

doi:10.19509/j.cnki.dzkq.2019.0326

鲁道洪,王维早,吴亚子.黄土梁滑坡型泥石流 2[#]沟工程治理及效果评价[J].地质科技情报,2019,38(3):244-249.

黄土梁滑坡型泥石流 2[#]沟工程治理及效果评价

鲁道洪¹, 王维早², 吴亚子³

(1.四川路博士土木工程勘察设计院有限公司, 四川 绵阳 621000; 2.河北地质大学, 石家庄 050031;
3.中国化学工程第一岩土工程有限公司, 河北 沧州 061001)

摘要:目前对谷坊、拦砂坝、排导槽等治理措施研究较多,但对滑坡型泥石流的治理研究较少。2008年9月24日,四川省北川县陈家坝乡黄土梁发生特大滑坡,诱发其下游的2[#]沟发生特大泥石流,导致沟口103国道被掩埋,堵塞都坝河。为防止泥石流再次发生,对2[#]沟泥石流进行了工程治理及治理效果评价。治理措施采用“2[#]沟中游4座浅拦坝+2[#]支沟中游3座浅拦坝+下游起点设置总长34.7 m束流堤,总长156.4 m排导槽,终点设置总长22.1 m导流堤,排导槽与103国道相交处,采用桥梁工程跨越排导槽”,中游和下游统筹的治理方案,并分析了各分项治理工程的作用。与2008年9月24日暴雨相比,2013年8月7日和2016年7月21日2次强降雨活动未发生泥石流灾害,验证了黄土梁2[#]沟泥石流防治工程效果较好,为类似滑坡型泥石流工程防治提供了参考。

关键词:滑坡型泥石流;工程治理;效果评价;黄土梁

中图分类号:P642.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-7849(2019)03-0244-06

Engineering Measures and Their Effect for Mobilization of Debris Flow from Landslides at Huangtuliang 2[#] Stream Valley

Lu Daohong¹, Wang Weizao², Wu Yazi³

(1.Sichuan Road Doctor Civil Engineer Survey Design Co., Ltd, Mianyang Sichuan 621000, China;

2.Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China;

3.China Chemical Engineering First Geotechnical Engineering Co., Ltd, Cangzhou Hebei 061001, China)

Abstract: Engineering measures such as dams, barrier dams, and guide grooves in certain catchments are studied extensively in China. However, few studies are reported on control measures mobilization of debris flow from landslides. An extremely large landslide occurred on September 24, 2008 in Huangtuliang of Beichuan County, Sichuan Province. This landslide caused a massive debris flow in the downstream 2[#] ditches, burying the G103 national highway in the Mizoguchi, and blocking the Duba River. In order to prevent the debris flow from happening again, engineering measures and effects valuation were adopted in 2[#] ditches. The control measures are four shallow bank dams in the midstream of 2[#] ditch, three shallow bank dams in the middle of 2[#] branch ditch, 34.7 m beam embankment at the downstream starting point, 156.4 m row of guide troughs, and 22.1 m diversion dike at the end point. The intersection of the trough and No.103 national highway is bridge construction across the guide troughs. The overall plan is made for the treatment of the middle and lower reaches of the river and the role of the various sub-projects is analysed. Finally, the prevention of debris flow disasters caused by two heavy rainfall events by the use of "2008-09-24" and "2013-08-07" and "2016-07-21" verifies the better effect of the 2nd gully debris flow con-

收稿日期: 2018-06-28 编辑: 杨 勇

基金项目: 河北省自然科学基金项目(D2015403033; E2016403060)

作者简介: 鲁道洪(1979—),男,高级工程师,主要从事地质灾害防治与地质环境保护研究工作。E-mail: 732399056@qq.com

通信作者: 王维早(1976—),男,副教授,主要从事地质灾害防治与地质环境保护研究工作。E-mail: wangvz2005@126.com

trol project of the Huangtuliang. This study provides reference for similar landslide debris flow engineering control.

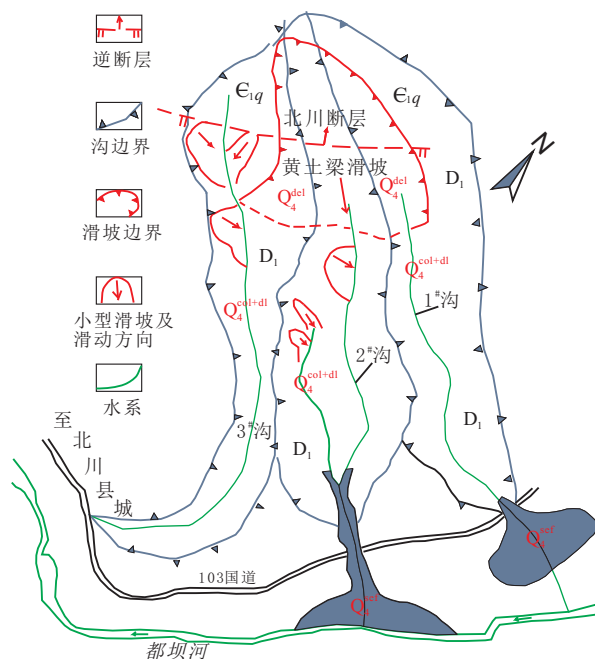
Key words: debris flow mobilization from landslide; engineering measure; evaluation; Huangtuliang

滑坡在一定条件下可转化为泥石流^[1-2],滑坡型泥石流具有滑坡和泥石流的一些特征,具备很强的快速运移泥沙石块的能力^[3-10]。2008年9月24日,四川省北川县陈家坝乡黄土梁发生特大滑坡,诱发其下游的2[#]沟发生特大泥石流,其物源主要来源于上游的黄土梁滑坡。冲出泥石流固体物质总量为 $2.08 \times 10^4 \text{ m}^3$,导致沟口103国道被掩埋,堵塞都坝河(图1)。

当前,对泥石流治理的工程措施主要为谷坊、拦砂坝、截流沟、排导槽、挡土墙等^[11-14]。国内学者对谷坊、拦砂坝、截流沟、排导槽等治理措施研究较多^[15-18],取得了很大的突破,但对滑坡型泥石流的治理研究较少^[19-22],笔者拟分析黄土梁滑坡型2[#]泥石流沟的基本特征^[23],对该泥石流沟提出综合工程治理措施,并分析治理所达到的效果,为其他滑坡型泥石流沟的治理工程提供一定参考。

1 流域特征

黄土梁滑坡位于四川省北川县陈家坝乡西河村4社,地理坐标:31°54′7.2″N, 104°33′48.5″E。距北



Q_4^{del} 第四系全新统泥石流堆积层; Q_4^{del} 第四系全新统滑坡堆积层;
 $Q_4^{\text{col+dl}}$ 第四系全新统崩塌堆积层; D_1 下泥盆统; ϵ_{1q} 下寒武统清平组

图1 黄土梁滑坡及其下游3条泥石流沟关系平面示意图

Fig.1 Schematic diagram of the relationship between the Huangtuliang landslide and its three downstream debris flow channel

川老县城约16 km,距陈家坝场镇约6 km,103国道从勘查区通过。

根据区域资料及现场踏勘调查,北川断层从勘查区斜坡后缘处通过。受北川断层活动影响,区内松散物源丰富,特别是受5·12汶川特大地震的影响,松散层进一步松动、变形,甚至发生滑坡滑塌,主要发育黄土梁大型滑坡1处及浅层小型滑坡6处,滑动物质堆积于斜坡及沟床内,为泥石流的形成提供了较为丰富的物源,并在“9·24”暴雨的作用下,斜坡处3条冲沟爆发泥石流(分别为1[#]沟、2[#]沟、3[#]沟)(图1)。黄土梁滑坡为3条泥石流沟提供物源,威胁着罗家院子安置点及周边居民的安全。

2[#]沟为季节性冲沟,发源于黄土梁滑坡中部,汇入都坝河,汇水面积约0.13 km²,主流方向128°,发育高程633~1 132 m,高差499 m,沟道全长约1.13 km,支沟长0.33 km/条,主沟平均纵坡降约365‰,沟道整体呈上陡下缓的形状(图2)。2[#]沟平面流域形态呈“口袋”状(图1),沟道总体上较顺直,基本无大而急的弯道,“口袋”状的流域形状非常有利于泥石流的发生。

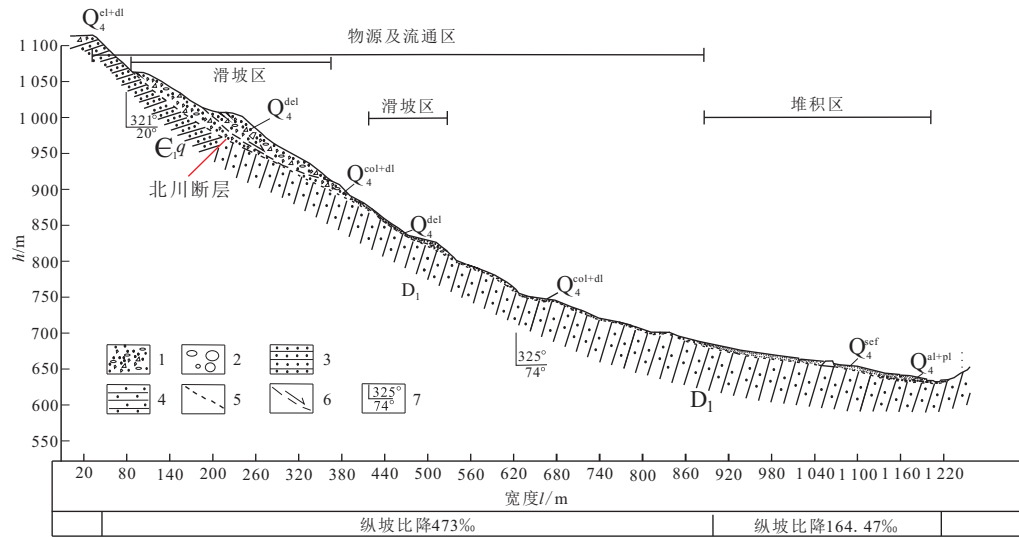
根据该泥石流的发育现状和形成特点,将2[#]沟域划分为泥石流物源及流通区、堆积区。

(1)泥石流物源及流通区特征 物源及流通区分布范围高程在680~1 132 m间,沟长约0.89 km,沟底宽3~7 m,汇水面积约0.15 km²,沟道纵坡比降约384‰,沟向128°,沟谷形态由呈“V”型,沟谷两岸地形坡度40°~50°。

据现场调查,5·12地震后,沟岸两侧坡体松动,滑坡不良地质体发育,为泥石流暴发提供了丰富的物源。特别是沟源发育黄土梁滑坡,其为该泥石流沟的主要物质来源,是致灾的主体因素。在强降雨作用下,滑坡堆积体、小型坡面泥石流的冲积物将会进入沟道,为泥石流提供物源。

该沟另发育4处小型浅层滑坡(H_1 、 H_2 、 H_3 、 H_4),该泥石流沟松散固体物源除黄土梁滑坡及4个小型滑坡外,还有沟道两岸斜坡松散物质,以上固体物质储量概算为 $122.70 \times 10^4 \text{ m}^3$ (表1)。

参加泥石流活动的松散固体物质储量可能由4部分构成;第一部分是沟源滑坡体可能汇入该沟的动储量;第二部分是可能被侧蚀、底蚀的物质储量;第三部分为上次泥石流暴发时产生的侧蚀、底蚀后形成的陡立土质岸坡,发生滑塌直至达到自稳休止角,其物源堆积于沟内,成为泥石流物源;第四部分



Q_4^{al+dl} .全新统残坡积层; Q_4^{al+pl} .全新统冲洪积层;1.碎石土;2.卵石土;3.石英砂岩;4.粉砂岩;5.推测地层界线;6.推测滑动面;7.岩层产状

图 2 黄土梁 2# 泥石流沟纵剖面图

Fig.2 Profile view of 2# debris flow ditch in Huangtuliang

表 1 松散固体物质储量概算

Table 1 Budgetary statements of reserves for loose solid substances

序号	物源	面积/ 10^4 m^2	平均厚度/m	储量/ 10^4 m^3
1	黄土梁滑坡于该沟域内物源分量	2.40	15	36.00
2	H ₁ 滑坡	0.99	8	7.92
3	H ₂ 滑坡	0.50	4	2.00
4	H ₃ 滑坡	1.36	5	6.80
5	H ₄ 滑坡	0.19	2	0.38
6	沟道两岸物源	11.60	6	69.60
合计				122.70

是在暴雨作用下(水土流失)坡面流水冲蚀形成物。总计为 $52.58\times10^4\text{ m}^3$ (表 2)。

(2)泥石流堆积区特征 据现场调查,该沟于“9·24”暴雨作用下,暴发泥石流,堆积区分布范围高程在 633~680 m 之间,相对高差 47 m,长 299 m,呈扇状,扇扩散角约 150° ,扇缘宽约 240 m,面积约 $1.9\times10^4\text{ m}^2$,地形较平缓,平均坡度约 10° ,沟道纵比降平均为 164.5‰,堆积层厚度 0.5~3.5 m,物质以碎石土为主,粗粒成分主要为砂岩,大小混杂堆积,主要粒径范围为 5~20 cm,最大粒径可达 0.9 m,堆积量约 $0.87\times10^4\text{ m}^3$ 。由于受泥石流堆积作用,地表植被稀少。

表 2 后期参与泥石流活动的松散固体物质储量概算

Table 2 Budgetary statements of loose solid substances participating in debris flow activities in the later period

物源类型		固体物质储量/ 10 ⁴ m ³	可能参与泥石流活动的固体 物质动储量/10 ⁴ m ³	已参与“9·24”泥石流的 物源量/10 ⁴ m ³	后期参与泥石流活动的固体 物质储量/10 ⁴ m ³
滑坡体可能汇入 该沟的动储量	黄土梁滑坡	36.00	32.40	0.52	31.88
	H ₁ 滑坡	7.92	4.75	0.06	4.69
	H ₂ 滑坡	2.00	1.60	0.03	1.57
	H ₃ 滑坡	6.80	5.40	0.04	5.36
	H ₄ 滑坡	0.38	0.30	0.01	0.29
可能被侧蚀、底蚀 的物质储量	岸坡侧蚀、 揭底刨蚀	69.60	5.00	0.14	4.86
可能发生岸坡 滑塌的物质储量	岸坡滑塌		3.00	0	3.00
坡面流水冲蚀 形成物质储量	面蚀		1.00	0.07	0.93
合计		115.01	51.26	0.87	52.58

(3)沟道冲淤情况 该泥石流物源及流通区因纵坡降大,沟道以下切、侧蚀为主。泥石流堆积区沟道以淤积为主。将来该沟仍以同样的方式进行冲淤。

2 黄土梁滑坡转化泥石流的机制分析

(1)地震作用下滑坡变形破坏机制 在地震力作用下,黄土梁滑坡在2 min内完成了从变形到高速滑动的全过程,坡体已部分—完全解体,滑动高差较大,滑坡在地震中的滑动破坏机制为推移式。

(2)地震后滑坡堆积体转化成泥石流机制 在强大的地震力作用下,黄土梁滑坡势能已得到充分的释放,并已半脱离滑床,其水平滑动最大距离达85 m,垂直距离最大高差达90 m,滑体前部堆积于原生坡体地面上。该堆积体呈两级平台。“9·24”暴雨时,该堆积体的变形迹象主要表现为,前部发生小型滑塌,后部失去支撑,逐级解体下滑,滑塌物质以分水岭为界,分别直接堆放于各冲沟内,转化为泥石流的物源,参与泥石流活动。另外,堆积体坡体上发育坡面泥石流,并以坡面泥石流的方式将物质带入其下游3条沟内,并成为泥石流的启动动力。

(3)黄土梁滑坡型泥石流与一般泥石流形成机理对比 黄土梁滑坡型泥石流是在2 min内,滑坡体的位能快速转化为动能,引起坡体一次性滑动,产生流动堆积体,转化为泥石流。在整个转化过程中滑坡先发生滑动,然后转化为泥石流,这2个阶段是连续进行的。一般泥石流有的物源也来源于滑坡体的滑动,其过程是滑坡滑动后,滑体堆积于坡脚处,在强降雨冲刷下形成泥石流,一般泥石流的动力主要是强降雨引起的地表径流,其转化过程不是连续的,往往是多次形成的。

3 工程防治设计概况

3.1 一般泥石流和滑坡型泥石流防治方案的异同点

一般泥石流防治的目的是减少物源量和降低泥石流启动的动力条件,其防治措施有谷坊、拦砂坝、截流沟、排导槽等。滑坡型泥石流防治的目的主要是稳固滑坡体,阻止滑体转化为泥石流,其防治措施以修筑拦砂坝为主,并辅以排水和夯填裂缝等措施。

3.2 设计参数

(1)降雨量参数 按50 a和20 a一遇暴雨强度进行设计,据《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》和现场调查,陈家坝乡按 $P=2\%$ 计算求得的1 h设计雨强是38.4 mm,按 $P=5\%$ 计算求得的1 h设计雨强为33.4 mm。

(2)泥石流固体物源参数 据现场调查,2[#]沟

泥石流松散固体物源量为 $1\,192.32 \times 10^4 \text{ m}^3$,可能参与泥石流活动的动储量为 $90.62 \times 10^4 \text{ m}^3$,按“2008-09-24”爆发的泥石流所经历的时间9 000 s计,2[#]沟泥石流“9·24”一次泥石流流体冲出总量为 $2.08 \times 10^4 \text{ m}^3$,一次泥石流固体冲出总量为 $0.87 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

(3)泥石流运动特征参数 黄土梁滑坡型2[#]沟泥石流主要运动特征参数统计如表3。

表3 2[#]沟泥石流主要运动特征参数

Table 3 Main movement characteristics of 2[#] debris flow ditch

位置	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	整体冲 压力/kPa	最大冲击 压力/kN
1	20.51	1.65	8.77		
2	20.56	1.67		6.3	70.6
3	20.00	1.58			

4 工程防治设计

4.1 防治目标与原则

治理工程的目标是确保黄土梁滑坡及泥石流沟对坡脚下居民、拟建安置区、厂房、103国道等不形成危害。

(1)考虑到黄土梁为高位滑坡,治理工程难以实施,因此主要采用治水的方法,提高滑坡稳定性。

(2)针对泥石流的类型、活动规律等进行的专项设计,按照各类工程(排导、拦挡、加固)配合使用,综合整治的原则,确保治理工程在所设计频率、规模的泥石流发生时,不再造成危害。

(3)防治工程选用安全可靠、经济合理、施工简便的技术。

(4)防治工程应美化生态环境,与灾区重建规划相协调。

4.2 设计思路

(1)各地质灾害点的治理工程应密切结合威胁对象进行,本次设计中泥石流灾害威胁的对象主要有:①沟道内及沟口居民厂房;②泥石流沟口段103国道;③2处居民安置点。

(2)滑坡及滑坡堆积物为泥石流的主要物源,在治理滑坡难度较大及代价较大的情况下,采取夯填裂缝设置截排水等简单的治理手段,以期达到一定限度地提高滑坡的稳定性,减少滑坡参与泥石流的程度或减慢其进度。

(3)本次治理方案的设计以防沟道下切固源为主,辅以排导、散流及停淤工程等。

4.3 治理方案设计

根据上述防治目标和原则,治理工程措施主要

是按照黄土梁滑坡型 2# 泥石流沟内物源的分布情况和泥石流活动规律来安排,各项工程措施配合使用,综合治理,共同发挥作用。采用“2# 沟中游 4 座浅拦坝+2# 支沟中游 3 座浅拦坝+下游起点设置总长 34.7 m 束流堤、总长 156.4 m 排导槽、终点设置 22.1 m 导流堤,排导槽与 103 国道相交处,采用桥梁工程跨越排导槽”,中游和下游统筹的治理方案(图 3)。

(1)浅拦坝 4 座浅拦坝布置于 2# 沟流通区中

游,3 座浅拦坝布置于 2# 支沟流通区中游,坝体主要起固床护坡作用,并能利用泥石流固体物质回淤对滑坡形成一定的压脚作用,提高滑坡的整体稳定性。7 座浅拦坝坝体设计参数如表 4。

(2)排导槽 排导槽布置在泥石流堆积区,总长 156.4 m。起点设置束流堤,总长 34.7 m,终点设置导流堤,总长 22.1 m。

(3)桥梁预设工程 排导槽与 103 国道相交处,建议采用桥梁工程跨越排导槽。

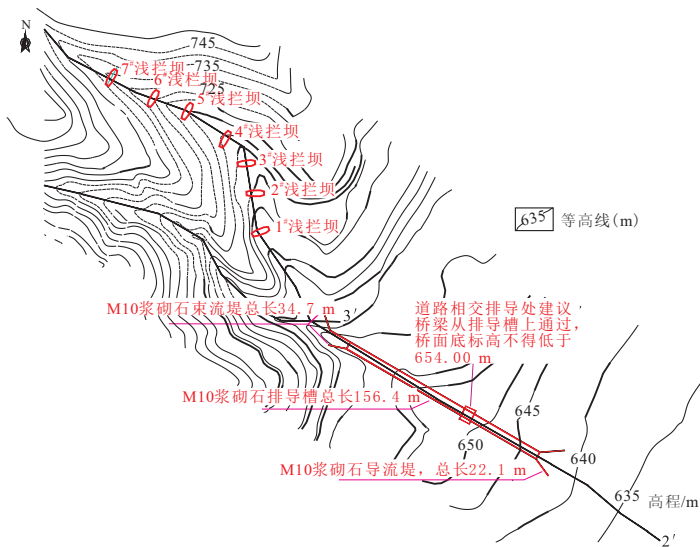


图 3 黄土梁 2# 泥石流沟工程措施布置全貌图

Fig.3 Engineer layout at 2# debris flow ditch in Huangtuliang

表 4 2# 沟坝体设计参数

Table 4 Design parameters of dam body for 2# debris flow ditch

坝体名称	位置	有效坝高/m	坝轴线长/m	顶宽/m
1# 浅拦坝	流通区沟口	2	9.50	1.2
2# 浅拦坝	流通区中部	2	10.20	1.2
3# 浅拦坝	流通区中部	2	9.5	1.2
4# 浅拦坝	流通区上部	3	12.55	1.5
支沟 5# 浅拦坝	流通区沟口	3	14.95	1.5
支沟 6# 浅拦坝	流通区中部	2	7.50	1.2
支沟 7# 浅拦坝	流通区中部	2	8.00	1.2

4.4 各分项治理工程作用分析

(1)分别在黄土梁滑坡型 2# 沟流通区中游布置 4 座浅拦坝,2# 支沟流通区中游布置 3 座浅拦坝,共在 2# 沟内布置了 7 座浅拦坝(图 3)。有稳固物源和削峰减流的作用,降低到达 2# 沟的固体物,减少下游泥石流洪峰流量,缓解下游排导槽的压力。

(2)在黄土梁滑坡型 2# 沟下游起点修建总长 34.7 m 束流堤、总长 156.4 m 排导槽,终点设置总长 22.1 m 导流堤,调整沟槽断面、减小弯道曲率,并

把泥石流物质顺利地排入都坝河。

5 泥石流工程防治效果评价

黄土梁滑坡及下游 3 条泥石流沟工程治理于 2010 年 5 月底竣工,尽管 2013 年和 2016 年这 3 条沟流域发生了特大暴雨,但这些特大暴雨引发的固体物质参与泥石流活动的物质较少(表 5)。

表 5 泥石流前后降雨对比

Table 5 Rainfall contrast before and after the debris flow

降雨时间	历时降雨量/mm	固体物质参与量/ 10^4 m^3
2008-09-24	279	2.20
2013-08-07	245	0.63
2016-07-21	204	0.51

表 5 反映了 2 次降雨历时降雨量虽然比 2008 年 9 月 24 日降雨量略小,但 2013 年 8 月 7 日和 2016 年 7 月 21 日 2 次降雨量分别是 245,204 mm,属于特大暴雨。由于在黄土梁 2# 泥石流沟修建了治理工程,这 2 次特大暴雨均未引发泥石流灾害。2

次降雨引发参与泥石流活动的固体物质均较少(分别是 0.63×10^4 , $0.51 \times 10^4 \text{ m}^3$),说明治理工程取得了较好的效果。经过现场勘查:上游4座浅拦坝,稳拦物源量约 $21.36 \times 10^4 \text{ m}^3$,支沟中游的3座浅拦坝,稳拦物源量约 $18.28 \times 10^4 \text{ m}^3$,共稳拦物源量约 $39.64 \times 10^4 \text{ m}^3$,达到了设计控制目标($52.58 \times 10^4 \text{ m}^3$)的75.4%,下游的导流堤将流体导入都坝河。

2013年8月7日和2016年7月21日2次降雨活动启动参与泥石流活动的物源量较小,这是因为大量容易参与泥石流活动的物源在2008年9月24日泥石流爆发时已启动,另外2010年工程治理的作用已得到发挥,由于工程的治理,参与泥石流活动的物源已明显减少。

根据分析,黄土梁2#泥石流沟“上游稳坡固源、中游调节拦挡、下游固床排导工程”的综合治理措施,在2013年8月7日和2016年7月21日2次强降雨时已见成效,未造成泥石流灾害发生。

6 结 论

(1)2008年9月24日,黄土梁2#沟发生特大泥石流,冲出泥石流固体物质约 $2.08 \times 10^4 \text{ m}^3$,导致沟口103国道被掩埋,堵塞都坝河,泥石流物源主要来自上游的黄土梁滑坡。

(2)“9·24”泥石流爆发后,后期参与泥石流活动的固体物质约 $52.58 \times 10^4 \text{ m}^3$,为该泥石流再次发生提供了大量的物源,由于“9·24”泥石流爆发使沟道平均纵坡降变陡,有利于泥石流的发生,在强降雨作用下,黄土梁2#沟再次发生泥石流的可能性较大。

(3)本次采用“2#沟中游设置4座浅拦坝+2#支沟中游设置3座浅拦坝+下游起点设置总长34.7 m束流堤、总长156.4 m排导槽,终点设置总长22.1 m导流堤,排导槽与103国道相交处,采用桥梁工程跨越排导槽”,中游和下游统筹的治理方案。各项治理工程的作用如下:浅拦坝有稳固物源和削峰减流的作用,降低到达2#沟的固体物,减少下游泥石流洪峰流量,缓解下游排导槽的压力;束流堤、排导槽、导流堤有调整沟槽断面、减小弯道曲率的作用,并把泥石流物质顺利地导入都坝河。

(4)工程治理结束后,经2013年8月7日和2016年7月21日2次强降雨活动未发生泥石流灾害,验证了黄土梁2#沟泥石流工程治理效果较好。

参考文献:

[1] valance J W, Scott K M. The Osceola mudflow from moutrainier sedimentology and hazard implications of a huge clay-rich debris flow[J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1997, 109: 143-163.

[2] Iversen R M, Reid M E, LaHusen R G. Debris-flow mobilization from landslides[J]. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 1997, 25: 85-138.

[3] 李天池,章书成,康志成. 滑坡型泥石流[C]//佚名. 全国泥石流学术会议论文集. 成都:中国科学院成都地理研究所, 1980.

[4] Hutchinson J N, Bhandari R K. Undrained loading, a fundamental mechanism of mudslide and other mass movements[J]. *Geotechnique*, 1971, 21(4): 353-358.

[5] Sassa K. The mechanism starting liquefied landslides and debris flows[C]//Anon. The 4th international symposium on landslides. International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Toronto, Ontario: [s.n.], 1984: 349-354.

[6] Sassa K. Mechanisms of landslide triggered debris flow[C]//Anon. Proceedings of IUFRO conference (Div. 8). Kyoto: Kluwer Academic Publishing, 1998: 471-490.

[7] Fleming R W, Ellen S D, Alguis M A. Transformation of dilative and constructive landslide debris into debris flows: An example from Marin County, California[J]. *Engineering Geology*, 1989, 27(2): 201-223.

[8] Emmanuel J G, Simon M M. The mobilization of debris flows from shallow landslides[J]. *Geomorphology*, 2006, 74(2): 207-218.

[9] Anderson S A, Sitar N. Analysis of rainfall-induced debris flow[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 121(7): 545-552.

[10] Dai F C, Lee C F, Wang S J. Analysis of rainstorm-induced slide-debris flows on natural terrain of Lantau Island, Hong Kong[J]. *Engineering Geology*, 1999, 51(3): 279-290.

[11] 周海波,陈宁生,卢阳. 泥石流沟谷坊坝群治理效应:以地震极重灾区北川县化石板沟为例[J]. *山地学报*, 2012, 30(3): 347-354.

[12] 曾庆利,岳中琦,杨志法,等. 谷坊在泥石流防治中的作用:以云南蒋家沟2条支沟的对比为例[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(17): 3137-3145.

[13] 张雪燕,薛炳勇,王维早,等. 陇南燕儿沟泥石流工程治理及效果评价[J]. *人民长江*, 2017, 48(17): 72-76.

[14] 廖丽萍,朱颖彦,杨志全,等. 中巴公路泥石流灾害破坏及防治优化[J]. *地质科技情报*, 2013, 32(6): 168-174.

[15] 李德华,许向宁,吉峰,等. 汶川县映秀镇红椿沟特大泥石流工程防治及初步效果分析[J]. *工程地质学报*, 2013, 21(2): 260-268.

[16] 亓星,许强,余斌,等. 汶川震区文家沟泥石流治理工程效果分析[J]. *地质科技情报*, 2016, 35(1): 161-165.

[17] 周海波,陈宁生,卢阳. 泥石流沟谷坊坝群治理效应:以地震极重灾区北川县化石板沟为例[J]. *山地学报*, 2012, 30(3): 347-354.

[18] 陈宁生,周海波,卢阳,等. 西南山区泥石流防治工程效益浅析[J]. *成都理工大学学报:自然科学版*, 2013, 40(1): 50-58.

[19] 卜祥航,唐川,屈永平,等. 烧房沟滑坡型泥石流工程治理及效果分析[J]. *工程地质学报*, 2016, 24(2): 220-227.

[20] 李树德. 滑坡型泥石流形成机理[J]. *北京大学学报:自然科学版*, 1998, 34(4): 519-522.

[21] 李树德,曾思伟. 论泥石流的另一种类型——滑坡型泥石流:以甘肃刘家堡泥石流为例[J]. *水土保持学报*, 1988, 2(4): 66-71.

[22] 谢洪,王成华,林立相. 标水岩沟滑坡型泥石流灾害及特征[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2000, 11(3): 20-22, 27.

[23] 王承俊,赵永旭,王巍,等. 四川省地震灾区第三批重大地质灾害北川县陈家坝乡黄土梁滑坡应急勘查报告[R]. 成都:四川省地质工程勘察院, 2009.