

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2025.02.027

CSTR:32310.14.stbcb.2025.02.027

刘均阳,周正朝,韩玮霄.不同种植密度下草本植物根系生长对土壤侵蚀阻力的影响[J].水土保持学报,2025,39(2)

LIU Junyang, ZHOU Zhengchao, HAN Weixiao. Effects of herbaceous root growth on soil resistance to erosion under different planting densities[J].

Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(2)

不同种植密度下草本植物根系生长对土壤侵蚀阻力的影响

刘均阳¹, 周正朝², 韩玮霄³

(1.延安大学生命科学学院,陕西延安716000; 2.陕西师范大学地理科学与旅游学院,陕西西安710119;

3.西安理工大学土木建筑与工程学院,陕西西安710048)

摘要: [目的] 为探讨不同种植密度下植物根系的固土减蚀效应。 [方法] 以黄土高原典型草本植物黑麦草(*Lolium perenne*)和紫花苜蓿(*Medicago sativa*)为研究对象,采用100、300、500株/m² 3个种植密度,研究不同种植密度下植物根系生长对土壤侵蚀阻力的影响。 [结果] 试验期内,植物根系特征整体呈先快速增长后缓慢下降的趋势,黑麦草和紫花苜蓿的根系特征分别在中、高密度种植样地生长最佳。在根系生长的驱动下,土壤有机质呈不断增长趋势,黑麦草和紫花苜蓿样地的土壤有机质分别在中、高密度种植下增量最大,分别增长2.44、1.84 g/kg。在根系和土壤特征变化的共同影响下,试验期内的土壤细沟可蚀性指数先快速减小后呈波动性变化,而土壤临界剪切力未表现出稳定的变化趋势。黑麦草根系在中密度种植模式下的减蚀效果最佳,其土壤细沟可蚀性指数减少18.86 s/m;紫花苜蓿根系在中、高密度种植模式下的减蚀效果较好,其土壤细沟可蚀性指数分别减少13.42、10.82 s/m。 [结论] 结合种植密度对根系及土壤特征的影响,中密度(300株/m²)和高密度(500株/m²)种植模式分别适合黑麦草和紫花苜蓿样地水土流失的综合防治。

关键词: 草本植物根系; 种植密度; 土壤侵蚀阻力; 动态变化; 黄土高原

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)02-0001-08

Effects of Herbaceous Root Growth on Soil Resistance to Erosion under Different Planting Densities

LIU Junyang¹, ZHOU Zhengchao², HAN Weixiao³

(1.School of Life Sciences, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 716000, China; 2.School of Geographical

Sciences and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 3.College of Civil and

Architectural Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: [Objective] To explore the effects of roots on soil consolidation and erosion reduction under different planting densities. [Methods] Typical herbaceous plants, including ryegrass (*Lolium perenne*) and alfalfa (*Medicago sativa*) on the Loess Plateau were selected as the research objects. By setting three planting densities, i. e. 100, 300 and 500 plants/m², the effects of plant root growth on soil resistance to erosion were studied experimentally. [Results] During the observation period, the root characteristics showed a trend of rapid increase at first and then slow decrease, with those of ryegrass and alfalfa being the best in medium and high planting-density plots, respectively. Driven by root growth, soil organic matter content showed an increasing trend, with that of ryegrass and alfalfa increasing the most in medium and high planting-density plots, which increased by 2.44 g/kg and 1.84 g/kg, respectively. Under the combined influence of changes in root and soil characteristics, rill erodibility index decreased rapidly at first and then showed a fluctuating change during the observation period, while soil critical shear stress did not show a stable trend. Ryegrass roots had the best erosion reduction effect in the medium

收稿日期: 2024-08-17

修回日期: 2024-11-06

录用日期: 2024-11-15

网络首发日期(www.cnki.net): XXXX-XX-XX

资助项目: 国家自然科学基金项目(42277320, 42407478); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2024JC-YBQN-0314, 2024JC-YBQN-0496); 延安大学博士启动项目(YAU202313804)

第一作者: 刘均阳(1987—), 女, 讲师, 博士, 主要从事植被恢复与土壤侵蚀研究。E-mail: jyliu@yau.edu.cn

通信作者: 周正朝(1980—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持相关研究。E-mail: zczhou@snnu.edu.cn

http://stbcb.alljournal.com.cn

planting-density plot, where rill erodibility index decreased by 18.86 s/m. Alfalfa roots had the better erosion reduction effect in the medium and high planting-density plots, where rill erodibility index decreased by 13.42 s/m and 10.82 s/m, respectively. [Conclusion] Considering the effect of planting density on roots and soil characteristics, the medium density (300 plants/m²) and high density (500 plants/m²) planting patterns are suitable for soil erosion control by growing ryegrass and alfalfa, respectively.

Keywords: herbaceous roots; planting density; soil resistance to erosion; dynamic change; the Loess Plateau

Received: 2024-08-17

Revised: 2024-11-06

Accepted: 2024-11-15

Online(www.cnki.net): XXXX-XX-XX

土壤侵蚀导致土壤退化、环境污染、洪涝灾害加剧等生态问题。据统计^[1],全球范围内土壤侵蚀面积约 1.643×10^7 km²,已达到地表总面积的 10.9%。若不能及时有效地遏制土壤侵蚀,人类的生存将面临严峻挑战。历经几十年的研究发现,植物可通过减小降雨的侵蚀营力及提升土壤的抗侵蚀能力等方式有效阻控土壤侵蚀过程,因此,运用植物技术保护土体稳定已被作为有效的生物措施而广泛地用于世界各地。

有研究^[2]发现,在固土和减少水土流失方面,相较于植物的地上部分(冠层、枯落物等),地下的根系起着更为显著的作用。一方面,根系通过自身的交错、穿插和压缩等物理方式,使根际周围的细小颗粒不断变大,稳固土壤结构^[3];另一方面根系通过各种分泌物改善土壤性质(土壤有机质、孔隙水压力、土壤表面电场等^[4-6]),提升土壤抗剪强力。植物根系的减蚀作用在大量研究中得以证实,例如,WANG等^[7]通过对黄土高原 10 种不同草本植物样地的冲刷试验发现,在植物根系作用下,土壤分离能力、细沟可蚀性和临界剪应力的变化分别为 0.030~3.297 kg/(m²·s)、0.004~0.447 s/m 和 4.73~1.13 Pa;王丹丹等^[8]对自然条件下黄土高原刺槐林地的抗蚀性研究发现,根系对土壤侵蚀有显著影响,且当根系密度 > 0.5 kg/m³ 时,土壤侵蚀量减小程度趋于稳定。

植物根系的减蚀效应主要与其形态特征有关。有研究^[7,9-10]表明,土壤的抗侵蚀能力与根长密度、根表面积密度、根体积密度、根重密度及根面积比呈正相关,与比根长和粗根($d > 5$ mm)占比呈负相关。种植密度是影响根系形态特征的重要因素之一。例如,在种植密度较高的情况下,植物物种之间对水分及养分等生长资源的竞争激烈,植物通过调整其根系的生长和分布,或者改变根表面积等方式,增大对水分和营养物质的吸收能力,以满足自身的生长需求^[11-12]。刘金祥等^[11]的研究发现,香根草在低密度种植的样地,其株高、分蘖数量高于高密度种植的样地等。近 20 多年内,有关植被根系的减蚀效应虽已开展大量研究,但多集中于区分不同植被种类、根系构

型的减蚀差异,较少关注种植密度对植物根系固土减蚀作用的影响,限制人们对植物根系调控土壤侵蚀机制的全面了解。

黄土高原是我国典型的生态环境脆弱区,土壤侵蚀极其严重。为保护和改善当地水土资源,一系列治理措施逐步开展,其中以 1999 年的“退耕还林(草)”的生态成效最为突出^[13]。但值得关注的是,植被的大面积恢复已接近该地区水资源植被承载力的阈值,严重威胁着该区域的生态需水和社会经济发展用水^[14]。为解决这一问题,选择并保持合理的种植密度成为黄土高原植被恢复过程中的关键问题,是实现新时期黄土高原生态建设“成效巩固和功能提升”的必经之路。为此,本研究以黄土高原典型的草本植物为研究对象,采用人工种植的方法,探析种植密度对植物根系生长及其固土减蚀作用的影响,以期获得植被恢复调控土壤侵蚀的最优种植密度。研究结果可为深入认识植物根系的减蚀效应及黄河流域生态保护和高质量发展提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设置

1.1.1 试验地准备 模拟试验场地设置在陕西省西安市陕西师范大学长安校区。试验场地内共设有 7 个种植小样方,每个样方的大小为 1.8 m × 5 m,四周由 0.5 m 高 PVC 板材进行围挡(图 1)。

试验用土采自延安市安塞区纸坊沟流域(36°46'28"~36°46'42"N,109°13'03"~109°16'46"E),位于黄土高原腹地,属粉质壤土,其黏粒(< 0.002 mm)、粉粒(0.05~0.002 mm)、砂粒(2~0.05 mm)分别为 7.29%、59.30% 和 32.41%,具有疏松多孔、土壤“黏结剂”含量低、遇水易崩解等特性。试验用土运回试验场后,依次进行风干、过 5 mm 孔径土筛、分层填装(每层 10 cm,共 3 层)。人为控制土壤体积质量与野外试验区一致,即 1.25 g/cm³。播种前,向土壤中施加尿素(25 g/m²),以利于后期种子的顺利萌发。

1.1.2 植物种植 试验植物选择黑麦草(Lolium perenne)和紫花苜蓿(Medicago sativa)。黑麦草为须

根系,主根不发达,主要由不定根和侧根组成;紫花苜蓿为直根系,具有明显主根,以及由主根上生长出的各级侧根。这2种植物生性耐寒、耐旱、适应性强,是黄土高原干旱区天然植被典型优势种,也是水土保持常用的草本植物。

根据研究区草本植被覆盖程度及覃森^[15]和聂慧莹^[16]研究中黑麦草和紫花苜蓿生长的适宜密度,本试验共设置3个种植密度,分别为100、300、500株/m²。采用单播的形式播种。低、中、高种植密度的黑麦草样地分别编号为L₁、L₂和L₃;低、中、高种植密度的紫花苜蓿样地分别编号为M₁、M₂和M₃;对对照样地编号为CK(无植物种植)(图1)。按照设计密度,于2020年11月初将种子均匀点播到试验样地内,后覆1~2 cm薄土,用手轻压使土壤与种子密接。后期进行田间常规管理,按需浇水、除杂草等。

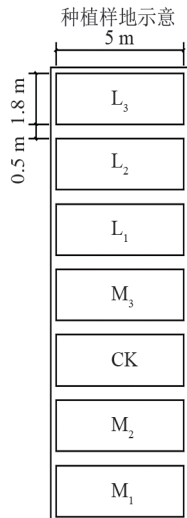


图1 试验场地信息

Fig. 1 Information of experimental site

1.2 样品采集

2021年1月采集土壤样品并测定,作为土壤指标初始值。植被出苗后(3—10月)的每月中旬分别采集根系及土壤样品。每块样地重复采样3次。具体方法为:

原状土水槽冲刷试验采用原状土取样器(长10 cm,宽10 cm,高10 cm)进行取样。采样前将植株的地上部分剪去,用橡皮锤将取样器缓慢砸进表层土内,当取样器顶部边缘与地面齐平时,用铲子慢慢将取样器挖出;冲刷试验结束后,将原状土取样器中的根-土复合体倒入0.5 mm的网袋内,用清水将根系洗净取出,与冲刷试验过程中冲出的根系一起,作为根系分析样品;土壤理化性质采用铝制饭盒(长15 cm,宽20 cm,高10 cm)进行采样。

1.3 指标测定与分析

1.3.1 土壤侵蚀阻力 土壤侵蚀阻力采用土壤细沟可蚀性指数和土壤临界剪切力进行综合表征,采用原状土水槽冲刷法测定。冲刷水槽的长3 m,宽0.1 m,高0.1 m,具体配置见文献[6]。根据黄土高原丘陵标准地块在典型强降雨造成的最大潜在径流量^[3]并参考卢超等^[17]的研究,设计5个模拟径流流量,分别为0.05、0.1、0.15、0.2、0.3 L/s,坡度设定为15°(农田转向林、草地的标准坡度^[3])。试验前,需将土壤样品在清水中饱和12 h,然后排除重力水8 h。

将装有土壤样品的取样器置于放样室内,出水口处放置水桶,用于收集冲刷下的水-土混合样。打开进水阀,径流(清水)流过取样器时开始计时,共15 min。冲刷过程中采用高锰酸钾测定径流流速,重复测定10次,取其平均值。冲刷结束后,将水桶中的泥沙样品澄清,放入烘箱内(105 °C, 24 h)烘干,记录泥沙样干重,每组试验重复3次。土壤分离速率(D_c)运用公式(1)获得,土壤细沟可蚀性指数(K_r)和土壤临界剪切力(τ_c)参照WEPP模型(water erosion prediction project)细沟水流分离方程获得,具体见公式(2)。

$$D_c = \frac{W}{At} \quad (1)$$

$$D_c = K_r(\tau - \tau_c) \quad \tau = \rho gHS \quad H = \frac{Q}{vB} \quad (2)$$

式中: W 为烘干后泥沙质量,g; A 为原状土采样器横截面积,m²; t 为冲刷时间,s; H 为坡面径流深,m; Q 为冲刷的径流流量,m³/s; v 为坡面径流的流速,m/s; B 为试验水槽的宽度,m; τ 为径流剪切力,Pa; ρ 为水的密度,kg/m³; S 为设置角度的正弦值。

1.3.2 根系参数 植物根系参数先采用根系扫描仪(万深LA-S系列)获取根系图像(分辨率设置为300 dpi),后用WinRHIZO系统(加拿大Regent Instruments Inc.)对根系图像进行分析,获取根系的总根长和总根表面积。分析后,将根系放置于烘箱内(60 °C, 8 h)烘干,获取根系干重,每组试验重复3次。根长密度(RLD)、根表面积密度(RSAD)和根重密度(RMD)的计算方法为:

$$RLD = \frac{RL}{V} \quad (3)$$

$$RSAD = \frac{RSA}{V} \quad (4)$$

$$RMD = \frac{RM}{V} \quad (5)$$

式中:RL为根系总长度,cm;RSA为根系总表面积,cm²;RM为根系干重,mg; V 为取样器的总体积,cm³。

1.3.3 土壤理化性质 土壤有机质采用外加加热重铬

酸钾容量法测定。

1.4 数据处理

基于测定分析数据,采用统计学方法,分析不同根系、土壤理化性质与土壤侵蚀阻力各指标的平均值及标准差;采用LSD多重比较法,分析不同密度处理下根系和土壤理化性质的差异显著性($p < 0.05$ 或 $p < 0.01$);采用Pearson相关分析法,分析不同种植密度样地间根系、土壤理化性质与土壤侵蚀阻力的显著相关性。文中数据分析及图形建立主要使用软件SPSS 26.0(IBM SPSS Statistics, 2019)和Origin Pro 8.6(Origin Lab. Corp. 2018)完成。

2 结果与分析

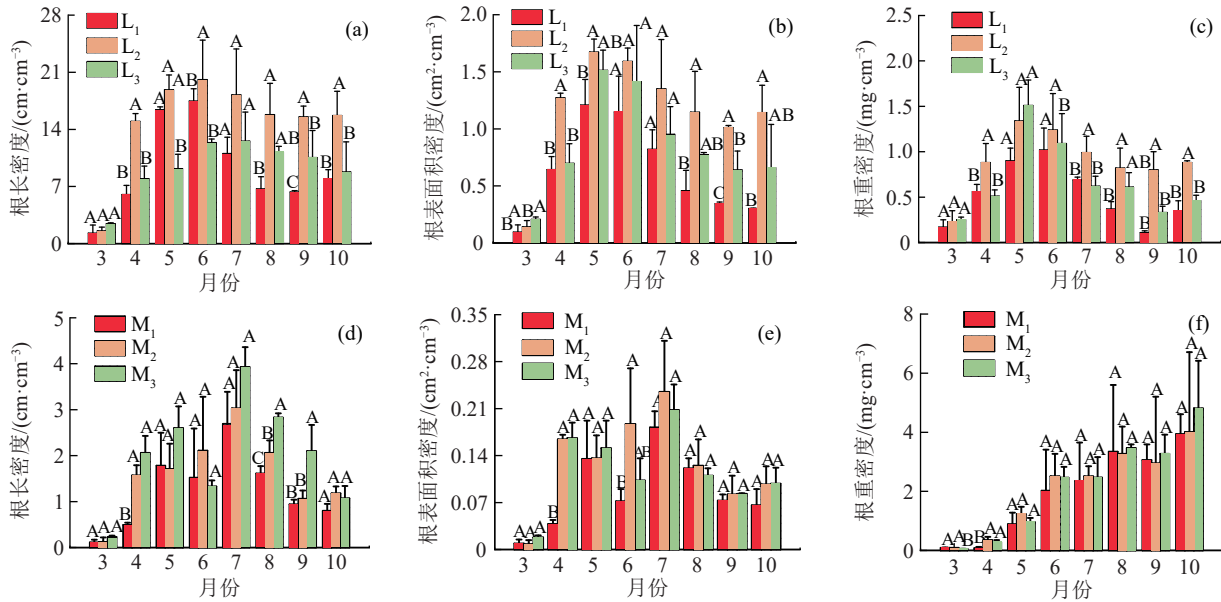
2.1 不同种植密度样地的根系特征

试验期内,黑麦草根长密度先快速增长后逐渐下降。在生长初期, L_3 样地的根长密度最大,为 2.43 cm/cm^3 , 其次是 L_2 样地 (1.55 cm/cm^3) 和 L_1 样地 (1.29 cm/cm^3)。但 3 月之后(除 5、6 月外), L_2 样地的根长密度最大, L_3 样地次之, L_1 样地最小(图 2a); 紫

花苜蓿根长密度同样呈先快速增长后逐渐下降的趋势。除 6、10 月外, M_3 样地的根长密度最大, M_2 样地次之, M_1 样地最小(图 2d)。

黑麦草根表面积密度呈先快速增加后逐渐减小的趋势。在生长初期, L_3 样地的根表面积密度最大,为 $0.207 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$, 其次是 L_2 样地 ($0.142 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$) 和 L_1 样地 ($0.095 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$)。但 3 月之后, L_2 样地的根表面积密度最大, L_3 样地次之, L_1 样地最小(图 2b); 紫花苜蓿根表面积密度在生长期内的变化趋势与黑麦草样地类似。除 6—8 月外, M_3 样地的根表面积密度最大, M_2 样地次之, M_1 样地最小(图 2e)。

黑麦草根重密度整体呈先增加后减小的趋势。在生长初期, L_3 样地的根重密度最大,为 0.249 mg/cm^3 , 其次是 L_2 样地 (0.226 mg/cm^3) 和 L_1 样地 (0.165 mg/cm^3)。但 3 月之后(除 4、7 月外), L_2 样地的根重密度最大, L_3 样地次之, L_1 样地最小(图 2c); 紫花苜蓿的根重密度在生长期内逐步增加。8 月之前, M_2 样地的根重密度高于其他 2 个密度样地; 8 月之后, M_3 样地的根重密度最大(图 2f)。



注:图中不同字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 2 不同种植密度样地的根系特征

Fig. 2 Root characteristics in plots with different planting densities

2.2 不同种植密度样地的土壤有机质

试验期内,黑麦草样地的土壤有机质呈稳步增加趋势。不同种植密度样地间, L_2 样地的土壤有机质增长最多,为 2.44 g/kg , L_1 、 L_3 样地的有机质增量相近,分别为 1.10 、 1.09 g/kg (图 3a); 紫花苜蓿样地的土壤有机质也呈逐渐增加趋势。其中, M_3 样地的土壤有机质增量最大,为 1.84 g/kg , 其次是 M_2 样地 (1.46 g/kg) 和 M_1 样地 (1.09 g/kg) (图 3b)。由此可见,黑麦草和紫花苜蓿根系的生

长发育促进土壤有机质增加,且受种植密度的影响。

2.3 不同种植密度样地的土壤侵蚀阻力

试验期内,不同种植密度黑麦草样地的土壤细沟可蚀性指数在 1—5 月迅速下降,减蚀率达到 $40.00\% \sim 63.35\%$,之后呈波动变化。其中, L_2 样地的土壤细沟可蚀性指数变化最大,共减小 18.86 s/m , 其次是 L_3 和 L_1 样地,分别减少 13.79 、 11.14 s/m (图 4a); 不同种植密度紫花苜蓿样地的土壤细沟可蚀性指数也呈先快速降低

后波动变化。M₂和M₃样地的土壤细沟可蚀性指数减少量相对较大,分别为 13.42、10.82 s/m(图 4b)。试验

期内,黑麦草和紫花苜蓿样地土壤临界剪切力均未表现出明显的变化趋势(图 5)。

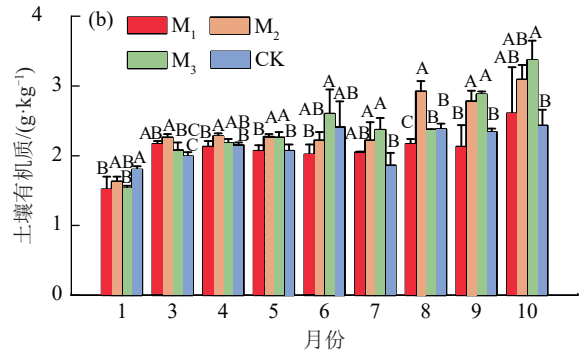
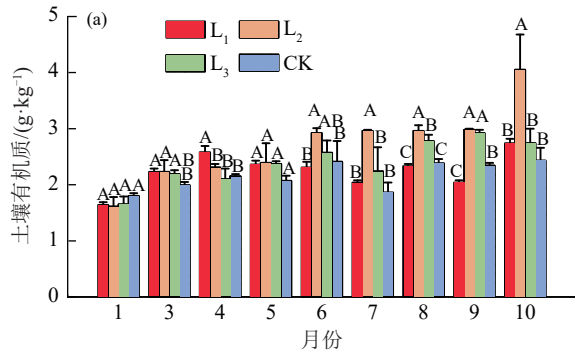


图 3 不同密度处理样地的土壤有机质

Fig. 3 Soil organic matter contents in plots with different planting densities

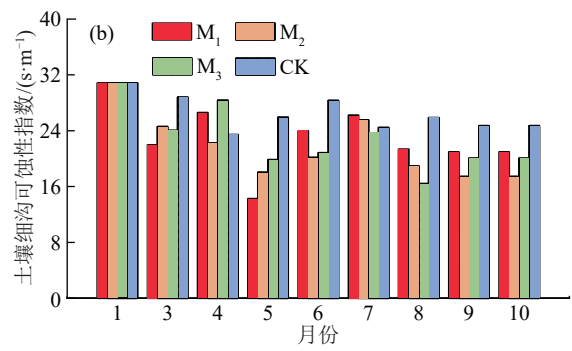
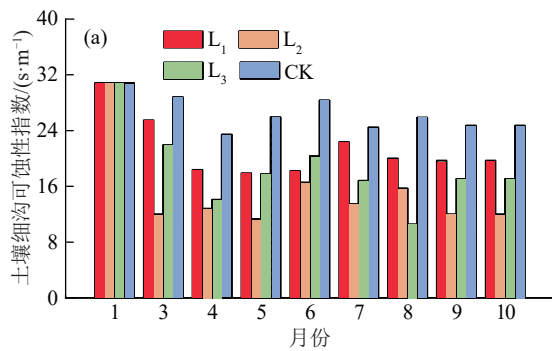


图 4 不同密度处理样地的土壤细沟可蚀性指数

Fig. 4 Rill erodibility index of plots with different planting densities

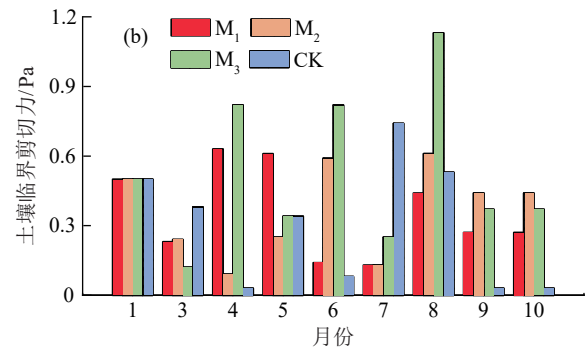
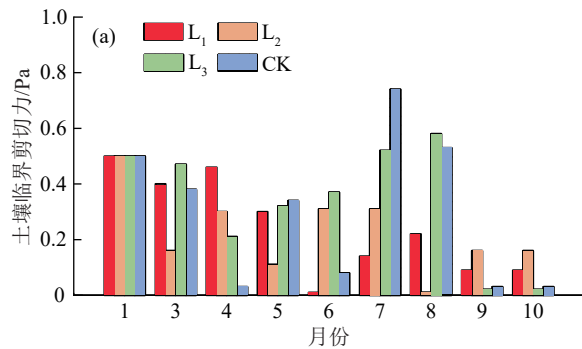


图 5 不同密度处理样地的土壤临界剪切力

Fig. 5 Soil critical shear stress of plots with different planting densities

2.4 根系及土壤理化性质与土壤侵蚀阻力的相关性

对根系、土壤参数与土壤侵蚀阻力进行相关性分析(表 1)表明,黑麦草样地的土壤细沟可蚀性指数与根长密度、根表面积密度、根重密度及土壤有机质呈极显著相关($p < 0.01$),土壤临界剪切力与根长密度

和土壤有机质呈显著相关($p < 0.05, p < 0.01$);紫花苜蓿样地的土壤细沟可蚀性指数与根长密度、根重密度及土壤有机质呈显著相关($p < 0.05, p < 0.01$),土壤临界剪切力与根系及土壤性质参数无显著相关性。

表 1 根系、土壤参数与土壤侵蚀阻力的相关系数

Table 1 Correlation coefficients of root and soil parameters and soil resistance to erosion

样地	指标	根长密度	根表面积密度	根重密度	土壤有机质
黑麦草	土壤细沟可蚀性指数	-0.758**	-0.708**	-0.686**	-0.565**
	土壤临界剪切力	-0.402*	-0.255	-0.247	-0.397*
紫花苜蓿	土壤细沟可蚀性指数	-0.392*	-0.370	-0.639**	-0.778**
	土壤临界剪切力	-0.160	0.085	0.054	0.047

注:**表示在 0.01 级别(双尾)显著性相关;*表示在 0.05 级别(双尾)显著性相关;N=63。

3 讨论

3.1 不同种植密度下根系特征的变化及其对土壤性质的影响

试验期内,根系特征整体呈先快速增长后逐渐降低的变化趋势(图2)。主要是因为,在生长初期,气温及降雨的不断增加促使草本植物根系迅速生长。随着气温及降雨的持续增加,根系的呼吸作用逐渐受到抑制,生长速度随之降低。此时,根系还需为植物的开花和结果过程提供养分,以及为土壤生物提供食物。因此,根系特征参数出现下降趋势。陈雨彤等^[18]对狗尾巴草(*Setaria viridis*)根系特征的定期监测(5—8月)中也发现相同的变化规律。

各样地的植物根系特征变化受到种植密度的影响。黑麦草根系特征差异在生长初期表现为 L_3 样地 $>L_2$ 样地 $>L_1$ 样地,而在生长后期表现为 L_2 样地 $>L_3$ 样地 $>L_1$ 样地(图2),主要是因为,在生长初期,土壤空间配置及养分含量充足,植株个体根系发育充分,因而种植密度越高,根系参数的增长速度越快。随着根系数量及体积的不断增加,根系之间竞争逐渐增强,在生长资源(空间及养分等)不足的情况下,高密度种植的根系生长受到抑制^[19],而低密度种植的根系由于播种数量较少,增长速度依旧相对缓慢;紫花苜蓿的根系特征差异在试验期表现为 M_3 样地 $>M_2$ 样地 $>M_1$ 样地(图2),主要是因为紫花苜蓿是直根系植物,其主根粗,细根少,且生长较为缓慢^[15]。试验期内,土壤空间配置及养分充足,植株个体根系能够正常生长,以致高密度种植模式下紫花苜蓿根系的生长最佳,与刘金祥等^[11]和王树丽等^[12]的研究结果基本一致。因此,本研究中,中、高密度种植模式分别适于黑麦草和紫花苜蓿根系的生长。

在根系生长驱动下,试验期内土壤有机质呈逐渐增加趋势。植物根系通过分泌、分解和转化等多种方式,促进土壤有机质的积累,增加土壤的有机质量分数^[20-21]。本试验中,植物根系的良好发育有效实现土壤有机质的显著增加。LIU等^[20]通过16周的盆栽试验也发现,植物根系的生长促进土壤有机质的显著增加。各种种植样地土壤有机质的变化同样受到种植密度的影响。黑麦草在 L_2 样地的土壤有机质增长最多,其次是 L_3 和 L_1 样地;紫花苜蓿的 M_3 样地土壤有机质增量最多, M_2 样地次之, M_1 样地最少(图3),是因为在模拟试验的相对较短时间内,土壤有机质变化主要来自于植物根系的生长。因此,不同种植密度样地间,植物根系特征差异一定程度上决定各样地间土壤有机质变化的差异,LIU等^[22]对黑麦草进行112 d的培育发现,低密度种植样地的土壤

有机质增长量大于高密度种植样地,与本研究结果相似。

3.2 不同种植密度下根系生长对土壤侵蚀阻力的影响

本试验中,伴随植物根系的生长,土壤细沟可蚀性指数明显减小(图4)。WANG等^[23]对黄土高原典型草本植物根系的减蚀效应试验发现,植物根系的生长使土壤细沟可蚀性下降21.7%~89.5%;程谅等^[24]研究南方红壤区草本植物根系与土壤抗侵蚀性能之间的关系提出,草本植物根系可有效增强土壤抗侵蚀性能。主要是由于:1)物理作用,植物根系通过自身的交错、穿插和压缩等物理方式,使根际周围的细小颗粒不断变大,增加土体的团粒结构以及土壤的抗剪强度^[3,7,23];2)化学作用,植物根系通过向土壤中输入大量分泌物,增加土壤有机质,进而增强土壤入渗,提升土壤结构的稳定性^[3,25]。

不同种植密度样地间,植物根系的减蚀效应也具有明显差异。黑麦草根系在中密度种植模式下对土壤细沟可蚀性指数影响最大;紫花苜蓿根系在中、高密度种植模式下对土壤细沟可蚀性指数的影响较大(图4)。一方面是因为不同种植密度样地的根系特征差异显著,直接影响根系对土壤“加筋锚固”等物理作用的发挥;另一方面,是因为植物根系的特征差异造成各样地间土壤有机质增量的差异,间接影响根系对土壤“调渗固土”等化学作用的发挥。因此,根系密度越高,减蚀效果越明显。可能是种植密度和培育时间等试验设置的差异,一些研究结果与本试验略有不同。例如,丁培^[26]对塔里木河流域常见草本植物进行12周的培育发现,高密度种植样地的根系密度显著高于低密度种植样地,并具有更显著的固土减蚀作用;LIU等^[22]通过112 d的盆栽试验发现,黑麦草根系在低密度种植模式下的减蚀效果优于高密度种植模式,而紫花苜蓿根系在低、高密度种植模式下的减蚀效果无显著差异。

本试验中,植物根系的生长对土壤临界剪切力未表现出明显的影响规律(图5)。目前,有关植被根系与土壤临界剪切力相关关系的研究已大量开展,但未得到统一的结论。例如,ZHANG等^[27]通过人工模拟种植的方法发现,根系生长对土壤临界剪切力无显著影响;WANG等^[23]通过水槽冲刷试验发现,植物根系生长提高土壤临界剪切力。主要由2个原因导致:1)土壤临界剪切力主要与表层土壤性质有关,而表层土壤性质极易受到外界环境的影响,具有较强的不稳定性^[28];2)不同的试验是基于差异较大的环境背景和冲刷强度下进行的,而这些因素对土壤

细沟侵蚀过程的影响极大。这也是本试验中土壤临界剪切力与根系特征参数及土壤有机质无显著相关性,甚至是负相关的主要原因。

综上可知,植物根系生长可增强土壤的侵蚀阻力,并且中密度种植模式(300株/m²)和高密度种植模式(500株/m²)分别适合于黑麦草和紫花苜蓿样地水土流失的综合防治。但对于多年生植物,本试验的观测周期较短(仅为1a),较难精准反映植物根系生长稳定后的实际减蚀效应。因此,还需开展更多深入的科学研究,以期在满足黄土高原水资源植被承载力的基础上,实现植被恢复阻控土壤侵蚀的最优化。

4 结论

本研究采用人工模拟种植的方法,对不同种植密度下黄土高原典型草本植物根系的减蚀效应进行了试验研究。研究发现,合理的种植密度可使植物根系充分、有效地利用土壤资源,实现植物根系生长最优化以及土壤环境改善的最大化,进而提高植物根系的固土减蚀效应。本研究中,基于种植密度对根系生长及土壤性质的影响,中密度(300株/m²)和高密度(500株/m²)种植模式分别适合黑麦草和紫花苜蓿根系的固土减蚀作用的发挥。因此,为实现新时期黄土高原生态治理成效的巩固和提升,建议选择并保持适于根系减蚀效应发挥的最优种植密度,以期植被恢复生态效益的最大化。

参考文献:

- [1] WANG B, ZHANG G H, SHI Y Y, et al. Effects of near soil surface characteristics on the soil detachment process in a chronological series of vegetation restoration [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(4):1213-1222.
- [2] LIU J Y, ZHOU Z C, ZHU B B, et al. Quantifying the effects of the plant canopy, plant roots, and biological soil crust on soil detachment by overland flow [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2022, 22(2):457-469.
- [3] LI Q, LIU G B, ZHANG Z, et al. Relative contribution of root physical enlacing and biochemical exudates to soil erosion resistance in the Loess soil [J]. *Catena*, 2017, 153:61-65.
- [4] 肖海, 张文琪, 夏振尧, 等. 狗牙根覆盖对三峡库区消落带波浪作用力和侵蚀的影响 [J]. *中国水土保持科学*, 2024, 22(4):34-40.
XIAO H, ZHANG W Q, XIA Z R, et al. Influence of *Cynodon dactylon* cover on the wave force and wave erosion of purple soil in the water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir [J]. *Chinese Science of Soil and Water Conservation*, 2024, 22(04):34-40.
- [5] 林杰, 张相, 姜姜, 等. 水力侵蚀过程中土壤有机碳循环研究进展 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(6):187-194.
LIN J, ZHANG X, JIANG J, et al. A review on the soil organic carbon cycling under water erosion [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2022, 46(6):187-194.
- [6] LIU J Y, YANG Y N, ZHENG Q W, et al. Response of soil aggregate stability and rill erodibility to soil electric field [J]. *Catena*, 2022, 215:e106338.
- [7] 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]. *Science of the Total Environment*, 2021, 754:e142304.
- [8] 王丹丹, 许海超, 单志杰, 等. 黄土高原刺槐林地根系与枯落物对土壤侵蚀的影响 [J]. *水土保持学报*, 2023, 37(2):83-89.
WANG D D, XU H C, SHAN Z J, et al. Effects of robinia pseudoacacia litter cover and roots on soil erosion in the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(2):83-89.
- [9] BURYLO M, REY F, MATHYS N, et al. Plant root traits affecting the resistance of soils to concentrated flow erosion [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, 37(14):1463-1470.
- [10] ERKTAN A, CÉCILLON L, GRAF F, et al. Increase in soil aggregate stability along a Mediterranean successional gradient in severely eroded gully bed ecosystems: Combined effects of soil, root traits and plant community characteristics [J]. *Plant and Soil*, 2016, 398(1):121-137.
- [11] 刘金祥, 张涛, 许小玉. 种植密度对香根草生长动态及生物量的影响 [J]. *湖北农业科学*, 2013, 52(17):4126-4129.
LIU J X, ZHANG T, XU X Y. Effects of planting density on dynamic growth and biomass of vetiver [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2013, 52(17):4126-4129.
- [12] 王树丽, 贺明荣, 代兴龙, 等. 种植密度对冬小麦根系时空分布和氮素利用效率的影响 [J]. *应用生态学报*, 2012, 23(7):1839-1845.
WANG S L, HE M R, DAI X L, et al. Effects of planting density on root spatiotemporal distribution and plant nitrogen use efficiency of winter wheat [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(7):1839-1845.
- [13] 傅伯杰, 刘彦随, 曹智, 等. 黄土高原生态保护和高质量发展现状、问题与建议 [J]. *中国科学院院刊*, 2023, 38(8):1110-1117.
FU B J, LIU Y S, CAO Z, et al. Current conditions, issues, and suggestions for ecological protection and high-quality development in Loess Plateau [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, 38(8):1110-1117.

- [14] FENG X M, FU B J, PIAO S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6: 1019-1022.
- [15] 覃淼. 黄土区典型草被生长过程中根系对土壤抗冲性影响的实验研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2016.
QIN M. Experimental study on the influence of root system on soil anti-scourability during the growth of typical grass cover in loess area[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2016.
- [16] 聂慧莹. 苜蓿种植密度对工程堆积体坡面侵蚀的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
NIE H Y. Effect of *Medicago sativa* planting density on slope erosion of engineering accumulation[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2021.
- [17] 卢超, 马周加, 李佳辉, 等. 冻融条件下土壤侵蚀阻力影响因素[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(6): 25-33.
LU C, MA Z, LI J H, et al. The factors influencing soil erosion resistance under freeze-thaw conditions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(6): 25-33.
- [18] 陈雨彤, 李法虎. 一年野生草本植物根系力学性能动态变化特征[J]. *人民长江*, 2018, 49(9): 19-25.
CHEN Y T, LI F H. Dynamic variation of root mechanical properties for annual wild herbaceous vegetations[J]. *Yangtze River*, 2018, 49(9): 19-25.
- [19] 马兆惠, 车仁君, 王海英, 等. 种植密度和种植方式对超高产大豆根系形态和活力的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(6): 1084-1094.
MA Z H, CHE R J, WANG H Y, et al. Effect of different seeding rates and planting patterns on root morphological traits and root vigor of super-high-yield soybean cultivars[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(6): 1084-1094.
- [20] LIU J E, ZHANG X C, ZHOU Z C. Quantifying effects of root systems of planted and natural vegetation on rill detachment and erodibility of a loessial soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 195: e104420.
- [21] 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.
- [22] LIU J Y, ZHOU Z C, LIU J E, et al. Effects of root density on soil detachment capacity by overland flow during one growing season[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2022, 22(5): 1500-1510.
- [23] 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.
- [24] 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[J]. *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[J]. *Prata-cultural Science*, 2019, 36(2): 284-294.
- [25] WANG C G, LI H R, XUE S B, et al. How root and soil properties affect soil detachment capacity in different grass-shrub plots: A flume experiment[J]. *Catena*, 2023, 229: e107221.
- [26] 丁培. 模拟降雨下根系密度对土壤侵蚀和侵蚀性的影响[J]. *水利科学与寒区工程*, 2022, 5(2): 40-44.
DING P. Effects of root density on loam erosion and erosivity under simulated rainfall [J]. *Hydro Science and Cold Zone Engineering*, 2022, 5(2): 40-44.
- [27] ZHANG G H, TANG K M, REN Z P, et al. Impact of grass root mass density on soil detachment capacity by concentrated flow on steep slopes[J]. *Transactions of the ASABE*, 2013: 927-934.
- [28] 张光辉. 对土壤侵蚀研究的几点思考[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(4): 21-30.
ZHANG G H. Several ideas related to soil erosion research [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(4): 21-30.