

文章编号: 1008 - 2786 - (2014) 3 - 336 - 09

汶川地震引发的次生山地灾害链及人工断链效果 ——以小岗剑泥石流沟为例

李文鑫^{1 2}, 王兆印^{3*}, 王旭昭⁴, 漆力健⁵, 何晓燕⁶

(1. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074; 2. 甘肃煤炭地质勘查院, 甘肃 兰州 730000;
3. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 4. 北京矿产地质研究院, 北京 100012;
5. 四川农业大学水利与建筑工程系, 四川 雅安 625014; 6. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘 要: 汶川地震后, 小岗剑沟由于滑坡、崩塌产生了大量松散物质, 其地势陡峻, 暴雨频率高, 2009—2011 年连续暴发 10 场泥石流, 损毁公路, 规模大时会堰塞绵远河, 形成以频发性泥石流为主的典型地震次生山地灾害链。2012 年完成泥石流治理工程, 同年 8 月小岗剑沟再次发生泥石流, 破坏了部分工程。以小岗剑沟为例, 通过整理现场采集的图片和数据, 并对比以往资料, 研究次生山地灾害链链式反应过程以及经过工程治理后的灾害链人工断链效果。研究表明: 小岗剑沟频发型次生灾害链的衰减不仅体现在引起下一级次生灾害的土石方量逐级减小上, 而且体现在随时间变化的灾害激发条件提高上; 虽然泥石流发生条件提高, 但由于泥石流沟沟床不断被切深, 小岗剑沟危险性随着可动势能增大而逐年增大, 人工断链失败后, 沟床再次下切, 建议使用阶梯-深潭结构增加沟道阻力, 保护沟道底部, 避免可动势能继续增大; 对比小岗剑沟、文家沟和红椿沟泥石流治理工程, 发现灾害链总能量与投资正相关, 要根据灾害能量进行合理投资, 当能量到达一定量时, 单位能量所需要的投资大幅度降低。

关键词: 汶川地震; 次生灾害链; 泥石流治理; 阶梯-深潭

中图分类号: P694, X43

文献标志码: A

2008 年汶川地震引发了大量的次生山地灾害, 震后发生的滑坡、崩塌和泥石流约 15 000 处, 新发现的地质灾害隐患点 4 970 处^[1], 震后 3 a, 灾区共发生各类不同规模泥石流、崩塌、滑坡灾害约 880 起^[2]。崩塌、滑坡产生了大量的松散物质, 山区降雨频繁, 震后灾害主要开始以泥石流为主^[3]。山区公路多依山傍水, 震区发生的泥石流经常性的损毁公路^[4]。如果泥石流进入河流, 可能会引起河流改道, 淹没城镇^[5], 或者堰塞河流^[6], 堰塞湖回水会淹没公路^[7]。泥石流形成的堰塞坝含水较多, 容易发生溃决^[8]; 溃决后, 大量的泥沙物质将被搬运到下游, 引起剧烈河床演变, 水生态受到严重影响^[9]。

震后次生山地灾害进入活跃期, 崩塌、滑坡的活跃期将持续 5 ~ 10 a, 泥石流的活跃期将持续 10 ~ 20 a^[10]。而且由次生山地灾害产生的物质会对流域的产沙量有显著影响, 可长达 100 a^[11]。一级次生灾害会成为下一级次生灾害的先导条件, 形成次生山地灾害链, 其造成的危害在时间和空间上都有所扩展。

研究灾害链可以预测重大灾害^[12] 并为切断灾害之间连锁反应提供依据。在灾害链的分类、链生机制和实例剖析上, 已经有了一些工作和成果^[13-16]。钟敦伦等对山地灾害链进行了详细论证, 根据山地灾害链的致灾因素不同将其分为地球内营

收稿日期(Received date): 2013 - 06 - 08; 改回日期(Accepted): 2013 - 07 - 03。

基金项目(Foundation item): 国家科技支撑计划(2012BAK10B03); 国家自然科学基金(51179089)。 [This research is supported by National Key Technology R & D Program(2012BAK10B03); National Natural Science Foundation of China(51179089).]

作者简介(Biography): 李文鑫(1990 -) 男, 山西阳泉人, 助理工程师, 专业为地质工程。 [Li Wenxin, male, born in 1990, Yangquan of Shanxi province, bachelor, assistant engineer, major in geology engineering.]

* 通信作者(Corresponding author): 王兆印(1951 -) 男, 山东济南人, 教授, 主要从事河流动力学及河流生态学研究。 [Wang Zhaoyin, male, born in 1951, Jinan of Shandong Province, doctor, professor, mainly engaged in river dynamics and ecology.] E-mail: zywang@tsinghua.edu.cn

力作用、外营力作用和人为作用致灾3种类型,并进一步将其划分为8个亚类和128种灾害链形式^[17]。但结合人工断链效果描述灾害链发展过程案例还少有报道。工程防护和治理措施是常用的灾害链断链环节^[18],汶川地震后,大量的工程技术手段用于切断灾害链,也发现了一些问题,并进行改进^[19]。以泥石流为例,汶川地震后,舟曲三眼峪和绵竹文家沟的泥石流防治失败,研究发现浆砌石结构抗泥石流冲击破坏能力弱,并提出了钢筋混凝土框架+浆砌石坝体式泥石流拦沙坝、预制钢筋混凝土箱体组装机式拦沙坝等新型泥石流拦挡结构,以及复式断面泥石流排导槽、预制钢筋混凝土箱体组装机式排导槽的新泥石流排导结构^[20];阶梯-深潭是一种常见的河流地貌,这种自然结构能够加剧水流旋滚和紊动,能够很大程度上消耗水流能量,将其应用于文家沟泥石流治理上,消耗了三分之二的能量,在控制泥石流上取得很好的效果^[21]。本文将结合激发泥石流的临界降雨量变化和工程断链实例类比,尝试从能量的角度分析切断次生灾害链方法和必需的治理投资额度规律。

1 研究区域及方法

小岗剑沟位于四川省绵竹市清平乡境内,靠近龙门山断裂带(大约40 km)。其流域形状为桃叶型,整体呈现东高西低,东侧最高点海拔1 987 m,最低点位于沟口绵远河,海拔810 m,相对高度1 177 m,流域面积1.36 km²,沟床比降412‰,主沟长度2.59 km,流域宽度330~990 m,两侧斜坡坡度30°~70°,局部为陡崖地貌。主沟左侧发育一条支沟,长度1.54 km,沟域面积0.61 km²,平均坡降625‰,最高点高程为1 980 m,最低点为960 m,相对高度为1 020 m。区域构造运动强烈,断裂发育,褶皱保存不完整,多为推覆体内部的次级构造,方向多变,陡缓并存。区内岩层多陡倾、直立乃至倒转,小断层、裂隙发育,岩体较破碎,岩性主要为白云岩和白云质灰岩。小岗剑沟为绵远河左岸支沟,两者之间是清平到汉旺的公路,此交通干线连接茂县和绵竹。2012年雨季前完成了小岗剑沟泥石流治理工程,2012年8月再次暴发泥石流,损毁了部分工程结构。

本文以小岗剑沟为例,剖析地震次生山地灾害链和人工干预断链的效果。2009—2013年课题组连续对小岗剑沟实地踏勘,照片采集,使用GPS和

激光测距仪进行泥石流沟沟道测量,并结合小岗剑沟泥石流应急勘察报告^[22]、2011年前沟道和雨量数据,绘制小岗剑沟雨量图和断面图。定义灾害链可动势能和总能量,分别作为灾害链短期潜在危险程度和长期治理的依据,其中可动势能计算公式如下

$$E_m = \int_0^s \gamma_s A_s y ds \quad (1)$$

式中 E_m 为松散物质相对于泥石流沟沟底的势能(J),称为可动势能, γ_s 为泥石流重度(N/m³), S 为断面离沟口的距离, A_s 距沟口 s 处的松散物质断面面积(m²), y 为沟坡两边松散物质重心离最近沟底的高度(m)。如果沟道被切深,边坡变陡, y 值增大,松散物质的可动势能变大,就极易使岸坡物质和地震产生的崩塌体掉落,继续提供松散物质,所以用可动势能表示沟道危险程度。

另一方面,泥石流沟松散物质的总能量按照以下公式计算

$$E_p = \int_0^s \gamma_s A_s h ds \quad (2)$$

式中 E_p 为松散物质相对于沟口的总势能(J),定义为灾害链总能量, h 为所在点距沟口的高度(m)。此值决定于沟道里松散物质的总量和相对于沟口的高度,沟道下切不会增加 E_p ,随着泥石流带出大量的碎屑物质, E_p 逐渐减小。总能量 E_p 大于可动势能 E_m 。

2 小岗剑沟山地灾害链

2.1 灾害情况和致灾方式

“5·12”汶川地震发生后,小岗剑沟对岸,即入汇干流绵远河左岸发生崩塌,严重堰塞绵远河,并形成高约70 m的堰塞坝^[23],由于堰塞体的存在,泥石流冲入绵远河后,更容易堵塞河流,形成堰塞湖。据工程勘察结果^[21],震后小岗剑流域产生崩塌、滑坡共24处(图1),形成了 334.3×10^4 m⁴ 的松散物质,其中,崩滑体物源总储量为 127.3×10^4 m³,沟道及两侧沟床物源量为 207×10^4 m³。2009-09-08,清平乡突降暴雨,小岗剑沟发生泥石流堵断绵(竹)茂(县)路汉(旺)清(平)段和绵远河,造成交通中断。据统计,小岗剑沟2009—2011年发生泥石流共10次,3次冲入绵远河形成堰塞湖,最严重的一次在2010-07-30,在河道内堆积成高约13 m、宽8 m、长200 m堰塞体,致使小岗剑沟至清平磷矿大桥段水位升高,淹没道路,进出清平乡境内道路完全中断。

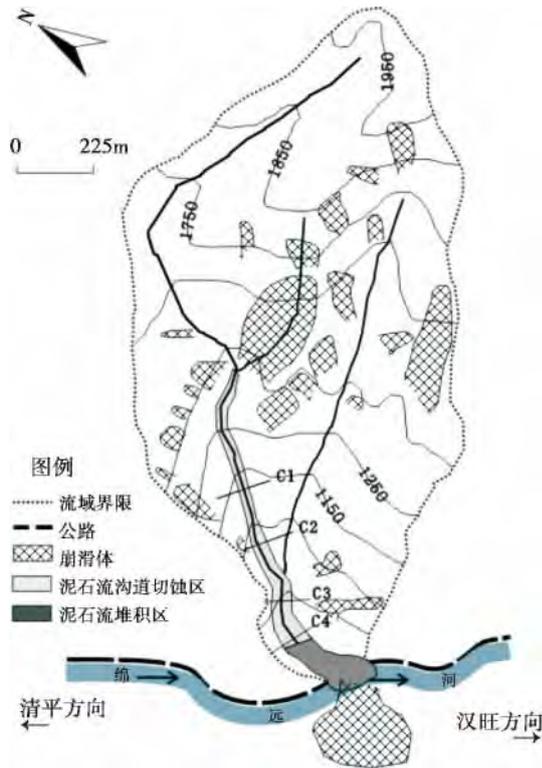


图1 小岗剑沟流域略图

Fig. 1 Sketch of Xiaogangjian area

小岗剑沟泥石流,其危害对象主要为进出清平乡的生命线——绵茂路汉清段,严重影响绵竹市清平乡居民的生产生活。主要成灾方式为淤埋公路、堵塞绵远河形成堰塞湖回水淹没上游公路、泥石流向下高强度输沙抬升河道而淤埋下游公路^[7](图2)。

2.2 灾害链衰减特性

地震后滑坡、崩塌产生的物质总量为 $334.3 \times$

10^4 m^4 ,而泥石流冲出量约为 $50 \times 10^4 \text{ m}^4$,其中能够进入绵远河并形成堰塞湖的方量为 $14 \times 10^4 \text{ m}^4$ 。将引起下一级灾害的土石方量与引起上一级灾害的土石方量的比值称为灾害链衰减率^[16]。根据上述数据和灾害链衰减率的计算方法得出:滑坡→泥石流衰减率为15%,泥石流→堰塞湖灾害衰减率为28%。整条链的综合衰减率为21.5%。

针对频发型次生灾害链,其衰减不仅体现在各次生灾害环节的关系上,也体现在随时间变化的灾害激发条件上。小岗剑沟距楠木沟3.5 km,距清平乡5 km。2009年,小岗剑沟在暴雨的激发下发生山体滑坡和泥石流,虽仅冲出物质 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,但在沟道内累积了较多的松散物质。2010-07-30仅在中到大雨的激发下,就多次发生泥石流,并堵断绵远河堰塞湖导流渠,形成坝高约13 m的二次堰塞坝体。2010-08-13特大暴雨诱发群发性泥石流,小岗剑沟连续冲出物质达 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。与2010年度比较,2011年的总冲出物质量减小了50%,小岗剑沟泥石流激发降雨量在总体上有所提高。2011年雨季刚开始的100.3 mm/d降雨量仅产生 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ 泥石流物质;7月3日至5日连续强降雨,也只有在后2 d发生泥石流灾害,最严重的是7月4日的泥石流堰塞河流,形成的堰塞湖上游回水淹没公路;8月19日的182.4 mm/d降雨量在第二天才诱发泥石流灾害,形成堰塞湖并淹没公路40~50 cm。不过2011年7、8月的泥石流仅形成3 m的二次堰塞坝体;9月5日之前的前期降雨比较充足,9月5日泥石流冲出物质达 $6 \times 10^4 \text{ m}^3$,堰塞湖回水淹没小岗剑沟上游公路1~2 m,是2011年灾害最重的一次。



a. 小岗剑沟上游堰塞湖和路基损毁情况



b. 小岗剑沟下游隧洞

图2 小岗剑沟泥石流对公路的危害

Fig. 2 Harm to the highway near the Xiaogangjian gully

地震形成的松散物质空隙率大,大都处于不稳定状态,在雨水作用下很容易失稳、启动形成泥石流。根据对台湾“9·21”集集地区地震后泥石流的研究,震后泥石流启动的最大小时雨强和临界累计降雨量较震前明显降低约 1/3^[24-25]。根据对 2008 年北川县“9·24”泥石流的形成雨量的研究发现,地震后该区域泥石流启动的前期累计雨量降低了 14.8% ~ 22.1%,小时雨强降低了 25.4% ~ 31.6%^[26]。震前和震后临界降雨量变化研究较多,但很少关注震后临界过程降雨量的变化。从震后的小岗剑沟最低泥石流临界过程激发雨量看,3 a 的数值分别为 80 mm、18.5 mm 和 76.5 mm。2011 年的最低降雨量是 2010 年的 4 倍,而且除 8 月 13 日泥石流外,2011 年每次引发泥石流降雨量比 2010 年同期数值要高,形成的泥石流物质却减少,泥石流规模和形成的危害程度都要小的多,可见小岗剑沟泥石流激发条件提高。

3 泥石流治理工程及其灾害链断链效果

3.1 治理工程及破坏情况

2011 年底,小岗剑沟泥石流治理工程开始修建,于 2012 年上半年完工。工程主要是,在主沟上段、中段各布置 1 座缝隙坝,在沟口附近布置 3 座拦沙坝,左支沟上布置 1 座缝隙坝和 1 条引流槛,用于拦截石块和引水。从主沟第二座拦沙坝开始布置 1

条泥石流导流槽,直接通往新修公路和绵远河中间的停淤场,公路从导流槽下部的明确穿过。但在 2012-08-14,小岗剑沟再次发生泥石流,导致 1# 缝隙坝完全损毁,2# 缝隙坝被损毁一半,同时被向下掏底 5 m,主沟内的 3 座拦沙坝和停淤场淤满,沟谷展宽到支沟上的引流槛一侧,另有巨石堵住了导流槽,泥石流物质从槽内溢出,堵塞了公路(图 4)。

小岗剑沟泥石流于 2012 年 8 月再次发生后,沟道发生了严重变化(图 5,断面位置见图 1)。地震后,崩塌产生的碎屑物停留在沟道内,并未冲出沟口。震后的多次泥石流不仅使沟口段表层的灌丛植被尽数被毁,原堆积台地也遭强烈冲刷,断面 1 达 18 m,其他 3 个断面下切深度为 28 m 左右。2011 年的泥石流冲出固体方量的统计数据为 $50 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。2012 年小岗剑沟泥石流治理工程结束,且从 5 月到 8 月的雨季期间,没有发生明显的泥石流灾害,直到 8 月。从纵剖面(图 6)可以看出,断面 1~2 所在位置是泥石流形成流通区,由于 1#、2# 缝隙坝的破坏,沟道加深并展宽,与 2011 年比较,切深深度约为 12 m,沟谷展宽到 70 m。断面 3 在 1# 拦沙坝上游,断面 4 在 2# 拦沙坝上侧,中间的低处为排导槽剖面。2012 年泥石流后,拦沙坝并未损毁,不过其中 1# 拦沙坝有掏底现象。从断面测量结果看,只是底部被泥石流物质淤高了约 10 m。

3.2 可动势能与沟道保护

根据公式(1),泥石流重度采用 $1.94 \times 10^4 \text{ N/m}^3$,计算出小岗剑沟每年度结束后的可动势能,并与

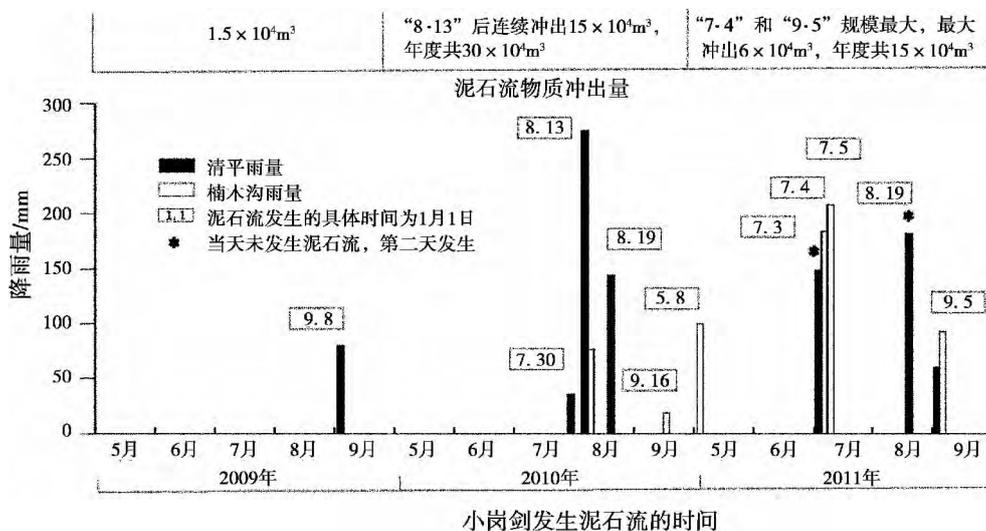


图 3 小岗剑沟雨量与泥石流发生关系图

Fig. 3 The relationship of rainfall and debris flow



图4 2012年小岗剑沟泥石流治理工程受损情况

Fig.4 Engineerings destroyed by the debris flow in 2012

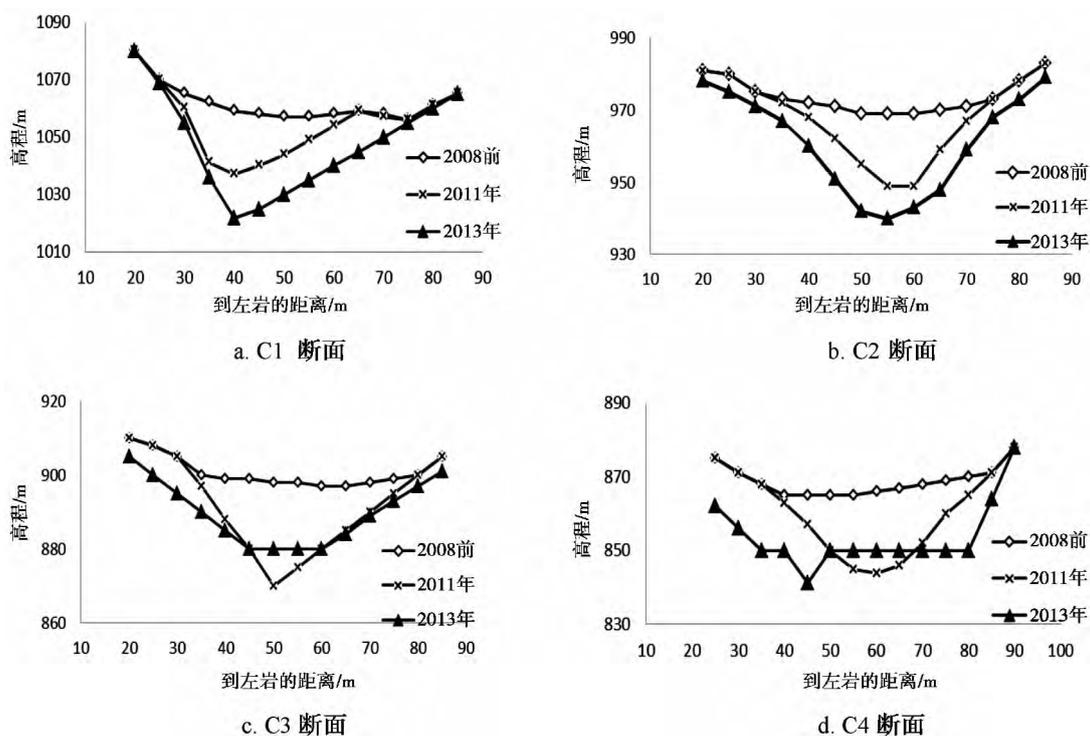


图5 小岗剑沟横断面变化图

Fig.5 Cross sections of the channel pre -2008 2011 and 2013

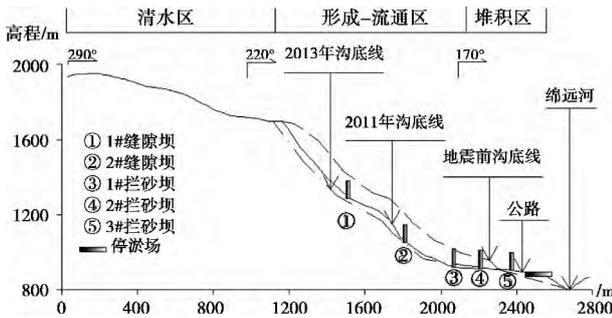


图 6 小岗剑沟纵剖面变化及工程示意图

Fig. 6 Longitudinal profiles of the channel pre-2008, 2011 and 2013 and the location of engineering

每年泥石流最小激发降雨量做比较(图 7)。可以看出 2009—2010 年, 临界街降雨量与可动势能增长呈现相反变化, 可能是由于泥石流刚启动, 激发雨量略大; 2010 年后, 按照一般规律, 泥石流会随时间衰减, 临界降雨量会升高, 但是由于沟道被不断切深, 小岗剑沟可动势能也在逐年增加, 后期治理工程建设但被损坏, 泥石流沟谷再次切深。工程建设前 2011 年的可动势能为 0.56×10^{12} J, 2012 年工程损毁后可动势能增大到 0.70×10^{12} J, 增大幅度为 25%。小岗剑沟治理工程失败后, 危险程度增加。为防止泥石流沟被继续冲蚀下切, 需要保护沟底并增加泥石流消能结构。小岗剑沟泥石流的形成-流通区地势陡峻, 在工程失败后安排拦挡工程难度进一步加大, 尤其是在原 1#-2# 缝隙坝段(见图 6)。所以, 除了按照工程规划稳定下游拦沙坝和边坡外, 建议在泥石流沟原 1#~2# 缝隙坝间搭建施工简易的阶梯-深潭结构(图 8), 每级阶梯需要 2~4 块巨石, 并用大石头嵌入形成互锁结构, 以增加稳定性, 在沟道两翼安放铁石笼用来保护边坡, 这种结构可以很好的增加沟道阻力, 并避免沟床下切^[21]。当泥石流流量较大时, 阶梯深潭结构可能会被破坏, 但由于巨石的存在, 会在较短时间内再次形成阶梯深潭结构, 延长抢险时间。

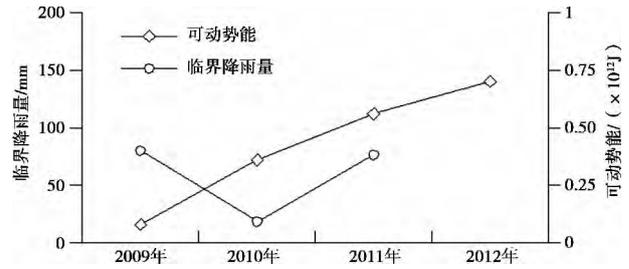


图 7 小岗剑沟临界降雨量与可动势能年度变化图

Fig. 7 The minimum excitation of rainfall and dynamic potential energy

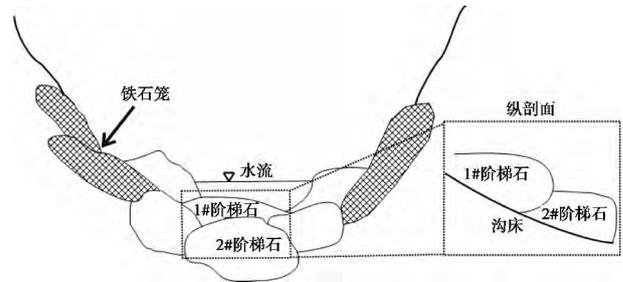


图 8 泥石流沟内阶梯-深潭结构示意图

Fig. 8 Artificial step-pool system suggested in Xiaogangjian gully

3.3 总能量与投资

小岗剑沟历史上最大泥石流一次冲出量为 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$, 前期耗资 5 000 万元, 未能完全治理, 后期欲投资 600 万元加固。文家沟是绵远河的另一条深切支沟, 距离小岗剑沟约 5 km, 曾投资 9 000 万元治理 $450 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的泥石流将其完全损毁, 后又耗资 25 000 万元治理, 情况至今比较稳定。红椿沟位于汶川映秀新城对面, 沟口是岷江, 工程修建前泥石流冲出量为 $80.5 \times 10^4 \text{ m}^3$, 投资 14 000 万元治理, 至今情况稳定。

表 1 记录的是 3 条泥石流沟相关数据, 灾害链总能量按公式(2)计算, 文家沟泥石流重度和小岗剑沟类似, 计算时采用 $1.94 \times 10^4 \text{ N/m}^3$, 红椿沟泥石流重度采用 $2.1 \times 10^4 \text{ N/m}^3$, 能量投资强度为投资和泥石流总能量的比值。可以看出, 文家沟仅冲出

表 1 泥石流沟对比

Table 1 The comparison of the prevention engineering

泥石流沟名	流域面积 /km ²	主沟长度 /km	主沟高差 /m	震后松散物质量 /($\times 10^4 \text{ m}^3$)	灾害链总能量 /($\times 10^{12} \text{ J}$)	投资 /($\times 10^8$ 元)	能量投资强度 /($\text{元}/10^8 \text{ J}$)	泥石流沟稳定状况
小岗剑沟	1.36	2.59	1 177	334.4	20	0.5	250	工程部分被损毁
文家沟	7.8	3.25	1 360	8 160	780	0.9	1	工程完全被损毁
红椿沟	7.68	3.6	1 288.4	357	735	2.5	30	至今较为稳定
					49.6	1.4	280	至今较为稳定

沟口的总量就大于小岗剑沟和红椿沟的物质总量,说明文家沟泥石流的危险程度很高。从能量与泥石流治理投资的角度对比,鉴于小岗剑沟只是部分工程损毁,其 20×10^{12} J 需要首次投资要略高于5 000 万元,工程失败后再进行加固,由于沟道情况恶化,可能需要消耗的更多;红椿沟工程投资底线应在14 000万元之下,其总能量为小岗剑沟的2.48倍,如果能按照比例计算,小岗剑沟需要首次投资5 650 万元,符合期望;而文家沟能量虽是红椿沟的19倍,投资却未按比例增长,仅为红椿沟投资的1.8倍,同时,以 $1 \text{元}/10^8 \text{J}$ 的投资强度治理文家沟可谓杯水车薪,工程投资的不合理造成了在文家沟发生方量达 $450 \times 10^4 \text{m}^3$ 的泥石流后,原建20座坝全被冲毁,沟床遭到严重下切,14人死亡,大量震后新建民居被埋的严重后果。可以看出,泥石流能量与投资正相关,要根据灾害能量进行合理投资,降低后发灾害风险;同时,当能量到达一定量时,单位能量需要的投资大幅度降低。

4 结 论

小岗剑沟在地震后产生了大量的松散物质,沟床平均纵比降达412‰,降雨充沛,形成了以频发性泥石流为主的典型次生山地灾害链:滑坡、崩塌→强降雨诱发泥石流→损毁公路、堰塞绵远河。灾害链主要威胁绵茂公路汉清段安全及其上下游可能被淹没或淤埋的区域。小岗剑沟频发型次生山地灾害链的衰减,不仅体现在引起下一级次生灾害的土石方量逐级减小上,而且体现在随时间变化的灾害激发条件提高上。

小岗剑沟泥石流治理工程没有完全切断灾害链。虽然从泥石流临界降雨量和泥石流规模上看,泥石流激发条件提高,但由于沟床不断被切深,泥石流危险性随着可动势能增大而逐年增大;人工断链失败后,沟床再次下切,建议使用阶梯-深潭结构增加沟道阻力,保护沟道底部,避免可动势能继续增大。通过与文家沟和红椿沟泥石流治理工程做比较,发现灾害链总能量与投资正相关,要根据灾害总能量进行合理投资,降低后发灾害风险;同时,当能量到达一定量时,单位能量需要的投资大幅度降低。

致谢:感谢中科院水利部成都山地灾害与环境研究所陈晓清研究员为本文提供小岗剑泥石流应急治理工程可行性研究报告。文中2011年前数据取

自于上述报告。

参考文献(References)

- [1] Researches on the geo-hazards triggered by Wenchuan Earthquake, Sichuan [J]. Journal of Engineering Geology 2008, 16(4): 433 - 444 [殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(4): 433 - 444]
- [2] Huang Runqiu. After effect of geohazards induced by the Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Engineering Geology 2011, 19(2): 145 - 151 [黄润秋. 汶川地震地质灾害后效应分析[J]. 工程地质学报 2011, 19(2): 145 - 151]
- [3] Cui Yun, Kong Jiming, Tian Shujun, et al. The critical role for heavy rainfall in the evolution of the mountain hazards chains [J]. Mountain Research 2011, 29(1): 87 - 94 [崔云, 孔纪名, 田述军, 等. 强降雨在山地灾害链成灾演化中的关键控制作用[J]. 山地学报 2011, 29(1): 87 - 94]
- [4] Cui Peng, Xiang Lingzhi, Zou Qiang. Risk assessment of highways affected by debris flows in Wenchuan earthquake area [J]. Mountain Research 2013, 10(2): 173 - 189
- [5] Tang Chuan, Li Weile, Ding Jun, 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 [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]. 地球科学—中国地质大学学报, 2011, 36(1): 172 - 180]
- [6] Hu Xiewen, Lv Xiaoping, Huang Runqiu, et al. Analyses of river-blocking and breaking mode of “9.24” debris flow near Tangjiashan barrier dam [J]. Journal of Southwest Jiaotong University 2009, 44(3): 312 - 326 [胡卸文, 吕小平, 黄润秋, 等. 唐家山堰塞坝“9.24”泥石流堵江及溃决模式[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(3): 312 - 326]
- [7] Yang Dongxu, Chen Xiaoqing, You Yong, et al. The debris flow development trend of in Xiaogangjian Gully in Mianzhu County, Wenchuan Earthquake Zone [J]. Mountain Research 2012, 30(6): 701 - 708 [杨东旭, 陈晓清, 游勇, 等. 汶川地震区绵竹小岗剑沟泥石流发展趋势[J]. 山地学报 2012, 30(6): 701 - 708]
- [8] Chen Zunlan, Cui Peng, Li Yong, et al. Major disasters and control measures of dammed lakes from landslides and debris flows [J]. Mountain Research 2008, 26(6): 733 - 738 [程尊兰, 崔鹏, 李泳, 等. 滑坡、泥石流堰塞湖灾害主要的成灾特点与减灾对策[J]. 山地学报 2008, 26(6): 733 - 738]
- [9] Wen Tzu Lin, Chao Yuan Lin, Jing Shyan Tsai, et al. Eco-environmental changes assessment at the Chiufenershan landslide area caused by catastrophic earthquake in Central Taiwan [J]. Ecological Engineering 2008, 33: 220 - 232
- [10] 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 [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]
- [11] Koi T ,Hotta N ,Ishigaki I ,et al. Prolonged impact of earthquake induced landslides on sediment yield in a mountain watershed: The Tanzawa region ,Japan[J]. *Geomorphology* 2008 ,101:692 – 702
- [12] Men Kepei and Gao Jianguo. Severe disaster chain and its defense [J]. *Progress in Geophysics* ,2008 23(1) :270 – 275 [门可佩 ,高建国. 重大灾害链及其防御[J]. *地球物理学进展* 2008 23(1) :270 – 275]
- [13] Han Jinliang ,Wu Shuren ,Wang Huabin. Preliminary study on geological hazard chains [J]. *Earth Science Frontiers* ,2007 ,14(6) :11 – 23 [韩金良 ,吴树仁 ,汪华斌. 地质灾害链[J]. *地质学前沿* 2007 ,14(6) :11 – 23]
- [14] Wang Chunzhen ,Chen Guojie ,Tan Rongzhi ,et al. Preliminary study on the secondary mountain disaster chains induced by Wenchuan Earthquake [J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition* 2009 41(Suppl.) :84 – 88 [王春振 ,陈国阶 ,谭荣志,等. “5·12”汶川地震次生山地灾害链(网)的初步研究[J]. *四川大学学报:工程科学版* 2009 41(增刊) :84 – 88]
- [15] Xiang Lingzhi ,Cui Peng and Fang Hua. Mechanism of disaster chain after earthquake and the impact to urban reconstruction in Wenchuan Earthquake area [J]. *Journal of Catastrophology* 2010 ,25(S) :278 – 281 [向灵芝 ,崔鹏 ,方华. 震后灾害链生机制及其对汶川地震城镇重建的影响[J]. *灾害学* ,2010 25(增刊) :278 – 281]
- [16] Xu Mengzhen ,Wang Zhaoyin ,Qi Lijian ,et al. Disaster chains initiated by the Wenchuan earthquake [J]. *Environ Earth Sci* 2012 ,65:975 – 985
- [17] Zhong Dunlun ,Xie Hong ,Wei Fangqiang ,et al. Discussion on mountain hazards chain [J]. *Mountain Research* 2013 31(3) :314 – 326 [钟敦伦 ,谢洪 ,韦方强,等. 论山地灾害链[J]. *山地学报* 2013 31(3) :314 – 326]
- [18] Li Ming ,Tang Hongmei and Ye Siqiao. Research on chain rule of typical geological disaster [J]. *Journal of Catastrophology* 2008 ,23(1) :1 – 5 [李明 ,唐红梅 ,叶四桥. 典型地质灾害链式机理研究[J]. *灾害学* 2008 23(1) :1 – 5]
- [19] Cui Peng ,He Siming ,Yao Lingkan ,et al. Mountain hazards formation mechanism and risk control in Wenchuan Earthquake [M]. Beijing: Science Press 2011. [崔鹏 ,何思明 ,姚令侃,等. 汶川地震山地灾害形成机理与风险控制[M]. 北京:科学出版社,2011.]
- [20] Chen Xiaoqing ,You Yong ,Cui Peng ,et al. New control methods for large debris flows in Wenchuan Earthquake area [J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition* 2013 45(1) :14 – 22 [程晓清 ,游勇 ,崔鹏,等. 汶川地震区特大泥石流工程防治新技术探索[J]. *四川大学学报:工程科学版* 2013 45(1) :14 – 22]
- [21] Wang Zhaoyin ,Qi Lijian ,Wang Xuzhao. A prototype experiment of debris flow control with energy dissipation structures [J]. *Natural Hazards* 2011 60:971 – 989
- [22] You Yong ,Chen Xiaoqing. Feasibility study report of Xiaogangjian debris-flow mitigation in Mianzhu County [R]. Chengdu: Institute of Mountain Hazards and Environment ,CAS 2011. [游勇 ,陈晓清. 绵茂路汉清段小岗剑泥石流应急治理工程可行性研究报告[R]. 成都:中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所 2011.]
- [23] Qiu Zhixing ,Li Shujian. Emergency treatment of Xiaogangjian barrier lake within Mianyuan River [J]. *Water Resources and Hydro-power Technique* 2008 39(8) :36 – 38 [邱焯兴 ,李书健. 绵远河小岗剑(上)堰塞湖应急排险处理[J]. *水利水电技术* ,2008 39(8) :36 – 38]
- [24] Lin C ,Shieh C ,Yuan B ,et al. Impact of Chi – Chi earthquake on the occurrence of landslides and debris flows: example from the Chenyulan River watershed ,Nantou ,Taiwan [J]. *Engineering Geology* 2003 71(1 – 2) :49 – 61
- [25] Lin C ,Huang H ,Dong J. Impact of September 21 ,1999 Chi – Chi earthquake on the characteristics of gully-type debris flows in central Taiwan [J]. *Natural Hazards* 2008 47(3) :349 – 368
- [26] Tang Chuan ,Liang Jingtao. Characteristics of debris flows in Beichuan epicenter of the Wenchuan Earthquake triggered by rain-storm on September 24 2008 [J]. *Journal of Engineering Geology* 2008 ,16(6) :751 – 758 [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]

Secondary Mountain Disaster Chain Induced by the Wenchuan Earthquake and the Result of Chain-cutting Engineering in the Xiaogangjian Gully

LI Wenxin^{1 2}, WANG Zhaoyin³, WANG Xuzhao⁴, QI Lijian⁵, HE Xiaoyan⁶

- (1. *China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*; 2. *Gansu Provincial Coal Geological Exploration Institute, Lanzhou 730000, China*;
3. *State Key Laboratory of Hydro-Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*;
4. *Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing 100012, China*; 5. *Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China*;
6. *China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100038, China*)

Abstract: There were a great mass of collapse and landslide induced by Wenchuan earthquake in Xiaogangjian gully of Sichuan, China which had an average longitudinal slope of 412‰. Then, the frequent rainstorms had led to 10 debris flows between 2009 and 2011. Following collapse and landslide, debris flows that buried the highway and blocked the Mianyuan River, quake lake, disasters occurred frequently, resulting in a secondary disaster chain. Chain-cutting engineering finished before rainy season were destroyed partly by debris flow occurred in August, 2012. Field investigation combined with former materials studied the processes and characteristics of the secondary disasters and the result of chain-cutting engineering in Xiaogangjian gully, finally come to some conclusions and recommendations. 1. The attenuation factor of occurred frequently disaster chain is not only reflected in the volume of mass movement or affected area decreasing episode by episode, but also, as time goes on, in the disaster excitation condition improving. 2. However, Xiaogangjian gully becomes more dangerous with the dynamic potential energy increasing due to the bed scoured down in the process of debris flow by years, especially after the failure of chain-cutting engineering. Artificial step-pool system is suggested to enhance the resistance to the flow and protect the gully bed from erosion. 3. Reasonable Investment, a key element for chain-cutting project, based on the comparison of the prevention engineering in Xiaogangjian gully, Wenjiagou gully and Hongchungou gully, increases as the total potential energy of disaster chain is larger. The investment needed for unit energy decreases dramatically when the total potential energy is large enough.

Key words: Wenchuan earthquake; disaster chain; control work; step-pool system