# 中國地質灾害共防治學秘

THE CHINESE JOURNAL OF GEOLOGICAL HAZARD AND CONTROL

中国科技核心期刊 《中国科学引用文数据库》来源期刊 Caj-cd规范获奖期刊

#### 基于沟域单元的康定市泥石流易发性评价

王 峰,杨 帆,江忠荣,吴 鄂,汪 冠

Susceptibility assessment of debris flow based on watershed units in Kangding City, Sichuan Province

WANG Feng, YANG Fan, JIANG Zhongrong, WU E, and WANG Guan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202205038

# 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 基于RBF神经网络信息量耦合模型的滑坡易发性评价

Landslide susceptibility assessment by the coupling method of RBF neural network and information value: A case study in Min Xian, Gansu Province

黄立鑫, 郝君明, 李旺平, 周兆叶, 贾佩钱 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 116-126

#### 基于不同评价单元和灾害熵的泥石流危险性分析

Hazard analysis of debris flows based on different evaluation units and disaster entropy: A case study in Wudu section of the Bailong river basin

李小龙, 宋国虎, 向灵芝, 罗亮, 唐良琴, 沈娜, 梁梦辉 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 107-115

#### 北京山区突发性地质灾害易发性评价

Assessment on the susceptibility of sudden geological hazards in mountainous areas of Beijing 罗守敬, 王珊珊, 付德荃 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 126–133

#### 泥石流致灾因子敏感性分析——以四川都江堰龙溪河流域为例

Sensitivity analysis of debris flow to environmental factors: a case of Longxi River basin in Dujiangyan, Sichuan Province 李彩侠, 马煜, 何元勋 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 32–39

#### 基于数值模拟的群发性泥石流危险性评价

Risk assessment of mass debris flow based on numerical simulation: An example from the Malu River basin in Min County 曹鹏, 侯圣山, 陈亮, 冯振, 王立朝, 李昂, 刘军友 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 100–109

#### 基于快速聚类-信息量模型的汶川及周边两县滑坡易发性评价

Landslide susceptibility assessment based on K-means cluster information model in Wenchuan and two neighboring counties, China 周天伦, 曾超, 范晨, 毕鸿基, 龚恩慧, 刘晓 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 137–150



DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202205038

王峰, 杨帆, 江忠荣, 等. 基于沟域单元的康定市泥石流易发性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(3): 145-156. WANG Feng, YANG Fan, JIANG Zhongrong, et al. Susceptibility assessment of debris flow based on watershed units in Kangding City, Sichuan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(3): 145-156.

# 基于沟域单元的康定市泥石流易发性评价

王 峰1,2,3, 杨 帆1,2,3, 江忠荣1,2,3, 吴 鄂1,2,3, 汪 冠1,2,3

(1. 四川省地质环境调查研究中心,四川成都 610081; 2. 四川省华地建设工程有限责任公司,四川成都 610081; 3. 四川省地质灾害防治工程技术研究中心,四川成都 610081)

摘要: 为研究康定市泥石流易发性,将康定市划分为 421 个沟域单元,采用 ArcGIS 软件中空间分析工具以及 SPSS 软件分别对评价指标内部叠加情况、评价指标与泥石流灾害相关性进行了分析,通过筛除剔除重叠度高、相关性差的评价因子,选取流域面积、melton 比率、形状系数比、流域崩滑密度、流域植被覆盖率、流域道路密度、流域平均径流侵蚀力指数、多年汛期平均降雨量等 8 个评价指标进行康定市泥石流地质灾害易发性评价。采用信息量模型与熵值法相结合的方法定量评价了泥石流易发性,熵值法定量确定了评价指标权重,计算出评价因子加权信息量值,将康定市泥石流划分为极高易发区、高易发区、中易发区以及低易发区 4 个等级。通过频率比模型、受试者工作特征曲线(ROC 曲线)对泥石流易发性评价结果进行检验,ROC 曲线 4UC 值为 0.842,表明评价模型精度较高。

关键词:泥石流;易发性评价;康定市;沟域单元;信息量

中图分类号: P642.23 文献标志码: A 文章编号: 1003-8035(2023)03-0145-12

# Susceptibility assessment of debris flow based on watershed units in Kangding City, Sichuan Province

WANG Feng<sup>1,2,3</sup>, YANG Fan<sup>1,2,3</sup>, JIANG Zhongrong<sup>1,2,3</sup>, WU E<sup>1,2,3</sup>, WANG Guan<sup>1,2,3</sup>

(1. Sichuan Geological Environment Survey and Research Center, Chengdu, Sichuan 610081, China; 2. Sichuan Huadi Building Engineering Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610081, China; 3. Sichuan Province Engineering Technology Research Center of Geohazard Prevention, Chengdu, Sichuan 610081, China)

Abstract: To study the susceptibility of debris flow in Kangding City, the study area was divided into 421 watershed units. Spatial analysis tools in ArcGIS software and SPSS software were used to analyze the internal superposition of evaluation indicators and the correlation between evaluation indicators and debris flows disasters. By screening out the evaluation factors with a high degree of overlap and poor correlation, eight evaluation factors were selected for debris flow susceptibility assessment. These included watershed unit area, melton rate, form factor ratio, collapse and landslides density of catchment, average fractional vegetation cover of catchment, road density of catchment, average stream power index of catchment, and average rainfall during the multi-year flood season. The susceptibility of debris flow was quantitatively evaluated by combining the information value model and the entropy method. The weights of the evaluation indicators were quantitatively determined by the entropy method, and the evaluation factor weighted information quantity value was calculated. Based on this, the debris flow susceptibility in Kangding City was divided into four grades: extremely high, high, medium and low. The results of debris flow susceptibility assessment were tested using the frequency ratio model and the Receiver-Operating Characteristic (ROC)

收稿日期: 2022-05-25; 修订日期: 2022-08-18 投稿网址: https://www.zgdzzhyfzxb.com/

curve, with an AUC curve of 0.842, indicating high accuracy of the evaluation model.

Keywords: debris flow; susceptibility assessment; Kangding City; watershed unit; information value

#### 0 引言

四川山区地质灾害发育,尤其是近年来强震作用下,斜坡坡体破碎,沟域松散固体物源增加,常在暴雨作用下发生大规模泥石流,如 2003 年 7 月 11 日发生的丹巴县邛山沟特大型泥石流,导致死亡和失踪人数达51人<sup>[1]</sup>,2009 年 7 月 23 日发生的康定市舍联乡干沟村响水沟泥石流造成54人死亡(或失踪)。2020 年 6 月 17 日丹巴县梅龙沟爆发大规模泥石流,一次性冲出固体物质42.7×10<sup>4</sup> m³,形成泥石流-堰塞坝-溃决洪水-滑坡灾害链,造成5 100余户2.12万余人被迫转移,直接经济损失达8亿元<sup>[2]</sup>。以上泥石流均造成了严重的经济财产损失,甚至人员伤亡,社会影响巨大,严重制约当地经济社会发展。开展泥石流易发性评价即为研究外界因素作用下易发生泥石流的重点沟域,是地质灾害风险管控工作的重要组成部分,具备极强的现实意义。

国内外学者主要从评价模型、评价指标的选取、评 价指标权重、评价结果检验等方面开展泥石流易发性 评价研究。部分学者采用单一的评价模型开展泥石流 易发性评价,如常用的信息量模型[3-7]、逻辑回归模 型[8-9]、确定性系数模型[10-11]、神经网络模型[12]、模糊 数学模型[13]等。更多学者采用多方法结合的方式开展 泥石流易发性评价,对比分析各个模型评价结果的合理 性、准确性,如 Zhang 等[14]采用神经网络、随机森林、决 策树与 XGBoost 结合对比分析了西藏日喀则地区泥石 流易发性评价结果,证明 XGBoost 模型结果最为合理。 Xiong 等[15]采用逻辑回归、随机森林、支持向量机等开 展了四川西南山区泥石流易发性评价。李坤等[16]采用 随机森林(RF)、支持向量机(SVM)两种机器学习算法, 基于流域单元完成了东川区泥石流易发性评价。徐艳 琴等[17]利用贡献权重叠加模型和基于确定性系数的确 定权重模型,进行了四川省攀西地区泥石流易发性评 价。于淼等[18]采用信息量模型、逻辑回归模型和信息 量—逻辑回归耦合模型分别完成了石棉县泥石流易发 性评价。陈怡等[19]利用确定性系数法和逻辑回归方法 定量分析评价了汶川震中区域震后泥石流易发性。

魏伦武等<sup>[20]</sup>采用不规则单元法将康定县城划分为 86个地质环境分区单元格,按"区内相似,区际相异"的 原则对康定县城开展危险性分区评价,研究方法主要以 定性分析为主,主观性较强。郑万模等<sup>[21]</sup>采用定性调查 分析的方法完成了康定县城单点地质灾害风险评价,研究对象仅为前期已经发生的地质灾害点,不能预测区域潜在可能发生地质灾害的重点区域。

前期研究成果主要以栅格单元为评价单元,泥石流不同于滑坡、崩塌等斜坡地质灾害,其完整灾害过程以沟域单元为基础,根据沟域功能分区一般可分为形成区、流通区以及堆积区,因此,采用栅格单元开展泥石流易发性评价不尽合理。另一方面,常用的信息量模型,没有考虑评价因子权重,导致评价结果与实际情况差异较大。

本文在对泥石流易发性影响因子统计分析的基础上,采用信息量模型与熵值法相结合的方式基于沟域单元开展康定市泥石流易发性评价,采用为康定地质灾害防治规划、国土空间管制规划提供参考。

### 1 研究区概况

康定市位于甘孜州东部,面积 1.14×10<sup>4</sup> km²,研究区属青藏高原亚湿润气候区,降雨量在地区分布上不平衡,多年平均降雨量 700~1 200 mm,区内发育水系主要为大渡河、雅砻江,康定市地处川西高原与东部盆地西缘山地接触带。山高谷深,由极高山至中山、由高原到河谷阶地等都有发育,山川水系严格受构造控制,地域分异明显,可划分为东部深切割高山、极高山峡谷区、西南部深切割高山峡谷区、西部丘状高原区三个地貌区。

区内出露地层主要为花岗岩、闪长岩以及变质砂岩、板岩等,康定市在区域大地构造上位于羌塘—三江构造区,玉龙达格—巴颜喀拉双向边缘前陆盆地褶皱带和杨子陆块西缘的结合部,活动断裂发育,处于鲜水河、龙门山及安宁河地震带交会部位,其中发震断裂鲜水河断裂带从康定县城穿过。复杂的地质环境条件导致研究区内泥石流灾害发育,共发育96处泥石流灾害点(图1)。

#### 2 数据来源与评价模型方法

#### 2.1 数据来源

本文主要数据为1:5万地形图、1:5万区域地质图、降雨数据、地震动加速度数据、植被覆盖数据以及历史泥石流灾害数据等,数据来源汇总详见表1。

#### 2.2 评价单元划分

根据泥石流的地貌单元特征,本文采用沟域单元

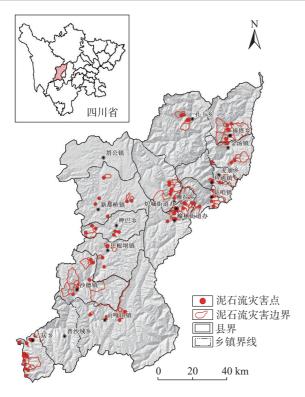


图 1 康定市泥石流分布图

Fig. 1 Distribution map of debris flow in Kangding City

# 表 1 数据来源和数据类型 Table 1 Sources and types of data

基础数据	数据来源	数据格式
DEM	县域1:5万DLG	栅格
交通、水系	县域1:5万DLG	矢量
地层、构造	县域1:5万区域地质图	矢量
降雨	康定市气象局	矢量
地震加速度	地震数据来自中国地震信息网 (http://www.csi.ac.cn/publish/main/837/1077/in dex.html)的1:400万中国地震动峰值加速度 区划图	矢量
Landsat8 数据	来源美国地质调查局(landsatlook.usgs.gov), 计算植被覆盖度	多波段栅格 数据
历史泥石流灾 害点	《康定市地质灾害风险调查评价报告》	矢量

开展研究区泥石流易发性评价,利用 ArcGIS 水文分析模块对区内 30m 精度的 DEM 数据进行沟域单元划分,再结合遥感影像进行校正,共划分 421 个沟域单元(图 2),沟域单元总面积 6 594.27 km²,占县域总面积 56.89%,面积区间为 0.09~96.08 km²,平均值 15.66 km²。沟域单元主要分布在大渡河两岸以及康定西部雅砻江流域高山峡谷区,区内切割较深,岸坡陡峻,常发生大规模泥石流,西部丘状高原区地形相对平缓,主要少量发育坡面型泥石流,冲沟不发育,因此,沟域单元划分较少。

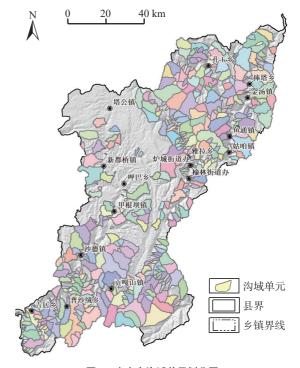


图 2 康定市沟域单元划分图

Fig. 2 Watershed units division map of Kangding City

#### 2.3 评价模型方法

本文采用信息量模型与熵值法相结合的方法开展研究泥石流易发性评价,信息量模型是通过特定评价单元内某种因素作用下地质灾害发生频率与区域地质灾害发生频率相比较,是一种基于统计数据的分析方法,通俗易懂,科学合理。采用熵值法分析各评价指标的权重,考虑了不同评价指标对泥石流易发性的贡献度大小。

#### 2.3.1 信息量模型

泥石流灾害的形成受多种因素影响,信息量模型反映了一定地质环境下最易致灾因素及其细分区间的组合。具体是通过特定评价单元内某种因素作用下泥石流发生频率与区域泥石流发生频率相比较实现的。对应某种因素特定状态下的地泥石流信息量公式可用式(1)表示:

$$I_{Aj \to B} = \ln \frac{N_j/N}{S_j/S} \tag{1}$$

式中:  $I_{Aj\to B}$  ——对应因素  $A \setminus j$  状态(或区间)下泥石流 B 发生的信息量;

 $N_j$ ——对应因素 A, j 状态(或区间)下泥石流分布的单元数;

N——研究区已知有泥石流分布的单元总数;

 $S_i$ ——因素  $A \setminus j$  状态(或区间)分布的单元数;

S——研究区评价单元总数。

当  $I_{Aj\to B}$  >0 时,反映了对应因素 A、j 状态(或区间)下泥石流发生倾向的信息量较大,泥石流发生的可能性较大,或者说利于泥石流发生;当  $I_{Aj\to B}$  <0 时,表明因素 A、j 状态(或区间)条件下,不利于泥石流发生;当  $I_{Aj\to B}$  = 0 时,表明因素 A、j 状态(或区间)不提供有关泥石流发生与否的任何信息,即因素 A、j 状态(或区间)可以剔除掉,排除其作为泥石流灾害评价因子。

由于每个评价单元受众多因素的综合影响,各因素 又存在若干状态,各状态因素组合条件下泥石流灾害发 生的总信息量可用式(2)确定:

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

式中: *I*——对应特定单元泥石流发生的总信息量, 指示 地质灾害发生的可能性:

 $N_i$ ——对应特定因素、第i 状态(或区间)条件下的 泥石流面积或点数;

 $S_i$ ——对应特定因素、第i状态(或区间)的分布面积;

N——研究区泥石流总面积或总点数;

S——研究区总面积;

n——所选取的评价因子的总数。

#### 2.3.2 熵值法

熵权法是常用的一种求权重的方法。它是指一个随机变量与某一组随机变量间线性相依性的度量。熵值法根据各指标变异程度确定贡献度,其原理是数据变异性越大,熵越大,则指标提供的信息量越小,该指标贡献度就越小。熵值法是一种客观赋权法,避免人为因素带来的偏差,其根据各评价指标所提供的信息大小来确定权重大小,具体步骤如下[22]:

(1)定义熵, 具体表达式见式(3):

$$E_{j} = -k \sum_{i=1}^{n} S_{ij} \ln(S_{ij})$$
 (3)

式中: i——各二级影响因子;

j——各一级影响因子;

 $S_{ij}$ ——各一级影响因子中二级影响因子区域内评价指标的归一化值,且  $S_{ii} \in [0,1]$ ;

 $E_i$ ——第j项一级影响因子的熵值;

k——常数,  $k = 1/\ln(n)$ , 其中 n 为各二级影响因子数。 (2) 求熵权, 公式为:

$$W_{j} = \frac{(1 - E_{j})}{\sum_{i=1}^{m} (1 - E_{j})}$$
 (4)

式中:  $W_j$ ——各一级影响因子权重系数; i——一级影响因子数量。

## 3 评价指标体系

#### 3.1 评价指标相关性分析

泥石流是在特定地质环境条件下孕育的特殊地质灾害,一般其形成条件可分为地形条件、物源条件以及水源条件等,三者缺一不可,根据研究区内地质灾害孕灾地质条件分析、前期学者泥石流易发性评价实践经验,初步厘定了15个评价指标,按其功能特征地形条件指标主要包括:流域面积、流域平均坡度、流域地形起伏度、沟道纵坡降、melton 比率、形状系数比、流域沟壑密度等7个;物源条件指标包括:工程地质岩组、流域断层密度、流域崩滑密度、流域植被覆盖率(NDVI)、流域道路密度、地震动峰值加速度(PGA)、流域平均径流侵蚀力指数(SPI)等7个;水源条件指标为流域多年汛期平均降雨量,研究区主要考虑降雨型泥石流易发性,不考虑冰湖溃决等小概率事件导致的泥石流灾害(图3)。

#### 3.1.1 评价指标内部相关性分析

分析厘定出的 15 个评价指标可能存在叠加影响作用,对泥石流发生的贡献作用是类似的,均纳入评价指标体系导致评价结果出现误差,采用 ArcGIS 软件中空间分析多元分析中的波段集统计工具开展评价指标内部相关性分析,剔除相互叠加的评价指标,保持各评价指标的独立性,当相关性系数>0.3 时,可以认为相关性较大[23],评价指标相关性分析结果详见表 2。表中流域平均坡度(B)、流域地形起伏度(C)、沟道纵坡降(D)等3个评价指标与其他因子相关性系数存在大于 0.3 情况,尤其是沟道纵坡降与 melton 比率相关性系数达到 0.88,说明两个评价因子是高度重叠的,因此,根据评价指标内部相关性系数分析结果,剔除流域平均坡度、流域地形起伏度、沟道纵坡降等 3 个评价指标。

# 3.1.2 评价指标与泥石流相关性分析

为进一步定量分析评价因子与泥石流灾害是否发生的相关性,科学合理选择评价指标,剔除对泥石流发生贡献度小的评价因子,康定市发育 96 处泥石流灾害点,随机选择 100 处非泥石流沟域单元,共计 196 个沟域单元,提取沟域属性信息,采用 SPSS 软件进行评价指标与泥石流之间的相关性分析。因变量 Y 为二分类变量,其值为 0 或 1,其中 0 代表非泥石流沟域,1 代表已发生的泥石流沟域,评价因子为自变量。选择常用的斯皮尔曼等级相关系数(spearman 相关系数)进行相关

表 2 评价指标内部相关性系数

Table 2 Internal correlation coefficients of evaluation factors

	•		•	•		-	-		•						
指标	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	0
A	1														
B	-0.13	1													
C	0.22	0.72	1												
D	-0.62	0.56	0.31	1											
E	-0.60	0.65	0.42	0.88	1										
F	-0.25	-0.03	-0.14	0.48	0.05	1									
G	-0.09	-0.13	-0.20	-0.13	0.01	-0.24	1								
H	0.00	-0.40	-0.51	-0.23	-0.31	0.08	0.05	1							
I	-0.08	0.03	0.06	0.06	0.08	-0.02	0.21	-0.18	1						
J	-0.26	0.32	0.31	0.35	0.16	-0.09	0.27	-0.31	0.32	1					
K	-0.08	0.40	0.24	0.19	0.24	-0.06	0.26	-0.25	0.21	0.25	1				
L	-0.02	-0.15	-0.15	-0.07	-0.05	-0.04	0.26	0.01	0.10	0.25	0.21	1			
M	-0.12	-0.06	0.11	0.17	0.16	0.06	0.01	-0.33	-0.05	0.13	0.07	0.06	1		
N	0.15	-0.16	0.16	-0.52	-0.49	-0.23	-0.01	-0.10	0.01	-0.12	-0.01	0.04	-0.01	1	
O	0.02	-0.33	-0.16	-0.12	-0.12	-0.03	0.26	-0.19	-0.03	-0.01	0.00	0.18	0.20	0.05	1

注:表中4为流域面积;B为流域平均坡度;C为流域地形起伏度;D为沟道纵坡降;E为melton比率;F为形状系数比;G为流域沟壑密度;H为工程地质岩组;I为流域断层密度;J为流域崩滑密度;K为NDVI;L为流域道路密度;M为PGA;N为SPI;O为多年汛期平均降雨量。

性分析,取值-1到1,正数表示评价指标与泥石流发生呈正相关关系,负数则呈负相关关系,若值为0,则两者之间无相关关系,其绝对值越大,表明两者相关性越强。显著性为相关显著性系数,它表明 spearman 等级相关系数是否具有统计学意义。

从表 3 评价指标与泥石流相关性分析结果可知,流域沟壑密度(X4)、工程地质岩组(X5)、流域断层密度(X6)以及地震动峰值加速度(X10)等 4 个评价因子显著性系数均明显大于 0.05, 表明这 4 个因子与泥石流相关性较差,应将其剔除,因此,最终选定流域面积、melton 比率、形状系数比、流域崩滑密度、NDVI、流域道路密度、SPI、多年汛期平均降雨量等 8 个评价指标进行康定市泥石流地质灾害易发性评价分析(图 3)。

#### 3.2 评价指标分级

将评价因子进一步分级,并分析各级评价因子泥石 流发育数量、面积,为计算信息量提供数据。

#### 3.2.1 流域面积

泥石流汇水面积为泥石流发生提供汇水条件,在分析现有泥石流点流域面积分布的基础上进行指标分级,将流域面积划分为<0.2 km²、0.2~5 km²、5~10 km²、10~50 km²和>50 km²五个评价区间。康定市泥石流的流域面积主要为5 km²以内,其中流域面积小于5 km²的泥石流沟有55条,占总数的57.29%,大于50 km²的泥石流较少,仅有1条,泥石流点密度随着流域面积的

#### 表 3 评价指标与泥石流相关性

Table 3 The correlation between evaluation factors and debris flow

白衣目	因变量Y					
自变量	spearman相关系数	显著性				
Xl	-0.247**	0.000				
<i>X</i> 2	0.221**	0.000				
<i>X</i> 3	-0.166**	0.001				
<i>X</i> 4	0.038	0.438				
<i>X</i> 5	-0.026	0.596				
<i>X</i> 6	0.009	0.858				
<i>X</i> 7	0.396**	0.000				
X8	0.180**	0.000				
<i>X</i> 9	0.378**	0.000				
X10	0.031	0.520				
<i>X</i> 11	-0.187**	0.000				
<i>X</i> 12	0.165**	0.001				

注:表中Y为泥石流是否发生,X1为流域面积,X2为melton比率,X3为形状系数比,X4为流域沟壑密度,X5为工程地质岩组,X6为流域断层密度,X7为流域崩滑密度,X8为流域植被覆盖率(NDVI),X9为流域道路密度,X10为地震动峰值加速度(PGA),X11为流域平均径流侵蚀力指数(SPI),X12为多年汛期平均降雨量。\*\*,在置信度(双侧)为0.01时,相关性是显著的。\*,在置信度(双侧)为0.05时,相关性是显著的。

增加,存在逐渐降低的趋势,见图 4(a)。

#### **3.2.2** melton 比率

melton 比率(与地貌信息熵类似)是反映一个流域 地势的指标,该值越大则表明流域内越陡峻,反之越平 缓。该指标主要表征泥石流搬运泥石流固体物质的能 力,其计算公式如式(4)所示:

$$R_{M} = \frac{\mathrm{d}H}{\sqrt{A}} \tag{5}$$

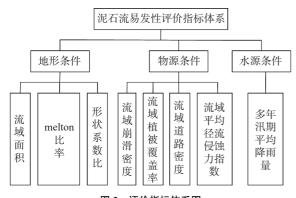


图 3 评价指标体系图

Fig. 3 Evaluation factors system chart

式中: dH——流域相对高差/m;

A——流域面积/ $m^2$ 。

将康定市流域 melton 比率分为<0.3、 $0.3 \sim 0.5$ 、 $0.5 \sim 0.7$ 、 $0.7 \sim 1$  以及>1 等 5 个级别, 见图 5(b), 统计分析表明, 随着 melton 比率增加泥石流点密度逐渐增大, 在 melton 比率大于 1 的区间内泥石流密度最大, 达到 27.28 个/100 km², 见图 4(b)。

#### 3.2.3 形状系数比

流域形状系数比反映了流域内地表径流的水动力 特征和汇流条件。在流域形态上,若长宽比接近1,则 说明汇流条件好;流域形状系数比越大,越有利于松散

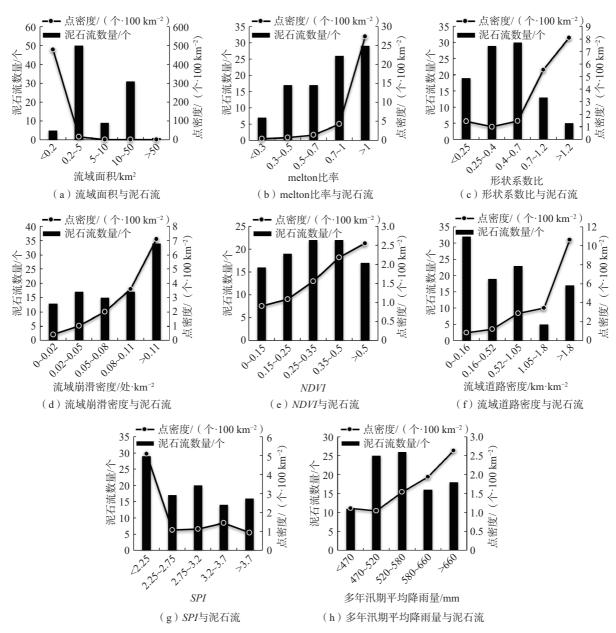


图 4 评价因子与泥石流关系统计图

Fig. 4 Statistical diagram of the relationship between evaluation factors and debris flow

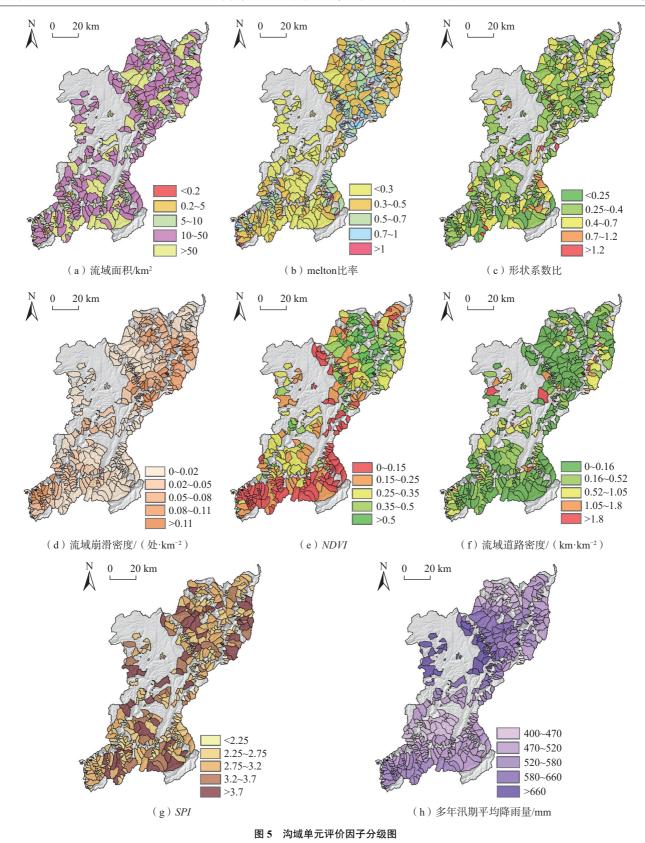


Fig. 5 Classification diagram of evaluation factors of watershed units

物质启动形成泥石流。形状系数比属于无量纲参数,用式(5)表示:

$$F = \frac{A}{L^2} \tag{6}$$

#### 式中: A---流域面积/km²;

# L——主沟长/km。

将形状系数比划分为<0.25、0.25~0.4、0.4~0.7、0.7~1.2以及>1.2等5个等级,见图5(c),整体来看,形状系数比与泥石流点密度呈正相关的趋势,在形状系数比大于1.2的区间内泥石流密度最大,达到8.09个/100km²,见图4(c)。

#### 3.2.4 流域崩滑密度

采用流域滑坡、崩塌密度表征泥石流的物源条件, 其值为沟域单元崩塌、滑坡密度加权算术平均值,流域 崩滑密度越大,流域内可参与泥石流活动松散固体物源 越多,发生泥石流的概率越大,将流域崩滑密度分为 0~0.02、0.02~0.05、0.05~0.08、0.08~0.11 和>0.11 处/ km²等5级,见图5(d)。根据图4(d),泥石流点密度随 流域崩滑密度逐步增大,最大达到7.11个/100 km²。

#### 3.2.5 流域植被覆盖率(NDVI)

植被对泥石流的发育和稳定性具有重要作用,植被覆盖低的区域,河流侵蚀作用强,土体稳定性差,大量岩石裸露、风化严重,容易产生松散固体物源,导致泥石流易发。将研究区 NDVI 分为 0~0.15、0.15~0.25、0.25~0.35、0.35~0.5、>0.5 等 5 个等级,见图 5(e)。流域植被覆盖率越大,泥石流点密度越大,见图 4(e),不符合认知情况,究其原因,主要为研究区泥石流受到植被覆盖率与地形地貌因子综合影响,植被覆盖率大的区域为高山峡谷地貌区,易发生泥石流灾害,植被覆盖率低区域则为丘状高原区,地形平缓,不易发生泥石流。

#### 3.2.6 流域道路密度

流域道路密度为流域内道路长度与流域面积的比值,研究区处于西部山区,道路修建切坡常诱发地质灾害发生,另外,道路修建会产生大量弃渣,易参与泥石流活动。将研究区流域道路密度评价因子分为0~0.16、0.16~0.52、0.52~1.05、1.05~1.8和>1.8km/km²五个等级,见图5(f),统计分析流域道路密度与泥石流关系,随着流域道路密度增大泥石流发育密度整体增大趋势,泥石流密度从0.82个/100km²增加至10.62个/100km²,见图4(f)。

#### 3.2.7 流域平均径流侵蚀力指数(SPI)

SPI 主要反映沟域地表受到地表径流侵蚀力的强弱,其值越大,说明受到的侵蚀作用越强,反之则越弱,其表达式见式(6)。

$$SPI = \ln\left(\frac{A_{c}}{L_{c}}\tan\beta\right) \tag{7}$$

式中: $A_c$ ——待计算栅格单元上游汇水面积/ $m^2$ ;

#### $L_c$ ——栅格单元宽度/m;

 $tan\beta$ ——待计算栅格坡度正切值。

SPI 为无量纲参数,参考自然间段法划分为<2.25、2.25~2.75、2.75~3.2、3.2~3.7以及>3.7五个等级见图 5(g),从图 4(g)可知,泥石流数量在五个区间近似均匀部分,但点密度呈减小的趋势,在 SPI 值小于 2.25 的区间内,泥石流点密度最大,为 5.1 个/100 km²。这主要是由区内泥石流发育特征控制, SPI 值较大的沟域单元主要为小型坡面冲沟型泥石流,流域整体纵坡较大,地表径流侵蚀力强,而 SPI 值较小的高山峡谷区沟谷型泥石流,相比而言,流域面积较大,纵坡较小。

#### 3.2.8 多年汛期平均降雨量

降雨量是泥石流发生的重要水源条件,是泥石流体的重要组成成分之一,是泥石流暴发不可缺少的条件。统计分析研究将康定市多年汛期平均降雨量(5—10月份)分为<470 mm、470~520 mm、520~580 mm、580~660 mm 以及>660 mm 以及>660 mm 等 5 级见图 5(h)。泥石流点密度随着降雨量增大而增大,最大达到 2.63 个/100 km²见图 4(h)。

#### 4 泥石流易发性评价

#### 4.1 评价指标权重

本文采用熵值法确定评价指标权重,在对评价指标数据归一化处理的基础上采用 SPSS 软件进行计算。首先需要对评价指标数据进行归一化处理,归一化分为正向指标、负向指标,详见式(7)、式(8),根据评价指标与泥石流相关关系确定,若正相关采用正向指标,负相关则采用负向指标。经过分析流域面积与 SPI 采用负相关指标,其余 6个评价指标采用正向指标。归一化处理后根据式(3)计算各个评价指标信息熵,最后根据式(4)计算权重,结果见表 4,其中流域道路密度的权重最大,达到 0.212,说明研究区人类工程活动对泥石流的影响较大,权重最小的是流域平均径流侵蚀力指数,其值为 0.069,对泥石流影响相对最小。

正向指标数据归一化处理:

$$Y_{ij} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \tag{8}$$

负向指标数据归一化处理:

$$Y_{ij} = \frac{X_{\text{max}} - X_{ij}}{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}} \tag{9}$$

式中: $X_{ij}$ ——二级评价因子数据;

 $X_{\text{max}}$ ——二级评价因子最大值;

 $X_{\min}$ ——二级评价因子最小值。

表 4 评价指标权重及加权信息量值

Table 4 Evaluation factors weights and its weighted information value

因子分类	一级评价因子	序号	二级评价因子	泥石流 数量/个	沟域单元 个数/个	泥石流密度/ (个·km <sup>-2</sup> )	信息量值	权重	加权信息量值
		1	<0.2	5	7	477.55	1.141 8		0.127 9
		2	0.2 ~ 5	50	134	14.65	0.492 5		0.055 2
	流域面积/km²	3	5 ~ 10	9	84	1.5	-0.755 3	0.112 0	-0.084 6
		4	10 ~ 50	31	171	0.79	-0.229 4		-0.025 7
		5	>50	1	25	0.06	-1.740 6		-0.194 9
		1	<0.3	7	57	0.32	-0.618 9	0.078 0	-0.048 3
		2	$0.3 \sim 0.5$	17	98	0.7	-0.273 5		-0.021 3
地形条件	melton比率	3	$0.5 \sim 0.7$	17	106	1.33	-0.351 9		-0.027 5
		4	0.7 ~ 1	26	104	4.2	0.092 0		0.007 2
		5	>1	29	56	27.28	0.820 2		0.064 0
		1	< 0.25	19	90	1.44	-0.077 1		-0.006 8
		2	$0.25 \sim 0.4$	29	163	1	$-0.248\ 2$		-0.021 8
	形状系数比	3	$0.4 \sim 0.7$	30	135	1.45	-0.025 8	0.088 0	-0.002 3
		4	0.7 ~ 1.2	13	25	5.53	0.824 4		0.072 5
		5	>1.2	5	8	8.09	1.008 3		0.088 7
-	流域崩滑密度/(处·km <sup>-2</sup> )	1	0 ~ 0.02	13	157	0.4	-1.013 0		-0.184 4
		2	$0.02 \sim 0.05$	17	107	1.02	-0.361 3	0.182 0	-0.065 8
		3	0.05 ~ 0.08	15	57	2	0.143 3		0.026 1
		4	0.08 ~ 0.11	17	36	3.6	0.728 0		0.132 5
		5	>0.11	34	64	7.11	0.845 8		0.153 9
		1	0 ~ 0.15	16	131	0.91	-0.624 3	0.097 0	-0.060 6
		2	0.15 ~ 0.25	19	87	1.09	-0.043 2		-0.004 2
	NDVI	3	0.25 ~ 0.35	22	71	1.56	0.306 6		0.029 7
		4	0.35 ~ 0.5	22	62	2.18	0.442 2		0.042 9
助流反归		5	>0.5	17	70	2.55	0.063 0		0.006 1
物源条件		1	0 ~ 0.16	32	253	0.82	-0.589 4		-0.124 9
		2	0.16 ~ 0.52	19	76	1.21	0.092 0		0.019 5
	流域道路密度/(km·km <sup>-2</sup> )	3	0.52 ~ 1.05	23	57	2.86	0.570 7	0.212 0	0.121 0
	,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	4	1.05 ~ 1.8	5	13	3.44	0.522 8	0.212 0	0.110 8
		5	>1.8	17	22	10.62	1.220 5		0.258 7
		1	<2.25	29	144	5.1	-0.124 2		-0.008 6
		2	2.25 ~ 2.75	17	118	1.07	-0.459 2		-0.031 7
	SPI	3	2.75 ~ 3.2	20	81	1.13	0.079 6	0.069 0	0.005 5
		4	3.2 ~ 3.7	14	37	1.46	0.506 4		0.034 9
		5	>3.7	16	41	0.94	0.537 3		0.037 1
	多年汛期平均降雨量/mm	1	<470	11	69	1.11	-0.357 9		-0.058 0
		2	470 ~ 520	25	145	1.04	-0.279 6		-0.045 3
水源条件		3	520 ~ 580	26	112	1.54	0.017 9	0.162 0	0.002 9
		4	580 ~ 660	16	48	1.94	0.379 7	0.102 0	0.061 5
		5	>660	18	47	2.63	0.518 5		0.084 0

## 4.2 评价指标信息量

采用信息量模型与熵值法相结合的方法确定评价指标信息量,充分考虑了不同评价指标对泥石流的贡献作用,加权信息量值计算公式如式(10)所示。

$$I = \sum_{i=1}^{n} (W_i \times I_i) \tag{10}$$

式中: Wi——熵值法确定的评价因子权重;

 $I_i$ ——信息量模型确定的二级评价因子信息量; n——评价因子数量。

加权信息量值计算结果详见表 4。

#### 4.3 泥石流易发性评价结果

根据上述8个评价指标信息量值采用ArcGIS软件进行评价因子信息量叠加计算,叠加信息量值越大表明评价沟域单元发生泥石流灾害的可能性越大,研究区

421 处沟域单元汇总信息量值为-0.630 至 0.636, 根据自然断点法(natural break) 将易发性信息量分为 4 个等级, 其中极高易发区 [0.090, 0.636]、高易发区 [-0.144, 0.090]、中易发区 [-0.357, -0.144]、低易发区 [-0.630, -0.357], 为了以整个县域单元进行分析评价, 未划分沟域单元区域沟道不发育, 不具备发生泥石流的地形条件, 泥石流易发性等级直接划分为低易发区, 综合整理后得到康定市泥石流易发性评价图(图 6)。

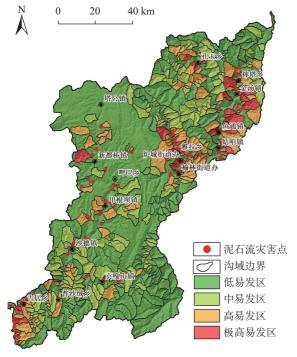


图 6 康定市泥石流易发性评价图

Fig. 6 Susceptibility evaluation map of the debris flow in Kangding City

从表 5 可知, 极高易发区面积 528.85 km², 占研究区总面积的 4.56%, 共发育 49 处泥石流, 泥石流占比达到 51.04%; 高易发区面积 1 597.19 km², 面积占比为13.78%, 发育 31 处泥石流, 泥石流占比 32.29%; 中易发区面积 1 988.87 km², 面积占比为 17.16%, 发育 12 处泥石流, 泥石流占比 12.50%; 低易发区面积 7 476.75 km², 占康定市总面积的 64.50%, 仅发育 4 处泥石流点。因此, 康定市泥石流低易发区占比最大。极高、高易发区主要分布在孔玉乡、鱼通镇、姑咱镇等大渡河两岸极高山、高山峡谷区, 康定县城及其周边区域以及县域南西部雅砻江流域高山峡谷区。这些区域地形陡峻, 断裂构造发育、岩土体结构破碎, 松散固体物源丰富, 同时, 区内人类工程活动强烈, 工程建设对区内自然环境破坏较大, 在降雨作用下常爆发大规模泥石流。

表 5 泥石流易发性评价结果统计表
Table 5 Statistical table of debris flow susceptibility
evaluation results

		_				
易	发性等级	面积/km²	面积 百分比/%	泥石流点 数量/个	泥石流 百分比/%	频率比
极	高易发区	528.85	4.56	49	51.04	11.19
ř	高易发区	1 597.19	13.78	31	32.29	2.34
F	中易发区	1 988.87	17.16	12	12.50	0.73
1	低易发区	7 476.75	64.50	4	4.17	0.06

#### 5 评价结果检验与分析

为分析康定市泥石流易发性评价的合理性与准确性,采用频率比模型<sup>[17]</sup>分析历史泥石流灾害与易发性评价结果的对应性,泥石流灾害频率比即为分级区间内泥石流所占总泥石流点的百分比与区间内面积占比的比值,能够评价易发性分区级别与历史泥石流灾害点分布的吻合度。若极高、高易发区频率比较大,低易发区频率比较小,则说明评价结果是合理的。

从表 5 可知, 康定市泥石流极高易发区频率比最大, 为 11.19, 远大于低易发区的 0.06, 且随着易发性等级增高频率比增大, 说明泥石流易发性评价结果与实际情况相符, 是可信的。

受试者工作特征曲线(receiver-operating characteristic, ROC)常被用来评价二分类数据结果可靠性,是以正确预测的泥石流流域与所有泥石流流域的比值纵坐标,以预测的非泥石流流域数量与所有非泥石流流域数量的比值为横坐标绘制的曲线。实践中常用曲线下面积(area under curve, AUC)对模型的性能进行评价, AUC 值越大说明评价结果精度越高,根据图 7 所示结果,康定市泥石流易发性评价模型 AUC 值为 0.842,说明模型准确性较好,评价结果是可靠的。

#### 6 结论

(1)本文采用信息量模型与熵值法相结合的方法开展研究区泥石流易发性评价,评价单元为沟域单元,更好地反映了泥石流的地貌单元特征,评价结果可利用程度更高,能更好地指导康定市地质灾害防治工作。

(2)采用 ArcGIS 软件中空间分析工具以及 SPSS 软件分别对评价指标内部叠加情况、评价指标与泥石流灾害相关性进行了分析,通过筛除剔除重叠度高、相关性差的评价因子,选取流域面积、melton 比率、形状系数比、流域崩滑密度、NDVI、流域道路密度、SPI、多年汛期平均降雨量等 8 个评价指标进行康定市泥石流地

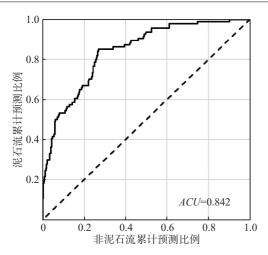


图 7 泥石流易发性评价模型 ROC 曲线

Fig. 7 ROC curve of the debris flow susceptibility assessment model 质灾害易发性评价。

- (3)采用自然断点法将易发性信息量分为极高易发区、高易发区、中易发区以及低易发区 4 个等级, 极高易发区面积 528.85 km², 高易发区面积 1 597.19 km², 合计占研究区面积的 18.34%, 共发育 80 处泥石流, 占总量的 83.33%。低易发区面积 7 476.75 km², 占康定市总面积的 64.50%, 仅发育 4 处泥石流点。
- (4)采用频率比模型、ROC曲线对泥石流易发性评价结果进行检验,康定市泥石流极高易发区频率比最大,远大于低易发区,且随着易发性等级增高频率比增大;ROC曲线 AUC 值为 0.842,说明模型准确性较好,评价结果是可靠的。
- (5)泥石流极高、高易发区地形陡峻,断裂构造发育、岩土体结构破碎,松散固体物源丰富,同时,区内人类工程活动强烈,工程建设对区内自然环境破坏较大,在降雨作用下常爆发大规模泥石流。应做好易发区内泥石流调查评价、工程防治、监测预警工作,切实保证人民财产安全。

#### 参考文献(References):

- [1] 陈宁生, 高延超, 李东风, 等. 丹巴县邛山沟特大灾害性泥石流汇流过程分析 [J]. 自然灾害学报, 2004, 13(3): 104-108. [CHEN Ningsheng, GAO Yanchao, LI Dongfeng, et al. Conflux process analysis of desastrous debris flow in Qiongshan Ravine, Danba, Sichuan Province [J]. Journal of Natural Disasters, 2004, 13(3): 104-108. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 文强, 胡卸文, 刘波, 等. 四川丹巴梅龙沟 "6·17" 泥石流成灾机理分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(3): 23-30. [WEN Qiang, HU Xiewen, LIU Bo, et al. Analysis on the mechanism of debris flow in Meilong valley in

- Danba County on June 17, 2020 [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(3): 23 30. (in Chinese with English abstract) ]
- [3] 陈永萍,周强,陈琼,等.高山、极高山地区地质灾害易发性评价——以昌都市为例 [J].高原科学研究,2021(4):35-43. [CHEN Yongping, ZHOU Qiang, CHEN Qiong, et al. Evaluation on the susceptibility of geological hazards in the high mountain and extreme high mountain areas: A case study in the Qamdo [J]. Plateau Science Research, 2021(4):35-43. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 周粤,王运生,赵逊,等.怒江支流迪麻洛河流域泥石流易发性评价 [J]. 地质通报, 2022, 41(4): 702 712. [ZHOU Yue, WANG Yunsheng, ZHAO Xun, et al. Susceptibility assessment of debris flow in Dimaluo River, branch of Nujiang River [J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(4): 702 712. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 张以晨,秦胜伍,翟健健,等.基于信息量的长白山地区 泥石流易发性评价[J].水文地质工程地质,2018,45(2): 150-158. [ZHANG Yichen, QIN Shengwu, ZHAI Jianjian, et al. Susceptibility assessment of debris flow based on GIS and weight information for the Changbai mountain area [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2018, 45(2): 150-158. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 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. [LIU Lintong, MENG Xingmin, GUO Peng, et al. Assessment of debris flow hazards in the Bailongjiang River based on the watershed unit and information value method [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2017, 53(3): 292-298. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 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 Jingsong, WANG Feng, CHENG Yingjian, et al. Study on the risk assessment of geological disasters in alpine valley area: A case study in Aba County, Sichuan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(3): 134-142. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 吴赛儿,陈剑, ZHOU Wendy, 等. 基于逻辑回归模型的泥石流易发性评价与检验——以金沙江上游奔子栏—昌波河段为例 [J]. 现代地质, 2018, 32(3): 611-622. [WU Saier, CHEN Jian, ZHOU Wendy, et al. Debris-flow susceptibility assessment and validation based on logistic regression model: An example from the benzilan-changbo segment of the upper Jinshajiang River [J]. Geoscience, 2018, 32(3): 611-622. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 杜国梁,杨志华,袁颖,等.基于逻辑回归-信息量的川藏

- 交通廊道滑坡易发性评价 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 102-111. [DU Guoliang, YANG Zhihua, YUAN Ying, et al. Landslide susceptibility mapping in the Sichuan-Tibet traffic corridor using logistic regression-information value method [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2021, 48(5): 102-111. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 李益敏,李驭豪,赵志芳.基于确定性系数模型的泸水市泥石流易发性评价 [J].水土保持研究,2019,26(4):336-342. [LI Yimin, LI Yuhao, ZHAO Zhifang. Assessment on susceptibility of debris flow in Lushui based on the certain factor model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(4):336-342. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 李益敏, 杨蕾, 魏苏杭. 基于小流域单元的怒江州泥石流易发性评价 [J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(10): 2419-2428. [LI Yimin, YANG Lei, WEI Suhang. Susceptibility assessment of debris flow in Nujiang befecture based on the catchment [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(10): 2419-2428. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 王鑫, 赵康, 蒋叶林, 等. 基于BP神经网络的怒江流域泥石流易发性动态区划模型研究 [J]. 化工矿物与加工, 2022, 51(1): 39-43. [WANG Xin, ZHAO Kang, JIANG Yelin, et al. Study on dynamic zoning model of mud-rock flow susceptibility in Nujiang Basin based on BP neural network [J]. Industrial Minerals & Processing, 2022, 51(1): 39-43. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 田宇鵬,李玉荣,范辉.模糊数学和权的最小平方法在西藏波密县白龙沟泥石流易发性评价中的应用[J]. 地质找矿论丛, 2021, 36(4): 546-552. [TIAN Yupeng, LI Yurong, FAN Hui. Application of fuzzy math and weighted least-square to debris flow susceptibility evaluation in Bailong Gully of Bomi County of Tibet [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2021, 36(4): 546-552. (in Chinese with English abstract)]
- [ 14 ] ZHANG Yonghong, GE Taotao, TIAN Wei, et al. Debris flow susceptibility mapping using machine-learning techniques in Shigatse area, China [ J ] . Remote Sensing, 2019, 11(23): 2801.
- [ 15 ] XIONG Ke, ADHIKARI B R, STAMATOPOULOS C A, et al.

  Comparison of different machine learning methods for debris
  flow susceptibility mapping: A case study in the Sichuan
  Province, China [ J ] . Remote Sensing, 2020, 12(2): 295.
- [16] 李坤, 赵俊三, 林伊琳, 等. 基于RF和SVM模型的东川泥石流易发性评价研究 [J]. 云南大学学报(自然科学版), 2022, 44(1): 107-115. [LI Kun, ZHAO Junsan, LIN Yilin, et al. Assessment of debris flow susceptibility in Dongchuan based on RF and SVM models [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2022, 44(1): 107-115. (in Chinese with English abstract)]

- [17] 徐艳琴, 白淑英, 徐永明. 基于两种方法的攀西泥石流易发性评价对比分析 [J]. 水土保持研究, 2018, 25(3): 285-291. [XU Yanqin, BAI Shuying, XU Yongming. Comparative analysis of debris flow susceptibility assessment based on two methods in Panxi District [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(3): 285-291. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 于森,邢会歌,胡士瑜.基于信息量-逻辑回归模型的泥石流易发性评价——以四川省石棉县为例 [J].人民长江,2021,52(12):107-114. [YU Miao, XING Huige, HU Shiyu. Debris flow susceptibility assessment based on information value and logistic regression coupled model: Case of Shimian County, Sichuan Province [J]. Yangtze River, 2021, 52(12):107-114. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 陈怡, 范宣梅. 震后地质灾害易发性评价——以映秀震区为例 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(9): 3516-3527. [CHEN Yi, FAN Xuanmei. Susceptibility assessment of postearthquake geo-hazard in the epicentral area of the 2008 Wenchuan eearthquake near Yingxiu Town [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(9): 3516-3527. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 魏伦武, 王德伟, 丁俊, 等. 四川康定城地质灾害危险性分区评价 [J]. 沉积与特提斯地质, 2006, 26(2): 81-87. [WEI Lunwu, WANG Dewei, DING Jun, et al. Risk assessment of geological hazards in Kangding County town, western Sichuan [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2006, 26(2): 81-87. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 郑万模, 巴仁基, 刘宇杰, 等. 四川康定城市地震地质及地质灾害风险评价 [J]. 沉积与特提斯地质, 2012, 32(3): 75-78. [ZHENG Wanmo, BA Renji, LIU Yujie, et al. Risk evaluation of urban seismogeology and geological hazards in Kangding, western Sichuan [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2012, 32(3): 75-78. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 赵东亮, 兰措卓玛, 侯光良, 等. 青海省河湟谷地地质灾害易发性评价 [J]. 地质力学学报, 2021, 27(1): 83 95. [ZHAO Dongliang, LAN C, HOU Guangliang, et al. Assessment of geological disaster susceptibility in the Hehuang Valley of Qinghai Province [J]. Journal of Geomechanics, 2021, 27(1): 83 95. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 王家柱,高延超,铁永波,等.基于斜坡单元的山区城镇 滑坡灾害易发性评价——以康定为例 [J]. 沉积与特提 斯地质, 2021, 03001: 1-17. [WANG Jiazhu, GAO Yanchao, TIE Yongbo, et al. Evaluation of the susceptibility to landslide in mountainous towns based on slope unit: Taking Kangding as an example [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2021, 03001: 1-17. (in Chinese with English abstract)]