

引用格式:王力,胡文卓,王世梅,李玉,范志宏. 三峡库区塌岸灾害易发性评价方法——以奉节—云阳段为例[J]. 山地学报, 2023, 41(4): 554-570.

WANG Li, HU Wenzhuo, WANG Shimei, LI Yu, FAN Zhihong. An updated method for susceptibility evaluation on bank collapses along the Fengjie-Yunyang section of Three Gorges Reservoir, China [J]. Mountain Research, 2023, 41(4): 554-570.

三峡库区塌岸灾害易发性评价方法 ——以奉节—云阳段为例

王力^{a, b}, 胡文卓^{a, b}, 王世梅^{a, b*}, 李玉^{a, b}, 范志宏^{a, b}

(三峡大学 a. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室; b. 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 塌岸灾害广泛分布于中国三峡库区。塌岸易发性评价对库区灾害防治具有重要意义。当前塌岸易发性评价的研究程度低,评价模型的适用性差,评价指标的选取依据不充分,并没有考虑波浪对库岸稳定性的影响。本研究以塌岸灾害广泛发育的三峡库区奉节段至云阳段为研究对象,考虑波浪和库岸形态对研究区塌岸发育的影响,提出江岸宽度、库岸形态、风速这三个指标,并基于研究区塌岸灾害发育和分布特征共选取 8 个影响因子,构建三峡库区塌岸灾害易发性评价指标体系;采用三种机器学习模型,实现三峡库区塌岸灾害易发性分区及检验、模型精度预测、评价结果的分区和实地验证。结果表明:(1)江岸宽度、岸坡形态和风速等影响因子权重靠前,对奉节段塌岸发育的贡献较大;(2)ANN 模型、RF 模型与 SVM 模型的较高-高易发区灾害点数量分别占总灾害点的 53.1%、48.9% 和 39.3%。ANN 模型与 RF 模型塌岸强度从低至高依次增大,分区结果较为合理,而 SVM 模型分区结果不太理想。(3)ANN 模型、RF 模型和 SVM 模型的 AUC 值分别为 0.798、0.793、0.766,三种机器学习模型的预测精度较为可靠;(4)RF 模型高易发性区域最符合实际地质条件,其易发性区划结果更为合理。本研究成果可以深化对水库塌岸灾害易发性评价方法的认识,并为三峡库区地质灾害防治工作提供理论指导和技术参考。

关键词: 三峡库区;塌岸;易发性评价;机器学习模型

中图分类号: P694

文献标志码: A

三峡库区自建成蓄水以来,在长期周期性水位升降和波浪作用下,库区侵蚀塌岸等地质灾害日益严重^[1]。自 2008 年至今,三峡库区奉节段—云阳段岸坡塌岸等地质灾害发生数十起,严重威胁了长江航道的安全^[2]。2020 年、2022 年两次调查发现,三峡库区共发生规模较大的塌岸点达 129 处,土质岸坡为库区塌岸的重点区域;2006 年正常蓄水调度以来,新增塌岸点约有 61.4% 位于土质岸坡中,且规

模较大^[3]。对蓄水期塌岸事件进行调查发现^[4],地层岩性和地形坡度是库区塌岸的主要影响因素;在塌岸易发频发区域,地形坡度多大于 30°且多为伸入河流的土质岸坡。

易发性评价研究的研究对象多为滑坡^[5]灾害,崩塌^[6]、崩岗^[7]等地质灾害次之,以塌岸为研究对象进行易发性评价的研究程度相对较低。针对水库塌岸研究,主要集中在塌岸影响因素及破坏模式和

收稿日期(Received date): 2023-03-02;改回日期(Accepted date): 2023-08-27

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金重点项目(U21A2031);中国博士后科学基金(2021M701969)。[Key Project of National Natural Science Foundation of China (U21A2031); China Postdoctoral Science Foundation(2021M701969)]

作者简介(Biography): 王力(1988-),男,湖北孝感人,博士,讲师,主要研究方向:地质灾害机理、预防与评价。[WANG Li (1988-), male, born in Xiaogan, Hubei province, Ph. D., lecturer, research on geological hazard mechanism, prevention and evaluation] E-mail: wangli_ctgu@126.com

* 通讯作者(Corresponding author): 王世梅(1965-),女,博士,教授,主要研究方向:岩土基本理论与地质灾害防灾减灾。[WANG Shimei (1965-), female, Ph. D., professor, research on basic theory of rock and soil and disaster prevention and reduction of geological disasters] E-mail: 284480957@qq.com

塌岸预测分析等两方面。部分学者分析了水库塌岸影响因素,发现岸坡物质组成^[8]、地质构造、地层岩性、岸坡结构^[9-11]和岸线形态^[12-14]等与塌岸发育密切相关,库水位变动^[15-16]和波浪作用^[17]是导致岸坡塌岸的主要外因。波浪作用对水库塌岸的影响目前以定性评价为主,也有部分学者结合“官厅公式”提出了新的风浪计算公式^[18],但呈现形式仍不直观。三峡库区波浪主要成浪因素是风力和行船^[19],且风浪波和船行波的波高受到三峡库区河面宽度的影响^[20]。由于三峡库区正常蓄水后风区长度会大幅增加,风浪波高也随之增加,部分学者提出了水库风浪要素计算公式^[21],风力、风区长度、风速等为风浪计算的主要参数^[22]。塌岸预测分析也是目前塌岸研究的热点问题^[23-26],总体而言都是预测水库发生后的影响范围,对塌岸灾害发生概率研究较少。

塌岸易发性评价存在以下不足:(1)塌岸易发性评价研究开展程度较低,不同的地质条件下,塌岸影响因素不同,评价指标的选取具有不确定性;对不同空间尺度的滑坡灾害进行易发性评价,评价模型的选取较为成熟,但对塌岸这一尺度的评价模型的适用性尚未可知。(2)在易发性评价中,考虑地层岩性、地质构造以及降雨等因素的影响已较为成熟,如何将波浪对塌岸造成的影响进行量化仍是有待解决的关键问题。

本文基于现场调查,分析奉节段—云阳段塌岸发育分布特征,探讨岸坡塌岸的主要影响因素,构建三峡库区塌岸灾害易发性评价指标体系;利用地理探测器分析了各指标和塌岸的相关性,结合近年来三峡库区塌岸影响因素分析成果,筛选江岸宽度、库岸形态、岸坡类型等与塌岸相关性大的7个评价指标,采用目前技术较为成熟的三种机器学习模型,对奉节段塌岸进行了易发性评价;以滑坡强度R指标验证三种机器学习模型易发性分区结果的优劣,同时用ROC曲线验证各模型的精度,最后通过实地验证分析各模型易发性区划结果是否符合实际调查成果。本研究成果可以深化对三峡库区塌岸灾害影响因素的认识,为三峡库区防灾减灾工作提供理论支撑。

1 研究区塌岸调查及塌岸影响因素分析

奉节县地处四川省盆地东部边缘,大巴山前缘

和鄂西山地的接壤地带。地貌东南、东北高,中部偏西稍平缓^[27]。全县高程为74~2123 m。长江是奉节县的主要河流,从县域中部穿过,过瞿塘峡后流入巫山县境内。奉节县境内长江41.5 km,由梅溪河、大溪河、石笋河等支流汇入长江。

奉节县境内出露均为沉积岩层,无岩浆岩、变质岩,从志留系至第四系均有分布。奉节县位于大巴山孤山与新华夏系的交接复合部位,地质构造以褶皱为主,断裂较为少见。现场调查发现,奉节县域库岸段塌岸点共37个,长江干流左岸13处,右岸14处,支流梅溪河10处(图1)。尤其在故陵镇附近塌岸发育强烈,该库岸段地处故陵向斜近核部,发育了20余处规模较大的塌岸。经实地调查,塌岸在土质岸坡中发育频繁,新增塌岸约82%位于土质岸坡,而在土质岸坡中土质滑坡的塌岸的发育频率、规模均为库区中的典型。其中最具代表的土质滑坡如安坪镇新铺村的新浦滑坡,其滑坡前缘涉水岸线呈直线型,左右边界均以冲沟为界,滑坡前缘发育有四处较严重坍塌型塌岸,均处于滑体内冲沟出口处,最大的宽约40 m,高约15 m,方量约1200 m³,最小的宽约20 m,高约10 m,方量约400 m³,其余两处规模基本相同,宽约30 m,高约12 m,方量约600 m³。塌岸均处于175 m水位线以下,未向上扩展,但在库水的影响下可能会进一步扩展。

分析表明,塌岸发育不仅与地质构造密切相关,还与地层岩性、物质组成、岸坡结构和波浪要素关系紧密。岸坡的地层岩性不同则岩土体物质成分组成不同,抗风化能力也因此不同,以致不同库岸段塌岸发育特征不同。本次库区塌岸调查发现,土质岸坡塌岸的发育密度、规模在不同地层、岩性中差异较大。调查总结研究区塌岸段的地层岩性、物质组成如表1所示。

岸坡结构控制着三峡库区岸坡变形破坏的原生环境,如顺向坡,第四系堆积体是广泛发育的,这也是土质岸坡的主要物源。野外调查结果表明,土质塌岸也主要分布于顺向坡等岸坡。岸坡剖面形态也是塌岸发生的主要影响因素,塌岸调查中发现,同一区段中,岩性等地质因素相似时,凸型坡塌岸发育规模及频率极为强烈,如图2a所示,通常凸型坡下段坡度较凹型坡下段更为陡峭。岸线形态也是制约塌岸发生的关键因素,调查时发现在岸线形态突变处即外凸岸线和内凹岸线处更易发生塌岸,因水流的

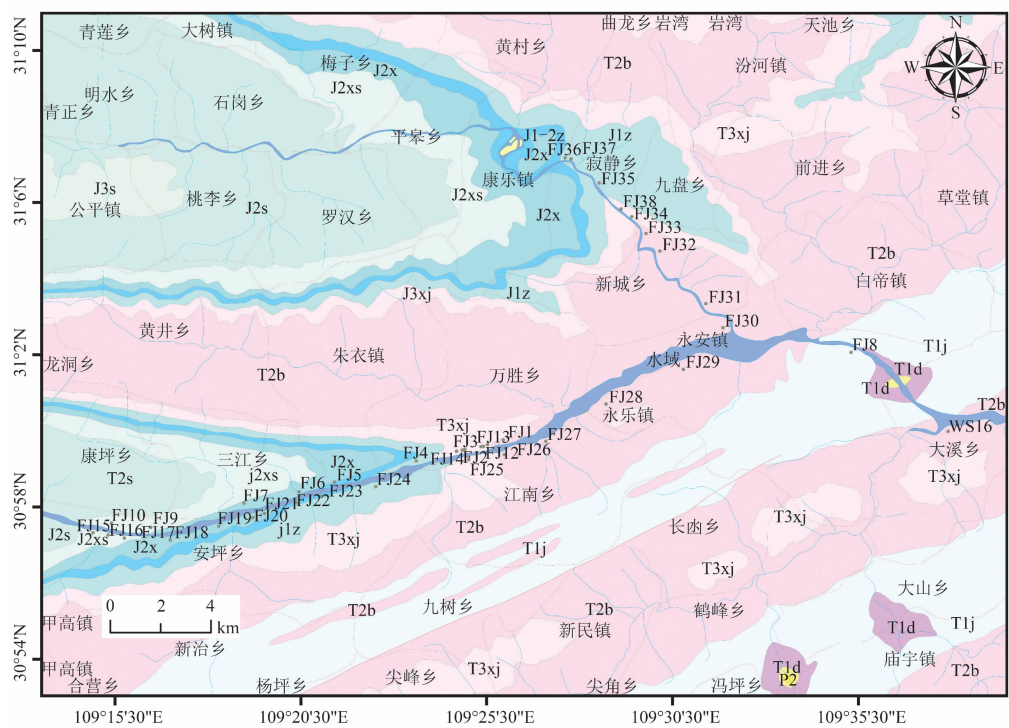


图 1 奉节县塌岸点分布图

Fig. 1 Distribution of bank collapse points in Fengjie county

表 1 研究区塌岸段地层岩性特征

Tab. 1 Lithologic characteristics of the collapsed bank section in the study area

库岸	地层时代	地层岩性	物质组成	大规模塌岸数量/处
奉节— 云阳段	J ₂ s、J ₂ xs、	泥岩、粉砂质泥岩与长石砂岩不等厚互层；紫 红色泥岩、泥岩夹块状细-中粒长石石英砂岩； 紫红色、砖红色泥岩，粉砂质泥岩。	冲洪积：粘土、砂、卵砾石；残坡积： 粘土、碎石质粘土、粘土质碎块石； 滑坡堆积：碎石、块石土等。	32
	J ₃ p、J ₃ s			



图 2 不同岸坡及岸线形态塌岸：(a)凸型坡坍塌破坏；(b)岸线外凸处；(c)岸线内凹处

Fig. 2 Bank collapse with different bank slope and bank line morphology：

(a)convex slope collapse failure；(b)outer bulge of the shoreline；(c)recesses in shoreline

冲刷及侧向侵蚀作用,图 2b 和图 2c 的岸线外凸处和岸线内凹线均较直线岸线塌岸发育的规模、方量更大。

库水和波浪侵蚀作用是影响三峡库区岸坡塌岸的最主要外部因素。库水对岸坡土体的主要作用包括:(1)库水位升降产生的水动力作用。当水库开

始蓄水时,水下岸坡会受到向上的浮拖力作用,使得岸坡坡脚的有效重量减少,造成整个岸坡的抵抗力变小、稳定性降低;当库水水位下降时,若坡体内部的地下水位下降滞后于库水位,形成水位差产生动水压力,此外,部分渗流受阻的地下水会形成静水压力,增大土体荷载,两者导致滑动力增大,引发岸坡

产生塌岸灾害。(2)库水对岸坡土体的浸泡软化作用。周期性的干湿循环条件下岸坡土体颗粒及粒间胶结物产生润滑或泥化作用,土体抗剪强度参数显著劣化,多种因素作用使得岸坡体内外原有的裂隙持续扩展,在重力作用下发生塌岸破坏。(3)波浪上爬对岸坡土体的冲刷作用。波浪上爬过程中,岸坡土体被冲刷剪切导致坡度不断变缓,并在波浪上爬至最高点处形成浪蚀龛(图3),使得岸坡重力塌岸现象更容易发生。由于直接监测波浪要素存在一定困难,通常用江岸宽度和年平均风速计算风浪大小,表征波浪要素对塌岸发育的影响。结合实地调查和相关研究可知,三峡库区蓄水后水面开阔,水面波浪高度最高可达1 m以上,波浪对岸坡塌岸发育的影响不容忽视。岸坡前缘塌岸对波浪侵蚀作用的响应十分强烈,如巫山段碎石土岸坡多发育冲刷浪坎型(图4a)和浪蚀龛型塌岸(图4b)。奉节段常见泥岩砂岩互层状岸坡在波浪掏蚀作用下,强风化泥岩岩层失稳,从而产生塌岸,如图4c所示。

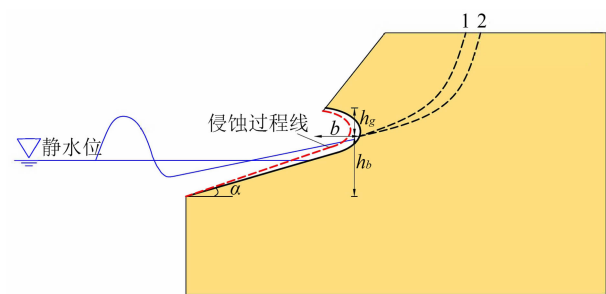


图3 波浪侵蚀导致陡坡的破坏示意

Fig. 3 Schematic damage of steep slopes caused by wave erosion

2 塌岸评价指标体系构建

2.1 指标数据来源

奉节段数据来源为:(1)武汉地质调查中心(<https://geocloud.cgs.gov.cn/>),获取1:50 000地

形图,用于提取DEM及高程、坡度、曲率等地形地貌数据,库岸形态和江岸宽度信息;(2)武汉地质调查中心(<https://geocloud.cgs.gov.cn/>),获取1:50 000地质图,用于提取地质构造、地层岩性、岸坡类型等数据;(3)中国气象数据中心(<https://data.cma.cn/>),获取奉节县多年平均风速和多年平均降雨量数据,用于提取年平均风速;(4)野外调查中塌岸规模方量、地理空间位置及坐标主要用于塌岸发育分布特征分析及作为目标函数同各评价指标建立联系。

2.2 评价指标体系构建

在构建评价指标体系的过程中,评价指标大多遵循系统性、代表性、可获取性、独立性等原则^[28]来进行选取,塌岸易发性评价指标选取过程中也根据上述原则进行选取。

通过分析研究区塌岸发育及分布特征,确定了影响岸坡塌岸产生的主要指标分为地形地貌、工程地质条件、气象水文条件和波浪要素等四类,利用ArcGIS从这四类指标中提取了19个二级因子(表2)。

表2 一级评价指标及对应二级因子

Tab. 2 First-level evaluation indexes and corresponding second-level factors

一级指标	二级因子
地形地貌	坡度、坡度变率、坡向、坡向变率、地形起伏度、曲率、平面曲率、剖面曲率、地表切割深度、高程、高程变异系数、地形粗糙度
工程地质条件	地层岩性、地质构造、库岸形态、岸坡类型
气象水文条件	降雨量
波浪要素	江岸宽度、年平均风速

2.3 因子权重计算及评价指标确定

塌岸灾害同滑坡灾害都具有空间分异性特征,而地理探测器可通过探索各个自变量因子间的空间



图4 波浪对塌岸的影响:(a)巫山段浪蚀龛型塌岸;(b)巫山段冲刷浪坎型塌岸;(c)奉节段岩土混合岸坡塌岸

Fig. 4 Influence of waves on collapsing bank:(a) wave niches collapse in Wushan section;

(b) washing-wave type bank collapse in Wushan section;(c) rock and soil mixed bank slope collapse in Fengjie section

分异性,并将因子驱动力以定量的角度表征出来^[29]。本文利用地理探测器中的分异及因子探测工具来求解各个因子的权重。

其原理为将塌岸灾害作为目标因变量,各个因子作为自变量。通过对比分析因变量的空间分异性同自变量的空间分异性的解释程度,以此判定影响因素对塌岸产生的贡献度,度量指标为因子驱动力 q ,具体见公式如下:

$$q = 1 - \frac{1}{\sigma^2} \sum_{h=1}^m n_h \sigma_h^2 = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (1)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^m n_h \sigma_h^2 \quad (2)$$

$$SST = n\sigma^2 \quad (3)$$

式中, σ^2 与 n 分别为 h 的栅格值方差和栅格总数; σ_h^2 、 n_h 和 m 分别为 D 的第 h 类栅格值方差、栅格数和类型总数; SSW 为层方差之和; SST 为全区的 Y 的方差; q 值的取值范围为 $0 \sim 1$, q 值越大,则 X 对 Y 的权重越高, q 值为 0 表示影响因子与塌岸产生完全无关;反之, q 值为 1 表示影响因子完全控制塌岸产生。

本文基于 ArcGIS 软件、遥感资料和地质资料,提取了包括岸坡类型在内的 19 个二级因子值,由于岸坡类型是影响岸坡塌岸发育的关键因素,故仅对除岸坡类型外的 18 个二级因子使用地理探测器中的因子探测工具进行权重分析,结果如表 3 所示。

江岸宽度、地层岩性、地质构造、库岸形态和坡度等因子的权重均在前列,说明这些因子与塌岸的相关性较大,但一般认为坡度与塌岸发育的相关性

更大,与坡度同为地形地貌指标的地形起伏度是指区域内高程变化的相对值,对塌岸影响较小。综合考虑应选取坡度作为地形地貌指标。波浪作用是库区塌岸发育的主要因素之一,而年平均风速在相关学者提出的风浪计算公式中可以粗略表征风浪的能量大小,降雨产生的坡面径流在土质岸坡中也会导致塌岸,对塌岸发育也有一定影响。最终确定岸坡类型、江岸宽度、地层岩性、地质构造、岸线形态、坡度、年平均风速和降雨量等作为塌岸易发性评价指标。

2.4 评价指标分析及分类分级

对最终确定的评价指标岸坡类型、江岸宽度、地层岩性、地质构造、岸线形态、坡度、年平均风速和降雨量,按照各指标对塌岸的影响进行定性分类或定量分级。统计各因子按类型或等级的塌岸发生率,分析各因子不同类型或等级对塌岸的影响。各评价因子分级标准如表 4 所示。

(1) 坡度

岸坡坡度对塌岸类型和塌岸进程影响显著。奉节段坡度分为 5 级: $0^\circ \sim 7^\circ$, $7^\circ \sim 17^\circ$, $17^\circ \sim 27^\circ$, $27^\circ \sim 37^\circ$, $> 37^\circ$,统计发现坡度为 $0^\circ \sim 7^\circ$ 的塌岸分布面积较大,其次为 $17^\circ \sim 27^\circ$ (图 5)。

(2) 岸坡结构

岸坡结构作为三峡库区岸坡变形破坏的原生环境,是控制塌岸发生的主要内部因素之一。奉节段岸坡结构类型分为横向坡、逆向坡、平缓坡、切向坡、顺向坡(图 6)。统计发现,在奉节段岸坡结构类型

表 3 地理探测器计算得到的各因子权重值

Tab. 3 Weight value of each factor calculated by geographical detector

指标类型	权重 q	排序	指标类型	权重 q	排序
江岸宽度	0.00308	1	坡向	6.30E-04	10
地层岩性	0.00273	2	坡度变率	5.50E-04	11
地质构造	0.00145	3	坡向变率	5.10E-04	12
库岸形态	9.30E-04	4	剖面曲率	4.80E-04	13
坡度	8.50E-04	5	高程	3.10E-04	14
地形起伏度	7.90E-04	6	地形粗糙度	2.40E-04	15
年平均风速	7.50E-04	7	曲率	2.20E-04	16
降雨量	6.80E-04	8	高程变异系数	1.90E-04	17
地表切割深度	6.60E-04	9	平面曲率	1.80E-04	18

表 4 评价指标分级标准
Tab. 4 Grading standards of evaluation indexes

影响因子	分级数量	分级标准
岸坡类型	5	横向坡、逆向坡、平缓坡、切向坡、顺向坡
江岸宽度	3	350 ~ 600、850 ~ 1100、1100 ~ 1350
地层岩性	9	巴东组、嘉陵江组、须家河组、大冶组、珍珠冲组、自流井组、新田沟组；下沙溪庙组；上沙溪庙组
地质构造	3	褶皱核部、褶皱翼部、断层
库岸形态	3	凹形、平缓、凸形
坡度	5	0 ~ 7、7 ~ 17、17 ~ 27、27 ~ 37、>37
年平均风速	2	1.15 ~ 1.25；1.25 ~ 1.5

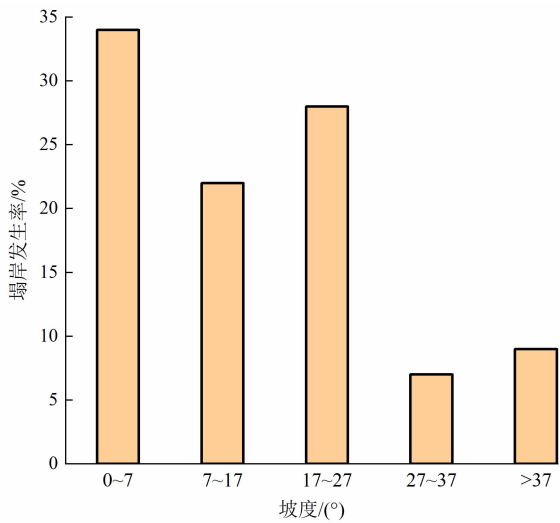


图 5 坡度与塌岸发生率关系

Fig. 5 Distribution relationship between slope and bank collapse area

为顺向坡中的塌岸分布面积所占比重最大。

(3) 地层岩性

地层岩性是塌岸发育的最主要内在影响因素。结合研究区地层岩性特征,奉节段地层岩性可分为巴东组、嘉陵江组、须家河组、大冶组、珍珠冲组、自流井组、新田沟组、下沙溪庙组和上沙溪庙组,如图 7 所示,地层岩性为须家河组、巴东组和新田沟组中塌岸分布面积所占比重最大。

(4) 地质构造

地质构造在很大程度上能影响岸坡的结构类型和节理裂隙的发育,从而影响岸坡稳定性,最终导致岸坡前缘塌岸的发生。研究区地质构造复杂,出露地层齐全,是地质灾害发育的环境条件。分类后,研

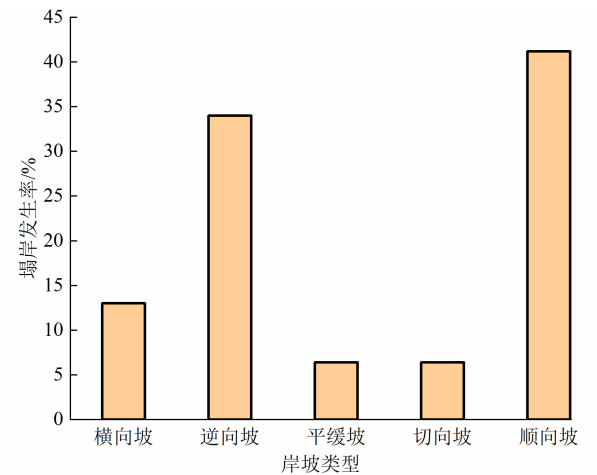


图 6 岸坡类型与塌岸发生率关系

Fig. 6 Distribution relationship between bank slope type and bank collapse area

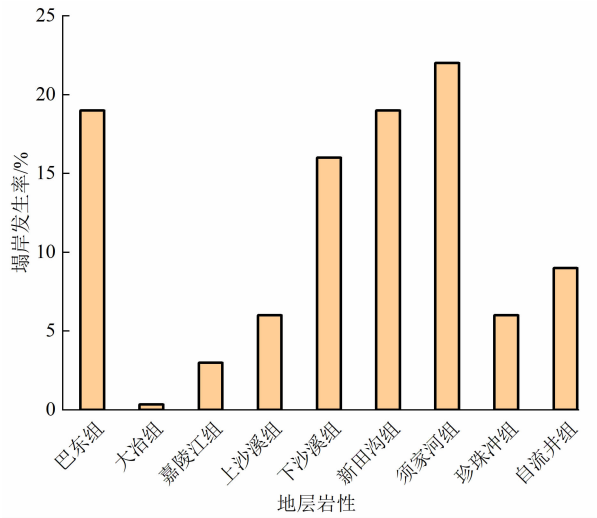


图 7 地层岩性与塌岸发生率关系

Fig. 7 Distribution relationship between stratigraphic lithology and bank collapse area

究区地质构造可分为褶皱两翼、断层、褶皱核部。由于褶皱断层等地质构造通常横跨数个行政区域,因此,评价指标中地质构造对塌岸的影响选取的是整个三峡库区范围,数据为作者 2020 年和 2022 年两次塌岸调查发现的 129 处塌岸,统计发现褶皱核部中塌岸分布面积所占比重最大(图 8)。

(5) 库岸形态

一般情况下,凸形坡面重力变形发生的频率更高,凹形坡面更为稳定。剖面曲率是指坡度的变化率,能在一定程度上反映剖面形态。通过计算剖面曲率并结合研究区域地形图得到库岸形态指标图层,当剖面曲率为负说明像元表面上凸,流速将减

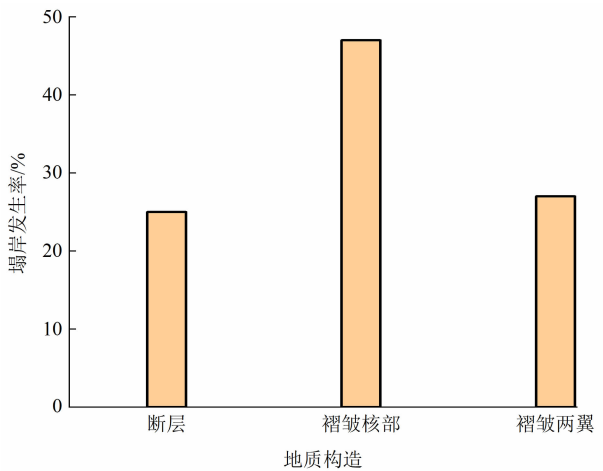


图 8 地质构造与塌岸发生率关系

Fig. 8 Distribution relationship between geological structure and bank collapse area

小;反之,剖面曲率为正时说明表面开口向下凹;值为空时说明表面平滑。

根据野外调查,研究区库岸的平面形态沿岸线可分为凹岸、平直、凸岸,如图 9 所示。库岸形态为平直时,塌岸分布面积所占比重大。

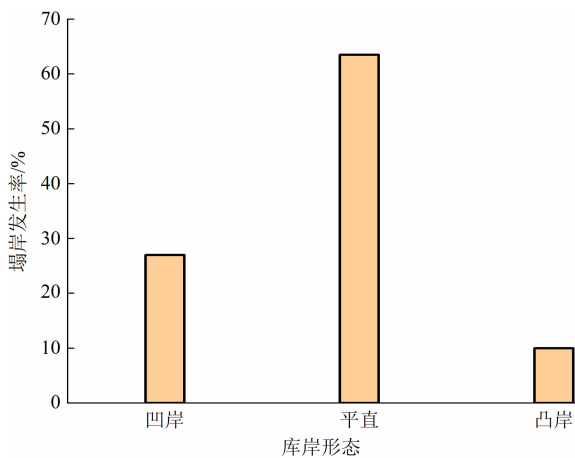


图 9 库岸形态与塌岸发生率关系

Fig. 9 Distribution relationship between bank morphology and bank collapse area

(6) 江岸宽度

用江岸宽度和年平均风速来表征波浪要素对塌岸发育的影响,根据风浪计算的官厅水库计算公式,可知江岸宽度即水面宽度和风速与风浪能量的对应关系,公式^[30]如下:

$$H = 0.0166U^{\frac{5}{4}}F^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

$$L = 10.4H^{0.8} \quad (5)$$

$$T = 3.79H^{0.385} \quad (6)$$

式中, H 为浪高(m); U 为风速(m/s); F 为水面宽度(m); L 为波长(m); T 为波周期(s)。

研究区江岸宽度可分为宽(1100 ~ 1350 m)、较宽(850 ~ 1100 m)、适中(600 ~ 850 m)、窄(350 ~ 600 m),如图 10 所示。奉节段中江岸宽度为 850 ~ 1100 m 时,区内塌岸分布面积最大。

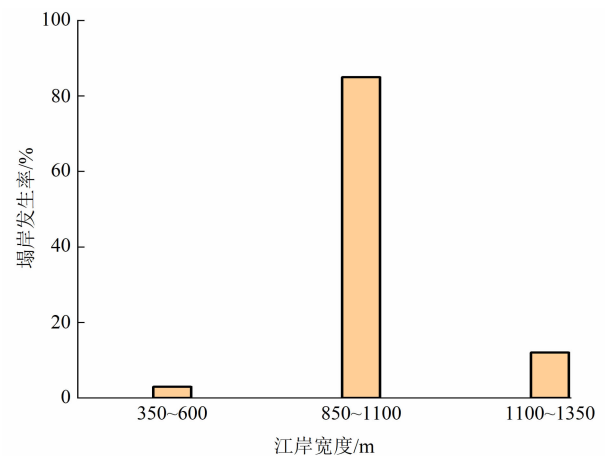


图 10 江岸宽度与塌岸发生率关系

Fig. 10 Distribution relationship between river bank width and collapsed bank area

(7) 年平均风速

通过中国气象数据中心,收集重庆市各区县气象站点数据。由于区域年平均风速数据较难收集,根据文献中重庆市 1960—2008 年的年平均风速数据,利用 ArcGIS 中的地理配准工具,以各区县气象站点的坐标点为基点进行地理配准,最终得到了奉节县的年平均风速指标图层。将得到的年平均风速指标重分类后可分为 0.52 ~ 0.8 m/s, 0.8 ~ 1 m/s, 1 ~ 1.15 m/s, 1.15 ~ 1.25 m/s, 1.25 ~ 1.5 m/s (图 11)。奉节段中 1.25 ~ 1.5 m/s 分布区内塌岸分布面积最大,其次为 1.15 ~ 1.25 m/s。

(8) 降雨量

三峡库区地表浅层多为非饱和黏土,其力学性质会随着气象变化发生改变。土体含水量因降雨入渗增加,饱和度也随之增大。研究区奉节段属亚热带季风气候,根据三峡库区多年平均降雨量等值线图插值得到研究区范围内降雨量等值线图(图 12)。奉节县境内由于研究区域较小,降雨量分布在区内

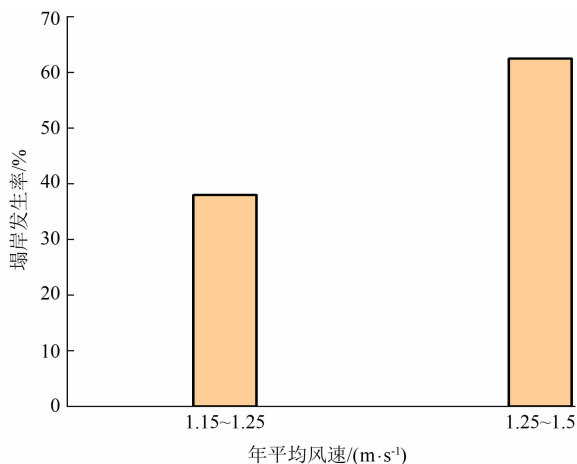


图 11 年平均风速与塌岸发生率关系

Fig. 11 Distribution relationship between annual average wind speed and bank collapse area

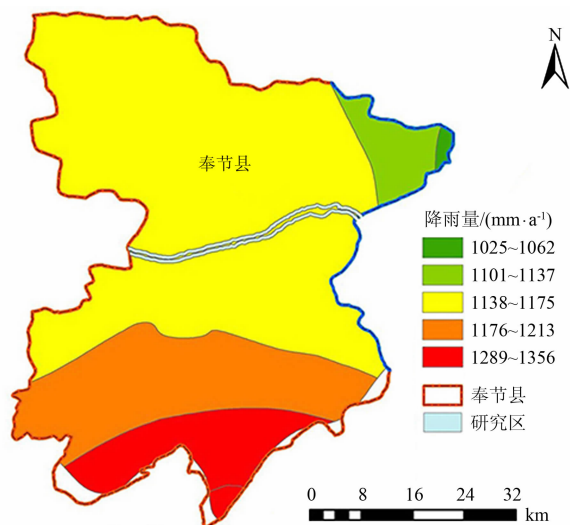


图 12 奉节县降雨量分布图

Fig. 12 Distribution relationship between rainfall and collapsed bank area

都呈现为同一值,多年平均降雨量均为 1138 ~ 1175 mm/a,不符合塌岸易发性评价过程有效性原则,故在奉节段易发性评价过程中不将降雨量作为有效指标进行计算。最后得到各个评价因子的专题图层(图 13)。

3 易发性评价模型

目前,以机器学习模型为主的数据驱动方法广泛运用于易发性评价,其优点是能更为准确地反映易发性与各评价因子之间的非线性关系,并且具有良好的数据处理能力。本文选择其中具有代表性的

人工神经网络、随机森林、支持向量机等三种模型。

3.1 BP 神经网络

人工神经网络(ANN)是将人脑神经元抽象化以此建立数学模型的信息处理手段。其中 BP 神经网络为主流应用,BP 模型由多层人工神经网络构成,其结构包括输入层、输出层和层间隐藏层,层内各个神经元之间不会相互连接,所以每一层的神经元只由前一层神经元输入,只对下一层神经元输出,Sigmoid 型函数为神经元的传递函数。输入层接受输入数据并通过几个隐藏层传播到输出层^[31]。两个人工神经元间的连接可表达为:

$$x_i^{(l)} = f^{(l)} \left(\sum_j w_{ij}^{(l)} x_j^{(l-1)} \right) \text{ with } l = 1, \dots, (N-1) \quad (7)$$

式中, $x_i^{(l)}$ 为输出值; w_{ij} 为用于将信号从 $l-1$ 层传输到 l 层的权重矩阵; $x_j^{(l-1)}$ 为输入值; f 为作用于每个参数向量 x 的激活函数; u 为隐藏层神经元节点数。

隐藏层神经元个数与神经网络的性能关系密切,若神经元数太多,会引起学习时间长、泛化能力差等问题;神经元数太少,则可能会导致网络性能差甚至无法训练等问题。BP 神经网络结构如图 14 所示。

3.2 随机森林

随机森林(RF),是一种利用 Bagging 预测器原理,通过不同子数据集构建各个聚合数据集即决策树,在预测一个类时进行多数投票,最终获取随机森林的输出结果^[32]。其原理大致为先构建多个训练数据集,并采用有放回方式进行随机抽样,训练子数据集小于总数据集,约为总训练样本的三分之一,每个训练子数据集均生成决策树模型,每颗决策树单独预测训练样本的分类,从中选择样本所属分类最高的类来确定样本的类,所有决策树模型所产生的结果进行融合得到的就是随机森林模型的结果。随机森林与单个决策树模型的函数关系为:

$$H(x) = \arg \max_z \sum_{i=1}^k I(h_i(x) = Z) \quad (8)$$

式中, $H(x)$ 为随机森林模型; h_i 为单个决策树模型; Z 为输出变量; $I(\cdot)$ 为示性函数。

通过网格搜索法对超参数寻优,以 AUC 值作为寻优指标,得到 RF 最优超参数值为: $n_estimators$ (决策树数目) = 100, max_depth (单个决策树深度) = 15。

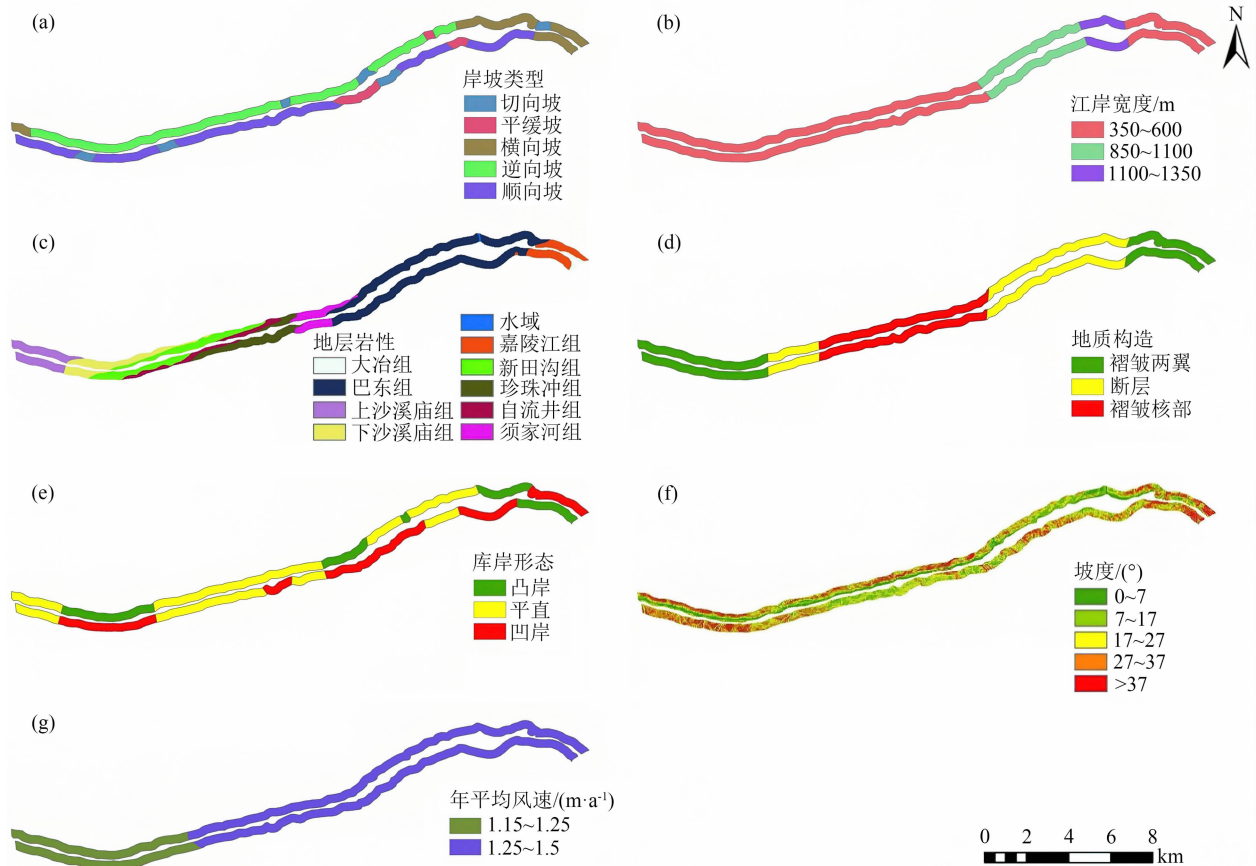


图 13 评价因子的专题图层:(a)岸坡类型;(b)江岸宽度;(c)地层岩性;(d)地质构造;(e)库岸形态;(f)坡度;(g)年平均风速

Fig. 13 Thematic layer of evaluation factor: (a) type of bank slope; (b) width of the river bank;

(c) stratigraphic lithology; (d) geological structure; (e) bank morphology; (f) slope; (g) annual mean wind speed

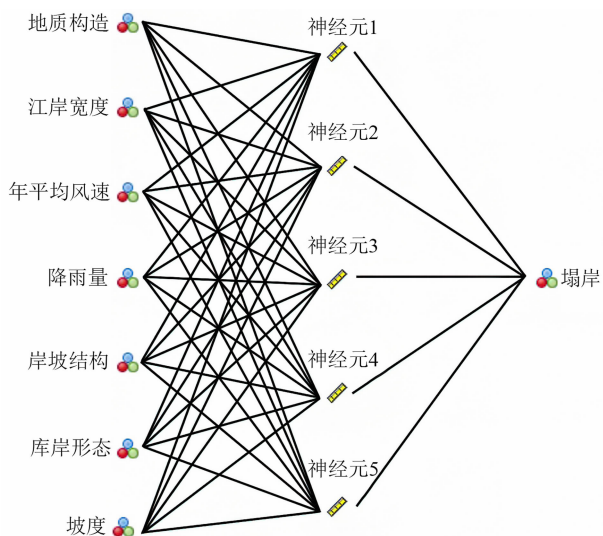


图 14 BP 神经网络结构图

Fig. 14 BP neural network structure

3.3 支持向量机

支持向量机(SVM)主要步骤是先选择合适的核函数把样本数据映射到高维空间,然后在高维空

间寻找支持向量来构造最优分类超平面,超平面应尽量将样本数据正确分开,同时保证分开的样本数据距离分类面最远^[33],SVM 模型回归的超平面形式为:

$$y = b + wx \quad (9)$$

式中, y 为输出值; b 为超平面的位移项; w 为超平面的法向量; x 为自变量。采用该方程拟合样本数据 $\{x_i, y_i\}, i = 1, 2, \dots, k, x_i \in R_n, x \in R$, 则根据 SVM 模型的原理,可知:

$$y_i = b + wx_i = \sum_{i=1}^k (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x, x_i) + b \quad (10)$$

式中, α_i, α_i^* 为支持向量; k 为训练样本总数; $K(x, x_i)$ 为核函数。

$$\begin{aligned} \max W(\alpha_i, \alpha_i^*) = & -\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^k (\alpha_i - \alpha_i^*)(\alpha_j - \alpha_j^*) \times \\ & K(x_i, x_j) + \sum_{i=1}^k y_i (\alpha_i - \alpha_i^*) - \\ & \varepsilon \sum_{i=1}^k (\alpha_i + \alpha_i^*) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^k (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0 \\ 0 \leq \alpha_i, \alpha_i^* \leq C, i = 1, 2, \dots, k \end{cases} \quad (12)$$

式中, $K(x_i, x_j)$ 为核函数; C 为惩罚参数。径向基核函数式为:

$$K(x, y) = \exp\left(\frac{-|x - y|^2}{\sigma^2}\right) \quad (13)$$

式中, σ 为核参数。径向基核函数(13)是特征为沿径向对称的一种标量函数,其具有非线性映射能力。

本研究选用 RBF 函数作为核函数, RBF 伽玛系数能影响模型训练的准确度,当 RBF 伽玛值增加时,会在一定程度上提高数据分类的准确度,但同时也可能导致模型出现过拟合现象。通过网格搜索法对超参数寻优,得到 RF 最优超参数值为: gamma (RBF 伽玛系数) = 5, C (惩罚参数) = 1。

4 三峡库区奉节—云阳段塌岸灾害易发性评价

4.1 奉节—云阳段塌岸灾害易发性评价结果

本文栅格数据采用 ArcGIS 中“多值提取至点”命令提取,矢量要素数据使用空间连接进行提取。考虑库区塌岸最大的宽约 40 m,以及获取数据的整体精度,故选择 50 m × 50 m 的网格单元,既能保证

易发性评价精度,也不会因栅格太小而导致计算量陡增。因此将研究区内全部塌岸点按 50 m × 50 m 范围生成缓冲区,再转为栅格单元,共获取 310 个塌岸样本点数据,基于历史塌岸创建距离为 300 m 的塌岸缓冲区,在塌岸缓冲区外选择非塌岸区域。根据目前滑坡易发性相关研究经验,可知当非滑坡样本点与滑坡样本点数量比例在 5:1 ~ 10:1 时模型构建的性能最佳^[34]。经过多次试验发现,塌岸样本点与非塌岸样本点比例为 1:10 时最优,故从非塌岸区域中随机选取 3 ~ 100 个非塌岸样本点。然后从总训练样本中抽取 70% 的样本数据进行模型训练,剩余 30% 的样本数据来进行测试,最后将训练好的模型代入研究区的全部数据以获取塌岸易发性的评价结果。最终获取的数据以 DBF 文件形式保存,并连接到研究区的全部数据点中,再利用 ArcGIS 中“点转栅格”命令,将不同模型的易发性评价结果转化为栅格形式,栅格分辨率同评价指标一致,将易发性分为较低、低、中、较高、高易发性等五个等级,所产生的不同模型的易发性区划,如图 15、图 16、图 17 所示。

对得到的机器学习模型的易发性评价结果进行验证和分析,主要引入塌岸强度来检验易发性结果分区的合理性,采用 ROC 曲线和置信区间评价不同模型的预测精度,并通过对比其中典型区域中高易

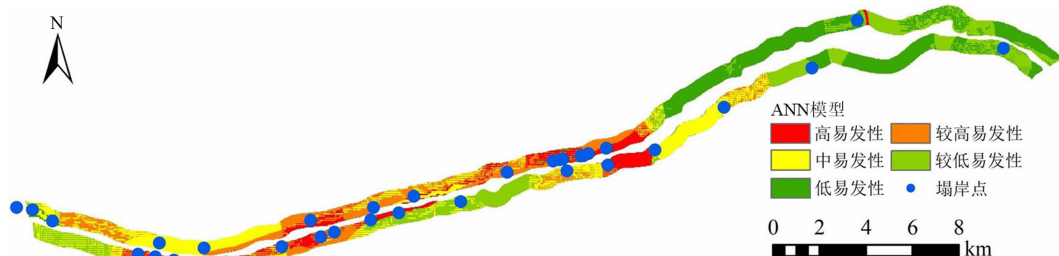


图 15 人工神经网络模型易发性区划图

Fig. 15 Susceptibility zoning diagram of artificial neural network model



图 16 随机森林模型易发性区划图

Fig. 16 Susceptibility zoning map of random forest model

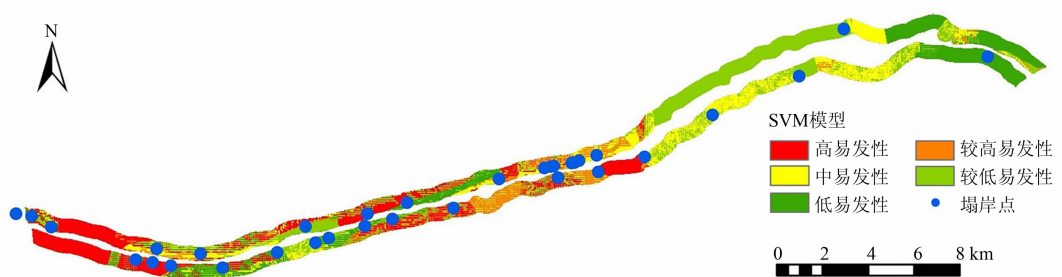


图 17 支持向量机模型易发性区划图
Fig. 17 Support vector machine model susceptibility zoning diagram

发性区域的分布特征及地质条件,分析易发性评价结果的合理性和正确性,最终确定奉节段最合理的易发性评价结果(表 5)。

结合目前滑坡易发性研究经验,可知有研究者采用滑坡强度 R 指标公式来验证分区结果的优劣,若 R 值从低至高分级依次增大,则代表分区结果合理^[35]。将这一概念引入塌岸易发性中计算其塌岸强度。塌岸强度计算如下:

$$R = B(P_i)/A(P_i) \tag{14}$$

式中, $B(P_i)$ 为分区内塌岸数量百分比; $A(P_i)$ 为各易发性分区面积占研究区面积的百分比。

奉节段分区结果检验如表 5 所示;奉节段易发性等级和塌岸数量统计,如图 18 所示;不同模型的 ROC 曲线,如图 19 所示;不同模型的 95% 置信区间,如表 6 所示;奉节段典型区域特征对比图,如图 20 所示。

4.1.1 人工神经网络模型评价结果及验证

人工神经网络模型的易发性区划如图 15 所示。ANN 模型塌岸强度 R 值随着易发性等级低、较低、中、较高和高依次增大, R 值低至高依次为 0.42、0.92、1、1.70、1.97,且易发性等级从中上升至较高

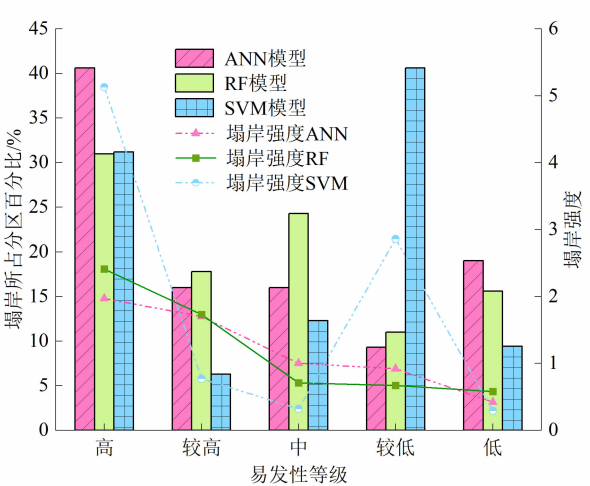


图 18 奉节段易发性等级和塌岸数量统计
Fig. 18 Statistics of vulnerability level and bank collapse quantity in Fengjie section

时 R 值增加速率最大(表 5、图 18),说明该模型易发性分区结果合理。ANN 模型的 AUC 值为 0.798,大于 0.75,说明该模型的预测效果较好(图 19)。ANN 模型 95% 置信区间为 0.552 ~ 0.872, AUC 值位于置信区间内,可认为 AUC 值的检验结果可信度较高(表 6)。从分布特征上看,ANN 模型中有少量

表 5 奉节段分区结果检验

Tab. 5 Results-checkup of section partition

分区等级	ANN 模型			RF 模型			SVM 模型		
	$B(P_i)$	$A(P_i)$	R	$B(P_i)$	$A(P_i)$	R	$B(P_i)$	$A(P_i)$	R
易发性低	17.00	40.60	0.42	11.10	19.30	0.58	9.40	32.30	0.29
易发性较低	14.30	15.60	0.92	15.60	23.30	0.67	40.60	14.20	2.86
易发性中	15.60	15.60	1.00	24.40	34.20	0.71	12.50	39.20	0.32
易发性较高	16.00	9.40	1.70	17.80	10.30	1.73	6.30	8.20	0.77
易发性高	37.10	18.80	1.97	31.10	12.90	2.41	31.30	6.10	5.13

表 6 不同模型的 95% 置信区间

Tab. 6 95% confidence intervals for different models

置信区间	ANN 模型	RF 模型	SVM 模型
置信下限	0.522	0.556	0.536
置信上限	0.872	1.000	0.766
平均正确性	0.687	0.878	0.660

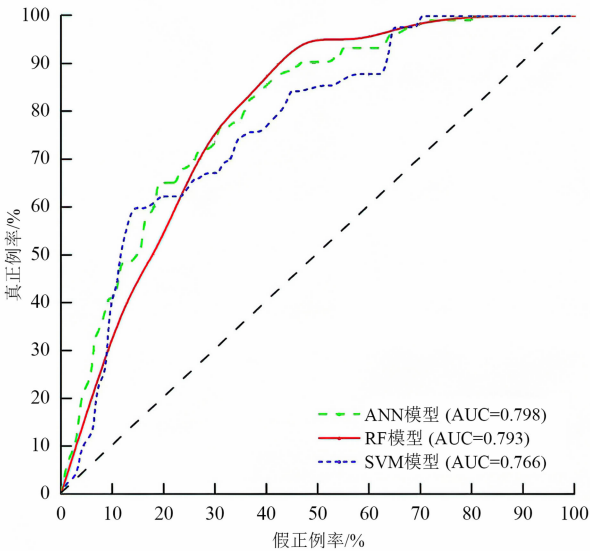


图 19 不同模型的 ROC 曲线

Fig. 19 ROC curves of different models

塌岸点落在了较低易发性区域和中易发性区域,大部分塌岸点都集中在高易发性区域中(图 20)。从地质条件上看,ANN 模型中高易发区所对应的岸坡类型为逆向坡、平缓坡和顺向坡,地层岩性为须家河

组和巴东组。

4.1.2 随机森林模型评价结果及验证

随机森林模型的易发性区划如图 16 所示。RF 模型塌岸强度 R 值随着易发性等级低、较低、中、较高和高依次增大(表 5、图 18), R 值低至高依次为 0.58、0.67、0.71、1.73、2.41,且易发性等级从中上升至较高时 R 值增加速率最大,说明该模型分区结果合理。RF 模型的 AUC 值为 0.793,大于 0.75(图 19),说明该模型的预测效果较好。RF 模型 95% 置信区间 0.556~1,AUC 值位于置信区间内(表 6),可认为 AUC 值的检验结果可信度较高。从分布特征上看,RF 模型中高易发区域最为集中,且高易发区都处于塌岸点集中的位置(图 20),说明评价结果与塌岸点的分布特征吻合度较高。从地质条件上看,RF 模型中高易发区所对应的岸坡结构类型为顺向坡、逆向坡,逆向坡中出现高易发区,出现这一现象的原因为奉节段地质灾害发育同时受岩性、裂隙发育程度等原因^[36],地层岩性为下沙溪庙组、新田沟组、珍珠冲组和自流井组。

4.1.3 支持向量机模型评价结果及验证

随机森林模型的易发性区划如图 17 所示。SVM 模型中易发性等级为较低时塌岸强度为 2.86,大于易发性等级为中时的塌岸强度 0.32,说明其分区结果不理想(表 5、图 18)。SVM 模型的 AUC 值为 0.766,大于 0.75,说明该模型的预测效果较好(图 19)。如表 6 所示,其 95% 置信区间为 0.536~0.766,AUC 值位于置信区间内,可认为 AUC 值的

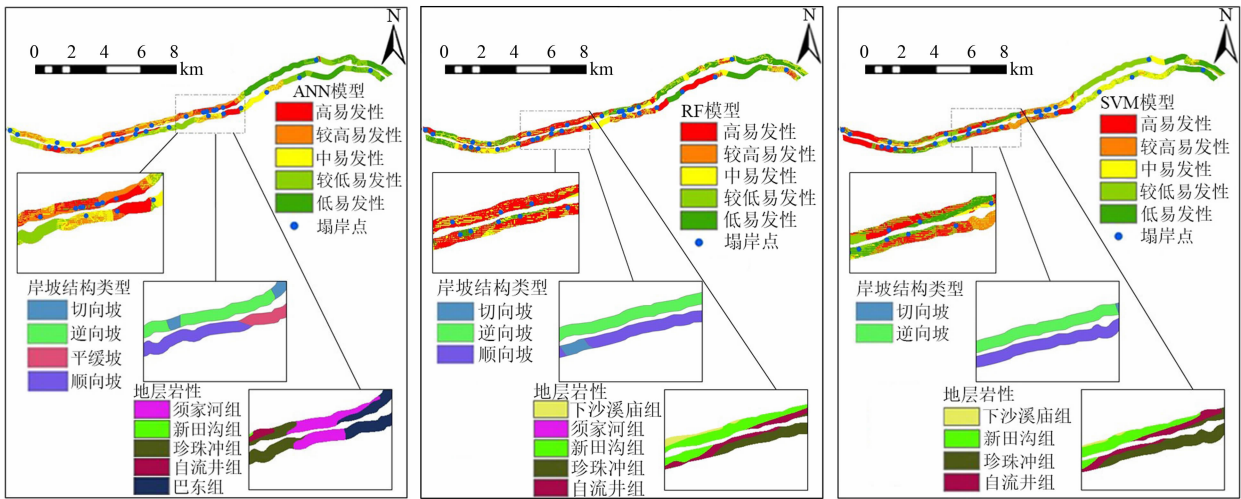


图 20 奉节段典型区域特征对比图:(a) ANN 模型;(b) RF 模型;(c) SVM 模型

Fig. 20 Comparison of typical regional features in Fengjie section: (a) ANN model; (b) RF model; (c) SVM model

检验结果可信度较高。从分布特征上看,SVM 模型中高易发性区域分别较为零散但同样位于塌岸点附近(图 20)。从地质条件上看,SVM 模型中高易发区所对应的岸坡结构类型为切向坡和逆向坡,地层岩性为新田沟组和自流井组。

4.2 模型性能比较与分析

奉节段中,ANN 模型以及 RF 模型塌岸强度 R 值都随着易发性等级低、较低、中、较高和高依次增大,易发性等级从中上升至较高时速率最大(图 18)。从低至高依次为 0.42、0.92,ANN 模型的塌岸强度 1、1.70、1.97,RF 模型的塌岸强度从低至高依次为 0.58、0.67、0.71、1.73、2.41,说明这两种模型分区结果合理,SVM 模型中易发性等级为较低时塌岸强度为 2.86 大于易发性等级为中时的塌岸强度 0.32,说明其分区结果不理想。

奉节段中 ANN、RF、SVM 等三种模型的 AUC 值分别为 0.798、0.793 和 0.766(图 19),三种模型的 AUC 值均大于 0.75,代表三种模型的预测精度达到标准。

三种模型中 RF 模型的平均正确性最高,其次为 ANN 模型,再者为 SVM 模型(表 7)。通过计算其 95% 的置信区间发现,前节所得 AUC 值均在 95% 置信区间内,可认为 AUC 值的检验结果可信度较高。

为了进一步分析三种算法得到的塌岸易发性区划结果,选择了几处高易发性区域进行分析,比较不同模型得到的易发性区划分布结果并对与之对应的地质要素如岸坡结构类型、地层岩性、地质构造等,分析最符合实际调查中地质条件的易发性区划结

果,从而为后续区域防灾减灾提供依据。奉节段典型区域特征对比如图 20 所示。ANN 模型和 RF 模型的 AUC 值极为接近,而通过典型区域对比发现 RF 模型的评价结果较之 ANN 模型更为合理。

综上所述,在奉节段中 RF 模型的易发性区划结果更为合理,故选取奉节段的随机森林(RF)模型评价结果作为最终的评价结果,通过“镶嵌至新栅格”得到了研究区域的易发性区划结果,如图 21 所示。

5 结论

(1)针对研究区的特殊性,通过分析岸坡塌岸的空间分布与地形地貌、地质条件、气象水文、波浪作用等因素间的关系,构建了研究区塌岸易发性评价指标体系,其中,江岸宽度、库岸形态、风速等是前人没有用过的,但在本研究区域这些因子与塌岸发育关系密切,在利用地理探测器进行影响因子的权重分析中,也显示这些影响因子的贡献较大。

(2)易发性分区结果显示,ANN 模型、RF 模型与 SVM 模型的塌岸较高-高易发区灾害点占总灾害点分别为 53.1%、48.9% 和 39.3%。ANN 模型与 RF 模型的塌岸强度从低至高依次增大,说明其分区结果较为合理,而 SVM 模型出现了塌岸强度随易发性等级而降低的情况,说明其分区结果不太理想。

(3)预测精度表明,ANN 模型的 AUC 值最高, AUC 值为 0.798。其次为 RF 模型, AUC 值为 0.793,SVM 模型的 AUC 值最低为 0.766。三种模型的 AUC 值均在置信度为 95% 的置信区间中,说

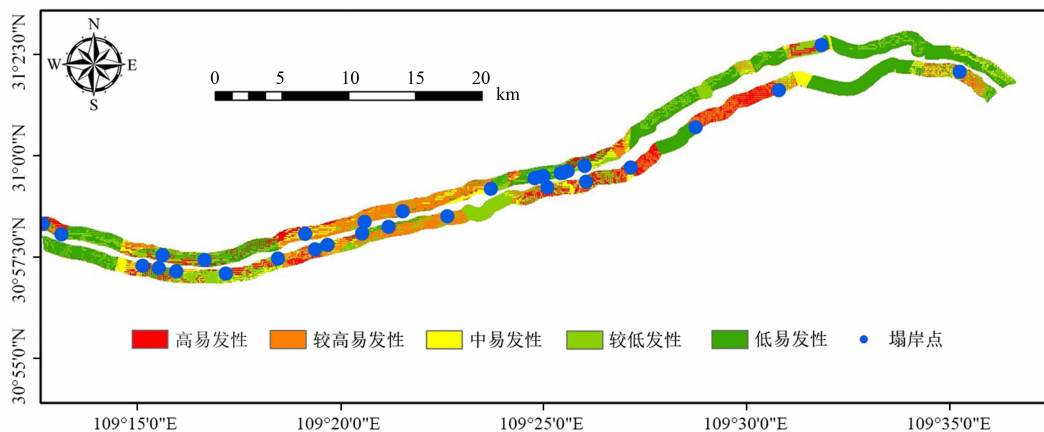


图 21 奉节—云阳段易塌岸灾害易发性区划图

Fig. 21 Fengjie-Yunyang section prone to bank collapse disaster susceptibility zoning map

明 AUC 值的预测结果较为可靠。

(4) 对评价结果的实际地质条件等进行验证分析得出, RF 模型的易发性区划结果更为合理, 高易发区所对应的岸坡类型为顺向坡、逆向坡, 地层岩性为新田沟组和自流井组。结果表明, RF 模型在奉节段中预测效果更好, 且易发性区划更符合实际调查成果。

参考文献 (References)

- [1] 张文春. 基于支持向量机—可拓学的三峡库区丰都县水库塌岸预测研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012: 81–103. [ZHANG Wenchun. Reservoir bank collapse prediction of Fengdu county in reservoir area of Three Gorges based on support vector machine and extenics [D]. Changchun: Jilin University, 2012: 81–103]
- [2] 王丰. 奉节消落带岸坡稳定性评价[D]. 北京: 中国地质大学, 2019: 27–38. [WANG Feng. Stability evaluation of bank slopes in Fengjie [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019: 27–38] DOI: 10.27493/d.cnki.gzdy.2019.001378
- [3] 王世梅, 王力, 陈勇, 等. 重大复活型滑坡诱发机理试验研究及复活工况预测评价[R]. 宜昌: 三峡大学, 2021: 551–556. [WANG Shimei, WANG Li, CHEN Yong, et al. Experimental study on the induced mechanism of major reactivation landslide and prediction and evaluation of reactivation conditions [R]. Yichang: China Three Gorges University, 2021: 551–556]
- [4] 叶润青, 付小林, 霍志涛, 等. 三峡库区 175 米试验性蓄水期间塌岸调查分析[J]. 华南地质与矿产, 2019, 35(3): 348–353. [YE Runqing, FU Xiaolin, HUO Zhitao, et al. Investigation and analysis of bank collapses during 175 m water level trial impounding of Three Gorges Reservoir area [J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2019, 35(3): 348–353] DOI: 10.3969/j.issn.1007–3701.2019.03.008
- [5] 黄发明, 曹昱, 范宣梅, 等. 不同滑坡边界及其空间形状对滑坡易发性预测不确定性的影响规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(S2): 3227–3240. [HUANG Faming, CAO Yu, FAN Xuanmei, et al. Effects of different landslide boundaries and their spatial shapes on the uncertainty of landslide susceptibility prediction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(S2): 3227–3240] DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.0246
- [6] 杨伟华. 汶川地震灾区崩塌滑坡易发性评估[D]. 西安: 长安大学, 2021: 3–21. [YANG Weihua. Assessment of the susceptibility of collapse and landslide in the Wenchuan earthquake disaster area [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021: 3–21] DOI: 10.26976/d.cnki.gchau.2021.001917
- [7] 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. Comparisons between Benggang risk assessments based on information model and random forest model [J]. Mountain Research, 2021, 39(4): 539–551] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.000618
- [8] 向贵府, 许模, 崔杰. 后河梓潼溪电站下游河段塌岸特征及影响因素分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(1): 156–163. [XIANG Guifu, XU Mo, CUI Jie. Analysis on the collapse characteristics and influencing factors of the lower reaches of Zitongxi hydropower station on Houhe river [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(1): 156–163] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003–8035.2017.01.25
- [9] 杨金林, 吴国宏, 刘庆军, 等. 小浪底库区垣曲段塌岸参数及其影响因素研究[J]. 人民黄河, 2018, 40(1): 96–103. [YANG Jinlin, WU Guohong, LIU Qingjun, et al. Study on the parameters of bank failure and the influence factors of Yuanqu section in the Xiaolangdi Reservoir area [J]. Yellow River, 2018, 40(1): 96–103] DOI: 10.3969/j.issn.1000–1379.2018.01.022
- [10] 孙启航, 夏军强, 周美蓉, 等. 层次分析法在荆江河段崩岸影响因素研究中的应用[J]. 泥沙研究, 2021, 46(2): 21–28. [SUN Qihang, XIA Junqiang, ZHOU Meirong, et al. Application of analytic hierarchy process in the study of factors affecting bank erosion in the Jingjiang reach [J]. Journal of Sediment Research, 2021, 46(2): 21–28] DOI: 10.16239/j.cnki.0468–155x.2021.02.004
- [11] 田正国, 程温鸣, 卢书强, 等. 三峡库区滑坡崩塌发育的控制与诱发因素分析[J]. 资源环境与工程, 2013, 27(1): 50–59. [TIAN Zhengguo, CHENG Wenming, LU Shuqiang, et al. Control and triggering factors analysis of landslides and rockfalls in the Three Gorges Reservoir area [J]. Resources Environment and Engineering, 2013, 27(1): 50–59] DOI: 10.16536/j.cnki.issn.1671–1211.2013.01.026
- [12] 彭仕雄, 陈卫东. 水库塌岸预测参数取值体系研究[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(11): 56–59+65. [PENG Shixiong, CHEN Weidong. System of parameter selection for reservoir bank collapse prediction [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(11): 56–59+65] DOI: 10.3969/j.issn.1001–5485.2014.11.012
- [13] 王力, 刘婷, 王世梅, 等. 三峡库区土质岸坡塌岸发育分布特征与易发性评价[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(8): 1853–1865. [WANG Li, LIU Ting, WANG Shimei, et al. Development distribution and susceptibility evaluation of soil bank slope in the Three Gorges Reservoir area [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(8): 1853–1865] DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202208019
- [14] 杨昌鑫. 土石混合岸坡塌岸变形破坏机理研究——以瀑布沟水库为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2019: 90–93. [YANG Changxin. Study on deformation and failure mechanism of soil-rock mixed bank slope collapse: Taking Pubugou Reservoir as an example [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019: 90–93] DOI: 10.26986/d.cnki.gcdle.2019.000167

- [15] 张景顺, 张世殊, 周光明, 等. 平缓细粒土岸坡水库塌岸机理研究[J]. 工程地质学报, 2016, **115**(5): 752–759. [ZHANG Jingshun, ZANG Shishu, ZHOU Guangming, et al. Collapse mechanism of gentle inclined and fine-grained soil slope on reservoir bank [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, **115**(5): 752–759] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2016.05.004
- [16] CHEN Mingliang, QI Shunchao, LYU Pengfei, et al. Hydraulic response and stability of a reservoir slope with landslide potential under the combined effect of rainfall and water level fluctuation [J]. Environmental Earth Sciences, 2021, **80**(1): 25. DOI: 10.1007/S12665-020-09279-7
- [17] 鲍玉海, 贺秀斌, 钟荣华, 等. 三峡水库消落带植被重建途径及其固土护岸效应[J]. 水土保持研究, 2014, **21**(6): 171–174+180. [BAO Yuhai, HE Xiubin, ZHONG Ronghua, et al. Revegetation and its effects on soil reinforcement in the riparian zone of Three-Gorge Reservoir [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, **21**(6): 171–174+180] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2014.06.034
- [18] 马明生, 许光祥. 三峡库区风浪波要素计算方法的初步研究[J]. 华北水利水电学院学报, 2005, **26**(3): 10–12. [MA Mingsheng, XU Guangxiang. Preliminary researches of the calculation method for main factor of wind and waves in the Yangtse Gorges Shed Area [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2005, **26**(3): 10–12] DOI: 10.19760/j.newu.zk.2005.03.004
- [19] 李峪, 鲍玉海, 贺秀斌, 等. 三峡水库典型库段近岸波高空间变异特征——以忠县段为例[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2016, **33**(2): 43–48. [LI Yu, BAO Yuhai, HE Xiubin, et al. Spatial variability of nearshore wave height in typical reach of Three Gorges Reservoir: A case study of Zhong county [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2016, **33**(2): 43–48] DOI: 10.11721/cqnj20160223
- [20] 付旭辉, 王硕, 唐定丹, 等. 三峡库区典型河段近岸波浪特征研究——以巫山大宁河为例[J]. 人民珠江, 2020, **41**(6): 32–38. [FU Xuhui, WANG Shuo, TANG Dingdan, et al. Study on the characteristics of near-shore waves in the typical section of the Three Gorges Reservoir area: A case study of Daning River [J]. Pearl River, 2020, **41**(6): 32–38] DOI: 10.3969/j.issn.1001-9235.2020.06.006
- [21] 杨敬东, 任晓军, 谢世平, 等. 向家坝库区风浪要素计算公式及变化规律[J]. 科学技术与工程, 2019, **19**(12): 378–383. [YANG Jingdong, REN Xiaojun, XIE Shiping, et al. Calculation formula and change law of wind wave elements in Xiangjiaba Reservoir area [J]. Science Technology and Engineering, 2019, **19**(12): 378–383] DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2019.12.054
- [22] 曹勇, 孙从军, 高阳俊, 等. 淀山湖水域风浪要素计算研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, **20**(S1): 39–43. [CAO Yong, SUN Congjun, GAO Yangjun, et al. Empirical wind-wave height formula in the Dianshan Lake [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, **20**(S1): 39–43] DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.01.015
- [23] 余文鹏, 霍志涛, 王世梅, 等. 九畹溪崩塌堆积体塌岸预测及对涌浪的影响分析[J]. 人民长江, 2018, **49**(1): 75–80. [YU Wenpeng, HUO Zhitao, WANG Shimei, et al. Bank collapse forecast of Jiawanxi collapse accumulation in Three Gorges Reservoir area and its influence on surge [J]. Yangtze River, 2018, **49**(1): 75–80] DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.01.015
- [24] ZOU Linlin, NIE Lei, SU Zhandong, et al. Forecasting of Jiatanchang bank collapse in the Three Gorge Reservoir area [J]. Advanced Materials Research, 2012, **487**: 850–854. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.487.850
- [25] SHEN Kangjian, MENG Yunwei. Stability analysis and treatment study on reservoir bank collapse area [J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, **737**: 437–440. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.737.437
- [26] SHANG Min, XU Qiang, XUE Yiguo, et al. Study on the mechanism of bank collapse and prevention-control measures in China Three Gorges Reservoir area [J]. Advanced Materials Research, 2013, **749**: 106–109. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.749.106
- [27] 管宏飞. 靠椅状顺层岩质水库滑坡机理及稳定性预测评价——以藕塘滑坡为例[D]. 宜昌: 三峡大学, 2013: 10–11. [GUAN Hongfei. Study on deformation mechanism and stability evaluation of chair-shape bedding rockslides associated with reservoirs – a case study of Outang landslide [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2013: 10–11] DOI: 10.7666/d.D471214
- [28] OH H J, PRADHAN B. Application of a neuro-fuzzy model to landslide-susceptibility mapping for shallow landslides in a tropical hilly area [J]. Computers and Geosciences, 2011, **37**(9): 1264–1276. DOI: 10.1016/j.cageo.2010.10.012
- [29] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, **72**(1): 116–134. [WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, **72**(1): 116–134] DOI: 10.11821/dlxb201701010
- [30] 王雪, 郭远臣. 三峡库区人工湿地护坡系统透水护坡面层材料及其稳定厚度[J]. 新型建筑材料, 2016, **43**(8): 86–88+122. [WANG Xue, GUO Yuanchen. Material and stable thickness of permeable slope surface of Three Gorges Reservoir area constructed wetland slope protection system [J]. New Building Materials, 2016, **43**(8): 86–88+122]
- [31] CAO Lingzhi, WANG Pengju, SAI Linwei, et al. Artificial neural network potential for gold clusters [J]. Chinese Physics B, 2020, **29**(11): 117304. DOI: 10.1088/1674-1056/abc15d
- [32] CUTLER A, CUTLER D R, STEVENS J R. Random forests [G]//ZHANG C, MA Y. Ensemble Machine Learning: Methods

- and Applications. Berlin; Springer Science + Business Media, LLC, 2012; 157–175. DOI: 10.1007/978-1-4419-9326-7_5
- [33] 焦亮, 柳金峰, 游勇, 等. 基于SVM-RF的泥石流窗口坝闭塞度判别研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(3): 439–446+466. [JIAO Liang, LIU Jinfeng, YOU Yong, et al. Research on the occlusion of debris flow window-frame dam based on SVM and RF methods [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(3): 439–446+466] DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.2020.03.016
- [34] DAS I, STEIN A, KERLE N, et al. Landslide susceptibility mapping along road corridors in the Indian Himalayas using Bayesian logistic regression models [J]. Geomorphology, 2012, 179(60): 116–125. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.08.004
- [35] 冯杭建, 周爱国, 俞剑君, 等. 浙西梅雨滑坡易发性评价模型对比[J]. 地球科学, 2016, 41(3): 403–415. [FENG Hangjian, ZHOU Aiguo, YU Jianjun, et al. A comparative study on plum-rain-triggered landslide susceptibility assessment models in West Zhejiang province [J]. Earth Science, 2016, 41(3): 403–415] DOI: 10.3799/dqkx.2016.032
- [36] 张佑祥. 巫山县地质灾害现状及防治[G]//中国灾害防御协会. 全国突发性地质灾害应急处置与灾害防治技术高级研讨会论文集. 兰州: 中国大地出版社, 2010: 187–192. [ZHANG Youxiang. Present situation and prevention of geological disasters in Wushan county [G]// China Association for Disaster Prevention. Proceedings of the National Advanced Symposium on Emergency Treatment and Disaster Prevention Technology of Sudden Geological Disasters. Lanzhou: China Land Press, 2010: 187–192]

An Updated Method for Susceptibility Evaluation on Bank Collapses along the Fengjie-Yunyang Section of Three Gorges Reservoir, China

WANG Li^{a, b}, HU Wenzhuo^{a, b}, WANG Shimei^{a, b*}, LI Yu^{a, b}, FAN Zhihong^{a, b}

(a. Key Laboratory of Geological Hazards in Three Gorges Reservoir Area of Ministry of Education;

b. College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China)

Abstract: Bank collapses are widely distributed in the Three Gorges Reservoir area of China. A proper evaluation of bank collapse susceptibility is of great significance to geo-disaster prevention. Unfortunately, evaluation-related research on bank collapse susceptibility in the Three Gorges Reservoir area had been poor performed; there were quite unresolved issues regarding the applicability of susceptibility models, or a correct selection of evaluation index; and in most evaluation models, there was no inclusion of the influence of shock wave on the stability of reservoir bank.

In this case study, it conducted evaluation on bank collapse susceptibility in the Fengjie-Yunyang section of Three Gorges Reservoir, where extensive geo-disasters severely dominated. In consideration of the influence of shock waves and bank morphology on the formations of bank collapses in the area, an evaluation index system of bank collapse susceptibility was constructed, which included three indexes, e. g. riverbank width, reservoir bank shape and wind speed, and eight influencing factors based on observed geo-disaster occurrences. Three machine learning models (ANN, RF and SVM model) were used to accomplish the risk zoning of bank collapse susceptibility and verification in the Reservoir area, as well as the prediction of model accuracy.

This study found that (1) influencing factors such as riverbank width, reservoir bank shape and wind speed had higher weights than others, contributing more to the development of bank collapses in the Fengjie-Yunyang section. (2) The numbers of bank collapses estimated by ANN, RF and SVM model in moderate high-high risk zones accounted for 53.1, 48.9 and 39.3 of total geo-disasters, respectively. The obtained collapse intensity by

ANN model and RF model increased from low to high, and risk zoning results were reasonable, whereas SVM model was less than ideal. (3) AUC values obtained from ANN, RF and SVM were 0.798, 0.793 and 0.766, respectively, indicating the three machine learning models all had reliable prediction accuracy. (4) The high risk areas zoned by RF model were most in line with actual geological conditions, thereby receiving a more reasonable results.

This study can provide theoretical guidance and technical reference for prevention and prediction of geological disasters in the Three Gorges Reservoir area.

Key words: Three Gorges Reservoir; bank collapse; susceptibility evaluation; machine learning model

(责任编辑 朱颖彦 李嵘)

三峡地区胡家沟塌岸带——典型塌岸灾害

(王力,三峡库区地质灾害教育部重点实验室)

三峡库区自建成蓄水以来,在长期周期性水位升降和波浪作用下,库区侵蚀、塌岸等地质灾害日益严重。自 2008 年至今,三峡库区奉节—云阳段岸坡塌岸等地质灾害发生数十起,严重威胁了长江航道的安全,塌岸逐渐成为制约该区经济发展和安全生产生活的不利因素之一。三峡库区塌岸易发性评价成果可以深化对三峡库区塌岸灾害影响因素的认识,为三峡库区防灾减灾工作提供理论支撑。

详见本期《三峡库区塌岸灾害易发性评价方法——以奉节—云阳段为例》一文。