

DOI: 10.11779/CJGE2016S1042

# 乌东德水电站白滩沟泥石流特性分析与防治措施

刘 波<sup>1</sup>, 牛运华<sup>1</sup>, 王 科<sup>1</sup>, 代德富<sup>2</sup>

(1. 长江勘测规划设计研究院, 湖北 武汉 430010; 2. 昆明市东川区泥石流防治研究所, 云南 昆明 654100)

**摘要:** 通过野外调查和室内模型试验对白滩沟的泥石流特性进行了分析, 结合特殊的地形、地质条件以及建筑物的布置情况, 对泥石流的排导线路进行了比选, 确立了最优的排导线路, 此外, 还对白滩沟的泥石流防治效果进行了跟踪评价。结果表明: 导流墙、拦挡坝、固床坝能够有效保护原始沟道, 阻止大量的固体物质参与泥石流活动, 再加上停淤场的停淤作用, 最终只有少量的固体物质和洪水通过排导槽排至金沙江, 达到了预期的防治效果。“稳坡、拦挡、固床、停淤、排导”的综合防治体系效果良好, 在今后的泥石流防治工程设计中值得推广采用。

**关键词:** 泥石流; 乌东德水电站; 特性分析; 防治措施

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)S1-0225-06

作者简介: 刘 波(1983-), 男, 高级工程师, 主要从事水利水电工程施工设计及相关研究工作。E-mail: wave0912@163.com。

## Characteristic analysis and control measures for debris flow in Baitan Gully of Wudongde Hydropower Station

LIU Bo<sup>1</sup>, NIU Yun-hua<sup>1</sup>, WANG Ke<sup>1</sup>, DAI De-fu<sup>2</sup>

(1. Chang Jiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China; 2. Kunming Dongchuan debris flow prevention and Control Research Institute, Kunming 654100, China)

**Abstract:** Adopting field investigation and indoor model tests, the characteristics of debris flow in Baitan Gully are studied. Combined with the particularity of terrain, geological conditions and building layout, the drainage route of debris flow is compared. The optimal drainage route is obtained. In addition, the effect of control measures of debris flow in Baitan Gully is evaluated. The results show that the guide wall, block dam and solid bed dam can effectively protect the original channel, and they can also prevent solid substances from being involved in debris flow activity. Beyond that, the silting field can also play the role of silting. Finally, only a small amount of solid substances and the flood are discharged to the Jinsha River through the drainage canal, and the effect of prevention is achieved. As a complete system, the guide wall, block dam, silting field and solid bed dam can have a good control effect. So such a control system should be widely adopted in the design of control measures for debris flow.

**Key words:** debris flow; Wudongde Hydropower Station; characteristic analysis; measure

## 0 引 言

泥石流是一种产生于沟谷和坡地的包含泥沙、岩石块体或巨砾和水的固液两相重力流体。中国西南地区山高坡陡、地表松散堆积物丰富、降水丰沛, 再加上人类活动等因素, 泥石流活动较为频繁。在西南水电大开发的今天, 泥石流的特性分析与防治措施成为热点科研课题之一。泥石流在沟道和沟口沉积形成堆积区, 易堵塞天然沟道, 甚至堵塞江河、影响水电站库容, 将会对人民的生命财产和电站的正常运行造成巨大损失。

国内外众多学者对泥石流的形成及防治进行了研究并取得了一定成果<sup>[1-4]</sup>。陈中学等<sup>[5]</sup>通过室内模型试

验, 初步探讨了黏土颗粒含量对泥石流启动的影响, 揭示了泥石流形成的内在机制; 舒安平等<sup>[6]</sup>通过室内模拟实验探究了不同坡度条件下非均质泥石流的堆积厚度、面积等特征值的变化特征; 周健等<sup>[7-8]</sup>通过室内模拟降雨, 研究了不同初始含水率对砂性泥石流启动下滑过程的影响, 探究了降雨条件下颗粒组分对泥石流形成的影响机理; 游勇等<sup>[9]</sup>通过理论推导, 得出不同断面型式泥石流排导槽的水力条件优劣性; 徐林荣等<sup>[10]</sup>基于冲淤平衡原理, 结合雨洪修正法与形态断面法相关原理, 对沟道横断面任意位置流速计算公式进

行了推导，并获取了泥石流流速横向分布的非线性特征。上述研究成果都是通过不同程度的简化，基于室内试验和理论推导获得。由于泥石流的形成机理十分复杂，其治理措施应与实际地形、地质特征以及建筑物分布等相结合，对治理效果还应进行跟踪评价，以便于对治理措施进行完善，但目前这方面的研究工作较少。

本文针对金沙江乌东德水电站坝区最大的泥石流沟—白滩泥石流沟，通过野外调查、室内试验对泥石流的静动力特性进行了详细分析，结合实际的地形、地质条件和建筑物的布置情况对防治措施进行了比选论证，并对治理效果进行了跟踪评价，为今后水电工程建设中的泥石流治理提供借鉴意义。

## 1 白滩泥石流沟简介

白滩泥石流沟由小沟和磨槽沟两支沟组成，呈“两沟夹一脊”形态，流域面积约  $4.44 \text{ km}^2$ ，冲沟发育呈北东向，总体呈近垂直方向汇入金沙江。小沟、磨槽沟沟长分别为  $1.87 \text{ km}$  和  $3.08 \text{ km}$ ，沟口分别距乌东德水电站坝址  $2.9 \text{ km}$  和  $2.4 \text{ km}$ 。白滩泥石流沟地形表现为北东高、南西低，北东侧分水岭一带多为陡崖（图 1）。

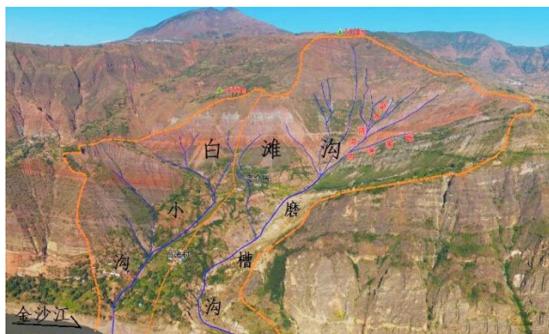


图 1 白滩沟原始实景

Fig. 1 Original condition of Baitan Gully

小沟主沟床弯曲系数 1.12，平均比降为 26.4%；磨槽沟主沟床弯曲系数 1.08，平均比降 34.5%。两沟沟谷断面均为不对称“V”型。白滩泥石流沟的特殊地形成了泥石流的发源地。

白滩泥石流沟内地层岩性复杂，出露地层主要为二叠系、三叠系、侏罗系及白垩系的碎屑岩及侵入岩；局部范围出露第四系地层，主要为残坡积物 ( $Q^{\text{edl}}$ )、崩坡积物 ( $Q^{\text{col+dl}}$ )、冲积层 ( $Q^{\text{al}}$ )、崩积物 ( $Q^{\text{col}}$ )、洪崩积物 ( $Q^{\text{col+pl}}$ )、滑坡堆积物 ( $Q^{\text{del}}$ ) 等，上述松散的固体物质为泥石流的形成提供了丰富的物源。

白滩泥石流沟位于中国降雨丰沛的西南地区，最大洪水流量：小沟 50 a 一遇为  $8.76 \text{ m}^3/\text{s}$ ；磨槽沟 50 年一遇为  $28.74 \text{ m}^3/\text{s}$ 。此外，沟内以干热河谷为基础的立体气候，整体植被覆盖率较少（约 20%）。降雨

丰沛、植被稀少成为形成泥石流要素之一。

## 2 泥石流特性分析

为揭示泥石流的静动力特征，笔者与昆明市东川区泥石流防治研究所实验室进行了泥石流模型试验。

试验槽总长  $210 \text{ cm}$ ，净宽  $16 \text{ cm}$ ，净高  $16 \text{ cm}$ ，坡度为  $3.5^\circ \sim 16.5^\circ$ ，如图 2。



图 2 模型试验装置

Fig. 2 Devices for model tests

### 2.1 泥石流静力特性

#### (1) 重度特征

在沟道下游和扇形堆积区取样进行颗粒试验，共进行两组。第一组样品重  $2949 \text{ g}$ ，第二组样品重  $3523 \text{ g}$ 。通过筛分，小沟<sup>#1</sup>样品的黏粒含量为  $8.835 \text{ g}$ ，<sup>#2</sup>样品的黏粒含量为  $3.291 \text{ g}$ ；磨槽沟<sup>#1</sup>样品的黏粒含量为  $3.632 \text{ g}$ ，<sup>#2</sup>样品的黏粒含量为  $6.097 \text{ g}$ 。

根据陈宁生等<sup>[11]</sup>基于黏粒含量的泥石流重度计算方法，白滩沟泥石流重度计算值分别为：小沟<sup>#1</sup>样品  $\gamma_c = 1.587 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，<sup>#2</sup>样品  $\gamma_c = 1.562 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，平均值为  $1.58 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ；磨槽沟<sup>#1</sup>样品  $\gamma_c = 1.569 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，<sup>#2</sup>样品  $\gamma_c = 1.554 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，平均值为  $1.56 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，两支沟均属稀性泥石流。

#### (2) 流量特征

洪峰流量是泥石流的重要特征值之一。根据《泥石流灾害防治工程设计规范 DZ/T0239—2004》以及相关经验数据，结合现场调查情况，小沟、磨槽沟以及汇合后的白滩沟在不同频率下的洪峰流量见表 1。

表 1 不同频率下的泥石流洪峰流量

Table 1 Peak values of debris flow at different frequencies

流域名称	流域面积/(\text{km}^2)	设计频率	流量/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})
小沟	1.0	$P=1\%$	20.5
		$P=2\%$	18.0
		$P=5\%$	15.1
磨槽沟	3.44	$P=1\%$	83.8
		$P=2\%$	73.7
		$P=5\%$	62.0
白滩沟	4.44	$P=1\%$	88.1
		$P=2\%$	77.4
		$P=5\%$	65.2

白滩沟泥石流防治设计标准为 50 a 一遇。

## 2.2 泥石流动力特性

### (1) 流速分析

泥石流流速是动力特性最为重要参数之一, 对泥石流沟的评价以及设防起着至关重要的作用。白滩沟泥石流属稀性泥石流, 根据《泥石流灾害防治工程勘查规范 DZ/T 0220—2006》的推荐公式进行计算, 结果见表 2。

表 2 泥石流流速计算

Table 2 Calculation of velocity of debris flow (m/s)

计算公式	北京市政	铁三院	铁二院	铁一院	均值
小沟	3.68	8.54	11.57	9.39	9.83
磨槽沟	4.45	9.75	13.21	10.92	11.30

从上述 4 种方法的计算结果可见, “北京市政”公式计算结果与其他 3 个公式的计算结果有较大差距, 故白滩沟泥石流流速计算结果取“铁路三公式”的平均值。

### (2) 冲击力分析

泥石流的冲击力关系到防治技术的选用、结构尺寸拟定和配筋设计等, 计算公式如下:

$$F_{\delta} = \lambda \frac{\gamma_c}{g} V_c^2 \sin \alpha \quad , \quad (1)$$

式中,  $F_{\delta}$  为泥石流整体冲击压力 (10 kPa),  $\gamma_c$  为泥石流重度 ( $10^3 \text{ kg/m}^3$ ),  $V_c$  为泥石流流速 (m/s),  $g$  为重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ ),  $\alpha$  为建筑物受力面与泥石流冲压方向的夹角 ( $^{\circ}$ ), 按正面撞击考虑  $\alpha=90^{\circ}$ ,  $\lambda$  为建筑物形状系数, 矩形建筑物  $\lambda=1.33$ 。

根据公式求得小沟和磨槽沟泥石流整体冲击力分别为 206.54 kPa 和 270.68 kPa。

### (3) 最小纵坡分析

泥石流排导线路的最小纵坡主要通过“直槽模型试验”模拟, 并且与现场调查、公式计算结果相互验证后确定, 实验结果见表 3。

表 3 白滩沟泥石流实验记录表

Table 3 Experimental records of debris flow in Baitan Gully

编号	流速时间 /s	泥位深 /cm	空杯深 /cm	样重 /g	淤积情况		纵向坡度
					淤积	冲积	
①	0.84	4.5	3.8	1221	无	16.5°	
②	0.73	5.0	2.9	1561	基本无	13.5°	
③	0.88	4.0	3.4	1402	基本无	8.5°	
④	0.82	4.5	2.4	1752	少量淤积	7.0°	
⑤	1.10	5.5	3.2	1515	全程淤积	5.3°	
⑥	0.92	5.5	2.4	1671	全程淤积	3.5°	

从实验结果可以得出: 纵坡  $i=3.5^{\circ}$ , 在过流后期全程有淤积, 首段淤深约 2 cm; 纵坡  $i=5.3^{\circ}$  时, 全

程仍有淤积, 首段淤深约 1.2 cm; 纵坡  $i=7.0^{\circ}$  时, 有少量淤积, 首部长 1.5 m; 纵坡  $i=8.5^{\circ}$  和  $i=13.5^{\circ}$  时, 基本无淤积。由此可以得出, 为满足泥石流的顺利过流, 白滩泥石流沟纵坡不宜小于 8.5%。

## 3 泥石流防治措施

### (1) 白滩沟建筑物布置

根据乌东德水电站坝区施工布置的需要, 白滩沟内布置有永久场内道路、临时施工道路、弃渣场及渣场顶部的存料场、砂石加工系统等临时设施 (图 3), 因此泥石流的防治工程至关重要。



图 3 白滩沟建筑物布置

Fig. 3 Layout of buildings in Baitan Gully

### (2) 防治措施

为使泥石流的发生得到有效控制, 采用了“稳坡、拦挡、固床、停淤、排导”的综合防治方案。



图 4 磨槽沟导流墙

Fig. 4 Guide wall of Mocao Gully

a) 稳坡: 在磨槽沟中游沟床高程 1000~1080 m 之间的沟道右岸及沟床高程 980~1000 m 之间的沟道左岸, 修建导流墙防止泥石流对沟岸的冲刷, 稳住洪积、崩坡积体及崩塌体坡脚, 减少松散固体物质参与洪水运动, 导流墙净高 4~5 m, 如图 4 所示。

b) 拦挡: 在磨槽沟中游主沟道内修建两座拦挡坝。

#1 拦挡坝布设于排导槽上游沟床高程 1000 m 处, 坝型为重力式实体格墩坝, 坝顶设格墩状溢流口过流, 溢流段净高 4 m, 隔墩高度为 2 m, 间距 1 m, 宽度 1.5 m, 主要作用是拦挡粒径大于 1 m 的松散物质下泄。#2 拦挡坝布设于沟床高程 1120 m 处, 坝型采用重力式实体坝, 坝顶设溢流口过流, 坝身设两排排水孔, 溢流段净高 5 m, 排水孔尺寸为 1 m×0.5 m, 主要作用是拦挡较小颗粒的松散物质下泄, 抬高沟床基准面, 从而减少沟道两侧的冲刷, 防止固体物质大量下泄对下游布设的建筑物造成危害 (图 5, 6)。

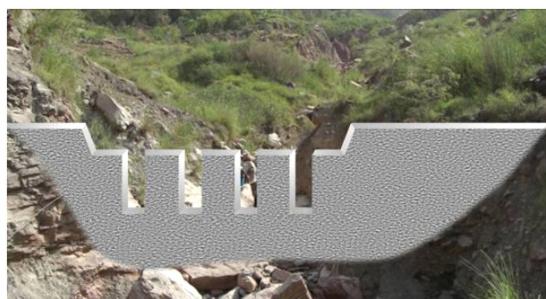


图 5 #1 拦挡坝示意图

Fig. 5 Sketch of block dam No. 1



图 6 #2 拦挡坝结构示意图

Fig. 6 Sketch of block dam No. 2

c) 固床: 在磨槽沟中游沟道内 (高程 980~1080 m 范围) 修建固床坝群, 其中#1 拦挡坝下游设置 2 道, #1~#2 拦挡坝之间设 4 道。坝顶设溢流口过流, 溢流段净高 0.5~1 m, 非溢流段坝体净高 2~2.5 m。固床坝群与导流墙相结合, 可稳定整段沟床, 防止沟床下切及床内松散物质起动, 并能保证拦挡坝的安全。

d) 停淤: 小沟、磨槽沟一次泥石流过程冲出的固体物质总量分别为 0.58 万 m<sup>3</sup>、2.29 万 m<sup>3</sup>。为了使得“固一液分离”、控制较大粒径固体物质进入排导槽, 在小沟和磨槽沟排导槽进口均留一定容量 (约 1.1 万 m<sup>3</sup>) 停淤场。泥石流发生时上游拦挡和下游排导同时进行, 停淤场的容量能够满足要求, 此外, 还可以通过加大停淤场清淤频次, 保证停淤场有充足的容量。

e) 排导: 在白滩沟中下游弃渣场上方修建排导槽, 将下泄的泥石流排入金沙江, 防止泥石流对弃渣场及其顶部的工程设施造成危害。

### (3) 排导线路

泥石流排导是防治工程的重中之重, 排导线路的优劣直接影响泥石流的防治效果。白滩沟地形总体呈“两沟夹一脊”特殊形态, 下游冲沟为磨槽沟、上游冲沟为小沟、中间山脊为社房梁子, 地势北东高、南西低。白滩沟上下游山体陡峻, 且下游为马鹿塘断层, 均不宜布设排导槽。磨槽沟下游侧一带为陡坡且属崩坡积覆盖层, 厚度 8~14 m, 沟口分布有 10~35 m 厚冲积层粉质黏土、淤泥质土及粉细砂层, 不宜作排导槽出口。因此, 排导槽出口段只有沿中间山脊而下 (中线方案) 或沿小沟弃渣场外边坡至上游相邻冲沟内 (西线方案) 两种方案成为可能, 以下对两方案进行分析比选。两方案排导槽平面布置见图 7。

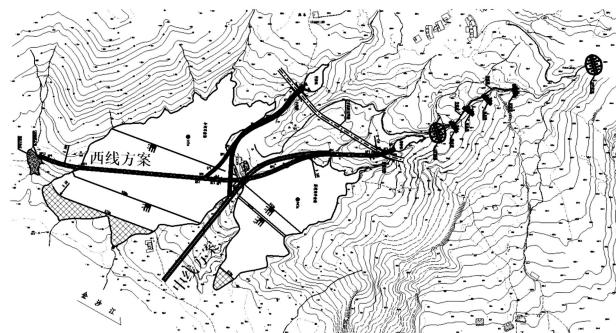


图 7 排导槽平面布置图

Fig. 7 Layout of drainage cannal

中线方案: 磨槽沟以弃渣场堆放高程 945 m 上方中游沟床高程 988.20 m 处为排导槽起点, 由东北沿磨槽沟弃渣场内侧原沟道右岸向西南约高程 940 m 处至社房梁子, 再沿社房梁子而下至坡面高程 850 m 处后排入金沙江。小沟以弃渣场堆放高程 945 m 上方中游沟床高程 972 m 处为排导槽起点, 沿原沟道左岸而下, 至社房梁子高程 940.17 处与磨槽沟排导槽交汇衔接。磨槽沟排导槽总长 837.87 m, 陡坡段平均纵坡为 28.18%, 其他段平均纵坡为 9.0%; 小沟排导槽总长 350.7 m, 平均纵坡 9.08%。

西线方案: 磨槽沟排导槽以弃渣场堆放高程 945 m 上方中游沟床高程 988.20 m 处为起点, 由东北沿磨槽沟弃渣场内侧原沟道右岸向西南约高程 940 m 处穿过社房梁子及小沟弃渣场外边坡至与小沟相邻的冲沟内排入金沙江。小沟排导槽以弃渣场堆放高程 945 m 上方中游沟床高程 972 m 处为排导槽起点, 由东北沿沟道及弃渣场向西南至社房梁子高程 936.36 m 处与磨槽沟排导槽交汇衔接。磨槽沟排导槽总长 1013.36

m, 平均纵坡 9.14%; 小沟排导槽总长 345.9 m, 平均纵坡 9%。

上述两方案相比, 中线方案虽然排导线路较短、投资较少, 但是排导槽进出口高差大, 陡坡段纵坡达 28.18%, 槽内泥石流流速大, 排导槽运行期间的稳定行难以保证。此外, 从两沟交汇处沿社房梁子而下至出口段为第四系堆积体, 不利于排导槽尾部的稳定。

西线方案与中线方案相比, 排导槽进出口高差较小, 平均纵坡较小, 小沟、磨槽沟平均纵坡分别为 15%、9%, 且单沟不变坡, 槽内泥石流流速较小, 排导槽不易产生冲刷, 并且排导槽出口处基岩出露, 抗冲刷能力较强。但缺点是排导槽线路较长、投资较大。

综合上述地形、地质条件以及排导槽自身抗冲刷能力、出口消能防冲、工程投资等方面, 西线方案为最优方案。

#### (4) 排导槽横断面

V 型断面排导槽具有“纵断面由上而下、横断面由两侧向中间”的立体束流特点, 对泥石流有“束水攻沙”排泄固体物质之功效, 在泥石流排导设计中常被采用。由于白滩沟排导槽位于弃渣填筑体上, 在渣体填筑碾压后开挖而成, 为了开挖成坡的需要, 其侧墙须为斜墙, 因此排导槽采用“斜墙 V 型断面”。

小沟、磨槽沟排导槽的侧墙坡比分别为 1:0.35、1:0.3, 槽底横坡 1:5。槽身由 C35 砼立模浇筑而成(图 8, 9)。

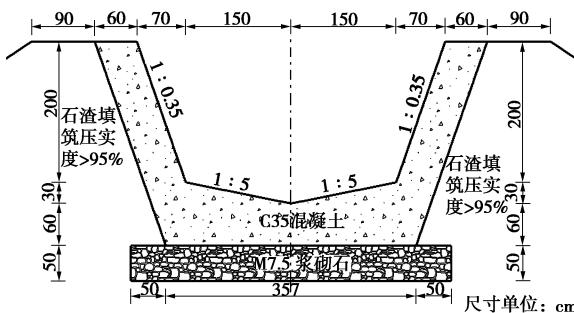


图 8 小沟排导槽横断面

Fig. 8 Cross section of drainage cannal in Xiaogou Gully

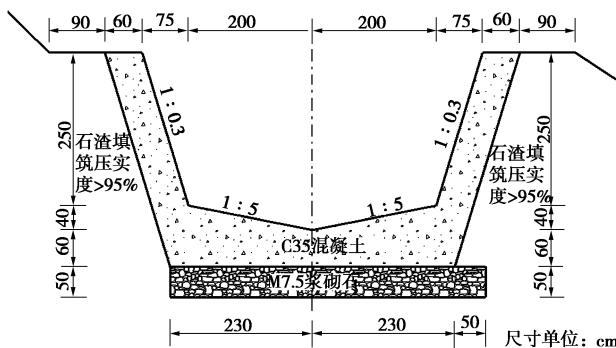


图 9 磨槽沟排导槽横断面

Fig. 9 Cross section of drainage cannal in Mocao Gully

## 4 泥石流防治效果

白滩沟泥石流防治工程完工后经历了汛期的强降雨考验, 以下对防治效果进行分析。

由于上游导流墙、拦挡坝、固床坝有效保护了原始沟道, 阻止了大量的固体物质参与泥石流活动, 再加上停淤场的停淤作用, 最终只有少量的固体物质下泄。

图 10 为小沟和磨槽沟汇合后的主沟在强降雨后泥石流的排导状况。从图中可以看出: 槽内只有零星分布的固体残留物, 未出现淤积、堵塞等情况, 表明排导槽的纵坡、断面设计合理可靠, 达到了预期的排导效果。



图 10 槽身段泥石流排导状况

Fig. 10 Silting-up form in drainage cannal

图 11 为排导槽出口的淤积情况。从图中可以看出, 大粒径的固体物质已被上游拦挡设施拦截, 在加上停淤场的停淤作用, 最终下泄的固体物质总量较小。排导槽出口仅有少量的小粒径碎块石形成堆积区, 沙子、洪水已顺利排入金沙江。



图 11 排导槽出口堆积状况

Fig. 11 Silting-up form at outlet of drainage cannal

## 5 结 论

通过对乌东德水电站白滩泥石流沟的野外调查和

室内模型试验, 对泥石流的特性进行了分析, 通过方案比选确立了“稳坡、拦挡、固床、停淤、排导”的综合防治方案, 结论如下:

(1) 野外调查和模型试验是分析泥石流特性的途径, 是泥石流防治设计的基础和必要环节。

(2) 白滩沟两支沟均属稀性泥石流沟。通过计算分析, 两支沟流速分别为 9.83 m/s, 11.3 m/s; 试验结果表明, 排导线路最小纵坡不宜小于 8.5%。

(3) 泥石流的治理措施应紧密结合地形、地质条件, 并考虑建筑物的布置等因素, 进行综合比选, 确立最优方案, 才能达到理想的防治效果。

(4) 对泥石流的防治效果进行跟踪评价, 是检验防治措施的有效手段, 便于不断完善防治体系。

(5) “稳、拦、固、停、排”的立体综合防治体系具有良好的防治效果, 在今后的泥石流防治工程设计中值得推广采用。

#### 参考文献:

- [1] HUNGR O, EVANS S G, BOVIS M, et al. Review of the classification of landslides of the flow type [J]. Environmental and Engineering Geoscience, 2001, (VII): 221 - 238.
- [2] WAND G, SASSA K. Pore-pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: Effects of grain size and fine-particle content [J]. Eng Geol, 2003, **69**: 109 - 125.
- [3] YANG W M, WU S R, ZHANG Y S, et al. Research on formation mechanism of the debris flow on slope induced by rainfall [J]. Earth Science Frontiers, 2007, **14**(6): 197 - 204.
- [4] 高冰, 周健, 张姣, 等. 泥石流启动过程中水土作用机制的宏细观分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(12): 2567 - 2573. (GAO Bin, ZHOU Jian, ZHANG Jiao, et al. Macro-meso analysis of water-soil interaction on mechanism of debris flow starting process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(12): 2567 - 2573. (in Chinese))
- [5] 陈中学, 汪稔, 胡明鉴, 等. 黏土颗粒含量对蒋家沟泥石流启动影响分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(7): 2197 - 2201. (CHEN Zhong-xue, WANG Ren, HU Ming-jian, et al. Study of content of clay particles for debris flow occurrence in Jiangjia Ravine [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(7): 2197 - 2201. (in Chinese))
- [6] 舒安平, 张欣, 唐川, 等. 不同坡度条件下非均质泥石流堆积过程与特征[J]. 水利学报, 2013, **44**(11): 1333 - 1337. (SHU An-ping, ZHANG Xin, TANG Chuan, et al. Analysis on the deposition processes and characteristics of non-homogeneous debris flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, **44**(11): 1333 - 1337. (in Chinese))
- [7] 周健, 高冰, 张姣, 等. 初始含水率对砂土泥石流启动影响作用分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(5): 1042 - 1048. (ZHOU Jian, GAO Bin, ZHANG Jiao, et al. Influence of initial water content on sandy debris flow starting process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(5): 1042 - 1048. (in Chinese))
- [8] 周健, 王连欣, 贾敏才, 等. 颗粒组分对泥石流形成形态影响研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, **41**(1): 8 - 14. (ZHOU Jian, WANG Lian-xin, JIA Min-cai, et al. Influence of grain size distribution on the formation of debris flow[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, **41**(1): 8 - 14. (in Chinese))
- [9] 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, **25**(增刊 1): 2820 - 2825. (YOU Yong, LIU Jin-feng, OU Guo-qiang. Comparison of hydraulic conditions among usual debris flow drainage canal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S1): 2820 - 2825. (in Chinese))
- [10] 徐林荣, 韩征, 苏志满, 等. 泥石流流速横向分布特征与防治工程结构优化[J]. 岩土力学, 2012, **33**(12): 3715 - 3720. (XU Lin-rong, HAN Zheng, SU Zhi-man, et al. Research on lateral distribution features of debris flow velocity and structural optimization of prevention and control works [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(12): 3715 - 3720. (in Chinese))
- [11] 陈宁生, 崔鹏, 刘中港, 等. 基于黏土颗粒含量的泥石流重度计算[J]. 中国科学 E 辑技术科学, 2003, **33**(增刊): 164 - 174. (CHEN Ning-sheng, CUI Peng, LIU Zhong-gang, et al. Calculation of the debris flow density based on the content of clay particles[J]. Science in China Ser. E Technological Sciences, 2003, **33**(S0): 164 - 174. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)