

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2024.03.033

张峰玮, 王小燕, 陈展鹏, 等. 柑橘园地土壤分离能力对集中流水力学参数的响应[J]. 水土保持学报, 2024, 38(3): 111-120.

ZHANG Fengwei, WANG Xiaoyan, CHEN Zhanpeng, et al. Response of soil detachment capacity to concentrated hydrodynamic parameters in citrus orchards[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3): 111-120.

柑橘园地土壤分离能力对集中流水力学参数的响应

张峰玮, 王小燕, 陈展鹏, 陈方鑫

(西南大学资源环境学院水土保持生态修复重庆市重点实验室, 重庆 400715)

摘要: [目的] 探究三峡库区典型坡地橘园土壤分离能力与集中水流水力学特性参数间的数学关系, 为坡地橘园土壤侵蚀预测建模提供理论依据与数据支撑。[方法] 通过集中流冲刷试验, 分析在不同坡度 ($10^{\circ} \sim 30^{\circ}$) 与流量 (18~126 L/min) 组合的梯度水动力条件下, 清耕样地与绿肥 (白三叶、早熟禾和野豌豆) 覆盖样地的土壤分离量, 探讨柑橘园地土壤分离能力与水流动力参数 (水流剪切力、水流功率)、流态流型参数 (雷诺数、弗罗德数)、阻力参数 (Darcy-Weisbach 阻力系数、曼宁系数) 的定量关系并建立相应的数学模型。[结果] 绿肥覆盖与清耕柑橘园地的土壤分离能力均与各水力学参数有显著相关性; 土壤分离能力与水动力和流态流型参数呈幂函数正相关 (R^2 为 0.86~0.99, NSE 为 0.88~0.98, $p < 0.01$), 与水流阻力参数呈幂函数负相关 (R^2 为 0.32~0.60, NSE 为 0.39~0.64, $p < 0.05$), 表明土壤分离能力随水动力和流态流型参数的增大而显著提高, 随阻力参数的增大而显著下降。[结论] 在绿肥覆盖或清耕柑橘园地, 水流剪切力对土壤分离能力的预测效果优于水流功率; 雷诺数预测土壤分离能力的效果优于弗罗德数; Darcy-Weisbach 阻力系数的预测效果优于曼宁系数。总体来说, 水流剪切力预测土壤分离能力的效果最好, 精度最高 (R^2 平均值为 0.96, NSE 平均值为 0.96)。

关键词: 柑橘园地; 土壤分离能力; 水力学参数; 预测模型

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)03-0111-10

Response of Soil Detachment Capacity to Concentrated Hydrodynamic Parameters in Citrus Orchards

ZHANG Fengwei, WANG Xiaoyan, CHEN Zhanpeng, CHEN Fangxin

(Chongqing Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration, School of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: [Objective] This study was aimed to explore the mathematical relationship between soil detachment capacity and concentrated water flow hydraulic characteristics parameters in the typical slope orange orchard in the Three Gorges Reservoir Area, and to provide theoretical basis and data support for predicting soil erosion in slope orange orchard. [Methods] Through concentrated flow erosion tests, the soil detachment amount of a clear plowed sample plot and three green manure (*Trifolium repens* L, *Poa annua* L, and *Vicia sepium* L) covered plots under gradient hydrodynamic conditions of different slopes ($10^{\circ} \sim 30^{\circ}$) and flow rates (18~126 L/min) combinations was analyzed. The quantitative relationships between soil detachment capacity of citrus orchard plots and hydrodynamic parameters (water shear force, water power), flow pattern parameters (Reynolds number, Froude number) and resistance parameters (Darcy-Weisbach resistance coefficient, Manning's coefficient) were explored, and corresponding mathematical models were established. [Results] There was a significant correlation between the soil detachment capacity of green manure coverage and clean cultivation of citrus orchard and various hydraulic parameters. The soil detachment capacity was

收稿日期: 2024-02-04

修回日期: 2024-03-08

录用日期: 2024-03-30

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-04-29

资助项目: 重庆市基础科学与前沿技术研究专项 (CSTB2023NSCQ-MSX0117); 国家自然科学基金青年基金项目 (42307422); 中央高校基本业务费项目 (SWU-KQ22039)

第一作者: 张峰玮 (1999-), 男, 贵州遵义人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 2470492116@qq.com

通信作者: 王小燕 (1983-), 女, 四川广安人, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事水土保持及土地资源管理与应用研究。E-mail: youblue@swu.edu.cn

positively correlated with hydrodynamic and flow regime parameters in a power function (R^2 was 0.86~0.99, NSE was 0.88~0.98, $p < 0.01$), and negatively correlated with water flow resistance parameters in a power function (R^2 was 0.32~0.60, NSE was 0.39~0.64, $p < 0.05$), indicating that the soil detachment capacity significantly increased with the increasing of hydrodynamic and flow regime parameters, while significantly decreased with the increasing of resistance parameters. [Conclusion] In the citrus orchard covered with green manure or cleared, the predictive effect of water flow shear force on soil detachment capacity was better than that of water flow power. The Reynolds number was more effective in predicting soil detachment capacity than the Froude number. The prediction effect of Darcy-Weisbach resistance coefficient was better than that of Manning's coefficient. Overall, the prediction of soil detachment capacity by water flow shear force had the best effect and the highest accuracy (R^2 average value was 0.96, NSE average value was 0.96).

Keywords: citrus orchard; soil detachment capacity; hydraulic parameters; prediction models

Received: 2024-02-04

Revised: 2024-03-08

Accepted: 2024-03-30

Online(www.cnki.net): 2024-04-29

土壤侵蚀指由自然或人为侵蚀力(降雨、地表径流、风、重力、耕作措施等)引起的土壤颗粒的分离、运输和沉积过程^[1]。作为土壤侵蚀的初始阶段,土壤分离通常被认为该过程中最重要的部分,定义为通过雨滴飞溅和陆上水流的冲刷将土壤颗粒与土壤表面的基质分离^[2-3]。研究坡面土壤分离能力的水力学特征是认识坡面土壤侵蚀过程及规律,建立坡面土壤侵蚀预测模型的重要途径。坡面流水力学特征参数包括水动力参数(水流剪切力 τ 、水流功率 W)、流态流型参数(雷诺数 Re 、弗罗德数 Fr)和阻力参数(Darcy-Weisbach 阻力系数 f 、曼宁系数 n)。其中,水流剪切力是径流运动时所产生的冲刷动力,当水流在坡面运动时能够沿运动方向促使土壤颗粒产生相对位移,被认为是土壤侵蚀过程中水流侵蚀力的一项关键指标^[4];水流功率反映水流沿着坡度流动时所产生的势能,也用来衡量径流的输沙能力,是表征水流在单位时间内做功的重要指标^[5];水流流态流型参数是水力学特性的关键表征,其中,雷诺数是水流惯性力与黏滞力的比值,常被用来作为水流流态(层流、过渡流和紊流)的临界判数,而弗罗德数反映水流的惯性力与重力之比,是判断水流流型是急流或缓流的参数^[6-7];Darcy-Weisbach 阻力系数作为坡面径流水动力学基本参数之一,其反映下垫面对流动水体的阻力大小^[8-9];曼宁系数 n 是工程和建筑用途的渠道流中使用最广泛的参数,其作为一种流动阻力在土壤侵蚀过程研究中起着重要作用^[10]。已有大量学者^[5,11-14]在不同条件下探讨水力学特征参数与土壤分离能力的关系。LI 等^[5]在西南地区探讨紫色土土壤分离能力与过水断面单位能量、水流功率和水流剪切力间的定量关系;张光辉等^[11]在陡坡条件下研究土壤分离

能力与水深、平均流速、坡度和流量间的关系;SHEN 等^[12]在黄土高原地区利用变坡水槽探究典型黄土土壤分离能力与水流剪切力、水流功率和雷诺数间定量关系;GENG 等^[13]在黄土高原丘陵区针对土壤分离能力的水动力学特征展开大量研究;ZI 等^[14]在西南岩溶区喀斯特地貌山坡也展开相关研究。

重庆忠县地处紫色土山地丘陵区,在自然及人为干扰下,坡地土壤侵蚀日益严重。为减少橘园坡地水土流失与促进绿色经济发展,该地区橘园大力种植绿肥。已有研究^[15-16]表明,绿肥对土壤理化性质产生影响,但对其土壤分离能力的水力学特征参数研究仍较少见。利用模拟细沟冲刷试验,研究在不同坡度与流量组合的水力条件下,柑橘园地原状土土壤分离能力与水力学特征参数间的定量关系,为典型坡地橘园土壤侵蚀预测建模及今后的坡地土壤侵蚀数学模型的优化提供理论依据与数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市忠县新立镇(107°38'00" E, 30°16'12" N),属长江流域,地处三峡库区腹心地带(图 1)。重庆忠县海拔 380~1 163 m,为典型的山地丘陵区,属亚热带东南季风区山地气候,年平均气温 17 °C,年平均降水量 1 279 mm,无霜期 320 天以上,年平均日照时间为 1 327 h,植被为亚热带常绿阔叶林,全县常见土类有紫色土、黄壤土、水稻土等。研究土样取自原生态橘园,土壤为侏罗纪蓬莱镇组紫色砂页岩发育的紫色土,果树类型均为柑橘树,无其他树种且分布较为规律,株间距大体一致,柑橘树种植年限为 15 年,橘园内有人为分区撒播的白三叶(*Trifolium repens* L.)、早熟禾(*Poa annua* L.)、野豌豆

(*Vicia sepium* L.)等类型绿肥植物,长势均匀。研究样地基本情况见表 1。



图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of the study area

1.2 样品采集与处理

2023 年在绿肥盛花期 4—6 月,于橘园内白三叶、野豌豆和早熟禾覆盖样地及绿肥覆盖样地附近处清耕坡地,采集坡面原状土。采样时,在样地内选择相对平整的地表,贴地表剪去植被地上部分,将 500 cm³的大环刀(直径 10 cm、高 6.37 cm)垂直放置在修剪好的土壤表面,使用环刀托柄和橡胶锤垂直地面向下,直至环刀口面与土壤表面齐平,采集内含植物根系的原状土,并对环刀下端的含根土体进行削剪至齐平另一面环刀口,确保环刀内土样呈未扰动自然状况。每种绿肥覆盖样地采集 33 个原状土样(共计 132 个),大环刀采集的原状土样用圆柱形塑料盒密封,带回实验室后将大环刀土样静置于平底容器内,缓慢加水至环刀口平面以下 1 cm 处,放置 12 h 使待测样品完全饱和后取出,于阴凉处铁架上静置 12 h,待去除重力水后即开始分离试验。

表 1 橘园样地基本情况

Table 1 Basic situation of citrus orchard plots

样地类型	海拔/m	坡度/(°)	盖度/%	土壤容重/ (g · cm ⁻³)	有机质/ (g · kg ⁻¹)	机械组成/%		
						黏粒	粉粒	砂粒
清耕	479	17	—	1.46	21.29	2.80	66.51	30.69
白三叶	475	19	67	1.53	34.72	3.87	80.02	16.11
野豌豆	476	18	59	1.59	47.05	3.63	80.90	15.46
早熟禾	477	12	74	1.55	42.40	3.83	76.35	19.38

1.3 水力学参数计算

利用 5 个坡度(10°, 15°, 20°, 25°, 30°)与 7 个流量(18, 36, 54, 72, 90, 108, 126 L/min)组成 11 个坡度流量组合的水力梯度,模拟不同的冲刷动力。

模拟冲刷槽是可调节坡度的(长 6 m、宽 0.12 m、深 0.1 m)钢制水槽(图 2)。将坡度和流量调至设计值后打开水阀,待水流稳定后使用游标卡尺(精度 0.01 mm)测定水槽内水流深度。在距下端口 0.6, 2.6 m 位置设置 2 个测定断面,在同一断面分别测定距两侧边 1 cm 处和断面中点共 3 个位置的水深,连续测定 15 次,取其平均值作为该次试验的水深^[17](*h*)。使用染色法测定表面流速,记录染色液(KMnO₄ 溶液)通过距水槽下端口 0.6, 2.6 m 2 个断面所用时间,用于计算流速,同场次试验重复测定 15 次,取其平均值作为表面流速^[17](*V*)。试验中测量的表面流速变化为 0.82~2.3 m/s,标准差 0.46 m/s;水深变化为 3.62~5.25 mm,标准差为 0.54 mm。在试验过程中实时测量水温用于计算水运动黏滞系数(*ν*),以此计算雷诺数($Re = VR/\nu$)。试验中雷诺数为 3 332~13 081,平均值为 7 319,表明在所有水力条件

下水流均处于紊流流态^[18],因此,取修正系数 0.8 乘以表面流速(*V*)^[14]得到各场次的平均流速(V_a^2)。利用表面流速、平均流速及平均水深计算得到水流剪切力(τ)、水流功率(*W*)、雷诺数(*Re*)、弗罗德数(*Fr*)、Darcy—Weisbach 阻力系数(*f*)及曼宁系数(*n*)^[7,19-20],计算公式为:

$$\tau = \rho g R S \tag{1}$$

$$W = \tau V_a \tag{2}$$

$$Re = \frac{VR}{\nu} \tag{3}$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \tag{4}$$

$$f = \frac{8gRS}{V_a^2} \tag{5}$$

$$n = \frac{R^{2/3} S^{1/2}}{V_a} \tag{6}$$

$$\nu = \frac{0.1775 \times 10^{-4}}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \tag{7}$$

式中: τ 为水流剪切力(Pa);*W* 为水流功率(kg/s³);*Re* 为雷诺数,无量纲;*Fr* 为弗罗德数,无量纲;*f* 为 Darcy—Weisbach 阻力系数,无量纲;*n* 为曼宁系数

($\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s}$); v 为水运动黏滞系数; t 为试验水温 ($^{\circ}\text{C}$); ρ 为水密度 (kg/m^3); g 为重力加速度 ($9.8 \text{ m}/\text{s}^2$); R 为水力半径 (m), $R = hb/(2h + b)$; b 为水槽宽 0.12 m ; h 为平均水深 (m); S 为水力坡降 (坡度正弦值); V_a 为平均流速; V 为表面流速。

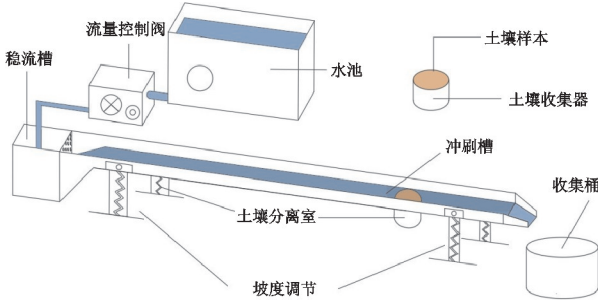


图 2 土壤模拟冲刷槽示意

Fig. 2 Schematic diagram of soil simulated scouring tank

1.4 土壤分离能力测量

将装有原状土样的大环刀浸水饱和并去除重力水后,揭开顶部钢盖,放于冲刷槽的土壤分离室内(距水槽下端出口 0.5 m)。为防止试验开始前漏水破坏环刀内原状土,在每次打开水阀之前将 1 个长方形钢板(长 25 cm 、宽 0.12 cm)放置在水槽土壤分离室的上口以使钢板将分离室顶部圆形口完全盖住,待水流稳定后,揭开钢板并计时,开始土壤分离试验。待土壤冲刷深度达到 2 cm 左右时关闭水阀并停止计时,完成本场次冲刷试验,记录试验所用时间。根据小环刀土样测得的土壤含水率及大环刀土样冲刷分离前的重量,推算大环刀土样冲刷分离前的烘干重,并将冲刷分离后的土样烘干称重,通过环刀土样冲刷试验前后烘干重量差、冲刷时间来计算土壤分离能力 (D_c),计算公式为:

$$D_c = \frac{M_o - M}{\Delta t A} \quad (8)$$

式中: D_c 为土壤分离能力 [$\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$]; M_o 为土壤分离前烘干重 (kg); M 为土壤分离后烘干重 (kg); Δt 为分离试验历时 (s); A 为土壤分离面积,即环刀圆形横截面积 (m^2)。

1.5 统计分析方法

使用 SPSS 23 软件进行统计分析,采用回归分析建立土壤分离能力和各水力学参数的数学关系,利用 Origin 2022 软件绘制数据图。采用 CAD 2023 软件绘制试验装置示意图。

2 结果与分析

2.1 柑橘园不同样地的土壤分离能力特征

由图 3 可知,橘园不同样地的土壤分离能力平均

值大小为清耕 [$0.727 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$] > 白三叶 [$0.218 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$] > 野豌豆 [$0.165 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$] > 早熟禾 [$0.152 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$]。在 4 个样地土壤分离能力中,清耕样地的土壤分离能力显著大于绿肥样地 ($p < 0.01$); 白三叶覆盖下土壤分离能力显著大于早熟禾与野豌豆 ($p < 0.01$); 而野豌豆覆盖下的土壤分离能力大于早熟禾,但二者差异不显著。总体来看,4 种样地的土壤分离能力均随着坡度与流量的增加而显著增加。

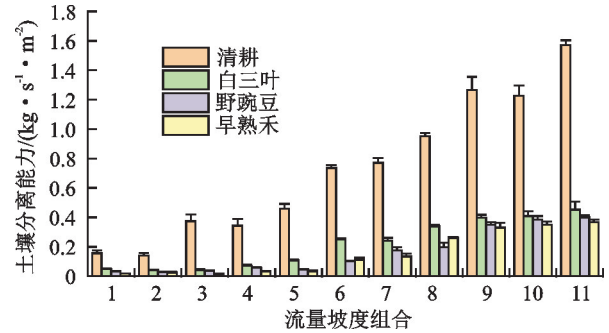


图 3 柑橘园地不同样地的土壤分离能力特征

Fig. 3 Characteristics of soil detachment capacity in different plots of citrus orchards

2.2 水力学参数与柑橘园地土壤分离能力的相关性

通过探究水流动力参数(水流剪切力 τ 和水流功率 W)、水流流态流型参数(雷诺数 Re 和弗罗德数 Fr)及水流阻力参数(Darcy-Weisbach 阻力系数 f 和曼宁系数 n)对土壤分离能力的影响,以明晰土壤分离能力对集中流冲刷的响应。水流剪切力随着坡度与流量从 6.26 Pa 增加至 29.71 Pa ,平均值为 18.42 Pa ;水流功率从 $4.10 \text{ kg}/\text{s}^3$ 增加至 $54.01 \text{ kg}/\text{s}^3$,平均值为 $24.14 \text{ kg}/\text{s}^3$;雷诺数从 3332.06 增加至 13081.20 ,平均值为 7319.00 ;弗罗德数从 4.34 增加至 10.07 ,平均值为 7.00 ;Darcy-Weisbach 阻力系数从 0.1124 减小至 0.0677 ,平均值为 0.1034 ;曼宁系数从 0.0146 减小至 $0.0120 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}$,平均值为 $0.0143 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}$ (表 2)。总体来看,水流剪切力从第 1 组水力梯度到第 11 组水力梯度增加 3 倍以上;水流功率增加 12 倍以上;雷诺数增加将近 3 倍;弗罗德数增加 1 倍多;Darcy-Weisbach 阻力系数减小近 40%;曼宁系数减小近 18%。

由表 3 可知,4 种样地的土壤分离能力均与水动力参数(相关系数为 $0.94 \sim 0.99$,平均值为 0.97)、流态流型参数(相关系数为 $0.93 \sim 0.99$,平均值为 0.96)呈极显著正相关,与水流阻力参数呈显著负相关(相关系数为 $0.59 \sim 0.75$,平均值为 0.66)。可以看出,土壤分离能力与水流动力参数的相关性略高于水流流态流型参数,而与水流阻力的相关性最低。

表 2 试验条件下各水流动力、水流流态流型和水流阻力参数

Table 2 Parameters of flow dynamics, flow regime and resistance under test conditions

坡度/(°)	流量/ (L · min ⁻¹)	水流剪切力/Pa	水流功率/ (kg · s ⁻³)	雷诺数	弗罗德数	Darcy—Weisbach 阻力系数	曼宁系数/ (m ^{1/3} · s ⁻¹)
10	18	6.26	4.10	3 332.06	4.34	0.112 4	0.014 6
15	18	10.14	7.19	3 833.27	4.55	0.154 8	0.017 4
15	36	9.86	8.92	4 765.94	5.91	0.091 5	0.013 3
20	36	14.14	13.57	5 320.79	6.09	0.115 8	0.015 1
20	54	14.90	15.64	6 108.97	6.49	0.103 2	0.014 3
25	54	19.98	22.91	6 964.72	6.93	0.113 9	0.015 2
25	72	20.81	24.45	7 411.62	6.99	0.113 6	0.015 3
25	90	21.65	29.91	9 036.51	8.01	0.085 0	0.013 3
30	90	26.96	39.38	9 610.38	8.52	0.095 8	0.014 1
30	108	28.22	45.41	11 044.20	9.12	0.083 3	0.013 2
30	126	29.71	54.01	13 081.20	10.07	0.067 7	0.012 0

表 3 柑橘园地土壤分离能力与水流动力、流态流型和阻力参数的相关性

Table 3 Correlation between soil detachment capacity and water flow dynamics, flow regime and resistance parameters in citrus orchards

样地类型	τ	W	Re	Fr	f	n
清耕	0.97**	0.99**	0.99**	0.98**	-0.68*	-0.75**
白三叶	0.97**	0.97**	0.96**	0.95**	-0.59	-0.68*
野豌豆	0.94**	0.97**	0.95**	0.93**	-0.62*	-0.68*
早熟禾	0.94**	0.97**	0.95**	0.93**	-0.62*	-0.69*

注: * 表示 $p < 0.05$; ** 表示 $p < 0.01$ 。下同。

2.3 水流动力对柑橘园地土壤分离能力的影响

不同绿肥样地土壤分离能力与水流剪切力均呈极显著幂函数正相关, R^2 为 0.94~0.99, 平均值为 0.96; 纳什效率 NSE 为 0.94~0.98, 平均值为 0.96(表 4)。表明当水流剪切力增大时, 其破坏土体并将土壤颗粒剥离土体的程度越剧烈, 由此土壤分离过程加剧^[4]。当使用水流剪切力预测土壤分离能力时, 3 种绿肥样地的土壤分离能力预测值与实测值相近, 清耕样地土壤

分离能力实测值与预测值的相近程度次之(图 4)。

水流功率与土壤分离能力呈极显著幂函数正相关, R^2 为 0.93~0.97, 平均值为 0.94; 纳什效率 NSE 为 0.94~0.98, 平均值为 0.95。表明径流输沙能力和冲刷作用随单位时间内径流受重力作用沿坡面向下做功的增大而增强, 从而加剧土壤分离过程。利用水流功率对 4 种样地土壤分离能力进行回归分析发现, 预测值均与实测值相近。

表 4 柑橘园地土壤分离能力与水流剪切力及水流功率的回归分析

Table 4 Regression analysis of soil detachment capacity, water flow shear force and water flow power in citrus orchards

样地类型	水流剪切力(τ)/Pa			水流功率 W /(kg · s ⁻³)		
	方程式	R^2	NSE	方程式	R^2	NSE
清耕	$D_c = 4.57 \times 10^{-3} \tau^{1.704}$	0.96**	0.97	$D_c = 0.0289W + 0.0295$	0.97*	0.98
白三叶	$D_c = 8.71 \times 10^{-4} \tau^{1.855}$	0.95**	0.96	$D_c = 0.0096W - 0.0130$	0.93*	0.94
野豌豆	$D_c = 4.39 \times 10^{-5} \tau^{2.710}$	0.99**	0.98	$D_c = 0.0088W - 0.0476$	0.94*	0.95
早熟禾	$D_c = 5.68 \times 10^{-5} \tau^{2.610}$	0.94**	0.94	$D_c = 0.0085W - 0.0538$	0.93*	0.94

2.4 水流流态流型对柑橘园地土壤分离能力的影响

雷诺数为 3 332~13 081, 平均值为 7 319, $> 2 000$ (表 2), 表明所有流量与坡度组合下的水流流态均属于紊流状态^[6-7]。3 种绿肥覆盖样地及清耕样地的土壤分离能力均与雷诺数呈极显著幂函数正相关(图 5), 其拟合式 R^2 为 0.87~0.95, 均值为 0.9; NSE 为 0.88~0.96, 平均值为 0.91(表 5)。

表明随着雷诺数增大, 水槽内水流流态越紊乱, 携沙与剥蚀能力越强, 土壤分离程度越剧烈。当通过雷诺数预测土壤分离能力, 4 种样地(含清耕)的土壤分离能力在 $< 0.2 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 时均被高估, 在 $0.2 \sim 0.4 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 时被低估; 其中, 清耕样地的土壤分离能力为 $0.7 \sim 0.8 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 且 $> 1.2 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 时被低估。

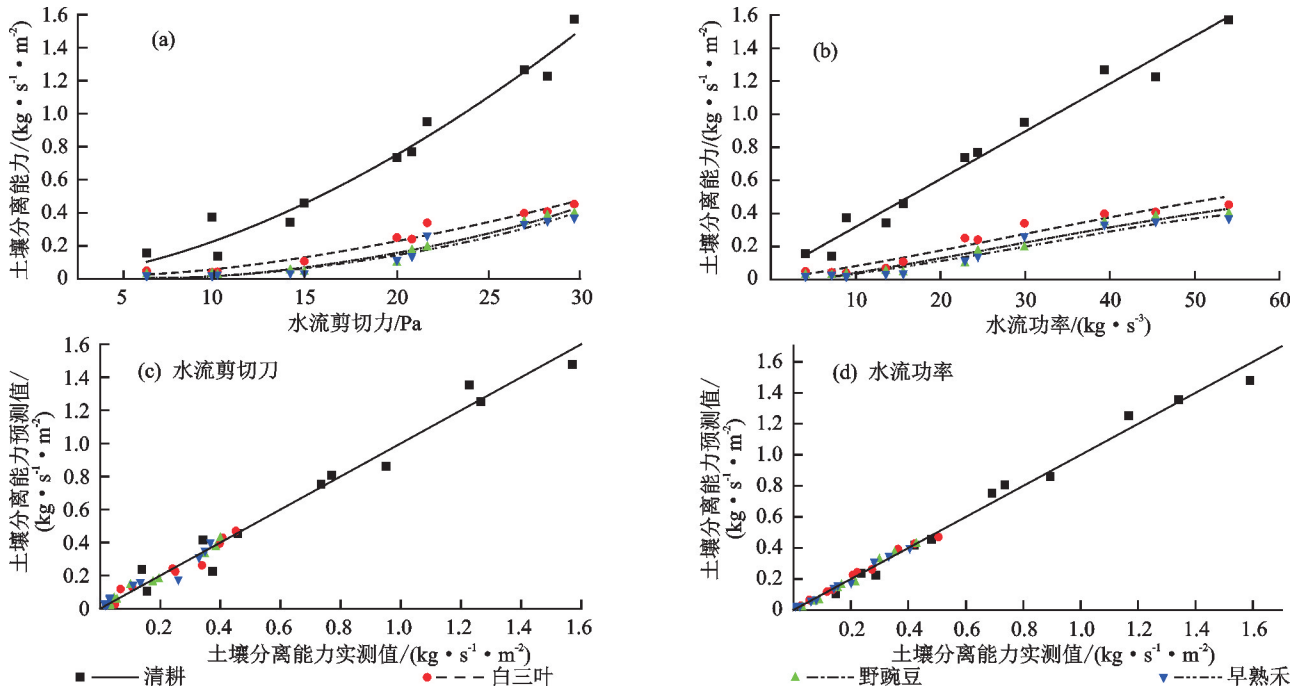


图 4 土壤分离能力与水流剪切力及水流功率的关系

Fig. 4 Relationship between soil detachment capacity and flow shear force and flow power

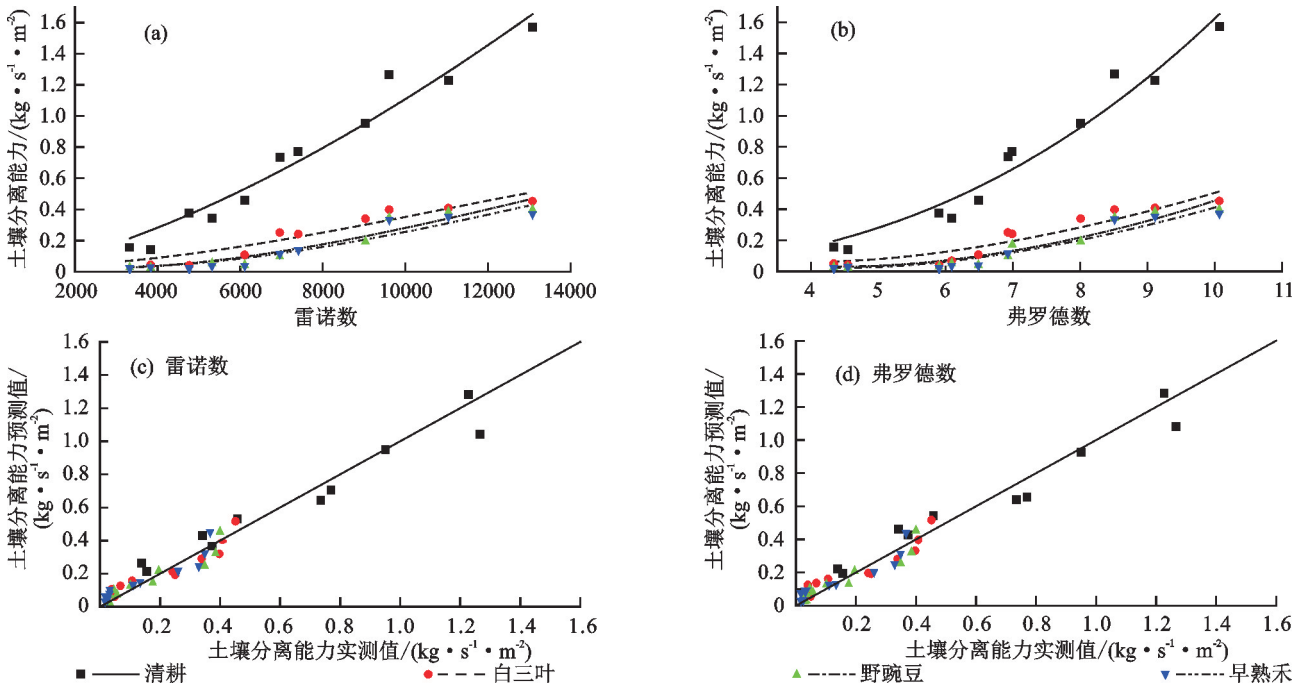


图 5 土壤分离能力与水流流态流型的关系

Fig. 5 Relationship between soil detachment capacity and water flow regime

弗罗汝德数反映水流的惯性力与重力之比,是判断水流流型的参数,一般将弗罗德数是否>1作为判别水流急缓的标准。当 F_r 其>1时,水流为急流; $F_r=1$ 时,为临界流; $F_r<1$ 时,为缓流^[6]。由表 2 可知,弗罗德数为 4.34~10.07,平均值为 7.00,表明在所有流量与坡度组合下的水流流型均属于急流。4 种样地的弗罗德数均与土壤分离能力呈极显著幂函数正相关(图 5),其 R^2 为 0.86~0.95,平均值 0.89;NSE 为 0.88~0.96,平均值为 0.91(表 5)。弗罗德数

对土壤分离能力的预测效果与雷诺数相似。

2.5 水流阻力对柑橘园地土壤分离能力的影响

Darcy-Weisbach 阻力系数作为坡面径流水力学基本参数之一,其反映下垫面对流动水体的阻力大小,在其他水动力条件相同的情况下,阻力系数越大,水体流动克服阻力需要的能量越多,则水流用于侵蚀和搬运泥沙的能量越小,土壤侵蚀越弱,反之越剧烈^[9]。Darcy-Weisbach 阻力系数为 0.066 7~0.112 4,平均值为 0.103 4(表 2)。由图 6 可知,3 种

绿肥覆盖样地及清耕样地的土壤分离能力与 Darcy-Weisbach 阻力系数均呈显著幂函数负相关。土壤分离能力与 Darcy-Weisbach 阻力系数的拟合式 R^2 值为 0.45~0.60, 平均值为 0.51; NSE 为 0.51~0.64, 平均值为 0.56(表 6)。利用 Darcy-Weisbach 阻力

系数预测土壤分离能力时,当清耕对照的土壤分离能力 $< 0.5 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 时被高估,土壤分离能力 $> 0.7 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 时被低估;3 种绿肥覆盖样地的土壤分离能力在 $< 0.2 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 时被高估,土壤分离能力为 $0.2 \sim 0.4 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 时被低估(图 6)。

表 5 柑橘园地土壤分离能力与水流流态流型的回归分析

Table 5 Regression analysis of soil detachment capacity and water flow regime in citrus orchards

样地类型	雷诺数			弗罗德数		
	方程式	R^2	NSE	方程式	R^2	NSE
清耕	$D_c = 1.20 \times 10^{-6} Re^{1.491}$	0.95 *	0.96	$D_c = 4.77 \times 10^{-3} Fr^{2.532}$	0.95 *	0.96
白三叶	$D_c = 1.90 \times 10^{-7} Re^{1.563}$	0.88 **	0.89	$D_c = 1.13 \times 10^{-3} Fr^{2.652}$	0.86 **	0.88
野豌豆	$D_c = 3.62 \times 10^{-9} Re^{1.968}$	0.88 **	0.89	$D_c = 1.91 \times 10^{-4} Fr^{3.370}$	0.88 **	0.90
早熟禾	$D_c = 3.16 \times 10^{-9} Re^{1.980}$	0.87 **	0.88	$D_c = 1.77 \times 10^{-4} Fr^{3.380}$	0.86 **	0.88

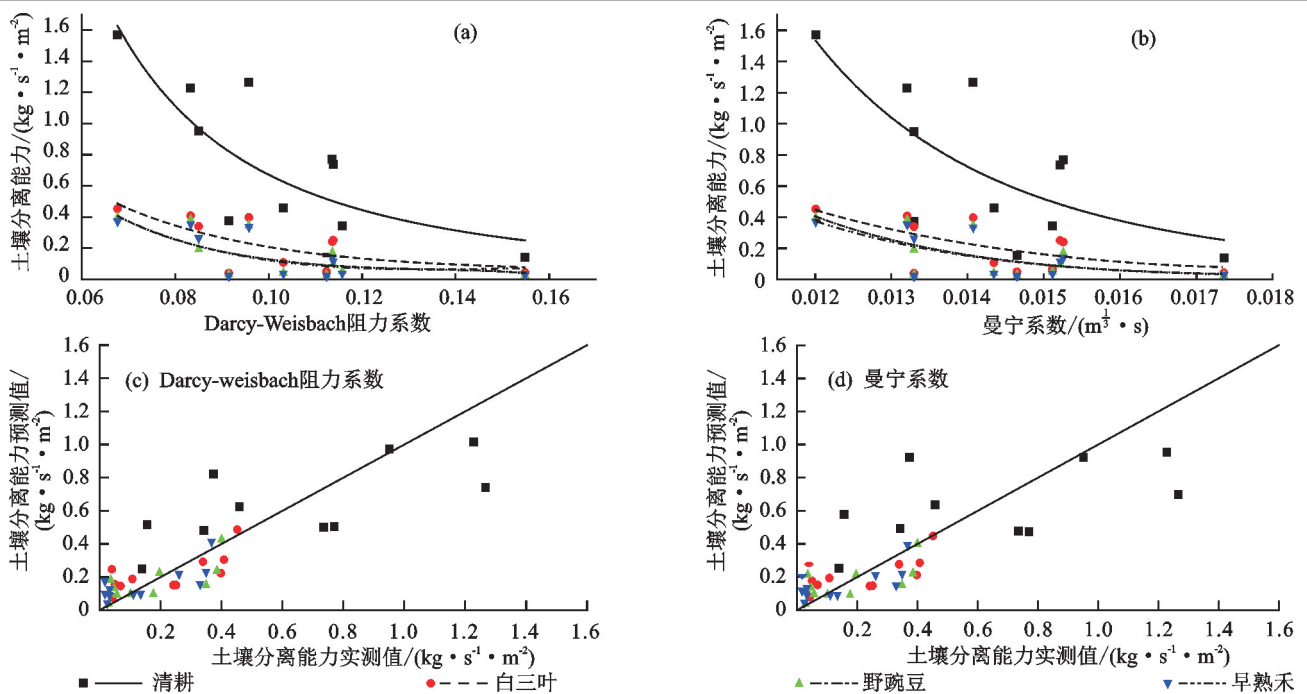


图 6 土壤分离能力与水流阻力的关系

Fig. 6 Relationship between soil detachment capacity and water flow resistance

曼宁系数是工程和建筑用途的渠道流中使用最广泛的参数,其作为一种流动阻力在土壤侵蚀过程研究中起着重要作用,一般来说,其值为 $0.008 \sim 0.012 \text{ m}^{\frac{1}{3}} \cdot \text{s}^{[10]}$ 。曼宁系数为 $0.012 \sim 0.017 \text{ m}^{-\frac{1}{3}} \cdot \text{s}$,均值为 $0.014 \text{ m}^{-\frac{1}{3}} \cdot \text{s}$ (表 2)。由图 6 可知,清耕样地、白三叶、野豌豆和早熟禾覆盖样地的土壤分离能力均与曼宁系数(n)呈显著幂函数负相关,其拟合式 R^2 为 0.32~0.47,平均值为 0.39;NSE 为 0.39~0.53,平均值 0.46(表 6)。曼宁系数对 4 种样地的土壤分离能力的拟合程度与 Darcy-Weisbach 阻力系数相似(图 6)。

不同样地间 Darcy-Weisbach 阻力系数、曼宁系数与土壤分离能力间的定量关系存在差异,可能是不同试验样地间土壤表面粗糙度、植物地上生物量、枯

落物(植物残茬)覆盖情况及表层土壤中植物根系特征的差异,导致原状土样在水流冲刷试验过程中下垫面情况与土壤抗冲性不一致所造成的^[14,21-24]。

3 讨论

土壤分离能力受近地表特征(地表粗糙度、地面生物特性)、土壤理化性质(有机质、团聚体、孔隙度)、植物根系、枯落物和水力学特性等因素的影响^[14,21-24]。本研究中,白三叶、野豌豆、早熟禾 3 种绿肥样地的土壤分离能力均显著小于清耕样地,可能是因为绿肥植物根系对土壤的物理缠绕和化学黏结作用及根系生理活动改变土壤理化性质,进而间接地影响土壤分离过程所造成的。在绿肥样地中,白三叶样地的土壤分离能力显著高于野豌豆和早熟禾样地,且野豌豆样地的土壤分离能力在绿肥样地中最小,可能是由于不同绿

肥样地间土壤物理结构与化学性质、植物根系及枯落物特征的差异所导致的,对此还需进一步研究。

表 6 柑橘园地土壤分离能力与水流阻力的回归分析

Table 6 Regression analysis of soil detachment capacity and water flow resistance in citrus orchards

样地类型	Darcy-Weisbach 阻力系数			曼宁系数		
	方程式	R^2	NSE	方程式	R^2	NSE
清耕	$D_c = 3.65 \times 10^{-3} f^{-2.265}$	0.60 *	0.64	$D_c = 6.45 \times 10^{-10} n^{-4.88}$	0.47	0.53
白三叶	$D_c = 1.14 \times 10^{-3} f^{-2.249}$	0.45 *	0.51	$D_c = 4.21 \times 10^{-10} n^{-4.70}$	0.32 *	0.39
野豌豆	$D_c = 2.48 \times 10^{-4} f^{-2.770}$	0.50 *	0.55	$D_c = 1.02 \times 10^{-12} n^{-6.04}$	0.39 *	0.45
早熟禾	$D_c = 1.95 \times 10^{-4} f^{-2.842}$	0.50 *	0.55	$D_c = 4.82 \times 10^{-13} n^{-6.20}$	0.39 *	0.45

本研究中,白三叶、野豌豆、早熟禾 3 种绿肥覆盖样地及清耕样地的土壤分离能力均随坡度与流量的增加而显著增加(图 3),是由于当坡度与流量增大时,水流流速大幅增大,对应的水动力参数(水流剪切力和水流功率)和流态流型参数(雷诺数和弗罗德数)也随之大幅提高,坡面径流具有更大的能量及更紊乱的流态,从而加剧土壤侵蚀程度,与罗榕婷等^[6]、张光辉^[25]、柳玉梅等^[26]的研究结果相似。在水动力参数中,土壤分离能力与水流剪切力($R^2 = 0.96$, $NSE = 0.96$)呈极显著幂函数正相关,与水流功率($R^2 = 0.94$, $NSE = 0.95$)呈极显著线性正相关,是由于水流剪切力在超过土壤抗剪强度时,土壤颗粒被剥离出土体后随着径流方向输移,在流速与坡度增加条件下,水流剪切力破坏土体并剥离土壤颗粒的程度越剧烈,土壤分离过程越剧烈,与 LI 等^[5,8]、SHEN 等^[12]、GENG 等^[13]、ZI 等^[14]、WANG 等^[18]、王凯等^[27]等的研究结果相符合。在流态流型参数中,雷诺数与弗罗德数二者数值分别大于 2 000 和 1,说明在本试验中,水流流态均为紊流,流型为急流^[6,17]。经过回归拟合发现,土壤分离能力与雷诺数($R^2 = 0.90$, $NSE = 0.91$)和弗罗德数($R^2 = 0.89$, $NSE = 0.91$)呈极显著幂函数正相关,表明随着雷诺数与弗罗德数的提高,冲刷槽内水流流态流型的紊流程度逐步增强,水流挟沙能力上升,土壤分离能力呈幂函数形式增加,与李少华等^[17]、柳玉梅等^[26]、安妙颖等^[28]的研究内容吻合。在水流阻力参数中,经过回归拟合分析发现,土壤分离能力与 Darcy-Weisbach 阻力系数($R^2 = 0.51$, $NSE = 0.56$)和曼宁系数($R^2 = 0.39$, $NSE = 0.46$)呈显著幂函数负相关,是由于阻力系数越高,径流在流动过程中遇到的阻力越大,消耗于克服阻力的能量也越多,而径流用来冲刷土体的剩余能量越少,对土壤的侵蚀程度也越小,与李少华等^[17]、柳玉梅等^[26]、肖丛宇等^[29]的研究结果相似。

本研究中,水流剪切力相比水流功率、雷诺数、弗罗德数、Darcy-Weisbach 阻力系数及曼宁系数可更好地预测土壤分离能力。目前,众多有关土壤分离能力与水力学参数之间的数学关系的研究结果尚存在

一定差异,针对不同研究对象,预测其土壤分离能力的最佳水力学参数往往不同。如在 LI 等^[5]的研究中,西南地区紫色土土壤分离能力与流速、水流剪切力、水流功率、单位水流功率和过水断面单位能量呈幂函数正相关,其中,水流功率是预测土壤分离能力的最佳参数;SHEN 等^[12]在黄土高原地区的研究发现,土壤分离能力与水流功率和水流剪切力呈幂函数正相关,与单位水流功率呈线性正相关,其中,水流功率对土壤分离能力的预测效果最好;ZI 等^[14]在西南岩溶区喀斯特山坡的研究结果表明,土壤分离能力与流速、水流剪切力、水流功率及单位水流功率流速呈指数函数正相关,其中,流速更能准确预测土壤分离能力;WANG 等^[18]在黄土高原地区的研究发现,土壤分离能力与流速、水流功率、单位水流功率及过水断面单位能量呈线性正相关,与水流剪切力呈幂函数正相关,其中过水断面单位能量是预测土壤分离能力的最佳参数;WANG 等^[7,30]在黄土高原典型草地的研究发现,土壤分离能力与流速、水流剪切力、水流功率及单位水流功率呈幂函数正相关,水流功率是最佳表征参数。综上,可能与不同的试验条件、土壤性质及植被特性有关^[14,21-24],其作用机理仍需进一步的研究及更多的实测数据来验证。

4 结论

在三峡库区柑橘园地,土壤分离能力与水力学特征参数均呈显著相关性,与水流剪切力(τ)、水流功率(W)、雷诺数(Re)和弗汝罗数(Fr)分别呈极显著(R^2 为 0.86~0.99, NSE 为 0.88~0.98, $p < 0.01$)幂函数正相关,与 Darcy-Weisbach 阻力系数(f)和曼宁系数(n)呈显著幂函数负相关(R^2 为 0.32~0.60, NSE 为 0.39~0.64, $p < 0.05$)。水动力参数(水流剪切力 τ 、水流功率 W)与流态流型参数(雷诺数 Re 、弗罗德数 Fr)均能较好地预测的柑橘园地的土壤分离能力,阻力参数(Darcy-Weisbach 阻力系数 f 、曼宁系数 n)的预测效果次于水动力参数与流态流型参数。总体比较,水动力学参数中的水流剪切力(τ)对土壤分离能力的预测效果最好(平均 $R^2 = 0.96$, 平均 $NSE = 0.96$),预测精度最高。

参考文献:

- [1] GOVERS G, GIMÉNEZ R, VAN OOST K. Rill erosion: Exploring the relationship between experiments, modelling and field observations[J]. *Earth-Science Reviews*, 2007, 84(3/4): 87-102.
- [2] WANG B, ZHANG G H. Quantifying the binding and bonding effects of plant roots on soil detachment by overland flow in 10 typical grasslands on the Loess Plateau[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81(6): 1567-1576.
- [3] WANG B, ZHANG G H, SHI Y 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.
- [4] 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.
- JIANG F S, HUANG Y H, LIN J S, et al. The dynamic characteristics of soil detachment of slumping deposit by surface runoff in Benggang[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(1): 86-89, 229.
- [5] 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.
- [6] 罗榕婷, 张光辉, 曹颖. 坡面含沙水流水动力学特性研究进展[J]. *地理科学进展*, 2009, 28(4): 567-574.
- LUO R T, ZHANG G H, CAO Y. Progress in the research of hydrodynamic characteristics of sediment-laden overland flow[J]. *Progress in Geography*, 2009, 28(4): 567-574.
- [7] WANG B, ZHANG G H, YANG Y F, et al. The effects of varied soil properties induced by natural grassland succession on the process of soil detachment[J]. *Catena*, 2018, 166: 192-199.
- [8] LI T Y, HE B H, CHEN Z P, et al. Effects of gravel on concentrated flow hydraulics and erosion in simulated landslide deposits[J]. *Catena*, 2017, 156: 197-204.
- [9] 张光辉, 卫海燕, 刘宝元. 坡面流水动力学特性研究[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(1): 58-61.
- ZHANG G H, WEI H Y, LIU B Y. Study on hydrodynamic properties of overland flow[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2001, 15(1): 58-61.
- [10] GUO T L, WANG Q J, LI D Q, et al. Flow hydraulic characteristic effect on sediment and solute transport on slope erosion[J]. *Catena*, 2013, 107: 145-153.
- [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.
- ZHANG G H, LIU B Y, ZHANG K L. Experimental simulation of hydraulic mechanism of soil detachment by surface runoff on slopeland[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(6): 882-886.
- [12] SHEN N, WANG Z L, GUO Q, et al. Soil detachment capacity by rill flow for five typical loess soils on the Loess Plateau of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 213: e105159.
- [13] GENG R, ZHANG G H, HONG D L, et al. Response of soil detachment capacity to landscape positions in hilly and Gully Regions of the Loess Plateau[J]. *Catena*, 2021, 196: e104852.
- [14] ZI R Y, ZHAO L S, FANG Q, et al. Path analysis of the effects of hydraulic conditions, soil properties and plant roots on the soil detachment capacity of karst hillslopes[J]. *Catena*, 2023, 228: e107177.
- [15] MA D K, YIN L N, JU W L, et al. Metaanalysis of green manure effects on soil properties and crop yield in northern China[J]. *Field Crops Research*, 2021, 266: e108146.
- [16] SHARRATT B S, MCGUIRE A, HORNECK D. Early-season wind erosion influenced by soil-incorporated green manure in the Pacific northwest[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2018, 82(3): 678-684.
- [17] 李少华, 何丙辉, 李天阳, 等. 生物埂不同植物类型下土壤分离水力学特性研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2020, 40(3): 111-118.
- LI S H, HE B H, LI T Y, et al. Coupling of soil detachment and hydraulic parameters under the terrace banks planted with different plants[J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2020, 40(3): 111-118.
- [18] 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.
- [19] LIU H Q, YANG J H, DIAO Y F, et al. The hydrodynamic mechanism of rainfall runoff from loess slopes treated with incorporated straw[J]. *Land Degradation and Development*, 2021, 32(14): 3812-3822.
- [20] 王仁新, 何丙辉, 李天阳, 等. 汶川震区滑坡堆积体坡面土壤侵蚀率及水动力学参数研究[J]. *土壤学报*, 2016, 53(2): 375-387.
- WANG R X, HE B H, LI T Y, et al. Research on soil erosion rate and hydrodynamic parameters of landslide accumulation slope in Wenchuan earthquake area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(2): 375-387.
- [21] WANG B, LI P P, HUANG C H, et al. Effects of root morphological traits on soil detachment for ten herbaceous species in the Loess Plateau[J]. *The Science of the*

- Total Environment, 2021, 754; e142304.
- [22] ZHANG G H, TANG M K, 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.
- [23] LIU J X, LIU G B, FLANAGAN D C, et al. Effects of soil-incorporated plant litter morphological characteristics on the soil detachment process in grassland on the Loess Plateau of China[J]. The Science of the Total Environment, 2020, 705; e134651.
- [24] 吴秋菊, 吴发启, 王林华. 土壤结皮坡面流水动力学特征[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 73-80.
- WU Q J, WU F Q, WANG L H. Hydrodynamic characteristics of overland flow under soil crusts condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(1): 73-80.
- [25] 张光辉. 坡面薄层流水动力学特性的实验研究[J]. 水科学进展, 2002, 13(2): 159-165.
- ZHANG G H. Study on hydraulic properties of shallow flow[J]. Advances In Water Science, 2002, 13(2): 159-165.
- [26] 柳玉梅, 张光辉, 李丽娟, 等. 坡面流水动力学参数对土壤分离能力的定量影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 96-99.
- LIU Y M, ZHANG G H, LI L J, et al. Quantitative effects of hydro-dynamic parameters on soil detachment capacity of overland flow[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(6): 96-99.
- [27] 王凯, 王玉杰, 王彬, 等. 黄壤坡面土壤分离速率研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(9): 2114-2121.
- WANG K, WANG Y J, WANG B, et al. Study on soil detachment rate on a yellow-soil hillslope[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(9): 2114-2121.
- [28] 安妙颖, 韩玉国, 王金满, 等. 黄土丘陵区坡面薄层水流动力学特性及其对土壤侵蚀的影响[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(2): 142-150.
- AN M Y, HAN Y G, WANG J M, et al. Hydrodynamic characteristics of overland flow and its impact on erosion in Loess Hilly Region[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(2): 142-150.
- [29] 肖丛宇, 程金花, 姜群鸥, 等. 台田措施下坡面流土壤侵蚀水动力学特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 10-15.
- XIAO C Y, CHENG J H, JIANG Q O, et al. Hydrodynamic characteristics of soil erosion in overland flow under terraced field measure[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(4): 10-15.
- [30] WANG B, ZHANG G H, YANG Y F, et al. Response of soil detachment capacity to plant root and soil properties in typical grasslands on the Loess Plateau[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2018, 266: 68-75.
- cy of organic C sequestration in deep soils is enhanced by drier climates[J]. Geoderma, 2022, 415; e115774.
- [22] RODRIGUES L A T, GIACOMINI S J, AITA C, et al. Short- and long-term effects of animal manures and mineral fertilizer on carbon stocks in subtropical soil under no-tillage[J]. Geoderma, 2021, 386; e114913.
- [23] ZHANG Y W, SHANGGUAN Z P. The coupling interaction of soil water and organic carbon storage in the long vegetation restoration on the Loess Plateau[J]. Ecological Engineering, 2016, 91: 574-581.
- [24] TUO D F, GAO G Y, CHANG R Y, et al. Effects of revegetation and precipitation gradient on soil carbon and nitrogen variations in deep profiles on the Loess Plateau of China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 626: 399-411.

(上接第 110 页)

- [18] 刘陟, 黄奇, 周延林, 等. 毛乌素沙地油蒿生物量估测模型研究[J]. 中国草地学报, 2014, 36(4): 24-30.
- LIU Z, HUANG Q, ZHOU Y L, et al. Study on the models for estimating the biomass of *Artemisia ordosicain* Mu Us sandland[J]. Chinese Journal of Grassland, 2014, 36(4): 24-30.
- [19] 樊兰英. 雁北地区樟子松单木生物量模型研究[J]. 山西林业科技, 2014, 43(4): 15-16.
- FAN L Y. Study on single biomass model for *Pinus sylvestris* in Yanbei area[J]. Shanxi Forestry Science and Technology, 2014, 43(4): 15-16.
- [20] WANG Y Q, SHAO M A, LIU Z P, et al. Prediction of bulk density of soils in the Loess Plateau region of China[J]. Surveys in Geophysics, 2014, 35(2): 395-413.
- [21] WANG S F, GAO X D, YANG M, et al. The efficient