

生物质炭基肥对重庆植烟区烤烟根系发育及产量和品质的影响

宋 鹏¹, 李 慧¹, 江厚龙², 赵鹏宇¹, 李理想¹, 赵 彪¹, 张 均¹

(1. 河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471000; 2. 重庆烟草科学研究所, 重庆 400715)

摘要: 【目的】研究生物质炭基肥对重庆植烟区烤烟 *Nicotiana tabacum* 根系发育及产量和品质的影响, 为重庆植烟区合理施用生物质炭基肥提供理论依据和技术支持。【方法】以‘云烟 116’ *N. tabacum* ‘Yunyan 116’ 为材料, 设置常规施肥 (T1)、生物质炭基有机肥 (T2) 和生物质炭基复混肥 (T3) 3 个处理, 分析施用生物质炭基肥对烤烟根系生理活性、烤后烟化学品质及经济性状的影响。【结果】施用生物质炭基肥可优化烟株根系生理及养分指标。其中, 根系活力在移栽后均以 T2 处理最高, 与 T1 处理相比提高了 4.2%~46.8%; 侧根条数和不定根条数均以 T3 处理最多, 与 T1 处理相比分别提高了 11.6%~41.1% 和 19.0%~53.1%; 根系氮和钾质量分数随烟株生长而降低, 且均以 T2 处理降幅最缓; 根系烟碱质量分数则呈现先升后降趋势, 以 T2 和 T3 处理较高; 施用生物质炭基肥可增加烤烟的产量和产值, 提升烤后烟的化学品质, 其中以 T2 处理的产量和产值最高, 与 T1 处理相比分别增加了 16.9% 和 22.6%。此外, 生物质炭基肥对烤后烟氮碱比、糖碱比和钾氮比均有提高作用, 增强了烟叶内在化学成分的协调性, 改善了烟叶品质; 相关分析可知: 根系钾质量分数 (在移栽后 30、60 和 120 d)、氮质量分数 (在移栽后 60、90 和 120 d) 与烤后烟的化学品质相关性最为密切。【结论】生物质炭基肥有利于烤烟根系的生长发育, 可增加烤烟的产量和产值, 提升烤后烟的化学品质, 其中使用生物质炭基有机肥处理效果更佳。图 4 表 4 参 31

关键词: 生物质炭基肥; 烤烟; 根系; 产量; 品质

中图分类号: S714.8

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2023)06-1232-09

Effect of biochar-based fertilizer on root development, yield and quality of flue-cured tobacco in Chongqing tobacco growing area

SONG Peng¹, LI Hui¹, JIANG Houlong², ZHAO Pengyu¹, LI Lixiang¹, ZHAO Biao¹, ZHANG Jun¹

(1. College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, Henan, China;

2. Chongqing Tobacco Science Institute, Chongqing 400715, China)

Abstract: [Objective] The objective is to explore the effect of biochar-based fertilizer on root development, and yield and quality of flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum*) in Chongqing tobacco growing area, in order to provide theoretical basis and technical support for the rational application of biochar-based fertilizer in this area. [Method] *N. tabacum* ‘Yunyan 116’ was taken as the research object, and three treatments including conventional fertilization (T1), biochar-based organic fertilizer (T2) and biochar-based compound fertilizer (T3) were set up to analyze the effect of biochar-based fertilizer on the physiological activity of flue-cured tobacco root, chemical quality and economic traits of flue-cured tobacco. [Result] The application of biochar-based

收稿日期: 2023-02-19; 修回日期: 2023-05-06

基金项目: 中国烟草总公司重庆公司科技项目 (A20201NY01-1301, A20201NY01-1306); 河南省科技攻关项目 (232102110040); 河南省高等学校重点科研项目 (22A210003); 河南省大学生创新创业训练计划项目 (202210464086)

作者简介: 宋鹏 (ORCID: 0000-0002-7086-3229), 从事农业废弃物微生物转化与利用研究。E-mail: songpeng0826@126.com。通信作者: 张均 (ORCID: 0000-0002-9975-7630), 副教授, 博士, 从事作物生理生态研究。E-mail: zhangjun0105@126.com

fertilizer could optimize the physiological and nutrient indexes of tobacco root. The root activity in T2 was the highest after transplantation, which increased by 4.2%–46.8% compared with T1. The number of lateral roots and adventitious roots in T3 was the most, which increased by 11.6%–41.1% and 19.0%–53.1% respectively compared with T1. The contents of nitrogen and potassium in root system decreased with the growth of tobacco plant, and the decrease was the slowest in T2. The nicotine contents in root system increased first and then decreased, and those in T2 and T3 were higher. The application of biochar-based fertilizer could increase the yield and output value of flue-cured tobacco and improve the chemical quality of flue-cured tobacco. Among them, T2 treatment had the highest yield and output value, which increased by 16.9% and 22.6% respectively compared with T1. In addition, biochar-based fertilizer could improve the nitrogen alkali ratio, sugar alkali ratio and potassium chloride ratio of flue-cured tobacco, improve the coordination of internal chemical components and improve the quality of flue-cured tobacco. Correlation analysis showed that the potassium contents (at 30, 60 and 120 d after transplanting) and the nitrogen contents (at 60, 90 and 120 d after transplanting) in root system were most closely related to the chemical quality of flue-cured tobacco. [Conclusion] Biochar-based fertilizer is beneficial to the growth and development of flue-cured tobacco roots, and can increase the output value as well as the chemical quality of flue-cured tobacco. [Ch, 4 fig. 4 tab. 31 ref.]

Key words: biochar-based fertilizer; flue-cured tobacco; root system; yield; quality

生物质炭基肥是一种以生物质炭为基质, 根据不同区域土地特点、不同作物生长特点以及科学施肥原理, 添加有机质或无机质配制而成的生态环保型肥料。生物质炭具有微观孔隙结构、较大的比表面积和高吸附性等特点, 这使得生物质炭基肥在优化土壤理化性质和调节土壤微生物群落及数量等方面效果显著^[1]。研究表明: 施用生物质炭基肥可以显著改善土壤的物理性状^[2], 降低土壤容重^[3], 增加田间持水量和透气性^[4], 提高土壤 pH 和养分有效性^[5]。在生产实践中, 施用生物质炭基肥可实现化肥减施, 提高当地烟农收益的目的^[6-7]。根据不同用途, 研究人员相继开发出多种生物质炭基肥类型, 并已在北方壤土、砂土麦田和南方烟田进行应用^[8]。

尽管生物质炭基肥在烤烟 *Nicotiana tabacum* 种植中已经得到一定的推广, 但相关研究多集中在施用生物质炭基肥对烤烟地上部生长及养分积累方面^[9-10], 而对烤烟根系发育及其与烤后烟化学品质关系的研究鲜有报道。重庆植烟区烟叶品质和地方性香韵特色突出, 是中国烟叶的重要产区。近年来, 随着有机肥的使用比例过少和土壤连作效应的增加, 重庆植烟区土壤有效养分严重失衡, 土壤酸化、黏化、贫瘠以及微生物群落结构恶化已经成为亟待解决的问题^[11]。研究显示: 重庆植烟土壤在 2005 年已经出现了严重的酸化现象^[12], 有一半以上的土壤严重酸化, 其中黔江县、丰都县的酸化土壤面积均达 65% 以上^[13], 酸碱度适宜的土壤不到 35%。因此, 在生产中应采取增施生物质炭基肥、种植绿肥等措施加强对酸化土壤的治理, 为优质烟叶的生产提供保障。本研究选用 ‘云烟 116’ *N. tabacum* ‘Yunyan 116’ 为材料, 在重庆彭水县设置常规施肥、生物质炭基有机肥和生物质炭基复混肥大田试验, 研究生物质炭基肥对烤烟根系发育、产量产值和化学品质的影响, 以期为指导当地烤烟生产和提高烟农收益提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

于 2020 年和 2021 年 3—10 月, 在重庆市彭水县润溪镇重庆烟草科学研究所彭水试验站 (29.14°N, 107.96°E) 开展研究。烟草种植制度为 1 年 1 熟, 冬季休闲。该区属亚热带湿润季风气候, 年均气温为 17.5 °C, 年均降水量为 1 241.0 mm。土壤类型为黄壤土, pH 5.4, 有机质和有机碳质量分数分别为 24.1 和 14.0 g·kg⁻¹, 碱解氮、速效磷、速效钾质量分数分别为 88.8、12.8、147.8 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

大田试验选择肥力中等、地势平坦、无严重病害史的田块, 采取完全随机设计, 共设 3 个处理:

①常规施肥 (T1)。按照当地农户习惯, 施农家肥 $2\ 250\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和烟草复合肥 $750\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; ②生物质炭基有机肥 (T2)。在 T1 处理基础上增施生物质炭基有机肥 $1\ 350\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; ③生物质炭基复混肥 (T3)。在农家肥 $2\ 250\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的基础上增施生物质炭基复混肥 $750\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。其中 T1 和 T2 处理中的烟草复合肥氮磷钾质量比为 6:12:25, 生物质炭基复混肥中的氮磷钾和生物质炭的质量比为 8:10:20:18, 生物质炭基有机肥发酵原料含质量分数为 85% 的杏鲍菇渣和 15% 的生物质炭。各处理分别用尿素、过磷酸钙和硫酸钾补充配平, 保证各处理氮磷钾肥用量相同。每个处理重复 3 次, 共 9 个小区。生物质炭基有机肥和生物质炭基复混肥均由贵州金叶丰农业科技有限公司提供。供试品种为‘云烟 116’, 由重庆市烟草公司彭水县分公司提供。烟苗采用漂浮育苗, 于 5 月上旬移栽, 移栽密度为 $16\ 492\ \text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$, 移栽行距为 120 cm, 株距为 50 cm, 垄高为 40 cm。其他田间管理按照规范化栽培技术进行。

1.3 样品采集与处理

1.3.1 根系样品采集与处理 分别在移栽后的 30、60、90 和 120 d, 选取每个处理具有代表性的烤烟 3 株, 取烟株根系 20 g 在超低温冰箱 $-80\ ^\circ\text{C}$ 内保存, 用于测定生理指标, 余下部分, 在 $105\ ^\circ\text{C}$ 下杀青 15 min, $65\ ^\circ\text{C}$ 烘干至恒量后用粉碎机进行粉碎, 过 60 目筛, 装入封口袋保存, 用于测定根系氮钾和烟碱质量分数。

1.3.2 烤后样品采集与处理 将移栽后 120 d 的烟叶从下部叶自下而上进行采收, 采收后按照小区进行统一编杆烘烤。依据 GB 2635—92 对烘烤后的烟叶样品进行分级, 每处理分别取上部叶、中部叶和下部叶烟叶各 2.5 kg, 置于 $65\ ^\circ\text{C}$ 烘箱烘至恒量, 粉碎过 60 目筛, 用于测定烤后烟叶的化学成分。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 根系生理活性指标 根系活力采用改良氯化三苯基四氮唑法测定^[14]; 根系氮质量分数采用凯氏定氮法测定, 根系钾质量分数采用火焰光度计法测定, 根系烟碱质量分数采用提取脱色法测定^[15]。

1.4.2 经济性状指标 各处理小区烟叶单独采收编杆, 单独计产量。待烟叶全部采收烘烤完毕后, 依照 GB 2635—1992 对烤后烟叶进行分级, 计算产值、产量与上等烟比例。

1.4.3 化学品质指标 分别测定分析各处理烤后烟叶的常规化学成分(质量分数)^[16]。全氮采用凯氏定氮法测定; 总糖和还原糖采用 3,5-二硝基水杨酸 (DNS) 比色法测定; 烟碱采用提取脱色法测定; 氯离子采用浸提法(热蒸馏水法)测定; 全钾采用火焰光度计法测定。

1.5 数据统计与分析

使用 Excel 整理数据, 采用 SPSS 22.0 对烤烟的根系活力、根条数、根系氮、钾和烟碱质量分数以及烤后烟的经济性状和化学品质等进行多重比较和相关分析, 其中多重比较采用 Duncan 的 SSR 检验法(显著性水平为 0.05), 相关分析采用 Pearson 相关系数中的双尾检验, 采用 Origin 2021 绘图。

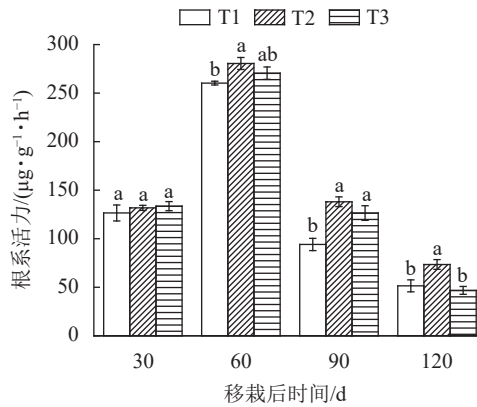
2 结果与分析

2.1 不同生物质炭基肥对烤烟根系性状的影响

2.1.1 不同生物质炭基肥对烤烟根系活力的影响 由图 1 可知: 随着烟株移栽时间的延长, 3 个处理的根系活力均呈先上升后下降的抛物线式变化, 以移栽后 60 d 时最高, 移栽后 120 d 时最低。在移栽后 30 d 时, 3 个处理的烟株根系活力无显著差异。在移栽后 60 d 时, T2 处理的根系活力较 T1 处理显著提高 ($P<0.05$)。在移栽后 90 d 时, T2 与 T3 处理的根系活力无显著差异, 但较 T1 处理分别显著提高了 46.8% 和 34.4% ($P<0.05$)。在移栽后 120 d 时, T2 处理的根系活力与 T3 和 T1 处理差异显著 ($P<0.05$)。生物质炭基肥可以提高烟株根系活力, 总体上以 T2 处理效果最好。

2.1.2 不同生物质炭基肥对烤烟根条数的影响 如表 1 所示: 烟株的侧根条数在移栽后的 30 d 时, 3 个处理间无显著性差异。在移栽后 60 d 时, T2 和 T3 处理的侧根条数显著高于 T1 处理 ($P<0.05$)。在移栽后 90 d 时, 3 个处理侧根条数从大到小依次为 T3、T2、T1, T3 处理相比 T1 处理增加了 17.5% ($P<0.05$)。在移栽后 120 d 时, T2 和 T3 处理比 T1 处理提高 14.7% 和 26.4% ($P<0.05$)。

移栽后 30 d 时, T2 和 T3 处理烟株的不定根条数均高于 T1 处理, 且与 T1 处理呈显著差异 ($P<0.05$)。移栽后 60 和 90 d 时, 3 个处理的不定根条数从大到小依次为 T3、T2、T1, 且 3 个处理间均存在显著差异 ($P<0.05$)。移栽后 120 d 时, 以 T2 处理的不定根条数最多, 其次为 T3 处理, 最后为



不同字母表示同一时间不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 移栽后不同生物质炭基肥处理下烤烟根系活力的变化

Figure 1 Change of root activities of flue-cured tobacco under different biochar-based fertilizers after transplantation

表 1 移栽后不同生物质炭基肥处理下烤烟根条数的变化

Table 1 Change of root number of flue-cured tobacco under different biochar-based fertilizers after transplantation

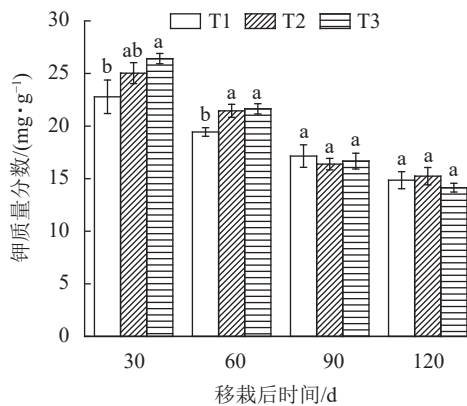
移栽后时间/d	处理	侧根/条	不定根/条
30	T1	13.8±4.1 a	62.4±1.3 b
	T2	14.3±1.2 a	74.9±2.6 a
	T3	15.4±0.8 a	76.6±3.1 a
60	T1	17.5±1.4 b	89.2±1.5 c
	T2	22.7±2.9 a	117.2±1.9 b
	T3	24.7±1.6 a	136.6±2.0 a
90	T1	25.7±3.8 b	59.0±4.8 c
	T2	26.3±1.0 ab	68.6±0.5 b
	T3	30.2±2.4 a	75.0±3.3 a
120	T1	23.1±1.3 b	44.8±0.8 b
	T2	26.5±1.6 a	54.7±1.5 a
	T3	29.2±1.7 a	53.3±1.9 a

说明：不同字母表示同一时间不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

T1 处理，且 T2、T3 与 T1 处理差异达显著水平 ($P < 0.05$)。总体上，烟株的侧根条数和不定根条数以 T3 处理最多。

2.1.3 不同生物质炭基肥对烤烟根系钾、氮和烟碱质量分数的影响 由图 2 可以看出：3 个处理根系钾质量分数随烟株的生长呈逐渐下降趋势。移栽后 30 和 60 d 时，T2 和 T3 处理的烟株根系钾质量分数均高于 T1 处理，其中 T3 处理显著高于 T1 处理 ($P < 0.05$)。移栽后 90 和 120 d 时，3 个处理的烟株根系钾质量分数无显著差异。

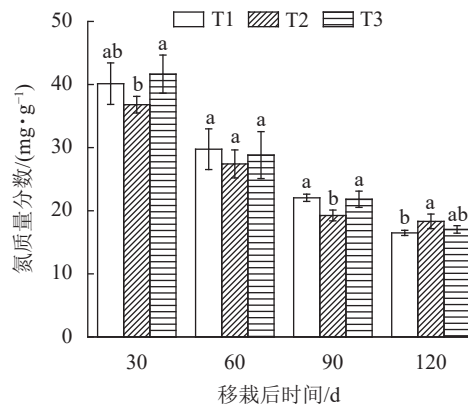
从图 3 可见：在移栽后的 30~90 d，T3 和 T1 处理的烟株根系氮质量分数均高于 T2 处理。其中在移栽后 30 d 时，T3 与 T2 处理烟株根系氮质量分数差异显著 ($P < 0.05$)，在移栽后 60 d 时，3 个处理之间的根系氮质量分数差异不显著。在移栽后 90 d 时，T1 和 T3 处理根系氮质量分数均显著高于 T2 处理 ($P < 0.05$)，而在移栽后 120 d 时，T2 处理根系氮质量分数最高，且与 T1 处理差异显著 ($P < 0.05$)。



不同字母表示同一时间不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 不同生物质炭基肥对根系钾质量分数的影响

Figure 2 Effects of different biochar-based fertilizers on potassium contents in roots



不同字母表示同一时间不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 3 不同生物质炭基肥对根系氮质量分数的影响

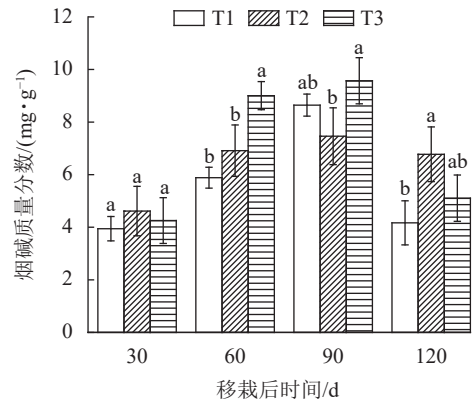
Figure 3 Effects of different biochar-based fertilizers on nitrogen contents in roots

图 4 表明：3 个处理的烟碱质量分数均在移栽后 90 d 时达最高值。移栽后 30 d 时，3 个处理的根系烟碱质量分数无显著差异。移栽后 60 d 时，以 T3 处理烟株根系的烟碱质量分数最高，且显著高于 T1 与 T2 处理 ($P < 0.05$)。移栽后 90 d 时，仍以 T3 处理最高，且与 T2 处理间差异显著 ($P < 0.05$)。移栽后 120 d 时，T1 和 T3 处理降幅较大，以 T2 处理烟碱质量分数最高，且与 T1 处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 不同生物质炭基肥对烤后烟产量和品质的影响

2.2.1 对烤后烟经济性状的影响 从表2可见：T2处理的烟叶产量最高，比T1处理高16.9% ($P < 0.05$)。T3与T1处理差异不显著，但比T1处理增加了11.4%。3个处理的产值与产量从大到小依次为T2、T3、T1。3个处理间的均价差异不显著 ($P > 0.05$)，其中T2和T3处理的均价高于T1处理。各处理间的上中等烟比例差异显著 ($P < 0.05$)，其中以T2处理最高，其次为T3处理，最后为T1处理。总体上，与T1处理相比，T2和T3处理的产量、产值、均价和中上等烟比例均呈增加趋势，整体以T2处理效果最佳，说明施用生物质炭基肥对烤后烟的产量产值及上中等烟比例均有明显的促进作用。

2.2.2 对烤后烟化学品质的影响 烟叶内在化学成分及其协调性是衡量烤烟品质的重要指标^[17]。由表3可知：T2处理烤后烟上部叶中的氯离子、还原糖、烟碱质量分数最高，且糖碱比高于其他2个处理。但T3处理的烤后烟叶的钾和总氮质量分数较为突出，在3个处理中钾氯比和氮碱比最高。T1处理的总糖质量分数占比最高，与T2、T3处理差异显著 ($P < 0.05$)。T2处理烤后烟中部叶的氯离子、还原糖、总糖和烟碱质量分数仍然最高，其中，3个处理的上部叶和中部叶的氯离子质量分数均差异显著 ($P < 0.05$)，且T2和T3处理的还原糖质量分数均差异显著 ($P < 0.05$)。T3处理的钾和总氮质量分数最高，与T1处理差异显著 ($P < 0.05$)，T3处理的钾氯比和氮碱比最高，与其他2个处理差异显著 ($P < 0.05$)，糖碱比则以T1处理最高。烤后烟下部叶中3个处理的氯离子、烟碱和总氮质量分数及钾氯比差别不显著，但钾、还原糖和总糖质量分数均以T2处理最高，且与T1或T3处理差异显著 ($P < 0.05$)，氮碱比则以T1处理最高。



不同字母表示同一时间不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图4 不同生物质炭基肥对根系烟碱质量分数的影响

Figure 4 Effects of different biochar-based fertilizers on nicotine contents in roots

表2 不同生物质炭基肥处理下烤后烟经济性状的比较

Table 2 Comparison of economic traits of different biochar-based fertilizer treatments

处理	产量/ (kg·hm ⁻²)	产值/ (万元·hm ⁻²)	均价/ (元·kg ⁻¹)	上中等烟 比例/%
T1	1 933 b	5.3 b	27.4 a	83.1 c
T2	2 260 a	6.5 a	28.5 a	86.0 a
T3	2 153 ab	6.0 ab	28.0 a	84.6 b

说明：同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

表3 烤后烟叶化学成分比较

Table 3 Comparison of chemical composition of flue-cured tobacco

等级	处理	氯/%	钾/%	钾氯比	还原糖/%	总糖/%	烟碱/%	糖碱比	总氮/%	氮碱比
上部叶	T1	0.24 c	1.51 b	6.43 b	19.82 ab	27.35 a	2.44 a	8.12 a	2.73 a	1.07 a
	T2	0.28 a	1.51 b	5.41 c	20.73 a	25.61 b	2.55 a	8.13 a	2.57 b	0.97 b
	T3	0.26 b	1.90 a	7.32 a	17.74 b	23.17 c	2.61 a	6.80 b	2.89 a	1.11 a
中部叶	T1	0.35 c	1.65 b	4.75 b	21.84 a	28.01 a	2.18 b	10.02 a	2.31 b	0.93 b
	T2	0.40 a	1.70 b	4.23 b	22.39 a	28.64 a	2.56 a	8.75 b	2.46 ab	0.96 b
	T3	0.37 b	2.09 a	5.63 a	20.58 b	27.66 a	2.17 b	9.48 ab	2.74 a	1.11 a
下部叶	T1	0.31 a	1.91 b	6.12 a	20.87 b	31.21 ab	1.86 a	11.22 b	2.15 a	0.92 a
	T2	0.33 a	2.53 a	7.57 a	24.66 a	32.43 a	1.89 a	13.05 a	2.02 a	0.87 b
	T3	0.34 a	2.18 b	6.53 a	21.39 b	28.89 b	1.93 a	11.08 b	2.10 a	0.87 b

说明：不同字母表示同等级不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)；氯、钾、还原糖、总糖、烟碱、总氮均为质量分数。

2.3 烤烟根系生长指标与烟叶化学品质指标的相关分析

相关分析(表4)可知：移栽后30d时，根系钾与烟叶氯离子呈显著正相关 ($P < 0.05$)；移栽后60d时，烟叶钾与根系活力呈显著正相关 ($P < 0.05$)，与氮碱比呈显著负相关 ($P < 0.05$)，根系氮与烟叶总氮呈显著正相关 ($P < 0.05$)，但与烟叶钾呈显著负相关 ($P < 0.05$)；移栽后90d时，根系烟碱与烟叶总氮呈

显著负相关 ($P < 0.05$), 与烟叶钾氯比呈显著正相关 ($P < 0.05$), 而根系氮与烟叶还原糖呈显著负相关 ($P < 0.05$); 移栽后 120 d 时, 根系烟碱与烟叶钾呈显著正相关 ($P < 0.05$)。根系钾与烟叶总糖呈显著正相关 ($P < 0.05$), 根系氮与烟叶钾氯比呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。

表 4 烤烟根系性状与烟叶化学品质的相关分析

Table 4 Correlation analysis of flue-cured tobacco root traits and chemical properties

移栽后时间/d	根系性状	烟叶化学成分								
		还原糖	总糖	总氮	钾	烟碱	糖碱比	氮碱比	钾氯比	氯离子
30	根系活力	0.395	-0.410	-0.621	0.665	0.936	0.213	0.970	0.528	0.996
	烟碱	-0.835	-0.970	0.663	-0.618	0.512	-0.924	0.068	-0.743	0.262
	钾	0.252	-0.543	-0.496	0.545	0.978	0.064	-0.923	0.394	0.998*
	氮	-0.899	-0.930	0.754	-0.714	0.397	0.966	0.196	-0.823	0.135
60	根系活力	0.919	0.332	-0.99	0.997*	0.434	0.828	-0.870	0.968	0.660
	烟碱	-0.075	-0.785	-0.188	0.245	0.993	-0.263	-0.748	0.076	0.924
	钾	0.573	-0.216	-0.767	0.803	0.844	0.407	-0.999*	0.690	0.957
	氮	-0.955	-0.428	0.999*	-0.999*	0.339	-0.882	0.814	-0.989	-0.579
90	根系活力	0.789	0.081	-0.922	0.943	0.649	0.658	-0.967	0.872	0.830
	烟碱	0.976	0.499	-0.999*	0.995	0.262	0.917	-0.765	0.998*	0.512
	钾	-0.858	-0.201	0.962	-0.976	-0.552	-0.745	0.929	-0.925	-0.756
	氮	-0.999*	-0.698	0.957	-0.939	-0.015	-0.987	0.582	-0.984	-0.284
120	根系活力	0.958	0.860	-0.849	0.817	-0.245	0.995	-0.350	0.903	0.024
	烟碱	0.922	0.339	-0.991	0.997*	0.427	0.832	-0.866	0.970	0.655
	钾	0.616	0.997*	-0.389	0.335	-0.759	0.754	0.254	0.491	-0.556
	氮	0.989	0.562	-0.993	0.984	0.189	0.944	-0.715	0.999**	0.446

说明: *表示 $P < 0.05$; **表示 $P < 0.01$ 。

综合来看, 根系性状与化学品质之间在移栽后存在不同的相关关系, 且在移栽后 60、90 和 120 d 时更为突出, 根系钾和氮与烤后烟的化学品质指标相关性均达到显著水平 ($P < 0.05$)。在移栽后 90 和 120 d 时, 根系烟碱与化学品质指标相关性同样也达到显著水平 ($P < 0.05$)。

3 讨论

根系不仅是作物吸收水分和养分的重要器官, 也是激素、氨基酸和有机酸等生物大分子的合成器官, 其形态建成和生理功能将直接影响作物地上部分的生长发育、产量和品质^[18]。不仅如此, 对于烤烟来说烟株根系还是次生代谢产物烟碱的重要合成器官, 其生长发育状况对烤烟品质有直接影响。在烤烟的生产实践中, 烟株的主根长度、须根条数、根总体积和根尖数等根系形态指标与烤烟农艺性状表现出显著正相关^[19]。本研究表明: T2 和 T3 处理烟株的根系活力相比常规施肥均有所提升, 其中 T2 处理的根系活力最高, 这与韩毅等^[20]的研究结果一致; 另外, 也有研究表明: 添加生物质炭可以有效提高烟株的根系活力^[21]。这说明生物质炭和生物质炭基肥本身具有的多孔和大比表面积结构有利于土壤通气性的增加, 这对烟株根系活力的提高起到重要的调控作用。与此同时, 施用生物质炭基肥能够显著增加烟株的不定根条数与侧根条数, 这表明生物质炭基肥能够对烟株根系发育提供良好的生态环境^[22-23]。根系钾和总氮质量分数均随着烟株的生长而逐渐降低, 生物质炭基肥处理相比 T1 处理的降幅较小, 可能是生物质炭具有缓释氮肥的作用, 从而保证了烤烟各生长期所需的氮肥量, 但要注意与氮肥的配施比例^[24]。根系烟碱质量分数则在移栽后 90 d 达到峰值, 可能与打顶后烟株体内的激素平衡状态被破坏有关, 这与范江等^[25]的研究结果一致。烟株的根系生长受到刺激, 其生物量显著高于未打顶的烟株, 发达的根系可促进烟株对养分的吸收。根系是合成烟碱的主要部位, 打顶后烟株合成烟碱的能力大幅提升, 进而提高烟株的烟碱积累量^[26]。除了能够改善土壤的通透性之外, 生物质炭基肥还含有丰富的大量元素

与微量元素,从而为烟株根系的生长发育、后期烤烟产量和品质提供了保障^[27]。

生物质炭基肥对常见农作物的生长具有促进作用,可达到增产的目的^[28]。本研究结果表明:施用生物质炭基肥显著增加了烤烟产量、产值、均价和上中等烟比例,其中以施用生物质炭基有机肥处理烟株的产量、产值最佳。王晓强等^[29]研究表明:生物质炭基肥与氮肥配施可提高烟叶产量和中上等烟比例,从而提高烟叶的均价及产值。同时施用生物质炭基肥可减少氮素化肥的施用量,从而改善烟叶内在化学成分的协调性,增加中性致香物质^[30]。从不同生物质炭基肥对烤后烟常规化学成分的影响来看,T2和T3处理对烤烟内在常规化学成分有显著的影响。其中T2处理能显著提高上中下部叶的还原糖质量分数及中下部叶的总糖质量分数,这与李青山等^[31]的研究结果一致。上中部叶的氯质量分数高于其他处理,减低总氮和烟碱质量分数处于适中稳定的范围,从而提高糖碱比。糖碱比高,有助于提高烟叶的安全性,柔和烟气。中上部叶钾质量分数差异不明显,钾氯比变化不大;T3处理可提高上中部叶的钾质量分数、钾氯比、氮碱比和总氮质量分数,T3处理的全氮、烟碱质量分数较高,可能由于施用生物质炭基复混肥可减少土壤养分的淋溶损失有关。T3处理的氯离子质量分数高,可能与淋溶损失能力与生物质炭基复合肥的施用成正比有关。据烟叶采收后对中部烟叶化学成分的分析表明:T2和T3处理烟叶在各指标上都符合优质烟叶的标准,T1处理在优质烟叶协调性方面略差。这表明施用生物质炭基肥不但能够促进烤烟生长,而且能提高烟叶内在化学成分的协调性,改善烟叶品质。

4 结论

施用生物质炭基肥能促进烤烟根系发育,有效提升烟株的根系活力,增加侧根和不定根条数,延缓根系钾、氮质量分数流失,提高烟株根系的烟碱积累量。同时,施用生物质炭基肥可增加烤烟的产量产值,提升烤后烟的化学品质。本研究的生物质炭基有机肥更有利于促进烤烟根系的生长发育,改善烤后烟叶化学成分质量分数,提高烤烟产量、产值、均价和中上等烟比例。

5 参考文献

- [1] 任依,姜培坤,鲁长根,等.炭基肥与有机肥替代部分化肥对青紫泥水稻土微生物丰度及酶活性的影响[J].浙江农林大学学报,2022,39(4):860-868.
REN Yi, JIANG Peikun, LU Changgen, *et al.* Effects of biochar-based fertilizer and organic fertilizer substituting chemical fertilizer partially on soil microbial abundances and enzyme activities [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, 39(4): 860-868.
- [2] 刘卉,周清明,黎娟,等.长期定位连续施用生物炭对植烟土壤物理性状的影响[J].华北农学报,2018,33(3):182-188.
LIU Hui, ZHOU Qingming, LI Juan, *et al.* Effects of long-term continuous application of biochar on physical properties of tobacco-growing soil [J]. *North China Agricultural Journal*, 2018, 33(3): 182-188.
- [3] RANDOLPH P, BANSODE R R, HASSAN O A, *et al.* Effect of biochars produced from solid organic municipal waste on soil quality parameters [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 192: 271-280.
- [4] ZHANG Chengsheng, LIN Yong, TIAN Xueying, *et al.* Tobacco bacterial wilt suppression with biochar soil addition associates to improved soil physiochemical properties and increased rhizosphere bacteria abundance [J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 112: 90-96.
- [5] GAO Lin, WANG Rui, SHEN Guoming, *et al.* Effects of biochar on nutrients and the microbial community structure of tobacco-planting soils [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2017, 17(4): 884-896.
- [6] 魏春辉,任奕林,刘峰,等.生物炭及生物炭基肥在农业中的应用研究进展[J].河南农业科学,2016,45(3):14-19.
WEI Chunhui, REN Yilin, LIU Feng, *et al.* Research progress of application of biochar and biochar-based fertilizer in agriculture [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2016, 45(3): 14-19.
- [7] 王成己,唐莉娜,胡忠良,等.生物炭和炭基肥在烟草农业的应用及展望[J].核农学报,2021,35(4):997-1007.
WANG Chengji, TANG Lina, HU Zhongliang, *et al.* Application and prospect of biochar and biochar-based fertilizer in tobacco agriculture [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(4): 997-1007.
- [8] 苑晓辰.包膜生物炭基肥的制备及特性研究[D].武汉:华中农业大学,2018.
YUAN Xiaochen. *Preparation and Properties of Coated Biochar-based Fertilizer*[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural

- University, 2018.
- [9] 申洪涛, 张子颖, 王新中, 等. 高炭基肥配施氮肥对牡丹江烤烟生长及产量和质量的影响[J]. 河南农业大学学报, 2020, **54**(2): 189 – 196.
SHEN Hongtao, ZHANG Ziying, WANG Xinzhong, *et al.* Effects of high carbon-based fertilizer combined with nitrogen fertilizer on growth yield and quality of Mudanjiang flue-cured tobacco [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2020, **54**(2): 189 – 196.
- [10] 何晓冰, 毛娟, 王晓强, 等. 生物炭基肥与化肥配施对烤烟干物质及养分积累的影响[J]. 贵州农业科学, 2020, **48**(3): 39 – 44.
HE Xiaobing, MAO Juan, WANG Xiaoqiang, *et al.* Effects of combined application of biochar-based fertilizer and chemical fertilizer on dry matter and nutrient accumulation of flue-cured tobacco [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2020, **48**(3): 39 – 44.
- [11] 李志鹏, 刘浩, 于晓娜, 等. 黄腐酸对植烟土壤改良及烟叶品质的影响研究[J]. 土壤通报, 2016, **47**(4): 914 – 920.
LI Zhipeng, LIU Hao, YU Xiaona, *et al.* Effect of fulvic acid on improvement of tobacco-planted soil and quality of flue-cured tobacco leaves [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, **47**(4): 914 – 920.
- [12] 李晓宁, 高明, 王子芳. 重庆市植烟土壤肥力数值化综合评价[J]. 西南农业学报, 2007, **20**(1): 67 – 71.
LI Xiaoning, GAO Ming, WANG Zifang. Integrated digitization evaluation on tobacco soil fertility at Chongqing [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2007, **20**(1): 67 – 71.
- [13] 江厚龙, 张定志, 李钠钾, 等. 重庆烟区植烟土壤养分现状分析[J]. 河南农业科学, 2015, **44**(6): 58 – 63.
JIANG Houlong, ZHANG Dingzhi, LI Najia, *et al.* Analysis of soil nutrients states at tobacco growing area in Chongqing [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2015, **44**(6): 58 – 63.
- [14] 张璐, 任天宝, 阎海涛, 等. 不同有机物料对烤烟根际土壤碳库、酶活性及根系活力的影响[J]. 中国烟草科学, 2018, **39**(2): 39 – 45.
ZHANG Lu, REN Tianbao, YAN Haitao, *et al.* Effects of different organic materials on soil carbon pool, enzyme activity and root activity in rhizosphere of flue-cured tobacco [J]. *Chinese Tobacco Science*, 2018, **39**(2): 39 – 45.
- [15] 张春, 赵浩淳, 郭涛, 等. 生物炭用量对烟苗生长的影响[J]. 烟草科技, 2015, **48**(6): 9 – 12, 26.
ZHANG Chun, ZHAO Haochun, GUO Tao, *et al.* Effect of biochar dosage on tobacco seedling growth [J]. *Tobacco Science & Technology*, 2015, **48**(6): 9 – 12, 26.
- [16] 韩锦峰, 袁秀秀, 谢晓辉, 等. 同一品种在不同生态区烟叶化学品质的差异[J]. 中国烟草学报, 2016, **22**(5): 70 – 78.
HAN Jinfeng, YUAN Xiuxiu, XIE Xiaohui, *et al.* Chemical quality differences in leaf tobacco of same variety grown in different ecological regions [J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2016, **22**(5): 70 – 78.
- [17] 杜文, 谭新良, 易建华, 等. 用烟叶化学成分进行烟叶质量评价[J]. 中国烟草学报, 2007, **13**(3): 25 – 31.
DU Wen, TAN Xinliang, YI Jianhua, *et al.* Quality evaluation of tobacco leaf by chemical components [J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2007, **13**(3): 25 – 31.
- [18] 陈懿, 陈伟, 高维常, 等. 烟秆生物炭对烤烟根系生长的影响及其作用机理[J]. 烟草科技, 2017, **50**(6): 26 – 32.
CHEN Yi, CHEN Wei, GAO Weichang, *et al.* Effects of tobacco stem biochar on root growth of flue-cured tobacco and its mechanism [J]. *Tobacco Science & Technology*, 2017, **50**(6): 26 – 32.
- [19] 艾栋, 刘青丽, 常乃杰, 等. 菌丝营养钵栽培对烤烟根系生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, **28**(1): 181 – 190.
AI Dong, LIU Qingli, CHANG Naijie, *et al.* Effects of mycelium culture on root growth of flue-cured tobacco [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2022, **28**(1): 181 – 190.
- [20] 韩毅, 陈发元, 赵铭钦, 等. 生物炭与有机无机肥配施对烟草和土壤汞含量及保护酶活性的影响[J]. 山东农业科学, 2016, **48**(8): 74 – 79.
HAN Yi, CHEN Fayuan, ZHAO Mingqin, *et al.* Effects of biochar combined with organic and inorganic fertilizers on mercury content and protective enzyme activities in tobacco and soil [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2016, **48**(8): 74 – 79.
- [21] 张璐. 不同高碳物料对土壤理化性状、微生物多样性和烟株生长发育的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2018.
ZHANG Lu. *Effects of Different High Carbon Materials on Soil Physical and Chemical Properties, Microbial Diversity and Tobacco Plant Growth* [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2018.
- [22] CHEW J, ZHU Longlong, NIELSEN S, *et al.* Biochar-based fertilizer: supercharging root membrane potential and biomass

- yield of rice [J/OL]. *Science of the Total Environment*, 2020, **713**: 136431 [2023-02-10]. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.136431.
- [23] 张伟明, 孟军, 王嘉宇, 等. 生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响[J]. 作物学报, 2013, **39**(8): 1445 – 1451.
ZHANG Weiming, MENG Jun, WANG Jiayu, *et al.* Effects of biochar on root morphology and physiological characteristics and yield of rice [J]. *Journal of Crops*, 2013, **39**(8): 1445 – 1451.
- [24] AN Xiongfang, WU Zhansheng, QIN Huihua, *et al.* Integrated co-pyrolysis and coating for the synthesis of a new coated biochar-based fertilizer with enhanced slow-release performance [J/OL]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **283**: 124642 [2023-02-10]. doi:10.1016/j.jclepro.2020.124642.
- [25] 范江, 杨继洪, 王守旗, 等. 打顶对烤烟生长和各器官烟碱积累分配的影响[J]. 作物研究, 2016, **30**(1): 36 – 40.
FAN Jiang, YANG Jihong, WANG Shouqi, *et al.* Effects of topping on growth and nicotine accumulation and distribution of flue-cured tobacco organs [J]. *Crop Research*, 2016, **30**(1): 36 – 40.
- [26] 罗斐, 陆新莉, 李朝阳, 等. 打叶留顶对烤烟上部叶和根系养分、烟碱及其合成酶的影响[J]. 核农学报, 2017, **31**(10): 2023 – 2031.
LUO Fei, LU Xinli, LI Chaoyang, *et al.* Effects of beating leaves and leaving tops on nutrients, nicotine and synthase in upper leaves and roots of flue-cured tobacco [J]. *Journal of Nuclear Agronomy*, 2017, **31**(10): 2023 – 2031.
- [27] 高林, 王瑞, 张继光, 等. 生物炭与化肥混施对烤烟氮磷钾吸收累积的影响[J]. 中国烟草科学, 2017, **38**(2): 19 – 24.
GAO Lin, WANG Rui, ZHANG Jiguang, *et al.* Effects of mixed application of biochar and chemical fertilizers on uptake and accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium in flue-cured tobacco [J]. *Chinese Tobacco Science*, 2017, **38**(2): 19 – 24.
- [28] 李先才, 张晓龙, 潘义宏, 等. 不同比例缓释肥、烟草专用复合肥配施对植烟土壤肥力及烤烟产质量的影响[J]. 中国农学通报, 2021, **37**(36): 47 – 53.
LI Xiancai, ZHANG Xiaolong, PAN Yihong, *et al.* Effects of different proportions of slow-release fertilizer and compound fertilizer for tobacco on soil fertility and flue-cured tobacco yield and quality [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, **37**(36): 47 – 53.
- [29] 王晓强, 许跃奇, 何晓冰, 等. 减氮配施生物炭基肥对豫中烤烟产质量的影响[J]. 贵州农业科学, 2019, **47**(2): 32 – 36.
WANG Xiaoqiang, XU Yueqi, HE Xiaobing, *et al.* Effects of nitrogen reduction combined with biochar fertilizer on the yield and quality of Yuzhong flue-cured tobacco [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2019, **47**(2): 32 – 36.
- [30] 汪坤, 魏跃伟, 姬小明, 等. 生物炭基肥与哈茨木霉菌剂配施对烤烟和植烟土壤质量的影响[J]. 作物杂志, 2021(3): 106 – 113.
WANG Kun, WEI Yuewei, JI Xiaoming, *et al.* Effects of combined application of biochar-based fertilizer and *Trichoderma harzianum* on the qualities of flue-cured tobacco and tobacco-growing soil [J]. *Crops*, 2021(3): 106 – 113.
- [31] 李青山, 王德权, 杜传印, 等. 有机无机肥与生物炭配施对烤烟生长发育和烟叶质量的影响[J]. 土壤通报, 2021, **52**(6): 1393 – 1401.
LI Qingshan, WANG Dequan, DU Chuanyin, *et al.* Effects of organic and inorganic fertilizers combined with biochar on growth and quality of flue-cured tobacco [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, **52**(6): 1393 – 1401.