

DOI: 10.5846/stxb201302040233

李玮, 郑子成, 李廷轩, 刘敏英. 不同植茶年限土壤团聚体及其有机碳分布特征. 生态学报, 2014, 34(21): 6326-6336.

Li W, Zheng Z C, Li T X, Liu M Y. Distribution characteristics of soil aggregates and its organic carbon in different tea plantation age. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(21): 6326-6336.

不同植茶年限土壤团聚体及其有机碳分布特征

李 玮, 郑子成*, 李廷轩, 刘敏英

(四川农业大学资源环境学院, 成都 611130)

摘要: 作为土壤结构的基本单元和土壤肥力的重要组成部分, 土壤团聚体对土壤的物理、化学和生物特性均有重要影响。试验选取了雅安市名山区中峰乡生态茶园区 12—15a、20—22a、30—33a 和 >50a 的茶园, 研究其土壤团聚体及其有机碳总量、储量和活性组分的分布特征, 探究植茶年限对土壤团聚体及其有机碳分布的影响。结果表明: (1) 研究区土壤以 >2 mm 粒级团聚体为主, 约为 70%—80%, 且在 0—20 cm 土层植茶 20—22a 土壤团聚体含量最高; (2) 茶园土壤团聚体有机碳含量随团聚体粒级的减小而增加, 最大值出现在 <0.25 mm 粒级团聚体, 且在植茶 >50a 时达最高值, 0—20 cm 土层团聚体有机碳含量均高于 20—40 cm, 土壤团聚体水溶性有机碳和微生物生物量碳随植茶年限的延长呈先增加后降低的变化趋势, 植茶 30—33a 时含量最高, 且小粒级团聚体水溶性有机碳含量较高而微生物量碳较低; (3) 土壤团聚体对有机碳的贡献率约有 70% 来自 >2 mm 粒级团聚体, 团聚体有机碳储量随植茶年限延长呈增加的趋势, 不同植茶年限 0—20 cm 土层各粒级团聚体有机碳储量均高于 20—40 cm 土层, 且以 <0.25 mm 粒级团聚体有机碳储量最高。研究结果在一定程度上揭示了不同植茶年限土壤团聚体及其有机碳的分布特征, 可为改善区域土壤质量及实施退耕还茶工程提供理论指导。

关键词: 植茶年限; 土壤团聚体; 有机碳; 水溶性有机碳; 微生物生物量碳; 有机碳储量

Distribution characteristics of soil aggregates and its organic carbon in different tea plantation age

LI Wei, ZHENG Zicheng*, LI Tingxuan, LIU Mingying

College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

Abstract: Soil organic carbon (SOC) is a complicated composition, which could be influenced by many factors such as land use, soil management regimes, soil property and even climate. Understanding its dynamics can know which of the parts are active or passive due to either physical protection or biochemical resistance, or both. The labile fractions, such as water-soluble organic carbon (WSOC) and microbial biomass carbon (MBC), have a much shorter turnover time and thus have been suggested as an early indicator of the effects of either soil management or cropping systems on total organic carbon (TOC) quality. As an important component of soil structure and fertility, soil aggregates have huge effects on the physical, chemical and biological properties of soil. Investigating the formation and stabilization of soil aggregates is very necessary to understand dynamics of soil organic matter. Tea plantation age has great potential to affect soil aggregates and carbon pools. Therefore, knowledge about the different tea plantation ages effecting on soil aggregate and SOC distribution is essential for understanding the carbon pools changes of tea plantation ecosystem. Therefore, in the present study, we compared the distribution patterns of organic carbon within soil aggregates among four different plantation ages (12—15, 20—22, 30—33 and >50 years old) located in Zhongfeng Township of Mingshan County, Sichuan. The results showed that: (1) The greatest

基金项目: 国家自然科学基金(40901138, 41271307); 四川省科技厅项目(2010JY0083); 四川省学术和技术带头人培养资金资助项目(2012)

收稿日期: 2013-02-04; **网络出版日期:** 2014-03-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zichengzheng@aliyun.com

proportion of aggregates was observed at the size of >2 mm in each tea plantation which approximately accounted for 70—80% of all aggregates. SOC contents of aggregate fractions in the 0—20 cm soil layer were the highest in the tea plantation of 20—22 years old. (2) SOC contents of aggregate fractions increased gradually with decreasing particle size, and the maximum values of SOC contents were found in the aggregate fractions of <0.25 mm diameter in tea plantations of >50 years old. SOC contents of aggregate fractions in the 0—20 cm soil layer were higher than those of 20—40 cm soil layer. The contents of WSOC and MBC in the aggregate fractions decreased after an increase along with rising ages of the tea plantations. The maximum values of the contents of WSOC and MBC in the aggregate fractions were found in the tea plantation of 30—33 years old. The contents of WSOC in the smaller size aggregates were higher and the contents of MBC in the smaller size aggregates were lower. (3) 70% of organic carbon resulted from the aggregate at size of >2 mm. SOC storage presented an increasing trend in different soil layers aggregates of all particle sizes along with rising age of the tea plantations. SOC storage of aggregate fractions in the 0—20 cm soil were higher than those of 20—40 cm soil layer, and the maximum values of SOC storage in the aggregate fractions were observed at size of <0.25 mm diameter. The results partly explored the distribution characteristics of SOC of aggregates in different tea plantation ages, and it would provide theoretical guidance for returning farmland to tea and improvement of soil quality in the study area.

Key Words: tea plantation age; soil aggregate; soil organic carbon; water-soluble organic carbon; microbial biomass carbon; soil organic carbon stock

土壤团聚体作为土壤结构的基本组成单元,其质量和数量不仅决定土壤肥力的高低,而且还与土壤的抗蚀能力、环境质量和固碳潜力等有直接关系。土壤有机碳对团聚体的数量和分布有重要影响,反之,团聚体的形成也影响着土壤有机碳的分解。由于土壤碳库在全球碳循环和土壤生产力上的重要作用,因此有关土壤有机碳的变化,特别是土壤团聚体有机碳分布等方面的研究备受关注^[1-3]。不同粒级团聚体,其有机碳含量存在明显差异,有研究表明,团聚体有机碳含量随粒级的增加而降低^[4-5],但也有研究提出了与之相悖的观点,指出大粒级团聚体有机碳含量更高, <0.25 mm 粒级团聚体有机碳含量相对较低^[6-8]。陈建国等^[9]指出,土壤的固碳能力伴随团聚体形成、稳定和周转过程的始终,而土壤碳库的变化主要发生在活性碳库里^[10-11]。土壤活性有机碳虽仅占土壤总有机碳的一小部分,但可在土壤总有机碳变化之前较好地反映土壤质量的微小变化。水溶性有机碳可指示土壤有机质的早期变化^[12],微生物生物量碳是土壤活性有机碳的主要组成部分,对种植、施肥等管理措施十分敏感^[13]。可见,开展土壤团聚体及其有机碳的研究,可为改善土壤质量、阐明土壤碳库动态提供科学参考。

茶树作为一种多年生常绿作物,由于根系吸收特性、根系分泌物及茶园施肥管理的特殊性,在区域

内可形成独特的茶园生态系统。2012 年我国植茶面积达 238 万 hm^2 ,且近年来种植面积有不断扩大的趋势。研究表明,茶园土壤性质会随着植茶年限的延长发生一系列变化,进而促使团聚体组成与结构发生改变,影响土壤团聚体有机碳分布^[14-16],但目前有关茶园土壤团聚体分布及其有机碳变化方面研究甚少。受退耕还林、经济发展、人口增长等因素的驱动,川西低山丘陵区土地利用结构发生了较大变化,退耕还茶已成为该区主要的退耕模式,在产生一定经济、社会效益的同时也使其生态环境发生了一系列改变,植茶的生态效益日益成为人们关注的焦点。因此,本文选取四川省名山区中峰乡万亩生态茶园为研究对象,开展不同植茶年限土壤团聚体有机碳分布特征的研究,以期摸清不同植茶年限土壤团聚体分布及其有机碳变化特征,为茶园生态系统的可持续发展以及协调区域土地利用、实施退耕还茶工程提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川盆地西缘,隶属于雅安市名山区中峰乡。该区域属亚热带季风性气候区,年均温 $15.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,无霜期 294d,年降雨量 1500 mm 左右,6—9 月降雨量占全年的 72.6%。地域差异明显,区内为

低山丘陵地貌,土壤类型为第四纪老冲积物发育而成的黄壤。区域内原始地带性植被为亚热带常绿阔叶林,自 20 世纪 90 年代长江中上游生态退耕工程实施以来,该区主要的退耕模式为退耕还茶,茶树种植密度为大行距(150±15) cm,小行距(35±15) cm,实行双行单株错株条植,株距(16±4) cm,每亩种植 5000 株至 6000 株。施肥集中在 1 月、3 月、6 月和 9 月,并于采茶后追施,肥料主要是尿素和 K₂SO₄ 型复合肥。

1.2 土样采集

供试土壤于 2010 年 9 月采自名山区中峰乡,在野外实地调查的基础上,根据不同植茶年限茶园的

地理位置和施肥情况进行综合考虑,选择成土母质相同、地理位置相对集中且施肥情况相似的植茶年限分别为 12—15 a(面积约 0.60 hm²)、20—22 a(面积约 0.73 hm²)、30—33 a(面积约 0.47 hm²)、50 a 以上(面积约 0.47 hm²)的茶园为采样对象。在各茶园中布设 5 个典型样方(15 m×15 m),每一样方内按“S”形设置 5 个采样点,具体采样点设在树冠边缘垂直下方,并分 0—20 cm、20—40 cm 两个层次采集原状土样,尽量避免挤压,以保持原状土壤结构。另外,采集混合土样用于测定土壤基本理化性质,采样点基本情况见表 1。

表 1 试验样点基本情况

Table 1 The basic properties of soils

项目 Item	土层 Soil layer 0—20 cm				土层 Soil layer 20—40 cm			
	12—15 a	20—22 a	30—33 a	>50 a	12—15 a	20—22 a	30—33 a	>50 a
容重/(g/cm ³) Bulk density	1.23	1.20	1.26	1.28	1.24	1.21	1.27	1.29
总孔隙度/% Total porosity	53.45	54.90	52.47	51.87	53.21	54.33	52.12	51.44
有机碳/% Organic carbon	1.50	1.76	1.90	2.10	0.81	0.89	1.20	1.37
pH	4.43	4.33	4.22	4.03	4.57	4.37	4.29	3.97

1.3 样品处理

将采集的土样在室内沿自然结构轻轻掰成直径约 1 cm 的小土块,除去植物残体、小石块以及蚯蚓等生物体后用沙维诺夫干筛法^[17]分离出>5 mm、2—5 mm、1—2 mm、0.5—1 mm、0.25—0.5 mm、<0.25 mm 的团聚体。

1.4 分析方法和数据处理

土壤团聚体有机碳用外加热重铬酸钾容量法测定;土壤 pH 值,土壤容重均采用常规方法测定^[18]。

$$\text{各粒级团聚体质量百分含量} = \frac{\text{各粒级团聚体质量}}{\text{土壤样品总质量}} \times 100\% \quad (1)$$

团聚体对土壤有机碳的贡献率 =

$$\frac{\text{该粒级团聚体中有机碳含量} \times \text{该团聚体含量}}{\text{耕层土壤有机碳含量}} \times 100\% \quad (2)$$

土壤团聚体微生物量碳(MBC)的测定采用氯仿熏蒸浸提方法测定^[19]。称取 25 g 相当于烘干土壤质量的预培养湿润土壤于 50 mL 的玻璃瓶中,与盛有 50 mL 氯仿的玻璃瓶一起放入真空干燥器中,抽真空至

氯仿沸腾后保持 3 min。将干燥器放入 25 ℃ 下 24 h 后,再次抽真空至完全去除土壤中的氯仿。将土壤完全转移到 200 mL 三角瓶中,加入 50 mL 0.5 mol/L 的 K₂SO₄ 溶液,充分振荡 30 min 过滤,迅速测定滤液中含碳量。熏蒸开始的同时,另称取等量风干土样,加入 0.5 mol/L 的 K₂SO₄ 溶液浸提,视为未熏蒸土壤。测定滤液中含碳量,并根据下式^[19]计算微生物量碳含量。所有测定均重复 3 次。

$$\text{土壤微生物量碳 } Bc(\text{mg/kg}) = 2.64Ec$$

式中,2.64 为微生物量碳系数,Ec 为熏蒸和未熏蒸土壤 K₂SO₄ 提取液的碳含量的差值。

土壤团聚体水溶性有机碳(WSOC)的测定参考杨长明等^[20]方法。

团聚体有机碳储量采用等质量土壤有机碳储量计算方法^[21]:

$$M_{\text{element}} = M_{\text{soil}} \times \text{conc} \times 0.001$$

$$M_{\text{soil}} = \rho_b \times T \times 0.01 \times 10000$$

式中, M_{element} 为土壤团聚体有机碳储量(Mg/hm²); M_{soil} 为单位面积土壤质量(Mg/hm²),1Mg = 10³ kg;

conc 为土壤团聚体有机碳含量 (g/kg); ρ_b 为土壤容重 (g/cm^3); T 为土层深度 (cm)。

数据统计分析采用 Excel 2003 和 DPS 11.0 软件进行。方差分析采用最小显著极差法 (LSD), 不同字母表示差异显著 ($P<0.05$), 所有数据测定结果以平均值 $\pm$ 标准误的形式表达。

2 结果与分析

2.1 土壤团聚体的分布特征

总体而言, 各植茶年限土壤 $>5\text{ mm}$ 粒级团聚体含量比例最高, 最高值达 73.42%, 而 $>2\text{ mm}$ 粒级团聚体含量约占总团聚体数量的 85%, 且与其余粒级

团聚体含量间存在显著差异 (表 2)。另外, 不同植茶年限土壤团聚体分布亦不一致, 植茶 20—22 a 时 $>5\text{ mm}$ 粒级团聚体含量均高于其他植茶年限, 而 $<5\text{ mm}$ 粒级的团聚体含量却与之相反, 表明植茶 20a 左右的土壤大粒级团聚体含量较高, 土壤的团聚能力较强。不同土层, 各级土壤团聚体含量各异。0—20 cm 土层 $>5\text{ mm}$ 粒级团聚体含量总体低于 20—40 cm 土层, 而 $<5\text{ mm}$ 粒级团聚体含量则呈相反的变化趋势, 表明 20—40 cm 土层土壤团聚能力较强, 这与茶园定期人为管理措施有关, 故导致 0—20 cm 土层小粒级团聚体数量较多。

表 2 不同植茶年限土壤团聚体分布特征/%

Table 2 Distribution of different aggregates in soils under tea plantation of different age

土层/cm Soil layer	植茶年限/a Tea plantation age	$>5\text{ mm}$	$5-2\text{ mm}$	$2-1\text{ mm}$	$1-0.5\text{ mm}$	$0.5-0.25\text{ mm}$	$<0.25\text{ mm}$
0—20	12—15	57.75 $\pm$ 2.35aC	21.08 $\pm$ 1.47bA	4.92 $\pm$ 0.26cdA	7.97 $\pm$ 0.48cA	2.89 $\pm$ 0.15dA	5.40 $\pm$ 0.36cdA
	20—22	62.57 $\pm$ 2.84aA	20.53 $\pm$ 1.63bA	4.28 $\pm$ 0.49cdB	6.40 $\pm$ 0.65cD	2.26 $\pm$ 0.17dC	3.97 $\pm$ 0.29cB
	30—33	73.42 $\pm$ 1.28aAB	14.89 $\pm$ 1.02bB	2.83 $\pm$ 0.34cdB	3.79 $\pm$ 0.19cC	1.54 $\pm$ 0.09dC	3.52 $\pm$ 0.21cdB
	>50	73.30 $\pm$ 1.93aBC	15.32 $\pm$ 1.31bB	2.43 $\pm$ 0.17cdA	3.62 $\pm$ 0.25cB	1.51 $\pm$ 0.11dB	3.81 $\pm$ 0.42cdA
20—40	12—15	67.48 $\pm$ 2.19aB	18.28 $\pm$ 1.41bA	3.39 $\pm$ 0.23cdA	5.01 $\pm$ 0.38cA	1.89 $\pm$ 0.13dA	3.96 $\pm$ 0.32cdA
	20—22	69.04 $\pm$ 2.29aA	17.04 $\pm$ 1.64bB	3.13 $\pm$ 0.24cC	4.57 $\pm$ 0.28cC	1.88 $\pm$ 0.11cB	4.34 $\pm$ 0.36cA
	30—33	62.55 $\pm$ 2.40aAB	19.57 $\pm$ 1.40bAB	4.31 $\pm$ 0.33cBC	6.29 $\pm$ 0.41cBC	2.35 $\pm$ 0.13cAB	4.94 $\pm$ 0.39cA
	>50	64.04 $\pm$ 2.21aB	19.48 $\pm$ 1.49bAB	3.86 $\pm$ 0.28cdAB	5.76 $\pm$ 0.44cAB	2.24 $\pm$ 0.19dA	4.63 $\pm$ 0.32cdA

同一行不同小写字母表示不同粒级团聚体在 $P<0.05$ 水平上的差异显著, 同一列不同大写字母表示不同年限相同粒级团聚体在 $P<0.05$ 水平上差异显著

2.2 土壤团聚体有机碳的含量变化

2.2.1 土壤团聚体总有机碳 (TOC) 的含量分布

由表 3 可知, 相同植茶年限各粒级团聚体有机碳含量因粒级不同而异。

表 3 不同植茶年限土壤团聚体有机碳的分布特征/%

Table 3 Distribution of organic carbon in soil aggregates under tea plantation of different age

土层/cm Soil layer	植茶年限/a Tea plantation age	$>5\text{ mm}$	$5-2\text{ mm}$	$2-1\text{ mm}$	$1-0.5\text{ mm}$	$0.5-0.25\text{ mm}$	$<0.25\text{ mm}$
0—20	12—15	1.32 $\pm$ 0.06cC	1.43 $\pm$ 0.07bcB	1.36 $\pm$ 0.04bcC	1.39 $\pm$ 0.04bcC	1.64 $\pm$ 0.06aB	1.52 $\pm$ 0.09abC
	20—22	1.53 $\pm$ 0.06cdB	1.45 $\pm$ 0.11dAB	1.69 $\pm$ 0.13bcdB	1.87 $\pm$ 0.12bB	1.81 $\pm$ 0.17bcB	2.29 $\pm$ 0.06aA
	30—33	1.44 $\pm$ 0.06dBC	1.87 $\pm$ 0.07cAB	2.00 $\pm$ 0.07abcA	1.92 $\pm$ 0.04bcAB	2.17 $\pm$ 0.05aA	2.08 $\pm$ 0.06abB
	>50	1.84 $\pm$ 0.04aA	2.06 $\pm$ 0.39aA	1.97 $\pm$ 0.02aA	2.10 $\pm$ 0.04aA	2.20 $\pm$ 0.05aA	2.29 $\pm$ 0.06aA
20—40	12—15	0.88 $\pm$ 0.01abBC	1.00 $\pm$ 0.02aB	0.95 $\pm$ 0.03aB	0.89 $\pm$ 0.09abB	0.72 $\pm$ 0.06cD	0.76 $\pm$ 0.01bcC
	20—22	0.73 $\pm$ 0.06bC	0.83 $\pm$ 0.04bC	0.85 $\pm$ 0.09bB	0.90 $\pm$ 0.07bB	0.94 $\pm$ 0.05abC	1.16 $\pm$ 0.16aB
	30—33	1.03 $\pm$ 0.09cAB	1.16 $\pm$ 0.09bcA	1.35 $\pm$ 0.07aA	1.17 $\pm$ 0.03abcAB	1.22 $\pm$ 0.02abB	1.26 $\pm$ 0.05abB
	>50	1.13 $\pm$ 0.08cA	1.17 $\pm$ 0.03cA	1.39 $\pm$ 0.07bcA	1.29 $\pm$ 0.18cA	1.55 $\pm$ 0.03abA	1.72 $\pm$ 0.03aA

0—20 cm 土层, 土壤团聚体有机碳含量随粒级减小呈升高的趋势, 且 $0.5-0.25\text{ mm}$ 和 $<0.25\text{ mm}$ 粒级有机碳含量显著高于其他粒级土壤团聚体。20—

40 cm 土层, 土壤团聚体有机碳含量则随粒级的减小呈先升高、后降低、最后升高的趋势。相同植茶年限下, 土壤团聚体有机碳含量随粒级的减少总体表现

为升高的趋势。

0—20 cm 土层,植茶 50 a 以上的土壤团聚体有机碳与 12—15 a 和 20—22 a 间存在显著差异。植茶 50 a 以上与 12—15 a、20—22 a 相比,各粒级团聚体有机碳含量增幅分别介于 34.17%—50.67% 和 12.01%—41.69% 之间。20—40 cm 土层各粒级团聚体有机碳变化趋势与 0—20 cm 土层相似,50 a 以上土壤团聚体有机碳含量显著高于植茶 12—15 a 和 20—22 a,团聚体有机碳含量增幅分别介于 17.71%—126.68% 和 40.70%—65.33%。此外,0—20 cm 土层各粒级团聚体有机碳含量均高于 20—40 cm 土层。

2.2.2 土壤团聚体水溶性有机碳(WSOC)含量分布

由表 4 可知,土壤团聚体 WSOC 含量表现为小

粒级中较高、大粒级中较低的现象,与团聚体总有机碳分布特征较为一致。除 5—2 mm 粒级团聚体外,总体上表现为小粒级团聚体 WSOC 含量显著高于大粒级团聚体。不同植茶年限对土壤团聚体 WSOC 含量的影响各异,随着植茶年限的延长,各粒级团聚体 WSOC 含量呈现先增加后降低的趋势,在植茶 30—33 a 时,团聚体 WSOC 含量显著高于其他年限。经野外实地调查可知,此植茶年限下茶树凋落物最多,进而导致土壤腐殖质较多的积累,同时也可能与其根系生长旺盛、根系分泌物较多有关。0—20 cm 土层各粒级团聚体 WSOC 含量明显高于 20—40 cm 土层,主要因为枯枝落叶在表层的积累与转化,促进了 0—20 cm 土层各粒级团聚体 WSOC 含量的增加。

表 4 不同植茶年限土壤团聚体水溶性有机碳的分布特征/(mg/kg)

Table 4 Distribution of water-soluble organic carbon in soil aggregates under different tea plantation age

土层/cm Soil layer	植茶年限/a Tea plantation age	>5 mm	5—2 mm	2—1 mm	1—0.5 mm	0.5—0.25 mm	<0.25 mm
0—20	12—15	147.55±12.75cB	173.97±12.75bcB	157.46±12.75cA	182.23±10.43bcB	200.95±14.06abA	236.74±12.75aAB
	20—22	190.49±15.08bcAB	242.24±24.16aA	167.37±15.08cA	224.62±12.68abA	183.89±15.08bcA	223.53±15.08abB
	30—33	199.3±17.84bcA	232.33±18.64bA	183.33±8.52cA	237.84±16.49abA	222.42±14.47bcA	281.88±14.47aA
	>50	188.84±12.25bcAB	209.21±15.08abAB	148.65±11.09cA	202.6±12.23bAB	230.68±19.99abA	248.3±18.08aAB
20—40	12—15	129.93±18.83cB	152.51±13.11cB	123.87±9.14cB	164.61±16.9bcB	202.05±12.07abA	227.93±22.61aA
	20—22	180.58±15.08bcA	221.32±9.91abA	147.55±15.08cAB	227.93±14.25aA	180.58±15.08bcA	212.51±15.08abAB
	30—33	164.07±15.08cAB	203.71±15.08abcA	172.88±15.08bcA	226.28±24.08aA	219.12±19.5abA	196±14.08abcAB
	>50	147.55±18.74bAB	188.84±19.66abAB	164.62±9.78bA	197.1±11.53abAB	218.57±28.18aA	173.98±15.08abB

0—20 cm 和 20—40 cm 土层,植茶 12—15 a、20—22 a、30—33 a 和 50 a 以上土壤团聚体 WSOC 含量平均值与 TOC 含量平均值的比值分别为 1.26%、1.18%、1.19%、0.98% 和 1.99%、2.19%、1.65%、1.34%。可见,随着植茶年限的延长,土壤团聚体易受分解组分所占比例越来越小,有机碳库逐渐趋于稳定,有机碳积累量不断增加。不同粒级团聚体 WSOC/TOC 值表现为 5—2 mm 粒级最高,2—1 mm 粒级最低。表明 2—1 mm 粒级团聚体有机碳最为稳定,不易分解。0—20 cm 土层各粒级团聚体 WSOC/TOC 值均低于 20—40 cm 土层,说明研究区 0—20 cm 土层团聚体有机碳含量较 20—40 cm 土层稳定。

2.2.3 土壤团聚体微生物生物量碳(MBC)含量分布

由表 5 可知,团聚体 MBC 含量随着粒级的减小

呈先增加后降低的变化趋势,在 5—2 mm 粒级中 MBC 含量最高,且与其他粒级 MBC 含量间均达到显著差异,而在<0.25 mm 粒级中 MBC 含量最低,与小粒级团聚体相比,大粒级团聚体活性有机碳比例较高,能为微生物提供更多的碳源,故出现上述研究结果。随着植茶年限的延长,各粒级团聚体 MBC 含量呈先增加后降低的趋势,在植茶 30—33 a 时其含量达最大值,主要由于此植茶年限茶树枯枝落叶归还量及根系分泌物在土壤中积累较多,对微生物生长繁殖较为有利,故出现最大值。经实地调查可知,研究区茶树凋落物主要集中分布在 0—20 cm 土层,可增加表层有机碳的输入量,且该层土壤温度和通气性良好,适宜微生物生长,故 0—20 cm 土层各粒级团聚体 MBC 含量明显高于 20—40 cm 土层。

表 5 不同植茶年限土壤团聚体微生物生物量碳的分布特征/(mg/kg)

Table 5 Distribution of microbial biomass carbon in soil aggregates under tea plantation of different age

土层/cm Soil layer	植茶年限/a Tea plantation age	>5 mm	5—2 mm	2—1 mm	1—0.5 mm	0.5—0.25 mm	<0.25 mm
0—20	12—15	627.57±8.47bB	677.76±8.47aB	358.18±8.47dD	315.42±8.47eC	404.24±8.47cC	182.92±8.47fC
	20—22	674.74±8.47bA	754.94±8.47aA	482.14±8.47cB	359.65±9.79dB	469.98±8.47cA	262.82±8.47eA
	30—33	663.71±8.47bA	748.82±8.47aA	523.19±8.47cA	413.05±11.08eA	493.08±8.47dA	248.67±8.47fA
	>50	554.72±8.47bC	618.88±16.48aC	425.34±8.47cC	350.86±8.08dB	436.17±8.47cB	210.84±8.47eB
20—40	12—15	560.86±8.11bB	677.73±17.96aB	331.47±8.47dC	353.55±8.47dC	395.51±8.47cB	160.34±8.47eD
	20—22	597.46±8.47bA	722.42±8.47aA	262.54±15.25eD	433.86±8.47cA	397.55±19.2dB	236.93±8.47eB
	30—33	562.93±11.67bB	642.72±12.07aB	485.05±8.47cA	380.55±8.47eB	433.21±6.99dA	266.03±8.47fA
	>50	485.25±8.47bC	569.39±5.10aC	423.15±15.29cB	425.62±8.47cA	316.92±8.47dC	185.94±8.47eC

0—20 cm 和 20—40 cm 土层,植茶 12—15 a、20—22 a、30—33 a 和 50 a 以上土壤团聚体 MBC 含量均值与 TOC 含量均值的比值分别为 3.01%、3.02%、2.81%、2.13% 和 4.70%、5.18%、3.92%、3.11%。可见,随着植茶年限的延长,土壤团聚体易被利用分解组分所占比例呈先增高后降低的趋势,植茶 20—22 a 土壤活性有机碳含量最高,土壤肥力状况较好,在植茶 30—33 a 后土壤有机碳库逐渐趋于稳定。不同粒级 MBC/TOC 值表现为 5—2 mm 粒级中最高,<0.25 mm 粒级中最低。0—20 cm 土层各粒级团聚体 MBC/TOC 值均小于 20—40 cm 土层,与不同土层各粒级团聚体 WSOC 含量的变化趋势一致。

2.3 土壤团聚体对有机碳的贡献率

由表 6 可知,>5 mm 和 5—2 mm 粒级团聚体对

有机碳贡献率较大,而 0.5—0.25 mm 和 2—1 mm 粒级团聚体对有机碳贡献率较小,这与团聚体含量分布特征相似。虽然团聚体有机碳含量在>2 mm 粒级中的分布较小粒级团聚体稍低,但其贡献率却高达 70%,这是研究区土壤该粒级团聚体含量占主要优势所致。经方差分析表明,>5 mm 和 5—2 mm 粒级团聚体对有机碳的贡献率显著高于其他粒级团聚体,<0.5 mm 粒级团聚体有机碳含量较高,但其对有机碳的贡献率较小且相互之间差异不显著。植茶 12—15 a 土壤团聚体对有机碳的贡献率最高,其次为 50 a 以上的茶园,可见,不同植茶年限对团聚体土壤有机碳贡献率的影响较为明显。此外,0—20 cm 土层大粒级团聚体有机碳贡献率均低于 20—40 cm 土层,而小粒级团聚体有机碳贡献率则表现出相反的变化趋势。

表 6 不同植茶年限土壤各粒级团聚体对土壤有机碳含量的贡献率/%

Table 6 Contribution rates of different aggregate fractions to soil organic carbon concentration under different tea plantation age

土层/cm Soil layer	植茶年限/a Tea plantation age	>5 mm	5—2 mm	2—1 mm	1—0.5 mm	0.5—0.25 mm	<0.25 mm
0—20	12—15	50.79±2.23aA	20.09±0.99bB	4.46±0.13dCD	7.39±0.19cC	3.16±0.11dD	5.48±0.31cdCD
	20—22	63.71±2.49aA	12.29±0.90bB	2.72±0.21cC	4.02±0.26cC	1.58±0.15cC	4.57±0.12cC
	30—33	51.27±2.06aA	17.99±0.72bB	3.57±0.12cdC	5.06±0.11cC	2.16±0.05dC	4.35±0.12cdC
	>50	54.99±1.21aA	19.24±3.65bB	4.05±0.04cC	6.29±0.12cC	2.47±0.05cC	5.38±0.14cC
20—40	12—15	67.37±0.99aA	25.12±0.42bB	4.98±0.14dCD	6.98±0.67cC	1.99±0.16eE	3.70±0.04dDE
	20—22	59.74±4.81aA	14.28±0.62bB	2.32±0.26cC	3.64±0.27cC	1.58±0.08cC	4.94±0.67cC
	30—33	59.04±5.29aA	16.41±1.27bB	3.50±0.18cC	4.46±0.10cC	1.91±0.03cC	4.53±0.18cC
	>50	52.84±3.64aA	16.59±0.45bB	3.89±0.20cC	5.40±0.75cC	2.52±0.05cC	5.78±0.11cC

同一行不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著,大写字母表示 $P<0.01$ 水平上差异显著

2.4 土壤团聚体有机碳储量

由图 1 可知,不同植茶年限 0—20 cm 土层各粒级团聚体有机碳储量均高于 20—40 cm 土层。随着

团聚体粒级的减小,团聚体有机碳储量总体呈逐渐增加的趋势。

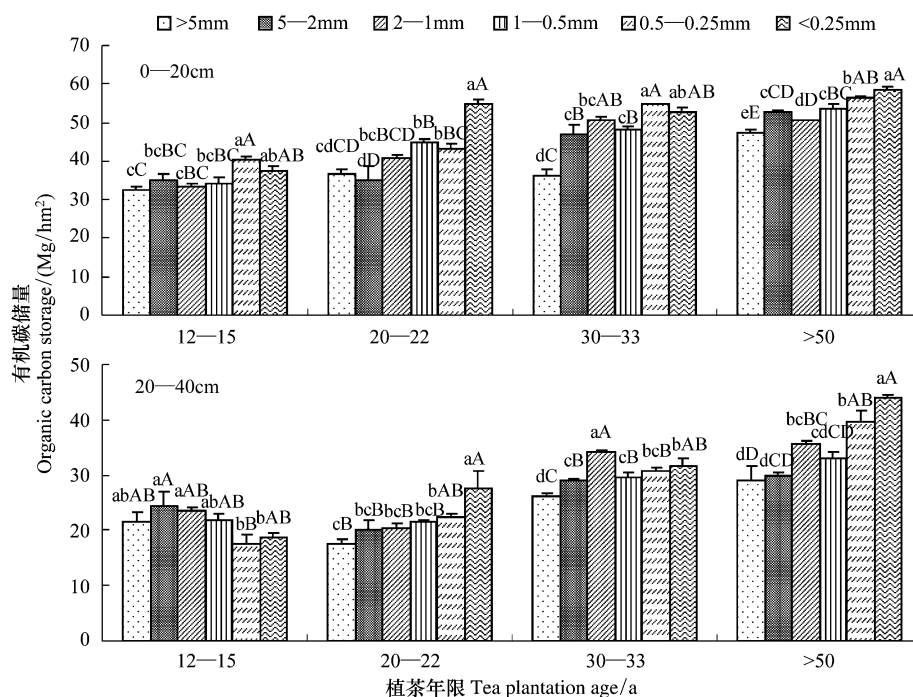


图1 不同植茶年限各粒级团聚体有机碳储量

Fig.1 The organic carbon storage of different aggregate fractions under different tea plantation age

图中不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著, 大写字母表示 $P < 0.01$ 水平上差异显著

如图1所示, 0—20 cm 土层, 各植茶年限均表现为 < 0.5 mm 粒级团聚体有机碳储量显著高于 > 2 mm 粒级, 植茶 50 a 以上团聚体有机碳储量最高, 较植茶 12—15 a 增加了 1.50 倍。就不同粒级而言, < 0.25 mm 粒级土壤团聚体有机碳储量最高, > 5 mm 团聚体有机碳储量最低。表明随着植茶年限的延长, 研究区茶园土壤碳汇效应有所增强, 且 < 0.25 mm 的团聚体对有机碳具有较强的保护作用。20—40 cm 土层, 除植茶 12—15 a 外, 其余各年限均表现为 < 0.25 mm 粒级团聚体有机碳储量显著高于 > 5 mm 团聚体。植茶 50 a 以上团聚体有机碳储量最高, 为植茶 12—15 a 的 1.65 倍 (图 1)。可见, 随着团聚体粒级的减少, 团聚体有机碳储量总体呈先增加、后降低、最后增加的变化趋势。

3 讨论

本研究中, 干筛法获得土壤团聚体以 > 2 mm 的团聚体为主, 说明研究区植茶土壤的稳定性较好。2—1 mm 和 0.5—0.25 mm 粒级团聚体含量较低, 可能是与其机械组成有关, 这与何淑勤等^[22]研究结果一致。随着植茶年限的延长, > 5 mm 粒级团聚体含量呈现先增加后降低的趋势, 以植茶 20—22 a 为界,

而 < 2 mm 粒级团聚体含量则呈现相反的趋势, 表明植茶 22 a 左右土壤团聚体稳定性较好, 这主要由于 0—20 cm 和 20—40 cm 土层团聚体平均重量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GWD) 在 20—22 a 最大^[23]。此外, 虽然土壤有机碳含量呈逐年增加, 但由于植茶连作, 土壤不断酸化和铝、氟的富集, 导致土壤团聚体稳定性在植茶 30 a 后有所降低。0—20 cm 土层 > 5 mm 粒级团聚体含量总体低于 20—40 cm 土层, 说明 20—40 cm 土层团聚体稳定性高于 0—20 cm 土层。一方面, 由于定期采茶、施肥等人为活动对表层土壤大粒级团聚体具有一定的破坏作用; 另一方面, 20—40 cm 土层更易受氧化物的影响, 促使其大粒级团聚体的增加^[24]。

土壤各粒级团聚体有机碳含量是土壤有机质平衡和矿化速率的微观表征, 对土壤肥力和土壤碳汇具有双重意义^[25]。本研究结果表明, 不同植茶年限土壤各粒级团聚体有机碳含量主要集中于 < 0.25 mm 粒级, 这是较小团聚体有机无机胶体紧密结合的结果^[26], 且团聚体粒级越小, 比表面积越大, 吸附的有机物质则越多, 这一研究结果证实了土壤有机碳含量随团聚体粒级减小而呈增加的变化趋势^[27-28], 说明 < 0.25 mm 粒级有机碳含量的高低对土壤团聚化

过程起到极其重要的作用。随着植茶年限的延长, 0—20 cm 和 20—40 cm 土层团聚体有机碳含量均呈逐渐增加的趋势, 植茶 50 a 以上有机碳含量显著大于 12—15 a 和 20—22 a, 这与茶园土壤接纳的枯落物增多有关, 且植茶 50 a 以上的土壤微团聚体含量较多, 进而使土壤有机碳含量呈增加的趋势; 同时, 由于土壤微团聚体的固持作用, 活性有机碳支出较少^[29]。此外, 0—20 cm 土层各粒级团聚体有机碳含量均高于 20—40 cm 土层, 这是由于茶园定期的修剪以及枝叶的凋落主要集中于土壤表层, 一定程度上促进了 0—20 cm 土壤的生物活性, 这与 Bandyopadhyay 等^[30]研究结果一致。

WSOC 是土壤环境变化的敏感性指标和微生物可直接利用的有机能源, 影响着土壤有机和无机物质的迁移、转化和降解^[31]。MBC 周转速率较快, 可更好地反映出土壤有机碳的变化, 是衡量土壤肥力的重要指标^[32]。大量研究表明, WSOC 和 MBC 在指示土壤有机碳库的短期变化方面比总有机碳更灵敏^[33-34]。不同植茶年限各粒级团聚体 WSOC 和 MBC 的含量均在植茶 30—33 a 达到最大值, 且表现为 0—20 cm 土层各粒级团聚体 WSOC 和 MBC 的含量高于 20—40 cm 土层, 这主要由于表层土壤能够不断接纳茶树凋落物及根系生长代谢输入的有机碳, 在一定条件下, 有机物质输入越多, 土壤微生物量碳愈高^[35]。本研究结果表明, WSOC 含量在小粒级团聚体中较高, MBC 含量则与之相反。由于地表径流对团聚体 WSOC 含量的影响较大, 较小粒级团聚体具有较高的稳定性, 受微生物活动影响较小, 不易随地表径流流失, 故小粒级团聚体 WSOC 含量较高^[36]; 而较大粒级团聚体能增强土壤的通气性, 良好的土壤通气状况为微生物生长提供适宜的环境, 从而促进了大粒级团聚体 MBC 含量的增加^[37]。WSOC 与 TOC 的比值更能反映土壤有机碳库状况, 其比例越高, 说明土壤有机碳活性越强, 稳定性越差, 而 MBC 与 TOC 的比值则反映了土壤有机碳的质量和生物活性有机碳库的周转速率^[11]。对比土壤团聚体 WSOC 和 MBC 的含量及其与 TOC 的比值可知, 当植茶 50 a 以上 WSOC/TOC 和 MBC/TOC 值最小, 表明土壤有机碳库逐渐趋于稳定, 表现出一定的碳增汇效应; 而 5—2 mm 粒级 WSOC/TOC 和 MBC/TOC 值最大, 表明较大粒级团聚体有机碳不稳定, 更

易于矿化。20—40 cm 土层团聚体有机碳的稳定性不及 0—20 cm 土层, 可能由于 0—20 cm 土层接纳茶园凋落物所致, 因茶园凋落物中含大量木质素及多酚物质, 难以被微生物利用^[14]; 而 20—40 cm 土层, 茶树根系分泌物可使有机碳活性增强, 从而降低了团聚体有机碳的稳定性, 这与 Rovira 等^[38]研究结果一致。

将各粒级土壤团聚体含量和不同粒级团聚体有机碳含量综合考虑, 不仅可更好地反映各粒级团聚体对土壤有机碳的贡献率, 而且能全面、客观地反映植茶年限对土壤有机碳库的作用^[39]。不同植茶年限土壤各粒级团聚体对有机碳的贡献率均以 >2 mm 的大粒级团聚体为主, 占总团聚体数量的 70% 以上, 显著高于其他粒级团聚体, 这与郑子成^[40]、卢凌霄等^[41]研究结果一致。<0.25 mm 粒级团聚体有机碳含量最高, 但其对有机碳的贡献率却较低, 这主要是由于研究区该粒级团聚体含量较低。植茶 12—15 a 与 50 a 以上土壤团聚体对有机碳的贡献率最高, 由于植茶 10 多年后茶园形成较稳定植物群落, 随着凋落物量增加, 土壤团聚体有机碳积累量较大^[42], 而植茶 50 a 以上土壤微团聚体含量增幅较大, 由于其对有机碳的固持作用, 使得植茶 50 a 以上土壤团聚体对有机碳的贡献也较大。此外, 0—20 cm 土层大粒级团聚体有机碳贡献率低于 20—40 cm 土层, 而小粒级团聚体有机碳贡献率则表现出相反的变化趋势。可见, >2 mm 的大粒级团聚体是土壤团聚体有机碳的主要贡献载体, 提高土壤 >2 mm 粒级团聚体, 可在一定程度上提高研究区植茶土壤固碳能力。土壤团聚体是土壤有机碳稳定和保护的载体, 是土壤有机碳储存的场所, 土壤有机碳的数量和质量与团聚体密切相关^[23]。本研究结果表明, 不同植茶年限 0—20 cm 土层各粒级团聚体有机碳储量均高于 20—40 cm 土层, 植茶 50 a 以上 0—20 cm 和 20—40 cm 土层有机碳储量均以 <0.25 mm 粒级团聚体有机碳储量最高, 这与该粒级团聚体有机碳含量较高有关。说明小粒级团聚体对土壤有机碳的保护作用有利于土壤有机碳的长期固存, 且随着植茶年限的延长, 呈现出一定的碳增汇效应, 这与王峰等^[43]对福建丘陵山地茶园土壤团聚体有机碳的研究结果较为一致。由于 0—20 cm 和 20—40 cm 土层团聚体 MWD 和 GWD 在 20—22 a 最大, 表明这一植茶年限

对土壤有机碳固持作用影响较大^[44],这也是 0—20 cm 和 20—40 cm 土层<0.25 mm 粒级团聚体有机碳储量在植茶 20—22 a 均维持在较高水平的主要原因。

4 结论

(1)不同植茶年限土壤团聚体主要以>2 mm 粒级团聚体为主,>5 mm 粒级团聚体含量以植茶 22a 左右为界,呈先增加后减少的趋势,<5 mm 的团聚体含量呈相反趋势。说明该研究区植茶土壤以大粒级团聚体为主,且在植茶 2a 年左右,土壤团聚体稳定性最好。

(2)不同植茶年限土壤较小粒级团聚体有机碳含量高于较大粒级,<0.25 mm 粒级团聚体有机碳含量最高,土壤各粒级团聚体有机碳的平均含量随着植茶年限的延长而增加,且 0—20 cm 土层团聚体有机碳含量均高于 20—40 cm 土层。土壤团聚体 WSOC 和 MBC 含量随植茶年限延长呈先增加后降低的变化趋势,植茶 30—33 a 时含量最高,而土壤团聚体 WSOC/TOC 和 MBC/TOC 值却呈下降趋势,说明随植茶年限延长,土壤有机碳活性降低,稳定性逐渐增强,表现出一定的碳增汇效应。

(3)土壤团聚体对有机碳的贡献率约有 70%—80%来自>2 mm 粒级团聚体,且 0—20 cm 土层>2 mm 粒级团聚体对有机碳贡献率均低于 20—40 cm 土层,而<2 mm 团聚体有机碳贡献率则表现出相反的变化趋势。0—20 cm 土层不同植茶年限各粒级团聚体有机碳储量均高于 20—40 cm 土层,且以<0.25 mm 粒级团聚体有机碳储量最高;各粒级团聚体有机碳储量均随植茶年限延长而增加,植茶 50 a 以上土壤团聚体有机碳储量最高。

References:

- [1] Zhang Z D, Yang X M, Li C L, Zhao L P, Zhou Y J, Yu B. Research progresses of soil organic carbon sequestration. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(21): 8-12.
- [2] Liu H Y, Zhou P, Zhu H H, Wu J S, Zou D S. Effect of land use change on topsoil organic carbon storage of paddy soil in a hilly landscape of red earth region. *Research of Agricultural Modernization*, 2012, 33(3): 359-362.
- [3] Ayoubi S, Karchegani P M, Mosaddeghi M R, Honarjoo N. Soil aggregation and organic carbon as affected by topography and land use change in western Iran. *Soil and Tillage Research*, 2012, 121: 18-26.
- [4] Liu M Y, Zheng Z C, Li T X. Distribution characteristics of microbial biomass carbon and nitrogen in soil aggregates under tea plantation. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44 (15): 3162-3168.
- [5] Denef K, Zotarelli L, Boddey R M, Six J. Microaggregate-associated carbon as a diagnostic fraction for management-induced changes in soil organic carbon in two Oxisols. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(5): 1165-1172.
- [6] Wang Y, Ji Q, Liu S, Sun H Y, Wang X D. Effects of tillage practices on water-stable aggregation and aggregate-associated organic C in soils. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(7): 1365-1373.
- [7] Gao H Y, Guo S L, Liu W Z, Che S G. Effect of fertilization on organic carbon distribution in various fractions of aggregates in caliche soils. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(5): 931-938.
- [8] Xiao F M, Fan S H, Wang S L, Xiong C Y, Yu X J, Shen Z Q. Moso Bamboo plantation soil aggregate stability and its impact on carbon storage. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22 (2): 131-134.
- [9] Chen J G, Tian D L, Yan W D, Xiang W H, Fang X. Progress on study of carbon sequestration in soil aggregates. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2011, 31 (5): 74-80.
- [10] Han X H, Tong X G, Yang G H, Xue Y L, Zhao F Z. Difference analysis of soil organic carbon pool in returning farmland to forest in loess hilly area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(12): 223-229.
- [11] Su Y Z, Yang R, Yang X, Fan G P. Effects of agricultural management practices on soil organic carbon and its fractions in newly cultivated sandy soil in Northwest China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(14): 2867-2876.
- [12] Wang J Y, Song C C, Wang X W, Song Y Y. Changes in labile soil organic carbon fractions in wetland ecosystems along a latitudinal gradient in Northeast China. *Catena*, 2012, 96: 83-89.
- [13] Liang Q, Chen H Q, Gong Y S, Fan M S, Yang H F, Lal R, Kuzyakov Y. Effects of 15 years of manure and inorganic fertilizers on soil organic carbon fractions in a wheat-maize system in the North China Plain. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 92 (1): 21-33.
- [14] Xue D, Yao H Y, Huang C Y. Characteristics of mineralization and nitrification in soils of tea gardens different in age. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(3): 373-378.
- [15] Xue D, Yao H Y, Huang C Y. Study on soil microbial properties and enzyme activities in tea gardens. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(2): 84-87.
- [16] Shen X R, Wang Q H, Wu X, Fu S W. Increasing tea garden carbon sink capacity, promoting the development of low carbon tea production. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(8):

- 254-260.
- [17] Singh R A. Soil Physical Analysis. New Delhi-Ludhiana: Kalyani Publishers, 1980: 52-56.
- [18] Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [19] Vance E D, Brookes P C, Jenkison D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass carbon. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703-707.
- [20] Yang C M, Ou Y Z, Yang L Z, Dong Y H. Organic carbon fractions and aggregate stability in an aquatic soil as influenced by agricultural land uses in the Northern China Plain. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 4148-4155.
- [21] Liang A Z, Zhang X P, Yang X M, Drury C F. Short-term effects of tillage on soil organic carbon storage in the plow layer of black soil in Northeast China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(6): 1287-1293.
- [22] He S Q, Zheng Z C, Yang Y M. Distribution characteristics of soil aggregates and organic carbon in tea plantation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(5): 187-190.
- [23] Liu M Y, Zheng Z C, Li T X. Study on the composition and stability of soil aggregates with different tea plantation age. *Journal of Tea Science*, 2012, 32(5): 402-410.
- [24] Zhou P, Song G H, Pan G X, Li L Q, Zhang X H, Wu L S. SOC enhancement in three major types of paddy soils in a long-term agro-ecosystem experiment in South China II. Chemical binding and protection in micro-aggregate size fractions. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(2): 263-273.
- [25] Li H X, Yuan Y H, Huang Q R, Hu F, Pan G X. Effects of fertilization on soil organic carbon distribution in various aggregates of red paddy soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3): 422-429.
- [26] Zheng Z C, He S Q, Li T X, Wang Y D. Effect of land use patterns on stability and distributions of organic carbon in the hilly region of Western Sichuan, China. *African Journal of Biotechnology*, 2011, 10(61): 13107-13114.
- [27] Zheng Z C, Wang Y D, Li T X, Yang Y M. Effect of abandoned cropland on stability and distributions of organic carbon in soil aggregates. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(1): 119-127.
- [28] He S Q, Zheng Z C, Gong Y B. Distribution characteristics and soil organic carbon of soil water-stable aggregates with different de-farming patterns. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5): 229-233.
- [29] Armas-Herrera M C, Mora J, Arbelo C, Rodríguez-Rodríguez A. Interannual variations of soil organic carbon fractions in unmanaged volcanic soils (Canary Islands, Spain). *Ecology and Evolution*, 2012, 2(10): 2374-2386.
- [30] Bandyopadhyay P K, Saha S, Mani P K, Mandal B. Effect of organic inputs on aggregate associated organic carbon concentration under long-term rice-wheat cropping system. *Geoderma*, 2010, 154(3/4): 379-386.
- [31] Wang M H, Wang G B, Ruan H H, Xie T, Xu C B, Xu Y M, Zhao X L, Xu H M. Characteristics of soil water-soluble organic carbon under four different land use patterns in coastal area of Northern Jiangsu. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(5): 1165-1170.
- [32] Yang H L, Ren J. Soil active organic carbon under different types of land use. *Shaanxi Forest Science and Technology*, 2012, (3): 1-6, 13.
- [33] Zhang S J, Xiang W H. Research progress in effects of land use mode on soil active organic carbon. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2012, 32(5): 134-143.
- [34] Kumar S, Aulakh M S, Garg A K. Soil aggregates, organic matter, and labile C and N fractions after 37 Years of N, P and K applications to an irrigated subtropical soil under maize-wheat rotation. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2011, 1(2A): 170-181.
- [35] Xu Y L, Lu L X, Zeng F P, Song T Q, Peng W X. Carbon distribution of microbial biomass of soil aggregates under different forest types in depressions between karst hills. *Research of Agricultural Modernization*, 2012, 33(5): 636-640.
- [36] Ma S J, Li Z C, Wang B, Liu R J, Geri L T, Wang G. Changes in soil active organic carbon under different management types of bamboo stands. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(8): 2604-2611.
- [37] Xie T, Wang M H, Zheng A B, Xu C B, Wang G B, Ge Z W, Ruan H H. Characteristics of soil labile organic carbon in poplar plantations of different ages in coastal area of North Jiangsu. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(1): 51-58.
- [38] Rovira P, Jorba M R, Romanyà J. Active and passive organic matter fractions in Mediterranean forest soils. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, 46(4): 355-369.
- [39] Liu Z L, Yu W T, Zhou H, Xu Y G, Huang B T. Effects of long-term fertilization on aggregate size distribution and nutrient content. *Soils*, 2011, 43(5): 720-728.
- [40] Zheng Z C, He S Q, Wang Y D, Li T X, Zhang X Z, Xu Y. Distribution feature of soil nutrients in aggregate under different land use. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(3): 170-174.
- [41] Lu L X, Song T Q, Peng W X, Zeng F P, Wang K L, Xu Y L, Yu Z, Liu Y. Profile distribution of soil aggregates organic carbon in primary forests in Karst cluster-peak depression region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(5): 1167-1174.
- [42] Xu M X, Wang Z, Zhang J, Liu G B. Response of soil organic carbon sequestration to the "Grain for Green Project" in the hilly Loess Plateau region. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(17): 5405-5415.
- [43] Wang F, Wang Y X, Jang F Y, Wu Z D, You Z M, Zhang W J,

Weng B Q. Distribution characteristics of soil aggregates and organic carbon in hill tea plantation. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 27(1): 87-92.

- [44] Li C L, Xu J B, He Y Q, Liu Y L, Fan J B. Dynamic relationship between biologically active soil organic carbon and aggregate stability in long-term organically fertilized soils. *Pedosphere*, 2012, 22(5): 616-622.

参考文献:

- [1] 张志丹, 杨学明, 李春丽, 赵兰坡, 周雅娟, 于博. 土壤有机碳固定研究进展. *中国农学通报*, 2011, 27(21): 8-12.
- [2] 刘欢瑶, 周萍, 朱捍华, 吴金水, 邹冬生. 红壤丘陵景观土地利用变化对稻田土壤有机碳储量的影响. *农业现代化研究*, 2012, 33(3): 359-362.
- [4] 刘敏英, 郑子成, 李廷轩. 茶园土壤团聚体中微生物量碳、氮的分布特征. *中国农业科学*, 2011, 44(15): 3162-3168.
- [6] 王勇, 姬强, 刘帅, 孙汉印, 王旭东. 耕作措施对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响. *农业环境科学学报*, 2012, 31(7): 1365-1373.
- [7] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 车升国, 李森. 不同施肥处理对黑垆土各粒级团聚体中有机碳含量分布的影响. *土壤学报*, 2010, 47(5): 931-938.
- [8] 肖复明, 范少辉, 汪思龙, 熊彩云, 于小军, 申正其. 毛竹林地土壤团聚体稳定性及其对碳贮量影响研究. *水土保持学报*, 2008, 22(2): 131-134.
- [9] 陈建国, 田大伦, 闫文德, 项文化, 方晰. 土壤团聚体固碳研究进展. *中南林业科技大学学报*, 2011, 31(5): 74-80.
- [10] 韩新辉, 佟小刚, 杨改河, 薛亚龙, 赵发珠. 黄土丘陵区不同退耕还林地土壤有机碳库差异分析. *农业工程学报*, 2012, 28(12): 223-229.
- [11] 苏永中, 杨荣, 杨晓, 范桂萍. 农业管理措施对新垦荒漠沙地农田土壤有机碳及其组分的影响. *中国农业科学*, 2012, 45(14): 2867-2876.
- [14] 薛冬, 姚槐应, 黄昌勇. 不同利用年限茶园土壤矿化、硝化作用特性. *土壤学报*, 2007, 44(3): 373-378.
- [15] 薛冬, 姚槐应, 黄昌勇. 植茶年龄对茶园土壤微生物特性及酶活性的影响. *水土保持学报*, 2005, 19(2): 84-87.
- [16] 沈星荣, 汪秋红, 吴洵, 傅尚文. 充分发挥茶园碳汇功能, 促进茶叶低碳生产发展. *中国农学通报*, 2012, 28(8): 254-260.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 杨长明, 欧阳竹, 杨林章, 董玉红. 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. *生态学报*, 2006, 26(12): 4148-4155.
- [21] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, Drury C F. 耕作方式对耕层黑土有机碳库储量的短期影响. *中国农业科学*, 2006, 39(6): 1287-1293.
- [22] 何淑勤, 郑子成, 杨玉梅. 茶园土壤团聚体分布特征及其对有机碳含量影响的研究. *水土保持学报*, 2009, 23(5): 187-190.
- [23] 刘敏英, 郑子成, 李廷轩. 不同植茶年限土壤团聚体的分布特征及稳定性研究. *茶叶科学*, 2012, 32(5): 402-410.
- [24] 周萍, 宋国茜, 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉, Wu L S. 三种南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究 II. 团聚体内有机碳的化学结合机制. *土壤学报*, 2009, 46(2): 263-273.
- [25] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如, 胡锋, 潘根兴. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响. *土壤学报*, 2006, 43(3): 422-429.
- [27] 郑子成, 王永东, 李廷轩, 杨玉梅. 退耕对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响. *自然资源学报*, 2011, 26(1): 119-127.
- [28] 何淑勤, 郑子成, 宫渊波. 不同退耕模式下土壤水稳性团聚体及其有机碳分布特征. *水土保持学报*, 2011, 25(5): 229-233.
- [31] 王明慧, 王国兵, 阮宏华, 谢涛, 徐长柏, 徐亚明, 赵小龙, 徐涵涓. 苏北沿海不同土地利用方式土壤水溶性有机碳含量特征. *生态学杂志*, 2012, 31(5): 1165-1170.
- [32] 杨怀林, 任建. 不同土地利用类型下川西亚高山土壤活性有机碳研究. *陕西林业科技*, 2012, (3): 1-6, 13.
- [33] 张仕吉, 项文化. 土地利用方式对土壤活性有机碳影响的研究进展. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(5): 134-143.
- [35] 徐云蕾, 卢凌霄, 曾馥平, 宋同清, 彭晚霞. 喀斯特峰丛洼地不同森林土壤微生物量碳在团聚体中的分布. *农业现代化研究*, 2012, 33(5): 636-640.
- [36] 马少杰, 李正才, 王斌, 刘荣杰, 格日乐图, 王刚. 不同经营类型毛竹林土壤活性有机碳的差异. *生态学报*, 2012, 32(8): 2604-2611.
- [37] 谢涛, 王明慧, 郑阿宝, 徐长柏, 王国兵, 葛之葳, 阮宏华. 苏北沿海不同林龄杨树林土壤活性有机碳特征. *生态学杂志*, 2012, 31(1): 51-58.
- [39] 刘中良, 宇万太, 周桦, 徐永刚, 黄宝同. 长期施肥对土壤团聚体分布和养分含量的影响. *土壤*, 2011, 43(5): 720-728.
- [40] 郑子成, 何淑勤, 王永东, 李廷轩, 张锡洲, 徐盈. 不同土地利用方式下土壤团聚体中养分的分布特征. *水土保持学报*, 2010, 24(3): 170-174.
- [41] 卢凌霄, 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 王克林, 徐云蕾, 俞孜, 刘艳. 喀斯特峰丛洼地原生林土壤团聚体有机碳的剖面分布. *应用生态学报*, 2012, 23(5): 1167-1174.
- [42] 许明祥, 王征, 张金, 刘国彬. 黄土丘陵区土壤有机碳固存对退耕还林草的时空响应. *生态学报*, 2012, 32(17): 5405-5415.
- [43] 王峰, 王义祥, 江福英, 吴志丹, 尤志明, 张文锦, 翁伯琦. 丘陵山地茶园土壤团聚体及其碳含量分布特征研究. *福建农业学报*, 2012, 27(1): 87-92.