

引用格式: 张天翼, 王志超, 许宇星, 等. 雷州半岛 4 种类型人工林土壤有机碳活性组分及其影响因素[J]. 浙江农林大学学报, 2026, 43(4): 681–694. ZHANG Tianyi, WANG Zhichao, XU Yuxing, *et al.* Active components of soil organic carbon and influencing factors in 4 types of plantations on Leizhou Peninsula[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2026, 43(4): 681–694.

雷州半岛 4 种类型人工林土壤有机碳活性组分及其影响因素

张天翼¹, 王志超¹, 许宇星¹, 黄润霞¹, 陶 怡², 钟源源², 竹万宽¹

(1. 中国林业科学研究院 速生树木研究所 广东湛江桉树林生态系统定位观测研究站, 广东 湛江 524022; 2. 中国林业科学研究院 热带林业实验中心 广西友谊关森林生态系统定位观测研究站, 广西 凭祥 532600)

摘要: 【目的】探究不同类型人工林对土壤有机碳活性组分及碳库管理指数的影响, 为改善土壤碳库质量并提高综合效益提供科学依据。【方法】以雷州半岛 4 种类型人工林(尾叶桉 *Eucalyptus urophylla* 纯林、尾叶桉-灰木莲 *Manglietia glauca* 混交林、尾叶桉-红锥 *Castanopsis hystrix* 混交林、湿地松 *Pinus elliottii*-红锥混交林)为研究对象, 分析不同种植模式下土壤有机碳储量和有机碳活性组分(易氧化有机碳、颗粒有机碳、轻组有机碳、可溶性有机碳、微生物生物量碳)在 0~20 cm 土层的分布情况; 明确土壤有机碳活性组分与土壤理化性质的关系; 计算碳库活度指数、碳库指数、碳库管理指数、氧化稳定系数, 明确不同种植模式的碳库变化情况。【结果】①土壤有机碳储量、有机碳及其活性碳组分质量分数均随着土层加深而减少。相较于其他 3 种种植模式, 尾叶桉-红锥混交林能较大提升土壤有机碳储量; 尾叶桉纯林在颗粒有机碳和轻组有机碳上呈现更高的积累量; 尾叶桉-红锥混交林在土壤有机碳、易氧化有机碳和可溶性有机碳上呈现更高的积累量; 尾叶桉纯林和湿地松-红锥混交林的微生物生物量碳呈现更高的积累量 ($P<0.05$)。②尾叶桉纯林的颗粒有机碳/土壤有机碳和轻组有机碳/土壤有机碳显著高于其他林分 ($P<0.05$)。③在不同土层中尾叶桉-红锥混交林土壤碳库指数显著高于尾叶桉纯林; 湿地松-红锥混交林土壤氧化稳定系数在不同林分中较低 ($P<0.05$)。④冗余分析结果显示: 土壤全氮质量分数是影响不同种植模式以及不同土层深度土壤有机碳组分的主要因子。【结论】不同种植模式显著改变表层土壤有机碳储量及活性有机碳分布。尾叶桉纯林和湿地松-红锥混交林土壤有机碳库稳定性较低。尾叶桉-红锥混交林能在提高土壤有机碳储量的同时增强土壤碳库稳定性。地区构建林分应根据土壤性质、碳库基本情况和氮磷等养分的有效性采取适宜的管理措施, 增强其固碳效率和碳汇水平。图 4 表 5 参 63

关键词: 活性有机碳; 碳库管理指数; 土壤质量; 尾叶桉; 混交林

中图分类号: S714.2 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2026)04-0681-14

Active components of soil organic carbon and influencing factors in 4 types of plantations on Leizhou Peninsula

ZHANG Tianyi¹, WANG Zhichao¹, XU Yuxing¹, HUANG Runxia¹,
TAO Yi², ZHONG Yuanyuan², ZHU Wankuan¹

(1. Positioning Observation and Research Station of Eucalyptus Plantation Ecosystem, Research Institute of Fast-Growing Trees, Chinese Academy of Forestry, Zhanjiang 524022, Guangdong, China; 2. Youyiguan Forest Ecosystem Research Station, Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang 532600, Guangxi, China)

Abstract: [Objective] This study aims to explore the effects of different types of plantations on the active components of soil organic carbon and carbon pool management index, so as to provide a scientific basis for improving the quality of soil carbon pools and enhancing overall benefits. [Method] The 4 types of plantations

收稿日期: 2026-01-02; 修回日期: 2026-06-12

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFD2201005)

作者简介: 张天翼 (ORCID: 0009-0003-8311-6614), 从事森林生态学研究。E-mail: 15235437960@163.com。通信作者: 竹万宽 (ORCID: 0000-0002-4344-1688), 副研究员, 博士, 从事森林碳汇计量监测研究。E-mail: zww_2015@163.com

on Leizhou Peninsula were taken as research objects, including *Eucalyptus urophylla*, *E. urophylla-Manglietia glauca*, *E. urophylla-Castanopsis hystrix* and *Pinus elliottii-C. hystrix*. The distribution of soil organic carbon storage and organic carbon (SOC) active components, namely easily oxidizable organic carbon (EOC), particulate organic carbon (POC), light fraction organic carbon (LFOC), dissolved organic carbon (DOC), and microbial biomass carbon (MBC) in the 0–20 cm soil layer under different planting patterns was analyzed. The relationship between the active components of soil organic carbon and soil physicochemical properties was clarified. The carbon pool activity index (LI), carbon pool index (CPI), carbon pool management index (CPMI), and oxidation stability coefficient (Kos) were calculated to elucidate the carbon pool changes under different planting patterns. [Result] (1) The mass fractions of soil organic carbon storage, organic carbon, and its active carbon components all decreased as the soil layer deepened. Compared to the other three planting patterns, the mixed plantation of *E. urophylla* and *C. hystrix* could significantly enhance soil organic carbon storage. The *E. urophylla* pure plantation showed higher accumulation in POC and LFOC. The mixed plantation of *E. urophylla* and *C. hystrix* showed higher accumulation in SOC, EOC, and DOC. The *E. urophylla* pure plantation and the *P. elliottii-C. hystrix* mixed plantation showed higher accumulation in MBC ($P < 0.05$). (2) The ratios of POC/SOC and LFOC/SOC in the *E. urophylla* pure plantation were significantly higher than those in other stands ($P < 0.05$). (3) In different soil layers, the soil carbon pool index of the *E. urophylla-C. hystrix* mixed plantation was significantly higher than that of the *E. urophylla* pure plantation. The Kos of the *P. elliottii-C. hystrix* mixed plantation was lower in different stands ($P < 0.05$). (4) Redundancy analysis showed that total nitrogen content was the main factor affecting soil organic carbon fractions under different planting patterns and soil depths. [Conclusion] Different planting patterns significantly alter the surface soil organic carbon storage and the distribution of active organic carbon. The stability of the soil organic carbon pool is relatively low in the *E. urophylla* pure plantation and the *P. elliottii-C. hystrix* mixed plantation. The *E. urophylla-C. hystrix* mixed plantation could substantially increase soil organic carbon storage while enhancing soil carbon pool stability. For plantation construction in the region, appropriate management measures should be taken based on soil properties, basic carbon pool conditions, and the effectiveness of nutrients such as nitrogen and phosphorus to enhance carbon sequestration efficiency and carbon sink level. [Ch, 4 fig. 5 tab. 63 ref.]

Key words: active organic carbon; carbon pool management index; soil quality; *Eucalyptus urophylla*; mixed plantation

气候变化显著改变了全球生态系统格局,减少温室气体排放和增强森林生态系统碳汇功能是应对全球气候变化的2条主要途径^[1]。森林生态系统作为陆地碳汇的主要载体,储存了约50%的土壤有机碳(SOC)^[2]。土壤有机碳其微小变化会显著影响全球碳平衡^[3],其中,人工林土壤碳固存潜力可通过树种选择、结构优化等经营措施进行有效调控^[4]。因此,制定科学有效的人工林管理策略以提升森林土壤碳储量尤为重要。

已有研究表明:土壤有机碳利于形成良好的土壤结构,提高生态系统生物多样性^[5],其稳定性与动态变化直接关系到生态系统的长期固碳潜力^[6],常被用作评价地区土壤质量和土地生产力^[7-8]。然而,土壤有机碳仅能反映有机质的静态储量而非质量,难以敏感响应短期人为干扰或环境变化^[8-9]。大量研究表明:活性有机碳组分,包括易氧化有机碳(EOC)、颗粒有机碳(POC)、可溶性有机碳(DOC)、微生物生物量碳(MBC)和轻组有机碳(LFOC),具有较高的周转速率和对环境变化的敏感性^[10-11]。综合评价活性有机碳组分能更全面地反映林型变化对土壤有机碳的影响。为量化碳库质量变化,基于土壤有机碳和氧化有机碳建立的碳库活度指数(LI)和碳库管理指数(CPMI)被广泛用于评估不同管理措施下碳库的质量变化和稳定性^[12-13]。

雷州半岛地处北热带湿润大区北缘。人工林种植规模大,是该区域实现增强森林生态系统碳汇功能目

标，发挥关键生态服务功能的重要载体。研究发现：林龄增长、多代连栽及季节变化对桉树 *Eucalyptus* 人工林土壤有机碳及部分活性组分有显著影响^[14-16]，但目前研究多集中于土壤有机碳和少数碳组分，缺乏对多种活性有机碳分布特征的整合分析。同时，研究多局限于桉树单一树种，未能系统比较不同树种组成的人工林的碳库质量差异，也少引入碳库管理指数等综合指标来量化评价不同林分经营模式的碳库质量。因此，有必要从土壤有机碳储量、活性有机碳组分及碳库质量等方面，综合评估不同种植模式对人工林土壤碳库的影响。

本研究以雷州半岛 4 种典型人工林 (尾叶桉 *Eucalyptus urophylla* 纯林、尾叶桉-灰木莲 *Manglietia glauca* 混交林、尾叶桉-红锥 *Castanopsis hystrix* 混交林、湿地松 *Pinus elliottii*-红锥混交林) 为研究对象，系统测定 0~20 cm 土层中土壤有机碳及 5 类活性有机碳组分，包括易氧化有机碳、颗粒有机碳、可溶性有机碳、微生物生物量碳和轻组有机碳，并结合土壤容重、土壤体积含水量和土壤全氮等理化性质，分析不同林分土壤碳库质量及其主要影响因素。研究内容主要包括：①比较不同林分土壤有机碳储量、活性有机碳组分质量分数及其占土壤有机碳的比例；②分析活性有机碳组分与主要土壤理化性质之间的关系；③基于碳库活度指数和碳库管理指数评价不同种植模式下土壤碳库质量和固碳稳定性潜力。研究结果可为雷州半岛人工林树种配置优化、林地质量评价和森林碳汇功能提升提供理论依据与管理参考。

1 研究区概况

研究区位于广东湛江桉树林生态系统定位观测研究站内 (21°15′53.5″N, 110°05′39.2″E)，平均海拔为 150.4 m。该区地处北热带湿润大区雷琼区北缘，为海洋性季风气候。据遂溪县气象台 1981—2010 年观测数据统计，该地年平均气温为 23.2 ℃，年平均降水量为 1 723.1 mm，集中在 5—10 月，年平均空气相对湿度为 82%，年平均日照时数为 1 937.0 h。试验地土壤类型为玄武岩发育的砖红壤^[17]，土层厚度≥84 cm。

2 研究方法

2.1 样地设置

按照气候条件和立地条件相似性原则，本研究分别选取尾叶桉纯林 (EU)、尾叶桉-灰木莲混交林 (EUM)、尾叶桉-红锥混交林 (EUC)、湿地松-红锥混交林 (PC) 等 4 种人工林为研究对象。尾叶桉和湿地松纯林均为 2007 年种植，造林密度为 1 665 株·hm⁻²。经台风危害及间伐后，保留相同密度，于 2017 年补植混交树种。补种时施用复合肥 500 g·株⁻¹，后无施肥和管理措施，所有混交林样地均严格包含 2 种树种，并保持 1:1 的混交比例。林分概况见表 1。2024 年 1 月，分别在每个林分内随机布设 9 个 20 m×20 m 样方，间距≥30 m。同时，对样方内乔木物种进行每木检尺，记录物种名称、胸径、树高、郁闭度等林分特征；在每个 20 m×20 m 样方内随机布设 3 个 1 m×1 m 草本小样方，记录其种名、盖度等。

表 1 不同林分样地基本特征

Table 1 Basic characteristics of different forest stand plots									
林分	海拔/m	坡度/(°)	林分密度/(株·hm ⁻²)	平均树高/m		平均胸径/cm		郁闭度	草本盖度/%
				尾叶桉	混交树种	尾叶桉	混交树种		
EU	110	<5	800	21.25±0.54		20.0±0.4		0.65±0.05	98
EUM	131	<5	775	20.76±0.56	13.76±0.16	21.0±0.1	13.0±0.1	0.78±0.07	83
EUC	128	<5	825	21.46±0.85	12.15±0.23	21.0±0.1	10.0±0.2	0.76±0.03	85
PC	115	<5	825	12.25±0.74	11.89±0.14	20.0±0.0	10.0±0.1	0.67±0.02	88

说明：EU. 尾叶桉纯林；EUM. 尾叶桉-灰木莲混交林；EUC. 尾叶桉-红锥混交林；PC. 湿地松-红锥混交林。

2.2 土壤样品采集与测定

为确保样品的代表性，在每个样方的 4 个角及中心共计 5 个取样点，用土钻钻取 0~10 和 10~20 cm 土层土样，随后将同一样方内同一土层的土壤样本混合均匀，装入无菌塑料自封袋，在 4 ℃ 冰箱保存，并运至实验室。

土壤含水量采用烘干法测定;土壤容重、毛管孔隙度采用环刀法测定;土壤全氮采用凯氏定氮法测定;土壤全磷采用钼锑抗比色法测定^[18];土壤有机碳采用重铬酸钾氧化-外加热法测定;易氧化有机碳采用高锰酸钾氧化-紫外分光光度法测定;可溶性有机碳采用去离子水浸提-TOC 分析仪法测定;轻组有机碳采用相对密度分组法提取测定;颗粒有机碳采用六偏磷酸钠分散、过筛,重铬酸钾外加热法测定;微生物生物量碳氮磷采用氯仿熏蒸浸提法测定^[19]。

2.3 数据分析

采用土壤碳库管理指数 (CPMI) 定量评价不同种植模式对土壤有机碳库质量的影响^[20]。本研究以同一土层尾叶桉纯林作为对照处理,依据土壤有机碳和易氧化有机碳划分土壤碳库活性特征,其中,碳库活度表示活性碳库与非活性碳库的相对比例。本研究以易氧化有机碳表征活性碳库,以土壤有机碳与易氧化有机碳相减后的部分表征非活性碳库。碳库活度指数表示各林分碳库活度相对于对照处理的变化程度。碳库指数表示各林分土壤有机碳质量分数相对于对照处理的变化程度。碳库管理指数综合反映土壤有机碳数量和活性变化,可用于评价不同种植模式下土壤碳库质量及管理效果。氧化稳定系数表示非活性碳库与活性碳库的相对大小,数值越高,说明土壤有机碳氧化稳定性越强。

土壤有机碳密度和单位面积土壤有机碳储量参照文献 [21] 方法计算。土壤有机碳密度表示一定土层内单位面积土壤有机碳的累积量,计算时综合考虑土壤有机碳质量分数、土层厚度、土壤容重和直径 $\geq 2\text{ mm}$ 石砾体积分数等参数。单位面积土壤有机碳储量由土壤有机碳密度换算得到,单位为 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。本研究分别计算 0~10 和 10~20 cm 土层的土壤有机碳储量,并累加得到 0~20 cm 土层的土壤有机碳储量。

使用 Excel 2019 处理数据。采用 SPSS 24 软件的单因素方差分析 (LSD) 探究土壤有机碳活性组分在不同林分类型的差异特征。双因素方差分析 (two-way ANOVA) 探究林分类型、土层与土壤有机碳活性组分间的交互效应。采用 Pearson 相关分析探究土壤有机碳活性组分与土壤其他环境因子的相关性。基于前人研究^[4],选取与土壤有机碳活性组分可能相关的环境因子为环境变量,以土壤有机碳活性组分及物理组分为响应变量,利用 Canoco 5.0 软件进行冗余分析 (RDA)。采用 Origin 2025 软件制图。

3 结果与分析

3.1 不同林分土壤理化性质、碳储量及有机碳活性组分差异特征

由表 2 可知:尾叶桉-红锥、尾叶桉-灰木莲混交林的 0~10 cm 土层土壤含水量显著高于桉树纯林 ($P<0.05$),湿地松-红锥、尾叶桉-灰木莲混交林的 0~10 cm 土层土壤总孔隙度显著高于尾叶桉纯林 ($P<0.05$),湿地松-红锥混交林、尾叶桉纯林的 0~10 cm 土层土壤全磷质量分数显著高于尾叶桉-灰木莲混交林 ($P<0.05$);尾叶桉-灰木莲混交林的 0~10 cm 土层土壤微生物生物量氮显著低于其他 3 种林分;4 种林分的 0~10 cm 土层土壤容重、毛管孔隙度以及全氮、微生物生物量磷质量分数无显著差异。尾叶桉纯林的 10~20 cm 土层土壤含水量显著低于其他林分 ($P<0.05$),尾叶桉-红锥混交林的 10~20 cm 土层土壤全氮质量分数显著高于湿地松-红锥、尾叶桉-灰木莲混交林 ($P<0.05$),湿地松-红锥的 10~20 cm 土层土壤全磷质量分数显著高于尾叶桉-红锥、尾叶桉-灰木莲混交林 ($P<0.05$);4 种林分的 10~20 cm 土层土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度、微生物生物量氮、微生物生物量磷无显著性差异。

如图 1 所示:4 种林分 0~10 cm 土层土壤有机碳及其活性组分质量分数普遍显著高于 10~20 cm 土层 ($P<0.05$),符合土壤养分的垂直分异特征。0~10 cm 土层对比来看,尾叶桉纯林土壤有机碳显著低于尾叶桉-红锥和尾叶桉-灰木莲混交林 ($P<0.05$);易氧化有机碳、颗粒有机碳在不同林分间无显著差异,尾叶桉纯林轻组有机碳显著高于湿地松-红锥混交林 ($P<0.05$),尾叶桉-红锥混交林可溶性有机碳显著高于其他林分 ($P<0.05$),湿地松-红锥混交林微生物生物量碳显著高于除尾叶桉纯林外的其他林分 ($P<0.05$)。10~20 cm 土层,尾叶桉-红锥混交林土壤有机碳显著高于其他林分 ($P<0.05$),易氧化有机碳在不同林分间无显著性差异,尾叶桉纯林颗粒有机碳、轻组有机碳显著高于其他林分 ($P<0.05$),尾叶桉-红锥混交林可溶性有机碳显著高于除尾叶桉-灰木莲混交林外的其他林分 ($P<0.05$),尾叶桉-灰木莲混交林微生物生物量碳显著低于其他林分 ($P<0.05$)。

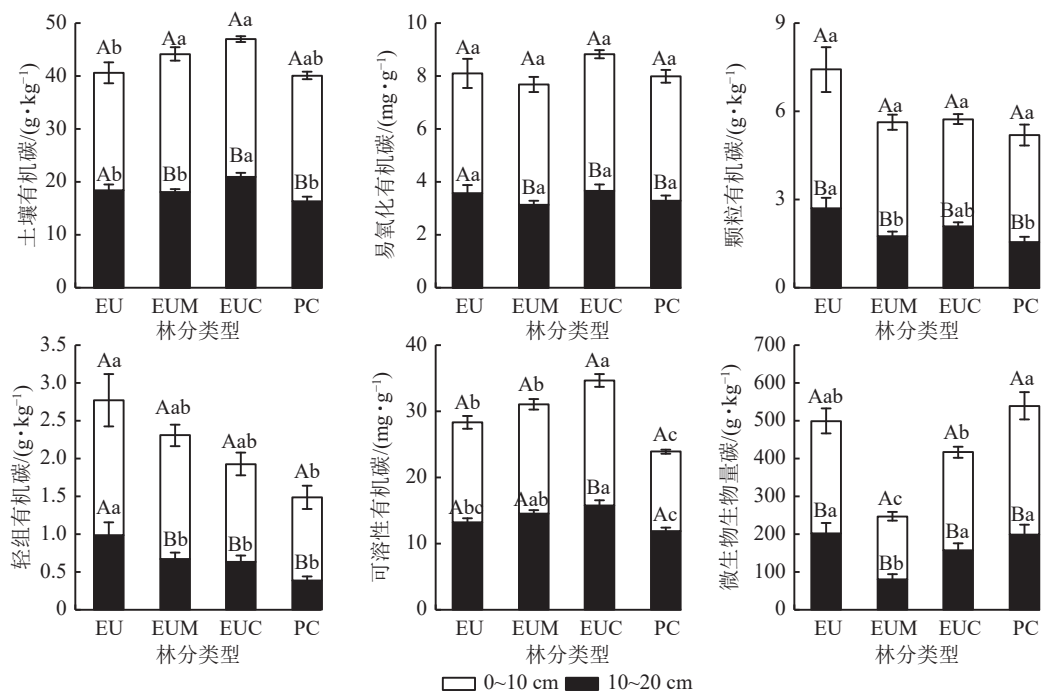
表 3 双因素方差分析结果表明:林分类型和土层深度对土壤有机碳及其活性组分质量分数均具有显著的主效应 ($P<0.05$),但两者的交互作用不显著。

表 2 不同林分土壤理化性质差异

Table 2 Differences in soil physicochemical properties among different forest stands

土层/ cm	林分	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	体积含 水量/%	土壤总 孔隙度	土壤毛管 孔隙度	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	微生物生物 量氮/(g·kg ⁻¹)	微生物生物 量磷/(g·kg ⁻¹)
0~10	EU	0.96±0.06 a	0.29±0.01 b	0.59±0.02 b	0.57±0.02 a	1.66±0.14 a	0.62±0.02 ab	0.026±0.005 a	0.005±0.002 a
	EUM	0.95±0.02 a	0.33±0.01 a	0.64±0.01 a	0.60±0.01 a	1.79±0.09 a	0.50±0.04 c	0.016±0.001 b	0.002±0.001 a
	EUC	0.91±0.02 a	0.33±0.01 a	0.63±0.01 ab	0.59±0.01 a	1.92±0.05 a	0.56±0.05 bc	0.023±0.002 ab	0.004±0.001 a
	PC	0.88±0.02 a	0.31±0.01 ab	0.65±0.01 a	0.61±0.01 a	1.80±0.05 a	0.69±0.02 a	0.026±0.003 a	0.002±0.001 a
10~20	EU	0.91±0.03 a	0.30±0.01 b	0.60±0.03 a	0.56±0.03 a	1.39±0.08 ab	0.59±0.01 ab	0.018±0.003 a	0.002±0.000 a
	EUM	0.92±0.04 a	0.33±0.01 a	0.63±0.02 a	0.58±0.02 a	1.26±0.07 b	0.51±0.03 b	0.017±0.002 a	0.002±0.001 a
	EUC	0.94±0.05 a	0.33±0.01 a	0.59±0.02 a	0.56±0.02 a	1.54±0.06 a	0.56±0.03 b	0.016±0.002 a	0.001±0.000 a
	PC	0.93±0.05 a	0.34±0.01 a	0.61±0.02 a	0.57±0.02 a	1.33±0.06 b	0.66±0.03 a	0.014±0.002 a	0.001±0.000 a

说明：EU. 尾叶桉纯林；EUM. 尾叶桉-灰木莲混交林；EUC. 尾叶桉-红锥混交林；PC. 湿地松-红锥混交林。不同小写字母表示不同林分在同一土层间差异显著 ($P<0.05$)。



EU. 尾叶桉纯林；EUM. 尾叶桉-灰木莲混交林；EUC. 尾叶桉-红锥混交林；PC. 湿地松-红锥混交林。

不同大写字母表示同一林分不同土层间差异显著 ($P<0.05$)，不同小写字母表示同一土层不同林分间差异显著 ($P<0.05$)。

图 1 不同林分土壤有机碳及其活性组分的差异

Figure 1 Differences in soil organic carbon and its labile components among different forest stands

由图 2 可知：尾叶桉纯林、尾叶桉-灰木莲混交林、湿地松-红锥混交林 0~10 cm 土层土壤有机碳储量显著高于 10~20 cm 土层 ($P<0.05$)。在 10~20 cm 土层中，尾叶桉-红锥混交林土壤有机碳储量显著高于尾叶桉-灰木莲混交林和湿地松-红锥混交林 ($P<0.05$)。

3.2 土壤有机碳活性组分与理化性质的关系

在 0~10 cm 土层，土壤有机碳活性组分间呈现广泛且显著的正相关 (图 3)：土壤有机碳与易氧化有机碳、颗粒有机碳、轻组有机碳、可溶性有机碳均呈显著正相关 ($P<0.05$)，易氧化有机碳与颗粒有机碳、轻组有机碳、微生物生物量碳呈显著正相关 ($P<0.05$)，颗粒有机碳与轻组有机碳、微生物生物量碳呈显著正相关性 ($P<0.05$)。土壤有机碳及其活性组分均与微生物生物量磷 (MBP) 呈显著正相关 ($P<0.05$)，其中易氧化有机碳、颗粒有机碳、轻组有机碳与微生物生物量磷达极显著正相关水平 ($P<0.01$)。土壤有机碳及其活性组分均与土壤全氮呈显著正相关 ($P<0.05$)，而且除可溶性有机碳外，其他组分与土壤全氮均达极显著水平 ($P<0.01$)。

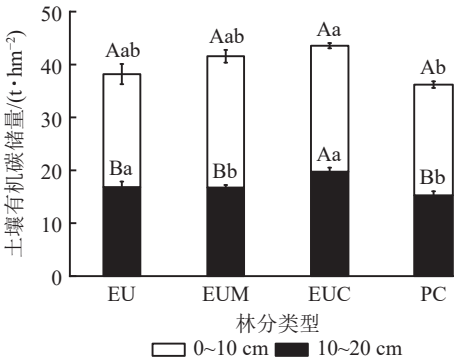
表 3 不同林分类型和土层深度对土壤有机碳及其活性组分影响的双因素方差分析

Table 3 Two-way ANOVA results of the effects of stand type and soil depth on soil organic carbon and its labile components

因变量	变异来源	自由度	<i>F</i>	<i>P</i>	因变量	变异来源	自由度	<i>F</i>	<i>P</i>
土壤有机碳	林分类型	3	4.598	0.006	轻组有机碳	林分类型	3	5.072	0.003
	土层深度	1	62.725	0.000		土层深度	1	42.033	0.000
	林分类型×土层深度	3	1.609	0.196		林分类型×土层深度	3	0.307	0.820
易氧化有机碳	林分类型	3	1.418	0.246	可溶性有机碳	林分类型	3	18.855	0.000
	土层深度	1	40.856	0.000		土层深度	1	11.814	0.001
	林分类型×土层深度	3	0.378	0.769		林分类型×土层深度	3	1.368	0.260
颗粒有机碳	林分类型	3	3.792	0.014	微生物生物量碳	林分类型	3	14.048	0.000
	土层深度	1	59.778	0.000		土层深度	1	38.386	0.000
	林分类型×土层深度	3	0.272	0.845		林分类型×土层深度	3	0.502	0.682

在 10~20 cm 土层，土壤有机碳及其活性组分间的相关性表现与 0~10 cm 土层基本一致。微生物生物量磷仅与轻组有机碳存在极显著正相关 ($P<0.01$)，这与 0~10 cm 土层差异较大。土壤全氮与土壤有机碳及其活性组分间的相关性均达显著水平 ($P<0.05$)，与 0~10 cm 土层表现一致。

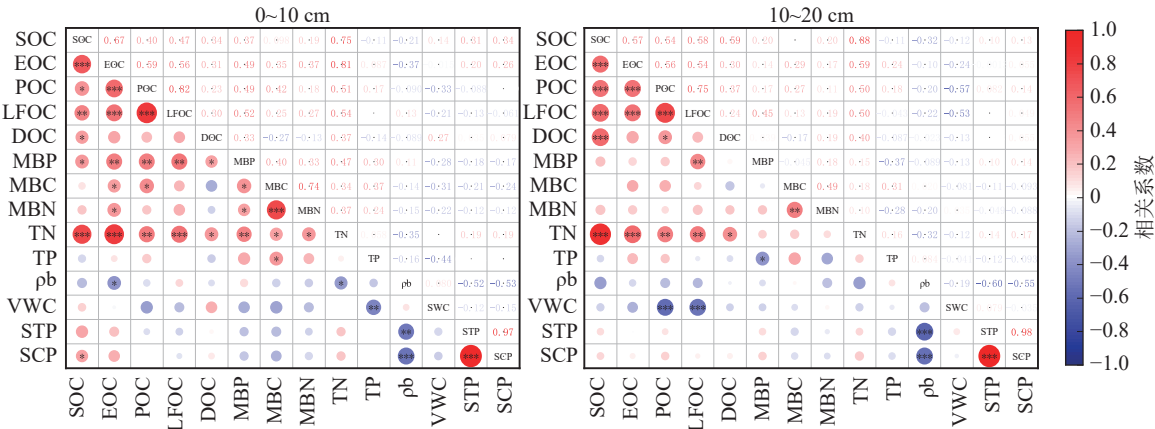
由图 4 的冗余分析结果可知：在 0~10 cm 土层中，全氮是解释土壤有机碳及其活性组分变异的最主要因子，贡献率为 35.6% ($P=0.004$)，主导了约 36.0% 的总变异。此外，土壤体积含水量 (贡献率为 13.1%， $P=0.038$) 也显著贡献于第 1 轴，进一步提升了模型的解释力 (前 2 轴累计解释 46.29%)。相比之下，10~20 cm 土层中，全氮仍居主导 (贡献率为 30.9%， $P=0.002$)，与土壤体积含水量 (贡献率为 7.8%， $P=0.038$) 累计解释约 38.7% 的变异，前 2 轴累计解释了总变异的 44.02%。表明全氮是土壤有机碳及其活性组分的核心驱动因子。



EU. 尾叶桉纯林; EUM. 尾叶桉-灰木莲混交林; EUC. 尾叶桉-红锥混交林; PC. 湿地松-红锥混交林。不同大写字母表示同一林分不同土层间差异显著 ($P<0.05$)，不同小写字母表示同一土层不同林分间差异显著 ($P<0.05$)。

图 2 不同林分土壤有机碳储量

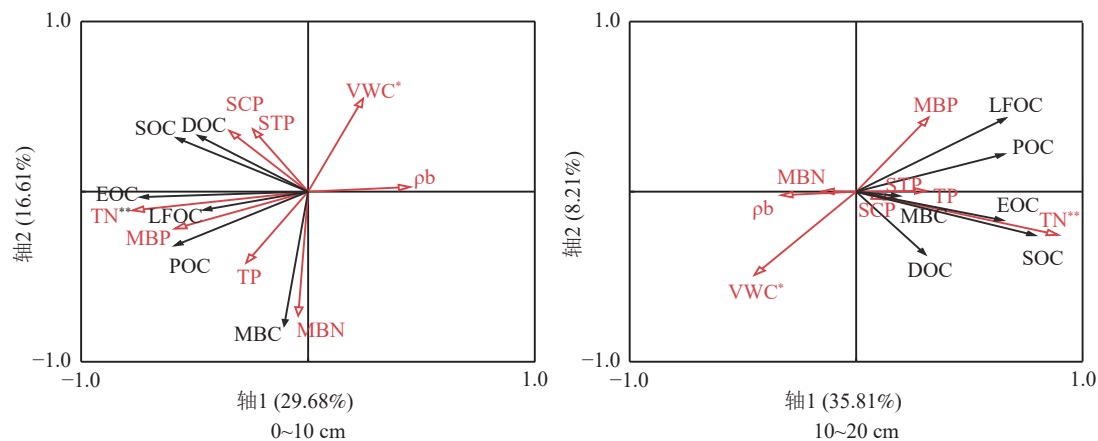
Figure 2 Soil organic carbon storage among different forest stands



SOC. 有机碳; EOC. 易氧化有机碳; POC. 颗粒有机碳; LFOC. 轻组有机碳; DOC. 可溶性有机碳; MBC. 微生物生物量碳; MBP. 微生物生物量磷; MBN. 微生物生物量氮; TN. 全氮; TP. 全磷; pb. 容重; VWC. 体积含水量; STP. 总孔隙度; SCP. 毛管孔隙度。*、**、***分别表示 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 。

图 3 土壤有机碳活性组分与土壤理化性质的相关性

Figure 3 Correlation between labile components of soil organic carbon and soil physicochemical properties



SOC. 土壤有机碳; EOC. 易氧化有机碳; POC. 颗粒有机碳; LFOC. 轻组有机碳; DOC. 可溶性有机碳; MBC. 微生物生物量碳; MBP. 微生物生物量磷; MBN. 微生物生物量氮; TN. 全氮; TP. 全磷; ρ_b . 容重; VWC. 体积含水量; STP. 总孔隙度; SCP. 毛管孔隙度。图中红色箭头表示环境因子, 蓝色箭头表示土壤有机碳及其活性组分; 轴1和轴2括号内数值表示对应排序轴的解釋率。
*、**分别表示环境因子经置换检验后在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上显著。

图 4 土壤有机碳及其活性组分与影响因子的冗余分析

Figure 4 Redundancy analysis of soil organic carbon chemical compositions and environmental variables

3.3 不同林分土壤碳库管理指数和碳组分占比差异特征

由表 4 单因素方差分析结果可知: 在 0~10 cm 土层, 碳库活度、碳库活度指数、碳库管理指数和氧化稳定系数在不同林分间差异均不显著; 尾叶桉-红锥、尾叶桉-灰木莲混交林的碳库指数显著高于尾叶桉纯林 ($P<0.05$)。在 10~20 cm 土层, 碳库活度、碳库活度指数和碳库管理指数在不同林分间差异均不显著, 碳库指数表现为尾叶桉-红锥混交林显著高于其他林分 ($P<0.05$)。可见, 林分类型仅对碳库指数产生了一定影响。

表 4 不同林分土壤碳库管理指数和氧化稳定性

Table 4 Soil carbon pool management index and oxidative stability among different forest stands

土层/cm	林分	碳库活度	碳库活度指数	碳库指数	碳库管理指数	氧化稳定系数
0~10	EU	0.25±0.02 a	1.00±0.08 a	1.00±0.09 b	102.07±13.66 a	4.12±0.28 a
	EUM	0.22±0.02 a	0.85±0.06 a	1.17±0.06 a	98.78±7.01 a	4.89±0.45 a
	EUC	0.25±0.01 a	0.98±0.03 a	1.18±0.02 a	114.79±3.98 a	4.07±0.13 a
	PC	0.25±0.01 a	0.98±0.05 a	1.07±0.03 ab	104.49±6.23 a	4.13±0.22 a
10~20	EU	0.24±0.01 a	1.00±0.06 a	1.00±0.06 b	100.79±9.51 a	4.27±0.26 ab
	EUM	0.21±0.02 a	0.88±0.07 a	0.98±0.03 b	85.99±5.91 a	4.91±0.30 a
	EUC	0.21±0.01 a	0.88±0.05 a	1.14±0.04 a	100.71±7.45 a	4.86±0.33 ab
	PC	0.26±0.02 a	1.09±0.10 a	0.89±0.04 b	94.51±6.82 a	4.04±0.30 b

说明: EU. 尾叶桉纯林; EUM. 尾叶桉-灰木莲混交林; EUC. 尾叶桉-红锥混交林; PC. 湿地松-红锥混交林。不同小写字母表示同一土层不同林分间差异显著 ($P<0.05$)。

由表 5 可知: 0~10 cm 土层, 尾叶桉纯林的颗粒有机碳/土壤有机碳和轻组有机碳/土壤有机碳显著高于其他林分 ($P<0.05$), 尾叶桉纯林的微生物生物量碳/土壤有机碳和湿地松-红锥混交林的微生物生物量碳/土壤有机碳间无显著差异, 但均显著高于其他林分 ($P<0.05$), 说明尾叶桉纯林处理显著提升了颗粒有机碳和轻组有机碳占比, 尾叶桉纯林和湿地松-红锥混交林处理提升了微生物生物量碳占比。10~20 cm 土层有机碳活性组分占比与 0~10 cm 土层表现基本一致。总体而言, 表层有机碳活性组分占比高于深层, 尾叶桉纯林的颗粒有机碳和轻组有机碳占比更高, 而湿地松-红锥混交林在微生物生物量碳占比上与尾叶桉纯林相当, 显示不同处理对不同深度土壤有机碳活性组分的影响存在显著差异。

4 讨论

4.1 林分类型对土壤有机碳储量、有机碳及其活性组分的影响

本研究中, 不同林分类型及植被凋落物输入显著改变了土壤理化性质与微生物特性, 进而影响土壤

表 5 不同林分土壤有机碳活性组分占土壤有机碳比例

Table 5 Proportions of soil organic carbon labile components to total soil organic carbon among different forest stands						
土层/cm	林分	易氧化有机碳/ 土壤有机碳/%	颗粒有机碳/ 土壤有机碳/%	可溶性有机碳/ 土壤有机碳/%	微生物生物量碳/ 土壤有机碳/%	轻组有机碳/ 土壤有机碳/%
0~10	EU	20.06±1.27 a	20.65±2.31 a	0.07±0.01 a	1.35±0.15 a	7.56±1.05 a
	EUM	17.63±1.08 a	15.21±1.15 b	0.06±0.00 ab	0.65±0.05 c	6.42±0.60 ab
	EUC	19.84±0.52 a	13.95±0.53 b	0.07±0.00 a	1.00±0.07 b	4.92±0.51 b
	PC	19.89±0.84 a	15.14±1.11 b	0.05±0.00 b	1.42±0.13 a	4.53±0.52 b
10~20	EU	19.32±0.90 a	14.53±1.70 a	0.07±0.00 a	1.08±0.50 ab	5.14±0.61 a
	EUM	17.37±1.13 a	9.65±0.66 b	0.08±0.00 a	0.45±0.44 c	3.65±0.46 b
	EUC	17.46±0.89 a	9.97±0.51 b	0.08±0.00 a	0.76±0.50 bc	2.95±0.36 bc
	PC	20.52±1.43 a	9.50±0.78 b	0.07±0.00 a	1.24±0.50 a	2.32±0.28 c

说明：EU. 尾叶桉纯林；EUM. 尾叶桉-灰木莲混交林；EUC. 尾叶桉-红锥混交林；PC. 湿地松-红锥混交林。不同小写字母表示同一土层不同林分间差异显著 ($P<0.05$)。

有机碳的固持与转化过程^[22-23]。总体而言，各林分 0~10 cm 土层土壤有机碳储量、土壤有机碳及其活性组分质量分数均表现出明显的表层富集特征，这与多数研究结果一致^[24-25]。植物凋落物集中在土壤表层，为有机质形成提供了充足的底物。表层土壤通透性好、微生物多样性高，有利于凋落物的快速分解^[26]；随着土层加深，凋落物分解作用强度减弱，导致深层土壤碳固存能力下降^[27]。

在 0~10 cm 土层，尾叶桉-红锥和尾叶桉-灰木莲混交林土壤有机碳显著高于尾叶桉纯林。混交林通过改善凋落物的数量和质量，促进土壤结构变化和养分积累，并提高了微生物活性，从而加速了凋落物分解和根际资源周转，最终促进土壤有机碳积累^[28-29]。相比之下，湿地松-红锥混交林土壤有机碳储量和土壤有机碳质量分数与尾叶桉纯林差异不显著。这可能是因为红锥属于阔叶树种，凋落物多且易分解，而湿地松作为针叶树种，其革质叶片透水性差，凋落物难分解，从而抵消了混交林对土壤有机碳积累的正效应^[30-31]。此外，试验地湿地松于 2007 年种植，红锥于 2017 年引入种植，混交林建立时间较短。土壤碳库响应的滞后性，也是导致土壤有机碳质量分数未显著提升的原因之一^[32-33]。

在 10~20 cm 土层，尾叶桉-红锥混交林土壤有机碳储量与土壤有机碳质量分数高于其他 3 种林分。这可能是该混交模式能够显著提高该土层全氮质量分数，进而改变土壤微生物组成和结构，减缓了木质素等难降解组分的矿化速率，降低土壤呼吸作用，从而促进了深层土壤碳的稳定积累^[34-35]。

关于活性碳组分，颗粒有机碳由未完全分解或半分解的植物残体以及栖息的小型动物残体和微生物群落组成^[36]，轻组有机碳主要由周转速率快且密度较低的新鲜的植物残体、部分分解的有机碎屑以及一些微生物细胞组成，其质量分数主要由有机残留物的输入和分解速率决定^[37]。在本研究中，颗粒有机碳和轻组有机碳呈极显著正相关，并且在尾叶桉纯林中质量分数最大，与多数研究结论不一致^[8, 38]。这可能是因为尾叶桉纯林虽然凋落物输入量较大，但叶片和树皮等富含单宁、萜烯类次生代谢物^[39]，这些化学物质抑制了微生物活性并干扰酶表达，导致有机物质分解不彻底，残留了大量颗粒有机碳和轻组有机碳。同时，也可能是尾叶桉纯林土壤团聚体有机质较少，总有机碳趋于活化，易被微生物和细根利用^[40]。

本研究中，尾叶桉-红锥混交林 2 个土层中的可溶性有机碳，除 10~20 cm 土层尾叶桉-灰木莲混交林外，显著高于其他林分。这可能是由于红锥根系分泌了更多小分子有机酸和糖类，增强了根际碳淀积过程^[41]；或其根系结构和孔隙分布改善了土壤团聚体结构和水分涵养能力，利于可溶性有机碳在土壤剖面内的滞留，使其被矿物颗粒吸附或由微生物同化转化为稳定有机碳，而非被迅速淋溶出土体^[42-43]。

微生物生物量碳是评估土壤微生物活性和有机质动态的重要指标^[44]。在 0~10 cm 土层，湿地松-红锥混交林微生物生物量碳显著高于尾叶桉-灰木莲混交林和尾叶桉-红锥混交林，表明该混交模式可能通过互补的凋落物质量与数量提升了养分有效性和微生物境异质性^[45]，从而加速了微生物群落生长与固碳。然而，在 10~20 cm 土层，尾叶桉-灰木莲混交林微生物生物量碳却显著低于其他林分，可能是该树种组合在此土层中有较强的养分竞争，或根系分泌物产生了抑制效应，限制了微生物的活性与生物量积累^[46]。

4.2 林分类型对土壤碳库管理指数和活性有机碳组分占比的影响

森林土壤碳库的循环和周转速率通常用土壤活性有机碳组分与总有机碳比值(如颗粒有机碳/土壤有机碳、轻组有机碳/土壤有机碳)来表示^[47]。WANG 等^[48]认为：比值越高代表土壤有机碳的生物可利用度越大也越不稳定^[49]。本研究中,尾叶桉纯林的颗粒有机碳/土壤有机碳和轻组有机碳/土壤有机碳显著高于其他林分,表明该种植模式可能促进土壤有机碳矿化,使土壤碳库稳定性较低,增加碳排放风险。尽管湿地松-红锥混交林的微生物生物量碳/土壤有机碳较高,暗示其土壤生物肥力较高^[50],但这可能与不稳定有机碳作为微生物基质被快速吸收利用有关^[51]。相反,尾叶桉-红锥混交林在 2 个土层中的碳库指数均显著高于尾叶桉纯林。这表明该混交模式能够显著提升碳汇能力,其机制可能在于提高了土壤氮、磷质量分数,缓解了对微生物生长的限制,从而加快了活性碳的转化并提升了碳库稳定性。

本研究中 4 种林分的碳库活度和碳库活度指数无显著差异,表明 4 种林分均未能显著改变表层土壤有机碳的活性组分比例。这可能是因为活性碳组分积累到一定值达到饱和,多余的活性有机碳向未定态碳转化^[52],从而导致尽管不同林分的土壤有机碳和活性碳组分质量分数不同,但碳库活度和活度指数无显著差异。

碳库管理指数是土壤碳库指标和土壤碳库活度指标的综合参数,能反映土地管理的科学性,指示土壤碳库是否稳定和土壤性能是否向良性发展^[53]。碳库管理指数通常由易氧化有机碳转化计算得出,但 VIEIRA 等^[54]指出:该指标在部分热带地区土壤中的响应并不敏感,与本研究结果一致。这揭示在特定区域或特定条件下,碳库管理指数对森林管理措施的响应可能不够敏感。相关分析显示:2 个土层的轻组有机碳和土壤有机碳呈极显著正相关,相关系数分别为 0.47 和 0.58,与易氧化有机碳和土壤有机碳的相关系数(分别为 0.67 和 0.57)相近。该结果表明:轻组有机碳能较好地反映土壤有机质动态变化,但能否将其用于计算碳库管理指数仍有待进一步验证。

土壤碳的氧化稳定性与腐殖质抗分解能力直接相关^[55]。本研究中,湿地松-红锥混交林土壤碳的氧化稳定性系数较低,反映该地土壤有机质活性增强和土壤肥力释放潜力得到提升,可能与该特定树种组合有更稳定的氮素养分循环机制有关^[56]。

4.3 土壤有机碳活性组分的主要影响因素

相关分析表明:土壤全氮和体积含水量与有机碳组分具有强相关性。冗余分析表明:土壤有机碳及其组分在不同林分之间具有较好的分异性,说明全氮是影响不同林分以及土层深度土壤有机碳及其组分的最主要环境因子。氮是土壤中重要的营养元素,会通过影响养分利用性缓解土壤微生物的氮限制,改变土壤微生物群落结构,促进酶的生产,加速有机质的分解和转换,最终影响土壤有机碳及其活性组分的质量和分布^[57]。本研究中,尾叶桉-红锥混交林的全氮质量分数显著高于尾叶桉-灰木莲混交林和湿地松-红锥混交林,这不仅加快了土壤有机碳的分解速率,还导致其可溶性有机碳高于其他林分。

不同林分在不同程度上改善土壤孔隙度和持水能力,使林分间土壤体积含水率不同。土壤水分通过影响土壤氧化还原电位和微生物活性,促进或抑制有机物矿化,改变土壤碳积累^[58]。在 10~20 cm 土层,尾叶桉纯林的颗粒有机碳和轻组有机碳显著高于尾叶桉-灰木莲混交林和湿地松-红锥混交林,且体积含水量与颗粒有机碳和轻组有机碳呈极显著负相关。这可能是因为取样时间正值旱季,尾叶桉纯林较其他林分有较强的吸水能力及水分利用效率,导致其土壤含水量偏低^[59],迫使植物将更多碳分配给地下部分,增加细根生物量和周转率,短期内刺激了颗粒有机碳和轻组有机碳的形成和积累^[60]。

根系的动态变化和分解过程对土壤碳循环有重要意义^[61]。全年中植物根系死亡和更替持续发生,不断向土壤输入有机质。有研究认为:较高的根系凋落物输入通过影响土壤有机碳矿化速率,改变土壤有机碳固存量^[62],并且丰富的根系生物量能为土壤微生物提供充足的代谢底物,促进微生物更多的分泌酶参与有机质分解代谢,最终影响土壤碳周转^[63]。后续研究中有必要量化土壤根系生物量对土壤有机碳及其活性碳组分的影响特征,以找到土壤碳库变化的控制因素。

5 结论

本研究表明:不同种植模式可显著改变雷州半岛人工林表层土壤有机碳储量和活性有机碳组分的分布。尾叶桉-红锥混交林土壤有机碳储量在 2 个土层中积累量均高于其他 3 个林分;尾叶桉纯林在颗粒

有机碳和轻组有机碳上呈现更高的积累量；尾叶桉-红锥混交林在土壤有机碳、易氧化有机碳和可溶性有机碳上呈现更高的积累量；尾叶桉纯林和湿地松-红锥混交林的在微生物生物量碳上呈现更高的积累量。

在本研究条件下，尾叶桉-红锥混交林在2个土层中碳库指数均显著高于尾叶桉纯林，表明相较于尾叶桉纯林，该混交模式能够提高土壤碳库稳定性；湿地松-红锥混交林土壤氧化稳定系数在不同林分中最低，表明该种植模式下土壤有机碳的化学氧化稳定性最低，土壤碳库稳定性较差。

土壤全氮质量分数是影响土壤有机碳及其活性组分的质量和分布的重要因子。在该地区营林时，建议采用尾叶桉-红锥种植模式，以增加地区土壤有机碳储量和碳库稳定性。同时，经营过程中需及时监测土壤全氮，避免全氮质量分数较低，维持土壤碳库的稳定性与固碳潜力。

6 参考文献

- [1] 刘世荣, 王晖, 李海奎, 等. 碳中和目标下中国森林碳储量、碳汇变化预估与潜力提升途径[J]. *林业科学*, 2024, **60**(4): 157–172. LIU Shirong, WANG Hui, LI Haikui, *et al.* Projections of China's forest carbon storage and sequestration and ways of their potential capacity enhancement[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2024, **60**(4): 157–172. DOI: [10.11707/j.1001-7488.LYKX20230206](https://doi.org/10.11707/j.1001-7488.LYKX20230206).
- [2] MAYER M, PRESCOTT C E, ABAKER W E A, *et al.* Tamm Review: influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: a knowledge synthesis[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, **466**: 118127. DOI: [10.1016/j.foreco.2020.118127](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118127).
- [3] HAO Zhiguo, ZHAO Yunfei, WANG Xia, *et al.* Thresholds in aridity and soil carbon-to-nitrogen ratio govern the accumulation of soil microbial residues[J]. *Communications Earth & Environment*, 2021, **2**: 236. DOI: [10.1038/s43247-021-00306-4](https://doi.org/10.1038/s43247-021-00306-4).
- [4] 付岱哈, 明安刚, 王亚南, 等. 乡土树种混交改造对桉树人工林土壤团聚体有机碳组分及碳固存能力的影响[J/OL]. *应用与环境生物学报*, 2025-12-31. <https://doi.org/10.19675/j.cnki.1006-687x.2025.11009>. FU Daihan, MING An'gang, WANG Ya'nan, *et al.* Effects of introducing native species into *Eucalyptus* monocultures on soil aggregate organic carbon fractions and carbon sequestration[J/OL]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2025-12-31. <https://doi.org/10.19675/j.cnki.1006-687x.2025.11009>.
- [5] ZARAFSHAR M, VINCENT G, KORBOULEWSKY N, *et al.* The impact of stand composition and tree density on topsoil characteristics and soil microbial activities[J]. *CATENA*, 2024, **234**: 107541. DOI: [10.1016/j.catena.2023.107541](https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107541).
- [6] 胡澳, 赵毅辉, 吴继来, 等. 采伐后植被自然恢复对马尾松次生林土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2024, **41**(6): 1189–1200. HU Ao, ZHAO Yihui, WU Jilai, *et al.* Effects of natural vegetation restoration after logging on soil organic carbon and its active components in *Pinus massoniana* secondary forests[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, **41**(6): 1189–1200. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.20240264](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.20240264).
- [7] 周子榆, 王孟佳, 冯向前, 等. 轮作模式和氮肥处理对稻田土壤有机碳储量及其结构的影响[J]. *中国水稻科学*, 2024, **38**(5): 577–590. ZHOU Ziyu, WANG Mengjia, FENG Xiangqian, *et al.* Effects of crop rotation patterns and nitrogen fertilizer levels on storage and structure of soil organic carbon in paddy fields[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2024, **38**(5): 577–590. DOI: [10.16819/j.1001-7216.2024.230912](https://doi.org/10.16819/j.1001-7216.2024.230912).
- [8] YANG Xu, WANG Di, LAN Yu, *et al.* Labile organic carbon fractions and carbon pool management index in a 3-year field study with biochar amendment[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, **18**(4): 1569–1578. DOI: [10.1007/s11368-017-1874-2](https://doi.org/10.1007/s11368-017-1874-2).
- [9] CHEN Ruirui, SENBAYRAM M, BLAGODATSKY S, *et al.* Soil C and N availability determine the priming effect: microbial N mining and stoichiometric decomposition theories[J]. *Global Change Biology*, 2014, **20**(7): 2356–2367. DOI: [10.1111/gcb.12475](https://doi.org/10.1111/gcb.12475).
- [10] 赵涵, 左甜, 刁静文, 等. 不同氮源对温带森林土壤活性有机碳、环境因子的影响及其相互作用[J]. *环境科学*, 2026, **47**(1): 573–580. ZHAO Han, ZUO Tian, DIAO Jingwen, *et al.* Effects of different nitrogen addition on soil labile organic carbon and environmental factors in temperate forests and their interactions[J]. *Environmental Science*, 2026, **47**(1): 573–580. DOI: [10.13227/j.hjlx.202411292](https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202411292).
- [11] 吴思政, 李小英, 王毅雯, 等. 滇中4种典型公益林土壤活性有机碳分布特征[J]. *中南林业科技大学学报*, 2025, **45**(2): 185–193, 215. WU Sizheng, LI Xiaoying, WANG Yiwen, *et al.* Distribution pattern of labile organic carbon in soil of four

- representative public welfare forests in Central Yunnan[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2025, **45**(2): 185–193, 215. DOI: [10.14067/j.cnki.1673-923x.2025.02.018](https://doi.org/10.14067/j.cnki.1673-923x.2025.02.018).
- [12] ZHAO Zhi, TAN Jingxing, LUO Xiao, *et al.* Successive planting of *Eucalyptus grandis* plantations reduce soil organic carbon and its labile fractions[J]. *Forests*, 2025, **16**(11): 1621. DOI: [10.3390/f16111621](https://doi.org/10.3390/f16111621).
- [13] LI Zhiyong, GUO Baojiang, ZHOU Yechen, *et al.* Forest management practices can increase the soil organic carbon sequestration potential of *Robinia pseudoacacia* plantations in the Loess Plateau[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2025, **89**(3): e70082. DOI: [10.1002/saj2.70082](https://doi.org/10.1002/saj2.70082).
- [14] 赵隽宇, 陆珍先, 王家妍, 等. 多代连栽对桉树人工林不同土层土壤有机碳组分特征及碳库管理指数的影响[J]. *水土保持研究*, 2026, **33**(2): 255–263. ZHAO Junyu, LU Zhenxian, WANG Jiayan, *et al.* Impact of multi-generation continuous planting on soil organic carbon fractions and carbon pool management index in different soil layers of *Eucalyptus* plantations[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2026, **33**(2): 255–263. DOI: [10.13869/j.cnki.rswc.2026.02.014](https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2026.02.014).
- [15] 顾晓娟, 吴妙兰, 张振源, 等. 季节变化对尾叶桉土壤有机碳组分和酶活性的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2025, **45**(1): 140–151. GU Xiaojuan, WU Miaolan, ZHANG Zhenyuan, *et al.* Effects of seasonal changes on soil organic carbon fractions and enzyme activities of *Eucalyptus urophylla*[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2025, **45**(1): 140–151. DOI: [10.14067/j.cnki.1673-923x.2025.01.015](https://doi.org/10.14067/j.cnki.1673-923x.2025.01.015).
- [16] 张振源, 顾晓娟, 吴妙兰, 等. 雷州半岛不同林龄桉树人工林土壤碳氮磷和易氧化有机碳的特征[J]. *林业与环境科学*, 2024, **40**(3): 87–94. ZHANG Zhenyuan, GU Xiaojuan, WU Miaolan, *et al.* Characteristics of soil carbon, nitrogen, phosphorus and easily oxidized organic carbon in *Eucalyptus* plantations with different ages in Leizhou Peninsula[J]. *Forestry and Environmental Science*, 2024, **40**(3): 87–94. DOI: [10.3969/j.issn.1006-4427.2024.03.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4427.2024.03.012).
- [17] XU Yuxing, DU Apeng, WANG Zhichao, *et al.* Effects of different rotation periods of *Eucalyptus* plantations on soil physiochemical properties, enzyme activities, microbial biomass and microbial community structure and diversity[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, **456**: 117683. DOI: [10.1016/j.foreco.2019.117683](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117683).
- [18] 蒲中禹, 黄宇晨, 田莎莎, 等. 降水变化对高寒草甸土壤微生物生物量及其化学计量比的影响[J/OL]. *土壤学报*, 2026-01-07. <https://link.cnki.net/urlid/32.1119.p.20260106.1509.004>. PU Zhongyu, HUANG Yuchen, TIAN Shasha, *et al.* Effects of precipitation change on soil microbial biomass and their stoichiometric ratios in an alpine meadow[J/OL]. *Acta Pedologica Sinica*, 2026-01-07. <https://link.cnki.net/urlid/32.1119.p.20260106.1509.004>.
- [19] 梁小玲, 张龙, 王克勤, 等. 滇中华山松林不同季节土壤微生物碳利用效率对氮沉降的响应[J]. *水土保持学报*, 2026, **40**(2): 242–252. LIANG Xiaoling, ZHANG Long, WANG Keqin, *et al.* Soil microbial carbon use efficiency in *Pinus armandii* forests in Central Yunnan responds to nitrogen deposition in different seasons[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2026, **40**(2): 242–252. DOI: [10.13870/j.cnki.stbxb.2026.02.015](https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbxb.2026.02.015).
- [20] BLAIR G J, LEFROY R, LISLE L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, **46**(7): 1459–1466. DOI: [10.1071/ar9951459](https://doi.org/10.1071/ar9951459).
- [21] 凌雷, 仁增草, 宗文贞, 等. 林龄和密度对洮河流域云杉人工林碳储量的影响[J/OL]. *广西植物*, 2026-02-13. <https://link.cnki.net/urlid/45.1134.Q.20260212.1755.008>. LING Lei, REN Zengcao, ZONG Wenzhen, *et al.* Effects of stand age and density on carbon storage of *Picea asperata* plantations in the Taohe River[J]. *Guihaia*, 2026-02-13. <https://link.cnki.net/urlid/45.1134.Q.20260212.1755.008>.
- [22] WANG Miao, QU Laiye, MA Keming, *et al.* Soil microbial properties under different vegetation types on Mountain Han[J]. *Science China Life Sciences*, 2013, **56**(6): 561–570. DOI: [10.1007/s11427-013-4486-0](https://doi.org/10.1007/s11427-013-4486-0).
- [23] LU Mingzhu, HE Gang, FAN Lei, *et al.* Temperature sensitivity of aerobic and anaerobic organic carbon mineralization varies with climate and soil depth in riparian zones[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2024, **195**: 109455. DOI: [10.1016/j.soilbio.2024.109455](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109455).
- [24] YUAN Ye, LI Juan, YAO Liang. Soil microbial community and physicochemical properties together drive soil organic carbon in *Cunninghamia lanceolata* plantations of different stand ages[J]. *PeerJ*, 2022, **10**: e13873. DOI: [10.7717/peerj.13873](https://doi.org/10.7717/peerj.13873).
- [25] 黄焕强, 邱展鹏, 古洛炜, 等. 2 种人工混交林林分空间结构与土壤有机碳的关系[J]. *四川农业大学学报*, 2025, **43**(4): 915–921. HUANG Huanqiang, QIU Zhanpeng, GU Luwei, *et al.* Relationship between stand spatial structure and soil

- organic carbon in two artificial mixed forests[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2025, **43**(4): 915–921. DOI: [10.16036/j.issn.1000-2650.202402586](https://doi.org/10.16036/j.issn.1000-2650.202402586).
- [26] 王冰怡, 张勇, 吴翠蓉, 等. 不同造林年限马尾松林碳密度结构特征及其影响因素[J]. *浙江农林大学学报*, 2025, **42**(2): 291–301. WANG Bingyi, ZHANG Yong, WU Cuirong, *et al.* Characteristics and influencing factors of carbon density structure in *Pinus massoniana* forests with different afforestation years[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, **42**(2): 291–301. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.20240401](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.20240401).
- [27] BLACKBURN K W, LIBOHOVA Z, ADHIKARI K, *et al.* Influence of land use and topographic factors on soil organic carbon stocks and their spatial and vertical distribution[J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(12): 2846. DOI: [10.3390/rs14122846](https://doi.org/10.3390/rs14122846).
- [28] 杨婷, 周晓果, 温远光, 等. 生态营林对桉树人工林土壤有机碳组分及酶活性的影响[J]. *广西科学*, 2025, **32**(3): 426–438. YANG Ting, ZHOU Xiaoguo, WEN Yuanguang, *et al.* Effects of eco-silviculture on soil organic carbon fractions and enzyme activities in *Eucalyptus* spp. plantations[J]. *Guangxi Sciences*, 2025, **32**(3): 426–438. DOI: [10.13656/j.cnki.gxkx.20250310.003](https://doi.org/10.13656/j.cnki.gxkx.20250310.003).
- [29] 徐云浩, 刘婷婷, 刘贵梅, 等. 混交林林木根系对氮磷养分的吸收利用及竞争策略[J]. *世界林业研究*, 2025, **38**(1): 38–44. XU Yunhao, LIU Tingting, LIU Guimei, *et al.* Absorption and utilization of nitrogen and phosphorus nutrients by tree root systems in mixed forests and their competition strategies[J]. *World Forestry Research*, 2025, **38**(1): 38–44. DOI: [10.13348/j.cnki.sjlyyj.2025.0021.y](https://doi.org/10.13348/j.cnki.sjlyyj.2025.0021.y).
- [30] 罗敦, 林婧, 梁晨, 等. 桂东南不同林分类型土壤有机碳储量及分配特征[J]. *南方农业学报*, 2024, **55**(5): 1416–1423. LUO Dun, LIN Jing, LIANG Chen, *et al.* Organic carbon storage and distribution characteristics of different stand types soil in Southeastern Guangxi[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2024, **55**(5): 1416–1423. DOI: [10.3969/j.issn.2095-1191.2024.05.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1191.2024.05.017).
- [31] 吴盼盼, 张艳, 江灵昕, 等. 林分类型和分解位置对亚热带人工林凋落叶养分动态的影响[J]. *生态学杂志*, 2024, **43**(9): 2632–2640. WU Panpan, ZHANG Yan, JIANG Lingxin, *et al.* Effects of stand type and decomposition position on leaf litter nutrient dynamics in subtropical plantations of China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, **43**(9): 2632–2640. DOI: [10.13292/j.1000-4890.202409.032](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202409.032).
- [32] 程曼. 黄土丘陵区典型植物枯落物分解对土壤有机碳、氮转化及微生物多样性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015. CHENG Man. *Effect of Litter Decomposition on Soil Carbon, Nitrogen, and Soil Microbial Community Structure on the Loess Plateau, China*[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015.
- [33] 竹万宽, 王志超, 杜阿朋, 等. 广东湛江桉树人工林碳水通量季节格局及其环境生物控制[J]. *林业科学*, 2024, **60**(9): 18–32. ZHU Wankuan, WANG Zhichao, DU Apeng, *et al.* Seasonal patterns of carbon and water fluxes and their environmental biological control in the *Eucalyptus* plantation in Zhanjiang of Guangdong Province[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2024, **60**(9): 18–32. DOI: [10.11707/j.1001-7488.LYKX20230482](https://doi.org/10.11707/j.1001-7488.LYKX20230482).
- [34] 曾晨阳, 满秀玲, 蔡体久. 不同林下植被兴安落叶松林土壤活性有机碳组分特征[J]. *水土保持学报*, 2026, **40**(1): 242–252, 266. ZENG Chenyang, MAN Xiuling, CAI Tijiu. Characterization of soil labile organic carbon fractions in *Larix gmelinii* forests with different understory vegetation types[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2026, **40**(1): 242–252, 266. DOI: [10.13870/j.cnki.stbxb.2026.01.033](https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbxb.2026.01.033).
- [35] KOUTIKA L S, TABA K, NDONGO M, *et al.* Nitrogen-fixing trees increase organic carbon sequestration in forest and agroforestry ecosystems in the Congo basin[J]. *Regional Environmental Change*, 2021, **21**(4): 109. DOI: [10.1007/s10113-021-01816-9](https://doi.org/10.1007/s10113-021-01816-9).
- [36] CHRISTENSEN B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover[J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, **52**(3): 345–353. DOI: [10.1046/j.1365-2389.2001.00417.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2001.00417.x).
- [37] POST W M, KWON K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential[J]. *Global Change Biology*, 2000, **6**(3): 317–327. DOI: [10.1046/j.1365-2486.2000.00308.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.00308.x).
- [38] HU Yunlong, AO G, FENG Jiguang, *et al.* The patterns of forest soil particulate and mineral associated organic carbon characteristics with latitude and soil depth across Eastern China[J]. *Forest Ecosystems*, 2025, **12**: 100291. DOI: [10.1016/j.fecs.2024.100291](https://doi.org/10.1016/j.fecs.2024.100291).
- [39] 康婷婷, 钟全林, 梁锋娜, 等. 亚热带巨尾桉凋落树皮的分解特征[J]. *应用生态学报*, 2025, **36**(8): 2325–2334. KANG Tingting, ZHONG Quanlin, LIANG Fengna, *et al.* Decomposition characteristics of bark litter in subtropical *Eucalyptus*

- plantations[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, **36**(8): 2325–2334. DOI: [10.13287/j.1001-9332.202508.008](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202508.008).
- [40] 马行聪, 金文豪, 屠嘉莹, 等. 不同优势菌根类型转变对土壤团聚体组成及性状的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2023, **40**(6): 1149–1157. MA Xingcong, JIN Wenhao, TU Jiaying, *et al.* Impact of shifts among mycorrhizal types on soil aggregate composition and characteristics[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, **40**(6): 1149–1157. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.20230376](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.20230376).
- [41] 李玲, 仇少君, 刘京涛, 等. 土壤溶解性有机碳在陆地生态系统碳循环中的作用[J]. *应用生态学报*, 2012, **23**(5): 1407–1414. LI Ling, QIU Shaojun, LIU Jingtao, *et al.* Roles of soil dissolved organic carbon in carbon cycling of terrestrial ecosystems: a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(5): 1407–1414. DOI: [10.13287/j.1001-9332.2012.0193](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.2012.0193).
- [42] HANSSON K, KLEJA D B, KALBITZ K, *et al.* Amounts of carbon mineralised and leached as DOC during decomposition of Norway spruce needles and fine roots[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**(2): 178–185. DOI: [10.1016/j.soilbio.2009.10.013](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.10.013).
- [43] SCHWENDENMANN L, VELDKAMP E. The role of dissolved organic carbon, dissolved organic nitrogen, and dissolved inorganic nitrogen in a tropical wet forest ecosystem[J]. *Ecosystems*, 2005, **8**(4): 339–351. DOI: [10.1007/s10021-003-0088-1](https://doi.org/10.1007/s10021-003-0088-1).
- [44] LARSEN K S, JONASSON S, MICHELSEN A. Repeated freeze-thaw cycles and their effects on biological processes in two Arctic ecosystem types[J]. *Applied Soil Ecology*, 2002, **21**(3): 187–195. DOI: [10.1016/S0929-1393\(02\)00093-8](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(02)00093-8).
- [45] 周莎, 马寰菲, 王洁莹, 等. 我国森林土壤微生物生物量碳的纬度分布特征及影响因子[J]. *林业科学*, 2022, **58**(2): 49–57. ZHOU Sha, MA Huanfei, WANG Jieying, *et al.* Latitudinal distribution of forest soil microbial biomass carbon and its affecting factors in China[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2022, **58**(2): 49–57. DOI: [10.11707/j.1001-7488.20220206](https://doi.org/10.11707/j.1001-7488.20220206).
- [46] 王玉凤, 席守鸿, 谭玲, 等. 南亚热带马尾松-红锥混交林与其纯林对土壤微生物生物量碳和氮的影响比较[J]. *西部林业科学*, 2022, **51**(2): 93–99, 105. WANG Yufeng, XI Shouhong, TAN Ling, *et al.* Effects of the monocultures and *Pinus massoniana* × *Castanopsis hystrix* plantations on soil microbial biomass carbon and nitrogen in southern subtropical China[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2022, **51**(2): 93–99, 105. DOI: [10.16473/j.cnki.xblykx1972.2022.02.014](https://doi.org/10.16473/j.cnki.xblykx1972.2022.02.014).
- [47] YANG Wen, AN Shuqing, ZHAO Hui, *et al.* Impacts of *Spartina alterniflora* invasion on soil organic carbon and nitrogen pools sizes, stability, and turnover in a coastal salt marsh of Eastern China[J]. *Ecological Engineering*, 2016, **86**: 174–182. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2015.11.010](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.11.010).
- [48] WANG Wei, CHENG Zhengguo, LI Mengying, *et al.* Increasing periods after seeding under twice-annually harvested alfalfa reduces soil carbon and nitrogen stocks in a semiarid environment[J]. *Land Degradation & Development*, 2020, **31**(18): 2872–2882. DOI: [10.1002/ldr.3592](https://doi.org/10.1002/ldr.3592).
- [49] 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 Yongmeng, SU Haohao, LU Yuming, *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. DOI: [10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.05.031](https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.05.031).
- [50] 赖家明, 李开志, 黄从德, 等. 不同改造措施对马尾松低效林土壤活性有机碳的影响[J]. *林业科学研究*, 2013, **26**(2): 167–173. LAI Jiaming, LI Kaizhi, HUANG Congde, *et al.* Effect of improvement measures on soil labile organic carbon of low-efficiency *Pinus massoniana* forest[J]. *Forest Research*, 2013, **26**(2): 167–173. DOI: [10.13275/j.cnki.lykxyj.2013.02.003](https://doi.org/10.13275/j.cnki.lykxyj.2013.02.003).
- [51] LEHMANN J, RILLIG M C, THIES J, *et al.* Biochar effects on soil biota: a review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(9): 1812–1836. DOI: [10.1016/j.soilbio.2011.04.022](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022).
- [52] 戴全厚, 刘国彬, 薛热, 等. 黄土丘陵区封禁对土壤活性有机碳与碳库管理指数的影响[J]. *西北林学院学报*, 2008, **23**(4): 18–22. DAI Quanhou, LIU Guobin, XUE Re, *et al.* Effect of soil labile organic matter and carbon management index under the closure in eroded hilly Loess Plateau[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2008, **23**(4): 18–22.
- [53] XU Yiliang, CHEN Baoliang. Investigation of thermodynamic parameters in the pyrolysis conversion of biomass and manure to biochars using thermogravimetric analysis[J]. *Bioresour Technol*, 2013, **146**: 485–493. DOI: [10.1016/j.biortech.2013.07.086](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.07.086).
- [54] VIEIRA F C B, BAYER C, ZANATTA J A, *et al.* Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, **96**(1/2): 195–204. DOI:

10.1016/j.still.2007.06.007.

- [55] 徐云岩, 宫渊波, 付万权, 等. 川南马尾松低效林不同改造措施对土壤碳、氮特征及其碳稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, **30**(1): 225–230. XU Yunyan, GONG Yuanbo, FU Wanquan, *et al.* Effect of different reform measures on soil carbon and nitrogen characteristics and carbon stability in low efficiency forest of *Pinus massoniana* in southern Sichuan Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, **30**(1): 225–230. DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.01.041.
- [56] 罗华龙, 刘文祥, 杨梅, 等. 不同桉树混交林土壤理化性质、酚酸含量与酶活性的差异[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2022, **50**(12): 54–63, 76. LUO Hualong, LIU Wenxiang, YANG Mei, *et al.* Differences of soil physicochemical property, phenolic acid and enzyme activities in different *Eucalyptus* mixed plantations[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2022, **50**(12): 54–63, 76. DOI: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2022.12.007.
- [57] MOOSHAMMER M, WANEK W, ZECHMEISTER-BOLTENSTERN S, *et al.* Stoichiometric imbalances between terrestrial decomposer communities and their resources: mechanisms and implications of microbial adaptations to their resources[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2014, **5**: 22. DOI: 10.3389/fmicb.2014.00022.
- [58] JUNK W J, AN Shuqing, FINLAYSON C M, *et al.* Current state of knowledge regarding the world's wetlands and their future under global climate change: a synthesis[J]. *Aquatic Sciences*, 2013, **75**(1): 151–167. DOI: 10.1007/s00027-012-0278-z.
- [59] TAN Yu, YANG Kaijun, QIN Jiashuang, *et al.* Soil hydrology characteristics among forest type, stand age and successive rotation in *Eucalyptus* plantations in Southern China[J]. *Forests*, 2024, **15**(3): 423. DOI: 10.3390/f15030423.
- [60] 徐晨, 阮宏华, 吴小巧, 等. 干旱影响森林土壤有机碳周转及积累的研究进展[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, **46**(6): 195–206. XU Chen, RUAN Honghua, WU Xiaoqiao, *et al.* Progresses in drought stress on the accumulation and turnover of soil organic carbon in forests[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2022, **46**(6): 195–206. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202209015.
- [61] 张乾, 汪依妮, 柳鑫, 等. 不同石漠化草地根系对土壤有机碳的贡献[J]. *生态科学*, 2022, **41**(6): 26–32. ZHANG Qian, WANG Yini, LIU Xin, *et al.* The contribution of roots to soil organic carbon in different rocky desertification grasslands[J]. *Ecological Science*, 2022, **41**(6): 26–32. DOI: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2022.06.004.
- [62] JANDL R, LINDNER M, VESTERDAL L, *et al.* How strongly can forest management influence soil carbon sequestration?[J]. *Geoderma*, 2007, **137**(3/4): 253–268. DOI: 10.1016/j.geoderma.2006.09.003.
- [63] ZHOU Guoyi, XU Shan, CIAIS P, *et al.* Climate and litter C/N ratio constrain soil organic carbon accumulation[J]. *National Science Review*, 2019, **6**(4): 746–757. DOI: 10.1093/nsr/nwz045.