

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230307001

# 基于信息量与灾害熵的泥石流危险性评价对比研究——以成兰铁路松潘段为例

雷青青<sup>1</sup>, 向灵芝<sup>1,2</sup>, 罗亮<sup>1</sup>, 张济燕<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400000; 2. 重庆交通大学山区公路水运交通地质减灾重庆市高校重点实验室, 重庆 400000)

**摘要:** 以成兰铁路松潘段为研究区域, 根据野外调查分析、研究区基本环境地质条件, 选取9项影响因子: 高程、坡度、降雨量、岩性、地震烈度、NDVI(归一化植被指数)、距离断裂距离、HI(物源参照值)以及流域形状系数, 分析泥石流的分布特征。基于GIS技术, 通过信息量和灾害熵两种不同的模型, 对各评价指标图层进行分类计算, 并进行泥石流危险性评价。结果: 在信息量模型中, 研究区内危险中度及以上占总面积的87%; 泥石流沟内危险中度及以上占沟总面积的65%, 共31条。灾害熵模型中, 研究区内中危及以上危险区占总面积的81%; 泥石流沟内中危及以上危险区占沟总面积的80%, 共38条。与灾害的实际分布相比, 灾害熵模型给出了更接近实际的结果。

**关键词:** 泥石流; GIS; 信息量法; 灾害熵; 危险性; 评价

**中图分类号:** P642.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)04-0921-12

## A Comparative Study on Debris Flow Hazard Assessment Based on Information Volume and Disaster Entropy: a Case Study of Songpan Section of Chengdu-Lanzhou Railway

LEI Qingqing<sup>1</sup>, XIANG Lingzhi<sup>1,2</sup>, LUO Liang<sup>1</sup>, ZHANG Jiyan<sup>1</sup>

(1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400000, China; 2. Key Laboratory of Geological Disaster Reduction of Highway and Water Transportation in Mountainous Areas Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400000, China)

**Abstract:** Focusing on the Songpan section of the Chengdu-Lanzhou Railway as the study area, the study analyzed the distribution characteristics of debris flow based on field investigation and the region's basic environmental geological conditions. Nine influencing factors were considered, including elevation, slope, rainfall, lithology, seismic intensity, normalized difference vegetation index (NDVI), distance from faults, source material reference value (HI), and watershed shape coefficient. Using GIS technology, two different models - information volume and disaster entropy - were applied to classify and calculate each assessment index layer, and the debris flow hazards were assessed. Results

\* 收稿日期: 2023-03-07; 修回日期: 2023-04-24

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究任务项目(2019QZKK0902); 重庆市研究生联合培养基地建设项目(JDL-HPYJD2018001)资助

作者简介: 雷青青(1997—), 女, 硕士研究生。主要从事地质灾害防治研究。E-mail: 2293793496@qq.com

通信作者: 向灵芝(1980—), 女, 副教授, 博士。主要从事地质灾害防治研究。E-mail: xlz1223xlz@sina.com

showed that, according to the information volume model, 87% of the total area in the study area was classified as moderate hazard or above, with 65% of the total area within the debris flow ditches classified as moderate or higher hazard, covering 31 ditches. In the disaster entropy model, areas with moderate or higher hazard levels accounted for 81% of the total study area, and 80% of the total area within the debris flow ditches were classified as moderate or higher hazard, covering a total of 38 ditches. Compared to the actual distribution of hazards, the disaster entropy model provided results that were closer to reality.

**Keywords:** debris flow; GIS; information volume method; disaster entropy; hazard; assessment

## 0 引言

泥石流是最严重的地质灾害之一,具有爆发突然、运动迅速、历时短暂等活动特点<sup>[1]</sup>。一旦发生,将有人员伤亡和财产损失。在断裂等地质构造的影响下,松散堆积物丰富,泥石流灾害频繁,因此,其危险性评估越来越受到关注<sup>[2]</sup>。泥石流的风险性是指活动强度、发生规模以及泥石流造成的危险程度<sup>[3]</sup>。由于各地区的地质环境条件有异,许多学者采用各种各样的方法对泥石流风险评价进行了深入的研究。如 A.Carrara 等<sup>[4]</sup>通过应用 GIS 技术收集和处理相关的地质和地貌因素,生成数字地形模型并自动将地形划分为主要斜坡单元的模块,使用 ARC/INFO 对每个斜坡单元加权总和,从而得到能够评估每个斜坡单元的危险和风险图层。阮沈勇等<sup>[5]</sup>利用 GIS 强大的空间处理能力结合信息法模型在地质灾害风险区划中得到有效应用。唐川等<sup>[6]</sup>选取 6 个成因因子建立栅格形式的图层数据库,利用 ARC/INFO 计算分析,叠加危险性和易损性评估的结果,由此得到云南泥石流风险评价图,为云南省灾害治理给与参考依据。G.C.Ohlmacher 等<sup>[7]</sup>使用 ArcView GIS 处理的数字化地质、斜坡和滑坡,将每个网格单元的地质和坡度数据输入到 Logistic 方程中生成一个个网格,后通过 ArcView GIS 构建出滑坡危险图。刘传正<sup>[8]</sup>通过在 GIS 中建立数据库与图形库,提取因子体系,并创建“发展程度”、“潜在程度”、“风险程度”和“危险程度”的“四度”计算模型,从而得到滑坡泥石流灾害预警和防治区划。C.Conoscenti 等<sup>[9]</sup>通过利用 Arcview3.2 的地形分析扩展,从 40 m×40 m 单元的 DEM 中直接提取坡度和斜坡水流图层并结合地形湿度与出露岩石数据,通过应用二元分析,确定了基岩岩性、坡度角、地形湿度指数和斜坡水流功率指数对不稳定地貌空间

分布的有效控制。同时还有诸多学者通过 GIS 媒介,采用不同评价方法、评价因子和评价单元对泥石流危险进行深入探索<sup>[10-13]</sup>。

成兰铁路是中国西北地区的一条重要干线,其中松潘段是一个要塞。该地区地形复杂,气候恶劣,地质灾害较为发育,而铁路又与该地区的岷江断层近乎平行发展,断裂及其引发的次生灾害将会严重影响铁路的运行。为了保证该段铁路的安全稳定运营,对该段的地质灾害进行深入研究,为其运营提供一定安全保障。本文基于野外详细调查与 GIS 技术,遴选出 9 项主要影响研究区的评价因子,总结泥石流灾害分布特点,并采用信息量法与灾害熵法对成兰铁路松潘段区域的泥石流灾害进行危险性对比分析,为区域减灾防灾研究作参考。

## 1 研究区概况

研究区位于四川省西北部,属长江流域岷江水系。成兰铁路松潘段呈南北走向穿过研究区,地理坐标范围为 103°27'32"~104°20'22"E,32°50'41"~32°09'21"N。该区域处于海拔第一阶梯向第二阶梯的过渡带,地势西北高,东南低。区内地形复杂,高差悬殊,地貌以构造侵蚀中山地貌为主,海拔高程为 1 000~5 498 m。研究区裸露地层主要包括泥盆系、石炭系、二叠统和三叠系,厚层状砂岩、板岩和板岩夹灰岩为区内主要岩性。区内地质构造复杂,近南北向岷江断裂、虎牙断裂和近东西向雪山断裂构成了“h”构造格架。研究区地处中国南北向地震带上,地震频发,地震基本烈度为 VI 度。

受地震影响,岩体破碎较多,节理较多,风化严重,储存了丰富的物源条件。并且该区域具有明显的青藏高原季风气候,受季风影响,降雨量不均,且降雨量集中多暴雨,时间上主要集中在夏

季,空间上由西北向东南逐渐减少,它为泥石流的发生提供了充足的激发条件。根据实地调查,共有54条泥石流沟分布在研究区域(图1),基本沿成兰铁路两侧8公里范围内分布,具有较大潜在危险性。

## 2 泥石流孕灾因子分析

泥石流的形成通常受多种因素的影响,但不同的地质环境基础导致孕灾因子对泥石流的分布和活动性的控制程度不同,因此遴选主控因素对不同区域的泥石流灾害研究尤为重要<sup>[3,14]</sup>。基于泥石流灾害的基本条件和相关研究,主要受流域综合地形、物质来源和水动力条件的影响<sup>[15]</sup>。本文对研究区进行了实地调查和数据分析,初步遴选地质条件的9项影响因素(高程、坡度、降雨、岩性、震级、归一

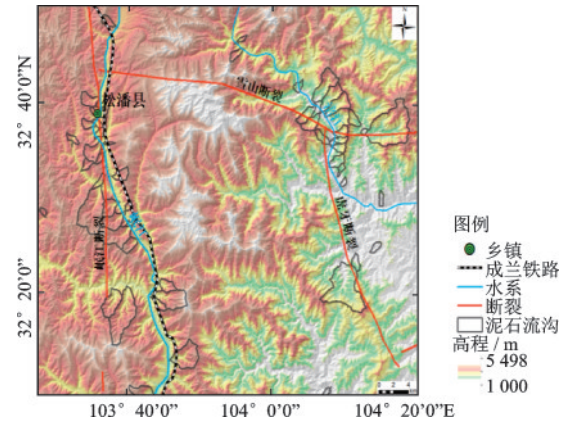
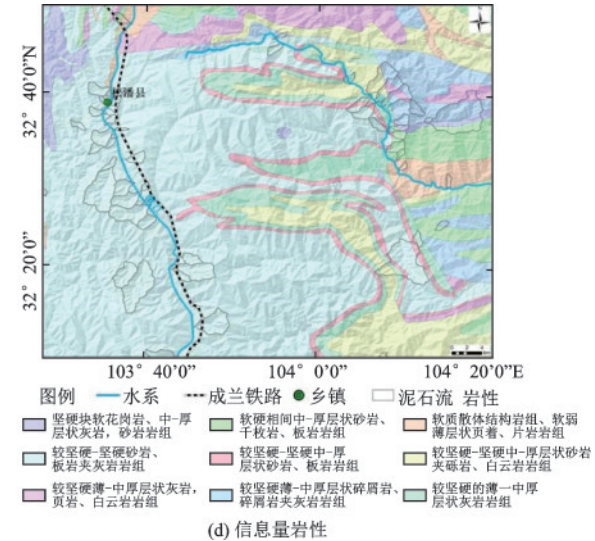
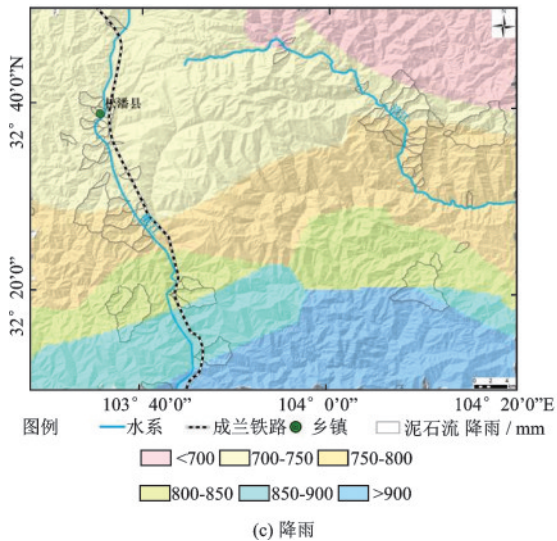
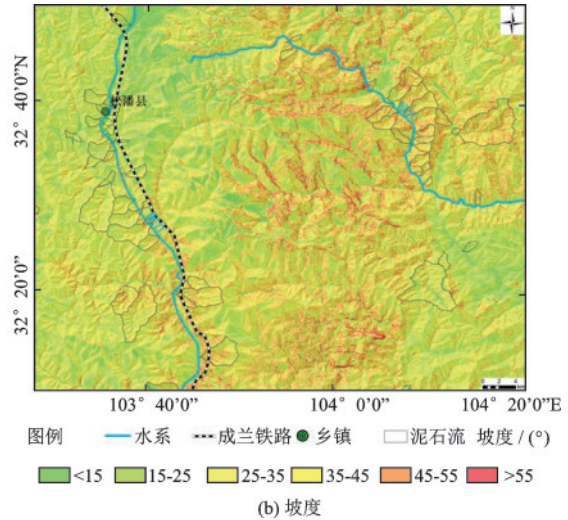
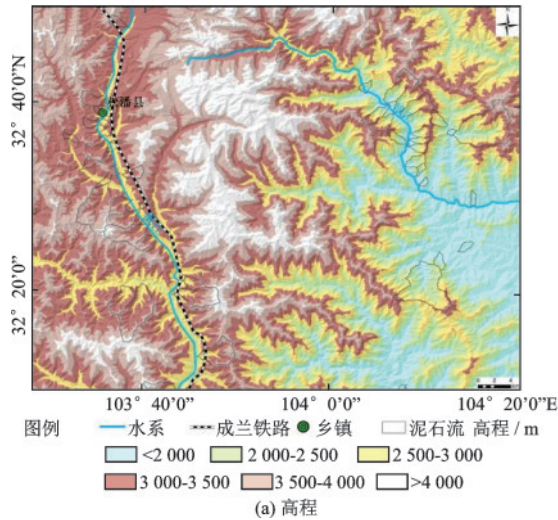


图1 研究区泥石流分布

Fig.1 Distribution of debris flow in study area

化植被指数(NDVI)、距离断层距离、物源参照值(HI)以及流域形状系数)。结合GIS技术,对区内泥石流在这9项因子的分布区间进行统计分析,总结了其分布特征(表1、图2)。



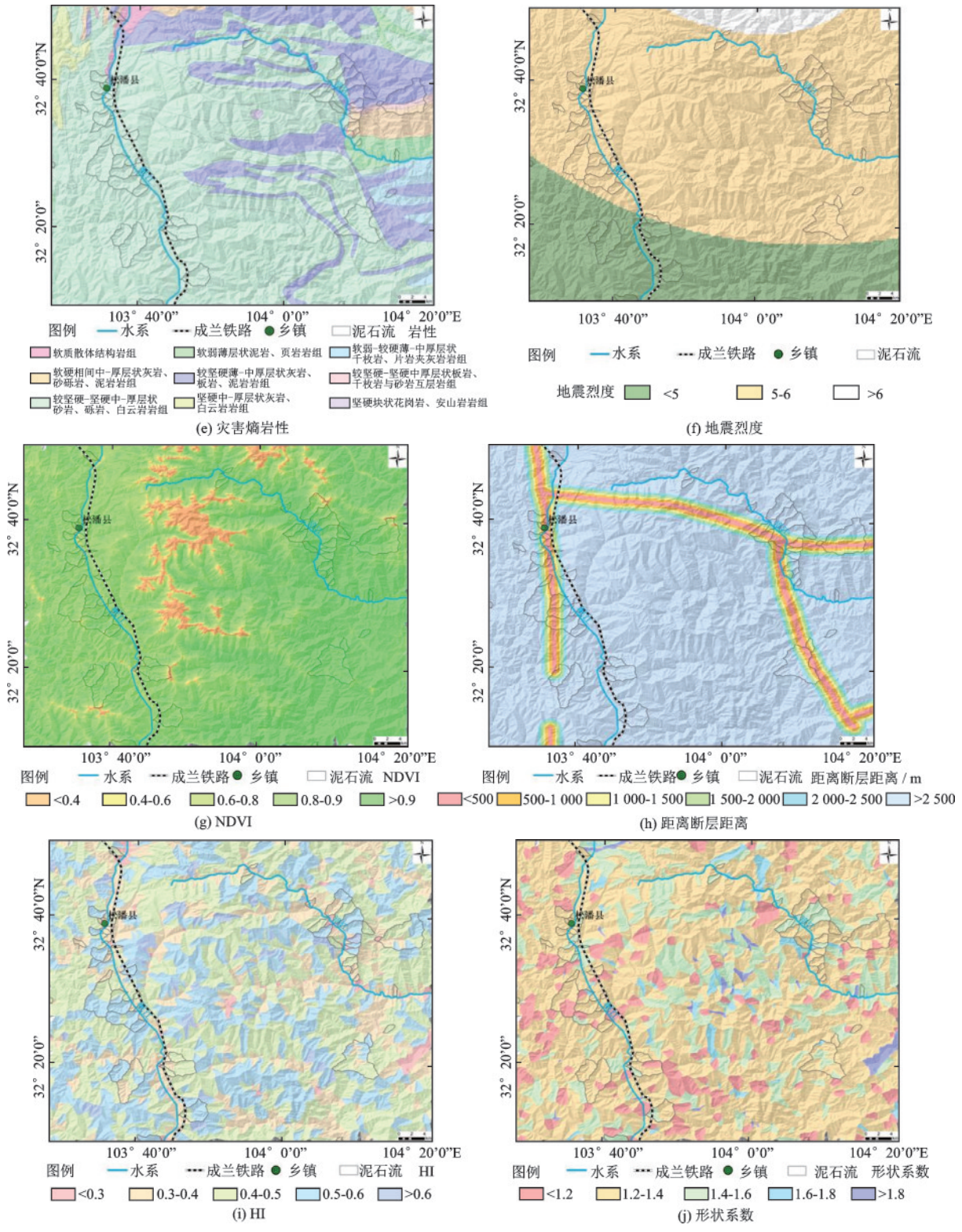


图2 研究区评价因子分级

Fig.2 Grading maps of assessment factors in study area

## 2.1 高程

泥石流的分布受高程的一定影响,各种地质、植被、水文等条件在不同的高程范围内都各不相同,

这些都影响着泥石流的形成。研究区多数泥石流沟分布为海拔2 500~3 500 m,比重为57.9%,分布在该范围外较少,说明该范围有利于泥石流的发生(表1、图2(a))。

表1 评价因子划分等级

Table1 Classification levels of assessment factors

评价因子	类别	占泥石流总面积比例/%	评价因子	类别	占泥石流总面积比例/%
高程/m	<2 000	0.071	NDVI	<0.4	0.004
	2 000~2 500	0.136		0.4~0.6	0.013
	2 500~3 000	0.217		0.6~0.8	0.082
	3 000~3 500	0.362		0.8~0.9	0.476
	3 500~4 000	0.188		>0.9	0.421
	>4 000	0.027			
坡度/(°)	<15	0.059	HI	<0.3	0.007
	15~25	0.169		0.3~0.4	0.038
	25~35	0.376		0.4~0.5	0.515
	35~45	0.293		0.5~0.6	0.432
	45~55	0.085		>0.6	0.014
	>55	0.017			
降雨/mm	<700	0.023	形状系数	<1.2	0.058
	700~750	0.346		1.2~1.4	0.742
	750~800	0.284		1.4~1.6	0.189
	800~850	0.190	1.6~1.8	0.007	
	850~900	0.084	>1.8	0.001	
	>900	0.073			
距离断裂距离/m	<500	0.082	岩性	较坚硬薄-中厚层状灰岩、板岩、泥岩岩组	0.026
	500~1 000	0.105		较坚硬相间中厚层状砂岩、千枚岩、板岩岩组	0.053
	1 000~1 500	0.059		较坚硬-坚硬砂岩、板岩夹灰岩岩组	0.651
	1 500~2 000	0.089		较坚硬薄-中厚层状碎屑岩、碎屑岩夹灰岩岩组	0.125
	2 000~2 500	0.075		软质散体结构岩组、软弱薄层状页岩、片岩岩组	0.013
	>2 500	0.583		较坚硬-坚硬中厚层状砂岩夹砾岩、白云岩岩组	0.049
地震烈度	<5	0.230		较坚硬的薄-中厚层状灰岩岩组	0.026
	5~6	0.770		坚硬块状花岗岩、中-厚层状灰岩、砂岩岩组	0.031
	>6	0.003		较坚硬-坚硬中厚层状砂岩、板岩岩组	0.024

## 2.2 坡度

坡度是引起泥石流灾害重要因素之一,是松散物质势能转化为动能的主要因素<sup>[16]</sup>。随着坡度的增加,松散堆积物重力增大、降雨的侵蚀能力和侵蚀强度也逐渐增加<sup>[17]</sup>,高度差使边坡沉积物等松散物质源具有较高的势能<sup>[18]</sup>,增加泥石流的可能性,但坡度越大却不意味着泥石流发生更容易。实际上,只有在一定范围内才会触发泥石流,坡度25°~45°是泥石流分布的主要区间(表1、图2(d))。

## 2.3 降雨

研究区中多暴雨型泥石流,其主要诱发条件是降雨,区内降雨量为700~800 mm内最易发生泥石

流(表1、图2(c))。泥石流的爆发取决于降水的积累和强降雨的最终引发。一方面,降雨会降低松散堆积黏聚力而垮塌,丰富的物源被供给;另一方面会提供充足的水动力促使泥石流的运动<sup>[19]</sup>。

## 2.4 岩性

泥石流的发生与地层岩性息息相关,地层岩性不仅决定或影响泥石流的性质<sup>[2]</sup>,也会影响松散物质的堆积<sup>[20]</sup>。区内构造较强,节理裂缝发育,岩土破碎,该区域相对高差大,动力势能较大,促使松散堆积物在极端强降雨条件下发生崩滑,而形成泥石流<sup>[18]</sup>。研究区的泥石流主要分布在坚硬的砂岩、板岩和碎屑岩上(表1、图2(d)),对岩性进行了细分,共分为9类(表2)。

同时也结合地层岩性与灾害熵理论的原理,将岩性细分为9类(表3)。根据表3中的岩性分类,将面积百分比叠加小流域内各种岩层,得到每个流域的岩性因子值( $f_{DSF}$ )(图2(e))<sup>[21]</sup>。

表2 研究区岩性分类

Table 2 Lithology classification in study area

分类	岩性
1	坚硬块体状花岗岩、中厚层状灰岩、砂岩岩组
2	较坚硬-坚硬中厚层状砂岩、板岩岩组
3	较坚硬-坚硬中厚层状砂岩夹砾岩、白云岩岩组
4	较坚硬-坚硬砂岩、板岩夹灰岩岩组
5	较坚硬薄-中厚层状灰岩、页岩、白云岩岩组
6	较坚硬薄-中厚层状碎屑岩、碎屑岩夹灰岩岩组
7	较坚硬的薄-中厚层状灰岩岩组
8	软硬相间中厚层状砂岩、千枚岩、板岩岩组
9	软质散体结构岩组、软弱薄层状页岩、片岩岩组

表3 研究区小流域岩性分类

Table 3 Lithology classification of small watersheds in study area

赋值	岩性
1	软质散体结构岩组
2	软弱薄层状泥岩、页岩岩组
4	软弱-较硬薄-中厚层状千枚岩、片岩夹灰岩岩组
5	软硬相间中厚层状灰岩、砂砾岩、泥岩岩组
6	较坚硬薄-中厚层状灰岩、板岩、泥岩岩组
7	较坚硬-坚硬中厚层状板岩、千枚岩与砂岩互层岩组
8	较坚硬-坚硬中厚层状砂岩、砾岩、白云岩岩组
9	坚硬中厚层状灰岩、白云岩岩组
11	坚硬块状花岗岩、安山岩岩组

## 2.5 地震烈度

研究区位于松潘-甘孜褶皱带上,构造运动强,主要震度为Ⅵ度,区内地震频繁(表1、图2(f))。地震的发生会导致边坡出现裂缝,破坏岩体的完整性和强度,同时还会诱发崩塌与滑坡,以致松散物质被大量积累,为泥石流提供物源<sup>[22]</sup>。故而,地震烈度通常被认为是泥石流最重要的因素之一。

## 2.6 归一化植被指数(NDVI)

NDVI指数是对植被覆盖的描述,值越高表示植被覆盖率越高。植被茂密具有土壤护坡和雨水截留的作用,有利于缓解边坡径流的积累和入渗率,对泥石流的发育起着抑制作用<sup>[20]</sup>。研究区域的

NDVI指数值普遍较大,植被覆盖率较高,泥石流主要分布在NDVI>0.8上(表1、图2(g))。

## 2.7 距离断裂的距离

研究区内泥石流沟主要分布在岷江、虎牙和雪山断裂带上,断裂带及其附近一定面积的岩土体受损,从而降低了岩土体的完整性,松散物质被大量提供<sup>[23]</sup>。泥石流沟沿着断裂呈带状分布,主要在距离断裂为500~1 000 m和>2 500 m内(表1,图2(h))。流域中心到断裂的距离反映了断裂构造活动对流域的整体影响,距离越近,对流域的影响越大<sup>[24]</sup>。

## 2.8 物源参照值(HI)

1952年,A.N.Strahler<sup>[25]</sup>提出面积高程曲线(Hypsometric Curve,简称HC),利用曲线积分值HI的大小定量划分流域的地貌演化阶段:幼年期HI>0.6,中年期HI为0.35~0.6,老年期HI<0.35。面积高程曲线(HC)形式的凸、S和凹型分别对应于地貌演化阶段的幼年、壮年和老年。本文根据研究区的具体概况,将HI分为:幼年期HI>0.6,中年期HI为0.4~0.6,老年期HI<0.4,同时区内泥石流主要分布在HI为0.4~0.6(表1、图2(i))。

## 2.9 流域形状系数

形状系数反映降雨和其他流量时间线的发生以及汇洪水的峰值,影响流域内的泥沙侵蚀<sup>[26]</sup>。一般情况下,当形状系数趋于1时,流域形状越靠近圆,集水效率越高,越容易在短时间内收集河道内的地表径流,形成较大的峰流,为松散物质的启动提供了有利条件<sup>[24]</sup>。区内泥石流主要分布在形状系数为1.2~1.4(表1、图2(j))。

# 3 研究方法

## 3.1 信息量法

信息量法是评价预测方法,通过将影响灾害的各种因素的测量值转换为信息值,利用信息值的大小来评估影响因素与研究对象之间的接近程度,进而评价研究对象的安定度。泥石流灾害受多种因素影响,计算主控因素信息量值定量评价灾害的危险程度<sup>[27-29]</sup>。根据式(1)~(2)计算综合信息量

值<sup>[14,29]</sup>。信息量法中的综合信息值越大,泥石流的可能性越大,最后根据该值进行危险划分,即:

1)计算各因子信息量的值:

$$I(X_i, H) = \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (1)$$

式中,  $X_i$  为评价因子;  $N_i$  为灾害分布在  $X_i$  中的面积;  $N$  为灾害总面积;  $S_i$  为研究区中包含  $X_i$  的面积;  $S$  为研究区总面积。

2)计算单个评估单元中的总信息:

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

式中,  $I_i$  为评价单元的信息总量;  $n$  为参与因素的数量。当  $I_i > 0$  时,说明灾害发生的可能性大;  $I_i$  越大,危险性程度也就越高。  $I_i < 0$ ,说明泥石流发生的可能性小;  $I_i$  越小,危险性程度也就越低。

### 3.2 灾害熵法

熵值法是通过根据评价体系中已有信息计算出各评价因子的信息熵,再根据评价因子的信息熵来判断各因子对研究整体的影响程度,从而得出各个因子的权重<sup>[1,30-31]</sup>。泥石流受众多因素共同作用,其发生有太多不确定性和复杂性,是内部与外部的能量交换,建立熵模型判断其能量的混乱程度,以此来危险评价<sup>[31-33]</sup>。熵值法具体步骤为建立评价因子矩阵并标准化,使成为无量纲矩阵,再按(3~6)计算危险性值,即:

$$F_{ij} = r_{ij} / \sum_{j=1}^n r_{ij} \quad (3)$$

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m F_{ij} \ln F_{ij} \quad (4)$$

$$w_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)} \quad (5)$$

$$P_i = \sum_{j=1}^n w_j r_{ij} \quad (6)$$

式中,  $i$  为第  $i$  条泥石流沟;  $j$  为第  $j$  项评价因子;  $r_{ij}$  为评价因子标准后的值;  $F_{ij}$  为灾害产生过程的频率;  $E_j$  为评价因子的灾害熵,  $k = 1 / \ln m$ ;  $w_j$  为评价因子的权重;  $P_i$  为危险性值。

$P_i$  代表危险性值,其值越大,则该泥石流发生的可能性越大。

## 4 泥石流危险性评价

### 4.1 信息量法评价结果

根据信息量法的原理与研究区地质概况,合理

分类选取的评价因子,并按照公式(1)~(2)计算出信息量值(表4)。泥石流受因子影响的综合指标以计算出的信息量值表示,其值越高发生的可能性越大。

由表4可以得出,高程分布范围在3 000~3 500 m、坡度在35°~45°、降雨在800~850 mm、距离断层距离为500~1 000 m、地震烈度为5-6、NDVI为0.8~0.9、HI在0.5~0.6、形状系数为1.2~1.4和岩性为较坚硬的薄-中厚层状碎屑岩岩组时各因子信息量值最大,表明在这些因子范围内泥石流发生的可能性最大。在ArcGIS中将所选出评价因子图层分配相应的信息量值并将其利用加权总和工具计算出各因子叠加的图层,综合危险性数值范围为-10.04~2.90,数值越高,因素贡献越大,发生泥石流的可能性就越大。根据自然间断点分级法将研究区危险性分为5个级别:极轻度、轻度、中度、高度和极高度危险区(图3(a)),同时采用一样的分级方法对泥石流沟危险性分为相同级别(图3(b))。

### 4.2 灾害熵法评价结果

以1 386个小流域为研究对象,按照前面选取的9个因素作为评价指标,评价因素按表5进行标准化分级。

根据文中公式(3)~(6)计算的得出各评价因子的灾害熵、信息效用值和评因子权重(表6)。

由表6可以看出,9项评价因子中降雨、坡度、形状系数、岩性、HI和高程的权重最大,分别为0.11 779、0.11 757、0.11 687、0.11 638、0.11 599和0.11 547,说明这些因子对泥石流的影响最大,是控制泥石流发生的主要因素。计算出各因子的权重后,由式(6)计算出各个小流域的危险数值,后根据面积所占百分比原则,计算出每条泥石流沟的危险性数值,采用与信息量法相同的分级方法和危险等级划分研究区和泥石流沟(图4(a)、(b))。由图3~4可知,两种方法计算结果相互佐证,同时也可以说明两种评价方法相对合理。

### 4.3 危险性评价结果对比

本文根据研究区特殊的地质环境选取适合该区域的评价因子,用信息量与灾害熵方法对比研究得出评价结果(表7)。

信息量法结果显示,区内信息量值在-10.04~2.90,中危及以上危险区总占比为87%;中危及以

表4 信息量值计算结果

Table4 Calculation results of information volume values

评价因子	类别	信息量值	评价因子	类别	信息量值
高程/m	<2 000	-0.47	NDVI	<0.4	-2.04
	2 000~2 500	0.17		0.4~0.6	-0.93
	2 500~3 000	0.21		0.6~0.8	-0.24
	3 000~3 500	0.27		0.8~0.9	0.16
	3 500~4 000	-0.17		>0.9	0.01
	>4 000	-1.27			
坡度/(°)	<15	-0.28	HI	<0.3	-0.98
	15~25	-0.20		0.3~0.4	-1.70
	25~35	0.04		0.4~0.5	0.16
	35~45	0.16		0.5~0.6	0.31
	45~55	0.04		>0.6	-0.64
	>55	-0.29			
降雨/mm	<700	-1.39	形状系数	<1.2	-0.50
	700~750	0.07		1.2~1.4	0.08
	750~800	0.26		1.4~1.6	0.06
	800~850	0.44	1.6~1.8	-1.38	
	850~900	-0.15	>1.8	-2.61	
	>900	-0.58			
距离断裂距离/m	<500	0.96	岩性	较坚硬薄-中厚层状灰岩、板岩、泥岩岩组	-0.66
	500~1 000	1.09		软硬相间中-厚层状砂岩、千枚岩、板岩岩组	-0.01
	1 000~1 500	1.04		较坚硬-坚硬砂岩、板岩夹灰岩岩组	0.20
	1 500~2 000	0.93		较坚硬薄-中厚层状碎屑岩、碎屑岩夹灰岩岩组	0.69
	2 000~2 500	0.83		软质散体结构岩组、软弱薄层状页岩、片岩岩组	-0.95
	>2 500	-0.36		较坚硬-坚硬中-厚层状砂岩夹砾岩、白云岩岩组	-0.89
				较坚硬的薄-中厚层状灰岩岩组	-1.10
地震烈度	<5	-0.17	坚硬块状花岗岩、中-厚层状灰岩、砂岩岩组	0.29	
	5~6	0.10	较坚硬-坚硬中-厚层状砂岩、板岩岩组	-0.59	
	>6	-2.39			

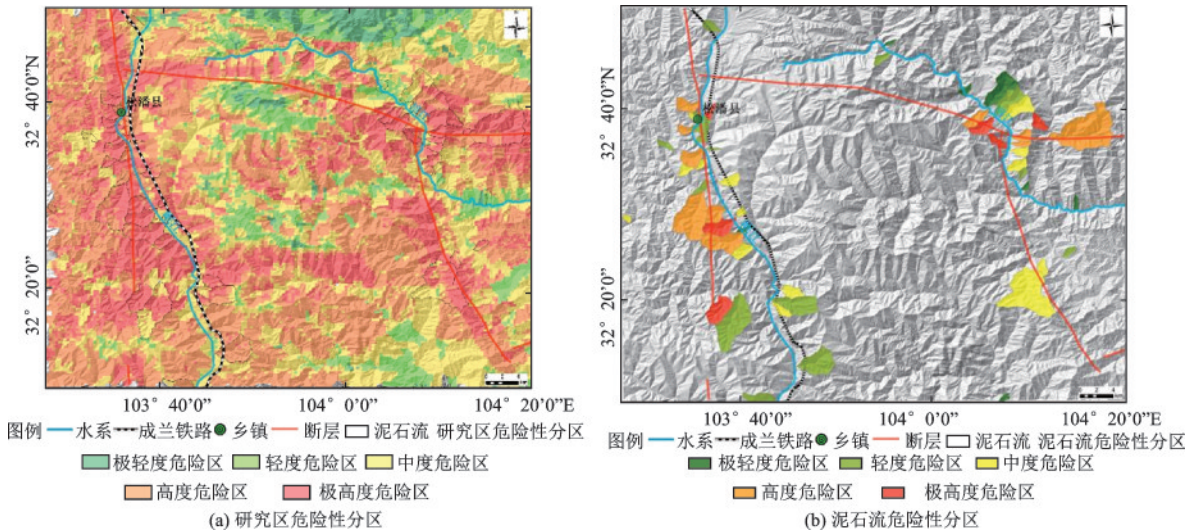


图3 信息量法危险性分区

Fig.3 Hazard zoning by information volume method

表5 研究区危险性评价因子标准化分级

Table5 Standardized grading table of hazard assessment factors in study area

评价因子	标准化赋值		
	1	2	3
高程/m	>3 500	<2 500	2 500~3 500
坡度/(°)	<25	25~35	>35
降雨/mm	<700	700~800	>800
岩性	>14	6~9	<6
地震烈度	<5	5~6	>6
NDVI	>0.9	0.8~0.9	<0.8
距离断层距离/km	>8	4~8	<4
HI	<0.4	>0.6	0.4~0.6
形状系数	>1.5	1.3~1.5	<1.3

上危险区在泥石流沟中有31条沟,占沟总面积的65%。

灾害熵法结果显示,区内危险值为1.43~2.68,中危及以上危险区总占比为81%;泥石流沟中有38条沟在中危及以上危险区,占沟总面积的80%。结合图3-4可以看出,区内中度危险以上的泥石流

占多数,危险度较高。

从两种方法得出的结果分析可知,灾害熵法得出中度危险及以上地区泥石流沟面积占泥石流沟总面积的80%多于信息量法得出的65%,同时在中度危险以上,灾害熵方法包含了47%亦大于信息量方法的42%。例:纳坡沟泥石流通过信息量法计算得其危险性等级为中高危险性,而灾害熵计算出危险性等级为极高危险性,更符合实地调查结果。同时根据区域实地调查的危险性分级,区内中高危险性比例为50%以上,与实际调查结果相印证,符合实际情况。对比两者结果,研究区泥石流危险评价采用灾害熵法更合适。

## 5 讨论与结论

### 5.1 讨论

泥石流灾害的危险评价方法诸多,不同区域如何抉择合适的研究方法,同一区域又如何选取不同的方法对比研究都是值得深入探索的问题。目前

表6 评价指标灾害熵及其权重

Table 6 Disaster entropy of assessment indices and their weight

评价因子	高程/m	坡度/(°)	降雨/mm	岩性	地震烈度	NDVI	距离断层距离/km	HI	形状系数
灾害熵	47.227	48.067	48.154	47.588	42.233	41.292	39.539	47.435	47.786
信息效用值	-46.227	-47.067	-47.154	-46.588	-41.233	-40.292	-38.539	-46.435	-46.786
评价因子权重	0.115 47	0.117 57	0.117 79	0.116 38	0.103 00	0.100 65	0.096 27	0.115 99	0.116 87

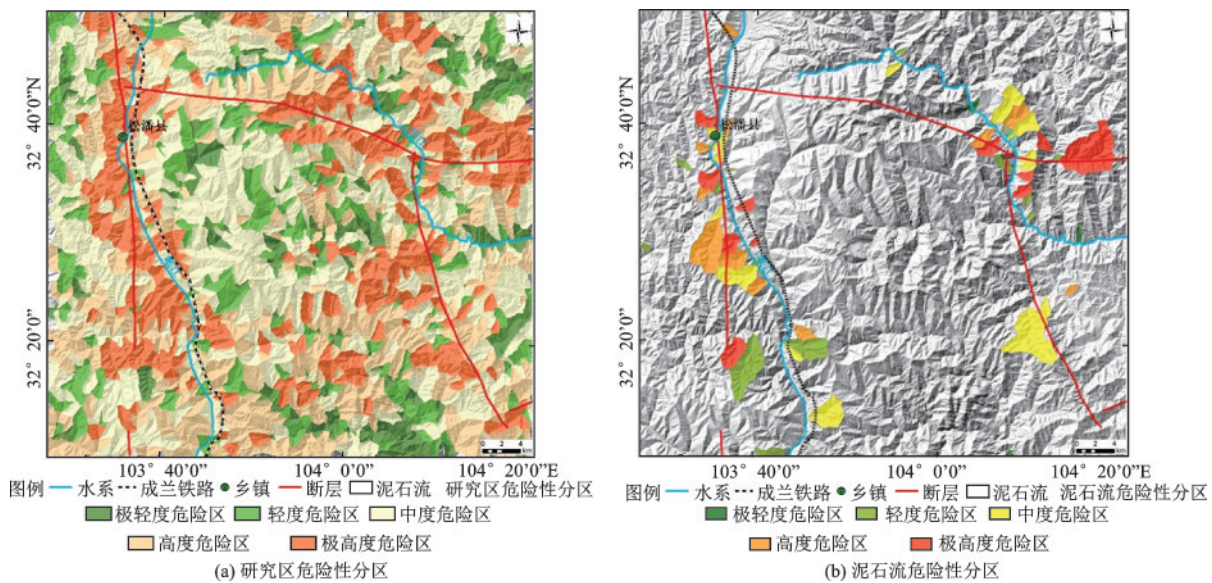


图4 灾害熵法危险性分区

Fig.4 Hazard zoning by hazard entropy method

表7 泥石流危险性结果的比较

Table 7 Comparison of debris flow hazard assessment results

方法	等级	研究区面积/km <sup>2</sup>	占总面积的比例/%	泥石流面积/km <sup>2</sup>	占泥石流面积的比例/%
信息量法	极轻度危险区	174.00	0.03	33.34	0.07
	轻度危险区	645.50	0.10	131.80	0.28
	中度危险区	1 704.25	0.27	108.77	0.23
	高度危险区	2 346.75	0.38	155.14	0.33
	极高度危险区	1 349.50	0.22	41.94	0.09
灾害熵法	极轻度危险区	423.10	0.07	7.20	0.02
	轻度危险区	791.86	0.13	90.99	0.19
	中度危险区	2 129.01	0.34	157.32	0.33
	高度危险区	1 556.21	0.25	98.37	0.21
	极高度危险区	1 353.33	0.22	121.50	0.26

同一区域的危险性评价采用不同评价方法的比较研究还相对较少,因此本文依据研究区的地质环境条件,选择信息量法与灾害熵法进行对比研究,从而得出更适于该区的研究方法。同时值得探讨的是如何选择适合的评价因子对研究区进行危险性研究,本文主要遴选9个内外动力评价因子,而泥石流影响因素众多,因子之间的相互影响的作用机制和数理模型的精确度值得进一步探讨。

## 6 结 论

(1)通过野外实地考察与分析,选取高程、坡度、降雨、岩性、地震烈度、归一化植被指数(NDVI)、距离断裂距离、物源参照值(HI)以及流域形状系数9个因子作为评价指标,进行泥石流分布与危险性评价分析,因子遴选、评价结果与实际情况一致。

(2)对比两种方法结果表明,研究区中度危险区及以上均占总面积80%以上,两种研究方法得以相互印证。对于泥石流沟中危及以上区域占沟总面积的比例,灾害熵大于信息量(80%>65%),表明灾害熵方法更适用于区内危险研究。

(3)对比两种结果,信息量法中评标指标的权重赋值是主观的,而灾害熵法中评价指标的权重赋值是客观的,排除主观判断的影响,选择客观赋权的灾害熵模型更为合理。

(4)研究区内成兰铁路呈南北走向穿过,泥石流主要沿铁路两侧分布,对铁路构成一定威胁,泥石流危险性评价时采取两种不同的方法,使评价结果更为接近实际,为研究区域防灾减灾提供了一定的依据。

## 参考文献:

- [1] 王晓朋,潘懋,任群智.基于流域系统地貌信息熵的泥石流危险性定量评价[J].北京大学学报(自然科学版),2007,43(2):211-215.  
Wang X P, Pan M, Ren Q Z. Quantitative assessment of debris flow risk based on geomorphic information entropy of watershed system[J]. Journal of Peking University (Natural Science Edition), 2007, 43(2): 211-215. (in Chinese)
- [2] 宁娜,田黎明,张鹏,等.甘肃南部武都地区泥石流危险性评价[J].山地学报,2013,31(5):601-609.  
Ni N, Tian L M, Zhang P, et al. Risk assessment of debris flow in Wudu area, southern Gansu Province[J]. Journal of Mountain Science, 2013, 31(5): 601-609. (in Chinese)
- [3] 宁娜,马金珠,张鹏,等.基于GIS和信息量法的甘肃南部白龙江流域泥石流灾害危险性评价[J].资源科学,2013,35(4):892-899.  
Ni N, Ma J Z, Zhang P, et al. Evaluation of debris flow hazard in Bailong River Basin of southern Gansu Province based on GIS and information method[J]. Resource Science, 2013, 35(4): 892-899. (in Chinese)
- [4] Carrara A, Cardinali M, Detti R, et al. GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1991, 16(5): 427-445.
- [5] 阮沈勇,黄润秋.基于GIS的信息量法模型在地质灾害危险性区划中的应用[J].成都理工学院学报,2001, 28(1):89-92.  
Ruan S Y, Huang R Q. Application of information method model based on GIS in geological hazard zoning

- [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001, 28(1):89-92.(in Chinese)
- [6] 唐川,朱大奎.基于GIS技术的泥石流风险评价研究[J].地理科学,2002,22(3):300-304.  
Tang C, Zhu D K. Research on risk assessment of debris flow based on GIS[J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(3):300-304.(in Chinese)
- [7] Ohlmacher G C, Davis J C. Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA [J]. Engineering Geology, 2003, 69(3-4): 331-343.
- [8] 刘传正.区域滑坡泥石流灾害预警理论与方法研究[J].水文地质工程地质,2004(3):1-6.  
Liu C Z. Study on the theory and method of regional landslide and debris flow disaster early warning [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004 (3) : 1-6. (in Chinese)
- [9] 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.
- [10] 张晨,王清,陈剑平,等.金沙江流域泥石流的组合赋权法危险度评价[J].岩土力学,2011,32(3):831-836.  
Zhang C, Wang Q, Chen J P, et al. Risk assessment of debris flow in Jinsha River basin by combination weighting method[J]. Geotechnical Mechanics, 2011, 32(3): 831-836.(in Chinese)
- [11] 罗真富,蒲达成,谢洪斌,等.基于GIS和信息量法的泥石流流域滑坡危险性评价[J].中国安全科学学报, 2011,21(11):144-150.  
Luo Z F, Pu D C, Xie H B, et al. Landslide risk assessment of debris flow basin based on GIS and information quantity method [J]. Chinese Journal of Safety Science, 2011,21(11):144-150.(in Chinese)
- [12] 邓辉,何政伟,陈哗,等.信息量模型在山地环境地质灾害危险性评价中的应用——以四川泸定县为例[J].自然灾害学报,2014,23(2):67-76.  
Deng H, He Z W, Chen Y, et al. Application of information quantity model in risk assessment of mountain environmental geological disasters-Taking Luding County, Sichuan Province as an example[J]. Journal of Natural Disasters, 2014,23(2):67-76.(in Chinese)
- [13] 邹强,唐建喜,李淑松,等.基于水文响应单元的泥石流灾害易发性分区方法[J].山地学报,2017,35(4):496-505.  
Zou Q, Tang J X, Li S S, et al. Zoning method of debris flow hazard susceptibility based on hydrological response unit[J]. Journal of Mountain Regions, 2017, 35 (4):496-505.(in Chinese)
- [14] 刘林通,孟兴民,郭鹏,等.基于流域单元和信息量法的白龙江流域泥石流危险性评价[J].兰州大学学报(自然科学版),2017,53(3):292-298,308.  
Liu L T, Meng X M, Guo P, et al. Risk assessment of debris flow in Bailong River basin based on watershed unit and information method [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition), 2017, 53 (3) : 292-298,308.(in Chinese)
- [15] 易靖松,王峰,程英建,等.高山峡谷区地质灾害危险性评价——以四川省阿坝县为例[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(3):134-142.  
Yi J S, Wang F, Cheng Y J, et al. Risk assessment of geological hazards in alpine and gorge areas-taking Aba County, Sichuan Province as an example [J]. Chinese Journal of Geological Hazards and Prevention, 2022, 33 (3):134-142.(in Chinese)
- [16] 牛全福,程维明,兰恒星,等.基于信息量模型的玉树地震次生地质灾害危险性评价[J].山地学报,2011,29(2):243-249.  
Niu Q F, Cheng W M, Lan H X, et al. Risk assessment of secondary geological disasters of Yushu earthquake based on information model[J]. Journal of Mountainous Regions, 2011,29(2):243-249.(in Chinese)
- [17] 杜宇琛,葛永刚,梁馨月,等.确定性系数与地理探测器模型耦合的泥石流易发性评估方法研究——以安宁河流域为例[J].防灾减灾工程学报,2022,42(4):664-673.  
Du Y C, GE Y G, Liang X Y, et al. Evaluation method of debris flow susceptibility coupled with deterministic coefficient and geographic detector model: a case study of Anning River Basin [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 42 (4) : 664-673.
- [18] 林虹宇.岷江上游泥石流易发性评价及沟谷趋势预测[D].绵阳:西南科技大学(四川),2017.  
Lin H Y. Debris flow vulnerability assessment and valley trend prediction in the upper reaches of Minjiang River[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2017.(in Chinese)
- [19] 李果.基于GIS的泥石流危险性评价研究[D].北京:中国地质大学,2015.  
Li G. Study on risk assessment of debris flow based on GIS [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015.(in Chinese)
- [20] 王高峰,杨强,田运涛,等.泥石流易发性评价模型的构建——以白龙江流域石门乡羊汤河段为例[J].干旱区研究,2019,36(3):761-770.  
Wang G F, Yang Q, Tian Y T, et al. Construction of

- debris flow vulnerability assessment model-Taking Yangtang reach of Shimen Township in Bailong River basin as an example[J]. Study on Arid Area, 2019, 36(3):761-770.(in Chinese)
- [21] 向灵芝,崔鹏,陈洪凯,等.基于灾害熵的汶川震后道路泥石流敏感性分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2017,36(5):71-78.  
Xiang L Z, Cui P, Chen H K, et al. Sensitivity analysis of road debris flow after Wenchuan Earthquake based on disaster entropy[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2017, 36(5):71-78.(in Chinese)
- [22] 吕立群.青藏高原泥石流的形成运动过程研究[D].北京:清华大学(北京),2017.  
Lyu L Q. Study on the formation and movement of debris flow in the Qinghai Tibet Plateau [D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.(in Chinese)
- [23] 李睿祺,胡桂胜,陈宁生,等.川藏铁路沟谷型泥石流形成运动特征与工程危害研究[J].防灾减灾工程学报,2021,41(3):432-440,462.  
Li R Q, Hu G S, Chen N S, et al. Study on the movement characteristics and engineering hazards of Sichuan-Tibet Railway gully-type debris flow formation [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(3):432-440,462.(in Chinese)
- [24] 张静.河谷地貌分异下岷江上游泥石流流域演化趋势研究[D].绵阳:西南科技大学(四川),2021.  
Zhang J. Study on the evolution trend of debris flow basin in the upper reaches of Minjiang River under the differentiation of valley geomorphology [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2021.(in Chinese)
- [25] Strahler A N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography[J]. Geological Society of America Bulletin, 1952, 63(11): 1117-1142.
- [26] 庄树裕,李广杰,王钢城,等.灾害熵-可拓综合评判理论在泥石流危险性评价中的应用[J].安徽农业科学,2010,38(6):3075-3077.  
Zhuang S Y, Li G J, Wang G C, et al. Application of disaster entropy extension comprehensive evaluation theory in debris flow risk assessment[J]. Anhui Agricultural Science, 2010, 38(6):3075-3077.(in Chinese)
- [27] Clerici A, Perego S, Tellini C, et al. A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method[J]. Geomorphology, 2002, 48(4): 349-364.
- [28] 陈亮,孟高头,张文杰,等.信息量模型在县市地质灾害调查与区划中的应用研究——以浙江省仙居县为例[J].水文地质工程地质,2003(5):49-52.  
Chen L, Meng G T, Zhang W J, et al. Study on the application of information model in the investigation and zoning of geological hazards in counties and cities-taking Xianju County, Zhejiang Province as an Example [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2003 (5) : 49-52.(in Chinese)
- [29] 邹强,崔鹏,杨伟.G318川藏公路段泥石流危险性评价[J].山地学报,2013,31(3):342-348.  
Zou Q, Cui P, Yang W. Hazard assessment of debris flow in G318 Sichuan Tibet Highway Section[J]. Journal of Mountainous Regions, 2013, 31(3) : 342-348. (in Chinese)
- [30] 李雅辉,杨武年,杨鑫,等.基于流域系统的地貌信息熵泥石流敏感性评价[J].中国水土保持,2011(1):55-57.  
Li Y H, Yang W N, Yang X, et al. Sensitivity evaluation of debris flow based on geomorphic information entropy of watershed system [J]. Soil and Water Conservation in China, 2011(1):55-57.(in Chinese)
- [31] 丁继新,周圣华,杨志法,等.川藏公路然乌—东久段地质灾害定量评价——“地质灾害熵”概念的提出和应用[J].自然灾害学报,2005(4):79-84.  
Ding J X, Zhou S H, Yang Z F, et al. Quantitative evaluation of geological hazards in Ranwu Dongjiu Section of Sichuan Tibet Highway-Proposal and application of the concept of "geological hazard entropy"[J]. Journal of Natural Disasters, 2005(4):79-84.(in Chinese)
- [32] 贾涛.成兰铁路松潘段泥石流灾害风险评估[D].成都:成都理工大学(四川),2015.  
Jia T. Risk assessment of debris flow disaster in Songpan Section of Chengdu Lanzhou Railway [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [33] 李小龙,宋国虎,向灵芝,等.基于不同评价单元和灾害熵的泥石流危险性分析——以白龙江流域武都段为例[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(6):107-115.  
Li X L, Song G H, Xiang L Z, et al. Analysis of debris flow risk based on different evaluation units and disaster entropy: a case study of Wudu Section in Bailong River Basin [J]. Chinese Journal of Geological Hazards and Control, 2021, 32(6):107-115.(in Chinese)

(本文编辑:周小潭)