

# 长江上游梯级电站开发区泥石流的治理 工程效果评估与减灾策略

——以金沙江白鹤滩水电站为例

胡桂胜<sup>1</sup>, 陈宁生<sup>1</sup>, 赵春瑶<sup>2</sup>, 李俊<sup>1</sup>, 苏立<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. 成都理工大学, 四川 成都 610059; 3. 三峡集团 工程建设管理局, 四川 成都 610023)

**摘要:** [目的] 评估灾害性泥石流严重的长江上游梯级电站开发区泥石流灾害治理工程效果, 为长江上游同类水电站的泥石流防灾减灾与治理效果评估研究提供思路。[方法] 选择金沙江白鹤滩水电站施工区的矮子沟和大寨沟泥石流治理工程为案例, 通过 2013—2015 年连续 3 a 的现场跟踪调查分析, 结合模型计算对矮子沟和大寨沟泥石流峰值流量过程进行计算, 分别评估 2014 和 2015 年矮子沟、大寨沟泥石流治理工程效果, 并进行泥石流危险性评价。[结果] 基于长江上游梯级电站开发区泥石流灾害特点, 提出了长江上游梯级电站开发区泥石流治理工程效果评估模式, 并提出了基于风险控制的水电工程泥石流“以排为主, 适当拦挡”治理模式与减灾策略。[结论] 矮子沟、大寨沟现有的泥石流防治措施在满库的状态下能够满足 500 年一遇泥石流过流的要求, 泥石流危险性小。

**关键词:** 长江上游; 梯级水电站; 泥石流工程; 效果评估; 减灾策略

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2017)01-0241-07

**中图分类号:** P642.23

**文献参数:** 胡桂胜, 陈宁生, 赵春瑶, 等. 长江上游梯级电站开发区泥石流的治理工程效果评估与减灾策略[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 241-247. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 01. 043; Hu Guisheng, Chen Ningsheng, Zhao Chunyao, et al. Effectiveness evaluation of debris flow control and mitigation strategies for cascade hydropower stations in Upper Yangtze River, China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(1): 241-247. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 01. 043

## Effectiveness Evaluation of Debris Flow Control and Mitigation Strategies for Cascade Hydropower Stations in Upper Yangtze River, China

—A Case Study in Baihetan Hydropower Station of Jinsha River

HU Guisheng<sup>1</sup>, CHEN Ningsheng<sup>1</sup>, ZHAO Chunyao<sup>2</sup>, LI Jun<sup>1</sup>, SU Li<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041,

China; 2. Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 3. Construction and Management Bureau, China Three Gorges Corporation, Chengdu, Sichuan 610023, China)

**Abstract:** [Objective] The objective of the study is to evaluate the effectiveness of debris flow disaster control project in development zone at cascade hydropower stations at severe landslides-affected Upper Yangtze River and provide references on effectiveness post-evaluation of debris flow control for other hydropower stations. [Methods] The Aizi and Dazhai gully debris flow regulation engineering in Jinshajiang River were chose as a case. The peak flow process of Aizi and Dazhai gully debris flow were calculated through the tracking investigation of three consecutive years from 2013 to 2015. The effectiveness of debris flow control engineering of Aizi and Dazhai gully in 2014 and 2015 were evaluated. The risk of debris flow was estimated. [Results]

收稿日期: 2016-03-11

修回日期: 2016-07-08

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于漫顶溃决过程分析的滑坡堰塞坝稳定性评估模型研究”(41501012); 国家自然科学基金国际合作与交流项目“地震山区可持续发展系统模型”(41661134012); 中国长江三峡集团公司科研项目“白鹤滩、乌东德水电站泥石流预测预警技术及示范”(JGJ0492014)

第一作者: 胡桂胜(1984—), 男(汉族), 江西省九江市人, 博士, 助理研究员, 主要从事山地灾害防治技术与区域规律研究。E-mail: hgsjxx@163.com。

Post-evaluation model on effectiveness of debris flow control in the cascade hydropower stations of Upper Yangtze River development zone was put forward based on the results of the assessment system. The governance model of debris flow and mitigation strategies were proposed based on the water and electricity engineering debris flow risk control according to the characteristics of debris flow hazards in the development of cascade hydropower stations in the Upper Yangtze River. [Conclusion] Existing debris flow prevention and control measures of Aizi and Dazhai gully can meet flow requirements of five hundred-year debris flow under the conditions of impletion, and debris flow risk is less in the area.

**Keywords:** Upper Yangtze River; cascade hydropower stations; debris flow engineering; effectiveness evaluation; mitigation strategies

长江干流在湖北宜昌以上称为上游,长 4 500 km, 占全江长度的 71%, 流域面积  $1.01 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 占总面积的 55.8%<sup>[1]</sup>。该区域目前是中国水电开发的重点区域,集中了以乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝、三峡、葛洲坝 6 个巨型电站为代表的一系列大型水电站(包括在建的水电站),总装机容量超过  $7.00 \times 10^7 \text{ kW}$ <sup>[2]</sup>。由于长江上游地区地形高差大,地震频繁,夏季降水集中,造成该区域水电工程无论是在建设期还是运营期都一直受到泥石流等山地灾害的严重影响,群死群伤事件时有发生,如 2009 年 7 月 23 日,甘孜州一水电站施工区暴发泥石流灾害,导致 54 人死亡失踪;2012 年 8 月 29 日 18 时至 30 日,凉山州一水电站施工区内外暴发泥石流灾害,致使 11 人死亡,13 人失踪;2012 年 6 月 28 日,白鹤滩在建水电站坝址近场区 9 条沟暴发了泥石流,其中矮子沟发生了特大型泥石流,导致 41 人死亡和失踪<sup>[3]</sup>;2012 年 8 月 30 日,锦屏水电站暴发泥石流灾害,导致 10 人死亡失踪。该区域已查明的泥石流沟约有 7 290 条,成为中国灾害性泥石流最为频繁的地区,中国泥石流灾害 50% 以上发生在该区域<sup>[1]</sup>。目前,长江上游梯级电站开发区部分水电站为避免和减轻泥石流灾害对水电站工程建设和运营安全的威胁,保障水电站及辖区内人民生命和财产安全,有针对性地实施一些泥石流治理工程。但纵观国内外泥石流灾害事件<sup>[4-7]</sup>,有一部分泥石流沟谷已经实施了治理工程,如绵竹县文家沟、舟曲三眼峪、龙池镇八一沟等,但是治理工程没能抵御住泥石流的破坏,造成了严重的危害和损失<sup>[8]</sup>。为此,进行长江上游梯级电站开发区的泥石流治理工程效果评估尤为重要。治理工程效果后评估是泥石流灾害防治工作中的重要环节,一方面可用以检验治理工程质量、机理认识及方案选取合理性等,另一方面可以为后续泥石流灾害治理提供借鉴<sup>[9]</sup>。泥石流峰值流量是泥石流防治工程和研究的一个极为重要参数。

白鹤滩水电站坝址施工区地质条件复杂,极端气候突出,河流水系发达,大多数沟道在地质历史上都

曾发生过泥石流,部分沟道在近期泥石流活动依旧十分活跃,频繁的泥石流灾害对当地居民的生命财产构成严重威胁,并制约着水电站的建设和当地经济发展<sup>[10]</sup>。

本文拟以金沙江白鹤滩水电站为例,基于 2013—2015 年的现场跟踪调查分析与模型计算数据,对该水电站泥石流治理工程效果进行评估,并基于泥石流风险控制提出针对性的泥石流减灾策略。在矮子沟和大寨沟泥石流现场调查的基础上,计算分析泥石流拦挡工程修建后不同频率下的泥石流再次发生时,空库、半库和满库工况下,泥石流洪峰流量变化过程及危险性,以期对白鹤滩水电站施工区矮子沟和大寨沟泥石流防治工程效益做出正确、合理的评价,并进一步提出后续的减灾策略,服务于白鹤滩水电站施工建设,也为长江上游其它水电站的泥石流防灾减灾与治理效果后评估研究提供思路,奠定深入研究该区域泥石流减灾工作的基础。

## 1 研究区概况

### 1.1 地理位置与地形地貌

白鹤滩水电站位于云南省巧家县大寨乡与四川省凉山彝族自治州宁南县白鹤滩交界的白鹤滩,上游与乌东德梯级电站相接,下游尾水与溪洛渡梯级电站相连,是金沙江下游(雅砻江口—宜宾)河段乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝 4 个梯级开发的第二级,建成后仅次于三峡水电站成为中国第 2 大水电站。矮子沟地处四川省凉山彝族自治州宁南县东北部,为金沙江左岸的一条支流,地跨白鹤滩镇、保格乡及跑马乡。大寨沟位于云南省巧家县境的西北隅,为金沙江干流段东岸的一级支流,其沟口位于拟建白鹤滩水电站中坝址的右坝肩。矮子沟和大寨沟地形地貌基本特征见表 1。

### 1.2 气象与水文

研究区地处中亚热带,属西南季风气候区,干湿季节分明。区域多年平均降水量为 715.9 mm,最大 24 h 降水量为 95.9 mm,最大 1 h 降雨量为

30.5 mm。区域内降水年内分配不均,5—10 月为雨季,降雨充沛,降雨量占全年的 85%以上,11 月至次年 4 月为旱季,降水稀少,气候温暖干燥。区域多年平均蒸发量为 2 306.7 mm;多年平均气温为 21.7 °C,历年最高气温为 42.2 °C,历年最低气温为 2.1 °C。多年平均风速为 2.1 m/s,最大风速为 13 m/s。

白鹤滩水电站坝址处控制流域面积 430 308 km<sup>2</sup>,多年平均流量 4 110 m<sup>3</sup>/s,实测历年最大洪峰流量为 25 800 m<sup>3</sup>/s(1966 年),历年最小洪峰流量为 8 570 m<sup>3</sup>/s(1967 年)。水库正常蓄水位 825 m,总库容 2.06 × 10<sup>10</sup> m<sup>3</sup>,调节库容 1.04 × 10<sup>10</sup> m<sup>3</sup>,防洪库容 5.84 × 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>。

表 1 白鹤滩水电站流域地形地貌特征

流域名称	面积/km <sup>2</sup>	主沟长/km	主沟比降/%	平均坡度/(°)	最高海拔/m	最低海拔/m	最大高差/m	植被覆盖率/%
矮子沟	65.55	21.96	155	18	3 646	604	3 042	62.1
大寨沟	28.73	12.31	209	19	2 893	590	2 303	30.7

### 1.3 地质环境

研究区地质构造十分发育,主要地质构造有六铁乡向斜、骑骡沟背斜、跑马断裂、回龙湾断裂、东坪断层、小田坝断层。

发育的地质构造不但对流域内地貌格局的形成、不良地质现象的产生(滑坡、崩塌)起控制作用,而且为区内泥石流的形成和发展提供了大量的物源。研究区出露的地层较为齐全,除了缺失古生界的石炭和中生界的侏罗系。从老到新出露地层为:震旦系、寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系、二叠系、三叠系、白垩系及第四系地层。不同年代地层的岩性主要有玄武岩、白云岩、灰岩、砂岩、泥岩等。

区域内主要的地震构造带有鲜水河断裂带、安宁河断裂带、则木河断裂带、小江断裂带。根据历史资

料记载,这些断裂带上曾发生了多次 7 级及以上地震。施工区范围内断裂活动较弱,除四开—交际河断裂带可能引发 6 级左右地震外,总体地震潜能不大。地震对白鹤滩水电站工程的影响未来仍将主要来自区域西侧的则木河断裂带和小江断裂带。

## 2 白鹤滩水电站泥石流治理工程效果评估

### 2.1 已建泥石流治理工程概况

根据现场调查,2014 年矮子沟泥石流治理工程有 3 级拦挡坝、2 个排水隧洞;2015 年矮子沟修建了沉砂池和排导槽(表 2)。2014 年大寨沟泥石流治理工程有 4 级重力式拦挡坝,排水隧洞;2015 年修建了排导槽(表 2)。

表 2 白鹤滩水电站已建泥石流治理工程与计算工况

泥石流沟	治理工程	类型	开孔率/%	2014 年工程状态	计算工况	2015 年工程状态	计算工况	假设工程状态	计算工况
矮子沟	I 级拦挡坝	重力式拦挡坝	6	空库		满库		满库	
	II 级拦挡坝	格栅坝	—	空库	工况 1	半库	工况 3	满库	工况 2
	III 级拦挡坝	格栅坝	—	空库		半库		满库	
	停淤工程	沉砂池	—	未修建		—		—	
	排导工程	梯形断面排导槽	—	未修建		—		—	
I 级拦挡坝	重力式拦挡坝	6	空库	半库		满库			
大寨沟	II 级拦挡坝	重力式拦挡坝	5	空库	工况 1	满库	工况 4	满库	工况 2
	III 级拦挡坝	重力式拦挡坝	3	空库		满库		满库	
	IV 级拦挡坝	重力式拦挡坝	5	空库		满库		满库	
	排导工程	复合断面排导槽	—	未修好		—		—	
	I 级拦挡坝	重力式拦挡坝	6	空库		半库		满库	

### 2.2 治理效果评估计算工况与标准

根据 2014 年现场调查,矮子沟、大寨沟所修建拦挡坝均属于空库状态,设为计算工况 1。根据 2015 年现场勘查,矮子沟 1 级拦挡坝淤积深度已超过溢流顶部排水孔,因此矮子沟 1 级拦挡坝只计算评估满库工况下泥石流洪峰流量。2 级格栅坝前和 3 级格栅

坝前淤积泥沙量较小(接近一半库容),因此 2 级格栅坝和 3 级格栅坝计算评估半库工况下泥石流洪峰流量变化,此工况设为工况 3。2015 年大寨沟的 2, 3, 4 级拦挡坝以及潜水坝都已淤积满库,1 级拦挡坝淤积满半库,此工况设为工况 4。矮子沟和大寨沟所有拦挡工程满库状态,设为计算工况 2,所有计算工况

详见表 2。

由于 2014 年矮子沟的沉砂池和排导槽、大寨沟的排导槽未完工,因此按照拦挡工程的设计标准,2014 年的防治工程效果评估标准只考虑了 100 年一遇的泥石流。2015 年矮子沟的沉砂池和排导槽、大寨沟的排导槽投入运行并考虑其设计标准,因此将 2015 年的防治工程效果评估标准进行提升,考虑了 500 年一遇的泥石流。

### 2.3 泥石流峰值流量过程评估的计算方法

2.3.1 泥石流峰值流量计算方法 雨洪法<sup>[11]</sup>(公式 2)是目前泥石流洪峰流量计算的基本方法,其计算步骤是先按水文方法计算出不同频率下小流域的暴雨洪峰流量,然后考虑沟道的堵塞情况<sup>[11]</sup>泥石流流量配方法,选用堵塞系数,按下式计算泥石流洪峰流量。

$$Q_c = (1 + \varphi)Q_p \cdot D_c \quad (1)$$

式中:  $Q_c$  ——频率为  $P$  的泥石流峰值流量( $m^3/s$ );  $\varphi$  ——泥石流泥沙修正系数;  $Q_p$  ——频率为  $P$  的暴雨洪水设计流量( $m^3/s$ );  $D_c$  ——泥石流堵塞系数,其取值可查表。下同。

$$Q_p = 0.278\psi \frac{S}{\tau^n} F \quad (2)$$

式中:  $\psi = f(\mu, \tau^n)$ ;  $\tau^n = f(m, s, J, L)$

式中:  $\psi$  ——洪峰径流系数;  $s$  ——暴雨雨力( $mm/h$ );  $n$  ——暴雨指数;  $F$  ——流域面积( $km^2$ );  $L$  ——沟道长度( $km$ );  $\tau$  ——流域汇流时间( $h$ );  $\mu$  ——入渗强度( $mm/h$ );  $m$  ——汇流参数。下同。

$$\varphi = (\gamma_c - \gamma_w) / (\gamma_s - \gamma_c) \quad (3)$$

式中:  $\gamma_c$  ——泥石流重度( $g/cm^3$ );  $\gamma_w$  ——清水的重度( $g/cm^3$ );  $\gamma_s$  ——泥石流中固体物质比重( $g/cm^3$ )。

2.3.2 重力式拦挡坝削峰计算方法 针对重力式拦砂坝的坝后泥石流洪峰流量的计算,贾世涛<sup>[12]</sup>等通过室内水槽模型试验,改变泥石流容重、一次过程体积总量和模型坝的开孔率等控制参数,得出泥石流流能在过坝前、后的变化规律,提出坝体削峰后泥石流洪峰流量的经验公式:一次泥石流固体物质总量与过坝前、过坝后泥石流流量比值关系:

$$Y = 0.036 X + 0.581 \quad (\text{坝体开孔率为 } 3\%) \quad (4)$$

$$Y = 0.030 X + 0.607 \quad (\text{坝体开孔率为 } 5\%) \quad (5)$$

$$Y = 0.022 X + 0.720 \quad (\text{坝体开孔率为 } 6\%) \quad (6)$$

式中:  $Y$  ——过坝前与过坝后泥石流峰值流量比值;  $X$  ——过坝前一次泥石流固体物质总量( $10^4 m^3$ )。

2.3.3 格栅坝削峰计算方法 针对格栅坝的坝后泥石流洪峰流量的计算,连惠邦等<sup>[13]</sup>通过渠槽定性试验,探讨了格栅坝对泥石流的防治效果,并按照渡边

正幸所提出的 4 个基本机能进行分析,结果证实了透过性拦砂坝确有防治泥石流的功能,并得到 2 个结论:

(1) 格栅坝狭缝间距  $b$  的设计,若符  $b/D_{\max} \leq 1.7$  的条件,则坝体具有显著拦砂功效;

(2)  $b/D_{\max} \leq 2.0$ ,则格栅坝可将泥石流集体流动型态转变成一般泥砂流动状态,且随  $b/D_{\max}$  值的减小,其分离泥石流中粗砾石的功效越显著,因格栅坝前堆积了石块,减少了格栅坝削峰能力,提出了经验公式及其修正公式:

经验公式:

$$\frac{Q_c}{Q'_c} = 1.608 + 0.1713 \frac{b}{D_{\max}} \quad (\text{空库无淤积}) \quad (7)$$

修正公式:

$$\frac{Q_c}{Q'_c} = 1.4 + 0.12 \frac{b}{D_{\max}} \times H \quad (\text{半库已淤积}) \quad (8)$$

式中:  $Q_c$  ——前格栅坝泥石流洪峰流量( $m^3/s$ );  $Q'_c$  ——坝后格栅坝泥石流洪峰流量( $m^3/s$ );  $D_{\max}$  ——通过格栅坝的最大粒径( $m$ );  $b$  ——格栅梁长度( $m$ );  $H$  ——坝前堆积深度( $m$ )。

2.3.4 经验分析方法 由于上述计算方法(2),(3)中只考虑了空库和半库状态,而且目前没有较为通用的泥石流拦挡工程满库工况下泥石流峰值流量削峰率的计算公式,陈宁生等<sup>[14]</sup>通过统计西南山区 26 条泥石流沟拦挡工程(重力坝 112 座,格栅坝 12 座),得出西南山区已建泥石流拦挡工程满库工况下的泥石流峰值流量削峰率约为 10%。

### 2.4 矮子沟泥石流治理工程效果评估

2.4.1 泥石流洪峰流量变化过程计算与分析 根据现场调查与计算的矮子沟泥石流的运动参数,分别在 2014 年实际库容(工况 1)、假设库容(工况 2)和 2015 年实际库容(工况 3)3 种工况下,假设不同频率下矮子沟泥石流再次发生时(频率  $P$  为 1%,2%,5%,10%,20%,50%),考虑坝间汇流,计算各拦挡坝过坝前、过坝后泥石流洪峰流量的变化过程,计算结果见表 3。

#### 2.4.2 矮子沟泥石流治理工程效益评价

(1) 2014 年矮子沟泥石流治理工程效益评价。矮子沟在其沟口处建有高位和低位两个排水隧洞,实地测量其过流断面面积分别为 12,15  $m^2$ ,现场断面调查得到其泥石流流速为 7.0  $m/s$ ,因此其排水隧洞过流能力 189  $m^3/s$ 。由表 3 可以看出,在空库状态下(工况 1),其治理工程基本能够满足 50 年一遇的泥石流过流要求,泥石流危险性较低;在满库状态下(工况 2),其治理工程基本能够满足 2 年一遇的泥石

流过流要求,其泥石流危险性极高。

(2) 2015 年矮子沟泥石流治理工程效益评价。矮子沟在沟口增建沉砂池和排导槽,实地测量沉砂池容量  $9.0 \times 10^5 \text{ m}^3$  ( $200 \text{ m} \times 150 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ )。其中当沉砂池装满  $5.1 \times 10^5 \text{ m}^3$  的松散固体物质,并且泥石流高度达 17 m 时,泥石流将从沟道右岸的排导槽排

出;矮子沟沟口排导槽过流断面面积分别为  $100 \text{ m}^2$ ,过流能力为  $700 \text{ m}^3/\text{s}$ 。由表 3 可以看出,在半库状态下(工况 3),其治理工程可以满足 100 年一遇的泥石流流过流要求;在满库状态下(工况 2),即使沉砂池淤满,其治理工程仍然基本满足 100 年一遇的泥石流流过流要求,泥石流危险性低。

表 3 矮子沟泥石流洪峰流量变化过程

$\text{m}^3/\text{s}$

库容	频率 $P/\%$	I 级拦挡坝流量		I, II 级坝间 汇流流量	II 级拦挡坝流量		II, III 级坝间 汇流流量	III 级拦挡坝流量	
		过坝前	过坝后		过坝前	过坝后		过坝前	过坝后
工况 1	1	942.67	668.91	64.60	733.51	349.72	117.28	467.00	209.92
	2	752.74	622.13	52.14	674.27	321.47	94.53	416.00	186.99
	5	543.82	462.25	38.42	500.67	238.71	69.48	308.19	138.53
	10	416.10	353.68	30.03	383.71	182.94	54.15	237.10	106.58
	20	281.75	239.49	21.03	260.52	124.21	37.77	161.98	72.81
	50	140.89	119.76	11.61	131.36	62.63	20.60	83.23	37.41
工况 2	0.2	1 203.77	1 083.39	80.21	1 163.60	740.48	151.10	1 198.34	1 078.51
	0.5	1 042.42	938.18	69.87	1 008.05	641.48	131.47	1 038.72	934.85
	1	942.67	848.40	64.60	913.00	821.70	117.28	938.98	845.08
	2	752.74	677.47	52.14	729.61	656.65	94.53	751.17	676.05
	5	543.82	489.44	38.42	527.86	475.08	69.48	544.55	490.10
	10	416.10	374.49	30.03	404.52	364.06	54.15	418.22	376.40
工况 3	20	281.75	253.58	21.03	274.61	247.15	37.77	284.92	256.43
	50	140.89	126.80	11.61	138.41	124.57	20.60	145.17	130.65
	1	942.67	848.40	64.60	913.00	581.00	117.28	698.28	381.16
	2	752.74	677.47	52.14	729.61	464.29	94.53	558.82	305.04
	5	543.82	489.44	38.42	527.86	335.91	69.48	405.39	221.28
	10	416.10	374.49	30.03	404.52	257.42	54.15	311.57	170.07
工况 3	20	281.75	253.58	21.03	274.61	174.75	37.77	212.52	116.00
	50	140.89	126.80	11.61	138.41	88.08	20.60	108.68	59.32

以上评价结果表明,矮子沟目前泥石流治理工程可以满足 100 年一遇泥石流的过流要求,由于矮子沟泥石流对白鹤滩水电站的安全运营影响巨大,故进一步提升评估标准,对其在假设库容状态下(工况 2),进行 200 年一遇和 500 年一遇泥石流洪峰流量变化过程的研究(表 3)。由表 3 可以看出,矮子沟满库状态下(工况 2),其 500 年一遇的泥石流流量为  $1 078.51 \text{ m}^3/\text{s}$ ,矮子沟排导隧洞能排走  $189 \text{ m}^3/\text{s}$ ,剩余的泥石流  $889.51 \text{ m}^3/\text{s}$  产生的一次固体物质总量根据修正五边形法<sup>[11]</sup>,其泥石流流量为  $889.51 \text{ m}^3/\text{s}$  能够产生的一次泥石流固体物质总量为  $2.05 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,而矮子沟沉砂池容量为  $9.00 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,完全能够满足拦挡要求;另外,当矮子沟发生超大规模的泥石流,排水隧洞完全堵塞时,满库工况下 500 年一遇的泥石流流量  $1 078.51 \text{ m}^3/\text{s}$  能够产生的一次泥石流固体物质总量为  $5.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,沉砂池能够全部容

纳该次泥石流产生的一次泥石流固体物质。综上所述,矮子沟现有的泥石流防治措施在满库的状态下能够满足 500 年一遇泥石流过流的要求,基本无泥石流危险。

## 2.5 大寨沟泥石流治理工程效果评估

### 2.5.1 泥石流洪峰流量变化过程计算与分析

与矮子沟相似,分别在 2014 年实际库容(工况 1)、假设库容(工况 2)和 2015 年实际库容(工况 4)3 种工况下,假设不同频率下泥石流再次发生时(频率  $P$  为 0.2%,0.5%,1%,2%,5%,10%,20%,50%),考虑坝间汇流,计算各拦挡坝过坝前、过坝后泥石流洪峰流量的变化过程,详细计算结果见表 4。

### 2.5.2 大寨沟泥石流治理工程效益评价

(1) 2014 年大寨沟泥石流治理工程效益评价。2014 年,大寨沟在其 IV 级拦砂坝下游处设有排导槽,实地测量其过流断面面积  $60 \text{ m}^2$ ,现场断面调查其泥

石流流速约 6.0 m/s, 则其排导槽过流能力 360 m<sup>3</sup>/s。由表 4 可以看出: 在空库状态下(工况 1), 其治理工程基本可以满足 10 年一遇泥石流的过流要求, 泥石流危险性较高; 在满库状态下(工况 2), 其治理工程能够满足 5~10 年一遇泥石流的过流要求, 泥石流危险性高。

(2) 2015 年大寨沟泥石流治理工程效益评价。2015 年, 大寨沟对其 IV 级拦沙坝下游的排导槽进行

扩建, 实地测量其过流断面面积 380 m<sup>2</sup>, 现场调查其流速 6.0 m/s, 因此其排导槽过流能力提高至 2 280 m<sup>3</sup>/s 左右。

由表 4 可以看出: 在半库状态下(工况 4), 其治理工程完全可以满足 100 年一遇的泥石流过流要求, 泥石流危险性低; 在满库状态下(工况 2), 其治理工程完全能够满足 100 年一遇的泥石流过流要求, 其泥石流危险性低。

表 4 大寨沟泥石流洪峰流量变化过程

m<sup>3</sup>/s

库容	频率 P/%	I 级拦挡坝流量		I, II 级 坝间汇 流流量		II 级拦挡坝流量		II, III 级 坝间汇 流流量		III 级拦挡坝流量		III, IV 级 坝间汇 流流量		IV 级拦挡坝流量	
		过坝前	过坝后	过坝前	过坝后	过坝前	过坝后	过坝前	过坝后	过坝前	过坝后	过坝前	过坝后	过坝前	过坝后
工况 1	1	942.67	542.69	68.46	611.16	492.72	116.68	609.40	455.16	95.34	787.60	536.32			
	2	752.74	445.18	54.53	499.72	453.14	92.65	545.79	446.71	74.94	710.90	528.19			
	5	543.82	317.14	39.69	356.83	303.30	67.04	370.34	314.79	52.81	506.23	432.56			
	10	416.10	240.80	30.83	271.63	230.89	51.75	282.64	240.24	39.42	388.26	330.02			
	20	281.75	161.09	21.38	182.46	155.09	35.54	190.64	162.04	26.92	263.96	224.37			
	50	140.89	80.23	11.80	92.03	78.23	19.11	97.34	82.74	12.54	137.94	117.25			
工况 2	0.2	833.95	750.56	84.44	835.00	751.50	149.52	901.02	810.91	121.35	932.26	839.04			
	0.5	723.56	651.20	73.67	724.87	652.39	130.53	782.92	704.62	103.99	808.61	727.75			
	1	665.03	598.53	68.46	666.99	600.29	116.68	716.97	645.27	95.34	740.61	666.55			
	2	523.74	471.37	54.53	525.90	473.31	92.65	565.96	509.37	74.94	584.31	525.88			
	5	373.10	335.79	39.69	375.48	337.93	67.04	404.97	364.47	52.81	417.28	375.56			
	10	283.30	254.97	30.83	285.80	257.22	51.75	308.97	278.07	39.42	317.49	285.74			
工况 3	20	189.51	170.56	21.38	191.94	172.74	35.54	208.29	187.46	26.92	214.38	192.94			
	50	94.39	84.95	11.80	96.75	87.08	19.11	106.19	95.57	12.54	108.11	97.30			
	1	665.03	542.69	68.46	611.15	550.04	116.68	666.72	600.04	95.34	695.38	625.89			
	2	523.74	445.18	54.53	499.71	449.74	92.65	542.39	488.15	74.94	563.09	506.84			
	5	373.10	317.14	39.69	356.83	321.15	67.04	388.19	349.37	52.81	402.18	362.05			
	10	283.30	240.80	30.83	271.63	244.47	51.75	296.22	266.60	39.42	306.02	275.45			
工况 4	20	189.51	161.09	21.38	182.47	164.22	35.54	199.76	179.79	26.92	206.71	186.00			
	50	94.39	80.23	11.80	92.03	82.83	19.11	101.74	91.74	12.54	104.28	93.84			

以上评价结果表明, 大寨沟目前的泥石流治理工程完全可以满足 100 年一遇的泥石流过流要求, 由于大寨沟沟口距离白鹤滩水电站坝址仅 500 m, 且正对坝址, 所以我们对其提升评价标准, 在假设库容状态下(工况 2), 继续进行 200 年一遇和 500 年一遇泥石流洪峰流量变化过程的研究(表 4)。

由表 4 可以看出, 大寨沟在满库状态下(工况 2), 其 500 年一遇泥石流 IV 级拦挡坝后洪峰流量为 839.04 m<sup>3</sup>/s, 远小于其目前排导槽的过流能力, 其治理工程完全可以满足 500 年一遇的泥石流过流要求。综上所述, 大寨沟现有的泥石流防治措施在满库的状态下能够满足 500 年一遇泥石流过流的要求, 基本无泥石流危险。

### 3 治理工程效果评估模式

通过 2013—2015 年调查与数据分析, 并对金沙江白鹤滩水电站泥石流工程治理效果系统总结, 提出了长江上游梯级电站开发区泥石流治理工程效果评估模式(图 1), 为长江上游梯级电站开发区后续的泥石工程治理效果评估提供借鉴。

### 4 减灾策略

鉴于长江上游梯级电站开发区泥石流活动历史长, 各流域地形地貌、土源条件及水源条件依然满足泥石流的形成, 在今后较长一段时间内, 区域仍可能会发生泥石流, 但是随着松散固物质的不断消减, 部分沟道泥石流的暴发频率和规模将逐渐降低和减小,

然而,在遭遇强地震、干湿循环变化气候、极端天气等强烈自然外力时,仍可能会发生超大规模的泥石流。针对长江上游梯级电站开发区泥石流灾害特点及上述治理工程效果评估结果,提出如下减灾策略。

(1) 提倡“以排为主,适当拦挡”治理模式。通过白鹤滩水电站施工区泥石流治理工程效果的评估结

果可以看出,基于主河的输沙能力远远大于支沟泥石流规模条件下,排导槽治理效果更加显著。因此,针对水电工程的特点,提出在泥石流形成流通区稳坡固源,在泥石流堆积区拦大排小,在出口安全排导的治理思路,建立长江上游梯级电站开发区基于风险控制的水电工程泥石流“以排为主,适当拦挡”治理模式。

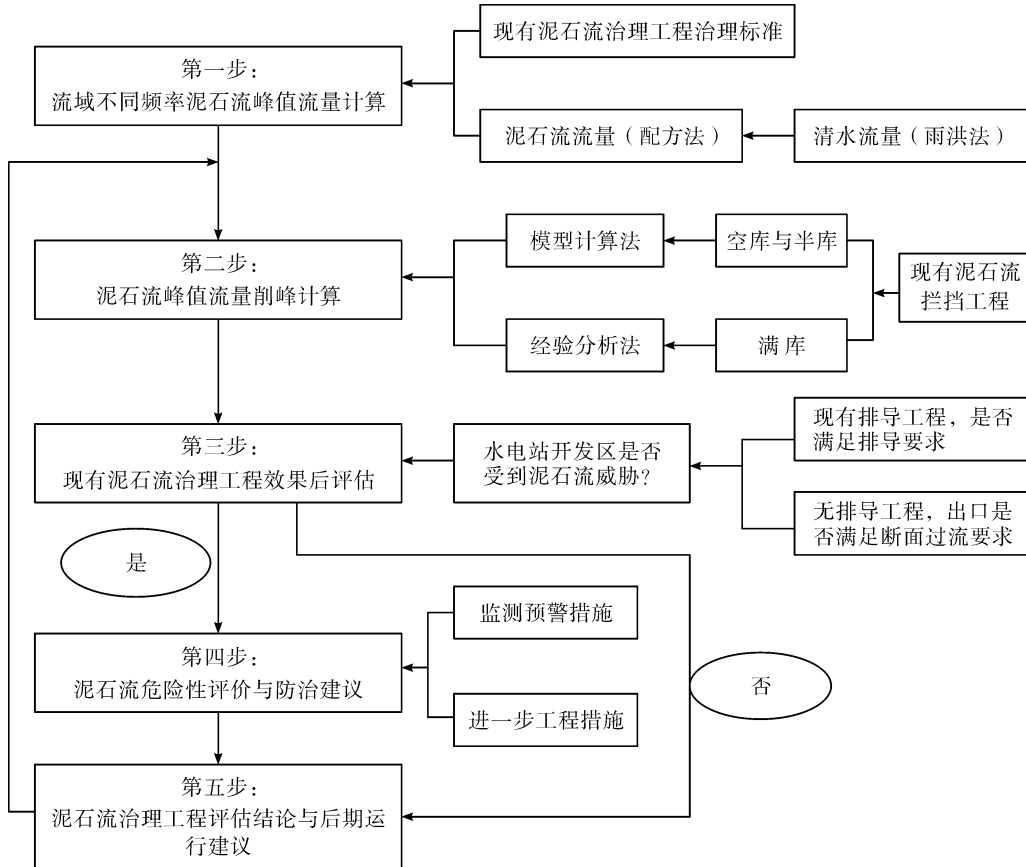


图 1 长江上游梯级电站开发区泥石流治理工程效果评估模式

(2) 采取有效措施预警大规模山地灾害。针对川滇干旱和地震作用下的长江上游梯级电站开发区山地灾害高中危险区,在原有 1:5 万地质灾害调查确定的重点区、次重点区和一般区的基础上,结合旱后泥石流等山地灾害物源的增加和临界雨量的降低,对地质灾害的危险区进行动态调整。在潜在山地灾害危险区内普及防灾知识、加强宣传教育;进一步加强重点区的群测群防体系建设;排查重点区域内的山地灾害隐患点,特别是低频泥石流隐患点,谨防低频泥石流沟暴发特大规模泥石流灾害;启动已建的气象、山洪、地质灾害监测预警点,实施气象、水利和国土部门联动与协作,以加强监测预警。

(3) 加强干旱与地震等因素对山地灾害动态影响的研究。建议加紧研究山地灾害的动态发展规律,并集成创新成果,投入区域应用。可选择云南小江、

西昌安宁河谷等干旱与地震强烈影响山地灾害发育的区域建立研究基地,系统收集长期历史数据,加强地震与干旱对山地灾害影响与模式机理研究,加强干旱和地震降低区域山地灾害暴发临界雨量研究,揭示中国长江上游山地灾害发育的动态规律。

(4) 建立山地灾害动态防灾减灾科学体系。以历史山地灾害动态危险区和危险事件为基础,结合基于历史事件、地形、地质等因素完成的传统山地灾害风险区划,以干旱、地震等动态变化指标为基础,在大规模旱后和震后,针对山地灾害的易发区域,启动山地灾害实时动态应急风险评估预测体系,建立基于动态评估和动态监测预警的防灾体系。并以动态山地灾害发育规律指导长江上游梯级电站开发区防灾减灾工作,有效减轻震后和旱后的山地灾害。

(下转第 269 页)

- [13] 马峰,王千,蔺文静,等.基于指标体系投影寻踪模型的水资源承载力评价:以石家庄为例[J].南水北调与水利科技,2012,10(3):62-66.
- [14] 田静宜,王新军.基于熵权模糊物元模型的干旱区水资源承载力研究:以甘肃民勤县为例[J].复旦学报:自然科学版,2013,52(1):86-93.
- [15] 马金珠,李相虎,贾新颜.干旱区水资源承载力多目标层次评价[J].干旱区研究,2005,22(1):11-16.
- [16] 王西琴,高伟,曾勇.基于SD模型的水生态承载力模拟优化与例证[J].系统工程理论与实践,2014,34(5):1352-1359.
- [17] De Wit M, Crookes D J. Improved decision-making on irrigation farming in arid zones using a system dynamics model[J]. South African Journal of Science, 2013, 109(11/12):1-8.
- [18] 刘晓君,付汉良.基于变权信息熵改进 TOPSIS 法的水资源承载力评价[J].水土保持通报,2015,35(6):34-39.
- [19] 邢军,孙立波.基于因子分析与模糊综合评判方法的水资源承载力评价[J].节水灌溉,2014(4):52-55.
- [20] 桓颖,张文静,王楠.基于主成分分析的吉林西部地区农业水资源承载力评价[J].长江科学院院报,2014,31(9):11-16.
- [21] 陈红蕾,彭开丽,刘超琼,等.基于脱钩理论的建设占用耕地与经济发展关系研究[J].水土保持通报,2016,36(4):333-338.
- [22] 约翰·D·斯特曼.商务动态分析方法:对复杂世界的系统思考与建模[M].朱岩,钟永光,译.北京:清华大学出版社,2008.
- [23] 孙乌仁·图雅,苏根成,迟文峰.农牧交错带耕地数量变化对粮食产量影响的时空关联性[J].水土保持通报,2016,36(3):186-192.
- [24] 高军波,刘彦随,张永显.1990—2012年淮河流域粮食生产的时空演进及驱动机制[J].水土保持通报,2016,36(3):179-185.
- [25] 嵇莹,杨倩,林爱文,等.江汉平原水土资源结构与产能时空分异特征[J].水土保持通报,2016,36(2):320-25.

(上接第 247 页)

[ 参 考 文 献 ]

- [1] 钟敦伦,谢洪,韦方强,等.长江上游泥石流综合危险度区划[M].上海:上海科学技术出版社,2010:10-40.
- [2] 胡桂胜,陈宁生,王元欢,等.金沙江白鹤滩水电站坝址施工区泥石流易发性与危险区初步分析[J].地球与环境,2014,42(5):652-657.
- [3] 贺拿,陈宁生,曾梅,等.白鹤滩水电站坝址近场区泥石流临界雨量研究[J].水利学报,2015,46(2):239-248.
- [4] 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] 苏鹏程,韦方强,冯汉中,等.“8·13”四川清平群发性泥石流灾害成因及其影响[J].山地学报,2011,29(3):337-347.
- [6] 王兆印,漆力健,王旭昭.消能结构防治泥石流研究:以文家沟为例[J].水利学报,2012,43(3):253-263.
- [7] Cui Peng, Chen Xiaoqing, Zhu Yingyan, et al. The Wenchuan earthquake (May 12, 2008), Sichuan Province, China, and resulting geohazards[J]. Natural Hazards, 2011,56(1):19-36.
- [8] 陈晓清,崔鹏,游勇,等.汶川地震区大型泥石流工程防治体系规划方法探索[J].水利学报,2013,44(5):586-594.
- [9] 王念秦,韩波,庞琦,等.泥石流防治工程效果后评价初探[J].工程地质,2015,23(2):219-227.
- [10] 贺拿,陈宁生,朱云华,等.矮子沟泥石流影响因素及运动参数分析[J].水利与建筑工程学报,2013,11(1):12-16.
- [11] 陈宁生,杨成林,周伟,等.泥石流勘查技术[M].北京:科学出版社,2011:55-60.
- [12] 贾世涛,崔鹏,陈晓清,等.拦沙坝调节泥石流拦挡与输移性能的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(11):2338-2346.
- [13] 连惠邦,柴钊武,柯志宗.梳子坝对土石流之防治效率[J].水土保持研究,2001,8(1):52-59.
- [14] 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):50-59.