

## 蒋家沟阵性泥石流输沙规律研究

魏 丽<sup>1,2</sup> 胡凯衡<sup>1,2</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 6100413)

**摘 要:** 阵性运动是粘性泥石流运动的主要形式, 以蒋家沟 5a 中 20 次具有完整观测资料的典型阵性泥石流作为基础数据, 对阵性泥石流输沙量、输沙级配变化进行了初步分析。分析发现阵性泥石流输沙量变化具有两种模式, 输沙量峰值一般出现在阵次序列前期或序列中期。不同阵次泥石流颗粒级配曲线具有相似的特征。随着阵流的发展, 泥石流细颗粒含量增加, 粗颗粒含量不断减少, 中值粒径、峰度系数、和质量密度总体均呈减小趋势; 出现连续流时, 粘粒含量不断增加, 质量密度迅速减小。0.01 mm 可以作为划分阵性泥石流颗粒的临界分维粒径, 大于和小于该粒径的颗粒组成均具有较好的分形特征, 其对于泥石流流态具有重要的意义。

**关键词:** 阵性泥石流; 输沙量; 颗粒组成; 分形

中图分类号: TV142. 2

文献标志码: A

## Study on sediment transporting characteristics of intermittent debris flows in Jiangjia Ravine

WEI Li<sup>1,2</sup>, HU Kaiheng<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Intermittent motion is the most important moving form of viscous debris flows. With field observation data of intermittent debris flow in Jiangjia Ravine, 20 typical intermittent debris flows with whole occurring process were chosen as the basic data to preliminarily analyze the characteristics of debris flow sediment discharge and gradation. The analysis shows that, there are two changing patterns of intermittent debris flow sediment discharge, and the sediment discharge peaks usually appear in early or middle stage. Some similar characteristics exist in sediment particle composition. With the development of intermittent debris flows series, there is an increase in fine particles content and continuous reduction of coarse particles content, while median diameter, bimodality parameter and mass density overall show a decreased trend. When continuous flow appears, the viscous particle content increases continuously and mass density decreases rapidly. Fractal dimension values are calculated, with non-scale range identified as 0.01 mm. The particles greater than and less than the size show evident fractal characteristics, which has important implications for the debris flow pattern.

**Key words:** intermittent debris flow; sediment discharge; sediment particle composition; fractal characteristic

泥石流是我国山区常见的一种重大自然灾害, 是一种富含大量泥沙石块和巨砾的固液两相流体, 呈粘性

收稿日期: 2013-04-29; 修回日期: 2013-07-10

基金项目: 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-05-01-03); 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所青年百人团队资助项目(110900K235)

作者简介: 魏丽(1986-), 女, 实习研究员, 硕士, 主要从事泥沙基本理论研究. E-mail: 201\_weili\_201@163.com

层流或稀性紊流等运动状态<sup>[1]</sup>。泥石流爆发突然,过程复杂,破坏力大,对我国社会环境及经济建设带来巨大的损失。如2010年8月7日爆发的甘肃舟曲特大山洪泥石流及2012年6月27日晚至28日凌晨爆发的白鹤滩矮子沟泥石流均造成了重大人员伤亡,许多房屋和耕地被冲毁及淤埋,舟曲泥石流甚至造成有的村庄被全部掩埋。一次泥石流特别是粘性泥石流巨大的输沙量加剧了房屋设施及耕地的淤埋及泥石流堵河阻水危险。如云南东川蒋家沟2001年7月8日暴发了大规模的泥石流,泥石流进入小江后淤积成坝,导致小江堵塞,并造成一定灾害。2002年8月15日蒋家沟爆发的一场泥石流输沙量就高达77万t,给下游带来巨大的输沙量。针对泥石流输沙特征的探讨可以为研究其输移规律及泥石流沟道冲淤观测提供重要支持。

粘性泥石流是自然界中最为常见的一种泥石流,其颗粒级配曲线为非常典型的宽级配类型,各级粒径分布曲线呈双峰型。阵性运动是粘性泥石流运动的主要形式,一场完整的粘性泥石流包含了数十个甚至上百个阵次,每阵泥石流流速、历时、容重、输沙量等均不同。许多学者对于阵性泥石流运动规律进行了一系列的研究<sup>[2-12]</sup>,但对于阵性泥石流输沙特征的研究较少,本文以云南东川蒋家沟2002-2007年5a中20次具有完整观测资料的典型阵性泥石流作为基础数据,对阵性泥石流输沙量变化、输沙级配变化进行初步分析。

### 1 研究区域<sup>[13]</sup>

蒋家沟是金沙江支流小江右岸的一条支沟,是小江流域内泥石流活动频率最高的一条泥石流沟,其泥石流暴发历史长,规模大,种类齐全,因此有“泥石流博物馆”之称。蒋家沟位置介于103°67'E-103°137'E, 23°137'N-23°17'N之间,流域面积48.52 km<sup>2</sup>,自东向西汇入小江。蒋家沟流域有支沟200多条,流域内岩性软弱、断裂纵横、地形陡峻、植物稀疏,地表形态十分复杂,滑坡和崩塌活动非常强烈,一到雨季,泥石流频频爆发。蒋家沟泥石流具有发育典型、类型齐全、过程完整、形态多样、规模巨大、作用强烈等特点,多年的观测资料为泥石流运动规律研究提供了基础。

### 2 阵性泥石流输沙量变化特征

一场完整的阵性泥石流由数十阵甚至上百阵组成,每阵泥石流历时几秒或者数十秒,相邻两阵泥石流具有明显的时间间隔,间隔时间一般为数十秒至数百秒。但这种泥石流并非从泥石流爆发到结束为止均为具有明显时间间隔的泥石流阵组成,一般情况下存在3种模式,即为:(I)连续流-阵1……阵n-连续流 (II)阵1……阵n-连续流 (III)连续流-阵1……阵n-连续流-阵n+1……其中连续流历时一般为数百秒甚至数小时。这种现象的出现可能与泥石流形成区固定物质的补给条件、降水特点、泥石流流通区的沟道边界条件及泥石流内在特性等因素有关。泥石流阵流输沙率巨大,会在短历时携带大量的泥沙冲向下游,造成严重危害。如蒋家沟2002年8月20日下午爆发的泥石流为类型I,阵流共有72阵,历时总共1466s,但输沙量达到20.87万m<sup>3</sup>,连续流总历时10543s,输沙量为2.96万m<sup>3</sup>,仅占该场泥石流总输沙量的12%,阵流输沙率是连续流的数十倍,故对于泥石流阵流输沙规律的研究显得尤为重要。

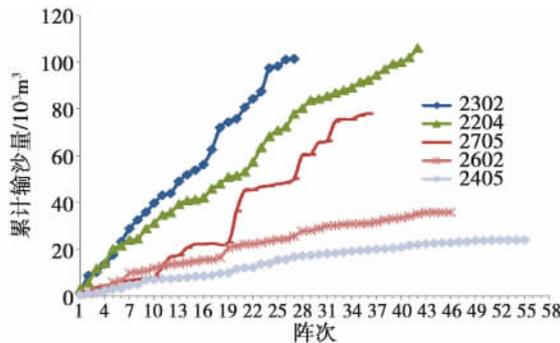


图 1 累积输沙量随阵次变化

Fig. 1 Change of cumulative sediment discharge with developmental sequence (Type I)

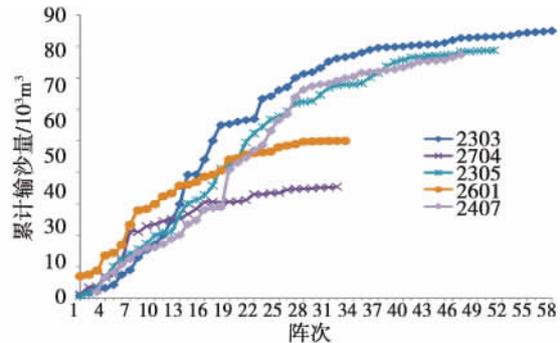


图 2 累积输沙量随阵次变化

Fig. 2 Change of cumulative sediment discharge with the developmental sequence (Type II)

首先选取输沙量累积曲线分析输沙量增速随泥石流阵次的变化。点绘 20 场泥石流阵流序列累积输沙

量随阵次的变化发现输沙量变化具有两种模式,见图 1、图 2 (文中仅选取部分场次示例)。模式 1 为输沙量增速随着阵次的增加几乎保持不变,输沙量累积曲线表现为一直线,如图 1 所示 2302、2204、2405、2602、2705 共 5 场泥石流。模式 2 为输沙量增速随着阵次的增加先保持不变,在阵次序列中后段输沙量增加速度减小,输沙量累积曲线先表现为一直线,然后直线斜率逐渐减小,如图 1 所示 2203、2305、2407、2601、2704 共 5 场泥石流。

图 1、图 2 对应的每阵输沙量随阵次变化见图 3、图 4。由图可见,随着阵次增加,输沙量也呈现两种变化模式,输沙量峰值一分别出现在阵次序列中期与序列前期,输沙量变化可能呈单峰分布,亦有双峰分布。同一场泥石流不同阵次输沙量最大最小值可相差数百倍,某阵次输沙量最大值可达到 20 000 m<sup>3</sup>,最小值近 4 m<sup>3</sup>,可见阵性泥石流各阵次输沙量具有变化剧烈的特点,也为泥石流的防治带来了一定难度。

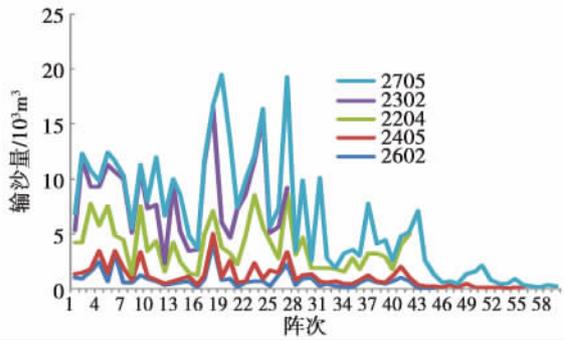


图 3 输沙量随阵次变化

Fig. 3 Change of sediment discharge with developmental sequence (Type I)

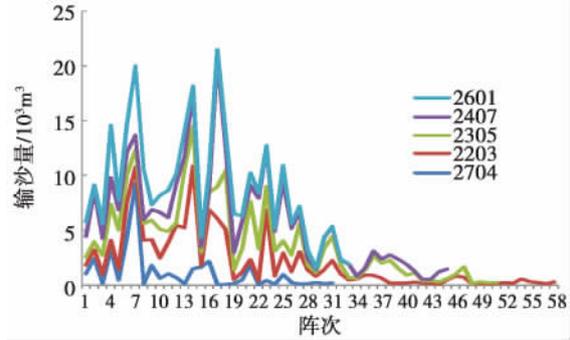


图 4 输沙量随阵次变化

Fig. 4 Change of cumulative sediment discharge with developmental sequence (Type II)

20 场泥石流峰值出现阵次情况统计见表 1。由表 1 可知,阵性泥石流输沙量峰值出现在前 50% 时段几率最大,其中出现在第 10 阵至 20 阵之间情况最多,但亦有出现在阵次序列的头尾处,在研究泥石流输沙灾害时此现象应引起注意。

表 1 输沙量峰值出现阵次情况统计

Table 1 Sequence statistics of sediment discharge peak value

总阵次 $T$	73	55	27	32	48	55	56	33	31	58	51	41	60	45	45	72	28	27	24	43			
输沙量峰值阵次 $T_{max}$	1	2	1	2	5	23	7	9	7	7	14	18	11	22	19	17	18	30	15	18	24	17	42
$\frac{T_{max}}{T} / \%$	1	2	4	6	10	48	13	16	21	23	24	35	27	54	32	38	40	42	54	67	89	71	98

### 3 阵性泥石流输沙颗粒组成特征

阵性泥石流爆发时,一般会携带极宽级配的泥沙颗粒,从巨石到粘粒,对下游造成巨大的灾害。因此对于阵性泥石流各阵次输沙颗粒特征变化的研究就显得极为重要,可以为研究阵性泥石流输沙机理提供一定的基础支持。由于观测资料所限,仅有 2007 年的 3 场阵性泥石流获得了部分阵次泥石流体的颗粒筛分情况。本文仅以此数据作为分析基础。

表 2 2007 年 7 月 24 泥石流样品取样记录 (2703)

Table 2 Debris flow sampling record (2703)

流态	阵	阵	阵	阵	阵	阵	阵	阵	阵	连	连	连	连	连
样品编号	24-1	24-2	24-3	24-4	24-5	24-6	24-7	24-8	24-9	24-10	24-11	24-12	24-13	
取样时间				7:48:12	8:13:58	8:35:26	9:04:30	9:18:44	9:36:00	10:01:25	10:40:00	11:20:00	12:00:00	
样品类型				龙头	龙头	龙头	龙头	龙头	连续流	连续流	连续流	连续流	连续流	
样品容重 / (g · cm <sup>-3</sup> )	1.995	1.959	2.101	2.0299	1.961	1.933	1.899	1.751	1.757	1.731	1.652	1.401	1.202	

表 3 2007 年 7 月 25 第 1 场泥石流样品取样记录(2704)

Table 3 Debris flow sampling record (2704)

流态	阵	阵	阵	阵	阵	阵	阵	连	阵	连
样品编号	25-1	25-2	25-3	25-4	25-5	25-6	25-7	25-8	25-9	25-10
取样时间	4:55:40	5:53:38	6:11:30	6:38:17	7:29:04	7:50:18	8:18:08	9:10:00	9:52:00	10:31:00
样品类型	龙头	连续流	龙头	连续流						
样品容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.208	2.245	2.147	2.077	2.022	1.851	1.875	1.766	1.869	1.706

表 4 2007 年 7 月 25 第 2 场泥石流样品取样记录(2705)

Table 4 Debris flow sampling record (2705)

流态	阵	阵	阵	阵	阵	连
样品编号	25-11	25-12	25-13	25-14	25-15	25-16
取样时间	14:33:40	15:7:25	15:47:50	16:24:48	17:10:00	18:25:00
样品类型	龙头	龙头	龙头	龙头	龙头	连续流
样品容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.138	2.199	2.244	2.007	2.072	1.585

注: 取样时间为: 时: 分: 秒 阵指阵性流 连指连续流。

表 2、表 3、表 4 为 2007 年爆发的 3 场阵性泥石流取样记录表。表中样品为泥石流爆发至结束过程中按时间段选取若干阵次采样获得, 包括阵流与连续流。

泥石流(2703) (2704) 和(2705) 的样品级配曲线及各粒径级重量分布见图 5、图 6、图 7。

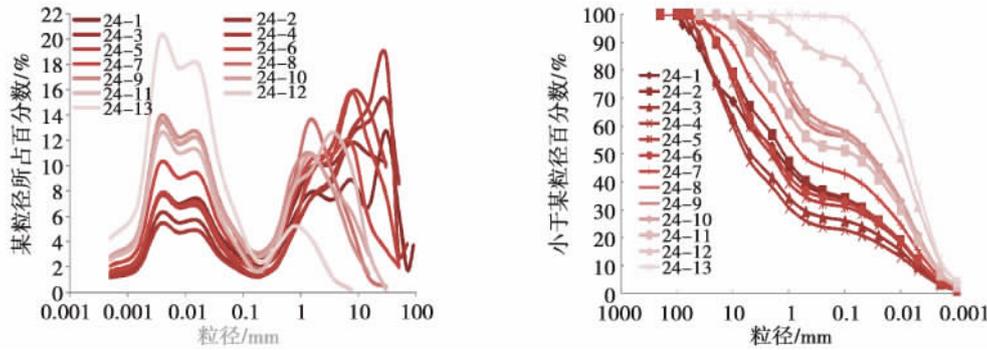


图 5 泥石流样品粒度分布曲线及级配曲线(2703)

Fig.5 Particle size weight distribution curve and gradation curve of debris flow samples (2703)

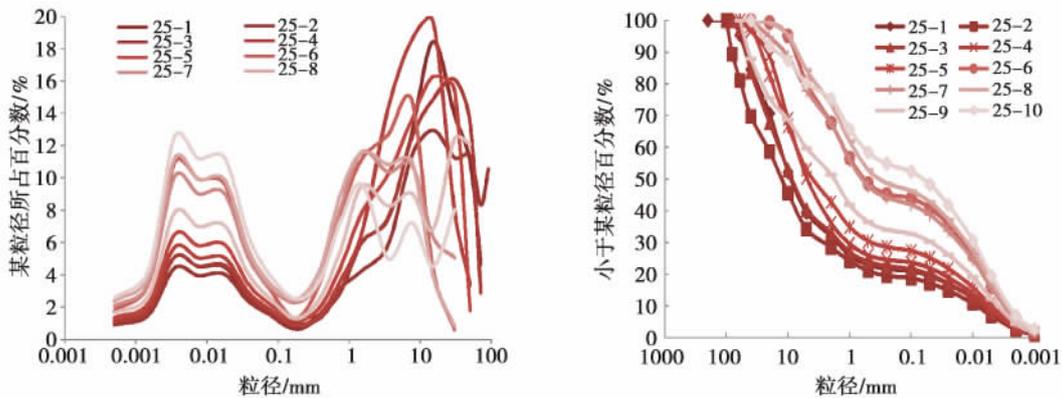


图 6 泥石流样品粒度分布曲线及级配曲线(2704)

Fig.6 Particle size weight distribution curve and gradation curve of debris flow samples(2704)

由泥沙级配曲线可以看出, 同一场泥石流不同阵次颗粒级配曲线均为具有相似特征的宽级配分布, 泥沙粒径范围由 0.001 mm 至 100 mm, 由粘粒、粉沙、沙粒、砾石组成, 最大最小粒径相差上千倍, 大部分阵次

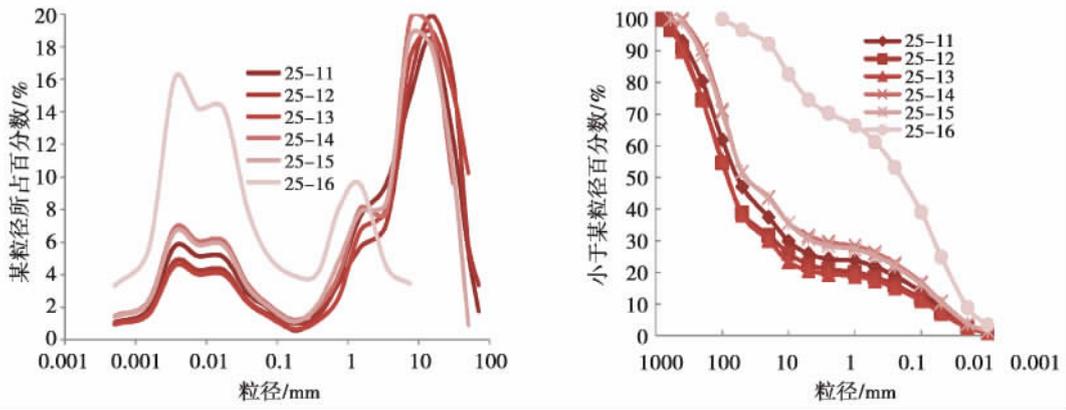


图 7 泥石流样品粒度分布曲线及级配曲线(2705)

Fig. 7 Particle size weight distribution curve and gradation curve of debris flow samples(2705)

泥石流颗粒粒径 0.1 ~ 1 mm 范围内沙粒含量较少,使其粒径分布曲线呈现“板凳状”,与文献[14]中类似。由图中各粒径级含量分布发现,泥石流各阵次各粒径含量比例分布具有明显的双峰分布特征,两峰值所对应泥沙粒径基本为 0.002 mm 及 10 mm 左右,粗颗粒峰值粒径具体稍有差异,但细颗粒峰值粒径却极为一致,但两峰值含量均不超过 20%。其中细颗粒泥沙含量百分数分布曲线均相似,仅曲线高低位置不同,说明阵性泥石流各阵次泥石流样品粘粒组成基本相同,形成非常稳定的泥石流浆体。

随着阵次增加,泥石流样品级配曲线大致均往上移动,一般情况下细颗粒含量增加,粗颗粒含量不断减少。当出现连续流时,泥沙级配曲线“板凳”位置亦不断上移,泥沙颗粒大部分由细颗粒组成,颗粒粒径范围变小。

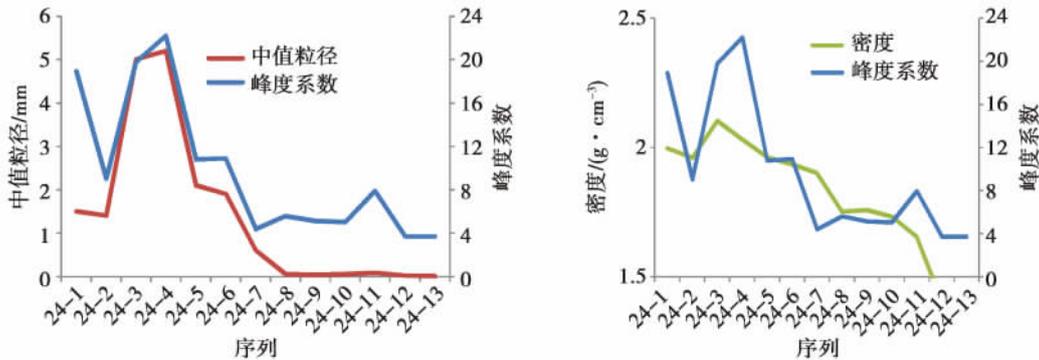


图 8 2703 各粒径参数变化

Fig. 8 Change of median diameter , bimodality parameter and mass density (2703)

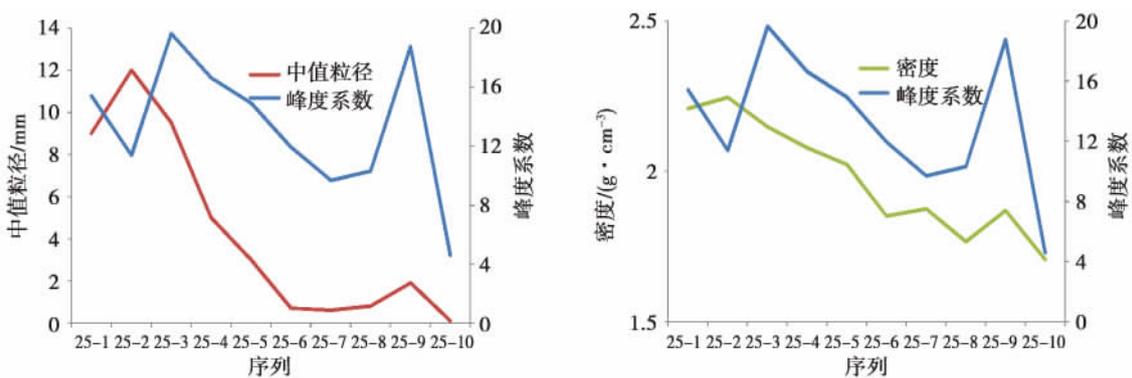


图 9 2704 各粒径参数变化

Fig. 9 Change of median diameter , bimodality parameter and mass density(2704)

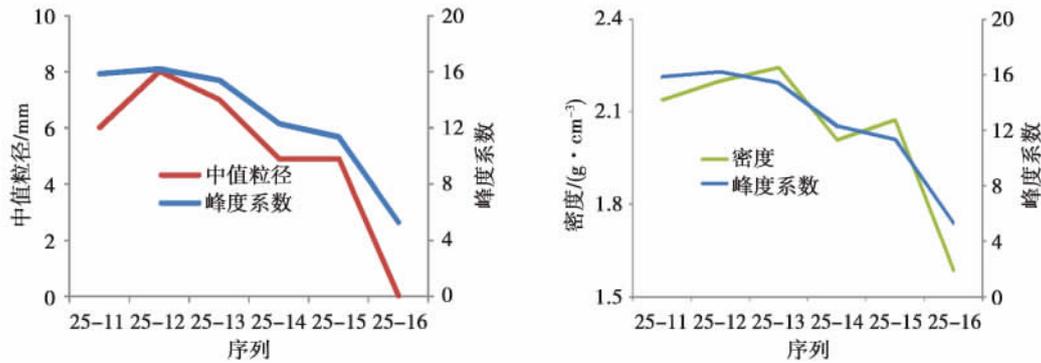


图 10 2705 各粒径参数变化

Fig. 10 Change of median diameter , bimodality parameter and mass density( 2705)

为了对泥石流样品粒径组合特征及均匀程度进行更直观地反映,对各阵次样品中值粒径  $d_{50}$ 、峰度系数  $B^*$  [15]、密度进行分析,各阵次泥石流样品  $d_{50}$ 、 $B^*$ 、密度三者比较见图 8 - 图 10。由图可见,随着泥石流阵次的发展,泥石流流体中值粒径  $d_{50}$ 、峰度系数  $B^*$ 、密度  $\gamma_c$  总体均呈减小趋势。 $d_{50}$  随着阵流序列增加迅速减小,密度  $\gamma_c$  在阵流阶段减小趋势较缓,当泥石流流态为连续流时,密度  $\gamma_c$  迅速减小,峰度系数  $B^*$  随着泥石流阵流发展呈现波状变化特点,并非不断减小,图 8 中的 25 - 3、25 - 9 序列峰度系数  $B^*$  均比之前阵次大,到流态为连续流时,  $B^*$  也并非不断减小,如图 8 中 24 - 9 - -24 - 13  $B^*$  几乎保持不变。

$B^*$  与  $d_{50}$  变化趋势并非完全一致,但  $B^*$  与  $\gamma_c$  变化趋势在一定程度上确具有相似特征,说明泥石流流体容重与其粗细颗粒含量比值有着密切的联系。

#### 4 阵性泥石流输沙颗粒的分形特征

分形理论是美国数学家 Mandelbrot 于 1977 年首次提出来的,它是用来研究自然界中没有特征长度但又具有自相似性的图形和现象。据分形理论,利用数据拟合得到泥石流样品在双对数坐标下的颗粒级配曲线的斜率,即可获得相应的分维值 [16]。

根据图 12 可见,在双对数坐标下,以序列 24 - 4 为例,当无标度区选为全部粒径范围时,数据拟合相关系数为 0.889 1,线性关系不太明显,但当以 0.01 mm 作为无标度区分界粒径时,将  $d \leq 0.01$  mm 颗粒和  $d > 0.01$  mm 颗粒分别进行线性拟合时,其相关系数分别为 0.970 8、0.980 5,线性关系非常明显,颗粒分维值分别为 2.78、1.93,可见将 0.01 mm 作为无标度分界粒径比较合适。所取得的泥石流样品中级配曲线都具有与 24 - 4 相似的特征,  $d \leq 0.01$  mm 粒径分维值范围为 1.88 ~ 1.93,平均分维值为 1.90;  $d > 0.01$  mm 颗粒分维值见表 5,其中泥石流(2703)(2704)(2705)颗粒平均分维值分别为 2.86、2.81、2.80,泥石流流态为连续流,除 25 - 8 样品之外,  $d > 0.01$  mm 颗粒分维值都大于或等于 2.88,可见 2.88 成为阵性泥石流流态变化的一个临界值。

各阵次泥石流  $d \leq 0.01$  mm 颗粒含量见图 13,  $d \leq 0.01$  mm 颗粒含量与  $d > 0.01$  mm 颗粒分维值变化趋势十分相似,随着泥石流阵流发展,  $d \leq 0.01$  mm 颗粒含量不断增加,当泥石流流态为连续流时,其含量迅速增加,一般大于 30%,说明  $d = 0.01$  mm 对于阵性泥石流颗粒粒径组成分析及流态具有十分重要的意思。

表 5  $d > 0.01$  mm 颗粒分维值

Table 5 Fractal dimension value of particles(  $d > 0.01$ mm)

样品编号	24 - 1	24 - 2	24 - 3	24 - 4	24 - 5	24 - 6	24 - 7	24 - 8	24 - 9	24 - 10	24 - 11	24 - 12	24 - 13
分维值	2.84	2.83	2.78	2.78	2.82	2.83	2.85	2.88	2.88	2.88	2.88	2.94	2.97
样品编号	25 - 1	25 - 2	25 - 3	25 - 4	25 - 5	25 - 6	25 - 7	25 - 8	25 - 9	25 - 10			
分维值	2.77	2.77	2.77	2.77	2.80	2.85	2.84	2.85	2.83	2.88			
样品编号	25 - 11	25 - 12	25 - 13	25 - 14	25 - 15	25 - 16							
分维值	2.78	2.76	2.75	2.80	2.79	2.90							

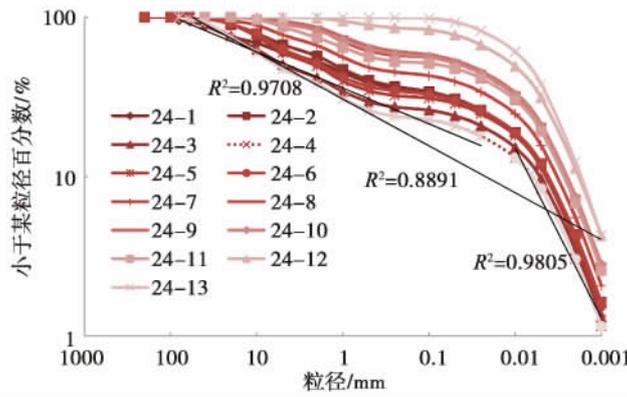


图 11 粒度分形无标度区的确定

Fig. 11 Definition of fractal scaleless range of grain size

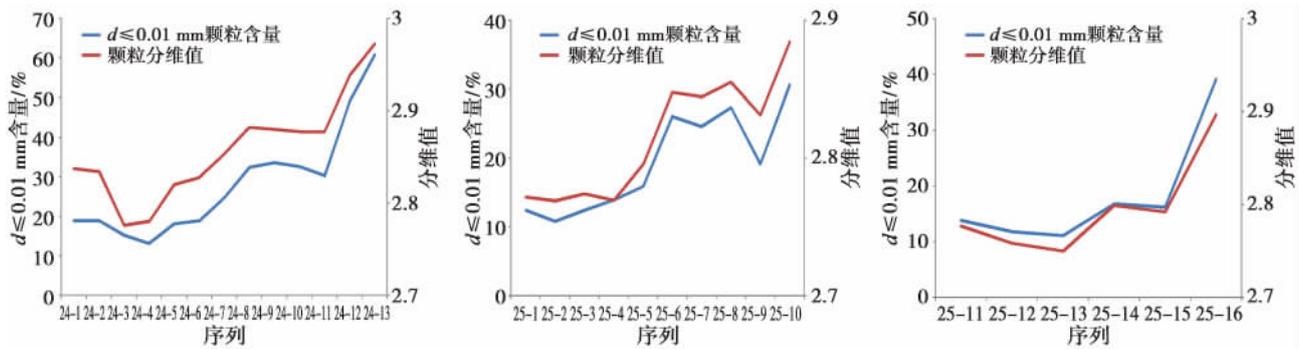


图 12  $d \leq 0.01$  mm 颗粒含量变化

Fig. 12 Particle content change ( $d \leq 0.01$  mm)

### 5 结论

本文通过蒋家沟 2002 - 2007 年 5a 中 20 次具有完整观测资料的典型阵性泥石流作为基础数据, 对阵性泥石流输沙量变化、输沙级配变化进行初步分析, 得到以下几点规律:

(1) 阵性泥石流输沙量增速随泥石流阵次的增加呈现两种模式, 对应的输沙量也呈现两种变化模式。各阵次输沙量具有变化剧烈的特点, 输沙量峰值一般出现在阵次序列中期或序列前期, 输沙量变化可能呈单峰分布, 亦有双峰分布。

(2) 阵性泥石流不同阵次颗粒级配曲线为具有相似特征的宽级配分布类型。各粒径含量比例分布具有明显的双峰分布特征, 两峰值所对应泥沙粒径基本为 0.002 mm 及 10 mm 左右, 粗颗粒峰值粒径具体稍有差异, 但细颗粒峰值粒径却极为一致。

(3) 随着阵流发展, 泥石流细颗粒含量增加, 粗颗粒含量不断减少, 中值粒径  $d_{50}$ 、峰度系数  $B^*$ 、容重  $\gamma_c$  总体均呈减小趋势。 $d_{50}$  值随着阵流序列增加迅速减小; 峰度系数  $B^*$  随着泥石流阵流发展呈现波状变化特点; 容重  $\gamma_c$  在阵流阶段减小趋势较缓, 当泥石流流态为连续流时, 容重  $\gamma_c$  迅速减小, 泥沙颗粒大部分由细颗粒组成。

(4) 0.01 mm 为阵性泥石流颗粒分析无标度区的平均分界值,  $d \leq 0.01$  mm 颗粒分维值几乎一致, 平均值为 1.9,  $d > 0.01$  mm 颗粒分维值随着阵流发展呈增大趋势, 当泥石流流态为连续流,  $d > 0.01$  mm 颗粒分维值几乎都大于或等于 2.88。

文中数据由中国科学院东川泥石流观测研究站提供。

### 参考文献:

[1] 国家防汛抗旱总指挥部办公室, 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 山洪泥石流滑坡灾害及防治 [M]. 北京: 科学出版社,

1994.  
The Commander Office of National flood and drought control& Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment CA S. Mountain Torrent , Landslide , and Debris - flow Hazards and Their Mitigation[M]. Beijing: Science Press , 1994. ( in Chinese)
- [2] 倪化勇, 吕学军. 泥石流阵流及其活动规律[J]. 水土保持研究, 2005, 12( 6) : 242 - 244.  
NI Huayong , LU Xuejun. Intermittent debris flow and its activity rule[J]. Research of Soil and Water Conservation. ( in Chinese)
- [3] 李泳, 刘晶晶, 苏凤环, 等. 泥石流阵流序列的整体性[J]. 地学前沿, 2009, 16( 4) : 381 - 388.  
LI Yong , Liu Jingjing , Su Fenghuan , et al. Integrity of debris flow surge sequence[J]. Earth Science Frontiers , 2009 , 16( 4) : 381 - 388. ( in Chinese)
- [4] Liu J J , Li Y , Su P C , Cheng ZL , et al. Temporal variation of intermittent surges of debris flow[J]. J Hydrol , 2009 , 365( 3/4) : 322 - 328.
- [5] 王裕宜, 詹钱登, 邹仁元, 等. 粘性泥石流流体阵性流形成机理研究[J]. 自然灾害学报, 2002, 11( 2) : 46 - 50.  
WANG Yuyi , ZHAN Qiangdeng , ZOU Renyuan , et al. Study on forming mechanism of viscous debris flow surges[J]. Journal of Natural Disasters , 2002 , 11( 2) : 46 - 50. ( in Chinese)
- [6] 胡凯衡. 泥石流的波状运动研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2002.  
HU Kaiheng. Characteristics of Debris - flow Surge[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences , 2002. ( in Chinese)
- [7] 胡凯衡, 韦方强, 李泳, 等. 泥石流的阵性波状运动[J]. 山地学报, 2004, 22( 6) : 707 - 712.  
HU Kaiheng , WEI Fangqiang , LI Yong , et al. Characteristics of debris - flow surge[J]. Journal of Mountain Science , 2004 , 22( 6) : 707 - 712. ( in Chinese)
- [8] 徐永年, 匡尚富, 舒安平. 阵性泥石流的平均流速与加速效应[J]. 泥沙研究, 2012( 6) : 8 - 13.  
XU Yong nian , KUANG Shangfu , SHU Anping. Average velocity and acceleration effects of intermittent debris flows[J]. Journal of Sediment Research , 2012( 6) : 8 - 13. ( in Chinese)
- [9] 倪晋仁, 廖谦, 曲轶众, 等. 阵性泥石流运动与堆积的欧拉-拉格朗日模型— I 理论[J]. 自然灾害学报, 2000, 9( 3) : 8 - 14.  
NI Jinren , LIAO Qian , QU Yizhong , et al. An euler - lagrangian model for non - continuous debris flow: I . theory [J] Journal of Natural Disasters 2000 , 9( 3) : 8 - 14. ( in Chinese)
- [10] 廖谦, 倪晋仁, 曲轶众, 等. 阵性泥石流运动与堆积的欧拉-拉格朗日模型— II 应用[J]. 自然灾害学报, 2000, 9( 4) : 53 - 58.  
LIAO Qian , NI Jinren , QU Yizhong , et al. An euler - lagrangian model for non - continuous debris flow: application [J] Journal of Natural Disasters , 2000 , 9( 4) : 53 - 58. ( in Chinese)
- [11] Chiu - On Ng , Mei , Chiang C. Roll wave on a shallow layer of mud modeled as a power - law fluid[J]. Journal of Fluid Mechanics , 1993 , 263: 151 - 183.
- [12] Hungr O. Analysis of debris flow surges using the theory of uniformly progressive flow[J]. Earth Surface Progresses and Landforms , 2000 , 25: 483 - 495.
- [13] 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 中国科学院东川泥石流观测研究站. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990.  
Institution of Mountain Disaster and Environment , CA S , Research and Observation of Debris Flow in Jiang Jia Gully , Yunnan , China [ M ] . Beijing: Science Press , 1990. ( in Chinese)
- [14] 魏丽, 卢金友, 徐海涛. 天然河道不连续宽级配床沙特性及形成条件探讨[J]. 长江科学院院报, 2012, 29( 10) : 6 - 10.  
WEI Li , LU Jinyou , XU Haitao. Study on characteristic and formation condition of sediment with discontinuous wide - graduation in three typical river section[J]. Journal of yangtze river scientific research institute , 2012 , 29( 10) : 6 - 10. ( in Chinese)
- [15] Wilcock P R , The critical shear stress of natural sediments[J]. Hydraul. Eng , 1993 , 119( 4) : 491 - 505.
- [16] 易顺民, 孙云志. 泥石流的分形特征及其意义[J]. 地理科学, 1997, 17( 1) : 24 - 31.  
YI Shunming , SUN Yunzhi. The fractal features of debris flow and its significance[J]. Scientia Geographica Sinica , 1997 , 17( 1) : 24 - 31. ( in Chinese)