

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.04.014

怒江支流迪麻洛河流域泥石流易发性评价

周粤,王运生*,赵逊,王国康,苏毅,毕杨杨,向超

ZHOU Yue, WANG Yunsheng*, ZHAO Xun, WANG Guokang, SU Yi, BI Yangyang, XIANG Chao

地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学),四川 成都 610059

State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China

摘要:以往对于怒江流域泥石流的研究大多关注支流泥石流对干流的影响,而对支流内群发性泥石流易发性的研究较少。迪麻洛河为怒江左岸一级支流,因其凸型斜坡地貌、变质软岩分布、断裂剪切破坏及新构造运动间歇性抬升产生的丰富物源等特征在怒江上游具有代表性。野外调查揭示,流域内泥石流主要分为沟谷型、坡面型和沟谷-坡面复合型3种,且多发育于迪麻洛河左岸。基于水文响应单元,从地质、地貌、降雨量、物源条件、人类工程活动等方面选取8项评价因子。针对各因子对不同类型泥石流影响程度的不同,采用层次分析法赋予各因子不同的权重。最后结合信息量法,分类剖析不同类型泥石流的易发性。结果表明:各类泥石流易发性高和极高的地区主要地层为石炭系第四段(C^d)、第五段(C^e)等岩性软弱地层;主要沿着道路建设等人类工程活动强烈的地区分布;越靠近断裂带易发性越高。随着易发性等级的提高,泥石流发育比例和相对发育比例也相应增高;各类型泥石流 AUC 达 83.34%、90.07% 和 84.39%,评价结果合理,可为怒江支流泥石流防治规划与预测预报提供科学依据,为西南深切峡谷变质软岩区群发性泥石流防灾减灾提供理论和技术参考。

关键词:云南怒江;泥石流;易发性评价;加权信息量法;地质调查工程**中图分类号:**P642.23 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)04-0702-11

Zhou Y, Wang Y S, Zhao X, Wang G K, Su Y, Bi Y Y, Xiang C. Susceptibility assessment of debris flow in Dimaluo River, branch of Nujiang River. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(4): 702-712

Abstract: The research on debris flow in Nujiang River mostly focused on the influence of tributary debris flow on the main stream, but ignored the tributary debris flow. Dimaluo river is a tributary on the left bank of Nujiang River. It is representative in the upper reaches of Nujiang River (Yunnan) because of its convex slope landform, distribution of metamorphic soft rock, fault shear failure and abundant provenance caused by intermittent uplift of Neotectonic movement. Field investigation shows that debris flow can be divided into three types, gully type, slope type and composite type. Based on the hydrological response unit, 8 evaluation factors are selected. This paper analyzes the susceptibility of different types of debris flow by using AHP and information method. The results show that the areas with high and extremely high susceptibility to all kinds of debris flow are mainly weak strata such as C^d and C^e , and they are mainly distributed along the areas with strong human engineering activities, such as road construction, with the closer to the fault zone, the higher the susceptibility. The AUC of all types of debris flow reaches 83.34%, 90.07% and 84.39%, so the evaluation results are reasonable, which can provide scientific basis for the prevention and control planning and prediction of debris flow in Nujiang River, and provide theoretical and technical reference for disaster prevention and mitigation of mass debris flow in southwest deep canyon.

收稿日期:2020-11-13; **修订日期:**2021-03-29

资助项目:中国地质调查局项目《怒江流域云南段第四纪河谷演变及灾生趋势研究》(编号:21800-DN0019)、国家自然科学基金项目《深切峡谷高位斜坡不同深度地震响应规律研究》(批准号:41877235)、国家重点研发计划《强震山区特大地质灾害致灾机理与长期效应研究》(编号:2017YFC1501000)

作者简介:周粤(1995-),男,硕士,从事地质灾害评价与预测相关研究。E-mail:603941783@qq.com

* **通信作者:**王运生(1960-),男,教授,从事工程地质及区域构造稳定性研究。E-mail:wangys60@163.com

metamorphic soft rock area.

Key words: Nujiang River; debris flow; susceptibility assessment; GIS; information method; geological survey engineering

泥石流易发性评价指在一定的地质环境中,考虑致灾控制因素从而判断泥石流在某个空间发生的可能性大小。评价结果能了解泥石流易发程度的整体特征和空间异质性,对泥石流预防及治理具有重要意义^[1-2]。

近年,随着 GIS 技术的发展和评价模型的增加,国内外学者对泥石流易发性的研究取得了诸多成果。王高峰等^[3]运用层次分析法建立了泥石流易发性评价模型,蒋卫国等^[4]探讨了多元回归方法在泥石流易发性评价中的准确性和可靠性。Sun 等^[5]将物理模型引入统计方法,建立了考虑泥石流起动机理的易发性评价方法。Qing 等^[6]应用机器学习技术评价了中巴喀喇昆仑公路沿线泥石流易发性。Chen 等^[7]建立了二维卷积神经网络模型,对吉林省泥石流易发性进行空间预测。毛佳睿等^[8]基于流域内物源数量、类型及分布,评价了白龙江流域泥石流的易发性。

云南怒江流域既是重要的战略能源基地,也是民族旅游圣地^[9]。该流域干流深切、支流发育、地形地貌复杂、软硬岩组分布不均匀、怒江断裂控制作用显著、降雨集中,加之人类工程活动,使泥石流灾害十分发育,严重限制了当地的脱贫工作,对人民群众的生命财产安全造成威胁。以往对怒江泥石流的研究,大多关注支流泥石流对干流的危险性及影响,如梁馨月等^[10]通过非度量多尺度分析,认为怒江一级支流在暴雨激发下易形成较大规模泥石流,有堵江风险。张杰等^[11]通过野外调查并结合遥感解译数据,分析了贡山 8·18 特大泥石流成因及其对干流的影响。吕立群等^[12]发现,怒江流域发育大量两相泥石流,其大石块较多,导致阻力大,是影响怒江河谷演化的主要动力。但是近年来,随着怒江支流居民密度增大及基础设施增多,支流流域内群发性泥石流灾害呈上升趋势,其泥石流易发性评价也备受关注。

迪麻洛河因地质构造复杂、河流间歇性下切、左缓右陡的不对称岸坡结构、软岩大面积出露等多因素叠加,在流域左岸上部宽谷段累积了大量松散物源,致使近年来灾难性泥石流事件频发,在怒江上游段具有典型的代表性。研究支流多沟泥石流孕育的主控因素,评价其易发性,可为怒江支流泥石流防治规划与预测预报提供技术支持,为西南山区深切峡谷段软岩分布区支流群发性泥石流易发性评价提供理论和技术参考,具有重要的现实意义。

1 研究区概况

研究区位于云南省怒江州捧当乡,地理坐标为东经 98°39'~98°48'、北纬 27°53'~28°08',属于滇西三江并流高山峡谷区(图 1),受新构造运动、第四纪冰川、河流切割等影响,此段怒江流域峡谷深切,地势险峻,纵比降大,支流发育且两岸陡峭,为地质灾害的形成提供了有利条件。

迪麻洛河属于怒江左岸一级支流,长度为 34.7 km,流域内最高点海拔 4588 m,而沟口仅 1548 m,相对高差 3040 m。上游地区主要岩性为石炭系变粒岩、片岩、大理岩等,中下游主要岩性为变质石英砂岩、千枚岩、大理岩等(图 2)。整体流域岩组软岩发育,岩体片理、裂隙发育,抗风化能力差异大。河流间歇性下切导致流域两岸具有明显的不对称性,相比右岸,左岸具有支流多、松散物源丰富、岩体结构破碎等特点。居民主要居住在迪麻洛河谷底,近

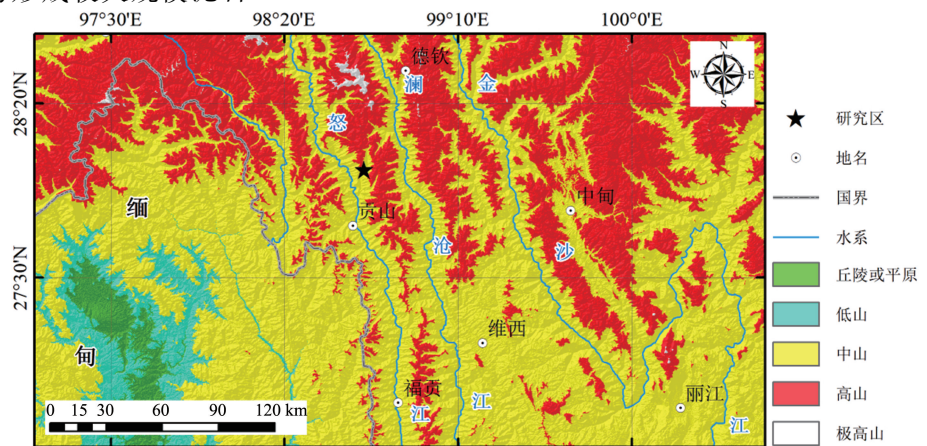


图 1 研究区地貌图

Fig. 1 Geomorphologic map of the study area

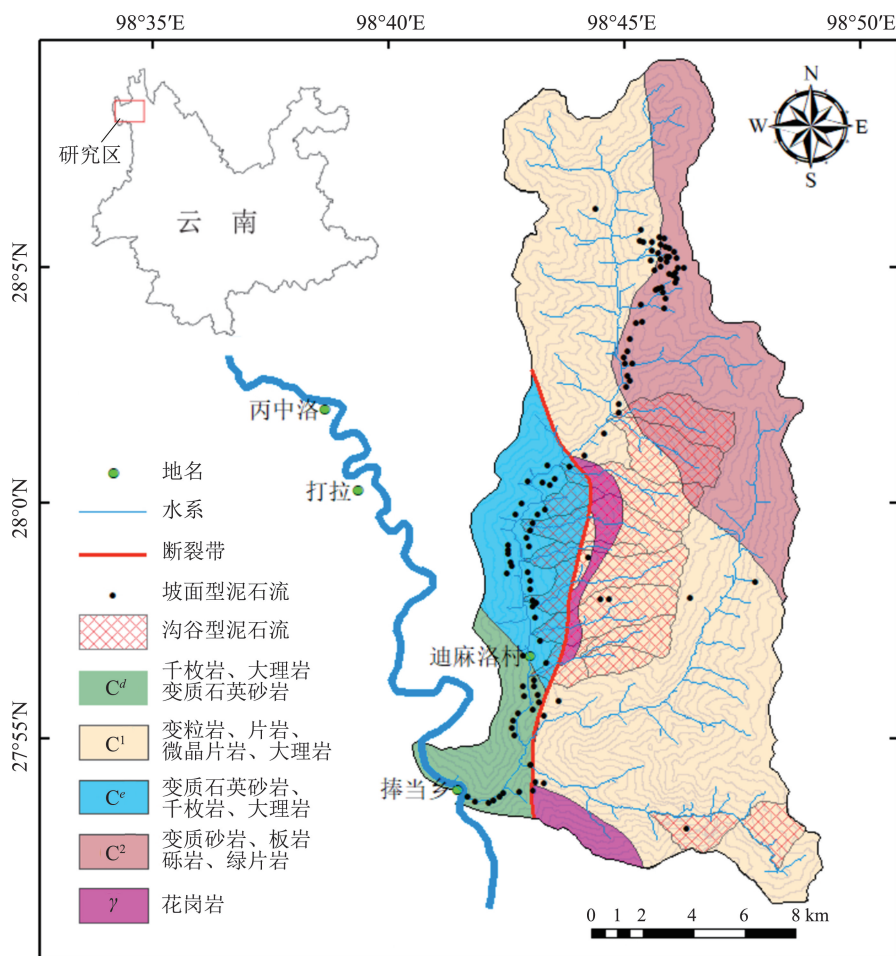


图2 研究区地质图

Fig. 2 Geological map of the study area

年流域内多次发生灾难性泥石流,如2020年5月26日暴雨引发群发性泥石流,致使“三步一小灾,五步一大灾”,且灾后恢复难度大,对流域内交通及居民财产造成了严重的损失。

2 泥石流发育特征

根据野外调查,迪麻洛流域右岸坡陡,基岩大多出露,支沟不发育,汇水面积小且仅山梁顶部有残积层,总体物源少;左岸呈台阶状坡型,支沟发育,汇水面积大,滑坡带坡残积及洪积发育,人类工程活动强烈,坡体上部形成区有断裂通过,使物源更丰富,地质灾害频发。根据泥石流的运动方式、分布特征及规模可将泥石流分为沟谷型、坡面型和沟谷-坡面复合型3种类型。

2.1 沟谷型泥石流

由于研究区岩性软弱,且被怒江断裂带穿过,

在降雨的作用下,顺支沟极易发生此类泥石流,往往运动距离长,物源丰富,破坏力大。此次受灾最严重的迪麻洛村就是被沟谷型泥石流冲毁,此处泥石流沟道全长3650 m,相对高差1271 m,纵比降348.2‰;有断层穿过物源区,使沟道内岩石破碎;基岩为云母片岩、片麻岩和石英砂岩。由于沟道狭长,在短时强降雨作用下水流速度快,松散物源碎石土易启动,顺沟运动,不断掏蚀沟床堆积和两侧沟壁土体,流量不断增大,最终冲出沟道,破坏村庄并挤压河道(图3)。

2.2 坡面型泥石流

坡面流是在斜坡上先形成滑坡,而后快速转变为泥石流^[13],往往发生突然、成灾快。研究区岩性破碎,坡残积及洪积发育,修建公路削坡严重,在降雨条件下极易形成坡面型泥石流。其成因可分为:老滑坡坡体表层复活(图4-a)、公路开挖外侧弃土、斜坡旱地

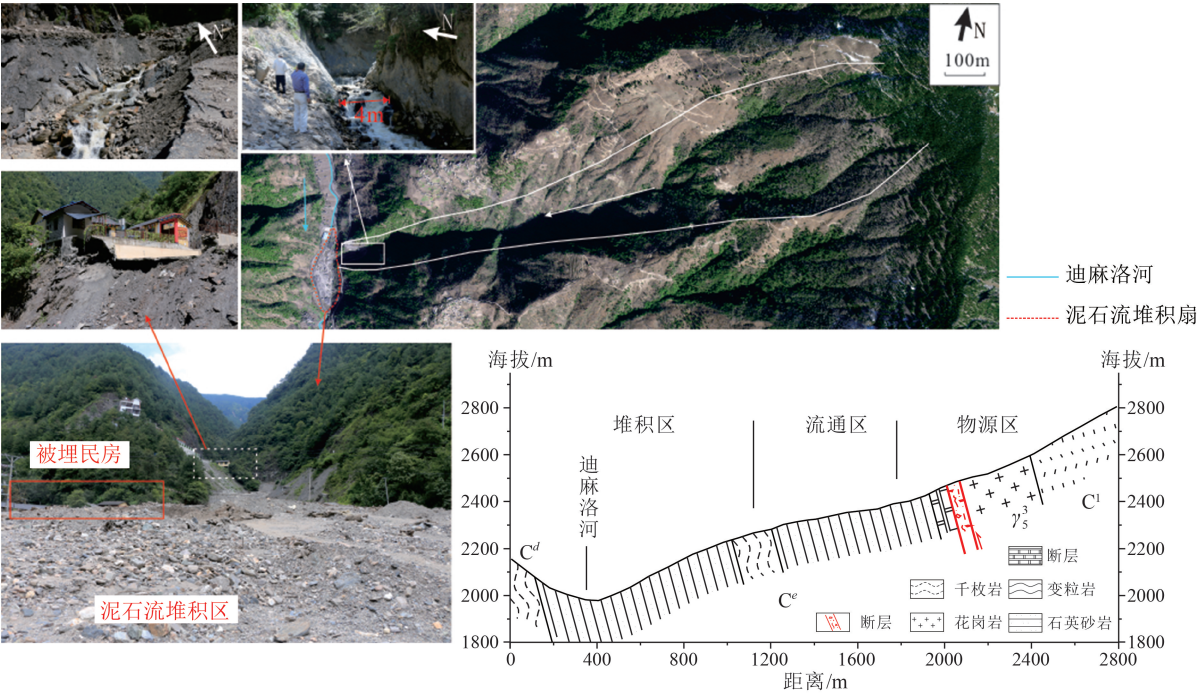


图 3 沟谷型泥石流地貌图及模式图

Fig. 3 Geomorphologic map and model map of gully type debris flow

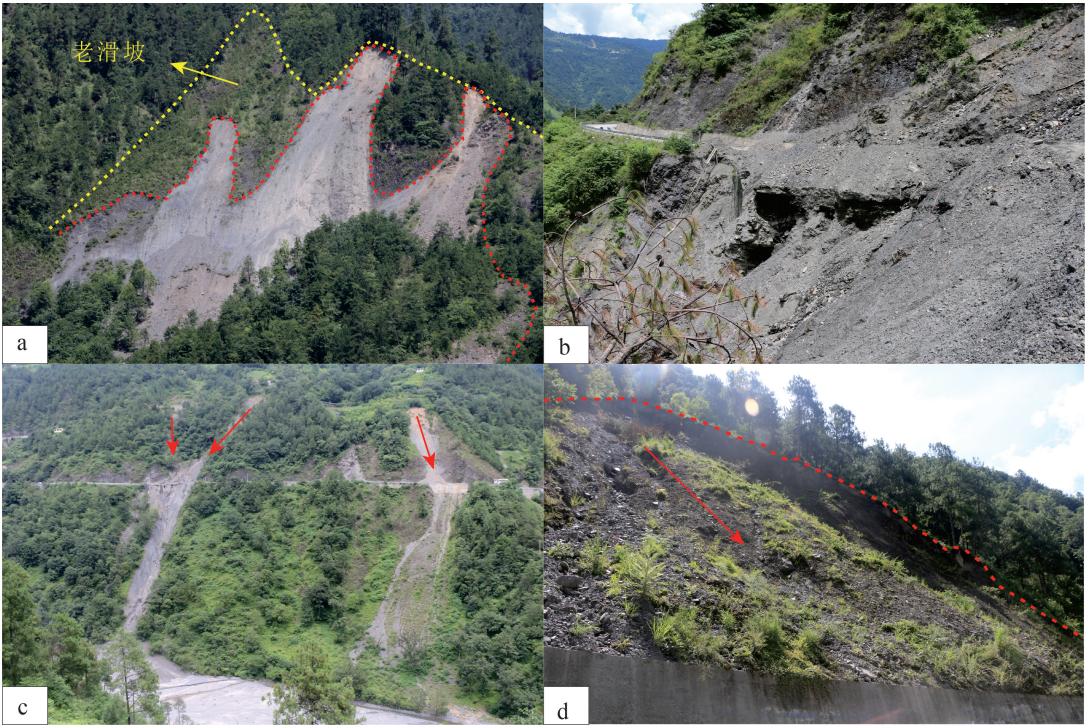


图 4 坡面型泥石流

Fig. 4 Slope debris flow

在降雨的作用下转化为坡面流(图 4-b、c)、全风化层剥皮式下滑(图 4-d)。运动方式主要分为顺基覆界面滑动式破坏和饱水后土块石流流动失稳。前者滑面深度一般大于 3 m,坡度大于 35° ,其后缘可见滑动面,而后者往往没有确定的滑动面且范围小。

2.3 沟谷-坡面复合型泥石流

流域左岸斜坡呈阶梯状,缓陡交界处以上的缓坡部位存在大量坡残积物(图 5),下方沟道陡浅,旱季无水,在强降雨作用下,斜坡上部平缓到下部陡峭的交界处坡残积启动,在坡面水流的作用下聚至下方浅沟道,再沿沟道向下运动,是坡面流型与沟谷型的复合模式。其启动模式主要为持续强降雨残坡积层饱水蠕滑拉裂、近水平岩层卸荷拉裂及两者复合启动。一般来说,坡残积层厚度不大于 5 m,与下伏基岩物理性质差异较大,且植被不发育或根系浅,因此降雨时能为泥石流提供充足的物源条件,往往不需要特别长的沟道就能产生方量大、破坏力强的泥石流。

3 泥石流易发性评价

3.1 数据源

研究区数据源包括:30 m 精度 DEM(地理空间

数据云 ASTER-GDEM V2),2020 年 Landsat 8 遥感影像(地理空间数据云),1:20 万地质图(德钦幅、贡山幅),1989—2019 年贡山降雨数据(云南省气象局),道路交通(Google Earth 提取)。泥石流灾害点主要由野外地质灾害调查获取,通过穿越研究区及其支沟追踪调查,对于不能到达处结合照片遥感解译确定。

3.2 评价单元划分

考虑到研究区地形地貌及范围,本文在子流域单元划分的基础上,选取水文响应单元作为评价单元,其按照一定的地貌特征划分^[14],能真实地反映自然环境的变化及存在差别的界线,更符合研究区泥石流发育特征,从而得出较客观的评价结果。利用 ArcGIS 的水文分析模块,按照填洼、计算流向流量、河网分级链接、分水岭的顺序划分评价单元。其中,最关键的步骤是最小阈值的确定,有学者提出汇水面积约 0.05 km^2 的河道就能形成泥石流^[15],考虑到研究区的大小,以 0.6 km^2 作为汇水阈值生成评价单元。再结合遥感影像进行修正,最终得到 301 个水文响应单元。

3.3 评价因子选取

基于前述不同类型泥石流形成的地质、地貌、

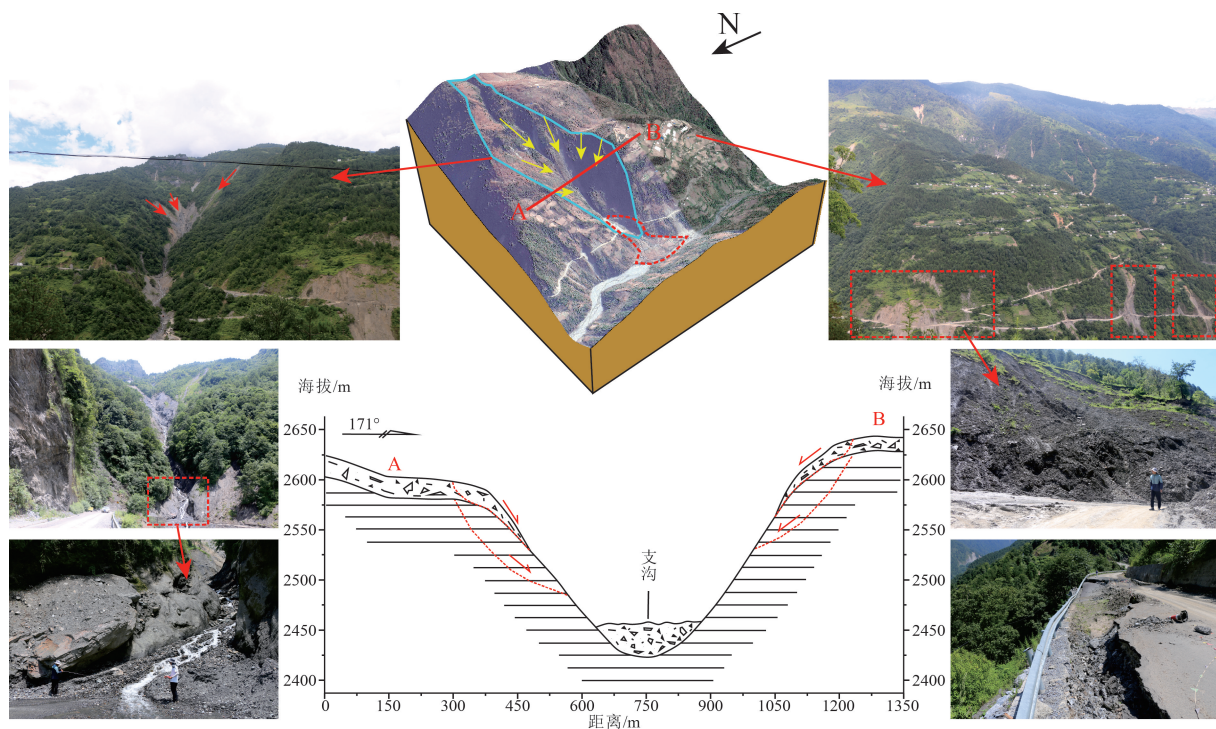


图 5 复合型地貌图及模式图

Fig. 5 Geomorphologic map and model map of compound debris flow

降雨、物源、人类工程活动等方面的条件,选取以下 8 项评价因子建立评价体系。

3.3.1 地质条件

(1) 构造作用

构造作用主要表现为怒江大断裂穿过左岸坡体中后部,断裂带及断裂影响带岩体破碎,宽达数百米,破碎的岩体能为泥石流的发育提供丰富的物源条件^[16]。故取单元内到断裂的平均距离,划分出 4 个等级(图 6-a)。

(2) 岩性

研究区地质灾害与地层岩性具有密切关系,岩性不同会使其性能差异显著,致灾难易程度也不同。故取单元内主要岩性,划分出 5 种岩性(图 6-b)。

3.3.2 地貌条件

(1) 高差率

流域高差率 R_r 是流域高差与流域长轴长度之比,能量化流域地势^[17]。计算公式如下:

$$R_r = \frac{dH}{L}$$

其中, dH 为流域高差, L 为流域长轴长度。如图 6-c 所示,本文将其划分为 5 个等级。

(2) 坡度

坡度从影响坡体应力分布和控制坡积物堆积状态 2 个方面决定研究区斜坡的稳定性,坡度过小不利于泥石流的发生^[18]。故取单元内坡度的平均值,将坡度分成 5 个等级(图 6-d)。

(3) 延伸率

流域越接近圆形,出口洪峰流量越大^[19],到达出水口的时间也越短。将延伸率作为其量化标准。具体计算公式如下:

$$BE = \frac{2\sqrt{A}}{L\sqrt{\pi}}$$

其中, A 为流域面积, L 为流域长轴长度。如图 6-e 所示,本文将其划分为 4 个等级。

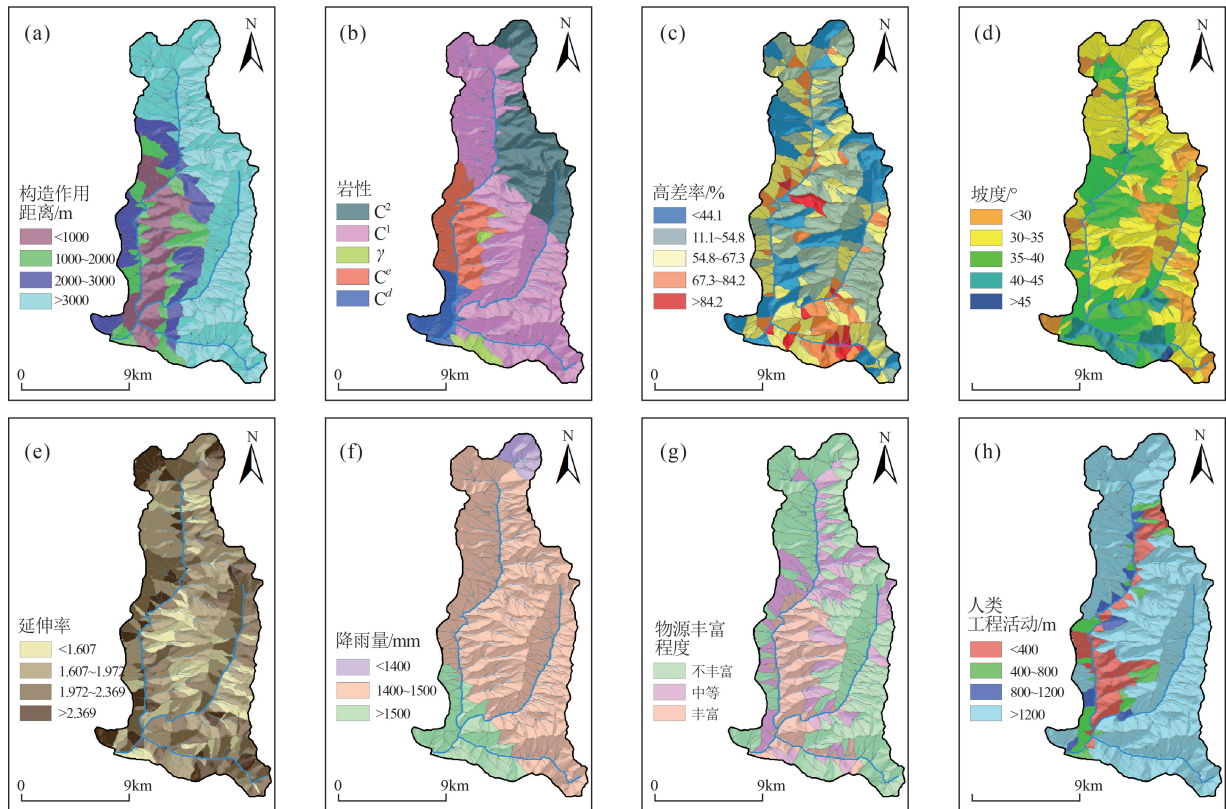


图 6 评价因子分级图

Fig. 6 Classification of evaluation factors

C^2 —变质砂岩、板岩、砾岩、绿片岩; C^1 —变粒岩、片岩、微晶片岩、大理岩;
 γ —花岗岩; C^e —变质石英砂岩、千枚岩、大理岩; C^d —千枚岩、大理岩、变质石英砂岩

3.3.3 降雨量条件

研究区泥石流的发生基本上都伴随着降雨,其对研究区泥石流的触发作用主要表现在增加坡体堆积物自重、转变为地下水削弱滑动面抗滑力、干湿交替使岩土体更破碎等方面。故取单元内平均降雨量,将降雨量分为 3 个等级(图 6-f)。

3.3.4 物源条件

物源丰富程度是研究区泥石流是否发生的关键。基于实际调查,将物源丰富程度划分为 3 个等级(图 6-g)。

3.3.5 人类工程活动

研究区左岸呈多级平台,缓坡段人类耕作活动频繁,加速静物源向动物源转化;同时,陡坡段公路建设削坡弃渣对斜坡扰动强烈,坡体稳定性降低,更易引发坡面群发性泥石流灾害。考虑到流域内居民点分布与道路建设具有一致性,故取单元内到道路的平均距离,将人类工程活动分为 4 个等级(图 6-h)。

3.4 多重共线性诊断

因子之间若具有高度线性相关,则会影响模型的准确性。容差和方差膨胀因子(VIF)可用于检测因子间的多重共线性^[20]。本文通过提取灾害点的各因子各等级值,基于 SPSS 26.0 软件计算评价因子的容差和方差膨胀因子(表 1),最小容差和最大 VIF 分别为 0.396 和 2.527,故新的评价因子间不存在共线性。

3.5 易发性评价方法

层次分析法与信息量模型是易发性评价常用的方法,其中层次分析法通过经验构建判断矩阵,具有较大的主观性。信息量模型可以客观反映单个评价因子不同分级标准下,对地质灾害易发性贡献的大小^[21]。而将两者结合起来的加权信息量模型可以将经验判断与客观信息量同时纳入评价体系,逐渐被越来越多的学者应用于易发性评价中^[22-25]。

3.5.1 层次分析法确定权重

因为选取的评价因子是区域内致灾的共性条件,但其对不同类型的泥石流影响又不相同。将评价因子两两比较,通过表 2 标度构建不同类型泥石流的判断矩阵,可以量化各个评价因子对不同类型泥石流的重要程度。采用不同权重与信息量结合的方式,能够有效区分各类型泥石流的易发程度。其中复合型兼具其余二者特性,故不考虑权重。前 2 种类型的判断矩阵 X 与因子权重如表 3、表 4 所示。

表 1 各评价因子 VIF 计算结果

Table 1 Evaluate factor's VIF calculate results				
评价因子	修改前		修改后	
	容差	VIF	容差	VIF
构造作用	0.393	2.544	0.396	2.527
岩性	0.516	1.936	0.517	1.934
高差率	0.223	4.479	0.581	1.722
坡度	0.452	2.214	0.452	2.211
延伸率	0.351	2.847	0.913	1.096
降雨量	0.680	1.471	0.687	1.455
物源丰富程度	0.528	1.894	0.528	1.894
人类工程活动	0.617	1.620	0.619	1.615

表 2 判断矩阵标度及其含义

Table 2 Scale of judgment matrix and its meaning	
标度	代表意义
1	表示两个因素的重要性相等
3	表示两个因素相比,前者稍微比后者重要
5	表示两个因素相比,前者比后者重要
7	表示两个因素相比,前者比后者明显重要
2、4、6	表示两个因素相比,重要性处于上述相邻判断之间
倒数	如果 i 和 j 两因素重要性之比为 X_{ij}
	那么 j 和 i 因素重要性之比则为 $X_{ji}=1/X_{ij}$

通过相关性计算得出:坡面型各因子权重 $\lambda_{Max}=8.802$ 、一致性指标 $CI=0.115$,一致性比例 $CR=0.081<0.1$;沟谷型各因子权重 $\lambda_{Max}=8.237$ 、一致性指标 $CI=0.034$;一致性比例 $CR=0.024<0.1$,可用于易发性评价。

3.5.2 信息量模型

信息量(I)模型最早应用在矿产预测中^[26],后被应用于易发性评价^[27-28]。其主要的原理是:地质灾害是受多种因素影响的复杂系统,当这些因素以某种特定的方式组合时,对灾害的发生有最大的“贡献”,因此对于灾害的危险性使用各个因素的信息量来衡量。具体公式如下:

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

式中, N_i 表示在因子二级状态 X_i 内的泥石流数; N 表示研究区泥石流总数; S_i 表示因子二级状态 X_i 的面积; S 表示研究区总面积。其本质是灾害数在各因子二级状态中的相对含量。

4 结果分析与有效性检验

4.1 评价结果分析

根据图 6 统计的各因子分级状态,结合信息量

表 3 坡面型泥石流评价因子判断矩阵及权重

Table 3 Judgment matrix and weight value of each factors for slope debris flow

因子	构造作用	岩性	高差率	坡度	延伸率	降雨量	物源丰富程度	人类工程活动	权重 w
构造作用	1	1/3	1/2	1/4	1/3	1/5	1/4	1/5	0.015
岩性	3	1	2	1/2	1	1/3	1/2	1/3	0.082
高差率	2	1/2	1	1/3	1/2	1/4	1/3	1/4	0.051
坡度	4	2	3	1	2	1/2	2	1/2	0.153
延伸率	3	1	2	1/2	1	1/3	1/2	1/3	0.082
降雨量	5	3	4	2	3	1	2	2	0.255
物源丰富程度	4	2	3	1/2	2	1/2	1	1/2	0.130
人类工程活动	5	3	4	2	3	1/2	2	1	0.213

表 4 沟谷型泥石流评价因子判断矩阵及权重

Table 4 Judgment matrix and weight value of each factors for gully type debris flow

因子	构造作用	岩性	高差率	坡度	延伸率	降雨量	物源丰富程度	人类工程活动	权重 w
构造作用	1	4	2	4	3	1/2	2	5	0.216
岩性	1/4	1	1/3	1/2	1/2	1/4	1/3	2	0.051
高差率	1/2	3	1	3	2	1/2	1/2	4	0.134
坡度	1/4	2	1/3	1	1/2	1/4	1/3	2	0.060
延伸率	1/3	2	1/2	2	1	1/3	1/2	3	0.088
降雨量	2	4	2	4	3	1	2	5	0.259
物源丰富程度	1/2	3	2	3	2	1/2	1	4	0.157
人类工程活动	1/5	1/2	1/4	1/2	1/3	1/5	1/4	1	0.035

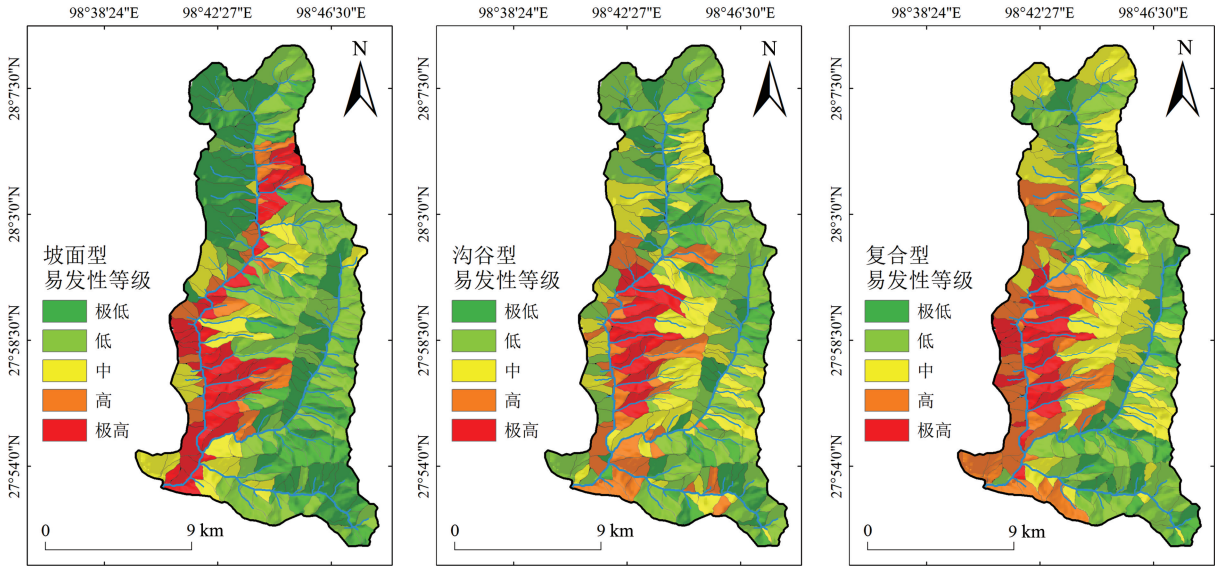


图 7 泥石流易发性评价图

Fig. 7 Debris flow susceptibility maps

GIS 信息量计算方法,计算因子各个分级状态下的信息量,结果如表 5 所示。应用 ArcGIS 叠加分析和重分类工具,得到信息量分级图并将易发性分为极低、低、中、高和极高 5 个等级(图 7)。每个水文响应单元对应一个易发性等级,结果更加直观且符合实际需求。

由表 6 和图 7 可知,在坡面型泥石流各分级状态中,石炭系第四段(C^d)地层和人类工程活动 400 m 内的信息量值较大;在沟谷型泥石流中,构造作

用 1000 m 内、物源丰富及平均坡度大于 45° 的单元信息量值较大;在复合型泥石流中,构造作用 1000 m 内和石炭系第五段(C^e)地层信息量值较大。这些单元中软岩发育,断裂带穿过,人类活动改造自然强烈,导致地质环境不稳定,极易发生泥石流灾害。总体上具有以下特点。

(1)易发性高的地区主要地层为石炭系第四段(C^d)、第五段(C^e)等。地层岩性控制着单元内的稳定性,反映了其不同物质的组成。该套易发地层

表 5 各因子信息量值
Table 5 The information values of each factor

评价因子 X	二级状态 X_i	坡面型 I	沟谷型 I	复合型 I	评价因子 X	二级状态 X_i	坡面型 I	沟谷型 I	复合型 I
构造作用	<1000	0.664	1.425	1.626	延伸率	<1.607	0.222	0.541	0.742
	1000~2000	0.308	0	0		1.607~1.972	0.171	0.067	0.267
	2000~3000	-0.254	-0.507	-0.307		1.972~2.369	-0.419	-0.505	-0.998
	>3000	-0.309	-0.749	-1.647		>2.369	-0.145	-0.232	0
岩性	C^2	0.468	-0.884	-0.683	物源丰富程度	丰富	0.665	1.460	1.409
	C^1	-1.072	-0.465	-0.958		中等	0.233	-0.228	-0.027
	γ	-0.266	0	0		不丰富	-0.530	0	0
	C^e	0.767	1.069	1.670	人类工程活动/m	<400	1.397	0.911	0.601
	C^d	1.139	0	0		400~800	0.239	0	0.112
高差率/%	<44.13	0.402	0.149	0.349		800~1200	-0.347	0.866	-0.320
	44.13~54.84	-0.182	0.273	0.474	坡度/ $^\circ$	>1200	-3.040	-1.134	-0.240
	54.84~67.34	-0.059	-1.079	0		<30	0.448	0	0
	67.34~84.23	-0.227	-0.218	0		30~35	-0.426	0.029	0.007
	>84.23	-0.760	0.858	1.059		35~40	0.226	0.363	0.564
降雨量/mm	<1500	0	0	0		40~45	-0.388	0	0
	1500~1600	-0.073	0.193	0.075		>45	0	3.325	0
	>1600	0.510	0	-0.236					

表 6 泥石流易发性信息
Table 6 Information of debris flow susceptibility

易发等级	坡面型			沟谷型			复合型		
	易发区间	泥石流发育比例	泥石流相对发育比例	易发区间	泥石流发育比例	泥石流相对发育比例	易发区间	泥石流发育比例	泥石流相对发育比例
极低	-0.96~-0.78	3.09%	0.10	-0.43~-0.26	0.00%	0.00	-3.87~-1.84	0.00%	0.00
低	-0.78~-0.61	6.02%	0.22	-0.26~-0.13	0.95%	0.03	-1.84~-0.60	0.92%	0.03
中	-0.61~-0.31	24.14%	2.51	-0.13~0.09	1.35%	0.05	-0.60~0.72	4.88%	0.36
高	-0.31~0.13	30.30%	2.76	0.09~0.43	4.55%	0.31	0.72~2.50	5.66%	0.32
极高	0.13~0.64	61.02%	3.11	0.43~0.74	41.18%	7.29	2.50~5.20	14.29%	1.54

注:泥石流发育比例=各等级发育泥石流水文响应单元个数/各等级水文响应单元总个数,泥石流相对发育比例=泥石流发育比例/各等级水文响应单元个数占比

岩性由薄层含炭质(石英)绢云千枚岩夹薄层绢云石英砂岩和层状大理岩组成。其岩性软弱、片理裂隙发育,抗风化能力差异大,使得岩层破碎、物源丰富,在坡体受短时强降雨冲刷或水流侵蚀作用下,极易产生泥石流,属于泥石流灾害高易发性地层。

(2)易发性高的地区基本属于怒江断裂带穿过区域,越靠近断裂带,易发性越高。由于河流间歇性强烈下切,使流域左岸地貌呈现阶梯状,积累了丰富的物源,加之断裂带使该套地层更破碎,进一步增加了物源量。在短时强降雨作用下,物源受冲刷作用、浮力减重、动水压力等对稳定性不利的影响,极易产生泥石流。且泥石流在运动过程中,又能带动破碎基岩,增加其破坏力。相比于左岸,右岸坡陡、基岩大多出露、支沟不发育、汇水面积小,危险源仅为山梁中上部残积层,故灾害较少。

(3)易发性高的地区大部分沿着公路分布,主要原因是道路为研究区人类工程活动改造自然环境最强烈的地方,且区内居民房屋建设、土地使用等方面同样沿着道路分布。其中不利的活动能够破坏地质环境,加速地层破坏、物源累积,使得坡体更不稳定,在强降雨的作用下极易发生各种泥石流。

4.2 有效性检验

合理的易发性等级分区应满足:随着易发性等级的提高,泥石流发育比例与相对发育比例在各分区的占比也逐渐增大^[17]。在实际发生的泥石流灾害中,沟谷型、坡面型和沟谷-坡面复合型泥石流各级发育比例由 3.09%、0% 和 0% 逐渐提升至 61.02%、41.18% 和 14.29%,同时各级相对发育比例也由 0.18、0 和 0 逐渐升高至 3.11、7.29 和 1.54,结果满足合理性。

此外,易发性分区面积累加百分比与实际灾害发生累加百分比曲线^[29]是常用来检验评价结果合理性的方法,根据累加曲线计算曲线下部面积 AUC (Area Under Curve) 作为判断指标(图 8)^[30]。结果显示, $AUC_{\text{坡面型}} = 83.34\%$, $AUC_{\text{沟谷型}} = 90.07\%$, $AUC_{\text{复合型}} = 84.39\%$ 。故认为,评价结果较好地反映了实际泥石流的分布,能够为预测泥石流空间分布提供依据。

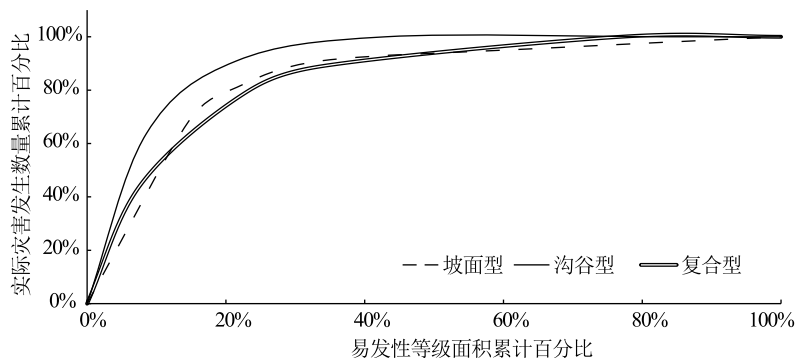


图 8 研究区易发性评价结果检验曲线

Fig. 8 Test curve of susceptibility results in study area

5 结 论

(1)研究区泥石流可分为沟谷型、坡面型和沟谷-坡面复合型 3 种类型。流域两岸具有明显的不对称性,右岸坡陡,汇水面积小,以坡面型为主;左岸呈台阶状坡型,汇水面积大,以沟谷型和复合型为主。

(2)结合流域内泥石流特点,通过 ArcGIS 水文分析提取水文响应单元,作为基础评价单元,选取 8 项评价因子,并考虑各因子在不同类型泥石流中的作用大小,赋予因子不同权重。能反映不同指标影响程度的差异性,从而有效地区分各类型泥石流的易发程度,更贴合实际需求。

(3)研究区泥石流灾害易发性评价结果表明:易发性高和极高的地区主要地层为石炭系第四段(C^d)、第五段(C^e)等岩性软弱、片理裂隙发育的地层;主要沿道路建设等人类工程活动强烈的地区分布;越靠近断裂带易发性越高。即泥石流孕育的主控因素为岩性、断裂及人类工程活动,故研究区未来泥石流治理的重点应是流域左岸。

(4)通过对研究区易发性分区结果进行有效性检验,结果显示:随着易发性等级的提高,各类型泥石流在各个分区内的发育比例和相对发育比例均逐渐提升,满足合理性;模型中三类泥石流的累加曲线 AUC 值分别为 83.34%、90.07% 和 84.39%,表明预测精度良好。

致谢:项目组全体成员在野外地质工作和论文撰写过程中给予了很大的帮助,审稿专家对本文提出了许多建设性修改意见,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] Guzzetti F, Reichenbach P, Cardinali M, et al. Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale [J]. *Geomorphology*, 2005, 72 (1/4): 272–299.
- [2] 任敬, 范宣梅, 赵程, 等. 贵州省都匀市滑坡易发性评价研究[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(5): 165–172.
- [3] 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.
- [4] Jiang W G, Rao P Z, Cao R, et al. Comparative evaluation of geological disaster susceptibility using multi-regression methods and spatial accuracy validation[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(4): 439–462.
- [5] Sun J, Qin S, Qiao S, et al. Exploring the impact of introducing a physical model into statistical methods on the evaluation of regional scale debris flow susceptibility[J]. *Natural Hazards*, 2021, 106: 881–912.
- [6] Qing F, Zhao Y, Meng X, et al. Application of Machine Learning to Debris Flow Susceptibility Mapping along the China – Pakistan Karakoram Highway[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(18): 2933–2933.
- [7] Chen Y, Qin S, Qiao S, et al. Spatial Predictions of Debris Flow Susceptibility Mapping Using Convolutional Neural Networks in Jilin Province, China[J]. *Water*, 2020, 12(8): 2079–2079.
- [8] 毛佳睿, 李铁锋, 田运涛, 等. 基于物源特征的白龙江流域泥石流易发性评价[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(28): 11479–11490.
- [9] 蔡定昆. 兼顾发展权与可持续性的怒江流域开发模式研究[D]. 西南财经大学博士学位论文, 2011.
- [10] 梁馨月, 徐梦珍, 吕立群, 等. 基于地貌特征的青藏高原边缘泥石流沟分类[J]. *地理学报*, 2020, 75(7): 1373–1385.
- [11] 张杰, 李世凯, 甘云兰, 等. 云南贡山 8·18 特大泥石流灾害调查分析与启示[J]. *工程地质学报*, 2015, 23(3): 373–382.
- [12] 吕立群, 王兆印, 徐梦珍, 等. 怒江泥石流扇地貌特征与扇体堵江机理研究[J]. *水利学报*, 2016, 47(10): 1245–1252.
- [13] 李树德. 滑坡型泥石流形成机理[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1998, (4): 3–5.
- [14] 杨涛, 唐川, 常鸣, 等. 基于数值模拟的小流域泥石流危险性评价研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(1): 197–204.
- [15] Lyons N J, Mitasova H, Wegmann K W. Improving mass-wasting inventories by incorporating debris flow topographic signatures [J]. *Landslides*, 2014, 11(3): 385–397.
- [16] 梁馨月, 曾璐, 葛永刚, 等. 川西高原鲜水河断裂带炉霍—道孚段泥石流分布特征[J]. *地质通报*, 2021, 40, 319(12): 2061–2070.
- [17] 张书豪, 吴光, 张乔, 等. 基于子流域特征的泥石流易发性评价[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(2): 142–149.
- [18] Melton M A. The Geomorphic and Paleoclimatic Significance of Alluvial Deposits in Southern Arizona: A Reply [J]. *The Journal of Geology*, 1966, 74(1): 102–106.
- [19] 熊德清, 崔笑烽. 喜马拉雅山脉地震带主要地质灾害与地形地貌关系——以西藏日喀则地区为例[J]. *地质通报*, 2021, 40(11): 1967–1980.
- [20] 周超. 集成时间序列 InSAR 技术的滑坡早期识别与预测研究[D]. 中国地质大学博士学位论文, 2018.
- [21] 梁丽萍, 刘延国, 唐自豪, 等. 基于加权信息量的地质灾害易发性评价——以四川省泸定县为例[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(6): 176–182, 321.
- [22] 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.
- [23] 胡芹龙, 王运生. 基于 GIS 的川西地貌过渡带滑坡灾害易发性评价[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(6): 746–753.
- [24] 杨盼盼, 王念秦, 郭有金, 等. 基于加权信息量模型的临潼区滑坡易发性评价[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(9): 50–56.
- [25] Singh K, Kumar V. Hazard assessment of landslide disaster using information value method and analytical hierarchy process in highly tectonic Chamba region in bosom of Himalaya [J]. *Journal of Mountain Science*, 2018, 15(4): 808–824.
- [26] 赵鹏大, 胡旺亮, 李紫金. 矿床统计预测[M]. 北京: 地质出版社, 1983.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 张欣, 王运生, 梁瑞锋. 基于 GIS 的小江断裂中北段滑坡灾害危险性评价[J]. *地质与勘探*, 2018, 54(3): 623–633.
- [30] 许冲, 戴福初, 姚鑫, 等. 基于 GIS 与确定性系数分析方法的汶川地震滑坡易发性评价[J]. *工程地质学报*, 2010, 18(1): 15–26.