

## 基于FLOW-3D的泥石流龙头运动过程模拟研究

罗超鹏, 常 鸣, 武彬彬, 刘沛源, 余 波

### Simulation of debris flow head movement process in mountainous area based on FLOW-3D

LUO Chaopeng, CHANG Ming, WU Binbin, LIU Peiyuan, and YU Bo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202107005>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于遗传规划的泥石流多因子融合预测方法

Multi-factors fusion method of debris flow prediction based on genetic programming

翟淑花, 冒建, 南, 刘欢欢, 王云涛, 王强强, 熊春华, 王艳梅 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 111-115

#### 基于水槽试验的冰碛土泥石流启动机理分析

Analysis of the start-up mechanism of moraine debris flow based on flume test: A case study of the Aierkuran Gully along the Sino-Pakistan highway

樊圆圆, 宋玲, 魏学利 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 1-9

#### 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

#### 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

#### 泥石流致灾因子敏感性分析——以四川都江堰龙溪河流域为例

Sensitivity analysis of debris flow to environmental factors: a case of Longxi River basin in Dujiangyan, Sichuan Province

李彩侠, 马煜, 何元勋 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 32-39

#### 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, 侯鹏鹏 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 9-16



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202107005

罗超鹏, 常鸣, 武彬彬, 等. 基于 FLOW-3D 的泥石流龙头运动过程模拟研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(6): 53-62.

LUO Chaopeng, CHANG Ming, WU Binbin, *et al.* Simulation of debris flow head movement process in mountainous area based on FLOW-3D[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(6): 53-62.

# 基于 FLOW-3D 的泥石流龙头运动过程模拟研究

罗超鹏, 常 鸣, 武彬彬, 刘沛源, 余 波

(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:** 由于 2020 年 10 月 3 日四川省阿坝州理县米亚罗镇突发暴雨, 二经里沟暴发了泥石流, 损坏沟口的高速公路, 并堵塞河道。为了探索泥石流龙头运动特征, 选取二经里沟为研究对象, 通过调查分析得到泥石流物源分布及规模、沟道形态等特征, 采用 FLOW-3D 数值模拟方法对该泥石流的运动特征进行分析。依据泥石流运动过程的不同特征, 将全过程划分为物源汇集、运动特征突变、持续发展、泥沙堆积 4 个阶段, 经验证模拟精度达 88.98%。结合泥石流流动速度和堆积深度计算其强度指数, 将其划分为 4 个等级并绘制强度分布图, 其中极高强度区占 2.4%, 高强度区占 5.1%, 中强度区占 13.6%, 低强度区占 78.9%。并通过三维建模在沟道拟设拦挡坝, 模拟分析其对泥石流的减灾效果, 为今后防治工程的修建提供科学依据。

**关键词:** 二经里沟; FLOW-3D; 泥石流; 运动特征; 泥石流强度

**中图分类号:** P642.23

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1003-8035(2022)06-0053-10

## Simulation of debris flow head movement process in mountainous area based on FLOW-3D

LUO Chaopeng, CHANG Ming, WU Binbin, LIU Peiyuan, YU Bo

(State Key Laboratory for Geo-Hazard Prevention and Geo-Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

**Abstract:** On October 3<sup>rd</sup>, 2020, a sudden rainstorm in Li County, Aba Prefecture, Sichuan Province. resulted in the outbreak of debris flow in Erjingli gully, which caused severe damage to the highway at the mouth of the gully and blocked the river. To explore the characteristics of the process of debris flow head movement, Erjingli gully was selected as the research object. Through investigation and analysis, the characteristics of the gully source distribution, scale, and morphology were obtained, and the FLOW-3D numerical simulation method was used to analyze the movement characteristics of the debris flow. The different characteristics of the debris flow movement process can be divided into four phases: provenance collection, movement feature mutation, sustainable development and sediment accumulation. It has been proved that the accuracy of this simulation reaches 88.98%. The intensity index was calculated based on the flow velocity and accumulation depth. The debris flow was divided into four grades, and the distribution map was drawn. The extremely high-intensity area accounts for 2.4%, the high-intensity area accounts for 5.1%, the medium intensity area accounts for 13.6%, and the low-intensity area accounts for 78.9%. Based on 3D modeling, the dam is designed to simulate and analyze its effect on debris flow mitigation, which provides a

收稿日期: 2021-07-10; 修订日期: 2022-09-23

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077245; 41521002); 四川省科技厅重点研发计划(2020YFS0352; 2020YFS0387)

第一作者: 罗超鹏(1997-), 男, 硕士, 主要从事工程地质与地质灾害防治方面的研究。E-mail: luochaopeng@stu.cdut.edu.cn

通讯作者: 常 鸣(1985-), 男, 博士, 副教授, 主要从事泥石流防灾减灾方面及遥感与 GIS 应用的工作。E-mail: changmxq@126.com

scientific basis for the future control projects.

**Keywords:** Erjingli gully; FLOW-3D; debris flow; movement characteristics; debris flow intensity

## 0 引言

我国西南地区主要以山地丘陵地貌为主,地质条件极为复杂,雨季雨量较大,尤其在近几年西南地区多次暴发地震之后,山体变得极为破碎,在一些泥石流流域范围内中经常发生崩塌、滑坡等地质灾害,大量的松散物质堆积于沟道之中,为泥石流的形成提供了充足的物源条件<sup>[1]</sup>。在四川西部强震区一些典型的沟道内存在大量的松散堆积物,致使泥石流暴发频率急剧增加,规模增大,成为震后主要的地质灾害类型<sup>[2]</sup>。因此,准确分析其全过程运动特征、量化其强度指标、提出科学合理的防治措施对今后泥石流防灾减灾工作的开展具有重大意义。

随着国内外学者近年来对泥石流运动特征展开的深入研究,目前已经有多种方法开展泥石流运动特征分析工作,常用的方法有数值模拟法<sup>[3]</sup>、统计经验模型法<sup>[4]</sup>、GIS 与经验模型相结合的预测方法<sup>[5]</sup>。其中数值模拟在泥石流运动特征研究中的应用逐渐广泛,模拟精度逐渐提升。近年来离散元方法<sup>[6-7]</sup>、光滑粒子方法<sup>[8-9]</sup>、格子波尔兹曼方法<sup>[10]</sup>、连续介质力学方法<sup>[11]</sup>等数值模拟技术大量应用于泥石流灾害动力学过程研究和危害范围评估。Begueria 等<sup>[12]</sup>采用基于泥石流动力学的二维有限差分流体动力学 MassMov2D 模型,借助 PCRaster 软件实现在复杂地形中模拟泥石流运动。Christen 等<sup>[13]</sup>提出用连续流体介质方法的 RAMMS 模型来调节泥石流的质量及运移速度,实现运动过程模拟。He 等<sup>[14]</sup>利用运动控制方程及临界降雨量值模拟了关山沟泥石流的侵蚀过程。Chang 等<sup>[15]</sup>利用 FLO-2D 计算模型模拟了都江堰龙溪河流域群发性泥石流运动堆积过程。Nocentini 等<sup>[16]</sup>结合 DAN-W 与 FLO-2D 模型运用动态代码对同一地区潜在泥石流建模,通过动态模型快速评估研究地区潜在泥石流风险。Ouyang 等<sup>[17]</sup>利用 Massflow 模型模拟了甘肃武都泥湾泥石流动力运动过程。Horton 等<sup>[18]</sup>利用 voellmy 铲刮模型开展震后泥石流模拟。Trujillo-vela 等<sup>[19]</sup>运用光滑粒子流体动力学(SPH)和离散元方法(DEM)建立了耦合数值模拟分析模型。Liu<sup>[20]</sup>等利用无限边坡稳定模型、增强的两相泥石流模型等组合,研究小流域内物源启动型泥石流的形成和传播过程。为了逐步优化泥石流评价结果,崔鹏等<sup>[21]</sup>建立了泥石流风险评估体系、熊江等<sup>[22]</sup>通过对强

震区多期精细化遥感解译,优化了西南山区典型的泥石流危险性评价指标。

综上所述,我国西南山区泥石流数值模拟研究主要基于二维数学模型,在三维数学模型对泥石流的运动堆积过程的模拟方面还存在不足,文中根据泥石流基本特征,开展二经里沟泥石流龙头运动过程数值模拟分析,揭示山区典型泥石流灾变过程,为后期防灾减灾工作提供科学依据。

2020 年 10 月 3 日,二经里沟发生泥石流灾害,破坏高速公路隔离带护墙,经实际调查分析沟口堆积物约有 4 000 m<sup>3</sup>。在调查中发现沟内物源仍然较丰富,在未来极端降雨条件下仍有泥石流暴发的可能,二经里沟一旦再次暴发,将威胁汶马高速与 G317,并且极有可能堵塞河道,形成灾害链,对下游居民生命财产安全造成巨大威胁。因此,为了有效降低泥石流带来的损失,文中以二经里沟为研究对象,基于前期调查工作所取得的泥石流各项成果,采用 FLOW-3D 数值计算模型,开展该泥石流的动力学运动特征分析,并提出合理的泥石流防灾减灾对策。

## 1 二经里沟流域概况

二经里沟位于四川省理县米亚罗镇鹧鸪山来苏河流域,汶马高速西侧,沟口与河道连接(图 1)。二经里沟流域面积 1.82 km<sup>2</sup>,沟长 2.47 km,最高点海拔 4 044 m,沟口海拔 2 964 m,高差达 1 080 m,沟道平均纵比降为 437.2‰,主沟横断面呈“V”字形。二经里沟地处青藏高原东缘与四川盆地西北边缘交错接触带,地形复杂,为高山峡谷区域,山势陡峭。区域主要断裂有茂汶断裂、米亚罗压扭性断层、松岗压扭性断层,复杂的地质构造致使山体岩层整体性较差,为泥石流的形成提供了充足的物源条件,是泥石流形成的关键条件之一<sup>[23]</sup>。研究区内新构造运动较活跃,属地震强烈和邻区强震波及区,地震动峰值加速度为 0.15 g,测区基本地震烈度为 VII 度。

流域内表层广泛分布第四系全新统崩坡积层(Q<sub>4</sub><sup>cd</sup>),主要由块状碎石组成,以强—中风化变质砂岩、板岩为主,表层有机质分布,局部粉黏粒、块石富集,结构不均,稍密,潮湿—饱和,透水性较好,形成区沟底冲刷较为严重,两侧主要为砂岩与板岩互层状的反倾边坡,新都桥组(T<sub>3x</sub>)侏倭组(T<sub>3zh</sub>)两套地层整合接触分

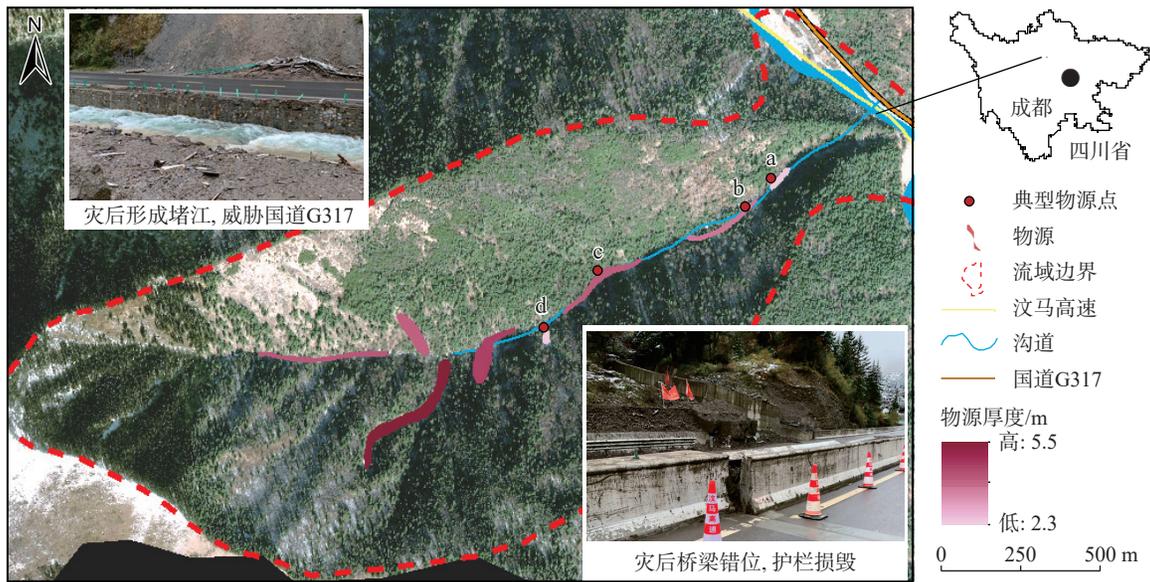


图 1 二经里沟流域概况图

Fig. 1 The overview map of Erjingli gully watershed

布; 流通区沟道内存在大量粒径较大的松散堆积物以及泥石流折断的树木, 近浅表处崩坡积层下部岩层强风化且较为破碎, 岩体强度较低。堆积区淤积的泥沙粒径明显较小, 存在少量块石以及树干, 堆积体堵塞河道。整体来看, 流域内崩坡积层松散沉积, 结构不均; 坡积层下部砂岩、板岩互层状岩体整体结构和性质较差, 遇水易软化, 有利于泥石流的形成。

通过无人机航摄以及详细调查, 确定了沟道内主要有 8 处较大规模的物源分布。2020 年 10 月 3 日暴发泥石流之后, 流域内物源储量显著增加, 其中沟道物源方量增加较为明显。在上次泥石流暴发过程中使沟道两侧的崩滑体复活, 今后在降雨和重力的作用下不稳定的崩滑体将会持续向沟道运动, 极有可能堵塞沟道, 放大泥石流的灾害效应。图 2(a) 为位于沟口以上 275 m 处右岸的滑坡, 滑动距离为 24 m, 宽为 45 m, 约 2 052 m<sup>3</sup>; 图 2(b) 为位于沟口以上 519 m 处右岸的滑坡, 滑动距离为 26 m, 宽 62 m, 约 3 869 m<sup>3</sup>; 图 2(c) 位于沟口以上 978 m 位置, 沟道左侧后缘发育的裂隙, 裂缝宽约 5~10 cm, 延伸约 70 m, 一旦失稳, 将向沟道内输入约 3 654 m<sup>3</sup> 物源; 图 2(d) 为沟口以上 1 618 m 处沟道物源, 约 504 m<sup>3</sup>。

二经里沟流域属于大陆性高原季风气候, 根据气象部门监测数据, 该区域年平均降雨量为 603.7 mm, 日最大降雨量 51.2 mm, 2020 年米亚罗镇降雨明显较往年偏多, 尤其是 10 月 3 日突发暴雨, 平均每小时降雨量达到 23.4 mm(图 3), 流域内裸露区在累计降雨作用下产

生坡面崩滑体, 导致二经里沟暴发泥石流, 流体中含有大量黏土颗粒, 泥浆呈黏性, 并携带少量树枝及大粒径块石。泥沙高速冲出沟口, 破坏力极强, 持续约 12 min, 造成汶马高速被阻断约 100 m, 且沟口桥梁被横向推移 20 cm 以上。泥沙在来苏河河道之中形成大规模堆积, 最大堆积深度约 6 m, 且堵塞河道约 150 m。

## 2 二经里沟泥石流数值模拟

### 2.1 模型概述

二经里沟泥石流具有浓度高、黏性大、边界条件明显的特点, 固体颗粒和流体存在着较为强烈的耦合关系。FLOW-3D 数值模拟软件中颗粒流与泥石流流体存在较大的相似性, 因此利用颗粒流模型开展二经里沟泥石流龙头运动过程模拟能够更加真实的反映其实际情况。

FLOW-3D 是基于有限差分法对控制方程进行求解的数值计算软件, 在模拟过程中将计算区域设置三维网格, 每一个网格在计算过程中都有多个相关变量的值在每一个网格上体现, 其中网格表面包括三个方向的速度  $u$ 、 $v$ 、 $w$ , 网格中心包括压强  $p$ 、流体体积分数  $F$ 、密度  $\rho$ 、湍流动能  $q$ 、紊流动能消耗率以及黏度  $\mu$  等变量, 能够更加真实的还原泥石流实际运过过程。研究利用颗粒流模型、漂移-通量模型、重力和非惯性框架模型以及黏流和湍流模型相互组合, 分析泥石流形成、运动、堆积特征, 其中控制方程包括连续方程和动量方程, 见式(1)~(4)。



图 2 沟道地形地貌以及典型物源照片

Fig. 2 The gully landform and typical provenance photos

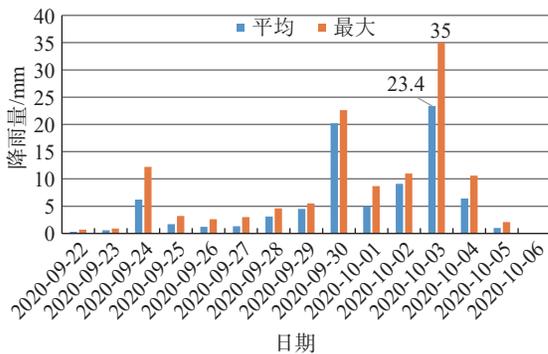


图 3 泥石流暴发期间降雨统计

Fig. 3 Rainfall statistics during the outbreak of debris flow

连续方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (4)$$

式中:  $u$ 、 $v$ 、 $w$ —— $x$ 、 $y$ 、 $z$ 三个方向上的速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ );

$A_x$ 、 $A_y$ 、 $A_z$ ——流体所流经单元格  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 三个方向上的面积比例/%;

$G_x$ 、 $G_y$ 、 $G_z$ ——流体在网格  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 三个方向上的加速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ );

$f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$ ——流体在网格  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 三个方向上的阻力加速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ );

$V_F$ ——流体体积分;

$\rho$ ——流体密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ );

$p$ ——作用在流体上的压强/Pa。

模拟中的颗粒流模型是将物源考虑为若干个三维球体颗粒以及液体的混合物,分析每一个三维球体在运动过程中的受力情况。当颗粒之间的静力平衡被破坏时,粒子产生运动,泥沙运动特征由内部粒子之间状态变化体现出来。由于实际泥石流流体的非均一性,泥石流在运动过程中颗粒与颗粒、颗粒与液体之间也必将存在相对运动。为了使模型可以允许粒子与粒子之间发生有限位移,并且各粒子之间能够自动辨识新的接触关系,因此在研究中将固体颗粒和液体之间定义为自由表面边界来近似表达黏性泥石流运动特征。由于固体颗粒和周围液体流动速度不同,混合物的两相效应可以用漂移-通量模型近似分析,在漂移通量模型中,可以使用一个选项来定义可能发生的最大固体分数,当达到极限体积分时,迫使其漂移速度为零。

## 2.2 泥石流基本参数及三维建模

此次在二经里沟堆积区、流通区及形成区各取一

组具有代表性的样品,针对每组样品在室内进行颗分试验,绘制颗粒级配曲线(图4)。由级配曲线可以分析得出,堆积区土样颗粒较为均匀,颗粒普遍偏细,平均粒径为1.8 mm;流通区土体颗粒粒径较堆积区更大,大小不均,级配相对较好,平均粒径为4.3 mm;形成区土样中大颗粒偏多,土颗粒不均匀,级配良好,颗粒的平均粒径为10.1 mm。

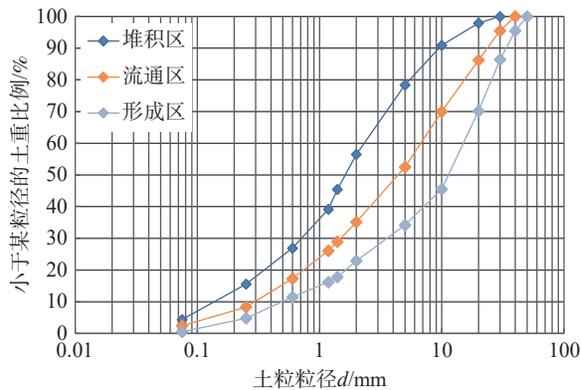


图4 二经里沟各样品级配曲线

Fig. 4 The grain size distribution of Erjingli gully

通过采取多组有代表性的泥石流堆积物样品加水搅拌成泥石流浆体,测量计算得到泥石流流体的重度以及泥沙体积浓度(式5—6):

$$\gamma_c = \frac{G_c}{V} \quad (5)$$

$$C_V = \frac{\gamma_c - \gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} \quad (6)$$

式中:  $\gamma_c$ ——泥石流流体重度/( $t \cdot m^{-3}$ );

$G_c$ ——配置浆体重量/t;

$V$ ——配置浆体体积/ $m^3$ ;

$C_V$ ——泥沙体积浓度;

$\gamma_s$ ——泥石流中固体颗粒比重/( $g \cdot cm^{-3}$ );

$\gamma_w$ ——水的重度/( $g \cdot cm^{-3}$ )。

通过计算得到  $\gamma_c=1.82 t/m^3$ ,  $C_V=0.5$ 。

由于缺乏实测数据,粗糙系数  $n$  值按照前人给出的天然河道的粗糙系数参考值确定,文中结合二经里沟实际情况取  $n=0.18$ <sup>[24]</sup>。其余参数均采用软件默认值。

通过物理实验及相关分析,在数值分析的颗粒流模型中,泥石流特征控制参数见表1。

表1 二经里沟特征控制参数

Table 1 Main parameters of numerical simulation of Erjingli gully

参数项	数值
临界体积分	0.49
最大体积分	0.52
最小体积分	0.09
泥石流容重/( $kg \cdot cm^{-3}$ )	1 820
沟道表面粗糙系数	0.18
松散物质的平均粒径/mm	10.1
松散固体材料的重度/( $kg \cdot cm^{-3}$ )	2 800
松散固体材料内休止角/(°)	32

基于无人机航拍以及人员实地调查,对研究区物源规模及分布特征进行了较为精细的记录。但是在调查过程中发现除了少量沟道物源可以根据泥痕测量其厚度以外,大多数地方无法获得物源的空间厚度数据。在本次模拟中参考前人研究计算各物源平均厚度<sup>[25]</sup>(式7):

$$H = 1.105 \ln(A) - 4.795 \quad (7)$$

式中:  $H$ ——物源平均厚度/m;

$A$ ——物源面积/ $m^2$ 。

在详细调查中实测了1、2、3、4处物源的实际体积,其他物源在调查时由于野外测量较为困难,因此模拟中采用经验公式计算确定。最终确定各物源的平均厚度及体积见表2,将计算结果引入Rhino三维建模软件,构建流域物源三维模型(图5)。

表2 二经里沟物源面积、平均厚度及体积

Table 2 Provenance area and average thickness of Erjingli gully

物源编号	1	2	3	4	5	6	7	8
面积/ $m^2$	1 212.5	2 969.4	4 181.2	633.1	5 805.7	10 730.2	4 008.6	4 485.6
平均厚度/m	1.69	1.30	0.87	0.80	4.78	5.46	4.37	4.50
体积/ $m^3$	2 052	3 869	3 654	504	27 751	58 586	17 518	20 185

## 2.3 边界条件

在模拟过程中,需要根据实际情况考虑各网格合理的边界条件。一共设置了6块计算网格,所有的边界条件设置均满足实际要求,包括出流边界  $O$ 、壁面边界  $W$ 、连续边界  $C$  以及对称边界  $S$  等4种边界类型(表3)。

## 3 二经里沟泥石流龙头运动过程分析

### 3.1 泥石流运动特征分析

为了保证模拟结果的完整性,需要设定合适的模拟时间,文中根据余斌<sup>[26]</sup>提出的黏性泥石流运动平均速度

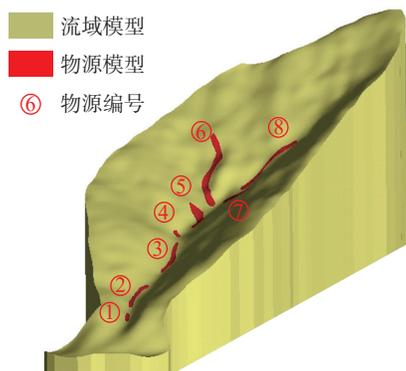


图 5 二经里沟地形及物源三维模型示意图

Fig. 5 Three-dimensional model of topography and provenance of Erjingli gully

表 3 模拟边界条件设定结果

Table 3 Boundary condition setting results of numerical simulation

网格序号	$X_{min}$	$X_{max}$	$Y_{min}$	$Y_{max}$	$Z_{min}$	$Z_{max}$
1	S	C	S	C	W	C
2	O	C	S	C	W	S
3	S	C	C	O	W	S
4	C	C	S	C	W	S
5	C	O	S	O	W	S
6	S	O	C	C	W	S

注: C为连续边界; O为出流边界; S为对称边界; W为壁面边界。

经验公式, 见式 8, 计算出泥石流在沟道中的平均运动速度, 进而估算泥石流龙头运动过程的时间。

$$U = 1.1(gR)^{1/2} S^{1/3} \left( \frac{D_{50}}{D_{10}} \right)^{1/4} \quad (8)$$

式中:  $U$ ——黏性泥石流运动平均速度/ $(m \cdot s^{-1})$ ;

$g$ ——重力加速度/ $(m \cdot s^{-2})$ ;

$R$ ——黏性泥石流运动水力半径/m;

$S$ ——黏性泥石流运动纵比降/ $\%$ ;

$D_{50}$ ——泥沙颗粒中百分比小于 50% 的颗粒粒径(中性粒径);

$D_{20}$ ——泥沙颗粒中百分比小于 20% 的颗粒粒径。

通过计算得到二经里沟泥石流的平均速度为 12.41 m/s, 最终确定泥石流龙头全过程历时 198.97 s, 文中计算时间设置为 200 s。

考虑到该沟道较窄, 此次模拟工作将计算网格设置为  $1m \times 1m$ , 通过控制方程计算泥沙在每个网格单元的运动参数。对二经里沟 2020 年 10 月 3 日暴发的泥石流开展精细化三维数值模拟, 重现该泥石流暴发过程中泥沙形成、运动、堆积的整个运动过程, 图 6、图 7 为不同模拟时间的泥石流运动情况。

$t=0 \sim 30s$ , 沟道两岸物源开始启动, 松散土体运动速度开始逐渐增大, 并且物源失稳边界开始逐渐扩大, 两岸泥沙持续向沟道聚集, 最大泥深为 7.06 m, 运动缓慢; 这一阶段属于物源汇集的过程。

$t=30 \sim 60s$ , 由于两岸以及上游物源的持续输入, 松散固体物质在沟道内部不断汇集, 在上游物质强大的动力作用下, 沟道内部大规模泥沙开始运动, 不断向下游推进, 最大泥深和流速分别为 8.28 m、11.94 m/s; 这一阶段属于泥石流运动特征突变阶段。

$t=60 \sim 100s$ , 由于泥浆在不断向下游推移的过程中

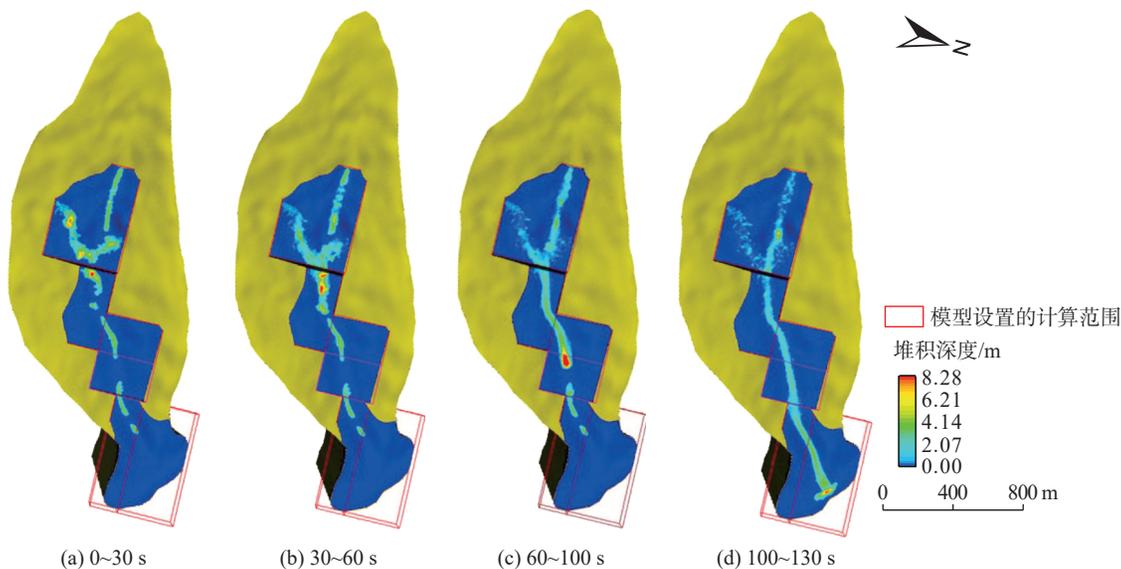


图 6 二经里沟泥石流堆积深度模拟结果

Fig. 6 Simulation results of debris flow accumulation depth in Erjingli gully

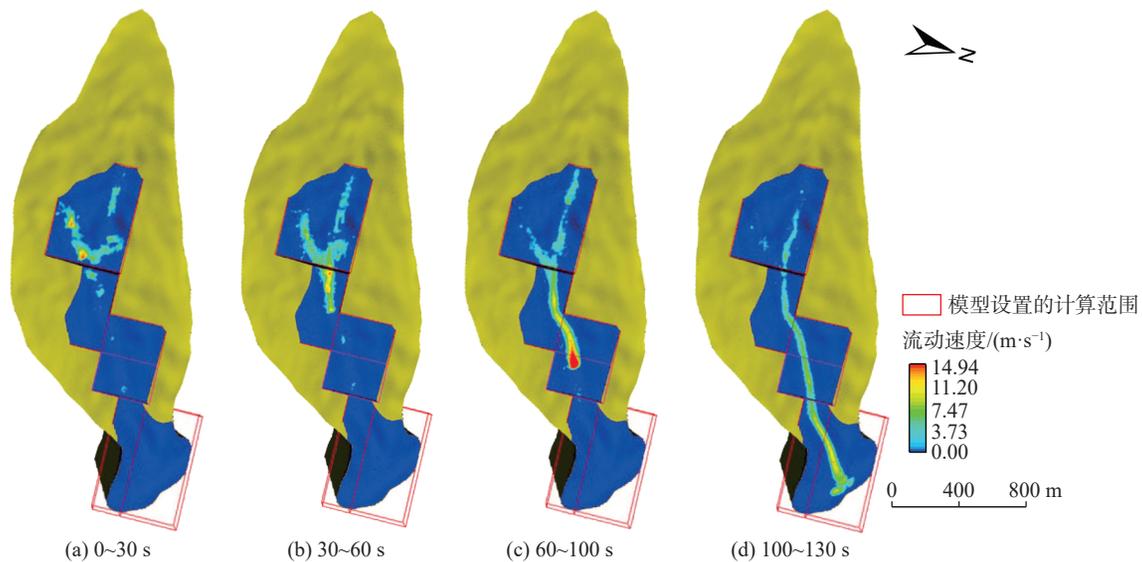


图 7 二经里沟泥石流流动速度模拟结果

Fig. 7 Simulation results of flow velocity of debris flow in Erjingli gully

也启动了下游沟道内堆积的松散物质, 泥石流规模逐渐增大, 此时泥石流前端的泥深和流速分别为 16.18 m、14.94 m/s; 这一阶段属于泥石流的持续发展阶段。

$t=100 \sim 130$  s, 泥石流运动到沟口, 强大的冲击力对高速路以及下游其他基础设施造成严重破坏, 泥石流冲出沟口之后运动速度急剧降低, 形成的堆积体堵塞河道。随着堆积规模的不断扩大, 泥沙开始向河流下游运动, 增加河道的堵塞程度; 最终泥沙在河道内最大堆积深度为 5.99 m, 堆积长度为 170.6 m, 完全堵塞河道, 泥石流基本停止运动, 其结果与现场调查相符; 这一阶段属于泥石流的泥沙堆积阶段。

模拟结果显示, 泥石流最终将在沟口形成最大深度为 5.99 m 的堆积扇, 野外实地调查结果为 6.0 m, 泥深模拟结果与实际情况吻合度较高。通过数值模拟获取的二经里沟泥石流堆积危险范围、野外实际测量堆积危险范围及两者重合的危险范围验证泥石流数值模拟的精确程度式如下:

$$F = \sqrt{\left(\frac{S_0}{S_M} \cdot \frac{S_0}{S_N}\right)} \times 100\% \quad (9)$$

式中:  $F$ ——模拟精度;

$S_0$ ——实测与本次模拟结果的堆积范围重叠区域/ $\text{m}^2$ ;

$S_M$ ——实测堆积面积/ $\text{m}^2$ ;

$S_N$ ——模拟堆积范围/ $\text{m}^2$ , 具体计算参数见表 4。

经过计算, 此次模拟精度达到 88.98%, 满足数值模拟的精度要求(图 8)。其计算结果和实际现象相似, 表明此次数值模拟结果对研究该泥石流灾害的运动特征

表 4 模拟结果与野外实测对比验证

Table 4 The comparison of simulated results and field measurements

模拟参数	实测值/ $\text{m}^2$	模拟值/ $\text{m}^2$	重叠区/ $\text{m}^2$	精度/%
模拟结果	8 015.83	9 500.41	7 765.05	88.98

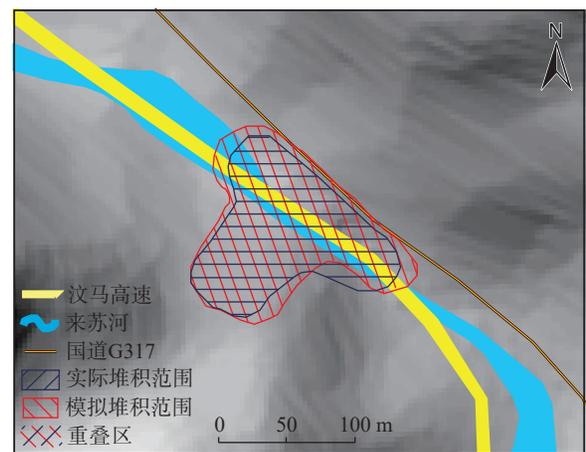


图 8 二经里沟模拟结果验证

Fig. 8 Verifying of the simulated results of Erjingli gully

具有较好的参考价值。

### 3.2 泥石流强度分析

泥石流强度分析是今后防灾减灾工作中十分关键的步骤, 相关研究提出泥石流的强度大小主要由泥石流的堆积深度和流动速度相关<sup>[27]</sup>。文中主要考虑对承灾体起主要影响因素的泥石流泥深和流速两个关键参数。用强度指数( $I_{DF}$ )<sup>[28]</sup>开展泥石流堆积区内强度特征分析, 见式 10, 并得到二经里沟泥石流强度空间分布特

征图(图 9)。

$$I_{DF} = \text{Max}_{t>0} [h(u^2 + v^2 + w^2)] \quad (10)$$

式中:  $I_{DF}$ ——泥石流强度指数/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$ );

$t$ ——模拟时间/s;

$h$ ——泥石流堆积深度/m;

$u, v, w$ —— $x, y, z$ 三个方向上的流速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

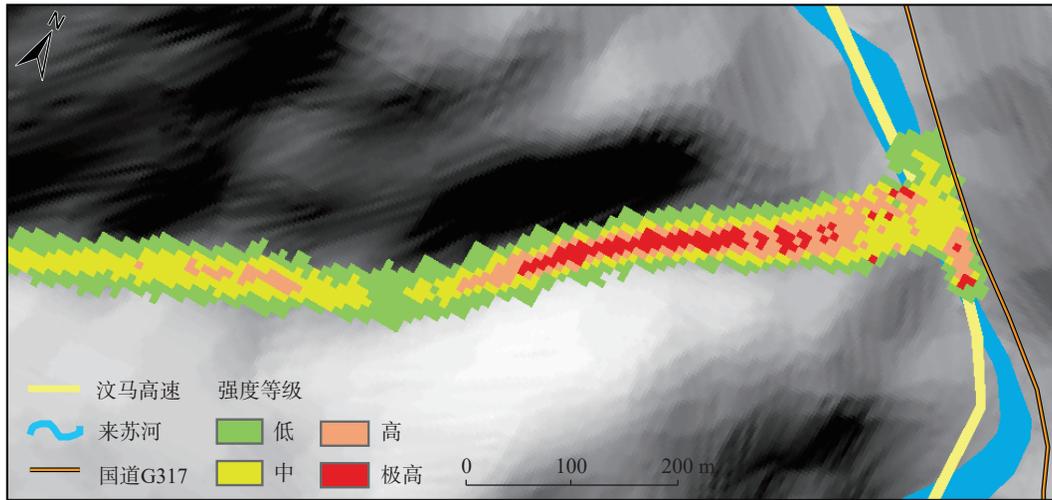


图 9 二经里沟泥石流强度空间分布图

Fig. 9 Spatial distribution characteristics of debris flow intensity in Erjingli gully

根据计算结果,二经里沟泥石流的强度参数取值区间为 0~586.8。文中根据归一化之后的值将泥石流强度划分为 4 个强度等级,定义  $I \geq 0.5$  为极高强度区域;  $0.5 > I \geq 0.3$  为高强度区域;  $0.3 > I \geq 0.1$  为中强度区域;  $0.1 > I \geq 0$  为低强度区域。

将计算结果进行统计分析可知,二经里沟泥石流极高强度区域占 609  $\text{m}^2$ ,高强度区域占 1 295  $\text{m}^2$ ,中强度区域占 3 451  $\text{m}^2$ ,低强度区域占 20 034  $\text{m}^2$ 。极高、高强度区域主要分布在下游窄陡沟道以及泥沙堆积厚度较大位置。中、低强度区域主要分布在坡度相对较缓的沟道中上游以及堆积区边缘位置。其中,高、极高强度的位置遭受到泥石流冲淤作用强烈,在后期管道、公路等工程选线中应该尽量避免,并且应该考虑在沟道内修建必要的泥石流消能型防治工程设施,降低泥石流强度。

### 3.3 拟设拦挡坝减灾效果评价

文中研究考虑了在沟道下游拟设一个拦挡坝,运用相同的计算模型分析泥石流在拦挡坝作用下的运动特征(图 10)。

拦挡坝距离沟口 300 m,拟定坝高为 12 m,将两侧坝肩嵌入坡体,且在模拟中不考虑坝体破坏。结果表明,拦挡坝对泥石流起到了很好的缓冲作用,泥沙将坝体淤满,坝后最大堆积深度达到了 11.78 m,坝体在沟道上游堆积长度 43 m,约拦挡 1 720  $\text{m}^3$  泥沙,在拦挡坝的

作用下,泥沙冲出沟口的流速为 2.55 m/s,形成小规模堆积,最大堆积深度为 2.97 m,形成小规模的堆积,造成约 1/3 的河道堵塞,降低了对沟口高速公路产生的影响,减灾效果明显。

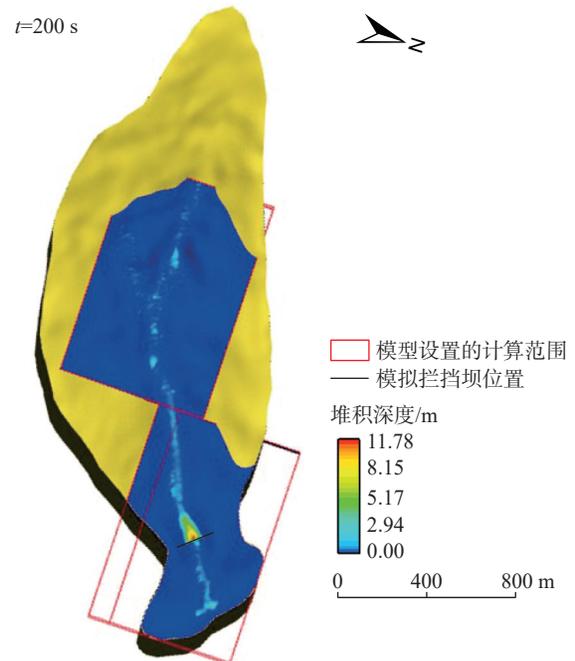


图 10 拦挡坝作用下泥石流堆积深度模拟结果

Fig. 10 Simulation results of debris flow accumulation depth under retaining dam

## 4 结论

文中以 2020 年 10 月 3 日二经里沟暴发的泥石流为研究背景,结合无人机航拍摄影以及现场调查取样工作,对二经里沟泥石流发育特征、降雨特征、物源空间分布特征开展详细调查。利用 FLOW-3D 对泥石流的运动全过程开展数值模拟分析,并划分了泥石流强度。文中取得的主要结论如下:

(1)采用 FLOW-3D 数值模拟的方法,重现了 2020 年 10 月 3 日二经里沟泥石流龙头运动过程,根据泥石流运动特征将二经里沟泥石流暴发全过程划分为 4 个阶段:物源汇聚、运动特征突变、持续发展阶段、泥沙堆积阶段。在堆积区范围内将模拟结果与实际调查结果进行对比验证分析,计算出模拟精度为 88.98%。

(2)基于泥石流最大堆积深度与流速确定其强度评价指标,建立强度等级划分标准,并绘制强度等级划分图。其中,极高强度区占 2.4%,高强度区占 5.1%,中强度区占 13.6%,低强度区占 78.9%。在极高、高强度区范围内房屋、道路、河堤及农田容易受到泥石流的破坏,需要加强监测预警及重点防护。

(3)选择距离沟口约 300 m 处设置一个高 12 m 拦挡坝,模拟结果显示沟口最大堆积深度减小 3.02 m,大幅度降低泥石流对沟口高速公路的威胁程度,该方案能为今后防治工程的修建提供参考。

### 参考文献(References):

- [1] 周伟,唐川.汶川震区暴雨泥石流发生的降雨阈值[J].水科学进展,2013,24(6):786-793. [ZHOU Wei, TANG Chuan. Rainfall thresholds for debris flows occurrence in the Wenchuan earthquake area [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(6): 786-793. (in Chinese with English abstract)]
- [2] D'ANIELLO A, COZZOLINO L, CIMORELLI L, et al. A numerical model for the simulation of debris flow triggering, propagation and arrest [J]. *Natural Hazards*, 2015, 75(2): 1403-1433.
- [3] CHANG M, LIU Y, ZHOU C, et al. Hazard assessment of a catastrophic mine waste debris flow of Hou gully, Shimian, China [J]. *Engineering Geology*, 2020, 275: 105733.
- [4] 乔建平,王萌,吴彩燕,等.汶川地震扰动区小流域滑坡泥石流风险评估——以都江堰白沙河流域为例[J].中国地质灾害与防治学报,2018,29(4):1-9. [QIAO Jianping, WANG Meng, WU Caiyan, et al. Landslide and debris flow risk assessment for small water sheels in the Wenchuan earthquake disturbance area; Taking the Baishaha River basin in Dujiangyan as an example [J]. The Chinese Journal of

Geological Hazard and Control, 2018, 29(4): 1-9. (in Chinese with English abstract)]

- [5] 王锐.基于GIS和Logistic回归模型的降雨型滑坡易发性研究[D].杭州:浙江大学,2018. [WANG Rui. GIS-based logistic regression model for rainfall-induced landslide susceptibility assessment [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 徐泳,孙其诚,张凌,等.颗粒离散元法研究进展[J].力学进展,2003,33(2):251-260. [XU Yong, SUN Qicheng, ZHANG Ling, et al. Advances in discrete element methods for particulate materials [J]. *Advances in Mechanics*, 2003, 33(2): 251-260. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 孙其诚,王光谦.颗粒流动力学及其离散模型评述[J].力学进展,2008,38(1):87-100. [SUN Qicheng, WANG Guangqian. Review on granular flow dynamics and its discrete element method [J]. *Advances in Mechanics*, 2008, 38(1): 87-100. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 缪吉伦,陈景秋,张永祥,等.库岸滑坡涌浪二维光滑粒子动力学数值模拟[J].水土保持通报,2013,33(3):175-179. [MIAO Jilun, CHEN Jingqiu, ZHANG Yongxiang, et al. Numerical simulation of impulsive wave generated by landslide on reservoir bank using two-dimensional smoothed particle hydrodynamics method [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(3): 175-179. (in Chinese with English abstract)]
- [9] HUANG Y J, NYDAL O J. Coupling of discrete-element method and smoothed particle hydrodynamics for liquid-solid flows [J]. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2012, 2(1): 012002.
- [10] 王沁,姚令侃.格子 Boltzmann 方法及其在泥石流堆积研究中的应用[J].灾害学,2007,22(3):1-5. [WANG Qin, YAO Lingkan. Lattice boltzmann method and its application in the study on deposition of debris flow [J]. *Journal of Catastrophology*, 2007, 22(3): 1-5. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 周公旦,孙其诚,崔鹏.泥石流颗粒物质分选机理和效应[J].四川大学学报(工程科学版),2013,45(1):28-36. [ZHOU Gongdan, SUN Qicheng, CUI Peng. Study on the mechanisms of solids segregation in granular debris flows [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2013, 45(1): 28-36. (in Chinese with English abstract)]
- [12] BEGUERÍA S, VAN ASCH T W J, MALET J P, et al. A GIS-based numerical model for simulating the kinematics of mud and debris flows over complex terrain [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2009, 9(6): 1897-1909.
- [13] CHRISTEN M, KOWALSKI J, BARTELT P. RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain [J]. *Cold Regions Science and*

- Technology, 2010, 63(1/2): 1 – 14.
- [ 14 ] HE S M, LI D X, WU Y, et al. Study on the rainfall and aftershock threshold for debris flow of post-earthquake [ J ] . *Journal of Mountain Science*, 2011, 8(5): 750 – 756.
- [ 15 ] CHANG M, TANG C, VAN ASCH T W J, et al. Hazard assessment of debris flows in the Wenchuan earthquake-stricken area, South West China [ J ] . *Landslides*, 2017, 14(5): 1783 – 1792.
- [ 16 ] NOCENTINI M, TOFANI V, GIGLI G, et al. Modeling debris flows in volcanic terrains for hazard mapping: the case study of Ischia Island (Italy) [ J ] . *Landslides*, 2015, 12(5): 831 – 846.
- [ 17 ] OUYANG C J, WANG Z W, AN H C, et al. An example of a hazard and risk assessment for debris flows—A case study of Niwan Gully, Wudu, China [ J ] . *Engineering Geology*, 2019, 263: 105351.
- [ 18 ] HORTON A J, HALES T C, OUYANG C J, et al. Identifying post-earthquake debris flow hazard using Massflow [ J ] . *Engineering Geology*, 2019, 258: 105134.
- [ 19 ] TRUJILLO-VELA M G, GALINDO-TORRES S A, ZHANG Xue, et al. Smooth particle hydrodynamics and discrete element method coupling scheme for the simulation of debris flows [ J ] . *Computers and Geotechnics*, 2020, 125: 103669.
- [ 20 ] LIU W, YANG Z J, HE S M. Modeling the landslide-generated debris flow from formation to propagation and Run-out by considering the effect of vegetation [ J ] . *Landslides*, 2021, 18(1): 43 – 58.
- [ 21 ] 崔鹏, 陈晓清, 程尊兰, 等. 西藏泥石流滑坡监测与防治 [ J ] . *自然杂志*, 2010, 32(1): 19 – 25. [ CUI Peng, CHEN Xiaqing, CHENG Zunlan, et al. Monitoring and prevention of debris-flows and landslides in Tibet [ J ] . *Chinese Journal of Nature*, 2010, 32(1): 19 – 25. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 22 ] 熊江, 唐川, 龚凌枫, 等. 强震区泥石流物源演化指标选取及规律分析 [ J ] . *水土保持研究*, 2020, 27(1): 360 – 365. [ XIONG Jiang, TANG Chuan, GONG Lingfeng, et al. Evolution indexes selecting and laws analyzing of debris flow source in strong earthquake area [ J ] . *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(1): 360 – 365. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 23 ] CHEN N S, YANG C L, ZHOU W, et al. The critical rainfall characteristics for torrents and debris flows in the Wenchuan earthquake stricken area [ J ] . *Journal of Mountain Science*, 2009, 6(4): 362 – 372.
- [ 24 ] SOULSBY R. Dynamics of marine sands [ M ] . Thomas Telford Ltd, 1998.
- [ 25 ] 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. An 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. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 26 ] 余斌. 粘性泥石流的平均运动速度研究 [ J ] . *地球科学进展*, 2008, 23(5): 524 – 532. [ YU Bin. Study on the mean velocity of viscous debris flows [ J ] . *Advances in Earth Science*, 2008, 23(5): 524 – 532. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 27 ] FUCHS S, HEISS K, HÜBL J. Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment [ J ] . *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2007, 7(5): 495 – 506.
- [ 28 ] JAKOB M, STEIN D, ULMI M. Vulnerability of buildings to debris flow impact [ J ] . *Natural Hazards*, 2012, 60(2): 241 – 261.