

引用格式:刘兆旭,任锦程,赵艳青,苏鹏程,汪洋,龚旭. 泥石流透过型拦砂坝群结构优化设计[J]. 山地学报, 2024, 42(6): 791-804.

LIU Zhaoxu, REN Jincheng, ZHAO Yanqing, SU Pengcheng, WANG Yang, GONG Xu. Optimization design of permeable debris flow check dam cascade [J]. Mountain Research, 2024, 42(6): 791-804.

## 泥石流透过型拦砂坝群结构优化设计

刘兆旭<sup>1,2</sup>,任锦程<sup>2</sup>,赵艳青<sup>3</sup>,苏鹏程<sup>1,2\*</sup>,汪洋<sup>2</sup>,龚旭<sup>2,4</sup>

(1. 西藏大学 工学院,拉萨 850032; 2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所,成都 610213;

3. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司,北京 100024; 4. 中国科学院大学,北京 100049)

**摘要:**泥石流常采用拦砂坝群布局工程措施。如何达到泥石流拦砂坝群,尤其是透过型拦砂坝群在多级拦截下的最优协同作用,是目前研究的难点。本文选择司地沟为研究区,在无人机数据和野外考察的基础上,以透过型拦砂坝群的重要设计参数开口比作为主要研究参数,采用基于改进 MacCormack-TVD 有限差分法的 Massflow 软件对开口比  $L$  为 1、2、3 的梳齿坝群进行数值模拟,得到泥石流在不同  $L$  条件下的泥深、流速及堆积面积。研究结果表明:(1)降雨频率为 1% 时,泥石流运动至沟口的最大泥深为 11.4 m,最大流速为  $16.50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,在沟口形成堆积面积为  $35.86 \times 10^4 \text{ m}^2$  的堆积扇。(2)拦砂坝群可有效拦截泥石流物质量,最大泥深出现在坝前,泥石流运动时长随开口比增加而减小,开口比为 1 时泥石流运动至 3 号坝址处的时间有效延长了 100 s。(3)坝前后流速随开口比  $L$  增加而增加,坝前拦截物质量随开口宽度增大而减小;随  $L$  增大,1 号坝功能由拦截向排导转变,2 号坝拦截效能呈现先增加后减小的趋势,主要拦截物质由 1、2 号坝向 2、3 号坝转变, $L=3$  为研究区拦砂坝群最佳开口比。本文针对泥石流透过型拦砂坝群结构优化设计的关键参数,通过理论分析与数值模拟,系统探讨透过型拦砂坝群设计中关键参数的影响机理及优化设计策略,以期在实际工程提供技术参考。

**关键词:**泥石流;设计优化;Massflow;透过型拦砂坝群;开口比

**中图分类号:** X43;P642.23

**文献标志码:** A

泥石流在重力作用下沿着沟道或坡面流动,具有高速度、高冲击力及固体颗粒物质混合特性<sup>[1-2]</sup>,严重危害山区基础设施和当地生产生活。例如,2021 年 7 月 5 日,四川省凉山州木里县项脚乡项脚沟暴发特大型泥石流,冲毁道路 2 km;2021 年 9 月 25 日,四川省天全县喇叭河镇龙头沟泥石流造成 8 人遇难;2022 年 8 月 17 日青海省大通县泥石流造成 16 人遇难、36 人失联;2023 年 6 月 27 日,阿坝州

汶川县绵虬镇板子沟泥石流 3 人失联、4 人遇难<sup>[3]</sup>。

拦砂坝作为常用的泥石流防护设施,通过拦截泥石流中的固体物质、削减流量及降低流速,保护下游区域安全<sup>[1]</sup>。面对高频次、强冲击的大型泥石流事件,单一拦砂坝往往难以胜任,其功能易出现衰减乃至失效。拦砂坝群采用级联布局,利用透过型拦砂坝实现逐级拦排调控,可以大幅提高泥石流整体防护能力<sup>[4-5]</sup>。透过型拦砂坝群允许泥石流流体中

**收稿日期** (Received date): 2024-11-18; **改回日期** (Accepted date): 2024-12-05

**基金项目** (Foundation item): 国家重点研发计划 (2022YFC3002905); 国家自然科学基金 (42271092); 中国科学院西部青年学者项目 (E2R2180180)。[National Key Research and Development Program of China (2022YFC3002905); National Natural Science Foundation of China (42271092); West Young Scholars Program of the Chinese Academy of Sciences (E2R2180180)]

**作者简介** (Biography): 刘兆旭 (1997-), 男, 山东聊城人, 硕士研究生, 主要研究方向: 泥石流数值模拟及工程防治。[LIU Zhaoxu (1997-), male, born in Liaocheng, Shandong Province, M. Sc. candidate, research on numerical simulation of debris flow and engineering prevention] E-mail: 798020432@qq.com

**\* 通讯作者** (Corresponding author): 苏鹏程 (1981-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向: 山区高速公路、水电基地及城镇地质灾害评估与工程减灾。[SU Pengcheng (1981-), male, Ph. D., associate professor, research on geological hazard assessment and engineering disaster mitigation for mountain highways, hydropower bases and towns] E-mail: supengcheng@imde.ac.cn

水分和细颗粒通过,将大颗粒固体物质在梯级坝前分级拦截<sup>[6-7]</sup>,减轻泥石流对坝体的冲击压力。这种设计提高泥石流防治效果,也显著延长了坝体的使用寿命<sup>[4]</sup>。

拦砂坝群的结构与布局设计包括确定坝体数量、尺寸及坝间距,优化坝群拦截能力<sup>[8-11]</sup>。泥石流建模工具可用来分析泥石流在不同沟道条件下的动力学过程,以及辅助泥石流防治工程设计<sup>[12-22]</sup>。例如,一些专业软件已经广泛应用于分析重力拦砂坝群空间布局与结构,确定坝体高度、坝体数量等设计参数<sup>[23-26]</sup>。坝群坝体开口尺寸是透过型坝群设计的重要参数之一,其结构形态有别于重力坝群或谷坊群的常规设计,目前在实际工程设计中关注较少。

本文以司地沟泥石流为例,采用现场调查、卫星遥感和高精度无人机遥感,查明泥石流沟地形特征和物源分布<sup>[27]</sup>,使用 Massflow 软件建立高精度地形与透过型坝群空间布局模型,从开口比的角度设定拦砂坝群开口尺寸,分析不同开口比下的优化效果。研究结果可为该泥石流沟工程治理提供依据,为拦砂坝群结构优化提供有效研究手段。

1 泥石流发育特征

司地沟位于四川省金川县卡卡足村,属大渡河右岸的一级支流,沟口地理坐标为 101°56'04"E、31°10'24"N,流域面积约 60.14 km<sup>2</sup>,主沟长约 17.26 km,沟口海拔约 2040 m,流域内高差达 2642 m,主沟平均纵坡降 153.1‰。司地沟沟口为马奈乡居民居住区,国道 G248 从沟口穿过,沟口堆积区拟建特大型渣场,其堆渣容量约为 9 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>,大渡河下游分布有巴底水电站。

1.1 地形地貌特征

司地沟流域内地形切割强烈,相对切割深度大于 1000 m,属高中山地貌。沟内地势西北高、东南低,形态呈狭长叶状(图 1),沟谷陡峭狭窄整体呈 V 型,平均坡度 35°,沟底常年流水。流域内中下游植被茂盛,上游常有积雪覆盖,岩土质风化严重。上游分布三个冰川退缩形成的冰蚀湖: bh01 冰湖高程为 4355 m,面积为 0.023 km<sup>2</sup>; bh02 冰湖高程为 4389 m,面积为 0.065 km<sup>2</sup>; bh03 冰湖高程为 4271 m,面积为 0.026 km<sup>2</sup>。通过多时相遥感影像对比,冰蚀湖缺少冰川融水补给,水源补给主要为

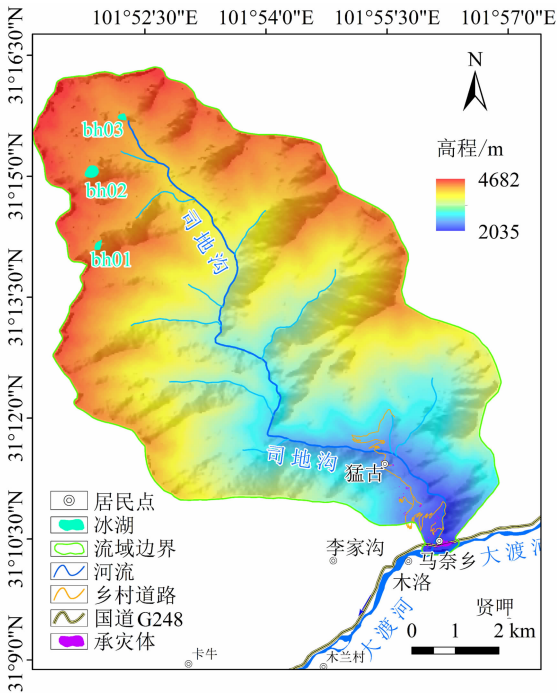


图 1 司地沟地形图

Fig. 1 Topographic map of the Sidi Gully, Sichuan Province, China

地下水和降雨,冰湖库容增长较慢,冰碛坝稳定性较高,发生溃决的可能性较小。

1.2 物源特征

受流域内 7 条小断层构造影响,新构造运动较活跃,属地震活动强烈区,地震加速度值为 0.10 g,抗震烈度为Ⅶ度(图 2)。表层岩石破碎,节理裂隙发育,山坡稳定性差。通过无人机航摄对研究区开展详细调查,确定泥石流主要物源有崩积物、坡积物、沟道堆积物和滑坡,物源集中分布在中缘流通区(图 3)。根据物源调查结果,其中静储量约为 766 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,动储量约为 227.72 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,为泥石流的形成提供了物质条件(表 1)。

表 1 司地沟物源发育情况

Tab. 1 Development of sediment sources in the Sidi Gully (单位:10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>)

崩积物方量	滑坡方量	沟道堆积物方量	坡积物方量
262.90	116.37	370.00	17.43

1.3 堆积物特征

司地沟泥石流堆积扇呈现完整的扇形,堆积扇顶点上接堆积段末端约占据 1/3 的大渡河干流断



图2 司地沟岩性构造图

Fig. 2 Lithologic structure map of the Sidi Gully

面。现场 GPS 测量,老堆积扇宽度约为 525 m,半径约为 340 m,地表面积约为 0.11 km<sup>2</sup>,堆积扇前缘平均厚度约为 12 m,堆积扇体积约为 0.88 × 10<sup>6</sup> km<sup>3</sup>。

堆积扇上分布有大量漂砾和块石,最大块石粒径为 3.8 m × 3.4 m × 4 m,临近堆积扇的下游沟道内老的堆积物中也包含大块石,被新的泥石流下切裸露在沟道旁,最大块石粒径为 5.2 m × 3 m × 4.2 m。在下游堆积区取土样进行室内土工试验,分析其物理力学特性。由图 4 可以看出其级配不良,且缺乏中间粒径,属于含细粒土砾。结合堆积物颗粒级配曲线及区域地质报告确定泥石流天然容重平均值  $\gamma_H$  为 27 kN · m<sup>-3</sup>,泥石流密度为 2.0 g · cm<sup>-3</sup>,判定司地沟为粘性泥石流沟。

1.4 水源特征

研究区属于明显的大陆性高原季风气候,根据国家气象信息中心 (<https://data.cma.cn/>) 金川县 1991—2020 年的降水数据,降水季节上分布不均,雨季降水量占全年降水的 79%,主要集中在 5—9 月,最大日降雨量达 68.4 mm,年平均降雨量为 739.8 mm。由《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》<sup>[28]</sup> 得到设计频率  $P=1\%$  下的暴雨雨力  $S$  为 34.38 mm · h<sup>-1</sup>,泥石流沟所在流域的暴雨特征值见表 2。结合沟内发育情况,可以判断司地沟是一条潜在危险性较高的泥石流沟,且该沟的激发条件为降雨。

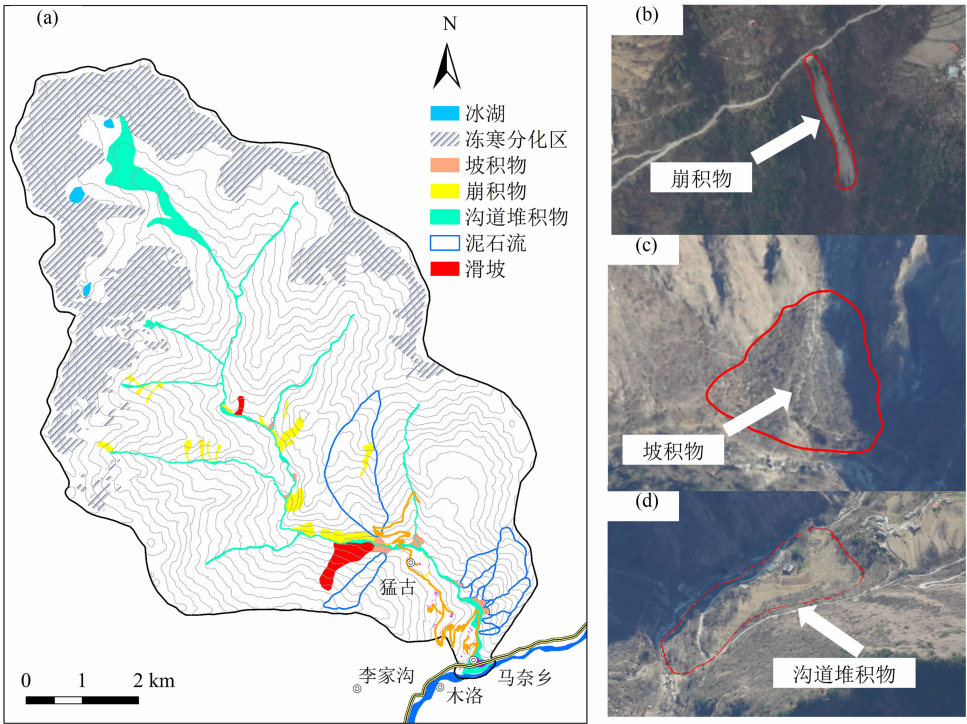


图3 司地沟物源分布情况:(a)流域内物源分布;(b)崩积物解译;(c)坡积物解译;(d)沟道堆积物解译

Fig. 3 Distribution of sediment sources in the Sidi Gully: (a) source distribution within the watershed; (b) interpretation of avalanche deposits; (c) interpretation of slope deposits; (d) interpretation of channel deposits



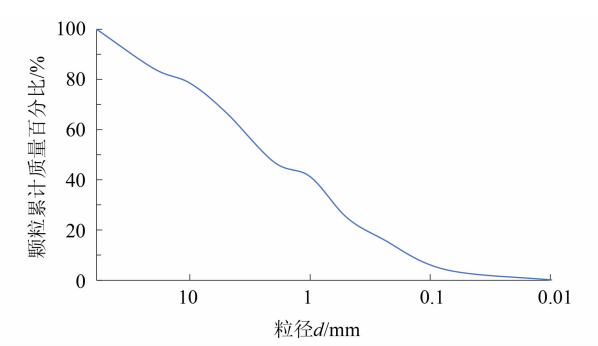


图 4 司地沟堆积区土体颗粒级配曲线  
Fig.4 Particle grading curve of soils in the stockpile area of the Sidi Gully

表 2 研究区暴雨特征值

Tab.2 Characteristic values of rainstorm in the study area

沟道	频率 $P/\%$	$H_{24}/\text{mm}$	$C_V$	$C_S$	$n$
司地沟	1.00	63.36	0.30	1.05	0.81

注: $H_{24}$  为频率  $P=1\%$  下的设计暴雨量; $C_V$  为变差系数,  $C_S=3.5C_V$ ;  $n$  为暴雨公式指数。

2 地形数据来源和处理

2.1 数据来源

首先,使用卫星数据(ALOS/12.5 m、高分 2 号/4 m)对研究区进行初步调查及泥石流初步模拟,然后,采用无人机进行影像数据采集,获取高精度的地形数据。无人机搭载 LiDAR 生成高精度的三维坐标信息,高精度的地形数据对其后的数值模拟工作至关重要。本研究中所使用的地形数据来源及用途如表 3 所示。

2.2 数据处理

2.2.1 卫星影像处理方法

通过中国资源卫星应用中心的高分二号存档数据查询,可用 2021 年 12 月 28 日的 1 景影像和 2022 年 1 月 2 日的两景影像进行覆盖,卫星景序列号为

9709988、9725924, 卫星产品序列号为 6176343、6188623。随后对遥感影像数据进行预处理,将拟合误差控制在 2 个像元内,选定 20~100 重叠像素做接缝平滑处理,图像之间几何对准控制在拟合精度 2 个像元以内,采用折线镶嵌,使整幅图像色调协调。

2.2.2 无人机数据处理

(1) 正射摄影数据处理

采用飞马固定翼 V1000 无人机对司地沟流域进行正射影像采集工作,离地相对高差平均 1200 m,相对起降点最高需爬升 2000 m,其正射影像见图 5。

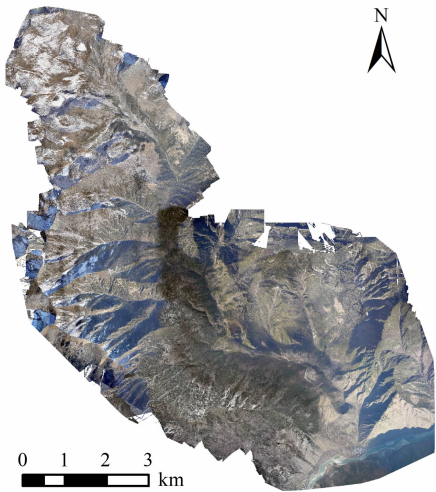


图 5 司地沟正射影像  
Fig.5 Orthophoto of the Sidi Gully

(2) 倾斜摄影数据处理

在条件允许的区域内,采用飞马多旋翼 D200 无人机高重叠率飞行摄像获取高分辨率、高重叠率的图片数据,采用变高仿地飞行测量,受地形起伏及风速影响,结合摄影分辨率、数码航测新型解算理论,最终确定倾斜摄影航向重叠 80%、旁向重叠 65%、相对航高 250 m、航摄地面分辨率 0.039 m 等

表 3 数据来源

Tab.3 Data sources

数据类型	卫星/无人机类型	序列号	日期	数据精度/m	研究用途
DEM	ALOS	ALPSRP249960610	2010-10-03	12.50	构建地形网格
	UAV	—	2021-12-28	1.00	构建地形网格
遥感影像数据	高分 2 号	6176343、6188623	2021-12-28、2022-01-02	4.00	多光谱影像遥感解译
	UAV	—	2021-12-28	1.00	可见光影像遥感解译

技术参数。

### (3) 激光雷达数据处理

飞马 D200 无人机搭载机载激光雷达低空、高重叠率飞行并摄像获取外方位元素、内方位元素和机载激光点云数据等。利用点云处理软件加载点云数据,建立点云图层。人工精细化分类点云,对点云数据进行编辑,构建不规则三角网,对采集区按照 0.2 m 格网间距内插,检查接边处数据高程值,最后依据数字表面模型 DSM (Digital Surface Model) 图层点云数据生成分辨率为 1 m 的 DSM,同时使用控制点对数据质量进行评价,司地沟机载激光雷达数据处理结果见图 6。

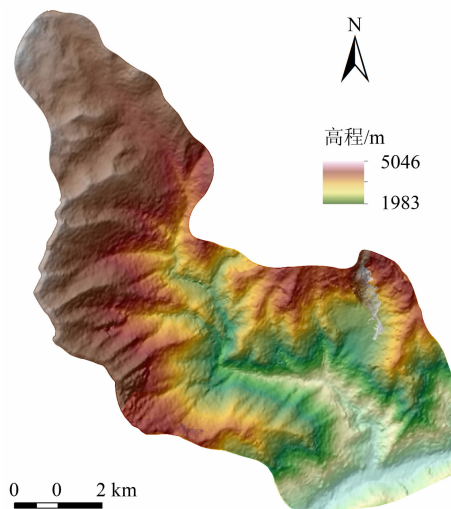


图 6 激光雷达数据处理结果  
Fig. 6 LiDAR data processing results

## 3 拦砂坝群模型构建

### 3.1 拦砂坝群结构设计

根据司地沟下游弃渣场工程要求,司地沟泥石流的设防标准为 100 年一遇。

#### 3.1.1 单坝体位置和坝高

为避免泥石流中的大块石、漂砾及携带的树木冲毁下游弃渣场和居民区,结合沟内实际调查情况,拟设置三道拦砂坝工程进行泥石流治理,上游布置两道梳齿坝用于拦截沟道中的大颗粒及树木,削减泥石流流速及流量,靠近渣场处设置一座重力坝用于拦截泥石流中的剩余固体物质,阻止泥石流威胁渣场安全。坝址一般考虑岸坡稳定性好、弯道后、沟道交叉前和狭窄处,对沟道内拟建坝处进行实际调

查,坝址河段河谷类型为深切 V 型,岸坡相对较完整;出露基岩石英片岩、石英岩等为硬质岩,岩体呈块状-次块状,岩体完整性较好,断裂构造不发育,主要构造型式为节理及裂隙,边坡稳定性较好;河床覆盖层主要为冲洪积块、碎石混合土,松散-稍密堆积。对风化、卸荷岩体采取适当的工程处理措施后,具备修建拦挡坝的工程地质条件,具体布坝位置见图 7。

坝高是影响拦砂坝拦蓄泥砂能力的重要参数,坝高不足无法对泥石流形成有效拦截,坝过高会造成工程浪费<sup>[29]</sup>。本文中坝高计算参照刘兴荣<sup>[30]</sup>等基于沟道治理工程统计进行优化得到的总坝高计算公式:

$$\sum H = 5\gamma_c F^{0.6} (j/0.06)^{0.15} + 6 \quad (1)$$

式中,  $\sum H$  为拦砂坝总高度(m);  $\gamma_c$  为泥石流容重( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ );  $j$  为沟道纵坡比降;  $F$  为流域面积( $\text{km}^2$ )。

根据坝址处工程地质条件及评价,确定各拦砂坝坝高(表 4)。

#### 3.1.2 坝体变更参数

开口作为透过型坝的重要结构参数,直接影响坝体的拦截性能及峰值流速的调控等。本文选择开口比作为变更参数,试图模拟不同开口比对拦砂坝群工程调控性能的影响。

梳齿坝开口尺寸  $b$  为水平方向上单个开口的横向长度(图 8),  $H$  为坝高。开口比  $L$  计算公式如下:

$$L = b_1/b_2 \quad (2)$$

式中,  $b_1$  为 1 号坝开口宽度(m);  $b_2$  为 2 号开口宽度(m)。

通过改变 1 号坝开口尺寸调整开口比  $L$ 。根据开口比  $L$  取值范围,设定 4 种工况(表 5),对比分析开口比  $L$  在拦砂坝群调控中的影响,指导司地沟拦砂坝群开口尺寸设计。

### 3.2 模拟控制方程

Massflow 基于深度积分连续介质力学理论,利用 MacCormack-TVD 有限差分方法计算求解。通常认为泥石流为不可压缩流体,在深度方向上对质量和动量守恒定律进行深度积分,控制方程如下。

质量守恒方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

动量守恒方程如下:

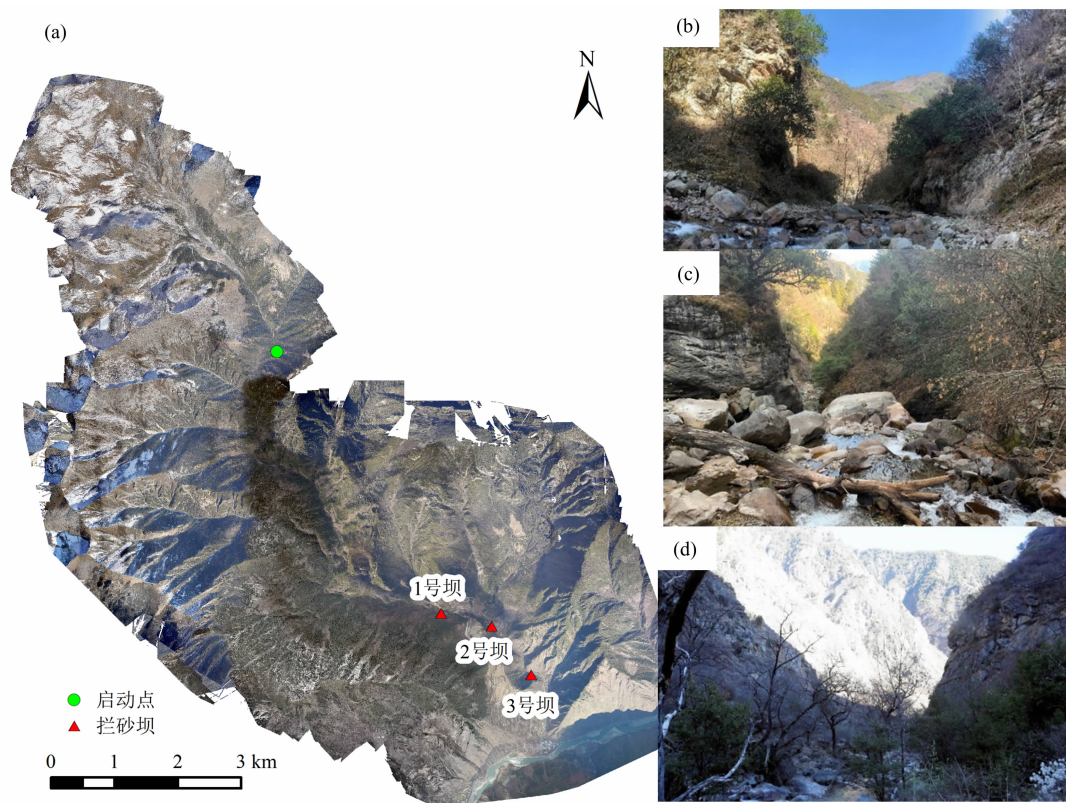


图 7 拟建拦砂坝位置:(a)司地沟无人机影像及拦砂坝位置;  
(b)1 号坝地形地貌图(镜像下游);(c)2 号坝地形地貌图(镜像下游);(d)3 号坝地形地貌图(镜像下游)  
Fig. 7 Location of proposed check dam:(a) UAV images of the Sidi Gully and the location of check dam;  
(b) topographic map of dam No. 1 (mirrored downstream); (c) topographic map of dam No. 2 (mirrored downstream);  
(d) topographic map of dam No. 3 (mirrored downstream)

表 4 拦砂坝群信息

Tab. 4 Information of check dam cascade

坝编号	坝型	坝高/m	坝顶长/m	经度	纬度
1 号坝	梳齿坝	42.00	138.41	101°55'15"E	31°11'35"N
2 号坝	梳齿坝	46.00	78.06	101°55'41"E	31°11'29"N
3 号坝	重力坝	46.00	101.50	101°56'4"E	31°11'3"N

表 5 模拟工况

Tab. 5 Simulated working conditions

工况	$b_1/\text{m}$	$b_2/\text{m}$	$L$
1	—	—	—
2	2.00	2.00	1.00
3	4.00	2.00	2.00
4	6.00	2.00	3.00

注:3 号坝为重力坝,无开口设置,故表中无 3 号坝相关数据;工况 1 无拦挡工程,故无开口数据。

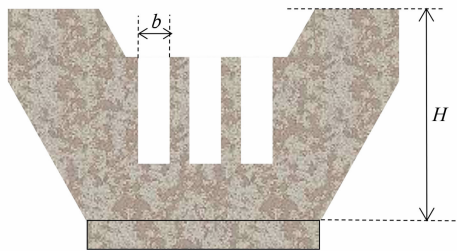


图 8 梳齿坝结构参数示意图  
Fig. 8 Schematic diagram of structural parameters  
of a comb-tooth dam



$$\frac{\partial(h\bar{v}_x)}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{v}_x^2 + k_{ap}g_z h^2/2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}_x \bar{v}_y)}{\partial y} = g_x h - k_{ap}g_z h \frac{\partial(Z_b)}{\partial x} - \frac{\tau_{zx,b}}{\bar{\rho}} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(h\bar{v}_y)}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{v}_y^2 + k_{ap}g_z h^2/2)}{\partial y} + \frac{\partial(h\bar{v}_x \bar{v}_y)}{\partial x} = g_y h - k_{ap}g_z h \frac{\partial(Z_b)}{\partial y} - \frac{\tau_{zy,b}}{\bar{\rho}} \quad (5)$$

式中,  $Z_b$  为流动层下表面高度(m);  $v_x$ 、 $v_y$ 、 $v_z$  分别为在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的速度( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $t$  为时间(s);  $h$  为泥深(m);  $\tau_{zx,b}$ 、 $\tau_{zy,b}$  为不同方向上的剪切应力分量(Pa);  $k_{ap}$  为土压力系数;  $\rho$  为流体密度( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $g_x$ 、 $g_y$ 、 $g_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的重力加速度分量。

### 3.3 计算模型参数

#### 3.3.1 泥石流流量过程曲线

软件不能直接模拟降雨,通过将降雨转化为流量来模拟暴雨型泥石流,但实时流量过程线难以获取,通常采用概化五边形表述流量过程曲线(图9)。流量过程曲线的大小主要取决于峰值流量,本文采用雨洪修正法东川公式<sup>[28]</sup>计算  $P=1\%$  条件下泥石流峰值流量,基本关系式为:

$$Q_P = 0.278\phi i F = 0.278\phi \frac{S}{\tau^n} F \quad (6)$$

式中,  $Q_P$  为频率  $P$  下的暴雨洪水流量( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ );  $\phi$  为洪峰径流系数;  $i$  为最大平均暴雨强度( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $S$  为暴雨雨力( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $\tau$  为流域汇流时间(h);  $n$  为暴雨公式指数。

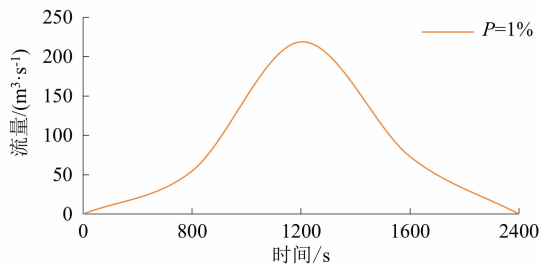


图9 泥石流流量曲线

Fig. 9 Flow curve of debris flow

泥石流洪峰流量按下式计算:

$$Q_C = Q_B(1 + \varphi) D_C \quad (7)$$

$$\varphi = \frac{\gamma_c - 1}{\gamma_H - \gamma_c} \quad (8)$$

式中,  $Q_C$  为泥石流流量( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ );  $Q_B$  为泥石流沟

的洪水流量( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ );  $\varphi$  为泥石流泥沙修正系数;  $D_C$  为泥石流堵塞系数,取 1.7;  $\gamma_H$  为固体物质的容重( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )。

参考《水电工程泥石流勘察与防治设计规程》(NB/T 10139—2019)公式(C.2.2-4)<sup>[31]</sup>计算粘性泥石流流速:

$$v_c = \frac{1}{n_c} (R_c^{2/3} \times I_c^{1/2}) \quad (9)$$

式中,  $v_c$  为泥石流断面平均流速( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $n_c$  为泥石流沟床糙率;  $R_c$  为泥石流平均泥位深度(m);  $I_c$  为水力坡降,用沟床坡降代替。

现场调查司地沟泥石流汇流特点,确定泥石流启动位置(图7a)。司地沟沟口处泥石流峰值流量为  $218.57 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,泥石流平均流速为  $6.66 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

泥石流历时根据主沟沟道长度及泥石流平均流速计算确定,参照刘波<sup>[22]</sup>泥石流历时计算公式:

$$T = L_{\text{总}} / v_c \quad (10)$$

式中,  $T$  为泥石流历时(s);  $L_{\text{总}}$  为启动位置到沟口总距离(km),取 15.9 km,即泥石流运动时间为 2400 s。

#### 3.3.2 流体运动模型

Massflow 中提供 3 种基底摩擦模型,Voellmy 模型多应用于泥石流灾害模拟,故选择该模型为基底摩擦模型,其表达式如下:

$$\tau_b = \sigma\mu + \frac{\rho g v^2}{\xi} \quad (11)$$

式中,  $\tau_b$  为底部剪应力(Pa);  $\sigma$  为正应力(Pa);  $\mu$  为基底摩擦系数;  $\xi$  为湍流系数( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )。

泥石流基底摩擦系数  $\mu$  和湍流系数  $\xi$  的测量计算,在现阶段泥石流运动研究中存在一定难度,故数值模拟中多通过反演确定其参数。现有数值模拟研究中,  $\mu$  取值多为 0.1 ~ 0.3,  $\xi$  取值多为 100 ~ 300。通过对初步确定的  $\mu$  和  $\xi$  进行模拟,并与古泥石流堆积情况对比,不断调整其参数。在  $\mu = 0.18$ 、 $\xi = 210 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  时,模拟结果较为吻合。

综合考虑模型精度和模拟效率,采用  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  的网格地形数据,模拟泥石流运动 2400 s 过程中的泥深、流速及堆积运动范围。

## 4 不同工况下拦砂坝群防治效果对比分析

通过 Massflow 软件模拟泥石流运动过程,对比

分析各工况下泥石流的运动时间、流速、泥深及堆积面积,分析泥石流拦砂坝群的治理效果。

#### 4.1 拦砂坝滞砂效应

根据工况 1 的模拟结果,司地沟泥石流高泥深区主要分布于沟谷低洼和沟道狭窄处,较高流速区分布于沟谷陡坎处,泥砂淤积处沟道坡度变缓,使得流速降低,故泥石流在上游堆积物较少,主要在中下游沟道及沟口处形成堆积。运动过程中最大泥深为 22.8 m,最大流速为  $18.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,沟口处较为平坦开阔,泥深有所降低,最大泥深为 11.4 m,最大流速为  $16.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,沟口处堆积面积约为  $35.86 \times 10^4 \text{ m}^2$  (图 10)。

工况 2 相比于工况 1,拦砂坝前泥石流流速明显降低,坝前区域泥深较大,最大泥位出现在 1 号坝坝前为 42 m,过坝后流速相比坝前有明显提高的现象。造成上述现象的原因为拦砂坝具有削峰减流的效果,泥石流流经拦砂坝时发生拦挡缓冲,降低泥石流流速,导致砂石颗粒不断堆积,坝前沟床抬升,沟床坡度逐渐降低,进一步减缓了砂石颗粒运动速度,使砂石颗粒进一步堆积。泥石流过坝后,由于坝前沟床被抬高,泥石流重力势能转化为动能,较高的流速形成了小范围的冲刷区(图 11),故坝后一定范围内泥深较低。

工况 1 条件下(不设坝),泥石流运动至 3 号坝坝址处的时间为 2250 s;而工况 2 条件下(设坝),泥石流运动至 3 号坝的时间为 2350 s,有效推迟时间 100 s。随着开口比  $L$  增加,泥石流运动时间逐渐减少。设置拦砂坝可有效减小泥石流流速,使砂石颗粒发生沉降堆积,减小局部沟床坡度,进一步减小泥石流流速,增加了砂石沉降物质量,可以发现拦砂坝有着明显的滞砂效应,可延长泥石流的运动时间,为下游人员撤离争取宝贵时间。

#### 4.2 不同开口比下防治效果对比分析

根据坝前后流速结果(图 12、图 13),不同开口比下泥石流流速变化具有以下特点。随开口比  $L$  增加,坝前后流速总体上呈现增大的趋势; $L$  由 1 增加至 2,1、2、3 号坝前流速分别增加约 28%、32%、29%,坝后流速分别增加约 25%、14%、3%,坝前流速增长幅度远大于坝后流速增长幅度; $L$  由 2 增加至 3,1、2、3 号坝前流速分别增加约 32%、7%、2%,坝后流速分别增加约 5%、3%、4%。随 1 号坝开口宽度增大,坝前拦截物质量减少,局部沟床坡度增大,流速削减效果减弱,坝前流速呈现出增大的趋势,使 2、3 号坝前流速有所增大。随着 2、3 号坝前拦截物质量增加,局部坡度减缓,流速增长幅度有所减小。

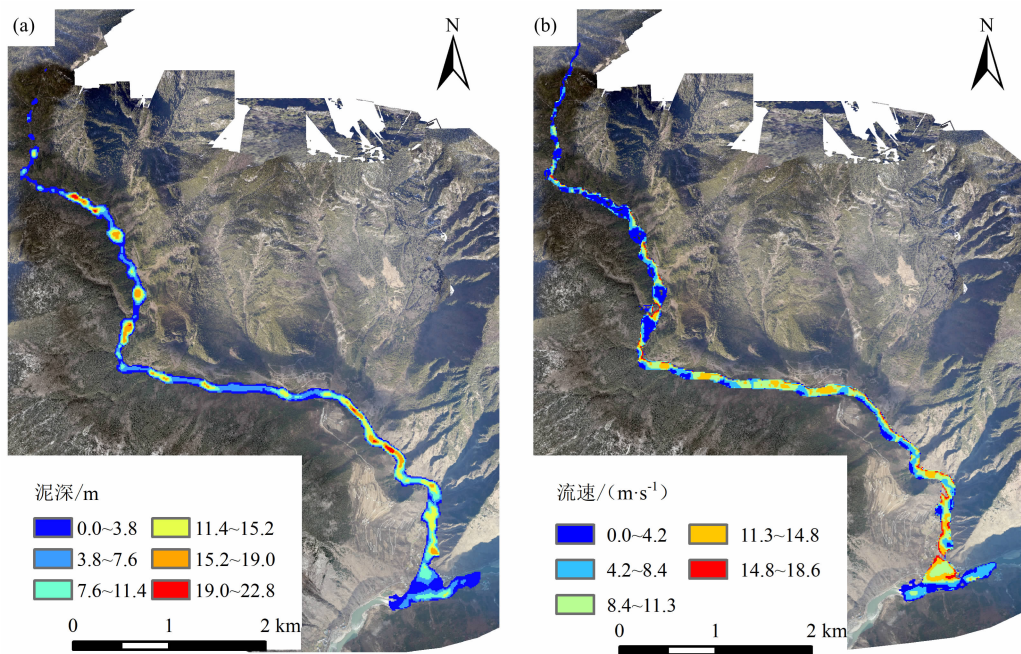


图 10 100 年一遇降雨频率下泥石流泥深与流速分布:(a) 泥深;(b) 流速

Fig. 10 Distribution of mud depth and velocity of debris flow under the frequency of once-in-a-century rainfall;

(a) flow depth; (b) flow velocity



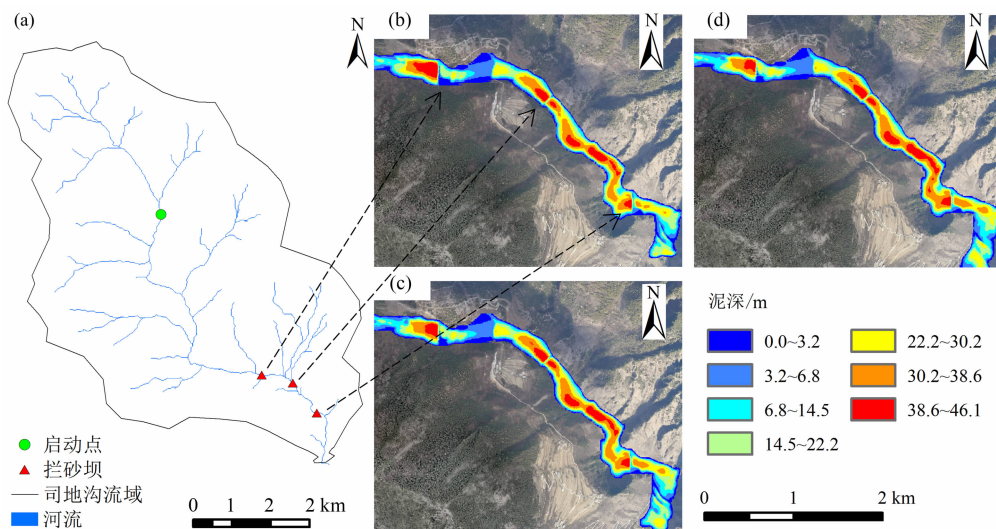


图 11 100 年一遇降雨频率下不同防治工况下的泥石流泥深分布: (a) 拦砂坝坝址; (b)  $L=1$ ; (c)  $L=2$ ; (d)  $L=3$

Fig. 11 Distribution of mud depth of debris flow under different control conditions with frequency of once-in-a-century rainfall;  
(a) location of check dam; (b)  $L=1$ ; (c)  $L=2$ ; (d)  $L=3$

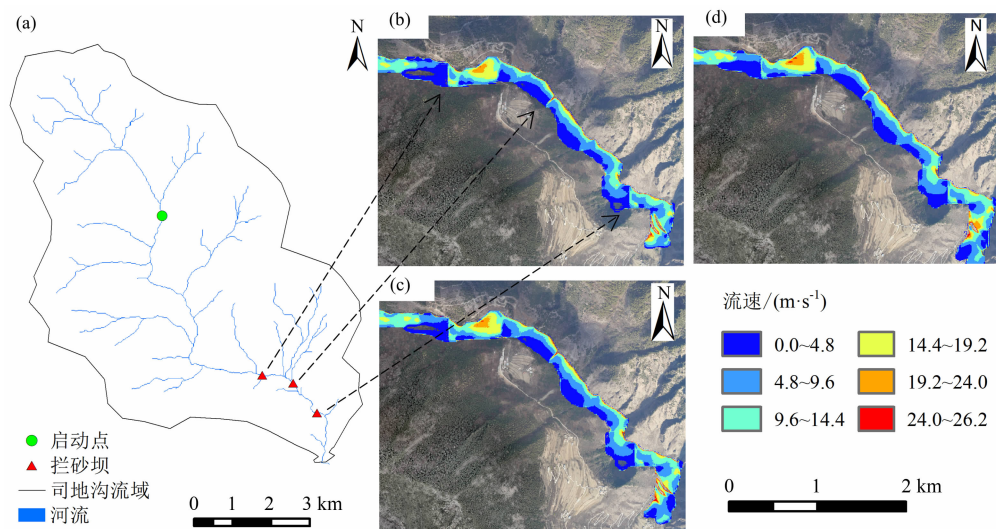


图 12 100 年一遇降雨频率下不同防治工况下的泥石流流速分布: (a) 拦砂坝坝址; (b)  $L=1$ ; (c)  $L=2$ ; (d)  $L=3$

Fig. 12 Distribution of velocity of debris flow under different control conditions with frequency of once-in-a-century rainfall;  
(a) location of check dam; (b)  $L=1$ ; (c)  $L=2$ ; (d)  $L=3$

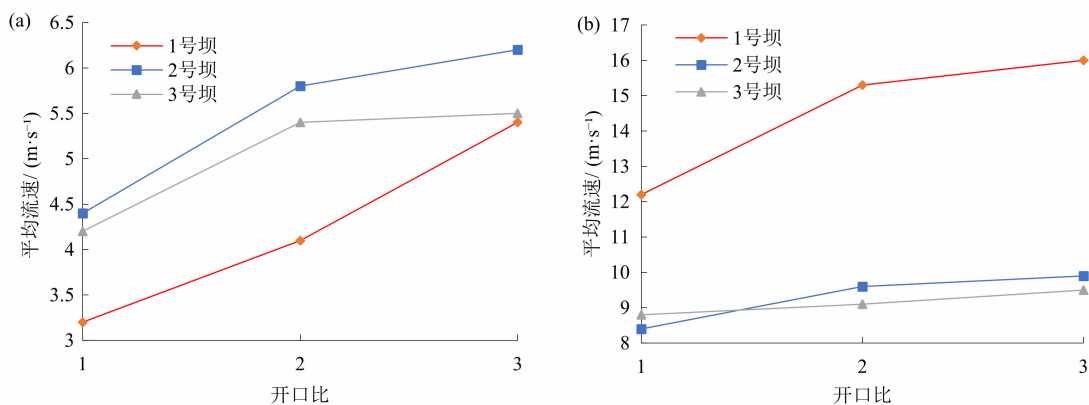


图 13 不同开口比条件下坝前后平均流速变化: (a) 坝前流速变化; (b) 坝后流速变化

Fig. 13 Variation of average flow velocity before and after the dam under different opening ratios;  
(a) changes in flow velocity in front of the dam; (b) changes in flow velocity behind the dam

拦砂坝坝前泥深和堆积范围是反映其拦截能力的重要参数。总体上,随着开口比的变化,不同位置的拦砂坝表现出不同的拦截效能,主要拦截物质量随着开口比变化,出现位置上的变化。结合图 11 和图 14 分析其原因, $L=1$  时,1 号坝开口较小,功能表现以拦截为主,故 1、2、3 号拦砂坝坝前堆积泥深和堆积面积逐级递减,1、2、3 号坝前最高泥深分别为 42 m、41 m、37 m(图 14a),坝前堆积面积分别为  $3.08 \times 10^4 \text{ m}^2$ 、 $2.05 \times 10^4 \text{ m}^2$ 、 $1.17 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,3 号坝前由于处于弯道处,泥石流运动受阻,削减了大部分能量,使较多泥石流物质量在此淤积,但大部分泥石流物质被拦截于 1、2 号坝前,故 3 号坝相较于 1、2 号坝拦截物质量较少。 $L=2$  时,1 号坝前堆积面积减少  $0.39 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,最大泥深减小 2 m;2 号坝前堆积面积增加  $0.51 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,最大泥深增加 5 m;3 号坝前堆积面积增加了  $0.15 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,最大泥深增加 2 m。1 号坝主要功能由拦截向排导转变,增加了 2、3 号坝的拦截效能,泥砂物质量的主要拦截 1、2 号坝前。 $L=3$  时,相比于工况 3( $L=2$ )1 号坝前堆积面积进一步减少  $0.43 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,2 号坝前堆积面积减少  $0.14 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,3 号坝前堆积面积增加  $0.43 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。随 1 号坝开口增大,其流速削减效果减弱,使 2 号坝前堆积面积有所减小,经过 2 号坝对流速的再一次削弱,使更多的泥砂堆积于 3 号坝前。

随开口比  $L$  增加,1 号坝拦截效能逐渐减小;2 号坝拦截效能表现为先增大后减小的趋势,故开口比  $L$  存在最优值,使 2 号坝拦截物质量最大;而 3 号坝拦截效能逐渐增大,其中  $L=3$  时增长幅度较大,主要泥砂物质由 1、2 号坝向 2、3 号坝转变

(图 14b)。

三种开口比均可实现完全拦截,保护下游居民城镇安全。 $L=1$  时,1 号坝以拦为主,由上往下拦截物质量依次减小,泥石流物质主要拦截于中上游,不便于后期清淤工作,清淤成本相对较高。 $L=2$  或  $L=3$  时,1 号坝以排为主,提高 2、3 号坝的拦截物质量,其中  $L=3$  时 1 号坝开口宽度较大,坝前淤积物质量较少,泥砂物质量主要集中在 2、3 号坝前,2、3 号坝距沟口较近,周边具备道路交通条件,便于后续清淤工作,故在本文中认为  $L=3$  时为当前方案中的最佳选择。

## 5 讨论

泥石流透过型拦砂坝群工程实践先于理论,目前坝群开口设计缺少理论指导。本文通过定义开口比建立坝群开口之间的关系,对不同开口比的坝群进行数值模拟,从泥石流运动时间、流速、泥深及堆积面积等角度分析,初步探讨了开口比与泥石流运动时间、流速及拦砂坝群拦截效能之间的关系,模拟结果可为泥石流拦砂坝群开口优化提供设计依据和研究思路。

本文着重关注开口比对透过型拦砂坝群的影响,提供了坝群开口设计思路和研究方法,研究结果可对工程开口设计提供一定支持。但本文假设坝体模型为刚体,未针对泥石流冲击作用下坝体的动力响应特征开展研究,未对坝体其他结构参数(如迎流面坡度、坝底宽度)进行优化设计。透过型拦砂坝群的治理效果还受坝高、坝址及坝型等多方面影

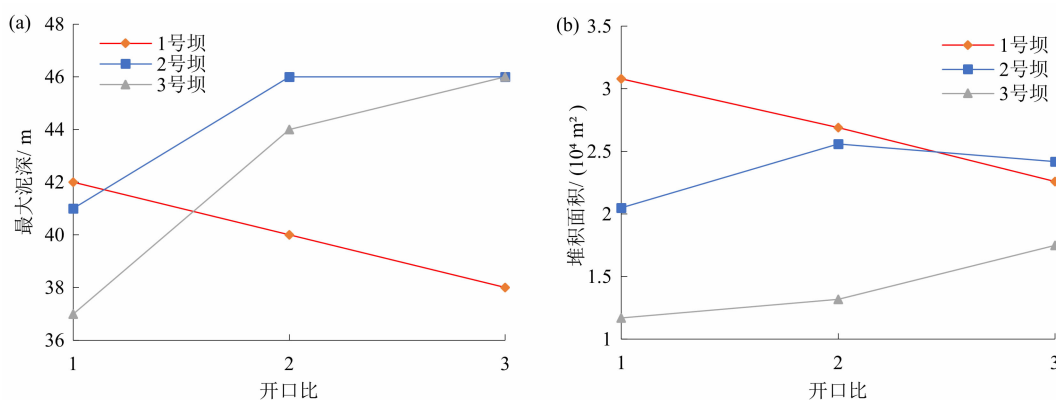


图 14 不同开口比下坝前峰值泥深和堆积面积变化:(a) 坝前峰值泥深变化;(b) 坝前堆积面积

Fig. 14 Variation of peak sediment depth and deposition area in front of the dam under different opening ratios:

(a) change in peak mud depth in front of the dam; (b) area of landfill in front of the dam

响,未来可针对其开展数值模拟研究,分析不同坝型之间的协同作用,建立更加全面的研究方法。

## 6 结论

(1)通过对司地沟实地考察,认为其具备发生泥石流的条件,同时是一条潜在危险性较高的泥石流沟,激发条件为降雨,泥石流对下游沟口处拟建的弃渣场和居民区构成威胁。模拟结果表明:在暴雨频率为1%的条件下,泥石流沟口处最大泥深为11.4 m,最大流速为 $16.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,沟口堆积面积约为 $35.86 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,严重威胁下游沟口处弃渣场工程和居民安全。

(2)通过对比分析不设坝和设置拦砂坝群时泥石流的运动时间、泥深及流速变化情况,发现设置拦砂坝群后,可有效延长泥石流运动时间。工况2有效将泥石流运动时间延长100 s,随开口比增加,泥石流运动时间延长减小;可有效拦截泥石流冲出物,最大泥深出现在坝前,减小下游泥石流冲出物;泥石流越坝后重力势能转化为动能,过坝后流速较高。

(3)拦砂坝群开口比对泥石流的治理效果的影响,根据拦砂坝前泥深、流速及拦截面积的模拟结果,表明:随开口比 $L$ 增加,坝前后流速整体上呈现增长趋势;1号坝拦截面积及泥深逐渐减小,当 $L=1$ 时,1号拦砂坝以拦为主,当 $L \geq 2$ 时,1号拦砂坝以排为主;2号拦砂坝拦截物质量表现为先增加后减小,存在最优值 $L$ 使得2号坝拦截物质量最大;主要拦截泥砂物质由1、2号坝向2、3号坝转变。考虑到后期清淤工作便捷, $L=3$ 时,泥石流拦截物质量主要集中在2、3号坝前,故认为 $L=3$ 为最佳方案。

## 参考文献 (References)

- [1] 钟敦伦, 谢洪. 泥石流灾害及防治技术[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2014: 1-14. [ZHONG Dunlun, XIE Hong. Debris flow disaster and its control technology [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2014: 1-14]
- [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: 20-30. [FEI Xiangjun, SHU Anping. Movement mechanism and disaster control for debris flow [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 20-30]
- [3] 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 DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202307003
- [4] 康志成, 李焯芬, 马蔼乃, 等. 中国泥石流研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 24-39. [KANG Zhicheng, LEE Chankfan, MA Ainai, et al. Study on debris flow in China [M]. Beijing: Science Press, 2004: 24-39]
- [5] 许强, 李锦辉, 何雨森, 等. 文家沟泥石流治理工程效果的定量分析评价[J]. 工程地质学报, 2017, 25(4): 1046-1056. [XU Qiang, LI Huajin, HE Yusen, et al. Quantitative evaluation of engineering treatments for prevention of debris flow at Wenjia Gully [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(4): 1046-1056 DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2017.04.019]
- [6] 陈晓清, 崔鹏, 游勇, 等. 汶川地震区大型泥石流工程防治体系规划方法探索[J]. 水利学报, 2013, 44(5): 586-593. [CHEN Xiaqing, CUI Peng, YOU Yong, et al. Layout methods of control works preventing large scale debris flows in Wenchuan earthquake area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(5): 586-593 DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2013.05.003]
- [7] 孙昊, 游勇, 李道凌, 等. 透过型泥石流拦砂坝工程减灾效果分析[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(6): 37-46. [SUN Hao, YOU Yong, LI Daoling, et al. Investigation of effectiveness of open check dams in debris-flow hazards mitigation [J]. Journal of Natural Disasters, 2023, 32(6): 37-46 DOI: 10.13577/j.jnd.2023.0604]
- [8] OSTI R, EGASHIRA S. Method to improve the mitigative effectiveness of a series of check dams against debris flows [J]. Hydrological Processes, 2008, 22(26): 4986-4996. DOI: 10.1002/hyp.7118
- [9] YAZDI J, SABBAGHIAN MOGHADDAM M, SAGHAFIAN B. Optimal design of check dams in mountainous watersheds for flood mitigation [J]. Water Resources Management, 2018, 32: 4793-4811. DOI: 10.1007/s11269-018-2084-4
- [10] ABEDINI M, SAID M A M, AHMAD F. Effectiveness of check dam to control soil erosion in a tropical catchment (The Ulu Kinta Basin) [J]. Catena, 2012, 97: 63-70. DOI: 10.1016/j.catena.2021.05.003
- [11] 王金水, 陈剑刚, 王喜安, 等. 小流域拦砂坝上下游冲淤特征调查分析[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(5): 171-178. [WANG Jinshui, CHEN Jiangang, WANG Xi'an, et al. Investigation and analysis of upstream and downstream erosion and sedimentation characteristics of check dams in small watershed [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2024, 41(5): 171-178 DOI: 10.11988/ckyyb.20221624]
- [12] WU Y H, LIU K F, CHEN Y C. Comparison between FLO-2D and Debris-2D on the application of assessment of granular debris



- flow hazards with case study [J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, **10**: 293–304. DOI: 10.1007/s11629-013-2511-1
- [13] BOCCALI C, CALLIGARIS C, ZINI L, et al. Comparison of scenarios after ten years; The influence of input parameters in Val Canale valley (Friuli Venezia Giulia, Italy) [G]//LOLLINO G, GIORDAN D, CROSTA G B, et al. *Engineering Geology for Society and Territory – Volume 2: Landslide Processes*. Switzerland: Springer International Publishing, 2015: 525–529. DOI: 10.1007/978-3-319-09057-3-87
- [14] 罗超鹏, 常鸣, 武彬彬, 等. 基于 FLOW-3D 的泥石流龙头运动过程模拟研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, **33**(6): 53–62. [LUO Chaopeng, CHANG Ming, WU Binbin, et al. Simulation of debris flow head movement process in mountainous area based on FLOW-3D [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, **33**(6): 53–62] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202107005
- [15] 熊冲冲, 胡卸文, 刘丁毅, 等. 基于 RAMMS 锄头沟泥石流运动过程模拟[J]. *四川地质学报*, 2021, **41**(1): 107–111 + 122. [XIONG Chongchong, HU Xiewen, LIU Dingyi, et al. Simulation of debris flow activity in the Chutou Gully based on RAMMS [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2021, **41**(1): 107–111 + 122] DOI: 10.3969/j.issn.1006-0995.2021.01.022
- [16] 杨鑫, 孟华君, 路璐, 等. 基于 Massflow 的达摩沟泥石流模拟与危险性分析[J]. *人民长江*, 2023, **54**(8): 146–152. [YANG Xin, MENG Huajun, LU Lu, et al. Numerical simulation and risk analysis of mudslide in Dharma Gully sub-basin based on Massflow [J]. *Yangtze River*, 2023, **54**(8): 146–152] DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.08.020
- [17] 王晓丽, 赵桂香, 李芳. 山西一次区域性暴雨过程的 ATOVS 资料同化模拟分析[J]. *干旱气象*, 2016, **34**(3): 522–532. [WANG Xiaoli, ZHAO Guixiang, LI Fang. Analysing effect of variational data assimilation of satellite radiance on a regional heavy rain in Shanxi Province [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2016, **34**(3): 522–532] DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-03-0522
- [18] HAN Zheng, SU Bin, LI Yange, et al. Numerical simulation of debris-flow behavior based on the SPH method incorporating the Herschel-Bulkley-Papanastasiou rheology model [J]. *Engineering Geology*, 2019, **255**: 26–36. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.04.013
- [19] LO C M, FENG Zhengyi, CHANG K T. Landslide hazard zoning based on numerical simulation and hazard assessment [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2018, **9**(1): 368–388. DOI: 10.1080/19475705.2018.1445662
- [20] SALVATICI T, MORELLI S, PAZZI V, et al. Debris flow hazard assessment by means of numerical simulations: Implications for the Rotolon creek valley (Northern Italy) [J]. *Journal of Mountain Science*, 2017, **14**: 636–648. DOI: 10.1007/s11629-016-4197-7
- [21] 熊朝正, 吉锋, 石豫川. 基于 Massflow 模型的青龙沟台风暴雨型泥石流运动特征研究[J]. *人民珠江*, 2023, **44**(3): 17–22 + 60. [XIONG Chaozheng, JI Feng, SHI Yuchuan. Movement characteristics of typhoon rainstorm-triggered debris flow in Qinglong Gully based on Massflow model [J]. *Pearl River*, 2023, **44**(3): 17–22 + 60] DOI: 10.3969/j.issn.1001-9235.2023.03.003
- [22] 刘波, 胡卸文, 何坤, 等. 西藏洛隆县巴曲冰湖溃决型泥石流演进过程模拟研究[J]. *水文地质工程地质*, 2021, **48**(5): 150–160. [LIU Bo, HU Xiewen, HE Kun, et al. Characteristics and evolution process simulation of the Baqu Gully debris flow triggered by ice-lake outburst in Luolong County of Tibet, China [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, **48**(5): 150–160] DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202103104
- [23] WANG Sha, MEI Guodong, XIE Xuyang, et al. The influence of the instantaneous collapse of tailings pond on downstream facilities [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, **2021**(1): 4253315. DOI: 10.1155/2021/4253315
- [24] 刘铁骥, 孙书勤, 赵峥, 等. 基于 Massflow 模型的冷渍沟泥石流工程治理效果评价[J]. *水利水电技术*, 2020, **51**(10): 195–201. [LIU Tiejie, SUN Shuqin, ZHAO Zheng, et al. Massflow model-based evaluation on effect of engineering treatment of debris flow in Lengzigou Gully [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, **51**(10): 195–201] DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.10.024
- [25] 唐海兵, 吴建军, 张春山, 等. 涪江源区韩家沟泥石流防治工程改进前后危险性分析[J]. *地质力学学报*, 2024, **30**(4): 659–672. [TANG Haibing, WU Jianjun, ZHANG Chunshan, et al. Debris flow hazard analysis before and after improvement of Hanjia Gully control engineering at the source area of the Fujiang River [J]. *Journal of Geomechanics*, 2024, **30**(4): 659–672] DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023097
- [26] 闫崧, 宋英华, 李墨潇, 等. 尾矿库溃坝泥石流多级拦截坝防护效果研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2024, **20**(1): 11–17. [YAN Zhan, SONG Yinghua, LI Moxiao, et al. Research on protection effect of multi-stage interception dam for dam-break debris flow of tailings pond [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2024, **20**(1): 11–17] DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2024.01.002
- [27] 毕瑞, 甘淑, 李绕波, 等. 面向东川复杂山地泥石流沟谷三维地形建模及特征分析的无人机遥感探测应用研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, **32**(3): 91–100. [BI Rui, GAN Shu, LI Raobo, et al. Application research of unmanned aerial vehicle remote sensing detection for 3D terrain modeling and feature analysis of debris flow gullies in complex mountainous area of Dongchuan [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, **32**(3): 91–100] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.

- 1003–8035. 2021.03–12
- [28] 四川省水利电力厅. 四川省中小流域暴雨洪水计算手册[M]. 成都: 四川省水利电力厅, 1984: 3–17. [Sichuan Provincial Department of Water Resources and Electric Power. Rainstorm flood calculation manual for small and medium basins in Sichuan Province [M]. Chengdu: Sichuan Provincial Department of Water Resources and Electric Power, 1984: 3–17]
- [29] 王喜安. 拦砂坝对泥石流沟道冲淤形态的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020: 2–4. [WANG Xi'an. The effect of check dam on erosion and deposition of debris flow gully [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020: 2–4] DOI: 10.27525/d.cnki.gkchs.2020.000030
- [30] 刘兴荣, 周自强, 董耀刚, 等. 泥石流拦挡坝总坝高设定及坝后淤积计算[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(29): 12500–12506. [LIU Xingrong, ZHOU Ziqiang, DONG Yaogang, et al. Design of total dam height and calculation of siltation behind debris flow dam [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(29): 12500–12506]
- [31] T/CAGHP006-2018. 泥石流灾害防治工程勘察规范(试行)[S]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2018. [T/CAGHP006-2018. Specification of geological investigation for debris flow stabilization [S]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2018]

## Optimization Design of Permeable Debris Flow Check Dam Cascade

LIU Zhaoxu<sup>1,2</sup>, REN Jincheng<sup>2</sup>, ZHAO Yanqing<sup>3</sup>, SU Pengcheng<sup>1,2\*</sup>,  
WANG Yang<sup>2</sup>, GONG Xu<sup>2,4</sup>

(1. College of Engineering, Tibet University, Lhasa 850032, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Chengdu 610213, China;  
3. Beijing Engineering Corporation Limited, Power China, Beijing 100024, China;  
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Engineering measures for debris flow control often employ the layout of a cascade of check dams. An engineered challenge for building a check dam cascade lies in achieving a designed synergistic effect of each dam in the grouping dams, especially to the utmost exploiting a cluster of permeable check dams designed with a function of cascading debris interception.

In this study, it selected the Sidi Gully as a research case. It used field surveys, satellite remote sensing and high-precision unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing to identify the topographic characteristics and geo-source distribution of the debris flow gully; it used Massflow software based on improved MacCormack-TVD finite difference method, to establish a spatial layout model of the comb-tooth dam cascade, which set different opening sizes for the dams in concert to specified opening ratios for design optimization; numerical simulations were conducted for the dams and acquired a series of design outcomes, such as mud depth, velocity, and accumulation area with opening ratios ( $L$ ) of 1, 2 and 3.

(1) At a rainfall frequency of 1% , the maximum mud depth at the Gully mouth reached 11.4 m, with a peak velocity of  $16.50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , forming a depositional fan with an area of  $35.86 \times 10^4 \text{ m}^2$ .

(2) The check dam cascade effectively intercepted debris in debris flow body, with the maximum mud depth occurring upstream of the dams. As the opening ratio increased, the duration of debris flow decreased. When the opening ratio set at 1, the debris flow body took an additional 100 seconds to reach the third dam location.

(3) The flow velocity at locations of before and after the dams increased with a larger opening ratio, while the mass of intercepted geo-material upstream of the dam decreased as opening widths enlarged. As  $L$  increased, the

function of No. 1 dam shifted from interception to diversion, while the interception efficiency at No. 2 dam initially increased and then decreased. The main interception roles transitioned from No. 1 dam/ No. 2 dam to No. 2/No. 3 dam, with  $L=3$  identified as the optimal opening ratio for the dam cascade in this gully.

This paper systematically explores key parameters affecting the design of permeable debris flow check dam cascade through theoretical analysis and numerical simulations, which would provide technical references for practical engineering project.

**Key words:** debris flow; design optimizations; Massflow; permeable check dam cascade; opening ratio

(责任编辑 朱颖彦 钟雨倩)

---

## 喜马拉雅山区察隅县布孔拉山 2024 年 2 月 6 日雪崩灾害

(陈宁生, 长江大学)

青藏高原近年来雪崩灾害的发生频率正逐年攀升。2023 年 1 月 17 日的多雄拉雪崩与 2024 年 2 月 6 日的布孔拉山段雪崩, 共导致 33 人不幸遇难。这些事件不仅严重威胁了当地居民的生命安全, 也对高海拔区域的重大工程项目建设与运营构成了严峻挑战。

地形地貌作为雪崩灾害孕育过程中的一个相对恒定的要素, 构成了识别雪崩灾害的基础框架。深入辨析易于引发雪崩区域的地形地貌特征, 并详尽摸清这些区域的地形限制条件, 对于工程前期的规划布局工作至关重要, 能够有助于我们更有效地规避雪崩灾害所带来的风险。

详见本期《青藏高原雪崩灾害的地形约束与地貌分类》一文。