

不同经营年限柑橘果园土壤稳定性有机碳比较

王义祥, 叶菁, 王成己, 翁伯琦*, 黄毅斌*

(福建省农业科学院农业生态研究所, 福建 福州 350013)

摘要:利用时空替代和物理、化学分组的方法比较研究不同经营年限对柑橘果园土壤稳定性有机碳组分的影响, 旨在为果园土壤固碳增汇技术的研究提供科学依据。结果表明, 1954 年建植的柑橘园表层土壤总有机碳比 1980 年建植的柑橘果园土壤提高 27.16%, 大团聚体内有机碳提高 13.59%, 微团聚体内有机碳提高 80.19%, 重组有机碳含量提高 29.25%, 惰性有机碳含量提高 32.00%, 黑碳含量提高 4.01%。说明随着经营年限的增加, 与粘粒相复合的和难降解的稳定性有机碳组分在土壤中逐渐富集下来, 有利于提高柑橘园土壤的长期碳汇。

关键词:经营年限; 柑橘果园; 土壤; 稳定性有机碳; 组分

中图分类号: S153.6

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2015)04-0332-06

doi: 10.13254/j.jare.2014.0362

Effect of Different Cultivation Periods on Soil Stable Organic Carbon Pool in Citrus Orchard

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

(Institute of Agricultural Ecology, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China)

Abstract: Effect of different cultivation periods on soil stable organic carbon pools and fractions in citrus orchard was investigated to provide scientific basis on the study of orchard soil carbon sequestration by the temporal-spatial substitution method and physical and chemical fractionation method. The results showed that the citrus orchard planted in 1954 compared with the citrus orchard planted in 1980, the content of total organic carbon increased by 27.16%, organic carbon content in macro-aggregates increased by 13.59%, organic carbon content in micro-aggregates increased by 80.19%, organic carbon content of heavy fraction increased by 29.25%, resistant organic carbon content increased by 32.00%, black carbon content increased by 4.01%. Organic carbon which combined with micro-aggregates was protected, and resistant organic carbon and black carbon were recalcitrant organic carbon in soil, this indicated that the stable organic carbon fractions gradually enriched in soil with the increase of growing periods, which was conducive to improve carbon sink in citrus orchard soil.

Keywords: cultivation periods; citrus orchard; soil; stable organic carbon; fractions

为评价现行土地利用措施(如植树造林或改变农业耕作措施等)在补偿大气 CO₂ 浓度升高中发挥的作用, 近年来, 土壤积累和稳定有机碳的能力研究受到国内外学者的极大关注^[1-2]。土壤有机碳的稳定机制决定着土壤固定和储备有机碳的能力, 了解土壤有机碳稳定机制, 可为准确估计土壤的固碳潜力和农业固碳减排技术的研究提供科学依据。

稳定性组分决定着土壤有机碳的储备, 因此在土

壤有机碳稳定性研究中备受重视^[3]。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的化学组成的差异, 其他方面的许多因素都能影响土壤有机碳的稳定性^[4]。目前, 土壤有机碳稳定性研究已经深入到土壤颗粒层面的土壤物理-化学-生物学的相互作用及其对土壤有机碳的保护、结合、转化与利用的影响上。但目前有关果园土壤惰性有机碳尤其是腐殖质组分的功能团结构和性质的研究还很缺乏, 对于物理保护作用、化学稳定作用对不同更新速率的库的影响及其在土壤碳固定上的相对重要性还认识不足。本研究以 2 种不同经营年限的柑橘园为对象, 研究现行经营模式下不同经营年限果园土壤微团聚体/大团

收稿日期: 2014-12-19

基金项目: 福建省科技项目(2014R1017-3); 国家科技支撑计划课题(2012BAD14B15, 2012BAD14B03); 农业部福州农业环境科学观测实验站项目

作者简介: 王义祥(1978—), 男, 副研究员, 主要从事土壤碳氮循环研究。E-mail: sd_wolong@163.com

* 通信作者: 翁伯琦 E-mail: wengboqi@163.com

黄毅斌 E-mail: ecohyb@163.com

聚体结合有机碳、重组有机碳、惰性有机碳和黑碳的变化,以求揭示果园土壤有机碳的物理和化学保护机制,为建立合理的果园土壤管理措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地选择

试验地位于福建省永春县猛虎柑橘场内,属亚热带湿润性季风气候,年平均温度 18.5℃,年降雨量 1 700~1 800 mm。猛虎柑橘场原为 1953 年印尼归国华侨尤扬祖在达埔乡创办的猛虎华侨垦殖场。1954 年春建植 0.27 hm² 芦柑,为福建省建植最早的永春芦柑。1978 年,更名为永春县猛虎柑橘场,占地总面积 36.67 hm²,其中柑橘面积 31.67 hm²。2010 年,本研究采用时空替代法选取选择 1954 年和 1980 年建植的 2 个树龄芦柑(*Citrus reticulata* Blanco cv. Ponkan)园作为对象。2 果园开垦前均为杂木林,地理位置相邻近,地形、成土母质及土壤类型等条件基本一致,坡向均为东南,坡度为 20°,成土母质为花岗岩坡积物,土壤类型为赤红壤。2 个果园管理方式基本一致,每次修剪后的枝条均移除园外,每年或隔年对果园 0~20 cm 的表层土壤进行中耕翻土。施肥采取化肥和有机肥配施,每年施纯氮量为 1 275 kg·hm⁻²,其中有机氮平均占施氮量的 17%。2010 年 2 个试验地土壤的基本理化性状见表 1。

1.2 土壤取样

分别在 2 个种植年限的试验地内设立 3 个 20 m×20 m 样区,研究样区按照邻近原则进行布置。在每个样区按 S 形布设取样点 5 个,利用取土钻采集 0~20 cm 和 20~40 cm 土样。将每个样区不同层次的 5 个样点样品混合均匀,采用多点采集方法形成混合样品,样品过 2 mm 筛,去除石砾和根系,分成 2 份,一份过 2 mm 筛用于重组有机碳和惰性有机碳的测定,一份过 0.25 mm 筛用于黑碳的测定。

1.3 指标测定

土壤团聚体内有机碳测定按照文献[5]的方法。重组有机碳(Heavy fraction organic carbon, HFOC)按照

Golchin 等^[6]的方法分组测定。惰性有机碳(Resistant organic carbon, ROC)测定采用酸水解法^[7]。黑碳(Black carbon, BC)^[8]:称取 3 g 左右过 100 目的烘干土样,加入 15 mL 3 mol·L⁻¹ HCl 除去碳酸盐,反应 24 h;加入 15 mL 10 mol·L⁻¹ HF:1 mol·L⁻¹ HCl 除去硅酸盐,反应 24 h;加入 15 mL 10 mol·L⁻¹ HCl 反应,除去可能生成的 CaF₂,反应 24 h;加入 15 mL 0.1 mol·L⁻¹ K₂Cr₂O₇:2 mol·L⁻¹ H₂SO₄,在(55±1)℃下除去有机碳,反应 60 h;离心、烘干后采用元素分析仪测定黑碳含量。

1.4 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 柑橘园土壤总有机碳含量的变化

由表 2 可以看出,1954 年建植的柑橘园不同土层的有机碳含量均高于 1980 年建植的柑橘园;其中 1954 年建植柑橘园 0~20 cm 土层有机碳含量比 1980 年高 27.16%,且差异达到显著水平。就垂直分布而言,1954 年和 1980 年柑橘园 0~20 cm 土层总有机碳含量均高于 20~40 cm 土层。

表 2 不同经营年限柑橘园土壤总有机碳含量(g·kg⁻¹)

Table 2 Total organic carbon contents of orchard soils under different tillage periods (g·kg⁻¹)

土层/cm	1954 年建植柑橘园	1980 年建植柑橘园
0~20	15.45 ± 0.30aA	12.15 ± 0.62bA
20~40	11.98 ± 0.25aB	11.06 ± 0.46bA

注:同一行中小写字母不同表示显著性差异(P<0.05);同一列中大写字母不同表示存在显著性差异(P<0.05)。下同。

2.2 柑橘园土壤团聚体内有机碳分配的变化

微团聚体内的有机碳比大团聚体内的有机碳更不易变化,与微团聚体结合的有机质大部分是由高度腐殖化的惰性组分组成,且受到物理保护,因而微团聚体有机碳的周转时间显著高于大团聚体的^[9]。由表

表 1 试验地土壤基本理化性状

Table 1 The basic physical and chemical properties of the experimental soils

年份	土层/cm	容重/g·cm ⁻³	pH 值	有机质/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	全磷/mg·kg ⁻¹	土壤质地
1954 年建植柑橘园	0~20	1.05 ± 0.01	5.30 ± 0.15	26.6 ± 0.36	1.31 ± 0.07	216.3 ± 3.87	砂壤土
	20~40	1.10 ± 0.03	5.13 ± 0.23	20.7 ± 0.47	1.01 ± 0.11	167.5 ± 4.43	砂壤土
1980 年建植柑橘园	0~20	1.02 ± 0.01	5.02 ± 0.17	20.9 ± 0.32	1.02 ± 0.12	197.4 ± 2.75	砂壤土
	20~40	1.09 ± 0.02	4.98 ± 0.31	19.1 ± 0.33	0.93 ± 0.08	189.4 ± 3.87	砂壤土

3 可以看出,1954 年建植的柑橘园 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤团聚体有机碳储量均高于 1980 年建植的柑橘园,其中 1954 年建植柑橘园大团聚体(>0.25 mm)有机碳储量是 1980 年建植柑橘园的 1.11~1.14 倍,但差异性不显著;而其微团聚体(<0.25 mm)有机碳储量是 1980 年建植柑橘园的 1.20~1.80 倍,差异性达显著水平,呈现为随着经营年限的增加,柑橘园土壤团聚体有机碳储量增加的变化规律。就不同土层而言,两年代柑橘园 0~20 cm 土层土壤大团聚体有机碳均显著高于 20~40 cm 土层。就团聚体有机碳储量的分配比例而言,1954 年建植的柑橘园土壤微团聚体有机碳储量占总储量的比例(19.41%~20.96%)亦高于 1980 年建植柑橘园(13.18%~19.80%),表明随着经营年限的增加,柑橘园微团聚体有机碳所占比例增加。

2.3 柑橘园土壤重组有机碳的变化

重组有机碳(Heavy fraction organic carbon, HFOC)主要成分是矿质颗粒,主要存在于有机-无机复合体中的有机质态碳^[10]。由于受土壤矿物不同程度的物理和化学保护,对土壤管理和作物系统变化的反映比轻组有机碳慢,一定程度上反映了土壤保持有机碳的能力。由表 4 可以看出,1954 年建植的柑橘园 0~20 cm 和 20~40 cm 土层重组有机碳含量分别比 1980 年建植的柑橘园增加 29.25%和 10.80%,其中 0~20 cm 土层两果园间的差异性达显著水平,表现为随着经营年限增长重组有机碳含量增加的趋势。就不同土层而言,1954 年和 1980 年建植的柑橘园 0~20 cm 土层重

组有机碳含量均高于 20~40 cm 土层,分别比 20~40 cm 土层的重组有机碳含量高 25.94%和 7.96%,差异性达显著水平,表现为随着土层深度增加重组有机碳含量降低的趋势。就重组有机碳占土壤有机碳的比例分析而言(表 4),1954 年和 1980 年建植的柑橘园重组有机碳占土壤有机碳的比例均随着土层的加深而增加,1954 年建植的柑橘园 0~20 cm 和 20~40 cm 土层重组有机碳所占比例分别比 1980 年建植的柑橘园高 1.63%和 2.16%。

2.4 柑橘园土壤惰性有机碳的变化

惰效性碳库(Resistant organic carbon, ROC)指化学性质和物理性质稳定,极难分解的那部分有机碳。已有的研究表明,采用酸水解法测定的土壤惰效性碳库,通常占总有机碳的 17.1%~48.1%,并且惰效性有机碳含量所占比例随土层加深而增加^[11]。由表 5 可知,1954 年建植的柑橘园 0~20 cm 土层土壤惰性有机碳含量比 1980 年建植的柑橘园的高 32.00%,且两者间的差异达到显著水平;20~40 cm 土层土壤惰性有机碳含量比 1980 年的柑橘园高 13.91%,表现出随经营年限的增长,惰性有机碳含量增加的趋势。就不同土层而言,1954 年和 1980 年建植的柑橘园 0~20 cm 土层惰性有机碳含量均比 20~40 cm 土层增加 25.95%和 8.70%,差异性达显著水平,表现为随土层加深惰性有机碳含量降低的趋势。就惰性有机碳占土壤有机碳的比例而言(表 5),1954 年和 1980 年建植的柑橘园土壤惰性有机碳占土壤有机碳的比例均随土层的加深而增加,1954 年建植的柑橘园 0~20 cm 和 20~40

表 3 不同经营年限柑橘园不同粒径土壤团聚体有机碳储量

Table 3 Organic carbon stocks of orchard soil aggregates under different reclamation periods

团聚体	1954 年建植柑橘园				1980 年建植柑橘园			
	0~20 cm		20~40 cm		0~20 cm		20~40 cm	
	储量 /t·hm ⁻²	比例 /%	储量 /t·hm ⁻²	比例 /%	储量 /t·hm ⁻²	比例 /%	储量 /t·hm ⁻²	比例 /%
大团聚体(>0.25 mm)	23.41 ± 3.21 aA	80.60	17.16 ± 1.53bA	79.06	20.61 ± 2.02 aA	86.82	15.40 ± 2.34bA	80.20
微团聚体(<0.25 mm)	5.64 ± 1.02 aB	19.41	4.55 ± 0.73bB	20.96	3.13 ± 0.65 cB	13.18	3.80 ± 0.67cB	19.80

表 4 不同经营年限柑橘园土壤重组有机碳含量

Table 4 HFOC contents of orchard soils under different tillage periods

土层 /cm	1954 年建植柑橘园		1980 年建植柑橘园	
	重组有机碳含量 /g·kg ⁻¹	占土壤有机碳的比例 /%	重组有机碳含量 /g·kg ⁻¹	占土壤有机碳的比例 /%
0~20	10.34 ± 1.02 aA	66.91	8.00 ± 0.83 bA	65.84
20~40	8.21 ± 0.75 aB	68.52	7.41 ± 0.73 aB	67.07

表 5 不同经营年限柑橘园土壤惰性有机碳含量

Table 5 ROC contents of orchard soils under different tillage periods

土层 /cm	1954 年建植柑橘园		1980 年建植柑橘园	
	惰性有机碳含量 /g·kg ⁻¹	占土壤有机碳的比例 /%	惰性有机碳含量 /g·kg ⁻¹	占土壤有机碳的比例 /%
0~20	9.90 ± 1.47aA	64.06	7.50 ± 0.05bA	61.76
20~40	7.86 ± 0.11aB	65.63	6.90 ± 0.44bB	62.44

cm 土层惰性有机碳占土壤有机碳的比例分别比 1980 年建植的柑橘园高 3.72%和 5.11%。

2.5 柑橘园土壤黑碳的变化

黑碳(Black carbon,BC)是生物质或化石燃料不完全燃烧的含碳物质的连续统一体,是土壤中缓慢碳库的重要组成部分^[12]。由于黑碳的高度芳香化结构,其具有较高的生物和化学稳定性,对土壤碳的积累有重要贡献。已有研究表明,土壤中 BC/SOC 的比例为 5%~45%^[13]。且多数研究集中于火烧、利用方式和施肥等对黑碳影响等方面^[14-16]。由表 6 可以看出,1954 年和 1980 年建植的柑橘园土壤黑碳含量均随土层的加深而降低,且 0~20 cm 与 20~40 cm 间的差异均达显著性水平。就经营年限的影响而言,1954 年建植的柑橘园 0~20 cm 和 20~40 cm 土层黑碳含量分别比 1980 年建植的柑橘园高 4.01%和 1.56%,但差异性未达显著水平。就土壤黑碳占土壤有机碳的比例而言(表 6),1954 年和 1980 年建植的柑橘园 0~20 cm 土层黑碳占土壤有机碳的比例分别比 20~40 cm 土层增加 4.68%和 6.11%,1954 年建植的柑橘园 0~20 cm 和 20~40 cm 土层黑碳占土壤有机碳比例分别比 1980 年建植的柑橘园增加 19.62%和 16.80%。

表 6 不同经营年限柑橘园土壤黑碳含量

Table 6 BC contents of orchard soils under different tillage periods

土层 /cm	1954 年建植柑橘园		1980 年建植柑橘园	
	黑碳含量 / g·kg ⁻¹	占土壤有机碳 的比例 /%	黑碳含量 / g·kg ⁻¹	占土壤有机碳 的比例 /%
0~20	3.11 ± 0.13aA	24.59	2.99 ± 0.04aA	21.36
20~40	2.60 ± 0.08aB	23.49	2.56 ± 0.09aB	20.13

2.6 土壤有机碳组分间的相关分析

根据分离提取方法的不同,土壤有机碳组分具有不同的表征,但不同组分之间亦存在一定的相关性。由表 7 可以看出,土壤总有机碳含量与惰性有机碳和重组有机碳含量间存在显著的正相关性。不同组分之

表 7 不同土壤有机碳组分间的相关性

Table 7 The correlation among different organic carbon fractions of soils

项目	黑碳	惰性有机碳	重组有机碳	微团聚体内有机碳
总有机碳	0.809	0.988*	0.995*	0.8
黑碳		0.726	0.751	0.296
惰性有机碳			0.999*	0.868
重组有机碳				0.853

注:“*”表示两变量间存在显著的相关性(P<0.05)。

间的相关分析表明,惰性有机碳与重组有机碳含量间存在显著的相关性。

3 讨论

目前,多数研究认为,土壤中有有机碳的稳定主要通过 3 种方式实现:(1)化学过程,如与 Ca²⁺、Fe³⁺离子形成沉淀;(2)生化顽固,由于底物内在分子结构的原因,微生物很难分解的有机组分,即难降解性有机碳;(3)物理保护,使有机碳与土壤颗粒尤其是与黏粒和粉粒形成复合体,使微生物较难接触到有机碳,即底物和分解者之间建立物理屏障^[17]。土壤重组有机碳的主要成分是矿质颗粒,重组中的有机碳通过与不同粒径的矿物颗粒紧密结合,形成有机-无机复合体,从而使其矿化速率大为减慢。因此,重组有机碳能反映土壤保持有机碳的能力。本研究结果表明,土壤重组有机碳含量随着经营年限的增加而增加,这是由于果园经营过程中凋落物和有机肥输入,给土壤带来了大量的碳源,补充了有机质的消耗,也促进了与粘粒相复合的土壤腐殖质的增加,使土壤中重组有机碳含量增加^[18]。同时因为有机质是团聚体形成的主要黏结介质,有机分子与粘粒和阳离子相互胶结形成微团聚体,微团聚体与周围基本粒子或微团聚体之间相互胶结形成大团聚体,而大团聚体的解体又可形成微团聚体。Buyanovsky 等^[19]研究还发现,粗微团聚体中有机碳的生物可利用性较高,细的微团聚体中有机碳更新周期更长、更稳定。随着经营年限的增加果园 0~20 cm 土层微团聚体有机碳的分配比例提高,说明长期垦殖和机械性的破坏,使大团聚体结构向细小颗粒转变,微团聚体有机碳增加,出现土壤非活性有机碳库的富集,从而增加了土壤的长期碳汇。

进入土壤的有机物,除了物理破碎和淋洗过程外,在微生物和酶的选择作用下,碳水化合物和蛋白类物质(包括水提取的、酸解的糖类如单糖,多糖和多肽、氨基酸等)最先分解,有机物的颗粒减小,碳氮比也下降,导致较难降解的复杂化学结构物质(如具有芳香环结构的木质素和烷基结构的碳)富集。Tan 等^[20]用 6 mol·L⁻¹ HCl 酸解得到非水解碳,证明生化保护机制对土壤有机碳的稳定性具有最重要的作用。由于 HCl 酸解法的简捷性,至今仍被广泛使用^[21]。许多研究表明,利用该方法可以从原土有机碳中去除 30%~77%的有机碳,残留的有机碳的平均年龄比原土有机碳高 1 500 年^[22]。本研究结果表明,利用酸水解测得的惰效性碳占土壤有机碳的 61.76%~65.63%,高于一般

农田的比例^[1]。其中1954年建植的果园惰性有机碳含量及其占总有机碳的比例均高于1980年的果园,说明随着经营时间的延长,易于被微生物分解的有机化合物优先被利用,而残存的难降解部分在土壤中逐渐富集。杨丽霞等^[23]研究表明,采用酸水解法测得的杉木林土壤惰效性碳库占总有机碳的20%~50%,不同林龄的杉木(8、16年和40年)土壤非活性碳库(缓效性碳库和惰效性碳库之和)含量的变化规律为40年>16年>8年。本研究中1954年建植的柑橘园土壤惰性有机碳含量高于1980年的柑橘园,由于惰性有机碳在土壤中的驻留时间比较长,说明随着经营年限增加,土壤中惰性有机碳逐渐积累,有利于增加土壤碳汇功能。

黑碳也是土壤中难降解有机碳的重要组成部分。一般认为,黑碳是由一系列燃烧产生的高芳香化碳、元素态碳或石墨化碳构成的。由于黑碳的高度芳香化结构,其具有较高的生物和化学稳定性。另外,黑碳因具有较高的比表面积和羧基、羟基、酚羟基等多种功能团,存在较强的吸附能力和保肥功能,能吸持环境中的污染物质。但目前对土壤黑碳的研究仍处于起步和探索阶段,人们对黑碳的作用机理、黑碳与土壤可持续利用关系的研究还很不系统。张履勤等^[24]对原生林地、次生林地、茶园和旱地土壤有机碳、黑碳和颗粒有机碳的含量进行比较,结果表明,BC/SOC的比例为8%~26%,不同土地利用方式BC/SOC的大小顺序为旱地、茶园>次生林地>原生林地,并认为在林地垦为农业用地过程中,黑碳的增加可能与施用有机肥有关。Brodowski等^[16]研究发现,施用无机肥,黑碳含量并没有发生明显的变化;而在施用农家肥20 t·hm⁻²和30 t·hm⁻²2年后,黑碳含量分别从2.16 g·kg⁻¹上升至2.68 g·kg⁻¹和2.86 g·kg⁻¹,表明农家肥中可能存在黑碳类物质。本研究结果表明,1954年和1980年建植的果园土壤中BC/SOC的比例为20.13%~24.59%。0~20 cm土层黑碳占土壤有机碳比例高于20~40 cm土层,与重组有机碳和惰性有机碳所占比例的变化趋势不同,这可能与土壤中黑碳的来源有关。土壤黑碳来源除与大气沉降有关外,还受地被物焚烧、有机肥的施用的影响。已有研究表明,农业用地土壤中黑碳的积累受大气沉降的影响相对较小,但有机肥的施用可能对土壤黑碳的积累产生一定的影响,且施肥对黑碳的影响主要发生在土壤表层,深层土壤黑碳受施肥影响较小^[25]。1954年建植的柑橘园土壤黑碳含量高于1980年的柑橘园,这是由于随着经营年限的增长,果

园施入的有机肥量增加,有机肥中存在的黑碳类物质也在土壤中逐渐累积下来。

4 结论

1954年建植的柑橘园土壤总有机碳含量比1980年的柑橘园提高了8.32%~27.16%,其中微团聚体结合有机碳和重组有机碳占土壤有机碳的比例分别提高了5.86%~47.27%和1.63%~2.16%,说明随着经营年限的增长,与粘粒相复合的土壤有机碳增加,土壤保持有机碳的能力增强。1954年建植的柑橘园土壤惰性有机碳和黑碳含量分别比1980年的柑橘园增加了13.91%~32.00%和1.56%~4.01%,说明随着经营年限的增长,进入土壤的有机物中碳水化合物和蛋白类物质等易分解部分最先被分解,而较难降解的复杂化学结构物质在土壤中逐渐富集下来。

参考文献:

- [1] Schmidt M W, Torn M S, Abiyen S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. *Nature*, 2011, 478: 49–56.
- [2] Conant R T, Rvan M G, Ågren G I, et al. Temperature and soil organic matter decomposition rates—synthesis of current knowledge and a way forward[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17: 3392–3404.
- [3] Falloon P D, Smith P. Modeling refractory soil organic matter[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 30(5–6): 388–398.
- [4] 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.
- [5] 王义祥, 翁伯琦, 黄毅斌, 等. 生草栽培对果园土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2012, 20(4): 349–355.
WANG Yi-xiang, WENG Bo-qi, HUANG Yi-bin, et al. Effects of sod cultivation in orchard on distributions of soil aggregates and soil organic carbon of aggregates[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2012, 20(4): 349–355. (in Chinese)
- [6] Golchin A, Oades J M, Skjemstad J O, et al. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ¹³C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy[J]. *Aust J Soil Res*, 1994, 32(2): 285–299.
- [7] Leavitt S W, Follett R F, Paul E A. Estimation of the slow and fast cycling soil organic carbon pools from 6N HCl hydrolysis[J]. *Radiocarbon*, 1996, 38(1): 230–231.
- [8] 何跃, 张甘霖. 城市土壤有机碳和黑碳的含量特征与来源分析[J]. 土壤学报, 2006, 43(2): 177–182.
HE Yue, ZHANG Gan-lin. Concentration and sources of organic carbon and black carbon of urban soils in Nanjing[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(2): 177–182. (in Chinese)
- [9] 谢锦升, 杨玉盛, 陈光水, 等. 植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 702–709.
XIE Jin-sheng, YANG Yu-sheng, CHEN Guang-shui, et al. Effects of

- vegetation restoration on water stability and organic carbon distribution in aggregates of degraded red soil in subtropics of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 702–709. (in Chinese)
- [10] Christensen B T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates[J]. *Advance in Soil Science*, 1992, 20: 1–90.
- [11] 邵月红, 潘剑君, 孙波, 等. 农田土壤有机碳库大小及周转[J]. 生态学报, 2006, 25(1): 19–23.
- SHAO Yue-hong, PAN Jian-jun, SUN Bo, et al. Pool sizes and turnover rates of farmland soil organic carbon[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(1): 19–23. (in Chinese)
- [12] Schmidt M W I, Noack A G. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 777–793.
- [13] Skjemstad J O, Reicosky D C, Wilts A R, et al. Charcoal carbon in U.S. agricultural soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(4): 1249–1255.
- [14] Ansley R J, Boutton T W, Skjemstad J O. Soil organic carbon and black carbon storage and dynamics under different fire regimes in temperate mixed-grass savanna[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20(3): 1–11.
- [15] Rumpel C, Alexis M, Chabbi A, et al. Black carbon contribution to soil organic matter composition in tropical sloping land under slash and burn agriculture[J]. *Geoderma*, 2006, 130(1–2): 35–46.
- [16] Brodowski S, Amelung W, Haumaier L, et al. Black carbon contribution to stable humus in German arable soils[J]. *Geoderma*, 2007, 139(1–2): 220–228.
- [17] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover[J]. *Eur J Soil Sci*, 2001, 52(3): 345–353.
- [18] 高福丽, 夏建国. 不同种植年限茶园土壤有机无机复合状况及有机碳分布特征[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 50–53.
- GAO Fu-li, XIA Jian-guo. Soil organic-mineral complex status and distribution of organic carbon in tea gardens of different planting-year[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(1): 50–53. (in Chinese)
- [19] Buyanovsky G A, Aslam M, Wagner G H. Carbon turnover in soil physical fractions[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1994, 58: 1167–1173.
- [20] Tan Z X, Lal R, Lzauralde R C, et al. Biochemically protected soil organic carbon at the north Appalachian experimental watershed[J]. *Soil Science*, 2004, 169(6): 423–433.
- [21] Rovira P, Vallejo V R. Labile, recalcitrant, and inert organic matter in Mediterranean forest soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(1): 202–215.
- [22] Paul E A, Follett R F, Leavitt S W, et al. Radiocarbon dating for determination of soil organic matter pool sizes and dynamics[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(4): 1058–1067.
- [23] 杨丽霞, 潘剑君. 土壤活性有机碳库测定方法研究进展[J]. 土壤通报, 2004, 35(4): 502–506.
- YANG Li-xia, PAN Jian-jun. Progress in the study of measurements of soil active organic carbon pool[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(4): 502–506. (in Chinese)
- [24] 张履勤, 章明奎. 土地利用方式对红壤和黄壤颗粒有机碳和碳黑积累的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(4): 662–665.
- ZHANG Li-qin, ZHANG Ming-kui. Effects of land use on particulate organic carbon and black carbon accumulation in red and yellow soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(4): 662–665. (in Chinese)
- [25] 于小玲, 佟小刚, 杨学云, 等. 长期施肥对垆土黑碳积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6): 1404–1411.
- YU Xiao-ling, TONG Xiao-gang, YANG Xue-yun, et al. Effects of long-term fertilization on soil black carbon accumulation in Lou soils[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(6): 1404–1411. (in Chinese)