

黄土高原典型灌草植物根系生物力学特性及其相互关系

苏雪萌¹, 周正朝², 刘俊娥², 曹玉莹², 刘均阳³

(1. 陕西理工大学人文学院, 陕西 汉中 723001; 2. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710000; 3. 延安大学生命科学学院, 陕西 延安 716000)

摘要: [目的] 为探究不同灌草植物根系生物力学特性的差异性及其相互关系。[方法] 选取黄土高原地区 6 种常见的水土保持灌草植物, 系统研究其根系形态、化学成分和抗拉力学特性及其相互关系。[结果] 1) 6 种灌草植物根系直径(D)主要以细根($<2\text{ mm}$)为主, 根长密度(RLD)、根表面积密度(RSAD)和根生物量密度(RMD)不同土层深度分布呈显著差异性($p<0.05$); 白羊草的 D 、RLD、RSAD 和 RMD 与其他 5 种植物存在显著差异性($p<0.05$)。2) 6 种植物根系平均抗拉强度(T_r), 白羊草根系平均 T_r 分别是苔草、铁杆蒿、芨蒿、柠条和狼牙刺的 6.83、15.03、30.15、7.01、14.15 倍; 植物根系 T_r 随着 D 增加呈幂函数或指数函数递减趋势; 6 种植物根系纤维素、木质素、半纤维素和综纤维素的质量分数分别为 13.43%~52.12%、5.87%~26.31%、1.01%~32.18% 和 17.60%~51.8%, 不同植物根系各化学成分与各径级存在显著差异($p<0.05$)。3) 植物根系极限延伸率($\epsilon_{\max}$)和 T_r 与半纤维素质量分数存在显著正相关($p<0.05$), 而且 D 与化学成分、 $\epsilon_{\max}$ 和 T_r 呈显著负相关($p<0.05$), 其植物根系形态和化学成分对根系抗拉力学特性的总解释为 62.91%。[结论] 研究结果为黄土高原进一步生态修复的乡土物种选择和根系固土的内在机制提供科学依据与理论指导。

关键词: 植物根系; 形态特性; 抗拉特性; 化学成分; 黄土高原

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)04-0071-10

Biomechanical Characteristics and Their Interrelationships of Root Systems of Typical Shrub and Herb Plants on the Loess Plateau

SU Xuemeng¹, ZHOU Zhengchao², LIU June², CAO Yuying², LIU Junyang³

(1. School of Humanities, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723001, China;

2. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China;

3. School of Life Sciences, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 716000, China)

Abstract: [Objective] To explore the differences of roots biomechanical characteristics of different plants and the relationships between biomechanical characteristics. [Methods] Six common soil and water conservation shrub and herb plants on the Loess Plateau were selected. Their root morphology, chemical composition, and tensile properties, as well as their relationships, were systematically studied. [Results] 1) The root diameter (D) of the six plants was mainly fine roots ($<2\text{ mm}$). The root length density (RLD), root surface area density (RSAD), and root mass density (RMD) at different soil depths showed significant differences ($p<0.05$). The D , RLD, RSAD and RMD of *Bothriochloa ischaemum* were significantly different from those of the other five plants ($p<0.05$). 2) The average root tensile strength (T_r) of *B. ischaemum* was 6.83, 15.03, 30.15, 7.01 and 14.15 times of that of *Carex tristachya*, *Artemisia gmelinii*, *Artemisia giraldii*, *Caragana korshinskii*, and *Sophora viciifolia*, respectively. T_r decreased with the increase of D , following a power function or exponential function.

收稿日期: 2024-12-05

修回日期: 2025-02-26

录用日期: 2025-03-31

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-05-16

资助项目: 国家自然科学基金项目(42277320, 42077058); 陕西省自然科学基金项目(2023-JC-JQ-27); 中央高校专项(GK202309005); 陕西省教育厅一般自然科学专项(24JK0375); 陕西理工大学人才启动项目(X20240036)

第一作者: 苏雪萌(1995年—), 女, 博士, 讲师, 主要从事植被恢复与土壤侵蚀研究。E-mail: 2942854521@qq.com

通信作者: 周正朝(1980年—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事环境变化与土壤侵蚀研究。E-mail: zczhou@snnu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

Additionally, the contents of cellulose, lignin, hemicellulose and holocellulose were 13.43%—52.12%, 5.87%—26.31%, 1.01%—32.18% and 17.60%—51.8%, respectively. There were significant differences in the chemical compositions and diameters among the roots of different plants ($p < 0.05$). 3) Plant root ultimate elongation ($\epsilon_{\max}$) and T_r were significantly positively correlated with hemicellulose content ($p < 0.05$), and D was significantly negatively correlated with the chemical composition, $\epsilon_{\max}$ and T_r ($p < 0.05$). The total explanation of root morphology and chemical composition on root tensile resistance was 62.91%. [Conclusion] The results provide a scientific basis and theoretical guidance for the selection of native species and the internal mechanism of root-soil reinforcement for further ecological restoration on the Loess Plateau.

Keywords: plant roots; morphological characteristics; tensile properties; chemical composition; the Loess Plateau

Received: 2024-12-05

Revised: 2025-02-26

Accepted: 2025-03-31

Online(www.cnki.net): 2025-05-16

退耕还林(草)工程实施以来,黄土高原大部分地区的植物得到显著恢复,其生态环境得到显著改善^[1]。但是,黄土本身结构疏松且湿陷性大,其抗侵蚀能力较差,导致黄土高原地区土地退化和水土流失问题依然严重,阻碍该区土壤环境及农业的可持续发展^[2]。2019年,国家召开黄河流域生态保护和高质量发展座谈会明确指出,将黄河流域生态保护和高质量发展上升为重大国家战略。当自然修复(封山育林、禁牧禁伐等措施)已无法改善当地的生态系统,近自然精准修复或许可能成为改善土壤侵蚀和水土流失的有效途径^[3]。近自然精准修复是指参照自然生态系统的结构与功能,通过精准识别退化生态系统的特征及其驱动因素,以适当的人为干预措施精准施策,激发生态系统自我修复的能力,强调使用自生乡土群落物种修复生态脆弱区^[3]。因此,在典型乡土植物中筛选出固土能力优势的物种并予以推广,是实现黄土高原近自然精准修复的可靠途径。

植物根系形态能直观地表现其根系在土壤中的生长情况,常用根长密度(RLD)、根表面积密度(RSAD)、根系生物量(RMD)和根面积比(RAR)不仅反映植物根系对土壤环境的生长适应情况,还体现根系的固土效果。已有研究^[4-5]表明,植物根系的形态特征、空间分布、生物化学和力学性质等特性是影响土壤抗剪强度和土壤侵蚀的重要因素。RLD、RSAD和RMD等根系形态指标反映根系的形态规模大小^[6],RAR反映根系的分布范围和根系的生长能力^[7],抗拉力学特性则反映根系抗拉能力及抵抗形变的能力^[8]。近年来,已有研究先后阐明三峡消落带^[7]、黄土丘陵区^[4,9]、中西部土石山区^[10]、高寒旱区域^[11]和川西大渡河等^[12]生态脆弱区灌草植物根系形态特征对根系抗拉强度的影响。表明根系形态及分布特征是影响根系固土能力的重要因素,但因植物的类型不同影响差异较大^[13-14]。就根系形态

参数而言,由于植物种类不同,其根系抗拉力、抗拉强度、弹性模量等与直径和根长等根系参数间呈线性相关或非线性相关^[15]。当根径一定时,铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)和苔草(*Carex tristachya* Thunb.)等植物根系抗拉强度随根长的增大而减小^[16]。就根长而言,紫花苜蓿(*Medicago sativa*)根系抗拉强度与根长呈显著正相关^[17]。就根系分布特征而言,灌草植物根系主要集中在0~30 cm土层内,其根系可显著提升抗剪强度和黏聚力^[4]。还有部分学者^[4]发现,根系化学成分(纤维素、半纤维素、木质素)与抗拉特性具有密切相关性。根系抗拉力学特性是固土能力的重要评判依据,但固土能力是复杂的根系系统相互作用的结果。因此,有必要对植物根系生物力学及其相互关系进行研究,以丰富根系固土的内在机制的理论基础。

黄土高原地区灌草植物在生态恢复与建设中发挥着重要作用。现有研究^[18]已阐明灌草植物根系的生长分布可有效改善土壤结构,提高土壤抗剪强度,进而增强坡体稳定性。但是较多研究是从宏观角度对植被根系力学特性与根—土复合体抗剪性能的相关研究,而缺乏微观角度对植被根系形态、力学和化学特性的内部相关机制进行研究。因此,本研究选取黄土高原6种典型自然恢复的灌草植物[狼牙刺(*Sophora viciifolia*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、苔草(*Carex tristachya*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)和芨芨草(*Artemisia giraldii*)],分析不同灌草植物根系生物力学特性及其相互关系,进一步了解根系系统内部相互作用的机制,以为黄土高原植物根系固土及生态重建提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究以黄土高原安塞区延河流域作为野外

研究区域(36°23′~37°17′N, 108°45′~110°28′E)(图1),平均海拔为1 266 m,坡度0~60°^[19]。该区属于温带半湿润气候区向温带半干旱大陆性气候过渡区,多年平均气温8.8℃,多年平均降水量为505.3 mm,年内降水主要集中在7—9月^[4]。土壤类型为黄绵土,土质疏松,遇水易崩解破碎,水土流失严重。自20世纪90年代,该区实行大规模退耕还林还草工程,分布大量自然恢复植被,主要植被类型有铁杆蒿、狼牙刺和白羊草等^[9]。

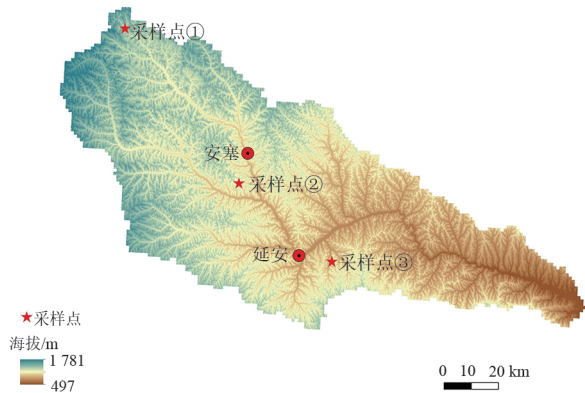


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

1.2 样地选择

本研究主要选取6种典型乡土灌草植物类型[狼牙刺(*Sophora viciifolia*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、苔草(*Carex tristachya*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)和芡蒿(*Artemisia giraldii*)]作为试验采样样地。其中,白羊草和苔草属于多年生草本植物,铁杆蒿和芡蒿属于多年生半灌木植物,狼牙刺和柠条属于多年生灌木植物。尽量保证样地坡度、坡向、土壤类型、退耕前土地利用方式等因素基本一致,其误差在可允许范围内,对试验结果影响较小^[20-21]。具体样地基本信息见表1。

表1 研究区样地基本信息

Table 1 Basic information of the sampling sites in the study area

样地	海拔/m	坡度/(°)	坡向/(°)	盖度/%	恢复年限/a
白羊草	1 266	38	120	80	25
苔草	1 107	35	252	85	25
铁杆蒿	1 266	24	270	72	20
芡蒿	1 338	20	300	60	22
柠条	1 385	29	150	82	25
狼牙刺	1 266	38	190	70	25

1.3 研究方法

1.3.1 根系采集 本研究在典型灌草植物试验坡面从上到下按“S”形,选取3株高度和冠幅相近的植物

并分层采集根—土复合体,主要用于测定根系形态、化学成分和力学特性。以植物根系为中心在其距离中心10 cm的侧面进行挖掘,采样剖面土层深度为60 cm。用卷尺测量每层根—土复合体的标准长宽高(长、宽和高分别为15、15、10 cm),分为6层。

为避免根—土复合体造成机械损伤,将根—土复合体整体铲出,放入自封袋中并带回实验室在4℃低温冰箱中保存。随后使用0.5 mm网袋将土壤冲洗干净并根据根系的形态、颜色和味道等综合筛选出研究的植物根系^[21-22],用于根系形态特征、化学成分、力学特性分析。6种植物根系,每种植物根系样品分别采集3个重复,6层为1组,根系样品共计6组108个样品。

1.3.2 根系形态特性分析 将清洗干净的根系进行扫描(EPSON Perfection V700 PHOTO,日本),扫描分辨率设置为300 dpi,图像保存为JPG格式。根长(RL)、根表面积(RSA)和根系平均直径(*D*)用根系分析软件WinRhizo测定(2009年,Regent Instruments, Quebec, QC,加拿大),根系生物量(RM)是将根系放入60℃烘箱,烘干至恒重后取出称重(mg)。各根系形态参数计算公式为^[18]:

$$RLD = \frac{RL}{V} \tag{1}$$

$$RSAD = \frac{RSA}{V} \tag{2}$$

$$RMD = \frac{RM}{V} \tag{3}$$

式中:RLD为根长密度,10 mm/cm³;RSAD为根表面积密度,mm²/cm³;RMD为根生物量密度,mg/cm³;RM为根系生物量,g;V为采样用具环刀体积,cm³。

依据6种灌草植物根系直径的差异,将白羊草(*D*>0.50、0.30<*D*≤0.50、*D*≤0.30)和苔草(*D*>1.60、1.20<*D*≤1.60、*D*≤1.20)根系直径分别划分3个径级;铁杆蒿和芡蒿划分5个径级(*D*>2.60、2.20<*D*≤2.60、1.80<*D*≤2.20、1.40<*D*≤1.80、*D*≤1.40);柠条和狼牙刺划分为4个径级(*D*>1.60、1.30<*D*≤1.60、1.00<*D*≤1.30、*D*≤1.00),以便后续植物根系力学和化学成分特征分析。

1.3.3 根系力学特性分析 本试验根系直径(*D*)采用根系分析软件WinRhizo(2009年,Regent Instruments, Quebec, QC,加拿大)进行测定,根系长度统一设定为100 mm。采用微机控制电子万能材料试验机(上海松顿LDM-1,最大荷重为1 000 N,精度为0.1 N)对植物根系进行匀速拉伸试验,测定抗拉力、延伸长度等参数。试验时,首先调整万能材料试验机标距(即根系长度)与试验设计中的根系设定长度一致,考虑仪器固定根系时所用夹头要占据一定根系长

度,实际根系长度相比测定长度多约 30 mm。将根系两端固定夹紧后,以 10 mm/min 的速度进行匀速拉伸直到根系被完全拉断为止。6 种植物根系总根数为 400 根,由于试验根系若在夹口处断裂则视为试验失败,数据作废,根系仅在夹口中间位置断裂记为成功,总计成功根数为 309 根,总成功率为 77%。

根系抗拉力学特性主要为抗拉力(根系拉伸断裂前最大拉力 T_r , N),抗拉强度(破坏处受截面的抗拉力除以断裂点处的根面积 T_r , MPa)和极限延伸率(根部拉伸断裂前变形达到最大长度比 $\epsilon_{\max}$, %)。根系抗拉力(T_r)和延伸长度(ΔL , mm)由试验所得数据。 T_r 和 $\epsilon_{\max}$ 计算公式为^[4]:

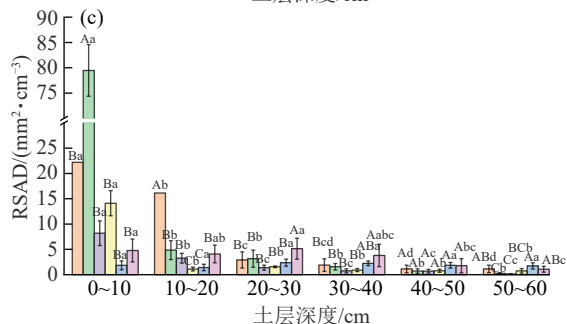
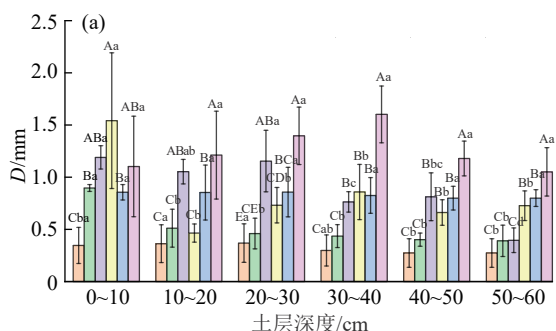
$$T_r = \frac{4T_f}{\pi D^2} \quad (4)$$

$$\epsilon_{\max} = \frac{\Delta L}{L} \times 100\% \quad (5)$$

式中: D 为根系直径,mm; L 为根系长度,mm。

1.3.4 根系化学成分 在完成根系力学拉伸特征试验后,对根系径级进行划分,进行根系的化学成分测定。测定分析指标为纤维素、木质素和半纤维素。测定方法依据范氏中酸性洗涤法(Van Soest)原理。本试验采用吕春娟等^[22]描述的方法进行化学成分测定。根据测定 3 种化学成分计算综纤维素质量分数,计算公式为:

$$\text{Holocellulose} = \text{Cellulose} + \text{Hemicellulose} \quad (6)$$



白羊草 苔草 铁杆蒿 芨芨草 柠条 狼牙刺

注:小写字母表示同一植物根系形态参数在不同土层间差异显著($p < 0.05$);大写字母表示同一土层不同植物间差异显著($p < 0.05$)。

图 2 黄土高原 6 种典型灌草植物根系形态特性

Fig.2 Root morphological characteristics of six typical plants on the Loess Plateau

<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

式中:Hemicellulose 为半纤维素,%;Cellulose 为纤维素,%;Holocellulose 为综纤维素,%。

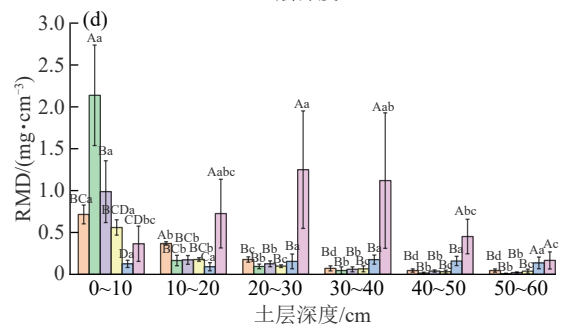
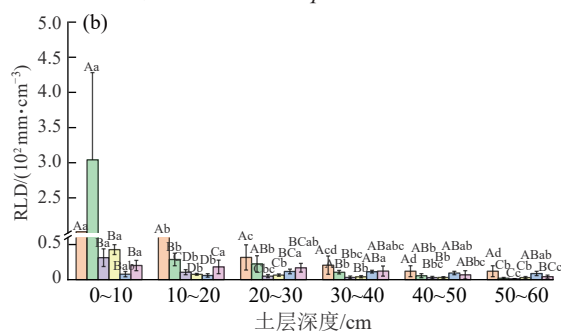
1.3.5 数据处理 本研究使用 SPSS 26 软件对各数据进行正态分布和方差齐性检验;利用 Duncan 多重比较法检验 2 组以上数据的差异显著性($p < 0.05$),数据均使用 Origin 2024 软件进行绘图。同时,使用 R4.1.3 的 Pearson 相关分析和冗余分析(RDA)进行植物根系形态、力学和化学成分的相关性分析并绘图。

2 结果与分析

2.1 植物根系形态特性

白羊草、苔草、铁杆蒿和芨芨草植物根系 D 、RLD、RSAD 和 RMD 随着土层深度增加而显著减小($p < 0.05$),而柠条和狼牙刺根系形态特性随土层深度增加无明显变化(图 2)。白羊草、苔草、铁杆蒿和芨芨草 0~10 cm 土层根系 RLD、RSAD 和 RMD 显著大于 10~60 cm 土层($p < 0.05$)。

不同植物根系 D 、RLD、RSAD 和 RMD 具有显著差异($p < 0.05$)。白羊草根系 D (0.35 mm)显著小于其他 5 种植物($p < 0.05$)。0~10 cm 土层,白羊草和苔草 RLD 显著大于其他 4 种植物($p < 0.05$),苔草 RSAD 和 RMD 显著大于其他 5 种植物($p < 0.05$)(图 2)。6 种植物平均 RSAD 表现为苔草>白羊草>狼牙刺>芨芨草>铁杆蒿>柠条,RMD 表现为狼牙刺>苔草>白羊草>铁杆蒿>芨芨草>柠条;其中,10~40 cm 土层狼牙刺 RMD 显著大于其他 5 种植物($p < 0.05$)(图 2)。



2.2 植物根系抗拉力学特性

由表 2 可知,铁杆蒿、芨蒿、柠条和苔草的最大根系径级($D>2.60\text{ mm}$ 和 $D>1.60\text{ mm}$) T_r 显著大于其余径级($p<0.05$)。白羊草、苔草、芨蒿和柠条根系 T_r 各径级存在显著差异性($p<0.05$)。铁杆蒿和芨蒿根系 $D>2.60\text{ mm}$ 的 $\epsilon_{\max}$ 与 $D\leq 1.40\text{ mm}$ 有显著性差异($p<0.05$)。

不同植物根系平均 T_r 表现为柠条(23.12 N)>铁

杆蒿(11.93 N)>苔草(11.90 N)>白羊草(8.63 N)>芨蒿(8.21 N)>狼牙刺(7.82 N),柠条根系抗拉力大于其他 5 种植物。白羊草根系 T_r 和 $\epsilon_{\max}$ 高于其他 5 种植物,其中白羊草根系平均 T_r 分别是苔草、铁杆蒿、芨蒿、柠条和狼牙刺的 6.83、15.03、30.15、7.01、14.15 倍;白羊草根系平均 $\epsilon_{\max}$ 分别是苔草、铁杆蒿、芨蒿、柠条和狼牙刺的 1.08、2.57、2.67、2.67、2.77 倍(表 2)。

表 2 黄土高原 6 种典型灌草植物根系不同径级抗拉力学特性

Table 2 Root tensile properties of six typical plants on the Loess Plateau

植物类型	径级/mm	T_r/N	T_r/MPa	$\epsilon_{\max}/\%$	样本数
白羊草	$D>0.50$	$11.79\pm 3.19\text{a}$	$184.94\pm 0\text{c}$	$25.32\pm 2.04\text{a}$	86
	$0.30<D\leq 0.50$	$8.57\pm 3.61\text{a}$	$370.56\pm 38.83\text{b}$	$18.88\pm 6.40\text{a}$	
	$D\leq 0.30$	$7.95\pm 3.34\text{a}$	$453.83\pm 52.85\text{a}$	$21.01\pm 6.32\text{a}$	
苔草	$D>1.60$	$16.76\pm 2.71\text{a}$	$25.94\pm 1.08\text{c}$	$20.57\pm 7.17\text{a}$	49
	$1.20<D\leq 1.60$	$12.41\pm 2.80\text{b}$	$29.78\pm 1.45\text{b}$	$19.70\pm 5.96\text{a}$	
	$D\leq 1.20$	$6.54\pm 1.51\text{c}$	$40.18\pm 0\text{a}$	$19.74\pm 5.54\text{a}$	
铁杆蒿	$D>2.60$	$37.96\pm 16.01\text{a}$	$15.48\pm 0.87\text{b}$	$6.64\pm 2.96\text{b}$	66
	$2.20<D\leq 2.60$	$21.56\pm 8.22\text{b}$	$18.41\pm 1.70\text{b}$	$8.50\pm 3.06\text{ab}$	
	$1.80<D\leq 2.20$	$16.03\pm 5.97\text{ab}$	$27.76\pm 2.39\text{b}$	$8.26\pm 2.45\text{ab}$	
	$1.40<D\leq 1.80$	$11.41\pm 3.30\text{c}$	$24.73\pm 1.68\text{b}$	$9.19\pm 2.79\text{ab}$	
	$D\leq 1.40$	$9.98\pm 2.08\text{c}$	$54.16\pm 7.75\text{a}$	$9.56\pm 1.50\text{a}$	
芨蒿	$D>2.60$	$16.21\pm 6.82\text{a}$	$7.03\pm 0.23\text{d}$	$8.50\pm 1.78\text{a}$	34
	$2.20<D\leq 2.60$	$8.20\pm 2.10\text{b}$	$7.44\pm 0.46\text{dc}$	$7.82\pm 3.10\text{a}$	
	$1.80<D\leq 2.20$	$8.60\pm 2.09\text{b}$	$11.59\pm 0.95\text{b}$	$11.13\pm 4.44\text{a}$	
	$1.40<D\leq 1.80$	$4.43\pm 0\text{b}$	$11.38\pm 0\text{bc}$	$9.79\pm 3.20\text{a}$	
	$D\leq 1.40$	$3.59\pm 0.24\text{b}$	$18.83\pm 1.99\text{a}$	$3.49\pm 2.78\text{b}$	
柠条	$D>1.60$	$46.52\pm 26.29\text{a}$	$52.18\pm 3.38\text{c}$	$5.46\pm 3.49\text{a}$	34
	$1.30<D\leq 1.60$	$19.44\pm 8.23\text{b}$	$48.30\pm 4.64\text{bc}$	$8.16\pm 5.85\text{a}$	
	$1.00<D\leq 1.30$	$14.25\pm 7.00\text{b}$	$52.44\pm 4.08\text{b}$	$9.32\pm 5.00\text{a}$	
	$D\leq 1.00$	$12.26\pm 4.87\text{b}$	$113.16\pm 9.56\text{a}$	$9.58\pm 3.95\text{a}$	
狼牙刺	$D>1.60$	$11.63\pm 7.19\text{a}$	$3.23\pm 1.28\text{a}$	$6.68\pm 3.00\text{a}$	40
	$1.30<D\leq 1.60$	$7.39\pm 4.62\text{a}$	$5.44\pm 1.73\text{a}$	$6.26\pm 2.41\text{a}$	
	$1.00<D\leq 1.30$	$7.64\pm 3.89\text{a}$	$7.82\pm 2.69\text{a}$	$9.76\pm 3.59\text{a}$	
	$D\leq 1.00$	$4.63\pm 2.09\text{a}$	$9.71\pm 3.46\text{a}$	$8.44\pm 2.70\text{a}$	

注:表中小写字母表示在同一植物不同径级之间具有显著性差异($p<0.05$)。下同。

6 种植物根系 T_r 和 T_r 随 D 增加呈幂函数或对数函数增加和下降变化趋势,植物根系 $\epsilon_{\max}$ 和 D 未表现明显趋势(表 3)。白羊草根系抗拉性能受根系直径影响不明显,主要原因在于白羊草根系直径总体偏细($D<0.60\text{ mm}$),根系直径变化幅度非常小,进而导致其根系抗拉力学性能无明显变化。

2.3 植物根系化学成分特性

植物根系的主要化学成分包括纤维素、半纤维素和木质素。白羊草、苔草、芨蒿、柠条植物根系的纤维素、木质素和半纤维素质量分数均达到 60.00%;铁杆蒿的纤维素、木质素和半纤维素质量分数均达

30.00%;狼牙刺的纤维素、木质素和半纤维素质量分数仅为 20.00%(表 4)。6 种植物根系的纤维素质量分数均显著高于木质素和半纤维素($p<0.05$)。草本植物(白羊草和苔草)根系纤维素、半纤维素和综纤维素质量分数大于其他 4 种植物,半灌木(铁杆蒿和芨蒿)和灌木(柠条和狼牙刺)根系木质素质量分数大于草本植物。

同一植物不同径级间纤维素、半纤维素、木质素和综纤维素存在显著差异性($p<0.05$)(表 4)。柠条根系的纤维素质量分数随着根径的增加逐渐增大。白羊草和苔草的半纤维素质量分数随着根径的增加

逐渐增大,柠条的半纤维素质量分数随着根径的增加逐渐减小。苔草和柠条的木质素质量分数随着根径增加逐渐增大。

表 3 黄土高原 6 种典型灌草植物根系抗拉特性与根系直径的回归函数

植物类型	抗拉力 (T_t)		抗拉强度 (T_r)		极限延伸率 ($\epsilon_{\max}$)		样本数
	回归函数	R^2	回归函数	R^2	回归函数	R^2	
白羊草	$T_t=13.93D^{0.55}$	0.33*	$T_r=82.22D^{-1.29}$	0.16*	$\epsilon_{\max}=8.01D+16.81$	0.01*	86
苔草	$T_t=5.832D^{2.09}$	0.64*	$T_r=43.49D^{-1.13}$	0.59*	$\epsilon_{\max}=4.29D+13.74$	0.02*	49
铁杆蒿	$T_t=3.94e^{0.68D}$	0.51*	$T_r=45.13D^{-1.10}$	0.57*	$\epsilon_{\max}=0.29D+9.14$	0.01*	66
芡蒿	$T_t=1.557\ 6e^{0.74D}$	0.57*	$T_r=18.91D^{-1.03}$	0.59*	$\epsilon_{\max}=-0.12D+8.68$	0.01*	34
柠条	$T_t=13.62D^{1.30}$	0.57*	$T_r=16.90D^{-1.33}$	0.55*	$\epsilon_{\max}=-3.04D+12.07$	0.14*	34
狼牙刺	$T_t=2.13e^{0.79D}$	0.41*	$T_r=21.96e^{-0.98D}$	0.58*	$\epsilon_{\max}=-1.55D+10.02$	0.07*	40

注:*表示 $p<0.05$ 。

表 4 黄土高原 6 种典型灌草植物根系化学成分和根系径级的关系

Table 4 The relationship between root chemical composition and root diameter class of six typical plants on the Loess Plateau						%
植物类型	径级/mm	纤维素	木质素	半纤维素	综纤维素	
白羊草	$D>0.50$	42.46±1.02a	11.31±0.12b	22.01±0.58a	64.47±1.60a	
	$0.30<D\leq0.50$	44.55±2.69b	12.72±0.34a	18.73±1.79b	63.29±4.47b	
	$D\leq0.30$	38.47±1.14ab	12.33±0.17b	17.00±1.00b	55.48±2.36a	
苔草	$D>1.60$	48.33±2.08ab	13.38±1.45b	27.53±3.65a	75.86±2.55a	
	$1.20<D\leq1.60$	51.02±0.48a	15.45±0.63ab	25.62±0.45b	76.65±0.54a	
	$D\leq1.20$	45.59±1.47b	15.68±0.40a	20.67±1.39b	66.26±0.90a	
铁杆蒿	$D>2.60$	32.54±0.80a	23.38±1.02a	5.13±1.18a	37.68±1.10a	
	$2.20<D\leq2.60$	32.10±0.27a	20.46±0.01a	5.85±0.51a	37.96±0.26a	
	$1.80<D\leq2.20$	26.36±1.77b	18.84±0.71a	1.36±1.75a	27.72±1.23b	
	$1.40<D\leq1.80$	32.11±1.91a	18.92±1.87b	10.04±1.63a	42.15±1.75a	
	$D\leq1.40$	23.43±1.82b	16.91±0.63a	3.81±1.98b	27.24±1.30b	
芡蒿	$D>2.60$	36.74±2.04a	24.86±2.05a	16.82±1.26a	53.56±1.65a	
	$2.20<D\leq2.60$	26.65±0.62bc	14.74±0.23ab	10.71±0.43c	37.36±0.53bc	
	$1.80<D\leq2.20$	30.87±1.96ab	15.24±0.19ab	14.23±2.06c	45.10±2.01ab	
	$1.40<D\leq1.80$	33.38±5.47ab	17.22±0.73b	15.39±5.97b	48.77±5.72ab	
	$D\leq1.40$	20.82±0.38c	14.66±0b	7.03±1.06c	27.85±0.72c	
柠条	$D>1.60$	51.41±0.50a	11.23±0.21c	12.30±0.30b	63.71±0.40a	
	$1.30<D\leq1.60$	44.78±1.17b	11.59±0.44b	12.61±1.34b	57.39±1.25b	
	$1.00<D\leq1.30$	43.58±0.69b	15.77±0.03b	13.30±0.76b	56.87±0.73b	
	$D\leq1.00$	40.70±0.64c	19.14±0.27a	16.09±0.54a	56.78±0.59b	
狼牙刺	$D>1.60$	23.00±2.17a	5.87±0.46c	3.40±0.34b	23.46±2.29a	
	$1.30<D\leq1.60$	23.02±0.73a	11.41±0.07b	2.03±0.20c	23.20±1.08a	
	$1.00<D\leq1.30$	22.33±2.82a	19.41±0.54a	4.31±0.43a	23.26±2.93a	
	$D\leq1.00$	16.32±2.30a	22.08±0.29a	3.98±0.27a	18.52±2.25a	

2.4 植物根系特性的相互关系

植物根系形态、化学成分和力学特性间相关性存在差异性。植物根系 RLD 和 RSAD 与 $\epsilon_{\max}$ 、纤维素、半纤维素和综纤维素质量分数存在显著正相关 ($p<0.05$),同时 $\epsilon_{\max}$ 和 T_r 与半纤维素质量分数存在显著正相关 ($p<0.05$),而且 D 与化学成分、 $\epsilon_{\max}$ 和 T_r 呈显著负相关 ($p<0.05$)(图 3a)。

为进一步说明植物根系形态、化学成分和力学特性间响应关系,采用 RDA 分析。植物根系形态和化学成分特性对根系抗拉力学特性的总解释为 62.91%,其中 RDA1 解释根系形态和化学特性对抗拉力学特性的 43.10%,而 RDA2 仅解释 19.81%。其中 RLD、RSAD、纤维素、半纤维素和综纤维素质量分数更好地解释 $\epsilon_{\max}$ 和 T_r ,交角 $<90.00^\circ$,呈显著正相关(图 3b)。

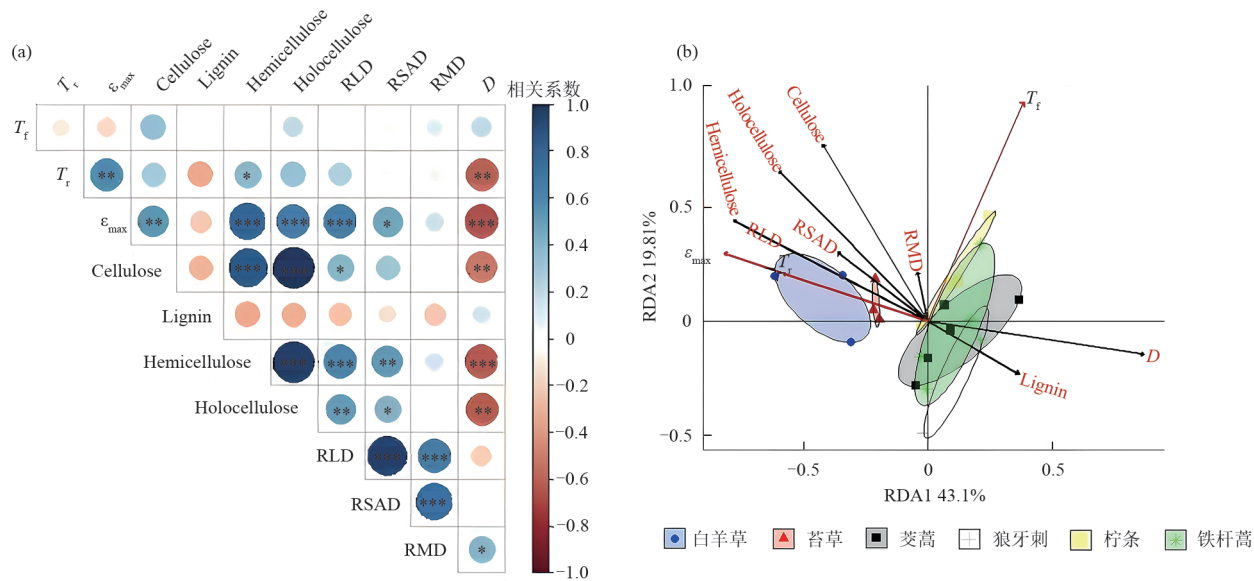


图3 黄土高原6种典型灌草植物根系特性的相互关系

Fig. 3 The interrelationships of root characteristics of six typical plants on the Loess Plateau

3 讨论

3.1 植物根系形态特性

植物根系形态及分布特性直接反映植物对于环境的适应能力和竞争能力。草本植物(白羊草和苔草)和半灌木(铁杆蒿和芨芨草)根系形态分布主要集中在0~30 cm土层,其中草本植物的RLD和RSAD显著大于半灌木和灌木,其根系分布深度高于川西大渡河干热谷草本鬼针草(*Bidens pilosa*)、黄茅(*Heteropogon contortus*)、艾草(*Aetemisias argyi*)和两头毛(*Incarvillea arguta*),以及灌木假杜鹃(*Barleria cristata*)和木蓝(*Indigofera tinctoria*)等6种优势灌草(0~15 cm土层)^[12]。其原因是,黄土高原区域土壤相较于干热河谷区域结构疏松具有湿陷性,土壤水分体积分数低,降雨入渗分布较深而诱导植物根系适应环境生长所致。

黄土高原6种典型灌草植物根系以细根($D \leq 2.00$ mm)为主,与寇萌等^[23]研究黄土丘陵区植被根系直径以 $D \leq 1.00$ mm的根系具有一致性。草本植物根系(白羊草和苔草)的RLD、RSAD和RMD显著大于其他4种灌木根系,说明草本植物更容易形成网络加筋作用,具有增强固结土壤的范围和能力,加强土壤的营养物质循环,进而提高其固土能力。王光沛等^[17]对紫花苜蓿根系研究发现,随着生长时间增加根系分支数量和拓展范围等扩大,其构建复杂密集的根系系统,可保障根系具有良好的资源吸收和竞争能力。

3.2 植物根系抗拉力学特性

本研究植物根系抗拉强度(T_r)受根系直径的影响明显,随着根系直径增大而 T_r 越小,细根比粗根

更能抵抗拉应力^[24]。本研究中,植物根系直径均为 <3.50 mm,当植物根系直径增大到某一范围时,在外力作用下的根系抗拉特性从弹性形变飞跃到塑性形变,此时根系抵抗拉力的特征发生明显变化。同时,可能土壤性质的影响,根系直径的增大也影响到根系和土壤颗粒间的摩擦系数变化,导致直径虽然增大但其抗拉特性反而变小的现象。

草本植物根系抗拉力学性能主要以加筋作用增强根—土复合体的抗剪强度,即当土壤受到剪切力作用时,穿过土壤剪切面的根系,通过将自身所受拉应力转化为土壤剪切面的垂直应力和水平应力,从而起到增强根系—土壤复合体抗剪强度的作用。因此,在灌草植物根系形态参数相同情况下,草本植物根系 T_r 越大,则越能起到增强根—土复合体抗剪强度的作用^[25]。相应地,植物根系 ϵ_{max} 越小,当土壤发生相对较小剪切位移时,根系即可将其自身的拉应力发挥出来,从而有效增强土壤抗剪强度。通过6种植物根系抗拉力学特性指标对比分析可知,白羊草(草本植物)在护坡中优于其他5种植物;但是,植物根系生长多久就可发挥根系固土能力,以及生长的土壤条件对其力学性能是否存在差异性,是值得研究探讨的问题。

3.3 植物根系化学成分特性

黄土高原6种典型灌草植物根系的纤维素、木质素、半纤维素和综纤维素的质量分数分别为13.43%~52.12%、5.87%~26.31%、1.01%~32.18%和17.60%~51.8%,其质量分数比吕春娟等^[22]研究的华北树木根系纤维素和木质素质量分数稍高。可能是因为其他研究者所使用的试验植物根系的

种类差异性,其化学成分与本研究中存在一定差异,同时化学成分的测定方法也影响其质量分数的高低,纤维素、木质素和半纤维素质量分数的测定原理,就是利用各种试剂溶解根系细胞中的内含物、矿物质等杂质,逐步分离出各化学成分的过程。因此,测定方法和植物种类不同,各成分的质量分数存在一定的差异,但是不同植物根系各化学成分间相差较小。

本研究,草本植物根系最大径级的纤维素质量分数最大,木质素质量分数最小,与其他研究中根系的纤维素和木质素质量分数与直径的关系相反^[26-27]。其原因可能是,灌木根系根径大于草本植物,纤维素质量分数较高的木质部增长的速度相对大于质量分数较低的韧皮部的增长速度,蒋坤云等^[28]在白桦(*Betula platyphylla* Suk.)、榆树(*Ulmus pumila* Linn.)和蒙古栎(*Quercus mongolicus* Fisch. ex Ledeb)显微结构的研究中得到进一步证实。

3.4 植物根生物力学的相互关系

黄土高原 6 种典型灌草植物根系 RLD、RSAD 与纤维素、半纤维素和综纤维素质量分数间存在显著正相关($p < 0.05$),表明根系形态对其化学成分具有重要作用,其原因是,本研究 6 种灌草植物根系以细根为主,其表面着生大量根毛,增加 RSAD 和 RLD,进而提高纤维素、半纤维素和综纤维素质量分数^[29]。同时,植物根系 $\epsilon_{\max}$ 和 T_r 与半纤维素和纤维素质量分数间存在正相关,赵丽兵等^[27]研究紫花苜蓿和马唐根系 T_r 与纤维素质量分数呈正相关,与本研究结果一致。而有研究^[22]发现,华北树木根系力学特征与纤维素和木质素的关系与本研究结果存在差异性,其原因是不同植物根系直径差异较大,使得根系抗拉力学与化学成分间的相关性存在差异性^[26,30]。

植物根系力学特性不仅由纤维素、半纤维素等影响,许多研究进行根系内部微观研究,植物根系的细胞壁由纤维素聚合组成的微纤丝,是植物细胞壁的组成中质量分数最高的多糖,是植物细胞壁最主要的组成成分,并构成骨架。微纤丝角的大小影响植物根系抗拉强度,且二者呈显著负相关,是植物机械性能的主要决定因子之一^[31],而微纤丝角随根系直径增大而增大,因此,从根系内部结构的角上阐明抗拉强度与直径呈负相关^[32],解释纤维素、半纤维素质量分数与抗拉强度成正比关系的原因。

本研究发现,6 种植物根系纤维素、半纤维素和木质素平均质量分数差异不大,但抗拉强度差异性

较大,白羊草根系平均抗拉强度是茭蒿的 30 倍,其原因可能是,植物根系的抗拉强度除与纤维素质量分数有关之外,还与根系的纤维强度、排列紧密程度及根系的其他物质组成有着重要关系^[33]。因此,将植物根系抗拉力学、化学成分与内部结构等方面结合起来开展更多的分析,可更好地揭示根系生物力学作用机理,为根系固土作用机制研究奠定理论和数据基础。

4 结 论

1) 黄土高原 6 种典型灌草植物根系以细根($D \leq 2.00$ mm)为主。RLD、RSAD 和 RMD 表现为草本植物(白羊草和苔草)显著大于其他 4 种植物类型($p < 0.05$)。草本植物(白羊草和苔草)和半灌木植物(铁杆蒿和茭蒿)的根系主要集中在 0~30 cm 土层。

2) 白羊草根系平均 T_r 显著高于其他 5 种植物。6 种植物根系 T_r 和 T_r 与 D 呈幂函数或对数函数的关系。植物根系的化学成分总质量分数均达到 60%,且纤维素质量分数均显著高于木质素和半纤维素($p < 0.05$)。

3) 6 种植物根系 T_r 与纤维素质量分数具有显著正相关($p < 0.05$),根系形态和化学成分特征对根系抗拉力学总解释为 62.91%,其中,RLD、RSAD 和化学成分可更好地解释根系 $\epsilon_{\max}$ 和 T_r 。

参考文献:

- [1] 李婷,吕一河,任艳姣,等.黄土高原植被恢复成效及影响因素[J].生态学报,2020,40(23):8593-8605.
LI T, LÜ Y H, REN Y J, et al. Gauging the effectiveness of vegetation restoration and the influence factors in the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23):8593-8605.
- [2] 史志华,刘前进,张含玉,等.近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J].土壤学报,2020,57(5):1117-1127.
SHI Z H, LIU Q J, ZHANG H Y, et al. Study on soil erosion and conservation in the past 10 years: Progress and prospects[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5):1117-1127.
- [3] 张克荣,张小全,李潜,等.退化生态系统近自然精准修复:基于自然的解决方案[J].植物科学学报,2023,41(6):751-758.
ZHANG K R, ZHANG X Q, LI Q, et al. Near-natural precise restoration of degraded ecosystems: Nature-based solutions[J]. Plant Science Journal, 2023, 41(6):751-758.
- [4] SU X M, ZHOU Z C, LIU J E, et al. The role of roots

- traits of climax community species to shear strength in the loess hilly region, China [J]. Soil and Tillage Research, 2022, 221: e105417.
- [5] 曹玉莹, 苏雪萌, 周正朝, 等. 黄土高原典型草本植物根-土复合体抗剪性能的空间差异性及其影响因素研究[J]. 草业学报, 2023, 32(5): 94-105.
- CAO Y Y, SU X M, ZHOU Z C, et al. Spatial differences in, and factors influencing, the shear strength of typical herb root-soil complexes in the Loess Plateau of China [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(5): 94-105.
- [6] 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.
- [7] 钟荣华, 鲍玉海, 贺秀斌, 等. 三峡水库消落带4种草本根系抗拉特性及根系粘聚力[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 188-194.
- ZHONG R H, BAO Y H, HE X B, et al. Root tensile properties and root cohesion of 4 herbaceous plant species in the riparian zone of Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(4): 188-194.
- [8] 陈飞, 施康, 钱乾, 等. 根土复合体材料的抗剪强度特性研究进展[J]. 有色金属科学与工程, 2021, 12(6): 96-104.
- CHEN F, SHI K, QIAN Q, et al. Research progress on shear strength characteristics of root soil composite materials [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2021, 12(6): 96-104.
- [9] 邢书昆, 张光辉, 朱平宗. 黄土丘陵沟壑区退耕年限对根-土复合体抗剪强度的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 41-48.
- XING S K, ZHANG G H, ZHU P Z. Effects of vegetation restoration age on shear strength of root-soil system in hilly and gully region of the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 41-48.
- [10] 欧阳前超, 魏杨, 周霞, 等. 土石山区护坡草本植物根系抗拉力学特性[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(4): 35-41.
- OUYANG Q C, WEI Y, ZHOU X, et al. Root tensile properties of the herbaceous plants for slope protection in earth-rocky mountain area, northern China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017, 15(4): 35-41.
- [11] 张海龙, 朱海丽, 张玉, 等. 黄河源河岸高寒草甸含根土体抗拉、抗剪特性及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 58-67.
- ZHANG H L, ZHU H L, ZHANG Y, et al. Tensile and shear characteristics and influencing factors of root-bearing soil in alpine meadow on bank of Yellow River source [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 58-67.
- [12] 姚怡宁, 宗桦, 周璐, 等. 川西大渡河干热河谷优势灌草植物根系特征及固土能力[J]. 生态学报, 2025, 45(6): 2798-2810.
- YAO Y N, ZONG H, ZHOU L, et al. Root characteristics and soil-fixing ability of the dominant shrubs and herbs in the dry and hot valley of Dadu River in West Sichuan [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(6): 2798-2810.
- [13] YE C, GUO Z L, LI Z X, et al. The effect of Bahia-grass roots on soil erosion resistance of Aquilts in subtropical China [J]. Geomorphology, 2017, 285: 82-93.
- [14] MEIJER J G. Improving power law fitting of root tensile strength-diameter relationships [J/OL]. Plant and Soil, 2024. DOI: 10.1007/s11104-024-07007-9.
- [15] DE BAETS S, POESEN J, REUBENS B, et al. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength [J]. Plant and Soil, 2008, 305(1): 207-226.
- [16] 苏雪萌, 刘俊娥, 周正朝, 等. 黄土丘陵区不同植物根系抗拉力学特性[J]. 水土保持研究, 2019, 26(3): 259-264.
- SU X M, LIU J E, ZHOU Z C, et al. Root tensile and mechanical properties of three typical plants in the loess hilly region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(3): 259-264.
- [17] 王光沛, 魏艳, 湛芸. 紫花苜蓿根系构型和力学特征对生长时间的响应[J]. 草业学报, 2025, 34(4): 82-92.
- WANG G P, WEI Y, CHEN Y. Changes in *Medicago sativa* root system architecture and mechanical characteristics during the growing period [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(4): 82-92.
- [18] WANG P P, SU X M, ZHOU Z C, et al. Differential effects of soil texture and root traits on the spatial variability of soil infiltrability under natural revegetation in the Loess Plateau of China [J]. Catena, 2023, 220: e106693.
- [19] 赵富王, 王宁, 苏雪萌, 等. 黄土丘陵区主要植物根系对土壤有机质和团聚体的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 105-113.
- ZHAO F W, WANG N, SU X M, et al. Effects of main plant roots on soil organic matter and aggregates in loess hilly region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(5): 105-113.
- [20] 苏旭飞, 张光辉, 曾荣昌. 黄土丘陵沟壑区典型植物群落切沟系统植被生长特性[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 1-10.
- SU X F, ZHANG G H, ZENG R C. Vegetation

- growth characteristics of typical plant communities in gully system in the hilly and gully region of Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4):1-10.
- [21] 徐远慧,冯璐,屈媛媛,等.黄土丘陵沟壑区退耕还草年限对土壤性质和入渗性能的影响[J].水土保持学报,2022,36(2):57-63.
- XU Y H, FENG L, QU Y Y, et al. Effects of different restoration years of grain for green on soil properties and infiltration performance in loess gully region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2):57-63.
- [22] 吕春娟,陈丽华.华北典型植被根系抗拉力学特性及其与主要化学成分关系[J].农业工程学报,2013,29(23):69-78.
- LÜ C J, CHEN L H. Relationship between root tensile mechanical properties and its main chemical components of typical tree species in north China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(23):69-78.
- [23] 寇萌,焦菊英,王巧利,等.黄土丘陵沟壑区不同植被带植物群落的细根分布特征[J].农业机械学报,2016,47(2):161-171.
- KOU M, JIAO J Y, WANG Q L, et al. Fine root distribution characteristics of plant community in different vegetation zones in hill-gully region of Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2):161-171.
- [24] 王鑫皓,黄盛,李通,等.植被缓冲带固土护坡效应研究:以涪江流域潼南段为例[J].中国水土保持科学(中英文),2025(2):199-209.
- WANG X H, HUANG S, LI T, et al. Research on the soil reinforcement effect of vegetation buffer zone: A case study of the Tongnan section of the Fujiang River Basin[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025(2):199-209.
- [25] 强娇娇,颜哲豪,湛芸,等.喀斯特区3种草篱根-土复合体抗剪性能及其影响因素[J].草业学报,2020,29(12):27-37.
- QIANG J J, YAN Z H, CHEN Y, et al. Factors affecting the shear strength of root-soil complexes from three types of grass hedgerows in a karst area[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(12):27-37.
- [26] GENET M A, DUMAIL J F, BEEK L, et al. Tensile strength, anatomy and cellulose content of woody roots[J]. Plant and Soil, 2005, 278(1/2):1-9.
- [27] 赵丽兵,张宝贵.紫花苜蓿和马唐根的生物力学性能及相关因素的试验研究[J].农业工程学报,2007,23(9):7-12.
- ZHAO L B, ZHANG B G. Experimental study on root bio-mechanics and relevant factors of *Medicago sativa* and *Digitaria sanguinalis* [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(9):7-12.
- [28] 蒋坤云,陈丽华,盖小刚,等.华北护坡阔叶树种根系抗拉性能与其微观结构的关系[J].农业工程学报,2013,29(3):115-123.
- JIANG K Y, CHEN L H, GAI X G, et al. Relationship between tensile properties and microstructures of three different broadleaf tree roots in north China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(3):115-123.
- [29] 刘小光.林木根系与土壤摩擦锚固性能研究[M].北京:北京林业大学,2013.
- LIU X G. Study on friction and anchorage characteristics between root system and soil[M]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.
- [30] VERGANI C, GIADROSSICH F, BUCKLEY P, et al. Root reinforcement dynamics of European coppice woodlands and their effect on shallow landslides: A review [J]. Earth-Science Reviews, 2017, 167:88-102.
- [31] 张双燕.化学成分对木材细胞壁力学性能影响的研究[D].北京:中国林业科学研究院,2011.
- ZHANG S Y. Effect of chemical composition on mechanical properties of wood cell wall [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2011.
- [32] 余雁,江泽慧,任海青,等.管胞细胞壁力学研究进展评述[J].林业科学,2003,39(5):133-139.
- YU Y, JIANG Z H, REN H Q, et al. A review: Current international research into cell wall mechanics of tracheids[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39(5):133-139.
- [33] 胡晶华,刘静,李雪松,等.黑沙蒿根系抗拉特性及其与化学成分的关联性[J].水土保持通报,2020,40(6):87-93.
- HU J H, LIU J, LI X S, et al. Relationship between root tensile properties and its responses to their chemical contents of *Artemisia ordosica* species [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6):87-93.