

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.03.020

肖欣娟, 夏建国, 于正义, 等. 茶渣生物质炭对茶园土壤团聚体及其有机碳分布的影响. 土壤, 2021, 53(3): 594–601.

茶渣生物质炭对茶园土壤团聚体及其有机碳分布的影响^①

肖欣娟¹, 夏建国^{1*}, 于正义¹, 马黛玉¹, 林婉嫔²

(1 四川农业大学资源学院, 成都 611130; 2 四川省遂宁生态环境监测中心站, 四川遂宁 629000)

摘要: 将茶生产过程中产生的茶渣在 500 °C 下制成生物质炭, 针对雅安名山区 3 种典型茶园土壤(紫色土、水稻土和黄壤)进行 112 d 的室内培养试验, 包括 CK、0.5%、1%、2% 和 4% 5 种炭土比, 共计 15 个处理, 采用湿筛法分析不同生物质炭添加比例下 3 种茶园土壤水稳性团聚体组成、稳定性和有机碳分布的影响。研究表明: 生物质炭输入后 3 种土壤 >0.25 mm 粒径水稳性大团聚体的数量有所增加, 且生物质炭添加比例越高提升越大, 其中紫色土中 >2 mm 粒径含量增幅最大, 最高提升了 12.71%; 水稻土和黄壤则是 0.25 ~ 2 mm 粒径增幅最大, 最高分别提升了 8.25% 和 8.19%。3 种土壤的 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 值均有所增加, 土壤水稳性团聚体稳定性增加, 表现为高添加量下作用更显著, 且对黄壤的提升效果最佳。3 种土壤各粒径团聚体有机碳的含量大幅提升, 且随添加比例的增加而增加, 各处理间差异显著($P < 0.05$), 紫色土中 <0.053 mm 粒径的增幅高达 96.35%, 水稻土中 0.053 ~ 0.25 mm 粒径有机碳含量增幅高达 74.22%, 黄壤中 >2 mm 粒径有机碳含量增幅最高达到 334.79%。3 种土壤中均是 0.25 ~ 2 mm 粒径有机碳相对贡献率最高。总体上, 茶渣生物质炭输入后可增加 3 种茶园土壤的大团聚体数量, 提升团聚体稳定性, 对各粒径水稳性团聚体有机碳的含量也有显著提升作用($P < 0.05$)。

关键词: 生物质炭; 茶园; 土壤团聚体; 土壤有机碳

中图分类号: S152.4; S156.2 **文献标志码:** A

Effects of Biochar of Tea Residue on Soil Aggregates and Their Organic Carbon Distribution in Tea Gardens

XIAO Xinjuan¹, XIA Jianguo^{1*}, YU Zhengyi¹, MA Daiyu¹, LIN Wanpin²

(College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2 Sichuan Suining Ecological Environment Monitoring Center Station, Suining, Sichuan 629000, China)

Abstract: In this study, biochar was made at 500 °C from tea residues produced during tea production process and used in a 112 d incubation experiment to study its impacts on the distributions, stabilities and organic carbon contents of soil aggregates in three typical tea garden soils (purple soil, paddy soil and yellow soil) of Ya'an, Sichuan Province. In total fifteen treatments were designed with five applying rates of biochar (0, 0.5%, 1%, 2% and 4%). Soil aggregate size distribution and their organic carbon contents were determined. The results showed >0.25 mm aggregates were increased in the three soils with the increase of biochar applied. >2 mm aggregates increased most in purple soil (increased by 12.71%), 0.25-2 mm aggregates were increased most in paddy soil and yellow soil (increased by 8.25% and 8.19%, respectively). Biochar increased mean weight diameters (MWD), geometric mean diameter (GMD) and macro-aggregate content ($R_{0.25}$) significantly, indicating biochar can improve the stability of soil water-stable aggregates, and the effect is intensified with increasing biochar input. Biochar increased organic carbon contents in all size aggregates in the three soils significantly, and the effect is intensified with increasing biochar input. The differences were significant ($P < 0.05$) between different treatments. Organic carbon content increased most in <0.053 mm aggregates in purple soil (increased by 96.35%), in 0.053-0.25 mm aggregates in paddy soil (increased by 74.22%), and in >2 mm aggregates in yellow soil (increased by 334.79%). The relative contribution rate of SOC was the highest in 0.25-2 mm aggregates in the three soils. In general, biochar of tea residues can increase large soil aggregates in tea gardens, improve the stability of soil aggregates, and significantly promote organic carbon contents in all size soil aggregates.

①基金项目: 四川省科技厅重点研发项目(2021YFS0279)和四川省自然资源厅科研项目(Kj-2021-7)资助。

* 通讯作者(xiajianguo@126.com)

作者简介: 肖欣娟(1994—), 女, 四川成都人, 硕士研究生, 主要从事土壤资源利用研究。E-mail: 1057006243@qq.com

Key words: Biochar; Tea garden; Soil aggregates; Soil organic carbon

土壤团聚体是土壤的基本结构单位,影响土壤养分转移和循环,与土壤抗蚀能力、环境质量和固碳潜力等有直接关系^[1]。土壤有机碳(SOC)作为胶结物质参与团聚体形成与周转的整个过程,土壤团聚体则为土壤有机碳储存提供场所,并影响其分解转化过程^[2]。近年来,生物质炭在农业资源与环境方面大受关注^[3],生物质炭富含碳,输入土壤后可与土壤中的矿物形成有机无机复合体,即土壤团聚体^[4],同时,生物质炭将自身封闭于土壤团聚体内,减少与土壤微生物的接触,实现自身的长期封存^[5]。王富华等^[6]将生物质炭与秸秆还田,发现单施生物质炭也可以增加紫色土中>0.25 mm 粒径大团聚体的数量,且土壤总有机碳和各粒径团聚体含量均显著提升。乔丹丹等^[7]将生物质炭、秸秆和化肥配施,发现生物质炭配施化肥以及生物质炭和秸秆配施化肥均能促进黄褐土>0.25 mm 粒径团聚体的形成。孟祥天等^[8]通过旱作红壤长期定位试验发现,生物质炭配施化肥处理相对单施化肥的处理显著增加了各粒级团聚体有机碳含量,其中以>2 mm 水稳性团聚体有机碳含量增势最明显。康熙龙^[9]将一次性施用 20 t/hm² 和 40 t/hm² 生物质炭 3 a 后的旱地土壤与对照相比,证实生物质炭处理均显著增加了 2 000 ~ 200 μm 团聚体粒组土壤有机碳的含量。Sun 和 Lu^[10]将秸秆和木屑生物质炭加入土壤进行室内培养,证实生物质炭的输入可以同时增加土壤大粒级团聚体数量及各粒级土壤团聚体有机碳的含量。

雅安名山茶区是我国重要的川茶产区之一,四川省委、省政府已将川茶纳入农业“10+3”产业体系重点

推进,茶园土壤是一种资源,也是一种生态,提高茶园土壤肥力并增强土壤固碳能力,保证茶园土壤质量,是雅安市乃至我国茶叶种植行业稳健发展的重要保障。因此,本试验利用茶渣制成生物质炭,通过室内培养试验分析不同施用量的茶渣生物质炭对不同茶园土壤团聚体组成、稳定性和有机碳含量与分布的影响,揭示生物质炭对茶园团粒土壤结构形成与有机碳转化的影响,以期明确生物质炭在茶园土壤结构改良中的作用提供一定的理论参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为雅安名山茶区典型茶园土,包括第三系名山群坡积物发育而来的紫色土、第四纪老冲积黄壤和第四纪老冲积黄壤发育而来的水稻土 3 种,均采自地理标志产品蒙山茶保护范围内。该区域位于四川省雅安市名山区(30°00' ~ 30°15'N, 103°03' ~ 103°22'E)。该区域属中纬度亚热带湿润气候,年均温度 15.8 °C,无霜期约 298 d,年平均相对湿度 82%,为低光辐射区,气候温和,雨量充沛。3 种土壤分开采集,取 0 ~ 20 cm 耕作层,自然风干后剔除石块和可见植物残体,过 2 mm 筛,按网格法取样一份测定土壤基本理化性质(表 1),剩余样品用于室内培养试验。生物质原料取自四川雅安蒙山茶保护范围内茶厂制茶过程中产生的废弃茶渣。茶渣自然风干后,剔除明显杂质,过 2 mm 筛,在马弗炉中以 500 °C 限氧裂解 2.5 h,冷却后过 0.15 mm 筛备用。

表 1 土壤基本理化性质
Table 1 Physicochemical properties of tested soil

土样	pH	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)	全钾(g/kg)	碱解氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)	砂粒(%)	黏粒(%)	粉粒(%)
紫色土	4.30	40.17	1.12	0.55	8.20	128.32	15.30	54.51	23	57	20
黄壤	4.32	11.38	0.85	1.31	9.60	96.71	7.14	48.25	30	32	38
水稻土	4.35	56.55	1.59	0.81	11.00	139.62	38.70	77.18	17	62	21

注:砂粒、黏粒、粉粒为质量分数。

1.2 试验设计

取 500 ml 的塑料瓶,装相当于烘干土重 400 g 的紫色土、水稻土和黄壤,设单一土壤处理(CK)和生物质炭土壤处理(生物质炭/土壤质量比分别为 0.5%、1%、2%、4%),共 15 个处理,每个处理设 3 个重复。在 25 °C 下预培养 1 周后,将土壤与生物质炭充分混匀,25 °C 下进行室内培养 112 d,调节水分使土壤含

水率达到田间持水率的 60%,培养过程中,每隔 7 d 用称重法补充矿化损失水分。

1.3 样品采集

于 2019 年 3 月 14 日开始培养试验,培养 112 d 后进行采样,在风干过程中沿自然断裂面掰开,过 10 mm 筛,风干后测定土壤水稳性团聚体各粒径含量,粒径分为 >2 mm、0.25 ~ 2 mm、0.053 ~ 0.25 mm

和 <0.053 mm, 并用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定各粒径团聚体有机碳含量。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 土壤水稳性团聚体测定 采用湿筛法, 将 50 g 风干土样置于套筛顶部(孔径依次为 2 mm、0.25 mm 和 0.053 mm), 于蒸馏水中浸泡 5 min, 开启团粒分析仪(浙江托普仪器有限公司生产, 型号 TPF-100), 然后以 3 cm 振幅、25 r/min 的频率振荡 2 min。振荡结束后将各级筛中团聚体洗入已烘干称重的铝盒中, 同时将悬液移入干净小桶中, 静置 24 h 倒去上清液移入铝盒中, 将铝盒置于 55 °C 烘箱中烘干称重, 每层土壤样品记为 W_i 。

1.4.2 土壤有机碳含量测定 采用重铬酸钾外加热法进行测定, 其中 >2 mm 和 0.25 ~ 2 mm 粒径团聚体需要先磨碎后过 0.15 mm 筛, 0.053 ~ 0.25 mm 和 <0.053 mm 粒径烘干后可直接进行测定。

1.5 数据处理

利用湿筛法获得的各粒径团聚体质量计算出各粒径团聚体的占比, 然后分别按式(1) ~ (3) 计算 >0.25 mm 水稳性大团聚体含量占比($R_{0.25}$)、平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD):

$$R_{0.25} = \frac{M_R > 0.25}{M_T} \times 100\% \quad (1)$$

$$MWD = \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i w_i) \quad (2)$$

$$GMD = \text{EXP} \left[\frac{\sum_{i=1}^n m_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \right] \quad (3)$$

式中: $M_{R>0.25}$ 为 >0.25 mm 团聚体的质量(g), M_T 为团聚体总质量(g), \bar{x}_i 为某粒径团聚体平均直径(mm), w_i 为某粒径团聚体质量比, m_i 为不同粒径团聚体的质量(g)。

各粒径团聚体有机碳对土壤总有机碳的相对贡献率按式(4)计算:

$$\text{团聚体中有机碳相对贡献率} = \frac{\text{SOC}_i \times w_i}{\sum_{i=1}^n (\text{SOC}_i \times w_i)} \times 100\% \quad (4)$$

式中: SOC_i 为各粒径有机碳含量(g/kg)。

试验数据采用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 24 软件进行分析; 应用单因素方差分析(ANOVA) 比较不同处理之间的差异性(Duncan 法)。

2 结果与分析

2.1 茶渣生物质炭输入对茶园土壤水稳性团聚体组成的影响

茶渣生物质炭加入后, 3 种茶园土壤的水稳性团聚体组成均发生改变(表 2)。3 种土壤的最优粒径均为 0.25 ~ 2 mm。所有生物质炭处理均能显著增加紫色土 >2 mm 粒级团聚体数量 ($P<0.05$), 增幅与生物质炭添加比例正相关, 紫色土 4% 生物质炭处理下增加了 12.71%; 水稻土和黄壤中 >2 mm 粒级团聚体数量在生物质炭添加比例为 0.5% 条件下变化不显著, 在其余处理下得到显著提升($P<0.05$), 增幅与生物质炭添加比例正相关。除 0.5% 添加比外, 其余生物质炭处理均减少了 3 种土壤 0.053 ~ 0.25 mm 粒级团聚体的含量, 降幅与生物质炭添加比例正相关, 3 种土壤 4% 生物质炭处理下分别减少了 9.34%、4.06% 和 8.55%。生物质炭处理对紫色土 <0.053 mm 粒级团聚体均无显著影响, 但减少了黄壤和水稻土 <0.053 mm 粒级团聚体数量。

2.2 茶渣生物质炭对茶园土壤水稳性团聚体稳定性的影响

平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD) 和 >0.25 mm 团聚体含量($R_{0.25}$)是反映土壤团聚体稳定性的指标, 值越大团聚体稳定性越好。茶渣生物质炭对这 3 个指标的影响如表 3 所示。生物质炭的输入提高了 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 值, 增幅与生物质炭添加比例正相关。0.5% 添加比下紫色土和水稻土的 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 变化不显著, 但黄壤 MWD 和 $R_{0.25}$ 显著提升($P<0.05$)。4% 添加比下紫色土 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 比 CK 处理增加了 8.82%、12.00% 和 9.85%, 水稻土增加了 7.06%、18.92% 和 8.10%, 黄壤增加了 6.12%、16.33% 和 7.52%。3 种茶园土壤水稳性团聚体稳定性表现为黄壤>水稻土>紫色土, 生物质炭的添加增加了 3 种茶园土壤水稳性团聚体的稳定性, 相同生物质炭添加比例下对 $R_{0.25}$ 的提升作用表现为紫色土>水稻土>黄壤, 而对生物质炭响应最大的指标为 GMD。

2.3 茶渣生物质炭对茶园土壤各级水稳性团聚体有机碳的影响

茶渣生物质炭输入对 3 种茶园土壤各级团聚体有机碳含量的影响如表 4 所示。3 种土壤各粒级团聚体有机碳含量均随生物质炭添加比例的增加而增加, 且均随团聚体粒径的增大而增大。生物质炭输入后, 紫色土 <0.053 mm 粒级团聚体有机碳含量增幅最大,

表 2 不同生物质炭处理下土壤水稳性团聚体组成(g/kg)
Table 2 Distributions of soil water-stable aggregates under different biochar treatments

土壤	生物质炭处理	>2 mm	0.25 ~ 2 mm	0.053 ~ 0.25 mm	<0.053 mm
紫色土	CK	144.2 ± 3.2 e	300.3 ± 5.6 c	281.9 ± 9.6 a	273.6 ± 5.4 a
	0.5%	148.9 ± 1.6 d	307.1 ± 2.1 bc	271.1 ± 7.4 ab	272.9 ± 6.9 a
	1%	152.9 ± 2.3 c	315.6 ± 4.1 ab	267.6 ± 8.3 ab	263.9 ± 8.3 a
	2%	156.9 ± 1.1 b	321.5 ± 12.7 a	261.5 ± 13.3 b	260.1 ± 25.8 a
	4%	162.5 ± 1.2 a	325.8 ± 4.5 a	255.6 ± 8.1 b	256.1 ± 13.6 a
水稻土	CK	172.7 ± 5.4 d	411.3 ± 9.3 d	206.7 ± 5.6 a	209.3 ± 9.0 a
	0.5%	176.7 ± 2.0 cd	416.9 ± 5.7 cd	203.2 ± 1.6 ab	203.2 ± 4.1 ab
	1%	179.8 ± 1.8 bc	427.1 ± 8.4 bc	201.2 ± 0.9 b	191.9 ± 10.3 b
	2%	182.4 ± 1.0 ab	438.9 ± 3.1 ab	199.7 ± 0.5 b	179.0 ± 2.2 c
	4%	186.0 ± 1.5 a	445.3 ± 5.3 a	198.3 ± 1.4 b	170.4 ± 2.9 c
黄壤	CK	247.7 ± 4.4 d	398.9 ± 6.5 d	199.7 ± 2.3 a	153.7 ± 04.2 a
	0.5%	251.9 ± 2.8 cd	404.0 ± 5.6 cd	196.1 ± 2.6 a	148.0 ± 5.5 b
	1%	256.1 ± 2.6 bc	411.1 ± 1.9 c	187.4 ± 1.4 b	145.4 ± 1.9 b
	2%	260.9 ± 1.2 ab	422.0 ± 3.4 b	185.8 ± 1.2 bc	131.3 ± 1.8 c
	4%	263.7 ± 1.0 a	431.6 ± 2.1 a	182.6 ± 1.7 c	122.1 ± 1.8 d

注：表中同列小写字母不同表示同种土壤不同生物质炭处理间差异显著($P < 0.05$)，下表同。

表 3 不同生物质炭处理下土壤团聚体稳定性
Table 3 Soil aggregate stabilities under different biochar treatments

土壤	生物质炭处理	MWD(mm)	GMD(mm)	$R_{0.25}(\%)$
紫色土	CK	0.68 ± 0.01 c	0.25 ± 0.00 b	44.45 ± 0.58 d
	0.5%	0.69 ± 0.00 c	0.25 ± 0.01 b	45.59 ± 0.17 cd
	1%	0.71 ± 0.01 b	0.27 ± 0.01 ab	46.86 ± 0.5 bc
	2%	0.72 ± 0.02 ab	0.28 ± 0.02 a	47.85 ± 1.29 ab
	4%	0.74 ± 0.01 a	0.28 ± 0.01 a	48.83 ± 0.57 a
水稻土	CK	0.85 ± 0.02 d	0.37 ± 0.02 c	58.4 ± 1.45 d
	0.5%	0.86 ± 0.01 cd	0.39 ± 0.01 bc	59.36 ± 0.57 cd
	1%	0.88 ± 0.01 bc	0.4 ± 0.02 b	60.69 ± 1.02 bc
	2%	0.89 ± 0.01 ab	0.43 ± 0.01 a	62.13 ± 0.25 ab
	4%	0.91 ± 0.01 a	0.44 ± 0.01 a	63.13 ± 0.41 a
黄壤	CK	0.98 ± 0.00 e	0.49 ± 0.00 d	64.67 ± 0.2 e
	0.5%	0.99 ± 0.01 d	0.5 ± 0.02 d	65.59 ± 0.78 d
	1%	1.01 ± 0.01 c	0.52 ± 0.00 c	66.72 ± 0.07 c
	2%	1.03 ± 0.00 b	0.55 ± 0.01 b	68.29 ± 0.27 b
	4%	1.04 ± 0.01 a	0.57 ± 0.01 a	69.53 ± 0.2 a

为 10.90% ~ 96.35%；在紫色土 4% 生物质炭处理下，各粒径由大到小有机碳含量依次增加了 68.07%、63.15%、83.79% 和 96.32%。水稻土中 0.053 ~ 0.25 mm 粒级团聚体有机碳含量增幅最大，为 10.47% ~ 74.21%，在水稻土 4% 生物质炭处理下，各粒径由大到小有机碳含量分别增加了 46.13%、68.51%、74.21% 和 69.79%。黄壤中 >0.25 mm 粒级团聚体有机碳含量增幅整体大于 <0.25 mm 粒级，其中 <0.053 mm 粒级增幅最小，增幅范围为 39.47% ~ 273.51%，仍显

著高于相同生物质炭添加比例下的紫色土和水稻土；黄壤 4% 生物质炭处理下，各粒径由大到小有机碳含量依次增加了 334.82%、333.17%、293.02% 和 273.51%。总体看，所有处理下 <0.25 mm 粒级团聚体的有机碳含量都低于全土有机碳含量。

3 种土壤各粒级团聚体有机碳相对贡献率如表 5 所示。紫色土中 0.25 ~ 2 mm 粒径团聚体有机碳相对贡献率最大，其后依次为 0.053 ~ 0.25 mm，<0.053 mm 和 >2 mm 粒径；生物质炭添加比例为 2% 和 4% 时

表 4 土壤各粒径团聚体中有机碳含量
Table 4 Organic carbon contents in different size soil aggregates

土壤	生物质炭处理	团聚体有机碳含量(g/kg)				
		>2 mm	0.25 ~ 2 mm	0.053 ~ 0.25 mm	<0.053 mm	全土
紫色土	CK	29.31 ± 0.3 e	28.55 ± 0.46 e	23.87 ± 0.32 e	20.65 ± 0.33 e	26.44 ± 0.11 e
	0.5%	32.28 ± 0.27 d	31.42 ± 0.25 d	26.77 ± 0.33 d	22.9 ± 0.33 d	30.43 ± 0.16 d
	1%	36.03 ± 0.24 c	34.74 ± 0.38 c	30.97 ± 0.32 c	27.96 ± 0.38 c	36.35 ± 0.13 c
	2%	41.85 ± 0.55 b	40.16 ± 0.54 b	36.77 ± 0.33 b	33.12 ± 0.19 b	42.17 ± 0.18 b
	4%	49.26 ± 0.27 a	46.58 ± 0.17 a	43.87 ± 0.65 a	40.54 ± 0.38 a	50.71 ± 0.12 a
水稻土	CK	40.36 ± 0.29 e	33.72 ± 0.45 e	30.86 ± 0.49 e	27.74 ± 0.85 e	35.21 ± 0.23 e
	0.5%	42.97 ± 0.44 d	37.46 ± 0.01 d	34.09 ± 0.38 d	29.46 ± 0.49 d	39.77 ± 0.18 d
	1%	47.03 ± 0.47 c	42.21 ± 0.48 c	39.89 ± 0.37 c	34.19 ± 0.33 c	45.13 ± 0.13 c
	2%	52.35 ± 0.12 b	48.88 ± 0.36 b	46.02 ± 0.49 b	40.11 ± 0.37 b	52.31 ± 0.23 b
	4%	58.98 ± 0.57 a	56.82 ± 0.65 a	53.76 ± 0.37 a	47.1 ± 0.33 a	59.94 ± 0.35 a
黄壤	CK	6.72 ± 0.24 e	6.21 ± 0.04 e	6.02 ± 0.37 e	5.7 ± 0.19 e	7.64 ± 0.62 e
	0.5%	10.69 ± 1.2 d	9.44 ± 0.34 d	9.03 ± 0.32 d	7.95 ± 0.18 d	10.35 ± 0.23 d
	1%	14.59 ± 0.42 c	13.73 ± 0.38 c	12.69 ± 0.49 c	11.5 ± 0.18 c	14.81 ± 0.19 c
	2%	20.74 ± 1.25 b	19.59 ± 0.41 b	18.17 ± 0.49 b	16.56 ± 0.37 b	20.69 ± 0.07 b
	4%	29.22 ± 0.39 a	26.9 ± 0.42 a	23.66 ± 0.37 a	21.29 ± 0.56 a	28.03 ± 0.23 a

表 5 土壤各粒径团聚体中有机碳相对贡献率
Table 5 Relative contribution rates of organic carbon in different size soil aggregates

土壤	生物质炭处理	团聚体有机碳相对贡献率(%)				
		>2 mm	0.25 ~ 2 mm	0.053 ~ 0.25 mm	<0.053 mm	总和
紫色土	CK	15.99 ± 0.37 a	32.42 ± 0.42 a	25.45 ± 0.89 a	21.35 ± 0.22 a	95.21 ± 0.22 a
	0.5%	15.79 ± 0.43 a	31.71 ± 0.19 ab	23.86 ± 0.81 ab	20.57 ± 0.96 a	91.93 ± 0.87 b
	1%	15.16 ± 0.27 b	30.17 ± 0.7 bc	22.79 ± 0.36 b	20.29 ± 0.5 a	88.41 ± 0.72 c
	2%	15.57 ± 0.08 ab	30.62 ± 1.13 c	22.8 ± 1.07 b	20.45 ± 0.83 a	89.44 ± 0.91 c
	4%	15.79 ± 0.16 a	29.93 ± 0.61 c	22.12 ± 0.74 b	20.46 ± 0.97 a	88.3 ± 0.87 c
水稻土	CK	19.79 ± 0.68 a	39.38 ± 0.69 c	18.12 ± 0.59 a	16.47 ± 0.45 a	93.76 ± 0.84 a
	0.5%	19.09 ± 0.55 ab	39.26 ± 0.15 c	17.42 ± 0.19 b	15.05 ± 0.28 b	90.82 ± 1.05 b
	1%	18.73 ± 0.19 b	39.95 ± 0.04 bc	17.78 ± 0.03 ab	14.54 ± 0.93 bc	91 ± 0.73 b
	2%	18.26 ± 0.33 b	41.02 ± 0.51 ab	17.57 ± 0.04 ab	13.72 ± 0.22 cd	90.57 ± 1.22 b
	4%	18.3 ± 0.19 b	42.22 ± 0.54 a	17.79 ± 0.13 ab	13.39 ± 0.23 d	91.7 ± 0.74 b
黄壤	CK	21.77 ± 0.43 b	32.43 ± 0.64 c	18.91 ± 0.73 a	11.46 ± 0.38 a	84.57 ± 0.9 b
	0.5%	26.01 ± 1.11 a	36.83 ± 0.79 b	17.1 ± 0.15 ab	11.38 ± 0.52 a	91.32 ± 1.39 a
	1%	25.22 ± 0.29 a	38.09 ± 0.23 b	16.05 ± 0.3 ab	11.3 ± 0.47 a	90.66 ± 0.44 a
	2%	26.16 ± 0.91 a	39.96 ± 0.46 a	16.32 ± 0.22 ab	10.51 ± 0.19 b	92.95 ± 0.88 a
	4%	27.49 ± 0.19 a	41.41 ± 0.16 a	15.41 ± 0.24 b	9.28 ± 0.44 c	93.59 ± 0.6 a

可显著增加紫色土 >2 mm 粒级团聚体有机碳含量相对贡献率($P<0.05$), 其他条件下均无显著变化。水稻土中各粒级有机碳相对贡献率表现为 $0.25 \sim 2 \text{ mm} > (>2 \text{ mm}) > 0.053 \sim 0.25 \text{ mm} > (<0.053 \text{ mm})$, 其中 >2 mm 和 <0.053 mm 粒级随生物质炭添加比例增加而减小, 0.25 ~ 2 mm 粒级则随生物质炭增加而增加, 0.053 ~ 0.25 mm 粒级团聚体有机碳贡献率则未受到生物质炭显著影响; 以水稻土 4% 生物质炭处理为例, 各

粒级由大到小其有机碳贡献率依次比 CK 处理减少了 1.25%、7.68%、13.08% 和 4.17%。黄壤中各粒级团聚体有机碳相对贡献率的排序与水稻土一致, 生物质炭的输入显著提升了 >2 mm 和 0.25 ~ 2 mm 两个粒级的有机碳贡献率, 同时显著降低了 0.053 ~ 0.25 mm 和 <0.053 mm 两个粒级的相对贡献率($P<0.05$); 以黄壤 4% 生物质炭处理为例, 与 CK 处理相比, >2 mm 和 0.25 ~ 2 mm 两个粒级有机碳贡献率增加了

26.27%、27.69%，而 0.053 ~ 0.25 mm 和 <0.053 mm 两个粒级有机碳贡献率减少了 18.51% 和 19.02%。紫色土、水稻土和黄壤不同处理各粒级团聚体分离的有机碳回收率分别为 88.30% ~ 95.21%、90.57% ~ 93.76% 和 84.57% ~ 93.59%，说明在团聚体分离过程中土壤有机碳未造成明显损失，获得的结果相对可靠。

2.4 茶园土壤水稳性团聚体稳定性与土壤基本性质的相关性

将土壤团聚体各稳定性参数、各粒径团聚体含量与土壤基本性质进行皮尔逊相关性分析(表 6)，结果显示除全氮外，土壤其他基本性质都与土壤团聚体组成和稳定性存在不同程度的相关关系。 $R_{0.25}$ 与土壤全磷呈极显著正相关($P<0.01$)，与黏粒含量呈显著正相

关($P<0.05$)；MWD 和 GMD 与全磷和黏粒含量均呈极显著相关($P<0.01$)，与砂粒含量显著负相关($P<0.05$)；>2 mm 粒级团聚体含量与土壤有机质和砂粒含量极显著负相关($P<0.01$)，与全磷、黏粒和粉粒含量均呈极显著正相关($P<0.01$)；0.25 ~ 2 mm 粒级团聚体含量与 pH 和全磷含量显著正相关($P<0.05$)，与全钾含量极显著正相关($P<0.01$)；0.053 ~ 0.25 mm 粒级团聚体含量与全磷含量呈极显著负相关($P<0.01$)，与 pH 和全钾含量显著负相关($P<0.05$)；<0.053 mm 粒级团聚体含量与全磷和黏粒含量极显著负相关($P<0.01$)，与砂粒含量显著正相关($P<0.05$)。整体看来，全磷含量和土壤颗粒组成是与土壤团聚体组成及稳定性密切相关的因素。

表 6 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD、各粒径团聚体含量与土壤基本性质相关性
Table 6 Correlation coefficients of $R_{0.25}$, MWD, GMD, size distribution of soil aggregates and soil basic properties

	pH	有机质	全氮	全磷	全钾	砂粒	黏粒	粉粒
$R_{0.25}$	0.533	-0.468	-0.129	0.914**	0.644	-0.641	0.756*	0.445
MWD	0.414	-0.592	-0.271	0.962**	0.523	-0.745*	0.842**	0.569
GMD	0.372	-0.634	-0.322	0.975**	0.483	-0.780*	0.870**	0.612
>2 mm	0.130	-0.817**	-0.565	0.992**	0.232	-0.919**	0.967**	0.801**
0.25 ~ 2 mm	0.790*	-0.078	0.277	0.681*	0.889**	-0.281	0.434	0.053
0.053 ~ 0.25 mm	-0.701*	0.255	-0.096	-0.798**	-0.789*	0.450	-0.589	-0.232
<0.053 mm	-0.383	0.612	0.295	-0.966**	-0.507	0.760*	-0.852**	-0.590

注：*、** 分别表示相关性达 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 显著水平(双侧)。

3 讨论

3.1 茶渣生物质炭对茶园土壤水稳性团聚体组成及稳定性的影响

稳定的团聚体相当于土壤的“细胞”，其分布和稳定性与土壤健康质量密切相关。通常认为 >0.25 mm 的团聚体为土壤中最好的结构体，其含量与土壤结构和土壤肥力状况正相关^[6]。本研究中，生物质炭的添加整体上可提升 3 种土壤 >2 mm 和 0.25 ~ 2 mm 粒径团聚体的含量，特别是高添加量下，提升效果更显著($P<0.05$)；同时生物质炭的添加降低了 0.053 ~ 0.25 mm 粒级的含量；对紫色土 <0.053 mm 粒级团聚体数量无显著影响，但可以降低水稻土和黄壤 <0.053 mm 粒级团聚体的数量，且在一定添加比例下差异显著($P<0.05$)。这与孙泰朋^[11]的研究结果类似，他认为这可能是因为生物质炭含有巨大的表面积和丰富的孔径结构，且内含大量有机分子，为土壤微生物提供活动场所，增强其活性，同时微生物代谢产生的胶结物质可与土壤小颗粒结合，从而促进大团聚体的形成。

其他学者在观察秸秆炭还田对黄褐土团聚体的影响时也发现秸秆炭可以显著增加大团聚体(>0.25 mm)的含量^[7]。本试验中，生物质炭添加比例越高，对土壤大团聚体的促进作用越明显。生物质炭能够增加土壤大团聚体含量的原因可以分为直接作用和间接作用。直接作用主要与土壤有机碳的增加和生物质炭表面存在的大量官能团有关。土壤惰性碳的含量越高，土壤团聚体稳定性越好，生物质炭表面携带有大量的正负电荷，可通过静电吸引或多价离子的键桥作用来与土壤矿物质颗粒结合，形成相对稳定的水稳性团聚体^[12-13]。间接作用则与生物质炭对土壤微生物和种植作物的影响有关。生物质炭本身携带的易分解态有机分子可以增加土壤微生物的活性，影响其代谢，刺激其分泌更多的土壤胶结物直接促进土壤大团聚体的形成^[14]，同时其活动会加深对植株根系生长的影响，刺激根系分泌物的分泌，增加土壤中的有机胶结物质，最终促进土壤大团聚体的形成^[15]。也有学者认为土壤中 pH 的适度增加有效促进土壤团聚体的形成^[16]，另外，生物质炭通过其表面的亲疏水作用与黏土矿物发

生反应也可能是土壤团聚体形成的原因之一^[17]。

土壤团聚体的 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 都是反映土壤团聚体稳定性的重要指标。MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 越大,表示土壤团聚体越稳定。本研究中,生物质炭的添加可以增加 3 种土壤水稳性团聚体的 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$,但与生物质炭添加量有关。当施用量较小时影响并不显著,如紫色土中添加 0.5% 的生物质炭时,与 CK 处理相比,MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 均无显著变化;当添加量为 1% 时,MWD 和 $R_{0.25}$ 才显著高于对照,而 GMD 仍无显著变化,这与其他学者的研究结果相似。Liu 等^[18]将不同量的木屑生物质炭输入黑垆土中,发现土壤 $R_{0.25}$ 值随生物质炭添加量增大而增大。安艳等^[19]发现不同热解温度的生物质炭均可提高壤土土壤团聚体的 MWD 值,且以 500 °C 条件下的提升效果最有利。李江舟等^[20]向红壤连续施用生物质炭 3 a 后,显著增加了红壤团聚体的稳定性,且以高碳量的提升效果最好。土壤中的生物质炭可以充当团聚体间的粘合剂,增加土壤团聚体的稳定性^[21],生物质炭自身所带的高浓缩芳香结构也可与土壤原有有机质结合,从而促进土壤团聚体的形成,提高团聚体的稳定性,提高团聚体抵抗外界物理干扰的能力^[22]。本研究的 3 种供试土壤由于成土母质、发育条件等的不同,土壤性质存在差异,对茶渣生物质炭的响应也不尽相同。供试黄壤以第四纪老冲积物为母质,风化程度较深,脱硅富铝化作用强,且土壤养分含量较低,黏重板结;而以此发育而来的水稻土的铁、锰还原淋溶和淋溶淀积明显;第三系名山群坡积物发育而来的紫色土的微量元素较另外两种土壤丰富。王道源^[23]推测这主要与土壤机械组成有关,黏性土壤相对砂质土壤具有更大比表面积,可以提供更多的吸附点位来促进生物质炭与黏土发生反应,从而促进土壤团聚体的形成,增加稳定性;Soinnie 等^[24]也指出,将生物质炭添加到高黏土壤和相对砂质土壤中后,对黏质土壤团聚体的促进作用更明显,本研究中对土壤团聚体组成、稳定性与土壤基本性质进行的相关性分析也说明了这一点。同时,土壤本身的全磷、全钾等养分元素的不同,也是造成 3 种土壤对相同生物质炭添加响应不同的原因。

3.2 茶渣生物质炭对茶园土壤各粒级团聚体有机碳的影响

生物质炭本身含碳量极高,通常为 40% ~ 75%,且结构稳定,高温制备下的生物化学稳定性更高^[25]。本研究中所使用的茶渣生物质炭由 500 °C 高温制备,含碳量为 67.95%,施入土壤后显著提升了 3 种

茶园土壤全土的总有机碳和水稳性团聚体各粒径粒级总有机碳含量,且随生物质炭添加比例的增加而增加。Six 等^[26]认为新加入的有机碳能促进大团聚体的形成,其内部的有机碳也将受到团聚体的保护而不断累积。孟祥天等^[8]发现,与单施氮肥处理相比,氮肥和生物质炭配施显著增加了各粒径团聚体有机碳的含量,且 >2 mm 粒径团聚体的有机碳含量增加最明显。本研究中,3 种土壤各粒径团聚体有机碳含量均随粒径增大而增大,但生物质炭加入对各粒径有机碳的提升作用大小在 3 种土壤中是有差异的。紫色土和水稻土中有机碳的增加更多体现在 0.053 ~ 0.25 mm 和 <0.053 mm 两种粒径上,而黄壤的研究结果与孟祥天等^[8]研究结果类似,这可能是因为紫色土和水稻土原本有机碳含量远高于黄壤,且有机碳多集中在大团聚体中,所以生物质炭的加入对此两种土壤大团聚体有机碳的含量影响相对较小;也可能是生物质炭作为外源新碳进入土壤团聚体中时是随机分配的^[27]。本研究中所使用生物质炭是过 0.15 mm 筛后输入供试土壤中的,因此导致偏砂质的紫色土和水稻土小粒径团聚体中还存在部分离散的生物质炭,使这部分粒径团聚体有机碳增加更多,而紫色土团聚体的稳定性要低于水稻土,因此更多的有机碳进入到了 <0.053 mm 的黏粉粒组分中,这也可能是导致 3 种土壤各级团聚体有机碳含量差异的原因。3 种土壤大粒径(>0.25 mm)团聚体中的有机碳含量均高于小粒径(<0.25 mm)团聚体,这与黄褐土^[7]和红壤^[28]条件下的研究结果一致。培养期内,不同生物质炭添加处理不同土壤下的团聚体粒径分布和团聚体有机碳含量的变化规律存在一定相似性,推测团聚体粒径分布和团聚体稳定性间存在显著相关关系。土壤各粒径团聚体的有机碳贡献率受土壤团聚体分布和各粒径有机碳含量的综合影响,本研究中,3 种茶园土壤均属 0.25 ~ 2 mm 粒径土壤有机碳相对贡献率最高,第二贡献率粒径虽有所差异,但整体都体现为大粒径(>0.25 mm)的有机碳相对贡献率高于小粒径(<0.25 mm),这与黄褐土^[7]中结果一致。

本研究是采用 200 g 土壤样品在室内恒温恒湿条件下培养进行的,共计 112 d,培养周期短。田间条件下影响土壤团聚体的因子复杂许多,比如耕作措施、地下水位、施肥情况和茶树生长等,对于茶渣生物质炭添加对茶园土壤团聚体的影响还待深入研究。本室内模拟研究结果与田间试验可能存在差异,今后还需进行长期的田间原位试验,这样才能更好地探究茶渣生物质炭输入对茶园土壤水稳性团聚体及其有

机碳的作用,为茶渣生物质炭在茶园土壤改良中的应用提供更多更有力的依据。

4 结论

向雅安名山区3种典型茶园土壤(紫色土、水稻土和黄壤)中添加4种不同比例的茶渣生物质炭后进行培养112 d后,3种茶园土壤水稳性大中团聚体(>2 mm和0.25~2 mm粒径)的含量、土壤MWD、GMD和 $R_{0.25}$ 值均显著提升,土壤团聚体稳定性增加;各粒级团聚体有机碳含量也显著增加,且随生物质炭添加比例增大而增大,紫色土和黄壤>2 mm粒级水稳性团聚体有机碳贡献率均有所增加。其中,茶渣生物质炭对黄壤水稳性团聚体的影响高于其余两种土壤,在4%添加量下土壤团粒结构改良效果最明显。

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.
- [2] Chaplot V, Cooper M. Soil aggregate stability to predict organic carbon outputs from soils[J]. Geoderma, 2015, 243/244: 205–213.
- [3] 王彤, 雍继芳, 林启美, 等. 生物质炭与有机肥料配施可以促进设施菜地土壤水稳性团聚体形成[J]. 华北农学报, 2019, 34(S1): 176–182.
- [4] 魏宇轩, 蔡红光, 张秀芝, 等. 不同种类有机肥施用对黑土团聚体有机碳及腐殖质组成的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 258–263.
- [5] Yu X, Wu C, Fu Y, et al. Three-dimensional pore structure and carbon distribution of macroaggregates in biochar-amended soil[J]. European Journal of Soil Science, 2016, 67(1): 109–120.
- [6] 王富华, 黄容, 高明, 等. 生物质炭与秸秆配施对紫色土团聚体中有机碳含量的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 929–939.
- [7] 乔丹丹, 吴名宇, 张倩, 等. 秸秆还田与生物炭施用对黄褐土团聚体稳定性及有机碳积累的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(3): 92–99.
- [8] 孟祥天, 蒋瑀霁, 王晓玥, 等. 生物质炭和秸秆长期还田对红壤团聚体和有机碳的影响[J]. 土壤, 2018, 50(2): 326–332.
- [9] 康熙龙. 生物质炭施用对土壤有机碳矿化和分配及团聚体组成的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- [10] Sun F F, Lu S G. Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore-space properties of clayey soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2014, 177(1): 26–33.
- [11] 孙泰朋. 生物质炭对黑土土壤团聚体稳定性及活性有机碳影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- [12] Zornoza R, Acosta J A, Faz A, et al. Microbial growth and community structure in acid mine soils after addition of different amendments for soil reclamation[J]. Geoderma, 2016, 272: 64–72.
- [13] Enders A, Hanley K, Whitman T, et al. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance[J]. Bioresource Technology, 2012, 114: 644–653.
- [14] Denef K, Six J. Clay mineralogy determines the importance of biological versus abiotic processes for macroaggregate formation and stabilization[J]. European Journal of Soil Science, 2005, 56(4): 469–479.
- [15] 关松, 窦森, 胡永哲, 等. 添加玉米秸秆对黑土团聚体碳氮分布的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 187–191.
- [16] Wang D Y, Fonte S J, Parikh S J, et al. Biochar additions can enhance soil structure and the physical stabilization of C in aggregates[J]. Geoderma, 2017, 303: 110–117.
- [17] 方婧, 金亮, 程磊磊, 等. 环境中生物质炭稳定性研究进展[J]. 土壤学报, 2019, 56(5): 1034–1047.
- [18] Liu X H, Han F P, Zhang X C. Effect of biochar on soil aggregates in the Loess Plateau: Results from incubation experiments[J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2012, 14(6): 975–979.
- [19] 安艳, 姬强, 赵世翔, 等. 生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(1): 293–300.
- [20] 李江舟, 代快, 张立猛, 等. 施用生物炭对云南烟区红壤团聚体组成及有机碳分布的影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(6): 2114–2120.
- [21] Brodowski S, Amelung W, Haumaier L, et al. Morphological and chemical properties of black carbon in physical soil fractions as revealed by scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy[J]. Geoderma, 2005, 128(1/2): 116–129.
- [22] Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, et al. The ‘Terra preta’ phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics[J]. Naturwissenschaften, 2001, 88(1): 37–41.
- [23] 王道源. 气候变化背景下生物炭对农田土壤环境过程影响的研究[D]. 上海: 东华大学, 2015.
- [24] Soinne H, Hovi J, Tammeorg P, et al. Effect of biochar on phosphorus sorption and clay soil aggregate stability[J]. Geoderma, 2014, 219/220: 162–167.
- [25] Kuzyakov Y, Bogomolova I, Glaser B. Biochar stability in soil: Decomposition during eight years and transformation as assessed by compound-specific ^{14}C analysis[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 70: 229–236.
- [26] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. Plant and Soil, 2002, 241(2): 155–176.
- [27] Urbanek E, Smucker A J M, Horn R. Total and fresh organic carbon distribution in aggregate size classes and single aggregate regions using natural $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ tracer[J]. Geoderma, 2011, 164(3/4): 164–171.
- [28] 杨莹莹, 魏兆猛, 黄丽, 等. 不同修复措施下红壤水稳性团聚体中有机质分布特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 154–158.