坏模式分析的易发性评价

朱宇航，黄海峰，殷坤龙，郭子正，郭　飞，赖　鹏

Evaluation of landslide susceptibility based on landslide failure mode analysis: A case study of the left bank of Xietan River in the first section of Three Gorges Reservoir

ZHU Yuhang, HUANG Haifeng, YIN Kunlong, GUO Zizheng, GUO Fei, and LAI Peng

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202112035

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于快速聚类-信息量模型的汶川及周边两县滑坡易发性评价

Landslide susceptibility assessment based on K-means cluster information model in Wenchuan and two neighboring counties, China

周天伦, 曾超, 范晨, 毕鸿基, 龚恩慧, 刘晓　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 137-150

机器学习模型在滑坡易发性评价中的应用

Application of machine learning model in landslide susceptibility evaluation

刘福臻, 王灵, 肖东升　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 98-106

三峡库区巫峡剪刀峰顺层岩质岸坡破坏模式分析

An analysis on the destruction mode of Wuxia scissors peak down the shore slope in the Three-Gorges Reservoir area

王平, 胡明军, 黄波林, 张枝华, 郑涛, 吴坤达, 毛博　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 52-61

三峡库区大型斜倾顺层滑坡失稳机理分析

Instability mechanism of massive oblique bedding rock landslide in the Three-Gorges Reservoir: A case study of the Longjing landslide in Shizhu County of Chongqing City

王平, 朱赛楠, 张枝华, 吴晓宾, 杨柳, 赵慧　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 24-32

三峡库区典型顺斜向岩质滑坡变形破坏特征及失稳机制分析

Deformation characteristics and failure mechanism of large-scale obliquely dip rock landslide in the Three Gorges Reservoir Region

蒋先念, 张晨阳　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 36-42

三峡库区箭穿洞危岩体变形破坏模式与防治效果分析

Analyses on failure modes and effectiveness of the prevention measures of Jianchuandong dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir area

蒋文明, 王鲁琦, 赵鹏, 黄波林, 张枝华, 胡明军　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 105-112

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202112035
朱宇航, 黄海峰, 殷坤龙, 等. 基于滑坡破坏模式分析的易发性评价——以三峡库区首段泄滩河左岸为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(2): 156-166.
ZHU Yuhang, HUANG Haifeng, YIN Kunlong, et al. Evaluation of landslide susceptibility based on landslide failure mode analysis: A case study of the left bank of Xietan River in the first section of Three Gorges Reservoir[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(2): 156-166.

基于滑坡破坏模式分析的易发性评价
——以三峡库区首段泄滩河左岸为例

朱宇航[1], 黄海峰[2,3], 殷坤龙[1], 郭子正[4], 郭 飞[2,3], 赖 鹏[2,3]
（1. 中国地质大学(武汉)工程学院，湖北 武汉 430074；2. 三峡大学湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站，湖北 宜昌 443000；3. 三峡大学土木与建筑学院，湖北 宜昌 443002；4. 河北工业大学土木与交通学院，天津 300401）

摘要：三峡库区首段发育有大量岩质滑坡，其中很多灾害点极具隐蔽性且目前并未被查明。文中以三峡库区首段泄滩河左岸为研究区，以区内唯一破坏的卡门子湾顺层岩质滑坡为例，在分析其成因机制的基础上归纳总结了该地区顺层岩质滑坡的破坏模式，并以此确定了高程、坡度、坡向、起伏度、平面曲率、剖面曲率、地层岩性、距河流距离及距道路距离共 9 个评价指标因子及疑似滑坡隐患点，将这些灾害隐患点作为滑坡样本，运用 ALSA 模型开展研究区的滑坡易发性分区，最后采用 ROC 曲线及现场复查等方法验证评价结果的可靠性。预测结果表明：研究区内顺层岩质滑坡的极高易发区和较高易发区大致呈面状分布，主要集中在岩性为侏罗系中统上沙溪庙组紫红色泥岩夹砂岩和西北坡向的近库岸地区。现场验证发现易发分区结果与滑坡破坏模式分布规律较吻合，表明基于滑坡破坏模式选择滑坡样本得到的滑坡易发性结果在整体上也能反映研究区滑坡概率空间分布规律，在缺乏准确滑坡样本时可作为一种替补方案。上述研究结果为基于滑坡破坏模式选取滑坡样本开展易发性评价工作提供了理论支持和科学依据。

关键词：ALSA 模型；滑坡易发性；三峡库区；滑坡样本
中图分类号：P642.22 **文献标志码：**A **文章编号：**1003-8035(2023)02-0156-11

Evaluation of landslide susceptibility based on landslide failure mode analysis: A case study of the left bank of Xietan River in the first section of Three Gorges Reservoir

ZHU Yuhang[1], HUANG Haifeng[2,3], YIN Kunlong[1], GUO Zizheng[4], GUO Fei[2,3], LAI Peng[2,3]
(1. *Faculty of Engineering, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan, Hubei* 430074, *China*; 2. *National Field Observation and Research Station of Landslides in the Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River, China Three Gorges University, Yichang, Hubei* 443000, *China*; 3. *College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei* 443002, *China*; 4. *School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin* 300401, *China*)

收稿日期：2021-12-28；**修订日期：**2022-04-06 **投稿网址：**https://www.zgdzzhyfzxb.com/
基金项目：国家自然科学基金项目（42107489）；水电工程智能视觉监测湖北省重点实验室开放基金项目（2020SDSJ02）；三峡库区地质灾害教育部重点实验室开放基金项目（2020KDZ09）
第一作者：朱宇航（1999-），男，硕士，主要从事地质灾害风险评价方面的研究工作。E-mail: cugzyh@cug.edu.cn
通讯作者：黄海峰（1978-），男，博士，教授，主要从事地质灾害监测防治等方面的教学与科研工作。E-mail: hhf@ctgu.edu.cn

Abstract: There are a large number of rock landslide disasters developed in the first section of the Three Gorges Reservoir area, many of which are very hidden and have not been identified. In this paper, taking the left bank of Xietan River in the first section of the Three Gorges Reservoir as the study area, taking the only bedding rock landslide in Kamenziwan as an example, the failure mode of bedding rock landslide in this area is summarized on the basis of analyzing its genesis mechanism. Nine evaluation index factors, including elevation, slope aspect, slope, relief, plane curvature, profile curvature, formation lithology, distance from river and distance from road, as well as suspected hidden danger points of landslide disaster are determined. These hidden danger points are taken as landslide samples. Automatic Landside Susceptibility Assessment Model (ALSA) was used to carry out landslide Susceptibility zoning in the study area. Finally, ROC curve and field review were used to verify the reliability of the evaluation results. The prediction results show that the extremely high and highly prone areas of bedding rock landslides in the study area are distributed in a plane shape, mainly concentrated in the middle Jurassic Upper Shaximiao Formation purplish red mudstone intercalated sandstone, and the northwest slope direction near the reservoir bank area. Field verification shows that the results of prone zoning are consistent with the distribution law of landslide failure mode, indicating that the landslide susceptibility results obtained by selecting landslide samples based on landslide failure mode can also reflect the spatial distribution law of landslide probability in the study area on the whole, and can be used as a substitute scheme in the absence of accurate landslide samples. The above research results provide theoretical support and scientific basis for selecting landslide samples to carry out vulnerability assessment based on landslide failure mode.

Keywords: ALSA model；landslide susceptibility assessment；Three Gorges Reservoir area；landslide samples

0　引言

我国的地质灾害具有种类多、分布广、发生频次高等特点[1]。其中，三峡库区地质环境脆弱复杂，历来是我国地质灾害高发区，每年都会造成大量的人员伤亡和经济损失[2－3]。滑坡易发性评价是滑坡监测预警的有效手段，其评价结果对滑坡防治、土地规划等具有重要指导意义[4]。但是滑坡成因复杂多样，如何科学准确的开展滑坡易发性评价，已成为现阶段滑坡研究的重点之一[5]。

一般来说，滑坡的易发性评价是通过已有滑坡数据的分布来预测未来容易发生滑坡的空间位置，因此，滑坡样本是开展易发性评价的基础。大多数研究在开展易发性评价时具有较为完备的滑坡数据库，区域尺度内历史滑坡数量通常为数百处，例如 Mohammady 等[6]使用 392 处滑坡开展了伊朗格列斯坦 12 050 km^2 区域的滑坡易发性评价，其中训练样本和测试样本的比例达 7∶3；王世宝等[7]分析了金沙江上游巴塘—德格河段 2 150 km^2 范围内的滑坡易发性评价，其中 164 处滑坡被选为建模样本。充足的滑坡样本能够满足各类评价模型尤其是机器学习模型的需求，但有些研究区存在着滑坡样本少或滑坡数据不完备等问题，这直接限制了滑坡易发性评价工作的开展。例如，在喜马拉雅山地区，由于高海拔的限制造成滑坡数据库不完备的情况，Du 等[8]通过遥感解译手段与启发式模型选择了疑似滑坡区完善了滑坡数据库并完成了易发性评价；在奥地利西部地区部分滑坡信息数据记录不全，Steger 等[9]重新核对滑坡数据库，根据准确滑坡数据集生成疑似滑坡数据集来完善滑坡数据库，并完成了易发性评价；在越南中部 Thua Thien-Hue 地区，由于野外调查较少，仅获得了公路两侧可到达区域内的滑坡数据，Meinhardt[10]等在易发性评价中应用视点法来避免由于有限的滑坡数据而产生的统计偏差。由此可见，针对历史滑坡数据较少或滑坡数据收集不完备等问题主要采取的措施为基于遥感解译等方法补充滑坡数据或者通过算法来降低滑坡数据不完备对易发性评价结果的负面影响。但是，此前基于滑坡破坏模式选择疑似滑坡区补充滑坡样本的相关研究还较少。

目前，常用的滑坡易发性评价模型类型为数理统计模型和机器学习模型[11－12]。其中，机器学习模型往往建模过程复杂、计算过程难以根据研究区特征改变且具有“黑箱性”，而数理统计模型与之相反，其原理简单明了、输入-计算-输出过程易于理解。常用的数理统计模型包括信息量模型[13－15]、频率比模型[16－17]、确定性系数模型[18]、逻辑回归模型[19－20]和证据权法模型[21]，本文选择的是频率比模型。该模型的应用前提条件是对各个评价指标因子进行分类，通常是主观选择分类的数量，如人为将各个指标分为 3—9 级，这种分类方式一方面受主观影响过大，另一方面每一级内所有指标都有相

同的频率比值，消除了同一级内指标的区分度[22]，使结果可靠度降低。因此本文选择了基于改进频率比方法的（Automatic landside susceptibility assessment model, ALSA）模型进行易发性计算。该方法可以实现滑坡评价指标的精细化分级，减小了指标分级的主观性，克服了传统通用方法中各指标频率比值分布不连续的问题，提高了各地质灾害影响因子（指标）敏感性的区分度，且已有研究证明了 ALSA 方法相较于传统频率比法在评价结果的精度上有一定的提升[23－24]。

本文以三峡库区首段泄滩河左岸为研究区，分析了区域内典型顺层岩质滑坡——卡门子湾滑坡的破坏模式，并以此为基础确定了评价指标和疑似滑坡区，将疑似滑坡区作为滑坡样本，运用 ALSA 模型开展滑坡易发性评价，探索基于滑坡破坏模式选择疑似滑坡区作为滑坡样本补充滑坡数据库进而开展滑坡易发性评价的可行性。

1 研究区概况

泄滩河位于三峡库区首段秭归向斜盆地西南方，上起秭归周家湾，下止泄滩乡集镇汇入长江主航道，河流长度约 19.36 km。研究区位于三峡库区首段，秭归向斜盆地腹部，泄滩河左岸，行政划分属于秭归县泄滩乡，距三峡大坝约 30 km（图 1）。

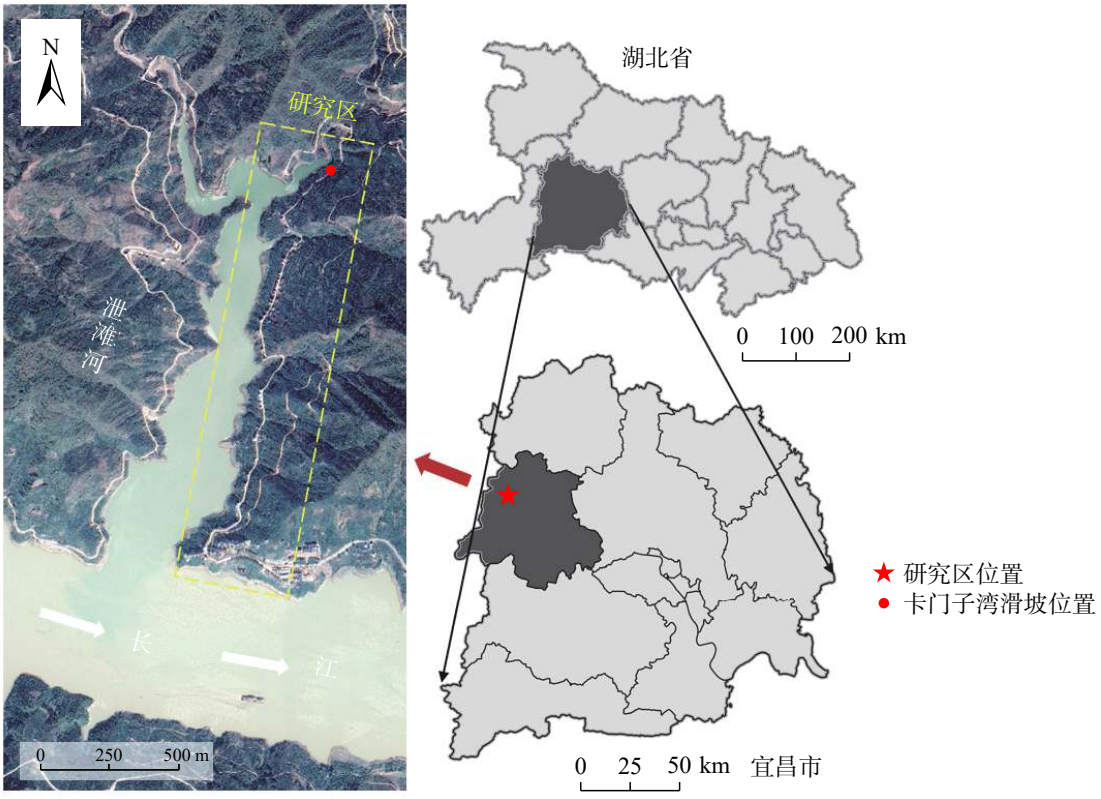


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location map of the study area

研究区面积约 1.5 km^2，高程 146 ~ 472 m，相对高差 326 m，地势东高西低，属中高山峡谷地区。气候为亚热带大陆季风气候，多年平均降雨量达 1 000 mm。出露地层从老到新主要为侏罗系下统桐竹园组（J_1t）、侏罗系中统千佛崖组（J_2q）、侏罗系中统上沙溪庙组（J_2s）。如图 2(a)所示，研究区砂泥岩互层结构十分普遍，区内虽无强烈构造活动，但结构面十分发育，图 2(b)中红色线为结构面交线，为滑坡发育提供了条件。

2 基于滑坡破坏模式分析的滑坡样本确定

2.1 卡门子湾滑坡及成因机制分析

卡门子湾滑坡是目前研究区内唯一被查明且破坏失稳的顺层岩质滑坡。它位于秭归向斜西南翼，距离三峡大坝约 43 km。滑坡面积约 2.1×10^4 m^2，体积约 42×10^4 m^3，滑坡产状 348°∠30°，主轴长约 280 m，平均宽度约 110 m，平均厚度约 20 m。滑坡坡向 330°，前缘高

（a）沙泥岩互层结构　　（b）岩层结构面

图 2　泄滩河左岸现场调查图（摄于 2020 年 8 月）

Fig. 2　Field geotechnical photo of the left bank of Xietan River (August 2020)

程 175 m 直接抵达长江，后缘以基岩陡崖为界，高程为 285 m，滑坡左边界为层面，右边界由交错结构面构成。滑坡区露头地层主要为侏罗系中统上沙溪庙组，岩性主要为粉砂质泥岩和粉砂岩，岩层产状 35°∠44°，微地貌与岩性有很高的相关性，粉砂岩露头区形成山脊，泥岩露头区相对平缓。卡门子湾滑坡破坏过程分为三个阶段，第一阶段，微小形变阶段：2019 年 11 月 20 日—11 月 27 日，卡门子湾滑坡区的公路上出现了一些裂缝。第二阶段，显著形变阶段：11 月 28 日—12 月 5 日，由于挤压作用滑坡下游出现鼓胀裂缝，沿粉砂质泥岩（软弱面）发生变形，由于拉张作用滑坡后缘出现近弧形拉张裂缝。在此阶段滑坡的前后缘边界开始初步形成。第三阶段，加速形变至失稳阶段：前缘沿河边界剧烈膨胀，后缘拉张裂缝进一步加深。终于 12 月 10 日，各边界完全贯通，滑坡破坏失稳。滑坡区内主要种植柑橘林，无住户和房屋，有一条高速公路北东向贯通整个滑坡，水路有长江航运，可常年通航，交通较方便（图 3）。

图 3　卡门子湾滑坡全貌及优势结构面

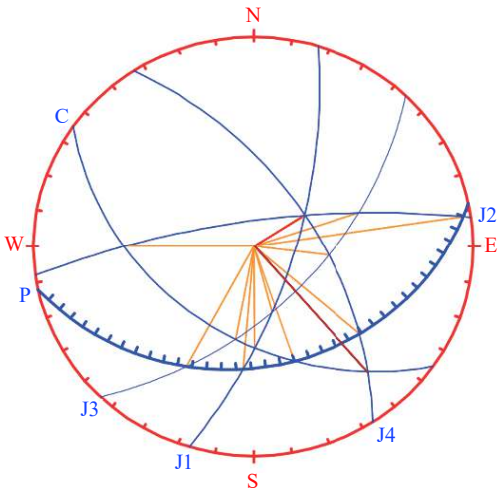
Fig. 3　Arial view and dominant structural plane of Kamenziwan landslide

2.1.1　结构面赤平投影分析

现场调查测得泄滩河左岸共 76 组产状，形成三组优势节理面分别为：Ja 284°∠71°，Jb 186°∠66°，Jc 310°∠56°。卡门子湾滑坡区内节理发育，有四组优势节理分别为 J1 287°∠69°，J2 172°∠76°，J3 314°∠58°，J4 237°∠59°（图 3），其中与整个泄滩河左岸的三组优势节理相近的三组节理应为同三组节理。根据图 4 赤平投影分析结构面组合交线对边坡稳定性的影响，从中可发现仅有 C-J4 组合结构面交线倾向与边坡倾向相同，倾角小于天然边坡坡角，结构面组合切割岩体形成的楔形体属不稳定结构，因此 C-J4 为卡门子湾滑坡失稳的控制性结构面。值得注意的是 C-J4、J1-J2、J1-J4、J2-J4 三组结构面交线重合，这验证了现场调查发现的滑坡左边界由多组结构面交错组成的现象。

2.1.2　降雨及库水位触发因素分析

卡门子湾滑坡破坏失稳前 5 d 库水位平均下降速率为 0.04 m/d，这种缓慢的速率不足以诱发滑坡，因此库水位大幅波动诱发滑坡的可能性不大。11 月 30 日至滑坡发生当天（12 月 10 日），连续 10 d 天气晴朗基本没有降雨（图 5）。此外，滑坡发生前最后 30 d 的累积降雨量仅为 24.4 mm，表明降雨诱发滑坡的可能性很低[25]。所以卡门子湾滑坡不太可能是由降雨引发的[26]，即这次



编号	结构面名称	倾向/(°)	倾角/(°)
P	坡面	348	30
C	层面	35	44
J1	结构面1	287	69
J2	结构面2	172	76
J3	结构面3	314	58
J4	结构面4	237	59

组合交棱线	倾向/(°)	倾角/(°)
P–C	341	30
P–J1	5	29
P–J2	261	2
P–J3	28	24
P–J4	311	25
C–J1	359	38
C–J2	90	29
C–J3	11	41
C–J4	319	13
J1–J2	237	59
J1–J3	345	54
J1–J4	237	59
J2–J3	251	36
J2–J4	237	59
J3–J4	277	52

图 4　卡门子湾滑坡结构面赤平投影

Fig. 4　Equated projection of Kamenziwan landslide section

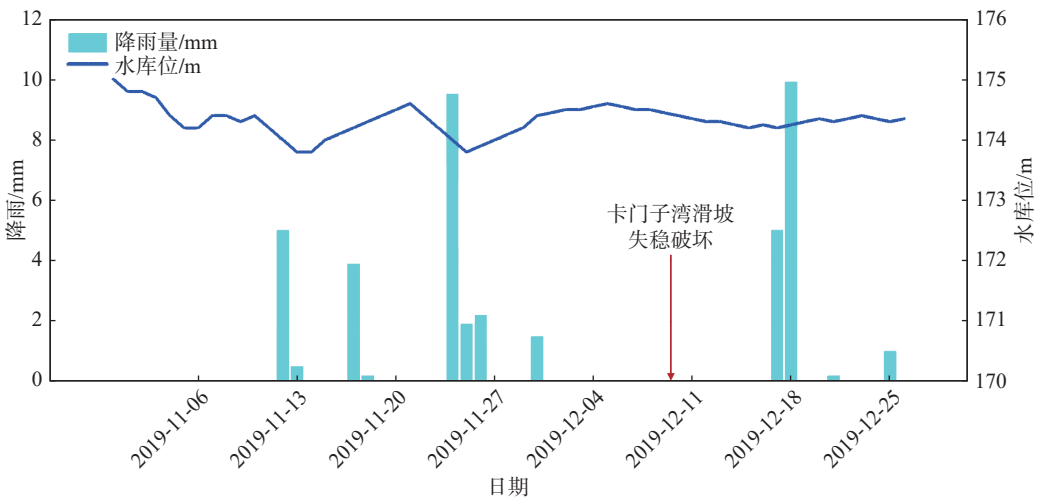


图 5　卡门子湾滑坡破坏前后库水位和降雨量

Fig. 5　Summery of reservoir water level and rainfall before and after Kamenziwan landslide failure

水库滑坡没有直接明显的降雨触发因素。

2.1.3　区内斜坡破坏模式总结

根据上述分析及野外现场调查的结果，卡门子湾滑坡的破坏失稳主要是由前缘的牵引和中后部的推力联合作用引起的，其中前缘牵引力对滑坡失稳的促进作用至关重要(表 1)。卡门子湾滑坡前后近 10 d 基本上没有降雨，库水位较稳定，因此排除降雨及库水大幅波动对滑坡失稳的影响。研究区砂泥岩互层的微地貌广泛发育，这种结构易被侵蚀，在库区长期的水位波动下，海拔 175 m 以下的关键抗滑段遭到严重侵蚀，造成前缘临空。因此，消落带岩体的退化大大加速了卡门子湾滑坡的破坏。具体的滑坡破坏模式示如图 6 所示，总的来看，卡门子湾滑坡失稳的控制性因素是岸坡结构和地层岩性，库水的长期侵蚀是关键触发因素。

2.2　疑似滑坡区划分

卡门子湾滑坡滑动前其微地貌是一个突出的粉砂岩山脊，失稳后卡门子湾滑坡微地貌变为粉砂岩脊夹泥岩沟谷[27]。经过野外调查发现研究区有大量类似粉砂岩山脊夹泥岩沟谷微地貌(图 7)，主要有两方面原因：(1)砂泥岩差异风化所致，即泥岩比粉砂岩易风化，泥岩

表 1　卡门子湾滑坡破坏模式总结表

Table 1　Summary table of failure mode of Kamenziwan landslide

岸坡类型		缓倾切向坡
破坏模式		视倾向顺层牵引式滑坡
孕灾(六面体)结构面	斜坡表面	“上陡下缓前临空”的台阶状折线地形
	底部滑带	左侧顺层，右侧切层
	前缘剪出口	河流冲刷侵蚀形成临空面，剪出口高程在145 ~ 175 m
	后缘边界	一组陡倾结构面切割，出露岩层切面
	左侧边界	多组结构面相互切割形成阶梯状边界
	右侧边界	岩层面
	边界特征	两个约束边界(右、后)+两个自由边界(左、前)
物质组成条件	滑体	块裂岩体
	滑带	中后部由三组结构面及岩层面形成阶梯状滑带，前部岩层溃曲形成缓倾结构面
	滑床	侏罗系中统沙溪庙组(J_2s)上部灰绿色砂岩夹泥岩，下部紫红色泥岩夹砂岩

风化后凹陷形成沟谷，粉砂岩凸出形成山脊。(2)可能是由于曾经发生的粉砂岩滑坡造成的。特别是在泄滩河左岸北段岩性为侏罗系中统上沙溪庙组，西北坡向区域，有大量的凹槽、山脊与平台，这些平缓的前缘平台和后缘的圈椅状地貌多是由历史滑坡形成[28]，但这些历史滑坡尚未查明。泄滩河左岸砂泥岩矿物成分主要是石英和蒙脱土，具有很强的膨胀和吸水能力的蒙脱土易泥化和软化，这些类型的矿物在滑带中的存在使得坡体更容易发生形变。该区域岩质滑坡破坏后，将形成两个较小砂岩山脊和泥岩沟谷，因此该地区岩性为砂泥岩互层，西北坡向，平行层理、斜层理或明显倾斜层理等类似有规律的凸出山脊微地貌区域，可能成为潜在滑坡地质灾害孕育区。通过广泛的野外现场调查，最终圈定了 5 个地点作为研究区的疑似滑坡区。它们均具有卡门子湾滑坡发生前类似的特征(图 7)。确定疑似滑坡

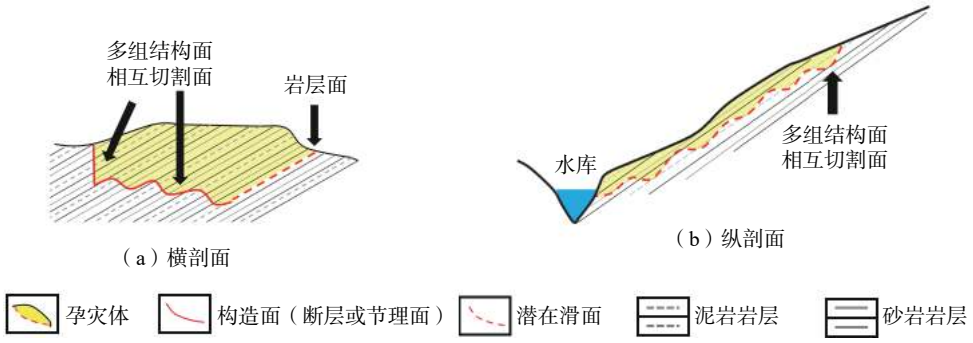


图 6　卡门子湾滑坡破坏模式概化示意图

Fig. 6　Generalized schematic diagram of failure mode of Kamenziwan landslide

图 7　泄滩河北段粉砂岩山脊夹泥岩沟谷微地貌示意图

Fig. 7　The terrain and watershed partition of siltstone ridge and mudstone valley in Xietan River north section

区后，结合卡门子湾滑坡区建立研究区滑坡样本数据库，其中圈定的 5 处疑似滑坡区（图 7 中蓝色位置）作为训练样本，卡门子湾滑坡区作为验证样本。

3 滑坡易发性评价

3.1 评价指标

滑坡发育由内因和外因共同影响，内因一般指坡体内部地质条件，主要包括地形地貌、地层岩性和岸坡结构等；外因通常指外在触发因素，如降雨和人类工程活动（建房、修路）等[29－32]。在本研究中，卡门子湾滑坡的破坏控制性因素为地层岩性及岸坡结构，其微地貌表现为砂岩山脊夹泥岩沟谷。评价指标选取地层岩性，这是卡门子湾滑坡破坏的主控因素之一；由于研究区内地层产状基本不发生变化，选取坡度、坡向表征岸坡结构；滑坡多发在砂岩山脊夹泥岩沟谷微地貌地区，故选取起伏度、平面曲率、剖面曲率表征微地貌；卡门子湾滑坡内有一条公路，用距道路距离表征人类工程活动对滑坡的影响；卡门子湾滑坡的触发因素被认为是滑坡关键抗滑段遭到库水严重侵蚀，加速滑坡破坏失稳，因此用距河流距离及高程表征库水侵蚀对滑坡失稳的影响，最终选取了高程、坡度、坡向、起伏度、平面曲率、剖面曲率、地层岩性、距河流距离、距道路距离共 9 个评价指标来建立易发性评价的指标体系。研究区的数字高程模型（DEM）是由无人机影像当中提取出来的，分辨率为 1 m。坡度、坡向、平面曲率、剖面曲率是在 ArcGIS 中由 DEM 导出的，地层岩性来自于地质图，距河流距离和距道路距离是根据河岸线与道路线在 ArcGIS 中通过 10 m 等间隔多环缓冲区生成的，起伏度在 ArcGIS 中通过使用搜索邻域为 3 m×3 m 的矩形统计高差得出。

3.2 易发性建模过程

ALSA 模型基于改进频率比方法[33－34]，其原理如式（1）—（4）所示。

$$FR_i = \frac{\text{滑坡频率}}{\text{分类频率}} \tag{1}$$

$$\text{滑坡频率} = \frac{\text{某分类内滑坡面积}}{\text{研究区滑坡总面积}} \tag{2}$$

$$\text{分类频率} = \frac{\text{某分类总面积}}{\text{研究区总面积}} \tag{3}$$

把各个指标的频率比值相加就得到了滑坡易发性评价指数：

$$LSI_i = \sum_{j=1}^{n} FR_i^{(j)} \tag{4}$$

式中：LSI_i——第 i 个分类区所有滑坡因子的滑坡易发性评价指数，$i(i = 1,2,3,\cdots,k)$为分类编号，$j(j = 1,2,3,\cdots,n)$为滑坡评价因子的种类编号；

FR_i——频率比值。

ALSA 建模是通过使用李郎平等[22]基于 GIS 开发的易发性评价工具箱实现的（图 8）。建模操作流程分为 7 个步骤：（1）输入滑坡面数据，即在 2.2 节中圈定的 5 个疑似滑坡区；（2）输入影响因子，影响因子分为连续型和非连续型，本文除地层岩性外其余指标均为连续型；（3）输入处理范围，即研究区范围；（4）确定输出栅格单元大小，本文输出和输入栅格大小保持一致，均为 1 m×1 m；（5）确定精度，这里的精度指的是评价指标分

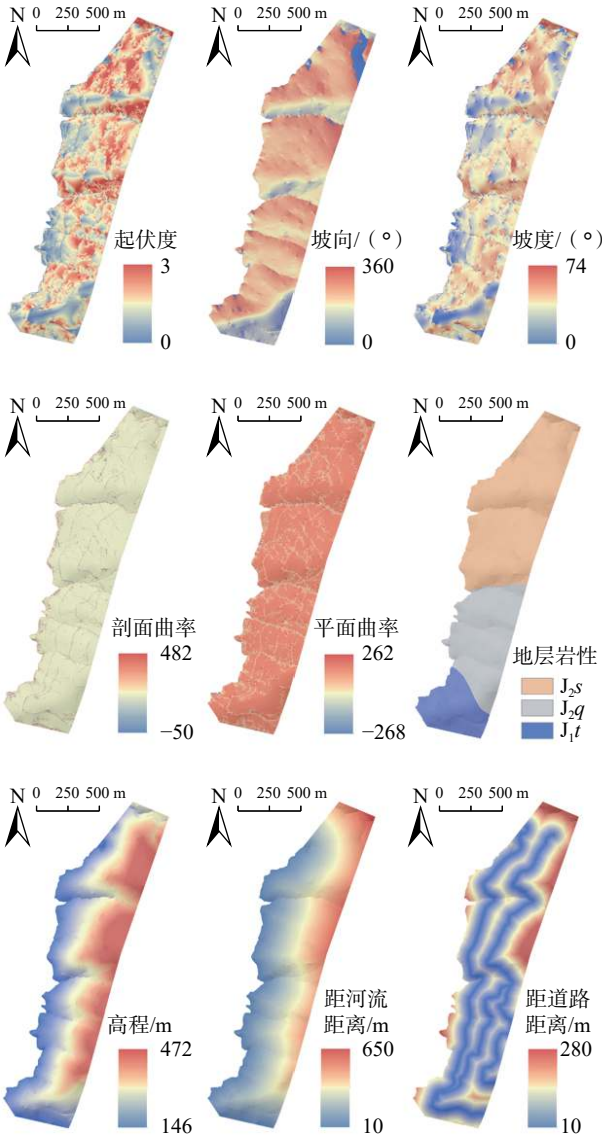


图 8 易发性评价指标图层

Fig. 8 Layer of susceptibility assessment index

级精细程度，本文将各个指标分为 10 001 级[22]；(6)确定邻域宽度，经过第 2 步归一化处理后，邻域宽度就变成 0 ~ 1 之间的数值，因此一般默认设置为 0.1；(7)输出结果，所有操作完成后 ALSA 工具箱可以自动输出包括各个指标频率比值及求和后得到易发性评价指数。

3.3　评价结果及检验

3.3.1　评价结果

以疑似滑坡区为滑坡样本，基于 ALSA 模型运用自然断点法将研究区分为极低易发区(23.3%)、较低易发区(31.2%)、中易发区(29%)、较高易发区(13.9%)、极高易发区(2.6%)(图 9)，其中极高易发区和较高易发区主要集中在西北坡向，岩性为侏罗系中统上沙溪庙组的近岸段，显然卡门子湾滑坡区及 2.3 节中选择的疑似滑坡区滑坡样本主要分布在极高易发区和较高易发区。

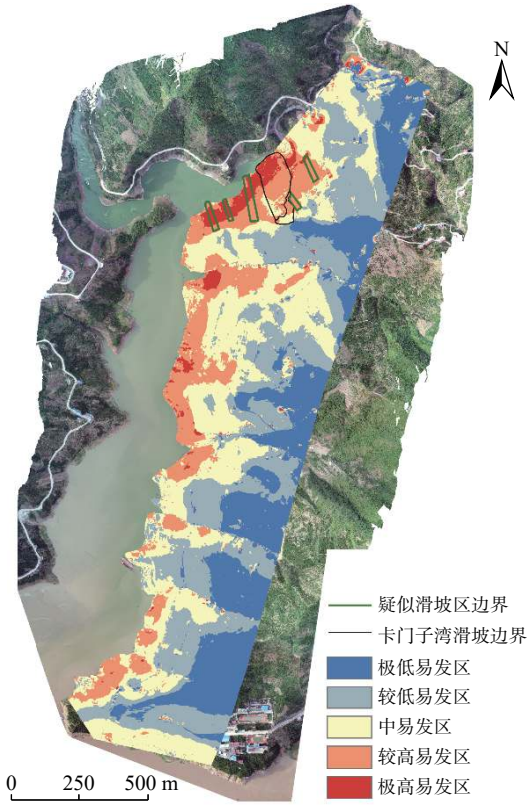


图 9　疑似滑坡区为训练样本的滑坡易发性分区图

Fig. 9　Distribution map of landslide susceptibility area

3.3.2　结果检验

(1) 统计分析方面验证

ROC 曲线指受试者工作特征曲线，是反映敏感性和特异性的综合指标，可用于滑坡易发性结果的精度分析，*AUC* 值是 ROC 曲线下积分面积，取值范围在 0 ~ 1，其值越大表示评估的准确性越高，*AUC* 值为 0.93(图 10)。结合在疑似滑坡区作为滑坡样本得到的滑坡易发性评价结果中，卡门子湾滑坡区内极高易发区和较高易发区占 82.8%(表 2)。表明评价结果具有一定的可靠性。

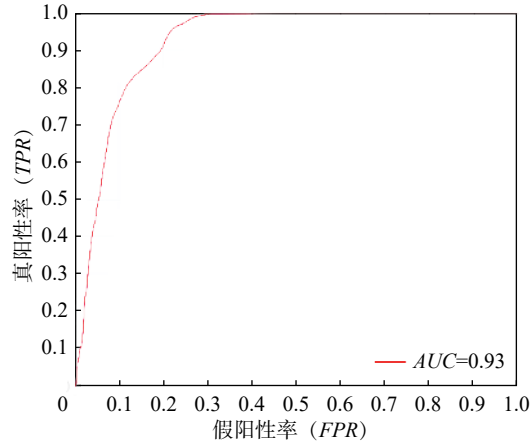


图 10　易发性结果 ROC 曲线

Fig. 10　ROC curve of susceptibility results

表 2　卡门子湾滑坡区易发性结果分析表

Table 2　Summey table of landslide susceptibility results at Kamenziwan landslide area

以疑似滑坡区为样本的滑坡易发性评价结果			
卡门子湾滑坡区	栅格数	各分区占比/%	极高及较高易发区占比/%
极高易发	5 986	26.6	82.8
高易发	12 640	56.2	
中易发	3 750	16.7	
低易发	113	0.5	
极低易发	0	0.0	
总计	22 489	100	

(2)现场调查验证

选取部分高易发区及低易发区进行现场调查验证易发分区结果的合理性(图 11)，其中黄色线代表砂岩山脊，红色线表示泥岩沟谷。选取极高易发区 I，较高易发区 II 及低易发区 III 进行验证。经现场调查，在 I 区后缘发现一座可能是由于变形导致大量裂缝的废弃房屋，近期未发现明显的变形痕迹。但 I、II 两区域与卡门湾滑坡区坡向相近、岩性相同并且都是粉砂岩山脊微地貌，与 2.2 节中的破坏模式相符。因此 I、II 区域目前可能处于休眠期，也许在未来某次强降雨或人类工程活动的诱发下发生变形破坏。III 区域虽然与卡门子湾滑坡区域有相同的岩性，但是坡向却近乎相垂直，且不具备山脊微地貌，所以 I、II 区域划分为极高和较高易发区，III 区域划分为低易发区的结果与实际相符，较为可靠。

图 11 现场验证位置及照片(摄于 2021 年 1 月)

Fig. 11 Field review verification photos (January 2021)

4 讨论

整体来看,滑坡易发性的结果(极高、较高、中、较低、极低)分区基本平行于泄滩河,这与卡门子湾滑坡触发因素及破坏模式有关。本文是基于破坏模式选取滑坡样本及评价指标进而开展的滑坡易发性评价。卡门子湾滑坡失稳的触发因素被认为是:在库区长期的水位波动下,海拔 175 m 以下的关键抗滑段遭到严重侵蚀,造成前缘临空,消落带岩体的退化大大加速了卡门子湾滑坡的破坏过程。从这个角度分析离河岸越远,坡体被侵蚀程度越低,滑坡易发性越低,即易发性的结果分区基本平行于泄滩河,这与研究区滑坡破坏模式是相符的。从易发性评价流程分析可能是滑坡样本选择时,仅在河岸附近选择了砂岩山脊夹泥岩沟谷微地貌作为滑坡样本(疑似滑坡区),以及距河流距离、高程等评价因子的综合作用导致了这样的易发性结果。实际上也仅在河岸附近会存在与卡门子湾滑坡破坏模式相似的潜在地质灾害体,与野外调查较为一致。

本文易发性评价单元采用的是栅格单元,除此之外斜坡单元也是一个很好的选择,斜坡单元能较好地表达破坏模式中砂岩山脊夹泥岩沟谷的微地貌结构。但是评价单元的选择需要根据研究区实际情况和数据质量等来进行取舍。由于研究区较小,如果采用斜坡单元可能只够划分数个斜坡单元,数量较少,难以开展易发性评价。另外 ALSA 模型基于栅格单元能够实现各指标的精细化分组,让频率比值趋近于连续,采用斜坡单元就削弱了 ALSA 模型的优势,且目前基于 ALSA 模型应用研究多采用的栅格单元[22-23],因此,最终选择了栅格单元。从结果来看,采用栅格单元基于滑坡破坏模式选择滑坡样本得到的滑坡易发性结果,在整体上也能反映研究区滑坡概率的空间分布规律,表明基于滑坡破坏模式选取滑坡样本的方法是可行的,有一定的合理性。或许采用斜坡单元,基于滑坡破坏模式选取滑坡样本,运用多种易发性模型对比分析,能得到更高的精度,这也是下一步改进的方向。

5 结论

本文以三峡库首段泄滩河左岸为例,基于研究区顺层岩质滑坡的破坏模式选取评价指标及滑坡样本,运用 ALSA 模型开展滑坡易发性评价。主要结论如下:

(1)本文在野外调查和工程地质分析的基础上,总结了三峡库首段泄滩河左岸卡门子湾滑坡的成因机制:坡体的顺层岸坡结构起内在的控制作用,砂泥岩互层的岩性受到了多组结构面切割,加上库水位周期波动侵蚀了滑坡前段主要抗滑段,加速了滑坡的失稳破坏。研究区内还存在较多与卡门子湾滑坡破坏模式类似的地质灾害,通过对卡门子湾滑坡的分析,归纳了区内潜在滑坡的地质特征:在地形地貌上的表现形式为砂岩山脊夹泥岩沟谷微地貌,砂岩山脊破坏后形成两个较小的砂岩山脊夹泥岩沟谷。

(2)利用上述发现划分了研究区内的疑似滑坡区,并将其选取为滑坡样本,采用基于改进频率比法的 ALSA 模型进行滑坡易发性评价,得到的滑坡易发性图及 ROC 曲线。从统计分析方面验证,易发性结果的 *AUC* 值为 0.93,卡门子湾滑坡区内高易发区和极高易发区占 82.8%,表明基于滑坡破坏模式选取的评价因子及滑坡样本具有一定的合理性。整体来看,高易发区和极高易发区主要分布在泄滩河左岸北段,地层为侏罗系中统上沙溪庙组,岸坡结构主要为顺向坡的区域,极低与较低易发区主要分布在西南坡向且岸坡结构为逆向坡的中高山区,与野外调查的结果较相符。这说明基于滑坡破坏模式选择滑坡样本得到的滑坡易发性结果在整体上也能反映研究区滑坡概率空间分布规律,在缺乏准确滑坡样本时可作为一种替补方案。

参考文献(References):

[1] 殷坤龙,朱良峰. 滑坡灾害空间区划及GIS应用研究[J]. 地学前缘, 2001, 8(2): 279-284. [YIN Kunlong,

ZHU Liangfeng. Landslide hazard zonation and application of GIS［J］. Earth Science Frontiers, 2001, 8(2): 279－284.（in Chinese with English abstract）］

［2］ 黄波林，殷跃平，李滨，等. 三峡工程库区岩溶岸坡岩体劣化及其灾变效应［J］. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 51－61.［HUANG Bolin, YIN Yueping, LI Bin, et al. Rock mass deterioration and its catastrophic effect of karst bank slope in the Three Gorges Project Reservoir area［J］. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 51－61.（in Chinese with English abstract）］

［3］ 卫童瑶，殷跃平，高杨，等. 三峡库区巫山县塔坪H1滑坡变形机制［J］. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 73－81.［WEI Tongyao, YIN Yueping, GAO Yang, et al. Deformation mechanism of the taping H1 landslide in Wushan County in the Three Gorges Reservoir area［J］. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 73－81.（in Chinese with English abstract）］

［4］ 郭子正，殷坤龙，付圣，等. 基于GIS与WOE-BP模型的滑坡易发性评价［J］. 地球科学, 2019, 44(12): 4299－4312.［GUO Zizheng, YIN Kunlong, FU Sheng, et al. Evaluation of landslide susceptibility based on GIS and WOE-BP model［J］. Earth Science, 2019, 44(12): 4299－4312.（in Chinese with English abstract）］

［5］ 张钟远，邓明国，徐世光，等. 镇康县滑坡易发性评价模型对比研究［J］. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(1): 157－171.［ZHANG Zhongyuan, DENG Mingguo, XU Shiguang, et al. Comparison of landslide susceptibility assessment models in Zhenkang County, Yunnan Province, China［J］. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(1): 157－171.（in Chinese with English abstract）］

［6］ MOHAMMADY M, POURGHASEMI H R, PRADHAN B. Landslide susceptibility mapping at Golestan Province, Iran: a comparison between frequency ratio, Dempster-Shafer, and weights-of-evidence models［J］. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 61: 221－236.

［7］ 王世宝，庄建琦，樊宏宇，等. 基于频率比与集成学习的滑坡易发性评价：以金沙江上游巴塘——德格河段为例［J］. 工程地质学报, 2022, 30(3): 817－828.［WANG Shibao, ZHUANG Jianqi, FAN Hongyu, et al. Evaluation of landslide susceptibility based on frequency ratio and ensemble learning: Taking the Batang-Dege section in the upstream of Jinsha River as an example［J］. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(3): 817－828.（in Chinese with English abstract）］

［8］ DU Juan, GLADE T, WOLDAI T, et al. Landslide susceptibility assessment based on an incomplete landslide inventory in the Jilong Valley, Tibet, Chinese Himalayas［J］. Engineering Geology, 2020, 270: 105572.

［9］ STEGER S, BRENNING A, BELL R, et al. Exploring discrepancies between quantitative validation results and the geomorphic plausibility of statistical landslide susceptibility maps［J］. Geomorphology, 2016, 262: 8－23.

［10］ MEINHARDT M, FINK M, TÜNSCHEL H. Landslide susceptibility analysis in central Vietnam based on an incomplete landslide inventory: Comparison of a new method to calculate weighting factors by means of bivariate statistics［J］. Geomorphology, 2015, 234: 80－97.

［11］ ABEDINI M, TULABI S. Assessing LNRF, FR, and AHP models in landslide susceptibility mapping index: A comparative study of Nojian watershed in Lorestan Province, Iran［J］. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(11): 405.

［12］ 夏辉，殷坤龙，梁鑫，等. 基于SVM-ANN模型的滑坡易发性评价——以三峡库区巫山县为例［J］. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(5): 13－19.［XIA Hui, YIN Kunlong, LIANG Xin, et al. Landslide susceptibility assessment based on SVM-ANN Models: A case stualy for Wushan County in the Three Gorges Reservoir［J］. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(5): 13－19.（in Chinese with English abstract）］

［13］ 殷坤龙，柳源. 滑坡灾害区划系统研究［J］. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11(4): 28－32.［YIN Kunlong, LIU Yuan. Systematic studies on landslide hazard zonation［J］. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2000, 11(4): 28－32.（in Chinese with English abstract）］

［14］ 周天伦，曾超，范晨，等. 基于快速聚类-信息量模型的汶川及周边两县滑坡易发性评价［J］. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(5): 137－150.［ZHOU Tianlun, ZENG Chao, FAN Chen, et al. Landslide susceptibility assessment based on K-means cluster information model in Wenchuan and two neighboring counties, China［J］. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(5): 137－150.（in Chinese with English abstract）］

［15］ 石菊松，张永双，董诚，等. 基于GIS技术的巴东新城区滑坡灾害危险性区划［J］. 地球学报, 2005, 26(3): 275－282.［SHI Jusong, ZHANG Yongshuang, DONG Cheng, et al. GIS-based landslide hazard zonation of the new Badong County site［J］. Acta Geosicientia Sinica, 2005, 26(3): 275－282.（in Chinese with English abstract）］

［16］ 郭子正，殷坤龙，黄发明，等. 基于滑坡分类和加权频率比模型的滑坡易发性评价［J］. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(2): 287－300.［GUO Zizheng, YIN Kunlong, HUANG Faming, et al. Evaluation of landslide susceptibility based on landslide classification and weighted frequency ratio model［J］. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(2): 287－300.（in Chinese with English abstract）］

［17］ MA Shuyue, QIU Haijun, HU Sheng, et al. Quantitative

assessment of landslide susceptibility on the Loess Plateau in China [J]. Physical Geography, 2020, 41(6): 489 − 516.

[18] 罗路广, 裴向军, 黄润秋, 等. GIS支持下CF与Logistic回归模型耦合的九寨沟景区滑坡易发性评价 [J]. 工程地质学报, 2021, 29(2): 526 − 535. [LUO Luguang, PEI Xiangjun, HUANG Runqiu, et al. Landslide susceptibility assessment in Jiuzhaigou scenic area with GIS based on certainty factor and Logistic regression model [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(2): 526 − 535. (in Chinese with English abstract)]

[19] 罗路广, 裴向军, 崔圣华, 等. 九寨沟地震滑坡易发性评价因子组合选取研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(11): 2306 − 2319. [LUO Luguang, PEI Xiangjun, CUI Shenghua, et al. Combined selection of susceptibility assessment factors for Jiuzhaigou earthquake-induced landslides [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(11): 2306 − 2319. (in Chinese with English abstract)]

[20] 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, 2017, 32(2): 139 − 154.

[21] 刘璐瑶, 高惠瑛. 基于证据权与Logistic回归模型耦合的滑坡易发性评价 [J]. 工程地质学报, 2021: 1 − 11 [2021-05-13]. [LIU Luyao, GAO Huiying. landslide susceptibility assessment based on coupling of woe model and Logistic regression model [J]. Journal of Engineering Geology, 2021: 1 − 11 [2021-05-13]. (in Chinese with English abstract)]

[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. (in Chinese with English abstract)]

[23] LI Langping, LAN Hengxing, GUO Changbao, et al. A modified frequency ratio method for landslide susceptibility assessment [J]. Landslides, 2017, 14(2): 727 − 741.

[24] ZHANG Yixing, LAN Hengxing, LI Langping, et al. Optimizing the frequency ratio method for landslide susceptibility assessment: A case study of the Caiyuan Basin in the southeast mountainous area of China [J]. Journal of Mountain Science, 2020, 17(2): 340 − 357.

[25] HE Keqiang, WANG Shangqing, DU Wen, et al. Dynamic features and effects of rainfall on landslides in the Three Gorges Reservoir region, China: Using the Xintan landslide and the large Huangya landslide as the examples [J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 59(6): 1267.

[26] TANG Huiming, WASOWSKI J, JUANG C H. Geohazards in the three Gorges Reservoir Area, China - Lessons learned from decades of research [J]. Engineering Geology, 2019, 261: 105267.

[27] YIN Yueping, HUANG Bolin, ZHANG Quan, et al. Research on recently occurred reservoir-induced Kamenziwan rockslide in Three Gorges Reservoir, China [J]. Landslides, 2020, 17(8): 1935 − 1949.

[28] Regional level landslide inventory maps of the Shyok River watershed, Northern Pakistan [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2016, 75(2): 563 − 574.

[29] 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. (in Chinese with English abstract)]

[30] 周超, 殷坤龙, 曹颖, 等. 基于集成学习与径向基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. (in Chinese with English abstract)]

[31] 闫举生, 谭建民. 基于不同因子分级法的滑坡易发性评价——以湖北远安县为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(1): 52 − 60. [YAN Jusheng, TAN Jianmin. Landslide susceptibility assessment based on different factor classification methods: A case study in Yuanan County of Hubei Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(1): 52 − 60. (in Chinese with English abstract)]

[32] LIU Zhongqiang, GILBERT G, CEPEDA J M, et al. Modelling of shallow landslides with machine learning algorithms [J]. Geoscience Frontiers, 2021, 12(1): 385 − 393.

[33] LAN H X, ZHOU C H, WANG L J, et al. Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China [J]. Engineering Geology, 2004, 76(1/2): 109 − 128.

[34] 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)]