

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

邱文涛¹, 肖列¹, 陈姝伊¹, 闵旭旭¹, 李占斌¹,

李鹏¹, 于沐², 马建业¹, 王周³

(1. 西安理工大学旱区水利工程生态环境全国重点实验室, 西安 710048; 2. 中国水利水电科学研究院流域水循环与
水安全全国重点实验室, 北京 100048; 3. 国家林业和草原局西北调查规划院, 西安 710048)

摘要: [目的] 明确黄土高原典型人工林不同凋落物类型对土壤有机碳(SOC)及其组分分布及稳定性的影响机制。[方法] 在陕西省延安市黄陵县双龙国有生态实验林场开展野外凋落物添加试验, 设置油松(*Pinus tabulaeformis*, PT)纯林凋落物、麻栎(*Quercus acutissima*, QA)纯林凋落物和针阔混交(PQ, 油松+麻栎)凋落物3种处理, 以不添加凋落物为对照(CK)。在凋落物不同分解阶段采集凋落物残体和0~20 cm土壤样品, 测定凋落物养分含量和SOC及其组分含量。[结果] 凋落物类型对SOC及其组分含量有显著影响($p < 0.05$), 3种凋落物添加处理均显著提高SOC、颗粒态有机碳(POC)和矿物结合态有机碳(MAOC)含量, 且各组分含量动态表现为先升高后降低。与CK相比, PQ处理的SOC含量提高19.4%~37.8%(150 d达到峰值), MAOC含量提高17.2%~33.2%(30 d达到峰值), PT处理对各碳组分提升效应最弱。凋落物中较高的纤维素、半纤维素和易利用氮素含量促进凋落物分解与MAOC的形成。凋落物纤维素、木质素含量与SOC含量呈显著正相关, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量与POC、MAOC含量显著相关($p < 0.05$)。[结论] 不同凋落物类型通过调控凋落物分解速率与碳组分转化, 进而影响SOC稳定性。针阔混交凋落物处理最有利于土壤有机碳的固存与稳定性提升, 是增强黄土高原人工林碳汇潜力的关键途径。

关键词: 凋落物添加; 黄土高原人工林; 有机碳组分; 稳定性碳

中图分类号: S714.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)03-0211-11

Effects of Litter Addition on Soil Organic Carbon Stability in Typical Plantations on Loess Plateau

QIU Wentao¹, XIAO Lie¹, CHEN Shuyi¹, MIN Xuxu¹, LI Zhanbin¹,

LI Peng¹, YU Shu², MA Jianye¹, WANG Zhou³

(1. State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 3. Northwest Institute of Investigation and Planning, National Forestry and Grassland Administration, Xi'an 710048, China)

Abstract: [Objective] To clarify the mechanisms by which different litter types in typical plantations on the Loess Plateau affect the distribution and stability of soil organic carbon (SOC) and its fractions. [Methods] A field litter addition experiment was conducted at the Shuanglong State-owned Ecological Experimental Forest Farm in Huangling County, Yan'an City, Shaanxi Province. Three treatments were established: litter from pure *Pinus tabulaeformis* (PT), litter from pure *Quercus acutissima* (QA), and conifer-broadleaf mixed litter (PQ,

收稿日期: 2025-10-29

修回日期: 2025-11-22

录用日期: 2025-11-25

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-01-19

资助项目: 国家自然科学基金项目(42330719, 42377350)

第一作者: 邱文涛(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤有机碳稳定性研究。E-mail: 14779945569@163.com

通信作者: 肖列(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土壤生态修复、水土保持和土壤固碳研究。E-mail: xiaosha525@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

P. tabuliformis+*Q. acutissima*), with no litter addition as the control (CK). At different decomposition stages of litter, litter residues and 0–20 cm soil samples were collected. The nutrient contents of the litter, as well as the contents of SOC and its fractions, were measured. [Results] Litter type had a significant effect on the contents of SOC and its fractions ($p<0.05$). All three litter addition treatments significantly increased the contents of SOC, particulate organic carbon (POC), and mineral-associated organic carbon (MAOC), and the dynamics of each fraction showed a trend of first increasing and then decreasing. Compared with CK, the SOC content in the PQ treatment increased by 19.4%–37.8% (peaking at 150 d), and the MAOC content increased by 17.2%–33.2% (peaking at 30 days). The PT treatment had the weakest enhancing effect on each carbon fraction. Higher contents of cellulose, hemicellulose, and readily available nitrogen in the litter promoted litter decomposition and MAOC formation. The contents of cellulose and lignin in the litter were significantly positively correlated with SOC content ($p<0.05$), and the contents of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ were significantly correlated with the contents of POC and MAOC ($p<0.05$). [Conclusion] Different litter types affect SOC stability by regulating the litter decomposition rate and the transformation of carbon fractions. The conifer-broadleaf mixed litter treatment is most conducive to the sequestration and stability of SOC, representing a key approach for enhancing the carbon sink potential of plantations on the Loess Plateau.

Keywords: litter addition; plantations on Loess Plateau; organic carbon fractions; stable carbon

Received: 2025-10-29

Revised: 2025-11-22

Accepted: 2025-11-25

Online(www.cnki.net): 2026-01-19

在碳循环进程中,森林生态系统占据着极为重要的地位,其中凋落物分解释放是森林土壤碳库的主要来源之一^[1-2]。WU等^[3]和陈春宇等^[4]研究表明,不同树种的凋落物差异显著影响土壤碳库组成与稳定性;已有研究^[5-7]表明,不同凋落物类型可改变土壤有机碳(SOC)活性组分比例分布,从而影响碳固定过程;陈甜等^[5]研究表明,不同树种叶凋落物添加对SOC矿化的影响存在显著差异,马尾松叶凋落物添加处理总 CO_2 释放速率均值最大,显著高于杉木、闽楠、青冈和相思;张晓曦等^[6]通过选取陕西延安的典型树种开展凋落物添加试验表明,五角枫、银杏和油松的凋落物处理能够显著提高SOC活性组分比例,而侧柏的凋落物则显著促进土壤碳积累率;姜永孟等^[7]研究表明,相比于马尾松纯林,马尾松和阔叶树种混交林显著增加MAOC和表层土SOC、POC含量。

目前,关于凋落物类型对SOC稳定性的影响尚未形成一致结论。部分研究^[8-10]认为,难分解物质含量高的凋落物有助于提升SOC形成过程中的稳定性。例如,ZHENG等^[8]研究表明,分解速率慢的凋落物向土壤碳氮组分转化的效率高于分解速率快的凋落物;ZHANG等^[9]研究也表明,杉树(木质素浓度和C:N比较高的低品质凋落物)和刺槐(高品质凋落物)的添加使SOC损失分别降低46.1%和26.9%,即低品质凋落物输入会促进刺槐人工林SOC的积累;BAI等^[10]通过对山杨和辽东栎凋落物163 d的分解试验,同样证实低品质凋落物有助于形成更稳定的碳

残留;另一方面,亦有研究^[11-13]表明,易分解凋落物因更易被微生物利用,其代谢产物可与矿物结合形成稳定有机碳^[11]。例如,垂柳与龙爪槐凋落物尽管碳氮比及酚类含量低,却有助于稳定性碳的形成^[12];郭鑫等^[13]的研究结果表明,长毛草和苦豆子叶片凋落物处理下的细小团聚体有机碳含量及新碳形成效率均显著高于铁杆蒿茎秆和长芒草根凋落物,表明高品质凋落物在形成稳定碳方面具有优势。因此,关于凋落物类型对稳定性有机碳的影响还需进一步研究。

综上,已有研究从凋落物化学特征、养分动态、微生物利用效率等方面探讨凋落物对SOC形成和稳定化的影响,但仍存在不足:1)多数研究基于单一树种凋落物,缺乏对针阔混交凋落物与单树种凋落物在SOC组分形成机制上的比较;2)关于凋落物性质-微生物过程-稳定性碳形成三者之间的耦合机制仍不清晰,尤其是在黄土高原人工林体系中研究较少。因此,有必要从典型人工林凋落物的性质差异出发,解析不同凋落物类型对SOC及其组分稳定性的差异化影响机制。通过前期文献查阅与实地考察发现,油松(*Pinus tabuliformis*)和麻栎(*Quercus acutissima*)是黄土高原最具代表性的造林树种。油松根系发达、抗旱性强,麻栎为落叶阔叶、养分循环快,二者养分差异导致其凋落物化学组成及分解特性显著不同,可能对SOC稳定性产生不同影响。因此,本研究在陕北黄土高原典型人工林区设置野外样方,系统研究不同

凋落物类型分解过程对SOC组分及稳定性的影响,旨在揭示凋落物质量差异驱动下SOC积累机制。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市黄陵县双龙国有生态实验林场(35°33′07″~35°49′30″N, 108°45′32″~109°01′21″E),海拔1545 m。该区域属温带大陆性季风气候,年平均降水量609.5 mm。森林植被以天然次生林为主,建群种包括油松(*Pinus tabulaeformis*)、麻栎(*Quercus acutissima*)、白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)与侧柏(*Platycladus orientalis*)等。研究区油松林龄约25 a,林分密度约1300株/hm²,麻栎林龄约22 a,林分密度约1100株/hm²,经营方式均为封育天然更新,无人抚育措施。

1.2 试验设计与样品采集

野外凋落物添加试验在坡度、坡向和海拔一致的坡面区域开展,共设置16个1 m×1 m样方,样方之间的间距超过50 m。试验开始前,清除地表活体植被和凋落物后,样方以PVC板围合,并在样方上面覆盖尼龙网袋以保持环境一致性。在每个样方内均布置4个孔径2 mm的凋落物分解袋,袋间距离>10 cm,并使用6 cm铁钉固定、尼龙线封口。4个分解袋分别设置4种处理:不添加凋落物(CK)、添加油松凋落物(PT)、添加麻栎凋落物(QA)和添加针阔混交凋落物(PQ),每个处理设置4个重复。各凋落物袋初始凋落物添加量均为10 g,其中混交处理按照5 g油松加5 g麻栎配置。凋落物采自试验林分内自然脱落的成熟落叶,采后剔除枝梗与泥土等杂质,并在通风条件下自然风干7 d。添加量参考已有野外原位凋落物添加研究中常用的适宜范围^[10,13]。

试验于2023年5月16日开始。分别在凋落物添加第30、90、150、210 d采集分解袋中凋落物及其0~20 cm土层的土壤样品(该土层土壤样品是凋落物影响最显著的土层^[14])。土样采集后剔除石砾和根系,通过2 mm筛分后,一部分用于室内土壤矿化培养,另一部分风干后用于土壤化学性质测定。

1.3 指标测定

植物凋落物质量采用烘干法测定;凋落物全碳和全氮含量使用元素分析仪测定;全磷以硫酸-高氯酸消解,使用全自动间断分析仪测定;纤维素、半纤维素与木质素含量通过范氏洗涤纤维法^[15]测定。

土壤有机碳(SOC)含量采用元素分析仪测定;土壤速效磷(AP)采用0.5 mol/L碳酸氢钠浸提(水土比10:1)、铵态氮(NH₄⁺-N)与硝态氮(NO₃⁻-N)以KCl溶液提取(水土比5:1),使用全自动间断分析仪

测定;土壤颗粒态有机碳(POC)与矿物结合态有机碳(MAOC)通过六偏磷酸钠分散法^[16]测定:称取10 g过2 mm筛的土样置于250 mL锥形瓶中,加入150 mL 0.5%六偏磷酸钠溶液,在往复式振荡器上振荡18 h,转速为200 r/min。土壤悬液过53 μm筛,并反复用蒸馏水冲洗。分别收集所有留在筛中的物质(POC)和过滤到筛网下的物质(MAOC),在50℃下烘至恒质量,并计算其所占土壤的质量分数。将烘干样品中的有机碳含量换算为单位质量土壤样品的POC和MAOC质量分数。

开展土壤矿化培养试验评估不同凋落物类型对SOC矿化潜力的影响。取50 g土样调节至田间持水量60%,20℃黑暗预培养1周,正式培养于25℃黑暗环境下进行,分别于第1、4、7、14、21、28、35、50 d采集气体,使用CO₂同位素质谱仪测定土壤中CO₂释放速率。

1.4 数据处理

凋落物干物质残留率(R_e)与土壤CO₂释放速率(R_c)的计算公式为:

$$R_e = \frac{M_t}{M_0} \times 100$$

$$\frac{M_t}{M_0} = e^{-kt}$$

$$R_c = \beta \times \frac{V}{m} \times \frac{1}{C} \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{273}{273 + T} \times \alpha$$

式中: R_e 为凋落物的干物质残留率,%; M_0 为凋落物的初始干质量,g; M_t 为分解时间 t 时凋落物的剩余干质量,g; k 为分解系数; R_c 为土壤CO₂释放速率,mg/(kg·d), β 为标准系数1.964; m 为土壤干质量,kg; V 为瓶内总气体体积,m³; C 为SOC质量分数,g/kg; Δt 为培养时间,d; Δc 为CO₂浓度变化量,mg/kg; T 为培养温度,℃; α 为碳与CO₂摩尔质量的换算系数。

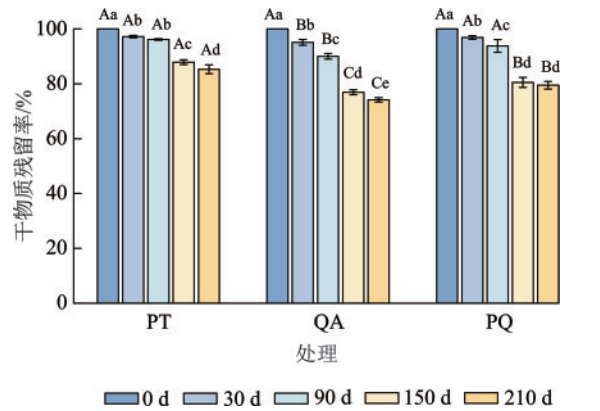
图表中数据为平均值±标准差。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和图基(Tukey)检验对不同处理和不同分解时间下的凋落物特征及土壤性质进行比较,采用Pearson相关分析研究凋落物类型、分解时间与土壤性质的相关性。所有分析均在Excel 2021和SPSS 26软件中完成,绘图使用Origin 2019软件。

2 结果与分析

2.1 分解过程中的凋落物特征动态

随着分解时间的增加,3种凋落物的干物质残留率均呈显著下降趋势($p < 0.05$)(图1)。培养210 d后,油松(PT)、麻栎(QA)和针阔混交(PQ)处理组的干物质残留率分别为85.3%、74.2%和79.5%;PQ和QA处理组的干物质残留率显著低于PT处理组($p <$

0.05)。在分解过程中,3种凋落物的分解系数(k)总体呈上升趋势,表明凋落物分解速率随时间加快,各处理组的分解系数排序为PT<PQ<QA(表1)。



注:图柱上方不同大写字母表示相同分解时间下不同凋落物类型间差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示同一凋落物类型下不同分解时间间差异显著($p<0.05$)。下同。

图1 不同凋落物类型的干物质残留率变化

Fig. 1 Changes in dry matter residual rate of different litter types

表1 不同类型凋落物添加的分解系数(k)

Table 1 Decomposition constants (k) under different litter addition types

凋落物类型	分解时间/d	Olson 拟合方程	分解系数(k)
PT	30	$y=9.74e^{-0.055x}$	0.055
	90	$y=9.68e^{-0.057x}$	0.057
	150	$y=9.66e^{-0.066x}$	0.066
	210	$y=9.65e^{-0.080x}$	0.080
QA	30	$y=9.45e^{-0.060x}$	0.060
	90	$y=9.39e^{-0.090x}$	0.090
	150	$y=9.35e^{-0.105x}$	0.105
	210	$y=9.31e^{-0.120x}$	0.120
PQ	30	$y=9.60e^{-0.065x}$	0.065
	90	$y=9.56e^{-0.075x}$	0.075
	150	$y=9.54e^{-0.080x}$	0.080
	210	$y=9.50e^{-0.100x}$	0.100

由图2可知,从凋落物类型来看,PT的总有机碳(TOC)、C/N比值和木质素含量在各个分解时间点普遍显著高于QA和PQ($p<0.05$)。QA的总氮(TN)、总磷(TP)、纤维素和半纤维素含量在各个分解时间点上显著高于PT和PQ($p<0.05$)。在分解过程中,全C、TN和纤维素含量均呈先增加后降低趋势,其中仅PT的TOC、PT和PQ的TN、QA和PQ的纤维素含量差异显著($p<0.05$)。C/N比值、半纤维素和木质素含量均随分解时间的增加显著降低($p<0.05$),而TP含量则在分解过程中显著增加($p<0.05$)。

2.2 分解过程中的土壤化学特征动态

凋落物添加后,铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)和速效磷(AP)含量普遍显著高于CK组($p<0.05$),但在分解第30 d的土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和第210 d的土壤AP含量间没有表现出显著差异(图3)。PT、QA和PQ处理组的土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量分别较CK组增加2.3%~17.8%、15.8%~22.9%和8.6%~20.3%;土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量分别增加7.5%~41.9%、17.7%~46.8%和17.1%~37.5%;土壤AP含量较CK组分别增加10.0%~17.9%、7.8%~30.0%和14.7%~54.1%。然而,PT、QA和PQ3种处理之间的土壤化学性质在不同分解时间点上的显著差异有所不同。例如,在分解第30 d时,3种凋落物添加的土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 指标没有显著差异;而在分解第90 d时,不同处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 指标差异显著($p<0.05$)。此外,3种处理之间的显著差异大多数表现为QA处理组大于PT和PQ处理组($p<0.05$),在少数情况下,如分解第30 d的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量,三者之间存在明显差异。从分解时间来看,各处理组的土壤化学指标随着分解时间先上升后下降。除PQ组的AP峰值出现在分解第150 d外,各处理组的土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和AP的最大值分别出现在第90 d、第150 d和第90 d。

2.3 分解过程中土壤有机碳含量和稳定性

相较于CK组,凋落物的添加显著改变土壤SOC、POC和MAOC的含量(表2)。PT、QA和PQ处理显著增加各分解时间点的土壤SOC和POC含量,但只有QA和PQ处理的土壤MAOC含量在所有分解阶段均显著增加,而PT处理下的土壤MAOC含量仅在第30 d和第210 d显著高于CK组($p<0.01$)。在各个分解阶段,PQ处理下的土壤SOC含量(19.4%~37.8%)的变化大于PT组(8.8%~26.4%)和QA组(10.7%~37.2%),并在第150 d达到最大值40.66 g/kg;QA处理下的土壤POC(65.8%~109.7%)的变化大于PT(27.9%~86.5%)和PQ(25.8%~61.8%),并在第30 d达到最大值11.62 g/kg;PQ处理下的土壤MAOC(17.2%~33.2%)的变化大于PT(-4.0%~26.0%)和QA(11.2%~27.2%),并在第30 d达到最大值28.09 g/kg。从分解时间来看,第210 d的土壤SOC、POC和MAOC含量都呈现下降趋势。CK、PT、QA和PQ处理下的土壤SOC的峰值分别出现在第150 d、第30 d、第30 d和第150 d;土壤POC的峰值分别出现在第90 d、第150 d、第30 d和第90 d;土壤MAOC的峰值分别出现在第150 d、第30 d、第150 d和第30 d。

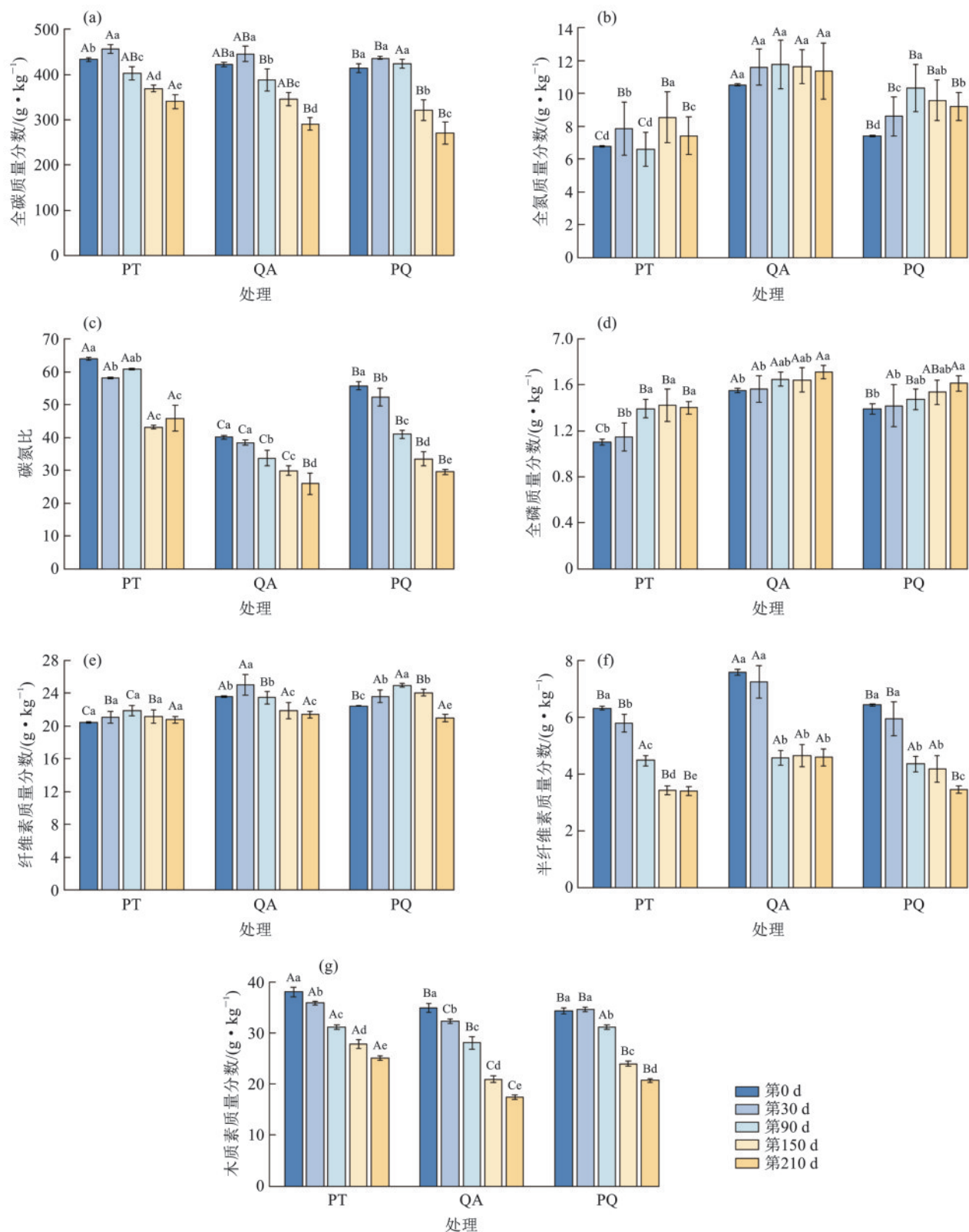


图 2 不同凋落物类型在分解过程中的主要化学组分动态

Fig.2 Dynamic changes of major chemical components during decomposition of different litter types

不同类型的凋落物添加能够显著影响土壤 CO_2 释放速率,并且随着培养时间的增加, CO_2 释放速率呈逐渐下降趋势(图4)。与CK组相比,凋落物添加均显著增加 CO_2 释放速率($p<0.001$)。然而,PT、QA和PQ处理之间的 CO_2 释放速率差异并不显著,在不同分解时间下的释放速率排序为 $\text{QA}>\text{PQ}>\text{PT}$ 。从分解时间来看,第30 d的 CO_2 释放速率显著最高($p<0.01$),表明有机碳活动较为活跃;第90 d的 CO_2 释放速率显著最低($p<0.01$),说明有机碳活动趋于稳定。

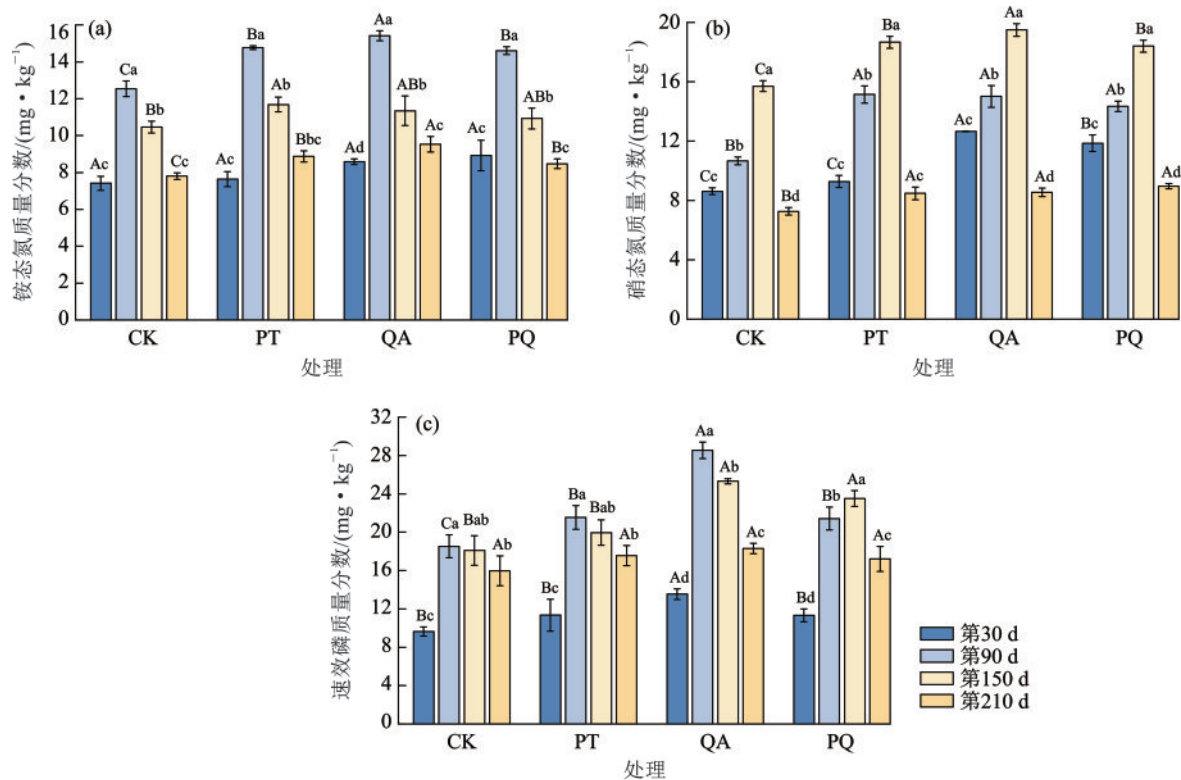


图3 不同凋落物添加对土壤化学性质的影响

Fig.3 Effects of different litter additions on soil chemical properties

表2 分解过程中的土壤有机碳变化特征

Table 2 Characteristics of soil organic carbon changes during decomposition

凋落物类型	分解时间/d	土壤有机碳(SOC)/(g·kg ⁻¹)	颗粒态有机碳(POC)/(g·kg ⁻¹)	矿物结合态有机碳(MAOC)/(g·kg ⁻¹)
CK	30	26.63±1.89Bab	5.54±0.37Dab	21.09±1.11Bb
	90	27.73±0.63Ba	7.09±0.39Ca	21.84±0.66Bb
	150	30.15±1.49Cab	5.05±0.33Cbc	25.10±0.29BCa
	210	24.94±1.33Bb	4.63±0.45Cc	20.05±0.95Bb
PT	30	33.67±2.75Aa	7.09±0.39Cc	26.58±1.08Aa
	90	30.18±1.77Aa	8.58±0.27Bb	21.61±1.53Bb
	150	33.47±2.68Bab	9.42±0.37Aa	24.05±0.95Cab
	210	28.71±1.39Ab	5.96±0.09Bd	22.75±0.45Aab
QA	30	36.55±1.07Aa	11.62±0.50Aa	25.08±1.55Ab
	90	31.42±1.44Aa	9.78±0.14Ab	22.50±0.32Bc
	150	35.66±1.20ABb	9.37±0.40Ab	27.54±0.24ABa
	210	27.62±1.77Ac	7.77±0.38Ac	22.02±0.41ABc
PQ	30	36.70±2.32Aa	8.46±0.63Ba	28.09±1.30Ab
	90	35.78±1.14Aa	9.20±0.13ABa	25.72±0.28Ac
	150	40.66±1.90Ab	8.17±0.41Ba	32.02±0.41Aa
	210	29.79±1.26Ac	5.82±0.88Bb	23.80±0.64Ad

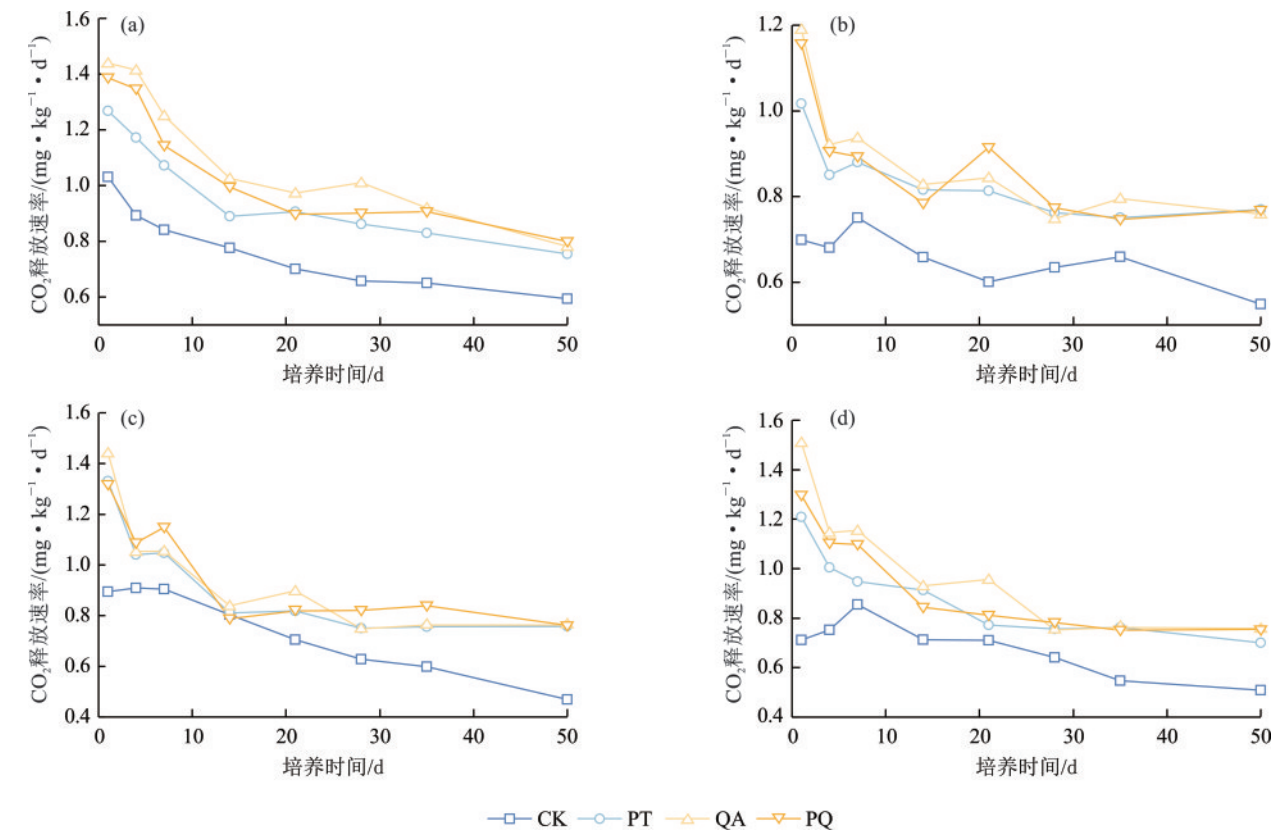
2.4 凋落物特征与土壤特征的相关性分析

Pearson 相关分析(图 5)表明,凋落物性质与土壤碳组分之间存在显著相关性($p<0.05$)。凋落物 TOC、

C/N 比、纤维素、半纤维素和木质素含量均与 SOC 含量呈显著正相关;凋落物 TOC、TN、纤维素、半纤维素和木质素含量与土壤 POC 含量也呈正相关;而凋落物

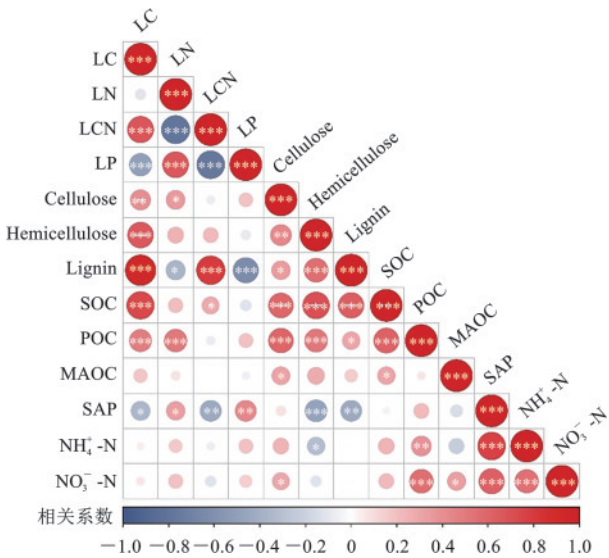
的纤维素含量与土壤 MAOC 含量之间存在显著正相关($p<0.05$)。凋落物性质与土壤化学性质之间存在显著相关($p<0.05$)。具体来说,凋落物的 TOC 和 C/N 比与土壤 AP 含量呈显著负相关,而凋落物 TN、TP、半纤维素和木质素含量与土壤 AP 含量呈显著正相关;凋

落物纤维素含量与土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量呈显著正相关关系($p<0.05$)。除此之外,土壤碳组分与土壤化学性质间也存在相关性,土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量与土壤 POC 含量呈显著正相关, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量与土壤 MAOC 含量呈显著正相关($p<0.05$)。



注:图 a~图 d 分别为分解 30、90、150、210 d 时开始培养,培养时间均为 50 d。
图 4 不同凋落物添加下土壤 CO₂ 释放速率

Fig. 4 Soil CO₂ emission rates under different litter additions



注:***表示 $p<0.001$; **表示 $p<0.01$; *表示 $p<0.05$; LC 为凋落物总碳含量; LN 为凋落物总氮含量; LCN 为凋落物碳氮比; LP 为凋落物总磷含量。

图 5 凋落物化学性质与土壤化学性质的相关性热图

Fig. 5 Heatmap of correlation between litter and soil chemical properties

3 讨论

3.1 不同凋落物类型对土壤化学性质的影响

凋落物的分解速率主要受凋落物自身因素(如碳氮比、木质素含量等)及外界环境因素(如温度、水分、微生物条件等)影响^[17]。本试验在相同的环境条件下进行,因此,分解速率主要受凋落物自身性质的影响。培养 210 d 后,油松(PT)、麻栎(QA)及其混合凋落物(PQ)的干物质残留率分别为 85.28%、74.15% 和 79.48%,分解速率表现为 $\text{PT}<\text{PQ}<\text{QA}$ 。与刘莎茜等^[18]的研究结果一致,主要归因于凋落物中木质素含量和氮含量的差异。木质素是一种复杂的有机聚合物,难以被微生物分解^[19],因此针叶中的较高木质素含量使其分解过程较为缓慢。而氮是微生物生长和代谢的必需元素^[20],针叶中的氮含量较低,在一定程度上限制微生物的分解活动。

凋落物分解中养分动态通常包括淋溶-富集-释放、富集-释放或直接释放 3 种模式。本研究中,凋落

物碳氮比、半纤维素、木质素含量显著下降,表现为直接释放模式。这些结果在以往的研究^[21-25]中均有体现。针叶的 TOC 含量和 TN 含量、针阔混交的 TN 含量先显著增加再降低,呈现富集-释放模式。但阔叶的 TOC 和 TN、针阔混交的 TOC 含量均没有显著增加的阶段,而是在一段时间后直接降低。这种现象的原因可能与凋落物品质有关,李志安等^[26]提出低品质凋落物易在分解初期固定环境养分,而高品质凋落物更快释放养分。在凋落物分解过程中,养分浓度变化与残留叶量呈反向关系,低品质凋落物倾向于初期吸收环境养分,而高品质凋落物则快速释放养分。因此,不同品质凋落物在分解过程中表现出不同的氮素动态特征。本研究中针叶至阔叶品质递增,3 种凋落物的全磷含量在分解时段内先显著上升,但由于试验时间限制,之后并未出现含量显著下降的趋势,这与李海涛等^[27]在井冈山的研究结果一致,因此其呈现富集-释放模式。可能是因为微生物在凋落物中进行分解作用需要比例平衡的元素环境,而凋落物中的磷元素无法满足微生物自身养分需求,微生物则从土壤中获取磷,并固持到凋落物中^[28]。值得注意的是,混合树种凋落物分解中的化学含量变化与树种相关,而不仅仅是以针阔叶区分。刘莎茜等^[18]研究发现,杉木-光皮桦混合抑制木质素释放,而云南樟-杉木混合则促进释放。因此,合理的树种混交可通过混合效应促进养分归还,维持土壤肥力。

3.2 不同凋落物类型对土壤有机碳及其组分的影响

SOC 稳定化过程受凋落物化学组成、微生物代谢效率、矿物吸附能力等多重机制共同驱动。因此,结合凋落物质量差异解析其对 MAOC 与 POC 的调控途径,有助于阐明稳定性碳形成机制。本研究与已有研究^[29-30]的结论相一致,均发现凋落物的输入能够显著提升土壤总有机碳水平。Pearson 相关表明,凋落物的 C、C/N、纤维素、半纤维素、木质素含量与 SOC 呈现正相关。在本研究结果中,针阔混交添加组(PQ)的 SOC 含量显著高于麻栎添加组(QA),但 C、C/N、纤维素等含量最高的油松添加组(PT)下的 SOC 含量却低于 PQ 处理。混交对林地 SOC 的积极影响也在其他研究中有所体现,如 GUO 等^[31]发现,无论哪个土层,混交处理都会显著增加 SOC 含量(表土增加 20.4%,底土增加 18.2%)。此现象可能源于低品质凋落物中氮素相对匮乏(表现为高碳氮比和低氮磷比),促使土壤微生物为满足氮需求而分解原有有机质,从而部分抵消凋落物输入本应带来的碳增益^[32]。此外,本研究还发现,高品质凋落物处理中

CO₂ 释放速率最高,表明其碳损失比例较大(占 46% 以上),在一定程度上限制有机碳的净积累。

在土壤有机碳固定机制方面,当前观点^[11]表明,高品质凋落物更易被微生物快速代谢,其残体可进一步与矿质结合形成稳定的矿物结合态有机碳(MAOC);而低品质凋落物则更多以颗粒碎屑形态进入土壤,形成相对不稳定的颗粒有机碳(POC)。本研究通过 POC 和 MAOC 含量及 CO₂ 释放速率综合评估 SOC 稳定性,其中 MAOC 是最具代表性的稳定性碳组分。本研究 3 种处理下土壤 POC 含量依次为麻栎>油松>混交处理,土壤 MAOC 含量的排序为混交处理>麻栎>油松。对油松凋落物而言,其 TOC、C/N 比值、纤维素、半纤维素等分解抑制物的含量最低,更不利于“续埋效应”形成稳定的 MAOC,反而有助于 POC 的积累^[33]。值得关注的是,麻栎处理中的 POC 显著高于油松,可能由于麻栎凋落物中易分解碎片较多^[34],所形成 POC 尚未完全转化为 MAOC;而混交处理中 MAOC 含量最高,是因为混合分解过程中产生的中间产物被微生物重新合成为结构更稳定的大分子腐殖质^[35],此机制更符合传统腐殖化理论。相关分析中纤维素与稳定性碳的正相关关系也支持上述推断。这些结果共同表明,凋落物-土壤碳转化过程存在多路径并存的复杂机制。

3.3 土壤化学组分特征与土壤有机碳特征的关系

已有研究^[36-37]发现,土壤中氮含量总体上抑制着土壤微生物生物量,可能降低微生物的“体内周转”而减少稳定性有机碳的形成。本研究发现,NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 等易利用氮素与 POC、MAOC 均呈显著正相关,说明凋落物分解释放的养分促进有机碳组分的形成与转化。氮的活化与转移可能通过促进微生物代谢而间接影响稳定碳的形成^[38-39]。表明在通过氮元素添加调控土壤稳定性碳组分的过程中,不依赖于生物活动的土壤物理和化学变化途径,以及依靠微生物的生命活动的生物途径,二者都发挥着重要作用。目前的研究在定量植物碳和微生物来源碳时,缺乏关键的微生物功能和代谢参数^[40]。除此之外,土壤因子之间的交互作用对凋落物向土壤碳库的转化过程的影响尚不明确,未来可以开展多因子的交互作用研究,例如,探究氮磷之间的交互作用。在全球变化背景下,氮沉降和磷沉降是相伴发生的^[41]。另外已有研究^[42-43]表明,相较于单独添加的氮或磷,氮磷共同添加对土壤总有机碳的促进作用更强,说明以往的结果或许低估土壤固碳潜力。以往的研究也评估了分解时间对土壤化学组分和土壤有机碳的影响,但多半为百天左右短期试验^[4,44]。

本研究为210 d的短期试验,主要反映凋落物输入初期对SOC组分的影响,未能评估长期稳定化过程及不同添加量的影响。其中关于凋落物类型影响有机碳固定的复杂机制依然值得探索,特别是应结合微生物代谢网络与碳组分分级方法,进一步揭示凋落物-微生物-矿物互作对SOC稳定化的调控机制。因此,未来需结合多年尺度与不同添加水平的长期试验,以更全面评估人工林凋落物管理对碳汇提升的作用。

4 结论

不同类型凋落物添加均显著提高土壤有机碳(SOC)、颗粒态有机碳(POC)和矿物结合态有机碳(MAOC)含量,且三者均随凋落物分解呈先升高后降低的变化特征。针阔混交凋落物(PQ)对SOC的固存与稳定性提升最显著,而油松凋落物(PT)对土壤稳定碳库形成的贡献较小,凋落物中较高的易利用氮素有助于稳定性碳组分的积累。凋落物类型通过调节分解速率与碳组分转化路径,影响土壤SOC的积累与稳定。针阔混交凋落物是提升黄土高原人工林碳汇潜力的关键途径。本研究结果为黄土高原人工林凋落物管理与土壤碳汇提升提供理论与数据支撑。

参考文献:

- [1] SUN T, DONG L L, ZHANG Y Y, et al. General reversal of N-decomposition relationship during long-term decomposition in boreal and temperate forests[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2024, 121(20): e2401398121.
- [2] 张东, 马文明, 王长庭, 等. 基于文献计量学的凋落物分解对土壤碳影响的研究发展态势分析[J]. 土壤通报, 2023, 54(5): 1237-1247.
- ZHANG D, MA W M, WANG C T, et al. Bibliometric analysis of the development of research on the effects of litter decomposition on soil carbon[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(5): 1237-1247.
- [3] WU Q X, WU F Z, ZHU J J, et al. Leaf and root inputs additively contribute to soil organic carbon formation in various forest types[J]. Journal of Soils and Sediments, 2023, 23(3): 1135-1145.
- [4] 陈春宇, 陈伏生, 郑志宇, 等. 凋落物管理对杉木林土壤有机碳化学结构和热稳定性的影响[J]. 生态学杂志, 2024, 43(9): 2641-2649.
- CHEN C Y, CHEN F S, ZHENG Z Y, et al. Effects of litter management on chemical structure and thermal stability of soil organic carbon in a Chinese fir forest[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(9): 2641-2649.
- [5] 陈甜, 元方慧, 张琳梅, 等. 不同化学性质叶凋落物添加对土壤有机碳矿化及激发效应的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(10): 2602-2610.
- CHEN T, YUAN F H, ZHANG L M, et al. Effects of addition of leaf litter with different chemical properties on soil organic carbon mineralization and priming effect[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(10): 2602-2610.
- [6] 张晓曦, 田爽, 曾磊, 等. 北方常见绿化树种凋落物添加对城市土壤有机碳组成特征的影响[J]. 植物科学学报, 2024, 42(2): 140-149.
- ZHANG X X, TIAN S, ZENG L, et al. Effects of litter addition from common greening tree species in northern China on organic carbon composition characteristics of urban soils[J]. Plant Science Journal, 2024, 42(2): 140-149.
- [7] 姜永孟, 苏浩浩, 陆宇明, 等. 针阔混交措施对红壤侵蚀区马尾松林土壤有机碳稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(5): 323-331.
- JIANG Y M, SU H H, LU Y M, et al. Effect of coniferous and broadleaf mixture measures on soil organic carbon stability of *Pinus massoniana* plantation in red soil erosion area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 323-331.
- [8] ZHENG Y, HU Z K, PAN X, et al. Carbon and nitrogen transfer from litter to soil is higher in slow than rapid decomposing plant litter: A synthesis of stable isotope studies[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 156: e108196.
- [9] ZHANG M, DONG L G, FEI S X, et al. Responses of soil organic carbon mineralization and microbial communities to leaf litter addition under different soil layers[J]. Forests, 2021, 12(2): e170.
- [10] BAI X J, ZHAI G Q, WANG B R, et al. Litter quality controls the contribution of microbial carbon to main microbial groups and soil organic carbon during its decomposition[J]. Biology and Fertility of Soils, 2024, 60(2): 167-181.
- [11] COTRUFO M F, WALLENSTEIN M D, BOOT C M, et al. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: Do labile plant inputs form stable soil organic matter?[J]. Global Change Biology, 2013, 19(4): 988-995.
- [12] 王清奎, 田鹏, 孙兆林, 等. 森林土壤有机质研究的现状与挑战[J]. 生态学杂志, 2020, 39(11): 3829-3843.
- WANG Q K, TIAN P, SUN Z L, et al. Research on soil organic matter in forest ecosystems: Status and challenge[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(11): 3829-3843.

- [13] 郭鑫,罗欢,许雪梅,等.不同品质凋落物分解对黄土高原草地土壤有机碳及其稳定性的影响[J].草业学报,2023,32(5):83-93.
- GUO X, LUOH, XU X M, et al. Effects of litter decomposition with different qualities on soil organic carbon content and its stability in grassland on the Loess Plateau[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(5): 83-93.
- [14] 郭晓伟,张雨雪,尤业明,等.凋落物输入对森林土壤有机碳转化与稳定性影响的研究进展[J].应用生态学报,2024,35(9):2352-2361.
- GUO X W, ZHANG Y X, YOU Y M, et al. Research advance in the effects of litter input on forest soil organic carbon transformation and stability[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(9): 2352-2361.
- [15] FRESCHET G T, AERTS R, CORNELISSEN J H C. A plant economics spectrum of litter decomposability[J]. Functional Ecology, 2012, 26(1): 56-65.
- [16] CAMBARDELLA C A, ELLIOTT E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(3): 777-783.
- [17] LIAO C, LONG C Y, ZHANG Q, et al. Stronger effect of litter quality than micro-organisms on leaf and root litter C and N loss at different decomposition stages following a subtropical land use change[J]. Functional Ecology, 2022, 36(4): 896-907.
- [18] 刘莎茜,杨瑞,侯春兰,等.贵州山区生态茶园不同凋落物木质素、纤维素分解特征[J].茶叶科学,2021,41(5): 654-668.
- LIU S Q, YANG R, HOU C L, et al. Decomposition characteristics of lignin and cellulose in different litters of ecological tea gardens in mountainous areas of Guizhou[J]. Journal of Tea Science, 2021, 41(5): 654-668.
- [19] 梁丛颖,林璐.环境微生物介导的木质素代谢及其资源化利用研究进展[J].微生物学通报,2020,47(10):3380-3392.
- LIANG C Y, LIN L. Environmental microorganisms driven lignin biodegradation and their roles in lignin utilization[J]. Microbiology China, 2020, 47(10): 3380-3392.
- [20] 栾历历,刘恩媛,顾新,等.凋落物处理和氮添加对松栎混交林土壤生态酶化学计量的影响[J].生态学报,2020,40(24):9220-9233.
- LUAN L L, LIU E Y, GU X, et al. Effects of litter manipulation and nitrogen addition on soil ecoenzymatic stoichiometry in a mixed pine and oak forest[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(24): 9220-9233.
- [21] 覃宇,张丹桔,李勋,等.马尾松与阔叶树种混合凋落叶分解过程中总酚和缩合单宁的变化[J].应用生态学报,2018,29(7):2224-2232.
- QIN Y, ZHANG D J, LI X, et al. Changes of total phenols and condensed tannins during the decomposition of mixed leaf litter of *Pinus massoniana* and broad-leaved trees[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(7): 2224-2232.
- [22] 湛贤,刘洋,唐实玉,等.川西亚高山森林凋落物不同分解阶段基质质量特征[J].西北植物学报,2017,37(3): 586-594.
- CHEN X, LIU Y, TANG S Y, et al. Substrate quality characteristics of forest litter at different decomposition stages in the western Sichuan subalpine region[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2017, 37(3): 586-594.
- [23] 左巍,贺康宁,田赟,等.青海高寒区不同林分类型凋落物养分状况及化学计量特征[J].生态学报,2016,35(9):2271-2278.
- ZUO W, HE K N, TIAN Y, et al. Surface litter stoichiometry for five forest types in alpine region, Qinghai, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(9): 2271-2278.
- [24] 李慧璇,马红亮,尹云锋,等.亚热带天然阔叶林凋落物分解过程中活性、惰性碳氮的动态特征[J].植物生态学报,2023,47(5):618-628.
- LI H X, MA H L, YIN Y F, et al. Dynamic of labile, recalcitrant carbon and nitrogen during the litter decomposition in a subtropical natural broadleaf forest[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(5): 618-628.
- [25] 岳可欣,龚吉蕊,于上媛,等.氮添加下典型草原凋落物质量和土壤酶活性对凋落物分解速率的影响[J].草业学报,2020,29(6):71-82.
- YUE K X, GONG J R, YU S Y, et al. Effects of litter quality and soil enzyme activity on litter decomposition rate in typical grassland subject to nitrogen addition[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(6): 71-82.
- [26] 李志安,邹碧,丁永祯,等.森林凋落物分解重要影响因素及其研究进展[J].生态学杂志,2004,23(6):77-83.
- LI Z A, ZOU B, DING Y Z, et al. Key factors of forest litter decomposition and research progress[J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(6): 77-83.
- [27] 李海涛,于贵瑞,李家永,等.井冈山森林凋落物分解动态及磷、钾释放速率[J].应用生态学报,2007,18(2):233-240.
- LI H T, YU G R, LI J Y, et al. Dynamics of litter decomposition and phosphorus and potassium release in Jinggang Mountain region of Jiangxi Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(2): 233-240.
- [28] 赵继德,杨雨春,申方圆,等.4种落叶松人工林凋落物分解与养分释放动态特征[J].中南林业科技大学学报,2024,44(7):119-129.

- ZHAO J D, YANG Y C, SHEN F Y, et al. Dynamic characteristics of litter decomposition and nutrient release in 4 species of *Larix* plantations [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2024, 44 (7):119-129.
- [29] LYU M K, HOMYAK P M, XIE J S, 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.
- [30] 李常准,陈立新,段文标,等.凋落物处理对不同林型土壤有机碳全氮全磷的影响[J].中国水土保持科学, 2020, 18(1):100-109.
- LI C Z, CHEN L X, DUAN W B, et al. Effects of litter treatment on soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus in different forest types [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(1):100-109.
- [31] GUO J H, FENG H L, MCNIE P, et al. Species mixing improves soil properties and enzymatic activities in Chinese fir plantations: A meta-analysis [J]. Catena, 2023, 220:e106723.
- [32] 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 Z X, SU B Q, SHANGGUAN Z P. 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.
- [33] LI S T, LYU M K, DENG C, et al. Input of high-quality litter reduces soil carbon losses due to priming in a subtropical pine forest [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2024, 194:e109444.
- [34] ZHANG Y X, GUO X W, CHEN L X, et al. Global pattern of organic carbon pools in forest soils [J]. Global Change Biology, 2024, 30(6):e17386.
- [35] 汪景宽,徐英德,丁凡,等.植物残体向土壤有机质转化过程及其稳定机制的研究进展[J].土壤学报, 2019, 56 (3):528-540.
- WANG J K, XU Y D, DING F, et al. Process of plant residue transforming into soil organic matter and mechanism of its stabilization: A review [J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(3):528-540.
- [36] XU C H, XU X, JU C H, et al. Long-term, amplified responses of soil organic carbon to nitrogen addition worldwide [J]. Global Change Biology, 2021, 27(6):1170-1180.
- [37] XIAO W, CHEN X, JING X, et al. A meta-analysis of soil extracellular enzyme activities in response to global change [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 123:21-32.
- [38] ZHU Q R, YANG Z Y, ZHANG Y P, et al. Intercropping regulates plant- and microbe-derived carbon accumulation by influencing soil physicochemical and microbial physiological properties [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2024, 364:e108880.
- [39] ROCCI K S, LAVALLEE J M, STEWART C E, et al. Soil organic carbon response to global environmental change depends on its distribution between mineral-associated and particulate organic matter: A meta-analysis [J]. Science of the Total Environment, 2021, 793:e148569.
- [40] 邓蕾,刘玉林,李继伟,等.植被恢复的土壤固碳效应:动态与驱动机制[J].水土保持学报, 2023, 37(2):1-10.
- DENG L, LIU Y L, LI J W, et al. Effect of vegetation restoration on soil carbon sequestration: Dynamics and its driving mechanisms [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(2):1-10.
- [41] 詹瑾,丛安琪,李玉霖,等.长期氮沉降和地上凋落物处理对半干旱区沙质草地表层土壤碳氮组分的影响[J].水土保持学报, 2023, 37(4):227-234.
- ZHAN J, CONG A Q, LI Y L, et al. Effects of long-term nitrogen deposition and aboveground litter treatment on top soil carbon and nitrogen fractions in the semi-arid sandy grassland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(4):227-234.
- [42] YUE K, FORNARA D A, YANG W Q, et al. Influence of multiple global change drivers on terrestrial carbon storage: Additive effects are common [J]. Ecology Letters, 2017, 20(5):663-672.
- [43] 冯继广,张秋芳,袁霞,等.氮磷添加对土壤有机碳的影响:进展与展望[J].植物生态学报, 2022, 46(8):855-870.
- FENG J G, ZHANG Q F, YUAN X, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil organic carbon: Review and prospects [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2022, 46(8):855-870.
- [44] 李永涛,魏海霞,王莉莉,等.凋落物输入变化对黄河三角洲柽柳人工林土壤有机碳及其组分的影响[J].东北林业大学学报, 2024, 52(7):64-70.
- LI Y T, WEI H X, WANG L L, et al. Effects of litter input changes on soil organic carbon and its fractions in tamarix chinensis plantation in the Yellow River Delta [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024, 52(7):64-70.