

水土保持对油桃园土壤有机碳库及其组分的影响

王义祥, 黄毅斌, 叶菁, 王成己, 翁伯琦*, 应朝阳

(福建省农业科学院农业生态研究所, 农业部福州农业环境科学观测实验站, 福州 350013)

摘要:以福建尤溪玉池果园水土流失定位观测点为平台,研究了不同水土保持工程措施对油桃园土壤有机碳及其组分的影响。结果表明,梯台清耕和梯台生草模式油桃园土壤有机碳密度较顺坡清耕模式分别提高 18.3%和 34.7%。梯台生草模式土壤有机碳含量分别比顺坡清耕和梯台清耕模式提高 15.3%和 46.5%, 颗粒有机碳、轻组有机碳、可溶性有机碳和微生物量碳含量分别提高了 17.6%和 30.9%、60.4%和 112.7%、6.5%和 24.3%、42.2%和 45.3%,说明生草栽培措施有利于改良果园土壤结构,提高土壤肥力。梯台生草模式土壤惰性有机碳含量也比顺坡清耕和梯台清耕模式分别提高 39.1%和 39.0%,说明生草栽培也可促进果园土壤稳定性碳库的增加。

关键词:水土保持;油桃园;土壤;有机碳组分

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)04-0803-07 doi:10.11654/jaes.2014.04.027

Effects of Different Soil Conservation Measures on Soil Organic Carbon Pools in Nectarine Orchard

WANG Yi-xiang, HUANG Yi-bin, YE Jing, WANG Cheng-ji, WENG Bo-qi*, YING Zhao-yang

(Institute of Agricultural Ecology, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou Scientific Observing and Experimental Station of Agro-Environment, Ministry of Agriculture, P.R. China, Fuzhou 350013, China)

Abstract: Soil organic carbon (C) is greatly influenced by soil management practices. Here we compared the effects of different soil conservation measures on soil organic C fractions in nectarine orchard. There were three soil management practices: slope plus clean tillage (T_1), terrace plus clean tillage (T_2) and terrace plus sod culture (*Arachis pinto* mulching) (T_3). Soil organic C content in T_3 orchard was 46.5% higher than in T_1 and 15.3% higher than in T_2 . Compared with T_1 , the contents of particulate organic C (POC), light fraction of organic C (LFOC), dissolved organic C (DOC) and microbial biomass C (MBC) increased by 17.6%, 60.4%, 6.5% and 42.2% in T_2 orchard, and 30.9%, 112.7%, 24.3% and 45.3% in T_3 , respectively. Resistant organic C content in T_3 was over 39% greater than in T_1 or T_2 . Our results show that sod culture would increase soil organic C and improve soil fertility.

Keywords: soil conservation measures; nectarine orchard; soil; organic carbon fractions

我国东南红壤丘陵区占全国土地总面积的 11.8%, 其中浙、赣、湘、闽、两广、琼 7 省区土地面积的 45% 为低丘红壤, 是世界上一个重要的生态类型区, 同时该区域也是我国热带、亚热带经济林果、茶叶的重要生产基地^[1]。就代表省份之一福建省而言, 2011 年福建省果园面积近 54 万 hm^2 , 占全省总面积的 4.4%, 占人工林面积的 23%。但由于长期以来对土地资源不合

理的开发与利用, 水土流失和土地退化严重。据报道, 我国东南丘陵区水土流失面积达 800 000 km^2 , 其中严重侵蚀地占 165 000 km^2 。2007 年福建省水土流失面积 9615 km^2 , 占全省土地总面积的 7.9%。近期全省山地开发水土流失现状调查显示, 百亩以上连片开发的山地果园、茶园、旱地和其他园地造成的水土流失面积为 2793 km^2 , 约占全省水土流失总面积的 1/5, 尤其是山地茶果园开发, 占水土流失面积的 85.1%^[2]。因此, 采取有效的水保工程措施来防治果园开发地的水土流失已成为红壤丘陵山区农业综合开发中首要解决的问题。

土壤有机碳 (Soil organic carbon, SOC) 是表征土

收稿日期: 2013-08-16

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划课题“2012BAD14B03”; 公益性行业(农业)科研专项(201103005); 福建省科技计划项目

作者简介: 王义祥(1978—), 男, 山东泰安人, 博士, 副研究员, 主要从事恢复生态与红壤保育研究。E-mail: sd_wolong@163.com

* 通信作者: 翁伯琦 E-mail: wengboqi@163.com

壤质量的重要指标,根据其功能和稳定性的不同可以分成不同的组分。同时,土壤有机碳组分研究也是探知土壤有机碳在经营管理措施下变化的重要环节。已有研究发现,土壤有机碳中有一些组分对土地利用方式等因子变化的反应比总有机碳更敏感,这部分碳被称为活性有机碳,可作为有机碳早期变化的指示物^[4]。杨长明等对不同土地利用方式对土壤活性有机碳影响的研究表明,与传统小麦、玉米轮作的粮田相比,果树栽培显著提高了土壤易氧化有机碳、颗粒有机碳、轻组有机碳和水溶性有机碳含量和分配比例^[5]。惰性组分决定着土壤有机碳的储备,因而在土壤有机碳稳定性研究中备受重视^[6]。一些研究认为,结构复杂、性质稳定的某些有机质如土壤腐殖质,抵抗土壤微生物分解的能力高于其他结构简单、活性较强的有机质,具有较高的稳定性。但也有大量研究表明,土壤有机碳的稳定性并不单一地取决于土壤有机质化学组成的差异,其他方面的许多因素都能影响土壤有机碳的稳定性^[7]。尽管目前不同研究所采用的分组方法存在一定差异,但分组方法的应用有利于加深对有机碳稳定性机制的认识^[8]。另外,目前有关不同水保工程措施下果园土壤有机碳组分变化及稳定性的影响研究少见报道。因此,本研究以定位试验为平台,结合土壤物理和化学分组方法,比较研究长期采用水保工程措施对果园土壤有机碳组分的化学结构、库存与分配的变化,旨在为果园土壤碳循环研究和合理的地被管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于福建省尤溪县西城镇玉池村,北纬 $26^{\circ}25'$,东经 $117^{\circ}57'$,属中亚热带季风性湿润气候,夏季暖热,冬季温凉,春夏多雨,降水丰富。年平均气温 19.2°C ,1月份月平均气温 $8.0\sim 12.0^{\circ}\text{C}$,7月份月平均气温 $26.6\sim 28.9^{\circ}\text{C}$ 。光照资源比较丰富,全年光照时数为 $4\,422.8\text{ h}$ 。年平均降雨量 $1\,620.6\text{ mm}$,年均蒸发量 $1\,346.4\text{ mm}$,年内降水分布不均匀,10月至次年1

月是少雨季,合计雨量仅占年雨量的13%左右;2—6月为春雨、梅雨季,大雨暴雨较多,合计雨量约占年雨量的62%。

1.2 试验设计

本研究以尤溪玉池水土流失定位观测点为平台,试验地坡向为东南方向,坡度 15° ;成土母质为花岗岩坡积物,土壤类型为红壤,供试果树为种植年限15年的油桃树(*Prunus persica* var. *nectarina* Maxim),试验地初始(1996年)土壤基础理化性状见表1。试验共设3个水保措施处理,分别为顺坡开垦+清耕(T_1)、梯台开垦+清耕(T_2)、梯台开垦+套种平托花生(*Arachis pintoi*)(T_3),牧草套种方式为带状,每个处理3个重复,每个处理小区面积为 100 m^2 ,随机排列,具体的试验处理见表2。本试验自1996年开始,试验前各处理小区的海拔、坡度、坡向等立地条件基本一致。试验过程中所有小区果树的施肥管理相同,每年施肥2~3次,肥料为复合肥,每年施肥量根据果树长势和产果量而定,不施用有机肥。施肥点在每株油桃树冠滴水线附近,挖条形沟(宽 15 cm 、深 10 cm),均匀撒入肥料后即覆土。

1.3 土壤取样

于2009年4月下旬在每个小区按S形布设取样点5个,调查土壤剖面特征,用环刀法测定土壤容重,

表1 果园试验地初始土壤基本理化性状

Table 1 Basic physical and chemical properties of orchard soil at beginning

基本理化性质	土层深度	
	0~20 cm	20~40 cm
物理性砂粒(>0.01 mm)/%	45.05	42.01
物理性粘粒(<0.01 mm)/%	54.95	58.00
pH	4.35	4.39
有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	23.10	20.30
CEC/ $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	7.35	6.09
全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.96	0.79
全磷/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.23	0.23
碱解氮/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	100.85	92.35
速效钾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	31.60	19.55

表2 试验处理

Table 2 Field experimental design

编号	处理	处理情况
T_1	顺坡+油桃+清耕	25 m长的小区坡面顺坡种植8株果树,坡面自然长草,每年中耕除草3~4次。
T_2	梯台+油桃+清耕	25 m长的小区坡面修建成8个梯台,台面宽4 m,每个梯台中间开挖直径80 cm、深80 cm的坑,种一株果树,台面自然长草,每年中耕除草3~4次。
T_3	梯台+油桃+平托花生	小区梯台同 T_2 ,梯台的埂种植百喜草和南非马唐,台面种植平托花生(<i>Arachis pintoi</i>),果树种植方式同 T_2 。

3次重复,每个取样点分0~20 cm和20~40 cm取原状土样,大小约为20 cm×20 cm,然后按四分法取混合土样1 kg,在阴凉处风干后备用。

1.4 测定内容与方法

土壤颗粒有机碳(Particle organic carbon,POC)的测定按照 Franzluebbbers 和 Stuedemann 的方法,通过湿筛法获得 53~2000 μm 的颗粒组分^[9];土壤轻组有机碳(Light fraction organic carbon,LFOC)测定参照 Besnard 等的相对密度分组法^[10],所用重液是密度为 $1.7\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的 NaI 溶液;土壤水溶性有机碳(Dissolved organic carbon,DOC)分析用 Ghani 等的方法^[11];土壤微生物生物量碳(Microbial biomass carbon,MBC)测定采用氯仿熏蒸- K_2SO_4 浸提法^[12];惰性有机碳(Resistant organic carbon,ROC)采用 $6\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HCl 酸水解法^[13]。浸提液有机碳浓度用岛津 TOC-VCPH 仪测定,土壤有机碳测定采用重铬酸钾-外加加热法^[14]。

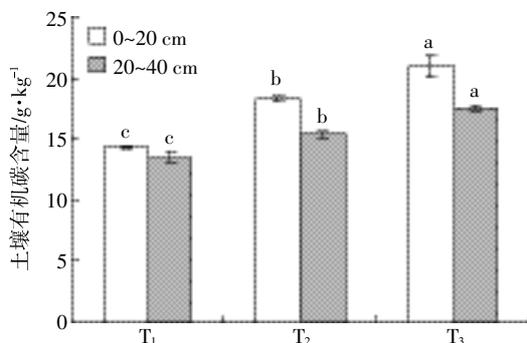
1.5 数据处理

利用 Microsoft Excel 2003 和 DPS 7.05 统计分析软件进行数据计算处理及差异显著性检验和相关性分析,多重比较采用 LSD 法。

2 结果分析

2.1 水保措施对土壤总有机碳的影响

由图1可以看出,0~20 cm 土层土壤有机碳含量和碳密度的变化趋势均为 $T_3>T_2>T_1$,其中 T_3 处理的土壤有机碳含量分别比 T_1 和 T_2 处理提高 46.5%和 15.3%,且其与 T_1 和 T_2 处理间的差异均达到显著性水平。 T_3 处理土壤有机碳密度分别比 T_1 和 T_2 处理提高 34.7%和 13.9%,其与 T_2 处理间的差异不显著,但与



不同小写字母表示处理间的差异显著($P<0.05$)。下同
Significant differences of different treatments were showed by small letters ($P<0.05$). The same as below

图1 不同水保措施处理土壤有机碳含量

Figure 1 SOC contents of orchard soils under different soil conservation measures

T_1 处理间存在显著性差异(图2)。0~20 cm 和 20~40 土层 T_2 处理土壤有机碳密度较 T_1 处理分别提高 18.3%和 14.7%,且其间的差异均达到显著性水平。就垂直分布而言, T_1 、 T_2 和 T_3 处理土壤有机碳含量和碳密度均随着土层的加深而减少,其中 T_1 、 T_2 和 T_3 处理的 0~20 cm 土层土壤有机碳含量分别比 20~40 cm 土层高 6.3%、18.4%和 19.8%,并以 T_3 处理的垂直变化较大。

2.2 水保措施对土壤活性有机碳的影响

由图3可以看出,3个处理土壤水溶性有机碳含量均为0~20 cm 土层>20~40 cm 土层,这与土壤有机碳的变化规律一致。0~20 cm 土层中, T_3 处理水溶性有机碳分别比 T_1 和 T_2 处理增加 24.3%和 6.5%,其中 T_2 和 T_3 处理与 T_1 处理间的差异达到显著性水平,而 T_2 和 T_3 处理间的差异不显著。20~40 cm 土层, T_3 处理水溶性有机碳含量分别比 T_1 和 T_2 处理增加 36.6%和 20.2%,其中 T_3 与 T_1 处理间差异显著,而 T_2 和 T_3 处理以及 T_1 和 T_2 处理间的差异不显著。相对 0~20 cm 土层而言,20~40 cm 土层 T_3 处理水溶性有机碳含量

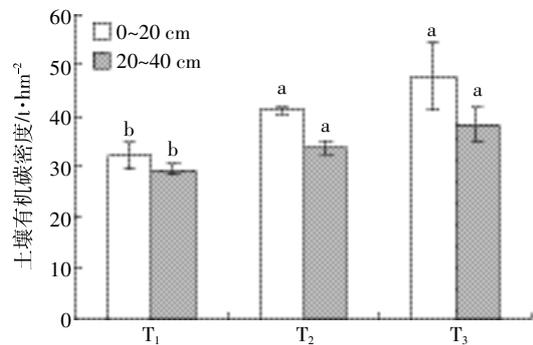


图2 不同水保措施处理土壤有机碳密度

Figure 2 SOC densities of orchard soils under different soil conservation measures

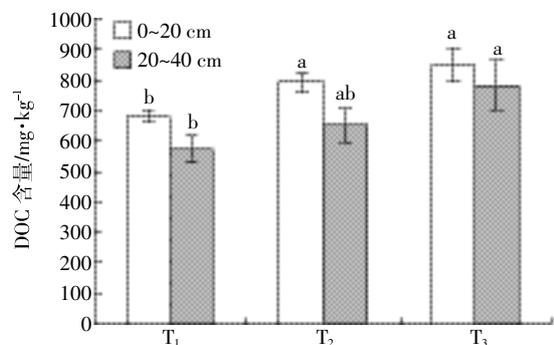


图3 不同水保措施下土壤可溶性有机碳含量

Figure 3 DOC contents of orchard soils under different soil conservation measures

比 T_1 和 T_2 处理的增幅变大,可能是因为上层有机碳矿化产生的简单有机分子又随下渗水下渗而产生积聚的结果。

由图 4 可知, 0~20 cm 土层 T_3 处理微生物量碳含量分别比 T_1 和 T_2 处理提高 45.3% 和 42.2%, 且与 T_1 和 T_2 处理间的差异达到显著水平; 20~40 cm 土层 T_3 处理微生物量碳含量分别比 T_1 和 T_2 处理提高 40.0% 和 29.8%。两个土层 T_2 处理微生物量碳含量比 T_1 处理分别高 2.2% 和 0.87%, 但两个处理间的差异不显著。就不同土层而言, T_1 、 T_2 和 T_3 处理 0~20 cm 土壤微生物量碳含量分别比 20~40 cm 土层增加 10.3%、11.7% 和 22.4%, 表现为随着土层加深, 土壤微生物量碳含量降低。

2.3 水土保持措施对土壤非保护性有机碳的影响

轻组有机质具有较高潜在的生物活性, 是土壤中不稳定有机碳库的重要组成。轻组部分虽然只占土壤有机碳总量的很小部分, 但它的含碳量对土壤有机碳的贡献是不能被忽略的。由图 5 可知, 0~20 cm 土层 T_3 处理轻组有机碳含量分别比 T_1 和 T_2 处理提高 112.7%

和 60.4%, 且与 T_1 和 T_2 处理间的差异达到显著性水平; 而 20~40 cm 土层 T_1 、 T_2 和 T_3 处理间的差异不显著, 与土壤总有机碳含量的变化规律一致。

颗粒态有机碳(POC)采用颗粒分组法获得, 是与砂粒结合(53~2000 μm)的有机碳部分, 周转期为 5~20 a, 属于有机质中慢库^[15]。颗粒态有机碳被认为是土壤有机碳库中活动性较大的碳库, 对土壤环境和管理措施的变化十分敏感^[16]。由图 6 可以看出, T_3 处理颗粒有机碳含量分别比 T_1 和 T_2 处理增加 30.15%~30.86% 和 5.81%~17.61%。0~20 cm 土层, T_1 与 T_3 处理间的差异达到显著性水平, 而 20~40 cm 土层 3 个处理间的差异均不显著。这可能是因为颗粒有机碳是与土壤粘粒和粉粒复合的、性质稳定的老有机碳, 易被地表水流携带流失。

2.4 水土保持措施对土壤惰性有机碳的影响

利用酸水解(盐酸或硫酸)对有机碳分组, 经水解作用的有机碳可分为活性和惰性有机碳^[17]。由图 7 可知, T_1 、 T_2 和 T_3 处理土壤惰性有机碳含量均呈现为 0~20 cm 土层高于 20~40 cm 土层, 其中 T_3 处理的 0~20

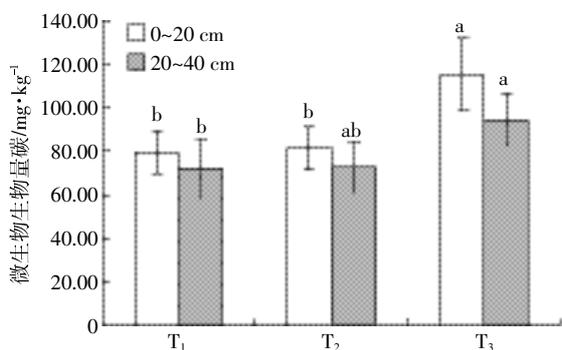


图 4 不同水土保持措施下果园土壤微生物量碳含量

Figure 4 MBC contents of orchard soils under different soil conservation measures

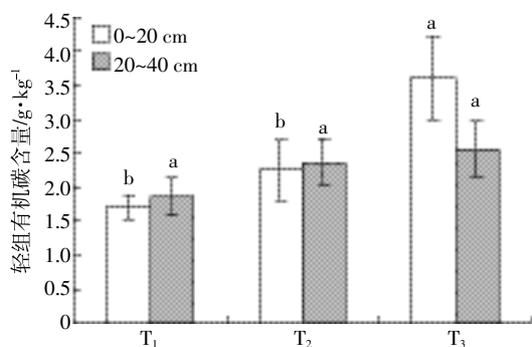


图 5 不同水土保持措施下果园土壤轻组有机碳含量

Figure 5 LFOC contents of orchard soils under different soil conservation measures

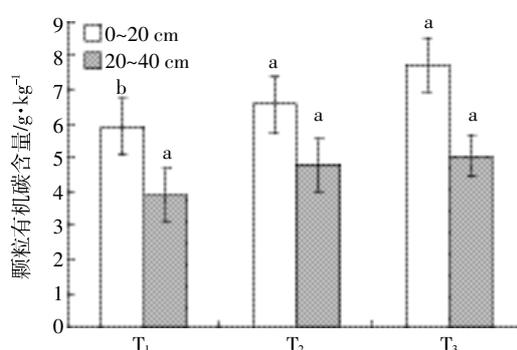


图 6 不同水土保持措施下果园土壤颗粒有机碳含量

Figure 6 POC contents of orchard soils under different soil conservation measures

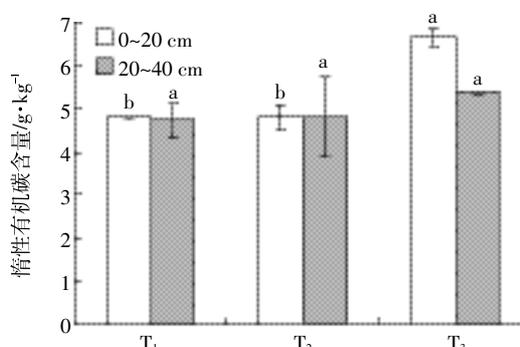


图 7 不同水土保持措施下果园土壤惰性有机碳含量

Figure 7 ROC contents of orchard soils under different soil conservation measures

cm 土层与 20~40 cm 土层间的差异达到显著性水平。0~20 cm 土层, T_3 处理土壤惰性有机碳含量分别比 T_1 和 T_2 处理提高 39.1% 和 39.0%, 且与 T_1 与 T_2 处理间的差异达到显著性水平, 但 T_1 与 T_2 处理间的差异不显著。20~40 cm 土层, T_1 、 T_2 和 T_3 处理土壤惰性有机碳含量间均没有显著性差异。

2.5 水保措施对各组分占总有机碳比例的影响

由图 8 可以看出, 各处理 MBC/TOC、DOC/TOC、LFOC/TOC、POC/TOC 的大小顺序均为 $T_3 > T_2 > T_1$, 说明梯台生草相对顺坡清耕和梯台清耕可以提高土壤有机碳库中活性有机碳的比例; 而 ROC/TOC 表现为 $T_1 > T_3 > T_2$, 这是由于顺坡清耕处理易因土壤侵蚀作用引起土壤活性有机碳的分解和流失, 导致土壤中惰性有机碳比例的增加。 T_3 处理的 LFOC/TOC 分别比 T_1 和 T_2 处理增加 45.2% 和 39.1%, 且高于 MBC/TOC、DOC/TOC、POC/TOC 和 ROC/TOC 的增幅。

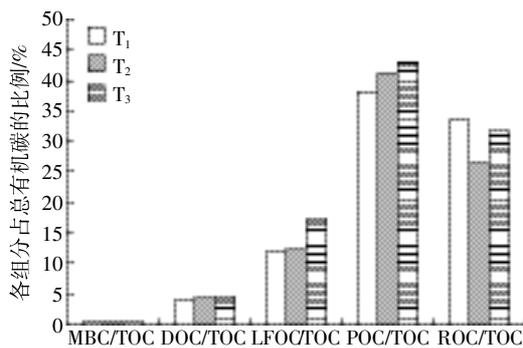


图 8 不同有机碳组分占总有机碳的比例

Figure 8 Percentages of different organic carbon fractions to total soil organic carbon

3 讨论

土壤有机碳是一种有机物质的异质混合物, 其不同的形态或组分可能对土壤肥力或质量产生不同的影响。研究发现, 土壤颗粒有机碳和轻组有机碳对不同耕作方式和秸秆还田处理的反应更为迅速^[18], 可作为反映因农业管理措施的改变而导致的土壤质量变化的敏感性指标。颗粒有机碳处于半分解状态, 一般被认为是处于新鲜的动植物残体和腐殖化有机物之间暂时的或过渡性的有机碳库。Cambardella 和 Elliot 研究发现, 颗粒有机碳在草地、裸地休闲、残茬覆盖和免耕土壤中的含量分别为 39%、18%、19% 和 25%, 免耕可减少以耕作和通气作用损失的颗粒有机碳, 与裸地休闲相比, 在免耕处理下以颗粒态存在的有机质组分具有更高的 C/N^[19]。王燕飞研究表明, 果园生草后,

有机碳、复合有机碳、松紧结态腐殖质、活性有机碳的含量显著增加, 松紧比显著提高, 腐殖质得到更新与活化, 土壤肥力显著提高^[20]。本研究结果表明, 果园生草免耕处理(T_3)的颗粒有机碳含量高于顺坡清耕和梯台清耕处理, 说明生草免耕耕作方式有助于提高土壤颗粒有机碳含量, 且表层增加的幅度更大^[21]。这种变化也与土壤团聚体的形成有密切关系, 生草模式增加了土壤中根系密度, 由于根系的缠绕作用, 使矿物颗粒和有机物胶结而促进团聚体的形成, 从而导致颗粒有机碳含量的变化。轻组有机碳是有机质中易改变的部分, 半衰期一般只有几周几十年, 代表着易分解的有机碳库。Bremert 研究表明, 施粪肥和牧草既能增加土壤中轻组有机质的含量, 又能增加其在土壤总有机质中的百分含量。本研究结果表明, 0~20 cm 土层果园生草处理轻组有机碳含量分别比顺坡清耕和梯台清耕处理提高 112.7% 和 60.4%, 且其间的差异达到显著性水平; 而 20~40 cm 土层各处理间的差异不显著, 说明生草处理通过根系死亡和枯枝落叶的分解可增加土壤轻组有机质的含量, 但生草处理对轻组有机碳的影响主要体现在表层。

水溶性有机碳是土壤中溶于水的可通过 0.45 μm 滤膜的有机碳, 它不仅是微生物的重要碳源, 而且对土壤养分有效性有重要的影响。水溶性有机碳主要来源于地表枯落物、腐殖质、微生物体及根系分泌物^[22]。本研究结果表明, 生草栽培处理的果园土壤水溶性有机碳含量分别比顺坡清耕和梯台清耕处理提高 6.5% 和 24.3%。这是因为植物残体和腐殖质是土壤中溶解性有机质的主要来源^[23]。相对清耕处理而言, 生草处理为土壤腐殖质提供更多的碳源, 从而增加了土壤水溶性有机碳含量。另外, 由于生草处理中牧草根系分泌大量可溶性有机物, 刺激了微生物活动, 使土壤水溶性碳含量显著增加^[24]。土壤微生物生物量碳的消长反映了微生物利用土壤碳源进行自身细胞建成并大量繁殖和微生物细胞解体使有机碳矿化的过程^[25]。本研究中生草处理微生物量碳含量比顺坡清耕和梯台清耕处理提高 42.2%~45.3%, 与土壤水溶性有机碳含量的变化趋势一致。

惰性碳库是土壤中较为稳定的部分, 土壤惰性碳含量越高, 越有利于土壤有机碳的积累。孟静娟等对 4 种农业利用方式土壤惰性碳库的研究表明, 不同农作方式土壤惰性碳含量的大小顺序为水田 > 旱地 > 桔园 > 水旱轮作, 而且惰性碳含量均是表层明显大于中层土壤^[26]。Collinse 等对长期耕作的美国中东部玉米

田土壤碳库影响的研究发现,30年后免耕模式0~20 cm土层土壤惰性有机碳比传统耕作增加了132.6%^[27]。本研究的结果表明,14年后3个处理土壤惰性有机碳含量均为0~20 cm土层大于20~40 cm土层,凋落物等外源有机物料输入和根系活动主要集中在土壤上层,结果使土壤惰性有机碳高于其他组分,有机碳的含量增加。生草处理土壤惰性有机碳含量显著高于顺坡清耕和梯台清耕处理,说明梯台生草的开发模式可增加土壤“碳汇”。

果园生草作为一项实用、高效的土壤管理方法,在欧美、日本等国已实施多年,目前欧美及日本实施果园生草面积占果园总面积的55%~70%以上,尤其在防止和减少水土流失方面效果十分明显^[28]。近期的一些研究还发现,果园生草栽培不仅可提高果园土壤肥力,而且有利于增加土壤碳储量。Liu等经过10年实验观测也发现,生草栽培表现出较强的土壤固碳潜力,每年可在1 m土壤中多固持2.85 t C·hm⁻²^[29]。本研究结果表明,14年后生草处理0~20 cm土层的土壤有机碳密度分别比顺坡清耕和梯台清耕处理提高34.7%和13.9%,其每年可多固持714.52 kgC·hm⁻²^[30]。就不同有机碳组分的增幅而言,生草处理土壤轻组有机碳的增幅最大,分别比顺坡清耕和梯台清耕处理提高112.7%和60.4%,这主要是由于生草处理通过根系死亡和枯枝落叶的分解为土壤轻组有机质提供了丰富的来源。

4 结论

相对顺坡开垦,长期采用梯台开垦方式有利于增加果园土壤有机碳库。相对顺坡清耕和梯台清耕处理,生草处理通过根系死亡和枯枝落叶向土壤输入更多碳源,刺激了微生物活动,加速了土壤有机质的转化,从而使果园土壤中颗粒有机碳、轻组有机碳和水溶性有机碳含量分别增加了17.6%和30.9%、60.4%和112.7%、6.5%和24.3%。生草处理土壤惰性有机碳含量比顺坡清耕和梯台清耕处理分别提高39.1%和39.0%。这是由于牧草残体进入土壤后,微生物易分解的有机化合物被优先利用,而残存的难降解部分在土壤中逐渐富集,说明果园梯台生草方式可提高土壤的碳汇功能。

参考文献:

[1] 赵其国,吴志东,张桃林.我国东南红壤丘陵地区农业持续发展和生态环境建设: I. 优势,潜力和问题[J].土壤,1998,30(3):113-120.

ZHAO Qi-guo, WU Zhi-dong, ZHANG Tao-lin. Sustainable agricultural development and eco-environmental construction in red earth hilly area in southeast China: I. Measure, countermeasure and advice[J]. *Soils*, 1998, 30(3):113-120.

[2] 杨凤亭,刘纪远,庄大方,等.中国东南红壤丘陵区土地利用变化的生态环境效应研究进展[J].地理科学进展,2004,23(5):43-55.
YANG Feng-ting, LIU Ji-yuan, ZHUANG Da-fang, et al. The preliminarily study on the ecological environment effects of land-use change in red earth hilly area in Southeast China[J]. *Progress in Geography*, 2004, 23(5):43-55.

[3] 陈明华.福建省山地果园水土流失现状与防治措施[J].福建水土保持,2004,16(2):20-24.
CHEN Ming-hua. The situation of soil and water loss and conservation measures of the mountain orchards in Fujian Province[J]. *Fujian Soil and Water Conservation*, 2004, 16(2):20-24.

[4] 张国,曹志平,胡婵娟.土壤有机碳分组方法及其在农田生态系统研究中的应用[J].应用生态学报,2011,22(7):1921-1930.
ZHANG Guo, CAO Zhi-ping, HU Chan-juan. Soil organic carbon fractionation methods and their applications in farm land ecosystem research: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(7):1921-1930.

[5] 杨长明,欧阳竹,杨林章,等.农业土地利用方式对华北平原土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响[J].生态学报,2006,26(12):4148-4155.
YANG Chang-ming, OUYANG Zhu, YANG Lin-zhang, et al. Organic carbon fractions and aggregate stability in an aquatic soil as influenced by agricultural land uses in the Northern China Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12):4148-4155.

[6] Falloon P D, Smith P. Modeling refractory soil organic matter[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 30:388-398.

[7] 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, 63:22-31.

[8] Krull E S, Baldock J A, Skjemstad J O. Importance of mechanisms and processes of the stabilization of soil organic matter for modeling carbon turnover[J]. *Funct Plant Biol*, 2003, 30:207-222.

[9] Franzluebbers A J, Stuedemann J A. Particulate and non particulate fractions of soil organic carbon under pastures in the Southern Piedmont US[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 116:53-62.

[10] Besnard E, Chenu C, Balesdent J, et al. Fate of particulate organic matter in soil aggregates during cultivation[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47:495-503.

[11] Ghani A, Dexter M, Perrott K W. Hot-water extractable carbon in soils: A sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation[J]. *Soil Biol Biochem*, 2003, 35:1231-1243.

[12] 鲁如坤.土壤农业化学分析法[M].北京:中国农业科技出版社,2000:231-232.
LU Ru-kun. Methods of soil and agriculture chemical analysis[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2000: 231-232.

[13] Leavitt S W, Follett R F, Paul E A. Estimation of the slow and fast cy-

- cling soil organic carbon pools from 6N HCl hydrolysis[J]. *Radio-carbon*, 1996, 38: 230-231.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
BAO Shi-dan. Soil agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [15] Parton W J, Scurlock J M, Ojima D S, et al. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grasslands biome world-wider[J]. *Global Biogeochemistry Cycle*, 1993, 7: 785-809.
- [16] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 东北黑土区坡耕地表层土壤颗粒有机碳和团聚体结合碳的空间分布[J]. 生态学报, 2006, 26(9): 2847-2854.
FANG Hua-jun, YANG Xue-ming, ZHANG Xiao-ping, et al. Spatial distribution of particulate organic carbon and aggregate associated carbon in topsoil of a sloping farmland in the Black Soil region, Northeast China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 2847-2854.
- [17] Rovira P, Vallejo V R. Examination of thermal and acid hydrolysis procedures in characterization of soil organic matter[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2000, 31: 81-100.
- [18] Freixo A A, Machado P, Dos Santos H P, et al. Soil organic carbon and fractions of a Rhodic Ferralsol under the influence of tillage and crop rotation systems in Southern Brazil[J]. *Soil & Tillage Research*, 2002, 64(3-4): 221-230.
- [19] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 777-783.
- [20] 王燕飞. 不同生草物料对土壤有机质数量和质量的的影响[D]. 福州: 福建农林大学硕士学位论文, 2009.
WANG Yan-fei. Effect on the amounts and quality of soil organic matter with different sod materials[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University Master Degree Thesis, 2009.
- [21] 孟凡乔, 况星, 张轩, 等. 土地利用方式和栽培措施对农田土壤不同组分有机碳的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2512-2519.
MENG Fan-qiao, KUANG Xing, ZHANG Xuan, et al. The impact of land use change and cultivation measures on light fraction organic carbon, sand and particle organic carbon[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2512-2519.
- [22] 倪进治, 徐建民, 谢正苗. 土壤水溶性有机碳的研究进展[J]. 生态环境, 2003, 12(1): 71-75.
NI Jin-zhi, XU Jian-min, XIE Zheng-miao. Advances in soil water-soluble organic carbon research[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(1): 71-75.
- [23] 王百群, 苏以荣, 吴金水. 开垦草地对土壤有机碳库构成与来源的效应[J]. 核农学报, 2007, 21(6): 618-622.
WANG Bai-qun, SU Yi-rong, WU Jin-shui. Impaction of grassland reclamation on the composition and derivation of soil organic carbon pool[J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2007, 21(6): 618-622.
- [24] 姜培坤, 徐秋芳, 周国模, 等. 种植绿肥对板栗林土壤养分和生物学性质的影响[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(3): 120-123.
JIANG Pei-kun, XU Qiu-fang, ZHOU Guo-mo, et al. Effects of green manure on soil nutrients and bio-properties of *Castanea mollissima* Blume plantations[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(3): 120-123.
- [25] 王继红, 刘景双, 于君宝, 等. 氮磷肥对黑土玉米农田生态系统土壤微生物量碳氮的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 35-38.
WANG Ji-hong, LIU Jing-shuang, YU Jun-bao, et al. Effect of fertilizing N and P on soil microbial biomass carbon and nitrogen of black soil corn agro-ecosystem[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(1): 35-38.
- [26] 孟静娟, 史学军, 潘剑君, 等. 农业利用方式对土壤有机碳库大小及周转的影响研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 144-148.
MENG Jing-juan, SHI Xue-jun, PAN Jian-jun, et al. Effects of agricultural land use types on soil organic carbon pool size and turnover[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(6): 144-148.
- [27] Collinse H P, Elliott E T, Paustiana K, et al. Soil carbon pools and fluxes in long-term corn belt agro-ecosystems[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32: 157-168.
- [28] 翁伯琦, 王义祥, 黄毅斌, 等. 生草栽培下果园土壤固碳潜力研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(6): 931-934.
WENG Bo-qi, WANG Yi-xiang, HUANG Yi-bin, et al. Carbon sequestration capacity of soil in sod cultivation orchard[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(6): 931-934.
- [29] Liu Z F, Lin Y B, Lu H F, et al. Maintenance of a living understory enhances soil carbon sequestration in subtropical orchards[J]. *PLoS ONE*, 2013, 8(10): e76950. doi: 10.1371/journal.pone.0076950
- [30] 王义祥, 王峰, 翁伯琦, 等. 果园生草模式土壤固碳潜力: 以福建省为例[J]. 亚热带农业研究, 2010, 6(3): 189-192.
WANG Yi-xiang, WANG Feng, WENG Bo-qi, et al. Study on soil carbon sequestration potential of sod cultivated orchard: Taking Fujian Province as a case[J]. *Subtropical Agriculture Research*, 2010, 6(3): 189-192.