

# 非均质泥石流固液两相运动特征探讨

舒安平<sup>①②</sup>, 王乐<sup>①</sup>, 杨凯<sup>①</sup>, 费祥俊<sup>②</sup>

① 北京师范大学环境学院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875;

② 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084

E-mail: shuap@bnu.edu.cn, shuanp@126.com

2010-07-15 收稿, 2010-09-06 接受

国家自然科学基金资助项目(10972042)

**摘要** 非均质泥石流是一种固体颗粒级配宽、容重变化大、流速分布不均匀的典型的固液两相流, 广泛分布于我国的西部山区, 表现出独特的固液两相运动特征. 基于非均质泥石流固液两相分界粒径的概念, 以 Darcy 公式和质量守恒定律为理论基础, 分别推求非均质泥石流固液两相平均流速表达式. 在此基础上, 根据云南省小江流域蒋家沟泥石流模拟实验数据及实测资料, 揭示了非均质泥石流固液两相运动特征. 蒋家沟泥石流实验与实测资料计算分析结果表明, 蒋家沟泥石流以临界容重  $2.234 \text{ t/m}^3$  为界限, 当泥石流容重低于、等于和高于该临界值时, 分别出现液相流速大于、等于和小于固相流速的 3 种情况, 由此可以分别揭示稀性泥石流、均质泥石流和稠性泥石流 3 种不同类型泥石流的运动特征. 研究结果为构建非均质泥石流动力学奠定了基础, 并对泥石流防治工程规划和预测预报泥石流灾害具有重要的现实意义.

## 关键词

非均质泥石流  
分界粒径  
固液两相流速  
运动特征

一般来说, 广义意义上的泥石流可按其固体物质颗粒组成及容重划分为泥流、泥石流和水石流 3 种类型<sup>[1]</sup>. 其中, 泥流的固体物质组成以细颗粒为主, 水石流的固体物质则以粗颗粒为主, 而泥石流(又称狭义泥石流)既含有大量的细小颗粒, 又具有相当比例的大粗颗粒, 这种颗粒粗细不等、容重大、流速分布不均的泥石流, 广泛分布于我国的西部山区, 呈现出典型的非均质泥石流运动特征. 由于颗粒粒径分布广, 粗细颗粒相差悬殊, 使得粗颗粒间孔隙被细小颗粒填充, 导致非均质泥石流具有很高的容重, 我国实际观测泥石流的最大容重达到  $2.373 \text{ t/m}^3$ <sup>[1]</sup>. 正因其容重高, 运动速度可高达  $13\sim 20 \text{ m/s}$ , 往往伴随巨大能量并携带大量的粗颗粒及巨大的石块, 具有极强的破坏性. 2010年8月8日发生在甘肃省舟曲县的特大泥石流灾害即为一个典型例证, 泥石流伴随巨大能量及冲击力将舟曲县城由北向南  $5 \text{ km}$  长、 $500 \text{ m}$  宽区域夷为平地, 造成约 2000 人死亡或失踪的重大

人员伤亡及财产损失灾害.

迄今为止, 国内外一些学者围绕泥石流问题开展了许多有益的探索性研究工作, 建立了一些有意义的泥石流运动模型<sup>[2-6]</sup>. 国外常用的泥石流模型有 TAKAHASHI 模型和 TITAN2D 模型<sup>[3-5]</sup>, 两者分别适用于粗颗粒泥石流(水石流)和细颗粒泥石流(即泥流). 而在我国, 比较有影响的模型有王光谦等提出的固液两相流模型<sup>[7-10]</sup>和倪晋仁等人<sup>[11,12]</sup>提出的泥石流“结构两相流模型”. 熊刚<sup>[13]</sup>基于固液两相双流体理论, 建立了泥石流固液两相运动方程, 并在二维恒定均匀的条件下对方程进行简化, 最终得出了泥石流混合流动的平均流速计算公式, 但并未考虑非均质泥石流固液两相流非等速问题, 而且粗细颗粒分界粒径  $d_0$  采用屈服应力  $\tau_B$  或容重的方法加以确定, 由此存在随着容重的增大  $d_0$  一直增大, 甚至于达到泥石流最粗粒径等不合理的缺陷. 陈洪凯等人建立了固液两相流速比例系数, 求解控制方程得到了固

**英文引用格式:** Shu A P, Wang L, Yang K, et al. Investigation on movement characteristics for non-homogeneous and solid-liquid two-phase debris flow (in Chinese). Chinese Sci Bull (Chinese Ver), 2010, 55: 3006—3012. doi: 10.1360/972010-741

液相流速, 尽管在实际应用中只得到了液相流速大于固相流速的结果<sup>[4]</sup>, 其前提是将粒径小于 2 cm 的固相颗粒视为等效浆体, 其余视为固相物质, 但并未对固液两相的流速变化及相互关系进行全面研究.

真正意义下的泥石流固液两相流运动模型应该建立在科学合理地确定分界粒径的基础之上. 舒安平等于基于最小能耗原理<sup>[15]</sup>, 提出了非均质泥石流固液两相分界粒径的确定方法与计算模型, 从而为揭示非均质泥石流运动特征开辟了新途径. 本文以非均质泥石流为研究对象, 以非均质泥石流固液两相分界粒径为出发点, 结合泥石流模拟实验成果, 探讨在非均质泥石流固液两相流非等速情况下的泥石流运动特征, 不仅有利于解决我国的泥石流防治工程规划设计及监测预警等实践问题, 而且可望推动泥石流学科向前发展.

## 1 理论推导

### 1.1 固液两相分界粒径的确定

非均质泥石流在流动过程中的能坡损失总值等于液相能坡损失和固相能坡损失之和. 根据最小能耗原理, 非均质泥石流中的悬移部分颗粒和层移部分颗粒在一定条件下可相互转换调整, 其调整趋向于悬移运动与层移运动总能耗达到最小, 以能坡形式可表达为<sup>[15]</sup>

$$J = J_1 + J_s = \frac{1}{gR} \left[ 27.8\omega_0 S_{vf}^{2/3} \left( \frac{4R}{d_0} \right)^{1/9} \right]^2 \frac{\gamma_f}{\gamma_m} + XS_{vc} \left( \frac{\gamma_s - \gamma_f}{\gamma_m} \right) \tan \alpha \rightarrow J_{\min}, \quad (1)$$

式中  $J$  为能坡损失总值,  $J_1$  和  $J_s$  分别为液相和固相能坡损失,  $R$  为水力半径;  $\gamma_f$  和  $\gamma_m$  分别为液相浆体及泥石流的容重;  $d_0$  为泥石流固液两相的分界粒径;  $\omega_0$  为  $d_0$  对应的颗粒沉降速度;  $S_{vf}$  为液相浆体体积浓度,  $S_{vc}$  为固相体积浓度;  $\tan \alpha$  为粗颗粒运动颗粒间的宏观摩擦系数.

由(1)式可知, 液相浆体的能坡损失  $J_1$  和固相颗粒运动的能坡损失  $J_s$  均与分界粒径  $d_0$  直接相关, 并且固相粗颗粒和液相细颗粒之间通过调整可以使泥石流在运动过程中能量耗损保持最小值  $J_{\min}$ , 其对应的颗粒粒径即为非均质泥石流的固液两相分界粒径  $d_0$ .

### 1.2 固液两相运动流速

对于非均质泥石流, 在确定了分界粒径  $d_0$  的前提下, 可将颗粒粒径  $d > d_0$  的粗颗粒物质视为是固相, 将  $d < d_0$  的固体细颗粒物质和水组成液相. 在此基础上, 研究确定非均质泥石流中的固液两相的运动流速.

(i) 液相流速. 根据 Darcy 阻力定律, 流体的平均流速可表示为

$$U = \sqrt{\frac{8gRJ}{f_m}} = \sqrt{\frac{8}{f_m}} \cdot u_*, \quad (2)$$

式中  $u_*$  为磨阻流速, 即  $u_* = \sqrt{gRJ}$ ,  $f_m$  为液相的流动阻力系数, 不仅与实验边界糙度有关, 而且还与一定浓度浆体的黏度有关, 在较大的水流雷诺数范围内可表达为

$$f = 0.11\alpha \left( \frac{d_0}{4R} + \frac{68}{R_{em}} \right)^{0.25}, \quad (3)$$

式中  $\alpha$  为减阻系数,  $R_{em}$  为泥石流固液混合相的雷诺数.

根据我们的水槽实验结果<sup>[16,17]</sup>, 当悬移质输沙达到冲游平衡时,  $\omega u_*$  与  $S_v(4R/d_0)^{1/6}$  之间的关系最为密切, 两者的关系可表示为

$$\frac{\omega}{u_*} = 0.036 \left[ S_v \left( \frac{4R}{d_{f\max}} \right)^{1/6} \right]^{2/3}, \quad (4)$$

式中  $d_{f\max}$  表示液相浆体的最大颗粒粒径, 与固液两相的分界粒径  $d_0$  接近, 即  $d_{f\max} \approx d_0$ , 将(4)式代入(2)式, 经过处理可得液相流速为

$$U_1 = 27.8 \sqrt{\frac{8}{f_m}} \omega_0 \cdot S_{vf}^{2/3} \left( \frac{4R}{d_0} \right)^{1/9}. \quad (5)$$

由(5)式可知, 在一定的水力半径条件下, 泥石流液相的运动速度与分界粒径  $d_0$  直接相关.

(ii) 固相流速. 基于最小能耗原理确定了非均质泥石流的分界粒径  $d_0$  后, 可以近似地应用固液两相之间的物质平衡关系(图 1)确定固相颗粒的平均流速  $U_s$ .

对于二维流动, 单宽流量  $q$  等于流速  $U_1$  乘以流深  $h$ , 在考虑固相颗粒浓度  $S_{vc}$  后, 有

$$q(1 - S_{vc}) = U_1[h - h'(1 - S_{vc})]. \quad (6)$$

由于

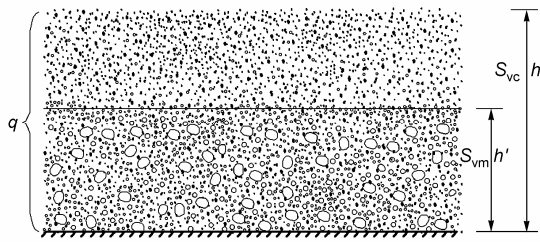


图1 非均质泥石流颗粒运动简图

$$qS_{vc} = h'U_s, hS_{vc} = S_{vm}h', \quad (7)$$

式中  $S_{vm}$  为泥石流极限浓度, 消去  $h, h'$  可得固相颗粒平均流速为

$$U_s = U_1 \left( \frac{S_{vm}}{1 - S_{vc}} - S_{vc} \right) \quad (8)$$

以上基于非均质泥石流固液两相分界粒径的概念, 以 Darcy 公式和质量守恒定律为理论基础, 分别推求非均质泥石流液固两相流速表达式((5)和(8)式), 由此可分别计算非均质泥石流液相及固相的平均流速.

## 2 泥石流运动模拟实验

### 2.1 实验沟道的选取

泥石流现场模拟实验的成功, 关键取决于以下 3 个重要条件: (1) 沟道内能有常流水, 以满足泥石流形成的水源条件; (2) 沟道要具有完整的形成、流通和堆积三大功能区, 而且坡降自上而下逐渐减小; (3) 沟道上游具有足够的松散物质来补给. 据此, 选择东川蒋家沟流域门前沟右侧约 1 km 处的长度 600 m 的天然泥石流沟道为泥石流模拟实验沟道. 该沟道纵剖面图及松散固体物质颗粒级配曲线分别如图 2 和 3

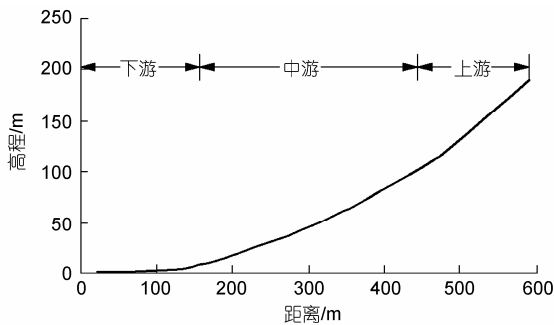


图2 实验沟道纵剖面图

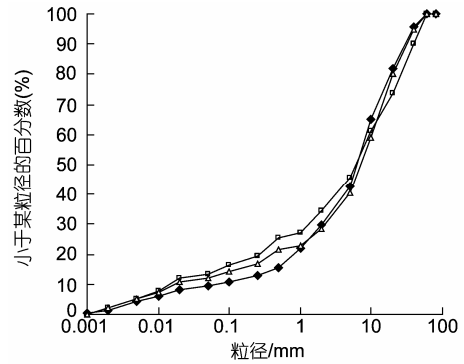


图3 实验泥石流沟道颗粒级配曲线

所示, 固体物料级配的中值粒径  $d_{50}$  分布在 6.6~7.5 mm 之间, 黏性及细颗粒含量在 28%~35% 之间, 并且含有几十毫米的较大砾石, 颗粒组成丰富, 级配较宽, 符合形成非均质泥石流的物质条件.

### 2.2 实验方法及内容

为验证分析非均质泥石流运动过程中固液两相流速的关系, 模拟实验中需要测定泥石流的运动要素特征值. 为此, 首先将实验沟道划分为形成区(含蓄水池、铺设固体物质颗粒的前槽)、流通区(布置有固定观测断面)及堆积区三个功能分区(图 4). 在实验过程中, 当泥石流形成后运动到流通区时, 采用数码相机对泥石流运动要素进行定点数码相机观测, 并在观测断面采取泥石流试样, 在东川站实验室内进行泥石流的颗分和流变实验, 获取泥石流容重、颗粒级配、流变参数等物理特征值, 实时测量泥深、过流断面形态, 并采用浮标法测定泥石流表面流速, 建立泥石流运动要素特征值数据库, 为分析研究非均质泥石流运动特征提供可靠的数据支持.

在 2008 年 8~9 月期间, 我们经过多次预备实验的调试后, 最终成功地完成了 25 组泥石流运动模拟实验, 模拟实验泥石流容重保持在 1.86~2.26  $t/m^3$  ( $S_v = 0.52\sim 0.77$ ) 之间, 水力半径在 0.12~0.33 m 之间, 各组颗粒级配曲线见图 5.

由图 5 可以看出, 蒋家沟模拟实验中泥石流颗粒既有 0.001 mm 的黏粒也有 80 mm 的卵石, 其中颗粒粒径分布在 7.5~24 mm 之间, 分选系数  $S_d$  在 8.5~23 之间, 且具有较好的分选性, 偏度系数  $S_k$  在 0.12~0.65 之间, 说明粗细颗粒含量分布较为对称. 黏粒( $d < 0.001$  mm)含量约在 0.25%~0.77% 之间,  $d < 2$  mm

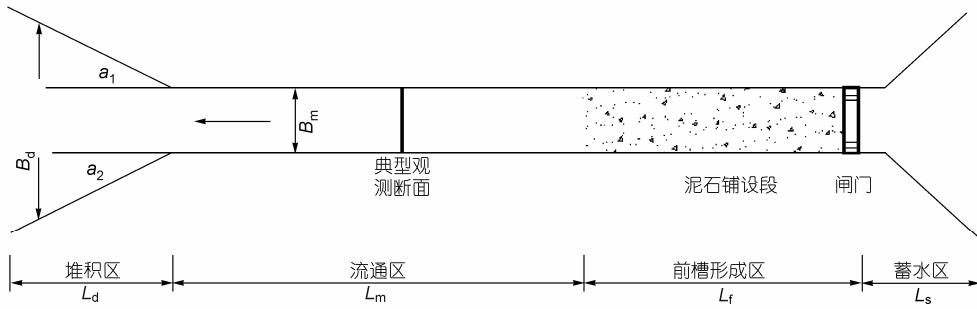


图4 泥石流沟功能分区示意图

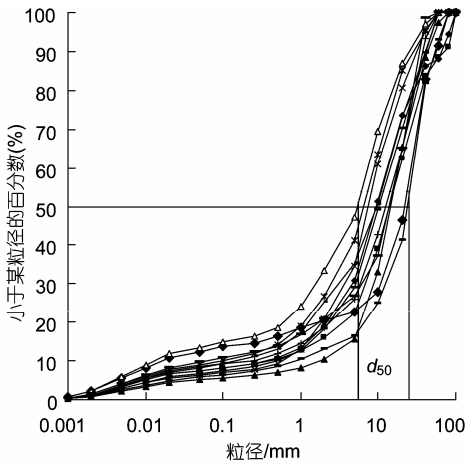


图5 实测泥石流固体颗粒级配曲线

的细颗粒含量在 10%~35%之间, 表明颗粒级配宽, 并且容重多在 2.0 t/m<sup>3</sup> 以上, 表明蒋家沟泥石流具有明显的非均质泥石流特性。

### 3 非均质泥石流固液两相运动特征

#### 3.1 固液两相颗粒的分界粒径

首先对(1)式进行 FORTRAN 编程数值化, 可计

算出前述 25 组泥石流模拟实验数据的分界粒径  $d_0$ . 计算结果表明, 25 组泥石流的分界粒径  $d_0$  处在 4.0~7.0 mm 之间, 与前人对蒋家沟实测数据的分析结果基本一致<sup>[18,19]</sup>. 进一步建立分界粒径  $d_0$  与液相能坡损失、固相能坡损失及最小能耗  $J_{\min}$  之间的关系, 如图 6 所示. 可见, 随着固液两相间的分界粒径  $d_0$  的不断增大, 泥石流内部的液相能坡损失  $J_l$  和固相能坡损失  $J_s$  相继增大, 致使最小能耗值  $J_{\min}$  也随之而增大的能耗规律。

#### 3.2 泥石流固液两相流速之间的关系

由(5)和(8)式可知, 对于非均质泥石流, 理论上固液两相的运动速度应该存在以下 3 种关系:

$$(1) \text{ 若 } U_s < U_l, \text{ 则有 } X^2 < \frac{S_{vc} - S_{vm}}{S_v^2}.$$

这是一种常见的液相流速大于固相流速的稀性泥石流运动情况, 液相将以悬移运动为主, 固相粗颗粒以推移运动为主, 并且液相带动整体泥石流的运动速度较大, 移动距离较远. 此时的泥石流运动应该采用真正意义下(固液两相非等速流动)的“两相流模型”来模拟。

$$(2) \text{ 若 } U_s = U_l, \text{ 则有 } X^2 = \frac{S_{vc} - S_{vm}}{S_v^2}.$$

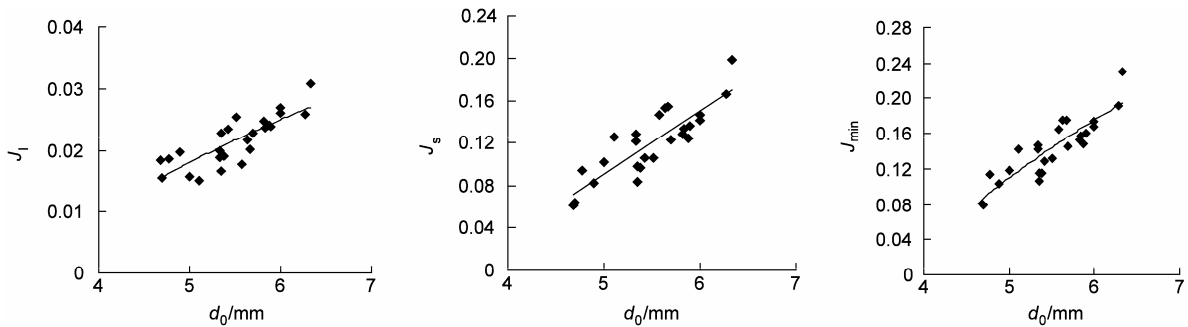


图6  $J_l$ ,  $J_s$  和  $J_{\min}$  与  $d_0$  之间的关系

这是一种固相与液相运动速度相等的临界运动状态,即表现出所谓的“结构泥石流”或“均质泥石流”的运动特征,此时的泥石流运动只能采用“单流体模型”、“结构两相流模型”、“均质流模型”来模拟才合理.

$$(3) \text{ 若 } U_s > U_l, \text{ 则有 } X^2 > \frac{S_{vc} - S_{vm}}{S_v^2}.$$

这是一种少见的固相流速大于液相流速的稠性泥石流的运动情况. 由于固体粗颗粒物质在泥石流运动中占主导地位,并以悬移方式运移,距离较短,导致破坏力极强. 这种情况下的固液两相非等速运动模型尚值得探讨.

从上述分析可知,非均质泥石流固液两相的运动速度与粗颗粒占全部固体的重量百分比  $X$ (与固液两相的分界粒径有关)、泥石流浓度  $S_v$  及泥石流极限浓度  $S_{vm}$  密切相关. 对于常见的液相速度大于固相的泥石流运动,当泥石流容重不断增大时,固相物质在泥石流运动中逐步起主要作用,直至固相速度大于液相速度的高容重泥石流的出现.

以上规律性认识不仅得到了 25 组泥石流运动模拟实验数据的支持,而且还得到了 10 组蒋家沟天然泥石流沟道的实测数据的验证.

在确定分界粒径  $d_0$  的基础上,根据(5)和(8)式,采用泥石流模拟实验数据和蒋家沟实测资料,可得到非均质泥石流固液两相运动流速之间的关系图,如图 7 所示.

由图 7 可知,对于非均质泥石流,其液相流速大于固相流速情况较多. 而随着泥石流容重的增加,固相颗粒所占的比重逐渐增加,参与泥石流固相运动的粗颗粒增多,固相运动将成为泥石流运动的主体部分. 因此,对于高容重的非均质泥石流,其固相流

速将大于液相颗粒. 由固液两相流速的运动关系可得到图 5 所示的拐点  $Z$ (其对应的泥石流容重为  $2.234 \text{ t/m}^3$ ),即泥石流的固液两相运动速度达到相等,而且模拟实验结果与天然实测结果一致.

### 3.3 非均质泥石流固液两相运动特征

对于蒋家沟非均质泥石流而言,当泥石流的容重远小于或远大于分界容重  $2.234 \text{ t/m}^3$  时,固液两相的运动差别就越大,单相(液相或固相)在泥石流运动的作用就越明显,当泥石流的容重接近  $2.234 \text{ t/m}^3$  时,固液两相的运动差别就越小,属于均质泥石流情况,如图 8(a)所示. 但由于泥石流沟道形态及固体物质补给条件的不断变化,其实两相流速几乎很难达到相等,大多情况处在非等速状态.

对于低容重的稀性非均质泥石流,液相运动流速大于固相是其运动的一个基本特征. 在这种情况下,细颗粒与水组成的液相浆体是泥石流运动的主要动力源,在悬移运动中带动粗大颗粒移动. 在泥石流整体运动中,液相浆体靠前,固相粗颗粒居后;液相浆体在上,固相粗颗粒居下,形成了一种液相主动、固相被动的稀性泥石流整体运动特征,如图 8(b)所示. 当泥石流以这种非等速运动在堆积扇骤然停止之时,液相浆体中的细颗粒位于堆积体的上端,固相粗颗粒处于下端,就会形成一种常见的正粒序颗粒堆积特征<sup>[20-22]</sup>.

随着泥石流容重的不断增大,泥石流中的固体粗颗粒含量随之增大,固体粗颗粒在泥石流运动中的作用越来越明显,将出现固相流速大于液相的稠性泥石流运动特征. 此时,固相粗颗粒在泥石流运动中占主导地位,并以悬移运动为主. 在泥石流快速运

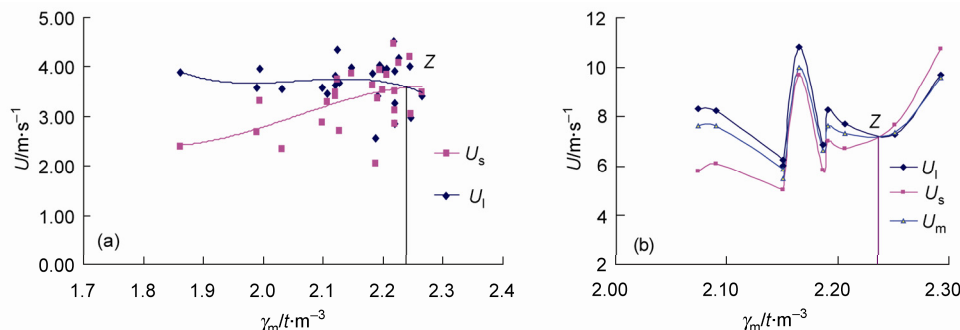


图 7 泥石流固液两相流速关系图  
(a) 25 组模拟实验; (b) 10 组天然实测

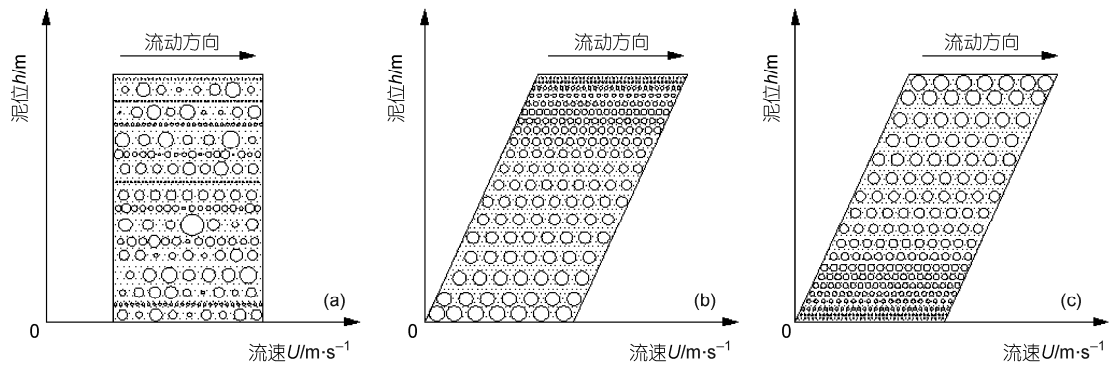


图8 泥石流运动3种模式示意图

(a) 均质泥石流( $U_l=U_s$ ); (b) 稀性泥石流( $U_s<U_l$ ); (c) 稠性泥石流( $U_s>U_l$ )

动中, 固相粗颗粒在前, 液相浆体中的细颗粒靠后; 固相粗颗粒在上, 液相细颗粒居下, 固相粗颗粒带动液相移动, 形成了固相粗颗粒主动、液相浆体被动的另一种少见的稠性泥石流运动特征, 如图 8(c)所示。在这种情况下, 当泥石流在堆积扇停止运动时, 粗颗粒在堆积体上端, 液相细颗粒在堆积体下端, 形成一种不可多见的反粒序颗粒堆积特征。

#### 4 结论

(1) 基于最小能耗原理可确定固液两相泥石流分界粒径, 以此为基础可将非均质泥石流划分为固液两相。通过理论与推导, 得出泥石流固液两相的流速表达式((5)和(8)式), 以此计算非等速的两相泥石流流速。

(2) 一般情况下, 非均质泥石流固液两相流速存在液相流速小于、等于和大于固相流速的3种情

况, 泥石流两相流速的差异性分别揭示了稀性泥石流、结构等速(均质)泥石流及稠性泥石流的运动特征, 同时得到了泥石流模拟实验及蒋家沟实测资料的验证。

(3) 蒋家沟泥石流模拟实验及实测资料分析结果表明, 当蒋家沟泥石流容重小于  $2.234 \text{ t/m}^3$  时, 液相流速大于固相流速, 而且这种情况占绝大多数; 当容重大于  $2.234 \text{ t/m}^3$  时, 固相流速大于液相流速, 这种情况比较少见; 而非均质泥石流运动过程中固液两相流速很难达到相等。

(4) 本文研究成果只是针对蒋家沟高容重泥石流为研究对象而展开的, 文中得到的非均质泥石流固液两相流速表达式也许带有半经验、半理论色彩, 对于其他区域泥石流是否适用, 尚需更进一步研究建立在经典的泥石流动力学模型基础上的流速求解, 对此我们正在进行深入的研究。

致谢 本文实施的蒋家沟泥石流模拟实验得到了中国科学院东川泥石流观测研究站的大力支持与帮助。

#### 参考文献

- 1 费祥俊, 舒安平. 泥石流运动机理与灾害防治. 北京: 清华大学出版社, 2004
- 2 兰恒星, 周成虎, 王小波. 泥石流本构模型及动力学模拟研究现状综述. 工程地质学报, 2007, 15: 314—321
- 3 Takahashi T. Mechanical characteristics of debris flow. J Hydraul Div, 1978, HY8: 1153—1169
- 4 Takahashi T. Debris flow on prismatic open channel. J Hydraul Div, 1980, HY3: 381—396
- 5 Takahashi T. Debris flow. Ann Rev Fluid Mech, 1981, 13: 57—77
- 6 刘丽, 陈洪凯. 泥石流运动动力学研究现状及趋势. 重庆交通大学学报, 2010, 29: 233—239
- 7 王光谦, 倪晋仁. 泥石流动力学基本方程. 科学通报, 1994, 39: 1700—1704
- 8 王光谦, 邵颂东, 费祥俊. 泥石流模拟——模型. 泥沙研究, 1998, 3: 7—13
- 9 王光谦, 邵颂东, 费祥俊. 泥石流模拟——验证. 泥沙研究, 1998, 3: 14—17

- 10 王光谦, 邵颂东, 费祥俊. 泥石流模拟——应用. 泥沙研究, 1998, 3: 17—22
- 11 倪晋仁, 王光谦. 泥石流结构两相流模型——理论. 地理学报, 1998, 53: 66—76
- 12 倪晋仁, 王光谦, 熊育武, 等. 泥石流结构两相流模型——应用. 地理学报, 1998, 53: 77—85
- 13 熊刚. 黏性泥石流运动机理. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 1996
- 14 陈洪凯, 唐红梅, 陈野鹰. 泥石流固液分相流速计算方法研究. 应用数学和力学, 2006, 3: 357—363
- 15 舒安平, 张志东, 王乐, 等. 基于能量耗损原理的泥石流分界粒径确定方法. 水利学报, 2008, 39: 257—263
- 16 舒安平. 高含沙水流挟沙能力及输沙机理的研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 1994
- 17 舒安平, 费祥俊. 高含沙水流挟沙能力. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2008, 38: 653—667
- 18 康志成, 李焯芳, 马霏乃, 等. 中国泥石流研究. 北京: 科学出版社, 2004
- 19 王兆印. 泥石流龙头运动的试验研究及能量理论. 水利学报, 2001, 3: 18—26
- 20 倪晋仁, 曲轶众. 固液两相流中固体颗粒的垂直分选模型. 水动力学研究与进展, 2003, 18: 349—354
- 21 曲轶众, 倪晋仁, 孟晓刚. 固液两相流中固体颗粒的垂直分选机理. 水动力学研究与进展, 2003, 18: 483—488
- 22 樊赞赞, 王思敬, 王恩志. 基于结构两相阻力分析的泥石流堆积形态研究. 工程地质学报, 2009, 18: 100—104

## Investigation on movement characteristics for non-homogeneous and solid-liquid two-phase debris flow

SHU AnPing<sup>1,2</sup>, WANG Le<sup>1</sup>, YANG Kai<sup>1</sup> & FEI XiangJun<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Environment, Beijing Normal University, Key Laboratory of Water and Sediment Sciences of Ministry of Education, Beijing 100875, China;

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Hydrosiences and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Non-homogeneous debris flow is a typical two-phase flow with a large range of solid grain size and specific gravity and non-uniform velocity distribution. Based on the principle of the minimum energy dissipation, the critical diameter between solid phase of the coarse particles and liquid phase composed by both the fine particles and water in non-homogeneous debris flow was established. Furthermore, based on the modified Darcy's formula and mass conservation law, two-phase flowing velocities for non-homogeneous debris flow were developed preliminarily. Correspondingly, it has been verified that calculating value using the velocity formulas of solid and liquid two-phase flow is corresponding to the measured data from Jiangjia gully, Yunnan Province, China. There comes to some meaningful conclusions, such as the velocity of solid phase is more than one of liquid phase due to the specific gravity higher than 2.234 of debris flow, the corresponding deposition shows the inverse property; whereas velocity of solid phase is usually less than one of liquid phase in the general situations, the corresponding deposition behaves the straight property. If the velocity of two phases become much closer, the corresponding deposition possesses intermix property. These results are very significant for both developing dynamical model for non-homogeneous debris flow and designing of control engineering for debris flow disasters.

**non-homogeneous debris flow, critical diameter, two-phase flowing velocities, movement characteristics**

doi: 10.1360/972010-741