

泥石流阵流及其活动规律

倪化勇<sup>1,2</sup>, 吕学军<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 阵流是黏性泥石流的主要运动形式。选择蒋家沟1987~1994年8年间运动过程完整, 阵次明显并且观测资料齐全的50次典型泥石流作为研究对象, 讨论泥石流阵流产生的原因, 并统计分析泥石流阵流的活动规律和特征。通过对完整的泥石流暴发过程进行分析, 发现泥石流阵流径流量与阵流频次之间存在幂律关系; 通过对历年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。对于进一步认识泥石流(尤其是黏性泥石流)的运动规律和运动特征具有重要参考价值。

关键词: 泥石流; 阵流; 蒋家沟; 幂律规则; 流量过程线

中图分类号: P642. 23

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2005) 06-0242-03

Intermittent Debris Flow and Its Activity Rule

NI Hua-yong<sup>1,2</sup>, LU Xue-jun<sup>1,2</sup>

(1. Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Intermittent debris flow is the most important moving form of viscous debris flows. According to field observation materials of debris flow along Jiangjia ravine between 1987 and 1994, 50 times typical debris flows with whole occurring process, obvious intermittent characteristics and detailed observation records were chosen as the research object. After analyzing the occurring reasons of debris flow, the rules and characteristics of intermittent debris flow were discussed. As one with whole occurring process of intermittent debris flow be concerned, there exists an obvious power-law relationship between runoff and frequency of intermittent debris flow; as the discharge curve of the intermittent debris flow of the past every year be concerned, intermittent debris flow has the following two characteristics: (1) One with whole occurring process usually has different mounts (usually from one to four); (2) though the largest discharge usually occurs at prophase, it still appears that the largest discharge occurs at more than one stage. This research has reference sense to further recognize the movement rule and characteristics of debris flow (especially viscous debris flow).

**Key words:** debris flow; intermittent debris flow; Jiangjia ravine; power-law rule; discharge process curve

阵流是黏性泥石流的主要运动形式, 其阵与阵之间有明显的断流时间, 一般在数秒到数十分钟左右, 最长间隔也可达到1 h 或者更长。黏性泥石流阵流既有独特性又有普遍性, 经观测研究发现, 云南东川蒋家沟、大白泥沟, 甘肃武都火烧沟, 四川凉山黑沙河支沟马颈沟等众多泥石流沟暴发的黏性泥石流都呈现出明显的阵流特征。目前, 黏性泥石流阵流已经引起众多学者的关注, 并予以研究<sup>[1-6]</sup>。但从以往的研究成果来看, 研究大多都集中于阵流所呈现的现象本身, 主要从阵流现象本身得出黏性泥石流阵流的运动特征和运动规律。本文在前人研究的基础上, 进一步分析观测资料, 应用数学方法和理论, 从统计意义上得出黏性泥石流阵流所具有的几点活动规律和特征。

1 泥石流阵流成因

泥石流阵流的形成既与形成区固体物质的补给形式、降水特点以及泥石流流动过程中沟床河槽的变化等外界因素有关, 也与黏性泥石流本身的特性(内在机理)有关。

1.1 黏性泥石流的特性所决定

一阵黏性泥石流形成并在河槽中开始流动时, 由于黏性

泥石流本身的性质, 泥石流流体要受到沿途河槽或者沟床的摩擦阻力。如果泥石流的动力小到不足以克服该阻力, 则阵流停止流动。下阵泥石<sup>[1]</sup>流则在上阵泥石流的基础上, 满足流体的下滑力大于黏性流体的极限切应力, 流体沿光滑的残留层向下运动, 阵流才有可能形成。

另外, 目前, 大多数学者同意泥石流流体符合宾汉体或者似宾汉体的观点。胡凯衡等<sup>[5-6]</sup>将阵性泥石流看作是波状运动, 认为泥石流阵流的产生是宾汉体模式和浅水波方程的结合自发产生的一种运动, 从而将浅水波方程的非线性和泥石流体的非牛顿体的流变模式看作为阵流产生的内在机理。

1.2 固体物质补给、降水的非连续性和不同步性

在泥石流形成区, 固体物质的补给主要是通过崩塌、滑坡体或其他堆积物冲水液化产流提供, 这就需要固体物质的补给和降水相同步。但在泥石流的形成过程中, 固体物质不是连续的进入沟床直接提供于泥石流的形成, 而往往是有一个由表层不断向下层渗水, 表层先冲水液化而启动补给, 然后下层再冲水液化启动补给的过程。这样一个固体物质间歇性进入沟床补给泥石流的过程, 也可能导致阵流的产生。

\* 收稿日期: 2005-01-11

作者简介: 倪化勇(1979-), 男, 山东临朐人, 硕士研究生, 主要从事泥石流灾害预测预报、灾害管理的学习和研究。

### 1.3 泥石流沟道特征的变化

在泥石流的流动过程中, 由于沟槽或河床的展览使得流体深度变小, 从而泥石流的流速也变小, 如果小到不足以克服阻力时, 这阵泥石流停止流动。另外, 泥石流在前进的过程中, 还可能遇到沟槽或者河道阻塞的情况, 这样使得泥石流在沟床内进行堆积而停止流动。当阻塞溃决或泥石流克服这种阻力后, 阵流即可产生。

综上所述可以看出, 阵流出现的整个过程, 是不断补给, 不断堆积, 不断前进的过程, 也是阵流自身不断产生、发展和消亡的过程。

## 2 泥石流阵流径流量的幂律规律

### 2.1 幂律规则的内容

幂律规则是自然界普遍存在的一种规则, 是指某事件发生的规模和频率之间呈现出的定量关系——幂函数关系。众多的研究证明, 各种自然灾害现象的背后存在这种幂函数关系, 并且依据这种关系得到了很多有意义的结论<sup>[7]</sup>。例如在地震震级和小于此震级的相应的地震次数之间<sup>[8]</sup>, 河流的长度和对应的流域面积之间<sup>[9]</sup>, 崩塌体暴发规模和相应发生频率之间<sup>[10]</sup>, 泥石流暴发规模和相应暴发频率之间<sup>[11]</sup>, 等等, 都存在明显的幂律规律。经过统计研究, 泥石流阵流径流量也存在幂律规律。

### 2.2 泥石流阵流活动的幂律规律

蒋家沟是我国甚至世界上的一条典型的降雨型泥石流沟, 每年的雨季都暴发多次泥石流, 平均 15 次左右, 最多年实测达到 28 次, 并且每次暴发的泥石流, 几乎都是黏性泥石流阵流运动为主。例如 1991 年 7 月 9 日暴发的泥石流达到 427 阵之多, 其中阵流 381 阵, 连续流 46 阵<sup>[12]</sup>。由于该次泥石流阵流次数多, 记录完整, 因此选择该次泥石流的阵流活动作为研究对象具有代表性。

泥石流径流量是泥石流的一个重要运动要素, 在一定程度上反映了泥石流规模, 下面分析阵流中泥石流径流量同相应次数之间的关系。根据蒋家沟泥石流阵流的径流量分布范围, 将泥石流的阵流径流量以  $10^3 \text{ m}^3$  为间隔, 分为不同的径流量区间段。然后根据研究问题的需要进行数值处理, 将几个数量过大且出现情况极少的极值予以排除, 最后选择了 378 组阵流数据进行统计分类分析, 得出在不同的径流量区

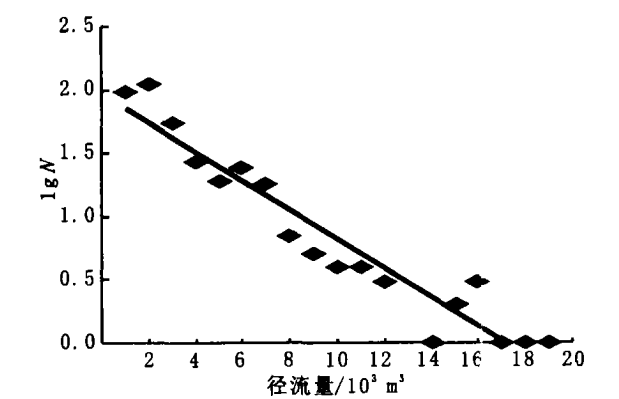


图1 阵流径流量和相应阵流次数关系图( 据文献[ 12] )

### 3.1 流量过程呈现多峰特征

从绘制的 50 次典型阵性泥石流的阵流流量过程曲线来看, 在不同的泥石流暴发过程中, 出现不同的高峰个数。为了便于说明蒋家沟泥石流暴发过程中高峰的出现规律, 笔者通过曲线拟合找出曲线的涨落趋势, 将有明显涨落的曲线段

间段内相应的阵流次数(表 1)。

表1 不同径流量范围内的阵流次数统计表

径流量/ $\text{m}^3$	< 1000	1000~2000	2000~3000	3000~4000	4000~5000	5000~6000
阵流次数	95	109	55	27	19	24
径流量/ $\text{m}^3$	6000~7000	7000~8000	8000~9000	9000~10000	10000~11000	11000~12000
阵流次数	18	7	5	4	4	3
径流量/ $\text{m}^3$	12000~13000	13000~14000	14000~15000	15000~16000	16000~17000	17000~18000
阵流次数	0	1	2	3	1	1

为了进一步分析泥石流阵流径流量和相应阵流次数之间的定量关系, 在以阵流次数  $N$  和阵流径流量  $Q$  为坐标的对数坐标系中绘图(图1)。通过数据分析和趋势拟合, 得出阵性泥石流暴发次数  $N$  和径流量  $Q$  之间存在以下关系:

$$\lg N = -0.115Q + 1.971$$

上式的相关系数  $r^2 = 0.9599$ , 说明这个关系可靠程度较高, 关系的得出也说明泥石流阵流中幂律规律的存在。为了进一步验证阵性泥石流的幂律规律, 选择不同时间暴发的泥石流进行验证, 结果发现阵性泥石流径流量和相应阵次之间都存在这种关系。

需要说明, 以上讨论的是指定泥石流阵流径流量区间段与该区间段内相应阵流次数之间的定量关系。与此相区别, 下面讨论一次泥石流总径流量与该次泥石流总阵流次数之间的关系。经研究发现泥石流总阵流次数和相应总径流量之间不存在线性正比关系, 即泥石流阵流总径流量并不是随着阵流次数的增多而严格增加。图2 是蒋家沟 1987~1994 年历次泥石流的阵流次数和相应总径流量之间的散点图。从图中可以看出, 点子分布散乱, 两者之间关系不明确, 例如用线性关系进行拟合时, 相关系数  $r^2 = 0.2786$ , 其他拟合手段结果均不理想, 说明两者相关性差。这个结论对以后的研究尤其值得注意。

## 3 泥石流阵流流量过程特征

泥石流流量是泥石流的另一个重要运动要素, 一般是指泥石流龙头的瞬时流量。阵性泥石流的间歇性特征, 决定了泥石流流量的不连续性, 使得泥石流流量过程线呈现出锯齿状的特点(如图3、图4)。根据蒋家沟泥石流历年观测统计资料<sup>[12]</sup>, 笔者绘制了从 1987 年到 1994 年有完整记录的 50 次泥石流的流量过程线, 以期充分发现阵性泥石流的活动特征。

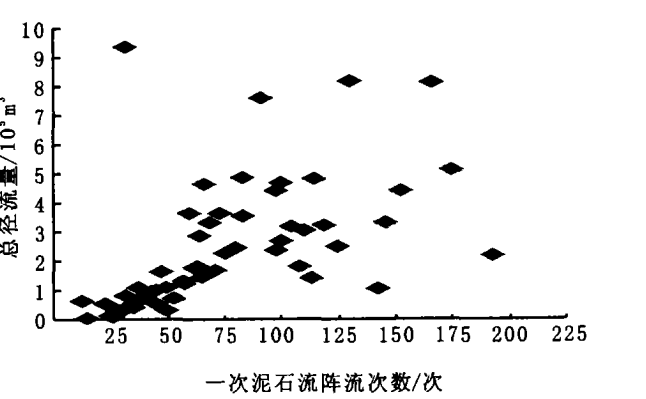


图2 泥石流总阵流次数与总径流量关系图(据文献[ 12] )  
(本文规定超过前后临近流量 2 倍的曲线段) 定义为流量高峰段。例如如图 3、图 4 两种类型的泥石流阵流流量过程曲线, 尽管呈现锯齿状, 但在这个前提条件下, 峰值个数确定, 分别为单峰型曲线和双峰型曲线。以此分析蒋家沟泥石流阵流流量过程出现的不同类型和呈现的不同特征。

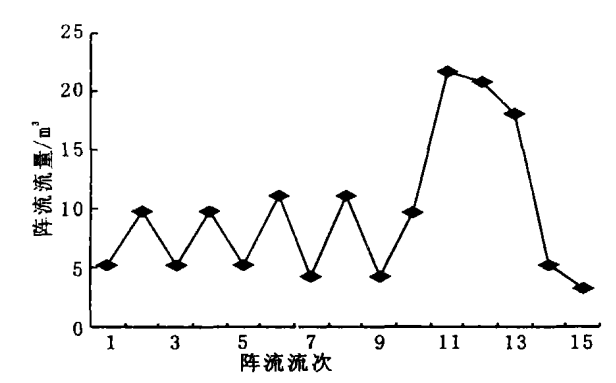


图3 单峰型流量过程曲线(1990-06-19)

从绘制的 50 次阵性泥石流的流量过程线来看, 流量过程峰值个数不等, 统计结果见表 2。从表 3 可以看出, 在蒋家沟泥石流暴发过程中, 每次泥石流暴发, 多数情况下(88%)都出现 1~4 次高峰。

表2 流量过程曲线峰值个数统计表(据文献[6])

流量过程曲线峰值个数	1	2	3	4	5	> 5	总数
出现次数	9	11	13	11	3	3	50
百分比	0.22	0.26	0.22	0.18	0.06	0.06	1

3.2 峰值流量出现时段不同

峰值流量是指一次泥石流暴发的整个过程中最大的阵流流量。黏性泥石流阵流峰值流量出现的时间与降水过程、固体物质的补给过程以及河床的形态和泥石流铺床过程等因素有密切关系。从理论上讲, 在泥石流暴发的初期, 一般是泥石流的铺床过程, 泥石流流体横向扩散, 使得阵流的流量偏小; 在泥石流暴发的中期, 降水补给充足, 固体物质补给充分, 铺床过程基本结束, 阵流流量明显增大, 峰值流量一般出现在这个时段; 在泥石流暴发过程的后期, 尽管铺床过程结束, 床面平滑, 但是由于降水减少, 固体物质的补给也相应减少, 使得阵流流量明显回落。

为了将理论与实际相验证, 进一步研究蒋家沟泥石流阵流的运动特征, 发现阵流峰值流量出现的规律, 笔者结合历次泥石流阵流流量过程线, 将流量过程平均分为四个时段: 前期、中前期、中后期和后期。表3 是蒋家沟1987~1994 年有完整记录的 50 次泥石流的暴发过程中阵流峰值流量出现时段的分析统计结果。

参考文献:

[1] 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.

[2] 杜榕桓, 康志成, 陈循谦, 等. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究[M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1987.

[3] 中国科学院成都山地灾害与环境研究所. 泥石流研究与防治[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1989.

[4] 中国科学院成都山地灾害与环境研究所. 中国泥石流[M]. 北京: 商务印书馆, 2000.

[5] 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.

[6] 胡凯衡, 韦方强, 等. 泥石流的阵性波状运动[J]. 山地学报, 2004; 22(6): 707- 712.

[7] 许强, 黄润秋. 地质灾害发生频率的幂律规则[J]. 成都理工大学学报, 1997, 24(增刊): 91- 96.

[8] Per Bak, Chao Tang, Kurt Wiesenfeld. Self-organized Criticality: An Explanation of 1/f Noise[J]. Phys. Rev. Lett., 1987, 59: 381- 384.

[9] Hack, J T. Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland[D]. U. S. Geol. Surv., 294- B, 1957. 46- 94.

[10] 刘汉超, 陈明东, 等. 金沙江向家坝水电站库区环境地质评价研究[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1993.

[11] 罗德军. 自组织临界状态及其在泥石流暴发中的应用[D]. 成都: 四川大学, 1994.

[12] 张军, 熊刚. 云南蒋家沟泥石流运动要素观测资料集(1987—1994)[M]. 北京: 科学出版社, 1997.

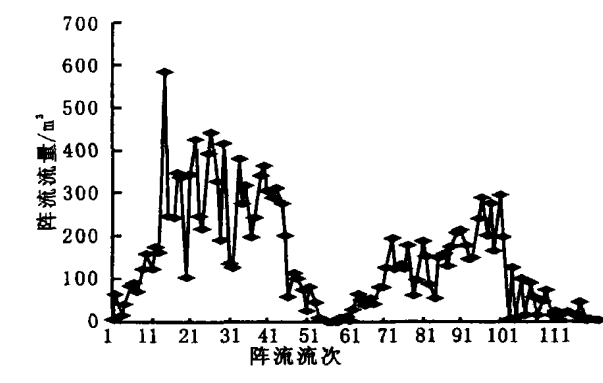


图4 双峰型流量过程曲线(1990-06-19)

表3 阵性泥石流峰值流量出现时间统计表(据文献[12])

峰值流量出现的时段	前期	中前期	中后期	后期	总数
出现次数	21	18	10	1	50
百分比	0.42	0.36	0.20	0.02	1

从统计结果来看, 前期时段(前25%时段)出现峰值流量的比例最大, 中前期(25%~50%时段)次之, 中后期和后期占的比例较小。同上述一般理论情形相比, 现实情况下泥石流峰值流量出现在前期和中前期的可能性较大, 这又是一个在今后的泥石流研究中应该注意的地方。

4 结 论

本文通过分析云南蒋家沟1987~1994 年泥石流观测资料<sup>[12]</sup>, 分析了泥石流阵流产生的原因, 并讨论了泥石流阵流活动的几点规律和特征:

- (1) 阵性泥石流总径流量与阵流次数之间不呈正比线性关系, 两者关系不明确。即阵性泥石流总径流量不随阵流次数的增加而单调增加。该关系的得出可以消除阵流次数越多, 总径流量越大的定势思维, 对进一步正确认识阵性泥石流具有重要意义。
- (2) 阵性泥石流阵流径流量与该径流量范围内出现的相应阵流次数之间呈现幂函数关系。根据该特征, 可以对特定的黏性泥石流沟暴发的阵性泥石流的次数和规模进行预测, 为泥石流径流量提供了一条估算途径。
- (3) 阵性泥石流阵流流量过程出现多峰特征, 一般以1~4 次高峰不等, 并且峰值流量出现在多个时段, 以前、中期为主。这在对阵性泥石流进行现场观测和预防时应予以注意。