

# 利用冲击力信号判断泥石流颗粒垂向分选的 试验研究\*

杨红娟<sup>1,2</sup>, 韦方强<sup>2</sup>, 胡凯衡<sup>2</sup>, 洪 勇<sup>2</sup>

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;  
2. 中国科学院·水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

**摘 要:** 分别提出根据冲击力数据的波动强度和峰值情况进行泥石流颗粒垂向分选研究的系统方法, 并配置了三组不同容重(2 095 kg/m<sup>3</sup>、2 008 kg/m<sup>3</sup> 和 1 960 kg/m<sup>3</sup>)的粘性泥石流样品开展泥石流冲击试验。两种方法的分析结果基本一致, 即容重为 2 095 kg/m<sup>3</sup> 的泥石流分选不明显, 其他两组泥石流呈现出正粒序分布且容重越小分选越显著。量纲分析表明, 开展的试验粘滞力在运动中起主导作用, 颗粒之间作用力较小, 不容易发生反粒序分选, 这与通过冲击力分析颗粒垂向分选的结果一致, 因此提出的利用冲击力信号判断泥石流颗粒垂向分选的系统方法具有适用性。

**关键词:** 泥石流; 颗粒分选; 冲击力; 试验

**中图分类号:** P642.23   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1000-811X(2011)04-0029-06

泥石流是发生于山坡与沟谷中的含有小至粘粒、大至巨石的固液两相流<sup>[1]</sup>。由于重力及颗粒之间的相互作用, 泥石流运动中可能发生固体颗粒的垂向分选, 因此颗粒垂向分选研究是泥石流动力学研究的重要内容, 对于认识泥石流的复杂运动机理具有重要意义。

在泥石流堆积体的不同位置取样并分析样品的颗粒级配是研究泥石流颗粒垂向分选的常用方法, 如 Major<sup>[2]</sup> 记录了美国俄勒冈州森林观测站大型泥石流流槽试验堆积物的反粒序(上粗下细)现象, 王裕宜等<sup>[3]</sup> 分析了云南蒋家沟某支沟泥石流堆积扇的剖面特征。堆积体是泥石流停积后形成的, 因此这种方法得到的颗粒垂向分选信息不能完全反映运动时的状况。对于不含粘土颗粒的泥石流(即水石流), 可通过影像资料观测颗粒在运动中的分选情况, 如王兆印<sup>[4]</sup> 开展的泥石流龙头运动试验研究。对于含有粘粒的泥石流, 流体的不透明性阻碍了该方法的应用。Savage 等<sup>[5]</sup> 通过在实验槽末端设置水平隔板并在回收样品的容器中设置垂直隔板研究干颗粒的垂向分选, 一些学者<sup>[6-7]</sup> 进一步利用该方法研究颗粒与牛顿体混合后的分选状况, 该方法存在的问题是隔板对流场扰动较大并且由于大石块的破坏作用难以用于野外测量。胡凯衡等<sup>[8]</sup> 在蒋家沟开展了泥石流冲击力

野外测量, 根据距离沟床不同位置处的冲击信号的尖峰初步分析了颗粒垂向分选状况, 但是该分析没有考虑流速的影响。为此, 本文进一步开展泥石流冲击力试验, 结合流速资料提出利用冲击力信号判断泥石流颗粒垂向分选的系统方法。

## 1 试验概况

### 1.1 试验装置和测量系统

本研究利用可变坡钢结构实验槽开展粘性泥石流冲击力测试。试验装置如图 1 所示, 由四部分构成: 泥浆池、实验槽、传感器支架和回收池。实验槽长 600 cm, 宽 30 cm, 高 40 cm, 实验槽坡度可以无级变动。实验槽上端连接泥浆池, 末端连接回收池, 为实验提供物料供应和回收利用。在距离实验槽末端 2 m 位置设立传感器支架, 供安装冲击力传感器使用。

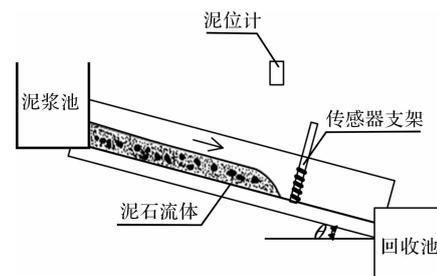


图 1 试验装置示意

\* 收稿日期: 2011-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(40771026); 中国科学院成都山地灾害与环境研究所青年百人团队项目

作者简介: 杨红娟(1982-), 女, 河南襄城人, 博士, 助理研究员, 主要从事泥石流流体力学研究。E-mail: yanghj@imde.ac.cn

测量系统包括冲击力测量和泥位测量两部分。冲击力测量系统包括冲击力传感器组、数据采集器和计算机。传感器组由8个直径1 cm的圆形应变式传感器组成,这些传感器被固定在一个中空的支架的迎水面,受力面与立柱迎水面位于同一平面。8个传感器分别距离槽底1.4 cm、2.9 cm、4.4 cm、5.9 cm、7.4 cm、8.9 cm、10.4 cm和11.9 cm。数据采集器共有24个通道,采样频率为4 000 Hz。采集器与计算机相连,冲击力数据可在计算机中同步记录和显示。使用激光泥位计测量支架处泥深变化过程,测量精度为0.1 cm,采样频率为30 Hz,安装在传感器前上方。

## 1.2 试验材料和试验结果

试验所用材料来自云南东川蒋家沟泥石流原状堆积物,经1 cm过筛处理,去除大于1 cm的颗粒。试验材料颗粒级配曲线见图2,粘粒(<0.004 mm)、粉砂(0.004~0.062 mm)、砂(0.062~2 mm)和砾石(2~16 mm)所占比例分别为8.5%、18.6%、28.6%和44.3%。

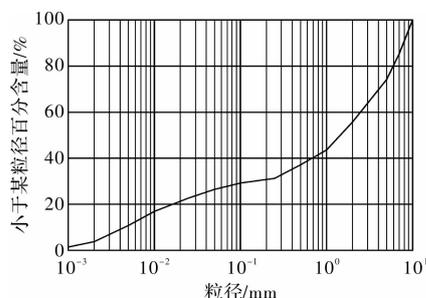


图2 固体颗粒粒径级配曲线

试验分三组,其容重、实验槽坡降、重复次数和秒表所测龙头平均流速列于表1。康志成等<sup>[9]</sup>将泥石流分为稀性泥石流、亚粘性泥石流、粘性泥石流、高粘性泥石流等类型,其中粘性泥石流容重为1 950~2 300 kg/m<sup>3</sup>。据此判断,三组样品均为粘性泥石流,其中第III组接近粘性泥石流的容重下限。根据表1所列同组各测次龙头平均流速范围,可以看出测量重复性较好。

表1 泥石流冲击力试验

| 分组  | 容重/(kg/m <sup>3</sup> ) | 实验槽坡降/% | 重复次数 | 龙头平均流速/(m/s) |
|-----|-------------------------|---------|------|--------------|
| I   | 2 095                   | 14.4    | 7    | 2.33~2.59    |
| II  | 2 008                   | 13.1    | 4    | 2.57~2.69    |
| III | 1 960                   | 13.1    | 6    | 2.54~2.90    |

每次试验可以通过测量系统获取泥石流运动过程中的两组数据,即冲击力和泥深数据,其中冲击力除以传感器面积得到冲击压强。图3显示了

其中一次试验获取的泥深和冲击压强过程线,其中冲击压强过程线为7.4 cm处的传感器获取的数据。从泥深过程看,流动约持续6 s,期间泥深先增大后减小,最大值为10.3 cm。龙头刚到达冲击力测量断面时泥深较小,7.4 cm处传感器受力为零,之后该传感器开始受力,在泥深最大时冲击力达到最大,随着泥深减小,冲击力逐渐归零。这些试验结果为研究泥石流颗粒垂向分选提供了试验数据支持。

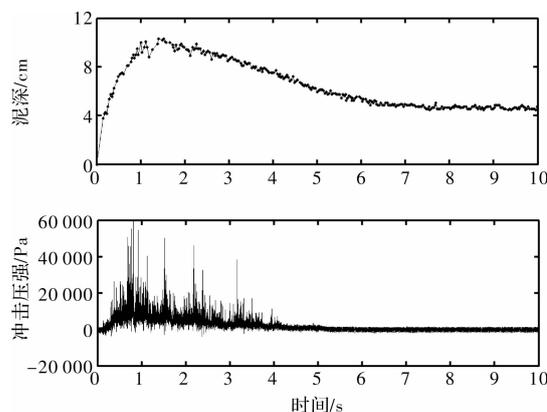


图3 某测次试验泥深和7.4 cm处的冲击压强过程

## 2 颗粒垂向分选分析

### 2.1 利用动压强标准偏差分析颗粒垂向分选

以两相流的观点来看,泥石流可分为液相和固相两部分,其中液相由水和较细的固体颗粒构成,固相由较粗的固体颗粒构成。与此相应,泥石流的动压强可分为液相动压强和固相动压强。液相在空间上的分布较为均匀,其动压强比较稳定,固相动压强因粒径分布范围较大且空间上不连续而不稳定。因此,相同粒径级配下动压强波动强度与固相体积浓度呈正相关关系,相同固相体积浓度下动压强波动强度与固相粒径呈正相关关系。张玉萍<sup>[10]</sup>利用三种粒径的颗粒分别配置不同体积浓度的水石流开展冲击试验,利用动压力标准偏差表示其波动强度,试验结果与该论断相符。若泥石流在运动过程中发生颗粒垂向分选,粗颗粒集中的部位与其他部位相比固相体积浓度和粒径均会有所增加,因此动压强波动强度的垂向分布可以反映颗粒垂向分选状况。

利用动压强波动强度判断颗粒垂向分选状况时需要考虑信号噪声和流速的影响,同样粒径级配和固相体积浓度的泥石流,动压强波动强度与噪声强度、流速均为正相关关系。削减噪声要求

对原始冲击压强数据进行降噪处理。冲击压强信号的频谱分析表明信号能量集中在低频部分, 基于快速傅里叶变换的低通滤波在使信号变光滑的同时滤掉了有用信号, 因此本文参考张玉萍<sup>[10]</sup>的研究利用小波分析进行降噪。以某一测次的冲击压强为例, 图 4 显示了原始信号、低通滤波后的信号和小波降噪后的信号。图中 0 时刻前泥石流尚未到达测量断面, 该时段的信号强度可代表噪声强度, 该时段原始信号的标准偏差为 304 Pa, 小波降噪后为 60 Pa, 因此小波降噪可以大幅度削弱噪声, 同时保留有用信号。

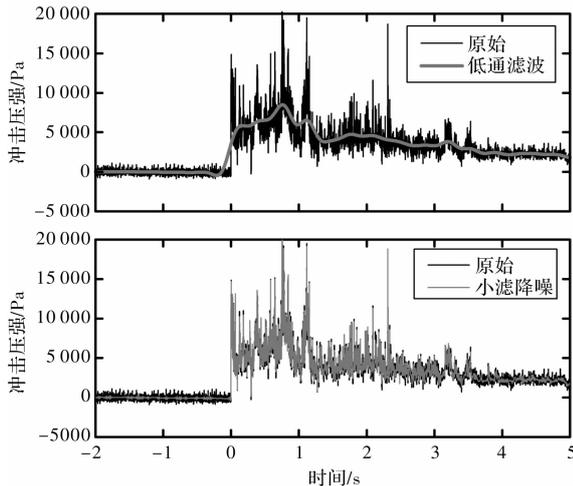


图 4 原始冲击压强信号与降噪处理后的信号

通过静水压公式计算静压强  $p_s$ <sup>[11]</sup>

$$p_s = \rho_c g (h - z) \cos \theta, \quad (1)$$

式中:  $\rho_c$  为泥石流容重 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $g = 9.81 \text{ m}/\text{s}^2$  为重力加速度;  $h$  为泥深 (m);  $z$  为传感器中心距离槽底的高度 (m);  $\theta$  为实验槽倾角。冲击压强减去静压强即为动压强  $p_k$ , 为

$$p_k = p - p_s, \quad (2)$$

式中:  $p$  为冲击压强 (Pa)。

低通滤波后的冲击压强对应的动压强反映了

泥石流流速的变化情况, 记为  $p_{k1}$ ; 小波降噪后的冲击压强对应的动压强则反映了流速和颗粒分选的综合影响, 记为  $p_{k2}$ 。定义相对动压强  $P_r$  为

$$P_r = \frac{p_{k2}}{p_{k1}}. \quad (3)$$

式中:  $P_r$  为无量纲量, 消除了流速影响, 因此可通过  $P_r$  波动强度的垂向分布判断泥石流颗粒垂向分选状况。

图 3 显示试验中泥深先增加后减小, 并且在最大值处比较稳定, 因此取平均泥深最大的 1 s 时段进行数据分析, 期间完全淹没在泥石流中的传感器有 5 个。记  $P_r$  的标准偏差为  $\text{STDP}_r$ , 代表  $P_r$  的波动强度, 分别计算同组各测量高度不同测次泥深最大 1 s 时段内的  $\text{STDP}_r$  的平均值, 结果如表 2 和图 5 所示。第 I 组 5 个测量高度  $\text{STDP}_r$  平均值的标准偏差为 0.031, 小于大多数测量高度不同测次  $\text{STDP}_r$  的标准偏差, 表明颗粒垂向分选不明显; 第 II 组和第 III 组则分别为 0.063 和 0.109, 大于大多数测量高度不同测次  $\text{STDP}_r$  的标准偏差, 表明颗粒垂向分选较明显。从平均值来看, 第 II 组和第 III 组  $\text{STDP}_r$  的最大值分别出现在 2.9 cm 和 4.4 cm 处, 最小值均出现在 7.4 cm 处, 因此可以初步判断为正粒序(上细下粗)分布。

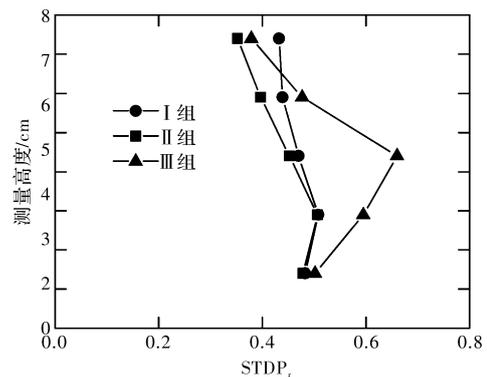


图 5 同组各测次  $\text{STDP}_r$  平均值的垂向分布

表 2

各测量高度  $\text{STDP}_r$  的统计结果

| 分组  | 指标   | 1.4 cm | 2.9 cm | 4.4 cm | 5.9 cm | 7.4 cm | 标准偏差  |
|-----|------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| I   | 平均值  | 0.483  | 0.509  | 0.471  | 0.439  | 0.433  | 0.031 |
|     | 标准偏差 | 0.060  | 0.048  | 0.021  | 0.034  | 0.040  |       |
| II  | 平均值  | 0.479  | 0.507  | 0.453  | 0.397  | 0.352  | 0.063 |
|     | 标准偏差 | 0.097  | 0.023  | 0.026  | 0.031  | 0.020  |       |
| III | 平均值  | 0.502  | 0.595  | 0.660  | 0.477  | 0.379  | 0.109 |
|     | 标准偏差 | 0.108  | 0.073  | 0.146  | 0.046  | 0.044  |       |

## 2.2 利用动压强尖峰数分析颗粒垂向分选

章书成等<sup>[12]</sup>通过对蒋家沟泥石流的观测, 将

泥石流冲击力概化为锯齿型脉冲、矩形脉冲和尖峰型脉冲, 其中尖峰型脉冲由大石块撞击引起,

因此可通过尖峰型脉冲的数量来判断大颗粒的垂向分布情况。

何思明等<sup>[13]</sup>根据能量平衡原理考察了泥石流中大石块横向冲击拦挡坝的问题。假设静力条件下大石块与拦挡坝接触面上的法向应力(冲击力) $F$ 与法向变形量 $\delta$ 之间满足如下关系

$$F = c\delta^k, \quad (4)$$

式中： $c$ 和 $k$ 为材料的特性参数。可以推导出泥石流大石块最大冲击力 $F_{\max}$ 为

$$F_{\max} = c \left[ \frac{mu^2(k+1)}{2c} \right]^{\frac{k}{k+1}}, \quad (5)$$

式中： $m$ 为石块质量(kg)。对于本试验所用冲击力传感器， $k=1$ ，由式(5)可知大颗粒的最大冲击压强 $p_{\max}$ 为

$$p_{\max} = \frac{\sqrt{cm}}{S} \cdot u, \quad (6)$$

式中： $S$ 为传感器面积( $m^2$ )。由此可知大颗粒的最大冲击压强与流速成正比，同时与颗粒质量正相关。记 $N_c$ 为 $p_{\max}$ 与 $u$ 的比值。

$$N_c = \frac{p_{\max}}{u} = \frac{\sqrt{cm}}{S}. \quad (7)$$

由于各传感器参数 $c$ 和 $S$ 相同，因此 $N_c$ 只与 $m$ 有关，某传感器在单位距离内测得的 $N_c$ 大于一定阈值的尖峰数越多，该传感器处大于一定粒径的颗粒数也越多，据此可以判断大颗粒的空间分布。

取泥石流的动压强为小波降噪对应的 $p_{k2}$ ，根据蒋家沟泥石流研究成果<sup>[14]</sup>，水和2 mm以下固体颗粒构成液相，其动压强 $p_{kf}$ 与一般流体相同。

$$p_{kf} = 0.5\rho_f C_{vf} u^2, \quad (8)$$

式中： $\rho_f$ 为液相容重( $kg/m^3$ )； $C_{vf}$ 为液相体积浓度。流速 $u$ 利用低通滤波对应动压强 $p_{k1}$ 计算<sup>[11]</sup>：

$$u = \sqrt{2p_{k1}/\rho_c}. \quad (9)$$

则固相对应的动压强 $p_{kc}$ 为：

$$p_{kc} = p_{k2} - p_{kf}. \quad (10)$$

根据式(7)和 $p_{kc}$ 可以计算出 $N_c$ ，图6是某测次泥深最大1 s内的 $N_c$ 过程。只有大于一定阈值 $N'_c$ 的尖峰才对应一个较大的颗粒，即需要统计单位长度内满足以下条件的信号个数：

$$N_c^i > N'_c; N_c^i > N_c^{i-1}; N_c^i > N_c^{i+1}, \quad (11)$$

式中： $N_c^{i-1}$ 、 $N_c^i$ 、 $N_c^{i+1}$ 分别代表 $i-1$ 、 $i$ 和 $i+1$ 时刻的 $N_c$ 值。

$N'_c$ 取值过小，尖峰可能是多个小颗粒同时冲击传感器的结果； $N'_c$ 取值过大，满足式(11)的尖

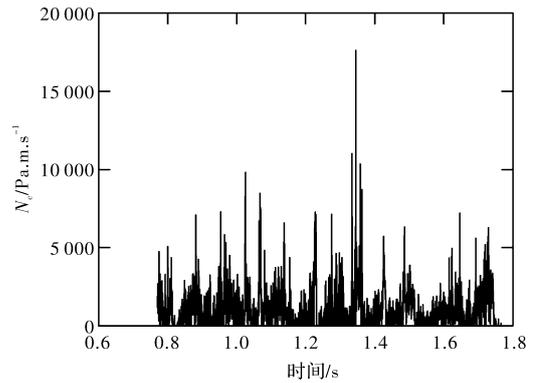


图6 某测次2.9 cm处泥深最大1 s内的 $N_c$ 过程

峰太少，统计结果缺乏代表性。综合考虑两项因素，本研究取 $N'_c = 5\,000$ 。首先计算各测次泥深最大1 s内的 $N_c$ 过程并统计大于 $N'_c$ 的尖峰个数，然后结合1 s内的平均流速计算单位距离(1 m)内的尖峰个数，最后统计出同组各测量高度不同测次尖峰数的平均值，如图7所示。各组1.4 cm处的尖峰数均明显小于其它位置，可能原因有两个：①该位置距离槽底很近，传感器前方因立柱的阻挡作用而停积有泥石流流体，对大颗粒撞击具有缓冲作用；②该处剪切速率很高，促使大颗粒向上运动。第I组其它四个高度的平均尖峰数接近，第II组和第III组则呈现随高度增加而减小的趋势，表明第I组的泥石流流体大颗粒分布均匀，第II组和第III组因重力作用大颗粒出现沉降，泥石流容重越小，沉降越明显。第I组到第III组泥石流容重递减，因颗粒级配不变，大颗粒含量必然相应减小，但是统计结果与此相反，这可能是因为容重减小时紊动增强，颗粒冲击力因叠加到紊动作用力之上而有所增加。

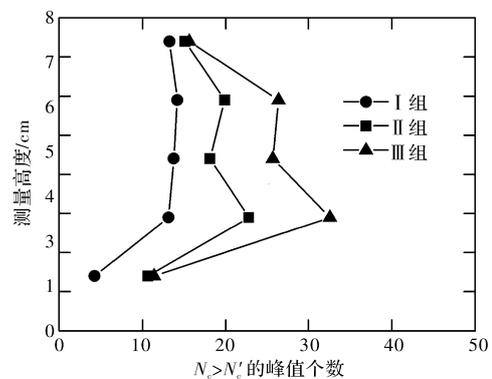


图7 同组各测次单位距离内 $N_c > N'_c$ 的尖峰平均数的垂向分布

### 2.3 泥石流内部作用力的量纲分析

泥石流运动阻力包括粘滞力、颗粒碰撞力和摩擦力等，颗粒垂向粒径分布与主导作用力有关。

Iverson<sup>[15]</sup>在前人研究基础上总结了三个无量纲数及相应阈值表征这些力的相对大小, 包括表征碰撞力和粘滞力相对大小的 Bagnold 数  $N_{\text{Bag}}$ 、表征碰撞力和摩擦力相对大小的 Savage 数  $N_{\text{Sav}}$ 、表征摩擦力和粘滞力相对大小的摩擦数  $N_f$ , 其表达式分别为:

$$N_{\text{Bag}} = \frac{1 - C_{\text{vf}}}{C_{\text{vf}}} \cdot \frac{\rho_s D^2 \dot{\gamma}}{\mu_f}, \quad (12)$$

$$N_{\text{Sav}} = \frac{\rho_s D^2 \dot{\gamma}^2}{(\rho_s - \rho_f) g h \tan \phi}, \quad (13)$$

$$N_f = \frac{1 - C_{\text{vf}}}{C_{\text{vf}}} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_f) g h \tan \phi}{\mu_f \dot{\gamma}}, \quad (14)$$

式中:  $\rho_s$  为颗粒密度, 本文取  $2\,700\text{ kg/m}^3$ ;  $D$  为固相中值粒径, 根据粒径级配曲线为  $5.7\text{ mm}$ ;  $\dot{\gamma}$  为剪切速率, 通过龙头平均流速  $u_{\text{surge}}$  和泥深计算得到 ( $\dot{\gamma} = u_{\text{surge}}/h$ );  $\phi$  为颗粒内摩擦角, 根据康志成等<sup>[9]</sup>的实验结果取  $29.8^\circ$ ;  $\mu_f$  为浆体粘滞系数, 通过液相流变试验得到。

利用分析颗粒垂向分选时段的平均泥深计算得到三组试验各测次的 Bagnold 数、Savage 数和摩擦数, 其范围列于表 3。从第 I 组到第 III 组, 随着泥石流容重减小, 液相粘滞系数显著减小, 剪切速率有所增加, 故  $N_{\text{Bag}}$  和  $N_f$  逐渐增加。第 III 组因剪切速率较大,  $N_{\text{Sav}}$  大于前两组。根据 Iverson<sup>[15]</sup>界定的阈值,  $N_{\text{Bag}} > 200$  表明碰撞作用超过粘滞作用,  $N_{\text{Sav}} > 0.1$  表明碰撞作用超过摩擦作用,  $N_f > 2\,000$  表明摩擦作用大于粘滞作用, 由此判断三组试验中粘滞力在泥石流运动中均起主导作用, 其次为颗粒碰撞力。目前主要通过运动筛分<sup>[16]</sup>和颗粒碰撞<sup>[17]</sup>理论解释颗粒物质运动中反粒序的形成, 本研究开展的试验中颗粒作用力在泥石流运动中不起主导作用, 故没有出现反粒序分布。与此同时, 泥石流容重越大, 液相粘滞系数越小, 颗粒沉降速度越大, 因此正粒序分布越显著。

表 3 无量纲数计算结果

| 分组  | 剪切速率/ $\text{s}^{-1}$ | 液相粘滞系数/ $(\text{Pa} \cdot \text{s})$ | $N_{\text{Bag}}$ | $N_{\text{Sav}}$ | $N_f$  |
|-----|-----------------------|--------------------------------------|------------------|------------------|--------|
| I   | 24.0 ~                | 0.29 ~                               | 2.6 ~            | 0.11 ~           | 22.6 ~ |
|     | 26.5                  | 0.33                                 | 3.0              | 0.13             | 25.7   |
| II  | 25.6 ~                | 0.13 ~                               | 5.4 ~            | 0.11 ~           | 43.2 ~ |
|     | 27.3                  | 0.15                                 | 6.1              | 0.13             | 54.1   |
| III | 26.8 ~                | 0.07 ~                               | 10.4 ~           | 0.12 ~           | 58.6 ~ |
|     | 33.8                  | 0.08                                 | 12.8             | 0.22             | 87.9   |

### 3 结论

本文分别提出根据冲击力数据的波动强度和峰

值情况进行泥石流颗粒垂向分选研究的系统方法, 并配置了三组不同容重 ( $2\,095\text{ kg/m}^3$ 、 $2\,008\text{ kg/m}^3$  和  $1\,960\text{ kg/m}^3$ ) 的粘性泥石流样品开展泥石流冲击试验。两种方法的分析结果基本一致, 即容重为  $2\,095\text{ kg/m}^3$  的泥石流分选不明显, 其他两组泥石流呈现出正粒序分布且容重越小分选越显著。量纲分析表明, 本文开展的试验粘滞力在运动中起主导作用, 颗粒之间作用力较小, 不容易发生反粒序分选, 这与通过冲击力分析颗粒垂向分选的结果一致, 因此本文提出的利用冲击力信号判断泥石流颗粒垂向分选的系统方法具有适用性。该方法会受紊动影响, 因此只能在同一流态下进行, 不同流态之间的计算结果不具有可比性。

### 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: 12.
- [2] Major J J. Experimental studies of deposition at a debris flow flume [R]. U S Geological Survey Fact Sheet, 1994: 28.
- [3] 王裕宜, 詹钱登, 韩文亮, 等. 泥石流堆积层结构的分析研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3): 68-71.
- [4] 王兆印. 泥石流龙头运动的实验研究及能量理论[J]. 水利学报, 2001(3): 18-26.
- [5] Savage S B, Lun C K K. Particle size segregation in inclined chute flow of dry cohesionless granular solids [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1988, 189: 311-335.
- [6] Vallance J W, Savage S B. Particle segregation in granular flows down chutes [C]//Rosato A, Blackmore D. Segregation in granular flows (International Union of Theoretical and Applied Mechanics Symposium). Dordrecht: Kluwer, 2005: 31-51.
- [7] Zanuttigh B, Ghilardi P. Segregation process of water-granular mixtures released down a steep chute [J]. Journal of Hydrology, 2010, 391: 175-187.
- [8] 胡凯衡, 韦方强, 洪勇, 等. 泥石流冲击力的野外测量[J]. 岩石力学与工程学报, 25(s1): 2813-2819.
- [9] 康志成, 李焯芬, 马嵩乃, 等. 中国泥石流研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 21-96.
- [10] 张玉萍. 泥石流冲击信号识别方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.
- [11] Yang H, Wei F, Hu K, et al. Measuring the internal velocity of debris flows using impact pressure detecting in the flume experiment [J]. Journal of Mountain Science, 2011, 8(2): 1-9.
- [12] 章书成, 袁建模. 泥石流冲击力及其测试[C]//中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊第 4 号(中国泥石流研究专辑). 北京: 科学出版社, 1985: 269-274.
- [13] 何思明, 吴永, 沈均. 泥石流大块石冲击力的简化计算[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(5): 51-56.
- [14] 王裕宜, 詹钱登, 严璧玉. 泥石流流体结构和流变特性[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2001: 5-7.
- [15] Iverson R M. The physics of debris flows [J]. Reviews of Geophysics, 1997, 35(3): 245-296.
- [16] Mideleton G V. Experimental studies related to problems of flysch

sedimentation [C]//Lajoie J. Flysch Sedimentology in North America. Toronto: Business and Economics Service, 1970: 253-272.

[17] Bagnold R A. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear [J]. Proc Roy Soc, 1954, 225: 49-63.

## Experimental Study on Vertical Sorting of Particles in Debris Flow with Impact Signals

Yang Hongjuan<sup>1,2</sup>, Wei Fangqiang<sup>2</sup>, Hu Kaiheng<sup>2</sup> and Hong Yong<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Studying vertical sorting of particles is important for understanding the complex mechanism of debris flow. In this paper we proposed two methods to judge vertical sorting of particles in debris flow. One is based on the standard deviation of impact signals, and the other is based on the peaks in impact signals. We carried out three groups of flume tests with debris densities of 2 095 kg/m<sup>3</sup>, 2 008 kg/m<sup>3</sup> and 1 960 kg/m<sup>3</sup>, respectively. Results of the two methods are similar. There is no significant vertical sorting with the first group of debris flows. There is normal sorting with the other two groups, and the normal sorting becomes more significant for debris flows with smaller density. Dimensional analysis indicates that viscous stress is dominant in debris flow movement. It is difficult for the smaller stress between particles to make a reverse sorting. This is consistent with the results using impact signals. Therefore, the methods proposed in this paper are applicable to judge vertical sorting of particles in debris flow.

**Key words:** debris flow; particle sorting; impact pressure; test

(上接第 28 页)

## Spatial and Temporal Evolution Characteristics of Extreme Rainfalls in the Pearl River Basin

Peng Juntai<sup>1,2</sup>, Zhang Qiang<sup>1,2</sup>, Chen Xiaohong<sup>1,2</sup> and Chen Yongqin<sup>3</sup>

(1. Sun Yat-sen University, Department of Water Resources and Environment, Guangzhou 510275, China; 2. Sun Yat-sen University, Guangdong University Key Laboratory of Water Cycle and Security in South China, Guangzhou 510275, China; 3. The Chinese University of Hong Kong, Department of Geography and Resource Management, Shatin China)

**Abstract:** Three extreme rainfall indexes as the maximum consecutive rainy days (*MCP*), the maximum number of consecutive rainy days (*MCD*) and related maximum precipitation intensity (*MCI*) and the *Z* index are defined and analyzed based on the daily precipitation data of 42 rain gauging stations in the period of 1960 ~ 2005. The results indicate that: (1) higher/lower *MCP*, *MCD*, *MCI* and *Z* values are found in the east/west parts of the Pearl River basin. The annual and summer *MCP*, *MCD*, *MCI* and *Z* values are high in the Pearl River delta, Guilin, Baise and Chongzuo, implying higher flood risk in these regions. No evident changes of *MCP*, *MCD*, *MCI* and *Z* values can be observed in winter; (2) No significant abrupt behaviors can be identified in these variables; (3) The spatial distribution of precipitation extremes is in close relations with that of topography. Those areas with higher probability of precipitation extremes are usually surrounded with mountains and may easily trigger mountainous flash floods. In this sense, the results of this study should be of great scientific and practical merits in scientific water resources management and enhancement of human mitigation to natural hazards.

**Key words:** precipitation extremes; Mann-Kendall analysis; spatio-temporal changes; the Pearl River basin