

基于逻辑回归信息量的川藏交通廊道滑坡易发性评价

杜国梁, 杨志华, 袁颖, 任三绍, 任涛

Landslide susceptibility mapping in the Sichuan-Tibet traffic corridor using logistic regression- information value method

DU Guoliang, YANG Zhihua, YUAN Ying, REN Sanshao, and REN Tao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104009>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于逻辑回归的四川青川县区域滑坡灾害预警模型

A early warning model of regional landslide in Qingchuan County, Sichuan Province based on logistic regression

方然可, 刘艳辉, 苏永超, 黄志全 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 181-187

基于有效降雨强度和逻辑回归的降雨型滑坡预测模型

Prediction of rainfall-type landslides based on effective rainfall intensity and logistic regression

盛逸凡, 李远耀, 徐勇, 吴吉明, 林巍 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 156-156

基于滑坡分类的西宁市滑坡易发性评价

Landslide susceptibility assessment in Xining based on landslide classification

孙长明, 马润勇, 尚合欣, 谢文波, 李焱, 刘义, 王彪, 王思源 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 173-181

川藏公路102滑坡后缘平台物质特征及其形成机制新思考

New thoughts on the material characteristics and formation mechanism of the platform at the back edge of the 102 Landslide on the Sichuan-Tibet Highway

杨德宏, 武博强, 黄勇, 陈兴强 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 133-140

四川巴中市滑坡灾害与降雨雨型关系探讨

A discussion of the relationship between landslide disaster and rainfall types in Bazhong of Sichuan

张勇, 温智, 程英建 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 178-182

滚石冲击下棚洞破坏动力响应分析及改进对策——以川藏公路(安久拉山南麓)门式棚洞为例

Dynamic response analyses and improvement countermeasures of shed-tunnel destruction under rolling stone impact: a case study of the shed-tunnel in the southern foot of the Anjiula Mountain on the Sichuan-Tibet Highway

袁博, 祝介旺 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 57-66



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104009

基于逻辑回归-信息量的川藏交通廊道滑坡易发性评价

杜国梁^{1,2}, 杨志华³, 袁颖^{1,2}, 任三绍⁴, 任涛¹

(1. 河北地质大学城市地质与工程学院, 河北 石家庄 050031; 2. 河北省高校生态环境地质应用技术研发中心, 河北 石家庄 050031; 3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 4. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061)

摘要: 川藏交通廊道位于青藏高原中东部, 是世界上隆升和地貌演化最快的区域之一。在内外动力耦合作用下, 区内滑坡灾害极其发育, 严重制约着公路、铁路和水电工程的规划建设。在区域地质资料收集和整理的基础上, 选取岩性、坡度、坡向、坡形、地形起伏度、地形粗糙度、断裂密度和河流距离 8 个因素为评价因子, 结合传统信息量和逻辑回归模型的优势, 采用逻辑回归-信息量模型对研究区滑坡进行易发性评价。通过对评价因子的多重共线性和显著性检验, 得到评价因子不存在多重共线性且均对滑坡发生具有显著影响。采用 ROC 曲线对评价结果进行检验, 其 AUC 值为 0.81, 表明评价模型能很好地预测滑坡的发生。易发性评价结果表明: 研究区高易发区主要集中龙门山断裂带、金沙江断裂带、澜沧江断裂带、怒江断裂带、边坝-洛隆断裂带等大型活动断裂带控制区, 以及区内坡度陡峭、地形起伏度大的大型河流深切河谷的两岸; 中易发区在区内分布广泛, 主要分布在岸坡较陡、地形起伏度中等的大型河流支流的两岸。研究结果有利于加深对川藏交通廊道滑坡发育分布的认识, 也可为研究区的工程规划建设和防灾减灾提供科学依据。

关键词: 青藏高原; 川藏交通廊道; 滑坡; 逻辑回归-信息量; 易发性

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)05-0102-10

Landslide susceptibility mapping in the Sichuan-Tibet traffic corridor using logistic regression- information value method

DU Guoliang^{1,2}, YANG Zhihua³, YUAN Ying^{1,2}, REN Sanshao⁴, REN Tao¹

(1. School of urban geology and Engineering, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031, China;
2. Hebei Center for Ecological and Environmental Geology Research, Shijiazhuang, Hebei 050031, China;
3. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 4. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050061, China)

Abstract: Located in east-central Qinghai-Tibet Plateau, the Sichuan-Tibet traffic corridor is one of fastest uplifting and geomorphic evolution regions on the earth. Under the coupling of internal and external dynamics, the landslide in this region is extremely developed, which seriously restricts the planning and construction of highways, railways and hydropower projects. Based on the data collection and analysis of regional geological data, this paper selects lithology, slope gradient, aspect, slope shape, topographic relief, terrain roughness, fault density and distance to rivers as contributing factors. Combined the advantages of traditional information value method and logistic regression, this paper uses the logistic regression-information value method to evaluate the landslide susceptibility of the study area. Through the multi-collinearity test and significance test of the contributing factors,

收稿日期: 2021-04-03; 修订日期: 2021-05-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807231; 41941017; 41731287); 中国地质调查局地质调查项目(20190505)

第一作者: 杜国梁(1989-), 男, 博士, 副教授, 主要从事工程地质与地质灾害研究工作。E-mail: 756591925@qq.com

it is found that the selected contributing factors have no multi-collinearity and have a significant impact on the occurrence of landslides. ROC curve is used to test the results of landslide susceptibility, and the AUC value is 0.81, which shows that the model can well predict the occurrence of landslides. The results show that the high risk areas in the study area mainly occur in the regions of the Longmenshan fault zone, Jinshajiang fault zone, Lancangjiang fault zone, Nujiang fault zone and Bianba-Luolong fault zone, as well as on the sides of deep valleys of large rivers with steep slope and large topographic relief. The middle risk areas widely exist on both sides of the tributaries of large rivers. The results are helpful in understanding the development and distribution of landslides in the Sichuan-Tibet traffic corridor, and also provide a scientific basis for the project planning and construction, disaster prevention and mitigation in the study area.

Keywords: Qinghai-Tibetan Plateau; Sichuan-Tibet traffic corridor; landslide; logistic regression-information value; landslide susceptibility

川藏交通廊道位于青藏高原中东部地区, 包括从成都通往拉萨的 G317、G318 和在建川藏铁路沿线区域(图 1), 是世界上构造活动最强烈和地貌演化最迅速的地区之一。伴随着青藏高原的隆升, 内、外动力地质作用强烈交织与转化, 塑造了复杂特殊的地质环境条件和强烈的河谷动力学过程, 导致区内滑坡灾害极其发育^[1-3]。频

繁发生的滑坡灾害不仅造成重大的人员伤亡和财产损失, 而且严重影响着川藏铁路的建设与安全运营, 制约着区域经济的发展^[4-5]。然而, 受高寒、高海拔、交通条件差的制约, 研究区滑坡调查受到一定限制。整合已有调查数据、分析研究区滑坡分布规律、预测区内滑坡空间分布特征具有十分重要的意义。

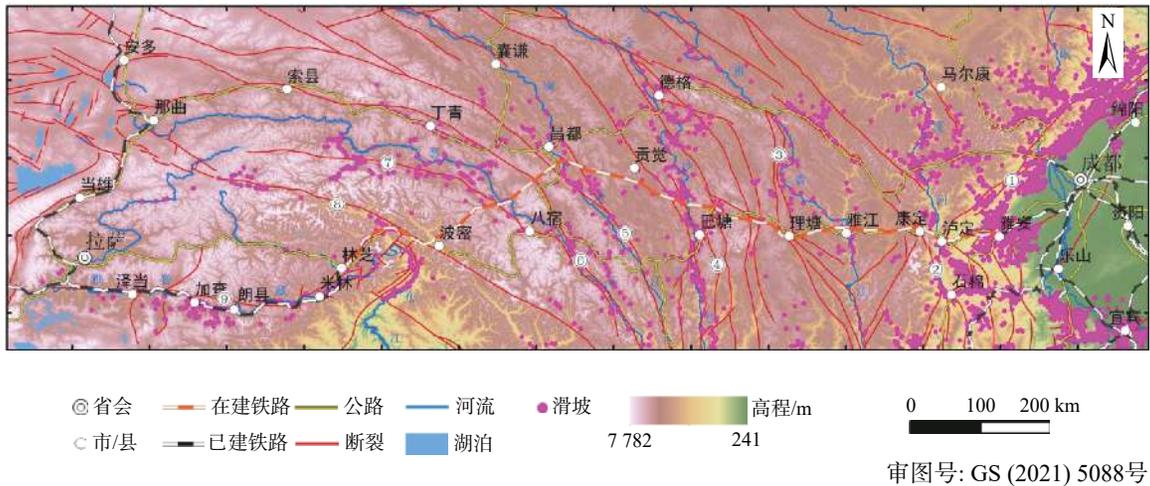


图 1 研究区地质背景图

Fig. 1 Geological background map of the study area

注: ①龙门山断裂带; ②鲜水河断裂带; ③甘孜—理塘断裂带; ④金沙江断裂带; ⑤澜沧江断裂带; ⑥怒江断裂带; ⑦边坝—洛隆断裂; ⑧嘉黎—察隅断裂带; ⑨雅鲁藏布江断裂带。

滑坡易发性评价是在现有滑坡调查、编目的基础上, 分析评价斜坡体在所处的地层岩性、地形地貌、地质构造、气象水文等因素组合下发生失稳、破坏的可能性^[6]。滑坡易发性评价常用的方法有确定性和非确定性方法, 其中确定性方法主要为基于斜坡稳定性的定量计算, 非确定性方法主要包括层次分析法、模糊综合评判、信息量法、概率比、逻辑回归、神经网络、支持向量机等数学分析方法, 这些方法在区域滑坡易发性评价中都取得了良好的应用效果^[7-13]。其

中, 信息量法由于其物理意义明确、操作简单、实用性强, 在地质灾害评价领域得到了广泛应用。但是, 信息量法属于“暗箱”操作, 它只反映评价因子不同类别在组合情况下对灾害发生的影响, 并没有考虑各评价因子之间的相关性, 以及各因子对灾害发生影响的差异^[14]。逻辑回归模型作为应用最为广泛的回归模型之一, 可以很好地拟合各评价因素的非线性特征, 且各因子不需要符合正态分布。充分发挥逻辑回归和信息量 2 种评价模型的优势, 建立逻辑回归-信息量组

合模型,对于提高预测精度具有十分重要的意义^[15]。

本文在资料收集整理、遥感解译和野外地质调查的基础上,选取岩性、坡度、坡向、坡形、地形起伏度、地形粗糙度、断裂密度、河流距离等 8 个影响因子,采用逻辑回归-信息量评价模型,评价川藏交通廊道的滑坡易发性,并分析、检验评价结果。本研究可为区内公路、铁路、水电工程的规划建设和防灾减灾提供参考。

1 地质背景

川藏交通廊道地势西高东低、地形起伏度大,从海拔 500 多米的四川盆地跃升到 4 000 多米的青藏高原,横跨横断山脉、念青唐古拉山、冈底斯山、喜马拉雅山等山脉,穿越岷江、大渡河、雅砻江、金沙江、澜沧江、怒江、雅鲁藏布江等多条大江大河。受第四纪以来青藏高原快速隆升的影响,研究区大江、大河在高原地区河谷深切,常形成高山峡谷地貌。

川藏交通廊道从东向西穿越扬子地块、川滇块体、甘青块体、西藏块体和喜马拉雅块体,地层岩性复杂,从第四系至震旦系均有分布,岩性以砂岩、板岩、泥岩、灰岩、白云岩、页岩、片岩、千枚岩、花岗岩、闪长岩、片麻岩、玄武岩及第四系松散沉积物为主。

伴随欧亚板块碰撞、挤压,青藏高原快速隆升,在区内形成了龙门山断裂带、鲜水河断裂带、金沙江断裂带、澜沧江断裂带、怒江断裂带、嘉黎-察隅断裂带、雅鲁藏布江断裂带等多条区域性大型活动断裂带。活动断裂在历史上曾多次发生强震,如 1933 年发生 Ms 7.5 叠溪地震,1950 年发生 Ms 8.6 察隅地震、1973 年发生 Ms 7.9 炉霍地震、2008 年发生 Ms 8.0 汶川地震等,这些大地震均诱发了大量的地震滑坡灾害。

2 评价方法

信息量模型最早由 Shannon 提出,殷坤龙等^[16]首次将其应用到地质灾害评估领域。信息量模型中,第 i 个影响因子分级指标对滑坡发生事件提供的信息量 (I_i) 表示为:

$$I_i = \log_2 \frac{S_i/A_i}{S/A} \quad (1)$$

式中: S_i ——分布在第 i 个影响因子分级中已发生滑坡的个数;

A_i ——第 i 个影响因子分级所占的面积;

S ——评估区滑坡总个数;

A ——评估区总面积。

逻辑回归(logistic 回归)是一种广义的线性回归分析模型。在逻辑回归模型中, P 为滑坡发生的概率,通过 Logit 变换,对滑坡发生的概率 P 和不发生的概率 $1-P$ 的比取自然对数,即 $\ln(P/1-P)$, 建立线性回归方程:

$$P = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (2)$$

$$z = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \quad (3)$$

式中: x_1, x_2, \dots, x_n ——滑坡影响因子;

β_0 ——常数项;

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ ——回归系数。

充分发挥逻辑回归模型和信息量模型的优势,建立逻辑回归-信息量组合模型,建立的主要步骤为^[17]:

- ①用式(1)计算影响因子分级指标提供的信息量;
- ②用式(4)对信息量值进行归一化;
- ③以归一化信息量值为自变量,滑坡发生为 1,不发生为 0,作为因变量,用式(5)进行回归计算,得到各影响因子的回归系数;
- ④将式(5)中计算得到的 z 值带入式(2),计算得到滑坡易发性指数值 P 。

$$x_i = \frac{I_i - I_{(i)\min}}{I_{(i)\max} - I_{(i)\min}} \quad (4)$$

$$z = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot \frac{I_i - I_{(i)\min}}{I_{(i)\max} - I_{(i)\min}} \quad (5)$$

式中: x_i ——第 i 个影响因子分级指标提供的信息量归一化值;

I_i ——第 i 个影响因子分级指标提供的信息量;

$I_{(i)\min}$ ——第 i 个影响因子分级指标所属影响因子分级指标类中提供的信息量最小值;

$I_{(i)\max}$ ——第 i 个影响因子分级指标所属影响因子分级指标类中提供的信息量最大值。

3 滑坡影响因子分析与检验

3.1 数据来源

本研究使用的数据包括:(1)历史滑坡数据:主要来自 1:5 万和 1:10 万县市地质灾害详细调查资料,以及野外实际的补充调查资料;(2)数值高程模型(DEM):来源于地理空间数据云,ASTER GDEM V2 版,空间分辨率为 30 m×30 m。坡度、坡向、地形起伏、坡形和地表粗糙度提取于 DEM;(3)岩性和断裂数据:来源于 1:50 万地质图;(4)主要河流和行政区划数据:来源于研究区 1:100 万地理底图。

3.2 影响因子分析

(1) 岩性

岩性是滑坡灾害的物质基础,影响斜坡受侵蚀的难易程度和滑坡发育类型。将地层岩性按软硬程度划分为:Ⅰ坚硬的层状和块状岩的砂岩、板岩、灰岩、白云岩、玄武岩、花岗岩等;Ⅱ较坚硬-坚硬的层状的

砾岩、板岩、砂岩、泥岩;Ⅲ软硬相间的砂泥岩、泥岩夹灰岩、白云岩夹泥岩、千枚岩等;Ⅳ软弱-较坚硬的片岩、页岩、千枚岩、泥砾岩及火成岩;Ⅴ软质的散体结构5个等级(图2)。由表1可知,研究区软硬相间的砂泥岩、泥岩夹灰岩、白云岩夹泥岩、千枚岩等岩组的信息量值最大,最有利于滑坡的发生。



审图号: GS (2021) 5088号

图2 研究区岩性分布图

Fig. 2 Lithology map of the study area

(2) 坡度

坡度与滑坡发生的关系十分密切,是滑坡形成的主控因素之一。坡度影响斜坡内的应力分布、斜坡上松散固体物质的厚度、植被覆盖度、地表水径流,从而影响斜坡的稳定性。将坡度划分为:0~10°、10°~20°、20°~30°、30°~40°、40°~50°、>50°共6个等级(图3);研究区在30°~40°范围内,最有利于滑坡的发生,其次为20°~30°,在<10°的范围最不利于滑坡的发生(表1)。

(3) 坡向

不同坡向太阳辐射强度不同,影响斜坡的植被覆盖、水分蒸发和风化程度,进而影响斜坡的稳定性。将坡向划分为:-1°(平面)、337.5°~22.5°(北)、22.5°~67.5°(东北)、67.5°~112.5°(东)、112.5°~157.5°(东南)、157.5°~202.5°(南)、202.5°~247.5°(西南)、247.5°~292.5°(西)、292.5°~337.5°(西北)9个等级(图4);从表1可以看出,研究区面向南、东南方向的斜坡滑坡容易发生,面向北的斜坡最不利于滑坡的发生,平面无信息量值,无滑坡发生。

(4) 地形起伏度

地形起伏度是一定范围内最高点和最低点海拔的差值,可以反映地表的起伏变化,与滑坡分布存在一定的相关性。本文将地形起伏度划分为:<50 m、50~100 m、100~150 m、150~200 m、200~250 m、

>250 m共6个等级(图5)。由表1可以看出,地形起伏度在150~200 m时,滑坡发生的可能性最大,100~150 m次之,<50 m最不利于滑坡的发生。

(5) 坡形

坡形可以影响坡体内地下水的分布,凹形坡在斜坡表面更易集水,在地震载荷作用下凸形坡的地震放大效应等,这些都影响坡体的稳定状态。将坡型划分为:凹形坡、平直坡和凸形坡(图6)。从表1可以看出,在研究区滑坡发生的可能性:凸形坡>凹形坡>平直坡。

(6) 地表粗糙度

地表粗糙度是反映地表起伏变化和侵蚀程度的指标,从一定程度上反映了构造运动伏度,对地质灾害的发生具有重要的意义。很多学者将地表粗糙度作为滑坡影响因素用于滑坡易发性评价^[18]。本文将地表粗糙度划分为:<1.1、1.1~1.2、1.2~1.3、1.3~1.4、1.4~1.5、>1.5共6个等级(图7)。由表1可以得到,研究区地表粗糙度在1.4~1.5信息量最大,最有利于滑坡的发生,1.3~1.4次之,1.1~1.2滑坡发生的可能性最小。

(7) 断裂密度

断裂密度体现了一个区域遭受构造作用改造的强度和构造的复杂程度,也反映了区域地表的破碎程度,与滑坡发育存在一定的相关性^[14]。本文将断裂密

表 1 信息量统计表

Table 1 Information value of landslide contributing factors

因子	分级	灾害点数量	分级面积/km ²	信息量
岩性	I	894	149 156.89	-0.224
	II	1 131	144 023.75	0.046
	III	1 298	147 800.05	0.158
	IV	1 311	159 143.54	0.094
	V	186	42 359.45	-0.535
坡度	<10°	671	148 031.37	-0.504
	10°~20°	940	136 206.86	-0.083
	20°~30°	1 437	168 805.57	0.127
	30°~40°	1 463	142 399.33	0.315
	40°~50°	265	38 300.46	-0.081
	>50°	44	8 740.09	-0.399
坡向	平面	0	3 054.36	-
	北	558	86 886.59	-0.155
	东北	586	83 958.15	-0.072
	东	618	74 825.46	0.096
	东南	735	77 610.05	0.233
	南	730	84 843.91	0.137
	西南	590	81 023.66	-0.030
	西北	488	72 673.02	-0.111
地形起伏度/m	<50	542	141 756.94	-0.674
	50~100	824	146 337.83	-0.287
	100~150	1 539	172 594.47	0.173
	150~200	1 601	122 119.25	0.558
	200~250	241	43 446.47	-0.302
	>250	73	16 228.72	-0.511
坡形	凹形坡	2 183	301 050.94	-0.034
	平面坡	39	17 135.93	-1.193
	凸形坡	2 598	324 296.81	0.066
地表粗糙度	<1.1	2 719	357 464.68	0.014
	1.1~1.2	1 137	159 157.91	-0.049
	1.2~1.3	563	76 548.35	-0.020
	1.3~1.4	216	26 711.40	0.075
	1.4~1.5	89	10 704.42	0.103
>1.5	96	11 896.92	0.073	
断裂密度/(m·km ⁻²)	<5	1 798	275 959.68	-0.141
	5~10	930	167 439.12	-0.300
	10~15	774	99 442.21	0.037
	15~20	703	57 267.24	0.493
	20~25	402	30 967.41	0.548
	>25	213	11 408.02	0.912
河流距离/m	<200	421	9 264.62	1.801
	200~400	342	9 102.11	1.611
	400~600	223	8 891.23	1.207
	600~800	158	8 698.89	0.884
	800~1 000	154	8 549.94	0.876
	>1 000	3 522	597 976.89	-0.242

度划分为: 0~5 m/km²、5~10 m/km²、10~15 m/km²、15~20 m/km²、20~25 m/km²、>25 m/km²共 6 个等级(图 8)。由表 1 可以看出, 随着断裂密度的增大, 研究

区滑坡发生的可能性增大。

(8) 河流距离

河流对斜坡体坡脚的冲刷和淘蚀加速了斜坡体的变形破坏, 从而导致滑坡的发生。河流距离与滑坡分布具有很好的相关性。本文将河流距离划分为: 0~200 m、200~400 m、400~600 m、600~800 m、800~1 000 m、>1 000 m 共 6 个等级(图 9)。由信息量统计表(表 1)可以看出, 随着与河流距离的增加, 滑坡发生的可能性基本呈减小的趋势。

3.3 因子多重共线性检验

进行 Logistic 回归时, 各自变量需要保证相互独立, 若因子相关性高, 会出现多重共线性。采用容忍度(Tolerance, *TOL*)和方差膨胀因子(Variance Inflation Factor, *VIF*)对自变量进行多重共线性诊断:

$$VIF = \frac{1}{1 - R^2} \quad (6)$$

其中, R^2 是以 x_i 为因变量时对其他自变量回归的复测定系数。*TOL* 为 *VIF* 的倒数, 当 *TOL* 大于 0.1 且 *VIF* 小于 10 时, 说明自变量不存在多重共线性。

采用 SPSS 进行多重共线性检验, 检验结果见表 2, 结果显示所选 8 个因子的 *TOL* 均大于 0.1 且 *VIF* 均小于 10, 表明各因子相互独立, 不存在多重共线性。

4 易发性评价

4.1 评价结果

在逻辑回归-信息量模型中, 滑坡发生的因变量值为 1, 不发生的因变量值为 0。随机生成结合遥感解译判别、修正, 生成与滑坡点数相同的非滑坡点 4 820 处。基于 GIS 提取各点的各影响因素的归一化信息量值, 并在 SPSS 中进行回归分析, 得到各因子的回归系数(表 3)。

将各因子回归系数带入式(5), 得到:

$$z = -4.908 + 1.115I_1 + 2.057I_s + 0.737I_a + 1.199I_t + 1.381I_q + 1.433I_r + 1.620I_f + 1.096I_{ri} \quad (7)$$

式中: I_1 ——岩性;

I_s ——坡度;

I_a ——坡向;

I_t ——地形起伏度;

I_q ——坡形;

I_r ——地表粗糙度;

I_f ——断裂密度;

I_{ri} ——河流距离。



审图号: GS (2021) 5088号

图 3 研究区坡度分级图

Fig. 3 Slope gradient map of the study area



审图号: GS (2021) 5088号

图 4 研究区坡向分布图

Fig. 4 Slope aspect map of the study area



审图号: GS (2021) 5088号

图 5 研究区地形起伏度分布图

Fig. 5 Topographic relief map of the study area

在 GIS 中, 将 z 值代入式 (2) 得到滑坡易发性指数值 P 。根据易发性指数将研究区划分为高易发 (0.8 ~ 1)、中易发 (0.6 ~ 0.8)、低易发 (0.6 ~ 0.4) 和极低易发 (<0.4) 4 个易发区 (图 10)。

4.2 评价结果检验

(1) 显著性检验

回归分析需要检验自变量对因变量影响的显著

性。采用 Wald 统计量对应的 Sig 值判断因子的显著性, 若因子的 Sig 值小于 0.05 表明影响因素对滑坡的发生有显著的影响^[17]。由表 3 可知岩性、坡度、坡向、地形起伏度、坡形、地表粗糙度、断裂密度、河流距离等 8 个因子的显著性 Sig 均小于 0.05, 通过检验。

(2) 精度验证

ROC 曲线 (receiver operating characteristic curve) 即



图 6 研究区斜坡坡形分布图
 Fig. 6 Slope shape map of the study area



图 7 研究区地表粗糙度分布图
 Fig. 7 Surface roughness map of the study area

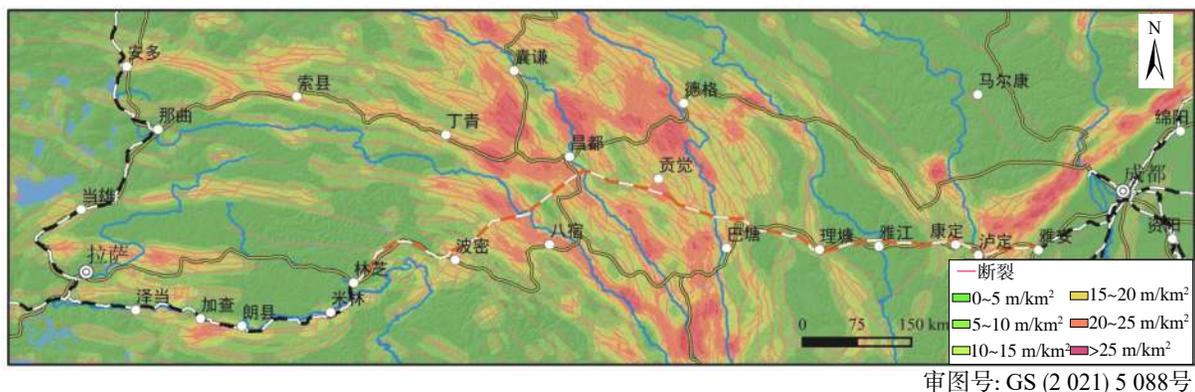


图 8 研究区断裂密度分布图
 Fig. 8 Fault density map of the study area

感受性曲线, 曲线下方面积(AUC)可以评价模型预测结果的准确度。一般认为: AUC 值小于等于 0.5 时, 模型预测失败, AUC 值为 0.5~0.7 时, 预测准确性较低, AUC 值为 0.7~0.9 时, 预测准确性较高, AUC 值在 0.9 以上, 说明预测准确性极高。采用 ROC 曲线对逻辑回归-信息量模型评价结果的准确性进行检验, 得到 ROC 曲线下的面积为 0.81(图 11), 说明模型评价

结果在研究区具有较高的准确性, 能够很好地预测研究区滑坡的发生。

4.3 评价结果分析

从易发性评价结果可以看出(表 4 和图 10), 研究区滑坡高易发区面积 83 464.69 km², 占研究区总面积的 13.00%, 主要分布在坡度陡峭、地形起伏度大的大渡河、雅砻江、金沙江、澜沧江、怒江、雅鲁藏布江、

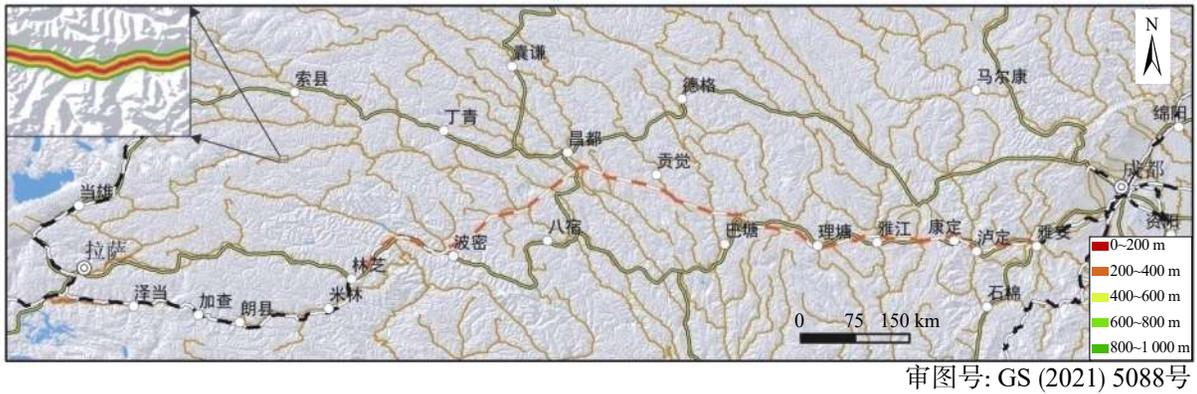


图 9 研究区河流距离分布图

Fig. 9 Map showing distance to rivers of the study area

表 2 评价因子共线性诊断

Table 2 Multi-collinearity analysis of contributing factors

因子	TOL	VIF
岩性	0.953	1.049
坡度	0.418	2.394
坡向	0.993	1.007
地形起伏度	0.499	2.005
坡形	0.921	1.086
地表粗糙度	0.732	1.367
断裂密度	0.994	1.006
河流距离	0.995	1.005

表 3 模型相关参数

Table 3 Relevant parameters of the model

因子	B	标准误差	Wald	Sig.	Exp(B)
岩性	1.115	0.087	163.885	1.60E-37	3.051
坡度	2.057	0.098	442.234	3.53E-98	7.824
坡向	0.737	0.070	112.309	3.06E-26	2.089
地形起伏度	1.199	0.097	154.125	2.17E-35	3.317
坡形	1.381	0.179	59.305	1.35E-14	3.978
地表粗糙度	1.433	0.139	106.528	5.65E-25	4.193
断裂密度	1.620	0.094	296.785	1.65E-66	5.054
河流距离	1.096	0.072	228.862	1.06E-51	2.991
常量	-4.908	0.200	601.547	7.72E-133	0.007

易贡藏布江等的大型河流深切河谷的两岸,以及龙门山断裂带、金沙江断裂带、澜沧江断裂带、怒江断裂带、边坝—洛隆断裂带等活动断裂控制区,区内地表切割强烈,岩体破碎;中易发区面积 204 267.96 km²,占研究区总面积的 31.79%,主要分布在坡度较为陡峭、地形起伏度中等的大江、大河及深切河谷支流两岸;低易发区面积 166 022.27 km²,占研究区总面积的 25.84%,主要分布在坡度相对较缓,断裂密度较小的大型河流支流的两岸;极低易发区面积 188 728.76 km²,占研究

区总面积的 29.37%,主要分布在坡度平缓、地形起伏小、断裂不发育的地区。通过统计不同易发区的滑坡、非滑坡数量和密度,可以看出随着易发程度的增强,滑坡点密度不断增大,而非滑坡点的密度不断减小,说明易发分区是合理的(表 4)。

研究区在工程规划和建设时,应尽量避免滑坡高易发区,必须穿越高易发区时,应对该区段斜坡进行详细勘察,对滑坡隐患点采取相应的工程治理措施。

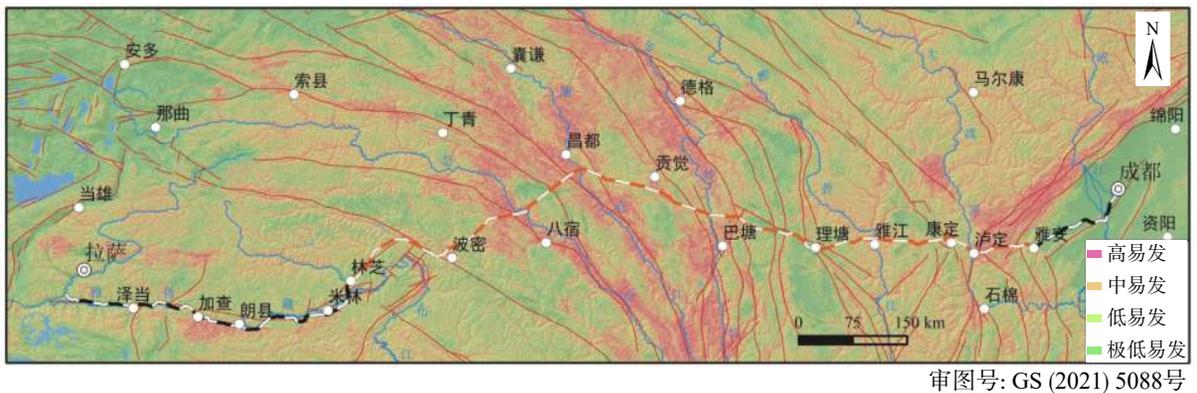


图 10 川藏交通廊道滑坡易发性评价图

Fig. 10 Landslide susceptibility map of the study area

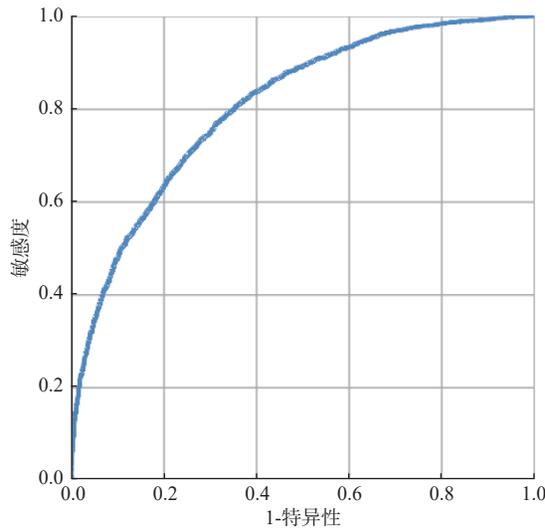


图 11 逻辑回归-信息量模型的 ROC 曲线

Fig. 11 ROC curve of the model

表 4 不同易发区滑坡统计结果

Table 4 Relevant parameters of the model

分级	面积/km ²	滑坡数量/ 个	滑坡密度/ (个·km ⁻²)	非滑坡数量/ 个	非滑坡密度/ (个·km ⁻²)
高	83 464.69	1 247	0.014 9	147	0.002
中	204 267.96	1 685	0.008 2	779	0.004
低	166 022.27	1 153	0.006 9	1 139	0.007
极低	188 728.76	735	0.003 9	2 755	0.015

在高、中易发区,需尽量避免工程建设和运营时对地质环境的扰动,以免诱发滑坡灾害,同时,应加强滑坡隐患的排查工作。在低易发区,仍需对潜在发生的地质灾害进行风险防范,并做好应急保障工作。

5 结论

(1)结合逻辑回归和信息量模型的优势,采用逻辑回归-信息量方法对研究区滑坡进行易发性评价。共收集整理川藏交通廊道滑坡 4 820 处,同时,通过随机生成结合遥感解译调整,生成同等数量的非滑坡点用于易发性评价。

(2)选取岩性、坡度、坡向、坡形、地形起伏度、地形粗糙度、断裂密度和河流距离 8 个因素作为评价因子,通过因子共线性和显著性检验,得到所选 8 个因子不存在多重共线性,且均对滑坡发生影响显著。通过 ROC 曲线对模型预测结果进行检验,评价结果的准确率达 81%,表明评价结果能够很好地预测研究区滑坡的发生。

(3)研究区高易发区主要分布龙门山断裂带、怒江断裂带、金沙江断裂带、澜沧江断裂带、边坝-洛

隆断裂等活动断裂带控制区,以及大渡河、雅砻江、金沙江、澜沧江、怒江、雅鲁藏布江、易贡藏布江等大型河流深切河谷的两岸。中易发区主要集中在岸坡较陡、地形起伏度中等的大型河流支流的两岸。在工程规划、建设和运营阶段,需加强上述区域滑坡隐患的排查和防治工作。

参考文献 (References) :

- [1] 彭建兵,马润勇,卢全中,等. 青藏高原隆升的地质灾害效应[J]. 地球科学进展, 2004, 19(3): 457 - 466. [PENG Jianbing, MA Runyong, LU Quanzhong, et al. Geological hazards effects of uplift of Qinghai-Tibet plateau[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2004, 19(3): 457 - 466. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 彭建兵,崔鹏,庄建琦. 川藏铁路对工程地质提出的挑战[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(12): 2377 - 2389. [PENG Jianbing, CUI Peng, ZHUANG Jianqi. Challenges to engineering geology of Sichuan-Tibet Railway[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(12): 2377 - 2389. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 张永双,郭长宝,姚鑫,等. 青藏高原东缘活动断裂地质灾害效应研究[J]. 地球学报, 2016, 37(3): 277 - 286. [ZHANG Yongshuang, GUO Changbao, YAO Xin, et al. Research on the geohazard effect of active fault on the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2016, 37(3): 277 - 286. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 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)]
- [5] 郭长宝,吴瑞安,蒋良文,等. 川藏铁路雅安-林芝段典型地质灾害与工程地质问题[J]. 现代地质, 2021, 35(1): 1 - 17. [GUO Changbao, WU Rui'an, JIANG Liangwen, et al. Typical geohazards and engineering geological problems along the Ya'an-Linzhi section of the Sichuan-Tibet Railway, China[J]. *Geoscience*, 2021, 35(1): 1 - 17. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 吴树仁,石菊松,张春山,等. 地质灾害风险评估技术指南初论[J]. 地质通报, 2009, 28(8): 995 - 1005. [WU Shuren, SHI Jusong, ZHANG Chunshan, et al.

- Preliminary discussion on technical guideline for geohazard risk assessment[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(8): 995 - 1005. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 许冲, 戴福初, 姚鑫, 等. 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*, 2009, 28(增刊2): 3978 - 3985. [XU Chong, DAI Fuchu, YAO Xin, et al. GIS-based landslide susceptibility assessment using analytical hierarchy process in Wenchuan earthquake region[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(Sup2): 3978 - 3985. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 牛瑞卿, 彭令, 叶润青, 等. 基于粗糙集的支持向量机滑坡易发性评价[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42(2): 430 - 439. [NIU Ruiqing, PENG Ling, YE Runqing, et al. Landslide susceptibility assessment based on rough sets and support vector machine[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2012, 42(2): 430 - 439. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 孙长明, 马润勇, 尚合欣, 等. 基于滑坡分类的西宁市滑坡易发性评价[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(3): 173 - 181. [SUN Changming, MA Runyong, SHANG Hexin, et al. Landslide susceptibility assessment in Xining based on landslide classification[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(3): 173 - 181. (in Chinese with English abstract)]
- [10] OZDEMIR A, ALTURAL T. A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping: Sultan Mountains, SW Turkey[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 64: 180 - 197.
- [11] 方然可, 刘艳辉, 苏永超, 等. 基于逻辑回归的四川青川县区域滑坡灾害预警模型[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(1): 181 - 187. [FANG Ranke, LIU Yanhui, SU Yongchao, et al. A early warning model of regional landslide in Qingchuan County, Sichuan Province based on logistic regression[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(1): 181 - 187. (in Chinese with English abstract)]
- [12] UMAR Z, PRADHAN B, AHMAD A, et al. Earthquake induced landslide susceptibility mapping using an integrated ensemble frequency ratio and logistic regression models in West Sumatera Province, Indonesia[J]. *CATENA*, 2014, 118: 124 - 135.
- [13] YAO X, THAM L G, DAI F C. Landslide susceptibility mapping based on Support Vector Machine: a case study on natural slopes of Hong Kong, China[J]. *Geomorphology*, 2008, 101(4): 572 - 582.
- [14] 杜国梁, 张永双, 吕文明, 等. 基于加权信息量模型的藏东南地区滑坡易发性评价[J]. *灾害学*, 2016, 31(2): 226 - 234. [DU Guoliang, ZHANG Yongshuang, LV Wenming, et al. Landslide susceptibility assessment based on weighted information value model in southeast Tibet[J]. *Journal of Catastrophology*, 2016, 31(2): 226 - 234. (in Chinese with English abstract)]
- [15] DU G L, ZHANG Y S, IQBAL J, et al. Landslide susceptibility mapping using an integrated model of information value method and logistic regression in the Bailongjiang watershed, Gansu Province, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2017, 14(2): 249 - 268.
- [16] 殷坤龙, 晏同珍. 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*, 1987, 12(6): 631 - 638. [YIN Kunlong, YAN Tongzhen. Distribution regularity of landslides and prediction of slope instability nearby Xunyang, Han river valley[J]. *Earth Science*, 1987, 12(6): 631 - 638. (in Chinese with English abstract)]
- [17] DU G L, ZHANG Y S, YANG Z H, et al. Landslide susceptibility mapping in the region of eastern Himalayan syntaxis, Tibetan Plateau, China: a comparison between analytical hierarchy process information value and logistic regression-information value methods[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(6): 4201 - 4215.
- [18] 张玘恺, 凌斯祥, 李晓宁, 等. 九寨沟县滑坡灾害易发性快速评估模型对比研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(8): 1595 - 1610. [ZHANG Qikai, LING Sixiang, LI Xiaoning, et al. Comparison of landslide susceptibility mapping rapid assessment models in Jiuzhaigou County, Sichuan Province, China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(8): 1595 - 1610. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳