

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230303003

基于信息量-Scoops3D联合模型的 地质灾害易发性评价*

余文秀^{1,2}, 李秀珍¹, 郑玲静¹, 孔纪名¹, 邵其其³, 熊华勇³, 谢成³

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 武汉市汉阳市政建设集团有限公司, 湖北 武汉 430050; 3. 国家石油天然气管网集团有限公司华南分公司, 广东 广州 510623)

摘要: 贵渝管道沿线地势险峻、构造活跃、雨量集中, 崩滑流等地质灾害十分发育, 科学开展管道沿线地质灾害的易发性评估工作对确保其安全运行至关重要。本研究在查明管道沿线自然地质环境及地质灾害分布的基础上, 结合管道沿线地形地质特征、管道展布与斜坡体的相互空间位置关系划分了101段适合管道工程特点的评价单元, 基于信息量数理统计模型与Scoops3D物理力学模型对管道沿线地质灾害的易发性进行了评价。评价结果表明管道沿线地质灾害的高易发区主要集中在遵义及桐梓县附近, 其中7段处于极高易发区, 26段处于高易发区, 20段处于中易发区, 30段处于低易发区, 18段处于极低易发区。通过ROC曲线分别求得信息量、Scoops3D以及二者联合模型的AUC值分别为0.796、0.683和0.803, 结果表明信息量-Scoops3D联合模型的评价准确性最高。

关键词: 贵渝管道; 地质灾害; 信息量-Scoops3D联合模型; 易发性评价

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)03-0649-11

Evaluation of the Susceptibility to Geological Hazards Based on the Information-Scoops3D Joint Model

YU Wenxiu^{1,2}, LI Xiuzhen¹, ZHENG Lingjing¹, KONG Jiming¹, SHAO Qiqi³,
XIONG Huayong³, XIE Cheng³

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. Wuhan Hanyang Municipal Construction Group Co., Ltd, Wuhan 430050, China;

3. South China Branch, State Petroleum and Natural Gas Pipeline Network Group, Guangzhou 510623, China)

Abstract: The terrain along the Guizhou-Chongqing Pipeline is rugged, the geological structure is active, and the rainfall is concentrated, leading to the development of geological hazards such as landslides and debris flows. Scientific assessment of the susceptibility to geological hazards along the pipeline is crucial for ensuring operational safety. Based on the investigation of the natural geological environment and disaster distribution along the pipeline, this study divided the pipeline route into 101 evaluation units. These units were determined by considering the terrain, geological characteristics, spatial relationship between the pipeline and the slopes. The susceptibility to geological hazards along the

* 收稿日期:2023-03-03;修回日期:2023-06-05

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3004401)、国家石油天然气管网集团华南分公司委托项目(GWHT20210014429)资助

作者简介:余文秀(1998—),女,硕士研究生。主要从事山地灾害风险评价与早期识别研究。E-mail:2414126023@qq.com

通信作者:李秀珍(1975—),女,研究员,博导,博士。主要从事地质灾害评价及预测研究。E-mail:lxzljt@imde.ac.cn

pipeline was evaluated using an information value statistical model and the Scoops3D physical mechanics model. The results indicated high-risk areas of geological disasters were concentrated in the vicinity of Zunyi and Tongzi counties. Among the evaluated sections, 7 were in extremely high-risk areas, 26 in high-risk areas, 20 in medium-risk areas, 30 in low-risk areas, and 18 in the very low-risk areas. The AUC values of the information model, the Scoops3D model and their combined model, determined using ROC curves, were 0.796, 0.683 and 0.803, respectively, indicating that the information-Scoops3D joint model had the highest evaluation accuracy.

Keywords: Guizhou-Chongqing pipeline; geological hazard; information-Scoops3D joint model; susceptibility evaluation

0 引言

贵州-重庆输油管道(简称贵渝管道)起于黔黔边界,向南展布,途经桐梓、遵义、息烽等县,最后抵达贵阳市,全长410 km,是中国西南地区输送油气的关键通道。管道沿线区域地势陡峭,地质构造复杂,夏季降雨集中且多暴雨天气,致使崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害频繁发生。在管道运行期间,因地质灾害引起的管道事故时有发生,造成了严重的环境污染与财产损失。如2020年7月,贵州省遵义市桐梓县因连续特大暴雨引发的山体滑坡导致ZY109+410处管道错断,引起柴油泄漏。经专家核算,此次事故造成柴油泄漏289.91 t,直接经济损失148.73万元,受污染土壤约491.9 t。

科学的开展管道沿线地质灾害的风险评估工作对于确保管道安全运行至关重要。地质灾害风险评价包含易发性、易损性、危险性评价三部分^[1],其中易发性评价通过分析基础地质环境条件得到地质灾害未来发生的可能性,是最为基础性的工作^[2-3]。现阶段常用的易发性评价方法主要有统计分析法与物理模型法两类^[4]。统计分析法是应用最为广泛的地质灾害易发性评估方法,常见的有信息量法、频率比法、支持向量机法等,其中信息量模型因概念明确、应用简单、实用性强,众多学者纷纷采用该模型进行易发性评估并取得了良好效果。如王雷等^[5-7]均基于信息量模型完成了区域地质灾害易发性评价,充分证实了信息量模型的可靠性。物理模型以传统力学理论为基础建立力学模型,可以计算特定地形条件下的斜坡稳定性,应用较多的有Scoops3D、3DSLOPE、SV-Slope等。Scoops3D模

型是采用Fortran语言编写的一个开源计算程序,以刚体极限平衡分析中的Bishop法作为理论基础,具有可考虑三维地形的优势,已成功应用于不稳定斜坡的识别与预测研究。如赵志阳等^[8]利用Scoops3D得出了三峡水库万州段的边坡稳定性时空分布情况。王志浩等^[9]通过Scoops3D模型发现库岸边坡稳定性随库水位下降速率增大而降低,随库水位上升速率增大而升高。B. Rashid等^[10]利用Scoops 3D模型得到了中巴经济走廊KKH沿线的滑坡易发性分布图,其高易发区与巴基斯坦地质调查局记录的历史灾害点位置吻合。信息量模型以概率统计及对比映射为理论基础,通过统计历史地质灾害的发生情况来推测将来在类似环境下发生灾害的可能性^[11]。该模型虽能考虑导致地质灾害发生的各类致灾因子(如坡度、坡向、岩性、降雨等)的影响,却无法从力学机制的角度判断斜坡的稳定性。而Scoops3D模型以极限平衡分析中的Bishop法为理论基础对斜坡稳定性进行计算,可准确计算出斜坡稳定系数^[12]。将二者联合得到的信息量-Scoops3D联合模型既能考虑各致灾因子对灾害的影响又能反映斜坡内部受力状态对坡体稳定性的影响,二者优势互补,弥补了传统单一模型的缺陷。

本研究在查明管道沿线自然地质环境及地质灾害分布的基础上,结合管道沿线地形地貌、地质特征及管道展布与斜坡体的相互空间位置关系划分了101个适合管道线性工程特点的评价单元,通过将信息量数理统计模型与Scoops-3D物理力学模型进行叠加联合完成了管道沿线地质灾害的易发性评价。相关研究成果可为贵渝管道沿线地质灾害的防灾减灾工作提供科学依据。

1 区域地质环境及地质灾害概况

1.1 自然地质环境

贵渝管线始于渝黔边界,一路往南延伸最终抵达贵阳,全区最低海拔316 m,最高海拔1 942 m,整体地势呈现南北高、中间低的特点(图1)。北部中山区内以侵蚀构造地貌为主,区内群山耸立、峡谷纵横、冲沟密集。南部属云贵高原区,由溶蚀洼地、剥蚀低山、宽谷及浅盆地等微地貌构成。区内特殊的地形地貌为地质灾害的发生提供了良好条件^[13]。

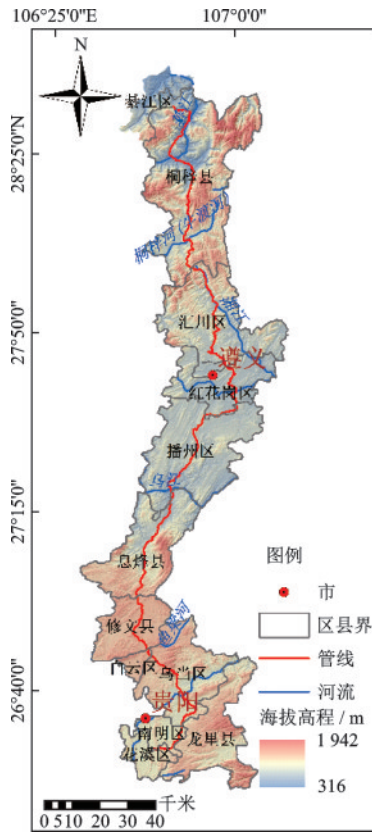


图1 海拔及河流

Fig.1 Elevation and river distribution

贵渝管道沿线穿越上扬子地块黔北隆起区的凤冈南北向隔槽式褶皱变形区、江南复合造山带的黔南台坳区及都匀南北向隔槽式褶皱变形区。沿线活动性断裂主要为北北东向和近北向活动的断层(图2),穿越的主要断裂带有彭水断裂、金沙-绥阳断裂、湄潭-德江断裂、开阳-纳雍断裂、遵义-贵阳断裂、贵阳断裂、江口-黄平断裂等。

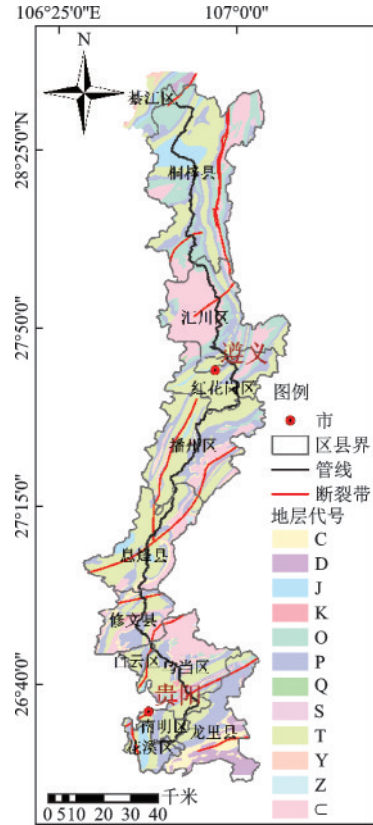


图2 地层及断裂带分布

Fig.2 Distribution of strata and fault zones

沿线地层出露较全,从寒武纪到第四系各个时代的地层均有出露,其中侏罗系、三叠系、二叠系地层在研究区内分布最为广泛。侏罗系与三叠系两套地层以泥岩、粉砂岩、页岩、黏土岩为主,岩性偏软,易风化且易与水发生作用而产生泥化。二叠系地层以碳酸盐岩为主,岩溶发育,孔隙裂隙较多,这几套地层整体稳定性都较差,极易发育崩塌、滑坡等地质灾害。根据区内岩体的工程性质、风化程度和完整程度等将研究区的地层岩性划分为易滑岩组、较易滑岩组、偶滑岩组及稳定岩组4大类。

管道沿线雨量充沛且集中于夏季,年均降雨量在1 100~1 300 mm。沿线地表径流强烈,水系发达,支流众多,穿越的河流主要有桐梓河、湘江、湄江、清水江等,均以降雨补给为主,地下水补给为辅。地下水类型以岩类孔隙水及岩溶水为主,因第四系覆盖层较薄,孔隙水相对较少,而碳酸盐岩分布广泛,岩溶水相对较多。

1.2 地质灾害概况

贵渝管道沿线特殊的地形地貌及地质环境条

件致使研究区地质灾害十分发育。通过资料收集及野外调查共查明管道沿线共发育地质灾害 130 处 (图 3), 包括 121 处滑坡、5 处崩塌、3 处岩溶塌陷和 1 处地面沉降。可以看出, 管道沿线地质灾害类型以滑坡为主, 主要集中于桐梓县及遵义红花岗区、播州区内, 息烽县及修文县内亦有少量灾害分布。

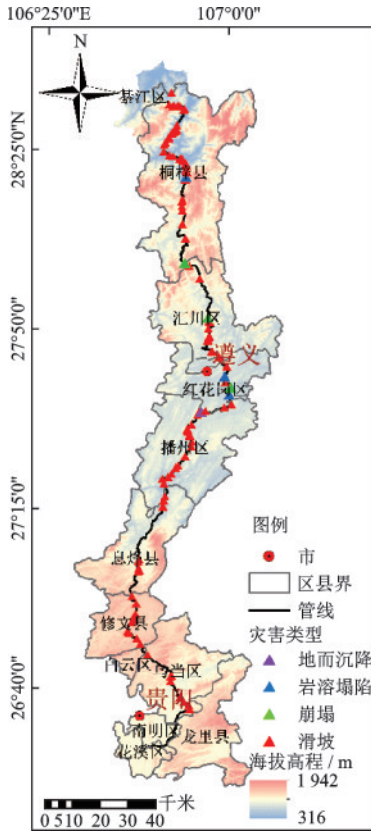


图 3 历史灾害分布

Fig.3 Distribution of historical disaster

2 模型简介

2.1 信息量模型

信息量模型以贝叶斯法则为理论基础, 被广泛应用于崩塌、滑坡等地质灾害的易发性评价中。该模型认为地质灾害的发生受到多种因素共同作用, 且同一因素的不同类别对于事件发生的影响存在差异, 其理论公式为:

$$I(Y, x_1, x_2, \dots, x_n) = \ln \frac{P(Y, x_1, x_2, \dots, x_n)}{P(Y)} \quad (1)$$

式中, $I(Y, x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为影响因素 x_1, x_2, \dots, x_n 对地质灾害发生提供的信息量; $P(Y, x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为

影响因素 x_1, x_2, \dots, x_n 共同作用下灾害发生的概率; $P(Y)$ 为灾害发生的先验概率。一般情况下, 影响灾害发生的因子较多, 且同一因子不同等级对灾害的影响程度也不同。因此分别计算单一因素的信息量值, 再对各因子的信息量值求和, 得到综合信息量^[14], 则原有理论模型简化为:

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

式中, I 为评价单元内的综合信息量值; N_i 为影响因素在 X_i 内的灾害面积; N 为研究区内灾害分布总面积; S_i 为影响因素在 X_i 内的研究区面积; S 为研究区总面积。

2.2 Scoops3D 模型

Scoops3D 模型是以 DEM 数据为基础进行斜坡三维稳定性计算。在计算过程中, 基于数字高程模型栅格建立立体的检索区域, 在该区域内确定若干检索点, 然后依次以每个检索点为球心, 按一定的半径扩展搜索, 最终被球面所圈定的栅格单元即为斜坡的失稳块体 (图 4)^[15-16]。

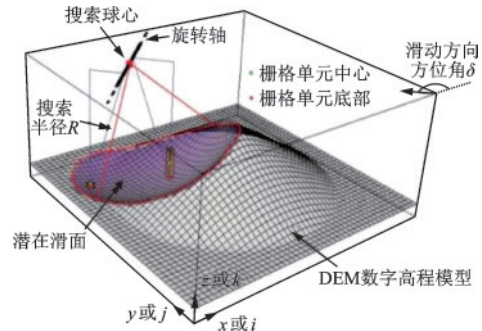


图 4 Scoops3D 模型球形滑面及潜在滑体的示意

Fig.4 Schematic diagram of spherical sliding surface and potential sliding body of Scoops3D model

以球心为原点, 建立坐标轴方向平行于 DEM 数据坐标系的空间直角坐标系, 则球体半径 R 可用以下公式表示:

$$R^2 = x^2 + y^2 + z^2 \quad (3)$$

式中, x, y, z 为栅格单元 (图 5) 底部坐标。近似处理该曲面为与水平面夹角呈 ϵ 的平面, 则 ϵ 及滑动方向视倾角 α 可表示为:

$$\epsilon = \cos^{-1} \cdot [\sqrt{1 + (\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2}]^{-1} \quad (4)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \cdot [(\partial z / \partial x) \cos \delta + (\partial z / \partial y) \sin \delta] \quad (5)$$

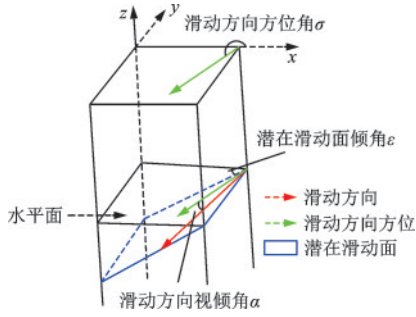


图5 栅格单元示意

Fig.5 Schematic diagram of a grid cell

由于岩土体性质和地层的三维结构会影响斜坡稳定性,因此土体容重 γ 是深度 z 的函数,设每个栅格单元的体积为 V_c ,则滑块重力可表示为:

$$W_c = \int V_c \gamma(z) dz \quad (6)$$

通过线性 Coulomb-Terzaghi 失稳准则计算抗剪强度 s :

$$s = c + (\sigma_n - u) \cdot \tan \varphi \quad (7)$$

式中, c 、 φ 分别为土体的黏聚力和内摩擦角; σ_n 为滑块所受的正应力; u 为剪切面的孔隙水压力。将斜坡稳定系数 F 定义为抗剪强度与剪切应力之比, $F < 1$ 时为不稳定斜坡。

$$F = \frac{s}{\tau} \quad (8)$$

设滑动面面积为 A ,则滑块的滑动力表示为:

$$T = \frac{1}{F} \sum s_{i,j} A_{i,j} \quad (9)$$

综上,斜坡稳定系数具体计算公式可表示为:

$$F = \frac{\sum R_{i,j} [c_{i,j} A_{i,j} + (N_{i,j} - u_{i,j} A_{i,j}) \tan \varphi_{i,j}]}{\sum W_{i,j} (R_{i,j} \sin \alpha_{i,j} + k_{i,j} e_{i,j})} \quad (10)$$

式中, i,j 为相应位置的栅格单元; $R_{i,j}$ 为搜索半径; $e_{i,j}$ 为搜索球心到三维柱体质心的距离; $A_{i,j}$ 为潜在滑体的滑面面积; $c_{i,j}$ 为潜在滑体的黏聚力; $\varphi_{i,j}$ 为潜在滑体的内摩擦角; $\alpha_{i,j}$ 为潜在滑体的视倾角; $W_{i,j}$ 为潜在滑体的重力; $u_{i,j}$ 为孔隙水压力; $k_{i,j}$ 为水平振动荷载; $\beta_{i,j}$ 为潜在滑体的真倾角。

2.3 信息量-Scoops3D 联合模型

信息量模型以概率统计及对比映射为理论基础,通过统计历史地质灾害的发生情况来推测将来在类似环境下发生灾害的可能性,虽能考虑各类致灾因子(如坡度、坡向、岩性等)的影响,却无法从力学机制的角度判断斜坡的稳定性。而 Scoops3D 模

型以极限平衡分析中的 Bishop 法为理论基础计算斜坡稳定系数,通过分析斜坡内部受力状态来判断灾害发生的概率。为充分发挥二者优势,将地质灾害易发性评价的数理统计模型(信息量模型)和物理力学模型(Scoops-3D 模型)进行叠加联合,得到了信息量-Scoops3D 联合模型。本研究技术路线如图 6 所示。

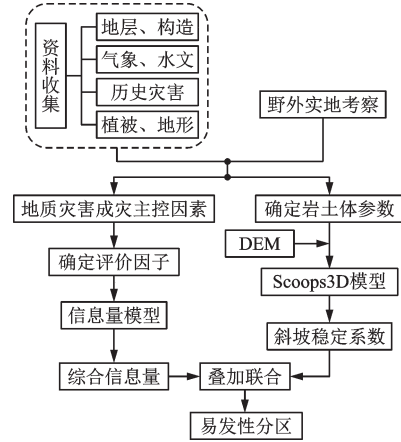


图6 研究技术路线示意

Fig.6 Schematic of research technology roadmap

3 基于信息量-Scoops-3D 联合模型的易发性评价

3.1 综合信息量计算

通过对桐梓、松坎、新站、贵阳乌当等地的管道沿线地质灾害进行实地考察,并结合已有资料分析地质灾害发育的地质环境背景特征,确定了研究区段地质灾害的成灾主控因素,主要包括四大类:地形因素(坡度、相对高差、坡向、曲率)、地质因素(地层岩性、断裂带)、水文因素(河流冲刷切割程度)及植被覆盖条件等。据此,选取坡度、岩组、河网密度、归一化植被指数(NDVI)4大类8个因子作为管道沿线地质灾害易发性的评价指标(图7),将贵渝管线左右两侧各4 km 范围内的区域作为评价范围,通过信息量模型计算各因子不同类别下的信息量值 I ,见表1。

各评价因子不同等级的信息量有正有负,正值表明发生崩滑灾害的概率高于先验概率,值越大表示发生灾害的概率越高;负值越小表示发生灾害的概率越小;0代表无法判断。将上述8个评价因子的

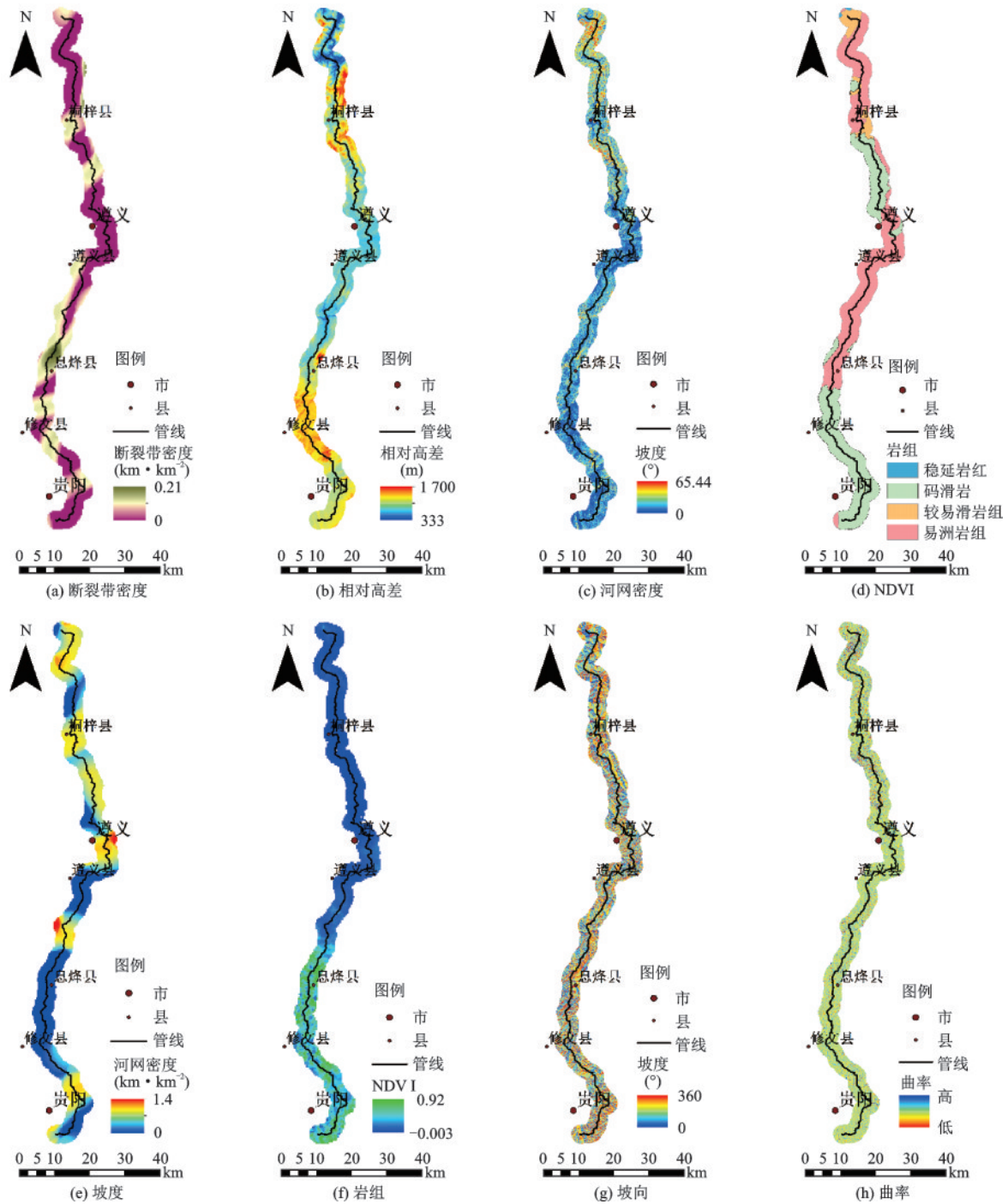


图7 评价因子图层

Fig.7 Evaluation factor layer

信息量值进行综合叠加分析,即得到表征研究区内易发性高低的综合信息量,信息量值越大,表示发生地质灾害的概率越高(图8)。

从综合信息量分布图中可以看出,桐梓及遵义附近的综合信息量明显高于其他区段,表明桐梓及遵义附近发生地质灾害的概率较高,与实际地质灾害分布特征相符。

3.2 稳定性系数计算

利用 Scoops3D 模型计算贵渝管道左右各 4km 范围内斜坡的稳定系数。首先结合野外调查资料及工程地质类比等方法,综合确定区内岩土体的平均粘聚力、内摩擦角、重度分别为: $C=24 \text{ kPa}$, $\Phi=14^{\circ}$, $\gamma=22 \text{ kN/m}^3$ 。因实际计算范围总面积为

表1 评价因子信息量计算结果

Table 1 Calculation results of evaluation factor information content

主控因素	评价因子	评价因子分级	信息量
地形因素	曲率	<-0.6	0.019
		-0.6~-0.3	0.816
		-0.3~0	0.115
		0~0.25	-0.399
		0.25~0.65	-1.24
		>0.65	0
	高差/m	255~672	1.885
		672~858	-0.119
		858~1 002	0.47
		1 002~1 167	-0.637
		1 167~1 344	-0.985
		1 344~1 885	-2.507
	坡度/(°)	<10	0.329
		10~20	-0.337
		20~30	-0.295
		30~50	-0.838
		50~60	0
		>60	0
	坡向	北	-0.121
		北东	0.206
东		0.207	
南东		-0.215	
南		-0.428	
南西		-0.275	
西		0.192	
北西		-1.823	
地质因素	岩组	稳定岩组	-0.552
		偶滑岩组	0.281
		较易滑岩组	0.303
		易滑岩组	0.403
	断裂带密度/(km·km ⁻²)	<0.024	0.322
		0.024~0.065	-0.011
水文因素	河网密度/(km·km ⁻²)	0.065~0.1	0.262
		0.1~0.15	-1.315
		0.15~0.2	0
		>0.2	0
		0~0.13	-0.269
植被因素	归一化植被指数	0.13~0.33	-0.281
		0.33~0.48	0.208
		0.48~0.66	0.099
		>0.66	0.063
		<0.12	0
		0.12~0.27	0.54
		0.27~0.45	0.248
		0.45~0.62	0.043
		>0.62	-1.28

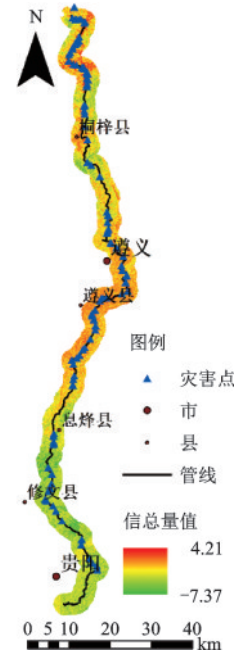


图8 综合信息量计算结果

Fig.8 Calculation results of comprehensive information content

3 444 km², 管线总长度为 410 km, 考虑到模型性能与计算效率, 采用 90 m 分辨率的 DEM。依据计算范围内 DEM 数据确定 Scoops3D 球心位置高程范围为 380~1 800 m, 其余参数见表 2。通过在 DEM 上方生成搜索球心矩阵(搜索点阵), 使用由粗到细的搜索方式(Coarse-to-fine), 迭代搜索每一个节点分析三维潜在滑动面。模型搜索时会出现在每个节点搜索过程中有无限多潜在滑动面的情况, 因此, 需要使用体积限制潜在滑体大小来确定最终滑动面, 根据野外调查确定研究区地质灾害体积方量, 确定最终搜索体积阈值范围为 1×10⁴~15×10⁴ m³。

斜坡稳定系数计算结果如图 9 所示。根据斜坡稳定系数的定义可知, 稳定系数越低, 发生灾害的

表2 Scoops3D 搜索参数表

Table 2 Scoops3D search parameters

参数	取值
搜索起始点坐标/个	(1, 1)
栅格横向点数/个	1 595
栅格纵向点数/个	3 181
球心最低高程/m	380
球心最高高程/m	1 800
相邻球心间隔栅格数目/个	4
搜索半径增量/m	70

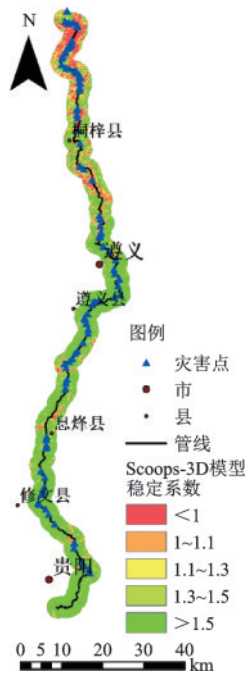


图9 Scoops-3D模型斜坡稳定系数计算结果
Fig.9 Calculation results of slope stability coefficient based on Scoops-3D model

概率越大,且一般认为稳定系数小于1即为不稳定斜坡。从分布图可以看出桐梓县内斜坡稳定系数小于1的区域分布十分广泛,表明该区域内坡体稳定性差,极易发生地质灾害。

3.3 基于信息量 - Scoops3D 联合模型的易发性分区

为充分发挥各模型优势,实现各模型优势互补,本研究将信息量模型与 Scoops-3D 模型的评价结果叠加联合进行易发性分区。基于信息量模型计算得到的信息量值越大,发生灾害的概率越高;而采用 Scoops-3D 模型计算得到的斜坡稳定系数是值越小,发生灾害的概率越高,二者不能直接叠加。故先将各模型结果转换为易发性指数值,再按 1:1 的权重进行叠加得到联合模型易发性指数。在评价单元选取方面,本次针对管道工程的特点,依据管道沿线地形地貌特征、地层岩性、断裂带分布、地质灾害空间分布、管道展布与斜坡体的相互空间位置关系等划分出 101 个区段作为评价单元。信息量-Scoops3D 联合模型的易发性评价结果如图 10 所示。

图 10 显示管道沿线地质灾害极高易发段主要分布于桐梓县附近,高易发段主要在遵义市附近,与已有地质灾害的分布特征基本一致。统计分析各级易发区内的区段数,其中 7 段处于极高易发区,

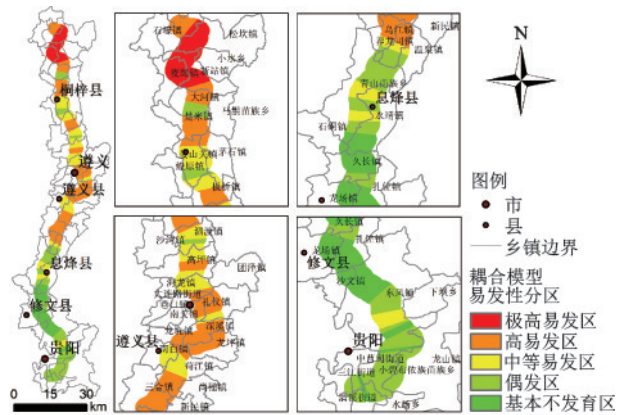


图 10 研究区地质灾害易发性分区示意
Fig.10 Zoning map of geological disaster susceptibility in the study area

26 段处于高易发区,20 段处于中易发区,30 段处于低易发区,18 段处于极低易发区。

统计分析各乡镇所在易发区(表 3),结果表明极高易发区集中分布在桐梓县的松坎镇、新站镇、夜郎镇内,高易发区主要分布在桐梓县尧龙山镇、大河镇、楚米镇、娄山关镇,遵义县板桥镇、四渡镇、高坪镇、苟江镇、三合镇、南白镇、深溪镇、乌江镇,以及遵义市董公寺镇、大连路礼仪镇及新蒲街道。

3.4 结果分析与验证

易发性评价结果对于制定防灾减灾计划至关重要,因此需要检验评价结果的准确性。首先对比分析易发性分区结果与实际历史灾害分布情况(表 4),统计分析各级易发区内的灾害点数量、灾害点密度及面积占比,结果显示随着易发性等级升高,灾害点密度急剧升高。中等及高和极高易发区的面积仅占研究区总面积的 58%,但该区域分布的灾害点占到灾害点总数的 84%,表明易发性分区结果与实际地质灾害分布特征相符。

受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve,简称 ROC 曲线)是易发性评价模型性能检验的常用方法,以未发生灾害的单元被正确预测的比例(假阳性率)为横坐标,以发生灾害的单元被正确预测的比例(真阳性率)为纵坐标绘制曲线,曲线越靠近左上角,说明评价结果准确率越高^[14]。AUC 值代表曲线右下方面积,取值在 0.5~1 之间。AUC=0.5 表示判别结果无意义;AUC=[0.5,0.7] 代表结果具有较低准确性;AUC=[0.7,0.9] 表示结果具有较高的准确性;AUC>0.9 则表示结果准确性非常高^[14]。

表3 乡镇易发性统计

Table 3 Statistical table of township susceptibility

易发性等级	所在市县	所在乡镇	易发性等级	所在市县	所在乡镇
极高易发区	桐梓县	松坎镇	高易发区	桐梓县	尧龙山镇
		新站镇			大河镇、新站镇
		夜郎镇、新站镇			大河镇
中等易发区	遵义县	板桥镇		楚米镇	
		四渡镇		楚米镇、娄山关镇	
		四渡镇、高坪镇		板桥镇	
	遵义市	高坪镇		板桥镇、四渡镇	
		董公寺镇		高坪镇	
		礼仪镇、新蒲街道		董公寺镇、大连路街道、礼仪镇	
遵义县	苟江镇、南白镇	礼仪镇、新蒲街道			
	乌江镇、养龙司镇、温泉镇	深溪镇、龙坪镇			
	息烽县	青山苗族乡、永靖镇			
贵阳市市辖区	东风镇	苟江镇、南白镇、龙坑镇			
	桐梓县	娄山关镇			
偶发区	桐梓县	大河镇	苟江镇、三合镇		
		娄山关镇	三合镇		
	遵义县	四渡镇	三合镇、乌江镇		
		乌江镇、养龙司镇、温泉镇	乌江镇、养龙司镇、温泉镇		
	息烽县	养龙司镇、青山苗族乡	息烽县	青山苗族乡、永靖镇	
		青山苗族乡、永靖镇	久长镇、永靖镇		
	修文县	久长镇、扎佐镇	久长镇		
		东风镇	龙场镇、扎佐镇		
	贵阳市市辖区	东风镇、龙山镇	扎佐镇		
		小碧布依族苗族乡、龙山镇	镇、东风镇		
小碧布依族苗族乡、孟关苗族布依族乡		贵阳市	东风镇		
中曹司街道、孟关苗族布依族乡、三江街道		市辖区	小碧、孟关布依族苗族乡		

表4 示范段管道沿线地质灾害易发性分区结果统计

Table 4 Statistics of zoning results of geological disaster susceptibility along the pipeline of demonstration section

易发性分区	灾害数量	灾害占比/%	面积/km ²	面积占比/%	点密度/(个·km ⁻²)
基本不发育区	9	7	344.44	10	0.026
偶发区	12	9	1102.8	32	0.01
中等易发区	36	28	757.68	22	0.0475
高易发区	43	33	792.12	23	0.0543
极高易发区	30	23	447.72	13	0.067

本研究利用 SPSS 软件进行 ROC 曲线分析。研究区共有 130 个地质灾害点,采用 ARCGIS 随机生成等量非灾害点共同组成样本数据,以各点提取的易发性值为自变量,是否发生灾害作为因变量,

各模型的 ROC 曲线如图 9 所示。通过 ROC 曲线计算得到联合模型、信息量模型及 Scoops-3D 模型对

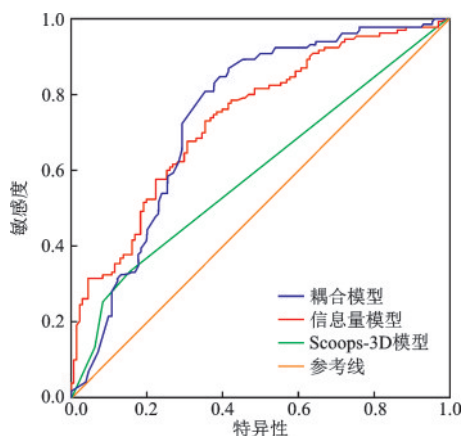


图 11 ROC 曲线分析

Fig.11 ROC curve analysis

应的 AUC 值分别为 0.803、0.796、0.683, 结果表明联合模型的 AUC 值最大, 准确性最高。

4 结 论

本研究采用信息量-Scoops3D 联合模型对贵州-重庆段输油管道沿线地质灾害易发性进行了评价, 得到如下结论:

(1) 选取地形高差、坡度、坡向、曲率、岩组、断裂带密度、河网密度及归一化植被覆盖指数作为评价因子, 通过信息量模型计算得到研究区内综合信息量分布图, 分布图显示桐梓及遵义附近的信息量明显偏高, 表明该区域发生地质灾害的概率较高。

(2) 通过野外调查及经验确定岩土体力学参数, 利用 Scoops-3D 模型计算得到研究区斜坡稳定性系数, 结果显示桐梓县内斜坡稳定系数小于 1 的区域分布十分广泛, 表明该区域内坡体稳定性差, 易发生地质灾害。

(3) 结合统计模型及物理模型优势构成信息量-Scoops3D 联合模型, 综合考虑地形地质、历史灾害、管道分布等因素划分出 101 个区段作为评价单元, 计算得到管道沿线易发性分区图。结果显示较高易发区集中于桐梓县及遵义市附近。

(4) 统计分析各级易发区内的灾害点数量及密度, 结果显示随着易发性等级升高, 灾害点数量及密度急剧升高。采用 ROC 曲线计算得到联合模型、信息量模型及 Scoops-3D 模型对应的 AUC 值分别为 0.803、0.796、0.683, 即联合模型的 AUC 值最大, 准确性最高。

参考文献:

- [1] 唐川, 马国超. 基于地貌单元的小区域地质灾害易发性分区方法研究[J]. 地理科学, 2015, 35(1): 91-98.
Tang C, Ma G C. Small regional geohazards susceptibility mapping based on geomorphic unit [J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(1): 91-98. (in Chinese)
- [2] Carrara A, Cardinali M, Detti R, et al. GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1999, 16(5): 427-445.
- [3] Conoscenti C, Di Maggio C, Rotigliano E. GIS analysis to assess landslide susceptibility in a fluvial basin of NW

Sicily (Italy) [J]. Geomorphology, 2008, 94(3/4): 325-339.

- [4] 马崇武, 刘忠玉. 降雨入渗时无限边坡的水平位移与稳定性分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(增1): 563-568.
Ma C W, Liu Z Y. Horizontal displacements and stability analysis of infinite slopes under rainfall infiltration [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (Sup1): 563-568. (in Chinese)
- [5] 王雷, 吴君平, 赵冰雪, 等. 基于 GIS 和信息量模型的安徽池州地质灾害易发性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(3): 96-103.
Wang L, Wu J P, Zhao B X, et al. Susceptibility assessment of geohazards in Chizhou City of Anhui Province based on GIS and Informative Model [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(3): 96-103. (in Chinese)
- [6] 温鑫, 范宣梅, 陈兰, 等. 基于信息量模型的地质灾害易发性评价: 以川东南古蔺县为例[J]. 地质科技通报, 2022, 41(2): 290-299.
Wen X, Fan X M, Chen L, et al. Susceptibility assessment of geological disasters based on an information value model: A case of Gulin County in Southeast Sichuan [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(2): 290-299. (in Chinese)
- [7] 李信, 薛桂澄, 柳长柱, 等. 基于信息量模型和信息量-逻辑回归模型的海南岛中部山区地质灾害易发性研究[J]. 地质力学学报, 2022, 28(2): 294-305.
Li X, Xue G C, Liu C Z, et al. Evaluation of geohazard susceptibility based on information value model and information value-logistic regression model: A case study of the central mountainous area of Hainan Island [J]. Journal of Geomechanics, 2022, 28(2): 294-305. (in Chinese)
- [8] 赵志阳, 杨雪琪, 宋扬, 等. 基于 Scoops 3D 模型的区域库岸边坡稳定性分析[J]. 人民黄河, 2020, 42(4): 135-139.
Zhao Z Y, Yang X Q, Song Y, et al. Analysis of regional bank slope stability based on Scoops 3D model [J]. Yellow River, 2020, 42(4): 135-139. (in Chinese)
- [9] 王志浩, 党进谦, 郭钊. 基于 Scoops 3D 模型的库岸边坡稳定性研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(12): 155-161.
Wang Z H, Dang J Q, Guo Z. Research on the bank slope stability based on Scoops 3D model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(12): 155-161. (in Chinese)

- [10] Rashid B, Iqbal J, Su L J. Landslide susceptibility analysis of Karakoram highway using analytical hierarchy process and scoops 3D [J]. Journal of Mountain Science, 2020, 17(7):1596-1614. (in Chinese)
- [11] 聂作泉, 郎秋玲, 张以晨, 等. 基于信息量模型和地理探测器的国道沿线崩塌灾害危险性评价[J]. 灾害学, 2023, 38(1):193-199.
- Nie Z Q, Lang Q L, Zhang Y C, et al. Hazard assessment of collapse along national highways based on information quantity model and geodetector [J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(1):193-199. (in Chinese)
- [12] 姚杰, 李秀珍, 徐瑞池. 降雨条件下拟建川藏铁路典型段潜在滑坡三维稳定性动态识别研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(3):422-431.
- Yao J, Li X Z, Xu R C. Dynamic identification of three-dimensional stability of potential landslide in a typical section of the proposed Sichuan-Tibet Railway under rainfall conditions [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(3):422-431. (in Chinese)
- [13] 詹华勤. 基于GIS川黔铁路贵州段地质灾害易发性评价研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- Zhan H Q. GIS-based geological hazard susceptibility assessment along Guizhou section of Sichuan-Guizhou railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [14] 杜晓晨. 基于ArcGIS和SPSS的德昌县滑坡危险性评价研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2020.
- Du X C. Hazard assessment of landslide in Dechang based on ArcGIS and SPSS [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [15] 辛星, 张帆宇. 三维确定性模型在浅层黄土滑坡稳定性预测中的应用[J]. 工程科学学报, 2018, 40(4):397-406.
- Xin X, Zhang F Y. Application of a 3D deterministic model for predicting shallow loess landslide stability [J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(4):397-406. (in Chinese)
- [16] 孙何生, 邱海军, 朱亚茹, 等. 黄河上游典型流域滑坡稳定性预测及模型应用[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(3):380-390.
- Zhang H S, Qiu H J, Zhu Y R, et al. Landslide stability prediction and model application in typical watersheds of the upper Yellow River [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2022, 52(3):380-390. (in Chinese)

(本文编辑: 苏泽云)