

# 溪洛渡坝区下游癞子沟泥石流发育特征及堵江可能性分析\*

陈兴长<sup>1,2,3</sup>, 崔鹏<sup>1</sup>, 裴来政<sup>1,2</sup>, 庄建琦<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院·水利部成都山地灾害与环境研究所/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. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010)

**摘要:**在野外详细调查、测绘的基础上,研究了癞子沟泥石流的特性,分析了泥石流堵江的可能性。研究结果表明,癞子沟是一条老泥石流沟,泥石流的性质为过渡-粘性,容重为 $1.8 \sim 2.2 \text{ t/m}^3$ ,规模属大一特大型。通过计算和分析,癞子沟泥石流在区域性降雨条件下,不会堵断金沙江,但是在局地暴雨条件下,可能堵断金沙江。如果在200年一遇泥石流堵断的情况下,堵河的高度达20.11 m;500年一遇时,堵河的高度达30.39 m。堵江后不但会淹没大坝尾水出水口,而且导致沟口右岸的癞子沟渣场失稳,形成灾害链。

**关键词:**溪洛渡大坝;癞子沟;泥石流;堵江;金沙江

**中图分类号:** P642.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2010)01-0045-05

泥石流进入主河后在短时间内改变主河水沙组成及局部边界条件,在入汇口附近发生淤积。泥石流的冲淤幅度受到泥石流活动规模和局部沟道条件的影响<sup>[1]</sup>。如果主河水动力条件与泥石流对比较弱,随着支主流量比的增加,则有可能发生堵江<sup>[2]</sup>。关于山区支沟泥石流突入主河引起堵江的事件多有报道<sup>[3-6]</sup>。泥石流一旦堵江,不但淹没上游农田和基础设施引发灾害,而且溃坝后洪水泛滥,往往形成二次灾害,危害极其严重。

癞子沟是金沙江下游左岸的一级支沟,位于四川省雷波县白铁坝乡境内,溪洛渡大坝下游约3 km处。根据实地调查,该沟系一老泥石流沟,沟内物源丰富。近期沟内人类活动加剧,松散物质进一步增加。由于溪洛渡大坝施工,在沟口右岸设置了一个大型弃渣场-癞子沟弃渣场。2005年渣场的弃渣开始堆至沟口,2006年沟口被堵,沟口弃渣厚度达25 m。

由于癞子沟口距大坝很近,一旦发生泥石流堵江事件,将对大坝的施工或运行造成威胁。溃坝后大量泥沙直接进入向家坝库区,淤积其有效库容。此外,堵江形成的回水浸泡和冲刷癞子沟渣场坡脚,导致渣场失稳,形成次生灾害链。为了弄清癞子沟泥石流的基本特征及其危险性,在

野外调查、测绘的基础上,深入研究了癞子沟泥石流的基本特征,并初步分析了泥石流堵江的可能性。

## 1 癞子沟自然环境概况

### 1.1 地形地貌

癞子沟发育于构造侵蚀和深切割的高山区,属高山峡谷地貌。流域平面呈“长树叶状”,面积 $25.47 \text{ km}^2$ ,主沟长9.43 km,支沟在海拔1 350 m以上开始发育,大都分布在主沟右岸,且均在海拔2 250 m以下(图1)。流域内地形起伏巨大,主沟最高点海拔约2 492.8 m,沟口海拔约370.0 m,相对高差2 122.8 m,沟床的平均纵比降224.66‰。主沟沟谷呈不对称的“V”字形,右岸坡度相对较缓;左岸较陡,多处近于直立。流域内坡度在 $25^\circ \sim 35^\circ$ 之间的陡坡地占总流域面积的21.28%; $>35^\circ$ 以上的急陡坡地占总流域面积的14.66%(图1)。癞子沟陡峻的地形和巨大的高差十分有利于泥石流的形成。

### 1.2 地质条件

癞子沟流域在大地构造部位上属扬子准地台西部的二级构造单元扬子台褶带,位于雷波-永

\* 收稿日期: 2009-07-29

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-302); 国家科技支撑计划项目(2006BAC10B04-1)

作者简介: 陈兴长(1970-),男,河南泌阳县人,博士生,讲师,研究方向: 山地灾害及其治理. E-mail: mygeotech@126.com

通讯作者: 崔鹏(1957-),男,陕西长安人,研究员,博士生导师,研究方向: 自然地理、山地灾害和水土保持.

E-mail: pengcui@imde.ac.cn

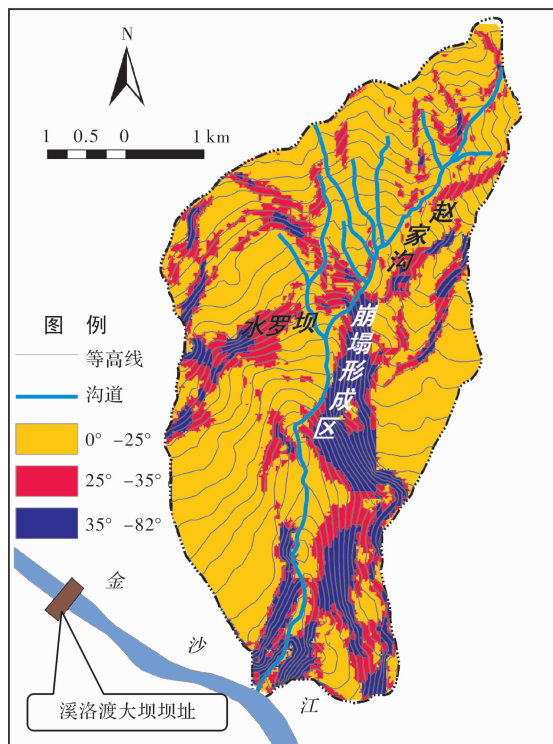


图1 癞子沟流域地形及坡度分区图

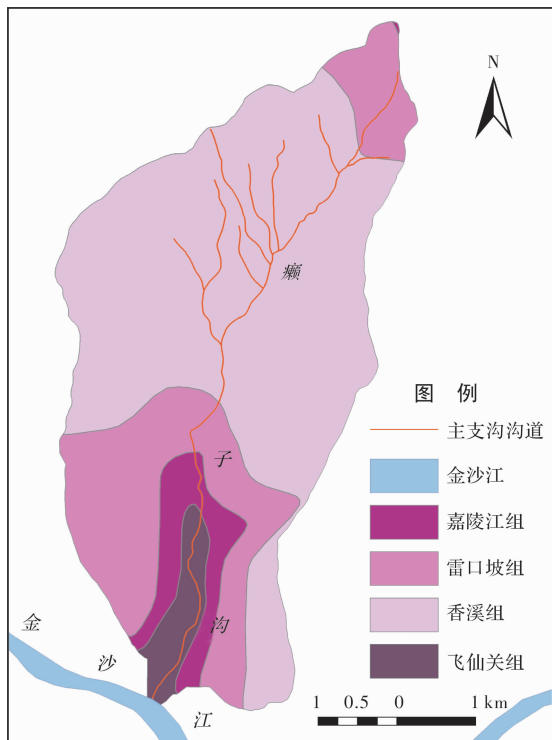


图2 癞子沟流域地层分布图

善三角形块体的中南部,永盛向斜西翼。

流域内的地层主要是三叠系的飞仙关组( $T_1f$ )、嘉陵江组( $T_2j$ )、雷口坡组( $T_2l$ )和上三叠统的香溪群( $T_3xn$ )(图2)。飞仙关组以灰紫色中至细粒岩屑砂岩为主,夹紫红色粉砂岩及泥岩。嘉陵江组主要为灰绿色、紫灰色的砂岩和泥页岩,局部分布有泥灰岩。雷口坡组下部主要为紫红色、灰绿色岩屑砂岩、粉砂岩、砂质泥岩互层;上部分布有灰、深灰色石灰岩、白云质灰岩,夹白云岩和泥灰岩。香溪群为一套内陆盆地沉积的河湖沼泽相地层,主要由灰、灰白色粗至中粒岩屑石英砂岩组成。流域内地层产状平缓,沟口附近岩层倾角约 $9^\circ$ 。岩层中陡倾裂隙发育,无充填,局部附少量钙膜,个别轻微锈染,结合紧密,裂面一般平直粗糙,强度较高。在沟口和沟谷中段左岸多形成近于直立的高陡边坡,同时也是崩塌频发的地段(图1)。

### 1.3 气候水文

根据溪洛渡坝址附近的永善气象站、雷波气象站和中兴场气象站资料,癞子沟流域多年平均年蒸发量 $2\,139.0\text{ mm}$ ,多年平均相对湿度 $67\%$ ,平均风速 $3.0\text{ m/s}$ 。降雨主要集中在4-10月,占全年的 $90.37\% \sim 96.55\%$ ,多年平均降水量为 $586.3 \sim 851.2\text{ mm}$ 。暴雨多集中在6-8月,最大日降雨量可达 $100\text{ mm}$ ,在暴雨中心区往往触发滑坡和泥石流。

据坝址下游约 $124\text{ km}$ 的屏山水文站1939-1992年资料统计,金沙江多年平均流量 $4\,620\text{ m}^3/\text{s}$ ,折合年径流量 $1\,460\text{ 亿 m}^3$ 。实测最大洪峰流量 $29\,000\text{ m}^3/\text{s}$ (1966年9月)。实测枯水期最小流量 $1\,060\text{ m}^3/\text{s}$ (1960年4月)。

## 2 癞子沟泥石流基本特征

### 2.1 物源特征

据调查,癞子沟泥石流物源主要有以下几种:沟源侵蚀、沟岸崩塌与沟床堆积、坡面冲刷。沟源侵蚀主要来自于右支沟水罗坝和主沟赵家沟一带(图1),为缓坡地段的地表松散土体,厚度 $2 \sim 3\text{ m}$ ,易受地表水冲刷起动,总量约 $40\text{ 万 m}^3$ ,可直接起动的物源量约 $10\text{ 万 m}^3$ ;主沟道左岸岸坡较陡,产生沟岸崩塌直接崩落沟床内,总量约 $15\text{ 万 m}^3$ ;沟道内老泥石流堆积物十分丰富,据调查平均厚度超过 $15\text{ m}$ ,分布面积达 $71.1\text{ 万 m}^2$ ,总量约 $1\,066.5\text{ 万 m}^3$ ,其中表层 $1\text{ m}$ 左右可在较大规模泥石流作用下直接起动,参与形成泥石流;除了沟岸崩塌外,由于沟道左岸人类活动的影响,坡面物质也较丰富,如新近修建的通乡公路产生的大量弃渣直接倾倒在山坡上,平均厚约 $0.5\text{ m}$ ,总量达 $4.0\text{ 万 m}^3$ ,这些松散物质在雨水的冲刷下直接进入沟床。沟口由于堆积了大量弃渣,已经

被堵塞, 整体抬高 20 多 m。直接堵塞沟口的弃渣宽约 60 m, 沿沟道方向长约 54 m, 弃渣厚度约 25 m, 呈倒锥形, 体积约 1.35 万 m<sup>3</sup>。癞子沟固体物源总计方量约 760 万 m<sup>3</sup>。

2.2 泥石流性质与容重

通过采样分析, 癞子沟泥石流堆积物中粒径 <0.075 mm 的含量为: 2.28% ~ 8.27%, 平均 5.22% (表 1 和图 3)。这种松散物质构成的泥石流体粘度较高, 可判定癞子沟泥石流性质为过渡 - 粘性。根据调查, 该沟内松散物质十分丰富, 沟

道堆积厚度很大, 堆积物中最大块石粒径可达 3 m。在不同降雨强度下形成的泥石流起动物质的厚度不同, 降雨强度越大, 起动厚度越大, 起动石块粒径也越大, 因此, 泥石流的容重也越大。根据现场调查和试验结果, 泥石流的容重为 1.8 ~ 2.2 t/m<sup>3</sup>。其中 500 年一遇时泥石流容重为 2.2 t/m<sup>3</sup>; 200 年一遇时泥石流容重为 2.0 t/m<sup>3</sup>; 百年一遇时泥石流容重为 1.9 t/m<sup>3</sup>; 50 年一遇时泥石流容重为 1.85 t/m<sup>3</sup>; 20 年一遇时泥石流容重为 1.8 t/m<sup>3</sup>。

表 1	癞子沟泥石流样品筛分试验结果								%
粒径/mm	<0.075	0.075 ~ 0.25	0.25 ~ 0.5	0.5 ~ 2	2 ~ 5	5 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 30	>30
1#	5.10	13.80	9.30	19.70	16.90	11.30	13.80	2.40	7.70
2#	2.28	3.42	5.08	13.55	15.80	16.05	18.85	9.35	15.61
3#	8.27	19.15	8.94	17.92	13.71	7.21	5.65	1.90	17.25

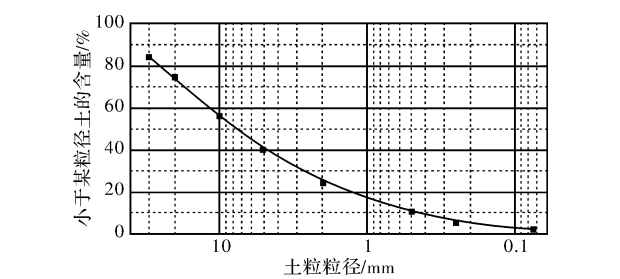


图3 典型筛分曲线(2#样)

2.3 清水洪峰流量

由于无实测流量资料, 参照国内外的通行方法, 对于癞子沟小流域的清水洪峰流量采用下式进行计算:

$$Q_B = 0.278 \times \psi \times \frac{S}{\tau^n} \times F, \tag{1}$$

式中:  $Q_B$  为清水洪峰流量(m<sup>3</sup>/s);  $\psi$  为洪峰径流系数;  $s$  为暴雨量, 即最大 1h 暴雨量(mm);  $\tau$  为流域汇流时间(h);  $F$  为小流域汇水面积(km<sup>2</sup>), 这里为 25.47 km<sup>2</sup>。

根据式(1)计算得到不同频率下癞子沟清水洪峰流量。计算参数及结果列于表 2。

表 3	不同频率下癞子沟泥石流流量计算结果					
频率 $P$	泥石流容重 $\gamma_c/(t/m^3)$	流量增加系数 $\phi_c$	清水洪峰流量 $Q_B/(m^3/s)$	泥石流峰值流量 $Q_C/(m^3/s)$	堵塞系数 $D_U$	一次泥石流过程总量 $Q_T/(万 m^3/s)$
5%	1.80	0.89	187.99	355.09	1.0	25.88
2%	1.85	1.00	230.21	690.63	1.5	60.06
1%	1.90	1.13	261.61	1 111.84	2.0	109.74
0.5%	2.00	1.43	292.02	1 772.98	2.5	198.10
0.2%	2.20	2.40	333.64	3 403.13	3.0	452.21

表 2	不同频率下清水洪峰流量计算表				
频率 $P$	径流系数 $\psi$	公式指数	汇流时间 $\tau/h$	暴雨量 $S/(mm/h)$	洪峰流量 $Q_B/(m^3/s)$
5%	0.93	0.65	3.50	64.98	187.99
2%	0.94	0.65	3.32	75.62	230.21
1%	0.95	0.65	3.22	83.22	261.61
0.5%	0.95	0.64	3.13	90.44	292.02
0.2%	0.96	0.64	3.03	100.32	333.64

2.4 泥石流峰值流量

根据考察, 癞子沟虽然沟道较顺直, 但卡口和陡坎较多, 加上坡面弃渣很容易进入沟道形成堵塞。因此, 泥石流峰值流量的计算采用了考虑堵塞条件下的配方法。计算公式如下:

$$Q_C = (1 + \phi_c) \times Q_B \times D_U, \tag{2}$$

式中:  $Q_C$  为泥石流峰值流量(m<sup>3</sup>/s);  $Q_B$  为清水洪峰流量(m<sup>3</sup>/s);  $\phi_c$  为泥石流峰值流量增加系数,  $\phi_c = (\gamma_c - \gamma_w)/(\gamma_s - \gamma_c)$ ;  $\gamma_c$  为泥石流容重(t/m<sup>3</sup>);  $\gamma_w$  为清水容重(t/m<sup>3</sup>);  $\gamma_s$  为固体物质实体容重(t/m<sup>3</sup>), 这里取 2.7(t/m<sup>3</sup>);  $D_U$  为堵塞系数, 泥石流暴发频率越低堵塞系数越大。

计算参数及结果列于表 3。

2.5 一次泥石流过程总量

由于癞子沟沟口及沟内人类活动较强，已经不具备实测一次泥石流过程总量的条件。因此，采用下式来概算在不同频率条件下的一次过程总量：

$$Q_c=0.018\ 8Q_T^{0.79},\tag{3}$$

式中： $Q_c$  为泥石流峰值流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )； $Q_T$  为一次泥石流过程总量( $\text{m}^3/\text{s}$ )。

从表 3 可以看出，在不同频率下，癞子沟泥石流计算峰值流量均超过  $350\ \text{m}^3/\text{s}$ ；一次泥石流总量均超过  $25\ \text{万}\ \text{m}^3/\text{s}$ 。这表明癞子沟泥石流的规模属大－特大型。

3 堵江可能性分析

3.1 堵江调查分析

考察期间为金沙江的枯水期，癞子沟泥石流在入汇主河处形成明显的单斜河床，河型虽然没有被改变，但泥石流堆积物严重挤占主河，胁迫主河向对岸推进，挤占河道约  $2/3$ 。在癞子沟口的金沙江对岸，可见残留的癞子沟泥石流堆积物。崔鹏通过研究，分析了泥石流与主河交汇的机理，将泥石流入汇主河的模式概括为掺混模式、潜入模式、推进模式和堵河模式<sup>[1]</sup>。因此，癞子沟泥石流入汇金沙江的模式介于推进模式和堵河模式之间，初步推断历史上曾经堵江或短时堵江。

3.2 评价方法

目前，关于泥石流堵河的判别研究成果仍然较少，且局限性都较大。在这些研究成果中能够进行定量判别的主要有何易平提出的泥石流堵河的动量和流量判别式<sup>[7]</sup>。朱平一提出的支沟泥石流输沙堵江系数表达式<sup>[4]</sup>。陈德明从支沟和主河动量比的角度提出的泥石流堵河的判别式<sup>[8]</sup>。这些判别式大都通过室内试验获取，需要实例修正，所以其判别结果差异很大。张金山等通过对岷江上游堵河泥石流的研究，定性地分析了影响泥石流堵河的因素<sup>[9]</sup>。党超等通过试验研究了泥石流堵河后堵塞坝的溃决模式<sup>[10]</sup>。这些研究成果对于定性地分析泥石流堵江可能性及堵溃后的危害具有实际意义。

欧国强等采用了主河与支沟流量比的简便判别方法，来判断在流域性降雨和局地暴雨两种情况下泥石流是否堵河，并把它用于南水北调西线一期工程区泥石流堵河的判别，取得了较好的效果<sup>[11]</sup>。本文拟采用这种方法对癞子沟在不同频率

下堵江的可能进行初步分析、评价。

3.3 不同频率下堵江分析

根据水文站的数据，溪洛渡坝区暴雨多集中在 6－8 月，最大日降雨量可达  $100\ \text{mm}$ 。坝址处各月平均最大流量出现在 8 月为  $10\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ ，最小流量出现在 1 月为  $1\ 620\ \text{m}^3/\text{s}$ ，年平均  $4\ 570\ \text{m}^3/\text{s}$ ，历年实测最小流量  $1\ 060\ \text{m}^3/\text{s}$ 。通过对比表 3 中的泥石流峰值流量可以发现，在各种频率条件下，癞子沟峰值流量均小于金沙江汛期平均流量，这表明在区域性降雨条件下，癞子沟泥石流不会堵断金沙江。但是，如果泥石流粘度较大在与主河交汇时可能形成潜入模式，甚至推进模式，在垂直于主河方向形成潜坝，压缩主河过流断面，可以部分堵断金沙江。

在癞子沟流域局地暴雨条件下，如果主沟发生崩塌、滑坡堵塞沟道的情况，将会发生溃决型大规模泥石流（如 200 年一遇或者 500 年一遇），可能堵断金沙江。

3.4 堵江高度预测

假定泥石流堵河形成的天然坝的形状为三棱锥体，坝体下游面坡度为泥石流起始坡度，取  $14^\circ$ ，上游面坡度取  $25^\circ$ 。根据一次泥石流流出总量中参与堵河的物质质量（约占总量的 50%），来计算堵河的高度<sup>[12]</sup>。计算公式如下：

$$Q_T=\left(\frac{1}{2\tan 14^\circ}+\frac{1}{2\tan \phi_s}\right)BH^2,\tag{4}$$

式中： $Q_T$  为一次泥石流流出总量( $\text{m}^3$ )； $\phi_s$  为泥石流体内摩擦角(度)； $B$  为主河宽度(m)； $H$  为堵河高度(m)。

利用上式计算得到 200 年一遇时，癞子沟泥石流堵河高度为  $20.11\ \text{m}$ ；500 年一遇时，堵河高度为  $30.39\ \text{m}$ 。

溪洛渡大坝设计尾水出口高程为  $381.74\ \text{m}$ ，接近目前河水位。癞子沟沟口海拔约  $370.0\ \text{m}$ ，因此一旦堵江，回水将淹没尾水出口，严重威胁大坝的正常运行。堵江后，回水浸泡和冲刷沟道出口右岸的癞子沟碴场，严重时会引起碴场失稳，直接进入金沙江加剧堵江，形成灾害链，危害严重。

4 结论与建议

(1) 癞子沟流域陡峻的地形和巨大的高差十分有利于泥石流的形成；沟内人类活动强度的加大对泥石流的形成也十分有利。

(2) 癞子沟泥石流的性质为过渡 - 粘性; 泥石流容重为  $1.8 \sim 2.2 \text{ t/m}^3$ ; 泥石流规模属大 - 特大型。

(3) 在区域性降雨条件下, 癞子沟泥石流不会堵断金沙江; 如果在主沟发生崩塌、滑坡堵塞沟道的情况下, 将会发生溃决型大规模泥石流, 可能堵断金沙江。

(4) 如果堵江, 根据计算, 在 200 年一遇的泥石流堵断下, 堵河高度为 20.11 m; 500 年一遇时, 堵河高度达 30.39 m; 堵江回水将会淹没尾水出口, 威胁大坝的正常运行, 甚至导致癞子沟渣场失稳, 引发灾害链。

(5) 建议流域内控制人类活动强度, 开展对癞子沟泥石流的专项研究, 加强监测预警, 防患于未然。

参考文献:

[1] 崔鹏, 何易平, 陈杰. 泥石流输沙及其对山区河道的影响[J]. 山地学报, 2006, 24(5): 539 - 549.

[2] 郭志学, 曹叔尤, 刘兴年, 等. 泥石流堵江影响因素试验研究[J]. 水利学报, 2004(11): 39 - 45.

[3] 陈循谦. 云南小江流域的泥石流灾害[J]. 灾害学, 1990, 5(2): 53 - 57.

[4] 朱平一, 程尊兰, 游勇. 川藏公路培龙沟泥石流输砂堵江成因探讨[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(1): 80 - 83.

[5] 游勇, 吴积善, 程尊兰. 蒋家沟下游泥石流导流堤冲决原因及防治对策[J]. 灾害学, 2001, 16(2): 14 - 17.

[6] 韦方强, 胡凯衡, 崔鹏, 等. 蒋家沟泥石流堵江成因与特征[J]. 水土保持学报, 2002, 16(6): 71 - 75.

[7] 何易平. 泥石流对山区河流河床演变的影响[D]. 成都: 中国科学院成都山地灾害与环境所, 2003.

[8] 陈德明, 王兆印, 何耘. 泥石流入汇对河流影响的实验研究[J]. 泥沙研究, 2002(3): 22 - 28.

[9] 张金山, 沈兴菊, 谢洪. 泥石流堵河影响因素研究[J]. 灾害学, 2007, 22(2): 82 - 86.

[10] 党超, 程尊兰, 刘晶晶. 泥石流堵塞坝溃决模式实验[J]. 灾害学, 2008, 23(3): 15 - 19.

[11] 欧国强, 游勇, 吕娟, 等. 南水北调西线一期工程区泥石流规模预测及其对调水工程的影响[J]. 山地学报, 2006, 24(5): 580 - 584.

[12] 周必凡. 泥石流防治指南[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 51 - 64.

Characteristics of Laizigou Debris Flow and Its Possibility of Blocking Jinsha River

Chen Xingzhang<sup>1,2,3</sup>, Cui Peng<sup>1,\*</sup>, Pei Laizheng<sup>1,2</sup> and Zhuang Jianqi<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment/Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, CAS, Chengdu 610041, China; 2. Graduate University, CAS, Beijing 100049, China; 3. School of Environment and Resources, SWUST, Mianyang 621010, China)

**Abstract:** The characteristics of debris flows in Laizigou are studied and the possibility of blocking river was analyzed based on detailed field study and survey. Results show that the gully is an old debris flow gully with characteristics of sub-viscous to viscous, bulk density of  $1.8 - 2.2 \text{ t/m}^3$ , and scale of large to oversize. From the calculation and analysis, it is concluded that debris flow of Laizigou can not block Jinsha River under the condition of regional precipitation, but it is most likely to block the River under the condition of local torrential rain. If debris flow of Laizigou totally blocks the River, the possible height of dam will reach 20.11 m and 30.39 m under the circumstance of a return period of 200 - year and 500 - year of debris flow, respectively. Once blocked, the backwater will not only submerge the water outlets of Xiluodu Dam but also lead to instability of Laizigou site of tunnel discard and will form disaster chains.

**Key words:** Xiluodu dam; Laizigou gully; debris flow; blocking river; Jinsha River