

生草栽培对果园土壤团聚体及其有机碳分布的影响

王义祥, 翁伯琦*, 黄毅斌, 王成己, 叶菁

(福建省农业科学院农业生态研究所, 福州 350013)

摘要: 以福建尤溪玉池生草果园定位观测点为平台, 研究了生草栽培对果园土壤团聚体有机碳分布的影响。结果表明, 生草栽培处理后, 0~20 cm 土壤团聚体中 >0.25 mm 水稳性团聚体的比例($R_{0.25}$)、平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GWD)分别比顺坡清耕和梯台清耕处理的高 3.78%~5.90%、16.82%~20.94%、5.86%~50.31% 和 3.81%~13.82%、13.33%~19.95%、7.50%~60.63%, 分形维数比顺坡清耕和梯台清耕处理的低 1.54%~2.35% 和 1.09%~9.64%。同时, 生草栽培可提高 >2 mm 土壤团聚体内有机碳贮量和大团聚体有机碳贮量占总有机碳的比例, 但其影响主要集中于 0~20 cm 土层。这说明生草栽培处理更有利于提高土壤团聚体稳定性, 增强土壤有机碳的保护和碳汇作用。

关键词: 生草栽培; 果园; 土壤团聚体; 有机碳

doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2012.04.005

Effects of Sod Cultivation in Orchard on Distributions of Soil Aggregates and Soil Organic Carbon of Aggregates

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

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

Abstract: The effects of sod cultivation in orchard on distribution of organic carbon in soil aggregates were investigated, which located in Yuchi Village, Youxi Xian, Fujian Province. The results showed that compared with downslope and landings clean tillage orchards, the proportion of >0.25 mm water-stable aggregate ($R_{0.25}$), mean weight diameter (MWD), and geometric mean diameter (GWD) of soil aggregate at 0–20 cm soil layer in sod cultivation orchard increased by 3.78%–5.90%, 16.82%–20.94%, 5.86%–50.31% and 3.81%–13.82%, 13.33%–19.95%, 7.50%–60.63%, and the fractal dimension decreased by 1.54%–2.35% and 1.09%–9.64%, respectively. The sod cultivation could improve proportion of organic carbon storage in large aggregates (>2 mm) to total organic carbon at 0–20 cm soil layer. Therefore, the sod cultivation was beneficial to improve stability of soil aggregate, and could enhance the protection of organic carbon and carbon sink in soil.

Key words: Sod cultivation; Orchard; Soil aggregate; Organic carbon

果园生草栽培是指在果树行间或全园种植多年生草本植物作为覆盖物的一种果园土壤管理方法和制度。已有研究认为, 生草栽培能降低果园土壤容重, 提高土壤团聚体的含量, 亦可有效地提高

土壤酶活性, 激活土壤微生物的活动^[1]。生草栽培同时能增加土壤有机质含量, 生草栽培年限越长, 有机质增加量就越多^[2]。目前对生草果园土壤有机碳积累趋势研究中, 涉及稳定容量的土壤机制、固

收稿日期: 2011-09-02

接受日期: 2011-11-23

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2008BAD95B08); 福建省科技计划项目(2009R10036-4); 福建省农科院创新团队建设项目资助

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

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: boqiwen@yahoo.com.cn

碳过程与土壤管理关系的研究还少见报道^[3]。

土壤是一种具有分形特征的分散多孔介质,土壤结构的形态不仅受颗粒大小的支配,还受到各粒级土粒数量分布的影响。平均重量直径(Mean weight diameter, MWD)和几何平均直径(Geometric mean diameter, GMD)是反映土壤团聚体大小分布状况的常用指标。MWD和GMD值越大表示团聚体的平均粒径团聚度越高,稳定性越强^[4]。土壤分形维数(Fractal dimension, D)是反映土壤结构几何形体的参数。关于土壤分形特征的研究认为,土壤粘粒含量越高,质地越细,分形维数越高;团聚结构越好、结构越稳定则分形维数越小^[5]。另外,有研究认为,土壤团聚体是土壤有机碳稳定和保护的载体,土壤有机碳的固定效应与团聚体的保护机制密切相关,土壤有机碳对土壤团聚体的数量和大小分布具有重要影响,而团聚体的形成反过来影响土壤有机碳的分解^[6]。有机碳的团聚体物理保护对有机碳的积累有重要的意义,并且土壤有机碳固定中团聚体的保护机制可以说明土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)的固定效应^[7]。本研究综合应用 >0.25 mm水稳性团聚体比例($R_{0.25}$)、GWD、GMD和D等指标,探讨不同垦殖模式下果园土壤团聚体的水稳性差异,了解土壤有机碳累积与团聚体稳定性的关系,为果园生草体制下土壤团聚体稳定的保护机制研究提供科学依据。

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 ,最冷月(1月)平均气温为 $8.0^{\circ}\text{C}\sim 12.0^{\circ}\text{C}$,最热月(7月)平均气温为 $26.6^{\circ}\text{C}\sim 28.9^{\circ}\text{C}$ 。光照资源比较丰富,全年光照时数为 4422.8 h。年平均降雨量为 1620.6 mm,年均蒸发量为 1346.4 mm,年内降水分布不均匀,10月至次年1月是少雨季,仅占年降雨量的13%左右;2-6月为春雨、梅雨季,大雨、暴雨较多,约占年降雨量的62%。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,坡度 15° ;成土母质为花岗岩残积坡积物,土壤类型为红壤。

2 材料和方法

2.1 试验设计

供试果树为15年的油桃(*Prunus persica* var. *nectarina* Maxim.),试验地初始(1996年)土壤基础理化性状见表1。试验采用裂区设计,共3个处理,分别为顺坡开垦+清耕(T_1),即在25 m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;梯台开垦+清耕(T_2),即在25 m的小区坡面修建8个梯台,台面宽4 m,在梯台中间开挖直径80 cm、深80 cm的坑,种1株果树,台面自然长草,每年中耕除草3~4次;梯台开垦+套种平托花生(*Arachis pintoi*)(T_3),即在梯台的埂种植百喜草(*Paspalum natatu*)和南非马唐(*Digitaria smutsii*),台面种植平托花生,梯台设计和果树种植方式同 T_2 。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。本试验自1996年开始,试验前各处理小区的立地条件基本一致。

表1 果园试验地初始土壤基本理化性状

Table 1 The basic physical and chemical properties of experimental orchard soil

理化性质 Physical and chemical property	土层深度 Soil depth (cm)	
	0~20	20~40
物理性砂粒 Physical sand (>0.01 mm) (%)	45.05	42.01
物理性粘粒 Physical clay (<0.01 mm) (%)	54.95	58.00
pH	4.35	4.39
有机质 Organic matter (g kg^{-1})	23.10	20.30
阳离子交换量 Cation exchange capacity (cmol kg^{-1})	7.35	6.09
全氮 Total nitrogen (g kg^{-1})	0.96	0.79
全磷 Total phosphorus (g kg^{-1})	0.23	0.23
碱解氮 Alkali-hydrolyzed nitrogen (mg kg^{-1})	100.85	92.35
速效钾 Rapidly available potassium (mg kg^{-1})	31.60	19.55

试验过程中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。

2.2 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, 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。将取回的原状土样, 按土壤自然裂隙轻轻掰成 10 mm 左右的团粒, 在阴凉处风干。

2.3 团聚体指标测定

土壤团聚体的分离依据 Elliott^[8] 的方法, 并略作修改。称取风干土 100 g, 把土样放在最大孔径筛上, 在水中浸泡 5 min, 用振荡式机械筛分仪(上下振幅 3 cm, 30 次 min⁻¹)筛 5 min, 分离出 >2 mm、1~2 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm、0.106~0.25 mm、<0.106 mm 的土壤团聚体, 分别在 50℃ 下烘干, 称重。

参照骆东奇等^[4] 的方法计算 >0.25 mm 团聚体 $R_{0.25}$ 、平均重量直径(Mean weight diameter, MWD)和几何平均直径(Geometric mean diameter, GWD)。分形维数(Fractal dimension, D)采用杨培岭等^[5] 的方法计算。

土壤团聚体有机碳贮量按下式计算: $SOC = soc \times W \times \rho \times H$, 式中: SOC 为土壤团聚体有机碳贮量(t hm⁻²); soc 为土壤团聚体有机碳含量(g kg⁻¹); W 为团聚体质量比例; ρ 为土壤容重(g cm⁻³); H 为土层厚度(cm)。

2.4 测定方法

土壤样品中的全氮采用开氏蒸馏法、碱解氮采用碱解扩散法、全磷采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法、速效钾采用乙酸铵提取-火焰光度法, CEC 测定采用乙酸铵法^[9]。不同粒级土壤团聚体总有机碳含量的测定采用重铬酸钾外加热法^[9]。

2.5 数据处理

用 Microsoft Excel 2003 和 DPS7.05 软件进行数据统计、差异显著性检验和相关性分析, 多重比较采用 LSD 法。

3 结果和分析

3.1 生草栽培对土壤团聚体分布的影响

由图 1 可以看出, T_1 、 T_2 和 T_3 处理对各粒级团聚体的分布表现出一定的相似性, 但 0~20 cm 土层 >2 mm 的团聚体含量显著高于 20~40 cm 土层的。不同垦殖方式在土壤团聚体的数量分布上存在一定的差异。就 0~20 cm 土层而言, T_1 处理的 >2 mm 团聚体含量比 T_2 和 T_3 处理的高 8.35% 和 55.30%, 其与 T_3 处理的差异达显著水平, 与 T_2 处理的差异不显著。 T_3 处理的 1~2 mm、0.5~1 mm 和 0.25~0.5 mm 团聚体含量分别比 T_1 和 T_2 处理的增加 46.70% 和 71.10%、53.53% 和 47.54%、51.92% 和 15.32%, 其与 T_1 处理的差异均达显著水平, 但 T_1 和 T_2 处理间的差异不显著。另外, 3 种处理的 0.106~0.25 mm 和 < 0.106 mm 团聚体含量亦无显著差异。就 20~40 cm 土层而言, T_3 处理的 >2 mm 团聚体含量显著高于 T_1 和 T_2 处理的, 但其 0.5~1 mm 和 0.25~0.5 mm 团聚体含量比 T_1 和 T_2 处理分别降低了 23.52% 和 10.30%, 19.12% 和 31.49%。

3.2 生草栽培对桃园土壤团聚体稳定性的影响

由表 2 可知, 同一土层, T_3 处理的土壤团聚体 $R_{0.25}$ 、MWD 和 GWD 分别比 T_1 和 T_2 处理的高 3.78%~5.90%、16.82%~20.94%、13.33%~19.95% 和 3.81%~13.82%、5.86%~50.31%、7.50%~60.63%, 且 T_3 与 T_1 处理间的差异达显著水平, 说明 T_3 处理的土壤团聚体结构比 T_1 和 T_2 处理的更稳定。同一处理, 0~20 cm 土层的 MWD 和 GWD 分别比 20~40 cm 土层的高 16.93%~66.04% 和 16.02%~73.37%, 且两土层间的差异达显著水平。由表 2 还可以看出, 0~20 cm 土层, 不同垦殖方式的土壤分形维数以 $T_1 > T_2 > T_3$; 20~40 cm 土层为 $T_2 > T_1 > T_3$; T_3 处理的土壤分形维数分别比 T_1 和 T_2 处理的降低 1.54%~2.35% 和 1.09%~9.64%, 亦说明 T_3 处理的团聚体稳定性优于 T_1 和 T_2 处理。

3.3 生草栽培对土壤团聚体有机碳含量的影响

表 3 显示, 不同粒级土壤团聚体的有机碳含量存在差异, 表现为大团聚体(>0.25 mm)的有机碳含量高于微团聚体(<0.25 mm)。就垂直分布来看, 0~20 cm 土层各粒级土壤团聚体有机碳含量均高于 20~40 cm 土层的。果园生草栽培显著增加了土壤

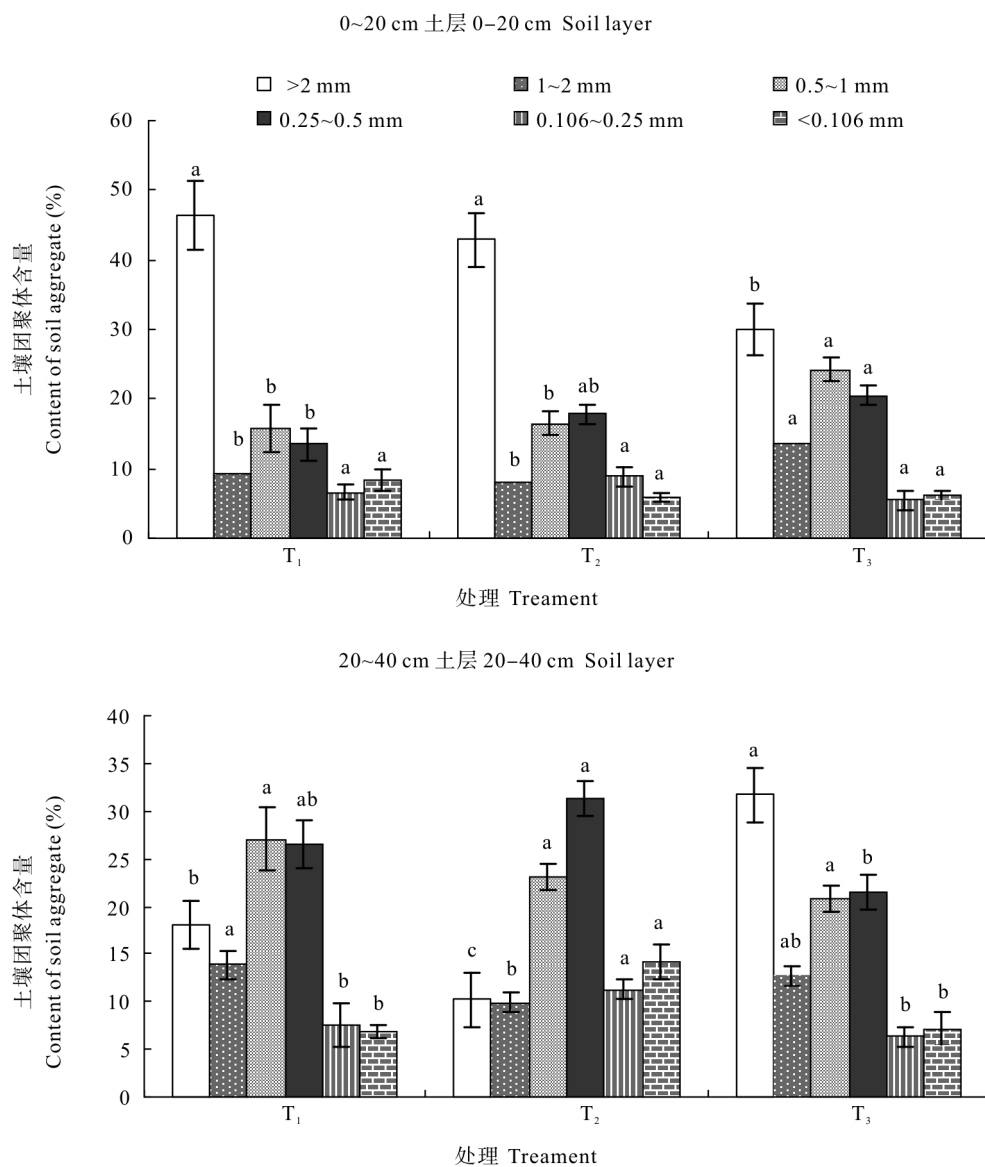


图1 不同垦殖方式对土壤团聚体含量的影响。同一粒级柱上不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Fig. 1 Effects of tillage method on contents of soil aggregate. Different letters above the same fraction size class column present significant differences at 0.05 level.

表2 不同垦殖方式对土壤团聚体 $R_{0.25}$ 、MWD、GWD 和分形维数(D)的影响

Table 2 Effects of different tillage method on $R_{0.25}$, MWD, GWD and fractal dimension (D) of soil aggregate

处理 Treatment	土层深度 Soil depth (cm)	$R_{0.25}$	MWD	GWD	D
T ₁	0~20	83.47 ± 1.26b	1.08 ± 0.20b	0.79 ± 0.14b	2.16 ± 0.09b
	20~40	83.37 ± 2.03b	0.89 ± 0.18c	0.64 ± 0.11c	2.21 ± 0.05b
T ₂	0~20	85.15 ± 1.47b	1.19 ± 0.10a	0.83 ± 0.08a	2.15 ± 0.03b
	20~40	76.02 ± 2.94c	0.72 ± 0.02d	0.48 ± 0.01d	2.41 ± 0.01a
T ₃	0~20	88.40 ± 0.25a	1.26 ± 0.19a	0.89 ± 0.17a	2.12 ± 0.08b
	20~40	86.53 ± 2.34a	1.08 ± 0.23b	0.77 ± 0.18b	2.18 ± 0.09b

同列数据后不同字母表示差异显著($P < 0.05$), 下同。MWD: 平均重量直径; GWD: 几何平均直径; D: 分形维数。

Data followed different letters within column indicate significant differences at 0.05 level. The same is following Tables. MWD: Mean weight diameter; GWD: Geometric mean diameter; D: Fractal dimension.

有机碳含量,对土壤不同粒径团聚体的有机碳含量的影响也非常明显。由表3可见,在0~20 cm土层, T₃处理以>2 mm和1~2 mm团聚体有机碳含量较高,分别比T₁和T₂处理高52.53%和24.54%,且差异达显著水平;而T₁处理以>2 mm和0.5~1 mm团聚体有机碳含量较高,T₂处理以1~2 mm和0.5~1 mm团聚体有机碳含量较高。在20~40 cm土层,不同垦殖方式下各粒级团聚体的有机碳含量均为>2 mm > 1~2 mm > 0.5~1 mm > 0.25~0.5 mm > 0.106~0.25 mm。

3.4 生草栽培对桃园土壤团聚体有机碳分配的影响

不同土层土壤团聚体有机碳贮量在不同垦殖方式下表现出相似的变化规律(表4),大团聚体有

机碳贮量占总有机碳贮量的比例(57.29%~69.78%)高于微团聚体有机碳贮量所占的比例,且0~20 cm土层团聚体有机碳贮量均表现为>2 mm > 1~2 mm > 0.5~1 mm > 0.25~0.5 mm > 0.106~0.25 mm。由表4可见,在0~20 cm土层,T₂和T₃处理以>2 mm团聚体有机碳贮量最高,分别占总贮量的34.46%和43.19%,而T₁处理的<0.106 mm团聚体有机碳贮量最高(占32.00%);且T₂和T₃处理大团聚体(>0.25 mm)有机碳贮量显著高于T₁处理。在20~40 cm土层,T₁、T₂和T₃处理均以<0.106 mm团聚体有机碳贮量最高,但T₃处理>2 mm团聚体有机碳贮量和分配比例明显高于T₁和T₂处理。另外,不同处理大团聚体(>0.25 mm)有机碳贮量均为T₃ > T₁ > T₂。

表3 不同粒级土壤团聚体的有机碳含量(g kg⁻¹)

Table 3 Organic carbon contents (g kg⁻¹) of different size water-stable aggregate

处理 Treatment	土层深度 Soil depth (cm)	土壤团聚体粒级 Soil aggregate size (mm)				
		>2	1~2	0.5~1	0.25~0.5	0.106~0.25
T1	0~20	12.68 ± 1.36bc	10.06 ± 1.20d	11.68 ± 3.84b	8.71 ± 1.57b	8.91 ± 1.43b
	20~40	11.55 ± 2.94c	11.08 ± 3.75cd	10.93 ± 2.87b	9.80 ± 2.47b	7.76 ± 1.31b
T2	0~20	15.57 ± 1.72b	16.41 ± 0.27b	16.96 ± 1.26a	12.71 ± 2.435ab	11.94 ± 1.44a
	20~40	12.36 ± 0.97c	12.37 ± 0.58c	11.65 ± 1.53b	10.1 ± 0.46b	8.76 ± 0.75b
T3	0~20	19.39 ± 1.36a	17.65 ± 2.59a	15.07 ± 3.13ab	13.06 ± 2.62a	11.61 ± 1.99ab
	20~40	14.32 ± 0.46b	13.13 ± 0.28c	12.74 ± 1.97b	10.73 ± 1.62b	8.14 ± 0.58b

表4 不同粒径团聚体有机碳贮量的分配

Table 4 Allocation of organic carbon in different size water-stable aggregate

土层深度 Soil depth (cm)	粒级 Fraction size (mm)	T ₁		T ₂		T ₃	
		贮量 Stock (t hm ⁻²)	%	贮量 Stock (t hm ⁻²)	%	贮量 Stock (t hm ⁻²)	%
0~20	>2	9.67	25.91	14.99	34.46	19.24	43.19
	1~2	3.46	9.27	3.14	7.21	3.39	7.63
	0.5~1	6.65	17.84	6.70	15.41	4.81	10.80
	0.25~0.5	4.34	11.63	5.33	12.26	3.64	8.16
	0.106~0.25	1.25	3.36	3.51	8.06	1.68	3.76
	<0.106	11.94	31.99	9.84	22.62	11.78	26.46
总和 Total		37.30	100.00	43.51	100.00	44.54	100.00
20~40	>2	5.93	17.73	3.22	8.72	10.06	26.64
	1~2	3.84	11.47	3.07	8.30	3.74	9.91
	0.5~1	7.36	21.99	6.86	18.55	5.73	15.18
	0.25~0.5	6.56	19.61	8.03	21.72	5.05	13.36
	0.106~0.25	1.53	4.56	2.49	6.73	1.17	3.108
	<0.106	8.24	24.64	13.29	35.98	12.01	31.80
总和 Total		33.46	100.00	36.96	100.00	37.76	100.00

4 讨论

长期生草栽培可增加果园土壤有机碳贮量并明显提高土壤团聚体的稳定性。李会科等^[10]的研究表明,果园生草可降低土壤容重,增加孔隙度,提高水稳性团聚体含量,其影响主要集中在0~40 cm土层。本研究也表明,果园生草处理使土壤团聚体的 $R_{0.25}$ 、MWD和GWD均高于顺坡清耕和梯台清耕处理,说明生草栽培使土壤团聚体的数量、分布和稳定性均优于清耕处理,可能是由于长期免耕和连续稳定输入有机物料,减少了人为扰动的频率和强度,有机物料在团聚体中富集的同时也促进了大团聚体的形成,进而增强土壤团聚体的稳定性。Tisdall等^[11]的研究指出,大团聚体(>250 μm)主要是由土壤根系和菌丝胶结作用而成,而微团聚体(<250 μm)主要是通过多价阳离子桥和多糖形成的。生草模式增加了土壤中的根系密度,由于根系的缠绕作用,使矿物颗粒和有机物胶结而形成较大的团聚体。此外,土壤中的死亡根系腐解后的活性有机质的强持水性,以及由此产生的稳定热容量和颗粒表面电场的相对稳定,使得生草处理的土壤密度低于清耕处理,土壤孔隙类型和数量更适宜土壤稳定结构的形成^[12]。

长期生草处理使不同粒径团聚体有机碳含量比顺坡清耕和梯台清耕处理有明显提高,且大团聚体的有机碳含量显著高于微团聚体,大团聚体对有机碳具有较高的富集作用^[13]。微团聚体有机碳含量低于大团聚体的,是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再相互胶结形成大团聚体^[14]。大团聚体的解体又可形成微团聚体,从而使微团聚体的有机碳含量更低。但土壤良好的结构状态不仅是存在大团聚体,而且土壤微团聚体的数量和质量也很重要。由于土壤团聚体特定的孔隙特征,使得不同粒径团聚体中的有机碳不仅在数量上存在差异,在稳定性方面也不尽相同^[15]。Buyanovsky等用¹⁴C标记法进行研究,结果表明,在1~2 mm粒径团聚体中新有机碳的平均驻留时间为1年,而在100~250 μm 粒径团聚体中的保留时间为6年,即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^[16]。本研究结果表明,长期生草处理果园土壤微团聚体有机碳含量分别

比顺坡清耕和梯台清耕处理平均提高40.10%和2.72%,这与生草栽培能显著提高土壤有机碳含量有关。

已有研究认为,土壤团聚体中有机碳的分配与结合机制反映了其有机碳的固定效应^[17]。本研究结果表明,不同垦殖方式对土壤团聚体有机碳贮量和分配产生一定的影响。从团聚体有机碳的分配比例来看,果园生草栽培的大团聚体有机碳分配比例分别比顺坡清耕和梯台清耕处理提高7.95%和0.65%,而微团聚体有机碳的分配比例分别降低了14.54%和1.48%,说明长期生草处理过程中,外源有机碳的输入首先出现在大团聚体中,大团聚体的形成速度比微团聚体快。同时,微团聚体通过有机质的胶结形成大团聚体而减少了微团聚体有机碳的比例,从而增加了大团聚体有机碳分配比例,这与Gale等^[18]的研究结果一致。由于大团聚体有机碳比微团聚体有机碳更易被微生物分解,能在较短的时间内分解释放部分养分供植物吸收利用^[19]。因此,果园生草栽培使大团聚体有机碳比例增加,对于果树的生长具有积极意义。另外,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,因此增加稳定微团聚体包裹态有机碳的数量,可降低微生物对其分解和延长周转时间^[20],从而增加长期的土壤碳汇。本研究结果表明,果园生草栽培的微团聚体有机碳贮量分别是清耕处理的1.01~1.02倍,说明果园生草处理增强了土壤有机碳的保护和碳汇作用,但对于果园生草管理措施下土壤团聚体对有机碳物理保护的饱和限还有待于进一步研究。

参考文献

- [1] Hernández-Hernández R M, López-Hernández D. Microbial biomass, mineral nitrogen and carbon content in savanna soil aggregates under conventional and no-tillage [J]. *Soil Biol Biochem*, 2002, 34(11): 1563–1570.
- [2] Ferauge M T H. Phosphate nutrition of fruit trees-Effect of cover crop on orchard soil [J]. *Soil Fert Agri Dig*, 1969, 16(2): 3–11.
- [3] Wang Y X, Wang F, Weng B Q, et al. Study on soil carbon sequestration potential of sod cultivated orchard: Taking Fujian Province as a case [J]. *Subtrop Agri Res*, 2010, 6(3): 189–192.
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.
- [4] Luo D Q, Hou C X, Wei C F, et al. Study on the indices to the features of purple soil aggregates [J]. *J Mount Sci*, 2003, 21(3): 348–353.

- 骆东奇, 侯春霞, 魏朝富, 等. 旱地紫色土团聚体特征的指标比较 [J]. 山地学报, 2003, 21(3): 348–353.
- [5] Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Fractal features of soils characterized by grain size distribution [J]. *Chin Sci Bull*, 1993, 38(20): 1896–1899.
- 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征 [J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896–1899.
- [6] Six J, Euiott E T, Panstian K. Soil macro-aggregate turnover and micro-aggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture [J]. *Soil Bio1 Biochem*, 2000, 32(14): 2099–2103.
- [7] Merwin I A, Stiles W C. Orchard groundcover management impact on soil physical properties [J]. *J Amer Hort Sci*, 1994, 119(2): 216–222.
- [8] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils [J]. *Soil Sci Soc Amer J*, 1986, 50(3): 627–633.
- [9] Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 30–34.
- 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30–34.
- [10] Li H K, Zhang G J, Zhao Z Y, et al. Effects of different herbage on soil quality characteristics of non-irrigated apple orchard in Weibei loess plateau [J]. *Sci Agri Sin*, 2008, 41(7): 2070–2076.
- 李会科, 张广军, 赵政阳, 等. 渭北黄土高原旱地果园生草对土壤物理性质的影响 [J]. *中国农业科学*, 2008, 41(7): 2070–2076.
- [11] Tisdall J M, Smith S E, Rengasamy P. Aggregation of soil by fungal hyphae [J]. *Aust J Soil Res*, 1997, 35(1): 55–60.
- [12] Zheng Z D, Huang Y B, Weng B Q, et al. Studies on the comprehensive development of hilly land in Fujian: I. Effects of different planting manners on the orchard ecosystem [J]. *Chin J Eco-Agri*, 2003, 11(3): 149–151.
- 郑仲登, 黄毅斌, 翁伯奇, 等. 福建山地综合开发中红壤保育研究: I. 不同垦殖方式对果园生态系统的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11(3): 149–151.
- [13] Cambardella C A, Elliot E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils [J]. *Soil Sci Soc Amer J*, 1992, 57(4): 1071–1076.
- [14] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. *J Soil Sci*, 1982, 33(2): 141–163.
- [15] Gregorich E G, Monreal C M, Ellert B H. Turnover of soil organic matter and storage of corn residue carbon estimated from natural ^{13}C abundance [J]. *Can J Soil Sci*, 1995, 75(2): 161–167.
- [16] Buyanovsky G A, Aslam M, Wagner G H. Carbon turnover in soil physical fractions [J]. *Soil Sci Soc Amer J*, 1994, 58(4): 1167–1173.
- [17] Beare M H, Hendfix P F, Cabrera M L, et al. Aggregate protected and unprotected organic matter pools in conventional and no-tillage soils [J]. *Soil Sci Soc Amer J*, 1994, 58(3): 787–795.
- [18] Gale W J, Cambardela C A, Bailey T B. Root-derived carbon and the formation and stabilization of aggregates [J]. *Soil Sci Soc Amer J*, 2000, 64(1): 201–207.
- [19] Xie J S, Yang Y S, Chen G S, 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 Ecol Sin*, 2008, 28(2): 702–709.
- 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.
- [20] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change [J]. *Geoderma*, 2004, 123(1/2): 1–22.