

临沧云县慢垒河流域泥石流发育特征及危险性评价

郭宏涛¹, 郭婷婷^{1*}, 汪木林¹, 周旭萌², 张智伟³

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093; 2. 云南地矿地质工程有限公司, 昆明 650041;
3. 华能澜沧江水电股份有限公司, 昆明 650214)

摘要: 1988年“11·6”耿马地震后, 慢垒河流域两侧山体发育多处滑坡、崩塌灾害, 加之人类活动的影响, 形成丰富物源, 导致流域内泥石流活动逐渐频繁, 严重危害幸福集镇规划区居民的生命财产。因此, 对慢垒河泥石流进行危险性评估刻不容缓。本文在慢垒河泥石流发育特征的基础上, 基于模糊层次分析法和刘希林评价模型对其开展危险性评价。研究表明: (1) 慢垒河流域受地震影响, 诱发了大量次生地质灾害, 导致松散物源储量增加, 在暴雨或连续降雨条件激发下, 易爆发泥石流灾害。(2) 慢垒河泥石流处于发展期, 易发程度为“易发”, 两种评价模型10~50 a一遇泥石流危险等级均为中度危险, 但在评定100 a一遇的泥石流危险等级时存在差异, 刘希林评价模型为高度危险, 而模糊层次分析为中度危险, 结合慢垒河实际情况, 综合评定其10~100 a的泥石流危险等级为中度危险。

关键词: 慢垒河流域; 泥石流; 危险性评价; 刘希林评价模型; 模糊层次分析法

中图分类号: P642.23; P56 **文献标识码:** A

CHARACTERISTICS AND HAZARD ASSESSMENT OF DEBRIS FLOW DEVELOPMENT IN THE MANLEI RIVER BASIN OF YUN COUNTY, LINCANG

GUO Hong-tao¹, GUO Ting-ting^{1*}, WANG Mu-lin¹, ZHOU Xu-meng², ZHANG Zhi-wei³

(1. Faculty of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
2. Yunnan Geology and Mineral Engineering Co., Ltd., Kunming 650041, China;
3. Huaneng Lancang River Hydropower Co., Ltd., Kunming 650214, China)

Abstract: Following the “11.6” Gengma earthquake in 1988, the Manlei River basin experienced extensive landslide and collapse disasters on both sides of its mountains. These, combined with human activities, provided a rich source of materials, leading to an increase in debris flow activities within the basin, severely endangering the lives and properties of residents in the Xingfu Township planning area. Consequently, assessing the hazard of debris flows in the Manlei River is of urgent necessity. Based on the characteristics of debris flow development in the Manlei River, this paper conducts a hazard assessment using the fuzzy analytical hierarchy process (FAHP) and the Liu Xilin evaluation model. The study reveals that: (1) the Manlei River basin, affected by the earthquake, triggered numerous secondary geological disasters, leading to an increased accumulation of loose material sources. Under conditions of heavy rain or continuous rainfall, this significantly raises the

收稿日期: 2024-02-20 改回日期: 2024-05-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41861134008); 云南省 Muhammad Asif Khan 院士工作站(202105AF150076); 云南省重点研发计划项目(202003AC100002); 云南省基础研究计划项目(202001AT070043)

likelihood of debris flow disasters; (2) the debris flows in the Manlei River are in a developmental phase, with a predisposition to "frequent occurrences." For events expected to occur every 10 to 50 years, both evaluation models rate the debris flow hazard as moderate. However, discrepancies arise in the hazard level assessment for 100-year events, with the Liu Xilin model classifying it as highly dangerous, while the FAHP considers it to be moderate. Taking into account the actual conditions of the Manlei River, the debris flow hazard level for events occurring every 10 to 100 years is comprehensively assessed as moderate.

Key words: Manlei river basin; debris flow; hazard assessment; Liu Xilin evaluation model; fuzzy hierarchical analysis method

泥石流是一种在山区或其他地形险峻地区发生的含有大量固体物质的(泥、砂、石)的特殊洪流,通常由暴雨、冰雪融水、水塘溃坝等水源激发,具有突发性、多因性、极强破坏性等特点,对人类的财产和生命造成巨大的危害及威胁,开展泥石流危险性评价,对于防灾减灾具有重要意义^[1-3]。

泥石流危险性评价旨在客观评估泥石流的潜在威胁,常通过危险度来呈现其危险性。随着研究的深入,评价方法已从定性转向定量分析。近年,国内学者广泛采用刘希林评价模型^[4]、层次分析法^[5]、模糊综合评价^[6]、灰色关联分析法^[7]、遥感及 GIS 评估^[8, 9]等多种方法进行评价,均取得了较为准确的评价结果。例如:霍建宇等^[10]运用刘希林评价模型对永胜刘官河流域泥石流进行危险性评价,评价结果与实际相吻合;孙聿卿等^[11]运用 GIS 技术对金沙江开展泥石流危险性评价,并通过 ROC 检验以及空间聚类分析完成了金沙江流域泥石流危险性区划。

然而,上述评价方法中均有其适应条件和不足之处,例如:模糊综合评价法适应于不同因素之间关系复杂、不确定性较大的情况,但计算繁杂,相反,层次分析法具有评价与预测简洁且系统的优势,但其不足之处在于评价结果受到人为主观控制的影响较大。考虑到泥石流的形成和发展过程以及其地质环境是复杂、多变的,充满了不确定性,因此本文采用将模糊数学理论应用于层次分析法的模糊层次分析法对其开展危险性评价。通过引入模糊逻辑,有效处理评价过程中的不确定性和模糊性,减少因主观判断带来的误差和偏差,并将评价结果与应用广泛、认可度较高的刘希林评价模型评价结果进行对比,综合得出慢垒河泥石流危险等级。所得成果不仅对该泥石流沟的防治具有现实指导意义,也为类似地质条件地区的灾害防治提供有益补充。

1 慢垒河泥石流基本特征

慢垒河泥石流位于云南省临沧市云县幸福镇,沟口距幸福镇集镇规划区约 2 km,为南汀河左岸支沟,1988 年“11·6”耿马地震后,慢垒河流域两侧山体发育多处滑坡、崩塌灾害,加之人类活动的影响,形成丰富物源,一旦爆发泥石流将会严重危害幸福集镇规划区居民的生命财产。

1.1 地形地貌条件

流域内地貌类型为构造侵蚀陡坡中山峡谷地貌,流域形态似叶片状,流域面积约 18.01 km²,主沟长约 8.9 km。地势南东高北西低,最高点高程为 2 172 m,沟口高程为 915 m,相对高差约 1 257 m,沟床平均纵坡降约 152‰。流域沟道深切,整体呈上游狭窄、下游宽阔的地貌特征,两侧岸坡较为陡峻,共发育 10 条支沟,主要分布在主沟左侧,沟长约 0.26~2 km,纵坡降 242‰~576‰(图 1)。

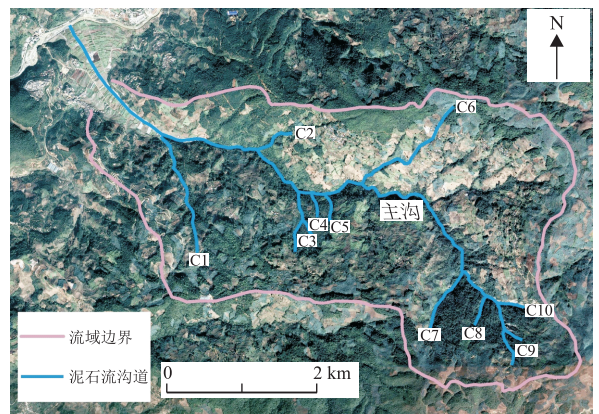


图 1 慢垒河泥石流示意图

根据慢垒河泥石流现状及形成特征,按照其物源、地形、植被等因素将慢垒河泥石流流域自上而下划分成形成区、流通区、堆积区 3 个区域(图 2、图 3)。

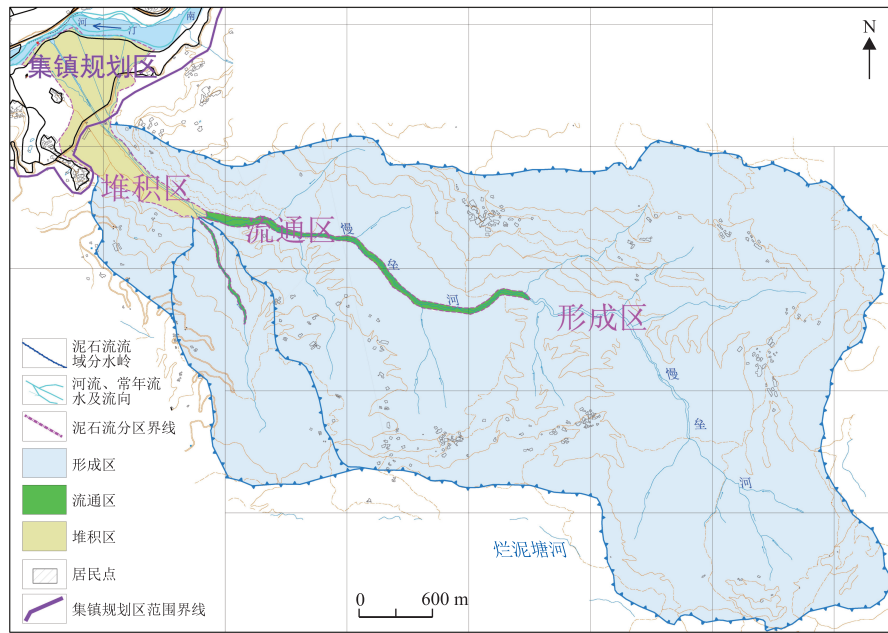
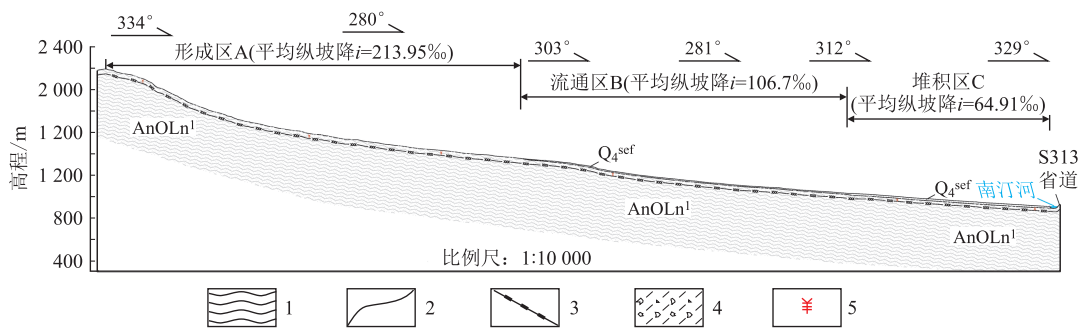


图 2 泥石流分区平面图



Q_4^{sef} . 第四系泥石流堆积; Q_4^{al+pl} . 第四系冲洪积层; AnOLn¹. 下古生界澜沧群下段; 1. 片岩; 2. 地层界线; 3. 风化界线; 4. 碎块土石; 5. 强风化符号。

图 3 泥石流分区纵剖面图

形成区:位于沟谷两侧斜坡及上游斜坡地段,地形地貌主要为中山陡坡地貌。该段主沟高程分布在 1 363~2 172 m 之间,汇水面积约 16.99 km², 占总流域面积的 94.34%,沟道平均纵坡降 213.95%,主沟深切,断面呈深切“V”字型,沟岸陡峻,平均坡度约 35°。经现场探勘,该区植被覆盖率一般,主要集中在山脊地段,斜坡多以灌木及农作物为主,坡表岩土体松散,植被固土能力弱,多数滑坡、崩塌、不稳定斜坡均在此处发育。两岸坡脚处堆积有大量物源,成分主要为含碎石粉质黏土、块石和巨石,结构松散,沟内局部可见基岩出露(图 4)。

流通区:位于流域中下部地段,地形地貌为中山斜坡地貌。主沟高程分布在 1 016~1 363 m 之间,汇水面积约 0.19 km², 占总流域面积的 1.05%,沟道平均纵坡降 106. %。流通区沟谷切割较深,沟道



(a) 形成区地貌特征 (b) 形成区沟道特征

图 4 慢垒河泥石流形成区特征

相对较为顺直,部分地段较为曲折,断面形态由“V”字型向“U”字型过渡,河床及两侧均有堆积物,成分为块石、碎石和泥砂(图 5)。

堆积区:位于慢垒河沟口至南汀河交汇处,地形地貌为山前洪积台地地貌。主沟高程分布在 915~1 016 m 之间,汇水面积约 0.83 km², 占总流域面积的 4.61%,沟道平均纵坡降 64.91%,该段谷底较为宽阔,多在 30~100 m(图 6)。



图 5 慢垒河泥石流流源区特征



图 6 慢垒河泥石流堆积区特征

1.2 水源条件

研究区属低纬度高原亚热带季风气候和暖湿带季风气候,年降雨量为 1 000~1 500 mm,降雨主要集中在 5~10 月,约占全年降雨量 88.2%,且时空分布不均匀。通过统计近 12 a 的年降雨量及月均降雨量(图 7),得到研究区平均降雨量约为 1 321.2 mm。

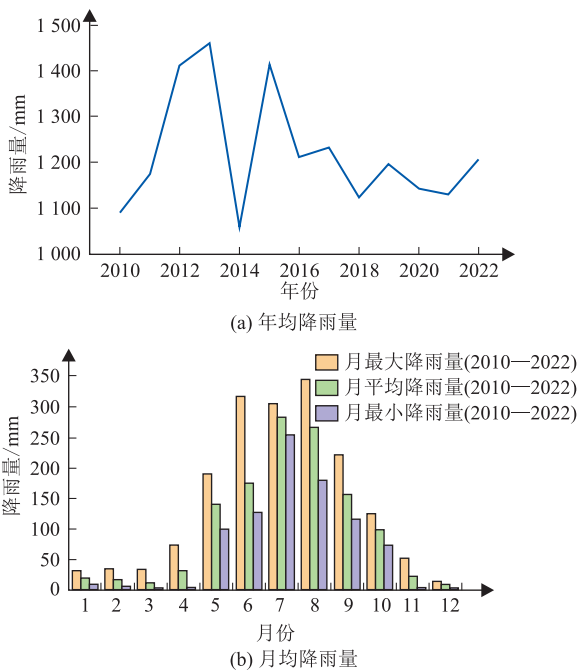


图 7 研究区降雨量分布图

1.3 物源条件

根据野外调查,慢垒河流域物源主要分为滑坡崩塌类、坡面侵蚀类、沟床堆积类 3 类,总静储量约 $916.96 \times 10^4 \text{ m}^3$,动储量约 $267.28 \times 10^4 \text{ m}^3$,其中滑

坡崩塌类、坡面侵蚀类,约占总可移动量 91.79% (表 1、图 8)。

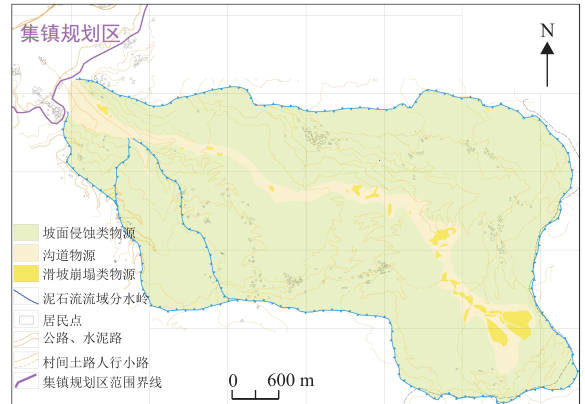


图 8 慢垒河泥石流物源分布图

表 1 慢垒河流域物源统计表

物源类型	静储量 / 10^4 m^3	动储量 / 10^4 m^3	各类物质占总可移动量的百分比/%
滑坡、不稳定斜坡、崩塌类	226.84	160.23	59.95
坡面侵蚀类	665.32	92.17	34.48
沟床冲刷及堆积类	24.8	14.88	5.57
合计	916.96	267.28	100

滑坡崩塌类物源主要分布于流域上游沟道两侧。沟道岸坡局部地段较为陡峭且土体较为松散,在持续降雨、暴雨或地震等不利因素作用下可能产生次级块体剧滑,易发育成滑坡和崩塌。调查揭示该类物源共发育 22 处,总静储量约 $226.84 \times 10^4 \text{ m}^3$,占总物源量的 24.74%,动储量为 $160.23 \times 10^4 \text{ m}^3$,占总动储量的 59.95%。

坡面侵蚀类物源主要分布在泥石流沟两侧斜坡人类活动频繁一带,特别是在斜坡耕地及农耕便道修筑处,侵蚀强度较大。调查揭示该类物源静储量约 $665.32 \times 10^4 \text{ m}^3$,占总物源量的 72.56%,动储量为 $92.17 \times 10^4 \text{ m}^3$,占总动储量的 34.48%。

沟床堆积物物源主要位于泥石流沟道内,可直接参与泥石流的运动。调查揭示该类物源多为块石、碎石及砂土,局部地段混粉质黏土,结构松散,砾石、碎石成分为片岩,块石直径一般 20~100 cm,局部直径较大,可达 1 000 cm,总物源量约 $24.8 \times 10^4 \text{ m}^3$,动储量为 $14.88 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

2 泥石流发展趋势

调查显示,慢垒河泥石流沟的沟口堆积地形相对较为开阔,现代泥石流堆积扇覆盖于老泥石流堆积扇之上,并呈现逐渐扩大的趋势,由于下游有南汀

河的作用,堆积区的堆积物会被河水持续冲刷并带走。在物源区及流通区主沟两岸的坡地区域中,坡体的物质结构松散,沟槽岸坡不稳定,存在强烈的沟槽切蚀,沟床两侧散布着大量的松散堆积物。按照《泥石流灾害防治工程勘查规范》^[12],慢垒河泥石流被评定为“发展期”,易发程度评分为113分,归类为易发泥石流。

调查分析表明,慢垒河是一条活跃的泥石流沟。自1988年耿马地震以来,多次发生规模不等的泥石流灾害,主要在1996年、1997年、1998年、2004年、2008年、2010年、2014年、2016年,其中2010年8月25日的泥石流规模最大,导致多数泥石流治理工程受损,河岸及河口附近大量农田被冲毁或淤埋。2016年6月28日的泥石流造成的危害极为严重,导致下游部分房屋被掩埋,大量农田被冲毁,直接经济损失约1500万元。2018年完成二期工程治理后,大量物源在沟道内被拦挡,使得近年来泥石流活动性有所减弱。

3 泥石流危险性评价

3.1 基于模糊层次分析法的危险性评价

3.1.1 模糊层次分析法原理

模糊层次分析法(FAHP)是一种将模糊数学理论应用于层次分析法的决策方法。它主要用于处理决策问题中的不确定性和主观性,尤其适用于那些难以进行量化分析的决策问题^[13]。其基本分析步骤如下:

(1) 建立层次结构模型

建立层次结构模型需要将决策问题分解为目标、准则和方案等层次结构,其目的是将复杂的决策问题系统化、层次化,以便更有效地分析和处理^[14]。其中目标层(决策过程解决的核心问题)位于最顶层,准则层(解决核心问题的中间环节)位于中间,而方案层(解决核心问题的措施、策略)位于底层(图9)。

(2) 建立模糊互补判断矩阵

模糊层次分析中,通过成对比较的方式构建判断矩阵,以确定各元素之间的相对重要性,通常采用0.1~0.9标度法给予数量标度(表2)。如果判断矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$,其满足:① $a_{ij}=0.5, i=1,2,\dots,n$;② $a_{ij}+a_{ji}=1, i,j=1,2,\dots,n$,则这样的判断矩阵称为模糊互补判断矩阵。

(3) 评价因子权重确定及一致性检验

模糊互补判断矩阵的权重公式^[15]如下:

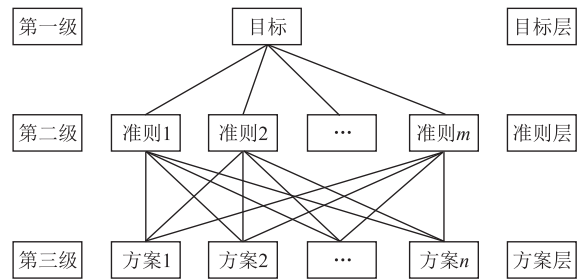


图9 层次结构分析模型

表2 模糊层次分析法评价尺度

标度	含义
0.5	两元素相比较,重要性相同
0.6	两元素相比较,前者稍微重要
0.7	两元素相比较,前者明显重要
0.8	两元素相比较,前者非常重要
0.9	两元素相比较,前者极端重要
0.1、0.2、0.3、0.4	若元素 <i>i</i> 与元素 <i>j</i> 相比较得到判断 r_{ij} ,则元素 <i>j</i> 与 <i>i</i> 相比较得到的判断为 $r_{ji}=1-r_{ij}$

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} + \frac{n}{2} - 1}{n(n-1)} \quad (1)$$

当相容性指标 $I(A,W) \leq \beta$ 时(一般取值0.1),则认为模糊互补判断矩阵满足一致性要求, β 越小,一致性要求越高^[16]。

(4) 评价指标隶属度确定

在本文中,选择结合了半梯形分布和三角分布的隶属函数(图10)。

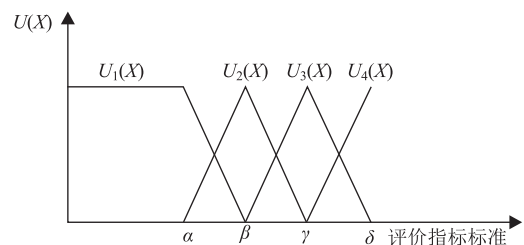


图10 隶属函数曲线图

隶属函数表达式如下:

$$U_1(X) = \begin{cases} 1 & x \leq \alpha \\ \frac{\beta-x}{\beta-\alpha}, & \alpha < x < \beta \\ 0 & x \geq \beta \end{cases} \quad (2)$$

$$U_2(X) = \begin{cases} 0, & x \leq \alpha, x \geq \gamma \\ \frac{x-\alpha}{\beta-\alpha}, & \alpha < x \leq \beta \\ \frac{\gamma-x}{\gamma-\beta}, & \beta < x < \gamma \end{cases} \quad (3)$$

$$U_3(X) = \begin{cases} 0, & x \leq \beta, x \geq \delta \\ \frac{x-\beta}{\gamma-\beta}, & \beta < x < \gamma \\ \frac{\delta-x}{\delta-\gamma}, & \gamma < x < \delta \end{cases} \quad (4)$$

$$U_4(X) = \begin{cases} 0, & x \leq \gamma \\ \frac{x-\gamma}{\delta-\gamma}, & \gamma < x < \delta \\ 1, & x \geq \delta \end{cases} \quad (5)$$

设 X_1, X_2, X_3 分别为评价标准的边界值,则 $\alpha = X_1, \beta = (X_1 + X_2) / 2, \gamma = (X_2 + X_3) / 2, \delta = X_3$ 。

根据选定的隶属函数,可以构建出评价指标集合 U 与评价等级集合 V 之间的模糊关系矩阵 R 。矩阵 R 的行列式如下:

$$R = (r_{ij}) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}$$

式中, r_{ij} 表示评价指标 u_i 对评价等级 v_j 的隶属度。

(5) 模糊综合评价结果

模糊综合评价结果通过各被评事物的模糊综合评价向量 B 来体现,其表达式为:

$$B = W \times R \quad (6)$$

为了充分反映不同评价等级对总评结果的贡献,本文采用模糊综合指数法进行分析,使危险度和评价标准相结合,从而增强评价结果的可信度和精确度。表达式为:

$$s = BV = [b_1, b_2, \dots, b_m] \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \cdots \\ v_m \end{bmatrix} \quad (7)$$

3.1.2 评价指标选取

泥石流的产生和演变是一个涉及多重因素的复杂自然过程,影响其危险性大小的因子众多,因此在选择评价指标时应遵循实用性、代表性、全面性的原则^[17-19]。本文在泥石流发育特征基础上,结合前人研究结果,最终确定了 5 个一级评价指标以及 9 个二级评价指标,并构建慢垒河泥石流危险性评价层次结构模型(图 11)。

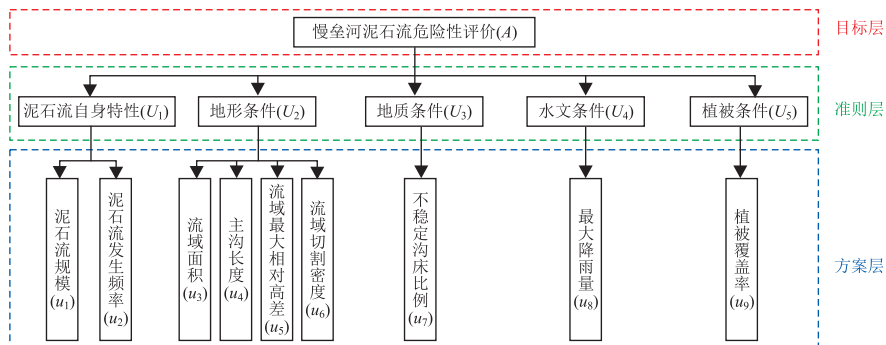


图 11 慢垒河泥石流危险性评价体系

泥石流规模:影响泥石流危险度的一个重要指标,泥石流一旦发生,其规模越大,对周围环境和人类造成的破坏也就越大。

泥石流发生频率:泥石流的发生频率受多种因素影响,包括地形地貌、气候、植被覆盖、地质条件、人类活动等,泥石流发生的频率是量化危险性评估的关键参数之一。通过统计分析特定区域内过去泥石流事件的发生频率,可以估计未来一段时间内泥石流发生的概率,从而为泥石流危险性评估提供定量依据。

流域面积:指以山脊为自然分水岭所围成的区域,流域面积直接关联到泥石流形成的两个关键因素:水源和可移动的松散物质储量。因此,在评估泥石流的危险性时,流域面积是一个重要的考量因素。

主沟长度:泥石流从发源地到终点的总行程,通

常,主沟越长,泥石流在流动途中携带的固体物质量就越大,其积累的能量和冲击力也相应增强,导致的破坏程度也更为严重。

流域相对高差:流域内最高与最低海拔之间的差值,是衡量势能和地形稳定性的重要指标。

流域切割密度:流域内主、支沟长度总和与流域面积的比值,综合反映流域沟谷侵蚀程度。

不稳定沟床比例:泥石流流域范围内松散物源补给长度与主沟长度比值,反映泥沙补给情况。

日最大降雨量:指区域 24 h 内记录的最大降雨量。在泥石流的研究中尤为重要,高强度的降雨会降低山坡的稳定性,从而触发泥石流,并增强泥石流的流动性,使其能够携带更多的泥沙石块。

植被覆盖率:指在一定区域内,地表被植被覆盖的比例。植被覆盖率对于泥石流的影响主要体现在

土壤保持和水文调节上。

3.1.3 模糊层次分析

据上述步骤,构造出慢垒河泥石流危险性评价模型模糊判断矩阵,求出模糊判断矩阵的特征矩阵和权重,并检验其一致性(表3)。

3.1.4 模糊综合评价

对慢垒河泥石流危险性模糊判断矩阵进行一致性检验后,根据泥石流评价指标实际值(表4)与指标危险等级表(表5),按式(3)~(5)计算,便可得出不同频率泥石流的隶属度与模糊关系矩阵。

表3 慢垒河泥石流危险性评价模糊判断矩阵

层次	模糊判断矩阵	模糊互补判断矩阵的特征矩阵	W	一致性检验
A-U ₅	$\begin{matrix} & A & U_1 & U_2 & U_3 & U_4 & U_5 \\ U_1 & 0.5 & 0.6 & 0.7 & 0.7 & 0.8 \\ U_2 & 0.4 & 0.5 & 0.6 & 0.6 & 0.8 \\ U_3 & 0.3 & 0.4 & 0.5 & 0.6 & 0.7 \\ U_4 & 0.3 & 0.4 & 0.4 & 0.5 & 0.5 \\ U_5 & 0.2 & 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.5 \end{matrix}$	$\begin{bmatrix} 0.5 & 0.52 & 0.55 & 0.56 & 0.61 \\ 0.48 & 0.5 & 0.52 & 0.54 & 0.59 \\ 0.45 & 0.48 & 0.5 & 0.52 & 0.56 \\ 0.44 & 0.46 & 0.48 & 0.5 & 0.54 \\ 0.39 & 0.41 & 0.44 & 0.46 & 0.5 \end{bmatrix}$	0.24 0.22 0.20 0.18	$I(U, W_{\check{c}}) = 0.094 < 0.1$, 满足一致性要求

表4 慢垒河泥石流评价指标实际值

评价指标		取值			
泥石流自身特性(U ₁)	泥石流发生频率(%)	1	2	5	10
	泥石流规模(10 ⁴ m ³)	10.33	6.95	3.92	2.53
地形条件(U ₂)	流域面积/km ²	18.01			
	主沟长度/km	8.9			
	流域相对高差/km	1.26			
	流域切割密度/km ⁻¹	0.96			
地质条件(U ₃)	不稳定沟床比例/%	56.23			
水文条件(U ₄)	日最大降雨量/mm	108.3			

表5 泥石流评价指标危险等级表^[20]

评价指标	危险等级			
	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄
泥石流规模/10 ⁴ m ³	≤1	1~10	10~100	≥100
泥石流发生频率(a/次)	≤10	10~30	30~100	≥100
流域面积/km ²	≤0.5	0.5~10	10~35	≥35
主沟长度/km	≤1	1~5	5~10	≥10
流域相对高差/km	≤0.35	0.35~0.6	0.6~1.0	≥1.0
流域切割密度/km ⁻¹	≤5	5~10	10~15	≥15
不稳定沟床比例/%	≤10	10~25	25~60	≥60
日最大降雨量/mm	≤50	50~75	75~100	≥100
植被覆盖率/%	≥50	50~30	30~20	≤20

$$R_{P=5\%} = \begin{bmatrix} 0.351 & 0.649 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.260 & 0.740 & 0 \\ 0 & 0 & 0.440 & 0.560 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.215 & 0.785 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{P=10\%} = \begin{bmatrix} 0.660 & 0.340 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.260 & 0.740 & 0 \\ 0 & 0 & 0.440 & 0.560 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.215 & 0.785 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

根据式(6),计算出模糊评价结果矩阵:

$$B_{P=1\%} = W * R_{P=1\%} = [0.214, 0.124, 0.123, 0.540]$$

$$B_{P=2\%} = W * R_{P=2\%} = [0.214, 0.172, 0.195, 0.420]$$

$$B_{P=5\%} = W * R_{P=5\%} = [0.256, 0.214, 0.111, 0.420]$$

$$B_{P=10\%} = W * R_{P=10\%} = [0.413, 0.057, 0.111, 0.420]$$

$$R_{P=1\%} = \begin{bmatrix} 0 & 0.902 & 0.098 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.260 & 0.740 & 0 \\ 0 & 0 & 0.440 & 0.560 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.215 & 0.785 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{P=2\%} = \begin{bmatrix} 0 & 0.971 & 0.029 & 0 \\ 0 & 0.333 & 0.667 & 0 \\ 0 & 0.260 & 0.740 & 0 \\ 0 & 0 & 0.440 & 0.560 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.215 & 0.785 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

根据式(7),对慢垒河泥石流危险性模糊结果矩阵进行计算,得到慢垒河泥石流危险性最终评价结果(表 6)。

表 6 不同频率下慢垒河泥石流危险性等级

泥石流爆发周期/a	100	50	20	10
模糊综合指数法计算结果	2.99	2.82	2.70	2.54
泥石流危险等级	中度危险	中度危险	中度危险	中度危险

3.2 基于刘希林评价模型的泥石流危险性评价

根据刘希林等^[21]提出的危险性评价方法,共选取 7 个评价因子:泥石流规模(M),发生频率(F),流域面积(S₁),主沟长度(S₂),流域相对高差(S₃),流域切割密度(S₆)和不稳定沟床比(S₉),并根据表 7 对其进行转换(表 8)。

表 7 转化函数表

危险因子	转换函数
F	$F=0$, 当 $f \leq 1$ 时; $F = \log f / 2$, 当 $1 < f \leq 100$ 时; $F=1$, 当 $f > 100$ 时
M	$M=0$, 当 $m \leq 1$ 时; $M = \log m / 3$, 当 $1 < m \leq 1\ 000$ 时; $M=1$, 当 $m > 1\ 000$ 时
S ₁	$S_1 = 0.245\ 8\ s_1^{0.349\ 5}$, 当 $0 \leq s_1 \leq 50$ 时; $S_1 = 1$, 当 $s_1 > 50$ 时
S ₂	$S_2 = 0.290\ 3\ s_2^{0.5372}$, 当 $0 \leq s_2 \leq 10$ 时; $S_2 = 1$, 当 $s_2 > 10$ 时
S ₃	$S_3 = 2s_3 / 3$, 当 $0 \leq s_3 \leq 1.5$ 时; $S_3 = 1$, 当 $s_3 > 1.5$ 时
S ₆	$S_6 = 0.05\ s_6$, 当 $0 \leq s_6 \leq 20$ 时; $S_6 = 1$, 当 $s_6 > 20$ 时
S ₉	$S_9 = s_9 / 60$, 当 $0 \leq s_9 \leq 60$ 时; $S_9 = 1$, 当 $s_9 > 60$ 时

表 8 慢垒河泥石流危险因子转换值

危险因子	转换值			
F	1	0.849	0.651	0.5
M	0.338	0.281	0.198	0.134
S ₁		0.675		
S ₂		0.939		
S ₃		0.840		
S ₆		0.048		
S ₉		0.937		

再根据计算公式 $H=0.29\ M+0.29\ F+0.14\ S_1+0.09\ S_2+0.06\ S_3+0.11\ S_6+0.03\ S_9$ 和分级标准(表 9),得到慢垒河泥石流危险性评价结果(表 10)。

表 9 泥石流危险度分级标准

危险度	≤ 0.35	0.35~0.60	0.60~0.85	≥ 0.85
泥石流危险性	轻度危险	中度危险	高度危险	极高危险

表 10 不同频率下慢垒河泥石流危险性

泥石流爆发周期/a	100	50	20	10
危险度	0.651	0.591	0.509	0.447
危险性	高度危险	中度危险	中度危险	中度危险

3.3 泥石流危险性综合分析

通过刘希林评价模型与模糊层次分析法对慢垒河泥石流进行危险性评价,得到对比结果如表 11 所示。

表 11 慢垒河泥石流危险性评价结果对比

泥石流爆发周期/a	100	50	20	10
刘希林评价模型	高度危险	中度危险	中度危险	中度危险
模糊层次分析法	中度危险	中度危险	中度危险	中度危险

由表 11 可知,两种模型评价结果基本一致,5~50 a 一遇泥石流均被评定为中度危险。然而,由于两种模型在评价因素和权重分配上的差异,对于 100 a 一遇的泥石流危险等级的评估有所不同,刘希林评价模型将其评为高度危险,而模糊层次分析法评为中度危险。

由于慢垒河泥石流的主要触发因素为降雨,但刘希林评价模型中并未考虑降雨因素的影响。因此,本文认为模糊层次分析法得出的危险性评价结果更加科学、可靠。

4 结论

(1) 慢垒河流域受地震影响,诱发了大量次生地质灾害,导致松散物源储量增加。在地形、地貌、构造、岩性和气候的共同作用下,泥石流的诱发条件加剧,从而使泥石流灾害成为该流域内潜在的高危地质灾害。

(2) 本文基于慢垒河泥石流的发育特征和《泥石流灾害防治工程勘查规范》,对慢垒河泥石流发展趋势进行分析,得出慢垒河泥石流正处于发展期,易发程度被评定为“易发”。

(3) 本文基于慢垒河泥石流成灾环境与致灾因子,利用模糊层次分析法和刘希林评价模型对其开展危险性评价。结果显示:10~50 a 泥石流危险等级两种评价模型均为中度危险,但在评定 100 a 一遇的泥石流危险等级时存在差异,刘希林评价模型为高度危险,而模糊层次分析为中度危险,结合慢垒河实际情况,综合评定其 10~100 a 一遇泥石流危险等级为中度危险,评价结果较为合理、可靠,可为该流域泥石流的防治提供理论支撑。

(4) 相较于刘希林评价模型,模糊层次分析法在评价因子的选择上展现出更高的灵活性。鉴于不同泥石流成灾环境及其致灾因子各异,本文认为模糊层次分析法在科学性和可靠性方面具有优势。

参考文献

[1] 黄崇福. 自然灾害基本定义的探讨[J]. 自然灾害学报, 2009, 18

- (5):41-50.
- [2] 唐邦兴,周必凡,吴积善. 中国泥石流[M]. 北京:商务印书馆, 2000.
- [3] 孟凡奇. 基于GIS的泥石流预测预报[D]. 吉林大学, 2011.
- [4] 魏星宇,沈军辉,吴俊杰,等. 沪-石高速甘草沟泥石流发育特征及危险性分析[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(6):229-238.
- [5] 冯培华,向灵芝,罗亮,等. 基于灾害熵与层次分析法的泥石流危险性评价对比分析:以甘肃省迭部县为例[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(29):12416-12426.
- [6] 李晓婷,刘文龙. 模糊综合评判法在甘肃陇南武都区石门乡泥石流危险性评价中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4):71-76.
- [7] 阮正峰,霍建宇,李四堂,等. “8·3”鲁甸地震背景下甘沟流域泥石流危险性评价[J]. 地质灾害与环境保护, 2023, 34(3):15-22.
- [8] 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.
- [9] Carrara A, Cardinali M, Guzzetti F. Uncertainty in assessing landslide hazard and risk [J]. ITC journal, 1992, (2):172-183.
- [10] 霍建宇,郭婷婷,徐世光,等. 永胜刘官河流域泥石流灾害危险性评价[J]. 地质灾害与环境保护, 2020, 31(1):9-16.
- [11] 孙聿卿,葛永刚,陈兴长,等. 金沙江流域泥石流危险性评价[J/OL]. 地质通报, 1-16 [2024-11-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.p.20240222.2025.005.html>.
- [12] 中华人民共和国国土资源部. 泥石流灾害防治工程勘查规范(DZ/T 0220-2006)[S]. 北京:2006.
- [13] 张吉军. 模糊层次分析法(FAHP)[J]. 模糊系统与数学, 2000, 14(2):80-88.
- [14] 郭金玉,张忠彬,孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(5):148-153.
- [15] 兰继斌,徐扬,霍良安,等. 模糊层次分析法权重研究[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(9):107-112.
- [16] 吕跃进. 基于模糊一致矩阵的模糊层次分析法的排序[J]. 模糊系统与数学, 2002, 16(2):79-85.
- [17] 刘希林. 我国泥石流危险度评价研究:回顾与展望[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(4):1-8.
- [18] 牛岑岑. 泥石流危险度评价指标的提取与等级划分[D]. 吉林大学, 2013.
- [19] 谭炳炎. 泥石流沟严重程度的数量化综合评判[J]. 水土保持通报, 1986, 6(1):51-57.
- [20] 韩雨菲. 四川省壤塘县茸郎沟泥石流发育特征及危险性评价[D]. 西南交通大学, 2019.
- [21] 刘希林. 泥石流危险度判定的研究[J]. 灾害学, 1988, 3(3):10-15.

作者简介: 郭宏涛(1999—),男,湖南郴州人,硕士研究生,主要研究方向为工程地质与灾害地质. E-mail:805114678@qq.com

通讯作者: 郭婷婷(1984—),女,内蒙古呼和浩特市人,博士,副教授,主要研究方向为灾害地质与水文地质. E-mail:181604785@qq.com

(上接第21页)

发生前后物源增加明显,相应松散物源储量增加,低频泥石流可能转化为中、高频泥石流。

5 结论

(1) 2023年8月15日滇金丝猴景区响古箐暴发低频泥石流,局部强降雨是主要激发因素,泥石流主要由上游支沟沟床启动,造成巨大经济损失。

(2) 自然保护区植被丰茂、腐植层厚,腐朽树木以局部堵溃形式参与泥石流活动,枯木对岸坡稳定性及物源启动具有特殊模式,漂木搬运具有冲击、堵溃、堵塞涵洞等致灾效应。

(3) 滇西北自然保护区泥石流具有隐蔽性、突发性、规模大、危害大的特点。在调查时,应充分考虑高植被区清水沟谷久远灾害史的访问调查。同时其具有支沟暴发泥石流的不确定性,在监测预警方面应充分考虑高中山地区局部降雨的差异性。

(4) 低频泥石流灾后因沟床下切、岸坡坡体及坡面树木失稳,沟内松散物源将进一步增加,具备向

中、高频泥石流转化的可能,应及早实施综合治理工程。

参考文献

- [1] 倪化勇,吕学军,刘宇杰,等. 低频泥石流特征及其预测初步探讨[J]. 工程地质学报, 2007, 15(5):612-620.
- [2] 向兵,谢万银,苏玉杰,等. 川西公路低频泥石流发育特征与防治综述[J]. 山西建筑, 2023, 49(17):1-8.
- [3] 徐如阁,铁永波,巴仁基. 西南山区典型低频泥石流沟谷特征与监测预警——以四川省泸定县兴隆沟为例[J]. 地质灾害与环境保护, 2017, 28(3):10-13.
- [4] 王毅,智晶子,卢鹏飞. 川西山区低频泥石流形成条件分析——以九寨沟县香扎沟泥石流为例[J]. 地质与资源, 2023, 32(3):360-365.
- [5] 魏凌浩,张可能,胡丰云,等. 薄土层高植被盖度区域低频泥石流成因分析[J]. 岩土工程与地下工程, 2022, 43(3):139-141.
- [6] 周必凡,李德基,罗德富,等. 泥石流防治指南[M]. 北京:科学出版社, 1991.
- [7] 崔鹏,柳素清,唐邦兴,等. 风景区泥石流研究与防治[M]. 北京:科学出版社, 2004.

作者简介: 刘珍(1983—),男,正高级工程师,主要从事地质灾害防治勘查、设计及调查评价工作. E-mail:463941763@qq.com