

## 烟秆生物炭对烤烟根系生长的影响及其作用机理

陈懿<sup>1</sup>, 陈伟<sup>1</sup>, 高维常<sup>1</sup>, 程建中<sup>2</sup>, 林叶春<sup>1</sup>, 潘文杰<sup>1</sup>

1. 贵州省烟草科学研究所, 贵阳市观山湖区龙滩坝路29号 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, 贵阳市观山湖区林城西路99号 550008

**摘要:**为揭示烟秆生物炭对烤烟根系生长的作用机理,通过田间试验研究了烟秆生物炭不同施用量(0、1、10、50 t/hm<sup>2</sup>)对烤烟根系生长和土壤理化性质的影响。结果表明:土壤中施用生物炭可促进烤烟根系前期生长,根系体积和干质量均有提高。随着生物炭用量的增加,烤烟根系伤流强度呈递增趋势,根系活跃吸收面积、活跃吸收面积百分比及干质量呈现出先增加后减少的趋势。10 t/hm<sup>2</sup>烟秆生物炭处理的烤烟根系形态生理特征指标最优、烟叶产量最高。随着生物炭用量的增加,土壤质量含水率、毛管持水量、气相率、有效磷及速效钾含量(质量分数)逐渐增加,土壤碱解氮含量和过氧化氢酶活性先增加后降低。与对照比较,生物炭处理的土壤速效钾含量增幅为11.0%~382.3%。

**关键词:**烤烟;烟秆;生物炭;土壤;理化性质;根系;产量

**中图分类号:**S431 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-0861(2017)06-0026-07

## Effects of tobacco stalk biochar on root growth of flue-cured tobacco and its action mechanism

CHEN Yi<sup>1</sup>, CHEN Wei<sup>1</sup>, GAO Weichang<sup>1</sup>, CHENG Jianzhong<sup>2</sup>, LIN Yechun<sup>1</sup>, PAN Wenjie<sup>1</sup>

1. Guizhou Academy of Tobacco Science, Guiyang 550081, China

2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550008, China

**Abstract:** To reveal the mechanism of tobacco stalk biochar on root growth of flue-cured tobacco, field experiments were carried out at three biochar application rates (0, 1, 10 and 50 t/ha) and the root growth of flue-cured tobacco and soil physicochemical properties were measured. The results showed that biochar promoted the root growth of flue-cured tobacco, both the volume and dry weight of roots increased at an early stage. Via increasing biochar application rate, root bleeding intensity of flue-cured tobacco increased, however, the active absorption area (AAA), percentage of AAA and dry weight of root increased first and then decreased. The optimal morphological and physiological characteristics of roots and the highest yield of flue-cured tobacco were obtained at the biochar application rate of 10 t/ha. With the increase of biochar application rate, the mass water content, capillary capacity, gas phase ratio and available phosphorus and potassium contents in soil increased. However, the alkaline nitrogen content and catalase activity increased first and then decreased. Comparing with the control, the available potassium content in soil increased by 11.0%–382.3% under the biochar treatment.

**Keywords:** Flue-cured tobacco; Tobacco stalk; Biochar; Soil; Physicochemical property; Root; Yield

收稿日期: 2016-06-06 修回日期: 2016-11-21

**基金项目:**贵州省科技重大专项“优质烤烟根系培育技术模式研究与示范”(黔科合重大专项字[2014]6015-2);贵州省农业攻关项目“生物炭对贵州烟区土壤及烟叶中有害物的调控研究与示范”(黔科合NY[2013]3019);贵州省烟草公司科技项目“烟秆炭基产品开发及其对烟地保育技术研究与与应用”(201614);贵州省烟草公司毕节市公司科技项目“烟秆炭基产品对烟地保育的机制研究”(201652050024139)。

**作者简介:** 陈懿(1982—), 硕士, 副研究员, 主要从事烤烟栽培与生理生态研究。E-mail: 59012819@qq.com; \*通讯作者: 潘文杰, E-mail: wenjiepan@163.com

**引文格式:** 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 stalk biochar on root growth of flue-cured tobacco and its action mechanism[J]. Tobacco Science & Technology, 2017, 50(6): 26–32.) DOI: 10.16135/j.issn1002-0861.2016.0268

生物炭是生物质在缺氧条件下热裂解形成的稳定的富碳产物<sup>[1]</sup>。生物炭在改善土壤理化性状<sup>[2-5]</sup>、调控土壤微生物数量及群落结构组成<sup>[6]</sup>、增加土壤养分吸持<sup>[7]</sup>、提高作物产量<sup>[8-10]</sup>、增碳减排<sup>[11-13]</sup>等方面具有重要作用。因此,近年来生物炭已成为农业、环境、资源领域中的研究热点。生物炭对土壤和作物系统的影响与作物种类、土壤类型及肥力密切相关,因而开展生物炭的不同作物土壤学效应研究具有重要意义。作物根系既是水分和养分吸收的主要器官,又是多种激素、有机酸和氨基酸合成的重要场所,其形态和生理特性与作物地上部的生长发育、产量和品质形成均有密切的关系<sup>[14]</sup>。有研究发现,生物炭对水稻、番茄、玉米等作物根系的生长发育具有积极效应<sup>[15-17]</sup>。在烟草生产中的应用也有相关报道,施用生物炭可促进烟叶生长和提高产量<sup>[18]</sup>,同时降低上部叶烟碱含量,提高烤后烟叶的钾含量<sup>[19]</sup>。但生物炭对烤烟生长尤其是根系生长的作用机理研究报道相对较少。为此,设置烟秆生物炭不同施用量试验,系统分析烟秆生物炭对烤烟根系生长和土壤理化性质的影响机制,旨在为利用烟秆生物炭促进烤烟根系发育、提高烟叶品质提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2015 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。土壤类型为黄壤,质地为壤黏土。土壤基本理化性质:碱解氮 154.14 mg/kg,有效磷 38.97 mg/kg,速效钾 291.15 mg/kg,有机质 47.75 g/kg, pH 6.84。

### 1.2 试验材料

供试烤烟品种为 K326。肥料为烤烟专用基肥 N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O = 10:10:25,烤烟专用追肥 N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O = 10:0:30。采用组合式生物炭颗粒炭化炉自制烟秆生物炭,制炭温度为 600 °C,炭化时间 8 h。施入大田前,磨细过 5 mm 筛。烟秆生物炭基本化学性质:氮 23.03 g/kg,碳 760.07 g/kg,氢 26.65 g/kg,硫 0.99 g/kg,碱解氮 54.6 mg/kg,有效磷 2 253.2 mg/kg,速效钾 12.44 g/kg, pH 9.67。

### 1.3 试验设计

试验设置 B0(对照, 0 t/hm<sup>2</sup>)、B1(1 t/hm<sup>2</sup>)、B10(10 t/hm<sup>2</sup>)、B50(50 t/hm<sup>2</sup>) 4 个处理,3 次重复,随机区组排列。具体操作:生物炭按试验设置量撒施均匀,利用农机旋耕入土(耕深 25 cm)。株行距为 1.1 m×0.55 m,每小区植烟 48 株,小区面积 29.04 m<sup>2</sup>。试验为等量施肥,其中专用基肥 N、

P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 用量分别为 36、36 和 90 kg/hm<sup>2</sup>,专用追肥 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 用量分别为 24、0 和 72 kg/hm<sup>2</sup>。

4 月 15 日条施基肥(60%总氮)、起垄(垄高 25 cm);4 月 30 日采用地膜覆盖井窖方式移栽;5 月 21 日进行井窖封土、穴施追肥(40%总氮)。其他田间管理措施均按照当地优质烟叶生产技术规范进行。

## 1.4 测定方法

### 1.4.1 土壤性状指标的测定

烤烟移栽后 75 d 采集土壤样品,用于土壤容重、质量含水率、毛管持水量的测定,并通过土壤容重、质量含水率、总孔隙度计算出土壤固体、液体和气体三相率。用 5 点取样法采集耕层土壤样品,风干、研磨,测定土壤养分含量(质量分数)。采用碱解扩散法测定碱解氮;0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 浸提-钼锑抗比色测定有效磷;1 mol/L NH<sub>4</sub>OAc 浸提-火焰光度法测定速效钾<sup>[20]</sup>。采用靛酚比色法测定土壤脲酶活性<sup>[21]</sup>;紫外分光光度法测定土壤过氧化氢酶活性<sup>[22]</sup>。

### 1.4.2 烤烟根系形态生理特征指标的测定

烤烟移栽后 60 d,采用质量法测定根系伤流强度<sup>[15]</sup>。移栽后 40、60、90 和 120 d,沿烟株冠幅投影面,用大铲向下挖 50 cm,掏去四周土体,连土取出根系,用于烤烟根系形态生理特征指标的测定。采用甲烯蓝比色法测定根系总吸收面积、活跃吸收面积及活跃吸收面积百分比<sup>[15]</sup>;用扫描仪(EPSON Expression 1000 XL)扫描根系图像,用 WinRHIZO 根系分析系统分析根系体积;用烘干称量法测定根系干质量。

### 1.4.3 烤烟经济性性状指标的统计

烟叶调制结束后,严格按烟叶等级质量标准对烤后烟叶进行分级、测定产量,并统计经济性性状指标。

## 1.5 数据处理

采用 Excel 2013 软件进行数据初步整理,用 IBM SPSS Statistics 20.0 软件进行单因素方差分析,用 Duncan 法进行差异多重比较,同时进行相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 生物炭对烤烟根系形态生理特征的影响

#### 2.1.1 生物炭对烤烟根系体积和干质量的影响

从烤烟 4 个生长发育时期观测数据(表 1)来看,移栽后 90 d,对照和 1 t/hm<sup>2</sup>处理的烤烟根系体积达最大值,移栽后 120 d 10 t/hm<sup>2</sup>和 50 t/hm<sup>2</sup>处理的烤烟根系体积达到最大。移栽后 60 d 以前,生

物炭处理的烤烟根系体积均大于对照,在移栽后 40 d 10 t/hm<sup>2</sup>处理与对照间差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。移栽后 120 d 10 t/hm<sup>2</sup>和 50 t/hm<sup>2</sup>处理的烤烟根系体积分别比对照增加 12.2%和 30.4%。

在烤烟移栽后 120 d,各处理烟株根系干质量达到最大。移栽后 90 d 以前,生物炭处理的烤烟根系干质量均大于对照,栽后 60 d 以前 10 t/hm<sup>2</sup>处理与对照间差异达到显著 ( $P < 0.05$ ) 水平。移栽后

120 d,烤烟根系干质量大小依次为 10 t/hm<sup>2</sup> > 对照 > 1 t/hm<sup>2</sup> > 50 t/hm<sup>2</sup>。与对照比较,10 t/hm<sup>2</sup>处理的烤烟根系干质量增加 24.9%。

可见,生物炭可促进烤烟根系的前期生长,根系体积和干质量均有提高。随着生物炭用量的增加,烤烟根系干质量呈现出先增加后降低的趋势。10 t/hm<sup>2</sup>生物炭用量处理的烤烟根系生长状况最佳。

表 1 生物炭对不同生育时期烤烟根系体积和干质量的影响<sup>①</sup>

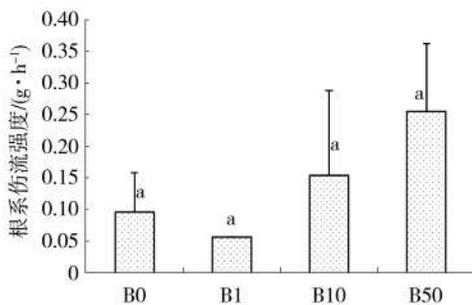
Tab.1 Effects of biochar on volume and dry weight of flue-cured tobacco roots at different growth stages

处理	根系体积/cm <sup>3</sup>				干质量/g			
	移栽后 40 d	移栽后 60 d	移栽后 90 d	移栽后 120 d	移栽后 40 d	移栽后 60 d	移栽后 90 d	移栽后 120 d
B0	21.67b	91.18a	159.14a	154.74a	3.93b	25.35b	47.60a	92.73a
B1	27.74ab	109.92a	254.32a	153.36a	4.91b	29.53ab	58.42a	89.74a
B10	37.17a	129.70a	177.84a	201.76a	7.83a	36.35a	70.45a	115.86a
B50	27.91ab	104.92a	158.00a	173.64a	4.30b	27.84ab	71.06a	88.06a

注:①同列数值后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

2.1.2 生物炭对烤烟根系伤流强度的影响

根系伤流强度是指单位时间内植株流出的伤流液量,是衡量根系活力的重要指标,根系伤流液中的物质运输是根冠物质交换的重要形式<sup>[15]</sup>。随着生物炭施用量的增加,烤烟根系伤流强度呈递增趋势。烤烟根系伤流强度排序依次为 50 t/hm<sup>2</sup> > 10 t/hm<sup>2</sup> > 对照 > 1 t/hm<sup>2</sup>,处理间差异不显著。与对照比较,10和 50 t/hm<sup>2</sup>处理的烤烟根系伤流强度分别增加 61.6%和 168.0%,见图 1。



柱形图上标有不同小写字母者表示差异达到显著 ( $P < 0.05$ ) 水平

图 1 生物炭对烤烟根系伤流强度的影响

Fig.1 Effects of biochar on root bleeding intensity of flue-cured tobacco

2.1.3 生物炭对烤烟根系吸收面积的影响

图 2 表明,随着烤烟生育进程的推进,根系总吸收面积和活跃吸收面积呈现先增加后减少的趋势。移栽后 40~60 d 根系总吸收面积和活跃吸收面积增加平缓,移栽 60 d 后急剧增加,移栽后 90 d 达最大值,之后又逐渐减少。移栽后 40 d,对照根系总吸收面积为 3.94 m<sup>2</sup>,与对照比较,10 和 50 t/hm<sup>2</sup>处理的根系总吸收面积分别增加 0.58 和 2.10

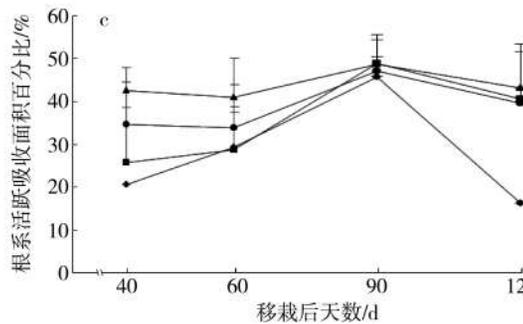
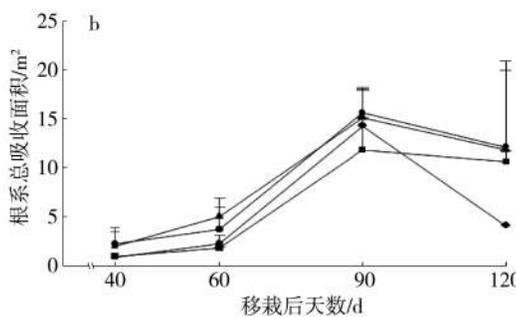
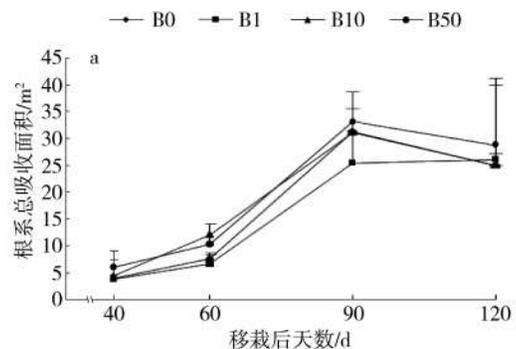


图 2 生物炭对烤烟根系吸收面积的影响

Fig.2 Effects of biochar on root absorption area of flue-cured tobacco

m<sup>2</sup>;生物炭处理的烤烟根系活跃吸收面积增幅为 11.7%~175.0%;1、10 和 50 t/hm<sup>2</sup>处理的根系活跃吸收面积百分比分别是对照的 1.24、2.06 和 1.67 倍。移栽后 120 d,与对照比较,生物炭处理的烤烟根系活跃吸收面积增加显著( $P<0.05$ ),增幅达 160.0%~196.7%;1、10 和 50 t/hm<sup>2</sup>处理的根系活跃吸收面积百分比分别是对照的 2.49 倍、2.64 倍和 2.43 倍,与对照间差异达到显著( $P<0.05$ )水平。烤烟 4 个生育时期施用生物炭的处理烤烟根系活跃吸收面积百分比均有提高,随着生物炭用量的增加,根系活跃吸收面积和活跃吸收面积百分比表现为先增加后减少,根系总吸收面积变化不明显。表明生物炭可提升烤烟根系对养分的截获效率,促进烟株前期生长,一定程度上延缓根系衰老,水分和养分供应水平平稳回落,保障了地上部激素调控和物质代谢的平衡。

**2.2 生物炭对烤烟主要经济性状的影响**

各生物炭处理对烤烟产量、产值、均价等主要经济性状指标的影响表现趋势一致,影响大小依次为 10 t/hm<sup>2</sup>>50 t/hm<sup>2</sup>>1 t/hm<sup>2</sup>>对照,处理间差异不显著,见表 2。随着生物炭施用量的增加,烤烟主要经济性状指标先提高后降低。与对照比较,生物炭处理的烤烟产量增加 40~168 kg/hm<sup>2</sup>,增幅为 1.7%~9.2%;生物炭处理烤烟产值增加 1 865~8 178 元/hm<sup>2</sup>,增幅为 5.5%~24.3%;生物炭处理烤烟均价增幅为 3.7%~13.2%。

表 2 生物炭对烤烟主要经济性状指标的影响

Tab.2 Effects of biochar on main economic traits of flue-cured tobacco

处理	产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	产值/ (元·hm <sup>-2</sup> )	均价/ (元·kg <sup>-1</sup> )
B0	2 293±131a	33 706±1 785a	14.72±0.88a
B1	2 333±279a	35 571±5 369a	15.26±1.79a
B10	2 503±211a	41 884±7 975a	16.66±1.78a
B50	2 461±122a	39 802±1 753a	16.19±0.88a

表 4 生物炭对土壤养分和酶活性的影响

Tab.4 Effects of biochar on nutrient contents and enzyme activities of soil

处理	碱解氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )	脲酶/(μg·d <sup>-1</sup> ·g <sup>-1</sup> )	过氧化氢酶/(μmol·d <sup>-1</sup> ·g <sup>-1</sup> )
B0	129.27±7.44a	38.46±4.48a	189.53±28.89b	565.08±29.69a	57.51±1.01a
B1	126.92±12.45a	35.88±5.48a	210.34±101.85b	601.81±1.86a	57.72±0.23a
B10	133.28±19.82a	38.05±9.49a	275.29±67.80b	582.13±87.21a	58.12±0.40a
B50	114.60±5.22a	40.17±8.03a	914.18±221.33a	571.64±30.74a	57.97±0.58a

表 5 烤烟根系指标与土壤性质指标的相关性分析<sup>①</sup>

Tab.5 Correlation analysis between flue-cured tobacco root indexes and soil characteristics

项目	质量含水率	毛管持水量	固相率	液相率	气相率	碱解氮	有效磷	速效钾	脲酶	过氧化氢酶
干质量	0.175	-0.006	-0.197	0.324	0.146	0.485	-0.216	-0.171	0.401	0.807*
活跃吸收面积	0.607	0.39	-0.526	0.375	0.447	0.102	0.463	0.313	-0.222	0.895**

注:①\*表示在 0.05 水平上的显著性;\*\*在 0.01 水平上的显著性。

**2.3 生物炭对土壤性质的影响**

2.3.1 生物炭对土壤物理性质的影响

表 3 表明,随生物炭施用量的增加,土壤含水率、毛管持水量、气相率呈递增趋势,土壤固相率逐渐下降。1、10 和 50 t/hm<sup>2</sup>处理的土壤含水率分别为对照的 1.02、1.11 和 1.24 倍。50 t/hm<sup>2</sup>处理的土壤毛管持水量显著高于其他处理( $P<0.05$ ),是对照的 1.44 倍。与对照比较,50 t/hm<sup>2</sup>处理的土壤固相率下降 9.3%,两处理间差异达到显著( $P<0.05$ )水平。表明施用适量生物炭可以改善土壤水分环境,疏松土壤,优化土壤耕作性能,改善土壤通气状况。

表 3 生物炭对土壤物理性质的影响

Tab.3 Effects of biochar on physical properties of soil

(%)

处理	质量含水率	毛管持水量	固相率	液相率	气相率
B0	22.7±3.7a	37.6±1.8b	40.3±5.4a	23.9±1.1a	35.8±4.6a
B1	23.2±1.4a	41.0±2.5b	37.6±2.3ab	23.1±0.9a	39.3±2.7a
B10	25.3±0.9a	42.5±3.2b	35.8±1.9ab	24.0±0.9a	40.3±2.7a
B50	28.2±7.4a	54.2±7.5a	31.0±4.3b	23.1±6.0a	46.0±8.5a

2.3.2 生物炭对土壤养分和酶活性的影响

表 4 表明,随着生物炭施用量的增加,土壤碱解氮含量、过氧化氢酶活性先增加后减少,土壤有效磷和速效钾含量呈递增趋势,土壤脲酶活性降低。施用生物炭后,土壤速效钾含量、脲酶和过氧化氢酶活性提高。与对照比较,生物炭处理的土壤速效钾含量、脲酶和过氧化氢酶活性增幅分别为 11.0%~382.3%、1.2%~6.5%和 0.4%~1.1%,其中,50 t/hm<sup>2</sup>处理土壤速效钾含量显著高于其他处理( $P<0.05$ )。表明施用生物炭可增加土壤对钾的吸持作用,提升土壤钾素供应水平,提高土壤脲酶和过氧化氢酶活性。

**2.4 烤烟根系指标与土壤性质指标的相关性**

由相关性分析结果(表 5)发现,烤烟根系干质

量与土壤过氧化氢酶活性显著正相关( $P<0.05$ ),根系活跃吸收面积与土壤过氧化氢酶活性极显著正相关( $P<0.01$ ),根系干质量和活跃吸收面积与其他土壤性质指标相关性不显著。因此,过氧化氢酶可能是施用生物炭后影响烤烟根系生长的重要土壤因素之一。

### 3 结论与讨论

土壤施用生物炭可促进烤烟根系前期生长,根系体积和干质量提高,根系活跃吸收面积百分比增加,养分截获效率提升。在烤烟成熟阶段生物炭的作用更突出,并可在一定程度上延缓根系衰老,保持根系生理代谢活力。这与前人对生物炭对水稻<sup>[15]</sup>、番茄<sup>[16]</sup>、烟苗<sup>[20]</sup>根系生长特征的影响研究结果一致。随着生物炭用量的增加,烤烟根系伤流强度呈递增趋势,根系活跃吸收面积、活跃吸收面积百分比及干质量表现为先增加后减少的趋势。同时施用生物炭可提高烤烟产量、产值和均价,10 t/hm<sup>2</sup>用量的生物炭处理烤烟根系形态生理特征指标最优,产量较高。

已有研究表明,施用生物炭可提高土壤含水率<sup>[23]</sup>和毛管持水量<sup>[16]</sup>,与本研究结果趋势一致。随着生物炭施用量的增加,土壤固相率逐渐下降,气相率的变化趋势正相反。施用生物炭可优化土壤结构和通气状况,有利于作物根系的发育<sup>[15-16]</sup>和土壤呼吸<sup>[24]</sup>,有益于土壤微生物活动与养分转化。随着生物炭施用量的增加,土壤碱解氮含量先增加后减少,土壤有效磷和速效钾含量呈递增趋势。本试验中生物炭对土壤碱解氮和有效磷的影响,与前人报道一致<sup>[25-26]</sup>。可能是因为生物炭中含有一定量的钾素,施用后增加了土壤全钾总量,施用生物炭增强了土壤对易移动钾素的吸持能力,大幅增加了土壤速效钾含量。可见,生物炭提高土壤脲酶和过氧化氢酶活性,与陈心想等<sup>[21]</sup>的研究结果一致。

由于生物炭本身的物理特征<sup>[1]</sup>,施用后引发了土壤生态环境的变化(如C/N、水分、pH、根系分泌等),促进了土壤生物化学与物理化学的交互作用。适量施用生物炭可提高土壤微生物和酶活性<sup>[21]</sup>,吸附土壤和肥料养分,减少淋溶损失,提高根际养分供应水平。生物炭在水、土交融作用下可能会释放一些小分子物质,如乙烯或激素类物质等,可对根系分泌物产生影响,从而刺激和干扰根系生理进程,影响根系生长<sup>[15]</sup>。本试验中发现,烤烟根系干质量与土壤过氧化氢酶活性显著正相

关,根系活跃吸收面积与土壤过氧化氢酶活性极显著正相关。过氧化氢酶可能是施用生物炭后影响烤烟根系生长的重要土壤因素。

### 参考文献

- [1] 陈温福,张伟明,孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学,2013,46(16):3324-3333.  
CHEN Wenfu, ZHANG Weiming, MENG Jun. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013,46(16):3324-3333.
- [2] 陈红霞,杜章留,郭伟,等. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(11):2930-2934.  
CHEN Hongxia, DU Zhangliu, GUO Wei, et al. Effects of biochar amendment on cropland soil bulk density, cation exchange capacity, and particulate organic matter content in the North China Plain [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(11): 2930-2934.
- [3] 王丹丹,郑纪勇,颜永毫,等. 生物炭对宁南山区土壤持水性能影响的定位研究[J]. 水土保持学报,2013,27(2):101-104,109.  
WANG Dandan, ZHENG Jiyong, YAN Yonghao, et al. Effect of biochar application on soil water holding capacity in the southern region of Ningxia [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(2): 101-104, 109.
- [4] 孔丝纺,姚兴成,张江勇,等. 生物质炭的特性及其应用的研究进展[J]. 生态环境学报,2015,24(4):716-723.  
KONG Sifang, YAO Xingcheng, ZHANG Jiangyong, et al. Review of characteristics of biochar and research progress of its applications [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(4): 716-723.
- [5] 陈懿,陈伟,林叶春,等. 生物炭对植烟土壤微生态和烤烟生理的影响[J]. 应用生态学报,2015,26(12):3781-3787.  
CHEN Yi, CHEN Wei, LIN Yechun, et al. Effects of biochar on the micro-ecology of tobacco-planting soil and physiology of flue-cured tobacco [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(12): 3781-3787.
- [6] 张又弛,李会丹. 生物炭对土壤中微生物群落结构及其生物地球化学功能的影响[J]. 生态环境学报,2015,24(5):898-905.  
ZHANG Youchi, LI Huidan. Influence of biochar on the community structure and biogeochemical functions of microorganisms in soils [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(5): 898-905.
- [7] 周志红,李心清,邢英,等. 生物炭对土壤氮素淋失的抑制作用[J]. 地球与环境,2011,39(2):278-284.

- ZHOU Zhihong, LI Xinqing, XING Ying, et al. Effect of biochar amendment on nitrogen leaching in soil [J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(2): 278-284.
- [8] Asai H, Samson B K, Stephan H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield [J]. *Field Crops Research*, 2009, 111(1/2): 81-84.
- [9] 陈心想,何绪生,耿增超,等. 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(20): 6534-6542.
- CHEN Xinxiang, HE Xusheng, GENG Zengchao, et al. Effects of biochar on selected soil chemical properties and on wheat and millet yield [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(20): 6534-6542.
- [10] 俞映惊,薛利红,杨林章,等. 生物炭添加对酸化土壤中小白菜氮素利用的影响[J]. *土壤学报*, 2015, 52(4): 759-767.
- YU Yingliang, XUE Lihong, YANG Linzhang, et al. Effect of biochar application on pakchoi (*Brassica chinensis* L.) utilizing nitrogen in acid soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4): 759-767.
- [11] 刘玉学,王耀锋,吕豪豪,等. 生物质炭化还田对稻田温室气体排放及土壤理化性质的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(8): 2166-2172.
- LIU Yuxue, WANG Yaofeng, LÜ Haohao, et al. Effects of biochar application on greenhouse gas emission from paddy soil and its physical and chemical properties [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(8): 2166-2172.
- [12] Nelissen V, Saha B K, Ruyschaert G, et al. Effect of different biochar and fertilizer types on N<sub>2</sub>O and NO emissions [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 70: 244-255.
- [13] 刘娇,高健,赵英. 玉米秸秆及其黑炭添加对黄绵土氮素转化的影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(6): 1361-1368.
- LIU Jiao, GAO Jian, ZHAO Ying. Effects of addition of both maize stalk and its biochar to loess soil on N transformations [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(6): 1361-1368.
- [14] 杨建昌. 水稻根系形态生理与产量、品质形成及养分吸收利用的关系[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(1): 36-46.
- YANG Jianchang. Relationships of rice root morphology and physiology with the formation of grain yield and quality and the nutrient absorption and utilization [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(1): 36-46.
- [15] 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. Effect of biochar on root morphological and physiological characteristics and yield in rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(8): 1445-1451.
- [16] 勾芒芒,屈忠义. 土壤中施用生物炭对番茄根系特征及产量的影响[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(8): 1348-1352.
- GOU Mangmang, QU Zhongyi. Effect of biochar on root distribution and yield of tomato in sandy loam soil [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(8): 1348-1352.
- [17] 蒋健,王宏伟,刘国玲,等. 生物炭对玉米根系特征及产量的影响[J]. *玉米科学*, 2015, 23(4): 62-66.
- JIANG Jian, WANG Hongwei, LIU Guoling, et al. Effect of biochar on root characteristics and yield in Maize [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2015, 23(4): 62-66.
- [18] 刘新源,刘国顺,刘宏恩,等. 生物炭施用量对烟叶生长、产量和品质的影响[J]. *河南农业科学*, 2014, 43(2): 58-62.
- LIU Xinyuan, LIU Guoshun, LIU Hongen, et al. Effect of biochar application amount on growth, yield and quality of tobacco [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2014, 43(2): 58-62.
- [19] 毛家伟,张翔,司贤宗,等. 不同碳肥水平对土壤肥力及烤烟养分吸收和产质量的影响[J]. *中国烟草科学*, 2015, 36(2): 43-48.
- MAO Jiawei, ZHANG Xiang, SI Xianzong, et al. Effects of different carbon fertilizer levels on soil fertility and nutrient absorption, yield and quality of flue-cured tobacco [J]. *Chinese Tobacco Science*, 2015, 36(2): 43-48.
- [20] 张春,赵浩淳,郭涛,等. 生物炭施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. Influences of biochar application rate on tobacco seedling growth [J]. *Tobacco Science & Technology*, 2015, 48(6): 9-12, 26.
- [21] 陈心想,耿增超,王森,等. 施用生物炭后-土土壤微生物及酶活性变化特征[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(4): 751-758.
- CHEN Xinxiang, GENG Zengchao, WANG Sen, et al. Effects of biochar amendment on microbial biomass and enzyme activities in loess soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(4): 751-758.
- [22] 杨兰芳,曾巧,李海波,等. 紫外分光光度法测定土壤过氧化氢酶活性[J]. *土壤通报*, 2011, 42(1): 207-210.
- YANG Lanfang, ZENG Qiao, LI Haibo, et al. Measurement of catalase activity in soil by ultraviolet spectrophotometry [J]. *Chinese Journal of Soil Science*,

2011, 42(1):207-210.

[23] 尚杰,耿增超,赵军,等. 生物炭对壤土水热特性及团聚体稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 1969-1976.

SHANG Jie, GENG Zengchao, ZHAO Jun, et al. Effects of biochar on water thermal properties and aggregate stability of Lou soil [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(7): 1969-1976.

[24] 吴志丹,江福英,尤志明,等. 生物黑炭输入对茶园土壤呼吸的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(4): 586-592.

WU Zhidan, JIANG Fuying, YOU Zhiming, et al. Effect of biochar application on soil respiration in tea plantation[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(4): 586-592.

[25] 曾爱,廖允成,张俊丽,等. 生物炭对壤土土壤含水量、有机碳及速效养分含量的影响[J]. 农业环境科

学学报, 2013, 32(5): 1009-1015.

ZENG Ai, LIAO Yuncheng, ZHANG Junli, et al. Effects of biochar on soil moisture, organic carbon and available nutrient contents in manural loessial soils [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(5): 1009-1015.

[26] 张祥,王典,姜存仓,等. 生物炭对我国南方土壤红壤和黄棕壤理化性质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(8): 979-984.

ZHANG Xiang, WANG Dian, JIANG Cuncang, et al. Effect of biochar on physicochemical properties of red and yellow brown soils in the South China region [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(8): 979-984.

责任编辑 董志坚

(上接第 20 页)

[10] 刘宪臣. 温湿度对烟草青枯病发生的影响及调控技术研究[D]. 重庆:西南大学, 2014.

LIU Xianchen. A study on effects of changes and control of temperature and humidity on the occurring of tobacco bacterial wilt and the control techniques [D]. Chongqing: Southwest University, 2014.

[11] 刘艳霞. 土传烟草青枯病的生物防控及其机理研究[D]. 南京:南京农业大学, 2012.

LIU Yanxia. Study on biological control of tobacco bacterial wilt and its mechanisms of action [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.

[12] 汪莹. 抗烟草青枯病的药剂筛选与应用技术研究[D]. 重庆:西南大学, 2007.

WANG Ying. Studies on selection of anti-tobacco bacterial wilt bactericides and the application technique of bactericides [D]. Chongqing: Southwest University,

2007.

[13] 朱贤朝,王彦亭,王智发. 中国烟草病害[M]. 北京:中国农业出版社, 2002: 20-25.

ZHU Xianchao, WANG Yanting, WANG Zhifa. Tobacco diseases of China [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2002: 20-25.

[14] 蔡刘体,商胜华,胡重怡,等. 烟草青枯病病圃土壤微生物多样性初步分析[J]. 烟草科技, 2012(8): 79-83.

CAI Liuti, SHANG Shenghua, HU Zhongyi, et al. Preliminary analysis of soil microbial diversity in tobacco bacterial wilt disease nursery [J]. Tobacco Science & Technology, 2012(8): 79-83.

责任编辑 董志坚