

## 泥石流拦挡坝工程服役性能特征分析

周 亮, 何晓英, 晋云超, 张 展, 向灵芝, 沈 娜

**Analysis of service performance characteristics of debris flow check dams: A case study in Wudu District, Longnan City, Gansu Province**

ZHOU Liang, HE Xiaoying, JIN Yunchao, ZHANG Zhan, XIANG Lingzhi, and SHEN Na

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202305019>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 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

#### 基于增量加载法的泥石流拦挡坝抗冲击力数值模拟

Numerical simulation of impact resistance of debris flow dam: A case study of the debris flow dam in Sanyanyu Gully, Zhouqu County, Gansu Province

刘兴荣, 魏新平, 陈豫津, 王翔宇 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 78-83

#### 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

$\${suggestArticle.titleEn}$

李晓婷, 刘文龙 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(4): 71-76

#### 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

#### 新型屋脊式拦砂坝拦挡输移性能试验研究

Experimental Study of Preventing Debris Flow by Type Debris Dam

吴佳俊, 杨兴国, 周宏伟, 杨丰荣, 陈昊, 梁煜峰 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(4): 85-90

#### 基于遗传规划的泥石流多因子融合预测方法

Multi-factors fusion method of debris flow prediction based on genetic programming

翟淑花, 冒建, 南, 刘欢欢, 王云涛, 王强强, 熊春华, 王艳梅 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 111-115



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202305019

周亮, 何晓英, 晋云超, 等. 泥石流拦挡坝工程服役性能特征分析——以甘肃省陇南市武都区为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(6): 37-46.

ZHOU Liang, HE Xiaoying, JIN Yunchao, et al. Analysis of service performance characteristics of debris flow check dams: A case study in Wudu District, Longnan City, Gansu Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(6): 37-46.

# 泥石流拦挡坝工程服役性能特征分析

——以甘肃省陇南市武都区为例

周亮<sup>1</sup>, 何晓英<sup>1,2</sup>, 晋云超<sup>1</sup>, 张展<sup>1</sup>, 向灵芝<sup>1,2</sup>, 沈娜<sup>1,2</sup>

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 山区公路水运交通地质减灾

重庆市高校重点实验室, 重庆 400074)

**摘要:** 拦挡坝是泥石流防治工程中最重要措施之一, 其防灾减灾能力在服役期间随着泥石流多次冲出逐渐降低, 需开展拦挡坝服役性能特征分析。以甘肃省陇南市武都区泥石流拦挡坝为研究对象, 对区内 15 条沟、55 座拦挡坝服役性能进行了现场调查, 从有效性和安全性两方面遴选了库容淤积比、坝肩边坡稳定程度、排水孔堵塞程度、坝体损毁度、坝基损毁度、坝肩损毁度、安全性等 7 个评价因子, 采用层次分析法和模糊综合评价法建立了拦挡坝单坝服役性和拦挡坝单沟综合服役性的评价模型, 将服役性能等级划分为优、良、中等、差等 4 个等级。评价结果表明: 拦挡坝单坝服役性等级“差”占 34.5%; 拦挡坝单沟综合服役性等级“差”占 33.3%, 评价结果与现场考察相符。研究成果为拦挡坝服役效果及服役寿命预测提供了可借鉴的依据。

**关键词:** 拦挡坝; 服役性评价; 模糊综合评价法; 泥石流; 武都区

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)06-0037-10

## Analysis of service performance characteristics of debris flow check dams: A case study in Wudu District, Longnan City, Gansu Province

ZHOU Liang<sup>1</sup>, HE Xiaoying<sup>1,2</sup>, JIN Yunchao<sup>1</sup>, ZHANG Zhan<sup>1</sup>, XIANG Lingzhi<sup>1,2</sup>, SHEN Na<sup>1,2</sup>

(1. *Hehai College, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China*; 2. *Key Laboratory of Geological Hazards Mitigation for Mountainous Highway and Waterway, Chongqing 400074, China*)

**Abstract:** Check dams play a pivotal role in debris flow prevention and control engineering. However, their disaster prevention and mitigation capacity gradually decrease over service time due to repeated debris flow impacts. The study was carried out in 15 ditches and 55 check dams within Wudu District, Longnan City, Gansu Province. Seven key evaluation factors were selected for effectiveness and safety: reservoir siltation ratio, slope stability, drainage hole blockage, dam body damage, dam foundation damage, dam shoulder damage, and safety. The evaluation model of the serviceability of the individual dam and the comprehensive serviceability of the single trench of the barrage was established by using hierarchical analysis and fuzzy comprehensive evaluation method, and the serviceability was divided into four grades: excellent, good, medium and poor. The

收稿日期: 2023-05-18; 修订日期: 2023-07-17

投稿网址: <https://www.zgdzzyfzxb.com/>

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0902); 国家内河航道整治工程技术研究中心暨水利水运工程教育部重点实验室开放基金项目(SLK2021B05); 国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目(U22A20600)

第一作者: 周亮(1997-), 男, 四川广元人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害防治理论与技术方面的研究。E-mail: 946698861@qq.com

通讯作者: 何晓英(1987-), 女, 四川射洪人, 副教授, 主要从事地质灾害防灾减灾理论与技术研究。E-mail: xiaoyinghe@cqjtu.edu.cn

evaluation results show that the serviceability rating of individual dams is predominately "poor", accounting for 34.5%. Similarly, the collective serviceability rating of single trench dams for debris flow is predominately "poor", at 33.3%. The results of the evaluation are consistent with the fieldwork observations, providing a valuable reference for predicting the service performance and service life of barrage dams.

**Keywords:** check dam; serviceability evaluation; fuzzy comprehensive evaluation method; debris flow; Wudu District

## 0 引言

中国是泥石流多发的国家,发生次数占多年地质灾害记录总数的 4.35%,造成的直接经济损失约占各类地质灾害总和的 30%<sup>[1]</sup>。对泥石流进行易发性<sup>[2]</sup>、危险性<sup>[3]</sup>评价和模拟从理论层面为泥石流灾害防治提供依据,而实施各种具体工程是防治泥石流的有效手段<sup>[4-5]</sup>。

20 世纪 80 年代,我国开始泥石流防治工作<sup>[6]</sup>。拦挡坝是防治工程最重要的手段之一,其主要功能为:①拦蓄:削减泥石流有效方量,降低泥石流峰值流量,减少泥石流下泄规模<sup>[7]</sup>;②稳:降低上游沟床纵坡率和横向坡度,增加了边坡稳定性,抑制泥石流发育规模<sup>[8-9]</sup>;③排:排泄流水、细颗粒、抑制坝基渗透和掏蚀作用。拦挡坝服役性能是指拦挡坝在设计使用期间能稳定发挥其功能,有效降低泥石流灾害风险,保证人民生命财产安全。其服役性能主要体现在“安全性”和“有效性”两方面,对拦挡坝的长期效益产生重要影响。

相关学者通过野外调查和室内模拟试验,对拦挡坝的破坏原因、破坏模式等做了大量研究。如刘兴荣等<sup>[3]</sup>针对陇南市武都区拦挡坝破损分析及优化对策中发现,拦挡坝破损形式依次为副坝破损、坝肩破损、溢流口破损、基础破损、冲毁、勾缝破损,对沟道机理认识不足、坝体存在缺陷和保护措施不当是拦挡坝破损的主要原因。齐得旭等<sup>[10]</sup>通过对四川 63 座拦挡坝现场调查发现:根据拦挡坝破坏部位分为坝基破坏、坝肩破坏和坝体破坏;按破坏原因统计结果显示,冲击破坏占 36.59%,冲刷掏蚀破坏占 31.71%,滑动倾覆破坏占 15.85%,渗透破坏占 15.85%,其中冲击破坏模式占比最大。SHOKI 等<sup>[11]</sup>利用实验和数值模拟发现多个滑坡坝的级联溃坝所引发的洪峰流量要大于单个溃坝所引发的洪峰流量,结果表明:下游坝高开始迅速侵蚀时,流入下游大坝的流量是导致级联故障的主因。LYU 等<sup>[12]</sup>发现坝间冲淤特性是影响拦挡坝设计的重要因素,通过水槽试验对沟床冲刷开展了研究,结果表明:水槽坡度对冲刷深度、长度、淤积长度和淤积量影响最大,研究结果可为泥石流防灾减灾中的窗口坝设计提供技术依据。刘兴荣等<sup>[3]</sup>还运用增量加减法模拟三眼峪沟泥石

流拦挡坝的抗冲击能力。

我国拦挡坝材料主要为浆砌块石,抗冲击能力弱<sup>[13]</sup>;拦挡坝库容量随着泥石流的多次冲淤逐渐减小;泥石流冲刷导致沟道边坡稳定差;坝体结构设计缺陷、坝址选择和坝高设置常不合理、坝肩和基础保护措施不足<sup>[14]</sup>、掏蚀、渗流破坏<sup>[15]</sup>等诸多原因导致其服役性下降。

拦挡坝的服役性能是泥石流防治工程关注的重点,然而鲜见对服役性评价的研究,因此,深刻认识拦挡坝服役性能降低机理,有效评价拦挡坝服役性能现状,是保证泥石流防治效果,是预测服役寿命、提高长期效益的关键任务。本文选取了武都区 15 条泥石流沟中的 55 座拦挡坝为研究对象,通过调查拦挡坝运行现状和损毁部位情况,运用层次分析法和模糊综合评价法,从安全性、有效性出发,建立服役性评价体系,为拦挡坝服役效果及其定量化评价提供可借鉴依据。

## 1 研究区概况

### 1.1 研究区地质条件

研究区位于甘肃省陇南市武都区,属于长江流域嘉陵江水系,总面积为 4 683 km<sup>2</sup>(图 1)。武都区位于秦岭山地,区内山峰众多且高差较大,河谷切割较为严重,峡谷多呈“V”字型,属于典型的侵蚀中高山地貌。地势陡峭,坡度多为 30°以上,地形起伏明显,河道多沿大断裂分布<sup>[16]</sup>。区域位于南北地震构造带内,属于青藏高原向中部高原过渡带,新构造活动剧烈,造成岩层褶皱较多,小断层发育强烈,表层风化严重,是导致该地区泥石流灾害频发的主要因素。区内出露的地层主要为中、新

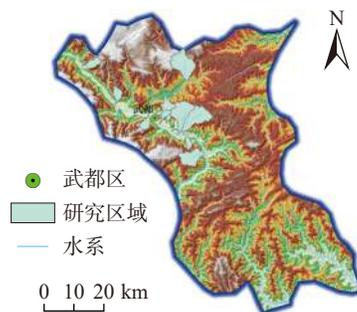


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Sketch map of the study area

生界泥质红层软岩、志留系和泥盆系的页岩、千枚岩、炭质千枚岩、板岩<sup>[17]</sup>。

### 1.2 区内拦挡坝分布及现状

甘肃省陇南市武都区是我国主要的泥石流高发区之一。据统计,区内泥石流沟 349 条,其中危害大、威胁性高和频发的灾害性泥石流沟 264 条,占泥石流沟总数的 75.6%。主要密集分布于武都区白龙江干流两岸,北峪河马街以下地段以及勾坝河、福津河等地段<sup>[15]</sup>,均为暴雨型泥石流。区内大部分泥石流沟处于发展期和

旺盛期,暴发频率高,如马槽沟、泥湾沟为武都地区的典型“沟谷型”泥石流,其历史活动非常频繁,1956—2005 年期间曾 8 次暴发大规模泥石流,造成直接经济损失近亿元,数万居民无家可归<sup>[17]</sup>。

选取研究区内人口密度高、泥石流致灾危害大的马街镇、汉王镇、城关镇等区域内的 15 条泥石流沟进行实地考察,对 55 座坝的运行情况和损毁特征进行统计分析,拦挡坝分布如图 2 所示。由于图 2 篇幅有限,部分拦挡坝未标注出来。

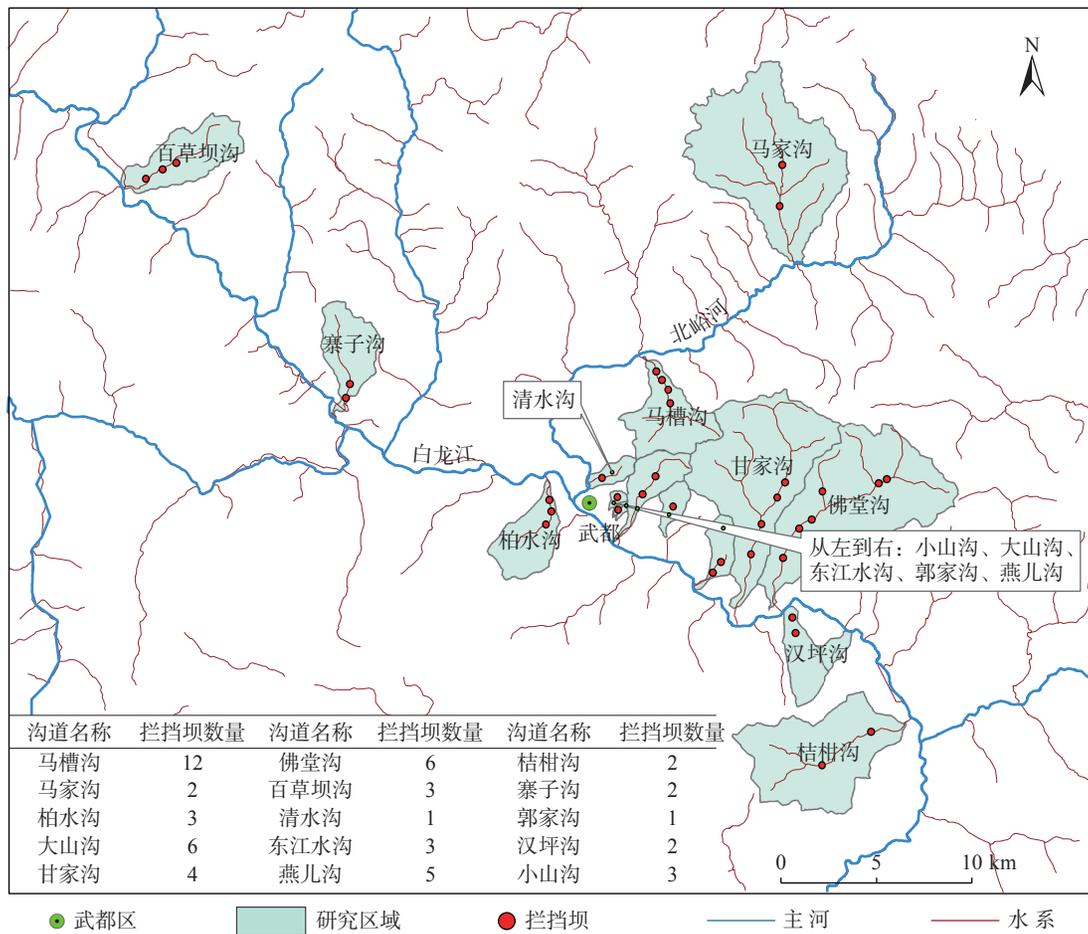


图 2 研究区拦挡坝分布

Fig. 2 Distribution of check dams in the study area

研究区内拦挡坝损毁类型多样化,主要表现为有效性与安全性能降低。①有效性降低-库容淤积,如燕儿沟 2 号坝,见图 3(a);②有效性降低-坝肩边坡失稳,如马槽沟 12 号坝,见图 3(b)上;③有效性降低-排水孔堵塞,如马槽沟 12 号坝,见图 3(b)下;④安全性降低-坝基损毁,如马槽沟 8 号坝,见图 3(c);⑤安全性降低-坝体损毁,如寨子沟 1 号坝,见图 3(d);⑥安全性降低-坝肩损毁,如寨子沟 1 号坝,见图 3(d)。拦挡坝典型损毁特征如表 1 所示。

通过实地考察发现,随着泥石流淤积,导致拦挡坝库容量急剧减少和排水孔堵塞,泥石流冲刷造成坝肩边坡失稳。在所选取的 55 座坝中,满库占比 62%、半库占比 11%、空库占比 27%。在泥石流的冲击和掏蚀作用下,导致坝基悬空-坝体倾倒、坝肩受冲击-坝肩损毁。坝肩和坝基损毁率较高,分别为 20% 和 18%,坝体损毁率为 11%。

因此,需开展拦挡坝服役性能现状评价,为保证泥



图 3 拦挡坝典型损毁类型

Fig. 3 Typical damage types in check dams

表 1 拦挡坝典型损毁特征

Table 1 Typical damage characteristics of check dams

坝体编号	拦挡坝损毁特征
燕儿沟2号	该坝位于燕儿流通区, 坝体淤埋, 库容已淤满, 右坝肩岩土体松散, 排水孔完全堵塞, 右坝肩出现裂缝
马槽沟12号	该坝位于马槽沟支沟交汇处, 库容已淤满, 右坝肩堆积大量松散物, 排水孔完全堵塞, 右坝肩出现轻度裂缝, 坝基裸露
马槽沟8号	该坝位于马槽沟流通区, 左坝肩冲毁严重, 库容未淤满, 沟道切割严重, 两侧岩土体松散, 坝体出现明显松弛, 坝基裸露
寨子沟1号	该坝位于寨子沟沟口处, 毗邻建筑物, 库容已淤满, 右坝肩堆积物松散, 排水孔完全堵塞, 右坝肩冲毁严重

### 2.1 泥石流单坝服役性能评价

#### (1) 建立评价因子级 $U$

武都区地质结构复杂, 又属于泥石流高发区, 导致拦挡坝服役能力下降因子较多, 可运用层次分析法 (AHP) 建立层次结构。层次分析法是将与决策有关的元素分解成目标、准则、方案层次, 进行定性和定量分析的决策方法<sup>[22]</sup>, 具有层次分明, 逻辑清晰等特点。

基于拦挡坝的设计规范、防灾减灾原理和对研究区实地考察, 以“拦挡坝服役性”为目标层, “有效性”为准则层, 其中包括“安全性、淤积库容比、坝肩边坡失稳程度、排水孔堵塞程度”, “安全性”为方案层, 其中包括“坝体、坝基、坝肩损毁度”, 以此建立三层拦挡坝服役性评价体系(图 4)。

拦挡坝安全性是指坝体结构在设计使用期内能够承受泥石流冲刷和块石的撞击, 能够保持必要的整体稳定性。坝体结构主要由“坝体、坝基、坝肩”组成, 分别以“损毁程度”进行评价, 评价因子分别以  $u_1$ 、 $u_2$ 、 $u_3$  表示, 损毁程度越小, 坝体越稳定。

拦挡坝有效性是指其设计使用期内能发挥拦蓄、稳定沟床岸坡、排泄泥沙、水流的功能性。由“安全性、拦蓄、稳、排”四部分组成。其中“安全性”评价因

子, 即  $u_4$ , 安全性起至关重要的作用; “拦蓄”以“淤积库容比”为评价因子, 即  $u_5$ , 淤积库容比为泥石流淤积量与设计库容之比, 淤积库容比越小则拦蓄能力越大; “稳”以“坝肩边坡失稳程度”为评价因子, 即  $u_6$ , 失稳程度越小越稳定; “排”以“排水孔堵塞程度”为评价因子, 即  $u_7$ , 堵塞程度越小越通畅。

### 2 泥石流拦挡坝服役性模糊综合评价模型

模糊数学的隶属度理论<sup>[18-19]</sup>可把定性评价转化为定量评价, 即用模糊数学对受到多种因素制约的事物或对象做出一个总体的评价, 它具有结果清晰, 系统性强, 能较好地解决模糊的、难以量化的问题。目前, 该方法已经在泥石流风险评估中得到大量应用<sup>[20-21]</sup>。拦挡坝作为泥石流防治的重要手段, 导致其服役性能下降因子众多, 难以定量综合评价, 因此模糊综合评价法非常适用于拦挡坝服役性能的评价。

模糊综合评价模型主要流程为: 建立评价因子级  $U$ →建立评价集  $V$ →构建判断矩阵及权重计算→确定隶属函数→代入函数计算→得出评价结果。

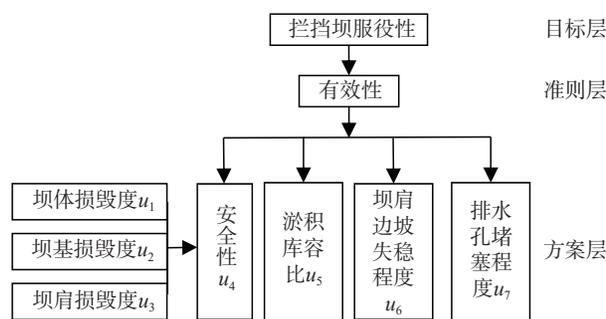


图 4 拦挡坝服役性评价体系

Fig. 4 Service evaluation system for check dams

#### (2) 建立评价集 $V$

参照地质灾害分级分类标准<sup>[23]</sup>, 划分拦挡坝服役性能评价集:  $V=\{\text{优}(V_1), \text{良}(V_2), \text{中等}(V_3), \text{差}(V_4)\}$ , 综合诸多学者的研究成果, 并结合实际调查情况进行分析, 将 7 个评价因子进行分级及定量化取值<sup>[22]</sup>(表 2—3)。

表2 拦挡坝服役性能评价因子等级及赋值

Table 2 Check dam service performance evaluation factor rating and assignment

	评价因子	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$
安全性	坝体损毁度 $u_1$	无	轻度	中度	重度
	坝基损毁度 $u_2$	无	轻度	中度	重度
	坝肩损毁度 $u_3$	无	轻度	中度	重度
	安全性 $u_4$	—	—	—	—
有效性	淤积库容比 $u_5/\%$	<20	20~<50	50~<80	≥80
	坝肩边坡失稳程度 $u_6$	无	轻度	中度	重度
	排水孔堵塞程度 $u_7$	无	轻度	中度	重度

表3 评价值的取值依据及量化取值

Table 3 The basis and quantitative values for evaluation values

评价值	取值依据	定量化取值
无	坝肩边坡稳定;排水孔未堵塞;坝基、坝体、坝基均未出现损、整体结构完好	0~<10
轻度	坝肩边坡出现裂痕;排水孔堵塞程度10%~20%;坝基完好,坝体表面脱落,坝肩局部产生裂缝	10~<20
中度	坝肩边坡局部岩土体松动;排水孔堵塞程度20%~40%;坝基处有积水、出现脱落,坝体张裂、掉块、局部损毁,坝肩掉块、残缺	20~<40
重度	坝肩边坡失稳、出现滑坡;排水孔堵塞;坝基出露、悬空,坝体倾倒,坝肩冲毁	≥40

(3)构建判断矩阵及权重计算

按照评价目标将相关评价指标构建起判断矩阵,并建立起上层对下层的支配关系,将方案层评价因子依次进行两两间的相互比较,引用1~9的整数及其倒数的标度方法<sup>[24-25]</sup>,判断矩阵的标度及其含义如表4所示。

表4 判断矩阵标度及其含义

Table 4 The scale of judgment matrix and its significance

标度	含义
1	两个因子相比较,两者具有相同的重要性
3	两个因子进行比较,前者比后者略微重要
5	两个因子进行比较,前者比后者较为重要
7	两个因子进行比较,前者比后者非常重要
9	两个因子进行比较,前者比后者极其重要

注:2,4,6,8为上述两相邻判断的中间值, $a_{ij}$ 表示因素 $a_i$ 与因素 $a_j$ 的重要性之比, $a_{ij}$ 与 $a_{ji}$ 之间的关系表示为 $a_{ij}=1/a_{ji}$ 。

可得方案层、准则层各影响因素的权重值(表5—6)。

表5 方案层的权重

Table 5 Weights at the scheme level

评价因子	$u_1$	$u_2$	$u_3$	权重
$u_1$	1	1	4	0.444
$u_2$	1	1	4	0.444
$u_3$	1/4	1/4	1	0.112

(4)确定隶属函数

基于评价因子数据的分布特征,参考相关学者的使用经验,建立“梯形分布”函数,进行隶属度函数的设计<sup>[21]</sup>,如下:

表6 准则层的权重

Table 6 Weight at the criterion level

评价因子	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$u_7$	权重
$u_4$	1	3	4	5	0.538
$u_5$	1/3	1	2	3	0.230
$u_6$	1/4	1/2	1	4	0.163
$u_7$	1/5	1/3	1/4	1	0.069

$$\begin{aligned}
 Y_{v1} &= \begin{cases} 1 & (x_i \leq e_1) \\ \frac{e_2 - x_i}{e_2 - e_1} & (e_1 < x_i \leq e_2) \\ 0 & (x_i > e_2) \end{cases} \\
 Y_{v2} &= \begin{cases} 0 & (x_i \leq e_1, x_i \geq e_3) \\ \frac{x_i - e_1}{e_2 - e_1} & (e_1 < x_i \leq e_2) \\ \frac{e_3 - x_i}{e_3 - e_2} & (e_2 < x_i \leq e_3) \end{cases} \\
 Y_{v3} &= \begin{cases} 0 & (x_i \leq e_2, x_i \geq e_4) \\ \frac{x_i - e_2}{e_3 - e_2} & (e_2 < x_i \leq e_3) \\ \frac{e_4 - x_i}{e_4 - e_3} & (e_3 < x_i \leq e_4) \end{cases} \\
 Y_{v4} &= \begin{cases} 0 & (x_i \leq e_3) \\ \frac{x_i - e_3}{e_4 - e_3} & (e_3 < x_i \leq e_4) \\ 1 & (x_i > e_4) \end{cases}
 \end{aligned} \tag{1}$$

式中: $x_i$ ——各因子实际取值;

$e_i$ ——评价集的上下限。

(5)应用案例

拦挡坝服役性模糊综合评判计算公式<sup>[26]</sup>:

$$O = W \cdot R \quad (2)$$

式中： $O$ ——模糊综合评判集；

$W$ ——权重向量；

$R$ ——模糊关系矩阵。

将“安全性”和“有效性”记为“A”和“B”，根据定量化取值代入隶属函数计算得到模糊关系矩阵  $R^{[25]}$ 。计算流程为：先计算方案层“安全性”模糊综合评判集  $O$  值，将计算结果带入准则层计算“有效性”，准则层模糊综合评判集即为目标层最终评判值，根据最大隶属度原则，综合评判集中最大值所对应的评价等级为评价结果。

以马槽沟 12 号拦挡坝为例，该坝现状分析：坝体表面局部脱落；坝基裸露；右侧坝肩表面脱落，出现轻度裂缝；右侧坝肩边坡出现大面积滑坡，边坡稳定性差；排水孔严重堵塞；库容已淤满。

方案层“安全性”评价因子  $u_1, u_2, u_3$  的取值分别为 25、15、18。模糊关系矩阵如下：

$$R_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.75 & 0.25 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \end{bmatrix}$$

可得方案层“安全性”模糊综合评判：

$$W_A = (0.444 \quad 0.444 \quad 0.112)$$

$$O_A = W_A \cdot R_A =$$

$$(0.444 \quad 0.444 \quad 0.112) \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.75 & 0.25 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \end{bmatrix} =$$

$$[0 \quad 0.31 \quad 0.64 \quad 0.11]$$

准则层“有效性”评价因子  $u_4, u_5, u_6, u_7$  的取值分别为  $O_A$ 、90、30、90，则准则层的模糊关系矩阵如下：

$$R_B = \begin{bmatrix} 0 & 0.31 & 0.64 & 0.11 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

准则层“有效性”模糊综合评判：

$$O_B = W_B \cdot R_B =$$

$$(0.538 \quad 0.230 \quad 0.163 \quad 0.069) \begin{bmatrix} 0 & 0.31 & 0.64 & 0.11 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$[0 \quad 0.167 \quad 0.426 \quad 0.440]$$

即目标层模糊综合评判矩阵为：

$$[0 \quad 0.167 \quad 0.426 \quad 0.440]$$

根据最大隶属度原则，综合评判结果集  $O_B$  中最大值所对应的评价等级为评价结果。即 12 号坝中  $O_B$  值最高为 0.440，则其服役性能等级为“差”，评判结果与现场调查相符，该坝现状如图 5 所示。



图 5 马槽沟 12 号坝现状

Fig. 5 Current state of dam No. 12 in Macao gully

由上述计算过程，推广至马槽沟内其余拦挡坝。其余拦挡坝服役性的评价因子实际取值及评判结果如表 7-8 所示。

马槽沟共调查 12 座坝，评价结果表明：单坝服役性等级“优”占 8.3%，“良”占 8.3%，“中等”占 25%，“差”占 58.3%，多数拦挡坝服役性能已不能达到要求。

表 7 马槽沟拦挡坝的评价因子实际取值

Table 7 Actual values of evaluation factors for check dams in Macao gully

评价因子	拦挡坝编号											
	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
$u_1$	25	22	24	2	85	80	80	10	15	10	85	15
$u_2$	15	30	35	5	90	75	80	20	24	10	80	18
$u_3$	18	35	30	0	90	40	40	10	15	5	80	10
$u_5$	90	96	95	25	96	95	95	95	95	95	96	96
$u_6$	30	16	15	5	18	20	22	25	25	24	18	20
$u_7$	90	95	95	8	10	80	80	90	90	90	85	90

表 8 马槽沟拦挡坝服役性评价结果

Table 8 Results of the serviceability evaluation for check dams in Macao gully

编号	$O_B$	结果	编号	$O_B$	结果	编号	$O_B$	结果
12	(0, 0.167, 0.426, 0.440)	差	8	(0, 0.102, 0.130, 0.768)	差	4	(0, 0.150, 0.463, 0.388)	中等
11	(0, 0.065, 0.447, 0.488)	差	7	(0, 0, 0.163, 0.837)	差	3	(0.03, 0.51, 0.13, 0.332)	良
10	(0, 0.082, 0.362, 0.556)	差	6	(0, 0, 0.147, 0.853)	差	2	(0, 0.033, 0.310, 0.658)	差
9	(0.668, 0.332, 0, 0)	优	5	(0, 0.299, 0.361, 0.340)	中等	1	(0, 0.227, 0.474, 0.299)	中等

2.2 泥石流拦挡坝单沟综合服务性能评价

对于一条泥石流沟而言,其沟内常设置多座拦挡坝。拦挡坝的数量由泥石流冲出总量、泥石流拦排比、拦挡坝设计坝高、回淤纵坡等多参数决定。因此,单沟内拦挡坝的服役性能,应为多座坝体综合服务的结果。因此,为评价多个拦挡坝共同作用下的泥石流沟内整体服役性能,本文对各座单坝增加“重要性”评价因子,主要从以下 3 方面综合考虑:①拦挡坝地理位置重要性:位于泥石流堆积区、流通区、沟口处;②拦挡坝设计库容重要性:根据设计库容大小;③防治重要性:拦挡坝周围居民、建筑物、道路密度等级。重要系数取值依据及定量化取值如表 9 所示。单沟综合服务性能“评判等级”与单坝服役性一致<sup>[27]</sup>。

表 9 重要系数取值依据及定量化取值

Table 9 Basis and quantitative values of important coefficients

重要性评价因子	取值依据	定量化取值
拦挡坝地理位置	物源区	0 ~ <0.3
	流通区	0.3 ~ <0.7
	沟口处	0.7 ~ 1
拦挡坝设计库容	坝高<5 m	0 ~ <0.3
	坝高5 ~ 15 m	0.3 ~ <0.7
	坝高>15 m	0.7 ~ 1
防治重要性	密度低	0 ~ <0.3
	密度中	0.3 ~ <0.7
	密度高	0.7 ~ 1

拦挡坝单沟综合服务性能评判流程:单坝重要系数定量化取值→计算重要系数均值→累加重要系数均值与单坝模糊综合评判矩阵的乘积→单沟服役性模糊综合评判集→得出评判结果。

拦挡坝单沟服役性模糊综合评判<sup>[12]</sup>公式:

$$D = \sum_{i=1}^n \bar{C}_i \cdot O_i \quad (3)$$

式中: $D$ ——拦挡坝单沟模糊综合评判集;

$n$ ——重要性评价因子个数;

$\bar{C}_i$ ——重要性系数均值(表 10);

$O_i$ ——单坝模糊综合评判集。

表 10 马槽沟重要系数取值及均值

Table 10 The value and mean of the important coefficient of Macao gully

评价因子编号	地理位置	设计库容	防治重要性	$\bar{C}$
12	0.3	0.5	0.3	0.37
11	0.3	0.35	0.3	0.32
10	0.4	0.35	0.4	0.38
9	0.5	0.7	0.6	0.60
8	0.6	0.6	0.6	0.60
7	0.7	0.72	0.6	0.67
6	0.7	0.53	0.7	0.64
5	0.75	0.58	0.8	0.71
4	0.8	0.64	0.8	0.75
3	0.9	0.63	1	0.84
2	1	0.57	1	0.86
1	1	0.42	1	0.81

以马槽沟为例,计算拦挡坝单沟综合服务性能评价。马槽沟拦挡坝单沟服役性模糊综合评判矩阵为:

$$D_{\text{马槽沟}} = [0.426 \quad 1.340 \quad 2.083 \quad 3.709]$$

根据隶属度最大原则,最大值所对应的评价等级为评价结果,马槽沟拦挡坝服役性模糊综合评判最大值为 3.709,即服役性等级为“差”,评判结果如图 6 所示。

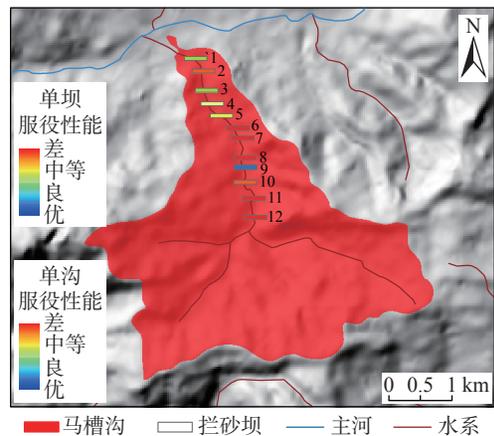


图 6 马槽沟拦挡坝服役性评价结果

Fig. 6 Results of the serviceability evaluation for check dams in Macao gully

依据上述方法,分别对研究区余下佛堂沟、桔柑沟等进行综合服务性能评价,评判结果如表 11 和图 7 所示。

表 11 武都区拦挡坝单沟综合服务役性评价结果

Table 11 Comprehensive service evaluation results of single gully check dam in Wudu District

沟名	D	结果	沟名	D	结果	沟名	D	结果
马槽沟	(0.426, 1.340, 2.083, 3.079)	差	佛堂沟	(0.365, 0.81, 0.927, 2.118)	差	桔柑沟	(0.047, 0.0471, 0.433, 0.352)	良
马家沟	(1.313, 0.686, 0, 0)	优	百草坝沟	(0, 0.393, 0.374, 0.533)	差	东江水沟	(1.612, 0.611, 0.156, 0.421)	优
柏水沟	(0.544, 0.708, 0.386, 0.212)	良	清水沟	(0, 0, 0.218, 0.342)	差	郭家沟	(0.680, 0.039, 0, 0)	优
大山沟	(0.985, 1.188, 0.421, 0.672)	良	寨子沟	(0, 0.023, 0.357, 1.191)	差	汉坪沟	(0.677, 0.285, 0.177, 0)	优
甘家沟	(0.990, 0.476, 0.406, 0.638)	优	燕儿沟	(0.404, 0.301, 0.694, 0.602)	中等	小山沟	(1.092, 0, 0.248, 0.689)	优

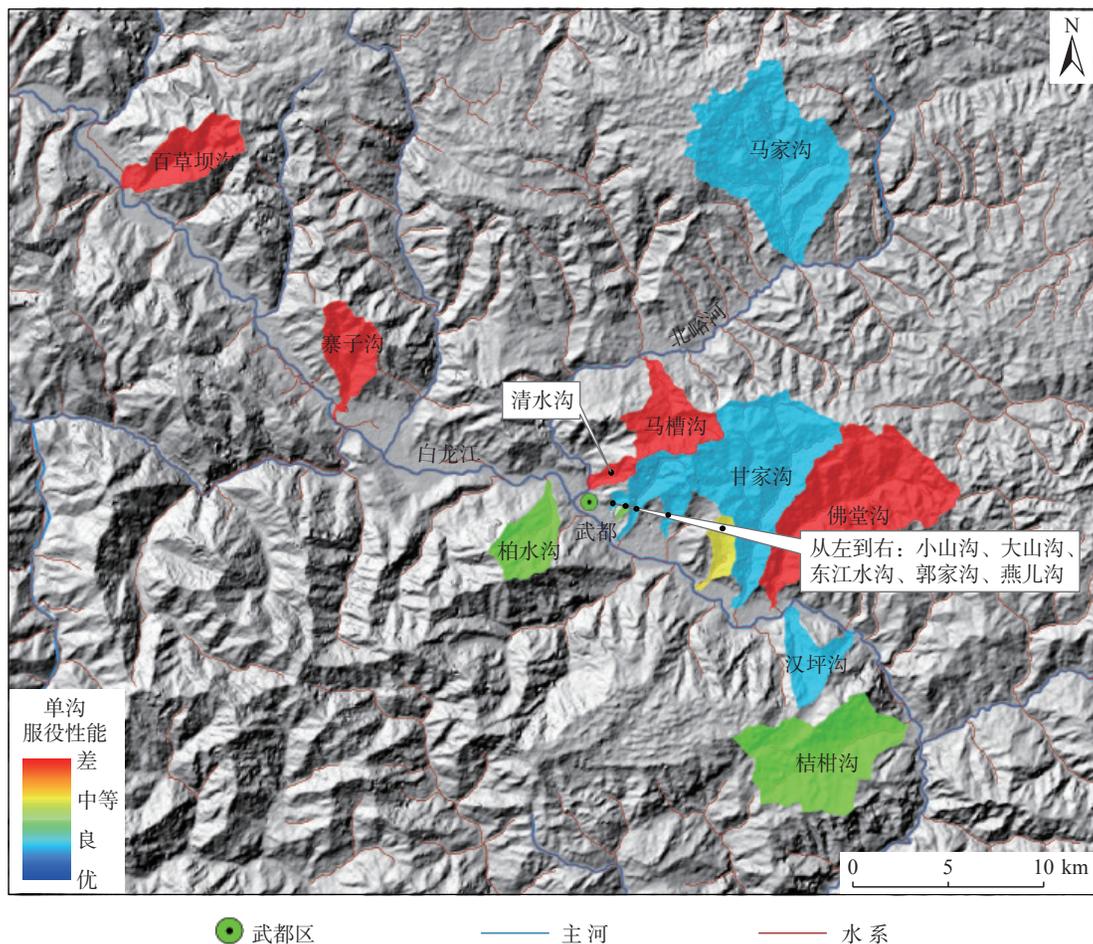


图 7 武都区单沟综合服务役性评价结果

Fig. 7 Comprehensive service evaluation results of single gully in Wudu District

研究区所调查的 15 条泥石流沟, 评价等级占比结果如表 12 所示。

表 12 泥石流沟道综合服务役性评价结果

Table 12 Comprehensive service evaluation results of debris flow gully

评价等级	泥石流沟道	占比/%
优	马家沟、郭家沟、汉坪沟、东江水沟、小山沟、甘家沟	40
良	柏水沟、桔柑沟、大山沟	20
中等	燕儿沟	6.7
差	马槽沟、佛堂沟、百草坝沟、清水沟、寨子沟	33.3

### 3 结论

(1) 根据武都区 15 条泥石流沟中的 55 座拦挡坝现场调研和服役性评价, 泥石流单坝服役性等级“优”占 32.7%, “良”占 25.2%, “中等”占 7.3%, “差”占 34.5%。泥石流拦挡坝单沟综合服务役性等级“优”占 40%, “良”占 20%, “中等”占 6.7%, “差”占 33.3%。其评判结果与研究区实际调查相符。

(2) 泥石流多次冲淤、掏蚀、渗透和坝体自身存在缺陷、保护措施不足、物源量大、泥石流频发等, 是导

致区内拦挡坝服役性能降低的主要原因。

(3)文章可为拦挡坝服役性能现状分析和服役效果及量化评价提供可借鉴的依据,为未来进行拦挡坝寿命预测奠定了基础。

### 参考文献(References):

- [1] 中国国家统计局. 2021 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022. [National Bureau of Statistics of China. 2021 China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2022. (in Chinese) ]
- [2] 石振明, 张公鼎, 彭铭, 等. 考虑河床坡度和泄流槽横断面影响的堰塞坝溃决过程试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 73 - 81. [SHI Zhenming, ZHANG Gongding, PENG Ming, et al. An experimental study of the breaching process of landslide dams with different bed slopes and drainage channel cross-sections [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 73 - 81. (in Chinese with English abstract) ]
- [3] 刘兴荣, 魏新平, 陈豫津, 等. 基于增量加载法的泥石流拦挡坝抗冲击力数值模拟——以甘肃舟曲三眼峪沟泥石流拦挡坝为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(2): 78 - 83. [LIU Xingrong, WEI Xinping, CHEN Yujin, et al. Numerical simulation of impact resistance of debris flow dam: a case study of the debris flow dam in Sanyanyu Gully, Zhouqu County, Gansu Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(2): 78 - 83. (in Chinese with English abstract) ]
- [4] 张宪政, 铁永波, 宁志杰, 等. 四川汶川县板子沟“6·26”特大型泥石流成因特征与活动性研究[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 134 - 145. [ZHANG Xianzheng, TIE Yongbo, NING Zhijie, et al. Characteristics and activity analysis of the catastrophic “6·26” debris flow in the Banzi Catchment, Wenchuan County of Sichuan Province [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 134 - 145. (in Chinese with English abstract) ]
- [5] 侯圣山, 曹鹏, 陈亮, 等. 基于数值模拟的耳阳河流域泥石流灾害危险性评价[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(2): 143 - 151. [HOU Shengshan, CAO Peng, CHEN Liang, et al. Debris flow hazard assessment of the Eryang River watershed based on numerical simulation [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(2): 143 - 151. (in Chinese with English abstract) ]
- [6] 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. (in Chinese with English abstract) ]
- [7] 严琦, 张琪. 贵州省黔东南州降雨型泥石流风险评估[J]. 气象与减灾研究, 2023, 46(2): 141 - 148. [YAN Qi, ZHANG Qi. Risk assessment of rainfall induced debris flow in Qiandongnan prefecture of Guizhou Province [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2023, 46(2): 141 - 148. (in Chinese with English abstract) ]
- [8] 王天健, 胡桂胜, 陈宁生, 等. 泥石流单双边防护堤防治效果对比——以曾达沟为例[J]. 防灾减灾学报, 2022, 38(1): 1 - 8. [WANG Tianjian, HU Guisheng, CHEN Ningsheng, et al. Comparison of prevention and control effect of single and double border embankment of debris flow: a case study of zengda gully [J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 2022, 38(1): 1 - 8. (in Chinese with English abstract) ]
- [9] 张文涛. 泥石流防治岩土-生态工程综合治理效果分析与评价[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所), 2021. [ZHANG Wentao. Analysis and evaluation of comprehensive control effect of geotechnical-ecological engineering for debris flow prevention and control [D]. Chengdu: Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese with English abstract) ]
- [10] 齐得旭, 闫俊, 张云卫. 泥石流拦挡坝破坏模式调查分析[J]. 资源环境与工程, 2018, 32(1): 89 - 91. [QI Dexu, YAN Jun, ZHANG Yunwei. Investigation and analysis on failure mode of dam [J]. Resources Environment & Engineering, 2018, 32(1): 89 - 91. (in Chinese with English abstract) ]
- [11] TAKAYAMA S, FUJIMOTO M, SATOFUKA Y. Amplification of flood discharge caused by the cascading failure of landslide dams [J]. International Journal of Sediment Research, 2021, 36(3): 430 - 438.
- [12] LYU Xiaobo, YOU Yong, WANG Zhuang, et al. Characteristics of gully bed scour and siltation between check dams [J]. Journal of Mountain Science, 2023, 20(1): 49 - 64.
- [13] 陈晓清, 游勇, 崔鹏, 等. 汶川地震区特大泥石流工程防治新技术探索[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(1): 14 - 22. [CHEN Xiaoqing, YOU Yong, CUI Peng, et al. New control methods for large debris flows in Wenchuan earthquake area [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013, 45(1): 14 - 22. (in Chinese with English abstract) ]
- [14] ZEMA D A, BOMBINO G, DENISI P, et al. Evaluating the effects of check dams on channel geometry, bed sediment size and riparian vegetation in Mediterranean Mountain torrents [J]. Science of the Total Environment, 2018, 642:

- 327 - 340.
- [ 15 ] ZHENG Hongchao, SHI Zhenming, SHEN Danyi, et al. Recent advances in stability and failure mechanisms of landslide dams [ J ] . *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 659935.
- [ 16 ] 杨春阳. 武都区典型泥石流活动机理与启动判据研究 [ D ] . 北京: 中国地质大学 (北京), 2020. [ YANG Chunyang. Study on the activity mechanism and initiation criterion of typical gully debris flow in Wudu District [ D ] . Beijing: China University of Geosciences, 2020. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 17 ] 魏万鸿, 刘兴荣, 宿星, 等. 陇南地区泥石流拦挡坝回淤比降影响因素及计算方法 [ J ] . 兰州大学学报 (自然科学版), 2022, 58(6): 744 - 748. [ WEI Wanhong, LIU Xingrong, SU Xing, et al. Study on the influencing factors and calculation method of siltation behind the debris flow dam in Longnan area [ J ] . *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2022, 58(6): 744 - 748. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 18 ] 舒和平, 齐识, 宁娜, 等. 甘肃省南部武都区泥石流灾害风险评价研究 [ J ] . 自然灾害学报, 2016, 25(6): 34 - 41. [ SHU Heping, QI Shi, NING Na, et al. Risk assessment of debris flow disaster: A case study of Wudu District in the south of Gansu Province, China [ J ] . *Journal of Natural Disasters*, 2016, 25(6): 34 - 41. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 19 ] 王俊豪, 金华丽, 倪天翔, 等. 基于层次分析法的模糊综合评判模型在康乐县泥石流沟危险性评价中的应用 [ J ] . 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(3): 52 - 57. [ WANG Junhao, JIN Huali, NI Tianxiang, et al. The application of fuzzy comprehensive evaluation model based on analytic hierarchy process in risk assessment of debris flow gully in Kangle County [ J ] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2017, 28(3): 52 - 57. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 20 ] 沈简, 饶军, 傅旭东. 基于模糊综合评价法的泥石流风险评价 [ J ] . *灾害学*, 2016, 31(2): 171 - 175. [ SHEN Jian, RAO Jun, FU Xudong. Assessment on debris flow risk based on fuzzy comprehensive evaluation method [ J ] . *Journal of Catastrophology*, 2016, 31(2): 171 - 175. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 21 ] 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. [ LI Xiaoting, LIU Wenlong. Application of fuzzy comprehensive evaluation method to debris flow risk evaluation in Shimen Township in Wudu District of Longnan City, Gansu Province [ J ] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(4): 71 - 76. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 22 ] 张文涛, 柳金峰, 游勇, 等. 泥石流防治工程损毁度评价——以汶川地区为例 [ J ] . 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(4): 77 - 83. [ ZHANG Wentao, LIU Jinfeng, YOU Yong, et al. Damage evaluation of control works against debris flow: A case study in Wenchuan area [ J ] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(4): 77 - 83. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 23 ] 地质灾害分类分级 ( 试行 ): DZ0238—2004 [ S ] . 北京: 中国标准出版社, 2005. [ Classification and Grading of Geological Hazards ( Trial ): DZ0238 —2004 [ S ] . Beijing: China Standards Publishing House, 2005. ( in Chinese ) ]
- [ 24 ] LIANG B, WU LB. Application of fuzzy comprehensive evaluation method in tunnel construction disasters [ C ] . Proceedings of 2008 National Symposium on Tunnel Monitoring Measurement and Anti-Analysis, 2008: 14-21.
- [ 25 ] YUAN Jintao. Fuzzy comprehensive evaluation for risk assessment on debris flow [ J ] . *Safety and Environmental Engineering*, 2010, 17(3): 14 - 16.
- [ 26 ] 尚慧, 王明轩, 罗东海, 等. 基于函数赋值模型与模糊综合评判法的单沟泥石流危险性评价 [ J ] . *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(1): 61 - 69. [ SHANG Hui, WANG Mingxuan, LUO Donghai, et al. Single gully debris flow hazard assessment based on function assignment model and fuzzy comprehensive evaluation method [ J ] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(1): 61 - 69. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 27 ] 王文沛, 殷跃平, 胡卸文, 等. 碎屑流冲击下桩梁组合结构拦挡效果及受力特征研究 [ J ] . *地质力学学报*, 2022, 28(6): 1081 - 1089. [ WANG Wenpei, YIN Yueping, HU Xiewen, et al. Study on retaining effect and mechanical characteristics of pile-beam composite structure under debris flow impact [ J ] . *Journal of Geomechanics*, 2022, 28(6): 1081 - 1089. ( in Chinese with English abstract ) ]