

基底侵蚀作用下泥石流动力过程分析

华曙光

(中国人民武装警察部队黄金第五支队,陕西 西安 710100)

摘要:基底侵蚀是运动物体与浅层地表在沿非滑动接触面剪切的时候而产生的相互作用,该作用可以改变泥石流系统的动力作用机制,从而影响泥石流的危害程度,是泥石流研究中的一项重要议题。本研究提出侵蚀率概念,分析了初始运动物质与夹带物质系统的侵蚀关系;同时建立了相关的数学模型和流变本构的数值实现,构建了数值模拟试验进行参数化评估。详细阐述了基底侵蚀作用对泥石流运动行为和整体流动性的影响。选取的流变模型和参数会产生比较好的模拟结果,侵蚀速率概念以及无量纲形式和动态模型的提出会给具有强烈侵蚀泥石流分析提供一套科学的潜在应用,也为地质灾害防治提供一定的技术参考。

关键词:基底侵蚀;泥石流;动力过程

中图分类号:TD824.7

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2016)04-0219-09

Numerical Study about the Influence of the Basal Erosional and Block Effectson Dynamic Process of Debris Dlow

HUA Shuguang

(No. 5 Gold Geological Party of Chinese Armed Police Force, Xi'an 710100, Shaanxi, China)

Abstract: The mechanism of mass changes and block in debris transportation process is an important topic in the study of fast landslides, debris flows and avalanches. Basal erosion is recognized as a dynamic interaction between the original moving material and the entrained basal topsoil sheared along their non-slip contact surface. The dam is used to control mobility behavior of debris flows, to decrease the runout speed of debris flows, to reduce erosion capability and discharge, and to make the flow direction diverge. In this paper, a new concept of yield rate has been proposed, and the erosional relationship between original moving material and the entrained basal topsoil has been analyzed. A pertinent mathematical model and numerical implementation have been formulated. Parametric numerical experiments have been conducted to compare the erosional effects. The influence of involved erosive material and block effects on the runout behavior and global mobility of moving material has been elucidated. The simulated results are consistent with available experimental and field observations. The excellent match to the field data suggests that it is a plausible potential application to analyze the gravity-driven flow with signifi-

收稿日期:2016-05-29;修回日期:2016-08-08

基金项目:国家自然科学基金项目(41302224)及陕西省科学技术研究发展计划项目(2014KJXX-20)共同资助

作者简介:华曙光(1970-),男,安徽桐城人,博士,高级工程师,从事矿山地质环境保护与恢复治理、地质灾害等方面的研究工作。E-mail:huashuguang88@sina.com

cant erosion. The defined dimensionless form and the proposed yield rate can be estimated conveniently in general geotechnical practices.

Keywords: basal erosion; block dam; debris flow; rheological model; numerical modelling

基底侵蚀是泥石流运动过程中最容易观察到的现象,它可以使得表层物质不断卷入泥石流中,使得运动系统的体积不断增大,同样物质也可以在尾部被分离。在泥石流的运动过程中,物质的改变影响着流动系统动力机制及其危害程度。关于基底侵蚀机理的研究是一项非常有意义却又有争议的课题。CANNON 和 SAVAGE(1988)发展了质量集中模型来研究物质卷入和分离过程。该模型引入了推动物质运动的作用与反作用力,直接作用于泥石流,当流动物质的质量增加或减少,物体动量便会自动的增加或减少。与此类似,VAN Gassen & CRUDEN(1989)揭示了泥石流沉积物质的传递,同时计算了泥石流运动距离。然而,HUNGR(1990a, 1990b)的相关研究表明,不存在这样的力来推动泥石流的运动,从流动物质中被排出的物质速度为零。否则典型泥石流在运动过程中具有的巨大推力需要额外的能量输入,但这是在重力驱动情况下是不存在的。ERLICHSON(1991)也指出,泥石流在运动过程中存在沉积物质与基底具有相互作用而不是物质之间具有相互作用,从而得出,运动物质的守恒方程并不直接适用于泥石流运动系统。泥石流在实际运动过程中基底侵蚀和浅表层物质的卷入是经常发生的,对泥石流、滑坡运动的影响十分关键,是一项重要的科学议题。鉴于以上分析,笔者采用泥石流概括模型,提出了侵蚀率概念,构建三维连续介质动态数值模型及求解方法,运用数值试验对泥石流运动过程、动力行为、基底侵蚀作用进行分析,以期对地质灾害防治提供一定的技术参考。

1 模型建立与参数选取

1.1 模型选取

泥石流在运动过程中属于非牛顿流体,由于速度梯度而引起摩擦,产生剪切力;而流变特性正是反映流体变形所受剪应力与剪切率的关系(CHEN et al., 2006; CROSTA et al., 2004)。通常采用摩擦模型、Voellmy 模型和 Bingham 模型描述流变特性

(CHEN and LI, 2000; 2003; CHEN et al., 2006),笔者选用摩擦模型(Friction model)和 Voellmy model 进行数值模拟试验研究(HUNGR, 1990a, 1990b; HUNGR et al., 1984)。

1.1.1 摩擦模型(Friction model)

在细颗粒较少而粗颗粒较多的条件下,底面剪切阻力主要表现出摩擦的行为,摩擦阻力与地面有效正应力成正比,如式(1)所示:

$$\tau = \sigma_z (1 - \gamma_u) \tan \delta \quad (1)$$

σ_z 为底面有效正应力, τ 为摩擦阻力, 孔隙水压力比率 γ_u 和动力底摩擦角: δ , 作为流变参数引入摩擦模型中, 孔隙水压力比率 γ_u 等于孔隙水压力 u 与底面应力 σ_z 比值。根据太沙基理论, 在底面总应力一定的条件下, 孔隙水压力的存在将会减小有效正应力, 从而减小底面摩擦阻力。孔隙水压力比率与动力摩擦角可以由单一变量体摩擦角 φ_b 统一表达, φ_b 定义为:

$$\varphi_b = \arctan(1 - \gamma_u) \tan \delta \quad (2)$$

摩擦阻力对于泥石流运动而言是一种非常重要的阻力类型, 对于底面剪切阻力主要由摩擦产生的泥石流而言, 底面孔隙水压力的存在常常用来解释其高速和长距离的运动原因。

1.1.2 Voellmy 模型(Voellmy model)

Voellmy 剪切阻力模型主要考虑了摩擦和湍流行为, 已经被广泛应用于颗粒流和岩石崩塌、流动的模式之中, 用下式表示:

$$\tau = \sigma \mu + \frac{\rho g v^2}{\xi} \quad (3)$$

式(3)中 μ 为动力摩擦系数, 与摩擦模型中的摩擦角类似, 此时 $\mu = (1 - \gamma_u) \tan \delta$ 。同样模型中引入孔隙水压力比率 γ_u 用以考虑孔隙水压的影响。在快速和强烈的载荷下, γ_u 可以达到一个很大的数值, 随时间和空间变化; ξ 为湍流(紊流)系数, 代表流体流动过程中湍流的影响, 许多泥石流在传递过程中都具备了湍流的性质。湍流是不稳定的结果, 湍流运动在统计意义上可以归纳为平均数量部分, 如将速度场和压力场分为平均部分和波动部分。当模型中

未考虑湍流项($\xi \rightarrow \infty$)时,Voellmy 模型则简化为摩擦模型(Friction model),湍流阻力在泥石流动力分析中,尽管有一些经验的性质,但已经取得许多较为成功的案例。

1.2 流变模型参数选取

在流变模型确定的基础上,选用流变参数。其中摩擦流变模型只与动力底摩擦角 δ 一个未知参数有关,其值与岩土体的含水量有关;Voellmy 流变模型包括动力摩擦系数 μ 和湍流系数 ξ 2 个未知参数(表 1),属于典型稀性泥石流范畴。

表 1 流变模型参数选取表

Tab. 1 Selection for rheology parameters

流变模型	流变参数
摩擦模型	$\delta=20^{\circ}, \varphi=30^{\circ}$
Voellmy 模型	$\mu=0.1, \xi=1\ 000\ \text{m/s}^2, \varphi=30^{\circ}$

1.3 侵蚀率计算与选取

侵蚀是泥石流动力过程中常见的现象,也是一个非常重要而又极其复杂的课题。由于异质性土壤理化性质和复杂的斜坡地形,总体等效的侵蚀速率只能通过已知事件的反分析进行确定。笔者根据 CHEN and LI, 2000, 2003; CHEN et al., 2006 所提出的侵蚀速率这一概念,进行数值模拟研究。

侵蚀速率 E 定义为法向沟床下降/流失速率与平均切向滑动速率之间的比率。根据诸多的研究成果(CHEN and LI, 2000, 2003; CHEN et al., 2006)表明, E 的数量级通常为 10^{-3} 。尽管沉积体积可以达到初始体积的多倍,由于侵蚀物质是从全部泥石流冲痕面积中收集而来,沟床地形的变化很小。

由于异质性土壤理化性质和复杂的斜坡地形,总体/等效的侵蚀速率只能通过已知事件的后预报分析确定。然而,对于地质工程实践中初步估计来说,可以使用如下的简化准则:

$$E \cong \alpha \frac{V_{\text{eroded}}}{A_{\text{effect}} d_{\text{center}}} \tag{4}$$

式(4)中, V_{eroded} 是总侵蚀体积, A_{effect} 代表总体受影响的侵蚀面积, d_{center} 代表物质中心的移动距离,所有变量均可以通过野外调查大致确定。考虑到系统非线性,修正系数 α 选取需要考虑流变模型和底部地形的影响。

对于地质工程实践初步评估来说,可以使用式

(4)计算。为了使侵蚀率估算更为容易,笔者通过数值模拟试验计算 A_{effect} 和 d_{center} , 获得相关系数,同时不断修正来真实反映地形和流变模型的可靠性。根据前人的研究成果(CHEN and LI, 2000, 2003; CHEN et al., 2006),对于摩擦模型,不论限制坡还是无限制坡均采用 $\alpha=2.0$;对于 Voellmy 模型,此时非线性更强,对于无限制坡面,采用 $\alpha=2.2$,对于限制坡面采用 $\alpha=2.5$ 。

1.4 模型几何结构

为了评估泥石流侵蚀行为,不同坡型的泥石流动力特征,本试验构建了不同的基础地形(A 系列:无限制形坡,B 系列:渠道坡,该坡可以在侧向限制物质运动),采用 2 种流变模型 Friction 模型、Voellmy 模型,3 种侵蚀率($E=0, 0.003, 0.007$),进行数值模拟计算。模型几何结构设计成一倾斜的 35° 坡面,一个水平面,之间采用 5° 线性过渡区连接, $x-y$ 平面内的直角坐标系位于与初始物质质量中心投影一致的水平区域。 x 轴方向与斜坡倾向一致(图 1)。所有模拟试验均是在斜坡上部同一位置,以相同数量的物源开始。

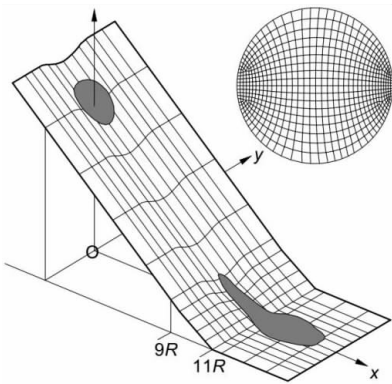


图 1 数值模拟试验结构示意图

Fig. 1 Set-up of the numerical experiments

整个斜坡在 y 轴方向宽度为 8 m ($y: -4 \sim +4$),在 x 轴方向坡面长 11 m ($x: -2 \sim +9$ m),过渡区长 2 m ($x: +9 \sim +11$ m),水平区域长 9 m ($x: +11 \sim +20$ m)。限制坡下凹部分宽 4 m ($y: -2 \sim +2$),最深处位于 $x=0$ 处,深度 h 均为 0.25 m。物源区几何体为一球缺,在 $x-y$ 平面投影的为圆,其投影半径 $R=2$ m,球缺高 $H=0.25$ m。因此,物源区体积为 V_0 为 $0.4\ \text{m}^3$ 。材料在坡面上突然释放,经过过渡区域运动到水平面上。

2 结果与讨论

2.1 摩擦模型模拟结果

泥石流整个运动过程在 $x-y$ 平面内的运动轮廓投影和运动物质深度情况如图 2、图 3 所示。图中虚线代表运动物质不同时刻轮廓线,时间间隔 0.5 s,等值线云图代表运动物质堆积区深度分布情况。

图 2(a)展示了摩擦模型下(Friction model)无

限制坡面在不同的侵蚀速率情况下,运动物质轮廓边界在 $x-y$ 平面的投影情况。可以看出,球缺运动物质一旦释放,它会延斜坡迅速加速下滑,在运动过程中,由于没有边界限制,物质会向两侧扩散,轮廓从圆形变为前端较钝尾部较尖泪珠形状。当物质前缘越过过渡区进入水平区域时,前端迅速减速,而尾部依然向前推进,当物质最终静止时,物质轮廓呈现马蹄形。非侵蚀结果见图 2(a)。计算结果非常典型,同 KOCH et al. (1994)采用内摩擦角 39° ,底摩擦角 29° 的石英颗粒的试验结果相似。

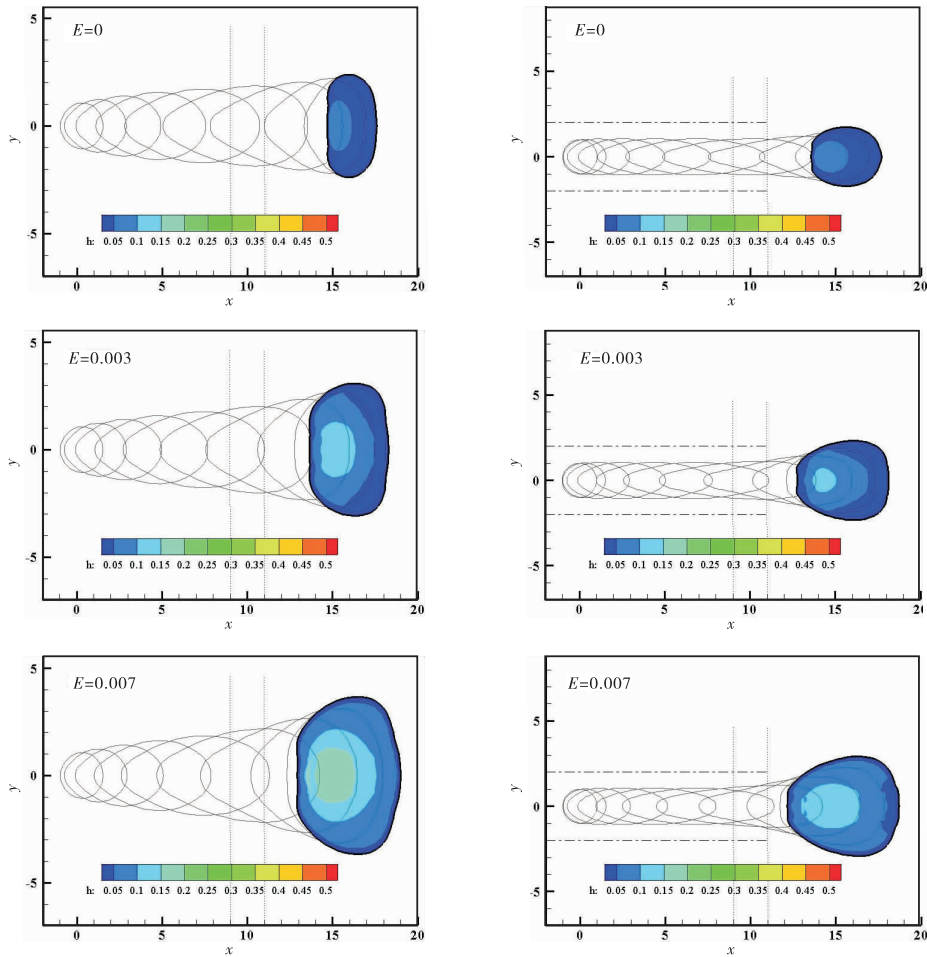


图 2 摩擦模型的泥石流运动轮廓模拟结果图

Fig. 2 Projection of debris profiles on horizontal plane of friction model

相同数量的物质在有限制的渠道中加速下滑,其运动情况见图 2(b)。物质初始形状是圆形,物质轮廓沿着渠道拉长,逐渐形成蝌蚪状,横向扩展在整个运动过程中很小。尽管侵蚀速率不同,沿着倾斜渠道的运动模式没有明显的改变。当进入水平区域,尽管没有边界限制,纵向延伸依然明显,并且侵蚀速率越大,横向扩展越大。值得指出的是,非侵蚀结果图 2(b)表明,

其沉积物轮廓呈子弹状。其结果与 GRAY et al. (1999) 采用内摩擦角 40° ,底摩擦角 30° 石英碎片(平均粒径 2~4 mm)的渠道颗粒流试验结果极其相似。

从图 2 堆积区厚度等值线图中可以看出,在各种工况下,堆积区深度分布基本均呈现出中后部较厚而前端较薄,且侵蚀作用非常影响堆积区轮廓,即侵蚀作用越强,尾部堆积区范围越大。在运动过程

中,如果大量的物质被侵蚀,无限制坡(系列 A)较限制坡(系列 B)而言,堆积区前端更钝;显然底部地形同样影响着堆积区轮廓。对于相同系列的运动情况,其侵蚀速率越大,运动距离越大。

从图 2 还可以看出,在运动初始阶段,运动物质尾部相对较厚、前端较薄。随着物体沿坡下降,尽管有额外的物质不断卷入,其平均深度仍然逐渐降低。当物质在堆积区不断沉积,随着累计体积不断增加,物质深度逐渐增加,物质最终形成了一个主体相对较厚,前端相对较薄的形态。

在运动过程中,其动力参数的变化过程见图 4。

可以看出,对于限制坡和无限制坡流动,平均速度、最大速度的变化几乎不受侵蚀速率的影响。也就是说采用摩擦模型时,即使有大量的物质被卷入,也并未明显改变整体下滑的运动性。同样可以看出,无限制坡流动的整体运动性只是轻微高于限制坡流动时的情况。体积随时间的变化展示了物质积累过程,在相同的地形条件下,在更大的侵蚀速率下,坡面流会卷走更多的物质,同样也具有更大的动能。在相同的侵蚀速率下,无限制坡坡面流与限制坡坡面流相比,会卷走更多的物质,这点表明底部地形条件在侵蚀过程中起到关键性作用(图 3)。

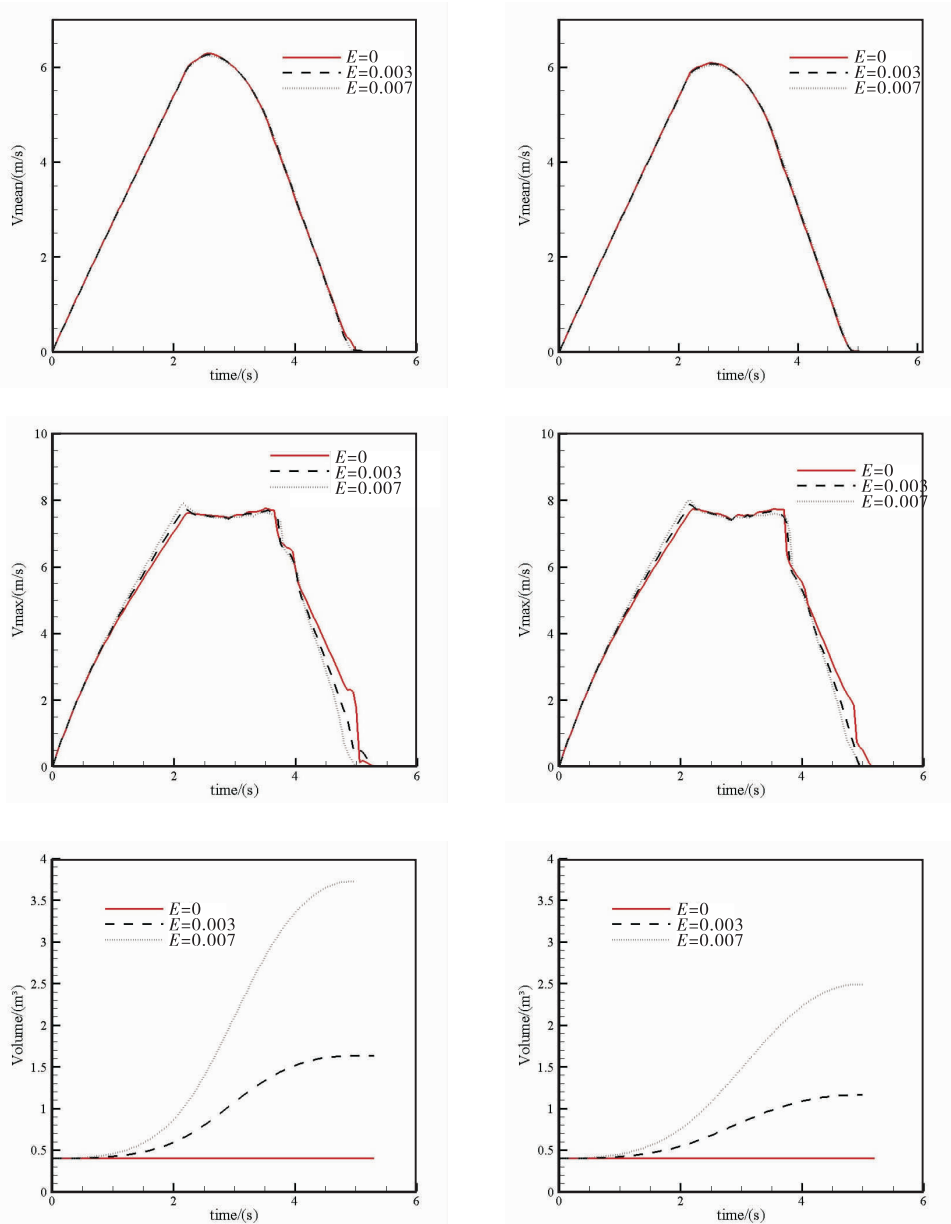


图 3 摩擦模型的泥石流流动力参数模拟结果图

Fig. 3 Time records of some kinematic parameters of friction model

2.2 Voellmy 模型模拟结果

图 4(a)展示了 Voellmy 模型下,无限制坡坡面流边缘随时间的变化情况。受 Voellmy 流变特性中湍流的影响,物体边缘从最初的圆形变化成为泪珠状。侧面扩展十分显著,且更大的侵蚀速率会导

致更平的后部。对于有限制的渠道流而言,纵向延伸依然是主要的,由于侧向限制,横向扩展相对较小,结果如图 4(b)所示。由于受地形的部分限制,沉积区前端停留在水平区域内,呈凸型,而后端依然滞留于过渡区内,呈窄凹形。

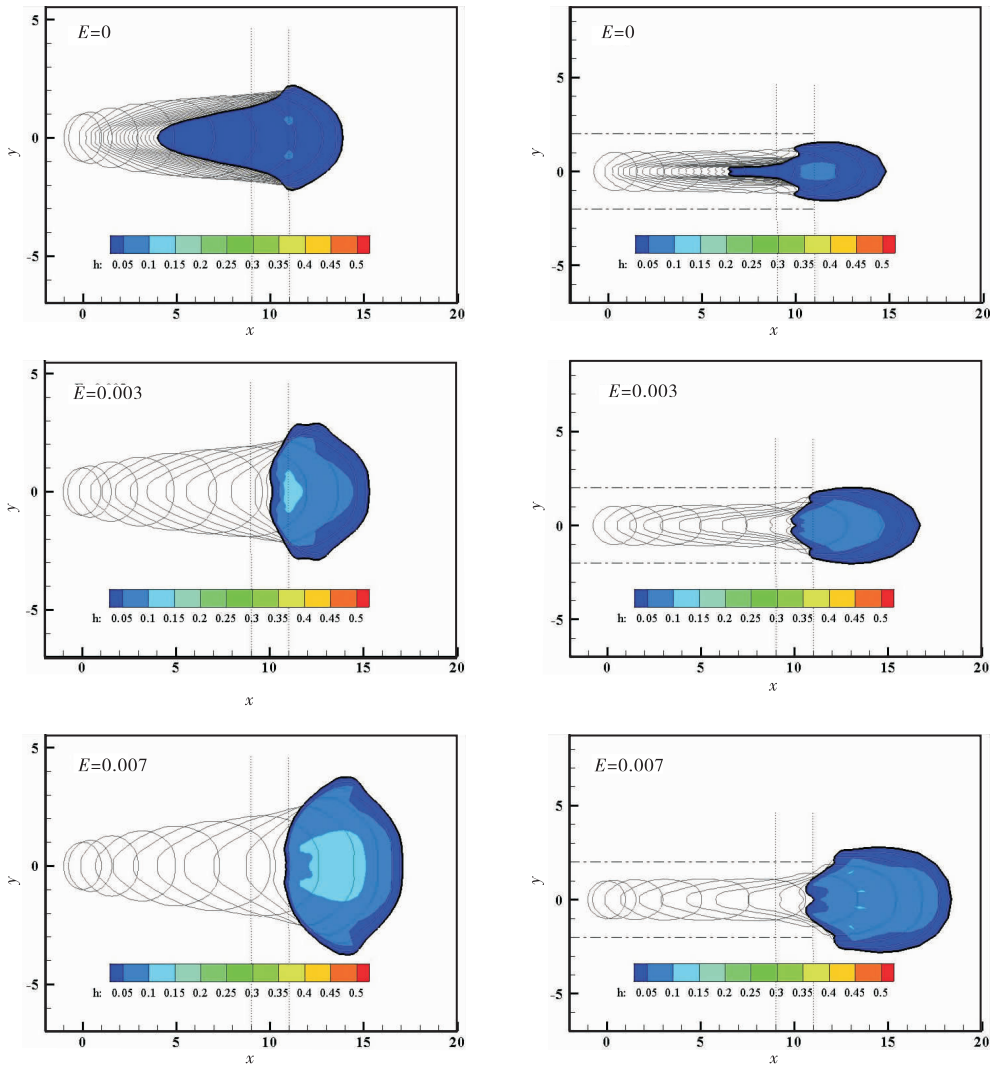


图 4 Voellmy 模型的泥石流动力参数模拟结果图

Fig. 4 Projection of debris profiles on horizontal plane of Voellmy model

沉积物剖面 and 厚度分布情况也可在图 4 中体现出来。可以看出,无限制坡坡面流动其堆积区前端呈钝形,限制坡渠道流其堆积区前端呈舌形。泥石流的传播距离和堆积区的宽度与侵蚀速率的大小有关。对于相同的侵蚀速率,限制坡渠道流的传播距离比无限制流坡面流更远。还可以看出,尽管堆积物前端和尾部较薄,最大堆积物厚度大部分位于堆积区中段,或者轻微朝向前端;堆积区物质的中心基

本在最大深处位置附近。移动物体轮廓从最初启动时的尾部较厚、前端较薄变化为堆积区内主体较厚、近尾端较薄的形状。侵蚀速率越大,其沉积层厚度越大。

比较图 5(a)和图 5(b)可以看出,侵蚀作用和冲出的几何形态强烈影响平均速度的变化情况。总的来说,由于侵蚀作用而导致的系统惯性增加,泥石流整体运动的越快,停止的也就越快。在相同侵蚀速

率下,限制坡渠道流平均速度与无限制坡坡面流相比,有一个更高的峰值,但下降速度也更快。体积随时间的变化情况如图 5 所示,可以看出,对于相同的侵蚀速率,无限制坡坡面流与渠道流相比,在运动过程中可以卷走更多的沟床物质。前端速度(最大速

度)的变化过程如图 5 所示,在各个侵蚀速率和地形条件下,它的变化趋势基本一致。在相同的地形条件下,较大的前端速度往往与较高的侵蚀速率相对应;在相同的侵蚀速率情况下,运动相同的距离,无限制坡坡面流相比渠道流而言,前端速度更慢。

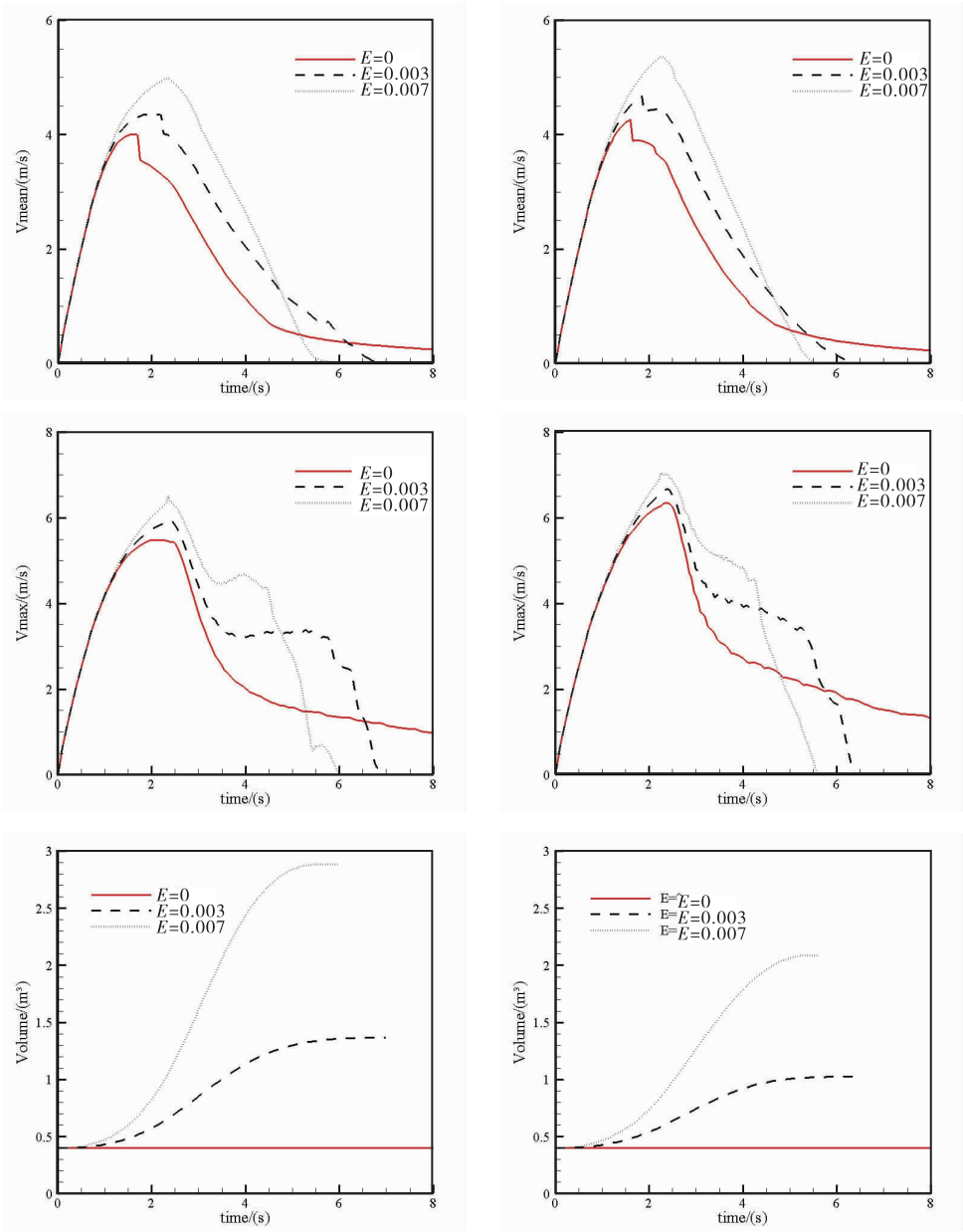


图 5 Voellmy 模型的泥石流动力参数模拟结果图

Fig. 5 Time records of some kinematic parameters of Voellmy model

2.3 侵蚀作用对泥石流动力过程的影响分析

摩擦模型(Friction model)和 Voellmy 模型都广泛应用于描述颗粒流、崩塌以及高速远程滑坡的

运动特性。值得注意的是,采用摩擦模型(图 2、图 3),底部侵蚀作用的存在只少量影响了 2 种坡型平均流速的变化模式。6 种情况下的物质中心基本都

在同一位置,这表明在摩擦流变模型下,尽管有大量的侵蚀物质卷入到运动系统中,但运动物质的纵向变形与整体下滑的运动性并未发生本质的变化。这项观察与 HUNGR & EVANS(1997)所做的分析实例完全一致,他猜测是由于离心力抵消了与夹带物质有关的最初潜在能量。而笔者的推断与此不同,认为造成这种现象的原因与主要下降方向的凹形地形有关。笔者通过监测在整个运动过程中的所有作用力的变化,表明作用于斜坡的剪切力 T 和在运动方向的重力 G 的数量级大约是净体积力的 2 倍,并且物质的改变对运动系统的影响是直接通过净体积力 P 实现的。沿下坡方向的变形比横向扩展更加明显,因此,当净体积力 P 项在技术上忽略的时候,沿斜坡方向的整体运动性不受夹带作用的明显影响。在水平区域内,重力 G 对系统运动没有贡献,此时通过净体积力 P 调整来调整物质的局部深度,使其很慢地达到土压力平衡状态。此时尽管 P 和 T 基本是同一数量级,但在堆积阶段没有发生明显的夹带作用。然而,值得注意的是,以上观测结果并不适用于 VOELLMY 流变模型,这是由于在 VOELLMY 流变模型中,随着夹带物质的增加使堆积物深度逐渐增加,能够明显减小剪切力 T 。因此,整体运动性会逐渐增加,并且推动物质中心移动更远。

在数值模拟试验中,在同一流变模型和同一侵蚀速率情况下,渠道流相比无限制坡面流前端可以传播更远(图 2、图 4),且同时具有更高的平均速度和前端速度以及更大的总动能;这点与渠道的影响可以加强运动距离这一现象相一致,并且非限制坡与渠道坡相比可以会卷走更多的物质,这是因为限制坡强烈影响了运动物质的整体位移和堆积区厚度分布,并且和上部分的分析结果一致。在实际应用中,对于泥石流和高速远程滑坡的灾害减缓措施而言,如堤坝和线形渠道一些技术都会部署用以限制和转移物体流动,使得物体以可控制的方式运动。而且,通过图 3 和图 5 展示的体积积累过程,表明由于横向扩展作用,无限制坡面流与渠道流相比,可以侵蚀掉更多的沟道与坡面物质。野外观测到无限制坡面流动典型地呈现出宽范围的夹带和沉积体积,相反限制流会产生比较平稳的夹带物体体积和较小的堆积体积(FANNIN & WISE, 2001),这点与计算结果相一致。计算结果也表明下垫面地形条件

是一项影响泥石流、滑坡运动和沉积过程的重要因子。

3 结论

(1)侵蚀是泥石流动力过程中常见的现象,是运动物体与浅层地表在沿接触面的剪切时候而产生的相互作用,这种动态行为影响着进入运动系统的体积。泥石流的危害规模更多的是受延程进入物质的体积所决定,而不是其初始物质的体积决定。通过对泥石流过去事件的调查,发现沟道侵蚀开始通常都是有一个相对小的表面侵蚀面积,但在长距离的运动过程中,都会出现较深的切沟;相反,开放的无限制坡面大体上都伴随大面积的浅层表面侵蚀出现。因此,在研究泥石流动力过程时,要考虑都基底侵蚀作用。

(2)下垫面地形条件以及侵蚀率是影响泥石流运动和沉积过程的重要因子,渠道流相比无限制坡面流,前端可以传播更远;由于横向扩展作用,无限制坡面流与渠道流相比,可以侵蚀掉更多的沟道与坡面物质。侵蚀速率概念和动态模型的提出会给有强烈侵蚀泥石流的分析提供一套科学的潜在应用,也为地质灾害防治提供一定的技术参考。

参考文献(References):

- CANNON, S. H. & Savage, W. Z. A mass change model for the estimation of debris flow runout[J]. J. Geol. 1988, 96, 221-227.
- CHEN H, LEE, CF. Numerical simulation of debris flows [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37: 146-160.
- CHEN H, LEE CF. A dynamic model for rainfall-induced landslides on natural slopes[J]. Geomorphology, 2003, 51: 269-288.
- CHEN H, DADSON S, CHI YG. Recent rainfall-induced landslides and debris flow in northern Taiwan[J]. Geomorphology, 2006, 77: 112-125.
- CROSTA GB, CHEN H, LEE CF. Replay of the 1987 Val Pola Landslide, Italian Alps[J]. Geomorphology, 2004, 60, Nos 1-2: 127-146.
- ERLICHSON, H. A mass-change model for the estimation of debris-flow runout, a second discussion: Conditions for the application of the rocket equation[J]. J. Ge-

ol. 1991, 99:633-634.

FANNIN, R. J. & WISE, M. P. An empirical-statistical model for debris flow travel distance. *Can. Geotech[J]*. 2001, 38(5):982-994.

GRAY, J. M. N. T., WIELAND, M. & Hutter, K. Gravity-driven free surface flow of granular avalanches over complex basalt topography. *Proc. R. Soc. London, Ser.* 1999, A455:1841-1874.

HUNGR, O. & EVANS, S. G. A dynamic model for landslides with changing mass. *Proceedings of the IAEG international symposium on engineering geology and the environment* (eds P. G. Marinos, G. C. Koukis, G. C. Tsiambaos and G. C. Stournaras), 1997, 1: 719-724. Rotterdam: Balkema.

HUNGR, O. A mass-change model for the estimation of debris-flow runout: a discussion. *J. Geol.* 1990a, 98:791.

HUNGR, O. Momentum transfer and friction in the debris of rock avalanche: discussion. *Can. Geotech. J.* 1990b, 27:697.

HUNGR O, MORGAN GC, KELLERHALS R. Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures[J]. *Can Geotech J*, 1984, 21:663-677.

KOCH, T., GREVE, R. & HUTTER, K. Unconfined flow of granular avalanches along a partly curved surface. II. Experiments and numerical computations. *Proc. R. Soc. London, Ser.* 1994, A445, 415-435.

VAN GASSEN, W. & CRUDEN, D. M. Momentum transfer and friction in the debris of rock avalanche. *Can. Geotech. J.* 1989, 26:623-628.

宁夏贺兰山磷矿开发史话

1972 年,宁夏化工局依据地质部门对贺兰山磷矿勘探成果兴建了首座年产 3 万 t 矿石的半机械化磷矿山,磷矿得以初步开发,始建宁夏磷肥厂。1973 年,自治区钙镁磷肥试验小组采用高炉法试制钙镁磷肥,取得了较满意的结果。试验材料为:苏峪口磷矿石(含磷量 18%~19%左右)130 kg,白云岩 75 kg 作熔剂;焦炭 105 kg 作燃料。五氧化二磷:氧化钙:二氧化硅:氧化镁分子比=1:6.2:4.5:2.2,经 1 400℃高温熔融—水淬—自然干燥—磨细(80 目占 80%)—包装。产品经用比色法分析,全磷达 12.83%,有效磷达 12.53%,达到了部颁四级标准。1977 年,宁夏煤炭工业地质队受燃化局的委托,在原勘探区之南的扩建区进行了新的勘探工作,又探明五氧化二磷含量为 16.3%、18.39%的磷矿石 768 万 t。1990 年,贺兰山磷矿已扩建到年产矿石 10 万 t 的规模,主要是为了发展地方磷肥工业的需要,建成采选配套体系,磷矿浮选厂年产含五氧化二磷 28%~30%的精矿 4.5 万 t,为自治区 10 多家磷肥企业提供约 1/3 的合格原料。

在国家技术监督局 1993 年磷肥质量统检中,宁夏磷肥厂生产的普通过磷酸钙质量指标全部符合国家标准,被评为全国磷肥行业“产品质量合格推荐企业”。1999 年,自治区引进山东鲁西化工集团投资改造宁夏磷肥厂,成立宁夏化肥有限责任公司,生产出了高质量的磷酸二胺,2002 年形成年产 7 万 t 磷酸二胺的生产能力。

(西安地质调查中心 杨合群;宁夏地质调查院 艾宁,毛自力,武丹)