

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0193

程 谅, 占海歌, 郭忠录. 3 种草本植物根系对土壤抗蚀特性的响应. 草业科学, 2019, 36(2): 284-294.

CHENG L, ZHAN H G, GUO Z L. Root system responses of three herbs to soil anti-erodibility. Pratacultural Science, 2019, 36(2): 284-294.

3 种草本植物根系对土壤抗蚀特性的响应

程 谅¹, 占海歌², 郭忠录¹

(1. 华中农业大学水土保持研究中心, 湖北 武汉 430070; 2. 湖北方源电力科学研究所有限公司, 湖北 武汉 430062)

摘要: 为探明南方红壤区常见草本植物根系与土壤抗侵蚀性能之间的关系, 以湖北省两种代表性土壤(黄棕壤和红壤)内生长的 3 种草本植物香根草 (*Vetiveria zizanioides*)、白三叶 (*Trifolium repens*) 和黑麦草 (*Lolium perenne*) 为研究对象, 在两种土壤中分别采集 3 种草本植物根土复合体(共 6 种根土复合体处理), 并设裸地对照, 采用集中水流冲刷试验, 测定了土壤细沟可蚀性和根系参数, 系统分析了该地区常见水土保持草本植物根系抗侵蚀特征。结果表明, 根系存在可有效增强土壤抗侵蚀性能, 不同植物的增强效果存在差异, 增强效果表现为香根草 > 白三叶 > 黑麦草; 根长密度 (RLD, root length density) 是影响土壤可蚀性的最重要根系参数, RLD 可较好地模拟两种土壤的根土复合体分离能力变化 ($R^2 \geq 0.930$), 而根重密度 (RMD, root mass density) 和根面积比 (RAR, root area ratio) 也有重要作用; 直径小于 1.0 mm 根系是影响根土复合体抗侵蚀性能的重要指标, 其中根径为 0.5~1.0 mm 的细根作用更为显著 ($P < 0.01$)。研究结果表明, 香根草是南方红壤区一种重要的水土保持植物种类, 可为区域内植被恢复中草本植物的选取以及根系特征与土壤抗蚀特性的关系研究提供理论依据。

关键词: 草本植物; 根系参数; 土壤细沟可蚀性; 土壤分离能力; 土壤抗侵蚀性能; 南方红壤区

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-0629(2019)02-0284-11

Root system responses of three herbs to soil anti-erodibility

CHENG Liang¹, ZHAN Haige², GUO Zhonglu¹

(1. Research Center of Water and Soil Conservation, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, Hubei, China;

2. Hubei Fangyuan Dongli Electric Power Science & Research Limited Company, Wuhan 430062, Hubei, China)

Abstract: To explore the relationship between herb roots and anti-erodibility in the red soil region of southern China, we examined three herbs (*Vetiveria zizanioides*, *Trifolium repens* and *Lolium perenne*) that naturally grow in two types of soil (yellow-brown and red) in Hubei Province. The soil-root composite of the three herbs were collected from two types of soil, with a total of six soil-root composite treatments. Each treatment (including the control) was subjected to concentrated flow scouring (hydraulic flume: 4.00 m long, 0.20 m wide) under three different water-flow shear stresses ranging from 2.41 to 15.03 Pa. Soil rill erodibility and root parameters were measured to investigate the effects of different soil erodibility characteristics. Results show that roots strengthen soil erodibility significantly. However, the influence of roots varied for different herbs, with *Vetiveria zizanioides* and *Lolium perenne* showing the largest and smallest enhancement effects, respectively. Root length density (RLD) was the root parameter that had the largest effect on soil erodibility, as RLD provided the most accurate simulation ($R^2 \geq 0.930$) of the soil detachment capacity change of two soil-root composites. Root mass density (RMD) and root area ratio (RAR) also had large effects on soil erodibility. Root diameters of less than 1.0 mm increased soil-root composite anti-erodibility, with the most significant effects observed for root diameters of 0.5~1.0 mm

收稿日期: 2018-04-02 接受日期: 2018-07-27

基金项目: 国家自然科学基金 (41671273)

第一作者: 程 谅 (1995-), 男, 安徽太湖人, 在读硕士生, 研究方向为水土保持与生态恢复。E-mail: 1601558599@qq.com

通信作者: 郭忠录 (1980-), 男, 山西忻州人, 副教授, 博士, 研究方向为水土保持与生态恢复。E-mail: zlguo@zhu@163.com

($P < 0.01$). Overall, we found that *Vetiveria zizanioides* is an important plant species that can improve soil and water conservation in the red soil region of southern China. Results from this study provide an herb selection reference for regional restoration projects and describe the relationship between root features and soil anti-erodibility.

Keywords: herb; parameters of roots; soil rill erodibility; soil detachment capacity; soil anti-erodibility; south red soil region

Corresponding author: GUO Zhonglu E-mail: zlguohezau@163.com

土壤侵蚀指的是土壤颗粒的分离、搬运和沉积, 自然环境中的侵蚀速率通常很慢, 但是由于人类活动引起的土地利用变化会加快土壤侵蚀速率^[1], 一般情况下, 在丘陵地区水土流失较严重的地区, 地表水流是导致土壤侵蚀的主要原因, 而水流侵蚀是指土壤颗粒在集中水流作用下发生剥离和位移, 导致细沟和沟渠的发育^[2]。植被恢复是农业区控制土壤侵蚀最重要且最有效的措施, 但是在许多热带亚热带地区(特别是在严重侵蚀的地区), 植被恢复还是存在着许多问题^[3]。植被对土壤侵蚀过程的影响主要涉及侵蚀动力和土壤抗蚀能力两个方面: 植被地上部分如冠层、枯落物和生物结皮等具有拦截降雨、涵养水源、增加入渗、增强土壤水分的蒸发、增加地表腐殖质等作用, 影响到土壤理化性质, 改善土壤质量, 以减少土壤侵蚀^[4-5]; 地下根系通过与土壤颗粒的缠绕作用来固结土壤, 以增强土壤抗侵蚀性能, 是稳定边坡和控制土壤侵蚀至关重要的因素, 另外还可通过死根与活根的生物化学过程影响到土壤性质^[5]。目前大量研究都集中于地上部分^[3], 事实上植被控制土壤侵蚀是其地上、地下部分综合作用的结果, 地下根系对控制集中水流侵蚀也具有重要作用^[4], 但由于根系隐蔽性及在土壤中分布的复杂性, 较地上部分研究相对困难, 研究工作进展相对缓慢^[6-7]。

植物根系可显著增强土壤结构稳定性以及土壤抗冲性而减小土壤侵蚀, 其作用往往是要明显强于植被地上部分^[8-9], 有研究^[10]指出霜冻期后作物根系对控制集中水流的侵蚀具有重要的作用, Zhang等^[11]针对两种草类根系对沟蚀的作用效果研究指出随着根密度的增加, 细沟可蚀性下降, 这是由于植物根系的缠绕作用可以提升土壤孔隙度, 增加土壤入渗速率, 从而控制了地表径流的形成^[12]。另外, 根系作为改善土壤侵蚀环境最重要的因素, 在土壤侵蚀预报中也受到越来越多的关注^[7, 9], Gyssels等^[13]将根系作为 WEPP(water erosion

predication project) 模型中的参数与土壤侵蚀相关联, 指出 WEPP 可很好地预测根系对细沟侵蚀的作用。

研究区位于我国南方红壤丘陵区, 由于频繁的夏季暴雨、陡峭的丘陵地形、长期不合理的土地开发利用, 导致土壤侵蚀退化严重, 是南方水土流失最为严重的区域^[14]。植被以及土壤性质与土壤侵蚀的关系是近些年国内外学者研究较多的领域之一, 但在南方红壤区的相关研究较薄弱。目前已有较多研究提出了土壤性质及水力特性与土壤分离能力的关系, 王军光等^[15]通过研究8种典型红壤在集中水流中的分离速率提出了不同破坏机制下团聚体稳定性特征参数预测土壤细沟侵蚀速率的预测方程, 还有研究^[16]指出相较于雷诺数和阻力系数等水动力学参数, 平均流速是预测土壤分离能力的最佳参数, 但都较少提出根系与土壤分离能力的关系, 因此研究南方红壤区草本植物根系对抗侵蚀特征的作用具有重要意义。本研究选取南方红壤区3种根系发达以及开发建设项目中常用的草本植物香根草(*Vetiveria zizanioides*)、白三叶(*Trifolium repens*)和黑麦草(*Lolium perenne*), 研究其根土复合体的根系特征以及在集中水流作用下的抗蚀特征, 分析比较3种草类根系对土壤抗冲性的影响, 利用 WEPP 模型细沟侵蚀预测方程定量描述根系特征与土壤分离能力之间的关系, 旨在为该地区植被恢复和建设提供理论依据, 同时为开发建设项目水土保持提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 研究区及草本植物概况

研究地点位于湖北省武汉市华中农业大学和咸宁市贺胜桥镇。华中农业大学位于武汉市东南部(30°29' N, 114°22' E), 该区域属亚热带季风湿润气候区, 年均温约16.9℃, 年平均降水量约1260mm, 且主要集中在4-8月, 区域内土壤类型为黄棕壤。

贺胜桥镇位于咸宁市咸安区 (29°40′–30°02′ N, 114°15′–114°35′ E), 该区域属热带大陆性季风湿润气候区, 年平均气温 16.8℃, 年均降水量 1577 mm, 区域土壤类型主要有红壤和红壤性水稻土。

本研究选取湖北省野外较常见的黄棕壤草地和泥质页岩发育的红壤草地, 草地内 3 种草本植物为香根草、白三叶和黑麦草。香根草的生物量大, 根系发达, 力学特性优良, 抗逆性强, 相较于其

他两种植物细根系较少; 白三叶根系较细, 分枝多, 生长迅速, 适应性抗逆性强; 黑麦草细根量大, 生长速度快, 分蘖能力强。3 种草本植物都是水土保持研究常用草种, 3 种草本植物于 2013 年春季在研究区野外种植恢复, 生长期均为 3 年左右。在试验样品采集的同时调查研究区内 3 种植物基本特性 (表 1), 由于白三叶与黑麦草分蘖较多, 因此未调查其密度。

表 1 研究区内试验草本植物特征
Table 1 Characteristics of tested herbs in the study area

植物类型 Vegetation type	生长性状 Growth traits	生长期 Growth period	盖度 Coverage/%	密度 Plant density/(plant·m ⁻²)	株高 Plant height/m
香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	草本, 须根 Herbs, fibrous roots	多年生 Perennial	80	2.29	1.88
白三叶 <i>Trifolium repens</i>	草本, 须根 Herbs, fibrous roots	多年生 Perennial	90	—	0.26
黑麦草 <i>Lolium perenne</i>	草本, 须根 Herbs, fibrous roots	多年生 Perennial	100	—	0.74

1.2 根土复合体样品采集

根土复合体试验样品于 2016 年 3–5 月份采集, 在野外选择合适的区域后随机取样, 采样深度为 0–10 cm, 根土复合体样品为直径 14 cm、高 10 cm 的圆柱体。采样前先清除地表草本以及覆盖物, 采样时, 将取样环刀 (内径 14 cm, 高 10 cm) 完全插入土壤中, 挖出环刀后慢慢削除环刀两端多余的土壤, 密封后小心运输回实验室, 避免破坏根土复合体。然后进行预处理, 将原状根土复合体置于水中吸收饱和水分, 之后取出放置 24 h 恢复至自然含水状态^[1, 3, 15], 再进行冲刷试验。共取 6 种处理和两种裸地对照 (CK): 黄棕壤香根草根土复合体、黄棕壤白三叶根土复合体、黄棕壤黑麦草根土复合体、黄棕壤裸地对照、红壤香根草根土复合体、红壤白三叶根土复合体、红壤黑麦草根土复合体、红壤裸地对照。每种处理取样 9 个。

同时在试验样点分别取两类土壤中 3 种草地以及对照裸地的表层 (0–10 cm) 土壤, 测定其基本理化性质 (表 2), 采用常规方法测定土壤理化性质^[17], 采用吸管法测定机械组成 (砂粒, 0.05~2 mm; 粉粒, 0.002~0.05 mm; 黏粒, <0.002 mm), 采用 LB 法中的快速湿润法测定水稳性团聚体, 采用环刀法测定容重, 采用重铬酸钾氧化–外加加热法测定有

机质, 采用电位法测定 pH。

1.3 冲刷试验方法

使用可变坡度水槽系统 (长 4.00 m, 宽 0.20 m, 高 0.20 m, 环刀内径 14 cm) 测定土壤分离能力 (图 1)。试验设计 3 种坡度和流量组合: 5°和 0.4 L·s⁻¹, 15°和 0.8 L·s⁻¹, 25°和 1.2 L·s⁻¹, 设置不同坡度与流量组合是为了模拟不同水流剪切力, 根据公式 (1) 和 (2) 计算得出对应水流剪切力分别为 2.41、9.31、15.04 Pa, 水流剪切力的范围选择参照耿晓东^[18]关于南方红壤坡面临界水流剪切力的研究结论及 Baets 等^[4]的研究, 每种处理在不同水流剪切力下做 3 次重复。

将根土复合体样品置于水槽底部出口处的圆柱形槽子中, 之后开始冲刷试验, 冲刷持续 2 min, 使用集流桶接泥沙样。随后将泥沙样静止放置一段时间, 倒去上清液并使用滤纸过滤, 在 105℃下烘干之后称重得泥沙分离干重。同时使用高锰酸钾染色法测定坡面表面水流流速。

根据流量计算坡面水流水深, 计算公式:

$$H = \frac{Q}{vB} \tag{1}$$

式中: H 为径流水深 (m); Q 为流量 (m³·s⁻¹); v 为流速 (m·s⁻¹); B 为水槽宽度 (m)。

根据设置坡度计算水流剪切力, 计算公式:

表 2 供试土壤基本情况
Table 2 Basic physico-chemical properties of the test soil

土壤类型 Soil type	植物类型 Vegetation type	机械组成 Particle-size distribution/%			水稳性团聚体 平均重量直径 Mean weight diameter of water stable aggregate/ mm	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	pH
		砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay				
黄棕壤 Yellow brown soil	香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	12.7 ± 0.5	46.1 ± 0.6	41.2 ± 5.4	1.45 ± 0.12	1.22 ± 0.03	16.38 ± 0.54	5.94 ± 0.12
	白三叶 <i>Trifolium repens</i>	11.9 ± 0.9	46.2 ± 0.4	41.9 ± 2.8	0.51 ± 0.06	1.29 ± 0.05	16.09 ± 0.76	5.67 ± 0.09
	黑麦草 <i>Lolium perenne</i>	10.2 ± 1.1	46.6 ± 0.8	43.2 ± 4.9	1.66 ± 0.20	1.33 ± 0.04	13.79 ± 0.37	5.76 ± 0.27
	裸地 Bare land(CK)	17.4 ± 0.6	42.7 ± 1.1	39.9 ± 2.3	0.89 ± 0.08	1.41 ± 0.08	10.34 ± 0.11	5.95 ± 0.19
红壤 Red soil	香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	12.6 ± 0.7	44.1 ± 4.1	43.3 ± 5.0	1.58 ± 0.13	1.31 ± 0.10	23.95 ± 0.21	5.33 ± 0.14
	白三叶 <i>Trifolium repens</i>	11.9 ± 0.3	44.5 ± 3.5	43.6 ± 1.8	0.58 ± 0.06	1.36 ± 0.08	20.31 ± 0.88	5.64 ± 0.33
	黑麦草 <i>Lolium perenne</i>	12.1 ± 0.8	44.6 ± 3.9	43.3 ± 2.1	1.73 ± 0.09	1.44 ± 0.03	19.58 ± 0.61	5.44 ± 0.10
	裸地 Bare land(CK)	15.0 ± 1.1	40.3 ± 1.9	44.7 ± 3.2	1.19 ± 0.08	1.47 ± 0.05	8.60 ± 0.22	5.15 ± 0.13

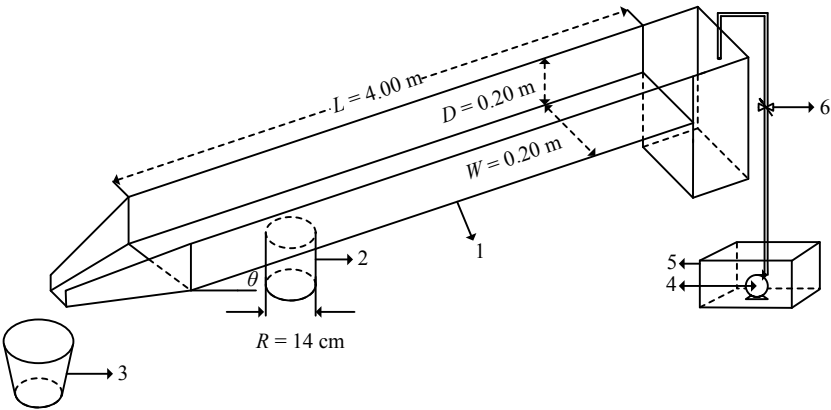


图 1 冲刷试验装置示意图
Figure 1 Diagram of scouring experiment device

1, 变坡水槽; 2, 根土复合体样品; 3, 集流桶; 4, 水泵; 5, 蓄水池; 6, 流量阀。L, 水槽长度; D, 水槽深度; W, 水槽宽度; R, 土样直径。
1, variable slope flume; 2, soil-root composite samples; 3, collecting barrels; 4, water pump; 5, reservoir; 6, flow valve. L, flume length; D, flume depth; W, flume width; R, the diameter of soil sample.

$$\tau = \rho g H S \quad (2)$$

式中： τ 为水流剪切力 (Pa); ρ 为水的密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);
 S 为坡度正弦值。

计算公式:

$$RSD = \frac{M_T}{M_{CK}} \quad (3)$$

式中： RSD 为相对泥沙分离量; M_T 为处理泥沙分

离干重 (g); M_{CK} 为对照泥沙分离干重 (g)。

土壤分离能力 (Soil detachment capacity, D_c) 计算公式:

$$D_c = \frac{Mc}{At} \quad (4)$$

式中: D_c 为土壤分离能力 [$\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$]; M_c 为泥沙分离干重 (g); A 为环刀面积 (m^2); t 为冲刷历时 (s)。

使用 WEPP 模型方程计算土壤细沟可蚀性, 公式:

$$D_c = K_r (\tau - \tau_0) \quad (5)$$

式中: K_r 为土壤细沟可蚀性 ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$), 代入 D_c 和 τ , 拟合线性方程, 其斜率即为 K_r ; τ_0 为临界水流剪切力 (Pa)。

1.4 植物根系参数测定方法

将冲刷后的根土复合体置于 0.01 mm 孔径的土壤筛上小心冲洗, 洗出所有根系 (死根 + 活根), 再采用 Epson 扫描仪对根系进行灰度扫描 (400 dpi), 利用 WinRHIZO 2000 分析软件分析扫描图像, 之后将已扫描的根系在 105 °C 下烘干后称重, 获得根系参数包括总根长、总体积、平均直径以及烘干根总重等, 再根据这些参数进行以下计算。

根长密度 (root length density, RLD) 是根系总长度除以根土复合体样品的体积^[4], 计算公式:

$$RLD = \frac{L}{V} \quad (6)$$

式中: RLD 为根长密度 ($\text{km} \cdot \text{m}^{-3}$); L 为总根长 (km); V 为环刀容积 (m^3)。

根重密度 (root mass density, RMD) 计算公式:

$$RMD = \frac{Mr}{V} \quad (7)$$

式中: RMD 为根重密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); Mr 为烘干根总重 (kg)。

根面积比 (root area ratio, RAR) 为剪切面上所有根系截面积之和与土体截面积之比^[4], 计算公式:

$$RAR = RLD \times RCSA \quad (8)$$

式中: RAR 为根面积比; $RCSA$ 为平均单根横截面积 (m^2)。

将试验结果通过回归分析得到根长密度 RLD 与两种土壤的根土复合体细沟可蚀性 K_r 的预测方程, 公式:

$$K_r = a \times \exp(b \times RLD) \quad (9)$$

式中: a 和 b 为回归参数。

1.5 数据分析

采用 Origin 2017 和 Excel 2017 软件进行图表绘制; 采用 SPSS 21.0 软件进行成对样本 t 检验分析不同植物之间土壤细沟可蚀性的差异, 对不同处理的根系参数与相对泥沙分离量进行 Pearson 相关性分析, 对相同剪切力下不同处理的根系参数进行单因素方差分析; 使用非线性回归方程确定土壤分离能力与根系参数的量化关系。

2 结果与分析

2.1 土壤分离能力和泥沙分离量

相同剪切力下 3 种草本植物的 D_c 均要显著 ($P < 0.05$) 小于 CK, 并且 6 个处理在 3 种水流剪切力作用下, RSD 均小于 0.70 ($RSD < 1$, 说明根土复合体处理抗侵蚀性能强于裸地对照), D_c 和 RSD 在同一水流剪切力下均表现为: 香根草 < 白三叶 < 黑麦草, 且具有显著差异性 ($P < 0.05$), 在两种土壤中 CK 的 D_c 分别为香根草、白三叶和黑麦草的 2.85~3.07 倍、2.06~2.37 倍和 1.43~1.56 倍, 黑麦草的 RSD 为香根草的 2 倍左右, 而香根草和白三叶的差距较小。在同一处理中, 两种土壤根土复合体 D_c 随水流剪切力的增大而增大, 其中黄棕壤黑麦草根土复合体增长率最小, 红壤白三叶根土复合体增长率最大, 而 RSD 随水流剪切力的增大变化不大, 处于相对平衡的状态 (图 2)。

2.2 RSD 与根系参数的关系

在两种土壤中, 香根草的 RLD、RMD 以及 RAR 都要显著高于白三叶和黑麦草 ($P < 0.05$), 白三叶的 RLD 显著高于黑麦草的 ($P < 0.05$), 但 RMD 和 RAR 在二者之间差异不显著 ($P > 0.05$)。两种土壤间的根系参数差距不大, 总体表现为黄棕壤 > 红壤 (图 3)。

在 3 种水流剪切力下, RSD 与 RLD、RMD 和 RAR 相关性较好, RSD 与 S_{total} 在水流剪切力为 9.31 和 15.04 Pa 时分别具有显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$) 相关性, 2.41 Pa 时无相关性 ($P > 0.05$), 而与 D_{mean} 在 3 种水流剪切力下都无相关性。故选择 RLD、RMD 和 RAR 作为代表性参数表征根系的作用 (图 4)。

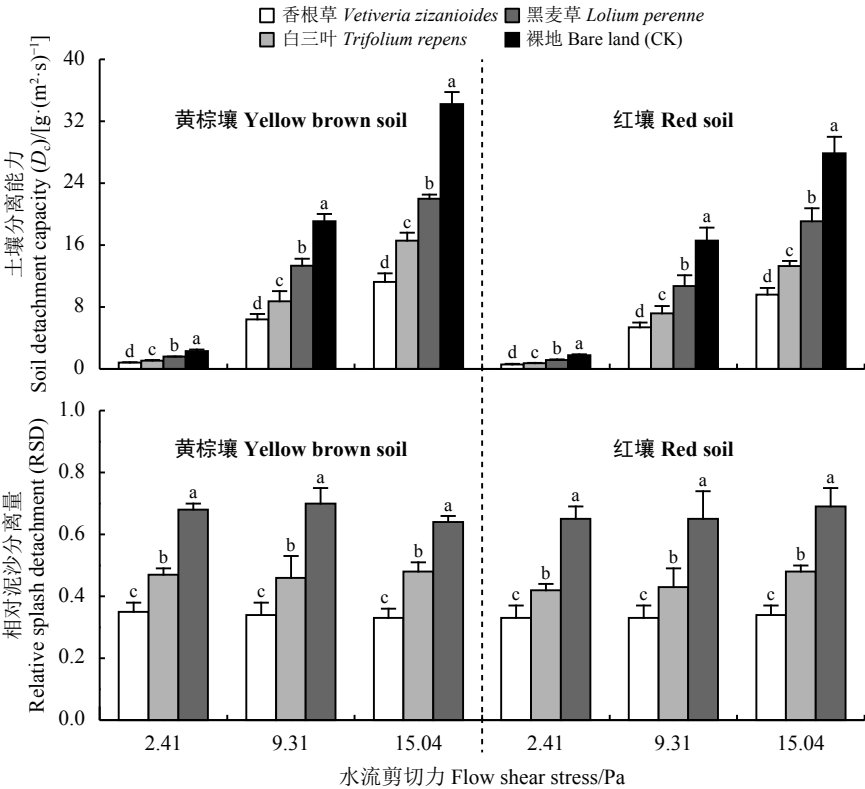


图 2 不同水流剪切力下土壤分离能力和泥沙参数

Figure 2 Soil detachment capacity and sediment parameters under different flow shear stress

不同小写字母表示不同植物间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。
Different lowercase letters show significant differences among different vegetation types at the 0.05 level; similarly for the following figures.

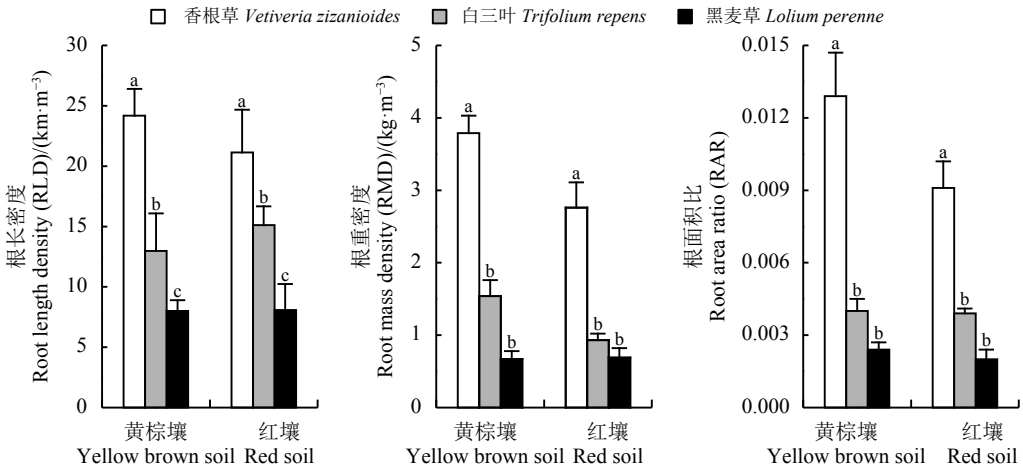


图 3 不同根土复合体根系参数

Figure 3 Parameters of roots in different soil-root composite samples

在两种土壤中，RLD、RMD 与 RAR 之间呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$)，RSD 与 RLD、RMD 和 RAR 均呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$)，且 RSD 与 RLD 相关性系数 (≥ 0.78) 在两种土壤中均为最大，而 RMD (≥ 0.64) 和 RAR (≥ 0.64) 次之，说明

RLD 是影响 2 种土壤根土复合体可蚀性最重要因素，因此再对 RLD 做进一步分析 (表 3)。
白三叶和黑麦草的根系主要集中在 0~1.0 mm 径级内，占比为 44.71%~69.79%，而香根草细根系较少，主要集中于 > 2 mm 径级内，占比为

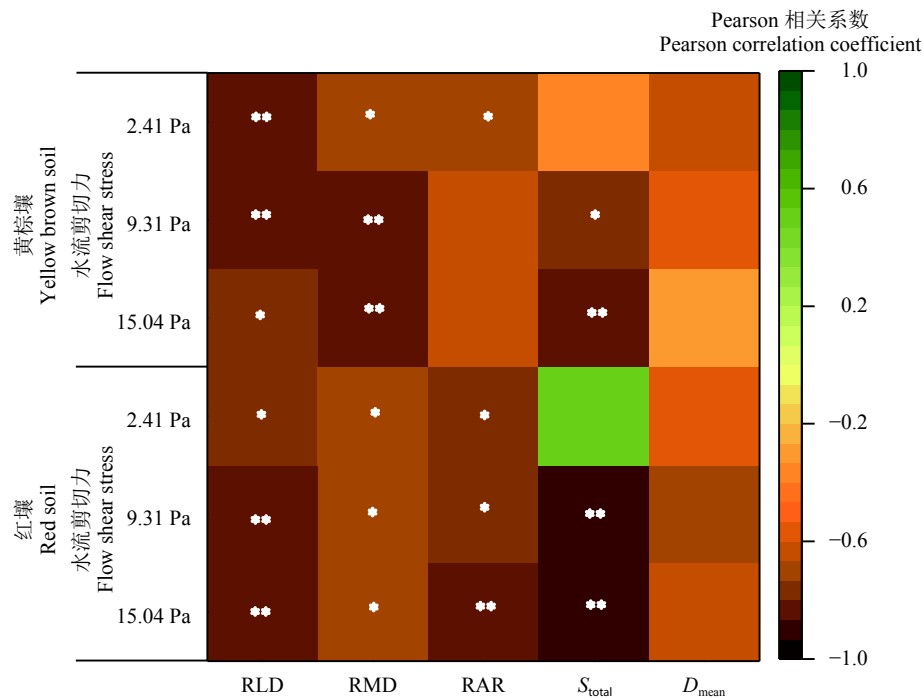


图 4 不同水流剪切力下 RSD 与根系参数相关性

Figure 4 Correlation between RSD and parameters of roots under different flow shear stress

S_{total} 为总根表面积; D_{mean} 为根平均直径。*、**分别表示在 0.05 水平上显著相关、在 0.01 水平上极显著相关 ($n=9$); 下同。
 S_{total} , root total surface area; D_{mean} , root mean diameter; *, **, indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 level, respectively ($n=9$); similarly for the Table 3.

表 3 不同根土复合体 RSD 与根系参数相关性
Table 3 Correlation between RSD and parameters of roots in different soil-root composite samples

土壤类型 Soil type	指标 Item	RSD	RLD	RMD	RAR
黄棕壤 Yellow brown soil	RSD	1.00			
	RLD	−0.78**	1.00		
	RMD	−0.66**	0.71**	1.00	
	RAR	−0.64**	0.89**	0.66**	1.00
红壤 Red soil	RSD	1.00			
	RLD	−0.83**	1.00		
	RMD	−0.64**	0.60**	1.00	
	RAR	−0.77**	0.84**	0.86**	1.00

42.94%~45.40%。在 0~0.5 mm 以及 0.5~1.0 mm 径级, 两种土壤中香根草根长百分比均显著低于白三叶和黑麦草 ($P<0.05$), 在直径 1.0~2.0 mm 的区间内 3 种植物的差异不大, 在直径 >2.0 mm 区间则表现为香根草 $>$ 白三叶 $>$ 黑麦草, 且具有显著性差异 ($P<0.05$)。结合图 3 根长密度参数计算, 两种土壤内 0~0.5 mm 以及 0.5~1.0 mm 径级根长密度均表现为香根草 $>$ 白三叶 $>$ 黑麦草 (图 5)。

通过相关性分析, RSD 与 0~0.5 mm 和 0.5~1.0 mm 根长百分比极显著相关 ($P<0.01$), 其中 0.5~1.0 mm 根长百分比的相关系数 (0.85) 最大, RSD 与 1.0~1.5 mm 和 >2.0 mm 径级的根长百分比无显著相关性 ($P>0.05$)。

2.3 土壤细沟可蚀性 (K_f) 分析

在两种土壤中 3 种草本类型的根土复合体土壤细沟可蚀性均表现为香根草 $<$ 白三叶 $<$ 黑麦草,

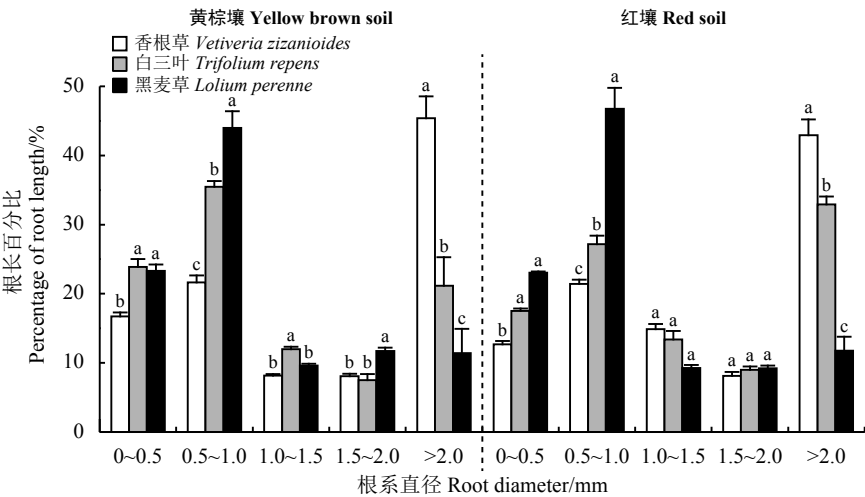


图 5 各径级根长百分比
Figure 5 Percentage of root length in each diameter

黄棕壤中香根草和白三叶根土复合体细沟可蚀性分别比黑麦草低 56% 和 50%，在红壤中分别低 50% 和 29%，因此 3 种草本植物在两种土壤中抗侵蚀性能均表现为香根草 > 白三叶 > 黑麦草。植物根系对两种土壤根土复合体作用效果差异均不大 (图 6)。

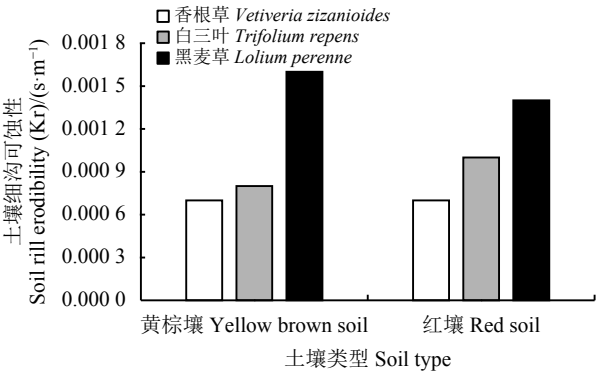


图 6 不同根土复合体土壤细沟可蚀性
Figure 6 Soil rill erodibility in different soil-root composite samples

2.4 建立根系预测土壤分离能力模型

将土壤细沟可蚀性试验结果与方程 (5) 和 (9) 结合进行回归分析，得出 RLD 与两种土壤根土复合体 D_c 的预测方程和决定系数 (图 7)。

由关系式可知 RLD 能解释两种土壤根土复合体细沟可蚀性 93.0% 和 94.8% 的变量，表明 RLD 可较好地模拟 D_c 的变化。将上述关系式的预测值与试验中的实测值进行比较，结果显示拟合度很

高，该方程能较为准确地预测两种土壤根土复合体在不同水流剪切力下的土壤分离能力 (图 7)。

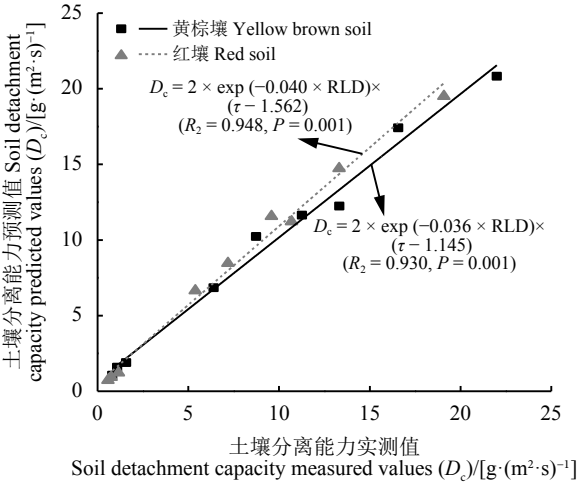


图 7 土壤分离能力预测值与实测值比较
Figure 7 Predicted soil detachment capacity versus measured values

3 讨论

3.1 根系对不同草地抗侵蚀性能的影响机制

植被可通过地表覆盖拦截降雨、增加土壤肥力与水分入渗、拦截地表径流以及根系固持土壤，改良土壤性状来减少水土流失，除了通过地下根系的作用降低土壤的可蚀性外，植被还会通过土壤水分的变化来影响土壤抗侵蚀能力^[19]。在本研究中，3 种草本植物根系均能有效增强两种土壤的抗侵蚀性能，根系通过在土体中的交叉穿插在浅层

土壤中形成稳定的根系网络, 增强土壤抵抗径流冲刷的能力^[20], 另外根系还可通过根际分泌物的生物和化学作用来改善土壤质量, 最主要的表现是通过各种过程提升土壤团聚体稳定性和有机质含量, 这是改善土体构型的关键因素, 可增强土壤抗侵蚀能力^[13]。

本研究对根系参数进行分析发现, 根长密度是提升土壤抗侵蚀性能最重要的因子, 根长密度可以较好地模拟土壤细沟可蚀性的变化 ($R^2 \geq 0.930$), 这与 Gyssels 等^[13]、Zhang 等^[11] 研究结论一致。徐少君和曾波^[21] 针对 5 种耐水淹植物的研究发现土壤抗蚀性的增强系数、抗冲性增强值与根长密度之间均呈极显著的线性关系, 其中植物本身发达的根量是关键, 根长密度是反映根系的缠绕和穿插能力的关键指标^[22]。本研究 3 种植物都具有较大的根长密度, 能有效地形成固土网络, 提升了根土复合体的抗冲性与抗剪性能, 可有效降低土壤细沟可蚀性。其中, 不同植物中直径小于 1.0 mm 根系百分比含量都为最高, 其对根土复合体泥沙分离能力作用明显, 能极显著 ($P < 0.01$) 提升土壤抗侵蚀性能, 这与 Li 等^[9]、Gyssels 等^[13] 相关的研究结论一致。根系主要是通过增加黏聚力来帮助提升土壤力学性能^[23], 土壤颗粒的粘结性能往往受到细根系的影响, 这种性能促进了土壤团聚体的形成^[24-25]; 一般认为直径小于 3.0 mm 的细根比粗根更重要, 尤其是在水蚀过程中, 细根的根网络控制水蚀最为有效^[13], 也有研究^[26-27] 指出直径小于 1.0 mm 的细根系会表现出很强的抗拉能力, 细根系由于具有更大的表面积, 所以与土壤之间的接触面积会更大, 这是提高土壤抗剪强度的关键, 使土体足以抵抗径流的冲刷作用; 另外, 细根通过与菌根和真菌的相互作用产生渗出物和结合剂, 可帮助提升土壤有机质含量以及土壤大颗粒团聚体的形成^[28], 而土壤团聚体稳定性是提升土壤抗侵蚀能力以及土体结构稳定性的关键^[24]。

不同植物根系增强土壤抗侵蚀能力表现为香根草 > 白三叶 > 黑麦草, 这是由于香根草速生快长、生物量大、根系发达, 具有优良的力学特性, 而白三叶与黑麦草根系较细, 生长速度快, 分蘖能力强, 因此其直径小于 1.0 mm 的细根系根长百分比比较高, 但是香根草的根长密度和直径小

于 1.0 mm 的细根系根长密度则更大, 使得根系与土壤间的接触面积提升, 固结土壤能力强, 增强了根土复合体抗侵蚀性能, 香根草是区域内更为理想的水土保持植物, 这与人关于香根草的固土护坡效益的研究结果相似^[29-30]。

3.2 根系对不同类型土壤抗侵蚀性能增强效应

研究结果表明, 3 种植物根系对两类土壤抗侵蚀性能均有增强效应, 其效果存在差异但差异不大, 但在总体上黄棕壤较红壤更容易被侵蚀, 这是由于根土复合体是一个复杂的系统, 其土壤可蚀性除植物根系的影响外, 也受到土壤自身性质, 如土壤类型、土壤粘结力、容重、质地、有机质、土壤含水量、团聚体等的影响^[31], 这与李强^[32] 针对紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 根系与沙黄土和黄绵土抗冲性的研究结论相似。Wynn 等^[19] 研究指出, 土壤容重可能是影响土壤分离能力最重要的土壤参数, 容重的增加会导致土壤可蚀性降低, 因为容重综合了土壤理化性质、根密度和土壤有机质含量等多种土壤特性, 也有研究^[33] 指出, 土壤粘聚力随着沙粒含量的增加而降低, 而土壤细沟可蚀性与砂粒和粘粒极显著正相关 ($P < 0.01$), 本研究中两种土壤的土壤分离能力的差异与土壤自身理化性质有关, 还需进一步研究。

4 结论

根系的存在是提升土壤抗侵蚀性能的关键, 根长密度是影响土壤细沟可蚀性最为关键的根系参数, 其可较好预测 ($R^2 \geq 0.930$) 两种土壤根土复合体的分离能力, 其中直径小于 1.0 mm 的细根系提升土壤抗侵蚀性效果最为显著 ($P < 0.01$)。

本研究选取的 3 种草本植物中, 香根草相较于其他两种草类具有更为发达的地下根系, 根系参数更优, 而白三叶与黑麦草的根系参数较为接近。根据对其根土复合体抗侵蚀性的探讨, 3 种草本植物都能较好地提升土壤抗侵蚀性能, 其效果表现为香根草 > 白三叶 > 黑麦草。由此可知, 香根草在区域内水土保持工程中是一种更为优良的固土护坡草类。3 种植物根系对两类土壤抗侵蚀性能均有增强效应, 效果不一, 而根据细沟可蚀性模拟方程中的临界剪切力发现, 区域内黄棕壤较红壤更容易被侵蚀, 其作用机理还需进一步研究。

参考文献 References:

- [1] 傅伯杰, 赵文武, 张秋菊, 刘宇. 黄土高原景观格局变化与土壤侵蚀. 北京: 科学出版社, 2014.
FU B J, ZHAO W W, ZHANG Q J, LIU Y. Changes of Landscape Pattern and Soil Erosion in the Loess Plateau. Beijing: Science Press, 2014.
- [2] NEARING M A, SIMANTON J R, NORTON L D, BULYGIN S J, STONE J. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hillslope. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, 24(8): 677-686.
- [3] ZHANG G H, TANG K M, REN Z, ZHANG X C. Impact of grass root mass density on soil detachment capacity by concentrated flow on steep slopes. *Transactions of the ASABE*, 2013, 56(3): 927-934.
- [4] MARSTON R A, HESSION W C, WYNN T, RESLER L, CURRAN J. Geomorphology and vegetation on hillslopes: Interactions, dependencies, and feedback loops. *Geomorphology*, 2010, 116(3): 206-217.
- [5] BAETS S D, POESEN J, GYSSELS G, KNAPEN A. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow. *Geomorphology*, 2006, 76(1-2): 54-67.
- [6] 史志华, 王玲, 刘前进, 张含玉, 黄萱, 方怒放. 土壤侵蚀: 从综合治理到生态调控. *中国科学院院刊*, 2018, 33(2): 198-205.
SHI Z H, WANG L, LIU Q J, ZHANG H Y, HUANG X, FANG N F. Soil erosion: From comprehensive control to ecological regulation. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 198-205.
- [7] 徐宪立, 马克明, 傅伯杰, 刘宪春, 黄勇, 祁建. 植被与水土流失关系研究进展. *生态学报*, 2006, 26(9): 3137-3143.
XU X L, MA K M, FU B J, LIU X C, HUANG Y, QI J. Research review of the relationship between vegetation and soil loss. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 3137-3143.
- [8] 刘定辉, 李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 34-37.
LIU D H, LI Y. Mechanism of plant roots improving resistance of soil to concentrated flow erosion. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(3): 34-37.
- [9] LI Y, ZHU X M, TIAN J Y. Effectiveness of plant roots to increase the anti-scourability of soil on the Loess Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 1991, 36(24): 2077-2082.
- [10] BAETS S D, POESEN J, MEERSMANS J, SERLET L. Cover crops and their erosion-reducing effects during concentrated flow erosion. *Catena*, 2011, 85(3): 237-244.
- [11] ZHANG G H, TANG K M, SUN Z L, ZHANG X C. Temporal variability in rill erodibility for two types of grasslands. *Soil Research*, 2014, 52: 781-788.
- [12] 赵鸿雁, 吴钦孝. 黄土高原森林植被水土保持机理研究. *林业科学*, 2001, 37(5): 140-144.
ZHAO H Y, WU Q X. Mechanism on soil and water conservation of forest vegetation on the Loess Plateau. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(5): 140-144.
- [13] GYSSELS G, POESEN J, BOCHET E, LI Y. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review. *Progress in Physical Geography*, 2005, 29(2): 189-217.
- [14] 陈志强, 陈志彪, 陈丽慧. 南方红壤侵蚀区典型流域土壤侵蚀危险性评价. *土壤学报*, 2011, 48(5): 1080-1082.
CHEN Z Q, CHEN Z B, CHEN L H. Assessment of soil erosion risk in watersheds typical of eroded red soil region, south China. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(5): 1080-1082.
- [15] 王军光, 李朝霞, 蔡崇法, 杨伟, 马仁明, 张国彪. 集中水流内红壤分离速率与团聚体特征及抗剪强度定量关系. *土壤学报*, 2011, 48(6): 1133-1140.
WANG J G, LI Z X, CAI C F, YANG W, MA R M, ZHANG G B. Quantitative relationships of detachment rate of red soil in concentrated flow with soil aggregate characteristics and soil shear strength. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(6): 1133-1140.
- [16] 柳玉梅, 张光辉, 李丽娟, 韩艳峰. 坡面流水动力学参数对土壤分离能力的定量影响. *农业工程学报*, 2009, 25(6): 96-99.
LIU Y M, ZHANG G H, LI L J, HAN Y F. Quantitative effects of hydrodynamic parameters on soil detachment capacity of overland flow. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(6): 96-99.
- [17] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 466-532.
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *Soil Physical and Chemical Analysis*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978: 466-532.
- [18] 耿晓东. 主要水蚀区坡面土壤侵蚀过程与机理对比研究. 杨凌: 中国科学院大学博士学位论文, 2010.

- GENG X D. Comparative study on hill slop soil erosion processes and mechanisms in main water erosion regions of China. PhD Thesis. Yangling: University of Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [19] WYNN T, MOSTAGHIMI S. The effects of vegetation and soil type on streambank erosion, southwestern virginia, USA1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2006, 42(1): 14.
- [20] 张晓艳, 周正朝. 黄土高原地区草地植被调控土壤水蚀机理的研究进展. 草业科学, 2015, 32(1): 64-70.
ZHANG X Y, ZHOU Z C. Research progress on mechanism of grassland vegetation regulating soil erosion in Loess Plateau. Pratacultural Science, 2015, 32(1): 64-70.
- [21] 徐少君, 曾波. 三峡库区 5 种耐水淹植物根系增强土壤抗侵蚀效能研究. 水土保持学报, 2008, 22(6): 13-18.
XU S J, ZENG B. Enhancement effects of 5 flooding-tolerant species' roots on soil anti-erodibility in Three Gorges reservoir region. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(6): 13-18.
- [22] 湛芸, 何丙辉, 练彩霞, 刘志鹏, 彭石磊. 三峡库区陡坡根-土复合体抗冲性能. 生态学报, 2016, 36(16): 5173-5181.
CHEN Y, HE B H, LIAN C X, LIU Z P, PENG S L. Root-soil system anti-scourability on steep slopes in the Three Gorges Reservoir Area. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(16): 5173-5181.
- [23] TIEN H W, WILLIAM P M, DOUGLAS N S. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 16(1): 19-33.
- [24] BAETS S D, POESEN J, KNAPEN A, GALINDO P. Impact of root architecture on the erosion-reducing potential of roots during concentrated flow. Earth Surface Processes & Landforms, 2007, 32(9): 1323-1345.
- [25] ZHOU Z C, SHANGGUAN Z P. Soil anti-scourability enhanced by plant roots. Journal of Integrative Plant Biology, 2005, 47(6): 676-682.
- [26] VANNOPPEN W, VANMAERCKE M, BAETS S D, POESEN J. A review of the mechanical effects of plant roots on concentrated flow erosion rates. Earth-Science Reviews, 2015, 150: 666-678.
- [27] 刘国彬. 黄土高原草地土壤抗冲性及其机理研究. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(1): 94-97.
LIU G B. Study on soil anti-scourability and its mechanism of grassland on Loess Plateau. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1998, 4(1): 94-97.
- [28] 熊燕梅, 夏汉平, 李志安, 蔡锡安. 植物根系固坡抗蚀的效应与机理研究进展. 应用生态学报, 2007, 18(4): 895-904.
XIONG Y M, XIA H P, LI Z A, CAI X A. Effects and mechanisms of plant roots on slope reinforcement and soil erosion resistance: A research review. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(4): 895-904.
- [29] 陈义君, 彭石磊, 湛芸, 李叶鑫, 王洋洋, 张越. 紫色土坡耕地香根草根系的固土抗蚀效应. 草业科学, 2015, 32(4): 485-491.
CHEN Y J, PENG S L, CHEN Y, LI Y X, WANG Y Y, ZHANG Y. Soil erosion control effectiveness of *Vetiveria zizanioides* root system in the purple soil cropland. Pratacultural Science, 2015, 32(4): 485-491.
- [30] 夏汉平, 敖惠修. 香根草生态工程应用于公路护坡的效益研究. 草业科学, 2002, 19(1): 52-56.
XIA H P, AO H X. Studies on benefits of the vetiver eco-engineering for protection of highway slopes. Pratacultural Science, 2002, 19(1): 52-56.
- [31] 史志华, 宋长青. 土壤水蚀过程研究回顾. 水土保持学报, 2016, 30(5): 1-10.
SHI Z H, SONG C Q. Water erosion processes: a historical review. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5): 1-10.
- [32] 李强. 黄土丘陵区植物根系强化土壤抗冲性机理及固土效应. 杨凌: 中国科学院大学博士学位论文, 2014.
LI Q. Mechanism of plant roots in improving resistance of soil to concentrated flow erosion and reinforcement in loess hilly region. PhD Thesis. Yangling: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [33] 林慧龙, 王苗苗, 李学玲, 王钊齐. 在模拟降水和践踏处理复合作用下长芒草典型草原土可蚀性研究. 草业学报, 2010, 19(3): 76-87.
LIN H L, WANG M M, LI X L, WANG Z Q. A study on soil erodibility in a combined experimental trampling and simulated rainfall experiment on a *Stipa bungeana* steppe in Huanxian County, Gansu Province, China. Acta Prataculturae Sinica, 2010, 19(3): 76-87.

(责任编辑 张瑾)