植物生态学报 2025, **49** (9): 1485-1497 DOI: 10.17521/cjpe.2025.0122
Chinese Journal of Plant Ecology CSTR: 32100.14.cjpe.2025.0122

植物根系构型对花岗岩弃渣土壤有机碳组分的影响

周雨婷[1] 肖 江[1] 黄欣瑞[1] 龚定康[1] 刘镌垚[1] 刘 雕[1] 雷泞菲[1,2*] 王 琦[1] 李玲娟[1] 李 琪[1,2] 裴向军[1,2*]

[1]成都理工大学, 地质灾害与环境保护全国重点实验室, 成都 610054; [2]天府永兴实验室, 成都 610200

摘 要 花岗岩弃渣堆积破坏土壤结构导致碳排放加剧, 生态修复后土壤仍存在碳库稳定性低等问题。根系作为植物-土壤-微生物互作的关键界面, 构型特征显著影响土壤有机碳的转化过程。该研究通过对比直根系紫花苜蓿(*Medicago sativa*)根际土(MR)与非根际土(MNR)和须根系披碱草(*Elymus dahuricus*)根际土(PR)与非根际土(PNR)的有机碳组分含量, 结合土壤理化性质、酶活性与细菌群落特征的调控作用, 揭示根系构型对花岗岩弃渣场重构土壤有机碳组分含量的影响。结果表明: (1)两种植物均显著提高总有机碳(TOC)、溶解性有机碳(DOC)和颗粒有机碳(POC)含量; (2)须根系披碱草对TOC和DOC的根际效应(50.36%和78.60%)显著高于苜蓿(13.38%和–7.10%), 表明其对碳含量的提升作用更强; (3) PR较MR更能显著提升土壤速效养分含量, 增强纤维素酶活性, 并富集变形菌门(相对丰度41.09%), 为碳积累创造更适宜的微环境; (4)相关性分析显示, 铵态氮含量、有效磷含量及纤维素酶活性与TOC、DOC和POC含量均呈显著正相关关系。综上, 相比直根系苜蓿, 须根系披碱草对花岗岩弃渣重构土壤有机碳积累的驱动效应更为显著。该研究结果为促进花岗岩弃渣场有机碳库的稳定、生态修复植物筛选和群落配置提供理论支撑。

关键词 根系构型; 根际效应; 活性有机碳; 弃渣场; 生态修复

周雨婷, 肖江, 黄欣瑞, 龚定康, 刘镌垚, 刘雕, 雷泞菲, 王琦, 李玲娟, 李琪, 裴向军 (2025). 植物根系构型对花岗岩弃渣土壤有机碳组分的影响. 植物生态学报, 49, 1485-1497. DOI: 10.17521/cjpe.2025.0122

Influence of root architecture on soil organic carbon fraction in a granite spoil dump

ZHOU Yu-Ting[1], XIAO Jiang[1], HUANG Xin-Rui[1], GONG Ding-Kang[1], LIU Juan-Yao[1], LIU Diao[1], LEI Ning-Fei[1,2*], WANG Qi[1], LI Ling-Juan[1], LI Qi[1,2], and PEI Xiang-Jun[1,2*]

[1]State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610054, China; and [2]Tianfu Yongxing Laboratory, Chengdu 610200, China

Abstract

Aims The accumulation of granite spoils destroys soil structure and increases carbon emissions. Even after ecological restoration, these soils still suffer from low stability of carbon pools. As a key interface of plant-soil-microorganism interactions, root system, particularly its architecture characteristics, significantly affect the transformation of soil organic carbon. However, the effect of root architecture on the transformation of organic carbon in granite spoil dump soils is not clear yet.

Methods In this paper, we compared the organic carbon fraction contents between rhizosphere and bulk soils of the taproot system *Medicago sativa* (MR and MNR) and the fibrous-root system *Elymus dahuricus* (PR and PNR) to reveal the effects of root architecture on organic carbon fraction contents in a granite spoil dump. Furthermore, we analyzed soil physicochemical properties, enzyme activities, and bacterial community characteristics to reveal their underlying drivers.

Important findings Our results showed that: (1) total organic carbon (TOC), dissolved organic carbon (DOC) and particulate organic carbon (POC) content were significantly increased by plants in both systems; (2) the rhizosphere effects on TOC and DOC were significantly higher in *Elymus dahuricus* (50.36% and 78.60%) than that in *Medicago sativa* (13.38% and –7.10%), suggesting a stronger effect on carbon enhancement in the fibrous-root system relative to the taproot system; (3) Compared to MR, PR was more effective at significantly

收稿日期Received: 2025-04-03 接受日期Accepted: 2025-09-09
基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划(2023B03011-3)、西藏自治区重点研发计划(XZ202401ZY0091)和四川省科技厅纵向项目(2024YFTX0005)。Supported by the Xinjiang Uygur Autonomous Region Key R&D Programme (2023B03011-3), Key R&D Programme of the Xizang Autonomous Region (XZ202401ZY0091), and Government-sponsored Projects of Sichuan Provincial Department of Science and Technology (2024YFTX0005).

* 通信作者Corresponding authors (Lei NF, 470226504@qq.com; Pei XJ, 379975180@qq.com)

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

increasing soil fast-acting nutrient content, enhancing cellulase activity, and enriching the *Proteobacteria* (relative abundance 41.09%), and thus creating a more suitable microenvironment for carbon accumulation; (4) correlation analysis showed that ammonium nitrogen, effective phosphorus and cellulase activity were significantly and positively correlated with TOC, DOC and POC contents. In summary, the driving effect of the fibrous-rooted *Elymus dahuricus* was more effective for organic carbon accumulation in granite spoil reconfigured soils compared to the taproot system *Medicago sativa.* This study provides theoretical support for the stabilization of organic carbon pools in granite dumps, and the screening and community allocation of ecological restoration plants.

Key words root architecture; rhizosphere effect; active organic carbon; granite spoil dump; ecological restoration

Zhou YT, Xiao J, Huang XR, Gong DK, Liu JY, Liu D, Lei NF, Wang Q, Li LJ, Li Q, Pei XJ (2025). Influence of root architecture on soil organic carbon fraction in a granite spoil dump. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 49, 1485-1497. DOI: 10.17521/cjpe.2025.0122

重大基建项目快速推进导致工程弃土弃渣量激增, 我国弃渣场面积持续扩张。花岗岩弃渣场因基质贫瘠、结构松散, 导致自然成壤进程缓慢(林强, 2006)。施工过程中机械碾压进一步破坏土壤物理结构, 致使团聚体破碎并加速有机碳氧化分解(Zheng et al., 2018), 加剧区域温室效应。受限于恶劣的立地条件, 花岗岩弃渣场植物生长过程面临诸多限制因素。目前针对弃渣场的生态修复主要采用客土覆盖法、客土喷播法和土壤重构法等技术(何丽, 2023)。这些技术的核心在于重建适宜植物生长的植生层, 从而推动植被恢复。植被地上复绿过程能有效控制水土流失; 地下部分则通过根系活动增强土壤结构并提升有机质含量。然而目前关于植物根系对弃渣场重构土壤碳库的形成与稳定影响机制研究较少。

土壤碳库是陆地碳库的重要组成部分, 土壤有机碳(SOC)对土壤生态系统功能维持和质量改善发挥重要作用。基于分解程度和周转速率SOC可划分为活性有机碳和稳定有机碳(Li et al., 2018)。其中, 活性有机碳因周转速率快且易被植物与微生物分解的特性, 成为响应环境扰动的重要指标(朱浩宇等, 2021)。其组分包含可溶性有机碳(DOC)、颗粒有机碳(POC)、微生物生物量碳(MBC)和易氧化有机碳(EOC) (Li et al., 2016), 可以来源于根系分泌物、有机质分解物、微生物残留物及其代谢产物(Liu et al., 2022)。作为评估土壤肥力的核心参数与调控微生物群落功能的关键因素(Kallenbach et al., 2016; Ramírez et al., 2020), 活性有机碳组分已成为土壤碳循环研究的关键示踪指标。然而, 现有研究多聚焦于不同植被类型、土壤利用方式及生态恢复措施对活性有机碳的影响(肖烨等, 2015; 蒲玉琳等, 2017; 贺美等, 2020), 但针对花岗岩弃渣场特殊生境中活性有机碳的积累特征尚未明确。因此, 探究活性有机碳在花岗岩弃渣场重构土壤中的积累过程, 对理解其有机碳库的形成与稳定具有重要意义。

土壤碳输入总量的60%–80%源于植物光合作用形成的碳同化产物, 经根际沉积、根分泌物释放及根凋落物分解等途径向土壤迁移, 该过程是陆地生态系统碳汇的关键枢纽(Dijkstra et al., 2021; Wang &Kuzyakov, 2024)。根系是植物-土壤-微生物发生物质转换和能量传递的核心界面, 其分泌物改变根际土壤物理化学性质诱发根际效应(Sokol et al., 2022)。根系按空间形态差异可分为直根系和须根系, 不同根系构型植物通过根际效应特异性影响微生物活性(Wang et al., 2023), 进而驱动有机碳的周转和积累。例如, Li等(2020)在河南石漠化地区的研究发现, 须根系植物比直根系植物更能增强土壤团聚体稳定性, 促进SOC固存; Zhu等(2023)在研究河南某铝土矿渣区的植被自然恢复过程中, 发现须根系植物花椒(*Zanthoxylum simulans*)通过增强根际微生物群落活性, 促进有机碳的积累; Callesen等(2016)研究表明深根系植物的深层根际能有效地将碳转移到深层土壤。但针对砾石含量高、微生物活性低及营养贫瘠的花岗岩弃渣场, 其生境条件可能对植物根系生长及碳分配产生独特影响, 且不同根系构型植物通过根际效应调控花岗岩重构土壤有机碳组分的作用仍不明晰。本研究选取两种具有典型根系构型差异的植物, 直根系紫花苜蓿(*Medicago sativa*)和须根系披碱草(*Elymus dahuricus*)为研究对象, 二者均为花岗岩弃渣场常见的耐贫瘠先锋物种, 其根系结构特征差异显著。通过分析两种植物对弃渣重构土壤理化性质、有机碳组分、酶活性及细菌群落结构的影响, 旨在探讨不同根系构型植物对花岗岩弃渣重构土壤有机碳含量提升效应的差异, 为弃渣场生态修复植物筛选与群落配置提供科学支撑。

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省甘孜藏族自治州康定市毛家沟大型花岗岩弃渣场(101.87° E, 29.98° N), 地处青藏高原东缘, 海拔3 595 m。属高原寒温带季风气候, 年平均气温为7.1 ℃, 年降水量为800–950 mm, 主要集中在5月下旬到9月, 年相对湿度为73% (罗竟成等, 2020)。弃渣体主要由花岗岩碎屑组成, 壤土少、结构松散、保水性差, 植被自然恢复极为困难。本研究将客土(取自研究区附近工程建设剥离表土)与弃渣均过3 cm筛网, 按3:7质量比混合, 添加浓度为1.5%的改性糯米浆以增强基质团聚体稳定性(朱利君等, 2020), 同时掺入少量秸秆纤维与有机肥, 构建厚度15 cm的重构土壤。其基本理化性质为pH 8.73, 含水率6.28%, 有机质含量8.33 $g·kg^{-1}$, 铵态氮含量0.43 $mg·kg^{-1}$。

1.2 样地设置与样品采集

2023年5月, 在重构土壤上分别种植直根系植物紫花苜蓿和须根系植物披碱草, 并划定苜蓿样地(M)和披碱草样地(P), 单块样地面积为3 m × 8 m, 各3个重复。每个样地内布设3个1 m × 1 m样方, 采用五点采样法采集0–20 cm土壤, 每个样方的5个土壤样品等量混合作为生态修复初期弃渣重构土壤(B)。2024年6月, 各样方内选取5株长势均匀、无病虫害的植株, 采用抖根法采集两种植物根际土壤样品(Phillips & Fahey, 2006)。抖落大块不含根系的土壤, 用刷子刷下粘附在根系周围的土壤(0–5 mm)作为根际土壤(R), 在远离植物根系约0.5 m处采集0–20 cm土壤作为非根际土壤(NR), 每个样方内5株植物的根际与非根际土壤分别混匀。所有样品分成两份, 一份于4 ℃条件下冷藏用于理化分析, 另一份–80 ℃冻存进行微生物分析。

1.3 土壤理化指标分析

新鲜土壤样品放105 ℃烘箱干燥24 h, 测定土壤含水率; 土壤pH用pH计测定(土水体积比=1:2.5); 用1 $mol·L^{-1}$ KCl溶液浸提过2 mm筛网的新鲜土壤(土液体积比为1:5), 通过紫外分光光度法测定硝态氮(NO_3^--N)、铵态氮(NH_4^+-N)含量; 使用重铬酸钾-硫酸溶液外加热法来测定土壤有机质(SOM)、总有机碳(TOC)含量; 有效磷(AP)含量采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法测定; 速效钾(AK)用1 $mol·L^{-1}$中性乙酸铵溶液浸提, 由火焰原子分光光度计测定含量; 使用去离子水从新鲜土壤样品中提取可溶性有机碳(DOC) (土水体积比为1:5), 振荡1 h后离心10 min, 通过0.45 μm聚丙烯滤膜, 滤液由总有机碳分析仪(TOC-L CPH, Shimadzu, Tokyo, Japan)测定(Wang et al., 2021); 采用5 $g·L^{-1}$六偏磷酸钠溶液(土液体积比为1:5)分散并提取土壤颗粒有机碳(POC), 经18 h振荡后通过53 μm筛网进行湿筛, 收集筛上土样干燥称质量, 使用重铬酸钾-硫酸溶液外加热法测定POC含量(梁爱珍等, 2010)。

1.4 土壤酶活性分析

土壤纤维素酶(CL)活性采用蒽酮比色法测定; 土壤碱性磷酸酶(AKP)活性采用磷酸苯二钠比色法测定; 土壤脲酶(UE)活性采用苯酚钠—次氯酸钠比色法测定(关松荫, 1986)。土壤N-乙酰-β-D葡萄糖苷酶(NAG)活性通过改进方法测定(Ekenler & Tabatabai, 2002), 简言之, 取10 g新鲜土壤于50 mL玻璃锥形瓶, 加入4 mL 0.1 $mol·L^{-1}$醋酸盐缓冲液(pH 5.5)和1 mL 0.01 $mol·L^{-1}$ pNP-NAG底物, 密封, 37 ℃振荡孵育1 h, 以0.5 $mol·L^{-1}$ $CaCl_2$和NaOH终止反应, 比色法测定pNP释放量, 通过黄色产物吸光值表征酶活性。使用β-葡萄糖苷酶试剂盒(北京索莱宝科技有限公司), 按试剂盒说明测定土壤β-葡萄糖苷酶(β-GC)活性, 1单位的β-GC被定义为每天每克土样中产生1 μmol对-硝基苯酚。

1.5 土壤微生物群落多样性和组成测定

土壤样本去除植物残体、碎石块及其他杂质后分装送往上海派森诺有限公司进行微生物测序和后续分析。采用MagBeads FastDNA试剂盒提取土壤微生物DNA, 使用引物338F (5′-ACTCCTACGGGAG-GCAGCAG-3′)和806R (5′-GGACTACHVGGGTW-TCTAAT-3′)对土壤细菌16S rRNA的V3-V4区域进行PCR扩增和测序。微生物生物信息学分析主要通过QIIME2软件进行, 使用cutadapt (v2.3)软件切除序列的引物片段, 再使用Vsearch (v2.13.4)软件中的fastq_mergepairs、fastq_filter和derep_fulllength函数进行序列合并、质量过滤和去冗余, cluster_otus基于97%相似度聚类为运算分类单元(OTU)。

1.6 统计分析

使用以下公式进行根际效应(RE)计算(Chen et al., 2018):

DOI: 10.17521/cjpe.2025.0122

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

$$RE\ (\%) = \frac{V_R - V_B}{V_B} \times 100$$

式中, V_R和V_B分别代表根际土壤和非根际土壤的变量参数。正根际效应表明根际土壤的参数值大于非根际土壤, 负根际效应表明根际土壤的参数值小于非根际土壤。

所有统计分析均使用SPSS 27.0软件进行。采用单因素方差分析法分析比较5组土壤样本(生态修复初期土壤(B)、直根系苜蓿根际土(MR)与非根际土(MNR)、须根系披碱草根际土(PR)与非根际土(PNR))在土壤理化性质、酶活性、有机碳组分及微生物多样性上的差异, 并利用最小显著差异(LSD)法进行显著性检验($\alpha = 0.05$)。采用独立样本*t*检验比较两种植物根际效应的显著性差异。通过Pearson相关分析探究土壤理化性质、酶活性与有机碳组分之间的相关性。图表绘制采用Origin 2024软件。微生物数据作图使用派森诺生物科技有限公司平台(https://www.genescloud.cn/)绘制。

2 结果和分析

2.1 土壤理化性质

种植直根系苜蓿和须根系披碱草后土壤理化性质较修复前有显著差异($p < 0.05$)。修复前重构土壤整体呈弱碱性(pH = 8.14), 修复后土壤pH显著降低并趋近中性范围(7.11–7.67), 具体表现为MR (7.67) > PR (7.38) > MNR (7.12) > PNR (7.11) (图1A)。土壤速效养分含量较修复前显著提高, 须根系披碱草根际土的NO_3^--N、NH_4^+-N、AK和SOM含量显著高于非根际土壤, 直根系苜蓿根际土壤养分含量均显著高于非根际土。披碱草根际土壤的NH_4^+-N和AP含量分别为1.69和244.90 mg·kg^{-1}, 相比生态修复初期增加288.04%和56.63%, 且显著高于苜蓿根际土(1.51 mg·kg^{-1}、217.04 mg·kg^{-1}) (图1C、1E); 披碱草根际土的NO_3^--N和SOM含量(16.82 mg·kg^{-1}、15.96 g·kg^{-1})高于苜蓿根际土(15.18 mg·kg^{-1}、14.20 g·kg^{-1}), 差异不显著(图1B、1F)。

2.2 有机碳组分含量

相比于生态修复初期, 直根系苜蓿和须根系披碱草的生长均显著提高重构土壤有机碳组分的含量。苜蓿根际与非根际土壤的TOC含量分别为8.23和7.30 g·kg^{-1}, 差异不显著; 披碱草根际与非根际土壤的TOC含量分别为9.25和6.15 g·kg^{-1}; 披碱草根际土TOC含量高于苜蓿根际土, 差异不显著(图2A)。苜蓿根际与非根际土壤的DOC含量分别为0.069和0.073 g·kg^{-1}, 其根际比非根际土壤DOC含量低6.67%; 披碱草根际与非根际土壤的DOC含

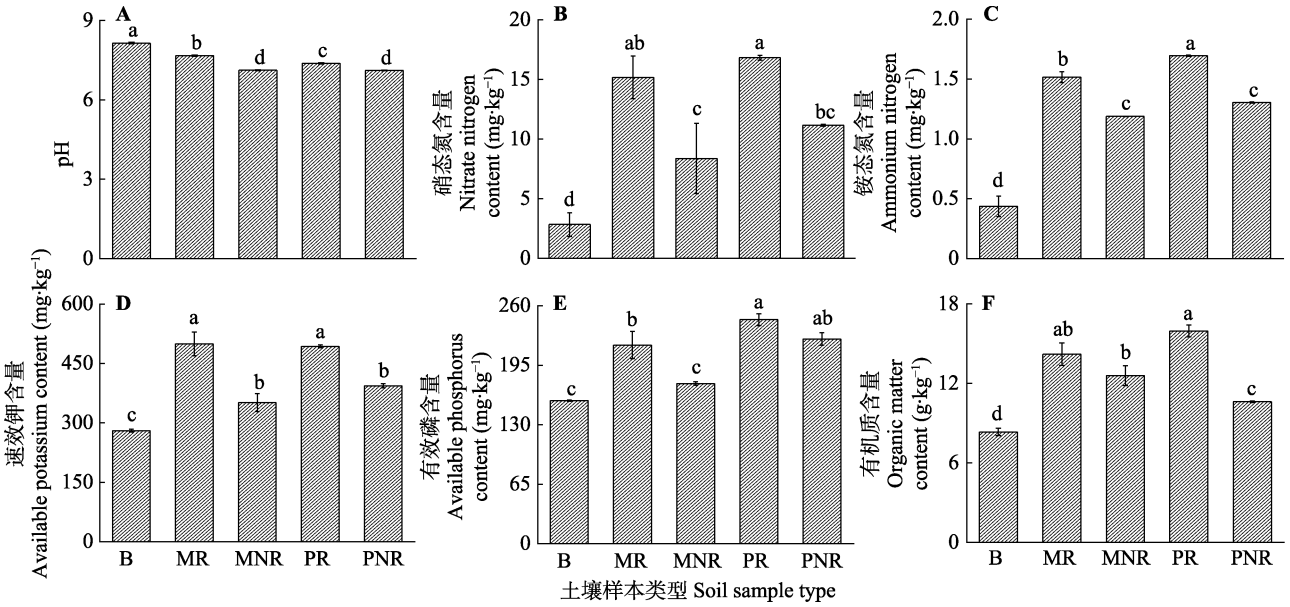


图1 不同植物根系构型对土壤理化性质(平均值±标准误)的影响。B, 生态修复初期土; MNR, 苜蓿非根际土; MR, 苜蓿根际土; PNR, 披碱草非根际土; PR, 披碱草根际土。不同小写字母表示不同土壤样本之间差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 1 Effects of different root architecture on soil physico-chemical properties (mean ± *SE*). B, soil at the beginning of ecological restoration; MNR, *Medicago sativa* bulk soil; MR, *Medicago sativa* rhizosphere soil; PNR, *Elymus dahuricus* bulk soil; PR, *Elymus dahuricus* rhizosphere soil. Different lowercase letters indicate significant differences between different soil samples significantly ($p < 0.05$).

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

量分别为0.071和0.039 g·kg^{-1}, 其根际比非根际土壤DOC含量高78.63%; 披碱草根际土和苜蓿根际土的DOC含量差异不显著(图2B)。苜蓿根际与非根际土壤的POC含量分别为3.39和2.53 g·kg^{-1}, 披碱草根际与非根际土壤的POC含量分别为2.98和2.29 g·kg^{-1}, 两种植物根际土POC含量均显著高于非根际土; 两种植物根际土POC含量无显著差异(图2C)。须根系披碱草对TOC和DOC的根际效应分别为50.36%和78.60%, 显著高于直根系苜蓿(13.38%, –7.10%), 披碱草和苜蓿对POC根际效应分别为30.51%和33.96%, 差异不显著, 表明根系构型显著影响弃渣重构土壤的TOC和DOC含量(图2D)。

2.3 土壤酶活性

种植直根系苜蓿和须根系披碱草均显著提高弃渣重构土壤酶活性(图3)。苜蓿根际土酶活性均显著高于非根际土; 披碱草根际土UE、CL和β-GC活性分别为91.48、3 930.58和1 642.74 μmol·h^{-1}·g^{-1}, 均显著高于非根际土(53.03、2 848.14和1 006.56 μmol·h^{-1}·g^{-1}), 披碱草根际土AKP和NAG活性与非根际土壤差异不显著。苜蓿根际土UE和AKP活性分别为134.36和215.42 μmol·h^{-1}·g^{-1}, 比披碱草根际土高46.87%和45.76% (图3A、3C)。披碱草根际土CL活性最高为3 930.58 μmol·h^{-1}·g^{-1}, 比苜蓿根际土高28.66% (图3B)。披碱草与苜蓿的根际土β-GC活性分别表现为1 642.74和1 792.8 μmol·h^{-1}·g^{-1} (图3D), NAG活性表现为560.0和552.93 μmol·h^{-1}·g^{-1}, 差异均不显著(图3E)。

2.4 微生物群落多样性及物种组成

所有样本Goods_coverage指数均大于0.98 (图4A), 表明测序深度可充分反映细菌群落特征。微生物α多样性分析显示, 种植直根系苜蓿和须根系披碱草显著提高花岗岩弃渣重构土壤细菌多样性(p <

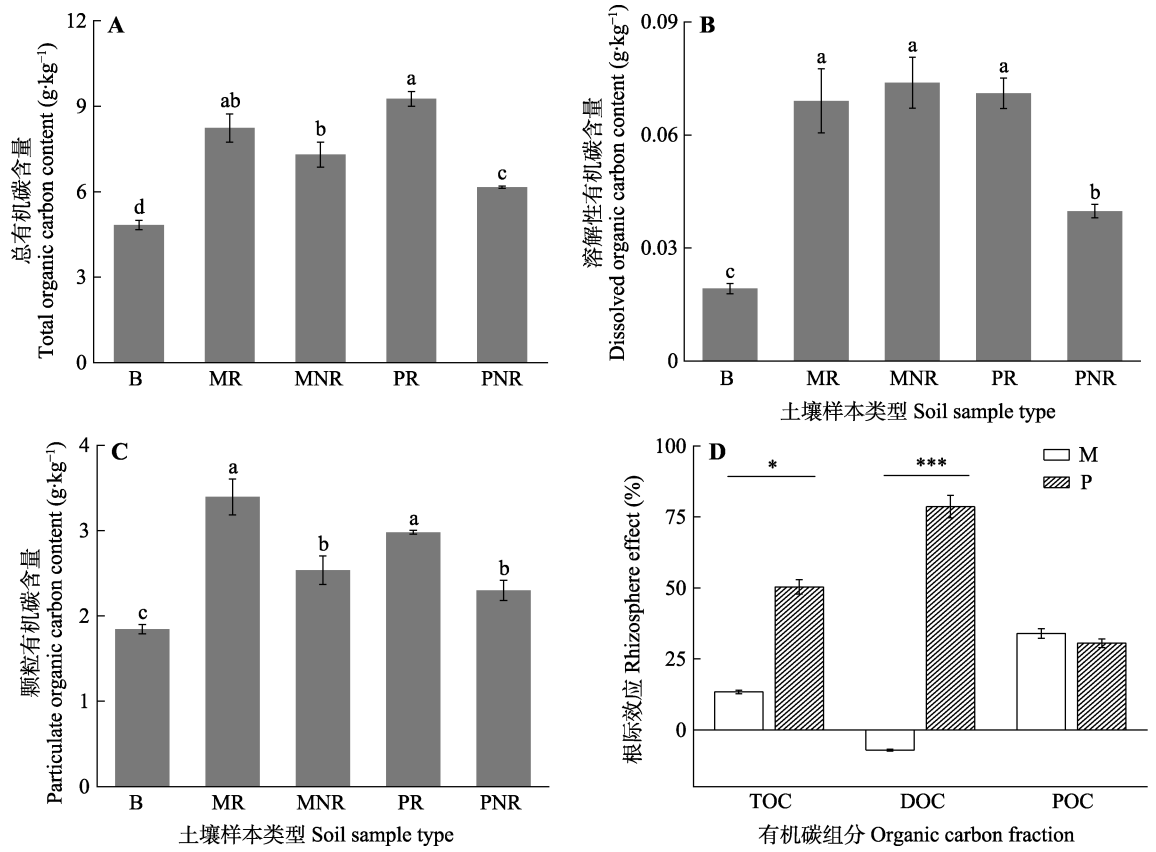


图2 不同植物根系构型对有机碳组分的影响(**A–C**)及根际效应(**D**) (平均值±标准误)。B, 生态修复初期土; MNR, 苜蓿非根际土; MR, 苜蓿根际土; PNR, 披碱草非根际土; PR, 披碱草根际土。M, 苜蓿; P, 披碱草。DOC, 溶解性有机碳; POC, 颗粒有机碳; TOC, 总有机碳。不同小写字母表示不同土壤样本之间差异显著(p < 0.05); *, p < 0.05; ***, p < 0.001。

Fig. 2 Effects of different root architecture on organic carbon fractions (**A–C**) and rhizosphere effects (**D**) (mean ± *SE*). B, soil at the beginning of ecological restoration; MNR, *Medicago sativa* bulk soil; MR, *Medicago sativa* rhizosphere soil; PNR, *Elymus dahuricus* bulk soil; PR, *Elymus dahuricus* rhizosphere soil. M, *Medicago sativa*; P, *Elymus dahuricus*. DOC, Dissolved organic carbon; POC, Particulate organic carbon; TOC, Total organic carbon. Different lowercase letters indicate significant differences between different soil samples significantly (p < 0.05); *, p < 0.05; ***, p < 0.001.

DOI: 10.17521/cjpe.2025.0122

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

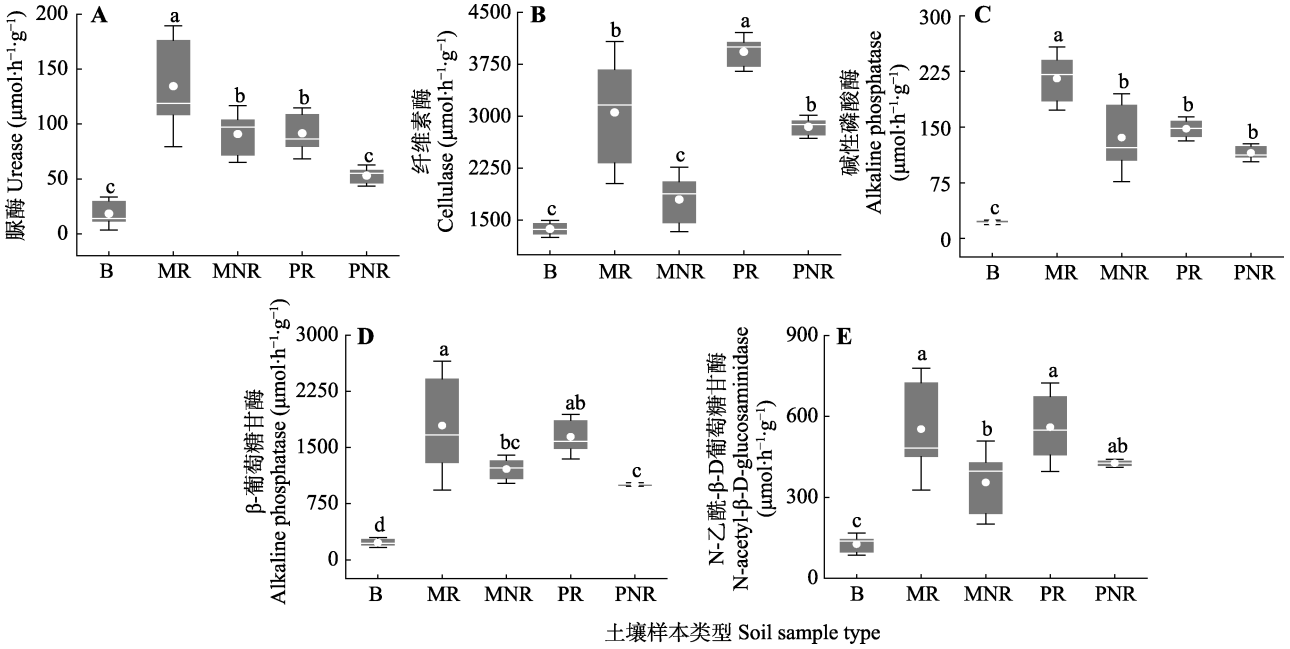


图3 不同植物根系构型对土壤酶活性(平均值±标准误)的影响。B, 生态修复初期土; MNR, 苜蓿非根际土; MR, 苜蓿根际土; PNR, 披碱草非根际土; PR, 披碱草根际土。不同小写字母表示不同土壤样本之间差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 3 Effects of different root architecture on soil enzyme activities (mean ± *SE*). B, soil at the beginning of ecological restoration; MNR, *Medicago sativa* bulk soil; MR, *Medicago sativa* rhizosphere soil; PNR, *Elymus dahuricus* bulk soil; PR, *Elymus dahuricus* rhizosphere soil. Different lowercase letters indicate significant differences between different soil samples significantly ($p < 0.05$).

0.05)。Chao1指数用于指示土壤微生物丰富度, Shannon指数反映微生物群落间的多样性和均匀性。两种根系构型植物根际土的Chao1指数和Shannon指数均大于非根际土, 其中须根系披碱草根际土的Chao1指数和Shannon指数大于直根系苜蓿根际土(图4A)。基于Bray-Curtis距离的非度量多维尺度分析(NMDS)图分析结果显示, 修复初期与植物生长后的细菌群落结构存在明显差异, 且不同根系构型植物的生长对细菌群落结构具有显著影响(图4B)。

花岗岩弃渣重构土壤细菌优势菌门为变形菌门、放线菌门、酸杆菌门、绿弯菌门、芽单胞菌门、拟杆菌门和黏菌门, 约占总菌群94% (图4C)。其中, 变形菌门是花岗岩弃渣土壤中相对丰度最高的菌门, 整体介于31.41%–41.09%。具体而言, 生态修复初期变形菌门相对丰度最低为31.41%; 直根系苜蓿和须根系披碱草根际土中的变形菌门丰度分别为37.85%和41.09%, 均高于非根际土(36.23%和38.74%), 且须根系披碱草根际土的相对丰度最高。其他优势菌门相对丰度由大到小依次为放线菌门(16.50%–21.15%) >酸杆菌门(9.94%–15.87%) >绿弯菌门(7.64%–10.04%) >芽单胞菌门(5.37%–9.85%) >拟杆菌门(3.56%–7.03%) >黏菌门(1.01%–2.57%)。放线菌门和酸杆菌门相对丰度在生态修复初期最高, 分别为21.15%和15.87%。苜蓿和披碱草非根际土中的酸杆菌门丰度(13.83%和10.94%)均高于根际土(10.51%和10.25%)。绿弯菌门在苜蓿和披碱草根际土中的相对丰度分别为7.64%和10.04%, 在非根际土中分别为8.99%和8.80%。

2.5 土壤理化性质、酶活性与有机碳组分的相关性分析及冗余分析

基于Pearson相关系数矩阵所得结果见图5A。有机碳组分与理化性质、酶活性指标均存在显著或极显著正相关关系, 但与土壤pH呈显著负相关关系。TOC与βG、SOM、AK和NH_4^+-N含量呈极显著正相关关系; DOC与βG、UE、SOM、NH_4^+-N和TOC含量呈极显著正相关关系; POC与NAG、AKP、SOM和AK含量呈极显著正相关关系, 相关系数均大于0.8。

对有机碳组分、理化性质和细菌群落结构进行冗余分析(RDA), 选取理化性质和细菌群落结构为解释变量, 有机碳组分为响应变量。图5B显示第一轴和第二轴方差贡献率分别为64.62%和7.84%, 前两轴累计方差贡献率为72.46%, 模型解释变量和响应变量之间关系的显著性为$p < 0.001$。RDA排序结果(图5B)显示, 理化因子对有机碳组分变异的解释

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

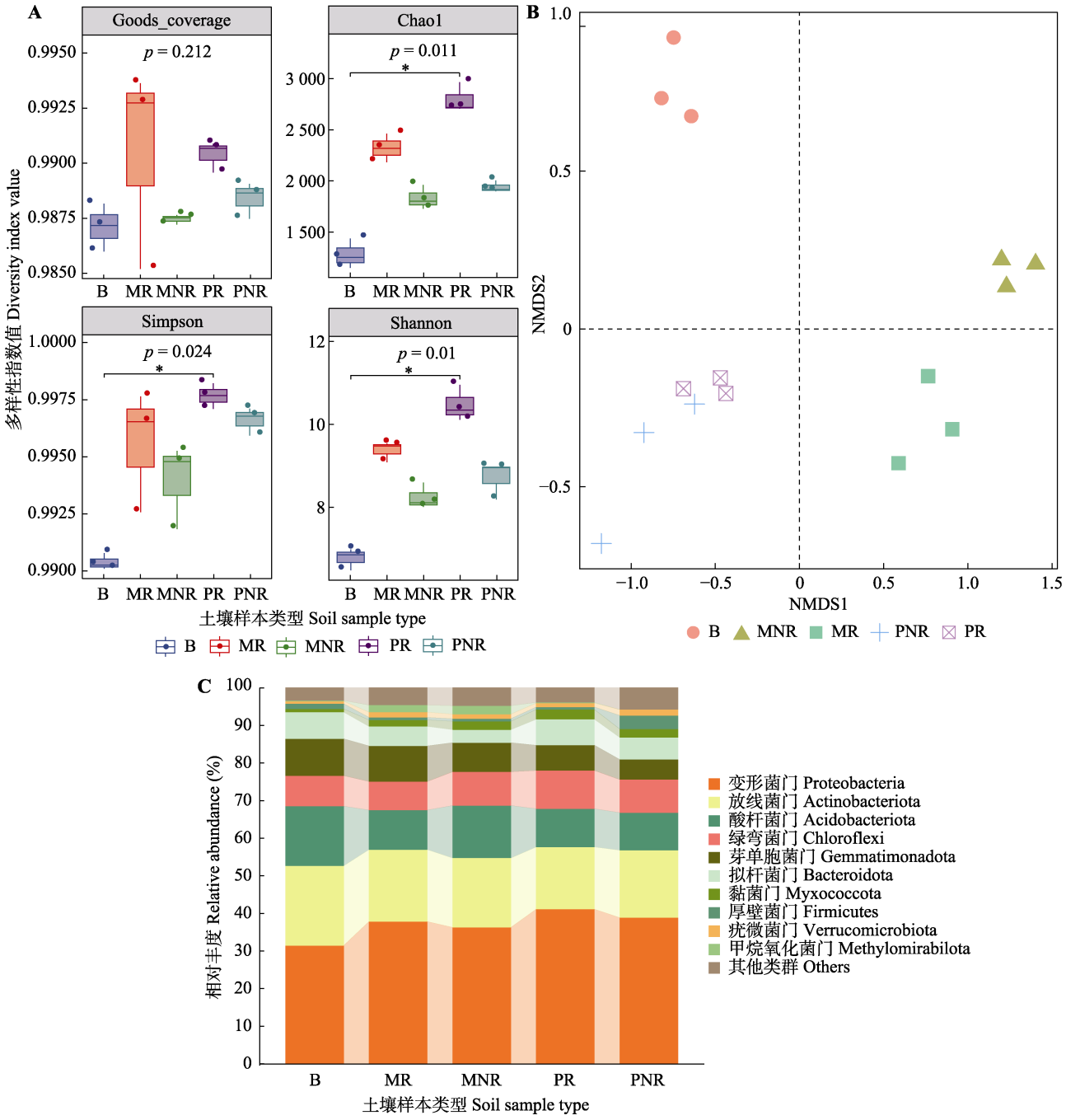


图4 不同植物根系构型对细菌群落多样性(**A**、**B**)及结构(**C**)的影响。B, 生态修复初期土; MNR, 苜蓿非根际土; MR, 苜蓿根际土; PNR, 披碱草非根际土; PR, 披碱草根际土。*, $p < 0.05$。NMDS, 非度量多维尺度分析。

Fig. 4 Effects of different root architecture on bacterial community diversity (**A, B**) and structure (**C**). B, soil at the beginning of ecological restoration; MNR, *Medicago sativa* bulk soil; MR, *Medicago sativa* rhizosphere soil; PNR, *Elymus dahuricus* bulk soil; PR, *Elymus dahuricus* rhizosphere soil. *, $p < 0.05$. NMOS, non-metric multidimensional scaling.

量排序为pH > NH_4^+-N含量> AP含量> NO_3^--N含量> AK含量, 其中pH、NH_4^+-N和AP含量是影响有机碳组分的关键环境变量。有机碳组分(TOC、DOC、POC)含量向量与pH向量的夹角均为钝角, 表明土壤pH与各有机碳组分含量均呈显著负相关关系; 而有机碳组分含量向量与NH_4^+-N、AP、NO_3^--N和AK含量理化因子向量的夹角呈锐角, 表明与有机碳组分含量呈显著正相关关系。此外, 有机碳组分(TOC、DOC、POC)含量向量与酸杆菌门、放线菌门、拟杆菌门和芽单胞菌门的相对丰度向量的夹角均大于90° (呈钝角), 表明这些微生物类群丰度与有机碳组分含量呈显著负相关关系; 相反, 变形菌门和黏菌门相对丰度向量则与DOC、POC含量向量夹角小于90° (呈锐角), 表明二者存在显著正相关关系。

DOI: 10.17521/cjpe.2025.0122

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

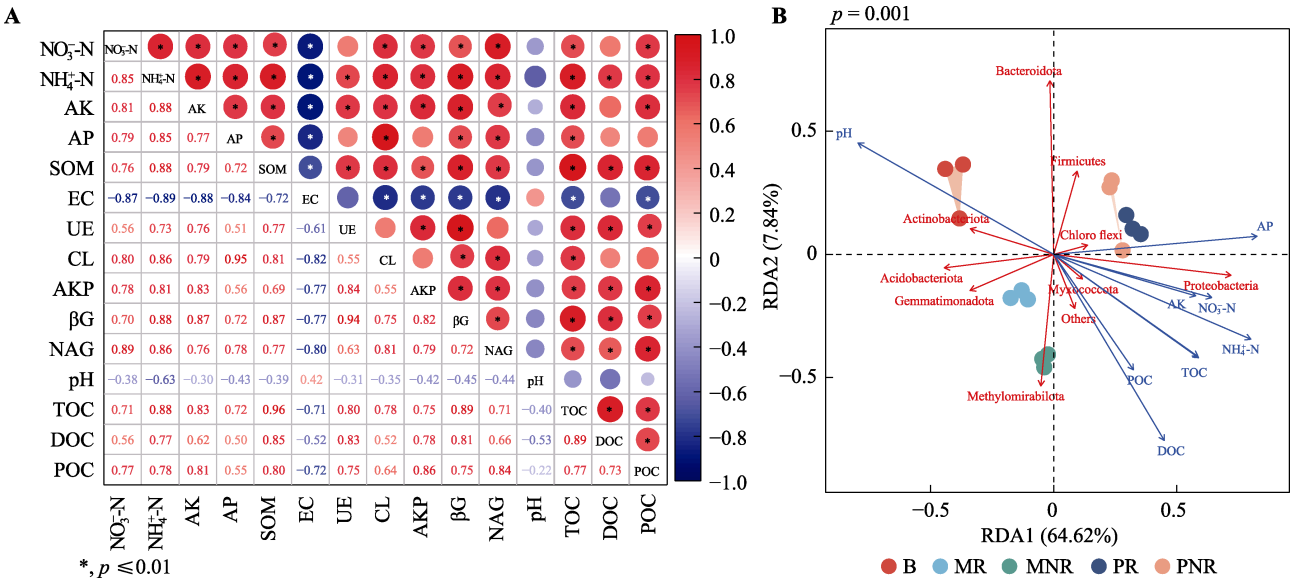


图5 有机碳与环境因子的相关性分析(**A**)和冗余分析(RDA, **B**)。B, 生态修复初期土; MR, 苜蓿根际土; MNR, 苜蓿非根际土; PR, 披碱草根际土; PNR, 披碱草非根际土。AK, 速效钾含量; AKP, 碱性磷酸酶活性; AP, 有效磷含量; βG, β-葡萄糖甘酶活性; CL, 纤维素酶活性; DOC, 溶解性有机碳含量; EC, 电导率; NAG, N-乙酰-β-D葡萄糖甘酶活性; NH_4^+-N, 铵态氮含量; NO_3^--N, 硝态氮含量; POC, 颗粒有机碳含量; SOM, 有机质含量; TOC, 总有机碳含量; UE, 脲酶活性。Acidobacteriota, 酸杆菌门; Actinobacteriota, 放线菌门; Bacteroidota, 拟杆菌门; Chloroflexi, 绿弯菌门; Firmicutes, 厚壁菌门; Gemmatimonadota, 芽单胞菌门; Methylomirabilota, 甲烷氧化菌门; Myxococcota, 黏菌门; Proteobacteria, 变形菌门; Others, 其他类群; Verrucomicrobiota, 疣微菌门。

Fig. 5 Correlation analysis (**A**) and redundancy analysis (RDA, **B**) of organic carbon with environmental factors. B, soil at the beginning of ecological restoration; MR, *Medicago sativa* rhizosphere soil; MNR, *Medicago sativa* bulk soil; PR, *Elymus dahuricus* rhizosphere soil; PNR, *Elymus dahuricus* bulk soil. AK, available potassium content; AKP, Alkaline phosphatase activity; AP, available phosphorus content; βG, β-glucosidase activity; CL, cellulase activity; DOC, dissolved organic carbon content; EC, conductivity; NAG, N-acetyl-β-D-glucosaminidase activity; NH_4^+-N, ammonium nitrogen content; NO_3^--N, nitrate nitrogen content; POC, particulate organic carbon content; SOM, organic matter content; TOC, total organic carbon content; UE, urease activity.

3 讨论

3.1 不同根系构型植物通过理化性质影响有机碳积累

根系是植物吸收土壤养分和水分的重要场所, 也是大气碳向土壤运输的主要途径, 不同根系构型影响土壤碳输入数量和质量(Srivastava & Yetgin, 2024)。本研究中须根系披碱草和直根系苜蓿均显著提高重构土壤TOC含量(图2A), 表明植物根系能通过活根分泌物和死根根沉积将大量有机碳输入到土壤。同时, 植被恢复作为生态修复的关键措施, 通过改善土壤结构和理化性质, 也显著增加非根际区域的TOC含量。本研究选取DOC和POC含量作为活性有机碳指标。DOC作为有机碳最活跃的组分, 是有机碳迁移转化的主要形式, 虽然所占比例小, 但在参与土壤生物活动、有机物迁移和养分循环等方面发挥重要作用(Liu et al., 2021)。本研究结果显示, 须根系披碱草根际土DOC含量显著高于非根际土(图2B)。因为DOC主要由水溶性有机物组成, 这些有机物通常是糖类、氨基酸和有机酸等低分子量化合物(陈安冉和王祖伟, 2012), 能作为根系分泌物持续释放到根际。须根系植物具有较强的根系分泌能力, 其分泌的黏液等物质显著提升根际DOC含量。而直根系苜蓿根际土DOC含量比非根际土低6.67%, 但差异不显著(图2B)。这可能归因于直根根系直径和结构占据更大的土壤孔隙, 进而改变土壤水分渗透情况(Wang et al., 2023), DOC通过水分传输或土壤孔隙的扩散作用, 影响到更广泛的土壤区域, 尤其是非根际区域。对比两种根系构型植物对DOC的根际效应, 结果显示须根系披碱草和直根系苜蓿的根际效应分别为78.60%和–7.10%, 二者相差85.7%(图2D)。须根系披碱草正根际效应主要由根系分泌物释放与根沉积输入驱动, 表明须根系披碱草根际土的有机碳形成速率快于分解速率(Lv et al., 2023), 显著促进土壤有机碳积累。直根系苜蓿呈负根际效应可能源于苜蓿根系分泌物被扩散到非根际区域,

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

或根系分泌物在根际区域内被微生物迅速转化消耗, 限制苜蓿根际区域DOC积累。POC主要来源于植物颗粒有机残留物, 能对环境变化或干扰迅速反应(Witzgall et al., 2021)。本研究中, 两种植物根际POC含量显著高于非根际土, 均呈正根际效应, 差异不显著(图2C、2D), 说明须根系披碱草和直根系苜蓿通过残留物转化有效地促进POC形成。

土壤氮、磷、钾不仅作为植物生长的重要养分, 也是调节有机碳动态的关键因素。本研究中, 须根系披碱草根际土铵态氮和有效磷含量显著高于直根系苜蓿(图1C、1E)。这可能源于须根系植物有更丰富的黏液和分泌物, 能促进矿物风化而加快养分释放(Callesen et al., 2016), 导致须根系根际铵态氮和有效磷含量更高。研究表明, 土壤中的氮和磷能被有机质吸附和固定形成复杂化合物, 降低微生物对有机质的分解, 从而提高土壤有机碳固存(武文卓等, 2024)。此外, 较高的氮可利用性(铵态氮、硝态氮)可优先满足微生物分解植物凋落物(高碳氮比)的氮需求, 促进其向腐殖质转化, 进而提高土壤有机碳组分含量(Zhang et al., 2022a; 常博然等, 2024)。本研究相关性分析及RDA结果显示, 铵态氮和有效磷含量是影响有机碳组分的重要因子(图5), 这与前人研究结果(杨泽宇等, 2025)一致, 表明须根系披碱草通过提高根际铵态氮和有效磷含量, 改善了根际微环境, 可能为促进有机碳积累提供有利条件。此外, 钾作为植物光合作用、碳水化合物合成与运输的重要调节物质, 在土壤碳循环中发挥着关键作用。相关性分析结果显示, 速效钾含量与有机碳组分含量呈显著正相关关系, 说明速效钾可能通过促进根系生长和代谢活动, 间接增加碳输入影响有机碳的积累与转化。须根系披碱草根际土pH显著低于直根系苜蓿(图1A), 这可能是由于须根系植物具有更密集的根系网络, 通过根系呼吸和有机碳分泌的协同作用降低土壤pH (de la Puente et al., 2024)。相关性分析结果显示, pH与有机碳组分含量呈显著负相关关系。Liu等(2018)认为土壤pH升高促进微生物分解速率, 导致有机碳损失; 冉健民等(2025)研究发现, 土壤pH与SOC、POC和MAOC含量负相关, 本研究结果与之一致。本研究中, 有机质含量与DOC、POC含量呈显著正相关关系, 这源于有机质可以通过微生物分解和降雨淋溶转化为DOC (Xu et al., 2012), 直接增加土壤活性有机碳组分含量。

3.2 不同根系构型植物通过酶活性和微生物群落影响有机碳积累

土壤酶通过降解有机大分子驱动元素循环, 在生物地球化学过程中发挥着重要作用(Wang et al., 2022)。本研究中, 直根系苜蓿和须根系披碱草均显著提高弃渣重构土壤酶活性, 这与生态演替过程中酶活性发展规律(Zhan & Sun, 2014)一致。植物生长提高重构土壤养分含量, 微生物利用这些能源物质增强代谢, 促进弃渣土壤酶活性升高。本研究结果显示, 修复后重构土壤C循环相关酶(CL、β-GC)活性最高(图3B、3D)。Wu等(2021)也证实碳循环酶在受损生态系统中发挥着重要作用, 通过驱动有机质分解, 促进小分子有机碳与土壤矿物颗粒结合, 间接参与碳的长期固存。但不同根系构型植物对酶活性的调控机制不明。本研究中, 须根系披碱草根际土CL活性最高, 比直根系苜蓿高28.66% (图3B), 这可能是因为须根系植物根际能释放更多的低分子量碳(例如DOC), 为微生物代谢提供更丰富的底物, 从而增强了根际微生物群落的纤维素分解能力(Shi et al., 2011)。而须根系披碱草根际土的UE和AKP活性比直根系苜蓿根际低46.87%和45.76% (图3A、3C), 这可能源于豆科植物苜蓿通过根瘤菌共生固氮作用, 比非豆科植物更能提高土壤氮库容量(Moreau et al., 2019)。研究表明, 土壤酶活性与有机碳的转化过程密切相关(王鹏等, 2021), 不同功能酶对有机碳组分的调控机制各异。纤维素酶和β-葡萄糖苷酶通过催化纤维素类物质水解, 促进土壤活性有机碳积累(Wickings et al., 2012); 而脲酶可能通过激发效应导致碳损失, 另一方面也可能通过提高土壤氮有效性刺激植物生长, 进而增加根系分泌物与凋落物输入, 促进植物源碳积累(Sun et al., 2021)。本研究结果进一步证实有机碳组分与酶活性间存在显著正相关关系(图5A), 这与李增强等(2018)揭示的CL、β-GC促进DOC、POC积累的结论一致。本结果表明, 须根系披碱草根际土纤维素酶活性最高, 能直接促进土壤活性有机碳的积累。

微生物是土壤中最活跃的部分, 其动态敏感地反映有机碳的积累和转化。本研究中, 披碱草和苜蓿根际微生物α多样性显著高于非根际(图4A), 这源于植物根际效应驱动更多活性碳输入, 为微生物提供了丰富的底物资源, 使微生物群落富集于根际(Dang & Morrissey, 2024)。但不同根系构型植物的

DOI: 10.17521/cjpe.2025.0122

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

根际土壤微生物多样性存在差异, 本结果显示, 须根系披碱草根际土Shannon指数和Chao1指数显著高于直根系苜蓿(图4A)。须根系植物因其发达的细根系统, 能扩大土壤微孔隙度(Jiang et al., 2023), 为更多微生物群落提供适宜的活动场所。研究表明, 变形菌门是高寒生态系统中的优势菌门(Iqbal et al., 2024)。本研究在海拔3 595 m的花岗岩弃渣场土壤中观察到变形菌门相对丰度最高, 进一步证实其在高海拔生境下的生态适应性优势。变形菌门作为典型的r对策者, 偏好利用土壤不稳定有机碳(如可溶性糖、有机酸) (Zhang et al., 2022b), 通常富集于活性有机碳含量较高的环境。本研究发现, 须根系披碱草和直根系苜蓿根际土中的变形菌门相对丰度均高于非根际土(图4C), 这可能与根际区高碳通量环境直接相关, 从而更利于变形菌门富集, 且RDA结果显示, 变形菌门相对丰度与DOC、POC含量呈正相关关系, 进一步印证其对活性有机碳的偏好。di Lonardo等(2017)的研究表明变形菌门通过快速代谢活性有机碳组分, 加速植物源碳向微生物源碳的转化, 最终间接促进土壤有机碳的稳定固存。在本研究中, 披碱草根际变形菌门丰度为41.09%, 高于苜蓿(图4C), 表明须根系植物可能通过根际富集变形菌门, 存在驱动活性有机碳积累的趋势。放线菌门可以通过产生多糖来促进土壤碳储存, 从而提高土壤碳组分的稳定性(Mitra et al., 2022)。但在本研究结果中, 植物根际构型对放线菌门相对丰度的影响不明显。

酸杆菌门属于K对策者, 这类微生物能兼性利用易分解和难分解有机碳, 通常富集于具有环境胁迫或营养贫乏的土壤(秦文宽等, 2024)。本研究中, 种植须根系披碱草和直根系苜蓿显著降低花岗岩弃渣重构土壤酸杆菌门相对丰度, 且两种植物根际土中酸杆菌门相对丰度均低于非根际土(图4C)。结合RDA结果, 酸杆菌门相对丰度与活性有机碳组分含量呈显著负相关关系(图5B)。这可能源于植物生长过程中根系分泌物输入的植物源碳显著提升了土壤活性碳含量, 而r对策微生物(如变形菌门)在富含活性有机碳的环境中较K对策者具有更高的生长速率, 从而占据生态位优势并抑制酸杆菌门增殖(Gharechahi et al., 2021)。绿弯菌门在有机质有限的条件下进行光能自养生长, 该菌门部分类群具有通过3-羟基丙酸循环途径固定CO_2能力, 其生长代谢产生的微生物残体碳有助于有机碳的固存(Shih et al., 2017); 但在营养条件丰富时, 绿弯菌门则消耗不稳定有机碳进行光能异养生长, 其直接影响土壤有机碳的形态和含量。在本研究中, 须根系披碱草根际土绿弯菌门相对丰度高于非根际土(图4C), 这与Wu等(2021)的研究结论一致。不同根系构型植物通过根际效应差异化调控酶活性与微生物群落结构, 显著影响有机碳的转化和积累。相较于直根系苜蓿, 须根系披碱草通过显著提高纤维素酶活性、富集变形菌门并抑制酸杆菌门, 在促进花岗岩弃渣重构土壤有机碳积累方面表现出更优效果。

4 结论

本文研究须根系披碱草和直根系苜蓿对花岗岩弃渣重构土壤有机碳组分的影响, 主要结论如下: (1)须根系披碱草较直根系苜蓿在短期内更有助于提升花岗岩弃渣重构土壤速效养分; (2)须根系披碱草对TOC、DOC根际效应显著高于直根系苜蓿, 对弃渣重构土壤有机碳积累作用更强; (3)须根系披碱草根际土纤维素酶活性最高, 并通过富集变形菌门、抑制酸杆菌门, 加速弃渣重构土壤碳积累过程; 相比之下, 直根系苜蓿在增强氮磷循环相关酶活性方面表现更为突出, 其脲酶和碱性磷酸酶活性显著高于须根系披碱草, 间接影响土壤有机碳含量。(4)须根系披碱草通过根际富集更多的变形菌门, 有利于活性有机碳积累。须根系披碱草比直根系苜蓿更有效地改善弃渣重构土壤理化性质、提升活性有机碳含量, 建议进行生态修复时, 优先种植须根系先锋植物(如披碱草), 可合理配置直根系植物, 快速提升土壤有机碳储量, 为后续植物定植创造更有利的条件。以后的研究可以集中在植物源碳和微生物源碳对花岗岩弃渣土壤有机碳含量的稳定机制。

参考文献

Callesen I, Harrison R, Stupak I, Hatten J, Raulund-Rasmussen K, Boyle J, Clarke N, Zabowski D (2016). Carbon storage and nutrient mobilization from soil minerals by deep roots and rhizospheres. *Forest Ecology and Management*, 359, 322-331.

Chang BR, Chen RL, Wang B, Lan T, Deng L, Xue HY (2024). Characteristics of soil organic carbon and its component distribution in different forest stand types on Mount Zola in southeastern Tibet. *Ecology and Environmental Sciences*, 33, 1495-1505. [常博然, 陈茹岚, 王彪, 蓝天,

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

邓琳, 薛会英 (2024). 藏东南折拉山不同林分类型土壤有机碳及其组分分布特征. 生态环境学报, 33, 1495-1505.]

Chen AR, Wang ZW (2012). Progress in the study of water-soluble organic carbon in soils//Chinese Society for Environment Sciences. *Proceedings of the Annual Academic Conference of the Chinese Society for Environmental Sciences*, Volume 3, China Environment Publishing Group, Beijing. 2570-2575. [陈安冉, 王祖伟 (2012). 土壤中水溶性有机碳研究进展//中国环境科学学会. 中国环境科学学会学术年会论文集(第三卷), 中国环境科学出版社, 北京. 2570-2575.]

Chen X, Ding ZJ, Tang M, Zhu B (2018). Greater variations of rhizosphere effects within mycorrhizal group than between mycorrhizal group in a temperate forest. *Soil Biology & Biochemistry*, 126, 237-246.

Dang C, Morrissey EM (2024). The size and diversity of microbes determine carbon use efficiency in soil. *Environmental Microbiology*, 26, e16633. DOI: 10.1111/1462-2920.16633.

de la Puente L, Echevarría L, Igual JM, Ferrio JP, Palacio S (2024). Changes in soil microbiota alter root exudation and rhizosphere pH of the gypsum endemic *Ononis tridentata* L. *Plant and Soil*, 505, 581-594.

di Lonardo DP, de Boer W, Klein Gunnewiek PJA, Hannula SE, van der Wal A (2017). Priming of soil organic matter: chemical structure of added compounds is more important than the energy content. *Soil Biology & Biochemistry*, 108, 41-54.

Dijkstra FA, Zhu B, Cheng WX (2021). Root effects on soil organic carbon: a double-edged sword. *New Phytologist*, 230, 60-65.

Ekenler M, Tabatabai M (2002). β-Glucosaminidase activity of soils: effect of cropping systems and its relationship to nitrogen mineralization. *Biology and Fertility of Soils*, 36, 367-376.

Gharechahi J, Vahidi MF, Bahram M, Han JL, Ding XZ, Salekdeh GH (2021). Metagenomic analysis reveals a dynamic microbiome with diversified adaptive functions to utilize high lignocellulosic forages in the cattle rumen. *The ISME Journal*, 15, 1108-1120.

Guan SY (1986). *Soil Enzyme and Its Research Methods*. Chinese Agricultural Press, Beijing. 294-297. [关松荫 (1986). 土壤酶及其研究方法. 农业出版社, 北京. 294-297.]

He L (2023). Ecological restoration practice of high steep rocky slopes in open pit mines. *China Metal Bulletin*, (9), 116-118. [何丽 (2023). 露天矿山高陡岩质边坡生态修复实践. 中国金属通报, (9), 116-118.]

He M, Wang YC, Wang LG, Li CQ, Wang LM, Li YH, Liu PQ (2020). Effects of subsoiling combined with fertilization on the fractions of soil active organic carbon and soil active nitrogen, and enzyme activities in black soil in northeast China. *Acta Pedologica Sinica*, 57, 446-456. [贺美, 王迎春, 王立刚, 李成全, 王利民, 李玉红, 刘平奇 (2020). 深松施肥对黑土活性有机碳氮组分及酶活性的影响. 土壤学报, 57, 446-456.]

Iqbal A, Maqsood Ur Rehman M, Sajjad W, Degen AA, Rafiq M, Niu JH, Khan S, Shang ZH (2024). Patterns of bacterial communities in the rhizosphere and rhizoplane of alpine wet meadows. *Environmental Research*, 241, 117672. DOI: 10.1016/j.envres.2023.117672.

Jiang XS, Zhong XM, Yu G, Zhang XH, Liu J (2023). Different effects of taproot and fibrous root crops on pore structure and microbial network in reclaimed soil. *Science of the Total Environment*, 901, 165996. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165996.

Kallenbach CM, Frey SD, Grandy AS (2016). Direct evidence for microbial-derived soil organic matter formation and its ecophysiological controls. *Nature Communications*, 7, 13630. DOI: 10.1038/ncomms13630.

Li J, Wen YC, Li XH, Li YT, Yang XD, Lin ZA, Song ZZ, Cooper JM, Zhao BQ (2018). Soil labile organic carbon fractions and soil organic carbon stocks as affected by long-term organic and mineral fertilization regimes in the North China Plain. *Soil and Tillage Research*, 175, 281-290.

Li JY, Yuan XL, Ge L, Li Q, Li ZG, Wang L, Liu Y (2020). Rhizosphere effects promote soil aggregate stability and associated organic carbon sequestration in rocky areas of desertification. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 304, 107126. DOI: 10.1016/j.agee.2020.107126.

Li S, Zhang SR, Pu YL, Li T, Xu XX, Jia YX, Deng OP, Gong GS (2016). Dynamics of soil labile organic carbon fractions and C-cycle enzyme activities under straw mulch in Chengdu Plain. *Soil and Tillage Research*, 155, 289-297.

Li ZQ, Zhang X, Wang JH, Cao K, Xu CX, Cao WD (2018). Effects of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) application rate on soil labile organic carbon and C-transformation enzyme activities. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, (4), 14-20. [李增强, 张贤, 王建红, 曹凯, 徐昌旭, 曹卫东 (2018). 紫云英施用量对土壤活性有机碳和碳转化酶活性的影响. 中国土壤与肥料, (4), 14-20.]

Liang AZ, Zhang XP, Yang XM, Shen Y, Shi XH, Fan RQ, Fang HJ (2010). Dynamics of soil particulate organic carbon and mineral-incorporated organic carbon in black soils in Northeast China. *Acta Pedologica Sinica*, 47, 153-158. [梁爱珍, 张晓平, 杨学明, 申艳, 时秀焕, 范如芹, 方华军 (2010). 黑土颗粒态有机碳与矿物结合态有机碳的变化研究. 土壤学报, 47, 153-158.]

Lin Q (2006). *Study on Soil Erosion and Its Control Technology of the Granite Mineral Area—Taking the*

DOI: 10.17521/cjpe.2025.0122

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

Granite Mineral Area in Tiefeng mountain of Anxi County as an Example. Master degree dissertation, Fujian Agricultural and Forestry University, Fuzhou. [林强 (2006). 花岗岩矿区水土流失及其治理技术研究——以安溪县铁峰山花岗岩矿区为例. 硕士学位论文, 福建农林大学, 福州.]

Liu B, Xia H, Jiang CC, Riaz M, Yang L, Chen YF, Fan XP, Xia XG (2022). 14 year applications of chemical fertilizers and crop straw effects on soil labile organic carbon fractions, enzyme activities and microbial community in rice-wheat rotation of middle China. *Science of the Total Environment*, 841, 156608. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156608.

Liu FT, Wang D, Zhang BB, Huang J (2021). Concentration and biodegradability of dissolved organic carbon derived from soils: a global perspective. *Science of the Total Environment*, 754, 142378. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142378.

Liu SB, Zamanian K, Schleuss PM, Zarebanadkouki M, Kuzyakov Y (2018). Degradation of Tibetan grasslands: consequences for carbon and nutrient cycles. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 252, 93-104.

Luo JC, Wang YQ, Xu Y, Wang M (2020). Evaluation of tourism climate and human comfort in Kangding City. *Journal of Green Science and Technology*, 22(16), 174-175. [罗竟成, 王严琪, 徐瑗, 王敏 (2020). 康定市旅游气候及人体舒适度评价. 绿色科技, 22(16), 174-175.]

Lv CH, Wang CK, Cai AD, Zhou ZH (2023). Global magnitude of rhizosphere effects on soil microbial communities and carbon cycling in natural terrestrial ecosystems. *Science of the Total Environment*, 856, 158961. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158961.

Mitra D, Mondal R, Khoshru B, Senapati A, Radha TK, Mahakur B, Uniyal N, Myo EM, Boutaj H, Sierra BEG, Panneerselvam P, Ganeshamurthy AN, Elković SA, Vasić T, Rani A, et al. (2022). Actinobacteria-enhanced plant growth, nutrient acquisition, and crop protection: advances in soil, plant, and microbial multifactorial interactions. *Pedosphere*, 32, 149-170.

Moreau D, Bardgett RD, Finlay RD, Jones DL, Philippot L (2019). A plant perspective on nitrogen cycling in the rhizosphere. *Functional Ecology*, 33, 540-552.

Phillips RP, Fahey TJ (2006). Tree species and mycorrhizal associations influence the magnitude of rhizosphere effects. *Ecology*, 87, 1302-1313.

Pu YL, Ye C, Zhang SR, Long GF, Yang LR, Jia YX, Xu XX, Li Y (2017). Effects of different ecological restoration patterns on labile organic carbon and carbon pool management index of desertification grassland soil in zoige. *Acta Ecologica Sinica*, 37, 367-377. [蒲玉琳, 叶春, 张世熔, 龙高飞, 杨丽蓉, 贾永霞, 徐小逊, 李云 (2017). 若尔盖沙化草地不同生态恢复模式土壤活性有机碳及碳库管理指数变化. 生态学报, 37, 367-377.]

Qin WK, Feng JG, Hu YL, Zhang QF, Zhu B (2024). Mechanisms and influencing factors of soil priming effect: a review. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 60, 957-970. [秦文宽, 冯继广, 胡云龙, 张秋芳, 朱彪 (2024). 土壤激发效应的机制及影响因素研究进展. 北京大学学报(自然科学版), 60, 957-970.]

Ramírez PB, Fuentes-Alburquenque S, Díez B, Vargas I, Bonilla CA (2020). Soil microbial community responses to labile organic carbon fractions in relation to soil type and land use along a climate gradient. *Soil Biology & Biochemistry*, 141, 107692. DOI: 10.1016/j.soilbio.2019.107692.

Ran JM, Song XY, Wang D, Wang CT (2025). Changes in soil organic carbon fractions and carbon sequestration potential of the degraded alpine meadows. *Acta Prataculturae Sinica*, 34(9), 38-52. [冉健民, 宋小艳, 王丹, 王长庭 (2025). 退化高寒草甸土壤有机碳组分变化与增汇潜力研究. 草业学报, 34(9), 38-52.]

Shi SJ, Richardson AE, O'Callaghan M, DeAngelis KM, Jones EE, Stewart A, Firestone MK, Condron LM (2011). Effects of selected root exudate components on soil bacterial communities. *FEMS Microbiology Ecology*, 77, 600-610.

Shih PM, Ward LM, Fischer WW (2017). Evolution of the 3-hydroxypropionate bicycle and recent transfer of anoxygenic photosynthesis into the Chloroflexi. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114, 10749-10754.

Sokol NW, Slessarev E, Marschmann GL, Nicolas A, Blazewicz SJ, Brodie EL, Firestone MK, Foley MM, Hestrin R, Hungate BA, Koch BJ, Stone BW, Sullivan MB, Zablocki O, Pett-Ridge J (2022). Life and death in the soil microbiome: How ecological processes influence biogeochemistry. *Nature Reviews Microbiology*, 20, 415-430.

Srivastava RK, Yetgin A (2024). An overall review on influence of root architecture on soil carbon sequestration potential. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 36, 165-178.

Sun XD, Ye YQ, Ma QX, Guan QW, Jones DL (2021). Variation in enzyme activities involved in carbon and nitrogen cycling in rhizosphere and bulk soil after organic mulching. *Rhizosphere*, 19, 100376. DOI: 10.1016/j.rhisph.2021.100376.

Wang CQ, Kuzyakov Y (2024). Rhizosphere engineering for soil carbon sequestration. *Trends in Plant Science*, 29, 447-468.

Wang D, Yi WB, Zhou YL, He SR, Tang L, Yin XH, Zhao P, Long GQ (2021). Intercropping and N application enhance soil dissolved organic carbon concentration with

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

complicated chemical composition. *Soil and Tillage Research*, 210, 104979. DOI: 10.1016/j.still.2021.104979.

Wang P, Zheng XB, Liang HB, Song WJ, Ji X, Xu YL, Kuang S, Dong JX (2021). Effects of different fertilization models on active organic carbon components and enzyme activities of Tobacco-growing brown soil. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 36(1), 187-196. [王鹏, 郑学博, 梁洪波, 宋文静, 季璇, 徐艳丽, 况帅, 董建新 (2021). 不同施肥模式对植烟棕壤活性有机碳组分和酶活性的影响. 华北农学报, 36(1), 187-196.]

Wang PP, Su XM, Zhou ZC, Wang N, Liu J, Zhu BB (2023). Differential effects of soil texture and root traits on the spatial variability of soil infiltrability under natural revegetation in the Loess Plateau of China. *Catena*, 220, 106693. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106693.

Wang ZW, Ma SQ, Hu Y, Chen YC, Jiang HM, Duan BL, Lu XY (2022). Links between chemical composition of soil organic matter and soil enzyme activity in alpine grassland ecosystems of the Tibetan Plateau. *Catena*, 218, 106565. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106565.

Wickings K, Grandy AS, Reed SC, Cleveland CC (2012). The origin of litter chemical complexity during decomposition. *Ecology Letters*, 15, 1180-1188.

Witzgall K, Vidal A, Schubert DI, Höschen C, Schweizer SA, Buegger F, Pouteau V, Chenu C, Mueller CW (2021). Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon. *Nature Communications*, 12, 4115. DOI: 10.1038/s41467-021-24192-8.

Wu H, Tang T, Zhu F, Wei XM, Hartley W, Xue SG (2021). Long term natural restoration creates soil-like microbial communities in bauxite residue: a 50-year filed study. *Land Degradation & Development*, 32, 1606-1617.

Wu WZ, Ren QR, Zhang SQ, Wang KJ, Liu JX, Wei YQ, Chai BF (2024). Structure and stability of soil organic carbon pools along depths in forests and grasslands in Luya Mountains. *Environmental Science*, 46, 6567-6575. [武文卓, 任倩茹, 张仕琪, 王鲲娇, 刘晋仙, 魏雨其, 柴宝峰 (2024). 芦芽山森林和草地不同深度土壤有机碳库结构与稳定性. 环境科学, 46, 6567-6575.]

Xiao Y, Huang ZG, Wu HT, Lü XG (2015). Compositions and contents of active organic carbon in different wetland soils in Sanjiang Plain, Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 7625-7633. [肖烨, 黄志刚, 武海涛, 吕宪国 (2015). 三江平原不同湿地类型土壤活性有机碳组分及含量差异. 生态学报, 35, 7625-7633.]

Xu XK, Luo XB, Jiang SH, Xu ZJ (2012). Biodegradation of dissolved organic carbon in soil extracts and leachates from a temperate forest stand and its relationship to ultraviolet absorbance. *Chinese Science Bulletin*, 57, 912-920.

Yang ZY, Xiao SH, Ma JJ, Gao CJ, Wei L, Li JH, He DJ (2025). Characteristics and influencing factors of soil organic carbon components in typical mangrove wetlands. *Journal of West China Forestry Science*, 54(1), 126-134. [杨泽宇, 肖石红, 马姣娇, 高常军, 魏龙, 李佳鸿, 何东进 (2025). 典型红树林湿地土壤有机碳组分特征及影响因素. 西部林业科学, 54(1), 126-134.]

Zhan J, Sun QY (2014). Development of microbial properties and enzyme activities in copper mine wasteland during natural restoration. *Catena*, 116, 86-94.

Zhang HK, Fang YY, Zhang BG, Luo Y, Yi XY, Wu JS, Chen YC, Sarker TC, Cai YJ, Chang SX (2022a). Land-use-driven change in soil labile carbon affects microbial community composition and function. *Geoderma*, 426, 116056. DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.116056.

Zhang ZL, Kaye JP, Bradley BA, Amsili JP, Suseela V (2022b). Cover crop functional types differentially alter the content and composition of soil organic carbon in particulate and mineral-associated fractions. *Global Change Biology*, 28, 5831-5848.

Zheng H, Wang X, Luo XX, Wang ZY, Xing BS (2018). Biochar-induced negative carbon mineralization priming effects in a coastal wetland soil: roles of soil aggregation and microbial modulation. *Science of the Total Environment*, 610-611, 951-960.

Zhu F, Zhang XC, Guo XY, Yang XW, Xue SG (2023). Root architectures differentiate the composition of organic carbon in bauxite residue during natural vegetation. *Science of the Total Environment*, 883, 163588. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163588.

Zhu HY, Wang ZF, Lu C, Chen SQ, Wang FH, Lü S, Gao M (2021). Variation characteristics of soil active organic carbon and carbon pools under five vegetation types in Jinyun Mountain. *Soils*, 53, 354-360. [朱浩宇, 王子芳, 陆畅, 陈仕奇, 王富华, 吕盛, 高明 (2021). 缙云山5种植被下土壤活性有机碳及碳库变化特征. 土壤, 53, 354-360.]

Zhu LJ, Pei XJ, Zhang XC, Ren T, Yang QW (2020). A study of water retention and ecological effects of loess improved by double polymers. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 47(4), 158-166. [朱利君, 裴向军, 张晓超, 任童, 杨晴雯 (2020). 双聚材料改良黄土持水性及生态效应研究. 水文地质工程地质, 47(4), 158-166.]

特邀编委: 杨贵彪 责任编辑: 赵 航

DOI: 10.17521/cjpe.2025.0122

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology