

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.06.04

基于 Massflow 模型的西藏仁布杰仲沟 泥石流运动特征分析

段学良^{1,2,3}, 马凤山^{1,2}, 郭捷^{1,2}, 孙琪皓^{1,2,3}

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所中国科学院页岩气与地质工程重点实验室, 北京 100029;
2. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为探明杰仲沟流域上游的潜在物源在极端条件下形成泥石流灾害, 对沟口建筑及 G318 国道的危害性。以实地无人机拍摄数据为基础, 通过三维建模生成研究区高精度的数字高程模型 (DEM), 再利用基于泥石流运动深度积分的 Massflow 数值分析方法, 模拟泥石流的运动过程。首先分别用两种模型 (Voellmy 模型和 Manning 模型) 对已发生的泥石流灾害进行了模拟, 将模拟结果与现场实际情况进行对比验证, 选取了结果更精确地 Manning 摩擦模型并确定了相应运动参数。在此基础上对体积为 $3.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ 的泥石流灾害进行了预测模拟评估。通过对模拟结果进行分析处理, 划定了研究区内的四个危险区, 为泥石流灾害的防治规划和设计提供了有效的参考依据。危险区 A 位于泥石流沟第一个弯道处, 该区及以南区域, 泥深和流动强度都较大, 但该区人类活动较少; 危险区 B 位于第一个弯道与第二个弯道之间, 危险区 C 位于第二个弯道处, 这两个区域内泥深较大, 局部区域流动强度较大, 极端条件下, 危险性相对较高; 危险区 D 位于国道南侧, 该区域流动强度相对较小, 但流体在此区域易发生堆积, 所以应提高公路下涵洞的排导能力。

关键词: 泥石流; G318 国道; 数值模拟; Massflow; 危险区

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)06-0025-09

Movement characteristics of Jiezhonggou debris flow of Renbu , Tibet based on massflow model

DUAN Xueliang^{1,2,3}, MA Fengshan^{1,2}, GUO Jie^{1,2}, SUN Qihao^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Shale Gas and Geoenvironment Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Institutions of Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to find out the potential sources in the upper reaches of the Jiezhonggou watershed, debris flow is formed under extreme conditions, which is harmful to the trench building and the G318 National road. Based on the UAV data, the high-precision digital elevation model (DEM) of the study area is generated by three-dimensional modeling, and the motion process of debris flow is simulated by using the Massflow numerical analysis method based on the depth integral of debris flow motion. Firstly, two models were used to simulate the occurrence debris flow. The more accurate Manning model was selected by comparing the simulation results with the actual situation. On this basis, a volume of $3.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ of debris flow is simulated to predict and evaluate the disaster. Through the analysis and processing of the simulation results, four risk

收稿日期: 2019-02-23; 修订日期: 2019-07-23

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究专题

第一作者: 段学良 (1994-), 男, 河北泊头人, 博士研究生, 研究方向为工程地质灾害。E-mail: 13051876966@163.com

通讯作者: 马凤山 (1964-), 男, 河北吴桥人, 研究员, 博士生导师, 研究方向为地质工程与地质灾害。E-mail: fsm@ mail.iggcas.

ac.cn

zones in the study area are delineated, which provides an effective reference for the prevention and control planning and design of debris flow disasters. The risk zone A is located at the first bend of the debris flow gully. The depth and flow intensity are relatively large in this area but the human activities in this area are less; The risk zone B is located between the first bend and the second of the debris flow gully and the risk C is located at the second bend. The depth is relatively large in these two areas and the flow intensity is large in local area. In extreme conditions, the risk of zone B and C are relatively high; The risk zone D is located on the south side of National highway. Though the flow intensity is relatively small, the fluid is prone to accumulation in this area, so the conductivity of culvert under highway should be improved.

Keywords: debris flow; G318 national road; numerical simulation; Massflow; risk zone

0 前言

泥石流是山区发育的一种自然地质现象,泥石流具有突然性以及流速快、流量大、物质容量大和破坏力强等特点^[1-3]。发生泥石流常常会冲毁公路铁路等交通设施甚至村镇等,造成巨大损失。2018 年 7 月 15 日,在距离研究区 20 km 的 G318 国道西藏日喀则市仁布段 4 739 km + 200 m 处发生泥石流灾害,导致交通中断,并造成经济损失。所以,对泥石流灾害进行模拟分析,并预测泥石流的流动距离和泛滥范围,从而提出防治措施,对于研究区内的国道通行以及人员安全有着重要的意义。

一般研究泥石流的方法是基于水源、物源、流通条件区域调查数据的统计评价和动力分析方法,这种方式结果可信度高,但耗费大、操作繁琐,经过参数校正的数值模拟也可以提供合理的分析,且成本低廉,是一种重要的研究方式^[4]。因此,通过数值分析方法建立泥石流的数值模型,对泥石流的启动过程、流动过程和堆积过程进行模拟,得到的结果借助数据、图形等方式将泥石流的运动过程呈现出来,能够为泥石流灾害防治规划和设计作为参考^[5-7]。胡明鉴等^[8]利用二维颗粒程序(PFC_{2D})分析了降雨作用下松散碎屑物质启动形成泥石流的过程。王纯祥等^[9]采用基于 GIS 的深度积分的二维数值模型,模拟了泥石流的运动规律。HUNGR 等^[10]使用基于半经验方法和等效流体的 DAN_{3D}模型模拟了泥石流的运动过程。Peng 等、Chang 等、杨涛等使用基于有限差分原理的 FLO-2D 模型对泥石流进行模拟,并进行了危险性评价^[11-13]。

SAVAGE 等^[14]提出了基于深度积分的连续介质力学模型,并利用该模型成功模拟了干性沙土的流动过程。该模型的优势是简化了 Navier-Stokes 模型,大大降低了方程的求解难度,有效地提高了计算效率^[15]。OUYANG 等提出了基于深度积分的 Massflow

数值分析方法,并利用 Massflow 软件对滑坡、泥石流等地质灾害进行了数值模拟,不仅很好吻合理论解和实验结果,而且还还原了真实灾害的发生过程^[16-18]。

以往研究,虽然在整个流域范围内对泥石流进行了分析或评价,但选取的 DEM 精度都较低,因此不能精细的刻画泥石流的运动规律。为探明研究区流域上游的潜在物源在极端条件下发生泥石流灾害,对沟口建筑及公路的影响,本研究利用无人机技术获取研究区的高精度 DEM 数据。并采用基于泥石流运动深度积分的 Massflow 数值分析方法模拟了杰仲沟泥石流的运动过程。

1 研究区地质特征

研究区杰仲沟位于西藏自治区日喀则市仁布县西北方向 16 km 处(图 1),G318 国道从沟口穿过,地理位置为东经 89°41'10"~89°43'30",北纬 29°16'00"~29°19'27",属于深切构造高中山地地形,流域总体呈树叶状,呈南北向展布,表现为南高北低形态。杰仲沟流域长约 6 km,平均宽约 0.3 km,汇水面积约 27 km²。杰仲沟流域最高点海拔 5 394 m,沟口海拔 3 794 m,相对高差 1 600 m,流域平均纵坡 306‰,流域地貌深切,呈“U”型宽谷,沟谷两侧斜坡坡度多在 30°左右,物源区坡度约 30°。雅鲁藏布江由西向东从堆积区上切过。

泥石流流域内主要分布紫红、灰色砾岩、砂岩、页岩夹凝灰岩。区域内活动构造发育,主要受第四系活动断裂达机翁-彭错林-朗县断裂影响较大。仁布县属于地震强烈活动区,杰仲沟的地震峰值加速度为 0.2g,对应的地震基本烈度为Ⅷ度。仁布县属于温带半干旱高原季风气候,年平均降水量 450 mm,雨季集中在 7、8 月份,降水量占全年的 95%。在雨季尤其是暴雨时期,研究区内会增加大量的崩塌、滑坡现象,为



图1 研究区及断裂位置分布

Fig.1 The location of the study area and the distribution of the fault

泥石流提供了松散固体物源。

2 泥石流形成条件

2.1 地形地貌条件

杰仲沟泥石流流域属于深切构造高中山地貌,相对高差 1 600 m。上游形成区地形三面环山,出口为漏斗状,地形比较开阔,周围山高坡陡、植被生长不良,这样的地形有利于降雨的汇集。流通区狭长,沟谷纵坡降大,为松散固体物质参与泥石流活动提供了有利条件。下游堆积区的地形为开阔平坦的河谷。较大的高差和汇水面积使得雨水快速而大量汇集,并侵蚀地表和带动松散固体物质的运动,从而极易引发泥石流的形成。

2.2 物源条件

研究区地质构造复杂,区内地震烈度较高,且发育有新构造断裂,如图 1 所示的达机翁-彭错林-朗县断裂从研究区穿过(在图 1 中简称为 D-P-L 断裂)。流通区沟道两侧的坡体上未发现有大量的破碎松散体,流域内主要松散体物源位于上游的构造断裂附近(图 2),在强烈的构造作用下,岩石裂隙发育,岩体破碎,同时研究区地处高寒山区,冬季长,气温差异较大,尤其是在春融季节早晚温差更大,加之植被稀少,使基岩的物理以及化学风化作用强烈。长期积累的松散固体物质储量大,分布集中,有利于泥石流的补给。

2.3 水源条件

研究区年平均降雨量 450 mm,7、8 月份降雨最为集中,降水量占年降水量的 95%,大雨、暴雨出现频率较高,加之气温升高,上游的冰雪消融,泥石流活动频率,规模随之增大,9 月降水逐渐减少,泥石流活动进入低潮期。总的来说,冬春季节降水量少,夏季降水多,丰富的降雨为泥石流的形成提供了水源和动力条件。

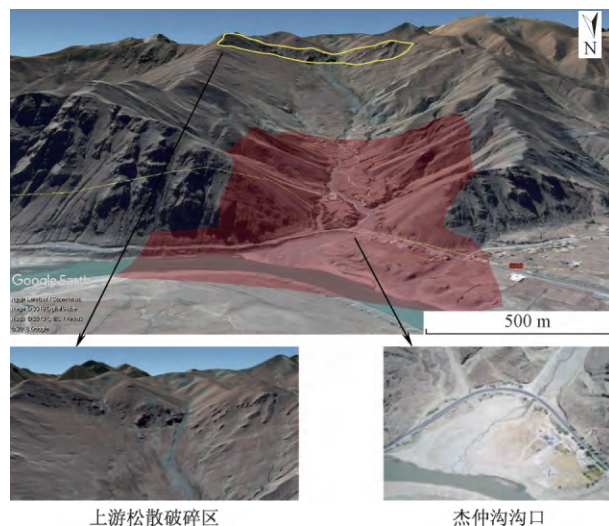


图2 杰仲沟流域全貌

Fig.2 The panoramic of Jiezhonggou watershed

3 Massflow 模型

3.1 模型控制方程

对流体动力学三维 Navier-Stokes 方程进行深度积分,推导出质量和动量控制方程。深度积分是指将控制方程中的各种变量沿深度方向进行积分,这里将对质量守恒方程和动量守恒方程进行深度积分,再运用莱布尼兹法则和动力学边界条件对方程化简,最终得到控制方程如下,公式(1)为质量守恒方程,公式(2)、(3)为动量守恒方程。

$$\frac{\partial(h)}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}^2 + k_{ap}g_z h^2/2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial y} = g_x h - k_{ap}g_z h \frac{\partial(z_b)}{\partial x} - \frac{(\tau_{xx})_b}{\bar{\rho}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{v}^2 + k_{ap}g_z h^2/2)}{\partial y} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial x} = g_y h - k_{ap}g_z h \frac{\partial(z_b)}{\partial y} - \frac{(\tau_{yy})_b}{\bar{\rho}} \quad (3)$$

式中: ρ ——流体密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$);

t ——时间;

u, v —— x 方向和 y 方向上的流体速度(m/s);

g_x, g_y, g_z ——各坐标轴上的重力分量;

Z_b ——河床标高(m);

h ——泥石流流体的泥深(m);

τ_b ——底部的剪应力(Pa);

k_{ap} ——土压力系数。

Massflow 在控制方程的求解方面采用 MacCormack-TVD 有限差分法。有限差分法在离散点上直接用差分代替微分, 相比于有限元法以及有限体积法的优点是更加简单成熟及可以构造高精度格式, 其数值方法具体介绍见文献^[16]。

3.2 模型参数选取

3.2.1 地形条件

以实地无人机拍摄的照片数据为基础(拍摄区域如图 2 中的红色阴影所示), 建立数字高程模型 (DEM) 进而生成研究区的地形信息。首先, 利用摄影三维建模软件 PhotoScan 把研究区的无人机航拍照片进行分析处理, 并生成研究区的 DEM 数据(分辨率为 1 m)。然后, 运用 GlobalMapper、Surfer 软件, 对 DEM 数据文件进行裁剪、生成矢量格式等操作, 得到流域和物源坐标及高程信息的栅格数据。最后, 利用 ArcGIS 将得到的流域和物源的栅格数据投影, 并转换为 Massflow 软件能识别的 ASC II 文件格式。

3.2.2 物源条件

在流域的上游存在松散破碎区, 如图 2 中黄色虚线所圈的区域。由前文分析可知, 该破碎区是一个潜在的泥石流物源, 在极端条件下如暴雨、地震等, 发生泥石流的可能性较高。通过在地图上测量, 得到潜在物源区的面积约为 $6 \times 10^5 \text{ m}^2$ 。

3.2.3 泥石流的运动条件

根据现场实地调查, 并参考相关研究^[19], 本模拟选取泥石流容重为 1800 kg/m^3 。考虑到本模拟中, 流体的初始运动位置不是实际的起点位置。因此, 通过在低精度 DEM (30 m 分辨率) 的条件下进行模拟, 估算出流体的初始速度为 10 m/s , 所以在进行高精度 DEM 模拟时, 给流体赋一个沿主沟方向的大小为 10 m/s 的初速度。

分别选用 Manning 模型和 Voellmy 摩擦模型, 进行初步模拟计算, 以选取适用于该研究区的摩擦模型和相应的运动参数。

(1) Voellmy 模型

对于 Voellmy 模型在库伦摩擦模型的基础上增加了湍流项, 认为运动的流体受到的抗剪应力为流体所受摩擦力和湍流流动产生的额外阻力之和, 因此该模型由摩擦项和湍流项两部分组成, 需确定摩擦系数和湍流系数, 其表达式如下:

$$\tau_b = \sigma\mu + \frac{\rho g v^2}{\xi} \quad (4)$$

式中: τ_b ——底部的剪应力/Pa;

σ ——正应力/Pa;

μ ——摩擦系数;

ρ ——泥石流容重/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$;

ξ ——湍流系数/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ 。

根据相关研究^[20]并结合现场调查情况, 将摩擦系数 μ 设定为 $0.1 \sim 0.3$, 湍流系数 ξ 设定为 $150 \sim 250 \text{ m/s}^2$ 。

(2) Manning 模型

对于 Manning 模型, 需要确定的计算参数是基底糙率即曼宁系数。本研究根据王裕宜等^[21]提出的不同阻力介质状态下统一的阻力糙率系数表征公式计算, 公式如下:

$$n_c = 0.033 R_{ns}^{-0.51} \exp(0.34 R_{ns}^{0.17}) \ln h \quad (5)$$

式中: n_c ——曼宁系数;

R_{ns} ——泥砂比;

h ——泥深/m。

根据现场调查情况, 取 $R_{ns} = 0.75$, h 为 $2 \sim 10 \text{ m}$, 代入公式 (4) 得到杰仲沟的曼宁系数取值范围 $0.04 \sim 0.12$ 。

为了选取适于杰仲沟泥石流数值模拟的摩擦模型和相应运动参数, 对两种摩擦模型 Voellmy 和 Manning 模型分别设定不同的运动参数, 得到了不同的泥石流泥深、流动强度以及堆积范围, 对比已发生的泥石流, 选择与实际情况最匹配的模型及运动参数。对于 Voellmy 模型将摩擦系数 μ 设定在 $0.1 \sim 0.3$, 湍流系数 ξ 设定为 $150 \sim 250 \text{ m/s}^2$ 。对于 Manning 模型将曼宁系数设定在 $0.04 \sim 0.12$ 。泥石流容重取 1800 kg/m^3 , 流体体积取 $6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。对比不同运动参数的模拟结果, 最终选取 $\mu = 0.1$, $\xi = 200 \text{ m/s}^2$, $n_c = 0.08$ 。如图 3 和图 4 分别是 Voellmy 模型和 Manning 模型的模拟结果。

图 3(a) 和图 4(a) 分别是两种模型整个运动过程中最大泥深的分布, 图 3(b) 和图 4(b) 是最大泥深与泥石流运动速度的乘积, 代表了泥石流的流动强度。从泥深分布图中可以看出, 两种模型的泥石流的堆积范围模拟结果与实际已发生的泥石流几乎相同, 但是 Manning 模型的模拟结果更接近实际情况, 而 Voellmy 模型模拟的泥石流运动范围误差相对较大, 尤其在流通区内。同样在流动强度分布图中也可看出, Manning 模型比 Voellmy 模型的模拟结果更精确。虽然两种模型在精度上有一定差距, 但是总的规律是相同的。图 3 和图 4 的(a-1) 和(a-2) 是实际被泥石流冲毁的两处公路石墩护栏。图 3、图 4 的(a-1) 中的两条黑色虚线

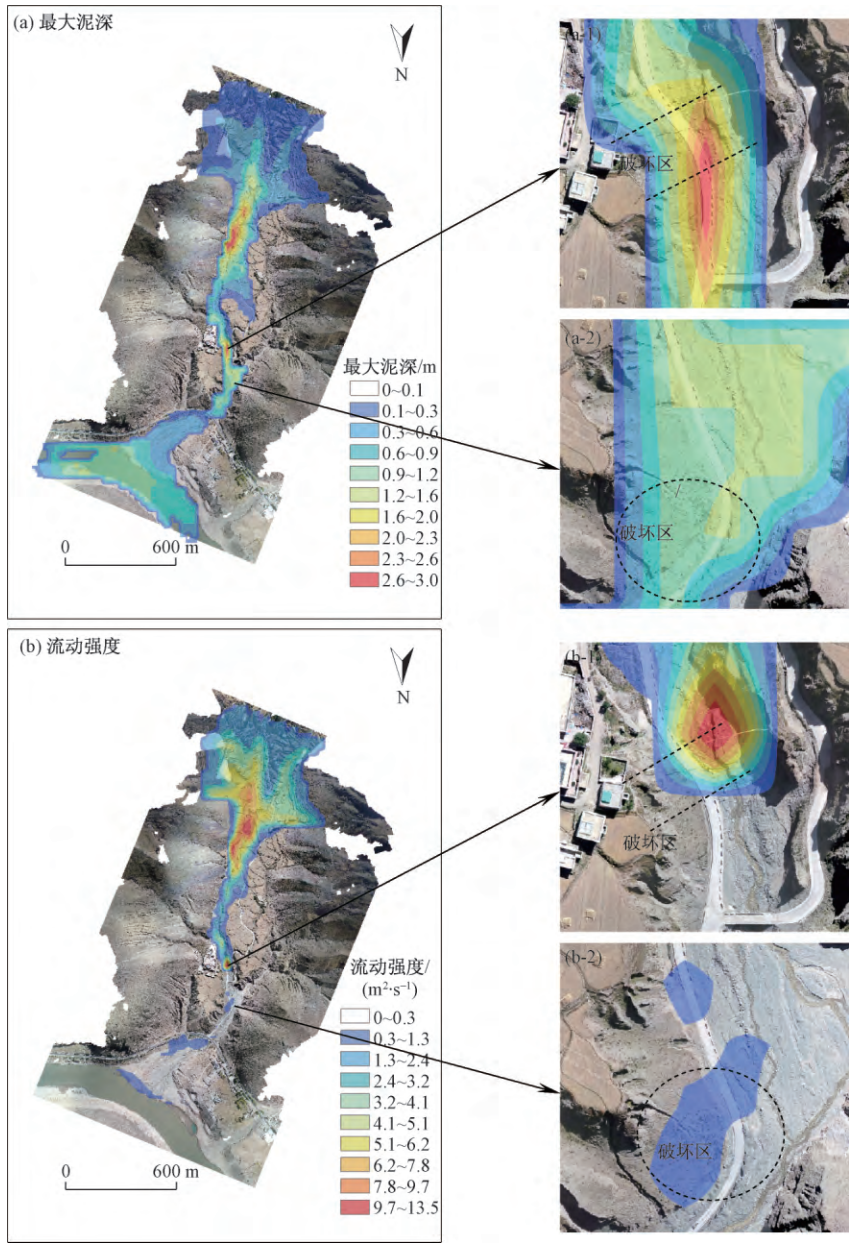


图 3 泥石流最大泥深和流动强度分布 , Voellmy 模型

Fig.3 Maximum depth and flow intensity distribution of the debris flow , Voellmy model

之间的公路西侧的石墩护栏被冲毁 (a-2) 中被黑色虚线圈起的公路西侧的石墩护栏也被冲毁。两种模型的模拟结果都与实际情况相匹配,尤其是 Manning 模型,从这两个图中可以看出,泥深在这两处都达到了 4 m 左右,这说明模拟结果与实际匹配的较好。此外,在图 4(b) 泥石流流动强度分布图中可以看出,泥石流初始运动阶段流动强度迅速增大,随后逐渐减小,但是在上述两处石墩护栏冲毁处,流动强度表现为增大。因此,也与实际情况匹配良好,这说明所选取的运动参数能够较真实的描述研究区内泥石流的运动状态。综合比

较上述两种摩擦模型,最终选取 Manning 模型对该泥石流沟做进一步的模拟研究。

4 模拟结果

根据估算的流域上游存在 $1.0 \times 10^5 \sim 6.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ 的固体物源,考虑到运动过程中流体的损失量,本次模拟选取流体体积为 $3.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。利用已选模型和相应参数对此体积的泥石流运动进行模拟,并分析其影响范围和危险性。

此次模拟共进行了 600 s。如图 5 和图 6 分别是

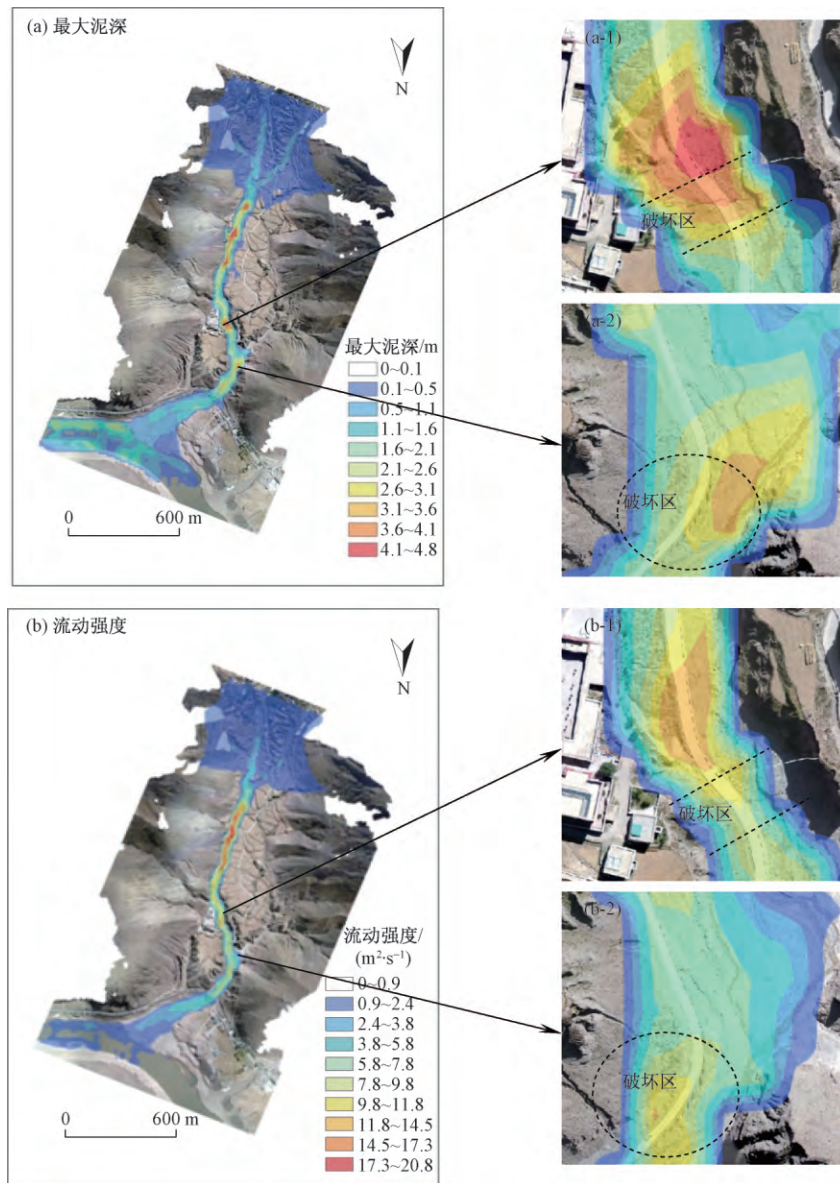


图 4 泥石流最大泥深和流动强度分布 Manning 模型

Fig. 4 Maximum depth and flow intensity distribution of the debris flow , Manning model

不同时刻的泥深分布图和整个泥石流运动过程中最大泥深及流动强度的分布图。可以看出泥石流刚开始运动 30 s 最大泥深就达到了 6 m ,90 s 时达到了 8 m ,且流动速度快,已达到甘丹桑阿曲林寺前,此后流动速度变慢,并出现堆积。这是因为甘丹桑阿曲林寺南侧的沟道较为平直,而在寺前以及其北侧,沟道出现了两次较大的弯曲,从而使流体速度减慢并发生堆积。模拟计算进行到 180 s 时,泥石流流体穿过了沟口处的 G318 国道,并开始扩散流入堆积区。进行到 270 s 时,泥石流流体开始流入雅江,并在寺北侧第二个弯道处发生堆积回流,流入西侧的支沟中。450 s 时,大部分流体流进雅江,最大泥深减小到 4 m ,600 s 时泥石流运动基

本结束。此次模拟,整个泥石流运动过程中出现的最大泥深高达 9.6 m。

综合最大泥深和流动强度分布图,定义了研究区内四处危险区,分别在图 6 中标为 A、B、C、D,图 7 是其放大图。最大泥深出现在图 6(a) 中的 A 和 B 处, A 处在沟道第一个弯道前,流体进入弯道后流速减小,发生堆积; B 处是石墩护栏被冲毁的地点,此处位于两个弯道之间,所以泥石流也易在此堆积;另一个护栏被冲毁的地点 C 处位于第二个弯道处,最大泥深达到了 8.7 m。G318 国道南侧沟道 D 处的最大泥深为 7.8 m,国道上的最大泥深达到了 5 m。此次模拟中,流动强度的最大值为 $104 \text{ m}^2/\text{s}$,流动强度大的区域集

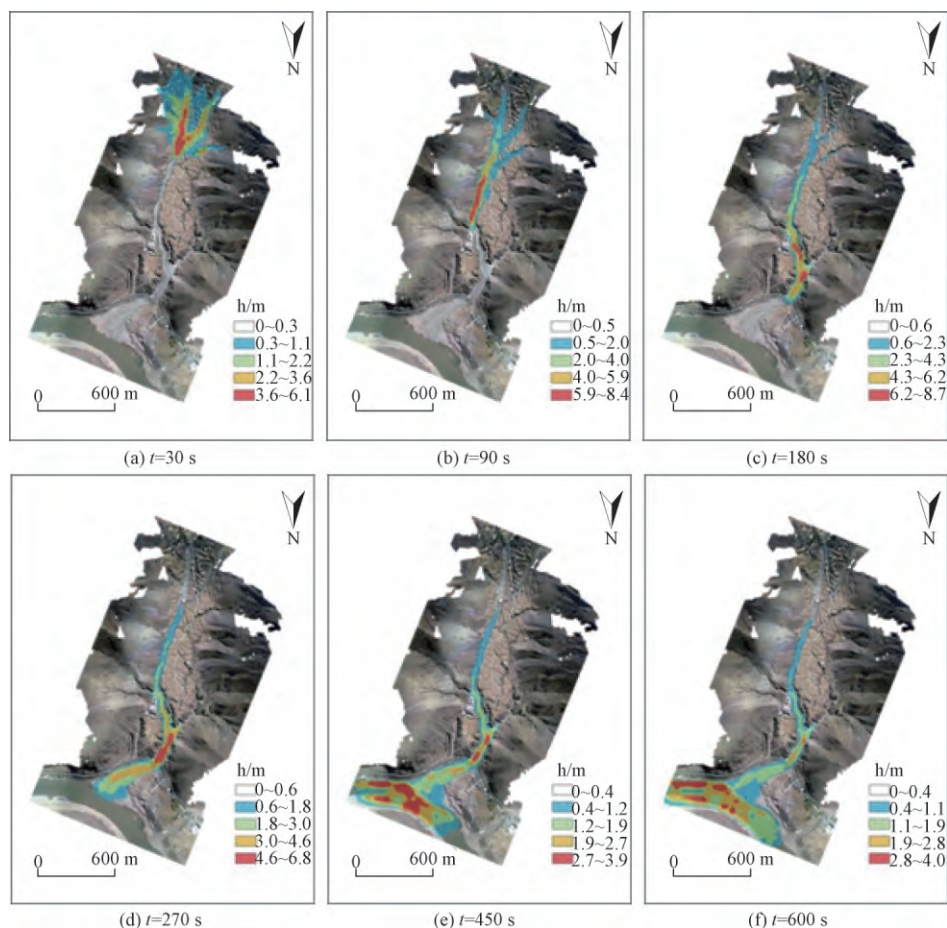


图5 不同时刻的泥深分布

Fig. 5 Mud depth distribution of debris flow at different times

中在第一个弯道南侧,即A处以南,这部分区域中沟道较为平直,泥石流流速快,冲击力强,但A处之后流动强度有所减小,但在B处,流动强度再次出现一个较大值,达到了 $75 \text{ m}^2/\text{s}$,在B处危险区边缘有一通向上游村庄的公路,从泥石流沟上架桥而过。G318国道处,达到 $36 \text{ m}^2/\text{s}$,泥石流穿过国道后流入堆积区,流动强度逐渐减小。

5 结论

对实际已发生的泥石流进行了数值模拟,模拟结果与实际情况匹配良好,从而确定了适合研究区杰仲沟泥石流模拟的摩擦模型和运动参数。

在选取了摩擦模型和相应运动参数的基础上,又对可能发生的更大体积的泥石流灾害进行了模拟,对泥石流从发生到休止,整个动态过程进行了分析。主要描述了不同时刻的泥深分布情况,以及对整个运动过程中的最大泥深分布和流动强度分布进行了分析,并划定了研究区内的四处危险区,从而得

出以下结论。

(1) 泥深和泥石流流动强度较大的区域,主要分布危险区A及以南的区域,即沟道第一个弯道南部,但处于这一范围的大部分区域人类活动较少,仅在弯道处有一条通向寺庙的公路。

(2) 危险区B在泥石流沟的第一个弯道与第二个弯道之间,危险区C在第二个弯道处,并且这两处的模拟结果与实际情况较为符合,公路旁的石墩护栏被泥石流冲毁,并且危险区B内有一通向上游村庄的公路,从泥石流沟上架桥而过。因此,在地震(地震烈度为Ⅷ度)和极端气候条件如暴雨的情况下,这两个区域的危险性相对较高,需对其加强防护。

(3) G318国道在沟口穿过,危险区D位于国道南侧附近,虽然流动强度相对其他危险区不大,但是流体在这个区域容易发生堆积,最大泥深达到了 7.8 m 。因此,大量堆积的泥砂、石块等容易造成对国道的冲埋,严重影响交通通行。所以,应提高此处公路下涵洞的排导能力,预防灾害的发生。

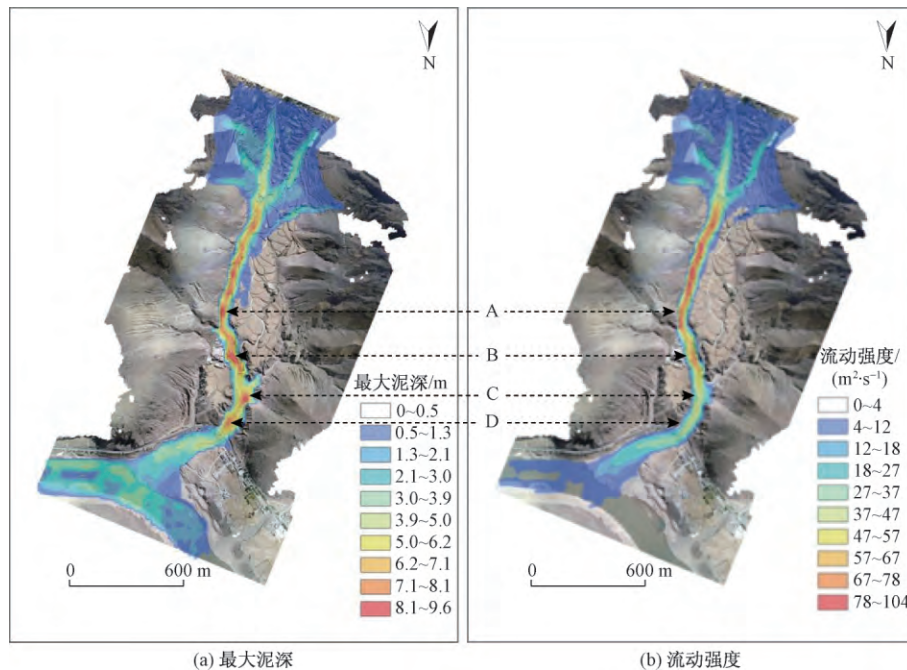


图 6 泥石流最大泥深和流动强度分布

Fig. 6 Maximum depth and flow intensity distribution of the debris flow

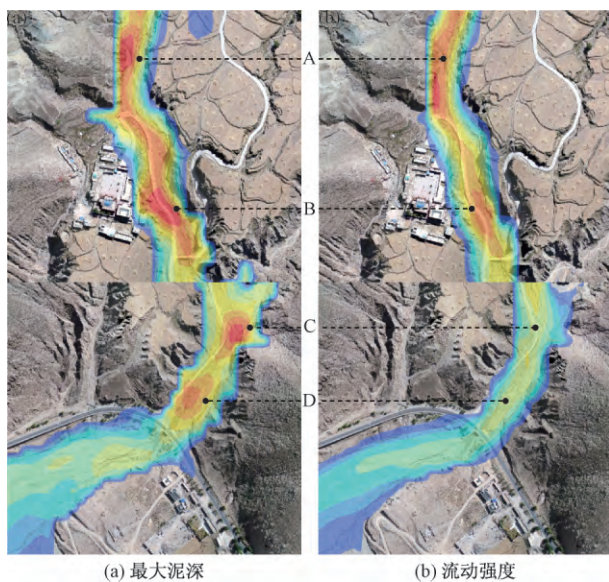


图 7 危险区放大图

Fig. 7 Enlarged map of risk zones

参考文献:

- [1] 张万顺, 赵琰鑫, 崔鹏, 等. 沟道二维泥石流运动和冲淤数值模型研究[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(1): 1-5.
ZHANG Wanshun, ZHAO Yanxin, CUI Peng, et al. Two-dimensional numerical model for debris flow motion and gully bed evolution[J]. Science of Soil

and Water Conservation, 2012, 10(1): 1-5.

- [2] 张鹏, 马金珠, 舒和平, 等. 基于 FLO-2D 模型的泥石流运动冲淤数值模拟[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, 50(3): 363-368.
ZHANG Peng, MA Jinzhu, SHU Heping, et al. Numerical simulation of erosion and deposition debris flow based on FLO-2D Model[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2014, 50(3): 363-368.
- [3] 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.
- [4] 李兆华, 胡杰, 冯吉利, 等. 基于黏弹塑性本构模型的泥石流数值模拟[J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊 1): 513-520.
LI Zhaohua, HU Jie, FENG Jili, et al. Numerical simulation of debris flow based on visco-elastoplastic constitutive model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S1): 513-520.
- [5] 徐博. 山西省忻州市伯强沟泥石流运动过程数值模拟及危险性分区[D]. 太原: 太原理工大学 2018.

- XU Bo. Movement course numerical simulation and hazard zoning of boqianggou debris flow in xinzhou City, Shanxi Province [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.
- [6] 王纳纳,唐川. 基于FLO-2D的都江堰市龙池镇黄央沟泥石流数值模拟[J]. 地质灾害与环境保护, 2014, 25(1): 107–112.
- WANG Nana, TANG Chuan. Numerical simulation of Huangyang gully debris flow Longchi town Dujiangyan City based on FLO-2D [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2014, 25(1): 107–112.
- [7] 梁鸿熙,尚敏,徐鑫. 基于FLO-2D数值模拟的泥石流流动与堆积影响因素研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(2): 228–234.
- LIANG Hongxi, SHANG Min, XU Xin. Research on the influence factors of flow and deposition of debris flow based on the FLO-2D simulation [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(2): 228–234.
- [8] 胡明鉴,汪稔,陈中学,等. 泥石流启动过程PFC数值模拟[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊1): 394–397.
- HU Mingjian, WANG Ren, CHEN Zhongxue, et al. Initiation process simulation of debris deposit based on particle flow code [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S1): 394–397.
- [9] 王纯祥,白世伟,江崎哲郎,等. 基于GIS泥石流二维数值模拟[J]. 岩土力学, 2007(7): 1359–1362.
- WANG Chunxiang, BAI Shiwei, JIANG Qizhelang, et al. GIS-based two-dimensional numerical simulation of debris flow [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007(7): 1359–1362.
- [10] HUNGR O. A model for the run out analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32: 610–623.
- [11] PENG S H, LU S C. FLO-2D Simulation of mudflow caused by large landslide due to extremely heavy rainfall in south eastern Taiwan during Typhoon Morakot [J]. Journal of Mountain Science, 2012, 10(2): 207–218.
- [12] CHANG MING, TANG CHUAN, 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: 1783–1792.
- [13] 杨涛,唐川,常鸣,等. 基于数值模拟的小流域泥石流危险性评价研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(1): 197–204.
- YANG Tao, TANG Chuan, CHANG Ming, et al. Hazard assessment of debris flow in small watershed based on numerical simulation [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(1): 197–204.
- [14] SAVAGE S B, HUTTER K. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1989, 199(1): 177–215.
- [15] IVERSON R M, OUYANG C J. Entrainment of bed material by Earth-surface mass flows: Review and reformulation of depth-integrated theory [J]. Reviews of Geophysics, 2015, 53(1): 27–58.
- [16] OUYANG C J, HE S M, XU Q, et al. A MAC cormack-TVD finite difference method to simulate the mass flow in mountainous terrain with variable computational domain [J]. Computers & Geosciences, 2013, 52(1): 1–10.
- [17] OUYANG C J, HE S M, TANG C. Numerical analysis of dynamics of debris flow over erodible beds in wenchuan earthquake-induced area [J]. Engineering Geology, 2015, 194: 62–72.
- [18] OUYANG C J, ZHOU K, XU Q, et al. Dynamic analysis and numerical modeling of the 2015 catastrophic landslide of the construction waste land fill at Guangming, Shenzhen, China [J]. Landslides, 2017, 14(2): 705–718.
- [19] 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(5): 789–796.
- YU Bin. Research on the calculating density by the deposit of debris flows [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008(5): 789–796.
- [20] 宋兵,沈军辉,阮壮,等. 九一绵高速公路鲁家沟泥石流形成机制与数值模拟分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(3): 25–30.
- SONG Bing, SHEN Junhui, RUAN Zhuang, et al. Formation mechanism and simulation analysis of debris flow at Lujiagou of Jiuzhaogou-Mianyu Expressway [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(3): 25–30.
- [21] 王裕宜,詹钱登,韩文亮,等. 粘性泥石流体的应力应变特性和流速参数的确定[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(1): 12–16.
- WANG Yuyi, ZHAN Qiandeng, HAN Wenliang, et al. Stress-strain properties of viscous debris flow and determination of velocity parameter [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14(1): 12–16.