

# 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

周海波<sup>1 2</sup> 陈宁生<sup>1</sup> 卢阳<sup>1 2</sup> 李兵<sup>3</sup>

( 1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所,中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室 四川 成都 610041;

2. 中国科学院研究生院 北京 100049; 3. 四川省交通厅公路规划勘察设计研究院 四川 成都 610041)

**摘 要:** 谷坊坝是泥石流治理的重要工程措施之一。化石板沟泥石流治理工程共设 13 座谷坊坝,组成梯级谷坊坝群;坝体主要分布在泥石流形成区和流通区,混凝土结构,轴向两端嵌入沟道两侧基岩 0.5 ~ 1 m。通过对比化石板沟谷坊工程修建前后沟床纵坡比降、沟道两侧斜坡稳定性及泥石流侵蚀速率等方面的差异,证明谷坊工程能够有效拦蓄松散固体物质、稳固沟床和岸坡、降低沟道纵坡比降、降低泥石流流速和耗散流体能量、抬高沟道上游泥石流侵蚀基准面。研究发现,化石板沟谷坊坝群共拦截固体物质  $2.76 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,仅占流域物源总量  $574.9 \times 10^4 \text{ m}^3$  的 0.5%,占近期可供给泥石流活动的物源量  $85 \times 10^4 \text{ m}^3$  的 3.3%;稳固沟床松散物质  $4.37 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,仅占流域物源总量的 0.76%,占近期可供给泥石流活动的物源量的 5.2%;稳固沟道两侧坡体松散物质  $134.07 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,占流域物源总量的 23.3%,泥石流物源减少;回淤的沟道比降为原比降的 60% ~ 75%,相同频率下泥石流流速、峰值流量降低,沟道侵蚀速率下降,泥石流输沙量减少 35% ~ 57%;上游泥石流支沟侵蚀基准面抬升 0.3 ~ 0.5 m。泥石流呈现从粘性到稀性,再到含沙水流的趋势发展。

**关键词:** 泥石流; 谷坊坝群; 防治效益

**中图分类号:** 642.23

**文献标识码:** A

泥石流是一种特殊的、对人类及其生存环境危害极大的山区自然地质灾害<sup>[1]</sup>。汶川地震导致大量山体崩塌滑坡、植被毁损,坡体组成物质异常松散,为地震次生泥石流形成和运动提供能量和物源,泥石流防治日益成为重要的研究课题。例如,2008-09-24 北川县暴雨泥石流灾害造成 42 人死亡,严重损毁公路和其他基础设施<sup>[2-3]</sup>;2010-06-08 我国舟曲、映秀、都江堰等 16 条沟发生泥石流灾害,死亡失踪 2 500 多人,经济损失近百亿人民币<sup>[4-5]</sup>。当前,主要采取岩土工程和生物工程措施综合防治泥石流,岩土工程措施主要包括谷坊、拦砂坝和排导槽等,起到拦截和储存砂石、减缓沟床纵坡、减少纵

向和横向侵蚀、减小下泄流量、减轻沟道下游泥石流规模以及疏导泥石流的作用<sup>[6-8]</sup>。

谷坊是指防治泥石流所使用的横置于上游沟床内的坝体,是应用比较普遍的泥石流防治工程,国外也称拦砂坝。19 世纪欧洲谷坊的建造已经很普遍,20 世纪初谷坊被引进到日本<sup>[6]</sup>。20 世纪 50 年代中国开始比较系统地开展泥石流灾害观测和防治研究工作,谷坊工程也随之被大量用来防治泥石流的形成。谷坊工程常常被认为是防治泥石流发育的有效工程措施之一,其防治效益已被广泛研究,但有关谷坊在地震次生泥石流沟的防治效益,特别是间接效益却很少有人进行报道,例如谷坊坝工程使泥石流

收稿日期( Received date ): 2012 - 02 - 29; 改回日期( Accepted ): 2012 - 03 - 31。

基金项目( Foundation item ): 十二五国家科技支撑项目: 龙门山地震带小流域滑坡泥石流灾害监测预警技术与示范( 2011BAK12B02 )。

[ “12th Five - Year Plan” National Science & Technology Support Plan Project, research on landslide and debris flow monitoring and warning technical in small watershed along Longmenshan earthquake belt( 2011BAK12B02 ) . ]

作者简介( Biography ): 周海波( 1985 - ), 男,四川合江人,硕士研究生,岩土工程专业,主要从事山地灾害形成机理及防治技术方面研究。

[ Zhou Haibo ( 1985 - ), male, born in Hejiang, Sichuan Province, master, geotechnical engineering, majoring in the formation mechanism and prevention technique of debris flow and landslide. ] E - mail: zhouhaibo09@ mails. gucas. ac. cn

性质变化,因涉及因素较多,如坝型、库容状态、上游固体物质来源等,研究的难度较大、研究较少。

化石板沟是汶川特大地震次生灾害性泥石流沟,现已修建谷坊坝群工程治理泥石流。为弥补间接防治效益的研究缺失,本文以化石板沟谷坊坝群为研究对象,分析其稳固沟床和边坡、削减泥石流峰值流量、降低泥石流密度、改变泥石流性质以及提高上游支沟侵蚀基准面等方面的效益,并对泥石流工程减灾措施提出进一步的建议。

## 1 化石板沟概况

### 1.1 地形

化石板沟发源于帽壳山,流域西高东低,最高海拔 1762 m(帽壳山),最低 756 m,于  $N31^{\circ}49.08'$ 、 $E104^{\circ}26.85'$  汇入新沟;流域面积  $1.37 \text{ km}^2$ ,总体呈条带状;沟谷形态多呈“V”型,海拔 730~887 m 段为“U”型;主沟长 2.517 km,近东西走向,沟道顺直,平均沟床比降 264.20‰;沟道两侧斜坡较陡,坡度  $25^{\circ} \sim 55^{\circ}$ ,少数可达  $60^{\circ}$  以上;地震前沟道整体呈“V”型,植被茂盛,沟底宽约 2 m,深约 1 m,经 2008-09-24 泥石流冲切,沟宽 4~18 m,深 1~4 m(表 1 图 1)。

### 1.2 工程地质条件

表 1 化石板沟地形特征参数表

Table 1 parameters of topography and landform, Huashiban gully

分区	面积/ $\text{km}^2$	沟长/km	最高点/m	最低点/m	平均坡降/‰
全沟	1.31	2.517	1395	730	264.20
形成流通区	1.19	1.617	1395	910	299.94
堆积区	0.203	1.218	900	707	158.38

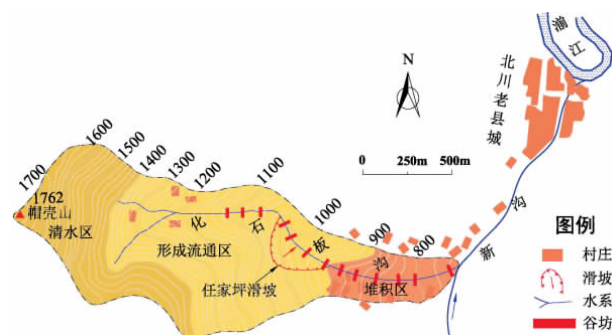


图 1 化石板沟流域位置和谷坊坝平面布置图

Fig. 1 Huashiban Gully basin location and Planar graph of check dams

地震与泥石流灾害关系密切<sup>[9-11]</sup>。化石板沟位于北川-映秀断裂带上盘,与断裂带呈  $40^{\circ} \sim 45^{\circ}$  夹角,汶川地震时流域断裂现象明显,附近的断层上下盘错动 1.5~2 m,拉伸断裂裂隙宽 10~25 mm,深 15~40 mm。沟道两侧及后缘有大量滑坡和溜滑体,可成为泥石流物源。流域主要出露寒武系下统清平组( $\epsilon_1q$ )灰色粉砂岩、深灰色中厚层砂岩夹深灰色中厚层钙质岩屑砂岩。第四纪覆盖层主要分布在山前斜坡、沟谷地带,以冲洪积物与残坡积物为主。其中,沟道两侧冲洪积层厚 3~15 m,残坡积层厚 2~5 m,主要为粘土和碎石土。

### 1.3 地震次生泥石流发育特征

化石板沟在 2008-05-12 地震之前发生过泥石流:1992-07-24 和 1995-08-12 暴雨激发泥石流,汇入主沟道后掩埋毁坏房屋造成经济损失。由于地震前工程治理和植被恢复,泥石流基本进入衰退期,只有洪水出现。因此,现今化石板沟是地震次生灾害性泥石流沟。

化石板沟流域处于北川-映秀断裂带(即龙门山中央断裂)上盘,汶川特大地震使沟内产生大量滑坡和崩塌,提供泥石流物源总量  $574.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ (表 2),其中 H2 和 H5 为大型滑坡,约  $530.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,近期可供给泥石流活动的物源量约  $85 \times 10^4 \text{ m}^3$ (图 2、图 3)。

流域内降水充足,震后松散固体物质丰富,比较容易发生泥石流灾害。2008-09-24 泥石流冲出量约  $23.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,其中 H2 滑坡活动量  $12 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,占冲出总量的 51.06%,H5 滑坡活动量  $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,占 10.64%,其他  $9 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,占 38.3%。

## 2 谷坊坝群工程

化石板沟已建 13 道谷坊组成梯级谷坊坝群(见图 1,由上游往下游依次为 1~13#坝),主要分布在泥石流形成流通区,坝体为浆砌混凝土结构,轴向两端楔入基岩 0.5~1 m。谷坊坝体高度 4.2~7 m,宽 16.5~35 m,其中 9#坝最小,坝高仅 4.2 m,宽 16.5 m(表 3);排水孔均为圆形,直径 0.40~0.60 m,开孔间距 1.60~2.40 m,其中 5#坝坝址位于 H2 滑坡局部失稳段,坝后松散固体物质颗粒直径 0.05~0.5 m,因此坝体开孔数目较多,间距较小,为 1.6 m,坝身开设上下 2 排圆孔共 9 个,呈“品”字形布设。

表2 化石板沟流域物源分布特征

Table 2 Distribution characteristics of soil source in Huashiban gully

编号	类型	位置	平均厚度/m	面积/m <sup>2</sup>	体积/m <sup>3</sup>	合计/m <sup>3</sup>	稳定性
H1	坡面溜滑	中游	3.2	11 730	37 536	5 749 394	潜在不稳定
H2	滑坡	中游	26.0	109 485	2 846 610		局部欠稳定
H3	坡面溜滑	中游	6.0	7 545	45 270		欠稳定
H4	坡面溜滑	上游	3.5	8 190	28 665		欠稳定
H5	滑坡	上游	17.0	144 500	2 456 500		潜在不稳定
H6	不稳定斜坡	上游	32.0	6 607	211 424		潜在不稳定
H7	坡面溜滑	上游	4.5	11 709	52 691		欠稳定
	沟道堆积物	沟道	3.0	23 566	70 698		潜在不稳定



图2 H2 滑坡全貌

Fig.2 Overview of H2 slope



图3 H5 滑坡全貌

Fig. 3 Overview of H5 slope

表3 化石板沟梯级谷坊坝实测参数

Table 3 Parameters of cascade check dams in Huashiban gully

坝号	坝宽/m	坝高/m	坝间距/m	回淤长度/m	已拦砂量 /m <sup>3</sup>	淤积状态	防冲肋板悬空高度/m	坝址径流排泄方式
1#	21.5	5.2	*	50.00	1 677	满库	1.6	坝底渗流和排水孔
2#	21.0	5.0	110.00	44.00	1 386	满库	1.0	溢流口和排水孔
3#	20.0	5.5	79.65	26.28	867	满库	4.0	溢流口和排水孔
4#	31.5	7.8	105.12	34.69	2 556	半库	0	地下渗流
5#	23.0	6.0	105.78	52.89	2 189	半库	2.0	地下渗流
6#	18.5	6.0	81.32	40.71	1 355	半库	3.4	地下渗流
7#	28.0	5.0	83.69	41.85	1 757	半库	2.5	排水孔
8#	22.0	5.0	128.94	42.55	1 404	1/4 库	2.5	排水孔
9#	16.5	4.2	146.58	73.29	1 523	满库	1.5	溢流口和排水孔
10#	32.0	6.2	105.04	34.66	2 063	半库	1.0	溢流口和排水孔
11#	26.3	6.0	138.48	45.70	2 163	1/3 库	1.5	地下渗流
12#	27.5	5.2	133.25	43.97	1 886	1/4 库	0.8	地下渗流
13#	35.0	7.0	369.45	92.36	6 788	满库	1.0	溢流口和排水孔



图4 3#坝防冲肋板底部被掏蚀  
Fig. 4 Basement of the third dam being erosion



图5 4#坝坝址处以地下渗流排泄水流  
Fig. 5 Groundwater seepage beneath the forth dam

坝体竣工后化石板沟已发生泥石流,部分坝体前缘防冲肋板底部遭到不同程度掏蚀,其中3#坝防冲肋板悬空4 m(图4);4#~6#、11#~12#坝的坝址处以地下渗流排泄沟道水流(图5);5#坝坝址前出现鼓胀裂纹,裂纹沿坝延展方向基本保持平行,坝前防冲肋板悬空2 m,板内侵蚀坑深约0.15 m;5#~6#坝之间沟道陡坡段与平直段长度比为1:1,沟道中无水流出现;8#坝轴向与帽壳子滑坡轴线基本平行,坝前防冲肋板内侵蚀坑为椭圆形,轴长0.33 m,轴宽0.16 m,深0.15 m,侵蚀坑下部长0.60 m,宽0.30 m,肋板悬空2.5 m;8#~9#坝基岩出露,岩层产状 $313^{\circ}\angle 53^{\circ}\sim 60^{\circ}$ ,层间褶曲发育,局部基岩破碎,易产生掉块。

### 3 谷坊坝群防治效益

#### 3.1 拦蓄泥沙

谷坊群共拦截固体物质 $2.76\times 10^4\text{ m}^3$ (表4),仅占流域物源总量 $574.9\times 10^4\text{ m}^3$ 的0.5%,占近期可供泥石流活动的物源量 $85\times 10^4\text{ m}^3$ 的3.3%,多数谷坊坝在修建当年即被淤满,进而间接稳固沟床和沟道两侧斜坡。1~3#坝址位于泥石流形成区,已满库,水流经溢流口和排水孔流出,沟道内水流流速和流量由陡峻段流至平直段后逐渐降低;4#~7#坝为半库,坝址位于H2滑坡前缘滑舌处,其中5#坝回淤34.69 m,淤积 $0.26\times 10^4\text{ m}^3$ ,4#~6#坝体间陡坡段主要堆积块碎石,平直段堆积细颗粒物,回淤段内地表水下渗流经坝底;8#~13#坝的沟道比降较小,拦截的松散物质主要来于H2滑坡,其中9#坝满库,回淤73.29 m。

表4 化石板沟谷坊群防治效益分析表

Table 4 Prevention and treatment effects of check dams in Huashiban gully

坝号	回淤 /m	拦挡量 /( $10^4\text{ m}^3$ )	稳沟量 /( $10^4\text{ m}^3$ )	固坡量 /( $10^4\text{ m}^3$ )	$I_0$ /‰	I /‰
1#	50	0.17	0.32	10.94	388.26	290.94
2#	44	0.14	0.28	9.66	371.29	274.92
3#	26.28	0.09	0.16	5.76	346.87	251.79
4#	34.69	0.26	0.33	7.13	325.71	231.67
5#	52.89	0.22	0.36	11.43	305.57	212.45
6#	40.71	0.14	0.23	8.91	285.84	193.56
7#	41.85	0.18	0.35	9.04	264.63	173.18
8#	42.55	0.14	0.28	9.32	234.79	144.38
9#	73.29	0.10	0.36	16.35	215.18	143.14
10#	34.66	0.21	0.33	7.28	194.64	123.08
11#	45.7	0.22	0.36	9.79	175.52	122.01
12#	43.97	0.20	0.36	9.48	146.52	111.05
13#	92.36	0.68	0.97	18.98	126.44	108.76
合计		2.76	4.37	134.07		

注:表中 $I_0$ 表示建坝前坝址处坡降,I建坝后坝址处坡降。

#### 3.2 前缘反压作用稳固沟床和边坡

泥石流对坡脚与沟床有很强侵蚀力,一次泥石流能使沟道冲刷切割1至数米,同时掏蚀沟谷两侧斜坡表层松散坡积物<sup>[12-13]</sup>。斜坡岩体在坡脚处为剪应力增高区,易形成剪切破坏<sup>[14]</sup>;坡肩处是拉应力增高区,易形成张裂缝,并且斜坡坡角和高差越大,坡脚剪应力和坡肩拉应力就越大。“U”形谷坊规定泥石流冲刷能力最强的底部只能从谷坊中部凹槽通过,谷坊侧墙能减少泥石流对沟谷两侧斜坡的冲刷,限制泥石流左右摆动,有效稳定沟床及其两侧



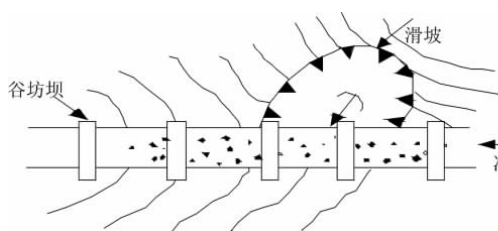


图6 谷坊坝稳固滑坡工程平面示意图

Fig. 6 Planar graph of check dam stabilizing slope

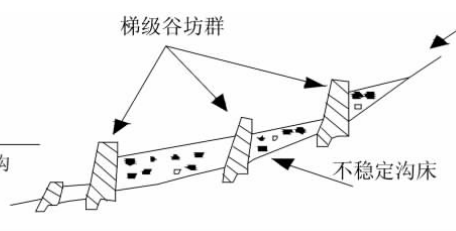


图7 谷坊坝保护沟床工程剖面示意图

Fig. 7 Profile of check dams protecting ditch bed



图8 谷坊坝稳固滑坡

Fig. 8 Check dam stabilizing the slope



图9 化石板沟的梯级谷坊群

Fig. 9 Check dams in Huashiban gully

斜坡。谷坊坝体回淤拓宽沟床、减弱沟岸掏蚀,增强谷坡和沟床的稳定性。

谷坊坝群稳固沟床松散物质  $4.37 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 仅占流域物源总量  $575.1 \times 10^4 \text{ m}^3$  的 0.76%, 占近期可供给泥石流活动的物源量  $85 \times 10^4 \text{ m}^3$  的 5.2%; 稳固沟道两侧坡体松散固体物质  $134.07 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 占流域物源总量的 23.3%, 泥石流物源减少(见表4)。此外,谷坊可抑制滑坡活动,在紧靠滑坡前缘的下游修建谷坊,利用其拦蓄的物质掩埋滑坡剪出口,稳定滑坡<sup>[12]</sup>(图6~9)。4#~7#谷坊坝址位于H2滑坡前缘剪出口,且沟内的回淤固体物质覆盖层平均厚度  $> 1 \text{ m}$ ,可近似认为该滑坡因剪出口被覆盖而基本处于稳定状态。

### 3.3 改变沟道纵坡比降

梯级结构谷坊群使回淤后沟床纵坡降小于原沟床坡降,一定程度上降低泥石流流速和耗散泥石流能量。化石板主沟的平均坡降 264.203‰,上游泥石流形成区和支沟比降更大,实测支沟坡降介于 323.25‰~384.23‰,泥石流流通和堆积区段沟道比降较小,堆积区平均坡降 158.38‰;谷坊坝群拦截松散固体物质并使其在坝后淤积,形成沟道陡峻

和平缓段相间。位于泥石流形成段的1#~3#坝,坝体库容已满库,甚至有固体物质经溢流口而漫坝。坝体淤积使回淤沟道的比降减小,解译震前遥感图像3#坝址处沟道原始坡降 346.87‰,淤积后沟道变得平缓,坡降仅为 251.8‰,其余坝址在工程前后的坡降对比(见表4)。研究发现,随着淤积的累增,回淤沟道比降逐渐减小,  $I \approx (0.6 \sim 0.75) I_0$ 。因此,谷坊不仅能拦截固体物质,还在减缓沟道比降方面发挥重要作用。随着沟道比降进一步减缓,泥石流流体的速度和动能将得到有效抑制,泥石流规模和致灾能力也会减弱。

### 3.4 降低泥石流密度、改变泥石流性质

现有泥石流治理工程效益表明:防治工程正常使用年限内,泥石流的性质会由粘性变为稀性、再到挟沙水流,甘肃陇南地区马槽沟泥石流防治工程建成运行8a后,泥石流密度由建坝前的  $2.0 \text{ g/cm}^3$  减小到  $1.5 \text{ g/cm}^3$ <sup>[15]</sup>。2008-09-24化石沟泥石流为20a一遇的粘性泥石流,密度为  $2.05 \text{ g/cm}^3$ ,修坝后发生的泥石流密度为  $1.79 \text{ g/cm}^3$ ,密度降低。梯级坝群拦截作用使含沙水流和固体物质分离,泥石流密度降低,性质改变。化石板沟泥石流是“5.12”地

震次生泥石流,其活动时间可长达 20 a 之久,而活动最为频繁、规模最大在当前 5~6 a 内<sup>[16]</sup>。谷坊坝群使含沙水流和固体物质分离,进而改变泥石流性质。

### 3.5 削减泥石流峰值流量和流速

2008-09-24 化石板沟泥石流的激发雨量为 53.1 mm/h,冲出总量  $23.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,实测峰值流量  $199.30 \text{ m}^3/\text{s}$ ,断面流速为 7.77 m/s;泥石流流速受水力半径( $R$ )、沟床糙率( $n_c$ )和沟道比降( $I$ )影响,梯级坝修建后,水力半径和糙率变化不大,伴随坝体回淤,沟道比降( $I$ )减小,因此相同频率暴雨下泥石流流速减小(公式 1);根据泥石流洪峰流量计算法则:梯级谷坊坝群使松散固体物质回淤,沟道拓宽变缓、比降减小,泥石流堵塞系数( $D_c$ )减小,同时泥石流泥沙修正系数( $\Phi$ )随泥石流密度( $\gamma_c$ )减小而降低,导致泥石流峰值流量减小(公式 2)

$$V_c = \frac{1}{n_c} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$Q_c = (1 + \Phi) Q_p D_c \quad (2)$$

式中  $V_c$ : 泥石流流速, m/s;  $n_c$ : 沟床的糙率;  $R$ : 水力半径(m),按式  $= w/p$  计算,  $w$ : 过流断面面积  $\text{m}^2$ ,  $p$ : 湿周 m;  $I$ : 泥石流水力坡度或沟床纵坡, %;  $Q_c$ : 频率为  $P$  的泥石流洪峰值流量( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $Q_p$ : 频率为  $P$  的暴雨洪水设计流量( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $D_c$ : 泥石流堵塞系数;  $\Phi$ : 泥石流泥沙修正系数。

### 3.6 减小沟道侵蚀速率,提高上游支沟的侵蚀基准面

震前化石板沟沟道内主要是块碎石,降雨时水流中碎屑物质含量约 0.5%~1%,来自坡体表层软土侵蚀;汶川地震导致流域内产生大量滑坡和崩塌积物,结构松散、稳定性差,降雨作用下易发生侵蚀输移,形成含泥沙量高的水流,碎屑物质含量可达 15% 以上,如遇强暴雨,造成滑坡和崩塌积体大规模坍塌,直接进入沟道形成泥石流。泥石流流体具有

较高速度和动能,势必加强沟道下切和侧蚀,导致原有沟道拓宽加深,2008-09-24 泥石流冲刷切割,侵蚀速率大大增加,冲沟宽度 4~18 m,切割深度 1~4 m。谷坊群修建后,侵蚀速率减小,冲沟不再拓宽,甚至因淤积而变窄;同时提高上游支沟的侵蚀基准面,有效地抑制支沟侵蚀下切,支沟侵蚀基准面增高

$$\Delta H = H - L_0(i - i_k) \quad (3)$$

式中  $H$ : 坝高(m);  $L_0$ : 支沟沟口距谷坊坝的距离;  $i, i_k$  分别为建坝前后的沟床纵坡。谷坊坝修建后,伴随泥石流物质淤积和稳沟固坡,沟道侵蚀速率明显减小,上游支沟侵蚀基准面抬升 0.3~0.5 m。

### 3.7 谷坊坝群防治效益

对比分析谷坊坝修建前后化石板沟的不同频率泥石流流速、峰值流量和一次固体物质总量,谷坊坝群工程修建后泥石流流速、峰值流量和一次固体物质输移总量都发生不同程度降低(表 5),综合防治效益显著,它使得泥石流或由粘性变为稀性,流域逐渐向高含沙水流为主的山洪沟演变,泥石流输沙量减少 35%~57%,处在已有泥石流工程拦沙减沙效益范围内,由此进一步验证了化石板沟工程治理效益良好。

## 4 问题讨论与建议

谷坊坝的破坏和坝前防冲肋板掏蚀:泥石流中石块对谷坊迎流坡面的撞击,对背流坡面的砸击,泥石流对谷坊的冲击,过坝泥石流对坝体和消能设施的磨蚀,都会造成对谷坊坝的破坏<sup>[17]</sup>。此外,谷坊出库水流的冲刷能力强,如果坝下没有很好的消能抗冲措施,会导致下游沟床的强烈冲刷,在一定程度上削弱坝体减小下游泥石流规模的作用,并对坝体安全构成威胁。为克服这一缺点,在谷坊坝前设置厚

表 5 泥石流防治效益分析表

Table 5 Prevention efficiency of check dams in Huashiban gully

频率 P /%	流速/(m/s)		峰值流量/( $\text{m}^3/\text{s}$ )		一次固体物质总量/( $10^4 \text{ m}^3$ )		
	治理前	治理后	治理前	治理后	治理前	治理后	减少百分比/%
20	5.92	4.44	134.21	107.36	13.48	5.76	57
10	6.68	4.94	167.45	133.95	16.82	9.64	43
5	7.40	5.63	199.30	159.44	20.02	12.55	37
3.33	7.75	5.81	217.50	178.01	25.50	13.36	48
2	8.09	6.12	240.10	187.08	32.17	17.35	46
1	8.76	6.35	270.31	210.25	40.74	22.43	45
0.5	9.39	6.98	300.11	236.06	50.26	30.89	39
0.2	10.01	7.20	339.06	271.24	62.47	40.51	35

约0.5~1 m高的防冲肋板,起到良好的消能抗冲效果。但调查发现多数坝体前缘防冲肋板下部遭到不同程度掏蚀,其中3#坝掏蚀最厉害,防冲肋板悬空高达4 m,6#坝的防冲肋板悬空3.4 m。建议加固坝基和改进护坦结构,减小径流对肋板下部的掏蚀。

拦蓄的固体物质成为泥石流的二次物源:谷坊坝群拦蓄一定量的松散固体物质。倘若沟内发生低频率泥石流,淤积在库内的固体物质可转化为泥石流的二次物源,建议加强沟内水土保持措施,稳固松散固体物源,降低泥石流灾害危险性。

工程防治与生态防治相结合的综合防治措施:汶川特大地震使沟内产生大量滑坡、崩塌等,共计泥石流物源 $574.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。谷坊坝群的拦蓄、稳定沟道和固坡效益对泥石流起到一定的抑制作用,但流域内依然存在大量物源,需要加强水土保持,从生态和工程相结合的角度综合防治。

## 5 结论

化石板沟在泥石流的形成流通区内修建13道谷坊坝,构成梯级谷坊坝群,并在坝前设置防冲肋板,以保护上一个坝的稳定与安全。谷坊坝一共拦截固体物质 $2.76 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,仅占流域物源总量 $574.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的0.5%,占近期可供泥石流活动的物源量 $85 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的3.3%,多数谷坊坝在修建当年即被淤满。谷坊坝群稳固沟床松散物质 $4.37 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,仅占物源总量的0.76%,占近期可供泥石流活动的物源量的5.2%;稳固沟道两侧坡体松散固体物质 $134.07 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,占物源总量的23.3%,泥石流物源减少。

谷坊坝群工程减缓沟道比降,随着淤积的累增,回淤沟道比降为原比降的60%~75%;改变泥石流性质,梯级坝使含沙水流和固体物质分离,泥石流密度降低,20 a一遇的泥石流密度由 $2.05 \text{ g/cm}^3$ 减小到 $1.79 \text{ g/cm}^3$ ;降低泥石流速度和峰值流量,在相同频率暴雨作用下,泥石流流速随沟道比降(1)减小而减小,泥石流峰值流量减小,20 a一遇峰值流量由 $199.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 下降为 $159.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ;降低沟道侵蚀速率并抬升上游支沟侵蚀基准面,谷坊群修建后侵蚀速率减小,冲沟不再拓宽,甚至因淤积而变窄,同时提高上游支沟的侵蚀基准面,有效地抑制支沟侵蚀下切,支沟侵蚀基准面增高 $\Delta H = H - L_0(i - i_k)$ ,抬升0.3~0.5 m。

对比分析谷坊坝修建前后化石板沟的不同频率泥石流流速、峰值流量和一次固体物质总量,谷坊坝群工程修建后泥石流流速、峰值流量和一次固体物质输移总量都发生不同程度降低,泥石流输沙量减少35%~57%,综合防治效益显著,使泥石流由粘性变为稀性,流域逐渐向高含沙水流为主的山洪沟演变,处在已有泥石流工程拦沙减沙效益范围内,由此进一步验证了化石板沟工程治理效益良好。

## 参考文献(References)

- [1] Tang Bangxing, Du Ronghen, Kang Zhicheng, et al. Debris flow research in China[J]. Journal of Geographical Science, 1980, 3(35): 259-264 [唐邦兴, 杜榕桓, 康志成, 等. 我国泥石流研究[J]. 地理学报, 1980, 3(35): 259-264]
- [2] Tang Chuan, Liang Jingtao. Characteristics of debris flows in Beichuan epicenter of the Wenchuan earthquake triggered by rainstorm 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]
- [3] Tang Chuan, Tie Yongbo. Reconnaissance and analysis on the rainstorm induced debris flow in Weijiagou Valley of Beichuan after the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Mountain Science, 2009, 27(5): 625-630 [唐川, 铁永波. 汶川震区北川县城魏家沟暴雨泥石流灾害调查分析[J]. 山地学报, 2009, 27(5): 625-630]
- [4] Hu Kaiheng, Ge Yonggang, Cui Peng, et al. Preliminary analysis of extra-large-scale debris flow disaster in Zhouqu County of Gansu Province[J]. Journal of Mountain Science, 2010, 28(5): 628-634 [胡凯衡, 葛永刚, 崔鹏, 等. 对甘肃舟曲特大泥石流灾害的初步认识[J]. 山地学报, 2010, 28(5): 628-634]
- [5] Xu Qiang. The 13 August 2010 catastrophic debris flow in Sichuan Province: characteristics, genetic mechanism and suggestions[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(5): 596-608 [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]
- [6] Lan Zhaosheng, Cao Guangrao, Yao Deji. Foreign project of debris flow block dam [G]//Article collection of debris flow. Chongqing: Chongqing Branch of Publishing House for scientific Reference, 1983, 76-84 [兰肇声, 曹光尧, 姚德基. 国外泥石流挡坝工程[G]//中国科学院成都地理研究所编. 泥石流论文集. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1983: 76-84]
- [7] Shun O, Hiroshi I, Yoshiharu I, et al. Development of new methods for countermeasures against debris flows [G]//Armanini A, Michiue M ed. Recent Development on Debris Flows, Lecture Notes in Earth Sciences. Berlin: Springer-Verlag, 1997: 166-185
- [8] Chen Xiaoqing, Wang Shige, Li Deji, et al. A comparison of two main types of debris flow drainage grooves [J]. Journal of catastrophology, 2001, 15(1): 12-15 [陈晓清, 王士革, 李德基, 等. 两种主要泥石流排导槽的比较[J]. 灾害学, 2001, 15(1): 12-15]
- [9] Li Shude, Ren Xiusheng, Yue Shengyang, et al. Earthquake and debris flow activities[J]. Research of Soil and water conservation,

- 2001 8(2): 26–27 [李树德,任秀生,岳升阳,等. 地震与泥石流活动[J]. 水土保持研究 2001, 8(2): 26–27]
- [10] Zhong Dengleng. The role of earthquake influence on debris flow occurrence [G]//Article collection of debris flow (1). Chongqing: Chongqing Branch of Publishing House for scientific Reference, 1981: 30–35 [钟敦伦. 论地震在泥石流活动中的作用[G]//泥石流论文集(1). 重庆: 科技文献出版社重庆分社, 1981: 30–35]
- [11] Ma Dongtao, Shi Yucheng. An approach on effects of earthquakes on formation of debris flow [J]. Northwestern Seismological Journal, 1996, 18(4): 38–42 [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]
- [12] Zeng Qingli, Yue Zhongqi, Yang Zhifan et al. Functions of check dam against debris flow: comparison of two watersheds of Jiangjia gully, Yunnan, China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2005 24(17): 3137–3145 [曾庆利, 岳中琪, 杨志法, 等. 谷坊在泥石流防治中的作用——以云南蒋家沟 2 条支沟对比为例[J]. 岩土力学与工程学报, 2005 24(17): 3137–3145]
- [13] Wang Yuyi, Zhang Jun, Yan Biyu. Stress analysis of debris flow in erosion process: an example of Jiangjia gully [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1996, 7(2): 12–20 [王裕宜, 张军, 严璧玉. 泥石流侵蚀过程中应力特征的分析研究——以云南蒋家沟为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1996 7(2): 12–20]
- [14] Emmanuel J Gabet, Sim. The mobilization of debris flows from shallow landslides [J]. Geomorphology 2006 74: 207–218
- [15] Gao Shouyi, Shi Zhengtao, Cui Bingtian. An approach on controlling works and their benefits of debris flow in Macaogou gully, Wudu [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1998 9(1): 134–140 [高守义, 史正涛, 崔炳田. 马槽沟泥石流工程治理及效益分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998 9(1): 134–140]
- [16] Chen Ningsheng, Hu Guisheng. Impact of earthquake of debris flows—a case study on the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Earthquake and Tsunami 2011 5(5): 493–508
- [17] Hu Kaiheng, Wei Fangqiang, Hong Yong. Field measurement of impact force of debris flow [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2006 25(Suppl.): 2813–2819 [胡凯衡, 韦方强, 洪勇. 泥石流冲击力的野外测量[J]. 岩土力学与工程学报, 2006 25(Suppl.): 2813–2819]

## Control Effectiveness of Check Dams in Debris Flow Gully

——A Case of Huashiban Gully in Earthquake Worst-stricken Area, Beichuan County

ZHOU Haibo<sup>1 2</sup>, CHEN Ningsheng<sup>1</sup>, LU Yang<sup>1 2</sup>, LI Bing<sup>3</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences; Key Lab. of Mountain Hazards and Surface Process, CAS, Chengdu 610041, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Sichuan Province Transport Department Highway Planning Survey Design and Research Institute, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Check dam is one of the most effective structures to control debris flows. In Huashiban gully, control measures includes civil engineering works and biological works, where there are 13 check dams which make up cascade check dams, mainly distributing in the debris flow form-circulate region. The type of gravity dams are concrete structure, with both axial ends embedded in the bedrock for about 0.5 ~ 1 m. Based on the comparison of the differences on gradient of the ditch, stability of the slope on both sides and erosion rate of debris flow between pre and post construction of the check dams, this paper shows the application of check dams on blocking and storing loss solid mass, stabilizing the ditch bed and bank slope, decreasing gradient of the gully, lowering debris flow velocity and its kinetic energy, and uplifting the base level of debris flow erosion in upstream. According to our research, check dams in Huashiban gully block solid mass  $2.76 \times 10^4 \text{ m}^3$ , only 0.50% of the total material source ( $575.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ ), and 3.3% of the short-term activity soil source ( $85 \times 10^4 \text{ m}^3$ ), which indicate blocking is not the main function. Check dams stabilize the bed  $4.37 \times 10^4 \text{ m}^3$ , accounting for 0.76% of the total material source, and 5.2% of the short-term activity content of debris flow. On the other hand, Check dams stabilize the slope  $134.07 \times 10^4 \text{ m}^3$ , accounting for 23.3% of the total material source, leading to the decreasing of debris flow source. Gradient of the deposition area has declined to 60% ~ 75%. For debris flows at the same frequency, the velocity, peak flux and erosion rate goes down, sediment transportation reduces by 35% ~ 57%, and erosion base level in the upper ditch was uplifted by 0.3 ~ 0.5 m. On the whole, debris flows are translating from viscous flows to turbulent flows, and then high sand content flows.

**Key words:** debris flows; check dams; control effectiveness