

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0785

基于不同侵蚀模型的高速崩滑碎屑 流动力过程模拟分析

吴凤元^{1,2}, 樊赟赟³, 陈剑平², 李 军¹

(1. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 吉林大学 建设工程学院, 吉林 长春 130012;
3. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 为实现高速崩滑碎屑流沿程侵蚀动力过程的模拟分析, 采用连续理论方法对 Nomash River 碎屑流动力过程进行了数值模拟。其中, 在连续理论模型中采用 3 种不同侵蚀速率模型, 并采用 HLLC 近似 Riemann 解对有限体积数值离散控制体单元的界面通量进行了计算求解。致灾范围及运动时间的计算结果均与实际灾害情况吻合良好, 验证了计算模拟的正确有效性, 并对最终堆积深度、运动速度和侵蚀区域侵蚀深度进行了分析讨论。结果显示: 采用 McDougall 侵蚀模型得到的最终堆积平均深度和最大深度与实测情况较为接近; 每个时刻采用 Medina 侵蚀模型得到的最大速度值最大, 其次是采用 McDougall 侵蚀模型的结果, 最后是采用 Pitman 侵蚀模型的结果; 采用 McDougall 侵蚀模型得到的侵蚀深度分布较为连续, 其最大值 8.1 m 与估测值 8 m 比较接近, 采用 Medina 侵蚀模型和 Pitman 侵蚀模型得到的侵蚀深度结果则较为分散, 其最大值分别为 10.9 m 和 8.6 m。

关 键 词: 碎屑流; 沿程侵蚀; 动力过程; 模型方程; 数值模拟

中图分类号: P 642.23

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 08-3236-11

Simulation analysis of dynamic process of debris flow based on different entrainment models

WU Feng-yuan^{1,2}, FAN Yun-yun³, CHEN Jian-ping², LI Jun¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China; 2. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China; 3. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

Abstract: Numerical simulation of the dynamic process of Nomash River debris flow was carried out using the continuous theory method in this study. Three different entrainment rate models were applied in the continuous theory model, and the HLLC approximate Riemann solution was used to calculate the interface flux of the control unit of the finite volume numerical discrete. Calculation results of disaster scope and motion time were in good agreement with the actual disaster situation, which verified the correctness and validity of the simulation. Then, the final accumulation depth, motion velocity and erosion depth were analyzed and discussed. The results showed that the average depth and maximum depth of final accumulation obtained using McDougall entrainment model were close to those measured. The maximum velocity obtained using the Medina entrainment model at each time was the largest, followed by the result of McDougall entrainment model and the result of Pitman entrainment model. The erosion depth distribution using McDougall erosion model was more continuous, and the maximum value of 8.1 m was close to the estimated value of 8 m. The erosion depth results obtained using Medina erosion model and Pitman erosion model were more dispersed, and their maximum values were 10.9 m and 8.6 m, respectively.

Keywords: debris flow; entrainment of path material; dynamic process; model equation; numerical simulation

1 引 言

高速崩滑碎屑流是一种危害性极大的自然灾

害, 其动力过程极其复杂^[1], 并且暴发时通常会伴有沿程侵蚀现象, 而沿程侵蚀的发生会增大碎屑流的破坏能力。因此, 开展高速崩滑碎屑流沿程侵蚀

收稿日期: 2018-05-07

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2016YFC0801603); 国家自然科学基金青年项目 (No. 41201007); 沈阳建筑大学科研创新培育计划项目 (No. CXPY2017016)。

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFC0801603), the Young Scholars of National Natural Science Foundation of China (41201007) and the Nurture Fund for Research Innovation of Shenyang Jianzhu University (CXPY2017016).

第一作者简介: 吴凤元, 男, 1989 年生, 博士, 讲师, 主要从事地质灾害动力过程方面的研究。E-mail: fywucivil@163.com

通讯作者: 樊赟赟, 男, 1982 年生, 博士, 副教授, 主要从事地质灾害动力过程方面的研究。E-mail: yunyunfan@126.com

动力过程的研究具有重要意义。

目前,数值模拟作为一种常用的研究手段被学者们广泛地应用到碎屑流灾害的研究中。在数值模拟中,采用最多的方法为连续理论方法,即将碎屑流看作为连续介质,应用连续方程和动量方程对其进行分析研究。Savage^[2]与 Hutter^[3]等提出了可以模拟干颗粒材料运动的 SH (Savage-Hutter) 理论。此后,大量的学者基于 SH 理论来进行模拟研究^[4-8]。Iverson 等^[9]提出了一种库仑混合流运动理论模型,并在模型中考虑了孔隙水压力的作用,又将此理论模型推广到复杂三维地形条件下的运动模拟中^[10]。Hungr 等^[11-12]提出了基于 Lagrange 形式求解运动方程的连续模型 (DAN),此模型可以选择不同的流变模型。McDougall 等^[13]应用 SPH 数值方法对 Hungr 提出的模型方程 (DAN) 做了进一步的简化,使得求解过程更加高效简便。齐超等^[14]应用 DAN-W,选用 3 种流变模型,对东河口碎屑流动力过程进行了数值模拟。高杨等^[15]应用 DAN3D 对鸡尾山碎屑流动力过程进行了数值模拟。朱圻^[16]、袁小一^[17]等分别应用 Fluent,通过用户自定义接口引入 Voellmy 准则定义碎屑流运动阻力,对牛圈沟、文家沟碎屑流动力过程及其产生的超前冲击气浪进行了数值模拟。

在沿程侵蚀研究方面,较早的有 Takahashi^[18]的半经验的侵蚀速率公式和 Egashira 等^[19]通过试验得到的侵蚀速率公式。Pitman 等^[20]认为,侵蚀速率与运动速度成正比关系,而比例系数由经验确定。McDougall 等^[21]提出了由沿程侵蚀体积和平均侵蚀长度得到的侵蚀速率公式,并实现了高速碎屑流沿程侵蚀的数值模拟。Medina 等^[22]通过分层受力分析得到侵蚀速率公式。Crosta 等^[23]对比研究了应用经验性侵蚀速率模型和通过物理分析得到的侵蚀速率模型的碎屑流侵蚀过程计算结果。Christen 等^[24]考虑了底层材料的垂向结构,引入了一个侵蚀系数,认为不同的侵蚀系数对应于不同的侵蚀过程。Iverson 等^[25]对侵蚀速率模型进行了较为系统的总结。樊赞赞^[26]、杜鹃^[27]等应用 McDougall 提出的侵蚀速率模型实现了高速崩滑碎屑流沿程侵蚀动力过程的数值模拟。欧阳朝军等^[28]提出了一种结合 Coulomb 和 Voellmy 摩擦准则优点的侵蚀速率模型。刘威等^[29]构建了考虑沿程侵蚀影响的高速远程滑坡热-水-力耦合物理模型。

目前为止,学者们针对高速崩滑碎屑流沿程侵蚀开展了一些研究工作,但很少有将各类侵蚀模型进行较为系统的对比研究。因此,本文主要基于连

续理论方法,并在模型中选用 3 种不同侵蚀速率模型,针对 Nomash River 碎屑流动力过程开展数值模拟,对比 3 种不同侵蚀速率模型下碎屑流致灾范围、最终堆积深度、运动速度及侵蚀深度的计算结果,并对其进行分析讨论,进而为高速崩滑碎屑流灾害的预防和治理提供参考依据。

2 理论模型

2.1 基本方程

深度平均的质量和动量方程的一般形式为

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

$$\begin{aligned} \rho h \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) = \\ - \left[k_x \tau_{zz}(z=z_b) \frac{\partial h}{\partial x} + \left(k_x \tau_{zz}(z=z_b) \frac{\partial z_b}{\partial x} - \tau_{zx}(z=z_b) \right) \right] + \rho h g_x \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \rho h \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) = \\ - \left[k_y \tau_{zz}(z=z_b) \frac{\partial h}{\partial y} + \left(k_y \tau_{zz}(z=z_b) \frac{\partial z_b}{\partial y} - \tau_{zy}(z=z_b) \right) \right] + \rho h g_y \end{aligned} \quad (3)$$

式中: x 、 y 、 z 为笛卡尔坐标系下 3 个方向的坐标变量; $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 分别为 x 和 y 方向速度沿深度方向平均积分得到的结果; h 为流深; E_t 为侵蚀速率; ρ 为流体密度; t 为时间; g_x 、 g_y 分别为 x 和 y 方向上的重力加速度分量; τ_{zz} 为底面正应力; τ_{zx} 、 τ_{zy} 分别为 x 和 y 方向上的底面剪切应力。 x 和 y 方向上的侧向应力系数分别为

$$\left. \begin{aligned} k_{x_{act/pass}} &= 2(1 \mp \sqrt{1 - \cos^2 \varphi / \cos^2 \delta}) \sec^2 \varphi - 1 \\ k_{y_{act/pass}} &= \frac{1}{2} \left(k_x + 1 \mp \sqrt{(k_x - 1)^2 + 4 \tan^2 \delta} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: φ 为内摩擦角; δ 为底面摩擦角; “+”表示被动状态; 而“-”表示主动状态。因此,得到不同运动速度梯度条件下侧向应力系数的状态值:

$$k_x = \begin{cases} k_{x_{act}} & \partial \bar{u} / \partial x \geq 0 \\ k_{x_{pass}} & \partial \bar{u} / \partial x < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$k_y = \begin{cases} k_{y_{act}} & \partial \bar{u} / \partial x \geq 0, \partial \bar{v} / \partial y \geq 0 \\ k_{y_{pass}} & \partial \bar{u} / \partial x \geq 0, \partial \bar{v} / \partial y < 0 \\ k_{y_{act}} & \partial \bar{u} / \partial x < 0, \partial \bar{v} / \partial y \geq 0 \\ k_{y_{pass}} & \partial \bar{u} / \partial x < 0, \partial \bar{v} / \partial y < 0 \end{cases} \quad (6)$$

2.2 阻力模型

在材料组成成分中以粗颗粒为主的情况下, 底面剪切阻力主要为摩擦阻力, 其大小与底面有效正应力成正比:

$$\tau_{zx(z=z_b)} = -\operatorname{sgn}(\bar{u})(\tau_{zz} - u_w)_{(z=z_b)} \tan \phi = -\operatorname{sgn}(\bar{u}) \tau'_{zz(z=z_b)} \tan \phi \quad (7)$$

式中: ϕ 为动力底面摩擦角; u_w 为孔隙水压力; $\tau'_{zz(z=z_b)}$ 为底面有效正应力; $\operatorname{sgn}(\bar{u})$ 为符号函数, 来表现 $\tau_{zx(z=z_b)}$ 与碎屑流运动方向的关系:

$$\operatorname{sgn}(a) = \begin{cases} 1 & (a > 0) \\ 0 & (a = 0) \\ -1 & (a < 0) \end{cases} \quad (8)$$

根据太沙基理论, 有效应力等于总应力减去孔隙水压力, 由于孔隙水压力的存在使得有效应力变小。因此, 计算中通常采用表观动力底摩擦角:

$$\tau_{zx(z=z_b)} = -\operatorname{sgn}(\bar{u})(\tau_{zz} - u_w)_{(z=z_b)} \tan \phi = -\operatorname{sgn}(\bar{u}) \tau_{zz(z=z_b)} \tan \delta \quad (9)$$

式中: δ 为表观动力底摩擦角, 即为底面摩擦角。

Voellmy 剪切阻力模型主要考虑了摩擦和湍流行为, 用下式表示:

$$\tau_{zx(z=z_b)} = -\operatorname{sgn}(\bar{u}) \left(\tau_{zz(z=z_b)} f + \frac{\rho g_z \bar{u}^2}{\xi} \right) \quad (10)$$

式中: f 为摩擦系数; ξ 为湍流参数, 右端第 1 项为摩擦阻力, 与式 (7) 形式相同, f 相当于 $\tan \delta$ 。第 2 项则具有湍流阻力的形式, 经验性的用于表示与速度有关的项。

2.3 侵蚀模型

侵蚀是高速崩滑碎屑流动力过程中一种重要的特征。常见的侵蚀速率形式有 3 种: McDougall 侵蚀速率、Medina 侵蚀速率以及 Pitman 侵蚀速率。

McDougall 的侵蚀速率形式认为侵蚀速率 E_t 与侵蚀增长率 E_s 之间存在以下的关系^[21]:

$$E_t = E_s h \bar{u} \quad (11)$$

式中: E_s 由侵蚀后的总体积和侵蚀前体积得到的平均增长率 E_s 替代, 并且表示如下:

$$\bar{E}_s = \frac{\ln(V_f/V_0)}{\bar{d}} \quad (12)$$

式中: V_0 为侵蚀前的体积; V_f 为侵蚀前体积与侵蚀区域被侵蚀材料体积之和, 为侵蚀后的体积; $\bar{d}$ 为侵蚀区域近似的平均长度。

Medina 的侵蚀速率 E_t 表示为^[22]

$$E_t = \begin{cases} \frac{1}{\rho \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}} (\tau_{1zxbot} - \tau_{2zxtop}) & \tau_{1zxbot} \geq \tau_{2zxtop} \\ 0 & \tau_{1zxbot} < \tau_{2zxtop} \end{cases} \quad (13)$$

式中: τ_{1zxbot} 为底面剪切阻力, 由 Bingham、Herschel-Bulkey 或 Voellmy 模型得到; τ_{2zxtop} 为侵蚀层抗侵蚀剪切应力, $\tau_{2zxtop} = c + \rho g_z h (1 - \lambda_2) \cos(\theta) \tan(\phi_2)$, c 和 ϕ_2 为床面黏聚力和摩擦角, λ_2 为超孔隙水压比值, θ 为地形坡角。

Pitman 的侵蚀速率 E_t 表示为^[20]

$$E_t = \begin{cases} \alpha \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2} & \tau_{1zxbot} \geq \tau_{2zxtop} \\ 0 & \tau_{1zxbot} < \tau_{2zxtop} \end{cases} \quad (14)$$

式中: α 为经验参数。

3 有限体积数值方法

将碎屑流动力模型方程写成如下统一的守恒形式:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial y} = S \quad (15)$$

式中: U 为守恒变量; F 为计算通量, $F = (E, H)$; S 为源项, 并可以分别表示为

$$U = \begin{pmatrix} h \\ hu \\ hv \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$E = \begin{pmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{1}{2} k_x g_z h^2 \\ huv \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$H = \begin{pmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + \frac{1}{2} k_y g_z h^2 \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$S = \begin{pmatrix} 0 \\ hg_x - k_x g_z h \frac{\partial z_b}{\partial x} \\ hg_y - k_y g_z h \frac{\partial z_b}{\partial y} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ S_{fx} \\ S_{fy} \end{pmatrix} \quad (19)$$

式中: h 为流深; $u = \bar{u}$ 和 $v = \bar{v}$ 分别为 x 和 y 方向的速度; g 为重力加速度; k 为侧向应力系数; S_f 为摩擦源项。

式 (15) 可以改写为向量的形式:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot F = S \quad (20)$$

将式 (20) 在控制体 V_i 上积分得

$$\int_{V_i} \frac{\partial U}{\partial t} dV + \int_{V_i} \nabla \cdot \mathbf{F} dV = \int_{V_i} \mathbf{S} dV \quad (21)$$

应用 Green 公式将式 (21) 的面积分转化为线积分, 则可得

$$\int_{V_i} \frac{\partial U}{\partial t} dV + \oint_{L_i} \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} dl = \int_{V_i} \mathbf{S} dV \quad (22)$$

式中: L_i 为第 i 个控制体单元的边界; $\mathbf{n}$ 为边界的外法线方向。

令 U_i 和 S_i 为单元变量的平均值并定义在单元中心上, 则有

$$\left. \begin{aligned} U_i &= \frac{1}{A_i} \int_{V_i} U dV \\ S_i &= \frac{1}{A_i} \int_{V_i} \mathbf{S} dV \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

将式 (23) 代入式 (22) 并进行离散得到

$$\frac{\Delta U_i}{\Delta t} A_i + \sum (\mathbf{F}_{ij}^* \cdot \mathbf{n}_{ij}) \Delta l_{ij} = S_i A_i \quad (24)$$

式中: ΔU_i 为变量增量; Δl_{ij} 为单元的边长; $\mathbf{F}_{ij}^*$ 为第 i 单元第 j 条边的通量。令 $\mathbf{F}_{ij} = \mathbf{F}_{ij}^* \cdot \mathbf{n}_{ij}$, 则 $\mathbf{F}_{ij}$ 表示通过第 i 单元第 j 条边的法向数值通量。进而由式 (24) 得到最终有限体积数值离散方程为

$$\Delta U_i = -\frac{\Delta t}{A_i} \sum (\mathbf{F}_{ij}) \Delta l_{ij} + \Delta t S_i \quad (25)$$

本文应用 HLLC 近似 Riemann 解计算控制体单元的界面通量, 表达式如下:

$$\mathbf{F}_{ij}^* \cdot \mathbf{n}_{ij} = \begin{cases} (\mathbf{F}_L^*)_{ij} \cdot \mathbf{n}_{ij}, & s_L \geq 0 \\ (\mathbf{F}_L^*)_{ij} \cdot \mathbf{n}_{ij} + s_L ((U_{LM})_{ij} - (U_L)_{ij}), & s_L \leq 0 \leq s_M \\ (\mathbf{F}_R^*)_{ij} \cdot \mathbf{n}_{ij} + s_R ((U_R)_{ij} - (U_{RM})_{ij}), & s_M \leq 0 \leq s_R \\ (\mathbf{F}_R^*)_{ij} \cdot \mathbf{n}_{ij}, & s_R \leq 0 \end{cases} \quad (26)$$

式中: 下标 L、R 和 M 分别为界面左、右两侧和中间的物理量; $(U_L)_{ij}$ 和 $(U_R)_{ij}$ 分别为第 i 单元第 j 条边左右两侧的变量 U 值, $(U_{LM})_{ij}$ 和 $(U_{RM})_{ij}$ 可以表示为

$$\left. \begin{aligned} (U_{LM})_{ij} &= h_L \frac{s_L - (u_L n_x + v_L n_y)}{s_L - s_M} \begin{bmatrix} 1 \\ s_M \\ v_L n_x + u_L n_y \end{bmatrix} \\ (U_{RM})_{ij} &= h_R \frac{s_R - (u_R n_x + v_R n_y)}{s_R - s_M} \begin{bmatrix} 1 \\ s_M \\ v_R n_x + u_R n_y \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

而 s_L 、 s_M 和 s_R 则为波速, 并且可以表示为

$$\left. \begin{aligned} s_L &= \min(u_L n_x + v_L n_y - c_L, u^* - c^*) \\ s_M &= \frac{s_L h_R (u_R n_x + v_R n_y - s_R) - s_R h_L (u_L n_x + v_L n_y - s_L)}{h_R (u_R n_x + v_R n_y - s_R) - h_L (u_L n_x + v_L n_y - s_L)} \\ s_R &= \max(u_R n_x + v_R n_y + c_R, u^* + c^*) \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

式中: $c = \sqrt{gh}$, u^* 和 c^* 分别表示为

$$\left. \begin{aligned} u^* &= 0.5[(u_L + u_R)n_x + (v_L + v_R)n_y] + c_L - c_R \\ c^* &= 0.5(c_L + c_R) + 0.25[(u_L - u_R)n_x + (v_L - v_R)n_y] \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

而当左侧或右侧为露滩条件 ($h_L = 0$ 或 $h_R = 0$) 时, s_L 和 s_R 可以分别计算为

$$\begin{cases} s_L = u_R n_x + v_R n_y - 2c_R \\ s_R = u_R n_x + v_R n_y + c_R \end{cases} \quad h_L = 0 \quad (30)$$

$$\begin{cases} s_L = u_L n_x + v_L n_y - c_L \\ s_R = u_L n_x + v_L n_y + 2c_L \end{cases} \quad h_R = 0 \quad (31)$$

4 案例计算与分析

4.1 案例概况

1999 年 4 月, 加拿大 British Columbia 西部的 Nomash River 源头暴发了一场大型高速崩滑碎屑流灾害, 如图 1 所示。碎屑流起源于一个 U 形冰川谷西南方向侧壁的顶部^[21, 30]。



图 1 Nomash River 碎屑流
Fig.1 Nomash River debris flow

源区位于坡度为 50° 的山坡上, 破裂面由一系列相交的节理组成。分离出的岩体呈扁平状, 并向底部倾斜, 体积约有 $3 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。按照破碎体积增长率 25% 计算, 岩体产生了 $3.75 \times 10^5 \text{ m}^3$ 的破碎岩屑垂直进入了河谷。山谷底部由粉砂构成的底砾所覆盖。冰碛构成的 Nomash River 窄滩延伸至山谷两侧

高度 100 m 以上^[30]。

图 2 中的 A 位置主要为崩积物和冰碛物, 该位置被侵蚀的宽度达 100~150 m, 最大深度可达 8 m, 侵蚀区如图 3 所示。根据实地调查显示, 约 $3.6 \times 10^5 \text{ m}^3$ 的材料从斜坡上被侵蚀并跟随滑体继续运动^[30]。

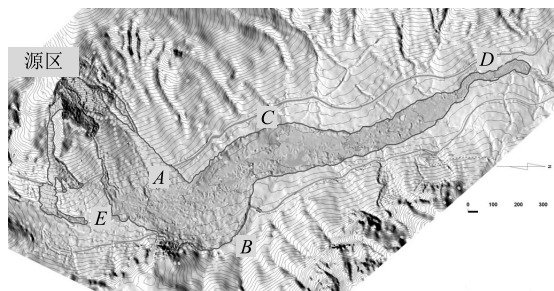


图 2 平面示意图

Fig.2 Plan sketch



图 3 侵蚀区

Fig.3 Erosion area

滑体穿过 Nomash River 的漫滩并到达了对岸山坡的 B 处, 然后向下运动并冲上左岸山坡, 到达了最大高度低于 B 点的 C 处。随后, 滑体继续向河谷运动, 最终堆积在 D 点^[30]。

在整个堆积区域, 碎屑似乎是以薄层状态在蔓延, 提出这种说法的主要依据是在碎屑上游边缘(图 2 中 E 点)缺少筑坝, 并且碎屑表面比较光滑。在第 2 个转弯处(图 2 中 C 点)发现了碎屑流堆积的巨砾, 尽管巨砾和有机碎屑比较明显, 但该位置的碎屑成分主要是粉砂, 跟从源区崩塌下来的材料较为类似。在堆积区的末端位置, 主要有几块直径达 6 m 的大卵石^[30]。

4.2 计算结果与分析

根据 McDougall 等^[21]的研究成果, 得到计算地形条件, 并在源区建立 $3.75 \times 10^5 \text{ m}^3$ 的材料, 得到初始时刻状态图, 如图 4 所示, 图中粗实线表示实际致灾范围, 400 m 和 500 m 表示高程, 地形等值线的间距为 20 m, 流深等值线的间距为 2 m。

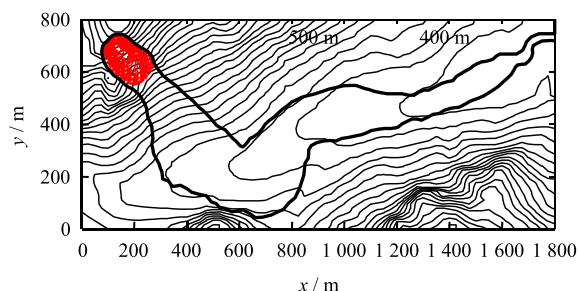


图 4 初始时刻状态

Fig.4 Initial conditions

计算中, 对于底面阻力模型的选取, 在碎屑流侵蚀前采用摩擦阻力模型, 其中内摩擦角 $\varphi = 35^\circ$, 底面摩擦角 $\delta = 30^\circ$; 在碎屑流侵蚀后则采用 Voellmy 阻力模型, 其中湍流参数 $\xi = 400 \text{ m/s}^2$, 摩擦系数 $f = 0.05$ ^[21]。

对于沿程侵蚀的计算, 为了对不同侵蚀速率模型的计算结果进行讨论, 采用 3 种侵蚀速率模型进行计算分析。其中, 在 McDougall 的侵蚀速率模型中, 通过参考相关文献^[21], 侵蚀前体积 $V_0 = 3.75 \times 10^5 \text{ m}^3$, 侵蚀后体积 $V_f = 7.35 \times 10^5 \text{ m}^3$, 侵蚀区域平均长度 $\bar{d} = 350 \text{ m}$, 由式 (12) 得到 $\bar{E}_s = 0.0019 \text{ m}^{-1}$ 。在 Medina 的侵蚀速率模型中, τ_{1zxbot} 为底面剪切阻力, 计算同上文底面阻力的计算, 侵蚀层抗侵蚀剪切应力 τ_{2zxtop} 中超空隙水压比值 $\lambda_2 = 0.5$ ^[21]。在 Pitman 的侵蚀速率模型中, 通过参考相关文献^[20], 得到经验参数 $\alpha = 0.1$ 。

通过采用上述模型及计算参数, 得到 3 种不同侵蚀速率模型下的 Nomash River 碎屑流运动过程计算结果如图 5~7。

从运动形态上看, 3 组计算结果比较相似。在 30 s 时, 基本运动到对面山坡的最高点; 在 60 s 时, 经过第 2 个转弯处后继续向下运动并形成堆积。在随后的时间段里, 基本上表现为碎屑流前缘的堆积运动过程。3 组致灾范围计算结果均与实际情况比较接近, 验证了 3 组计算模拟的正确有效性。

在最终堆积深度计算结果方面, 第 1 组 (McDougall 侵蚀速率模型)、第 2 组 (Medina 侵蚀速率模型) 和第 3 组 (Pitman 侵蚀速率模型) 计算结果, 平均深度分别为 3.7、4.7、4.0 m, 最大深度分别为 7.2、9.4、8.1 m。其中, 第 1 组计算结果与实测情况较为接近, 而第 2 组和第 3 组计算结果相较实测结果偏大。对于被侵蚀材料的体积计算结果, 分别为 3.35×10^5 、 6.62×10^5 、 $4.95 \times 10^5 \text{ m}^3$, 同样为第 1 组结果与实测情况较为接近。因此, 可以看出, 很可能是由于被侵蚀材料的体积偏大而造成

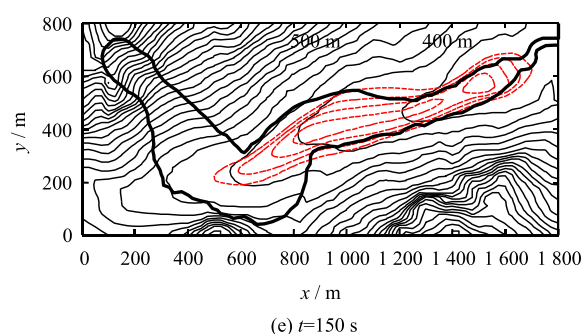
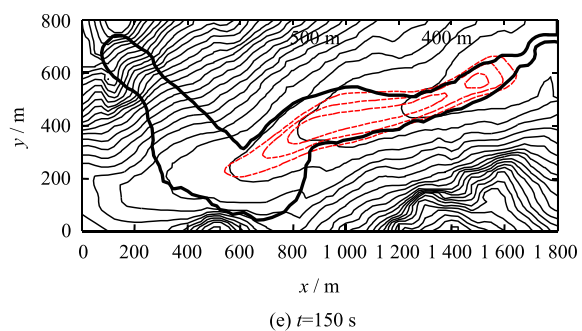
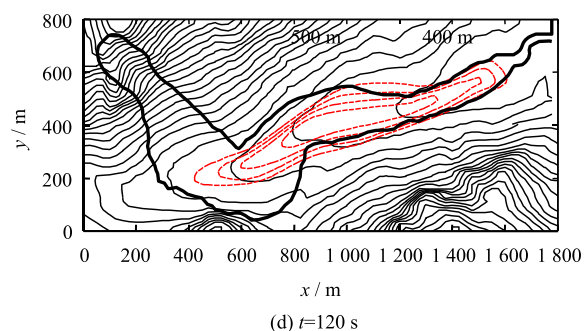
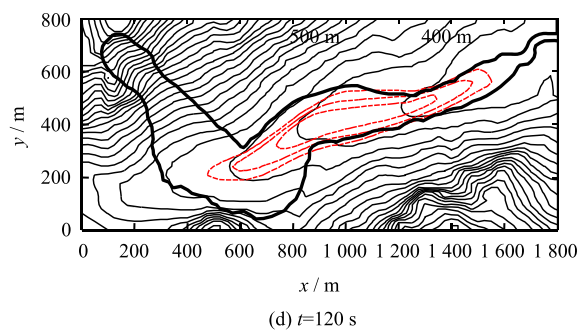
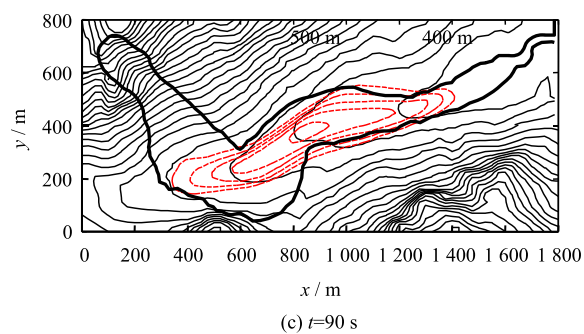
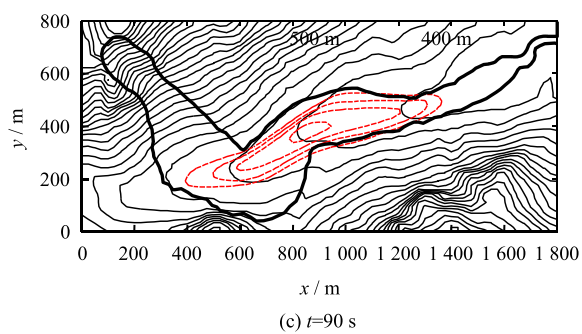
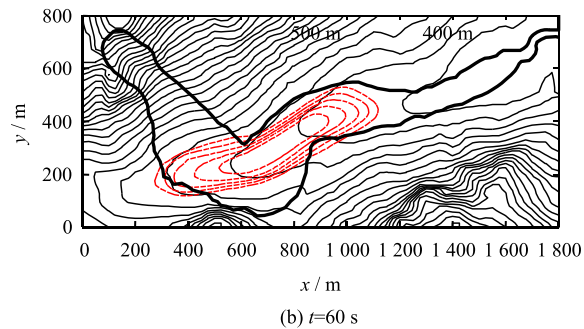
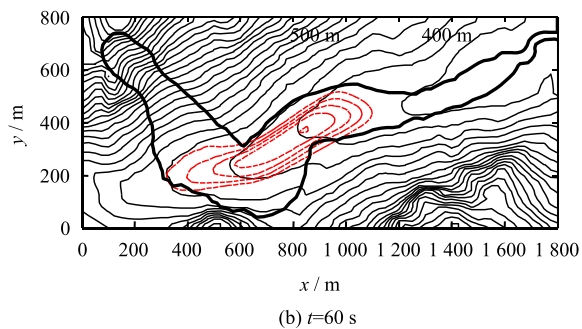
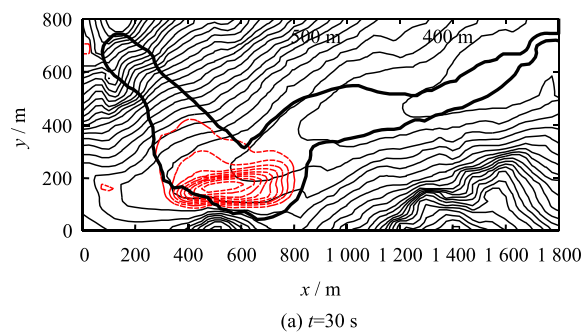
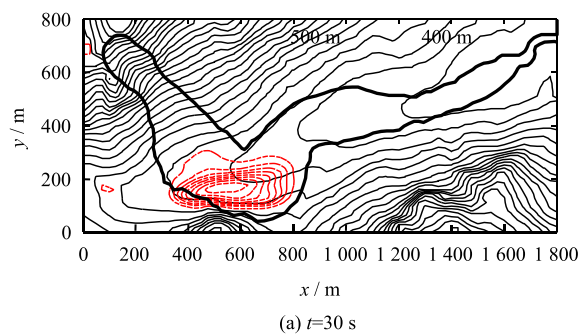


图 5 McDougall 侵蚀速率模型下运动过程
Fig.5 Motion process with McDougall's erosion velocity model

图 6 Medina 侵蚀速率模型下运动过程
Fig.6 Motion process with Medina's erosion velocity model

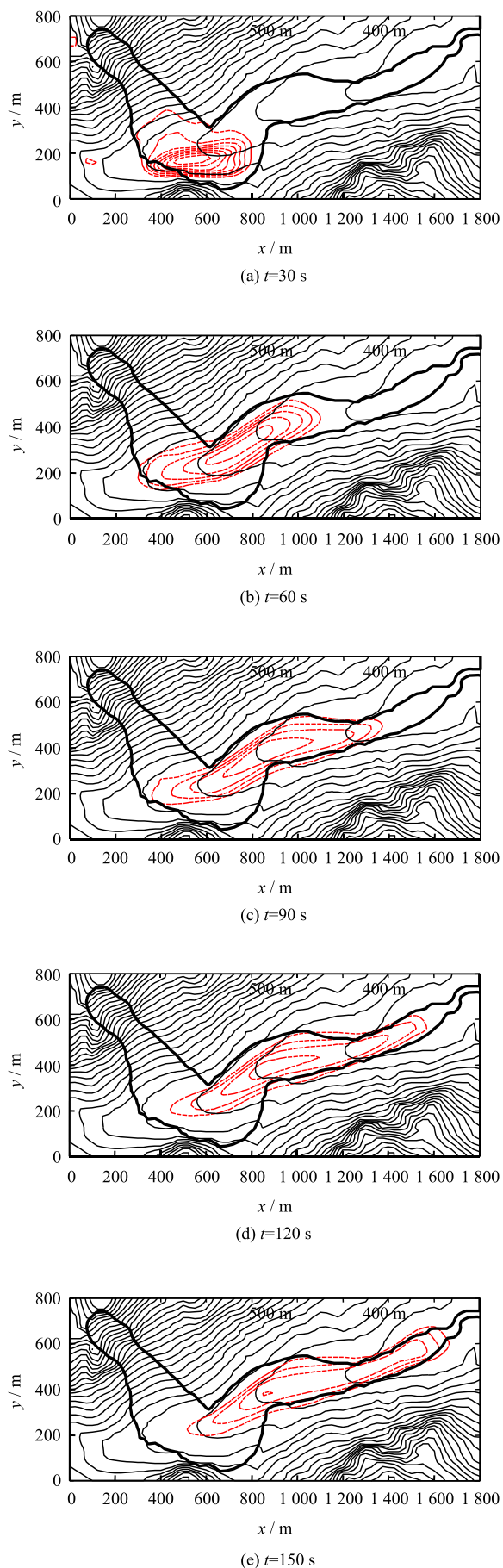


图7 Pitman 侵蚀速率模型下运动过程
Fig.7 Motion process with Pitman's erosion velocity model

的堆积深度偏大。

为了对运动过程中的速度进行分析,得到了3组结果中间4个时刻的速度分布,如图8~10所示。

对比3组中间时刻速度分布可以看出, $t=60\text{ s}$ 、 $t=90\text{ s}$ 和 $t=120\text{ s}$ 3个时刻的速度分布形式比较接近,表现为碎屑流头部的速度较大。其中第1组结果 $t=60\text{ s}$ 、 $t=90\text{ s}$ 和 $t=120\text{ s}$ 3个时刻头部的最大速度分别为10.2、7.3、6.8 m/s;第2组结果3个时

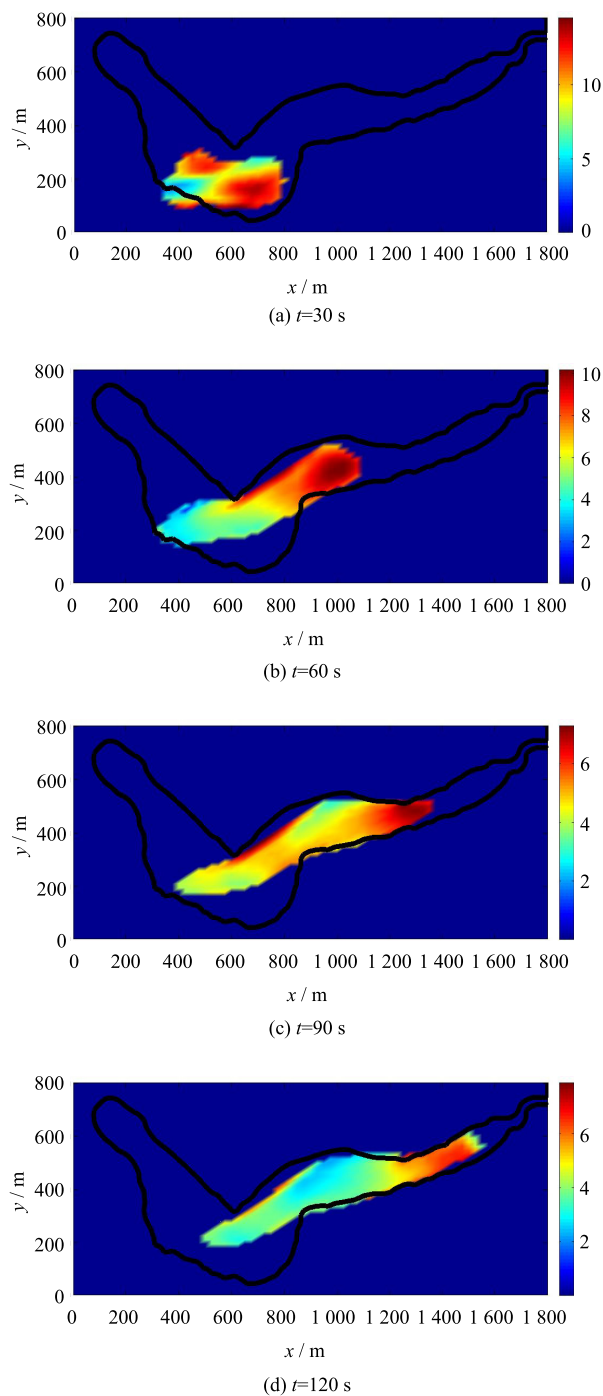


图8 McDougall 侵蚀速率模型下不同时刻速度云图
(单位: m/s)

Fig.8 Velocity magnitudes with McDougall's erosion velocity model at different time (unit: m/s)

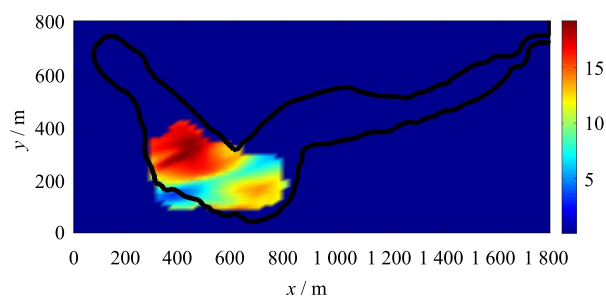
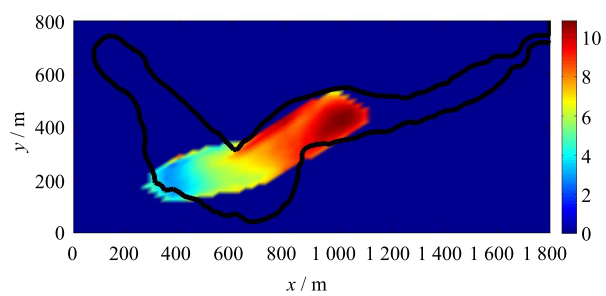
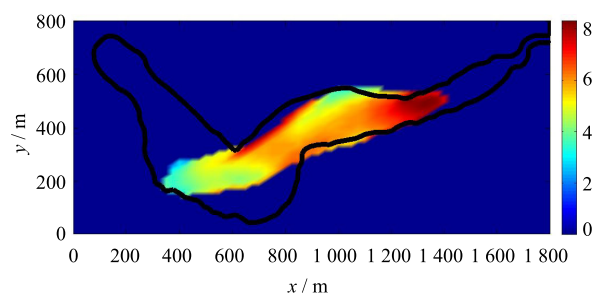
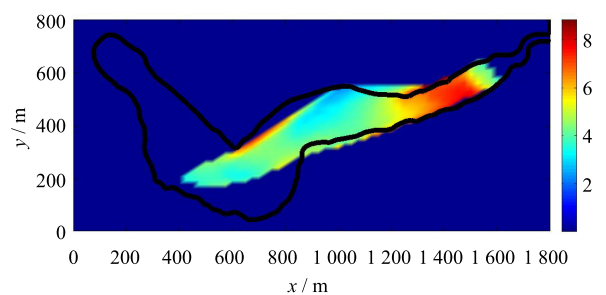
(a) $t=30$ s(b) $t=60$ s(c) $t=90$ s(d) $t=120$ s

图 9 Medina 侵蚀速率模型下不同时刻速度云图
(单位: m/s)

Fig.9 Velocity magnitudes with Medina's erosion velocity model at different time (unit: m/s)

刻头部的最大速度分别为 10.8、8.3、7.5 m/s；第 3 组结果 3 个时刻头部的最大速度分别为 10.3、7.6、7.1 m/s。结果显示， $t=60$ s、 $t=90$ s 和 $t=120$ s 3 个时刻 3 组结果头部的最大速度值比较接近。

但对于 $t=30$ s 时刻，3 组结果的速度分布则存在差异，具体表现在第 1 组结果的头部速度较大，最大速度值为 14.5 m/s；第 2 组和第 3 组的结果相

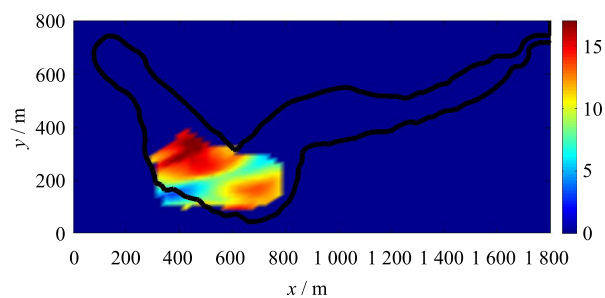
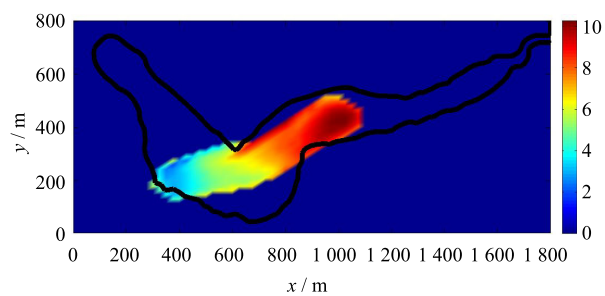
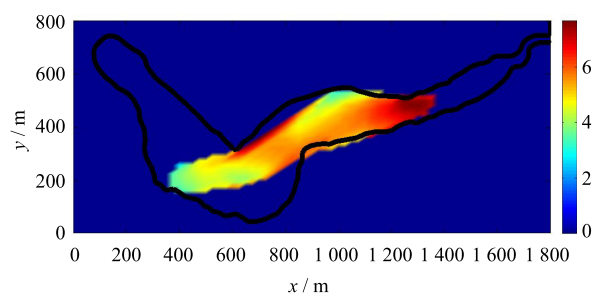
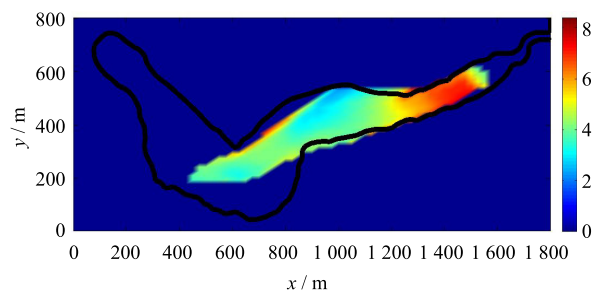
(a) $t=30$ s(b) $t=60$ s(c) $t=90$ s(d) $t=120$ s

图 10 Pitman 侵蚀速率模型下不同时刻速度云图
(单位: m/s)

Fig.10 Velocity magnitudes with Pitman's erosion velocity model at different time (unit: m/s)

似，为尾部速度较大，最大速度值分别为 19.2、17.0 m/s。

从总体上看，每个时刻第 2 组结果的最大速度值最大，其次是第 3 组结果，最后第 1 组结果。而对于 3 组结果在 $t=30$ s 时刻的速度分布差异，通过观察发现，第 1 组结果接近通过侵蚀区，而第 2 组和第 3 组结果的尾部还在侵蚀区域。因此，很可

能是由于侵蚀作用而导致的速度分布差异。

计算得到了侵蚀区域侵蚀深度的计算结果, 侵蚀区域为图 11 中黑粗虚线所示, 并将该区域 3 组侵蚀深度计算结果放大, 如图 12 所示。

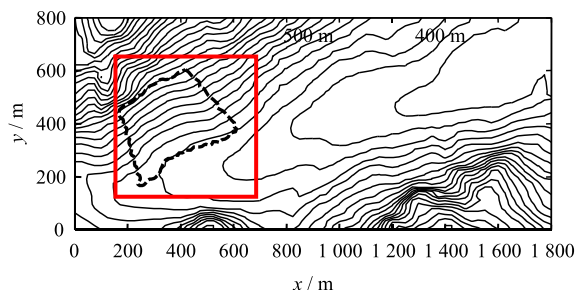
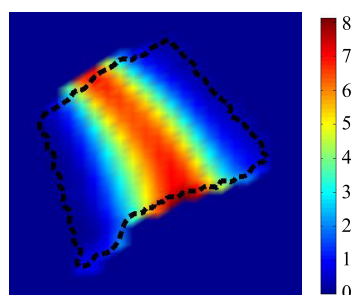
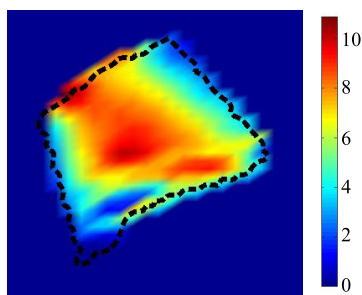


图 11 侵蚀区域位置

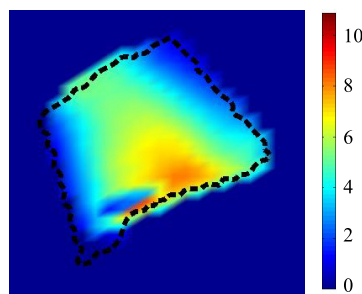
Fig.11 The position of erosion area



(a) 第1组



(b) 第2组



(c) 第3组

图 12 侵蚀深度计算结果 (单位: m)

Fig.12 Calculation results of erosion depth (unit: m)

从图 12 中可以看出, 对于第 1 组侵蚀深度计算结果, 沿运动方向的中心线位置深度最大, 最大值

为 8.1 m, 而两侧的深度最小, 即其横断面表现为 V 形; 对于第 2 组侵蚀深度计算结果, 进入侵蚀区域和区域中心位置的深度较大, 最大值为 10.9 m, 而区域四周边缘的深度较小; 对于第 3 组侵蚀深度计算结果, 为即将离开侵蚀区域位置的深度较大, 最大值为 8.6 m。

将 3 组侵蚀结果与现场实测结果 (见图 3) 进行对比, 发现第 1 组结果与实测结果较为接近, 体现在侵蚀深度分布较为连续, 而第 2 组和第 3 组的侵蚀深度结果分布则较为分散。同时, 第 1 组结果侵蚀深度最大值也与现场估测值 8 m 比较接近。因此, 第 1 组侵蚀深度模拟效果较好。

然而, 第 1 组模拟中所采用的 McDougall 侵蚀速率模型更适用于反演分析, 因为模型中的参数需结合灾害发生后的一些数据得到, 在预测模拟方面存在一定的局限性。对于 Medina 侵蚀速率模型和 Pitman 侵蚀速率模型, 先采用底面剪切阻力与侵蚀层抗侵蚀剪切应力的差值来判定是否产生侵蚀, 而 McDougall 侵蚀速率模型则不需要判定, 只要材料通过侵蚀区域便产生侵蚀。因此, 从侵蚀力学机制角度分析, Medina 侵蚀速率模型和 Pitman 侵蚀速率模型更为合理, 也更适用于预测模拟。

综上所述, 采用 3 种侵蚀模型都得到了侵蚀深度计算结果。但是, 有些实际高速崩滑碎屑流灾害的侵蚀过程却是较为复杂的, 即有对底面的侵蚀作用, 还伴有材料在侵蚀区域的堆积。现有的侵蚀模型基本上以研究对底面的侵蚀作用为主, 而无法考虑材料通过侵蚀区域所产生的堆积作用。因此, 在后续的研究中, 有必要在侵蚀模型中补充对侵蚀区域堆积作用的计算, 进而使得侵蚀模型更加合理和完善。

5 结 论

(1) 本文针对 Nomash River 碎屑流, 基于 3 种不同侵蚀速率模型, 采用连续理论方法对其进行了数值模拟。得到的致灾范围及运行时间计算结果均与实际情况吻合良好, 从而验证了计算模拟的正确有效性。

(2) 采用 McDougall、Medina 和 Pitman 侵蚀模型的平均深度计算结果分别为 3.7、4.7、4.0 m, 最大深度计算结果分别为 7.2、9.4、8.1 m。其中, 采用 McDougall 侵蚀模型的计算结果与实测情况较为接近。被侵蚀材料的体积计算结果分别为 3.35×10^5 、 6.62×10^5 、 $4.95 \times 10^5 \text{ m}^3$, 同样为采用 McDougall 侵蚀模型的结果与实测情况较为接近。

(3) 由于侵蚀作用的存在, $t=30\text{ s}$ 时刻采用 McDougall 侵蚀模型的结果头部速度较大, 而采用 Medina 和 Pitman 侵蚀模型的尾部速度较大。 $t=60\text{ s}$ 、 $t=90\text{ s}$ 和 $t=120\text{ s}$ 3 个时刻的速度分布形式比较接近, 表现为碎屑流头部的速度较大。从总体上看, 每个时刻采用 Medina 侵蚀模型结果的最大速度值最大, 其次是采用 Pitman 侵蚀模型的结果, 最后是采用 McDougall 侵蚀模型的结果。

(4) 采用 McDougall 侵蚀模型的侵蚀深度结果分布较为连续, 其最大值 8.1 m 与估测值 8 m 比较接近。而采用 Medina 和 Pitman 侵蚀模型的侵蚀深度结果则较为分散, 其最大值分别为 10.9 m 和 8.6 m 。

(5) 虽然上述 3 种侵蚀模型可以较好地模拟出侵蚀深度结果, 但对于更为复杂的侵蚀情况, 则有待于发展更加细化且更为完善的侵蚀模型, 从而为高速崩滑碎屑流沿程侵蚀提供理论依据。

参考文献

- [1] 雷先顺, 朱大勇, 刘诚, 等. 考虑滑道坡度和宽度的滑坡模型试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1281—1288.
LEI Xian-shun, ZHU Da-yong, LIU Cheng, et al. Model test study of the effect of slope angle and chute width on landslide[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(5): 1281—1288.
- [2] 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: 177—215.
- [3] HUTTER K, SAVAGE S B, NOHGUCHI Y. Numerical, analytical, and laboratory experimental studies of granular avalanche flows[J]. *Annals of Glaciology*, 1989, 13: 109—116.
- [4] GREVE R, HUTTER K. Motion of a granular avalanche in a convex and concave curved chute: experiments and theoretical predictions[J]. *Philosophical Transactions, Physical Sciences and Engineering*, 1993, 342(1666): 573—600.
- [5] PUDASAINI S P, HUTTER K. Rapid shear flows of dry granular masses down curved and twisted channels[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2003, 495: 193—208.
- [6] MANGENEY-CASTELNAU A, VILOTTE J P, BRISTEAU M O, et al. Numerical modeling of avalanches based on Saint Venant equations using a kinetic scheme[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108(B11): 2527—2544.
- [7] CHIOU M C, WANG Y, HUTTER K. Influence of obstacles on rapid granular flows[J]. *Acta Mechanica*, 2005, 175(1): 105—122.
- [8] 鲁晓兵, 张旭辉, 崔鹏. 碎屑流沿坡面运动的数值模拟[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊 2): 524—527.
LU Xiao-bing, ZHANG Xu-hui, CUI Peng. Numerical simulation of clastic grain flow along a slope[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(Suppl.2): 524—527.
- [9] IVERSON R M, DENLINGER R P. Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain: 1. coulomb mixture theory[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2001, 106(B1): 537—552.
- [10] DENLINGER R P, IVERSON R M. Granular avalanches across irregular three-dimensional terrain: 1. theory and computation[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2004, 109(F1), DOI. org/10.1029/2003JF000085.
- [11] HUNGR O. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1995, 32(4): 610—623.
- [12] HUNGR O, MCDOUGALL S. Two numerical models for landslide dynamic analysis[J]. *Computers & Geosciences*, 2009, 35(5): 978—992.
- [13] MCDOUGALL S, HUNGR O. A model for the analysis of rapid landslide motion across three-dimensional terrain[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, 41(6): 1084—1097.
- [14] 齐超, 邢爱国, 殷跃平, 等. 东河口高速远程滑坡—碎屑流全程动力特性模拟[J]. 工程地质学报, 2012, 20(3): 334—339.
QI Chao, XING Ai-guo, YIN Yue-ping, et al. Numerical simulation of dynamic behavior of Donghekou rockslide-debris avalanche[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, 20(3): 334—339.
- [15] 高杨, 李滨, 王国章. 鸡尾山高速远程滑坡运动特征及数值模拟分析[J]. 工程地质学报, 2016, 24(3): 425—434.
GAO Yang, LI Bin, WANG Guo-zhang. Motion feature and numerical simulation analysis of Jiweishan landslide with rapid and long run-out[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(3): 425—434.
- [16] 朱圻, 程谦恭, 王玉峰, 等. 高速远程滑坡超前冲击气浪三维动力学分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2909—2926.
ZHU Qi, CHENG Qian-gong, WANG Yu-feng, et al.

- Three-dimensional modelling and dynamic analysis of the airblast generated by rock avalanche[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(10): 2909—2926.
- [17] 袁小一, 许强, 程谦恭, 等. 高速远程滑坡-碎屑流超前冲击气浪分析[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(6): 113—119.
- YUAN Xiao-yi, XU Qiang, CHENG Qian-gong, et al. An analysis of air-blasts induced by rock avalanche[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2016, 43(6): 113—119.
- [18] TAKAHASHI T. Debris flow, international association for hydraulic research monograph[M]. Rotterdam: Balkema, 1991.
- [19] EGASHIRA S, HONDA N, ITOH T. Experimental study on the entrainment of bed material into debris flow[J]. **Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science**, 2001, 26(9): 645—650.
- [20] PITMAN E B, NICHITA C C, PATRA A K, et al. A model of granular flows over an erodible surface[J]. **Discrete and Continuous Dynamical Systems Series B**, 2003, 3(4): 589—600.
- [21] MCDOUGALL S, HUNGR O. Dynamic modelling of entrainment in rapid landslides[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2005, 42(5): 1437—1448.
- [22] MEDINA V, HURLIMANN M, BATEMAN A. Application of FLAT model, a 2D finite volume code, to debris flows in the northeastern part of the Iberian Peninsula[J]. **Landslides**, 2008, 5(1): 127—142.
- [23] CROSTA G B, IMPOSIMATO S, RODDEMAN D. Numerical modelling of entrainment deposition in rock and debris-avalanches[J]. **Engineering Geology**, 2009, 109(1—2): 135—145.
- [24] 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.
- [25] IVERSON R M, OUYANG C. 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.
- [26] 樊赟赟, 王思敬, 王恩志, 等. 泥石流沿程侵蚀动力过程模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 4146—4152.
- FAN Yun-yun, WANG Si-jing, WANG En-zhi, et al. Simulation analysis of dynamic process of entrainment of path material by debris flow[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(Suppl.2): 4146—4152.
- [27] 杜娟, 殷坤龙, 王佳佳. 基于有限体积法的滑坡-碎屑流三维运动过程模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3): 480—488.
- DU Juan, YIN Kun-long, WANG Jia-jia. Simulation of three-dimensional movement of landslide-debris flow based on finite volume method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(3): 480—488.
- [28] OUYANG C J, HE S, TANG C. Numerical analysis of dynamics of debris flow over erodible beds in Wenchuan earthquake-induced area[J]. **Engineering Geology**, 2015, 194: 62—72.
- [29] 刘威, 何思明, 吴清. 高速远程滑坡热-水-力耦合效应与沿程侵蚀研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(5): 54—59.
- LIU Wei, HE Si-ming, WU Qing. Research of high-speed landslide thermo-poro-elastic effect and its impact on the landslide erosion[J]. **Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)**, 2015, 47(5): 54—59.
- [30] HUNGR O, EVANS S G. Entrainment of debris in rock avalanches: an analysis of a long run-out mechanism[J]. **Geological Society of America Bulletin**, 2004, 116(9—10): 1240—1252.