

【水土保持】

泥石流阵流的物质组成、流量过程与形态特征

余 杰¹, 李 浦², 胡凯衡^{3,4}, 李华东¹

(1.四川师范大学 工学院, 四川 成都 610101; 2.西北大学 地质学系 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 3.中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041; 4.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:阵性运动是黏性泥石流的主要运动形式,但对泥石流阵流过程中各参数变化规律的研究较少。以蒋家沟泥石流为研究对象,依据2001年7月8日泥石流监测数据,对黏性泥石流阵流的物质组成、流量过程与形态特征进行了分析。结果表明:泥石流阵流固体颗粒粒径范围较大、以粗颗粒为主,具有良好的分形特征,粒度分维值与泥石流的容重、颗粒含量、分选系数、峰值流量、峰值流速、最大输沙率等特征参数之间有明显的函数关系,说明分形特征可以较好地反映阵流流态变化过程;阵流流量呈先增大后减小的变化规律,流速具有双峰特征,流量、流速的变化虽然不同步但存在相关性,流速限制着流量的变化;流量是影响输沙率的因素之一,输沙率与流量线性正相关;可用泥石流深宽比反映阵流的横向形态特征,阵流流量随着深宽比的增大呈幂次减小。

关键词:阵性泥石流;黏性泥石流;粒度;分形特征;流量;深宽比;蒋家沟

中图分类号:P642.23;S157.1

文献标志码:A

Material Composition, Flow Process and Morphological Characteristics of Debris Flow

YU Jie¹, LI Pu², HU Kaiheng^{3,4}, LI Huadong¹

(1.Institute of Technology, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China;

2.State Key Laboratory of Continental Dynamics /Department of Geology, Northwest University, Xi'an

710069, China; 3.Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of

Sciences, Chengdu 610041, China; 4.Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS & MWR, Chengdu 610041, China)

Abstract: Intermittent debris flow is the most important moving form of viscous debris flows, few studies have addressed the variation of characteristic parameters in the debris flow surges. This paper analyzed the material composition, flow process and morphological characteristics of the viscous debris flows in Jiangjiagou Ravine, based on the real-time monitored data of debris flow in July 8, 2001. Studies found that debris flow is generally composed of a wide range of solid particles, mainly coarse particles, with good fractal characteristics. Besides, there is a clear functional relationship between the grain-size fractal dimension and the density, the particle content, the sorting coefficient as well as the peak discharge of debris flow, the peak velocity of debris and maximum sediment transport rate. This relationship indicates that the fractal feature can better reflect the flow regime of intermittent debris flow. The discharge increases first and then decreases from the dimension of time, and the flow velocity has displayed a two-peak distribution that although the discharge and velocity changes are not synchronized, there is correlation that the flow velocity limits the development of discharge. The change of flow velocity is one of the factors affecting the sediment transport rate. The sediment transport rate is linearly positively correlated with the discharge of debris flow. The lateral morphological characteristic can be reflected by the aspect ratio of the debris flow, and the discharge decreases as a power function, with the increase of the aspect ratio.

Key words: intermittent debris flow; viscous debris flow; granularity; fractal dimension; discharge; aspect ratio; Jiangjia Ravine

泥石流是介于沙砂水流与滑坡之间的土、水、气混合流^[1],按其固体物质颗粒组成可分为泥流、黏性泥石流和水石流三种类型,其中黏性泥石流是最常见的一种泥石流,也是众多相关学者研究的重点^[2]。泥石流特别是黏性泥石流都以阵流形式运动, Pierson 等^[3]现场观察发现泥石流在沟道内的阵流运动过程中生成了许多直立波;李泳等^[4-6]认为每场泥石流表现为一个阵流序列,阵流流量均值随时间衰减,泥石流堆积厚

度与阵流的深度和速度具有相似的统计分布(在一定

收稿日期:2019-08-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41801002);国家自然科学基金面上项目(41371039);陕西省博士后科学基金资助项目

作者简介:余杰(1993—),女,四川巴中人,硕士研究生,研究方向为泥石流灾害及其动力过程

通信作者:李浦(1990—),男,江西萍乡人,讲师,博士,研究方向为泥石流动力过程和数值模拟

E-mail:lipus9009@126.com

尺度内呈负幂关系);倪化勇等^[7]通过对典型泥石流流量过程的分析,发现蒋家沟泥石流阵流活动具有多峰性与多时段性,泥石流阵流径流量与阵流频次之间存在幂律关系;刘晶晶等^[1]通过对流量序列的研究,揭示了阵性泥石流的流量过程及涨落分布情况,发现大于一定流量的阵次以指数形式减少。关于阵流的研究,多是针对阵流流量时空特征及流量与阵次、堆积物关系的,而对整个泥石流阵流发生过程中各参数变化规律的研究较少,因此笔者根据云南省蒋家沟 2001 年 7 月 8 日泥石流监测数据,对其物质组成、流量过程与形态特征进行了分析。

1 泥石流监测情况

蒋家沟位于云南省东北部金沙江支流小江河右岸,是全世界最大的泥石流自然博物馆,流域面积 48.6 km²,主沟长 13.9 km、平均纵比降 16.02%,流域内有 4 级支沟,属于典型的暴雨型泥石流沟^[8]。流域内分布着多级夷平面,其上覆盖的亚黏土、黏土残积层及砾石层是黏性泥石流土体颗粒的重要来源之一^[9]。

我国从 20 世纪 60 年代中期开始对云南小江流域泥石流进行野外定位观测研究,对 2001 年 7 月 8 日蒋家沟泥石流阵性运动的整个过程有具体的记述^[10]。对该场泥石流的监测从 07:25:00 开始,于 20:04:00 结束,经历 12 h39 min,监测到 217 个阵次。监测方法:在泥石流沟道观测断面的缆道上,安装 UL-1 型超声波泥位计、光电测距仪和圆柱形采样器,根据超声波反射时间差和光电波往返传播时间,计算得到泥深、泥宽数据;采样器高 610 mm、内径为 180 mm,可采集粒径不大于 180 mm 的粗颗粒,通过悬挂电缆和滑轮升降采样,根据样品的质量和体积,可计算出阵流容重;将采集的样品烘干并充分碾磨,通过振筛机进行筛分,对直径小于 0.075 mm 的颗粒用激光粒度仪测定颗粒组成;在阵流沟道中安装传感器钢桩,钢桩底端固定在沟床中,顶部用钢丝绳固定在沟道两侧的混凝土锚桩上,传感器安装在钢桩底部距沟床 650 mm 处,钢桩之间的距离为 60 m,通过传感器测得阵流时间差,根据传感器之间的距离和阵流时间差计算平均流速。根据阵流的时间、泥深、泥宽、流速以及样品数据,可计算出流量、输沙率、径流量等,进而进行更深入的分析。

2 泥石流阵流的物质组成特征

2.1 样本颗粒分析

颗粒组成与泥石流的形成机制、流态变化密切相关。泥石流发生时,取 07:40:00、08:46:57、09:23:

27、10:05:54、11:15:14、13:31:04、14:43:31、17:03:03 的 8 个泥石流样品(编号依次为 1、2、…、8)进行物质组成分析,各样品颗粒级配曲线见图 1。

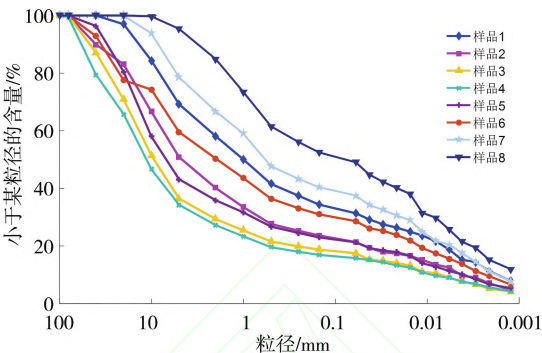


图 1 各样品颗粒级配曲线

由图 1 可以看出:泥石流固体颗粒范围较大,从黏粒到粗大砾石均有分布,整体来看,粗颗粒含量较高,说明该次泥石流侵蚀搬运能力较强。样品 8 取自该次阵流最后的连续流,粗颗粒含量最高,颗粒级配曲线在最上方;样品 4 为阵流的龙尾样,粗颗粒含量最多,颗粒级配曲线位于最下方。

2.2 泥石流固体粒度参数

粒度参数是反映泥石流搬运方式和沉积环境的重要指标^[11],本文采用福克公式^[12]计算粒度平均值 M_Z 、分选系数 σ_1 和偏度 S_{K1} ,公式形式见表 1(其中 ϕ_5 、 ϕ_{16} 、 ϕ_{50} 、 ϕ_{84} 、 ϕ_{95} 分别为颗粒级配曲线上百分含量为 5%、16%、50%、84%、95% 对应的粒径),计算结果见表 2。

表 1 福克粒度参数计算公式

粒度参数	公式
M_Z	$M_Z = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$
σ_1	$\sigma_1 = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6}$
S_{K1}	$S_{K1} = \frac{\phi_{84} + \phi_{16} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_{95} + \phi_5 - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$

表 2 泥石流粒度参数

样品编号	M_Z/mm	σ_1	S_{K1}
1	5.51	6.59	0.88
2	11.39	15.97	0.77
3	17.62	20.08	0.64
4	21.91	23.89	0.63
5	12.71	13.47	0.60
6	12.30	16.19	0.91
7	3.89	4.48	0.90
8	1.43	1.77	0.97

由表 2 可知:样品 2~6 粒度平均值 $M_Z > 10$ mm,样品 1、7 粒度平均值 $M_Z > 2$ mm,样品 8 粒度平均值 $M_Z < 2$ mm,87.5% 的样品粒度平均值 M_Z 在 2 mm 以上,以粗颗粒为主;从颗粒的均匀程度上来看,样品 1~7 分选

性极差(分选系数越接近 1 分选性越好,分选系数越大分选性越差)、泥石流颗粒大小混杂、粗细均匀程度差,而样品 8 的细粒物质含量明显比其他样品的高、分布较均匀;泥石流颗粒偏度均为正值,成正偏态,说明粗颗粒占比较大。

2.3 泥石流阵流固体颗粒分形维数

2.3.1 分形维数的计算

分形理论主要用于研究自然界中没有特征长度但具有自相似性的结构^[13]。在分形集合中,若某一集合关于标度 r 具有自相似性,且在标度 r 度量下的个数为 N ,则有

$$N(r) = r^{-D} \quad (1)$$

式中: r 为粒径; D 为分形维数。

土体颗粒中粒径大小与频度服从 Weibull 分布:

$$\frac{M(<r)}{M_0} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{r}{r_0}\right)^\lambda\right] \quad (2)$$

式中: r_0 为平均粒径; $M(<r)$ 为粒径小于 r 的颗粒质量之和; M_0 为整个颗粒集合的质量; λ 为常数,即粒径 r 与颗粒累计百分含量在双对数坐标系中拟合直线的斜率。

当 $r \ll r_0$ 时,对式(2)进行 Taylor 级数展开,并略去二次项后得:

$$\frac{M(<r)}{M_0} = \left(\frac{r}{r_0}\right)^\lambda \quad (3)$$

对式(3)求导可得:

$$dM = \frac{\lambda M_0}{r_0^\lambda} r^{\lambda-1} dr \quad (4)$$

对式(1)求导可得:

$$dN = -D(r)^{-D-1} dr \quad (5)$$

泥石流颗粒数目与颗粒质量之间存在如下关系:

$$dN \approx r^{-3} dM \quad (6)$$

由此可得泥石流颗粒分形维数的计算公式:

$$D = 3 - \lambda \quad (7)$$

泥石流固体颗粒的分形特征只发生在一定范围内,这种分形关系成立的范围称为无标度区间^[13]。本文划分无标度区间的依据为双对数颗粒级配拟合直线的相关系数 R 。当 $R \geq 0.90$ 时,说明泥石流固体颗粒在整个粒度范围内具有良好的分形特征,无标度区间为整个粒度范围,即具有一重分形特征;当 $R < 0.90$ 时,通过寻找双对数颗粒级配曲线的拐点进行无标度区间划分,在保证拐点相邻两直线段的斜率存在不小于 3 倍关系且 $R \geq 0.90$ 前提下,通过不断改变拐点位置,找出最佳拟合曲线,进而确定无标度区间,若存在一个拐点且相邻区间线性关系较好,则说明在整个粒度范围内自相似性较差,而在由拐点划分的两个区间内分别

具有较好的分形特征,无标度区间为依据拐点划分的 2 个区间,即具有二重分形特征;若存在 2 个拐点且相邻区间线性关系较好,则表明具有三重分形特征。

2.3.2 泥石流固体颗粒分形特征

前人主要针对泥石流源区或堆积物进行泥石流固体颗粒分形特征研究^[14],本文则利用阵流样品数据,对泥石流固体颗粒进行分形特征研究。各样品双对数颗粒级配曲线见图 2(其中: r 为粒径,mm; P 为小于某粒径的含量,%),按照上述方法计算的分维值见表 3。由表 3 可知:样品 1~7 双对数颗粒级配曲线的相关系数 $R \geq 0.90$,在整个粒度范围内具有良好的分形特征,无标度区间为整个粒度范围,即具有一重分形特征,分形维数为 2.75~2.80,相差最大为 0.05,一条泥石流沟同一位置不同时刻泥石流固体颗粒分维值相差较小,说明同一条泥石流沟的土体颗粒具有良好的自相似性;样品 8 具有二重分形特征,原因是样品 8 属于黏性阵流最后的连续流,容重为 1.71 g/cm³,颗粒之间比较松散。

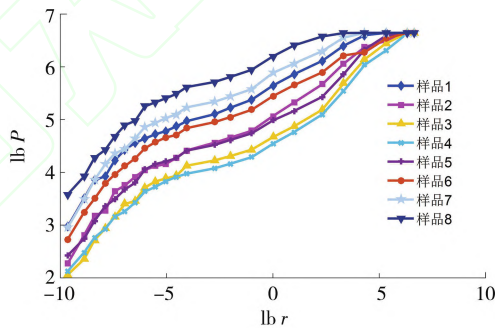


图 2 双对数颗粒级配曲线

表 3 泥石流固体颗粒分形维数

样品 编号	D	R	σ_1	容重/ (t · m ⁻³)	>2 mm 颗粒 含量/%	≤0.05 mm 颗粒含量/%
1	2.80	0.96	6.59	1.80	41.87	29.22
2	2.76	0.97	15.97	1.99	59.88	19.35
3	2.75	0.97	20.08	2.18	70.68	15.28
4	2.75	0.97	23.89	2.22	72.82	15.06
5	2.77	0.97	13.47	2.09	64.14	19.25
6	2.79	0.96	16.19	1.99	49.64	26.15
7	2.80	0.92	4.48	1.94	33.15	34.27
8	2.54/ 2.88	0.99/ 0.94	1.77	1.71	15.09	44.82

图 3 为样品 5 和样品 8 双对数颗粒级配拟合直线,可以看出:样品 5 在整个粒度范围内线性关系较好,具有一重分形特征;样品 8 在整个粒度范围内线性关系较差,在 $r = 0.011\ 24$ mm 处存在一个拐点,将粒度范围划分成 $[0.001\ 24, 0.011\ 24]$ 和 $[0.011\ 24, 100]$ 两个无标度区间,在区间内具有较好的自相似性,即具有二重分形特征,分维值分别为 2.54 和 2.88。

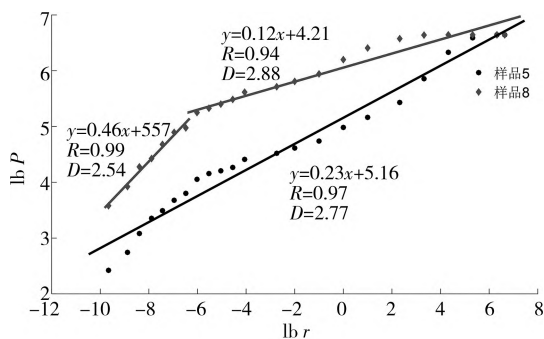


图3 样品5和样品8双对数颗粒级配拟合直线

泥石流固体粒度分维值随时间维度呈现先减小后增大的趋势,见图4。泥石流初期运动方式为连续流,流体主要由细颗粒和水组成,黏粒含量高,颗粒大小较均匀,分维值较大;随着时间推移,泥石流变成波状运动方式,即具有龙头、龙身、龙尾的阵性流,既含有细颗粒也含有粗大颗粒,颗粒大小不均匀,分维值变小;泥石流运动到后期粗大颗粒减少,颗粒大小逐渐均匀,分维值增大。阵流最后的连续流细颗粒逐渐减少,颗粒之间自相似性降低,从而呈现二重分形特征。

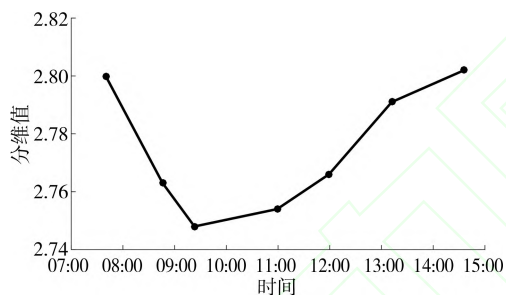
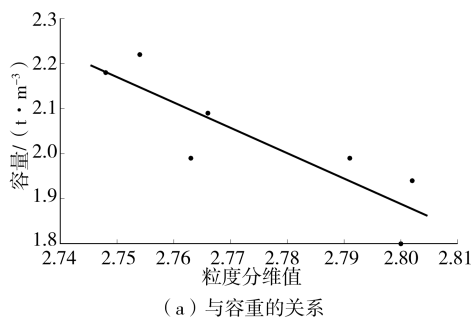


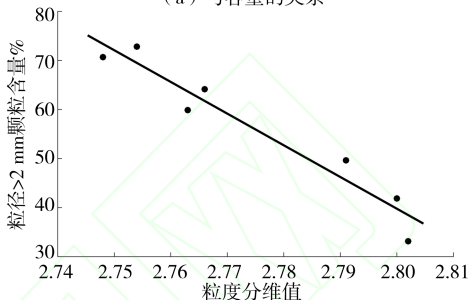
图4 粒度分维值变化过程

泥石流固体粒度分维值与容重、粗细颗粒含量、分选性具有较强的相关性:分维值与容重、>2 mm 颗粒含量负相关,容重越大、>2 mm 颗粒含量越高,分维值就越小,见图5(a)(b),这与黄祺等^[15-18]的研究结果一致;分维值与分选性、≤0.05 mm 颗粒含量正相关,即颗粒组成的分选性越好、黏粒含量越大,分维值就越大,见图5(c)(d),这与倪化勇等^[19]的研究结果一致。

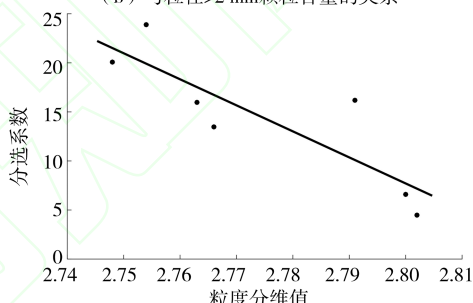
峰值流量对泥石流过程起决定性的作用^[1]。数据拟合表明,粒度分维值与运动参数峰值流量、峰值流速、最大输沙率、横截面最大深宽比有较好的函数关系(见图6),说明泥石流的颗粒级配决定了其流态的性质,而粒度的分形特征反映了颗粒的组成,可以通过阵流颗粒的分形特征来分析黏性泥石流阵流过程。由图6(d)可知泥石流横截面最大深宽比(泥深与泥宽之比)随着粒度分维值的增大呈指数形式增长,当 $D < 2.79$ 时横向最大深宽比随 D 增大平稳波动,当粒度分维值较小时因黏粒含量较低而不易形成较大的深宽比,



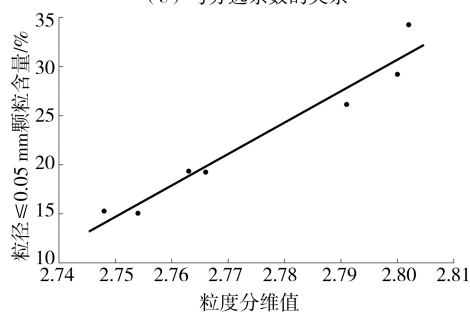
(a) 与容重的关系



(b) 与粒径>2 mm颗粒含量的关系



(c) 与分选系数的关系



(d) 与粒径≤0.05 mm颗粒含量的关系

图5 粒度分维值与特征参数的关系

而当 $D > 2.79$ 时,最大深宽比呈现出陡增趋势,粒度分维值较大时固体颗粒间自相似性较好,表明泥石流黏粒含量高、流体黏性增强,致使横向截面深宽比增大。因此,可将 $D = 2.79$ 作为粒度分维值对应的最大深宽比的临界值,当 $D < 2.79$ 时最大深宽比较小,当 $D > 2.79$ 时最大深宽比较大。

3 泥石流阵流流量过程

泥石流流量的大小决定了灾害的严重程度,因此许多学者对泥石流流量进行了研究,如 Garter 等^[20]、刘晶晶等^[1]、胡凯衡等^[21],研究成果大多是关于泥石流流量计算的,而本文对泥石流阵流流量的时空特征、

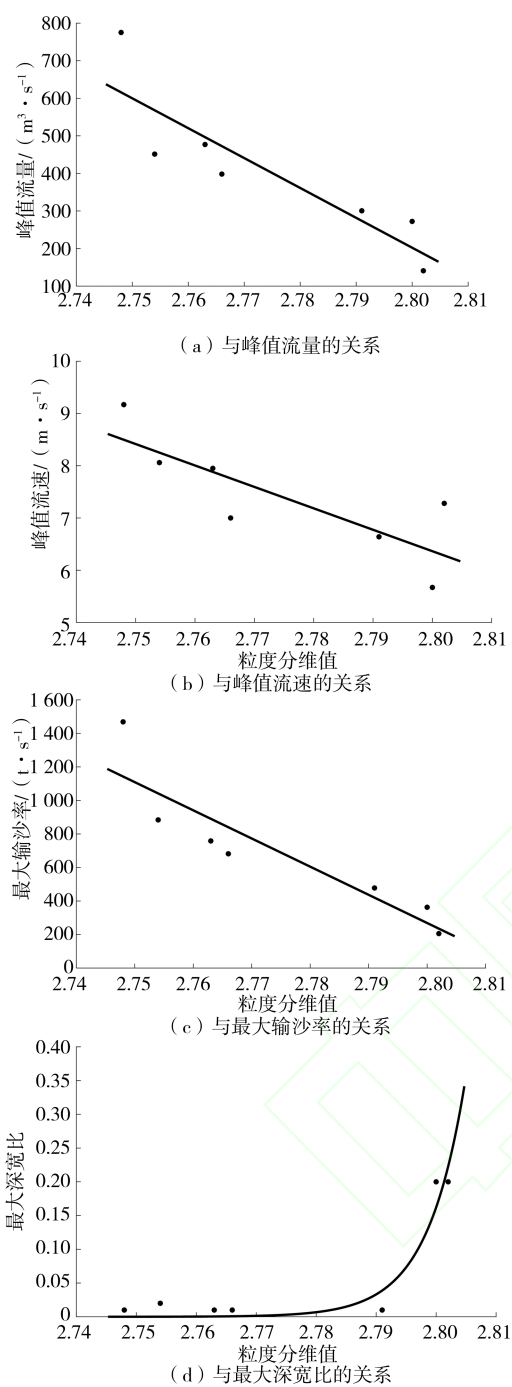


图 6 粒度分维值与运动参数的关系

流量与流速的关系、流量与输沙率的关系进行了分析。

由图 7 可以看出,蒋家沟黏性泥石流的流量起伏较大,峰值流量出现在泥石流活动前期和中期,这与倪化勇等^[7]的研究结果一致。泥石流流速是动力学重要参数之一,影响着阻力、冲击力等参数的计算结果,同时对流量过程也会产生一定影响。对比图 7 中流量和流速变化过程曲线,可以看出流速与流量的变化不是同步的,流量在时间维度上呈先增大后减小的趋势,而流速先加快后减慢并在后期又加快,原因是泥石流发展到后期时,源区松散物质减少、沟道补给不足,黏

性泥石流逐渐转变为稀性泥石流,使得流速加快但流量减小。流量、流速的变化具有一定相关性,如图 8 所示,流量—流速关系点据聚集在右下方,流速较慢时流量也较小,流速快时流量也大,一般不会出现速度很慢而流量很大的情况,即流速限制着流量的变化。

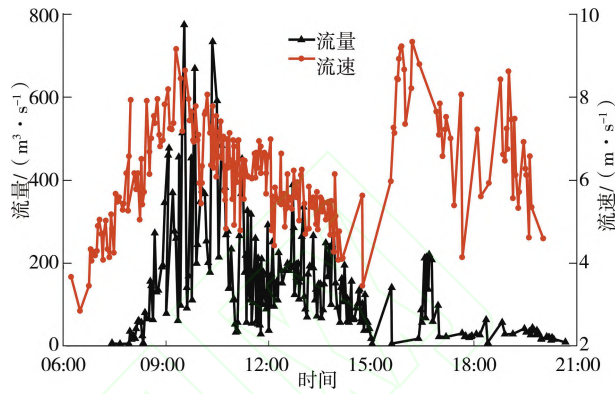


图 7 流量与流速变化过程

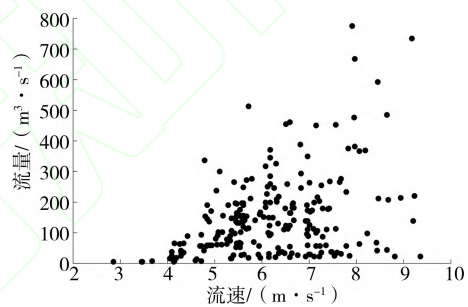


图 8 流速与流量的关系

泥石流输沙率不仅反映了泥石流形成区的环境特征和泥石流的搬运能力,也反映了泥石流规模的大小^[22]。泥石流流量是输沙率大小的影响因素之一,如图 9 所示,输沙率与泥石流流量线性正相关。

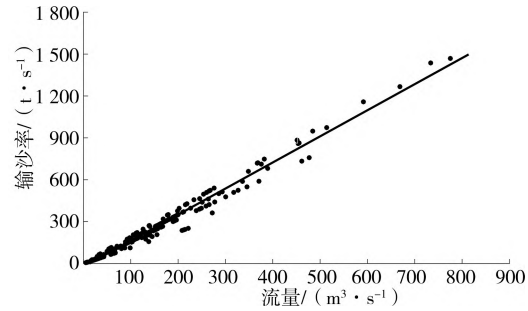


图 9 流量与输沙率的关系

4 泥石流阵流的形态特征

泥石流的阵性运动使得其挟带的物质在短时间内经过观测断面,导致峰值流量是正常清水流量的几倍甚至几十倍^[23]。吴积善等^[24]认为黏性泥石流阵流在通过观测断面时,其整体为一楔形体,形状基本保持不变,可把阵性泥石流的流量过程线概化成三角形。这

些研究主要是针对泥深变化过程的,没有考虑阵流横向形态特征以及深宽比与阵流的关系。

泥石流过程中的不同横断面形态反映了不同的流态。本文用深宽比来表示阵流横断面形态,其变化过程如图 10 所示,可以看出该次泥石流深宽比变化过程具有双峰特征。泥石流初期运动缓慢、能量较小,因而泥宽较小,此时深宽比很大,峰值之后逐渐达到稳定期;泥石流运动后期补给不足、能量消耗、截面宽度减小,深宽比再次出现峰值。分析深宽比与流量间的关系,发现两者接近幂函数的关系,即流量随着深宽比的增大呈幂次减小,见图 11。

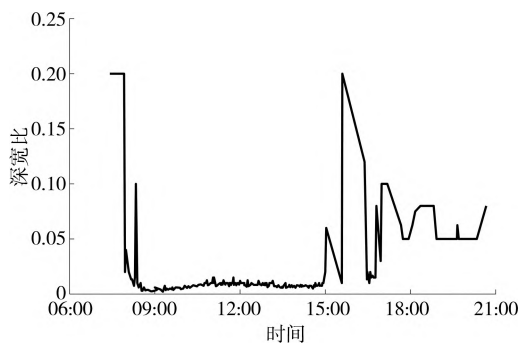


图 10 深宽比变化过程

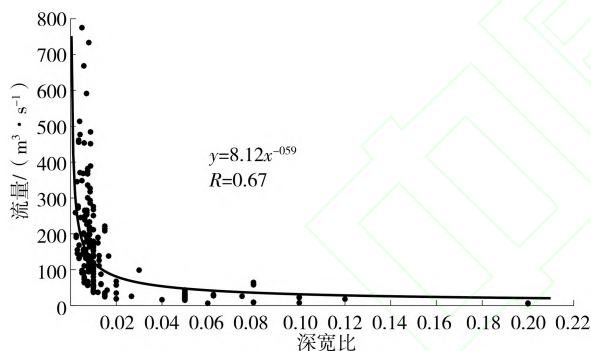


图 11 深宽比与流量的关系

5 结 论

(1) 泥石流阵流固体颗粒粒径范围大,以粗颗粒为主,具有良好的分形特征,分维值为 2.75~2.80,粒度分维值与泥石流的容重、各类颗粒含量、分选系数、峰值流量、峰值流速、最大输沙率等特征参数之间具有明显的函数关系,说明分形特征可以较好地反映阵流流态变化过程。

(2) 阵流过程中,流量呈先增大后减小的变化规律,流速具有双峰特征,流量、流速的变化虽然不同步但存在相关性,流速较慢时流量也较小,流速较快时流量也较大,即流速限制着流量的变化。

(3) 流量是影响输沙率的因素之一,输沙率与流量线性正相关。

(4) 可用泥石流深宽比反映阵流过程的横向形态特征,深宽比与流量成幂函数关系,即阵流流量随深宽比的增大呈幂次减小。

参考文献:

- [1] 刘晶晶,李泳,程尊兰.阵性泥石流的流量衰减特征[J].中国科学院大学学报,2008,25(2):177-184.
- [2] 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(3):7-11.
- [3] PIERSON W R, THOMAS C. Erosion and Deposition by Debris Flows at Mt Thomas, North Canterbury, New Zealand [J]. Earth Surface Processes, 1980, 5(3): 227-247.
- [4] 李泳.蒋家沟泥石流阵流的时空特征[J].自然杂志,2014,36(5):319-324.
- [5] 李泳,姚寿福,胡凯衡,等.从蒋家沟泥石流阵流看泥石流堆积[J].山地学报,2003,21(6):712-715.
- [6] 李泳,胡凯衡,何易平.根据阵流估计泥石流堆积参数[J].自然灾害学报,2003,12(2):71-78.
- [7] 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.
- [8] 胡卸文,钟沛林.云南蒋家沟流域泥石流沟谷演变的非线性特征[J].长江流域资源与环境,2002,11(1):94-97.
- [9] 唐邦兴.中国泥石流[M].北京:科学出版社,2000:40-50.
- [10] 胡凯衡,韦方强,李泳.泥石流的阵性波状运动[J].山地学报,2004,22(6):707-712.
- [11] 成都地质学院.沉积岩(物)粒度分析及其应用[M].北京:地质出版社,1978:44-53.
- [12] FOLK R L, WARD W C. A Study in the Signification of Grain Size Parameters [J]. J Sedim Petro, 1957, 27:3-27.
- [13] 陈颙,陈凌.分形几何学[M].北京:地震出版社,1998:23-45.
- [14] 杨伟,崔鹏,庄建琦.泥石流堆积物粒度分形特征及影响因素分析[J].水土保持通报,2012,32(2):80-83.
- [15] 黄祺,陈宁生,朱云华.泥石流源区砾石土的粒度分形特征[J].山地学报,2012,30(5):578-584.
- [16] 陈剑,陈松,慎乃齐.泥石流堆积物的粒度特征及分形结构:以金沙江上游干热河谷区瓦卡泥石流沟为例[J].现代地质,2014(2):438-442.
- [17] 贺拿,陈宁生,朱云华.泥石流源区砾石土分形特征及其与渗透系数关系试验研究[J].岩土力学,2014(9):2543-2548.
- [18] 董佳祺,王清,张旭东.泥石流堆积物粒度分布特征影响因素分析及分维数预测[J].工程地质学报,2015,23(3):462-468.
- [19] 倪化勇,刘希林.泥石流粒度分维值的初步研究[J].水土保持研究,2006,13(1):89-91.
- [20] CARTER J E, CANNON S H, SANTI P M, et al. Empirical Models to Predict the Volumes of Debris Flows Generated by Recently Burned Basins in the Western U.S. [J]. Geo-

morphology, 2008, 96 (3/4): 339-354.

[21] 胡凯衡, 崔鹏, 游勇, 等. 汶川灾区泥石流峰值流量的非线性雨洪修正法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(5): 52-57.

[22] 田冰, 王裕宜. 气候因素对蒋家沟泥石流输沙率的影响分析研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(5): 218-222.

[23] 胡凯衡, 康志成, 李泳. 阵性泥石流泥位过程线的 Euler-Lagrange 分析[J]. 泥沙研究, 2010(4): 6-10.

[24] 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: 99-140.

【责任编辑 张智民】