

不同坡度坡面径流输沙能力对集中流流量变化的响应

师宏强¹, 刘刚^{1,2}, 谷举¹, 周紫荆³, 李凯⁴

(1. 西北农林科技大学, 水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100;
2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 3. 四川农业大学,
四川温江 611130; 4. 四川农业大学, 四川雅安 625000)

摘要: 坡面水流的输沙能力是影响土壤侵蚀过程的重要参数之一, 加强坡面集中水流输沙能力的研究有助于深入理解集中流发生机理, 并为防治集中流侵蚀发生提供科学依据。采用室内集中流放水冲刷试验, 以黄土高原典型黄绵土为研究对象, 研究了集中流输沙能力与放水流量和坡度以及与单宽流量和坡度之间的关系, 同时对集中流力参数和输沙能力的相应关系进行了研究。结果表明: 集中流输沙能力随着坡度和放水流量的增加而增加。多元统计分析建立输沙能力与坡度和放水流量之间的幂函数关系发现坡度指标对输沙能力相对放水流量影响更大, 而在坡度和单宽流量作用下, 由于集中流在大坡度时汇集作用的影响下, 坡度指标影响减小。水流功率是描述集中流输沙能力最好的水动力学参数, 其次为单位水流功率和水流剪切力, 过水断面单位能描述效果最差。总体来说各水动力学参数均能够较好地拟合描述集中流输沙能力。

关键词: 集中流; 输沙能力; 放水流量; 单宽流量; 坡度; 水动力学参数

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)01-0025-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.01.005

Response of Sediment Transport Capacity Under Different Slope to the Change of Concentrate Flow Rate

SHI Hongqiang¹, LIU Gang^{1,2}, GU Ju¹, ZHOU Zijing³, LI Kai⁴

(1. State Key Laboratory of Erosion and Dryland Agriculture on the Loess Plateaus, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 3. Sichuan Agricultural University, Wenjiang, Sichuan 611130; 4. Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625000)

Abstract: As one of the important parameters, sediment transport capacity must be considered when developing physical models of soil erosion. It is necessary to research on the concentrate flow sediment transport capacity for a better understanding of rill erosion mechanism and for control purpose. An indoor concentrate scouring experiment was carried out to investigate the concentrate flow sediment transport capacity under different flow rates and slopes. Loessal soil, a kind of typical soil in the Loess Plateau, was prepared for this research. The relations between sediment transport capacity and inflow rate, slope were analyzed, the regression of sediment transport capacity with inflow rate and slope and with unit discharge per unit width and slope were established, and the relations between runoff hydrodynamic characteristics and sediment transport capacity were also analyzed. The results indicated sediment transport capacity increased with the increasing inflow rate and slope. Multivariate power function regression of sediment transport capacity with inflow rate and slope indicated slope was more influential on sediment transport capacity than that of inflow rate. However, unit discharge per unit width was more influential on sediment transport capacity than that of slope because of the flow convergence under steep slope. In general, all of runoff hydrodynamic characteristics can describe sediment transport capacity well, and the optimal factor in our research was stream power as it had

the largest determination coefficient. The results provide valuable information for a better understanding of the sediment transport capacity in concentrate flow on loess hillslope.

Keywords: concentrate flow; sediment transport capacity; inflow rate; unit discharge per unit width; slope; hydrodynamics

土壤侵蚀过程中存在着剥离、搬运和沉积 3 个相互影响又相互制约的子过程。坡面水流的输沙能力是控制土壤侵蚀过程的主要参数之一^[1]。径流输沙能力是指径流能够输沙的最大泥沙浓度的能力,径流输沙能力在侵蚀研究中占有重要地位,径流中实际泥沙含量小于输沙能力时剥离发生,而大于输沙能力则会形成沉积^[2]。可见径流中泥沙含量关系决定着侵蚀剥离过程,对于两者之间的关系存在 3 种观点:(1)剥离是一个独立的过程,与径流中含沙量无关;(2)使用概率密度函数预测径流剥离率;(3)使用剩余径流输沙能力模拟剥蚀率^[3]。其中由 Foster 等^[4]提出体现第 3 种关系的公式,得到了大量研究和验证,并被 WEEP 模型所采用^[5]。

$$\frac{D_r}{D_c} + \frac{q_s}{T_c} = 1 \quad (1)$$

式中: D_r 为细沟剥蚀率($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); D_c 为径流在清水状态时的剥离能力($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); q_s 为径流中泥沙含量($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$); T_c 为径流输沙能力($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$)。

在 WEEP 模型中, T_c 由搬运系数和水流剪切力确定,这也得到了大量学者的验证^[6-9],除此之外,输沙能力还能使用其他如水流功率、单位水流功率和过水断面单位能等水动力学参数进行确定^[7-8]。同时大量试验研究表明径流输沙能力均与放水流量和坡度呈现密切相关^[7-12],Govers^[12]总结提出了一个描述径流输沙能力与坡度和流量之间关系的方程:

$$T_c = aS^b q^c \quad (2)$$

式中: a 、 b 、 c 为常数; S 坡度(%); q 单宽流量(m^2/s)。

目前针对径流输沙能力 T_c 不同研究者通过不同研究方法手段进行模拟和计算。张光辉等^[7]使用均匀河沙模拟泥沙,在定床试验条件下通过不断增加径流中的泥沙含量至饱和,确定了其试验条件下径流输沙能力。考虑到张光辉等^[7]使用均匀河沙模拟泥沙与土壤性质并不完全一致,王占礼等^[8]使用黄土作为研究对象,通过相似的使用装置和方法研究了黄土条件下集中流输沙能力。上述定床试验对研究径流输沙机理和构建关系具有独特优势,而在细沟实际发育过程中径流会对坡面产生下切作用,因此不少学者在可下切的动床坡面进行试验研究。张科利等^[13]采用对室内填土模拟野外田间情况研究了在动床条件下

坡面细沟发展过程中的侵蚀输沙特征。雷廷武等^[14]使用集中流对动床条件下的模拟细沟进行冲刷,通过对不同长度沟长下取得的样品泥沙浓度进行组合,得到整个细沟的侵蚀过程样品测定不同沟长所对应的泥沙含量后,对泥沙含量与沟长之间的关系进行拟合,经理论分析计算随沟长无限地增加所对应的径流极限泥沙含量,从而确定相应径流条件下的输沙能力。上述方法对不同坡长分别取样,人为的打断了细沟发育的连续过程,因此,Zhang 等^[15]使用 10 种稀土元素对细沟分段示踪,确定了不同坡长段径流中泥沙浓度随沟长变化情况,从而在不人为打断细沟发育过程条件下计算获得集中流输沙能力。尽管如此,上述方法所模拟的细沟在宽度上被限制为 10 cm,这显然与真实细沟宽度随着沟壁坍塌而不断增加不符。因此,本文旨在通过室内土槽冲水的试验方法,真实连续地模拟集中流对坡面细沟发育剥离和输沙过程,分析不同坡度流量下集中流对黄土坡面剥离输沙情况,通过理论分析结合试验数据计算径流输沙能力,研究在黄土坡面集中流作用下输沙能力与坡度及流量和相关水动力学参数之间的关系,从而为深入理解集中流发生机理和预防集中流侵蚀发生提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本研究在中科院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨大厅开展。试验土壤为陕西省延安市黄绵土,颗粒组成为:砂粒 31.33%,粉粒 59.59%,黏粒 9.08%,有机质含量为 1.52 g/kg。试验前将土壤自然风干并过 5 mm 筛。

试验小区为长×宽×深分别为 5 m×1 m×0.5 m 的可调坡度升降钢槽^[16]。填土之前先在底层铺设 10 cm 厚的天然细沙,用透水纱布覆盖,以保证坡面能够顺利透水。填土厚度为 40 cm,以每层约 5 cm 的厚度分层装填压实,控制容重在 1.25 g/cm³ 左右。为减小坡面因装土造成的变异性,每次装好土后使用电动喷雾器对坡面进行均匀喷洒雾状水至坡面各处即将产流^[16]。

根据黄土高原地区典型雨强及坡度^[16],试验设

计4组放水流量(0.000 17, 0.000 25, 0.000 33, 0.000 41 m³/s即10, 15, 20, 25 L/min)和4个坡度(17.62%, 26.78%, 36.38%, 46.60%即10°, 15°, 20°, 25°), 放水流量与坡度相互交叉组合共16场次。试验前先将坡度设置为设计坡度, 然后将率定好的流量水管放置于坡面4.75 m处的正中间形成集中流, 待下方接水口产流后开始计时, 以1 min为时间间隔接取全部泥沙样品用以测定泥沙量和径流量。同时使用染色剂法测出集中流流速, 并使用尺子在坡面4个坡段测量坡面集中流宽。产流10 min后停止冲刷。

1.2 计算方法与统计分析

对WEPP模型中关于泥沙剥离与搬运公式(1)进行转化, 可将径流输沙能力 T_c 计算公式转化为:

$$T_c = \frac{q_s}{(1 - \frac{D_r}{D_c})} \quad (3)$$

式中: D_c 为径流在清水状态时的剥离能力(kg/(m²·s))。

D_c 表达的是径流在不受任何其他作用条件下的最大剥离能力, 计算公式为:

$$D_c = k_r(\tau - \tau_c) \quad (4)$$

式中: k_r 为径流剪切力情况下细沟可蚀性(s/m); τ 为径流剪切力(Pa); τ_c 为临界径流剪切力(Pa)。

水流剪切力(τ , Pa)反映坡面集中流在坡面下坡梯度方向产生一个对坡面土壤剥蚀力的参数, 计算公式为:

$$\tau = \rho g R J \quad (5)$$

式中: ρ 为水密度(kg/m³); R 水力半径(m), 由于集中流相对较薄, 计算时取径流深 H (m); J 为水力坡度(m/m), 计算时的可用正弦值近似代替。

$$H = \frac{R}{V W_t} \quad (6)$$

式中: R 为观测时段 t (s)内的径流量(m³); V 为观测时段所测的表层流速(m/s)乘以流速修正系数 k (0.67)所得的值^[17]; W_t 为试验 t 时间内所测量的4个坡段平均宽度(m)。

D_r 是指细沟在次侵蚀过程中考虑了径流中原有和本身剥离作用及沿途坍塌作用中泥沙后径流实际产生的剥蚀率。

$$D_r = \frac{E_r}{L W_t} \quad (7)$$

式中: E_r 为每个样品中所收集到的泥沙样(kg); L 为实际试验坡长, 4.75 m; q_s 为径流中泥沙含量(kg/(m·s)), 表达的是径流经过细沟剥离一段时间后到达出口处单位时间单位宽度的泥沙含量。

$$q_s = \frac{E_r}{W_t} \quad (8)$$

通过上述公式计算各取样时间段的 τ 相应的 D_c 后取平均值, 使用 q_s 、 D_c 及 D_r 平均值带入公式(2)中计算次冲刷场次条件下的径流输沙能力 T_c 。常用的水流动力学参数除了水流剪切力之外, 还有水流功率(ω)、单位水流功率(P)和过水断面单位能(E), 计算公式为:

水流功率(ω , N/(m·s))表征作用于单位面积的水流所消耗的功率, 反映剥蚀一定量土壤所需功率, 计算公式为:

$$\omega = \tau V \quad (9)$$

单位水流功率(P , m/s)是指径流作用于泥沙床面的单位重量水体所消耗的功率, 计算公式为:

$$P = V J \quad (10)$$

过水断面单位能量(E , m)为以过水断面最低点做基准面的单位水重的动能与势能之和, 计算公式为:

$$E = \frac{a V^2}{2g} + h \quad (11)$$

式中: a 为校正系数, 取为1^[18]。

公式(2)中流量 q 为单宽流量, 是指单位宽度下流量大小, 计算公式为:

$$q = \frac{R}{W} \quad (12)$$

使用Excel进行数据计算、绘图及一元回归分析, 使用SPSS 21进行多元统计分析。使用决定系数及(R^2)和根均方差RMSE作为判定各拟合公式拟合效果, R^2 越大, RMSE越小, 表明拟合公式拟合效果越好。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}} \quad (13)$$

2 结果与分析

2.1 径流输沙能力计算与分析

由1.2节分析可知, 集中流剥蚀能力为径流在清水状态下的极限剥离能力, 对其计算需要在清水条件下不考虑本身剥离作用及坍塌等其他作用所建立的剥蚀率与相应的径流剪切力为基础。本文采用陈浩^[19]在同地区同种土壤类型进行的仅考虑清水状态时的径流直接对土体表面作用所得剪切力对应的可蚀性参数0.55 s/m和临界剪切力2.27 Pa为依据, 建立对应的 D_c 方程(公式(14))。而集中流的剥蚀量 D_r 为考虑了径流中原有和本身剥离作用及沿途坍塌等作用后泥沙径流能量条件下所能够产生的实际剥蚀率。

$$D_r = 0.55(\tau - 2.27) \quad (14)$$

通过本试验各场次所测的平均水流剪切力, 使用公式(14)计算集中流在各次试验对坡面的剥蚀能力 D_c 。

同时通过本试验各场次所测的泥沙剥蚀量, 使用公式(7)计算在本试验条件下各场次集中流对坡面的实际剥蚀率 D_r 。使用公式(8)计算各场次冲刷试验的平均径

流含沙量 q_s , 将上述所计算剥蚀能力 D_c 、剥蚀率 D_r 以及径流含沙量 q_s 代入公式(3)计算相应的各场次的集中流输沙能力, 所得计算结果汇总形成表 1。

表 1 集中流输沙能力

坡度 / (°)	放水流量 / (L · min ⁻¹)	集中流剥蚀能力 (D_c) / (kg · m ⁻² · s ⁻¹)	集中流剥蚀量 (D_r) / (kg · m ⁻² · s ⁻¹)	径流中泥沙含量 (q_s) / (kg · m ⁻¹ · s ⁻¹)	输沙能力 (T_c) / (kg · m ⁻¹ · s ⁻¹)
		$D_c = 0.55(\tau - 2.27)$	$D_r = E_r / LW_t$	$q_s = E_r / W_t$	$T_c = q_s / (1 - D_r / D_c)$
10	10	1.05	0.07	0.32	0.34
	15	0.87	0.07	0.34	0.37
	20	6.07	0.16	0.75	0.77
	25	5.53	0.18	0.86	0.89
15	10	2.01	0.06	0.29	0.30
	15	3.81	0.09	0.43	0.44
	20	5.25	0.14	0.65	0.67
	25	4.82	0.17	0.80	0.83
20	10	3.23	0.08	0.39	0.40
	15	12.04	0.18	0.87	0.88
	20	14.13	0.21	0.99	1.00
	25	14.95	0.28	1.32	1.34
25	10	13.10	0.22	1.03	1.05
	15	23.37	0.32	1.53	1.56
	20	31.85	0.44	2.10	2.13
	25	31.54	0.50	2.35	2.39

2.2 径流输沙能力与坡度及流量间的关系

所计算的输沙能力为 0.34~2.39 kg/(m · s), 总的来说径流输沙能力随着放水流量和坡度的增加而增加(图 1)。在坡度不变时, 随着放水流量增加, 径流输沙能力亦快速增加, 使用幂函数对各坡度下输沙能力与放水流量进行拟合发现所拟合关系的决定系数均超过 0.85 的幂函数关系(表 2), 表明幂函数能够较好的描述两者之间关系, 这与已有研究^[7-8,20]结果一致。放水流量不变时, 集中流输沙能力随着坡度的增加呈现增幅越来越大的趋势, 这是因为对于放水流量不变时, 随着坡度的增加, 集中流所拥有的势能和相应的总能量增加, 因此造成集中流输沙能力也相应增加。对各放水流量下进行集中流输沙能力与坡度关系进行拟合发现指数函

数能够较好的描述两者之间关系(决定系数 $R^2 = 0.680 \sim 0.950$)。当坡度 $\leq 20^\circ$ ($S = 34.2\%$), 放水流量不变时, 随着坡度的增加, 集中流输沙能力并不会大幅度增加, 而在 25° ($S = 42.2\%$) 坡度时集中流输沙能力相对 20° 时大幅度增加, 这种现象在其他研究中也出现了在某一坡度时输沙能力开始明显增加的现象^[7-8]。对集中流对输沙能力与坡度 S 和放水流量 Q 进行多元统计分析, 建立不同流量及坡度条件下细沟水流输沙能力因子拟合公式(公式(15))。坡度和放水流量的对应指数分别为 1.834 和 0.972, 说明坡度对集中流输沙能力影响大于放水流量。

$$T_c = 4.697 S^{1.834} Q^{0.972} \quad n=16$$

$$R^2 = 0.875 \quad \text{RMSE} = 0.214 \quad (15)$$

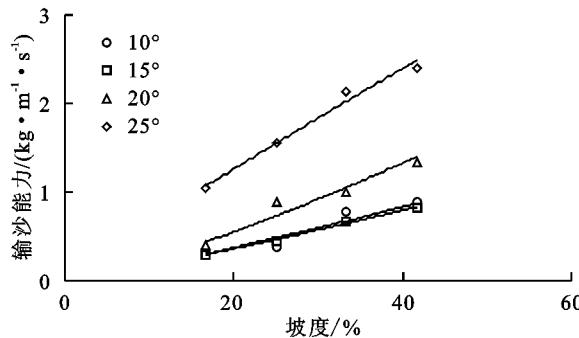
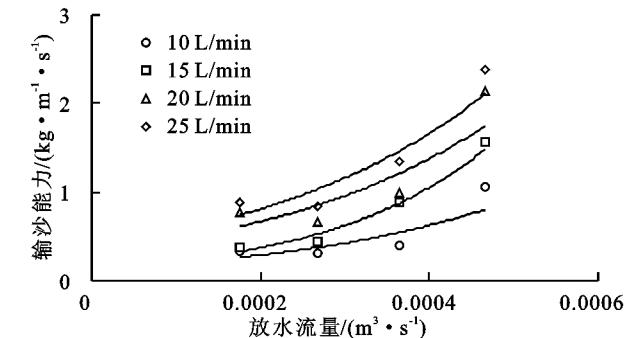


图 1 集中流输沙能力与放水流量及坡度关系

根据 Govers^[12]总结提出的描述输沙能力与坡度和单宽流量关系的公式(2), 对所有集中流水流输沙



能力随坡度和单宽流量变化的试验数据进行多元统计分析, 建立不同流量及坡度条件下细沟水流输

沙能力因子拟合公式(公式(16))。本试验条件下坡度和放水流量对应的幂函数指数分别为0.551和0.861,这表明在本试验条件下单宽流量对集中流输沙能力的影响大于坡度。而究竟两者谁对输沙能力影响更大,学者们所得结果并不一致。Zhang等^[7]研究结果表明两者指数分别为1.227和1.237,两者相差不大,Wang等^[8]所得相应指数分别为0.98和1.20,坡度作用明显小于放水流量作用,Beasley等^[21]在流域非点源污染模型(Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation,ANSWERS)中流量小于等于0.046时相应的指标为1.0和0.5,坡度作用大于放水流量作用,流量大于0.046时对应的指标为1和2,放水流量作用大于坡度作用。与放水流量和坡度对输沙能力的拟合

结果不同,在单宽流量和坡度拟合输沙能力所得结果坡度对输沙能力影响变小,这是由于随着坡度的增加,径流在侵蚀过程中在坡面上更加集中^[22],径流宽度更小,因此在相同放水流量时所计算出来的单宽流量比坡度小对应的放水流量时的要大得多,从而相应放大放水流量作用导致坡度作用减小。同时,使用单宽流量和坡度对输沙能力拟合效果要比放水流量和坡度拟合效果要好($R^2=0.977 > 0.875$; $RMSE=0.092 < 0.214$),但是考虑到单宽流量还需要对侵蚀过程中进行径流宽度测量,因此在实际计算过程中仍可使用放水流量和坡度对集中流输沙能力进行简要计算。

$$T_c = 40.311S^{0.551} q^{0.861} \quad n=16 \\ R^2 = 0.977 \quad RMSE = 0.092 \quad (16)$$

表2 输沙能力与放水流量和坡度关系

坡度/(°)	拟合方程	决定系数 R^2	放水流量/(L·min ⁻¹)	拟合方程	决定系数 R^2
10	$y = 7156.111Q^{1.158}$	0.859	10	$y = 0.122e^{0.044S}$	0.680
15	$y = 5862.978Q^{1.138}$	0.992	15	$y = 0.113e^{0.060S}$	0.950
20	$y = 26814.189Q^{1.267}$	0.942	20	$y = 0.298e^{0.041S}$	0.736
25	$y = 3340.450Q^{0.925}$	0.989	25	$y = 0.361e^{0.041S}$	0.829

2.3 本试验结果准确性验证

雷廷武等^[23]的研究中,所使用的土壤与本研究一致,试验坡度比本试验更多($5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$)单宽流量在本试验范围内($0.000\ 33, 0.000\ 67, 0.001\ 33\ m^2/s$),他们对泥沙含量与沟长之间的关系进行拟合,经理论分析计算随沟长无限的增加所对应的径流极限泥沙含量确定输沙能力的方法。为了验证本试验的准确性,使用本文中所得到的公式(16)对计算文献中试验条件下的输沙能力,所得结果与原文中所得输沙能力进行对比(图2)。两者具有决定系数 R^2 达到0.945的过原点线性关系。图2中拟合直线越靠近1:1线表明两组数据的一致性越好,两者拟合直线斜率为1.157,说明雷廷武等^[23]所得输沙能力与本试验所得的公式(15)计算输沙能力比较接近,验证了本试验结果的准确性。同时从图2中可以看出,雷廷武等^[23]所得输沙能力结果略微大于公式(15)所计算结果,这可能与前人在试验过程中未考虑径流汇集导致实际径流宽减小单宽流量增大有关。

2.4 输沙能力与径流剪切力及水流功率间关系

径流输沙能力的获得是一个力和能量转化的过程,径流的动能和势能在泥沙剥离和搬运过程中逐渐转化用于对泥沙的剥离和搬运。集中流输沙能力分别随着水流剪切力、水流功率、单位水流功率以及过水断面单位能增加而增加(图3)。经过拟合分析发现输沙能力与水流剪切力和水流功率分别存在决定

系数为0.949和0.968的线性关系(公式(17),公式(18)),而与单位水流功率和过水断面单位能分别均存在决定系数为0.960和0.938的幂函数关系(公式(19),公式(20))。从决定系数来看,使用径流功率是描述集中流输沙能力的最好的水动力学参数,其次为单位水流功率和水流剪切力,过水断面单位能描述效果最差。总体来说各力学参数均能够较好的拟合描述集中流输沙能力。

$$T_c = 0.033\tau + 0.240 \quad n=16 \\ R^2 = 0.949 \quad RMSE = 0.251 \quad (17)$$

$$T_c = 0.121\omega + 0.246 \quad n=16 \\ R^2 = 0.968 \quad RMSE = 0.107 \quad (18)$$

$$T_c = 570.166P^{1.018} \quad n=16 \\ R^2 = 0.960 \quad RMSE = 0.141 \quad (19)$$

$$T_c = 1574.870 E^{1.713} \quad n=16 \\ R^2 = 0.938 \quad RMSE = 0.172 \quad (20)$$

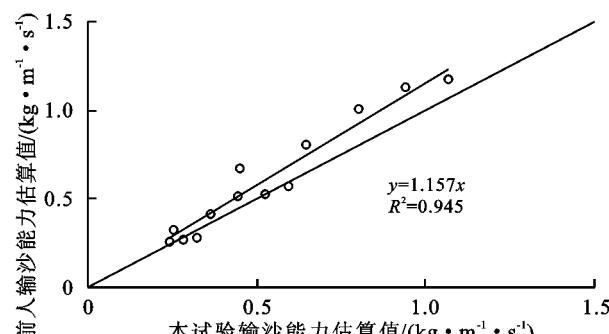


图2 前人试验与本试验得到输沙能力估算值的对比

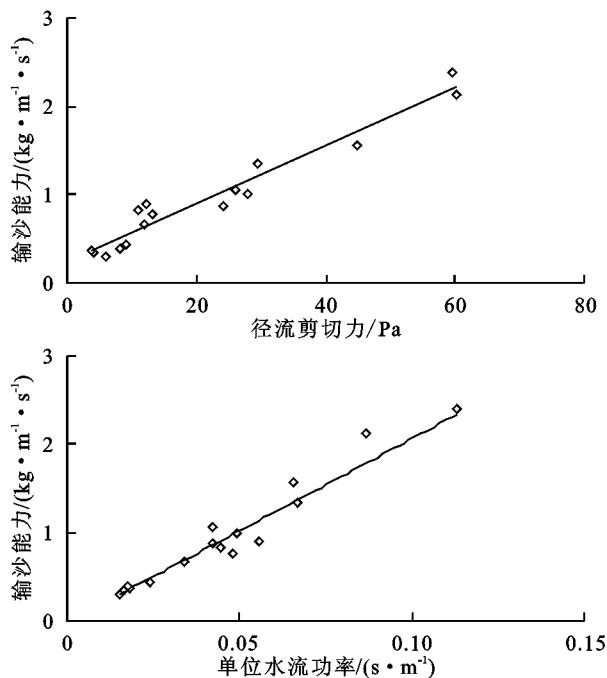


图 3 集中流输沙能力与侵蚀动力参数的关系

3 结论

本研究在坡面上直接放水冲刷,对坡面集中流及其剥蚀情况进行连续观察,通过理论分析结合试验结果计算出集中流输沙能力,试验方法相对之前相关研究方法更为符合集中流对坡面侵蚀及细沟发育实际情况。集中流输沙能力随着坡度和放水流量的增加而相应增加。在坡度不变时集中流输沙能力与放水流量呈较好的幂函数关系,而在放水流量不变时集中流输沙能力与坡度之间存在较好的指数函数关系。通过多元统计分析建立输沙能力与坡度和放水流量之间的幂函数关系发现坡度指标对输沙能力相对放水流量来说影响更大,而在坡度和单宽流量作用下,由于集中流在大坡度时汇集作用的影响下,坡度指标影响减小。同时,使用单宽流量和坡度对输沙能力拟合效果比放水流量和坡度拟合效果好,但是考虑到放水流量和坡度对输沙能力拟合更为快捷方便,因此在操作过程中可以使用放水流量和坡度对集中流输沙能力进行简要计算。通过将集中流输沙能力与常用的水动力学参数进行拟合发现,水流功率是描述集中流输沙能力最好的水动力学参数,其次为单位水流功率和水流剪切力,过水断面单位能描述效果最差。总体来说各力学参数均能够较好地拟合描述集中流输沙能力。

参考文献:

- [1] Lei T W, Nearing M A, Haghghi K, et al. Rill erosion and morphological evolution: A simulation model [J]. Water Resources Research, 1998, 34(11): 3157-3168.
- [2] Yu B F, Zhang G H, Fu X D. Transport capacity of overland flow with high sediment concentration [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 20(C4014001): 1-10.
- [3] Zhang G H, Liu Y M, Han Y F, et al. Sediment transport and soil detachment on steep slopes: II. Sediment feedback relationship [J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(73): 1298-1304.
- [4] Foster G R, Meyer L D. Transport of soil particles by shallow flow [J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1972, 51(5): 99-102.
- [5] 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 Agricultural Engineers, 1989, 32(5): 1587-1593.
- [6] Yalin Y S. An expression for bed-load transportation [J]. Journal of Hydraulics Division- American Society of Civil Engineers, 1963, 89(3): 221-250.
- [7] 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.
- [8] Wang Z L, 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 & Water Conservation, 2015, 70(1): 36-44.
- [9] Ali M, Sterk G, Seeger M, et al. Effect of hydraulic parameters on sediment transport capacity in overland flow over erodible beds [J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2012, 16(4): 591-601.
- [10] Wilfried E. Empirical relations for the sediment trans-

- port capacity of interrill flow [J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2010, 16(6): 513-532.
- [11] Prosser I P, Rustomji P. Sediment transport capacity relations for overland flow [J]. *Progress in Physical Geography*, 2000, 24(2): 179-193.
- [12] Govers G. Empirical relationships on the transporting capacity of overland flow: Transport and deposition processes [M]. USA: LAHS Publ, 1990: 45-63.
- [13] 张科利, 秋吉康弘, 张兴奇. 坡面径流冲刷及泥沙输移特征的试验研究 [J]. 地理研究, 1998, 17(2): 163-170.
- [14] 雷廷武, 张晴雯, 赵军, 等. 细沟侵蚀动力过程输沙能力试验研究 [J]. 土壤学报, 2002, 39(4): 476-482.
- [15] Zhang Q W, Lei T W, Huang X J. Quantifying the sediment transport capacity in eroding rills using a REE tracing method [J]. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(2): 591-601.
- [16] 肖海, 刘刚, 刘普灵. 集中流作用下黄土坡面剥蚀率对侵蚀动力学参数的响应 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 106-111.
- [17] Li G. Effect of saltating sediment load on the determination of the mean velocity of overland flow [J]. *Water Resources Research*, 1997, 33(2): 341-348.
- [18] 康宏亮, 王文龙, 薛智德, 等. 北方风沙区砾石对堆积体坡面径流及侵蚀特征的影响 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 125-134.
- [19] 陈浩. 黄土坡面细沟水流分离动力学过程试验研究 [D]. 陕西: 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [20] 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.
- [21] Beasley D B, Huggins L F. ANSWERS User's Manual [S]. West Lafayette: Department of Agriculture Engineers, Purdue University, 1982.
- [22] Armstrong A, Quinton J N, Heng B C P, et al. Variability of interrill erosion at low slopes [J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2011, 36(1): 97-106.
- [23] 雷廷武, 张晴雯, 闫丽娟. 细沟侵蚀物理模型 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.

(上接第 24 页)

- [74] Gong Y, Shen Z, Liu R, et al. A comparison of single- and multi-gauge based calibrations for hydrological modeling of the Upper Daning River Watershed in China's Three Gorges Reservoir Region [J]. *Hydrology Research*, 2012, 43(6): 822-832.
- [75] Shrestha M K, Recknagel F, Frizenschaf J, et al. Assessing SWAT models based on single and multi-site calibration for the simulation of flow and nutrient loads in the semi-arid Onkaparinga catchment in South Australia [J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 175(9): 61-71.
- [76] Gan T Y, Dlamini E M, Biftu G F. Effects of model complexity and structure, data quality, and objective functions on hydrologic modeling [J]. *Journal of Hydrology*, 1997, 192(1/4): 81-103.
- [77] Coffey M E, Taraba J L, Fogle A W, et al. Statistical

procedures for evaluating daily and monthly hydrologic model predictions [J]. *Transactions of the Asae American Society of Agricultural Engineers*, 2004, 47(1): 59-68.

- [78] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations [J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 885-900.
- [79] Krause P, Boyle D P, Se F B. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment [J]. *Advances in Geosciences*, 2005, 5(5): 89-97.
- [80] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, Williams J R. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009 [R]. Temple, Texas: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Texas Agricultural Experiment Station, Technical Report, 2011.