

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*

张振源¹ 顾晓娟¹ 吴妙兰¹ 何普林² 王忠林²
徐其贤² 周 庆¹ 莫其锋¹

(1. 华南农业大学林学与风景园林学院, 广东 广州 510642; 2. 中林集团雷州林业局有限公司, 广东 湛江 524043)

摘要 为研究林龄对桉树人工林土壤碳 (C)、氮 (N)、磷 (P) 等养分含量和易氧化有机碳 (ROC) 的影响及其垂直变化规律, 分析林龄对人工林土壤生态化学计量特征和碳稳定性的影响, 以雷州半岛不同林龄 (7 a 生和 12 a 生) 尾叶桉 *Eucalyptus urophylla* 人工林为研究对象, 根据土层深度按 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 和 60~100 cm 共 5 个层次分别采集土壤样品并测定土壤养分与有机碳含量。结果显示: (1) 12 a 生尾叶桉人工林土壤 ROC、总有机碳 (TOC)、总氮 (TN) 和总磷 (TP) 比 7 a 生分别高 72.64%、114.07%、225.69% 和 14.41%, 说明尾叶桉人工林土壤 TOC 含量和养分水平随着林龄的增加而提高; (2) 12 a 生尾叶桉人工林表层土壤 (0~10 cm) 的 ROC/TOC 显著大于 7 a 生 ($P<0.05$), 说明前者表层土壤的碳稳定性较低; 而 12 a 生尾叶桉底层土壤 (20~60 cm) 的 ROC/TOC 值对比 7 a 低 36.85%, 说明 12 a 生人工林底层土壤碳稳定性高于 7 a; (3) 相关性分析结果表明, 两种林龄人工林土壤 TOC 与 TN、速效磷 (AP) 和 C/P 呈显著正相关, 且 7 a 生和 12 a 生人工林土壤 TOC 还分别受到 TP 和 N/P 的显著影响。土壤 ROC 与 TN、C/P 呈显著正相关, 其中 7 a 生和 12 a 生土壤 ROC 还分别受到 TP、AP 和 N/P 的显著影响, 表明 7 a 生尾叶桉人工林土壤有机碳含量和碳稳定性受到土壤 P 元素供应的影响更大。此外, 12 a 生人工林土壤 ROC/TOC 受到 TN 和 N/P 的显著影响, 表明 12 a 生尾叶桉人工林则更容易受到土壤 TN 含量的调控。因此, 在雷州半岛地区, 适当延长桉树人工林的轮伐周期, 并根据不同林龄改善土壤的氮磷养分供应水平, 有利于提高雷州半岛桉树人工林土壤的碳封存潜力。

关键词 易氧化有机碳; 土壤化学计量; 尾叶桉; 林龄; 雷州半岛

中图分类号: S714.5 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2024) 03-0087-08

Characteristics of Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Easily Oxidized Organic Carbon in *Eucalyptus* Plantations with Different Ages in Leizhou Peninsula

ZHANG Zhenyuan¹ GU Xiaojuan¹ WU Miaolan¹ HE Pulin²
WANG Zhonglin² XU Qixian² ZHOU Qing¹ MO Qifeng¹

(1. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China;

2. China Forestry Group Leizhou Forestry Bureau Co., Ltd., Zhanjiang, Guangdong 524043, China)

* 基金项目: 广东省林业科技创新项目 (2022KJCX015、2022KJCX017)。

第一作者: 张振源 (1997—), 男, 在读硕士, 研究方向为森林土壤, E-mail: 924379991@qq.com。

通信作者: 莫其锋 (1986—), 男, 副教授, 主要从事森林生态与全球变化研究, E-mail: moqifeng@scau.edu.cn。

Abstract To investigate the impact of stand age on soil nutrient content carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P), etc., and readily oxidizable carbon (ROC) in *Eucalyptus* plantations, we analyzed the ecological stoichiometry and C stability of soils at different depths in two *Eucalyptus urophylla* plantations (7 years and 12 years old) in the Leizhou Peninsula. Soil samples were collected at five layers, 0–10 cm, 10–20 cm, 20–40 cm, 40–60 cm, and 60–100 cm, for analyzing soil nutrient content and organic C. The results showed that: (1) ROC, total organic C (TOC), total N (TN), and total P (TP) of *Eucalyptus urophylla* plantation with 12 a were 72.64%, 114.07%, 225.69%, and 14.41% higher than those with 7 a, respectively, indicating that the soil TOC content and nutrient concentration of *E. urophylla* plantation increased with the increase of stand age. (2) The ROC/TOC of the surface soil (0–10 cm) of *E. urophylla* plantation with 12 a was significantly higher than that with 7 a ($P < 0.05$), indicating that the soil C stability of 12 a plantation was lower, while the ROC/TOC of the bottom soil (20–60 cm) of *E. urophylla* with 12 a was 36.85% lower than that with 7 a, suggesting that the C stability of 12 a was higher than that of 7 a. (3) The correlation analysis showed that there was a significant positive correlation between soil TOC and TN, available P (AP), C/P in two plantations, and the soil TOC of 7 a and 12 a plantations was also significantly affected by TP and N/P; respectively. Soil ROC showed a significant positive correlation with TN and C/P, and 7 a and 12 a plantations were also significantly affected by TP, AP and N/P, respectively, indicating that the TOC content and C stability of 7 a were more affected by the supply of soil P elements. In addition, soil ROC/TOC of 12 a plantation was significantly affected by TN and N/P. The results show that the TOC content and C stability of 12 a were more easily regulated by soil TN content. Therefore, appropriately extending the rotation cycle of *Eucalyptus* plantations and improving the soil N and P supply levels according to different stand ages are conducive to improving the soil C sequestration potential of *Eucalyptus* plantations in the Leizhou Peninsula.

Key words readily oxidized carbon; soil stoichiometry; *Eucalyptus urophylla*; stand ages; Leizhou Peninsula

森林生态系统是陆地最大的碳库, 储存着陆地生态系统地上部分 80% 和地下部分 40% 的有机碳, 是全球陆地碳库的重要组成部分^[1]。研究表明, 在全球气候变化背景下, 森林土壤养分和有机碳储量的动态变化异常显著, 土壤的碳封存能力下降, 森林土壤由碳汇逐渐转变为碳源^[2]。因此, 理解和探究土壤有机碳的循环机制及其关键控制因子, 提高森林土壤碳封存能力被认为是应对全球气候治理的重要措施之一, 符合碳中和的时代背景。

土壤有机碳 (total organic carbon, TOC) 根据其稳定性大小可分为活性有机碳和惰性有机碳, 其中的易氧化有机碳 (readily oxidized carbon, ROC) 代表了绝大部分活性有机碳, 是土壤有机碳库中不稳定的组分, 极易被 $333 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 高锰酸钾溶液所氧化^[3]。研究表明, ROC 与 TOC 的比值 (ROC/TOC) 可以反映出土壤有机碳库的稳定性, ROC/TOC 的值越大, 土壤有机碳稳定性越低, 不利于土壤碳封存^[4]。碳 (C)、氮 (N)、磷

(P) 是森林土壤中的重要元素, 参与土壤有机质的合成与分解过程^[5], C/N/P 化学计量比可以反映有机质分解过程中的养分矿化和固持之间的动态平衡^[6]。因此, 研究土壤 C/N/P 化学计量比有利于更好地理解森林土壤养分积累模式和碳封存机制, 并为森林管理提供科学参考。

当前, 我国桉树 *Eucalyptus* 人工林种植面积超过 450 万 hm^2 , 约占全国森林面积的 2.0%^[7], 是华南地区重要速生人工林树种之一, 其土壤碳封存潜力十分重要^[8]。桉树人工林土壤碳封存的研究已有多篇报道, 例如, 滕秋梅等^[8] 报道了 8 a 生桉树人工林土壤 TOC、活性有机碳和惰性有机碳以及碳储量均高于对照组 10 a 生马尾松 *Pinus massoniana* 林, 说明相同土壤和气候条件下桉树人工林具有较强的固碳能力; 邓荫伟等^[9] 研究发现, 10 a 生桉树人工林土壤 TOC 和 TN 含量显著高于 10 a 生马尾松和杉木 *Cunninghamia lanceolata* 人工林; 竹万宽等^[10] 发现 1~7 a 生尾巨桉 *Eucalyptus urophylla* × *grandis* 人工林土壤碳储量随林龄

的增加而增大。上述研究结果表明, 桉树人工林具备显著的固碳能力。

林龄是影响桉树人工林土壤碳封存能力和养分水平的关键因素。例如, 许宇星等^[11]发现桉树林土壤 TOC 含量随着林龄的增加而显著增加; Kerr 等^[12]指出随着林龄的增加, 桉树人工林土壤的持水能力、土壤 TOC 和各养分含量逐渐降低; 段春燕等^[13]研究发现随着桉树林龄的增加, 土壤速效 N 含量呈现增加趋势, 而总 P 呈现下降趋势; 相关研究表明, 5 a 生桉树人工林土壤 TOC、活性有机碳含量显著高于其他林龄 (小于 5 a)^[8]。因此, 开展不同林龄桉树人工林土壤元素的生态化学计量特征和碳组分变化的研究, 有助于揭示各林龄下桉树人工林土壤养分的供应水平及碳稳定性。然而, 这些关于桉树人工林土壤有机碳组分和生态化学计量的研究多集中在 1~7 a 生等较短的桉树轮伐期内, 7 a 生及以上较大林龄跨度的桉树人工林土壤碳稳定性的研究却鲜有报道。因此, 本文通过对雷州半岛地区 7 a 生和 12 a 生尾叶桉人工林土壤 TOC 和 ROC 以及土壤化学计量比的研究, 探讨不同林龄对桉树人工林土壤有机碳含量和碳封存能力的变化规律的影响, 可为桉树人工林的可持续性利用, 提高桉树人工林生态系统的碳封存能力提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样地概况

本研究样地设在广东省湛江市中林集团雷州林业局有限公司遂溪林场分公司 (21°08′50″N, 109°50′48″E) 的桉树种植基地。气候为典型海洋性季风气候, 年平均气温 23.1 °C, 极端低温 1.4~3.6 °C, 极端最高温度为 38.1 °C, 年降雨量超过 1 500 mm, 主要集中在 5—10 月, 9 月为暴雨集中期, 有明显旱、雨季之分。土壤类型多为浅海沉积物砖红壤以及玄武岩砖红壤, 其次为砂页岩红壤、花岗岩砖红壤, 有机质含量超过 1%, pH 值为 4.5~5.3。

1.2 样品采集与测定

于 2022 年 9 月, 在野外调查的基础上, 以尾叶桉 *Eucalyptus urophylla* 人工林为研究对象, 选择营林、管理方法和立地条件基本一致的两块林地 (7 a 生和 12 a 生), 分别设置 3 块 20 m×20 m 的调查样地, 即每种林分共有 3 个重复调查样地。

在每块样地的对角线上挖取 3 个土壤剖面, 根据土层深度按 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 和 60~100 cm 共 5 个层次分别采集土壤样品, 装回封口袋标记后带回实验室处理。

土壤含水量 (SWC) 测定采用烘干法; 土壤全氮 (TN) 用半微量凯氏定氮法测定, 经过硫酸 (H_2SO_4) 消煮后, 然后用氢氧化钠 (NaOH) 碱化, 加热蒸馏出氨, 经硼酸 (H_3BO_3) 吸收后, 用盐酸标准溶液滴定计算; 土壤全磷 (TP) 采用硫酸 (H_2SO_4) 和氢氟酸 (HF) 消煮, 钼锑抗比色法测定; 土壤有效磷 (AP) 以 Bray-2 溶液浸提后用钼锑抗比色法测定; TOC 采用 $H_2SO_4-K_2Cr_2O_7$ 外加热法测定^[14]; 土壤 ROC 用 333 mmol·L⁻¹ 高锰酸钾氧化后, 在 565 nm 波长下进行比色法测定^[15]。

1.3 数据分析

两种林龄林地间的显著性差异采用单因素方差分析 (One-way ANOVA), 采用最小显著差异 (least significant difference, LSD) 法进行多重比较, 用 SPSS 27.0 统计分析软件分析, 土壤化学计量特征与土壤碳含量相关性采用 Pearson 检验法, $P<0.05$ 时两因素显著相关, $P<0.01$ 时两因素极显著相关; 绘图用 Excel 2010 和 Origin 2023 软件完成。

2 结果与分析

2.1 两种林龄尾叶桉人工林土壤 TOC 和 ROC 含量差异

在 0~100 cm 土层范围内, 两种林龄尾叶桉人工林 TOC 和 ROC 含量均随土层深度的增加而呈现下降趋势 (图 1 a、b)。土层显著影响 7 a 生和 12 a 生尾叶桉人工林 TOC 和 ROC 含量, 在 0~10 cm 与 20~100 cm 土层间差异显著 ($P<0.05$)。7 a 生表层土壤 (0~10 cm) TOC 和 ROC 含量分别为 12.31 和 1.86 g·kg⁻¹, 分别占 1 m 深土层 TOC 和 ROC 含量的 38.11% 和 32.24%; 12 a 生表层土壤 (0~10 cm) TOC 和 ROC 含量分别为 15.55 和 4.90 g·kg⁻¹, 分别占 1 m 土层 TOC 和 ROC 含量的 27.88% 和 39.75%。

林龄显著影响尾叶桉人工林土壤 TOC 含量 ($P<0.05$)。同一土层不同林龄间, 12 a 生人工林各土层土壤 TOC 含量均大于 7 a 生, 并且在 10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 和 60~100 cm 土层差异显著 ($P<0.05$), 分别高 61.32%、130.51%、140.71% 和 120.60% (图 1 a)。同一土层不同林

龄间, 12 a 生人工林土壤 ROC 含量在 0~100 cm 土层范围内均大于 7 a 生, 但仅在 0~10 cm 和 10~20 cm 两个土层中差异显著 ($P<0.05$), 分别高 163.44% 和 126.92% (图 1b)。

2.2 两种林龄尾叶桉人工林土壤 ROC/TOC 的差异

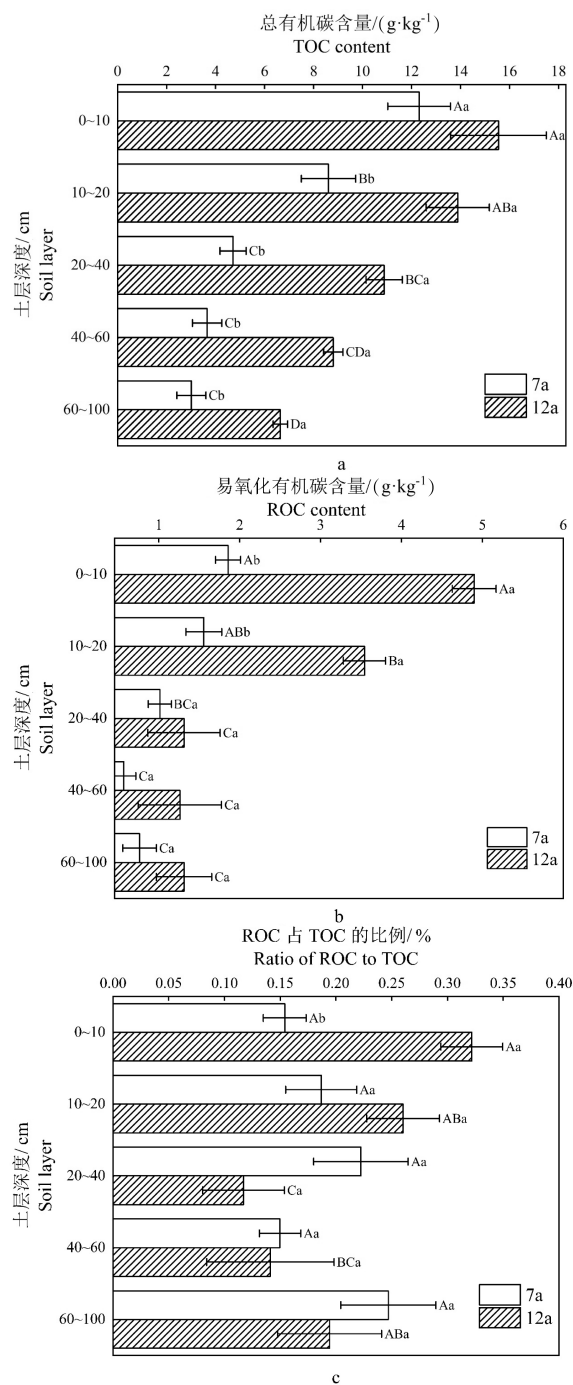
7 a 生尾叶桉人工林土壤 ROC/TOC 值在 1 m 深的土壤中的变化范围为 14.98%~24.70%, 其中 60~100 cm 土层中 ROC/TOC 最高, 为 24.70%, 其次为 20~40 cm 土层, 比值为 22.24%, 0~10 cm 表层土壤中 ROC/TOC 较低, 为 15.40%。土层显著影响了 12 a 生人工林土壤 ROC/TOC, 其在 0~10 cm 土层中的变化范围为 11.70%~32.18%, 其中 0~10 cm 土层中 ROC/TOC 值最高, 为 32.18%, 20~60 cm 土层中 ROC/TOC 相对较小, 显著低于 0~10 cm 土层土壤 ($P<0.05$)。在 0~20 cm 土层范围内, 12 a 生人工林土壤 ROC/TOC 大于 7 a 生, 其中 0~10 cm 土层 12 a 生土壤 ROC/TOC 显著大于 7 a 生 ($P<0.05$), 但在 20~100 cm 土层范围内, 同一土层 12 a 生土壤 ROC/TOC 值均小于 7 a 生, 分别低 47.39%、5.82% 和 21.31%, 但无统计学上的显著差异 (图 1c)。

2.3 两种林龄尾叶桉人工林土壤基本理化性质及生态化学计量比

7 a 生和 12 a 生尾叶桉人工林各层土壤 TN 含量随着土层深度的加深而呈现降低趋势, 土层显著影响 TN 和 TP 含量。TN 也存在表层积累现象, 0~10 cm 土层土壤 TN 和 TP 含量最高, 分别为 0.78, 1.64 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 0.44, 0.37 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均显著大于 20~100 cm 土层土壤 ($P<0.05$)。从土壤剖面上看, 在两种林龄人工林的同一土层中, 12 a 生人工林在 0~100 cm 土层范围内土壤 TN 含量 (1.64, 1.35, 1.07, 1.05, 0.52 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 均显著大于 7 a 生 (0.78, 0.52, 0.14, 0.22, 0.06 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) ($P<0.05$) (图 2a)。

在 40~60 cm 和 60~100 cm 底层土壤中, 12 a 生土壤 TP 含量与 7 a 生相比, 分别显著高 49.41% 和 29.96% ($P<0.05$), 土壤 AP 含量显著增加 4 倍以上 ($P<0.05$)。在 0~40 cm 土层土壤中, 7 a 生与 12 a 生人工林在 TP 和 AP 的含量无统计学的显著差异 (图 2b, c)。

林龄显著影响尾叶桉人工林土壤 C/N、C/P 和 N/P, 但土层对三者无显著影响。在 0~40 cm 土层

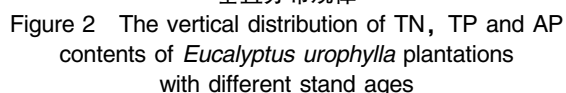


注: 不同大写字母表示同一林龄不同土层间的差异显著, 不同小写字母表示同一土层不同林龄间的差异达到显著水平 ($P<0.05$)。

Note: Different capital letters indicate significant differences among different layers within the same stand age, while different lowercase letters indicate significant differences between two stand ages within the same layers, $P<0.05$.

图 1 不同林龄尾叶桉人工林土壤 TOC、ROC 含量的垂直分布规律及土壤 ROC 占 TOC 的比例

Figure 1 The vertical distribution of TOC and ROC contents and ROC/TOC ratios of *Eucalyptus urophylla* plantations with different stand ages



相关研究表明,林龄显著影响土壤有机碳的输入^[18]。本研究中,12 a 生尾叶桉人工林各土层土壤 TOC 含量均高于 7 a 生,一方面可能是随着桉树的生长,林下植物多样性与地表凋落物较为丰富,促使土壤有机质的输入量增加,有机物的积累速率大于分解速率,从而导致土壤有机碳含量的增加;另一方面,Wang 等^[18]发现人工林根系分泌物与凋落物含有一定数量的难降解的成分如多酚等,这类物质的长期分解可持续增加土壤有机碳的输入。另外,12 a 生人工林各土层的 ROC 含量均高于 7 a 生,其中在表层(0~20 cm)差异显著,说明尾叶桉人工林土壤 ROC 含量受到林龄的影响。一方面 ROC 含量主要取决于 TOC 含量,相关性分析结果表明,两种林地土壤 ROC 含量与 TOC 含量呈极显著的正相关,这与滕秋梅等^[8]研究结果相一致;另一方面,两种林龄尾叶桉人工林土壤 ROC 含量与 TN 呈显著正相关关系,说明随着林龄的增加,人工林土壤氮含量也随之提高,这对土壤 ROC 含量的积累产生积

表 1 两种林龄尾叶桉人工林土壤碳氮磷化学计量比

Table 1 Stoichiometry ratios of soil C, N, P contents of *Eucalyptus urophylla* plantations with different stand ages

林龄/a Stand ages	土层/cm Soil layers	碳氮比 C/N	碳磷比 C/P	氮磷比 N/P
7	0~10	16.35±1.66a	27.99±0.75b	1.76±0.23b
	10~20	16.99±1.20a	24.25±2.11b	1.42±0.03b
	20~40	33.42±2.64a	21.07±1.37b	0.64±0.07b
	40~60	20.35±6.01a	18.41±1.89b	1.09±0.32b
	60~100	41.68±25.98a	14.04±1.87b	1.30±1.00a
12	0~10	9.52±1.01b	42.68±5.43a	4.47±0.09a
	10~20	10.60±1.76b	39.23±6.60a	3.70±0.23a
	20~40	10.23±0.78b	33.53±5.86a	3.30±0.63a
	40~60	8.39±0.21b	30.23±2.09a	3.62±0.33a
	60~100	10.67±3.04a	24.07±1.30a	2.74±0.87a

注：表中数据为 mean±SE，不同小写字母表示同一土层不同林龄间的差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: The data in the table was mean±SE, the different lowercase letters indicate significant differences between two stand ages within the same soil layers ($P<0.05$).

表 2 7 a 生尾叶桉人工林土壤易氧化有机碳与理化因子的相关性

Table 2 Correlations among ROC and physi-chemical factors of seven-year *Eucalyptus urophylla* plantations

指标 Index	SWC	pH	ROC	TOC	ROC/TOC	TN	TP	AP	C/N	C/P	N/P
SWC	1	-0.522*	-0.292	-0.390	0.415	-0.116	-0.353	-0.401	-0.277	-0.278	0.203
pH		1	0.891**	0.870**	-0.173	0.644**	0.784**	0.770**	-0.374	0.815**	0.336
ROC			1	0.843**	0.069	0.663**	0.750**	0.730**	-0.466	0.840**	0.442
TOC				1	-0.399	0.837**	0.950**	0.939**	-0.449	0.848**	0.464
ROC/TOC					1	-0.314	-0.403	-0.464	0.015	-0.273	-0.072
TN						1	0.828**	0.731**	-0.611*	0.653**	0.839**
TP							1	0.965**	-0.402	0.671**	0.429
AP								1	-0.328	0.722**	0.301
C/N									1	-0.551*	-0.705**
C/P										1	0.458
N/P											1

注：*表示显著相关（ $P<0.05$ ）；**表示极显著相关（ $P<0.01$ ）。
Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$); ** indicates extremely significant ($P<0.01$).

表 3 12 a 生尾叶桉人工林土壤易氧化有机碳与理化因子的相关性

Table 3 Correlations among ROC and physi-chemical factors of twelve-year *Eucalyptus urophylla* plantations

指标 Index	SWC	pH	ROC	TOC	ROC/TOC	TN	TP	AP	C/N	C/P	N/P
SWC	1	-0.246	0.620	-0.100	0.242	-0.03	-0.527*	-0.456	-0.142	0.189	0.343
pH		1	0.345	0.487	-0.133	0.307	0.270	0.609*	0.104	0.371	0.163
ROC			1	0.836**	0.799**	0.740**	0.245	0.488	0.004	0.787**	0.684**
TOC				1	0.454	0.756**	0.469	0.586*	0.139	0.880**	0.589*
ROC/TOC					1	0.607*	0.134	0.254	-0.251	0.420	0.595*
TN						1	0.579*	0.656**	-0.495	0.543*	0.836**
TP							1	0.827**	-0.169	0.009	0.063
AP								1	-0.175	0.196	0.228
C/N									1	0.228	-0.560*
C/P										1	0.641**
N/P											1

注：*表示显著相关（ $P<0.05$ ）；**表示极显著相关（ $P<0.01$ ）。
Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$); ** indicates extremely significant ($P<0.01$).

极的影响。

相关研究表明, 林龄显著影响了桉树人工林土壤的养分水平^[19-20]。本研究, 12 a 生尾叶桉人工林土壤 TN、TP 和 AP 含量相比 7 a 生均有不同程度的增加。土壤 TN 含量可能是影响桉树林土壤有机碳积累的重要因子, 这是因为土壤中的 N 可以通过形成高 N 含量的有机质, 进而提高土壤有机碳的稳定性。此外, Ramirez 等^[21] 报道土壤 TN 含量的增加可以提高微生物对 C 的利用效率, 减缓其呼吸作用, 促使土壤有机碳的积累。本研究中, 两种林龄尾叶桉人工林土壤 TOC 均与 TN 呈极显著的正相关, 且同一土层中 12 a 生土壤 TN 含量均显著高于 7 a 生。研究表明, 土壤 N 的来源主要有 3 种, 包括大气沉降、凋落物的分解和微生物固氮^[22]。因此, 在本研究中相同的管理条件和气候条件下, 随林龄的增加, 凋落物产量的增加和微生物的分解作用共同调控尾叶桉人工林土壤 N 的供应水平, 进而影响土壤 TOC 和 ROC 的积累。陆艳武等^[23] 对广西 1~7 a 生桉树林土壤的研究表明, 土壤 TP 与 TN 呈显著的正相关, 这与本研究结果相似。在相关研究中, 土壤 C/P 反映了土壤有机质向周围吸收或释放 P 的潜力和土壤 P 的有效性, 其比值越低, P 的有效性越高^[24]。本研究中, 12 a 生尾叶桉人工林土壤 C/P 高于 7 a 生, 其中在 40~100 cm 土层差异显著, 这说明 12 a 生人工林土壤 P 的有效性低于 7 a 生, 这促使 P 在土壤中不断积累。

本研究表明, 两种林龄土壤 AP 与 TOC 呈显著的正相关, AP 可能是影响有机碳积累的另一重要因素。在相关研究中, 土壤 N/P 反映 N 饱和与限制, 指示土壤养分的供给情况^[25]。本研究样地中, 土壤 N/P 低于中国土壤 N/P 的平均值 (5.2), 说明本地区桉树的生长受到 P 含量限制的可能性较低, 相反林分生长易受到 N 限制。有研究表明, 当 C/P<200 时, 土壤微生物碳素会出现短暂增加和有机磷的净矿化, 并且植物根系也会刺激分泌磷酸酶, 增加土壤中磷酸盐的溶解度, 进而提高土壤 AP 含量^[25]。此外, 丰富的根系为根际微生物提供了更多的有机质^[26], 进而提高土壤磷酸酶的活性, 促进土壤有机 P 的矿化, AP 含量增加。

ROC/TOC 值在一定程度上反映出土壤碳稳定性^[4]。本研究中, 12 a 生尾叶桉人工林土壤 ROC/TOC 在 0~20 cm 土层大于 7 a 生, 其中 0~10 cm 差异显著。相关性分析表明, 12 a 生人工林土壤

ROC/TOC 与 TN、ROC 和 N/P 呈显著的正相关关系, 而 TN 与 ROC 含量呈极显著的正相关关系, 这说明 TN 含量的累积使土壤 ROC 含量增加。相关研究表明, 土壤 C/N 比与土壤有机质的分解速率成反比, C/N 较低, 则表明有机质的矿化速率较快^[27]。而在本研究中, 12 a 生尾叶桉人工林在 0~20 cm 土层范围的土壤 C/N 显著低于 7 a 生, 原因可能是 12 a 生人工林在表层土壤积累的有机碳大部分为活性有机碳, 12 a 生土壤 ROC 含量在 0~20 cm 土层范围显著大于 7 a 生也可以支持这一结论。而 20~100 cm 土层范围内, 12 a 生人工林土壤 ROC/TOC 比 7 a 生低 36.85%, 这表明 12 a 生人工林底层土壤中的有机碳的稳定性高于 7 a 生。相关研究表明, 林龄对桉树人工林土壤微生物活性有显著影响^[28], 更高的林龄意味着地下根际系统更加完善, 根系衍生碳的分子结构性质可能显著提高了底层土壤有机碳的稳定性^[29]。而土壤养分水平对土壤微生物的活动具有重要影响, 王绍强等^[5] 报道从微生物的生存策略考虑, 当土壤中 C、N、P 的供应充足的情况下, 对应的水解酶和脲酶等酶分泌减少, 从而影响土壤有机碳的分解速率。此外, 根际微生物与植物根系的相互作用促进土壤团聚体的形成, 这些因素增加了底层土壤的碳封存能力。本研究表明, 土层显著影响了 12 a 生人工林土壤 ROC/TOC, 20~100 cm 土层土壤 ROC/TOC 均值为 15.08%, 其中 20~40 cm 和 40~60 cm 仅为 11.70% 和 14.11%, 显著低于 0~10 cm 土层土壤, 说明 12 a 生人工林底层土壤积累的有机碳可能是土壤碳组分中较稳定的部分, 有利于土壤的碳稳定性。

本研究结果表明, 林龄显著影响了土壤养分与有机碳的积累。12 a 生人工林土壤 TN、TP、AP、TOC 和 ROC 含量相对 7 a 生均有不同程度的提升。12 a 生尾叶桉树人工林 0~20 cm 土层土壤 ROC 含量和 ROC/TOC 高于 7 a 生, 说明随着林龄的增加, 其表层土壤积累的土壤有机碳可能是有机碳库中的活性部分, 土壤的碳稳定相对较低。而在 20~100 cm 土层范围内, 12 a 生人工林土壤 ROC/TOC 比 7 a 低 36.85%, 说明 12 a 生人工林底层土壤中积累的有机碳是碳组分中较稳定的部分, 碳稳定性较高。相关性分析结果表明, 两种林龄尾叶桉人工林土壤 TOC 与 TN、AP 和 C/P 呈显著的正相关, 且 7 a 生和 12 a 生土壤 TOC 还分

别受到 TP 和 N/P 的显著影响。土壤 ROC 与 TN、C/P 呈显著的正相关,其中 7 a 生和 12 a 生土壤 ROC 还分别受到 TP、AP 和 N/P 的显著影响。此外,12 a 生尾叶桉人工林土壤 ROC/TOC 受到 TN 和 N/P 的显著影响,7 a 生土壤有机碳含量及碳稳定性受土壤 P 元素供应的影响更大,而 12 a 生则更容易受到 TN 含量的调控。因此,适当延长桉树人工林的轮伐周期,并采用适当的施肥抚育措施调控土壤氮磷供应水平,可以有效提高桉树人工林土壤有机碳稳定性和碳封存潜力。

参考文献

- [1] 刘冰燕,陈云明,曹扬,等. 秦岭南坡东段油松人工林生态系统碳、氮储量及其分配格局[J]. 应用生态学报, 2015,26(3):643-652.
- [2] 顾晓娟,于耀泓,刘悦,等. 华南典型人工林对土壤易氧化有机碳的影响[J]. 森林与环境学报,2023,43(2):145-151.
- [3] 于耀泓,刘悦,王艺颖,等. 鹅凰嶂季雨林土壤有机碳特征及空间分布规律[J]. 中国土壤与肥料,2022(9):139-147.
- [4] 朱志建,姜培坤,徐秋芳. 不同森林植被下土壤微生物量碳和易氧化态碳的比较[J]. 林业科学研究,2006(4):523-526.
- [5] 王绍强,于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报,2008(8):3937-3947.
- [6] 冯德枫,包维楷. 土壤碳氮磷化学计量比时空格局及影响因素研究进展[J]. 应用与环境生物学报,2017,23(2):400-408.
- [7] 谢耀坚. 我国木材安全形势分析及桉树的贡献[J]. 桉树科技,2018,35(4):3-6.
- [8] 滕秋梅,沈育伊,徐广平,等. 桂北不同林龄桉树人工林土壤碳库管理指数和碳组分的变化特征[J]. 广西植物,2020,40(8):1111-1122.
- [9] 邓荫伟,李凤,韦杰,等. 桂林市桉树、马尾松、杉木林下植被与土壤因子调查[J]. 广西林业科学,2010,39(3):140-143.
- [10] 竹万宽,陈少雄,张利丽,等. 不同林龄尾巨桉林地土壤有机碳储量变化差异[J]. 桉树科技,2015,32(4):5-9.
- [11] 许宇星,王志超,张丽丽,等. 不同种植年限尾巨桉人工林叶片-凋落物-土壤碳氮磷化学计量特征[J]. 林业科学研究,2018,31(6):168-174.
- [12] KERR T F, RUWANZA S. Does *Eucalyptus grandis* invasion and removal affect soils and vegetation in the Eastern Cape Province, South Africa[J]. Austral Ecology, 2016,41(3):328-338.
- [13] 段春燕,何成新,徐广平,等. 桂北不同林龄桉树人工林土壤养分及生物学特性[J]. 热带作物学报,2019,40(6):1213-1222.
- [14] 查同刚. 土壤理化分析[M]. 北京:中国林业出版社, 2017.
- [15] BLAIR G, 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):393-406.
- [16] 王纪杰,鲍爽,梁关峰,等. 不同林龄桉树人工林土壤有机碳的变化[J]. 四川林业科技,2015,36(4):18-21.
- [17] DUNGAIT J A J, HOPKINS D W, GREGORY A S, et al. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance [J]. Global Change Biology, 2012,18(6):1781-1796.
- [18] WANG H, LIU S R, MO J M, et al. Soil organic carbon stock and chemical composition in four plantations of indigenous tree species in subtropical China [J]. Ecological Research, 2010,25(6):1071-1079.
- [19] 练金生,高艳芳,谢威,等. 广东不同林龄桉树人工林土壤肥力比较研究[J]. 桉树科技,2021,38(1):23-30.
- [20] 段春燕,徐广平,沈育伊,等. 桂北不同林龄桉树人工林土壤生态化学计量特征[J]. 林业资源管理,2018(6):117-124.
- [21] RAMIREZ K S, CRAINE J M, FIERER N. Consistent effects of nitrogen amendments on soil microbial communities and processes across biomes [J]. Global Change Biology, 2012,18(6):1918-1927.
- [22] SHAO Y H, XIE Y X, WANG C Y, et al. Effects of different soil conservation tillage approaches on soil nutrients, water use and wheat-maize yield in rainfed dryland regions of North China [J]. European Journal of Agronomy, 2016,81:37-45.
- [23] 陆艳武,易弘韬,石驭天,等. 不同林龄桉树人工林土壤碳氮磷钾化学计量特征[J]. 桉树科技, 2023, 40(2):53-58.
- [24] 袁知洋,邓邦良,张学玲,等. 武功山草甸植被小群落土壤活性有机碳与土壤养分的典型相关分析[J]. 中南林业科技大学学报,2016,36(2):84-90.
- [25] HERBERT D A, WILLIAMS M, RASTETTER E B. A model analysis of N and P limitation on carbon accumulation in Amazonian secondary forest after alternate land-use abandonment [J]. Biogeochemistry, 2003, 65(1):121-150.
- [26] 彭建勤,林成芳,洪慧滨,等. 中亚热带森林更新方式对土壤磷素的影响[J]. 生态学报,2016,36(24):8015-8024.
- [27] 郭其强,盘金文,李慧娥,等. 贵州高原山地马尾松人工林土壤碳、氮、磷生态化学计量特性[J]. 水土保持学报,2019,33(4):293-298.
- [28] 段春燕,何成新,沈育伊,等. 桂北不同林龄桉树人工林土壤微生物数量和酶活性特征研究[J]. 广西植物, 2020,40(12):1877-1888.
- [29] 徐嘉晖,孙颖,高雷,等. 土壤有机碳稳定性影响因素的研究进展[J]. 中国生态农业学报,2018,26(2):222-230.