

DOI:10.12403/j.1001-1498.20230336

林龄和土层对柠檬桉林土壤养分和易氧化有机碳的影响

何普林¹, 徐其贤¹, 王忠林¹, 张振源², 刘悦²,
顾晓娟², 周庆², 莫其锋^{2*}

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

摘要: [目的] 人工林土壤的地力维持和有机碳稳定性受到林龄和土层的极大影响。本文旨在探明林龄和土层对柠檬桉人工林土壤养分含量和易氧化有机碳 (Readily oxidizable organic carbon, ROC) 的影响, 为人工林土壤固碳质量的提升提供科学参考。[方法] 本文测定了广东省湛江市遂溪县 2 种林龄柠檬桉人工林的土壤理化性质和易氧化有机碳含量及其垂直分布特征, 探讨林龄 (3 年生和 20 年生) 和土层 (0~10、10~20、20~40、40~60 和 60~100 cm) 对柠檬桉人工林土壤碳稳定性的影响及其调控因素。[结果] 林龄显著影响柠檬桉人工林土壤的物理性质、碳氮磷含量及 C:N、C:P 和 N:P, 但土层仅对自然含水量 (SWC)、总有机碳 (TOC)、全氮 (TN)、全磷 (TP) 和 ROC 存在显著影响。20 年生柠檬桉人工林土壤 TOC、TN 和 TP 比 3 年生分别高 138.60%、29.77% 和 56.99%, 说明土壤有机碳和氮磷养分随着林龄的增加而增加。这是由于随着人工林林龄的增加, 地表凋落物和根系提高了土壤有机质的输入进而改善了土壤肥力。20 年生柠檬桉林土壤 ROC 含量比 3 年生高 49.52%, 而土壤 ROC/TOC 值比 3 年生低 30.17%, 说明随着林龄的增加, 土壤 TOC 积累的量更多而 ROC 积累的量相对较少, 因而土壤碳稳定性增强。相关分析表明, 两种林龄柠檬桉人工林土壤 TOC 和 ROC 受到土壤 TN、TP、C:N 和 C:P 的显著影响, 而 3 年生柠檬桉人工林土壤 TOC 和 ROC 还受到土壤毛管持水量、总孔隙度和通气孔隙度的影响, 说明柠檬桉幼龄林土壤碳储量及稳定性同时受到土壤物理性质和氮磷养分供应的调控, 而成熟林则更容易受到土壤养分供应水平的调控。[结论] 柠檬桉人工林土壤有机碳稳定性随着林龄的增加而提高, 且容易受到土壤氮磷养分供应的影响。因此, 在人工林经营实践中, 适当延长轮伐期, 并注意调控土壤氮磷养分供应, 可以有效提高柠檬桉人工林土壤有机碳的稳定性。

关键词: 碳稳定性; 土壤养分; 易氧化有机碳; 柠檬桉人工林; 粤西地区

中图分类号: S714.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2024)02-0115-09

人工林是陆地生态系统的重要组成部分之一, 具有提供木材产品、提高森林碳汇和改善生态环境等功能, 因而具有重大的经济效益和生态效益^[1-2]。我国人工林的发展速度和现存面积居世界首位。全国第九次森林资源连续清查结果显示, 华南地区人

工林面积占我国人工林总面积的 19%, 是重要的人工林分布区。在广东省的人工林树种构成中, 桉树 (*Eucalyptus* spp.) 和杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) 纯林分别占人工林面积的 39% 和 16%。因此, 桉树仍是我国重要的人

收稿日期: 2023-09-02 修回日期: 2023-09-27

基金项目: 广东省林业科技创新项目“粤西地区优质高产林分碳封存潜力提升的施肥技术体系构建”(2022KJCX017); “碳中和背景下广东省典型优势树种大径材培育关键技术体系构建与示范”(2022KJCX015)。

作者简介: 何普林, 大学本科, 高级工程师, 主要研究方向: 森林资源培育。电话: 13827178719, E-mail: honglin923@sohu.com

* 通讯作者: 莫其锋, 博士, 副教授, 主要研究方向: 森林生态学。电话: 020-85280256, E-mail: moqifeng@scau.edu.cn

工林树种之一。

林龄显著影响人工林土壤理化特征和碳汇能力。一般认为,土壤碳储量随林龄的增加而增加。一方面,林龄增加后地上生物量快速累积,导致地表凋落物的输入增加,从而提高土壤碳含量^[3-4],另一方面,树木根系死亡后分解亦可以提高土壤碳含量^[5]。例如,对不同龄级(1、2~3、4~5、6~7、8年生)尾巨桉(*Eucalyptus urophylla* × *grandis*)人工林的研究发现,随林龄的增加,土壤有机碳、总氮和有效氮含量呈增加趋势^[6]。另有研究表明,不同林龄(1、2、3、6和7年生)尾巨桉人工林土壤碳含量随林龄增加并未发现显著的差异^[7]。以上关于林龄对桉树土壤有机碳和养分含量影响的结果存在较大差异,可能与土壤的性质以及桉树林龄的跨度大小相关。另外,土层对人工林土壤理化特性和有机碳含量及稳定性也会产生极大影响,且这种影响一般随着土层的增加而减小^[8],这与不同土层的土壤受到表层有机质的淋溶和淀积作用有关,且与林木根系分布的不同深度也相关^[9]。

易氧化有机碳(ROC)是土壤有机碳库中比较活跃的组分,参与土壤中各种化学反应,且容易被分解^[10]。土壤ROC与总有机碳的比值(ROC/TOC)在一定程度上可以反映出土壤有机碳的稳定性^[11]。研究发现,土壤ROC会受到土壤含水量和氮磷养分含量的影响^[10, 12]。随着林龄的增加,人工林的地表凋落物逐渐增加,土壤含水量和养分也呈现出一定的变化^[13-14],因而人工林林龄的差异将可能对土壤ROC和碳稳定性产生极大的影响,且随着土层的变化可能会发生显著差异。

桉树人工林土壤固碳的研究已有很多报道,且主要集中在尾叶桉人工林^[15-16]或尾巨桉人工林^[17-18],而对华南地区柠檬桉(*Eucalyptus citriodora* Hook.)人工林土壤固碳方面的报道相对较少^[19-20]。一方面,柠檬桉含有芳香类物质,可作为香料工业中的原料;其木材材质坚硬,耐磨抗腐,具有重要的工业价值。由于柠檬桉的生长周期较长,其生态效益和固碳潜力也得到了重视^[21];另一方面,由于柠檬桉的生长特性,其作为用材林的大面积推广并没有得到重视,因而柠檬桉人工林的地力维持和土壤有机碳稳定性的相关研究报道较少。因此,本文以广东省湛江市中林集团雷州林业局有限公司唐家林场分公司种植的柠檬桉人工林为研究对象,探讨不同

林龄柠檬桉人工林土壤养分、碳汇能力、碳稳定性及其垂直分布规律,回答以下问题:(1)不同林龄和土层对柠檬桉人工林土壤理化性质的影响如何?(2)不同林龄柠檬桉人工林土壤有机碳和易氧化有机碳的垂直分布规律如何?其碳稳定性受到哪些因素的影响?本研究结果可为华南地区柠檬桉人工林土壤地力维持和固碳能力的提升提供科学数据参考。

1 材料与方法

1.1 样地概况

研究样地位于广东省湛江市中林集团雷州林业局有限公司唐家林场分公司柠檬桉种植基地(109°63'25"E, 20°74'08"N)。样地位于北回归线以南,属亚热带湿润性季风气候,年均日照时数2 003.6 h,年总辐射量108~117 ka·cm⁻²,年均气温22℃,年均积温约8 382.3℃。年均无霜期达364 d。年均降雨量为1 711.6 mm,降雨年际变化大,干湿季明显。湿季为6~9月,干季为11月至次年3月。研究样地地势平坦,海拔高度约为50 m,土壤类型主要为浅海沉积物发育的砖红壤,质地较轻,土层深厚,但淋溶强烈,酸性强,养分贫瘠^[22]。

1.2 样品采集

本试验选择的2种林龄柠檬桉人工林造林时间分别为2019年5月和2002年5月,调查和土壤采样时间为2022年12月,即为3年生和20年生人工林。采样时,2种林分的平均胸径分别为 8.73 ± 0.58 cm和 18.43 ± 2.82 cm,树高分别为 10.90 ± 0.55 m和 19.33 ± 0.54 m,2种林分密度分别为 $1 050 \pm 32$ 株·hm⁻²和 225 ± 17 株·hm⁻²。

在选定的每种林龄的柠檬桉人工林内,设置3块20 m × 20 m的样方,进行调查和土壤采样,各样方之间的距离大于100 m。在每块样方的对角线上选择3处挖掘土壤剖面,每个剖面划分5个层次(0~10、10~20、20~40、40~60、60~100 cm),并使用环刀法和剖面法进行采样,每份土壤样品采集约500 g,带回实验室进行风干过筛处理,备用。

1.3 样品测定

土壤含水量(SWC)测定采用烘干法;土壤密度(SD)利用环刀法测定,毛管持水量

(CWHC) 利用环刀采集的土壤, 吸水 12 h 并排除重力水后计算得出, 总孔隙度 (TPO)、毛管孔隙度 (CPO)、非毛管孔隙度 (NCPO) 和土壤通气孔隙度 (APO) 结合土壤密度、土壤比重 (一般取 $2.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) 和毛管持水量进行计算得出^[23]。

土壤 pH 值用 pH 计测定, 水土比为 2.5:1, 土壤全氮 (TN) 采用半微量凯氏定氮法测定; 用硫酸 (H_2SO_4) 和氢氟酸 (HF) 消化土壤样品后, 用钼锑抗显色法测定土壤全磷 (TP); 以 Bray-2 溶液浸提后用钼锑抗显色法测定土壤有效磷 (AP); 总有机碳 (TOC) 采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 外加热法测定^[23]; 易氧化有机碳 (ROC) 用 $333 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ KMnO}_4$ 氧化, 在 565 nm 波长下进行比色测定^[12]。

1.4 数据分析

采用双因素分析方法 (Two-way ANOVA) 比较林龄和土层对柠檬桉人工林土壤理化性质的影响, 并采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 及多重比较 (LSD 法) 对不同林龄林分的显著性

差异进行比较。使用 Pearson 相关分析分别比较两种林龄人工林土壤各因子之间的相关性。用 SPSS 19.0 统计分析软件对数据进行分析, 绘图用 Origin 2021 软件完成。显著性设定为 $p < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同林龄柠檬桉人工林土壤物理性质的垂直变化趋势

双因素方差分析结果表明, 林龄显著影响柠檬桉人工林土壤的物理性质, 但土层及土层与林龄的交互作用对土壤物理性质没有显著影响 (表 1)。3 年生柠檬桉林土壤密度高于 20 年生, 且在 0~10 cm 和 40~60 cm 土层的土壤密度存在显著的林龄差异; 20 年生柠檬桉林土壤自然含水量高于 3 年生, 且在 0~10、40~60 和 60~100 cm 土层差异显著; 而且土壤毛管持水量表现为 20 年生高于 3 年生, 且在 0~10、20~40 和 40~60 cm 土层差异显著。2 种林龄柠檬桉人工林土壤密度随土层加深而逐渐增大, 而土壤自然含水量和毛管持水量则随土层的增加无明显变化 (表 2)。

表 1 林龄和土层对柠檬桉人工林土壤理化性质的双因素方差分析结果

Table 1 Two-way ANOVA of stand age and soil layer on the soil physicochemical properties of *E. citriodora* plantations

指标 Index	土层 Soil layer		林龄 Stand age		土层 × 林龄 Soil layer × Stand age	
	F	p	F	p	F	p
土壤密度 Soil density	2.464	0.078	52.636	0.000	1.213	0.337
自然含水量 Soil water contents	6.555	0.002	50.553	0.000	1.099	0.384
毛管持水量 Capillary water holding capacity	2.440	0.080	52.770	0.000	1.178	0.350
总孔隙度 Total porosity	2.423	0.082	52.115	0.000	1.178	0.350
毛管孔隙度 Capillary porosity	1.720	0.185	29.946	0.000	1.426	0.262
非毛管孔隙度 Non-capillary porosity	0.277	0.890	4.742	0.042	1.595	0.215
通气孔隙度 Aeration porosity	1.317	0.298	13.014	0.002	0.371	0.827
酸碱度 pH	0.535	0.712	28.767	0.000	0.972	0.445
总有机碳 Total organic C	8.624	0.000	27.734	0.000	3.027	0.042
全氮 Total N	32.075	0.000	16.740	0.001	3.677	0.021
全磷 Total P	20.222	0.000	51.117	0.000	0.840	0.516
有效磷 Available P	1.523	0.233	0.052	0.821	1.402	0.269
碳氮比 C : N	1.259	0.319	21.936	0.000	2.975	0.044
碳磷比 C : P	2.313	0.093	9.832	0.005	4.401	0.010
氮磷比 N : P	0.952	0.455	12.285	0.002	0.453	0.769
易氧化有机碳 ROC	14.502	0.000	13.888	0.001	3.366	0.029
易氧化有机碳:总有机碳 ROC:TOC	2.129	0.115	18.099	0.000	3.383	0.029

表 2 不同林龄柠檬桉人工林土壤密度、含水量和毛管持水量特征

Table 2 Soil density, water contents, and capillary water holding capacity of *E. citriodora* plantations with different stand ages

林龄 Stand age	土层 Soil layer/cm	土壤密度 Soil density/(g·cm ⁻³)	自然含水量 Soil water contents/%	毛管持水量 Capillary water holding capacity/%
3年生 Three-years	0~10	1.31 ± 0.04 Aa	17.55 ± 2.29 Bab	32.85 ± 2.13 Ba
	10~20	1.30 ± 0.08 Aa	20.99 ± 2.43 Aa	33.47 ± 3.31 Aa
	20~40	1.30 ± 0.08 Aa	22.18 ± 2.74 Aa	30.79 ± 1.79 Bab
	40~60	1.46 ± 0.02 Aa	14.51 ± 1.14 Bb	25.65 ± 0.31 Bb
	60~100	1.42 ± 0.03 Aa	15.59 ± 0.88 Bab	27.60 ± 1.59 Aab
20年生 Twenty-years	0~10	0.96 ± 0.04 Bb	26.37 ± 1.40 Aa	50.98 ± 1.48 Aa
	10~20	1.08 ± 0.05 Aab	27.77 ± 0.70 Aa	44.96 ± 6.96 Aab
	20~40	1.08 ± 0.07 Aab	27.57 ± 1.38 Aa	48.64 ± 3.15 Aab
	40~60	1.03 ± 0.05 Bab	24.71 ± 0.64 Aa	47.12 ± 4.11 Aab
	60~100	1.21 ± 0.11 Aa	20.59 ± 0.31 Ab	36.62 ± 4.04 Ab

注：表中不同大写字母表示同一土层不同林龄间的显著差异，不同小写字母表示同一林龄不同土层间的显著差异， $p < 0.05$ 。下同

Notes: Different capital letters indicate significant differences between two stand ages within the same layers, while different lowercase letters indicate significant differences among different layers within the same stand age, $p < 0.05$. The same as below

林龄对土壤总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度和通气孔隙度均有显著影响，而土层及土层与林龄的交互作用对土壤不同种类的孔隙度则无显著影响（表 1）。20 年生柠檬桉土壤总孔隙度和毛

管孔隙度高于 3 年生，且在 0~10、20~40 和 40~60 cm 3 个土层表现出显著的林龄差异，非毛管孔隙度和通气孔隙度表现为 20 年生大于 3 年生，但两者仅在 40~60 cm 土层表现出显著差异（表 3）。

表 3 不同林龄柠檬桉人工林土壤孔隙度的垂直变化趋势

Table 3 Changes of soil porosity of *E. citriodora* plantations with different stand ages

林龄 Stand age	土层 Soil layer/cm	总孔隙度 Total porosity/%	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity/%	通气孔隙度 Aeration porosity/%
3年生 Three-years	0~10	50.42 ± 1.67 Ba	42.98 ± 1.45 Ba	7.44 ± 1.13 Aa	27.35 ± 4.16 Aa
	10~20	51.09 ± 3.17 Aa	42.85 ± 1.85 Aa	8.24 ± 1.90 Aa	24.29 ± 1.70 Aa
	20~40	50.97 ± 2.94 Ba	39.73 ± 0.46 Bab	11.24 ± 2.97 Aa	22.57 ± 1.10 Aa
	40~60	44.85 ± 0.90 Ba	37.49 ± 0.91 Bb	7.35 ± 1.76 Ba	23.59 ± 2.92 Ba
	60~100	46.36 ± 0.97 Aa	39.15 ± 1.58 Aab	7.21 ± 0.86 Aa	24.24 ± 0.27 Aa
20年生 Twenty-years	0~10	63.62 ± 1.63 Aa	49.06 ± 1.47 Ab	14.56 ± 2.94 Aa	38.29 ± 1.75 Aa
	10~20	59.06 ± 1.77 Aab	48.13 ± 5.68 Ab	10.93 ± 3.94 Aa	28.88 ± 3.68 Aa
	20~40	59.37 ± 2.61 Aab	51.95 ± 0.91 Ab	7.42 ± 2.78 Aa	29.54 ± 5.75 Aa
	40~60	61.07 ± 1.97 Aab	48.19 ± 1.89 Ab	12.88 ± 0.80 Aa	35.63 ± 2.70 Aa
	60~100	54.46 ± 4.03 Ab	43.34 ± 1.16 Ab	11.13 ± 2.88 Aa	29.58 ± 6.51 Aa

2.2 不同林龄柠檬桉人工林土壤化学性质的垂直变化趋势

林龄显著影响柠檬桉人工林土壤 pH 值，但土层及土层与林龄的交互作用对土壤 pH 值没有显著影响（表 1）。20 年生柠檬桉人工林土壤 pH 值高于 3 年生，且在 10~20、20~40 和 40~60 cm

呈现出显著的年龄差异（表 4）。

林龄、土层及其交互作用显著影响柠檬桉人工林土壤总有机碳和全氮含量（表 1），且 2 种林龄柠檬桉人工林均表现在随着土层的增加而呈下降趋势。20 年生柠檬桉人工林土壤总有机碳和全氮比 3 年生分别高出 21.30%~232.89% 和 0.00%~

表 4 不同林龄柠檬桉人工林土壤化学性质的垂直变化趋势

Table 4 Change of chemical properties of *E. citriodora* plantations with different stand ages

林龄 Stand age	土层 Soil layers/cm	酸碱度 pH	总有机碳 TOC / (g·kg ⁻¹)	全氮TN / (g·kg ⁻¹)	全磷TP / (g·kg ⁻¹)	速效磷AP / (mg·kg ⁻¹)
3年生 Three-years	0~10	4.46 ± 0.04 Aa	10.21 ± 1.06 Aa	0.71 ± 0.05 Ba	0.16 ± 0.01 Ba	3.26 ± 0.52 Aa
	10~20	4.24 ± 0.11 Ba	10.19 ± 1.56 Aa	0.62 ± 0.02 Aab	0.15 ± 0.02 Aa	1.77 ± 0.84 Aab
	20~40	4.07 ± 0.18 Ba	5.51 ± 0.41 Bb	0.54 ± 0.09 Ab	0.13 ± 0.02 Aa	0.90 ± 0.35 Ab
	40~60	4.14 ± 0.13 Ba	3.59 ± 0.01 Bbc	0.31 ± 0.01 Bc	0.08 ± 0.01 Bb	0.99 ± 0.28 Ab
	60~100	4.20 ± 0.25 Aa	2.42 ± 0.78 Bc	0.32 ± 0.03 Ac	0.07 ± 0.01 Bb	1.29 ± 0.41 Ab
20年生 Twenty-years	0~10	4.62 ± 0.05 Aa	19.32 ± 4.13 Aa	0.94 ± 0.04 Aa	0.24 ± 0.01 Aa	1.17 ± 0.52 Ba
	10~20	4.66 ± 0.04 Aa	12.36 ± 2.74 Ab	0.64 ± 0.04 Ab	0.20 ± 0.01 Ab	2.88 ± 1.38 Aa
	20~40	4.71 ± 0.10 Aa	12.23 ± 2.28 Ab	0.54 ± 0.01 Ab	0.18 ± 0.01 Abc	1.88 ± 1.53 Aa
	40~60	4.66 ± 0.08 Aa	11.95 ± 2.28 Ab	0.55 ± 0.04 Ab	0.16 ± 0.01 Ac	0.73 ± 0.20 Aa
	60~100	4.58 ± 0.09 Aa	7.95 ± 1.07 Ab	0.43 ± 0.03 Ac	0.12 ± .01 Ad	0.88 ± 0.15 Aa

77.65%，且 20 年生 20~100 cm 土层总有机碳显著高于 3 年生，而土壤全氮仅在 0~10 cm 和 40~60 cm 两个土层间表现出显著的林龄差异（表 4）。

林龄和土层对柠檬桉人工林土壤全磷呈现出显著的影响，但两者的交互作用不显著（表 1）。2 种林龄人工林土壤全磷含量随着土层的增加而明显下降，20 年生柠檬桉人工林土壤全磷高于 3 年生，且在 0~10、40~60 和 60~100 cm 3 个土层间呈现出显著的林龄差异，另外，土壤速效磷仅在表层 0~10 cm 呈现出显著的林龄差异，且随土

层增加无显著的变化（表 4）。

林龄显著影响柠檬桉人工林土壤 C : N、C : P 和 N : P，但土层对三者无显著影响，且土层和林龄的交互作用仅显著影响 C : N 和 C : P，20 年生柠檬桉人工林土壤 C : N 高于 3 年生，且在 40~60 cm 和 60~100 cm 呈现出显著的林龄差异。相反，土壤 N : P 表现为 3 年生大于 20 年生，但仅在 20~40 cm 呈现显著差异。土壤 C : P 比在中间土层（10~20、20~40 和 40~60 cm）呈现出显著的林龄差异（表 5）。

表 5 不同林龄柠檬桉人工林土壤碳氮磷化学计量比特征

Table 5 Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry characteristic of *E. citriodora* plantations with different stand ages

林龄 Stand age	土层 Layer/cm	碳氮比 C : N	碳磷比 C : P	氮磷比 N : P
3年生 Three-years	0~10	14.61 ± 1.73 Aab	61.80 ± 4.05 Aab	4.29 ± 0.24 Aa
	10~20	16.46 ± 2.36 Aa	68.81 ± 2.90 Aa	4.31 ± 0.48 Aa
	20~40	10.72 ± 1.63 Ab	45.44 ± 7.85 Abc	4.22 ± 0.16 Aa
	40~60	11.74 ± 0.47 Bab	47.83 ± 5.78 Bb	4.06 ± 0.41 Aa
	60~100	7.71 ± 2.73 Bc	34.43 ± 12.90 Bc	4.30 ± 0.46 Aa
20年生 Twenty-years	0~10	20.28 ± 3.40 Aa	80.83 ± 18.63 Aa	3.91 ± 0.25 Aa
	10~20	19.42 ± 3.86 Aa	61.64 ± 13.05 Bb	3.22 ± 0.32 Aa
	20~40	22.57 ± 4.06 Aa	66.60 ± 9.13 Aab	2.99 ± 0.12 Ba
	40~60	22.21 ± 1.96 Aa	76.52 ± 6.59 Aa	3.47 ± 0.25 Aa
	60~100	19.12 ± 3.96 Aa	66.69 ± 3.31 Aab	3.71 ± 0.55 Aa

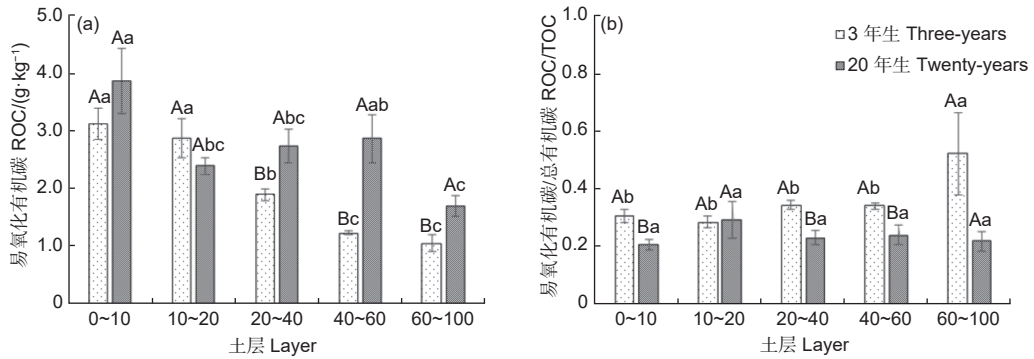
2.3 不同林龄柠檬桉人工林土壤易氧化有机碳的垂直分布趋势

林龄、土层及两者的交互作用对柠檬桉人工林

土壤易氧化有机碳（ROC）呈现显著影响，且林龄及林龄和土层的交互作用对 ROC/TOC 值呈现显著效应（表 1）。3 年生柠檬桉人工林土壤

ROC 含量随土层增加而明显下降, 而 20 年生则表现随土层增加表现出一定的降低趋势 (图 1 a)。除 0~10 cm 和 10~20 cm 土层外, 20 年生柠檬桉人工林土壤 ROC 含量比 3 年生显著高出

44.77%~133.29%, 而 2 种林龄柠檬桉人工林土壤 ROC/TOC 值随土层变化的规律不明显, 在 0~10、20~40 和 40~60 cm 表现为 3 年生显著高于 20 年生 (图 1 b)。



注: 图中不同大写字母表示同一土层不同林龄间的显著差异, 不同小写字母表示同一林龄不同土层间的显著差异, $p < 0.05$

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

图 1 不同林龄柠檬桉人工林土壤 ROC 及 ROC/TOC 的垂直变化趋势

Fig. 1 Vertical changes of ROC and ROC:TOC ratios of *E. citriodora* plantations with different stand ages

2.4 土壤有机碳和易氧化有机碳与其他土壤因子的相关性

相关分析表明, 3 年生柠檬桉人工林土壤 TOC 和 ROC 含量与土壤密度呈极显著负相关, 与毛管持水量、总孔隙度、毛管孔隙度、全氮、全磷、C:N、C:P 呈极显著正相关, 而土壤 ROC/TOC 值与 C:N、C:P 呈极显著负相关 (表 6)。20 年生柠檬桉人工林土壤 TOC 含量与土壤密度呈显著负相关, 与总孔隙度、全磷、C:N 呈显著正相关, 与全氮、C:P 呈极显著正相关; 土壤 ROC 含量与全氮呈极显著正相关, 与全磷、C:P 呈显著正相关, 而土壤 ROC/TOC 值与 C:N、C:P 呈显著负相关 (表 6)。

3 讨论

3.1 林龄和土层对柠檬桉人工林土壤有机碳和养分的影响

本研究发现, 林龄对柠檬桉人工林土壤的物理和化学特征 (除有效磷含量外) 均存在显著影响, 说明随着林龄的增加, 林下植被的覆盖和凋落物分解后输入的有机质显著改善了土壤碳和养分情况, 这与以往的研究结果相一致^[24]。有研究报道, 广西高峰林场 5 种林龄尾巨桉人工林 0~40 cm 土层土壤全氮和全磷随林龄变化表现为 3 年生 > 2 年生 >

6 年生 > 1 年生 > 7 年生, 表明土壤全氮和全磷随桉树林龄增加而没有呈现明显的递增或递减的变化规律^[7]。对桂南地区不同龄级尾巨桉人工林的研究发现, 土壤总碳随龄级增加至 6~7 a 后下降, 土壤总氮、总磷和总钾含量均在中龄林 (2~3 年生) 达到最大值, 说明桉树人工林土壤总碳随着林龄的增加呈上升趋势, 而土壤氮磷钾养分随林龄增加先上升后下降^[6]。以上结果说明, 林龄对桉树人工林土壤养分特征的影响存在较大差异, 且与本研究结果不一致。造成上述差异的原因可能是林龄跨度。以往研究关注的桉树人工林林龄跨度较小, 仅在一个轮伐期内, 土壤理化特性受施肥或营林措施影响较大, 而凋落物以及根系输入的碳累积量相对有限, 故土壤总碳及养分随林龄的变化并未呈现明显的递增或递减规律。另外, 本研究 20 年生柠檬桉人工林土壤 TOC、TN 和 TP 比 3 年生分别高 138.60%、29.77% 和 56.99%, 说明土壤有机碳和氮磷养分随着林龄的增加而增加, 这是由于随着人工林林龄的增加, 林龄跨度的增大, 地表凋落物及根系分解后带来有机质的持续输入, 提高了人工林土壤有机碳含量及固碳能力, 并改善了土壤肥力状况^[24]。本研究中, 2 种柠檬桉人工林土壤有机碳、全氮和全磷随土层的增加而明显下降, 与以往研究结果一致^[8]。这主要是由于不同土层土壤受到

表 6 不同林龄柠檬桉人工林土壤 TOC、ROC 和 ROC/TOC 与其他土壤因子的相关性

Table 6 Correlations between TOC, ROC, ROC/TOC, and other soil factors in *E. citriodora* plantations with different stand ages

变量 Variates	3年生 Three-year			20年生 Twenty-year		
	TOC	ROC	ROC/TOC	TOC	ROC	ROC/TOC
土壤密度 Soil density	-0.654**	-0.677**	0.200	-0.528*	-0.481	0.218
自然含水量 Soil water contents	0.443	0.494	-0.140	0.394	0.432	0.037
毛管持水量 Capillary water holding capacity	0.768**	0.791**	-0.189	0.471	0.390	-0.351
总孔隙度 Total porosity	0.658**	0.677**	-0.205	0.525*	0.474	-0.226
毛管孔隙度 Capillary porosity	0.744**	0.787**	-0.095	0.248	0.201	-0.323
非毛管孔隙度 Non-capillary porosity	0.217	0.190	-0.188	0.269	0.267	0.109
通气孔隙度 Aeration porosity	0.400	0.341	-0.136	0.380	0.299	-0.270
酸碱度 pH	0.211	0.240	0.255	0.261	0.251	-0.131
全氮 Total N	0.824**	0.900**	-0.477	0.690**	0.725**	-0.046
全磷 Total P	0.863**	0.890**	-0.452	0.600*	0.620*	-0.119
有效磷 Available P	0.439	0.459	-0.101	-0.065	-0.150	-0.207
碳氮比 C : N	0.865**	0.764**	-0.786**	0.617*	0.407	-0.609*
碳磷比 C : P	0.823**	0.755**	-0.828**	0.806**	0.614*	-0.543*
氮磷比 N : P	-0.233	-0.165	0.069	0.173	0.209	0.135

注: *表示显著相关 ($p < 0.05$); **表示极显著相关 ($p < 0.01$)

Notes: * indicates significant correlation ($p < 0.05$); ** indicates extremely significant ($p < 0.01$)

表层有机质的淋溶和淀积作用的影响, 同时也与林木根系分布的深度有关^[9]

3.2 不同林龄柠檬桉人工林土壤碳稳定性的垂直变化趋势及影响因素

本研究发现, 林龄及林龄与土层的交互作用显著影响了柠檬桉人工林土壤 ROC 含量和 ROC/TOC 值, 说明林龄对土壤碳稳定性存在显著效应, 且 ROC 存在明显的垂直分布规律, 随土层的增加而下降, 与前人研究结果基本一致^[17]。20 年生柠檬桉人工林土壤 ROC 含量比 3 年生高 49.52%, 而 ROC/TOC 值比 3 年生低 30.17%, 说明柠檬桉人工林随着林龄的增加, 土壤有机碳的稳定性增强, 这与人工林林龄的增加使有机质的持续输入并转化为更稳定性的碳密切相关^[17, 25]。土壤 ROC/TOC 值在一定程度上可以反映出土壤有机碳的稳定性, 其比值受到土壤性质、林分类型、林龄、森林演替和海拔等因子的影响^[26-28]。对桂北不同林龄桉树人工林土壤碳库的研究发现, 土壤活性有机碳含量随林龄的增加而降低, 但是土壤活性有机碳占总有机碳的比例随林龄变化无明显变化规律^[17]。随着人工林林龄的增加, 土壤 TOC 的累积的量较大, 而 ROC 累积的量相对较少, 因而导致

20 年生柠檬桉人工林土壤 ROC 占 TOC 的比例降低, 土壤有机碳趋向于更稳定。另外, 本研究发现 2 种林龄柠檬桉人工林土壤 TOC 和 ROC 均受到土壤 TN、TP、C : N、C : P 的显著影响, 而 3 年生柠檬桉人工林土壤 TOC 和 ROC 还受到土壤毛管持水量、总孔隙度和通气孔隙度的影响, 这说明柠檬桉幼龄林 (3 年生) 土壤碳储量及稳定性受到土壤物理性质和氮磷养分供应的调控, 而成熟林 (20 年生) 则更容易受到土壤养分供应水平的调控。因此, 适当延长柠檬桉人工林的轮伐期, 且在一定程度提高土壤的氮磷供应水平, 有利于提高土壤中稳定性碳的比例, 从而更好地提升碳在土壤中存留的周期, 可以有效提高桉树人工林土壤碳库的质量和稳定性。

4 结论

本文探讨不同林龄和土层对柠檬桉人工林土壤养分状况和碳稳定性的影响, 主要结论如下: (1) 柠檬桉人工林土壤理化性质受到林龄和土层的显著影响, 土壤有机碳和氮磷养分随着林龄的增加而增加, 且随着土层的增加而下降。(2) 20 年生柠檬桉人工林土壤易氧化有机碳 (ROC) 含量

高于 3 年生, 但 ROC/TOC 的比值比 3 年生低, 表明 20 年生柠檬桉人工林土壤碳的稳定性更高。

(3) 柠檬桉幼龄林土壤碳储量及稳定性受到土壤物理性质和氮磷养分供应的调控, 而成熟林则更容易受到土壤氮磷养分供应水平的调控。本研究结果为柠檬桉人工林土壤碳汇能力及其稳定性的提升提供了科学的数据参考。因此, 在桉树人工林经营中, 可以适当延长人工林的轮伐期, 同时适当调整土壤氮磷供应比例, 可以有效提高土壤有机碳库的储量及其稳定性。

参考文献:

- [1] 王云霖. 我国人工林发展研究[J]. 林业资源管理, 2019 (1): 6-11.
- [2] BUKOSKI J J, COOK-PATTON S C, MELIKOV C, *et al.* Rates and drivers of aboveground carbon accumulation in global monoculture plantation forests[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 4206.
- [3] 竹万宽, 陈少雄, 王志超, 等. 不同林龄尾巨桉人工林凋落物和土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. 热带亚热带植物学报, 2017, 25 (2): 127-135.
- [4] WEI Y Q, XIONG X, RYO M, *et al.* Repeated litter inputs promoted stable soil organic carbon formation by increasing fungal dominance and carbon use efficiency[J]. *Biology Fertility of Soils*, 2022, 58: 619-631.
- [5] 邢维奋, 石珊奇, 薛 杨, 等. 海南乐东 5 种森林土壤有机碳储量的比较[J]. 热带农业科学, 2017, 37 (5): 14-19.
- [6] 兰 秀, 刘永贤, 宋同清, 等. 广西不同龄级桉树人工林植被与土壤特征及相关分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42 (7): 127-136.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 吴梦佳, 于耀泓, 顾晓娟, 等. 尾叶桉与木荷林对土壤理化性质及易氧化有机碳的影响[J]. 森林与环境学报, 2023, 43 (4): 356-362.
- [11] CULMAN S W, SNAPP S S, FREEMAN M A, *et al.* Permanganate oxidizable carbon reflects a processed soil fraction that is sensitive to management[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(2): 494-504.
- [12] 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.
- [13] 刘 平, 李 鹏, 杨章旗, 等. 广西不同林龄和区域马尾松人工林的土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. 广西科学, 2022, 29 (1): 192-200.
- [14] 杨 霞, 陈丽华, 郑学良. 不同林龄油松人工林土壤碳、氮和磷生态化学计量特征[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2021, 19 (2): 108-116.
- [15] HUANG X M, LIU S R, YOU Y M, *et al.* Different mechanisms underlying the divergent responses of soil respiration components to an introduction of N₂-fixer tree species into Eucalyptus plantations[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 308-309: 108536.
- [16] 黄香兰, 叶龙华, 卢广超, 等. 三种人工林的土壤碳密度动态研究[J]. 湖南林业科技, 2013, 40 (3): 18-22.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 李跃林, 胡成志, 张 云, 等. 几种人工林土壤碳储量研究[J]. 福建林业科技, 2004 (4): 4-7.
- [20] FERNANDES M M, CARVALHO M G C, ARAUJO J M R, *et al.* Organic matter and microbial biomass in eucalyptus plantations in the Cerrado of the State of Piauí[J]. *Floresta e Ambiente*, 2012, 19(4): 453-459.
- [21] GIRMA B, FELEKE S, ABDULKADIR A. Effect of border planting of *Eucalyptus citriodora* Hook. on the growth and biomass production performance of *Cymbopogon winterianus* Jowitz ex Bor Grass at Wondo Genet, Southern Ethiopia[J]. *Journal of Forestry Research*, 2019, 30(2): 639-646.
- [22] 许宇星, 王志超, 竹万宽, 等. 雷州半岛不同林龄桉树人工林土壤化学计量特征[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2019, 34 (3): 486-493.
- [23] 查同刚. 土壤理化分析[M]. 北京: 中国林业出版社, 北京, 2017.
- [24] 王红英, 樊星火, 华玉武, 等. 不同林龄序列杉木人工林生态系统碳储量变化特征[J]. 江苏农业科学, 2017, 45 (21): 278-280.
- [25] 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.
- [26] XIANG H M, LUO X Z, ZHANG L L, *et al.* Forest succession accelerates soil carbon accumulation by increasing recalcitrant carbon stock in subtropical forest topsoils[J]. *Catena*, 2022(212): 106030.
- [27] 王军广, 赵志忠, 王 鹏, 等. 海南岛东南部热带雨林土壤易氧化有机碳特征及影响因素[J]. 西部林业科学, 2023, 52 (2): 106-112 + 131.
- [28] CHEN Y Q, ZHANG Y, CAO J B, *et al.* Stand age and species traits alter the effects of understory removal on litter decomposition and nutrient dynamics in subtropical Eucalyptus plantations[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2019(20): e00693.

Effects of Stand Age and Soil Layer on Soil Nutrients and Readily Oxidizable Organic Carbon Concentrations of *Eucalyptus citriodora* Plantations

HE Pu-lin¹, XU Qi-xian¹, WANG Zhong-lin¹, ZHANG Zhen-yuan², LIU Yue²,
GU Xiao-juan², ZHOU Qing², MO Qi-feng²

(1. China Forestry Group Leizhou Forestry Bureau Co., Ltd, Zhanjiang 524043, Guangdong, China; 2. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of stand age and soil layer on soil nutrient contents and readily oxidizable organic carbon (ROC), and provide scientific reference for improving soil C sequestration quality of plantation. [Method] This study measured the soil physical and chemical properties and ROC contents of two kinds of *Eucalyptus citriodora* Hook. plantations with two ages (3a and 20a) and soil layers (0~10, 10~20, 20~40, 40~60, and 60~100 cm) in Suixi, Zhanjiang City, Guangdong Province. [Result] The results showed that the stand age significantly affected the soil physical properties, C, nitrogen (N), and phosphorus (P) contents and C : N, C : P and N : P, but the soil layer only had significant effects on soil water content (SWC), total organic C (TOC), total N (TN), total P (TP) and ROC. The soil TOC, TN, and TP of 20a plantation were 138.60%, 29.77%, and 56.99% higher than those of 3a plantation, respectively, indicating that soil TOC, TN, and TP increased with the increase of stand age. In addition, the soil ROC content of 20a plantation was 49.52% higher than that of 3a plantation, while the ROC/TOC ratio was 30.17% lower than that of 3a plantation, indicating that soil C stability of 20a plantation increases with the increase of stand age, which is attributed to the higher accumulation of TOC while less accumulation of ROC with the increase of stand age. Correlation analysis showed that the TOC and ROC contents of two plantations with different ages were significantly influenced by TN, TP, C : N, and C : P, but the TOC and ROC of 3a plantations also affected by SWC, total porosity, and capillary porosity. [Conclusion] The results of this study show that the stability of soil organic C increases with the increase of stand age, and is easily affected by the supply of soil N and P nutrients. Therefore, in the plantation management practices, the stability of soil C can be effectively improved by properly prolonging the rotation periods, as well as the regulation of soil N and P supplement of *Eucalyptus* plantations.

Keywords: Carbon stability; soil nutrient; readily oxidizable organic carbon; *Eucalyptus citriodora* plantation; West Guangdong

(责任编辑: 崔 贝)