

汶川县绵镇板子沟“8·20”大型泥石流堵河特征及危害性预测

王东伟, 游 勇, 李道凌, 柳金峰, 孙 昊, 吕小波, 王 壮

The river blockage characteristics of “8·20” large-scale debris flow and the hazard prediction in Banzi gully in Miansi Town Wenchuan County

WANG Dongwei, YOU Yong, LI Daoling, LIU Jinfeng, SUN Hao, LYU Xiaobo, and WANG Zhuang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.01-07>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于面积高程和面积坡度积分的泥石流物质供给能力分析

The material supply ability analysis of debris flows based on area-hypsometric integral and area-gradient integral

张静, 田述军, 侯鹏鹞 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 9-16

基于增量加载法的泥石流拦挡坝抗冲击力数值模拟

Numerical simulation of impact resistance of debris flow dam: A case study of the debris flow dam in Sanyanyu Gully, Zhouqu County, Gansu Province

刘兴荣, 魏新平, 陈豫津, 王翔宇 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 78-83

喜德县中坝村火后泥石流发育特征及预警避险

Study on the development characteristics of post-fire debris flow and its early warning risk aversion in Zhongba Village, Xide County

殷万清, 金涛, 胡卸文, 曹希超, 杨相斌, 黄健 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 61-69

基于数值模拟的群发性泥石流危险性评价

Risk assessment of mass debris flow based on numerical simulation: An example from the Malu River basin in Min County

曹鹏, 侯圣山, 陈亮, 冯振, 王立朝, 李昂, 刘军友 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 100-109

四川省冕宁县华岩子沟火后泥石流成灾机理

Disaster mechanism of post-fire debris flow in Huayanzi gully, Mianning County, Sichuan Province

张绍科, 胡卸文, 王严, 金涛, 杨瀛 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 79-85

面向东川复杂山地泥石流沟谷三维地形建模及特征分析的无人机遥感探测应用研究

Application research of unmanned aerial vehicle remote sensing detection for 3D terrain modeling and feature analysis of debris flow gullies in complex mountainous area of Dongchuan

毕瑞, 甘淑, 李绕波, 胡琳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 91-100



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.01-07

王东伟, 游勇, 李道凌, 等. 汶川县绵虬镇板子沟“8·20”大型泥石流堵河特征及危害性预测[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(1): 58-66.

WANG Dongwei, YOU Yong, LI Daoling, *et al.* The river blockage characteristics of “8·20” large-scale debris flow and the hazard prediction in Banzi gully in Miansi Town, Wenchuan County[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(1): 58-66.

汶川县绵虬镇板子沟“8·20”大型泥石流 堵河特征及危害性预测

王东伟^{1,2}, 游 勇¹, 李道凌³, 柳金峰¹, 孙 昊^{1,2}, 吕小波^{1,2}, 王 壮^{1,2}

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室/中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 四川省阿坝藏族羌族自治州自然资源局, 四川 马尔康 624000)

摘要:汶川地震后, 板子沟曾发生过多多次大规模泥石流, 尤其是 2019 年“8·20”泥石流对沟口的道路桥梁以及村寨造成了严重的破坏, 将主河道向对岸严重挤压, 今后仍存在较大堵河的风险。文章在野外调查以及对泥石流基本特征和形成条件综合分析的基础上, 分析了堵河特征, 计算了不同频率下泥石流的堵河参数, 并预测了各频率下溃决洪水对绵虬镇可能产生的影响。计算结果表明, 频率为 2%、5% 和 10% 的泥石流造成岷江堵塞的可能性较小, 假设发生堵河事件, 绵虬镇也不会受到溃决洪水的危害。频率为 1% 的泥石流很可能造成主河堵塞。体积约 $57.38 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的泥石流物质可以到达岷江, 形成高度约为 51.61 m 的堰塞坝。在主河洪水的作用下, 堰塞坝发生溃坝, 溃坝洪水的峰值流量为 $5\,935.49 \text{ m}^3/\text{s}$, 到达绵虬镇后降至 $2\,312.25 \text{ m}^3/\text{s}$ 。由于相应的洪水深度 (4.00 m) 大于防护堤的高度 (3.50 m), 因此溃坝洪水很可能会对绵虬镇防护堤附近民房造成破坏。为今后大型泥石流堵河特征的分析, 以及溃决洪水对下游城镇可能造成的影响提供了参考。

关键词: 板子沟; 泥石流; 堵河; 溃坝洪水; 危害预测

中图分类号: P642.23; X43

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)01-0058-09

The river blockage characteristics of “8·20” large-scale debris flow and the hazard prediction in Banzi gully in Miansi Town, Wenchuan County

WANG Dongwei^{1,2}, YOU Yong¹, LI Daoling³, LIU Jinfeng¹, SUN Hao^{1,2}, LYU Xiaobo^{1,2}, WANG Zhuang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process/Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. The Natural Resources Bureau of Aba Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture, Sichuan Province, Barkam, Sichuan 624000, China)

Abstract: After Wenchuan earthquake, many large debris flow have occur in Banzi Gully. Especially in 2019, the “8·20” debris

收稿日期: 2021-05-25; 修订日期: 2021-07-28

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 四川省应用基础研究项目(2019YJ0005); 中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-425); 四川省重点研发项目(2019YFG0460)

第一作者: 王东伟(1995-)男, 内蒙古乌兰察布人, 博士研究生, 主要从事山地灾害综合防治技术试验研究。E-mail: 1522711642@qq.com

通讯作者: 游 勇(1964-)男, 四川乐山人, 研究员, 博士生导师, 主要从事泥石流运动机理及综合防治技术研究。E-mail: yyong@imde.ac.cn

flow caused serious damage to the roads, bridges and villages in the gully mouth, mail river was seriously squeezed to the other side and there is a big risk of blocking the river in the future. Based on the field investigation and comprehensive analysis of the basic characteristics and formation conditions of the debris flow, the characteristics of river blockage are analyzed, the parameters of river blockage under different debris flow frequency are calculated, and the possible impact of dam-breaking flood under each frequency on Miansi Town is predicted. The results show that debris flow with frequencies of 2%, 5% and 10% are less likely to cause river blockage of Min River, and if there was a river blocking event, the town of Miansi would not be exposed to dam-breaking flood. The debris flow with a frequency of 1% are likely to cause river blockage. The debris flow material with a volume of $57.38 \times 10^4 \text{ m}^3$ can reach the Min River to form a dam with a height of about 51.61 m. Under the action of the main river flood ($1890.0 \text{ m}^3/\text{s}$), the dam will be broken, and the peak flow rate of the flood was $5935.49 \text{ m}^3/\text{s}$, which dropped to $2312.25 \text{ m}^3/\text{s}$ while arrive at Miansi Town. Since the flood depth (4.00 m) is higher than the height of the protective embankment (3.5 m), the flood is likely to damage the houses near the protective embankment of Miansi Town. This paper provided a reference for the analysis of the characteristics of large-scale debris flow blockage in the future, as well as the possible impact of the collapse flood on downstream towns.

Keywords: Banzi gully; debris flow; river blocking; dam-breaking flood; hazard prediction

0 引言

“5·12”汶川地震产生大量的崩塌滑坡体等松散物质,为泥石流的发生提供了有利条件^[1],震后都江堰-汶川公路沿线多次爆发大规模泥石流,给沿线人民的生命财产安全带来严重威胁^[2]。

汶川地震后 10~30 年(或更长时间)泥石流活动频繁,前 5~10 年泥石流活动更为活跃^[3]。泥石流活动对灾区的交通运输、救援、疾病控制、灾民安置及灾后恢复重建都有巨大的影响^[4]。近 10 年来,岷江沿岸的绵鹿镇上游几条泥石流沟均处于活跃期,频繁暴发的大规模群发性泥石流形成的堆积扇将岷江不断向对岸挤压,堵塞岷江的可能性大大增加,一旦形成堰塞湖,溃坝洪水会对绵鹿镇造成极大的威胁。因此,预测绵鹿镇上游的泥石流堵河可能性及次生危害(尤其是溃坝洪水)非常重要。文中通过野外调查及计算,描述并分析了板子沟泥石流堵河特征,计算了一系列堵河参数,并预测在不同泥石流频率下溃坝洪水对绵鹿镇的影响。

1 流域环境背景

1.1 地理位置

板子沟位于汶川县绵鹿镇板子沟村(图 1),汶川县城下游约 9.5 km,距绵鹿镇约 6.1 km,属岷江右岸一级支沟。流域面积 54.9 km^2 ,主沟长度 16.96 km,泥石流沟沟道为西北-东南方向。国道 G213 和都汶高速 S9 从板子沟口以桥梁形式通过。

1.2 气象水文

研究区位于汶川县南部的绵鹿一带,属岷江上游



图 1 研究区地理位置图

Fig. 1 Geographical map of the study area

南温带半干旱河谷气候,降水量少而稳定,年降水量 526.3 mm。据威州气象站 23 年实测,研究区内多年平均降水量为 528.7 mm。岷江年平均流量 $168 \sim 268 \text{ m}^3/\text{s}$,最大流速 6.9 m/s,最小流速 1.44 m/s。河面宽度一般在 $80 \sim 100 \text{ m}$ ^[7]。

1.3 地形地貌

流域最高点海拔 5 251 m,沟口海拔 1 295 m,相对高差 3 956 m(图 2),陡峭的斜坡有利于降水径流的汇集。纵向平均坡降 232‰,沟谷整体坡向 116° ,沟道上游段较陡,平均坡降约 339‰;中下端前缘较缓,平均坡降约 15‰~121‰。泥石流沟两侧岸坡较陡,坡度约 $30^\circ \sim 40^\circ$,局部地段达 $60^\circ \sim 70^\circ$,植被以低矮的灌木和草丛为主,汇水及水源条件较好,沟道两岸崩塌堆积物较多,多为“5·12”地震后形成。较大的汇水面积和丰富

的物源条件,为泥石流的暴发提供了有利的水源条件和物源条件。

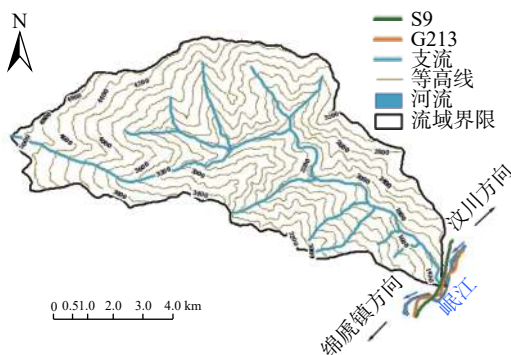


图 2 板子沟等高线地形图

Fig. 2 Topographical contour map of Banzi gully

1.4 地质构造与岩性

研究区位于龙门山华夏系构造体系之中南段的九顶山华夏系构造带内,又属于甘孜-松潘地槽褶皱带与扬子地台之间褶皱亚系,构造复杂。断层排列密集,褶曲断裂繁多。接近研究区的主要断层为茂汶断裂和雪隆包断层^[5](图 3)。

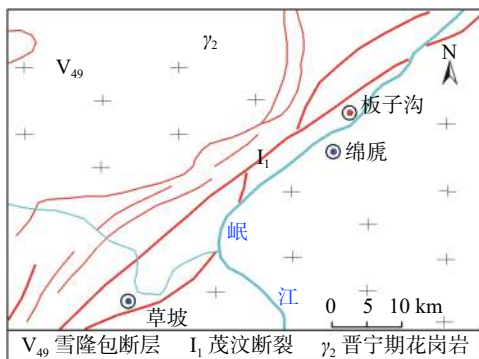


图 3 研究区主要断裂分布图

Fig. 3 The main fracture distribution in the study area

群发性泥石流流域岩性主要以砂泥岩及其变质的板岩、千枚岩和花岗岩为主^[6]。研究区出露地层主要为前震旦系黄水河群、下元古-太古界康定群、中元古代晋宁期,岩性主要以花岗岩、砂泥岩、斜长角闪岩为主。岩体具有强度高、节理裂隙发育、强风化的结构特性,因此岩层很容易变得不稳定,进而发生崩溃或形成滑坡在降雨激发条件下转化为泥石流。研究区属于高烈度地震区(VIII度),地震动峰值加速度为0.2g,地震反应谱特征周期为0.35s。

1.5 研究区泥石流灾害历史

根据现场调查访问,板子沟在1936年、1982年、2013年7月10日、2019年8月20日曾发生过大型泥

石流。据当地居民描述,1982年发生泥石流时,泥石流堆积物冲至沟口,规模较大。2019年“8·20”泥石流发生之前,堆积区主要为2013年“7·10”泥石流堆积物。

地震发生前,在研究区引发泥石流的日降雨量为80~100mm,1h降雨量为30~50mm^[8]。然而,由于地震后泥石流流域中存在大量的疏松固体物质,触发泥石流的临界降雨量值下降^[9-10]。根据汶川县气象台通报,2019年8月19日8时—8月20日8时绵鹿镇板子沟村雨量站点降雨量55.2mm,降雨量等级达到暴雨级别。大多数泥石流发生过程持续时间一般不超过1.5h^[11],在20日凌晨3时左右,板子沟村2组板子沟沟口开始出现泥石流现象,泥石流一直持续到凌晨7点左右,泥石流冲毁都汶高速公路桥梁400m、淤埋村道50m(图4a)、损毁房屋89栋(图4b),泥石流冲出沟口将岷江河道向对岸挤压(图4c),沟口拦砂坝和排导槽受损严重(图4d)。



图 4 “8·20”板子沟泥石流灾害特征

Fig. 4 The characteristics of the “8·20” debris flow

2 泥石流基本参数计算

2.1 泥石流容重计算

采用余斌公式^[12],根据现场采集的样品进行容重计算:

$$\gamma_c = 2.0P_{05}^{0.35}P_2 + 1.5 \quad (1)$$

式中: P_{05} ——小于0.05mm的颗粒的百分含量(用小数表示);

P_2 ——大于2mm的颗粒的百分含量(用小数表示)。

现场取样的颗分试验结果表明,板子沟泥石流1号样中粉粒 P_{05} (<0.05mm)含量为0.58%,砾石 P_2 (>2mm)含量约占40.69%。2号样粉粒 P_{05} (<0.05mm)含量为

1.16%, 砾石 $P_2(>2\text{ mm})$ 含量约占 63.89%。从颗粒组成上看, 从上游到下游板子沟泥石流中粗颗粒含量呈逐渐减小的趋势, 可能是泥石流在运动输移过程中, 由于输沙能力有限, 部分大石块在运动过程中就堆积于沟道, 并未直接输移至下游。计算得到板子沟不同重现期下(1%、2%、5%、10%)的泥石流容重 γ_c 分别为 1.70 t/m³、1.62 t/m³、1.50 t/m³、1.42 t/m³。

2.2 泥石流流速计算

根据野外调查, 板子沟泥石流属稀性泥石流, 采用《泥石流灾害防治工程勘查规范》(DT/T0220—2006)^[13]中提供的铁二院稀性泥石流流速计算公式:

$$V_c = \frac{1}{n_c \sqrt{\gamma_H \phi + 1}} R_c^{2/3} J_c^{1/2} \tag{2}$$

式中: V_c ——泥石流断面平均流速/(m·s⁻¹);
1/ n_c ——沟床糙率系数;
 ϕ ——泥沙修正系数, 可通过公式 $(\gamma_c - \gamma_w)/(\gamma_H - \gamma_w)$ 计算;
 γ_H ——泥石流固体物质容重/(t·m⁻³);
 R_c ——水力半径/m, 一般可用平均泥深代替;
 J_c ——泥石流水力坡度(用小数表示), 一般可用沟床纵坡代替。

计算结果详见表 1。

表 1 板子沟泥石流基本运动参数计算结果

Table 1 Calculation results of the basic motion parameters of debris flow in Banzi gully						
计算内容	参数	单位	频率			
			1%	2%	5%	10%
容重计算	γ_c	t·m ⁻³	1.70	1.62	1.50	1.42
	1/ n_c	/	12.50	12.50	12.50	12.50
流速计算	ϕ	/	0.74	0.59	0.44	0.34
	γ_H	t·m ⁻³	2.60	2.60	2.60	2.60
	R_c	m	6.10	4.05	2.02	1.32
	J_c	/	0.23	0.23	0.23	0.23
	V_c	m·s ⁻¹	10.64	8.70	5.95	4.78
洪峰流量计算	S	mm·h ⁻¹	38.54	35.02	30.10	26.4
	ψ	/	0.93	0.93	0.93	0.93
	n	/	0.88	0.87	0.85	0.84
	μ	/	2.79	2.63	2.39	2.20
	τ	h	2.75	2.84	2.98	3.11
	Q_p	m ³ ·s ⁻¹	197.32	173.81	143.22	119.76
泥石流流量计算	D_c	/	3.00	2.80	2.60	2.40
	Q_c	m ³ ·s ⁻¹	1 028.15	776.17	535.98	385.27
一次冲出总量计算	T	s	3 600	3 600	3 600	3 600
	Q_i	10 ⁴ m ³	97.72	73.77	50.94	36.62

2.3 清水流量计算

参照《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》^[14], 分别

根据 20 a 一遇, 50 a 一遇, 100 a 一遇的暴雨强度进行清水流量计算。

暴雨推理计算式如下:

$$Q_p = 0.278 \psi \frac{S}{\tau^n} F \tag{3}$$

式中: Q_p ——暴雨流量/(m³·s⁻¹);
 ψ ——洪峰径流系数;
 F ——流域面积/km²;
 S ——暴雨雨力/(mm·h⁻¹);
 n ——暴雨公式指数;
 τ ——流域汇水时间/h。

计算结果见表 1。

2.4 泥石流洪峰流量计算

雨洪法泥石流洪峰流量计算式^[15-16]为:

$$Q_c = Q_p(1 + \phi)D_c \tag{4}$$

式中: Q_c ——泥石流最大流量/(m³·s⁻¹);
 D_c ——泥石流堵塞系数。

计算结果见表 1。

形态调查法泥石流流量计算结果见表 2, 其中断面 1、断面 2 的位置见图 5。

表 2 形态调查法泥石流流量计算结果

Table 2 Results of flow calculation by morphological investigation method of debris flow in Banzi gully

断面位置	断面高程 /m	沟道宽度 /m	平均泥深 /m	过流面积 /m ²	平均流速 /(m·s ⁻¹)	峰值流量 /(m ³ ·s ⁻¹)
断面1	1 255	71	2.1	149.1	4.74	707.39
断面2	1 263	70	2	140	4.77	667.49



图 5 “8·20”泥石流后板子沟堆积区形态及主要参数

Fig. 5 The form and main parameters of the debris fan in Banzi gully after the “8·20” mudslide.

结合上述野外实测断面计算得到的泥石流流量(707.39 m³/s、667.49 m³/s)与雨洪法计算得到的不同暴

雨频率下泥石流流量值相比较,发现该次板子沟泥石流规模更接近频率为 2% 的泥石流流量标准($776.17 \text{ m}^3/\text{s}$)。

2.5 一次泥石流冲出量计算

一次泥石流冲出总量按照《泥石流灾害防治工程勘查规范》(DT/T0220—2006)^[13]附录 I 提供的计算公式进行计算:

$$Q_t = 0.264TQ_c \quad (5)$$

式中: Q_t ——一次泥石流过程总量/ m^3 ;

T ——泥石流历时/s。

板子沟泥石流持续约 1 h, 计算结果见表 1。

3 “8·20”泥石流堵河因素分析

堆积区位于板子沟沟口高程 1 300 ~ 1 390 m, 相对高差约 90 m, 纵坡比降 102‰, 堆积区长度约 880 m, 平均宽度约 200 m。由于前缘入河口常年遭受岷江的冲刷而形成高约 10 ~ 20 m 的台地, 板子沟数次泥石流对沟口处堆积台上的居民并没有造成太大威胁, 因此板子沟泥石流的主要威胁对象为沟口处国道 G213 以及都汶高速 S9。

如图 4, “8·20”泥石流后, 沟口冲出的大量泥石流堆积体将岷江向左岸挤压, 红色三角区域即为本次泥石流形成的堆积扇, 野外调查测得, 堆积扇最大长度约 60 m, 最大宽度约 140 m。根据前人对泥石流堵河方面的研究, 影响泥石流堵河的主要因素包括: 泥石流入汇角、泥石流流速比、流量比、泥石流入汇总量、沟道河道条件和泥石流流体性质等。

3.1 入汇角

入汇角被普遍认为是影响泥石流与主河汇流结果的一个关键因素, 即泥石流入汇方向与主河水流方向的夹角^[16], 而当入汇角接近或等于 90° 时, 泥石流流体几乎只有垂直主河方向的运动, 水平方向克服主河水流阻力做功耗散的能量最少, 因此泥石流更容易快速到达对岸, 与对岸发生冲击后淤积在主河道, 造成主河的堵塞, 文中的研究对象板子沟沟口入汇角即接近 90° (图 5)。

3.2 流速比

流速比即泥石流流速与主河道河水流速之比。该比值大表明泥石流流速相对较大, 泥石流流体在汇入主河后更容易保持整体性, 从而造成河流堵塞; 反之, 该比值小则表明主河流速相对较大, 那么主河的冲刷能力较强, 泥石流不易堵塞主河。文中岷江年平均流速为 5.40 m/s , 因此板子沟不同频率下 (1%、2%、5%、10%) 该比值分别为 2.17、1.77、1.21、0.97, 由此可以粗略分析出在频率为 1% 和 2% 时泥石流堵河可能性较大。

3.3 流量比

通常来讲, 小流量的泥石流一般不易堵塞主河, 泥石流汇入主河即被冲刷带走, 而当泥石流流量相对较大时, 大量泥石流物质可以短时间快速汇入主河, 从而造成主河堵塞, 进而形成堰塞湖。本文中板子沟不同频率下 (1%、2%、5%、10%) 该比值分别为 0.54、0.41、0.28、0.20, 总体上板子沟泥石流流量较小, 岷江汛期流量较大。然而这一比值并未考虑泥石流流体性质, 板子沟泥石流以大块石为主, 这样即便泥石流流量较主河流量小, 但短时间大量块石汇入主河, 仍存在较大堵河可能性。

3.4 泥石流入汇总量

直接参与堵河的泥石流物质被称为泥石流入汇总量, 下一次泥石流来临时, 部分泥石流物质将堆积在原先的堆积扇上; 其余的将到达主河并参与堵塞河道 (图 6)。

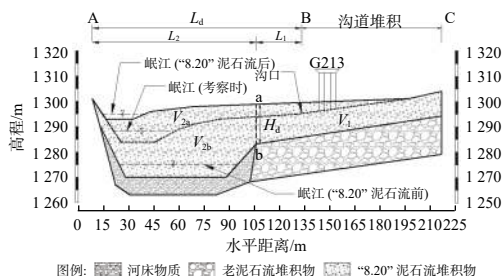


图 6 板子沟“8·20”泥石流沟口堆积扇纵剖面图

Fig. 6 The vertical profile of debris fan of “8·20” debris flow in Banzi gully

从沟口流出的泥石流物质体积 (Q_t) 可分为两部分: 沟道堆积 (V_1) 和堵河堆积 (V_2)。参与河道堵塞的泥石流流量 (V_2) 等于 Q_t 减去 V_1 。线 a-b 界定了 V_1 和 V_2 , 其中 V_2 又可以按形成时间先后分为 “8·20” 泥石流发生后沟口处被岷江冲刷带走的泥石流物质 V_{2a} , 以及剩下未被冲刷走的泥石流物质 V_{2b} 。

图 6 中 L_d 为最大堆积长度, B_d 为最大堆积宽度, H_d 为平均堆积深度, L_d 如果小于 L_r , 则泥石流物质将无法到达主河, 而只能堆积在阶地上。反之则泥石流可以到达主河并可能发生堵塞。

3.5 沟道河道条件

3.5.1 主河宽度

主河宽度对泥石流堵河程度的影响主要体现在两个方面: 当主河宽度较大时, 一方面流速往往会较缓慢, 对泥石流体的冲刷能力就弱, 而窄河道由于束流作用更易将泥石流物质带走, 从而不易形成堵河; 另一方面, 泥

石流穿越主河到达对岸距离变长, 沿程受主河水流冲刷和河床阻力做功越多, 泥石流还未到达对岸就已经淤积下来。图 5 中沟口处上游岷江河道宽度约 70 m, 而下游处河道由于受到泥石流堆积体的挤压明显向左岸推移, 最窄处河道宽度仅约 30 m。可以明显看出由于河道变窄, 主河冲刷能力明显增强, 进而携带泥石流物质向下游堆积。

3.5.2 支沟主河纵坡

一般来说, 泥石流沟道纵坡越大, 泥石流流速越快, 更易造成堵河, 而对于主河, 其纵坡越大越有利于泥石流物质的冲刷搬运, 从而降低了堵河可能性。板子沟沟道平均纵坡为 190‰, 沟口处主河平均纵坡为 16‰, 主河纵坡较缓, 冲刷能力较弱, 而泥石流沟道较陡, 因此泥石流较易在汇口处堆积。

3.5.3 泥石流流体性质

泥石流容重越大, 黏性越高, 整体性越强, 抗冲刷能力也越强, 越容易在河床上淤积。文中板子沟不同重现期下的泥石流容重分别为 1.70 t/m³、1.62 t/m³、1.50 t/m³、1.42 t/m³, 为稀性泥石流。然而板子沟泥石流固体物质中粗颗粒含量较大, 当大量块石汇入主河时, 主河水流无法短时间将块石冲走, 后续泥石流就会在入汇口堆积进而堵塞主河。

根据以上的分析, 板子沟泥石流条件、主河条件以及汇口条件均有利于堵塞主河, 且由于该沟近些年暴发频率比较高, 原有的多次泥石流物质仍大量堆积在沟口, 河床逐年抬升, 河道不断向对岸挤压。因此, 下一次大规模泥石流极大可能会沿着原有沟口堆积体继续向对岸推进, 并很快冲击对岸后回落, 由于河床的抬升导致主河道内淤积变少, 大量泥石流物质会较之前几次泥石流更快的形成堰塞湖。

4 堵河及溃坝洪水参数计算分析

4.1 堵河可能性计算

根据陈德明堵河判别公式^[17]:

$$C_{\gamma} = \frac{\gamma_c Q_c V_c \sin \alpha}{\gamma_m Q_m V_m} \tag{6}$$

式中: γ_m ——主河堆积密度, 通常为 1.00 t/m³;
 Q_m ——主河的洪峰流量;
 V_m ——主河的流速;
 α ——泥石流方向与主河方向的夹角。

由于泥石流通常发生在雨季(6月至9月), 主河的雨季峰值流量 1 890 m³/s, 流速为 5.40 m/s(据《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》)。根据 1 : 50 000 地形图, 泥石流方向与主河的洪水方向的角度为 90°。如果 C_{γ} 的计算值等于或大于 1.44(临界值), 则主河可能会被泥石流堵塞^[18]。计算结果见表 3。

表 3 不同频率下泥石流堵河参数计算结果
Table 3 The calculation results of river blockage parameters at different frequencies

P/%	$\gamma_c/(t \cdot m^{-3})$	$Q_c/(m^3 \cdot s^{-1})$	$V_c/(m \cdot s^{-1})$	$Q_m/(m^3 \cdot s^{-1})$	$V_m/(m \cdot s^{-1})$	C_{γ}
1	1.70	1 028.15	11.70	1 890	5.40	2.00
2	1.62	776.17	9.57	1 890	5.40	1.18
5	1.50	535.98	6.54	1 890	5.40	0.52
10	1.42	385.27	5.26	1 890	5.40	0.28

C_{γ} 是堵塞主河的临界值。

为了更好地说明堵河计算结果的可靠性, 选用学者中普遍认可并且适用于汶川地区的其他堵河公式计算堵河可能性, 并与本文中所选用的公式的计算结果作对比, 计算结果基本吻合(表 4), 即频率为 1% 的泥石流会造成堵河, 频率为 2% 的泥石流可能会造成主河部分堵塞, 频率为 5% 和 10% 的泥石流基本不会造成堵河。

表 4 其他堵河公式计算结果

Table 4 The calculation results of the river blockage parameters at different frequencies

作者	表达式	参数	研究对象	计算结果
张金山等 ^[19]	$R = \frac{P Q_n J_n}{B_z Q_z J_z}$	R 为表示泥石流堵塞度; P 为爆发频率; B_z 在为沟口主河宽度; Q_n 为泥石流流量; Q_z 为主河流量; J_n 为支沟纵比降; J_z 为主河纵比降。	岷江上游及其支流的 8 条泥石流沟	1% 易于堵塞 2% 轻微堵塞 5% 轻微堵塞 10% 轻微堵塞
陈春光等 ^[20]	$D = 21.18 \frac{Q_n}{Q_s} + 0.54 \frac{J_n}{J_s} + 0.08 \beta + 1.39 \gamma_n - 0.06 K_z - 9.69$	D 为表示泥石流堵塞度; β 为泥石流流入汇角; K_z 在为沟口主河宽度; Q_n 为泥石流流量; Q_s 为主河流量; J_n 为支沟纵比降; J_s 为主河纵比降; γ_n 为泥石流容重。	汶川震区的 6 条泥石流沟	1% 完全堵塞 2% 部分堵塞 5% 不堵塞 10% 不堵塞

4.1.1 堆积形态参数计算

基于研究区内岷江两岸多条泥石流沟的历史测量

数据, 通过以下公式^[18]计算板子沟泥石流的最大堆积长度(L_d), 最大堆积宽度(B_d)和平均堆积深度(H_d)。

$$H_d = 0.141 Q_t^{1/3} + 4.21 \quad (7)$$

$$L_d = 2.446 Q_t^{1/3} + 0.748 7 \quad (8)$$

$$B_d = 2.748 Q_t^{1/3} + 0.348 3 \quad (9)$$

野外测得的板子沟沟口与岷江(L_t)之间的距离为 50 m(图 6), 阶地堆积部分的泥石流流体体积(V_t)可以通过 L_d 、 B_d 和 H_d 来估计。

4.1.2 堵塞高度计算

如果泥石流堵塞主河并形成堰塞坝, 则可以通过《泥石流防治指南》^[15]中给出的式(10)反算得到堵塞高度(H):

$$V_2 = \left(\frac{1}{2tg14^\circ} + \frac{1}{2tg\delta} \right) B_m H^2 \quad (10)$$

式中: δ ——泥石流物质在饱和状态下的内摩擦角, 通常为 25° ;

B_m ——主河宽度, 现场测得为 70 m。

计算结果见表 5。

表 5 不同频率下泥石流堵河高度计算结果

Table 5 The calculation results of the height of river blockage at different frequencies

$P/\%$	Q_t/m^3	H_d/m	L_d/m	B_d/m	V_1/m^3	V_2/m^3	H/m
1	97.72	18.20	243.47	273.04	40.33	57.38	51.61
2	73.77	16.95	221.76	248.65	31.15	42.61	44.48
5	50.94	15.47	196.10	219.81	22.23	28.71	36.51
10	36.62	14.30	175.74	196.94	16.49	20.12	30.56

4.2 溃坝洪水特征参数计算

对于泥石流堰塞坝的破坏, 历史数据表明, 部分破坏(以大坝高度计为 1/4、1/3 或 1/2)最常发生, 而整体破坏较为少见^[20]。对于板子沟, 采取 1/2 破坏模式进行计算和分析。

如果泥石流堰塞坝发生溃坝破坏, 可以通过式(11)^[21]计算堰塞坝溃坝洪水的峰值流量(Q_M):

$$Q_M = 0.9 \left(\frac{H-h}{H-0.827} \right) B_m \sqrt{H} (H-h) \quad (11)$$

溃决洪水(Q_M)的峰值流量可通过式(12)^[20]来计算:

$$Q_{LM} = \frac{W}{\frac{W}{Q_M} + \frac{S}{vk}} \quad (12)$$

式中: h ——溃坝后的剩余坝高;

W ——堰塞湖的水量, 可以根据水面宽度、深度、回水长度来估算;

S ——下游村镇与堰塞坝之间的距离, 为 6.1 km;

v ——雨季岷江的平均流速, 根据历史数据等于

5.40 m/s;

k ——经验系数(对于山洪, $k=1.5$)^[22];

B_m ——主河宽度, 根据野外调查为 70 m。

汶川震后重建的绵虬镇外侧修建了防护堤(图 7), 以保护城镇免受河流洪水的危害。为简化计算, 导流渠道的横截面可近似看作矩形, 防护堤的高度约为 3.50 m 左右。因此, 如果溃坝洪水的水深(H_f)大于 3.50 m, 则洪水可能会漫过防护堤并破坏防护堤附近的民房。

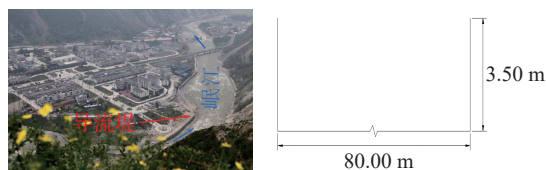


图 7 震后重建的绵虬镇及导流渠横断面示意图

Fig. 7 The Miansi Town rebuilt after the earthquake and cross-sections of the diversion channel

通过以上步骤, 可以计算出到达绵虬镇后的溃坝洪峰(Q_{LM})(表 6)。然后, 可以使用式(13)^[22]计算洪水速度(v_f):

$$V_f = \frac{1}{n_f} J_f^{1/2} R_f^{2/3} \quad (13)$$

最后, 使用式(14)和式(15)计算溃坝洪水(H_f)的水深:

$$R_f = \frac{S_f}{P_f} = \frac{H_f B_f}{B_f + 2H_f} \quad (14)$$

$$V_f = \frac{Q_{LM}}{S_f} = \frac{Q_{LM}}{H_f B_f} \quad (15)$$

式中: J_f ——导流渠的纵坡, 为 1.50%;

R_f ——水力半径;

n_f ——糙率系数, 取公共分配表中的 0.04^[23];

B_f ——导流渠的宽度, 野外测得为 80 m;

S_f ——过流断面面积;

P_f ——湿周周长。

表 6 不同频率下堰塞坝溃坝洪水计算结果

Table 6 The calculation results of dam-breaking flood with different frequencies

$P/\%$	H/m	Q_M /($m^3 \cdot s^{-1}$)	Q_{LM} /($m^3 \cdot s^{-1}$)	W/m^3	R_f / $10^4 m^3$	V_f /($m \cdot s^{-1}$)	H_f /m
1	51.61	5 935.49	2 312.25	285.26	3.64	7.24	4.00
2	44.48	4 760.71	1 704.09	199.88	3.06	6.45	3.31
5	36.51	3 555.03	1 108.91	121.37	2.39	5.47	2.54
10	30.56	2 735.38	725.68	74.38	1.86	4.64	1.96

4.3 溃坝洪水危害性分析

表 3-6 列出了用于泥石流堵河分析和溃决洪水灾

害预测的相关参数的计算结果。频率为 5% 和 10% 的泥石流其最大沉积长度均大于沟口与岷江之间的距离 $L_1 (= 50 \text{ m})$, 所以泥石流可以到达主河。而由于计算出的 C_v 值分别为 0.52 和 0.28, 远小于 1.44 (河流堵塞的临界值)。因此, 频率为 5% 和 10% 的泥石流基本不可能堵塞主河, 也不会对绵虬镇造成影响。

频率为 2% 的泥石流, 比较其 L_d 、 L_1 和河流宽度, 泥石流有可能造成主河堵塞。这里, 假设泥石流可能导致河道堵塞, 计算得到的溃坝洪水深度 (3.31 m), 接近防护堤高度 (3.5 m)。而计算出的 C_v 值为 1.18, 小于 1.44, 因此, 频率为 2% 的泥石流堵塞主河的可能性较小, 不会对绵虬镇造成威胁。

对于频率为 1% 的情况, 总的泥石流体积为 $97.71 \times 10^4 \text{ m}^3$, 平均速度为 10.64 m/s。相应的最大沉积长度为 243 m。计算出的 C_v 值为 2.00, 大于 1.44。结合 L_d 、 L_1 和河流宽度的比较, 结果表明, 频率为 1% 的泥石流很可能造成河流堵塞。体积为 $57.38 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的泥石流物质可以到达岷江, 形成高度约为 51.61 m 的堰塞坝。在主河洪水的作用下, 一半的堰塞坝将溃坝并导致洪峰流量增加。在 1% 的泥石流频率下, 溃坝洪水的峰值流量为 $5\,935.49 \text{ m}^3/\text{s}$, 到达绵虬镇后降至 $2\,312.25 \text{ m}^3/\text{s}$ 。由于相应的洪水深度 (4.00 m) 大于防护堤的高度 (3.5 m), 因此溃坝洪水可能会对绵虬镇防护堤附近民房造成破坏。

5 结论

(1) 近些年, 板子沟泥石流处于活跃期, 频繁暴发的大规模群发性泥石流使得沟口泥石流堆积扇将岷江不断向对岸挤压。同时, 沟道内松散物源储量仍然很大, 当达到泥石流起动的临界降雨量, 仍有可能暴发大规模泥石流。一旦形成堰塞湖, 那么溃坝洪水会对下游 6.1 km 处的绵虬镇造成极大的威胁。

(2) 主支流交汇关系是导致堵江的主要原因^[24]。文中分析了泥石流堵河的主要影响条件, 得出板子沟泥石流条件、主河条件以及汇口条件均有利于堵塞主河, 且在以往泥石流堆积的基础上, 下次大规模泥石流将更容易堵塞主河。并重点分析了泥石流一次冲出量与参与堵河的泥石流量之间的关系。

(3) 文中使用一系列经验方程计算并讨论了不同重现期的河道堵塞分析和泥石流灾害预测。计算结果表明, 频率为 2%、5% 和 10% 的泥石流造成岷江堵塞的可能性较小, 假设发生堵河事件, 绵虬镇也不会受到溃坝洪水的危害。频率为 1% 的泥石流造成岷江堵塞的可能性较大, 同时溃坝产生的洪水可能会对绵虬镇防护

堤附近居民造成威胁。

参考文献 (References):

- [1] 谢洪, 钟敦伦, 矫震, 等. 2008 年汶川地震重灾区的泥石流 [J]. 山地学报, 2009, 27(4): 501–509. [XIE Hong, ZHONG Dunlun, JIAO Zhen, et al. Debris flow in Wenchuan quake-hit area in 2008 [J]. Journal of Mountain Science, 2009, 27(4): 501–509. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 庄建琦, 崔鹏, 葛永刚, 等. “5·12”地震后都汶公路沿线泥石流沟危险性评价 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(3): 131–139. [ZHUANG Jianqi, CUI Peng, GE Yonggang, et al. Hazard assessment of debris flow valleys along Dujiangyan-Wenchuan highway after “5·12” Wenchuan devastating earthquake [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2009, 41(3): 131–139. (in Chinese with English abstract)]
- [3] CUI P, HU K H, ZHUANG J Q, et al. Prediction of debris-flow danger area by combining hydrological and inundation simulation methods [J]. Journal of Mountain Science, 2011, 8(1): 1–9.
- [4] 余斌, 谢洪, 王士革, 等. 汶川县泥石流沟在汶川“5·12”地震后的活动趋势 [J]. 自然灾害学报, 2011, 20(6): 68–73. [YU Bin, XIE Hong, WANG Shige, et al. Activity tendency of debris flow gully in Wenchuan County after “5·12” Wenchuan earthquake [J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(6): 68–73. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 周荣军, 蒲晓虹, 何玉林, 等. 四川岷江断裂带北段的新活动、岷山断块的隆起及其与地震活动的关系 [J]. 地震地质, 2000, 22(3): 285–294. [ZHOU Rongjun, PU Xiaohong, HE Yulin, et al. Recent activity of Minjiang fault zone, uplift of Minshan block and their relationship with seismicity of Sichuan [J]. Seismology and Geology, 2000, 22(3): 285–294. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 杨成林, 陈宁生, 李战鲁. 汶川地震次生泥石流形成模式与机理 [J]. 自然灾害学报, 2011, 20(3): 31–37. [YANG Chenglin, CHEN Ningsheng, LI Zhanlu. Formation mode and mechanism for debris flow induced by Wenchuan earthquake [J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(3): 31–37. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 张会平, 杨农, 张岳桥, 等. 岷江水系流域地貌特征及其构造指示意义 [J]. 第四纪研究, 2006, 26(1): 126–135. [ZHANG Huiping, YANG Nong, ZHANG Yueqiao, et al. Geomorphology of the Minjiang drainage system (Sichuan, China) and its structural implications [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(1): 126–135. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 谭万沛. 中国暴雨泥石流预报研究基本理论与现状 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 10(1): 88–95. [TAN Wanpei. Basic theory and study situation of rainstorm debris flow forecast in China [J]. Journal of Soil Erosion and

- Soil Conservation, 1996, 10(1): 88–95. (in Chinese with English abstract)]
- [9] TANG C, ZHU J, LI W L, et al. Rainfall-triggered debris flows following the Wenchuan earthquake [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2009, 68(2): 187–194.
- [10] 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. [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. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 倪化勇, 郑万模, 唐业旗, 等. 绵竹清平 8·13 群发泥石流成因、特征与发展趋势 [J]. *水文地质工程地质*, 2011, 38(3): 129–133. [NI Huayong, ZHENG Wanmo, TANG Yeqi, et al. Formation, characteristics and trend of the group debris flows occurred on August 13 in Qingping, Mianzhu County [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(3): 129–133. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 余斌. 根据泥石流沉积物计算泥石流容重的方法研究 [J]. *沉积学报*, 2008, 26(5): 789–796. [YU Bin. Research on the calculating density by the deposit of debris flows [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(5): 789–796. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 中华人民共和国国土资源部. 泥石流灾害防治工程勘查规范: DZ/T 0220—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006. [Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Specification of geological investigation for debris flow stabilization: DZ/T 0220—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006. (in Chinese)]
- [14] 四川省水利电力厅. 四川省中小流域暴雨洪水计算手册 [M]. 1984. [Sichuan Provincial Water Resources Department. The rainstorm-flood calculation manual for middle and small catchment in Sichuan Province[M]. 1984. (in Chinese)]
- [15] 周必凡, 李德基, 罗德富, 等. 泥石流防治指南[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 92–93. [ZHOU Bifan, LI Deji, LUO Defu, et al. Guide to prevention of debris flow [M]. Beijing: Science Press, 1991. (in Chinese)]
- [16] 陈泽硕. 泥石流入汇主河后水—泥流特征研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016. [CHEN Zeshuo. Study on characteristics of flow and sediment when debris flow confluence with the main river[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 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. [CHEN Deming, WANG Zhaoyin, HE Yun. Experimental study on the fluvial process of debris flow discharging into a river [J]. *Journal of Sediment Research*, 2002(3): 22–28. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 向灵芝, 崔鹏, 钟敦伦, 等. 汶川地震区泥石流危害道路的定量分析: 以汶川县肖家沟为例 [J]. *西南交通大学学报*, 2012, 47(3): 387–393. [XIANG Lingzhi, CUI Peng, ZHONG Dunlun, et al. Quantitative hazard assessment of road debris flow in Wenchuan earthquake area: a case study of Xiaojia ravine in Wenchuan County [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2012, 47(3): 387–393. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 张金山, 谢洪. 岷江上游泥石流堵河可能性的经验公式判别 [J]. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(4): 651–655. [ZHANG Jinshan, XIE Hong. Calculation of the possibility of river-blocking due to debris flow in the upper reaches of Minjiang river [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(4): 651–655. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 陈春光, 姚令侃, 刘翠容, 等. 泥石流堵河条件的研究 [J]. *水利学报*, 2013, 44(6): 648–656. [CHEN Chunguang, YAO Lingkan, LIU Cuirong, et al. Study on conditions of river-blocking due to debris flow [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(6): 648–656. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 朱勇辉, 廖鸿志, 吴中如. 国外土坝溃坝模拟综述 [J]. *长江科学院院报*, 2003, 20(2): 26–29. [ZHU Yonghui, LIAO Hongzhi, WU Zhongru. Review on oversea earth-dam-break modeling [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2003, 20(2): 26–29. (in Chinese with English abstract)]
- [22] YOU Y, LIU J, CHEN X. Design of sluiceway channel in a landslide dam triggered by the Wenchuan earthquake [J]. *Disaster Advances*, 2012, 5(4): 241–249.
- [23] LIU J F, YOU Y, CHEN X Q, et al. Characteristics and hazard prediction of large-scale debris flow of Xiaojia Gully in Yingxiu Town, Sichuan Province, China [J]. *Engineering Geology*, 2014, 180: 55–67.
- [24] 许晓君, 胡卸文, 许泽鹏, 等. 四川壤塘县石吾陇沟泥石流启动条件与堵河程度分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(3): 44–53. [XU Xiaojun, HU Xiewen, XU Zepeng, et al. Incipient Shiwalong gully, motion condition and river-blocking possibility of debris flow, Rangtang County, Sichuan Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(3): 44–53. (in Chinese with English abstract)]