

半干旱矿区典型灌木根系固土力学及疲劳性能的差异性

张欣^{1,2}, 王博³, 刘铁军^{1,2}, 郭建英^{1,2}, 王虎刚⁴, 杨振奇^{1,2}

(1.中国水利水电科学研究院 内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外

科学观测研究站,北京 100038; 2.水利部 牧区水利科学研究所,内蒙古 呼和浩特 010020;

3.内蒙古师范大学,内蒙古 呼和浩特 010020; 4.内蒙古自治区水利事业发展中心,内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要: [目的] 研究循环荷载对 3 种典型灌木根系抗拉力学特性的影响,明确疲劳作用后灌木根系固土效能的变化,为半干旱矿区生态修复和侵蚀防控过程中的植物种选择提供科学依据。[方法] 以北沙柳、小叶锦鸡儿和沙棘根系为研究对象,利用 TY8000 伺服控制材料试验机对 2~4 mm 根径范围内的直根及侧根分支处施加轻度和重度循环荷载,分析疲劳前后根系抗拉力和抗拉强度的变化。[结果] ①3 种灌木根生物量、累计根长、根体积和根表面积间差异显著,均表现为:北沙柳>小叶锦鸡儿>沙棘,且根生物量和根体积均主要分布于 0—10 cm 的表层土体,所占比例平均为 38.5% 和 35.3%,累计根长和根表面积均主要分布于 10—20 cm 的浅层土体,所占比例平均为 30.1% 和 29.8%。②3 种灌木直根在疲劳前后抗拉力均与根径呈幂函数正相关,抗拉强度均与根径呈幂函数负相关,且抗拉力和抗拉强度均表现为:小叶锦鸡儿>北沙柳>沙棘,根系疲劳可显著提升直根抗拉性能。③3 种灌木侧根分支处在疲劳前后抗拉力与抗拉强度随根径的变化与直根相似,疲劳前小叶锦鸡儿抗拉力最大,北沙柳次之,沙棘最低,但疲劳后却表现为:沙柳>小叶锦鸡儿>沙棘,根系疲劳可显著提升北沙柳和沙棘侧根分支处的抗拉力学性能,却会降低小叶锦鸡儿抗拉能力。[结论] 在风蚀环境中,北沙柳根系在侵蚀过程中能始终保持良好的抗拉性能,可发挥稳定的固土抗蚀效能,应作为半干旱矿区植被重建的优选植物种。

关键词: 根系固土; 抗拉力; 根系疲劳; 灌木; 半干旱矿区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)06-0047-07

中图分类号: S157.2, S714.7

文献参数: 张欣, 王博, 刘铁军, 等. 半干旱矿区典型灌木根系固土力学及疲劳性能的差异性[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 47-53. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.06.006; Zhang Xin, Wang Bo, Liu Tiejun, et al. Differences in soil reinforcement and root fatigue properties of typical shrubs in semi-arid mining areas [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 47-53.

Differences in Soil Reinforcement and Root Fatigue Properties of Typical Shrubs in Semi-arid Mining Areas

Zhang Xin^{1,2}, Wang Bo³, Liu Tiejun^{1,2}, Guo Jianying^{1,2}, Wang Hugang⁴, Yang Zhenqi^{1,2}

(1.Yinshanbeilu Grassland Eco-hydrology National Observation and Research

Station, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038,

China; 2.Institute of Water Resources for Pastoral Area Ministry of Water Resources, Hohhot,

Inner Mongolia 010020, China; 3.Inner Mongolia Normal University, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China;

4.Inner Mongolia Autonomous Region Development Center of Water Conservancy, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China)

Abstract: [Objective] The effects of cyclic load on root tensile resistance characteristics of three typical shrubs, and the change of soil reinforcement efficiency of shrub roots after fatigue were determined in order to provide a scientific basis for plant selection in the process of ecological restoration and erosion prevention

收稿日期: 2022-03-15

修回日期: 2022-06-01

资助项目: 内蒙古科技计划项目“鄂尔多斯农牧交错区生态修复植物生态功能对多动力侵蚀响应及保育增汇技术与示范”(2022YFHH0045); 国家自然科学基金项目“荒漠草原植被根—土系统响应环境变化的自调控机理研究”(51779156); 科技兴蒙项目(KJXM-EEDS-2020005); 国神华能源股份有限公司神东煤炭分公司科技创新项目(202016000017)

第一作者: 张欣(1972—), 女(满族), 河北省清河县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水土保持与生态修复方面研究。Email: nmmkszx@163.com。

通讯作者: 郭建英(1979—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水土保持与生态修复方面研究。Email: 382224491@qq.com。

and control in semi-arid mining areas. [Methods] The roots of *Salix psammophila*, *Caragana microphylla*, and *Hippophae rhamnoides* were taken as the research objects. The TY8000 servo-controlled material testing machine was used to apply mild and severe cyclic loads on the taproots and lateral root branches within the root diameter range of 2~4 mm, and changes in root tensile force and tensile strength before and after fatigue were analyzed. [Results] ① There were significant differences in root biomass, cumulative root length, root volume, and root surface area among the three shrubs that followed the order of *S. psammophila* > *C. microphylla* > *H. rhamnoides*. The root biomass and root volume were mostly concentrated in the 0—10 cm surface soil, with proportions of 38.5% and 35.3%, respectively. The cumulative root length and root surface area were mostly concentrated in the 10—20 cm shallow soil, with proportions of 30.1% and 29.8%, respectively. ② The tensile force of the taproots of the three shrubs before and after fatigue was positively correlated with root diameter by a power function relationship, and a negative power function relationship between tensile strength and root diameter was observed. Both tensile force and tensile strength of the three shrubs followed the order of *S. psammophila* > *C. microphylla* > *H. rhamnoides*. Root fatigue significantly improved the tensile properties of the taproot. ③ Before and after fatigue, the tensile force and tensile strength of the lateral root branches of the three shrubs were similar to that of the taproot. Before fatigue, the tensile force of *C. microphylla* was the highest, followed by *S. psammophila*, and *H. rhamnoides* was the lowest. However, after fatigue, the tensile force followed the order of *S. psammophila* > *C. microphylla* > *H. rhamnoides*. Root fatigue can significantly improve the tensile properties of lateral root branches of *S. psammophila* and *H. rhamnoides*, but can decrease the tensile properties of *C. microphylla*. [Conclusion] In a wind erosion environment, the root system of *S. psammophila* can always maintain good tensile performance during the erosion process, and can exert a stabilizing soil reinforcement effect, and therefore, this species should be considered as the better choice for vegetation reconstruction in semi-arid mining areas.

Keywords: soil reinforcement; tensile force; root fatigue; shrub; semi-arid mining area

植物根系既具有吸收、传输水分和养分的生物功能,也兼备稳固自身并固持土体抵抗侵蚀的力学功能^[1]。长期以来,能够积极发挥枝叶防风和根系固土效能的植物措施,一直是中国北方进行植被重建和生态修复的主要方式。尤其在半干旱矿区的复杂侵蚀环境中,因灌木根系在减弱土壤侵蚀,加固斜坡,固持土体等方面都能发挥积极的作用,使得该类植物成为边坡防护的首选物种以及区域水土流失防治的是首道防线^[2]。

灌木根系的固土效能主要取决于其生物力学特性。因根系是由纤维素、半纤维素和木质素等化学物质组成,类似于高聚物材料,自身具有抗拉、抗压、抗折和抗弯曲等力学特性,对土体产生有效的约束^[3]。一方面通过与土体错综缠绕形成一种加筋土,有效抵抗土体变形^[4],另一方面根系如同锚杆一样扎入土体中,将浅层土体与深层土体嵌合在一起,使土体更加坚固和稳定^[5]。从生长及力学特性角度研究不同灌木根系锚固土体、抵抗土体位移和变形能力,对于正确理解灌木根系固土抗蚀特性并充分发挥其保育水土、防风固沙的作用有重要意义。而不同灌木自身特性的种间差异又可造成其固土效能的差异化,在半干

旱矿区侵蚀防控和精准植被建设的双重需求下,这种差异化特征将成为物种选择的基础依据。

目前关于植物根系抗拉力学特性的研究多集中于植物种类^[6]、土壤含水量^[7]、季节变化等外部因素^[8]及根系直径、结构特征^[9]、活性、化学组成等^[10]内部因素的影响,且基本均为静荷载下根系拉伸试验,获取的数据也仅能代表静态下根系力学特性。但实际上,在自然界中,尤其是在以风蚀为主的干旱半干旱区,风力不间断地吹蚀作用于植物地上枝叶,形成动荷载由茎干不断地向地下根系传导,使根系处于循环拉伸的疲劳状态,形成疲劳性塑性损伤^[11]。在这种动荷载作用下,植物根系的抗拉力学特性会发生何种变化?是否会影响其固土效能,进而改变群落及土体的稳定性?

本研究以半干旱矿区常见植物北沙柳(*Salix psammophila*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)为研究对象,对3种灌木根系形态的垂直分布差异性进行分析,并开展动荷载拉拔试验,模拟研究风力吹蚀下循环拉拔造成的根系疲劳对直根及侧根分支处抗拉力学特性的影响,探讨典型灌木根系固土力学及疲劳性能的差异性,以

明确不同灌木根系的固土功能特征,为生态脆弱区植被恢复过程中的物种筛选和侵蚀有效防控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古鄂尔多斯市伊金霍洛旗与陕西省榆林市交界处,该区域属于神府—东胜煤田神东矿区,地理坐标为:110°05′—110°30′E,39°27′—39°15′N,海拔 1 310 m,属于大陆性干旱半干旱气候,年均气温 8.9 °C,年均降水量 396.8 mm,年均蒸发量 1 790.4 mm,无霜期 130 d,该地区土壤贫瘠,成土母质主要有风积沙、冲积物和洪积物,土壤粒径主要以砂砾为主。生态环境脆弱,属于典型的荒漠化草

原景观,植被主要分布有北沙柳、小叶锦鸡儿、沙棘、黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等。

1.2 样地设置

矿区自 2005 年开始针对采煤沉陷区进行生态治理,主要选择小叶锦鸡儿、沙棘和北沙柳进行带状栽植,植被建设 10 hm²,初植密度为 220 株/hm²。针对研究内容和研究对象,选择长势良好的人工建植灌木群落:小叶锦鸡儿群落、北沙柳群落和沙棘群落,分别布设 3 块 20 m×20 m 灌木样方。统计各灌木样方中灌丛盖度、密度等样地参数,在各灌木样方中随机选取生长状况健康的植株 20 株,测量每株基径 D (mm)、冠幅 C (m²)、株高 H (m),计算均值并依此选择标准株,生长指标详见表 1。

表 1 研究区灌木标准株生长状况

植物种	密度(株/m ²)	盖度/%	株高/m	冠幅/m ²	基径/cm	分枝数
小叶锦鸡儿	0.14±0.04	0.13±0.02	0.72±0.15	0.95±0.22	1.53±0.34	15±3
北沙柳	0.07±0.02	0.16±0.12	1.35±0.41	1.72±0.36	1.97±0.46	18±5
沙棘	0.31±0.11	0.23±0.05	0.65±0.12	0.74±0.15	2.44±0.52	主干型

注:数据为平均值±标准差。每种灌木选取与标准株相近的 5 株作为供试植株。

1.3 根系形态测定

对所选供试植株根系进行整株保护性挖掘,选择逐层去土,土层设置为 0—10, 10—20, 20—30, 30—40 cm 以及 40 cm 以下土层,整株根系挖掘深度要求不出现细毛根为止。每一土层暴露出来的根系利用软毛刷刷去根系表层附土,剪断后按径级分装如密封袋冷藏。使用 Epson Expression 10000XL 高精度扫描仪对单位面积内的累计根长、根体积以及根表面积进行测定,使用 WinRHIZO 2009 年系统对根系形态学指标进行分析。根生物量采用烘干法进行测定。整株根系指标为各土层根系所测指标之和。

1.4 根系疲劳试验方法

根系是由各个径级的直段根与侧根分支处连接

构成的复杂的网络结构。从根的拓扑学特性的角度来分析,灌木侧根分支主要为二分枝型。二分枝型的侧根去掉主根,剩下的两部分侧根直径粗细相差很小,呈人字形。2019 年 5 月在研究区内挖取 3 种灌木 2~4 mm 根径范围内的直根和侧根分支处若干,将挖取的根系覆盖根际土,放入冷藏箱低温保存带回实验室,在 10 d 内完成试验,以保证试验过程中根系具有活性。试验前采用精度为 0.01 mm 电子游标卡尺精确测量供试根直径,图 1a 为直根,十字交叉测量 A、O、B 三点直径,计算平均值作为直根根径采用游标卡尺;图 1b 为侧根分支处,每隔 120°测量分支节点 O、上级直根 A 和 2 条下级侧根 B 处的直径,计算平均值作为侧根分支处的根径。测试部分长度为 6 cm,阴影部分为夹具加持段。

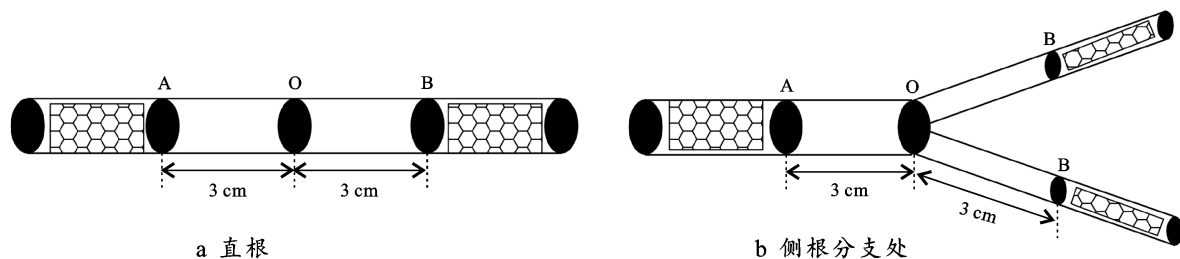


图 1 供试根形态示意图

利用 TY 8000 伺服控制材料试验机对供试根施加轴向循环荷载。试验分 3 组进行,A 组为单次荷载

下的根系极限抗拉力试验,测定供试根的极限抗拉力,供试根样本数为 40 个,其中直根和侧根分支处各

20; B组为轻度循环荷载, 施力强度为 A组所测极限抗拉力的 30%。第 1次执行测试前输入 30% 极限力数值, 以便在固定的拉力值时对根系停止拉伸, 循环进行 50 次, 加载速度设定为 20 mm/min, 循环中途滑脱、表皮破裂或断裂均视为无效数据, 其中直根试验成功率为 55%, 供试根样本数为 80 个, 有效数据为 44 个, 侧根分支处试验成功率为 46%, 供试根样本数为 80 个, 有效数据为 36 个。当 50 次循环完成后, 以相同加载速度将供试根以匀速拉伸直至完全断裂, 记录断裂时的拉力值。C组为重度循环荷载, 施力强度为 A组所测极限抗拉力的 70%。第 1次执行测试前输入 70% 极限力数值, 后续操作同 B组, 其中直根试验成功率为 30%, 供试根样本数为 80 个, 有效数据为 24 个, 侧根分支处试验成功率为 25%, 供试根样本数为 80 个, 有效数据为 20 个。循环完成后将所有供试根匀速拉断并记录拉力值。根系抗拉强度计算公式为:

$$\delta = 4F / \pi D^2$$

式中: δ 为抗拉强度 (MPa); F 为抗拉力 (N); D 为

根系平均直径 (mm)。

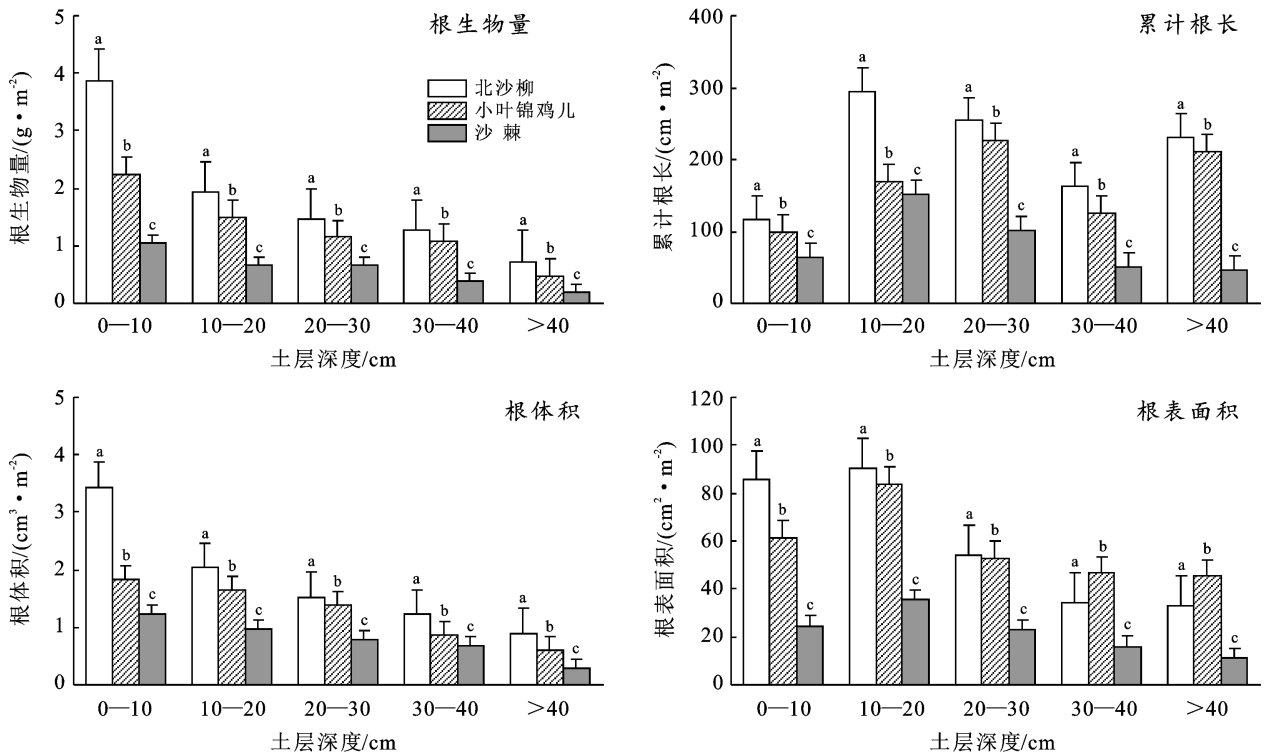
1.5 数据处理与分析

试验数据处理及作图采用 Excel 及 SigmaPlot 14.0 软件完成, 采用 SPSS 20.0 软件进行统计检验。选取最小显著极差法 (LSD) 对 3 种灌木根系形态、直根及侧根分支处在单次荷载、轻度循环荷载和重度循环荷载下的抗拉力学特性进行差异性检验 ($\alpha = 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 灌木根系形态特征差异性

单位面积根生物量是反映植物根系在土壤内生长状况的指标。由图 2 可知, 3 种灌木根生物量差异显著 ($p < 0.05$), 表现为: 北沙柳 ($9.46 \pm 3.73 \text{ g/m}^2$) > 小叶锦鸡儿 ($5.77 \pm 1.37 \text{ g/m}^2$) > 沙棘 ($2.37 \pm 0.36 \text{ g/m}^2$), 且根生物量均随土体加深而逐层递减。北沙柳、小叶锦鸡儿和沙棘根生物量均在 0—10 cm 的表层土体所占比例最大, 分别占总生物量的 41.86%, 34.87% 和 38.88%。单位面积累计根长是反映植物根系吸收水分和养分能力的指标。



注: 不同小写字母表示同一土层中不同灌木根系形态指标差异显著 ($p < 0.05$)。

图 2 灌木根系形态指标变化

由图 2 可知, 3 种灌木累计根长差异显著 ($p < 0.05$), 表现为北沙柳 ($1\ 015.49 \pm 295.11 \text{ cm/m}^2$) > 小叶锦鸡儿 ($718.76 \pm 132.62 \text{ cm/m}^2$) > 沙棘 ($362.82 \pm 65.43 \text{ cm/m}^2$), 且均在 10—20 cm 的浅层土体所占比

例最高, 依次占总根长的 28.19%, 24.93% 和 36.42%。单位面积根体积也是反映植物根系吸收和传导水肥的重要指标, 由图 2 可知, 3 种灌木根体积差异显著 ($p < 0.05$), 表现为: 北沙柳 ($8.78 \pm 2.44 \text{ cm}^3/\text{m}^2$) >

小叶锦鸡儿($5.11 \pm 1.12 \text{ cm}^3/\text{m}^2$) > 沙棘($2.73 \pm 1.06 \text{ cm}^3/\text{m}^2$), 根体积均随土层加深而减小, 在 0—10 cm 的表层土体所占比例最大, 分别占根总体积的 39.41%, 30.42% 和 36.21%。单位面积根表面积是影响根系固土的重要指标, 由图 2 可知, 3 种灌木根表面积差异显著 ($p < 0.05$), 表现为: 北沙柳 ($335.38 \pm 68.01 \text{ cm}^2/\text{m}^2$) > 小叶锦鸡儿 ($231.39 \pm 60.06 \text{ cm}^2/\text{m}^2$) > 沙棘 ($158.63 \pm 59.09 \text{ cm}^2/\text{m}^2$), 且均在 10—20 cm 的浅层土体所占比例最高, 依次占总根表面积的 28.61%, 30.72% 和 31.01%。

2.2 循环荷载对灌木直根抗拉特性的影响

根系抗拉力和抗拉强度是反映其对外力轴向拉拔破坏抵抗能力的指标。由表 2 可知, 在 2~4 mm 根径范围内, 北沙柳、小叶锦鸡儿和沙棘直根在单次、轻度和重度循环荷载后, 抗拉力均与根径呈幂函数正

相关, 抗拉强度均与根径呈幂函数负相关。由表 3 可知, 3 种灌木直根在单次、轻度和重度循环荷载后抗拉力均差异显著 ($p < 0.05$), 均表现为小叶锦鸡儿抗拉力最大, 北沙柳次之, 沙棘抗拉力最低, 抗拉强度在种间具有相同的差异性。循环荷载能够显著提升北沙柳和小叶锦鸡儿直根的抗拉力学特性, 且随荷载程度增加, 提升幅度增大, 相比单次荷载, 轻度循环荷载后二者抗拉力分别增加 20.26% 和 58.99%, 抗拉强度分别增大 14.57% 和 34.63%; 重度循环荷载后二者抗拉力分别增加 25.98% 和 83.30%, 抗拉强度分别增大 28.78% 和 47.68%。相比单次荷载, 沙棘直根抗拉力学特性在轻度循环荷载下有所下降但差异不显著, 抗拉力和抗拉强度分别降低 3.28% 和 6.83%, 而在重度循环荷载下抗拉性能又显著提升, 抗拉力和抗拉强度分别增加 50.06% 和 53.95%。

表 2 循环荷载下灌木直根极限抗拉力学与根径回归分析

灌木种	荷载类型	抗拉力			抗拉强度		
		回归方程	R^2	p	回归方程	R^2	p
北沙柳	单次荷载	$F_{\text{单次}} = 34.69D^{1.356}$	0.91	<0.001	$\delta_{\text{单次}} = 44.78D^{-0.652}$	0.98	<0.001
	轻度循环荷载	$F_{\text{轻度}} = 60.66D^{0.968}$	0.82	<0.001	$\delta_{\text{轻度}} = 535.67D^{-2.793}$	0.93	0.034
	重度循环荷载	$F_{\text{重度}} = 52.20D^{1.187}$	0.85	<0.001	$\delta_{\text{重度}} = 66.51D^{-0.813}$	0.67	0.001 4
小叶锦鸡儿	单次荷载	$F_{\text{单次}} = 49.36D^{1.054}$	0.97	<0.001	$\delta_{\text{单次}} = 62.88D^{-0.946}$	0.96	<0.001
	轻度循环荷载	$F_{\text{轻度}} = 59.34D^{1.284}$	0.56	0.033	$\delta_{\text{轻度}} = 75.59D^{-0.715}$	0.51	0.042
	重度循环荷载	$F_{\text{重度}} = 32.41D^{1.975}$	0.82	<0.001	$\delta_{\text{重度}} = 97.62D^{-0.846}$	0.71	<0.001
沙棘	单次荷载	$F_{\text{单次}} = 20.90D^{1.144}$	0.99	<0.001	$\delta_{\text{单次}} = 26.62D^{-0.855}$	0.98	<0.001
	轻度循环荷载	$F_{\text{轻度}} = 9.21D^{1.778}$	0.54	0.021	$\delta_{\text{轻度}} = 11.72D^{-0.222}$	0.53	0.058
	重度循环荷载	$F_{\text{重度}} = 13.45D^{1.905}$	0.57	0.011	$\delta_{\text{重度}} = 154.14D^{-2.113}$	0.63	0.023

表 3 循环荷载下灌木直根抗拉力学特性差异性分析

植物种	抗拉力/N			抗拉强度/MPa		
	单次荷载	轻度循环荷载	重度循环荷载	单次荷载	轻度循环荷载	重度循环荷载
北沙柳	$146.44 \pm 10.17^{\text{bb}}$	$176.11 \pm 9.03^{\text{ab}}$	$184.49 \pm 20.31^{\text{ab}}$	$21.89 \pm 0.68^{\text{cb}}$	$25.08 \pm 3.47^{\text{bb}}$	$28.19 \pm 2.12^{\text{ab}}$
小叶锦鸡儿	$157.63 \pm 17.95^{\text{ca}}$	$250.62 \pm 73.16^{\text{ba}}$	$288.94 \pm 68.08^{\text{aa}}$	$26.30 \pm 2.29^{\text{ba}}$	$35.41 \pm 8.44^{\text{aa}}$	$38.84 \pm 4.10^{\text{aa}}$
沙棘	$73.08 \pm 6.70^{\text{bc}}$	$70.68 \pm 13.13^{\text{bc}}$	$109.67 \pm 27.26^{\text{ac}}$	$10.25 \pm 0.73^{\text{bc}}$	$9.55 \pm 3.22^{\text{bc}}$	$15.78 \pm 3.15^{\text{ac}}$

注: 同行不同大写字母表示同一灌木抗拉力或抗拉强度在不同处理下差异显著 ($p < 0.05$), 同列不同小写字母表示同一处理下不同植物种抗拉力或抗拉强度差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

2.3 循环荷载对灌木侧根分支处抗拉特性的影响

由表 4 可知, 在 2~4 mm 根径范围内, 北沙柳、小叶锦鸡儿和沙棘的侧根分支处在单次、轻度和重度循环荷载后, 抗拉力均与根径呈幂函数正相关, 抗拉强度与均根径呈幂函数负相关。由表 5 可知, 3 种灌木侧根分支处抗拉力差异显著 ($p < 0.05$), 单次荷载下小叶锦鸡儿抗拉力最大, 北沙柳次之, 沙棘抗拉力最低, 但在轻度和重度循环荷载后则表现为: 沙柳 > 小叶锦鸡儿 > 沙棘, 抗拉强度在种间具有相同的差异性。循环荷载对 3 种灌木侧根分支处的影响不尽相

同, 能够显著提升北沙柳侧根分支处的抗拉力学特性, 且随荷载程度增加, 提升幅度增大, 轻度和重度循环荷载后北沙柳抗拉力分别增加 71.52% 和 107.08%, 抗拉强度分别增大 113.81% 和 168.26%; 而小叶锦鸡儿侧根分支处在循环荷载后抗拉力和抗拉强度均出现明显的下降, 相比单次荷载, 二者分别降低 50.45% 和 54.25% (轻度和重度无差异) 轻度循环荷载对沙棘侧根分支处抗拉力学特性无明显影响, 但重度循环荷载可显著增加其抗拉力和抗拉强度, 二者分别增加 33.52% 和 41.57%。

表 4 循环荷载下灌木侧根分支处极限抗拉力学与根径回归分析

灌木种	荷载类型	抗拉力			抗拉强度		
		回归方程	R^2	p	回归方程	R^2	p
北沙柳	单次荷载	$F_{\text{单次}} = 20.31D^{1.115}$	0.99	<0.001	$\delta_{\text{单次}} = 25.87D^{-0.884}$	0.99	<0.001
	轻度循环荷载	$F_{\text{轻度}} = 8.56D^{2.327}$	0.58	0.013	$\delta_{\text{轻度}} = 114.34D^{-1.746}$	0.67	<0.001
	重度循环荷载	$F_{\text{重度}} = 54.68D^{0.878}$	0.50	0.022	$\delta_{\text{重度}} = 69.66D^{-1.122}$	0.62	0.025
小叶锦鸡儿	单次荷载	$F_{\text{单次}} = 42.04D^{1.331}$	0.98	<0.001	$\delta_{\text{单次}} = 62.88D^{-0.946}$	0.96	<0.001
	轻度循环荷载	$F_{\text{轻度}} = 1.76D^{3.501}$	0.57	0.001 2	$\delta_{\text{轻度}} = 321.99D^{-3.03}$	0.82	<0.001
	重度循环荷载	$F_{\text{重度}} = 14.25D^{1.694}$	0.52	0.034	$\delta_{\text{重度}} = 18.16D^{-0.306}$	0.62	<0.043
沙棘	单次荷载	$F_{\text{单次}} = 10.58D^{1.182}$	0.97	<0.001	$\delta_{\text{单次}} = 13.48D^{-0.817}$	0.98	<0.001
	轻度循环荷载	$F_{\text{轻度}} = 2.24D^{2.522}$	0.69	<0.001	$\delta_{\text{轻度}} = 29.16D^{-1.52}$	0.75	0.017
	重度循环荷载	$F_{\text{重度}} = 3.98D^{2.362}$	0.77	<0.001	$\delta_{\text{重度}} = 23.62D^{-1.062}$	0.69	<0.001

表 5 循环荷载灌木侧根分支处抗拉力学特性差异性分析

植物种	抗拉力/N			抗拉强度/MPa		
	单次荷载	轻度循环荷载	重度循环荷载	单次荷载	轻度循环荷载	重度循环荷载
北沙柳	72.23±7.07 ^{Cb}	123.89±30.21 ^{Ba}	149.58±31.67 ^{Aa}	7.53±0.77 ^{Cb}	16.10±2.96 ^{Ba}	20.20±3.95 ^{Aa}
小叶锦鸡儿	182.34±25.44 ^{Aa}	90.34±20.49 ^{Bb}	94.10±23.97 ^{Bb}	25.79±1.85 ^{Aa}	11.78±4.36 ^{Bb}	13.21±2.42 ^{Bb}
沙棘	40.83±4.87 ^{Bc}	41.22±12.47 ^{Bc}	54.52±10.78 ^{Ac}	5.34±0.46 ^{Bc}	5.27±1.08 ^{Bc}	7.56±1.25 ^{Ac}

3 讨论

3.1 形态学特性对根系固土的影响

在干旱矿区的复杂侵蚀环境中,固土抗蚀作用是根系首要发挥的生态功能。在本研究中,北沙柳的根系形态指标如根生物量、根体积、根长和根表面积均是最优值,小叶锦鸡儿次之,沙棘的根系形态表现最差,表明北沙柳根系能够更好地支撑土体并减轻位移变形的程度。这是因为根系形态是决定固土效能的直接指标,根系与土体的接触面积越大,根—土界面摩擦力随之增大^[12]。当土体在采煤沉陷的重力作用或其他侵蚀营力破坏下发生变形时,土体与根系间将会形成相互错动的趋势,这种趋势一方面能被根—土界面的摩阻力所抵抗,另一方面,根系的侧向约束力也能有效减弱土体位移^[13]。Frydman 等^[14]也表明根系密度和长度越大,地下生物量越大,则植物保持水土的能力越强。试验结果还表明,3种灌木根生物量、体积和表面积均集中分布于表层和浅层土体,具有随土层加深而减小的趋势,以分形理论对植物根系分布结构的研究表明,根系分形维数与根系加筋能力具有一致的变化,根系生物量集度越高,分形维数越大,则植物根系对土体的加固能力增强^[15]。这说明在干旱矿区,北沙柳等的根系对表层和浅层土体具有更好的固持作用,对深层土体的支撑作用相对较弱。

3.2 抗拉力学特性对根系固土的影响

不同植物种间根系抗拉强度差异明显。本试验

结果表明,小叶锦鸡儿单根极限抗拉强度(单次荷载)均显著大于北沙柳和沙棘,因为根系抗拉力、抗拉强度等材料力学指标可量化反映根系的力学支撑效应^[16],表明小叶锦鸡儿根系对土体有较高的力学加固和保护作用。单根抗拉力和抗拉强度的差异可能与植物根系化学成分含量差异有关,小叶锦鸡儿根系纤维素和综纤维素含量高于后者,这两种成分凝聚成的纤维束可增强根系的材料力学强度^[17]。不同植被类型中,小叶锦鸡儿单根抗拉强度明显低于黑麦草、百喜草和香根草等草本植物^[18],但明显高于白桦、油松和落叶松等乔木^[19],与柠条锦鸡儿和霸王等灌木相近^[20]。根系含水量、纤维素微纤丝排列方式、木质素含量、解剖结构等综合作用导致了这种差异的产生^[21]。本研究表明,北沙柳、小叶锦鸡儿和沙棘单根抗拉力均与根径呈幂函数正相关,抗拉强度均与根径呈幂函数负相关,这与关于白刺、霸王、黄花柳等^[20, 22]植物的研究结果一致,也符合 Tosi 等^[23]提出的抗拉强度 T_r 与根径 D 的回归方程($T_r = aD^{-b}$),这种现象出现的原因主要是纤维素微纤丝存在于根系细胞壁中,承担着拉力传导的功能并决定了根系强度,其含量普遍表现为随根径增大而降低的趋势^[24]。

3.3 疲劳特性对根系固土的影响

试验结果表明,相比单次荷载,3种灌木直根在循环荷载后抗拉力和抗拉强度均出现明显提升,这与学者对油松^[25]和侧柏^[11]的研究结果相似。说明风力等循环动荷载造成的植物根系疲劳可改变其材料力学特性,在一定程度上会增强单根抗拉拔能力,也相

应提高了根系增强土体抗蚀能力的程度。这种“增强效应”可能是因为在循环荷载过程中根细胞会逐渐失去水分并对空间结构形成挤压,纤维素微纤丝形成聚集并形成强有力的纤维束,以根系弹性的丧失来换取更强的抗拉能力^[26]。但根型对疲劳特性存在一定影响,试验结果表明,小叶锦鸡儿侧根分支处的抗拉力和抗拉强度在循环荷载后出现了明显下降,抵抗外力拉拔破坏的能力被显著削弱,这可能是因为小叶锦鸡儿侧根分支处的分支节点是根网的易损部位^[27],在循环拉拔下节点处容易产生裂隙,根段的结构稳定性被破坏,导致抗拉强度减弱,对土体的支撑和侧向约束力将被抑制,固土效能降低。

4 结论

(1) 3 种灌木根生物量、累计根长、根体积和根表面积种间差异显著,均表现为:北沙柳>小叶锦鸡儿>沙棘。根系形态指标均具有随土体加深而递减的趋势,根生物量和根体积集中分布于 0—10 cm 的表层土体,累计根长和根表面积集中分布于 10—20 cm 的浅层土体。

(2) 3 种灌木直根在单次、轻度和重度循环荷载后,抗拉力均与根径呈幂函数正相关,抗拉强度均与根径呈幂函数负相关,且抗拉力和抗拉强度均表现为:小叶锦鸡儿>北沙柳>沙棘;循环荷载能够显著提升 3 种灌木直根的抗拉力和抗拉强度,重度循环荷载后的提升效果更明显。

(3) 3 种灌木侧根分支处在单次、轻度和重度循环荷载后,抗拉力与抗拉强度随根径的变化与直根相似。单次荷载下小叶锦鸡儿侧根分支处抗拉力最大,北沙柳次之,沙棘最低,但在轻度和重度循环荷载后则表现为:沙柳>小叶锦鸡儿>沙棘;循环荷载后北沙柳和沙棘侧根分支处的抗拉力学性能明显增加,但小叶锦鸡儿却被显著削弱。

[参 考 文 献]

[1] 左志严,格日乐,乌仁图雅,等.内蒙古中西部 3 种乡土植物根系抗拉力学特性的对比研究[J].水土保持通报,2015,35(2):52-57,63.

[2] 李珍玉,欧阳森,肖宏彬,等.基于根系构型的调控提高植物边坡根系固土能力[J].岩土力学,2021,42(12):3271-3280,3290.

[3] Zhou Y, Watts D, Cheng H, et al. The traction effect of lateral roots of *Pinus yunnensis* on soil reinforcement: A direct in situ test [J]. *Plant Soil*, 1997,190:77-86.

[4] Gyssels G, Poesen J, Bochet E, et al. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A

review [J]. *Progress in Physical Geography*, 2005, 29(2):189-217.

- [5] 陈文乐,杜鹃,方迎潮,等.泥石流频发区典型乔灌植物根系的固土效应[J].水土保持通报,2019,39(5):32-39.
- [6] 李宁,陈丽华,杨苑君,油松,华北落叶松根系抗拉特性的影响因素[J].北京林业大学学报,2015,37(12):77-84.
- [7] 李长暄,陈丽华,周娟,等.蒙古栎根系单根抗拉力学特性[J].水土保持通报,2014,34(4):232-235.
- [8] Nilaweera N S, Nutalaya P. Role of tree roots in slope stabilization [J]. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 1999,57(4):337-342.
- [9] 王博,刘静,李有芳,等.不同损伤条件下沙柳直根力学特性的自修复差异[J].生态学杂志,2018,37(12):3549-3555.
- [10] 周萍,文安邦,严冬春,等.三峡库区紫色土坡耕地草本地埂植物根系分布及抗拉力学特征[J].水土保持通报,2017,37(3):1-6,14.
- [11] 穆枫,程子敏,李玉灵,等.太行山区林木根系单根固土生物力学及疲劳特性研究[J].西北林学院学报,2019,34(2):14-21,55.
- [12] 田佳,卞莹莹,于江珊,等.贺兰山 3 种乔木单根及根土复合体力学特性[J].水土保持学报,2018,32(6):123-129.
- [13] 邢会文,刘静,王林和,等.柠条、沙柳根与土及土与土界面摩擦特性[J].摩擦学学报,2010,30(1):87-91.
- [14] Frydman S, Operstein V. The influence of vegetation on soil strength [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Ground Improvement*, 2000, 4(2):81-89.
- [15] 洪苗苗,汪霞,赵云飞,等.浅层滑坡多发区典型植被恢复树种根系对土壤抗剪强度影响[J].山地学报,2018,36(1):107-115.
- [16] 程洪,谢涛,唐春,等.植物根系力学与固土作用机理研究综述[J].水土保持通报,2006,26(1):97-102.
- [17] 王博,刘静,王晨嘉,等.半干旱矿区 3 种灌木侧根分支处折力损伤后的自修复特性[J].应用生态学报,2018,29(11):3541-3549.
- [18] 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.
- [19] 吕春娟,陈丽华,周硕,等.不同乔木根系的抗拉力学特性[J].农业工程学报,2011,27(S1):329-335.
- [20] 朱海丽,胡夏嵩,毛小青,等.青藏高原黄土区护坡灌木植物根系力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(S2):3445-3452.
- [21] 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.

键指标。另外,需要注意的是目前土壤三相比的理想值参考的是旱作农业土壤的相关参数,未来应探索林地土壤理想土壤三相比,不断完善广义土壤结构指数和土壤三相结构距离等表征土壤结构的指标在林业土壤中的应用。

4 结论

研究区土壤机械稳定性团聚体与水稳定性团聚体组成均表现出细大团聚体($2\sim 0.25\text{ mm}$) $>$ 微团聚体($0.25\sim 0.053\text{ mm}$) $>$ 粉黏粒($<0.053\text{ mm}$)的趋势。刺槐 \times 麻栎混交林土壤团聚体机械稳定性显著优于板栗林,而水稳定性与板栗林无显著差异。不同坡位之间,土壤团聚体组成与稳定性无显著差异。刺槐 \times 麻栎混交林的土壤结构稳定性更强。不同坡位土壤 GSSI 与 STPSD 均未表现出显著差异。固相体积所占比例可作为评价团聚体组成的重要指标。

[参 考 文 献]

- [1] Zheng Wei, Zhao Zhiyuan, Lv Fenglian, et al. Assembly of abundant and rare bacterial and fungal sub-communities in different soil aggregate sizes in an apple orchard treated with cover crop and fertilizer [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 156:108222.
- [2] Merino-Martin L, Stokes A, Gweon H S, et al. Interacting effects of land use type, microbes and plant traits on soil aggregate stability [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 154:108072.
- [3] 张志明,李禄军.基于 CNKI 的近 30 年土壤团聚体研究趋势分析[J].*土壤与作物*, 2021, 10(4):385-394.
- [4] 张彧行,翁白莎,严登华.基于文献可视化分析的土壤团聚体研究进展[J].*地球科学进展*, 2022, 37(4):429-438.
- [5] 王清奎,汪思龙.土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J].*土壤通报*, 2005, 36(3):415-421.
- [6] 杨青,杨广斌,赵青松,等.喀斯特地区不同降雨和植被覆

盖的坡面产流产沙特征[J].*水土保持通报*, 2020, 40(1):9-16.

- [7] 杨振奇,郭建英,秦富仓,等.裸露砒砂岩区不同植被类型土壤团聚体稳定性与抗蚀性能[J].*水土保持通报*, 2021, 41(3):8-14.
- [8] 刘鹏,蒋忠诚,李衍青,等.岩溶断陷盆地高原面洼地不同坡位土壤抗蚀性研究[J].*地球学报*, 2021, 42(3):373-381.
- [9] 王志印,曹建生.中国北方土石山区植被恢复及其生态效应研究进展[J].*中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(9):1319-1331.
- [10] He Jianing, Shi Yu, Yu Zhenwen. Subsoiling improves soil physical and microbial properties, and increases yield of winter wheat in the Huang-Huai-Hai Plain of China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 187:182-193.
- [11] Yu Qi, Wang Hao, Wen Pengfei, et al. A suitable rotational conservation tillage system ameliorates soil physical properties and wheat yield: An 11-year in-situ study in a semi-arid agroecosystem [J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 199:104600.
- [12] 邹文安,姜波,顾李华.土壤水分常数的测定[J].*水文*, 2015, 35(4):62-66.
- [13] Wu Qicong, Zhang Congzhi, Yu Zhengong, et al. Effects of elevated CO₂ and nitrogen addition on organic carbon and aggregates in soil planted with different rice cultivars [J]. *Plant and Soil*, 2018, 432(1):245-258.
- [14] 方薇,范弢.滇东岩溶山地不同类型云南松林地土壤团聚体稳定性差异[J].*水土保持通报*, 2020, 40(3):95-102,132.
- [15] 潘树林,周顺涛,辜彬.坡度和坡位对岩质边坡早期生态恢复土壤养分变异性的影响[J].*水土保持研究*, 2012, 19(4):289-292.
- [16] 李传人,艾应伟,郭培俊,等.铁路边坡不同坡位土壤物理化学性质差异性[J].*水土保持学报*, 2012, 26(6):91-95,101.

(上接第 53 页)

- [22] Bischetti G B, Chiaradia E A, Simonato T, et al. Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy) [J]. *Plant and Soil*, 2005, 278:11-22.
- [23] Tosi M. Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in Northern Apennines (Italy) [J]. *Geomorphology*, 2007, 87:268-283.
- [24] Li Youfang, Liu Jing, Zhang Xin, et al. Study on the vulnerable root location of two kinds of plants by anti-

fracture force [C]. Hunan Changsha: Proceedings of 2016 International Conference on New Energy and Sustainable Development, 2016.

- [25] 吕春娟,陈丽华,赵红华,等.油松根系的轴向疲劳性能研究[J].*摩擦学学报*, 2013, 33(6):578-585.
- [26] Genet M, Stokes A, Salin F, et al. The influence of cellulose content on tensile strength of tree roots [J]. *Plant Soil*, 2005, 278:1-9.
- [27] 苏慧敏,刘静,张欣,等.3 种灌木根系易损荷载类型及易损部位研究[J].*干旱区资源与环境*, 2019, 33(12):127-131.