

引用格式: 张素娥, 邹文华, 雷春松, 等. 生物质炭基肥对茶园土壤肥力和茶叶产量与品质的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(3): 486–494. ZHANG Su'e, ZOU Wenhua, LEI Chunsong, *et al.* Impact of biochar-based fertilizers on soil fertility in tea plantations and their effects on tea yield and quality[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(3): 486–494.

生物质炭基肥对茶园土壤肥力和茶叶产量与品质的影响

张素娥¹, 邹文华², 雷春松¹, 罗小平¹, 赖丽芬³, 雷 晶⁴, 邬建红⁵, 姜培坤⁵

(1. 遂昌县土肥植保能源站, 浙江 遂昌 323300; 2. 遂昌县三仁畲族乡农业农村服务中心, 浙江 遂昌 323300;
3. 遂昌县农村经济改革发展中心, 浙江 遂昌 323300; 4. 遂昌县农民异地转移服务中心, 浙江 遂昌 323300;
5. 浙江农林大学 环境与资源学院/碳中和学院, 浙江 杭州 311300)

摘要: 【目的】明确生物质炭基肥应用于茶园对土壤养分及茶叶产量和品质的影响有助于提高茶园的生产效益, 促进农业生产方式向低碳、循环利用方向的转变。【方法】以茶园为研究对象, 基于 2 a 田间试验研究不施肥 (ck)、施用化肥 (CF)、施用生物质炭基肥 (BF) 和生物质炭基肥与化肥 1:1 配施 (CBF) 等 4 种处理对土壤养分和茶树 *Camellia sinensis* 生长的影响。【结果】①与 ck 相比, CF、BF 和 CBF 处理均显著提高了土壤 pH, 总氮、碱解氮、有效磷和速效钾质量分数 ($P<0.05$), 并显著提升了茶树对氮、磷、钾养分的吸收 ($P<0.05$), 且 CBF 处理的效果优于 CF 和 BF 处理。②相比 CF 处理, BF 和 CBF 处理的茶叶产量分别提高了 23.13%~24.54% 和 53.27%~53.75%, 且各施肥处理之间的两两差异均达到显著水平 ($P<0.05$)。施肥类型对茶叶水浸出物、咖啡碱、茶多酚、游离氨基酸质量分数的影响显著 ($P<0.05$), 表现为 CBF>BF>CF>ck, 而不同处理间酚氨比则呈相反的变化。③色关联分析表明: 土壤 pH、碱解氮和有效磷是影响茶叶产量的关键因素, 而茶叶品质受土壤 pH, 茶叶钾和氮质量分数影响更大。【结论】生物质炭基肥与化肥配施可改善茶园土壤养分状况、增加茶叶产量和提升茶叶品质, 是推动农业绿色可持续发展的一种有效措施。图 2 表 3 参 37

关键词: 生物质炭基肥; 茶园; 土壤肥力; 养分吸收; 茶叶产量; 茶叶品质

中图分类号: S157.3 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)03-0486-09

Impact of biochar-based fertilizers on soil fertility in tea plantations and their effects on tea yield and quality

ZHANG Su'e¹, ZOU Wenhua², LEI Chunsong¹, LUO Xiaoping¹, LAI Lifen³, LEI Jing⁴,
WU Jianhong⁵, JIANG Peikun⁵

(1. Soil Fertilizer Plant Protection Energy Station, Suichang 323300, Zhejiang, China; 2. Agricultural and Rural Services Center of Sanren Country for She Ethnic, Suichang 323300, Zhejiang, China; 3. Center for Rural Economic Reform and Development, Suichang 323300, Zhejiang, China; 4. Center for the Translocation Services of Farmers, Suichang 323300, Zhejiang, China; 5. College of Environment and Resources/College of Carbon Neutrality, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] To clarifying the impacts of biochar-based fertilizers on soil nutrients, tea yield and quality in tea gardens is conducive to enhancing the production efficiency of tea gardens and promoting the transition of agricultural production towards low-carbon, recycling-oriented practices. [Method] Focusing on tea gardens, this study conducted two years field experiments with four treatments: no fertilization (ck), chemical fertilizer application (CF), biochar-based fertilizer application (BF), and a 1:1 combination of biochar-based fertilizer and chemical fertilizer (CBF). The study investigated the effects of these treatments on soil

收稿日期: 2024-08-08; 修回日期: 2025-01-22

基金项目: 浙江省“三农九方”科技协作计划项目 (2023SNJF040)

作者简介: 张素娥 (ORCID: 0009-0004-9967-9275), 高级农艺师, 从事土壤肥力提升、秸秆利用等研究。E-mail: 249226477@qq.com。通信作者: 邹文华 (ORCID: 0009-0003-5846-3446), 高级畜牧师, 从事畜牧养殖、农作物秸秆处理等研究。E-mail: 1051365002@qq.com

nutrients and tea plant growth. [Result] (1) Compared with ck, CF, BF, and CBF treatments significantly increased soil pH, total nitrogen, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, and readily available potassium contents, and significantly increased the absorption of nitrogen, phosphorus and potassium by tea plants ($P < 0.05$), with CBF treatment showing better effects than CF and BF treatments. (2) Compared to CF treatment, the tea yield in BF and CBF treatments increased by 23.13%–24.54% and 53.27%–53.75%, respectively, and the pairwise differences among different fertilization treatments reached a significant level ($P < 0.05$). The type of fertilization significantly affects the contents of water extract, caffeine, tea polyphenols and free amino acids in tea leaves ($P < 0.05$), with the trend being CBF > BF > CF > ck, while the polyphenol/amino acids showed opposite changes. (3) Grey relational analysis showed that soil pH, alkali-hydrolyzable nitrogen, and available phosphorus are key factors influencing tea yield, while soil pH and the concentrations of potassium and nitrogen in tea leaves have a greater impact on tea quality. [Conclusion] The application of biochar-based fertilizers combined with chemical fertilizers can improve soil nutrient conditions in tea gardens, increase tea yield, and enhance tea quality. This method is as an effective measure to promote green and sustainable agricultural development. [Ch, 2 fig. 3 tab. 37 ref.]

Key words: biochar-based fertilizer; tea garden; soil fertility; nutrient absorption; tea yield; tea quality

茶树 *Camellia sinensis* 是中国南方地区广泛种植的重要经济作物之一。随着茶叶受欢迎程度的增加和茶叶市场需求的扩大,在耕地面积有限条件下,加大了化肥投入以提高单位土地茶叶的产量^[1]。长期过量施用化肥导致了茶园土壤酸化、养分淋失及有机质加速分解等一系列问题,降低了土壤对茶树生长所需养分的供给能力,从而使茶叶产量和品质下降,但这又促使茶农进一步增加化肥使用量,如此反复,进入恶性循环^[2-3]。因此,优化施肥策略、改善茶园土壤肥力状况,以提高茶叶的产量和品质势在必行。

已有研究表明:增施有机肥、添加改良剂等措施可以改良土壤结构和提高土壤养分,能解决单施化肥带来的不利影响^[4-5]。生物质炭通常是由秸秆、种壳等农林废弃物在无氧或低氧条件下经过高温热解而制成的固体炭质物质^[6]。由于具有丰富的孔隙结构及较大的比表面积,生物质炭能够有效改良土壤,因此被广泛关注^[7-8]。然而,生物质炭本身所含矿质养分较少且质地轻,单独使用无法充分满足作物生长的养分需求,同时在运输和施用过程中还易产生扬尘等环境污染问题^[9]。为了克服生物质炭的缺点并保留其优点,将生物质炭作为肥料载体与一些肥料混合后制成了生物质炭基肥。目前该肥料已经在果蔬等农业领域广泛应用^[10-11],然而生物质炭基肥对茶园土壤性质改良和茶叶增产提质的效果仍不清晰,因此未得到普遍推广。本研究选择茶树专用生物质炭基肥,以茶园为研究对象,采用田间试验的方法,探讨生物质炭基肥替代化肥对茶园土壤养分及茶叶产量和品质的影响,评估生物质炭基肥对茶园土壤改良和茶叶增产提质的效果,并探讨它对茶叶增产提质的作用机制,以期为生物质炭基肥的推广应用提供数据支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于浙江省丽水市遂昌县项村茶园(28°34'12"N, 119°12'06"E),海拔为 275.7 m。该地属于亚热带季风气候,年平均气温为 19.1 °C,年平均降水量达 1 559.0 mm,全年可以分为干季和湿季,降水集中在 3—9 月(湿季),多年平均日照时数为 1 755.0 h,平均霜期为 114.5 d。所选试验茶园的茶树属于白化茶树品种,树龄 10 a。整个茶园肥力分布较为均匀,产茶量低。试验开始前,采集试验田 0~20 cm 的茶园土,该地土壤理化性质为 pH 4.60,有机质 24.49 g·kg⁻¹,全氮 1.67 g·kg⁻¹,碱解氮 90.12 mg·kg⁻¹,有效磷 52.45 mg·kg⁻¹,速效钾 100.02 mg·kg⁻¹。

1.2 材料与方法

为减少单一年份可能存在异常情况对结果的影响,在 2022—2023 年进行了为期 2 a 的茶园试验。共设置 4 个处理组:不施肥(ck)、化肥(CF)、生物质炭基肥(BF)以及生物质炭基肥与化肥按氮磷钾施用

量 1:1 混施 (CBF)。对于 CF、BF 和 CBF 处理, 所施肥料中含有的氮、磷、钾养分元素等量。每个施肥小区纯氮 (N) 的施用量为 $360\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 纯磷 (P_2O_5) 的施用量为 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 纯钾 (K_2O) 的施用量为 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。不同处理之间的施肥、施肥时间以及施肥处理的营养施用量如表 1 所示。每个处理 3 个重复, 共 12 个试验小区, 每个小区面积为 50 m^2 。各个试验小区间的保护垄用塑料膜进行包裹并踩实, 以避免小区间串水串肥。每年施肥时间为春季追肥 (3 月) 和秋季追肥 (10 月底) 2 次, 分别占 60% 和 40%。施肥方式均为沟施, 土壤深度控制在 10~20 cm。病虫杂草的控制等其他田间管理措施, 均遵循当地农业管理习惯。

表 1 各处理年施肥设计各营养成分施用量

Table 1 Annual fertilization design and nutrient element contents of each treatment

处理	肥料及施肥量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)				施用量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)		
	尿素	钙镁磷肥	硫酸钾	茶园专用 生物质炭基肥	N	P_2O	K_2O
ck	0	0	0	0	0	0	0
CF	770.88	2 125.00	490.38	0	360	255	255
BF	0	0	0	4 500.00	360	255	255
CBF	385.44	1 062.50	245.19	2 250.00	360	255	255

说明: CF 和 BF 60% 用作春季追肥, 40% 用作秋季追肥; CBF 化肥和茶园专用生物肥分别取 60% 用作春季追肥, 40% 用作秋季追肥。尿素中 N 质量分数为 6.7%, 钙镁磷肥中 P_2O_5 质量分数为 12.0%, 硫酸钾中 K_2O 质量分数为 5.0%, 茶园专用生物质炭基肥的 N: P_2O_5 : K_2O 质量比为 8:5:5。茶园专用生物质炭基肥由浙江省中科同奥农业科技 (嘉兴) 有限公司提供, 以水稻秸秆为原料在厌氧、高温 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下热解生成生物质炭, 再将猪粪、牛粪、羊粪等畜禽粪便与秸秆混合经 30 d 发酵腐熟制成有机肥, 最后按照 17% 尿素、40% 过磷酸钙、10% 硫酸钾、15% 生物质炭及 18% 有机肥的原料配比 (质量分数) 混匀造粒制成。经测定, 茶园专用生物质炭基肥碳质量分数为 11.8%, pH 为 8.2。

1.3 样品采集

所采集的样品分为土壤样品和茶叶样品。土壤样品在每年秋肥施用前采集。采样时需要避开沟渠、道路等区域, 清除地表凋落物后采集 0~20 cm 土层土样, 每个小区取 8 个样品 (“S” 形取样法取样) 混合均匀, 剔除杂物后取 1 kg 左右带回实验室通风处自然晾干, 然后研磨过筛备用。茶叶样品是在春茶采摘期按照 1 芽 2 叶的采摘标准在各小区采集鲜叶。将采摘的鲜叶带回实验室后立即放置于 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中杀青 30 min 后, 降至 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温烘干至恒量, 研磨过筛后保存。

1.4 项目测定及方法

1.4.1 土壤化学指标测定 土壤相关化学指标的测定主要参照《土壤农化分析》^[12] 进行, 其中 pH 采用电位法测定 (土水体积比为 1.0:2.5); 总有机质 (OM) 采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定; 全氮 (TN) 采用浓硫酸-高氯酸消煮, 用凯氏定氮法测定; 碱解氮 (AN) 采用碱解扩散法测定; 有效磷 (AP) 采用 NH_4F 浸提-钼锑抗比色法测定; 速效钾 (AK) 采用 NH_4OAc 浸提-火焰光度计法测定。

1.4.2 茶叶产量及品质测定 茶叶产量测定参照李昌娟等^[9] 的方法。于每年春茶采摘期 (3—4 月), 在每个小区随机设置 3 个点, 分别使用测产框 ($1\text{ m}\times 1\text{ m}$) 采摘框中所有茶芽 (1 芽 2 叶为标准), 并称量记录。间隔半月等新芽抽出再次采摘茶芽。春茶采摘期每个小区各批次采摘的茶叶质量相加即为相应处理的茶青产量, 并折算成单位面积产量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。将茶叶经过 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮, 使用凯氏定氮仪法测定茶叶全氮, 钼锑抗比色法测定茶叶全磷, 火焰光度计法测定茶叶全钾。

游离氨基酸作为茶树的初级代谢产物, 在茶水的鲜味形成中起着重要作用; 咖啡碱和茶多酚是茶树的次生代谢产物, 茶叶所含咖啡碱是茶水中苦味的来源, 可与游离氨基酸、茶多酚等形成鲜爽络合物; 酚氨比则是茶叶适制性的重要指标之一^[5, 13], 因此选取茶叶中的水浸出物、游离氨基酸、咖啡碱、茶多酚、酚氨比作为衡量茶叶品质的指标。茶叶中水浸出物采用沸水浸提重量法 (GB/T 8305—2013) 测定; 咖啡碱采用碱式乙酸铅紫外分光光度法 (GB/T 8312—2013) 测定; 茶多酚采用福林酚分光光度法 (GB/T 8313—2018) 测定; 游离氨基酸的测定采用茚三酮分光光度法 (GB/T 8314—2013) 测定。酚氨比为茶多酚与游离氨基酸的比值, 其比值越低, 表明绿茶品质越高。茶叶品质指数由各单项品质指标乘以相应的权重得到, 各单项品质指标的权重基于主成分分析法确定^[9]。水浸出物的权重为 0.22, 游离氨基酸权重为 0.20, 咖啡碱的权重为 0.25, 茶多酚的权重为 0.11, 酚氨比的权重为 0.22。这些权重值体现了各品质

指标在茶叶综合品质评价中的相对重要性。

1.5 数据处理与分析

使用 SPSS 26.0 对数据进行单因素 ANOVA 方差分析时, 采用 LSD 多重比较法检验不同处理之间差异的显著性。使用 Excel 绘制图形。使用 SPSSAU 进行灰色关联度分析, 以确定各潜在影响因子对茶叶产量和品质的影响程度。

2 结果与分析

2.1 施肥类型对茶园土壤化学性质的影响

从表 2 可知: 相比 ck, 2022—2023 年 CF 处理的土壤 pH 降低, 但未达显著差异; 而 BF 和 CBF 处理显著提升了土壤 pH ($P<0.05$), 且 CBF 处理的提升效果显著优于 BF 处理。这表明施用生物质炭基肥可以改良土壤酸碱度, 且与单施生物质炭基肥相比, 生物质炭基肥与化肥配施对缓解土壤酸化的效果更好。研究期内, 茶园 CBF 处理的土壤有机质质量分数显著高于 ck ($P<0.05$), 表明生物质炭基肥与化肥配施相比不施肥有利于提升土壤碳储量。不同施肥处理对茶园土壤中全氮、碱解氮、有效磷、速效钾质量分数变化的影响趋势相似, 均表现为 $CBF>BF>CF>ck$, 且 CBF 和 BF 处理土壤中氮磷钾质量分数均显著高于 CF 处理 ($P<0.05$), 表明施用生物质炭基肥能有效增加土壤中氮磷钾养分质量分数。

表 2 不同施肥处理下茶园土壤养分质量分数变化

Table 2 Variations in soil nutrient contents in tea gardens under different fertilization treatments							
年份	处理	pH	有机质/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	有效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)
2022	ck	4.42±0.27 c	23.85±1.92 b	1.45±0.1 c	86.55±5.14 d	44.45±1.48 d	99.33±4.73 d
	CF	4.37±0.18 c	26.14±1.54 b	1.75±0.09 b	122.12±0.22 c	64.16±1.92 c	128.33±3.79 c
	BF	4.89±0.16 b	27.28±1.03 ab	2.03±0.13 ab	132.39±4.54 b	78.22±1.77 b	148.67±0.58 b
	CBF	5.15±0.31 a	29.66±1.33 a	2.23±0.12 a	142.17±5.48 a	86.51±1.70 a	174.67±3.79 a
2023	ck	4.35±0.26 c	21.18±2.12 b	1.13±0.11 d	75.12±5.20 d	39.64±1.83 d	93.67±3.21 d
	CF	4.28±0.18 c	27.27±1.05 a	1.82±0.11 c	123.16±0.51 c	65.67±4.50 c	131.00±7.00 c
	BF	4.85±0.32 b	27.94±1.28 a	2.12±0.15 b	138.37±4.71 b	78.78±2.85 b	155.33±0.58 b
	CBF	5.23±0.21 a	29.65±1.66 a	2.42±0.09 a	152.54±5.93 a	87.82±1.68 a	179.67±4.73 a

说明: 同列不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著($P<0.05$)。

2.2 施肥类型对茶树氮磷钾吸收的影响

从图 1 可知: 单施化肥、生物质炭基肥以及生物质炭基肥和化肥配施均不同程度地促进了茶树对氮、磷、钾养分的吸收。相比 ck, 3 种施肥处理的茶叶氮、磷、钾质量分数分别增加了 10.67%~54.82%, 33.27%~71.10% 和 12.86%~25.60%。施肥类型影响茶叶氮、磷、钾质量分数的累积, 不同施肥处理茶叶中平均氮、磷、钾质量分数均表现为: $CBF>BF>CF$, 且它们之间的差异达到显著水平 ($P<0.05$)。与 CF 处理相比, BF 和 CBF 处理茶叶氮质量分数分别增加 11.75%~13.88% 和 26.98%~28.13%; 磷质量分数分别增加 4.52%~10.45% 和 17.95%~21.78%; 钾质量分数分别增加 4.12%~5.04% 和 7.03%~7.44%。由此可知, 单施生物质炭基肥及生物质炭基肥与化肥配施均能促进茶树对氮、磷、钾养分的吸收, 其中以生物质炭基肥与化肥配施效果最佳。

2.3 施肥类型对茶叶产量和品质的影响

从表 3 可知: 不同施肥处理对茶叶产量影响较大。相较于 ck 处理, 施肥均能显著提高茶叶产量 ($P<0.05$)。不同施肥类型之间茶叶产量存在显著差异 ($P<0.05$), 其中 CBF 处理对茶叶的增产效果最好。与 CF 处理相比, BF 和 CBF 处理的茶叶产量分别提高了 23.13%~24.54% 和 53.27%~53.75%。施肥类型也对茶叶品质具有显著影响。与 CF 处理相比, CBF 处理的茶叶水浸出物、咖啡碱、茶多酚和游离氨基酸质量分数均得到显著提高, 提高率分别为 17.69%~19.04%、16.19%~16.35%、9.55%~11.64% 和 15.33%~16.65%; 而酚氨比则显著降低 ($P<0.05$)。BF 处理相比 CF 处理对茶叶水浸出物、咖啡碱、茶多酚和氨基酸的提高率分别为 6.42%~7.62%、5.94%~10.20%、4.03%~6.25% 和 8.48%~10.40%, 其提升效果

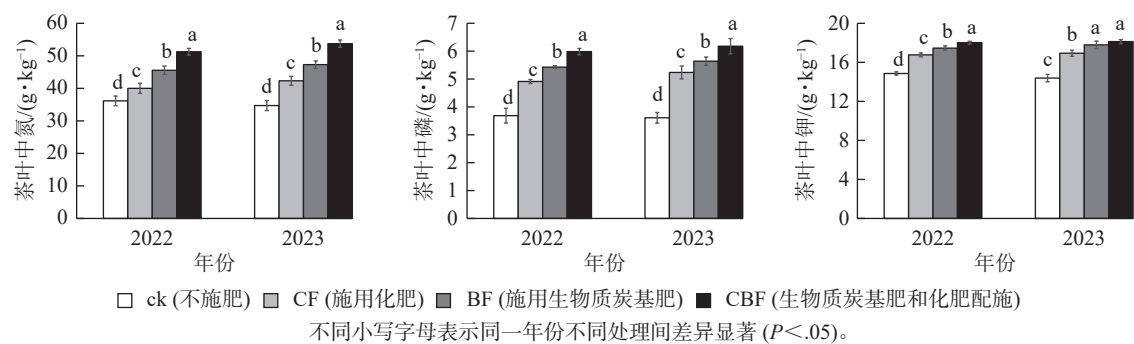


图 1 不同施肥处理对茶叶内氮、磷、钾质量分数的影响

Figure 1 Influence of different fertilization treatments on the nitrogen, phosphorus, and potassium concentrations of tea leaves

小于 CBF 处理。研究期内 CBF 处理的酚氨比显著低于 BF 处理 ($P<0.05$)。不同施肥处理茶叶综合品质指数大小表现为 $CBF>BF>CF>ck$ ，其中 CBF 处理的茶叶品质综合指数显著高于 BF、CF 和 ck 处理 ($P<0.05$)，2023 年 BF 和 CF 处理间无显著差异。综合而言，与不施肥处理相比，施用化肥、生物质炭基肥及生物质炭基肥和化肥配施均能显著提高该茶园茶叶各品质成分质量分数，但茶叶的综合品质提升效果以 CBF 处理更为明显。

表 3 不同施肥处理下茶叶产量和品质差异分析

Table 3 Analysis of yield and quality differences in tea under different fertilization treatments

年份	处理	茶叶产量/ (kg·hm ⁻²)	水浸出物质 量分数/%	咖啡碱质量 分数/%	茶多酚质 量分数/%	游离氨基酸质 量分数/%	酚氨比	综合指数
2022	ck	593.85 ± 17.92 d	40.63 ± 1.41 c	2.69 ± 0.17 d	26.34 ± 1.12 c	3.81 ± 0.06 d	6.92 ± 0.25 a	14.48 ± 0.29 c
	CF	882.77 ± 40.71 c	43.02 ± 0.23 c	3.01 ± 0.24 b	27.94 ± 0.28 b	4.09 ± 0.07 c	6.84 ± 0.11 a	14.97 ± 0.08 c
	BF	1 099.44 ± 40.64 b	46.30 ± 1.39 b	3.31 ± 0.16 ab	29.07 ± 0.41 b	4.43 ± 0.05 b	6.56 ± 0.14 a	15.69 ± 0.33 b
	CBF	1 357.27 ± 46.17 a	51.21 ± 1.79 a	3.49 ± 0.20 a	30.61 ± 0.82 a	4.71 ± 0.05 a	6.5 ± 0.23 b	16.70 ± 0.54 a
2023	ck	571.69 ± 22.13 d	39.17 ± 1.39 d	2.65 ± 0.09 c	26.39 ± 0.92 b	3.81 ± 0.12 d	6.92 ± 0.23 a	14.25 ± 0.38 c
	CF	891.10 ± 11.03 c	44.26 ± 1.86 c	3.14 ± 0.12 b	27.31 ± 0.85 b	4.10 ± 0.02 c	6.66 ± 0.17 b	15.30 ± 0.4b b
	BF	1 103.17 ± 26.57 b	47.10 ± 0.29 b	3.33 ± 0.11 b	29.02 ± 0.84 a	4.53 ± 0.03 b	6.41 ± 0.24 c	15.80 ± 0.17 b
	CBF	1 369.84 ± 29.68 a	52.10 ± 1.80 a	3.65 ± 0.21 a	30.49 ± 0.54 a	4.79 ± 0.06 a	5.82 ± 0.28 d	16.88 ± 0.48 a

说明：同列不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著($P<0.05$)。

2.4 茶叶产量和品质的主要影响因素

分别以茶叶产量和品质作为“参考值”，以潜在影响因素作为“子序列”进行灰色关联度分析，结果如图 2 所示。从图 2 可知：茶叶产量与土壤 pH、碱解氮和有效磷的关联程度最高，关联系数均大于

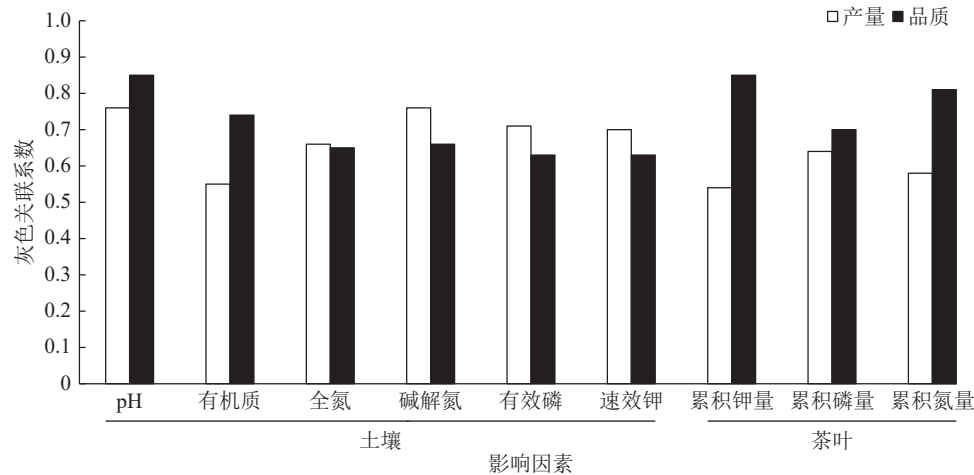


图 2 茶叶产量和品质与潜在影响因素的灰色关联分析

Figure 2 Grey relational analysis of tea yield and quality with potential influencing factors

0.70。其次为土壤速效钾、全氮和茶叶磷质量分数，与产量的关联系数为 0.64~0.70，而土壤有机质及茶叶氮、茶叶钾质量分数与产量的相关性较低，关联系数为 0.54~0.58。土壤 pH、茶叶钾、茶叶氮质量分数对茶叶品质影响最大，灰色关联系数大于 0.81；其次为土壤有机质和茶叶磷质量分数，灰色关联系数为 0.70~0.74。由此可知，影响茶叶产量和品质的关键因素不同，供试茶园土壤 pH、碱解氮和有效磷是影响茶叶产量关键因素，而茶叶品质与土壤 pH、茶叶钾和氮质量分数的关系更紧密。

3 讨论

3.1 生物质炭基肥施用对茶园土壤化学性质的影响

茶树适宜生长于 pH 为 4.5~6.0 的土壤中。化肥长期施用和茶树根系分泌物会导致茶园土壤 pH 下降，严重阻碍茶树的生长，进而导致茶叶的产量和品质下降^[14]。因此，改善茶园土壤的酸碱度对于实现茶园可持续发展至关重要。本研究通过在老龄酸化茶园施用生物质炭基肥 2 a 后发现，研究期内茶园土壤的 pH 持续提高，有效缓解了长期施用化肥带来的土壤酸化问题。一般而言，生物质炭富含碱性盐基物质和具有丰富的负电荷表面，将其作为原材料之一制成的生物质炭基肥呈碱性 (pH 8.2)，将其施入土壤后既能中和土壤中已存在和茶树根系释放的 H^+ ，也可以增加土壤交换性盐基，提高土壤酸缓冲能力，从而提升土壤 pH^[15-16]。

土壤有机质是衡量土壤肥力的重要标志之一。本研究中 BF 和 CBF 处理比 ck 显著提高了茶园土壤有机质质量分数。这是因为生物质炭基肥中含有大量有机碳，作为外源有机碳输入到土壤中可以增加土壤有机质质量分数^[17]；另外，肥料中的生物质炭可与土壤中的矿物质发生络合、阳离子桥联等相互作用形成有机无机复合物，从而提高土壤有机质质量分数^[18-19]。

已有研究表明：施用生物质炭基肥能够显著增加土壤中碱解氮、有效磷和有效钾等养分^[20-21]。本研究结果显示：BF 相较于 ck 在提升土壤氮素效果上有显著优势。这一优势源于施入生物质炭基肥后的双重效应：一方面，土壤中的 NO_3^- -N 能被吸附在生物质炭的阴离子交换位点上，有效降低了 NO_3^- -N 在反硝化过程中向大气的挥发损失，并降低了土壤中 NO_3^- -N 的淋失率^[22]；另一方面，南方高温多雨，化肥施入土壤后， NH_4^+ 易通过硝化作用转换为 NO_3^- -N 淋失^[9]，而生物质炭基肥由于富含羟基和酚羟基等官能团，能够通过静电吸附作用将 NH_4^+ 吸附在土壤中^[23]；还可以抑制土壤中硝化细菌的活性，减缓硝化过程，从而降低氮素损失的发生^[24-25]。相比 CF，BF 处理显著增加了 15.85%~18.57% 速效钾和 19.96%~21.92% 有效磷，这一现象部分归因于生物质炭基肥施入土壤后显著提高了土壤 pH，减少了土壤对磷的固定作用^[26]；另外，本研究所用高温热解水稻秸秆生物质炭具有疏松多孔、比表面积大的特点，生物质炭基肥保留了生物质炭的多孔特性，为土壤钾和磷溶解细菌等微生物提供了良好的生存环境，增加了它们的活性，进而增加土壤中有效磷和速效钾质量分数^[27-28]。

3.2 生物质炭基肥施用对茶叶的增产提质效果

已有多项研究表明：施用生物质炭基肥有助于提高作物产量^[29]。茶树作为多年生作物，在生长过程中需要及时补充养分，因此施肥对于提高茶叶产量至关重要，增产效果受到施肥类型的影响。本研究表明确明：与单施化肥相比，单施生物质炭基肥增加了 23.13%~24.54% 的茶叶产量，这是因为遂昌雨水较多，施入茶园的化肥容易随地表径流流失造成施肥后期养分供应不足，而生物质炭基肥由生物质炭和化肥等混制而成，其中，化肥能够快速满足施肥初期茶树对养分的需求，生物质炭因表面具有丰富的官能团能增加阳离子吸附位点，能够提高对土壤中氮、磷、钾等养分的吸附作用，减少其淋失^[30-31]，并且延长矿质营养元素的释放时间，满足茶树生长期的养分需求^[32]，提高肥料的利用率^[33-34]。本研究结果显示：生物质炭基肥与化肥配施相较于单施生物质炭基肥或化肥，能显著提高茶叶产量，这可能归因于两者的协同作用。两者协同作用可以充分发挥各自的优点，改善土壤 pH，增加土壤有效养分，促进茶树生长，最终提高茶叶产量。

产量是茶树种植的基础，品质则是经济效益的保障，提高茶叶品质有利于增加茶园的经济产值。合理施肥能够增加茶叶中营养物质的积累，是提高茶叶品质的重要途径。茶园土壤有效养分供给影响茶树初级和次生代谢产物的积累^[9]，从而影响茶叶品质。茶叶中水浸出物、咖啡碱和茶多酚等是衡量茶叶品

质的重要指标, 这些物质与茶汤的鲜香味密切相关^[35]。本研究结果表明: 不同处理的茶叶水浸出物、咖啡碱和游离氨基酸质量分数表现为 CBF>BF>CF>ck。茶叶水浸出物和茶多酚与土壤磷、钾质量分数密切相关, 而游离氨基酸和咖啡碱因属于含氮有机物, 其质量分数高低则取决于茶叶中氮的累积量^[9, 36]。本研究结果显示: 生物质炭基肥与化肥配施可以显著提高茶园土壤中速效养分的质量分数, 促进茶树的生长和茶叶中矿质养分的积累。这主要是因为生物质炭基肥中的生物质炭和有机肥对养分的吸持和缓释作用, 调节茶园土壤有效养分的供给, 与化肥配施既能保证养分的供应强度, 又能满足施肥后期茶叶养分的吸收和积累^[37]。灰色关联分析结果表明: 供试茶园茶叶产量主要受土壤 pH 以及碱解氮、速效磷质量分数的影响, 茶叶品质则主要与土壤 pH 和茶叶中氮和钾质量分数的相关, 这些因子的变化将显著影响茶叶产量和品质。综合结果揭示了生物质炭基肥与化肥 1:1 配施的协同作用在提升茶园土壤养分和促进茶叶产量和品质的效果优于单施生物质炭基肥或化肥。因此, 未来在低 pH、高降雨的亚热带茶园中, 可进一步推广和应用化肥与生物质炭基肥配施模式。

4 结论

本研究探讨了生物质炭基肥对茶园土壤化学性质以及对茶叶产量和品质的影响。研究表明: 生物质炭基肥与化肥 1:1 配施处理相较于单施化肥或生物质炭基肥, 显著提升了茶园土壤 pH, 增加了土壤有机质和速效养分质量分数, 并增强了茶树对氮磷钾养分的吸收利用能力, 进而显著提高了茶园茶叶的产量和品质。生物质炭基肥和化肥配施对土壤 pH、碱解氮、速效磷及茶叶内钾和氮量等因子的影响是提升茶叶产量和品质的主要驱动因素。鉴于生物质炭基肥和化肥协同作用对土壤改良和茶叶增产提质方面效果最佳, 因此推广生物质炭基肥和化肥配施对茶园的可持续经营及提高生产效率有积极的促进作用。

5 参考文献

- [1] 阮建云, 季凌飞, 申瑞寒, 等. 茶树栽培研究“十三五”进展及“十四五”发展方向[J]. *中国茶叶*, 2021, **43**(9): 58–65.
RUAN Jianyun, JI Lingfei, SHEN Ruihan, *et al.* Tea cultivation research during the 13th Five-Year Plan period and development direction in the 14th Five-Year Plan period[J]. *China Tea*, 2021, **43**(9): 58–65.
- [2] YANG Xiangde, NI Kang, SHI Yuanzhi, *et al.* Effects of long-term nitrogen application on soil acidification and solution chemistry of a tea plantation in China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, **252**: 74–82.
- [3] 赵锦, 付静, 刘宁宁, 等. 茶树施肥研究进展[J]. *中国土壤与肥料*, 2023(3): 226–235.
ZHAO Jin, FU Jing, LIU Ningning, *et al.* Research status and prospects of fertilization in tea plants[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(3): 226–235.
- [4] WANG Chongqing, LUO Dan, ZHANG Xue, *et al.* Biochar-based slow-release of fertilizers for sustainable agriculture: a mini review[J/OL]. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2022, **10**: 100167[2024-08-01]. DOI: [10.1016/j.ese.2022.100167](https://doi.org/10.1016/j.ese.2022.100167).
- [5] 疏再发, 吉庆勇, 邵静娜, 等. 茶园有机肥替代化肥对土壤养分和茶叶产量与品质的影响[J]. *园艺学报*, 2023, **50**(10): 2207–2219.
SHU Zaifa, JI Qingyong, SHAO Jingna, *et al.* Effects of organic fertilizer replacement on soil nutrients in tea garden and yield-quality of tea plant[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2023, **50**(10): 2207–2219.
- [6] QI Yuqi, LIU Haolang, WANG Jihong, *et al.* Effects of different straw biochar combined with microbial inoculants on soil environment in pot experiment[J/OL]. *Scientific Reports*, 2021, **11**: 14685[2024-08-01]. DOI: [10.1038/s41598-021-94209-1](https://doi.org/10.1038/s41598-021-94209-1).
- [7] LÜ Guifen, YANG Tao, CHEN Yuanhua, *et al.* Biochar-based fertilizer enhanced Cd immobilization and soil quality in soil-rice system[J/OL]. *Ecological Engineering*, 2021, **171**: 106396[2024-08-01]. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2021.106396](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106396).
- [8] 杜倩, 黄容, 李冰, 等. 生物炭还田对植烟土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. *核农学报*, 2021, **35**(6): 1440–1450.
DU Qian, HUANG Rong, LI Bing, *et al.* Effect of biochar returning on labile organic carbon and enzyme activity in tobacco-growing soil[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, **35**(6): 1440–1450.
- [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.
LI Changjuan, YANG Wenhao, ZHOU Biqing, *et al.* Effects of biochar based fertilizer on soil nutrients, tea output and

- quality in an acidified tea field[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, **52**(2): 387–397.
- [10] MELO L C A, LEHMANN J, Da SILVA CARNEIRO J S, *et al.* Biochar-based fertilizer effects on crop productivity: a meta-analysis[J]. *Plant and Soil*, 2022, **472**(1): 45–58.
- [11] 吴强建, 胡梦蝶, 侯松峰, 等. 减氮配施生物炭基肥对蜜柚土壤理化性质及酶活性的影响[J]. 河南农业大学学报, 2022, **56**(5): 732–741.
- WU Qiangjian, HU Mengdie, HOU Songfeng, *et al.* Effect of nitrogen reduction with carbon-based fertilizer on the physicochemical properties and enzyme activity of pomelo soil[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2022, **56**(5): 732–741.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO Shidan. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [13] YE Jianghua, WANG Yuhua, WANG Yuchao, *et al.* Improvement of soil acidification in tea plantations by long-term use of organic fertilizers and its effect on tea yield and quality[J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, **13**: 1055900[2024-08-01]. DOI: [10.3389/fpls.2022.1055900](https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1055900).
- [14] YAN Peng, WU Liangquan, WANG Donghui, *et al.* Soil acidification in Chinese tea plantations[J/OL]. *Science of the Total Environment*, 2020, **715**: 136963[2024-08-01]. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.136963](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136963).
- [15] 闫家普, 丁效东, 崔良, 等. 不同改良剂及其组合对土壤镉形态和理化性质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(9): 1842–1849.
- YAN Jiapu, DING Xiaodong, CUI Liang, *et al.* Effects of several modifiers and their combined application on cadmium forms and physicochemical properties of soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(9): 1842–1849.
- [16] 李艳春, 陈志鹏, 王义祥, 等. 不同类型生物质材料改良茶园土壤酸度的效果评价[J]. 福建农业学报, 2018, **33**(11): 1190–1194.
- LI Yanchun, CHEN Zhipeng, WANG Yixiang, *et al.* Effect of biomass on amelioration of acidic soils at tea plantations[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2018, **33**(11): 1190–1194.
- [17] 史登林, 王小利, 段建军, 等. 氮肥减量配施生物炭对黄壤稻田土壤有机碳活性组分和矿化的影响[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(12): 4117–4124.
- SHI Denglin, WANG Xiaoli, DUAN Jianjun, *et al.* Effects of chemical N fertilizer reduction combined with biochar application on soil organic carbon active components and mineralization in paddy fields of yellow soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(12): 4117–4124.
- [18] 高梦雨, 江彤, 韩晓日, 等. 施用炭基肥及生物炭对棕壤有机碳组分的影响[J]. 中国农业科学, 2018, **51**(11): 2126–2135.
- GAO Mengyu, JIANG Tong, HAN Xiaori, *et al.* Effects of applying biochar-based fertilizer and biochar on organic carbon fractions and contents of brown soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, **51**(11): 2126–2135.
- [19] 陈全, 陈丽芳, 吴丹萍, 等. 土壤矿物质增强生物炭稳定性的机制综述[J]. 农业环境科学学报, 2023, **42**(3): 490–499.
- CHEN Quan, CHEN Lifang, WU Danping, *et al.* Mechanisms of soil minerals enhance biochar stability: a review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, **42**(3): 490–499.
- [20] 胡苗苗, 朱新萍, 李典鹏, 等. 生物炭基肥和木醋液对干旱区土壤养分及棉花产量的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2018, **41**(5): 369–375.
- HU Miaomiao, ZHU Xinping, LI Dianpeng, *et al.* Effects of biocharcoal-based base fertilizer and wood vinegar on soil nutrients and cotton yield in arid area[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2018, **41**(5): 369–375.
- [21] 吴强建, 谢志坚, 谢凯柳, 等. 井冈蜜柚果园土壤和叶片养分状况及果实品质研究[J]. 中国土壤与肥料, 2022(11): 133–139.
- WU Qiangjian, XIE Zhijian, XIE Kailiu, *et al.* Study on soil and leaf nutrient status and fruit quality of Jinggang pomelo orchards[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(11): 133–139.
- [22] 时正伦, 郭雅倩, 周之栋, 等. 生物炭基肥与平茬措施对喀斯特土壤养分含量及刺槐幼苗热能的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2019, **28**(2): 71–78.
- SHI Zhenglun, GUO Yaqian, ZHOU Zhidong, *et al.* Effects of biochar based fertilizer and stumping measure on karst soil nutrient content and heat energy of *Robinia pseudoacacia* seedlings[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2019, **28**(2): 71–78.
- [23] MANDAL S, THANGARAJAN R, BOLAN N S, *et al.* Biochar-induced concomitant decrease in ammonia volatilization and increase in nitrogen use efficiency by wheat[J]. *Chemosphere*, 2016, **142**: 120–127.

- [24] ZHANG Qianqian, SONG Yanfeng, WU Zhen, *et al.* Effects of six-year biochar amendment on soil aggregation, crop growth, and nitrogen and phosphorus use efficiencies in a rice-wheat rotation [J/OL]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **242**: 118435 [2024-08-01]. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118435.
- [25] 刘钰莹, 张妍, 汪哲远, 等. 硝化抑制剂与生物炭配施对水稻土氮素转化及氮肥利用率的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2021, **47**(2): 223–232.
- LIU Yuying, ZHANG Yan, WANG Zheyuan, *et al.* Effects of combined application of nitrification inhibitors and biochars on nitrogen transformation and nitrogen use efficiency in paddy soil[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2021, **47**(2): 223–232.
- [26] CHU Qingnan, XUE Lihong, SINGH B P, *et al.* Sewage sludge-derived hydrochar that inhibits ammonia volatilization, improves soil nitrogen retention and rice nitrogen utilization[J/OL]. *Chemosphere*, 2020, **245**: 125558 [2025-08-01]. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.125558.
- [27] 王雪玉, 刘金泉, 胡云, 等. 生物炭对黄瓜根际土壤细菌丰度、速效养分含量及酶活性的影响[J]. 核农学报, 2018, **32**(2): 370–376.
- WANG Xueyu, LIU Jinquan, HU Yun, *et al.* Effect of biochar on microorganism, nutrient content and enzyme activity of cucumber rhizosphere soil[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, **32**(2): 370–376.
- [28] 郑慧芬, 曾玉荣, 王成己, 等. 生物炭对红壤茶园溶磷细菌数量和土壤有效磷含量的影响[J]. 中国农学通报, 2018, **34**(18): 114–118.
- ZHENG Huifen, ZENG Yurong, WANG Chengji, *et al.* Effects of biochar on phosphate solubilizing bacteria number and soil available P content in red soil tea plantation[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, **34**(18): 114–118.
- [29] 喻成龙, 汤建, 郑琴, 等. 紫云英翻压条件下生物炭基肥配施量对水稻 Cd 迁移累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, **39**(11): 2554–2560.
- YU Chenglong, TANG Jian, ZHENG Qin, *et al.* Effects of biochar-based fertilizers on the migration and accumulation of Cd in rice under incorporation of *Astragalus sinicus* [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(11): 2554–2560.
- [30] OLADELE S O, ADEYEMO A J, AWODUN M A. Influence of rice husk biochar and inorganic fertilizer on soil nutrients availability and rain-fed rice yield in two contrasting soils[J]. *Geoderma*, 2019, **336**: 1–11.
- [31] 史登林, 王小利, 刘安凯, 等. 生物炭氮替代部分化肥氮对黄壤水稻的生物效应[J]. 中国土壤与肥料, 2021(2): 199–205.
- SHI Denglin, WANG Xiaoli, LIU Ankai, *et al.* Biological effect of biochar nitrogen replacing partial fertilizer nitrogen on rice in yellow soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(2): 199–205.
- [32] LIU Wenbin, TANG Yanxin, MA Jiawei, *et al.* Effects of biochar and inorganic amendments on soil fertility, tea yield, and quality in both Pb-Cd-contaminated and acidified tea plantations[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2023, **23**(9): 3275–3284.
- [33] KAMAU S, KARANJA N K, AYUKE F O, *et al.* Short-term influence of biochar and fertilizer-biochar blends on soil nutrients, fauna and maize growth[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2019, **55**(7): 661–673.
- [34] 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/OL]. *Industrial Crops and Products*, 2019, **140**: 111607 [2024-08-01]. DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.111607.
- [35] 孔晓君, 尚晓阳, 李玉胜, 等. 有机肥与控释复合肥配施对茶叶产量、品质和土壤化学性质的影响[J]. 土壤通报, 2021, **52**(6): 1377–1383.
- KONG Xiaojun, SHANG Xiaoyang, LI Yusheng, *et al.* Effects of combined application of organic fertilizer and controlled-release compound fertilizer on yield and quality of tea, and soil chemistry properties[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, **52**(6): 1377–1383.
- [36] 杨浩瑜, 刘惠见, 张乃明, 等. 化肥减施处理对茶园土壤养分及茶叶品质的影响[J]. 南方农业学报, 2020, **51**(4): 887–896.
- YANG Haoyu, LIU Huijian, ZHANG Naiming, *et al.* Effects of different fertilization application reduction methods on tea garden soil nutrient and tea quality[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2020, **51**(4): 887–896.
- [37] GUO Hao, CHEN Linyi, WANG Yixiang, *et al.* Combined application of biochar and magnesium fertilizer effectively improved the soil environment and the tea quality in southern strongly acidic tea garden[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2023, **23**(7): 2798–2815.