

林 诚, 郑祥洲, 郭宝玲, 等. 亚热带地区不同种植年限果园土壤团聚体结构及有机碳、氮分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(7): 1560–1566.

LIN Cheng, ZHENG Xiang-zhou, GUO Bao-ling, et al. Characteristics of soil aggregate structure and organic carbon and nitrogen distribution in orchards of different planting age in subtropical areas[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(7): 1560–1566.

亚热带地区不同种植年限果园土壤团聚体结构及有机碳、氮分布特征

林 诚¹, 郑祥洲¹, 郭宝玲¹, 丁 洪¹, 解 钰², 张玉树^{1*}

(1. 福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福州 350013; 2. 海南省农业科学院农业环境与土壤研究所, 海口 571100)

摘 要: 研究不同种植年限果园土壤团聚体结构变化规律, 探究各粒级团聚体有机碳、全氮分布变化特征, 旨在为亚热带地区果园土壤肥力形成和变化规律等相关研究提供参考。以林地土壤(0 a)和不同种植年限(2、10、20、30 a)果园土壤为研究对象, 分析种植年限与土壤团聚体结构及其有机碳和全氮含量的关系。结果表明: 与林地土壤相比, 开垦为果园后的土壤中>2 mm团聚体含量显著增加; 果园土壤团聚体含量随粒级减小而降低, 其中>2 mm和0.25~2 mm粒级分别占40.1%~64.9%和30.6%~46.4%; 不同种植年限果园土壤各粒级团聚体含量无显著差异。各粒级团聚体有机碳和全氮含量随着种植年限的延长呈增加趋势, 但C/N值呈下降趋势。相关分析表明, 随种植年限延长而增加的土壤有机碳或全氮主要分布于0.25~2 mm粒级团聚体。亚热带地区林地开垦为果园可增加土壤大团聚体含量, 但开垦为果园后种植年限对土壤团聚体各粒级的分布无显著影响。虽然随着种植年限延长可显著提高各粒级下有机质和全氮含量, 但C/N降低, 建议果园管理过程中应适当减施氮肥、增施有机肥, 提高土壤养分有效性。

关键词: 耕作; 土壤团聚体; 有机碳; 全氮; C/N

中图分类号: S153.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2019)07-1560-07 **doi:** 10.11654/jaes.2018-1193

Characteristics of soil aggregate structure and organic carbon and nitrogen distribution in orchards of different planting age in subtropical areas

LIN Cheng¹, ZHENG Xiang-zhou¹, GUO Bao-ling¹, DING Hong¹, XIE Yu², ZHANG Yu-shu^{1*}

(1. Institute of Soil and Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China; 2. Institute of Agro-Environment and Soil, Hainan Academy of Agricultural Sciences, Haikou 571100, China)

Abstract: To investigate the relationship between planting age and soil aggregate structure as well as the distribution characteristics of organic carbon and nitrogen, soils from a woodland (0 a) and orchards of different planting age (2, 10, 20, 30 a) were collected and analyzed in this study. The results showed that the content of soil aggregates with size >2 mm increased after conversion from woodland to orchard. In orchard lands, the soil aggregate content decreased with its size and was dominated by the particle size classes of >2 mm and 0.25~2 mm, which were 40.1%~64.9% and 30.6%~46.4% of all size classes, respectively. However, there were no significant differences in soil aggregate structure among the different planting ages. The soil organic carbon and total nitrogen contents increased within each aggregate size class with planting age, whereas the C/N ratio decreased. The increased soil organic carbon and total nitrogen contents were mainly distrib-

收稿日期: 2018-09-19 录用日期: 2018-12-28

作者简介: 林 诚(1981—), 福建永泰人, 助理研究员, 主要从事土壤养分循环研究。E-mail: lincengox@163.com

*通信作者: 张玉树 E-mail: zys3505@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771330, 41401339, 41330744); 福建省自然科学基金项目(2018J01058, 2019J01105, 2019J01104); 海南省自然科学基金项目(317190); 福建省属公益类科研院所基本科研专项(2016R1021-1, 2019R1025-1); 福建省农业科学院科技项目(YC2015-6, AB2017-2, SIIT2017-1-9)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41771330, 41401339, 41330744); The Natural Science Foundation of Fujian Province(2018J01058, 2019J01105, 2019J01104); The Natural Science Foundation of Hainan Province(317190); The Basic Scientific Foundation of Public Service Research Institutes of Fujian Province(2016R1021-1, 2019R1025-1); Foundation of Fujian Academic of Agricultural Sciences(YC2015-6, AB2017-2, SIIT2017-1-9)

uted in the soil aggregates with sizes of 0.25~2 mm. These results indicated that soil macroaggregate content (>2 mm) increased after conversion from woodland to orchard, whereas there were no significant differences among soils from orchards of different planting age. The contents of organic carbon and total nitrogen improved with planting age. However, the C/N ratio decreased and should be adjusted in orchards via reduced nitrogen fertilizer application and increased organic fertilizer application.

Keywords: tillage; soil aggregate; organic carbon; total nitrogen; C/N

土壤团聚体结构是土壤肥力的主要指标之一,不仅决定土壤肥力,还与土壤的抗蚀能力、固碳潜力和环境质量等有直接关系^[1]。良好的团聚体结构具有较好的持水性、孔隙度和通气性,可以满足植物对水、肥、气、热等因素的需求^[2]。土壤团聚体是有机碳储存的场所,而有机碳又是水稳性团聚体形成必需的胶结物质^[3],因此土壤有机碳对增强土粒的团聚性、促进团粒结构的形成有重要作用^[4]。反之,团聚体的形成又是有机碳固持与稳定的重要过程。有机碳通过被吸附到黏土矿物表面而包被在团聚体内得到物理保护,稳定的团聚体可以对其可矿化有机质进行有效保护从而免受微生物的分解^[5]。但不同粒级团聚体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^[6-7],但也有研究认为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^[8-9]。

由于果树种植的经济效益较高,近几十年来很多林地被开垦为果园,我国果树种植面积由1980年的178万 hm^2 增加到2016年的1298万 hm^2 ^[10]。果园是一种特殊的经济林地,管理过程中踩踏多(农药化肥施用、采摘等)、翻耕少^[11],土壤团聚体结构的变化规律可能与常规农业用地不同。此外,高温多雨的气候条件,亚热带土壤的高度风化,脱硅富铝化程度高,富含铁、铝氧化物等^[12],这些特点对于团聚体的形成及稳定性均有一定的影响^[13]。本文以亚热带地区不同种植年限柑橘园土壤作为研究对象,分析土壤团聚体结构变化规律及有机碳、氮分布变化特征,旨在为果园土壤肥力形成和变化规律等相关研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域选择在福建省泉州市永春县,地跨南亚热带雨林带和中亚热带常绿阔叶林带,原始地带性植被为栲属、石柯属和青冈属植物。土壤以红壤为主,发育于花岗岩母质。年均气温17~21℃,年均降水量1660~2100 mm,具有典型的亚热带土壤、气候特征。

此外,永春县是我国著名的“芦柑之乡”,柑橘种植面积超过8667 hm^2 。

研究区域果园习惯施肥量为:开垦为果园后的前7 a每年施用的化肥氮、磷和钾肥大约为300~500 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、100~300 $\text{kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ 和150~350 $\text{kg K}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}$,有机肥2000~8000 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。种植10 a后化肥氮、磷和钾肥大约为500~600 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$,200~400 $\text{kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ 和300~500 $\text{kg K}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}$,有机肥8000~10 000 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。其中化肥一般由尿素、碳酸铵、过磷酸钙、氯化钾和复合肥等组成,有机肥一般为农家肥。

1.2 土样采集与分析

选择未开垦林地(0 a)和种植2、10、20、30 a的柑橘园土壤作为研究对象,每个种植年限选择3个果园作为重复(每个果园间隔30 m以上)。所有果园的坡向、坡度和管理措施基本一致。于2012年11月(水果采收后)取样。每个果园随机选择6株果树作为研究对象,在每棵果树滴水线内以树干为圆心、在2个不同半径(大约0.5 m和0.8 m)圆周上各随机取得3点,每个果园共36个子样点混合成一个样品。取样时先剥离土壤表面的枯枝落叶和杂草,采用内径为5 cm土钻采集0~20 cm土层样品。土壤水稳性团聚体的分离参照Elliott^[14]的方法,采用德码zy200型土壤团粒分析仪分析。具体分析方法是:将采集的土壤样品风干后过5 mm筛,称取100 g风干土,置于2 mm土筛上,蒸馏水浸泡10 min,然后将土样依次通过0.25 mm和0.053 mm的土筛,分离出>2、2~0.25、0.25~0.053 mm和<0.053 mm共4级团聚体,收集各级筛子上的团聚体并分别转移至铝盒,于60℃下烘干,称量。<0.053 mm的团聚体通过将溶液沉降、离心获得。把>0.25 mm粒级的团聚体称为水稳性大团聚体,<0.25 mm粒级的团聚体称为水稳性微团聚体。土壤有机碳用重铬酸钾外加热法、全氮用凯氏定氮法测定^[15]。不同种植年限果园土壤基本性质见表1。

1.3 数据统计方法

采用SPSS 18.0进行单因素方差分析,当差异达到5%显著水平时用Duncan进行检验。

表1 不同种植年限果园土壤基本性质^[16]
Table 1 Soil properties of studied orchard and woodland^[16]

土壤性质 Soil properties	0 a	2 a	10 a	20 a	30 a
pH	5.19±0.09a	4.44±0.03a	5.12±0.77a	4.54±0.64a	4.18±0.07a
有机碳 SOC/g·kg ⁻¹	7.18±0.99d	13.40±4.53c	14.98±2.70c	22.06±4.87b	29.84±1.43a
全氮 TN/g·kg ⁻¹	0.47±0.09c	0.94±0.36b	0.97±0.07b	1.41±0.40b	1.90±0.11a

注:不同字母表示不同种植年限土壤间差异达5%显著水平。
Note: Different letters between the soil samples with different planting ages means significant at the 5% levels.

2 结果与分析

2.1 不同种植年限果园土壤团聚体分布特征

图1显示,除未开垦林地土壤外,不同种植年限果园土壤团聚体粒级含量表现为随粒级减小而降低。土壤团聚体粒级主要集中在>2 mm和0.25~2 mm两个粒级,分别占整个团粒含量的40.1%~64.9%和30.6%~46.4%。与林地相比,开垦为果园后显著增加土壤>2 mm粒级团聚体含量,显著降低0.053~0.25 mm粒级团聚体含量,但是对0.25~2 mm以及<0.053 mm粒级团聚体没有显著影响。不同种植年限果园土壤各粒级团聚体含量无显著差异。

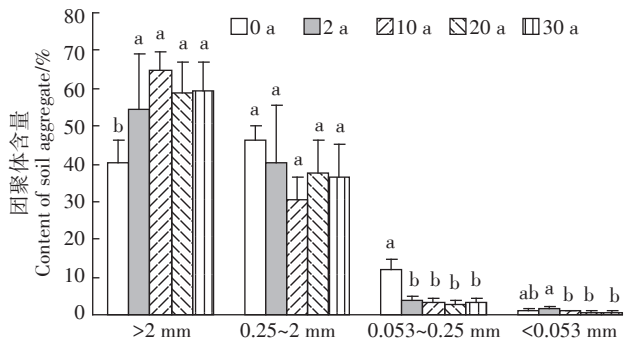
2.2 不同种植年限果园土壤有机碳分布特征

由图2可知,土壤有机碳在各粒级团聚体的分布特征总体表现为随种植年限延长呈上升趋势。与未开垦林地土壤相比,除种植2 a外,其余不同种植年限果园土壤>2、0.25~2、0.053~0.25 mm和<0.053 mm粒级团聚体中有机碳含量分别增加3.69~8.71、4.55~21.86、4.82~15.31、4.67~15.80 g·kg⁻¹,其中种植20 a和30 a与未开垦林地土壤有机碳含量的差异达到显著水

平。各粒级下土壤有机碳含量与种植年限呈显著或极显著正相关(表2)。

2.3 不同种植年限果园土壤全氮分布特征

从图3可以看出,土壤全氮在各粒级团聚体中的分布特征与有机碳一致,各粒级下土壤全氮含量与种植年限呈极显著正相关(表2)。与未开垦林地土壤相比,除种植2 a外,其余不同种植年限果园土壤>2、0.25~2、0.053~0.25 mm和<0.053 mm粒级下全氮含量分别增加0.27~0.87、0.39~2.17、0.49~1.59、0.50~1.84 g·kg⁻¹,其中种植20 a和30 a果园土壤与未开垦林地差异达到极显著水平,但种植20 a与30 a间无显著差异。



不同字母表示不同种植年限土壤间差异达5%显著水平。下同
Different letters between the soil samples with different planting ages means significant at the 5% levels. The same below

图1 不同种植年限果园土壤团聚体分布特征
Figure 1 Distribution of different aggregates in soils with different planting age

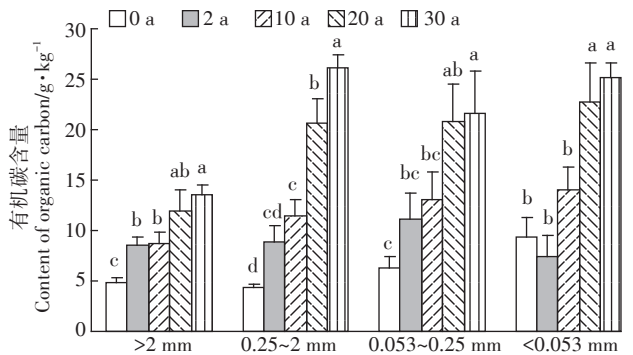


图2 不同种植年限果园土壤有机碳含量
Figure 2 Organic carbon contents in soils with different planting age

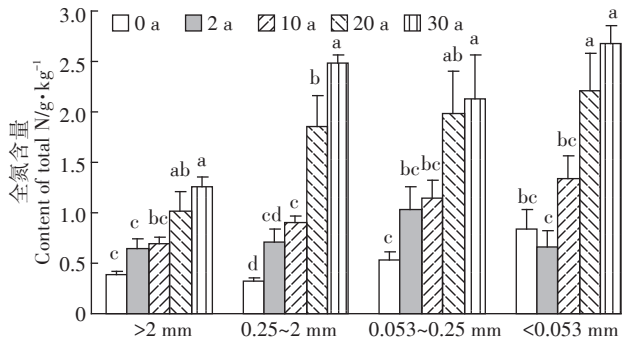


图3 不同种植年限果园土壤全氮含量
Figure 3 Total nitrogen contents in soils with different planting age

表2 果园种植年限与团聚体碳氮含量的关系

Table 2 Relationship of plant age with organic content and total nitrogen content in aggregates

项目 Items	>2 mm		0.25~2 mm		0.053~0.25 mm		<0.053 mm	
	关系式 Relationship	R ²	关系式 Relationship	R ²	关系式 Relationship	R ²	关系式 Relationship	R ²
有机碳 Organic carbon	$Y=0.25X+6.42$	0.88*	$Y=0.70X+5.58$	0.98**	$Y=0.49X+8.42$	0.90*	$Y=0.61X+8.18$	0.95**
全氮 Total N	$Y=0.03X+0.48$	0.94**	$Y=0.07X+0.39$	0.98**	$Y=0.05X+0.73$	0.91*	$Y=0.07X+0.70$	0.97**
C/N	$Y=-0.07X+13.03$	0.86*	$Y=-0.08X+13.02$	0.90*	$Y=-0.03X+11.25$	0.59	$Y=-0.06X+11.35$	0.96**

注:*代表显著相关($P<0.05$),**代表极显著相关($P<0.01$)。

Note:*means significant correlation($P<0.05$),**means extremely significant correlation($P<0.01$).

2.4 不同种植年限果园土壤各团聚体 C/N 变化特征

从图4可知,在>2、0.25~2、0.053~0.25 mm和<0.053 mm 4个粒级下土壤C/N平均值分别为12.2、12.0、10.9和10.6,随团聚体粒级减小呈下降趋势。在同一粒级中,土壤C/N值与种植年限均呈负相关关系(表2),其中>2、0.25~2、<0.053 mm呈显著或极显著负相关。

2.5 土壤有机碳和全氮含量与土壤团聚体碳氮含量间的关系

将土壤有机碳、全氮含量与各团聚体有机碳、全氮含量进行相关分析发现(图5和图6),不同种植年限耕层土壤有机碳、全氮含量与各团聚体粒级下有机碳、全氮含量均呈显著或极显著正相关。通过拟合的线性方程可以得出,耕层土壤每累积1 g·kg⁻¹有机碳或全氮,>2、0.25~2、0.053~0.25 mm和<0.053 mm 4个粒级下有机碳含量可增加0.38、1.02、0.72、0.83 g·kg⁻¹,全氮含量可增加0.62、1.62、1.20、1.48 g·kg⁻¹,表明<2 mm团聚体粒级有利于土壤碳、氮存储。

3 讨论

团聚体是土壤结构的基本单位,其组成和稳定性直接影响土壤肥力和作物生长^[11],若土壤中水稳性团

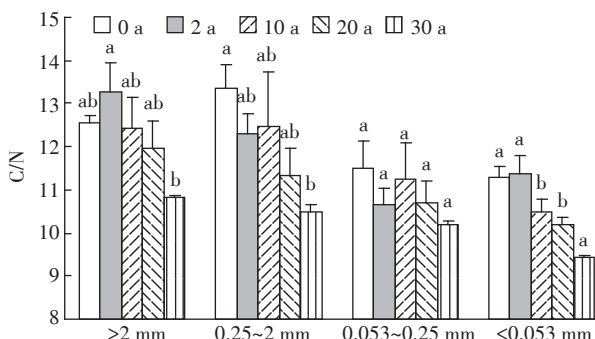
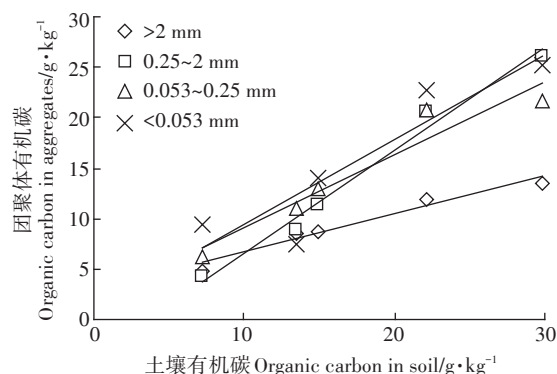


图4 不同种植年限果园土壤 C/N

Figure 4 The value of C/N in soils with different planting age

聚体(>0.25 mm团聚体)含量越高,则团聚体越稳定,结构就越好,但<0.25 mm的微团聚体含量过多则会影响土壤通气透水性和微生物活性^[17-18]。有研究表



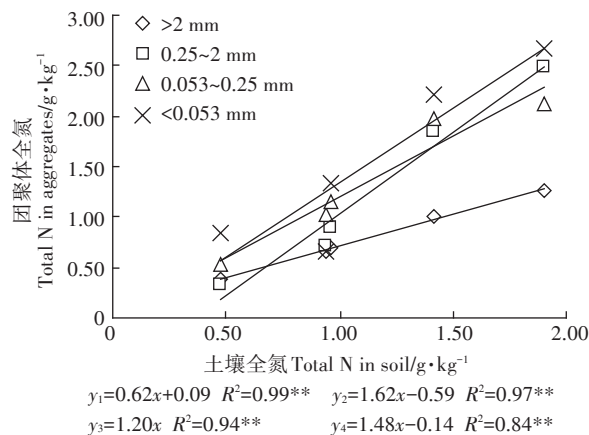
$$y_1=0.38x+2.88 \quad R^2=0.96^{**} \quad y_2=1.02x-3.54 \quad R^2=0.98^{**}$$

$$y_3=0.72x+1.92 \quad R^2=0.93^{**} \quad y_4=0.83x+1.19 \quad R^2=0.84^{**}$$

y_1, y_2, y_3, y_4 分别代表>2、0.25~2、0.053~0.25、<0.053 mm。图6同
 y_1, y_2, y_3, y_4 represents aggregates >2, 0.25~2, 0.053~0.25 mm and <0.053 mm, respectively. The same as table 6

图5 土壤有机碳与团聚体有机碳间关系

Figure 5 Relationship between organic carbon in soil and organic carbon content in aggregates



$$y_1=0.62x+0.09 \quad R^2=0.99^{**} \quad y_2=1.62x-0.59 \quad R^2=0.97^{**}$$

$$y_3=1.20x \quad R^2=0.94^{**} \quad y_4=1.48x-0.14 \quad R^2=0.84^{**}$$

图6 土壤全氮与团聚体全氮间关系

Figure 6 Relationship between total nitrogen in soil and total nitrogen content in aggregates

明,自然土壤(或荒地)开垦为农田后,随着利用年限的增加,>0.25 mm水稳定性团聚体总量呈增加趋势^[19-20]。孙蕾等^[21]在对渭北果区不同种植年限果园土壤的研究中指出,随种植年限的延长,>0.25 mm水稳性土壤团聚体含量有明显增加趋势,而<0.25 mm团聚体含量减少,果树种植促进了表层土壤水稳性团聚体的形成。本研究中,果园耕作显著提高了>0.25 mm团聚体含量,降低了<0.25 mm团聚体含量,与上述研究结果一致。林地开垦为果园后,由于有机肥和化肥的施用,仅开垦2 a的土壤有机质含量就可增加86.6%(表1)。现有研究表明,水稳性大团聚体的形成主要依靠有机质的胶结作用,增加土壤有机质含量有利于水稳性大团聚体的形成^[5],这可能是林地开垦为果园后大团聚体含量显著提高的重要原因(图1)。然而,该研究区域管理过程中,除每年开沟施肥翻耕果园外,年周期内干扰强度较大的还有修剪、除草和采摘等所产生的踩踏行为,这些可能导致土壤紧实度加大,容易破坏已形成的土壤团聚体^[22],造成随着种植年限的增加,土壤各粒级团聚体含量无显著变化。

微团聚体通常是由大团聚体分解或黏粒与有机物胶结后形成的产物,其对有机碳的吸附能力随土壤团聚体粒级的减小而增强;微团聚体的固持作用促进有机无机胶体紧密结合,导致储存在其中的有机碳不容易被微生物分解利用,从而使有机碳在微团聚体中积累^[23]。有研究表明土壤团聚体有机碳、氮含量随着粒级减小呈升高趋势^[24]。杜少平等^[25]在不同年限旱砂田中的研究有相同结果,本研究结果也发现类似规律。土壤有机碳和全氮的变化趋势通常具有一致性^[1,8],本研究结果也表明全氮在团聚体中的含量与分布规律与有机碳类似,可能是因为土壤团聚体粒级越小,对 NH_4^+ 的吸附能力越强,从而提高小粒级团聚体全氮含量^[26]。现有的长期试验表明^[5,9],不管是施用有机肥还是化肥,均能提高土壤团聚体碳氮含量,但以施用有机肥的效果更加显著。从相关分析结果来看,不同团聚体粒级下土壤有机碳和全氮含量与种植年限呈显著正相关。Six等^[27]研究认为,若在土壤中添加新鲜有机物料会促进新一轮大团聚体-微团聚体循环进行。果园常年施用化肥和有机肥,特别是有机肥施入土壤后,增加的有机碳和全氮会先进入微团聚体中,并逐渐向大团聚体转移并被储存起来。土壤团聚体对有机碳和全氮有着一定的物理保护作用;通过耕作提高土壤大团聚体含量,增强了对土壤中原有的和新输入的有机碳和全氮的保护作用,促进了土壤

中不同粒级下有机碳和全氮的积累^[28]。相关分析结果揭示,亚热带地区果园土壤中有有机碳和全氮的含量变化主要取决于<2 mm团聚体有机碳和全氮的变化,这可能是由于孔隙较大的>2 mm粒级的团聚体可促进物质和氧气的传输,提高土壤中微生物活性从而加快有机碳、氮的矿化分解,而小团聚体孔隙度小、通气性较差、内部微生物活性较弱,且较小的孔隙也不利于 CO_2 释放^[29]。

一般来说,土壤C/N与有机质分解速度呈反比^[23],即:土壤C/N低,其意味着土壤中有有机质矿化或者分解速度较快,可供微生物利用的碳源较少,微生物活性降低,从而影响养分的有效性^[30]。从本研究结果来看,各粒级土壤C/N随着种植年限的增加呈下降趋势,这与长期大量施用氮肥促进土壤有机质分解有关^[31]。梁珊珊^[32]通过研究我国柑橘主产区氮磷钾施肥现状发现,福建柑橘主产区化学氮肥投入量过量面积达到85.9%,氮肥有57.9%的减施潜力。而柑橘属多年生木本果树,其生命周期较长,树体寿命可达数十年。因此,长期耕作的果园在施肥时要保持有机肥输入,并适当减施氮肥。

4 结论

(1)亚热带林地土壤开垦为果园后,土壤中>2 mm粒级团聚体含量显著提高;然而,开垦后的果园土壤团聚体结构对种植年限的响应不显著,团聚体含量随粒级的减小而降低。

(2)果园土壤中小粒级团聚体有机碳和全氮含量高于大粒级团聚体,各粒级团聚体有机碳和全氮含量随着种植年限的延长而增加,增加的有机碳和全氮主要分布于0.25~2 mm粒级团聚体。

参考文献:

- [1] 李 玮, 郑子成, 李廷轩, 等. 不同植茶年限土壤团聚体及其有机碳分布特征[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6326-6336.
LI Wei, ZHENG Zi-cheng, LI Ting-xuan, et al. Distribution characteristics of soil aggregates its organic carbon in different tea plantaiton age [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(21): 6326-6336.
- [2] 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[J]. 茶叶科学, 2012, 32(5): 402-410.
LIU Min-ying, ZHENG Zi-cheng, LI Ting-xuan. Study on the composition and stability of soil aggregates with different tea plantation age [J]. *Journal of Tea Science*, 2012, 32(5): 402-410.
- [3] 窦 森, 李 凯, 关 松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. 土壤学报, 2011, 48(2): 412-418.
DOU Sen, LI Kai, GUAN Song. A review on organic matter in soil ag-

- gregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(2):412-418.
- [4] Karlen D L, Mausbach M J, Doran J W, et al. Soil quality: A concept, definition, and framework forevaluation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(1):4-10.
- [5] 陈晓芬, 李忠佩, 刘 明, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物量的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(5):950-960.
- CHEN Xiao-fen, LI Zhong-pei, LIU Ming, et al. Effects of different fertilizations on organic carbon and nitrogen contents in water-stable aggregates and microbial biomass content in paddy soil of subtropical China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(5):950-960.
- [6] 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[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(15):3162-3168.
- LIU Min-ying, ZHENG Zi-cheng, LI Ting-xuan. Distribution characteristics of microbial biomass carbon and nitrogen in soil aggregates under tea plantation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(15):3162-3168.
- [7] Denef K, Zotarelli L, Boddey R M, et al. Micro aggregate associated carbon as a diagnostic fraction for management-induced changes in soil organic carbon in two Oxisols[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(5):1165-1172.
- [8] 王 勇, 姬 强, 刘 帅, 等. 耕作措施对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(7):1365-1373.
- WANG Yong, JI Qiang, LIU Shuai, et al. Effect of tillage practices on water-stable aggregation and aggregate-associated organic C in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(7):1365-1373.
- [9] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 等. 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[J]. *土壤学报*, 2010, 47(5):931-938.
- GAO Hui-yi, GUO Sheng-li, LIU Wen-zhao, et al. Effect of fertilization on organic carbon distribution in various fractions of aggregates in caliche soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(5):931-938.
- [10] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- National Bureau of Statistics. China statistical yearbook 2016[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.
- [11] 刘文利, 吴景贵, 傅民杰, 等. 种植年限对果园土壤团聚体分布与稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(1):129-135.
- LIU Wen-li, WU Jing-gui, FU Min-jie, et al. Effect of different cultivation years on composition and stability of soil aggregate fractions in orchard[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(1):129-135.
- [12] Qafoku N P, Ranst E V, Noble G A, et al. Variable charge soils: Their mineralogy, chemistry and management[J]. *Advances in Agronomy*, 2004, 84:159-215.
- [13] 王小红, 杨智杰, 刘小飞, 等. 中亚热带山区土壤不同形态铁铝氧化物对团聚体稳定性的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(9):2588-2596.
- WANG Xiao-hong, YANG Zhi-jie, LIU Xiao-fei, et al. Effect of different of Fe and Al oxides on soil aggregate stability in mid-subtropical mountainous area of southern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(9):2588-2596.
- [14] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3):627-633.
- [15] 鲁如坤. 土壤农化分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- LU Ru-kun. The analytical methods for soil and agrochemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science Technology Press, 2000.
- [16] Zhang Y S, Zhang J B, Zhu T B, et al. Effect of orchard age on soil nitrogen transformation in subtropical China and implications[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015(34):10-19.
- [17] 石宗琳, 王加旭, 梁化学, 等. 渭北不同园龄苹果园土壤团聚体状况及演变趋势研究[J]. *土壤学报*, 2017, 54(2):387-398.
- SHI Zong-lin, WANG Jia-xu, LIANG Hua-xue, et al. Status and evolution of soil aggregates in apple orchards different in age in Weibei[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(2):387-398.
- [18] 李 娟, 韩霁昌, 陈 超, 等. 黄土高原丘陵沟壑区土地利用方式对土壤团聚体特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1):248-259.
- LI Juan, HAN Ji-chang, CHEN Chao, et al. Effect of land use types on soil aggregate characteristics in hilly-gully region of Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(1):248-259.
- [19] 刘晓利, 何园球. 不同利用方式和开垦年限下红壤水稳性团聚体及养分变化研究[J]. *土壤*, 2009, 14(1):84-89.
- LIU Xiao-li, HE Yuan-qiu. Water-stable aggregates and nutrients in red soil under different reclamation years[J]. *Soil*, 2009, 14(1):84-89.
- [20] 彭 萍, 杨水平, 李品武, 等. 植茶对土壤环境效应分析研究[J]. *茶叶科学*, 2007, 27(3):265-270.
- PENG Ping, YANG Shui-ping, LI Pin-wu, et al. Effect of tea planting on the yellow soil properties in tea garden[J]. *Journal of Tea Science*, 2007, 27(3):265-270.
- [21] 孙 蕾, 王益权, 张育林, 等. 种植果树对土壤物理性状的双重效应[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(1):19-23.
- SUN Lei, WANG Yi-quan, ZHANG Yu-lin, et al. Dual effect of fruit tree cultivation on soil physical characteristics[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(1):19-23.
- [22] 王义祥, 叶 菁, 黄毅斌, 等. 不同经营年限对柑橘果园土壤团聚体有机碳的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2015, 31(5):724-729.
- WANG Yi-xiang, YE Jing, HUANG Yi-bin, et al. Effect of cultivation history of citrus orchard on organic carbon in soil aggregates therein[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, 31(5):724-729.
- [23] Six J, Elliot E T, Paustain K. Soil macro-aggregate turnover and micro-aggregate formation: A mechanism for carbon sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32(14):2099-2103.
- [24] 李 玮, 郑子成, 李廷轩. 不同植茶年限土壤团聚体碳氮磷生态化学计量学特征[J]. *应用生态学报*, 2015, 2(1):9-16.
- LI Wei, ZHENG Zi-cheng, LI Ting-xuan. Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus within soil aggregates in tea plantations with different ages[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 2(1):9-16.

- [25] 杜少平, 马忠明, 薛 亮. 不同年限旱砂田土壤团聚体及其有机碳分布特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5):1619-1625.
DU Shao-ping, MA Zhong-ming, XUE Liang. Distribution characteristics of soil aggregates and their associated organic carbon in gravel-mulched land with different cultivation years[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(5):1619-1625.
- [26] 徐阳春, 沈其荣. 长期施用不同有机肥对土壤各粒级复合体中CNP含量与分配的影响[J]. 中国农业科学, 2000, 33(5):65-71.
XU Yang-chun, SHEN Qi-rong. Influence of long term application of manure on the contents and distribution of organic C, total N and P in soil particle sizes[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(5):65-71.
- [27] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(5):1367-1377.
- [28] 魏艳春, 马天娥, 魏孝荣, 等. 黄土高原旱地不同种植系统对土壤水稳性团聚体及碳氮分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(2):305-313.
WEI Yan-chun, MA Tian-e, WEI Xiao-rong, et al. Effect of cropping systems on distribution of water-stable aggregates and organic carbon and nitrogen in soils in semiarid farmland of the Loess Plateau[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(2):305-313.
- [29] 王 君, 宋新山, 严登华, 等. 多重干湿交替格局下土壤Birch效应的响应机制[J]. 中国农学通报, 2013, 29(27):120-125.
WANG Jun, SONG Xin-shan, YAN Deng-hua, et al. The response of Birch effect under multiple wet-dry cycles[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(27):120-125.
- [30] Schipper L A, Sparling G P. Accumulation of soil organic C and change in C:N ratio after establishment of pastures on reverted scrubland in New Zealand[J]. *Biogeochemistry*, 2011, 104(1/3):49-58.
- [31] 张雅蓉, 李 渝, 刘彦伶, 等. 长期施肥对西南黄壤碳氮磷生态化学计量学特征的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(3):673-680.
ZHANG Ya-rong, LI Yu, LIU Yan-ling, et al. Effect of long-term fertilization on ecological stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in southwest yellow soil[J]. 2016, 47(3):673-680.
- [32] 梁珊珊. 我国柑橘主产区氮磷钾肥施用现状及减施潜力研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2017.
LIANG Shan-shan. Studies on N P K fertilization status and the potential of reducing application rate in major citrus planting regions of China[D]. Wuhan:Huazhong Agriculture University, 2017.