

茶树修剪物及其生物炭施用对茶树生长的影响

刘悦萱^{1,2},王海兵¹,胡强²,董雅洁³,于泉¹,颜鹏²,李鑫²,陈延玲^{1*}

1. 青岛农业大学资源与环境学院, 山东 青岛 266109

2. 中国农业科学院茶叶研究所, 农业部茶叶质量安全控制重点实验室, 浙江 杭州 310008

3. 普洱学院茶叶咖啡学院, 云南 普洱 665000

摘要: 茶树修剪枝叶年生物量可达 8-9 t·hm⁻², 对茶园生态系统物质循环具有重要影响。但是茶树修剪枝叶及其不同利用方式对茶树生长的影响其调控机制方面研究尚缺乏。本研究通过盆栽实验, 研究茶树修剪物直接还田和加工为生物炭施用两种方式对茶树生长的影响, 并从土壤理化性状方面分析其调控机制。试验设置三个处理: T1: 对照处理, T2: 施用茶树修剪物, T3: 施用生物炭。结果表明, 施用茶树修剪物及其生物炭处理显著促进了茶树生长。具体来讲, T2、T3 处理下茶叶生物量、茎生物量和总生物量均显著高于对照处理, 增幅分别达到 18.5%-21.2%、15.9%-17.8% 和 18.1%-18.3%。此外, 生物炭处理显著促进了茶树根系生长。与对照处理相比, 生物炭处理下茶树总根长、根密度和根尖数分别提高 41.3%、41.3% 和 73.4%。茶树修剪物及生物炭处理显著改善了土壤理化指标, 包括土壤 pH、无机氮、速效磷和速效钾等分别提高 7.8%-13.8%、25.2%-176.1%、15.4%-84.1% 和 486.3%-1500.6%。同时, 与对照处理相比, 茶树修剪物及其生物炭处理均显著降低了交换性氢、交换性铝和土壤交换性酸的含量, 降低幅度分别为 6.5%-46.3%、11.0%-27.8% 和 7.6%-48.0%。此外, 冗余分析表明影响茶树形态特征的主要因素为土壤含水率和速效磷 ($P < 0.05$)。因此, 茶树修剪物及其生物炭施用有利于改善土壤养分状况, 促进茶树生长。

关键词: 茶树修剪物; 生物炭; 茶树生长; 土壤养分; 土壤酸度

中图分类号: S571.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2025)06-0956-11

Effects of Tea Plant Pruning Materials and Their Biochar Application on Tea Plant Growth

LIU Yue-xuan^{1,2}, WANG Hai-bing¹, HU Qiang², DONG Ya-jie³, YU Quan¹,
YAN Peng², LI Xin², CHEN Yan-ling^{1*}

1. College of Resource and Environmental Sciences/Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109/China

2. Key Laboratory of Tea Quality and Safety Control/Ministry of Agriculture, Tea Research Institute/Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310008/China

3. Pu'er University/College of Tea and Coffee College, Pu'er 665000/China

Abstract: The annual biomass of pruned branches and leaves of tea reaches 8-9 t·hm⁻², which significantly influences the material cycle of tea garden ecosystems. However, research remains limited regarding the effects of pruned tea branches and leaves and their different utilization methods on tea growth, as well as their regulatory mechanisms. This study investigates the effects of two application methods on tea tree growth through pot experiments—directly returning tea pruning materials to soil versus applying them after processing into biochar, and analyzes the regulation mechanism based on soil physical and chemical properties. This study sets three treatments: T1 (control treatment), T2 (application of tea pruning materials), T3 (application of biochar). The results show that the treatments with tea pruning materials and their biochar significantly promote tea growth. Specifically, under the T2 and T3 treatments, the leaf biomass, stem biomass their biochar significantly promote tea growth. Specifically, under the T2 and T3 treatments, the leaf biomass, stem biomass and total biomass of tea plants are significantly higher than those in the control treatment, with the increase rates reaching 18.5%-21.2%, 15.9%-17.8% and 18.1%-18.3%, respectively. In addition, the biochar treatment significantly promotes the root growth of tea plants. Compared with the control treatment, the total root length, root density and root tip number of tea plants treated with biochar increase by 41.3%, 41.3% and 73.4% respectively. Both the tea pruning materials treatment and the biochar treatment significantly improve soil physical and chemical indexes, with soil pH, inorganic nitrogen, available phosphorus

收稿日期: 2025-01-03

修回日期: 2025-11-13

基金项目: “浙江省‘尖兵’‘领雁’研发攻关计划(2022C02046); 浙江省“三农九方”科技协作计划项目(2024SNJF031); 中国农业科学院科技创新工程(CAASZDRW202417); 国家自然科学基金青年科学基金(42007096)

第1作者简介: 刘悦萱(2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 资源利用与植物保护。E-mail: liuyuexuan0726@163.com

*通讯作者: Author for correspondence. E-mail: chenyanling21@163.com

and available potassium increasing by 7.8%-13.8%, 25.2%-176.1%, 15.4%-84.1% and 486.3%-1500.6%, respectively. Meanwhile, compared with the control treatment, tea pruning materials treatment and their biochar treatment significantly reduce the contents of exchangeable hydrogen, exchangeable aluminum and soil exchangeable acid, with reduction ranges of 6.5%-46.3%, 11.0%-27.8% and 7.6%-48.0%, respectively. In addition, redundancy analysis shows that soil moisture content and available phosphorus are the main factors affecting tea morphological characteristics ($P < 0.05$). Therefore, the application of tea pruning materials and their biochar is beneficial for improving soil nutrient status and promoting tea growth.

Keywords: Tea pruning materials; biochar; tea growth; soil nutrients; soil acidity

茶树冠层修剪作为茶树栽培管理的一项重要技术措施,对改善茶叶品质、提高产量和防治病虫害具有重要意义。茶树修剪物年生物量可达 $8-9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,其含有丰富的有机物质和植物生长发育所必须的氮、磷、钾(N、P、K)等营养元素,是茶园的天然有机肥源^[1-4]。通常作物秸秆还田可增加土壤有机质含量、改善土壤物理结构、提高土壤氮、磷、钾等养分含量、提高土壤微生物群落多样性,从而促进作物生长发育^[5-7]。前期研究发现,茶树修剪枝叶富含多酚物质,其在土壤中的积累可促进土壤有机碳的累积,提高土壤C/N,从而来调控土壤微生物群落结构^[8]。随着土壤全氮和有机碳含量的增加,土壤细菌群落多样性呈增加趋势。此外,土壤中的有机碳含量与土壤细菌群落丰度指数和Chao1指数之间也存在一定的相关性^[9]。研究报道茶树修剪物作为有机物料施用,能显著提高土壤蔗糖酶和土壤脲酶等与土壤碳氮代谢相关酶活性促进土壤碳氮代谢。同时其分解释放氮、磷、钾等养分,从而提高土壤肥力水平^[10,11]。张玥等^[12]发现采取深埋的方式利用茶树修剪物可以改良土壤理化性质,提高土壤细菌多样性。土壤细菌多样性得到增加又能起到降解土壤腐殖质,修复土壤重金属污染,促进茶树生长等作用^[13,14]。但是,有研究报道作物秸秆还田不总是有上述积极效果。茶树修剪物还田造成铝在茶树-土壤间的生物地球化学循环,导致土壤活性铝含量不断提高,进而造成土壤酸化不断加剧^[15]。修剪物还田还有可能引起土壤碳激发效应,导致土壤有机碳含量降低,以及引起土壤氮、磷等养分的损失,从而直接或间接限制茶树生长^[16,17]。

生物炭(Biochar)是一种由农林废弃物经高温限氧而形成的高碳固体有机物质,其孔隙结构发达、比表面积大、表面具有多种活性官能团,有较强的离子吸附、交换能力^[18,19]。生物炭的施用能明显改良土壤理化性质,提高土壤肥力水平,

有效降低土壤养分淋失,提高肥料利用率,促进植物生长、提高作物产量及改善茶叶品质^[20-24]。同时,生物炭在茶园生产管理中改善茶园土壤酸化状况、提高土壤养分含量、促进茶树生长等方面的积极作用也不断得到验证^[25,26]。因此,与茶树修剪物直接还田相比,将其加工为生物炭施用可能更有利于改善土壤质量,从而进一步促进茶树生长。

本研究拟通过比较茶树修剪物不同利用方式(直接还田和加工为生物炭施用)对茶树生长的影响,并从土壤理化性质方面深入剖析其内在联系,为指导茶园生产管理中合理利用茶树修剪物改善茶园土壤质量,促进茶树生长提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本试验利用长、宽、高分别为20 cm, 8 cm, 30 cm的根箱开展盆栽试验。试验用土壤采自常规管理的生产茶园,取其0-20 cm土层土壤,将土壤中的作物残根、枯枝落叶及石块等杂质去除,充分混合均匀后过20目筛置阴凉处待用。

根据试验需要,原料分别采取以下两种方式处理:(1)茶树修剪物:取自中国农业科学院茶叶研究所实验茶园,修剪下来后晒干,收集,粉碎,过1 mm筛备用;(2)制备生物炭:自然风干后,粉碎,置于特制的密闭容器内,于550 °C马弗炉中缺氧热裂解5 h加工而成,待冷却至室温取出,所制得的生物炭再次粉碎,过1 mm筛,混匀后密封备用。

试验用土壤基本理化性状以及试验材料茶树修剪物及其生物炭的基本理化特征见表1。

1.2 试验设计

试验设置3个处理,分别为:T1:对照处理,T2:施用茶树修剪物,T3:施用生物炭,每个处理3个重复。其中,生物炭用量按照土壤重量的2%

表 1 土壤、茶树修剪物及其生物炭基本理化性质
Table 1 Basic physicochemical properties of soil, tea pruning materials, and their biochar

材料 Material	pH	总碳/% TC	全氮/% TN	全磷/% TP	全钾/% Tk	灰分/% ASH	比表面积/(m ² ·g ⁻¹) SUA
土壤 Soil	4.72	1.15	0.10	0.35	1.78	-	-
茶树修剪物 Tea pruning materials	5.95	46.8	1.51	1.95	8.90	0.05	1.21
茶树生物炭 tea biochar	11.04	55.3	2.95	5.12	3.18	0.78	2.45

施用。因该试验采用生物炭加工工艺下其产碳率为35%，因此茶树修剪物用量按照土壤重量的5.7%施用。试验用茶苗为1年生龙井43扦插苗，于2017年10月种植，每个处理3个根箱，每个根箱种植2棵，试验种植茶树时施用修剪物和生物炭。试验期间各处理水肥管理等所有措施均一致，并在2019年6月试验进行取样。

1.3 试验测定指标及测定方法

1.3.1 茶树样品 试验结束后茶树从每个根箱中采集分别测定茶树叶片、茎和根系生物量。地上部叶片和茎的生物量，地下部根系生物量采用称重法测定，测定方法为先置于105℃烘箱中处理40 min后，再调整至65℃烘干至恒质量，称重。采用以下公式计算总生物量和根冠比：

总生物量=根生物量+茎生物量+叶生物量；

(1)

根冠比=根生物量/(叶生物量+茎生物量)×100%。

(2)

取样后，参照杨彪升等^[27]方法将各处理茶树根系全部挑出后将在保证根系完整的情况下用流水缓慢冲洗茶树根。采用根系分析仪测定根系形态学特征，具体方法为取洗净的完整根系分散、平摊并置于根盘中，用Epson-根系扫描仪(Epson Perfection V850 Pro, Nagano, Japan)对根进行扫描(图像分辨率4800 dpi)，使用WinRHIZO程序分析扫描图片，获得根长、根体积、根表面积和平均根径等形态指标。采用WR软件的“Lagarde's Method”(LM)模式分析提取0-1.5 mm直径范围数据，根据侯赛赛等^[28]人的方法将细根直径划分为<0.5 mm和0.5-1.5 mm。

1.3.2 土壤样品 轻轻地摇动根部，去除松散的附着土壤，其余黏附紧密的土壤被认为是根际土壤，靠近茶根的土壤被认为是散装土壤。从根箱中仔细收集根际土和块状土，土壤样品通过2 mm筛，以去除大根和植物残留物。其中一部分在4℃下保存，另一部分被风干并保存在室温下。

采用Auto Analyzer连续流动分析仪(SEAL-AA3, 德国)测定土壤铵态氮和硝态氮，方法为取土壤样品一部分鲜土过5 mm筛后用1 mol·L⁻¹ KCL浸提(水土比为5:1)^[29]。土壤全氮(TN)和总碳(TC)含量采用Vario Max CN分析仪(Element Analysensysteme, 德国)测定^[30]。土壤pH测定采用玻璃电极法，土壤用蒸馏水提取(水土比为2.5:1)；土壤速效磷的测定方法暨采用0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法测定；采用1 mol·L⁻¹ 乙酸铵浸提-火焰光度计法测定土壤速效钾；土壤全磷采用硫酸高氯酸消煮比色法测定；土壤全钾采用NaOH提取火焰光度法测定；采用1 mol·L⁻¹ 氯化钾交换-中和滴定法测定土壤交换性酸和土壤交换性氢；土壤交换性铝为土壤交换性酸总量与土壤交换性氢的差值^[31]。

1.4 数据分析方法

本实验数据采用IBM SPSS Statistics 22.0软件，运用5%水平的单因素方差分析(ANOVA)、最小显著性差异(LSD)和多重比较法(Duncan)，分析处理间差异和各指标相关性；采用Canoco 5.0中的冗余分析(RDA)评价了土壤理化性质对茶树生长性状的影响；相关图表使用Origin Pro 2021软件进行绘制。

2 结果与分析

2.1 茶树修剪物及其生物炭对茶树生物量的影响

与对照处理相比，茶树修剪物及其生物炭处理均显著促进茶树生长(图1)。其中，T2、T3处理下叶生物量分别从23.0 g(T1处理)增加到27.8 g和27.2 g，分别增加21.2%和18.5%(图1(a))；T2、T3处理下茎生物量分别从29.3 g(T1处理)增加到34.0 g和34.5 g，分别增加15.9%和17.8%(图1(b))；T2、T3处理下根生物量分别从19.2 g(T1处理)增加到32.2 g和28.1 g，分别增加67.8%和46.6%(图

1(c))。因此,与T1处理相比,T2、T3处理茶树总生物量分别增加 18.3%、18.1% ($P<0.05$) (图 1

(d))。此外,茶树根冠比从T1处理的0.37分别增加到T2、T3处理下0.52和0.46(图1(e))。

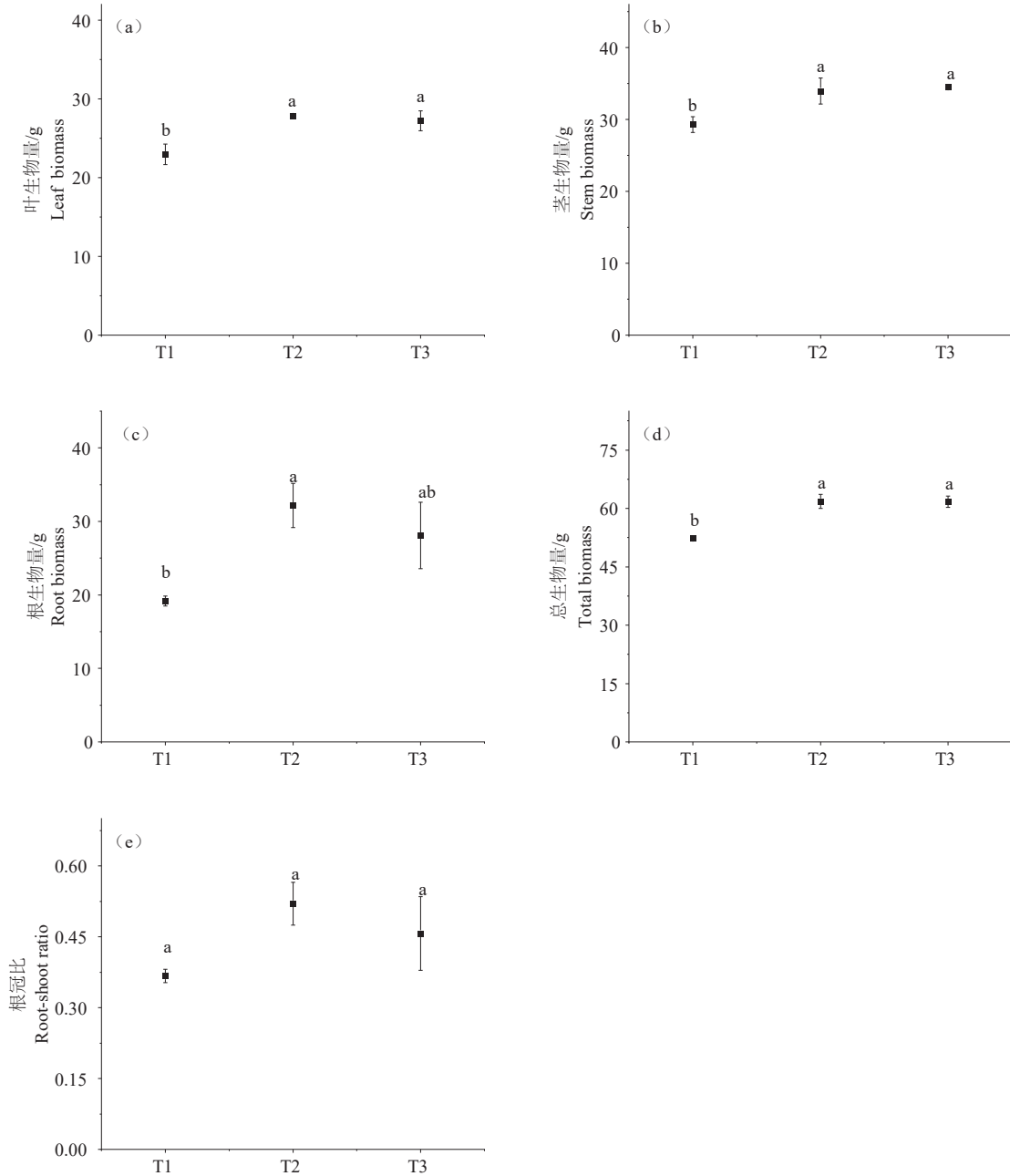


图 1 不同处理对茶树生长状况的影响

Fig. 1 Different treatments on the growth status of tea plants

注:(a)叶生物量,(b)茎生物量,(c)根生物量,(d)总生物量,(e)根冠比;T1:对照处理,T2:施用茶树修剪物,T3:施用生物炭;不同小写字母表示取样点间差异显著($P<0.05$)。

Note: (a) leaf biomass; (b) stem biomass; (c) root biomass; (d) total biomass; (e) root-shoot ratio; T1: control treatment; T2: tea tree trims applied; T3: biochar applied; Different lowercase letters indicate significant differences between sampling points ($P<0.05$).

2.2 茶树修剪物及其生物炭对根系形态特征的影响

总体来看,茶树修剪物及其生物炭处理显著提高茶树根长、根比表面积、根密度和根尖数等

根系形态特征(图2)。与T1处理相比,T3处理茶树总根长、根比表面积、根密度以及根尖数分别提高41.3%、31.1%、41.3%和73.4%,除根比表面积外,其他三项指标之间的差异显著($P<$

0.05)。与T1处理相比,T2处理下茶树总根长、根比表面积、根密度以及根尖数等分别提高15.8%、47.5%、15.8%和47.2%,根比表面积差异

显著。由此可见,与茶树修剪物直接还田相比,加工为生物炭施用更有利于促进茶树根系生长。

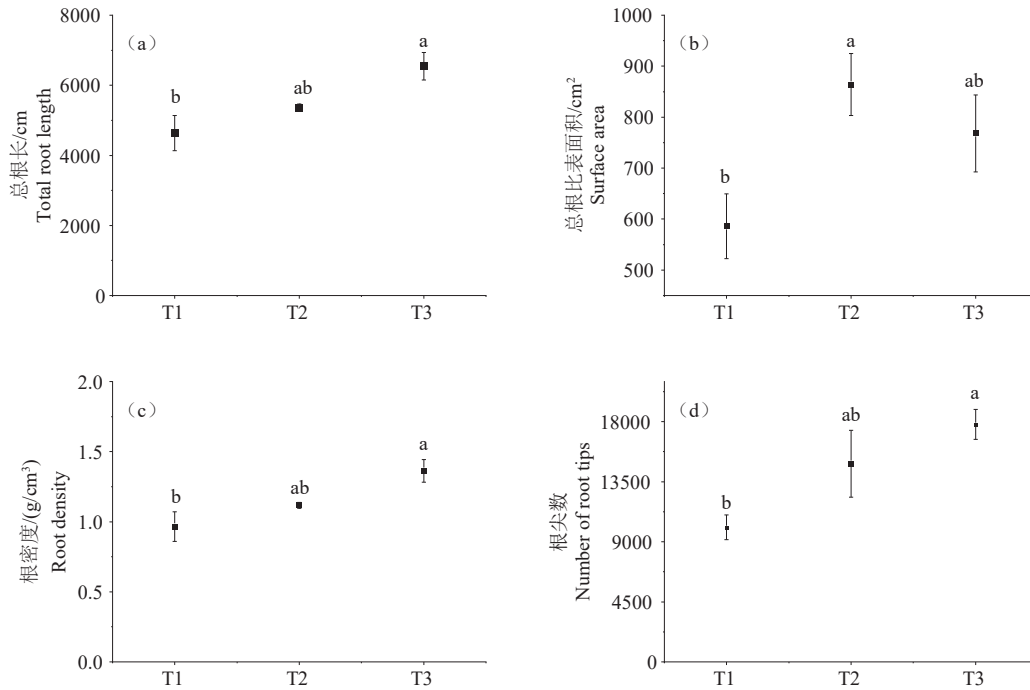


图2 不同处理对茶树根系形态的影响

Fig. 2 Different treatments on root morphology of tea plants

注:(a)总根长,(b)总根比表面积,(c)根密度,(d)根尖数;T1:对照处理,T2:施用茶树修剪物,T3:施用生物炭;不同小写字母表示取样点间差异显著($P < 0.05$)。

Note: (a) total root length, (b) surface area, (c) root density, (d) number of root tips; T1:control treatment, T2:tea tree trims applied, T3: biochar applied; Different lowercase letters indicate significant differences between sampling points ($P < 0.05$).

进一步研究发现,各处理间不同直径下根总表面积、总根长、根尖数也受到茶树修剪物及其生物炭施用影响(图3)。T1处理下,直径<0.5 mm根系总表面积、根长和根尖数占总根系量的比例分别为72.8%、86.8%和97.6%。T3处理下,直径<0.5 mm根系总表面积、根长和根尖数占总根系量比例分别提高到75.8%,88.9%和98.1%。与T1处理相比,T3分别提高了3.0%、2.1%和0.5%。虽然T2处理下直径<0.5 mm根系总表面积、根长和根尖数占总根系量比例与T1处理无显著性差异,但是T2处理显著提高了0.5-1.0 mm下根系总表面积和根长所占比例。与T1处理相比,T2处理0.5-1.0 mm下根系总表面积和根长所占比例分别从27.2%和13.2%增加到37.3%和21.5%(图3(a),3(b))。T2、T3处理与T1处理相比直径0.5-1.0 mm下根尖数所占比例分别提高2.4%和1.9%,但均未达到差异显著水平。

2.3 茶树修剪物及其生物炭对土壤理化性状的影响

土壤pH、无机氮、速效磷、速效钾和含水率等土壤理化性状均显著受到茶树修剪物及其生物炭的影响(表2)。土壤pH从T1处理下4.70分别增加到T2和T3处理下5.06和5.34,分别提高7.8%和13.8%。与T1处理相比,T2和T3处理下土壤无机氮含量分别提高25.2%和176.1%($P < 0.05$)。由此可见生物炭处理对提高土壤pH和无机氮的效果更为显著。同时土壤速效磷和速效钾含量也分别从T1处理下7.5 mg·kg⁻¹和29.3 mg·kg⁻¹分别提高到T2处理下23.6 mg·kg⁻¹和469.3 mg·kg⁻¹,分别提高215.4%和1500.6%。T3处理也显著提高土壤速效磷和速效钾含量,与T1处理相比分别提高84.1%和486.3%。此外,土壤含水率从T1处理下17.2%分别提高到T2和T3处理下19.0和20.3%。但是T2和T3处理之间无显著性差异。

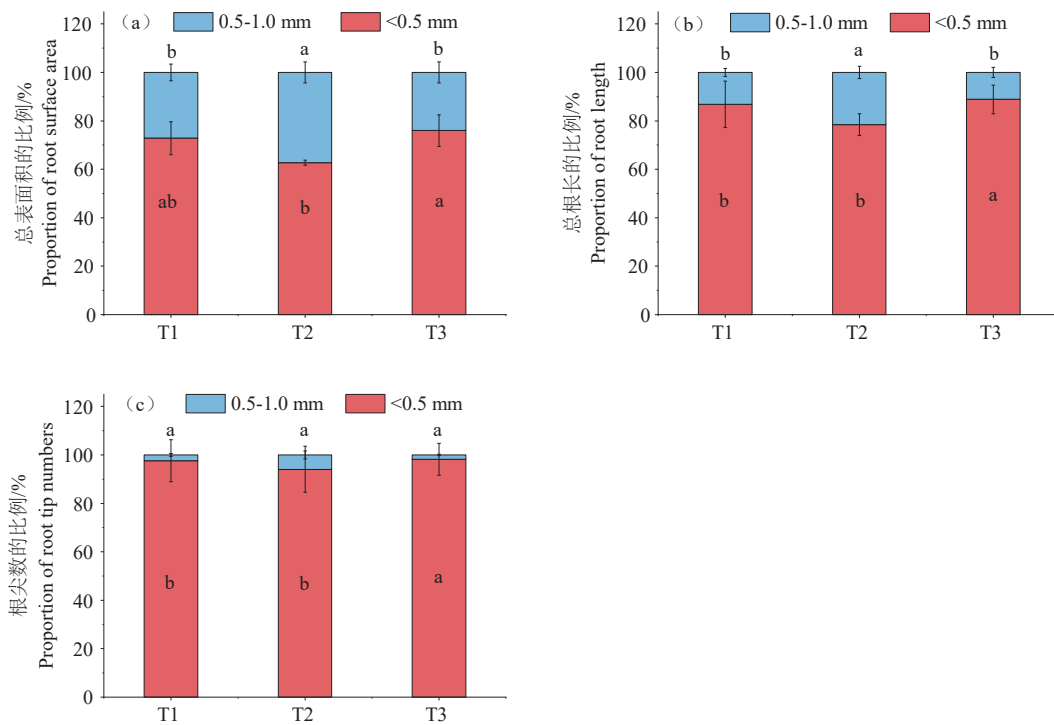


图 3 茶树根系直径<0.5 mm, 0.5-1.0 mm 的总表面积、根长、根尖数占总量的比例

Fig. 3 Proportion of total surface area, root length, and root tip number of tea plant roots with diameter <0.5 mm and 0.5-1.0 mm relative to the total amount

注: (a) 总表面积的比例, (b) 总根长的比例, (c) 根尖数的比例; T1: 对照处理, T2: 施用茶树修剪物, T3: 施用生物炭; 不同小写字母表示取样点间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: (a) proportion of total surface area, (b) proportion of total root length, (c) proportion of root tips; T1: control treatment, T2: tea tree trims applied, T3: biochar applied; Different lowercase letters indicate significant differences between sampling points ($P < 0.05$).

表 2 不同处理对土壤理化性状的影响

Table 2 Different treatments on soil physicochemical properties

处理 Treatment	pH	无机氮/(mg·kg ⁻¹) IN	速效磷/(mg·kg ⁻¹) AP	速效钾/(mg·kg ⁻¹) AK	含水率/% SMC
T1	4.7±0.0c	1.9±0.1c	7.5±0.1c	29.3±1.7c	17.2±0.4b
T2	5.1±0.1b	2.4±0.0b	23.6±0.6a	469.3±59.4a	19.0±0.5a
T3	5.3±0.0a	5.3±1.1a	13.8±0.3b	171.9±32.4b	20.3±0.3a

注: 同列数据后不同小写字母表示处理之间的差异水平 ($P < 0.05$)。

Note: After the same column of data, different lowercase letters indicated the level of difference between treatments ($P < 0.05$).

与 T1 处理相比, 茶树修剪物及其生物炭处理显著降低了土壤交换性酸、氢、铝离子的含量 (图 4)。土壤交换性酸总量从 T1 对照处理下的 5.67 mg·L⁻¹ 下降到 T2 (茶树修剪物) 处理下的 5.30 mg·L⁻¹, 降低 6.5%。而 T3 (生物炭处理) 下土壤交换性酸总量进一步下降到 3.04 mg·L⁻¹, 与 T1 和 T2 处理相比, 分别降低 46.3% 和 42.5%。进一步分析发现, 土壤交换性铝的含量分别从 T1 处理下的 5.19 mg·L⁻¹ 下降到 T2 和 T3 处理下的 4.80 mg·L⁻¹ 和 2.70 mg·L⁻¹, 分别降低 7.6% 和 47.8%。与 T1 处理相比, T2、T3 处理的交换性酸

离子分别降低 11.0%、27.8%, 但是差异不显著。

2.4 茶树根系生长与土壤性质的关系分析

冗余分析表明, 茶树叶、茎、根系生物量以及根系形态受到土壤 pH、无机氮 (IN)、速效磷 (AP)、速效钾 (AK)、含水率 (SMC) 以及交换性酸 (EH) 等理化性状的影响 (图 5)。叶生物量与 pH、AP 显著正相关; 茎生物量与 pH、SMC、IN 显著正相关, 而根系形态特征与 AP、AK 正相关。RDA1 解释了茶树形态特征总变异性的 96.73%, RDA2 解释了茶树形态特征总变异性的 2.62%。

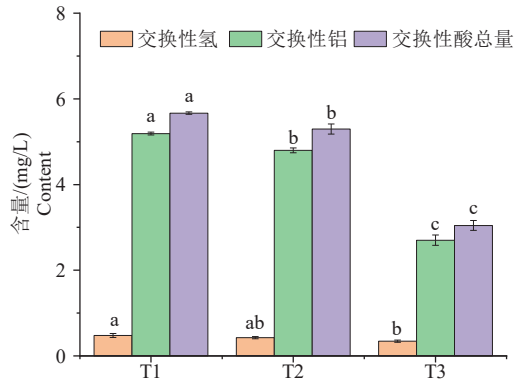


图4 不同处理对土壤交换性酸、氢、铝的影响

Fig. 4 Different treatments on exchangeable acid, hydrogen and aluminum in soil

注: T1: 对照处理, T2: 施用茶树修剪物, T3: 施用生物炭; 不同小写字母表示取样点间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: T1: control treatment, T2: tea tree trims applied, T3: biochar applied; Different lowercase letters indicate significant differences between sampling points ($P < 0.05$).

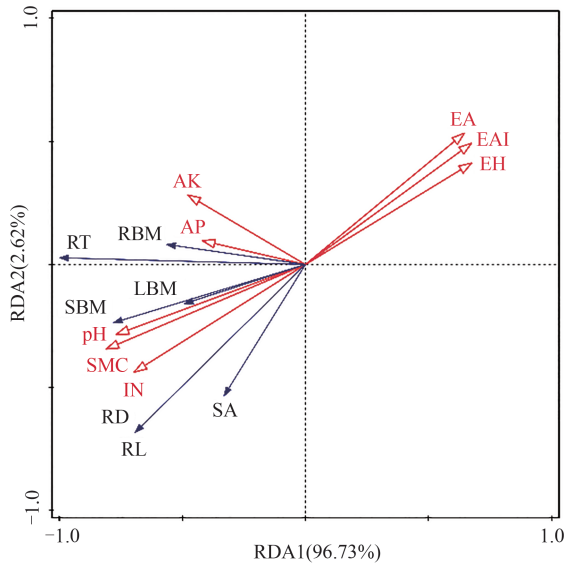


图5 不同处理下茶树形态特征与土壤性质的冗余分析

Fig. 5 Redundancy analysis of tea plant morphological characteristics and soil properties under different treatments

注: IN: 无机氮, SMC: 含水率, AK: 速效钾, pH: 土壤酸碱度, AP: 速效磷, EA: 土壤交换性酸, EH: 土壤交换性氢, EAI: 土壤交换性铝, RL: 总根长, SA: 总根比表面积, RD: 根密度, RT: 根尖数, RBM: 根生物量, LBM: 叶生物量, SBM: 茎生物量。

Note: IN: inorganic nitrogen, SMC: soil moisture content, AK: available potassium, pH: soil pH, AP: available phosphorus, EA: soil residual acidity, EH: soil hydrogen, EAI: soil aluminum, RL: total root length, SA: surface area, RD: root density, RT: root tip number, RBM: root biomass, LBM: leaf biomass, SBM: stem biomass.

结果表明, 土壤 SMC 和 AP 被认为是影响茶树形态特征的主要因素 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 茶树修剪物直接施用以及加工为生物炭施用的效应及作用机制

本研究的核心结果表明, 茶树修剪物直接施用和加工为生物炭施用均显著促进了茶树生长, 这一发现与前人在相关领域的研究相互印证, 同时也为深入理解茶园土壤管理和茶树栽培提供了新的视角。

从促进茶树生长的效应来看, 诸多研究已证实秸秆还田和生物炭施用对作物生长具有积极作用^[32-37]。茶树修剪物直接施用以及加工为生物炭施用都能显著促进茶树生长(图1), 与对照处理(T1)相比, 茶树修剪物处理(T2)和生物炭处理(T3)下, 茶树叶生物量、茎生物量和总生物量均显著增加。葛选良等^[38]研究结果表明, 秸秆还田可以提高土壤质量, 增强土壤酶活性, 提升土壤供肥能力, 促进作物产量增加。在番茄、玉米等作物上研究发现, 适量秸秆还田可以促进作物生长和养分吸收, 显著提高其生物量和产量^[39, 40]。这与本研究中茶树修剪物还田促进茶树生长的结果相契合, 表明茶树修剪物还田可以为茶树生长创造良好的土壤环境并提供充足的养分。而生物炭对作物生长的促进作用在本研究中也得到了充分体现, 生物炭处理显著促进了茶树根系生长, 这与 Zou 等^[30]研究结果一致, 他们发现添加生物炭不仅提高茶树地上部叶生物量和茎生物量, 施用生物炭也显著促进茶树根系生长, 显著提高总根长、根表面积、根直径和根尖数。本研究结果显示, 生物炭不仅能促进茶树地上部生长, 对茶树根系生长也有促进作用(图2), 进一步验证了生物炭在促进茶树根系生长方面的关键作用^[41]。Gao 等^[42]研究发现, 施用生物炭后, 番茄茎粗、株高、叶面积和生物量均有不同程度增加。Yan 等^[43]研究发现, 施用生物炭提高了茶树叶面积和光合速率, 从而促进茶树生长。同时, 土壤速效养分(N、P、K、Mg)有效性和茶树(P、K、Mg)养分吸收均有显著增加。

深入分析其作用机制, 本研究发现茶树生物量以及根系形态等生长指标主要受到土壤 pH、无机氮、速效磷、速效钾、含水率以及交换性酸等土壤理化性状的影响(图5)。修剪物和生物炭

两个处理均显著提高了土壤N、P、K等养分含量,这与杨平平^[44]研究结果中修剪物及生物炭施用能够增强土壤肥力的结果一致。前期已有大量文献结果报道称秸秆直接还田和施用生物炭都能有效地促进土壤养分含量的增加,从而改善土壤质量^[45,46]。秸秆还田后,微生物分解产生的腐殖酸能与土壤中的钙、镁结合,形成稳定的腐殖酸盐,促进土壤形成水稳性团粒结构,土壤总孔隙度增加,减少了土壤容重。这有利于改善农作物的根部生长情况,促进其生长过程中对土壤养分的吸收,进而促进植物生长发育,提高作物产量和品质^[47]。在本研究中,茶树修剪物还田可能通过类似机制,改善了土壤结构和养分供应,促进茶树生长。

关于生物炭促进作物生长方面的机制研究主要集中在以下几个方面,首先,生物炭能够直接提供氮、磷、钾等有效态养分供给作物吸收,从而促进作物生长^[48,49]。本研究中茶树修剪物加工而成生物炭中氮、磷、钾等养分含量也分别高达 2.95 mg·kg⁻¹、5.12 mg·kg⁻¹、3.18 mg·kg⁻¹(表1)。因此,施入土壤可以直接提高土壤氮、磷、钾等养分状况,为茶树生长提供了充足的营养物质(表2)。其次,生物炭具有较大的比表面积以及大量表面官能团,可以吸附土壤氮、磷、钾等养分,阻止土壤养分流失,实现在整个生长季节为植物提供充足的养分供应,促进根系对养分的吸收^[50,51]。这一特性在本研究中可能是生物炭处理下茶树根系生长更好、生物量更高的重要原因之一,其确保了茶树在生长过程中能持续获取养分,满足生长需求。再次,生物炭具有孔隙率高、比表面积大、容重小等特点,使得它可以优化土壤团聚体结构,降低土壤容重,增强其透水透气性能,进而改善其土壤理化性质,有利于促进作物生长^[52]。本研究中,生物炭处理显著改善了土壤的多项理化指标,为茶树生长创造了更适宜的土壤环境。

3.2 茶树修剪物直接施用与加工为生物炭施用的应用前景分析

土壤酸化是制约当前茶产业绿色可持续发展的重要限制因素^[53]。虽然茶树是喜酸作物,但是当土壤pH<4.5时,茶叶产量及品质都受到很大限制^[54]。研究结果发现,修剪物和生物炭处理

均能显著提高土壤pH,尤其是生物炭提高效果更加明显(表2)。进一步发现,生物炭处理显著降低土壤交换性酸含量(图4)。这一结果与Chen等^[55]对水稻土的研究结论类似,生物炭添加显著提高了土壤pH值、阳离子交换量和土壤有机质含量。杨彩迪等^[56]研究结果表明,将秸秆直接还田和炭化还田均能改良土壤酸性和增加养分含量的效果。

生物炭能改善土壤酸化的主要原因在于,生物炭中碳酸盐和有机阴离子(如CaCO₃、-COOH和-COO⁻等)能与土壤溶液中的活性酸(如H⁺、Al³⁺和HCO₃⁻等)发生反应,释放出Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺等盐基阳离子,它们能与土壤中的交换性H⁺和交换性Al³⁺发生交换反应。这一过程有助于降低土壤中交换性酸的含量,并提高土壤的pH值^[57-59]。在茶树实际生产中,这一特性使得生物炭在改良酸化土壤方面极具应用潜力。

茶树修剪枝叶年生物量大,其合理利用对于茶园生态系统物质循环,改善茶园土壤质量,促进茶树生长具有重要作用。本研究表明茶树修剪物直接还田和加工为生物炭施用两种方式均能够显著促进茶树生长,尤其是显著促进茶树根系生长。这主要得益于茶树修剪物及生物炭处理显著提高土壤理化指标,包括土壤pH、无机氮、速效磷和速效钾等。同时,显著降低土壤交换性酸、交换性氢和交换性铝的含量,而且生物炭的效果更优。因此,从酸化土壤改良和促进茶树根系生长的角度出发,生物炭在茶园生产中具有更好的应用前景。然而,实际应用时还需综合考虑生物炭的生产成本、制备工艺以及长期使用对土壤生态系统的潜在影响等因素,以保障茶园的可持续发展。

参考文献

- [1] 王发国,叶华谷,陈玉琼. 茶树修剪时期和程度对早市名优茶品质的影响[J]. 经济林研究,2003,21(02): 16-18.
- [2] Lakshmi K H, Mantu B, Budhindra N H. Insect pests of tea and their management[J]. Annual Review of Entomology,2009,(54):267-284.
- [3] Yang X, Ma L, Ji L, et al. Long-term nitrogen fertilization indirectly affects soil fungi community structure by changing soil and pruned litter in a subtropical tea(*Camellia sinensis* L.)plantation in

- China[J]. Plant and Soil, 2019, 444(1): 409-426.
- [4] 阮建云. 茶园生态系统固碳潜力及低碳茶叶生产技术[J]. 中国茶叶, 2010, 32(07): 6-9.
- [5] 张叶叶, 莫非, 韩娟, 等. 秸秆还田下土壤有机质激发效应研究进展[J]. 土壤学报, 2021, 58(06): 1381 - 1392.
- [6] Liu B, Xia H, Jiang C C, et al. 14 year applications of chemical fertilizers and crop straw effects on soil labile organic carbon fractions, enzyme activities and microbial community in rice-wheat rotation of middle China[J]. Science of the Total Environment, 2022, 841: 156608.
- [7] 李佳芮, 叶淑娟, 覃业玲, 等. 不同秸秆还田量对棉花生长发育和根际土壤的影响[J]. 作物研究, 2023, 37(06): 577-581.
- [8] Maudu M, Mudau F N, Mariga I K. The effect of pruning on growth and chemical composition of cultivated bush tea (*Athrixia phylicoides* D. C) [J]. Journal of Medicinal Plants Research, 2010, 4(22): 2353-2358.
- [9] Shen C C, Xiong J B, Zhang H Y, et al. Soil pH drives the spatial distribution of bacterial communities along elevation on Changbai Mountain[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 57: 204-211.
- [10] Kaidol P, Wardle D A. How understanding aboveground/belowground linkages can assist restoration ecology[J]. Trends in Ecology and Evolution, 2010, 25(11): 670-679.
- [11] 朱留刚, 孙君, 张文锦, 等. 修剪对茶树修剪凋落物水文特性的影响[J]. 南方农业学报, 2017, 48(10): 1795-1801.
- [12] 张玥, 胡云飞, 高水练, 等. 茶树修剪物还田方式对茶园土壤性质及细菌群落结构的影响[J]. 南方农业学报, 2018, 49(08): 1596-1602.
- [13] Myresiotis C, Vryzas Z. Biodegradation of soil-applied pesticides by selected strains of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and their effects on bacterial growth[J]. Biodegradation, 2012, 23(2): 297-310.
- [14] Chen B, Shen J, Zhang X C, et al. The endophytic bacterium, *Sphingomonas* SaMR12, improves the potential for Zn phyto remediation by its host *Sedum alfredii*[J]. Plos One, 2014, 9(9): e106826.
- [15] 梁月荣, 赵启泉, 陆建良, 等. 茶树修剪叶和不同氮肥对土壤 pH 和活性铝含量的影响[J]. 茶叶, 2000, 26(04): 205-208.
- [16] 石锦芹, 丁瑞兴, 刘友兆, 等. 尿素和茶树落叶对土壤的酸化作用[J]. 茶叶科学, 1999, 19(01): 7-12.
- [17] 丁瑞兴, 黄晓. 茶园-土壤系统铝和氟的生物地球化学循环及其对土壤酸化的影响[J]. 土壤学报, 1991, 28(03): 229-236.
- [18] Renner R. Rethinking biochar[J]. Environmental Science and Technology, 2007, 41(17): 5932-5933.
- [19] 张伟明, 修立群, 吴迪, 等. 生物炭的结构及其理化特性研究回顾与展望[J]. 作物学报, 2021, 47(01): 1-18.
- [20] 勾芒芒, 屈忠义. 生物炭对改善土壤理化性质及作物产量影响的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2013(05): 1-5.
- [21] Laird D, Fleming P, Wang B Q, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil[J]. Geoderma, 2010, 158(3/4): 436-442.
- [22] Fuertes A B, Arbestain M C, Svilla M, et al. Chemical and structural properties of carbonaceous products obtained by pyrolysis and hydrothermal carbonisation of corn stover[J]. Soil Research, 2010, 48(7): 618.
- [23] 吴志丹, 尤志明, 江福英, 等. 生物黑炭对酸化茶园土壤的改良效果[J]. 福建农业学报, 2012, 27(02): 167-172.
- [24] 张影, 刘星, 焦瑞锋, 等. 生物质炭与有机物料配施的土壤培肥效果及对玉米生长的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(09): 1287-1297.
- [25] 郑慧芬, 吴红慧, 翁伯琦, 等. 施用生物炭提高酸性红壤茶园土壤的微生物特征及酶活性[J]. 中国土壤与肥料, 2019(02): 68-74.
- [26] 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(02): 387-397.
- [27] 杨彪生, 单立山, 马静, 等. 红砂幼苗生长及根系形态特征对干旱-复水的响应[J]. 干旱区研究, 2021, 38(02): 469-478.
- [28] 侯赛赛, 仝姗姗, 王鹏企, 等. 生物炭和秸秆对不同作物生长性状和养分吸收的影响[J]. 中国农业科技导报(中文问), 2025, 27(04): 179-191.
- [29] 于嘉文, 宋明丹, 康倍铭, 等. 不同生物炭施用水平对沙质土壤氮素淋溶和持水特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(17): 212-218.
- [30] Zou Z H, Mi W H, Li X, et al. Biochar application method influences root growth of tea (*Camellia sinensis* L.) by altering soil biochemical properties[J]. Scientia Horticulturae, 2023, 315: 111960.
- [31] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2005.

- [32] Huang R, Tian D, Liu J, et al. Responses of soil carbon pool and soil aggregates associated organic carbon to straw and straw-derived biochar addition in a dryland cropping mesocosm system[J]. *Agriculture, ecosystems and environment*, 2018, 265: 576-586.
- [33] 徐莉莉, 李丹, 李璇, 等. 不同秸秆还田量对土壤理化性质、微生物以及鲜食玉米产量的影响[J]. *上海农业学报*, 2023, 39(05): 115-118.
- [34] Sun Z, Zhang Z, Zhu K, et al. Biochar altered native soil organic carbon by changing soil aggregate size distribution and native SOC in aggregates based on an 8-year field experiment[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 708: 134829.
- [35] Song D, Xi X, Zheng Q, et al. Soil nutrient and microbial activity responses to two years after maize straw biochar application in a calcareous soil[J]. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2019, 180: 348-356.
- [36] Li Q W, Liang J F, Zhang X Y, et al. Biochar addition affects root morphology and nitrogen uptake capacity in common reed (*Phragmites australis*) [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 766: 144381.
- [37] Ding Y, Liu Y, Liu S, et al. Biochar to improve soil fertility. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2016, 36(2): 36.
- [38] 葛选良, 钱春荣, 李梁, 等. 秸秆还田配合施肥措施对玉米产量及耕层土壤质量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(01): 131-136.
- [39] 李波, 包正荣, 姚名泽, 等. 灌水下限及秸秆还田对温室番茄产量、品质和水分利用效率的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(02): 493-500.
- [40] 王月宁, 冯朋博, 李荣, 等. 不同秸秆还田方式对宁夏扬黄灌区土壤性质及玉米生长的影响[J]. *西南农业学报*, 2019, 32(11): 2607-2614.
- [41] Zou Z H, Fan L C, Li X, et al. Response of plant root growth to biochar amendment: A meta-analysis[J]. *Agronomy*, 2021, 11(12): 2442.
- [42] Gao Y, Shao C, Chen C, et al. Study on the effect of biochar on alleviating waterlogging stress of tomato under rain shelter cultivation in southern China[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2019(3): 1-9.
- [43] Yan P, Shen C, Zou Z H, et al. Biochar stimulates tea growth by improving nutrients in acidic soil[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 283: 110078.
- [44] 杨平平. 茶树修剪叶及其生物质炭还田的土壤环境效应[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [45] 谷月, 吴景贵. 有机物料还田土壤碳、氮及微生物量动态影响研究[J]. *中国农业科技导报*, 2022, 24(04): 126-133.
- [46] Poormansour S, Razzaghi F, Sepaskhah A R. Wheat straw biochar increases potassium concentration, root density, and yield of faba bean in a sandy loam soil[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2019, 50(15): 1799-1810.
- [47] 贝为岳. 秸秆还田对土壤改良及作物生长影响的研究[J]. *种子科技*, 2021(08): 78-79.
- [48] Wang Y, Villamil M B, Davidson P C, et al. A quantitative understanding of the role of co-composted biochar in plant growth using meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 685: 741-752.
- [49] Wen ZH, Chen YX, Liu ZQ, et al. Biochar and arbuscular mycorrhizal fungi stimulate rice root growth strategy and soil nutrient availability[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2022, 113: 103448.
- [50] Li G, Khan S, Ibrahim M, et al. Biochars induced modification of dissolved organic matter (DOM) in soil and its impact on mobility and bioaccumulation of Arsenic and Cadmium[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 348: 100-108.
- [51] Bu X L, Xue J H, Wu Y B, et al. Effect of biochar on seed germination and seedling growth of *Robinia pseudoacacia* L. in karst calcareous soils[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2020, 51(3): 352-363.
- [52] 任芳芳, 张金霞, 刘兴荣, 等. 生物炭添加对农田土壤环境及作物生长影响研究[J]. *水利规划与设计*, 2022(08): 94-96.
- [53] Fan L, Han W. Soil respiration after forest conversion to tea gardens: A chronosequence study[J]. *Catena*, 2020, 190: 104532.
- [54] Xu Q, Wang Y, Ding Z, et al. Aluminum induced physiological and proteomic responses in tea (*Camellia sinensis*) roots and leaves[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2017, 115: 141-151.
- [55] Chen L, Guo L, Ali A, et al. Effect of biochar on the form transformation of heavy metals in paddy soil under different water regimes[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2023, 69(3): 387-398.
- [56] 杨彩迪, 卢升高. 秸秆直接还田和炭化还田对红壤酸度、养分和交换性能的动态影响[J]. *环境科学*, 2020, 41(09): 4246-4252.
- [57] Dai Z M, Zhang X J, Tang C, et al. Potential role of biochars in decreasing soil acidification-A critical

- review[J]. Science of the Total Environment, 2017 (581/582):601-611.
- [58] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures[J]. Bioresource Technology, 2011, 102 (3):3488-3497.
- [59] Van Z L, Kimber S, Morriss, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of paper mill-waste on agronomic performance and soil fertility[J]. Plant and Soil, 2010, 327(1/2):235-246.