

# 茶渣生物质炭对茶园土壤有机碳及其活性组分的影响

肖欣娟, 夏建国, 马黛玉, 于正义, 周玥希

(四川农业大学资源学院, 成都 611130)

**摘要:** 为探究生物质炭对茶园土壤有机碳含量及其稳定性的影响, 将茶渣在 500 ℃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 天的室内培养试验, 包括 CK, 0.5%, 1%, 2% 和 4% 5 种炭土比, 共计 15 个处理, 在培养的第 1, 2, 7, 30, 60, 112 天取样测定。结果表明: 茶渣生物质炭输入能显著增加紫色土、水稻土和黄壤总有机碳(TOC)含量和稳定性, 且随添加比例的增加而增加, 培养结束时 3 种土壤 TOC 的增幅范围依次为 15.97%~96.64%, 13.01%~72.36% 和 15.29%~321.43%, 其中对黄壤 TOC 含量的提升作用最大; 生物质炭加入后 3 种茶园土壤的微生物量碳(MBC)、水溶性有机碳(WSOC)和易氧化有机碳(ROC)含量也得到显著提升, 到培养结束时 3 种土壤 MBC 含量变化最大的是紫色土, 增幅范围为 12.97%~40.35%, WSOC 和 ROC 含量变化最大的均为黄壤, 增幅范围分别为 12.50%~50.00% 和 5.66%~54.72%; 茶渣生物质炭显著提升了 3 种土壤有机碳的氧化稳定性, 且随添加比例的增加而增强, 紫色土、水稻土和黄壤的氧化稳定系数提升范围分别为 28.07%~146.66%, 44.79%~225.66% 和 447.18%~1 941.19%。

**关键词:** 茶渣生物质炭; 茶园土壤; 有机碳; 活性有机碳; 有机碳稳定性

**中图分类号:**S152.4; S156.2      **文献标识码:**A      **文章编号:**1009-2242(2020)06-0294-07

**DOI:**10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.06.041

## Effect of Tea Residue Biochar on Soil Organic Carbon and Its Active Components in Tea Garden Soil

XIAO Xinjuan, XIA Jianguo, MA Daiyu, YU Zhengyi, ZHOU Yuexi

(College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130)

**Abstract:** In order to investigate the impact of biochar on the tea garden soil organic carbon, tea residue was made into biochar at 500 ℃. In this study, a 112-day incubation experiment was conducted to study the impact of biochar input on soil organic carbon contents and stability in three typical tea garden soils (purple soil, paddy soil, and yellow soil) of Ya'an. The study included five kinds of carbon soil ratio (CK, 0.5%, 1%, 2% and 4%), fifteen treatments in total, and samples were taken at 1, 2, 7, 30, 60, and 112 days of culture. Research showed that: tea residue biochar input can significantly increase the content and stability of total organic carbon (TOC) in purple soil, paddy soil, and yellow soil, and increases with the addition ratio, at the end of the cultivation period, the increasing ranges of total soil organic carbon in the three soils were 15.97%~96.64%, 13.01%~72.36%, and 15.29%~321.43%, respectively. Among them, the effect of increasing the TOC content of yellow soil was the best. After the addition of biochar, the contents of microbial biomass carbon (MBC), water-soluble organic carbon (WSOC), and readily oxidized organic carbon (ROC) in the three tea garden soils had also been significantly increased. By the end of the cultivation period, the largest change in MBC content in the three soils was purple soil, with an increase range of 12.97%~40.35%, and the largest changes in WSOC and ROC contents were in yellow soil, with increases ranging from 12.50% to 50.00% and 5.66% to 54.72%, respectively. Tea residue biochar significantly improved the oxidation stability of three types of soil organic carbon, and increased with the addition ratio. The improvement range of oxidation stability coefficient was 28.07%~146.66%, 44.79%~225.66% and 447.18%~1 941.19%, respectively.

收稿日期:2020-04-12

资助项目:四川农业大学学校建设双支计划项目(2019)

第一作者:肖欣娟(1994—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事土壤资源利用研究。E-mail:1057006243@qq.com

通信作者:夏建国(1967—), 男, 教授, 主要从事土壤资源与环境研究。E-mail:xiajianguo@126.com

**Keywords:** tea residue biochar; tea garden soil; organic carbon; active organic carbon; organic carbon stability

土壤有机碳(SOC)是土壤重要的组成部分,其变化受外源有机碳的影响较大,常以反应灵敏的土壤活性有机碳来表征土壤有机碳的动态变化<sup>[1]</sup>,主要包括微生物量碳(MBC)、水溶性有机碳(WSOC)和易氧化有机碳(ROC)<sup>[2]</sup>。土壤活性有机碳库能够直接影响土壤微生物活性,进而对土壤碳库稳定性产生影响,因此,研究土壤有机碳及其活性组分的分配对土壤肥力固持及土壤温室气体减排有重大意义。生物质炭(biochar)是有机废弃物在限氧条件下经高温裂解形成的高度芳香化合物,富含碳,稳定性高,可长时间封存于土壤中<sup>[3]</sup>。近年来,不少学者聚焦生物质炭输入对土壤有机碳库积累及分解的影响,特别是土壤活性有机碳库<sup>[4-5]</sup>,但由于生物质炭材料和试验土壤的不同,生物质炭对土壤有机碳的影响存在较大差异。我国是农业生产大国,茶叶是重要的经济作物之一,同时茶产业也是乡村振兴战略和现代农业产业体系的重要组成部分。四川省雅安市的茶园面积在2018年底达到5.44万hm<sup>2</sup><sup>[6]</sup>,茶产业已成为名山区富民强区的主导产业,茶园土壤不仅是一种资源保障,蕴含经济发展的潜力,更是生产生态的基础保障,承载地方生态文明,助力产业健康可持续发展。因此防止茶园土壤退化,增强土壤固碳能力,保证土壤结构良好,是雅安市乃至我国茶产业稳健发展的关键。雅安市名山区主要茶园土壤类型为黄壤、紫色土和水稻土3种,在茶生产过程中会产生大量废弃茶渣,而

这些茶渣尚缺乏高效利用,造成了再生资源的浪费。目前关于生物质炭对茶园土壤活性有机碳动态变化特征影响的研究甚少,因此,本文将茶渣在500℃下制成生物质炭,以不同比例输入雅安市名山区3种典型茶园土壤中,通过室内培养试验分析不同量的茶渣生物质炭对3种茶园土壤有机碳及其活性组分动态的影响,判定茶渣生物质炭在茶园土壤有机碳提升方面的可行性和最佳施用土壤,以期为生物质炭在茶园土壤有机碳提升中的应用提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试土壤为雅安名山茶区(30°00'—30°15'N,103°03'—103°22'E)典型茶园土,包括第三系名山群坡积物发育而来的紫色土(PU)、第四纪老冲积黄壤(YE)和第四纪老冲积黄壤发育而来的水稻土(PA)3种,均于2018年12月采自地理标志产品蒙山茶保护范围内,该区域属中纬度亚热带湿润气候,气候温和,雨量充沛。3种土壤分开采集,取0—20cm耕作层,自然风干后剔除石块和可见植物残体,过2mm筛,按网格法取样1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,待茶渣自然风干后,剔除明显杂质,过2mm筛,在马弗炉中以500℃限氧裂解2.5h,冷却后过0.15mm筛备用,记作BC(表2)。

表1 供试土壤基本理化性质

| 土样      | pH   | 有机质/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 氮/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 全磷/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 全钾/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 碱解氮/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 速效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 粉粒/% | 黏粒/% | 砂粒/% |
|---------|------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|------|------|------|
| 紫色土(PU) | 4.30 | 40.17                     | 2.61                    | 0.55                     | 8.20                     | 128.32                     | 15.30                      | 54.51                      | 57   | 20   | 23   |
| 黄壤(YE)  | 4.32 | 11.38                     | 0.75                    | 1.31                     | 9.60                     | 96.71                      | 7.14                       | 48.25                      | 32   | 38   | 30   |
| 水稻土(PA) | 4.35 | 56.55                     | 3.68                    | 0.81                     | 11.00                    | 139.62                     | 38.70                      | 77.18                      | 62   | 21   | 17   |

表2 茶渣生物质炭基本理化性质

| 样品 | 产率/%  | 灰分/%  | pH   | CEC/(cmol·kg <sup>-1</sup> ) | C/%   | H/%  | N/%  | S/%  | O/%   | H/C   | O/C   | S <sub>BET</sub> | V <sub>total</sub> |
|----|-------|-------|------|------------------------------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|------------------|--------------------|
| BC | 38.19 | 12.73 | 9.48 | 35.78                        | 67.95 | 2.31 | 4.74 | 0.09 | 12.45 | 0.034 | 0.183 | 2.585            | 3.33               |

### 1.2 试验设计

培养试验从2019年3月正式开始,共计112天。取500mL的塑料瓶,装相当于烘干土600g的紫色土(PU)、水稻土(PA)和黄壤(YE),设单一土壤处理(CK)、生物质炭土壤(炭土比分别为0.5%,1%,2%,4%)共15个处理,每个处理设3个重复(每个重复由3个500mL的塑料瓶组成,以减少取样多次后土量过少引起的误差)。将生物质炭土壤充分混匀,放入25℃恒温培养箱中培养,使土壤含水率达到田间持

水率的60%,每隔6天通过称重法补充土壤水分。在培养第1,2,7,30,60,112天时取表层土壤120g左右(第1~2,3~4次和5~6次分别取自同1个塑料瓶),测定土壤总有机碳(TOC)、水溶性有机碳(WSOC)、微生物量碳(MBC)和易氧化有机碳(ROC)的含量,其中100g新鲜土样立即过2mm筛保存于4℃冰箱中,用于测定土壤含水量、MBC含量和WSOC含量。剩余20g左右土样自然风干后磨细过0.25mm筛以测定土壤TOC和ROC。

### 1.3 样品测定

土壤 TOC 采用重铬酸钾外加热法进行测定;土壤 WSOC 的测定:将 10 g 新鲜土样放入 50 mL 去离子水中振荡 1 h, 滤液以 4 500 r/min 离心 10 min, 再通过 0.45 μm 的滤膜抽滤, 采用重铬酸钾外加热法测定澄清滤液中的土壤有机碳含量, 即为 WSOC 含量; 土壤 MBC 的测定采用氯仿熏蒸提取法测定, 熏蒸土壤和未熏蒸土壤提取的有机碳测定值之差为 ( $F_c$ ), 除以转换系数  $K_c$  (0.45), 即得土壤 MBC 含量; 土壤 ROC 的测定采用 333 mmol/L 高锰酸钾氧化法进行测定, 按消耗 1 mmol KMnO<sub>4</sub> 溶液相当于氧化 9 mg 碳计算 ROC 含量, 并计算土壤氧化稳定系数 (Kos), Kos=(总有机碳-易氧化有机碳)/易氧化有机碳。

### 1.4 数据分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS24 软件进行分析; 应用单因素方差分析 (ANOVA) 比较同一时间不同处理之间的差异性 (Duncan 法); 采用 Pearson 相关系数矩阵进行相关性分析; 图表采用 Origin 2018 软件进行绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 茶渣生物质炭对茶园土壤总有机碳 (TOC) 的影响

茶渣生物质炭输入后茶园土壤 TOC 的变化见图 1。茶渣生物质炭增加了 3 种茶园土壤 TOC 的含量, 且随添加比例的增加而增加, 各处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。从不同土壤来看, 3 种茶园土壤 TOC 的含量表现为水稻土 > 紫色土 > 黄壤, 而茶渣生物质炭对 3 种茶园土壤 TOC 的提升程度则相反, 表现为黄壤 > 紫色土 > 水稻土。从培养时间看, 各处理下的土壤 TOC 含量均呈逐渐下降趋势, 下降幅度土壤类型而异, 但均随生物质炭添加比例增加而减少, 以 4% 添加量为例, 培养结束时, 紫色土、水稻土和黄壤的 TOC 含量较各自 CK 处理分别增加 96.64%, 72.36% 和 321.43%, 碳损失率则均显著低于各自 CK 处理, 分别为 10.32%, 8.35% 和 7.96%。

### 2.2 茶渣生物质炭对茶园土壤微生物量碳 (MBC) 的影响

茶渣生物质炭加入后 3 种茶园土壤 MBC 含量变化见图 2。从培养时间来看, 3 种茶园土壤 MBC 含量整体随培养时间的延长而先增加后减少。从不同土壤看, 整个培养期内 MBC 含量均表现为水稻土 > 紫色土 > 黄壤, 与土壤 TOC 含量关系一致。添加茶渣生物质炭后, 紫色土土壤 MBC 含量 (PU-0.5%, 第 1 天除外) 均得到显著提升, 且在第 2~3 天达到峰值, 随后逐渐下降, 培养结束时 PU-0.5%、PU-1%、PU-2% 和 PU-4% 处理下的 MBC 平均含量

分别比 PU-CK 处理增加 12.97%, 18.73%, 33.14% 和 40.35%, 各处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ); 水稻土中除 PA-0.5% 处理外, 其余处理在整个培养期内均显著提高土壤 MBC 含量, 在培养第 2~3 天达到峰值, 随着培养时间进行各相邻处理间差异逐渐减小, 培养结束时, PA-0.5%、PA-1%、PA-2% 和 PA-4% 处理下的 MBC 平均含量分别较 PA-CK 处理增加 4.28%, 11.78%, 16.06% 和 22.48%; 随培养进行, 黄壤中所有生物质炭处理均显著增加土壤 MBC 含量 ( $P < 0.05$ ), 但各相邻生物质炭处理间差异逐渐减小, 培养结束时, YE-0.5%、YE-1%、YE-2% 和 YE-4% 处理下的 MBC 含量分别比 YE-CK 处理增加 13.70%, 11.99%, 23.97% 和 30.82%。整体看来, 少量 (0.5%) 茶渣生物质炭的添加对 3 种茶园土壤 MBC 的影响均较小, 而添加较高比例 (2% 和 4%) 时则均能显著提升土壤 MBC 含量, 且随添加比例增加而增加。

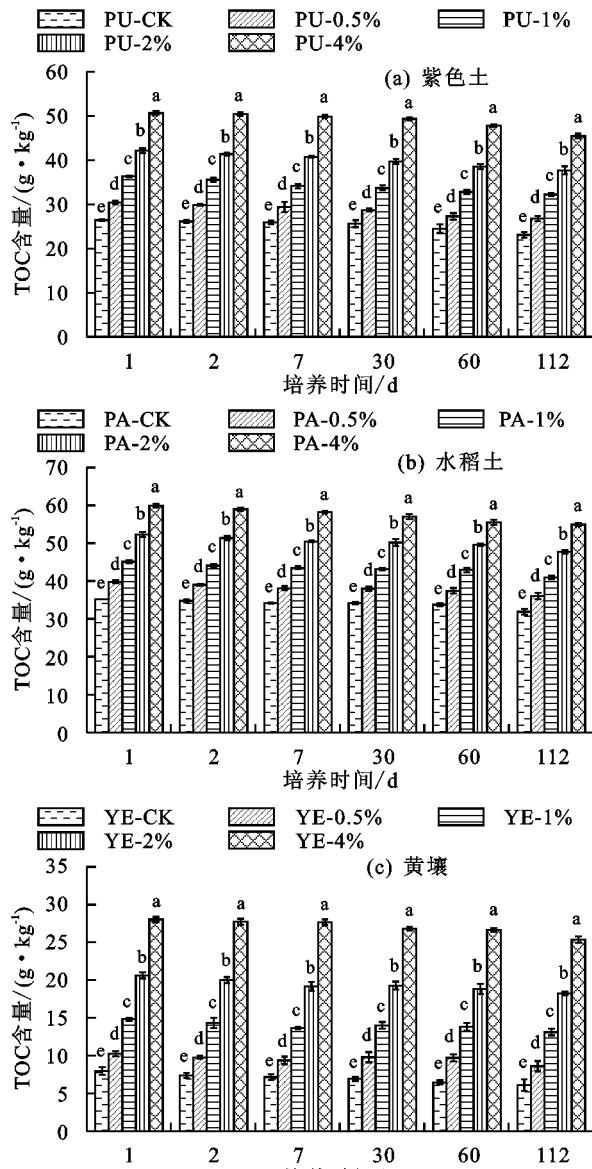


图 1 生物质炭对茶园土壤总有机碳 (TOC) 的影响

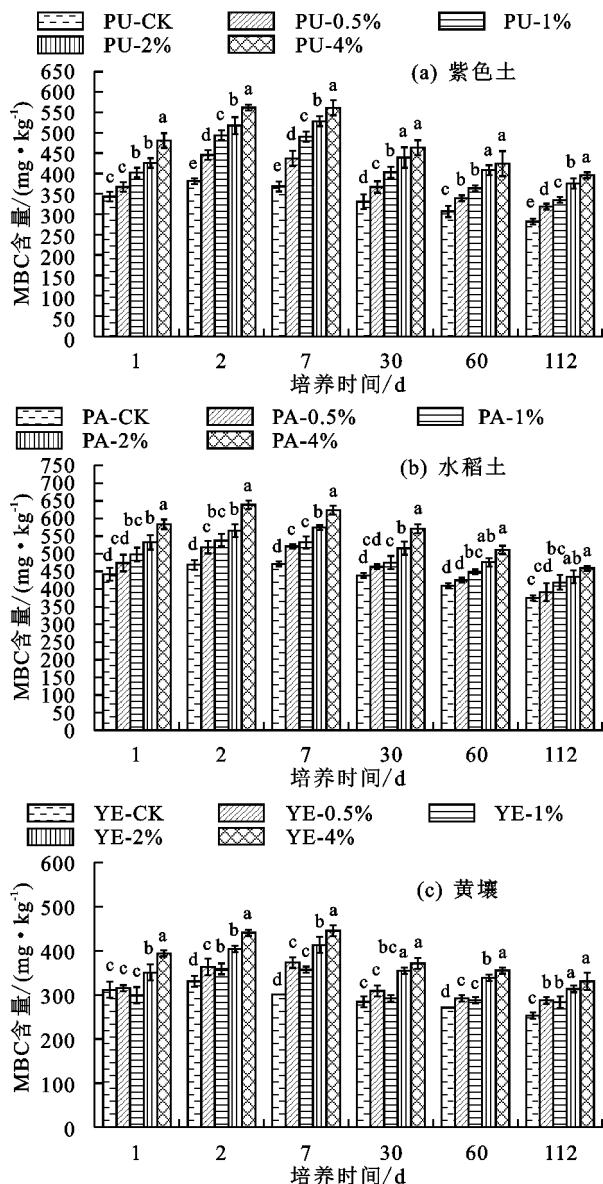


图 2 生物质对茶园土壤微生物量碳(MBC)的影响

### 2.3 茶渣生物质炭对茶园土壤水溶性有机碳(WSOC)的影响

茶渣生物质炭输入后 3 种茶园土壤 WSOC 的变化情况见图 3。茶渣生物质炭的输入在整个培养期均增加土壤 WSOC 含量,增幅与生物质炭添加比例正相关,在较高添加比例下提升效果达到显著( $P < 0.05$ )。从培养时间来看,所有处理下的土壤 WSOC 含量均随着时间的延长逐渐减小。整个培养期内土壤 WSOC 含量也表现为水稻土>紫色土>黄壤。3 种土壤分别来看,加入茶渣生物质炭后,紫色土整个培养期内 PU-0.5% 和 PU-1% 处理下的土壤 WSOC 含量与 PU-CK 处理均无显著差异,更高添加比例下的土壤 WSOC 含量则显著高于 PU-CK 处理( $P < 0.05$ ),随着培养进行各处理间差异逐渐减小;水稻土 WSOC 含量在培养初期(第 1~2 天)均得到显著提高,而培养末期(第 112 天)只有 PA-4% 处理下的 WSOC 含量显著高于 PA-CK 处理( $P < 0.05$ );黄壤 WSOC 含量在培养初期(第 1~2 天)显著提高,而培养末期(第 112 天)只有 YE-4% 处理下的 WSOC 含量显著高于 YE-CK 处理( $P < 0.05$ )。

理( $P < 0.05$ ),此时各处理间差异很小;黄壤中 YE-0.5% 和 YE-1% 处理对土壤 WSOC 含量的提升在整个培养期内均未达到显著水平,YE-2% 处理在培养前 30 天可显著增加土壤 WSOC 含量,在培养末期(112 天)仅有 YE-4% 处理能够显著提升土壤 WSOC 含量( $P < 0.05$ )。培养结束时,0.5%,1%,2% 和 4% 茶渣生物质炭添加比例下紫色土 WSOC 含量分别比自身 CK 处理增加 16.33%,16.67%,25.00% 和 41.67%;水稻土增加 7.14%,14.29%,21.43% 和 36.00%;黄壤增加 12.50%,25.00%,37.50% 和 50.00%。

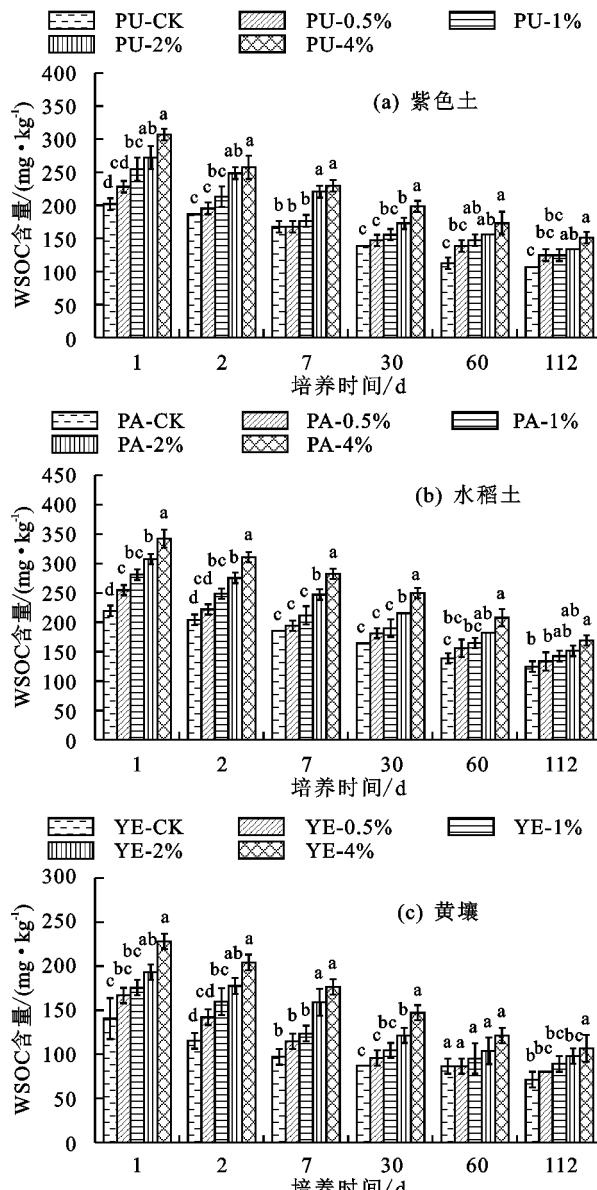


图 3 生物质炭对茶园土壤水溶性有机碳(WSOC)的影响

### 2.4 茶渣生物质炭对茶园土壤易氧化有机碳(ROC)的影响

茶渣生物质炭输入后 3 种茶园土壤 ROC 的变化情况见图 4。从培养时间来看,所有处理下的土壤 ROC 含量均随着培养时间的增加而减少。从相同处理不同土壤来看,紫色土和水稻土中所有生物质炭处理在整个培

养期内均显著提升了土壤 ROC 含量 (PA-0.5%, 第 1 天除外), 土壤各处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 至培养结束时, 紫色土中 PU-0.5%、PU-1%、PU-2% 和 PU-4% 处理下的 ROC 含量分别比 PU-CK 处理增加 9.30%, 18.31%, 32.27% 和 49.13%; 水稻土中 PA-0.5%、PA-1%、PA-2% 和 PA-4% 处理分别比 PA-CK 处理增加 5.33%, 11.83%, 19.53% 和 26.04%; 黄壤中除 YE-0.5% 处理外, 其余生物质炭处理对土壤 ROC 含量的提升均达显著, 且随生物质炭添加比例增加而增加, 各处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 至培养结束时, YE-0.5%、YE-1%、YE-2% 和 YE-4% 处理下的 ROC 含量分别比 YE-CK 处理增加 5.66%, 22.64%, 41.51% 和 54.72%。

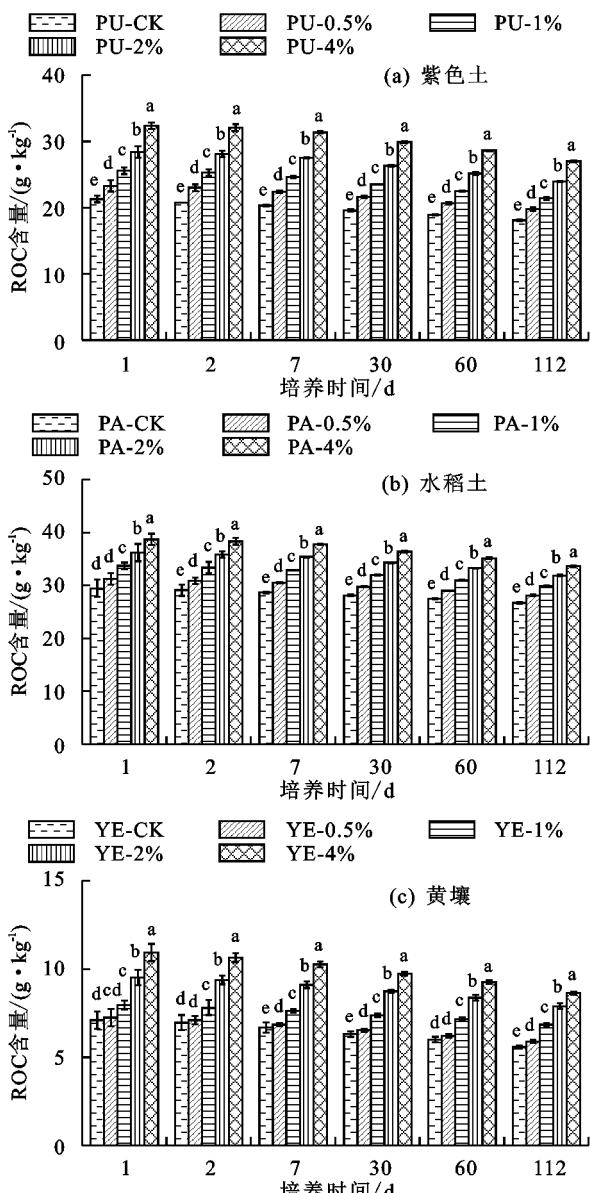


图 4 生物质炭对茶园土壤易氧化有机碳(ROC)的影响

## 2.5 茶渣生物质炭对茶园土壤有机碳氧化稳定性的影响

氧化稳定性是土壤的固有属性之一, 可以反映土壤的抗氧能力, 是一项评价土壤有机质动态质量的指

标<sup>[7]</sup>。土壤有机碳的氧化稳定性可由土壤氧化稳定系数 (Kos) 来反映, Kos 值越大, 土壤有机碳活性越低<sup>[8]</sup>。由表 3 可知, 茶渣生物质炭输入后 3 种茶园土壤 Kos 值均显著增大 ( $P < 0.05$ ), 且随生物质炭添加比例的增加而增加。3 种土壤分别来看, 培养结束时, 紫色土所有处理下的 Kos 值均大于培养初期, 此时 PU-0.5%、PU-1%、PU-2% 和 PU-4% 处理下的 Kos 值分别为 PU-CK 下的 1.28, 1.82, 2.07, 2.47 倍; 水稻土所有处理下的 Kos 值也均高于培养初期, PA-0.5%、PA-1%、PA-2% 和 PA-4% 处理下的 Kos 值分别为 CK 处理下的 1.45, 1.91, 2.54, 3.26 倍; 黄壤 YE-CK 处理下的 Kos 值在培养期内处于波动中, 生物质炭处理下则均呈现“V”形变化, 培养结束时所有处理下的 Kos 值均要高于培养初期, YE-0.5%、YE-1%、YE-2% 和 YE-4% 处理下的 Kos 值分别为 CK 处理下的 5.47, 10.01, 13.99, 20.41 倍。综上, 茶渣生物质炭可以显著提升 3 种茶园土壤有机碳的氧化稳定性 ( $P < 0.05$ ), 且添加比例越高土壤有机碳的稳定性越好, 3 种茶园土壤中对黄壤的影响最大。

## 3 讨论

### 3.1 茶渣生物质炭对土壤有机碳及其稳定性的影响

茶渣生物质炭是含碳量极高的有机物料, 且芳香结构特征明显, 与前人<sup>[2]</sup>关于生物质炭的研究结果类似。生物质炭输入土壤后能大幅提升土壤有机碳含量, 特别是惰性碳, 可长期固存于土壤中<sup>[3]</sup>。Laird 等<sup>[9]</sup>将不同比例生物质炭施入土壤中发现, 有机碳含量与生物质炭添加量呈正相关; 罗梅等<sup>[4]</sup>以 0.5, 2 倍生物质炭配施化肥还田发现, 紫色土有机碳含量和生物质炭用量成正比。本研究中, 茶渣生物质炭的添加显著增加了 3 种茶园土壤 TOC 含量, 且随添加比例的增加而增加。黄壤 TOC 的提升幅度显著高于另外 2 种土壤, 在高添加比例下这种差异更明显, 这是因为供试黄壤由第四纪老冲积物发育而成, 养分含量低, 且所采集黄壤有机碳含量远低于另外 2 种土壤, 因此提升空间更大。随着茶渣生物质炭添加比例的增加, 土壤碳损失率降低, 且均显著低于对照处理, 土壤有机碳氧化稳定系数增大, 说明茶渣生物质炭可以提升 3 种茶园土壤有机碳的稳定性。这是因为生物质炭作为外源有机碳输入土壤中, 一方面自身带入大量稳定的有机碳, 直接增加了土壤 TOC 的含量, 在较长时间内提升土壤有机碳含量; 另一方面生物质炭能够通过表面催化作用促进被它吸附的有机小分子聚合形成有机质<sup>[10]</sup>, 增加土壤有机碳含量。本研究发现, 茶渣生物质炭在提升茶园土壤有机碳的同时, 也会增加土壤总有机碳损失量的绝对数值, 说明茶渣生物质炭自身也在不断分解, 只是比土壤原有

机质分解更慢。Lehmann<sup>[3]</sup>指出,生物质炭的稳定性高于绿植类有机物,因此其碳损失率远低于绿肥。目前,关于生物质炭在土壤中的分解机理还没有统一的观点<sup>[11]</sup>,由于本研究为室内培养模拟,因此推测主要为化学分解中的表面氧化作用和生物分解中土壤生物的新陈代谢和酶的催化分解作用。Lian 等<sup>[12]</sup>指出,氧化作用能够提升生物质炭的表面活性和亲水

性,促使微生物的利用并分解生物质炭;Zimmerman<sup>[13]</sup>将灭菌的生物质炭土壤和接种微生物的生物质炭土壤进行为期1年的室内培养发现,前者的碳释放量仅为后者的50%~90%,说明微生物对生物质炭的分解作用。本研究中茶渣生物质炭加入后提高了土壤微生物的活性,侧面印证了土壤微生物对生物质炭的利用和分解。

表3 生物质炭对茶园土壤有机碳氧化稳定系数(Kos)的影响

单位: %

| 土壤类型    | 生物质炭<br>处理/% | 培养时间         |              |              |              |              |              |
|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|         |              | 1 d          | 2 d          | 7 d          | 30 d         | 60 d         | 112 d        |
| 紫色土(PU) | CK           | 24.08±1.47d  | 26.02±1.09d  | 27.46±1.28d  | 30.98±2.61d  | 29.71±2.69d  | 27.75±1.98e  |
|         | 0.50         | 30.61±1.24c  | 29.87±1.92d  | 31.22±2.99d  | 32.87±0.97d  | 31.92±1.97d  | 35.53±1.65d  |
|         | 1            | 42.17±1.42b  | 40.67±0.59d  | 38.68±1.69d  | 43.39±1.46d  | 46.14±1.56d  | 50.62±1.19c  |
|         | 2            | 48.41±2.41b  | 47.06±2.03b  | 48.11±0.11b  | 51.08±0.88b  | 53.28±1.94b  | 57.45±2.42b  |
|         | 4            | 56.58±0.67a  | 57.16±0.91a  | 59.13±0.31a  | 65.23±0.86a  | 67.21±0.49a  | 68.44±1.08a  |
|         | CK           | 19.46±0.75d  | 19.41±3.21d  | 19.08±0.71e  | 21.46±1.07e  | 22.52±0.47e  | 19.45±1.92e  |
| 水稻土(PA) | 0.50         | 27.26±1.89cd | 26.15±1.31c  | 24.89±1.01d  | 27.62±0.98d  | 29.14±1.58d  | 28.16±2.21d  |
|         | 1            | 33.76±0.93c  | 32.08±1.86c  | 32.32±0.45c  | 35.13±0.55c  | 38.52±0.89c  | 37.21±1.24c  |
|         | 2            | 44.41±1.63b  | 43.21±1.49b  | 42.48±0.27b  | 46.29±1.72b  | 49.13±0.51b  | 49.51±1.21b  |
|         | 4            | 54.85±2.79a  | 53.77±1.52a  | 53.96±0.69a  | 56.58±1.38a  | 57.83±0.97a  | 63.35±1.17a  |
|         | CK           | 12.31±0.98e  | 6.11±1.43e   | 7.15±1.16d   | 9.69±0.87e   | 7.84±1.33e   | 9.74±3.65e   |
|         | 0.50         | 41.57±1.39d  | 37.59±2.38d  | 36.89±3.26d  | 49.99±1.04d  | 56.28±3.02d  | 53.32±1.48d  |
| 黄壤(YE)  | 1            | 86.23±1.16c  | 83.26±1.61c  | 84.82±0.95c  | 90.08±1.77c  | 93.12±2.63c  | 98.14±2.04c  |
|         | 2            | 116.72±2.21b | 113.32±0.74b | 110.58±2.27b | 120.64±2.27b | 124.94±1.05b | 136.35±1.44b |
|         | 4            | 156.31±1.06a | 160.25±1.35a | 169.49±1.2a  | 175.32±1.51a | 187.35±3.23a | 198.92±0.43a |

注:表中同种土壤同列不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

### 3.2 茶渣生物质炭对土壤有机碳活性组分的影响

茶渣生物质炭含有多种养分元素,比表面积大且孔隙结构发达,阳离子交换量也大,输入茶园土壤后可以为土壤微生物提供充足的养分,对有机碳活性组分产生直接或间接的影响。本研究中,茶渣生物质炭的输入在整个培养期内均提升了3种茶园土壤的WSOC含量,且随添加比例的增加而增加。这是因为生物质炭在热解过程中产生了一定量的可溶性有机分子,输入土壤后直接增加WSOC含量。另外,生物质炭的输入在一定程度上提升了3种土壤的pH,使WSOC中的弱酸性官能团去质子化,活性有机碳分子的亲水性和电荷密度增加,促进固态有机碳的溶解<sup>[9]</sup>。随着培养的进行,3种土壤各生物质炭处理下的土壤WSOC均逐渐减少,这是因为生物质炭通过包封作用将土壤WSOC吸存到其孔径内,减少微生物的接触与分解,同时通过吸附保护作用将有机分子吸附到外表面,抑制被吸附有机质分子的活性<sup>[14]</sup>,WSOC含量不断减少。除此之外,土壤WSOC作为土壤微生物生殖繁衍的重要消耗品,在无植物提供根系分泌物进行补充的条件下,含量进一步减少,这也是本研究中3种土壤WSOC含量均随培养进行不断减少的重要原因。本研究进行期间,生物质炭处理下的3种土壤WSOC均不低于对照,但下降速度快于CK处理,随时间进行各生物质炭处理下的WSOC

含量与CK处理下的差异不断减小,出现将低于CK处理的趋势,这与赵世翔等<sup>[2]</sup>在苹果枝条生物质炭对果园壤土土壤活性有机碳的研究中的发现有相似之处,苹果枝条生物质炭在培养前60天内提高了壤土WSOC含量,而在之后的培养阶段则降低了壤土WSOC的含量,这说明生物质炭对土壤WSOC含量的影响与培养时间和供试材料都有关。

本研究的培养初期,所有处理下的土壤MBC含量均有所增加,这应该是培养开始水分的加入刺激了微生物,使其生长繁殖活动加剧。茶渣生物质炭的输入增加了3种茶园土壤MBC的含量,与前人<sup>[15-16]</sup>研究结果一致,这是因为生物质炭在制备过程中生成一定量的可溶性碳氮,为微生物生长提供良好养分。随着培养的进行,3种茶园土壤的MBC均出现下降趋势,这应该是土壤WSOC的减少和土壤供氮减少共同造成的。有研究<sup>[17]</sup>表明,氮素可以影响微生物代谢活动,当氮供应不足时,土壤MBC含量也将受到负面影响,而本研究中并未配施氮素,因此引起后期氮素不足,土壤MBC含量减少。生物质炭的吸附包封作用使微生物与可利用有机分子隔离,因而茶渣生物质炭添加比例越高,后期3种土壤的MBC含量下降越快,这与赵世翔等<sup>[2]</sup>研究结果类似。有研究<sup>[17-18]</sup>表明,生物质炭黏质土MBC的提升作用大于砂质土,本研究结果与之相似,茶渣生物质炭对3种茶园

土壤 MBC 影响的程度表现为水稻土>紫色土>黄壤,说明生物质炭对土壤 MBC 的影响与添加生物质炭种类和供试土壤种类均有关。

土壤 ROC 含量的高低及其在土壤有机碳中的分配比例可以表征土壤有机质的潜在分解性质。本研究中,茶渣生物质炭显著提升了 3 种土壤 ROC 的含量,促进了土壤中 ROC 的积累,但是 ROC 占 TOC 的比例则有所下降,与前人<sup>[4,5,19]</sup>的研究结果类似,说明茶渣生物质炭的输入使茶园土壤朝缓性化和惰性化发展,有利于茶园土壤有机碳的固存,这从土壤肥力角度看不利于土壤生产力的提升,但从土壤固碳角度则有利于土壤有机碳的长期固存。

本研究以雅安市名山区 3 种主要茶园土壤为供试土壤,由于成土母质、发育条件等的不同,3 种土壤的性质存在差异,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 2 种土壤丰富。综上,将茶渣制备成生物质炭是可行的,能够有效使茶渣进行资源化利用,且茶渣生物质炭对雅安市名山区 3 种典型茶园土壤中的黄壤提升效果最佳。将茶渣生物质炭以 0.5% 质量比添加到黄壤中,能够提升黄壤总有机碳的含量并有利于黄壤有机碳固存,且不影响土壤养分的供应。

## 4 结论

(1) 茶渣生物质炭含碳量高达 67.95%,呈碱性,比表面巨大,孔径发达,拥有高度浓缩的芳香结构且内含大量基团,结构稳定。

(2) 茶渣生物质炭能显著增加紫色土、水稻土和黄壤的土壤 TOC 含量( $P < 0.05$ ),且随添加比例增加而增加,3 种土壤增幅范围依次为 15.97%~96.64%,13.01%~72.36% 和 15.29%~321.43%,其中对黄壤 TOC 含量的提升作用最大。茶渣生物质炭能显著增加紫色土、水稻土和黄壤各活性组分(MBC、WSOC 和 ROC)的含量,在高添加量下提升效果显著( $P < 0.05$ )。

(3) 茶渣生物质炭能显著提升土壤有机碳的氧化稳定性( $P < 0.05$ ),且随添加比例增加而增强,紫色土、水稻土和黄壤的氧化稳定性提升范围分别为 28.07%~146.66%,44.79%~225.66% 和 447.18%~1 941.19%。

## 参考文献:

- [1] 米会珍,朱利霞,沈玉芳,等.生物炭对旱作农田土壤有机碳及氮素在团聚体中分布的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(8):1550-1556.
- [2] 赵世翔,于小玲,李忠徽,等.不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响:对土壤活性有机碳的影响[J].环境科学,2017,38(1):333-342.
- [3] Lehmann J. A handful of carbon[J]. Nature, 2007, 447(7141):143-144.
- [4] 罗梅,田冬,高明,等.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.
- [5] 马莉,吕宁,治军,等.生物炭对灰漠土有机碳及其组分的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(8):976-981.
- [6] 雅安市统计局.雅安统计年鉴:2018[M].四川 雅安:雅安市统计局,2019.
- [7] 章明奎, Waleign D B, 唐红娟.生物质炭对土壤有机质活性的影响[J].水土保持学报,2012,26(2):127-131,137.
- [8] 关连珠,姜雪楠,张广才,等.添加稻草生物质炭对滨海水稻土有机质活性的影响[J].土壤,2019,51(1):205-209.
- [9] Laird D A, Fleming P, Davis D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil[J]. Geoderma, 2010, 158(3/4):443-449.
- [10] Smebye A, Alling V, Vogt R D, et al. Biochar amendment to soil changes dissolved organic matter content and composition[J]. Chemosphere, 2016, 142:100-105.
- [11] 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.
- [12] Lian F, Xing B S. Black carbon(biochar)in water/soil environments: Molecular structure, sorption, stability, and potential risk[J]. Environmental Science and Technology, 2017, 51(23):13517-13532.
- [13] Zimmerman A R. Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon (biochar)[J]. Environmental Science and Technology, 2010, 44(4):1295-1301.
- [14] Zimmerman 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.
- [15] Jones D L, Murphy D V, Khalid M, et al. Short-term biochar-induced increase in soil CO<sub>2</sub> release is both biotically and abiotically mediated[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(8):1723-1731.
- [16] Liu J Y, Shen J L, Li Y, et al. Effects of biochar amendment on the net greenhouse gas emission and greenhouse gas intensity in a Chinese double rice cropping system[J]. European Journal of Soil Biology, 2014, 65:30-39.
- [17] Durenkamp M, Luo Y, Brookes P C. Impact of black carbon addition to soil on the determination of soil microbial biomass by fumigation extraction[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(11):2026-2029.
- [18] 刘杰云,邱虎森,汤宏,等.生物质炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响[J].环境科学,2019,40(8):3799-3807.
- [19] 花莉,唐志刚,洛晶晶,等.生物质炭对关中水稻土有机碳矿化及 CO<sub>2</sub> 释放的影响[J].西北农业学报,2014,23(5):185-190.