

引用格式: 苗绿, 马超, 吕立群. 蒋家沟泥石流阻力的无量纲参数分析[J]. 山地学报, 2021, 39(4): 515-523.

MIAO Lyu, MA Chao, LYU Liqun. Dimensionless analysis of the resistance of debris flow in the Jiangjia gully, China [J]. Mountain Research, 2021, 39(4): 515-523.

蒋家沟泥石流阻力的无量纲参数分析

苗绿, 马超*, 吕立群

(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 流速作为泥石流防治工程的重要参数之一, 泥石流阻力的大小对其计算过程至关重要。但关于泥石流内部应力变化对阻力影响的研究甚少。本文利用东川蒋家沟泥石流观测数据, 反算曼宁系数来表达泥石流运动过程中受到的综合阻力, 并利用拜格诺数、萨维奇数和摩擦数三个无量纲参数, 分析它们和阻力之间的关系。结果表明: 粘性和稀性泥石流的拜格诺数和萨维奇数均小于临界值; 粘性泥石流摩擦数大于临界值, 而稀性泥石流摩擦数小于临界值。因此, 颗粒接触摩擦对粘性泥石流运动的贡献程度超过了粘性剪切应力和颗粒碰撞产生的离散应力, 粘性剪切应力对稀性泥石流运动的贡献程度超过了颗粒碰撞产生的离散应力和颗粒接触产生的摩擦应力。蒋家沟粘性泥石流和稀性泥石流阻力与拜格诺数、萨维奇数的相关性较弱, 与摩擦数关系非常密切, 且随着摩擦数的增大综合阻力不断增大。水石流的相对流速随流深的增大而增大, 但是粘性泥石流和稀性泥石流的相对流速随流深的增大而减小。本研究结果有望加深对泥石流阻力规律的认识。

关键词: 泥石流阻力; 流速; 曼宁系数; 蒋家沟

中图分类号: TV144

文献标志码: A

泥石流是介于滑坡和高含沙水流的连续过程, 兼具有滑坡不具有的流动性和高含沙水流不具有的结构性^[1-5]。流速是泥石流动力学研究、冲击力估算和风险评估的重要参数之一, 阻力的大小对其最终的计算过程至关重要。国内外相关学者将阻力分为外部和内部两方面进行研究^[6-7]。

由于泥石流颗粒组成具有单峰或者多峰特征, 因而其内部阻力规律复杂^[1-3]。一般而言, 泥石流内部阻力由颗粒碰撞、接触摩擦和粘性剪切等多重应力组成。因此, 曼宁系数可能与其中的一种或几种相关^[8-12]。泥石流外部阻力与沟道粗糙度有关, 有研究表明: 蒋家沟粘性泥石流的外部阻力约为

$0.023 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1/2}$, 其他区域粘性泥石流的外部糙率系数均值为 0.033 ^[2]。泥石流内部阻力与固相浓度、颗粒组成、泥深与坡降等因素有关^[7], 但基于泥石流内部应力变化对流速的影响分析甚少; 部分学者利用相对粗糙度 (h/d_{50}) 与无量纲流速 (u/u_*) 尝试建立泥石流流速表达式^[3], 但是相对粗糙度无法表征不同类型泥石流运动过程中的主导应力, 由此建立的流速经验公式有待商榷^[4]。

本文利用云南东川蒋家沟粘性泥石流观测数据, 反算曼宁系数表征泥石流运动过程中受到的综合阻力; 借鉴相关无量纲参数分析主导应力类型, 分析曼宁系数与无量纲参数的相关性, 探讨影响泥石

收稿日期 (Received date): 2020-11-19; 改回日期 (Accepted date): 2021-07-30

基金项目 (Foundation item): 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0902) [the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (2019QZKK0902)]

作者简介 (Biography): 苗绿 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 泥石流起动与侵蚀机理。[MIAO Lyu (1995-), male, born in Xinzhou, Shanxi province, M. Sc. candidate, research on debris flow initiation and erosion mechanism] E-mail: ml852637@bjfu.edu.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): 马超 (1986-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 泥石流成灾动力学。[MA Chao (1986-), male, Ph. D., associate professor, research on vegetation and mountain hazards] E-mail: sanguoxumei@163.com

流运动过程中主导应力对阻力的影响,以深入认识泥石流运动的阻力规律。

1 研究方法

1.1 无量纲参数

由于泥石流物质组成复杂,其内部阻力受到多重应力共同影响^[3-5]。一般而言,固相颗粒之间的离散应力和摩擦应力、液相粘性剪切应力和紊动、孔隙流体剧烈波动等对泥石流阻力都具有重要作用^[5](表1)。

表1 泥石流运动过程中的各项应力

Tab.1 Various stresses governing debris flow movement

类别	计算公式
总流体剪应力	$\tau = \tau_y + \eta \frac{du}{dy} + \xi \left(\frac{du}{dy} \right)^2$, 式中 $\tau_y = P_s \tan\phi$, $\xi = \rho_m l_m^2 + a_i \rho_s \lambda^2 d_s^2$ ^[5,13-15]
颗粒接触摩擦	$\tau_{sp} \sim c(\rho_s - \rho_m)g(h-z)\tan\phi$ ^[16-17]
颗粒碰撞	$\tau_c \sim f(c, e)\rho_s d_p^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2$ ^[18-20]
粘性剪切	$\tau_{fq} \sim \mu \left(\frac{du}{dy} \right)$ ^[7]

注: η 为动力学黏度; $\frac{du}{dy}$ 为速度梯度 (1/s); P_s 为颗粒间的压力 (kPa); ϕ, φ 为内摩擦角 (°); ξ 为颗粒碰撞系数; ρ_m 为泥石流的密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); l_m 普朗特混合长度; a_i 为冲击系数; ρ_s 为泥石流固相颗粒密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); λ 为线粒浓度; d_s, d_p 为泥沙粒径 (m); c 为固体颗粒体积浓度; h 为流动深度 (m); z 为摩擦层深度 (m); e 为颗粒弹性系数。

在多重应力中,颗粒接触摩擦(颗粒-颗粒相互作用)、惯性颗粒碰撞(颗粒-颗粒相互作用)和粘性剪切(流体-流体相互作用)三种应力对泥石流运动阻力影响比较大。为了量化说明这些应力对泥石流运动的贡献程度,引入了无量纲参数:拜格诺数(Bagnold number, N_{Bag})、萨维奇数(Savage number, N_{Sav})和摩擦数(Friction number, N_{Fric})来进一步分析泥石流内部主导应力^[5,11]。

拜格诺数 N_{Bag} 表征颗粒碰撞 τ_c 与粘性剪切力 τ_{fq} 之间的比值大小,计算如下:

$$B_{\text{Bag}} = \frac{\rho_s \gamma d_{50}^2}{\mu} \times \frac{V_s}{1 - V_s} \quad (1)$$

式中, ρ_s 为泥石流固相颗粒密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); γ 为剪

切速率 (1/s), $\gamma = \frac{v}{h}$; d_{50} 为平均直径 (m); μ 为泥石流液相的动力学粘度 ($\text{pa} \cdot \text{s}$); V_s 为固相物质体积分数。通常取 2 mm 以下的细颗粒物质与水组成的混合浆体作为泥石流体的液相, 2 mm 以上的颗粒物质作为泥石流体的固相。因此:

$$V_s = C_v (1 - V_2) \quad (2)$$

$$V_2 = \frac{C_v P_{(2)}}{100} \quad (3)$$

$$C_v = \frac{\rho - \rho_w}{\rho_s - \rho_w} \quad (4)$$

式中, V_2 为 $D < 2$ mm 所占的体积分数; $P_{(2)}$ 为土体中 $D < 2$ mm 的土体颗粒质量百分比 (%); C_v 为泥石流混合物中固体的体积与整个泥石流混合物体积的比值; ρ 为泥石流容重 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); ρ_w 为水的容重 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)。

萨维奇数 N_{Sav} 表征颗粒碰撞应力 τ_c 与颗粒接触摩擦应力 τ_{sp} 之间的比值大小, 计算如下:

$$N_{\text{Sav}} = \frac{\rho_s \gamma d_{50}^2}{(\rho_s - \rho_f) g h \tan\phi} \quad (5)$$

$$\rho_f = \rho_s V_{\text{fine}} + \rho_w (1 - V_{\text{fine}}) \quad (6)$$

$$V_{\text{fine}} = \frac{C_v V_2}{1 - C_v + C_v V_2} \quad (7)$$

式中, g 为重力加速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$); h 为泥石流流深 (m); ϕ 为固相颗粒内摩擦角 (°), 蒋家沟泥石流固相颗粒内摩擦角为 30° ^[5]; ρ_f 为泥石流中液相密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); V_{fine} 为液相中细颗粒 ($D < 2$ mm) 的体积分数。

摩擦数 N_{Fric} 表征颗粒接触摩擦应力 τ_{sp} 与粘性剪切力 τ_{fq} 的比值大小:

$$N_{\text{Fric}} = \frac{(\rho_s - \rho_f) g h \tan\phi}{\gamma \mu} \times \frac{V_s}{1 - V_s} \quad (8)$$

Iverson 根据美国 USGS 大型水槽实验结果, 提出了三个无量纲参数的临界值, 以表征泥石流运动过程中一种应力向另外一种应力过渡的转换区间^[5]。比如, 当颗粒碰撞力对泥石流运动的贡献超过了粘性剪切力时, N_{Bag} 的值大于 200; 当 N_{Sav} 大于 0.1 时, 颗粒间碰撞应力的贡献程度超过颗粒接触摩擦应力; 当 N_{Fric} 大于 2000 时, 颗粒接触摩擦应力的贡献超过了粘性剪切应力。

1.2 数据整理

如果水石流是饱和流, 流体中颗粒碰撞产生

的离散应力是支撑泥石流运动的主要原因;若为不饱和流,流体底部是以摩擦应力为主,流体上部是以颗粒碰撞为主^[21-22]。对于粘性泥石流,颗粒间接触摩擦起主要作用,离散应力以及粘性剪切应力对支撑泥石流具有重要贡献^[22]。考虑到不同类型泥石流流态以及可能主导应力类型差别,将

泥石流分为稀性泥石流($1.46 \sim 1.85 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)和粘性泥石流($1.85 \sim 2.38 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)^[9],利用蒋家沟粘性泥石流流深、流速实测数据(表2),反算曼宁系数;再利用式(1)~(8)分析主要应力类型,尝试与曼宁系数建立联系。曼宁系数 n 由下式反算得到:

表2 蒋家沟泥石流观测数据

Tab.2 Observed data of debris flows in Jiangjia gully

编号	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	h/m	J	$\mu/(\text{pa} \cdot \text{s})$	编号	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	h/m	J	$\mu/(\text{pa} \cdot \text{s})$
1	2.10	6.70	0.40	0.06	0.13	40	2.25	6.40	1.09	0.06	0.29
2	2.17	5.70	0.35	0.06	0.18	41	2.20	6.00	1.20	0.06	0.22
3	2.00	7.50	0.45	0.06	0.09	42	2.25	7.40	1.45	0.06	0.28
4	2.20	8.84	1.50	0.06	0.22	43	2.12	5.80	1.03	0.06	0.15
5	2.21	7.36	2.00	0.06	0.23	44	1.91	5.60	0.70	0.06	0.06
6	2.25	7.89	2.00	0.06	0.29	45	1.99	4.90	0.60	0.06	0.08
7	2.25	7.36	0.55	0.06	0.29	46	1.97	4.70	0.60	0.06	0.08
8	2.07	7.63	1.10	0.06	0.12	47	2.07	3.92	0.55	0.06	0.11
9	2.19	7.63	1.00	0.06	0.20	48	1.92	4.75	0.93	0.06	0.06
10	2.21	7.32	0.90	0.06	0.22	49	2.15	5.87	0.90	0.06	0.17
11	2.19	6.63	0.70	0.06	0.20	50	2.24	6.29	1.20	0.06	0.27
12	2.09	7.63	1.27	0.06	0.13	51	2.33	7.33	1.80	0.06	0.51
13	2.21	9.15	3.72	0.07	0.22	52	2.15	5.50	0.80	0.06	0.17
14	2.21	9.56	2.75	0.07	0.23	53	2.21	8.80	2.20	0.06	0.23
15	2.19	7.45	1.70	0.07	0.20	54	2.24	7.33	1.50	0.06	0.27
16	2.20	8.36	2.10	0.07	0.22	55	2.09	6.29	1.00	0.06	0.13
17	2.22	8.08	1.60	0.07	0.24	56	1.89	4.94	1.30	0.11	0.06
18	2.20	8.17	1.30	0.07	0.22	57	1.89	7.13	0.60	0.11	0.05
19	2.29	9.56	2.20	0.07	0.38	58	2.07	9.16	2.00	0.11	0.26
20	2.21	9.37	2.10	0.07	0.23	59	2.25	9.03	1.20	0.11	0.13
21	2.21	9.30	2.10	0.06	0.23	60	2.05	7.91	1.20	0.11	0.15
22	2.27	6.90	2.04	0.06	0.32	61	2.12	5.66	0.70	0.11	0.18
23	2.22	6.90	2.50	0.06	0.24	62	2.07	5.47	1.50	0.11	0.12
24	2.21	6.60	2.26	0.06	0.23	63	2.13	6.07	1.80	0.11	0.25
25	2.24	5.00	0.65	0.06	0.27	64	1.95	8.05	1.30	0.11	0.08
26	2.21	5.90	1.22	0.06	0.23	65	2.11	5.34	1.00	0.11	0.17
27	2.28	7.45	1.68	0.06	0.34	66	2.19	6.80	1.50	0.11	0.20
28	2.29	5.80	1.07	0.06	0.37	67	2.14	6.15	0.50	0.06	0.15
29	2.25	7.70	1.61	0.06	0.29	68	2.20	7.97	1.20	0.06	0.17
30	2.24	7.70	1.77	0.06	0.27	69	2.15	7.53	0.80	0.06	0.12
31	2.07	4.92	1.40	0.06	0.12	70	1.68	2.04	0.40	0.11	0.04
32	1.58	3.98	0.17	0.06	0.03	71	1.52	4.23	0.20	0.11	0.04
33	1.83	3.67	0.17	0.06	0.05	72	1.65	2.00	0.20	0.11	0.06
34	1.84	4.56	0.17	0.06	0.05	73	1.59	3.94	0.20	0.11	0.04
35	1.57	4.44	0.20	0.11	0.03	74	1.81	6.30	0.50	0.11	0.14
36	1.80	2.56	0.30	0.11	0.8	75	1.85	3.08	0.30	0.11	0.11
37	1.65	2.53	0.30	0.11	0.04	76	1.74	2.35	0.30	0.11	0.10
38	1.71	1.86	0.40	0.11	0.11	77	1.69	2.00	0.30	0.11	0.05
39	1.54	1.95	0.30	0.11	0.04						

$$v = \frac{1}{n} h^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

式中, v 为泥石流平均断面流速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); n 为曼宁系数; J 为沟床比降。

2 研究结果

2.1 泥石流曼宁系数

由图 1a 可见, 蒋家沟泥石流流速、流深对应点主要分布于红色虚线和蓝色虚线之间(其中红色虚线为上限, 蓝色虚线为下限); 泥石流流速与流深呈正相关关系, 即随着流深增大, 其流速也在增大。 $1/n$ 与流深呈负相关关系, 但不同类型泥石流的负相关指数有很大差异(如图 1b 所示)。与实测泥石流流深、流速不同的关系相对比^[23-25], 总体变化趋势一致, 即: 随着泥深增大, $1/n$ 减小, 即曼宁系数 n 不断增大综合阻力增大。在蒋家沟, 一定坡降条件下, 如果泥深越大, 流量也越大, 泥石流流动性越强, 这无法解释综合阻力随着流深逐渐增加的原因^[9]。

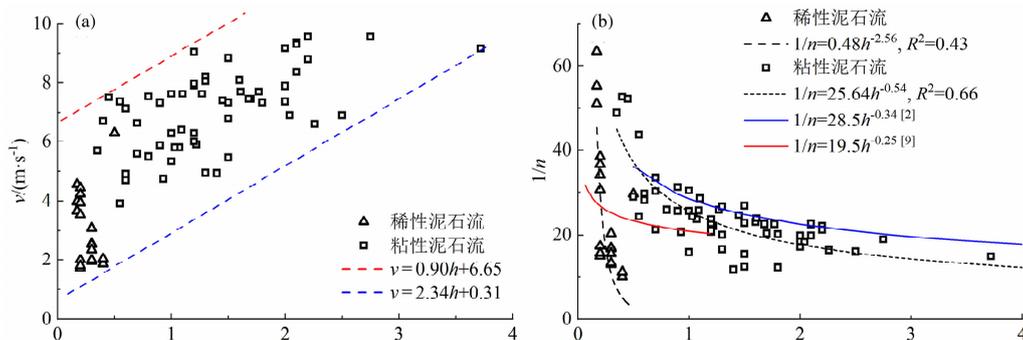


图 1 泥石流流速和曼宁系数随流深的变化: (a) 流速; (b) 曼宁系数

Fig. 1 Variation of velocity and Manning coefficient with flow depth: (a) velocity; (b) Manning coefficient

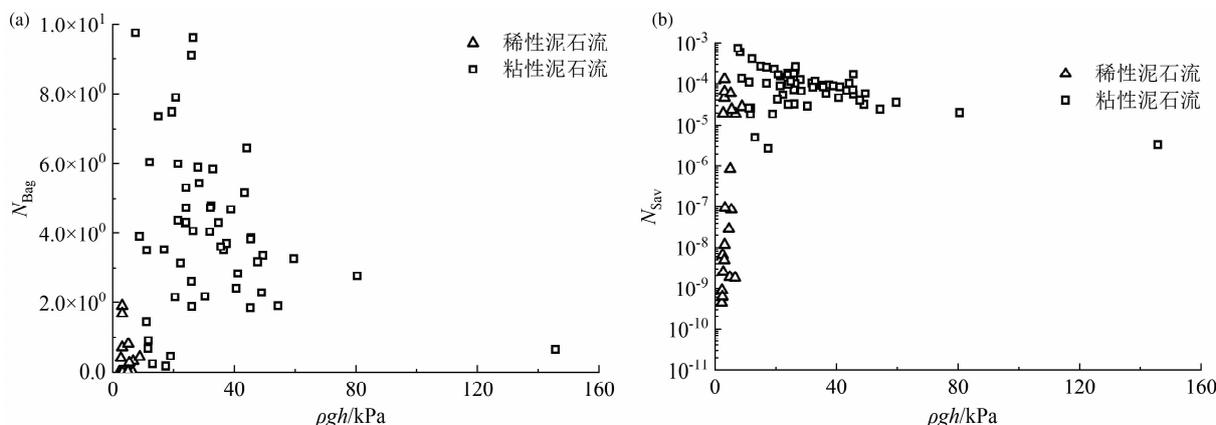


图 2 拜格诺数和萨维奇数随总应力 ρgh 的变化: (a) 拜格诺数; (b) 萨维奇数

Fig. 2 Variation of Bagnold number and Savage number with total stress ρgh : (a) Savage number; (b) Bagnold number

一些研究学者认为泥石流流体中的内部阻力是影响综合阻力的主要因素^[26], 而 $1/n$ 与流深 h 之间的关系不能够反映出颗粒组成、容重等因素对综合阻力的影响。因此, 从泥石流流内部应力出发分析综合阻力很有必要。

2.2 泥石流无量纲参数

拜格诺数结果表明: 蒋家沟粘性泥石流和稀性泥石流运动时, 粘性剪切对运动的贡献程度超过了颗粒碰撞(图 2a)。实际上, 蒋家沟粘性泥石流浆体容重较高, 尤其是当粘性泥石流容重达到或者超过 $2.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时, 浆体容重甚至达到 $1.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ^[27]。粘性泥石流运动时, 龙头剧烈紊动, 而龙身和龙尾部分紊动程度较弱。表 2 中的流速数据是泥石流龙身的平均流速, 不是龙头流速。因此, 粘性泥石流拜格诺数的结果是代表一阵泥石流运动过程龙身部分颗粒碰撞与粘性剪切应力的比值。

由于蒋家沟粘性泥石流的高黏性, 紊动受到极大抑制。因此粘性剪切相对颗粒碰撞来说更为重要。对于蒋家沟稀性泥石流而言, 固相粗颗粒主要

集中在底层,液相运动流速大于固相是其运动的基本特征。因而稀性泥石流液相产生的粘性剪切应力对泥石流运动影响超过颗粒碰撞产生的离散应力。

粘性泥石流的萨维奇数值远远小于临界值。也就是说,摩擦应力对泥石流运动的贡献超过了颗粒碰撞产生的离散应力(图 2b)。一阵典型的粘性阵流,从龙头到龙尾,流态从强紊动流、弱紊动流、波动流向层动流和滑动流逐渐过渡^[28],颗粒相互碰撞产生的离散应力不断减小;从另一方面来说,粘性泥石流中固态、液态物质混成一体,具有一定的结构。流体中大小石块密集,颗粒间离散力被浆体间的黏性阻力所抑制,粗颗粒间的相互作用以黏附力为主(柔性摩擦)^[29],因而颗粒接触摩擦相对颗粒碰撞来更为重要。

蒋家沟稀性泥石流与日本水石流不同的地方在于其液相中含有大量粘性颗粒。根据野外观察到的水石流颗粒分层特征,将其分为上部惯性层(主要为液相,较少颗粒集中)和下部摩擦层(主要为固相颗粒集中)^[19,30]。粗颗粒主要集中在流体底部,底部流速较低,颗粒的运动主要受摩擦应力贡献。因此颗粒接触摩擦相对颗粒碰撞来说更为重要,其萨维奇数值远小于临界值(图 2b)。

粘性泥石流随着容重的增大其液相浆体的黏性阻力不再增加,在块石之间形成泥膜,起润滑作用,以减小颗粒间的运动阻力。黏性液相浆体对泥石流阻力更多的是负作用^[29];固体粗颗粒间相互作用是粘性泥石流阻力不断增大的原因。对于粘性泥石流,颗粒间的相互作用在泥石流运动过程中起主导作用,颗粒接触摩擦所产生的摩擦应力对阻力的贡献程度超过了粘性剪切,因此蒋家沟粘性泥石流摩擦数总体上大于临界值(图 3)。蒋家沟实际观测资料表明:稀性泥石流主要发生在一场泥石流的开始和结束阶段。当形成区停止了物质补给后,进入沟槽的固体物质大量减少,粗颗粒物质开始有分选。因此稀性泥石流液相浓度较高,而固相浓度较低^[2]。由于稀性泥石流中固相主要集中在底层,液相运动流速大于固相是其运动的基本特征。粘性剪切应力相对于摩擦应力而言更加重要,因此稀性泥石流摩擦数小于临界值(图 3)。

粘性剪切和颗粒摩擦对泥石流运动的重要性都超过了颗粒碰撞(图 2)。摩擦数总体上是随着总应力增加而增加,大部分的粘性泥石流摩擦数超过了

2000,而稀性泥石流的摩擦数低于 2000(图 3)。对于粘性泥石流而言,摩擦应力对泥石流运动的重要性超过粘性剪切和颗粒碰撞。对于稀性泥石流而言,粘性剪切超过了摩擦应力和离散应力。

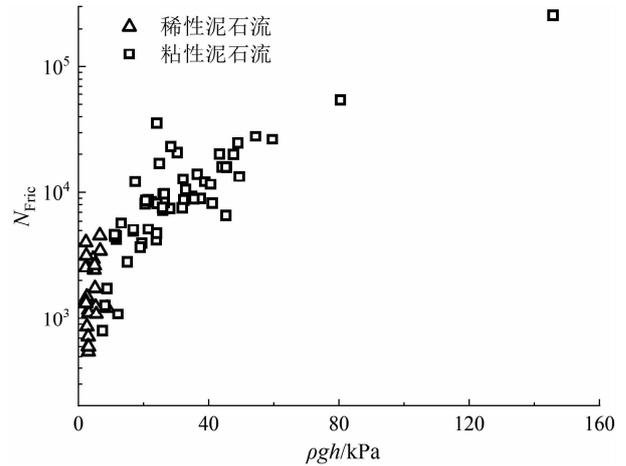


图 3 摩擦数随总应力的变化

Fig. 3 Variation of friction number with total stress

3 讨论

3.1 曼宁系数与无量纲参数

各地区的泥石流在性质上的明显差异,从而决定了阻力特征不一样。已有黄河支干流高含沙水流曼宁系数与床沙中值粒径的关系表明沟道糙率不是曼宁系数的主要影响因子^[26]。因此,泥石流即便属于紊流态,外部阻力因子也处于次要地位。根据我国学者估算,粘性泥石流外部阻力系数均值 $1/n = 30$ ^[10],即曼宁系数 $n = 0.033$ 。部分学者将曼宁系数设定为 $n = 0.1$,即 $1/n = 10$ ^[31]来计算泥石流平均流速。本文通过对蒋家沟粘性泥石流和稀性泥石流实测流速、流深数据进行反算,曼宁系数均值 $n = 0.041$,即 $1/n = 24.52$ 。 $1/n$ 值变异性很大,范围从 6 到 60,大部分的值在 6 到 24.52 之间。由此看出,颗粒之间相互作用及粘性泥石流中的高粘性阻力(即内部阻力)往往是阻力的主要部分,但其很难用曼宁系数反映。

随着容重增大,固相体积分数增加,含水量减小,粘度增加,泥石流的紊动受到抑制,在考虑粘性泥石流内部阻力特性时经常忽略浆体紊动引发颗粒碰撞。对于蒋家沟稀性泥石流和粘性泥石流而言,颗粒碰撞产生的离散应力对泥石流阻力的影响小于颗粒接触摩擦和粘性剪切。因此,蒋家沟泥石流曼

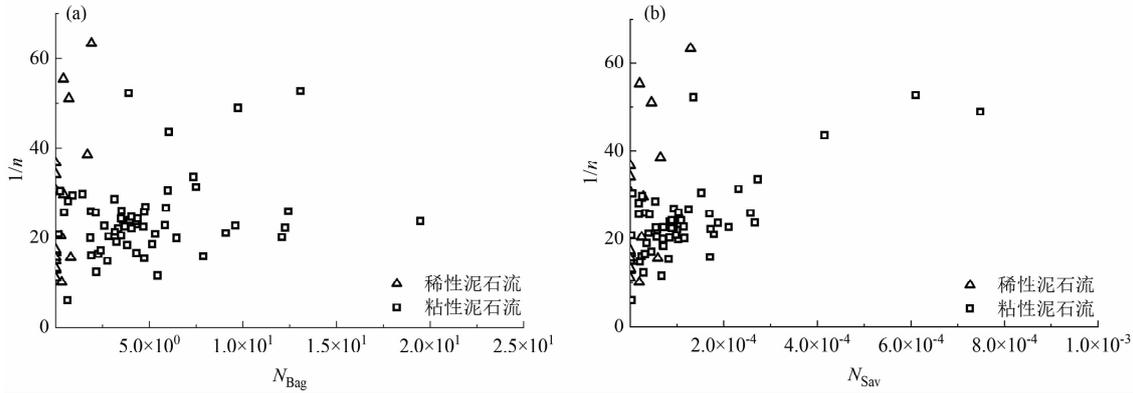


图 4 曼宁系数随无量纲参数 N_{Bag} 和 N_{Sav} 的变化趋势: (a) 拜格诺数; (b) 萨维奇数

Fig. 4 Manning coefficient with the dimensionless parameters of N_{Bag} and N_{Sav} : (a) Savage number; (b) Bagnold number

宁系数与拜格诺数 N_{Bag} (图 4a) 和萨维奇数 N_{Sav} (图 4b) 的相关性较差。

蒋家沟粘性泥石流和稀性泥石流曼宁系数 n 值随着摩擦数 N_{Fric} 的增大而增大(图 5)。一方面,蒋家沟液相浆体黏性增强,使得流动紊动减弱,粘性剪切力增大;另一方面,蒋家沟粘性泥石流容重越大,固体颗粒越多,结构越紧密,粗颗粒间黏附力增大,颗粒接触摩擦力越大,阻力不断增大。因此对于粘性泥石流和稀性泥石流来说,随着摩擦数 N_{Fric} 的值不断增大, $1/n$ 的值不断减小(图 5)。泥石流由稀性泥石流转换为粘性泥石流的过程中,泥石流液相黏度的增强使液相对泥石流阻力的影响由增阻作用转换为减阻作用,此时粘性泥石流综合阻力小于稀性泥石流,粘性泥石流的运动速率大于稀性泥石流。粘性泥石流 $1/n$ 与摩擦数 N_{Fric} 的回归曲线位于稀性

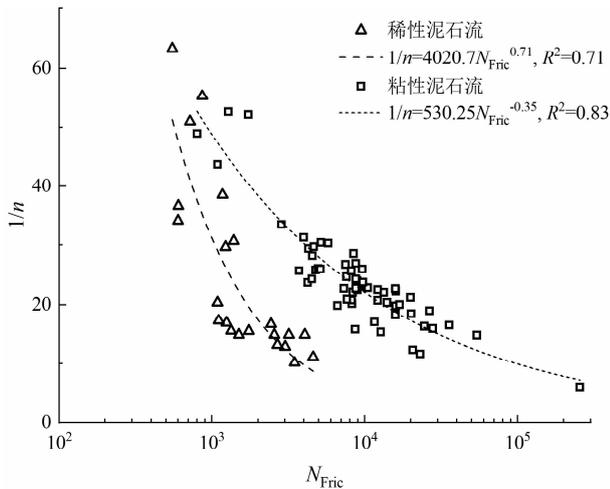


图 5 曼宁系数与摩擦数的相关关系

Fig. 5 Correlation between Manning coefficient and friction number

泥石流上方。且经过独立性分析,两个参数具有较好的独立性。

3.2 泥石流相对平均流速和相对流深

部分学者认为泥石流相对平均运动速度(u/u_*)与相对流深(h/D_{50})成正比^[3],但在计算时未考虑到不同类型泥石流主导应力的差异。在相对流深达到 100 时,相对平均运动速度(u/u_*)随着相对流深的增大反而逐渐减小^[4]。有学者在此基础上对平均运动流速的计算进行改进(如图 6 所示)^[30],引入变量 $(h/D_{50})\sqrt{\rho_f/(\rho_s F(C))}$,其中:

$$F(C) = \frac{(C/C_*)^2}{1 - C/C_*} \quad (10)$$

式中, D_{50} 为泥石流颗粒中值粒径 (m); C 为小于 2 mm 的细颗粒所占体积^[30]; C_* 为泥石流极限浓度,根据蒋家沟的观测资料,泥石流最大容重为 2.37 g/cm^3 ,相当于体积浓度为 0.83 ^[27]。 $(h/D_{50})\sqrt{\rho_f/(\rho_s F(C))}$ 代表的是颗粒接触摩擦与颗粒碰撞应力的比值大小。其值较小时,颗粒接触摩擦占主导地位;而其值较大时,颗粒碰撞占主导地位。

对于水石流来说,浆体中细颗粒含量相对较少,固相颗粒主要为大块石和砾石,固相液相之间具有明显的相对运动,流体紊动强烈,其内部阻力主要为颗粒间的碰撞阻力和摩擦阻力。水石流随着容重的增大,流体中颗粒物增多,颗粒间距不断减小,颗粒间的惯性碰撞逐渐转换为颗粒接触摩擦,紊动减弱,泥石流相对平均运动流速受此影响不断减小,因此 u/u_* 随着 $(h/D_{50})\sqrt{\rho_f/(\rho_s F(C))}$ 的减小不断减小(图 6 红色实线)。

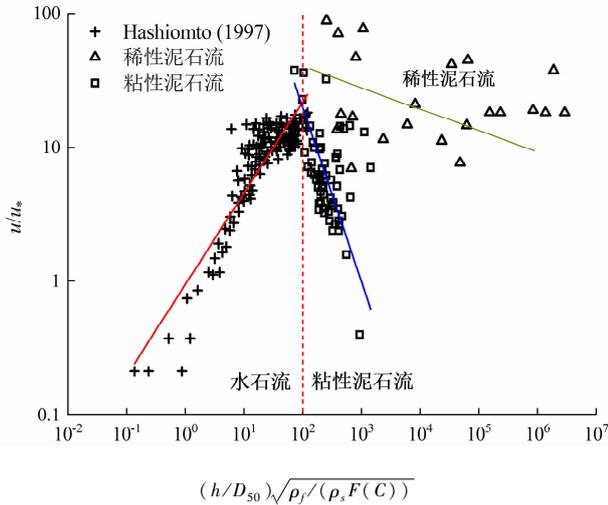


图6 u/u_* 与相对流动深度的关系

Fig. 6 Relationship between u/u_* and relative flow depth

而蒋家沟粘性泥石流和稀性泥石流在运动过程中除了颗粒接触摩擦应力和颗粒碰撞产生的离散应力,还存在粘性剪切应力。容重的增大意味着固体颗粒浓度的增大及含水量的减小,黏性增强,流体紊动受到抑制,颗粒碰撞产生的离散阻力减弱;随着容重的增大,泥石流主导应力由粘性剪切向颗粒接触摩擦转换,颗粒接触摩擦产生的摩擦应力增大, $(h/D_{50})\sqrt{\rho_f/(\rho_s F(C))}$ 的值不断减小,但此时粘性泥石流和稀性泥石流相对平均流速反而不断增大(图6蓝色实线和黄色实线),该项变化可能是在粘性剪切影响下呈增大趋势,因此粘性剪切对泥石流平均流速的影响需要进一步进行研究和讨论。

泥石流是山区介于挟沙水流与滑坡体之间的固、液、气混合流体,它既不同于挟沙水流,又不同于滑坡体,但同时兼有滑坡体和挟沙水流的某些特性,性质又不完全相同,这主要是由于泥石流多是由于宽级配颗粒物质组成导致的^[2]。正是由于颗粒组成物质级配宽,因而内部阻力对泥石流运动具有非常重要的影响^[13,32-33]。虽然国内外一些学者提出了如拜格诺、萨维奇、摩擦数等无量纲参数来分析泥石流的物理力学机制、流动性和动床物质间的相互作用,但较少将这些无量纲参数与阻力结合起来分析^[7]。此外,相对平均运动速度(u/u_*)与 $(h/D_{50})\sqrt{\rho_f/(\rho_s F(C))}$ 之间的关系,对于水石流而言是呈正相关关系,但是对于含细颗粒含量高的粘性泥石流和稀性泥石流而言,两者之间呈递减的关

系。这可能是由于水石流、粘性泥石流和稀性泥石流运动的主导作用力不同导致的。

4 结论

本文利用东川蒋家沟泥石流观测数据,反算曼宁系数来表达泥石流运动过程中受到的综合阻力,并尝试将其与拜格诺数、萨维奇数和摩擦数等无量纲参数建立联系,结果表明:

(1)对于蒋家沟粘性泥石流而言, $N_{Bag} < 200$, $N_{Sav} < 0.1$, $N_{Fric} > 2000$,因此颗粒接触摩擦产生的摩擦应力对粘性泥石流运动阻力的贡献程度超过了粘性剪切和颗粒碰撞产生的离散应力;而对于蒋家沟稀性泥石流而言, $N_{Bag} < 200$, $N_{Sav} < 0.1$, $N_{Fric} < 2000$,因此粘性剪切对稀性泥石流运动阻力的贡献程度超过了摩擦应力和离散应力。

(2)离散应力对蒋家沟粘性泥石流和稀性泥石流的影响是最小的,因此曼宁系数与拜格诺数和萨维奇数的相关性较弱;但曼宁系数与摩擦数存在显著相关的关系,且随着摩擦数的增大,综合阻力不断增大。

(3)水石流的相对平均流速随相对流深的增大而增大,但是粘性泥石流和稀性泥石流的相对平均流速随相对流深的增大而减小。其主要原因可能在于:随着水石流相对流深加大,颗粒间的主导应力逐渐从颗粒碰撞转为摩擦应力;而粘性泥石流的主导应力是摩擦应力为主,稀性泥石流的主导应力是粘性剪切应力为主。水石流与粘性泥石流和稀性泥石流的相对平均运动速度(u/u_*)与相对平均流深(h/D_{50})关系相反的原因可能在于粘性泥石流和稀性泥石流中浆体产生的粘性剪切应力对泥石流的运动不可忽略。

参考文献 (References)

- [1] 钱宁,王兆印. 泥石流运动机理的初步探讨[J]. 地理学报, 1984, **39**(1): 33 - 43. [QIAN Ning, WANG Zhaoyin. A preliminary study on the mechanism of debris flows [J]. Acta Geographica Sinica, 1984, **39**(1): 33 - 43]
- [2] 康志成,李焯芬,马嵩乃,等. 中国泥石流研究[M]. 北京:科学出版社, 2004:212 - 240. [KANG Zhicheng, LEE Chackfan, MA Aina, et al. Research on debris flow in China [M]. Beijing: Science Press, 2004:212 - 240]
- [3] JULIEN P Y, PARIS A. Mean velocity of mudflows and debris flows

- [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, **136**(9): 676 – 679. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000224
- [4] YU Bin. Discussion of “mean velocity of mudflows and debris flows” by Pierre Y. Julien and Anna Paris [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, **138**(2): 223 – 224. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000480
- [5] IVERSON R M. The physics of debris flows [J]. *Reviews of Geophysics*, 1997, **35**(3): 245 – 296. DOI: 10.1029/97RG00426
- [6] 朱兴华, 崔鹏, 唐金波, 等. 粘性泥石流流速计算方法 [J]. *泥沙研究*, 2013(3): 59 – 64. [ZHU Xinghua, CUI Peng, TANG Jinbo, et al. Calculation of viscous debris velocity [J]. *Sediment Research*, 2013(3): 59 – 64] DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2013.03.001
- [7] 崔鹏, 唐金波, 林鹏智. 泥石流运动阻力特性及其研究进展 [J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2016, **48**(3): 1 – 11. [CUI Peng, TANG Jinbo, LIN Pengzhi. Research progress of resistance character of debris flow [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2016, **48**(3): 1 – 11] DOI: 10.15961/j.jsuese.2016.03.001
- [8] ZHU Xinghua, LIU Bangxiao, LIU Yue. New method for estimating roughness coefficient for debris flows [J]. *Water*, 2020, **12**(9): 2341. DOI: 10.3390/w12092341
- [9] 费祥俊, 舒安平. 泥石流运动机理与灾害防治 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 114 – 144. [FEI Xiangjun, SHU Anping. *Movement mechanism and disaster control for debris flow* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 114 – 144]
- [10] RICNENMANN D. Empirical relationships for debris flows [J]. *Natural Hazards*, 1999, **19**: 47 – 77. DOI: 10.1023/A:1008064220727
- [11] 徐永年, 匡尚富, 舒安平. 阵性泥石流的平均流速与加速效应 [J]. *泥沙研究*, 2001(6): 8 – 13. [XU Yongnian, KUANG Shangfu, SHU Anping. Average velocity and acceleration effects of intermittent debris flows [J]. *Journal of Sediment Research*, 2001(6): 8 – 13] DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2001.06.002
- [12] TAKAHASHI T. Debris flow [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1981, **13**(1): 57 – 77. DOI: 10.1146/annurev.fl.13.010181.000421
- [13] 田连权, 吴积善, 康志成, 等. 泥石流侵蚀搬运与堆积 [M]. 成都: 成都地图出版社, 1993: 73 ~ 90. [TIAN Lianquan, WU Jishan, KANG Zhicheng, et al. *Transport and accumulation of debris flow erosion* [M]. Chengdu: Chengdu Cartographic Publishing House, 1993: 73 ~ 90]
- [14] CHEN Chenglung. Generalized viscoplastic modeling of debris flow [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1988, **114**(3): 237 – 258. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:3(237)
- [15] 王兆印, 林秉南, 张新玉. 非牛顿体不稳定流的研究 [J]. *力学学报*, 1990, **22**(3): 266 – 275. [WANG Zhaoyin, LIN Bingnan, ZHANG Xinyu. Instability of non-newtonian open channel flow [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1990, **22**(3): 266 – 275] DOI: 10.6052/0459-1879-1990-3-1995-944
- [16] HUANG X, GARCIA M H. A Herschel-Bulkley model for mud flow down a slope [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1998, **374**(1): 305 – 333. DOI: 10.1017/S0022112098002845
- [17] BERZI D, JENKINS J T. Steady inclined flows of granular-fluid mixtures [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2009, **641**: 359 – 387. DOI: 10.1017/S0022112009991510
- [18] BAGNOLD R A. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a newtonian fluid under shear [G]. *Proc. Royal Soc. London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1954, **225**(1160): 49 – 63. DOI: 10.2307/99440
- [19] TAKAHASHI T. Mechanical characteristics of debris flow [J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1978, **104**(8): 1153 – 1169. DOI: 10.1061/JYCEAJ.0005046
- [20] VIESCA R. Book review of debris flow: mechanics, prediction and countermeasures by Tamotsu Takahashi [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2008, **165**(5): 995 – 996. DOI: 10.1007/s00024-008-0342-8
- [21] 苏重光, 连惠邦, 江永哲. 土石流剖面流速分布之研究 [J]. *中华水土保持学报*, 1993, **24**(1): 75 – 82. [SU Chongguang, LIEN Huipang, CHIANG Yungcheh. Study on the velocity distribution of debris flow [J]. *Chinese Journal of Soil and Water Conservation*, 1993, **24**(1): 75 – 82]
- [22] ZHOU G G D, NG C W W. Dimensional analysis of natural debris flows [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2010, **47**(7): 719 – 729. DOI: 10.1139/T09-134
- [23] 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: 94 – 141. [DU Ronghuan, KANG Zhicheng, CHEN Xunqian, et al. *A comprehensive investigation and control planning for debris flow in the Xiaojiang river basin of Yunnan province* [M]. Chongqing: Science and Technology Literature Press Chongqing Branch, 1987: 94 – 141]
- [24] 张信宝, 刘江. 云南大盈江流域泥石流 [M]. 成都: 成都地图出版社, 1989: 94 – 103. [ZHANG Xinbao, LIU Jiang. *Debris flow in Dayingjiang river basin in Yunnan* [M]. Chengdu: Chengdu Map Publishing House, 1989: 94 – 103]
- [25] 舒安平, 费祥俊. 粘性泥石流运动流速与流量计算 [J]. *泥沙研究*, 2003(3): 9 – 13. [SHU Anping, FEI Xiangjun. Calculation for velocity and discharge of the viscous debris flow [J]. *Journal of Sediment Research*, 2003(3): 9 – 13] DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2003.03.002
- [26] 邓安军, 郭庆超, 陈建国. 挟沙水流综合糙率系数的研究 [J]. *泥沙研究*, 2007(5): 24 – 29. [DENG Anjun, GUO Qingchao, CHEN Jianguo. Study on the roughness in sediment-laden flows [J]. *Journal of Sediment Research*, 2007(5): 24 – 29] DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2007.05.005
- [27] 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: 53 – 127. [WU Jishan, KANG

- Zhicheng, TIAN Lianquan, et al. Observational research on debris flow in Jiangjiagou, Yunnan [M]. Beijing: Science Press, 1990: 53 – 127]
- [28] 田密. 动床条件下泥石流阻力特性的实验研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2013:15 – 20. [TIAN Mi. Experimental study on the resistance of debris flows over an erodible bed [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013:15 – 20]
- [29] 王裕宜, 詹钱登, 严璧玉, 等. 泥石流流体的流变特性与运移特征 [M]. 长沙:湖南科学技术出版社, 2014:63 – 89. [WANG Yuyi, JAN Chyandeng, YAN Biyu. Debris flow rheology and movement [M]. Hunan Science and Technology Press, 2014:63 – 89]
- [30] HASHIMOTO H, HIRANO M. A flow model of hyperconcentrated sand-water mixtures [C]//Proceedings of the First International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment. CHEN Chenglung. New York: ASCE, 1997:464 – 473.
- [31] RICKENMANN D, ZIMMERMANN M. The 1987 debris flows in Switzerland: Documentation and analysis [J]. *Geomorphology*, 1993, **8**(2 – 3): 175 – 189. DOI: 10.1016/0169 – 555X(93)90036 – 2
- [32] 熊刚. 粘性泥石流的运动机理 [D]. 北京:清华大学, 1996:3 – 17. [XIONG Gang. Mechanics of viscous debris flow [D]. Beijing: Tsinghua University, 1996:3 – 17]
- [33] 李泳, 谢江, 周小军, 等. 泥石流颗粒的标度分布 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, **45**(1): 1 – 7. [LI Yong, XIE Jiang, ZHOU Xiaojun, et al. A scaling distribution for grain composition of debris flow [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2013, **45**(1): 1 – 7] DOI: 10.15961/j.jsuese.2013.01.002

Dimensionless Analysis of Resistance of Debris Flow in the Jiangjia Gully, China

MIAO Lyu, MA Chao*, LYU Liqun

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Velocity is a key parameter of debris flow control engineering, and the value of debris flow resistance is very important to its calculation process. However, there are few studies on the effect of internal stress change of debris flow on resistance. In this work, the observed data of debris flow at the Jiangjia gully in Dongchuan, Yunan province, China were used to back estimate the Manning coefficient, which is an indirect value expressing the comprehensive resistance property. Three dimensionless parameters, i. e., Bagnold number, Savage number and friction number were used to analyze the relationship between resistance and Manning coefficient. The results show that: the values of Bagnold number and Savage number were all less than the critical value, but the friction number of viscous debris flow was greater than the critical value, and the friction number of diluted debris flow was less than the critical value. Therefore, the contribution of grain contact friction to the motion of viscous debris flow exceeded the inertial stress and viscous shear stress. The contribution of viscous shear stress to the movement of a diluted debris flow exceeded the dispersive stress from inertial grain collision and the friction stress caused by grain contact. The resistances of viscous- and dilated debris flow had a weak correlation with the Bagnold number and Savage number, and were closely related to the friction number. As the Friction number increased, the comprehensive resistance kept increasing. The relative average velocity of stony flow increased with the relative flow depth, but the relative average velocity of viscous debris flow and diluted debris flow decreased with the relative flow depth. The results of this study are expected to deepen the understanding of debris flow resistance.

Key words: resistance of debris flow; velocity; Manning coefficient; Jiangjia gully