

广东不同立地条件下的土壤碳差异性*

林丽平¹ 罗勇¹ 林寿明¹ 陈海亮¹ 伍国清¹ 罗赵慧²

(1. 广东省林业调查规划院, 广东广州 510520; 2. 生态环境部华南环境科学研究所, 广东广州 510655)

摘要 为了给森林土壤碳库管理、提升适应与应对气候变化能力提供理论依据, 研究以湿地生态系统(深圳福田红树林样地)、陆地生态系统(陈禾洞天然林样地、岳山林场生态修复样地以及高州香花油茶 *Camellia osmantha* 新造林样地)的0~100 cm 土层土壤为研究对象, 对比分析了4种生态系统的土壤有机碳含量、有机碳密度及其垂直分布特征。结果表明, 4种典型森林0~100 cm 土层土壤容重平均值为0.994~1.421 g·cm⁻³, 有机碳含量为4.42~29.43 g·kg⁻¹, 有机碳密度为0.42~2.53 kg·m⁻²; 不同立地条件生态系统的土壤容重、土壤有机碳、土壤碳密度随深度变化存在差异, 湿地生态系统土壤容重最大值出现在50~60 cm, 陆地生态系统土壤容重最大值出现在20~40 cm; 湿地生态系统土壤碳密度随深度增加总体表现为先增加(0~60 cm)后减小(60~100 cm)的趋势, 陆地生态系统土壤碳密度总体上随土壤深度增加而减小。土壤容重在一定范围内随深度变化而增大, 超过这一范围, 则保持相对稳定; 土壤有机碳含量随土壤深度增加而减小。湿地生态系统土壤碳含量显著高于陆地生态系统 ($P<0.05$), 人工修复林地土壤碳含量高于天然林; 陆地生态系统土壤碳密度随土壤深度增加而减小, 适度人为干扰有助于提高土壤碳密度。

关键词 典型森林; 土壤理化性质; 土壤碳储量; 广东省

中图分类号: S714 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2024) 06-0026-07

DOI: 10.20221/j.cnki.2096-2053.202406004

Study on Soil Carbon Variability under Different Environmental Conditions in Guangdong

LIN Liping¹ LUO Yong¹ LIN Shouming¹ CHEN Hailiang¹
WU Guoqing¹ LUO Zhaohui²

(1. Guangdong Forestry Survey and Planning Institute, Guangzhou, Guangdong 510520, China;

2. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou, Guangdong 510655, China)

Abstract To provide a theoretical basis for forest soil carbon pool management and improving the ability to adapt to and cope with climate change, the 0–100 cm soil layer of wetland ecosystem (Futian mangrove plot in Shenzhen), terrestrial ecosystem (Chenhedong natural forest plot, Yue shan forest farm ecological restoration plot, and *Camellia osmantha* new planting plot) were studied. The soil organic carbon content, organic carbon density and vertical distribution characteristics of four ecosystems were compared and analyzed. The results showed that the average soil bulk density in 0–100 cm soil layer of four typical forests was 0.994–1.421

* 基金项目: 广东省林业科技创新项目 (2024KJCX008)。

第一作者: 林丽平 (1988—), 女, 高级工程师, 主要从事森林生态监测、林业碳汇计量研究, E-mail: 239813728@qq.com。

通信作者: 罗勇 (1976—), 男, 高级工程师 (教授级), 主要从事森林生态监测、林业碳汇计量研究, E-mail: 417328350@qq.com。

$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, the organic carbon content was $4.42\text{--}29.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, and the organic carbon density was $0.42\text{--}2.53 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. The soil bulk density, soil organic carbon and soil carbon density of ecosystems with different site conditions varied with depth. The maximum soil bulk density of wetland ecosystem appeared in 50–60 cm, and the maximum soil bulk density of terrestrial ecosystem appeared in 20–40 cm. The soil carbon density of wetland ecosystem increased first (0–60 cm) and then decreased (60–100 cm) with the increase of soil depth, while the soil carbon density of terrestrial ecosystem decreased with the increase of soil depth. Soil bulk density increases with depth within a certain range, and remains relatively stable beyond this range. Soil organic carbon content decreased with the increase of soil depth. The soil carbon content of wetland ecosystem was significantly higher than that of terrestrial ecosystem ($P < 0.05$), and the soil carbon content of artificial restoration forest was higher than that of natural forests. The soil carbon density of terrestrial ecosystems decreased with the increase of soil depth, and moderate human disturbance helped to increase soil carbon density.

Key words typical forest; soil physicochemical properties; soil carbon storage; Guangdong province

森林生态系统是陆地生态系统的固碳主体, 发挥了巨大的固碳潜力。森林植被中储存着全球植被总碳储量的 86% 左右, 森林土壤中储存着全球土壤总碳储量的 73% 左右^[1]。土壤有机碳库储量是全球温室气体的一个主要源和汇, 同时土壤作为人类生存和发展的基底环境, 很容易受到人类活动影响。地下有机碳库, 特别是土壤碳库, 是陆地生态系统最大的有机碳库, 约占整个陆地生态系统的三分之二, 约为植物碳库的 3 倍, 大气碳库的 2 倍^[2], 其微量降低都可通过向大气排放温室气体而直接导致大气层 CO_2 浓度升高, 进而改变气候变暖的进程, 在维持温室气体平衡和减缓气候变化方面发挥着重要作用^[3]。研究陆地土壤固碳能力是预测大气成分含量及全球气候变化的基础, 也是合理有效利用土地资源缓解温室效应的依据。

在过去一个世纪的时间里, 全球土壤有机碳储量始终在减少^[4]。许多驱动因素会直接或间接地影响土壤有机碳的水平^[5]。土地利用变化是全球范围内影响土壤有机碳的主要驱动因素, 根据 Winkler K 等^[6] 的研究, 过去 60 a (1960—2019 年), 全球近三分之一的土地面积发生了土地利用变化。例如, 热带地区原始林转变为农田导致土壤有机碳储量损失 25~30%^[7]。由于土壤碳库在减缓与应对气候变化、实现“双碳”愿景等方面发挥着重要作用, 掌握不同利用方式下的土壤碳储量现状, 进而精细化提升土壤碳储量, 充分发挥其在减缓气候变化中的巨大作用, 成为目前土壤碳储量研究的重要方面。

广东省拥有多样化的土壤类型和丰富的植被

覆盖, 是研究土壤碳储量和碳循环的理想区域。2022 年 12 月广东省委发布《关于深入推进绿美广东生态建设的决定》, 要求“精准提升森林质量, 增强森林生态系统稳定性和碳汇能力”。然而, 目前生态系统质量改善与提升主要关注林木质量的精准提升。土壤, 作为陆地生态系统储量最大的活跃碳库, 不同利用方式对土壤碳储量产生怎样的影响, 如何精准提升其碳汇功能往往被忽视。

因此, 本研究考虑了湿地与陆地生态系统、不同立地利用方式陆地生态系统之间的差异性, 选取了广东省不同立地条件的生态系统, 通过分析各样地不同土层深度下的土壤有机碳, 旨在明确不同立地条件下土壤地下碳储量及其差异, 对深入认识地下碳固存能力, 预测和控制未来土壤生态系统中碳流方向、速度, 提升适应与应对气候变化能力等具有重要的理论和实践意义。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

2024 年 8 月, 本研究在广东省内选取了 4 个典型森林样地 (图 1): 深圳福田红树林样地、陈禾洞天然林样地、岳山林场生态修复样地和高州香花油茶 *Camellia osmantha* 新造林样地 (以下简称高州油茶新造林)。深圳福田红树林样地位于深圳福田红树林保护区, 优势树种为秋茄 *Kandelia obovata*、白骨壤 *Avicennia marina*, 平均胸径为 14.3 cm, 平均树高为 4.4 m; 陈禾洞天然林样地位于广东省广州市从化区陈禾洞省级自然保护区内, 优势种为野含笑 *Michelia skinneriana*、华润楠 *Machilus chinensis* 等, 平均胸径 13.5 cm, 平均树

高 8.9 m；岳山林场生态修复林样地位于广东省肇庆市怀集县蓝钟镇，植被以杉木 *Cunninghamia lanceolata* 为主，该区域生物多样性丰富，平均胸径 16.0 cm，平均树高 11.1 m；高州油茶新造林样地位于广东省茂名市国有荷塘林场，植被以香花油茶为主，平均地径 1.2 cm，平均树高 0.9 m；各研究样地林分特征见表 1。

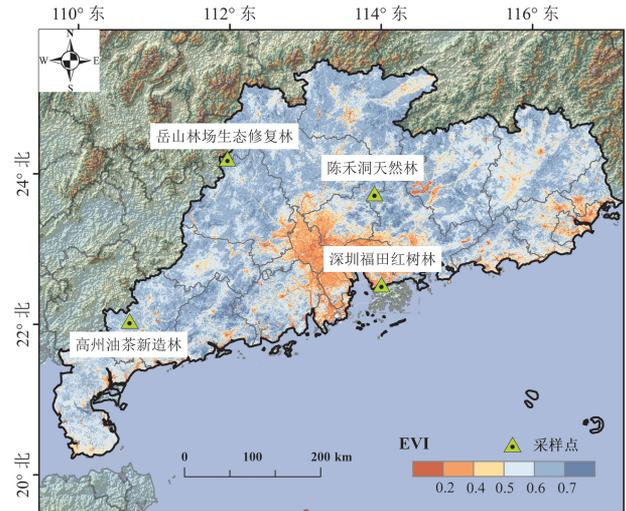
1.2 研究方法

1.2.1 样地剖面点布设 每个样地的 1 个土壤剖面点选择具有代表其所处的土壤类型、植被条件和地形地貌，避免受人为活动影响较大的位置，距树干 1~2 m 以外，避免树干附近土壤受树木根系活动的影响。土壤剖面坑的深 2.0 m，长度为 1.5 m，宽度为 0.8 m。挖掘时，表土与底土分别堆放于土坑两侧，观察面上部保持植被和凋落物的完整。土壤挖掘完成后，将观察面修平整，再自上而下、从左到右整理出宽约 10 cm 的自然状态断面（无刀痕）。

1.2.2 土壤样品采集 采样深度以 100 cm 为基准，采取系统分层采样，采样深度为 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm、50~60 cm、60~80 cm 和 80~100 cm。用环刀在各层中部取样，在采集过程中，确保环刀垂直插入土壤，避免倾斜或偏移，以保持土壤结构的完整性。观察、调查和剖面层次土壤样品取样完成后，将剖面回填，尽量恢复原状。

1.2.3 土壤样品处理 样品采集后，用自封袋封装带回实验室，自然风干并除去砾石和根系后过 2 mm 筛，用于进行土壤理化性质的测定。土壤容重等土壤物理性状指标采用环刀法测定，土壤有机碳含量用重铬酸钾—外加热法测定。

1.2.4 数据分析 数据采用 Excel 2013 和 SPSS 19.0 (IBM SPSS, USA, NY) 进行统计分析，采用单因素方差分析和 LSD 多重比较的方法，分析各群落有机碳含量及其他指标之间的差异。



注：行政边界数据来源于自然资源部官网下载，对边界无修改。

Note: The administrative boundary data is downloaded from the official website of the Ministry of Natural Resources, and the boundary is not modified.

图 1 研究地概况

Fig. 1 Overview of study site

表 1 研究样地特征

Table 1 Characteristics of study site

林分类型 Stand type	优势树种 Dominant tree species	平均胸径（地径）/cm Average diameter	平均树高/m Average height	平均密度/（株·hm ⁻² ） Average density
深圳福田红树林	秋茄、白骨壤	14.3	4.4	2 085
陈禾洞天然林	野含笑、华润楠	13.5	8.9	1 410
岳山林场生态修复林	杉木	16.0	11.1	1 920
高州油茶新造林	香花油茶	1.2	0.9	765

2 结果与分析

2.1 不同林区土壤容重

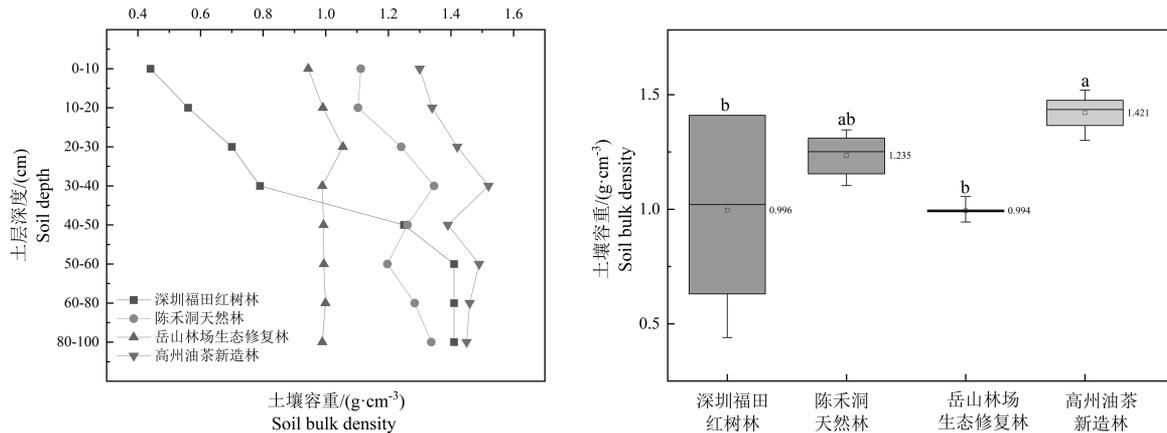
深圳福田红树林表层土壤（0~10 cm）的容重为 0.44 g·cm⁻³，10~20 m 深度的容重为 0.56 g·cm⁻³，20~30 cm 为 0.70 g·cm⁻³，30~40 cm 为 0.79 g·cm⁻³，表明在较浅的土层中，随土层加深，土壤密度缓慢增加，在 40 cm 深度以下，土壤容重增长显著加快，50~80 cm 深度的容重为 1.41 g·cm⁻³（图 2）。陈禾洞天然林的土壤容重从表层到深层均保持在较高水平，随着深度的增加，10~20 cm 的容重为 1.10 g·cm⁻³，与表层相比变化不大，在 20~30 cm 深度，土壤容重升高至 1.24 g·cm⁻³，在 30~40 cm 深度的容重达到最高值，为 1.35 g·cm⁻³，在 40~50 cm 深度，土壤容重略有下降，降至 1.26 g·cm⁻³，但仍保持在较高水平。岳山生态修复林土壤容重表层（0~10 cm）的

土壤容重为 $0.94 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，在 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 深度，土壤容重上升至 $0.99 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，增幅较小， $20 \sim 30 \text{ cm}$ 深度的土壤容重为 $1.06 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，在 $30 \sim 100 \text{ cm}$ 深度，土壤容重开始下降，随后基本保持稳定，容重平均水平达到 $0.99 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。高州油茶新造林土壤表层土壤容重为 $1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，随着深度增加逐渐升高，至 $30 \sim 40 \text{ cm}$ 时达到最高值 $1.52 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，在 $40 \sim 50 \text{ cm}$ 深度，土壤容重下降至 $1.39 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，随后在 $50 \sim 60 \text{ cm}$ 深度略微上升至 $1.49 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，在 $60 \sim 80 \text{ cm}$ 深度和 $80 \sim 100 \text{ cm}$ 深

度时，分别为 1.46 和 $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，显示出深层土壤容重相对稳定的状态。

从各样地土壤容重均值看，高州市样地 $0 \sim 100 \text{ cm}$ 深度土壤容重最大，平均值为 $1.421 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，其次为陈禾洞和福田，分别为 1.235 和 $0.996 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，最低为岳山林场，为 $0.994 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

多重比较结果表明，高州油茶新造林的土壤容重显著高于深圳福田红树林、岳山生态修复林 ($P < 0.05$)，而深圳福田红树林、陈禾洞天然林和岳山生态修复林的土壤容重差异不显著 (图 2)。



注：不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著，新造林样地树种为香花油茶 *Camellia osmantha*。

Note: Different lowercase letters indicate a significant difference at the 0.05 level, the new afforestation sample tree species is *Camellia osmantha*.

图 2 广东省不同立地生态系统样地土壤容重

Fig. 2 Soil bulk density of different site ecosystems in Guangdong province

2.2 不同林区土壤有机碳含量

深圳福田红树林土壤有机碳随土壤深度变化呈现明显的梯度差异，表现出典型的表层富集、深层递减的趋势 (图 3)。土壤表层 ($0 \sim 10 \text{ cm}$) 有机碳高达 $46.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，为整个剖面中碳储量最高的层次。 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 为 $37.84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，而 $20 \sim 30 \text{ cm}$ 深度则上升至 $41.72 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。这一区域的有机碳相较于表层虽有所下降，但仍维持较高水平。自 30 cm 深度开始，土壤有机碳明显下降， $30 \sim 40 \text{ cm}$ 的有机碳为 $30.96 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，比 $20 \sim 30 \text{ cm}$ 减少了约 25.8%。在 $40 \sim 50 \text{ cm}$ 深度，有机碳进一步下降至 $20.86 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，在 50 cm 以下，有机碳逐步趋于平稳， $50 \sim 60 \text{ cm}$ 和 $60 \sim 80 \text{ cm}$ 分别为 22.56 和 $17.55 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，到了 $80 \sim 100 \text{ cm}$ 深度，有机碳进一步下降至 $10.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，为该剖面中的最低值。这表明随着深度的增加，土壤有机碳的输入和固定作用明显降低，深层土壤更多依赖长期累

积的稳定有机碳库。

陈禾洞天然林土壤有机碳随深度的变化展现出明显的递减趋势，且随着深度的增加，土壤有机碳明显减少，呈现典型的表层富集和深层相对较低的格局。表层 ($0 \sim 10 \text{ cm}$) 土壤有机碳为 $21.96 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，为整个剖面中最高值。 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 深度的有机碳为 $7.13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，相比表层土壤明显降低， $20 \sim 30 \text{ cm}$ 深度的有机碳进一步下降至 $3.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，在 $30 \sim 40 \text{ cm}$ 深度，有机碳为 $2.97 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，与 $20 \sim 30 \text{ cm}$ 深度相比波动幅度较小。 $40 \sim 50 \text{ cm}$ 和 $50 \sim 60 \text{ cm}$ 的有机碳分别为 2.63 和 $2.68 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，逐渐趋于平稳趋势，在 $60 \sim 80 \text{ cm}$ 和 $80 \sim 100 \text{ cm}$ 深度，土壤有机碳分别为 2.17 和 $2.39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，略有波动但总体仍处于低水平。

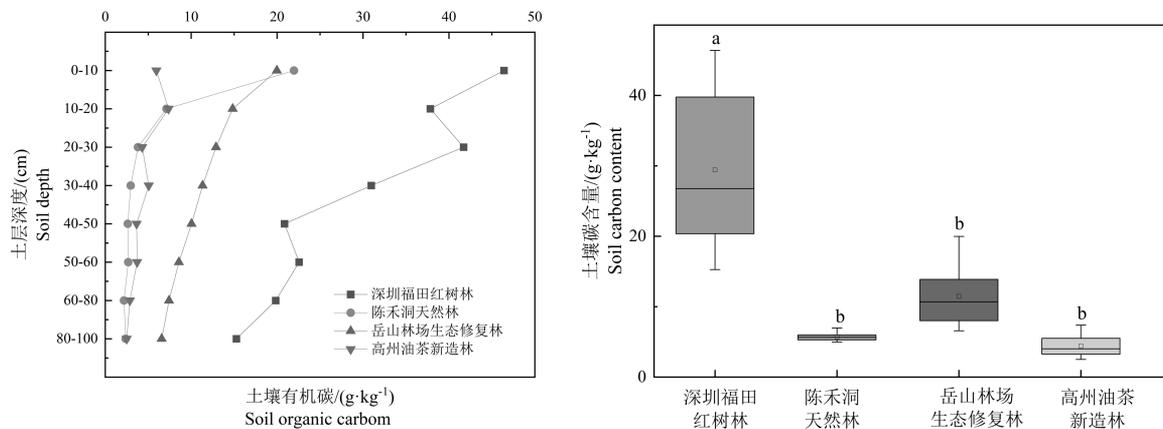
岳山林场生态修复林土壤有机碳随深度变化表现出相对较为平稳的递减趋势。表层 ($0 \sim 10 \text{ cm}$) 土壤有机碳为 $18.68 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，为整个剖面中

最高。在 10~20 cm 深度，土壤有机碳为 16.16 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，在 20~30 cm 深度的有机碳进一步下降至 12.90 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，显示出有机碳随着土层深度增加而逐渐减少的趋势。在深层土壤（30~100 cm）中，土壤有机碳继续下降，但下降幅度趋于平缓。这一趋势表明，深层土壤的有机碳含量有限，主要是由于有机质的垂直迁移受限以及分解过程较为缓慢。深层土壤中的有机碳稳定性较高，多以难以分解的形式存在。

高州油茶新造林土壤有机碳随深度的变化显示出一定的波动性和递减趋势，这种分布特点与造林生态系统的特征有关，表明造林过程中植被对土壤碳库的影响。在 0~10 cm 的表层土壤中，

有机碳为 5.95 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。这一层的有机碳最高，反映出表层土壤富集了大部分有机碳。在中层土壤中（10~30 cm），土壤有机碳呈现一定的波动变化。在 30~100 cm 的深层土壤中，有机碳总体呈现逐渐下降的趋势。

从 4 个样地土壤有机碳含量均值（0~100 cm）看，深圳福田红树林土壤有机碳含量最大，约为 29.43 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，其次为岳山林场生态修复林和陈禾洞天然林，分别为 11.46 和 5.72 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，最低为高州油茶新造林，为 4.42 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。高州油茶新造林土壤有机碳含量与陈禾洞天然林差异不显著（图 3），多重比较结果表明，深圳福田红树林土壤有机碳与其他三地均存在显著差异（ $P < 0.05$ ）。



注：不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著，新造林样地树种为香花油茶 *Camellia osmantha*。

Note: Different lowercase letters indicate a significant difference at the 0.05 level, the new afforestation sample tree species is *Camellia osmantha*.

图 3 广东省不同立地生态系统样地有机碳质量分数

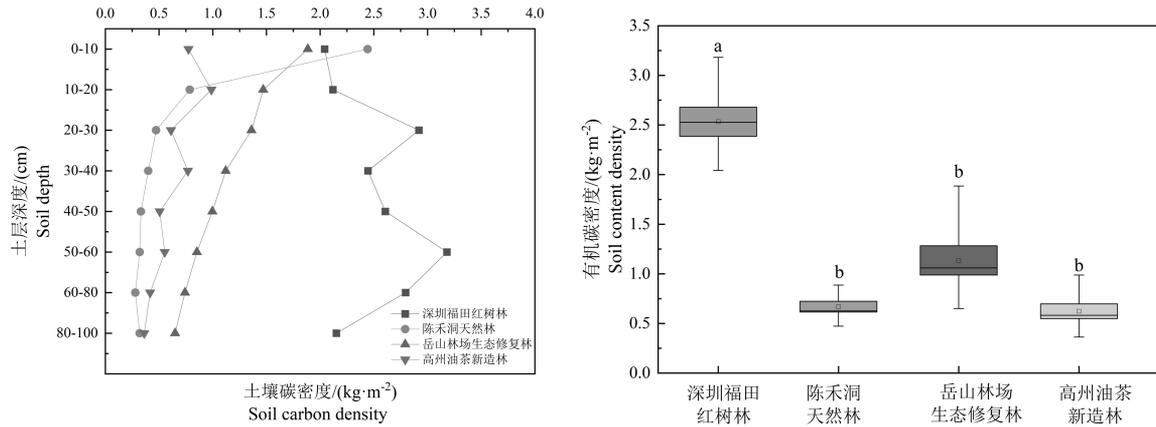
Fig. 3 Organic carbon mass fraction of different site ecosystems in Guangdong province

2.3 土壤碳密度

深圳福田红树林土壤碳密度的分布特征显示出明显的随深度变化的规律性（图 4）。从 0~100 cm 的土层中，碳密度呈现出波动上升的趋势，0~10 cm 的表层土壤碳密度为 2.04 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ，在 20~30 cm 的土层中达到最大值（2.92 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ），而后逐渐降低。这个分布模式揭示了深圳福田红树林土壤碳动态的独特性，反映了潮汐湿地生态系统的特征以及土壤碳固定机制。陈禾洞天然林土壤碳密度的分布呈现出明显的垂直变化规律，表现出随土壤深度增加而逐渐减少的趋势。0~100 cm 范围内土壤碳密度从表层较高水平逐渐下降，尤其是在 20 cm 以下的土壤深度，碳密度明显降低。岳山林场生态修复林的土壤碳密度随深度的

分布呈现出明显的差异，表现为土壤表层碳密度相对较高，而随着深度增加，碳密度逐渐下降。岳山林场生态修复林生态系统由于植被恢复和土壤结构的演变，表现出与天然林不同的碳密度分布模式。高州油茶新造林的土壤碳密度在不同深度呈现出较为复杂的变化趋势。总体而言，4 种林分表层土壤碳密度较低，随着深度增加呈现出波动下降的趋势。这种分布模式可能受到多种因素的影响，如高州油茶新造林地的土地利用历史、植被类型、土壤结构和养分循环等。

多重比较结果表明，深圳福田红树林土壤碳密度显著高于其他 3 个样地（ $P < 0.05$ ）（图 4），而陈禾洞天然林、岳山林场生态修复林、高州油茶新造林土壤碳密度差异不显著。



注：不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著，新造林样地树种为香花油茶 *Camellia osmantha*。

Note: Different lowercase letters indicate a significant difference at the 0.05 level, the new afforestation sample tree species is *Camellia osmantha*.

图 4 广东省不同立地生态系统样地土壤碳密度

Fig. 4 Soil carbon density of different site ecosystems in Guangdong province

3 结论与讨论

3.1 土壤容重在一定范围内随深度变化而增大，超过一定阈值，则土壤容重保持稳定。深圳福田红树林土壤容重最大值出现在 50~60 cm，陆地生态系统土壤容重最大值出现在 20~40 cm。4 个林地的土壤容重变化趋势反映了不同生态系统对土壤物理结构的影响。这些差异可能与土壤的有机质含量、土壤结构、植被类型及其管理方式有关。进一步的研究需要结合土壤物理性质、化学性质以及生物活性等多方面因素，以更全面地理解土壤容重的空间分布特征及其生态意义。

深圳福田红树林的土壤容重从表层到深层呈现逐渐增加的趋势，这与华国栋等^[8]、吴雪等^[9]等人的研究结果相类似，深层土壤的紧实性可能受沉积物堆积和长期潮汐作用的影响，显示了红树林土壤在垂直剖面上的显著分层特征。这一趋势对理解红树林湿地土壤的物理性质及其生态功能具有重要意义。

陈禾洞天然林的土壤容重随深度逐渐增加，整体呈现出较高的容重值，反映了该区域土壤的密实性和稳定性，这与福建省三明市格氏栲 *Castanopsis kawakamii* 天然林的研究结果相接近^[10]。这种趋势表明该林地具有较强的土壤结构抵抗力，能够在天然条件下长期保持紧实的土壤特征，同时也为植物生长提供了坚实物质支持。这一现象可能对林地的水分保持、土壤透气性和养分循环产生深远影响，表明天然林地生态系统的土壤功

能较为健全，且能够很好地适应自然环境的变化。

岳山林场生态修复林的土壤容重呈现出从表层到深层相对一致且较低的趋势，这种趋势反映了该区域通过生态修复措施有效改善了土壤物理结构，特别是在促进土壤疏松性方面。这种低容重的土壤有利于水分渗透、养分循环和植物根系的生长，表明修复后的林地维持健康的土壤结构方面成效显著。此外，土壤容重的平稳趋势说明修复林地不仅在表层土壤改善上取得了显著进展，还对深层土壤的恢复产生了积极影响。这一结果为后续生态修复实践提供了有力支持，并进一步表明修复林地在恢复土壤健康、增强土壤抵抗力方面具有重要的生态价值。

高州油茶新造林的土壤容重在不同深度层次上表现出逐渐增加的趋势，尤其是在深层土壤中显示出较高的密实性，这与彭映赫等^[11]的研究结果相接近。这可能对水分的渗透和养分的循环产生负面影响。因此，未来的土壤管理措施应注重改善土壤结构，增加有机质含量，采用覆盖种植等方法，以促进土壤的疏松性和生态系统的健康发展。这一结果为高州油茶新造林的生态管理提供了重要的依据，强调了优化土壤管理在促进生态系统恢复过程中的关键作用。

3.2 土壤有机碳含量随土壤深度增加呈现减小趋势；湿地生态系统（深圳福田红树林）土壤碳含量（ $29.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ）显著高于陆地生态系统，这与《2022 世界红树林状况》^[12] 报告研究结果一致；人工修复林地土壤碳含量高于天然林，不同

林区土壤有机碳随着深度的增加普遍呈现出下降趋势,这与朱丽琴等^[13]的研究结果一致,尤其是在高州油茶新造林区,深层土壤有机碳最低。这一现象表明,表层土壤作为主要的有机碳储存区,对生态系统的碳汇功能具有重要影响。深圳福田红树林表现出显著的碳储存能力,尤其在表层土壤(0~10 cm)中,其有机碳高达 $46.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,显示出红树林在碳固定和存储方面的优越性。相比之下,陈禾洞天然林和岳山林场生态修复林的土壤有机碳相对较低,分别为 21.96 和 $18.68 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,这反映了不同生态系统的生态功能和土壤健康状况的差异。高州油茶新造林的土壤有机碳明显低于其他样点,表明其在生态恢复初期尚未充分发挥碳储存功能,需在未来的林业管理中重视土壤有机质的积累和植物生长的促进,以提高其碳汇能力。

3.3 陆地生态系统土壤碳密度随土壤深度增加而逐渐减小,但湿地生态系统土壤碳密度随深度增加波动较大。湿地生态系统土壤碳密度显著高于陆地生态系统,且适度人为干扰后的林地,土壤碳密度高于天然林。岳山林场生态修复林土壤碳密度分布呈现出随深度增加而逐渐下降的规律。表层土壤碳密度相对较高,而中层和深层土壤碳密度逐渐减少。表层土壤中碳的积累主要受凋落物输入和微生物分解作用的影响,而中深层土壤则更多依赖于长期的碳沉积与保存过程,这种碳密度的分布特征与修复林的植被类型、恢复时间及人为管理措施密切相关。岳山林场生态修复林的土壤碳密度分布特征反映了生态修复过程中土壤碳库的动态变化,这对了解修复林的碳循环过程及其对气候变化的响应具有重要意义。

3.4 本研究选取了4种立地利用方式的生态系统,分析陆地与湿地生态系统以及不同管理/利用方式对陆地生态系统碳储量的影响,结果表明在陆地生态系统中,不同的干扰方式(管理/利用)对生态系统碳储量产生显著影响。适度人为干扰有助于提高土壤碳储量,这与乐旭等^[14]、李璟等^[15]和冯嘉仪等^[16]等研究结论一致。然而本研究的4个样地分散在广东省的不同行政区域,其气候、树种、林龄、土壤背景等均会对土壤碳储量产生不同程度的影响。因此,未来研究中可进一步关注树种、林龄等其他因子相近的情况下,管理/利用方式对土壤碳储量的影响。

参考文献

- [1] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, 304 (5677): 1623–1627.
- [2] DLAMINI P, CHIVENGE P, CHAPLOT V. Overgrazing decreases soil organic carbon stocks the most under dry climates and low soil pH; a meta-analysis shows [J]. *Agriculture ecosystems & environment*, 2016, 221: 258–269.
- [3] SCHMIDT M W I, TORN M S, ABIVEN S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property [J]. *Nature*, 2011, 478 (7367): 49–56.
- [4] YICHENG W, FULU T, YI C, et al. Interactive impacts of climate change and agricultural management on soil organic carbon sequestration potential of cropland in China over the coming decades. [J]. *The science of the total environment*, 2022, 817: 153018.
- [5] BEILLOUIN D, CORBEELS M, DEMENOIS J, et al. A global meta-analysis of soil organic carbon in the Anthropocene [J]. *Nature communications*, 2023, 14 (1): 3700.
- [6] WINKLER K, FUCHS R, ROUNSEVELL M, et al. Global land use changes are four times greater than previously estimated [J]. *Nature communications*, 2021, 12 (1): 2501.
- [7] CROWTHER T, TODD-BROWN K, ROWE C, et al. Quantifying global soil carbon losses in response to warming [J]. *Nature*, 2016, 540 (7631): 104–108.
- [8] 华国栋, 庄礼凤, 李家祥, 等. 广东台山镇海湾红树林国家湿地公园土壤有机碳含量及其影响因素分析 [J]. *林业与环境科学*, 2021, 37 (6): 118–123.
- [9] 吴雪, 赵鑫, 辜伟芳, 等. 浙南海岸带人工秋茄红树林与互花米草盐沼土壤碳汇对比研究 [J/OL]. *热带海洋学报*, (2024-05-10) [2024-11-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1500.P.20240508.1512.002.html>.
- [10] 沈彩霞. 格氏栲天然林转为人工林对土壤碳储量的影响 [J]. *福建林业科技*, 2022, 49 (3): 24–29.
- [11] 彭映赫, 许彦明, 王瑞, 等. 不同林龄油茶林土壤有机碳和氮储量特征 [J]. *湖南林业科技*, 2018, 45 (1): 65–70, 77.
- [12] Wetlands international. The State of the World's Mangroves 2022 [R/OL]. (2022-9-21) [2024-11-21] <https://www.wetlands.org/publication/the-state-of-the-worlds-mangroves-2022/>.
- [13] 朱丽琴, 黄荣珍, 段洪浪, 等. 红壤侵蚀地不同人工恢复林对土壤总有机碳和活性有机碳的影响 [J]. *生态学报*, 2017, 37 (1): 249–257.
- [14] 乐旭, 周浩, 曹阳, 等. 科学的人为干预可有效提升中国陆地碳汇潜力 (英文) [J]. *Science bulletin*, 2024, 69 (16): 2622–2631.
- [15] 李璟, 沈雅飞, 王丽君, 等. 人工林土壤碳的影响途径研究进展 [J]. *陆地生态系统与保护学报*, 2023, 3 (3): 89–98.
- [16] 冯嘉仪, 储双双, 王婧, 等. 华南地区几种典型人工林土壤有机碳密度及其与土壤物理性质的关系 [J]. *华南农业大学学报*, 2018, 39 (1): 83–90.