

张文涛, 柳金峰, 游勇, 等. 泥石流岩土防治工程治理效果分析与评价——以四川汶川卧龙幸福沟为例[J]. 灾害学, 2021, 36(3): 208–214. [ZHANG Wentao, LIU Jinfeng, YOU Yong, et al. Analysis and Evaluation of the Treatment Effect of the Geotechnical Engineering of Debris Flow: Case of Xingfu Gully in Wolong [J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(3): 208–214. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2021.03.036.]

# 泥石流岩土防治工程治理效果分析与评价<sup>\*</sup>

## ——以四川汶川卧龙幸福沟为例

张文涛<sup>1,2,3</sup>, 柳金峰<sup>1,2</sup>, 游勇<sup>1,2</sup>, 孙昊<sup>1,2,3</sup>, 杨华铨<sup>1,2,3</sup>, 芦明<sup>1,2,3</sup>

(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:** 为了研究泥石流岩土防治工程在泥石流的防灾减灾中所起的作用, 以2019年“8.20”泥石流为背景, 结合现场考察, 对四川汶川县卧龙幸福沟泥石流岩土防治工程的治理效果进行分析和评价。根据研究区防治工程的分布, 将拦挡工程因子和排导工程因子作为2项一级指标, 同时考虑防治工程运行情况, 筛选出与治理效果相关的9项二级指标, 其中拦挡工程的评价指标包括工程运行情况、容重削减率、堆积物粒径比、流量削减率、回淤坡度比、拦蓄泥沙比, 排导工程的评价指标包括工程运行情况、沟床纵坡比、断面参数比, 采用层次分析法确定权重进行效果综合评价, 认为幸福沟泥石流岩土防治工程的治理效果为中等, 与现场的调研结果一致, 验证了评价体系的合理性和该方法的可行性。

**关键词:** 泥石流; 拦挡工程; 排导工程; 治理效果; 层次分析法; 四川汶川

**中图分类号:** P624.23; X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2021)03–0208–07

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2021.03.036

防治工程作为泥石流治理中重要的环节, 主要包括跨越工程、防护工程、排导工程、拦挡工程、生物措施等<sup>[1]</sup>。在泥石流的防治中, 岩土防治工程措施起着至关重要的作用。岩土防治工程措施主要包括实体拦挡坝、格拦坝、排导槽等<sup>[2]</sup>, 岩土工程措施应用广泛, 具有受气候影响小、见效快等优点。但在我国的某些地方, 即使采取了岩土工程措施, 但其治理效果却不是很明显, 泥石流造成的破坏依然十分严重, 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<sup>[3]</sup>。舟曲“8.7”泥石流冲毁沟内堆石坝和拦挡坝, 冲毁房屋5500余间<sup>[4]</sup>。由此可见, 虽然在泥石流沟中布置了大量的防治工程, 但泥石流灾害依然十分严重, 在治理过程中存在的各

种问题仍亟待探索, 因此需要对泥石流岩土防治工程的治理效果展开研究, 分析并总结防治工程对泥石流所起的作用, 以此对防治工程的治理效果进行评价。

国内外有众多学者对泥石流岩土防治工程的治理效果展开了相关研究, 在对拦挡工程的研究中, JOHNSON P A等<sup>[5]</sup>认为梳齿坝能够有效地减缓泥石流的流速; HIROSHI Ikeya<sup>[6]</sup>根据总输砂量和泥石流输砂量的峰值来分析梳齿坝的防治效果; 水野秀明等<sup>[7]</sup>通过模型试验发现格栅坝减少泥沙率随着格栅坝最小间距与泥沙最大粒径比值的增大而减小; 贾世涛等<sup>[8]</sup>从回淤坡度、调节泥石流的容重、流量等方面, 对拦砂坝的防治效果进行研究; 曾庆利等<sup>[9]</sup>认为谷坊工程能够有效抬高泥石流侵蚀基准面、降低沟床回淤纵坡、降低泥石

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2020–11–23 修回日期: 2021–03–03

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA23090403); 四川省应用基础研究项目(2019YJ0005); 国家基金委面上项目(41772343)

第一作者简介: 张文涛(1995–), 男, 汉族, 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, 汉族, 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

流流速。在对排导工程的研究中, KIM Youngil<sup>[10]</sup>通过排导槽模型试验, 认为泥石流的堆积厚度取决于泥石流的粒径分布; 张红兵等<sup>[11]</sup>从东川槽和 V 型槽的沟床纵坡来分析其排泄效果; 游勇等<sup>[12]</sup>通过比较不同断面型的排导槽, 分析各自的水力最佳断面。上述对泥石流岩土防治工程治理效果的研究中, 未考虑工程运行情况的影响, 且对治理效果综合定量评价方面研究不足。

基于上述的讨论, 本文以卧龙幸福沟泥石流为例, 结合防治工程的运行情况, 对研究区域内泥石流岩土防治工程的治理效果进行分析, 由此提取相应的评价因子, 运用层次分析法, 对治理效果进行综合评价, 以此为泥石流的治理提供可借鉴的依据。

## 1 研究区域概况

### 1.1 泥石流沟的基本特征

幸福沟位于卧龙自然保护区耿达乡, 地处汶川地震震中区域, 巴郎河左岸, 沟口即耿达乡场镇, 沟口地理坐标为 103°18′26.3″E, 31°05′31.9″N。幸福沟位于渔子溪上游左岸, 系渔子溪一级支流, 流域形态近似矩形, 面积约为 33.34 km<sup>2</sup>, 主沟纵长约 10.51 km, 平均纵坡降 168‰, 流域最高点位于东侧火烧坡, 高程 4 140 m, 最低点位于幸福沟沟口处, 海拔为 1 518 m。幸福沟沟口为耿达乡, 现有居民约 294 户 1 176 人, 沟口经过 S303 省道公路, 泥石流灾害严重威胁着人民的生命财产安全和交通设施安全。

幸福沟在地形上属深切构造侵蚀低山和中山地形, 地形陡峭且条件发育, 为流域内崩塌、滑坡、泥石流等灾害的形成提供了有利条件。沟域在总体上呈现 V 型谷地貌, 特别是上游沟段沟谷较为狭窄, 纵坡较陡, 水流湍急, 且动态变化较大, 具有陡涨陡落的山溪沟谷特征<sup>[13]</sup>。幸福沟位于龙门山后山断裂南段, 距龙门山中央断裂约 17 km, 处于薛城—卧龙“S”型褶皱构造带内, 构造活动强烈, 断裂、褶皱发育。这种构造特征使流域内的沟谷狭窄, 岩体破碎, 并决定了沟域水系的分布格局, 即幸福沟主沟沿 NE—SW 方向的主构造线方向展布, 而支沟则多沿主构造断裂逆冲挤压形成的 X 剪节理方向发育<sup>[14]</sup>。

研究区内全年气候湿润, 四季分明, 夏季降雨集中, 冬季少雨寒冷, 属亚热带湿润气候区。受西南季风和东南季风的影响, 每年 5—9 月为雨季, 降雨集中且多暴雨, 降雨量占全年的 78%,

为泥石流的形成提供了有利的条件。根据幸福沟多年的降雨资料统计, 年平均降雨量为 932.6 mm, 最大年降雨量出现在 1992 年, 高达 1 177 mm, 诱发了幸福沟的高夹沙洪水灾害<sup>[14]</sup>。

幸福沟曾分别于 1964 年和 1992 年爆发过两次泥石流。汶川地震后, 沟内物源量明显增加, 2008 年 6 月 19 日, 因日降雨量达 181.4 mm, 造成 5 条支沟爆发泥石流; 2013 年 7 月 10 日因爆发泥石流造成主沟 7 座拦砂坝被全部淤满<sup>[14]</sup>; 2019 年 8 月 20 日降雨量达 131.6 mm, 导致主沟内拦砂坝几乎被淤满。从泥石流发生次数分析, 汶川地震前幸福沟为低频泥石流沟, 而地震后沟内可供泥石流发生的固体物源增加, 加之近期降雨强度又较高, 因此认为幸福沟为高频泥石流沟。

### 1.2 防治工程概况

汶川地震后, 由于沟内松散固体物质丰富, 泥石流十分发育, 因此在 2009 年期间, 幸福沟的主沟内采取了“拦挡+排导”相结合的岩土防治工程, 分别在上游至下游修建了 7 座拦砂坝, 并在沟口附近修建排导槽, 一定程度上减轻了泥石流灾害。2019 年 10 月对幸福沟进行实地考察, 由于受 2019 年“8.20”泥石流的影响, 导致幸福沟内多座拦砂坝淤满和排导槽内泥沙淤积。对研究区拦挡工程从上游至下游依次进行编号, 防治工程的分布图如图 1 所示。

## 2 岩土防治工程治理效果分析

幸福沟的岩土防治工程主要包括拦挡工程和排导工程, 拦挡工程是指从上游至下游修建的 7 座拦砂坝, 排导工程即为沟口的排导槽。

### 2.1 拦挡工程治理效果分析

研究区拦挡工程包括 5 座窗口坝和 2 座梳齿坝, 拦挡工程的作用主要体现在: 拦砂节流, 调节泥石流的下泄峰值流量和固体物质总量; 抬高河床, 防止沟床切蚀, 抑制泥石流的发育; 降低流速, 减小泥石流下泄固体物质的粒径<sup>[15]</sup>。同时考虑拦挡工程的运行情况, 对拦挡工程的治理效果进行分析, 主要包括以下几个方面。

#### 2.1.1 拦挡工程的运行情况

根据拦挡工程的损毁部位, 将损毁模式分为坝基损毁、坝肩损毁和坝体损毁<sup>[16]</sup>, 结合拦挡工程的泥沙淤积情况分为空库、半库和满库, 以及溢流口的损毁情况、排水孔的堵塞情况, 根据上述因素综合考虑拦挡工程的运行情况, 对运行情况进行分级和定量化, 运行情况分为良好、中等、较差、极差四个等级(表 1)。

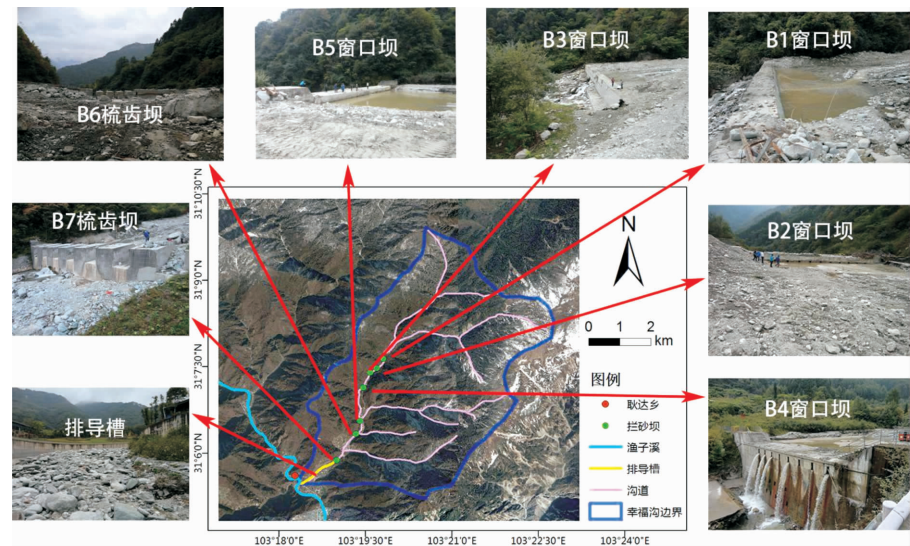


图1 幸福沟泥石流岩土防治工程分布图

表1 拦挡工程运行情况分类

运行情况	表现特征	定量化取值
良好	坝基、坝肩、坝体、溢流口未发生损毁，库内泥沙淤积情况为空库，排水孔不堵塞	0.75~1
中等	坝基未被淘蚀，坝肩、坝体、溢流口有较少部分发生损毁，库内泥沙淤积量为半库以下，排水孔堵塞较少	0.5~0.75
较差	坝基被淘蚀，坝体、坝肩发生损毁，库内泥沙淤积量为半库以上，排水孔较少部分未堵塞	0.25~0.5
极差	坝基被严重淘蚀，坝肩、坝体破坏严重，库内泥沙淤积满库，排水孔全部堵塞	0~0.25

表2 研究区拦挡工程运行情况及相关参数

编号及类型	工程状态	坝净高/m	坝宽/m	原沟床坡度	回淤坡度	运行情况	定量化取值
B1 窗口坝	满库	4.0	48.0	0.16	0.08	极差	0.1
B2 窗口坝	满库	4.5	39.0	0.17	0.05	极差	0.1
B3 窗口坝	满库	3.5	40.5	0.13	0.06	极差	0.1
B4 窗口坝	满库	7.6	35.0	0.15	0.05	极差	0.1
B5 窗口坝	满库	5.6	43.5	0.17	0.11	极差	0.2
B6 梳齿坝	半库	5.0	50.0	0.16	0.12	中等	0.6
B7 梳齿坝	半库	2.0	32.0	0.16	0.13	中等	0.6

根据上述分类依据，对研究区拦挡工程运行情况进行统计，并用红外测距仪对坝体的尺寸、沟床的坡度等参数进行测量(表2)。根据每座拦砂坝运行情况的取值，得到7座拦砂坝运行情况的平均值，即工程运行情况  $\gamma_1 = 0.257$ ，处于0.25~0.5之间，可见拦挡工程的运行情况较差。

2.1.2 削减泥石流的容重

拦砂坝对于泥石流容重的调节表现在过坝后容重会有减小的趋势<sup>[17]</sup>。现场分别对B1窗口坝的上游和B7梳齿坝的下游进行取样，取样点沿主沟道方向，取样时将堆积物的表面覆盖层去除，取下部未经扰动的泥石流堆积物，使用60 mm的钢筛剔除大颗粒砾石，保留<60 mm的样品作为试验土样进行筛分试验，使用SZS型三维振筛机进行筛分，得到不同颗粒质量百分比。引用泥石流容重的计算公式<sup>[18]</sup>：

$$\gamma_D = P_{0.5}^{0.35} P_2 \gamma_V + \gamma_0 \quad (1)$$

式中： $P_{0.5}$ 为粒径<0.05 mm的颗粒百分含量， $P_2$ 为粒径>2 mm的颗粒百分含量， $\gamma_V$ 为粘性泥石流的最小容重，取2.0 g/cm<sup>3</sup>， $\gamma_0$ 为泥石流的最小容重，取1.5 g/cm<sup>3</sup>。

用容重削减率  $\gamma_2$  来表征拦挡工程削减泥石流容重的效果：

$$\gamma_2 = \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_1} \quad (2)$$

式中： $\gamma_1$ 为初始容重，即位于B1窗口坝上游的容重(g/cm<sup>3</sup>)； $\gamma_2$ 为经拦砂坝逐级削减后的容重(g/cm<sup>3</sup>)，即位于B7梳齿坝下游的容重，得出容重削减率  $\gamma_2 = 0.09$ 。通过拦砂坝的逐级拦挡，对泥石流容重起到了一定的削减作用，但容重削减率很小，效果并不是很明显。

表3 幸福沟各计算断面处泥石流峰值流量计算表

断面编号	河床糙率/(1/nc)	泥深/m	纵坡率	流速/(m/s)	沟道宽度/m	峰值流量/(m <sup>3</sup> /s)
1-1 断面	10.00	2.40	0.16	7.17	52.50	903.45
2-2 断面	10.00	2.60	0.17	7.80	41.90	849.30
3-3 断面	10.00	2.80	0.13	7.16	43.50	872.42
4-4 断面	10.00	2.20	0.15	6.55	37.40	539.04
5-5 断面	10.00	2.30	0.17	7.18	45.30	748.52
6-6 断面	10.00	1.90	0.16	6.14	51.70	602.75
7-7 断面	10.00	1.80	0.15	5.73	35.80	369.30
8-8 断面	10.00	1.90	0.15	5.94	29.00	327.37

### 2.1.3 调节泥石流的粒径

拦砂坝的“拦粗排细”作用体现在其能够调节泥石流的粒径,  $D_{50}$  作为表征拦砂坝分选泥石流粒径能力的参数<sup>[17]</sup>,  $D_{50}$  是指大于或等于此粒径土样含量占总量的 50%, 现场分别对 B1 窗口坝的上游和 B7 梳齿坝的下游进行取样, 根据所取土样的颗粒级配曲线, 得出各自  $D_{50}$  的取值, 用堆积物粒径比来表征拦砂坝调节泥石流粒径的能力:

$$\gamma_3 = \frac{D_1 - D_2}{D_1} \quad (3)$$

式中:  $D_1$  表示过坝前  $D_{50}$  的取值(mm);  $D_2$  表示过坝后  $D_{50}$  的取值(mm); 得出堆积物粒径比  $\gamma_3 = 0.422$ , 说明拦挡工程对泥石流粒径起到了一定的分选作用, 且调节泥石流粒径的效果较为明显。

### 2.1.4 削减泥石流的峰值流量

拦砂坝对于泥石流流量的调控在于控制其洪峰流量, 使其削减延时, 减小下游各项防护工程的负担<sup>[17]</sup>。根据现场取土样的容重计算结果在  $1.73 \text{ g/cm}^3 \sim 1.90 \text{ g/cm}^3$  之间, 可将幸福沟泥石流性质定性为粘性泥石流, 因此泥石流流速公式<sup>[19]</sup>为:

$$V_c = \frac{1}{n_c} H^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中:  $n_c$  为粘性泥石流沟床糙率, 根据规范查表确定, 根据沟床纵坡及凹凸情况进行取值;  $H_c$  为平均泥深(m);  $I_c$  为泥位处的纵坡率。

从上游 B1 窗口坝至下游 B7 梳齿坝, 依次取 8 个断面, 结合泥深数据, 用形态法调查法<sup>[19]</sup> 计算断面的峰值流量:

$$Q_c = V_c S_c \quad (5)$$

式中:  $S_c$  为沟道过流断面面积。

则流量削减率为:

$$\gamma_4 = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad (6)$$

式中:  $Q_1$  为初始流量( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $Q_2$  为经过拦挡工程逐级削减后的流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )。得到幸福沟的流量削减率  $\gamma_4 = 0.638$ , 计算过程如表 3 所示。由流量削减率可知拦挡工程在削减泥石流的峰值流量方面

起到了较大的作用, 效果较为明显。

### 2.1.5 形成回淤坡度

拦砂坝对泥石流的调控作用表现在回淤缓坡, 抬高局部沟床的侵蚀基准面, 起到护床固坡的作用<sup>[20]</sup>。拦砂坝在拦截泥石流后会在上游形成一个回淤坡度, 考虑该地区内拦砂坝下游受泥石流的影响作用不明显, 因此将下游泥石流沟道坡度值作为其原始沟床天然坡度值<sup>[8]</sup>。用红外测距仪, 测出拦砂坝上下游的坡度, 定义回淤坡度比:

$$\gamma_5 = \frac{I_1 - I_2}{I_1} \quad (7)$$

式中:  $I_1$  为原沟床坡度,  $I_2$  为拦砂坝上游回淤坡度, 对研究区 7 座拦砂坝的回淤坡度比进行计算, 最终根据其平均值, 得到回淤坡度比  $\gamma_5 = 0.450$ , 说明研究区拦挡工程对泥石流的回淤作用较为明显。

### 2.1.6 拦蓄泥沙

拦挡工程的直接效益体现在拦截泥沙<sup>[21]</sup>, 拦截泥沙量由坝高以及坝上游地形等条件决定, 可按三角楔体计算, 即:

$$V = \frac{Hlb}{2} = \frac{bH^2}{2(I_1 - I_2)} \quad (8)$$

式中:  $V$  为拦砂坝库容( $\text{m}^3$ );  $H$  为拦砂坝净高(m);  $l$  为回淤长度(m);  $b$  为平均沟宽(m);  $I_1$  为原沟床坡度;  $I_2$  为拦砂坝上游回淤坡度。在沟道内取得上述所需数据, 带入公式可得出拦蓄泥沙量为  $5.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。再根据一次泥石流过流总量来计算一次泥石流固体物质冲出量<sup>[19]</sup>, 计算步骤如下:

$$Q = \frac{19TQ_c}{72} \quad (9)$$

式中:  $Q$  为一次泥石流过程总量( $\text{m}^3$ );  $Q_c$  为泥石流的最大流量, 根据上述所取断面, 取其最大值, 为  $903.45 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $T$  为泥石流的持续时间, 根据调查访问, 取  $3\ 600 \text{ s}$ 。

一次泥石流固体物质冲出量:

$$Q_H = Q \frac{\gamma_c - \gamma_w}{\gamma_H - \gamma_w} \quad (10)$$



式中:  $\gamma_c$  为泥石流流重度, 根据现场所测土样的计算重度均值, 为  $1.82 \text{ t/m}^3$ ;  $\gamma_w$  为水的重度, 取  $1 \text{ t/m}^3$ ;  $\gamma_H$  为泥石流固体物质的重度, 取  $2.65 \text{ t/m}^3$ 。最终可计算出一次泥石流固体物质冲出量为  $31.57 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 用拦蓄泥沙比来反映拦蓄泥沙的效益, 即拦蓄泥沙量与一次泥石流固体物质冲出量之比:  $\gamma_6 = 0.174$ , 说明研究区内拦挡工程的拦蓄泥沙效果不佳。

## 2.2 排导工程治理效果分析

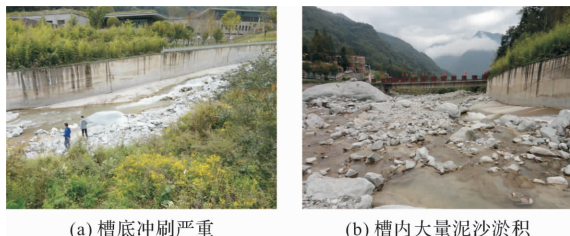
### 2.2.1 排导工程的运行情况

根据排导槽的淤积和侵蚀破坏两个方面<sup>[22]</sup>, 对排导工程的运行情况进行分析, 并进行分级和定量化, 运行情况分为良好、中等、较差三个等级(表4)。

表4 排导工程运行情况分类

运行情况	表现特征	定量化取值
良好	排导槽无泥沙淤积, 且工程结构完整, 未遭受明显侵蚀	0.7~1
中等	排导槽存在少量泥沙淤积, 工程结构轻微损毁, 侧墙、槽底存在轻微侵蚀	0.3~0.7
较差	排导槽内泥沙淤积严重, 且被大块石冲击破坏严重, 工程结构严重损毁, 侧墙、槽底出现严重侵蚀	0~0.3

通过现场对幸福沟排导槽的调查, 发现其槽内大量泥沙淤积, 且大块石居多, 槽底被流水侵蚀, 造成钢筋外露, 侧墙存在轻微损毁, 如图2a、图2b, 排导槽的淤积严重影响着泥沙的输移, 综合考虑上述因素, 因此工程运行情况的取值  $\gamma_7 = 0.3$ , 处于0~0.3之间, 认为幸福沟排导槽的运行情况为较差。



(a) 槽底冲刷严重

(b) 槽内大量泥沙淤积

图2 排导槽的现场调查

### 2.2.2 分析排导工程的纵坡

排导工程为泥石流的运动提供条件, 若纵坡提供的输移力和流动阻力相等, 则泥石流会顺利从槽内排泄出, 否则会使泥石流淤积在槽内, 严重影响排导槽的正常运行, 因此纵坡决定了泥石流是否能够顺利排泄<sup>[23]</sup>。引用周必凡<sup>[19]</sup>对于排导槽合理纵坡的研究(表5)。

表5 排导工程合理纵坡的分类

容重 $\gamma/(\text{g/cm}^3)$	1.3~1.5	1.5~1.6	1.6~1.8	1.8~2.0	2.0~2.2
纵坡/%	3~5	3~7	5~10	5~12	10~18

对现场所取泥石流土样的容重计算结果取均值, 为  $1.82 \text{ g/cm}^3$ , 其合理纵坡范围为5~12%。现场排导槽长度约1176 m, 高差约125 m, 计算纵坡为0.106, 因此处于合理纵坡范围以内。定义沟床纵坡比为实际纵坡与合理纵坡之比, 调查发现研究区排导槽处于合理纵坡范围以内, 因此效果最佳, 则纵坡之比  $\gamma_8 = 1$ 。

### 2.2.3 对比断面形态参数

排导槽的横断面是设计中的重要参数, 选择合理的过流断面, 使排导槽具有最佳的排泄能力, 这对于排导工程的研究十分重要<sup>[24]</sup>。从水力最佳断面角度来选择排导槽的过流断面, 是研究排导槽排泄能力的重点。水力最佳断面是指在纵坡  $I$ 、糙率系数  $n$  和设计流量  $Q$  一定时, 过流断面面积  $A$  最小或水力半径  $R$  最大的断面, 即以最小的过流面积通过设计流量的断面。现场调查发现, 幸福沟的排导工程属于梯型排导槽。现场测量面坡坡比为1:0.4,  $m_V$  为排导槽槽底横坡系数, 因此槽底横坡系数  $m_V$  为0.4。引用游勇等<sup>[12]</sup>探究不同类型排导槽的断面形态参数  $M$  与槽底横坡系数  $m_V$  之间的关系得出的梯形排导槽断面形态参数公式:

$$M = 4(2\sqrt{1+m_V^2} - m_V) \quad (11)$$

可计算出幸福沟的排导槽断面形态参数  $M$  为7.02, 而梯形排导槽水力最佳时的断面形态参数  $M$  为6.93<sup>[12]</sup>, 用断面参数比来表征排导槽的治理效果, 即水力最佳断面参数与实测断面形态参数之比:

$$\gamma_9 = \frac{M_{\min}}{M} \quad (12)$$

式中:  $M$  为计算的断面形态参数,  $M_{\min}$  为水力最佳断面参数, 得出  $\gamma_9 = 0.987$ , 说明研究区排导槽在梯形截面的类型中, 其断面形态参数已接近最佳断面参数。

## 3 岩土防治工程治理效果评价

### 3.1 评价体系的建立

对于涉及到多个评价指标, 可运用层次分析法(AHP)进行评价, 层次分析法是将与决策有关的元素分解成目标、准则、方案等层次, 进行定性和定量分析的决策方法<sup>[25]</sup>。对幸福沟泥石流岩土防治工程治理效果评价因子的选取, 可从拦挡工程和排导工程两个方面进行分析, 拦挡工程包

括工程的运行情况、削减泥石流容重、调节泥石流粒径、削减泥石流流量、形成回淤坡度、拦蓄泥沙等六个方面,排导工程包括工程的运行情况、排导槽的纵坡、断面形态参数等三个方面,由此建立幸福沟泥石流岩土防治工程治理效果评价体系(图3)。

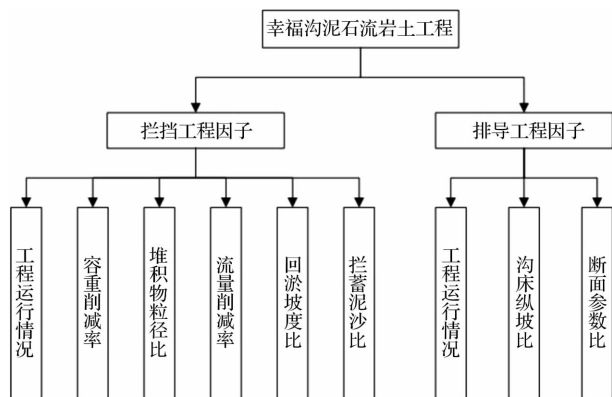


图3 幸福沟泥石流岩土防治工程治理效果评价体系

### 3.2 评价因子的权重及计算结果

将一级指标层中的拦挡工程因子  $x_1$ 、排导工程因子  $x_2$  根据评价指标的重要性,按照1~9标度法<sup>[26]</sup>两两进行比较得到判断矩阵  $A$ :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

将二级指标层中的工程运行情况  $y_1$ 、容重削减率  $y_2$ 、堆积物粒径比  $y_3$ 、流量削减率  $y_4$ 、回淤坡度比  $y_5$ 、拦蓄泥沙比  $y_6$  得到判断矩阵  $B_1$ :

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 6 & 4 & 2 & 3 & 2 \\ \frac{1}{6} & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} \\ \frac{1}{4} & 2 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{2} & 5 & 3 & 1 & 2 & 1 \\ \frac{1}{3} & 3 & 2 & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & 5 & 3 & 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

同样的,将二级指标层中的工程运行情况  $y_7$ 、沟床纵坡比  $y_8$ 、断面参数比  $y_9$  得到判断矩阵  $B_2$ :

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ \frac{1}{2} & 1 & 2 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

对各个判断矩阵的最大特征值进行计算,再对其一致性进行检验,得到一致性比例均小于0.1,结果满足一致性检验,最终得到评价体系中各指标的权重分配及取值如表6所示。

表6 各指标的权重分配及取值

一级评价指标及权重	二级评价指标及权重	取值
拦挡工程 $x_1$ (0.667)	工程运行情况 $y_1$ (0.344)	0.257
	容重削减率 $y_2$ (0.043)	0.090
	堆积物粒径比 $y_3$ (0.074)	0.422
	流量削减率 $y_4$ (0.209)	0.638
	回淤坡度比 $y_5$ (0.121)	0.450
	拦蓄泥沙比 $y_6$ (0.209)	0.174
排导工程 $x_2$ (0.333)	工程运行情况 $y_7$ (0.539)	0.300
	沟床纵坡比 $y_8$ (0.297)	1.000
	断面参数比 $y_9$ (0.164)	0.987

引用王念秦等<sup>[27]</sup>对泥石流防治工程效果后评价的隶属度区间表(表7),根据治理效果的最终计算结果为0.439,处于0.3~0.7的隶属区间内,因此判断幸福沟泥石流岩土防治工程治理效果为中等,根据泥石流防治工程效果分级的定性描述<sup>[27]</sup>,再结合现场调研,最终与定性评估的结果相符,说明本方法进行幸福沟泥石流岩土防治工程治理效果的评价是可行的。

表7 泥石流防治工程效果隶属度区间划分

评价等级	1级	2级	3级	4级
评价结果	很好	良好	中等	过于保守或失败
隶属度区间	0.85~1.00	0.75~0.85	0.30~0.70	0~0.30

## 4 结论

(1)通过对幸福沟泥石流岩土防治工程的治理效果进行分析,建立治理效果评价体系,拦挡工程包括工程运行情况、容重削减率、堆积物粒径比、流量削减率、回淤坡度比、拦蓄泥沙比;排导工程包括工程运行情况、沟床纵坡比、断面参数比。通过对各个评价指标进行计算,结果显示拦挡工程的运行情况较差,在削减泥石流容重和拦蓄泥沙方面效果不明显,但在调节泥石流粒径、削减泥石流峰值流量、形成回淤坡度方面效果较为明显;排导工程的运行情况较差,但其纵坡处于合理范围之内,且断面的形态参数接近最佳断面形态参数。

(2)运用层次分析法,对幸福沟泥石流岩土防治工程的治理效果进行综合评价,根据评价结果认为幸福沟泥石流岩土防治工程的治理效果为中等,与现场的调研结果一致,验证了该方法的可行性和评价体系的合理性。

## 参考文献:

- [1] 陈光曦,王继康,王林海,等.泥石流防治[M].北京:中

- 国铁道出版社, 1983: 120-121.
- [2] 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: 248-262.
- [3] 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.
- [4] 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报告[J]. 工程地质学报, 2010, 18(4): 437-444.
- [5] JOHNSON P A, MCCUEN R H. Slit Dam Design for Debris Flow Mitigation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989, 115(9): 1293-1296.
- [6] HIROSHI Ikeya, 朱桂芳, 王生. 日本的泥石流及其防范措施[J]. 世界地质, 1992(2): 78-90.
- [7] 水野秀明, 南哲行, 水山高久, 等. 连续配置钢管格栅坝拦截泥石流效果[J]. 水土保持科技情报, 2001(2): 29-32, 36.
- [8] 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.
- [9] 曾庆利, 岳中琦, 杨志法, 等. 谷坊在泥石流防治中的作用——以云南蒋家沟 2 条支沟的对比为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(17): 3137-3145.
- [10] KIM Youngil, PAIK Joongcheol. Depositional characteristics of debris flows in a rectangular channel with an abrupt change in slope[J]. Journal of Hydro - environment Research, 2015, 9(3): 420-428.
- [11] 张红兵, 周道银. 泥石流 V 型排导槽防治理论及应用研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006(3): 1-4.
- [12] 游勇, 柳金峰, 欧国强. 泥石流常用排导槽水力条件的比较[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(S1): 2820-2825.
- [13] 林植, 杨虎, 郭峰, 等. 汶川县耿达乡幸福沟泥石流发育特征研究[J]. 中国水运(下半月), 2014(4): 239-241.
- [14] 童建波. 卧龙幸福沟泥石流发育特征及发展趋势预测[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- [15] 王继康. 泥石流防治工程技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1996: 157-159.
- [16] 熊道银, 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.
- [17] 贾世涛, 崔鹏, 陈晓清, 等. 拦沙坝调节泥石流拦挡与输移性能的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 2338-2345.
- [18] 余斌. 根据泥石流沉积物计算泥石流容重的方法研究[J]. 沉积学报, 2008(5): 789-796.
- [19] 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: 80-92.
- [20] 李德基. 泥石流减灾理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 158-160.
- [21] 陈宁生, 周海波, 卢阳, 等. 西南山区泥石流防治工程效益浅析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2013, 40(1): 50-58.
- [22] 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.
- [23] 游勇. 泥石流排导槽最小不淤纵坡初步试验研究[J]. 水土保持通报, 2000(6): 36-38.
- [24] 游勇. 泥石流排导槽水力最佳断面[J]. 山地学报, 1999(3): 3-5.
- [25] 汪应洛. 系统工程(第二版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 120-131.
- [26] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
- [27] 王念秦, 韩波, 庞琦, 等. 泥石流防治工程效果后评价初探[J]. 工程地质学报, 2015, 23(2): 219-226.

## Analysis and Evaluation of the Treatment Effect of the Geotechnical Engineering of Debris Flow: Case of Xingfu Gully in Wolong

ZHANG Wentao<sup>1,2,3</sup>, LIU Jinfeng<sup>1,2</sup>, YOU Yong<sup>1,2,3</sup>, SUN Hao<sup>1,2,3</sup>,  
YANG Huaquan<sup>1,2,3</sup> and LU Ming<sup>1,2,3</sup>

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

**Abstract:** In order to research the effect of geotechnical engineering in the prevention and mitigation of debris flow. Based on the “8.20” debris flow in 2019, combined with the field investigation, the treatment effect of geotechnical engineering of debris flow of Xingfu gully in Wolong is analyzed and evaluated. According to the distribution of geotechnical engineering in the study area, it can be divided into two first-class indices: check dams and drainage projects. At the same time, considering the operation of engineering, nine secondary indices related to the treatment effect of engineering are selected. Among them, the evaluation indices of the check dams include the operation of the check dams, the reduction rate of the bulk density, the particles ratio, the reduction rate of the peak flow rate, the ratio of gradient of intercepted sediments and the ratio of sediment retention. The evaluation indices of the drainage projects include the operation of the drainage projects, the ratio of the gradient and the ratio of section factor coefficient. The analytic hierarchy process is used to determine the weight for the comprehensive evaluation of the effect. It is considered that the treatment effect of geotechnical engineering of debris flow of Xingfu gully is moderate, which is consistent with the field investigation results, and verifies the rationality of the evaluation system and the feasibility of this method.

**Key words:** debris flow; check dam; drainage project; treatment effect; analytic hierarchy process; Sichuan Wenchuan