

文章编号: 0559-9350(2008)03-0257-07

## 基于能量耗损原理的泥石流分界粒径确定方法

舒安平<sup>1,2</sup>, 张志东<sup>1</sup>, 王 乐<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)

摘要: 本文以泥石流固相与液相的能坡损失之和来表达泥石流运动能量耗损总值, 并基于最小能耗原理提出了泥石流固、液两相分界粒径的确定方法。通过在云南蒋家沟实施 6 组现场泥石流模拟试验, 结果表明试验沟道的泥石流分界粒径处在 5~6mm 之间, 与前人成果基本相符, 同时分析了分界粒径与最小能量耗损和容重之间的变化规律, 即分界粒径随着最小能坡损失和容重的增加而呈缓慢的增大趋势等, 为建立了非均质黏性泥石流动力学模型奠定了基础。

关键词: 黏性泥石流; 容重; 能量耗损; 分界粒径

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

## 1 研究背景

泥石流作为一种典型的山区地质灾害, 由于其来势凶猛、成灾规模广、影响深远而受到人们的普遍关注。尤其在在我国西部山区, 因特殊复杂的地质构造、地形地貌及气候等自然环境条件, 加之汛期集中强降雨不断, 致使山洪泥石流灾害频发。根据 2004 年有关部门的不完全统计<sup>[1]</sup>, 进入 21 世纪以来, 我国平均每年遭受山洪泥石流等自然灾害的经济损失高达几十亿元, 造成的伤亡人数超过千人, 而且近年来尚有加重之趋势。因此, 现阶段建立泥石流模型以正确预测预报泥石流灾害的发生、成灾过程及结果不仅为工程实践所急需, 而且已成为泥石流研究中最重要、最紧迫的课题之一, 受到了学术界与工程界极大重视。

泥石流通常是产生于山坡与沟谷中的一种典型固液两相流, 是一种含有小到黏粒、大至巨石的固体颗粒物(固相)以及水与黏性细颗粒组成的浆体(液相)的流体。就我国的泥石流而言, 由于大量细小颗粒的存在, 大多表现为颗粒级配宽、容重(1.80~2.40t/m<sup>3</sup>)变化范围大的黏性泥石流特征<sup>[1~2]</sup>。迄今为止, 前人围绕泥石流运动机理与预测模型展开过大量的研究工作<sup>[3~11]</sup>, 但大多数是将泥石流视为均质流体处理的。对于实际发生的非均质、两相黏性泥石流模型的研究成果并不多见。而划分并确定固、液两相分界粒径又是建立黏性泥石流模型的基础与前提, 因为唯有确定这一分界粒径才能分别计算液相与固相的浓度以及内部的阻力作用, 才能建立真正意义下的固相与液相流动的基本方程, 最终求解泥石流的阻力与流速和建立相应的预测模型。

对于固、液两相分界粒径(又称浆体上限粒径), 以前我国曾有学者认为<sup>[1]</sup>, 它是由浆体屈服应力能支撑的最大粒径来确定的, 考虑悬液中直径为  $d$  的颗粒, 促使其下沉的重力与阻止其下沉的阻力达到平衡时, 即

收稿日期: 2007-09-10

基金资助: 国家自然科学基金项目(10672024); 教育部留学回国人员启动基金项目

作者简介: 舒安平(1965—), 男, 湖北鄂州人, 教授, 博士, 主要从事河流动力学、水土保持及生态修复研究。

E-mail: shuap@bnu.edu.cn

$$\frac{\pi}{6}d^3(\gamma_s - \gamma_f) = k\pi d^2 \cdot \tau_B \quad (1)$$

得到

$$d = d_0 = k \frac{6\tau_B}{\gamma_s - \gamma_f} \quad (2)$$

式中： $d_0$  为泥石流固、液两相分界粒径，系数  $k$  为与颗粒形状有关的略大于 1 的系数， $\gamma_f$  为对颗粒浮力作出贡献的浆体容重， $\gamma_s$  为泥石流固相的容重， $\tau_B$  为泥石流浆体的屈服应力。

式(2)可看出， $d_0$  值随  $\gamma_f$  的增加而变大，而  $d_0$  的增加又导致浆体容重  $\gamma_f$  增大，这样  $d_0$  有可能一直递增下去，直至达到泥石流的最粗颗粒的粒径。也就是说，分界粒径可以等同于泥石流的最大的粒径  $d_{max}$ ，显然这是不太可能的。此外，也有学者认定某一粒径为分界粒径，如  $d=2\text{mm}$  或  $1\text{mm}$ ，但这只不过是受到泥石流流变试验条件的限制所作出的一种假定而已。而从能量的角度来研究泥石流运动规律来说，除了王兆印<sup>[12]</sup> 通过现场试验和理论分析研究泥石流龙头运动的能量变化规律以外，其它成果尚不多见。可见采用现有方法是难以正确确定非均质泥石流的固、液两相分界粒径的。

鉴于此，这里以泥石流固相与液相的能坡损失之和来表达泥石流的能量耗损总值，提出基于最小能量耗损原理来确定非均质泥石流固相与液相的分界粒径的方法，并应用现场试验实测数据，研究分析分界粒径与最小能量耗损和容重之间的变化规律，其成果对建立非均质黏性泥石流动力学模型及指导泥石流防治工程规划设计具有重要的理论与实际意义。

## 2 泥石流现场模拟试验

### 2.1 泥石流沟道概况

云南省是我国泥石流山地灾害十分活跃的省份之一，其境内泥石流暴发最为频繁，在我国最有代表性的泥石流易发区莫过于昆明市东川区蒋家沟流域。该流域地处云贵高原北部、乌蒙山脉西缘，属滇东北高山峡谷型地貌类型，呈东高西低地势，沟内山高坡陡、西窄东宽，相对高差达 2 200 m，地理位置处在  $103^{\circ}06' \sim 103^{\circ}13'E$ ， $26^{\circ}13' \sim 26^{\circ}17'N$  之间，附近岩层破碎，新构造运动活跃，地震活动比较强烈，自然环境十分脆弱。

作为金沙江一级支流小江流域的支流，蒋家沟流域面积  $48.5\text{km}^2$ ，沿沟分布有 200 多条支沟，包括 154 条切沟、46 条冲沟，沟岸滑坡、崩塌非常活跃，储有大量固体松散物质，平均每年暴发泥石流达 15 次之多。根据中国科学院东川泥石流观测研究站(简称东川站)的观测资料<sup>[13~14]</sup>，蒋家沟每年向小江流域输送泥沙量高达  $200 \sim 300 \text{万 m}^3$ ，最大可达 600 多万  $\text{m}^3$ ，因而蒋家沟泥石流具有暴发次数多、规模大、历时长、危害大等特点，被人们誉为“泥石流的天然博物馆”。

本次泥石流现场模拟试验，从沟道底部较陡、固体松散物质补给来源丰富、水源充足等形成泥石流的坡度、固体物质及水源等三大要素来考虑，试验沟道选择在蒋家沟流域门前沟约 1km 处的天然泥石

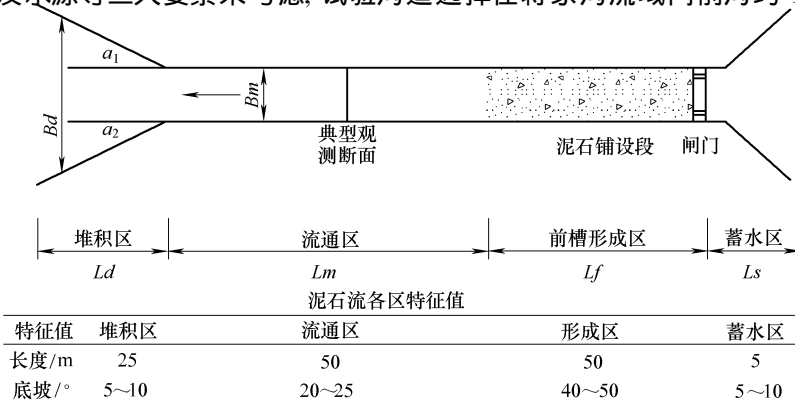


图 1 泥石流沟功能分区示意

流沟道内,南距东川站大约 3km,沟道试验段全长约 125m。按泥石流形成、运动及堆积的特点,自上而下将试验沟道划分为蓄水区、前槽形成区、流通区和堆积区 4 个功能分区,如图 1 所示。

**2.2 泥石流的形成与试验流程** 为了比较真实地现场模拟泥石流运动过程,试验中首先设法满足了泥石流形成的三大条件:

其一,动力条件:选择在天然泥石流沟内,形成区长达 50m,确保泥石流在形成过程中固液两相物质充分调整、混合,而且沟道底坡  $40 \sim 50^\circ$ ,具备泥石流形成的动力条件;

其二,松散固体物质补给条件:试验沟道周围分布有大量固体松散物质,而且级配宽、补给充分,无需人工配沙,为形成泥石流提供物质保障条件;

其三,水源条件:沟内常年流水,为泥石流模拟试验提供了丰富的天然水源条件。

为了在沟道内能够形成泥石流,经过多次预备试验探索,首先在沟道上游区段设置一个长 5m、宽 2m、高 1m 的蓄水池,利用闸门、塑料布等材料将沟内流水完全截流、密封;与此同时,在沟道两侧就地采取沙石材料人工铺设于沟道形成区的前段(长约 10m),平均铺厚 0.35m;当蓄水和沙石材料铺设完成后,开启闸门放水,因沟道坡度较大,水流挟带着固体松散物质经过水沙充分混合和调整后即形成了泥石流,必要时人工补给沙石。

**2.3 试验观测内容** 在 2007 年 8~9 月期间,经过 10 余次预备试验的调试后,最终成功地完成了 6 组泥石流模拟试验。在这 6 组模拟试验中,泥石流容重保持在  $2.07 \sim 2.32 \text{ t/m}^3$  ( $S_v = 0.648 \sim 0.727$ ) 之间,属于典型的黏性泥石流,各组颗粒分析级配曲线分别见图 2。

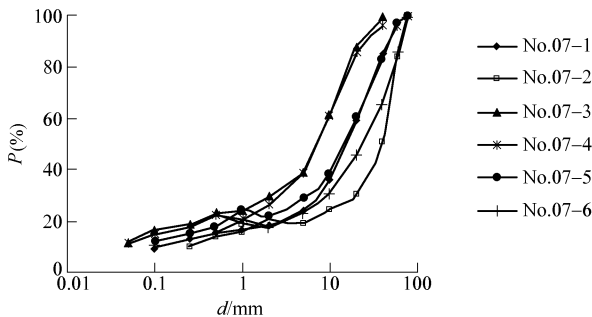


图2 泥石流模拟试验中固体颗粒级配曲线

为分析黏性泥石流在运动过程中的能量耗损规律,模拟试验中需要测定泥石流的运动要素数据。当泥石流形成后运动到流通区时,采用数码摄像机对泥石流运动要素进行定点观测,并在事先设定的观测断面采取泥石流试样,在东川站试验室内进行泥石流的颗分和流变试验,获取泥石流容重、颗粒级配、流变参数等基本数据,并实时测量泥深、过流断面形态,采用简易浮标法初步测定泥石流流速,并通过解译数码摄像资料校正泥石流流速;当泥石流流速减缓并进入堆积区形成堆积扇后,测定泥石流堆积扇的形态并取样,测定堆积物的容重、体积、颗粒组成等,至此 1 组全套泥石流试验即告完成。

### 3 泥石流的固液两相能量耗损

作为一种典型的固液两相流,黏性泥石流在流动过程中的能坡损失总值  $J$  等于液相浆体能坡损失  $J_l$  和固相能坡损失  $J_s$  之和,分别推求泥石流固液两相流的能坡损失表达式,进而提出泥石流最小能量耗损原理的概念。

**3.1 泥石流液相的能坡损失** 泥石流中的液相浆体由具有悬移运动的细小颗粒和水体构成,其能坡损失可由 Darcy 公式来表达,在考虑液相浆体的容重修正后,可得出液相的能坡损失为

$$J_l = \frac{f}{8} \times \frac{U^2}{gR} \times \frac{\gamma_f}{\gamma_m} \quad (3)$$

式中:  $\gamma_f$  和  $\gamma_m$  分别为液相浆体及泥石流容重,浆体阻力系数  $f$  的表达式为<sup>[15]</sup>:

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

式中:  $d_0$  即为黏性泥石流固液两相的分界粒径,  $R$  为泥石流沟的水力半径,  $Re$  为泥石流的雷诺数, 可由下式来表达:

$$Re = \frac{4RU_c \cdot \gamma_m}{g\eta_m} \quad (5)$$

式中:  $\eta_m$  为黏性系数; 此外, 系数  $\alpha$  的表达式为

$$\alpha = 1 - 0.41g(\mu_r) + 0.08(\lg\mu_r)^2 \left( \frac{4R}{d_{90}} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (6)$$

式中:  $\mu_r$  为泥石流的相对黏度。

根据我们的研究结果<sup>[1,17~19]</sup>, 保持浆体中细颗粒作悬移运动的不淤临界流速为

$$U = U_c = 27.8 \sqrt{\frac{8}{f} \omega_0 \cdot S_v^{2\beta}} \left( \frac{4R}{d_{90}} \right)^{\frac{1}{9}} \quad (7)$$

式中,  $\omega_0$  为  $d_0$  对应的颗粒沉降速度, 在 Stokes 范围内,  $\omega_0$  可表示为

$$\omega_0 = \frac{\gamma_s - \gamma_m}{18\eta_m} d_0^2 \quad (8)$$

若将上限粒径  $d_{90}$  用分界粒径  $d_0$  表示, 粗颗粒占全部固体的重量百分比为  $X$ , 并以  $S_v$  和  $S_{vc}$  分别表示液相浆体浓度和固相粗颗粒浓度, 则两者表达式为

$$S_{vc} = X \cdot S_v \quad (9)$$

和

$$S_v = \frac{S_v(1-X)}{1-XS_v} \quad (10)$$

如果将式(7)中泥石流液相浓度  $S_v$  用液相浆体浓度  $S_{vf}$  来表示, 则可得非均质泥石流液相浆体细颗粒作悬移运动的不淤流速可以表示为

$$U = U_c = 27.8 \sqrt{\frac{8}{f} \omega_0 \cdot S_{vf}^{2\beta}} \left( \frac{4R}{d_0} \right)^{\frac{1}{9}} \quad (11)$$

将式(11)代入式(3)中, 整理后得到如下泥石流液相能坡损失公式

$$J_l = \frac{1}{gR} \left[ 27.8 \omega_0 S_{vf}^{2\beta} \left( \frac{4R}{d_0} \right)^{\frac{1}{9}} \right]^2 \frac{\gamma_f}{\gamma_m} \quad (12)$$

由式(12)可见, 液相浆体的能坡损失  $J_l$  与其分界粒径  $d_0$  具有十分密切的关系。

**3.2 泥石流固相的能坡损失** 根据 Bagnold<sup>[3]</sup> 的研究, 固液两相流中的固相颗粒运动克服内部阻力所消耗的能坡与粗颗粒浓度  $S_{vc}$  及颗粒相互作用的宏观摩擦系数  $\tan\alpha$  有关, 在考虑浆体容重  $\gamma_f$  对粗颗粒的浮力后, 固相颗粒运动阻力以能坡形式可表示为:

$$J_s = XS_{vc} \left( \frac{\gamma_s - \gamma_f}{\gamma_m} \right) \tan\alpha \quad (13)$$

式中:  $\gamma_f$  为黏性泥石流液相浆体容重  $\gamma_f = \gamma + S_{vf}(\gamma_s - \gamma)$

$\tan\alpha$  为固相粗颗粒运动颗粒间宏观摩擦系数为<sup>[3]</sup>

$$\tan\alpha = 0.40 \left[ 1 + \left( \frac{S_{vb}}{S_{vm}} \right)^{0.8} \right]^{1/3} \quad (14)$$

式中:  $S_{vm}$  和  $S_{vb}$  分别为泥石流极限浓度和平均浓度, 分别由费祥俊<sup>[15]</sup> 和沈寿长<sup>[16]</sup> 提出的计算方法来确定。

由式(13)可知,  $J_s$  与固相浓度  $S_{vc}$  成比例, 自然也与固液两相分界粒径  $d_0$  直接相关。

**3.3 泥石流的最小能量耗损原理** 黏性泥石流的内部黏性阻力在液相雷诺数较大的情况下可用式(4)表达, 固体粗颗粒的移动则受摩擦阻力的影响。因此, 黏性泥石流的能坡损失总值  $J$  为固相能坡损失  $J_s$ ,

和液相浆体能坡损失  $J_l$  之和。

$$J = J_l + J_s \quad (15)$$

与冲积河流河床自动调整相类似, 泥石流沟道也会随着水沙来量的变化作出调整, 调整后使沟床的冲刷和淤积达到新的平衡状态, 与此同时伴随能量耗损、转化和调整, 即各个要素(如床沙、断面及纵坡等)倾向于向水流总体能量消耗最小的方向调整, 这种能耗最小原理目前在河流动力学中已被广泛应用。首次将这一理论应用到泥石流研究中, 与河流动力学中的最小能耗原理相似, 黏性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

$$J_l + J_s = J_{\min} \quad (16)$$

如前所述, 液相浆体的能坡损失  $J_l$  和固相颗粒运动的能坡损失  $J_s$  均与分界粒径  $d_0$  有着直接的关系。这表明通过固相粗颗粒和液相细颗粒之间调整, 分界粒径  $d_0$  将发生变化, 以便使泥石流在运动过程中能量耗损保持最小值  $J_{\min}$ 。因此从理论上来看, 泥石流分界粒径  $d_0$  与其能量耗损最小值  $J_{\min}$  之间存在着密切关系。

## 4 泥石流分界粒径的确定方法及其变化规律

**4.1 分界粒径的确定方法** 为方便起见, 现以本次泥石流模拟第 2 组 (No. 07-2) 试验为例简述泥石流分界粒径的确定方法。首先假定一系列的分界粒径  $d_0$  数值, 由颗粒分析级配曲线图 3 中查出  $d > d_0$  粗颗粒的累积沙重百分数  $X$ , 并由上述对应公式依次计算  $S_{vf}$ 、 $\omega_0$ 、 $S_{vc}$ 、 $J_l$ 、 $J_s$ , 求出各个分界粒径  $d_0$  值对应的能坡总值  $J = J_l + J_s$ , 最终从中求出最小的能坡值  $J_{\min}$ , 计算过程及结果见表 1。

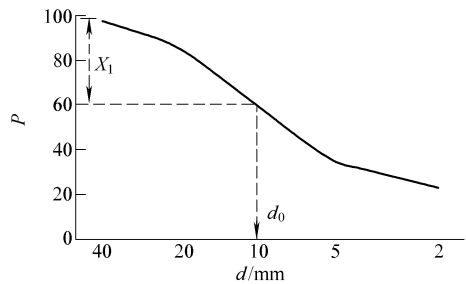


图 3 固体颗粒级配曲线 (No. 07-02 组次)

表 1 泥石流分界粒径的算例 (No. 07-2)

$d_0/\text{mm}$	$X$ (图 3)	$S_{vf}$ 式(8)	$\omega_0 / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$ 式(8)	$J_l$ 式(12)	$S_{vc}$ 式(9)	$J_s$ 式(13)	$J$ 式(15)
10	0.401	0.589	1.815	0.1680	0.281	0.0450	0.2130
8	0.483	0.553	1.161	0.0645	0.338	0.0589	0.1234
6	0.604	0.486	0.653	0.0177	0.423	0.0837	0.1013
4	0.697	0.420	0.290	0.0030	0.488	0.1087	0.1117

备注:  $S_v = 0.697$   $S_m = 0.790$   $S_b = 0.754$   $\tan \alpha = 0.508$   $\gamma_m = 2.151$

依据表 1 的计算结果, 绘制 No. 07-02 组次的泥石流能坡损失  $J$  与分界粒径  $d_0$  之间关系, 如图 4 所示。由此可见, 随着分界粒径  $d_0$  的增加, 液相能坡损失  $J_l$  增大, 固相能坡损失  $J_s$  减小, 两者之和确实存在一个最小能坡损失  $J_{\min}$ , 与其相对应的泥石流的颗粒粒径即为真正的固相与液相分界粒径  $d_0$ 。

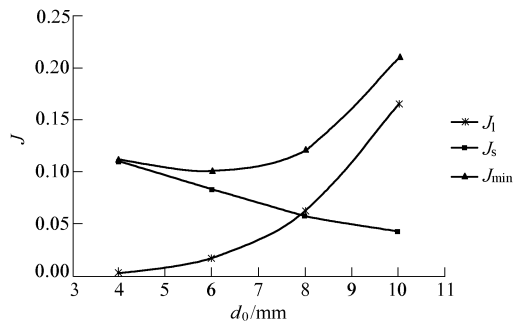


图 4 能坡损失  $J$  与分界粒径  $d_0$  之间关系 (No. 07-2)

**4.2 分界粒径的变化规律** 依据 No. 07-02 组试验类似的方法, 可类推求出其他 5 组泥石流试验的固相与液相分界粒径  $d_0$ , 据此可建立分界粒径  $d_0$  与最小能坡损失  $J_{\min}$  和容重  $\gamma_m$  之间关系, 如图 5 所示。

由图 5 可见, 试验所在蒋家沟沟道的黏性泥石流的分界粒径  $d_0$  均处在 5~6mm 之间, 这与王兆

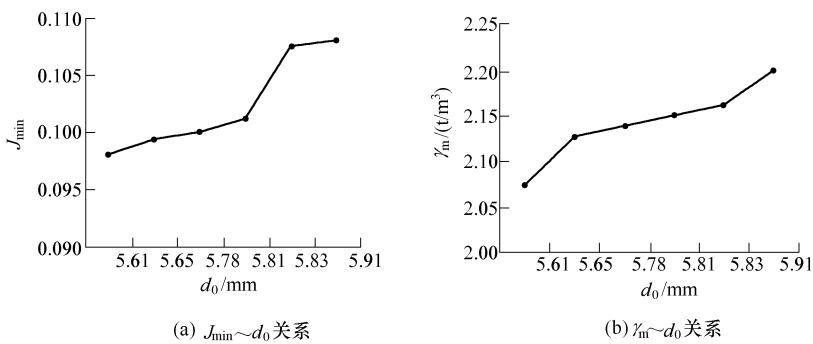


图5 分界粒径  $d_0$  与  $J_{\min}$  和  $\gamma_m$  之间关系

印<sup>[12]</sup>和吴积善<sup>[20]</sup>研究提出蒋家沟泥石流的分界粒径  $d_0$  一般处在 4~6mm 的结论基本相吻合。另一方面,从图 5 还能看出,对于非均质黏性泥石流,当其运动处在均衡态势下的泥石流固液相的分界粒径  $d_0$  呈现出随着最小能坡损失  $J_{\min}$  和容重  $\gamma_m$  的增大而增大的变化规律,表明非均质黏性泥石流随着流动强度和容重  $\gamma_m$  的增加,将有更多的较粗颗粒由于其沉速减少,进而转入悬移运动,成为液相浆体的组成部分。在现场黏性泥石流试验中可以观察到粒径为数 mm 乃至数十 mm 的较粗颗粒在运动过程中仍能保持悬移状态,而且由于泥石流容重高,黏性急剧提高,致使更粗颗粒由推移运动转入悬移运动,固相成分向液相转化,造成分界粒径以呈缓慢的递增趋势,而不会出现式(2)所表示的简单的、而无止境的正变关系,表明本文所提出的泥石流固液相分界粒径的确定方法比较切合实际。

## 5 结论

(1) 对于非均质黏性泥石流而言,流动过程中的能量耗损可以水力能坡损失来表示,泥石流能坡损失总值等于液相能坡损失和固相能坡损失之和,并提出了泥石流液相和固相能坡损失的表达式(12)和式(13);(2) 随着泥石流分界粒径的增大,液相能坡损失也增大,而固相能坡损失则减小,泥石流通过调整内部液相和固相比例使能量消耗保持一个最小值,表明泥石流能量耗损遵循最小能耗原理,据此可确定黏性泥石流固相与液相颗粒之间的分界粒径,运用现场试验资料建立黏性泥石流的分界粒径与最小能坡损失和容重之间的关系,得到分界粒径呈现出随着最小能坡损失和容重的增大而增大的变化规律,这对于建立非均质黏性泥流动力学模型具有重要意义;(3) 6 组泥石流现场试验结果表明,对于所在蒋家沟试验沟道发生的非均质黏性泥石流,其泥石流的分界粒径均分布在 5~6mm 之间,而且在泥石流运动均衡态势条件下的泥石流分界粒径呈现出随着最小能坡损失和容重的增加而增大的变化规律,同时说明泥石流分界粒径随着泥石流流动强度的不断增大和容重的增加,固相成分不断向液相转化分界粒径呈缓慢的递增趋势。

致谢: 泥石流现场试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, 籍此致谢!

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 费祥俊,舒安平. 泥石流运动机理与灾害防治[ M ]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [ 2 ] 吴积善,康志成,田连权,等. 云南蒋家沟泥石流观测研究[ M ]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [ 3 ] Bagnold R A. Experiments on a gravity free dispersion on large solid spheres in a Newtonian fluid under shear[ J ]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 1954, 225: 49- 63.
- [ 4 ] Takahashi T. Mechanical characteristics of debris flow[ J ]. ASCE Journal of Hydraulics Division, 1978, 104(8): 1153- 1169.
- [ 5 ] Takahashi T. Debris flow on prismatic open channel[ J ]. ASCE Journal of the Hydraulics Division, 1980, 106(3): 381- 396.

- [ 6] Takahashi T. Debris flow[ J]. Annual Reviews of Fluid Mechanics, 1981, 13: 57— 77.
- [ 7] 王光谦,倪晋仁. 泥石流流体力学基本方程[ J]. 科学通报, 1994, 39( 18): 1700— 1704.
- [ 8] 熊刚. 黏性泥石流运动机理[ D]. 北京: 清华大学, 1996.
- [ 9] 胡健,匡尚富,徐永年. 二维非恒定黏性泥石流运动堆积的数值模拟[ J]. 泥沙研究, 2006, ( 6): 60— 64.
- [ 10] 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[ J]. 工程地质学报, 2007, 15( 3): 314— 321.
- [ 11] 王纯祥,白世伟. 泥石流的二维数学模型[ J]. 岩石力学, 2007, 28( 6): 1237— 1241.
- [ 12] 王兆印. 泥石流龙头运动的试验研究及能量理论[ J]. 水利学报, 2001, ( 3): 18— 26.
- [ 13] Kang Z C. Motion characteristics of debris flow at Jiangjia Gully, Yunnan Province[ R]. IRTCES Publication Circular 3, 1990.
- [ 14] 丁明涛,韦方强. 云南蒋家沟泥石流成因及其防治措施探析[ J]. 水土保持研究, 2007, 14( 4): 105— 107.
- [ 15] 费祥俊. 黄河中、下游含沙水流黏度的计算模型[ J]. 泥沙研究, 1991, ( 2): 1— 8.
- [ 16] 沈寿长. 泥石流运动阻力与流速[ J]. 铁道工程学报, 1986, ( 4): 108.
- [ 17] 舒安平. 高含沙水流挟沙能力及输沙机理的研究[ D]. 北京: 清华大学, 1994.
- [ 18] 舒安平,费祥俊. 黏性泥石流运动流速与流量计算[ J]. 泥沙研究, 2003, ( 2): 7— 11.
- [ 19] 舒安平,费祥俊,刘青泉. 非均质泥石流的输移特性[ J]. 水利学报, 2003, ( 7): 46— 51.
- [ 20] 吴积善,田连权,康志成,张有富,刘江. 泥石流及其综合治理[ M]. 北京: 科学出版社, 1993.

## Method for determining the critical grain size of viscous debris flow based on energy dissipation principle

SHU An-ping<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhi-dong<sup>1</sup>, WANG Le<sup>1</sup>, FEI Xiang-jun<sup>2</sup>

(1 *Beijing Normal University, Beijing 100875, China;*

2 *Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

**Abstract:** By means of theoretical analysis the expressions of hydraulic energy gradient for liquid phase and solid phase were deduced respectively and the total hydraulic energy dissipation of debris flow was regarded as the sum of the losses of these two energy gradients. On this basis, a method for determining the critical size of vicious debris flow was established by applying the principle of minimum energy dissipation. The verification experiment carried out in Yunnan Province, China, showed that the predicted result is in good agreement with observed data. The critical grain size is 5—6mm. It tends to gradually increase with the increases of minimum energy dissipation gradient and specific weight of flow. This provides the solid basis for establishing dynamic model for the heterogeneous viscous debris flows.

**Key words:** viscous debris flow; specific weight; energy dissipation; critical grain size

(责任编辑:李福田)