北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

不同连栽代次桉树人工林土壤团聚体中有机碳组分的积累和转化

崔宇鸿 叶绍明 卢志锋 燕羽 蒋晨阳

Accumulation and transformation of organic carbon components in soil aggregates of *Eucalyptus* spp. plantations across different continuous cropping generations

Cui Yuhong, Ye Shaoming, Lu Zhifeng, Yan Yu, Jiang Chenyang

引用本文:
崔宇鸿, 叶绍明, 卢志锋, 燕羽, 蒋晨阳. 不同连栽代次桉树人工林土壤团聚体中有机碳组分的积累和转化[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(10):42–52. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240144
Cui Yuhong, Ye Shaoming, Lu Zhifeng, Yan Yu, Jiang Chenyang. Accumulation and transformation of organic carbon components in soil aggregates of *Eucalyptus* spp. plantations across different continuous cropping generations[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(10):42–52. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240144

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240144

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

林火干扰对广东省杉木林土壤有机碳及其组分的影响
Effects of forest fire disturbance on soil organic carbon and its components of *Cunninghamia lanceolata* forest in Guangdong Province, southern China
北京林业大学学报, 2019, 41(12): 108–118. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190179

岩溶区不同恢复方式下土壤有机碳组分及酶活性研究
Soil organic carbon fraction and enzyme activities under different restoration methods in karst area
北京林业大学学报, 2019, 41(2): 1–11. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180184

天然次生林人工管理后土壤团聚体稳定性及碳氮分布变化
Changes of soil aggregate stability and carbon–nitrogen distribution after artificial management of natural secondary forests
北京林业大学学报, 2022, 44(7): 97–106. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210497

园林绿化废弃物堆肥对土壤有机碳组分影响
Effects of green waste compost on soil organic carbon fractions
北京林业大学学报, 2021, 43(7): 120–127. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210035

穿透雨减少对红椎人工林土壤有机碳含量和化学组分的影响
Effects of throughfall reduction on soil organic carbon concentration and chemical compositions in the *Castanopsis hystrix* plantation
北京林业大学学报, 2022, 44(10): 102–111. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220191

黄土丘陵区典型人工林土壤有机碳储量的分布特征
Distribution characteristics of soil organic carbon stocks in typical plantations in loess hilly region of northwestern China
北京林业大学学报, 2023, 45(12): 100–107. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230097

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240144

不同连栽代次桉树人工林土壤团聚体中有机碳组分的积累和转化

崔宇鸿[1]　叶绍明[1]　卢志锋[2]　燕　羽[1]　蒋晨阳[1]
（1. 广西大学林学院，广西 南宁 530004；2. 广西壮族自治区国有雅长林场，广西 百色 533000）

摘要:【目的】探究不同连栽代次桉树人工林土壤中有机碳组分的积累与转化特征，以期揭示环境因素对土壤有机碳组分积累和转化过程的影响，进而为提高桉树生产力和土壤管理提供科学依据。**【方法】**以广西博白县博白林场第 1、2、3 代桉树人工林为研究对象，采用干筛法将收集的 0 ~ 40 cm 土壤分为 > 2 mm、1 ~ 2 mm、0.25 ~ 1 mm 和 < 0.25 mm 粒径的团聚体以评估土壤团聚体稳定性，并测量不同团聚体中有机碳组分（包括活性有机碳、缓性有机碳和惰性有机碳）的含量和储量，利用冗余分析和偏最小二乘法结构方程模型揭示影响土壤有机碳积累和转化的关键因素。**【结果】**（1）连栽显著降低了土壤团聚体的稳定性和各有机碳组分的含量和储量。（2）土壤各有机碳组分含量随团聚体粒径的增加而下降，而储量的分布规律则相反。（3）冗余分析和偏最小二乘法结构方程模型证明，土壤团聚体稳定性是影响土壤有机碳积累的主要因素，连栽抑制了惰性有机碳向活性有机碳的转化，导致土壤有机碳总体有效性下降。**【结论】**连栽主要通过改变土壤团聚体的分布和稳定性，进而调控桉树人工林土壤有机碳组分的积累和转化。研究结果有助于理解桉树人工林土壤有机碳的积累和转化过程中土壤团聚体调控机制。

关键词：桉树；连栽；土壤团聚体；有机碳组分；碳组分转化
中图分类号：S718.54　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2024)10−0042−11
引文格式：崔宇鸿，叶绍明，卢志锋，等. 不同连栽代次桉树人工林土壤团聚体中有机碳组分的积累和转化［J］. 北京林业大学学报，2024，46(10)：42−52. Cui Yuhong, Ye Shaoming, Lu Zhifeng, et al. Accumulation and transformation of organic carbon components in soil aggregates of *Eucalyptus* spp. plantations across different continuous cropping generations［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(10): 42−52.

Accumulation and transformation of organic carbon components in soil aggregates of *Eucalyptus* spp. plantations across different continuous cropping generations

Cui Yuhong[1]　Ye Shaoming[1]　Lu Zhifeng[2]　Yan Yu[1]　Jiang Chenyang[1]
(1. College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China;
2. Guangxi Zhuang Autonomous Region State-Owned Yachang Forest Farm, Baise 533000, Guangxi, China)

Abstract:［**Objective**］This paper aims to investigate the accumulation and transformation characteristics of soil organic carbon (SOC) components in *Eucalyptus* spp. plantations of different continuous planting generations, so as to reveal the impact of environmental factors on accumulation and transformation processes of SOC components, thereby providing a scientific basis for improving *Eucalyptus* spp. productivity and soil management.［**Method**］Taking the first, second, and third generations of *Eucalyptus*

收稿日期: 2024−05−09　**修回日期:** 2024−06−21
基金项目: 国家自然科学基金项目（32260382）。
第一作者: 崔宇鸿。主要研究方向：森林培育、森林土壤生态学。Email: 583665196@qq.com　地址：530004 广西壮族自治区南宁市大学东路 100 号。
责任作者: 叶绍明，博士，教授。主要研究方向：森林经理、森林生态学研究。Email: yshaoming@qq.com　地址：同上。卢志锋，高级工程师。主要研究方向：苗木培育、森林经营研究和林业技术推广。Email: lzf3977662830@163.com　地址：533000 广西壮族自治区百色市左江区站前大道 109 号。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

spp. plantations in Bobai Forest Farm, Bobai County, Guangxi Province of southern China as the research objects, soil samples from 0–40 cm depth were collected. The soil was fractionated into aggregates of > 2 mm, 1–2 mm, 0.25–1 mm, and < 0.25 mm using dry sieving to evaluate soil aggregate stability. The contents and storage of organic carbon components, including active organic carbon, slow organic carbon, and inert organic carbon in different aggregates were measured. Redundancy analysis (RDA) and partial least square structural equation modeling (PLS-SEM) were used to identify the key factors affecting the accumulation and transformation of SOC. [**Result**] (1) Continuous planting significantly reduced the stability of soil aggregates and decreased the content and storage of various organic carbon components. (2) The contents of each SOC component decreased with increasing aggregate particle size, while the storage distribution showed the opposite trend. (3) RDA and PLS-SEM demonstrated that soil aggregate stability was the main factor influencing SOC accumulation. Continuous planting inhibited the transformation of inert organic carbon into active organic carbon, leading to a decline in the overall effectiveness of SOC. [**Conclusion**] Continuous planting primarily regulates the accumulation and transformation of SOC components in *Eucalyptus* spp. plantations by altering the distribution and stability of soil aggregates. These findings enhance the understanding of regulatory mechanisms of soil aggregates in accumulation and transformation processes of SOC in *Eucalyptus* spp. plantations.

Key words: *Eucalyptus* spp.; continuous cropping; soil aggregates; organic carbon components; carbon component transformation

为了应对自然森林面积的减少和对森林产品可持续性的需求增长，全球范围内人工林的建立和扩张成为了一种重要的策略[1]。在这一背景下，桉树（*Eucalyptus* spp.）因其快速生长和高产量的特性，在中国人工林建设中占据了特殊的地位[2]。为了满足社会的需要，桉树人工林采用多代连栽模式，此模式虽能快速经济回报，但在生态层面导致土壤养分枯竭、有害病菌累积和生物多样性减少，影响后续植被生长和健康[3]。因此，深入研究桉树人工林对土壤环境，特别是对土壤有机碳（soil organic carbon，SOC）积累和转化的影响变得尤为重要。

土壤是陆地生态系统中重要的 SOC 储存库，研究桉树人工林的 SOC 储存能力及管理策略对于全球 SOC 平衡调节至关重要[4]。近年来，为了更好地研究土壤有机碳（SOC），通常将其分为不同的组分，包括活性有机碳（labile organic carbon，LOCI）、缓性有机碳（semi-labile organic carbon，LOCII）以及惰性有机碳（recalcitrant organic carbon，ROC），这种分类反映了土壤有机碳在不同时间尺度上的动态变化与生态功能[5]。LOC 因其快速周转率，为土壤微生物活动提供能量和养分，是反映土壤质量和养分循环速率的重要指标，但对长期储存贡献较小[5]。ROC 由复杂、难分解的有机物质组成，分解速率慢，周转时间长，对土壤中碳的长期稳定储存起关键作用，其稳定性受到土壤团聚体保护、土壤矿物与有机物相互作用及微生物群落结构的影响[5]。

土壤 SOC 在不同粒径的土壤团聚体中的分布模式是一个复杂的议题，近年来的研究表明存在多种观点。一方面，有研究表明大粒径团聚体（> 1 mm）是 SOC 尤其是 LOC 的主要储存场所，因其能提供更多物理保护，减缓微生物对有机质的分解，利于 C 的长期储存[6]。另一方面，部分研究发现小粒径团聚体（< 0.25 mm）可能是 SOC 的富集场所，LOC 含量高于大团聚体，因为小团聚体具有更大的比表面积和更多的微生物活动位点[7]。此外，研究还发现土壤团聚体的稳定性与 SOC 储量之间存在显著的正相关关系[8]。这些研究结果揭示了 SOC 及其组分在土壤团聚体中的分布受多种因素影响，突显了深入研究土壤团聚体与 SOC 关系的必要性，以更好理解土壤 SOC 积累和转化的机制，指导森林管理和土壤保护措施。

本研究在中国广西博白县博白林场进行，以第 1 代桉树纯林（Ⅰ）、第 2 代桉树纯林（Ⅱ）和第 3 代桉树纯林（Ⅲ）为研究对象，分析了不同连栽代次人工林的土壤团聚体组成、稳定性以及相关 SOC 组分分布特征，评估了连栽对土壤结构稳定性以及 SOC 积累和转化的影响。旨在为改善桉树人工林的土壤肥力和构建健康土壤环境提供理论依据。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

本研究的主要区域位于中国广西壮族自治区博白县的博白林场（109°38′ ~ 110°17′E，21°39′ ~ 22°30′N）。该地区以丘陵为主，南亚热带季风气候，

具有丰富的阳光和充足的热量。该区域年均气温21.9 ℃，年平均降水量达 1 756.2 mm，年平均日照时长约 1 778.3 h，夏季漫长、冬季短暂。主要土壤类型为砖红壤，这种土壤土层深厚，具有良好的排水性能和中等肥力。在造林之前，该地主要覆盖常绿阔叶天然林，现今以人工林为主，包括桉树、马尾松（*Pinus massoniana*）、杉木（*Cunninghamia lanceolata*）和金合欢（*Vachellia farnesiana*）。

1.2 试验设计

采用“时空替代”方法来研究不同连栽代次桉树人工林中土壤团聚体 SOC 及其组分的变化[9]。选择第 1 代、第 2 代和第 3 代桉树人工林作为研究对象，确保所有选定林地的土壤类型、海拔、坡度和坡向一致性，以减少土壤空间变异的影响（表 1）。第 1 代桉树种植于原有天然林地，而第 2 代和第 3 代种植在先前收获的桉树林地上。这些林分均在 2015 年 3 月同步建立，种植后前 3 年，每年按 800 kg/hm^2 的比例施用肥料（成分主要包括 31% N、10% P、10% K、< 0.5% B 和 Zn），并进行年度除草，以模仿天然林的生态系统管理。本研究设立 15 个样地（每代 5 个重复），每个样地间距超过 1 000 m 以减少空间自相关和避免伪重复。在每个大约 1 × 10^4 m^2 的样地中，样方（20 m × 20 m）随机设立于离样地边缘至少 100 m 处，用于采样分析。

1.3 土壤样品采集

2022 年 10 月，在桉树人工林中进行土壤采样。在每个样方内，分别从 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 深度随机选择 5 个 1 m × 1 m 的小样方进行土壤采样（表 2）。每个深度的土壤样本合并成一个复合样本，总共收集了 30 个复合样品。这些样品经过 5 mm 筛网筛分，以除去小石块、粗根和大型动物残留，筛下的土壤团聚体一部分用于团聚体尺寸分类，另一部分用于测定全土 pH 值和 SOC、TN、TP 含量。此外，每个土层还使用环刀（直径 50.46 mm，深 50 mm，体积 100 cm^3）额外采集 5 个土壤样本，用于测定全土的密度（bulk density，BD）。

1.4 土壤团聚体分级方法

本研究采用沙维诺夫干筛法对土壤团聚体进行分离[10]。具体操作为将 500 g 空气干燥的土壤样品置于 2 mm、1 mm 和 0.25 mm 开口的筛网上，然后 5 cm/s 垂直摇动筛网 20 min。将土壤分成 4 种粒径的团聚体：大粒径（> 2 mm）、中粒径（1 ~ 2 mm）、小粒径（0.25 ~ 1 mm）和微粒径（< 0.25 mm）。

1.5 土壤性质分析

用干燥法来测定凋落物量[10]。采用重铬酸钾外加热法测定土壤 SOC[11]。根据 Rovira 等[12]提出的两步硫酸水解法测定 SOC 组分，在 5 N 和 26 N H_2SO_4 条件下可氧化的有机碳分别被认为是为 LOCI 和 LOCII，这两个部分共同代表了易分解有机碳库。水解后的残留物在 40 ℃ 下干燥，使用酸性条件下的重铬酸盐氧化法量化碳含量。

1.6 数据计算

本研究选用平均重量直径（mean weight diameter，MWD）、几何平均直径（geometric mean diameter，GMD）和分形维数（fractal dimension，*D*）作为评估土壤团聚体稳定性的关键指标，其计算方法参照 Ma 等[9]。

土壤总有机碳储量（g/m^2）和其余碳组分的计算参考 Yan 等[10]的方法。

1.7 数据统计

使用 SPSS 22.0 进行统计分析，单因素 ANOVA 用于分析林分类型对凋落物层质量和土壤理化性质的影响，并通过 Tukey HSD 检验进行显著性分析。使用 CANOCO 5.0 进行冗余分析，以评估土壤团聚体参数与 SOC 储量的关系。为预测 SOC 及其组分变化的主要影响因子，基于 Smart PLS 3.0 构建偏最

表 1 样地基本信息

Tab. 1 Basic information of sample plots

指标Index	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
海拔 Altitude/m	170 ~ 180	165 ~ 175	170 ~ 185
坡度 Slope/(°)	26 ~ 29	25 ~ 27	23 ~ 26
坡向 Aspect	阳坡 Sunny slope	阳坡 Sunny slope	阳坡 Sunny slope
坡位 Position	中坡 Mid-slope	中坡 Mid-slope	中坡 Mid-slope
土壤类型 Soil type	砖红壤 Latosol	砖红壤 Latosol	砖红壤 Latosol
成土母岩 Soil-forming parent rock	砂岩 Sandstone	砂岩 Sandstone	砂岩 Sandstone
冠层密度 Canopy layer density	0.7	0.7	0.7
种植密度/(株·hm^{-2}) Planting density/(tree·ha^{-1})	2 222	2 222	2 222

注：Ⅰ. 第1代桉树人工林；Ⅱ. 第2代桉树人工林；Ⅲ. 第3代桉树人工林。下同。Notes: Ⅰ, the first generation of *Eucalyptus* spp. plantations; Ⅱ, the second generation of *Eucalyptus* spp. plantations; Ⅲ, the third generation of *Eucalyptus* spp. plantations. Same as below.

表 2　不同林分类型凋落物和土壤理化性质

Tab. 2　Litter and soil physicochemical properties of different stand types

项目 Item	指标 Index	林分类型 Stand type		
		I	II	III
凋落物 Litter	量 Quantity/(g·m^{-2})	323.68 ± 16.23 A	293.41 ± 12.94 B	249.33 ± 12.59 C
土壤0 ~ 20 cm Soil 0−20 cm	土壤密度 Soil density/(g·cm^{-3})	1.06 ± 0.09 C	1.18 ± 0.04 B	1.26 ± 0.02 A
	含水率 Moisture content/%	21.95 ± 4.73 A	15.24 ± 1.33B	13.13 ± 2.20 B
	pH	4.31 ± 0.02 A	4.27 ± 0.01 AB	4.21 ± 0.03 B
土壤20 ~ 40 cm Soil 20−40 cm	土壤密度 Soil density/ (g·cm^{-3})	1.22 ± 0.13 B	1.39 ± 0.06 A	1.39 ± 0.09 A
	含水率 Moisture content/%	19.44 ± 0.93 A	15.04 ± 1.02 B	12.20 ± 1.02 C
	pH	4.26 ± 0.01 A	4.20 ± 0.01 A	4.12 ± 0.01 A

注：不同大写字母表示相同土层不同连栽代次桉树人工林间差异显著（$P < 0.05$）。下同。Notes: different uppercase letters indicate significant differences among varied generations of continuous *Eucalyptus* spp. plantations within the same soil layer at 0.05 level. Same as below.

小二乘结构方程模型（PLS-SEM），并使用 R^2 和 Q^2 评估模型的解释力和预测相关性。R^2 衡量潜变量的解释方差与总方差之间的关系，R^2 值为 0.670、0.333 和 0.190 分别表示高、中、低的解释率。Q^2 衡量特定结构模型的预测相关性，Q^2 为 0.670、0.333 和 0.190 分别表示高、中、低的预测相关性[9]。

2　结果与分析

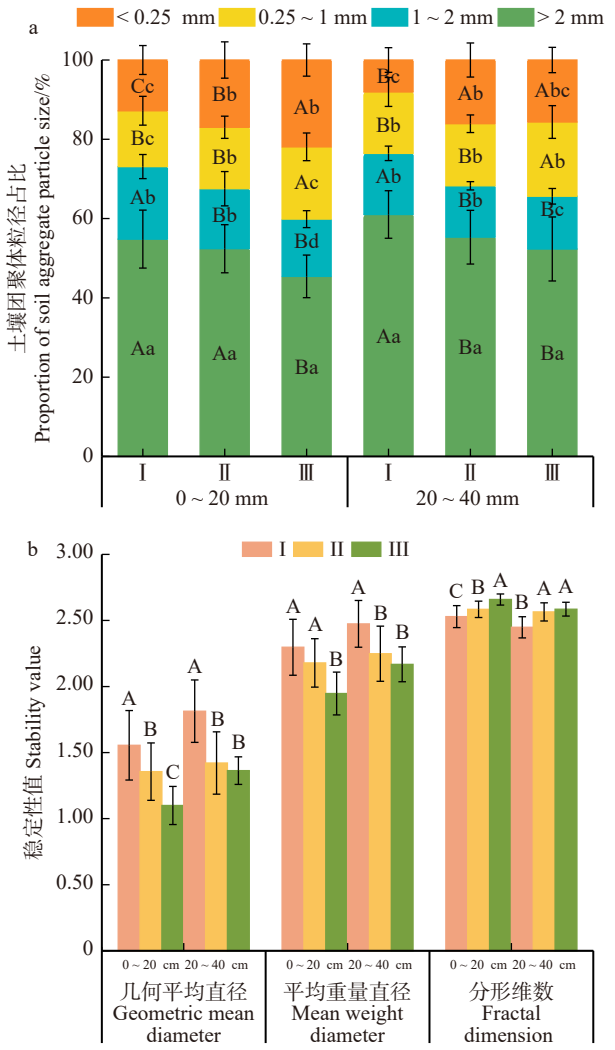
2.1　不同连栽代次桉树人工林土壤团聚体组成与稳定性特征

不同连栽代次桉树人工林土壤团聚体组成差异显著（$P < 0.05$，图 1a）。3 个林分类型各土层 > 2 mm 粒径的团聚体占比均显著高于其他粒径（$P < 0.05$）。第 1 代林土壤中 > 2 mm 的团聚体比例明显高于第 3 代林，而 < 0.25 mm 的团聚体比例显著低于第 3 代林（$P < 0.05$）。此外，20 ~ 40 cm 土层中 > 2 mm 的团聚体比例超过了 0 ~ 20 cm 土层。

在土壤团聚体稳定性方面（图 1b），0 ~ 20 cm 土层，GMD 范围为 1.10 ~ 1.55，MWD 范围 1.94 ~ 2.29，D 值范围为 2.53 ~ 2.66。在 20 ~ 40 cm 土层，GMD、MWD 和 D 值的范围分别为 1.36 ~ 1.81、2.16 ~ 2.47 和 2.45 ~ 2.56。随着连栽代次增加，各林分土壤团聚体的 MWD 和 GMD 均呈显著下降趋势，而 D 值则显著上升（$P < 0.05$）。

2.2　不同连栽代次桉树人工林土壤团聚体有机碳组分含量

在不同连栽代次的桉树人工林中，对土壤团聚体中的 SOC、LOCI、LOCII 和 ROC 含量的研究结果如图 2 所示。SOC、LOCI、LOCII 和 ROC 的含量均随着连栽代次的增加显著下降（$P < 0.05$）。在所有连栽代次中，团聚体的粒径越小，其 SOC、LOCI、LOCII 和 ROC 的含量越高。具体而言，粒径为 < 0.25 mm



不同小写字母表示各连栽代次桉树人工林同一土层不同粒径团聚体间差异显著（$P < 0.05$）。下同。Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$) among soil aggregates of varied particle sizes within the same soil layer for each successive rotation of *Eucalyptus* spp. plantations. The same below.

图 1　土壤团聚体组成与稳定性特征

Fig. 1　Composition and stability characteristics of soil aggregates

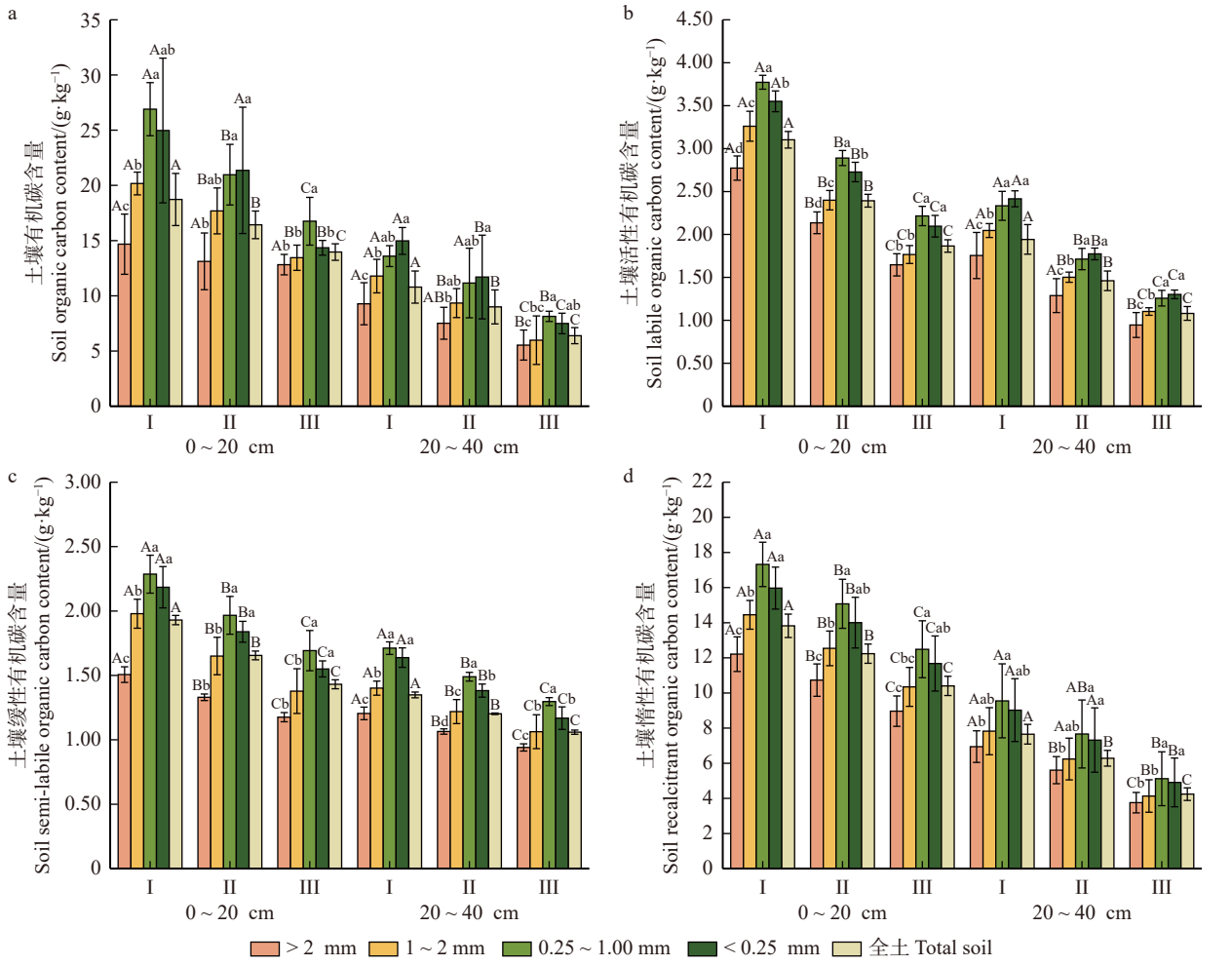


图 2 不同连栽代次桉树人工林土壤团聚体有机碳组分含量分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of soil aggregate organic carbon contents in different consecutive generations of *Eucalyptus* spp. plantations

和 0.25 ~ 1 mm 团聚体中的这些碳组分的含量最高；粒径为 1 ~ 2 mm 的团聚体次之；而粒径为 > 2 mm 的团聚体含量最低。不同连栽代次土壤团聚体有机碳组分含量在 20 ~ 40 cm 土层中的含量普遍低于 0 ~ 20 cm 土层。

2.3 不同连栽代次桉树人工林土壤团聚体有机碳组分储量

SOC、LOCI、LOCII 和 ROC 在 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层中的储量都随着连栽代次的增加显著下降（$P < 0.05$，图 3）。在团聚体粒径中，第 1 代林和第2 代林中 > 2 mm 团聚体的 SOC、LOCI、LOCII 和 ROC 储量显著高于第 3 代林（$P < 0.05$）。> 2 mm 粒径的团聚体，其储量显著高于其他粒径的团聚体（$P < 0.05$）。全土和各粒径团聚体的各组分储量在 20 ~ 40 cm 土层均低于 0 ~ 20 cm 土层。

2.4 土壤团聚体碳组分循环

每个林分碳组分 R^2 和 Q^2 值多数超过 0.670，表明模型具有较好的解释性和较强的预测能力（图 4）。PLS-SEM 结果强调了各连栽代次中不同碳组分对 LOCI 的直接与间接影响，揭示了每个连栽代次中独特的碳转化模式。如在 Ⅰ代林中，LOCI 与 LOCII 和 ROC 呈现直接正相关性。在Ⅱ代林中，LOCII 对 LOCI 存在直接正向影响，而 ROC 对 LOCI 产生直接负向影响。在Ⅲ代林中，LOCI 只受到 LOCII 的直接正向影响，而 ROC 对 LOCI 没有直接影响。Ⅰ代林中 ROC 对 LOCI 的总影响最高，而Ⅱ代林和Ⅲ代林中 LOCII 对 LOCI 的总影响最高。

2.5 土壤团聚体对碳组分的影响

通过 RDA 分析了 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层中土壤碳组分与团聚体特征的关系（图 5）。结果表明，0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层中环境变量（MWD、GMD、D、> 2 mm、1 ~ 2 mm、0.25 ~ 1 mm 和 < 0.25 mm）分别解释了 57.77% 和 57.17% 的碳库变异，揭示了碳组分与团聚体特性之间的密切联系。MWD、GMD 及 > 2 mm 团聚体与土壤碳组分呈显著正相关，表明大团聚体对碳储量有重要贡献。其他环境参数与土壤碳组分呈负相关，且 MWD、GMD、D 及 > 2 mm 团聚体解释了 0 ~ 20 cm 和 20 ~

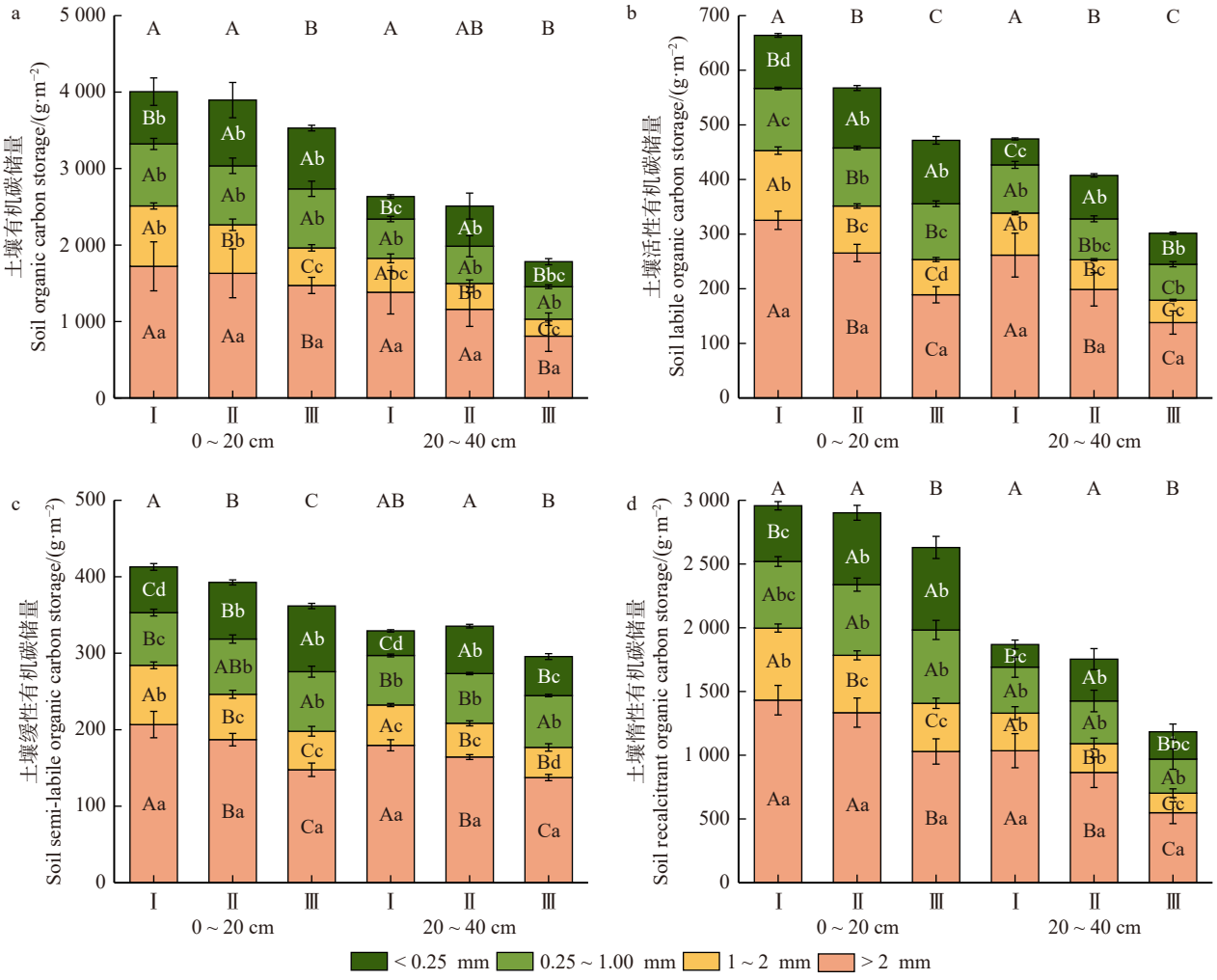


图 3　不同连栽代次桉树人工林土壤团聚体有机碳组分储量分布特征

Fig. 3　Distribution characteristics of soil aggregate organic carbon component storage in different consecutive generations of *Eucalyptus* spp. plantations

40 cm 土层中碳库的主要变异($P < 0.01$)。

通过 PLS-PM 模型(图 6),研究发现连栽代次对环境因素有直接负面影响,对其余指标有间接负面影响。土壤环境、团聚体分布和稳定性对碳库有显著正面影响($P < 0.05$),其中团聚体稳定性对碳库的正面影响最大,而连栽代次的负面影响最为显著。模型的 R^2 和 Q^2 值均超过 0.333,表明其解释力和预测能力较强。

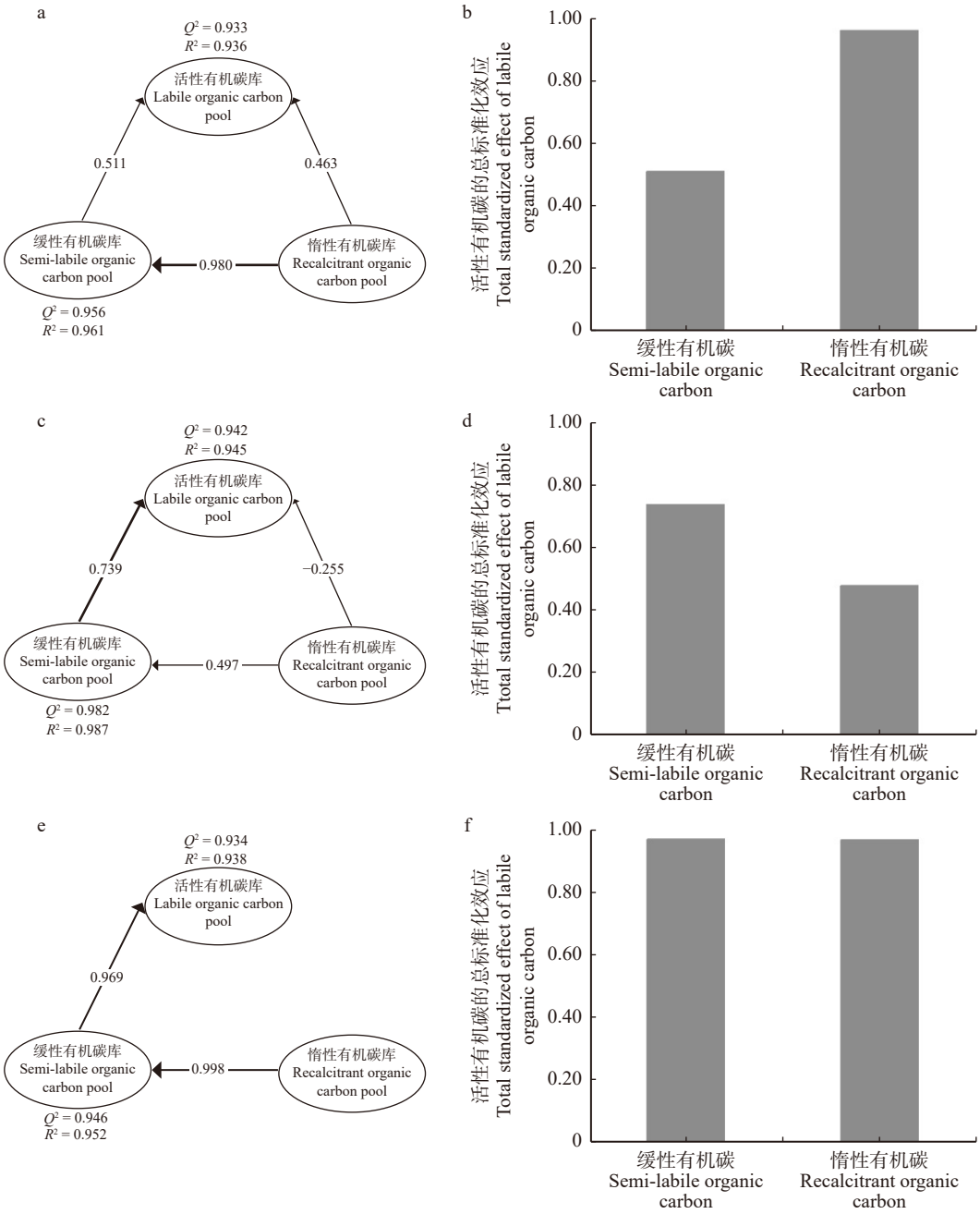
3　讨　　论

3.1　不同连栽代次桉树人工林土壤团聚体组成及其稳定性特征

本研究发现,随着桉树连栽代次的增加,大团聚体(> 2 mm 和 1 ~ 2 mm)比例显著减少,小团聚体(0.25 ~ 1 mm 和 < 0.25 mm)比例显著增加,GMD 和 MWD 显著减少,D 值显著增加($P < 0.05$)。这是由于重复的林业实践,如重型机械作业和犁耕,对土壤团聚体结构造成压力和破坏[13]。此外,桉树凋落物量较少,减少了土壤对雨水侵蚀的保护,进一步削弱了大团聚体的形成[14]。桉树对水分的高需求使得土壤水分流失逐渐加剧,尤其影响大粒径团聚体的稳定性[15]。土壤微生物和动物在团聚体的形成中也起着关键作用,如真菌网络和蚯蚓活动可以增强团聚体稳定性[16],但桉树生态环境的单一性及其酸性分泌物对微生物和动物多样性造成负面影响,连栽还进一步减少了水分,导致其多样性和丰度下降,最终削弱了土壤团聚体的稳定性[17]。

3.2　不同连栽代次桉树人工林土壤团聚体中碳组分分布差异

在土壤碳循环中,LOCI 和 LOCII 作为活跃的有机碳库,对维护土壤的生态功能和肥力至关重要[7]。然而,随着桉树连栽代次的增加,LOCI 和 LOCII 的含量和储量显著下降,表明有机物归还量不足以补充桉树生物量收获和土地管理造成的 SOC 损失,反映了土壤生态系统受压状态[18]。连栽导致的土壤理化性质变化(如土壤密度增加、含水率和 pH 下降)



a 和 b 为第 1 代桉树人工林；c 和 d 为第 2 代桉树人工林；e 和 f 为第 3 代桉树人工林。图中出现的箭头均代表相连指标间存在显著影响（$P < 0.05$）。箭头数据表示路径系数，箭头粗细与路径系数的大小成比例。R^2 和 Q^2 表示评估模型的解释力和预测相关性。下同。a and b, first generation *Eucalyptus* spp. plantations; c and d, second generation *Eucalyptus* spp. plantations; e and f, third generation *Eucalyptus* spp. plantations. The lines appearing in the figure represent significant influences between connected indicators ($P < 0.05$).The data in the arrow mean path coefficient, thickness of the line is proportional to the size of path coefficient. R^2 and Q^2 are used to evaluate the explanatory power and predictive relevance of the model. The same below.

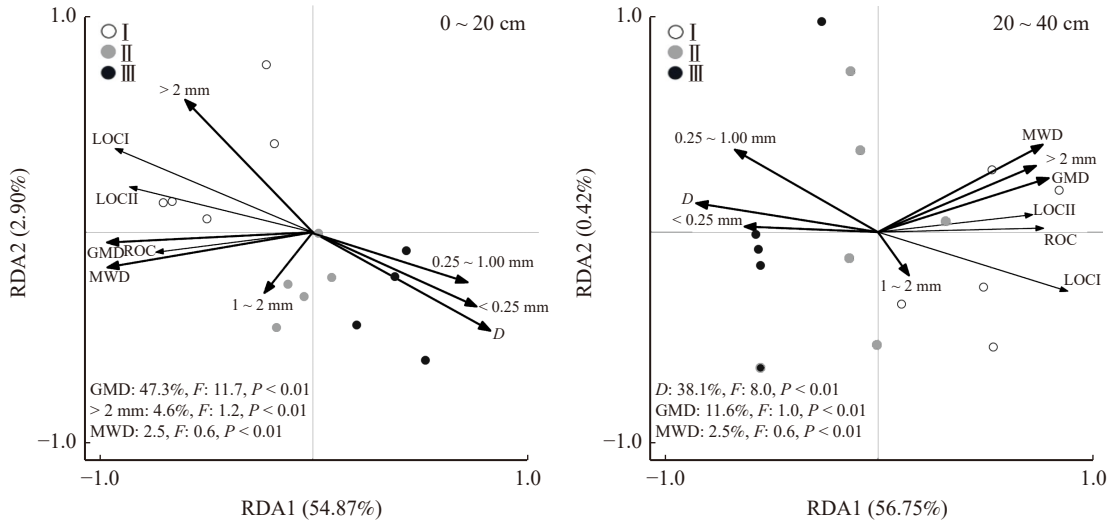
图 4 不同连栽代次桉树人工林土壤碳组分转化的 PLS-SEM 分析

Fig. 4 PLS-SEM analysis of soil carbon component transformation in different consecutive generations of *Eucalyptus* spp. plantations

进一步影响微生物群落结构和根系分泌物，对 LOC 库造成影响，减少了土壤养分的有效循环和肥力[17]。

本研究中，第 1 代和第 2 代桉树林的 ROC 储量无显著差异，表明这两个代次的 ROC 储存能力保持相对稳定。然而，第 3 代桉树林的 ROC 储量显著下降，表明碳汇能力减弱。ROC 下降可能由于土壤有机质耗竭，桉树对碳需求大且生长快，连栽减少了通过微生物分解和植物残体补充的时间。此外，连续的收割与再植活动打破了土壤表层结构，减少有机物输入，增加了土壤侵蚀与有机质流失[19]。桉树根系分泌物还可能通过改变土壤 pH，影响土壤有机质的稳定性和微生物活性，进一步降低 ROC 形成[17]。

较小粒径团聚体，尤其是 0.25～1 mm 和 < 0.25 mm 范围内 SOC、LOCI、LOCII 和 ROC 含量较高。这一



GMD.几何平均直径; MWD.平均重量直径; *D*.分形维数; > 2 mm. > 2 mm 粒径土壤团聚体粒径占比; 1 ~ 2 mm. 1 ~ 2 mm 粒径土壤团聚体粒径占比; 0.25 ~ 1 mm. 0.25 ~ 1 mm.粒径土壤团聚体粒径占比; < 0.25 mm. < 0.25 mm 粒径土壤团聚体粒径占比; LOCI.活性有机碳; LOCII.缓性有机碳; ROC.惰性有机碳。GMD, geometric mean diameter; MWD, mean weight diameter; *D*, fractal dimension; > 2 mm, proportion of soil aggregates with particle size > 2 mm; 1–2 mm, proportion of soil aggregates with particle size between 1 and 2 mm; 0.25–1 mm, proportion of soil aggregates with particle size between 0.25 and 1 mm; < 0.25 mm, proportion of soil aggregates with particle size < 0.25 mm; LOCI, labile organic carbon; LOCII, semi-labile organic carbon; ROC, recalcitrant organic carbon.

图 5　不同连栽代次桉树人工林土壤团聚体粒径分布、稳定性与碳组分的冗余分析

Fig. 5　RDA analysis between soil C fractions and soil aggregate composition and stability in different consecutive generations of *Eucalyptus* spp. plantations

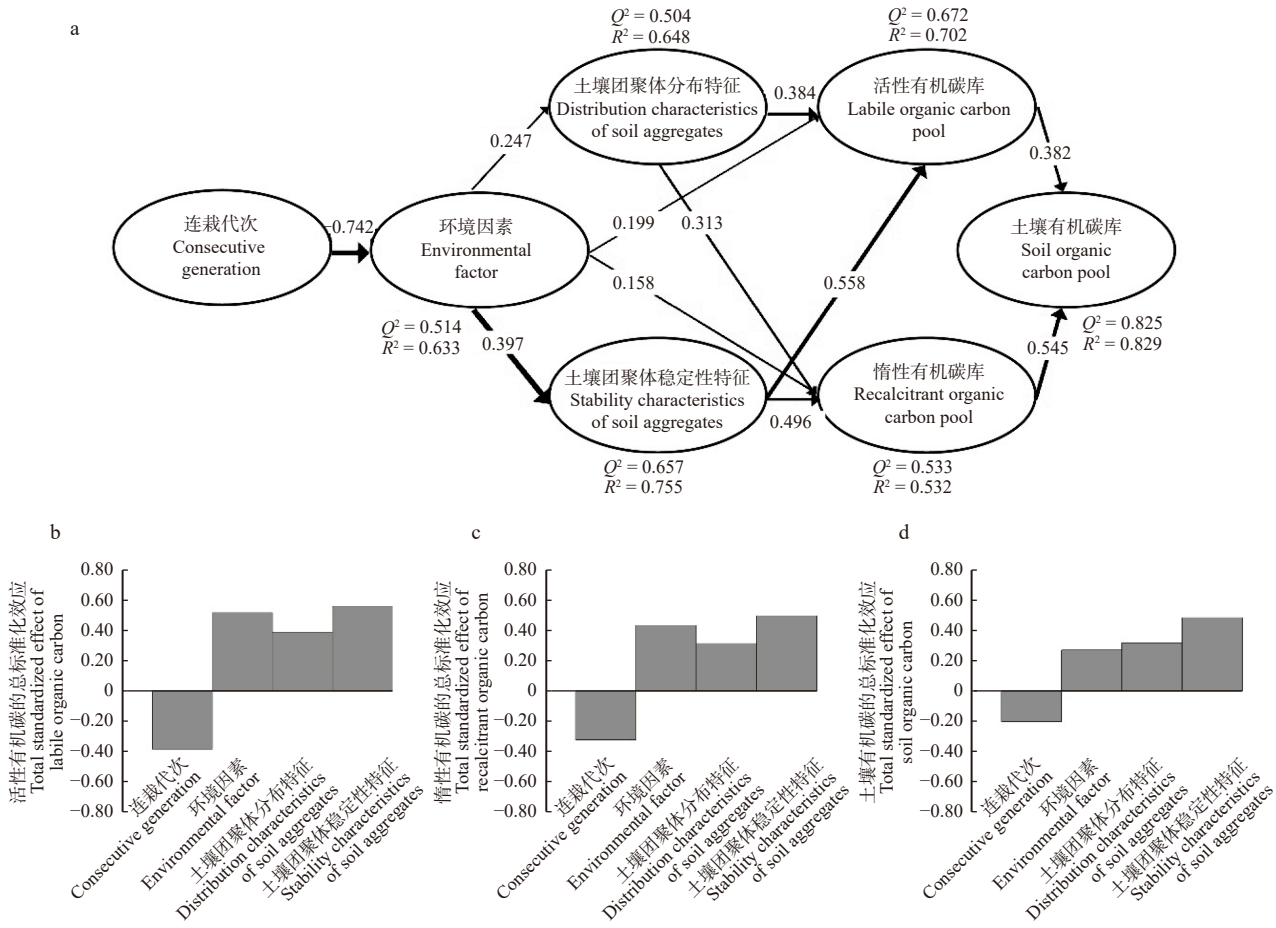


图 6　不同连栽代次桉树人工林土壤团聚体粒径分布、稳定性和碳组分的 PLS-SEM 分析

Fig. 6　PLS-SEM analysis for soil aggregate size distribution, stability, and carbon composition in different consecutive generations of *Eucalyptus* spp. plantations

发现与以往研究[20]一致，强调了较小团聚体在碳循环中的关键作用。较小团聚体通常由根系分泌物、真菌菌丝及微生物分解产物等有机胶结物组成，这些胶结物不仅促进了微团聚体的形成，还物理保护了碳免受分解。此外，较小团聚体的大比表面积为碳吸附提供了更多位点，增强了碳吸附能力[21]。

尽管较大的土壤团聚体在地表径流中容易破坏，导致存储的碳流失[22]，但它们仍是碳储量的主要来源。虽然单个大团聚体的碳含量不如细小团聚体高，但由于其在土壤体积中占较大比例，故在整体碳储量中占主导地位。

3.3 不同连栽代次桉树人工林土壤团聚体中碳组分的循环转化

在土壤碳循环中，LOCI 是最易被微生物利用的碳组分，其转化速率最快，连接着微生物代谢与碳循环[5]。相比之下，LOCII 的生物可利用性稍低，包含部分分解的植物残体、复杂糖类和微生物产物[5]。ROC 难以被微生物分解，代表碳的长期储存形态[7]。桉树人工林的微生物群落，包括细菌、真菌等，是 ROC 向 LOCI 转化的关键驱动力，特定微生物能够分解桉树中的木质素和复杂有机物[7]。

本研究发现，在Ⅰ代林中，ROC 对 LOCI 和 LOCII 有正向影响，而在Ⅱ代林中，ROC 对 LOCI 的影响变为负面，到了Ⅲ代林，ROC 与 LOCI 之间已无显著直接影响（图 4～6）。这可能是由于Ⅰ代林中的微生物群落更加多样且活跃，能更有效地将 ROC 转化为 LOCI 和 LOCII，并且土壤肥力较高，有助于有机碳的转化[23]。随着连栽代次的增加，持续的营林活动和单一物种种植改变了土壤环境，导致微生物群落结构发生显著变化，许多关键木质素分解微生物减少，减缓了 ROC 的分解[24]。此外，土壤紧实化和水分保持能力下降等环境变化也抑制了 ROC 的转化过程。

桉树的连续种植对土壤碳循环产生了显著负面影响，随着连栽代次增加，ROC 向 LOCI 的转化受到了抑制，导致土壤碳有效性下降。这进一步揭示了持续桉树种植对土壤生态系统的潜在影响，特别是在碳循环和土壤肥力方面的长期退化。

3.4 不同连栽代次桉树人工林土壤团聚体对土壤碳组分积累的影响

RDA 和 PLS-SEM 的研究结果表明，土壤团聚体的稳定性与碳组分之间存在显著的正相关关系，支持了前人的研究结论[25]。这说明在桉树连栽体系中，团聚体稳定性是影响碳组分积累的关键因素。

稳定的土壤团聚体通过复杂的结构形成有效的物理屏障，减少微生物和酶与易分解碳组分的接触，从而延缓了碳的分解过程[26]。这种物理隔离不仅延长了养分在土壤中的保留时间，还为土壤微生物提供了适宜的微环境，促进了微生物多样性和有机质转化[27]。此外，团聚体的稳定性还通过影响根系生长、根际呼吸和分泌物释放等过程，间接调控土壤中碳组分的动态[28]。根系呼吸改变土壤 CO_2 浓度和微生物活性，而根际分泌物增加了养分的生物可用性，并影响微生物群落组成，从而进一步影响碳组分的积累[28]。

此外，稳定的团聚体结构还能抵御水流和风的侵蚀，防止土壤颗粒和养分的流失[29]。通过保持土壤孔隙度和促进水分渗透，土壤团聚体降低了表面径流带走养分的风险[30]。这种物理保护机制为土壤微生物活动和植物根系提供了稳定的环境，有助于土壤养分循环，维持长期的土壤肥力[31]。因此，在桉树人工林的管理中，应注重土壤结构的维护，以提升生态系统的可持续性。综上所述，土壤团聚体稳定性是调控不同连栽代次桉树人工林中碳组分积累的关键因素。未来的研究应关注如何通过管理措施增强土壤团聚体稳定性，以促进碳的固存和提高土壤健康，从而支持可持续林业的发展。

4 结　　论

随着连栽代次增加，< 0.25 mm 粒径团聚体比例增加，MWD 和 GMD 值减小，*D* 值增加。不同连栽代次的土壤 SOC 及其组分含量和储量均随连栽代次和土层深度增加而减少。各代次桉树人工林的 SOC 及其组分主要分布于 < 0.25 mm 和 0.25～1 mm 粒径团聚体中，而 > 2 mm 粒径团聚体的 SOC 及其组分储量最高。连栽显著抑制 ROC 向 LOCI 的转化，导致土壤碳有效性下降。RDA 和 PLS-SEM 结果表明，连栽通过影响土壤环境和团聚体特性间接影响土壤 C、N、P 库，团聚体稳定性是最主要影响因素。本研究为了解连栽对桉树人工林碳组分积累和转化的影响提供了重要参考。

参 考 文 献

［1］ 曹现富, 王晓丽, 邹广权, 等. 不同坡向对尾巨桉人工林林木生长及林下植物多样性的影响 [J]. 西南农业学报, 2023, 36(11): 2511−2517.
Cao X F, Wang X L, Zou G Q, et al. Effects of different slope orientations on growth and understory plant diversity of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantation forests[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2023, 36(11): 2511−2517.

［2］ 龙靖, 何小芳, 陆宏芳, 等. 混交比例对桉树 乡土树种混交林优势树种叶片资源获取性状的影响 [J]. 热带亚热带植物学报, 2024, 32(1): 27−36.

Long J, He X F, Lu H F, et al. Effect of mixed proportions on leaf resource acquisition ccapability in mixed plantations of *Eucalyptus* and native trees[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2024, 32(1): 27−36.

[3] Huang X, Liu S, Wang H, et al. Changes of soil microbial biomass carbon and community composition through mixing nitrogen-fixing species with Eucalyptus urophylla in subtropical China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 73: 42-48.

[4] 习丹, 旷远文. 城市化梯度上亚热带常绿阔叶林土壤有机碳及其组分特征 [J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2149−2155.
Xi D, Kuang Y W. Characteristics of soil organic carbon and its fractions in subtropical evergreen broad-leaved forests along an urbanization gradient[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(7): 2149−2155.

[5] Ma W W, Li G, Wu J H, et al. Response of soil labile organic carbon fractions and carbon-cycle enzyme activities to vegetation degradation in a wet meadow on the Qinghai-Tibet Plateau[J/OL]. Geoderma, 2020, 377: 114565[2024-02-23]. DOI:10.1016/j.geoderma.2020.114565

[6] Kurmi B, Nath A J, Lal R, et al. Water stable aggregates and the associated active and recalcitrant carbon in soil under rubber plantation[J/OL]. Science of the Total Environment, 2020, 703: 135498[2024-02-12]. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135498

[7] Du L, Zheng Z C, Li T X, et al. Aggregate-associated carbon compositions explain the variation of carbon sequestration in soils after long-term planting of different tea varieties[J/OL]. Science of the Total Environment, 2023, 856: 159227[2024-02-10]. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159227

[8] 杨家明, 胡健, 潘军晓, 等. 氮添加对高寒草甸土壤团聚体分布及其碳氮含量的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(12): 102−110.
Yang J M, Hu J, Pan J X, et al. Effects of nitrogen addition on soil aggregate distribution and carbon and nitrogen contents in alpine meadow[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(12): 102−110.

[9] Ma Y, Cheng X Q, Kang F F, et al. Dynamic characteristics of soil aggregate stability and related carbon and nitrogen pools at different developmental stages of plantations in northern China[J/OL]. Journal of Environmental Management, 2022, 316: 115283[2023−12−23]. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115283.

[10] Yan Y, Wang S Q, Cui Y H, et al. Soil C–N–P stoichiometric characteristics at the aggregate scales in eucalyptus plantations with different stand types in subtropical China[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2023, 23(4): 6527-6541.

[11] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京:中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil agrochemical analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[12] Rovira P, Vallejo V R. Labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in organic matter decomposing at different depths in soil: an acid hydrolysis approach[J]. Geoderma, 2002, 107(1−2): 109−141.

[13] Jiang W S, Li Z W, Xie H X, et al. Land use change impacts on red slate soil aggregates and associated organic carbon in diverse soil layers in subtropical China[J]. Science of the Total Environment, 2023, 856: 159−194.

[14] Wiesmeier M, Steffens M, Mueller C W, et al. Aggregate stability and physical protection of soil organic carbon in semi-arid steppe soils[J]. European Journal of Soil Science, 2012, 63(1): 22−31.

[15] 吴昊阳, 牛健植, 王迪, 等. 辽东山区冰缘地貌大孔隙结构特征及其对团聚体稳定性和土壤可蚀性的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(6): 69−81.
Wu H Y, Niu J Z, Wang D, et al. Characteristics of the macropore structure of ice-marginal landforms in the Liaodong Mountain Area of northeastern China and its influence on soil aggregate stability and soil erodibility[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(6): 69−81.

[16] Tang L L, Wang S Q. Dynamics of soil aggregate-related C-N-P stoichiometric characteristics with stand age and soil depth in Chinese fir plantations[J]. Land Degradation & Development, 2022, 33(8): 1290−1306.

[17] Ullah S, Xu Y Y, Liao C, et al. Continuous planting *Eucalyptus* plantations in subtropical China: soil phenolic acid accumulation and adsorption physiognomies[J/OL]. Frontiers in Forests and Global Change, 2023, 6: 1135029[2024−02−12]. https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1135029.

[18] Li Y P, Wang J. Application of earthworm cast improves soil aggregation and aggregate-associated carbon stability in typical soils from Loess Plateau[J/OL]. Journal of Environmental Management, 2021, 278: 111504[2024−02−12]. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111504.

[19] 张頔, 满秀玲, 刘思琪, 等. 寒温带地区非生长季典型森林群落凋落物分解及养分释放 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(3): 65−74.
Zhang D, Man X L, Liu S Q, et al. Litter decomposition and nutrient release of typical forest communities in non-growing season in cold temperate zone[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(3): 65−74.

[20] 王龙凤, 肖伟伟, 王树力. 天然次生林人工管理后土壤团聚体稳定性及碳氮分布变化 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(7): 97−106.
Wang L F, Xiao W W, Wang S L. Changes of soil aggregate stability and carbon-nitrogen distribution after artificial management of natural secondary forests[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(7): 97−106.

[21] Egan G, Crawley M J, Fornara D A. Effects of long-term grassland management on the carbon and nitrogen pools of different soil aggregate fractions[J]. Science of the Total Environment, 2018, 613: 810−819.

[22] Qiu L, Wei X, Gao J, et al. Dynamics of soil aggregate-associated organic carbon along an afforestation chrono sequence[J]. Plant and Soil, 2015, 391: 237−251.

[23] 姚旭, 景航, 梁楚涛, 等. 人工油松林表层土壤团聚体活性有机碳含量对短期氮添加的响应 [J]. 生态学报, 2017, 37(20):

6724−6731.
Yao X, Jing H, Liang C T, et al. Response of labile organic carbon content in surface soil aggregates to short-term nitrogen addition in artificial *Pinus tabulaeformis* forests[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 37(20): 6724−6731.

[24] 杨倩, 朱大运, 陈静, 等. 植被恢复模式对土壤团聚体和有机碳储量的影响 [J]. 森林与环境学报, 2022, 42(6): 631−639.
Yang Q, Zhu D Y, Chen J, et al. Effects of vegetation restoration models on soil aggregate and organic carbon stock[J]. Journal of Forest and Environment, 2022, 42(6): 631−639.

[25] 周正虎, 刘琳, 侯磊. 土壤有机碳的稳定和形成: 机制和模型 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(10): 11−22.
Zhou Z H, Liu L, Hou L. Soil organic carbon stabilization and formation: mechanism and model[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(10): 11−22.

[26] Liu M, Han G L, Zhang Q. Effects of agricultural abandonment on soil aggregation, soil organic carbon storage and stabilization: Results from observation in a small karst catchment, Southwest China[J/OL]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 288: 106719[2024−02−12]. https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106719.

[27] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(14): 2099−2103.

[28] Wen Z, White P J, Shen J, et al. Linking root exudation to belowground economic traits for resource acquisition[J]. New Phytologist, 2022, 233(4): 1620−1635.

[29] 崔宇鸿, 张钱春, 燕羽, 等. 杉木纯林及其混交林土壤团聚体有机磷组分分布特征 [J]. 西北植物学报, 2023, 43(9): 1547−1556.
Cui Y H, Zhang Q C, Yan Y, et al. Distribution characteristics of soil aggregate organic phosphorus in pure and xixed *Cunninghumia lanceolata*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2023, 43(9): 1547−1556.

[30] 曹伟, 李露, 赵鹏志, 等. 坡地黑土碳氮分布及其与团聚体稳定性的关系 [J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(8): 56−63.
Cao W, Li L, Zhao P Z, et al. Distribution of C and N in black soil and its relationship with aggregate stability in sloping land[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(8): 56−63.

[31] 燕羽, 崔宇鸿, 樊容源, 等. 桉树纯林及其混交林土壤团聚体稳定性及有机氮组分分布特征 [J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(7): 149−158.
Yan Y, Cui Y H, Fan R Y, et al. Soil aggregate stability and distribution characteristics of organic nitrogen components in *Eucalyptus* pure and mixed forests[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023, 43(7): 149−158.

（责任编辑 孟 瑶
责任编委 孙向阳）