

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.03.04

# 九一绵高速公路鲁家沟泥石流形成机制与数值模拟分析

宋兵,沈军辉,阮壮,李本松,罗恒,李颖

(地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学),四川成都 610059)

**摘要:** 拟建九一绵高速公路通过四川省平武县木座乡鲁家沟泥石流堆积扇,经调查对拟建高速公路具有危险性。本文通过对鲁家沟泥石流灾害的现场调查,从物源、地形地貌、水动力条件入手,分析了鲁家沟泥石流灾害的基本特征和形成机制:鲁家沟内基岩风化严重,坡积物丰富,共计有松散固体物源量约  $6.3087 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,雨量充沛,平均纵坡降  $424\%$ ,水动力作用强,鲁家沟是在暴雨作用下,顺层斜坡失稳破坏,堰塞沟道并溃决形成的泥石流。本文对鲁家沟泥石流做 RAMMS: DEBRIS FLOW 数值模拟研究得出:在 50 年一遇的频率下,泥石流冲出量为  $5.68 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,为防治工程设计提供一定依据。

**关键词:** 九一绵高速;鲁家沟;泥石流;堰塞体;数值模拟;形成机理

中图分类号: P694

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)03-0025-06

## Formation mechanism and simulation analysis of debris flow at Lujiagou of Jiuzhaogou-Mianyuan Expressway

SONG Bing, SHEN Junhui, RUAN Zhuang, LI Bensong, LUO Heng, LI Ying

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection

(Chengdu University of Technology), Chengdu, Sichuan 610059, China)

**Abstract:** Jiumian expressway cuts through the debris flow fan in Lujiagou, Muzuo township, Pingwu county, Sichuan province and it is dangerous for the proposed expressway. This paper, according to the field investigation of the debris flow disaster of Lujiagou and based on the topography, provenance and hydrodynamic conditions of debris flow, analyzed the characteristics and causes of debris flow disaster: Lujiagou internal bedrock weathering is very serious, the total amount of loose solids is about  $6.3087 \times 10^6 \text{ m}^3$ . The area is abundant in rainfall, the average longitudinal grade is  $424\%$ , and hydrodynamic force is strong. Under the influence of rainstorm, the bedding slope lost stability, collapsed into the valley and blocked the channel, then the barrier lake broke and formed the debris flow. In this paper, the RAMMS: DEBRIS FLOW numerical simulation of Lujiagou debris flow shows that: run-out amount of the debris flow is  $5.68 \times 10^5 \text{ m}^3$  at the frequency of per 50 years. this study provide a basis for the prevention and control of engineering design.

**Keywords:** Jiuzhaogou-Mianyuan Expressway; Lujiagou; debris flow; barrier dam; numerical simulation; forming mechanism

## 0 引言

泥石流是山区常见自然灾害,特别是“5·12”地

震后,泥石流灾害进入了一个活跃期。九一绵高速公路沿线地质条件复杂,泥石流灾害更为频繁,鲁家沟曾在 1998 年发生的特大泥石流,不仅在火溪河右

收稿日期: 2017-09-07; 修订日期: 2017-10-18

第一作者: 宋兵(1994-),男,四川内江人,地质工程专业,在读研究生,主要从事地质灾害与工程地质研究。E-mail: 798239979@qq.com

通讯作者: 沈军辉(1964-),男,浙江奉化人,地质工程专业,博士,教授,博士生导师,主要从事工程地质、环境地质研究。E-mail: 820747923@qq.com

岸造成了特大灾害,而且流体流入火溪河,堰塞并抬高沟床,冲毁火溪河左岸公路 1 000 余米,数十万立方米和巨石顿时堆积成天然拦河坝截断火溪河,洪水翻坝将大量泥沙输送到下游木座水电站,直接经济损失达 3 000 多万元。九一绵高速公路路线通过鲁家沟泥石流堆积扇,本文根据现场调查资料分析了鲁家沟泥石流的成因机制<sup>[1-7]</sup>,并在此基础上使用 RAMMS;DEBRIS FLOW 软件进行数值模拟<sup>[8-10]</sup>,预测鲁家沟泥石流 50 年一遇的泥石流冲出量<sup>[11]</sup>,对于泥石流的形成机制的研究,主要从物源、气象水文、地形基本条件入手,进而分析诱发条件及整个演化过程,运用数值模拟分析研究不仅可以对形成机

制进行验证,更可以对泥石流的未来发展趋势作出预测。本文主要为区域的泥石流研究提供借鉴,为拟建防治工程提供一定参考。

### 1 鲁家沟泥石流流域基本特征

鲁家沟泥石流位于绵阳市平武县木座藏族乡,火溪河右岸,沟口地理坐标为东经 104°30'16.14",北纬 32°36'46.76"。平武县属北亚热带山地湿润季风气候,年平均降水量 907.5 mm,最大日降水量 195 mm,属于深切构造高中山地地形,流域总体呈树叶状,呈 SE-NW 向展布。鲁家沟流域(图 1)长约 4.3 km,平均宽约 2.1 km,汇水面积约 7.96 km<sup>2</sup>。

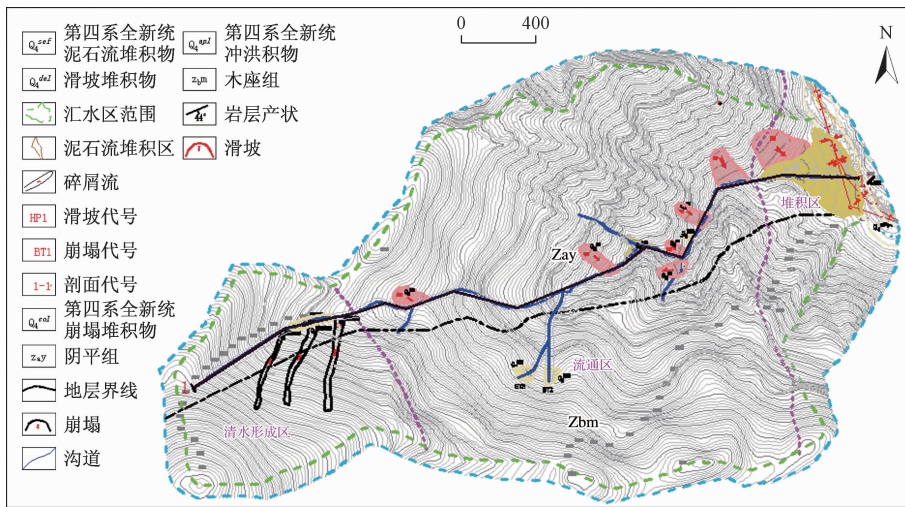


图 1 鲁家沟泥石流流域分区示意图

Fig.1 Map of basin zoning of debris flow in Lujiagou

鲁家沟源头最高海拔 3 350 m,沟口标高 1 310 m,落差 2 040 m,流域平均纵坡 424‰,流域地貌深切,呈“V”型峡谷,斜坡陡峻,沟谷两侧斜坡坡度多在 30°~70°。流域中上游发育 5 条比较大的支沟。区域内活动构造发育,主要受第四系活动断裂虎牙断裂及平武-青川断裂影响较大。泥石流流域内主要分布震旦系黑云母变粒岩(变砂岩),局部含有板岩、碳质板岩。平武县属于地震强烈活动区,鲁家沟的地震基本烈度为 VII 度,流域内堆积体主要包括泥石流堆积物(Q<sub>4</sub><sup>ef</sup>)、冲洪积物(Q<sub>4</sub><sup>al</sup>)、坡残积物(Q<sub>4</sub><sup>el</sup>)、崩坡积物(Q<sub>4</sub><sup>col+dl</sup>)、滑坡堆积物(Q<sub>4</sub><sup>el</sup>),主沟物源及流通区段两岸分布崩坡积、滑坡堆积物、岸坡侵蚀物源。据勘查统计结果,沟域内崩塌堆积固体物源总量为 1.115 × 10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>;滑坡堆积体物源总量 4.061 1 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>;沟道堆积固体物源总量为 1.303 5 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>;老泥石流堆积体物源量 3.32 × 10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>,滑塌堆积体固体物源总量 1.035 ×

10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>,碎屑流堆积体物源量 37.43 m<sup>3</sup>,共计有松散固体物源量约 6.308 7 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>。

### 2 鲁家沟泥石流形成机制分析

鲁家沟泥石流属于暴雨溃决型泥石流,与其强降雨、大量松散物质、陡峭的地形和物源启动后的运动机理有直接的联系(图 2)。

#### 2.1 物源丰富

“5·12”地震和虎牙断裂、平武-青川断裂作用使得鲁家沟流域内形成大量松散物源,清水区及流通区上部在冬季积雪冻结,夏季融化,冻结作用使得岩体更为破碎,产生更多的松散物质。可参与泥石流的动储量物源主要为滑坡堆积体,表层松散物质在水力和重力作用下不断向沟道迁移,在沟谷内的松散固体物质得到长期累积,为泥石流形成准备了丰富的固体物质。据现场调查总物源量约 6.308 7 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>,动储量物源

量<sup>[12-14]</sup>约  $1.8934 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

## 2.2 降雨充沛

平武县降水丰沛,大量的降雨使得区内新增大量的崩滑、滑坡现象,为泥石流增加了松散固体物源,平武县多年平均降雨量 907.5 mm,雨季集中在 7~8 月,最大日降水量可达 195 mm。

## 2.3 多跌水坎地形

鲁家沟流域属于深切构造高中山地形,流域总体呈树叶状,呈 SE-NW 向展布。源头形成区纵比降在 550‰ 以上,山坡坡度  $35^\circ \sim 45^\circ$ ,流通区沟床纵比降一般在 390‰ 以上。流域地貌深切,呈“V”型峡

谷,斜坡陡峻,沟谷两侧斜坡坡度多在  $30^\circ \sim 70^\circ$  之间。据调查在该沟段发育 3 个跌水坎,跌水坎高差大,而跌水坎上游很开阔,这种沟道地形使得流体在跌水坎以上流动时发生减速,有利于泥石流流体在各个跌水坎上游堆积,另一方面而当流体到达跌水坎时,翻过跌水坎而迅速向跌水坎下倾泻,重新获得加速,可见流域中游各个跌水坎具有鲁家沟泥石流提供动力的作用,在跌水坎下游沟道愈渐狭窄,并且沟道两侧边坡陡立,物源丰富。以上两方面造成了流域中游极易堵沟并且具有泥石流堆积和堆积体有被冲刷侵蚀的特征。

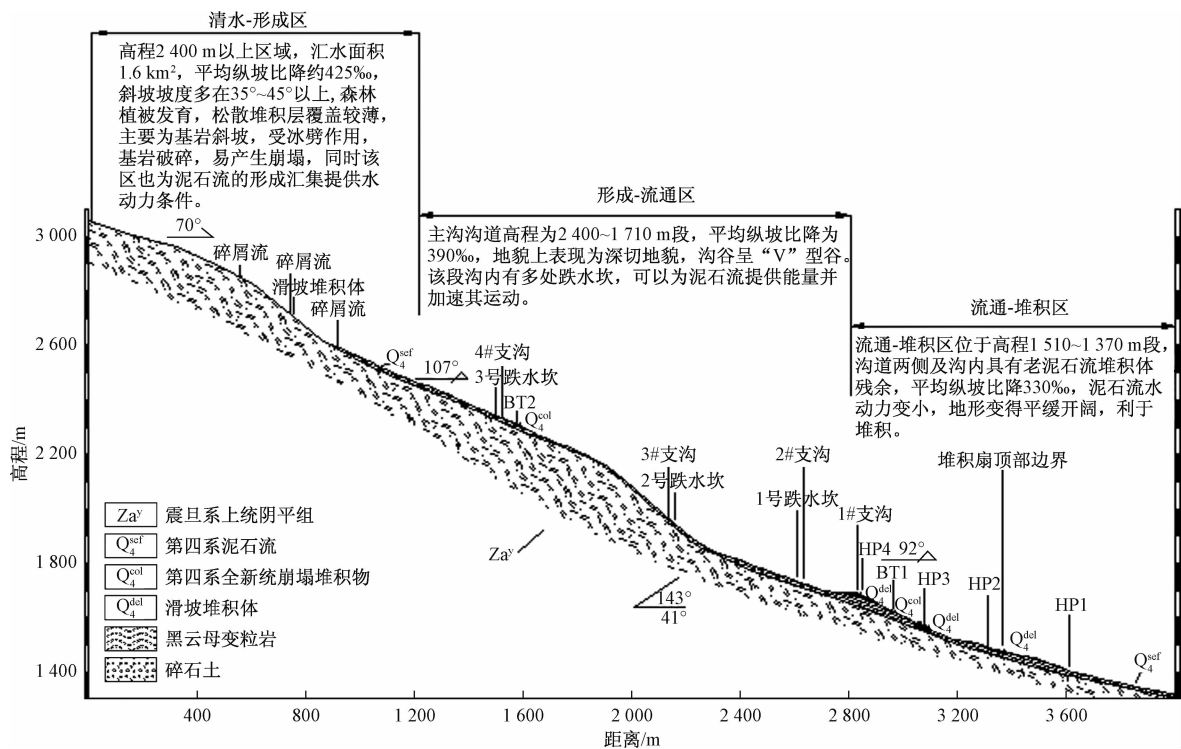


图2 鲁家沟泥石流形成机制图

Fig.2 The formation mechanism of debris flow in Lujiagou

## 2.4 形成机制与演化

鲁家沟各支沟泥石流主要为暴雨作用下,大量汇集于沟道,汇流过程中将坡面松散泥沙及坡面的各类松散堆积物源携带进入沟道,并顺沟而下,通过沟道揭底冲刷卷动沟道内的松散堆积物源,并将两侧沟岸松散固体物质带走,以滚雪球的方式向下游运动,从而暴发泥石流灾害。而沟道两侧风化程度较高的顺向陡立山坡在强暴雨的作用下极易发生滑坡等灾害,冲下大量碎粒物质及巨大石块堵塞沟口,使得沟内水位不断升高,上游冲下的泥石流物质不断冲击堵塞沟口并堆积,根据所收集的资料以及实地勘察证明鲁家沟是非常典型的堵塞

溃决型泥石流,可见溃决口残余巨石(图3),现场测量得长 16 m,宽 7 m,厚 5.5 m。鲁家沟内滑坡发育,顺层斜坡发育,斜坡内部结构面极为发育,岩层产状倾角一般达到  $40^\circ$  以上,并在河流的侵蚀下发生顺层滑坡,堵塞河道,为泥石流的发生提供大量物源。

在泥石流形成过程中,沟域内地形陡峻,沟谷纵坡大为水源和泥沙的汇聚提供了有利的地形地貌条件,鲁家沟中段两岸及各支沟中下游地段强烈的崩塌、滑坡等现象和水土流失的加剧,以及沟道内大量的沟道堆积物为泥石流的发生提供了丰富的松散固体物源,而暴雨则是泥石流形成的主要引发因素。鲁家沟泥石



图 3 堵塞沟道的巨石

Fig. 3 Boulders blocking the channel

流形成机制和演化过程总结为:暴雨诱发—滑坡失稳—堵塞沟道—堰塞溃决—泥石流形成。

### 3 鲁家沟泥石流模拟分析

#### 3.1 原理

本文数值模拟采用 RAMMS:DEBRIS FLOW 软件进行数值模拟。Hungr 等<sup>[15]</sup>认为利用连续介质法模拟分析时,最为困难的问题是选取合适的流变模型,这是因为由于泥石流在运动全过程中,时刻都会因受不确定因素的干扰而发生特征改变。RAMMS 采用 Voellmy-Fluid 摩擦模型,该模型基于 Voellmy-Salm 模型。这个模式是将摩擦阻力分为两部分:干-库仑型摩擦系数( $\mu$ ),其与正常应力和速度平方阻力一致或黏性湍流摩擦系数( $\xi$ ),摩擦阻力  $S$  (Pa)为:

$$S = \mu\rho Hg\cos(\varphi) + \frac{\rho g U^2}{\xi}$$

其中: $\rho$ ——密度;

$H$ ——流动高度;

$g$ ——重力加速度;

$\varphi$ ——坡角;

$U$ ——流速。

RAMMS 模型中将泥石流视作具有流变性质的流体,RAMMS 用 Vomlley-Salm 流变连续介质模型和 RKE(Random Kinetic Energy)模型来处理流变问题,经实际应用验证 RAMMS 应用两个模型能很好的模拟泥石流运动过程,得到泥石流的运动特征参数。

#### 3.2 Vollemy-Salm 流变模型

RAMMS 使用笛卡尔坐标系: $x$ 、 $y$  和高程  $z$ , $t$  为泥石流流动时间。根据 Christen 等<sup>[16]</sup>,泥石流的运动特征由两个主要参数表示:泥石流流深  $H(x, y, t)$  和流动速度  $U(x, y, t)$ ,  $U_{(x,y,t)} = (U_{x(x,y,t)}, U_{y(x,y,t)})$ 。

流动速度的大小由下式确定:

$$\|U\| = \sqrt{U_x^2 + U_y^2} \quad (1)$$

$$\text{其方向为 } n_U = \frac{1}{\|U\|(U_x, U_y)}$$

流深由  $\partial_t H + \partial_x(HU_x) + \partial_y(HU_y) = Q(x, y, t)$  确定,Vollemy-Salm 流变模型的摩擦阻力  $S_f = (S_{fx}, S_{fy})$  由如下式确定:

$$S_{fx} = nU_x \left[ \mu g_z H + \frac{g\|U\|^2}{\xi} \right] \text{ 和 } S_{fy} = nU_y \left[ \frac{\mu g_z H + g\|U\|^2}{\xi} \right] \quad (2)$$

#### 3.3 RKE 模型

RKE 是 RAMMS 中使用的另一模型,RKE 模型作为 Vollemy 流变模型的补充,这个模型可以追踪泥石流内部速度的发展从而使 RAMMS 可以更准确的模拟泥石流的携带和堆积。流动速度  $U$  被定义为深度平均意味着流动速度平行于斜坡,然而实际上流动速度  $U$  的方向散乱。因此流动速度  $U$  可以被分为平均速度  $(U_x, U_y, U_z)$  和瞬时速度  $(u_x, u_y, u_z)$ ,在  $x$ 、 $y$  和  $z$  三个方向上分别为  $\hat{U}_x = U_x + u_x$ ,  $\hat{U}_y = U_y + u_y$  和  $\hat{U}_z = U_z + u_z$ 。RKE 模型假定平均速度在  $z$  方向上  $U_z = 0$ ,即没有竖直分量。在 RKE 模型中摩擦系数  $\mu$  和湍流系数  $\xi$  由下式得出

$$\mu(R) = \mu_0 \exp\left(-\frac{R}{R_0}\right) \text{ 和 } \xi(R) = \xi_0 \exp\left(-\frac{R}{R_0}\right) \quad (3)$$

公式中  $\mu$  为摩擦系数,  $\xi$  为湍流系数,  $R_0$  为一常数(定义为表示随机动能密度函数的摩擦指数增长率),  $R$  为深度平均随机动能,  $\exp$  为指数。

#### 3.4 数值模拟

本文在以现场调查获取的资料结合 RAMMS:DEBRIS 软件进行数值模拟,准备工作:1. 提取等高线并使用 ArcToolbox 转化成 TIN 格式,再转化为栅格,最后转化为 ASCII 格式。2. 地理参考数据集必须是笛卡尔坐标系,地形数据是最重要的输入要求,模拟结果依赖于强烈的地形输入数据的分辨率和准确性。3. 将工程地质平面图中的物源文件和流域范围导出备用。运行 RAMMS 后,打开第一步工作准备好的 DEM 文件,依次加载流域范围、物源区,并根据现场调查数据为物源的厚度赋值,并开始设置参数。(1)密度( $\rho$ ): $1.67 \text{ g/cm}^3$ (现场重度试验获取),重力加速度( $g$ ): $9.8 \text{ m/s}^2$ ,平均坡角  $\varphi$ : $38^\circ$ 。(2)保持土压力系数 Lambda(1.00)的默认值。参数 Lambda 修改驱动流量的纵向压力梯度。除了 1.00 以外的 Lamda 的使用只能在 1 阶数值求解器中进行,并且将影响模拟结果。(3)保持零高度截止值(0.000 100 m)的默认值。消除了模拟的实际浅流量高度以最小化数值的误差。(4) $\mu = 0.174$ ,  $\xi =$



189.2 m/s<sup>2</sup> (根据调查所得数据通过物理原理计算所得)。(5)洪水流量  $Q_B = 116.99 \text{ m}^3/\text{s}$  (50年一遇洪水流量)。开始 RAMMS 模拟并得到模拟结果如下:泥石流冲出量为  $5.68 \times 10^5 \text{ m}^3$ , 泥石流运动总时长 93 min 32 s (图4)。其中,洪水流量由雨洪法确定。

洪水流量  $Q_B$  计算公式:

$$Q_B = 0.278 r \times i \times F$$

式中: $r$ ——按小时平均雨强(mm/h)设计,计算用实测最大小时雨强校核,根据水文手册查阅本地降雨历史资料取得;

$i$ ——产水系数。植被具有保水功能,降雨后入渗少,产水系数与雨强的大小和植被的多少呈正变,与松散土层的厚度呈反变,一般产水系数  $i = 0.5 \sim 0.9$ ;鲁家沟泥石流沟取 0.60;

$F$ ——流域面积/km<sup>2</sup>, 7.64 km<sup>2</sup>。

50年一遇:  $Q_B = 0.278 r \times i \times F = 0.278 \times 91.81 \times 0.60 \times 7.64 = 116.99 \text{ m}^3/\text{s}$

通过数值模拟,可以对流域内物源由变形失稳到泥石流运动的全过程进行分析。该泥石流的各个时间段的运动过程见图4,结果分析详见表1。

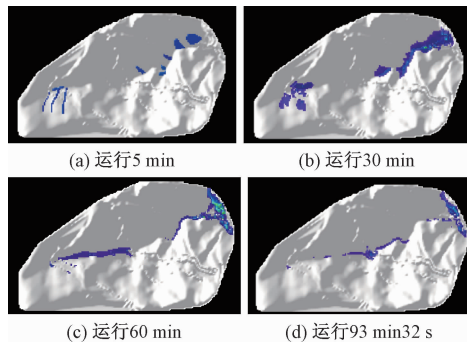


图4 泥石流运动过程模拟

Fig. 4 Simulation of debris flow movement process

表1 模拟结果分析

Table 1 Simulation results analysis

阶段	运动过程的描述
a	由于暴雨冲刷和降雨入渗,坡体表面碎石土变得松散,土体重力增加,受软化作用强度降低,沿滑向下滑分力增大,不稳定物源开始变形。
b	随着雨水入渗,大量降雨汇集于清水-形成区加上高纵坡降提供强大的水动力条件,不稳定土体变形加剧,雨水携带泥沙、块石,卷入沟道,泥石流向下游以滚雪球的方式越来越壮大。
c	沟道物源随着雨水冲刷,继续运动,冲出沟口,并形成堆积扇,随着雨量和不稳定物源的减小,泥石流动能开始变小。
d	运动至 93 min 32 s,鲁家沟重新回到稳定状态,泥石流运动结束,冲出量为 $5.68 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。

## 4 结论

(1)鲁家沟其独特多跌水地形地貌、水动力条件、地层岩性、地质构造、沟床变化和人类对沟内生态破坏程度决定着鲁家沟泥石流的暴发规模、周期、泥石流类型及其危害程度。鲁家沟内基岩风化严重,坡积物丰富,滑坡、崩塌等地质灾害点多。固体物源丰富为鲁家沟提供了产生泥石流的物源,共计有松散固体物源量约  $6.3087 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。鲁家沟沟纵道坡比降从上游至下游由大变小,上游地貌适合于雨水汇集,支沟发育,这为鲁家沟提供了发生泥石流水动力条件。

(2)鲁家沟泥石流为滑坡堰塞坝溃决型泥石流,泥石流的发生主要与沟域内顺层斜坡失稳破坏,堰塞沟道并溃决形成。形成机制和演化过程总结为:暴雨诱发—滑坡失稳—堵塞沟道—堰塞溃决—泥石流形成。

(3)鲁家沟泥石流仍然有再次暴发泥石流的可能性,数值模拟研究鲁家沟 50 年一遇泥石流洪峰流量为  $476.73 \text{ m}^3/\text{s}$ , 泥石流暴发至休止时间为 93 min 32 s, 泥石流冲出量  $5.68 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。

## 参考文献:

[1] 沈军辉,李永林,王小群,等. 二郎山公路隧道泥石流地质灾害及防治[J]. 中国地质灾害与防治学报,2005,16(2):58-62.  
SHEN Junhui, LI Yonglin, WANG Xiaoqun, et al. The debris flow hazards of the tunnel in Erlang Mountain and its prevention [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16(2): 58-62.

[2] 杨敏,王运生,胡伟. 牛塘沟泥石流发育特征及危险性评价[J]. 科学技术与工程,2015,16(33):1-7.  
YANG Min, WANG Yunsheng, HU Wei. Development characteristics and risk assessment of Niutang gully [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 16(33): 1-7.

[3] 尤琳,沈军辉,彭昌翠,等. 四川省青川县银溪窝滑坡复活机制研究及稳定性评价[J]. 水土保持研究,2011(2):44-47.  
YOU Lin, SHEN Junhui, PENG Changcui, et al. Study on the resurrection mechanism and stability of silver creek nest landslide of Qingchuan Country in Sichuan Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011(2): 44-47.

[4] 伍保祥,沈军辉,沈中超,等. 四川省华蓥市赵子秀山变形体的成因机制研究[J]. 水文地质工程地

- 质,2008(3):23-27.
- WU Baoxiang, SHEN Junhui, SHEN Zhongchao, et al. Study of formation mechanism of the Zhaozixiu deformed body of Huaying City, Sichuan Province [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2008(3): 23-27.
- [5] 黄海,石胜伟,刘建康.大渡河上游干桥沟泥石流发育特征与防治方法[J].*水土保持研究*,2015,22(5):354-357.
- HUANG Hai, SHI Shengwei, LIU Jiankang. Characteristics and countermeasures of debris flow of Ganqiao Gully in the upper Dadu River[J]. *Research of Soil and Water Conservaton*, 2015, 22(5): 354-357.
- [6] 高波,王佳运,张成航,等.青海省玉树州高原暴雨型泥石流形成机制——以称多县拉隆沟泥石流为例[J].*水土保持通报*,2016,36(2):28-31.
- GAO Bo, WANG Jiayun, ZHANG Chenghang, et al. Formation mechanism of rainstorm-induced debris flow in Yushu State of Qinghai Province: A case study on debris flow of Lalong gully in Chengduo Country[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(2): 28-31.
- [7] 陈泽硕,邓荣贵,宋志,等.四川石棉县“7·4”朱扎沟泥石流形成机制与堵河影响分析[J].*中国地质灾害与防治学报*,2016,27(3):61-65.
- CHEN Zeshuo, DENG Rongzhi, SONG Zhi, et al. Analysis of the formation mechanism and blockage of Zhuzha gully debris flow disaster in Shimian of Sichuan on July 4th, 2013[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2016, 27(3): 61-65.
- [8] 韦方强,胡凯衡,程尊兰.西藏古乡沟泥石流的数值模拟[J].*山地学报*,2016,24(2):167-171.
- WEI Fangqiang, HU Kaiheng, CHENG Zunlan. The numerical simulation of the debris flow in the ancient villages of Tibet [J]. *Journal of Mountain Science*, 2014, 24(2): 167-171.
- [9] 申通,王运生,张云辉.皂角沱崩塌形成机制数值模拟[J].*山地学报*,2016,34(4):442-450.
- SHEN Tong, WANG Yunsheng, ZHANG Yunhui. Numerical simulation of the formation mechanism of the formation of saponious formation [J]. *Journal of Mountain Science*, 2014, 34(4): 442-450.
- [10] 杜飞,任光明,夏敏,等.地震作用诱发老滑坡复活机制的数值模拟[J].*山地学报*,2015,33(2):233-239.
- DU Fei, REN Guangming, XIA Min, et al. Numerical simulation of the mechanism of seismic action induced by the old landslide [J]. *Journal of Mountain Science*, 2015, 33(2): 233-239.
- [11] 宋志,巴仁基,刘宇杰.磨西河特大型泥石流堵塞大渡河分析——以一次泥石流规模、不同频率雨洪法流量定量计算[J].*灾害学*,2010,25(2):73-75.
- SONG Zhi, BA Renji, LIU Yujie. Nalysis on blocking of the Dadu River by a giant debris flow of Moxi River—Quantitative calculation of scale of a debris flow and flows of different frequencies by rain-flood method. [J]. *Journal of Catastrophology*, 2010, 25(2): 73-75.
- [12] 乔建平,黄栋,杨宗佶,等.汶川地震极震区泥石流源动储量统计方法讨论[J].*中国地质灾害与防治学报*,2012,23(2):1-6.
- QIAO Jianpin, HUANG Dong, YANG Zongji, et al. Statistical method on dynamic reserve of debris flow's source materials in meizoseismal area of Wenchuan earthquake region [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2012, 23(2): 1-6.
- [13] 方群生,唐川,王毅,等.汶川极震区泥石流源储量与总物源量计算方法研究[J].*防灾减灾工程学报*,2016,36(6):1008-1014.
- FANG Qunsheng, TANG Chuan, WANG Yi, et al. A calculation method for predicting dynamic reserve and the total amout of material source of the debris flows in the Wenchuan meizoseismal area [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2016, 36(6): 1008-1014.
- [14] 方群生,唐川,程霄,等.汶川震区泥石流流域内滑坡物源量计算方法探讨[J].*水利学报*,2015,46(11):1298-1304.
- FANG Qunsheng, TANG Chuan, CHENG Xiao, et al. A calculation method for predicting landslides volumes of the debris flows in the Wenchuan earthquake area [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(11): 1298-1304.
- [15] Hungr O, Corominas J, Eberhardt E. Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity[J]. *Landslide Risk Management*, 2005: 99-128.
- [16] Christen M, Kowalski J, Bartelt P. RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain[J]. *Cold Regions Science & Technology*, 2010, 63(1-2): 1-14.