径流作用下泥石流固体物质冲刷速率试验研究

安 笑[1,2,4]，潘华利[1,2]，邓其娟[3]，欧国强[1,2]，李炳志[1,2,4]，孔 玲[1,2,4]

(1. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室，四川 成都 610041；2. 中国科学院水利部 成都山地灾害与环境研究所，四川 成都 610041；3. 四川建筑职业技术学院，四川 成都 610081；4. 中国科学院大学，北京 100049)

摘 要：[目的] 探讨泥石流固体物质的冲刷深度随时间的变化规律，以及对应的冲刷速率与不同影响因素之间存在的关系，为泥石流规模预测及防治工程设计提供参考依据。[方法] 根据激光测距仪的历时测距原理，借助试验方法分析泥石流固体物质冲刷深度随时间的变化规律以及对应的冲刷速率与不同影响因素之间的关系，包括来流流量、水力半径、沟床纵坡以及细粒物质含量等。[结果] 冲刷速率与水力半径间呈指数关系，与来流流量间呈正相关关系，与能坡梯度间呈指数关系；若固体物质为均匀冲刷，冲刷速率与剩余切应力成线性正相关关系；对于初始含水率相对较低的固体物质，冲刷速率随着细粒物质含量的增大呈微小增大趋势。[结论] 在薄层径流条件下，能坡梯度对冲刷速率的影响高于水力半径。

关键词：泥石流；径流冲刷作用；冲刷速率；剩余切应力

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2020)06-0094-07 **中图分类号**：TV144

文献参数：安笑，潘华利，邓其娟，等. 径流作用下泥石流固体物质冲刷速率试验研究[J]. 水土保持通报，2020，40(6)：94-100. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2020.06.014；An Xiao，Pan Huali，Deng Qijuan，et al. Experimental study on scouring rate of debris flow solid matter under runoff [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2020，40(6)：94-100.

Experimental Study on Scouring Rate of Debris Flow Solid Matter Under Runoff

An Xiao[1,2,4], Pan Huali[1,2], Deng Qijuan[3], Ou Guoqiang[1,2], Li Bingzhi[1,2,4], Kong Ling[1,2,4]

(1. *Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan* 610041, *China*; 2. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan* 610041, *China*; 3. *Sichuan College of Architectural Technology, Chengdu, Sichuan* 610081, *China*; 4. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: [Objective] The variation of the erosion depth of debris flow solid mater, and the relationship between the corresponding scouring rate and different influencing factors were explored in order to provide reference for debris flow prediction and prevention engineering design. [Methods] According to the principle of the laser rangefinder, the variation of the erosion depth of debris flow solid matter over time and the relationship between the corresponding erosion rate and different influencing factors were explored, including the incoming flow, hydraulic radius, and gully bed longitudinal slope and the content of fine particles. [Results] The scour rate showed an exponential relationship with the hydraulic radius, a positive correlation with the incoming flow, and an exponential relationship with the energy slope gradient. If the solid matter was uniformly scoured, the scouring rate had a linear positive correlation with residual shear force. For the solid matter with a relatively low initial moisture content, the scouring rate increased slightly with the increase of the content of fine particles. [Conclusion] Under the condition of thin runoff, the energy slope gradient had a greater influence on the erosion rate, compared to the hydraulic radius.

Keywords: **debris flow; runoff; scouring rate; residual shear**

收稿日期：2020-06-14 **修回日期**：2020-08-04

资助项目：国家重点研发计划项目“山洪多要素立体监测技术及体系研发”(2017YFC1502502)，“区域山洪灾害监测预警技术集成与应用示范”(2017YFC1502506)；国家自然科学基金项目(51679229；41672318)；云南省应用基础研究计划项目(2016FB074)；中国科学院成都山地所 135 项目(2017 年)；中国科学院青年创新促进会(2018405)

第一作者：安笑(1993—)，女(汉族)，湖北省枣阳市人，研究生，研究方向为泥石流起动。Email：anxiao2017@163.com。

通讯作者：潘华利(1982—)，女(汉族)，重庆市人，博士，青年研究员，硕士生导师，主要从事山地灾害动力学方面的研究。Email：hlpan@imde.ac.cn。

山洪泥石流灾害严重制约山区社会经济发展,是当前山区防灾减灾面临的最为突出问题[1]。泥石流固体物质的冲刷速率决定着暴发泥石流的活动强度及活动规模[2],是泥石流工程防治设计的重要参数[3]。目前,针对泥石流固体物质冲刷输移速率的研究相对较少,尤其对于影响因素的探讨。目前主要集中在对野外泥石流案例冲刷特征的分析,例如,蒋家沟[4]、小江流域[5]、金沙江支流的海支沟[3]以及震中牛圈沟等[6]典型泥石流流域;也有学者通过理论分析结合水槽试验,对稀性泥石流的冲刷规律[7]以及弃渣型泥石流输沙速率进行了探讨[2]。目前,与泥石流固体物质侵蚀特征相似的研究主要集中在两方面,其一为水土流失的土壤侵蚀率研究[8-16]。试验对象及条件不同,土壤分离的动力学机理不同[9],例如,有学者[8-9]得出土壤侵蚀率与流量间呈指数关系,有学者[10-11]认为呈线性关系;有学者[12-13]得出土壤侵蚀率与水流剪切力呈线性关系,也有学者[14-16]认为呈幂函数关系;其二为清水或高含沙水流对河床质的冲刷研究[17-18]。泥石流固体物质结构松散、级配宽、性质复杂,不同于粒径相对较小结构相对均匀的河床质,并且泥石流沟道特征及水动力条件不同于河床及河道水流。直接借鉴二者的侵蚀速率规律显然不尽合理。综合以上分析,本文开展模型试验,借助精度较高的激光历时测距仪,探讨泥石流固体物质的冲刷深度随时间的变化规律,以及对应的冲刷速率与不同影响因素之间存在的关系,以期为泥石流规模预测及防治工程设计提供参考依据。

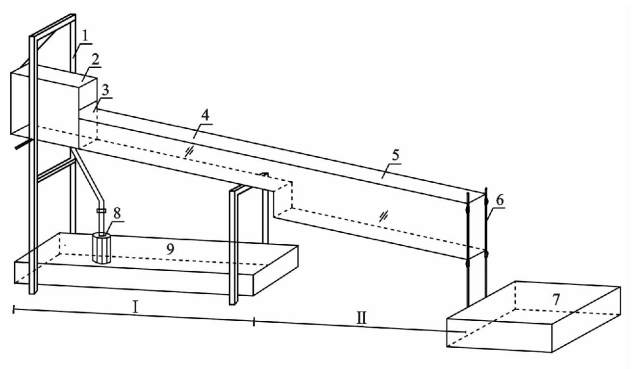
1　材料与方法

1.1　试验装置

试验装置如图 1 所示。试验槽的尺寸为长 200 cm,宽 20 cm,高 45 cm,试验槽上游是尺寸为长 200 cm,宽 20 cm,高 25 cm 的供水水槽,二者均由 5 mm 厚的光滑透明玻璃制成,便于从侧面对试验过程进行观测。土体堆放水槽底床低于供水水槽底床 20 cm,且土体的堆积高度为 20 cm,即供水水流由试验土体表层开始作用于堆积体,用以模拟野外泥石流源区汇水水流作用于沟道固体物质的情况。整个装置可调整坡度范围为 0°～21°;供水流量由水泵及集水装置出水高度二者组合控制,可调整的范围为 500～1 400 ml/s,满足试验需求。

1.2　试验土体及模型

根据前人[19]研究成果可知,影响固体物质起动的影响因素很多,主要包括来流流量、沟床纵坡以及固体物质性质等。其中,影响固体物质性质的指标主要包括细粒物质含量、密实度、重度、初始含水率等。本次试验初步考虑了来流流量、沟床纵坡以及细粒物质含量等三项因素。参考《土工试验规程(SL237-1999)》,细粒物质的分界粒径为 0.25 mm。因沟道物质在历次水流作用下,细粒物质(≤0.25 mm)多被水流带走,导致其细粒物质含量较低。故而,在控制来流流量及沟床纵坡条件时,暂不考虑细粒物质的影响。试验土体级配特征见表 1 中的物料①,是根据原型级配采用不同粒径的石英碎屑颗粒配制而成。为充分模拟泥石流固体物质的松散状态,采用逐层自然堆积方式,即不对每层土体进行压实,保证不同条件下固体物质初始结构状态一致。



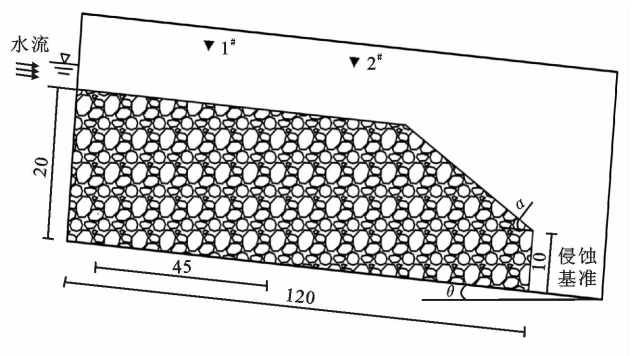
注:1 为支架;2 为水箱;3 为闸门;4 为供水水槽;5 为物料堆放水槽;6 为活动支架;7 为尾料回收装置;8 为动力泵;9 为集水装置;Ⅰ为供水装置;Ⅱ为沟道模拟装置。

图 1　试验装置示意图

不同细粒物质含量的配制过程为:在不含细粒物质的试验土体基础上,等梯度添加不同细粒含量的固体物质,细粒物质的取样地点为泥石流沉积物,风干捣碎后进行配制,该物质具有一定黏性物质的特性。配制后的级配特征见表 1 中物料②—⑤。该项影响因素的探讨对于新形成的泥石流沟道的水流冲刷特征具有积极参考意义。试验土体初始含水状态保持相同,采用型号为 VM-220F 便携式含水率测定仪即时测定。同时,试验槽的宽度为 20 cm 与试验土体的最大粒径 10 mm 的比值为 20,满足模型试验宽径比的要求[20]。试验土体堆放如图 2 所示。试验土体堆放至图 1 中的装置Ⅱ处,堆积尺寸为长 120 cm,宽 20 cm,高 20 cm。由于试验槽底部较为光滑,故在堆积体下游设置了高为 10 cm 的可透水的侵蚀基准板,以此消除试验土体与试验槽底部明显分界面的影响,同时,延长侵蚀时间便于观察试验土体侵蚀过程和

获取相关数据等。通过预试验,不断调整侵蚀基准高度以此满足试验需求,最终将侵蚀基准高度设定为 10 cm。

为探究固体物质的侵蚀深度随时间的变化规律,在堆积体上方近中心线处等间距放置两个型号为 RLM-S30C 的激光历时测距仪,距离测量精度为 0.1 cm,见图 2 中 1# 和 2# 位置处。根据测距仪的历时测距原理,实时测量固体物质的侵蚀深度随时间的变化规律。试验开展于 2019 年 8 月 20 日至 9 月 20 日。



注:单位:cm;θ 为坡度;α 为天然休止角。

图 2 试验土体堆放示意图

表 1 不同粒径区间百分含量

不同物料	10～5 mm 百分含量/%	5～2 mm 百分含量/%	2～1 mm 百分含量/%	1～0.5 mm 百分含量/%	0.5～0.25 mm 百分含量/%	≤0.25 mm 百分含量/%
物料①	30.87	41.48	16.40	6.28	3.67	1.3
物料②	21.80	43.95	17.66	8.43	2.16	6.0
物料③	21.36	42.15	15.63	6.10	2.76	12.0
物料④	23.88	34.87	13.42	6.51	4.31	17.0
物料⑤	20.95	34.58	12.34	6.69	5.44	20.0

2 试验结果与分析

2.1 径流冲刷作用力

泥石流沟道固体物质起动冲刷过程与河道或河岸冲刷特征类似,区别在于固体物质的性质存在差别。目前河道或河岸土体冲刷相关研究相对成熟,可借鉴其相关理论对固体物质冲刷速率进行分析。河岸或河道土体冲刷,从力学角度分析,主要与两种作用力相关[21],其一为促使河岸冲刷的作用力,即水流冲刷力,一般用水流剪切力表示;与此对应的是阻止河岸冲刷的作用力,即河岸土体抗冲力,一般用土体的起动拖曳力表示。当水流剪切力克服土体的起动拖曳力后,土体便在剩余切应力(水流剪切力与起动拖曳力之差)作用下起动破坏。基于以上分析发现,径流水体冲刷固体物质的速率与剩余切应力密切相关。

2.1.1 *水流剪切力* 水流剪切力相关计算公式为:

$$\begin{cases}\tau=\gamma_w RJ\\ R=B\cdot h/(B+2h)\\ J=\tan\theta\end{cases}\tag{1}$$

式中:τ 为水流剪切力(N/m^2);γ_w 为水的重度(kN/m^3);R 为水力半径(m),在河道或沟道较宽时,一般采用径流深度近似;B 为冲刷宽度(m);h 为径流深度(m);J 为能坡梯度;θ 为沟床纵坡(°)。

2.1.2 *起动拖曳力* 固体物质性质不同,对应的起动拖曳力计算模型不同。对于非黏性物质,抗冲刷力主要取决于固体物质的有效重力,一般情况下,可以采用 Shields 类型的起动拖曳力公式来估算非黏性物质的起动条件[21]。其中,Van Rijn[22]对 Shields 计算模型进行了改进,建立了 Shields 数 θ_{cr} 与泥沙粒径参数 D_* 之间的函数关系:

$$\begin{cases}\theta_{cr}=0.24(D_*)^{-1} & (D_*\leqslant 4)\\ \theta_{cr}=0.14(D_*)^{0.64} & (4<D_*\leqslant 10)\\ \theta_{cr}=0.04(D_*)^{-0.10} & (10<D_*\leqslant 20)\\ \theta_{cr}=0.013(D_*)^{0.29} & (20<D_*\leqslant 150)\\ \theta_{cr}=0.055 & (D_*>150)\end{cases}\tag{2}$$

$$D_*=D\left[\frac{(\rho_s/\rho_w-1)g}{\nu^2}\right]^{1/3}\tag{3}$$

$$\tau_{cn}=\theta_{cr}(\rho_s-\rho_w)gD\tag{4}$$

式中:τ_{cn} 为无黏性物质的起动拖曳力(N/m^2);D 为土体的代表粒径(m);D_* 为固体物质粒径参数(m);ρ_s,ρ_w 分别为固体物质和水流的密度(kg/m^3);ν 为水流运动黏滞系数(m/s^2);g 为重力加速度(m/s^2);θ_{cr} 为 Shields 数。

2.1.3 *剩余切应力* 若水流剪切力超过固体物质起动拖曳力,则存在剩余切应力,即水流剪切力与固体物质起动拖曳力的差值,计算公式为:

$$\tau_s=\tau-\tau_{cn}=\gamma_w RJ-\tau_{cn}\tag{5}$$

式中:τ_s 为剩余切应力(N/m^2);其他符号含义同前。

针对同种固体物质(即 ρ_s 相同),假定其为各向同性,且为均匀冲刷(即代表粒径 D 保持不变),则起动拖曳力保持不变,即 τ_{cn} 为常数,此时剩余切应力主

要与水流剪切力有关,见公式(5)。进而可知,剩余切应力与水力半径、能坡梯度密切相关。实际情况中,来流流量是控制泥石流起动的重要水源条件参数之一。一般采用来流流量作为控制径流深度的参数,故而探究来流流量及沟床纵坡对固体物质冲刷速率的影响。

2.2　冲刷深度历时变化规律

试验分析表明,不同点位处固体物质冲刷深度随时间的推移均呈增大趋势,根据变化特征,将不同点位处的变化规律采用不同函数进行拟合。2# 观测点距离固体物质冲出口较近,在径流作用下,固体物质迅速被冲出,随后冲刷深度的增加幅度逐渐降低,采用对数函数进行拟合;1# 观测点位于堆积体中部,相对于 2# 观测点,其冲刷深度随时间的推移变化趋势相对均匀,采用线性函数进行拟合,不同点位处的拟合相关系数均在 0.9 以上,将冲刷深度随时间的变化规律表示为:

$$\begin{cases} H(t)_{2\#} - H_0 = a\ln(t+1) \\ H(t)_{1\#} - H_0 = bt \end{cases} \tag{6}$$

式中:$H(t)_{2\#}$,$H(t)_{1\#}$ 分别为冲刷时间 t 时不同观测点与堆积体表面的距离(cm);H_0 为堆积体初始高度(cm);a,b 为系数且为常数;t 为冲刷时间(s)。根据数学逻辑关系,$H(t)$ 表达式的导数对应的物理含义为固体物质冲刷一定深度与对应时间的比值,将其定义为冲刷速率 k,则有 $k(2\#)=a/(t+1)$、$k(1\#)=b$,单位为 cm/s。其中,2# 观测点冲刷速率与时间有关,取 $t=1$ s 时,即 $k(2\#)=a/2$,对比不同条件下的固体物质由初始状态冲刷时间至 1 s 时的冲刷速率,即瞬时冲刷速率;$k(1\#)$ 用来表征堆积体的平均冲刷速率。

2.3　来流流量对冲刷速率的影响

图 3 为同一沟床纵坡 9°不同流量条件固体物质冲刷过程正视图,其中 0 s 表示固体物质开始起动时刻。由图 3 可知,当流量较小时,冲刷水流不会平均分配至整个沟道,而是集中水动力冲刷出一条宽度较小的水流通道,随后在水流的持续冲刷下,固体物质的堆积高度逐渐降低,即固体物质的侵蚀模式为下蚀。随着来流流量的增大,冲刷通道的宽度逐渐增大,直至整个沟道的固体物质同时被水流冲刷带走,则水流冲刷的横向分异现象结束,即固体物质的横向冲刷宽度因来流流量的不同存在较大差异。此外,冲刷径流深度也因来流流量的不同存在差别,将不同流量对应的冲刷特征参数进行整理(表 2)。通过拟合,冲刷水力半径与来流流量之间呈对数关系,且二者表达式为:

$$R=0.911\ln Q-4.896 \quad (r^2=0.954) \tag{7}$$

式中:Q 为来流流量(ml/s);r 为拟合相关系数。其中,相关系数为 0.954,可信度较高。



流量:573 ml/s;冲刷时间:0~50 s　　流量:649 ml/s;冲刷时间:0~49 s　　流量:1 379 ml/s;冲刷时间:0~21 s

图 3　不同流量条件固体物质冲刷过程正视图

水力半径是刻画冲刷宽度及径流深度的重要指标,选取水力半径这一指标,探究其与冲刷速率间的关系。由表 2 可知,2# 观测点瞬时冲刷速率随水力半径的增大变化幅度相对较小,主要是由于该点接近冲出口,固体物质在水流的作用下极易快速冲出沟道,该过程发生的时间极短,不能明显表征水力半径对冲刷速率的影响,对应于野外泥石流沟道冲出口或是坡脚临空处的固体物质最容易被冲出的特征;1# 观测点位于坡体的中前部,几乎不受来流水体进入坡体初始位置以及固体物质冲出口的影响,受流量的影响相对明显,因此采用 1# 观测点试验规律表征水力半径对冲刷速率的影响(图 4)。通过拟合,平均冲刷速率(1# 测点)与水力半径间呈指数关系,见公式(8)。这与蒋芳市等[9]对崩岗崩积体的研究以及张

光辉等[11]对黄土的研究结果一致；此外，分析平均冲刷速率与来流流量间的关系(图 5)，发现二者呈正相关关系，见公式(8)，这与何小武等[10]研究成果相一致。

$$\begin{cases} k(1^{\#})=0.055\ 8e^{1.056R} & (r^2=0.972) \\ k(1^{\#})=0.000\ 2Q+0.005\ 5 & (r^2=0.918) \end{cases} \quad (8)$$

同一沟床纵坡条件，随着来流流量的增大，固体物质横向冲刷宽度及垂向冲刷速率均呈逐渐增大趋势(表 2)。对应于泥石流发生过程中，起动水量越大，相同沟床纵坡条件，固体物质的冲刷宽度及深度(相同时间的冲刷深度，即 $k \cdot \Delta t$ 均增大，故而泥石流的活动规模越大。

表 2 不同流量对应的冲刷特征参数

流量 Q/(ml·s^{-1})	径流深度 h/cm	冲刷宽度 B/cm	水力半径 R/cm	瞬时冲刷速率 $k(2^{\#})$/(cm·s^{-1})	平均冲刷速率 $k(1^{\#})$/(cm·s^{-1})
573	1.2	5	0.81	2.83	0.14
649	1.3	10	1.03	2.84	0.15
697	1.4	12	1.14	2.87	0.19
847	1.5	18	1.29	2.85	0.22
1 183	1.7	20	1.45	2.93	0.25
1 379	2.1	20	1.74	3.76	0.36

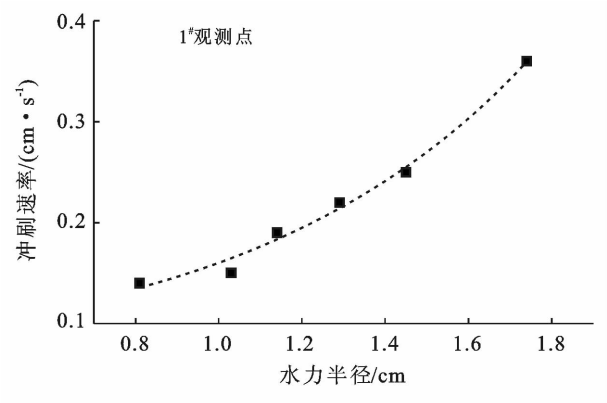


图 4 冲刷速率与水力半径间关系

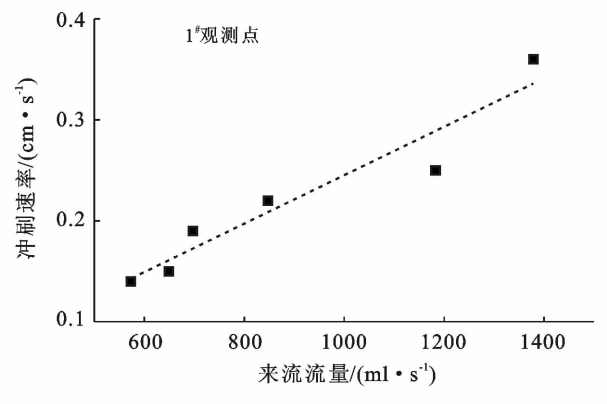


图 5 冲刷速率与来流流量间关系

2.4 沟床纵坡对冲刷速率的影响

试验分析表明，能坡梯度越大，冲刷速率越大(图 6)。在相同流量条件下，冲刷速率与能坡梯度之间呈指数关系〔公式(9)〕。这与唐科明等[8]、蒋芳市等[9]学者得出的正相关关系不同，这与试验条件有关，两位学者探讨的坡度范围分别 10°～23°，20°～40°，没有综合低坡度对土壤剥离速率的影响；张光辉等[11]学者探讨的坡度范围为 2°～25°，分析发现，当流量取值为 0.5～1.5 L/s 时，土体分离速率与能坡梯度之间呈指数增大趋势，与本文趋势相同。

$$\begin{cases} k(2^{\#})=1.903e^{2.162J} & (r^2=0.917) \\ k(1^{\#})=0.081e^{7.430J} & (r^2=0.973) \end{cases} \quad (9)$$

对比以上来流流量、能坡梯度对冲刷速率的影响(详见表 2—3)。随着来流流量及能坡梯度的增大，冲刷速率均呈增大的趋势，但增加幅度相差较大。从剩余切应力角度进行分析，当其他参数保持恒定时，水力半径的变化范围是(0.008 1～0.074 0)m，而能坡梯度的变化范围是(0.052～0.344)，显然，薄层径流条件，能坡梯度对剩余切应力的影响更大，即冲刷固体物质的作用力越大。对应于野外条件，沟床纵坡越大，冲刷速率越大，暴发泥石流的时间可能越短，且动能越大，泥石流的冲击破坏能力也越强，即泥石流的活动强度也越大，结合来流流量对固体物质冲刷的影响可知，较大的水量及陡峻的坡度是诱发特大泥石流的必要条件。

表 3 不同坡度条件对应的冲刷速率

坡度 θ/(°)	3°	7°	9°	11°	13°	15°	17°	19°
瞬时冲刷速率 $k(2^{\#})$/(cm·s^{-1})	2.25	2.48	2.57	2.7	2.95	3.83	3.74	3.95
平均冲刷速率 $k(1^{\#})$/(cm·s^{-1})	0.13	0.16	0.26	0.37	0.45	0.7	0.75	0.96

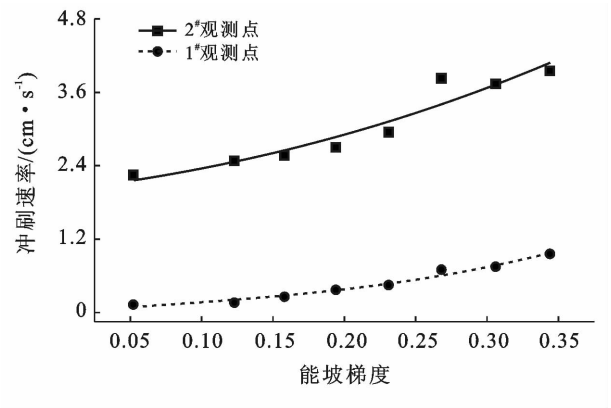


图 6　冲刷速率与能坡梯度间关系

2.5　冲刷速率与剩余切应力间关系

本次试验所采用的土体是根据原型级配人工配制而成,物质相对均匀,假定试验土体在冲刷过程中为均匀冲刷,则试验土体的代表粒径 D 保持不变,取中值粒径(见表 4);试验土体无黏,采用水中置换法测量其颗粒密度,多次测量求取平均值(表 4);此外,计算起动拖曳力所需其他参数同见表 4。基于此分析不同变量条件下(来流流量及沟床纵坡)冲刷速率与剩余切应力间的关系(见图 7)。冲刷速率与剩余切应力间呈正相关关系,这与许多学者(蒋芳市等[9];牛耀彬等[12];蒋芳市等[13];Huang 等[23])探讨的土壤剥蚀率与水流剪切力呈线性关系相一致。

$$\begin{cases} k(2^{\#})=0.045\,5\tau_s+1.963 & (r^2=0.848) \\ k(1^{\#})=0.0251\tau_s-0.201 & (r^2=0.949) \end{cases} \tag{10}$$

其中,2# 和 1# 观测点的拟合相关系数分别为 0.848,0.949,可信度较高;此外,由 1# 观测点冲刷速率的表达式可看出,该表达式的适用条件为 $\tau_{cn} \geqslant 8.04$,对应的物理含义为只有当剩余切应力达到一定程度后,方能起动固体物质进而产生冲刷,这与实际情况相对应。

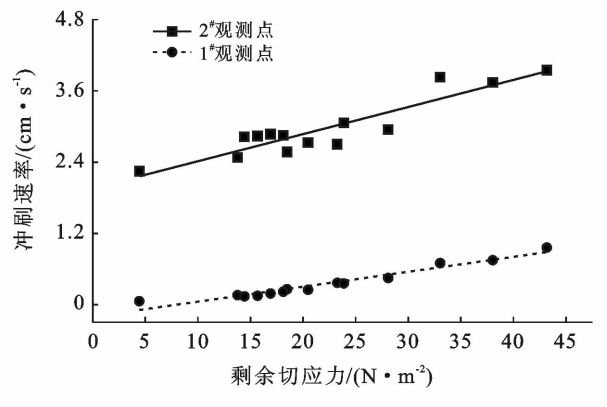


图 7　冲刷速率与剩余切应力间关系

在固体物质起动拖曳力保持稳定的基础上,固体物质冲刷主要取决于水流剪切力。若忽略水流对坡体内部的作用,单从径流水层对固体物质表层的作用得出,水流剪切力决定着固体物质起动冲刷的数量,进而决定着发生泥石流的规模。这一特征与水石流暴发特征类似,即当水流与固体物质充分作用后,主要表现为水流冲刷特征。

表 4　起动拖曳力模型计算所需参数

水的密度 ρ_w/(g·m^{-3})	颗粒密度 ρ_s/(g·m^{-3})	水流粘滞系数 ν/(m·s^{-2})	冲刷宽度 B/m	代表粒径 D/m	粒径参数 D^*/m	Shields 数 θ_{cr}
1.0	2.64	10～6	0.2	0.0033	83.84	0.047

2.6　细粒物质含量对冲刷速率的影响

表 5 为平均冲刷速率与细粒物质含量间关系。试验土体的初始质量含水率为 10.3%,含水量较为适中,结构较为松散,便于人工搅拌均匀,同时也为避免当含水率较高时,因人为扰动使得黏聚力充分发挥,使得固体物质间的黏聚力较强,而与野外固体物质状态不相符合。由表 5 可知,随着细粒物质含量的增多,固体物质的冲刷速率呈增大趋势,但增大的幅度较小。在无细粒物质添加时,固体物质均为具有一定棱角的碎屑颗粒,结构性质较为均匀。颗粒间相互支撑,导致颗粒物质的可压缩性较低,孔隙度较大,结构状态比较稳定,坡体物质在水流作用下,其结构状态几乎未发生改变,仅有极少的细小颗粒在大孔隙内发生有限移动。同时,颗粒之间的摩擦角相对较大,被水流移动的固体物质,颗粒间相互碰撞、摩擦作用较强,其冲刷速率相对较慢。当增加了一定量的细粒物质时,如 6%。此时,细粒物质充填在大孔隙内,当水流作用坡体时,细粒物质快速溶于水,从坡体的孔隙通道流出,携带细粒物质的水体相对于清水,对坡体物质的压力更大,对冲刷口处固体物质冲击力更强,当水流初次越过坡体后,便把坡体内大部分细粒物质携带出坡体,坡体物质整体下沉。随后,固体物质的冲刷过程与无细粒物质时的状态一致。相对于未添加细粒物质的堆积体,其前期冲刷速率增大,而后冲刷过程相同,故而,平均冲刷速率仅是微小增加。当细粒物质含量逐渐增大至一定程度时,如 12%。此时,大颗粒物质逐渐被细粒物质包裹,固体物质间的摩擦阻力及孔隙度逐渐降低,水流由开始进入坡体到流出坡体的速度降低,整个坡体物质完全接触水流后,一定含量的细粒物质的黏聚力并未发挥作用,黏

聚力较低，对固体物质起动反而起到润滑作用，这是因为当含有黏性的物质刚开始被水浸湿后，自由水能破坏颗粒间的黏结力[24]，在相同水动力条件下，更容易起动。此外，坡体内的水流也因携带黏性物质而变浑浊，对固体物质起动也起到一定润滑作用。故而，其冲刷速率相对较高。当细粒物质含量增加至将大颗粒物质充分包裹时，如 17%，20%。此时，固体物质结构状态相对紧密，孔隙度极具降低，当水流作用坡体物质时，来流流速大于坡体物质渗透速率，故而快速形成地表径流，水流从坡体表面迅速到达冲出口，位于冲出口的固体物质在径流作用下，被带出坡体，而后固体物质在有限渗流的作用下力学性质降低，进而被径流水层冲刷，坡体物质便在二者的综合作用下逐层向下侵蚀。而细粒物质含量增多，其润滑作用更强，水流的浑浊度更高，冲击能量也相应越大。故而，冲刷速率相对更大。

表 5 不同细粒物质含量对应的冲刷速率

≤0.25 mm 颗粒含量/%	1	6	12	17	20
冲刷速率/(cm·s^{-1})	0.157	0.172	0.183	0.197	0.213

3 结 论

利用水槽试验初步探究了泥石流固体物质的冲刷速率与来流流量、水力半径、沟床纵坡以及细粒物质含量之间的关系。结果表明，冲刷速率与水力半径间呈指数关系；与来流流量间呈正相关关系；与能坡梯度间呈指数关系；而与剩余切应力间呈线性正相关关系；对于初始含水率较低的固体物质，冲刷速率随着细粒物质含量的增大呈微小增大趋势。限于试验条件，来流流量及细粒物质含量的控制变量相对较少，后续可展开进一步探讨；从定性角度分析了细粒物质含量对泥石流固体物质冲刷速率的影响，在后续研究中需进一步开展模型试验或结合已有研究理论对微结构展开分析；冲刷速率与单因素间的关系进行了初步探讨，后续可开展冲刷速率与多因素间的耦合关系，为泥石流活动规模预测及防治工程设计进一步提供参考。

[参 考 文 献]

[1] 韩用顺，黄鹏，朱颖彦，等. 震区山洪泥石流野外监测与侵蚀产沙研究[J]. 水利学报，2012，43(S2)：133-139.

[2] 朱兴华，庄建琦，李亚哲，等. 弃渣型泥石流输沙速率模型试验研究[J]. 长江科学院院报，2017，34(9)：41-46.

[3] 陈宁生，刘美，刘丽红，等. 小流域中—低频泥石流与山洪输沙比例的讨论：以金沙江支流海子沟为例[J]. 成都理工大学学报(自然科学版)，2017，44(2)：225-231.

[4] 魏丽，胡凯衡，黎晓宇，等. 蒋家沟泥石流沟道年际冲淤变化特征分析[J]. 长江科学院院报，2017，34(9)：57-62.

[5] 游勇，程尊兰. 泥石流输沙对小江中下游河床演变的影响[J]. 灾害学，2003，18(2)：7-11.

[6] 韩用顺，梁川，韩军，等. 震区重力侵蚀及其产沙输沙效应研究：以震中牛圈沟为例[J]. 四川大学学报(工程科学版)，2012，44(S2)：110-116.

[7] 朱兴华，崔鹏，周公旦，等. 稀性泥石流冲刷规律的试验研究[J]. 水利学报，2012，43(S2)：85-91.

[8] 唐科明，张光辉，任宗萍，等. 坡面薄层水流分离土壤的动力学机理[J]. 水土保持学报，2011，25(4)：46-49.

[9] 蒋芳市，黄炎和，林金石，等. 坡面水流分离崩岗崩积体土壤的动力学特征[J]. 水土保持学报，2013，27(1)：86-89，229.

[10] 何小武，张光辉，刘宝元. 坡面薄层水流的土壤分离实验研究[J]. 农业工程学报，2003，19(6)：52-55.

[11] 张光辉，刘宝元，张科利. 坡面径流分离土壤的水动力学实验研究[J]. 土壤学报，2002，39(6)：882-886.

[12] 牛耀彬，高照良，刘子壮，等. 工程措施条件下堆积体坡面土壤侵蚀水动力学特性[J]. 中国水土保持科学，2015，13(6)：105-111.

[13] 蒋芳市，陈培济，黄炎和，等. 集中水流下土石混合崩积体坡面侵蚀水动力特征试验研究[J]. 水土保持学报，2017，31(6)：8-14，99.

[14] 王瑄，李占斌，郑良勇. 土壤剥蚀率与水流剪切力关系室内模拟试验[J]. 沈阳农业大学学报，2007，38(4)：577-580.

[15] 王瑄，李占斌，丁文峰，等. 土壤剥蚀率与水流剪切力关系试验研究[J]. 沈阳农业大学学报，2004，35(5)：592-594.

[16] 王雪松，谢永生. 模拟降雨条件下锥状工程堆积体侵蚀水动力特征[J]. 农业工程学报，2015，31(1)：117-124.

[17] 王兆印，黄金池，苏德惠. 河道冲刷和清水水流河床冲刷率[J]. 泥沙研究，1998 (1)：1-11.

[18] 梁志勇，匡尚富. 高含沙洪水冲刷规律的探讨[J]. 泥沙研究，1999 (6)：68-73.

[19] 徐友宁，曹琰波，张江华，等. 基于人工模拟试验的小秦岭金矿区矿渣型泥石流起动研究[J]. 岩石力学与工程学报，2009，28(7)：1388-1395.

[20] 周必凡，李德基，罗德富，等. 泥石流防治指南[M]. 北京：科学出版社，1991.

[21] 夏军强，王光谦，吴保生. 游荡型河流演变及其数值模拟[M]. 北京：中国水利水电出版社，2005.

[22] Van Rijn L C. Sediment transport, part I: bed load transport [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1984, 110(10): 431-455.

[23] Huang C, Laflen J M, Bradford J M. Evaluation of the detachment-transport coupling concept in the WEPP rill erosion equation [J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(3): 734-739.

[24] Grissinger E H. Resistance of selected clay systems to erosion by water [J]. Water Resource Research, 1996, 2(1): 131-138.