

荒漠草原柠条引入后根系拓扑结构演变及对土壤碳氮组分的影响

张恩培^{1,2,3}, 孟晨^{1,2,3}, 王磊^{1,2,3}, 陈林^{1,2,3}, 马阳阳⁴, 杨志强⁴

(1. 宁夏大学 西北土地退化与生态系统恢复国家重点实验室培养基地,

银川 750021; 2. 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021;

3. 宁夏大学 生态环境学院, 银川 750021; 4. 宁夏大学 林业与草业学院, 银川 750021)

摘要: [目的] 探究荒漠草原人工柠条种植后的根系动态变化及其对土壤养分的作用机制, 为改善沙漠过渡带的土壤质量与养分循环提供科学依据。[方法] 选择宁夏盐池县典型荒漠草原区, 以草地和 9, 14, 24, 35 a 生的人工柠条林为研究对象, 通过 CT 扫描和图像处理技术, 获取根系构型, 量化根系拓扑结构参数, 分析了柠条引入后根系构型和拓扑结构变化以及对土壤碳氮组分的影响。[结果] (1) 整体上, 随柠条引入林龄增加, 粗根逐渐增多, 而细根在引入柠条 24~35 a 明显增多; (2) 在 0—20 cm 土层, 柠条林龄显著影响根系等效直径 ($p < 0.05$), 35 a 相较于 14 a 和 24 a 分别显著减少 28.1% 和 24.5%, 相较于对照草地 14 a 显著增加 15.3%。随着林龄增长, 根系数量密度和长度密度随林龄先减少后增加, 但都低于对照草地, 且趋势相同, 均为 $CK > 35 a > 9 a > 14 a > 24 a$ 。相反, 各样地根系等效直径随林龄先增大后减小, 35 a 甚至小于对照草地。在 0—10 cm 土层, 柠条林龄显著影响根系体积密度 ($p < 0.05$), 表现在相较于 9 a, 24 a 和 35 a 分别显著减少 22% 和 44%。(3) 在 0—20 cm 土层, 根系体积密度与可溶性有机碳呈显著正相关 ($p < 0.05$)。根系等效直径与易氧化有机碳和有机碳呈显著正相关 ($p < 0.05$), 与颗粒有机碳和全氮呈极显著正相关 ($p < 0.001$)。(4) PLS-SEM 结果揭示了根系拓扑结构对氮组分产生极显著正向影响 ($p < 0.001$), 碳组分对氮组分产生极显著正向影响 ($p < 0.001$); [结论] 荒漠草原中人工柠条引入后, 初期灌木的粗壮根系发育抑制草本植物细根的生长, 后期草本植物的细根有所恢复。根系拓扑结构的优化显著提升土壤的氮素供应能力, 形成良性的土壤植物互作机制。

关键词: CT 扫描; 柠条; 根系构型; 几何特征; 碳氮组分

中图分类号: S154.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0151-09

Evolution of root system topology and its impact on soil carbon and nitrogen components after introduction of *Caragana korshinskii* in desert steppe

Zhang Enpei^{1,2,3}, Meng Chen^{1,2,3}, Wang Lei^{1,2,3}, Chen Lin^{1,2,3}, Ma Yangyang⁴, Yang Zhiqiang⁴

(1. State Key Laboratory of Land Degradation and Ecosystem Restoration in Northwest China, Ningxia

University, Yinchuan 750021, China; 2. Key Laboratory of Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem

in Northwestern China of Ministry of Education, Yinchuan 750021, China; 3. School of Ecology and Environment, Ningxia

University, Yinchuan 750021, China; 4. School of Forestry and Grassland Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the dynamic changes of root systems after artificial planting of *Caragana korshinskii* in desert steppe and the action mechanisms of these changes on soil nutrients, thereby providing a scientific basis for improving soil quality and nutrient cycling in desert transition zones. [Methods] This study was conducted in a typical desert steppe area of Yanchi County, Ningxia, with natural grassland and

收稿日期: 2025-05-06

修回日期: 2025-05-26

接受日期: 2025-06-07

资助项目: 国家自然科学基金(42407086); 宁夏回族自治区教育厅高等学校科学研究重点项目(NYG2024005); 宁夏重点研发计划项目(2022BEG02003, 2021BEB04012)

第一作者: 张恩培(2000—), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: 1476338507@qq.com

通信作者: 孟晨(1990—), 男, 宁夏石嘴山人, 博士, 副研究员, 主要从事水土保持与土壤水文研究。E-mail: mengchen@nxu.edu.cn

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

Caragana korshinskii plantations of 9, 14, 24 and 35 years old selected as the research objects. Using CT scanning and image processing techniques, root system architecture was obtained and root topology parameters were quantified to investigate the changes in root system architecture and topology after the introduction of *Caragana korshinskii*, as well as the effects of these changes on soil carbon and nitrogen components. [Results] (1) Overall, with the increase of stand age after *Caragana korshinskii* introduction, coarse roots gradually increased, while fine roots increased significantly from 24 to 35 years. (2) In the 0—20 cm soil layer, stand age significantly affected root equivalent diameter ($p < 0.05$). Compared with the 14- and 24-year-old stands, the 35-year-old stand showed a significant decrease of 28.1% and 24.5%, respectively, but a pronounced increase of 15.3% compared with the 14-year-old control grassland. As stand age increased, root number density and root length density first decreased and then increased, but both were lower than those of the control grassland, following the order of CK > 35 a > 9 a > 14 a > 24 a. On the contrary, the root equivalent diameter of each plot first increased and then decreased, and the 35-year-old stand was even lower than the control grassland. In the 0—10 cm soil layer, stand age significantly affected root volume density ($p < 0.05$). Compared with the 9-year-old stand, the 24-year-old and 35-year-old stands showed a significant decrease of 22% and 44%, respectively. (3) In the 0—20 cm soil layer, root volume density was significantly positively correlated with soluble organic carbon ($p < 0.05$). Root equivalent diameter was significantly positively correlated with easily oxidizable organic carbon and total organic carbon ($p < 0.05$), and extremely significantly positively correlated with particulate organic carbon and total nitrogen ($p < 0.001$). (4) PLS-SEM results showed that root system topology had an extremely significant positive effect on nitrogen components ($p < 0.001$), and carbon components also had an extremely significant positive effect on nitrogen components ($p < 0.001$). [Conclusion] After the artificial introduction of *Caragana korshinskii* in the desert steppe, the development of coarse shrub roots initially inhibits the growth of herbaceous fine roots, and the fine roots of herbaceous plants partially recover in the later stage. The optimization of root system topology significantly improves the soil nitrogen supply capacity, establishing a positive soil-plant interaction mechanism.

Keywords: CT scanning; *Caragana korshinskii*; root system architecture; geometric characteristics; soil carbon and nitrogen components

人工植被建设对沙漠化恢复与控制具有重要作用^[1]。柠条(*Caragana korshinskii*)作为干旱和半干旱地区人工造林的重要树种,具有耐旱、耐寒、抗风沙、根系发达等生物学特性,对荒漠草原等干旱地区生物多样性的维持及生态系统功能的稳定具有重要作用^[2]。然而大规模的造林也存在着诸多问题,包括草本死亡、灌木恢复后期退化以及种植根系发达的植物加剧水土流失等,但是引起这些问题的地下生态过程不清楚^[3]。

为了更好地从土壤中获得养分,根系的塑性会使得根系在土壤空间中发生形态变化^[4],根系在土壤空间中的形态特征及几何分布被定义为根系构型(Root System Architecture, RSA)^[5]。根系构型可以精确描述根系在土壤中的生长结构和空间造型,是根系的基础特征^[6],决定着根系吸收、转化功能和运输效率^[7]。具体而言根系构型包含拓扑结构、链接长度与半径、分支角度等关键结构特征^[8]。根系的拓扑结构是描述植物整个根系发育的重要指标,它可以理解为根系的架构,包括根长、根系表面积、根系体积等几何形态特征,也包括根系的分枝状况^[9]。已有

研究已关注到根系构型与土壤环境的关联,例如Guo等^[10]探讨了不同根径水平下柠条根系形态指数和土壤含水量的空间分布。Fu等^[11]发现柠条根面积比、根长密度等结构指标随土层深度增加呈下降趋势。而在根系获取的土壤资源中,土壤碳氮组分是维系土壤质量的主要指标^[12]。土壤有机碳作为陆地土壤碳库的重要组成部分,其数量、组分特征及结构均显著影响着土壤团聚体的形成与稳定、有机质的分解矿化和养分的有效性、微生物的生长与代谢,进而影响到土壤肥力和森林生产力^[13]。土壤氮素是植物生长必需的大量营养元素,也是决定生态系统物种组成的关键因素,在促进植物生长、提高林木产量方面起着重要的作用^[13]。然而以往研究没有解释根系拓扑结构与土壤碳氮组分的联系,对根系的研究方法集中于地面雷达法、根箱法、微根管法、CCD相机等方法,以上方法可用于获取根系骨架立体构型,但可获取的根系拓扑参数较少,且常配合挖掘后的平板图像分析法等破坏性取样、探测方法^[14-17]。

本研究在宁夏盐池县荒漠草原地区以4种不同

种植年限柠条地和对照草地为研究对象,利用CT扫描技术和图像处理技术,在准确获取植物根系构型的同时,保持土壤原状量化更为丰富的根系拓扑结构参数(数量密度、长度密度、体积密度、表面积密度、等效直径、连接度),探究柠条引入后根系构型和拓扑结构变化以及对土壤碳氮组分的影响,深入了解根系如何通过其形态、分布和连接性影响土壤中的碳氮,为揭示人工柠条林引入后的地下生态过程提供理论支撑。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区吴忠市盐池(37°57′23″—37°83′47″N, 106°77′99″—107°50′70″E),北邻毛乌素沙地,东南方向与黄土高原相接,整体地

势呈南高北低的特点^[18]。平均海拔1 600 m,主要的土壤类型是灰钙土和风沙土。研究区域属于温带大陆性气候,年平均气温为8.1℃,无霜期为150 d。年均降水量为280 mm,80%以上的降水量集中在5—9月,其中全年60%以上的降水又集中在7—9月,年均蒸发量为2 710 mm,西风和西北风为全年主要风向,主要发生在春季^[19]。研究区内的主要土壤类型包括灰钙土和风沙土,主要植被有牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、草木樨状黄耆(*Astragalus melilotoides*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、狗尾草(*Setaria viridis*)等。

1.2 样地选取与取样方法

本试验于2021年7—8月植物生长期,在宁夏盐池县荒漠草原区域开展。柠条林地未引入柠条前均为放牧草地,样地的基本情况见表1。

表1 试验点样地信息

Table 1 Information of experimental plots

样地编号	植被类型	柠条林龄/a	海拔/m	纬度(N)	经度(E)
9 a	人工柠条林+猪毛蒿+狗尾草	9	1497	37°49.3001′	107°29.6180′
14 a		14	1489	37°49.1854′	107°30.1312′
24 a		24	1491	37°49.0330′	107°29.7485′
35 a		35	1519	37°49.2152′	107°30.3382′
草地	猪毛蒿+狗尾草	未种植柠条	1511	37°49.4154′	107°29.7912′

依据当地林业种植档案记录,选择9 a(2011年种植)、14 a(2006年种植)、24 a(1996年种植)、35 a(1985年种植)和对照草地共5个样地。由于CT扫描设备的精度有限,为确保分析的准确性,每个扫描样品的高度需控制在65 mm以内。因此,使用高度为65 mm、内径为50 mm的自制环刀,在各样地0—10 cm和10—20 cm土层采样。最终采集的样品数量为(4个林龄×4个重复+1个对照×2个重复)×2个土层总共36个环刀样品。采样时先清除土壤表面凋落物,将环刀底部平置土面,用反铲轻铲环刀周围土壤,同时缓慢垂直下压环刀。在运输过程中固定环刀避免颠簸导致土壤破损,降低误差。此外每个样地还使用普通环刀、铝盒和自封袋分别采集3个土壤样品,带回实验室以测定样地的基本理化特性(表2)。采用烘干法测定土壤容重(Bulk Density, BD),计算方法是在105℃下烘干48 h后土壤质量与总体积的比率。土壤含水量(Soil Water Content, SWC)采用烘干法测定:取田间湿润土柱,通过烘箱烘干后,以烘干前后的质量差值占烘干土质量的百分比计算得出。采用环刀恒定水头入渗法测定稳定入渗速率。从每个土层取3个重复样品并混合均匀后,使用MS3500激光粒度分析仪测定土壤颗粒组成以颗粒的抗风蚀能力作为筛分

依据。大孔隙度是由CT扫描图像分析得到。

1.3 数据分析

1.3.1 CT扫描与图像处理 CT扫描仪器采用的是由三英精密有限公司生产的nanoVoxel-5000系列双射线源CT系统,具有高达200 nm的空间分辨率和像素细节分辨能力,适用于直径和高度均小于600 mm的样品。利用自制环刀采集的36个原状土柱,每个土柱可生成949张横向切层图像,切片厚度为68 μm。首先使用ImageJ软件对所有切层图像进行预处理,生成二值化图像。随后使用Avizo 2019.1图像处理软件导入二值化图像,并对每个土柱的所有横切图像进行三维重构,最终获得原状土样的三维可视化模型。

具体操作步骤如下:首先,通过Non-Local Means模块对图像进行滤波处理,接着设定阈值分割以优化图像质量。为确保重构模型与实际样品接近,还需要通过裁剪功能调整单位,并利用Volume-edit模块截取圆柱形区域并生成mask,最终得到分辨率为0.068 mm/pixel(X方向)×0.068 mm/pixel(Y方向)×0.068 mm/pixel(Z方向)的三维立体图像。

1.3.2 根系参数分析 在采样过程中,土柱边缘可能因反向土壤压力而引起结构变化,影响试验结果。因此在三维重构前,需去除因边缘效应带来的误

差。通过观察分析决定从土柱的上下两端及圆周各去除 1 mm 的数据。利用 Avizo 2019.1 软件的 ROI 工具,分别去除土柱上下端 1 mm 和圆周 1 mm 的图像数据。处理后得到 X, Y 轴范围为 -24~24 mm, Z 轴范围为 -32~32 mm 的三维土柱图像数据。结合局部衰减差异与圆形像素组连通性(根系通常呈圆形)的耗时手动分割方法,完成土柱中根系的分割^[20]。对选

出的根系进行直观的视觉检查,确保设置合理避免出现大面积错误。然后利用 Volume Rendering 工具进一步标记土柱三维结构中的根系,使其三维可视化。接着利用 Avizo 2019.1 软件中的 Label analysis 模块,对根系的参数进行逐项计算。通过该模块的分析,可以获得每个根系的等效直径、体积、表面积、直线长度、平滑度、异质性及其空间分布信息。

表 2 样地土壤基本性质

Table 2 Basic soil properties of experimental plots

样地	土层深度/ cm	大孔隙度/ %	土壤容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	稳渗速率/ ($mm \cdot min^{-1}$)	土壤含水量/ %	土壤颗粒组成/%		
						<0.05 mm	0.05~0.25 mm	>0.25 mm
9 a	0—10	1.58±0.64	1.44±0.02Aa	2.23±0.06Aa	9.47±0.26	5.35	58.32	36.33
	10—20	1.25±0.16	1.48±0.01Ab	2.57±0.21Aa	8.84±0.65	1.85	58.24	39.91
14 a	0—10	1.81±0.59	1.29±0.07Aa	2.73±0.06ABa	8.85±1.36	6.58	55.35	21.87
	10—20	1.38±0.30	1.34±0.01ABa	3.00±0.10Ab	12.23±2.98	7.88	59.16	30.73
24 a	0—10	2.22±1.02	1.32±0.01Aa	2.67±0.15ABa	6.60±4.55	9.81	68.32	21.87
	10—20	1.84±0.73	1.27±0.03Ba	3.00±0.26Aa	7.58±1.75	6.12	63.15	30.73
35 a	0—10	2.78±1.61	1.31±0.07Aa	3.53±0.25Ba	11.65±1.88	9.53	76.28	14.19
	10—20	1.28±0.34	1.32±0.05ABa	3.37±0.32Aa	10.05±1.96	6.30	70.12	23.58
草地	0—10	1.63±0.19	1.31±0.03Aa	2.70±0.20ABa	7.98±1.11	0.98	61.67	37.35
	10—20	1.32±1.34	1.36±0.01ABb	3.20±0.30Aa	7.80±0.35	1.25	50.36	48.39

注:不同大写字母表示相同深度不同林龄差异显著($p < 0.05$);不同小写字母表示相同林龄不同深度差异显著($p < 0.05$);同一土层内不同样地间无字母标注则表示差异不显著($p > 0.05$)。

利用 Excel 软件对所获得的数据进行分析与汇总。由于细根数量庞大,无法逐一进行分析,因此对每个原状土柱的每层土壤(1 mm 一层)根系进行统计,计算其平均等效半径(Root Equivalent Diameter, RED)、体积密度(Root Volume Density, RVD)、表面积密度(Root Area Density, RAD)(表面积总和与总体积的比值)、长度密度(Root Length Density, RLD)(总长度与总体积的比值)、数量密度(Root Number Density, RND)以及连接度(Root Connectivity, RC)。

1.3.3 土壤碳氮组分测定 全氮(AN):采用凯氏定氮法。硝态氮(NO_3^- -N)和铵态氮(NH_4^+ -N)的测定采用比色法和连续流动分析仪法。易氧化有机碳(Easily Oxidizable Carbon, EOC)测定采用高锰酸钾氧化-比色法。土壤有机碳(Total Organic Carbon, TOC)测定采用重铬酸钾氧化法,以 10 g/L 葡萄糖标准溶液绘制标准曲线,在土壤样品中加入 0.1 g 硫酸汞、5.00 ml 重铬酸钾溶液和 7.5 ml 硫酸,在恒温加热器中加热,135 °C 加热 30 min,冷却后取上清液,2 000 r/min 离心 10 min,最后在 585 nm 处测定吸光度。采用 $K_2Cr_2O_7$ 外加热法测定颗粒有机碳(Particulate Organic Carbon, POC)和矿物结合态有机碳(Mineral-Associated Organic Carbon, MAOC)。可溶性有机碳(Dissolved Organic Carbon, DOC):0.5 mol/L K_2SO_4 浸提法测定,可溶性有机氮(Dissolved

Organic Nitrogen, DON)的浓度计算为 TDN 与无机氮物质(即 NH_4^+ , NO_3^- 和 NO_2^-)总和的差值。速效氮(Available Nitrogen, AN)含量采用碱解扩散法测定。

1.4 数据处理

运用方差分析检验不同处理间的差异显著性($p < 0.05$), $p < 0.05$ 为显著, $p < 0.01$ 为非常显著, $p < 0.001$ 为极显著,并用进行多重比较($\alpha = 0.05$)。采用 R4.4.2 中“base”包中的“cor.test”函数进行 Spearman 相关性分析,用“plsmp”包采用偏最小二乘结构方程模型(Partial Least Squares Structural Equation Modeling, PLS-SEM)研究根系拓扑结构对土壤碳氮组分的影响,模型可靠性通过拟合优度(Goodness of Fit, GOF)进行评估;用 Origin 2024 绘制图形,结果中数值采用“平均值±标准误”表示。

2 结果与分析

2.1 不同林龄柠条林根系三维结构特征

通过 CT 扫描及图像处理技术对人工灌丛恢复过程中不同林龄(35 a, 24 a, 14 a, 9 a 及对照草地)的土壤根系进行取样分析,研究其根系构型(图 1)及几何分布特征(表 3)。结果显示,整体上,随着柠条林龄的增加连通性较强的粗根(即直径 > 5 mm 的根)逐渐增多而细根(即直径 ≤ 5 mm 的根)在 24~35 a 明显增多。

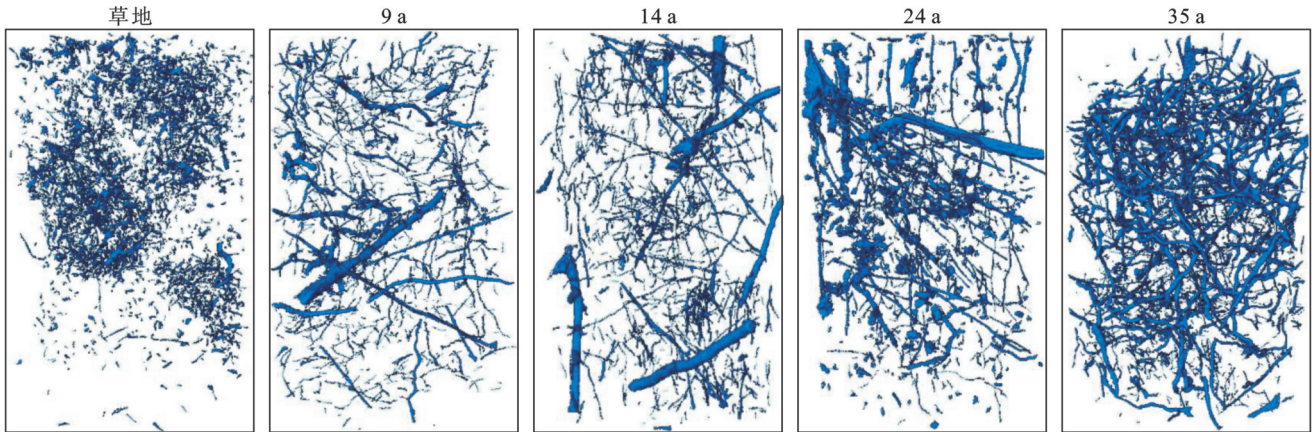


图 1 柠条在 0—20 cm 土层的根系构型

Fig. 1 Root system architecture of *Caragana korshinskii* in 0—20 cm soil layer

2.2 不同林龄柠条林根系拓扑结构分布特征

由表 3 及图 2 可以看出,在 0—20 cm 土层,柠条林龄显著影响根系等效直径 ($p < 0.05$), 35 a 相较于 14 a 和 24 a 分别显著减少 28.1% 和 24.5%, 相较于对照草地 14 a 显著增加 15.3%。随着林龄增长,根系数量密度和长度密度随林龄先减少后增加,但都低于对照草地,且趋势相同均为 $CK > 35 a > 9 a > 14 a >$

24 a。相反各样地根系等效直径随林龄先增大后减小, 35 a 甚至小于对照草地。体积密度与连接度随林龄先升高降低再升高降低,趋势相同且显著正相关 ($p < 0.05$) 均为 $9 a > 24 a > 35 a > CK > 14 a$ 。在 0—10 cm 土层,柠条林龄显著影响根系体积密度 ($p < 0.05$),表现在相较于 9 a, 24 a 和 35 a 分别显著减少 22% 和 44%。

表 3 不同林龄柠条林地不同土层深度根系拓扑结构特征

Table 3 Root system topological characteristics at different soil depths in *Caragana korshinskii* plantations of different stand ages

林龄	深度/ mm	数量密度/ (个 · mm ⁻³)	长度密度/ (mm · mm ⁻³)	体积密度/ (mm ³ · mm ⁻³)	表面积密度/ (mm ² · mm ⁻³)	等效直径/mm	连接度
9 a	0—64	0.0126 ± 0.0029	0.0369 ± 0.0114	0.0050 ± 0.0007	0.0599 ± 0.02	0.6020 ± 0.06AB	622.2 ± 75.4
	100—164	0.0085 ± 0.0013	0.0244 ± 0.0061	0.0036 ± 0.0029	0.0422 ± 0.02	0.6188 ± 0.03	614.4 ± 44.6
14 a	0—64	0.0095 ± 0.0016	0.0259 ± 0.0059	0.0023 ± 0.0014	0.0307 ± 0.01	0.7352 ± 0.20A	540.4 ± 104.3
	100—164	0.0096 ± 0.0028	0.0268 ± 0.0091	0.0031 ± 0.0022	0.0398 ± 0.02	0.7138 ± 0.22	585.7 ± 117.2
24 a	0—64	0.0095 ± 0.0017	0.0287 ± 0.0069	0.0041 ± 0.0019	0.0520 ± 0.02	0.7497 ± 0.16A	819.2 ± 226.3
	100—164	0.0078 ± 0.0013	0.0232 ± 0.0055	0.0042 ± 0.0034	0.0393 ± 0.02	0.6208 ± 0.12	649.5 ± 169.7
35 a	0—64	0.0167 ± 0.0031	0.0343 ± 0.0093	0.0028 ± 0.0005	0.0436 ± 0.01	0.4824 ± 0.12B	513.2 ± 83.4
	100—164	0.0119 ± 0.0021	0.0336 ± 0.0073	0.0050 ± 0.0031	0.0585 ± 0.02	0.5529 ± 0.07	620.5 ± 151.1
草地	0—64	0.0177 ± 0.0077	0.0361 ± 0.0166	0.0028 ± 0.0038	0.0425 ± 0.01	0.4986 ± 0.01AB	596.8 ± 76.5
	100—164	0.0134 ± 0.0032	0.0367 ± 0.0106	0.0037 ± 0.0093	0.0502 ± 0.03	0.5645 ± 0.04	577.5 ± 16.9

注:不同大写字母表示相同土层不同林龄间差异显著 ($p < 0.05$); 未标注字母的表示该土层不同林龄间差异不显著 ($p > 0.05$)。

2.3 不同林龄柠条林土壤碳氮组分及对根系结构的响应

不同林龄柠条林土壤碳组分含量如图 3 所示,方差分析表明:不同林龄梯度土壤颗粒有机碳、易氧化有机碳含量差异显著 ($p < 0.05$),土层深度与林龄对易氧化有机碳含量影响具有显著的交互效应 ($p < 0.05$)。

不同林龄柠条林土壤氮组分含量如图 4 所示,方差分析和相关分析表明:不同林龄铵态氮和硝态氮含量差异极显著 ($p < 0.001$),且与林龄极显著正相关 ($p < 0.001$),相关系数为 0.326, 0.385。土层深度与

林龄对硝态氮含量影响具有显著的交互效应 ($p < 0.05$)。随土层深度增加不同土层硝态氮含量与林龄显著相关 ($p < 0.05$),相关系数分别为 0.339, 0.427。可溶性有机氮含量与林龄显著正相关 ($p < 0.05$),相关系数为 0.301。

将土壤碳氮组分与根系拓扑结构参数进行相关分析(图 5)表明:根系体积密度与可溶性有机碳显著正相关 ($p < 0.05$)。等效直径与易氧化有机碳和有机碳显著正相关 ($p < 0.05$),与颗粒有机碳和全氮呈极显著正相关 ($p < 0.001$)。

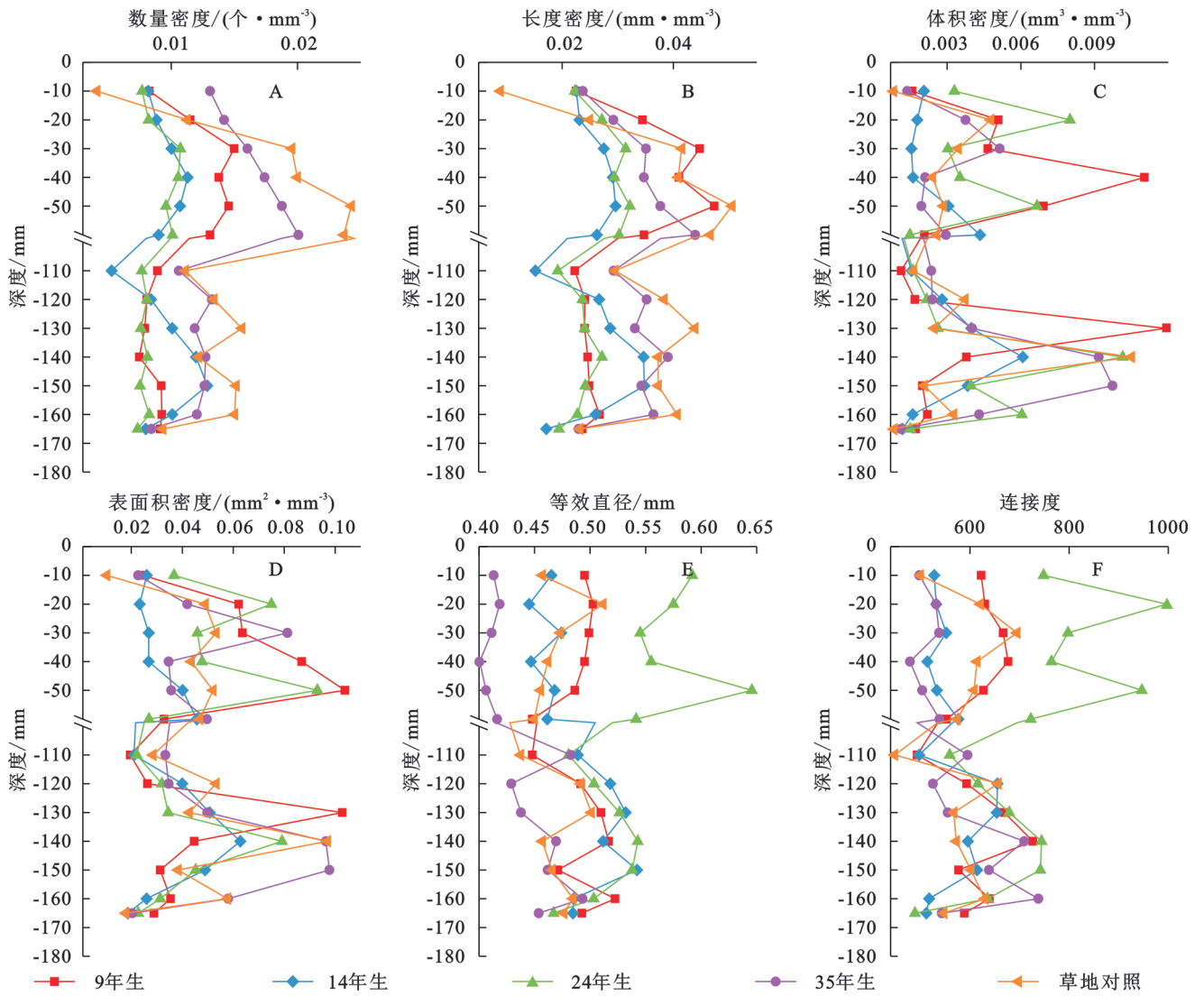


图 2 不同林龄柠条林土壤根系拓扑结构

Fig. 2 Root system topology of soil in *Caragana korshinskii* plantations of different stand ages

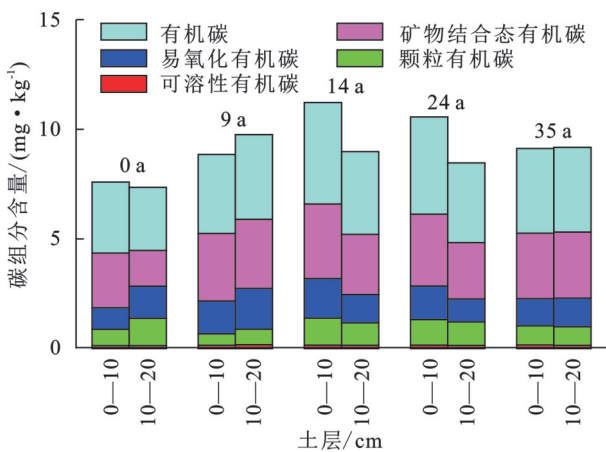


图 3 不同林龄的有机碳、颗粒有机碳、矿物结合态有机碳、易氧化有机碳以及可溶性有机碳

Fig. 3 TOC, POC, MAOC, EOC, and DOC across different stand ages

最终得到的 SEM 拟合效果优秀 (GOF > 0.36), 如图 6 所示, 根系拓扑结构对氮组分产生极显著正向影响 ($p < 0.001$), 路径系数为 0.325。碳组分对氮组分

产生极显著正向影响 ($p < 0.001$), 路径系数为 0.865。

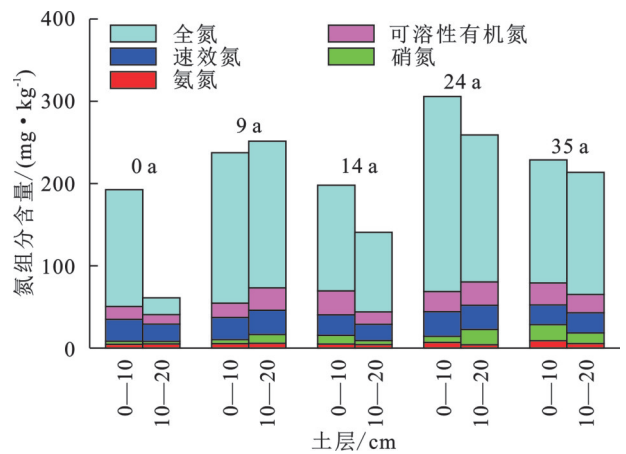


图 4 不同林龄的全氮、速效氮、铵态氮、硝态氮以及可溶性有机氮

Fig. 4 TN, AN, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, and DON across different stand ages

注: 为确保所有与氮组分对应的条形图能在同一图表中尽量完整呈现已从全氮(TN)数据中减去 150 mg/kg。

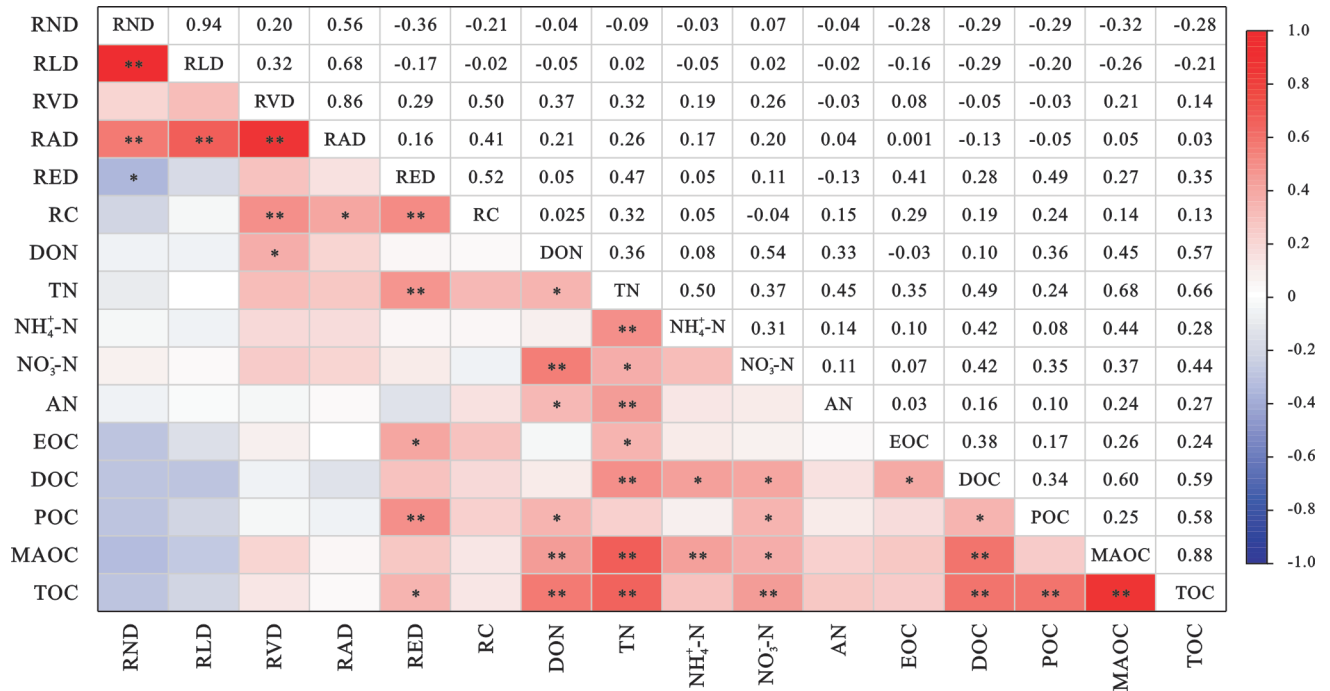
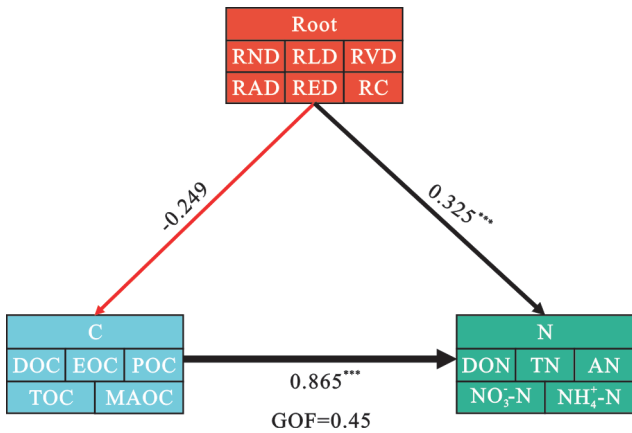


图 5 0—20 cm 土壤碳氮组分与根系拓扑结构参数相关关系

Fig. 5 Correlation between soil carbon and nitrogen components and root system topology parameters in 0–20 cm soil layer



注:箭头上的数字为标准化路径系数反映模型中各变量的重要性箭头的宽度表示关联的强度。黑色和红色箭头分别表示正向和负向影响。

图 6 根系对碳氮组分的影响

Fig. 6 Effect of root system on carbon and nitrogen components

3 讨论

根系代谢旺盛,产生丰富的碳、氮源物质,对土壤碳、氮变化贡献较大^[21]。在风沙活动剧烈的沙地生境,植物根系与土壤碳氮的关系较地上部分更为紧密,根系活动可能是影响土壤碳氮积累的重要因素之一^[22]。根系发育状况及水分供应明显影响硝态氮的迁移及分布^[23],根系密度与土壤氮分布呈正相关^[24]。本研究中荒漠草原根系拓扑结构对土壤氮组分产生显著正向影响(图 6)。根系体积密度与可溶性有机碳显著正相关($p < 0.05$)。根系等效直径与易氧化有机碳和有机碳显著正相关($p < 0.05$),与颗粒

有机碳和全氮呈极显著正相关($p < 0.001$)。其内在关联可通过以下三方面解释:首先,根系通过根系分泌物的直接输入和根系分泌物驱动的微生物生物量积累,提高根际土壤碳和氮含量^[25]。其次,木本植物根系可以通过影响土壤微生物及氮转化过程来影响 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的运移,根直径与根体积更大的主根系木本植物对出流氮的削减效果更好^[26]。最后,本研究人工引入的柠条为豆科树种,其固氮速率高、生长快,通过与根瘤菌的共生关系为周围的土壤增加可用氮^[12]。因而优化的根系结构提升土壤的氮素供应能力,形成良性的土壤-植物互作机制,加速土壤的恢复和改善,增强土壤肥力,从而为后续的植物生长提供更好的基础。

本研究荒漠草原地区,人工引入柠条后,随着林龄增加连通性强的粗根增加(图 1),根系的等效直径先增加后减少,相反数量密度和长度密度先减少后增加(表 3)。这是因为灌木生长会刺激对土壤水分和养分的利用,加强灌木与草本植物的竞争能力,导致靠近豆科灌木生长的草本植物生物量和养分积累较差,远离灌木生长的草本植物生长较好,养分积累较好^[27]。另外,一些研究表明,豆科植物可能通过从根部释放化感物质来抑制附近草本植物的萌发和生长,以减少竞争^[28]。说明在柠条引入初期,灌木的粗壮根系发育会抑制草本植物细根的生长。而引入后期根系数量密度和根系密度有所增加,等效直径有所减少甚至少于对照草地(表 3),说明草本植物的细根增多。可以从土壤养分方面来解释:柠条是豆科

植物,其生物固氮作用为生态系统创造重要的氮储备,影响着草本植物的生长和群落结构^[12]。研究发现澳大利亚灌丛侵占草地中的灌丛明显提高周围土壤的养分含量,促进水循环,增加土壤碳和氮含量^[29]。因而柠条灌木不仅能够固定足够的氮来满足自身的生长需要还能满足邻近植物的生长需要。本研究中氨氮、硝氮和可溶性有机氮与引入柠条林龄呈显著正相关($p < 0.05$),35 a生柠条土壤全氮和有机碳明显高于对照草地。因而柠条引入后期,草本植物的细根有所恢复,可能是由于土壤养分的增加。总体而言,柠条引入后从初期的资源竞争者转变为后期的生态促进者,实现从抑制到共存的动态演替,这一发现丰富了干旱区灌草群落构建的理论体系,从而指导干旱区生态修复的可持续设计,优化荒漠草原生态恢复植被配置策略,且验证柠条“低密度定植+阶段性管理”模式的合理性。

4 结论

(1) 荒漠草原人工柠条引入后,随着柠条林龄的增加,连通性较强的粗根(即直径 > 5 mm的根)逐渐增多,而细根(即直径 ≤ 5 mm的根)在24~35 a明显增多。根系数量密度和长度密度随林龄先减少后增加,但都低于对照草地;等效直径随林龄先增大后减小,甚至小于对照草地;体积密度与连接度随林龄先升高降低再升高降低。

(2) 通过相关性分析发现,根系体积密度与可溶性有机碳显著正相关($p < 0.05$)。等效直径与易氧化有机碳和有机碳显著正相关($p < 0.05$),与颗粒有机碳和全氮呈极显著正相关($p < 0.001$)。

(3) 初期灌木的粗壮根系发育抑制草本植物细根的生长,后期草本植物的细根有所恢复。根系拓扑结构的优化显著提升土壤的氮素供应能力,形成良性的土壤植物互作机制,加速土壤的恢复和改善,增强土壤肥力。

参考文献(References):

- [1] 王楠,黄菁华,霍娜,等.黄土高原半干旱区不同林龄柠条人工林土壤线虫群落特征[J].生态学报,2022,41(2):236-245.
Wang N, Huang J H, Huo N, et al. Characteristics of soil nematode communities in *Caragana korshinskii* plantations with different stand ages in semi-arid region of Loess Plateau, Northwest China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022,41(2):236-245.
- [2] 姜丽娜,马洁,刘建康,等.毛乌素沙地不同植被恢复措施下土壤理化性质空间分布特征[J].水土保持通报,2022,42(5):1-7.
- [3] 韦景树,李宗善,冯晓琦,等.黄土高原人工刺槐林生长衰退的生态生理机制[J].应用生态学报,2018,29(7):2433-2444.
Wei J S, Li Z S, Feng X Y, et al. Ecological and physiological mechanisms of growth decline of *Robinia pseudo-acacia* plantations in the Loess Plateau of China: a review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(7): 2433-2444.
- [4] 厉翔,丁启朔,陈信信,等.大田群体小麦根系构型3D拓扑表型的参数化[J].江苏农业学报,2020,36(4):936-941.
Li X, Ding Q S, Chen X X, et al. Parameterization of 3D topological phenotype of wheat root system architecture in field population[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2020,36(4):936-941.
- [5] Teramoto S, Takayasu S, Kitomi Y, et al. High-throughput three-dimensional visualization of root system architecture of rice using X-ray computed tomography [J]. Plant Methods, 2020,16:66.
- [6] 孙佳.黄河三角洲滨海滩涂柽柳根系形态及生长的水盐适应规律[D].山东泰安:山东农业大学,2022.
Sun J. Water-salt adaptation of root morphology and growth of *Tamarix chinensis* on the coastal beach in the Yellow River Delta [D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2022.
- [7] 邢强,秦俊,胡永红.城市垂直绿墙常用植物的根系构型特征和生长动态[J].生态学报,2023,43(6):2515-2523.
Xing Q, Qin J, Hu Y H. Research on the architectural characteristics and growth dynamics of two plants root in vertical greenery systems [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(6):2515-2523.
- [8] Zhang Z Y, Fan B M, Song C, et al. Advances in root system architecture: functionality, plasticity, and research methods[J]. Journal of Resources and Ecology, 2023,14(1):15-24.
- [9] Berntson G M. Topological scaling and plant root system architecture: developmental and functional hierarchies [J]. New Phytologist, 1997,135(4):621-634.
- [10] Guo Y F, Qi W. Correlations between roots of *Caragana Korshinskii* and soil moisture after stumping [J]. Ekoloji, 2018,27(104):9-20.
- [11] Fu J T, Hu X S, Brierley G, et al. The influence of plant root system architectural properties upon the stability of loess hillslopes, Northeast Qinghai, China [J]. Journal of Mountain Science, 2016,13(5):785-801.
- [12] Muqaddas B, Zhou X Q, Lewis T, et al. Long-term frequent prescribed fire decreases surface soil carbon and

- nitrogen pools in a wet sclerophyll forest of Southeast Queensland, Australia [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 536:39-47.
- [13] 谭学进, 穆兴民, 高鹏, 等. 黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(2):713-722.
Tan X J, Mu X M, Gao P, et al. Effects of vegetation restoration on soil physical properties in loess area [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(2):713-722.
- [14] Wu J, Guo Y. An integrated method for quantifying root architecture of field-grown maize [J]. *Annals of Botany*, 2014, 114(4):841-851.
- [15] Hawkins H J, George E. Effect of plant nitrogen status on the contribution of arbuscular mycorrhizal hyphae to plant nitrogen uptake [J]. *Physiologia Plantarum*, 1999, 105(4):694-700.
- [16] Majdi H. Root sampling methods-applications and limitations of the minirhizotron technique [J]. *Plant and Soil*, 1996, 185(2):255-258.
- [17] 廖荣伟, 刘晶淼, 安顺清, 等. 基于微根管技术的玉米根系生长监测[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(10):156-161.
Liao R W, Liu J M, An S Q, et al. Monitor of corn root growth in soil based on minirhizotron technique [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(10):156-161.
- [18] 程静, 王鹏, 陈红翔, 等. 半干旱区生态风险时空演变及其影响因素的地理探测: 以宁夏盐池县为例[J]. *干旱区地理*, 2022, 45(5):1637-1648.
Cheng J, Wang P, Chen H X, et al. Geographical exploration of the spatial and temporal evolution of ecological risk and its influencing factors in semi-arid regions: a case of Yanchi County in Ningxia [J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(5):1637-1648.
- [19] 朱志昊, 孟晨, 王兴, 等. 荒漠草原人工柠条引入后土壤团聚体几何分布及拓扑结构演变特征[J]. *草业学报*, 2023, 32(11):53-64.
Zhu Z H, Meng C, Wang X, et al. Geometric distribution, formation, and topological structure of soil aggregates after introduction of *Caragana korshinskii* on the desert steppe [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(11):53-64.
- [20] Mawodza T, Burca G, Casson S, et al. Wheat root system architecture and soil moisture distribution in an aggregated soil using neutron computed tomography [J]. *Geoderma*, 2020, 359:113988.
- [21] Dijkstra F A, Zhu B, Cheng W X. Root effects on soil organic carbon: a double-edged sword [J]. *New Phytologist*, 2021, 230(1):60-65.
- [22] 罗永清, 赵学勇, 王涛, 等. 沙地植物根系特征及其与土壤有机碳和总氮的关系[J]. *草业学报*, 2017, 26(8):200-206.
Luo Y Q, Zhao X Y, Wang T, et al. Characteristics of the plant-root system and its relationships with soil organic carbon and total nitrogen in a degraded sandy grassland [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(8):200-206.
- [23] 宋海星, 李生秀. 根系的吸收作用及土壤水分对硝态氮、铵态氮分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(1):96-101.
Song H X, Li S X. Effects of root uptake function and soil water on NO_3^- -N and NH_4^+ -N distribution [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(1):96-101.
- [24] February E C, Higgins S I. The distribution of tree and grass roots in savannas in relation to soil nitrogen and water [J]. *South African Journal of Botany*, 2010, 76(3):517-523.
- [25] Li Q, Yan F, Chen D M, et al. Root exudates of *Salix cupularis* orchestrate the accumulation of soil carbon and nitrogen in the rhizosphere during the restoration of a desertified alpine meadow [J]. *Applied Soil Ecology*, 2025, 209:106041.
- [26] 王涛涛, 张蓓, 胡小明, 等. 典型木本植物根系对土壤入渗过程氮的影响研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2024, 35(6):186-193, 206.
Wang T T, Zhang B, Hu X M, et al. Typical ligneous plant roots affect nitrogen in soil infiltration process [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2024, 35(6):186-193, 206.
- [27] Alvarez L J, Epstein H E, Li J, et al. Spatial patterns of grasses and shrubs in an arid grassland environment [J]. *Ecosphere*, 2011, 2(9):103.
- [28] Jacot K A, Lüscher A, Suter M, et al. Significance of legumes for the distribution of plant species in grassland ecosystems at different altitudes in the Alps [J]. *Plant Ecology*, 2005, 180:1-12.
- [29] Howard K S C, Eldridge D J, Soliveres S. Positive effects of shrubs on plant species diversity do not change along a gradient in grazing pressure in an arid shrubland [J]. *Basic and Applied Ecology*, 2012, 13(2):159-168.