

# 紫色土丘陵区生物埂不同植被类型土壤分离水动力学特征

李少华<sup>1</sup>, 何丙辉<sup>1</sup>, 李天阳<sup>1</sup>, 郭正曙<sup>2</sup>, 曾凤铃<sup>1</sup>

(1. 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;

2. 四川省遂宁市射洪县水务局, 四川 遂宁 629200)

**摘要:** 野外采集紫色土区六棱型预制网格式护坡生物埂内不同植被类型原状土样, 通过室内模拟细沟水槽(长4 m, 宽0.12 m, 深0.1 m)冲刷试验, 探究不同植被类型影响下土壤分离能力与水动力学参数之间的关系。选择麦冬、韭菜2种生物埂类型, 以单一网格式裸坡为对照, 在3个坡度(15°, 20°, 25°)、5个流量(39.86, 59.98, 79.67, 100.45, 121.16 L/min)组合条件下进行冲刷试验。结果表明: 生物埂内不同植被类型下土壤分离能力差异显著( $P < 0.05$ ), 表现为麦冬(均值  $2.24 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ ) > 对照(均值  $1.34 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ ) > 韭菜(均值  $1.09 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ )。幂函数方程可用于描述土壤分离能力与水流剪切力( $R^2 = 0.75$ )、水流功率( $R^2 = 0.73$ )、单位水流功率( $R^2 = 0.46$ )及过水断面单位能量( $R^2 = 0.63$ )间的数学关系。生物埂各植被类型下土壤发生分离的临界剪切力  $\tau_c$  表现为  $\tau_c$  麦冬(8.75 Pa) >  $\tau_c$  韭菜(6.47 Pa) >  $\tau_c$  对照(1.93 Pa), 表明植被可增强网格式护坡生物埂土壤抵抗分离的能力。

**关键词:** 分离能力; 水动力学; 土壤可蚀性; 植物根系; 紫色土

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)03-0070-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.03.011

## Hydraulic Characteristics of Soil Detachment Under the Terrace Banks with Different Vegetation Types in the Purple Hilly Area

LI Shaohua<sup>1</sup>, HE Binghui<sup>1</sup>, LI Tianyang<sup>1</sup>, GUO Zhengshu<sup>2</sup>, ZENG Fengling<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715; 2. Water Resources Bureau of Shehong County, Suining, Sichuan 629200)

**Abstract:** To determine the relationships between soil detachment capacities and hydrodynamic parameters under Terrace Banks in hexagonal prefabricated net format with different vegetation types, we collected the undisturbed soil samples in Terrace Banks planted with *Ophiopogon japonicus*, *Allium tuberosum* and bare land (control) in situ respectively, and conducted the simulated rill flume (4 m long, 0.12 m wide, 0.1 m height) scouring experiments in laboratory. Flume scouring experiments were carried out under the combinations of 3 slopes (15°, 20°, 25°) and 5 flow rates (39.86, 59.98, 79.67, 100.45, 121.16 L/min) with 3 replicates (i.e., a total of 135 scouring experiments). The results showed that soil detachment capacities were significant differences under various vegetations ( $P < 0.05$ ), and ranked as *Ophiopogon japonica* ( $2.24 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ ) > bare land ( $1.34 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ ) > *Allium tuberosum* ( $1.09 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ ). The power functions could be used to describe the relationships of soil detachment capacities with shear stress ( $R^2 = 0.75$ ), stream power ( $R^2 = 0.73$ ), unit stream power ( $R^2 = 0.46$ ) and unit energy ( $R^2 = 0.63$ ). The shear stress threshold presented as  $\tau_c$  *Ophiopogon japonicus* (8.75 Pa) >  $\tau_c$  *Allium tuberosum* (6.47 Pa) >  $\tau_c$  bare land (1.93 Pa), indicating that vegetation planted in the Terrace Banks in hexagonal prefabricated net format could enhance the soil resistance to detachment.

**Keywords:** detachment capacity; hydrodynamics; soil erodibility; plant roots; purple soil

土壤分离是土壤侵蚀的初始阶段, 它表征了土壤颗粒或团聚体脱离土体、离开原地的过程。在坡面流

侵蚀研究中, 土壤分离能力是土壤分离特性的主要量化指标, 被定义为在一定的水动力条件下, 径流含沙

量为零时的最大分离速率<sup>[1]</sup>。研究土壤分离能力的水动力学特征及其影响因素,是探究不同类型土壤侵蚀差异的重要手段,也是建立土壤侵蚀预测模型的基础。Nearing等<sup>[2]</sup>利用变坡水槽,在缓坡条件下开展径流冲刷试验,研究扰动回填土的土壤分离能力水动力学特征;张光辉等<sup>[3]</sup>在陡坡条件下研究扰动回填土土壤分离能力与水动力学参数间的定量关系。此后,学者们<sup>[4-5]</sup>对不同因素影响下原状土的土壤分离能力水动力学特征也开展了大量研究。

四川中部丘陵区由于自然及人为活动的影响,坡地水土流失十分严重。为减少水土流失并增加土地利用,该地区大力推广工程与植被相结合的护坡新技术,在工程护坡网格内种植麦冬、韭菜等植被,形成网格格式生物埂,从而达到减少水土流失、增加经济效益的目的。目前,已有研究<sup>[6-7]</sup>报道了网格格式生物埂内不同植被类型对土壤养分及土壤团聚体特征的影响,但对其土壤分离能力的水动力学特征研究还很少见。本文通过模拟拟沟水槽冲刷试验,分析在不同坡度和流量组合条件下网格格式生物埂不同植被类型原状土的土壤分离能力与水动力学参数间的定量关系,

为区域生物埂植被选择及土壤侵蚀预报模型构建提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于四川省射洪县太乙河小流域(30°40′—30°46′N, 105°18′—105°28′E)和汭溪小流域(30°46′—30°50′N, 105°23′—105°30′E),地貌为典型的紫色土丘陵,属亚热带湿润季风气候,年平均气温 17.6℃,多年平均降水量 954.3 mm,无霜期 284 d,年均日照时间 1 307 h,土壤类型以紫色土为主,植被为以柏木为优势种的亚热带常绿针阔混交林。

六棱型预制网格为正六边形,外边长 34.6 cm,宽 10 cm,厚 8 cm,相对外边距 60 cm,砣标号为 200#,压顶采用 C25 砣,其规格宽 30 cm,高 10 cm;边坡为 1:(0.8~1.2);基础若采用干砌条石宽 35 cm,高 10 cm,若采用浆砌卵石宽 35 cm,高 25~30 cm(图 1);在六棱型网格中栽种麦冬、韭菜等植物,网格格式生物埂高度不超过 1.8 m。生物埂不同植被类型土壤理化性质见表 1。

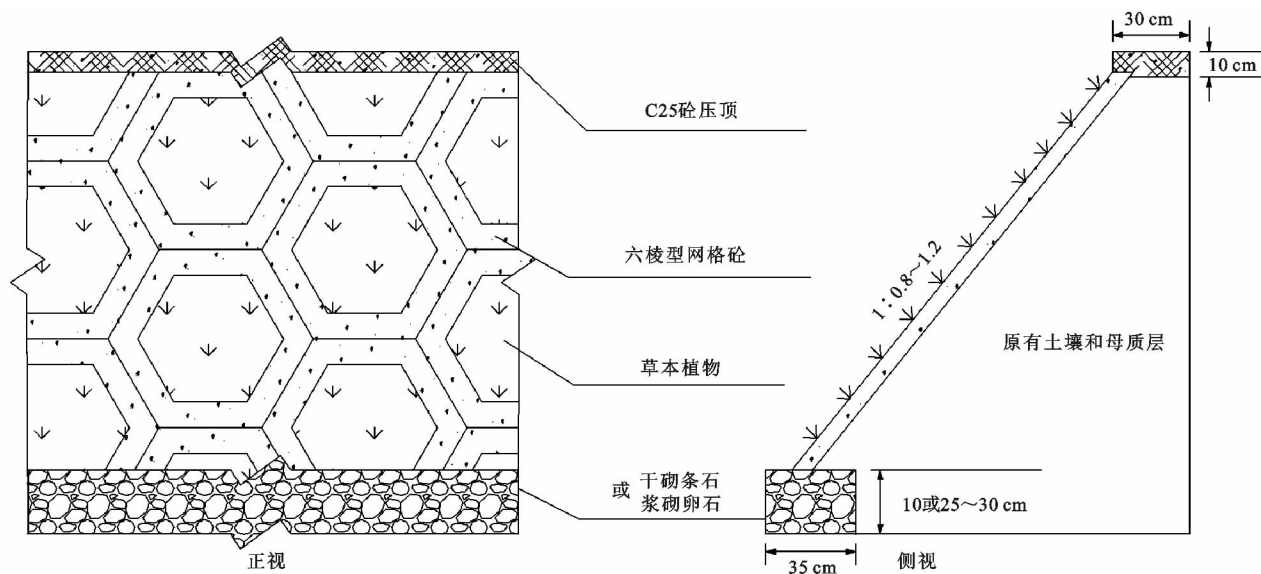


图 1 六棱型预制网格格式生物埂示意

表 1 生物埂不同植被类型土壤理化性质

生物埂 类型	容重/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	有机质/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	机械组成/%		
			砂粒	粉粒	黏粒
麦冬	1.53	7.14	45.10	40.47	14.16
韭菜	1.42	8.77	25.91	53.53	20.56
对照	1.52	10.79	36.02	45.78	18.20

### 1.2 样品采集与处理

在 2018 年 8—9 月进行野外样品采集。选取麦冬及韭菜生物埂,以单一网格格式裸坡为对照,采集护坡网格内原状土。采样时紧贴地表剪去植被地上部分后,用 500  $\text{cm}^3$  环刀(直径 10 cm,高 6.37 cm)采集包括植物根系的原状土,每种类型均分别采集 45 个原状土样(共计

135 个),同时用铝盒收集采样点剖面土样,密封后带回实验室测定土壤含水率。采集土样后用塑料盒将环刀密封并用橡皮筋捆绑,带回实验室。将环刀土样静置于容器内,并缓慢加水至环刀表面以下 1 cm 处,放置 8 h 后取出于阴凉处静置 12 h 后开始冲刷试验。

### 1.3 水动力学参数测量

试验利用可变坡钢制水槽(长 4 m,宽 0.12 m,高 0.1 m)完成(图 2)。试验中,当水槽内水流稳定后,用游标卡尺(精度 0.01 mm)测定水槽内水深:在距下端出口 0.8, 1.8 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,取其平均值作为该次试验的水深( $h$ )。采用染色法

(KMnO<sub>4</sub> 溶液)测定表面流速:记录染色液通过距水槽下端口 1.8, 0.8 m 的时间,用于计算流速,同场次试验重复测定流速 10 次,取其平均值作为表面流速( $V_s$ )。试验中测量的水深变化范围为 4.92~10.57 mm,标准差为 1.87 mm,表面流速变化范围为 1.74~3.77 m/s,标准差为 0.68 m/s。试验过程中,实时监测水温用于计算水运动黏滞系数,并以此计算雷诺数( $Re = V_s R / \nu$ )。试验中雷诺数为 10 009~37 283,平均值为 23 130,表明在所有组合条件下水流流态属于紊流,因此将表面流速乘以修正系数 0.8<sup>[8]</sup>,得到各场次的平均流速( $V$ )。利用平均水深及平均流速计算得到水流剪切力  $\tau$ <sup>[9]</sup>、水流功率<sup>[10]</sup>、单位水流功率  $P$ <sup>[11]</sup> 及过水断面

单位能量  $E$ <sup>[12]</sup>,计算公式为:

$$\tau = \rho g R S \quad (1)$$

$$\omega = \tau V \quad (2)$$

$$P = \omega S \quad (3)$$

$$E = \frac{a V^2}{2g} + h \quad (4)$$

式中: $\tau$  为水流剪切力(Pa); $\rho$  为水密度(kg/m<sup>3</sup>); $g$  为重力加速度(9.8 m/s<sup>2</sup>); $R$  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。 $\omega$  为水流功率(kg/s<sup>3</sup>); $V$  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); $a$  为校正系数,取为 1。

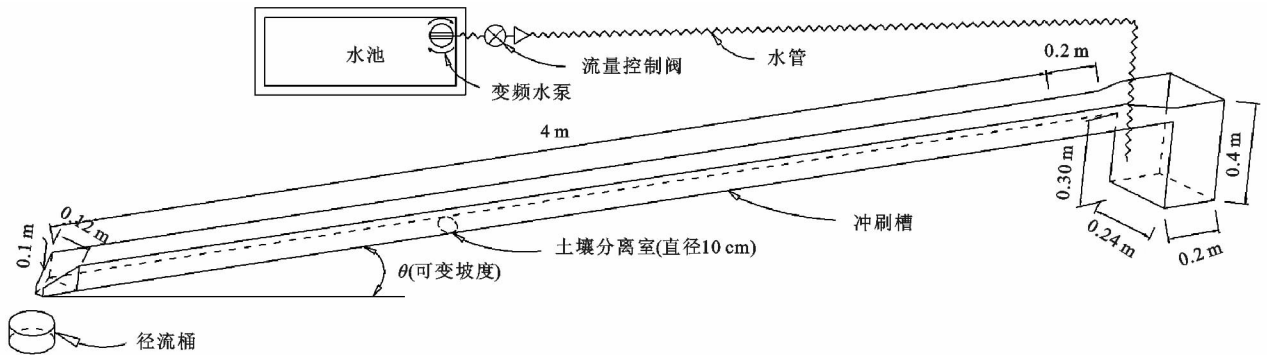


图 2 变坡水槽示意

#### 1.4 土壤分离能力的测量

将环刀内土样放于水槽土壤室内(距水槽下端出口 0.5 m),为防止漏水,用生料带缠绕环刀 4 圈左右,并盖上钢盖。待水流稳定后,揭开钢盖开始分离试验。待土壤冲刷深度达到 2 cm 时停止供水,完成本场次试验,记录试验所用时间。重复以上步骤完成其他组合条件下试验。试验设计 3 个坡度(15°, 20°, 25°)与 5 个流量(39.86, 59.98, 79.67, 100.45, 121.16 L/min)完全组合,每个组合重复 3 次,共计 135 场冲刷试验。

根据土壤含水率计算分离前土样烘干重,并将分离后的土样烘干称重。利用已测土样试验前后重量、冲刷时间可计算土壤分离能力,计算公式为:

$$D_c = \frac{W_F - W_L}{\Delta T A_d} \quad (5)$$

式中: $D_c$  为土壤分离能力(kg/(s · m<sup>2</sup>)); $W_F$  为未分离的土壤烘干重(kg); $W_L$  为分离后的土壤烘干重(kg); $\Delta T$  为试验历时(s); $A_d$  为土壤分离面积,即圆筒横截面积(m<sup>2</sup>)。

#### 1.5 细沟可蚀性及水动力学临界值

土壤基质本身对径流冲刷有一定的抵抗能力,当水流作用强度达到一定临界值才能引起土壤分离发生,可利用线性拟合来获取土壤可蚀性及临界水动力学值<sup>[13]</sup>,计算公式为:

$$D_c = K_{HP} (HP - HP_c) \quad (6)$$

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。

#### 1.6 统计分析方法

采用 Sigmaplot 12.5 软件进行数据的统计分析。用独立样本  $T$  检验评价生物埂不同植被类型对土壤分离能力的影响差异( $P < 0.05$ )。采用回归分析探究土壤分离能力和各水动力学参数(即  $\tau$ 、 $\omega$ 、 $P$  和  $E$ )的数学关系。利用线性模型拟合确定  $\tau$ 、 $\omega$ 、 $P$  和  $E$  水动力学参数所对应的可蚀性系数( $K_{HP}$ )及临界水动力学值( $HP_c$ )。 $T$  检验用于评估线性拟合方程系数显著性( $\alpha < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 水动力学参数及土壤分离能力

从表 2 可以看出,水流剪切力  $\tau$  为 13.46~38.53 Pa,平均为 24.50 Pa;水流功率  $\omega$  为 18.73~116.06 kg/m<sup>3</sup>,平均为 57.83 kg/m<sup>3</sup>;单位水流功率  $P$  为 0.37~1.40 m/s,平均为 0.84 m/s;过水断面单位能量  $E$  为 10.44~47.27 cm,平均为 27.39 cm。

独立样本  $T$  检验结果表明,麦冬土壤分离能力显著大于韭菜与对照( $P < 0.05$ ),而韭菜与对照的土壤分离能力差异不显著( $P > 0.05$ )(表 3)。各坡度不同植被类

型土壤分离能力随流量的增大而增大(图 3),且土壤分离能力平均值大小表现为麦冬(2.24 kg/(s·m<sup>2</sup>))>对照(1.34 kg/(s·m<sup>2</sup>))>韭菜(1.09 kg/(s·m<sup>2</sup>))。

表 2 试验条件下各水动力学参数值

坡度/ (°)	流量/ (L·min <sup>-1</sup> )	水流剪 切力/Pa	水流功率/ (kg·m <sup>-3</sup> )	单位水流功率/ (m·s <sup>-1</sup> )	过水断面 单位能量/cm
15	39.86	13.46	18.73	0.37	10.44
	59.98	16.27	27.01	0.44	14.74
	79.67	19.35	34.25	0.47	16.81
	100.45	21.88	38.53	0.47	16.79
	121.16	23.61	53.57	0.61	27.33
20	39.86	16.67	26.55	0.58	13.45
	59.98	21.22	39.43	0.68	18.27
	79.67	25.49	55.45	0.79	24.94
	100.45	29.06	81.11	1.02	40.70
	121.16	29.93	90.19	1.10	47.31
25	39.86	20.75	45.94	1.03	25.49
	59.98	25.35	57.27	1.05	26.64
	79.67	30.43	85.91	1.32	41.41
	100.45	35.53	97.46	1.28	39.29
	121.16	38.53	116.06	1.40	47.27

表 3 土壤分离能力独立样本 T 检验显著性分析结果

生物埂植被类型	麦冬	韭菜	对照
麦冬	1		
韭菜	0.003	1	
对照	0.015	0.179	1

注：样本数量为 15。

### 2.2 土壤分离能力与水动力学参数的关系

从表 4 可以看出,土壤分离能力与各水动力参数间呈极显著幂函数正相关。水流剪切力  $R^2$  (0.69~0.84,均值 0.75)及水流功率(0.69~0.78,均值 0.73)较接近,

表 4 生物埂不同植被类型土壤分离能力与水动力学参数拟合关系

生物埂 类型	水流剪切力 $\tau$ /Pa		水流功率 $\omega$ /(kg·s <sup>-3</sup> )		单位水流功率 $P$ /(m·s <sup>-1</sup> )		过水断面单位能量 $E$ /cm	
	方程式	$R^2$	方程式	$R^2$	方程式	$R^2$	方程式	$R^2$
麦冬	$D_c=0.013\tau^{1.597}$	0.72**	$D_c=0.061\omega^{0.890}$	0.69**	$D_c=2.619P^{0.867}$	0.44**	$D_c=0.12E^{0.886}$	0.59**
韭菜	$D_c=0.016\tau^{1.309}$	0.69**	$D_c=0.049\omega^{0.773}$	0.73**	$D_c=1.262P^{0.733}$	0.43**	$D_c=0.062E^{0.869}$	0.72**
对照	$D_c=0.037\tau^{1.119}$	0.84**	$D_c=0.119\omega^{0.603}$	0.79**	$D_c=1.514P^{0.597}$	0.50**	$D_c=0.187E^{0.602}$	0.67**

注：\*\*表示方程在 0.01 水平下显著。

### 2.3 不同类型生物埂土壤可蚀性及水动力学临界值

从表 5 可以看出,整体分析时,生物埂不同植被类型土壤可蚀性系数  $K_{HP}$  具有极显著差异( $\alpha < 0.01$ ),说明这 4 个水动力学参数均可以较好地描述其土壤分离能力,与此相反,各坡度条件下临界水动力学值  $HP_C$  与零均无显著差异( $\alpha > 0.05$ )。不同坡度下,相对麦冬,韭菜和对照可蚀性系数  $K_{HP}$  与零差异显著较多,而麦冬仅在 15°坡度下水流功率、单位水流功率及过水断面单位能量可蚀性系数  $K_{HP}$  与零差异显著( $\alpha < 0.05$ )。水动力学参

且都高于单位水流功率  $R^2$  (0.43~0.50,均值 0.46)以及过水断面单位能量  $R^2$  值(0.59~0.72,均值 0.66),表明利用水流剪切力及水流功率预测土壤分离能力的效果更好。

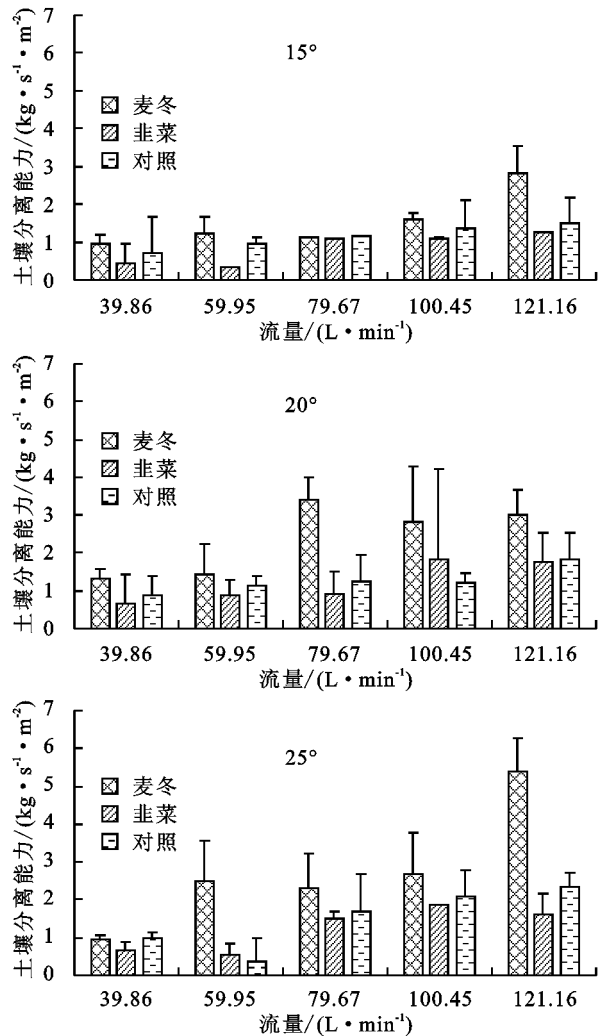


图 3 生物埂各植被类型下土壤分离能力随流量的变化

数临界值  $HP_C$  只有对照在 25°坡度下水流剪切力及单位水流功率临界值存在显著差异性( $\alpha < 0.05$ ),其临界值分别为 10.34 Pa 和 0.75 m/s。该研究结果表明,土壤可蚀性系数  $K_{HP}$  是描述土壤分离能力与水动力学参数之间显著关系的有效参数,而大多数水动力学参数的临界值  $HP_C$  与 0 无显著性差异,这与其他学者<sup>[14]</sup>的研究类似。

水流剪切力可蚀性系数  $K_c$  表现为麦冬(0.142 s/m)>韭菜(0.061 s/m)>对照(0.059 s/m),水流

功率可蚀性系数  $K_w$  表现为麦冬 ( $0.038 \text{ s}^2/\text{m}^2$ ) > 对照 ( $0.021 \text{ s}^2/\text{m}^2$ ) > 韭菜 ( $0.018 \text{ s}^2/\text{m}^2$ ), 单位水流功率可蚀性系数  $K_P$  表现为麦冬 ( $2.261 \text{ kg}/\text{m}^3$ ) > 对照 ( $1.508 \text{ kg}/\text{m}^3$ ) > 韭菜 ( $1.255 \text{ kg}/\text{m}^3$ ), 过水断面单位能量可蚀性系

数  $K_E$  表现为麦冬 ( $0.081 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^3)$ ) > 对照 ( $0.046 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^3)$ ) > 韭菜 ( $0.040 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^3)$ )。线性拟合得到临界剪切力  $\tau_c$  表现为麦冬 ( $8.75 \text{ Pa}$ ) > 韭菜 ( $6.47 \text{ Pa}$ ) > 对照 ( $1.93 \text{ Pa}$ )。

表 5 生物埂不同植被类型下土壤可蚀性系数及临界水动力值

生物埂类型	坡度/ (°)	$n$	$K_\tau$ / ( $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$\tau_c$ / Pa	$R^2$	$K_w$ / ( $\text{s}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ )	$W_c$ / ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$ )	$R^2$	$K_P$ / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$P_c$ / ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$R^2$	$K_E$ / ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$E_c$ / cm	$R^2$
麦冬	15	5	0.147	8.37	0.65	0.053*	5.16	0.85	8.263*	0.29	0.88	0.116*	3.81	0.91
	20	5	0.144	7.85	0.70	0.039	1.14E-09	0.45	3.196	0.08	0.54	0.077	6.64E-11	0.23
	25	5	0.189	15.52	0.72	0.048	22.84	0.73	7.513	0.85	0.59	0.133	15.27	0.62
	整体	15	0.142**	8.75	0.71	0.038**	2.14E-9	0.68	2.261**	1.11E-10	0.44	0.080**	3.10E-9	0.58
韭菜	15	5	0.091*	9.73	0.81	0.027	3.56	0.73	3.722	0.25	0.58	0.051	0.03	0.57
	20	5	0.088*	10.67	0.80	0.020*	9.08E-10	0.90	2.369**	0.32	0.92	0.041**	2.57E-10	0.91
	25	5	0.073*	13.05	0.80	0.018*	13.42	0.82	3.213*	0.83	0.82	0.055*	13.56	0.80
	整体	15	0.061**	6.47	0.70	0.018**	9.38E-10	0.68	1.255**	4.62E-11	0.38	0.039**	9.33E-10	0.71
对照	15	5	0.076**	3.89	0.99	0.032*	2.58E-10	0.78	3.328*	0.13	0.83	0.064*	1.26E-10	0.63
	20	5	0.051	5.61E-09	0.64	0.020	4.29E-10	0.09	1.497	2.18E-11	0.38	0.039	2.69E-10	-
	25	5	0.082**	10.34*	0.97	0.021**	2.55	0.98	3.473*	0.75*	0.90	0.060*	8.99	0.90
	整体	15	0.059**	1.93	0.84	0.021**	4.48E-10	0.54	1.508**	1.81E-11	0.34	0.046**	7.08E-10	0.45

注: \* 表示在  $\alpha < 0.05$  显著; \*\* 表示在  $\alpha < 0.01$  显著。

### 3 讨论

土壤分离能力受土壤容重、质地、黏结力和有机质等的影响<sup>[15]</sup>, 而植被根系通过物理缠绕捆绑和化学吸附胶结作用等显著改变土壤性质<sup>[16]</sup>, 进而影响土壤分离能力。通常植被影响下的土壤, 其分离能力小于裸地土壤分离能力<sup>[17]</sup>, 而本研究中对照(裸地)土壤分离能力显著小于麦冬影响下的土壤分离能力, 这可能是因为对照样地土壤前期受到踩踏压实, 土壤硬化并导致分离能力发生变化<sup>[18]</sup>。

土壤分离能力与各水动力学参数呈幂函数正相关关系, 这与 Wang 等<sup>[15]</sup>的研究结果相似。王凯等<sup>[19]</sup>在黄壤坡面研究发现, 土壤分离能力与水流剪切力、水流功率、过水断面单位能量均呈线性正相关, 而与单位水流功率呈二项式正相关; Su 等<sup>[20]</sup>研究发现, 北京不同土壤类型原状土的土壤分离能力与水流剪切力呈线性正相关, 与水流功率呈幂函数正相关; Wang 等<sup>[21]</sup>研究表明, 土壤分离能力与水流剪切力呈幂函数正相关, 而与水流功率、单位水流功率及过水断面单位能量线性正相关。可以看出, 土壤分离能力与水动力学参数间的具体数学关系的认识还尚未一致, 这可能与试验条件及土壤特性有关<sup>[9]</sup>。因此, 还需要更多的实测数据来揭示土壤分离能力与水动力学参数间的具体数学关系。

各水动力学参数对应的土壤可蚀性系数受植被

类型的影响较大, 麦冬影响下的土壤可蚀性系数显著大于韭菜影响下的土壤可蚀性系数, 而 2 种植被影响下土壤发生分离的临界剪切力均远大于对照, 这可能与 2 种植被类型的根系生物量及分布位置有关<sup>[16]</sup>。本研究中的 2 种植被类型根系均为须根, 但根系生物量及分布位置不同导致土壤性质有所差异, 从而影响土壤分离能力<sup>[17]</sup>。Wang 等<sup>[15]</sup>对比研究黄土高原自然演替草地中不同草被类型对土壤分离能力的影响, 发现不同须根系草类影响下的土壤可蚀性系数具有差异, 且临界剪切力也不同, 针茅影响下的土壤可蚀性系数最大, 为  $0.0940 \text{ s}/\text{m}$ , 硬质早熟禾影响下的土壤可蚀性系数最小, 仅为  $0.0120 \text{ s}/\text{m}$ , 而赖草、糙隐子草、白羊草影响下的土壤可蚀性系数分别为  $0.0654, 0.0229, 0.0129 \text{ s}/\text{m}$ , 均小于本研究中麦冬作用下的土壤可蚀性系数 ( $0.142 \text{ s}/\text{m}$ ), 而与韭菜作用下的土壤可蚀性系数 ( $0.061 \text{ s}/\text{m}$ ) 差异不大; 同时针茅、硬质早熟禾、赖草、糙隐子草及白羊草影响下的土壤发生分离的临界剪切力分别为  $4.3420, 2.7635, 4.7313, 3.9985, 1.7109 \text{ Pa}$ , 也远低于本研究中 2 种植被作用下土壤发生分离的临界剪切力 (麦冬  $\tau_c$  为  $8.75 \text{ Pa}$ , 韭菜  $\tau_c$  为  $6.47 \text{ Pa}$ )。总体而言, 尽管紫色土区网格生物埂不同植被类型对土壤分离能力的水动力学特征具有显著影响, 但具体的影响机理还不清楚, 需要进一步研究。

## 4 结论

(1)六棱型生物埂中,不同植被类型土壤分离能力差异显著( $P < 0.05$ );各植被类型影响下平均土壤分离能力表现为麦冬( $2.24 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ ) > 对照( $1.34 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ ) > 韭菜( $1.09 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ )。

(2)幂函数可以较好地描述土壤分离能力与水流剪切力、水流功率、单位水流功率及过水断面单位能量间的定量关系。相比而言,利用水流剪切力( $R^2 = 0.75$ )与水流功率( $R^2 = 0.73$ )预测土壤分离能力效果更好。

(3)生物埂不同植被类型下土壤分离发生的临界剪切力  $\tau_c$  表现为麦冬( $8.75 \text{ Pa}$ ) > 韭菜( $6.47 \text{ Pa}$ ) > 对照( $1.93 \text{ Pa}$ )。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Nearing M A, Bradford J M, Parker S C. Soil detachment by shallow flow at low slopes[J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55(2): 339-344.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 张光辉, 刘宝元, 何小武. 黄土区原状土分离过程的水动力学机理研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 48-52.
- [6] 黄欢, 何丙辉, 李建兴, 等. 网格式生物埂对坡面土壤养分分布特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(12): 1491-1499.
- [7] 王涛, 何丙辉, 秦川, 等. 不同种植年限黄花生物埂护坡土壤团聚体组成及其稳定性[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 153-158.
- [8] Luk S H, Merz W. Use of the salt tracing technique to determine the velocity of overland-flow[J]. Soil Technology, 1992, 5(4): 289-301.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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): 16-22.
- [12] 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.
- [13] 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): e07504.
- [14] Moffet C A, Pierson F B, Robichaud P R, et al. Modeling soil erosion on steep sagebrush rangeland before and after prescribed fire[J]. Catena, 2007, 71: 218-228.
- [15] 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.
- [16] Vannoppen W, De Baets S, Keeble J, et al. How do root and soil characteristics affect the erosion-reducing potential of plant species[J]. Ecological Engineering, 2017, 109: 186-195.
- [17] 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.
- [18] 王长燕, 郁耀闯. 黄土区冰草和柳枝稷草地土壤分离生长季变化[J]. 土壤通报, 2016, 47(4): 790-796.
- [19] 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.
- [20] Su Z L, Zhang G H, Yi T, et al. Soil detachment capacity by overland flow for soils of the Beijing region[J]. Soil Science, 2014, 179(9): 446-453.
- [21] 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.