

# 狭陡型泥石流成灾特征与防治对策研究

——以阿坝州金川县刘家沟泥石流为例

崔华丽<sup>1,2</sup>, 杨东旭<sup>1</sup>, 杨栋<sup>1,2</sup>, 李元灵<sup>1</sup>, 贾逸<sup>1,2</sup>, 吴波<sup>\*1,2</sup>

(1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川成都 611734; 2. 成都华建地质工程科技有限公司, 四川成都 611734)

**摘要:** 刘家沟位于四川省阿坝州金川县, 是一条狭陡型高频泥石流沟, 每年雨季, 降雨激发泥石流灾害链。本文在野外调查和实地勘测的基础上, 分析认为, 受汶川 MS8.0 地震扰动, 刘家沟形成流通区单位面积上松散固体物质达  $98.11 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 在 409.8‰ 的平均纵坡降下, 泥石流活动频率明显增强, 泥石流沿程放大效应明显, 最终形成了降雨+径流侵蚀-滑坡-堰塞体-堰塞体溃决-增大的泥石流-堵河形成堰塞湖-卡撒沟中、下游损害的灾害链。提出采用格宾石笼进行固坡护床, 结合拦挡坝拦粗排细的作用, 根据保护对象设置防护堤, 优化排导槽与主河交汇条件的综合治理措施, 可为小流域高频狭陡型泥石流灾害的治理提供参考。

**关键词:** 狭陡型泥石流; 灾害链; 堵河; 格宾石笼; 拦挡坝; 刘家沟泥石流

中图分类号: P313.2 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2022)06-0122-08

## Disaster characteristics and prevention measures of narrow-steep debris flow—A case study of Liujia gully in Jinchuan county, Aba prefecture, Sichuan province

CUI Huali<sup>1,2</sup>, YANG Dongxu<sup>1</sup>, YANG Dong<sup>1,2</sup>, LI Yuanling<sup>1</sup>, JIA Yi<sup>1,2</sup>, WU Bo<sup>\*1,2</sup>

(1. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China;

2. Chengdu Huajian Geological Engineering & Technology Co., Ltd., Chengdu Sichuan 611734, China)

**Abstract:** Liujia gully is a narrow-steep and high-frequency debris flow gully which is located in Jinchuan county, Aba Prefecture, Sichuan Province. Every raining season, rainfall will lead to debris flow disaster chains. In this paper, the author analyzes the characteristics and the environment of debris flow on the basis of field investigation and field survey. Debris flow parameters under different rainfall frequency are calculated by the rain flood method. The paper also analyzes the possibility of debris flow blocking the main river (Kasa gully) to provide the volume weight required. Many difficulties in treatment of debris flow in narrow-steep gullies and are discussed with the case-dependent measures. The Wenchuan earthquake induced a great mass of collapse and landslide with unit-area loose solid materials in Liujia gully up to  $98.11 \times 10^4 \text{ m}^3$ , and debris flow happened at higher frequency and amplified volume at the average longitudinal slope of 409.8‰ leading to the formation of the valley disaster chain consisting of rain + runoff erosion-landslide-landslide dam-weir burst-increasing debris flow-barrier lake-hazardous Kasa gullies. To solve the disaster, we suggest comprehensive treatment measures which include using Gabion stone cage to stabilize the slope and the

收稿日期: 2022-07-22; 修回日期: 2022-09-24 DOI: 10.12143/j.ztgc.2022.06.017

基金项目: 国家科技重大专项“第二次青藏高原综合科学考察研究”(编号: 2019QZKK0902)

第一作者: 崔华丽, 女, 汉族, 1983年生, 工程师, 岩土工程专业, 硕士, 从事地质灾害成灾机理和防治技术研究工作, 四川省成都市郫都区现代工业港(北区)港华路139号, huali8831@126.com。

通信作者: 吴波, 男, 汉族, 1981年生, 从事水文地质、工程地质、工程管理等工作, 四川省成都市郫都区现代工业港(北区)港华路139号, 43187097@qq.com。

引用格式: 崔华丽, 杨东旭, 杨栋, 等. 狭陡型泥石流成灾特征与防治对策研究——以阿坝州金川县刘家沟泥石流为例[J]. 钻探工程, 2022, 49(6): 122-129.

CUI Huali, YANG Dongxu, YANG Dong, et al. Disaster characteristics and prevention measures of narrow-steep debris flow—A case study of Liujia gully in Jinchuan county, Aba prefecture, Sichuan province[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(6): 122-129.

gully, construction of retaining dams and drainage canals. They can provide reference for treatment of high-frequency narrow steep debris flow disasters in small watersheds.

**Key words:** narrow-steep debris flow; disaster chain; blocking river; Gabion gabion; retaining dam; Liujia gully debris flow

## 0 引言

2008年汶川8.0级地震诱发了大量的崩塌、滑坡,据粗略估算区内新增松散固体物源量达 $55.86 \times 10^8 \text{ t}^{[1]}$ ,为泥石流的活动提供了丰富的物源。受地震影响,大量沟道从山洪沟转化为泥石流沟,针对重震区、(特)大规模的泥石流灾害,众多学者从泥石流的暴发成因、泥石流特征、成灾(堵河)分析、防治经验等方面均进行了大量的研究<sup>[2-7]</sup>。其中一类“狭陡型泥石流”的特征指标、防治对策以及动力学特性与震前常规泥石流存在显著差异,烧房沟、小岗剑、磨子沟、连山大桥沟、福堂沟、蒋家沟均属于此类。屈永平等<sup>[8-9]</sup>、杨东旭等<sup>[10]</sup>在对汶川震区泥石流灾害的调查与分析中得出,狭(急)陡(窄)沟道泥石流流域面积 $< 5 \text{ km}^2$ ,沟道纵比降 $> 300\%$ ,沟道横断面以V形为主,流域内单位面积物源量丰富,区域强降雨集中,活动旺盛。韩玫等<sup>[11]</sup>以都汶高速沿线磨子沟为例,分析了汶川震区窄陡沟道型泥流动力学过程,并分析其危险范围、评价其危害性,为此类泥石流防治工程措施提供了依据。杨东旭等<sup>[12]</sup>以小岗剑泥石流灾害为例分析了强震-暴雨叠加区泥石流在形成、活动及危害方面的典型特征,并提出了相应的防治对策。陈明等<sup>[13]</sup>以汶川瓦窑沟为例,研究其动力特性及启动、侵蚀、堆积演化过程,提出应开展对震区急陡沟道型泥石流风险评估、监测、早期预警等研究,治理方案也需有效组合运用。

狭(急)陡(窄)型泥石流暴发时间短、冲出速度快、冲出距离远、成灾性强,危害大,因此有必要针对单条狭陡型泥石流沟道的特点,深入分析治理难点,提出针对性、适宜性的防治新技术。近年来高频小流域、成灾性与危害性较弱的狭陡型泥石流受关注较少,在灾害防治方面未引起重视,在治理经验方面还存在一些不足。本文以阿坝州金川县刘家沟泥石流为例,分析该泥石流沟的成灾机理、堵江可能性并结合沟道情况提出适宜的治理措施,以为同类型泥石流防治提供思路。

## 1 研究区概况

### 1.1 流域概况

刘家沟位于阿坝州金川县卡撒乡脚姆塘村,为卡撒沟的支沟。流域面积 $0.36 \text{ km}^2$ ,主沟长 $1.43 \text{ km}$ ,沟域内最高点高程 $2710 \text{ m}$ ,沟口高程 $2124 \text{ m}$ ,相对高差达 $566 \text{ m}$ ,沟道平均坡降 $409.8\%$ 。刘家沟沟域内无支沟发育,且无清水汇流区,遥感图像显示为白色条带状(见图1)。沟域内植被不发育,流域形态指数 $\delta = A/L^2$ 定量计算<sup>[14]</sup>为 $0.168$ 。

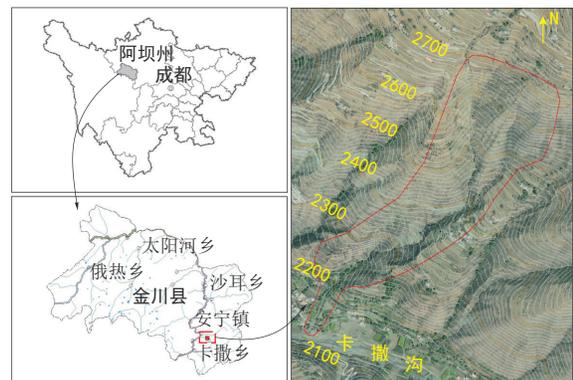


图1 刘家沟流域全貌

Fig.1 Liujia gully drainage area

### 1.2 地貌环境

刘家沟沟道切割较深,跌水和陡坎较发育,沟道两侧地形坡度在 $50^\circ$ 左右,局部可达 $65^\circ$ 以上,整个沟域由形成流通区、堆积区组成。形成流通区在 $2161 \sim 2710 \text{ m}$ ,区纵坡 $432.28\%$ ,沟道较窄,沟底宽约 $3 \sim 5 \text{ m}$ (邻脊宽度 $170 \sim 280 \text{ m}$ ),呈典型V字形深切沟谷,两侧斜坡在 $30^\circ \sim 50^\circ$ ,局部可达 $70^\circ$ ,此段滑坡堆积体和残坡积体发育; $2161 \text{ m}$ 至沟口段纵比降 $111.45\%$ ,地形平缓,沟道较浅,为泥石流的堆积区。

### 1.3 地层岩性

研究区内地层主要为中生界三叠系中统杂谷脑组( $T_2z$ ),岩性为浅灰、灰、深灰色中层、厚层及块状变质长石石英砂岩、石英砂岩、凝灰质砂岩、粉砂岩夹灰色粉砂质板岩、炭质板岩。砂、板岩之比为 $5:1 \sim 7:1$ ,砂岩以单层厚、分布集中为特征。

### 1.4 地质构造与地震

刘家沟流域位于滇藏歹字形构造头部外围与金汤弧形构造西半弧复合部位。其构造的显著特点是：一方面区内褶皱构造发育，断裂不发育，以挤压紧密、轴部尖棱为特征之褶皱为主，一个大的褶皱往往由数个至数十个次级褶皱组成，一个次级褶皱，又包含多个揉皱、挠曲，断裂主要有向阳断裂和烧日断裂，皆为推测断裂；另一方面，两构造体系之构造形迹表现形式不一，并在平面上构成明显分区，其中歹字形构造体系为区域性强大的压应力作用的产物，由一系列强烈挤压之线性褶皱组成，构造线呈北西线展布，而金汤弧形构造体系为局部应力场的产物，

应力相对较弱，主要由一系列强烈挤压之紧密褶皱组成，由北向南褶皱紧密程度递增，构造轴线呈东西向、北西西向，地层多以塑性变形为主。

研究区新构造运动十分强烈，第四纪以来主要表现为强烈升降运动和断裂活动。川西北断块的3条边界——托索湖-玛沁-文县断裂带、龙门山断裂带和鲜水河断裂带均为活动断裂。晚近期以来地震活动十分强烈且频繁，这些地震主要分布于川西北断块的边界断裂带上。流域地处鲜水河地震带和松潘地震带之间，抗震设防烈度为7度，地震加速度值为0.10g。刘家沟沟道纵、横断面及物源如图2、图3所示。

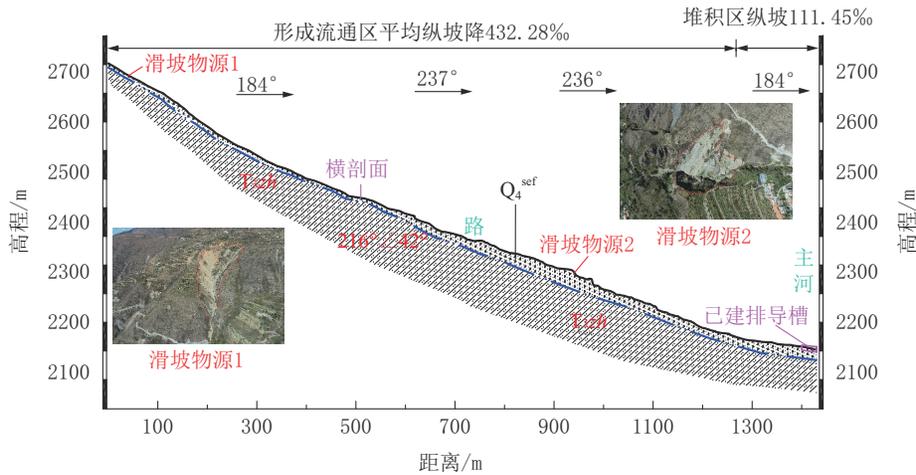


图2 刘家沟沟道纵断面及物源

Fig.2 Longitudinal-section and source of Liujia gully

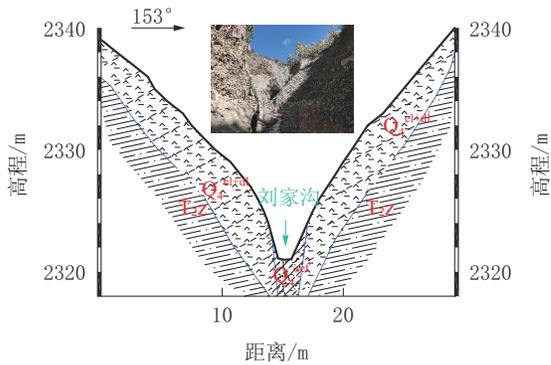


图3 刘家沟沟道典型横断面

Fig.3 Cross-section of Liujia gully

### 1.5 气象气候

刘家沟流域属明显的大陆性高原季风气候，流域内为高山峡谷区，地形复杂，相对高差大，气候呈立体分布，随海拔高度、地形不同而有差异。区内大

致可分为2种气候类型区：(1)暖温带季风气候，在海拔2400m以下，活动积温3400~4500℃，年降雨量606.8~654.4mm；(2)在海拔2400~2800m中温带季风气候，活动积温3400~1600℃，年降雨量654~745mm。金川县泥石流发育地区的特征为1h降雨量≥10mm，24h降雨量≥30mm时就有发生泥石流的可能。

## 2 泥石流发育特征及致灾机制

### 2.1 物源与势能

泥石流发生的势能条件与泥石流流域地形地貌关系密切，金川县陡峻的地形为泥石流发生提供了良好的势能和动能条件，主要表现在沟谷流域高差一般较大，沟谷为典型的深V形谷，使得沟道内或两岸松散堆积物具有较大势能，有利于向动能转化

进而引发泥石流。

刘家沟形成流通区沟道两侧发育有5处滑坡以及5处坡面倾蚀物源,上游泥石流启动区(海拔2710~2335 m),沟道长801 m,平均纵坡为468.16‰,此段沟道在泥石流侧蚀作用影响下,概算大约有 $17.52 \times 10^4 \text{ m}^3$ 物源储量,动储量约 $6.03 \times 10^4 \text{ m}^3$ ;中游启动区(海拔2335~2180 m),沟道长362 m,平均纵坡为375.23‰,概算大约有 $17.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 物源储量,动储量约 $5.97 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。形成流通区单位面积上的物源量达 $98.11 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,该段沟道在下蚀和侧蚀作用下,大量残坡积物以垮塌和滑坡的形式持续补给泥石流,增大了泥石流的规模和破坏力。

### 2.2 泥石流暴发历史及危害

刘家沟泥石流威胁对象是沿沟两岸农田、沟口两岸的居民以及道路。自1997年起,每年雨季均会暴发不同规模的泥石流,受泥石流灾害的影响,目前沟口乡道已经改道。在近两年(2020年、2021年)发生的泥石流灾害中,泥石流漫出沟道,堵塞卡撒沟,形成2.0 m高的堰塞坝,造成上游淤积,回水淹没了沟道堆积区左侧平坝区。由于大颗粒物质残留在主河道内,很难被主河携带走,卡撒沟在此处过流能力严重减弱,沟道被压缩变形。参见图4。



图4 2021年6月泥石流淤积情况

Fig.4 Debris flow event on June, 2021

### 2.3 灾害链机制

根据刘家沟泥石流灾害暴发历史分析,其暴发时间与连续降水或短时强降雨具有明显一致性,表明降水是该泥石流发生的触发因素。

降雨及其形成的径流直接导致沟谷两岸的滑坡和坡面倾蚀在流水侧蚀作用下解体,松散土体被席卷进入狭陡的沟道,形成堵塞体,在上游暴雨洪峰流量作用下,堵塞体溃决形成泥石流,这种堵溃并非单一的,而是沿沟道发育,多次堵溃作用下,对泥石流峰值流量产生极大的放大作用<sup>[15]</sup>。泥石流进入主

河,堵塞主河,形成堰塞坝,造成危害。在整个泥石流形成和发生过程中,呈现出的是一个降雨—侵蚀下切—崩滑—堵塞体—堵塞体溃决—席卷沟床物质—进一步侵蚀下切—进一步崩滑—进一步堵溃—增大的泥石流规模—堰塞湖—堰塞坝溃决—卡撒沟中、下游损害的成灾过程。

### 2.4 泥石流流量特征值计算

#### 2.4.1 不同降雨频率下泥石流的流量

据《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》所附暴雨等值线图,由变异系数查皮尔逊Ⅲ型曲线,求得 $P=5\%$ 设防频率下的1 h、6 h雨强值分别为33.4、47.1 mm,利用雨洪法计算泥石流的流量:

$$Q_c = (1 + \Phi) Q_p \times D_c \quad (1)$$

式中: $Q_c$ ——频率为 $P$ 的泥石流峰值流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $Q_p$ ——频率为 $P$ 的暴雨洪水流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $\Phi$ ——泥石流泥沙修正系数, $\Phi = (\gamma_c - \gamma_w) / (\gamma_H - \gamma_c)$ ; $\gamma_c$ ——泥石流重度, $\text{kN}/\text{m}^3$ ; $\gamma_w$ ——清水的重度, $\text{kN}/\text{m}^3$ ; $\gamma_H$ ——泥石流中固体物质重度, $\text{kN}/\text{m}^3$ ; $D_c$ ——泥石流堵塞系数。下同。

泥石流重度是影响泥石流峰值流量的关键因素,从泥沙携带能力考虑,重现期越长,泥石流沟的水力条件越好,携带大块石能力越强,泥石流重度越高<sup>[16]</sup>。泥石流的流量计算结果见表1。

表1 不同频率下泥石流峰值流量计算

Table 1 Calculated peak volumes of debris flow at different frequencies

| 频率/<br>% | 洪水流量/<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 泥石流重度/<br>( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 泥石流堵塞<br>系数(堵溃<br>模式) | 泥石流峰<br>值流量/<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) |
|----------|---|---|-----------------------|--|
| 1        | 2.62  | 21.0  | 3.5                   | 27.51  |
| 2        | 2.27  | 20.3  | 3.0                   | 18.12  |
| 5        | 1.83  | 19.1  | 2.8                   | 11.43  |
| 10       | 1.48  | 18.6  | 2.5                   | 7.73   |
| 20       | 1.14  | 18.0  | 2.0                   | 4.43   |

#### 2.4.2 一次泥石流活动总量预测

泥石流历时 $T$ 和泥石流流量 $Q_c$ 是决定泥石流一次活动总量的关键,按泥石流暴涨暴落的特点,将其过程概化“三角形”状<sup>[17]</sup>,通过断面一次泥石流总量 $W_c$ 由下式计算:

$$W_c = 19 \times T \times Q_c / 72 \quad (2)$$

一次冲出固体物质的总量 $W_s$ 由下式计算:

$$W_s = W_c(\gamma_c - \gamma_w)/(\gamma_H - \gamma_w) \quad (3)$$

据式(2)、(3),计算出该沟一次泥石流流总量和相应的固体物质总量(见表2)。

表2 泥石流流固体物质总量

Table 2 Total solids in debris flow at different frequencies

| 频率/<br>% | 泥石流峰值流量/<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 泥石流总量/<br>$\text{m}^3$ | 泥石流固体<br>物质总量/ $\text{m}^3$ |
|----------|--|------------------------|-----------------------------|
| 1        | 27.51  | 10002.64               | 6668.42                     |
| 2        | 18.12  | 6588.43                | 4112.78                     |
| 5        | 11.43  | 4155.95                | 2292.07                     |
| 10       | 7.73   | 2810.63                | 1464.93                     |
| 20       | 4.43   | 1610.75                | 780.97                      |

#### 2.4.3 形态调查法

根据2021年6月20日泥石流泥位、过流面积,采用形态调查法(表3)计算泥石流的流量明显大于根据雨洪法计算的泥石流峰值流量(表2),表明沟道内堵溃作用造成了泥石流流量沿程放大。

#### 2.4.4 泥石流冲击力计算

刘家沟形成流通区平均纵坡为468.16‰,使得泥石流在运动过程中,沿程流速加大,冲击力增强,本文选取拟设工程部位为计算断面,对单块块石最大冲击力进行计算。计算公式如下,计算结果见表4。

$$F = \gamma \cdot V_s \cdot \sin \alpha \sqrt{W/(C_1 + C_2)} \quad (4)$$

式中: $F$ ——对墩的冲击力,kN; $\gamma$ ——动能折减系数,巨石冲击时取0.3; $\alpha$ ——受力面与泥石流撞击面接触角,取 $90^\circ$ ; $W$ ——大块石重力,kN; $C_1$ 、 $C_2$ ——巨石与建筑物的弹性变形系数,取 $C_1 + C_2 = 0.0005$ ; $V_s$ ——泥石流中块石移运速度,m/s。

### 3 泥石流堵河可能性判别

#### 3.1 泥石流与主河交汇条件

刘家沟沟口于2021年修建了长50.0 m的排导槽,排导槽过流面积 $23.22 \text{ m}^2$ ,根据雨洪法计算是可以满足20年一遇泥石流过流能力的,但由于排导槽与主河卡撒沟交汇角为 $87^\circ$ ,近似直角交汇,泥沙沉降速度加快<sup>[18]</sup>,较易形成堆积体,增加堵塞卡撒沟的可能性。

#### 3.2 堵河可能性计算

根据泥石流沟口的断面宽度、流量及泥石流重度参数、主河在汇口处断面宽度、流量及河水重度参数,泥石流沟与主河交汇的夹角等,将主河与泥石流不同设计洪水频率以及两者不同组合条件下的相关参数带入泥石流堵河流量判别指标<sup>[19]</sup>公式进行计算:

$$C_F = \ln \frac{Q_M}{Q_B} - 0.883(1 - \cos \theta)^2 - 2.587 \frac{\gamma_G}{\gamma_M} < -8 \quad (5)$$

式中: $Q_M$ ——主河单宽流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $Q_B$ ——支槽泥石流单宽流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $\theta$ ——泥石流沟与主河交汇的夹

表3 形态调查法计算刘家沟泥石流流量

Table 3 Calculated volumes of debris flow in Liujia gully

| 计算位置            | 沟道平均宽度/ | 沟道平均泥深/ | 泥石流过流断面          | 泥石流断面平均                              | 泥石流断面峰值                                |
|-----------------|---------|---------|------------------|--------------------------------------|--|
|                 | m       | m       | 面积/ $\text{m}^2$ | 流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | 流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ |
| 拟建31号潜坎(格宾石笼)部位 | 4.2     | 0.8     | 3.36             | 7.49                                 | 25.17                                  |
| 拟建71号潜坎(格宾石笼)部位 | 4.5     | 0.7     | 3.15             | 7.3                                  | 23.00                                  |
| 拟建拦挡坝部位         | 6.5     | 0.5     | 3.25             | 6.4                                  | 20.80                                  |
| 沟口拟建排导工程部位      | 8       | 0.4     | 3.2              | 5.28                                 | 16.90                                  |

表4 单块块石最大冲击力计算结果

Table 4 Calculated maximum impact force of a single stone

| 沟 谷             | $\gamma$ | $C_1 + C_2$ | $\sin \alpha$ | $V_s/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | $W/\text{kN}$ | $F/\text{kN}$ |
|-----------------|----------|-------------|---------------|--------------------------------------|---------------|---------------|
| 拟建31号潜坎(格宾石笼)部位 | 0.3      | 0.0005      | 1             | 7.49                                 | 5.0           | 224.70        |
| 拟建71号潜坎(格宾石笼)部位 | 0.3      | 0.0005      | 1             | 7.3                                  | 4.5           | 197.10        |
| 拟建拦挡坝部位         | 0.3      | 0.0005      | 1             | 6.4                                  | 4.0           | 153.60        |
| 沟口拟建排导工程部位      | 0.3      | 0.0005      | 1             | 5.28                                 | 3.0           | 95.04         |

角, ( $^{\circ}$ );  $\gamma_G$ ——支槽泥石流重度,  $\text{kN}/\text{m}^3$ ;  $\gamma_M$ ——主槽水流重度,  $\text{kN}/\text{m}^3$ 。

计算得  $C_F = -8.42$ , 即会产生堵河。

徐永年等<sup>[20]</sup>通过分析堵河影响因素, 选取主要因子, 得到泥石流堵江的危险程度表达式:

$$K = \frac{\gamma_c Q_c J_c}{\gamma_m Q_m J_m} \sin \theta \quad (6)$$

式中:  $\gamma_m$ 、 $\gamma_c$ ——主河和支沟重度,  $\text{kN}/\text{m}^3$ ;  $Q_m$ 、 $Q_c$ ——主河和支沟流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $J_c$ 、 $J_m$ ——主河和支沟比降, %;  $\theta$ ——入汇角, ( $^{\circ}$ )。

据金川县河流统计数据, 卡撒沟长度 23.5 km, 落差 2250 m, 坡降 95.25%, 流域面积 246.2  $\text{km}^2$ , 多年平均流量 4.31  $\text{m}^3/\text{s}$ , 由于沟口修建的排导槽使泥石流归流, 目前可见主支沟夹角为  $87^{\circ}$ , 卡撒沟水流重度取 10  $\text{kN}/\text{m}^3$ , 刘家沟泥石流重度取 18  $\text{kN}/\text{m}^3$ 。计算  $K = 20.74$ , 根据庄建琦等<sup>[19]</sup>将  $K = 10$  作为泥石流堵江的临界指标,  $K$  大于或接近 10 后泥石流便会发生堵江。

### 3.3 堵河规模判别

根据正交入主河的三角形堰塞体堵河, 所需最小泥石流总量, 则堵沟所需堆积体的最大体积依以下经验公式估算:

$$Q_s = (1.732 \times B + b) \left( 0.1634 \times B^2 + 0.7 \times hB + h^2 \right) + \left[ \frac{(0.7 \times B + h)^2}{\tan \alpha - 0.7} \right] \times \left( \frac{0.7 \times B + h}{2.1} + \frac{b}{4} \right) \quad (7)$$

式中:  $B$ 、 $h$ ——河面宽度、水宽, m;  $b$ ——滑坡堆积体顺河顶宽, m;  $a$ ——沟口原堆积扇或岸坡的坡度, ( $^{\circ}$ )。

卡撒沟在此段河宽 15.0 m, 按形成 3.0 m 高的堰塞坝, 水深 1.5 m, 沟口堆积扇坡度  $65^{\circ}$  计算堵河所需堆积体体积为 2419.30  $\text{m}^3$ , 大于 20 年一遇泥石流固体物质含量。

## 4 泥石流防治的特殊性

(1) 形成流通区沟道两岸松散残坡积物层较厚, 岸坡垮塌发育, 未见明显基岩出露, 中部纵坡达 432.28%, 沟道横向平均宽度约 6.0 m, 最窄处仅 3.0 m, 沟底跌水。若在此段修建拦挡工程, 回淤库容和反压稳固方量极为有限, 坝肩、坝基稳定性堪忧, 且

沟道狭窄、纵坡较陡, 设备转运以及布置的施工难度大。

(2) 刘家沟泥石流在形成过程中, 沿程铲刮沟床质堆积物、席卷坡脚残坡积或崩坡积等松散堆积物以及堵塞体溃决导致流速、流量在向下游运动的过程中都呈现出显著的沿程放大效应, 用传统的雨洪法推求泥石流流量, 与现场泥痕调查法得出的流量指标相比偏小, 防治工程的设计参数不能满足实际流量的要求。

(3) 出山口距离主河入口处有 600 m, 此段纵坡达 111.45%, 沟道仅有 1.0 m 深, 沟型不明显, 泥石流暴发时极易漫出沟道, 因此此段需修建归流工程, 避免漫流与堵河成灾。

## 5 防治思路与措施

### 5.1 泥石流形成流通区设置潜坎群

防冲潜坎可以起到稳固岸坡, 防治物源揭底启动, 潜坎应急防冲以格宾石笼为宜。格宾石笼具有施工快速, 就地取材, 搬运轻便, 少扰动的施工工艺。主体联结强, 整体稳定, 耐冲刷, 成本较低, 因其柔性强, 可抵抗高强度压力, 可承受大范围的变形而不破裂, 可以依地势灵活布置, 整体结构稳定, 可有效提高地基承载力和冲刷淘蚀, 且具有很强的抵御自然破坏及耐磨蚀和抗恶劣气候影响的能力, 使用寿命长。

### 5.2 出山口设置拦挡坝

刘家沟泥石流为粘性泥石流, 并含众多大石块, 纵坡较陡, 在出山口处流速较大的石块将产生巨大的冲击力, 严重威胁下游建筑物及卡撒沟的行洪。基于此, 经现场比选在出山口处岸坡覆盖层较薄, 且沟道变缓, 具有较好的拦挡条件处修建一座拦砂坝, 以拦挡沟道中的巨石及较大固体物质, 减小泥石流对下游的破坏<sup>[21-22]</sup>。

### 5.3 堆积区设置排导工程

针对堆积区沟道纵坡可以排泄泥石流, 与出山口拦挡坝衔接做成八字堤导流, 修建双边防护堤, 对泥石流进行归流, 在主河处修建双边排导槽, 与主河呈小角度交汇, 最大限度利用主河的输移能力, 对泥石流进行排导<sup>[22]</sup>。

### 5.4 建立监测预警系统

降雨是刘家沟泥石流暴发的激发因素, 流域内局部降雨明显, 且流域附近无雨量站。当监测到可

能发生泥石流的临界雨量时,及时进行预警预报,减少灾害发生的可能性。另由于沟道内物源比较丰富,在降雨激发情况下,物源一旦启动,极易形成堵溃性泥石流,因此建议加强群测群防,在沟道上游、

中游及下游建立雨量监测系统,尤其在沟道中游安装裂缝计,加强对滑坡物源的监测,发现滑坡物源大规模启动时,及时采用声光报警器进行预警<sup>[23]</sup>。

防治工程规划示意图5。

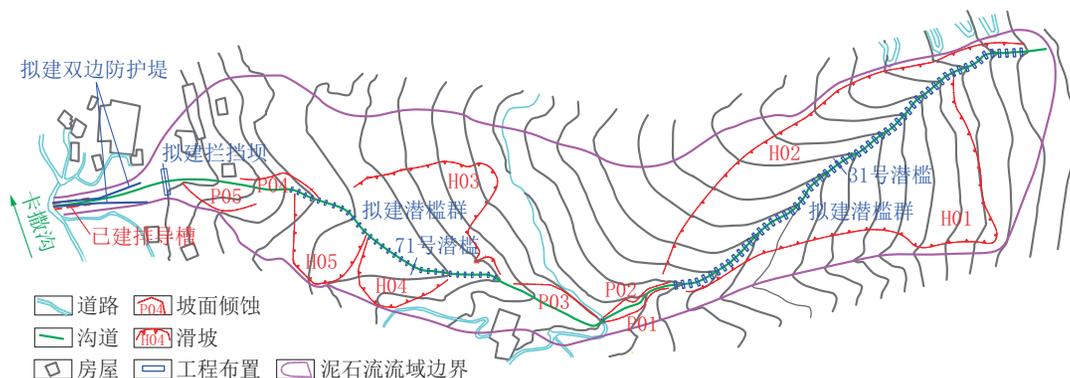


图5 防治工程规划示意

Fig.5 Mitigation planning for Liujia gully

## 6 结论与讨论

通过现场调查、理论计算与分析,探讨了刘家沟泥石流的成灾特征并提出可行的防治措施,得出结果如下:

(1)刘家沟泥石流属于高频泥石流,由于沟道陡峭,沟口流速、流量出现沿程放大,使用雨洪法计算数据难以满足工程设计要求,设计理念、方法与设防标准均应有所调整。

(2)刘家沟泥石流流域面积仅 $0.36\text{ km}^2$ ,平均纵坡为 $409.8\%$ ,流域完整性系数为 $0.168$ ,沟道横断面以典型V形,单位面积上物源量达 $98.11 \times 10^4\text{ m}^3$ 。沟口已建排导槽与主河呈大角度相交,加重了堵河可能性,泥石流堵河定量分析以及堵河所需体积计算均表明在发生20年一遇泥石流灾害情况下均会发生堵河。

(3)受限于较窄的沟道以及极陡的纵坡降,施工设备及材料转运、基础开挖难度较大,在施工阶段,需地质灾害专业人员全面科学评估泥石流灾害的链式效应,科学有效组织施工,避免次生灾害发生。

(4)需加强对沟道物源、沟域内降雨量及泥石流活动的动态监测,尤其是对松散物源稳定性和失稳情况的监测,建议安装专业仪器在汛期实行实时监测。

## 参考文献(References):

- [1] 陈晓清,李智广,崔鹏,等.“5.12”汶川地震灾区水土流失初步估算[J].山地学报,2009,27(1):122-127.  
CHEN Xiaoqing, LI Zhiguang, CUI Peng, et al. Estimation of soil erosion caused by the 5.12 Wenchuan earthquake[J]. Journal of Mountain Science, 2009,27(1):122-127.
- [2] Cui P, Chen X Q, Zhu Y Y, et al. The Wenchuan earthquake. 12th May, 2008, Sichuan province, China and resulting [J]. Geo-hazards. Nature Hazards, 2011,56:19-36.
- [3] 崔鹏,韦方强,陈晓清,等.汶川地震次生山地灾害及其减灾对策[J].中国科学院院刊,2008,23(4):317-323.  
CUI Peng, WEI Fangqiang, CHEN Xiaoqing, et al. Geohazards in Wenchuan earthquake area and countermeasures for disaster reduction [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2008,23(4):317-323.
- [4] 黄润秋,李为乐.“5.12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(12):2585-2592.  
HUANG Runqiu, LI Weile. Research on development and distribution rules of geohazards induced by Wenchuan earthquake on 12th May, 2008[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008,27(12):2585-2592.
- [5] 崔鹏,庄建琦,陈兴长,等.汶川地震区震后泥石流活动特征与防治对策[J].四川大学学报(工程科技版),2010,42(5):10-19.  
CUI Peng, ZHUANG Jianqi, CHENG Xingchang, et al. Characteristics and countermeasures of debris flow in Wenchuan area after the earthquake[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010,42(5):10-19.
- [6] 胡卸文,韩玫,梁敬轩,等.汶川地震灾区泥石流若干关键问题[J].西南交通大学学报.2016,51(2):331-340.  
HU Xiewen, HAN Mei, LIANG Jingxuan, et al. Some key

- problems on debris flow in Wenchuan earthquake area[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(2): 331-340.
- [7] 康志成, 李焯芬, 马嵩乃, 等. 中国泥石流研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 32-38.
- KANG Zhicheng, LI Zhuofen, MA Ainai, et al. Study on Debris Flow in China[M]. Beijing: Science Press, 2004: 32-38.
- [8] 屈永平, 肖进. 强震区急陡沟道泥石流特征研究[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2018, 19(4): 57-61.
- QU Yongping, XIAO Jin. The preliminary study on characteristics of urgent steep-channel debris flows in meizoseismal area[J]. Changchuan Inst. Tech. (Nat. Sci. Edi.), 2018, 19(4): 57-61.
- [9] 屈永平. 强震区急陡沟道泥石流动力特性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- QU Yongping. The research on dynamic characteristics of urgent steep-channel debris flows in meizoseismal area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [10] 杨东旭, 游勇, 陈晓清, 等. 汶川震区陡峻型泥石流典型特征与防治[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(1): 146-153.
- YANG Dongxu, YOU Yong, CHEN Xiaoqing, et al. Typical characteristics and mitigation of debris flow in narrow-steep gullies in the Wenchuan earthquake areas[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(1): 146-153.
- [11] 韩政, 胡涛, 王严, 等. 汶川震区窄陡沟道型泥石流动力学特性及堵江分析——以都汶高速沿线磨子沟为例[J]. 工程地质学报, 2016, 24(4): 559-568.
- HAN Mei, HU Tao, WANG Yan, et al. Dynamics character and river-blocking analysis of narrow-steep channels debris flow in Wenchuan earthquake region—Illustrated with case of Mozi gully along Duwen freeway[J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(4): 559-568.
- [12] 杨东旭, 游勇, 陈晓清, 等. 强震-暴雨叠加区小岗剑泥石流灾害特征与防治关键技术[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2015, 51(6): 898-903.
- YANG Dongxu, YOU Yong, CHEN Xiaoqing, et al. Disaster characteristics and key technologies for treatment of Xiaogangjian debris flow in severe earthquake and intense rainstorm areas[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2015, 51(6): 898-903.
- [13] 陈明, 唐川, 甘伟, 等. 震区急陡沟道型泥石流特征及动力过程研究——以汶川瓦窑沟为例[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2018, 40(2): 272-278.
- CHEN Ming, TANG Chuan, GAN Wei, et al. Characteristics and dynamical process of debris flow at urgent steep gully in the earthquake areas—Illustrated with case of Wayao gully in Wenchuan[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences), 2018, 40(2): 272-278.
- [14] 陆中臣, 贾绍凤, 黄克斯, 等. 流域地貌系统[M]. 大连: 大连出版社, 1991.
- LU Zhongchen, JIA Shaofeng, HUANG Kesi, et al. Basin Geomorphic System[M]. Dalian: Dalian Press, 1991.
- [15] 游勇, 陈兴长, 柳金峰. 汶川地震后四川安县甘沟堵溃泥石流及其对策[J]. 山地学报, 2011, 29(3): 320-327.
- YOU Yong, CHEN Xingchang, LIU Jinfeng. Dam-breaking debris flows and its countermeasures of Gangou gully following the Wenchuan earthquake in Anxian county, Sichuan[J]. Mountain Research, 2011, 29(3): 320-327.
- [16] 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.
- ZHOU Bifan, LI Deji, LUO Defu, et al. Debris Flow Control Guide[M]. Beijing: Science Press, 1991.
- [17] 黄海, 谢忠胜, 石胜伟, 等. 汶川震区哈尔木沟堵河型泥石流灾害特征与防治方法[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 327-337.
- HUANG Hai, XIE Zhongsheng, SHI Shengwei, et al. Characteristics and countermeasures of river-blocking debris flow of Haermu gully in Wenchuan area after earthquake[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(1): 327-337.
- [18] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 189-210.
- QIAN Ning, WAN Zhaohui. Mechanics of Sediment Transport[M]. Beijing: Science Press, 1983: 189-210.
- [19] 庄建琦, 葛永刚, 陈兴长. 震后都汶公路沿线泥石流沟堵江危险性评估[J]. 工程地质学报, 2012, 20(2): 195-203.
- ZHUANG Jianqi, GE Yonggang, CHEN Xingchang, et al. Assessment of river block probability by debris flow along Dujiangyan-Wenchuan highway after Wenchuan earthquake[J]. 2012, 20(2): 195-203.
- [20] 徐永年, 匡尚富, 黄永健, 等. 泥石流入汇的危险性判别指标[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(3): 33-38.
- XU Yongnian, KUANG Shangfu, HUANG Yongnian, et al. Hazard-deciding induces for convergence of debris flow[J]. Journal of Natural Disasters, 2002, 11(3): 33-38.
- [21] 余涛, 李金洋, 陈欢, 等. 崩塌堆积体启动坡面泥石流判别与防治——以北川县开坪乡平石板泥石流为例[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(8): 88-92.
- SHE Tao, LI Jinyang, CHEN Huan, et al. Discrimination and prevention of slope debris flow caused by collapse accumulation: A case study on Pingshiban debris flow in Beichuan[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(8): 88-92.
- [22] 崔华丽, 石胜伟, 谢忠胜. 凉山州小流域泥石流形成机制及防治方法探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(7): 33-35, 40.
- CUI Huali, SHI Shengwei, XIE Zhongsheng. Formation mechanism of small watershed debris flow and the discussion of control methods[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(7): 33-35, 40.
- [23] 周策, 罗光强, 吴陶. FDR型岩土多层含水量监测仪的研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(6): 60-66.
- ZHOU Ce, LUO Guangqiang, WU Tao. Research on FDR-type multilayer water content monitor[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(6): 60-66.

(编辑 荐华)