

不同土壤容重水平下喀斯特黄壤分离能力水动力学特性

冯梦蝶, 陈展鹏, 何丙辉, 梁珂, 张海香, 郑颖, 毕贇斐, 李天阳

(西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 通过开展不同流量(20,30,40,50,60 L/min)条件下的室内模拟细沟水流冲刷试验,研究不同容重(1.06,1.15,1.18,1.21 g/cm³)对喀斯特黄壤分离能力(D_c)的影响,并建立土壤分离能力预测经验模型。结果表明:流量与容重均显著影响土壤分离能力,当容重为 1.06 g/cm³时, D_c 随流量呈幂函数递增,而在其他更高的容重条件下, D_c 随流量呈线性增加;同一流量条件下, D_c 随容重增加呈线性减小,且减少趋势在高流量条件下更为明显;幂函数方程可分别描述 D_c 与水流剪切力(τ)、水流功率(ω)、单位水流功率(P)、过水断面单位能量(E)间的关系,利用水流剪切力来预测土壤分离能力($R^2=0.96$)更为理想;细沟可蚀性系数(K_τ 、 K_ω 、 K_P 、 K_E)及临界水动力学值(τ_c 、 ω_c 、 P_c 、 E_c)随容重增加均呈减小趋势,且容重与细沟可蚀性系数(K_τ 、 K_ω 、 K_P 、 K_E)间存在线性关系。研究结果为阐明喀斯特地区土壤侵蚀机理、建立该地区土壤侵蚀过程模型提供理论依据。

关键词: 喀斯特; 水动力学特性; 土壤分离能力; 容重

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2021)02-0001-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.02.001

Hydraulic Characteristics Related to Karst Yellow Soil Detachment Capacity Under Different Bulk Densities

FENG Mengdie, CHEN Zhanpeng, HE Binghui, LIANG Ke,

ZHANG Haixiang, ZHENG Ying, BI Yunfei, LI Tianyang

(Key Laboratory of Eco-environment in the Three Gorges Reservoir Region,

Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715)

Abstract: Flume experiments were conducted with the combinations of five flow rates (20, 30, 40, 50, and 60 L/min) to clarify the effects of hydraulic characteristics on yellow soil detachment capacity (D_c) under different bulk densities (1.06, 1.15, 1.18, and 1.21 g/cm³) in karst area, and establish the prediction model for D_c . The results showed that both flow rate and bulk density significantly affected D_c . When the bulk density was 1.06 g/cm³, D_c increased with the flow rate as a power function, while D_c increased with the flow rate as a linear function under other higher bulk density conditions. Under the same flow condition, D_c decreased with the increase of bulk density, and the reduction trend was more obvious under the higher flow condition. Power functions could be used to describe the relationships between D_c and shear stress (τ), stream power (ω), unit stream power (P), and unit energy (E), respectively, while τ showed the best predictability ($R^2=0.96$). The erodibility values (K_τ , K_ω , K_P , and K_E) and critical values (τ_c , ω_c , P_c , and E_c) corresponding to hydraulic parameters all presented decreased trend with the increasing bulk density, and these erodibility values were negatively linearly correlated with bulk density. The results will provide theoretical basis for understanding the mechanism of soil erosion in karst area and establishing soil erosion process models.

Keywords: karst; hydraulic characteristics; soil detachment capacity; bulk density

土壤分离过程指在降雨击溅和径流冲刷作用下, 土壤颗粒被外营力分散破坏、脱离土体的过程,该过程是土壤侵蚀的起始,为后续的泥沙输移提供初始的泥沙来源^[1-2]。随着水流含沙量的增加,土壤分离速

率随之降低,这是因为泥沙输送所消耗的能量增加,分离新土壤颗粒的能量减少^[3-4]。因此,土壤分离能力 D 被定义为径流含沙量为零时坡面径流的最大分离速率^[5]。有研究^[6-7]表明,径流的水动力学参数与土壤的分离过程密切相关。目前,学者们主要集中于研究土壤分离能力与剪切力^[8]、水流功率^[9]和单位水流功率^[10]等水力参数之间的定量关系;Nearing 等^[11]通过变坡水槽试验研究各水动力学参数对土壤分离能力的影响;Zhang 等^[12]通过 0~46.6% 坡度范围内的原状土水槽试验探究各水动力学参数与土壤分离能力间的定量关系。此后,学者们^[5,13-14]陆续对水动力学参数与土壤分离能力间的数学关系展开研究,但两者间的数学关系尚未统一。当前,对于特定的水动力学条件下容重与土壤分离能力间关系的研究相对较少,Wang 等^[15]研究发现,原状土容重与土壤分离能力呈显著的线性负相关。

我国西南喀斯特地区由于其自然因素及集约的农业生产活动,极易发生水土流失,进而导致该区域生态退化、石漠化程度加重^[16-17]。目前,针对土壤分离能力的研究主要集中在黄土高原地区,而在西南喀斯特地区的研究较少。不同土壤类型的特征属性相差较大,显著影响水动力学参数与土壤分离能力之间的关系。因此,本文根据喀斯特槽谷区实际坡度与土壤容重,在不同的水动力条件下,定量研究细沟水流水动力学特性对不同容重喀斯特黄壤分离能力的影响,建立相应的数学经验模型,为阐明该地区土壤侵蚀机理、定位土壤侵蚀关键点位、建立喀斯特槽谷区土壤侵蚀过程模型提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究区域位于重庆东南部酉阳土家族苗族自治县境内龙潭背斜槽谷(108°57'14"—108°57'37"E, 29°22"—29°45"N),海拔 382~548 m,槽谷流域总面积为 1 677 km²,其中喀斯特地区面积为 1 276.31 km²,石漠化面积为 183 km²,分别占流域面积的 76%和 11%。酉阳县水资源丰富,地下河流极多,年均降水量为 1 000~1 500 mm,约为年均蒸发量 2 倍,年平均相对湿度 79%,年平均风速 0.8 m/s。年均气温 14.6 ℃,年平均日照时间 1 131 h。

1.2 样品采集与处理

于 2018 年 6 月在酉阳县麻旺镇青椒示范基地的顺层坡上野外样品采集。该研究区为典型喀斯特地貌,土壤类型为黄壤,典型土地利用类型为经果林(花椒地)、灌草地、林地、荒地。采用 100 cm³ 环刀采集 4 种土地利用类型土样,密封后带回实验室分析容重。同时,在所有样地上随机选择样点 10 个,用四分

法采集样地表面 0—10 cm 土层混合土样,装入塑料袋运回实验室,室内弃除土壤中的砾石、草根等杂物后,风干、研磨,过 2 mm 筛后备用。

土壤容重与土壤饱和导水率由环刀法测得,土壤颗粒组成采用吸管法测定,土壤有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定。土壤基本理化性质测定均设置 3 次平行试验组,有机质含量 32.45 g/kg,10 ℃ 土壤饱和导水率 4.04 mm/min,粒径分布中砂粒(2~0.02 mm)52.03%、粉粒(0.02~0.002 mm)22.19%、黏粒(<0.002 mm)25.77%,荒地容重 1.18 g/cm³,灌草地容重 1.21 g/cm³,林地容重 1.06 g/cm³。

1.3 试验设计

由图 1 可知,土壤分离试验在长 4 m、宽 0.12 m、深 0.1 m 的矩形截面的变坡钢制水槽完成。该钢制水槽上端带有长 0.24 m、宽 0.2 m、高 0.4 m 的水箱,其内部由钢制挡水隔板与水箱双侧内壁焊接,底部留有约 3 cm 高的水流通通道,以便水流平稳进入冲刷槽内。钢制水槽两侧内壁及槽底面均用油漆粘有约 5 mm 厚的试验土壤,以模拟自然条件下的土壤糙率状况,同时也使整个试验过程中糙率保持不变。钢制水槽的水箱可用 PVC 管与置于旁侧供水池(长 4 m、宽 1.5 m、高 1.5 m)内的水泵(功率 350 W,扬程 6 m,流量 7.5 m³/h)连接,可通过阀门控制流量,距阀门 2 m 处连接涡轮流量计(流量范围 0.45~9.00 m³/h),此外,钢制水槽底面距下端出口 0.5 m 处设有圆形孔(10.5 cm),用于放置冲刷环刀土样(直径 10 cm)。以研究区域顺层坡的实际情况为依据,水槽坡度设计为 15°。

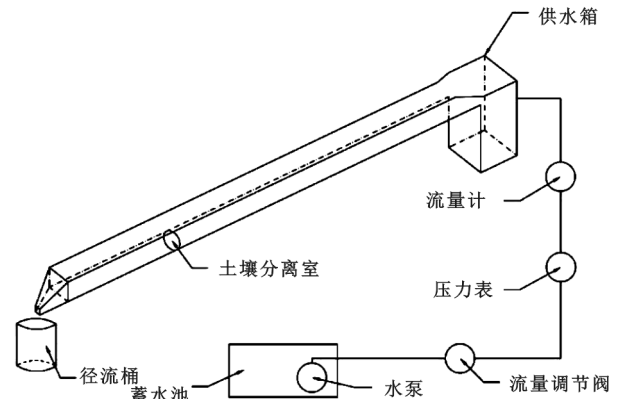


图 1 水槽试验装置示意

考虑研究区自然降雨强度、先前的研究以及经果林(花椒地)、灌草地、林地、荒地实际容重,土壤分离试验在 5 个流量(20,30,40,50,60 L/min)下进行,设置 4 个容重梯度(1.06,1.15,1.18,1.21 g/cm³),即进行 20 个组合的冲刷试验,每个组合进行 3 次平行试验,共完成 60 次冲刷。各次冲刷试验所用土壤样品均来自均匀混合且过筛后的土样,土壤理化性质无显著差异。

1.4 水力学参数测量

将通过 2 mm 筛的黄壤样品分 5 层填入直径 10 cm、高 6.37 cm、体积 500 cm³ 环刀中,控制填入土壤样品的重量,使环刀内的土样容重达到设定值。之后采用微型雾状喷水壶喷水使土壤含水量达到 18% 后,静置 48 h,使土壤水分达到静态平衡。最后将装好的土样放入塑料盒内饱和,逐渐增加塑料盒内水深(5 次),直到水面低于土样表面 1 cm 时为止,保持水位 24 h 后用于试验^[18]。将装入环刀的冲刷土样转移至水槽下端的圆形孔,调节土样表面与水槽底面齐平后,用钢板盖住土样,启动水泵供水。通过阀门控制水流流量,涡轮流量计监测流量,保证流量达到试验设计值。调节流量后,待水槽内水流稳定后,用游标卡尺(精度 0.01 mm)测定水槽内水深(h)。在距下端出口 0.6,1 m 位置设置 2 个测定断面,分别测定距两侧边 1 cm 处以及断面中点位置处的水深,每个点测 3 次取平均值作为该点水流深度,共获取 6 个径流深 h 数据,再取其平均值作为该次试验的水流深 h ^[17]。采用染色(高锰酸钾溶液)法测定表面流速 V_s :在距下端出口 2 m 处向水流快速注入高锰酸钾溶液,用秒表记录染色水体前端通过距下端出口 0.6 m 处的时间,用于计算流速。同次试验重复测定流速 15 次,取其平均值作为该次试验的表面流速 V_s 。同时监测水流温度,计算出水流雷诺数 Re ,判断水流流态,计算水流平均流速 V 。雷诺数 Re 利用公式(1)~(3)计算^[19]:

$$Re = \frac{V_s R}{\nu} \tag{1}$$

$$R = \frac{hb}{2h + b} \tag{2}$$

$$\nu = \frac{0.01775 \times 10^{-4}}{(1 + 0.0337t + 0.000221t^2)} \tag{3}$$

式中: Re 为雷诺数; V_s 为表面流速(m/s); R 为水力半径(m); ν 为水运动黏滞系数(m²/s); b 为水槽宽(m); h 为径流深(m); t 为试验用水温度(℃)。本试验设计的 5 组流量条件下,雷诺数 Re 值在 2 363~6 811 区间,水流流态均为紊流。将表面流速 V_s 乘以校正系数 0.8,获得水流平均流速 V ^[18]。

水流剪切力 τ 、水流功率 ρ 、单位水流功率 P 、过水断面单位能量 E 利用公式(4)~(7)计算^[8,20]:

$$\tau = \rho g R S \tag{4}$$

$$\omega = \tau V \tag{5}$$

$$P = VS \tag{6}$$

$$E = \frac{\alpha V^2}{2g} + h \tag{7}$$

式中: τ 为水流剪切力(Pa); ρ 为水的密度(kg·m³); R 为水力半径(m); S 为水力坡降(m/m); ω 为水流

功率(m/s); g 为重力加速度(m/s²); h 为径流深(m); V 为平均流速(m/s); P 为单位水流功率(m/s); E 为过水断面单位能量(cm); α 为动能修正系数,常取为 1; h 为径流深(m)。

1.5 土壤分离能力 D_c 测量

当圆筒内土壤分离深达到约 2 cm 时立刻停止供水,记录试验时间,将环刀内未被分离的土样以及完成分离试验的土壤均烘干称重,分别记录下烘干重,用于计算土壤分离能力^[4,20]:

$$D_c = \frac{W_F - W_L}{\Delta T A_d} \tag{8}$$

式中: D_c 为土壤分离能力(kg/(s·m²)); W_f 为未分离的土样烘干重(kg); W_L 为分离后的土样烘干重(kg); ΔT 为分离试验历时,即分离试验开始时间与结束时间差(s); A_d 为土壤分离面积,即圆筒横截面积(m²)。

1.6 细沟可蚀性及临界水流剪切力

由于土壤基质本身对水流冲击有一定的抵抗能力,水流作用强度往往需要达到一定临界值才能引起土壤分离。在细沟侵蚀研究中,常采用方程来研究细沟可蚀性及临界水动力学值^[21]:

$$D_c = K_{HP} (HP - HP_c) \tag{9}$$

式中: K_{HP} 为对应于水动力学指标的可蚀性因子; HP 为对应的水动力学指标; HP_c 为土壤分离发生时的水动力学临界值。

1.7 数据处理

采用 SPSS 21 软件进行数据处理和分析。采用 Excel 2018 和 AutoCAD 2018 进行绘图。利用双因素方差分析(Two-way ANOVA)分别研究流量和容重对土壤分离能力的主效应以及二者的交互效应,显著性水平设置为 $P < 0.05$ 。采用回归分析法,建立土壤分离能力与各水动力学参数间的数学关系。

2 结果与分析

2.1 流量与容重对土壤分离能力的影响

对不同容重和流量下的土壤分离能力 D_c 进行主效应和交互效应分析。由表 1 可知,在容重、流量单独与交互作用下 D_c 均差异极显著($P < 0.01$)。不同容重及流量影响下的 D_c 达到极显著差异($P < 0.01$),在容重和流量的交互作用下, D_c 也同样表现出极显著性差异($P < 0.01$)。

表 1 不同容重和流量土壤分离能力显著性检验

因变量	影响因素	df	F	P
土壤分离能力	容重	3	390	<0.01
	流量	4	232	<0.01
	容重×流量	12	50	<0.01

在同一流量条件下, D_c 随着容重的减小逐渐增加。在大流量条件下,这一趋势尤为显著。当流量为

60 L/min, 容重为 1.06 g/cm^3 时的 D_c 是容重 1.21 g/cm^3 时的 24 倍(图 2a)。

同一容重条件下, D_c 随着流量的增加而增加。

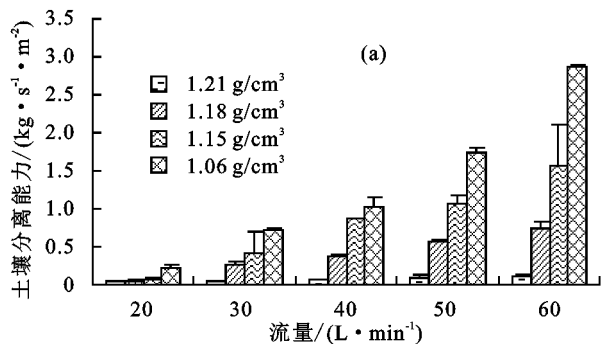


图 2 不同流量和容重下土壤分离能力的变化情况

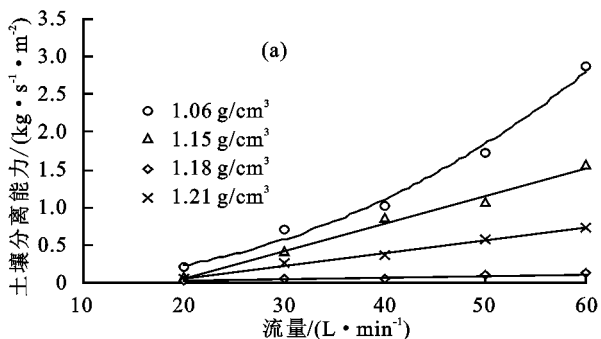
2.2 流量和容重与土壤分离能力的数学关系

通过回归分析, 建立不同土壤容重下 D_c 与流量的关系见图 3a。当容重为 1.06 g/cm^3 时, D_c 随流量呈幂函数递增; 而在其他更高的容重条件下, D_c 随流量呈线性增加。

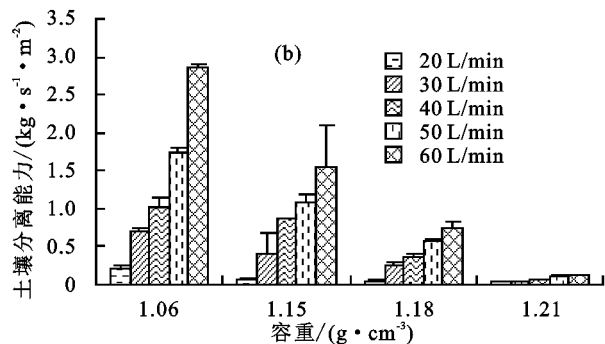
同一流量条件下, D_c 随容重增加呈线性减小, 且减少趋势在高流量条件下更为明显(图 3b)。通过线性函数拟合得出各流量条件下的临界容重值。

$$20 \text{ L/min}; D_c = -1.22(\rho - 1.22) \quad (10)$$

$$30 \text{ L/min}; D_c = -4.22(\rho - 1.24) \quad (11)$$



在小容重条件下, 这一趋势尤为显著。当容重为 1.06 g/cm^3 , 流量为 60 L/min 时的 D_c 是流量为 20 L/min 时的 D_c 的 14 倍(图 2b)。



$$40 \text{ L/min}; D_c = -6.14(\rho - 1.24) \quad (12)$$

$$50 \text{ L/min}; D_c = -13.06(\rho - 1.23) \quad (13)$$

$$60 \text{ L/min}; D_c = -18.14(\rho - 1.22) \quad (14)$$

公式(10)~(14)决定系数分别为 0.98, 0.95, 0.81, 0.97 和 0.95, ANOVA 检验结果表明各方程均达到显著水平($P < 0.05$)。随着流量的增加, 各方程的斜率逐渐增加, 表明土壤越易分离。随流量增加, 临界容重值先增大后减小, 范围为 $1.22 \sim 1.24 \text{ g/cm}^3$, 且相差不大, 表明当黄壤容重超过 1.24 g/cm^3 时, 极难被分离, 且临界容重值与流量间无明显规律。

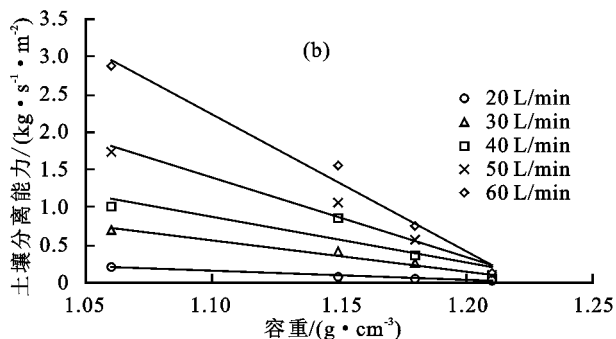


图 3 土壤分离能力与流量和容重的关系

2.3 土壤分离能力与水动力学参数的关系

从表 2 可以看出, 水流剪切力 τ 范围为 $8.76 \sim 19.03 \text{ Pa}$, 平均为 14.36 Pa ; 水流功率 ω 范围为 $8.59 \sim 28.90 \text{ kg/s}^3$, 平均为 18.24 kg/s^3 ; 单位水流功率 P 范围为 $0.24 \sim 0.39 \text{ m/s}$, 平均为 0.32 m/s ; 过水断面单位能量 E 范围为 $0.053 \sim 0.126 \text{ cm}$, 平均为 0.08 cm 。

利用回归分析建立 D_c 与 τ 、 ω 、 P 、 E 的数学关系见表 3。 D_c 与上述水动力学参数均呈显著幂函数相关, τ 的 R^2 平均值为 0.96; ω 的 R^2 平均值为 0.95; P 的 R^2 平均值为 0.89; E 的 R^2 平均值为 0.90。利用 τ 和 ω 预测 D_c 方程的 R^2 高于利用 P 和 E 预测 D_c 方程的 R^2 , 表明 τ 和 ω 预测 D_c 的效果更好。

当容重为 1.15 g/cm^3 时, 各预测方程水动力学参数指数均为最大, τ 指数为 3.98, ω 指数为 2.54, P 指

数为 6.71, E 指数为 3.39, 说明此容重条件下 D_c 对各水动力学参数的敏感性最高。

2.4 不同容重黄壤细沟可蚀性及临界水动力学值

利用公式(9)线性回归拟合不同容重下 D_c 与各水动力学参数的关系, 各容重条件下 D_c 与各个水动力学指标, 拟合结果均达到极显著水平($P < 0.01$) (表 4)。水流剪切力可蚀性系数 K_τ 、水流功率可蚀性系数 K_ω 、单位水流功率可蚀性系数 K_P 、过水断面单位能量可蚀性系数 K_E 均随容重增加呈现减小趋势; 临界剪切力 τ_c 、临界水流功率 ω_c 、临界单位水流功率 P_c 、临界过水断面单位能量 E_c 均随容重增加呈现减小趋势(表 4)。

利用回归分析建立容重与细沟可蚀性系数间的数学关系(图 4)可知, 容重与 K_τ 、 K_ω 、 K_P 、 K_E 呈线性

关系($P<0.05$),而容重与各临界水动力值间无明显数学关系。

表 2 不同流量下水力参数及土壤分离能力变化

流量 $q/$ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	平均流速 $V/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	水流剪切力 τ/Pa	水流功率 $\omega/$ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$)	单位水流功率 $P/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	水断面单位 能量 E/cm	土壤分离能力 $D_c/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2})$			
						1.06 g/cm^3	1.15 g/cm^3	1.18 g/cm^3	1.21 g/cm^3
20	0.98	8.76	8.59	0.25	0.053	0.21	0.07	0.04	0.03
30	1.13	12.35	13.96	0.29	0.066	0.71	0.41	0.26	0.04
40	1.22	14.66	17.95	0.32	0.083	1.02	0.86	0.36	0.06
50	1.31	17.00	22.26	0.34	0.095	1.74	1.07	0.56	0.10
60	1.52	19.03	28.90	0.39	0.126	2.87	1.56	0.74	0.12

表 3 不同容重土壤分离能力与水动力学参数拟合关系

容重 $\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	水流剪切力 τ/Pa		水流功率 $\omega/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-3})$		单位水流功率 $P/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$		过水断面单位能量 $E/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	
	方程式	R^2	方程式	R^2	方程式	R^2	方程式	R^2
1.06	$D_c=1.7 \times 10^{-5} \tau^{3.27}$	0.99 *	$D_c=2.4 \times 10^{-3} \omega^{2.12}$	0.98 *	$D_c=7.4 \times 10^2 P^{5.75}$	0.94 *	$D_c=1.37 \times 10^3 E^{2.90}$	0.94 *
1.15	$D_c=1.5 \times 10^{-5} \tau^{3.98}$	0.97 *	$D_c=4.1 \times 10^{-4} \omega^{2.54}$	0.94 *	$D_c=1.3 \times 10^3 P^{6.71}$	0.84 *	$D_c=2.64 \times 10^3 E^{3.39}$	0.86 *
1.18	$D_c=2.2 \times 10^{-5} \tau^{3.59}$	0.96 *	$D_c=4.4 \times 10^{-3} \omega^{2.28}$	0.92 *	$D_c=2.9 \times 10^2 P^{6.00}$	0.82 *	$D_c=5.72 \times 10^3 E^{3.03}$	0.83 *
1.21	$D_c=8.3 \times 10^{-4} \tau^{1.65}$	0.93 *	$D_c=3.0 \times 10^{-3} \omega^{1.09}$	0.95 *	$D_c=2.16 P^{3.03}$	0.96 *	$D_c=2.94 E^{1.52}$	0.96 *

注: * 表示方程在 0.01 水平下差异显著。

表 4 不同容重黄壤细沟可蚀性及临界水动力学值

容重 $\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$K_\tau/$ ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)	$\tau_c/$ Pa	$K_\omega/$ ($\text{s}^2 \cdot \text{m}^{-2}$)	$\omega_c/$ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$)	$K_P/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$P_c/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$K_E/$ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$)	$E_c/$ cm
1.06	0.244	9.00	0.130	8.16	19.04	0.248	36.18	0.048
1.15	0.142	8.79	0.073	7.44	10.75	0.243	20.19	0.045
1.18	0.067	8.46	0.034	6.73	4.97	0.238	9.35	0.042
1.21	0.009	6.01	0.004	2.29	0.65	0.207	1.23	0.027

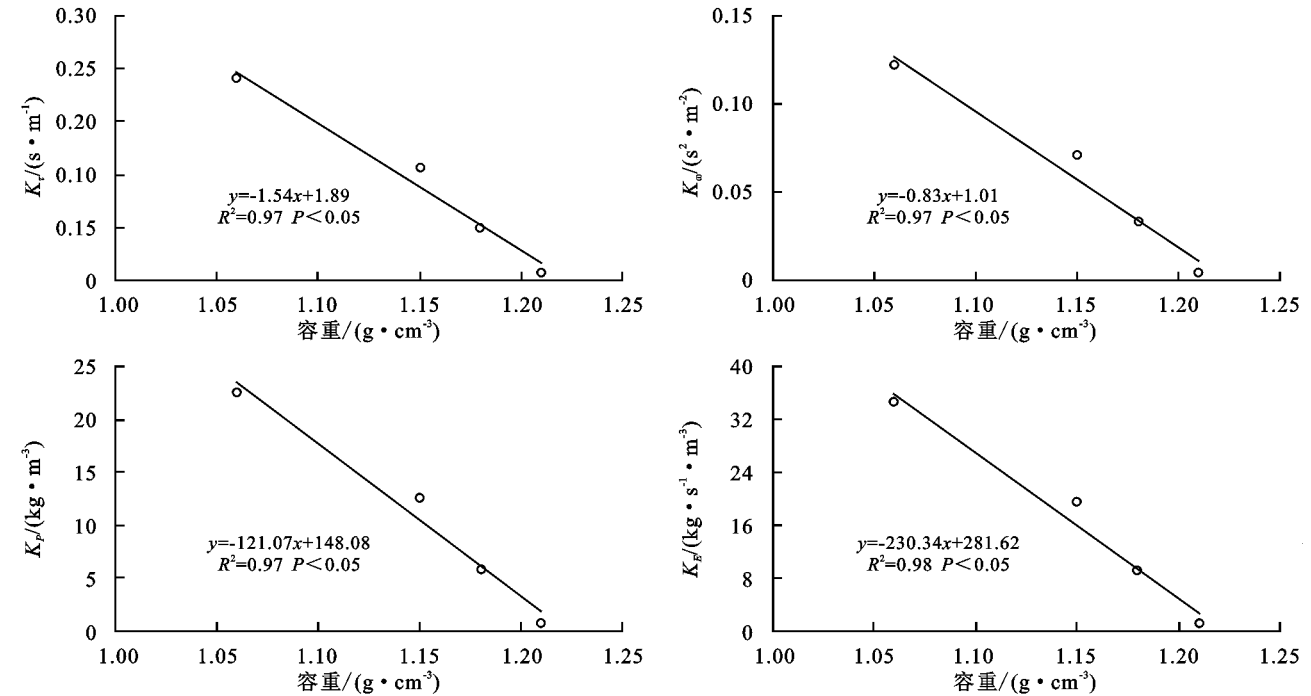


图 4 容重与细沟可蚀性系数关系

3 讨论

3.1 土壤分离能力与容重和水动力学参数的关系

本研究结果表明,容重为 1.06 g/cm^3 时,随流量增加, D_c 呈幂函数增加,而在其他更大的容重条件下,随着流量增加, D_c 呈线性增加,这与何小武等^[1]

的研究结果相似。Li 等^[22] 在容重为 1.3 g/cm^3 的紫色土坡面研究发现,坡度 $\geq 10^\circ$ 时, D_c 与流量间呈幂函数相关;张光辉等^[18] 在容重为 1.2 g/cm^3 的褐土研究中发现,坡度较小时,随着流量的增大土壤分离速率呈幂函数增加,当坡度为 46.6% 时,流量与土壤分

离速率间呈线性关系。上述结果说明, D_c 与流量究竟是幂函数关系还是线性函数关系可能与土壤质地、坡度、容重相关,需要更多试验数据进一步明确。

本试验结果表明, D_c 与水流剪切力 τ 、水流功率 ω 、单位水流功率 P 、过水断面单位能量 E 间呈幂函数正相关,这与 Zhang 等^[12] 研究结果一致。Xiao 等^[23] 研究结果表明, D_c 与 τ 、 ω 呈幂函数正相关,与 P 及 E 呈线性正相关;Wang 等^[24] 研究结果表明, D_c 与 τ 呈幂函数正相关,而与 ω 、 P 及 E 呈线性正相关;Li 等^[22] 研究结果表明, D_c 与 τ 、 ω 、 P 及 E 呈幂函数正相关。对预测 D_c 的精确度而言,本研究结果表明, τ 和 ω 是相对较好的水动力学指标。一些学者^[14,25] 认为, ω 比 τ 更适合用于模拟 D_c 。但本研究利用 τ 预测土壤分离能力方程的 R^2 稍大于利用 ω 预测土壤分离能力方程的 R^2 ,表明 τ 比 ω 更适合用于土壤分离能力预测,同时 ω 本身是 τ 与流速的函数,因此利用 τ 来预测 D_c 更为理想。

Wang 等^[24] 试验设计黄土容重为 1.20 g/cm^3 ,预测模型中 τ 的指数为 3.18;Zhang 等^[12] 研究中试验设计褐土容重为 1.20 g/cm^3 ,预测模型中 ω 的指数为 1.62;Li 等^[22] 研究中试验设计紫色土容重为 1.31 g/cm^3 ,预测模型中过水断面单位能量 E 的指数为 3.42。本研究中,当容重为 1.21 g/cm^3 时, τ 的指数仅有 1.65, ω 指数仅有 1.09, E 的指数仅为 1.52,均小于上述研究,可能是因为本试验试供土壤为黄壤,黏粒含量和有机质含量高于上述研究中的紫色土、黄土和褐土,当容重较大时,径流很难将土壤分离表面;本试验设计流量小于 Zhang 等^[12] 研究中的流量,水流能量不足,难以将其分离,因此在下一步的研究中,应加大试验设计流量。

3.2 不同容重黄壤细沟可蚀性及临界水动力学值

本试验结果表明,各细沟可蚀性系数(K_τ 、 K_ω 、 K_P 、 K_E)随容重增加均呈现减小趋势,这可能是因为坡面土壤颗粒之间具有黏结力,径流要分离土壤颗粒必须首先克服它们之间的相互作用力,容重增加后,孔隙度减小,土壤颗粒间的黏结力增加,土壤更紧实,具有较强的抗侵蚀能力,因此细沟可蚀性系数减小^[15]。本试验发现,临界水动力学值(τ_c 、 ω_c 、 P_c 、 E_c)随容重增加而减小,但已有研究^[26] 表明,临界水动力学参数并不适宜揭示土壤分离机制;Zhu 等^[22,27] 研究认为,采用临界水动力学参数描述土壤分离能力有一定的局限性,因此需要更多的研究来验证临界水动力参数描述土壤分离能力的适用性及揭示土壤性质对土壤分离能力的影响机制。

先前对于土壤分离进行的研究中,试验设计的土壤容重范围为 $1.20 \sim 1.31 \text{ g/cm}^3$,因此接下来对细沟可蚀性及临界水动力学值比较中均用本试验容重为 1.21 g/cm^3 时黄壤所对应数值。黄壤水流剪切力可蚀性系数 K_τ (0.09 s/m) 低于 Shen 等^[25] 黄土研究获得的水流剪切力可蚀性系数 K_τ (0.55 s/m),水流功率可蚀性系数 K_ω ($0.04 \text{ s}^2/\text{m}^2$) 低于黄土 K_ω ($0.42 \text{ s}^2/\text{m}^2$),单位水流功率可蚀性系数 K_P (0.65 kg/m^3) 也远低于黄土 K_P (10.58 kg/m^3),临界剪切力 τ_c (6.01 Pa) 高于黄土 τ_c (2.31 Pa),临界水流功率 ω_c (2.29 kg/s^3) 高于黄土 ω_c (0.69 kg/s^3),临界单位水流功率 P_c (0.207 m/s) 高于黄土 P_c (0.018 m/s)。黄壤水流剪切力可蚀性系数 K_τ (0.09 s/m) 低于 Li 等^[22] 紫色土研究获得的水流剪切力可蚀性系数 K_τ (0.11 s/m),水流功率可蚀性系数 K_ω 、单位水流功率可蚀性系数 K_P 、过水断面单位能量可蚀性系数 K_E 均低于紫色土,临界水流剪切力 τ_c (6.01 Pa) 高于紫色土分离时的临界水流剪切力 τ_c (2.98 Pa),表明相较于紫色土和黄土,黄壤更难分离,分离时需要更多的能量,这可能是因为黄壤的黏粒含量(25.77%)高于紫色土(20.84%)和黄土(8.7%),同时有机质含量也高于紫色土和黄土,黄壤的黏结力更大,从而导致其更难分离^[25]。

4 结论

(1) 流量与容重均显著影响土壤分离能力,当容重为 1.06 g/cm^3 时, D_c 随流量呈幂函数递增,而在其他更高的容重条件下, D_c 随流量呈线性增加;同一流量条件下, D_c 随容重增加呈线性减小,且减少趋势在高流量条件下更为明显。

(2) 土壤分离能力与水流剪切力、水流功率、单位水流功率、过水断面单位能量的幂函数可以较好预测土壤分离能力,用水流剪切力来预测土壤分离能力更为理想。

(3) 细沟可蚀性系数(K_τ 、 K_ω 、 K_P 、 K_E)及临界水动力学值(τ_c 、 ω_c 、 P_c 、 E_c)随容重增加均呈现减小趋势,且容重与细沟可蚀性系数(K_τ 、 K_ω 、 K_P 、 K_E)间存在线性关系。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张光辉.坡面水蚀过程水动力学研究进展[J].水科学进展,2001,12(3):395-402.
- [3] Moore I D, Burch G J. Modeling erosion and deposition: Topographic effects [J]. Transactions of the ASAE,

- 1986,29:1624-1630.
- [4] Zhang G H, Liu B Y, Nearing M A, et al. Soil detachment by shallow flow[J].Transactions of the American Society of Agricultural Engineers,2002,45(2):351-357.
- [5] Wang Y, Cao L X, Fan J B, et al. Modelling soil detachment of different management practices in the red soil region of China[J].Land Degradation and Development,2017,28:1496-1505.
- [6] Hairsine P B, Rose C W. Modeling water erosion due to overland flow using physical principles, 2. Rill flow[J].Water Resources Research,1992,28:245-250.
- [7] Zhang G H, Tang K M, Zhang X C. Temporal variation in soil detachment under different land uses in the Loess Plateau of China[J].Earth Surface Processes and Landforms,2009,34(9):1302-1309.
- [8] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics: II. Shear stress relationships [J].Transactions of the American Society of Agricultural Engineers,1984,27:797-804.
- [9] Hairsine P B, Rose C W. Modeling water erosion due to overland flow using physical principles, 1. Sheet flow [J].Water Resources Research,1992,28:237-243.
- [10] Morgan R P, Quilton J N, Smith R E, et al. The European soil erosion model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments[J].Earth Surface Processes and Landforms,1998,23:527-544.
- [11] Nearing M A, Simanton J R, Norton L D, et al. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hillslope [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1999,24:677-686.
- [12] Zhang G H, Liu B Y, Liu G B, et al. Detachment of undisturbed soil by shallow flow[J].Soil Science Society of America Journal,2003,67:713-719.
- [13] Wang B, Zhang G H, Shi Y, et al. Effect of natural restoration time of abandoned farmland on soil detachment by overland flow in the Loess Plateau of China[J].Earth Surface Processes Landforms,2013,38:1725-1734.
- [14] 丁文峰.紫色土和红壤坡面径流分离速度与水动力学参数关系研究[J].泥沙研究,2010(6):18-24.
- [15] Wang B, Zhang G H, Shi Y, et al. Soil detachment by overland flow under different vegetation restoration models in the Loess Plateau of China[J].Catena,2014,116:51-59.
- [16] 李晋,熊康宁,李晓娜.中国南方喀斯特地区水土流失特殊性研究[J].中国农学通报,2011,27(23):227-233.
- [17] 郑世清,王占礼,陈文亮,等.坡地开垦对水土流失的影响[J].水土保持通报,1986(3):55-56.
- [18] 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.
- [19] Zhang G H, Liu G, Wang G, et al. Effects of patterned *Artemisia capillaris* on overland flow velocity under simulated rainfall [J]. Hydrological Processes, 2012,26(24):3779-3787.
- [20] Bagnold R A. An approach to the sediment transport problem for general physics [M]. Washington: U. S. Government Printing Office,1966:422.
- [21] Al-Hamdan O Z, Pierson F B, Nearing M A, et al. Concentrated flow erodibility for physically based erosion models: Temporal variability in disturbed and undisturbed rangelands [J]. Water Resources Research, 2012,48(7):W07504.
- [22] Li T Y, Li S Y, Liang C, et al. Erosion vulnerability of sandy clay loam soil in southwest China: Modeling soil detachment capacity by flume simulation [J].Catena,2019,178:90-99.
- [23] Xiao H, Liu G, Liu P L, et al. Response of soil detachment rate to the hydraulic parameters of concentrated flow on steep loessial slopes on the Loess Plateau of China[J].Hydrological Processes,2017,31:2613-2621.
- [24] Wang D D, Wang Z L, Shen N, et al. Modeling soil detachment capacity by rill flow using hydraulic parameters[J].Journal of Hydrology,2016,535:473-479.
- [25] Shen N, Wang Z L, Zhang Q W, et al. Modelling soil detachment capacity by rill flow with hydraulic variables on a simulated steep loessal hillslope[J].Hydrology Research,2019,50(1):85-98.
- [26] Nearing M A, Lane L J, Lopes V L. Soil erosion research methods[M].2nd Ed. Delray Beach: Soil and Water Conservation Society and St. Lucie Press,1994:127-156.
- [27] Zhu J C, Gantzer C J, Anderson S H, et al. Comparison of concentrated-flow detachment equations for low shear stress [J].Soil Tillage Research,2001,61:203-212.