

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.02.011

肖和友, 朱伟, 郑生猛, 等. 连续施用不同种类生物质炭对植烟土壤养分的影响. 土壤, 2024, 56(2): 326–332.

## 连续施用不同种类生物质炭对植烟土壤养分的影响<sup>①</sup>

肖和友<sup>1</sup>, 朱伟<sup>1</sup>, 郑生猛<sup>2\*</sup>, 刘聪聪<sup>1</sup>, 何祥春<sup>1</sup>, 刘蓉<sup>1</sup>, 张赐喜<sup>1</sup>, 刘娜梅<sup>1</sup>, 刘旭<sup>1</sup>, 唐涛<sup>1</sup>, 陈立军<sup>1</sup>

(1 湖南省烟草公司邵阳市公司, 湖南邵阳 422000; 2 福建省生态产业绿色技术重点实验室, 武夷学院生态与资源工程学院, 福建武夷山 354300)

**摘要:** 为了改良植烟土壤质量, 探讨连续施用不同种类生物质炭对植烟土壤养分含量的影响, 通过 3 a 大田定位试验研究了连续施用不同生物质炭(CK: 不添加生物质炭; T1: 添加烟秆炭; T2: 废弃烟叶炭; T3: 玉米秸秆炭)下植烟土壤中的养分含量。结果表明: ①连续施用不同种类生物质炭能够显著提高土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾含量, 但对全磷、全钾以及碱解氮的作用并不显著。②在 2018 年采收期, 3 种生物质炭处理分别提高有机质 10.26%、9.12% 和 6.96%, 全氮 10.36%、18.29% 和 9.03%, 有效磷 6.96%、18.57% 和 9.82%, 速效钾 16.53%、33.84% 和 13.05%。③随着试验年限的延长, 添加烟秆炭对土壤有机质提升效果最好, 其次是废弃烟叶炭, 玉米秸秆炭最差; 废弃烟叶炭提升土壤全氮、有效磷和速效钾效果最佳。综合分析来看, 连续施用生物质炭能提高土壤养分含量, 改善土壤肥力, 以废弃烟叶炭效果最好, 可大面积推广。

**关键词:** 连续施用; 生物质炭; 植烟土壤; 养分

中图分类号: S156.6 文献标志码: A

### Effects of Continuous Application of Different Biochars on Tobacco-planting Soil Nutrients

XIAO Heyou<sup>1</sup>, ZHU Wei<sup>1</sup>, ZHENG Shengmeng<sup>2\*</sup>, LIU Congcong<sup>1</sup>, HE Xiangchun<sup>1</sup>, LIU Rong<sup>1</sup>, ZHANG Cixi<sup>1</sup>, LIU Namei<sup>1</sup>, LIU Xu<sup>1</sup>, TANG Tao<sup>1</sup>, CHEN Lijun<sup>1</sup>

(1 Shaoyang Tobacco Company of Hunan Province, Shaoyang, Hunan 422000, China; 2 Laboratory of Eco-Industrial Green Technology, College of Ecology and Resources Engineering, Wuyi University, Wuyishan, Fujian 354300, China)

**Abstract:** In order to improve the quality of tobacco-planting soil, the effects of continuous application of different kinds of biochars on the tobacco-planting soil nutrient contents were studied by a 3 a field experiment conducted in Fengtian Town, Xinning County, Shaoyang City, Hunan Province during 2016–2018. The treatments included CK (no biochar added), T1 (tobacco stem-derived biochar), T2 (wasted tobacco leaf-derived biochar), T3 (maize straw-derived biochar). The results showed that continuous application of different biochars significantly increased the contents of soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN), available phosphorus (AP) and available potassium (AK), but had no significant influence on the contents of total phosphorus (TP), total potassium (TK), and alkali-hydrolyzed nitrogen (AN). In the harvest period of 2018, three biochar treatments increased SOM by 10.26%, 9.12% and 6.96%, respectively; increased TN by 10.36%, 18.29% and 9.03%, respectively; increased AP by 6.96%, 18.57% and 9.82%, respectively; and increased AK 16.53%, 33.84% and 13.05%, respectively. With the extension of the test period, the addition of tobacco stem biochar increased SOM most, followed by wasted tobacco leaf biochar and maize straw biochar. However, the wasted tobacco leaf biochar increased TN, AP and AK most. In conclusion, continuous application of biochar can improve soil nutrient contents and soil fertility, and the tobacco leaf biochar has the best potential and prospect of application.

**Key words:** Continuous application; Biochar; Tobacco-planting soil; Nutrients

①基金项目: 邵阳市烟草公司科技计划重点项目(2015—2018)、邵阳市烟草专卖局(公司)科技项目(2015)和武夷学院引进人才启动项目(YJ202117)资助。

\* 通讯作者(shengmz0712@163.com)

作者简介: 肖和友(1989—), 男, 湖南邵阳人, 硕士, 农艺师, 主要从事植烟土壤改良及烟叶提质增效研究。E-mail: hyxiao0521@163.com

烤烟是我国南方农村地区最重要的经济作物之一，健康的土壤是生产高质量烟草的基础。由于过去烟叶种植中对化肥的过度依赖，植烟土壤环境呈现恶化趋势，土壤质量和结构变差、养分流失，从而导致烟草生理代谢失调、烟叶质量下降<sup>[1]</sup>。改良植烟土壤、提高土壤养分，从而提升烟叶质量已经成为烟草工作者的研究重点。近年来，生物质炭因其不仅具有普通有机物质的优良性质，更具有独特的物理、化学及生物学特性，在用于土壤改良方面取得较好效果<sup>[2-4]</sup>。生物质炭是生物质在完全或部分缺氧情况下经高温热解化后不完全燃烧的产物，含有60%以上的碳素，孔隙结构发达，具较大的比表面积，能够降低土壤容重，增强土壤通气性和保水性，降低土壤酸度，有效改善土壤理化特性，明显提高土壤肥力，促进作物增产增质<sup>[5-7]</sup>。生物质炭本身具有的理化性质使其可以作为土壤改良剂，提高土壤有机碳含量水平，稳定土壤有机碳库，增加土壤中矿质养分含量，提高肥料养分利用率，具有较好的保肥性能，并降低环境污染风险<sup>[8-10]</sup>。

将生物质炭用于改善植烟土壤质量，提升烟叶品质具有较好的应用前景<sup>[11-12]</sup>。有研究表明，生物质炭有利于促进植烟土壤有机碳、全氮和全钾含量的提高，全磷含量变化不大<sup>[13]</sup>；土壤速效养分对生物质炭的响应表现为碱解氮含量有所降低，速效钾含量显著提高，对有效磷影响不大<sup>[14]</sup>。郭伟等<sup>[15]</sup>通过3 a定位试验研究发现，连续施用3 a生物质炭明显增加了0~15 cm耕层土壤中的全氮含量。刘卉等<sup>[16]</sup>研究表明施用生物质炭能够显著提高植烟土壤有机质、碱解氮、铵态氮及速效钾含量，且随着生物质炭施用量的增加呈先升高后降低的趋势，从改良土壤肥力效果来看，生物质炭施用量在3 750 kg/hm<sup>2</sup>的水平下较为适宜。

邵阳是湖南主要烤烟种植区之一，烤烟香型风格属于南岭丘陵生态区-焦甜醇甜香型<sup>[17]</sup>，其常年烤烟种植面积约0.46万hm<sup>2</sup>，烟叶产量近0.8万t，植烟土壤类型主要为红壤和黄壤，轮作制度为烟稻轮作。虽然近年来生物质炭用于植烟土壤上的研究很多，但邵阳烟区相关的研究尚缺。另外，不同种类生物质炭在土壤改良中的效果差异也有待于进一步系统研究。鉴于此，本文通过在邵阳典型烟区的3 a田间定位试验，以烟草废弃物和玉米秸秆为原料制成生物质炭，研究其连续施用对土壤性质改良的效果，旨在调节植烟土壤中养分含量，为优质烤烟的生产提供良好的土壤条件，并为生物质炭在改善土壤肥力、改良植烟土壤方面提供科学指导。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

供试烟草品种为云烟87，由邵阳市烟草公司新宁县分公司提供。供试土壤为第四纪红黏土发育的红壤，土壤有机质、全氮、全磷和全钾含量分别为14.55、1.21、0.54和16.56 g/kg，碱解氮、有效磷和速效钾含量分别为96.07、17.84和88.41 mg/kg，pH为4.72，CEC为6.06。供试肥料为湖南金叶众望科技有限公司生产的烟草专用肥料(基肥N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O为8-11-11，追肥N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O为10-0-32，提苗肥N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O为20-9-0)和硫酸钾(K<sub>2</sub>O≥50%)。生物质炭由烟秆、废弃烟叶和玉米秸秆采用炭化炉制备而成。3种生物质炭养分含量参见文献<sup>[18]</sup>，其中有机碳含量分别为552.85、371.34和501.34 g/kg，全氮含量分别为20.35、29.23和8.34 g/kg，全磷含量分别为0.06、0.23和0.34 g/kg，全钾含量分别为5.05、87.56和46.35 g/kg，碱解氮含量分别为622.2、869.87和94.33 mg/kg，有效磷含量分别为241.05、255.55和601.03 mg/kg，速效钾含量分别为674.68、5 948.34和3 829.29 mg/kg。

### 1.2 试验设计

田间试验于2016—2018年在湖南省邵阳市新宁县丰田乡堆子田村进行。共设4个处理，不添加生物质炭处理为对照(CK)，其他3个处理分别为添加烟秆炭(T1)、废弃烟叶炭(T2)、玉米秸秆炭(T3)，不同年份施肥处理、施肥量和施肥方法相同。各处理的施肥量为CK：烟草基肥750 kg/hm<sup>2</sup>，烟草提苗肥75 kg/hm<sup>2</sup>，烟草专用追肥450 kg/hm<sup>2</sup>，硫酸钾375 kg/hm<sup>2</sup>；T1、T2、T3的施肥量均为：生物质炭2 250 kg/hm<sup>2</sup>，烟草基肥600 kg/hm<sup>2</sup>，烟草提苗肥75 kg/hm<sup>2</sup>，烟草专用追肥450 kg/hm<sup>2</sup>，硫酸钾375 kg/hm<sup>2</sup>。每个处理重复3次，共12个田间小区(42 m<sup>2</sup>)，每个小区移栽长势一致的烟苗64株，所有田间操作管理(包括采样时间以及采样方法)均按当地烟叶生产技术进行<sup>[18]</sup>。每一年移栽前对土壤施用石灰消毒。烤烟于前一年12月中下旬播种，当年3月中上旬移栽，5月中上旬打顶，5月下旬开始采集烘烤下部叶片。

### 1.3 测定项目与方法

分别在团棵期(4月20日左右)、旺长期(4月20日—5月30日)、打顶期(5月30日左右)、采收期(6月10日—7月30日)各取1次耕层土壤样，测定有机质、全氮、全钾、全磷、碱解氮、速效钾和有效磷含量，具体测定方法参考《土壤农化分析》<sup>[19]</sup>。

## 1.4 数据处理

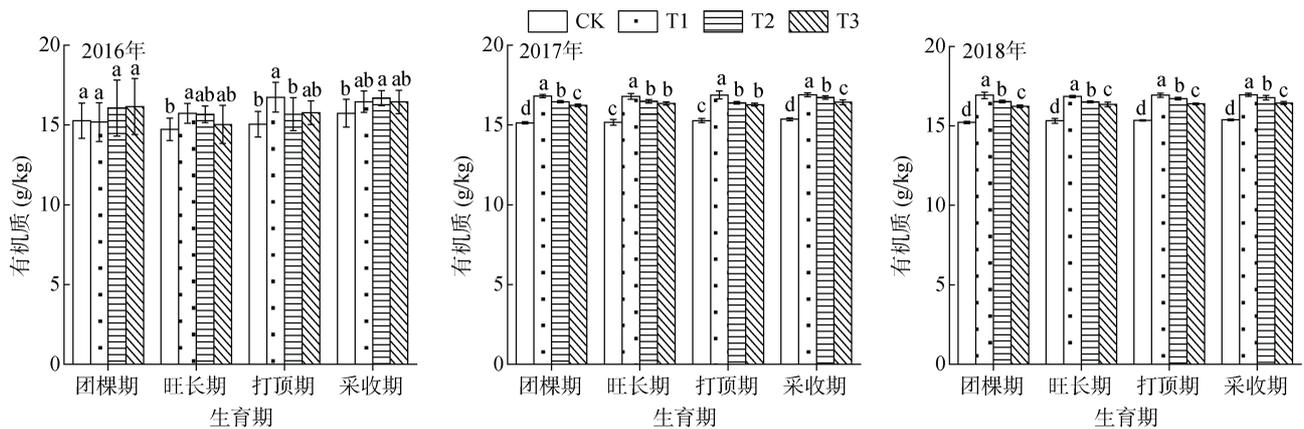
试验数据采用 Excel 2010 进行处理, 方差分析和多重比较采用 SPSS 17.0 统计分析软件进行。

## 2 结果

### 2.1 施用生物质炭对土壤有机质含量的影响

土壤有机质是植物养分的主要来源, 也是评估土壤肥力和土壤质量的重要指标之一<sup>[20]</sup>。由图 1 可知, 3 a 定位试验表明, 连续施用不同生物质炭处理在各生育期土壤有机质含量变化存在差异, 含量范围为 14.72~16.95 g/kg。总体上生物质炭处理的有机质含量都高于 CK 处理, 其中第 1 年差异

不显著, 但随着试验年限的延长, 后两年的差异达到显著水平。2016 年, 各生物质炭处理间, 仅有打顶期 T1 显著高于 T2, 其他生长期均无显著差异; 此外, T1 在旺长期、打顶期显著高于 CK, T2 在采收期高于 CK。2017 年与 2018 年, 各生物质炭处理的土壤有机质含量在不同生育期间变化趋势一致, 各生物质炭处理均显著高于 CK, 其中以 T1 最高, T2 次之, T3 较低。在 2018 年采收期, 相比 CK, 3 种生物质炭处理土壤有机质含量分别提高 10.26%、9.12% 和 6.96%。因此, T1 处理土壤有机质含量提高效果更佳, 原因可能是烟杆生物质炭含有更高的有机碳。



(图中小写字母不同表示同一生育期不同处理间差异显著( $P < 0.05$ ), 下同)

图 1 不同生物质炭处理下烟草不同生育期土壤有机质含量(g/kg)

Fig. 1 Soil organic matter contents under different biochar treatments in different tobacco growth stages

比较 2016—2018 年各处理采收后土壤有机质含量变化, 表明施用生物质炭能够显著提高土壤有机质含量, 随着试验年限的延长, 各生物质炭处理后的土壤有机质含量均有小幅提高, 其中 T1 处理最高, 这进一步说明施加烟杆生物质炭对提高土壤有机质含量效果较好。

### 2.2 施用生物质炭对土壤全氮及碱解氮含量的影响

连续施用不同种类生物质炭后土壤全氮含量如图 2 所示。从整体上看, 3 a 内各处理全氮含量变化幅度较小, 均处在一个较为稳定的水平, 基本在 1.05 g/kg 左右。这说明, 全氮含量短期内较为稳定, 不易发生较大变化。各处理之间在 4 个不同生育期的变化趋势一致。2016 年各处理间均无显著差异, 而到了 2017 年和 2018 年, 各生物质炭处理全氮含量均显著高于 CK, 说明生物质炭对全氮含量具有促进作用。各生物质炭处理之间, T2 处理后全氮含量最高, 且在 2017 年和 2018 年显著高于 T1 和 T3 处理。在 2018 年采收期, 相比 CK, 3 种生物质炭处理全氮含量分

别提高 10.36%、18.29% 和 9.03%。不同生物质炭处理下不同生育期全氮含量的变化与有机质含量的变化规律相类似, 这应该是因为全氮含量与土壤有机质具有较好的耦合关系。

碱解氮含量的高低能够反映土壤近期的供氮能力, 与当季烤烟的产量和质量关系密切<sup>[15]</sup>。研究表明, 碱解氮含量为 70~100 mg/kg 时, 更适宜优质烤烟生产<sup>[21]</sup>。由图 3 可以看出, 连续施用不同生物质炭后碱解氮无显著差异, 基本在 93 mg/kg 左右。比较 3 a 内各处理间的碱解氮含量, 2016 年 CK 含量最高, 在旺长期显著高于 T3, 在打顶期显著高于各生物质炭处理。2017 年, T3 处理碱解氮含量最低, 在旺长期和打顶期显著低于 CK 和 T1、T2 处理。2018 年, T2 处理碱解氮含量最高, T3 处理含量最低; 其中, 团根期和旺长期表现为: CK、T3 < T1、T2, 打顶期表现为: T3 < CK、T1 < T2; 采收期表现为: T3 < CK < T1 < T2。说明不同种类生物质炭对碱解氮的作用存在差异。

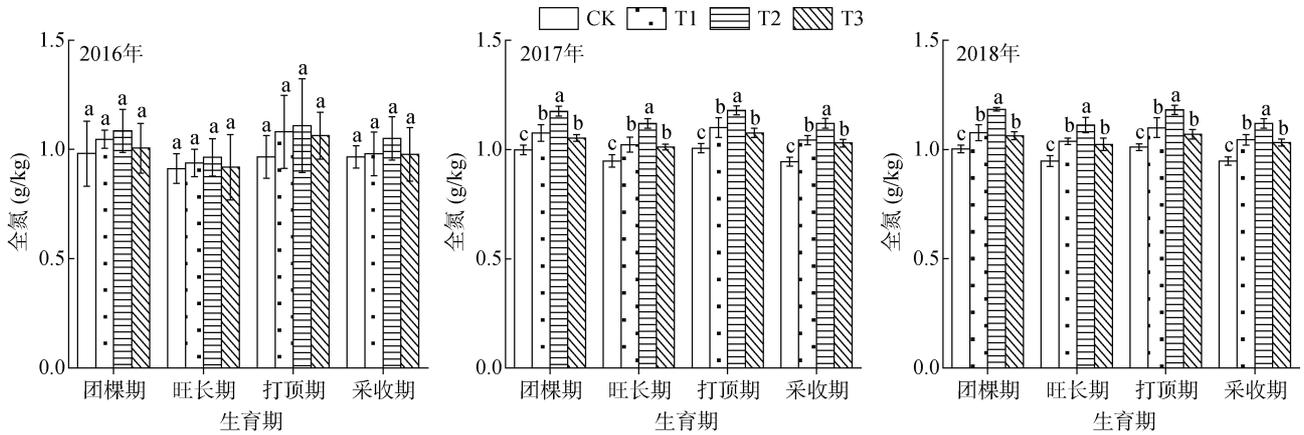


图 2 不同生物质炭处理下烟草不同生育期土壤全氮含量(g/kg)

Fig. 2 Soil total nitrogen contents under different biochar treatments in different tobacco growth stages

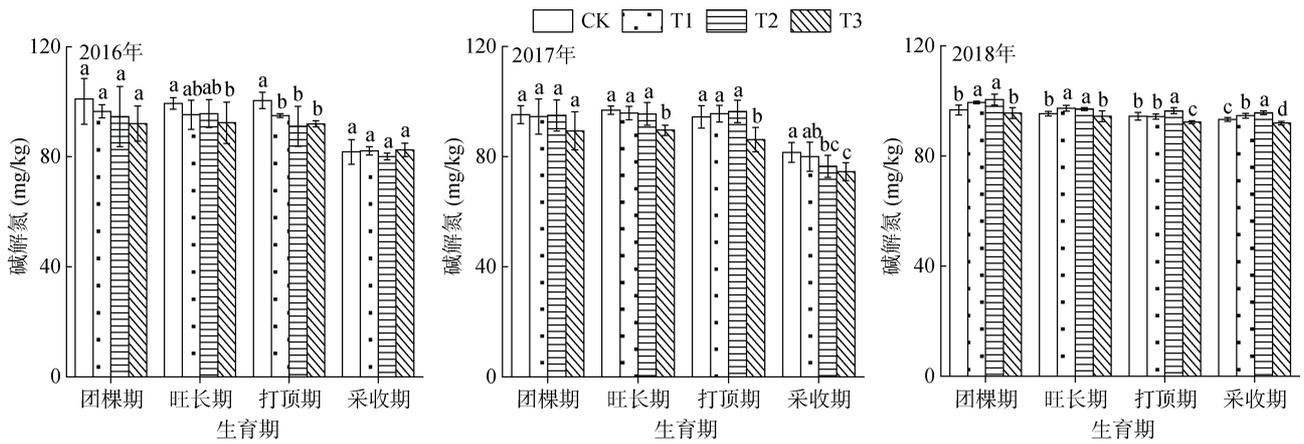


图 3 不同生物质炭处理下烟草不同生育期土壤碱解氮含量(mg/kg)

Fig. 3 Soil alkali-hydrolyzable nitrogen contents under different biochar treatments in different tobacco growth stages

### 2.3 施用生物质炭对土壤全磷及有效磷含量的影响

土壤磷含量受土壤母质和成土作用影响较大,有利于提高烤烟的抗逆性,促进烤烟成熟,改善烟叶颜色<sup>[22]</sup>,而有效磷是植物磷素营养的直接来源,含量一般为 10~20 mg/kg。如图 4 所示,3 a 定位试验,各处理表现为随

着年限延长全磷先降低后升高,但变化幅度不大,较为稳定。在 2016 年和 2017 年,全磷含量不同处理间仅在旺长期表现出差异,其他生长期均无显著差异,基本在 0.44 g/kg 左右。这说明,全磷含量在不同生育期的变化较小,且生物质炭处理对全磷含量的影响较小。

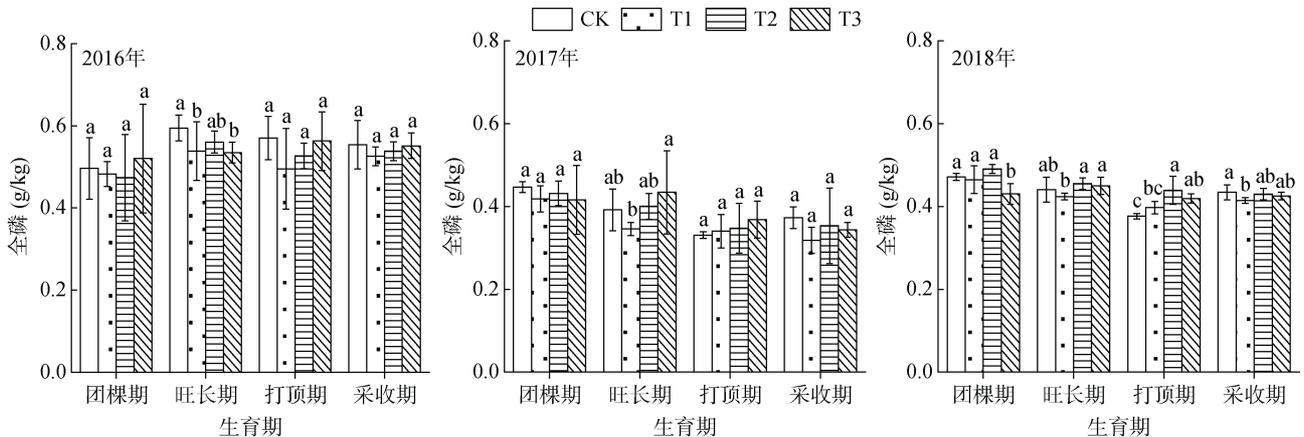


图 4 不同生物质炭处理下烟草不同生育期土壤全磷含量(g/kg)

Fig. 4 Soil total phosphorus contents under different biochar treatments in different tobacco growth stages

从图 5 可以看出,有效磷含量年际间变化幅度不大,在各生育期变化也较小,但不同处理间表现出差异。其中 2016 年,各生物质炭处理在团棵期显著高于 CK, T1、T3 在打顶期显著高于 CK; 而到了采收期,仅有 T3 高于 CK。2017 年, T2、T3 处理有效磷含量在团棵期显著高于 CK 和 T1;

T2 在采收期显著高于 CK 和 T1 处理。在 2018 年,各生物质炭处理有效磷含量显著高于 CK, 以 T2 处理最高,且在旺长期、打顶期和采收期显著高于其他处理。在 2018 年采收期,相比 CK, 3 种生物质炭处理有效磷含量分别提高 6.96%、18.57% 和 9.82%。

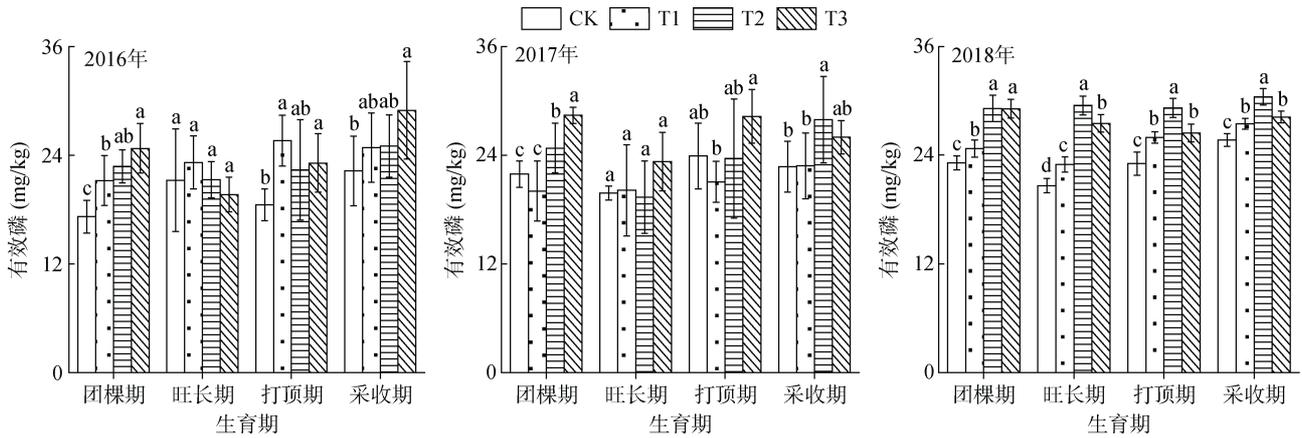


图 5 不同生物质炭处理下烟草不同生育期土壤有效磷含量(mg/kg)

Fig. 5 Soil available phosphorus contents under different biochar treatments in different tobacco growth stages

#### 2.4 施用生物质炭对土壤全钾及速效钾含量的影响

钾可以改善烟叶叶片颜色、燃烧性和吸湿性,对烟叶一些芳香物质的合成积累有促进作用<sup>[23]</sup>。由图 6 可知,总体上不同时期以及不同生物质炭处理间全钾含量变化较小且差异不显著,基本在 8.42 g/kg 左右。比较同一时期不同处理间的全钾含量,发现生物质炭处理的全钾含量高于 CK 处理,但是差异不显著。其中,2017 年 T2 处理后全钾含量在旺长期和采收期显著高于 CK; 2018 年生物质炭处理整体上均高于 CK, 但各生物质炭处理之间仅在旺长期略有差异,表现为 T2>T1、T3, 其他生长期均无差异。

土壤速效钾是指易被作物吸收利用的钾,尽管速效钾仅占全钾含量的 1%~2%,但由于能被当季作物吸收,直接影响作物烤烟烟叶的含钾量,是表征土壤钾素丰缺的重要指标,优质烟叶所需的土壤速效钾含量至少维持在 150 mg/kg 以上<sup>[22]</sup>。由图 7 可知,3 a 间不同处理在各生育期速效钾含量变化存在差异,含量为 142.63~610.21 mg/kg。生物质炭处理后的速效钾含量显著高于 CK 处理,说明生物质炭处理有助于提升土壤速效钾,且以 T2 处理效果最好。在 2018 年采收期,相比 CK, 3 种生物质炭处理速效钾含量分别提高 16.53%、33.84% 和 13.05%。

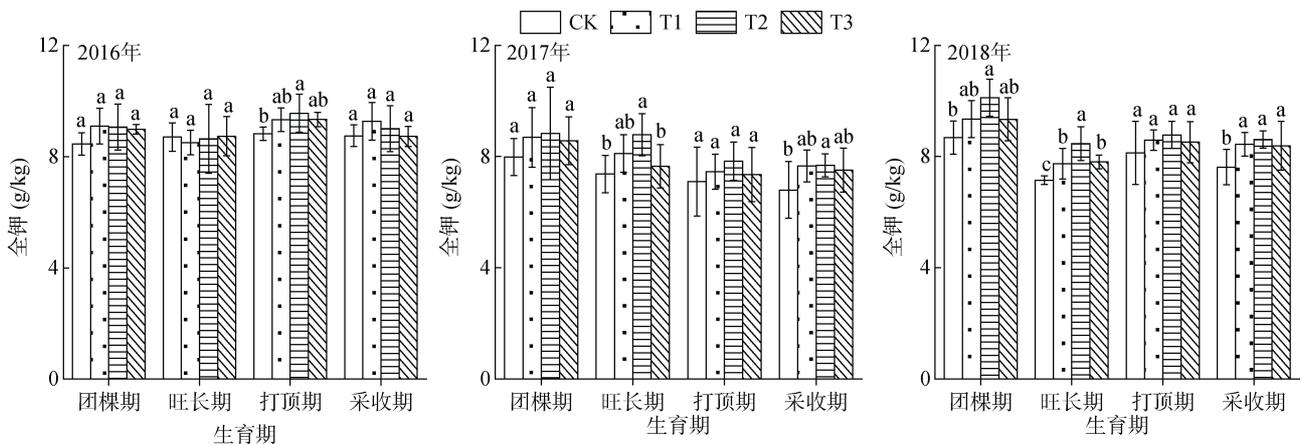


图 6 不同生物质炭处理下烟草不同生育期土壤全钾含量(g/kg)

Fig. 6 Soil total potassium contents under different biochar treatments in different tobacco growth stages

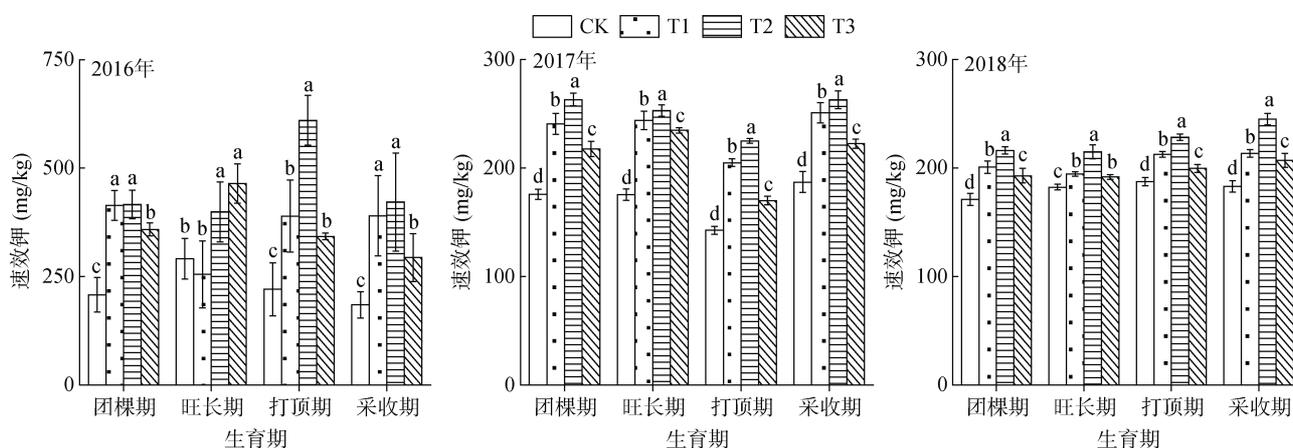


图 7 不同生物质炭处理下烟草不同生育期土壤速效钾含量(mg/kg)

Fig. 7 Soil available potassium contents under different biochar treatments in different tobacco growth stages

### 3 讨论

土壤养分含量与烤烟生产密切相关,良好的土壤肥力是优质烤烟生产的前提<sup>[16]</sup>。生物质炭被证实可用于优化土壤环境、改良土壤肥力及提升作物品质<sup>[11, 24]</sup>。本研究 3 a 定位试验表明,连续施用生物质炭能够提升土壤有机质、全氮等养分含量,这与已有的研究结果一致<sup>[14, 25]</sup>。生物质炭本身就是有机质,其芳基碳及羧基碳的比例较高,化学结构相对稳定,属于生物及化学“惰性”物质,不易被矿化,因而有利于土壤有机质含量的提升。随着试验年限的延长,各生物质炭处理后的土壤有机质含量均有小幅提高,但不同种类生物质炭对土壤有机质提升的效果存在差异,以烟秆炭效果最好(图 1)。生物质炭物理化学性质与其来源和产生条件有关,不同种类生物质炭结构性质可能存在着较大的差异<sup>[26]</sup>,进而导致其对土壤养分的改善效果也不一样。本研究中所用的生物质炭以烟秆炭有机碳含量较高<sup>[18]</sup>,因此,其施入土壤后对土壤有机质的提升效果最为显著。

施用生物质炭,土壤全氮含量也有所增加(图 2),可能是施用生物质炭后,土壤 C/N 提高,减缓了植株对土壤氮素的利用,导致全氮含量增加。此外,生物质炭的多孔隙结构和高的 CEC,增加了对土壤氮素的吸附和固定,有利于氮素在土壤中的积累。生物质炭还可以通过自身的吸附特性减少雨水冲刷造成的氮素流失,间接提高土壤氮等养分含量<sup>[27]</sup>。同时,在 3 种生物质炭中,由于废弃烟叶炭全氮含量最高<sup>[18]</sup>,解释了其施用后对土壤全氮含量提升效果最好的现象。

本研究中,施用生物质炭对土壤碱解氮含量的影响表现为先降低后趋于稳定(图 3)。前两年,施入生

物质炭导致碱解氮含量略有降低,这可能是施用生物质炭后,土壤 C/N 会大幅提高,减缓了微生物对土壤有机氮的矿化;同时,生物质炭的施入增加了土壤的孔隙结构,有利于氨态氮的挥发,导致碱解氮含量下降<sup>[28]</sup>。随着施用年限的增加,碱解氮含量降低变化幅度较小,这可能是由于施加生物质炭后,增加了对土壤养分的固定,同时也抑制了有效养分释放的速度,导致碱解氮含量处于一个较为稳定的水平。废弃烟叶炭的碱解氮含量最高<sup>[18]</sup>,导致对土壤碱解氮提升效果最好;而玉米秸秆炭的碱解氮含量相对偏低,表现出对土壤碱解氮含量并无提升效果。

土壤有效磷含量随生物质炭施入而显著增加(图 5),这可能与生物质炭独特的物理性状有关,生物质炭的多孔结构有利于增加微生物活性,相关功能微生物活化磷的能力增强,进而有助于提升有效磷含量。土壤速效钾含量在施入生物质炭后也显著增加(图 7),可能是生物质炭本身含有一定量的速效钾,施入土壤后可直接提升速效钾含量<sup>[29]</sup>;本研究所用废弃烟叶炭速效钾含量远高于其他两种生物质炭<sup>[18]</sup>,因此对土壤速效钾改善效果最佳。另一方面,土壤 CEC 也因施入生物质炭而增加,进而增加了土壤中可交换性钾含量。考虑到烟草的喜钾特性,较高的速效钾含量也是生产优质烟草的有利条件。

3 种生物质炭处理中,废弃烟叶炭对提升土壤全氮、有效磷、速效钾的效果最优,说明不同生物质炭对土壤养分的调控和改善效果存在差异。鉴于施入废弃烟叶炭在对改善烟叶产量和品质、提升烤烟的经济效益等方面的作用均优于其他两种生物质炭<sup>[11]</sup>,将废弃烟叶生物质炭用于改善植烟土壤养分具有广阔前景,也是最佳选择。

本研究进一步表明,通过合理地施用生物质炭能

够调节植烟土壤养分含量,改善土壤质量,从而对烤烟生长和烟叶质量起到积极作用<sup>[30]</sup>,但选择合适的生物质炭种类是关键。

#### 4 结论

在本试验条件下,3 a 连续施用不同种类生物质炭均能够显著提高土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾含量,但对全磷、全钾和碱解氮影响并不显著。由于各生物质炭本身的养分含量有所不同,不同种类生物质炭改善土壤养分的效果略有差异,烟秆炭对提升土壤有机质含量效果最好,废弃烟叶炭提升土壤全氮、速效钾和有效磷的效果最佳。综上,废弃烟叶炭对改善植烟土壤的养分效果相对最佳,适宜在产区推广应用。

#### 参考文献:

- [1] 李雪利,叶协锋,顾建国,等. 土壤 C/N 比对烤烟碳氮代谢关键酶活性和烟叶品质影响的研究[J]. 中国烟草学报, 2011, 17(3): 32–36.
- [2] Zhang Y F, Wang J M, Feng Y. The effects of biochar addition on soil physicochemical properties: A review[J]. CATENA, 2021, 202: 105284.
- [3] 李毅,梁嘉平,王小芳,等. 改善土壤理化性质和作物出苗率的最佳生物炭施用量[J]. 土壤学报. 2024, 61(1): 64–76.
- [4] 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.
- [5] Marris E. Putting the carbon back: Black is the new green[J]. Nature, 2006, 442(7103): 624–626.
- [6] Singh B P, Cowie A L, Smernik R J. Biochar carbon stability in a clayey soil as a function of feedstock and pyrolysis temperature[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(21): 11770–11778.
- [7] 王昆艳,官会林,卢俊,等. 生物质炭施用量对旱地酸性红壤理化性质的影响[J]. 土壤, 2020, 52(3): 503–509.
- [8] Zhang Q Q, Song Y F, Wu Z, 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]. Journal of Cleaner Production, 2020, 242: 118435.
- [9] El-Naggar A, El-Naggar A H, Shaheen S M, et al. Biochar composition-dependent impacts on soil nutrient release, carbon mineralization, and potential environmental risk: A review[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 241: 458–467.
- [10] 李江舟,娄翼来,张立猛,等. 不同生物炭添加量下植烟土壤养分的淋失[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 1075–1080.
- [11] 肖和友,朱伟,王海军,等. 连续施用不同生物质炭对植烟土壤特性和烤烟品质的影响[J]. 中国烟草科学, 2021, 42(3): 19–25.
- [12] 陈懿,林英超,杨志晓,等. 炭基肥对黄壤烤烟生理和氮素吸收与平衡的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 864–872.
- [13] 李志刚,张继光,申国明,等. 烟秆生物质炭对土壤碳氮矿化的影响[J]. 中国烟草科学, 2016, 37(2): 16–22.
- [14] 王成己,陈庆荣,陈曦,等. 烟秆生物质炭对烟草根际土壤养分及细菌群落的影响[J]. 中国烟草科学, 2017, 38(1): 42–47.
- [15] 郭伟,陈红霞,张庆忠,等. 华北高产农田施用生物质炭对耕层土壤总氮和碱解氮含量的影响[J]. 生态环境学报, 2011, 20(3): 425–428.
- [16] 刘卉,周清明,黎娟,等. 生物炭对植烟土壤养分的影响[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(3): 150–155.
- [17] 罗登山,王兵,乔学义. 《全国烤烟烟叶香型风格区划》解析[J]. 中国烟草学报, 2019, 25(4): 1–9.
- [18] 肖和友,李宏图,杨勇,等. 烟草废弃物生物质炭对植烟土壤、烤烟生长及经济效益的影响[J]. 湖南农业科学, 2018(6): 36–39, 43.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] 郑聪,许自成,苏永士,等. 三门峡烟区烤烟总氮与土壤氮素含量的分布特点及关系分析[J]. 江西农业学报, 2009, 21(8): 64–67.
- [22] 刘国顺. 烟草栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [23] 王全贞,潘义宏,杨森,等. 不同钾肥施用方式和施用量对烟叶品质和经济性状的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(8): 84–88.
- [24] 程明琨,萧洪东,李学文,等. 减氮条件下生物质炭施用对珠三角地区生菜产量、品质及土壤性质的影响[J]. 土壤, 2023, 55(1): 37–44.
- [25] 潘占东,马倩倩,陈晓龙,等. 添加生物质炭对黄土高原旱作农田土壤养分、腐殖质及其组分的影响[J]. 草业学报, 2022, 31(2): 14–24.
- [26] 周桂玉,窦森,刘世杰. 生物质炭结构性及其对土壤有效养分和腐殖质组成的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(10): 2075–2080.
- [27] 孙敬国,孙光伟,王昌军,等. 生物质炭对植烟土壤改良及烟叶品质的影响[J]. 山西农业科学, 2017, 45(9): 1557–1560.
- [28] 聂天宏,韩学博,王海龙,等. 不同种类生物质炭对植烟土壤保育及烤烟生长和品质的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 346–351, 358.
- [29] 李丽,王雪艳,田彦芳,等. 生物质炭对土壤养分及设施蔬菜产量与品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(5): 1237–1244.
- [30] 凌天孝,于晓娜,李志鹏,等. 生物炭与化肥配施对土壤特性及烤烟品质和经济性状的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(6): 1425–1432.