

网络出版时间:2018-02-26 08:48 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2018.06.011  
网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.s.20180226.0847.022.html>

# 小麦生物质炭对烤烟生长及根际土壤理化性质的影响

张阿凤<sup>1</sup>,邵慧芸<sup>1</sup>,成 功<sup>1</sup>,杜红宇<sup>1</sup>,张育林<sup>1</sup>,王旭东<sup>1</sup>,张艳玲<sup>2</sup>

(1 农业部 西北植物营养与农业环境重点实验室,西北农林科技大学 资源环境学院,陕西 杨凌 712100;

2 中国烟草总公司 郑州烟草研究院,河南 郑州 450001)

**[摘要]** 【目的】探讨生物质炭对烤烟前期生长、根际土壤理化性质及酶活性的影响。【方法】以烤烟 K326 为供试品种,采用盆栽试验,研究不同用量(0%(对照),0.1%,0.5%,1%,2%,3%)小麦生物质炭施入后对烤烟前期农艺性状、根际土壤理化性质及酶活性的影响。【结果】与对照相比,不同用量的生物质炭对还苗期烟草叶片数、株高、叶绿素含量无显著影响,但是总体上增加了最大叶面积,其中生物质炭用量为 3% 的处理使烤烟的最大叶面积较对照显著增加了 155.3%。不同用量生物质炭总体上增加了团棵期烟草的叶片数、最大叶面积和叶绿素含量,但株高与对照相比无显著变化,当生物质炭用量为 3% 时,最大叶面积、叶片数分别较对照显著增加 17.7% 和 21.5%。与对照相比,不同用量生物质炭影响了烟草团棵期地上部生物量,但对地下部生物量无显著影响。生物质炭的施用影响烟草根际土壤的理化性质,其中生物质炭用量为 3% 的处理,烟草根际土壤的有机碳、全氮、全钾、速效磷、速效钾含量较对照分别显著提高了 302.3%,41.7%,114.0%,220.3% 和 474.8%,pH 提高了 0.50,而对土壤全磷含量没有显著影响。与对照相比,生物质炭用量为 2% 的处理,烟草根际土壤脲酶活性增加了 35%;而生物质炭用量为 0.5% 和 3% 的处理,土壤蔗糖酶活性分别增加了 108% 和 100%;但是生物质炭的施用却降低了土壤脱氢酶的活性,生物质炭用量为 0.5%,1%,2% 和 3% 的处理,土壤脱氢酶活性分别较对照降低了 51.5%,63.6%,63.6% 和 51.5%。相关性分析表明,烟叶地上部干质量与土壤有机碳、氮含量和蔗糖酶活性呈显著正相关关系( $P < 0.05$ ),与速效钾含量呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ ),而与脱氢酶活性呈极显著负相关关系( $P < 0.01$ )。【结论】施用生物质炭不仅可改善烟叶的农艺性状,而且会影响土壤理化性质和酶活性,其中以生物质炭用量为 3% 时效果较佳。

**[关键词]** 小麦生物质炭;烤烟;根际土壤性质;农艺性状

**[中图分类号]** S572.062

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2018)06-0085-09

## Effects of biochar amendment on flue-cured tobacco growth and soil physical and chemical properties of rhizosphere

ZHANG Afeng<sup>1</sup>,SHAO Huiyun<sup>1</sup>,CHENG Gong<sup>1</sup>,DU Hongyu<sup>1</sup>,

ZHANG Yulin<sup>1</sup>,WANG Xudong<sup>1</sup>,ZHANG Yanling<sup>2</sup>

(1 Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Northwest A&F University, College of Natural Resources and Environment, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 China Tobacco Corporation Zhengzhou Tobacco Research Institute, Zhengzhou, Henan 450001, China)

**Abstract:** 【Objective】This study investigated the effects of biochar amendment on growth of flue-cured tobacco, soil physical and chemical properties and soil enzyme activities.【Method】Agronomic traits, soil physical and chemical properties and enzyme activities of flue-cured tobacco K326 were studied under pot experiment with different application rates of biochar (0%(control),0.1%,0.5%,1%,2%,and 3%).【Result】As compared to the control,different biochar amendments had no significant effect on leaf num-

**[收稿日期]** 2017-04-07

**[基金项目]** 中国烟草总公司郑州烟草研究院部门开放基金项目

**[作者简介]** 张阿凤(1985—),女,河南开封人,讲师,博士,主要从事生物质炭的农田施用及固碳减排研究。

E-mail:zhangafeng@nwsuaf.edu.cn

ber, plant height and chlorophyll content of tobacco at seedling stage, but increased maximum leaf area. The maximum leaf area of flue-cured tobacco was significantly increased by 155.3% compared with the control under 3% biochar amendment. Different biochar amendments increased leaf number, maximum leaf area and chlorophyll content at the glomeration stage, but had no effect on plant height. The maximum leaf area and leaf number were increased significantly by 17.7% and 21.5% under 3% biochar amendment, respectively. Different biochar amendments affected aboveground biomass, but had no significant effect on underground biomass at the glomeration stage. The application of biochar affected physical and chemical properties of tobacco rhizosphere soil. The contents of organic carbon, total nitrogen, total potassium, available phosphorus, available potassium and soil pH in rhizosphere soil were increased by 302.3%, 41.7%, 114.0%, 220.3%, 474.8% and 0.50 under 3% biochar amendment, respectively, but soil total phosphorus content was not affected. Compared with the control, soil urease activity was increased by 35% in rhizosphere soil under 2% biochar amendment. The activity of soil sucrase was increased by 108% and 100% under 0.5% and 3% biochar amendment, respectively. However, soil dehydrogenase activity was decreased by 51.5%, 63.6%, 63.6% and 51.5% under 0.5%, 1%, 2% and 3% biochar amendment, respectively. Shoot dry weight had significant and positive correlations with soil total carbon, nitrogen and soil invertase activity ( $P < 0.05$ ), very significant and positive correlation with available potassium ( $P < 0.01$ ), and significant and negative correlation with soil dehydrogenase activity ( $P < 0.01$ ). 【Conclusion】 Biochar not only improved agronomic traits of tobacco leaves, but also affected soil physical and chemical properties and enzyme activities. The 3% biochar application was the best for improving soil function and tobacco growth.

**Key words:** biochar; flue-cured tobacco; rhizosphere soil properties; agronomic traits

生物质炭是各种农田废弃物及果木枝条在高温(350~550 °C)限氧条件下热解的产物,主要的元素组成为碳、氢、氧等,还有一定量的氮和硫<sup>[1]</sup>,并且碳的含量比较高(70%~80%),以纤维素、羰基、酸和酸的衍生物以及成分复杂的有机碳的混合物为主。施入土壤后因其性质比较稳定,在土壤中的周转过程可能长达数百年或者更久<sup>[2]</sup>,这为生物质炭还田后持续发挥改土增产、固碳减排作用奠定了基础<sup>[3]</sup>。

我国是一个农业生产大国,每年产生的各类作物秸秆在 $7 \times 10^8$  t 左右<sup>[4]</sup>。大量研究表明,生物质炭对于改善土壤结构及土壤理化性质<sup>[5]</sup>、提升作物产量及肥料利用率<sup>[6-7]</sup>、提高温室气体减排等方面有重要作用<sup>[8]</sup>。生物质炭的农田施用一方面为秸秆的资源化利用提供了新的途径<sup>[2,9]</sup>,另一方面也为农田土壤的固碳减排提供了新思路。由于化学肥料的长期单一施用,导致植烟土壤结构板结、肥力下降,并进一步影响烟叶的产量及品质。因此,探究对植烟土壤的改良措施已受到广泛关注<sup>[10]</sup>。但有研究表明,生物质炭的施用虽然促进了烟叶生长和产量的提高<sup>[11-12]</sup>,提升了烟叶的品质及产值<sup>[11]</sup>,但是烟叶品质随着生物质炭施用量的增加呈现先提高后下降的趋势,当生物质炭施用量达到 2 025 kg/hm<sup>2</sup>时,烟叶品质开始下降<sup>[11]</sup>。另有研究表明,生物质炭的施

用对烟田土壤结构和理化性质的改善有一定作用<sup>[13]</sup>。而目前的研究主要集中于生物质炭的施用对烤烟不同生育期生长发育特征及成熟期土壤理化性质的影响方面<sup>[14-16]</sup>,关于生物质炭对烟叶根际土壤理化性质及酶活性的影响研究较少。

贵州遵义市是全国烤烟种植最适宜区之一,近年烤烟种植面积为 80 万 hm<sup>2</sup> 左右,是全国第三大烟叶主产区,种植面积和烟叶产量居贵州省第一<sup>[17]</sup>。生物质炭的来源和用量、气候条件、土壤类型都会影响烟叶的生长、产量及品质,但是目前在贵州方面的研究还比较欠缺。因此本研究选取贵州遵义市烟田土壤黄壤,采用盆栽试验,探讨不同用量的小麦生物质炭对烟叶前期生长及根际土壤理化性质及酶活性的影响,以期为遵义市植烟土壤中生物质炭的施用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验采用盆栽的方式,于 2016 年在西北农林科技大学日光温室(34°16'56.24"N, 108°04'27.95"E)内进行。供试烟草品种为 K326,将烤烟种子种在育苗盘基质中,并使其保持湿润状态,再放入配制好的营养液箱中,之后放入人工气候箱里进行育苗。育

苗温度控制在25℃,湿度控制在60%。待烟苗约4 cm高时,选取长势一致的烟苗统一移栽至高25 cm、口径为36 cm的硬质塑料花盆中,每盆移栽1棵烟苗,每盆装土和生物质炭共10 kg。所用土壤为采自贵州遵义市遵义县的0~10 cm土层的黄壤,其基本性质如下:pH 6.37,有机碳3.43 g/kg,全氮0.96 g/kg,全磷0.090 g/kg,全钾7.29 g/kg,有效磷16.6 mg/kg,有效钾92.1 mg/kg。供试小麦生物质炭购自河南三利新能源有限公司,是将小麦秸秆在缺氧条件下经350~550℃高温裂解后所得的产物,其基本性质如下:pH 10.3,有机碳489.6 g/kg,全氮10.7 g/kg,全磷2.0 g/kg,全钾26.3 g/kg,矿质态氮90.4 mg/kg,有效磷0.87 mg/kg,有效钾462 mg/kg,灰分含量467.0 g/kg。

## 1.2 试验设计

试验设6个处理,分别为不施用生物质炭的对照(CK),以及添加0.1%(质量分数,下同),0.5%,1%,2%和3%生物质炭的处理,每个处理3次重复,每重复1盆。在烟苗移栽前,将生物质炭、肥料(肥料的用量每盆按2 g纯氮量施用氮磷钾复合肥( $m(N) : m(P_2O_5) : m(K_2O) = 1 : 1.5 : 3$ )和土按试验设计充分混合均匀后装盆,各处理标记后随机排列。整个生育期烟苗所需水分全部由人工供给,在移栽还苗期保持水分相对含水量的60%<sup>[18]</sup>,还苗期以后按照烟株的生长情况和水分蒸发情况适当补充水分。其余栽培管理严格按照优质烟叶生产技术执行。

## 1.3 样品采集及分析方法

在烤烟移栽后的15 d(还苗期)测定烟叶的株高、叶片数、最大叶面积、叶绿素含量(SPAD)等农

表1 不同用量生物质炭对还苗期和团棵期烤烟农艺性状的影响

Table 1 Effect of different biochar amendments on agronomic traits of flue-cured tobacco during the seedling and glomeration stages

生物 质炭 用量/% Biochar dosage	还苗期 Seedling stage				团棵期 Glomeration stage			
	叶片数/ (个·株 <sup>-1</sup> ) Leaf number	株高/cm Stem length	最大叶 面积/cm <sup>2</sup> Maximum leaf area	叶绿素含量 SPAD	叶片数/ (个·株 <sup>-1</sup> ) Leaf number	株高/cm Stem length	最大叶 面积/cm <sup>2</sup> Maximum leaf area	叶绿素含量 SPAD
0(CK)	3.0±0.0 ab	6.8±0.0 a	19.7±0.3 b	24.6±1.6 ab	10.7±1.2 bc	17.0±0.4 a	523.5±2.2 bcd	34.4±1.0 ab
0.1	2.7±0.6 b	5.3±0.6 a	18.2±5.8 b	24.1±3.2 b	10.3±0.6 c	20.4±0.1 a	468.3±15.5 d	34.7±0.9 ab
0.5	3.0±0.0 ab	5.2±2.0 a	28.2±20.2 b	28.4±3.7 a	12.0±1.0 ab	18.5±4.0 a	505.0±28.3 cd	38.6±3.7 a
1	3.0±0.0 ab	5.8±1.1 a	21.9±2.3 b	27.7±1.6 ab	11.7±0.6 abc	17.4±3.4 a	579.6±49.5 ab	35.2±3.8 ab
2	2.7±0.6 b	5.2±1.0 a	25.1±2.2 b	24.7±0.4 ab	11.7±0.6 abc	15.6±3.2 a	549.2±21.4 bc	31.9±1.6 b
3	3.5±0.7 a	6.5±0.9 a	50.3±5.3 a	26.4±2.0 ab	13.0±1.0 a	21.0±1.8 a	616.0±12.2 a	39.1±4.2 a

注:同列数据后标不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。表2和表3同。

Note: Different small letters within each line indicate significant difference ( $P<0.05$ ). Table 2 and Table 3 are the same.

从表1可以看出,与对照(CK)相比,不同用量

艺性状指标,在烤烟移栽后的45 d(团棵期)再次测定上述指标,之后将整个植株连根一起挖出,用抖根法取根际土壤。将整株烤烟在105℃条件下杀青15 min,60℃烘干,在烘干前后分别测定烤烟地上部和地下部的鲜质量与干质量。

土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化法测定,pH采用DELTA320pH计测定(土水质量比为1:1),硝态氮含量采用酚二磺酸比色法测定,铵态氮含量采用1.2 mol/L氯化钾浸提-靛酚蓝比色法测定,全氮含量用半微量凯氏法测定,速效磷含量采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定,全磷含量采用氢氧化钠熔融法测定,速效钾含量采用1 mol/L醋酸铵浸提-火焰光度法测定,全钾含量采用氢氧化钠熔融-火焰光度法测定,以上养分含量的测定均参考文献[19]的方法进行。土壤脲酶、脱氢酶、蔗糖酶活性均采用比色法测定,其测定方法参照文献[20]的方法进行。烟叶中叶绿素含量采用SPAD-502 PLUS(叶绿素计)测定,株高、叶长和叶宽采用长度为2 m的卷尺测定。

## 1.4 数据处理

试验数据均取3次重复的平均值,采用Microsoft excel 2013和JMP10.0(SAS Institute, USA, 2011)统计软件进行处理和相关性分析,用Duncan's法检验数据间的差异显著性( $P<0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同用量生物质炭对烤烟农艺形状及生物量的影响

不同用量生物质炭对烤烟农艺性状的影响详见表1。

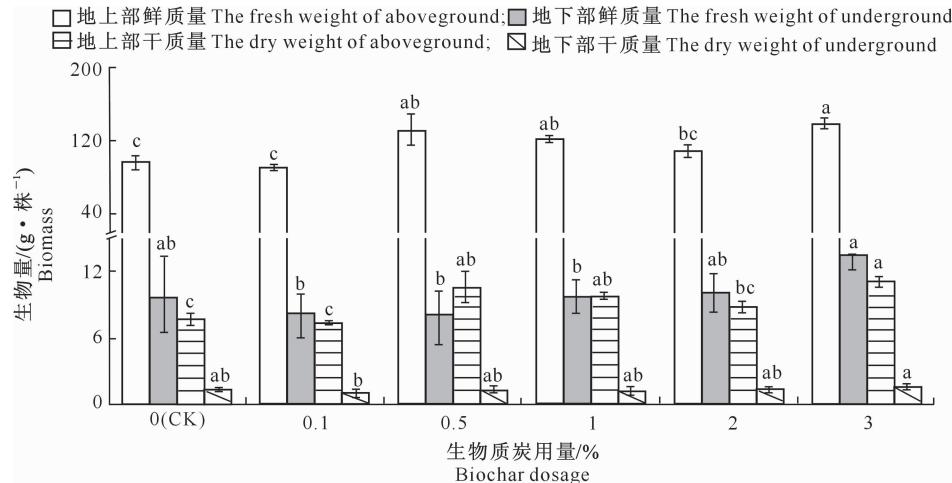
表1 不同用量生物质炭对还苗期和团棵期烤烟农艺性状的影响

生物质炭对还苗期烟草的叶片数、株高及叶绿素含

量没有明显影响,但是总体增加了烟叶的最大叶面积,其中当生物质炭用量为 3% 时,烟叶的最大叶面积较对照增加了 155.3%,而其他处理与对照没有显著差异。在团棵期,与对照相比,生物质炭的施用总体增加了烟草的叶片数、最大叶面积及叶绿素含量,但是对于烟草的株高没有显著影响;当生物质炭

用量为 3% 时,与对照相比,烟草的叶片数增加了 21.5%,最大叶面积增加了 17.7%。

由图 1 可以看出,与对照相比,不同用量生物质炭影响了烟草团棵期地上部的生物量,不同生物质炭处理与对照之间烟草地上部鲜质量、干质量总体上有显著性差异。



图柱上标不同小写字母表示处理之间有显著性差异( $P<0.05$ ),下图同

Different small letters indicate significant difference ( $P<0.05$ ) among treatments. The same below.

图 1 不同用量生物质炭对烟叶团棵期地上部和地下部生物量的影响

Fig. 1 Effect of different amounts of biochar amendment on aboveground and root biomass of flue-cured tobacco during the glomeration stage

图 1 显示,与对照相比,生物质炭用量为 0.5%, 1%, 2% 及 3% 时,地上部鲜质量分别增加了 36.7%, 26.3%, 13.6% 和 43.7%;地上部干质量分别增加了 37.7%, 27.3%, 14.3% 和 44.2%。可以看出,生物质炭用量为 3% 的处理烟草地上部生物量增幅最大。与对照相比,不同用量生物质炭对烤

烟地下部鲜质量及干质量没有显著性影响。

## 2.2 不同用量生物质炭对烟草根际土壤养分含量的影响

表 2 显示,生物质炭的施用影响了土壤 pH、有机碳、全氮及全钾含量,但对土壤全磷含量无显著影响。

表 2 不同用量生物质炭对烟草根际土壤养分含量的影响

Table 2 Effects of different amounts of biochar amendment on nutrients contents in rhizosphere soil of tobacco

生物质炭用量/% Biochar dosage	pH	有机碳/(g·kg⁻¹) Organic C	全氮/(g·kg⁻¹) Total N	全钾/(g·kg⁻¹) Total K	全磷/(g·kg⁻¹) Total P
0(CK)	6.37±0.04 b	3.43±0.38 c	0.96±0.03 d	7.3±1.2 b	0.090±0.040 a
0.1	6.43±0.2 b	5.06±1.74 c	1.00±0.03 cd	13.5±3.2 ab	0.095±0.014 a
0.5	6.45±0.1 b	4.45±1.92 c	1.02±0.04 cd	13.3±0.9 ab	0.087±0.024 a
1	6.49±0.1 b	16.50±3.45 a	1.06±0.04 c	10.6±5.9 ab	0.073±0.014 a
2	6.95±0.1 a	11.50±0.55 b	1.24±0.05 b	13.1±1.6 ab	0.076±0.003 a
3	6.87±0.3 a	13.80±2.31 ab	1.36±0.04 a	15.6±1.0 a	0.084±0.010 a

当生物质炭用量为 2% 和 3% 时,与对照相比,土壤 pH 分别显著增加了 0.58 和 0.50,而其他生物质炭处理与对照之间没有显著性差异。当生物质炭用量为 1%, 2% 和 3% 时,与对照相比,土壤有机碳含量分别增加了 381.0%, 235.3% 和 302.3%;而当生物质炭的用量为 0.1% 和 0.5% 时,与对照相比,

土壤有机碳含量虽略有增加,但没有显著差异。当生物质炭用量为 1%, 2% 和 3% 时,与对照相比,土壤全氮含量分别增加了 10.4%, 29.2% 和 41.7%;而低用量(0.1% 和 0.5%)生物质炭处理下,土壤全氮含量没有显著变化。钾是烟草的品质元素,土壤中全钾含量影响烟草对钾的吸收。与对照相比,生

物质炭的施用增加了土壤全钾含量,特别是当生物质炭用量为3%时,土壤全钾含量最高,较对照增加了114.0%;其他生物质炭处理土壤全钾含量虽有增加的趋势,但是与对照差异不显著。土壤全磷含量各处理间差异不显著。

图2显示,生物质炭的施用影响了烟草根际土壤硝态氮和铵态氮的含量。与对照相比,当生物质炭用量为0.1%,0.5%,1%,2%和3%时,土壤硝态

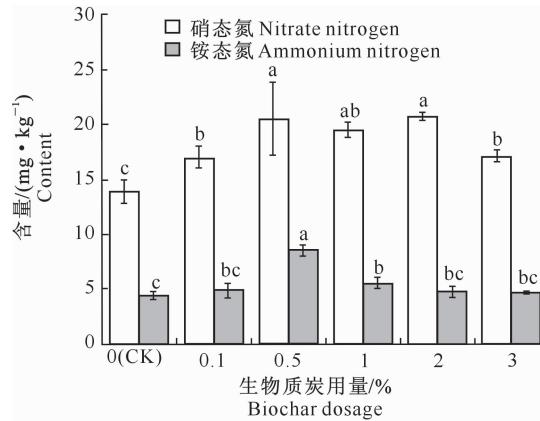


图2 不同用量生物质炭对烟草根际土壤铵态氮和硝态氮含量的影响

Fig. 2 Effect of different amounts of biochar amendment on  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  and  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  contents of rhizosphere soil

图3显示,生物质炭处理显著影响了根际土壤速效磷和速效钾的含量。与对照相比,当生物质炭用量为0.1%,0.5%,1%,2%和3%时,土壤速效磷含量分别显著增加了197.7%,148.6%,220.3%,282.4%和220.3%。当生物质炭用量为0.5%,1%,2%和3%时,烟草根际土壤速效钾含量分别较对照显著增加了45.3%,78.5%,237.0%和474.8%;但当生物质炭用量为0.1%时,烟草根际土壤速效钾含量与对照之间没有显著差异。

### 2.3 不同用量生物质炭对烟草根际土壤酶活性的影响

表3显示,生物质炭的施用影响了土壤脲酶、脱

氮含量分别显著增加了22.1%,47.1%,39.9%,48.8%和22.9%。与对照相比,当生物质炭的用量为0.5%和1%时,土壤铵态氮含量分别显著增加了90.5%和21.4%;而其他处理与对照没有显著性差异。

不同用量生物质炭对烟草根际土壤速效磷和速效钾含量的影响见图3。

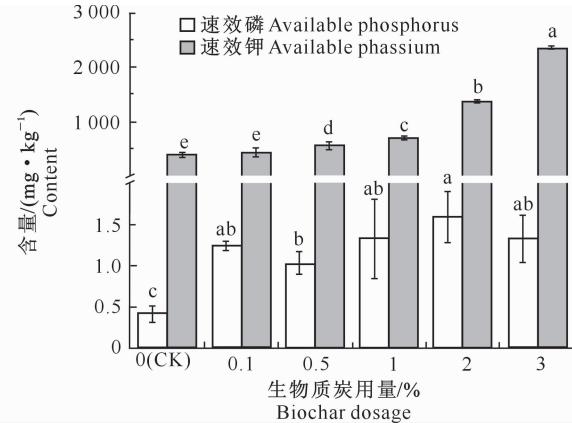


图3 不同用量生物质炭对烟草根际土壤速效磷和速效钾含量的影响

Fig. 3 Effects of different amounts of biochar amendment on soil available phosphorus and soil available potassium contents of rhizosphere soil

氢酶及蔗糖酶活性,但是3种酶活性的变化与生物质炭的用量之间没有线性关系。与对照相比,当生物质炭用量为2%时,土壤脲酶活性增加35%。而施用生物质炭(添加0.1%的生物质炭处理除外)降低了土壤脱氢酶的活性,与对照相比,当生物质炭用量为0.5%,1%,2%和3%时,土壤脱氢酶活性分别降低了51.5%,63.6%,63.6%和51.5%;当生物质炭用量为0.1%时,土壤脱氢酶活性较对照略有增加,但二者之间没有显著性差异。与对照相比,当生物质炭用量为0.5%和3%时,土壤蔗糖酶活性显著增加了108.7%和100%;而其他处理下土壤蔗糖酶活性与对照没有显著差异。

表3 不同用量生物质炭对烟草根际土壤酶活性的影响

Table 3 Effects of different amounts of biochar amendment on soil enzyme activities of rhizosphere soil

Biochar dosage	Urease activity/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$	Dehydrogenase activity/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$	Invertase activity/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$
0(CK)	0.020±0.003 b	0.0033±0.001 a	0.23±0.07 b
0.1	0.022±0.001 ab	0.0038±0.0008 a	0.33±0.08 ab
0.5	0.022±0.004 b	0.0016±0.0010 b	0.48±0.20 a
1	0.023±0.004 ab	0.0012±0.0002 b	0.38±0.10 ab
2	0.027±0.003 a	0.0012±0.0001 b	0.36±0.02 ab
3	0.023±0.002 ab	0.0016±0.0004 b	0.46±0.02 a

## 2.4 团棵期烟草农艺性状、土壤理化性质、酶活性之间的相关关系

本试验分析了团棵期烟草农艺性状、土壤理化性质、酶活性之间的相关关系,其中烟草农艺性状与全钾、全磷、硝态氮、铵态氮、速效磷含量以及脲酶活性相关性均不显著,因此本研究只列出了烟草农艺性状与土壤 pH、有机碳、全氮、速效钾含量以及脱氢酶、蔗糖酶活性的相关性,结果见表 4。表 4 显示,团棵期烟草的叶片数与脱氢酶活性呈显著负相关关系( $P<0.05$ ),与全氮、速效钾含量呈极显著正

相关关系( $P<0.01$ );最大叶面积与脱氢酶活性呈显著负相关关系( $P<0.05$ ),与叶片数呈显著正相关关系( $P<0.05$ ),与 pH、全氮含量呈极显著正相关关系( $P<0.01$ ),与有机碳、速效钾含量呈极显著正相关关系( $P<0.001$ );地上部干质量与有机碳、全氮含量、蔗糖酶活性呈显著正相关关系( $P<0.05$ ),与速效钾含量、最大叶面积、叶片数呈极显著正相关关系( $P<0.01$ ),而与脱氢酶活性呈极显著负相关关系( $P<0.01$ )。

表 4 团棵期烟草农艺性状、土壤理化性质、酶活性之间的相关关系

Table 4 Correlations between agronomic traits of flue-cured tobacco and soil physical and chemical properties as well as enzyme activities

指标 Index	pH	有机碳 Organic C	全氮 Total N	速效钾 Available K	脱氢酶 Dehydrogenase	蔗糖酶 Invertase	叶片数 Leaf number	株高 Stem length	最大叶面积 Maximum leaf area
pH	1								
有机碳 Organic C	0.546 5**	1							
全氮 Total N	0.796 8***	0.609 9***	1						
速效钾 Available K	0.750 4***	0.577 3**	0.957 5***	1					
脱氢酶 Dehydrogenase	-0.400 8	-0.557 3*	-0.453 2	-0.442 7	1				
蔗糖酶 Invertase	0.183 5	0.281 6	0.446 1	0.404 6	-0.242 8	1			
叶片数 Leaf number	0.327 5	0.458 6	0.609 5**	0.656 1**	-0.478 8*	0.440 1	1		
株高 Stem length	-0.030 4	0.004 4	0.169 5	0.209 0	0.100 7	0.105 4	0.237 6	1	
最大叶面积 Maximum leaf area	0.549 2**	0.708 0***	0.664 1**	0.742 5***	-0.563 9*	0.139 0	0.568 6*	-0.031 4	1
地上部干质量 Aboveground dry weight	0.399 8	0.501 7*	0.503 3*	0.578 1**	-0.591 1**	0.506 4*	0.770 1***	0.253 5	0.632 3**

注: \*、\*\*、\*\*\* 分别表示在  $P<0.05$ ,  $P<0.01$ ,  $P<0.001$  水平相关性显著。

Note: \*, \*\*, and \*\*\* represent significant correlations at  $P<0.05$ ,  $P<0.01$ , and  $P<0.001$ , respectively.

## 3 讨 论

### 3.1 生物质炭的施用对烤烟农艺形状及干质量的影响

烟草的长势可以通过农艺形状直观地反映<sup>[21]</sup>。赵殿峰等<sup>[15]</sup>的研究结果表明,小麦/玉米秸秆生物质炭施用抑制了烤烟前期的生长。万海涛<sup>[21]</sup>研究表明,花生壳生物质炭抑制壤质潮土(pH 7.48)烟株前期的生长,但促进了烤烟后期的生长。本研究发现,添加质量分数 3% 的生物质炭能改善烟株生长前期的农艺形状,增加还苗期烟叶的最大叶面积以及团棵期的叶片数和最大叶面积。陈懿等<sup>[22]</sup>的研究表明,当烟秆生物质炭用量为 1,10,50 t/hm<sup>2</sup>

时,其增加了黄壤(pH 6.84)上烤烟根系干质量、地上部干质量及总干质量,这与本研究结果一致,即生物质炭的施用增加了烤烟地上部鲜质量、干质量,且添加 3% 生物质炭处理的增幅最大。而刘卉等<sup>[16]</sup>的研究表明,当生物质炭用量为 3 000~3 750 kg/hm<sup>2</sup> 时,其可促进烤烟的干物质积累。这可能与供试土壤的基本性质、生物质炭的性质及生物质炭的制备原料和条件等因素有关<sup>[14]</sup>。本研究的相关性分析表明,团棵期烤烟地上部干质量与土壤有机碳、全氮含量和蔗糖酶活性呈显著正相关关系( $P<0.05$ ),与速效钾含量呈极显著正相关关系( $P<0.01$ ),而与脱氢酶活性呈极显著负相关关系( $P<0.01$ )。可知土壤中丰富的速效钾、有机碳、全氮含量及较高的

蔗糖酶活性能够有效促进烤烟地上部生物量的积累。

### 3.2 生物质炭的施用对土壤 pH 及养分含量的影响

土壤 pH 与土壤养分的有效性密切相关<sup>[14]</sup>, 生物质炭的施用能显著提高土壤的 pH<sup>[23-24]</sup>。本研究结果也显示, 添加 2% 和 3% 的生物质炭处理显著增加了土壤 pH 值, 但是其他生物质炭处理之间没有显著性差异, 可知少量的生物质炭自身的灰分元素及其对阳离子的吸附能力不足以使土壤酸性离子被充分吸收交换, 只有生物质炭的用量达到一定程度时才能影响土壤的 pH 值<sup>[15]</sup>。与对照相比, 生物质炭的施用增加了土壤有机碳的含量, 其中生物质炭用量为 1%~3% 的处理土壤有机碳含量显著增加了 381.0%~302.3%, 这与前人的研究结果一致<sup>[25-26]</sup>。成功等<sup>[25]</sup>研究表明, 土壤有机碳含量随着生物质炭施用量的增加而增大。生物质炭用量为 1%~3% 的处理, 土壤全氮含量分别较对照显著增加 10.4%~41.7%, 这可能是因为生物质炭本身含有较丰富的含氮物质(全氮含量 10.7 g/kg)。与对照相比, 施用生物质炭后土壤全钾含量明显增加, 尤其生物质炭用量为 3% 的处理土壤全钾含量增幅最大。这与管恩娜等<sup>[26]</sup>的研究结果一致, 可能与生物质炭较高的全钾含量(26.3 g/kg)有关。生物质炭本身含有的可溶性钾元素, 施用后可以增加土壤钾的含量。而对于土壤全磷来讲, 各处理之间没有显著差异, 这可能与生物质炭本身磷含量较低以及生物质炭用量少有关<sup>[27]</sup>。

本研究中, 与对照相比, 施用生物质炭增加了根际土壤硝态氮和铵态氮的含量, 这与陈山等<sup>[27]</sup>的研究结果一致。赵殿峰等<sup>[15]</sup>的研究发现, 随着生物质炭施用量的增加, 土壤中速效氮含量呈先升高后降低的趋势, 这与本研究结果一致, 其中生物质炭用量为 2% 的处理硝态氮含量最高, 生物质炭用量为 0.5% 的处理铵态氮含量最高。本研究中, 随着生物质炭施用量的增加, 土壤速效磷含量总体呈现先升高再降低的趋势, 生物质炭用量为 2% 的处理土壤速效磷含量最高。这可能是因为低用量的生物质炭施用可减少土壤有效磷的淋溶和固定, 同时可吸附土壤中的磷酸根, 使得土壤有效磷含量增加; 而高用量的生物质炭施用仅以吸附土壤中的磷酸根为主, 因此导致土壤有效磷含量降低<sup>[15]</sup>。本研究中, 施用生物质炭增加了土壤速效钾的含量, 这与前人的研究结果<sup>[21,28]</sup>一致, 这是因为生物质炭中不仅含有一

定量的钾离子, 而且还可以减少土壤钾的淋洗<sup>[29]</sup>。

### 3.3 生物质炭的施用对烤烟根际土壤酶活性的影响

本研究中, 生物质炭用量为 2% 的处理与对照相比根际土壤脲酶活性增加了 35%, 而其他处理与对照相比没有显著性差异, 这与翟优雅等<sup>[30]</sup>的研究结果一致。而黄剑<sup>[31]</sup>的研究表明, 生物质炭用量高(4 500 kg/hm<sup>2</sup>)时可能抑制土壤脲酶活性。本研究中施用生物质炭(用量为 0.1% 的生物质炭处理除外)降低了土壤脱氢酶的活性, 这与 Oleszczuk 等<sup>[32]</sup>的研究结果相反。生物质炭用量为 0.5% 和 3% 的处理显著增加了蔗糖酶活性, 这与张继旭等<sup>[14]</sup>的研究结果一致, 而陈心想等<sup>[33]</sup>研究认为, 施用生物质炭在短期内对蔗糖酶活性并无显著影响。由以上结果可以看出, 目前关于生物质炭对土壤酶活性的影响结果有差异, 可能与生物质炭本身的性质和施用量、供试土壤的理化性质及目标底物之间进行的各种反应等有关<sup>[34]</sup>。

### 3.4 烤烟种植中施用生物质炭的优缺点

化肥虽然养分含量高、肥效快, 但养分单一, 长期施用就会导致土壤养分失衡, 结构板结, 肥力下降, 进而造成烟叶产量和品质下降, 烟叶产值降低<sup>[35]</sup>。而有机肥含有丰富的有机质和各种养分, 作为一种优质的土壤改良剂和肥料, 被用于施肥、改良土壤。烟田中施用有机肥可以增加土壤养分含量并改善土壤的理化性质<sup>[36-38]</sup>, 但不同有机肥的适宜用量在实际生产中很难把握。另外有机肥如污泥、猪粪、堆肥等均受到不同程度的重金属污染, 施入农田之后可能会被烟叶吸收, 进而影响烟叶的品质<sup>[35]</sup>。因此, 有机肥在烟田中的施用受到了一定的限制。生物质炭中的营养元素比较丰富, 除 C 含量较高外, N、P、K、Ca、Mg 的含量也较高<sup>[39]</sup>, 施用到烟田中可以为烤烟生长发育提供必要的营养物质, 另外对于钝化土壤中的重金属也有一定的作用<sup>[40]</sup>。本研究中, 添加 3% 的生物质炭后, 由生物质炭携入的养分如有机碳、全氮、全磷、全钾、矿质态氮、有效磷、有效钾的含量分别增加 14.7 g/kg、0.32 g/kg、0.06 g/kg、0.79 g/kg、2.7 mg/kg、0.026 mg/kg、13.9 mg/kg。可以看出生物质炭的施用一方面解决了植烟土壤有机质含量偏低的现状<sup>[41]</sup>, 另外对于土壤结构的改善、肥力的提升也有重要作用。但是由于秸秆生物质炭的 pH 值(10.3)较高, 长期大量施用会影响土壤 pH 值, 而土壤 pH 值 5.0~7.0 为烟草的适宜生长范围, 若 pH 值 >7.0, 就会造成烟叶品质

下降<sup>[42]</sup>,因此在烟田施用生物质炭时应考虑这一问题。同时,大量施用生物质炭还存在一定的环境风险,在施用量高的条件下容易造成多环芳烃污染的潜在危害<sup>[43]</sup>,因此,在施用过程中要控制生物质炭的用量;另外,生物质炭呈粉末状,占空间较大,运输成本相对较高,这也是生物质炭在推广中亟需解决的问题。

## 4 结 论

施用生物质炭不仅改善了烤烟生长前期烟叶的农艺性状,而且也影响了土壤理化性质及酶活性,其中以生物质炭用量为3%时效果较佳。

### [参考文献]

- [1] Goldberg E D. Black carbon in the environment: properties and distribution [J]. Environmental Science and Technology, 1985.
- [2] Lehmann J. A handful of carbon [J]. Nature, 2007, 447: 143-144.
- [3] 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 W F, Zhang W M, Meng J. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture [J]. Chinese Journal of Agricultural Sciences, 2013, 46(16): 3324-3333.
- [4] 孙小飞.稻草秸秆与猪粪混合厌氧消化实验研究 [D].成都:西南交通大学,2014.  
Sun X F. Experimental studies on anaerobic digestion of straw stalk mixed with pig dung [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [5] Glaser B. Manioc peel and charcoal:a potential organic amendment for sustainable soil fertility in the tropics [J]. Biology and Fertility of Soils, 2005, 41: 15-21.
- [6] Krull E S, Swanston C W, Skjemstad J O, et al. Importance of charcoal in determining the age and chemistry of organic carbon in surface soils [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111: G04001.
- [7] Robertson F A, Thorburn P J. Management of sugarcane harvest residues:consequences for soil carbon and nitrogen [J]. Australian Journal of Soil Research, 2006, 45(1): 13-23.
- [8] Nelissen V, Saha B K, Ruysschaert 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.
- [9] Novak J M, Busscher W J, Laird D L, et al. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil [J]. Soil Science, 2009, 174: 105-112.
- [10] 张勇.有机肥在植烟土壤性状改良中应用的研究进展 [J].安徽农业科学,2012,40(14):8126-8129.  
Zhang Y. Research advances in the application of organic fertilizers in the improvement of tobacco soil [J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2012, 40(14): 8126-8129.
- [11] 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 X Y, Liu G S, Liu H E, 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.
- [12] 李珊珊,蔡志远,邹阳,等.化肥配施炭醋材料对烟草生长和产量与品质的影响 [J].河南农业大学学报,2017,51(30): 312-317.  
Li S S, Cai Z Y, Zou Y, et al. Effect of chemical fertilizer mixing with biochar and pyrolygneous on growth, yield and quality of tobacco [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2017, 51(30): 312-317.
- [13] 李莉,张耸,张兆阳,等.生物炭对烟田土壤理化性状及烟叶化学成分的影响 [J].山东农业科学,2015(10):60-62.  
Li L, Zhang S, Zhang Z Y, et al. Effects of biological carbon on physical and chemical properties of soil and chemical compositions of flue-cured tobacco leaves [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2015(10): 60-62.
- [14] 张继旭,张继光,张忠锋,等.秸秆生物炭对烤烟生长发育、土壤有机碳及酶活性的影响 [J].中国烟草科学,2016,37(5): 16-21.  
Zhang J X, Zhang J G, Zhang Z F, et al. Effects of straw biochar on tobacco growth, soil organic carbon and soil enzyme activities [J]. Chinese Tobacco Science, 2016, 37(5): 16-21.
- [15] 赵殿峰,徐静,罗璇,等.生物炭对土壤养分、烤烟生长以及烟叶化学成分的影响 [J].西北农业学报,2014,23(3):85-92.  
Zhao D F, Xu J, Luo X, et al. Effect of biochar on soil nutrients, growth and chemical composition of tobacco [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2014, 23(3): 85-92.
- [16] 刘卉,周清明,黎娟,等.生物炭施用量对土壤改良及烤烟生长的影响 [J].核农学报,2016,30(7):1411-1419.  
Liu H, Zhou Q M, Li J, et al. Effect of biochar application amount on the soil improvement and the growth of flue-cured tobacco [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2016, 30(7): 1411-1419.
- [17] 厉福强,梁永江,陈杰.遵义烟区南北生态区域的划分 [J].中国烟草科学,2009,30(3):33-36.  
Li F Q, Liang Y J, Chen J. Regionalization of northern and southern tobacco ecotypic area in Zunyi region [J]. Chinese Tobacco Science, 2009, 30(3): 33-36.
- [18] 车安斌,尚军,冉清,等.土壤水分对烤烟生长发育和产质量的影响 [J].贵州农业科学,2012,40(8):75-77.  
Che A B, Shang J, Ran Q, et al. Effects of soil moisture on growth, yield and quality of flue-cured tobacco [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2012, 40(8): 75-77.
- [19] 鲍士旦.土壤农化分析 [M].北京:中国农业出版社,2000.  
Bao S D. Soil agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [20] 关松荫.土壤酶及其研究法 [M].北京:农业出版社,1986.  
Guan S Y. Soil enzymes and their research methods [M]. Beijing: Agricultural Publishing House, 1986.
- [21] 万海涛.烤烟发育和产量品质及植烟土壤理化性状对生物炭

- 的响应研究 [D]. 郑州:河南农业大学,2014.
- Wan H T. Responses of flue-cured tobacco development yield, quality and tobacco-planting soil properties to biochar rates [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2014.
- [22] 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 Y, Chen W, Lin Y C, 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.
- [23] 卢再亮,李九玉,徐仁扣.钢渣与生物质炭配合施用对红壤酸度的改良效果 [J].土壤,2013,45(4):722-726.
- Lu Z L, Li J Y, Xu R K. Amelioration effects of steel slag combined with biochar on Red soil acidity [J]. Soils, 2013, 45 (4):722-726.
- [24] 时仁勇,李九玉,徐仁扣,等.生物质灰对红壤酸度的改良效果 [J].土壤学报,2015(5):1088-1095.
- Shi R Y, Li J Y, Xu R K, et al. Effects of bio-ash ameliorating Red soil in acidity [J]. Journal of Soil Science, 2015(5):1088-1095.
- [25] 成功,陈静,刘晶晶,等.秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析 [J].环境科学,2017,38(2):792-801.
- Cheng G, Chen J, Liu J J, et al. Comparative analysis on effect of wheat straw and its biochar amendment on net global warming potential under wheat-maize rotation ecosystem in the Guanzhong Plain [J]. Environmental Science, 2017, 38 (2): 792-801.
- [26] 管恩娜,管志坤,杨波,等.生物质炭对植烟土壤质量及烤烟生长的影响 [J].中国烟草科学,2016,37(2):36-41.
- Guan E N, Guan Z K, Yang B, et al. Effects of biochar on tobacco-planting soil quality and flue-cured tobacco growth [J]. Chinese Tobacco Science, 2016,37(2):36-41.
- [27] 陈山,龙世平,崔新卫,等.施用稻壳生物炭对土壤养分及烤烟生长的影响 [J].作物研究,2016,30(2):141-147.
- Chen S, Long S P, Cui X W, et al. Affect of rice husk biochar to soil nutrient and tobacco growth [J]. Crop Research, 2016, 30(2):141-147.
- [28] 王丽渊.生物炭对植烟土壤主要性状及烤烟生长的影响 [D].郑州:河南农业大学,2014.
- Wang L Y. Effects of biochar on the main properties of soil and growth of flue-cured tobacco [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2014.
- [29] 邢刚,张庆忠,王绍斌,等.施用秸秆炭对土壤钾淋洗量的影响 [J].安徽农业科学,2009,37(18):8644-8646.
- Xing G, Zhang Q Z, Wang S B, et al. Effect of crop-residue-derived carbon application on potassium leaching amount in soil [J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2009, 37 (18): 8644-8646.
- [30] 翟优雅,阮志,张立新,等.施用秸秆对烤烟土壤酶活性及烤烟氮和钾含量的影响 [J].中国烟草科学,2014(5):45-49.
- Zhai Y Y, Ruan Z, Zhang L X, et al. Effects of straw applica-tion on soil enzyme activities and nitrogen and potassium contents in flue-cured tobacco [J]. Chinese Tobacco Science, 2014 (5):45-49.
- [31] 黄剑.生物炭对土壤微生物量及土壤酶的影响研究 [D].北京:中国农业科学院,2012.
- Huang J. The effect of biochar application on soil microbial biomass and soil enzymes [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.
- [32] Oleszczuk P, Josko I, Futa B, et al. Effect of pesticides on microorganisms, enzymatic activity and plant in biochar-amended soil [J]. Geoderma, 2014, 214-215(2):10-18.
- [33] 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 X X, He X S, Geng Z C, et al. Effects of biochar on selected soil chemical properties and on wheat and millet yield [J]. Journal of Ecology, 2013, 33(20):6534-6542.
- [34] Bailey V L, Fansler S J, Smith J L, et al. Reconciling apparent variability in effects of biochar amendment on soil enzyme activities by assay optimization [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(2):296-301.
- [35] 胡启山.化肥与农家肥混施经验谈 [J].科学种养,2008(4):7.
- Hu Q S. A discussion about the experience of mixed fertilizer and farm fertilizer [J]. Scientific Breeding, 2008(4):7.
- [36] 李正,刘国顺,叶协锋,等.绿肥翻压年限对植烟土壤微生物量C、N和土壤C、N的影响 [J].江西农业学报,2010,22(4):62-65.
- Li Z, Liu G S, Ye X F, et al. Effects of different years of burying green manure on soil microbial biomass C, N and C, N content in soil [J]. Acta Agricultural Jiangxi, 2010, 22(4):62-65.
- [37] 占朝琳,谢廷鑫,练炼晶,等.施用不同有机肥对烤烟K326生长发育及土壤无机氮的影响 [J].江西农业学报,2011,23(9):12-14.
- Zhan C L, Xie T X, Lian Y J, et al. Effects of different organic fertilizer application on growth and development of flue-cured tobacco K326 and inorganic nitrogen in soil [J]. Journal of Jiangxi Agricultural Sciences, 2011, 23(9):12-14.
- [38] 张新要.饼肥用量对不同有机质含量的土壤上烤烟生长发育及产质量的影响 [D].郑州:河南农业大学,2004.
- Zhang X Y. Effects of different cake fertilizer quantities on growth, yield and quality of flue-cured tobacco on soils of different organic matter contents [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2004.
- [39] 袁金华,徐仁扣.生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展 [J].生态环境学报,2011,20(4):779-785.
- Yuan J H, Xu R K. Progress of the research on the properties of biochars and their influence on soil environmental functions [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20 (4): 779-785.

- in seeds and skins of Shiraz grapes throughout berry development [J]. Australian Journal of Grape and Wine Research, 2003, 9(1): 15-27.
- [28] Riou V, Vernhet A, Doco T, et al. Aggregation of grape seed tannins in model wine: effect of wine polysaccharides [J]. Food Hydrocolloids, 2002, 16(1): 17-23.
- [29] Hanlin R, Hrmova M, Harbertson J, et al. Review: condensed tannin and grape cell wall interactions and their impact on tannin extractability into wine [J]. Australian Journal of Grape and Wine Research, 2010, 16(1): 173-188.
- [30] Downey M O, Harvey J S, Robinson S P. The effect of bunch shading on berry development and flavonoid accumulation in Shiraz grapes [J]. Australian Journal of Grape and Wine Research, 2004, 10(1): 55-73.
- [31] Jones H G. Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology [M]. London: Cambridge University Press, 2013.
- [32] Koyama K, Goto-Yamamoto N. Bunch shading during different developmental stages affects the phenolic biosynthesis in berry skins of 'Cabernet Sauvignon' grapes [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2008, 133(6): 743-753.
- [33] 黄璐琦, 郭兰萍. 环境胁迫下次生代谢产物的积累及道地药材的形成 [J]. 中国中药杂志, 2007, 32(4): 277-281.
- Huang L Q, Guo L P. Secondary metabolites accumulating and geoherbs formation under environmental stress [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2007, 32(4): 277-281.
- [34] 黄升谋, 邹应斌. 库源关系对杂交水稻根系及叶片衰老的影响 [J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2002, 28(3): 192-194.
- Huang S M, Zou Y B. Effects of sink source ratio on roots and leaves senescence in hybrid rice [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science Edition), 2002, 28(3): 192-194.
- [35] He F, Pan Q H, Shi Y, et al. Biosynthesis and genetic regulation of proanthocyanidins in plants [J]. Molecules, 2008, 13(10): 2674-2703.
- [36] Kemp B S, Harrison R, Creasy G L. Effect of mechanical leaf removal and its timing on flavan-3-ol composition and concentrations in *Vitis vinifera* L. cv. Pinot Noir wine [J]. Australian Journal of Grape and Wine Research, 2011, 17(2): 270-279.
- [37] Kozina B, Karoglan M, Herjavec S, et al. Influence of basal leaf removal on the chemical composition of Sauvignon Blanc and riesling wines [J]. Journal of Food, Agriculture and Environment, 2008, 6(1): 28-33.

(上接第 93 页)

- [40] 刘晶晶, 杨 兴, 陆扣萍, 等. 生物质炭对土壤重金属形态转化及其有效性的影响 [J]. 环境科学学报, 2015, 35(11): 3679-3687.
- Liu J J, Yang X, Lu K P, et al. Effect of bamboo and rice straw biochars on the transformation and bioavailability of heavy metal in soil [J]. Journal of Environmental Science, 2015, 35(11): 3679-3687.
- [41] 陈朝阳, 陈志厚, 吴 平, 等. 南平植烟土壤有机质状况及其与土壤养分的关系 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39(19): 11547-11550.
- Chen C Y, Chen Z H, Wu P, et al. Study on the status of soil organic matter and its relationship with soil nutrient in Nanping tobacco-growing areas [J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2011, 39(19): 11547-11550.
- [42] 秦 松. 贵州烟区营养环境与烟叶质量的关系 [D]. 重庆: 西南大学, 2007.
- Qin S. Relationship between nutrition environment and tobacco leaf's quality in tobacco-growing regions of Guizhou [D]. Chongqing: Southwest University, 2007.
- [43] 仓 龙, 朱向东, 汪 玉, 等. 生物质炭中的污染物含量及其田间施用的环境风险预测 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 163-167.
- Cang L, Zhu X D, Wang Y, et al. Pollutant contents in biochar and their potential environmental risks for field application [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(15): 163-167.