

有机肥替代化肥与生物炭配施对茶园土壤团聚体稳定性及有机碳积累的影响

王莎莎¹, 陈俊玲¹, 张晓杰¹, 李艳春², 陈 华², 王义祥^{2*}

1. 福建农林大学, 福建福州 350002; 2. 福建省农业科学院资源环境与土壤肥料研究所/福建省红壤山地农业生态过程重点实验室, 福建福州 350003

摘 要: 有机肥部分替代化肥是茶园“化肥零增长”的关键路径之一, 而生物炭作为新型的农田土壤改良剂, 在优化土壤微生态环境方面也展现出积极的效用。进一步认识有机肥替代化肥与生物炭配施对茶园土壤团聚体稳定性及有机碳积累的影响及其协同效应, 可为茶园化肥减施增效与固碳减排提供科学依据。采用湿筛法将 7 种不同施肥处理, 即不施肥 (CK), 常规施肥 (NPK), 化肥+10 t/hm² 生物炭 (NPK+BC10), 50%化肥+50%有机肥 (OM50), 50%化肥+50%有机肥+10 t/hm² 生物炭 (OM50+BC10), 50%化肥+50%有机肥+20 t/hm² 生物炭 (OM50+BC20), 50%化肥+50%有机肥+40 t/hm² 生物炭 (OM50+BC40) 进行土壤团聚体物理分级, 研究不同处理茶园土壤团聚体分布、结构与稳定性及其结合有机碳含量的变化规律。结果表明: 与 NPK 和 CK 相比, OM50+BC10、OM50+BC20、OM50+BC40 这 3 种处理的茶园土壤中不同粒径团聚体有机碳贮量均有不同程度的提高。与 NPK 和 CK 处理相比, 有机肥替代 50%化肥配施不同剂量生物炭均能够显著提高土壤粒径>2.000 mm、0.250~2.000 mm 粒级团聚体的有机碳含量, 提高幅度分别为 23.96%~70.87%、21.87%~49.27%, 其中以 OM50+BC20 和 OM50+BC40 处理的效果最为显著; 团聚体中的几何平均直径 (GWD) 和平均重量直径 (MWD) 均为: CK<NPK<NPK+BC10<OM50<OM50+BC10<OM50+BC20<OM50+BC40, 且团聚体含量和有机碳含量均为 OM50+BC40 处理的提高效果最为显著。50%有机肥替代 50%化肥、不同量生物炭施用均能显著增加茶园土壤团聚体和有机碳含量, 促进茶园土壤团聚体更具有稳定性和优良的结构水平, 与单施有机肥相比, 与生物炭共同配施则更有利于提升土壤团聚体的稳定性并促进有机碳的固存。OM50+BC20 与 OM50+BC40 处理对于提高茶园土壤有机碳和土壤团聚体的稳定性有显著效果。若不考虑成本效应, OM50+BC40 处理为适宜施肥方案; 反之, 则可以选择 OM50+BC20 处理。

关键词: 茶园; 有机肥替代; 生物炭; 水稳性团聚体; 土壤有机碳; 土壤碳储量

中图分类号: S571.1; S158.3 文献标志码: A

Impacts of Substituting Chemical Fertilizer with Organic Fertilizer in Conjunction with Biochar on Soil Aggregate Stability and Accumulation of Organic Carbon in Tea Plantations

WANG Shasha¹, CHEN Junling¹, ZHANG Xiaojie¹, LI Yanchun², CHEN Hua², WANG Yixiang^{2*}

1. Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2. Institute of Resources, Environment and Soil Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Sciences / Fujian Provincial Key Laboratory of Agroecological Processes in Red Soil Mountains, Fuzhou, Fujian 350003, China

Abstract: Partial replacement of chemical fertilizers with organic fertilizers is a key path for achieving zero growth in

收稿日期 2024-10-16; 接受日期 2024-11-20

基金项目 中央引导地方科技发展专项 (No. 2023L3026); 南平市科技计划项目 (No. N2023A001); 福建省农科院协同创新工程项目 (No. XTCXGC2021010)。

作者简介 王莎莎 (1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 土壤碳循环。*通信作者 (Corresponding author): 王义祥 (WANG Yixiang), E-mail: sd_wolong@163.com。

chemical fertilizers in tea gardens. Biochar, a new agricultural soil amendment, has positive effects in optimizing the soil microecological environment. Further understanding the effects of organic fertilizer substitution and biochar application on the soil aggregate stability and organic carbon accumulation in tea gardens, also the synergistic effects, can provide scientific basis for reducing fertilizer application, increasing efficiency, and carbon sequestration and emission reduction in tea gardens. Wet screening method was used to treat seven different fertilizers, namely no fertilization (CK), conventional fertilization (NPK), fertilizer and biochar application (biochar dosage 10 t/hm², NPK+BC10), 50% fertilizer+50% organic fertilizer (OM50), 50% fertilizer+50% organic fertilizer (OM50) combined with different amounts of biochar. The amount of biochar was 10 t/hm² (OM50+BC10), 20 t/hm² (OM50+BC20) and 40 t/hm² (OM50+BC40) for physical grading of soil aggregates. The distribution, structure and stability and the change of organic carbon content in different treated tea plantations were studied. Under the treatment of OM50+BC10, OM50+BC20 and OM50+BC40, the organic carbon reserves of aggregates increased to different degrees compared with the conventional fertilization control treatment. In contrast to the NPK and CK treatments, the replacement of 50% chemical fertilizer with different doses of biochar could significantly improve the organic carbon content of soil >2 mm and 0.25–2.00 mm granular aggregates. The increase rate was ranged from 23.96%–70.87% and 21.87%–49.27%, OM50+BC20 and OM50+BC40 had the most significant treatment effect. Geometric mean diameter (GWD) and mean mass diameter (MWD) in aggregate were in the order CK<NPK<NPK+BC10<OM50<OM50+BC10<OM50+BC20<OM50+BC40. The aggregate content and organic carbon content were the most significant in OM50+BC40 treatment. 50% organic fertilizer replacing 50% fertilizer, different amount of biomass carbon application could significantly increase tea garden soil aggregate, organic carbon content, promote tea garden soil aggregate stability and structure level. Organic fertilizer and biomass carbon is more conducive to improving the stability of soil aggregate and promoting the sequestration of organic carbon. OM50+BC20 and OM50+BC40 treatment showed significant results in improving the stability of soil organic carbon and soil aggregates in tea plantations. Without considering the cost effect, OM50+BC40 is a suitable fertilization scheme; otherwise, OM50+BC20 can be selected.

Keywords: tea plantation; organic fertilizer substitution; biochar; water-stable aggregates; soil organic carbon; soil carbon stocks

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.04.016

茶树是我国经济领域中的关键作物,我国茶园面积与茶叶产量均在全球茶叶产业中占据领先地位^[1]。近年来,鉴于茶农对茶叶高产的迫切需求,部分地区的茶园存在长期不施有机肥或者过量单一施用化肥的情况,导致茶园土壤养分失衡现象屡见不鲜^[2],继而引发严重的环境污染,养分严重流失,土壤酸化加剧等一系列问题^[3]。杨海滨等^[4]通过研究明确指出,在茶园中适量配施有机肥可显著提升土壤的硝酸还原酶活性,进而促进茶园土壤的反硝化过程,有效减少硝态氮的淋溶损失。俞慎等^[5]的研究表明,茶园土壤肥力和熟化程度的关键指标在于土壤有机质含量,而高品质茶叶的产出依赖于土壤中丰富的有机质。在茶园管理中,适度配施有机肥能够有效增强土壤肥力,促进茶叶产量的提升,并有助于缓解土壤酸化问题^[6-8]。孙宇龙等^[9]通过长期研究也验证了这一点,研究发现,采用 25% 有机肥替代化肥并结合生物质炭的施肥方式,能够显著改善土壤质量。还有多项为期 3 a 及以上的定位试验表明,茶园土壤质量、茶叶产量及其品质的提升,在有

机肥替代比例为 25%~50% 时达到最优效果^[6-8, 10]。因此,在茶园土壤中选择化肥与有机肥配施的措施,对于改善土壤质量和充分提供作物的养分需求更有益。同时能够缓解当前茶园环境污染的紧迫形势,并且显著提升茶叶的产量与品质^[11-13]。

土壤团聚体是土壤结构的最基础单元^[14]。不同粒径的团粒组合作用于表土层的土壤结构,全方位协调土壤水分的循环以及养分的分布^[15],团聚体稳定与否也反映了土壤是否具有优良的适用于农业生产的土壤结构^[16]。土壤有机碳作为团粒结构的一种胶结物质^[17],可与土壤中的菌丝、碎散腐殖质等多种物质进行胶结,胶结而成的即为团粒结构,此结构在来自外部的力量挤压作用下使土壤具有稳定性。团聚体固相骨架所具备的高孔隙度特点,为微生物营造了更适宜的栖息环境^[18]。土壤碳的固存和养分的保持等生态功能与土壤团聚体结构的调控紧密相关^[19]。不同粒径的土壤团聚体在土壤生态系统中体现了多维度的调控作用。不仅能够有效地调节土壤养分的供应与平衡^[20],还能显著改善土壤的结构与组成^[21],同时对土壤

的水力学性质及生物学特性产生影响^[15]。此外，土壤团聚体与土壤有机碳之间存在动态关系：一方面，土壤团聚体能够包裹并物理保护土壤有机碳，防止其快速分解；另一方面，土壤有机碳能够增强土壤团聚体的结构水平并促进其稳定性，是团聚体的关键驱动力^[22-24]。土壤团聚体稳定性是表征土壤有机碳是否长期稳定的一个关键指标，而团聚体结构特征则是衡量土壤有机碳贮存潜力的控制因素^[25]。生物炭作为一种新型土壤调理剂能致力于改良土壤的物理结构，其功效体现在能够促进土壤团聚体的形成，更显著地提高土壤中的有机碳含量^[26]。有机肥替代化肥以及生物炭的施用，均展现出增强土壤质量及提升茶叶产量的潜力，已有文献表明，生物炭与有机肥配施可以提高黄土高原、亚热带地区土壤团聚体的稳定性，提高土壤总有机碳水平^[27-28]，但对土壤团聚体结合有机碳的影响仍了解不多，尤其是在强酸性条件下土壤团聚体稳定性与结合有机碳间的作用关系还有待进一步研究。因此，本研究通过对福建铁观音茶园进行田间小区试验，研究有机肥替代50%化肥并配施不同比例生物炭对铁观音茶园土壤团聚体稳定性及其结合有机碳间的关系，对科学优化有机肥替代比例、强化土壤团聚体的稳定性与土壤肥力，为实现茶园化肥减施增效提供措施和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于福建省安溪县感德镇槐植村（116°20'24"E, 28°15'30"N），属亚热带季风气候，年均降雨量为1800 mm，年均气温为16.5℃。土壤为红壤，其基础性质：pH 4.05，有机碳含量为14.0 g/kg，全氮含量为1.5 g/kg，全磷含量为0.74 g/kg，有效磷含量为26.5 mg/kg，速效钾含量为67.5 mg/kg^[29]。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 供试茶园为15 a铁观音，等高梯台常规种植，试验于2018年8月开始。共设置7个处理：不施肥（CK）、常规施肥（NPK）、化肥+10 t/hm²生物炭（NPK+BC10）、50%化肥+50%有机肥（OM50）、50%化肥+50%有机肥+10 t/hm²生物炭（OM50+BC10）、50%化肥+50%有机肥+20 t/hm²生物炭（OM50+BC20）、50%化肥+50%有机肥+40 t/hm²生物炭（OM50+BC40）。所有处

理按照每年等氮量（150 kg/hm²）进行施肥，每种处理3个重复，小区面积均为16 m²（16 m×1 m），共21个小区，随机排列^[29]。

1.2.2 样品采集与测定 于2023年5月春茶采收季后进行土壤样品采集。每个小区按“S”形采集5个0~20 cm土层样品，剔除杂物，其中团聚体样品置于铝盒中保持不受外力扰动；剩余样品装入自封袋带回实验室，自然条件下风干后过筛，用于土壤基本理化性质和有机碳分析。

湿筛法^[30]是土壤团聚体分级的一种标准且常用的方法。该方法明确界定了土壤团聚体的4个级别：大团聚体（粒径大于2.000 mm，macro aggregates）、小团聚体（粒径介于0.250~2.000 mm之间，small aggregates）、微团聚体（粒径在0.053~0.250 mm范围内，micro aggregate）以及粉粘粒（粒径小于0.053 mm的细微土壤颗粒，powdery clay particles）。本研究采用湿筛法进行土壤分级。首先去除土壤样品中的杂质（石块、杂草和植物根系）并粗略过10 mm筛，然后称取100 g土壤样品，将其均匀平铺于孔径为2 mm的筛面上。在室温条件下加入去离子水将土壤样品浸润10 min后，在去离子水中以每分钟30次的频率进行振荡操作2~5 min，保持筛子在水桶中的上下振幅为3 cm。振荡结束后，冲洗不同粒级筛网上的水稳性团聚体至铝盒中，分离出4个级别不同粒径的组分。各组分样品置于55℃烘箱中烘干，从铝盒中取出称重（g）并研磨过100目筛（即0.149 mm）。计算不同粒级的团聚体含量，计算方法如下：

$$\text{团聚体含量} = \frac{\text{团聚体粒级烘干重量 (g)}}{\text{风干总土量 (团聚体) (g)}} \times 100\%$$

采用重铬酸钾-外加热法^[31]测定土壤有机碳。

1.2.3 土壤团聚体稳定性评价指标 评估团聚体稳定性利用平均重量直径（MWD）与几何平均直径（GMD）这2项指标。评估粒径>0.25 mm的团聚体，则采用 $R_{0.25}$ 指标。团聚体稳定性按以下公式进行计算：

$$\text{MWD} = \sum_{a=1}^n (\bar{x}_a w_a)$$

$$\text{GMD} = \text{EXP} \left[\frac{\sum_{a=1}^n m_a \ln \bar{x}_a}{\sum_{a=1}^n m_a} \right]$$

$$R_{0.25} = \frac{M_{I>0.25}}{M_I}$$

式中， $\overline{x_a}$ 为团聚体 a 粒级平均直径， w_a 为团聚体 a 粒级含量（团聚体所占的百分比）， m_a 为团聚体 a 粒级质量， M_I 为团聚体的总质量， $M_{I>0.25}$ 为粒级 >0.25 mm 团聚体所组成的质量， $R_{0.25}$ 为粒级 >0.25 mm 团聚体占的总百分比含量。

土壤有机碳贮量的计算公式：

$$SOC_s = (SOC_a \times pb \times T_a) \times 0.1$$

式中， SOC_s 为土层 0~20 cm 有机碳贮量（t/hm²）； SOC_a 为第 a 层土壤有机碳含量（g/kg）； pb 为第 a 层土壤容重（g/cm³）； T_a 为第 a 层土壤厚度（cm），0.1 是转换单位系数。

1.3 数据处理

采用 MATLAB 和 Microsoft Excel 软件对试验数据进行整理与分析。运用单因素方差分析法评估不同处理之间的差异显著性，利用 Origin 2024 软件作图，其中图表数据均为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理茶园土壤团聚体的组成分布

不同施肥处理下土壤团聚体粒径在 0.250~2.000 mm 粒级的团聚体含量最高，占比为 72.02%~75.39%；土壤团聚体粒径在 0.053~0.250 mm 粒级的含量次之，占比为 7.38%~12.63%；土壤团聚体粒径 <0.053 mm 粒级的含量占比最小，仅占 4.52%~8.71%（表 1）。各粒级土壤团聚体含量随着施入生物炭比例的增加而增加，其中不同处理中大团聚体和小团聚体含量均显著增加；OM50+BC10、OM50+BC20、OM50+BC40 处理的各粒级团聚体占比与其他处理有显著差异（ $P<0.05$ ）。

2.2 不同施肥处理土壤团聚体稳定性的变化

从表 2 可以看出，与 CK 和 NPK 处理相比，在茶园土壤采用有机肥替代 50%化肥并增施生物炭均能显著提高团聚体平均重量直径（MWD）和团聚体几何平均直径（GMD），特别是粒径 >0.250 mm 的团聚体，其 $R_{0.25}$ 值从 78.66 增至 86.70，其中 OM50+BC40 处理的效果最为突出。通过逐步回归方程分析团聚体稳定性与团聚体粒级之间的关系，结果表明，影响团聚体稳定性的主要粒级为 >0.250 mm 团聚体（表 3）。且 $R_{0.25}$ 与粒径 >2.000 mm 和粒径为 0.250~2.000 mm 的团聚体呈显著正相关（ $P<0.05$ ），而与粒径为 0.053~0.250 mm 以及粒径 <0.053 mm 的团聚体呈极显著负相关（ $P<0.01$ ）。微团聚体和粉粘粒级团聚体对稳定性的影响程度大于小团聚体和大团聚体。团聚体 GMD 与粒径 >2.000 mm 和粒径为 0.250~2.000 mm 的团聚体呈极显著正相关（ $P<0.01$ ），但与粒径为 0.053~0.250 mm 以及粒径 <0.053 mm 的团聚体呈极显著负相关（ $P<0.01$ ）。在所有粒级中，粒径为 0.250~2.000 mm 的团聚体对 GMD 的提升效果最为显著，而粒径 <0.053 mm 的团聚体对 GMD 的降低效果最为明显。MWD 与不同处理以及不同粒级团聚体之间均呈显著正相关（ $P<0.01$ ）。

2.3 不同施肥处理土壤总有机碳与不同粒级团聚体有机碳含量的变化

由图 1A 可知，CK 与 NPK（常规施肥）处理间的土壤总有机碳含量差异不显著；与 NPK 处理相比，有机肥替代 50%化肥配施不同量生物炭均显著提高了土壤总有机碳含量，OM50+BC10 处理的土壤总有机碳含量显著增加 22.89%，OM50+

表 1 不同施肥处理茶园土壤各粒级团聚体分布
Tab. 1 Distribution of soil aggregates of different particle sizes in tea gardens under different fertilization treatments

处理 Treatment	土壤团聚体含量 Soil aggregates content/%			
	>2.000 mm	0.250~2.000 mm	0.053~0.250 mm	<0.053 mm
CK	6.64±0.20 ^c	72.02±1.00 ^b	12.63±0.01 ^a	8.71±0.08 ^b
NPK	8.50±2.04 ^{bc}	75.04±0.01 ^{ab}	11.94±1.17 ^a	4.52±0.24 ^c
NPK+BC10	10.40±0.80 ^b	73.55±1.55 ^{ab}	9.86±0.10 ^{bc}	6.19±2.20 ^{ab}
OM50	9.30±1.28 ^{bc}	75.39±0.30 ^a	9.28±1.31 ^{ab}	6.03±0.62 ^{bc}
OM50+BC10	10.37±1.34 ^b	74.43±0.96 ^a	9.20±0.64 ^{bc}	6.00±0.15 ^{bc}
OM50+BC20	11.61±3.40 ^a	73.85±5.83 ^{ab}	7.38±0.18 ^c	7.16±1.21 ^a
OM50+BC40	11.49±4.46 ^a	75.21±2.53 ^{ab}	7.53±0.32 ^b	5.77±0.01 ^{bc}

注：同列不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between treatments ($P<0.05$).

表 2 土壤不同处理团聚体稳定性指标
Tab. 2 Indicators of soil aggregate stability under various treatments

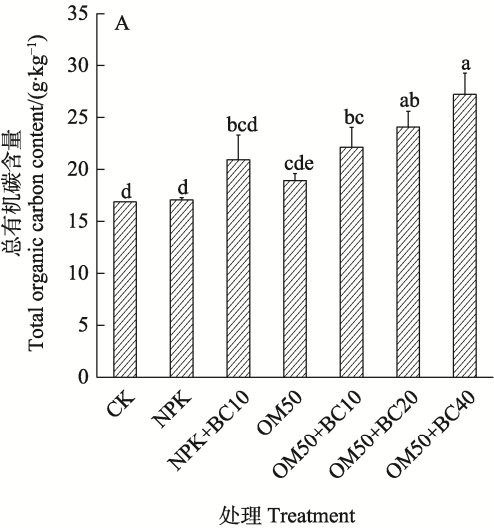
处理 Treatment	平均重量直径 MWD/mm	几何平均直径 GMD/mm	>0.25 mm 团聚体含量 $R_{0.25}/\%$
CK	0.94±0.02 ^{bc}	0.67±0.00 ^c	78.66±0.01 ^c
>NPK	0.92±0.04 ^c	0.68±0.03 ^{bc}	83.54±0.00 ^{bc}
NPK+BC10	0.96±0.07 ^{bc}	0.73±0.08 ^{bc}	83.95±0.40 ^{bc}
OM50	1.00±0.04 ^b	0.78±0.04 ^b	84.69±0.15 ^b
OM50+BC10	1.02±0.02 ^{ab}	0.80±0.02 ^{ab}	84.80±0.07 ^{ab}
OM50+BC20	1.07±0.10 ^{ab}	0.85±0.07 ^a	85.46±0.10 ^a
OM50+BC40	1.22±0.00 ^a	0.87±0.00 ^a	86.70±0.03 ^a

注：同列不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between treatments ($P<0.05$).

表 3 土壤团聚体稳定性与团聚体粒级的逐步回归方程
Tab. 3 Stepwise regression equation regarding stability of aggregates and particle size of aggregates

指标 Index	回归方程 Regression equation	R^2
$R_{0.25}$	$y=0.189x_1+0.206x_2-0.792x_3-0.808x_4+0.796$	0.999 58**
GWD	$y=0.584x_1+0.084x_2-1.322x_3-2.189x_4+0.955$	0.998 25**
MWD	$y=2x_1+1.125x_2+0.1515x_3+0.053x_4+2.979$	1.000 00**

注： x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 分别代表 4 个粒级团聚体， x_1 为粒径>2.000 mm， x_2 为粒径 0.250~2.000 mm， x_3 为粒径 0.053~0.250 mm； x_4 为粒径<0.053 mm；**表示极显著相关（ $P<0.01$ ）。
Note: x_1 , x_2 , x_3 , x_4 represent the four particle sizes of aggregates, x_1 is >2.000 mm, x_2 is 0.250–2.000 mm, x_3 is 0.053–0.250 mm, and x_4 is <0.053 mm; ** represents extremely significant correlation ($P<0.01$).

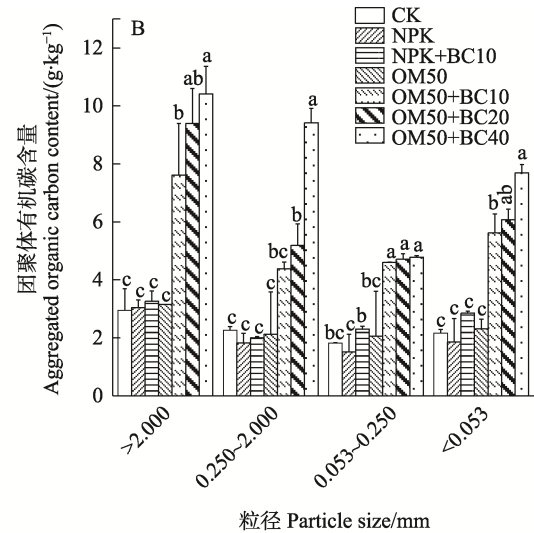


BC20 处理显著增加 29.10%,OM50+BC40 处理显著增加 37.25%，其中以 OM50+BC40 处理的提升效果最好。

不同施肥处理均能不同程度地提高各粒级土壤团聚体的有机碳含量（图 1B）。与 CK 和 NPK 处理相比，有机肥替代 50%化肥配施不同剂量生物炭均能够显著提高土壤粒径>2.000 mm 粒级团聚体的有机碳含量，提高幅度为 23.96%~70.87%，其中以 OM50+BC40 处理效果最为显著，可能是因为施用生物炭能够增加土壤有机碳含量，同时有机碳可以粘合土壤颗粒形成较大团聚体，团聚体的形成也可以保护有机碳免受分解。与 CK 和 NPK 处理相比，有机肥替代 50%化肥配施生物炭亦能够显著提高土壤 0.250~2.000 mm 粒级团聚体的有机碳含量，提高幅度为 21.87%~49.27%，其中以 OM5+BC40 处理的提高效果最为显著。与 CK 和 NPK 处理相比，有机肥替代 50%化肥配施生物炭对 0.053~0.250 mm 粒级团聚体和粒径<0.053 mm 粒级粉粘粒的有机碳含量也有显著提升，其中以 OM50+BC10、OM50+BC20 和 OM50+BC40 处理效果最为显著。

2.4 不同施肥处理团聚体结合有机碳贮量的变化

CK 与 NPK 处理在粒径>2.000 mm 团聚体中的有机碳贮量最高，在粒径<0.053 mm 团聚体的



不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Different lowercase letters indicate significant difference between treatments ($P<0.05$).

图 1 不同施肥处理的总有机碳含量和不同粒径团聚体有机碳含量
Fig. 1 Total organic carbon content and organic carbon content of aggregates with different particle sizes under different fertilization treatment

有机碳贮量次之；与 CK 相比，OM50+BC10、OM50+BC20、OM50+BC40 处理显著提高粒径 >2.000 mm 和 0.250~2.000 mm 粒级团聚体的有机碳贮量，且大团聚体的有机碳贮量明显高于小团聚体；同一粒级团聚体有机碳贮量随着有机肥替代化肥及生物炭用量的增加呈增长趋势（表 4）。表明有机肥替代化肥配施生物炭可以显著增加茶园土壤水稳性大团聚体的有机碳贮量。

表 4 不同施肥处理的各粒级团聚体有机碳贮量和有机碳贡献率
Tab. 4 Organic carbon storage and contribution rate of aggregate fractions under different fertilization treatments

处理 Treatment	>2.000 mm		0.250~2.000 mm		0.053~0.250 mm		<0.053 mm	
	贮量 Storage /(t·hm ⁻²)	贡献率 Contribution rate/%	贮量 Storage /(t·hm ⁻²)	贡献率 Contribution rate/%	贮量 Storage /(t·hm ⁻²)	贡献率 Contribution rate/%	贮量 Storage /(t·hm ⁻²)	贡献率 Contribution rate/%
CK	83.37±11.53 ^b	10.71	52.21±1.59 ^c	68.48	49.59±2.16 ^c	11.23	73.11±9.39 ^{bc}	8.36
NPK	79.38±27.53 ^b	13.37	49.00±4.67 ^c	69.91	39.64±0.41 ^c	9.31	50.70±1.78 ^c	7.34
NPK+BC10	91.29±10.36 ^{ab}	15.41	88.96±3.58 ^{bc}	68.00	64.44±4.51 ^c	9.43	79.84±1.79 ^{bc}	8.02
OM50	78.43±12.45 ^b	13.04	52.82±1.53 ^c	72.10	51.09±3.70 ^c	8.47	56.26±0.19 ^c	5.76
OM50+BC10	197.18±0.24 ^{ab}	16.45	148.60±4.03 ^{ab}	68.90	159.83±0.00 ^a	7.87	254.61±2.00 ^a	7.02
OM50+BC20	180.68±6.28 ^{ab}	18.81	121.90±7.79 ^b	67.60	110.62±0.08 ^b	7.32	162.58±1.22 ^b	6.27
OM50+BC40	216.93±4.32 ^a	20.73	221.97±4.47 ^a	68.64	105.52±6.25 ^{ab}	5.21	193.06±4.32 ^{ab}	5.54

注：同列不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between treatments ($P<0.05$).

在所有处理中，粒径为 0.250~2.000 mm 的团聚体对有机碳的贡献率最高，为 67.60%~72.10%；粒径>2.000 mm 的团聚体有机碳贡献率位居第二，为 10.71%~20.73%；粒径<0.053 mm 的团聚体有机碳贡献率最低，仅为 5.54%~8.36%。且粒径为 0.053~0.250 mm 的粒级团聚体有机碳贡献率高于粒径<0.053 mm 的团聚体。与 NPK 处理相比，有机肥替代 50%化肥并配施不同剂量的生物炭显著提升粒径>2 mm 团聚体的有机碳贡献率，增幅为 23.05%~55.04%，同时降低粒径为 0.053~0.250 mm 和粒径<0.053 mm 团聚体的有机碳贡献率，降幅分别为 15.42%~43.98%和 4.41%~24.48%。与仅使用有机肥替代 50%化肥（OM50）的处理相比，施加不同剂量生物炭显著提高粒径>2.000 mm 团聚体对土壤有机碳的贡献率，同时显著降低了粒径<0.053 mm 团聚体对土壤有机碳的贡献率。OM50+BC40 处理的提升效果最为显著，粒径>2.000 mm 的团聚体有机碳贡献率提高了 59.02%，而粒径为 0.053~0.250 mm 和粒径<0.053 mm 的团聚体有机碳贡献率分别降低了 38.42%和 3.91%（表 4）。

3 讨论

3.1 有机肥替代化肥配施生物炭对土壤团聚体稳定性的影响

土壤结构是调控众多土壤物理与生物过程、

调节土壤有机碳分解的核心属性之一^[32]。作为土壤结构的基本组成单元的土壤团聚体，其分布特征及其稳定性能够精准地反映在不同管理策略下土壤质量的动态演变过程，是评估这些管理手段对土壤自然属性及农业土壤生产能力提升效果的关键量化指标之一^[33-34]。土壤团聚体的结构及其组成成分和土壤有机碳含量之间存在紧密的相关性^[35-36]。本研究中有有机肥能提升土壤肥力与团聚体稳定性的结果与以往研究结果相似。张平良等^[37]研究发现，长期施用有机肥可显著提高西北黄绵土耕层中粒径>0.25 mm 的团聚体含量和稳定性，且显著提升土壤和团聚体的有机碳贮量。李婕等^[38]则研究表明施用有机肥和秸秆还田等方式均可显著增加作物产量、输入土壤有机物和土壤有机碳含量，且在 0~10 cm 土层中粒径>2 mm 粒级土壤团聚体含量的比例显著增加。刘京等^[39]也研究证实土壤较大团聚体的形成在实施秸秆和化肥配施后效果更佳。霍琳等^[40]研究表明，增施有机肥和秸秆还田处理下的水稳性大团聚体含量均显著提升。SIX 等^[24]研究指出，施用有机肥后的有机残体在促进土壤水稳性大团聚体形成方面的效果优于秸秆还田。本研究结果表明，采用有机肥替代化肥显著增加茶园土壤中粒径>2.000 mm 及 0.250~2.000 mm 的粒级团聚体含量，有利于提高团聚体结构水平和稳定性，其主要原因可能是有机肥可以增加有机碳源，改善土壤的物理结构，

有利于大团聚体的形成。 $R_{0.25}$ 、几何平均直径(GMD)和平均重量直径(MWD)是衡量土壤团聚体粒级分布情况的评价指标, $R_{0.25}$ 的增加往往伴随着GMD和MWD的提高,进而表明土壤中团聚体的稳定性增强。本研究中,随着配施生物质炭剂量的提高, $R_{0.25}$ 、GMD及MWD均呈显著增长的趋势,生物炭施用于茶园土壤后,粒径为0.250~2.000 mm的团聚体占据主导地位^[41],这可能与生物质炭的特性有关,其高比表面积和仅有的孔隙结构等能吸附并稳定土壤中的有机物质,促使土壤颗粒结合成有机无机复合的大团聚体^[42]。这一发现与王亚琼等^[43]的研究结果相契合,进一步证实了生物炭在促进土壤中较大团聚体(粒径>0.250 mm)形成方面的积极作用。此外,生物质炭本身所含有的可溶性有机碳作为外源输入也能够显著提升土壤的有机碳含量,进而推动微团聚体进一步转化为大团聚体^[44]。然而,并不是所有研究均认为施用生物炭对土壤团聚体的稳定性产生正面积效应。如,BUSSCHER等^[45]在土壤中分别添加5、10、20 g/kg生物炭硅质70 d后,土壤团聚体的稳定性无显著影响;ZHANG等^[46]的一项为期1.5 a的研究指出,按16 t/hm²生物质炭施用可显著提高中国黄土高原土壤中的大团聚体(粒径>2.000 mm)含量,而8 t/hm²生物质炭处理则未见显著效果。产生此类差异可能与土壤特性、生物质炭施用时长和施用量等有关。

本研究结果表明,与单施有机肥(OM50)和单施生物炭(NPK+BC10)相比,有机肥与生物炭配施均不同程度地提高了 $R_{0.25}$ 、GMD和MWD,表明有机肥与生物炭配施后对土壤团聚体的稳定性更能起积极的正向作用^[47]。李伟等^[48]在小麦-玉米农田的研究中发现,生物质炭配施氮肥使土壤团聚体稳定性、水稳性大团聚体含量显著增加,且两季作物总产量也显著增加。邓伟明等^[49]基于大豆盆栽试验发现,与不施生物炭相比,生物炭与磷肥配施促进了更大粒径团聚体的形成,在不同磷水平下添加生物炭均显著增加粒径>2.000 mm粒级团聚体比例,而降低粒径为0.250~2.000 mm粒级团聚体比例。本研究也发现,有机肥与生物炭的协同配施对土壤结构和保肥性能产生了积极的协同效应。这种效应体现在它们共同推动了粉粘粒土壤矿物向有机无机复合体的转变,进而显著提高了土壤中粒径>0.250 mm粒级团聚体的稳定性。生物炭较稳定不易分解,大量孔隙吸附结

秆分解产生的养分物质,提供团聚体形成过程中必需胶结物质的物质基础,从而促进大粒级团聚体的形成。此外,生物炭与有机肥配施为土壤中细菌和真菌提供营养物质,使细菌和真菌生长速率显著提高,从而使植物根系分泌物增加,土壤中有有机胶结物质含量也增加,最终促进形成大粒级的团聚体。

3.2 有机肥替代化肥配施生物炭对土壤团聚体有机碳分布的影响

土壤有机碳是土壤质量评估中的关键指标^[50],同时也是促进团聚体稳定性增强的关键有机结合剂^[51]。本研究结果表明,有机肥替代化肥和施用生物炭均能增加茶园土壤有机碳含量,且不同施用量的生物炭均能显著提升茶园土壤中的有机碳水平,且该提升效果与生物炭的添加量呈正相关,这一发现与前人研究结果相吻合,即有机肥替代化肥施用和生物炭的添加均能显著增加土壤碳含量^[52]。这可能是因为一方面生物炭本身作为碳源能够增加土壤中的有机碳含量;另一方面,生物炭本身具有稳定的芳香结构,施入土壤后难以被微生物分解,而且生物炭的高比表面积和丰富的孔隙结构能吸附土壤中的有机碳,能有效固定土壤中的有机碳,形成物理性保护屏障,进而抑制有机碳的分解,成为土壤碳库中不可或缺的关键组成部分^[53]。本研究中,与单施化肥相比,施用有机肥能更好地提高土壤有机碳含量,即施用有机肥能显著提升粒径<0.053 mm团聚体有机碳含量。本研究还发现,随着生物炭配施量的增加,茶园土壤中粒径>0.250 mm的团聚体有机碳含量与储量稳定维持在63.70%~70.60%的高位水平,表明有机碳集中在粒径为0.250~2.000 mm的团聚体内分布。张晓杰^[54]研究也发现添加2种不同类型生物炭均显著增加土壤有机碳(SOC)和水溶性有机碳(WSOC)含量,且颗粒有机碳(POC)含量在粒径>0.250 mm的大团聚体中较高,SOC和WSOC含量在粒径>0.250 mm大团聚体和粒径为0.053~0.250 mm微团聚体中更高,且随着培养时间的延长显著增加。这些均说明生物炭的施用对提高土壤粒径>0.250 mm的团聚体的有机碳含量呈积极正向作用。

有机肥替代化肥配施生物炭作为能够提高土壤有机碳含量、改善土壤优良结构和提升土壤肥力水平的农业措施,应进行大力推广和应用。本研究表明,有机肥替代50%化肥配施生物质炭后,

茶园土壤的有机碳含量显著增加,这增强了土壤颗粒中有机和无机复合体的胶结作用,进而促进了更多粒径 $>0.250\text{ mm}$ 粒级团聚体的形成,提升了土壤团聚体的结构及其稳定性。即大团聚体相较于微团聚体而言,能够储存更为丰富的碳、氮元素及颗粒状有机质和不稳定有机质,进而促进土壤的固碳能力^[55]。李越等^[56]也研究表明,在有机肥配施生物炭处理下各粒级团聚体的有机碳含量显著增加,与仅施化肥相比,有机肥配施生物炭对提升土壤各粒级团聚体有机碳的效果更佳。本研究也发现,与单施有机肥或仅施生物炭处理相比,50%有机肥+50%化肥配施不同量生物炭使茶园土壤各粒级团聚体有机碳含量显著增加,且在粒径 $>0.250\text{ mm}$ 的粒级大团聚体有机碳贡献率均有不同程度地提高。与微团聚体和粉粘粒组分相比,宏观团聚体能储存更多的 C、N、颗粒有机物和不稳定有机物,更有利于提高土壤碳固存。表明与单施化肥或有机肥、生物炭相比,有机肥替代化肥并配施生物炭是土壤固碳的有效方式。

4 结论

与常规化肥处理相比,有机肥配施生物炭均能显著改善茶园土壤团聚体结构和提高其稳定性。茶园土壤团聚体的分布以粒径为 $0.250\sim 2.000\text{ mm}$ 为主,占 67.12%~76.39%。有机肥配施生物炭后,茶园土壤团聚体进一步向粒径为 $0.250\sim 2.000\text{ mm}$ 聚集,土壤团聚体的 MWD、GMD、 $R_{0.25}$ 以 OM50+BC40 处理的最高。与常规化肥处理相比,有机肥与生物炭配施显著提高了粒径 $>2.000\text{ mm}$ 粒级团聚体的有机碳贡献率(23.05%~55.04%),降低粒径为 $0.053\sim 0.250\text{ mm}$ 和粒径 $<0.053\text{ mm}$ 粒级团聚体的有机碳贡献率。而与单施有机肥或单施生物炭处理相比,有机肥与生物炭配施处理后茶园土壤各粒级团聚体有机碳含量显著增加,土壤团聚体的 $R_{0.25}$ 、GMD、MWD 以及粒径 $>0.250\text{ mm}$ 粒级团聚体的有机碳贡献率均不同程度地提高,有机肥与生物炭配施更有利于增加土壤团聚体稳定性和有机碳的固存,其中以 OM50+BC20 与 OM50+BC40 处理的应用效果较佳。

参考文献

[1] 陈检锋, 杨向德, 马立锋, 倪康, 阮建云, 付利波. 有机肥

替代部分化肥对云南大叶茶产量和品质的影响[J]. 中国茶叶, 2022, 44(10): 49-54.

CHEN J F, YANG X D, MA L F, NI K, RUAN J Y, FU L B. Effects of partial organic substitution for chemical fertilizer on the yield and quality of Yunnan large-leaf tea[J]. China Tea, 2022, 44(10): 49-54. (in Chinese)

[2] 王峰, 吴志丹, 陈玉真, 张文锦. 提高福建茶园土壤肥力质量的技术途径[J]. 福建农业学报, 2012, 27(10): 1139-1145.

WANG F, WU Z D, CHEN Y Z, ZHANG W J. Means to improve soil fertility of tea plantations in Fujian[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2012, 27(10): 1139-1145. (in Chinese)

[3] 林生, 庄家强, 陈婷, 张爱加, 周明明, 林文雄. 福建安溪不同年限茶树土壤养分与微生物 Biolog 功能多样性的差异分析[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(11): 1471-1477.

LIN S, ZHUANG J Q, CHEN T, ZHANG A J, ZHOU M M, LIN W X. Analysis of nutrient and microbial biology function diversity in tea soils with different planting years in Fujian Anxi[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(11): 1471-1477. (in Chinese)

[4] 杨海滨, 李中林, 邓敏, 盛忠雷, 张莹, 胡方洁, 邹秀宏, 徐泽. 不同施肥措施对重庆茶园土壤氮转化酶活性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(5): 1107-1114.

YANG H B, LI Z L, DENG M, SHENG Z L, ZHANG Y, HU F J, WU X H, XU Z. Effects of the combined application of different fertilizers and urea on nitrogen transformation enzyme activities in tea-garden soil from Chongqing[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2020, 26(5): 1107-1114. (in Chinese)

[5] 俞慎, 何振立, 陈国潮, 黄昌勇. 不同树龄茶树根层土壤化学特性及其对微生物区系和数量的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(3): 433-439.

YU S, HE Z L, CHEN G C, HUANG C Y. Soil chemical characteristics and their impacts on soil microflora in the root layer of tea plants with different cultivating ages[J]. Journal of Soil Science, 2003, 40(3): 433-439. (in Chinese)

[6] 纪 L F, 王 Z D, 尤 Z M, 易 X Y, 倪 K, 郭 S W, 阮 J Y. Effects of organic substitution for synthetic N fertilizer on soil bacterial diversity and community composition: a 10-year field trial in a tea plantation[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2018, 268: 124-132.

[7] 纪 L F, 倪 K, 王 Z D, 张 J W, 易 X Y, 杨 X D, 凌 N, 尤 Z M, 郭 S W, 阮 J Y. Effect of organic substitution rates on soil quality and fungal community composition in a tea plantation with long-term fertilization[J]. Biology and Fertility of Soils, 2020, 56: 633-646.

[8] 王子腾, 耿元波, 梁涛, 胡雪燕. 减施化肥和配施有机肥

- 对茶园土壤养分及茶叶产量和品质的影响[J]. 生态环境学报, 2018, 27(12): 2243-2251.
- WANG Z T, GENG Y B, LIANG T, HU X D. Effects of chemical fertilizer reduction and chemical fertilizer applied with organic fertilizer on tea garden soil nutrients and tea yield and quality[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(12): 2243-2251. (in Chinese)
- [9] 孙宇龙, 张永利, 王辉军, 苏有健, 罗毅, 廖珺, 廖万有. 机采茶园有机替代技术对土壤肥力和茶叶产量品质的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(21): 43-49.
- SUN Y L, ZHANG Y L, WANG Y J, SU Y J, LUO Y, LIAO J, LIAO W Y. Effects of chemical fertilizers replaced by organic manure on soil fertility, tea yield and quality in machine-picked tea garden[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(21): 43-49. (in Chinese)
- [10] VOGEL H, BALAEIR R, KRAVCHENKO A, OTTEN W, POT V, SCHLUTER S, WELLER U, BAVEYE C. A holistic perspective on soil architecture is needed as a key to soil functions[J]. European Journal of Soil Science, 2021, 73(1): 13152.
- [11] 阮建云, 马立锋, 伊晓云, 石元值, 倪康, 刘美雅, 张群锋. 茶树养分综合管理与减肥增效技术研究[J]. 茶叶科学, 2020, 40(1): 85-95.
- RUAN J Y, MA L F, YI X Y, SHI Y Z, NI K, LIU M Y, ZHANG Q F. Integrated nutrient management in tea plantation to reduce chemical fertilizer and increase nutrient use efficiency[J]. Tea Science, 2020, 40(1): 85-95. (in Chinese)
- [12] 胡雪荻, 耿元波, 梁涛. 缓控释肥在茶园中应用的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2018(1): 1-8.
- HU X D, GENG Y B, LIANG T. The progress of controlled-release fertilizer applied in tea garden[J]. Soil and Fertilizer in China, 2018(1): 1-8. (in Chinese)
- [13] 祝金虹. 有机肥替代化肥模式对茶叶产量及品质的影响[J]. 中国农技推广, 2020, 36(12): 60-62.
- ZHU J H. Effects of organic fertilizer instead of chemical fertilizer on tea yield and quality[J]. China Agricultural Technology Extension, 2020, 36(12): 60-62. (in Chinese)
- [14] 刘中良, 宇万太, 周桦, 马强. 不同有机厩肥输入量对土壤团聚体有机碳组分的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(6): 1149-1157.
- LIU Z L, YU W T, ZHOU H, MA Q. Effect of application rate of barnyard manure on organic carbon fraction of soil aggregates[J]. Acta Soil Science, 2011, 48(6): 1149-1157. (in Chinese)
- [15] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Soil macro aggregate turnover and micro aggregate formation: a mechanism for C sequestration under no -tillage agriculture[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [16] 刘鸿宇. 泡桐人工林土壤团聚体稳定性及其影响因素研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020.
- LIU H Y. Study on the stability of soil aggregates in *Pau- lownia* plantation and its influencing factors[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2020. (in Chinese)
- [17] PULLEMAN M M, MARINISSEN J C Y. Physical protection of mineralizable C in aggregates from long-term pasture and arable soil[J]. Geoderma, 2004, 120(3/4): 273-282.
- [18] 徐香茹, 汪景宽. 土壤团聚体与有机碳稳定机制的研究进展[J]. 土壤通报, 2017, 48(6): 1523-1529.
- XU X R, WANG J K. A review on different stabilized mechanisms of soil aggregates and organic carbon[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(6): 1523-1529. (in Chinese)
- [19] 刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, HWAT Bing-So, 李秀英, 李娟. 不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(4): 1035-1041.
- LIU E K, ZHAO B Q, MEI X R, HWAT B S, LI X Y, LI J. Distribution of water-stable aggregates and organic carbon of arable soils affected by different fertilizer application[J]. Acta Ecological Sinica, 2010, 30(4): 1035-1041. (in Chinese)
- [20] 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[J]. 土壤, 2011, 43(5): 720-728.
- 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[J]. Soils, 2011, 43(5): 720-728. (in Chinese)
- [21] 陈恩凤, 关连珠, 汪景宽, 颜丽, 王铁宇, 张继宏, 周礼恺, 陈利军, 李荣华. 土壤特征微团聚体的组成比例与肥力评价[J]. 土壤学报, 2001, 38(1): 49-53.
- CHEN E F, GUAN L Z, WANG J K, YAN L, WANG T Y, ZHANG J H, ZHOU L K, CHEN L J, LI R H. Compositional proportion of soil characteristic micro aggregates and soil fertility evaluation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(1): 49-53. (in Chinese)
- [22] TISDALL J M, OADES J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. Journal of Soil Science, 1982, 33(2): 141-163.
- [23] SOLLINS P, HOMANN P, CALDWELL B A. Stabilization ND destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls[J]. Geoderma, 1996, 74(1/2): 65-105.
- [24] SIX J, CONANT R T, PAUL E A, PAUSTIAN K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils[J]. Plant and Soil, 2002, 241(2): 155-176.
- [25] 侯倩倩, 王国华, 屈建军. 农田土壤有机碳库研究述评[J]. 中国农学通报, 2017, 33(33): 107-114.
- GOU Q Q, WANG G H, QU J J. A review of researches on

- soil organic carbon pool in cropland[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(33): 107-114. (in Chinese)
- [26] HERATH H M S K, CAMPS-ARBESTAIN M, HEDLEY M. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: an Alfisol and an Andisol[J]. Geoderma, 2013, 209/210: 188-197.
- [27] 庞津雯, 王钰皓, 陶宏扬, 卫婷, 高飞, 刘恩科, 贾志宽, 张鹏. 生物炭不同添加量对旱作覆膜农田土壤团聚体特性及有机碳含量的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(9): 1729-1743.
- PANG J W, WANG Y H, TAO H Y, WEI T, GAO F, LIU E K, JIA Z K, ZHANG P. Effects of different biochar application rates on soil aggregate characteristics and organic carbon contents for film-mulching field in semiarid areas[J]. Scientific Agricultural Sinica, 2023, 56(9): 1729-1743. (in Chinese)
- [28] 张红雪, 赵壮, 王晓朋, 朱巧莲, 邹双全, 毛艳玲. 生物炭对亚热带红壤水稳性团聚体及其碳、氮分布的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(6): 27-33.
- ZHANG H X, ZHAO Z, WANG X P, ZHU Q L, ZOU S Q, MAO Y L. Effect of biochar on water stable aggregate and distribution of carbon and nitrogen in subtropical red soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020(6): 27-33. (in Chinese)
- [29] 李艳春, 汪航, 李兆伟, 叶菁, 王义祥. 几种改良措施对酸化茶园土壤理化性质和微生物群落结构的影响[J]. 茶叶科学, 2022, 42(5): 661-671.
- LI Y C, WANG H, LI Z W, YE J, WANG Y X. Ameliorative effect of several measures on soil physicochemical properties and microbial community structures in acidified tea gardens[J]. Journal of Tea Science, 2022, 42(5): 661-671. (in Chinese)
- [30] CAMBARDELLA C A, ELLIOTT E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(4): 1071-1076.
- [31] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005. (in Chinese)
- [32] VAN VEEN J A, KUIKMAN P J. Soil structural aspects of decomposition of organic matter by micro-organisms[J]. Bio-geochemistry, 1990, 11: 213-223.
- [33] MANNA M C, SWARUP A, WANJARIR H, RAVANKAR H N, MISHRA B, SAHA M N, SINGH Y V, SAHI D K, SARAP P A. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil organic carbon storage, soil quality and yield sustainability under sub-humid and semi-arid tropical India[J]. Field Crops Research, 2005, 93(2/3): 264-280.
- [34] MIKHA M M, RICE C W. Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68: 809-816.
- [35] HAYNES R J, FRANCIS G S. Changes in microbial biomass C, soil carbohydrate composition and aggregate stability induced by growth of selected crop and forage species under field conditions[J]. Journal of Soil Science, 1993, 44(4): 665-675.
- [36] BRONICK C J, LAL R. Soil structure and management: a review[J]. Geoderma, 2005, 124(1/2): 3-22.
- [37] 张平良, 刘晓伟, 曾骏, 郭天文. 长期施用有机肥对西北半干旱区小麦田土壤团聚体分布及其有机碳的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024(4): 1-8.
- ZHANG P L, LIU X W, ZENG J, GUO T W. Effects of long-term organic manure application on the distribution and organic carbon content of soil aggregates in wheat field of northwest semi-arid region[J]. Soil and Fertilizer in China, 2024(4): 1-8. (in Chinese)
- [38] 李婕, 黎青慧, 李平儒, 王莲莲, 杨学云, 张树兰. 长期有机肥施用、秸秆还田对壤土团聚体及其有机碳含量的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(6): 1456-1460.
- LI J, LI Q H, LI P R, WANG L L, YANG X Y, ZHANG S L. Effects of long-term organic inputs on distribution of aggregate size and its organic carbon content on Lou soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(6): 1456-1460. (in Chinese)
- [39] 刘京, 常庆瑞, 李岗, 魏永胜. 连续不同施肥对土壤团聚性影响的研究[J]. 水土保持通报, 2000(4): 24-26.
- LIU J, CHANG Q R, LI G, WEI Y S. Effect of different fertilization on soil characteristics of aggregate[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2000(4): 24-26. (in Chinese)
- [40] 霍琳, 武天云, 蔺海明, 曹诗瑜, 唐文雪. 长期施肥对黄土高原旱地黑垆土水稳性团聚体的影响[J]. 应用生态学报, 2008(3): 545-550.
- HUO L, WU T Y, LIN H M, CAO S Y, TANG W X. Effects of long-term fertilization on water-stable aggregates in calcic kastanozem of Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008(3): 545-550. (in Chinese)
- [41] 李天豪. 生物炭对煤矿复垦土壤团聚体稳定性、碳氮分布和微生物群落的影响[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
- LI T H. Effects of biochar on soil aggregate stability, carbon and nitrogen distribution and microbial community in coal mine reclamation[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [42] ISLAM M U, JIANG F H, GUO Z C, PENG X H. Does biochar application improve soil aggregation? A meta-analysis[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 209: 104926.
- [43] 王亚琼, 牛文全, 李学凯, 王婕, 官雅辉, 董继红. 生物炭对日光大棚土壤团聚体结构的影响[J]. 水土保持通报,

- 2019, 39(4): 190-195.
- WANG Y Q, NIU W Q, LI X K, WANG J, GUAN Y H, DONG J H. Effect of biochar on soil aggregate structure in greenhouse[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4): 190-195. (in Chinese)
- [44] 姜灿烂, 何园球, 刘晓利, 陈平帮, 王艳玲, 李辉信. 长期施用有机肥对旱地红壤团聚体结构与稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 715-722.
- JIANG C L, HE Y Q, LIU X L, CHEN P B, WANG Y L, LI H X. Effect of long-term application of organic manure on structure and stability of aggregate in upland red soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(4): 715-722. (in Chinese)
- [45] BUSSCHER W J, NOVAK J M, EVANS D E, WATTS D W. Influence of pea can biochar on physical properties of a Norfolk loamy sand[J]. Soil Science, 2010, 175(1): 10-14.
- [46] ZHANG M, CHENG G, FENG H, SUN B H, ZHAO Y, CHEN H X, CHEN J, DYCK M, WANG X D, ZHANG J G, ZHANG A F. Effects of straw and biochar amendments on aggregate stability, soil organic carbon, and enzyme activities in the Loess Plateau, China[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2017, 24(11): 10108-10120.
- [47] 侯晓娜, 李慧, 朱刘兵, 韩燕来, 唐政, 李忠芳, 谭金芳, 张水清. 生物炭与秸秆添加对砂姜黑土团聚体组成和有机碳分布的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(4): 705-712.
- HOU X N, LI H, ZHU L B, HAN Y L, TANG Z, LI Z F, TAN J F, ZHANG S Q. Effects of biochar and straw additions on lime concretion black soil aggregate composition and organic carbon distribution[J]. Scientific Agricultural Sinica, 2015, 48(4): 705-712. (in Chinese)
- [48] 李伟, 代镇, 张光鑫, 刘杨, 韩娟. 生物炭和氮肥配施提高壤土团聚体稳定性及作物产量[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(5): 782-791.
- LI W, DAI Z, ZHANG G X, LIU Y, HAN J. Combination of biochar and nitrogen fertilizer to improve soil aggregate stability and crop yield in Lou soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(5): 782-791. (in Chinese)
- [49] 邓伟明, 唐梦天, 郭玉栋, 池哲伟, 黄期, 邝曦芝, 蔡昆争, 田纪辉. 生物炭与磷肥添加对红壤团聚体及其磷组分分布的影响[J]. 土壤通报, 2023, 54(2): 352-363.
- DENG W M, TANG M T, GUO Y D, CHI Z W, HUANG Q, KUANG X Z, CAI K Z, TIAN J H. Effects of biochar and phosphorus application on red soil aggregates and their phosphorus components distribution[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(2): 352-363. (in Chinese)
- [50] 罗梅, 田冬, 高明, 黄容. 紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应[J]. 环境科学, 2018, 39(9): 4327-4337.
- LUO M, TIAN D, GAO M, HUANG R. Soil organic carbon of purple soil as affected by different application of biochar[J]. Environmental Science, 2018, 39(9): 4327-4337. (in Chinese)
- [51] CHAI Y J, ZENG X B, S. Z. E, BAI L Y, SU S M, HUANG T. Effects of freeze-thaw on aggregate stability and the organic carbon and nitrogen enrichment ratios in aggregate fractions[J]. Soil Use and Management, 2014, 30(4): 507-516.
- [52] WANG C, LIU J Y, SHEN J L, CHEN D, LI Y, IANG B S, WU J S. Effects of biochar amendment on net greenhouse gas emissions and soil fertility in a double rice cropping system: a 4-year field experiment[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2018, 262: 83-96.
- [53] ZIMERMAN A R, GAO B, AHN M Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(6): 1169-1179.
- [54] 张晓杰. 生物炭添加对稻田土壤团聚体稳定性及有机碳组分的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.
- ZHANG X J. Effects of biochar addition on the stability of aggregates and organic carbon components in paddy soil[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [55] 王攀宇. 炭基有机肥对土壤团聚体有机碳分布及烤烟产质量的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2023.
- WANG P Y. Effect of charcoal-based organic fertilizer on carbon distribution in soil aggregates and quality of roasted tobacco production[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [56] 李越, 徐曼, 谢永红, 王颖, 黄容, 谢军, 王子芳, 高明. 不同改良剂对酸性紫色土团聚体和有机碳的影响[J]. 环境科学, 2024, 45(2): 974-982.
- LI Y, XU M, XIE Y H, WANG Y, HUANG R, XIE J, WANG Z F, GAO M. Effects of different modifiers on aggregates and organic carbon in acidic purple soil[J]. Environmental Science, 2024, 45(2): 974-982. (in Chinese)