

汶川震区哈尔木沟堵河型泥石流灾害特征与防治方法

黄海^{1,2}, 谢忠胜^{1,2}, 石胜伟^{1,2}, 余涛^{1,2}

(1. 中国地质科学院 探矿工艺研究所, 四川 成都 611734; 2. 中国地质调查局 地质灾害防治技术中心, 四川 成都 611734)

摘要: [目的] 分析汶川震区哈尔木沟堵河型泥石流灾害特征, 为堵河型泥石流灾害防治提供借鉴。[方法] 通过震后历次泥石流跟踪调查, 分析哈尔木沟地质环境演变过程。利用雨洪法等计算了泥石流运动特征参数, 并采用经验公式计算了不同频率的泥石流堵河可能性。[结果] 哈尔木沟泥石流流体特性、交汇条件和主河水文条件均有利于泥石流堵河, 4 个经验公式计算均显示, $P=1\%$ (100 年一遇泥石流) 以上规模的泥石流有严重堵河风险。对哈尔木沟治理工程运行情况进行跟踪调查分析, 发现经过 3 个水文年共 7 次泥石流灾害的检验, 治理工程防灾效果明显, 但同时还存在拦挡工程平面布局不合理、坝肩渗流、溢流口淤积、排导槽冲刷损毁等问题, 影响了防治工程的安全可靠度及防灾效果。[结论] 针对哈尔木沟泥石流发育特征, 应通过增设拦挡工程, 修复加固排导槽等方法进行治理。

关键词: 泥石流; 堵塞主河; 活动特征; 防治方法

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)01-0327-06

中图分类号: P642.23

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.01.059

Characteristics and Countermeasures of River-blocking Debris Flow of Haermu Gully in Wenchuan Area After Earthquake

HUANG Hai^{1,2}, XIE Zhongsheng^{1,2}, SHI Shengwei^{1,2}, SHE Tao^{1,2}

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

2. Technical Center for Geological Hazard Prevention and Control, CGS, Chengdu, Sichuan 611734, China)

Abstract: [Objective] To provide reference for disaster prevention and control of river-blocking debris flow of Haermu gully in Wenchuan area after earthquake. [Methods] By in-situ investigation, the changes of geological environment was analyzed systematically based on the formation of debris flows after Wenchuan Earthquake. The possible size of the debris flow under different rain frequencies was studied. We used four experience formulae to evaluate the risk of debris flow. [Results] The characteristics of debris flow, confluence condition and hydrologic condition of main river were conducive to debris flow blocking the river. Calculated by the 4 empirical equations, it was indicated that there was risk of river blocking when $P=1\%$ and above. After the comprehensive treatment for 7 debris flows within 3 years, significant improvement have been achieved. However, issues such as project layout unreasonable, abutment seepage, overflow port siltation, erosion damage to drainage canal still existed. [Conclusion] To solve those issues, we suggested that more check dams need to be built and drainage canal need to be reinforced in the future.

Keywords: debris flow; blocking river; activity characteristics; countermeasures

哈尔木沟为杂谷脑河中游左岸的一级支流, 地处薛城 S 型构造中部核心区域, 沟内次级断裂发育, 据现场调查统计, 共发育 3 条次级断裂。受构造及沟道切割影响, 沟域内岩层破碎, 高陡临空面发育, 沟岸两侧滑坡、崩塌及坡面泥石流发育, 形成丰富的松散固体物源, 具备了泥石流发育的所有条件^[1-2]。近 40 a 来, 哈尔木沟泥石流灾害频发^[3], 曾于 1989 年 6 月 16 日暴发特大规模泥石流, 淤埋沟口农田 2.33 hm²,

冲毁房屋 3 间, 并堵断主河杂谷脑河形成堰塞湖, 回淹区淹没农田 6.70 hm², 冲毁主河右岸国道 G317 路基 300 m, 中断道路 30 d, 造成巨大经济损失^[4]。“5·12”汶川地震后, 哈尔木沟泥石流暴发频率进一步增高, 每年雨季均暴发 2~3 次规模不等的泥石流灾害, 严重危害了木堆羌寨和 G317 国道的安全。

本文通过震后历次泥石流跟踪调查, 综合分析沟域地质环境演变过程, 查明沟域内松散物源分布及稳

收稿日期: 2014-02-26

修回日期: 2014-03-10

资助项目: 中国地质调查局项目“西南山区重大泥石流灾害调查与防治”(12120113011000)

第一作者: 黄海(1984—), 男(汉族), 湖南省醴陵市人, 硕士, 工程师, 从事地质灾害成灾机理和防治技术研究。E-mail: hhai84@163.com。

定性,分析高位滑坡进入沟道形成壅塞体及灾害链的风险,对哈尔木沟泥石流启动机理、动力过程、运动特征参数和震后泥石流灾害特征进行研究,利用 4 种判别指数对堵河风险进行评价,并对防治工程近 3 个水文年的运行现状进行总结分析,提出基于工程损坏情况及防治目标优化方法,以期为汶川震区堵河型泥石流灾害防治提供借鉴。

1 泥石流发育特征

1.1 地质环境背景

哈尔木沟处于青藏高原东部边缘的邛崃山系,属于侵蚀深切河谷地貌区,以中、高山山地和峡谷地貌为主,所在区域新构造运动主要以抬升作用为主,沟道强烈下切,呈“V”字型,形成下部基岩陡立,上部缓坡滑坡发育的沟谷形态。沟域流域面积 6.35 km²,主沟长 4.646 km,沟口海拔 1 665 m,流域最高点海拔 3 610 m,相对高差达 1 945 m,平均沟床纵比降 332.8‰。沟谷以山地和峡谷地貌为主,区内新构造运动主要以抬升作用为主,沟道强烈下切,呈“V”型,形成下部基岩陡立,上部缓坡滑坡发育的沟谷形态。流域形态呈树叶状,流域完整系数 $\delta=0.3009$,相对切割程度 $h'=0.432$,高程—面积积分值 $H=0.5361$,地貌信息熵 $S=0.1595$,表明该流域发育较完整,沟谷地貌处于壮年(偏幼)期^[2],具有良好的汇流条件,对泥石流的形成有利。

哈尔木沟沟域内的新构造运动受薛城 S 型构造控制,压扭性弧形断层较发育,褶皱紧密,地层岩性简单,以泥盆系危关群和志留系茂县群的千枚岩、砂岩为主,河谷两侧斜坡主要覆盖有残坡积层,左岸覆盖层厚度约 5—15 m,右岸覆盖层厚度约 10—35 m。受构造和沟谷下切作用共同影响,沟域内松散物质储量丰富,沟道泥沙补给长度 56.5%。

据 2009 年调查,哈尔木沟泥石流形成区共有滑坡崩塌 14 处、坡面泥石流 6 条、堵塞沟道堰塞体 1 处,滑坡崩塌体积约 4.61×10^6 m³,坡面泥石流堆积 2.72×10^4 m³,沟道老泥石流堆积 1.85×10^4 m³,总计固体物源 4.65×10^6 m³,可能参与泥石流活动的动储量约 2.09×10^6 m³。

1.2 地震对哈尔木沟的影响

“5·12”汶川大地震主要影响沟域内的地表表生过程,表现为松散固体物质增多、沟谷微地貌条件改变和沟域汇水条件变化^[5]。哈尔木沟对地震的相应主要表现为松散物源增多和沟道堵塞加剧。

物源增多是沟域内最为直观的地表变化,导致震后泥石流活动激发临界降雨条件降低,泥石流活动频率增大,灾害规模增大,活跃期限增长^[6-9]。地震直接诱发崩塌、滑坡、泥石流等次生灾害是造成哈尔木沟内松散物源急剧增加的最重要因素,哈尔木沟震后新增可参与泥石流活动的松散物质储量 1.19×10^6 m³,占总物源的 56.7%(表 1)。

表 1 哈尔木沟中型以上崩塌滑坡物源特征统计结果

物源编号	规模/m	形成时间	补给方式	现状稳定性	预计参与泥石流规模/10 ⁴ m ³
滑坡①	357×360×10	199607	整体滑动	欠稳定	16.0
滑坡②	127×320×8	199806	前缘解体	欠稳定	8.5
滑坡③	85×450×5	199806	前缘解体	欠稳定	27.0
滑坡④	220×480×10	199806	整体滑动	欠稳定	10.0
崩塌⑤	55×150×5	200805	沟道切蚀、侧蚀	基本稳定	3.5
滑坡⑥	260×470×7	200805	整体滑动	欠稳定	43.5
滑坡⑦	230×150×15	200805	整体滑动	欠稳定	16.5
滑坡⑧	380×320×10	199806	整体滑动	欠稳定	18.0
滑坡⑨	270×100×25	200805	整体滑动	欠稳定	25.0
滑坡⑩	260×110×10	200805	前缘局部解体	基本稳定	5.0

同时地震造成坡面覆盖层土体结构更加松散,基岩裂隙扩张,为后期滑坡、崩塌等灾害提供有利条件,哈尔木沟内现堵沟风险最大的 H03 高位滑坡即为受地震影响,是在 2008 年 7 月在暴雨作用下形成的(如图 1 所示)。沟谷地貌条件的变化改变了泥石流输移过程中的运动学状态。

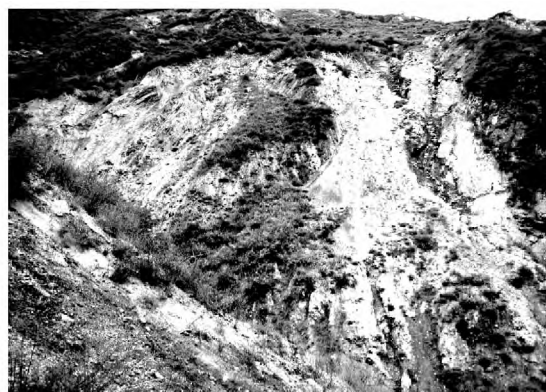
哈尔木沟两侧受地震影响,发育大量崩塌、滑坡和坡面泥石流,松散堆积体进入沟道后,造成沟道堵塞,完全堵塞沟道将抬高沟床面,减小淤积段沟床纵比降,块石较多时还可能形成跌坎,对泥石流在沟道中运动时造成消能作用(图 2a),半堵塞则挤占沟道过流断面(图 2b)。此外受地震后泥石流暴发规模和

频率均增大的影响,泥石流运动过程对沟床冲刷淤积作用强烈,主要表现为泥石流堆积物在串珠状沟道的

宽缓段淤积严重,形成侧积垄,抬高沟床侵蚀基准面和减小沟道过流断面。



a 典型高位滑坡



b 滑坡演化成的坡面泥石流

图 1 泥石流形成区地震诱发的典型滑坡



a 左岸滑坡半堵塞沟道



b 左岸崩塌堵塞沟道

图 2 哈尔木沟两岸滑坡崩塌堵塞沟道

哈尔木沟沟域内发育不良地质现象共 23 处,造成沟道全堵塞 7 处,包含崩塌 1 处,滑坡 5 处,坡面泥石流 1 处,对沟道造成半堵塞的灾害点 15 处。沟内的堵塞体急剧增加导致沟道内松散物质增加,泥石流“滚雪球”效益较震前更显著,同时,堵塞体对沟内泥石流输移过程将产生堵溃放大效应,增大泥石流峰值流量,因此,沟道条件的变化是震后哈尔木沟泥石流规模和频率均增大的重要原因。

1.3 泥石流活动情况

哈尔木沟泥石流形成的主要原因是:沟内发育大量滑坡,前缘进入沟道后在流水侧蚀作用下解体,松散土体进入沟道内,堵塞沟道形成堵塞体,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^[10],形成大规模泥石流灾害。根据调查访问,哈尔木沟曾于 1989 年 6 月暴发大规模泥石流。据中国科学院成都山地

灾害与环境研究所的调查记录^[4],泥石流一次冲出量达 $2.50 \times 10^5 \text{ m}^3$,重度达 2.21 t/m^3 ,沟口流速为 2.79 m/s ,具有典型黏性泥石流特征。泥石流体运动至沟口堆积扇后,沿沟道淤积,沟床一次抬高 $2 \sim 3 \text{ m}$,最大处淤积高度达 5.0 m 。泥石流进入主河后,由于流体结构性强,抵抗主河洪水稀释能力强,从而逐步挤压杂谷脑河过流断面,直至全部堵塞形成堰塞湖,造成主河右岸 G317 国道 300 m 余的路基冲毁,道路中断 3 个月,堰塞湖上游回淹长度约 400 m。自此,哈尔木沟泥石流灾害进入活跃期,每 $3 \sim 5 \text{ a}$ 暴发一次泥石流,规模不等。

汶川地震后,哈尔木沟泥石流暴发频率进一步提高,仅 2008 年 7—9 月就暴发了 4 次泥石流,2009—2013 年共暴发了 12 次泥石流,泥石流活动规模不等,最大为 2012 年 7 月,一次冲出固体物质总量 $3.56 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。最小为 2011 年 6 月,一次冲出固体物质总量约 600 m^3 。

通过调查统计,震后参与泥石流活动的固体物质总量 $1.50 \times 10^5 \text{ m}^3$,其中累计冲出固体物质 $4.68 \times 10^4 \text{ m}^3$,其他固体物质沿沟道堆积,为下一次泥石流灾害提供沟床补给物源。

1.4 泥石流流体特征

哈尔木沟沟域内地层岩性较为单一,主要为志留系和泥盆系的千枚岩、板岩,覆盖层以残坡积碎石土为主,含大块石相对较少。为了确定哈尔木沟泥石流的性质,对震后哈尔木沟爆发的最大规模的泥石流分别采集了堆积物样品,颗粒分析结果如图 3 所示。

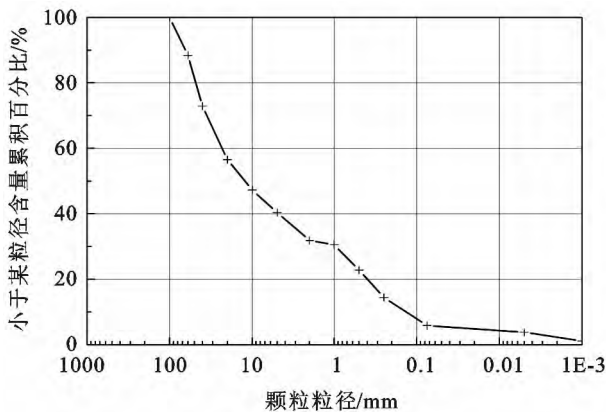


图 3 哈尔木沟震后泥石流样品颗粒级配

原始泥石流堆积物的颗粒分析表明,哈尔木沟泥石流堆积物中,黏粒($<0.005 \text{ mm}$)含量为 $3.84\% \sim 4.00\%$,含量较高,综合震前震后的多次历史泥石流调查,确定哈尔木沟发育的泥石流重度为 $1.95 \sim 2.25 \text{ g/cm}^3$ 。

对比震前可知,沟内泥石流土力条件变化极大,震后泥石流重度相对震前略高。重度变大与沟内松散物源量增多密切相关,主要原因是地震诱发了多处崩塌,增加了流域内大块石补给,同时松散物质中细颗粒含量增多,导致泥石流的粘度系数和侵蚀搬运能力剧增^[11-12]。

2 泥石流运动特征分析

2.1 不同降雨频率下泥石流流量

利用雨洪法计算泥石流的流量:

$$Q_C = (1 + \varphi) Q_P \times D_C \quad (1)$$

式中: Q_C ——频率为 P 的泥石流峰值流量(m^3/s); Q_P ——频率为 P 的暴雨洪水流量(m^3/s); φ ——泥石流泥沙修正系数, $\varphi = (\gamma_C - \gamma_w) / (\gamma_H - \gamma_C)$; γ_C ——泥石流重度(kN/m^3); γ_w ——清水的重度(kN/m^3); γ_H ——泥石流中固体物质比重(t/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。泥石流的流量计算结果见表 2。

表 2 雨洪法泥石流计算结果

频率/ %	洪水流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	泥石流 重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	泥石流 堵塞 系数	泥石流峰 值流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
1	26.87	2.10	3.5	241.83
2	22.41	2.06	3.0	188.02
5	17.99	1.96	2.8	120.45
10	15.21	1.90	2.5	83.66

2.2 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^[13],通过断面一次泥石流的总量 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:

$$W_S = W_C (\gamma_C - \gamma_w) / (\gamma_H - \gamma_w) \quad (3)$$

据公式(2)和(3),可计算该沟一次泥石流总量和相应的固体物质总量(表 3)。

表 3 哈尔木沟全流域不同降雨频率一次泥石流暴发总量预测

频率/ %	泥石流峰值 流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	泥石流 总量/ 10^4 m^3	泥石流固体 物质总量/ 10^4 m^3
1	241.83	30.63	20.42
2	188.02	17.86	11.47
5	120.45	7.63	4.44
10	83.66	3.97	2.17

3 泥石流堵河风险分析

3.1 泥石流与主河交汇条件

(1) 入汇角。泥石流入汇主河一般有 3 种形式:锐角入汇、直角入汇、钝角入汇,尤以前两种形式为多见^[14]。据张金山等^[15]的研究,3 种交汇形式堵塞主河可能性为:锐角入汇 \leq 直角入汇 \leq 钝角入汇。锐角入汇时,主河水流与入汇后的泥石流体运动方向一致,主河增加泥石流运动动能,并减小汇合后流体内部能量损耗,增大泥沙输移力,泥沙沉降形成堆积体体积较小,即堵塞主河的可能性相对较小。另外两种情况则相反,泥石流入汇后顺河向流速分量为负值或为零,增加了主河流体内部能量耗散,减小泥沙输移力,泥沙沉降速度加快^[16],较易形成堆积体,增加

堵塞主河可能性。哈尔木沟自然沟道与杂谷脑河的交汇角为 85°, 近似直角交汇, 属较易堵塞主河情况。汶川地震后, 已对哈尔木沟泥石流进行工程治理, 沟口修建排导工程, 现状排导槽的入汇角为 70°, 入汇条件较天然沟床有所改善, 但仍属较易堵塞主河的入汇条件。

(2) 流量比。流量比指汇入口泥石流流量与主河洪水流量之间的比值, 有文献也称为汇流比^[17]。流量比(R)主要影响泥石流进入主河后的堆积形态和规模, 是泥石流堵河的关键因素之一。哈尔木沟泥石流堵河预测计算中, 泥石流峰值流量与设防标准密切相关, 拟采取泥石流重现频率为 1%, 2% 和 5% 进行计算; 主河杂谷脑河的洪水流量采取主河汛期多年平均流量。计算结果如表 4 所示。

表 4 流量比计算统计

序号	泥石流重现频率/%	泥石流流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	主河流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	流量比
1	1	241.83	—	1.96
2	2	188.02	123.26	1.53
3	5	120.45	—	0.98

3.2 堵河可能性判别

泥石流堵河与否取决于泥石流与主河的交汇条件, 包括泥石流运动物理特征、主河水文条件以及交汇处的空间状态等。前人对堵河判别的公式开展了大量工作(表 5), 张金山等^[15]和唐川等^[18]通过分析

川西地区堵河型泥石流总结出经验公式^[15]:

$$R = \frac{PQ_n J_n}{K_z Q_z J_z} \quad (4)$$

$$Z = \frac{2KQ_n \gamma_n \beta}{K_z Q_z} \quad (5)$$

式中: R ——泥石流堵塞度; P ——泥石流暴发频率; K_z ——堆积区主河宽度(km); Q_n ——泥石流流量(m^3/s); Q_z ——主河流量(t/m^3); J_n ——泥石流沟比降; J_z ——主河比降; Z ——泥石流堵河判别值; K ——修正系数(取值范围 1.0~1.5); γ_n ——泥石流容重(t/m^3); β ——石流沟与主河顺流方向夹角($^\circ$)。

崔鹏等^[19]通过室内试验分析了堵河条件中动量比和流量比, 得到了泥石流堵河的动量 C_M 和流量 C_F 判别式:

$$C_M = \ln \frac{Q_M V_M}{Q_B V_B} - 1.189(1 - \cos\theta)^2 - \quad (6)$$

$$3.677 \frac{\gamma_m}{\gamma_w} \leq -12.132$$

$$C_F = \ln \frac{Q_M}{Q_B} - 0.883(1 - \cos\theta)^2 - \quad (7)$$

$$2.587 \frac{\gamma_m}{\gamma_w} \leq -8.527$$

式中: Q_B ——泥石流流量(m^3/s); Q_M ——主河流量(m^3/s); V_B ——泥石流表面流速(m/s); V_M ——主河洪水流速(m/s); θ ——交汇角($^\circ$); γ_w ——清水容重(t/m^3); γ_m ——泥石流容重(t/m^3); β ——石流沟与主河顺流方向夹角($^\circ$)。

表 5 4 种堵河判别公式计算分析

序号	堵河判据	设计洪水频率/%	参数计算值			堵河可能判据
			工程治理前	工程治理后	工程治理效果/%	
1	动量指标	1	-12.325	-9.767	79.25	≤ -12.132
		2	-9.571	-7.876	82.29	
2	流量指标	1	-8.932	-7.065	79.10	≤ -8.527
		2	-7.346	-5.992	81.57	
3	堵塞度	1	53.417	41.348	77.41	≥ 10
		2	20.766	17.043	82.07	
4	堵河判别值	1	1.437	1.074	74.74	≥ 1
		2	1.096	0.795	72.50	

计算结果表明, 天然沟床条件下, $P=1\%$ 的频率的泥石流堵河可能性大, 而小于 100 a 的重现期的泥石流堵断主河的可能性均较小。计算结果与哈尔木沟泥石流暴发历史基本吻合, 哈尔木沟泥石流最近一次完全堵塞主河杂谷脑河为 1989 年, 该次泥石流暴发频率超过 100 年一遇, 而此后多次爆发的泥石流灾

害均未完全堵塞主河, 主要表现为堆积区挤占主河过流断面, 杂谷脑河河床宽度由 1989 年的 15.9 m 演变为 2013 年的 8.9 m。

同时, 对比分析工程治理前后的泥石流堵塞主河可能性计算结果, 工程治理后的堵河参数下降 20%~30%, 堵河可能性均由堵塞主河下降为堵河可能性

较小(张金山公式堵塞度仍然较大)。结合哈尔木沟泥石流暴发情况,工程竣工后,共经历 6 次泥石流灾害,对主河影响较小,工程治理效果明显。

4 泥石流防治对策及工程运行情况

4.1 防治工程概况及效果

“5·12”汶川地震后,在相关主管部门主持下,对哈尔木沟泥石流进行了工程治理,共布置了四道实体拦砂坝,350 m 长的排导槽。

哈尔木沟泥石流治理工程对泥石流灾害的影响主要表现为:拦挡泥沙、调节峰值流量、加大沟口输移能力、调节泥石流入汇角度等。工程竣工后的 7 次泥石流灾害对沟口未造成危害,对杂谷脑河主河影响较小,未造成堵塞,主河淤积高度仅 0.15 m。

4.2 防治工程存在问题及对策

泥石流治理工程竣工后,历经 3 个水文年,共 7 次泥石流灾害的考验。工程措施目前存在 3 方面的问题。

(1) 上游 1# 拦砂坝和 2# 拦砂坝间距过小,2# 拦砂坝的回淤高度高于 1# 拦砂坝溢流口,其拦挡效益全部失效。主要原因为设计回淤纵比降比实际回淤纵比降小。(2) 2# 拦砂坝坝肩渗流造成坡体变形。2# 拦砂坝右岸为基岩山坡,右岸为松散堆积体。拦砂坝修建运行后,库区黏性泥石流堆积物渗透性差,将坝体的泄水孔堵塞。泄水孔与溢流口之间蓄满深 2.1 m 的静水,蓄水从左岸坡体内产生渗流,造成坡体变形。(3) 排导槽工程冲刷破坏,主要集中在急流槽的中心。为保证对黏性泥石流的输移能力,排导槽断面设计为“V”型槽。经实践证明,排导槽对黏性泥石流的排导能力满足设计要求,但同时造成了常年流水及高含沙水流流速过快,冲刷能力超出混凝土的抗磨蚀能力,水流集中地中心线冲刷严重。

基于哈尔木沟的危害特征及泥石流物理特性,可对哈尔木沟泥石流防治体系进行调峰、防冲刷等优化。具体优化措施为:① 中游滑坡集中段沟道设置谷坊群固源,减小泥石流发生堵溃产生放大效益增大峰值流量;② 沟谷宽缓段增加开放式拦挡工程对泥石流消能,减小流体动能;③ 排导槽优化槽底防冲刷设计,增加防冲肋槛、换填抗磨能力强的材料等。

5 结论

(1) 哈尔木沟自 1989 年进入泥石流活跃期,多次暴发泥石流堵塞主河,主河河床宽度由 15.9 m 减小为 8.9 m,缩减幅度达 44%,多年观测结果表明,哈尔木沟输沙量远大于主河杂谷脑河的输沙能力。

(2) 受“5·12”汶川地震影响,可参与泥石流活动的固体物源增加了 $1.19 \times 10^6 \text{ m}^3$,占总物源的 56.7%。岸坡失稳造成大量土体进入沟道,严重堵塞沟道,降低了泥石流启动的临界条件,并对泥石流峰值流量的放大效应明显,表现为震后泥石流暴发频率和活动规模大大增加。

(3) 计算分析显示,哈尔木沟暴发 $P=1\%$ 以上规模的泥石流将严重堵塞甚至堵塞主河, $P=2\%$ 以上规模的泥石流部分堵塞主河,挤压主河行洪断面。对泥石流进行“以排为主,拦挡调峰”工程治理后,堵河可能性降低 20%~30%,治理工程有效减小了堵河风险。

(4) 通过 3 个水文年 7 次泥石流检验,哈尔木沟泥石流的“以排为主、辅以拦挡工程调峰”的治理思路可行,工程达到了预期治理效果。在泥石流作用下,工程结构出现了局部损毁的现象,可通过优化工程结构型式、更换建筑材料等方式进行修复。同时,可基于现有的治理思路,在工程地质条件较好的沟道段增设调峰、固坡工程,增大泥石流的安全储备,以应对日益频繁的极端天气。

[参 考 文 献]

- [1] 孟国才,王士革,谢洪,等. 岷江上游泥石流灾害特征分析[J]. 灾害学,2005,20(3):94-98.
- [2] 陈晓清,崔鹏,赵万玉. 汶川地震区泥石流灾害工程防治时机的研究[J]. 四川大学学报:工程科学版,2009,41(3):125-130.
- [3] 黄海,石胜伟,谢忠胜. 杂谷脑河下游坡面泥石流发育特征及防治对策[J]. 水土保持研究,2013,20(6):111-116.
- [4] 谢洪,韦方强,钟敦伦. 哈尔木沟泥石流形成剖析[C]// 第四届全国泥石流学术讨论会论文集. 兰州:甘肃文化出版社,1994:214-220.
- [5] 黄海,石胜伟,谢忠胜,等. 杂谷脑河流域暴雨型泥石流沟地貌特征分析[J]. 水土保持通报,2012,32(3):203-207.
- [6] 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:工程科学版,2010,42(5):10-19.
- [7] 余斌,谢洪,王士革,等. 汶川县泥石流沟在汶川“5·12”地震后的活动趋势[J]. 自然灾害学报,2012,20(6):68-73.
- [8] 游勇,柳金峰. 汶川 8 级地震对岷江上游泥石流灾害防治的影响[J]. 四川大学学报:工程科学版,2009,41(1):16-22.
- [9] 马东涛,石玉成. 试论地震在泥石流形成中的作用[J]. 西北地震学报,1996,18(4):38-42.

(下转第 337 页)

业结构的调整,丰富了农民收入方式,促进了当地经济发展,对农民生活状况在一定程度上起到了改善作用。第二,就农村经济的可持续发展来说,涑水县农村产业结构和农业内部结构还不完善,种植业、牧渔业对农村经济贡献较少,有待进一步优化升级,与农村经济关联度较低的产业是今后涑水县产业调整的主要方向。

为了巩固退耕成果,促进农村经济的改善,针对当前问题提出有关建议:首先,加大智力扶贫、技能致富的投资力度,提高农民的就业能力,尤其是非农就业能力,依托当地丰富的旅游资源,发展餐饮、住宿及配套产品深加工,提升从业人员整体素质与旅游行业服务水平。其次,加大农业扶持力度,稳定农业中各生产要素的关系。通过稳定粮食价格,提高农民的种粮积极性,控制种子、化肥、农药、农业机械的价格,降低农民的生产成本,兴建水利设施、道路等基础设施方便农业生产。第三,抓特色产业,力促资源和产业优势向经济优势转化。旅游玻璃器皿、矿产、建材和工艺品是涑水县颇具特色的 4 大骨干产业,可通过产业集群与产业深化,推动集群发展,努力完善产业链条,以特色产业带动地方经济发展,提高农民生计水平。

[参 考 文 献]

- [1] 张红霞,赵武军,余劲. 退耕还林政策对陕北农户收入影响的实证分析:基于米脂县 339 个农户的调查[J]. 商洛学院学报,2012,26(4):37-40.
- [2] 侯军岐,王亚红. 退耕还林对西部经济发展的影响及对策分析[J]. 干旱地区农业研究,2002,20(4):116-119.
- [3] 谢旭轩,张世秋,朱山涛. 退耕还林对农户可持续生计的影响[J]. 北京大学学报:自然科学版,2010(3):457-464.
- [4] 张贵军,张蓬涛. 环京津贫困地区基于退耕的土地利用变化及其与经济发展关系研究[J]. 林业经济问题,2010,30(4):298-303.
- [5] 李晓明,梅莹,牛栋瑜. 退耕还林工程效益评价与对策建议:以合肥市郊区三县为例[J]. 林业经济问题,2007,27(3):243-248.
- [6] 易福金,徐晋涛,徐志刚. 退耕还林经济影响再分析[J]. 中国农村经济,2006(10):28-36.
- [7] 何家理,秦巴山区退耕还林实践经验对后续产业发展的启示:基于陕川鄂 3 省退耕还林效果与后续产业的调查[J]. 山地学报,2012,30(3):257-263.
- [8] 郭欢欢,李波,于海跃,等. 退耕还林工程对农户生产生活影响研究[J]. 中国人口资源与环境,2012,21(12):110-114.
- [9] 聂森,谷建才,杨玉梅,等. 退耕还林工程项目区产业结构变化趋势分析[J]. 林业经济,2011(3):65-67.
- [10] 孙芳,章杏杏,孟凡艳. 政府退耕补贴行为对农牧交错带农户收入的影响[J]. 林业经济问题,2008,27(5):394-397.
- [11] 李朝甫,徐迎,谭跃虎,等. 灰色系统理论在滑坡位移信息分析中的应用[J]. 系统工程理论与实践,2001(2):129-132.
- [12] 吴志伟,胡远满,陈文波. 基于 GIS 技术的土地利用效益评价研究[J]. 水土保持研究,2011,18(2):75-79.
- [13] 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.
- [14] 崔鹏,韦方强,谢洪,等. 中国西部泥石流及其减灾对策[J]. 第四纪研究,2003,23(2):142-151.
- [15] 张金山,沈兴菊,谢洪. 泥石流堵江影响因素研究:以岷江上游为例[J]. 灾害学,2007,22(2):82-86.
- [16] 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京:科学出版社,1983:189-210.
- [17] 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,2002,6(3):22-28.
- [18] 唐川,黄润秋,黄达,等. 金沙江美姑河牛牛坝水电站库区泥石流对工程影响分析[J]. 工程地质学报,2006,14(2):145-151.
- [19] 郭志成,李绰芬,马藹乃. 中国泥石流研究[M]. 北京:科学出版社,2004:32-38.
- [20] 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(11):39-45.
- [21] 崔鹏,何易平,陈杰. 泥石流输沙及其对山区河道的影响[J]. 山地学报,2006,24(5):539-549.

(上接第 332 页)