

汶川震区文家沟泥石流治理工程效果分析

亓 星, 许 强, 余 斌, 董秀军, 尹国龙

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘 要:汶川地震使文家沟内产生大型滑坡并解体成碎屑流堆积在沟道内, 成为一条高频泥石流沟, 在后期降雨作用下发生了多次泥石流灾害。根据文家沟泥石流的特点, 采取了“水沙分离、固护拦停、监测维护”的治理措施进行综合治理, 使泥石流启动方式由碎屑堆积体冲刷侵蚀转变为支沟沟床起动。治理后文家沟4个雨季内共发生了3次泥石流, 治理工程有效减小了泥石流的规模和危害, 但引水截流的实施也伴随了上游清淤等长期性的问题, 需进一步重视。通过获得的降雨参数建立了文家沟泥石流临界雨量阈值模型, 实施治理工程后泥石流临界雨量有明显提高, 并逐年缓慢增长。

关键词:文家沟; 治理措施; 形成特征; 工程效果

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1000-7849(2016)01-0161-05

在汶川震区, 由于地震导致的大量山体崩塌滑坡提供了丰富的泥石流物源, 使泥石流的发生变得更加频繁, 震前大量的非泥石流沟转变为泥石流沟, 发生泥石流所需的临界雨量也大大降低^[1-3], 震后相当长的时间内都将是泥石流的活跃期^[4-5], 随着时间的增长, 震区植被逐渐恢复, 泥石流暴发的频率也朝着震前水平缓慢恢复^[6]。防止泥石流造成重大人员伤亡和财产损失成为泥石流工程治理的重要目标, 而不同沟道暴发泥石流的机理不同, 分析沟道的特征和泥石流起动过程, 采用对应的工程治理措施能有效地减小泥石流灾害。

文家沟位于汶川极震区, 受地震和降雨影响震后发生了多次大规模泥石流, 泥石流堆积物堵塞了绵远河, 并淤埋下游场镇, 造成了重大经济损失^[7]。2011年实施的文家沟泥石流治理工程经历了4个雨季的考验, 通过对比治理前后暴发泥石流的特征和降雨数据分析, 反映了工程防治措施的效果以及震后临界雨量缓慢恢复的趋势, 并可以建立文家沟泥石流临界雨量阈值模型, 为后期泥石流的预警提供参考。

1 文家沟概况

文家沟位于绵竹市清平乡场镇北部, 汶川地震使文家沟流域上游产生巨型滑坡, 约2 750万^m³岩体在滑动过程中多次碰撞解体成碎屑流, 同时铲刮和卷携大量松散固体物质停留在主沟内。其中, 约

2 000万^m³固体物质停留在韩家大坪处, 由于堆积区域相对平缓, 这部分堆积体基本未参与泥石流活动; 另一部分从其前缘陡坎顶部高速抛射出去后经碰撞转化为碎屑流, 进入1 300 m平台^[7]并最终停留在主沟中下游, 方量约3 000万^m³^[8], 该部分松散固体物质以碎块石、角砾以及沙土为主, 黏土含量较少, 呈自然松散堆积状态, 最大厚度达150 m^[9], 稳定性较差, 是形成泥石流的主要物源(图1)。

汶川地震后至2011年, 文家沟在降雨作用下共



图1 文家沟堆积区特征^[7]

Fig.1 Deposition characteristics in Wenjia Gully

收稿日期: 2015-07-15

编辑: 杨 勇

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2014CB744703; 2013CB733200); 国家杰出青年科学基金项目(41225011)

作者简介: 亓 星(1988—), 男, 现正攻读地质工程专业博士学位, 主要从事地质灾害防治相关工作。E-mail: qixing2009@163.com

发生了5次特大规模和大规模的泥石流灾害,多次造成了主河的堵塞,并淤埋了主河下游清平乡场镇,造成了重大的经济损失^[7],地震前后主要降雨情况如表1所示。

表1 地震前后文家沟降雨情况^[7,10]

Table 1 Some heavy rainfall events in Wenjia Gully before and after earthquake

时间	总降雨量/ mm	最大雨强/ (mm·h ⁻¹)	规模/ 10 ⁴ m ³
百年一遇计算值	550.0	116.0	0
1995-8-15	496.5	49.8	0
2008-9-24	88.0	30.5	50
2010-7-31	60.2	51.7	约20
2010-8-13	185.9	70.6	310
2010-8-19	72.6	31.9	30
2010-9-18	52.0	29.0	17

震后文家沟暴发的5次大规模和特大规模的泥石流物源主要来自1300m平台下方的碎屑堆积体,在降雨条件下还存在暴发大规模和特大规模泥石流的可能性,对主河和下游场镇均产生严重危害隐患。

2 工程治理措施

泥石流工程治理措施有多种,概括起来主要为“稳、拦、排、截”4种方法。“稳”是稳固沟道内的物源;“拦”是拦挡泥石流堆积物;“排”是及时排除冲出的泥石流;“截”是对上游降雨汇流的拦截。具体的工程治理措施则需要根据各个沟的情况综合判断,既可以是一种,也可以是多种治理措施的结合。

文家沟与一般沟床起动机泥石流沟道最主要的区别在泥石流物源上。震后文家沟发生的泥石流固体物质主要来自于1300m平台下方的主堆积区Ⅱ的下切侵蚀,同时,调查得到上游③~⑤号支沟还有大约256万m³物源,经过多次泥石流侵蚀下切,1300m平台下方碎屑堆积体上已形成最深达70m的深槽^[7]。随着后期强降雨的不断汇流侵蚀,将使沟槽继续加深扩宽并带走更多固体物质,从而对下游造成严重危害,因此,治理文家沟泥石流的关键应为如何降低或防止该区域的碎屑堆积体被继续侵蚀带走,稳固该区域成为治理泥石流的重点之一。

针对文家沟主要特点,文家沟泥石流的治理工程总体思路为“水沙分离、固护拦停、监测维护”,即在上游1300m平台通过修建集水沉沙池并打通一条引水隧洞,将上游降雨汇流通过隧洞引走,防止水流冲刷1300m平台下方主堆积区;在中部采用固底护坡设计,并修建排导槽防止堆积体的继续下切侵蚀;在下游至沟口段设计多道拦挡坝以将上游冲

出的固体物质拦淤在沟道内,防止泥石流冲出沟口堵塞绵远河,治理工程于2011年5月基本完成(图2)。同时,在文家沟流域内布设了多个雨量计,通过雨量计实时监测流域内暴发泥石流时的降雨情况,获得了多次降雨过程数据。

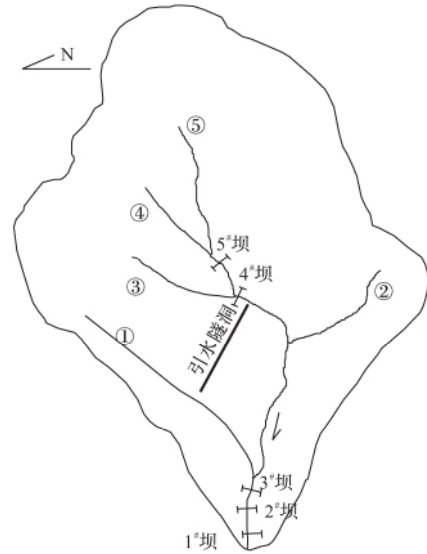


图2 文家沟泥石流工程治理平面示意图

Fig. 2 Layout of engineering control measures in Wenjia Gully

3 治理工程效果分析

3.1 工程治理后泥石流暴发特征

2011年治理工程完工后,文家沟经历了2011—2014年4个雨季,主要降雨过程及泥石流规模如表2所示。

表2 文家沟主要降雨过程特征

Table 2 Some heavy rainfall processes in Wenjia Gully

时间	总降雨量/mm	最大小时雨强/mm	最大10min雨强/mm	降雨历时/h	泥石流规模/10 ⁴ m ³
2011-6-30	387.5	—	10.5	约100	0
2012-8-14	109.0	68.0	25.5	4.3	3.2
2012-8-17	89.5	41.0	24.5	2.0	7.8
2012-9-16	44.0	8.0	2.0	12.0	0
2013-6-19	62.0	33.5	16.0	4.0	0
2013-6-29	41.5	16.5	4.5	4.0	0
2013-6-30	94.0	40.5	10.0	4.0	0
2013-7-4	98.0	32.0	9.0	5.5	0
2013-7-8	496.5	49.0	20.5	5.5	34.4
2014-7-10	67.0	51.5	14.0	5.5	0
2014-8-8	66.0	43.0	10.5	4.5	0

治理后4个雨季内文家沟发生了多次泥石流灾害,以沟床起动机泥石流为主,泥石流暴发具有明显的消防水管效应^[11-12]。工程治理前泥石流物源主要为1300m平台下方的松散堆积物,堆积体的侵蚀提供了绝大多数的物源,而主要支沟仅在2010年8月13日强降雨作用下参与了主沟泥石流活动^[13]。

2011 年治理工程完工后,流域内上游的降雨汇流至中部集水沉沙池后通过引水隧洞流向下游,使流经 1 300 m 平台下方的汇流大大减小,同时,1 300 m 平台下方主堆积区的固底护坡和排导工程有效防止了该区域内碎屑堆积体的继续侵蚀下切,而该区域是形成泥石流的主要固体物质来源,治理工程完工后该主堆积区松散堆积物在强降雨作用下均未被起动。泥石流的发生模式从治理前由上游支沟泥石流汇流带动中部碎屑堆积体侵蚀形成大规模泥流转变为仅在各个支沟暴发小规模泥石流,同时,文家沟上游 4[#] 和 5[#] 坝有效拦截了上游支沟发生的泥石流,下游 1[#] ~ 3[#] 坝的修建也起到了相应的拦截和

停淤作用,使泥石流的影响范围仅在文家沟内,规模大大减小。经过 4 个雨季,文家沟只在 2012 年 8 月 14 日、8 月 17 日和 2013 年 7 月 8 日暴发了泥石流,治理前后文家沟泥石流特征如表 3 所示。

文家沟“水沙分离、固护拦停、监测维护”的治理思路中,控制 1 300 m 平台的碎屑堆积体物质转化是工程治理的重点。工程治理前后泥石流物源起动位置、水源补给、危害方式和暴发规模均发生了较大改变,原 1 300 m 平台下方的大量松散堆积物不再起动,泥石流起动模式转变为以支沟暴发为主的沟床起动型泥石流(表 4)。

表 3 治理前后发生泥石流时间和规模

Table 3 Debris flow scale and time before and after engineering control

时 间	最大小时雨强/mm	总降雨量/mm	泥石流冲出量/10 ⁴ m ³	泥石流危害范围	
治 理 前	2008-9-24	30.5	88.0	50	淤埋沟口房屋,堵塞主河
	2010-7-31	51.7	60.2	10~20	淤埋沟口房屋,部分堵塞主河
	2010-8-13	70.6	185.9	310	堵塞主河,淤埋下游场镇
	2010-8-19	31.9	72.6	30	淤埋沟口房屋,部分堵塞主河
	2010-9-18	29.0	52.0	17	淤埋沟口房屋,部分堵塞主河
治 理 后	2011-6-30	—	387.5	0	—
	2012-8-14	74.5	109.0	3.2	淤埋部分 4 [#] 坝
	2012-8-17	65.5	89.5	7.8	淤埋 4 [#] 、5 [#] 坝以及主沟下游
	2013-6-30	40.5	94.0	0	—
	2013-7-4	32.0	98.0	0	—
	2013-7-8	66.0	496.5	34.4	淤埋 4 [#] 、5 [#] 坝以及主沟下游
	2014-7-10	51.5	67.0	0	—
	2014-8-8	43.0	66.0	0	—

表 4 泥石流治理前后暴发特征

Table 4 Debris flow characteristics before and after control engineering

	工程治理前	工程治理后
起动位置	1 300 m 平台下方松散堆积体和①~⑤号支沟	①~⑤号支沟
水源补给	沟道内自然汇流侵蚀,各支沟汇入主沟进入下游	上游汇流至 1 300 m 平台后通过引水隧洞进入①号支沟到达下游,1 300 m 平台下方松散堆积体上游汇流被截断,仅有雨水直接入渗和两侧山坡水流补给
危害方式	堵塞绵远河,造成一系列灾害链效应	淤埋修建的拦挡坝,①号支沟由于引水隧洞引水对支沟沟口附近拦挡坝造成较大冲击危害
暴发规模	小时雨强达 29 mm 时即可诱发大规模泥石流冲出沟口,堵塞主河	暴发的泥石流规模明显减小,均被有效阻拦在文家沟内,未造成主河堵塞

3.2 治理工程效果评价

文家沟泥石流具有典型的震后规模增大特征,震后泥石流的暴发也随时间和治理工程的作用相应变化。调查得到震前该沟为普通清水沟,震后最初数年由于物源的激增,低降雨强度即可引发大规模泥石流;随着降雨冲刷和渗透固结作用的逐渐积累,后期暴发泥石流的激发雨量逐渐增大。随着治理工程的实施,人为将文家沟上游主要汇水引走,同时增大了中下游沟底的抗冲蚀能力,使文家沟在一般降雨作用下无法起动 1 300 m 平台下游的松散堆积物,在强降雨作用下也大大减小了泥石流危害。治理后文家沟暴发的 3 次泥石流均主要被 4[#]、5[#] 坝

有效拦挡,下游①号支沟由于引水隧洞排水暴发的小规模泥石流也被下游三道拦挡坝阻挡在主沟内,特别是 2013 年 7 月 8 日文家沟总降雨量远大于 2010 年 8 月 13 日,但泥石流基本被阻拦在沟道内,并未对主河造成危害。可见,“水沙分离、固护拦停、监测维护”的治理思路在文家沟起到了良好的效果,而雨量监测反映出治理工程完工后 40 mm/h 以下的雨强已无法引发危害性泥石流,即使是如 2013 年 7 月 8 日那样大范围的强降雨,也并不会产生堵塞主河和淤埋下游场镇等严重危害。文家沟目前的问题变为为了引水隧洞的引水作用使下游沟口处冲刷危害增加,泥石流向上下游转移,同时,为保证上游引

水隧洞的长期有效性,每年汛期的拦挡坝清淤也成为了长期性的问题,需要在今后重视。

Shieh 等^[14]、谭万沛等^[15]使用 1 h 或 10 min 降雨强度和前期有效降雨量建立了适用于这类沟床起动型泥石流预警模型,临界雨量阈值公式为:

$$S = B + KI \tag{1}$$

式中: S 为临界雨量阈值(mm); B 为有效累积降雨量(mm),定义为发生泥石流前 3 天降雨折减值与当日降雨开始至发生泥石流前的降雨总量之和,折减系数一般取 0.85^[6],即 $B = a_0 + 0.85a_1 + 0.85^2 a_2 + 0.85^3 a_3$,其中 a_0 为降雨开始至发生泥石流的雨量值, a_1, a_2, a_3 分别为前 3 天的日降雨量; K 为降雨雨强系数; I 为 1 h 或 10 min 雨强值(mm)。前人根据不同类型泥石流的降雨资料建立的 K 值变化范围较大,但对于强震影响区域,如台湾集集地震影响区域, K 值变化范围在 10~13.7 之间,由于文家沟位于汶川地震极震区,受地震影响强烈,因此,结合前人研究,系数 K 取平均值 12.5^[16]。

根据文家沟的雨量监测数据得到文家沟从震前至 2014 年不同降雨量对应的泥石流暴发情况,采用临界雨量阈值公式建立当年泥石流暴发的临界雨量阈值(图 3)。

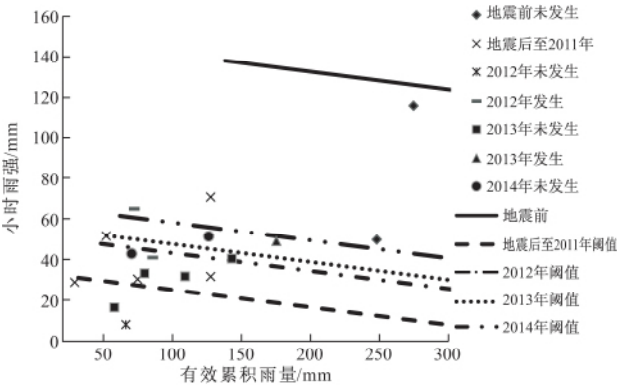


图 3 文家沟泥石流临界雨量阈值

Fig. 3 Critical rainfall threshold for debris flow in Wenjia Gully

根据建立的临界雨量阈值线对比地震前后的临界雨量阈值可以明显看出,震后发生泥石流的阈值大大降低,但随着时间的增长阈值逐渐恢复。汶川地震前文家沟有效累积降雨量达 275 mm 时仍未发生泥石流,在震后发生泥石流的激发小时雨强降低至震前的 22.7%。随着 2011 年 5 月治理工程的完工,治理措施开始发挥作用,文家沟泥石流起动方式也发生了明显变化,对应泥石流激发雨量的迅速回升,随后两年中泥石流激发雨量相比上一年均有较小幅度提高,表明随着时间增长,泥石流激发临界雨量呈缓慢回升的过程,这与流域内植被的恢复、沟道内的松散堆积物固结和稳定有关。

为量化文家沟泥石流临界雨量恢复过程,定义雨量参数 n 为某一区域地震后泥石流发生的临界雨量阈值与地震前的比值,震前临界雨量采用 100 年一遇的临界雨量阈值,根据图 3 临界雨量阈值得到震后 n 值与时间的关系,如图 4 所示。由于 2009 年和 2011 年的降雨数据不完整,因此缺少震后 1 a 和 3 a 的 n 值。

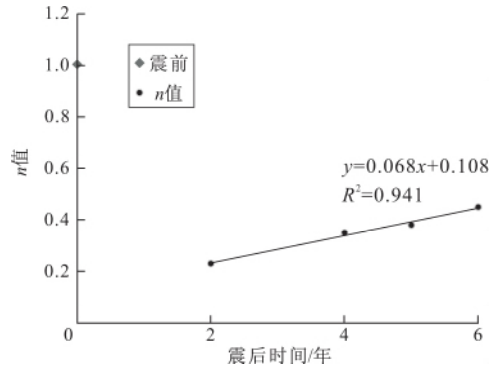


图 4 文家沟泥石流临界雨量与时间关系图

Fig. 4 Relationship between critical rainfall and time in Wenjia Gully

可见震后文家沟泥石流的临界雨量随时间呈线性增长的趋势,其临界雨量相比于震后每年增长约 6.8%,随着时间的不断增长,激发泥石流的雨量逐年向震前恢复。临界雨量的恢复与工程治理措施和地震增加的物源固结作用密切相关。治理工程有效地提升了泥石流的临界雨量,使泥石流活动向上下游转移,上游支沟的大量泥石流堆积物对引水截流工程造成了较大的危害,为保证导流洞入口正常进水实现引水,每年汛期的清淤成为了现在需考虑的问题。同时,由于引水的作用使下游①号支沟的冲刷更加强烈,支沟的泥石流阻拦或疏导也成为了需考虑的问题,有待后期进一步分析。但随着震后时间的不断增长,泥石流临界雨量逐年回升,未来文家沟泥石流的发展将逐渐趋于稳定。

4 结 语

文家沟为典型的滑坡碎屑堆积体形成的泥石流沟,其物源丰富,危害性大,单一的防治措施无法有效防治泥石流灾害,通过对文家沟泥石流的特性分析,利用“水沙分离、固护拦停、监测维护”的治理思路,并结合雨量监测分析降雨对泥石流暴发的影响。实施治理工程后文家沟暴发泥石流的规模和冲出方量大大减小,泥石流形成模式由主要从 1 300 m 平台下方碎屑堆积体冲刷侵蚀形成泥石流转变为上游支沟沟床起动型泥石流,中游的堆积体基本上不再

启动提供物源,防治工程取得了一定的成效,但为保证引水工程的有效性,后期文家沟上游拦挡坝清淤工作仍然为长期性的问题,需要进一步的重视。根据监测得到的降雨特征参数,建立了从震前至 2014 年的文家沟泥石流临界雨量阈值,根据获得的雨量参数 n 值可知文家沟随着治理工程的实施,暴发泥石流所需雨量有明显增大,并呈逐年增加的趋势。

参考文献:

- [1] 许强. 汶川大地震诱发地质灾害主要类型与特征研究[J]. 地质灾害与环境, 2009, 20(2): 86-93.
- [2] Tang C, van Asch T W J, Chang M, et al. Catastrophic debris flows on 13 August 2010 in Qingping area, southwestern China: The combined effects of a strong earthquake and subsequent rainstorms[J]. *Geomorphology*, 2012, 139-140(2): 559-576.
- [3] 唐川, 梁京涛. 汶川震区北川 9.24 暴雨泥石流特征研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 751-758.
- [4] 谢洪, 王士革, 孔纪名. 512 汶川地震次生山地灾害的分布与特点[J]. 山地学报, 2008, 26(4): 396-401.
- [5] 唐川. 汶川地震区暴雨滑坡泥石流活动趋势预测[J]. 山地学报, 2010, 28(13): 341-349.
- [6] 吴雨夫. 地震对泥石流暴发的临界降雨条件影响的初步研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- [7] 许强. 四川省 8·13 特大泥石流灾害特点成因与启示[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 596-608.
- [8] 许强, 裴向军, 黄润秋, 等. 汶川地震大型滑坡研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 381-406.
- [9] 黄河清, 赵其华. 汶川地震诱发文家沟巨型滑坡—碎屑流基本特征及成因机制初步分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(2): 169-175.
- [10] Yu Bin, Ma Yu, Wu Yufu. Case study of a giant debris flow in the Wenjia Gully, Sichuan Province, China[J]. *Nat Hazards*, 2012, 65(1): 835-849.
- [11] Coe J A, Glancy P A, Whitney J W. Volumetric analysis and hydrologic characterization of a modern debris flow near Yucca Mountain Nevada[J]. *Geomorphology*, 1997, 20(1): 11-28.
- [12] Griffiths P G, Webb R H, Melis T S. Frequency and initiation of debris flows in Grand Canyon, Arizona[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(4): 321-336.
- [13] 吴积善, 康志成, 田连权, 等. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 197-221.
- [14] Shieh C L, Chen Y S, Tsai Y J. Variability in rainfall threshold for debris flow after the Chi-Chi earthquake in central Taiwan, China[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2009, 24(2): 177-188.
- [15] 谭万沛, 韩庆玉. 四川省泥石流预报的区域临界雨量指标研究[J]. 灾害学, 1992, 7(2): 37-42.
- [16] Yu Bin, Li Li, Chu Shengming. A formation model for debris flows in the Chenyulan River Watershed, Taiwan[J]. *Nat Hazards*, 2013, 68(2): 745-762.

Treatment Effects in Wenjia Gully, Wenchuan Earthquake Area

Qi Xing, Xu Qiang, Yu Bin, Dong Xiujun, Yin Guolong

(State Key Laboratory of Geo-hazards Prevention and Geo-environment
Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Wenchuan earthquake triggered a large landslide in the Wenjia Gully, making it a place for debris flow of high frequency, which may cause many debris flows in next rainfalls. According to characteristics of the debris flow, some treatments, e. g. , water and sediment separation, consolidation and barrier combination, monitoring and maintenance, etc. , were taken to change the start mode of debris flow from clastic erosion into bed starting. Ater these measures, three debris flows happened in the gully during the four monsoons. The measures effectively reduce the scale and harm of debris flows, but the water and sediment separation still remain as long-term problems of cleaning which needs further attention. A critical rainfall threshold model is established with the obtained rainfall parameters to show after treatments. The critical rainfall of debris flow obviously increases, and the ratio of the critical rainfall slowly increases annually.

Key words: Wenjia Gully; control measures; forming characteristics; engineering effect