

# 泥石流堰塞湖影响区域评估及其应急预案 —以汶川县磨子沟为例

刘晶晶<sup>1,2</sup>, 孙正超<sup>3</sup>, 程尊兰<sup>1</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, 成都 610041; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 西南石油大学 土木工程与建筑学院, 成都 610500)

**摘要:** 2008年汶川“5·12”地震后, 汶川震区内大量新、老泥石流沟的泥石流活动频度增加, 致使泥石流堰塞湖的形成几率也随之增大。通常泥石流所形成的堰塞体稳定性较差, 从形成至溃决通常在几小时内发生, 人工工程干预的可能性小。因此, 做好堰塞湖溃决洪水影响区域评估和溃决洪水应急预案, 成为必要且有效的减灾手段之一。但泥石流堰塞湖的溃决洪水既不同于一般意义的洪水, 也不同于人工大坝的溃决, 是过去应急预案研究中较少涉及的灾种。选择汶川磨子沟作为研究对象, 在泥石流堰塞湖溃决危险性评估基础上提出溃决洪水应急预案的编制原则和方法: 首先确定泥石流堰塞湖可能溃决的最大洪峰流量、淹没高度、泛滥范围和持续时间; 其后, 实地调查居民点, 圈定洪水淹没范围和危险区人口数, 并根据地形条件制定可能的撤退路线; 最后, 结合政府部门的行政安排, 制定险情通报程序、险情发生安全保障措施和预案启动、结束的时间节点。试图为其余泥石流堰塞湖溃决洪水危害应急预案制定提供借鉴, 提升应对突发泥石流堰塞湖溃决事件的效率。

**关键词:** 泥石流; 堰塞湖; 溃决洪水; 影响区域; 应急预案

**中图分类号:** TV 122    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2015)05-0935-06

## Assessment of influence area and emergency plan for debris flow dammed lake

— A case study in Mozi Gully of Wenchuan, Sichuan

LIU Jingjing<sup>1,2</sup>, SUN Zhengchao<sup>3</sup>, CHENG Zunlan<sup>1</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment & Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

3. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** After the "5.12 Wenchuan earthquake", a large number of new and old debris flow gullies increase their activities, and the possibility of dammed lake formed by debris flow increases as well. The dam formed by debris flow is unstable, and there are only a few hours from the dam formation to outburst, so it is difficult to conduct man made engineering intervention. Assessment of influence area and establishment of emergency plan for debris flow dammed lake are necessary and effective for disaster reduction. The dam failure flood caused by debris flow dammed lake is different from the traditional flood or the outburst of man made dam, which is an infrequent disaster type in the emergency plans. The Mozi Gully was chosen as the study object, and the principles and preparation methods of emergency plans were put forward on the basis of risk assessment for the outburst of debris flow dammed lake. First, the potential peak flow, flood height, and outburst duration time were determined for the outburst of debris flow dammed lake. Second, the inundation area was circled and risk population was estimated through field survey, and possible escape route and aftercare locations were chosen according to terrain conditions. Finally, the notification procedures, security measures, and time node of emergency plan starting and ending were set based on governmental administrative arrangements. The emergency plan for the Mozi Gully can lay the foundation for the similar plans of other dangerous debris flow gullies and improve the response efficiency of debris flow dammed lake.

收稿日期: 2014-12-26    修回日期: 2015-07-10    网络出版时间: 2015-09-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150924.2031.010.html>

基金项目: 中科院重点部署项目(KZZD-EW-05-01); 国家自然科学基金项目(41201010); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201301037); 中国科学院西部之光基金资助

作者简介: 刘晶晶(1981-), 四川成都人, 助理研究员, 博士, 主要从事山地灾害机理及防治工程方面研究。E-mail: chouchouji@163.com

**Key words:** debris flow; dammed lake; outburst flood; influence area; emergency plan

5·12 汶川地震触发了大量的崩塌和滑坡<sup>[1]</sup>, 严重改变了震区各流域的地形条件和松散碎屑物质条件, 极大促进了震后泥石流的发生和活动, 使得震区内很多小流域泥石流活动目前处于一个活跃期<sup>[2,3]</sup>, 且泥石流的发生规模和频率都较震前增大数倍。这些都导致泥石流流入汇主河发生堵塞形成堰塞湖的几率大大增加, 仅岷江干流就有数十条泥石流沟在震后堵塞岷江造成危害<sup>[4,9]</sup>。虽然泥石流堵塞主河形成的堰塞湖, 其规模和危害都较之滑坡小, 但由于其暴发突然, 且形成的堰塞体稳定性较差, 溃决时间短, 人工工程干预可能小。所以正确评估泥石流流入汇形成堰塞湖后的影响区域和合理制定应急预案是有效减灾手段之一。2010 年 8 月 14 日, 位于四川汶川县映秀镇的红椿沟和烧房沟<sup>[5]</sup>, 爆发了大规模的泥石流曾堵断岷江, 改变水流流向, 使得江水冲向岷江右岸震后新建的映秀镇, 危及新镇安全, 造成了大量的人员伤亡和经济损失。2013 年 7 月 11 日汶川七盘沟爆发特大泥石流, 致使阳光家园 4 期全部冲毁, 都汶高速公路阻断, 并在岷江一侧形成近 5 km 堰塞湖, 淹没新桥村、威州市场、阿坝州车管所、七盘沟变电站<sup>[6]</sup>。虽然政府启动了应急预案, 但预案在执行中也暴露了一系列问题, 例如缺乏预警, 方案不具体, 可操作性较差等。

制定应急预案的目的主要有两个: (1) 使突发灾害事件可能引起的紧急情况不扩大, 并尽可能地排除它们; (2) 减少事故造成的人员伤亡、财产损失和环境破坏。大量事实证明, 应急预案制定得当可以极大地避免事故、防止事故和减少事故所造成的损害<sup>[7,9]</sup>。应急预案的制定要具体细致、重点突出、程序简单、责任明确, 有针对性和可操作性<sup>[10,12]</sup>, 而堰塞湖溃决洪水危害是过去应急预案研究中较少涉及的灾种<sup>[13,14]</sup>。堰塞湖的溃决洪水既不同于一般意义的洪水, 也不同于人工大坝的溃决, 它涉及很多不确定因素, 包括: 易形成堰塞湖的泥石流沟或滑坡点、可能形成堰塞体的最大高度、溃决洪水的洪峰流量、洪水演进过程、淹没范围和持续时间<sup>[15,16]</sup>, 只有确定了这些因素, 才可能在实地调查的基础上提出切实可行的预案。

位于汶川县的磨子沟暴发泥石流的规模大、频率高, 是一条危害较大的泥石流沟, 2008 年-2010 年连续 3 年暴发泥石流, 甚至堵塞岷江形成堰塞湖。故本文选择磨子沟为典型研究点, 研究泥石流形成堰塞湖的可能最大坝高, 假设入库流量为汛期岷江平均流量, 计算溃决洪峰流量, 溃决后的可能最大洪水淹没区域, 依据上游回水情况和下游洪水淹没情况, 划分影响区域并制定相应的堰塞湖溃决洪水危害应急预案, 也为其余泥石流堰塞湖溃决洪水危害应急预案制定提供借鉴。在目前震后泥石流暴发频率、规模增大的情况下, 有助于提升应对突发泥石流堰塞湖溃决事件的效率。

## 1 磨子沟概况

### 1.1 地理位置

磨子沟位于四川省汶川县银杏乡一碗水村, 系岷江上游右岸的一级支沟, 从西向东汇入岷江干流(图 1)。G317(省

道 213) 线从沟口通过, 沟口处距离汶川县城 45 km。磨子沟流域面积 7.20 km<sup>2</sup>, 主沟长度 3.81 km, 流域相对高差达 2 569 m (最高点 3 556 m, 最低点 987 m), 主沟道平均纵比降为 493‰, 地形十分陡峻。

在地质构造上, 磨子沟位于龙门山断裂带内, 处于主中央断裂(北川映秀断裂)和后山断裂(茂汶断裂)之间, 沟口距离“5·12”汶川地震震中(映秀牛圈沟支沟莲花心沟)12.5 km。根据中国地震局发布的《汶川 8.0 级地震震度分布图》, 磨子沟所在位置属地震极震区, 地震烈度为 Ⅶ 度(图 1)。

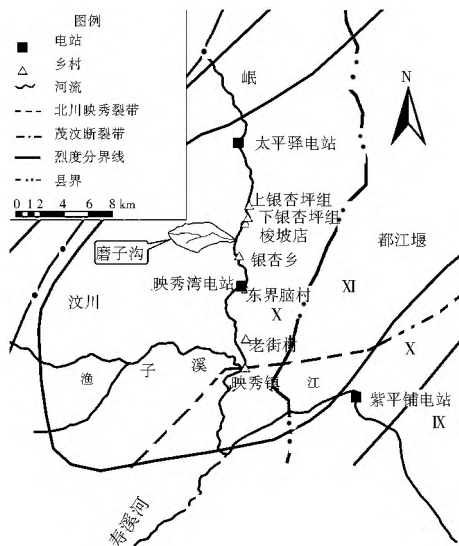


图 1 磨子沟流域地理位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of location of Mozi Gully

### 1.2 地质与气象

磨子沟内出露岩石主要为元古代晋宁-澄江期的侵入岩, 岩性以抗风化能力较强的中粒花岗岩为主( $\gamma_0^{(4)}$ )。流域下游主要是第三期的石英闪长岩( $\delta_2^{(3)}$ ), 右岸局部出露第三期的辉长岩( $\nu_2^{(3)}$ ); 流域中、上游以第四期的斜长花岗岩( $\gamma_0^{(4)}$ )为主, 源头地区出露少量的中粒黑云花岗岩( $\gamma_2^{(4)}$ )。而在左支沟源头一侧也有少量第三期的石英闪长岩( $\delta_2^{(3)}$ )出露, 并上覆一定厚度的石英片岩和灰岩( $P_{thn}^{(4)}$ )。

受气候的水平地带性影响, 整个汶川县的气候, 大致以草坡乡为界, 分为南、北两个气候区, 降雨量从北向南逐渐递增。梭坡店以北属暖温带大陆性半干旱季风气候区, 梭坡店以南属于山地亚热带湿润季风气候区。磨子沟流域则属于南部的山地亚热带湿润季风气候区, 受夏季太平洋暖流高压控制和冬季盛行西北高原干冷气流的影响, 该区域的气候特征呈现为: 四季分明; 夏季湿热、多雨; 秋绵雨危害严重; 气温年较差小、无霜期长、光照不足(是四川省及阿坝州的少日照中心)。梭坡店至下游的映秀、漩口和三江一带, 也是川西的多雨中心之一, 尤其在雨季(5月-9月), 受西南和东南暖湿气流共同影响, 常有暴雨出现(汶川县志, 1992)。距离磨子沟下游 12 km 的映秀镇多年平均降雨量为 1 253 mm, 7月-9月份的降雨量达 726 mm, 占全年的 57.9%。此外, 受局部地形影响, 磨子沟流域的气候和土壤具有明显的垂直地带性。

### 1.3 历史灾害情况

汶川地震后,磨子沟流域源头和沟道两侧的山体形成了大量的崩塌、滑坡,沟道内形成多处堵塞体,这些巨量的固体松散物质以及陡峻的沟谷地形为泥石流的发生提供了极为有利的条件。2008年汛期在降雨激发作用下,磨子沟先后暴发了多场次泥石流,主要集中在7月-9月。其中,尤以2008年7月14日、8月6日、8月21日和9月24日发生的4次泥石流规模较大,前3次均堵断过岷江干流,其中7月14日堵江时间最长,达15 min。随后在2009年和2010年汛期都发生了泥石流短暂堵断岷江的事件。尽管堵断岷江的泥石流坝很快被江水冲出缺口过流,但大量泥石流堆积物仍然停积在沟口段岷江河道中,使河床被抬高,江水水流受阻,堰塞湖长期存在(图2)。

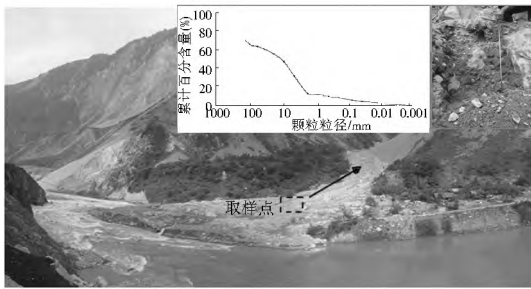


图2 磨子沟堵塞岷江

Fig. 2 The Minjiang River blocked by debris flow in the Mozi Gully

根据现场洪痕调查,上游的堰塞湖最高水位比现在的河床约高15 m,回水约3 km。在2008年12月枯水期现场调查时堰塞湖水深仍有8 m,回水仍有1 km。由此可以推断在汛期的7月-9月,磨子沟的泥石流发生堵江时,堰塞湖的水位比12月实地测量时要高7 m。泥石流堆积呈宽扇形,扇面坡度约为15°,扇缘长约500 m,堆积体厚度约为5~15 m,初步估算总方量约为20万 m<sup>3</sup>。在磨子沟上、下游5 km范围内只有银杏乡一个较大的乡镇,并且其位于岷江左岸的台地上,溃决洪水未对其造成危害,而上游的银杏乡一碗水村(图3)则由于回水淹没损失严重,淹没了数十户群众住房及大量耕地,目前此地居民已全部搬出。



图3 磨子沟泥石流堵塞岷江形成的堰塞湖淹没上游民房(2008年12月)(镜头向北)

Fig. 3 The buildings inundated by back water due to debris flow dammed lake in the Mozi Gully (Dec, 2008)(camera faces to the North)

通过以上分析,确定汶川磨子沟是易形成堰塞湖的高危险泥石流沟。故本文选择磨子沟为泥石流堰塞湖溃决洪水影响区域评估和应急预案编制的对象。

## 2 磨子沟堰塞体溃决分析

### 2.1 溃决洪水流量计算

#### 2.1.1 假定条件

根据现场实地考察,预估磨子沟暴发泥石流堵江形成堰塞体的可能最大高度为22 m。故本文即以磨子沟形成坝高22 m的最危险堰塞体为研究对象。假设堵塞坝体达到预期最大高度22 m,汇水库容为360万 m<sup>3</sup>,入库流量为汛期岷江平均流量467 m<sup>3</sup>/s,以进行溃决洪峰流量的计算(表1)。

表1 磨子沟泥石流形成最危险堰塞体假定值

Tab. 1 The assumed parameters of the debris flow dammed lake in the Mozi Gully

坝高 / m	横断面 积/m <sup>2</sup>	坝体内 摩擦角	物料 系数	库容 系数	库容 指数	库容 / 万 m <sup>3</sup>	入库流量 / (m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )
22	3326.45	22	3.68	3035	2.29	360	467

#### 2.1.2 相关模型选择

依据堰塞体溃决的过程,溃决洪水流量的计算主要涉及溃口形态方程、溃口堰流方程、库区水量平衡和溃口泥沙输移方程,这里主要选取党超<sup>[7]</sup>提出的土石坝漫顶溃决模型进行计算。

##### (1) 溃口形态模拟。

首先假设坝体溃口多呈梯形或两侧为均匀斜坡、底部为抛物线的形态特征,建立了如下溃口平均宽度的回归公式:

$$\bar{B} = 0.367 \left( \frac{W}{E} \right)^{0.195} \left( \frac{B_0}{\tan \beta} \right)^{0.337} H_0^{0.5} \quad (1)$$

式中: $\bar{B}$ 为坝体平均宽度; $W$ 为库容; $E$ 为坝体横断面面积; $B_0$ 为坝后水面宽度(坝体有效宽度)。对于溃口底部宽度,根据在溃决过程中不发生变化的假定,在计算时可以首先假定一个初值,然后通过不断迭代的方式计算出最后的底宽。

##### (2) 溃口堰流方程。

溃口假定为梯形,由于在溃口附近的局部加速度远小于对流加速度,在溃口可以认为是准定常流,因而通过溃口或坝顶水流的水力特征可以用宽顶堰流描述:

$$Q_0 = 1.71b\sigma(H-Z)^{1.5} + 1.2\tan(\beta)\sigma(H-Z)^{2.5}$$

$$\sigma = \begin{cases} 1 & H_2 - Z \leq \frac{2}{3}(H-Z) \\ 1 - 2.783 \left( \frac{H_2 - Z}{H - Z} - 0.67 \right)^3 & H_2 - Z > \frac{2}{3}(H-Z) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $H$ 为堰塞湖水深; $Z$ 为溃口相对于坝堤的高程; $\beta$ 为溃口边坡,取决于坝体组成物质的天然休止角(可认为等于内摩擦角); $\sigma$ 为淹没系数; $H_2$ 为坝下游水深。

##### (3) 库区水量平衡。

堰塞湖库容选用如下公式:

$$W = \int_0^H A_s(H) dH \quad (3)$$

式中: $W$ 为堰塞湖库容; $A_s(H)$ 为堰塞湖表面面积;式(3)适用于堰塞湖表面为水平时,一旦溃决开始,湖水就会向溃口集中并沿溃口下泄,这时由于库区水面坡度较小,仍可认为式(3)适用。这时堰塞湖水位下降速度可以表示为

$$\frac{dW}{dt} = Q - Q_s - Q_p \text{ 或 } \frac{dW}{dt} = I - Q \quad (4)$$

$I$  为入库总流量;  $Q$  为出库总流量;  $Q_i$  为入库流量;  $Q_b$  为通过溃口的流量;  $Q_s$  为通过溢洪道的流量;  $Q_p$  为管涌出流量 (由于天然土石坝无溢洪道且管涌量较小, 可忽略后两项)。对于特定的坝体, 其水位库容曲线可以由地形图绘制, 如下式:

$$W = aH^n \quad (5)$$

则通过式(4)和式(5)可得:

$$anH^{n-1} \frac{dH}{dt} = Q_i - Q_b \quad (6)$$

上式中包含两个未知量, 堰塞湖水面高程  $H$  和溃口的出流量  $Q_b$ 。

(4) 溃口泥沙输移。

溃口的冲刷速率与堰塞湖的水位库容关系、水位, 以及坝体的物质组成密切相关。本文选用赵超<sup>[17]</sup>提出的溃口输沙率计算公式

$$\bar{\rho} = \frac{(0.42n+1)\Phi}{100na^{0.58}} H^{-(0.58n-1)} \quad (7)$$

式中:  $\bar{\rho}$  为平均含沙量;  $\Phi$  为物料系数;  $H$  为水位。

### 2.1.3 计算结果

通过前期的系列假定条件和对堰塞湖溃决洪水过程的模拟, 最终得到 22 m 磨子沟泥石流堰塞湖的最危险溃决结果(表 2)。

表 2 磨子沟泥石流堰塞体最终溃决参数

Tab. 2 The outburst parameters of the debris flow dammed lake in the Mozi Gully

溃决历时/h	洪峰流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	洪峰时刻/h	最终溃口深度/m	最终水深/m	最终溃口顶宽/m	最终溃口底宽/m	排出水量/亿 m <sup>3</sup>
2.52	1 923	0.92	3.14	7.36	122.26	28.9	0.038

溃决时坝址峰值流量为 1 923 m<sup>3</sup>/s, 以堵江形成堰塞体为起始时刻, 开始溢流至溃决结束约为 2.52 h, 溃决洪峰时刻约为 0.92 min, 最终泄水量为 380 万 m<sup>3</sup>, 泥石流坝体无残留。上游汇水区的水深为 7.36 m, 淹没上游长度 4.78 km。

## 2.2 影响范围内的有关情况

### 2.2.1 上游回水影响

磨子沟若形成最危险的 22 m 的堵塞坝体, 回水将导致上游淹没范围为 0.98 km<sup>2</sup>, 上游淹没长度 4.78 km。实地考察知, 磨子沟上游 4.78 km 内有梭坡店居民点(一碗水被淹后居民迁至梭坡店)、沙坪关村上银杏坪组、沙坪关村下银杏坪组。对涉及影响的三个居民点的最低高程和计算所得的回水最大高程进行对比, 判断磨子沟口岷江上游侧的 3 个居民点都处于安全区域(表 3)。

表 3 堰塞湖回水影响范围

Tab. 3 The influence area of backwater of the dammed lake

居民点	居民人数	距堰塞湖距离/km	居民点最低高程/m	回水最大高程/m	判断
梭坡店	48 户 147 人	1.5	1042	1018.83	安全
沙坪关村下银杏坪组	28 户 82 人	2.9	1060	1018.83	安全
沙坪关村上银杏坪组	10 户 48 人	3.2	1063	1018.83	安全

注: 表格中涉及数据实地测于 2011 年。

### 2.2.2 下游洪水影响

若磨子沟泥石流堰塞湖在最高位发生溃决, 洪水沿程演进会对下游区域带来灾害, 故我们选择磨子沟下游至紫坪铺电站共 7 个典型断面进行野外实地测量, 包括 4 个居民点(银杏乡、东界脑村、老街村、映秀镇(2 个断面))、1 个水电站

(映秀湾电站) 和 1 个岷江典型滑坡处(映秀老虎嘴), 以计算洪水演进的高程、洪峰达到时间、断面最大流速等(表 4)。通过测量居民点最低高程和水电站闸顶高程, 并计算相应点洪水淹没高程, 判断磨子沟下游区域 3 个居民点银杏乡、老街村、映秀镇都处于安全区域, 而映秀湾电站和东界脑村处于危险淹没区。

### 2.2.3 沿程水库调洪

映秀湾水电站是一座低水头水闸引水式电站, 距离太平驛电站 13.5 km, 设计洪水流量 2 700 m<sup>3</sup>/s, 校核洪水流量 5 600 m<sup>3</sup>/s, 相应设计洪水位 944.6 m, 校核洪水位 948.6 m, 死水位 943.0 m, 水库总库容 58 万 m<sup>3</sup>, 调节库容 12 万 m<sup>3</sup>。映秀湾水电工程于 1972 年建成, 于 1987 年改建, 将闸顶高程由 949.5 m 抬高 2 m 至 951.5 m。

在 2010 年的汛期, 岷江左岸的清水沟暴发泥石流, 使得震后已经恢复运行的映秀湾电站再次受损, 2011 年调查时停止运行(表 5)。枯水季节实地测量发现, 映秀湾电站上游岷江宽约 100 m, 水面高程 943 m, 测量此处断面, 进行计算知, 此处洪水的最大淹没高程为 954.34 m, 距离映秀湾大坝的闸顶很近, 在本预案中将其认为其处于危险淹没区, 电站人员需撤离。并且由于映秀湾电站本身建设期早, 调节库容非常小, 仅有 12 万 m<sup>3</sup>, 调查时也未运行, 故本次应急预案制定中, 不考虑映秀湾电站的调洪的作用。

紫坪铺水利枢纽工程是一座以灌溉和供水为主, 兼有发电、防洪、环境保护、旅游等综合效益的水利工程, 是都江堰灌区的调节水源工程。紫坪铺水库总库容为 11.12 亿 m<sup>3</sup>, 调节库容 7.74 亿 m<sup>3</sup>, 具有不完全年调节能力。磨子沟堰塞湖溃决产生的洪水完全可以由紫坪铺水库拦截, 对于紫坪铺电站下游地区不会造成威胁。

表 4 磨子沟沟口及下游岷江 6 个断面计算最大洪水参数

Tab. 4 The peak flood parameters in six sections of downstream Mozi Gully

位置	里程/m	溃坝峰值流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	洪峰出现时间/h	断面平均流速/(m·s <sup>-1</sup> )	流深/m
磨子沟	K0+ 0.00	1 923	0.92	6.01	4.45
银杏乡上游	K0+ 546.58	1 900	0.95	7.38	2.34
映秀湾电站大坝上游	K0+ 4451.52	1 438	1.05	6.18	5.26
东界脑村	K0+ 4600.34	1 430	1.06	5.74	5.21
老街村	K0+ 6612.54	1 242	1.08	5.54	3.86
映秀老虎嘴	K0+ 8367.94	1 138	1.10	5.12	2.74
映秀镇上游	K0+ 11162.51	1 180	1.15	4.96	1.98
映秀镇下游	K0+ 12664.1	1 097	1.25	4.73	3.12

表5 磨子沟堰塞湖溃决洪水影响范围

Tab. 5 The influence area of outburst flood of the debris flow dammed lake in the Mozi Gully

居民点	居民人数	距堰塞湖距离/km	居民点最低高程/m	洪水淹没最大高程/m	判断
银杏乡	844户 2697人	0.55	994	981.96	安全
映秀湾电站大坝上游	10余人	4.45	951.5	954.34	不安全
东界脑村	102户 388人	4.6	945	949.94	不安全
老街村	28户 93人	6.6	941	931.67	安全
映秀镇	2 407户 6 266人	12	881	873.82	安全

表格中涉及数据实地测于 2011 年

### 2.2.4 最危险情况下磨子沟泥石流堰塞湖影响区划定

根据磨子沟堰塞湖的回水与溃决洪水演进的计算分析,当高为 22 m 的磨子沟泥石流堰塞湖发生溃决后,其主要的影 响范围见图 4。上游回水区涉及的居民点都安全,而下游 溃决洪水演进区中除了映秀湾电站和东界脑村,其余居民点 都属于安全区域。由于东界脑村中居民众多,所以预案的制 定尤以保障东界脑村的人员生命安全为重。

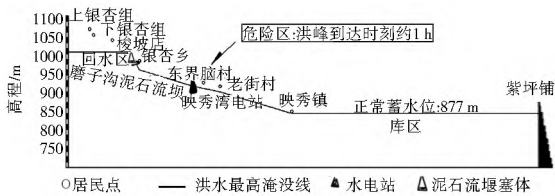


图4 磨子沟 22 m 高泥石流堰塞体回水及溃决洪水影响区  
Fig. 4 The influence area of backwater and outburst flood of the 22-m high debris flow dammed dam in the Mozi Gully



图5 东界脑村全图  
Fig. 5 Overview of the Dongjiennaocun village



图6 东界脑村居民家里清晰的淹没线  
Fig. 6 Clear flood line in a resident's home

## 3 风险人口转移安置

前述分析得知风险区域为映秀湾电站和东界脑村,风险人口约 400 人,针对淹没区内地形、地质灾害隐患点位置等情况具体制定当地转移路线和安置区。

### 3.1 转移路线和安置区域

#### 3.1.1 映秀湾电站

映秀湾电站处入库流量大于 3 700 m<sup>3</sup>/s,为大洪水。由于汶川 5·12 大地震后河道缩窄,河床抬高。当入库流量达到 1 500 m<sup>3</sup>/s 时,停机避峰。当入库流量达到或大于 2 700 m<sup>3</sup>/s 时,泄洪闸门提升到最大开启高度泄洪。大坝值班人员在闸门操作完成后撤离到安全地带。根据实地考察,映秀湾电站职工最好撤离到东界脑村后山上,便于统一安排与物资的储存。

#### 3.1.2 东界脑村

东界脑村是个大型村组(图 5),共有 102 户 388 人,距离磨子沟 4.6 km。居民点最低高程为 945 m,距离映秀湾电站约 140 m。枯水季节实地测量发现,此处岷江宽 103 m,水面高程 942 m,距离东界脑村最低高程为 3 m,根据前述分析东界脑村处于淹没区。2010 年汛期,曾由于清水沟泥石流暴发涌入岷江致使江水上涨,淹没房屋约 1 m 余,当时村民躲入了东界脑村后山(图 6、图 7)。

以上分析知,若磨子沟形成 22 m 堰塞湖,溃决时产生的洪水,最高将达到二层楼房处,对东界脑村造成极大毁坏。故村中居民即使登上二楼也不安全,只能撤离。东界脑村组织中 388 名居民需往其后山地带转移。



图7 东界脑村后山  
Fig. 7 Mountain behind the Dongjiennaocun village

### 3.2 转移时间安排

从泥石流堵塞岷江成坝至溃决洪峰演进到淹没危险区,共约 60 min。为保证居民生命安全,必须在接到避灾指令后 30 min 内集结村民转移。

## 4 磨子沟泥石流堰塞湖溃决洪水危害应急组织系统设计

泥石流堰塞湖溃决洪水危害应急组织系统包括 4 个运作机构设置,即应急指挥机构、灾害现场指挥机构、支持保障机构和信息管理机构,通过对系统内四个方面机构的设计和建立,以实现机构的快速反应、整体行动、信息共享,尽可能提高应急的速度,缩短反应时间,降低溃决事件灾害后果,最大可能完成最优化的应急系统建设。

在本文中从泥石流堵江到溢流溃决,共需约 30 min,而溃决洪峰到达映秀湾电站约为 60 min。时间短暂,无法对堰

塞湖进行工程措施处理,故本预案中并不涉及到现场工程干预情况。其组织系统见图 8。

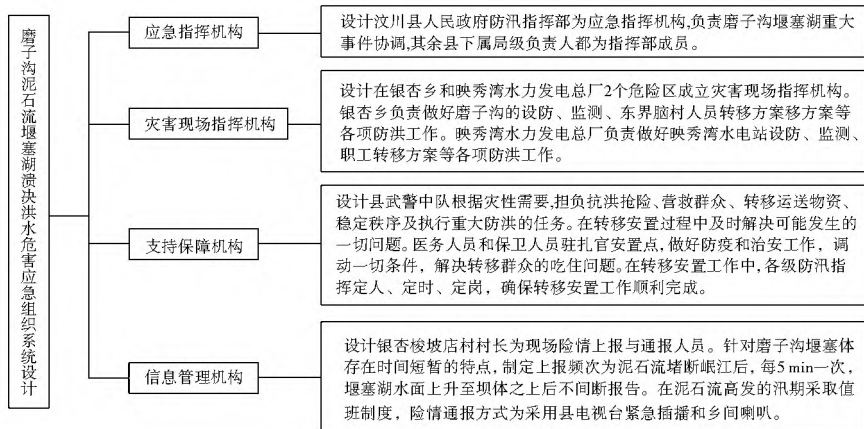


图 8 磨子沟泥石流堰塞湖溃决洪水危害应急组织系统设计

Fig. 8 System design of emergency organization for flood disaster caused by the debris flow dammed lake in the Mozi Gully

以上设计结合政府部门的行政安排,建立动态管理机制和科学民主的决策机制,完善应急预案启动机制和管理模式、落实物质保障、协调应急预案的实施。这一部分需要同当地部门紧密结合,所以仅简述应急组织系统中囊括的主要部分,可结合当地现状,进行适当调整设计。

### 5 结论

泥石流堰塞湖的溃决洪水既不同于一般意义的洪水,也不同于人工大坝的溃决,是过去应急预案研究中较少涉及的灾种。震前,震区河流两侧泥石流沟的分布就极为广泛。震后,大量的新、老泥石流沟泥石流活动频度增加,规模增大,甚至原本的非泥石流沟谷也转变为泥石流沟,暴发泥石流形成堰塞湖的几率也随之增加。在这样的背景下,前期做好泥石流沟评估工作并就其堵河并溃决的可能编制应急预案,是有效的减灾手段之一,能减少灾害事件发生后的人员伤亡和经济损失。

针对过去去泥石流堰塞湖应急预案制定和执行的不足,以汶川县高频泥石流沟磨子沟为案例,研究泥石流形成的堰塞湖溃决洪水影响区域评估和应急预案的制定程序。结合当地地形和气象因素,预估最危险情况下磨子沟泥石流堰塞湖最高水位 22 m。计算可能溃决的最大洪峰流量、淹没高度,最终圈定洪水淹没区为映秀湾电站和东界脑村,确定风险人口数约 400 人,设计转移路线和东界脑后山为安置区域。通过溃决洪水分析和现场踏勘,研究应急组织系统机构设置,设计和建立应急指挥机构、灾害现场指挥机构、支持保障机构和信息管理机构。以实现机构的快速反应、整体行动、信息共享,尽可能提高应急的速度,缩短反应时间,降低溃决事件灾害后果,最大可能完成最优化的应急系统建设。在目前震后泥石流暴发频率、规模增大的情况下,有助于提升应对突发泥石流堰塞湖溃决事件的效率。

### 参考文献(References):

[1] 黄润秋. 汶川 8.0 级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1239-1249. (HANG Runqiu. Mechanism and geomchanical modes of landslide hazards triggered by Wenchuan 8.0 earthquake[J]. Chinese Jour-

nal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1239-1249. (in Chinese))

[2] 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. (CUI Peng, WEI Fang qiang, CHEN Xiaor qing, et al. Geor hazards in Wenchuan Earthquake area and countermeasures for disaster reduction[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2008, 23(4): 317-323. (in Chinese))

[3] 谢洪, 王士革, 孔纪名. “5·12”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. (XIE Hong, WANG Shi ge, KONG Ji ming. Distribution and characteristics of mountain hazards induced by the earthquake of May 12 in Wenchuan, China[J]. Journal of mountain science, 2008, 26(4): 396-401. (in Chinese))

[4] 苏鹏程, 韦方强, 程尊兰. 5·12 汶川地震对磨子沟的影响及震后泥石流活动状况[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(2): 16-21. (SU Peng cheng, WEI Fang qiang, CHENG Zun lan. Debris flow activity of Mozi Gully after Wenchuan Earthquake on May 12[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(2): 16-21. (in Chinese))

[5] 甘建军, 孙海燕, 黄润秋, 等. 汶川县映秀镇红椿沟特大型泥石流形成机制及堵江机理研究[J]. 灾害学, 2012, 27(1): 5-9. (GAN Jiarr jun, SUN Har yan, HUANG Run qiu, et al. Study on mechanism of formation and river blocking of Hongchungou giant debris flow at Yingxiu of Wenchuan County[J]. Journal of Catastrophology, 2012, 27(1): 5-9. (in Chinese))

[6] 曾超, 崔鹏, 葛永刚, 等. 四川汶川七盘沟“7·11”泥石流破坏建筑物的特征与力学模型[J]. 地球科学与环境学报, 2014, 36(2): 81-91. (ZENG Chao, CUI Peng, GE Yong gang, et al. Characteristics and mechanism of buildings damaged by debris flows on 11 July, 2013 in Qipangou of Wenchuan, Sichuan[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2014, 36(2): 81-91. (in Chinese))

[7] 栾盈菊. 对政府应急预案编制与实施的思考—以 2008 年南方低温雨雪冰冻灾害为例[J]. 江南社会学院学报, 2008, 10(2): 27-30. (LU AN Ying ju. On making and implementing of governmental emergency plan—a case study of snow and ice disasters in southern China in 2008[J]. Journal of Jiangnan Social University. 2008, 10(2): 27-31. (in Chinese))

(下转第 952 页)

- [14] 殷宗泽, 袁俊平, 韦杰, 等. 论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J], 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2155-2161. (YIN Zong ze, YU AN Jurr ping, WEI Jie, et al. Influences of fissures on slope stability of expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2155-2161. (in Chinese))
- [15] 海龙, 梁冰. 考虑降雨入渗条件的土体边坡稳定性分析[J], 水资源与水工程学报, 2010, 21(4): 46-50. (HAI Long, LIANG Bing. Analysis of land slope stability considering rainfall infiltration[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2010, 21(4): 46-50. (in Chinese))
- [16] 邵龙潭, 王助贫, 关立军, 等. 非饱和土中水流入参与气体排出过程的求解[J]. 水科学进展, 2000, 11(1): 8-16. (SHAO Long-tan, WANG Zhr pin, GUAN Li jun, et al. Numerical simulation of the process of pore water infiltration and pore gas flow in unsaturated soil[J]. Advances in Water Science, 2000, 11(1): 8-16. (in Chinese))
- [17] Glass RJ, Steenhuis TS, Parlange JY. Wetting front instability II. Experimental determination of relationships between system parameters and two dimensional unstable flow field behavior in initially dry porous media[J]. Water Resource Research, 1989, 25(6): 1195-1207.
- [18] DiCarlo DA, Banters TWJ, Darnault CJG Steenhuis TS, et al. Lateral expansion of preferential flow paths in sands[J]. Water Resource Research, 1999, 35(2): 427-434.
- [19] 李亮. 地裂缝带黄土的渗透变形试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2007. (LI Liang. Seepage deformation experimental research of fissured loess[D]. Xi'an: Chang'an University, 2007. (in Chinese))
- [20] 许兆义, 赵英杰, 陈家军. 包气带水流中黄土裂隙作用机制研究[J]. 长春地质学院学报, 1993, 23(3): 326-329. (XU Zhaoyi, ZHAO yir jie, CHEN Jia jun. Research of fractural efficacy on mechanisms governing water flow in unsaturated loess[J]. Journal of Changchun University of Earth Sciences, 1993, 23(3): 326-329. (in Chinese))
- [21] 李贺丽. 指流特性及其影响因素的实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007. (LI He li. Experimental research on characteristics and effect factors of finger flow[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [22] Fredlund, Rahardjo. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: Wiley and Sons Inc, 1993.
- [23] Van Genuchten, M. Th. "A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils". Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [24] Coulomb C A. Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs, a l'architecture. Mem. Acad. Roy. Div. Sav., 1776(7): 343-387.
- [25] M ORGENSTERN N R, PRICE V E. The analysis of the stability of general slip surface[J]. Geotechnique, 1965, 15(1): 79-93.

(上接第 940 页)

- [8] 钟开斌, 张佳. 论应急预案的编制与管理[J]. 甘肃社会科学, 2006(3): 230-241. (ZHONG Kai bing, ZHANG Jia. The formulation and management of pre arranged planning[J]. Gansu Social Sciences. 2006(3): 230-241. (in Chinese))
- [9] 马宗晋. 中国重大自然灾害及减灾对策(分论). 北京: 科学出版社, 1994: 320-326. (MA Zong jin. The major natural disasters and mitigation measures in china (subpandect) [M]. Beijing: Science Press, 1994: 320-326. (in Chinese))
- [10] 李风. 工程安全与防灾减灾[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (LI Feng. Engineering safety and disaster prevention and mitigation. Beijing: China Architecture and Building Press [M]. 2008. (in Chinese))
- [11] 陈群祥. 对我国应急管理体系统建设的回顾与思考[J]. 长春工业大学学报: 社会科学版, 2008, 20(3): 70-74. (CHEN Qun xiang. Review and reflection of emergency management system in China[J]. Journal of Changchun University of Technology: Social Sciences Edition, 2008, 20(3): 70-74. (in Chinese))
- [12] 孙绍聘. 中国救灾制度研究[M]. 北京: 商务印书馆, 2004: 20-31. (SUN Shaoping. The study of China relief system[M]. Beijing: The Commercial Press, 2004: 20-31. (in Chinese))
- [13] 马宗晋. 中国重大自然灾害及减灾对策(总论)[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 110-197. (MA Zong jin. The major natural disasters and mitigation measures in china (pandect) [M]. Beijing: Science Press, 1994: 110-197. (in Chinese))
- [14] 马宗晋, 方蔚青, 高文学, 等. 中国减灾重大问题研究[M]. 北京: 地震出版社, 1992: 290-295. (MA Zong jin, FANG Wei qing, GAO Werr xue, et al. Major issues on disaster reduction in China [M]. Beijing: Earthquake Press, 1992: 290-295. (in Chinese))
- [15] 魏迎奇. 堰塞湖灾变特征及应急处理技术[J]. 中国水利, 2008(11): 37-39. (WEI Ying qi. Cataclysm feature of dammed lake and emergency treatment technology[J]. Water Conservancy, 2008(11): 37-39. (in Chinese))
- [16] Dai F C, Lee C F, Deng J H, et al. The 1786 earthquake triggered landslide dam and subsequent dam break flood on the Dadu River, southwestern China[J]. Geomorphology, 2005, 65(3): 205-221.
- [17] 党超, 丁瑜, 褚娜娜. 土石坝漫顶溃决模型[J]. 山地学报, 2012, 30(2): 207-215. (DANG Chao, DING Yu, CHU Na na. Simulation of debris dams breach due to overtopping[J]. Journal of mountain science, 2012, 30(2): 207-215. (in Chinese))