北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

西北矿区不同植物配置模式的碳汇潜力评估

刘慧辉 刘斌 栗峰 周润霖 邢友 王春梅

Carbon sink potential assessment of different vegetation configuration patterns in mining areas of northwestern China

Liu Huihui, Liu Bin, Li Feng, Zhou Runlin, Xing You, Wang Chunmei

引用本文:
刘慧辉, 刘斌, 栗峰, 周润霖, 邢友, 王春梅. 西北矿区不同植物配置模式的碳汇潜力评估[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(4):64–71. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250272
Liu Huihui, Liu Bin, Li Feng, Zhou Runlin, Xing You, Wang Chunmei. Carbon sink potential assessment of different vegetation configuration patterns in mining areas of northwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(4):64–71. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250272

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250272

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

采伐强度对东北针阔混交林生态系统碳储量的影响
Effects of thinning intensity on carbon storage in the mixed coniferous and broadleaved forest ecosystem in northeastern China
北京林业大学学报, 2025, 47(6): 1–9. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240032

东北林区10种主要森林类型的蓄积量、生物量和碳储量模型研建
Developing stand volume, biomass and carbon stock models for ten major forest types in forest region of northeastern China
北京林业大学学报, 2021, 43(3): 1–8. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200058

采伐强度对阔叶红松林生态系统碳密度恢复的影响
Effects of logging intensity on restoration of carbon density in broadleaved Korean pine forest ecosystem
北京林业大学学报, 2022, 44(10): 33–42. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220190

长白山园池湖岸湿地生态系统碳氮储量沿环境梯度空间分异规律
Spatial differentiation law of carbon and nitrogen storage along the environmental gradient of Yuanchi lakeshore wetland ecosystems in Changbai Mountain of northeastern China
北京林业大学学报, 2024, 46(8): 34–46. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230185

基于InVEST模型云南省生态系统服务功能综合评估
Comprehensive evaluation of ecosystem service functions in Yunnan Province of southwestern China based on InVEST model
北京林业大学学报, 2024, 46(11): 103–112. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240123

震后生态恢复初期植被土壤的耦合关系研究
Coupling relationship between vegetation and soil in the early stage of ecological restoration after earthquake: a case study of Weizhou Town in Wenchuan County and Hanwang Town in Mianzhu City of Sichuan Province, southwestern China
北京林业大学学报, 2021, 43(5): 53–63. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200289

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250272

西北矿区不同植物配置模式的碳汇潜力评估

刘慧辉[1] 刘 斌[2] 栗 峰[1] 周润霖[2] 邢 友[1] 王春梅[3]
（1. 国家能源集团陕西神延煤炭有限责任公司，陕西 榆林 719315；2. 国能水务环保有限公司，北京 100039；
3. 北京林业大学环境科学与工程学院，北京 100083）

摘要:【目的】探究西北干旱半干旱区不同植物配置模式下的碳汇潜力，为当地生态环境改善及碳汇功能提升提供科学依据。**【方法】**基于前期试验筛选出来的抗旱增碳汇的灌草植物，依据生态位互补和功能协同原则，设计 6 种不同的植物配置模式，并在矿区排土场开展植物群落构建试验，研究植物配置的碳储量及增汇效果。**【结果】**(1)不同植物配置的生物量碳储量为 2.63 ~ 3.24 t/hm^2，分别是对照样地的 1.56~ 1.93 倍。土壤碳密度为 5.98 ~ 8.67 t/hm^2，较对照显著提升($P < 0.05$)。(2)生态系统有机碳储量较高的 3 种植物配置依次是柠条锦鸡儿 + 沙打旺 + 紫花苜蓿 + 高冰草 + 狗尾草、紫穗槐 + 柠条锦鸡儿 + 胡枝子 + 草木樨 + 高冰草 + 狗尾草、胡枝子 + 柠条锦鸡儿 + 沙打旺 + 紫花苜蓿 + 披碱草 + 狗尾草。其有机碳储量分别为 11.62、11.32 和 10.68 t/hm^2，比对照样地有机碳储量平均增加 56.95%。(3)不同植物配置的生态系统均表现为碳汇，碳汇强度 1.41 ~ 2.20 t/hm^2，所有处理平均增加碳汇 51.38%。**【结论】**生态修复过程中，基于科学植物配置充分利用生态位，能够有效提升土壤有机碳密度，增强生态系统的碳汇功能，实现生态修复与碳固持双重目标。

关键词：植物配置；碳储量；生态系统；生物量；土壤；西北矿区
中图分类号：S793 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)04−0064−08
引文格式：刘慧辉，刘斌，栗峰，等. 西北矿区不同植物配置模式的碳汇潜力评估 [J]. 北京林业大学学报，2026，48(4)：64−71. Liu Huihui, Liu Bin, Li Feng, et al. Carbon sink potential assessment of different vegetation configuration patterns in mining areas of northwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(4): 64−71.

Carbon sink potential assessment of different vegetation configuration patterns in mining areas of northwestern China

Liu Huihui[1] Liu Bin[2] Li Feng[1] Zhou Runlin[2] Xing You[1] Wang Chunmei[3]
(1. National Energy Group Shaanxi Shenyan Coal Co. Ltd., Yuling 719315, Shaanxi, China;
2. China Energy Water and Environmental Protection Co. Ltd., Beijing 100039, China;
3. Colleage of Environmental Scinece & Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [**Objective**] To explore the ecosystem carbon storage under different plant configurations, and provide scientific basis for improving the ecological environment and enhancing carbon sink potential in the arid and semi-arid regions of northwestern China. [**Method**] Based on drought-resistant and carbon sequestering shrubs and herbs screened from preliminary experiments, six different plant configuration modes were designed using the principles of niche complementarity and functional synergy. A plant community construction experiment was conducted in a mining dump site to investigate the carbon storage and carbon sequestration effects of these configurations. [**Result**] (1) The biomass carbon storage of different plant configurations ranged from 2.63 to 3.24 t/ha, which was 1.56−1.93 times that of the control

收稿日期: 2025−07−15 **修回日期:** 2025−12−22
基金项目: 国家能源集团科技创新项目(GJNY-22-134)。
第一作者: 刘慧辉，高级经济师。主要研究方向：矿山生态修复。Email: 10019032@ceic.com 地址：719315 国家能源集团陕西神延煤炭有限责任公司。
责任作者: 王春梅，教授，博士生导师。主要研究方向：生态系统碳固持，矿山生态修复。Email: wangcm@bjfu.edu.cn 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学环境科学与工程学院。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

plots. The soil carbon density significantly increased (5.98−8.67 t/ha, $P < 0.05$). (2) The three plant configurations with the highest ecosystem soil organic carbon (SOC) storage were *Caragana korshinskii* + *Astragalus laxmannii* + *Medicago sativa* + *Agropyron elongatum* + *Setaria viridis*; *Amorpha fruticosa* + *Caragana korshinskii* + *Lespedeza bicolor* + *Melilotus officinalis* + *Agropyron elongatum* + *Setaria viridis*; and *Lespedeza bicolor* + *Caragana korshinskii* + *Astragalus laxmannii* + *Medicago sativa* + *Elymus dahuricus* + *Setaria viridis*, with values of 11.62, 11.32, and 10.68 t/ha, respectively, representing an average increase of 56.95% compared to the control plot organic carbon stock. (3) All plant configurations functioned as carbon sinks, with sequestration intensities ranging from 1.41 to 2.20 t/ha. On average, carbon sequestration increased by 51.38% across all treatments. [**Conclusion**] During ecological restoration, scientifically designed plant configurations based on niche utilization can effectively enhance SOC density and strengthen the carbon sequestration capacity of ecosystems, achieving the dual goals of ecological restoration and carbon fixation.

Key words: plant species combinations; carbon storage; ecosystem; biomass; soil; mining areas of northwestern China

“双碳”战略明确提出了碳减排发展目标，即力争 2030 年前实现碳达峰，2060 年前实现碳中和。我国要如期实现这一承诺，提升生态系统碳汇能力、增加固碳储量是关键支撑[1]。然而，露天矿山开采活动破坏地形地貌，剥离植被层，重构土壤结构[2]，导致矿区碳储量急剧流失，已成为陆地生态系统碳汇功能退化的重要源区。尽管矿山生态修复在温室气体自愿减排机制中具有巨大潜力[3]，但既有研究对不同植被配置模式下矿区生态系统碳储量的动态演变规律及其驱动机制仍缺乏全面认知。因此，系统揭示不同植被配置模式的碳汇效应差异及其关键驱动因子，对精准化生态重建及矿区碳汇功能提升具有重要的理论与实践价值。

在西北矿区生态修复实践中，大面积单一种植紫花苜蓿（*Medicago sativa*）或紫穗槐（*Amorpha fruticosa*）的现象较为普遍。这种单一群落结构难以形成有效的垂直分层，导致生态位利用不充分；同时，对特定土壤养分和水分的集中消耗会限制植物生长和生态系统生产力的提升。例如，多年生苜蓿易导致 200 cm 以下土层形成干层[4]，而半干旱黄土区一旦形成干层将很难恢复[5]，进而限制苜蓿生长、导致产量下降，最终引发草地退化[6]。因此，在生态修复初期科学配置植物物种至关重要，这不仅有助于提升生态系统稳定性和生物多样性，还能显著增强碳汇潜力。

植被配置模式通过调控群落结构和土壤过程，对矿区碳汇潜力具有决定性影响。研究[7]表明，高多样性草地土壤碳储量是单物种样地的 5 倍，其中 C_4 禾草和豆科植物分别使碳累积量增加 193% 和 522%，主要归因于根系生物量提升及功能群互补效应导致的土壤深层（60 cm）碳分布集中。类似地，内蒙古退化草原恢复中，豆科沙打旺（*Astragalus laxmannii*）与禾本科高冰草（*Agropyron elongatum*）混播的碳汇效应显著优于单播模式[8]。此外，紫花苜蓿作为西北矿区修复常用豆科植物，单位面积碳储量可达 0.605 kg/m^2[9]。这些研究表明，豆科植物通过固氮作用改善土壤碳氮比，而禾本科植物的密集根系则促进有机碳的固定。因此，豆科与禾本科植物的功能互补是提升矿区生态修复碳汇潜力的关键。

本研究通过群落调查明确当地常见植物种类，并结合生态修复实践，选取 17 种常用植物（10 种草本、7 种灌木）进行田间种植，测定其生长性状、光合生理、生物量及碳储量等指标，运用层次分析法分别对草本和灌木开展抗旱增汇综合评价，筛选适生种类。随后，基于前期筛选获得的 10 种优势植物，依据生态位互补与功能协同原则设计 6 种配置模式，在矿区排土场构建植物群落试验。生长季内，系统监测各模式的土壤理化性质及碳储量，综合评价其碳汇潜力，最终筛选出碳汇效能最优的配置方案。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

研究区位于陕西省北部，属典型大陆性季风气候区，年均气温 7.8 ~ 8.6 ℃，冬季寒冷漫长（持续 5 ~ 6 个月），夏季短暂炎热（平均气温 > 25 ℃）。降水时空分布不均，年降水量 365.7 ~ 440.8 mm，60% 以上集中在 7—9 月，而年潜在蒸发量达降水量的 3 ~ 4 倍。土壤以风沙土和黄黏土为主，呈碱性（pH = 8.2）。土壤有机质（3.2 g/kg）、全氮（0.60 g/kg）、速效磷（0.19 g/kg）及速效钾（116.20 g/kg）等养分匮乏。这种水热失衡与瘠薄的土壤条件对植被恢复构成严峻挑战。

1.2 植物配置设计

2022 年，基于前期试验设置 6 种优化植物配置。T1，柠条锦鸡儿（*Caragana korshinskii*）+ 沙打旺 + 紫花苜蓿 + 高冰草（*Agropyron elongatum*）+ 狗尾草（*Setaria viridis*）；T2，紫穗槐（*Amorpha fruticosa*）+ 柠条锦鸡儿 + 紫花苜蓿 + 草木樨（*Melilotus officinalis*）+ 高羊茅（*Festuca elata*）+ 狗尾草；T3，胡枝子（*Lespedeza bicolor*）+ 柠条锦鸡儿 + 沙打旺 + 紫花苜蓿 + 披碱草（*Elymus dahuricus*）+ 狗尾草；T4，紫穗槐 + 沙打旺 + 高冰草 + 狗尾草；T5，紫穗槐 + 柠条锦鸡儿 + 胡枝子 + 草木樨 + 高冰草 + 狗尾草；T6，紫穗槐 + 草木樨 + 紫花苜蓿 + 高冰草 + 狗尾草。

2023 年，在陕西北部某矿区内排土场开展试验。样地地势平坦，每个处理种植面积约 933 m^2，均采用撒播方式建植。对照样地为自然恢复植被，主要植物包括紫花苜蓿、藜（*Chenopodium album*）、沙蒿（*Artemisia desertorum*）、羊草（*Leymus chinensis*）及狗尾草等。早期所有样地统一进行喷灌管护且灌溉水量无显著差异。6 种配置植物长势良好，生长季末盖度均达到了 95%。

1.3 地上、地下生物量和地表凋落物采集

于 2023 和 2024 年 8 月，采用随机抽样方法设置样方，每个样方面积 1 m × 1 m，设置 3 个平行。采用齐地面刈割法收获地上生物量，并收集对应样方内全部地表凋落物；为采集地下生物量，在每个样方内随机设置 1 个 25 cm × 25 cm 的子样方，完整挖取 0 ~ 30 cm 土层的根系。所有样品经清洗后，在 120 ℃ 条件下杀青 30 min，65 ℃ 烘干至质量恒定，粉碎过 100 目筛备用。

1.4 土壤理化性质与生态系统呼吸样品测定

2023 和 2024 年 8 月份，通过挖土壤剖面，采集 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm 和 20 ~ 30 cm 土层样品，环刀法测定土壤容重。部分土壤样品风干后过 2 mm 筛，然后研磨过 100 目筛，其余样品保存于−80 ℃ 冰箱中备用。为土壤有机碳测定前，样品经稀盐酸处理去除无机碳（碳酸盐）干扰，使用元素分析仪（Vario Macro Cube）测定总碳及有机碳含量。基于 2023 年和 2024 年测得的生态系统碳储量数据，通过比较两个年度碳储量的差值，计算不同植物配置模式下的生态系统碳汇量。

2024 年生长季（4—10 月）采用静态箱法测定不同植物配置模式下生态系统呼吸，采样箱体积为 50 cm × 50 cm × 50 cm（材质为 PVC，底部配不锈钢底架密闭）。取样时间上午 9—11 点，封闭箱体后于 0、10、20 和 30 min 时采集气体样品，带回实验室用 Agilent 7890A 气相色谱仪测定其浓度[10]。

1.5 土壤不同组分碳测定

采用物理分散−粒径分组法分离颗粒有机碳（particulate organic carbon，POC）和矿物结合态有机碳（mineral-associated organic carbon，MAOC）。称取 10.00 g 预处理土样，加入 50 mL 浓度为 5 g/L 的六偏磷酸钠溶液，振荡分散。分散后的悬浊液通过 53 μm 筛网过滤，其中大于和小于 53 μm 的组分分别为 POC 和 MAOC。采用密度分组法分离轻组（light fraction organic carbon，LFOC）和重组（heavy fraction organic carbon，HFOC）有机碳。取 10.00 g 过 2 mm 筛的风干土样放入离心管，加入 50 mL 密度为 1.70 g/cm^3 的 NaI 溶液，振荡离心，离心后收集悬浮的 LFOC，同时保留沉淀的 HFOC，分别称质量。

1.6 有机碳分子结构分析

选取生物量较高的 3 种植物配置（T1、T3 和 T5），采用 ^{13}C 核磁共振波谱（cross-polarization magic angle spinning nuclear magnetic resonance，CPMAS-NMR）分析土壤有机碳化学结构特征。称取 5.00 g 土壤样品，用 2% HF 溶液多次清洗，并进行振荡、离心、过滤，去除顺磁性物质。将沉淀样品冷冻干燥，研磨过 150 μm 筛，用 Bruker Avance III HD 400 MHz 光谱仪测定。从光谱中获得典型结构信息，烷基碳区（0 ~ 45 ppm）、烷氧基碳区（45 ~ 110 ppm）、芳香碳区（110 ~ 165 ppm）以及羧基碳区（165 ~ 210 ppm）[11]。

1.7 土壤微生物群落结构测定

采用 PowerSoil Pro DNA 提取试剂盒从 0.5 g 土壤样品中提取总 DNA。针对细菌群落分析，选用引物 338f（5′-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3′）和 806r（5′-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3′）扩增 16S rRNA 基因 V3 ~ V4 高变区。PCR 扩增程序设置：95 ℃ 预变性 5 min，随后进行 25 个循环扩增（95 ℃ 变性 30 s，55 ℃ 退火 30 s，72 ℃ 延伸 40 s），最后 72 ℃ 终延伸 7 min。扩增产物经纯化后，使用荧光光度计进行定量分析，并在 Illumina NovaSeq 平台进行高通量测序。

1.8 数据分析

采用 SPSS 23.0 进行统计分析，使用 OriginPro 2024 绘制图表。分析前，使用 Levene's 检验和 Mauchly's 检验进行正态性检验，非正态数据在分析前进行了转换。采用单因素方差分析和最小显著性差异分析比较不同植物配置之间的生物量碳储量、土壤有机碳密度、凋落物量、生态系统 CO_2 通量、碳汇量、碳组分及有机碳官能团的差异。结果以平均值 ± 标准差表示，显著性水平为 $P < 0.05$。

2　结果与分析

2.1　不同植物配置对碳储量的影响

不同植物配置显著影响植被生物量及其碳储量，不同植物配置下生物量碳储量为 2.63 ~ 3.24 t/hm^2，是对照样地的 1.56~1.93 倍（图 1a）。T5 和 T6 的地上生物量最高，分别是对照区的 1.41 倍和 1.36 倍；地下生物量则为 CK 的 1.63 倍和 1.97 倍。T5 地上碳储量最高，达 CK 的 2.17 倍；而 T3 的地下碳储量最高，达 CK 的 10.58 倍。植物总碳储量增幅前 3 位依次为 T5、T1 和 T3，较 CK 分别增加 92.9%、75.6% 和 75.0%。

0 ~ 30 cm 土层中，不同植物配置土壤有机碳含量范围为 1.96 ~ 3.71 g/kg，土壤有机碳密度范围为 5.98 ~ 8.67 t/hm^2（图 1b）。其中，T1 配置的土壤有机碳含量（3.71 g/kg）和密度（8.67 t/hm^2）最高，分别为对照的 1.89 倍和 1.45 倍。

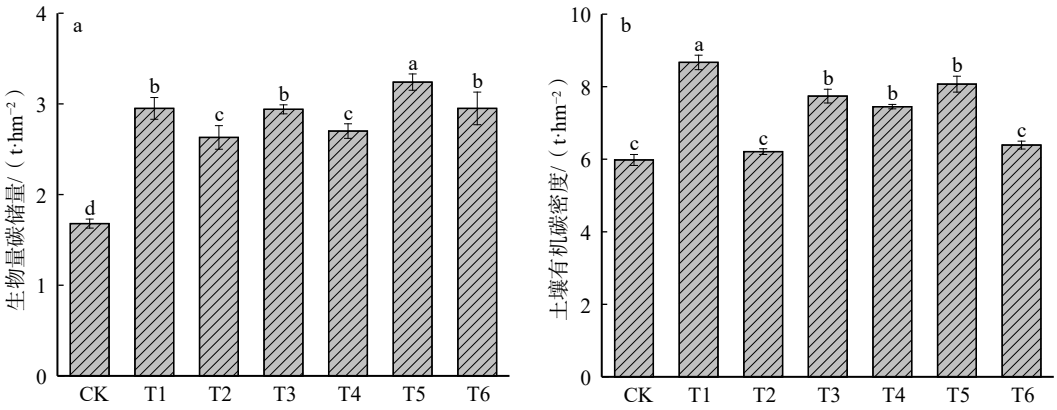
凋落物作为土壤有机碳的重要来源，其生物量在不同植物配置下介于 78.19 ~ 118.83 g/m^2，平均值为 102.19 g/m^2。不同凋落物碳储量范围为 0.18 ~ 0.29 t/hm^2，平均值为 0.23 t/hm^2，较 CK 增加 53.3%（图 2a）。生态系统呼吸通量（以 CO_2 计）范围为 0.61 ~ 0.81 kg/(m^2·a)，均值较 CK（0.42 kg/(m^2·a)）增加 69.28%。其中，T2 最低，T5 最高（图 2b）。

生态系统有机碳储量是生物量、凋落物以及土壤有机碳储量的总和。2024 年，对照样地生态系统有机碳储量为 7.66 t/hm^2（图 3a）。有机碳储量增幅较大的 3 种植物配置依次是 T1、T5 和 T3，分别为 11.62、11.32 和 10.68 t/hm^2。

连续两年生态系统有机碳储量的差值即为碳汇量。2023—2024 年间，对照样地碳汇量为 1.15 t/hm^2，各植物配置均表现为碳汇，范围为 1.41 ~ 2.20 t/hm^2（图 3b）。其中，T3 的碳汇量较 CK 仅增加 6.9%，其余植物配置的碳汇量较 CK 增加了 22.5% ~ 91.2%（平均增加 51.38%）。T1 和 T5 在 2023—2024 年间的增汇潜力最大，分别为 2.20 和 2.18 t/hm^2。

2.2　不同植物配置土壤有机碳组分特征

2024 年，各植物配置均显著影响土壤有机碳组分。与对照相比，各植物配置使土壤轻组有机碳和重组有机碳含量分别增加了 16.22% 和 165.76%（图 4a、b）。土壤颗粒有机碳 和矿物结合态有机碳含量分别增加了 50.23% 和 25.95%（图 4c、d）。不同



柱子上方不同小写字母表示不同植物配置间差异显著（$P < 0.05$）。下同。

图 1　2024 年不同植物配置模式下的生物量碳储量（a）和土壤有机碳密度（b）

Fig. 1　Biomass carbon stock (a) and soil organic carbon density (b) under different species combination patterns in 2024

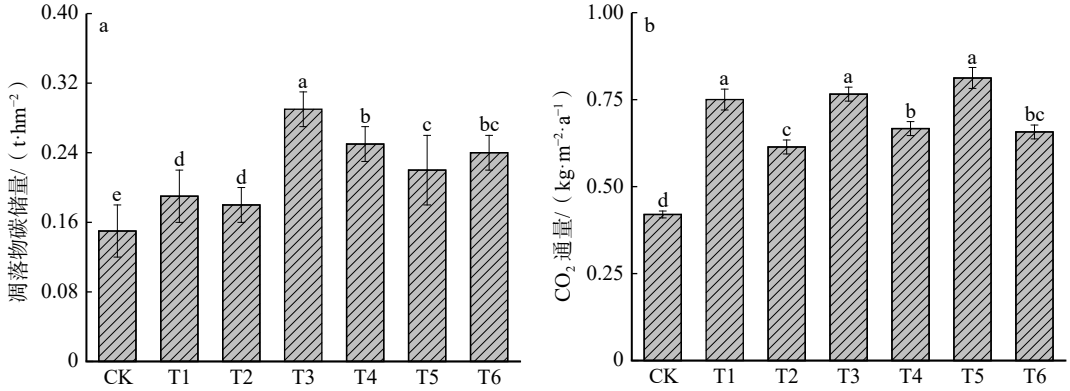
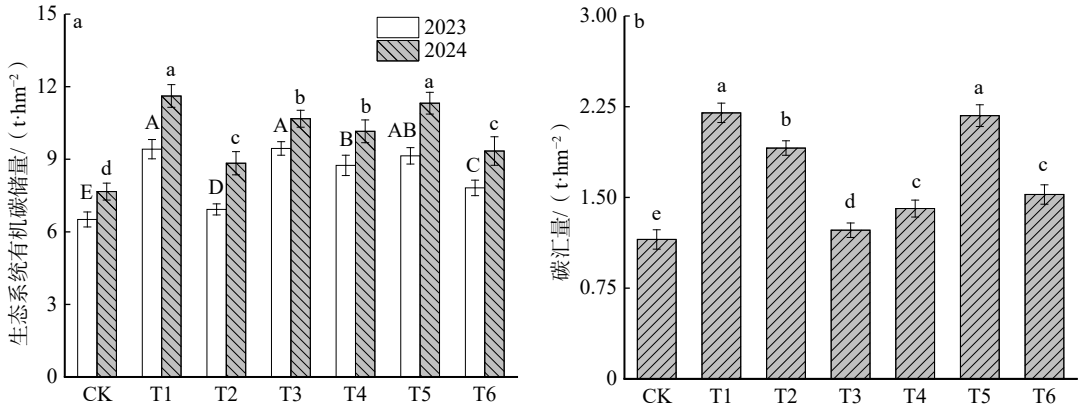


图 2　2024 年不同植物配置模式下的凋落物碳储量（a）和生态系统 CO_2 通量（b）

Fig. 2　Litter carbon stock (a) and ecosystem CO_2 flux (b) under different species combination patterns in 2024



柱子上方不同大写和小写字母分别表示 2023 和 2024 年不同植物配置间差异显著（$P < 0.05$）。碳汇量为2024 年与2023年生态系统有机碳储量的差值。

图 3 2023 和 2024 年不同植物配置生态系统有机碳储量(a)和碳汇量(b)

Fig. 3 Ecosystem organic carbon stocks (a) and carbon sequestration (b) within the ecosystem under different species combination patterns in 2023 and 2024

植物配置处理下，T1、T3 和 T5 植物配置增加幅度最大。

2.3 不同植物配置土壤有机碳分子结构特征

基于^{13}C 核磁共振波谱分析，土壤有机碳官能团可划分为 7 个功能区。对照组烷氧基碳(45~110 ppm)相对含量为 45.4%，T1、T3 和 T5 配置均显著高于 CK，增幅为 2.9%(T5) ~ 19.9%(T3)(图 5)。烷氧基碳主要来源于碳水化合物，属于易分解组分。烷基碳(0~45 ppm)平均占比 29.0%，T5 较 CK 增幅最大(26.5%)，而 T1 与 T3 较 CK 均增加 8.8%。不同植被配置的芳香碳(110~165 ppm)和羧基碳(165~210 ppm)较 CK 显著下降，降幅分别为 18.9% ~ 20.5% 和 9.6%~23.3%。烷基碳、芳香碳与羧基碳主要源于脂类、木质素等难分解物质。

2.4 土壤微生物量碳与群落结构

2024 年，各植物配置土壤微生物量碳平均为 99.99 mg/kg，较 CK(81.53 mg/kg)显著提高 22.59%(图 6a)。

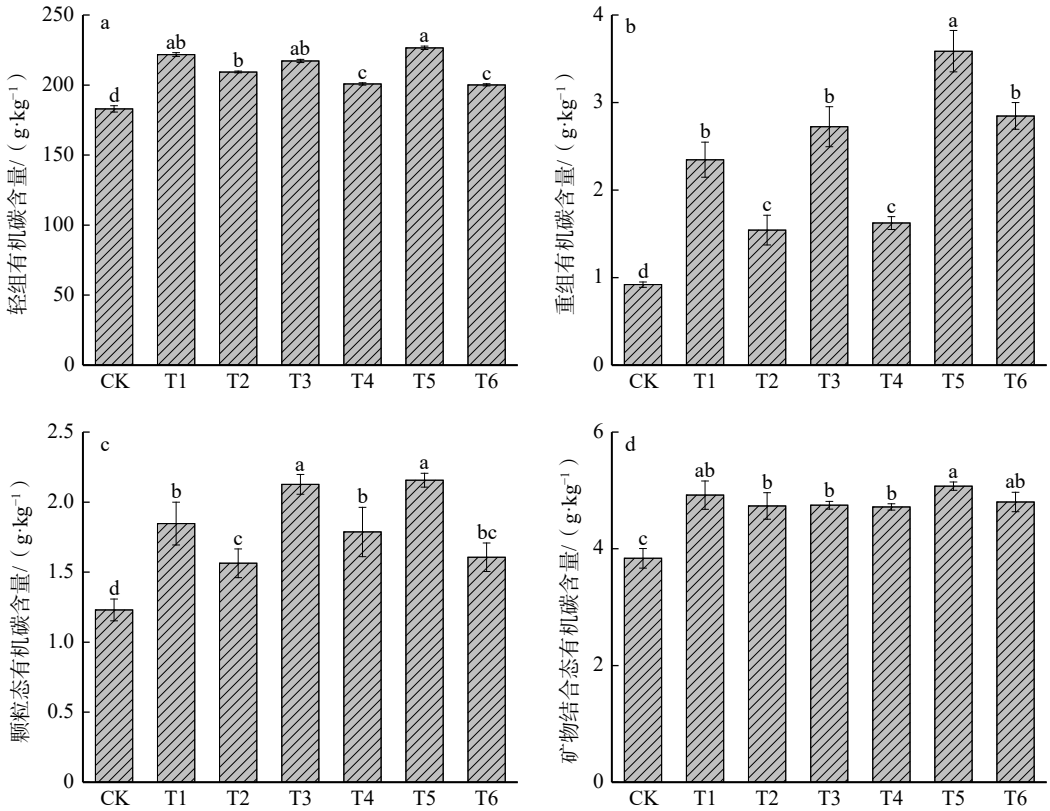


图 4 2024 年不同植物配置下轻重组碳(a、b)和颗粒态碳、矿物结合态碳(c、d)

Fig. 4 Light and heavy fraction organic carbon (a, b) and particulate and mineral-associated organic carbon (c, d) under different plant configurations

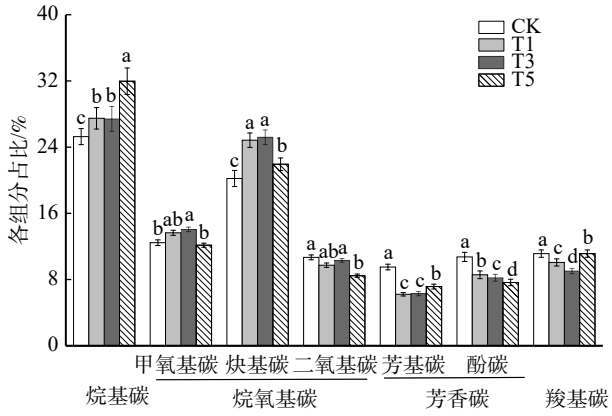


图 5　2024 年不同植物配置下土壤有机碳官能团组成特征

Fig. 5　Characteristics of soil organic carbon functional group compositions under different plant configurations in 2024

细菌群落分析显示（图 6b），变形菌门（Proteobacteria）、放线菌门（Actinobacteria）和芽单胞菌门（Gemmatimonadetes）为优势门。碳汇增效最优的 T1、T3、T5 的变形菌门相对丰度较 CK 无显著变化（$P > 0.05$）。而放线菌门显著增加，表现为 T5 > T3 > T1 > CK（$P < 0.05$）；芽单胞菌门在 T1 和 T3 中显著富集（$P < 0.05$）。此外，各配置 Chao1 指数较对照提升 5.24% ~ 7.24%（$P < 0.05$），群落丰富度显著提高。

3　讨　　论

3.1　科学植物配置增加生态系统碳储量

本研究表明，灌草复层配置通过垂直结构优化显著提升了矿区生态系统碳储量。深根系灌木（柠条，根系深度 4 ~ 5 m）与中根系豆科植物（苜蓿和草木樨，根系深度 2 ~ 3 m）以及浅根系禾草（冰草和狗尾草，根系主要分布在 0 ~ 30 cm 土层）形成了立体根系网络，有效规避资源竞争并促进深层土壤碳固定。同时，功能群互补增强了碳输入稳定性，豆科植物的生物固氮与灌木的深层碳泵效应协同，提升了养分利用效率与碳汇持续性。

在植物配置的时间动态方面，本研究提出阶段性优化策略：修复初期以草本植物（占比 70%）为主导，利用其快速生长特性实现短期碳积累；随着生态系统发育，逐步增加灌木比例（50% 以上），借助木本植物长期稳定的碳储存特性维持生态系统碳库。这种时空优化模式协调了短期积累与长期稳定的权衡，为干旱半干旱区矿区碳汇管理提供了可操作的配置方案。

优化植物配置通过增强碳输入，优化碳分配，显著提升了生态系统碳汇能力（图 7）。本研究中，配置处理碳汇量较对照平均提高 51.38%，其中，T1 和 T5 年际碳汇量分别达 2.20 和 2.18 t/hm^2。这一发现与全球其他地区的相关研究结果相吻合。丹麦黑麦草（*Lolium perenne*）与三叶草（*Trifolium*）混播试验证实，混合种植促进新鲜凋落物向颗粒有机物和矿物相关有机物高效转化[12]。^{13}C 标记研究表明，豆科与禾本科根际互作显著提高了地下生物量的碳储量[13]。此外，稀树灌草生态系统长期观测数据显示，灌木层地下碳储量约为地上部分的 4.55 倍[14]，印证了深根系灌木在本研究中的“碳泵”效应。此外，根际沉积物的数量和组成差异可能会进一步改变灌草生态系统土壤微生物群落组成，进而影响有机碳的稳定性与积累效率[15]。

3.2　植物–微生物协同效应提升土壤碳储量

灌草科学配置通过“碳输入–稳定性–微生物调控”三重机制提升土壤碳储量。其一，多层次碳输入优化。地上部分，灌木（如柠条）木质化程度高，分解慢，利于稳定碳库形成；而草本（如苜蓿、高冰草）凋落物周转速度快，短期碳输入量大。地下部分，中、深根系灌木（ > 2 m）将碳固定于深层土壤，减少分解

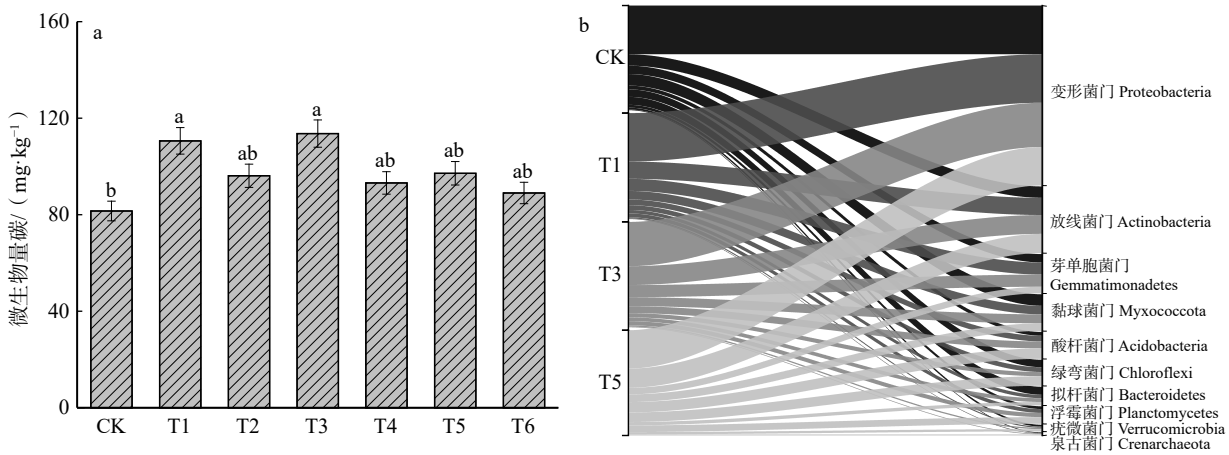
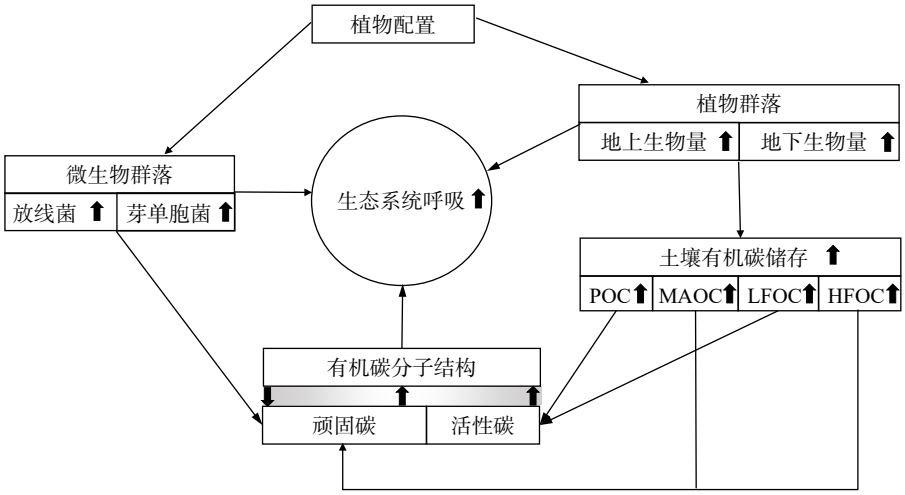


图 6　2024 年不同植物配置土壤微生物量碳（a）与微生物群落结构（b）

Fig. 6　Soil microbial biomass and carbon (a) in different plant configurations, and soil microbial community structure(b) in 2024



图中文字旁向上和向下的箭头分别表示增加和降低。POC. 颗粒有机碳；MAOC. 矿物结合态有机碳；LFOC. 轻组有机碳；HFOC. 重组有机碳。

图 7 生态修复中植物配置对土壤碳循环的影响机制概念图

Fig. 7 Conceptual diagram of plant configuration effects on soil carbon input-output dynamics and sequestration mechanisms in ecological restoration

损失；浅根系草本(0 ~ 30 cm)促进表层碳积累，二者形成垂直碳分配的互补效应。其二，碳稳定性多路径增强。物理保护方面，灌木根系促进土壤团聚体形成，增强矿物结合态有机碳对物理分解的抵抗。化学稳定性方面，大量新鲜凋落物输入土壤，提升烷氧基碳比例，而烷氧基碳通过 C—O 键断裂(如水解、氢解)转化为烷基碳(如生成醇或烃)，提升抗降解性。微生物固存方面，微生物量增加意味着更多微生物残体碳的加入，持续扩充稳定碳库。其三，关键微生物功能群富集。本研究发现，碳汇最优配置(T1、T5)中放线菌门与芽单胞菌门显著富集。放线菌分泌纤维素酶与木质素过氧化物酶，分解灌木木质化组织，降解顽固性有机碳[16]，其丰度与土壤有机碳含量显著正相关[17]。芽单胞菌门作为土壤中广泛分布的寡营养细菌，偏好利用土壤中的易降解碳(如根系分泌物)，与放线菌形成功能互补[18]。此外，部分菌属(如 *Bacillus subtilis*)产生糖苷水解酶，参与简单碳源利用[19]。T5 配置中放线菌增幅最大，与其高灌木占比和木质凋落物输入相匹配，印证了植物配置通过调控微生物功能群结构实现固碳的机制。

4 结 论

(1)优化植物配置显著提升生态系统碳储量。6 种配置的生物量碳储量达 2.63 ~ 3.24 t/hm^2，是对照的 1.56 ~ 1.93 倍；土壤有机碳密度为 5.98 ~ 8.67 t/hm^2，较对照显著增加($P < 0.05$)。

(2)碳汇效能最优的 3 种配置依次为 T1(柠条锦鸡儿 + 沙打旺 + 紫花苜蓿 + 高冰草 + 狗尾草)、T5(紫穗槐 + 柠条锦鸡儿 + 胡枝子 + 草木樨 + 高冰草 + 狗尾草)和 T3(胡枝子 + 柠条锦鸡儿 + 沙打旺 + 紫花苜蓿 + 披碱草 + 狗尾草)，其生态系统有有机碳储量分别为 11.62、11.32 和 10.68 t/hm^2。

(3)不同植物配置的生态系统均表现为碳汇，碳汇强度 1.41 ~ 2.20 t/hm^2，较对照平均提升 51.38%。

灌木(豆科)与草本(禾本科)功能群配置可充分利用生态位时空异质性，通过凋落物−根系多途径碳输入、土壤结构改良及微生物群落定向调控，实现生态修复与碳固持的协同增效，为干旱半干旱矿区生态重建提供了理论依据与技术模式。

参 考 文 献

[1] 刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 等. 碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望 [J]. 环境科学, 2022, 43(4): 2237−2240, 2242−2250.
Liu X H, Yan Y J, Liu W, et al. System construction and the function improvement of ecological carbon sink in coal mining areas under the carbon neutral strategy[J]. Environmental Science, 2022, 43(4): 2237−2240, 2242−2250.

[2] 李季. 桥山富平段废弃矿山地质环境问题及生态修复技术研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2023.
Li J. Research on geological environment problems and ecological restoration technology of abandoned mines in Fuping section of Qiaoshan Mountain[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2023.

[3] 苏军德. 矿山废弃地生态修复区植被碳库研究 [J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 234−237.
Su J D. A study on vegetation carbon storage in ecological restoration area of abandoned mines [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 234−237.

[4] 李玉山. 苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应 [J]. 土壤学报, 2002, 39(3): 404−411.
Li Y S. Productivity dynamic of alfalfa and its effects on water eco-environment [J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(3): 404−411.

［5］ 王力, 邵明安, 侯庆春. 土壤干层量化指标初探 [J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 87−90.
Wang L, Shao M A, Hou Q C. Preliminary study on quantitative index of soil dry layer [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(4): 87−90.

［6］ Jia X, Zhao C, Wang Y, et al. Traditional dry soil layer index method overestimates soil desiccation severity following conversion of cropland into forest and grassland on China's Loess Plateau[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 291: 106794.

［7］ Fornara D A, Tilman D. Plant functional composition influences rates of soil carbon and nitrogen accumulation [J]. Journal of Ecology, 2008, 96(2): 314−322.

［8］ 岳淑芳. 不同模式豆∶禾混播草地牧草光合生理生态特性及种间关系的研究 [D], 银川: 宁夏大学, 2015.
Yue S F. Studies on eco-physiological characteristics and interspecific relationship for forages of different patterns of legume-grass mixture grassland[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2015.

［9］ 苏力德. 不同品种苜蓿人工草地地下碳储量比较研究: 以阿鲁科尔沁旗为例 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024.
Su L D. Comparative study on underground carbon storage of different alfalfa cultivars in artificial grassland: A case study of arukerqin banner [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.

［10］ Wang C, Yang X, Xu K, Effect of chronic nitrogen fertilization on soil CO_2 flux in a temperate forest in North China: a 5-year nitrogen addition experiment[J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18(2): 506−516.

［11］ Qiu J, Song M, Wang C, et al. Five-year warming does not change soil organic carbon stock but alters its chemical composition in an alpine peatland [J]. Pedosphere, 2023, 33(5): 776−787.

［12］ Mortensen E Ø, Abalos D, Engedal T, et al. Smart mixture design can steer the fate of root-derived carbon into mineral-associated and particulate organic matter in intensively managed grasslands [J]. Global Change Biology, 2025, 31(3): e70117.

［13］ Mortensen E Ø, Abalos D, Rasmussen J. Well-designed multi-species grassland mixtures enhance both soil carbon inputs and aboveground productivity[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2025, 385: 109578.

［14］ 金艳强, 李敬, 张一平, 等. 元江干热河谷稀树灌草丛植被碳储量及净初级生产力 [J]. 生态学报, 2017, 37(17): 5584−5590.
Jin Y Q, Li J, Zhang Y P, et al. Carbon storage and net primary productivity of a savanna ecosystem in a dry-hot valley in Yuanjiang, Yunnan [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(17): 5584−5590.

［15］ Xiao M M, Li F C, Jia B, et al. Decreasing carbon allocation belowground in alpine meadow soils by shrubification [J]. Geoderma, 2024, 443: 116810.

［16］ 占奥丽, 黄敏, 尹龙, 等. 土壤碳循环微生物作用研究进展 [J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(4): 70−81.
Zhan Q L, Huang M, Yin L, et al. Roles of microorganisms in carbon cycling in soil [J]. Jorunal of Huazhong Agricultural University, 2024, 43(4): 70−81.

［17］ Zhang B, Wu X, Tai X, et al. Variation in actinobacterial community composition and potential function in different soil ecosystems belonging to the arid Heihe River Basin of northwest China [J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10: 2209.

［18］ Bao Y, Sáez-Sandino T, Feng Y, et al. Gemmatirosa adaptations to arid and low soil organic carbon conditions worldwide [J]. Geoderma, 2025, 460: 117420.

［19］ Zhang H, Zhu T, Zhai Q, et al. Two-step computational redesign of *Bacillus subtilis* cellulase and β-glucanase for enhanced thermostability and activity [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 285: 138274.

（责任编辑　孟　瑶
责任编委　董世魁）