



### 岭南垛基果林湿地土壤碳组分特征

张茜莹, 周庆, 潘楚婷, 王珊, 罗晰, 刘结仪, 赵倩

#### 引用本文:

张茜莹,周庆,潘楚婷,王珊,罗晰,刘结仪,赵倩. 岭南垛基果林湿地土壤碳组分特征[J]. 热带亚热带植物学报, 2023, 31(6): 789–796.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4662>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 鼎湖山3种演替阶段森林土壤C、N、P现状及动态

Status and Dynamic of Soil C, N and P of Three Forest Succession Gradient in Dinghushan

热带亚热带植物学报. 2017, 25(6): 523–530 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3748>

#### 5种相思树和尾巨桉人工林土壤养分和酶活性特征

Characteristics of Soil Nutrient and Enzyme Activities in Plantations of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* and Five *Acacia* Species

热带亚热带植物学报. 2021, 29(5): 483–493 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4334>

#### 种植模式对巴戟天生长的影响

Effect of Planting Pattern on the Growth of *Morinda officinalis*

热带亚热带植物学报. 2020, 28(2): 163–170 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4100>

#### 3种作物(莴笋、茄子、小白菜)对香樟凋落叶化感作用的生理响应

Physiological Responses of Three Crops (Lettuce, Eggplant and Pakchoi) to Allelopathy of *Cinnamomum camphora* Litter Leaves

热带亚热带植物学报. 2021, 29(1): 41–49 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4229>

#### 土壤有机碳形成机制的探索历程

Exploration History of Soil Organic Carbon Formation Mechanisms

热带亚热带植物学报. 2019, 27(5): 481–490 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4094>

向下翻页，浏览PDF全文

# 岭南垛基果林湿地土壤碳组分特征

张茜莹<sup>1</sup>, 周庆<sup>1</sup>, 潘楚婷<sup>2</sup>, 王珊<sup>1</sup>, 罗晰<sup>1</sup>, 刘结仪<sup>1</sup>, 赵倩<sup>1\*</sup>

(1. 华南农业大学林学与风景园林学院, 广州 510642; 2. 广州市海珠湿地科研宣传教育中心, 广州 510235)

**摘要:** 岭南垛基果林湿地是珠三角地区典型的湿地类型之一, 其对土壤碳汇的贡献值得关注。为探讨果林种植类型对土壤有机碳的影响, 对广州垛基果林湿地内种植黄皮(*Clausena lansium*) (HP), 龙眼(*Dimocarpus longan*) (LY)、杨桃(*Averrhoa carambola*) (YT), 龙眼和黄皮间种(LH), 杨桃、龙眼和黄皮间种(YLH)共 5 种植类型下的表层(0~20 cm)土壤碳组分进行研究。结果表明, 不同的植被类型对土壤的总有机碳(SOC)、可溶性有机碳(DOC)、微生物生物量碳(MBC)、易氧化有机碳(ROC)、惰性碳(NLC)含量都有影响, LY 的 SOC 含量最高(22.6 g/kg), 显著高于 YLH ( $P<0.05$ ), 且 NLC 含量显著高于 LH 和 YLH ( $P<0.05$ )。NLC 含量与土壤养分呈正相关, 与土壤容重呈负相关。YT 的 MBC 含量显著高于 LY、HP、LH ( $P<0.05$ ), 且 MBC/SOC 显著高于 HP、LY ( $P<0.05$ )。YLH 模式下, 土壤 DOC 含量和 DOC/SOC 显著高于其他植被类型( $P<0.05$ )。LH 的 ROC/SOC 显著高于 HP 和 LY, 而 NLC/SOC 显著低于 HP 和 LY。岭南垛基果林湿地中单独种植龙眼和黄皮有助于提高土壤有机碳稳定性, 而混合种植模式下土壤有机碳活性最高。

**关键词:** 垛基果林湿地; 土壤有机碳; 土壤活性有机碳; 土壤惰性碳

doi: 10.11926/jtsb.4662

## Soil Carbon Components in Typical Duoji Fruit Forest Wetland

ZHANG Xiyi<sup>1</sup>, ZHOU Qing<sup>1</sup>, PAN Chuting<sup>2</sup>, WANG Shan<sup>1</sup>, LUO Xi<sup>1</sup>, LIU Jieyi<sup>1</sup>, ZHAO Qian<sup>1\*</sup>

(1. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Haizhu Wetland Scientific Research and Education Center, Guangzhou 510235, China)

**Abstract:** Lingnan Duoji Fruit Forest Wetland is a semi-natural managed wetland in Pearl River Delta, which plays an important role in soil carbon sequestration. The soil organic carbon (SOC) components in surface layer (0–20 cm) under five planting types in Duoji Fruit Forest Wetland in Guangzhou were studied, including *Clausena lansium* (HP), *Dimocarpus longan* (LY), *Averrhoa carambola* (YT), *D. longan* and *C. lansium* interplanting (LH), *A. carambola*, *D. longan* and *C. lansium* interplanting (YLH). The results showed that the fruit-forest types significantly affected the contents of SOC, dissolved organic carbon (DOC), microbial biomass carbon (MBC), readily oxidizable carbon (ROC) and non-labile carbon (NLC). The SOC content of LY was the highest (22.6 g/kg), which was significantly higher than that of YLH ( $P<0.05$ ), and the NLC content was also significant higher than LH and YLH. The NLC was positively related with soil N and P, negatively related with soil bulk density. The content of MBC in YT was higher than that in LY, HP and LH, while the MBC/SOC was higher than that in HP and LY. The DOC content and DOC/SOC in YLH were significantly higher than that of other types ( $P<0.05$ ). The ROC/SOC of LH were significantly higher than that of HP and LY, while the NL/SOC were significantly lower than that of HP and LY ( $P<0.05$ ). Therefore, it was suggested that the stability of soil organic carbon was improved by planting *C. lansium* and *D. longan* alone, while the activity of soil organic

收稿日期: 2022-04-28 接受日期: 2022-08-03

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(2020A1515010493)资助

This work was supported by the Project for Basic and Applied Basic Research in Guangdong (Grant No. 2020A1515010493).

作者简介: 张茜莹(1998年生), 硕士研究生, 主要从事森林生态学研究。E-mail: 2252422938@qq.com

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaopian@scau.edu.cn

carbon was the highest under mixed planting mode.

**Key words:** Duoji Fruit Forest Wetland; Soil organic carbon; Soil active organic carbon; Recalcitrant carbon

土壤的储存碳约占全球碳储量的三分之二,是陆地生态系统最大的碳汇载体,土壤碳的细微变化都可能对大气中 CO<sub>2</sub> 的浓度产生巨大影响,进而对陆地生态系统的碳循环产生重要影响<sup>[1-2]</sup>,对全球碳循环具有重大意义<sup>[3]</sup>。土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)包括有效性高、不稳定的活性有机碳和稳定性好的惰性碳<sup>[4]</sup>。土壤可溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)、易氧化有机碳(readily oxidizable carbon, ROC)和土壤微生物生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)等都属于土壤碳活性有机碳<sup>[5]</sup>。DOC 的淋溶是土壤碳减少的主要途径<sup>[6]</sup>; MBC 指土壤中活体微生物细胞内所有有机化合物的含碳总碳<sup>[7]</sup>,为植物提供生长所需的有效养分<sup>[8]</sup>,也会影响土壤碳转化过程和固碳能力,从而影响全球气候<sup>[9]</sup>; ROC 是土壤有机碳中最容易氧化的组分,可以预测土壤有机质的敏感性<sup>[10]</sup>; 惰性碳(nonlabile carbon, NLC)可以衡量土壤肥力的高低和土壤碳库的稳定性,主要来自土壤碳中的腐殖质<sup>[11]</sup>。因此,关注土壤碳库组成对不同生态系统环境差异的响应,将有助于明确土壤生态系统的固碳潜力。

植被类型是影响土壤有机碳的重要因素,通过改变水热条件、有机质和根系分泌物的分解、枯枝落叶的输入从而影响土壤有机碳含量<sup>[12-13]</sup>。优良的水热条件和微生物种类、数量的丰富是森林积累大量有机质的基础。在黄土高原延河流域 0~20 cm 的表层土壤中,森林土壤 DOC、MBC 含量均大于森林草原区和草原区,这主要是因为森林区茂密的枝叶及林冠、枯枝落叶层能起到拦截雨水的作用,减少土壤 DOC、MBC 受淋溶与侵蚀的影响<sup>[13]</sup>。宝天曼自然保护区内混交林土壤碳储量显著高于纯林,这主要是受凋落物输入质量差异导致<sup>[14]</sup>。有研究表明,不同的果树类型土壤碳含量也有所差异,盛果期枣园土壤 ROC 达到最高值,且枣园的 ROC 和 NLC 均略高于盛果期核桃园,但其中的原因仍需进一步揭示<sup>[15]</sup>。由此可见,不同植被类型对土壤碳储量和碳组分有显著影响,但是相关研究多集中在森林、草原或农田生态系统中,针对湿地生态系统的相关研究仍较少。

岭南垛基果林湿地是一种极具特色的湿地系统,指在沼泽地上挖沟排水,淤泥堆积成垛后种植

果树,是一个以生态保护为主的半自然管理的湿地。在生态文明建设背景下,广州海珠垛基果林是构成“城市生态守护者”海珠湿地的重要组成部分,原有的生态功能弱化,其生态系统服务能力的需求凸显。有研究指出,湿地生态系统碳储量可达 20%~30% 的全球土壤碳储量,其对全球气候变化的影响不容小觑<sup>[16]</sup>。在我国提出 2060 年实现碳中和的背景下,分布于城市周边的垛基果林湿地土壤碳汇能力值得关注<sup>[17]</sup>。然而,目前针对垛基果林湿地的土壤有机碳组分及其影响因素缺乏系统性的研究。本研究以岭南垛基果林湿地的不同果树类型下的土壤为研究对象,研究不同果林类型下土壤碳组分的积累及影响因素,以期为湿地果园土壤有机碳管理提供基础数据,对岭南垛基果林湿地土壤质量及土壤生态作出评价,以及对岭南垛基果林湿地保护以及经营管理提供一定的理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究地概况

研究地位于广州市的海珠区(23°02'58"~23°04'53" N, 113°18'40"~113°21'50" E),属于南亚热带海洋性季风气候,由于冬夏季风交替的影响,光照充足、年平均日照时数在 1 500 h 以上,湿热少寒、温暖多雨、水热同期,年均温高于 20 °C,年均相对湿度约为 77%,年均降雨量约为 1 700 mm。土壤质地有壤土、黏土、粉壤土、粉粘壤土。本研究对象是以生态保护为主的半自然垛基果林湿地,主要种植龙眼(*Dimocarpus longan*)、杨桃(*Averrhoa carambola*)、黄皮(*Clausena lansium*)、番石榴(*Psidium guajava*)和荔枝(*Litchi chinensis*)等经济树种。

### 1.2 土壤样品采集

果树类型分为黄皮(HP)、龙眼(LY)、杨桃(YT)、龙眼和黄皮间种(LH)及杨桃、龙眼、黄皮间种(YLH)。每个样点挖掘剖面,考虑到垛基果林湿地内涨落水的特殊性,部分土壤在深层处于水淹的状态,本试验仅采集 0~20 cm 的土样。采集土壤样品后,去除根系、凋落物等杂质后,让其自然风干,过筛备用。

### 1.3 土壤基本理化性质测定

土壤基本理化性质分析方法参照《土壤农业化

学分析方法》<sup>[18]</sup>。土壤自然含水量采用烘干法(GB/7833—1987); 土壤容重采用环刀法测定; pH 值采用玻璃电极法(NY/T1377—2007); 全氮采用凯氏-蒸馏滴定法(GB/7173—1987); 全磷采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法(GB/9837—1988); 全钾采用氢氧化钠熔融-火焰原子吸收分光光度法(GB/9836—1988)。

#### 1.4 土壤碳组分测定方法

土壤总有机碳采用重铬酸钾外加热法进行测定。易氧化有机碳(ROC)含量采用 333 mmol/L 高锰酸钾氧化法测定; 微生物量碳(MBC)含量采用 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提、氯仿熏蒸法测定; 惰性碳含量为总有机碳含量和易氧化有机碳含量间的差值<sup>[19]</sup>。土壤碳库  $Y_{库} (Mg/hm^2) = X_i \times BD_i \times th_i / 10$ , 式中,  $X_i$  为活性碳或惰性碳组分含量(g/kg),  $BD_i$  为土壤容重(Mg/m<sup>3</sup>),  $th_i$  为土壤厚度(cm)。

土壤活性有机碳与 SOC 的比例表示土壤碳库的活性特征, 以 MBC/SOC 表示微生物生物碳对总

有机碳的贡献率<sup>[20]</sup>。

#### 1.5 数据处理

采用 Excel 2003 和 SPSS 16.0 软件对数据进行统计分析。采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)和 Duncan 多重极差检验法比较不同处理间的差异, 以  $P < 0.05$  表示差异显著。

## 2 结果和分析

### 2.1 土壤理化性质

不同果林类型的土壤 pH 为 4.73~5.22, 均为酸性土壤, 全氮含量为 1.27~1.52 g/kg (表 1)。不同果树类型对土壤全磷、全钾、容重和有机质有显著影响, 对于全磷而言, LY 显著高于 LH 和 YLH ( $P < 0.05$ ); YLH 显著低于 YT ( $P < 0.05$ )。LY 的全钾显著低于其他 4 种果林类型 ( $P < 0.05$ ), 有机质含量显著高于 YLH ( $P < 0.05$ )。LY 的容重显著低于 YLH ( $P < 0.05$ ), 且土壤含水量显著高于其他 4 种果林类型 ( $P < 0.05$ )。

表 1 不同果林土壤的基本性质

Table 1 Basic properties of different fruit forest soil

类型 Type	pH	全氮 (g/kg) Total nitrogen	全磷 (g/kg) Total phosphorus	全钾 (g/kg) Total potassium	容重 (g/cm <sup>3</sup> ) Bulk density	含水量 (g/g) Water content	有机质 (g/kg) Soil organic matter
HP	5.06±0.18a	1.39±0.12a	1.10±0.12abc	19.35±0.27a	1.16±0.03ab	0.28±0.02bc	31.15±3.49ab
LY	4.73±0.14a	1.52±0.10a	1.44±0.10a	18.05±0.47b	1.02±0.04b	0.40±0.02a	38.91±2.62a
YT	4.99±0.16a	1.43±0.08a	1.23±0.15ab	19.46±0.24a	1.15±0.03ab	0.33±0.02b	32.19±2.17ab
LH	5.13±0.17a	1.40±0.13a	1.00±0.08bc	19.74±0.18a	1.12±0.06ab	0.27±0.03c	32.41±3.24ab
YLH	5.22±0.15a	1.27±0.09a	0.84±0.05c	19.71±0.23a	1.19±0.06a	0.28±0.02bc	27.62±2.60b

HP: 黄皮; LY: 龙眼; YT: 杨桃; LH: 龙眼+黄皮; YLH: 杨桃+龙眼+黄皮。同列数据后不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同

HP: *Clausena lansium*; LY: *Dimocarpus longan*; YT: *Averrhoa carambola*; LH: *D. longan*+*C. lansium*; YLH: *A. carambola*+*D. longan*+*C. lansium*. Data followed different letters indicate significant differences at 0.05 level. The same below

### 2.2 土壤碳组分含量

除了 ROC, 不同有机碳组分对不同果林类型的响应存在显著差异(图 1,  $P < 0.05$ )。LY 的 SOC 含量最高(22.6 g/kg), 显著高于 YLH ( $P < 0.05$ )。YLH 的 DOC 含量最高, 达 103.6 mg/kg, 显著高于 YT、LY 和 HP。YT 的 MBC 含量最高(252.8 mg/kg), 显著高于 LY、LH 和 LH。LY 的 NLC 含量最高(10.6 g/kg), 显著高于 LH 和 YLH。

垛基果林湿地土壤总有机碳库为 37~45 Mg/hm<sup>2</sup>, 易氧化有机碳库为 20~28 Mg/hm<sup>2</sup>, 不同果树类型间无显著差异(表 2)。YT 的微生物生物量碳库最高(0.58 Mg/hm<sup>2</sup>), 显著高于其他种植模式; LY 的土壤

惰性碳库为 22 Mg/hm<sup>2</sup>, 显著高于 LH。

### 2.3 相关性分析

土壤各种形态有机碳间的相关关系存在差异(表 3)。SOC 含量与 ROC、NLC 间的相关关系均达到极显著水平 ( $P < 0.01$ ), ROC 和 NLC 间呈极显著性负相关 ( $P < 0.01$ )。DOC 和 MBC 与其他活性碳组分相关性均不显著 ( $P > 0.05$ )。这说明 SOC 对土壤活性有机碳有着较大的影响, 土壤各有机碳组分密切相关。

土壤有机碳与土壤理化性质间存在一定的相关性(表 4)。SOC 含量与除 pH 之外的土壤理化性质间的相关关系均达极显著水平 ( $P < 0.01$ )。ROC 与有

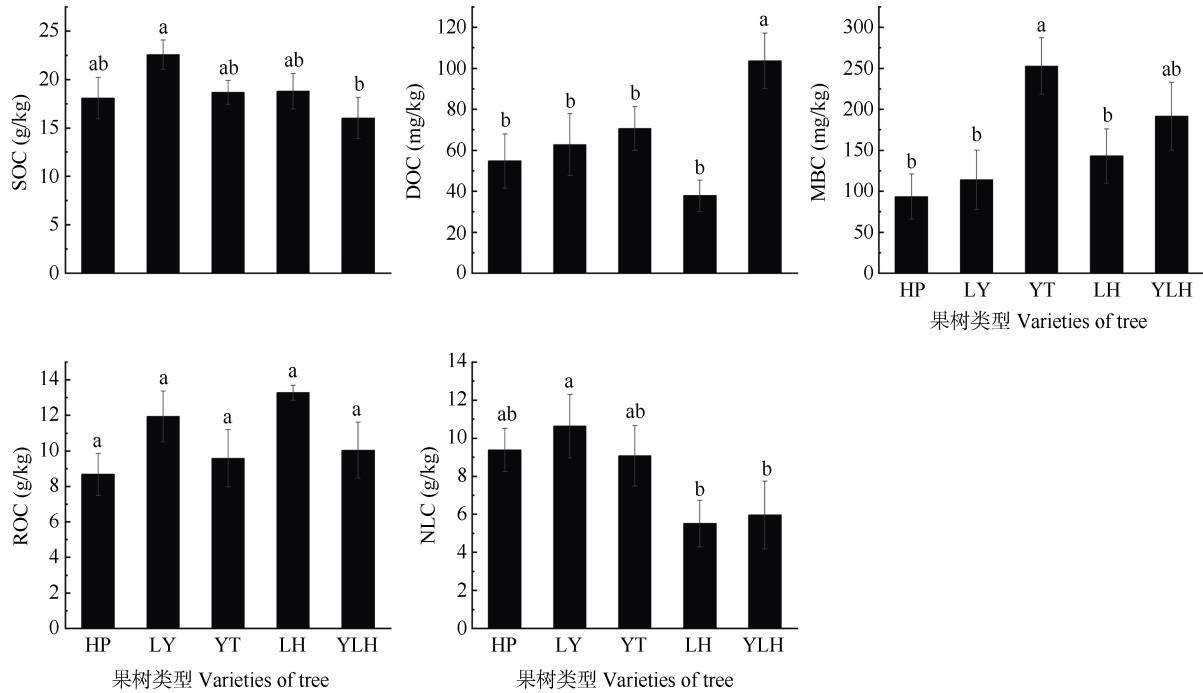


图 1 不同果林类型的土壤碳组分含量。柱上不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。SOC: 土壤总有机碳; DOC: 可溶性有机碳; MBC: 微生物生物量碳; ROC: 易氧化有机碳; NLC: 惰性碳。

Fig. 1 Soil carbon component contents under different fruit forest types. Different letters upon column indicate significant difference at 0.05 level. SOC: Soil organic carbon; DOC: Dissolved organic carbon; MBC: Microbial biomass carbon; ROC: Readily oxidizable carbon; NLC: Non-labile Carbon.

表 2 不同果林类型的土壤活性碳和惰性碳库

Table 2 Active carbon pool and recalcitrant carbon pool under different fruit forest types

类型 Type	碳库 Carbon pool (Mg/hm <sup>2</sup> )				
	SOC	DOC	MBC	ROC	NLC
HP	41.24±16.55a	0.13±0.02bc	0.21±0.17c	19.99±13.87a	21.26±10.73ab
LY	45.47±10.12a	0.13±0.07bc	0.22±0.19c	23.89±16.75a	21.58±9.84a
YT	42.87±11.00a	0.16±0.09b	0.58±0.41a	22.21±10.10a	20.66±8.89ab
LH	40.41±7.08a	0.09±0.07c	0.31±0.26bc	27.97±13.55a	12.44±11.95b
YLH	37.29±9.41a	0.24±0.04a	0.47±0.22b	23.90±6.69a	13.39±8.86ab

表 3 土壤有机碳组分间的相关关系

Table 3 Correlation coefficient among soil organic carbon components

组分 Component	SOC	DOC	MBC	ROC	NLC
SOC	1.000				
DOC	0.022	1.000			
MBC	-0.139	-0.242	1.000		
ROC	0.699**	0.031	-0.085	1.000	
NLC	0.393**	-0.011	-0.071	-0.382**	1.000

\*\* :  $P < 0.01$

机质 ( $P < 0.01$ )、全氮 ( $P < 0.01$ )、全磷 ( $P < 0.01$ )、含水量 ( $P < 0.05$ ) 呈极显著或显著正相关, 与土壤容重呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )。NLC 含量与 pH、有机质、全氮、全磷、含水量间均呈极显著相关 ( $P < 0.01$ ),

与全钾、土壤容重间呈显著相关 ( $P < 0.05$ )。DOC 和 MBC 与土壤理化性质间的相关性均不显著 ( $P > 0.05$ )。

## 2.4 土壤有机碳稳定性

不同果林类型的土壤活性有机碳占 SOC 的比例存在差异 (表 5)。DOC/SOC 为 0.20%~0.66%, 土壤 DOC/SOC 为 YLH>YT>HP>LY>LH, 其中 HP、LY 的 MBC/SOC 显著低于 YT、LH ( $P < 0.05$ )。ROC 和 NLC 占 SOC 的比例明显高于 DOC 和 MBC 的占比。ROC/SOC 依次是 LH>YLH>YT>LY>HP。LH 的 NLC/SOC 显著高于 HP 和 LY ( $P < 0.05$ )。总的来说, 果树混种后土壤的 DOC/SOC 显著高于单独种植模式。相比单独种植模式, 龙眼黄皮混种的土壤

表4 土壤有机碳组分与土壤理化性质间的相关关系

Table 4 Correlation coefficient between soil organic carbon components and soil physicochemical properties

组分 Component	pH	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全钾 Total potassium	土壤容重 Bulk density	含水量 Water content
SOC	-0.195	0.948**	0.653**	-0.393**	-0.508**	0.500**
DOC	-0.049	0.110	-0.111	0.212	-0.002	0.002
MBC	0.032	-0.126	-0.156	0.059	-0.007	-0.136
ROC	0.054	0.675**	0.327**	-0.165	-0.276*	0.244*
NLC	-0.322**	0.357**	0.424**	-0.295*	-0.303*	0.332**

\*\*: $P<0.01$ ; \*: $P<0.05$

表5 土壤活性有机碳占土壤有机碳的比例(%)

Table 5 Ratio of soil active organic carbon to soil organic carbon

类型 Type	DOC/SOC	MBC/SOC	ROC/SOC	NLC/SOC
HP	0.38±0.25bc	0.54±0.47b	46.92±22.73b	53.09±22.73a
LY	0.28±0.16bc	0.54±0.51b	49.09±24.59b	50.91±24.59a
YT	0.40±0.23b	1.60±1.48a	51.82±18.70ab	48.18±18.70ab
LH	0.20±0.15c	0.84±0.69a	69.07±28.99a	30.93±28.99b
YLH	0.66±0.29a	1.38±0.87ab	66.07±17.39ab	33.92±17.39ab

MBC/SOC、ROC/SOC 显著升高, NLC/SOC 显著降低, DOC/SOC 也呈下降趋势。

### 3 结论和讨论

岭南典型垛基果园湿地0~20 cm土壤总有机碳库为37~45 Mg/hm<sup>2</sup>,与南亚热带典型红椎(*Castanopsis hystrix*)林土壤0~20 cm表层土相似,说明岭南垛基果园湿地土壤碳汇能力不容小觑<sup>[21]</sup>。在本研究中,种植龙眼的SOC显著高于其他果树,这说明种植龙眼对于SOC的积累更加有利。这可能与不同植被下的枯落物、腐殖质、根系分解等的差异有关<sup>[22]</sup>。相关性分析表明,土壤SOC与土壤容重呈显著负相关,与土壤全氮、全磷、土壤含水量呈显著正相关,这与以往的研究结果一致<sup>[23-24]</sup>。土壤含水量一方面可以通过调节氧化还原电位,改变土壤碳周转速率<sup>[25-26]</sup>,另一方面影响植物光合作用和土壤碳输入过程,最终影响土壤有机碳源汇的调节过程<sup>[27]</sup>。

不同果树种植模式下,土壤有机碳组分存在差异。本研究中杨桃、龙眼和黄皮混种模式下土壤的DOC含量显著高于其他4种植植模式,这体现了凋落物输入的多样性在一定程度上能增加土壤DOC含量。植物叶片性质、根系属性等均会影响土壤DOC含量<sup>[28]</sup>。郝江勃等<sup>[29]</sup>研究表明以栲(*Castanopsis fargesii*)林为主的亚热带常绿阔叶林土壤DOC为9.72 mg/kg,远低于本研究湿地果树表层土。朱浩宇

等<sup>[12]</sup>研究表明草本植物表层土DOC为141.98 mg/kg,显著高于其他阔叶林土壤的DOC含量,这可能是由于草本为一年生植物,生长周期短,对有机质的注入时间短有关。相较于单一果树种植模式,杨桃、龙眼和黄皮混种模式下,输入的有机质种类更为丰富,可能是导致其土壤DOC含量高的主要原因。

MBC与整个土壤生态系统养分周转密切相关,其主要与土壤微生物的生存环境有关<sup>[30]</sup>,土壤水分、温度以及植物根系分泌物的互作等都会影响土壤微生物的丰度<sup>[31]</sup>。其中,单一种植杨桃时土壤MBC含量最高且显著高于其他类型,混种杨桃土壤的MBC含量也高于单独种植龙眼或黄皮,这说明种植杨桃有利于提高土壤的MBC含量,这可能是由于杨桃根际土中含有大量真菌和放线菌<sup>[32]</sup>,这些微生物使得杨桃土壤MBC含量增加,或是由于杨桃凋落物如果实的输入,提高了土壤中可利用碳含量,从而增加了土壤微生物生物量<sup>[33]</sup>。以栲林为主的亚热带常绿阔叶林土壤MBC含量为71.32 mg/kg,远小于本研究中土壤MBC含量,这可能一方面是由于凋落物性质的差异,另一方是由于岭南湿地良好的水热条件,从而促进了微生物活性<sup>[34]</sup>。

ROC是主要的活性有机碳,反映土壤碳库的活跃度<sup>[35]</sup>。研究表明,ROC与腐殖质含量,植物根系的分布情况及根系分泌物相关<sup>[36]</sup>。SOC含量与ROC含量间呈极显著相关,这与朱浩宇等<sup>[14]</sup>的研究结果相同,这也表明了ROC可以敏感的反映土壤有机

碳的动态变化<sup>[37]</sup>。此外, ROC 占 SOC 的比例越高, 表示土壤碳活性越高, 越有利于 SOC 的增加<sup>[38]</sup>。本研究结果表明, 混种的 ROC/SOC 高于单独种植, 这说明混合种植模式下, 土壤碳汇能力更强。由于存在垂直结构和物种多样性的差异, 混合种植也更利于提高生物量<sup>[39]</sup>。

NLC 在土壤碳库中较难被微生物分解, 其积累和周转时间长, 对环境变化响应缓慢, 其经常作为土壤对环境长时间变化的反应指标以及衡量土壤碳库积累的重要指标<sup>[11,39]</sup>。NLC/SOC 反映土壤有机碳的稳定程度, 比值越高代表土壤有机碳越稳定<sup>[38-40]</sup>。土壤惰性碳含量主要与植物根系中含有难分解缩合单宁酸以及酸不溶性碳有关, 同时植物细根在分解过程中可以将大量的有机碳转化为较为稳定的惰性碳成分储存于土壤中<sup>[39]</sup>。不同植被下, 输入土壤中的碳源性质和数量均不同<sup>[40]</sup>。本研究中 LY 的 NLC 含量显著高于 2 个混合种植模式, HP 和 LY 的 NLC/SOC 显著高于其他种植模式, 这说明单独种植黄皮和龙眼有利于提高土壤有机碳的稳定性。NLC 与有机质、全氮和含水量呈显著正相关, 与全磷和土壤容重呈显著负相关, 这与前人<sup>[41-42]</sup>研究结果一致。Zhou 等<sup>[43]</sup>研究表明高氮含量的凋落物可以促进土壤碳积累, 进一步证实了不同果树类型下, 凋落物性质的差异导致了土壤碳组分的差异。

综上, 垛基果林的土壤碳库接近常绿阔叶林土壤碳库, 且不同的土壤有机碳组分对果树类型的响应不同。单独种植杨桃或混种模式下, 土壤有机碳活性比例增加, 土壤碳周转速率最快; 单独种植模式下, 土壤惰性碳含量比混种模式下高, 土壤有机碳稳定性最高。

## 参考文献

- [1] VON LÜTZOW M, KÖGEL-KNABNER I, EKSCHMITT K, et al. Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions: A review [J]. *Eur J Soil Sci*, 2006, 57(4): 426–445. doi: 10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x.
- [2] 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.
- [3] BATJES N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. *Eur J Soil Sci*, 2014, 65(1): 10–21. doi: 10.1111/ejss.12114\_2.
- [4] ZHAO F, KANG D, HAN X H, et al. Soil stoichiometry and carbon storage in long-term afforestation soil affected by understory vegetation diversity [J]. *Ecol Eng*, 2015, 74: 415–422. doi: 10.1016/j.ecoeng.2014.11.010.
- [5] XU X F, THORNTON P E, POST W M. A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems [J]. *Glob Ecol Biogeogr*, 2013, 22(6): 737–749. doi: 10.1111/geb.12029.
- [6] YU J, FANG L, BIAN Z F, et al. A review of the composition of soil carbon pool [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, 34(17): 4829–4838. [余健, 房利, 卞正富, 等. 土壤碳库构成研究进展 [J]. *生态学报*, 2014, 34(17): 4829–4838. doi: 10.5846/stxb201301050036.]
- [7] MELERO S, LÓPEZ-GARRIDO R, MADEJÓN E, et al. Long-term effects of conservation tillage on organic fractions in two soils in southwest of Spain [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2009, 133(1/2): 68–74. doi: 10.1016/j.ageec.2009.05.004.
- [8] XIAO X, ZHU W, XIAO L, et al. Suitable water and nitrogen treatment improves soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities of paddy field [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2013, 29(21): 91–98. [肖新, 朱伟, 肖靓, 等. 适宜的水氮处理提高稻基农田土壤酶活性和土壤微生物量碳氮 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29(21): 91–98. doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.21.012.]
- [9] SIX J, CONANT R T, PAUL E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils [J]. *Plant Soil*, 2002, 241(2): 155–176.
- [10] WANG J, XIE H T, ZHU P, et al. C-notation and modern analysis method for active soil organic matter (carbon) [J]. *Chin J Ecol*, 2003, 22(6): 109–112. [王晶, 解宏图, 朱平, 等. 土壤活性有机质(碳)的内涵和现代分析方法概述 [J]. *生态学杂志*, 2003, 22(6): 109–112. doi: 10.13292/j.1000-4890.2003.0151.]
- [11] PARTON W J, SCHIMEL D S, COLE C V, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1987, 51(5): 1173–1179. doi: 10.2136/sssaj1987.03615995005100050015x.
- [12] ZHU H Y, WANG Z F, LU C, et al. Variation characteristics of soil active organic carbon and carbon pools under five vegetation types in Jinyun Mountain [J]. *Soils*, 2021, 53(2): 354–360. [朱浩宇, 王子芳, 陆畅, 等. 缙云山 5 种植被下土壤活性有机碳及碳库变化特征 [J]. *土壤*, 2021, 53(2): 354–360. doi: 10.13758/j.cnki.tr.2021.02.019.]
- [13] DONG Y H, ZENG Q C, LI Y Y, et al. The characteristics of soil active organic carbon composition under different vegetation types on the Loess Plateau [J]. *Acta Agrest Sin*, 2015, 23(2): 277–284. [董扬红, 曾全超, 李娅芸, 等. 黄土高原不同植被类型土壤活性有机碳组分布特征 [J]. *草地学报*, 2015, 23(2): 277–284. doi: 10.11733/j.issn.1007-0435.2015.02.010.]

- [14] PENG S L, WANG H T, CHEN C D, et al. Distribution patterns of soil organic carbon and nitrogen storage in forestland of Baotianman Nature Reserve [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2015, 22(5): 30–34. [彭舜磊, 王华太, 陈昌东, 等. 宝天曼自然保护区森林土壤碳氮储量分布格局分析 [J]. *水土保持研究*, 2015, 22(5): 30–34. doi: 10.13869/j.cnki.rswc.2015.05.007.]
- [15] LI Z J. Effect of planting years in southern Xinjiang orchard soil nutrients and organic carbon components [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2016. [李志军. 种植年限对新疆南部果园土壤养分及有机碳组分的影响 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016.]
- [16] NAHLIK A M, FENNESSY M S. Carbon storage in US wetlands [J]. *Nat Commun*, 2016, 7: 13835. doi: 10.1038/ncomms13835.
- [17] YUAN X Z, FAN C X, LIN Z B, et al. Restoration of Duoji fruit forest wetland: Rebirth of agricultural cultural heritage of Lingnan Region [J]. *Ecol Environ Monit Three Gorges*, 2021, 6(2): 36–44. [袁兴中, 范存祥, 林志斌, 等. 垛基果林湿地恢复——岭南农业文化遗产的重生 [J]. *三峡生态环境监测*, 2021, 6(2): 36–44. doi: 10.19478/j.cnki.2096-2347.2021.02.05.]
- [18] LU R K. *Soil Agricultural Chemical Analysis Method* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 12–292. [鲁如坤. *土壤农业化学分析方法* [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 12–292.]
- [19] BLAIR G J, LEFROY R D B, LISLE L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. *Aust J Agric Res*, 1995, 46(7): 1459–1466. doi: 10.1071/AR9951459.
- [20] LIU L, YU J J, ZHOU W J. Soil active organic carbon components and organic carbon reserves under different garden plants [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2020, 27(5): 38–44. [刘琳, 余佳洁, 周文静. 不同园林植物土壤活性有机碳组分及有机碳储量 [J]. *水土保持研究*, 2020, 27(5): 38–44. doi: 10.13869/j.cnki.rswc.2020.05.006.]
- [21] WANG R J, JIANG Y, WANG Y, et al. The change of soil carbon stabilization and carbon management index in different mixed plantations of *Castanopsis hystrix* in subtropical area of South China [J]. *For Res*, 2021, 34(2): 24–31. [王仁杰, 蒋焱, 王勇, 等. 南亚热带不同红锥混交林土壤碳库稳定性与碳库管理指数变化 [J]. *林业科学研究*, 2021, 34(2): 24–31. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.02.003.]
- [22] LIU N, HAN J B, ZHAO J R, et al. Soil organic carbon under typical vegetations at alpine timberline in Wutai Mountain [J]. *Soils*, 2019, 51(5): 970–978. [刘楠, 韩进斌, 赵建儒, 等. 五台山高山林线典型植被土壤有机碳特征 [J]. *土壤*, 2019, 51(5): 970–978. doi: 10.13758/j.cnki.tr.2019.05.018.]
- [23] XU W W, QIAO M. Soil carbon contents in relation to soil physicochemical properties in arid regions of China [J]. *J Desert Res*, 2014, 34(6): 1558–1561. [徐薇薇, 乔木. 干旱区土壤有机碳含量与土壤理化性质相关分析 [J]. *中国沙漠*, 2014, 34(6): 1558–1561. doi: 10.7522/j.issn.1000-694X.2013.00311.]
- [24] XIE J, CHANG S L, ZHANG Y T, et al. Plant and soil ecological stoichiometry with vertical zonality on the northern slope of the middle Tianshan Mountains [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, 36(14): 4363–4372. [谢锦, 常顺利, 张毓涛, 等. 天山北坡植物土壤生态化学计量特征的垂直地带性 [J]. *生态学报*, 2016, 36(14): 4363–4372. doi: 10.5846/stxb201506301387.]
- [25] PÉREZ-ROJAS J, MORENO F, QUEVEDO J C, et al. Soil organic carbon stocks in fluvial and isolated tropical wetlands from Colombia [J]. *CATENA*, 2019, 179: 139–148. doi: 10.1016/j.catena.2019.04.006.
- [26] ZHAN C L, CAO J J, HAN Y M, et al. Spatial patterns, storages and sources of black carbon in soils from the catchment of Qinghai Lake, China [J]. *Eur J Soil Sci*, 2015, 66(3): 525–534. doi: 10.1111/ejss.12236.
- [27] HUMPHREY V, BERG A, CIAIS P, et al. Soil moisture-atmosphere feedback dominates land carbon uptake variability [J]. *Nature*, 2021, 592(7852): 65–69. doi: 10.1038/s41586-021-03325-5.
- [28] TANG Y X, WANG Q C, CHEN J, et al. Quantitative and structural characteristics of dissolved organic carbon in 13 tree seedling leaves and fine roots in the mid-subtropics [J]. *Acta Ecol Sin*, 2022, 42(12): 4882–4891. [唐玉祥, 王全成, 陈娟, 等. 中亚热带 13 种树种幼苗叶片和细根的可溶性有机碳的数量特征和结构特征 [J]. *生态学报*, 2022, 42(12): 4882–4891. doi: 10.5846/stxb202106301742.]
- [29] HAO J B, QIAO F, CAI Z L. Seasonal dynamics of soil labile organic carbon and its fractions in subtropical evergreen broadleaved forest [J]. *Ecol Environ Sci*, 2019, 28(2): 245–251. [郝江勃, 乔枫, 蔡子良. 亚热带常绿阔叶林土壤活性有机碳组分季节动态特征 [J]. *生态环境学报*, 2019, 28(2): 245–251. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2019.02.004.]
- [30] DEVI N B, YADAVA P S. Seasonal dynamics in soil microbial biomass C, N and P in a mixed-oak forest ecosystem of Manipur, north-east India [J]. *Appl Soil Ecol*, 2006, 31(3): 220–227. doi: 10.1016/j.apsoil.2005.05.005.
- [31] WANG Y, SHEN Q R, SHI R H, et al. Soil microbial biomass and its ecological effects [J]. *J Nanjing Agric Univ*, 1996, 19(4): 45–51. [王岩, 沈其荣, 史瑞和, 等. 土壤微生物量及其生态效应 [J]. *南京农业大学学报*, 1996, 19(4): 45–51.]
- [32] RUAN C Q, CHEN J L, LIU B, et al. Physical/chemical properties and microbial communities in rhizospheric soil of *Averrhoa carambola* Linn. [J]. *Fujian J Agric Sci*, 2013, 28(8): 789–795. [阮传清, 陈建利, 刘波, 等. 杨桃根际土壤理化性质及微生物群落特征分析 [J]. 福



- 建农业学报, 2013, 28(8): 789–795. doi: 10.19303/j.issn.1008-0384.2013.08.013.]
- [33] LI R B. Review of research advances of soil microbial biomass carbon [J]. Guangdong For Sci Technol, 2008, 24(6): 65–69. [黎荣彬. 土壤微生物生物量碳研究进展 [J]. 广东林业科技, 2008, 24(6): 65–69. doi: 10.3969/j.issn.1006-4427.2008.06.014.]
- [34] LI Q, CHENG X L, LUO Y Q, et al. Consistent temperature sensitivity of labile soil organic carbon mineralization along an elevation gradient in the Wuyi Mountains, China [J]. Appl Soil Ecol, 2017, 117/118: 32–37. doi: 10.1016/j.apsoil.2017.04.018.
- [35] SHEN H, CAO Z H, HU Z Y. Characteristics and ecological effects of the active organic carbon in soil [J]. Chin J Ecol, 1999, 18(3): 32–38. [沈宏, 曹志洪, 胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应 [J]. 生态学杂志, 1999, 18(3): 32–38. doi: 10.13292/j.1000-4890.1999.0038.]
- [36] XU M G, YU R, SUN X F, et al. Effects of long-term fertilization on labile organic matter and carbon management index (CMI) of the typical soils of China [J]. Plant Nutr Fert Sci, 2006, 12(4): 459–465. [徐明岗, 于荣, 孙小凤, 等. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 459–465. doi: 10.3321/j.issn:1008-505X.2006.04.001.]
- [37] WANG Y X, WENG B Q, XING S H, et al. Advance in soil organic carbon stock and the impact factors on orchard ecosystem research [J]. Fujian J Agric Sci, 2011, 26(6): 1113–1122. [王义祥, 翁伯琦, 邢世和, 等. 果园土壤有机碳及其影响因素的研究进展 [J]. 福建农业学报, 2011, 26(6): 1113–1122. doi: 10.3969/j.issn.1008-0384.2011.06.036.]
- [38] ZHU Z J, JIANG P K, XU Q F. Study on the active organic carbon in soil under different types of vegetation [J]. For Res, 2006, 19(4): 523–526. [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, 19(4): 523–526. doi: 10.3321/j.issn:1001-1498.2006.04.022.]
- [39] KNORR W, PRENTICE I C, HOUSE J I, et al. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming [J]. Nature, 2005, 433(7023): 298–301. doi: 10.1038/nature03226.
- [40] XI D, LI J, KUANG Y W, et al. Variation of soil non-labile carbon under different forest types in Heshan [J]. J Trop Subtrop Bot, 2013, 21(3): 203–210. [习丹, 李炯, 旷远文, 等. 鹤山不同植被类型土壤惰性碳含量及其季节变化特征 [J]. 热带亚热带植物学报, 2013, 21(3): 203–210. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2013.03.002.]
- [41] ZHANG L, ZHANG D L, MAO Z J, et al. The characteristic and maintains of recalcitrant organic carbon of different communities type [J] For Eng, 2019, 35(6): 16–25. [张玲, 张东来, 毛子军, 等. 不同群落类型土壤惰性碳含量特征与维持机制 [J]. 森林工程, 2019, 35(6): 16–25. doi: 10.3969/j.issn.1006-8023.2019.06.003.]
- [42] ZHANG L, ZHANG D L, MAO Z J. Characteristic mineralization of soil organic carbon in different successional series of broadleaved Korean pine forests in the temperate zone in China [J]. Acta Ecol Sin, 2017, 37(19): 6370–6378. [张玲, 张东来, 毛子军. 中国温带阔叶红松林不同演替系列土壤有机碳矿化特征 [J]. 生态学报, 2017, 37(19): 6370–6378. doi: 10.5846/stxb201607111415.]
- [43] ZHOU G Y, XU S, PHILIPPE C, et al. Climate and litter C/N ratio constrain soil organic carbon accumulation [J]. Nation Sci Rev, 2019, 6(4): 746–757. doi: 10.1093/nsr/nwz045.