

坡度和流量对崩积体坡面细沟水流输沙能力的影响

高鹏宇, 詹振芝, 蒋芳市, 林金石, 黄惠玉, 沙圣坚, 易德龙, 黄炎和

(福建农林大学资源与环境学院, 福建省土壤环境健康与调控重点实验室, 福州 350002)

摘要: 为探究坡度及流量对崩岗崩积体土壤坡面细沟侵蚀输沙能力的影响, 精确计算细沟水流输沙能力, 建立坡面细沟输沙能力因子模型, 以崩岗崩积体土壤为研究对象, 进行室内水槽模拟试验研究。结果表明: (1) 不同流量条件下, 坡面细沟输沙能力随坡度的增大而增大, 且增幅随坡度的增加而增大, 可用一元线性方程表示; (2) 不同坡度条件下, 坡面细沟输沙能力随着流量的增大而增大, 可用幂函数表示; (3) 崩岗崩积体坡面细沟输沙能力因子模型为二元幂函数方程, 其中流量 (q) 和坡度 (S) 的指数分别为 1.054 和 0.617, 流量对细沟输沙能力的影响大于坡度; (4) 通过模型对比发现, Wu 模型、ANSWERS 模型及 Zhang 模型方程都无法很好地预测崩岗崩积体坡面细沟输沙能力。

关键词: 崩岗; 崩积体; 输沙能力; 模型

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0068-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.03.011

Effects of Slope and Flow on Sediment Transport Capacity of the Colluvial Deposit for Rill Flow in Benggang

GAO Pengyu, ZHAN Zhenzhi, JIANG Fangshi, LIN Jinshi,

HUANG Huiyu, SHA Shengjian, YI Delong, HUANG Yanhe

(Fujian Provincial Key Laboratory of Soil Environmental Health and Regulation,

College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002)

Abstract: This study aimed to explore the influence of slope and flow on sediment transport capacity of colluvial deposits for rill erosion, calculate the rill flow sediment transport capacity accurately and establish rill sediment transport capacity factor model. The soil of colluvial deposit was taken as the case and a flume was used to conduct the experiment. The results showed that: (1) Rill flow sediment transport capacity increased with slope gradients at different flow discharge, which could be described by liner equation; (2) Rill flow sediment transport capacity increased with the increasing flow discharge at different slope gradients and the relationship could be described by power equation; (3) Rill flow sediment transport capacity factor model could be described by a dual binary power function, the index of flow rate (q) and slope (S) were 1.054 and 0.617 respectively. The effect of flow discharge was superior to slope gradient in the power function; (4) Compared with Wu model, ANSWERS model and Zhang model, the model of this study was more suitable to predicted sediment transport capacity of colluvial deposits for rill erosion.

Keywords: benggang; colluvial deposit; sediment transport capacity; model

土壤侵蚀过程包括土壤颗粒的分离、搬运和沉积^[1]。水流的输沙能力是指细沟中水流能够携带泥沙的最大量, 是水流分离、搬运泥沙过程中的重要特征指标^[2-3]。在水流侵蚀的过程中, 当水流携沙量大于水流的输沙能力时, 坡面就会发生沉积; 反之, 则会发生侵蚀^[4-5]。因此, 输沙能力的精确估算对于侵蚀模拟和建立侵蚀模型具有重要意义。目前, 国内外学者通过室内外模拟试验建立了众多的坡面细沟水流

输沙能力因子模型。Foster 等^[6]在 1972 年通过评价多个不同冲刷水槽和小坡度的数据模型提出 Yalin 方程可以用于降雨条件下坡面的细沟输沙能力的评估; Nearing 等^[7]将 Yalin 模型应用于 WEPP 模型用来估计输沙能力; Beasley 等^[8]通过总结大量研究结果提出了 ANSWERS 模型; Zhang 等^[9]、袁殷等^[10]、Mahmoodabadi 等^[11]及 Wu 等^[12]通过室内坡面冲刷试验提出了以二元幂函数方程来模拟坡面细沟输沙

收稿日期: 2017-12-11

资助项目: 福建省自然科学基金项目(2017J01459); 国家自然科学基金项目(41571272)

第一作者: 高鹏宇(1992—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与治理研究。E-mail: 1359406444@qq.com

通信作者: 黄炎和(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与治理研究。E-mail: yanhehuang@163.com

能力。但是,由于试验对象以及坡度、流量等条件设计的差别,目前的模型方程均有差异。

崩岗是指在水力和重力的综合作用下,山坡土体受到破坏而崩塌和冲刷的侵蚀现象^[13-14]。崩积体是崩壁的重要组成部分,是崩壁上方土体被水流冲刷和受重力作用在崩壁下方堆积形成的物质,其特征主要是土质疏松,易侵蚀,含有大量砾石,其质量含量最高可达70%^[14],与目前国内外学者研究对象多为粒径在2 mm以下的细土^[9-12]有很大的差异;同时,崩积体坡度陡,可达40°以上^[14],而其他研究仅局限于25°以下坡度^[8-12]。因此,目前已有的模型能否精确模拟预测砾石含量高且坡度大的崩积体坡面的水流输沙能力,还需进一步验证。本研究通过设置不同的坡度和流量组合条件,以崩岗崩积体为试验对象进行室内水槽模拟试验,分析细沟水流输沙能力随坡度和流量

的变化特征,建立崩岗崩积体坡面细沟水流输沙能力的模拟方程,以深化对崩积体坡面细沟侵蚀过程的认识,进而为崩岗侵蚀区的治理提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试土壤

供试土壤于2017年5月18日取自福建省安溪县龙门镇(118°05' E, 24°57' N)。龙门镇位于安溪县东南部,地势属低山河谷盆地,属于亚热带气候区,年降水量1800 mm,年平均气温19℃。龙门镇是福建省乃至南方崩岗发生区的典型代表地区之一,崩岗数量达到1228个,崩岗侵蚀面积为246.77 hm²^[14],数量和面积分别占安溪县的9.57%和11.48%。崩岗崩积体为典型的花岗岩发育土体,砾石含量较高,土质疏松,结构性差,遇水易崩塌,极易被侵蚀。供试土壤的理化性质见表1。

表1 供试土壤理化性质

有机质/ (g·kg ⁻¹)	pH	颗粒分布/%						中值粒径 <i>d</i> ₅₀ /mm
		0~0.002 mm	0.002~0.05 mm	0.05~0.25 mm	0.25~2 mm	2~5 mm	5~10 mm	
1.68	5.19	2.01	22.58	15.92	29.45	25.39	4.66	0.79

1.2 试验设计

根据研究区暴雨发生频率在崩积体坡面上建立的小区上产生的单宽流量换算得到本试验的水流单宽流量,设置流量分别为 0.56×10^{-3} m²/s(4 L/min), 1.11×10^{-3} m²/s(8 L/min), 2.22×10^{-3} m²/s(16 L/min), 3.33×10^{-3} m²/s(24 L/min);崩积体的坡度可达40°,故设计本试验的坡度分别为15°,20°,25°,30°,35°;采用流量和坡度2因素完全组合试验,每组试验均重复3次,共60场。

1.3 试验装置

试验装置由供水系统、冲刷系统及加沙系统组成。为使细沟水槽能够稳固,将长、宽、高分别为400,12,10 cm的水槽嵌在液压式可变坡钢槽内(可调节坡度0~40°,长5 m,宽2 m,高1 m)。试验前,在水槽底部及两侧粘一层试验土壤(粒径<5 mm),以保持水槽底部及两侧粗度与试验地表及沟壁粗度相似。在离水槽最低端20 cm出的开头,嵌入1个规格为20 cm(长)×10 cm(宽)×10 cm(高)的有机玻璃盒,有机玻璃厚度为0.2 cm,故其内径为19.6 cm(长)×9.6 cm(宽)×9.8 cm(高),玻璃盒土样作为补充土来源,以保证当细沟水流接受供土后,水流流经时可以继续侵蚀携带土壤,使细沟水流流过出口时,其含沙量能够达到水流的输沙能力。供土装置采用传输带设计,在土样箱出土侧设置挡板控制出土高度,并通过电机控制传输带速度,准确和稳定的控制供土速率。试验装置示意图见图1。

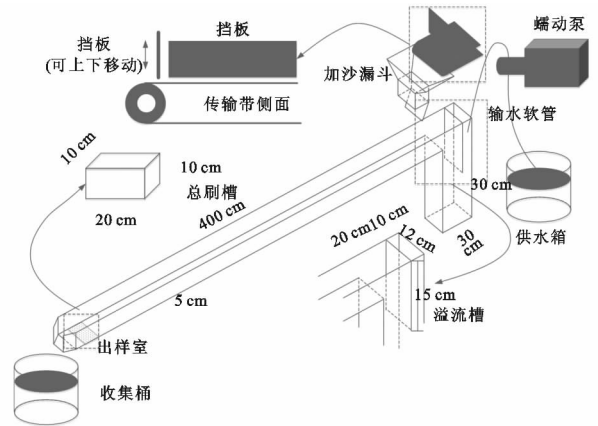


图1 试验装置示意

1.4 试验过程

崩积体土经过自然风干后,试验开始于2017年7月15日,一部分土样作为补充沙源,控制其含水率约为15%,密封48 h,使其水分均匀后放置待用,再将处理好的土样均匀地分层装入底部有若干小孔的有机玻璃盒内,填装之前,在玻璃盒底部平整的铺一层纱布,以便于玻璃盒内试验用土能够均匀吸水饱和,同时控制土壤容重在1.40 g/cm³,将装有土样的玻璃盒吸水24 h后待用。另一部分土样作为输沙试验的加沙漏斗的供沙源。

试验前,用液压式可变坡钢槽调节至试验所需坡度,用蠕动泵反复校正试验流量至预设流量(误差小于20 min),然后将处理好的土样放入水槽下端的有机玻璃盒内,并用薄铁片盖住,待水流稳定后,使用供土装置向水槽内供土,供土速率以水流搬运土壤且同

时有少量沉积在水槽床面为准。供土过程中使用铁丝不停的搅动,以使水流以饱和含沙量状态搬运土壤。待饱和含沙量水流流出水槽出口稍许,取下盖住补充沙源的薄铁片,并在水槽出水口处采集 5 个水沙样。试验结束后,在 105 °C 下烘干后称重,计算得出不同试验条件下的细沟水流输沙含沙量数据。

1.5 模型误差评价指标

选用的模型误差评价指标包括:相对误差(RE)、平均相对误差(MRE)、相对误差绝对值平均值(MARE)、决定系数(R^2)、模型有效系数(NSE)等^[14]。具体计算为:

$$RE = \frac{Q_i - P_i}{Q_i} \times 100\% \quad (1)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i - P_i}{Q_i} \times 100\% \quad (2)$$

$$MARE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Q_i - P_i}{Q_i} \right| \times 100\% \quad (3)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (4)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum (Q_i - P_i)^2}{\sum (O_i - \bar{O})^2} \quad (5)$$

式中: O_i 表示第 i 个样本实测值; P_i 表示第 i 个样本测算值; \bar{O} 表示实测平均值; \bar{P} 表示预测平均值; n 表示样本数,其中当 $NSE \geq 0.7$ 时,模型较好;当 $0.4 < NSE < 0.7$ 时模型一般;当 $NSE < 0.4$ 时,模型较差。

1.6 数理统计与分析

试验数据采用 Excel 2010 和 SPSS 18.0 进行统计分析,利用 Origin 9.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 细沟水流输沙能力随流量变化特征

由图 2 可知,不同坡度下,崩积体坡面细沟输沙能力随着流量的增大而增大随着流量的增大,增长幅度逐渐增大。相同坡度下,当流量达到 $3.33 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ 时,细沟输沙能力增长幅度最大,同时输沙能力达到最大。这是由于随流量的增加,相同坡度下细沟中水流的势能相应增大,在细沟冲刷过程中转化为对细沟土石混合泥沙的动能也增大,水流对土石混合泥沙的搬运能力则更大。同时,随着流量的增大,用于输移泥沙的载体(水体)就越多,这也是导致输沙能力随流量增而大增大的因素之一。Zhang 等^[9]、Wu 等^[12] 研究也证明了坡面细沟输沙能力随流量的增大而增大,说明虽然试验条件和设计各有不同,但是流量作为影响坡面水流输沙能力的重要因素对坡面水流输沙能力的影响是相同的。经过方程模拟可以发现,细沟输沙能力与流量的大小有很显著的关系,可

以用一元线性方程表达,其决定系数 R^2 达到 0.99 以上(表 2)。

由表 2 可知,随着坡度的增大,输沙能力与流量关系的一元线性方程表达式中斜率相应增大,说明输沙能力随流量增大的增幅会随着坡度的增大而增大。这是因为随着坡度增大,水槽中携带泥沙的水体以及试验土壤自身势能会随之增大,坡面细沟输沙能力的增幅也会随之增大。

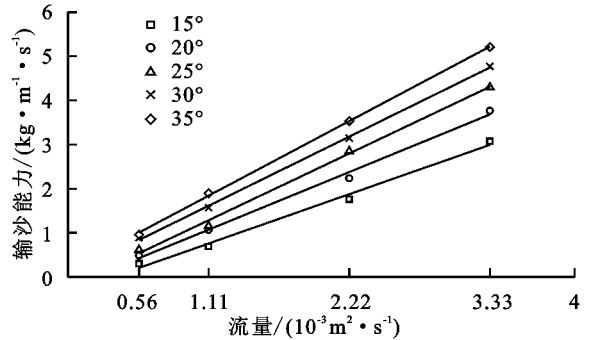


图 2 不同坡度下细沟输沙能力随流量变化

表 2 不同坡度下细沟输沙能力随流量变化的经验方程

坡度/(°)	回归方程	R^2	P
15	$y = 1006.7x - 0.3598$	0.993	0.01
20	$y = 1175.8x - 0.2338$	0.995	0.01
25	$y = 1362.2x - 0.2275$	0.997	0.01
30	$y = 1410.9x + 0.0465$	0.999	0.01
35	$y = 1522.4x + 0.1512$	0.999	0.01

注: y 为输沙能力($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$); x 为流量($10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)。

2.2 细沟水流输沙能力随坡度变化特征

由图 3 可知,不同流量条件下,崩积体坡面细沟的输沙能力随坡度的增加而增大。这是因为当坡度升高时,由于受到重力的影响,相同流量下的水流拥有更多转化为搬运泥沙动能的势能,输沙能力就更大;另外,当坡度变陡时,本试验采用的是崩积体土壤,砾石含量较大,故受到的重力影响就更加明显,砾石和细土在受到水流冲刷的动能以外自身也存在着向下滚动的势能,水流的势能和土石混合土自身的势能叠加之后导致输沙能力更大。通过方程模拟分析发现,不同流量下细沟输沙能力和坡度之间有显著的关系,可用幂函数方程表达,其决定系数 R^2 达到 0.90 以上(表 3)。

虽然王莎等^[3]、袁殷等^[10] 研究认为坡面细沟水流输沙能力随坡度的增大而增大,但是,其增长幅度明显高于本试验条件下输沙能力增长幅度,这是因为这些研究是在坡度 25° 以下进行的,而本试验设计坡度最高达到 35° ,随着坡度的增长,泥沙颗粒自身重力势能不是呈线性增长的,而是先增长然后逐渐趋于平缓,因此在坡度升高时,泥沙颗粒所受到的重力势能先增长后趋于平缓,输移泥沙颗粒的整体势能增长也趋于平缓,从而导致输沙能力的增幅逐渐平缓。

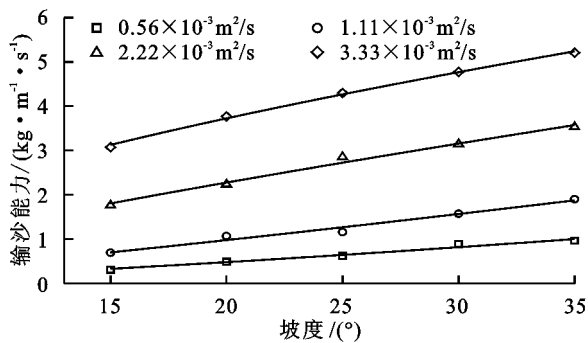


图 3 不同流量下细沟输沙能力随坡度变化

表 3 不同流量下细沟输沙能力随坡度变化的经验方程

流量/ ($10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	回归方程	R^2	P
0.56	$y=1.597x^{1.227}$	0.953	0.01
1.11	$y=2.706x^{1.013}$	0.972	0.01
2.22	$y=4.718x^{0.733}$	0.973	0.01
3.33	$y=6.429x^{0.546}$	0.990	0.01

注:输沙能力($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$); x 为坡度的正切值(m/m)。

2.3 细沟水流输沙能力因子模型

2.3.1 输沙能力因子模型 通过对不同条件下细沟水流输沙能力变化分析可以发现,输沙能力是坡度和流量相互作用产生的结果。因此,为了讨论细沟水流输沙能力在同时受到坡度和流量 2 方面作用的变化特征,本研究将细沟输沙能力随坡度和流量变化的数据进行多元统计回归分析,建立细沟输沙能力与坡度及流量关系的因子模型:

$$T_c = 2746.18S^{0.617}q^{1.054} \quad (R^2 = 0.992, \text{NSE} = 0.992, P < 0.01) \quad (6)$$

式中: T_c 为细沟输沙能力($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$); S 为坡度的正切值(m/m); q 为单宽流量(m^2/s)。

将试验实测值和通过模型计算得到的输沙能力模拟值进行统计(图 4)。由公式(6)和图 4 可知,细沟输沙能力与坡度及流量因子具有极显著的关系,可以用二元幂函数方程表达,其决定系数 R^2 高达 0.99 以上;模型模拟的数值接近实测值,模型效果好($\text{NSE} = 0.992 > 0.7$);并且流量 q 的幂函数(1.054)大于坡度 S 的幂函数(0.617)。因此,对于本试验,流量对细沟水流输沙能力的作用大于坡度。

表 4 各输沙因子能力模型与本试验输沙模型指数的比较

模型	模拟方程	坡度指数	流量指数	坡度/%	中值粒径/mm
ANSWERS 模型	$T_c = 146Sq^{0.5} (q \leq 0.046)$	1.000	0.500	<10.00	0.28
	$T_c = 14600Sq^2 (q > 0.046)$	1.000	2.000		
Zhang 模型	$T_c = 19831S^{1.227}q^{1.237}$	1.227	1.237	8.80~46.60	0.28
Wu 模型	$T_c = 224S^{0.914}q^{1.297}$	0.914	1.297	10.51~38.39	0.04
本试验	$T_c = 2746.18S^{0.617}q^{1.054}$	0.617	1.054	26.79~70.02	0.79

2.3.2 输沙能力因子模型比较 为评价其他输沙能力模型在本试验条件下的模拟精度,将本试验条件分别代入 ANSWERS 模型、Zhang 模型、Wu 模型得出其预测值,与实测值进行对比(图 5~图 7),并计算各

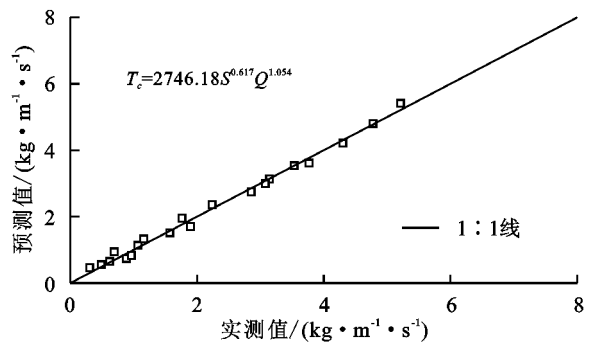


图 4 本研究实测值与模拟值对比

目前,国内外许多学者^[8-9,12]都通过模拟试验提出用二元幂函数表示坡面细沟水流输沙能力因子模型,但由于试验设备、土壤、设计以及人为操作等的不同,其常数以及流量 q 和坡度 S 的指数又各不相同。将各输沙因子能力模型与本试验条件下建立的崩积体坡面细沟水流输沙模型指数进行对比(表 4)。通过对比可以发现,本试验模型坡度指数分别比 ANSWERS 模型^[8]、Zhang 模型^[9]、Wu 模型^[12]坡度指数低 38.3%,49.7%,32.5%,这与本试验的坡度大于其他试验坡度有关。ANSWERS 模型、Zhang 模型、Wu 模型试验坡度范围分别为 <10%(6°),8.8%~46.6%(5°~25°),10.51%~38.39%(6°~21°),而本试验试验坡度范围为 26.79%~70.02%(15°~35°),本试验的坡度均大于他们的坡度,而当坡度增大到一定程度时,坡度对坡面输沙能力的影响反而会变得更小;另外,本试验模型流量指数分别比 ANSWERS 模型、Zhang 模型、Wu 模型流量指数低 47.3%,14.8%,18.7%,这是因为 ANSWERS 模型、Zhang 模型、Wu 模型试验采用的是粒径在 2 mm 以下的细土,而本试验采用的是砾石含量较高(30%)的崩岗崩积体土壤,中值粒径为 0.79 mm,含有砾石的崩岗崩积体土在接受水流的冲刷过程中,由于砾石增大了试验土壤与冲刷水槽面的摩擦力,从而削弱了水流搬运土壤的能力,进一步减小了流速对坡面细沟输沙能力的影响,导致本试验输沙模型中流量的指数相对于其他输沙模型较小。

输沙能力模型误差评价指标(表 5)。

通过观察 1:1 线图中散点的集中程度,可以判断该模型是否可以较好的模拟本试验条件下的输沙能力。显然,各模型 1:1 线图中散点分布在 1:1 线

附近,由分散到集中分别为 Zhang 模型、ANSWERS 模型和 Wu 模型,说明 3 种模型用来模拟本试验条件下的输沙能力值精度由小到大为 Zhang 模型、ANSWERS 模型和 Wu 模型。由表 5 可知,从决定系数 (R^2) 看来,可以发现决定系数都很高,这说明坡面细沟水流输沙能力与坡度和流量有很显著的关系;从相对误差绝对值平均值(MARE)来看,模型的优劣效果依次为 Wu 模型、Zhang 模型、ANSWERS 模型;从模型有效系数(NSE)看来,本试验(0.992) > Wu 模型(0.918) > ANSWERS 模型(0.771) > Zhang 模型(-0.703),说明 Zhang 模型无法精确的预测本试验条件下的细沟输沙能力。虽然 Wu 模型和 ANSWERS 模型用于模拟崩岗崩积体土壤细沟侵蚀能力的误差相对较低,但高于本试验模型。

总体来看,在各模型 1:1 线图中可以发现,当坡度和流量达到一定值以后预测值就会高于实测值。从试验设计考虑,Beasley 等^[8]、Zhang 等^[9]和 Wu 等^[12]试验设计坡度最大值均小于 25° ,而本试验坡度设计为 $15^\circ \sim 35^\circ$,在坡度小于 25° 情况下模拟出的模型当坡度和流量增大到一定程度,模型预测输沙能力的误差值就会明显偏大,这就证明细沟输沙能力的模拟存在着坡度影响能力趋缓的规律。这是因为随着坡度的增大,细沟中水流输送泥沙的动能和泥沙本身具有的势能逐渐增大,但细沟中泥沙和水流本身重力势能并不能随坡度的增大而线性增长,而是先增长后趋于平缓,当坡度达到一定值时,细沟中输沙水流的动能和泥沙本身的势能开始缓速增长,这就导致小坡度下模拟出的模型用来模拟大坡度情况下的输沙能力值会偏大于实际情况下的细沟输沙能力。

由于本试验对象(崩积体)自身具有砾石含量高、坡度高的特性,因此试验设计坡度达到 35° ,加之试验设备的差异等因素,都是造成试验结果不同的必然因素,这些影响因素都是造成其他模型预测崩积体坡

面细沟水流输沙能力误差较大的原因。相反,本试验通过模拟自然条件下崩积体坡面的输沙情况,较为精确地得到了模拟其输沙能力值的因子模型,这进一步深化了对崩积体坡面细沟侵蚀过程的认识,为崩岗侵蚀区的治理提供更有力的理论基础。

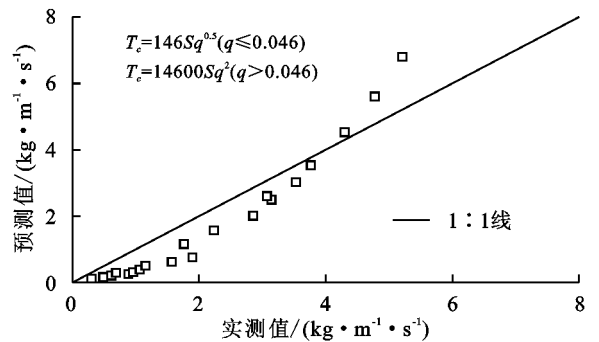


图 5 本研究实测值与 ANSWERS 模型预测值对比

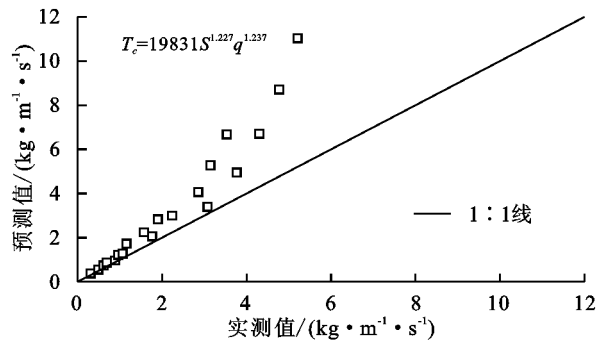


图 6 本研究实测值与 Zhang 模型预测值对比

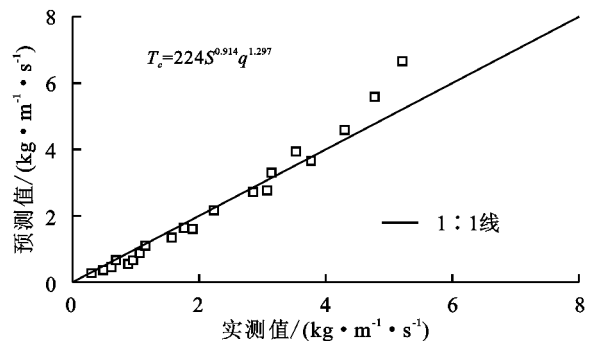


图 7 本研究实测值与 Wu 模型预测值对比

表 5 各输沙能力因子模型在本试验条件下模拟输沙能力的误差评价指标

模型	模拟方程	RE/%	MRE/%	MARE/%	R^2	NSE
ANSWERS 模型	$T_c = 146Sq^{0.5} (q \leq 0.046)$	-30.6 ~ 70.9	36.3	41.67	0.939	0.771
	$T_c = 14600Sq^2 (q > 0.046)$					
Zhang 模型	$T_c = 19831S^{1.227} q^{1.237}$	-111.8 ~ -8.5	-40.9	40.90	0.929	-0.703
Wu 模型	$T_c = 224S^{0.914} q^{1.297}$	-27.8 ~ 37.5	7.3	14.07	0.974	0.918
本试验	$T_c = 2746.18S^{0.617} q^{1.054}$	-50.6 ~ 16.9	-4.4	10.20	0.992	0.992

3 结论

(1)不同流量条件下,崩积体坡面细沟输沙能力随着坡度的增大而增大,可用一元线性函数表示,随着流量的增大,坡度越大,输沙能力增幅越明显。

(2)不同坡度条件下,崩积体坡面细沟输沙能力随流量的增加而增大,且增幅平缓,可用一元幂函数表示。

(3)不同坡度流量组合条件下,崩积体坡面细沟输沙能力与坡度和流量二者的共同作用密切相关,崩积体坡面细沟输沙能力因子模型为用坡度 S 和流量 q 表示的二元幂函数: $T_c = 2746.18S^{0.617} q^{1.054}$,其中流量的指数大于坡度的指数,流量对崩积体坡面细沟输沙能力的影响大于坡度。通过对比不同试验条件下坡面细沟输沙能力因子模型,可以发现细沟输沙能力

的增长存在坡度影响能力趋缓现象,当坡度达到一定程度,细沟输沙能力的增长速度会减缓。同时证明 Zhang 模型、ANSWERS 模型模拟崩积体坡面细沟水流输沙能力的模拟精度较弱,虽然 Wu 模型误差相对较低,但高于本试验模型。

参考文献:

- [1] 张光辉. 土壤分离能力测定的不确定性分析[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 1-6.
- [2] 闫丽娟, 余新晓, 雷廷武, 等. 坡面流输沙能力与土壤可蚀性参数对细沟土壤侵蚀过程影响的有限元计算模型研究[J]. 土壤学报, 2009, 46(2): 192-200.
- [3] 王莎, 王占礼, 袁殷, 等. 黄土坡面细沟水流输沙能力变化特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 104-107.
- [4] 赵宇, 陈晓燕, 米宏星, 等. 估算细沟含沙水流剥蚀率的改进方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 174-181.
- [5] Zhang Q, Dong Y, Li F, et al. Estimation of the sediment transport capacity in eroding ephemeral gullies with a flume experiment method [J]. *Catena*, 2015, 9: 1-7.
- [6] Foster G R, Meyer L D. Transport of soil particles by shallow flow [J]. *American Society of Association Executives*, 1972, 51(5): 99-102.
- [7] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, et al. A process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology [J]. *Transactions of the American Society of Association Executives*, 1989, 32(5): 1587-1593.
- [8] Beasley D B, Huggins L F, Monke E J. Modeling sediment yields from agricultural watersheds [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1982, 37(2): 113-117.
- [9] Zhang G H, Liu Y M, Han Y F, et al. Sediment transport and soil detachment on steep slopes: I. Transport capacity estimation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(4): 1291-1297.
- [10] 袁殷, 王占礼, 刘俊娥, 等. 黄土坡面细沟径流输沙过程试验研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 88-91.
- [11] Mahmoodabadi M, Ghadirri H, Rose C, et al. Evaluation of GUEST and WEPP with a new approach for the determination of sediment transport capacity [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 513: 413-421.
- [12] Wu B, Wang Z, Shen N, et al. Modelling sediment transport capacity of rill flow for loess sediments on steep slopes [J]. *Catena*, 2016, 147: 453-462.
- [13] 郝福星, 黄炎和, 林金石, 等. 指纹法研究花岗岩区典型崩岗小流域悬浮泥沙来源[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 45-49.
- [14] 蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 等. 坡度和雨强对崩岗崩积体侵蚀泥沙颗粒特征的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 974-982.
- [15] Wang Z, Yang X, Liu J, et al. Sediment transport capacity and its response to hydraulic parameters in experimental rill flow on steep slope [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 70(1): 36-44.
- [16] 俱战省, 文安邦, 严冬春, 等. 基于¹³⁷Cs、²¹⁰Pb 和 CSLE 的三峡库区小流域土壤侵蚀评估[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 75-80.
- [17] 符素华, 刘宝元, 周贵云, 等. 坡长坡度因子计算工具[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(5): 105-110.
- [18] Hickey R, Smith A, Jankowski P. Slope length calculations from a DEM within ARC/INFO grid [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 1994, 18(5): 365-380.
- [19] Fu S H, Wu Z P, Liu B Y, et al. Comparison of the effects of the different methods for computing the slope length factor at a watershed scale [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2013, 1(2): 64-71.
- [20] 中华人民共和国水利部水土保持司. 土壤侵蚀分类分级标准(SL 190-2007)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [21] 李秀彬, 马志尊, 姚孝友, 等. 北方土石山区水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 9-15.
- [22] 刘宝元, 阎百兴, 沈波, 等. 东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 1-8.
- [23] 刘宪春, 温美丽, 刘洪鹤. 东北黑土区水土流失及防治对策研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12(2): 74-76, 79.
- [24] 尹忠东, 李余波, 刘伟泽. 西南紫色土区水土流失调控原理与范式[J]. 人民长江, 2009, 40(3): 25-26.
- [25] 凡非得, 王克林, 熊鹰, 等. 西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征[J]. 生态学报, 2011, 31(21): 6353-6362.
- [26] Foster G R, Wischmeier W H. Evaluating irregular slopes for soil loss prediction [J]. *Transactions of the ASAE*, 1974, 17(2): 305-309.
- [27] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes [J]. *Transactions of the ASAE*, 1994, 37(6): 1835-1840.
- [28] 张宏鸣, 杨勤科, 王猛, 等. 沟道截断对分布式土壤侵蚀学坡长提取的影响[J]. 水利学报, 2017, 48(5): 568-575.

(上接第 67 页)