

# 泥石流固相在浆体中沉降规律研究\*

陈洪凯, 舒小红

(重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074)

**摘要:**基于大量试验观察及数据分析研究,揭示了泥石流固相在浆体中的沉降规律。研究影响固相在泥石流浆体中沉降的三个主要因素,分析了各个因素影响泥石流固相沉降的根本原因。泥石流固相在浆体中沉降过程中可分为三个阶段,首先为初始阶段,继而为快速沉降阶段,最后呈减速沉积阶段,并对各个阶段的沉降过程作了详细的分析。其中浆体粘度、固相质量和附加孔隙压力对固相在泥石流浆体中的沉降规律存在着至关重要的影响。

**关键词:**泥石流; 固相; 沉降规律

**中图分类号:**P642.23 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7329(2007)04-0099-05

## Study on the Sedimentation Rule of the Particles in Debris Flow

CHEN Hong-kai, SHU Xiao-hong

(Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** In this paper, according to the study on a great number of experiments and data analyses, the sedimentation rule of solid particles in debris flow is set up. Three main factors that influence the particle sedimentation in debris flow were studied; the basic reasons to influence the particle sedimentation were analyzed. The particle sedimentation in debris flow could be divided into three stages, i. e. the starting stage, the quick sedimentation stage and the accumulation stage, and detailed analysis on the sedimentation process each stage was made. The liquid viscosity, particle quality and additional water pressure have an important role on the sedimentation rule of the particle in debris flow.

**Keywords:** debris flow; solid particle; sedimentation rule

泥石流是发生在山区小流域的固、液二相流体,其形成的三大主要条件为丰沛的水源、大量的固体物质储备、陡峭的地形。我国是个多山国家,泥石流广泛分布,特别是西部地区泥石流危害的问题更加突出,建国前仅有少数水利、地质学家进行过这方面的工作,新中国成立以来,经过50多年的努力已跻身于世界先进行列。泥石流作为一种高浓度的固液气混合流变体,由于它的突然爆发、来势凶猛、破坏力强,严重地影响着山区的建设和经济发展。而泥石流固相在沉积区的沉降规律是泥石流运动机理、泥石流能量衰减条件和泥石流沉积扇变化形态等一系列理论研究之基础,对泥石流固相在浆体中沉降规律的认识是我们研究泥石流必须解决的重大关键技术问题。目前,国内外在泥石流固相在浆体中沉降规律研究方面尚属薄弱环

节<sup>[1~8]</sup>。鉴于此,笔者基于大量室内试验和野外考察,就其泥石流固相在浆体中沉降规律进行分析与研究。

### 1 室内试验研究

#### 1.1 试验研究目的和方法

目的是通过实验研究,认识泥石流固相在浆体中沉降规律,弄清影响固相在泥石流浆体中沉降的本质原因,以便于进一步认清泥石流流体在沉积区的沉降特性。研究方法是,首先研究级配固相在泥石流浆体中的沉降特性,弄清级配固相在浆体中的沉降方式及沉降路径,继而研究影响固相在泥石流浆体中沉降的主要因素,然后进行资料整理分析。试验模型如图1、2。

模型四侧由玻璃组成,底面用木板制作,顶面不封顶。测点设置在底面的正中央,在正面边上安装一把

\* 收稿日期:2007-02-03

基金项目:高校博士点基金(20060618001);交通部人才基金(95050508)

作者简介:陈洪凯(1964-),男,重庆人,教授,博士生导师,博士后,主要从事泥石流与边坡力学机理与工程控制研究。

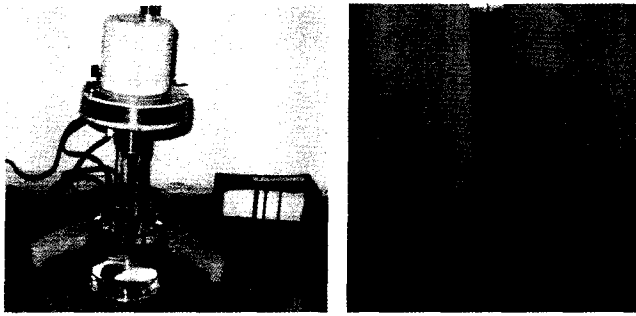


图1 NDJ-1 旋转式粘度计 图2 泥石流试验模型  
 钢尺,用于观察颗粒下降的位置。泥石流的天然浓度和颗粒级配之间没有必然的理论联系。天然浓度同时受固体颗粒和水、气等多因素影响,而颗粒级配只决定于固体颗粒本身的性质<sup>[1]</sup>。试验试样采用天然级配碎石,共筛分成5级颗粒级配,颗粒直径分别为<1.25 mm, 1.25~3 mm, 3~5 mm, 5~10 mm, 10~50 mm。其泥石流颗粒级配累积频率曲线(如图3)。

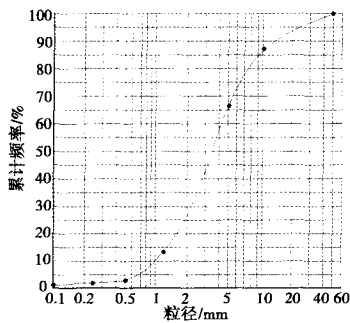


图3 泥石流颗粒累积频率曲线

1.2 试验内容及分析过程

为研究级配固相在泥石流浆体的沉降规律,筛析分选出不同粗细和质量的筛分固相,以之作为试样,对其初始沉速和试样前锋面(即最大粒径)的运动过程进行了测试及比较;分析级配固相在泥石流浆体中的沉降规律,研究影响其固相沉降的因素。试验研究过程如下所述:

1)配制浆体,由于泥石流浆体为不透明液体,不易观察,故需用酒精、甘油及粉灰配制出相应粘度的透明液体,便于观察。使用NDJ-1 旋转式粘度计(如图1)测量浆体的粘度,以便于控制浆体的粘度。

2)筛分试样,将试样筛分成五组不同级配的固相颗粒。

3)根据级配曲线取相应质量的颗粒,将颗粒放在漏斗里,然后打开漏斗阀门,尽可能确保让所有固相颗粒全部同时接触浆体。

4)观察其沉降规律及记录沉降时间,观察颗粒自接触浆体后的运动轨迹及沉降方式;颗粒入水后至最大前锋面着地的时间即为沉降时间。研究影响固相沉速的主要因素。

5)记录相关实验数据,记录所测液体的粘度、浓度和附加孔隙压力值。分析固相在泥石流浆体中的沉降方式及沉降规律。记录附加孔隙压力随颗粒的下沉所引起值的变化,本试验用孔隙水压力计(如图2)测量颗粒下沉时的附加孔隙压力值。

6)实验数据分析。

2 固相在浆体中的沉降特性

为研究固相颗粒的沉降规律,研究影响其固相沉降的主要因素,笔者采用不同粗细和不同质量的筛分级配固相,对其沉降的全过程及其沉速进行了量测。众所周知,天然泥石流体是由不同粒径的固相和水组成的两相流体,其控制体可假定为多层均质介质的叠加(如图4)。

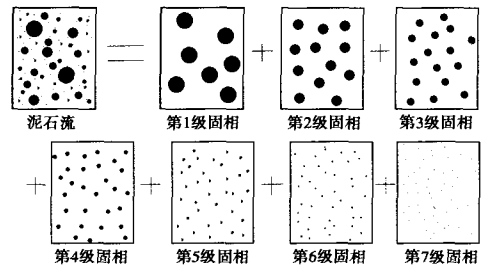


图4 泥石流固相分级分解

控制体内竖体的初始粘度即为未加入固相时的浆体粘度,加入固相后,细粒径固相依次对原浆体的粘度产生贡献,逐渐得到级配两相泥石流流体的综合粘度,在研究其规律时必须重视控制体综合粘度的作用。其沉降过程可概括为三个阶段,各阶段的特点可概括为:

2.1 初始阶段固相呈整体高速沉降

固相颗粒在均质泥石流浆体(如图5)中沉降时,控制体内各相沉降初速度相同。沉降开始后的前1 s内,泥石流中各级固体颗粒基本上都凝聚成为一个粘稠的整体,固相成团整体沉降,沉速很快,无论颗粒的大小,均以高达11 cm/s 以上的速度下沉。原因是,在沉降开始时,级配固相以近于自然堆集的密实度自漏洞内注于容器中,这些固相与浆体结合,絮凝作用使颗粒聚集成絮团,浓度稍高后,絮团连结成絮网结构<sup>[2,3]</sup>,形成成团沉降(如图6)。

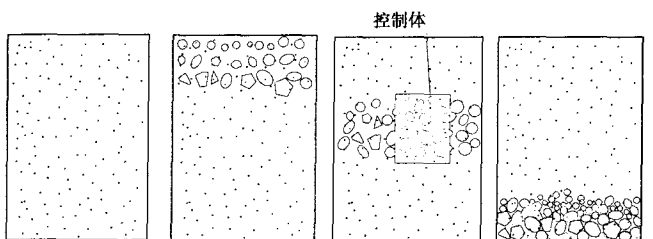
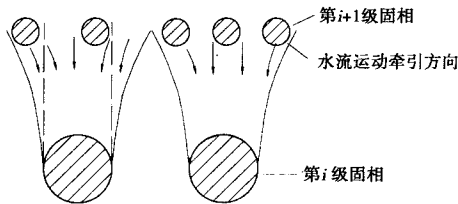


图5 均质浆体 图6 初始阶段 图7 沉降阶段 图8 沉积阶段

### 2.2 沉降阶段固相呈快速沉降

经过前 1 s 内的整体高速沉降之后,固相在容器内运行了一段距离后,这时固相的浓度被稀释(就容器内而言),由于固相密度已得到较大程度的稀释,成团沉降现象消失,因而沉速有了大幅度的减小。大粒径颗粒在下沉降时引起浆体向下运动,给小粒径颗粒一定的牵引力,使小颗粒沉速大于单颗沉速,且控制体第 1 级固相对第 2 级固相、第 3 级固相……第 5 级固相有牵引力作用;第 2 级固相对第 3 级固相、……第 7 级固相有牵引力作用,依次类推……第 4 级固相对第 5 级固相有牵引力作用。并且存在,即次一级固相不能超越前一级固相的沉速(如图 7)。当大颗粒到达容器底时,其引起的紊动作用逐渐消失,级配固相进入快速



沉降状态(如图 8)。

### 2.3 沉积阶段固相呈减速沉降

固相沉降转入沉积阶段后,由于大颗粒下沉,置换相应体积的浆体上升,带动一部分小颗粒上浮。这种逆向运动,将导致一部分小颗粒沉速比单颗沉速偏小。并且在固相沉降一段时间后,除较小的细颗粒外,其余的颗粒全部已经沉降到容器的下半部,导致下半部的浆体浓度急剧增加,此时浆体阻力大于颗粒的重力而作减速运动。在沉积阶段,第一级固相冲击床面后,可不考虑颗粒向上的反弹,但必须考虑对其层部浆体的扰动,这是产生紊动之根本原因(如图 9)。因此说固相沉降规律是复杂的。但起主导作用的因素是固相级配及粘度大小。

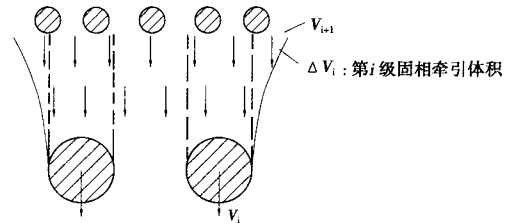


图 9 粒径相互牵引作用分解

## 3 影响沉降的三种主要因素

影响泥石流固相在沉积区沉降的因素很多,也一直是国际众多专家研究探讨的重点问题之一<sup>[6~13]</sup>。其主要影响因素可概括为以下三点:

### 3.1 固相质量对沉降规律的影响

不同的固相质量,对固相在同一粘度浆体中沉降

有显著影响。固相沉速实质上是一个颗粒相互作用的问题。质量大的级配固相颗粒多,则相互影响作用显而易见大。虽则今天的科学水平还不足以解决高浓度中的相互作用问题,但对颗粒相互作用的任何进展都为探索颗粒群体沉速的经验关系提供一定的启示(如图 10)。

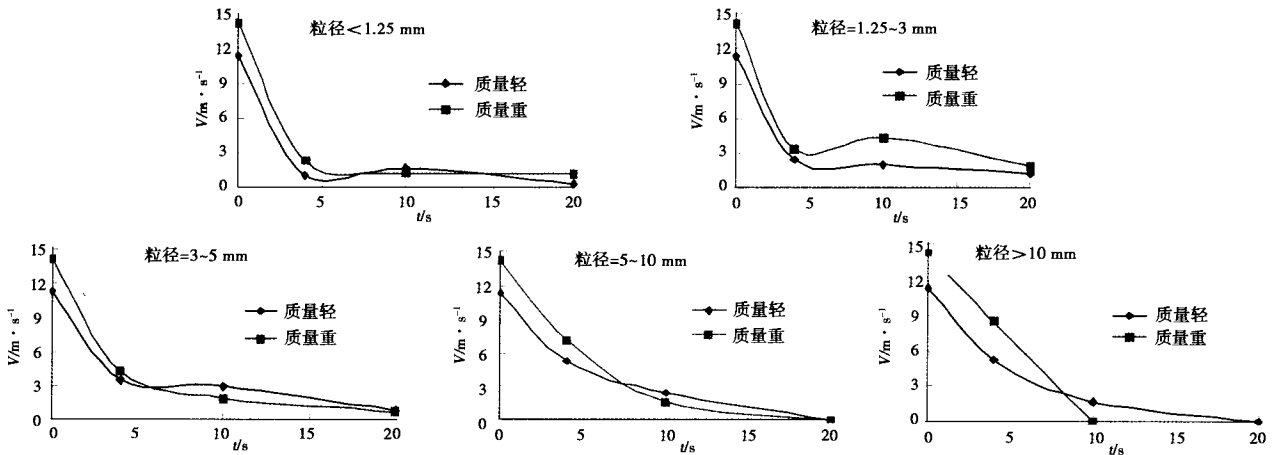


图 10 不同质量固相颗粒沉降时沉速随时间的变化

在整体高速沉降阶段,固相沉速随固相质量增大而有增大的趋势。在过渡阶段,固相质量越大,沉速越快。原因是固相质量越大,粗颗粒越多,故在其下降过程对细颗粒的牵引力越大,致使细颗粒在粗颗粒的影响下沉速加快,所以整体速度也随之变快。沉速越快,固相置换向上运动的浆体体积越大,浆体向上运动所

引起的向上的作用力越大,从而减缓固相的沉速。在未始阶段,固相质量越大,级配越细,细颗粒的增多使浆体浓度增大,固相在沉降时受到阻力越强,从而使沉速减小。在加大固相质量的情况下,粗颗粒(> 10 mm)在整个沉降过程中,速度有明显的增强。在未始阶段,细颗粒的沉速则减弱。

### 3.2 浆体粘度对沉降规律的影响

泥石流固相控制体沉降过程中要受到浆体的粘滞作用。当同一固相质量在不同粘度的浆体中沉降时,沉降特性有明显差异。王裕宜<sup>[4]</sup>等将蒋家沟和浑水沟泥石流浆体的有效浓度(或称土水比  $P_d/P_w$ )与进行相关推导,也可以看出它们有较好的相关性(相关系数  $y=0.8835$ )。

东川蒋家沟泥石流浆体:

$$\begin{cases} \bar{\tau}_B = 12\,119.0C_{vf}^{0.12}y \\ \bar{\eta}_\rho = 195.39C_f^{3.30} \\ y = 0.9519, 0.9650 \end{cases} \quad (1)$$

盈江浑水沟泥石流浆体:

$$\begin{cases} \bar{\tau}_B = 651.99C_f^{4.02} \\ \bar{\eta}_\rho = 108.52C_{vf}^{4.95} \\ y = 0.9484, 0.9650 \end{cases} \quad (2)$$

$$\tau_B = 10.12(P_d/P_w)^{1.20} \quad (3)$$

式中:  $\tau_B$  为泥石流浆体屈服应力,  $C_{vf}$  为泥石流浆体的固体颗粒体积浓度,  $P_d$ 、 $P_w$  分别为泥粘粒 ( $d < 0.05$  mm) 土体重量含量和水的重量含量。因此,就泥石流浆体而言,粘性越高,其流体变形所产生的损失越大。这种充填在粗颗粒间的高粘性浆体的减阻作用远大于低粘性浆体的减阻作用。同时,因为浆体的这种减阻

作用又远大于浆体的粘性阻力,所以在同等条件下 ( $C_{v1}$ 、 $\eta_\rho$ ) 高粘性泥石流要比低粘性泥石流对固相在沉降过程中的阻力要大得多。如图 11。

试验表明,浆体的粘度越小,使其阻力系数也随之减小,固相在沉降过程中,沉速明显比浆体粘度大时速度快得多。浆体粘度越大,所受阻力越大,受浆体粘性及紊动影响也越大,沉速变慢。浆体粘度不仅影响固相的沉速,而且影响其沉降路线,粗颗粒的沉降引起周围浆体紊动,其它颗粒则在沉降过程中就要受到涡流的影响。首先,由于浆体的脉动性质,使作用在固相上的外力不能经常保持平衡,再加以涡体的旋转作用,颗粒在沉降中不断打转,不能以最稳定的方位下沉。其次,由于固相沉速的大小和方向都不断因时因地而改变,使固体在沉降中有时受到加速运动,有时又受到减速运动。这时,作用在固相上的阻力除了浆体的正常阻力以外,还要加上因为加(减)速运动而产生的额外阻力。最后,浆体中存在紊动,将使颗粒顶部的分离点位置以及颗粒表面的压力分布发生变化,从而使颗粒所承受的阻力减少或者增大。在这三种作用中,前两种作用使固相沉速减小,而后一种则可能使固相沉速减小或增大。

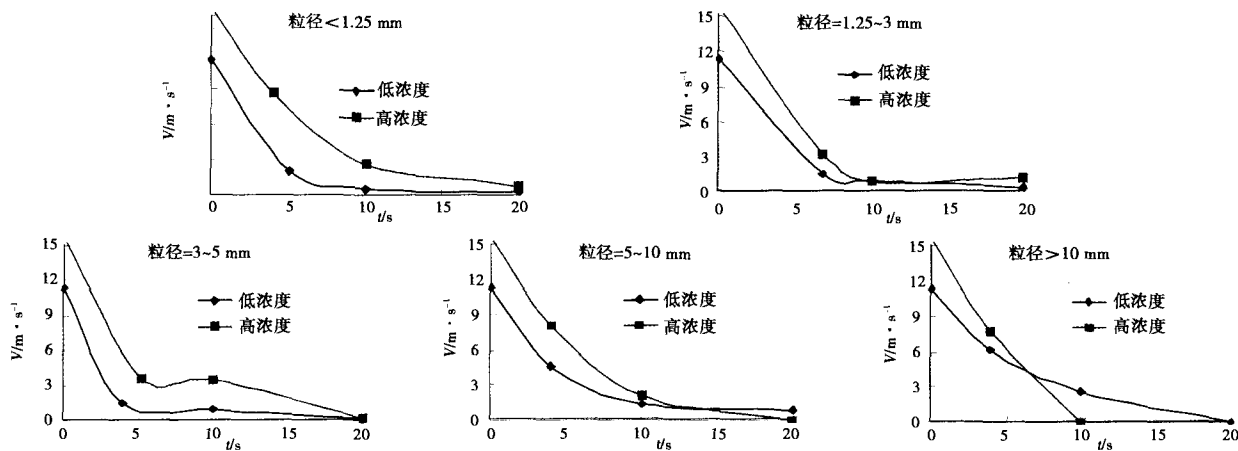


图 11 不同粘度浆体中各级颗粒沉速比较

### 3.3 附加孔隙压力对沉降规律的影响

泥石流流体中固体颗粒被混入液体时,固体颗粒的部分重量将暂时由液相通过浮力来承受。文献[5,14,15]已展示了这种流体压力,称为孔隙压力,它随着孔隙流体承载的碎屑颗粒比例增加而增大:

$$P = P_0 + P_e \quad (4)$$

式中:  $P$  是流体孔隙压力,  $P_0$  是静水压力,  $P_e$  是附加孔隙压力,附加孔隙压力就由某泥浆处的固体颗粒体积浓度所确定:

$$P_e = (\rho_s - \rho_0) \int_h^0 C_{v1} dh \quad (5)$$

式中:  $\rho_s$  是固体颗粒的比重,  $C_{v1}$  是某泥深处的体积浓度,  $\rho$  是  $h$  处附加孔隙压力。假设颗粒在液体中离散是均匀的,可将上式简化成:

$$P_e = C_u (\rho_s - \rho_0) h \quad (6)$$

当固体颗粒在浆体中沉积时,附加孔隙压力逐渐消散,泥石流中物质对固体颗粒的浮力也随之消散。孔隙水压力是用 XP05 型振弦式孔隙水压力计测量。由:

$$P = \rho_0 (h + h') = \rho_0 h + \rho_0 h' \quad (7)$$

$$P_e = C_u (\rho_s - \rho_0) h = \rho h' \quad (8)$$

可得: 
$$C_{vf} = \frac{h'}{h} [\rho_0 / (\rho_s - \rho_0)] \quad (9)$$

式中  $C_{vf}/C_{\alpha}$  就是由浮力支持的固体颗粒部分,  $\rho_0 h'$  值为附加孔隙压力。

泥石流浆体中大量的极少分选的粗颗粒的存在既能起到结构性流体的骨架作用,又提供泥石流固体颗粒浓度和内摩擦力,并且还能使颗粒间孔隙变得狭窄和曲折,从而产生附加孔隙压力。附加孔隙压力的

存在给固体向上的浮托力,从而降低了固体的沉降速度。并且附加孔隙压力的值受浆体粘度、固相质时大小及固相沉速的综合影响(如图12)。从图得出,沉速越快,附加孔隙压力越大,因此对固相向上的浮托力也越大,从此减缓固相的沉速。当固相颗粒在浆体中沉积时,附加孔隙压力逐渐消散,固相颗粒混合液中的附加孔隙压力对固相的浮力也随之消散。

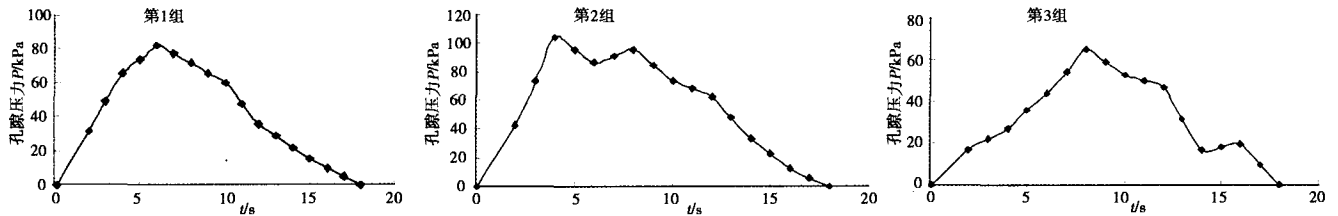


图12 附加孔隙压力在不同粘度和固体质量的浆体中变化规律比较

#### 4 结论

基于前述,可得结论如下:

1) 概括了泥石流固相在沉积区沉降时经历了三个阶段,即初始阶段、沉降阶段和沉积阶段,并对各个阶段的沉降过程作了详细的分析。

2) 通过试验研究,得出了影响泥石流固相沉降的三个主要因素,分析了各个因素影响泥石流固相沉降的具体原因。

3) 初步建立了泥石流固相在沉积区内的沉降规律。为研究泥石流运动机理、能量衰减条件和沉积扇变化形态等一系列理论奠定了初步基础。

#### 参考文献:

- [1] 王玉章,康志成. 泥石流体的沉积稳定浓度与颗粒级配之关系[J]. 山地研究, 1991, 9(3): 165-170.
- [2] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [3] 费祥俊, 康志成, 王裕宜. 细颗粒浆体、泥石流浆体对泥石流运动的作用[J]. 山地学报, 1991, 9(3): 143-152.
- [4] 王裕宜, 詹钱登等. 泥石流浆体屈服应力综合表达式的研究[J]. 自然灾害学报, 1999, 8(3): 103-110.
- [5] 王裕宜, 费祥俊. 粘性泥石流颗粒悬浮机理研究[J]. 中国科学(E辑), 1999, 29(4): 372-377.
- [6] CHEN HONGKAI, TANG HONGMEI, WU SIFEI. Research on abrasion of Debris Flow to High-speed drainage Structure[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2004, 25(11): 1257-1264.
- [7] P. GHILARDI, L. NATALE, F. SAVI. Modeling debris flow propagation and deposition[J]. Phys. Chem. Earth (c), 2001, 26(9): 651-656.
- [8] CHUN-LUNG CHEN. General Solutions for Viscoplastic Debris Flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 114, 3(1986).
- [9] J. S. O'BRIEN, P. Y. JULIEN, W. T. FULLERTON. Two-dimensional Water Flood and Mudflow Simulation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 119, 1993, 2: 244-261.
- [10] G. G. BATROUNI, S. DIPPEL, L. SAMSON. Stochastic Model for the Motion of a Particle on an Inclined Rough Plane and the Onset of Viscous Friction[J]. Physical Review, 53, 6(1996): 6496-6503.
- [11] MAJOR J. J. PIERSON T. C. Debris flow rheology: Experimental analysis of fine grained slurries[J]. Water Resources Research, 1992, 28(3): 841-857.
- [12] CHEN HONGKAI, TANG HONGMEI. Research and Control of Giant Debris Flow along Highway[J]. See: THE PROCEEDINGS OF THE CHINA ASSOCIATION FOR SCIENCE AND TECHNOLOGY, No. 1. Beijing/New York: Science Press, 2004: 320-328.
- [13] CHUN-LUNG CHEN. Generalized viscoplastic modeling of debris flow[J]. J. of Hydraulic Division, Proceedings of American Society of Civil Engineering, 1988, 114(3): 237-258.
- [14] HAMPOTON A. Buoyancy in debris flows[J]. J Sediment Petrol, 1975, 49: 753-758.
- [15] WOLMAN M G. 1997. Changing Needs and Opportunities in the Sediment Field[J]. Water Resources Research, 13: 50-54.

(编辑 王秀玲)