

# 泥石流运动流型与流态特征\*

张 军

(中国科学院东川泥石流观测研究站)

**提 要** 泥石流的运动流型与流态是研究泥石流运动力学的重要内容。以云南东川蒋家沟泥石流运动观测为例, 对阵流型、连续型、复合型三种流型及相应的流量过程特征进行了分析; 借鉴水力学的流态理论, 对天然沟道中泥石流的流动状态(即层动流、波动流现象)进行了探讨分析, 指出在一阵流动过程中也会出现几种不同流态特征。

**关键词** 泥石流 流型 流态

研究泥石流的运动特性, 尤其是加强对泥石流运动流型与流态的研究, 有利于通过认识泥石流的基本物理特征, 深入研究泥石流的基本性质, 建立其运动物理和数学模型, 并对泥石流防治工程设计具有重要意义。

我国云南东川地区蒋家沟泥石流暴发频繁, 为开展泥石流运动原型观测和研究提供了得天独厚的有利条件。我国一些泥石流学者, 曾从流变学等角度对其流态进行了研究<sup>[1,2]</sup>。现结合前人的工作, 根据近几年观测到的蒋家沟泥石流运动观测资料, 试图对泥石流的运动流型与流态作进一步具体探讨。

## 一、泥石流的运动流型

通过多年来对我国西南山区(如云南盈江浑水沟和东川蒋家沟)泥石流观测表明, 泥石流运动流型基本上存在三种类型, 即阵流型, 连续流型和复合流型。流型的区别可从其相应的流量过程线直观分析得出。

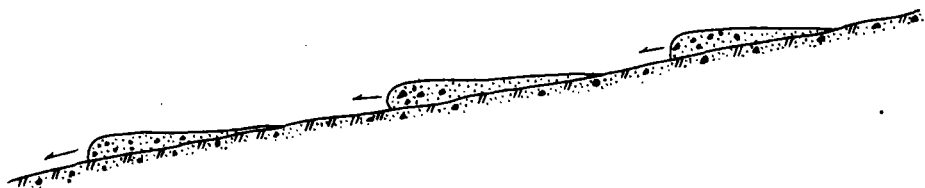


图1 阵性流型泥石流示意图  
Fig. 1 Sketch of gustiness flow

### (一) 阵 流 型

阵流型即阵性流型泥石流, 是以阵性运动为主要特征。一场泥石流主要由若干阵组成(图1)。蒋家沟阵性泥石流多由几十阵或上百阵组成, 每阵历时一般为20—40秒, 阵

\* 引用资料由东川站同仁共同收集, 此一并致谢。  
本文改回日期: 1991-05-27。

与阵之间有断流现象,断流时间不等,与汇流和起动机理有关。阵性流在流量过程线上呈独立的峰值型。这里以1987年6月27日泥石流为例,分析阵性泥石流的物理过程。

1987年6月27日下午5时50分蒋家沟开始降雨,降雨前沟床常流量 $Q=0.3-0.5$ 立方米/秒。半小时后流量增大到3.0立方米/秒,实测挟沙洪水密度 $\gamma_c$ 为1.05克/立方厘米。该场泥石流全过程历时4小时20分钟,由56阵泥石流组成,最大阵性流量为402.0立方米/秒,最大流速7.5米/秒,最大泥深2米,最大密度2.20克/立方厘米,观测段沟床纵比降5.7‰,整个过程有下列特征(图2)。

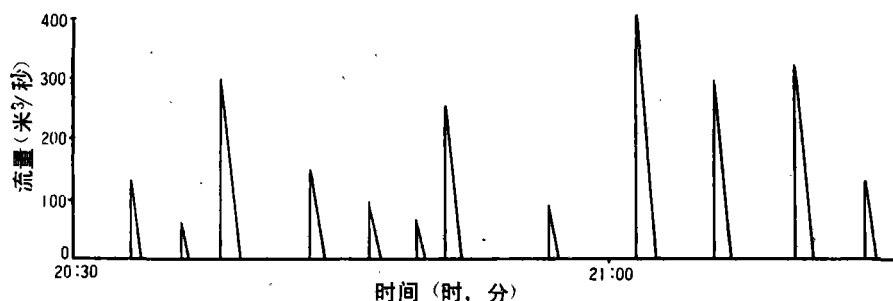


图2 阵性流型流量过程线(蒋家沟,1987.6.27)

Fig. 2 Discharge hydrograph of gustiness flow (Jiangjia Ravine, on Jun. 27, 1987)

1. 6:15—7:10,挟沙洪水阶段,流量 $Q=0.5-5.0$ 立方米/秒,流体密度 $\gamma_c=1.02-1.20$ 克/立方厘米。这段时间的运动特点是随着流量的增大,不断侧蚀两岸沟床,沿程泥沙量增加,揭蚀沟床带走细颗粒,沟床被粗化,洪水紊动强烈,发出哗哗声。

2. 7:12—7:25,稀性泥石流阶段,流量 $Q$ 为13.5—25.0立方米/秒,流体密度增加到1.50克/立方厘米以上。流体铺满沟床,泥石流不断撞击停留在沟床上的大石头,泥石流飞溅,紊动更加强烈,流体密度迅速增高,响声更大。但通常这段时间不长,约一刻钟,便可听到上游山谷轰轰雷鸣声,蒋家沟阵性泥石流开始出现。

3. 7:25—10:00,这段时间阵性流占主导地位,该场有56阵。习惯上将阵性泥石流的前部称为“龙头”,随之为“龙身”和“龙尾”。龙头部位流量最大,龙尾最小。蒋家沟一阵泥石流的长度一般在150—250米左右,有时更长,阵性流长度与龙头流量多呈正相关。阵之间断流,偶有 $Q=3.0-5.0$ 立方米/秒的泥石流出现,多是由于停滞在沟床的泥浆增厚而重新起动形成,往往逐渐增大形成新的一阵泥石流,或随沟床变缓停积消失。阵性流时段流体密度 $\gamma_c$ 变化不大,多为2.00—2.20克/立方厘米,有时可达2.30克/立方厘米,该时段最长,输沙量最大,塑造沟床最甚,沟床冲淤明显。

4. 10:00—10:15,转入稀性泥石流,阵性流规模减小,流量减弱,密度由1.80克/立方厘米,很快降到1.50克/立方厘米左右,这段时间一般显得短暂。

5. 10:15—11:00,挟沙洪水阶段,进入尾声。流体密度减到1.30克/立方厘米以下,流量也降到5.0立方米/秒以下。由于降水地表渗流的滞后影响,这段时间往往拖得很长。沟床残留层中的细颗粒被水带走,沟床被粗化。

## (二)连续流型

观测表明, 蒋家沟除阵性泥石流外, 同样存在着连续流型泥石流。连续流型与阵流型的明显区别在于, 前者不出现断流, 后者则有。连续流流量变化会出现峰值波动。例如 1989 年 6 月 10 日凌晨 2 时 23 分泥石流, 历时 2 小时余, 全过程以连续流为主, 该场泥石流最大流速 10.0 米/秒, 总径流量 32.9 万立方米, 总输沙量 17.5 万立方米。该场连续流型泥石流的流量过程线如图 3。

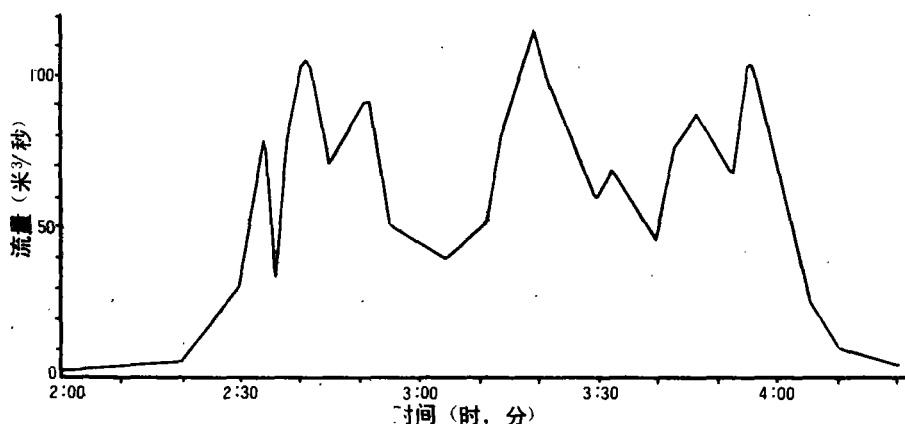


图 3 连续流型流量过程线(蒋家沟, 1989. 6. 10)

Fig. 3 Discharge hydrograph of continuous flow (Jiangjia Ravine, on Jun. 10, 1989)

### (三) 复合流型

复合流型的泥石流是指一场泥石流过程中分别存在连续流或阵性流, 这种流型在蒋家沟也存在。如 1987 年 7 月 5 日暴发的泥石流就属此类。这场泥石流从当日下午 9 时 2

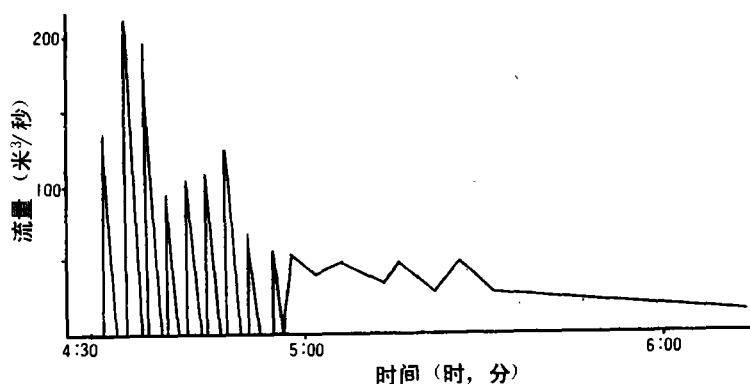


图 4 复合流型流量过程线(蒋家沟, 1989. 7. 3)

Fig. 4 Discharge hydrograph of mixed flow (Jiangjia Ravine, on Jul. 3, 1989)

分开始至 6 日上午 9 时 18 分结束, 历时达 12 小时 16 分, 其中 9 时 2 分至 10 时 4 分为阵性泥石流阶段, 共有 37 阵, 从 10 时 4 分至 6 日晨 7 时 30 分为连续流, 历时长达 9 小时

26 分; 7 时 30 分至 9 时 18 分由稀性连续流转入挟沙洪水。该场泥石流规模大, 输沙浓度高, 最大流量达 1100.0 立方米/秒以上; 密度在 2.25 克/立方厘米以上, 总径流量达 111.0 万立方米, 输沙量达 77.5 万立方米。出现复合流型泥石流往往与降雨强度及降雨过程有关。该场总降雨量为 76.3 毫米, 其中 5 日晚 9 时 40 分至零点, 降雨量达 55.0 毫米, 最大 1 小时雨强达 46.4 毫米, 最大 10 分钟雨强达 12 毫米(晚 9 时 40 分至 9 时 50 分)。像这类前期是阵性流、后期为连续流的, 又如 1987 年 7 月 3 日泥石流亦是如此。而前期为连续流、后期为阵性流的也有之, 如 1987 年 8 月 5 日泥石流, 该场泥石流从凌晨 2 时 45 分暴发至 5 时结束, 其中前期为连续粘性泥石流, 后期则暴发了 48 阵泥石流(图 4)。

## 二、泥石流运动流态特征

对泥石流运动流态的认识和研究源于水力学的雷诺实验, 后者已趋成熟, 前者则起步不长。雷诺实验是水流通过 8 米长的透明玻璃管道(实际量测段长 4.5 米)加入有色液体进行的<sup>[3]</sup>。水力学认为, 当有色液体质点呈一条稳定、明显的直线流动(肉眼观测), 彼

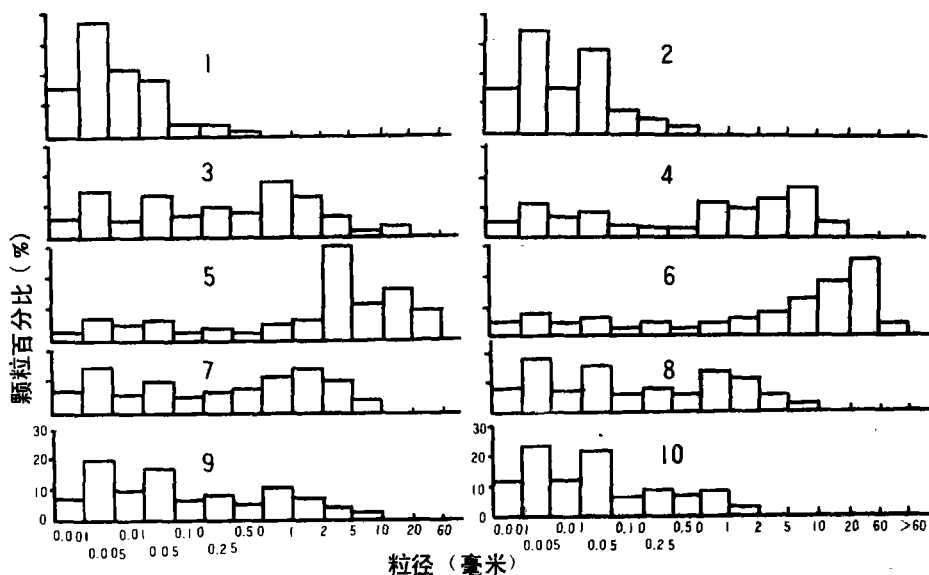


图 5 蒋家沟泥石流颗粒组成直方图

Fig. 5 Histogram of debris flow grain composition in Jiangjia Ravine

1.  $\gamma_c = 1.067$ ; 2.  $\gamma_c = 1.172$ ; 3.  $\gamma_c = 1.789$ ; 4.  $\gamma_c = 1.808$ ; 5.  $\gamma_c = 2.046$

6.  $\gamma_c = 2.192$ ; 7.  $\gamma_c = 1.880$ ; 8.  $\gamma_c = 1.735$ ; 9.  $\gamma_c = 1.630$ ; 10.  $\gamma_c = 1.475$

此互不混杂时, 该种流态称为层流; 当质点运动轨迹极不规则, 相互混杂、碰撞时称为紊流。两种流态产生的本质是流体惯性力与粘滞力相互制约、相互作用的结果。当惯性力大于粘滞力时, 呈紊流流态, 反之为层流流态。在假定水体是一种均质体(严格说来也是

混合体)前提下,由雷诺数  $Re$  判定流态。随实验方法不同,  $Re$  判别值也是存在一个变化幅度较大的区间<sup>[4]</sup>。钱宁在泥沙运动力学中对管道的固体输送及流态特征进行了深入的研究<sup>[5]</sup>。对泥石流流态的定量判定难度较大,这是因为泥石流流体结构组成复杂得多,固体物质尺寸范围太大。尽管如此,我国的泥石流工作者仍通过野外观测研究,进行了尝试。

### (一)泥石流野外观测到的层动流现象

通过野外及蒋家沟泥石流观测表明,泥石流运动仍然存在与水流类似的不同流态。基于泥石流已远不是数米长的管道流动,而是自然界宏观大尺度的运动,加之内部组成尺度的跨度(从粘粒到砾石)大,因而认识泥石流的流态也应是尺度的。为便于与水流区别,有的泥石流工作者提议分别将泥石流两种流态称为层动流和紊动流。泥石流运动中的紊动流态是普遍存在的。下面侧重讨论野外观测中的层动流现象。

1987 年 6 月 27 日下午 6 时,蒋家沟暴发泥石流,由上游两条主要支沟(多照沟和门前沟)组成的主沟泥石流经观测站流入下游小江,主沟流体呈灰黑色(固体物质为灰黑色板岩碎屑),7 时 30 分位于观测站上游一侧的大凹子沟亦随之暴发泥石流,流体呈棕黄色(基岩风化后呈棕黄色),它与主沟流体颜色明显不同,汇入主沟后有 100 余米长较顺直沟床段。支沟棕黄色流体与主沟灰黑色流体泾渭分明,棕黄色流体在 100 米长沟段内流线顺直连续,互不干扰,流面平稳。这时流体粘稠均匀,无粗大石块参与运动。此种层动流现象与雷诺实验有异常相似之处(这种流态现象后来多次被观测到)。当时测得的运动要素:流速  $V=3$  米/秒,流面宽  $B=7$  米,泥深  $h=0.8$  米,密度  $\rho_c=2.00-2.10$  克/立方厘米,其颗粒组成特征见图 5。观测表明,当泥石流粘性高,流速低(一般  $<4$  米/秒),且断面顺直时,是可以呈现层动流现象的。我国泥石流工作者通过宾汉体流态判别式做试算<sup>[2]</sup>,其式为

$$Re = 4 \rho_m U_c h / \eta \quad (1)$$

$$He = 16 \rho_m \tau_b h^2 / \eta^2 \quad (2)$$

式中  $Re$  为雷诺数;  $\rho_m$  为泥石流浆体密度;  $U_c$  为流速;  $h$  为泥深;  $\eta$  为刚性系数;  $He$  为赫氏数;  $\tau_b$  为屈服应力。如果将式中的  $\rho_m$  直接用密度值代入上式,  $\eta$  和  $\tau_b$  只可用相应流体密度的浆体量测值代入,可通过式(1,2)得到 1987 年 6 月 27 日观测到层动流时的雷诺数  $Re=1.647 \times 10^5$ ,赫氏数  $He=8.858 \times 10^7$ 。

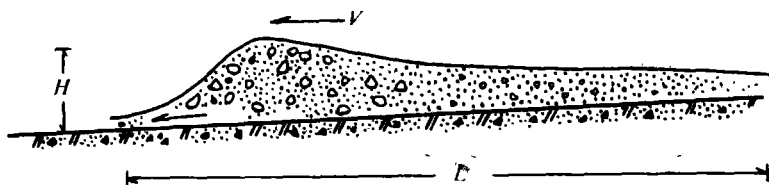


图 6 泥石流波状运动示意图

Fig. 6 Sketch of debris flow undulatory motion

$H$ : 波高;  $U$ : 流速;  $L$ : 波长

### (二)泥石流运动中的波动流现象

野外观测表明,泥石流运动流态存在着一种波动流现象,它与大海中的涌浪相似,无

声无息沿床面运动。波动流往往出现在泥石流过程后期或阵性流动的后部,尤其在阵性流型后期,在大流量向小流量过渡中多次观测到。蒋家沟发生波动流时的流量多在20—50立方米/秒,密度 $\rho_c$ 在1.70—1.95克/立方厘米之间,其运动特征见图6。观测表明,波动流波长 $L$ 一般为10米左右,波高 $H$ 一般在0.3—0.5米,波速 $V$ 一般在3—4米/秒。波动流运动时,波表面浮托的粗颗粒(5厘米左右)石块并未明显随波峰同步运动,而是下层顶抬面上一层,下层运动快于上层运动速度,类似异重流。波动流在运动中或形成新的更大的阵性流,或在运动中自然消失。

### (三)一阵泥石流中存在的几种不同流态及流速特征

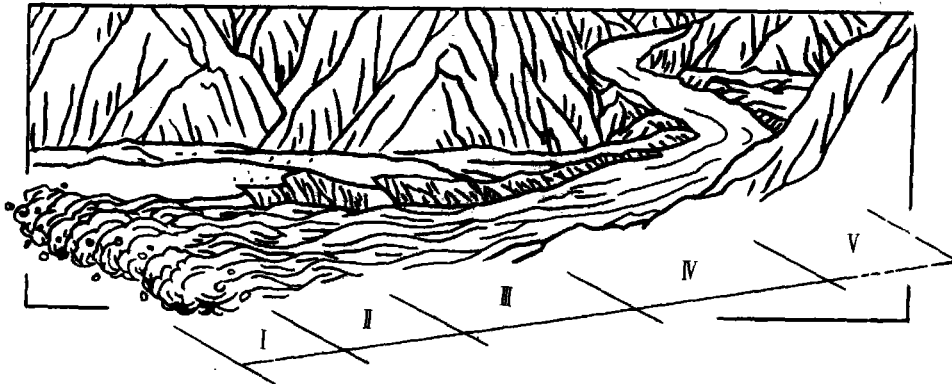


图7 一阵泥石流的流动状态分区示意图(蒋家沟,1987.6.30)

Fig. 7 Distribution of debris flow regime(Jiangjia Ravine, on Jun. 30, 1987)

蒋家沟泥石流运动表明,一阵泥石流中也可能出现几种不同的流态类型,流速变化也表现各一。蒋家沟一阵中等规模泥石流的阵性长度一般在200米左右。一阵典型的阵流,从龙头到龙尾,可分别出现强紊动流,弱紊动流,波动流,层动流,滑动流几种流动状态。图7中:I.强紊动区,即龙头前部3—5米左右,泥浪翻滚,集中有大石块互相撞击,运动声轰鸣,前进时可见表层向下翻滚,龙头流速也最大,可达15.0米/秒;II.弱紊动区,紊动强度明显减弱,粒度变细,该段长约10—20米,与龙头速度变化不大;III.波动流区,流面呈明显波状,波动规模由大转小,该段长约30—50米,流速呈递减趋势,流面趋于平稳;IV.层动流区,流面平顺,因流体粘滞作用,各质点运动轨迹规则,流速变缓,泥深变小,该段长度较长,多为50—80米;V.滑动流区,流面宽度变窄,流速明显减缓,似剪切滑动,特别当流速 $\leq 0.5$ 米/秒,龙尾呈整体拖曳或滑动,最后当流速变小得不足克服床面粘滞力时,尾端停滞在沟床内,该段泥深最薄,粒度最细,停滞在沟床的余部成为下阵泥石流运动的滑动面,或参与下阵泥石流又重新起动前进。

### 参 考 文 献

- [1] 吴积善,1981,泥石流流态及流速计算,泥石流论文集(1),科学技术文献出版社重庆分社,第79—86页。
- [2] 吴积善等,1990,云南蒋家沟泥石流观测研究,科学出版社,第113页。
- [3] 武汉水利电力学院,1974,水力学,人民教育出版社,第96页。
- [4] 清华大学,1980,水力学,人民教育出版社,第249页。
- [5] 钱宁、万兆惠,1985,泥沙运动力学,科学出版社,第583—585页。

## THE CHARACTERISTICS OF FLOW PATTERN AND REGIME IN DEBRIS FLOW MOTION

Zhang Jun

(Dongchuan Debris Flow Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences)

### Abstract

The flow pattern and regime of debris flow motion is an important aspect in research on motion mechanics of debris flow. Research on this aspect is contributive to a deep understanding of basic characteristics of debris flow, establishing of motion physical and mathematical models and serving to debris flow prevention and control. Based on observed data of debris flow in Jiangjia Ravine at Dongchuan, Yunnan Province, three flow patterns (gustiness continuous and mixed flows) and characters of relative discharge processes in motion are analysed in this paper. And then the flow regime of debris flow in the natural channel is observed and analysed, especially laminar and fluctuating flows, with reference to the flow regime theory of hydraulics. For example, in a typical gustiness flow, there are varied flow regimes such as strong turbulent, weak turbulent, fluctuating, laminar and slip flows and varied characters of relative flow velocity.

**Key words** debris flow, flow pattern, flow regime