

蒋家沟泥石流流态*

吴积善

(中国科学院成都地理研究所)

蒋家沟是一条规模巨大、暴发频繁、类型齐全、流态典型的暴雨型泥石流沟，为开展泥石流流态和流变的研究提供了良好的条件。本文试图从讨论泥石流的流变特性着手，研究各类泥石流的流态性质，分析影响泥石流流态的诸因素，阐明泥石流流态的时空变化，为建立泥石流所特有的流动模式提供论据。因笔者水平限制，文中谬误之处，敬请指正。

一、泥石流浆体的流变特性

泥石流流体由水体和土体所组成，是一种介于挟沙水体和塑性土体之间的过渡性流体。含沙水体属牛顿体，塑性土体系圣维南体，而泥石流流体是两者的复合体，从流变曲线的形态来看，为具有起始静切力的幂律体^[1]，其中大部分为宾汉体或似宾汉体。

蒋家沟泥石流浆体（粒径 <2.00 毫米的泥石流流体）的实测流变曲线如图1所示，图中的 $f_1—f_5$ 分别为泥石流浆体的5种切应力极限值（也可认为是屈服值）。 f_1 即为起始静切力 τ_0 ，又称第一极限剪切力^[2]或真动抗剪强度^[3]，表征浆体由蠕变转变为塞流（或低速滑流）时的切应力； f_2 表征浆体由塞流转变为蠕流（即不完全层流^[4]）时的切应力； f_3 表征浆体由蠕流转变为层流时的切应力； f_4 表征浆体由层流转变为紊流或滑流（高速）时的切应力； f_5 表征浆体由滑流转变为滑动时的切应力。 $f_2—f_5$ 分别可以用其在横坐标上的垂直投影值 $\tau_2—\tau_5$ 来表示， τ_B 为宾汉屈服值。

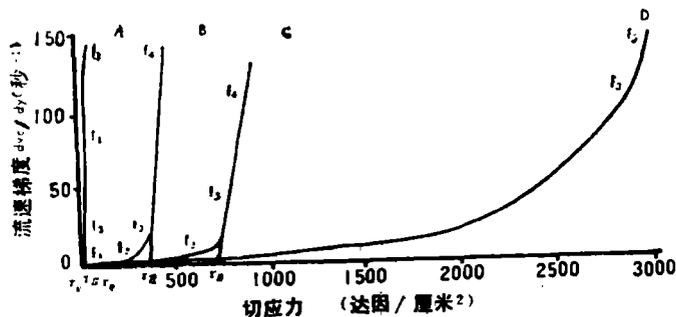


图1 泥石流浆体的流变曲线

Fig. 1 Rheologic curve of debris flow slurry

泥石流浆体容重: A. 1.300吨/立方米; B. 1.621吨/立方米;

C. 1.688吨/立方米; D. 1.760吨/立方米

* 本文所用资料由中国科学院东川蒋家沟泥石流观测实验研究站全体人员共同收集。

蒋家沟泥石流浆体按其流变曲线的形态基本上可以分为四类。

第一类为具有紊动效应的宾汉体(图1A线):当容重小于1.5吨/立方米,属稀性泥石流浆体时, f_1 值很小, $\tau_0 < 5$ 达因/平方厘米,塞流段(f_1f_2)几乎消失,蠕流段(f_2f_3)亦不明显,但层流段(f_3f_4)明显,当流速梯度 dv_c/dy 较大时,层流转变为紊流,曲线(f_4b)向右偏转,从外形来看似具有起始静切力的膨胀体,但实际上是由于紊动效应所致,并不是真正的膨胀体。

第二类为宾汉体(图1B线):当容重在1.50—1.65吨/立方米,为偏稀的粘性泥石流浆体时, τ_0 为10—50达因/平方厘米,塞流段很短、蠕流段较为明显,层流段长,在仪器(RV₂型粘度计)测量范围内未出现紊流或滑流,为比较典型的宾汉体。

第三类为具有滑动效应的宾汉体(图1C线):当容重在1.65—1.75吨/立方米,为偏稠的粘性泥石流浆体时, $\tau_0 < 100$ 达因/平方厘米,塞流、蠕流和层流等段均较明显。当 dv_c/dy 较大时,曲线向左偏转,出现滑流。一般浆体容重越大,曲线左偏亦越明显,即滑动效应也越清楚。

第四类为具有起始静切力的似伪塑性体(图1D线):当容重大于1.75吨/立方米,接近塑性泥石流浆体时, $\tau_0 > 100$ 达因/平方厘米,具有明显的塞流和蠕流段,没有层流段,曲线呈下凹形,与具有起始静切力的伪塑性体相似,但实际上是由于由蠕流段直接过渡到滑流段(f_4f_5)所致,并不是真正的伪塑性体,故称具有起始静切力的似伪塑性体。

二、泥石流流体的流变特性

图2为蒋家沟泥石流流体(土粒最大粒径为20毫米)的一组流变曲线,采用SHL-1型沙浆流变仪测得,泥石流流体的容重为1.90—2.30吨/立方米,系粘性泥石流。当容重 < 1.70 —1.90吨/立方米,系稀性泥石流流体时,且流体一旦静止,泥石流流体中的粗颗粒石块迅速下沉,则难以测得流体的流变曲线;当容重 > 2.30 吨/立方米,属塑性泥石流流体时,起始静切力很大,超过仪器的测量范围,或发生沿壁滑动,也无法测得流变曲线,或已进入圣维南体的范畴,因此测定的范围仅限于粘性泥石流。但稀性泥石流流体,实质上是以稀性泥石流浆体作为搬运介质,因而浆体的流变曲线可以近似地反映流体的流变特性,流体的粘度 η 和屈服值 τ_B 可用浆体的粘度 η' 和屈服值 τ'_B 为基础进行近似地计算,其算式引用下列公式:

$$\eta = \eta' \left(1 + K \frac{C_v}{C'_v}\right)^n, \quad (1)$$

$$\tau_B = \tau'_B K \left(\frac{C_v}{C'_v}\right)^m = K \tau'_B \left(\frac{C_v}{C'_v}\right)^m, \quad (2)$$

式中 C_v 为泥石流流体的体积浓度; C'_v 为泥石流浆体的体积浓度; K 为修正系数; n 、 m 为指数,根据实验资料确定。而容重很大的塑性泥石流浆体的流变曲线,亦可以近似地揭示塑性泥石流流体的流变特性,后者也属于具有起始静切力的似伪塑性体,但滑动效应更明显,有的接近圣维南体。

蒋家沟粘性泥石流流体的流变曲线如图2所示,5条曲线除 k_1k_2 段外,其它各段总的变化趋

势大致相似,即 k_2k_3 段为直线, k_3k_4 段为上凸曲线、 k_4k_5 段为下凹曲线、 k_5k_6 段为垂直于横轴的直线,各段分别表示层动流,紊动流,滑动流和滑动。可以设想,如果没有石块的影响, k_2k_3 段可能是直线,即呈层流状态。

石块在泥石流中产生两种作用。一是滑动效应,因为石块在泥浆体中形成格架结构,大大增加了泥石流体的内部摩阻力,一旦此力接近于泥石流与边壁之间的粘附和摩擦力时,流体沿壁发生不完善的滑移,这种泥石流既在流动,又出现沿壁滑动,称之滑动效应,线段 k_4k_5 就是滑动效应作用的结果。当流体内部的摩阻力大于流体与边壁间的粘附和摩擦阻力时,出现整体沿壁滑动,即 k_5k_6 段。另一是扰动效应,处于泥石流流速场中的石块,受流速差造成的压力差的影响,石块发生转动,出现碰撞,流线遭到干扰,甚至出现泥浆飞溅,这种由于石块扰动而不是脉动引起的紊动状态,称之扰动效应。图2中的 k_3k_4 段,可能是扰动效应所致。至于 k_2k_3 段,因流速梯度小,不足以产生明显的扰动效应,故呈直线,表示层动流。

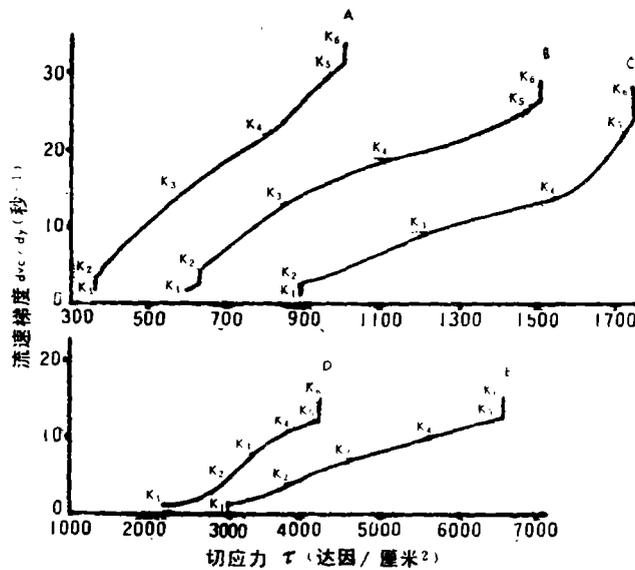


图2 粘性泥石流体的流变曲线

Fig.2 Rheologic of viscous debris flow body

泥石流流体容重: A. 1.999吨/立方米;
B. 2.177吨/立方米; C. 2.235吨/立方米;
D. 2.252吨/立方米; E. 2.292吨/立方米

泥石流流体流变曲线的 k_1k_2 段,形态较为复杂,其中部分线段与横轴垂直,这也是由于流体出现沿壁滑动所致。

从图2的5条曲线看出,尽管曲线有所起伏,但基本上摆动在直线 k_2k_5 (C线是 k_2k_4)的两侧,因此粘性泥石流流体可近似地按宾汉体处理。

三、泥石流的流态类型

泥石流浆体的流态在第一部分业已指出,若不考虑蠕变、塞流和滑动,则可分蠕流、层流、紊流和滑流四类。鉴于黄土泥流和高含沙水流的固体颗粒粒径与浆体大致接近,故泥石流浆体的四种流态可以认为是泥流和高含沙水流的流态。

泥石流流态大致与浆体流态相似,但由于石块所造成的滑移和扰动效应的影响,使其流态明显偏离一相流体的流态,为此在泥石流流态的名称上均加了一个“动”字,以区别于标准的流态,这样泥石流有蠕动流、层动流、紊动流和滑动流,加上另一种特殊的流态——波动流,则共有5种流态。

(一) 蠕 动 流

蠕动流是一种介于塞流和层动流之间的不完全层流,流变曲线呈下凹形,表观流变方程:

$$\tau = \tau_0 + K(dv_c/dy)^n, \quad (3)$$

式中 K 和 n 分别为稠度和流动指数, $n < 1$ 。

蒋家沟泥石流的蠕动流流速一般为0.02—0.5米/秒,容重大部分 > 2.20 吨/立方米(表1)。

表 1 泥石流蠕动流的特征值

Table 1 Some characteristic values of varied creeping flows

序号	容重 (吨/米 ³)	比降 (%)	沟宽 (米)	泥深 (米)	流速 (米/秒)	床面粗糙度
1	2.25*	5.8	40	0.50*	0.32	粗糙的沟床面
2	2.31	5.5	25	0.40	0.25*	粗糙的滩面
3	2.37	15.8	0.70	0.42	0.008	粗糙的沟床面
4	2.32	17.6	2.32	0.45	0.015	粗糙的斜坡面
5	2.19	15.8	0.70	0.46	0.03	平缓粗糙的小沟床
6	1.90	12.3	0.80	0.30*	0.13	干缓的残留层
备注	* 为目估值(以下各表同)					

蠕动流在蒋家沟主沟床内出现很少,只有在下列条件下才发生:1.泥石流暴发时,一开始就出现粘稠的阵性泥石流,它在粗糙的床面上铺床前进时,可呈蠕动流(表1,1);2.粘性泥石流漫滩后,在粗糙的滩面上呈蠕动流前进(表1,2);3.塑性泥石流沿沟床或比较平缓的坡面向前蠕动(表1,3,4);4.比较粘稠的粘性泥石流沿着粗糙平缓的小支沟向前蠕动(表1,5);5.泥石流残留层,当其超过某一厚度后,缓慢向前蠕动(表1,6)

(二) 层 动 流

层动流是一种含有大量石块的似层流,流变曲线呈直线,流变方程为:

$$\tau = \tau_B + \eta(dv_c/dy), \quad (4)$$

式中 η 为刚性系数。

蒋家沟层动流的流速变幅很大, 一般从0.2—10米/秒, 最大达15米/秒; 容重一般 >1.80吨/立方米 (表2)。

表2 泥石流层动流的特征值

Table 2 Some characteristic values of varied laminar flows

序号	容重 (吨/米 ³)	比降 (%)	沟宽 (米)	泥深 (米)	流速 (米/秒)	所在部位
1	2.17	6.2	28	1.70	6.85	阵性波的波身
2	2.16	6.2	23	0.65	5.51	阵性波的波尾
3	2.31	5.7	28	2.5*	16.0*	粘性连续流
4	2.08	16.0	0.95	0.40	0.524	支沟阵性波的波头

层动流在蒋家沟主支沟内普遍出现, 多见于下列情况: 1. 粘性泥石流阵性波的尾部 (表2, 2), 当流速较小时亦可出现在阵性波的中部 (表2, 1); 2. 粘性连续流在比较顺直的沟道中运动时, 流速达10—15米/秒, 但流层表面十分平滑, 流动轨迹大致平行, 呈较典型的层动流 (表2, 3); 3. 粘性或塑性泥石流在比较平缓的小支沟中运动, 整个阵性波呈层动流 (表2, 4)。

(三) 紊动流

紊动流属于紊流的范畴, 但与标准的紊流差异甚大, 尤其是扰动性紊动流。紊动流的流变曲线呈上凸形, 流变方程为:

$$\tau = \tau_B + K_1(dv_c/dy_1) + K_2(dv_c/dy - dv_{c1}/dy)^n, \quad (5)$$

$$\tau = \tau_r + K_2(dv_c/dy)^n, \quad (6)$$

式中 K_1 为粘性系数, 一般等于 η ; K_2 为紊动系数; τ_r 为紊动段流变曲线起点的切线向下延伸与横轴交点处的切应力; dv_{c1}/dy 为开始出现紊动或滑移时的流速梯度; n 为流动指数, $n > 1$ 。当泥石流容重很小, 粘滞应力的作用远不及雷诺应力的作用, 则 τ_r 趋近于 0, 可用一般挟沙水流的流变方程:

$$\tau = \rho_c l^2 (dv_c/dy)^2, \quad (7)$$

式中 ρ_c 为泥石流流体密度; l 为混合长度。

蒋家沟紊动流的流速一般为0.5—12米/秒, 最大达15米/秒; 泥石流容重从1.30—2.30吨/立方米, 但当容重 >1.80吨/立方米后, 属扰动性紊动流 (表3)。

紊动流, 尤其是扰动性紊动流, 是蒋家沟泥石流主要的流态之一。形成紊动有如下几种情况: 1. 容重偏小的稀性泥石流在沟道中运动时, 一般均呈脉动性紊动流 (表3, 1); 2. 容重偏大的稀性泥石流在沟道中运动时多呈扰动性紊动流 (表3, 2); 3. 流速较大的阵性波头部均为扰动性紊动流 (表3, 3), 中部和尾部有时亦呈紊动流; 4. 一般小型的连续阵性流, 当流速较大时可呈扰动性紊动流 (表3, 4)。

(四) 滑动流

滑动流是一种层流和滑动之间的过渡性流态,其表面往往呈层动流或紊动流,有时亦可呈蠕动流,其流变曲线呈下凹曲线,表观流变方程为:

$$\tau = \tau_B + K_1 dv_c/dy_1 + K_2 (dv_c/dy - dv_{c1}/dy)^n, \quad (6)$$

$$\tau = \tau_p + K_3 (dv_c/dy)^n, \quad (7)$$

式中 τ_p 为滑动流的流变曲线起点切线与横轴交点处的切应力; n 为流动指数, $n < 1$ 。

表3 泥石流紊动流的特征值
Table 3 Some characteristic values
of varied turbulent flows

序号	容重 (吨/米 ³)	浆体容重 (吨/米 ³)	沟宽 (米)	泥深 (米)	流速 (米/秒)
1	1.29	1.28	0.45	0.18	2.08
2	1.73	1.63	8.5	0.20	3.33
3	2.24	1.72	28	1.70	8.48
4	2.22	1.69	45	0.70	6.26

表4 泥石流滑动流特征值
Table 4 Some characteristic values
of varied gliding flow

序号	容重 (吨/米 ³)	比降 (%)	沟宽 (米)	泥深 (米)	流速 (米/秒)
1	2.15	6.3	27	1.46	7.69
2	2.23	5.7	30	3.00	10.6
3	2.31	42.4	0.73	0.45	1.35
4	2.20	73.0	0.35	0.12	3.25

滑动流在蒋家沟主沟床内,直观外形不很明显,但实际上经过泥石流铺床后,阵性波的运动均具有一定程度的滑动效应,有时颇为明显(表4, 1、2);在比降 $> 30\%$ 的支沟内,经常可以见到阵性波溜滑而下(表4, 3),其中当比降 $> 60\%$ 时,出现流体分离的滑动流(表4, 4)。

(五) 波动流

波动流是一种特殊的泥石流流态,发生在残留层加厚开始蠕动演体到形成标准阵性流的过程中。在刚形成波时,波形前进的速度为流体质点前进速度的2—4倍,以后随着波速的加快,波高的加大,两者速度逐渐一致,演化成为波动流。流体本身的运动属于层动流,因此其流变方程与层动流的流变方程(式2)基本相似,但需进行参数修正。

蒋家沟波动流波形前进的速度一般为0.1—5.0米/秒,流体质点前进的速度为波形前进速度的1/4至逐渐相等。泥石流流体容重大部分为1.80—2.15吨/立方米,最大变幅可达1.60—2.25吨/立方米(表5)。

蒋家沟泥石流的波动流往往出现在沟床明显展宽或比降变缓的沟段,发生在由阵性

表5 泥石流波动流特征值
Table 5 Some characteristic values of varied undular flows

序号	容重 (吨/米 ³)	屈服值 (达因/厘米 ²)	粘度 (泊)	比降 (%)	宽度 (米)	泥深 (米)	波形速度 (米/秒)	流体速度 (米/秒)
1	2.17	310	0.844	5.7	30	0.20	4.29	2.00*
2	2.17	485	1.203	5.7	40	0.30	7.50	5.00*
3	1.85			5.9	30	0.50	4.05	1.06

泥石流过渡到稀性连续流的时段。当小型阵性流进入开阔的沟段时, 流体展宽, 厚度减小, 并小于残留层的极限厚度 h_k ($h_k = \tau_0 / i\gamma_c$, 式中 i 为沟床比降), 阵性流消失, 当后继的流体继续加入, 其厚度大于 h_k 后, 流体开始向前蠕动, 形成波的雏形, 并在平滑的残留层上以波的形式向前推进 (表5, 1、2); 也有小型阵性波进入比降较缓的沟段后, 推动原来的残留层以波的形式前进 (表5, 3)。

四、影响泥石流流态的主要因素

影响蒋家沟泥石流流态主要有如下因素:

(一) 泥石流体的性质

泥石流按其性质分为稀性、粘性和塑性(高粘性) 3类, 由于各类泥石流的结构强度和流变性质不同其流态也不同。稀性泥石流, 水体含量多, 结构性差, 其性质比较接近挟沙水流, 流态以紊动流为主; 塑性泥石流, 土体含量多, 结构性强, 其性质接近塑性土体, 流态以蠕动流和滑动流为主; 粘性泥石流的组成和性质介于二者之间, 同时兼有挟沙水流和塑性土体的性质, 其流态以紊动流和层动流为主, 在一定的条件下可以出现波动流、蠕动流和滑动流

(二) 沟床条件

沟床条件主要包括沟床的纵坡、宽度、糙率和平面形状。通常沟床的纵坡大、宽度小、比较顺直, 则易形成层动流或扰动性紊动流; 沟床的纵坡大、糙率小, 易形成滑动流; 沟床的纵坡平缓、宽度大、粗糙亦大, 易形成蠕动流或波动流。总之沟床条件不同的组合形式, 相同性质的泥石流亦可形成不同的流态。

(三) 形成源地或上游沟段泥石流体供给量

形成源地和上游沟段的泥石流体供给量往往决定泥石流的规模和流动形式, 从而影响到泥石流流态。当形成源地泥石流体供给十分充足时, 易形成粘性连续流, 往往呈现层动流, 而流体偏稀时可出现紊动流; 当形成源地泥石流体供给充足, 但不足形成连续流时, 往往形成规模较大的粘性阵性流, 呈现扰动性紊动流和层动流; 当形成源地或上游供给泥石流体量减少, 由粘性阵性流向稀性连续流过渡时, 易形成波动流、层动流或紊动流; 当上游沟段或形成源地泥石流固体物质供应减少, 形成稀性连续流时, 则往往呈现紊动流。因此随着形成源地泥石流体供给量的变化, 泥石流的性质和流动过程均发生变化, 流态也随之发生改变。

五、泥石流流态的时空变化

泥石流流态的时空变化反映在下列几个方面。

(一) 在一次泥石流暴发过程中的流态变化

蒋家沟泥石流在暴发过程中, 泥石流的性质、规模和流动过程是不断改变的, 因此

泥石流流态也随之变化。表6摘录了一次特大泥石流暴发过程中几次有代表性的观测资料。泥石流暴发开始为小型粘性阵性流(表6, 1), 然后依次是大型粘性阵性流(表6, 2)、特大型粘性连续流(表6, 3、4)、中小型粘性连续流(表6, 5)、最后为稀性连续流(表6, 6), 其主要流态开始为紊动流—层动流, 然后相应是紊动流—层动流、层动流、层动流, 最后为紊动流。其中在阵性流时均伴有滑动流。

表 6 特大泥石流过程中流态的特征值

Table 6 The characteristic value of fluid states of a catastroPhe debris flow

序号	出现时间 (时:分)	容重 (吨/米 ³)	屈服值 (达因/厘米 ²)	沟宽 (米)	泥深 (米)	流速 (米/秒)	流体性质和流动过程
1	23 : 07	2.37	2310	30	2.0	11.8	塑性阵性流
2	23 : 15	2.30	2480	50	4.0	11.2	大型粘性阵性流
3	23 : 42	2.28	1380	30	2.0*	12.0*	粘性连续流
4	23 : 57	2.31	706	28	2.5*	15.0*	粘性连续流
5	24 : 37	2.30	1162	25	1.8	13.0*	粘性连续流
6	次日2:35	1.76	195	20	0.45	4.50	稀性连续流

表7记录了一条小型支沟在短短的13分钟内流动过程和流态的变化, 与主沟一样它也经历了粘性阵性流(表7, 1)、小型粘性阵性流(表7, 2)、偏稀粘性阵性连续流(表7, 3)、偏粘稀性连续阵性流(表7, 4)、稀性连续流(表7, 5), 其相应的流态见表7。

表 7 支沟泥石流过程中的流态特征

Table 7 The characteristic value of fluid states of debris flow in a small tributary

序号	出现时间 (时:分)	容重 (吨/米 ³)	屈服值 (达因/厘米 ²)	沟宽 (米)	泥深 (米)	流 态
1	14 : 05	2.29	560	1.05	0.50	紊动流、层动流
2	14 : 08	2.11	620	0.70	0.15	波动流、层动流
3	14 : 10	2.01	796	0.30	0.07	波动流
4	14 : 13	1.286	4.5	0.45	0.18	紊动流
5	14 : 18	1.053	0.4	0.26	0.20	紊动流

(二) 一阵泥石流中的流态变化

一阵泥石流称一个阵性波或一个龙头, 一个阵性波又可分为波头、波身和波尾三部分, 由于这三部分的泥石流厚度、容重、石块含量和表面坡度不一样, 因此流态也有差异。通常流速快的粘性泥石流阵性波, 波头和波身为紊动流, 波尾为层动流; 流速比较慢的粘性泥石流阵性波, 波头为紊动流、波身和波尾为层动流; 流速快, 又含有大量石块的偏稀粘性泥石流阵性波, 三部分均为紊动流。

泥石流在小型支沟的沟道中运动时,当容重比较大而流速又很慢时,则波头和波身为蠕动流(表8, 1、2),波尾的前半部为层动流(表8, 3),后半部为紊动流(表8, 4)。

表8 支沟泥石流波面流态特征值

Table 8 The characteristic value of fluid state wave surface of debris flow in the tributary

序号	容重 (吨/米 ³)	沟宽 (米)	泥深 (米)	流速 (米/秒)	出现部位	
					出现的位置	各段长度(米)
1	2.21	0.70	0.45	0.097	波头	0.52
2	2.00	0.55	0.40	0.146	波身	2.40
3		0.40	0.22	0.146	波尾前半部分	3.56
4	2.19	0.30	0.08	0.583	波尾后半部分	4.70

(三) 泥石流流态的沿程变化

在泥石流运动过程中,由于沿程沟床条件的变化,导致同一阵泥石流流态也随之变化。

在1984年7月,蒋家沟观测断面以上约400米长的沟段内可分为三段,每段的沟床比降、宽度和平面形态如表9所示。当一阵粘性泥石流通过时,在上段,波头、波身、波

表9 主沟泥石流流态特征值的沿程变化

Table 9 The change course of flow state characteristic value of debris flow at the typical reaches

沟道分段及形态	容重 (吨/米 ³)	浆体容重 (吨/米 ³)	起始静切力 (毫克/厘米 ²)	比降 (%)	沟宽 (米)	流速 (米/秒)	流态
上段顺直段				6.3	22	7.23*	紊动流、层动流
中段窄深弯曲段	2.17*	1.17*	346*	6.9	15	6.34	紊动流
下段	平顺展宽段			5.2	35	3.23	层动流
	平顺宽阔段			5.7	40	5.55	层动流
备注	*仅在下段附近的观测断面取的样						

尾均为紊动流;在中段,波头和波身为紊动流,波尾为层动流,间有紊动流;在下段,开始为波动流,到断面附近又为阵性流,其头部为紊动流,而身部和尾部为层动流(表9)。

参 考 文 献

- (1) 吴积善, 1981, 试论泥石流浆体的静切力, 泥沙研究, (4), 第40页。
- (2) 钱宁、马惠民, 1959, 浑水的粘性及流型, 泥沙研究, (3), 第32页
- (3) 罗格斯, W.F., 1963, 石油钻井泥浆成分与性能, 中国工业出版社, 第27页。
- (4) 方宗岱, 1980, 非牛顿体高含沙水流治理黄河的理论基础, 力学进展, (41), 第44—48页。

FLUID STATE OF DEBRIS FLOW IN THE JIANGJIA RAVINE

Wu Jishan

(Chengdu Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

The debris flow body in the Jiangjia Ravine and its slurry body is of power law fluid with the starding static shear, in which watery debris flow is pseudo-Bingham fluid with the turbulent effect, viscous debris flow is Bingham fluid or Bingham fluid with slipping effect, plastic debris flow is pseudo-plastic fluid with the starding static shear.

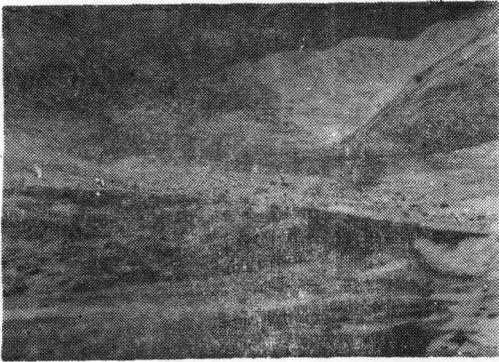
Debris flow state is an interim fluid state between sedimentladen flow (turbulent and lamellar flows) and plastic earth mass (wriggle and slip) i. e. turbulent flow, lamellar flow, wriggling flow, slipping flow and a spacial fluid state—undulatory flow.

The debris flow state is decided by debris flow characteristics, the ravine bed conditions and debris flow amount at the upper reach. These factors is a variable at the different reaches and in differends stages, so that debris flow state is of variability too.

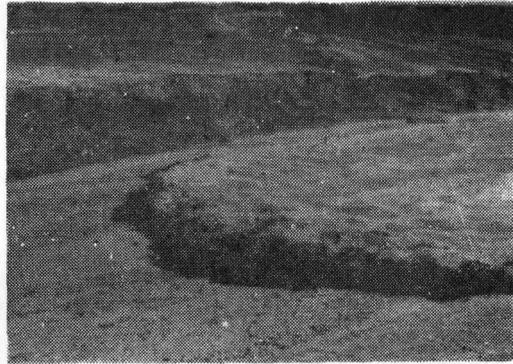
泥石流流态特征
THE CHARACTERISTICS OF DEBRIS FLOW STATE



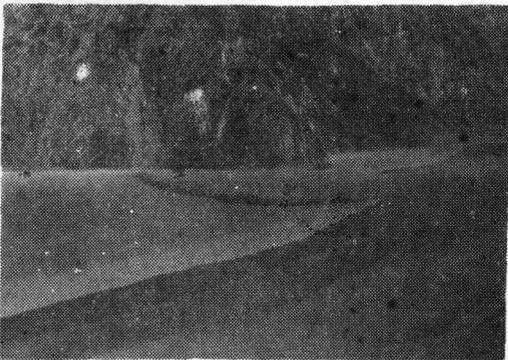
泥石流阵流全貌 (I. 龙头; II. 龙身; III. 龙尾)



稀性连续泥石流的紊流流态



粘性阵性泥石流的龙头紊情况



在河床表面的层流运动情况



在沟槽中的层流运动情况