

DOI: 10.5846/stxb202112103508

杨淑琪, 唐芬, 杨桦, 张云斌, 彭小瑜, 黄勇. 滇南地区桃树种植模式对土壤有机碳组分及碳库管理指数的影响. 生态学报, 2023, 43(1): 290-303.

Yang S Q, Tang F, Yang H, Zhang Y B, Peng X Y, Huang Y. Effects of peach tree planting patterns on soil organic carbon fractions and carbon pool management index in southern Yunnan. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(1): 290-303.

# 滇南地区桃树种植模式对土壤有机碳组分及碳库管理指数的影响

杨淑琪<sup>1</sup>, 唐 芬<sup>2</sup>, 杨 桦<sup>1</sup>, 张云斌<sup>3</sup>, 彭小瑜<sup>1</sup>, 黄 勇<sup>1,\*</sup>

1 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650500

2 云南省生态环境工程评估中心, 昆明 650228

3 红河哈尼族彝族自治州开远市林业和草原局, 开远 661199

**摘要:** 经果林种植可改变土壤质量、改善生态环境, 同时具有较高的经济效益。合理的种植模式可通过物种间的互补性提高资源利用效率, 改善土壤碳库质量并提高综合效益。为探讨桃树种植模式对土壤有机碳组分及碳库管理指数的影响, 以云南省开远市不同桃树种植模式(桃树单种-SP 和桃树南瓜套种-PP)为研究对象, 以毗邻的天然林地(CK)为对照, 分析不同种植模式下活性碳库, 即高锰酸钾氧化有机碳(POXC)、颗粒有机碳(POC)、惰性有机碳库即矿物结合态有机碳(MAOC)在 0—40 cm 土层的分布情况, 明确土壤有机碳组分与土壤理化性质的关系; 计算碳库活度指数(CPAI)、碳库指数(CPI)以及碳库管理指数(CPMI), 明确不同桃树种植模式的碳库变化情况。结果表明: 桃树种植模式和对照的土壤有机碳组分的含量均随着土层深度的增加而减少, 平均土壤有机碳(SOC)含量为: 14.68 g/kg(CK) > 9.57 g/kg(PP) > 8.58 g/kg(SP)。平均活性有机碳组分所占比例与 POC/MAOC 均表现为: SP > CK > PP, PP 的活性有机碳比例较低, 具有较高的有机碳稳定性。两种桃树种植模式的 CPMI 在 10—20 cm 土层达到最大值; 相较于 PP, SP 具有较高的 CPAI(1.10), 而 PP 则具有更高的 CPMI(69.51), 表明 PP 的碳库稳定性和土壤碳库质量均优于 SP。桃树种植模式、土层深度以及二者的交互作用对土壤有机碳组分及其分配比例存在不同程度的影响。冗余分析结果显示砂粒、pH 是影响不同桃树种植模式以及不同土层深度下土壤有机碳组分及土壤有机碳库的主要环境因子。综上, PP 是较好的种植模式, 有利于有机碳的固存。经果林的种植应根据土壤性质、碳库基本情况和氮磷等养分的有效性等采取适宜的管理措施, 增强其固碳效率和碳汇水平。

**关键词:** 滇南; 桃树种植模式; 土壤有机碳组分; 有机碳稳定性; 碳库管理指数

## Effects of peach tree planting patterns on soil organic carbon fractions and carbon pool management index in southern Yunnan

YANG Shuqi<sup>1</sup>, TANG Fen<sup>2</sup>, YANG Hua<sup>1</sup>, ZHANG Yunbin<sup>3</sup>, PENG Xiaoyu<sup>1</sup>, HUANG Yong<sup>1,\*</sup>

1 Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650500, China

2 Yunnan Appraisal Center for Ecological and Environmental Engineering, Kunming 650228, China

3 Forestry and Grassland Bureau of Kaiyuan, Hani-Yi Autonomous Prefecture of Honghe, Kaiyuan 661199, China

**Abstract:** The ecological environment in southern Yunnan is fragile with serious land degradation. Economic orchard, as a major ecological management, has a certain effect on organic carbon sequestration. Reasonable planting patterns can improve resource utilization efficiency through the complementarity between species, increasing the quality of soil carbon pool and obtaining higher comprehensive benefits. This study was carried out on different planting patterns of peach single species

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(42071127); 云南大学人才项目(C176220100083)

**收稿日期:** 2021-12-10; **网络出版日期:** 2022-08-26

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huangyong@ynu.edu.cn

(SP) and peach pumpkin interplanting (PP), located in Taoyuan Village, Kaiyuan City, Yunnan Province. Taking the adjacent natural forest (CK) as control, soil organic carbon (SOC), permanganate oxidizable carbon (POXC), particulate organic carbon (POC), and mineral-associated organic carbon (MAOC) were measured in 0—40 cm soil layer at an interval of 10 cm. Meanwhile, we calculated carbon pool activity index (CPAI), carbon pool index (CPI) and carbon pool management index (CPMI). Our objective was to investigate the effects of peach tree planting patterns on the stability of soil organic carbon and CPMI and clarify the relationship between soil organic carbon fractions and soil physicochemical properties. The results showed that the content of soil organic carbon fractions of the peach tree planting patterns and the control decreased with the increase of soil depths, the average SOC content were 14.68 g/kg (CK), 9.57 g/kg (PP), 8.58 g/kg (SP), respectively. The proportion of average POC, POXC and POC/MAOC showed as SP>CK>PP. PP had a lower proportion of active organic carbon with better organic carbon stability. Moreover, the CPMI of both peach tree planting patterns were lower than CK and reached the maximum value in the layer of 10—20 cm. SP had a higher CPAI (1.10), while PP had a higher CPMI (69.51), indicating that the stability and quality of PP soil carbon pool was better than that of SP. SOC, POXC, POC, and MAOC were all significantly positively correlated with sand, C/N, available phosphorus, exchangeable potassium, pH, and total phosphorus (in order of correlation). Peach tree planting patterns, soil depth and their interaction had different effects on soil organic carbon fractions and its proportion. Redundancy analysis also showed that sand and pH were the main environmental factors affecting the soil organic carbon fractions and soil organic carbon pool under different peach tree planting patterns and soil depths. We concluded that peach tree planting patterns changed the SOC and its fractions. Here, we consider PP as a better planting pattern, which is beneficial to organic carbon sequestration. Appropriate management measures should be taken according to the soil properties, basic situation of carbon pool and the effectiveness of nutrients such as nitrogen and phosphorus, so as to enhance the carbon sequestration efficiency and carbon sink level while improving the economic benefits.

**Key Words:** South Yunnan; peach tree planting pattern; soil organic carbon fractions; soil organic carbon stability; carbon pool management index

我国滇南地区生态环境脆弱,因人口增长以及经济发展的需要,土地利用方式逐渐由原始的林业转变为农业用地,土地退化情况严重,不仅对生态系统的稳定带来了极大的挑战,同时也潜在影响了土壤有机碳的储量。经果林种植作为土地退化治理工程的重要措施,可缓解人地矛盾、改善生态环境,并给当地带来一定的经济效益。土壤有机碳(SOC)作为评价土壤质量的重要指标之一<sup>[1]</sup>,由多种从简单到复杂的分子稳定性各不同的化合物组成<sup>[2]</sup>。其中,活性有机碳的周转速率较快、易氧化分解且活性较高,对农业管理方式敏感,可以表征SOC的矿化分解<sup>[3]</sup>。Blair等<sup>[4]</sup>研究发现KMnO<sub>4</sub>可将有机碳分为活性有机碳和非活性有机碳,并提出碳库管理指数(CPMI),可综合反映SOC总量和活性有机碳变化,进一步分析土地利用、农业措施等因素对土壤碳库的影响。

果园SOC含量通常受种植年限、种植模式、土地管理措施等因素的影响<sup>[5]</sup>,不同种植模式下植物种类、土壤条件不同,均会影响SOC的形成与稳定<sup>[6]</sup>,改变土壤有机碳库的组成。张坤<sup>[7]</sup>对荔枝园间作的研究发现幼龄果园间作能提高溶解性有机碳、易氧化有机碳、颗粒有机碳、微生物量碳的含量,提高SOC的含量和活性。相关研究发现苹果园行间长期间作植物,其轻质有机碳、可溶性有机碳、颗粒有机碳、易氧化有机碳和微生物量碳含量均显著提高,不同间作植物的提高效果不同<sup>[8]</sup>。CPMI能反映果园活性和非活性碳库的整体情况,有学者以柑橘园单种为对照,发现柑橘/大球盖菇间作能够显著提高0—10 cm土层的CPMI<sup>[9]</sup>。也有研究对比不同土地利用方式下的碳库发现CPMI的数值呈现撂荒地>林地>果园,林地开垦为果园之后CPMI数值降低,不利于土壤的碳截存<sup>[10]</sup>。可见,合理的种植模式可以实现对资源的有效利用,提高SOC含量以及土壤碳库质量;不合理的种植模式可能导致SOC的流失,造成土壤退化<sup>[11]</sup>。因此,研究不同种植模式下土壤有机

碳组分及其碳库的变化特征,对 SOC 的固存以及农业产业的可持续发展具有重要意义。

云南南部开远市桃源村土地退化严重,20 世纪 90 年代初当地农户进行农业结构调整,由单一粮食作物种植转变为经果林种植,桃树单种和桃树套种(与草本植物)成为该地区主要的种植模式。本研究以桃树单种(SP)和桃树南瓜套种(PP)模式为研究对象,并选取土壤类型相近的天然林(CK)为对照,分别采用化学和物理分组法,将 SOC 分为高锰酸钾氧化有机碳(POXC)、颗粒有机碳(POC)和矿物结合态有机碳(MAOC),分析单种和套种模式下桃园 0—40 cm 土壤不同有机碳组分的含量和分配比例及其随土层深度的变化特征,计算 CPMI,明确土壤理化性质与有机碳组分的关系,进一步探究桃树种植模式对 SOC 稳定性以及土壤碳库的影响,以期为该地区土壤有机碳的固存提供理论依据,促进生态环境治理与农业可持续发展。

1 材料与方法

1.1 采样区域概况

云南省开远市地处 23°30′—23°58′N、103°04′—103°43′E 之间,位于云南省东南部,红河州中东部。海拔 950—2775.6 m,地处亚热带半干旱季风气候区,干、湿两季分明,常年多干旱现象发生,年平均气温 19.8℃,年平均降水量 800 mm。该区主要成土母岩是碳酸盐岩中的石灰岩、白云岩等<sup>[12]</sup>。通过走访和实际调查,选定开远市桃源村作为研究区域,该村以油桃、南瓜为特色农业产业,对种植户进行上门访问调查。种植作物为桃树(*Amygdalus persica*)和南瓜(*Cucurbita moschata*),桃树的种植模式分为桃树单种和桃树南瓜套种,均不施用有机肥,5 月份施基肥 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O (15:15:15、总养分≥45%),12 月份施追肥(桃树为 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O,南瓜为 KNO<sub>3</sub>或尿素)。于 2022 年 1 月份对树高进行补测,此时为修剪枝条之后的树高。各样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic status of the sample site

| 处理<br>Treatments                                          | 桃树单种<br>Peach single species                                                    | 桃树南瓜套种<br>Peach pumpkin interplanting                                               |
|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 树龄 Age/a                                                  | 10—15                                                                           | 10—15                                                                               |
| 平均胸径<br>Average diameter at breast height (DBH)/cm        | 19.89±3.33                                                                      | 17.51±3.75                                                                          |
| 平均树高 Average tree height/m                                | 1.91±0.11                                                                       | 1.94±0.10                                                                           |
| 种植密度 Plant density/(株/hm <sup>2</sup> )                   | 920                                                                             | 920                                                                                 |
| 坡向 Slope aspect                                           | 东                                                                               | 东                                                                                   |
| 施肥情况 Fertilization/(kg hm <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> ) | N 肥(N): 253、P 肥(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ): 253、K 肥(K <sub>2</sub> O): 253 | N 肥(N): 312、P 肥(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ): 253、K 肥(K <sub>2</sub> O): 253—312 |
| 田间管理 Field management                                     | 水分来源为自然降雨,整地方式为深耕,喷洒农药除草。<br>一年中分别在 4 月和 12 月修剪枝条并就地焚烧。                         |                                                                                     |

1.2 土壤样品采集

于 2020 年 9 月下旬在开远市桃源村分别选择 3 个土壤条件和管理水平相近的单一桃园和桃树南瓜套种桃园采集土壤样品,每个果园按 S 形 5 点法以 10 cm 间隔采集桃树植株间 0—40 cm 土层的土壤样品,把同一个果园各个采样点上采集的土壤样品按照相同层次分别进行混合后作为处理的一个重复。天然林选择 3 个样地,以 S 形布点,按上述方法采集土壤样品。将采集的土壤样品带回室内自然风干,研磨后过筛,测定土壤的基本理化性质(表 2)并进行土壤有机碳分组等。

1.3 实验方法

1.3.1 土壤理化性质测定

用电位测定法(雷磁 PHS-3E)测定土壤 pH 值(水土比 2.5:1, V/W);土壤质地使用马尔文激光粒度仪(Malvern, Mastersizer 2000)进行测定;土壤有机碳(SOC)由酸化后的土壤经 TOC 分析仪测定(Elementar vario TOC cube);土壤全氮(TN)采用凯氏消煮法浸提-流动注射仪(FIA-6000+)测定<sup>[13]</sup>;全磷(TP)采用碱熔-钼锑

抗比色法测定;有效磷(AP)采用钼锑抗比色法测定;全钾(TK)采用氢氧化钠碱熔-火焰光度法测定;交换性钾钙钠镁( $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Na^+$ 、 $Mg^{2+}$ )采用乙酸铵浸提(水土比 10:1, V/W),由电感耦合等离子原子发射光谱仪(iCAP6300)测定。

表 2 各处理土壤基本理化性质

Table 2 Basic physical and chemical properties of the soil

| 理化性质<br>Physical and chemical properties | 天然林<br>Natural forest | 桃树单种<br>Peach single species | 桃树南瓜套种<br>Peach pumpkin interplanting |
|------------------------------------------|-----------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| pH                                       | 5.93—6.64             | 5.48—6.30                    | 5.31—5.88                             |
| 有机碳 Soil organic carbon/(g/kg)           | 8.03—29.52            | 3.96—14.69                   | 4.78—14.25                            |
| 全氮 Total nitrogen/(g/kg)                 | 2.11—2.68             | 1.09—1.43                    | 1.73—2.31                             |
| 碳/氮                                      | 3.08—13.66            | 3.38—13.52                   | 3.14—7.30                             |
| 全磷 Total phosphorus/(g/kg)               | 0.46—0.66             | 0.39—0.51                    | 0.54—0.84                             |
| 全钾 Total potassium/(g/kg)                | 4.17—12.57            | 5.92—9.93                    | 6.03—10.39                            |
| 有效磷 Available phosphorus/(mg/kg)         | 2.10—6.17             | 6.45—56.44                   | 4.65—94.94                            |
| 交换性钾 Exchangeable potassium/(g/kg)       | 0.20—0.34             | 0.15—0.29                    | 0.10—0.25                             |
| 交换性钙 Exchangeable calcium/(g/kg)         | 1.40—2.22             | 1.51—1.86                    | 1.32—1.44                             |
| 交换性钠 Exchangeable sodium/(mg/kg)         | 6.18—15.05            | 10.37—12.18                  | 8.45—11.58                            |
| 交换性镁 Exchangeable magnesium/(g/kg)       | 0.07—0.14             | 0.17—0.22                    | 0.15—0.16                             |
| 黏粒 Clay/%                                | 46.87—89.46           | 56.20—67.43                  | 60.06—86.83                           |
| 粉粒 Silt/%                                | 10.11—41.80           | 30.49—37.86                  | 12.48—34.25                           |
| 砂粒 Sand/%                                | 0.42—11.33            | 2.09—5.94                    | 0.69—5.69                             |

### 1.3.2 土壤有机碳组分的测定以及碳库管理指数的计算

参考 Marriott 等<sup>[14]</sup>的方法进行土壤有机碳分组,称取过 2 mm 筛的风干土样 5 g,加入 25 mL 的六偏磷酸钠(5 g/L),将分散液过 53  $\mu\text{m}$  筛,筛上部分为 POC、筛下部分为 MAOC,烘干后称重并计算质量百分比,磷酸酸化后测定有机碳含量(TOC 分析仪,Elementar vario TOC cube,德国);分别用有机碳含量乘以质量百分比,除以 SOC 含量,得到相应的分配比例。

高锰酸钾氧化有机碳(POXC)的提取和分析参考 Weil 等<sup>[15]</sup>的方法,称取 2.5 g 风干并研磨至 2 mm 的土壤,依次加入 2 mL 的 0.02 mol/L  $\text{KMnO}_4$  和 18 mL 的去离子水,震荡后吸取 1 mL 上清液并定容到 100 mL,同时配置标准曲线(0.005、0.01、0.015 和 0.02 mol/L  $\text{KMnO}_4$ ),使用紫外可见分光光度计(UV-5500)测定在 550 nm 的吸光度(Abs),依据标准曲线计算样品 POXC 含量。用 POXC 含量除以 SOC 含量,得到相应的分配比例。

以周边天然林土壤为参照土壤,以 POXC 作为活性有机碳根据下列公式进行土壤碳库指数的计算<sup>[4]</sup>:

$$\text{稳态碳 (STOC)} = \text{土壤总有机碳} - \text{活性有机碳} \quad (1)$$

$$\text{碳库活度 (CPA)} = \text{土壤活性有机碳} / \text{稳态碳} \quad (2)$$

$$\text{碳库指数 (CPI)} = \text{土壤有机碳含量} / \text{参考土壤有机碳含量} \quad (3)$$

$$\text{碳库活度指数 (CPAI)} = \text{样品碳库活度} / \text{参考土壤碳库活度} \quad (4)$$

$$\text{碳库管理指数 (CPMI)} = \text{碳库指数} \times \text{碳库活度指数} \times 100\% \quad (5)$$

### 1.3.3 数据分析

使用单因素方差分析比较不同处理及各土层间 SOC、有机碳组分含量以及有机碳组分分配比例的差异,并用邓肯多范围检验差异的显著性;使用双因素方差分析分析桃树种植模式和土层深度之间的交互作用对土壤有机碳及其组分的影响;使用 Pearson 相关分析对 SOC 及其组分和土壤理化性质进行相关性分析;以上统计分析均使用 SPSS Statistics 23.0,使用 Canoco 5 软件进行冗余分析(RDA)并作图,使用 Origin 2021 进行有机



碳及相关性分析的作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同桃树种植模式土壤总有机碳的变化特征

土壤有机碳含量如图 1 所示,CK、SP 和 PP 的 SOC 含量分别为 8.03—29.52 g/kg、3.96—14.69 g/kg、4.78—14.25 g/kg,垂直剖面上均表现为随土层深度增加而减少。虽然 SP、PP 的平均 SOC 含量在 0—10 cm、30—40 cm 土层较 CK 显著降低( $P<0.05$ ),但在 10—20 cm 土层,SP、PP 和 CK 无显著性差异( $P>0.05$ ),SP、PP 的平均 SOC 含量仅分别比 CK 低了 16.32%、0.67%。另外,SP 与 PP 各土层的 SOC 含量也无显著性差异( $P>0.05$ ),在 0—10 cm,PP 的平均 SOC 含量略低于 SP,而在 10—20 cm、20—30 cm、30—40 cm 土层,PP 的平均 SOC 含量分别比 SP 高 18.70%、30.16%、20.56%。

### 2.2 不同桃树种植模式土壤有机碳组分的变化特征

#### 2.2.1 不同桃树种植模式有机碳组分分布特征

三个处理土壤有机碳组分随着土层变化的趋势和 SOC 的趋势大致相同(图 1),垂直剖面上均表现为随土层深度增加而减少的趋势。除 10—20 cm 土层外,PP 和 SP 各土层的 POXC、MAOC 含量无显著性差异,并显著低于 CK。PP 的平均 POXC 含量在 0—10 cm 土层相较于 SP 较低,在其它土层均大于 SP。SP 的平均 POC 含量大于 PP,在 20—30 cm、30—40 cm 土层差异性显著( $P<0.05$ )。三个处理下 MAOC 含量的平均值大约是 POC 含量平均值的 3.35 至 6.16 倍。PP 除了在 0—10 cm 土层的平均 MAOC 含量低于 SP,在 10—20 cm、20—30 cm、30—40 cm 土层,PP 的平均 MAOC 含量较 SP 分别提高了 24.20%、17.32%、36.55%。综上,

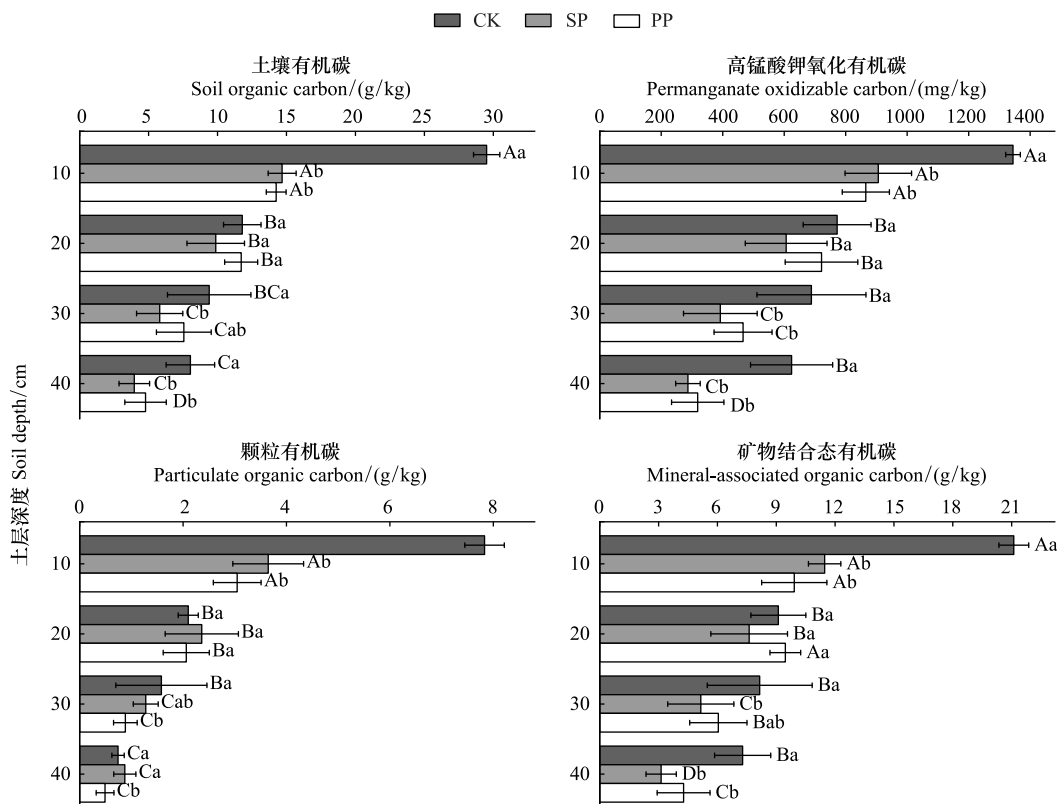


图 1 桃树单种和桃树南瓜套种模式下土壤有机碳及其组分的分布特征

Fig.1 Distribution characteristics of soil organic carbon and its fractions under single peach tree and interplanting peach tree and pumpkin

CK:天然林 Natural forest; SP:桃树单种 Peach single species; PP:桃树南瓜套种 Peach pumpkin interplanting; 不同大写字母表示同一处理不同土层差异显著,不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著( $P<0.05$ )

SP、PP 的各有机碳组分含量均小于 CK,活性较高的活性有机碳组分 POXC 以及惰性有机碳 MAOC 的平均含量 PP 大于 SP,活性相对较低的活性有机碳组分 POC 的平均含量 SP 大于 PP。

### 2.2.2 不同桃树种植模式土壤有机碳组分分配特征

POXC/SOC 的数值随着土层深度的增加逐渐增加(图 2),PP 在各土层之间无显著性差异( $P>0.05$ ),在 0—10 cm 土层,SP、PP 的 POXC/SOC 值较 CK 分别显著提高了 35.16%、33.21%( $P<0.05$ ),而在 10—20 cm、20—30 cm、30—40 cm 土层 POXC/SOC 均小于 CK。POC/SOC、POC/MAOC 随土层变化的趋势与 POXC/SOC 相反,随着土层深度的增加逐渐减小,数值范围分别是 9.33%—26.57%、0.10—0.37。SP 的 POC/SOC、POC/MAOC 在各土层之间均无显著性差异( $P>0.05$ ),仅次于 CK 在 0—10 cm 土层的值。在 0—10 cm 土层 PP 的 POC/SOC、POC/MAOC 与 SP 无显著性差异( $P>0.05$ ),但在 10—20 cm、20—30 cm、30—40 cm 土层,PP 的 POC/SOC 较 SP 分别显著降低了 26.48%、49.32%、54.29%,POC/MAOC 较 SP 分别显著降低了 30.73%、44.95%、59.27%( $P<0.05$ )。MAOC/SOC 的数值均大于 60%,各处理的平均 MAOC/SOC 分别为 81.56%(CK)、80.66%(SP)、80.39%(PP)。CK 的 MAOC/SOC 的数值随着土层深度的增加逐渐增大且具有差异性( $P<0.05$ ),SP、PP 的 MAOC/SOC 在各土层间差异性不显著( $P>0.05$ ),PP 的平均 MAOC/SOC 随着土层深度的增加逐渐大于 SP。综上,不同种植模式间有机碳组分分配比例差异性显著,PP 的活性有机碳分配比例小于 SP,SP 深层土壤 POC 的分配比例较高。

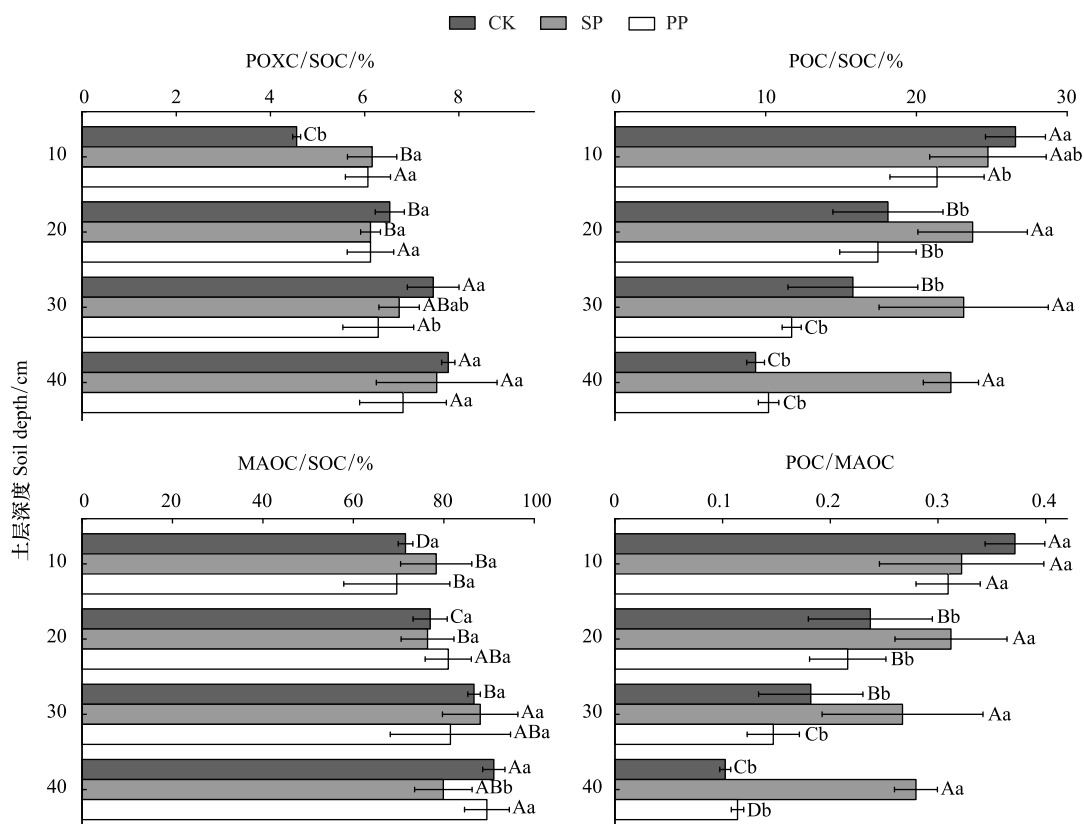


图 2 桃树单种和桃树南瓜套种模式下土壤有机碳组分的分配比例及颗粒有机碳与矿物结合态有机碳的比值

Fig.2 Distribution ratio of soil organic carbon fractions and ratio of particulate organic carbon to mineral-associated organic carbon under single peach tree and interplanting peach tree and pumpkin

POXC/SOC:高锰酸钾氧化有机碳与土壤有机碳的比值 Ratio of permanganate oxidizable carbon to soil organic carbon; POC/SOC:颗粒有机碳与土壤有机碳的比值 Ratio of particulate organic carbon to soil organic carbon; MAOC/SOC:矿物结合态有机碳与土壤有机碳的比值 Ratio of mineral-associated organic carbon to soil organic carbon; POC/MAOC:颗粒有机碳与矿物结合态有机碳的比值 Ratio of particulate organic carbon to mineral-associated organic carbon

### 2.2.3 不同桃树种植模式的碳库管理指数

两种桃树种植模式和对照的碳库管理指数如表 3 所示。分土层计算各项碳库指数,SP、PP 的 STOC 随着土层的增加而减小,PP 的平均 STOC 含量高于 SP。在 0—10 cm 土层,SP、PP 的 CPAI 较 CK 分别显著增加了 37.53%、35.41% ( $P<0.05$ ),在其它土层均小于 CK 且无显著性差异 ( $P>0.05$ )。SP、PP 的 CPMI 随土层呈现先增加后减少的趋势,在 10—20 cm 土层达到最大值,78.29 (SP)、93.27 (PP);在 0—10 cm、20—30 cm、30—40 cm 各土层,SP、PP 的 CPMI 均值均分布在 45.81—68.60 之间;PP 的平均 CPMI 大于 SP。整体而言,0—40 cm 土层 SP、PP 的 CPAI 均略高于 CK,其它指数 STOC、CPI、CPMI 均小于 CK。两种植模式各项指数之间无显著性差异,PP 相较于 SP 具有更高的 STOC,SP 的 CPI 略低于 PP,分别为 0.58、0.65,但是 CPAI 略高于 PP,分别为 1.10、1.07;SP、PP 的 CPMI 分别为 64.35、69.51。综上,桃树种植改变了土壤有机碳库,与对照相比两种植模式的 CPMI 均有不同程度的降低,然而 CPAI 和对照无显著性差异,PP 的碳库较稳定。

表 3 桃树单种和桃树南瓜套种模式下土壤碳库管理指数

Table 3 Soil carbon pool management index under single peach tree and interplanting peach tree and pumpkin

| 处理<br>Treatments | 土层<br>Soil layer/cm | 稳态碳<br>STOC/(g/kg) | 碳库活度<br>CPA   | 碳库指数<br>CPI  | 碳库活度指数<br>CPAI | 碳库管理指数<br>CPMI |
|------------------|---------------------|--------------------|---------------|--------------|----------------|----------------|
| 天然林              | 0—10                | 28.17±0.81Aa       | 0.05±0.01Cb   | 1a           | 1b             | 100a           |
| CK               | 10—20               | 11.02±1.22Ba       | 0.07±0.01Ba   | 1a           | 1a             | 100a           |
|                  | 20—30               | 8.71±2.84BCa       | 0.08±0.01Aa   | 1a           | 1a             | 100a           |
|                  | 30—40               | 7.41±1.62Ca        | 0.08±0.01Aa   | 1a           | 1a             | 100a           |
|                  | 0—40                | 13.83±1.99a        | 0.06±0.01a    | 1a           | 1a             | 100a           |
|                  | 0—10                | 13.78±0.60Ab       | 0.07±0.01Ba   | 0.50±0.03Bb  | 1.38±0.12Aa    | 68.60±9.38ABb  |
| SP               | 10—20               | 9.26±1.85Ba        | 0.07±0.01Ba   | 0.84±0.18Aa  | 0.93±0.03Ba    | 78.29±17.57Ab  |
|                  | 20—30               | 5.41±1.50Cb        | 0.07±0.01ABab | 0.62±0.18Bb  | 0.90±0.06Bb    | 55.57±17.46BCb |
|                  | 30—40               | 3.67±1.04Db        | 0.08±0.02Aa   | 0.49±0.14Bb  | 0.97±0.18Ba    | 45.81±6.70Cb   |
|                  | 0—40                | 8.03±1.30b         | 0.07±0.01a    | 0.58±0.10b   | 1.10±0.04a     | 64.35±12.45b   |
| 桃树南瓜套种           | 0—10                | 13.39±0.12Ab       | 0.06±0.01Aa   | 0.48±0.02Cb  | 1.35±0.11Aa    | 65.48±7.78Bb   |
| PP               | 10—20               | 10.99±0.98Ba       | 0.07±0.01Aa   | 0.99±0.10Aa  | 0.93±0.08Ba    | 93.27±16.24Aab |
|                  | 20—30               | 7.09±1.88Cab       | 0.07±0.01Ab   | 0.80±0.21Bab | 0.83±0.11Bb    | 65.64±13.07Bb  |
|                  | 30—40               | 4.46±1.39Db        | 0.07±0.01Aa   | 0.59±0.19Cb  | 0.87±0.13Ba    | 50.55±13.89Bb  |
|                  | 0—40                | 8.98±1.01b         | 0.07±0.01a    | 0.65±0.07b   | 1.07±0.11a     | 69.51±8.35b    |

STOC:稳态碳 Stable organic carbon; CPA:碳库活度 Carbon pool activity; CPI:碳库指数 Carbon pool index; CPAI:碳库活度指数 Carbon pool activity index; CPMI:碳库管理指数 Carbon pool management index;不同大写字母表示同一处理不同土层差异显著,不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ( $P<0.05$ );因 CK 的 CPI、CPAI、CPMI 在各土层之间数值相等,故不在各土层间进行单因素方差分析;CK: Natural forest; SP: Peach single species; PP: Peach pumpkin interplanting;

### 2.3 土壤有机碳及其组分的影响因子

不同种植模式 SOC 及其组分与土壤理化性质之间的相关性分析见图 3, SOC、POXC、POC、MAOC 均与 C/N、pH、K<sup>+</sup>、TP、AP、砂粒呈极显著正相关,按照相关性大小排序,依次为:砂粒、C/N、AP、K<sup>+</sup>、pH、TP;与黏粒呈极显著负相关 ( $P<0.01$ )。各组分 POXC、POC、MAOC 与 SOC 均呈极显著正相关且相关系数分别为 0.98、0.90、0.95。

双因素方差分析结果如表 4 所示,不同种植模式对 SOC、POC、POC/SOC 及 POC/MAOC 均有显著影响;土层深度对土壤有机碳、土壤有机碳组分及其分配比例均有显著影响;桃树种植模式和土层深度的交互作用对 MAOC、POC/SOC、MAOC/SOC 及 POC/MAOC 具有显著影响 ( $P<0.05$ )。

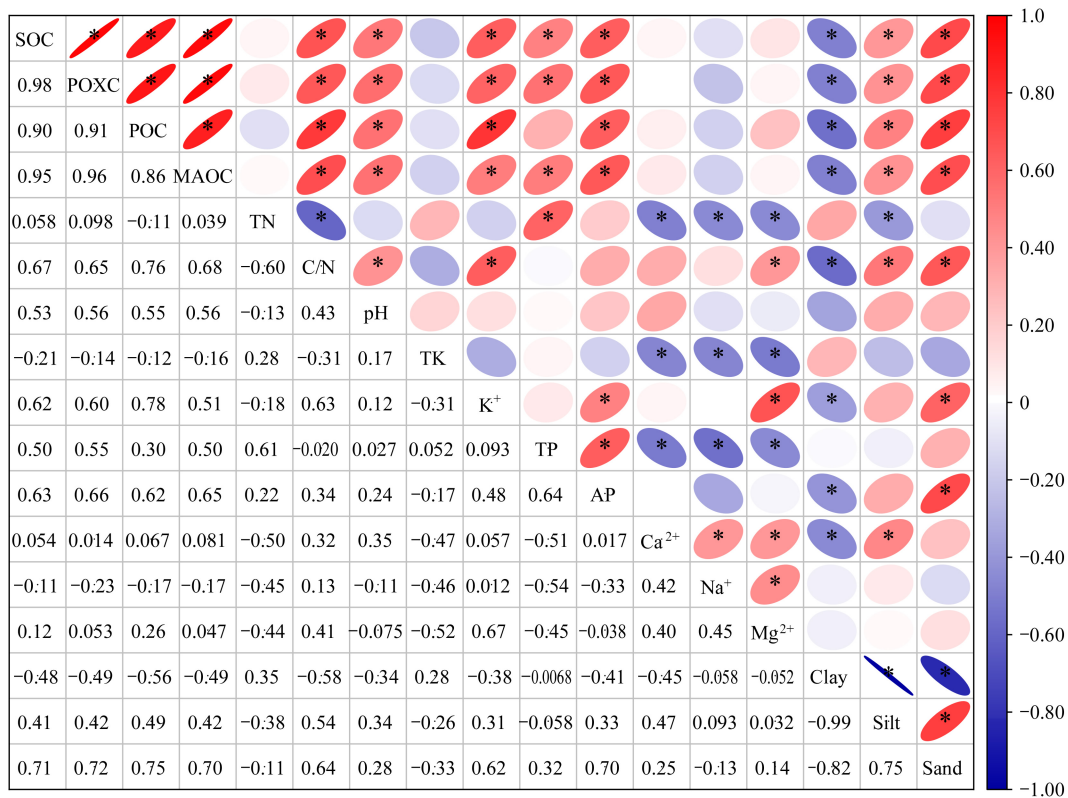


图3 桃树单种和桃树南瓜套种模式下土壤有机碳及其组分与土壤理化性质的相关性

Fig.3 Correlation of soil organic carbon and its fractions with soil physical and chemical properties under single peach tree and interplanting peach tree and pumpkin

\* 表示相关性极显著 ( $P < 0.01$ ); 图中椭圆颜色深度越深、形状越小均代表相关性程度越强; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; POXC: 高锰酸钾氧化有机碳 Permanganate oxidizable carbon; POC: 颗粒有机碳 Particulate organic carbon; MAOC: 矿物结合态有机碳 Mineral-associated organic carbon; TN: 全氮 Total nitrogen; 碳/氧类: C/N 比 C/N ratio; TK: 全钾 Total potassium; K<sup>+</sup>: 交换性钾 Exchangeable potassium; TP: 全磷 Total phosphorus; AP: 有效磷 Available phosphorus; Ca<sup>2+</sup>: 交换性钙 Exchangeable calcium; Na<sup>+</sup>: 交换性钠 Exchangeable sodium; Mg<sup>2+</sup>: 交换性镁 Exchangeable magnesium; Clay: 黏粒; Silt: 粉粒; Sand: 砂粒

表4 桃树种植模式以及土层深度对土壤有机碳、土壤有机碳组分及其分配比例的双因素方差分析

Table 4 Two-way ANOVA of soil organic carbon, soil organic carbon fractions and its ratio to peach tree planting patterns and soil depths

| 影响因子<br>Impact factor | 桃树种植模式<br>Peach tree planting patterns |          | 土层深度<br>Soil depths |          | 桃树种植模式×土层深度<br>Peach tree planting patterns × Soil depths |          |
|-----------------------|----------------------------------------|----------|---------------------|----------|-----------------------------------------------------------|----------|
|                       | <i>F</i>                               | <i>P</i> | <i>F</i>            | <i>P</i> | <i>F</i>                                                  | <i>P</i> |
| SOC                   | 5.410                                  | 0.025 *  | 109.269             | 0.000 *  | 1.534                                                     | 0.220    |
| POXC                  | 2.391                                  | 0.130    | 78.656              | 0.000 *  | 1.303                                                     | 0.287    |
| POC                   | 10.785                                 | 0.002 *  | 88.420              | 0.000 *  | 0.250                                                     | 0.861    |
| MAOC                  | 2.139                                  | 0.151    | 60.325              | 0.000 *  | 3.432                                                     | 0.026 *  |
| POXC/SOC              | 2.318                                  | 0.136    | 5.881               | 0.002 *  | 0.648                                                     | 0.589    |
| POC/SOC               | 82.500                                 | 0.000 *  | 11.450              | 0.000 *  | 5.241                                                     | 0.004 *  |
| MAOC/SOC              | 0.012                                  | 0.913    | 4.588               | 0.007 *  | 3.261                                                     | 0.031 *  |
| POC/MAOC              | 53.995                                 | 0.000 *  | 16.927              | 0.000 *  | 5.730                                                     | 0.002 *  |

SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; POXC: 高锰酸钾氧化有机碳 Permanganate oxidizable carbon; POC: 颗粒有机碳 Particulate organic carbon; MAOC: 矿物结合态有机碳 Mineral-associated organic carbon; POXC/SOC: 高锰酸钾氧化有机碳与土壤有机碳的比值 Ratio of permanganate oxidizable carbon to soil organic carbon; POC/SOC: 颗粒有机碳与土壤有机碳的比值 Ratio of particulate organic carbon to soil organic carbon; MAOC/SOC: 矿物结合态有机碳与土壤有机碳的比值 Ratio of mineral-associated organic carbon to soil organic carbon; POC/MAOC: 颗粒有机碳与矿物结合态有机碳的比值 Ratio of particulate organic carbon to mineral-associated organic carbon; \* 表示在 0.05 水平上差异性显著 ( $P < 0.05$ )



以 SOC、POXC、POC、MOAC 为响应变量,土壤理化因子为环境变量,进一步进行 RDA 分析,结果如图 4 所示,两种桃树种植模式具有较好的分异性,表明不同桃树种植模式以及土层深度对 SOC 及其组分有一定的影响。从表 5 可知砂粒、pH、TP、C/N、TN、Na<sup>+</sup>均显著影响了 SOC 及其组分,砂粒、pH、TP 和 C/N 共同解释了 78.5%的变异。

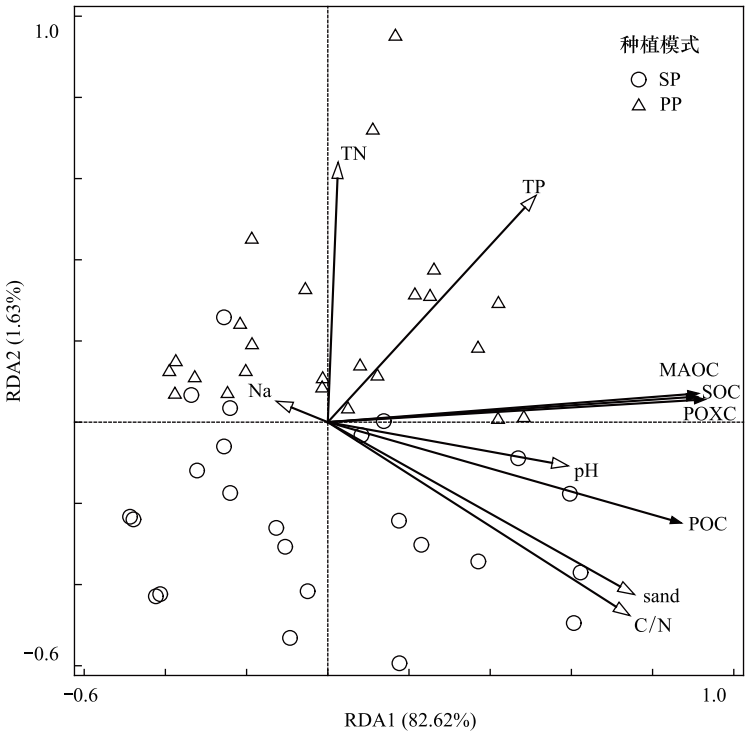


图 4 桃树单种和桃树南瓜套种模式下土壤有机碳组分与土壤环境因子冗余分析 (RDA)

Fig.4 Redundancy analysis (RDA) of differences in organic carbon fractions under single peach tree and interplanting peach tree and pumpkin

表 5 桃树单种和桃树南瓜套种模式下土壤有机碳及其组分的影响因素

Table 5 Factors affecting soil organic carbon and its fractions under single peach tree and interplanting peach tree and pumpkin

| 土壤环境因子<br>Soil<br>environmental<br>factor | 解释度<br>Explains/% | 贡献率<br>Contribution/% | <i>F</i> | <i>P</i> | 土壤环境因子<br>Soil<br>environmental<br>factor | 解释度<br>Explains/% | 贡献率<br>Contribution/% | <i>F</i> | <i>P</i> |
|-------------------------------------------|-------------------|-----------------------|----------|----------|-------------------------------------------|-------------------|-----------------------|----------|----------|
| 砂粒 Sand                                   | 47.5              | 53.8                  | 41.5     | 0.002    | C/N                                       | 9.0               | 10.2                  | 17.9     | 0.002    |
| pH                                        | 12.8              | 14.5                  | 14.6     | 0.002    | TN                                        | 3.5               | 4.0                   | 8.3      | 0.014    |
| TP                                        | 9.2               | 10.4                  | 13.2     | 0.002    | Na <sup>+</sup>                           | 2.5               | 2.8                   | 6.5      | 0.008    |

TN:全氮 Total nitrogen;碳/氧类:C/N 比 C/N ratio;TP: 全磷 Total phosphorus;Na<sup>+</sup>:交换性钠 Exchangeable sodium

3 讨论

3.1 桃树种植模式对土壤有机碳和有机碳组分的影响

SOC 含量是有机物质输入和矿化分解动态平衡的结果<sup>[16]</sup>。徐鹏等<sup>[10]</sup>研究发现,自然林地转变为果园后,SOC 含量降低了 21.56%。本研究得到与之相似的结果,两种桃树种植模式的 SOC 含量均低于 CK。可能是由于林地植被覆盖度高、地表生物量大,归还土壤的凋落物和根系分泌物的数量多,同时受人为活动影响也相对较小,降低了人为干扰和耕作造成的土壤碳的流失<sup>[17]</sup>。另外,虽然 CK 的 SOC 含量在 0—10 cm 土层显著高于 PP 和 SP,但是在 10—20 cm 土层,CK 和两种植模式的 SOC 含量无显著性差异,可能是因为果园施肥采取沟施且整地方式为深耕,增加了该土层有机质的输入。施用 NPK 肥能够提高作物产量,从而增加作物根

系归还土壤的比例,改变植物和微生物残留组分积累程度,有利于 10—20 cm 土层 SOC 的积累<sup>[18]</sup>。本研究 PP 相较于 SP 具有更多的地表生物量及地下根系,根系分泌物的释放、凋落物的积累以及作物残茬作为绿肥进入土壤,有助于改善土壤中的生物多样性和生物过程,促进 SOC 的形成和积累<sup>[19]</sup>,因此具有较高的固碳能力。

本研究中 POXC、POC 随着土层深度变化的趋势与 SOC 的趋势基本相似,且均与 SOC 呈极显著正相关,与 Bongiorno 等<sup>[20]</sup>的研究得到相似结论,SOC 含量与活性有机碳组分具有很好的正相关性。土壤活性有机碳含量在很大程度上由 SOC 含量决定,不同种植模式下有机质的输入量不同,微生物群落组成和多样性存在差异,从而影响了 SOC 的矿化和固定过程,进而决定了活性有机碳的含量<sup>[21]</sup>。POXC 是 SOC 中周转最快的组分,相关学者在贵州关岭花江的研究中发现,花椒林的 POXC 含量大于花椒火龙果混交林<sup>[22]</sup>。POXC 作为对耕作和有机质输入敏感的有机碳组分<sup>[23]</sup>,可以灵敏的反映 SOC 的动态变化,本研究中 PP 的人为活动干扰相对较多,且具有更多的地表凋落物以及植物根系,因此 PP 的 POXC 含量较高。POXC 也可作为反映土壤的物理、化学、生物等条件的综合性指标<sup>[20]</sup>,相关分析的结果也显示 POXC 较其它土壤有机碳组分与土壤理化性质的相关性较强,能较好的反映因环境差异而导致的有机碳活性组分的变化。POC 主要来源于新鲜的动植物残体和腐殖化有机物之间暂时的或过渡的有机碳<sup>[24]</sup>,本研究发现,POC 含量以 CK 最高、PP 最低,可能是由于 PP 相较于 CK 和 SP 具有较多的果园管理等人为活动,破坏了土壤团聚体,影响了 POC 的形成与稳定<sup>[25]</sup>。由调查得知 PP 相较于 SP 施加了较多的氮肥,已有研究发现施氮可以提高微生物及酶的活性,进而促进 POC 的分解<sup>[26]</sup>,施氮也可使根系分泌物与微生物分泌物增多,这些分泌物可直接与土壤黏粒相结合,有利于土壤 MAOC 的积累<sup>[27]</sup>。本研究中 PP 的 SOC、MAOC 含量均高于 SP,POC 含量均低于 SP。是由于 PP 增加了氮素的有效性,促进了 POC 的分解,同时也促进了 MAOC 的积累。

土壤活性有机碳占总有机碳的比例表示土壤中活性有机碳与非活性有机碳的相对数量,较活性有机碳本身更能反映 SOC 组成的变化,活性有机碳组分分配比例可反映 SOC 的稳定性。李鉴霖等<sup>[28]</sup>对我国西南地区缙云山亚热带常绿阔叶林以及果园的土壤有机碳组分的研究中发现林地中活性较强的有机碳组分占 SOC 的比例高于果园,果园 SOC 的活性相对较低。POXC 包含溶解性有机质及微生物可利用碳<sup>[29]</sup>,本研究中两种植模式的 POXC/SOC 均值均小于天然林,微生物可利用性为 CK>SP>PP。在 0—10 cm 土层,天然林虽然具有较多的 POXC,但其有机质输入量较高,因此该土层 POXC/SOC 值较低。在大多数土壤中,POC 通常只占 SOC 含量的 10—25%<sup>[30]</sup>,本研究中 POC/SOC 的数值略高于这一范围(10.19%—26.57%),SP 的 POC/SOC 数值在各土层之间无显著性差异且均大于 PP。双因素方差分析的结果表示不同桃树种植模式显著影响了 POC 含量及其分配比例,Kantola 等<sup>[25]</sup>研究发现多年生植物替代一年生植物后,土壤中的 POC 含量增加,本研究中 SP 为多年生单作,PP 为多年生和一年生植物间作,因此可能导致 SP 相较于 PP 具有较高的 POC 分配比例。关于非活性有机碳组分,Cotrufo 等<sup>[31]</sup>在欧洲范围内对森林和草原的 POC 和 MAOC 的一项研究发现,大多数碳以 MAOC 的形式储存(特别是在碳含量低的土壤中),本研究中各处理 MAOC/SOC 的比例均大于 70%,PP 的平均 MAOC/SOC 值大于 SP。可能是因为本研究中套种作物伸展生长的枝叶或藤蔓自然覆盖裸露地面,不仅降低了土壤温度,还缓和降雨对土壤的直接侵蚀,同时遮阴作用可以减少土壤水分的蒸发和流失,土壤水分通过改变土壤氧化还原电位和微生物活性,减少土壤有机物的矿化,有利于有机物在土壤中的积累<sup>[32]</sup>,使 PP 的 MAOC 的累积优于 SP。另一方面,POC/MAOC 值可在一定程度上反映 SOC 的质量和稳定程度,一般来说,POC/MAOC 值越大,则表明 SOC 稳定性越低<sup>[33]</sup>。已有研究发现橘园地的 POC/MAOC 在 0—20 cm 土层显著高于林地<sup>[34]</sup>,本研究中 SP 的 POC/MAOC 的值相比于 CK 和 PP 较大,SOC 易矿化、稳定性低,不利于有机碳的积累<sup>[35]</sup>;PP 的 POC/MAOC 的值相较于 SP 呈现降低的趋势,SOC 较稳定,不易被微生物所利用。综上,PP 的活性有机碳组分的分配比例均小于 SP,惰性有机碳的分配比例均大于 SP,PP 的稳定性高于 SP,利于有机碳积累,因此,PP 的 SOC 含量高于 SP。

### 3.2 桃树种植模式对土壤碳库的影响

CPI、CPI 和 CPMI 均反映了土壤有机碳库的质量,可以用来反映土地管理方式是否具有科学性,其值越

大土壤碳库质量越高。已有研究以封育林为参考土壤,计算种植玉米、种植牧草、火烧等处理方式的 CPMI,发现受人为干扰越大则 CPMI 越低<sup>[36]</sup>。本研究得到与之相似的结果,人为干扰程度较高的 SP、PP 的 CPAI、CPMI 均低于 CK,桃树种植影响了土壤有机碳组分和土壤碳库质量。相关研究发现苹果园间作植物可以有效提高土壤活性有机碳含量,改变土壤碳库组分<sup>[37]</sup>。本研究中 SP 的 CPAI 的均值大于 PP,CPI、CPMI 的均值均小于 PP,即 PP 通过提高 CPI 来提高 CPMI,PP 相较于 SP 降低了 SOC 的活性,减缓了 SOC 的矿化分解,同时具有较高的碳固存能力。龙攀等<sup>[38]</sup>在长江中游地区的研究中发现稻田 0—20 cm 土壤随着土层深度的增加 CPAI 和 CPMI 总体呈下降趋势。滕秋梅等<sup>[17]</sup>对桂北喀斯特山区不同植被类型(次生林、灌丛、农田、草地等,裸地为参考土壤)的研究中发现,不同植被 CPMI 随土壤深度的变化规律基本一致,随着土层深度的增加先减小后增加再减小。本研究中 CPMI 随着土层先增加后减小,随着土层加深,CPAI 和 CPMI 总体呈下降趋势,表明下层土壤的稳定碳库和活性碳库间的转化与养分循环慢慢下降。因为在 0—10 cm 土层,CK 的 SOC 含量大约是 SP、PP 的两倍,所以在该土层各处理 CPI 较低,导致 CPMI 值较小。两种植模式虽然降低了 0—10cm 土层的 SOC 含量,但显著提高了该土层的 SOC 的活性。在 10—20 cm 土层,两种桃树种植模式 CPMI 达到最大值,表明在该土层两种桃树种植模式相较于 CK,其 SOC 含量及活性有机碳含量相对较高。综上,SP 碳库的有机碳活度略高于 PP,PP 具有较高的碳积累能力和碳库稳定性,土壤碳库质量较好。

### 3.3 影响土壤有机碳库及其组分的环境因子

相关分析表明质地、pH、C/N 等土壤理化因子与有机碳组分具有强相关性;冗余分析结果表明有机碳及其组分在不同种植模式之间具有较好的分异性;双因素方差分析结果显示,不同桃树种植模式、土层深度以及二者的交互作用对土壤有机碳组分及其分配比例具有不同程度的影响;另外,RDA 结果说明砂粒、pH、TP、C/N 是影响不同种植模式以及土层深度 SOC 及其组分的主要环境因子。土壤质地通过调节土壤的物理结构、土壤水分等,改变微生物以及酶的活性,影响有机质分解的过程,进而影响 SOC 和活性有机碳组分含量<sup>[39]</sup>。有学者在滇中尖山流域研究中发现园地的 SOC 与砂粒含量之间呈极显著的负相关<sup>[40]</sup>。然而,本研究中砂粒含量随土层变化的趋势与 SOC 含量的变化趋势一致,且砂粒分别与 POXC、POC、MAOC 组分呈极显著的正相关。双因素方差分析结果显示,桃树种植模式、土层深度以及土层深度的交互作用显著影响了 POC 以及 MAOC 的分配比例。滕秋梅等<sup>[17]</sup>研究发现植被类型和土层深度共同影响着喀斯特山区土壤 SOC 和活性有机碳的含量。本研究中,SP 的砂粒含量高于 PP,同时,随着土层深度的增加,PP 和 SP 间砂粒含量差异逐渐增大。砂粒含量影响了有机碳组分的形成过程,可能导致不同桃树种植模式以及不同土层间 SOC 及其组分的差异性。颗粒组成影响土壤的孔隙结构,PP 土壤中砂粒含量较低可能阻碍了水分以及气体在土壤中的移动与分布,毛细管作用增强、气体连通性减弱,降低微生物群落的组成与活性,进而限制 SOC 的周转,导致 POC 含量降低<sup>[41—42]</sup>。本研究中两桃树种植模式的成土母质以及土壤形成过程等具有一致性<sup>[43]</sup>。根据土壤各粒径分配比例,土壤质地均为粘土土壤。由于该地区空间异质性较强<sup>[44]</sup>,同时砂粒含量所占比例较小,数值分布在 0.69%—5.69%之间,因此,在统计结果上两者的砂粒含量略有差异。另外,由于 SOC 的“表聚现象”<sup>[17]</sup>以及各土层的理化性质随着土层深度的加深逐渐升高/降低且具有一定的差异性,可能相对放大了土层深度对结果的影响。

氮磷元素的添加可减缓土壤的氮磷限制,氮磷作为重要的土壤养分因子,其含量的多少以及化学计量比影响土壤中氮磷养分可利用性,改变土壤中微生物群落结构从而改变不同酶的活性,最终影响 SOC 的含量与质量<sup>[45]</sup>。本研究中 PP 的氮磷含量均高于 SP,较多的氮输入可能促进了不稳定组分(POC)的分解<sup>[46]</sup>;同时,较多的磷输入可能导致较低的微生物生物量(特别是真菌),进而抑制稳定组分(MAOC)的分解<sup>[47]</sup>。作为土壤肥力的关键指标,氮磷也可通过影响植物的生长水平,从而改变有机质的输入,进而影响 POXC 的含量<sup>[48]</sup>。另一方面,SOC 和全氮的比值(C/N)可以指示 SOC 的矿化能力,评价土壤有机物的分解程度,其值越高有机物的分解程度越低,有机碳趋于积累<sup>[49]</sup>。PP 施加了更多的氮肥而导致表层土壤 N 含量相对增多,使得在 0—10cm 土层 C/N 比值显著低于 SP,提高了土壤微生物的活性,加快了 SOC 的分解<sup>[50]</sup>,因此在该土层 PP 的



SOC 及活性有机碳组分的含量相较于 SP 较低。土壤 pH 则反映了土壤系统整体的化学状态,它对 SOC 的影响是一个重要且复杂的过程,本研究中两种桃树种植模式下土壤呈酸性,pH 与 POXC、POC 和 MAOC 呈极显著正相关,PP 的 pH 低于 SP,土壤环境酸性更强则土壤微生物的数量减少,微生物的生长和活动受到抑制,降低活性有机碳组分的合成以及 SOC 的分解<sup>[51]</sup>。因此,PP 的活性有机碳组分占比较低,SOC 的含量相对较高。SOC 的形成与固存是复杂且多变的过程,土壤质地、pH、养分水平等因子的共同作用改变了 SOC 的周转过程,最终影响 SOC 及其组分的含量<sup>[52]</sup>。

#### 4 结论

本文对滇南地区不同桃树种植模式下土壤有机碳及其组分以及土壤碳库的变化情况进行分析,并探究其主要的环境影响因子。结果表明:(1)桃树种植改变了 SOC 及其组分,两种植模式的 SOC 含量相较于 CK 较低,PP 的 SOC、POXC、MAOC 平均含量均高于 SP,而 POC 平均含量低于 SP。(2)活性有机碳组分分配比例(POXC/SOC、POC/SOC)以及 POC/MAOC 值的均值均表现为 SP>PP,SP 的 SOC 活性更高,PP 的 SOC 较稳定,有利于有机碳的积累。(3)不同种植模式改变了土壤有机碳库以及活性有机碳库,SP、PP 的 CPMI 均小于 CK;SP 的碳库活度略高于 PP,PP 具有较高的 CPMI 和碳库稳定性,土壤碳库质量较好。(4)双因素方差分析表明不同桃树种植模式、土层深度以及二者的交互作用对土壤有机碳组分及其分配比例存在不同程度的影响。(5)相关分析和冗余分析的结果均表明砂粒、pH、TP、C/N 是影响不同桃树种植模式以及不同土层下 SOC 及其组分主要的环境因子。PP 的综合效果更好,有利于 SOC 的固存,是较为合理的种植模式。分析不同活性的有机碳组分可为揭示人类活动或全球环境变化背景下 SOC 的变化提供更细致和深入的视角。经果林的种植应根据土壤性质(如土壤质地、pH)、碳库基本情况和氮磷等养分的有效性采取适宜的管理措施,在提高经济效益的同时,增强固碳效率和碳汇水平。

#### 参考文献(References):

- [1] Lal R, Follett R F, Stewart B A, Kimble J M. Soil carbon sequestration to mitigate climate change and advance food security. *Soil Science*, 2007, 172(12): 943-956.
- [2] Deb S, Bhadoria P B S, Mandal B, Rakshit A, Singh H B. Soil organic carbon: towards better soil health, productivity and climate change mitigation. *Climate Change and Environmental Sustainability*, 2015, 3(1): 26.
- [3] Bailey V L, Pries C H, Lajtha K. What do we know about soil carbon destabilization? *Environmental Research Letters*, 2019, 14(8): 083004.
- [4] Blair G J, Lefroy R, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459.
- [5] Granatstein D, Andrews P, Groff A. Productivity, economics, and fruit and soil quality of weed management systems in commercial organic orchards in Washington State, USA. *Organic Agriculture*, 2014, 4(3): 197-207.
- [6] 张维理, KOLBE H, 张认连. 土壤有机碳作用及转化机制研究进展. *中国农业科学*, 2020, 53(2): 317-331.
- [7] 张坤. 幼龄果园间作对土壤有机碳组分含量及活性的影响. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [8] 李萍, 荀咪, 岳松青, 曹辉, 冯丰, 范伟国, 杨洪强. 果园土壤有机碳及呼吸速率对豆科和禾本科草类的差异反应. *水土保持学报*, 2018, 32(6): 327-332.
- [9] 张洋, 刘月娇, 倪九派, 谢德体. 柑橘/大球盖菇间作对三峡库区紫色土活性有机碳库的影响. *草业学报*, 2015, 24(5): 53-65.
- [10] 徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 祝滔. 缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响. *环境科学*, 2013, 34(10): 4009-4016.
- [11] 袁嘉欣, 杨滨娟, 胡启良, 唐海鹰, 李淑娟, 黄国勤. 长江中游稻田种植模式对土壤有机碳及碳库管理指数的影响. *中国生态农业学报: 中英文*, 2021, 29(7): 1205-1214.
- [12] 王宇, 张华, 张贵, 王波, 彭淑惠, 何绕生, 周翠琼. 喀斯特断陷盆地环境地质分区及功能. *中国岩溶*, 2017, 36(3): 283-295.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] Marriott E E, Wander M M. Total and labile soil organic matter in organic and conventional farming systems. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(3): 950-959.
- [15] Weil R R, Stine M A, Islam K R, Gruver J B, Samson-Liebig S. Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. *American Journal of Alternative Agriculture*, 2003, 18(1): 3-17.

- [16] Bai Z G, Caspari T, Gonzalez M R, Batjes N H, Mäder P, Bünenmann E K, de Goede R, Brussaard L, Xu M G, Ferreira C S S, Reintam E, Fan H Z, Mihelič R, Glavan M, Tóth Z. Effects of agricultural management practices on soil quality: a review of long-term experiments for Europe and China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 265: 1-7.
- [17] 滕秋梅, 沈育伊, 徐广平, 张中峰, 张德楠, 周龙武, 黄科朝, 孙英杰, 何文. 桂北喀斯特山区不同植被类型土壤碳库管理指数的变化特征. *生态学报*, 2020, 39(2): 422-433.
- [18] 霍海南, 李杰, 张效琛, 朱平, 王立春, 石元亮, 何红波, 张旭东. 不同施肥管理措施对农田土壤中植物和微生物残留组分的影响. *应用生态学报*, 2020, 31(9): 3060-3066.
- [19] Morugán-Coronado A, Linares C, Gómez-López M D, Faz Á, Zornoza R. The impact of intercropping, tillage and fertilizer type on soil and crop yield in fruit orchards under Mediterranean conditions: a meta-analysis of field studies. *Agricultural Systems*, 2020, 178: 102736.
- [20] Bongiorno G, Bünenmann E K, Oguejiofor C U, Meier J, Gort G, Comans R, Mäder P, Brussaard L, de Goede R. Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe. *Ecological Indicators*, 2019, 99: 38-50.
- [21] Kravchenko A N, Guber A K, Razavi B S, Koestel J, Quigley M Y, Robertson G P, Kuzyakov Y. Microbial spatial footprint as a driver of soil carbon stabilization. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 3121.
- [22] 白义鑫, 盛茂银, 胡琪娟, 赵楚, 吴静, 张茂莎. 西南喀斯特石漠化环境下土地利用变化对土壤有机碳及其组分的影响. *应用生态学报*, 2020, 31(5): 1607-1616.
- [23] Hurisso T T, Culman S W, Horwath W R, Wade J, Cass D, Beniston J W, Bowles T M, Grandy A S, Franzluebbers A J, Schipanski M E, Lucas S T, Ugarte C M. Comparison of permanganate-oxidizable carbon and mineralizable carbon for assessment of organic matter stabilization and mineralization. *Soil Science Society of America Journal*, 2016, 80(5): 1352-1364.
- [24] Franzluebbers A J, Stuedemann J A. Particulate and non-particulate fractions of soil organic carbon under pastures in the Southern Piedmont USA. *Environmental Pollution*, 2002, 116: S53-S62.
- [25] Kantola I B, Masters M D, DeLucia E H. Soil particulate organic matter increases under perennial bioenergy crop agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 113: 184-191.
- [26] 付智丹, 周丽, 陈平, 杜青, 庞婷, 杨文钰, 雍太文. 施氮量对玉米/大豆套作系统土壤微生物数量及土壤酶活性的影响. *中国生态农业学报*, 2017, 25(10): 1463-1474.
- [27] 张世汉, 武均, 张仁陟, 蔡立群, 齐鹏, 张军. 施氮对陇中黄土高原旱作农田土壤颗粒态有机碳的影响. *水土保持研究*, 2019, 26(6): 7-11.
- [28] 李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊. 缙云山不同土地利用方式土壤有机碳组分特征. *生态学报*, 2015, 35(11): 3733-3742.
- [29] Romero C M, Engel R E, D'Andrilli J, Chen C C, Zabinski C, Miller P R, Wallander R. Patterns of change in permanganate oxidizable soil organic matter from semiarid drylands reflected by absorbance spectroscopy and Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry. *Organic Geochemistry*, 2018, 120: 19-30.
- [30] Curtin D, Beare M H, Qiu W W, Sharp J. Does particulate organic matter fraction meet the criteria for a model soil organic matter pool? *Pedosphere*, 2019, 29(2): 195-203.
- [31] Cotrufo M F, Ranalli M G, Haddix M L, Six J, Lugato E. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. *Nature Geoscience*, 2019, 12(12): 989-994.
- [32] 刘亚男, 郝敏, 张希丽, 于政达, 孔范龙. 中国湿地碳储量分布特征及其影响因素. *应用生态学报*, 2019, 30(7): 2481-2489.
- [33] 章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧. 红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征. *环境科学*, 2020, 41(3): 1466-1473.
- [34] 陈高起, 傅瓦利, 沈艳, 伍宇春, 胡宁, 文志林. 岩溶区不同土地利用方式对土壤有机碳及其组分的影响. *水土保持学报*, 2015, 29(3): 123-129.
- [35] 闫丽娟, 李广, 吴江琪, 马维伟, 王海燕. 黄土高原 4 种典型植被对土壤活性有机碳及土壤碳库的影响. *生态学报*, 2019, 39(15): 5546-5554.
- [36] 张亚杰, 钱慧慧, 李伏生, 苏以荣. 不同土地管理和利用方式喀斯特坡地养分和碳库管理指数的差异. *中国岩溶*, 2016, 35(1): 27-35.
- [37] 韩明政, 田估, 姚允聪, 张杰. 土壤碳库对苹果幼树间作芳香植物的响应研究. *北京农学院学报*, 2020, 35(3): 28-32.
- [38] 龙攀, 苏姗, 黄亚男, 李超, 肖志祥, 祝志娟, 刘莉, 傅志强. 双季稻田冬季种植模式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 1135-1142.
- [39] Wiesmeier M, Urbanski L, Hobbey E, Lang B, von Lützow M, Marin-Spiotta E, van Wesemael B, Rabot E, Ließ M, Garcia-Franco N, Wollschläger U, Vogel H J, Kögel-Knabner I. Soil organic carbon storage as a key function of soils-A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, 2019, 333: 149-162.



- [40] 张华渝,王克勤,宋娅丽. 滇中尖山河流域不同土地利用类型土壤粒径分布对土壤有机碳组分的影响. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(4): 93-100.
- [41] Kravchenko A N, Guber A K. Soil pores and their contributions to soil carbon processes. *Geoderma*, 2017, 287: 31-39.
- [42] 张维俊,李双异,徐英德,刘旭,安婷婷,朱平,彭畅,汪景宽. 土壤孔隙结构与土壤微环境和有机碳周转关系的研究进展. 水土保持学报, 2019, 33(4): 1-9.
- [43] 欧阳宁相,张杨珠,盛浩,周清. 中国南方富铁铝化土壤土系建立进展. 土壤, 2021, 53(5): 907-915.
- [44] 段兴武,洪欢. 云南土壤地理. 北京: 科学出版社, 2019.
- [45] 王玉鑫,付晓莉,王辉民,戴晓琴,寇亮,方向民. 氮磷添加对杉木根叶分解残余物微生物群落结构及酶活性的影响. 生态学报, 2021, 41(13): 5408-5416.
- [46] Zhang J F, Sayer E J, Zhou J G, Li Y W, Li Y X, Li Z A, Wang F M. Long-term fertilization modifies the mineralization of soil organic matter in response to added substrate. *Science of the Total Environment*, 2021, 798: 149341.
- [47] Yuan X, Qin W K, Xu H, Zhang Z H, Zhou H K, Zhu B. Sensitivity of soil carbon dynamics to nitrogen and phosphorus enrichment in an alpine meadow. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 150: 107984.
- [48] Zhang H, Wu P B, Fan M M, Zheng S Y, Wu J T, Yang X H, Zhang M, Yin A J, Gao C. Dynamics and driving factors of the organic carbon fractions in agricultural land reclaimed from coastal wetlands in Eastern China. *Ecological Indicators*, 2018, 89: 639-647.
- [49] 谢钧宇,孟会生,焦欢,洪坚平,张杰,李丽娜,黄晓磊,栗丽,赵林婷,李廷亮. 施肥对复垦土壤中活性和难降解碳氮组分的影响. 应用与环境生物学报, 2019, 25(5): 1113-1121.
- [50] Wang S Y, Lu Y, Wen X F, Sun K, Jia J J, Li Z X, Gao Y. Long-term effects of nitrogen deposition on carbon assimilation characteristics in the past three decades in a typical subtropical watershed. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 308/309: 108561.
- [51] Rasmussen C, Heckman K, Wieder W R, Keiluweit M, Lawrence C R, Berhe A A, Blankinship J C, Crow S E, Druhan J L, Hicks Pries C E, Marin-Spiotta E, Plante A F, Schädel C, Schimel J P, Sierra C A, Thompson A, Wagai R. Beyond clay: towards an improved set of variables for predicting soil organic matter content. *Biogeochemistry*, 2018, 137(3): 297-306.
- [52] 汪景宽,徐英德,丁凡,高晓丹,李双异,孙良杰,安婷婷,裴久渤,李明,王阳,张维俊,葛壮. 植物残体向土壤有机质转化过程及其稳定机制的研究进展. 土壤学报, 2019, 56(3): 528-540.