

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.134

引用格式: 陈鹏飞,王佩,江雪峰,等. 典型堵河型泥石流致灾和防治模式——以平武县卿家沟泥石流为例[J]. 中国地质调查, 2025,12(1): 120–128. (Chen P F, Wang P, Jiang X F, et al. Cause and prevention model of typical river-blocking debris flow disaster: A case study of Qingjia gully debris flow in Pingwu County[J]. Geological Survey of China, 2025, 12(1): 120–128.)

典型堵河型泥石流致灾和防治模式 ——以平武县卿家沟泥石流为例

陈鹏飞¹, 王佩^{1*}, 江雪峰², 武荣华¹, 周盼¹

(1. 四川省地质矿产勘查开发局区域地质调查队, 四川 成都 610213; 2. 四川省地质环境调查研究中心, 四川 成都 610081)

摘要: 为探寻典型堵河型泥石流致灾和防治模式,以涪江流域中上游典型堵河型泥石流卿家沟为例,通过调查走访、实地测量、综合论证等方法,总结出了典型堵河型泥石流4种主要致灾模式:主河上游淹没及次生灾害、主河下游洪水及次生灾害、主河异岸冲蚀和淹没、泥石流沟口渐进式后退淤堵。基于该型泥石流的基本特征和致灾机理,提出了两种防治模式:一是中上游拦砂固源,沟口原沟排导模式;二是堆积区沟道改移防治模式。结果表明,两种模式在防灾技术层面上均具有较高的可行性。研究可为堵河型泥石流灾害的防治提供新的视角和方法,对类似特征泥石流灾害防治具有借鉴意义。

关键词: 堵河型泥石流; 淹没灾害; 溃坝洪水; 异岸冲蚀; 渐进式后退淤堵; 防治模式

中图分类号: **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8706(2025)01-0120-09

0 引言

涪江中上游流域地处青藏高原向四川盆地过渡的东缘地带,受区域地质构造、地形地貌、气候条件和人类工程活动等影响,属于泥石流高发、易发、频发区域。这些区域多以中高山峡谷地貌为主,人地矛盾突出,居民多聚居在山前泥石流堆积扇上。泥石流常引发人员伤亡和财产损失,目前仅涪江上游泥石流数量已经达到40余处,灾损土地达2.47 km²^[1]。2022年卿家沟“8·19”泥石流引发主河涪江形成堰塞坝,主河被挤压并被迫偏移后,在异岸冲毁X120县道100余米。此外,主河被堵塞后,泥石流在沟口排导困难,继而引发渐进式后退淤堵。淤积体掩埋、冲毁了10户民房和0.02 km²农田,造成直接经济损失约200万元。

前人针对堵河型泥石流的研究主要集中在对堵河因素识别和堵河程度的判别,堵塞主河后主河

上游、下游和异岸致灾机理,以及堰塞坝稳定性评价、破坏模型和溃坝后的影响评估,例如:张金山等^[2]通过研究岷江上游8条典型泥石流,详细论述了泥石流堵河的主要因素为泥石流规模、主河宽度、泥石流沟床比降、泥石流流量、入汇处主河流量、泥石流颗粒级配、入汇处主河比降、泥石流粘度、重度、泥石流沟与主河夹角、泥石流暴发频率等;张金山等^[3]通过文献查阅和实地调查岷江上游多条泥石流,对泥石流堵塞主河的基本特征进行了分析总结,得出了泥石流堵断主河可能性大小的经验判断公式;陈德明等^[4]基于泥石流与主河水流交汇机理,通过室内水槽试验,提出了泥石流堵河判别式;胡卸文等^[5]采用三维有限差分地下水渗流模型对唐家山堰塞体的渗流稳定性和溃决模式进行了分析;刘翠容等^[6]详细论述了堵河型泥石流堰塞坝堵河模式和致灾模式,并且运用数值模拟方法分析了主河在不同堵塞情况下水流的流场,并针对不同堵河模式引发的主河上游、下游和异岸

收稿日期: 2024-02-04; 修订日期: 2024-11-19。

基金项目: 绵阳市发展与改革委员会“平武县2024年度地质灾害综合治理(编号: 2311-510700-04-01-465475)”项目资助。

第一作者简介: 陈鹏飞(1989—),男,高级工程师,主要从事地质灾害防治研究方面的工作。Email: 412386438@qq.com。

通信作者简介: 王佩(1996—),女,助理工程师,主要从事地质灾害防治研究方面的工作。Email: 773025076@qq.com。

灾害效应,提出了相应的减灾对策。

以往研究对堵河型泥石流堆积扇上渐进式后退淤堵致灾模式尚未进行过探讨,对易堵塞主河型泥石流的治理模式主要依靠工程经验,相关研究亦较少。本研究以卿家沟泥石流为例,采用现场调查、实地测量和综合论证等方法,通过对卿家沟泥石流的地形地貌特征、水源特征、物源特征和堵河特征进行详细分析,结合泥石流堵河后产生的次生灾害链效应,总结典型易堵塞主河型泥石流致灾模式和典型防治模式,旨在为堵河型泥石流致灾预测、评价和防治工程布置提供指导。

1 研究区概况

1.1 地形地貌

研究区属后龙门山构造侵蚀中高山地貌,地形尖峭峻拔,山脊呈梳状、鱼鳞状,海拔为2 000 ~ 3 500 m。切割深度为500 ~ 1 500 m,由于地形切割剧烈,河谷以峡谷为主。卿家沟沟域内最高点海拔2 465 m,最低点位于卿家沟汇入涪江处,沟口海拔1 190 m,相对高差为1 275 m。主沟纵坡降介于110‰~590‰,平均纵坡降为303‰,上陡下缓。

1.2 气象水文

研究区属亚热带季风气候区,气候温和,降水丰沛,四季分明,多年平均气温为14.7℃。多年平均降水量为806.0 mm,具有冬干、春旱、夏涝、秋淋的特点,5—9月降水量占全年降水量的82%。

卿家沟主沟纵长为4.21 km,流域面积为4.78 km²,沟口汇入涪江。涪江发源于岷山主峰雪宝顶北坡,流域面积为5 510 km²,河床平均比降为15‰,平均流量为153 m³/s,平均径流总量为47 × 10⁸ m³/a。

1.3 地质概况

研究区位于扬子准地台、西秦岭褶皱带、松潘—甘孜褶皱带三大一级大地构造单元的结合部位,地处龙门山和川西北三角形断块地震活动区,地震活动频繁^[7],崩塌、滑坡、泥石流等不良地质现象十分发育。研究区地质构造概况如图1所示。

卿家沟流域出露的地层主要为前震旦系碧口群上部岩组,岩性为片理化变质中酸性火山岩、凝灰质千枚岩、变质粉砂岩和千枚岩等。流域内第四系松散堆积层如残坡积、崩坡积和泥石流堆积等,主要位于主、支沟两侧岸坡区域,以及山前洪积扇。

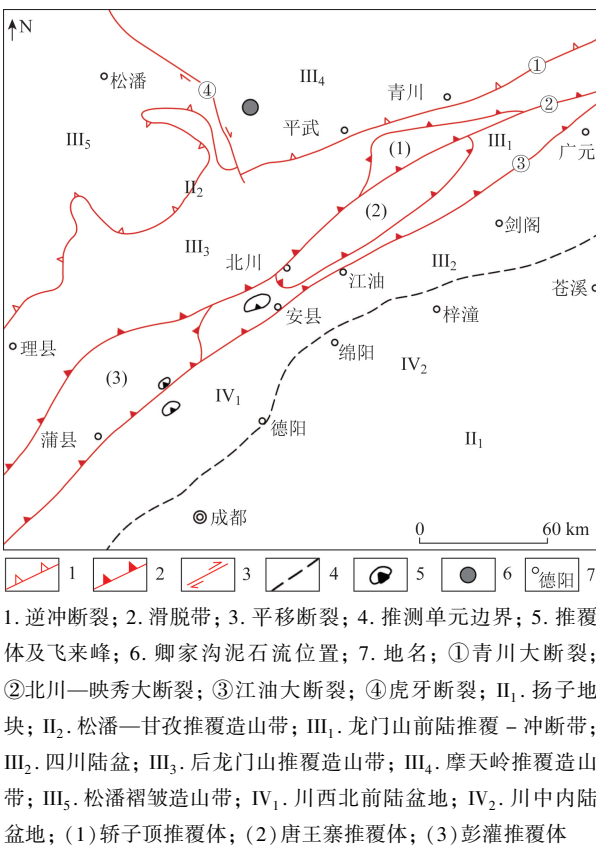


图1 研究区区域构造简图

Fig.1 Regional structural sketch of the study area

2 泥石流基本特征

2.1 物源特征

卿家沟泥石流共发育崩滑物源4处、沟道物源5处,坡面物源2处,如图2所示。

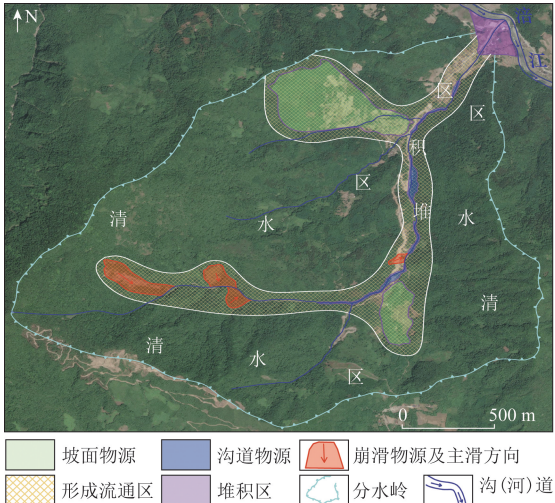


图2 泥石流物源平面分布

Fig.2 Debris flow source area planar distribution

卿家沟流域物源量丰富,松散物源静储量达 $52.65 \times 10^4 \text{ m}^3$,沟域松散物模量达 $11.01 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$,动储量达 $20.87 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

2.2 水源特征

据《四川省暴雨统计参数图集》^[8]所附降雨量等值线图,采用皮尔逊Ⅲ型曲线得到不同设防频率暴雨的模比系数,求得不同设防频率暴雨的 1 h 雨强值,如表 1 所示。

表 1 研究区不同设防频率下雨强值

Tab.1 Rainfall intensity calculation results for different fortification frequencies in the study area

频率 $P/\%$	平均值/ $(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	变差系数 C_{v1}	模比系数 K_p	设计雨强/ $(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$
1	20	0.53	2.872	57.44
2			2.522	50.44
5			2.050	41.00
10			1.696	33.92
20			1.336	26.72

根据地区经验,四川山区泥石流激发雨量一般为 $(48, 50] \text{ mm/h}$ ^[9],可见卿家沟在 $P = 2\%$ 设防频率下的雨强值便已达到该区域的激发雨量。

2.3 泥石流特征值

2.3.1 泥石流流量

卿家沟泥石流重度综合了现场配浆法和查表法,泥石流浆体重度取 1.660 t/m^3 。

泥石流流量计算采用《T/CAGHP 006—2018 泥石流灾害防治工程勘查规范(试行)》^[10]推荐的东川公式

$$Q_c = (1 + \varphi) Q_p D_c \quad (1)$$

式中: Q_c 为泥石流洪峰流量, m^3/s ; φ 为泥沙修正系数,无量纲; Q_p 为暴雨洪水流量, m^3/s ; D_c 为堵塞系数,无量纲。

卿家沟泥石流流量计算结果如表 2 所示。

表 2 卿家沟泥石流流量

Tab.2 Debris flow discharge calculation for Qingjia gully

频率 $P/\%$	泥沙修正 系数 φ	暴雨洪水流量 $Q_p/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	堵塞系 数 D_c	泥石流洪峰流量 $Q_c/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
1	0.67	55.57	2.5	231.56
2	0.67	47.02	2.5	195.93
5	0.67	35.86	2.5	149.40
10	0.67	27.78	2.5	115.74
20	0.67	19.90	2.5	82.93

2.3.2 泥石流过流量和固体物质冲出量

按泥石流暴涨暴落的特点,泥石流过程线可概化为五角形,泥石流过流量计算公式为

$$Q = 0.264 \times T \times Q_c \quad (2)$$

式中: Q 为泥石流流过流量, m^3 ; T 为泥石流历时, s ; Q_c 为泥石流洪峰流量, m^3/s 。

泥石流固体物质冲出量公式为

$$Q_H = Q(\gamma_c - \gamma_w)(\gamma_H - \gamma_w) \quad (3)$$

式中: Q_H 为泥石流固体物质冲出量, m^3 ; γ_c 为泥石流重度, t/m^3 ; γ_w 为水的重度, t/m^3 ; γ_H 为泥石流固体物质的重度, t/m^3 。

卿家沟泥石流过流量和固体物质冲出量计算成果,如表 3 所示。

表 3 泥石流过流量和固体物质冲出量

Tab.3 Debris flow excess flow and solid matter flushing output

频率 $P/\%$	泥石流过流量 $Q/10^4 \text{ m}^3$	固体物质冲出量 $Q_H/10^4 \text{ m}^3$
1	14.67	5.87
2	12.41	4.97
5	9.47	3.79
10	7.33	2.93
20	5.25	2.10

2.4 泥石流堵河机理与特征

2.4.1 泥石流堵河影响因素

郭志学等^[11]对可能影响泥石流堵塞主河的各类因素进行了试验研究,结果表明泥石流流入汇总量、泥石流与主河的流量比、泥石流流入汇角等的增大有利于泥石流堵塞主河现象的发生,而主河比降和主河宽度的增大则不利于泥石流堵塞主河,泥石流密度与主河临界堵江流量呈现一种抛物线性关系。

2.4.2 泥石流堵河定量分析

有关泥石流堵塞主河的定量计算理论研究较多,目前主要分为基于流体理论的计算法、经验公式法和试验模拟方法,各种堵塞计算判别式对特定泥石流的适用性仍有待进一步论证,堰塞的评判与溃决的预测仍是尚在探索的难题^[12]。

何易平^[13]经数次室内水槽模拟后,通过多因素的非线性回归分析得到了泥石流堵河流量判别式

$$C_F = \ln \frac{Q_M}{Q_B} - 0.883(1 - \cos\theta)^2 - 2.587 \frac{\gamma_c}{\gamma_M} \quad (4)$$

式中: C_F 为判别系数,无量纲; Q_M 、 Q_B 分别为主河和泥石流单宽流量, m^3/s ; θ 为泥石流与主河的交角, $(^\circ)$; γ_c 、 γ_M 分别为泥石流与主河水流的重度, t/m^3 。 C_F 小于 -8.572 为堵河。

蒋忠信^[14]在中科院山地所基于规模判别泥石流堵河经验式基础上,将顺河淤塞坝截面近似为三角形后,推导了三角形堵河的规模判别式

$$Q_s = \frac{B}{2} \left(\frac{1}{\tan 14^\circ} + \frac{1}{\tan \varphi_w} \right) \times \left(\frac{\tan^2(\varphi_c) \times B^2}{3} + \tan \varphi_c \times B + h^2 \right) + \frac{(\tan \varphi_c \times B + k)^3}{3 \times \tan \varphi_w \times (\tan \alpha - \tan \varphi_c)} \quad (5)$$

式中: Q_s 为三角形堵河所需泥石流体积, m^3 ; B 为主河水面宽度, m ; h 为主河水深, m ; α 为沟口原堆积扇或岸坡的坡度, $(^\circ)$; φ_c 为泥石流堆积体纵坡, $(^\circ)$; φ_w 为堆积体水下安息角, $(^\circ)$ 。

2.4.3 卿家沟泥石流堵河评价

(1)定性评价。卿家沟现状入汇角接近 90° , 涪江常流量与卿家沟 20 a 一遇泥石流峰值流量比值为 0.83。卿家沟入江处涪江河道宽 30 m, 其河道相对较窄。卿家沟主沟泥石流平均重度为 1.66 t/m^3 , 泥石流流体容重较大。根据现场走访, 以往强降雨雨强小于 $(45, 50] \text{ mm/h}$ 时, 卿家沟泥石流未出现过明显堵江情况, 反之则堵江现象严重。综合判断, 卿家沟泥石流发生小规模泥石流堵塞主河涪江的可能性小。

(2)定量评价。根据泥石流堵河流量判别式(式 4)计算判别系数 C_F , 如表 4 所示。根据流量判别结果, 卿家沟泥石流堵塞主河涪江的可能性较小。根据泥石流三角形堵河的规模判别式(式 5)计算堵河所需泥石流体积 Q_s , 如表 5 所示。根据泥石流规模堵江判别结果, 泥石流堵江所需要的最小体积为 $0.60 \times 10^4 \text{ m}^3$, 而 5% 频率泥石流固体物质冲出量为 $3.79 \times 10^4 \text{ m}^3$, 泥石流固体物质冲出量远大于堵河所需泥石流堆积体体积。

表 4 根据流量堵塞涪江判别结果
Tab. 4 Assessment results for Fu river blockage based on discharge

频率 /%	主河单宽流量 $Q_M/(m^3 \cdot s^{-1})$	泥石流单宽流量 $Q_B/(m^3 \cdot s^{-1})$	交角 $\theta/(^\circ)$	判别系数 C_F
2	5	16.33	90°	-6.36
5	5	12.45	90°	-6.09

表 5 根据规模堵塞涪江判别结果
Tab. 5 Assessment results for Fu river blockage based on scale

主河 水面 宽 B/m	水下安 息角 $\varphi_w/(^\circ)$	沟口原堆积扇 或岸坡的坡度 $\alpha/(^\circ)$	泥石流堆 积体纵坡 $\varphi_c/(^\circ)$	主河 水深 h/m	三角形堵河 所需泥石流 体积 Q_s/m^3
30	18°	6°	4.5°	2.5	5 952.94

结合定性和定量评价结果: 当卿家沟泥石流爆发规模大于等于 20 a 一遇强度标准时, 泥石流会大面积挤占主河河道, 甚至完全堵塞涪江河道, 壅高主河水位, 威胁主河道另一侧河岸稳定; 当卿家沟泥石流爆发规模小于 20 a 一遇强度标准时, 泥石流仅会少部分挤占主河河道, 造成堵塞涪江的可能性较小。综合分析结果与既有泥石流灾害史一致。

3 典型堵河型泥石流致灾模式

既有研究成果表明, 泥石流堵塞主河尤其是全堵主河而引发的次生灾害链效应比泥石流自身的危害大得多。堵河型泥石流易出现以下 4 种典型致灾模式。

3.1 主河上游淹没及次生灾害

泥石流引起主河壅塞, 上游水位升高, 形成内涝, 淹没成灾。堵河型泥石流在主河河谷形成卡口, 抬升河流侵蚀基准, 引起上游泥沙淤积, 抬高河床, 河道宽度可能变宽变浅, 给上游工农业生产和环境带来危害。此外, 泥石流堵塞河道后, 河道的淤积、侵蚀和沉积物运输模式可能发生变化, 影响河道的长期稳定性和生态系统。堰塞湖溃决后, 水位骤降, 常诱发库岸滑坡等地质灾害。

卿家沟泥石流爆发后, 主河上游水位雍高约 2.0 m, 造成少量农田被淹没, 因居民区相对河床位置较高, 未引发民房淹没等灾害。

3.2 主河下游洪水及次生灾害

堵塞形成的堰塞湖溃决后, 会产生超常规流量的溃坝洪水, 冲蚀速率显著增加, 导致下游地区洪水泛滥和河床变形。溃坝洪水还会加剧河岸侵蚀和大量沉积物向下游输送。溃决后河床形态可能发生显著变化, 如河床的坡度增加和下游河段的坡度降低。卿家沟泥石流堵河规模较小, 上游拦蓄河水有限, 溃坝后洪水仅造成近河岸的少量农田被冲毁, 未造成下游严重洪涝灾害。

堰塞体溃决还会触发一系列连锁反应, 2020 年丹巴县梅龙沟“6·17”泥石流就触发形成了泥石流-堰塞坝-溃决洪水-滑坡灾害链, 溃决后的洪水和狭窄河流的流动重新激活了阿娘寨滑坡^[15]。

3.3 主河异岸冲蚀和淹没

(1)主河异岸侵蚀。泥石流爆发侵占部分主河道时, 常导致河道主流偏移, 在凹岸形成堰口, 异岸水位大幅上升, 水流速度显著增加, 河道凹岸侵蚀

加剧,从而对异岸造成严重的冲刷影响,异岸岩土体稳定性大幅降低。卿家沟“8·22”泥石流侵占主河道以后,主流偏移,异岸水位大幅上升,水流速度显著增加,导致异岸 X120 县道路基和挡墙全部被掏蚀破坏(图 3)。



图 3 卿家沟泥石流异岸冲蚀照片

Fig.3 Photo of Qingjia gully debris flow cross-shore erosion

(2)异岸洪水风险。泥石流固体冲出物大幅或全部侵占主河道时,河道主流偏向凹岸,上游水位大幅壅高,大大增加了异岸洪水风险,常导致主河改道,并诱发异岸洪水形成淹没灾害。汶川震区映秀镇红椿沟“8·14”特大泥石流堰塞堆积体堵断岷江主河道,导致河水改道冲入映秀新镇,引发洪水泛滥,造成映秀镇 13 人死亡、59 人失踪,受灾群众 8 000 余人被迫避险转移^[16]。

3.4 泥石流沟口渐进式后退淤堵

卿家沟“8·19”泥石流龙头到达沟口时,涪江排导能力不足,泥石流持续 15 ~ 20 min 后,主河涪江被挤占偏移至原河道左岸不足 1/3 处,泥石流因排导困难在堆积区逐渐向上游渐进式后退淤堵,堆积区高程 1 220 m 以下沟道很快被全部淤满,并漫流至堆积区民房。大约持续 20 min 后,堵塞体溃决,主河恢复正常。

卿家沟泥石流堆积区原自然沟道纵坡为 100‰ ~ 130‰,已达不淤纵坡。自然沟道宽 15 ~ 19 m,深 3.2 ~ 4.5 m,截面积为 43 ~ 54 m²,经计算的自然沟道泥石流流速为 4.60 ~ 5.44 m/s。泥石流流过流能力达 233.92 ~ 248.40 m³/s,完全满足近百年一遇的泥石流过流能力。但本次泥石流依然冲毁堆积区 10 户民房,掩埋土地 0.02 km²。泥石流爆发后堆积区现场影像如图 4(a)所示,沟口影像如图 4(b)所示。

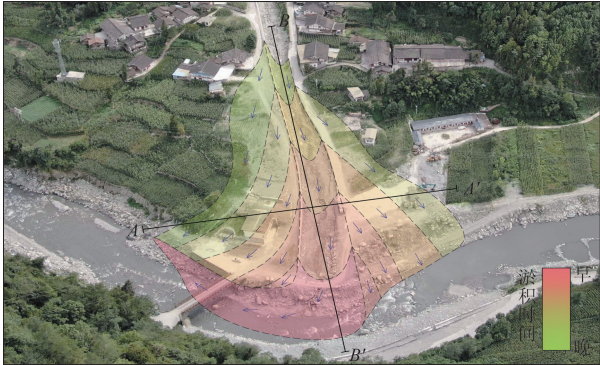


(a) 泥石流堆积区 (b) 泥石流沟口

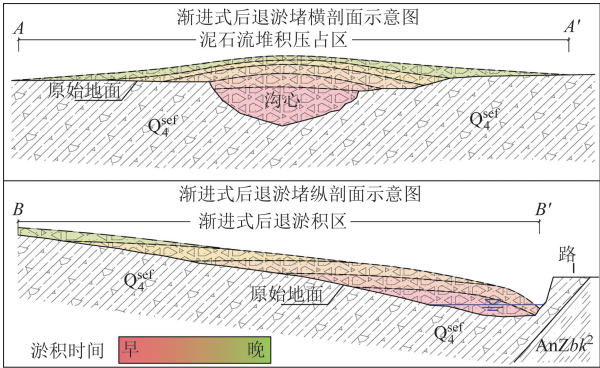
图 4 泥石流爆发后现场照片

Fig.4 Photos of the scene after the debris flow eruption

根据现场实地走访调查,该次泥石流致灾模式主要为泥石流堵塞涪江→高浓度泥石流浆体渐进式后退淤高→原沟道全部被淤积后高出两侧地面→泥石流从两侧漫流→冲毁房屋。由于卿家沟泥石流初期并未在堆积区堆积,而是在沟口淤塞主河后,逐渐向后渐进式淤堵成灾,证明该致灾模式客观存在。泥石流渐进式后退淤堵致灾模式示意图,如图 5 所示。



(a) 平面示意图



(b) 剖面示意图

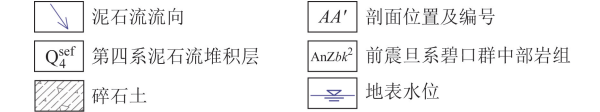


图 5 泥石流渐进式后退淤堵示意图

Fig.5 Illustration of the progressive retreat and siltation of debris flow

4 典型堵河型泥石流防治模式

4.1 中上游拦砂固源、沟口原沟排导模式

堵河型泥石流主河输砂能力有限,可采取“拦排结合,以拦为主”的治理原则。在泥石流流通区选择“肚子大、纵坡缓、锁口窄”的区域设置拦砂坝工程,可大大减少泥石流固体物质冲出量,减轻主河输砂压力。条件允许时,可结合固源工程,在控制性物源区固床护坡,减少物源启动量。拦砂、固源后,泥石流重度、洪峰流量、过流量和固体物质冲出量都将得以控制,拦固区下游将由冲淤转换为以冲为主。此外,还可针对保护对象设置排导或单边防护工程,并在沟口设置散流工程,将泥石流引向主河下游。该模式在西南地区众多泥石流治理工程中得到了应用,治理成效显著。

卿家沟泥石流控制性物源位于高陡无人区,无布设固源工程条件,可在流通区两沟交汇的弯道卡口区域设置一处拦砂坝,并在沟口针对威胁对象设置排导工程,拦砂坝设置基本情况如表 6 所示。

表 6 拦砂坝设置基本情况

Tab.6 Basic information of sediment storage dam design

有效坝高/m	回淤面积/m ²	回淤长度/m	库容/10 ⁴ m ³
15	8 929	114 ~ 130	5.09

拦砂坝可拦挡上游 50 a(20 a)一遇泥石流固体物质冲出量 1.5 次(2 次)。设坝后,下游沟口排导工程流量设计参数应予以调整,如表 7 所示。

表 7 设坝后下游排导工程流量设计参数

Tab.7 Downstream conveyance project flow parameters after dam design

频率 P/%	泥石流重度 $\gamma_c/(t \cdot m^{-3})$	泥沙修正系数	堵塞系数 D_c	泥石流洪峰流量 $Q_c/(m^3 \cdot s^{-1})$
2	1.660(1.50)	0.67(0.43)	2.5(1.8)	195.93(121.44)
5	1.660(1.50)	0.67(0.43)	2.5(1.8)	149.40(92.60)

注：“()”内为设置拦砂坝后下游泥石流流量特征参数。

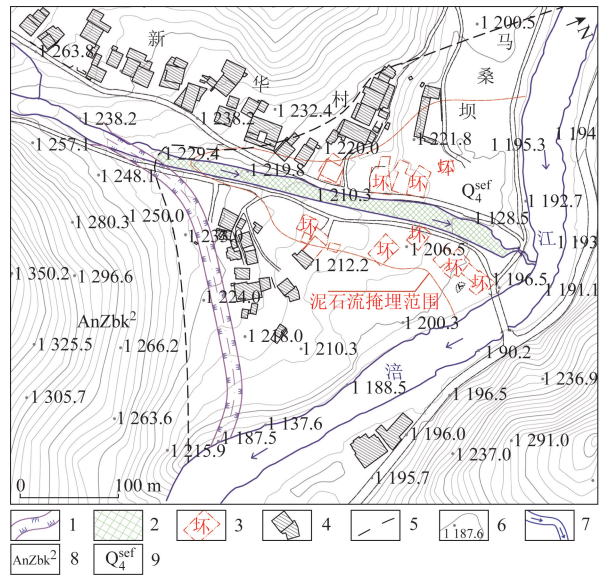
采用此方案治理后,大部分泥石流固体冲出物被拦挡,高含砂水流经排导槽导流,获得了良好的治理效果。

4.2 堆积区沟道改移防治模式

山区泥石流堆积扇常挤占主河道使得主河不断偏移。主河在泥石流沟汇入口上游一般地势较平缓,水动力条件较弱。下游河道纵坡一般大于上游,水流湍急,冲刷强烈。泥石流主沟一般位于扇

体中部,这些区域地势相对平缓,土壤肥沃,多为居民聚居区。泥石流爆发时,部分因为流体浓度太大而沟道纵坡太缓而导致淤积,部分因沟道狭窄过流能力不足而产生漫流,部分因堵主河导致排导困难而向上游渐进式后退淤堵。

考虑到山区泥石流上述特点,针对卿家沟提出另一种“以排为主、拦排结合”的治理模式:在泥石流出口将整个泥石流沟向下游改道,并将原来堆积区的泥石流沟道恢复为农田。采用该排导为主的治理模式,排导槽出口标高低于原自然沟道出口,排导槽纵坡大于原自然沟道,泥石流排导能力更强。改移后的沟道相较于自然沟道,其交汇角大幅减小,且交汇处主河水动力条件强于原交汇处,泥石流堵河的基本要素大部分被消除。针对卿家沟泥石流,仅设置排导槽便可达到治理目标。对于改沟后下游排导能力仍欠佳或物源量过大时,可同时在上游布设拦砂和固源工程,增加治理工程的有效系数。沟道改移模式治理方案,如图 6 所示。



1. 排导槽; 2. 复垦区; 3. 损毁房屋; 4. 房屋; 5. 泥石流堆积扇边界; 6. 等高线, m; 7. 沟(河)道及流向; 8. 前震旦系碧口群中部岩组; 9. 第四系泥石流堆积层

图 6 泥石流沟道改移防治示意图
Fig. 6 Schematic diagram of debris flow channel reconfiguration and prevention

对涪江上游平武段 10 余条典型易堵河型泥石流(主要针对具有冲积扇、河形弯曲且交汇角近于垂直的泥石流)进行实测后,统计结果显示,采用沟道改移防治模式设置的排导工程,其长度较设置于原自然沟道内排导工程短的泥石流沟数量占总数量的

68%,平面长度平均减少约 10%。这一数据表明,沟道改移防治模式在经济性方面具有较好的可行性。

4.3 不同防治模式优缺点

泥石流防治除了考虑防治技术本身的因素以外,亦需要统筹兼顾治理工程的经济性、可实施性等因素。在典型堵河型泥石流致灾模式研究的基础上,探索出的两种治理模式,在治理效果、经济性、征地协调、运营维护、手续办理等方面的对比结果,如表 8 所示。

总体来说,两种治理模式在技术层面上可行性均较高。在治理效果、经济性和运营维护上,堆积区沟道改移防治模式占优;在施工占地协调、耕地占补平衡手续办理方面,中上游拦砂固源、沟口原沟排导模式占优。具体采用何种防治模式,需要综合考量泥石流特性、地形地貌条件、工程地质特征、经济性、既有工程、当地居民意愿和政策导向等系列因素。

表 8 不同泥石流治理模式优缺点对比表

Tab.8 Comparison table of advantages and disadvantages of different debris flow prevention and control models				
治理方案	治理效果	经济性	优点	缺点
中上游拦砂固源、沟口原沟排导模式	拦砂固源条件较好时,两者相当;条件较差时,模式二更优	模式一多设拦砂坝,后期仍需定期清淤。模式二改沟长度一般短于原自然沟道,排导工程长度更小。模式一工程建设和维护成本一般较高	①治理工程几乎不改变原沟道位置和形态; ②治理工程征地协调工作难度小	①工程建设规模大,拦砂坝需定期清淤,工程建设和维护成本较高; ②中上游拦砂固源工程布设条件较差时,仍存在堵河风险; ③交汇角改变幅度小,主河水动力条件差,主河宽度窄,除减少固体物质冲数量外,其余堵河基本要素改变有限
堆积区沟道改移防治模式			①改沟后纵坡较陡,堆积区淤积条件改善; ②改沟后交汇角大幅减小,主河变宽,主河水动力条件更强,泥石流堵塞主河情况得到根本改善; ③改沟方案圪工量小,维护成本低	①改沟可能占用房屋或耕地,拆迁或征地难度较大; ②改沟后需要对原沟道进行复垦,耕地占补平衡手续复杂

5 结论

(1)卿家沟泥石流堆积扇挤占主河道涪江导致河型弯曲,河道狭窄;泥石流物源丰富,水源条件好,泥石流过流量和固体物质冲出量较大;泥石流沟道与主河近乎垂直,主河水动力条件较差。该泥石流为一典型易堵塞主河型泥石流。

(2)典型堵河型泥石流致灾模式主要有主河上游淹没及次生灾害、主河下游洪水及次生灾害、主河岸岸冲蚀和淹没、泥石流沟口渐进式后退淤堵 4 种类型。

(3)针对典型堵河型泥石流提出了两种防治模式:中上游拦砂固源、沟口原沟排导模式和堆积区沟道改移防治模式。两种治理模式在技术层面上可行性均较高,在治理效果、经济性和运营维护上,堆积区沟道改移防治模式占优,在施工占地协调、耕地占补平衡手续办理方面,中上游拦砂固源,沟口原沟排导模式占优。

参考文献 (References):

[1] 杨顺,黄海,田尤,等. 涪江上游泥石流灾损土地资源化利用

模式[J]. 中国地质调查,2019,6(5):124-130.
Yang S,Huang H,Tian Y,et al. Land utilization modes of debris flow disaster areas in the upper reaches of Fujiang River[J]. Geological Survey of China,2019,6(5):124-130.
[2] 张金山,沈兴菊,谢洪. 泥石流堵河影响因素研究——以岷江上游为例[J]. 灾害学,2007,22(2):82-86.
Zhang J S,Shen X J,Xie H. Study on factors affecting the river - blocking due to debris - flow in the upper reaches of Minjiang river[J]. Journal of Catastrophology,2007,22(2):82-86.
[3] 张金山,谢洪. 岷江上游泥石流堵河可能性的经验公式判别[J]. 长江流域资源与环境,2008,17(4):651-655.
Zhang J S,Xie H. Calculation of the possibility of river - blocking due to debris flow in the upper reaches of Minjiang river[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2008,17(4):651-655.
[4] 陈德明,王兆印,何耘. 泥石流入汇对河流影响的实验研究[J]. 泥沙研究,2002,27(3):22-28.
Chen D M,Wang Z Y,He Y. Experimental study on the fluvial process of debris flow discharging into a river[J]. Journal of Sediment Research,2002,27(3):22-28.
[5] 胡卸文,罗刚,王军桥,等. 唐家山堰塞体渗流稳定及溃决模式分析[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(7):1409-1417.
Hu X W,Luo G,Wang J Q,et al. Seepage stability analysis and dam - breaking mode of Tangjiashan barrier dam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(7):1409-1417.

- [6] 刘翠容. 泥石流堵塞大河判据及沿河线减灾对策[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- Liu C R. Criteria of Blocking Large River by Debris Flow and Disaster Reduction Countermeasures in Highways Along Rivers[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [7] 刘志刚, 邢忠信, 王孟科, 等. 震后地质灾害特征与防治研究: 以汶川地震灾区为例[M]. 北京: 地质出版社, 2014.
- Liu Z G, Xing Z X, Wang M K, et al. Characteristics of Post – Earthquake Geological Hazards and Prevention Research: A Case Study of the Wenchuan Earthquake Disaster Area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [8] 四川省水文水资源勘测局. 四川省暴雨统计参数图集[Z]. 成都: 四川省水文水资源勘测局, 2010.
- Sichuan Hydrological and Water Resources Survey Center. Atlas of Statistical Parameters for Rainstorm in Sichuan Province [Z]. Chengdu: Sichuan Hydrological and Water Resources Survey Center, 2010.
- [9] 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 D X, You Y, Chen X Q, 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.
- [10] 中国地质灾害防治工程行业协会. T/CAGHP 006—2018 泥石流灾害防治工程勘查规范(试行)[S]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2018.
- China Geological Hazard Prevention Engineering Industry Association. T/CAGHP 006—2018 Specification of Geological Investigation for Debris Flow Stabilization[S]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2018.
- [11] 郭志学, 曹叔尤, 刘兴年, 等. 泥石流堵江影响因素试验研究[J]. 水利学报, 2004, 35(11): 39 – 45.
- Guo Z X, Cao S Y, Liu X N, et al. Experimental study on parameters affecting the river – blocking due to debris flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(11): 39 – 45.
- [12] 蒋忠信. 震后泥石流治理工程设计简明指南[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2014: 400 – 401.
- Jiang Z X. Concise Guide to the Design of Post – Earthquake Debris Flow Control Engineering [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2014: 400 – 401.
- [13] 何易平. 泥石流对山区河流河床演变的影响[D]. 成都: 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 2003.
- He Y P. The Impact of Debris Flows on the Evolution of Mountain River Beds[D]. Chengdu: Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, 2003.
- [14] 蒋忠信. 震后山地地质灾害治理工程勘查设计实用技术[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2018: 68 – 70.
- Jiang Z X. Practical Techniques for Investigation and Design of Geological Hazard Mitigation Engineering in Mountainous Areas After Earthquakes [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2018: 68 – 70.
- [15] 文强, 胡卸文, 刘波, 等. 四川丹巴梅龙沟“6·17”泥石流成灾机理分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(3): 23 – 30.
- Wen Q, Hu X W, Liu B, et al. Analysis on the mechanism of debris flow in Meilong valley in Danba County on June 17, 2020[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(3): 23 – 30.
- [16] 唐川, 李为乐, 丁军, 等. 汶川震区映秀镇“8·14”特大泥石流灾害调查[J]. 中国地质大学学报: 地球科学版, 2011, 36(1): 172 – 180.
- Tang C, Li W L, Ding J, et al. Field investigation and research on giant debris flow on August 14, 2010 in Yingxiu Town, epicenter of Wenchuan earthquake[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2011, 36(1): 172 – 180.

Cause and prevention model of typical river – blocking debris flow disaster: A case study of Qingjia gully debris flow in Pingwu County

CHEN Pengfei¹, WANG Pei¹, JIANG Xuefeng², WU Ronghua¹, ZHOU Pan¹

(1. Regional Geological Survey Brigade of Sichuan Bureau of Geology, Chengdu Sichuan 610213, China; 2. Sichuan Geological Environment Survey and Research Center, Chengdu Sichuan 610081, China)

Abstract: In order to explore the cause and prevention model of typical river – blocking debris flow disaster, the authors took Qingjia gully debris flow, a typical river – blocking debris flow in the middle and upper reaches of Fu river basin as a study case, and adopted the investigation, field measurement, and comprehensive analysis methods. Four main disaster – causing modes of typical river – blocking debris flow were summarized, including upstream inundation and secondary disaster, downstream flooding and secondary disaster, cross – shore erosion and inundation of the main river, and progressive retreat and siltation in the debris flow channel mouth. Two prevention and control models were proposed based on the fundamental characteristics and disaster – causing mechanisms

of this type of debris flow. The first model is sediment interception and source stabilization in the middle and upper reaches, and original channel diversion at the mouth of the gully. The second model is deposition area channel relocation and control. The results show that both models have high feasibility at the technical level of disaster prevention. This study could offer new perspectives and methods for the prevention and control of river – blocking debris flow disasters, and has significant reference value for the prevention and control of debris flow disasters with similar characteristics.

Keywords: river – blocking debris flow; flooding disaster; dam – break flood; cross – shore erosion; progressive retreat and siltation; prevention and control model

(责任编辑: 刘丹)