

泥石流防治工程损毁度评价

张文涛, 柳金峰, 游 勇, 孙 昊, 杨华铨, 芦 明

Damage evaluation of control works against debris flow: A case study in Wenchuan area

ZHANG Wentao, LIU Jinfeng, YOU Yong, SUN Hao, YANG Huaquan, and LU Ming

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202104015>

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

滇中香炉山引水隧洞工程区地应力场特征及断裂影响模糊综合评价

Characteristics of in-situ stress field and fuzzy comprehensive evaluation of the influence of active faults on the water diversion engineering of Xianglushan Tunnel Area in central Yunnan

付平, 张新辉, 刘元坤, 尹健民, 徐春敏 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 123–132

安宁河流域西昌北段东岸沟谷泥石流危险度评价

Risk Assessment of Gully Debris Flow Ravine at the East Bank of the Xichang North Section in the Anning River

罗健, 郭宁, 杨峥 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(4): 40–49

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

基于面积高程和面积坡度积分的泥石流物质供给能力分析

The material supply ability analysis of debris flows based on area-hypsometric integral and area-gradient integral

张静, 田述军, 侯鹏鹏 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 9–16

基于水槽试验的冰碛土泥石流启动机理分析

Analysis of the start-up mechanism of moraine debris flow based on flume test: A case study of the Aierkuran Gully along the Sino-Pakistan highway

樊圆圆, 宋玲, 魏学利 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 1–9



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202104015

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.

泥石流防治工程损毁度评价 ——以汶川地区为例

张文涛^{1,2,3}, 柳金峰^{1,2}, 游勇^{1,2}, 孙昊^{1,2,3}, 杨华铨^{1,2,3}, 芦明^{1,2,3}

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 泥石流岩土防治工程被广泛应用于泥石流灾害的治理, 而工程的损毁程度会对工程的功能性产生一定的影响, 并影响效益的持续发挥。文章以汶川为研究区域, 选取 18 条泥石流沟的岩土防治工程作为研究对象, 结合现场考察, 对防治工程的损毁程度进行评价。评价指标体系总体上分为拦挡工程因子和排导工程因子 2 项, 细化二级评价指标包括坝基损毁度、坝肩损毁度、坝体损毁度、基础冲刷度、结构冲击度、斜坡推力度等 6 项。运用模糊综合评价方法构建判断矩阵和隶属度函数, 将损毁度等级划分为优、良、中、差四个等级。评价结果显示, 除板子沟和登溪沟的防治工程损毁等级为差和中以外, 其余泥石流沟内防治工程损毁等级均为良或优, 且评价结果与现场考察一致。

关键词: 泥石流; 岩土防治工程; 损毁度; 评价; 模糊综合法

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)04-0077-07

Damage evaluation of control works against debris flow: A case study in Wenchuan area

ZHANG Wentao^{1,2,3}, LIU Jinfeng^{1,2}, YOU Yong^{1,2}, SUN Hao^{1,2,3}, YANG Huaquan^{1,2,3}, LU Ming^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Geotechnical control engineering is widely used in the treatment of debris flow disasters, and the damage degree of the engineering will have a certain impact on the functionality of the engineering. It affects the continuous exertion of benefits. This paper selects geotechnical control engineering of 18 debris flow gullies in Wenchuan area as the research objects, combined with field investigation, the damage degree of control engineering was evaluated. The system of evaluation index is generally divided into two factors: check dam factor and drainage channel factor. The secondary evaluation indexes are refined, including the damage degree of dam foundation, the damage degree of dam abutment, the damage degree of dam body, scouring degree of foundation, structural impact degree and slope thrust degree. The fuzzy comprehensive evaluation method is used to construct the judgment matrix and membership function, and the damage degree is divided into four grades: excellent, good, medium and poor. The evaluation results show that except for Banzi gully and Dengxi gully, the damage grades of other debris

收稿日期: 2021-04-11; 修订日期: 2021-05-07

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 四川省应用基础研究项目(2019YJ0005); 国家重点研发计划课题(2020YFD1100701); 国家基金委面上项目(41772343)

第一作者: 张文涛(1995-), 男, 湖北大冶人, 硕士研究生, 主要从事山地灾害实验与防治工程研究。E-mail: zwt@imde.ac.cn

通讯作者: 柳金峰(1979-), 男, 安徽泾县人, 博士, 研究员, 主要从事山地灾害实验与防治工程研究。E-mail: liujf@imde.ac.cn

flow control engineering are good or excellent, and the evaluation results are consistent with the field investigation.

Keywords: debris flow; geotechnical control engineering; damage degree; evaluation; fuzzy comprehensive evaluation method

0 引言

近年来,我国泥石流灾害频发,北川县城由于降雨引发区域性泥石流,导致 42 人死亡、失踪,道路几乎被泥石流冲毁^[1];舟曲泥石流造成遇难人数达 1 287 人,失踪人数 457 人^[2];汶川县桃关沟爆发特大泥石流,总冲出固体物质约 110 万 m³,造成直接经济损失高达 2 亿余元^[3];汶川“8·20”泥石流造成 12 人遇难,26 人失踪,多地道路、电力、通讯中断,直接经济损失达 36.26 亿元,由此可见泥石流危害之大。而泥石流的防治离不开防治工程,根据工程的类型可将防治工程分为岩土防治工程和生态防治工程两大类。其中岩土防治工程作为泥石流灾害治理中至关重要的环节,且在短期内能够起到立竿见影的作用。因泥石流形成及流域条件的差别,泥石流岩土防治工程因地制宜采用多种方法来实施,主要包括排导工程、拦挡工程等^[4]。但在我国的某些地方,即使采取了岩土防治工程,其治理效果却不是很明显,泥石流造成工程的损毁依然十分严重,如在 2010 年文家沟“8·13”泥石流灾害中,泥石流冲毁沟内 19 座岩土谷坊和 1 座拦砂坝,造成 6 人死亡或失踪,379 间房屋被掩埋^[5]。舟曲“8·7”泥石流冲毁沟内堆石坝和拦挡坝,冲毁房屋 5 500 余间^[2]。由此可见,工程的损毁程度与治理效果息息相关,对工程损毁度进行定量化评价是衡量其治理效果的重要前提。

我国众多学者对泥石流岩土防治工程的损毁展开了相关研究,在对拦挡工程的研究中,熊道锟等^[6]认为拦挡坝的破坏方式包括坝体、坝基、坝肩破坏,并阐述其发生破坏的原因;钟卫等^[7]认为谷坊坝的破坏模式可总结为滑动破坏、倾覆破坏以及承载力失稳破坏等三种;齐得旭等^[8]结合现场考察情况对拦挡坝的破坏模式进行分类;周文兵等^[9]对坝体的破坏情况(坝肩、溢流口等)进行定性描述;在对排导工程的研究中,杨东旭等^[10]对排导槽发生磨蚀破坏的影响因素进行分类总结;刘曙亮等^[11]通过室内实验对排导槽的冲刷侵蚀破坏的变化规律进行分析;周文兵等^[12]结合野外调查对排导槽的槽底侵蚀、基础掏蚀、侧墙侵蚀破坏等情况进行分类总结。上述对岩土防治工程损毁破坏等方面的研究,大多通过定性描述及分类等方法进行分析,其中较少涉及到定量分析,且对此展开的评价更是少之又少。

基于上述讨论,本文结合汶川地区的泥石流岩土防治工程,对其损毁因素进行总结和分类,并运用模糊综合评价方法对评价结果进行分级,使定性描述变为定量描述,对工程的损毁程度进行评价,为防治工程治理效果产生的机理研究及其定量化评价提供可借鉴的依据。

1 研究区域概况

汶川县位于四川省阿坝藏族羌族自治州东南部,总面积约 4 082.9 km²,境内的 G213、G317、S303 公路是川西重要交通要道和进藏国防通道。汶川县地处四川盆地西北部,位于邛崃山系和龙门山系之间,属典型高山峡谷地貌,地势西北高、东南低,沟谷纵横、切割强烈,且地形坡度和相对高差较大^[13]。由于岷江的快速下切,导致两岸切割较为强烈,因此地形普遍较陡,为泥石流的形成提供了充足的条件。

研究区地处汶川县境内,位于岷江中下游流域,包括绵虬镇、银杏乡、耿达乡、映秀镇等多个地区,区域中包含七盘沟、板子沟、登溪沟、苏村沟、麻溪沟、磨子沟在内的 18 条泥石流沟。由于受“5·12”汶川大地震的影响,使区域内形成数量众多的崩塌和滑坡,为泥石流活动提供了丰富的松散固体物质,在过去近十年内,汶川地区爆发了多起泥石流灾害,严重威胁到了山区群众的生命财产安全,因此选取该区域作为研究对象具有典型意义。

汶川县处于地震极震区,南湿北旱,垂直分带明显,银杏乡苏坡店以南为川西多雨中心区,年均降雨量 1 285.1 mm,以北属于岷江上游半干旱河谷区,年均降雨量为 526.3 mm,独特的自然地理环境和复杂的气候条件为滑坡泥石流等山地灾害的形成发育提供了良好条件^[13]。根据近 30 年(1991—2020 年)降雨量数据统计发现,汶川县多年平均降雨量为 847.59 mm,最大年降雨量为 1 213.29 mm,出现在 2018 年,最小年降雨量为 537.25 mm,出现在 1996 年;在 1991—2020 年期间,降水集中在 5—9 月,其中最大月降雨量为 166.13 mm,最小月降雨量为 5.87 mm。由于山区的地形复杂,而降雨多集中在夏季,因此该时期为泥石流灾害频发期。

沿岷江中下游依次对泥石流沟进行编号,从 GD01 到 GD18。对每条泥石流沟内的岩土防治工程进行实地

调查,共包括 46 座拦砂坝和 10 座排导槽,统计各泥石流沟的流域面积、主沟长度、沟床坡降等参数,见表 1。各泥石流沟的位置及拦砂坝、排导槽的布置如图 1 所示。

表 1 研究区泥石流沟参数统计
Table 1 Parameter statistics of debris flow gully in study area

沟道编号	沟名	流域面积/km ²	主沟长度/km	相对高差/m	沟床坡降/‰	拦砂坝	有无排导槽
GD01	七盘沟	52.98	15.21	3 401	202	1	有
GD02	板子沟	53.91	15.33	3 955	257	1	无
GD03	登溪沟	43.72	13.73	3 605	263	1	无
GD04	苏村沟	9.55	4.43	2 253	509	3	无
GD05	簇头沟	21.41	8.53	2 800	328	1	无
GD06	桃关沟	50.86	12.52	2 906	232	2	有
GD07	彻底关沟	16.61	3.51	2 376	432	1	无
GD08	银杏坪沟	7.02	4.46	1 952	438	3	有
GD09	红椿沟	5.46	3.62	1 285	356	3	有
GD10	幸福沟	33.40	10.48	2 504	239	7	有
GD11	银厂沟	8.07	5.76	2 600	451	1	无
GD12	牛圈沟	10.12	5.36	1 838	282	2	有
GD13	麻溪沟	13.90	7.6	1 877	266	3	无
GD14	谷基沟	28.97	9.91	2 354	238	3	有
GD15	刘家沟	7.93	5.74	1 392	243	3	有
GD16	牛塘沟	23.54	7.17	1 544	215	4	有
GD17	椒木沟	11.99	5.41	1 772	328	2	有
GD18	磨子沟	7.13	4.33	1 608	371	5	无



图 1 研究区域防治工程布置图
Fig. 1 Layout of control engineering in study area

2 工程的损毁程度分析

对研究区内的岩土防治工程进行现场考察,包括拦挡工程和排导工程。根据损毁部位对拦挡工程的损毁因素进行总结,包括坝基损毁、坝肩损毁和坝体损毁^[6],

对各自的损毁程度进行量化取值,主要依据见表 2;对排导工程发生损毁的主控因素进行分类^[14],其中包括洪水、泥石流对排导槽基础的淘蚀冲刷、泥石流块石对排导槽的冲击以及两侧斜坡的主动土压力等,可概括总结为基础冲刷、结构冲击、斜坡推力,对损毁程度进行量化取值,主要依据见表 3,从而对研究区岩土防治工程的损毁情况进行综合评价,总体上可分为两级,如图 2 所示。

表 2 拦挡工程损毁主控因素分类表
Table 2 Classification of main control factors for check dams

损毁主控因素	表现特征	损毁度	量化取值
坝基损毁	坝基或护坦、副坝等受到泥石流、洪水的侵蚀、冲刷作用,导致坝基出露、悬空,使坝基发生倾倒变形等情况	重度损毁	0 ~ 0.3
		中度损毁	0.3 ~ 0.7
		轻度损毁	0.7 ~ 1
坝肩损毁	坝肩斜坡坡脚处受洪水、泥石流等的侵蚀、掏空作用,使坝肩岩土体发生破坏	重度损毁	0 ~ 0.3
		中度损毁	0.3 ~ 0.7
		轻度损毁	0.7 ~ 1
坝体损毁	拦挡坝坝体受泥石流块体的冲击作用,导致坝体张裂、掉块、局部损伤等破坏	重度损毁	0 ~ 0.3
		中度损毁	0.3 ~ 0.7
		轻度损毁	0.7 ~ 1

若工程未发生任何损毁,则各自主控因素的损毁度取值均为 1;若发生损毁,则通过现场对工程的实际情

表 3 排导工程损毁主控因素分类表
Table 3 Classification of main control factors for drainage channel

损毁主控因素	表现特征	损毁度	量化取值
基础冲刷	排导槽基础受到泥石流、洪水的侵蚀、掏空,从而导致沟道内侵蚀严重或排导槽基础部分悬空、结构发生倾倒等情况	重度损毁	0 ~ 0.3
		中度损毁	0.3 ~ 0.7
		轻度损毁	0.7 ~ 1
结构冲击	排导槽结构受到泥石流中块石的冲击,发生开裂、掉块的现象,表现为排导槽墙体被砸坏、垮塌等,从而导致排导槽失效	重度损毁	0 ~ 0.3
		中度损毁	0.3 ~ 0.7
		轻度损毁	0.7 ~ 1
斜坡推力	排导槽受到其背侧斜坡的主动土压力作用,导致排导槽被推挤变形破坏而失效的情况	重度损毁	0 ~ 0.3
		中度损毁	0.3 ~ 0.7
		轻度损毁	0.7 ~ 1

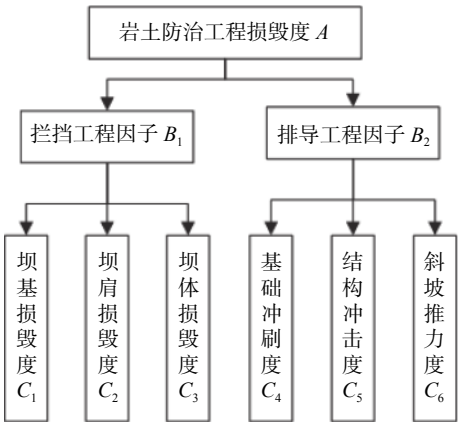


图 2 工程损毁度评价指标图

Fig. 2 Evaluation index chart of engineering damage degree

况进行定性描述从而判断其损毁的程度,根据损毁程度进行量化取值。

拦挡工程以苏村沟 1#坝为例,根据现场考察,可看出该拦砂坝的坝基已经被流水侵蚀严重,导致坝基出露、悬空,坝基随时面临着倾倒变形的危险,如图 3 所示;而该拦砂坝的坝肩和坝体却完整度较高,发生损毁程度较低,如图 4 所示;但由于坝体已经被泥沙淤积满库,其功能必然受到一定程度的影响。对各主控因素的分类进行描述及量化取值,其中坝基损毁为重度损毁,取值为 0.10;由于坝肩及坝体损毁较少,因此坝肩损毁为轻度损毁,取值为 0.90;坝体损毁为轻度损毁,取值为 0.90。

排导工程以椒木沟为例,现场调研发现其排导槽发生损毁较为严重,槽底受到流水侵蚀,有多处发生严重损毁,导致基础部分悬空,随时面临倾倒的危险,如图 5 所示,属于基础冲刷重度损毁,定量取值 0.10;排导槽结构受到块石的冲击作用,导致侧墙等结构发生严重损毁,发生开裂、掉块等现象,如图 6 所示,属于结构冲



图 3 坝基被流水侵蚀严重

Fig. 3 The dam foundation is seriously eroded by water



图 4 坝肩及坝体完整度较高

Fig. 4 The integrity of dam abutment and dam body is high

击重度损毁,定量取值 0.20;而排导槽受到其背侧斜坡的主动土压力作用较小,且未发生推挤变形破坏等情况,属于斜坡推力轻度损毁,定量取值 1。



图 5 槽底发生严重损毁

Fig. 5 Serious damage occurred at the bottom of the drainage channel

3 基于模糊综合评价方法的损毁度评价

根据工程损毁度的评价指标图,可以采用模糊综合评价方法来进行量化评价。模糊综合评价方法对于影响因素多样化的事物,能够实现覆盖这些要素的总的评价。通过隶属函数及隶属度来描述模糊界限,从而对事物进行分级或类别,进行评价,其中应用到最大隶属



图 6 侧墙被块石破坏严重

Fig. 6 The side wall was seriously damaged by the block stone

度原则,对事物的属性或相关因素做出较为细致的分析。模糊综合评价方法能够较好地把握影响损毁度的因素以及各因素之间的关系,借助人的经验将各因素量化并赋予权重,最终计算工程的损毁度进而确定损毁度的等级,使定性描述变为定量描述,因此评价结果会显得简明而直观^[15]。

3.1 建立层次结构

根据上述工程损毁度评价指标图,应用层次分析法,岩土防治工程损毁度为评价目标,中间层包括拦挡工程因子和排导工程因子等 2 项,最底层包括坝基损毁度、坝肩损毁度、坝体损毁度、基础冲刷度、结构冲击度、斜坡推力度等 6 项。

3.2 构造判断矩阵

引用 1—9 标度法^[16]构造判断矩阵,见表 4,进而实现定量评价。

表 4 判断矩阵标度及其含义

Table 4 The scale of judgment matrix and its meaning

标度	含义
1	表示两个因素相比,具有相同的重要性
3	表示两个因素相比,一个因素较另一个因素略微重要
5	表示两个因素相比,一个因素较另一个因素明显重要
7	表示两个因素相比,一个因素较另一个因素强烈重要
9	表示两个因素相比,一个因素较另一个因素极端重要

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 $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$ 。

根据 1—9 标度法分别构造 A—B 层、B₁—C 层、B₂—C 层的判断矩阵:

$$A-B = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}, B_1-C = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{3} \\ 2 & 3 & 1 \end{bmatrix}, B_2-C = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 2 \\ \frac{1}{4} & 1 & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{2} & 3 & 1 \end{bmatrix}。$$

3.3 计算特征向量及最大特征根

采用和法,近似法计算,计算步骤如下:

- (1) 将判断矩阵的每一列向量归一化得: $\overline{w}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}};$
- (2) 对于 $\overline{w}_{ij}$ 按行求和, 即 $\overline{w}_i = \sum_{j=1}^n \overline{w}_{ij};$
- (3) 将 $\overline{w}_i$ 归一化处理, $w_i = \frac{\overline{w}_i}{\sum_{i=1}^n \overline{w}_i}, w = (w_1, w_2, \cdots, w_n)^T,$ 即为特征向量;
- (4) 判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max};$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{w_i}, Aw \text{ 为矩阵 } A \text{ 与特征向量 } w \text{ 的乘积。}$$

由此可得各自的特征向量及最大特征根, 如下:

- A—B 层特征向量:
 $W_1 = (0.667, 0.333)^T$, 最大特征根: $\lambda_{\max} = 2;$
- B₁—C 层特征向量:
 $W_2 = (0.297, 0.164, 0.539)^T$, 最大特征根: $\lambda_{\max} = 3.0092;$
- B₂—C 层特征向量:
 $W_3 = (0.557, 0.123, 0.32)^T$, 最大特征根: $\lambda_{\max} = 3.0536。$

3.4 进行一致性检验

查找一致性指标 RI (表 5), 计算一致性指标 $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$, (其中 $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征值), 计算一致性比例 $CR = \frac{CI}{RI}$, 分别为 0, 0.008 8, 0.05 均小于 1, 因此判断矩阵的一致性可以接受。

表 5 平均随机一致性指标

Table 5 Average random consistency index

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.24	1.36	1.41	1.46

3.5 建立隶属函数

按一定准则定量化处理这些定性的指标, 把因素划分为优、良、中、差四个等级, 相应的等级分值依次为 0.875, 0.625, 0.375, 0.125, 根据定性因素的特点, 采用梯形隶属函数构建其隶属函数, 如下:

$$U_1(x) = \begin{cases} 0 & x < 0.6875 \\ 8x - 5.5 & 0.6875 \leq x \leq 0.8125 \\ 1 & x > 0.8125 \end{cases} \quad (1)$$

$$U_2(x) = \begin{cases} 0 & x < 0.4375 \\ 8x - 3.5 & 0.4375 \leq x < 0.5625 \\ 1 & 0.5625 \leq x < 0.6875 \\ 6.5 - 8x & 0.6875 \leq x < 0.8125 \\ 0 & x \geq 0.8125 \end{cases} \quad (2)$$

$$U_3(x)=\begin{cases}0 & x<0.1875 \\ 8x-1.5 & 0.1875\leq x<0.3125 \\ 1 & 0.3125\leq x<0.4375 \\ 4.5-8x & 0.4375\leq x<0.5625 \\ 0 & x\geq 0.5625\end{cases}\quad (3)$$

$$U_4(x)=\begin{cases}1 & x<0.1875 \\ 2.5-8x & 0.1875\leq x\leq 0.3125 \\ 0 & x>0.3125\end{cases}\quad (4)$$

3.6 定量化评价

根据上述原则结合现场考察,对坝体的损毁因素进

由表 6 可知,拦挡工程和排导工程的最终计算矩阵

表 6 七盘沟防治工程损毁度计算表

Table 6 Calculation on damage degree of control engineering of Qipangou gully

工程类别	损毁因素	取值	优	良	中	差	权重	优	良	中	差	工程损毁度
拦挡工程	坝基损毁	0.90	1	0	0	0	0.297					0.88
	坝肩损毁	0.95	1	0	0	0	0.164	1	0	0	0	
	坝体损毁	1.00	1	0	0	0	0.539					
排导工程	基础冲刷	0.85	1	0	0	0	0.557					0.88
	结构冲击	0.85	1	0	0	0	0.123	1	0	0	0	
	斜坡推力	1.00	1	0	0	0	0.32					

相同,即 $A=(1,0,0,0)$,依据最大隶属度原则,认为七盘沟内拦挡工程和排导工程的损毁等级为优,最终根据权重计算出各自的工程损毁度为 0.88。据现场考察,发现七盘沟内拦砂坝与排导槽发生损毁情况较少,工程完整度较高,如图 7 所示,评价结果与现场调研一致。



图 7 七盘沟内拦挡工程和排导工程

Fig. 7 The check dam and drainage channel in Qipangou gully

由上述计算过程,推广到各泥石流沟内防治工程,对于涉及到同一泥石流沟内的多座拦挡工程,分别计算出各个拦挡工程的损毁度,取均值,得到每条泥石流内拦挡工程的损毁度,再根据拦挡工程以及排导工程的权重系数得到每条泥石流沟的工程损毁度,以此对工程的损毁情况进行评价,最终结果如表 7 所示。从表中可看出,板子沟防治工程损毁等级为差,登溪沟防治工程损毁等级为中,野外调研发现,板子沟和登溪沟内拦挡工程损毁较严重,拦砂坝大部分被破坏,功能受到严重影响;其余泥石流内防治工程损毁等级均为良或优,结合野外考察发现,这些防治工程完整度均较高,发生损毁较少,因此工程的功能性受影响较小,综上可看出评价结果与实际调查较为吻合。

行定量化取值,然后再将数据代入隶属度函数中,可得到等级隶属度矩阵,再根据各因素的特征向量(即权重)来计算最终的矩阵 A ,依据最大隶属度原则来区分各个拦砂坝或排导槽的损毁等级,最终根据影响因素对应的等级分值(0.875、0.625、0.375、0.125)^T,可得到拦挡工程或排导工程的损毁度。依据拦挡工程和排导工程权重系数,可得到单个泥石流流沟的工程损毁度。以七盘沟拦砂坝与排导槽为例,计算结果如表 6 所示。

由表 6 可知,拦挡工程和排导工程的最终计算矩阵

表 7 研究区防治工程损毁度评价表

Table 7 Evaluation of damage degree of control engineering in study area

沟道名称	拦挡工程损毁度	排导工程损毁度	工程损毁度	损毁等级
七盘沟	0.88	0.88	0.875	优
板子沟	0.13	—	0.125	差
登溪沟	0.29	—	0.287	中
苏村沟	0.62	—	0.619	良
簇头沟	0.53	—	0.527	良
桃关沟	0.80	0.30	0.628	良
彻底关沟	0.52	—	0.523	良
银杏坪沟	0.85	0.83	0.841	优
红椿沟	0.86	0.80	0.836	优
幸福沟	0.75	0.64	0.645	良
银厂沟	0.88	—	0.875	优
牛圈沟	0.88	0.43	0.726	良
麻溪沟	0.82	—	0.821	优
谷基沟	0.88	0.57	0.773	优
刘家沟	0.88	0.88	0.875	优
牛塘沟	0.88	0.54	0.765	优
椒木沟	0.88	0.37	0.706	良
磨子沟	0.88	—	0.875	优

4 结论

(1)通过对汶川地区内 18 条泥石流沟的岩土防治工程损毁情况进行调查,建立了治理效果评价指标体系,总体上分为两层,其中一级评价指标为拦挡工程因子、排导工程因子等 2 项,二级评价指标为坝基损毁

度、坝肩损毁度、坝体损毁度、基础冲刷度、结构冲击度、斜坡推力度等 6 项。

(2)评价结果表明板子沟防治工程损毁等级为差,登溪沟防治工程损毁等级为中,其余泥石流沟内防治工程损毁等级为良或优,结果能够较好地反映现场的情况。

参考文献(References):

- [1] 唐川,梁京涛.汶川震区北川9·24暴雨泥石流特征研究[J].工程地质学报,2008,16(6):751-758. [TANG Chuan, LIANG Jingtao. Characteristics of debris flows in Beichuan epicenter of the Wenchuan earthquake triggered by rainstorm on September 24, 2008 [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 751-758. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 余斌,杨永红,苏永超,等.甘肃省舟曲8·7特大泥石流调查研究[J].工程地质学报,2010,18(4):437-444. [YU Bin, YANG Yonghong, SU Yongchao, et al. Research on the giant debris flow hazards in Zhouqu County, Gansu Province on August 7, 2010 [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(4): 437-444. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 胡卸文,韩玫,梁敬轩,等.汶川震区桃关沟2013-07-10泥石流成灾机理[J].西南交通大学学报,2015,50(2):286-293. [HU Xiewen, HAN Mei, LIANG Jingxuan, et al. Hazard mechanism analysis of Taoguan giant debris flow in Wenchuan earthquake area on July 10th, 2013 [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(2): 286-293. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 费祥俊,舒安平.泥石流运动机理与灾害防治[M].北京:清华大学出版社,2004. [FEI Xiangjun, SHU Anping. Movement mechanism and disaster control for debris flow [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)]
- [5] 游勇,陈兴长,柳金峰.四川绵竹清平乡文家沟“8·13”特大泥石流灾害[J].灾害学,2011,26(4):68-72. [YOU Yong, CHEN Xingzhang, LIU Jinfeng. “8·13” extra large debris flow disaster in Wenjia gully of Qingping township, Mianzhu, Sichuan Province [J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(4): 68-72. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 熊道锟,徐世民.泥石流拦挡坝之虞[J].中国地质灾害与防治学报,2010,21(4):136-138. [XIONG Daokun, XU Shimin. Concerns about debris dams [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(4): 136-138. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 钟卫,陈晓清.泥石流谷坊防治工程的可靠性分析[J].水利学报,2012,43(增刊2):155-161. [ZHONG Wei, CHEN Xiaoqing. Reliability analysis of Check-Dam engineering control of debris flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(Sup 2): 155-161. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 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)]
- [9] 周文兵,柳金峰,袁东,等.白龙江中游泥石流拦砂坝防治效果分析[J].长江科学院院报,2019,36(9):64-70. [ZHOU Wenbing, LIU Jinfeng, YUAN Dong, et al. Control effect of check dams on debris flow in the midstream of Bailong river [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(9): 64-70. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 杨东旭,游勇,陈晓清,等.泥石流排导槽磨蚀行为特征研究[J].灾害学,2021,36(1):48-53. [YANG Dongxu, YOU Yong, CHEN Xiaoqing, et al. Study on the characteristics of abrasion behavior of debris flow drainage channel [J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(1): 48-53. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 刘曙亮,游勇,柳金峰,等.泥石流排导槽槛后侵蚀实验研究[J].兰州大学学报(自然科学版),2016,52(3):328-333. [LIU Shuliang, YOU Yong, LIU Jinfeng, et al. Experimental study of the erosion after debris flow drainage cannl ribs [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2016, 52(3): 328-333. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 周文兵,柳金峰,袁东,等.白龙江中游泥石流排导槽运行现状及防治建议[J].防灾减灾工程学报,2019,39(2):338-346. [ZHOU Wenbing, LIU Jinfeng, YUAN Dong, et al. The operation status and prevention suggestions on drainage channels of debris flow in the midstream of bailong river [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(2): 338-346. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 韩用顺,王晶,吴淼,等.汶川县震后潜在泥石流危险性评价研究[J].工程科学与技术,2018,50(3):158-168. [HAN Yongshun, WANG Jing, WU Miao, et al. Hazard assessment on potential post-earthquake debris flows in Wenchuan County [J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(3): 158-168. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 蔡红刚.汶川震区泥石流防护工程损毁特征及破坏机制研究[D].成都:成都理工大学,2012. [CAI Honggang. Investigation of damage features and study failure mechanism to protection engineering for debris flow in the Wenchuan earthquake region [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 胡淑礼.模糊数学及其应用[M].成都:四川大学出版社,1994. [HU Shuli. Fuzzy mathematics and its application [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1994. (in Chinese)]
- [16] 赵玮,姜波.层次分析方法进展[J].数学的实践与认识,1992,22(3):63-71. [ZHAO Wei, JIANG Bo. Progress of analytic hierarchy process [J]. Mathematics in Practice and Theory, 1992, 22(3): 63-71. (in Chinese)]