

泥石流的运动机理和减阻

王兆印¹, 崔鹏², 余斌²

(1.清华大学水利系, 国际泥沙研究培训中心, 北京 100084; 2.中科院成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 野外调查研究发现, 存在着两种具有不同动力学特征和机理的泥石流: 粘滞性泥石流和两相泥石流。粘滞性泥石流由卵石、沙和粘土构成, 难以区分固相和液相, 为典型的非牛顿体, 具有间歇性流动、“铺床现象”、高达60%的减阻和显著超高等流动特点。粘滞性泥石流的阻力远小于流变参数所代表的阻力, 传统的利用本构方程研究阻力的方法不能解决问题。研究表明, 其30%的减阻是由于铺床作用, 另外20%~30%是由于流动混合物充气所致。两相泥石流主要由粗颗粒物质构成, 两相之间有明显的相对流动, 显示较大的阻力和发生“石街”现象。粘滞性泥石流沟谷的中值坡度为0.16, 两相泥石流阻力大, 因而河谷的平均坡度较大(0.19~0.27)。

关键词: 泥石流; 减阻现象; 充气减阻; 石街现象; 铺床作用; 泥石流沟谷

中图分类号: P642.23 **文献标识码:** A

The mechanism of debris flow and drag reduction

WANG Zhao-yin¹, CUI Peng², YU Bin²

(1. International Research and Training Center on Erosion and Sedimentation, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: Field investigations reveal that the resistance of debris flow can not be approached by using the constitutive equations because the viscosity and other rheologic parameters represent much greater resistance than the real debris flow. There are two types of debris flow, namely viscous debris flow and two-phase debris flow. Viscous debris flow consists of clay, silt, sand and gravel, and it is non-Newtonian, pseudo-one phase flow. It exhibits “paving way process”, drag reduction and extremely high super-elevation. The main flow is laminar, intermittent or wavy. The study indicates that the drag reduction is due to the paving way process(30%) and air entrainment (20%~30%). The two-phase debris flow consists of gravel and boulders and exhibits obvious relative moment between the solid phase and the liquid phase. So called “stone street” is formed by the deposit. The slope of viscous debris flow gullies is smaller than that of two-phase debris flow gullies because of the drag reduction of the former and higher resistance of the later.

Key words: debris flow; drag reduction; air entrainment; stone street; paving way process; slope of debris flow gullies

泥石流是一种独特的物质运动, 通常由陡峭山坡上的强降雨和融雪引发。虽然不少学者已对泥石流的运动作了许多研究, 但对其运动规律和机理的认识仍然模糊不清。在强烈的重力作用下, 泥石流可发生在

收稿日期: 2000-11-11; 修订日期: 2001-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59425005); 中科院东川泥石流观测研究站基金支持项目(49831010)

作者简介: 王兆印(1951-), 男, 山东济南人, 教授, 主要从事河流动力学、泥石流、淤泥质河口海岸、生态泥沙和环境泥沙学研究。

陡坡沟谷中,而在强降雨条件下,山洪的猛烈冲刷作用也可在缓坡沟谷中触发泥石流。含少量细颗粒的泥石流是湍流,含较多细颗粒的泥石流又常常是层流,此时其基质具有很高的粘滞性和屈服强度。即使是层流,简单的粘滞度也并不能代表泥石流的阻力,因为除粘滞度外还有许多其它因素可以产生阻力和减小阻力。泥石流沿程有很大变化,是非恒定、非均匀流。泥石流可携带大量泥沙,从小至 10^{-3} mm以下的粘土到大至直径数m的巨石不等。这些粘土、沙粒、砾石和漂砾以不同的机理运移,使问题更加复杂。

Iverson 和 Denlinger^[1]对这一学科的各种理论和著述进行了述评,但他们的述评中并未涉及中国学者的发现和著述。Yano 和 Daido^[2]首次建立了有关泥石流阻力的理论,他们认为泥石流是一种均质的粘塑性连续流,具有屈服强度。王兆印等^[3]用实验方法并从理论上研究了粘塑性流体由连续流演变成具一系列滚波的间歇流的过程。他们推导出了这种现象的微分方程并证明了屈服强度影响流动的稳定性,是导致泥石流滚波的主要因素。O' Brien Julien^[4]以及 Julien 和 Lan^[5]测得的最大屈服应力(τ_b)超过 100Pa,动力粘滞性(η)超过 10Pa·s。东川泥石流观测站的王裕宜等甚至报导过泥石流基质的屈服应力高达 240 Pa。如果用这些流变学参数计算泥石流阻力,所得阻力值将比水流大百倍千倍,泥石流流速应比水流小得多。但野外观测发现,粘滞性泥石流的流速并不比清水流的流速低。蒋家沟的粘滞性泥石流由高浓度细颗粒物构成,其流态多为层流,但其流速甚至比水流的流速高 1~2 倍。因此,泥石流的阻力不能用流变学参数代表,这种流动中存在着复杂的减阻机理。

Bagnold^[6]建立了泥石流颗粒间相互作用的离散力理论,Takahashi^[7-9]据此建立了一种泥石流运动模型。该理论认为,泥石流是一种胀流型流体,其剪切应力主要是由颗粒间的碰撞所产生。它提供了运动阻力和使砾石不沉积的支撑力机理,并且表明了泥石流不同于水流的运动速度分布以及水石流具有较大的阻力。这个理论的缺陷主要的是忽略了孔隙液体的动力学效应。它认为液相基质可以当作理想流体,其粘滞性可以忽略不计。这是不正确的,特别是当基质为粘土和粉沙悬浮液时更不正确。

要研究泥石流运动机理,必须解决以下几个问题:泥石流是如何从陡坡或沟谷内的水流演变而成的?是什么作用给予浓度极高的沙石以显著的流动性,使其能在小至仅几度的缓坡上流动?在泥石流中能量是如何分配消耗的?液相流体基质起着什么作用?守恒和消耗性能量转换作用如何影响泥石流的宏观特性?毫无疑问,要建立一种能回答所有这些问题并能清楚地解释泥石流所有现象的综合性理论,还有很长的一段路要走,还需要做更多野外调查、实验室研究和理论分析。作者对著名的小江流域进行了野外泥石流调查,发现了一些现象,特别是减阻现象。这种减阻现象的存在是对采用本构方程研究泥石流的否定。

1 粘滞性泥石流和两相泥石流

小江是长江在云贵高原上的一条长 138km 的支流。流域为典型的暴雨泥石流区,在其 3043km² 的范围内分布着 107 条泥石流沟谷。每年在这些沟谷中发生 100 多次具各种特征的泥石流,被称为“泥石流博物馆”。东川泥石流观测研究站位于小江右侧的蒋家沟边。根据蒋家沟泥石流的特征,东川泥石流观测研究站将泥石流划分为粘滞性、亚粘滞性和非粘滞性泥石流。康志成^[10]报导,蒋家沟的泥石流发生在夏季暴雨过程中或暴雨之后,且一般随山洪爆发而发生。沟底冲刷时,固体浓度逐渐增加,山洪在 10~20 min 内演变成非粘滞性泥石流,并在短时间内可进一步发展成亚粘性泥石流,流动混合物的密度也随之从 1.1g/cm³ 增至 1.9g/cm³。这一过程的高潮是出现间歇性粘性泥石流,此时密度可达 1.9~2.3g/cm³,一般可持续 2~3 h,其间通过的泥石流波可达 80~100 个。然后发生混合稀释,使间歇性泥石流又转化成非粘性泥石流。

将泥石流划分为粘滞性、亚粘滞性和非粘滞性 3 类的分类方法反映的主要是细颗粒泥沙浓度的影响,只能用于蒋家沟和具有类似物质构成的泥石流沟。自然界有两类截然不同的泥石流:(1)粘滞性泥石流,由粘土、沙和砾石组成,发生在小江流域的蒋家沟,大白泥沟和小白泥沟等。在其固体物总量中,直径小于 2mm 的粘土和沙占 60%。这种泥石流具有极显著的非牛顿性质,以明显的间歇性流动、“铺床作用”、层流、减阻现象、极大的弯道超高、以及沉积物不分选为特征。砾石和石块随基质一同运移,液体和固体之间无明显的相对运动。(2)两相泥石流,它由固相和液相构成,固相为大石块和砾石,液相是一种流体混合物,由水和少量粘土及沙组成。典型的两相泥石流见于小江左侧豆腐沟。其头部高而陡,由滚动、碰撞并发出声响的大石块组成。液相基本上是牛顿体,液相和固相之间存在明显的相对运动。

图 1(a)为蒋家沟粘滞泥石流沉积物照片，图 1(b)和(c)为豆腐沟两相泥石流头部和主体部分的沉积物照片，是在泥石流发生后两天拍摄的。粘滞性泥石流沉积在坡度约为 0.04 的缓坡上，两相泥石流沉积在坡度为 0.1 的陡坡上。两种泥石流的机理不同，应当用不同的模型来研究。在白龙江，粘滞性泥石流沉积物厚度达 30 ~ 50m，沉积物剖面上可看到巨大石块和砾石与沙和粘土混合在一起。两相泥石流偶尔产生具反向粒径分布的沉积物(上粗下细)，这一点与河流淤积截然不同，此种独特分选现象是粘土和粉沙含量很少的条件下两相泥石流沉积的特点。尽管如此，一般两相泥石流沉积物为正向粒径分布。

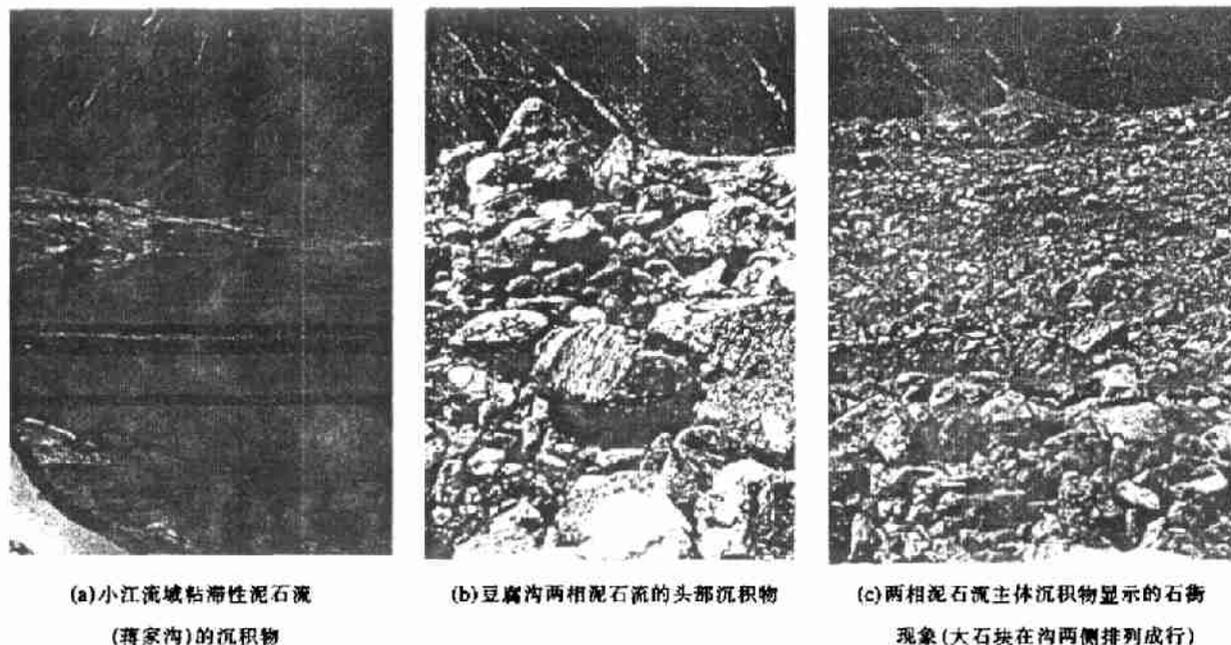


图 1 研究区的沉积物

Fig.1 Deposits in researched area

粘滞性泥石流因其非牛顿性质常可发展成一系列滚动波。王兆印等^[11]研究了粘滞性泥石流的非稳定性，指出泥石流的非稳定性决定于基质的非牛顿特性。若屈服强度和弗劳德数较大，则泥石流非稳定，并能发展成滚动波。屈服强度越高、弗劳德数越大，泥石流就易于发展成滚波。图 2 给出了间歇性阵流、波动流和连续性泥石流与屈服应力和弗劳德数的关系^[12]。只有当屈服应力和弗氏数较小时，流动才是稳定的连续流。

在弯道处，粘滞性泥石流还显示极高的弯道超高。调查发现，一个深度只有 2m 的泥石流，其弯道超高高出正常流动面大约 26m，比水流的超高大得多。表 1 给出了粘滞性泥石流的实测超高 H_{debris} 及相同深度和流速下水流的超高 H_{water} ^[13,14]。泥石流超高值为水流的 6~30 倍，其机理尚待研究。

两相泥石流都具有由大石块构成的高而陡的头部，大石块间的碰撞产生很大声响并消耗大量能量。因此头部运动阻力很大，前面石块的运动速度要低于后面石块的运动速度。实验发现，小颗粒以较高的瞬时

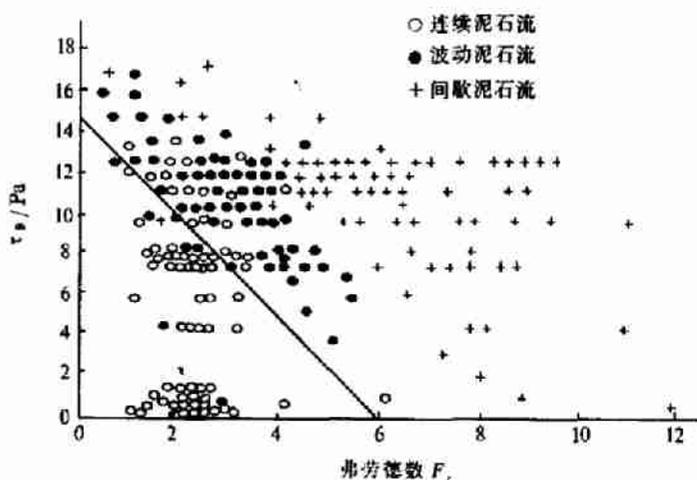


图 2 间歇(+)、波动(●)和连续(○)泥石流与屈服强度 τ_b 和弗劳德数 F_r 的关系

Fig.2 Intermittent, wave and continuous debris flows as a function of the yield stress τ_b and the Froude number F_r

速度移动，但赶上大颗粒并与之碰撞后会短暂停止运动；大颗粒则是以稳定的速度运移，通过其后的小颗粒与其碰撞而获取能量，从而使石块以高速运移，最终到达泥石流头部，再与其一道以较低速度移动^[15,16]。结果，越来越多的大石块来到头部，有些石块会被挤到沟谷的两侧。这些大石块停留在沟谷两侧后形成“石街”。图 1(c) 为豆腐沟内形成的这种石街，图上清楚地看出大石块在两侧排列成行。沟的中间并没有大石块，因为头部经过以后，泥石流的尾部留在沟的中间，而尾部主要由较小颗粒组成。

表 1 泥石流与水流的弯道超高之对比

Table 1 Comparison of the superelevation of debris flows at bends with those of water flow

地点	R_c/m	$U/(ms^{-1})$	B/m	H_{debris}	H_{water}
Yakitakai	442	5	13.5	26	0.08
	212	5	20.0	4.0	0.24
	74	5	13.0	3.4	0.43
	94	5	15.0	3.5	0.40
Miaokao Plateau	365	17	110.0	50.0	8.90
St. Helens	70.0			20.0	
蒋家沟	500		40	26.0	0.40

2 粘滞性泥石流的减阻现象及其机理

许多研究人员用曼宁公式描述泥石流流速与沟床糙度的关系：

$$U = \frac{1}{n} H^{2/3} J^{1/2} \tag{1}$$

式中 U 为泥石流平均流速， n 为沟底糙度， H 为泥石流深度， J 为沟床坡度。蒋家沟泥石流实测结果表明，在相同深度下，粘滞性泥石流阻力要小于水流阻力，而其流速则大于水流流速。由正常山洪发展成粘滞性泥石流期间，常可见到 n 值大幅度降低的现象。图 3 给出了 1999 年实测粘滞性泥石流(铺床过程之后)糙度与流动深度的关系，以清水水流和发生铺床过程之前的泥石流的糙度-深度关系作为对比。泥石流的减阻现象非常明显，同样深度和坡降泥石流比水流快 1~2 倍。定义减阻率为

$$R_D = (n_w - n_d) / n_w \tag{2}$$

其中 n_w 和 n_d 分别为水流和泥石流的糙度。实测粘滞性泥石流的减阻率可达到 55%~60%。

在水利工程中，5% 的减阻就会引起工程师的极大关注。泥石流中这种高达 60% 的减阻现象具有重要的意义。分析表明，这种减阻来自 3 种机理：(1) 泥石流阵流的铺床过程显著减小了河床糙率；(2) 粘滞性泥石流中掺有大量气泡，泥石流的高粘性和屈服应力使它们不能逸出，它们在运动中形成气垫，使粘滞性泥石流阻力大大减小；(3) 粗糙边界上粘滞性泥石流的高粘性和屈服应力遏制了湍流，减少或者消除了湍流阻力。

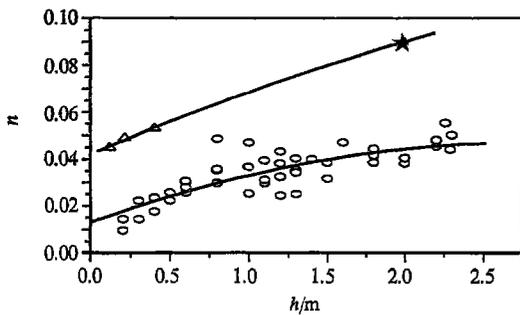


图 3 实测粘滞性泥石流(铺床过程之后)(○)，清水水流(△)和发生铺床过程之前的泥石流(★)的糙度-深度关系

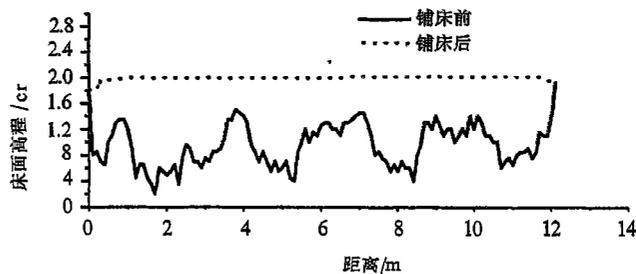


图 4 铺床过程前后河床粗糙形状对比

Fig.3 Bed roughness of viscous debris flows (before and after the paving way process) and water flow as a function of the depth of the flows

Fig.4 The original rough bed surface and the smoothed bed surface after the paving way process

野外调查发现，泥石流沟发生清水流时的糙度与发生粘滞性泥石流时的糙度有很大不同。粘滞性泥石

流发展成阵流时, 前几阵阵流的粘性物质粘附在沟床上, 将沟床铺成一条光滑沟道, 后续泥石流可以快速流过这条沟道。我们测量了水流时河床的粗糙形状, 并通过录相分析了铺床过程和铺床之后沟床表面的形状。图 4 给出了这两种情况下沟床形状对比。水流时沟床平均粗糙度为 $K_{sw}=0.1\sim 0.15\text{m}$, 粘性泥石流时粗糙高度仅为 $K_{sd}=0.01\text{m}$ 。由曼宁-斯特瑞克勒公式^[7]

$$n = k(RJ)^{1/2}K_s^{1/6} \quad (3)$$

推导出

$$R_D = (K_{sw}^{1/6} - K_{sd}^{1/6})/K_{sw}^{1/6} \quad (4)$$

由此可以算出, 铺床过程可以导致大约 30% 的减阻率。

将从粘滞性泥流中取得的样品静置或者振荡, 可以看到许多气泡不断由浆体中逸出, 状如开锅。图 5 给出了气泡体积比含量 C_g 与实测粘滞性泥石流流速及减阻率的关系, 图中气泡资料引自王裕宜等人^[8]。从高速流动的粘滞性泥石流中取样得到排除气体前后的样品容重 γ_m' 和 γ_m'' , 可以算出原始样品的体积比气体含量 C_g ,

$$C_g = 1 - \gamma_m'/\gamma_m'' \quad (5)$$

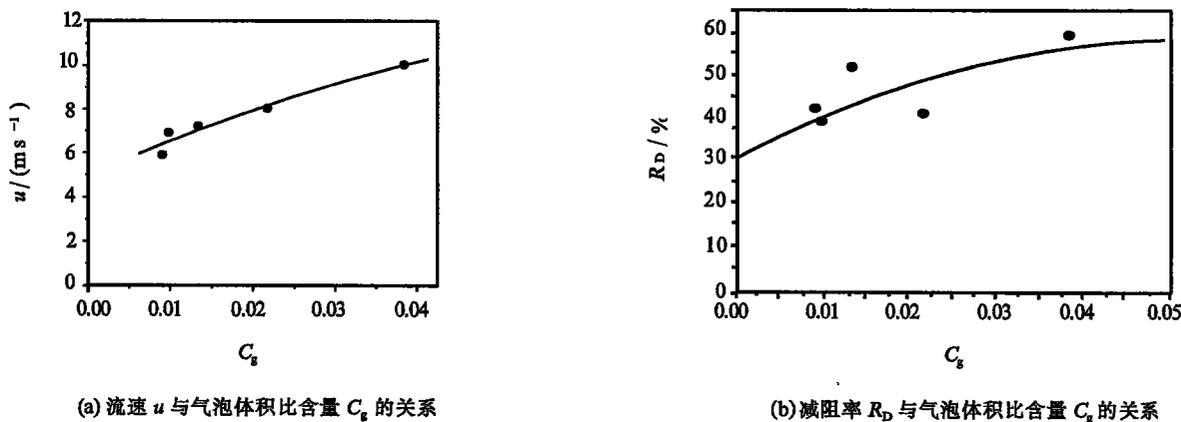


图 5 粘滞性泥石流和减阻率与气泡体积比的关系

Fig.5 Variations of velocity u and drag reduction R_D of viscous debris flow with gas concentration

由图 5 可见, 粘滞性泥石流的流速和减阻率都有随着气泡含量增加而增长的趋势。比较 4% 和 0% 气泡含量的减阻率, 可以推断大约 25% 的减阻率可能是气泡引起的。如果图 5(b) 曲线反向延伸到零气体含量, 减阻率大约 30%。换句话说, 这 30% 不是气泡而是铺床过程或其它原因引起的。

王兆印等人研究发现, 非牛顿体的屈服应力抑制湍流的发生发展, 从而减少湍流阻力, 这样的减阻效应可以达到 15% ~ 40%^[9]。粘性泥石流较少发生湍流, 这种减阻机理不重要。

3 两相泥石流的阻力和泥石流沟谷的坡度

两相泥石流的运动速度都比清水流小, 阻力比清水流大, 一般不发生减阻。在两相泥石流的实验中发现, 两相泥石流阻力比清水流大 2 ~ 4 倍, 主要是由于颗粒与沟床的碰撞消耗了大量能量的缘故。详细结果请参看作者另一论文^[6]。

由于两相泥石流阻力大, 发生两相泥石流的沟谷坡度都较大。图 6 给出了发生两相泥石流的长江三峡地区(图 6(a))、日本花岗岩区(图 6(c))和火成岩区(图 6(d))泥石流沟谷坡度的累积分布, 其纵座标为坡度小于 J 的沟谷的百分比。图中还给出了小江流域沟谷坡度分布作对比。定义中值坡度 J_{50} 为 50% 沟谷的坡度小于其值的坡度。小江流域多发生粘滞性泥石流, 中值坡度 J_{50} 为 0.16, 而三峡地区的泥石流物质比小江流域粗, 多发生两相泥石流, J_{50} 为 0.19, 日本花岗岩和火成岩地区碎屑物质更粗且很少含粘土和粉沙, 主要发生两相泥石流, J_{50} 为 0.22 和 0.27。

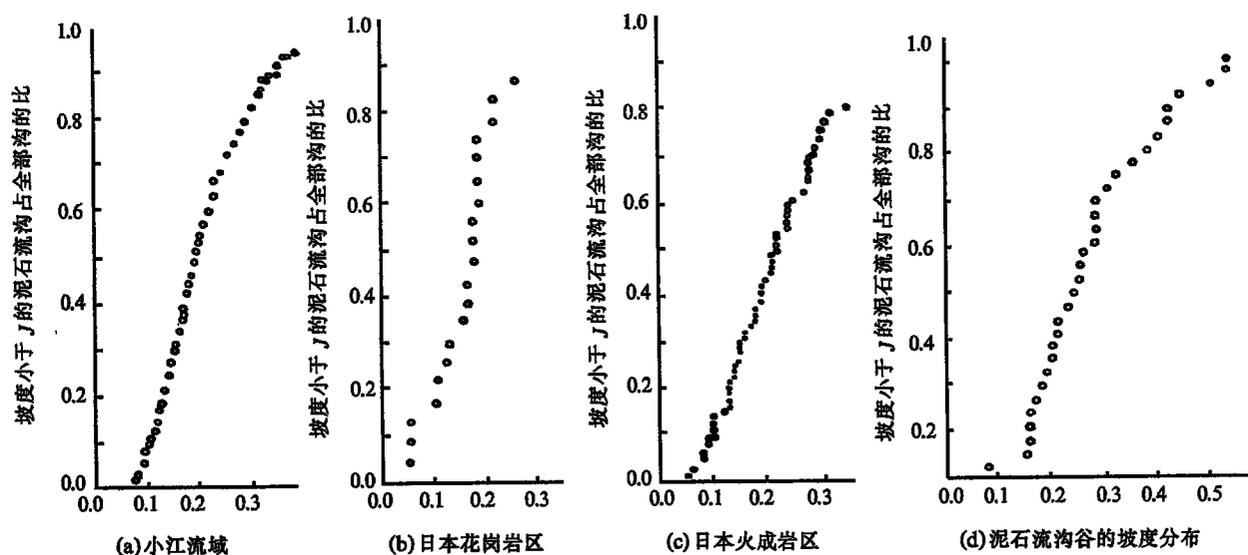


图6 长江三峡地区泥石流沟河床坡度分布

Fig.6 Integration distribution of bed slopes of the debris flow gullies in the Yangtze River Three-Gorges watershed

4 结论

粘滞性泥石流的阻力远小于流变参数所代表的阻力，因而不能采用本构方程来解答泥石流的阻力问题和流速问题。存在着两种具有不同动力学特征和机理的泥石流：粘滞性泥石流和两相泥石流。粘滞性泥石流由粘土、沙和砾石组成，为非牛顿体流动，具有明显的间歇流动，发生“铺床”现象，有极大的减阻和弯道超高。两相泥石流有明显的固相和液相，固相为石块和砾石，液相为水和低浓度粘土及沙的混合流体。两相之间具有明显的相对运动，发生石街现象。粘滞性泥石流发生高达60%的减阻，有时比水流高两倍。研究表明，30%的减阻可能是由铺床作用减小沟床的粗糙度所造成，另外10%~25%则是由于流动的混合物中有1%~4%的气泡形成低阻力的气垫造成的。非牛顿体的屈服应力抑制紊动，可以使湍流阻力减小。粘滞性泥石流沟谷的中值坡度为0.16，两相泥石流阻力大，因而沟谷的平均坡度较大(0.19~0.27)。

参考文献:

- [1] Iverson R M, Denlinger R P. The physics of debris flow—a conceptual assessment[A]. Beschita, Blinn, Grant. Ice and Swanson: Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim[C]. IAHS Publication No.165, 1993.155—165.
- [2] Yano K, Daido A. Fundamental study on mudflow[R]. Bull. Disaster Prev. Res. Inst., Kyoto Univ. Japan. 14, part 2 1965. 69—83.
- [3] Wang Zhao Yin. A study on debris flow surges[A]. Hydraulic Engineering'93[C]. Vol.2. New York: American Society of Civil Engineers, 1993, 1616—1621.
- [4] O'Brien J S, Julien P Y. Laboratory analysis of mudflow properties[J]. J. of Hydraulic Engineering, ASCE, 1988, 114(8): 877—887.
- [5] Julien P Y, Lan Y. Rheology of hyperconcentrations[J]. J. of Hydraulic Engineering, ASCE, 1991, 107:346—353.
- [6] Bagnold R A. The flow of cohesionless grains in fluids[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, 1956, 249(964): 235—297.
- [7] Takahashi T. Mechanical characteristics of debris flow[J]. J. Hydraulic Div., ASCE, 1978, 104:1153—1169.
- [8] Takahashi T. Debris flow on prismatic open channel[J]. J. Hydraulic Div., ASCE, 1980, 106:381—386.
- [9] Takahashi T. Debris flow, Ann. Rev. Fluid Mech[J]. 1980, 13:55—77.

- [10] 康志成. 云南东川蒋家沟泥石流的运动特[A]. 兰州冰川冻土研究所论文集[C]. 1985, (4): 97-100.
- [11] 王兆印, 林秉南, 张新玉. 非牛顿体明渠流的不稳定性[J]. 力学学报, 1990, 22(3): 266-276.
- [12] Winzen K, Wang Z Y, Dittrich A. Intermittent and continuous behavior of debris flow[J]. International Journal of Sediment Research, 1999, (1): 62-69.
- [13] Pierson T C. Flow behavior of channelized debris flows, Mount St. Helens, Washington[A]. Abrahams, Boston, Allen, Unwin. Hillslope Processes. 1986, 269-296.
- [14] Sieyama T, Woemoto S. Characteristics of debris flow at bends[J]. J. of Civil Engineering, 1981, (5).
- [15] 王兆印, 张新玉. 水流冲刷沉积物形成泥石流的条件及运动规律[J]. 地理学报, 1989, 44(3): 291-301.
- [16] 王兆印. 泥石流龙头运动的实验研究及能量理论[J]. 水利学报, 2001, (3): 21-29.
- [17] Englund F, Hansen E. A monograph on sediment transport in alluvial streams[M]. Copenhagen: Teknisk Forlag. 1972.62.
- [18] 王裕宜, 邹仁元, 吴积善, 等. 气体对高浓度粘性泥石流减阻作用的初步研究[J]. 自然灾害学报, 1998, 7(3): 178-182.
- [19] Wang Zhao-Yin, Larsen P, Nestmann F, Dittrich A. Resistance and drag reduction in hyperconcentrated turbulent flows[J]. J. Hydraulic Engineering, ASCE, 1998, (1): 41-49.

消息

我国第一支国家地震灾害紧急救援队成立

经国务院和中央军委批准, 我国第一支旨在参与国内外地震灾害紧急救援的国家地震灾害紧急救援队, 于2001年4月27日在北京正式成立。中共中央政治局委员、国务院副总理温家宝出席了救援队成立大会, 向救援队授旗并作了重要讲话。

国家地震灾害紧急救援队的正式成立, 结束了我国没有专业地震灾害救援队伍的历史, 标志着我国防震减灾工作又迈出了重要的一步。救援队的成立, 将大大提高我国地震发生后抢救生命的能力与效率, 并将通过参与国外地震灾害救援, 进一步提高我国的国际影响力。

(摘自《地震工作简报》)