

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2026.05.006

CSTR: 32310.14.stbxb.2026.05.006

张诗琦, 陈相霖, 张轲, 等. 水热梯度下刺槐林植物碳水化合物分配及对凋落物的影响[J]. 水土保持学报, 2026, 40(5): 292-300.

Zhang Shiqi, Chen Xianglin, Zhang Ke, et al. Carbohydrate allocation in *Robinia pseudoacacia* plantations and its impact on litter under hydrothermal gradients[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(5): 292-300.

水热梯度下刺槐林植物碳水化合物 分配及对凋落物的影响

张诗琦¹, 陈相霖¹, 张轲^{2,3,4}, 王国梁^{1,2,3}, 刘国彬^{1,2,3}, 刘莹^{1,2,3}

(1. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院(水土保持研究所), 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: [目的] 凋落物碳水化合物组成对黄土高原人工林土壤碳储量具有显著影响, 但该区域在水热梯度变化下, 人工林乔灌草碳水化合物组成的空间分布及其对凋落物碳水化合物储量的影响尚不明确。[方法] 对比了黄土高原3个植被带刺槐人工林乔灌草各器官(叶、枝、根)非结构性碳水化合物(NSC)与结构性碳水化合物(SC)的储量差异, 并分析其对地上凋落物碳水化合物储量的影响。[结果] 各植被带刺槐人工林碳水化合物储量以乔木层为主导, 贡献比例达92%。乔灌草碳水化合物组成均以SC为主, 但灌草SC储量仅为乔木的3%~8%。人工林地下碳水化合物储量显著高于地上, 其中乔木和灌木的地上碳水化合物储量均随水热条件改善而显著增加, 地下部分仅乔木SC储量和灌木NSC储量呈显著增加趋势。不同植被带对比表明, 草原区受水分胁迫限制, 碳水化合物总储量最低, 森林草原区储量显著提升, 森林区在水热与土壤养分协同作用下, 碳水化合物总储量达到最高水平。草地上NSC及乔灌草地上SC储量是驱动不同植被带地上凋落物碳水化合物储量变化的关键因子, 可显著促进表层土壤有机碳的积累。[结论] 水热梯度可通过调控乔灌草碳水化合物分配策略, 改变凋落物碳输入结构, 进而调控土壤有机碳积累。

关键词: 黄土高原; 刺槐人工林; 复层植被; 结构性碳水化合物; 非结构性碳水化合物; 凋落物

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0292-09

Carbohydrate Allocation in *Robinia pseudoacacia* Plantations and Its Impact on Litter under Hydrothermal Gradients

Zhang Shiqi¹, Chen Xianglin¹, Zhang Ke^{2,3,4}, Wang Guoliang^{1,2,3}, Liu Guobin^{1,2,3}, Liu Ying^{1,2,3}

(1. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering (Institute of Soil and Water Conservation), Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] The carbohydrate composition of litter plays a critical role in regulating soil carbon storage in plantations on the Loess Plateau. However, the spatial distribution of carbohydrate composition among tree, shrub, and herb layers under varying hydrothermal gradients, as well as its influence on litter carbohydrate storage, remains poorly understood. [Methods] Storage differences of non-structural carbohydrates (NSC) and structural carbohydrates (SC) in leaves, branches, and roots of trees, shrubs, and herbs in *Robinia pseudoacacia* plantations across three vegetation zones on the Loess Plateau were compared, and their contributions to

收稿日期: 2026-02-08

修回日期: 2026-03-03

录用日期: 2026-03-10

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-07-10

资助项目: 国家自然科学基金重点项目(42130717); 国家自然科学基金面上项目(42577397)

第一作者: 张诗琦(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态系统碳汇研究。E-mail: zhangshiqi@nwfau.edu.cn

通信作者: 刘莹(1984—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事植物生理生态响应和森林生态系统碳水循环研究。E-mail: ying.liu@nwfau.edu.cn

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

aboveground litter carbohydrate storage were analyzed. [Results] Carbohydrate storage in *R. pseudoacacia* plantations across all vegetation zones was dominated by the tree layer, accounting for approximately 92% of the total storage. SC predominated in all vegetation layers, whereas the SC storage of shrubs and herbs accounted for only 3% – 8% of that in trees. Overall, belowground carbohydrate storage was significantly greater than aboveground storage. Aboveground carbohydrate storage in trees and shrubs increased significantly with improving hydrothermal conditions, while in the belowground parts, only tree SC and shrub NSC storage showed a significant increasing trend. Comparisons among different vegetation zones indicated that the grassland area, limited by water stress, had the lowest total carbohydrate storage. The forest-grassland area showed a significant increase in storage. In the forest area, driven by the combined effects of hydrothermal conditions and soil nutrients, total carbohydrate storage reached its highest level. Aboveground NSC in the herb layer and aboveground SC in all vegetation layers were key drivers of litter carbohydrate storage variations and significantly enhanced the accumulation of surface soil organic carbon. [Conclusion] The hydrothermal gradients can regulate the carbohydrate allocation strategies of trees, shrubs, and herbs, alter litter carbon input structures, and thereby influence soil organic carbon accumulation.

Keywords: Loess Plateau; *Robinia pseudoacacia* plantations; multilayered vegetation; structural carbohydrates; non-structural carbohydrates; litter

Received: 2026-02-08

Revised: 2026-03-03

Accepted: 2026-03-10

Online(www.cnki.net): 2026-07-10

黄土高原作为我国典型的干旱半干旱生态脆弱区,植被恢复是其生态治理主要措施之一。自1999年退耕还林还草工程实施以来,黄土高原植被覆盖率已从31.6%显著提高至约65%^[1]。刺槐(*Robinia pseudoacacia*)人工林因生长迅速、固氮能力强、水土保持效果显著等优势,被大面积推广种植,成为黄土高原生态修复的主要树种,覆盖黄土高原约60%的森林,在水土保持与碳循环过程中发挥重要作用^[2-3]。

植被的冠层复层结构(乔灌草)不仅决定光合碳的捕获效率,更调控碳水化合物在地上与地下器官间的分配模式,是生态系统碳循环过程中的核心调节环节。碳水化合物作为植物光合产物的核心载体,主要分为非结构性碳水化合物(non-structural carbohydrates, NSC)和结构性碳水化合物(structural carbohydrates, SC),其组分分配直接关系到植物的生长发育、抗逆调节及生态系统碳输入过程^[4-5]。此类物质的合成、储存与周转,受到水热条件和土壤养分等环境因子的精准调控,进而呈现出因植物生长策略与构建成本差异而有的适应性分配模式^[6]。水热梯度不仅影响光合作用强度,还影响植被对碳资源的分配策略:在干旱限制条件下,复层植被更多将碳分配至地下强化根系吸水能力,提升抗逆性,在水热改善条件下乔木可将更多碳投入到地上结构性组分以支持生长积累^[7],而灌木与草本植物则倾向于将碳储存于非结构性部分,以应对遮阴与竞争的林下环境^[8]。表明植物会根据其生长策略和应对环境

变化的需求来调整NSC和SC比例。然而,目前关于黄土高原刺槐人工林的研究多数聚焦在乔木层碳积累对生态系统碳库的贡献^[7],对复层植被中灌木与草本的碳水化合物响应及其对凋落物NSC、SC碳库输入的影响关注不足,限制了对复层植被地上-地下碳水化合物动态与生态系统碳循环过程之间耦合关系的理解。

刺槐人工林冠层乔灌草在光合产量、器官功能分工及凋落动力学特征上存在显著差异,该差异直接导致三者碳分配策略的显著分化。乔木叶片作为核心光合与碳输出器官,是凋落物碳输入质量与数量的主要决定因素^[9-10];而灌木与草本器官虽然生物量较小,但其高周转性NSC在短期碳循环中占据重要地位^[11]。进一步从碳水化合物组分功能分化来看,不同器官的NSC、SC周转速率也显著不同:SC作为植物长期碳库,主要构成细胞壁结构,其周转速率缓慢、稳定性强^[4,7],而NSC作为短期能源库,周转速率快,环境响应灵敏^[4,12]。在冠层复层结构中,乔灌草不同器官的NSC与SC周转特征,不仅调控乔灌草自身的生理适应策略,更决定各组分对凋落物碳库的贡献质量与数量;并通过调控凋落物分解速率与微生物利用效率,间接影响土壤有机碳的积累过程与稳定性^[13]。例如,乔木凋落物以SC为优势组分,具有极强的化学稳定性和抗微生物降解能力,分解速率缓慢,其木质素等组分可与土壤黏土矿物形成稳定的矿质有机复合体,显著促进土壤稳定碳库

的形成^[14];而灌木与草本输入的 NSC 可快速为土壤微生物提供易利用碳源,加速凋落物初期分解进程,进而调控土壤微生物活性与碳固存效率^[15]。然而,当前针对水热梯度驱动下,刺槐人工林乔灌草地上-地下 NSC、SC 的分配格局及其对凋落物碳库的贡献机制缺乏系统性研究。因此,从冠层复层及器官尺度,系统解析刺槐林碳水化合物空间分布特征对凋落物影响,对于深入理解黄土高原植被带碳汇管理具有重要意义。

本研究选取黄土高原草原区、森林草原区和森林区 3 个典型植被带刺槐人工林为研究对象,系统测定乔木、灌木、草本的叶、枝、根 NSC、SC 储量及 NSC/SC 比值,旨在揭示水热条件和土壤养分因子对刺槐碳水化合物组分空间分配的影响规律,并定量分析地上植物碳水化合物对凋落物碳水化合物储量的影响,以阐明刺槐人工林碳汇组分空间分布的环境适应性机制,对理解刺槐人工林碳汇功能优化及生态系统碳循环机制具有重要意义。

表 1 不同植被带环境因子差异

Table 1 Differences of environmental factors among different vegetation zones

植被带	MAP/mm	MAT/℃	pH	含水量/%	SOC/(g·kg ⁻¹)	TN/(g·kg ⁻¹)	AP/(mg·kg ⁻¹)
草原区	424.6	10.75	8.28±0.09c	8.04±3.12b	5.08±0.94a	0.36±0.11b	1.43±0.86c
森林草原区	511.7	11.68	8.21±0.07b	9.11±1.05b	6.49±2.46a	0.43±0.16b	2.35±1.04b
森林区	597.3	12.38	8.15±0.05a	16.23±2.14a	10.06±1.03a	0.65±0.21a	3.50±0.87a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示不同植被带间差异显著($p<0.05$);MAP 为年平均降水量;MAT 为年平均气温。

1.2 样地设置与样品采集

在每个采样点分布均匀的刺槐林中设置 3 个刺槐树龄在 20 a 左右,种植密度约为 1 500 株/hm²的样地,共 36 个。每个样地内设置 20 m×20 m 的乔木样方,5 m×5 m 灌木样方与 1 m×1 m 草本样方。对每个乔木样方进行每木检尺,并选取 3 株标准木,用高枝剪在树冠处采集枝和叶,并用直径 90 mm 根钻挖取 1 m 深乔木根,分器官(叶、枝、根)均匀混合。用全收获法采集样方内灌木的叶、枝、根及草本的地上与地下部分。收集 50 cm×50 cm 样方内所有凋落物。将上述采集的植物样品于 105 ℃杀青 30 min,65 ℃烘干至恒重,称重并推算单位面积生物量之后进行粉碎处理。每个样方按土壤分层采集土壤样品:去除土层上枯落物,用土钻按 0~20 cm 采集土样,密封后带回实验室。土壤样品自然风干后,仔细除去细根、砾石等杂物,然后研磨过筛待测。

1.3 指标测定方法

1.3.1 植物生物量计算 灌木、草本及凋落物层分别采取收获法收集生物量。乔木选用李泰君^[16]的研究中所建立的异速生长方程计算不同植被带刺槐生

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原位于中国北方干旱半干旱地区,面积达 64 万 km²,具有明显的地带性差异。年平均降水量为 360.3~642.6 mm,年内降雨分配不均,且多集中在 7—9 月,自南向北降雨量逐渐降低。年平均气温为 9.7~13.2 ℃,气温年较差大,太阳辐射量充足,蒸散发量为 976.8~1 097.9 mm。从南到北因水热条件差异依次形成森林区、森林草原区、草原区 3 个植被带。本研究在每个植被带选取 4 个刺槐纯林样点,其中选取吉县、富县、永寿和天水作为森林带的典型采样点,吴起、安塞、兴县和庆城作为森林草原带的典型采样点,会宁、神木、定边和环县作为草原带的典型采样点。不同植被带环境因子差异见表 1。该区域土壤类型以黄绵土及褐色森林土为主,各区灌木主要有白芨梢(*Buddleja alternifolia*)、悬钩子(*Rubus corchorifolius*)和胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等;草本植被包括披针苔草(*Carex lancifolia*)、茜草(*Rubia cordifolia*)和臭草(*Melica scabrosa*)等优势种。

物量,计算公式为:

$$\ln M = a + b \ln DBH$$

式中: M 为生物量,kg;DBH 为胸径,cm; a 、 b 分别为异速生长模型系数与指数,最小二乘回归模型用于估计 a 与 b 的值。

1.3.2 碳水化合物储量计算方法 淀粉、可溶性糖和纤维素含量采用蒽酮比色法测定,以葡萄糖标准溶液浓度为基准计算得出^[7];木质素含量采用重量分析法(Klason 法)^[17]测定。

碳水化合物储量为各个器官碳水化合物含量乘以对应器官生物量;NSC 储量为可溶性糖与淀粉储量之和;SC 储量为纤维素与木质素储量之和。

1.3.3 土壤理化性质测定 土壤有机碳(SOC)用 H₂SO₄-K₂Cr₂O₇氧化法测定;土壤全氮(TN)经 H₂SO₄消煮 1 h 后,用凯氏定氮仪测定;土壤速效磷(AP)经 NaHCO₃浸提后,用分光光度计测定;土壤 pH 用电位法测定;土壤体积质量和含水量(SWC)均用烘干法测定。

1.4 数据处理与统计分析

采用 Excel 软件进行数据统计,SPSS 软件进行单因素方差分析(ANOVA)比较不同植被带的指标

差异, Pearson相关分析碳水化合物与影响因素的相关性, 利用 Origin 2021 软件作图。采用 Canoco 5 软件对不同植被带凋落物碳水化合物与地上植物器官碳水化合物进行冗余分析(RDA), 以识别对凋落物碳水化合物有关键贡献的地上植物器官。

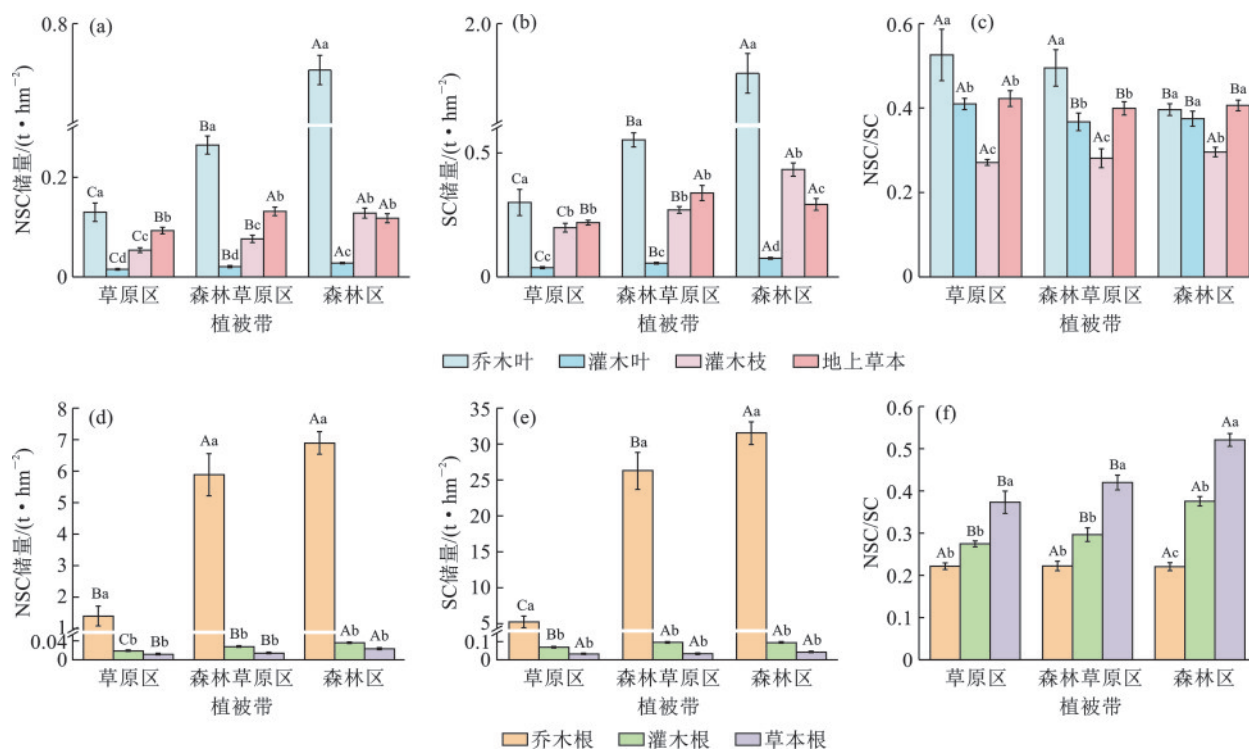
2 结果与分析

2.1 不同植被带乔灌草地上地下碳水化合物储量差异

不同植被带植物地上器官碳水化合物储量总体为乔木叶>地上草本>灌木枝、叶(图1a~图1c), SC

储量高于NSC储量, 且乔木叶、灌木叶和地上草本层NSC/SC从草原区到森林区不断下降。地上各器官NSC和SC储量在森林区显著增加。

不同植被带乔灌草根系的碳水化合物储量整体呈乔木根>灌木根>草本根(图1d~图1f)。乔木、灌木和草本根NSC储量在森林区显著高于草原区; 乔木和灌木根SC储量在森林区显著增加。整体SC储量占比更高, 灌木和草本根系的NSC/SC从森林草原区至森林区显著上升。



注: 图柱上方不同大写字母表示相同器官不同植被带间差异显著($p < 0.05$); 不同小写字母表示相同植被带不同器官间差异显著($p < 0.05$)。

图1 不同植被带植物碳水化合物储量

Fig.1 Carbohydrate storage of plants in different vegetation zones

2.2 不同植被带凋落物碳水化合物储量差异

森林草原区地上凋落物NSC和SC储量显著高于森林区, 在草原区最低(图2)。森林草原区地上凋落物NSC/SC比值最高。森林区和森林草原区地下凋落物NSC储量显著高于草原区; 森林区地下凋落物SC储量最高, 显著高于森林草原区, 在草原区最低。

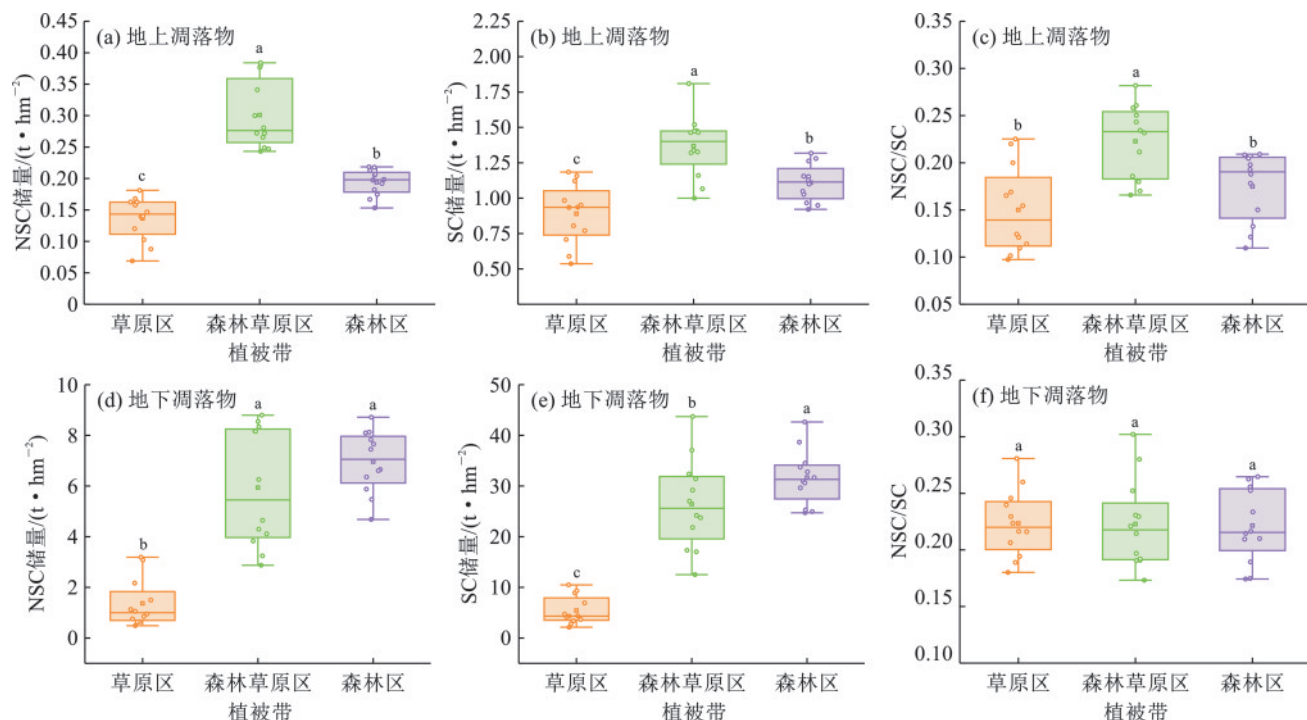
2.3 环境因子对植物地上和地下碳水化合物储量的影响

不同植被带植物地上、地下器官碳水化合物储量与环境因子的相关性存在显著区域分异与器官差异(图3)。草原区地上草本和乔木叶NSC、SC主要受水分影响(MAP、SWC), 草本根系碳水化合物储量与MAP、SWC、SOC呈显著正相关; 森林草原区乔木叶碳水化合物储量与MAP、SOC、AP呈显著正相关, 草本根系碳水化合物储量与MAP、SOC呈显著正相关; 森林区乔木叶和根NSC分别与MAP、SOC、AP及MAP、MAT、SOC

呈显著正相关, 灌木叶SC与MAT、SWC、SOC呈显著正相关, 根NSC与MAT、SWC呈显著正相关。

2.4 不同植被带植物碳水化合物对凋落物碳水化合物的影响

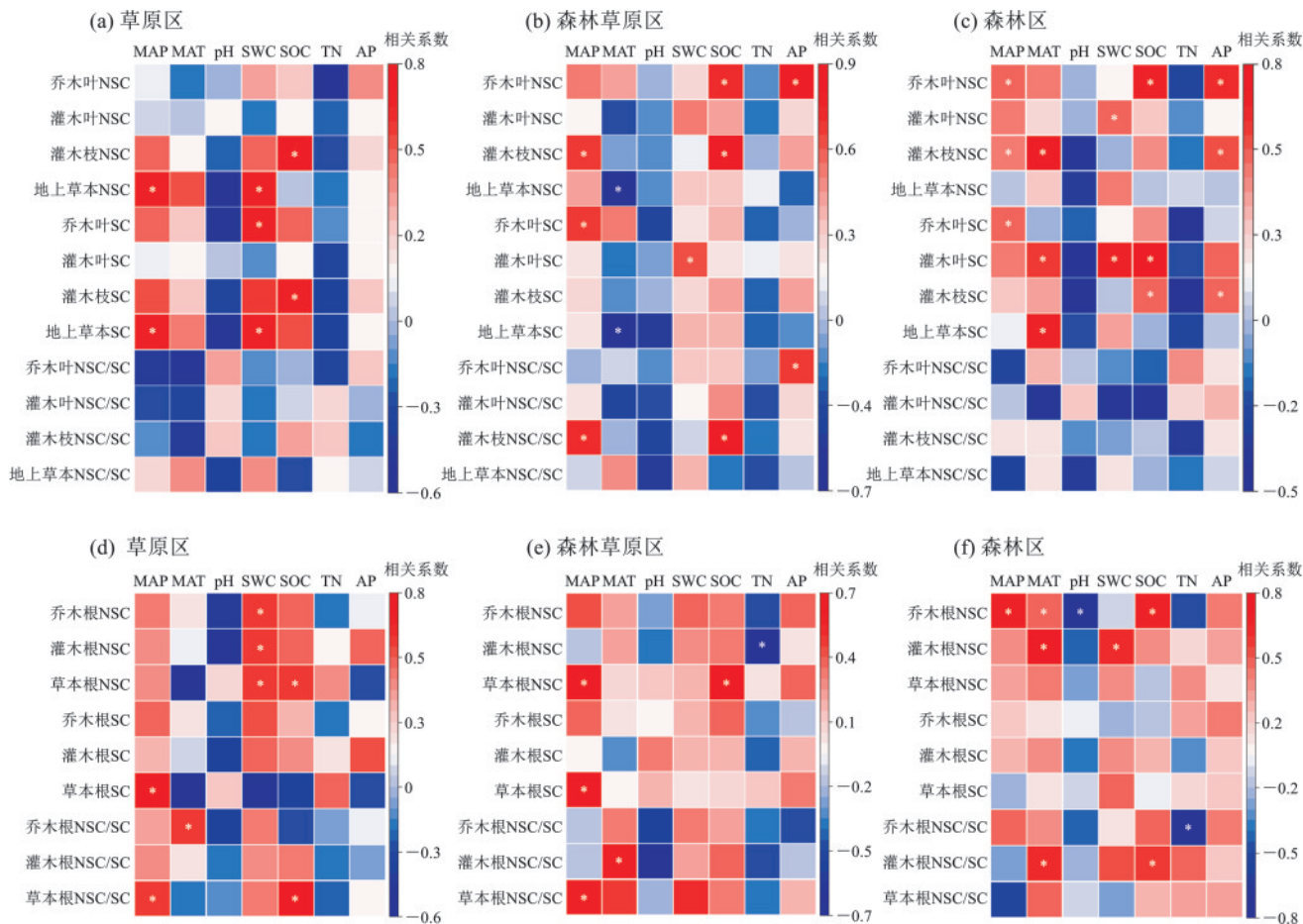
RDA分析表明, 地上植物对凋落物碳水化合物变异的解释率总体较高(84.08%~92.37%), 森林区最高(图4)。草原区前2轴总解释率87.82%, 乔木叶SC(贡献37.00%)、地上草本SC(贡献20.40%)均与凋落物SC呈显著正相关; 森林草原区前2轴总解释率84.08%, 乔木叶SC(37.20%)、地上草本NSC(28.50%)影响显著, 前者与凋落物碳水化合物呈显著正相关, 后者与凋落物SC呈正相关, 与凋落物NSC呈负相关; 森林区前2轴总解释率92.37%, 乔木叶SC(29.70%)、灌木叶SC(20.40%)均与凋落物碳水化合物呈显著正相关。



注: 线箱图箱体为 25%~75% 分位数, 上下须线为最大值和最小值, 箱体中横线为中值线, 方框为平均值; 图中不同小写字母表示不同植被带间差异显著 ($p < 0.05$)。

图 2 不同植被带凋落物碳水化合物储量及其比值

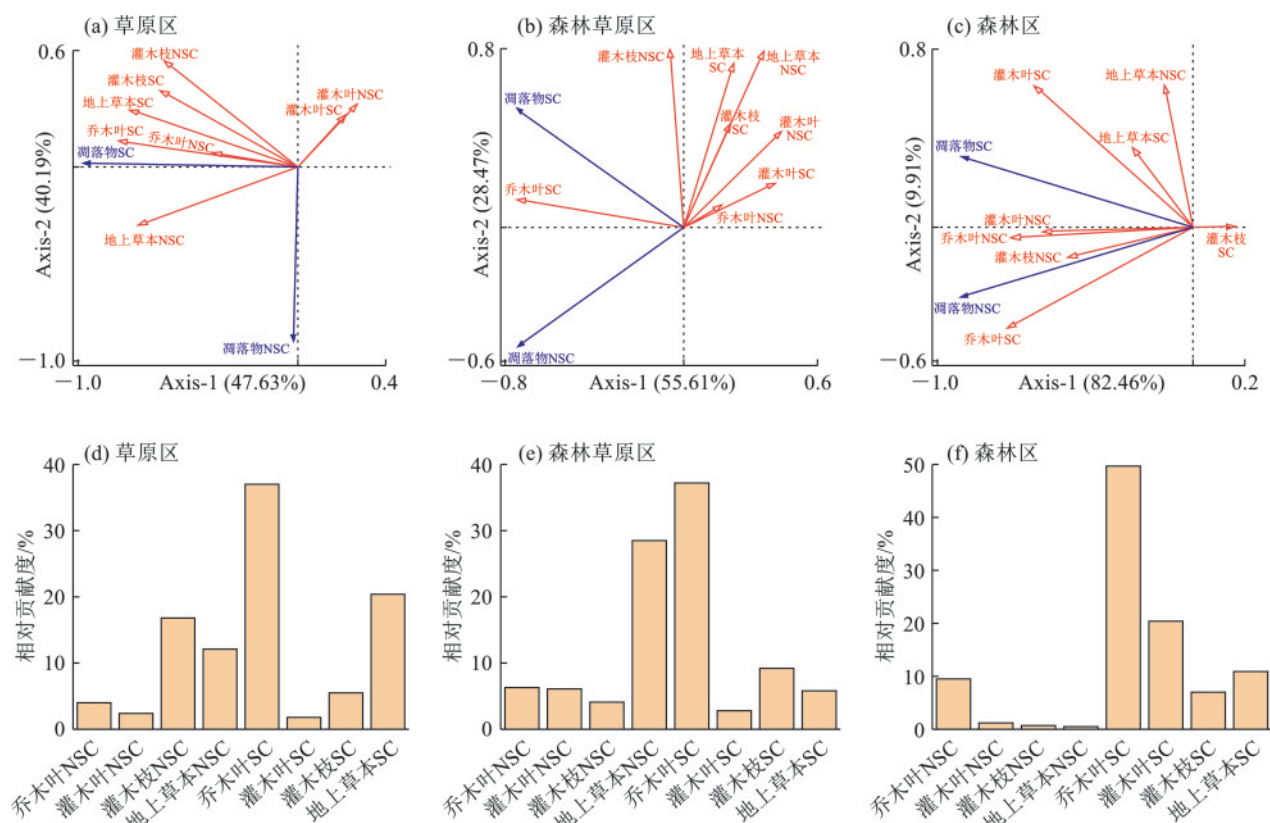
Fig.2 Carbohydrate storage and ratios of litter in different vegetation zones



注: *表示 $p < 0.05$ 。

图 3 不同植被带植物碳水化合物储量影响因素

Fig.3 Influencing factors on carbohydrate storage of plants in different vegetation zones



注:(a)(b)(c)分图中红色箭头表示植物不同器官的结构性碳水化合物(SC)和非结构性碳水化合物(NSC)指标;蓝色箭头表示凋落物SC和NSC指标;Axis-1、Axis-2分别为排序轴及其解释率;箭头夹角 $<90^{\circ}$ 代表正相关, $>90^{\circ}$ 代表负相关。

图4 不同植被带植物碳水化合物对凋落物碳水化合物的影响及其贡献度

Fig.4 Influences of plant carbohydrates on litter carbohydrates and their contribution rates in different vegetation zones

3 讨论

3.1 刺槐人工林乔灌草碳水化合物的区域差异特征

沿黄土高原草原区-森林草原区-森林区的环境梯度,水热条件与土壤养分逐步优化,驱动植物碳水化合物(NSC、SC)调控机制从单一因子主导向多因子协同转变,同时冠层植物碳水化合物储量呈现显著增加,反映乔灌草对不同环境梯度的适应性碳分配策略。在草原区,水分胁迫(MAP、SWC)是主要限制因子,植物倾向于采取保守策略^[18],主要是草本碳水化合物组分响应环境变化,与Liu等^[19]研究中黄土高原草本有更强的干旱适应性及快速碳周转能力密切相关;乔木仅叶片SC对SWC有响应,其光合过程受显著限制,叶片NSC、SC难以实现碳固定积累,反而通过主动消耗为植株基础生理代谢供能,成为刺槐应对水分逆境的关键碳分配策略^[20]。森林草原区水热条件改善,形成水热和土壤养分双因子驱动;冠层响应格局以乔木为核心,草本为辅助;乔木叶片NSC与土壤养分、SC与水热条件呈显著正相关,成为碳库的主导力量。表明木本植物在改善的环境中可以通过提高光合作用增加生物量,促进碳固定^[21-22];草本则通过根系碳组分响应水热与土壤因

子,表明其面对乔木、灌木竞争带来的地上生长压力,草本将光合碳更多分配至根系^[23],而地上草本NSC/SC与MAT呈负相关,表明温度升高可能加剧其呼吸消耗。森林区,水热与土壤因子协同驱动,冠层以乔木和灌木响应为主。其中,乔木的地上地下器官协同响应水热、土壤因子,而灌木则通过叶、枝、根系的分工调控形成多样化的适应策略,共同主导森林区碳水化合物的积累和分配^[24]。

环境驱动的碳分配策略深刻塑造黄土高原刺槐人工林碳水化合物的地上-地下空间配置格局。量化分析显示,3个植被带灌木与草本贡献占比仅1.1%~4.2%,以地上分配为主。草原区乔木对总碳水化合物的贡献占比达92.1%,且95.9%的碳分配至地下根系,由于强水分胁迫抑制乔木地上光合,通过优先向根系分配SC强化吸水结构、积累NSC保障代谢,与干旱区植物“地下碳投资”的适应规律一致^[25];森林草原区乔木贡献占比升至96.9%,地下分配占比仍达97.5%,森林草原区水热改善缓解光合限制,乔木维持地下主导分配以应对环境异质性^[26];森林区乔木贡献占比稳定在97.0%,地下分配占比降至93.9%,地上贡献占比提升至6.1%,乔木碳分配转向“地上-

地下协同积累”,印证木本植物通过优化碳结构增强适应性的机制^[27]。

各植被带均呈SC高于NSC的格局:乔木SC占自身总碳水化合物的80.7%~81.4%,草原区乔木地下SC占比达98.3%,92.7%的NSC集中于地下,反映干旱胁迫下植物倾向于将碳优先分配至地下结构组织,以增强抗逆性和资源获取能力^[7];而草本层高NSC/SC表明植物将更多资源分配给可溶性糖或淀粉以维持短期生存^[28]。森林草原区乔木地上NSC、SC较草原区分别提升116.4%、133.2%,SC的高占比(NSC/SC低)与其生长季延长、结构构建需求增加有关,体现水热改善后碳水化合物的再分配^[29]。森林区乔木地上NSC、SC储量较草原区分别提升477.4%、658.7%,呈地上-地下碳水化合物协同积累特征,乔木依托生物量与光合能力提升成为冠层碳水化合物主导组分,其SC高积累彰显生态系统碳汇潜力与稳定性,与树木抗旱能力依赖木质部导水效率、安全性及NSC积累分配密切相关^[9];灌木与草本SC占比为70.9%~77.6%,但生物量有限,仅森林区灌木和草本地下根系NSC/SC显著上升,表明森林区灌木与草本根系通过主动积累NSC以适应林下遮荫与种间竞争环境,同时借助根系碳输入、微生物活性调控及根际微环境优化的协同作用,间接强化土壤SOC的积累与固存^[30]。

3.2 地上植物碳水化合物对凋落物的影响

地上植物器官(包括乔木叶、灌木枝/叶、地上草本等)的碳水化合物储量,直接决定凋落物输入的质量与数量,是连接植物碳代谢与土壤碳循环的关键纽带^[31]。结果表明,地上凋落物层在森林草原区表现出较高的NSC储量贡献,这可能是由于乔灌草地上器官的碳代谢活性较高,使凋落物中NSC得以高效保留,标志生态系统碳循环从干旱限制向养分竞争限制的转变。本研究通过RDA揭示不同植被带乔木、灌木、草本地上器官对凋落物碳水化合物的贡献存在显著差异,深刻影响凋落物的分解潜力及后续的SOC动态。

在草原区,水分是主要限制因子。RDA结果显示,乔木叶的SC和地上草本的SC是凋落物碳水化合物的主要贡献者,表明在干旱胁迫下,乔木可能将更多的光合产物以SC的形式储存在组织中,导致其凋落物输入以SC为主。由于SC(如纤维素、木质素等)化学性质相对稳定,其高比例输入可能使凋落物分解速率较慢,初始阶段对SOC的贡献可能滞后,但有利于形成更稳定的碳库^[32]。

森林草原区水热条件改善,养分有效性的作用凸显。此时,凋落物的碳水化合物来源更为多样化:一方面,乔木通过其高生物量持续输出SC;另一方面,草本层的NSC(可溶性糖和淀粉)对凋落物SC有显著贡献,可能反映草本植物在衰老过程中NSC的快速转移或微生物对易分解NSC的利用,将其转化为凋落物中的结构组分^[33]。这种混合来源可能使凋落物具有中等分解速率,既有利于微生物活动,又能维持一定的碳积累。

在森林区,水热条件最优,凋落物中的碳水化合物主要来源于木本植物的地上器官,特别是乔木叶SC和灌木叶SC,说明由于降水增加,光合产物充足,促进木质部生长,从而积累大量的SC^[34]。这些以木本植物SC为主的凋落物输入,虽然初始分解可能较慢,但在森林稳定的微环境下,能够支持更复杂的分解者群落,促进腐殖质的形成,从而对SOC的长期固存产生积极影响^[35]。

4 结 论

1)乔木始终为碳水化合物积累的主要植物群落,灌木与草本贡献较小,但均呈现SC高于NSC的格局。

2)刺槐人工林碳水化合物整体以地下分配为主。草原区乔木根系SC高比例分配强化吸水结构,同时提高NSC维持基础代谢以适配林下遮荫与竞争环境;森林区地上与地下碳水化合物协同提升,形成高效碳积累格局。而灌草根系NSC/SC随植被带梯度提升,主动积累NSC作为代谢储备以适配林下遮荫与竞争环境的适应性策略,有利于土壤有机碳长期固存。

3)环境调控从草原区单一水分胁迫,演变为森林草原区和森林区水热-土壤养分协同驱动,乔灌草通过差异化碳分配策略响应环境。

4)地上植物对凋落物碳水化合物储量的影响随植被带变化,解释率显著提升,间接调控凋落物分解潜力与土壤有机碳含量。

参考文献:

- [1] Fu Bojie, Wang Shuai, Liu Yu, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2017, 45: 223-243.
- [2] 焦秋燕, 黄林嘉, 张娟娟, 等. 黄土丘陵沟壑区刺槐混交林生态化学计量特征与碳储量[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 238-246.
- Jiao Qiuyan, Huang Linjia, Zhang Juanjuan, et al. Ecological stoichiometry and carbon storage of *Robinia pseudoacacia* in the Loess Plateau of China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 238-246.

- doacacia* mixed forests in the hilly-gully area of the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 238-246.
- [3] Liu Binbin, Qiu Linghua, Tang Xianhui, et al. Non-linear drought responses of transpiration and water use efficiency in black locust plantations in semi-arid north-western China [J]. Journal of Hydrology, 2026, 664: e134348.
- [4] Overdieck D. Nonstructural and structural carbohydrates [M]//CO₂, Temperature, and Trees. Singapore: Springer Singapore, 2016: 65-79.
- [5] Herrera-Ramírez D, Sierra C A, Römermann C, et al. Starch and lipid storage strategies in tropical trees relate to growth and mortality [J]. New Phytologist, 2021, 230(1): 139-154.
- [6] Dusenge M E, Duarte A G, Way D A. Plant carbon metabolism and climate change: Elevated CO₂ and temperature impacts on photosynthesis, photorespiration and respiration [J]. New Phytologist, 2019, 221(1): 32-49.
- [7] Xu Bin, Jiang Xueli, Zong Yingying, et al. The storage and utilization of carbohydrates in response to elevation mediated by tree organs in subtropical evergreen broad-leaved forests [J]. Forest Ecosystems, 2024, 11: e100167.
- [8] Poorter H, Niklas K J, Reich P B, et al. Biomass allocation to leaves, stems and roots: Meta-analyses of interspecific variation and environmental control [J]. New Phytologist, 2012, 193(1): 30-50.
- [9] 苏卓侠, 苏冰倩, 上官周平. 植物凋落物分解对土壤有机碳稳定性影响的研究进展 [J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 406-413.
- Su Zhuoxia, Su Bingqian, Shangguan Zhouping. Advances in effects of plant litter decomposition on the stability of soil organic carbon [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(2): 406-413.
- [10] Partelli-Feltrin R, Smith A M S, Adams H D, et al. Death from hunger or thirst? Phloem death, rather than xylem hydraulic failure, as a driver of fire-induced conifer mortality [J]. New Phytologist, 2023, 237(4): 1154-1163.
- [11] Liu Lingli, Sayer E J, Deng Meifeng, et al. The grassland carbon cycle: Mechanisms, responses to global changes, and potential contribution to carbon neutrality [J]. Fundamental Research, 2023, 3(2): 209-218.
- [12] Zhang Guangqi, Mao Zhun, Maillard P, et al. Not all sweetness and light: Non-structural carbohydrate storage capacity in tree stems is decoupled from leaf but not from root economics [J]. Functional Ecology, 2024, 38(3): 668-678.
- [13] Dang Yahui, Ren Xiaoyu, Ding Zhaonan, et al. Effects of forest-floor litter manipulations on soil organic carbon pools in a temperate mixed forest: A stoichiometric perspective [J]. Biogeochemistry, 2025, 168(5): e70.
- [14] Angst G, Mueller K E, Nierop K G J, et al. Plant- or microbial-derived? A review on the molecular composition of stabilized soil organic matter [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 156: e108189.
- [15] 刘蕾, 张运龙, 张俊伶, 等. 微生物介导的土壤颗粒态-矿物结合态有机碳动态研究进展 [J/OL]. 土壤学报, 1-12 [2026-03-27]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1119.P.20251203.0951.002>.
- Liu Lei, Zhang Yunlong, Zhang Junling, et al. Research progress on soil particulate versus mineral-associated organic carbon dynamics mediated by microorganisms [J/OL]. Acta Pedologica Sinica, 2026, 1-12 [2026-03-27]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1119.P.20251203.0951.002>.
- [16] 李泰君. 陕西黄土高原人工刺槐林碳固持特征与影响因素 [D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- Li Taijun. Characteristics of carbon sequestration and effect factors of black locust plantations on the Loess Plateau of Shaanxi Province [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2015.
- [17] Sluiter J B, Ruiz R O, Scarlata C J, et al. Compositional analysis of lignocellulosic feedstocks. 1. Review and description of methods [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(16): 9043-9053.
- [18] Yan Pu, He Nianpeng, Fernández-Martínez M, et al. Plant acquisitive strategies promote resistance and temporal stability of semiarid grasslands [J]. Ecology Letters, 2025, 28(4): e70110.
- [19] Liu Pai, Chi Yonggang, Huang Zhi, et al. Multidimensional response of China's grassland stability to drought [J]. Global Ecology and Conservation, 2024, 52: e02961.
- [20] 张舒乐, 彭祚登, 李香. 土壤水分条件对刺槐实生苗叶片功能性状及生长潜力的影响 [J]. 安徽农业大学学报, 2025, 52(3): 386-396.
- Zhang Shule, Peng Zuodeng, Li Xiang. Effects of soil moisture conditions on the leaf functional traits and the growth potential of *Robinia pseudoacacia* seedlings [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2025, 52(3): 386-396.
- [21] 刘杰, 李宗善, 梁海斌. 黄土高原中部降水对乔灌木气候响应敏感性的影响 [J]. 生态学报, 2024, 44(3): 1203-1220.
- Liu Jie, Li Zongshan, Liang Haibin. Climate response sensitivity analysis of trees and shrubs with precipitation

- gradients in the central of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(3): 1203-1220.
- [22] 刘旻霞, 夏素娟, 穆若兰, 等. 黄土高原中部三种典型绿化植物光合特性的季节变化[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(12): 4098-4109.
- Liu Minxia, Xia Sujuan, Mu Ruolan, et al. Seasonal variation of photosynthetic characteristics of three typical green plant species in central Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(12): 4098-4109.
- [23] Zhang Ze, Liu Hongyan, Li Zidong, et al. Decoupled stability of above- and belowground productivity across global change drivers[J]. *Global Change Biology*, 2026, 32: e70668.
- [24] 胡玥灿, 官云兰, 魏泽锋, 等. 黄土高原碳水复合利用效率时空演变及其驱动机制[J]. *水土保持学报*, 2026, 40(1): 340-351.
- Hu Yuecan, Guan Yunlan, Wei Zefeng, et al. Spatio-temporal evolution of carbon-water compound use efficiency on Loess Plateau and its driving mechanisms[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2026, 40(1): 340-351.
- [25] Li Weibin, Zhang Hongxia, Pu Yingyi, et al. Effects of drought on carbon-nitrogen dynamics in root exudates of *Qin-ghai spruce*[J]. *Tree Physiology*, 2025, 45(8): e85.
- [26] Shang Yu, Wang Ruzhen, Wang Bin, et al. Trade-off in carbon allocation between roots and *Rhizodeposition underpins* plant adaptation to acidification in a meadow steppe[J]. *Journal of Ecology*, 2025, 113(10): 2992-3004.
- [27] 邓美凤, 刘慧颖, 杨贵彪. 地上-地下互作影响生态系统结构和功能[J]. *植物生态学报*, 2025, 49(9): 1339-1343.
- Deng Meifeng, Liu Huiying, Yang Guibiao. Above-ground-belowground interactions shape ecosystem structure and function[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2025, 49(9): 1339-1343.
- [28] 张雯, 臧永新, 徐文轩, 等. 7年极端干旱对准噶尔假木贼群落叶片非结构性碳水化合物的影响[J]. *生态学报*, 2025, 45(15): 7470-7481.
- Zhang Wen, Zang Yongxin, Xu Wenxuan, et al. Effects of 7-year extreme drought on leaf non-structural carbohydrates of *Anabasis salsa* community in Junggar desert[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(15): 7470-7481.
- [29] 高扬, 何念鹏, 汪亚峰. 生态系统固碳特征及其研究进展[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(7): 1264-1274.
- Gao Yang, He Nianpeng, Wang Yafeng. Characteristics of carbon sequestration by ecosystem and progress in its research[J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(7): 1264-1274.
- [30] Yu Lei, Dai Haixiang, Fang Lidong, et al. Sex-specific non-structural carbohydrate variation and hydraulics explain differences in drought resistance of *Populus euphratica* females and males along an aridity gradient[J]. *Functional Ecology*, 2025, 39(10): 2925-2939.
- [31] 毛紫溪, 甘子莹, 谢江涛, 等. 基于器官和碳氮比差异的闽楠凋落物输入对土壤激发效应的影响及机理[J/OL]. *土壤学报*, 1-14 [2026-03-27]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1119.P.20260127.1455.002>.
- Mao Zixi, Gan Ziying, Xie Jiangtao, et al. Effects and Mechanisms of *Phoebe bournei* litter input on soil priming effect based on organic and carbon to nitrogen ratio differences[J/OL]. *Acta Pedologica Sinica*, 2026, 1-14 [2026-03-27]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1119.P.20260127.1455.002>.
- [32] 邱文涛, 肖列, 陈姝伊, 等. 黄土高原典型人工林凋落物添加对土壤有机碳稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2026, 40(3): 211-221.
- Qiu Wentao, Xiao Lie, Chen Shuyi, et al. Effects of litter addition on soil organic carbon stability in typical plantations on Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2026, 40(3): 211-221.
- [33] Signori-Müller C, Oliveira R S, de Vasconcellos Barros F, et al. Non-structural carbohydrates mediate seasonal water stress across Amazon forests[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: e2310.
- [34] Yu Biyun, Rossi S, Liang Hanxue, et al. Effects of nitrogen addition and increased precipitation on xylem growth of *Quercus acutissima* Carruth. in central China[J]. *Tree Physiology*, 2022, 42(4): 754-770.
- [35] Lyu Maokui, Homyak P M, Xie Jinsheng, et al. Litter quality controls tradeoffs in soil carbon decomposition and replenishment in a subtropical forest [J]. *Journal of Ecology*, 2023, 111(10): 2181-2193.