

复配调理剂对茶园土壤质量和茶叶品质的改良效果

赵涵¹, 方宏达², 曹英兰², 叶欣³, 杨祖洁⁴

(1. 集美大学海洋食品与生物工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 集美大学港口与海岸工程学院, 福建 厦门 361021; 3. 中国科学院城市环境研究所, 福建 厦门 361021; 4. 中科同恒环境科技有限公司, 福建 厦门 361021)

[摘要] 以复配调理剂(50%生物炭+25%牡蛎壳粉+25%鸟粪石)为试验材料,在土壤酸化茶园进行田间试验,探究复配调理剂对土壤和茶叶品质的改良效果。设置CK组和T1~T3处理组,分别施加土壤调理剂0,1500,3000,4500 kg/hm²进行试验。结果表明:与对照组相比,施用调理剂可提高土壤pH值和有机质、有效磷、速效钾的含量,分别提高了0.68~1.55,26.80~37.00 g/kg,22.82~39.18 mg/kg,86.23~108.04 mg/kg。同时,施加调理剂后,茶叶水浸出物和游离氨基酸含量增加,茶多酚含量降低,酚氨比下降,Cd、Cr、As和Pb含量在残留限量规定范围内。可见,施加复配调理剂可增加土壤肥力,提高茶叶的品质。

[关键词] 复配调理剂; 茶园; 牡蛎壳; 生物炭; 鸟粪石

[中图分类号] S 571.1

Improvement Effect of Composite Conditioner on Soil and Tea Quality in Tea Garden

ZHAO Han¹, FANG Hongda², CAO Yinglan², YE Xin³, YANG Zujie⁴

(1. College of Ocean Food and Biological Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. College of Harbour and Coastal Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

3. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China;

4. Zhongke Tongheng Environmental Technology Co. Ltd., Xiamen 361021, China)

Abstract: By using a composite conditioner(50% biochar + 25% oyster shell powder + 25% struvite) as the testing material, a field experiment was carried out to improve the soil and tea quality in the acidic tea gardens. Four groups CK and T1 ~ T3 were set, including 0, 1 500, 3 000, 4 500 kg/hm², respectively. The results showed that the application of composite conditioner enhanced the soil pH value, organic matter, available phosphorus and potassium content compared with the control group, with increased values of 0.68-1.55, 26.80-37.00 g/kg, 22.82-39.18 mg/kg and 86.23-108.04 mg/kg, respectively. Meanwhile, after applying the composite conditioner, the content of tea water extract and free amino acids increased, together with the decrease of polyphenols and the phenol-ammonia ratio. Moreover, heavy metal contents of tea such as Cd, Cr, As and Pb were within the limits of residues. Therefore, the application of composite conditioners can improve soil fertility and tea quality.

Keywords: composite conditioner; tea garden; oyster shell; biochar; struvite

[收稿日期] 2021-08-04

[基金项目] 厦门市科技计划项目(3502Z20193051)

[作者简介] 赵涵(1995—),男,硕士生,从事食品质量与安全方向研究。通信作者:方宏达(1980—),男,副教授,博士,从事环境系统治理与生态修复技术研究。E-mail:hongdafang@126.com

0 引言

土壤质量是影响茶树生长和茶叶品质的主要因素之一。由于茶树长时间种植^[1]、茶树自身性质^[2-3]、人为活动^[4]、环境因素^[5]和过度施肥等原因,部分茶园土壤出现酸化、重金属污染和肥力不均等问题。土壤酸化使茶树根尖生长受抑制,影响茶树生长和茶叶品质。茶叶重金属污染影响食品安全,危害人体健康。肥力不均影响茶叶品质,如氮肥过量会降低茶叶香气前体物质的合成^[6],缺磷肥影响茶叶黄酮类物质的合成^[7]等。这些问题严重影响了茶叶的品质,制约茶产业的发展。

对于存在土壤问题的茶园,土壤改良是提升茶叶品质最直接、最有效的方法。土壤改良不仅要考虑修复效果,还需兼顾经济效益。所以,目前的改良剂已从传统的碱性矿物^[5,8]转变为选用廉价易得的工业副产品^[9-10]、有机物料^[11-12]等材料。其中,由农业废弃物制成的生物炭可增加土壤的持水和保肥性能,增加土壤中有机质的含量^[13];由废弃牡蛎壳制成的牡蛎壳粉可以提高土壤 pH 值^[14],改善土壤根系通气和排水能力,再辅以从高氮磷废水中回收的鸟粪石缓释肥^[15],可有效提升土壤磷、镁含量,平衡土壤肥力,提高作物产量^[16]。

然而,施加单一的土壤调理剂难以解决茶园土壤存在的复合问题。因此,本文尝试使用生物炭、牡蛎壳粉和鸟粪石为原料复配成土壤调理剂,考察其在土壤改良和茶叶品质提升方面的性能,为副产品的加工再利用、茶园土壤改良和茶叶品质提升提供理论参考。

1 材料与方方法

1.1 材料

生物炭购于郑州竹林活性炭开发公司,牡蛎壳粉来源于漳浦县国民贝壳加工厂,鸟粪石由中国科学院城市环境研究所提供。3 种材料的基本理化性质见表 1。

表 1 供试材料基本理化性质
Tab.1 Basic physical and chemical properties of the tested materials

材料 Materials	pH	$w(\text{N})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$w(\text{P})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$w(\text{K})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$
生物炭 Biochar	9.77	2.49	23.62	8.02
鸟粪石 Struvite	7.96	23.90	475.38	3.15
牡蛎壳粉 Oyster shell	8.38	1.76	14.81	1.31

1.2 仪器设备

pH211C 型酸度计,意大利哈纳;7000DV 型电感耦合等离子体发射光谱仪,美国珀金埃尔默仪器;UV-5200 型紫外-可见分光光度计,上海元析仪器有限公司;AR224CN 型电子天平,奥豪斯仪器有限公司;ZQTY-70 型恒温振荡培养箱,上海知楚仪器有限公司;H2-16K 型台式高速离心机,湖南可成仪器设备有限公司;HH-4 型数显恒温水浴锅,上海梅香仪器有限公司。

1.3 试验设计

试验地位于福建省华安县某茶园,地理坐标为 25°00'29.55"N, 117°39'44.98"E,海拔 (637.90 ± 1.90) m,属亚热带与中亚地带过渡段气候,年降雨量为 1 700 mm,年平均气温为 20.9 °C,全年无霜期 357 d,土壤为砖红壤。试验田茶树品种为铁观音,树龄 5 a。

以课题组前期试验得出的调理剂最优配方 (50% 生物炭 + 25% 牡蛎壳粉 + 25% 鸟粪石) 开展大田试验。选择 12 块土壤情况相当、茶树长势均一的试验田地,每块田地面积 20 m²,间隔 2 m。设置 4 种不同的调理剂施用剂量:不施加土壤调理剂 (CK), 1 500 kg/hm² (T1), 3 000 kg/hm² (T2), 4 500 kg/hm² (T3)。每种处理设置 3 块田地作为重复,各处理序号随机排布见图 1。调理剂的施加方式为沟施,沟深控制在 10 ~ 15 cm,所开沟距茶树约 10 ~ 15 cm。试验期间,每块地的施肥和日常管理均按照当地茶农的种植习惯进行。肥料为有机肥,施加量为 1 500 kg/(hm² · a)。2020 年 1 月 9 日采

集土样测试背景值。采样后施加调理剂,待5月茶叶采摘时再次采集土样和茶叶,分析测试相关指标。

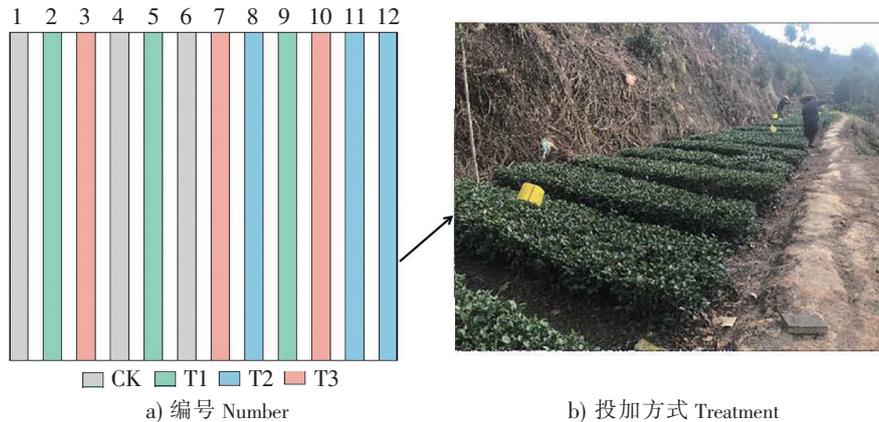


图1 试验地编号和投加方式

Fig.1 Test site number and treatment

1.4 实验方法

1.4.1 土壤采集及测定

按照梅花式布点法进行土壤样品采集,每个点采集0~20 cm深度的土壤1 kg,去除树枝、碎叶和石块等杂物,将5个点点位的土壤混匀后平均分成4份,舍弃其中的2份,剩下2份装入袋中,做好标记,带回实验室。土壤采集后,置于室内阴凉通风处自然风干,期间将大土块细分,并除去树枝、碎叶等杂物,过10目尼龙网筛备用。

土壤pH值测定采用电位法;有机质测定采用重铬酸钾氧化-外加热法;碱解氮测定采用氢氧化钠扩散法;有效磷测定采用 $\text{NH}_4\text{F-HCl}$ 浸提法^[17];速效钾测定采用乙酸铵浸提法。

1.4.2 茶叶采集及测定

2020年5月进行茶叶采摘工作。每块试验茶叶地采摘茶叶300 g,采摘叶样为茶树的“一芽三叶”,茶叶采摘后低温运输保存,运至实验室当天进行蒸青和杀青,所得样品进行后续实验测试。

茶多酚的测定采用福林酚法;游离氨基酸的测定采用茚三酮法;水浸出物测定采用茶水浸出物法;茶叶重金属含量测定参考NY 659—2003规定的方法。

1.5 数据处理

采用MS Office 2018系列软件进行数据处理,SPSS 24.0进行统计分析,Origin 2017进行作图。

2 结果与讨论

2.1 不同施用量调理剂对茶园土壤肥力的影响

2.1.1 对土壤pH值的影响

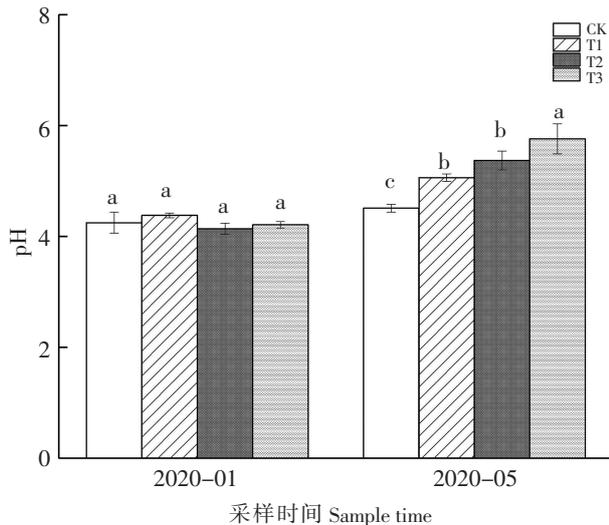
土壤pH值影响土壤的化学和生物学性质,土壤酸化程度加重会导致重金属活化、盐基离子淋失和土壤微生物种群失衡等,影响茶树的生长。图2为不同施用量调理剂对茶园土壤pH值的影响情况,可见,与CK组相比,T1、T2和T3处理组的土壤pH值分别增加了12.20%,19.07%,27.72%,存在显著差异($P < 0.05$)。

土壤pH值的提升与调理剂中3种原料的特性密切相关。牡蛎壳粉主要成分为碳酸钙,可以中和土壤中的氢离子^[18],改善土壤酸化。另外,牡蛎壳粉中含有的盐基离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等的离子半径与 Al^{3+} 相似,易交换至土壤水溶液中与碳酸钙中和,使土壤pH值升高。首先,生物炭含有大量的碱性物质如羧基和酚羟基等含氧官能团^[19],可以直接作用于土壤,中和土壤的酸度;其次,生物炭含有的盐基离子与土壤表面的 Al^{3+} 交换,使其进入土壤水溶液中,促进其向不易交换的氢氧化铝转变。鸟粪石的施加也可以提高土壤的pH值^[20]。鸟粪石含有丰富的 Mg^{2+} 和 PO_4^{3-} , Mg^{2+} 可以与酸性土壤表

面的 Al^{3+} 交换, 其提高土壤 pH 值的机理与生物炭类似。此外, PO_4^{3-} 可以与土壤表面的羟基进行配位交换, 释放出 $OH^{-[21]}$ 。综上所述, 3 种材料均呈碱性, 可以直接中和土壤的酸度。另外, 材料还可以向土壤中补充盐基离子, 交换土壤表面的 H^+ 和 Al^{3+} , 增加土壤的酸缓冲能力。

2.1.2 对土壤有机质含量的影响

土壤有机质主要来源于动植物的残体, 是土壤重要的构成组分和植物营养来源之一, 与土壤微生物的生长和土壤结构密切相关。图 3 给出了不同施用量调理剂对茶园土壤有机质含量的影响情况, 可见, 与 CK 组相比, T1、T2 和 T3 处理组的土壤有机质含量分别增加了 19.32%, 31.07%, 42.90%, T2、T3 组与 CK 组存在显著差异 ($P < 0.05$)。



说明: 小写字母表示同一采样时间不同施加量之间差异性显著 ($P < 0.05$), 下同

Note: The lowercase letters indicated that there were significant differences between different application amounts at the same sampling time ($P < 0.05$), the same below

图 2 不同施用量复配土壤调理剂对茶园土壤 pH 值的影响

Fig.2 Effects of different application rates of compound soil conditioner on soil pH value in tea garden

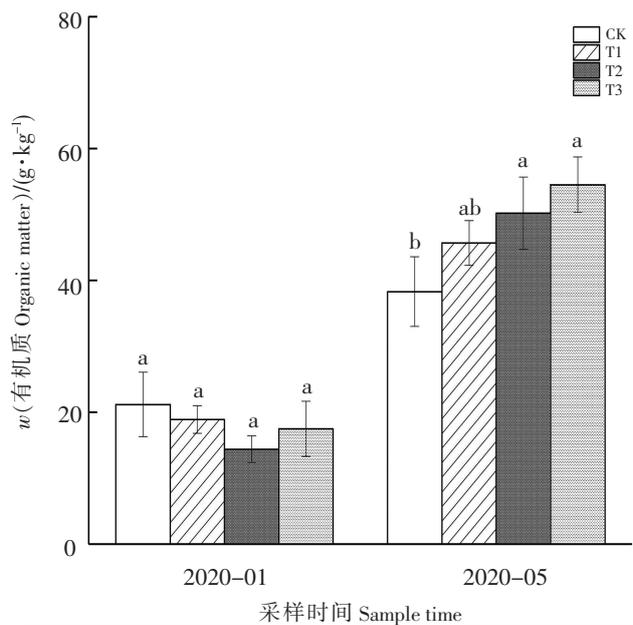


图 3 不同施用量复配土壤调理剂对茶园土壤有机质含量的影响

Fig.3 Effects of different application rates of compound soil conditioner on soil organic matter content in tea garden

有机碳是有机质含量的一个评价标准^[22]。已有报道指出, 添加生物炭可以增加土壤的有机碳含量^[23-24], 生物炭含碳丰富 ($>60%$)^[25], 生物炭施入土壤后可以直接增加土壤的碳库存, 促进土壤微生物对其进行分解, 从而提高土壤有机碳含量。另外, 生物炭和牡蛎壳粉能增加土壤的持水能力, 降低土壤容重^[26], 适宜土壤微生物的生长繁殖, 有利于土壤微生物数量的增加, 提高土壤生物的活性^[27]。此外, 土壤 pH 值影响微生物的结构和活性, 土壤酸化严重, 有利于真菌的繁殖, 但抑制细菌和放线菌^[28]。施加复配调理剂后, 土壤 pH 值提高, 有利于细菌生长繁殖, 提高生物活性, 从而提高土壤的有机质含量。同时, 生物炭还可以吸持有机肥中的有机质^[29], 提高有机肥的利用率。综上所述, 复配调理剂除自带碳素增加土壤有机质含量外, 还可以改善土壤微生物的环境, 提高土壤生物的活性和微生物数量, 从而提高土壤肥力。

2.1.3 对土壤碱解氮含量的影响

图 4 给出了不同施用量调理剂对茶园土壤碱解氮含量的影响情况, 可见, 与第一次采样的初始值相比, CK、T1、T2 和 T3 处理组的碱解氮含量分别增加了 21.09, 23.57, 19.42, 21.29 mg/kg。

实验结果表明, 施加土壤调理剂对茶园土壤碱解氮含量影响较小, 甚至可以降低其含量, 黄连喜等^[30]和刘涛等^[31]也得到类似结论。这可能是因为生物炭中含有丰富的碳, 施加复配调理剂后, 土壤中的碳含量增加, 未能及时补充氮肥, 使 C/N 比值增加, 促进土壤微生物对氮的固定^[32]。此外, 土

壤碱解氮含量会随着土壤 pH 值升高而降低^[33]。

2.1.4 对土壤有效磷含量的影响

图 5 给出了不同施用量调理剂对茶园土壤有效磷含量的影响情况, 可见, 与第一次采样的初始值相比, CK、T1、T2 和 T3 处理组的有效磷含量分别增加了 12.73, 22.82, 25.31, 39.18 mg/kg, 3 个处理组均与 CK 组存在显著差异 ($P < 0.05$), 但相互之间差异性不显著。

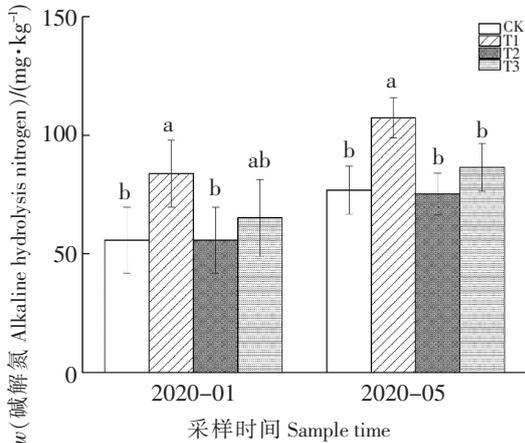


图 4 不同施用量复配土壤调理剂对茶园土壤碱解氮含量的影响

Fig.4 Effects of different application rates of compound soil conditioner on alkali hydrolyzable nitrogen content in tea garden soil

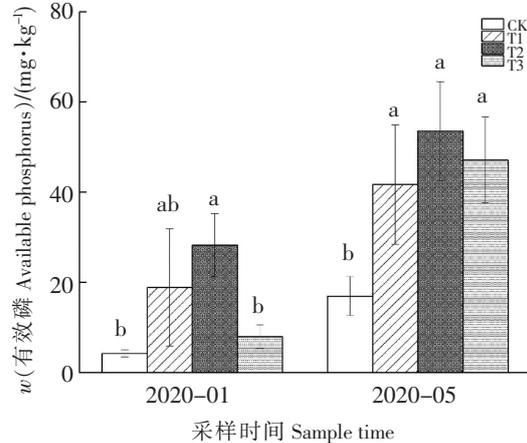


图 5 不同施用量复配土壤调理剂对茶园土壤有效磷含量的影响

Fig.5 Effects of different application rates of compound soil conditioner on soil available phosphorus content in tea garden soil

鸟粪石含有丰富的磷, 可作为缓释磷肥^[34]。鸟粪石在土壤中会持续分解生成 PO_4^{3-} , 特别是在酸性 ($pH < 5$) 条件下^[35], 有利于磷从鸟粪石中溶出。除鸟粪石可以增加土壤有效磷含量外, 生物炭和牡蛎壳粉也可以辅助提高有效磷的含量。首先, 生物炭含有可溶性磷, 可以直接提高土壤中有有效磷的含量^[36]。其次, 牡蛎壳粉和生物炭可以提高酸性土壤的 pH 值, 降低 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 等阳离子的活性, 增加土壤对磷的吸附, 从而提高土壤中有有效磷的含量^[37]。同时, 生物炭和牡蛎壳粉能改善土壤理化性质, 降低容重, 增加持水, 有利于土壤微生物的生长繁殖, 使其矿化、溶解有机磷和无机磷, 供植物吸收。

2.1.5 对土壤速效钾含量的影响

图 6 给出了不同施用量调理剂对茶园土壤速效钾含量的影响情况, 可见, 与第一次采样的初始值相比, CK、T1、T2 和 T3 处理组的速效钾含量分别增加了 33.72, 86.23, 86.47, 108.04 mg/kg, 3 个处理组均与 CK 组存在显著差异 ($P < 0.05$)。

T1、T2 和 T3 处理组速效钾增加的原因与施加复配调理剂有关。首先, 生物炭自身含有钾^[38], 且多为交换性钾, 施加在土壤中可及时释放, 被植物吸收^[39]。其次, 牡蛎壳粉、生物炭和鸟粪石可以提高土壤阳离子交换量, 增强土壤对 K^+ 的吸附能力。最后, 3 种材料可以提高土壤的 pH 值, 当 OH^- 增加时, 土壤表面负电荷增加, 可以吸附更多的 K^+ 。同时, 3 种材料还可以降低土壤中的 Al^{3+} , 使更多的 K^+ 可以进入层间穴位, 从而减少 K^+ 的淋失, 提高土壤中速效钾的含量。

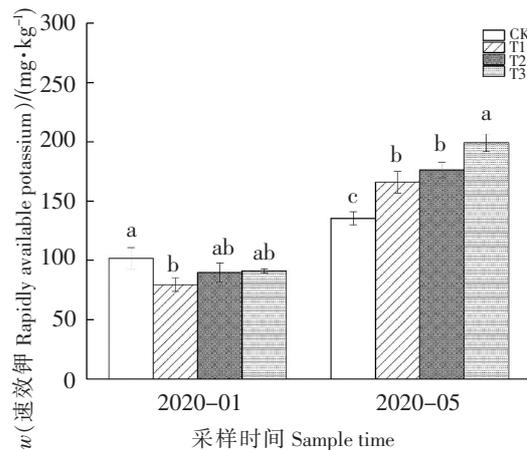


图 6 不同施用量复配土壤调理剂对茶园土壤速效钾含量的影响

Fig.6 Effects of different application rates of compound soil conditioner on soil available potassium content in tea garden soil

2.2 不同施加量调理剂对茶叶品质的影响

2.2.1 对茶叶水浸出物含量的影响

水浸出物是指茶叶中可被沸水浸出的物质,包括茶多酚、咖啡碱、氨基酸、水溶性果胶、可溶性糖、维生素、色素、无机盐和可溶蛋白等成分。水浸出物的含量是评价茶叶品质的指标之一,水浸出物与茶叶品质呈正相关。

图 7 是不同施加量调理剂对茶叶水浸出物影响的结果。由图 7 可知,与不施加调理剂的 CK 组相比,施加调理剂的 3 个处理组均可提高茶叶的水浸出物。和 CK 组相比, T1、T2 和 T3 组的水浸出物分别增加了 0.92%, 1.52%, 1.99%, 3 个处理组均与 CK 组存在显著差异 ($P < 0.05$)。因此,施加调理剂可以增加茶叶的水浸出物含量,当施加量为 4 500 kg/hm² 时,茶叶的水浸出物含量最高。

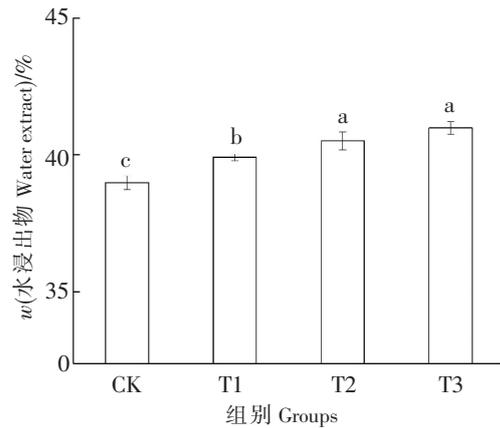
2.2.2 对茶叶茶多酚含量的影响

图 8 是不同施加量调理剂对茶叶茶多酚含量影响的结果,可见,和 CK 组相比, T1、T2 和 T3 组的茶多酚含量分别降低了 8.76%, 2.19%, 5.31%, 3 个处理组除 T2 外均与 CK 组存在显著差异 ($P < 0.05$)。因此,施加调理剂会降低茶叶茶多酚的含量。

茶多酚在感官评价中主要为涩味,当茶多酚含量在 20% 以内时,与茶汤滋味呈正相关;当茶多酚含量大于 24% 时,茶汤苦涩味加重,鲜醇风味降低,茶汤滋味受到影响。在本研究中,CK 组的茶叶茶多酚含量最高为 268.59 mg/g, T1 处理组的茶叶茶多酚含量最低为 245.06 mg/g,均大于 24%,可能与茶树的品种有关。万青等^[40]研究发现,在茶园施加生物炭会降低茶叶茶多酚的含量,与本研研究所得结果一致。综上所述,施加复配调理剂可以降低茶叶茶多酚含量,进而减轻茶汤的苦涩滋味。

2.2.3 对茶叶游离氨基酸含量的影响

图 9 是不同施加量调理剂对茶叶游离氨基酸含量影响的结果,可见,和 CK 组相比, T1、T2 和 T3 组的游离氨基酸含量分别增加了 8.61%, 3.59%, 0.24%, 3 个处理组中,只有 T1 组与 CK 组存在显著差异 ($P < 0.05$)。因此,施加调理剂会增加茶叶游离氨基酸的含量,当施加量为 1 500 kg/hm² 时,茶叶的游离氨基酸含量最高。



说明:小写字母表示不同处理之间差异性显著($P < 0.05$),下同
Note:The lowercase letters indicated significant differences among different treatments ($P < 0.05$), the same below

图 7 不同施加量复配土壤调理剂对茶叶水浸出物含量的影响

Fig.7 Effects of different application rates of compound soil conditioner on tea water extract content

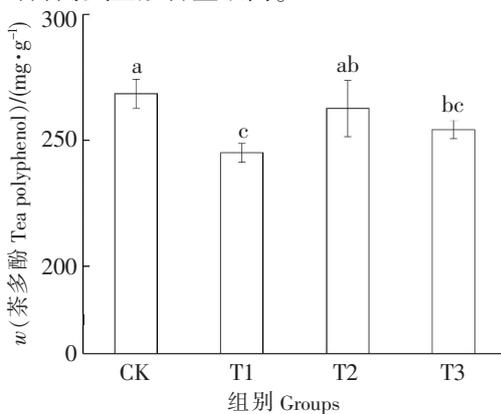


图 8 不同施加量复配土壤调理剂对茶叶茶多酚含量的影响

Fig.8 Effects of different application rates of compound soil conditioner on tea polyphenol content

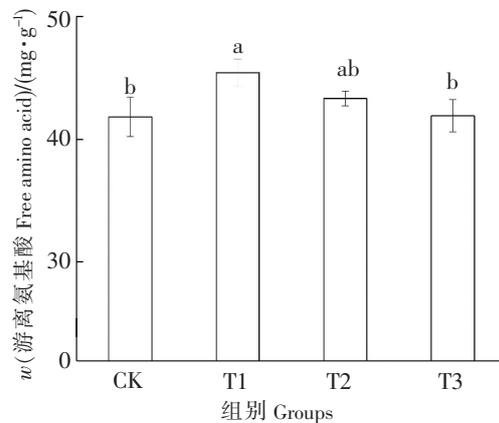


图 9 不同施加量复配土壤调理剂对茶叶游离氨基酸含量的影响

Fig.9 Effect of different application rates of compound soil conditioner on free amino acid content in tea

游离氨基酸主要为茶汤提供甜鲜味, 其含量与茶叶品质呈正相关。游离氨基酸的含量与土壤中氮肥水平有一定关系。朱旭君等^[41]研究发现, 当有机肥施加占比为 50% ~ 75% 时, 施加氮肥可以显著提高茶叶游离氨基酸的含量。在本实验 3 个处理组中, T1 组的茶叶游离氨基酸含量最高, 而 T2、T3 组与 CK 组的茶叶游离氨基酸含量不存在显著差异 ($P > 0.05$)。可能是因为 T2 和 T3 组的生物炭施加量更多, 土壤有机质含量增加, 但没有及时补充氮肥, 土壤中 C/N 比变大, 更多的氮被微生物固定, 可供茶树吸收的氮减少, 导致 T2 和 T3 组的茶叶游离氨基酸含量降低。

2.2.4 对茶叶酚氨比的影响

酚氨比是茶叶中茶多酚和氨基酸的比值, 是衡量茶叶实质性的一个参数。酚氨比还能反映茶叶的品质, 酚氨比小, 则茶汤鲜香, 品质越高^[42]。

图 10 是不同施加量调理剂对茶叶酚氨比影响的结果, 可见, 和 CK 组相比, T1、T2 和 T3 组的酚氨比分别降低了 15.89%, 5.45%, 5.45%, 3 个处理组均与 CK 组存在显著差异 ($P < 0.05$)。其中, T2 和 T3 组的酚氨比相同, T1 组的酚氨比小于 T2 和 T3 组, 且差异性显著 ($P < 0.05$)。因此, 施加调理剂会降低茶叶的酚氨比, 当施加量为 1 500 kg/hm² 时, 茶叶的酚氨比最低。

2.2.5 茶叶重金属残留量

茶叶中重金属残留量如表 2 所示, 可见, 各组茶叶中的 Cd、Cr、Pb 和 As 含量无显著差异, 均未超出残留限值, 说明施用调理剂不会影响茶叶的安全性。

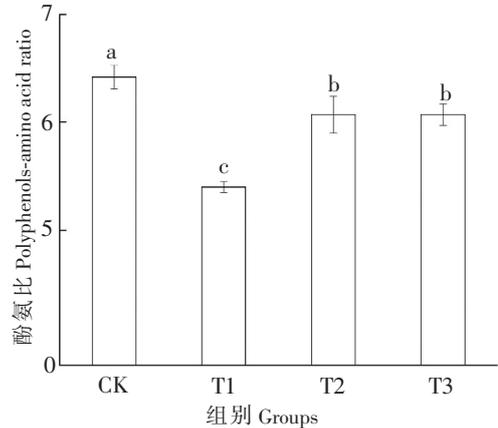


图 10 不同施加量复配土壤调理剂对茶叶酚氨比的影响

Fig.10 Effect of different application rates of compound soil conditioner on phenol ammonia ratio of tea

表 2 茶叶重金属含量

Tab.2 Heavy metal concentration in tea

组别 Groups	w(Cd)	w(Cr)	w(As)	w(Pb)
CK	0.03 ± 0.01	2.66 ± 0.45	0.61 ± 0.02	0.21 ± 0.02
T1	0.04 ± 0.02	2.34 ± 0.43	0.49 ± 0.02	0.25 ± 0.05
T2	0.02 ± 0.03	2.50 ± 0.57	0.63 ± 0.10	0.28 ± 0.11
T3	0.02 ± 0.01	2.21 ± 0.20	0.54 ± 0.02	0.20 ± 0.01
残留限量 Residue limit ^[43]	1.00	5.00	2.00	5.00

3 结论

生物炭基土壤调理剂可有效修复茶园土壤, 提高土壤 pH 值和有机质、有效磷和速效钾含量, 改善土壤肥力, 更适宜茶树的生长。施加调理剂后, 茶叶水浸出物和游离氨基酸含量增加, 茶多酚含量降低, 酚氨比下降, 且 Cd、Cr、As 和 Pb 含量在残留限量规定范围内。综合土壤改良效果、茶叶品质和经济效益考虑, 推荐施加量为 1 500 kg/hm²。

[参 考 文 献]

[1] 马立锋. 重视茶园土壤的急速酸化和改良 [J]. 中国茶叶, 2001(4): 30-31.
 [2] 廖万有. 我国茶园土壤的酸化及其防治 [J]. 农业环境保护, 1998(4): 35-37.
 [3] 胡红青, 廖丽霞, 王兴林. 低分子量有机酸对红壤无机态磷转化及酸度的影响 [J]. 应用生态学报, 2002, 13(7): 867-870.
 [4] 罗敏. 江苏省茶园土壤酸化现状及其影响因素研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2006.

- [5] 张新民, 柴发合, 王淑兰, 等. 中国酸雨研究现状 [J]. 环境科学研究, 2010, 23(5): 527-532.
- [6] LIU M Y, BURGOS A, MA L, et al. Lipidomics analysis unravels the effect of nitrogen fertilization on lipid metabolism in tea plant (*Camellia sinensis* L.) [J]. BMC Plant Biology, 2017, 17(1): 165. DOI:10.1186/s12870-017-1111-6.
- [7] DING Z T, JIA S S, WANG Y, et al. Phosphate stresses affect ionome and metabolome in tea plants [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2017, 120: 30-39. DOI:10.1016/j.plaphy.2017.09.007.
- [8] LI J Y, WANG N, XU R K, et al. Potential of industrial byproducts in ameliorating acidity and aluminum toxicity of soils under tea plantation [J]. Pedosphere, 2010, 20(5): 645-654. DOI:10.1016/S1002-0160(10)60054-9.
- [9] HAN W Y, SHI Y Z, MA L F, et al. Effect of liming and seasonal variation on lead concentration of tea plant (*Camellia sinensis* L.) [J]. Chemosphere, 2007, 66(1): 84-90.
- [10] WANG L, BUTTERLY C R, CHEN Q H, et al. Surface amendments can ameliorate subsoil acidity in tea garden soils of high-rainfall environments [J]. Pedosphere, 2016(2): 180-191.
- [11] PRABHAT P, SHAMINA S, ASHRAFA Z, et al. Cellulolytic microorganisms control the availability of nitrogen in microcosm of shredded pruning litter treated highly acidic tea-growing soils of Assam in Northeast India [J]. Applied Soil Ecology, 2017, 120: 30-34.
- [12] NAZARIA S, RAHIMIA G, NEZHAD A K J. Effectiveness of native and citric acid-enriched biochar of Chickpea straw in Cd and Pb sorption in an acidic soil [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2019, 7(3): 103064.
- [13] 殷大伟, 宋章玉, 孟令义, 等. 生物炭对白浆土养分含量及水稻产量的影响 [J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2019, 31(3): 15-21.
- [14] KWON Y T, LEE C W, YUN J H. Development of vermicast from sludge and powdered oyster shell [J]. Journal of Cleaner Production, 2009, 17(7): 708-711.
- [15] 谢海. 生物炭的特性分析及其在黄水资源化中的应用 [D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [16] RYU H D, LIM C S, KANG M K, et al. Evaluation of struvite obtained from semiconductor wastewater as a fertilizer in cultivating Chinese cabbage [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 221/222: 248-255.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 3 版. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- [18] 刘莉, 李倩, 黄成, 等. 生物质炭和石灰对酸化紫色土的改良效果 [J]. 环境科学与技术, 2019, 42(12): 173-179.
- [19] 徐仁扣. 秸秆生物质炭对红壤酸度的改良作用: 回顾与展望 [J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(4): 303-309.
- [20] LIU X N, TAO Y, WEN G Q, et al. Influence of soil and irrigation water pH on the availability of phosphorus in struvite derived from urine through a greenhouse pot experiment [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(17): 3324-3329.
- [21] 温元波. 磷石膏对黄壤酸性和铝形态的影响及机制研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.
- [22] BALDOCK J A, SANDERMAN J, MACDONALD L M, et al. Quantifying the allocation of soil organic carbon to biologically significant fractions [J]. Soil Research, 2013, 51(8): 561-576.
- [23] CUI L Q, PAN G X, LI L Q, et al. Continuous immobilization of cadmium and lead in biochar amended contaminated paddy soil: a five-year field experiment [J]. Ecological Engineering, 2016, 93: 1-8.
- [24] ZHANG A F, CHENG G D, HUSSAIN Q, et al. Contrasting effects of straw and straw-derived biochar application on net global warming potential in the Loess Plateau of China [J]. Field Crops Research, 2017, 205: 45-54.
- [25] CHEN W F, MENG J, HAN X R, et al. Past, present, and future of biochar [J]. Biochar, 2019, 1(1): 75-87.
- [26] 李传哲, 章欢, 姚文静, 等. 生物炭配施氮肥对典型黄河故道区土壤理化性质和冬小麦产量的影响 [J]. 应用生态学报, 2020, 31(10): 3424-3432.
- [27] 尚杰, 耿增超, 王月玲, 等. 施用生物炭对(土委)土微生物量碳、氮及酶活性的影响 [J]. 中国农业科学, 2016, 49(6): 1142-1151.
- [28] 王海斌, 陈晓婷, 丁力, 等. 土壤酸度对茶树根际土壤微生物群落多样性影响 [J]. 热带作物学报, 2018, 39(3): 448-454.
- [29] 郑健, 李欣怡, 马静, 等. 秸秆生物炭配施沼液对土壤有机质和全氮含量的影响 [J]. 农业环境科学学报,

- 2020, 39(5): 1111-1121.
- [30] 黄连喜, 魏岚, 李衍亮, 等. 花生壳生物炭对土壤改良、蔬菜增产及其持续效应研究 [J]. 中国土壤与肥料, 2018(1): 101-107.
- [31] 刘涛, 应建平, 张涛, 等. 生物炭对桃园土壤微生物功能多样性的影响 [J]. 浙江农业科学, 2020, 61(4): 654-659.
- [32] 李明, 李忠佩, 刘明, 等. 不同秸秆生物炭对红壤性水稻土养分及微生物群落结构的影响 [J]. 中国农业科学, 2015, 48(7): 1361-1369.
- [33] 胡敏, 向永生, 鲁剑巍. 石灰用量对酸性土壤 pH 值及有效养分含量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2017(4): 72-77.
- [34] 章绍康, 弓晓峰, 林媛, 等. 人工鸟粪石对 Cd 污染土壤中黑麦草生长的影响 [J]. 环境工程, 2021(9): 193-198.
- [35] VASSILEV N, MARTOS E, MENDES G, et al. Biochar of animal origin: a sustainable solution to the global problem of high-grade rock phosphate scarcity? [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2013, 93(8): 1799-1804.
- [36] 占亚楠, 王智, 孟亚利. 生物炭提高土壤磷素有效性的整合分析 [J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1185-1193.
- [37] 王智慧, 殷大伟, 王洪义, 等. 生物炭对土壤养分、酶活性及玉米产量的影响 [J]. 东北农业科学, 2019, 44(3): 14-19.
- [38] PANDIT N R, MULDER J, HALE S E, et al. Biochar improves maize growth by alleviation of nutrient stress in a moderately acidic low-input Nepalese soil [J]. The Science of the Total Environment, 2018, 625: 1380-1389.
- [39] 丛铭, 张梦阳, 夏浩, 等. 施用生物炭对红壤中不同形态钾含量及小白菜生长的影响 [J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(4): 22-28.
- [40] 万青, 胡振民, 李欢, 等. 调理剂对茶园土壤和茶叶产量及品质的影响 [J]. 土壤, 2019, 51(6): 1086-1092.
- [41] 朱旭君, 王玉花, 张瑜, 等. 施肥结构对茶园土壤氮素营养及茶叶产量品质的影响 [J]. 茶叶科学, 2015, 35(3): 248-254.
- [42] 许伟, 彭影琦, 张拓, 等. 绿茶加工中主要滋味物质动态变化及其对绿茶品质的影响 [J]. 食品科学, 2019, 40(11): 36-41.
- [43] 中华人民共和国农业部. 茶叶中铬、镉、汞、砷及氟化物限量: NY 659—2003 [S]. 北京: 中华人民共和国农业部, 2003.

(责任编辑 马建华 英文审校 刘静雯)