

植物源生物质炭对酸化茶园土壤质量和茶叶品质的影响^①

王婷¹, 杨青², 倪凯伦², 张海娟², 邵赛男², 丁耿伟², 徐君^{2*}, 李章涛¹, 单胜道¹, 孟俊¹

(1 浙江科技大学环境与资源学院, 杭州 310023; 2 杭州市富阳区农业技术推广中心, 杭州 311400)

摘要: 通过田间试验, 研究了不同植物源生物质炭(水稻秸秆生物质炭、玉米秸秆生物质炭、竹炭)对茶园土壤基本理化特性、养分活性、茶叶养分吸收以及茶叶品质的影响。结果表明: 与不施用生物质炭的对照处理相比, 施用水稻秸秆生物质炭、玉米秸秆生物质炭、竹炭后土壤 pH 分别提升了 1.12、1.02 和 0.77 个单位。3 种生物质炭均显著降低了土壤交换性氢和交换性铝含量, 但显著增加了土壤有机质、水解性氮、速效钾、有效磷、交换性钙和交换性镁等含量及阳离子交换量。施用水稻和玉米秸秆生物质炭对茶叶中养分元素吸收无显著影响, 而施用竹炭可增加茶叶对镁的吸收, 降低茶叶对钙、锰、铁等养分的吸收。施用生物质炭对茶叶产量及茶多酚、咖啡碱、游离氨基酸和水浸出物等含量的影响差异不显著。总体上, 水稻秸秆生物质炭在提升酸性茶园土壤 pH、降低土壤交换性氢和交换性铝含量, 以及提升土壤矿质养分元素活性等方面优于玉米秸秆生物质炭和竹炭。

关键词: 生物质炭; 茶园酸化; 土壤改良; 茶叶品质; 土壤养分

中图分类号: S156 文献标志码: A

Effects of Plant-derived Biochars on Qualities of Acidified Tea Garden Soil and Tea Leaves

WANG Ting¹, YANG Qing², NI Kailun², ZHANG Haijuan², SHAO Sainan², DING Gengwei², XU Jun^{2*}, LI Zhangtao¹, SHAN Shengdao¹, MENG Jun¹

(1 School of Environment and Natural Resources, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China;

2 Agricultural Technology Extension Center of Fuyang District, Hangzhou, Hangzhou 311400, China)

Abstract: In this study, a field experiment was conducted in a tea garden with three different biochars derived from rice straw, corn straw, and bamboo. Soil basic physicochemical properties, available nutrient contents, and nutrient accumulation and quality of tea leaves were determined and compared. The results showed that compared with the control treatment (no biochar), the application of rice straw, corn straw, and bamboo biochars increased soil pH by 1.12, 1.02, and 0.77 units, respectively. Biochar treatments significantly reduced the exchangeable hydrogen and aluminum while significantly increasing concentrations such as organic matter, available nitrogen, potassium and phosphorus, exchangeable calcium and magnesium, and cation exchange capacity. Rice and corn straw biochars had no significant influence on mineral nutrient accumulation in tea leaves, however, bamboo biochar enhanced the uptake of magnesium in the tea leaves while reducing the uptake of calcium, manganese, iron, and other nutrients in tea leaves. Biochar treatments had no significant influence on tea yield and contents of tea polyphenols, caffeine, free amino acids, and water extract in tea leaves. In conclusion, compared with corn straw and bamboo biochars, rice straw biochar is more effective in increasing soil pH, decreasing exchangeable H^+ and Al^{3+} , and enhancing soil available mineral nutrients in acidic tea gardens.

Key words: Biochar; Tea garden soil acidification; Soil amendment; Tea quality; Soil nutrients

我国是全球最大的茶叶生产国和消费国。据中国茶叶流通协会发布的《2023 年中国茶叶产销及进出口

形势分析》^[1]统计资料显示, 2023 年我国茶叶种植面积达 343.31 万 hm^2 , 全国干毛茶总产量为 333.95

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFE0196000), 农业农村部酸化耕地治理重点县项目(ZJAC2023-20)和国家自然科学基金青年基金项目(42207018)资助。

* 通信作者(15292165@qq.com)

作者简介: 王婷(1997—), 女, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 研究方向为土壤酸化改良。E-mail: fywangting@163.com

万 t, 内销总量为 240.40 万 t, 出口 36.75 万 t, 进口茶叶量 3.90 万 t。茶产业在我国农业生产和国民经济发展中占有极为重要的地位。然而, 近几十年来过量的氮肥施用、酸沉降和茶树多年宿根连作根系泌酸等原因, 造成我国茶园土壤酸化问题日趋严重^[2]。茶树最佳生长土壤 pH 范围介于 4.5 ~ 5.5, 而我国约有 52% 的茶园土壤 pH 低于 4.5, 已经处于严重酸化程度^[3-4]。研究表明, 随着茶园土壤 pH 的降低, 茶园土壤中养分元素磷、钾、钙、镁、硫等含量显著下降, 茶叶中养分元素的吸收减少^[5]。茶园土壤酸化会引起矿质营养元素淋失、土壤板结以及重金属活性增加等环境问题, 从而影响茶树的生长, 降低茶叶的产量和品质。因此, 迫切需要探讨有效改良措施来缓解和防治茶园土壤酸化, 解决当前茶叶生产所面临的土壤酸化问题。

生物质炭作为一种碱性材料, 富含碳元素和多种矿质营养元素, 在中和土壤酸性、改善土壤物理化学性质、提高土壤肥力、减少养分淋失和固碳减排等方面具有很好的应用前景^[6-7]。以往研究表明, 生物质炭在酸化茶园土壤改良中具有很好的应用效果, 施用生物质炭可以显著提高酸性土壤 pH^[8], 增加土壤有效养分和阳离子交换量^[9], 提升土壤有质含量^[10], 改变土壤微生物群落结构和活性^[11-12], 从而提升茶叶的产量和品质。然而, 茶树喜生于酸性富铝化的土壤中, 但茶树又是一种“嫌钙”^[13]、“忌氯”^[14]作物。以往有关生物质炭改良酸化茶园土壤的试验研究中, 较少讨论生物质炭制备原料的来源及种类对酸性改良效果的影响, 而不同原料制备的生物质炭对酸性茶园土壤的物理、化学和生物特性的影响可能存在差异性, 如畜禽粪肥、污泥等原料制备的生物质炭中钙、氯等元素高于植物源制备的生物质炭, 但植物源制备的生物质炭中碳含量较高。当土壤高钙、高氯时会引起茶树叶片发生黄化、脱落等现象, 降低其品质^[13-14]。因此, 在实际应用生物质炭改良酸性茶园土壤时, 需要控制生物质炭中钙、氯的含量, 避免影响茶叶的品质。因此, 本研究针对当前生物质炭在酸性土壤改良、固碳、有机质提升等方面具有的广泛应用前景, 拟进一步探讨低钙、低氯和高碳植物源生物质炭对茶园酸化

土壤的改良效果和茶叶品质的影响。

浙江省茶叶种植面积达 20.78 万 hm², 干毛茶总产量为 20.17 万 t, 茶叶出口量为 15.03 万 t, 分别位居全国第 8 位、第 7 位和首位^[1]。但省内茶园土壤 pH 平均值为 4.93, pH<4.5 和 pH 4.5 ~ 5.5 的茶园土壤点位数分别占 27.4% 和 58.6%, 全省茶园土壤酸化问题较为严峻^[3]。因此, 本研究选择在浙江省酸化茶园土壤上开展试验, 选取具有代表性且高碳含量的植物源生物质炭如水稻秸秆生物质炭、玉米秸秆生物质炭和竹炭, 研究了不同植物源生物质炭施用对酸化茶园土壤酸度和养分有效性的影响, 并探讨了其对茶叶产量和品质的影响, 以期为区域茶园酸化土壤改良与治理提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验茶园位于浙江省杭州市富阳区栗柴坞 (119°51'40"E, 30°04'53"N), 海拔 91.3 m, 属亚热带季风性气候, 年平均气温 16.27 °C, 平均湿度 68%, 年平均降水量 1 452.5 mm, 年平均日照时数 1 899.9 h, 年蒸发量 1 235.3 mm, 年无霜期 248 d, 常年主导风向为东南风。土壤类型为老成土, 由第四纪红壤发育而成。茶树品种为龙井 43, 种植于 1991 年。2023 年 10 月采集土壤测定其理化性质, 其中 pH 为 4.05 ± 0.06, 氯离子为 (2.68 ± 0.39) mmol/kg, 阳离子交换量、交换性氢、交换性铝、交换性钙和交换性镁含量 (cmol/kg) 分别为 20.20 ± 0.27、5.83 ± 0.29、10.21 ± 0.69、0.90 ± 0.07 和 0.15 ± 0.07, 有机质、全氮和水溶性盐含量 (g/kg) 分别为 69.60 ± 6.65、1.77 ± 0.04 和 0.70 ± 0.14, 速效钾、有效磷和水解性氮含量 (mg/kg) 分别为 269.00 ± 46.67、139.55 ± 8.70 和 396.00 ± 33.94。

1.2 生物质炭来源及性质

试验水稻秸秆生物质炭 (RS) 和玉米秸秆生物质炭 (CS) 购于南京勤丰秸秆科技有限公司, 竹炭 (BB) 购于浙江佶竹生物科技有限公司。3 种生物质原料制备生物质炭的热解炭化温度为 500 ~ 600 °C, 供试生物质炭基本理化性质和 X 射线荧光光谱 (XRF) 技术扫描的生物质炭矿物质组成如表 1 所示。

表 1 供试生物质炭基本理化性质
Table 1 Basic properties of biochars derived from rice straw, corn straw and bamboo

生物质炭	pH	C(%)	N(%)	H(%)	CaO(%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MgO(%)	K ₂ O(%)	SO ₃ (%)	P ₂ O ₅ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Cl(%)
RS	9.87 c	50.37 b	1.79 a	2.35 a	7.54 b	45.97 a	13.30 a	7.88 b	10.75 c	2.99 a	2.87 a	3.43 a	1.39 b
CS	10.25 a	51.81 b	0.88 b	1.82 b	8.02 a	46.24 a	10.24 b	8.75 a	15.22 b	2.13 c	2.41 b	2.46 b	1.53 b
BB	10.03 b	81.66 a	0.53 c	2.08 b	6.21 c	42.73 b	7.32 c	8.93 a	20.62 a	2.65 b	2.96 a	2.69 b	3.15 a

注: 同列不同小写字母表示同一指标在不同生物质炭之间差异显著 ($P<0.05$)。

1.3 试验设计

试验设置 4 个处理, 即不施生物质炭对照处理(CK)、施水稻秸秆生物质炭处理(RS)、施玉米秸秆生物质炭处理(CS)和施竹炭处理(BB), 每个处理 3 次重复, 随机区组分布。基于前期该茶园土壤添加不同比例生物质炭(按 0~20 cm 表层土壤质量的 0.5%、1%、2% 和 3% 添加)室内土壤培养试验对土壤 pH 的提升效果, 茶园田间试验中生物质炭的施用量设置为表层土壤总质量的 2%(即 45 t/hm²)。2023 年 12 月上旬一次性将不同植物源生物质炭撒施于茶树大行间表层土壤距离茶树根区 15~20 cm 处, 施用前先将两排茶树之间刨出深度约 20 cm 的沟槽, 然后将生物质炭均匀撒于沟槽内, 再将表土覆盖于生物质炭表面, 并再次进行人工翻耕使生物质炭与表层土壤混合均匀。茶园按当地常规管理, 每年春季和秋季施用尿素、重过磷酸钙和硫酸钾等化肥, 换算为 N、P₂O₅ 和 K₂O 的施用量分为 315、90 和 225 kg/hm²。

1.4 样品采集与处理

2024 年 3 月中旬按一芽两叶标准采集茶叶新梢及对应茶树间表层土壤样品, 同时测量各处理每排茶树长度和宽度, 按面积计算茶叶的鲜重。茶叶样品在实验室内经蒸馏水清洗、擦干后, 放入烘箱内在 105 °C 杀青 30 min 后于 60 °C 烘干至恒重, 然后采用德国莱驰 MM400 型球磨机研磨过 0.145 μm 尼龙筛备用。采集的土壤样品, 放置阴凉处自然风干, 剔除树枝、根系、碎石等杂物后, 采用玛瑙研钵研磨全部通过 2 mm 或 0.145 μm 尼龙筛后备用。

1.5 测定项目及方法

茶叶茶多酚采用福林酚比色法测定(GB/T 8313—2018)^[15]; 茶叶咖啡碱采用紫外分光光度法测定(GB 8312—2013)^[16]; 茶叶游离氨基酸采用茚三酮比色法测定(GB/T 8314—2013)^[17]; 茶叶水浸出物采用重量法测定(GB/T 8305—2013)^[18]。土壤 pH 采用 pH 酸度计进行测定(HJ 962—2018)^[19]; 土壤水溶性盐采用重量法测定(NY/T 1121.16—2006)^[20]; 土壤阳离子交换量采用盐酸标准溶液滴定法测定(NY/T 295—1995)^[21]; 土壤交换性氢和交换性铝采用氢氧化钠标准溶液滴定法测定(LY/T 1240—1999)^[22]; 土壤有机质采用硫酸亚铁标准溶液滴定法测定(NY/T 1121.6—2006)^[23]; 土壤水解性氮采用盐酸标准溶液滴定法测定(LY/T 1228—2015)^[24]; 土壤速效钾采用原子吸收分光光度计测定(NY/T 889—2004)^[25]; 土壤有效磷采用钼锑抗比色法测定(NY/T 1121.7—2014)^[26]; 土壤交换性钙和交换性镁采用原子吸收分光光度计测定

(NY/T 1121.13—2006)^[27]; 土壤氯离子采用硝酸银标准溶液滴定法测定(NY/T 1121.17—2006)^[28]。

另外, 称取一定质量研磨过 0.145 μm 筛的茶叶或土壤样品, 置于聚四氟乙烯容器中, 加入 4 mL 浓硝酸、2 mL 过氧化氢和 1 mL 氢氟酸, 置于 CEM Mars 6 微波消解仪中, 于 210 °C 下消煮 50 min, 然后置于赶酸板中于 140 °C 赶酸至液体近干, 过滤并移至 50 mL 容量瓶中用去离子水定容, 用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)和电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)分别测定待测试液中的矿质养分元素含量。

1.6 数据处理与分析

文中涉及的图表中的数据均采用平均值 ± 标准差表示。数据处理采用 Excel 2010, 图形处理采用 OriginPro 2021。采用 SPSS 27 进行单因素方差分析(One-way ANOVA), 显著性检验采用邓肯法(Duncan)进行, 以不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平下具有显著性差异。

2 结果与分析

2.1 施用生物质炭对茶园土壤基本理化指标的影响

在施用 3 种植物源生物质炭 4 个月后采集茶园土壤样品, 茶园土壤基本理化性质测定结果如表 2 所示。对照(CK)处理土壤 pH 平均值为 4.10, 属于极强酸化水平^[29]。与 CK 处理相比, 水稻秸秆生物质炭(RS)、玉米秸秆生物质炭(CS)和竹炭(BB)处理土壤 pH 平均值分别显著提升至 5.22、5.14 和 4.87, 即分别提升了 1.12、1.02 和 0.77 个单位, 但 3 种生物质炭处理之间差异不显著。

交换性酸度是土壤胶体表面上交换性氢和交换性铝被盐类溶液中盐基离子交换后所表现的酸度。CK 处理土壤交换性氢、交换性铝和交换性总酸度分别为 5.76、10.41 和 16.17 cmol/kg, 与 CK 处理相比, RS、CS 和 BB 处理分别使土壤交换性氢和交换性铝显著下降 38.54%、66.15%、41.49% 和 79.54%、66.19%、66.57%, 从而导致交换性酸度也显著下降。

土壤阳离子交换量是表征土壤胶体吸附能力和土壤肥力大小的重要指标。CK 处理土壤阳离子交换量为 20.71 cmol/kg, 相较 CK 处理, RS、CS 和 BB 处理显著提升了茶园土壤阳离子交换量, 增幅分别为 99.66%、96.62% 和 47.56%。与 CK 处理相比, RS 和 BB 处理对土壤水溶性盐含量有一定的降低效果, 但处理间差异不显著, 而 CS 处理显著增加了土壤水溶性盐含量, 增幅为 42.86%。

表 2 施用不同生物质炭对茶园土壤基本理化指标的影响
Table 2 Physicochemical properties of tea garden soils treated by different biochars

处理	pH	交换性氢(cmol/kg)	交换性铝(cmol/kg)	交换性酸度(cmol/kg)	阳离子交换量(cmol/kg)	水溶性盐(g/kg)
CK	4.10 ± 0.09 b	5.76 ± 0.23 a	10.41 ± 0.60 a	16.17 ± 0.37 a	20.71 ± 0.90 c	0.70 ± 0.10 b
RS	5.22 ± 0.31 a	3.54 ± 0.37 b	2.13 ± 0.21 c	5.66 ± 0.34 c	41.35 ± 0.65 a	0.67 ± 0.15 b
CS	5.14 ± 0.17 a	1.95 ± 0.11 c	3.52 ± 0.43 b	5.47 ± 0.34 c	40.72 ± 1.57 a	1.00 ± 0.10 a
BB	4.87 ± 0.23 a	3.37 ± 0.38 b	3.48 ± 0.29 b	6.85 ± 0.14 b	30.56 ± 0.98 b	0.57 ± 0.12 b

注：同列不同小写字母表示同一指标在不同处理之间差异显著($P<0.05$)，下同。

2.2 施用生物质炭对茶园土壤养分特征的影响

土壤有机质是土壤固相部分的重要组成部分，具有改善土壤结构，促进植物和微生物生长，提高土壤酸碱缓冲性能等作用。CK 处理土壤有机质含量为 68 g/kg，属于丰富水平^[29]；与 CK 处理相比，RS、CS 和 BB 处理显著提升了茶园土壤有机质含量，增幅分别达到 107.45%、76.35% 和 94.03%。土壤水解性氮是茶叶根系吸收的主要活性氮。与 CK 处理相比，RS、CS 和 BB 处理分别使茶园土壤水解性氮含量显著提升 72.02%、58.76% 和 77.55%。

CK 处理土壤速效钾和有效磷含量分别为 276.67 和 146.20 mg/kg，属于丰富水平^[29]；与 CK 处理相比，RS、CS 和 BB 处理显著增加了茶园土壤速效钾和有

效磷含量，增幅分别为 64.34%、57.83%、73.61% 和 14.78%、21.25%、12.63%。CK 处理土壤交换性钙和交换性镁含量分别为 0.90 和 0.17 cmol/kg，与 CK 处理相比，RS、CS 和 BB 处理显著增加了土壤交换性钙和交换性镁的含量，分别增加了 7.41 倍、8.41 倍、2.03 倍和 13.12 倍、10.94 倍、4.71 倍，且均以 CS 处理增幅最大。

氯是茶树的必需营养元素，但茶树又属于忌氯植物，若土壤中氯离子含量过量，将对茶树造成氯害。与 CK 处理相比，CS 和 BB 处理使土壤氯离子含量分别增加了 12.59% 和 14.07%，但差异不显著；而 RS 处理显著降低了土壤氯离子含量，降幅达到 18.15%。

表 3 施用不同生物质炭对茶园土壤养分特征的影响
Table 3 Nutrient characteristics of tea garden soils treated by different biochars

处理	有机质(g/kg)	水解性氮(mg/kg)	速效钾(mg/kg)	有效磷(mg/kg)	交换性钙(cmol/kg)	交换性镁(cmol/kg)	氯离子(cmol/kg)
CK	68.33 ± 5.19 c	392.00 ± 24.98 c	276.67 ± 35.57 b	146.20 ± 13.06 b	0.90 ± 0.02 d	0.17 ± 0.06 d	2.70 ± 0.28 a
RS	141.75 ± 9.50 a	674.33 ± 29.30 a	454.67 ± 27.30 a	167.81 ± 4.92 a	7.57 ± 0.65 b	2.40 ± 0.17 a	2.21 ± 0.12 b
CS	120.50 ± 3.04 b	622.33 ± 16.07 b	436.67 ± 15.28 a	177.27 ± 3.94 a	8.47 ± 0.65 a	2.03 ± 0.06 b	3.04 ± 0.17 a
BB	132.58 ± 2.02 a	696.00 ± 15.13 a	480.33 ± 30.35 a	164.67 ± 6.09 a	2.73 ± 0.21 c	0.97 ± 0.06 c	3.08 ± 0.17 a

2.3 施用生物质炭对茶叶中养分元素含量的影响

不同生物质炭处理茶叶中养分元素含量情况如表 4 所示。与 CK 处理相比，RS 处理对茶叶中养分元素钾、钙、镁、磷、硫、锰的含量均无显著影响，但显著降低了茶叶中铁的含量，降幅为 24.23%；CS

处理对茶叶中 7 种养分元素的含量均无显著影响；BB 处理对茶叶中钾、磷含量无显著影响，显著降低了茶叶中钙、硫、锰、铁的含量，降幅分别为 18.06%、7.00%、19.55% 和 15.52%，显著增加了茶叶中镁的含量，增幅为 14.61%。

表 4 施用不同生物质炭对茶叶养分元素含量的影响(g/kg)
Table 4 Nutrient concentrations of tea leaves under different biochar treatments

处理	钾	钙	镁	磷	硫	锰	铁
CK	15.01 ± 0.21 a	3.10 ± 0.04 ab	0.89 ± 0.02 b	3.78 ± 0.27 a	2.43 ± 0.13 a	1.79 ± 0.24 a	128.84 ± 6.42 a
RS	15.02 ± 0.12 a	3.20 ± 0.23 a	0.86 ± 0.04 b	3.57 ± 0.28 a	2.39 ± 0.02 ab	1.72 ± 0.12 ab	97.62 ± 4.49 b
CS	14.94 ± 0.33 a	2.85 ± 0.05 b	0.96 ± 0.10 ab	3.68 ± 0.08 a	2.36 ± 0.04 ab	1.63 ± 0.14 ab	132.84 ± 11.37 a
BB	15.06 ± 0.22 a	2.54 ± 0.16 c	1.02 ± 0.06 a	3.82 ± 0.27 a	2.26 ± 0.09 b	1.44 ± 0.04 b	108.03 ± 10.27 b

2.4 施用生物质炭对茶叶鲜重和品质的影响

不同生物质炭处理单位面积一芽两叶新鲜茶叶鲜重和品质特征如表 5 所示。与 CK 处理相比，RS、CS 和 BB 处理分别使单位面积茶叶鲜重增加了 31.33%、

92.07% 和 27.08%；RS、CS 处理使茶多酚含量分别下降了 4.42% 和 3.58%，而 BB 处理使茶多酚含量提升了 2.94%；RS、CS 处理使水浸出物含量分别提升了 0.32% 和 6.66%，而 BB 处理使水浸出物含量下降了 5.21%；

RS、CS 和 BB 处理分别使咖啡碱和游离氨基酸含量提升了 2.22%、0.89%、0.89% 和 6.87%、7.97%、8.79%。

但总体上,不同生物质炭处理对茶叶单位面积鲜重和品质的影响均未达到显著水平。

表 5 施用不同生物质炭对茶叶鲜重和品质特性的影响
Table 5 Yields and biochemical components of tea leaves under different biochar treatments

处理	产量(g/m ²)	茶多酚(%)	咖啡碱(%)	游离氨基酸(%)	水浸出物(%)
CK	5.17 ± 1.12 a	9.51 ± 0.22 a	2.25 ± 0.16 a	3.64 ± 0.36 a	31.68 ± 2.14 a
RS	6.79 ± 2.91 a	9.09 ± 0.43 a	2.30 ± 0.25 a	3.89 ± 0.48 a	31.78 ± 2.56 a
CS	9.93 ± 3.61 a	9.17 ± 0.11 a	2.27 ± 0.07 a	3.93 ± 0.39 a	33.79 ± 1.90 a
BB	6.57 ± 2.75 a	9.79 ± 0.72 a	2.27 ± 0.11 a	3.96 ± 0.13 a	30.03 ± 0.72 a

3 讨论

3.1 生物质炭对酸化茶园土壤改良效果

茶树是一种喜酸植物,其最佳生长土壤 pH 范围为 4.5 ~ 5.5,而我国约有 52% 的茶园土壤 pH 低于 4.5,已经处于严重酸化程度^[4]。茶园土壤酸化成因包括:①过量施用氮肥导致铵的硝化作用产生致酸氢离子^[30];②茶树多年宿根连作根系分泌有机酸和质子释放^[31];③茶叶采摘致使盐基离子大量移出或茶树老叶脱落腐解后加速酸化土壤盐基离子淋失^[32]。生物质炭作为一种碱性材料,在中和土壤酸性、改善土壤物理化学性质、提高土壤肥力、减少养分淋失和固碳减排等方面具有很好的应用前景^[6-7]。

本研究针对种植 30 多年茶树的强酸性茶园土壤,选用 3 种植物源制备的强碱性生物质炭进行改良,显著提升了土壤的 pH,抑制了土壤的酸化。这是由于生物质炭中富含钙、镁、钾等矿质元素,呈碱性,将其施入到酸化茶园土壤中,能抑制铵的硝化作用,增强土壤对酸的缓冲性,提升土壤 pH,从而起到抑制茶园土壤酸化的作用^[8-9]。

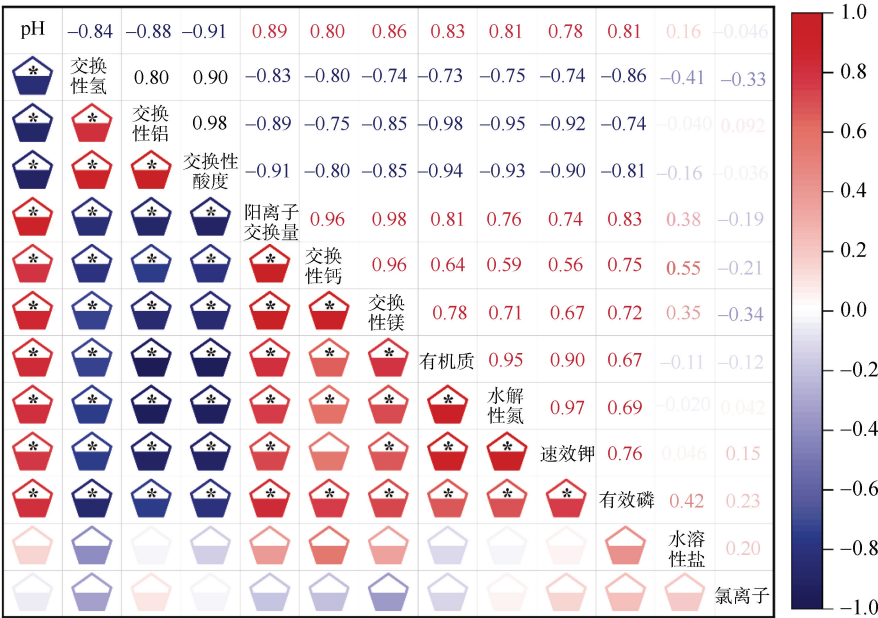
本研究中,施用生物质炭后,茶园土壤 pH 与土壤交换性氢、交换性铝和交换性酸度呈显著负相关关系(图 1, $P<0.05$),生物质炭对土壤酸度起到直接中和作用,有利于降低土壤交换性氢和交换性铝的含量,这与其他学者的研究结果相一致^[33]。这是由于当土壤呈强酸性时,土壤中的氢离子会与硅酸盐矿质晶格间的铝反应生成羟基铝化合物而释放出铝离子;当土壤 pH 升高后,土壤中的铝离子发生水解反应,使铝离子转化成铝的水合物和氢氧化物及无机吸附态铝^[34]。土壤中交换性氢和交换性铝是制约茶树生长的重要因子,施用生物质炭可以通过调控植物对铝离子的生理响应,缓解茶树受到铝毒的影响^[35]。与此同时,施用生物质炭后,茶园土壤 pH 也与土壤阳离子交换量、交换性钙、交换性镁、有机质、水解

性氮、速效钾和有效磷呈显著正相关关系($P<0.05$),但与水溶性盐和氯离子相关性不显著,这可能是因为生物质炭富含的钙、镁、钾等碱基阳离子释放对土壤酸度具有中和作用,同时也补充了土壤因酸化和茶叶采摘所带走的盐基离子,显著增强了土壤的酸缓冲能力^[36]。Shi 等^[37-38]研究表明,植物源生物质炭如花生秸秆制备生物质炭中碱性阴离子如碳酸根、有机酸根在中和质子的同时所释放的钾、钠、钙、镁等碱基阳离子,是增强土壤酸缓冲能力的关键机制。其他不同植物源生物质制备的生物质炭改良酸性土壤的研究也同样发现,生物质炭中的碱基阳离子和有机阴离子均可以消耗外源质子,从而减缓土壤酸化^[39]。

本研究发现,生物质炭中的高碳、氮含量可在其施用后显著提升土壤有机质和水解性氮的含量。晁代顺等^[10]研究发现,高施用量生物质炭影响了土壤腐殖物质组分,可增加土壤胡敏素碳含量,使其在土壤中较稳定不易被分解,从而显著增加土壤有机质的含量。Dai 等^[40]研究也发现,将不同种类生物质炭添加至酸性土壤后,可显著增加土壤总碳、可溶性有机碳和水溶性氮等含量,且酸性土壤 pH 提升幅度与生物质炭自身 pH、生物质炭施用量呈现显著正相关关系。土壤有机质是重要的土壤肥力指标,有机质在增强土壤保水保肥能力、促进团聚体形成、提高土壤稳定性等方面具有重要的作用^[41]。由于生物质炭本身具有丰富的矿质养分,施用生物质炭可增加土壤中钙、镁、钾、磷的总量和可交换态含量^[42];土壤中可交换态养分含量的增加,是因为生物质炭中和土壤氢离子时会释放等量的阳离子。因此,生物炭通过增加土壤养分和土壤的持水能力,从而提升土壤肥力^[38]。氯是茶树的必需元素,但茶树又属于忌氯植物,如果土壤中氯离子含量过量,会对茶树叶绿素、抗氧化酶活性等造成负面的“氯害作用”^[14]。本研究施用的 3 种生物质炭对茶园土壤水溶性盐和氯离子含量的影响存在一定的差

异性，但未对茶园茶树生长产生负面影响。

综上所述,试验所施用的植物源生物质炭对茶园土壤 pH 提升和土壤肥力改良方面具有良好的促进作用，其中水稻秸秆生物质炭在提升土壤 pH、阳离子交换量、有机质、有效磷和交换性镁等方面效果优于玉米秸秆生物质炭和竹炭。



(*表示相关性在 $P<0.05$ 水平显著)

图 1 土壤理化指标和养分之间的 Pearson 相关性

Fig. 1 Pearson correlations between soil physicochemical properties and nutrient contents

3.2 生物质炭对茶叶养分含量和品质影响效果

茶叶品质与养分元素有着密切联系。茶树是“嫌钙作物”，对钙的需求量较少，但钙能中和茶树体内的有机酸，不过高钙含量会降低茶叶的品质^[13]。镁能改善茶树中硝酸盐的吸收和代谢,促进茶树木质部和韧皮部中氨基酸和糖的长距离运输^[32]。磷参与茶树中光合作用和碳代谢,影响各种酶促反应和能量传递,参与茶树体内蛋白质、糖类和单宁等物质的合成和转化^[43]。硫是蛋氨酸、胱氨酸等多种氨基酸的组成元素，参与维生素和叶绿素的合成^[44]。锰参与茶树体内多种蛋白质、酶、叶绿素以及生长素的合成和运输,茶树锰含量过量或不足均会影响茶树的生长发育和茶叶品质^[45]。铁、锰和钾是茶树体内各种酶的激活剂，参与茶树光合作用和呼吸作用等生理过程，从而影响茶叶产量和品质^[32]。本研究中，施用水稻和玉米秸秆生物质炭对茶叶中钾、钙、镁、磷、硫、锰等养分元素的含量无显著影响,但施用水稻秸秆生物质炭降低了茶叶中铁的含量；而施用竹炭对茶叶中钾、磷含量无显著影响,但显著增加茶叶中镁的含量，显著降低了茶叶中钙、硫、锰、铁的含量。万青等^[46]研究发现，配方肥和生物质炭复施用可显著增加茶叶中磷、钾、钙和镁的含量。相关研究表明，施用生物质炭显著增加了茶叶中磷、钾、镁养分的含量，这

主要是因为生物质炭对土壤养分有吸持和缓释作用，减少了矿质元素的淋失，提升了土壤养分有效性，从而增加了茶叶中养分元素的吸收和积累量^[9]。陈玉真等^[47]研究发现，茶叶中铁锰的含量与土壤中有效铁锰含量呈显著正相关，而土壤有效铁锰含量与土壤 pH 呈显著负相关。因此，酸化茶园土壤施用生物质炭显著提升土壤 pH 的同时可能会降低土壤有效铁锰的含量，从而减少茶叶对铁锰的吸收。

茶多酚、咖啡碱、游离氨基酸和水浸出物等是茶叶品质的主要成分，共同影响着茶汤的香气和滋味。茶多酚具有涩味和苦味，是茶叶品质的主要成分，其含量高低决定着茶叶品质的优良程度。咖啡碱是茶叶中含量最高的生物碱，具有苦味，但与茶多酚和氨基酸等形成的络合物却是一种鲜爽物质。游离氨基酸具有鲜甜味，对绿茶滋味、香气和色泽的形成具有重要作用。水浸出物是茶叶中水溶性生化成分混合物的总和，其含量反映茶汤内含成分的多少。本研究结果发现，施用生物质炭可增加茶叶产量，但与对照相比，差异性不显著；施用 3 种植物源生物质炭在短期内对茶叶品质成分茶多酚、咖啡碱、游离氨基酸和水浸出物等无显著影响，但与对照相比，略微提升咖啡碱和游离氨基酸含量。李小飞等^[48]研究发现，不同生物黑炭的施用量对茶叶中茶多酚、咖啡碱和水浸出物的

含量无显著影响,但会显著增加茶叶中氨基酸含量。罗凡等^[49]研究发现,随着茶叶中氮、磷、钾等养分元素累积量的增加,茶树合成的茶多酚、氨基酸、水浸出物、咖啡碱总量也随之增加,使茶汤鲜爽,香气高涨,品质显著提升。近期研究结果还发现,土壤中氮肥的增加可使茶叶中氨基酸含量得到明显的提升($P<0.05$)^[9,50]。此外,由于生物质炭具有较高的比表面积和孔隙率,能够有效吸附养分和固持水分,减少土壤养分的淋溶和固定损失,并延长矿质养分的释放时间,增加茶树对养分的吸收,进而影响次生代谢产物的产生,促进氨基酸的形成^[51]。茶树具有聚锰的性质,但高锰含量会降低茶叶品质^[12]。本研究中,茶叶养分和品质成分相关性分析发现,茶叶中锰含量与品质成分游离氨基酸含量呈显著负相关关系($P<0.05$),其他各养分元素含量与品质成分含量之间均无显著相关性。总体而言,短期内 3 种植物源生物质炭施用对茶叶养分元素吸收、茶叶产量和品质的影响差异不显著,需要加强研究施用生物质炭对茶叶产量和品质的长期影响及机制。

4 结论

本研究初步揭示了施用 3 种植物源生物质炭对酸性茶园土壤基本理化特性、有效养分活性、茶叶养分吸收以及茶叶品质的影响。与对照处理相比,施用水稻秸秆生物质炭、玉米秸秆生物质炭、竹炭可显著提高土壤 pH 和有效养分含量,显著降低土壤交换性氢、交换性铝含量和交换性酸度,但对茶叶产量和品质无显著影响。就生物质炭种类而言,水稻秸秆生物质炭在提升酸性茶园土壤 pH、降低土壤交换性氢和交换性铝含量,以及提升土壤矿质养分元素活性等方面优于玉米秸秆生物质炭和竹炭。总体上,不同生物质炭对茶叶矿质养分元素吸收和累积的影响存在差异性,未来需要进一步开展施用生物质炭对茶园土壤改良和茶叶品质影响的长期监测与评估,以为生物质炭在酸化土壤改良和茶叶品质提升等方面应用提供科学依据。

参考文献:

- [1] 梅宇,梁晓. 2023 年我国茶叶产销及进出口形势分析[J]. 中国茶叶, 2024, 46(4): 18–26.
- [2] 项舒延,詹丽钊,周卿伟,等. 不同植茶年份土壤性质差异研究[J]. 浙江农业科学, 2024, 65(6): 1364–1369.
- [3] 颜鹏,韩文炎,李鑫,等. 中国茶园土壤酸化现状与分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53(4): 795–813.
- [4] 陈晓婷,王裕华,林立文,等. 土壤酸度对茶叶产量及品质成分含量的影响[J]. 热带作物学报, 2021, 42(1): 260–266.
- [5] 李荣林,黄继超,黄欣卫,等. 生物炭对茶园土壤酸性和土壤元素有效性的调节作用[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(12): 345–347.
- [6] 谢祖彬,刘琦,许燕萍,等. 生物炭研究进展及其研究方向[J]. 土壤, 2011, 43(6): 857–861.
- [7] 明润廷,万方,那立苹,等. 改良剂施用下的土壤降酸培肥效果—基于中国酸性土壤改良研究的 Meta 分析[J]. 土壤学报, 2025, 63(2): 400–410.
- [8] 凌彩金,周巧仪,魏岚,等. 施用不同调理剂对酸化茶园土壤化学性质及茶叶品质的影响[J]. 土壤与作物, 2024, 13(1): 85–97.
- [9] 李昌娟,杨文浩,周碧青,等. 生物炭基肥对酸化茶园土壤养分及茶叶产质量的影响[J]. 土壤通报, 2021, 52(2): 387–397.
- [10] 晁代顺,曹欢,李建武. 不同生物炭添加量对茶园土壤呼吸及腐殖质组分的影响[J]. 农业与技术, 2024, 44(13): 15–18.
- [11] 陈哲,靳鹏辉,胡天龙,等. 长期连续施用生物质炭对土壤肥力、小麦产量和微生物群落结构的影响[J]. 土壤, 2023, 55(6): 1230–1236.
- [12] 张四海,邓先俊,赵承森,等. 竹炭基生物炭对茶叶品质和土壤微生物群落结构的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(7): 1485–1495.
- [13] 吴洵. 茶树的钙镁营养及土壤调控[J]. 茶叶科学, 1994, 14(2): 115–121.
- [14] 李春雷. 氯胁迫对幼龄茶树叶绿素含量及抗氧化系统的影响[J]. 河南农业科学, 2014, 43(9): 56–59, 65.
- [15] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法: GB/T 8313–2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 茶 咖啡碱测定: GB/T 8312–2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 茶 游离氨基酸总量的测定: GB/T 8314–2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 茶 水浸出物测定: GB/T 8305–2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [19] 中华人民共和国生态环境部. 土壤 pH 值的测定 电位法: HJ 962–2018[S]. 北京: 中国环境出版社, 2018.
- [20] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第 16 部分: 土壤水溶性盐总量的测定: NY/T 1121.16–2006[S]. 北京: 中国林业出版社, 2006.
- [21] 中华人民共和国农业部. 中性土壤阳离子交换量和交换性盐基的测定: NY/T 295–1995[S]. 北京: 中国林业出版社, 1995.
- [22] 中华人民共和国国家林业局. 森林土壤交换性酸度的测定: LY/T 1240–1999[S]. 北京: 中国林业出版社, 1999.
- [23] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第 6 部分: 土壤有机质的测定: NY/T 1121.6–2006[S]. 北京: 中国林业出版社, 2006.
- [24] 中华人民共和国国家林业局. 森林土壤氮的测定: LY/T 1228–2015[S]. 北京: 中国林业出版社, 2015.

- [25] 中华人民共和国农业部. 土壤速效钾和缓效钾含量的测定: NY/T 889-2004[S]. 北京: 中国农业出版社, 2004.
- [26] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第7部分: 土壤有效磷的测定: NY/T 1121.7-2014[S]. 北京: 中国林业出版社, 2014.
- [27] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第13部分: 土壤交换性钙和镁的测定: NY/T 1121.13-2006[S]. 北京: 中国林业出版社, 2006.
- [28] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第17部分: 土壤氯离子含量的测定: NY/T 1121.17-2006[S]. 北京: 中国林业出版社, 2006.
- [29] 傅海平, 张亚莲, 常硕其, 等. 茶园土壤肥力质量的综合评价[J]. 江西农业学报, 2011, 23(3): 78-81.
- [30] 万青, 徐仁扣, 黎星辉. 氮素形态对茶树根系释放质子的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 720-725.
- [31] 樊战辉, 唐小军, 郑丹, 等. 茶园土壤酸化成因及改良措施研究和展望[J]. 茶叶科学, 2020, 40(1): 15-25.
- [32] 田芦明, 刘小琴, 叶志平, 等. 茶树对土壤酸碱度及营养元素的响应研究进展[J]. 南方农业, 2024, 18(9): 22-26.
- [33] 江福英, 吴志丹, 张磊, 等. 不同施肥模式对茶园土壤酸度和茶叶产量的影响[J]. 茶叶学报, 2023, 64(5): 36-42.
- [34] 张艳萍, 宗良纲, 史艳芳. 茶园土壤 pH 变化对土壤中铝特性的影响[J]. 土壤, 2019, 51(4): 746-751.
- [35] 来宏伟, 倪妮, 时仁勇, 等. 生物质炭和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 缓解土壤酸化过程中植物铝毒性的模拟对比研究[J]. 土壤学报, 2023, 60(4): 1017-1025.
- [36] 王义祥, 黄家庆, 叶菁, 等. 生物炭对酸化茶园土壤性状和真菌群落结构的影响[J]. 茶叶科学, 2021, 41(3): 419-429.
- [37] Shi R Y, Hong Z N, Li J Y, et al. Mechanisms for increasing the pH buffering capacity of an acidic Ultisol by crop residue-derived biochars[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(37): 8111-8119.
- [38] Shi R Y, Hong Z N, Li J Y, et al. Peanut straw biochar increases the resistance of two Ultisols derived from different parent materials to acidification: A mechanism study[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 210: 171-179.
- [39] Pan X Y, Xu R K, Nkoh J N, et al. Effects of straw decayed products of four crops on the amelioration of soil acidity and maize growth in two acidic Ultisols[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(5): 5092-5100.
- [40] Dai Z M, Meng J, Muhammad N, et al. The potential feasibility for soil improvement, based on the properties of biochars pyrolyzed from different feedstocks[J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13(6): 989-1000.
- [41] 郭龙, 李陈, 刘佩诗, 等. 牛粪有机肥替代化肥对茶叶产量、品质及茶园土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 264-269.
- [42] Masud M M, Baquy M A, Akhter S, et al. Liming effects of poultry litter derived biochar on soil acidity amelioration and maize growth[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 202: 110865.
- [43] 张皓钰, 刘竞, 易军, 等. 生物质炭短期添加对不同类型土壤水力性质的影响[J]. 土壤, 2022, 54(2): 396-405.
- [44] 潘建义, 洪苏婷, 张友炯, 等. 茶树体内硫的分布特征及施硫对茶叶产量和品质影响研究[J]. 茶叶科学, 2016, 36(6): 575-586.
- [45] 颜明娟, 陈贤玉, 曹榕彬, 等. 福建典型白茶产区茶园土壤锰锌形态特征及其影响因素[J]. 生态环境学报, 2022, 31(5): 885-895.
- [46] 万青, 胡振明, 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.
- [47] 陈玉真, 单睿阳, 王峰, 等. 闽中茶园土壤和茶叶铁锰含量及影响因素研究[J]. 福建农业学报, 2018, 33(9): 986-993.
- [48] 李小飞, 叶川, 雷礼文, 等. 生物黑炭对酸化茶园土壤酸度和茶叶品质及产量的影响[J]. 蚕桑茶叶通讯, 2018(2): 1-6.
- [49] 罗凡, 张厅, 龚雪蛟, 等. 不同施肥方式对茶树新梢氮磷钾含量及光合生理的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3499-3506.
- [50] Tang S, Zhou J J, Pan W K, et al. Effects of combined application of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers on tea (*Camellia sinensis*) growth and fungal community[J]. Applied Soil Ecology, 2023, 181: 104661.
- [51] Saha A, Basak B B, Gajbhiye N A, et al. Sustainable fertilization through co-application of biochar and chemical fertilizers improves yield, quality of *Andrographis paniculata* and soil health[J]. Industrial Crops and Products, 2019, 140: 111607.