

生物炭与氮肥减量配施对烤烟生长及土壤酶活性的影响

刘 领¹,王艳芳¹,宋久洋¹,周俊学²,王小东¹,陈明灿^{1*}

(1.河南科技大学 农学院,河南 洛阳 471003; 2.洛阳市烟草公司,河南 洛阳 471000)

摘要: 通过盆栽试验研究了生物炭与氮肥减量配施(CK:常规施氮量;T1:常规施氮量+生物炭;T2:90%常规施氮量+生物炭;T3:80%常规施氮量+生物炭;T4:70%常规施氮量+生物炭)对烤烟生长及土壤酶活性的影响,以期为生物炭输入条件下烤烟的氮肥运筹提供理论依据。结果表明,与CK相比,在常规施氮量条件下添加生物炭显著增加了烟叶叶绿素a+b和类胡萝卜素的含量,显著提高了烟株根系活力及土壤酶活性,促进了烤烟的生长;在生物炭添加条件下,减少常规施氮量的10%~20%并没有显著影响烟株生长及烟叶叶绿素a+b含量、类胡萝卜素含量、净光合速率,且更有利于提高土壤酶活性、烟株根系活力和根冠比。建议在生物炭输入条件下适量减少氮肥施用量,这样更有利于提高烟田氮肥利用效率,保障烟区健康发展。

关键词: 生物炭;氮肥减量施用;烤烟;根系活力;净光合速率;土壤酶活性

中图分类号: S56.2;S143.1;S511 文献标志码: A 文章编号: 1004-3268(2016)02-0062-05

Effects of Biochar Addition Combined with Reducing Nitrogen Application Rate on Growth of Flue-cured Tobacco and Soil Enzyme Activities

LIU Ling¹, WANG Yanfang¹, SONG Jiuyang¹, ZHOU Junxue², WANG Xiaodong¹, CHEN Mingcan^{1*}

(1. School of Agriculture, Henan University of Science & Technology, Luoyang 471003, China;

2. Luoyang Tobacco Company, Luoyang 471000, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to investigate the influences of biochar addition combined with reducing nitrogen application rate (CK: conventional nitrogen application rate; T1: conventional nitrogen application rate combined with biochar; T2: 90% conventional nitrogen application rate combined with biochar; T3: 80% conventional nitrogen application rate combined with biochar; T4: 70% conventional nitrogen application rate combined with biochar) on growth of flue-cured tobacco and soil enzyme activities, so as to provide theoretical basis for nitrogen application rate under biochar addition condition. The results showed that compared with CK, the treatment of conventional nitrogen application rate combined with biochar significantly increased the contents of tobacco chlorophyll and carotenoid, significantly enhanced tobacco root activity and soil enzyme activities, and promoted the growth of tobacco; the treatments of biochar addition combined with 10%—20% reducing nitrogen application rate were beneficial to improve the soil enzyme activities, tobacco root activity and root-shoot ratio when compared with the control. This research suggested that reducing nitrogen application rate was beneficial to improve nitrogen use efficiency and guarantee the healthy development of tobacco production area under biochar addition condition.

Key words: biochar; reducing nitrogen application rate; flue-cured tobacco; root activity; net photosynthesis rate; soil enzyme activities

收稿日期: 2015-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(31200332); 河南科技大学人才基金项目(09001597); 河南科技大学青年科学基金项目(2012QN004); 河南省烟草公司项目(M201307)

作者简介: 刘 领(1978-), 男, 河南项城人, 副教授, 博士, 主要从事作物生理生态研究。E-mail: liulinghenan@126.com

* 通讯作者: 陈明灿(1963-), 男, 河南汝州人, 教授, 主要从事作物高产栽培技术与理论研究。E-mail: cmcan@126.com

烟草作为我国主要的经济作物之一,在国民经济发展中占有举足轻重的地位。目前,烟草在我国的常年种植面积约 100 万 hm^2 ^[1]。随着我国化肥工业的发展和烟叶的连年种植,人们在烟叶生产中不断投入大量的化肥,在获得烟叶产量提高的同时,烟区土壤有机质含量下降、土壤结构和微生物生态环境恶化、烟叶病害加重、烟叶品质降低等问题已逐渐凸显^[2-3]。在目前的烤烟生产中,氮肥施用过量的现象较为普遍。氮素供应过多,一方面造成烟叶生长后期贪青晚熟,烘烤性能差,烤后烟叶品质低劣;另一方面还造成烟田氮素营养流失,肥料利用率低,影响烟区生态环境和可持续发展^[4-5]。

生物炭是指农林废弃物等生物质材料在缺氧条件下高温裂解形成的一种固体产物^[6]。由于其特殊的理化特性,近年来在农业生态系统中的应用研究逐渐增多,在消除土壤污染、改善土壤性能、提高肥料利用效率、增强农业系统生产力方面具有潜在的应用前景^[7-9]。目前,关于生物炭在烤烟上的应用研究主要集中于其对烤烟生长及烤后烟叶产量、品质的影响方面,且多数研究聚焦在其添加量和添加方式方面^[10-13]。有关生物炭与肥料的互作效应及其对土壤酶活性影响的报道比较缺乏。为此,开展了生物炭与氮肥减量配施对烤烟生长及土壤酶活性影响的研究,旨在进一步探明生物炭在烤烟生产中的生态学效应,为生物炭输入条件下烤烟的氮肥运筹提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验于 2013 年在河南科技大学开元校区农场进行。盆栽试验用土为农场 0~20 cm 耕层土壤,经自然风干后过筛,土壤质地为红黏土,土壤有机质含量为 15.1 g/kg,速效氮含量为 82.2 mg/kg,速效磷含量为 8.39 mg/kg,速效钾含量为 128.5 mg/kg, pH 值为 7.54。每盆装土 25 kg,烟草专用复合肥(N:P₂O₅:K₂O = 10:12:18)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 17%)、硫酸钾(含 K₂O 50%)及生物炭与土壤充分混匀后装入塑料盆中,盆上口径为 36 cm,底直径为 30 cm,高为 40 cm。供试烤烟(*Nicotiana tabacum* L.)品种为豫烟 6 号;生物炭为河南商丘三利新能源有限公司提供的花生壳高温炭化后产品。

1.2 试验设计

试验共设 5 个处理,即 CK:100% 常规施氮量; T1:100% 常规施氮量 + 生物炭; T2:90% 常规施氮量 + 生物炭; T3:80% 常规施氮量 + 生物炭; T4:

70% 常规施氮量 + 生物炭。每个处理 15 盆,共计 75 盆,完全随机排列。常规施氮量指每盆添加纯氮 5 g,氮肥来源为烟草专用复合肥;生物炭添加量为每盆 180 g;所有处理的磷、钾肥用量相同, T2、T3、T4 三个处理磷、钾肥的差值分别采用过磷酸钙、硫酸钾来补充。烟苗于 5 月 6 日移栽入盆中,每盆栽烟 1 株,烟苗栽入盆中后深埋于土壤中,按田间行株距(行距 120 cm,株距 50 cm)进行随机排列,烟苗定期定量浇水,按当地烟叶栽培技术进行管理。

1.3 测定项目及方法

于烟株旺盛生长期(移栽后 60 d),分别测定各处理烟株的株高、最大叶面积、叶片数、茎围、根冠比、根系活力、叶绿素含量、类胡萝卜素含量、净光合速率及根际土壤脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶活性。最大叶面积 = 最大叶长 × 最大叶宽 × 0.634 5,根冠比 = (根系干质量/地上部干质量) × 100%。根系活力采用改良的氯化三苯基四氮唑(TTC)法测定^[14]。叶绿素和类胡萝卜素含量采用分光光度法测定^[15]。在 8:00—18:00 采用 Li-6400 便携式光合作用测定系统测定功能叶(倒数第 6 位叶)的净光合速率, Li-6400 仪器使用开放式气路,内置光源,光强为 1 500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。土壤脲酶活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定,过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定,蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定^[16]。

1.4 数据处理和分析

试验数据采用 Excel 2007、SPSS 16.0 和 DPS 6.55 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 生物炭与氮肥减量配施对烤烟生物学性状的影响

由表 1 可知, T1 处理烤烟的株高、叶片数、最大叶面积、茎围、根冠比均最大,且除叶片数外,其他指标均与 CK 差异显著,表明常规施氮量条件下添加生物炭有利于烟株根系的发育,促进烟株地上部分的快速生长。与 CK 相比,在生物炭添加条件下各减量施氮处理的烤烟株高、叶片数、最大叶面积和茎围均不同程度下降,但仅 T4 处理与 CK 差异显著,表明在生物炭输入条件下减少氮肥施用量的 10%~20% 未对烤烟生长造成显著影响,这可能与生物炭能够保肥增效、提高氮肥利用率有关;在生物炭添加条件下各减量施氮处理的根冠比均增加,表明生物炭在改良土壤结构、促进烟株根系发育方面具有较大潜力。

表 1 生物炭与氮肥减量配施对烤烟生物学性状的影响

处理	株高/cm	叶片数	最大叶面积/cm ²	茎围/cm	根冠比
CK	106.7 ± 1.0b	15.6 ± 0.5ab	1 041 ± 6.2b	8.61 ± 0.2b	0.133 ± 0.012bc
T1	114.5 ± 2.2a	16.0 ± 0.7a	1 163 ± 7.6a	9.23 ± 0.3a	0.160 ± 0.010a
T2	106.2 ± 2.0b	15.4 ± 0.6abc	1 036 ± 5.9b	8.57 ± 0.2b	0.143 ± 0.003b
T3	105.7 ± 1.4b	15.2 ± 0.2bc	1 032 ± 7.2b	8.34 ± 0.3bc	0.137 ± 0.003bc
T4	101.5 ± 1.1c	14.8 ± 0.6c	1 006 ± 6.0c	8.17 ± 0.2c	0.135 ± 0.007bc

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

2.2 生物炭与氮肥减量配施对烤烟叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

由表 2 可知, 叶绿素 a + b 和类胡萝卜素含量均以 T1 处理最高, 显著高于 CK。与 CK 相比, 在生物炭添加条件下各减量施氮处理烤烟的叶绿素 a + b 含量均降低, 但仅有 T4 处理与 CK 差异显著; 在生物炭添加条件下各减量施氮处理烤烟的类胡萝卜素含量也呈减少趋势, 但处理间差异均不显著。综上, 在生物炭输入条件下减少氮肥施用量的 10% ~ 20% 并未显著影响烟叶中光合色素的合成, 这也可能与生物炭具有较强的养分持留作用有关。

表 2 生物炭与氮肥减量配施对烤烟叶绿素和类胡萝卜素含量的影响 mg/g

处理	叶绿素 a + b	类胡萝卜素
CK	1.65 ± 0.03b	0.14 ± 0.01b
T1	1.73 ± 0.04a	0.18 ± 0.02a
T2	1.63 ± 0.03b	0.16 ± 0.01ab
T3	1.61 ± 0.02bc	0.13 ± 0.01bc
T4	1.56 ± 0.03c	0.13 ± 0.01bc

2.3 生物炭与氮肥减量配施对烤烟净光合速率的影响

由图 1 可知, 各处理烤烟的净光合速率日变化曲线表现一致, 均呈 M 形双峰曲线。各处理均在 10:00 净光合速率达到最大值, 其后净光合速率逐渐下降; 在 14:00 时净光合速率达到一个低谷, 此时由于外界气温较高, 蒸腾速率加快, 导致叶片部分气孔关闭, 从而使烟草叶片产生“午休”现象; 16:00 时净光合速率又有所增高, 此后逐渐下降, 到 18:00 时

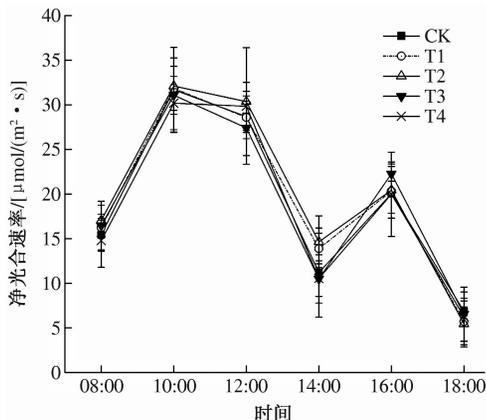
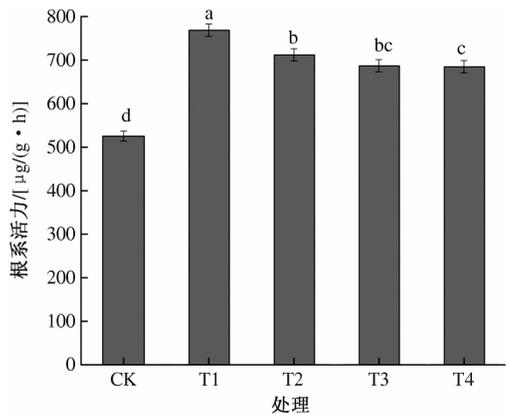


图 1 生物炭与氮肥减量配施对烤烟净光合速率的影响

净光合速率达到最小值。各处理烤烟净光合速率平均值表现为 T2 > T3 > T1 > CK > T4, 由方差分析可知, T4 处理与 CK 差异显著 ($P < 0.05$), T1、T2 和 T3 处理与 CK 差异不显著 ($P > 0.05$), 表明在生物炭输入条件下减少氮肥施用量的 10% ~ 20% 未对旺长期烤烟净光合速率产生显著影响。

2.4 生物炭与氮肥减量配施对烤烟根系活力的影响

由图 2 可知, 与 CK 相比, 添加生物炭处理的根系活力均显著增加, T1 处理最高, T2 处理次之, 其次为 T3、T4 处理, 分别比 CK 增加 31.7%、26.2%、23.6%、22.1%。表明, 添加生物炭对烟株根系生长具有较大的促进作用, 且在生物炭添加条件下适量减少氮肥施用量时烟株根系仍具有较强的活力, 这可能与生物炭能够疏松土壤结构, 改善土壤微生态环境, 进而提高根系活力有关。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图 2 生物炭与氮肥减量配施对烤烟根系活力的影响

2.5 生物炭与氮肥减量配施对烤烟根际土壤酶活性的影响

土壤酶作为土壤中活跃的有机成分之一, 在土壤养分循环以及植物生长所需养分的供给过程中起到重要作用。由图 3 可知, 与 CK 相比, 在生物炭添加条件下不同施氮量处理土壤脲酶、过氧化氢酶和蔗糖酶的活性均有不同程度的增加, 表明生物炭输入对改善土壤微生态环境, 促进土壤酶活性具有重要作用。其中, 土壤脲酶活性表现为 T2 > T1 > T3 > T4 > CK, T1、T2、T3 处理均与 CK 差异显著; 土壤过

氧化氢酶活性表现为 $T2 > T4 > T1 > T3 > CK$, $T2$ 、 $T4$ 处理与 CK 差异显著;土壤蔗糖酶活性表现为 $T3 > T1 > T2 > T4 > CK$, $T3$ 、 $T1$ 处理与 CK 差异显著。表

明在生物炭添加条件下,减量施氮 10% 有益于提高土壤脲酶和过氧化氢酶的活性,减量施氮 20% 更有益于提高土壤蔗糖酶的活性。

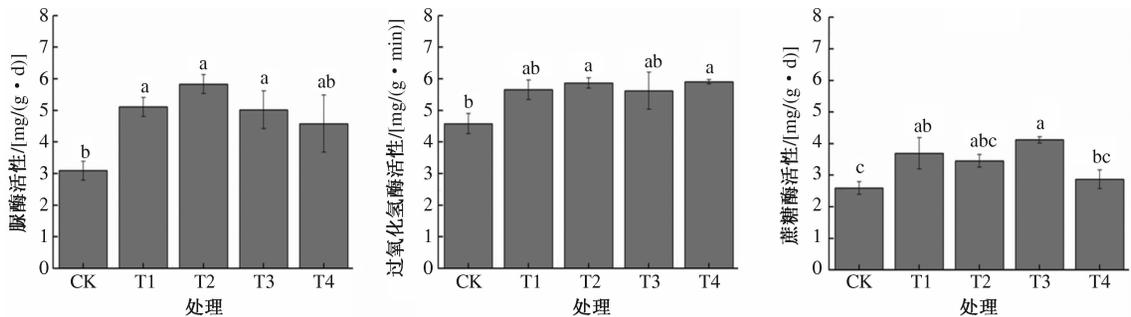


图 3 生物炭与氮肥减量配施对烤烟根际土壤酶活性的影响

3 结论与讨论

由生物质热解而成的生物炭可作为土壤改良剂、肥料缓释载体及碳封存剂,备受世人关注^[6]。国内外许多研究表明,施用生物炭对不同作物生长发育与产量提高有着积极作用^[9,17]。本研究也表明,施用生物炭对烤烟的生长具有良好效应,与 CK 相比,在常规施氮量条件下施用生物炭可显著提高叶片中叶绿素 $a + b$ 和类胡萝卜素的含量,增强烟株的根系活力,进而提高烟株的株高、最大叶面积、茎围。这与当前生物炭在烟草生产中的应用效果是一致的^[11,18]。本研究还表明,与 CK 相比,在生物炭输入条件下,减少氮肥施用量的 10% ~ 20% 并没有显著影响烤烟叶片的叶绿素 $a + b$ 和类胡萝卜素的含量、净光合速率及株高、最大叶面积、茎围,而且减少氮肥施用量的 10% ~ 30% 还可以提高烟株根系活力和根冠比。生物炭与氮肥配施对烤烟生长的促进作用可能存在以下几个方面的原因:(1)改善土壤结构和微生态环境。生物炭体小多孔,表面积大,容重低,能够改善土壤结构和通气、透水性能,同时生物炭丰富的多孔结构和较大的比表面积也有利于土壤微生物的生存繁衍,增加烟田土壤中有益菌群数量,为烤烟根系提供良好的生长环境^[19,20]。(2)提高土壤温度。施用生物炭能够加深土壤颜色,增加土壤吸热能力,从而提高土壤温度,有利于烤烟的生长发育^[21]。(3)生物炭本身含有一定数量的对作物生长发育有益的元素。生物炭多为农林废弃物等生物质在缺氧条件下高温裂解形成的固体产物,其本身含有少量的氮、磷、钾及一些微量元素,在一定程度上能够为烟株生长提供良好的元素供应源^[6]。(4)生物炭具有肥料缓释载体功能。生物炭对土壤水溶液中的 $NH_4^+ - N$ 、 $NO_3^- - N$ 、 K 、 P 等不同形态的营养元素有很强的吸附作用,从而能够减少

水溶性营养离子的迁移和淋失。因此,生物炭与化学肥料配合使用时,相当于营养元素的缓释载体,并在土壤中持续而缓慢地加以释放,提高肥料利用率,促进增产^[22-24]。

土壤酶是土壤中活跃的有机成分之一,其活性高低反映了土壤养分转化的动态,对协调土壤生态系统的碳、氮平衡,维持土壤健康及在植物生长所需养分的供给过程中起到重要作用。土壤脲酶直接参与土壤中含氮有机化合物的转化,提高氮的生物有效性,其活性强度常被用来表征土壤氮素供应状况。过氧化氢酶直接参与生物呼吸过程的物质代谢,解除在呼吸过程中产生的对活细胞有害的过氧化氢,其活性强度常用来表征土壤氧化强度。蔗糖酶直接参与土壤碳循环,改善土壤碳素营养状况,常用来表征土壤碳素营养状况^[25]。生物炭的特殊结构及其吸附性能决定了其对土壤酶作用的复杂性。一方面由于生物炭对反应底物的吸附,有利于酶促反应,进而提高土壤酶活性;另一方面由于生物炭对酶分子的吸附,保护了酶促反应的结合位点,从而抑制了酶促反应的进行^[26]。陈心想等^[27]研究表明,施用生物炭可显著提高土壤脲酶、过氧化氢酶和玉米收获后碱性磷酸酶活性,但对蔗糖酶和小麦季碱性磷酸酶活性影响不显著。王丽渊等^[28]研究表明,生物炭抑制根际土壤转化酶活性,但这种抑制作用随着生育期的推进而逐渐减小,施加生物炭可以提高烤烟生育后期过氧化氢酶活性,且土壤过氧化氢酶活性随着生物炭添加量的增加而提高。冯爱青等^[29]研究表明,施用控释肥及添加生物炭可提高土壤脲酶活性,抑制土壤脱氢酶和中性磷酸酶活性,对土壤过氧化氢酶活性没有显著影响。本研究表明,与 CK 相比,在生物炭添加条件下不同施氮量处理土壤脲酶、过氧化氢酶和蔗糖酶的活性均有不同程度的增加,这可能与生物炭输入改善了植烟土壤通气状况和微生

物环境,提高土壤碳氮比,增强土壤的生物化学反应,促进物质循环,进而提高土壤酶活性有关^[30]。本研究还表明,在生物炭添加条件下适量减少氮肥施用量并没有显著影响植烟土壤酶活性,而且减量施氮 10% 更有益于提高土壤脲酶和过氧化氢酶的活性,减量施氮 20% 更益于提高土壤蔗糖酶的活性。这可能与生物炭能够为微生物提供碳源,作为肥料载体具有较强的养分持留和缓释效应有关^[7,22]。

综上所述,本研究表明施用生物炭能够提高植烟土壤酶活性,对烤烟的生长具有积极的促进效应;相比于常规施氮量,生物炭输入条件下减量施氮 10% ~ 20% 并没有显著影响烤烟的生长。鉴于目前我国烟区烟叶生产中化学肥料长期过量投入带来的负面效应,建议在生物炭输入条件下减少氮肥施用量的 10% ~ 20%,这样更有利于提高烟田肥料的利用效率,从而保障烟区持续健康发展。

参考文献:

- [1] 袁晓霞. 浅析我国烟叶生产面临的主要问题[J]. 中国烟草科学, 2009, 30(5): 77-80.
- [2] 尤垂淮, 高峰, 王峰吉, 等. 连作对云南烤烟根际生态及烟叶产质量的影响[J]. 中国烟草学报, 2015, 21(1): 60-67.
- [3] 姜林灿. 对烟叶原料保障上水平的探讨[J]. 中国烟草科学, 2011, 32(6): 90-93.
- [4] 李春俭, 张福锁, 李文卿, 等. 我国烤烟生产中的氮素管理及其与烟叶品质的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(2): 331-337.
- [5] 李琰琰, 刘国顺, 冯小虎, 等. 氮营养水平对烤烟根际土壤酶活性及烟叶内在品质的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(5): 1177-1182.
- [6] 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.
- [7] Qian K, Kumar A, Zhang H, *et al.* Recent advances in utilization of biochar[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 42: 1055-1064.
- [8] Xie T, Reddy K R, Wang C, *et al.* Characteristics and applications of biochar for environmental remediation: A review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2015, 45(9): 939-969.
- [9] Biederman L A, Harpole W S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2013, 5(2): 202-214.
- [10] 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.
- [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.
- [12] 宋久洋, 刘领, 陈明灿, 等. 生物质炭施用对烤烟生长及光合特性的影响[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2014, 35(4): 68-72.
- [13] 周孚美, 周龙翔, 黄新国. 不同生物质炭施用量对烤烟相关性状的影响研究[J]. 现代农业科技, 2015(17): 15-18.
- [14] 杨铁钊, 杨志晓, 聂红资, 等. 富钾基因型烤烟的钾积累及根系生理特性[J]. 作物学报, 2009, 35(3): 535-540.
- [15] 赵世杰, 刘华山, 董新纯. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1998: 68-72.
- [16] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 274-339.
- [17] 勾芒芒, 屈忠义. 生物炭对改善土壤理化性质及作物产量影响的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2013(5): 1-5.
- [18] 毛家伟, 张翔, 叶红朝, 等. 生物质炭对豫西烤烟生长、SPAD 值及经济性状的影响[J]. 山西农业科学, 2014, 42(8): 851-853, 883.
- [19] McCormack S A, Ostle N, Bardgett R D, *et al.* Biochar in bioenergy cropping systems: Impacts on soil faunal communities and linked ecosystem processes[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2013, 5(2): 81-95.
- [20] Wei L, Shutao W, Jin Z, *et al.* Biochar influences the microbial community structure during tomato stalk composting with chicken manure[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 154: 148-154.
- [21] 刘红杰, 胡新, 任德超, 等. 生物炭对黄淮海区土壤温度的影响[J]. 农学学报, 2014, 4(9): 47-49.
- [22] Dong D, Feng Q, McGrouther K, *et al.* Effects of biochar amendment on rice growth and nitrogen retention in a waterlogged paddy field[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(1): 153-162.
- [23] Gai X P, Wang H Y, Liu J, *et al.* Effects of feedstock and pyrolysis temperature on biochar adsorption of ammonium and nitrate[J]. *PLoS One*, 2014, 9(12): e113888.
- [24] Oram N J, van de Voorde T F J, Ouweland G J, *et al.* Soil amendment with biochar increases the competitive ability of legumes via increased potassium availability[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2014, 191: 92-98.
- [25] 陈丹梅, 陈晓明, 梁永江, 等. 种植模式对土壤酶活性和真菌群落的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(2): 77-84.
- [26] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, *et al.* Biochar effects on soil biota—A review[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43(9): 1812-1836.
- [27] 陈心想, 耿增超, 王森, 等. 施用生物炭后壤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.
- [28] 王丽渊, 刘国顺, 王林虹, 等. 生物质炭对烤烟干物质积累量及根际土壤理化性质的影响[J]. 华北农学报, 2014, 29(1): 140-144.
- [29] 冯爱青, 张民, 路艳艳, 等. 控释氮用量及生物炭对玉米产量及土壤生物化学性质的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 159-164.
- [30] Xu G, Lü Y C, Sun J N, *et al.* Recent advances in biochar applications in agricultural soils: Benefits and environmental implications[J]. *Clean-Soil Air Water*, 2012, 40(10): 1093-1098.