

生物炭对植烟土壤微生态和烤烟生理的影响*

陈懿¹ 陈伟¹ 林叶春¹ 程建中² 潘文杰^{1**}

(¹贵州省烟草科学研究院, 贵阳 550081; ²中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081)

摘要 生物炭是农林废弃物资源化利用的研究热点之一。通过田间试验,研究了烟杆炭不同施用量(0、1、10、50 t·hm⁻²)对植烟土壤微生态和烤烟生理特性的影响。结果表明:烤烟各时期土壤含水量均随生物炭用量增加而增加;在烤烟旺长阶段,50 t·hm⁻²处理的土壤含水量显著高于其他处理。随着生物炭用量的增加,土壤总孔隙度和毛管孔隙度逐渐增加,细菌、放线菌、真菌的数量表现为先增后减的趋势,其中生物炭用量10 t·hm⁻²处理下数值最大。土壤早期呼吸速率随生物炭用量的增加而增大,与对照相比,生物炭处理土壤呼吸速率增幅为7.9%~36.9%,生物炭高用量(50和10 t·hm⁻²)与对照差异显著。生物炭提升了烤烟叶片水势,增加了叶片类胡萝卜素和叶绿素含量,显著增加了根系、地上部和总干质量。说明生物炭在改良植烟土壤微生态和调控烤烟生理特性等方面具有积极效应。

关键词 烤烟; 植烟土壤; 生物炭; 微生物; 土壤呼吸速率

文章编号 1001-9332(2015)12-3781-07 中图分类号 S15, S572 文献标识码 A

Effects of biochar on the micro-ecology of tobacco-planting soil and physiology of flue-cured tobacco. CHEN Yi¹, CHEN Wei¹, LIN Ye-chun¹, CHENG Jian-zhong², PAN Wen-jie¹ (¹Guizhou Academy of Tobacco Science, Guiyang 550081, China; ²State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2015, 26(12): 3781-3787.

Abstract: Biochar is one of the research hotspots in the field of the agroforestry waste utilization. A field experiment was carried out to investigate the effects of different amounts of tobacco stem biochar (0, 1, 10, 50 t·hm⁻²) on soil micro-ecology and physiological properties of flue-cured tobacco. The results showed that soil water content (SWC) increased at all tobacco growth stages as the amounts of biochar applications increased. There were significant differences of SWC between the treatment of 50 t·hm⁻² and other treatments at the period of tobacco vigorous growth. As the application of biochar increased, the total soil porosity and capillary porosity increased, while soil bacteria, actinomyces, fungi amount increased firstly and then decreased. The amount of soil bacteria, actinomyces, fungi reached the maximum at the treatment of 10 t·hm⁻². Soil respiration rate (SRR) at earlier stage increased with the increase of biochar application. Compared with the control, SSR under biochar treatments increased by 7.9%–36.9%, and there were significant differences of SRR between high biochar application treatments (50 t·hm⁻² and 10 t·hm⁻²) and the control. Biochar improved leaf water potential, carotenoid and chlorophyll contents. Meanwhile, the dry mass of root, shoot and total dry mass under biochar application were higher than that of the control. These results indicated that the biochar played active roles in improving tobacco-planting soil micro-ecology and regulating physiological properties of flue-cured tobacco.

Key words: flue-cured tobacco; tobacco-planting soil; biochar; microorganism; soil respiration rate.

DOI:10.13287/j.1001-9332.20150929.016

在全国总耕地面积不断减少的背景下,过度使

用和长期偏重施用化肥,不重视土壤肥力培育,造成耕地土壤质量和耕性下降,主要表现为酸化、板结、有机质含量减少、养分不平衡等^[1]。烤烟生产也面临类似的问题,一些地区优质植烟土壤资源有限,烤烟连作较普遍,植烟土壤理化性状和烤烟根际微生态

* 国家烟草专卖局科技重大专项(Ts-02-20110015)、贵州省科技重大专项[2014]6015-2和贵州省农业攻关项目(NY[2013]3019)资助。

** 通讯作者。E-mail: wenjiepan@163.com
2015-03-17 收稿, 2015-08-24 接受。

恶化,土壤养分失调,病原微生物大量繁殖,微生物群落结构失衡,土壤酶活性下降,导致烟株营养失调、土传病害发生严重,制约了烤烟优质生产^[2-3]。烟叶采收完毕后,烟杆通常被农户废弃在烟田或集中焚烧,废弃的烟株残体易成为部分病虫和病原菌寄主,影响下季作物的种植,增加病虫害发生风险;烟杆直接焚烧,则会增加农田温室气体排放,不利于农田碳库储备。生物炭是农林废弃物等生物质在缺氧条件下热裂解形成的稳定的富碳产物^[4]。大量研究表明,生物炭在提高土壤持水性能^[5-6]和阳离子交换量^[7-8]、增加土壤pH和有机碳含量^[9-11]、增加土壤养分吸持^[12-13]及作物产量^[14]、增碳减排^[15-16]等方面具有重要作用。然而,关于生物炭在烤烟生产中的应用及相关机理研究报道较少。全国烟区烟杆的生物量为2250~3000 kg·hm⁻²,每年约有450万t烟杆生物质,资源丰富,烟杆生物炭开发的潜力巨大。因此,本研究利用烟杆进行炭化,设置不同施用量,探索生物炭对植烟土壤微生态和烤烟生理的影响机制,旨在为植烟土壤保育技术提供理论支撑。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

试验于2014年在贵州省烟草科学研究院龙岗基地(26°52′24.8″N,107°06′40.8″E)进行。基地位于贵阳市开阳县龙岗镇,海拔1110 m,无霜期240~265 d,年均气温13.5~14.6℃,年日照时数948.2~1084.8 h,年均降雨量1129.9~1205.9 mm,土壤类型为黄壤。试验地基本性质:水解氮154.14 mg·kg⁻¹,有效磷38.97 mg·kg⁻¹,速效钾291.15 mg·kg⁻¹,有机质47.75 g·kg⁻¹,pH(1:2.5 H₂O)6.84,质地为壤黏土。

1.2 试验材料

烤烟品种为K326。肥料:烤烟专用基肥N:P₂O₅:K₂O=10:10:25,烤烟专用追肥N:P₂O₅:K₂O=13:0:26。生物炭:采用组合式生物炭颗粒炭化炉自制烟杆炭,施入大田前,磨细过5 mm筛。制炭温度为600℃,炭化时间8 h,其基本化学性质:氮23.03 g·kg⁻¹,碳760.07 g·kg⁻¹,氢26.65 g·kg⁻¹,硫0.99 g·kg⁻¹,水解氮54.6 mg·kg⁻¹,pH(1:5 H₂O)9.67。

1.3 试验设计

小区试验4个处理,3次重复,随机区组排列。设置不同的生物炭施用量:B₀(对照,0 t·hm⁻²)、B₁(1 t·hm⁻²)、B₁₀(10 t·hm⁻²)、B₅₀(50 t·hm⁻²)。株

行距为1.1 m×0.55 m,各小区植烟48株,小区面积29.04 m²。试验为等量施肥,其中专用基肥N、P₂O₅、K₂O用量分别为45 kg·hm⁻²、45 kg·hm⁻²、112.5 kg·hm⁻²,专用追肥N、P₂O₅、K₂O用量分别为30 kg·hm⁻²、0 kg·hm⁻²、60 kg·hm⁻²。

4月17日生物炭撒施均匀,旋耕入土(耕深25 cm);4月18日条施基肥(60%总氮)、起垄(垄高25 cm);4月27日采用地膜井窖方式移栽;5月19日进行井窖封土、穴施追肥(40%总氮)。其余作业及田间管理措施则按当地优质烟叶生产规范进行。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 土壤性状 烤烟栽后50 d,在各小区耕层利用环刀和铝盒对应采集土样,用于土壤容重、比重、质量含水量、毛管持水量的测定,计算总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度^[17];5点取样均匀混合后四分法留取耕层土样1 kg,4℃冰箱保存备测微生物(采用稀释平板法)。烤烟栽后100 d、采收结束,利用铝盒采集耕层土样,测定土壤质量含水量。

1.4.2 土壤呼吸 烤烟栽后35 d,采用LI-Cor 8100土壤碳通量测定系统连接内径20 cm短期叶室测定植烟土壤呼吸速率,测定用的PVC环插入土壤5 cm处。各小区设置1个观测点,位置为垄体上两烟株中间,观测时间为13:30。

1.4.3 烤烟生理指标测定、干物质质量统计 烤烟栽后35 d,各小区取1株烟,测定根系活力(氯化三苯基四氮唑法)^[18]。7月1日,各小区选择2株烟,采集第10叶位,采集时间为16:00,用于水势(采用WP4-T露点水势仪测定,样品平衡时间为0.5 h)和光合色素(80%丙酮提取,采用分光光度法)测定。8月20日,各小区选择2株烟,采集第18叶位,用于水势测定。烤烟栽后105 d,各小区取2株烟,洗净后按器官分开,105℃烘箱杀青30 min,80℃烘干至恒量后称量。

1.5 数据处理

采用Microsoft Excel 2013进行数据初步整理和制图,利用IBM SPSS Statistics 20.0进行单因素方差分析,多重比较采用Duncan法。

2 结果与分析

2.1 生物炭对植烟土壤微生态的影响

2.1.1 土壤水分 土壤水分在土壤和作物系统起至关重要的作用,不仅影响土壤有机质运移、微生物活动及土壤呼吸,而且影响作物根系对土壤养分和水分的吸收。从表1可以看出,植烟土壤不同深度土层

表 1 生物炭对土壤质量含水量的影响

Table 1 Effects of biochar on soil mass water content

土层深度 Soil depth (cm)	处理 Treatment	质量含水量 Mass water content (%)		
		旺长期 Vigorous growth stage	成熟期 Mature stage	采收结束 End of the harvest
0~10	B ₀	24.7±1.3c	12.2±2.5a	23.21±0.1b
	B ₁	23.8±0.3c	12.2±2.8a	23.85±0.7b
	B ₁₀	28.7±1.8b	13.0±3.6a	25.77±1.7b
	B ₅₀	40.2±0.5a	15.6±3.2a	34.05±7.6a
10~20	B ₀	25.4±1.4b	16.0±1.5b	24.37±1.4b
	B ₁	25.5±2.2b	16.4±1.5b	24.78±0.3b
	B ₁₀	29.2±1.6b	16.4±0.7b	25.12±1.5b
	B ₅₀	39.4±5.4a	20.1±3.5a	36.90±7.1a

不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters meant significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

各时期质量含水量均随生物炭施用量的增加而提高,各时期的降雨及烟地水分蒸发变化大,处理间质量含水量差异显著水平不同.烤烟旺长期,降雨充沛,烤烟生长所需水分最多;0~10 cm 土层,50 t·hm⁻²处理质量含水量最高,达 40.2%,是对照的 1.63 倍,50 和 10 t·hm⁻²处理质量含水量显著高于其余两处理 ($P < 0.05$);10~20 cm 土层,50 t·hm⁻²处理质量含水量 (39.4%) 显著高于其余处理.烤烟成熟阶段,降雨量急剧下降,土壤水分蒸发加剧;0~10 cm 土层处理间的差异均未达显著水平,可能与土壤浅表层毛管持水量快速下降有关;10~20 cm 土层,50 t·hm⁻²处理的质量含水量 (20.1%) 显著高于其余处理.烟叶采收结束后,降雨增多,不同深度土层 50 t·hm⁻²处理的质量含水量均显著高于其余处理.表明在降雨充沛的条件下,施用生物炭可提高植烟土壤质量含水量,且随着土层深度的增加,效果更明显.

2.1.2 土壤孔隙性质 土壤孔隙性质是指土壤孔隙总量及大、小孔隙分布,是土壤结构性的反映,结构好则孔性好,对土壤中水、肥、气、热状况和农业生产有显著影响.土壤总孔隙度反映土壤所有孔隙的总量,包括毛管孔隙度和非毛管孔隙度.施用生物炭后植烟土壤总孔隙度增加,随施用量的增加,总孔隙度呈逐渐递增的趋势.从表 2 可以看出,与对照总孔隙度 57.1% 相比,10 和 50 t·hm⁻²处理土壤总孔隙度均显著增加.毛管水占据的孔隙为毛管孔隙,一般小于 0.1 mm,毛管孔隙借毛管力的作用保持水分,为土壤蓄水供水.施用生物炭后植烟土壤毛管孔隙度增加,随施用量的增加,毛管孔隙度呈逐渐递增的趋势.50 t·hm⁻²处理的毛管孔隙度达 55.5%,较对照增加 10.1%,差异显著.毛管水不能占据的大孔隙为

表 2 生物炭对土壤孔隙性质的影响

Table 2 Effects of biochar on soil pore properties

处理 Treat- ment	总孔隙度 Total porosity (%)	毛管孔隙度 Capillary porosity (%)	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity (%)
B ₀	57.1±0.0c	45.4±3.7b	11.7±3.8a
B ₁	60.3±2.5bc	46.3±5.2b	14.1±7.5a
B ₁₀	64.9±1.7ab	49.3±0.3ab	15.5±1.6a
B ₅₀	69.9±4.0a	55.5±2.3a	14.4±3.4a

非毛管孔隙,是土壤通气和降雨或灌溉时透水的通道.随施用量的增加,非毛管孔隙度表现为先增后减的抛物线趋势,10 t·hm⁻²处理非毛管孔隙度最大,处理间差异不显著.表明施用生物炭有助于增加植烟土壤总孔隙度、毛管孔隙度,从而提高植烟土壤持水和渗水能力,改善通气状况.但施用量过大时,可能增加植烟土壤渗水能力下降的风险.

2.1.3 土壤微生物数量 土壤中功能细菌越多,越利于土壤中矿质养分的转化.施用生物炭后植烟土壤细菌数量增加,随施用量的增加,细菌数量呈现先增后减的抛物线趋势.从表 3 可以看出,所有处理植烟土壤细菌数量表现为 10 t·hm⁻² > 1 t·hm⁻² > 50 t·hm⁻² > 对照;10 t·hm⁻²处理细菌数量是对照的 4.95 倍,显著大于其余 3 个处理;1 t·hm⁻²处理细菌数量显著大于对照.随施用量的增加,放线菌数量呈现先增后减的趋势.所有处理植烟土壤放线菌数量表现为 10 t·hm⁻² > 1 t·hm⁻² > 对照 > 50 t·hm⁻²;10 t·hm⁻²处理放线菌数量分别是对照和 50 t·hm⁻²处理的 2.20 和 2.43 倍,差异均达显著水平.真菌的功能是多方面的,如参与新鲜有机物的降解和腐殖质的合成,通过菌丝体渗透作用和对土壤颗粒的机械束缚作用,积极参与稳定性团聚体的形成,使土壤的物理结构得到改善.同时,真菌也是植物主要的土传病原菌.随施用量的增加,真菌数量呈现先增后减的趋势.所有处理植烟土壤真菌数量表现为 10 t·hm⁻² > 1 t·hm⁻² > 对照 > 50 t·hm⁻²;10 t·hm⁻²处理真菌数量分别是对照和 50 t·hm⁻²处理的 1.33 和

表 3 生物炭对土壤微生物数量的影响

Table 3 Effects of biochar on soil microorganism amount

处理 Treat- ment	细菌 Bacteria (×10 ⁷ cfu·g ⁻¹)	放线菌 Actinomycetes (×10 ⁶ cfu·g ⁻¹)	真菌 Fungi (×10 ⁵ cfu·g ⁻¹)
B ₀	0.58±0.30c	3.91±1.67b	1.85±0.61ab
B ₁	1.37±0.03b	6.55±2.33ab	2.21±0.26ab
B ₁₀	2.85±0.53a	8.59±3.42a	2.46±0.79a
B ₅₀	0.87±0.38bc	3.54±1.70b	1.44±0.47b

1.71 倍,显著大于 50 t · hm⁻²处理.表明施用生物炭后植烟土壤微生物总数量增加,生物炭大量的微孔为植烟土壤微生物生长和繁殖提供了良好的栖息环境.同时生物炭吸附的丰富碳源和氮源可供其利用;生物炭施用量过大,植烟土壤微生物总数量急剧减少,可能与土壤 pH 值大幅升高和非毛管孔隙度下降等引起的土壤环境变化有关.

2.1.4 土壤呼吸速率 土壤呼吸是土壤环境中生物学和生物化学综合作用的结果,指未受扰动土壤中产生 CO₂的所有代谢作用,包括 3 个生物学过程(土壤有机质的分解和土壤微生物的呼吸、植物根系的呼吸和土壤动物的呼吸)和一个非生物学过程(含碳矿物质的化学氧化作用)^[19].从图 1 可以看出,生物炭增加了植烟土壤呼吸速率,随施用量的增加而有增大的趋势.对照的植烟土壤呼吸速率仅为 2.06 mg · cm⁻² · h⁻¹,10 和 50 t · hm⁻²处理较之增幅分别为 7.9%、18.0%、36.9%,50 t · hm⁻²处理显著大于其余 3 个处理,10 t · hm⁻²处理与对照的差异达显著水平.

2.2 生物炭对烤烟生理指标的影响

2.2.1 烤烟根系活力 从图 2 可以看出,50 t · hm⁻²处理的根系活力最大,为 5.12 mg · g⁻¹ · h⁻¹,较对照提高 15.6%,总体表现为 50 t · hm⁻²>10 t · hm⁻²>1 t · hm⁻²>对照,所有处理间差异均未达显著水平.表明施用生物炭对提升烤烟生长前期根系活力有一定作用,但效果不显著.这可能与生物炭改善植烟土壤孔隙性质、提高烤烟根系对养分的吸收、增强根际微生物活性有关.

2.2.2 烤烟光合色素 类胡萝卜素是植物光合作用色素蛋白复合体不可缺少的组分,可以作为捕光色素,在保护光合器官免受单线态氧的伤害中起重要

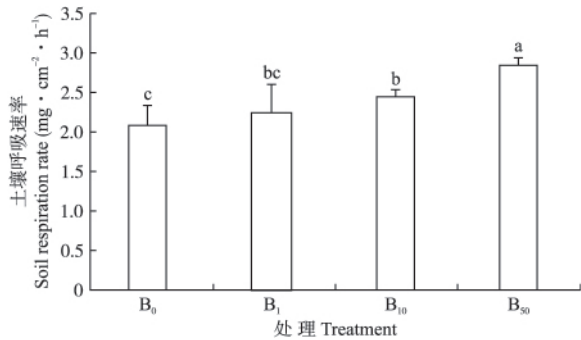


图 1 生物炭对土壤呼吸速率的影响

Fig.1 Effects of biochar on soil respiration rate.

不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters meant significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

作用.烤烟叶片中类胡萝卜素经过田间成熟和烘烤调制后形成的降解产物是重要的香气物质.从图 2 可以看出,施用生物炭后,烤烟叶片(第 10 叶)类胡萝卜素含量增加,且随施用量的增加而递增.10 和 50 t · hm⁻²处理的类胡萝卜素含量分别是对照的 1.43 和 1.44 倍,显著高于其余两处理.表明施用生物炭可能提高烟株叶片的抗逆性,有利于其香气物质的形成.叶绿素在植物的光合作用中对光能的吸收、传递和转化起着极为重要的作用.施用生物炭后,烤烟叶片的叶绿素含量增加,并随施用量的增加而递增.10 和 50 t · hm⁻²处理叶绿素含量分别是对照的 1.47 和 1.49 倍,显著高于其余两处理.

2.2.3 烤烟叶片水势 在烤烟旺长阶段,施用生物炭后烤烟叶片水势表现为升高的趋势.从图 2 可以看出,7 月 1 日,中部叶(第 10 叶)水势表现为 50 t · hm⁻²>1 t · hm⁻²>10 t · hm⁻²>对照,对照的水势仅为 -2.77 MPa,50 t · hm⁻²处理水势达 -1.58 MPa,两者差异显著.8 月 20 日,上部叶(第 18 叶)水势随

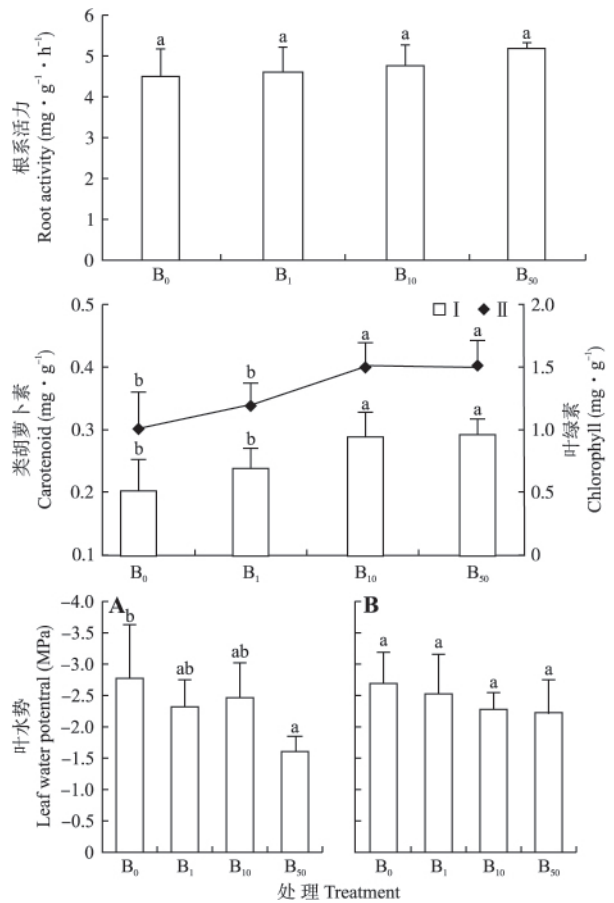


图 2 生物炭对烤烟生理指标的影响

Fig.2 Effects of biochar on physiological indices of flue-cured tobacco.

A: 第 10 叶 The 10th leaves; B: 第 18 叶 The 18th leaves.

表 4 生物炭对烤烟干物质积累与分配的影响
Table 4 Effects of biochar on dry matter accumulation and distribution of flue-cured tobacco

处理 Treatment	根系干质量 Dry mass of root (g)	地上部干质量 Dry mass of shoot (g)	总干质量 Total dry mass (g)	根冠比 Root/shoot ratio
B ₀	84.35±5.08b	207.86±10.62b	292.21±15.70b	0.41±0.00a
B ₁	101.70±11.02a	225.82±12.19a	327.52±14.55a	0.45±0.06a
B ₁₀	103.84±6.58a	225.18±10.24a	329.02±16.82a	0.46±0.01a
B ₅₀	108.11±3.22a	247.57±14.19a	355.68±14.93a	0.44±0.03a

生物炭施用量的增加而升高,所有处理间差异不显著。两时期处理间水势的差异可能与土壤水分状况以及烟株叶片的水分蒸腾强度差异有关。表明在雨水正常和叶片生理功能未衰退的时期,施用生物炭可提高烤烟叶片的水势。

2.3 生物炭对烤烟干物质积累与分配的影响

从表 4 可以看出,与对照相比,所有生物炭处理的烤烟根系干质量、地上部干质量、总干质量均显著增加,增幅分别为 20.6%~28.2%、8.3%~19.1%和 12.1%~21.7%。烤烟根系干质量和总干质量随生物炭用量的增加呈递增趋势。生物炭处理的烤烟根冠比升高,但差异未达显著水平。

3 讨 论

已有研究认为生物炭施入后可提高土壤含水量及降水的渗入量^[20]。本研究发现,植烟土壤各时期质量含水量随生物炭的施用量增加而提高;烤烟旺长阶段,降雨充沛,烤烟生长所需水分最多;0~10 cm 土层,50 t·hm⁻² 处理质量含水量最高,达 40.2%,是对照的 1.63 倍,50 和 10 t·hm⁻² 处理质量含水量显著高于其余两处理;10~20 cm 土层,50 t·hm⁻² 处理质量含水量(39.4%)显著高于其余处理。生物炭提高植烟土壤含水量,可能与其微孔隙结构丰富以及颗粒表面亲水性基团的吸附作用有关。生物炭对土壤水分入渗特征的影响取决于土壤的质地类型,且影响程度与添加量呈正相关关系。与对照相比,生物炭总体上能够明显增加壤土(壤质黏土)入渗能力,降低风沙土(砂土)入渗能力^[21]。本研究结果表明,施用生物炭有助于增加植烟土壤总孔隙度、毛管孔隙度,从而提高植烟土壤持水和渗水能力,改善通气状况。但施用量过大时,可能增加植烟土壤渗水能力下降的风险,影响土壤的水、肥、气平衡供应。本研究涉及的植烟土壤同样为壤黏土,生物炭通过改变植烟土壤孔隙性质来影响土壤水分的入渗。这与齐瑞鹏等^[21]研究结论一致。

生物炭对土壤微生物的调控作用与生物炭固有的物理特性、生物炭施用引发的土壤微生态环境变化(C/N、水分、pH、根系分泌)有密切的关系。细菌能够吸附到生物炭的表面,使它们不易受土壤淋洗的影响^[22],从而增加了土壤中细菌的数量。生物炭的吸附作用很大程度上取决于孔隙大小^[23]。生物炭保留细菌的能力大部分取决于其灰分、孔径和挥发物含量等特性^[24]。不同微生物群体对土壤微生态环境的变化响应不同。Pietri 等^[25]研究认为,随着土壤 pH 从 3.7 上升到 8.3,微生物量有所增加,但是真菌和细菌群落对 pH 有不同的反应;随着 pH 上升到大约 7 时,细菌丰度增加,而真菌丰度变化并不一致,或者在总生物量上没有变化^[26],或者在较高的 pH 时显著降低^[27]。本研究表明,施用生物炭后植烟土壤微生物总数量增加;生物炭施用量过大时,植烟土壤微生物总数量急剧减少。

据吴志丹等^[28]研究报道,生物黑炭输入提高了茶园土壤呼吸速率,各处理年平均土壤呼吸速率分别比 CK 提高 10.8%、17.5%、35.8%和 42.6%,并与对照差异显著。本研究结果与此相似,生物炭增加了植烟土壤呼吸速率,随施用量的增加而增大。对照植烟土壤呼吸速率仅为 2.06 mg·cm⁻²·h⁻¹,1、10 和 50 t·hm⁻² 处理较之增加 7.9%、18.0%、36.9%,50 t·hm⁻² 处理显著大于其余 3 个处理,10 t·hm⁻² 处理与对照差异达显著水平。生物炭提高植烟土壤呼吸速率的原因可能有:施入植烟土壤的早期,生物炭含有的有机碳活性组分(微生物量碳和水溶性碳)在土壤微生物的作用下分解。据 Smith 等^[29]研究报道,添加生物质炭后土壤有机碳的矿化量呈先增加后减少的趋势,且前期 CO₂ 增量来源于生物质炭的分解。进入土壤初期其降解速率较高可能与生物质炭中部分易分解有机碳被土壤微生物利用有关。生物炭改善了植烟土壤的物理性状,增加了土壤总孔隙度,改善了土壤的通气状况,提高了土壤含水量,优化了土壤微生物的生态环境,促进土壤微生物呼吸。通过优化和改善植烟土壤的物理化学属性,促进烤烟根系的生长,提高了根系呼吸速率。

张伟明等^[30]研究发现,生物炭提高了水稻根系主根长、根体积、根鲜质量、总吸收面积和活跃吸收面积,尤以生长前期促进作用明显,并在一定程度上延缓了后期根系衰老。生物炭提高了根系生理活性如根系伤流速率、氧化力等。本研究结果表明,施用生物炭对提升烤烟生长前期根系活力有一定作用,但效果不显著。生物炭孔隙结构丰富^[31],施用后可

改善植烟土壤孔隙性质,增加土壤总孔隙,改善烤烟根系通气状况.生物炭比表面积较大,具有丰富的表面官能团和较强的吸附能力^[32],可间接地提高烤烟根系对养分的吸收效率.生物炭增强了根际微生物的活动,改善了根际生长环境,有利于促进烤烟根系生理代谢.本研究结果表明,施用生物炭后,烤烟叶片类胡萝卜素和叶绿素含量增加,随施用量的增加,类胡萝卜素含量递增.10和50 t·hm⁻²处理类胡萝卜素含量分别是对照的1.43和1.44倍,显著高于其余两处理.10和50 t·hm⁻²处理叶绿素含量分别是对照的1.47和1.49倍,显著高于其余两处理.在烤烟旺长阶段,施用生物炭后烤烟叶片水势表现为升高的趋势.与对照相比,所有生物炭处理烤烟根系干质量、地上部干质量、总干质量均显著增加.

全国一些烟区优质植烟土壤资源有限,烤烟连作较普遍,烟农长期偏重施用化肥,导致植烟土壤理化性状和微生态环境恶化,表现为酸化、板结、综合肥力下降,病害发生严重,制约了烤烟优质生产.在全国烟区烟杆资源丰富,烟杆生物炭开发的潜力巨大.与其他作物生物炭相比,烟杆生物炭全氮、全磷和全钾含量分别为25.8、22.1和39.6 g·kg⁻¹,显著高于稻秆、玉米和小麦等作物生物炭^[33-34],有利于作物的生长,减少肥料施入量.因此,探索烟草公司组织烟农合作社的形式开展烟杆收集、烟杆炭制备、烟杆炭就近还田以及烟杆炭基肥应用的运作模式,改良植烟土壤质量,保障烟叶优质生产,是现代烟草农业循环经济的新模式,符合未来烟草农业科技和烟草可持续发展的方向.

综上所述,生物炭可以改善植烟土壤物理性状,促进其物理化学与生物化学的相互作用,改良土壤微生态环境,调控烤烟生长发育及生理特性.生物炭对植烟土壤和烤烟的作用与其施用方式、施用量以及土壤类型、质地、综合肥力(包括养分管理)等密切相关.

参考文献

- [1] Huang D-F (黄东风), Wang L-M (王利民), Li W-H (李卫华), et al. Research progress on the effect and mechanism of fertilization measure on soil fertility. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2014, **22**(2): 127-135 (in Chinese)
- [2] Shi Q-H (石秋环), Jiao F (焦枫), Geng W (耿伟), et al. An overview on research into factors hindering continuous cropping in flue-cured tobacco. *Acta Tabacaria Sinica* (中国烟草学报), 2009, **15**(6): 81-84 (in Chinese)
- [3] Zhang J-G (张继光), Shen G-M (申国明), Zhang J-Q (张久权), et al. Advance in continuous cropping problems of tobacco. *Chinese Tobacco Science* (中国烟草科学), 2011, **32**(3): 95-99 (in Chinese)
- [4] Antal MJ, Gronli M. The art, science and technology of charcoal production. *Industrial and Engineering Chemistry*, 2003, **42**: 1619-1640
- [5] Wang D-D (王丹丹), Zheng J-Y (郑纪勇), Yan Y-H (颜永豪), et al. Effect of biochar application on soil water holding capacity in the southern region of Ningxia. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2013, **27**(2): 101-104, 109 (in Chinese)
- [6] Yan Y-H (颜永豪), Zheng J-Y (郑纪勇), Zhang X-C (张兴昌), et al. Impact of biochar addition into typical soils on field capacity in loess plateau. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2013, **27**(4): 120-124, 190 (in Chinese)
- [7] Liu Y-X (刘玉学), Liu W (刘微), Wu W-X (吴伟祥), et al. Environmental behavior and effect of biomass-derived black carbon in soil: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(4): 977-982 (in Chinese)
- [8] Chen H-X (陈红霞), Du Z-L (杜章留), Guo W (郭伟), et al. Effects of biochar amendment on cropland soil bulk density, cation exchange capacity, and particulate organic matter content in the North China Plain. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(11): 2930-2934 (in Chinese)
- [9] Chen X-X (陈心想), He X-S (何绪生), Geng Z-C (耿增超), et al. Effects of biochar on selected soil chemical properties and on wheat and millet yield. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(20): 6534-6542 (in Chinese)
- [10] Liu Y-X (刘玉学), Wang Y-F (王耀锋), Lv H-H (吕豪豪), et al. Effects of different application rates of rice straw biochar and bamboo biochar on yield and quality of greengrocery (*Brassica chinensis*) and soil properties. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2013, **19**(6): 1438-1444 (in Chinese)
- [11] Zhang X (张祥), Wang D (王典), Jiang C-C (姜存仓), et al. Effect of biochar on physicochemical properties of red and yellow brown soils in the South China Region. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2013, **21**(8): 979-984 (in Chinese)
- [12] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, **70**: 1719-1730
- [13] Zhou Z-H (周志红), Li X-Q (李心清), Xing Y (邢英), et al. Effect of biochar amendment on nitrogen leaching in soil. *Earth and Environment* (地球与环境), 2011, **39**(2): 278-284 (in Chinese)
- [14] Liu S-J (刘世杰), Dou S (窦森). The effects of black carbon on growth of maize and the absorption and leaching of nutrients. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2009, **23**(1): 79-82 (in Chinese)

- [15] Zhang B (张 斌), Liu X-Y (刘晓雨), Pan G-X (潘根兴), *et al.* Changes in soil properties, yield and trace gas emission from a paddy after biochar amendment in two consecutive rice growing cycles. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2012, **45**(23): 4844-4853 (in Chinese)
- [16] Liu Y-X (刘玉学), Wang Y-F (王耀锋), Lv H-H (吕豪豪), *et al.* Effects of biochar application on greenhouse gas emission from paddy soil and its physical and chemical properties. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(8): 2166-2172 (in Chinese)
- [17] Lu R-K (鲁如坤). *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000 (in Chinese)
- [18] Dong Z-Q (董志强), Shu W-H (舒文华), Zhang B-M (张保明), *et al.* A preliminary study on the reductive activity of cotton lateral root in different soil layers. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2005, **31**(2): 219-223 (in Chinese)
- [19] Li Y-N (李玉宁), Wang G-Y (王关玉), Li W (李 伟). Soil respiration and carbon cycle. *Earth Science Frontiers* (地学前缘), 2002, **9**(2): 351-357 (in Chinese)
- [20] Asai H, Samson BK, Stephan HM, *et al.* Biochar amendment techniques for upland rice production in northern Laos. *Field Crops Research*, 2009, **111**: 81-84
- [21] Qi R-P (齐瑞鹏), Zhang L (张 磊), Yan Y-H (颜永豪), *et al.* Effects of biochar addition into soils in semiarid land on water infiltration under the condition of the same bulk density. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25**(8): 2281-2288 (in Chinese)
- [22] Pietikäinen J, Kiikkilä O, Fritze H. Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus. *Oikos*, 2000, **89**: 231-242
- [23] Rivera-Utrilla J, Bautista-Toledo I, Ferro-Garcia MA, *et al.* Activated carbon surface modifications by adsorption of bacteria and their effect on aqueous lead adsorption. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2001, **76**: 1209-1215
- [24] Ding Y-L (丁艳丽), Liu J (刘 杰), Wang Y-Y (王莹莹). Effects of biochar on microbial ecology in agriculture soil: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(11): 3311-3317 (in Chinese)
- [25] Pietri JCA, Brookes PC. Relationships between soil pH and microbial properties in a UK arable soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**: 1856-1861
- [26] Rousk J, Baath E, Brookes PC, *et al.* Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil. *The ISME Journal*, 2010, **4**: 1340-1351
- [27] Rousk J, Brookes PC, Baath E. Contrasting soil pH effects on fungal and bacterial growth suggest functional redundancy in carbon mineralization. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, **75**: 1589-1596
- [28] Wu Z-D (吴志丹), Jiang F-Y (江福英), You Z-M (尤志明), *et al.* Effect of biochar application on soil respiration in tea plantation. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2014, **23**(4): 586-592 (in Chinese)
- [29] Smith JL, Collins HP, Bailey VL. The effect of young biochar on soil respiration. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, **42**: 2345-2347
- [30] Zhang W-M (张伟明), Meng J (孟 军), Wang J-Y (王嘉宇), *et al.* Effect of biochar on root morphological and physiological characteristics and yield in rice. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2013, **39**(8): 1445-1451 (in Chinese)
- [31] Chen W-F (陈温福), Zhang W-M (张伟明), Meng J (孟军). Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2013, **46**(16): 3324-3333 (in Chinese)
- [32] Comelissen G, Kukulka Z, Kalaitzidis S, *et al.* Relations between environmental black carbon sorption and geochemical sorbent characteristics. *Environmental Science and Technology*, 2004, **38**: 3632-3640
- [33] Xu Y-P (许燕萍), Xie Z-B (谢祖彬), Zhu J-G (朱建国), *et al.* Effects of pyrolysis temperature on physical and chemical properties of corn biochar and wheat biochar. *Soils* (土壤), 2013, **45**(1): 73-78 (in Chinese)
- [34] Wang J (王 晋), Zhuang S-Y (庄舜尧), Cao Z-H (曹志洪), *et al.* Effects of different biochar extracts on rice germination and seedling development. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2014, **30**(30): 50-55 (in Chinese)

作者简介 陈 懿 男,1982 年生,硕士,助理研究员.主要从事烟草栽培与生理生态研究. E-mail: cheniyi829@126.com

责任编辑 肖 红
