

# 基于 GIS 与 CF-LR 耦合模型的川藏铁路泥石流易发性评估



黄艳婷, 郭永刚\*, 苏立彬

西藏农牧学院水利土木工程学院, 西藏林芝 860000

**摘要:** 川藏铁路是我国重要的交通运输系统, 对促进西藏与内地的交流有着重要的意义。本文以川藏铁路林昌段两侧宽度在 2km 的范围内作为研究区。结合泥石流的发生必须要具备合适的固体物源、水源和地形条件, 本文选取起伏度、剖面曲率、粉砂土、河流距离、断层距离、高程、坡向、归一化植被指数、年均降雨量和土地利用 10 个致灾因子。在 Arcgis 中提取致灾因子信息, 用确定性系数模型 (CF) 进行因子评价。二元逻辑回归模型 (Logistic) 结合因子评价得到耦合模型并计算研究区单元格泥石流发生概率。对此模型进行 ROC 曲线分析, AUC 为 0.89, 表示此模型效果较好。在 GIS 中使用栅格计算器得到研究区泥石流易发性分布图。结果显示, 在 CF-LR 模型下, 极低、低、中、高易发区分别占地面积  $254\text{km}^2$ ,  $235\text{km}^2$ ,  $246\text{km}^2$ ,  $1099\text{km}^2$ , 各占总研究区面积的 61.72%, 5.69%, 5.96%, 26.63%, 高易发区主要在米林县、林芝县和波密县。本研究给川藏铁路评估泥石流地质灾害风险提供重要参考。

**关键词:** 川藏铁路; 泥石流; 确定性系数模型; 二元逻辑回归模型; 易发性

**DOI:** [10.57237/j.earth.2022.01.002](https://doi.org/10.57237/j.earth.2022.01.002)

## Debris Flow Susceptibility Assessment of Sichuan-Tibet Railway Based on GIS and CF-LR Coupling Model

Huang Yanting, Guo Yonggang\*, Su Linbin

Hydraulic and Civil Engineering College, Tibet Agriculture & Animal Husbandry University, Nyingchi 860000, China

**Abstract:** Sichuan-Tibet Railway is an important transportation system in China, which is of great significance to promote the communication between Tibet and the mainland. This paper takes the lin-chang section of the Sichuan-Tibet railway with a width of 2km on both sides as the research area. The occurrence of debris flow must have appropriate solid source, water source and topographic conditions. In this paper, ten disaster-causing factors are selected, including relief degree of land surface, profile curvature, silty soil, distance to the river, distance to the fault, elevation, slope aspect, NDVI, average annual rainfall and land utilization rate. The information of disaster-causing factors was extracted from Arcgis and evaluated by the certainty factor model. The probability of debris flow in the study area was calculated by the

基金项目: 本文为国家自然科学基金重点支持项目资助 (U21A20158);  
西藏自治区自然科学基金项目(XZ202201ZY0034G)的阶段性成果之一。

\*通信作者: 郭永刚, 1960373107@qq.com

收稿日期: 2022-09-21; 接受日期: 2022-10-20; 在线出版日期: 2022-11-01

<http://www.earthscieng.com>

coupling model of binary Logistic regression model combined with certainty factor model. ROC curve analysis of the CF-LR model shows that AUC is 0.89, indicating that the model has a good effect. The distribution map of debris flow susceptibility in the study area was obtained by using grid calculator in GIS. The results show that under the CF-LR model, extremely low, low, medium and high prone areas cover 2547km<sup>2</sup>, 235km<sup>2</sup>, 246km<sup>2</sup> and 1099km<sup>2</sup> respectively, accounting for 61.72%, 5.69%, 5.96% and 26.63% of the total area of the study area, respectively. The high risk areas are mainly in Milin, Nyingchi and Bomi counties. This study provides an important reference for assessing the risk of debris flow geological disaster on Sichuan-Tibet Railway.

**Keywords:** Sichuan-Tibet Railway; Debris Flow; Certainty Factor Model; Binary Logistic Regression Coupled Model; Susceptibility

## 1 引言

由于藏东南地区特殊的气候地理条件,林芝、昌都市内的铁路受地质灾害的影响较大。据不完全统计,泥石流灾害是两地区主要的自然地质灾害,占灾害总数的三分之二[1]。泥石流是携带有沙石及其余杂志固体的特殊洪流,具有突发性和较大的爆发力,一旦对铁路工程造成了严重的损坏就会造成难以估量的损失。所以采取适当可行的方法对川藏铁路林昌段进行合理的泥石流灾害预测分析,可以及时采取避险措施,建造有用的灾害防护设施,以减少人员财产损失。

目前,已有不少对川藏铁路工程沿线的地质灾害研究,但是多数主要是针对某个站点或者某小段廊道。如川藏铁路车站的选址[2],川藏铁路廊道泸定段的地质灾害成灾机制[3],川藏铁路沿线某泥石流沟对工程施工安全的研究[4]等。现在缺少川藏铁路藏东南路段沿线泥石流宏观分布规律的成果,总结泥石流发育分布特征和规律,对铁路工程建设和运营具有一定的指导意义[5]。基于地理信息系统(Geographic information system, GIS)强大的时空处理功能,本文从宏观的角度出发,预测并找出整条川藏铁路林昌段沿线附近的泥石流高易发地区,从而缩小泥石流隐患危险的寻找范围,集中资源进行某区域泥石流的防灾减灾活动,减少人力、物力的浪费。

随着科技发展,灾害评价的手段和方法越来越趋于成熟。“3S”技术让获取地质因素信息越来越方便快捷,张凯翔、黄露等人深入分析了“3S”技术在当前地质灾害的时空数据收集与管理、二三维可视化分析、风险评估、监测预警等方面有着重要的作用[6, 7]。地质灾害易感性评价模型也逐渐完善。层次分析法(AHP)和模糊综合评判法(FCA)广泛应用于泥石流评价,但是由于因子权重是由专家打分所得,是主观性较强

的两种模型方法[8-11]。随机森林模型(RF)、梯度提升决策树模型(GBDT)、贝叶斯优化算法(BOA)等机器学习模型也逐渐运用在预测自然地质灾害当中,依靠计算机强大的计算功能和快速的模仿能力,已经取得了不错的成果[12]。二元逻辑回归模型(LR)可以很好地用算法来描述线性关系和预测未来走向,同时客观的评价因子的权重。确定性系数模型(CF)用于计算单因子不同类别的权重。如今,将这两种评价模型耦合能更好地对地质灾害进行评价[13, 14]。罗广路等人利用CF与Logistic回归耦合模型对九寨沟某景区进行滑坡易发性评价,找出了滑坡极高易发区,刘福臻等人基于CF-LR模型对帕隆藏布流域泥石流展开危险性评价[15, 16]。

泥石流平均影响距离在1km左右[17, 18],考虑到研究区地势较高并且要建立足够的泥石流样本点,选取距离林昌铁路段两侧宽度为2km范围内的区域作为研究对象。水源作为泥石流发生的重要条件,具有不确定性和难以计算、预测等特点。如今降雨阈值被引入泥石流研究当中[19]。藏东南地区的大多数泥石流是由降雨诱发导致的,具体的土壤含水量无法进行准确测量,所以把年降雨量作为重要的水源致灾因子。结合西藏环境特点和藏东南地区泥石流致灾因子的相关性分析,选取了起伏度、剖面曲率、粉砂土、河流距离、断层距离、高程、坡向、归一化植被指数(NDVI)、年均降雨量和土地利用率为本次研究的评价因子。采取效果较好的确定性系数与二元逻辑回归的耦合模型来对研究区进行泥石流易感性评价,为川藏铁路林昌段的工程防灾建设提供可靠的理论依据和参考。

2 研究区概况

研究区位于藏东南的林芝市、昌都市境内，以两市内的川藏铁路沿线为中心，附近 2km 范围内的地方作为本次研究对象。地理位置起于 92°47'33.5"N,

29°4'43.4"E, 终于 98°56'20.9"N, 30°30'25.6"E, 海拔在 1918-6071m 之间。

研究区内共有 35 个被记录的潜在泥石流点，由于研究需要，在研究区中创建 35 个随机非泥石流点，形成 1: 1 的泥石流数据库，见图 1。

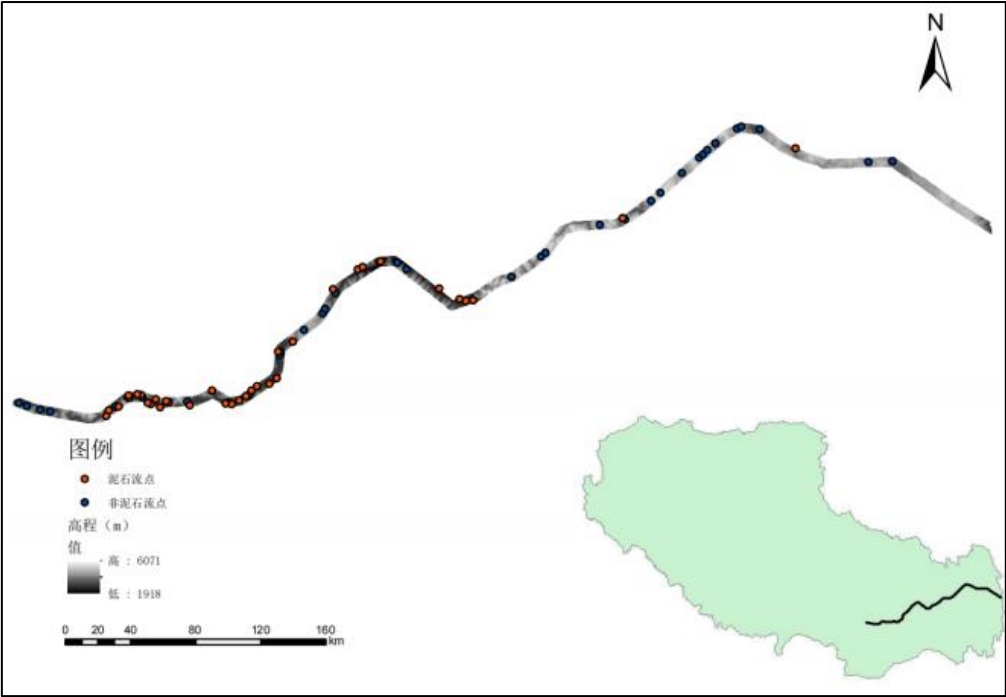


图 1 研究区及泥石流样本点分布图

3 数据来源与因子相关性

结合区域特点，选取了表 1 中的 14 个泥石流致灾因子。

表 1 泥石流致灾因子及数据来源

致灾因子	数据来源
公路距离	1: 100 万全国基础地理信息数据
河流距离	
断层距离	
高程	中国地震和火山
坡度	
坡向	
剖面曲率	
起伏度	
年均降雨量	ASTGTM2 DEM30m
粉砂土含量	
砂土含量	
粘土含量	
NDVI	
土地利用	
土地利用	

由于青藏高原其特殊的海拔和地理条件，选取了高程、坡向、坡度、剖面曲率和起伏度作为地形因素。其中剖面曲率可以影响土壤的侵蚀量和积水的累积量 [20]。起伏度是地形的宏观指标，起伏度越小越容易积累固体物源。两者均通过 Arcgis 分析所得。

土壤的组成成分可以决定该区域的水土保湿能力，水土保湿力强的土壤质地可以延迟或防止泥石流的发生。选取了粉砂土、砂土、粘土的含量作为地质因素。考虑到人类工程活动和地壳活动会产生固体堆积物的影响，还选取了公路距离和断层距离作为固体因子。

年均降雨量和河流距离作为水源因子，土地利用率和 NDVI 作为环境因子。

根据 2001-2009 西藏自治区县市地质灾害调查资料，得到 326 组林昌市泥石流数据点，如图 2。在 Arcgis 平台中利用欧氏距离得到泥石流点到公路、河流、断层的距离图层；利用 Spatial Analyst Tools 工具得到坡度、坡向等图层。最后用值提取到点功能，把 326 组泥石流点的 14 个致灾因子信息提取出来。年均降雨量

也选取了 2001-2009 之间 8 年的平均值[21]。

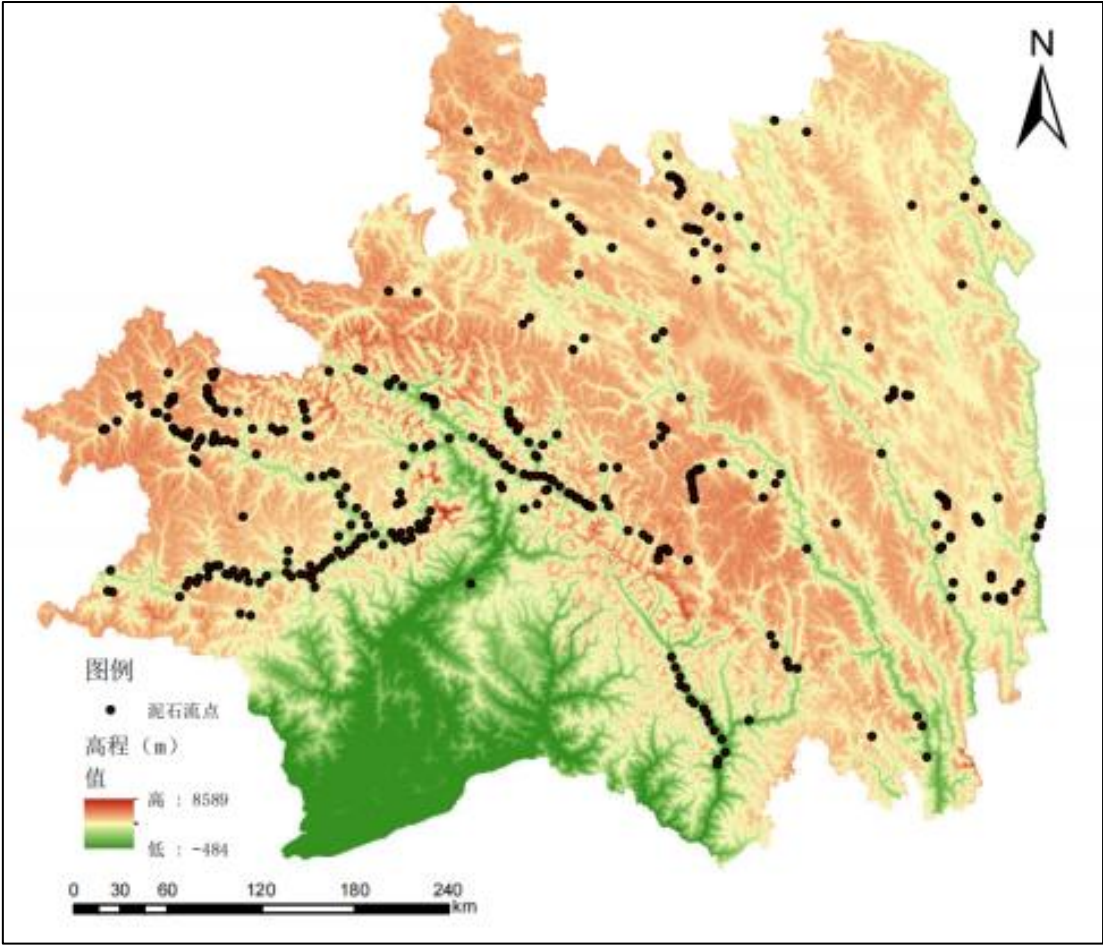


图 2 林芝-昌都市泥石流分布图

因子间如果存在较高的相关性，会使模型产生冗余，最终影响判断结果。利用 326 组泥石流点的因子数据进行相关性分析，见表 2。结果显示：坡度和起伏度高度相关；粉砂土、砂土、粘土含量高度相关；粘土含量与高程强相关；公路距离与河道距离强相关。多方比较后，最后选取了起伏度、剖面曲率、粉砂土含量、河流距离、断层距离、高程、NDVI、年均降雨量和土地利用作为本次研究的致灾因子。

表 2 泥石流 13 个致灾因子相关性分析表

	剖面曲率	起伏度	砂土	粉砂土	到公路	到流域	到断层	高程	NDVI	坡度	年均降雨	土地利用	粘土
剖面曲率	1												
起伏度	0.167	1											
砂土	-0.01	0.085	1										
粉砂土	0.047	-0.068	-0.85	1									
到公路	0.036	0.183	-0.057	0.099	1								
到流域	0.034	0.143	0.019	0.125	0.511	1							
到断层	-0.003	-0.059	0.129	-0.044	-0.07	-0.052	1						
高程	0.074	0.186	0.183	0.126	0.25	0.405	0.269	1					
NDVI	0.132	0.142	-0.137	0.046	0.203	0.224	-0.195	-0.233	1				
坡度	0.173	0.951	0.082	-0.064	0.178	0.163	-0.026	0.217	0.147	1			
年均降雨	-0.043	0.132	0.067	-0.141	0.09	0.107	-0.151	-0.132	0.053	0.133	1		
土地利用	0.085	0.134	0.156	-0.046	0.1	0.102	0.203	0.314	-0.337	0.122	0.072	1	
粘土	-0.049	-0.062	-0.648	0.151	-0.036	-0.217	-0.178	-0.526	0.191	-0.062	0.078	-0.226	1

4 研究模型

4.1 CF 值计算

确定性因子模型（CF）最早应用于医学诊断研究，如今也普遍地用在地质灾害危险性评估领域，是一种广泛应用于确定同一因素不同分类的权重[22]。CF 的计算公式如下：

$$CF = \begin{cases} \frac{PPa - PPs}{PPa * (1 - PPs)} & \text{if } PPa > PPs \\ \frac{PPa - PPs}{PPs * (1 - PPa)} & \text{if } PPa < PPs \end{cases} \tag{1}$$

上式中，CF 是确定性系数，PPa 表示泥石流流点在单因子不同类别面积中的出现概率，PPs 表示泥石流流点在总研究区面积中的出现概率。CF 值范围在-1 到 1 之间，越接近 1 确定性越强，越接近-1 不确定性就越强。

通过对研究区 35 个泥石流样本点的 10 个致灾因子进行分类处理，可得到同一因子不同分类级别的 CF 值，即不同类别的重要性。致灾因子各分类级别的 CF 值见表 3。

表 3 10 个致灾因子分类级别的 CF 值

评价因子	分类级别	类别面积（km <sup>2</sup> ）	泥石流点	CF	评价因子	分类级别	类别面积（km <sup>2</sup> ）	泥石流点	CF
高程	2000-2500	53.0478	1	0.5708	NDVI	0.2-0.3	221.7564	1	-0.4507
	2500-3000	470.1312	11	0.6558		0.3-0.4	311.1147	2	-0.2155
	3000-3500	773.6913	9	0.2993		0.4-0.5	450.7506	4	0.0789
	3500-4000	833.3145	11	0.3835		0.5-0.6	536.5584	2	-0.5463
	4000-4500	1023.886	3	-0.6437		0.6-0.7	777.3192	5	-0.2150
剖面曲率	0-5	1021.162	10	0.1661	2001-2009 年均降雨量	0.7-0.8	726.0903	6	0.0102
	5-10	1499.609	9	-0.2679		0.8-0.9	1016.301	15	0.4495
	10-15	976.4145	9	0.1135		600-700	1001.414	6	-0.2691
	15-20	482.9472	5	0.2117		700-800	1875.807	20	0.2348
	20-25	204.5538	1	-0.4043		800-900	799.9479	6	-0.0836
起伏度	25-30	73.6983	1	0.4005	土地利用 率	900-1000	442.6173	3	-0.1725
	0-20	879.8409	10	0.2826		10-20	64.3716	2	0.7428
	20-40	1341.824	8	-0.2727		20-30	1543.701	23	0.4547
	40-60	1148.971	7	-0.2567		30-40	1897.827	6	-0.6154
	60-80	604.1412	4	-0.1918		40-50	139.2561	3	0.6254
	80-100	209.9628	5	0.6619		50-60	1.0404	0	-1.0000
	100-120	64.8711	0	-1.0000		60-70	630.9558	1	-0.8075
	120-140	21.7152	1	0.8292	粉砂土 含量	25-30	1530.718	25	0.5033
到河流	0-1000	1595.256	12	-0.0810		30-35	1394.193	7	-0.3881
	1000-2000	1017.142	16	0.4840		35-40	628.8012	2	-0.6131
	2000-3000	900.6849	3	-0.5948		40-45	254.0619	1	-0.5208
	3000-4000	498.5154	2	-0.5116	坡向	北	549.2889	3	-0.3341
	4000-5000	185.3478	0	-1.0000		东北	563.5953	3	-0.3511
	5000-6000	64.386	2	0.7428		东	537.201	6	0.2699
到断层	0-5000	1248.642	10	-0.0210		东南	519.0867	5	0.1521
	5000-10000	1148.216	11	0.1474		南	487.8441	5	0.2036
	10000-15000	773.3772	12	0.4767		西南	543.555	4	-0.1011
	15000-20000	373.5576	1	-0.6745		西	520.3179	2	-0.5321
	20000-25000	319.3452	0	-1.0000		西北	565.074	7	0.3425
	25000-30000	196.4772	1	-0.3797		平面	0.3294	0	-1.0000

## 4.2 CF-LR 耦合模型

二元逻辑回归模型是以统计为基础，适用于两个类别的应变量，广泛应用于各种预测模型的算法。确定性因素模型细分了不同类别的权重，CF 与 Logistic 两者结合剔除了确定性小的因子类别[23]，使模型更加精准。

把 70 组泥石流样本中的致灾因子数据用 CF 值代替。随机选取 25 组泥石流点和 25 组非泥石流点作为模型的研究样本，剩余 20 组泥石流点作为模型的验证样本。

$$Y = -0.628 + 3.641x_1 + 2.153x_2 + 4.19x_3 + 5.367x_4 - 6.867x_5 + 2.061x_6 + 5.967x_7 + 3.286x_8 + 2.333x_9 + 4.421x_{10} \quad (2)$$

$$\text{泥石流发生概率表达式: } P = \frac{1}{1 + e^{-Y}}。$$

表 4 Logistic 回归分析

	B	标准误差	瓦尔德	自由度	显著性
泥石流到河道距离 (x1)	3.641	1.835	3.938	1	0.047
泥石流到断层 (x2)	2.153	1.588	1.839	1	0.175
高程 (x3)	4.19	2.105	3.96	1	0.047
NDVI (x4)	5.367	2.507	4.584	1	0.032
年均降雨量 (x5)	-6.867	4.299	2.552	1	0.11
土地利用率 (x6)	2.061	1.046	3.887	1	0.049
剖面曲率 (x7)	5.967	3.018	3.909	1	0.048
起伏度 (x8)	3.286	2.308	2.027	1	0.155
粉砂土 (x9)	2.333	1.303	3.206	1	0.073
坡向 (x10)	4.421	2.354	3.526	1	0.06
常量	-0.628	0.635	0.978	1	0.323

## 4.3 ROC 曲线检验

研究模型样本中的 50 组泥石流致灾因子的 CF 值作为自变量，是否发生泥石流作为因变量（发生泥石流为“1”，未发生泥石流为“0”），将数据导入在 SPSS 中进行二元逻辑回归分析，结果如表 4。B 表示各因子的回归系数，B 的绝对值代表权重。从表中可以看出，对泥石流影响的重要性从大到小依次为年均降雨量、剖面曲率、NDVI、坡向、高程、泥石流到河道距离、起伏度、粉砂土、泥石流到断层、土地利用率。回归系数公式为：

ROC 曲线是用于评价二分类模型建模效果优劣的图形方法[24]。用剩下 20 组泥石流绘制 ROC 曲线，计算出的泥石流发生概率为检验变量，是否发生泥石流为状态变量（发生泥石流为“1”，未发生泥石流为“0”），状态变量值设为 1。曲线下方面积的大小计为 AUC，AUC 值越大，模型的准确率越高。

本次研究的耦合模型 ROC 曲线如图 3，横坐标是未发生泥石流点被正确预测的比例，纵坐标是发生泥石流点被正确预测的比例，AUC 值为 0.890，表示该耦合模型对研究区的预测率较高。

## 5 泥石流灾害区域

### 5.1 因子分级图

ArcGIS 是一个具有强大空间数据分析处理能力的软件，能有效收集、分析各种复杂的空间地理数据[25]，强大的时空变化数据分析和计算功能加快了地质灾害研究的进程，可以快速准确地制作地质灾害易感性分布图。



图 3 耦合模型 ROC 曲线

为了绘制出研究区泥石流易发性图，要先根据表 3 的分类级别对 10 个致灾因子栅格图进行重分类，并赋

予 CF 值，再通过掩膜在栅格图中提取出研究区。效果见图 4。

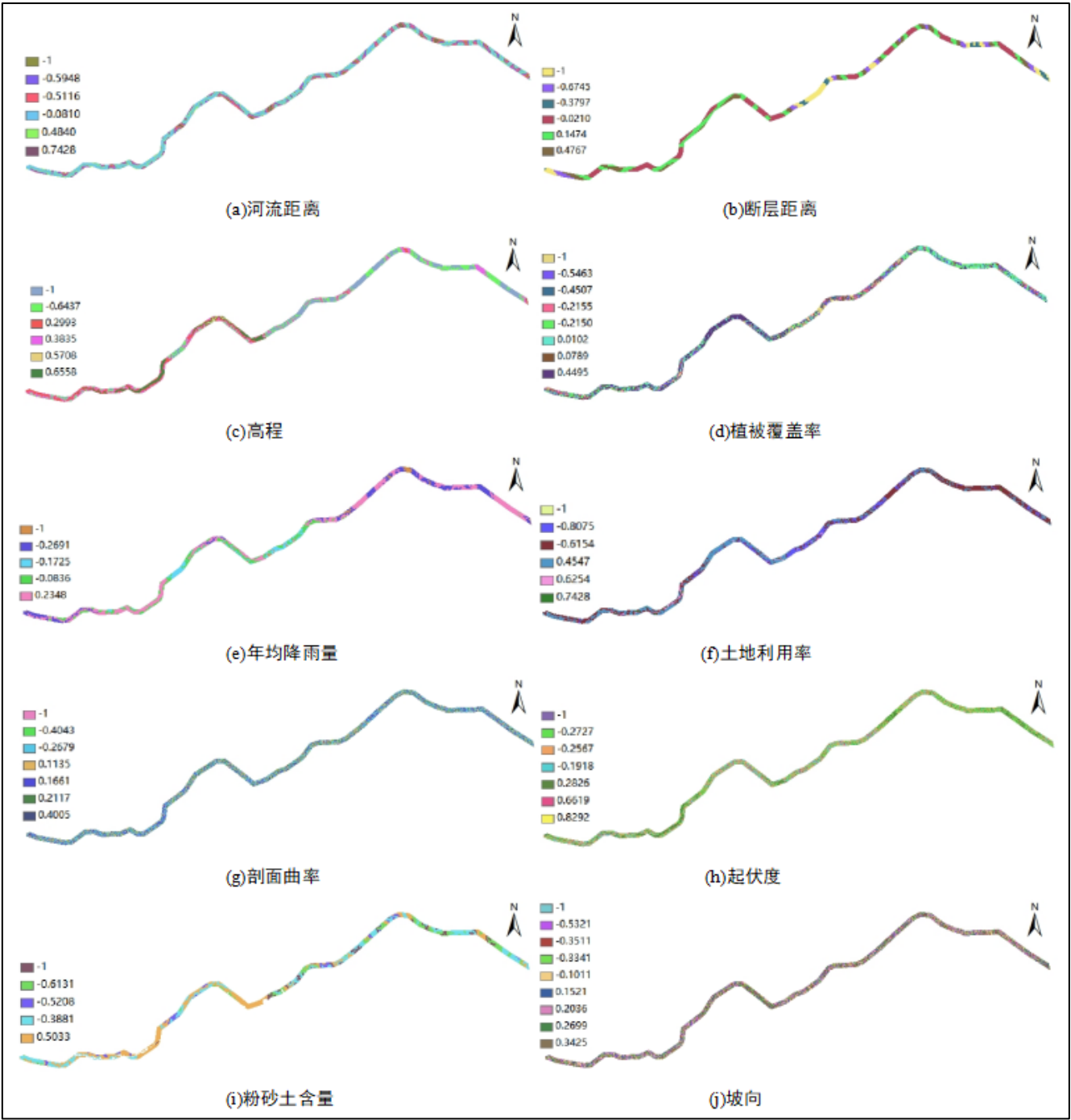


图 4 同因子不同分类 CF 值栅格图

5.2 泥石流易发性图

对图 4 的 10 个分类子图根据回归系数公式进行叠加，计算整个研究区 Y 的值。再利用 GIS 的栅格计算

功能，根据泥石流概率表达式计算研究区每个单元的泥石流发生概率 P 值，得到研究区泥石流易感性图 5。利用重分类中的相等间隔，将概率分为 0-0.25，0.25-0.5，0.5-0.75，0.75-1 四个等区间，分别划分为极低易发区，

低易发区, 中易发区和高易发区。从图中可以看出, 被记录的泥石流点基本分布在高易发区内, 说明该模型较为准确。

在数据属性表中利用字段计算器计算“像元宽\*像元高\*count”的值来计算各区间面积。发现研究区内极低易发区共 2547km<sup>2</sup>, 占总面积的 61.72%; 低易发区共 235km<sup>2</sup>, 占总面积 5.69%; 中易发区共 246km<sup>2</sup>, 占 5.96%; 高易发区共 1099km<sup>2</sup>, 占总面积 26.63%。

泥石流高易发区主要有 3 处。主要集中在林芝市

米林县中部, 地理位置在 (93°31'22.07"E, 29°9'29.91"N-94°31'59.82"E, 29°36'6.72"N); 林芝县东北部和波密县西南部的交界处, 地理位置在 (94°40'32.59"E, 29°43'34.21"N-95°40'55.70"E, 29°55'36.54"N); 昌都市昌都县南部, 地理位置在 (97°14'47.53"E, 30°57'26.18"N-97°26'22.58"E, 30°56'22.43"N)。林芝段铁路的安全隐患远大于林昌段铁路, 是防范泥石流灾害的重点地区。

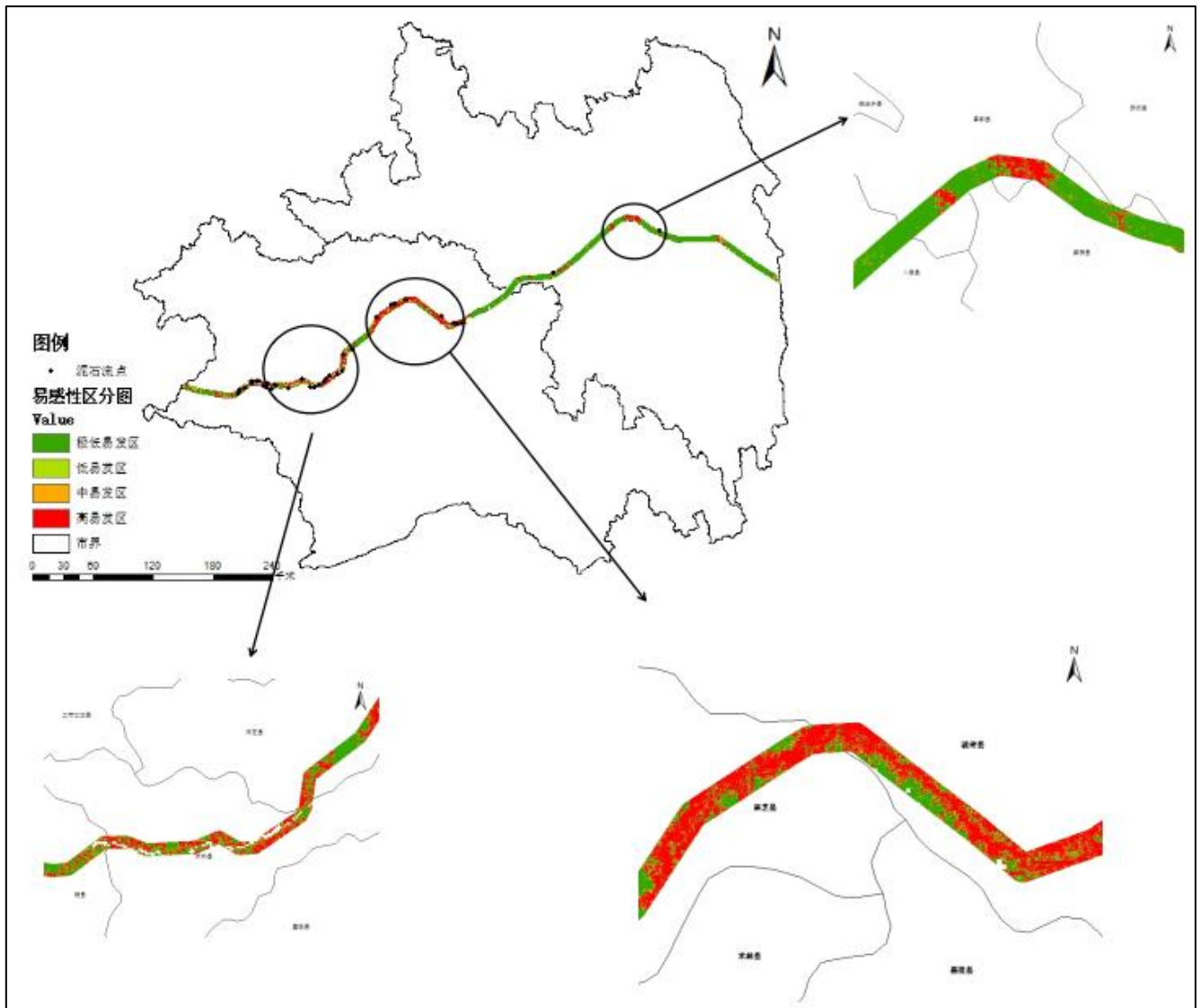


图 5 川藏铁路林昌段 2km 范围内泥石流易感性图

## 6 结论

本文从宏观的角度出发, 通过因子相关性分析得

到适用于研究区的 10 个泥石流致灾因子, 采用确定性系数 (CF) 与二元逻辑回归 (Logistic) 耦合模型来开展川藏铁路藏东南路段的泥石流易发性评估工作。研究范围定位在铁路两侧 2km 的范围内, 缩小有效研究

范围的同时,增加了模型的精度。结合往年年降雨量数据,对重要水源因子降水量的等级也进行了确定性系数的计算,得到不同等级降水量对泥石流的影响程度。在 Arcgis 平台下,对栅格数据重分类、赋值、计算,得到研究区泥石流易感性图。主要结论如下:

- (1) 通过相关性因子筛选和 CF-LR 耦合模型的计算,影响研究区内的泥石流主要灾害因子权重从大到小依次是:年均降雨量、剖面曲率、NDVI、坡向、高程、泥石流到河道距离、起伏度、粉砂土含量、泥石流到断层、土地利用率。
- (2) 在林芝-昌都市内川藏铁路范围两千米内,根据确定性因子分析泥石流确定性高的分类级别是在高程 2500~3000m,剖面曲率 25~30,起伏度 120~140,河流距离 5000~6000m,断层距离 10000~15000m,NDVI 0.8~0.9,年均降雨量 700~800mm,土地利用率 10~20,粉砂土含量 25~30,坡向为东。
- (3) 利用 50 个泥石流点研究样本制作模型,剩余 20 个泥石流点验证样本进行 ROC 曲线验证分析。结果表明 CF-LR 耦合模型的 AUC 值达到 0.89,说明该模型可以较好的评估研究区的泥石流发生情况。
- (4) 根据 CF-LR 模型计算得到,在研究区内,有 26.63%的面积处于高易发区,其主要分布在米林县、林芝县和昌都县的铁路沿线附近。所以这些区域是泥石流灾害防控的重要地区。

本研究模型可以给川藏铁路周边泥石流灾害的监测与防治提供可借鉴的理论依据,及时对灾害高风险地区采取避险措施可以减少人员财产的伤亡。需要指出的是,宏观评价可以缩小寻找范围,但准确到经纬度的易灾地点还需要实地考察后才能下结论。根据考察地形地势后得到的精确数据,再来判断什么程度的降雨量在哪个沟道会引起泥石流的爆发。

## 参考文献

- [1] 马艳鲜,余忠水. 西藏泥石流、滑坡时空分布特征及其与降水条件的分析 [J]. 高原山地气象研究, 2009, 29 (01): 55-58.
- [2] 袁东,任金龙,张广泽,等. 遥感技术在川藏铁路车站选址中的应用 [J]. 测绘通报, 2021 (12): 83-87+93.
- [3] 王运生,程万强,刘江伟. 川藏铁路廊道泸定段地质灾害孕育过程及成灾机制 [J]. 地球科学, 2022, 47 (03): 950-958.
- [4] 史洪滨,胡卸文,文强,等. 拟建川藏铁路夏里 2~#沟泥石流发育特征及动力学过程数值模拟 [J]. 地质灾害与环境保护, 2021, 32 (03): 39-46.
- [5] 袁东,张广泽,王栋,等. 川藏交通廊道雅安至昌都段泥石流发育特征及对策分析 [J/OL]. 地质通报: 1-13 [2022-07-26].
- [6] 黄露,谢忠,罗显刚. 3S 技术在突发地质灾害应急管理中的应用 [J]. 测绘科学, 2016, 41 (11): 56-60.
- [7] 张凯翔. 基于“3S”技术的地质灾害监测预警系统在我国应用现状 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31 (06): 1-11.
- [8] 鞠远江,曾思伟,刘耕年. 泥石流沟最优治理方案选择的层次分析法模型 [J]. 水土保持研究, 2003 (03): 52-54.
- [9] 李万花. 层次分析法在地质灾害危险性评估中的应用研究 [D]. 中国地质大学(北京), 2013.
- [10] 王春磊,吴云刚,隗锦涛. 模糊综合评判法在泥石流危险度评价中的应用 [J]. 安全与环境工程, 2010, 17 (03): 14-16.
- [11] 陈伟,任光明,左三胜. 泥石流危险度的模糊综合评判 [J]. 水土保持研究, 2006 (02): 138-139+171.
- [12] 高泽民,丁明涛,杨国辉,等. 川藏铁路孜热—波密段泥石流灾害危险性评价 [J]. 工程地质学报, 2021, 29 (02): 478-485.
- [13] 杨光,徐佩华,曹琛,等. 基于确定性系数组合模型的区域滑坡敏感性评价 [J]. 工程地质学报, 2019, 27 (05): 1153-1163.
- [14] 刘璐瑶,高惠瑛,李照. 基于 CF 与 Logistic 回归模型耦合的永嘉县滑坡易发性评价 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, 51 (10): 121-129.
- [15] 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 (02): 526-535.
- [16] 刘福臻,崔超,王军朝,等. 基于 CF 与 LR 模型的泥石流危险性评价 [J]. 安全与环境学报, 2021, 21 (04): 1693-1703.
- [17] M 马超,胡凯衡,崔鹏,等. 汶川地震灾区坡面和沟谷泥石流冲出距离计算方法 [J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32 (06): 759-765.
- [18] 铁永波,唐川,倪化勇. 暴雨泥石流冲出距离预测 [J]. 山地学报, 2011, 29 (02): 250-253.
- [19] 刘佳,郭海燕,邓国卫,等. 川藏铁路四川段沿线诱发地质灾害降水阈值研究 [J]. 灾害学, 2022, 37 (01): 83-91.

- [20] 刘新华. 区域水土流失地形因子分析与提取研究 [D]. 西北农林科技大学, 2001.
- [21] 黄艳婷, 郭永刚. 考虑降雨敏感度的泥石流危险性评价——以藏东南地区为例 [J/OL]. 中国地质灾害与防治学报: 1-11 [2022-08-03].
- [22] SHORTLIFFE E H, BUCHANAN B G. A model of inexact reasoning in medicine [J]. *Mathematical Biosciences*, 1975, 23 (3/4): 351-379.
- [23] 付树林, 梁丽萍, 刘延国. 基于 CF-Logistic 模型的雅砻江新龙段地质灾害易发性评价 [J]. *水土保持研究*, 2021, 28 (04): 404-410.
- [24] 王彦兵, 王聪, 赵亚丽, 等. 基于 ROC 曲线的永久散射体识别最佳阈值定量筛选 [J]. *遥感学报*, 2021, 25 (10): 2083-2094.
- [25] 倪化勇, 陈绪钰, 周维, 等. 高寒高海拔山原区沟谷型泥石流成因与特征——以四川省雅江县祝桑景区为例 [J]. *水土保持通报*, 2013, 33 (01): 211-215.