

生物炭对大豆根际土壤养分含量及微生物数量的影响

谷思玉¹, 李欣洁^{1,2}, 魏丹², 李玉梅², 金梁², 赵富阳², 郭文义³, 徐猛³, 赵赛东^{1,2}

(1. 东北农业大学 资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省农业科学院 土壤肥料与环境资源研究所/黑龙江省土壤环境与植物营养重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150086; 3. 沈阳军区空军后勤部克东农副业生产基地, 黑龙江 克山 161600)

摘要: 采用盆栽试验方法研究了不同量生物炭对大豆根际土壤养分含量及微生物数量的影响。结果表明: 土壤中施入生物炭对大豆根际土壤养分含量及微生物数量产生显著影响, 在 300~1 500 kg·hm⁻² 范围内, 各时期可平均提高土壤 pH 0.06 个单位, 土壤有机碳平均提升 24.08%, 速效氮、磷、钾分别增加 10.37%、34.56% 和 9.16%; 土壤蔗糖酶、过氧化氢酶和脲酶的活性分别增加 19.05%、21.18% 和 25.90%; 土壤中细菌、真菌和放线菌的数量分别提高 1.95、1.65 和 1.69 倍。

关键词: 生物炭; 大豆; 微生物; 根际

中图分类号: S565.1

文献标识码: A

DOI: 10.11861/j.issn.1000-9841.2014.03.0393

Effects of Biochar on Soil Nutrient Contents and Microorganism of Soybean Rhizosphere

GU Si-yu¹, LI Xin-jie^{1,2}, WEI Dan², LI Yu-mei², JIN Liang², ZHAO Fu-yang², GUO Wen-yi³, XU Meng³, ZHAO Sai-dong^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Institute of Soil Fertilizer and Environment Resource, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences/The Key Laboratory of Soil Environment and Plant Nutrition of Heilongjiang Province, Harbin 150086, China; 3. Shenyang Military Region Air Force Logistics Department, Kedong Agricultural and Sideline Production Base, Keshan 161600, China)

Abstract: The effects of different amount of biochar on soil nutrient contents and microorganism of soybean rhizosphere were studied on the basis of pot experiment. The results showed that compared with the treatment no application of biochar in soybean rhizosphere soil, when the application of biochar range at 300~1 500 kg·ha⁻¹, in each period soil pH was increased by an average of 0.06 units, the soil organic carbon could be increased at an average of 24.08%, available N, P and K were increased by 10.37%, 34.56% and 9.16%, separately; the activity of soil invertase, catalase and urease was increased by 19.05%, 21.18% and 25.90%, and the quantity of bacteria, fungi and actinomycetes were improved by 1.95, 1.65 and 1.69 times in soybean rhizosphere soil.

Key words: Biochar; Soybean; Microorganism; Rhizosphere

生物炭是由生物质如作物秸秆、木屑等在完全或部分缺氧条件及相对较低的温度(≤700℃)下经热解炭化产生的一种含碳量丰富、性质稳定的产物,具有高度的芳香环分子结构和多孔特性^[1]。研究表明,生物炭可以提高土壤对营养元素的吸持能力和阳离子交换量^[2],降低土壤的酸度和有毒元素对植物的毒性^[3-4],改善土壤结构、增强土壤的保水能力,提高土壤养分利用率^[5],增加土壤有机碳含量。通过促进土壤微生物种群的发展,增强土壤微生物的活性^[6-7],从而有效调控根际土壤肥力,促进作物生长。黑龙江省是我国大豆的主要产地之一,由于长期连作,土壤酸化造成大豆产量降低、土壤肥力下降等一系列连作障碍问题。目前,关于生物炭对大豆根际微域土壤环境影响的研究较少,本试

验拟通过考察施用生物炭对大豆根际土壤养分含量及微生物数量的影响,为改善连作大豆土壤的微域环境和提高土壤肥力提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

生物炭基本理化性质为 pH 8.69, 有机碳 598 g·kg⁻¹, 全氮 7.85 g·kg⁻¹, 全磷 1.327 g·kg⁻¹, 全钾 2.41 g·kg⁻¹, 由沈阳生物炭工程技术研究中心提供。供试土壤采集于黑龙江省哈尔滨市民主乡试验站,土壤类型为东北地区典型黑土。其基本性质为 pH 6.74, 有机质 29.87 g·kg⁻¹, 全氮 1.49 g·kg⁻¹, 全磷 0.224 g·kg⁻¹, 全钾 21.37 g·kg⁻¹, 碱解氮 163.30 g·kg⁻¹, 速效磷 20.61 g·kg⁻¹, 速效钾 187.92

收稿日期: 2013-11-18

基金项目: 黑龙江省科技攻关项目(GC12B102); 公益性行业专项(200305)。

第一作者简介: 谷思玉(1964-), 女, 教授, 主要从事土壤肥力研究。E-mail: gusiuyu777@163.com。

通讯作者: 魏丹(1965-), 女, 研究员, 主要从事土壤肥力研究。E-mail: wd2087@163.com。

$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。试验用大豆品种为黑农 65, 由黑龙江省农业科学院大豆研究所提供。

1.2 试验设计

试验于 2013 年 3 月在黑龙江省农业科学院自动化温室中进行, 采用盆栽试验, 根据生物炭施用量不同, 设置 6 个处理: 生物炭用量 C0 ($0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、C1 ($300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、C2 ($600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、C3 ($900 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、C4 ($1200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、C5 ($1500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 每个处理重复 3 次, 氮磷钾肥用量分别为: N: $47 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, P_2O_5 : $78 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, K_2O : $33 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中氮肥为尿素, 磷肥为磷酸二铵, 钾肥为硫酸钾。

分别在大豆生长二节期 (V2)、盛花期 (R2)、盛荚期 (R4)、完熟期 (R8), 采用“抖根法”取根际土样 (收集紧附于根系 $0 \sim 0.5 \text{ cm}$ 范围内土壤作为根际土样), 即轻轻抖落黏附于根系上的土壤, 然后把根系放入无菌袋内用力抖下的土壤为根际土。一部分土样 4°C 保存, 供土壤微生物数量分析, 另一部分土样于室内自然风干后, 分别过 20 目及 100 目筛, 混匀, 用于进行常规分析。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤微生物数量 采用稀释平板培养法, 分别用牛肉膏蛋白胨培养基、马丁氏培养基、高氏一号培养基对细菌、真菌、放线菌进行涂布培养, 细菌 $30 \sim 37^\circ\text{C}$ 培养 $1 \sim 2 \text{ d}$, 真菌 28°C 培养 $3 \sim 5 \text{ d}$, 放线菌 $28 \sim 30^\circ\text{C}$ 培养 $5 \sim 7 \text{ d}$, 对其进行菌落计数^[8]。

1.3.2 土壤酶的测定 土壤过氧化氢酶活性、脲酶活性、蔗糖酶活依次采用高锰酸钾滴定法、苯酚钠-次氯酸钠比色法、3,5-二硝基水杨酸比色法进行测定^[9]。

1.3.3 土壤养分的测定 土壤碱解氮采用碱解扩散法, 速效磷采用碳酸氢钠-钼锑抗比色法, 速效钾采用乙酸铵提取-火焰光度计法^[10], 有机质采用 TOC 分析仪进行测定。

1.3.4 土壤 pH 的测定 土壤 pH 采用梅特勒托利多 SevenEasy 台式 pH 计 S20K 进行测定, 水土比为 $2.5:1$, 振荡 30 min 后测定 pH。

1.4 统计分析

采用 Excel 2007 进行数据的计算与处理, 采用 SPSS 20.0 统计分析软件进行单因素方差分析和制图, LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 生物炭对大豆根际理化性质的影响

由表 1 可以看出, 施入生物炭在 $300 \sim 1500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 范围内, 与对照不施生物炭对比, 成熟期 pH 平均增加 0.07 个单位, 随着施炭量的增加, 各时期土壤 pH 均呈增加的趋势, 其中各时期 C5 与对照 C0 处理均差异显著 ($P < 0.05$), 各时期 pH 平均增加 0.06 个单位; 随生物炭用量的增加, 各时期土壤有机碳含量变化也表现为增加的趋势, 当生物炭量达到 $600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 及以上时, 与对照处理差异均极显著, 施用生物炭处理相对于不施生物炭各时期可平均提高土壤有机碳含量 24.08% 。

生物炭对土壤速效养分含量有一定的影响。由表 1 可见, 土壤碱解氮、速效磷、速效钾均随生物炭用量增加而先增加后降低。土壤中碱解氮在苗期、开花期和成熟期均以 C3 处理最高, 结荚期以 C4 处理最高, 加入生物炭处理相对于对照各时期可平均增加土壤碱解氮含量 10.37% ; 土壤速效磷含量在大豆生长的 4 个关键时期均以 C4 处理最高, 施炭处理速效磷含量较对照平均增加 21.18% ; 土壤速效钾在苗期、结荚期、成熟期以 C3 处理含量最高, 开花期以 C4 处理含量最高, 施入生物炭可平均提高土壤速效钾 9.16% 。可见, 土壤施生物炭量在 $900 \sim 1200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 范围内, 对改善大豆根际的土壤环境, 提高土壤的养分含量影响较大。

表 1 不同施炭量下大豆根际土壤养分含量变化

Table 1 The changes of nutrients content in soybean rhizosphere soil with different amount of biochar

生育期 Growth stage	处理 Treatment	pH	有机碳 TOC / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	碱解氮 A-N / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效磷 A-P / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效钾 A-K / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
苗期	C0	$6.92 \pm 0.08 \text{ bcA}$	$16.61 \pm 0.36 \text{ eE}$	$112.17 \pm 2.35 \text{ eC}$	$27.55 \pm 1.02 \text{ dC}$	$197.60 \pm 3.74 \text{ dC}$
V2	C1	$6.93 \pm 0.06 \text{ bcA}$	$17.67 \pm 0.29 \text{ dD}$	$120.75 \pm 2.87 \text{ bcAB}$	$29.16 \pm 1.36 \text{ cBC}$	$207.77 \pm 4.24 \text{ cB}$
	C2	$6.96 \pm 0.08 \text{ abA}$	$20.22 \pm 0.40 \text{ cC}$	$122.83 \pm 3.07 \text{ abAB}$	$35.94 \pm 2.05 \text{ bAB}$	$218.43 \pm 4.15 \text{ bA}$
	C3	$6.98 \pm 0.11 \text{ abA}$	$20.59 \pm 0.38 \text{ cC}$	$124.55 \pm 4.23 \text{ aA}$	$39.44 \pm 2.48 \text{ aA}$	$224.20 \pm 5.07 \text{ aA}$
	C4	$7.02 \pm 0.05 \text{ aA}$	$21.74 \pm 0.21 \text{ bB}$	$121.12 \pm 1.65 \text{ bA}$	$41.90 \pm 1.96 \text{ aA}$	$218.93 \pm 2.59 \text{ bA}$
	C5	$7.04 \pm 0.10 \text{ aA}$	$24.30 \pm 0.43 \text{ aA}$	$116.08 \pm 3.04 \text{ dBC}$	$41.31 \pm 1.12 \text{ aA}$	$214.77 \pm 3.66 \text{ bAB}$

续表 1

生育期 Growth stage	处理 Treatment	pH	有机碳 TOC /g·kg ⁻¹	碱解氮 A-N /mg·kg ⁻¹	速效磷 A-P /mg·kg ⁻¹	速效钾 A-K /mg·kg ⁻¹
开花期	C0	6.93 ± 0.12 bcA	16.72 ± 0.47 dD	112.06 ± 2.78 dBC	27.42 ± 1.75 eBC	195.28 ± 4.23 dC
	R2					
	C1	6.96 ± 0.08 abA	17.34 ± 0.31 dCD	117.28 ± 3.02 cAB	28.96 ± 1.42 dBC	203.56 ± 3.61 cB
	C2	6.95 ± 0.11 bcA	20.03 ± 0.29 cBC	121.65 ± 2.96 bAB	33.08 ± 2.36 cAB	210.35 ± 4.07 bAB
	C3	6.99 ± 0.08 abA	21.40 ± 0.40 bcBC	124.32 ± 3.11 aA	38.62 ± 2.91 bA	218.03 ± 3.77 aA
	C4	7.02 ± 0.12 abA	22.02 ± 0.28 bB	122.03 ± 4.24 abAB	42.06 ± 2.36 aA	220.40 ± 5.00 aA
结荚期	C5	7.05 ± 0.10 aA	24.30 ± 0.36 aA	119.17 ± 3.55 bcAB	41.95 ± 1.19 aA	216.21 ± 3.67 aA
	C0	6.96 ± 0.06 bcA	17.02 ± 0.27 eD	113.30 ± 2.76 cB	26.35 ± 1.85 dB	195.32 ± 4.42 dB
	R4					
	C1	6.98 ± 0.06 abA	17.91 ± 0.49 deD	122.27 ± 2.20 bAB	26.27 ± 1.75 dB	202.65 ± 3.96 cB
	C2	7.01 ± 0.08 abA	19.05 ± 0.27 cdC	123.79 ± 2.13 abAB	31.36 ± 2.42 cB	211.38 ± 5.11 abA
	C3	7.05 ± 0.10 aA	20.11 ± 0.45 cC	124.45 ± 3.96 aA	36.52 ± 1.68 bAB	216.27 ± 4.33 aA
成熟期	C4	7.06 ± 0.05 aA	22.28 ± 0.28 bB	126.03 ± 4.77 aA	40.91 ± 2.06 aA	212.34 ± 3.73 abA
	C5	7.07 ± 0.08 aA	24.39 ± 0.43 aA	123.68 ± 3.69 abAB	39.33 ± 1.49 abAB	209.56 ± 4.68 bA
	C0	6.95 ± 0.06 bcA	17.10 ± 0.26 eCD	113.51 ± 2.76 cdB	27.60 ± 2.13 dC	197.79 ± 2.76 eC
	R8					
	C1	6.97 ± 0.06 abA	18.19 ± 0.29 deBC	123.23 ± 3.68 bcAB	29.07 ± 1.78 dBC	206.03 ± 4.51 dB
	C2	7.01 ± 0.08 abA	19.52 ± 0.40 cdB	129.10 ± 2.98 aAB	34.63 ± 1.69 cAB	219.82 ± 3.32 bA
	C3	7.04 ± 0.10 aA	21.36 ± 0.38 cAB	130.06 ± 4.37 aA	38.94 ± 2.53 bA	223.05 ± 2.24 aA
	C4	7.04 ± 0.05 aA	22.27 ± 0.51 bA	127.48 ± 4.69 abAB	42.37 ± 2.86 aA	220.77 ± 3.03 abA
	C5	7.05 ± 0.08 aA	23.76 ± 0.43 aA	125.72 ± 3.03 bAB	41.36 ± 1.72 abA	215.32 ± 3.58 cAB

同列同一时期不同大小写字母分别表示 0.01 与 0.05 水平上的差异显著。下同。
Different capital and lowercase letters in the same column and growth stage indicate the significant difference at 0.01 and 0.05 level, respectively. The same below. TOC: Total organic carbon; A-N: Available nitrogen; A-P: Available phosphorus; A-K: Available potassium.

2.2 生物炭对大豆根际土壤酶活性的影响

蔗糖酶可以将土壤中的蔗糖水解为葡萄糖和果糖,为土壤中的生物体提供能源,其活性可以反映微生物对土壤中易溶性物质的利用程度,及土壤有机质积累和转化的状况。由图 1a 可以看出,施入生物炭处理蔗糖酶活性提高幅度为 9.3%~26.4%, C3 处理蔗糖酶活性最高。相对于对照处理各时期平均提高 19.05%。

过氧化氢酶是土壤氧化还原酶的一种,其主要作用是分解土壤中的过氧化氢,是土壤新陈代谢水平的重要表征^[9]。由图 1b 可见,与不施生物炭 C0 处理比较,施用生物炭处理过氧化氢酶活性可提高 10.5%~30.5%,以 C3 处理过氧化氢酶活性最高,

显著高于对照及其他处理,平均提高 21.18%。

脲酶是参与土壤氮素循环的重要的水解酶,其主要功能是催化土壤中尿素的水解。由图 1c 可以看出,施入生物炭处理,脲酶活性提高幅度为 10.9%~44.4%,开花期、结荚期、成熟期均以 C3 处理最高,苗期以 C4 处理最高,与对照 C0 呈显著性差异,各时期平均可提高脲酶活性达 25.90%。

添加生物炭处理酶活性均高于未添加生物炭处理,表明土壤中添加生物炭处理能够促进土壤中蔗糖酶、过氧化氢酶、脲酶的活性,尤其以添加生物炭用量在 900~1 200 kg·hm⁻²时,酶的活性最高,因此,适量的生物炭可增加土壤酶的活性,进而提高土壤肥力和肥料利用率。

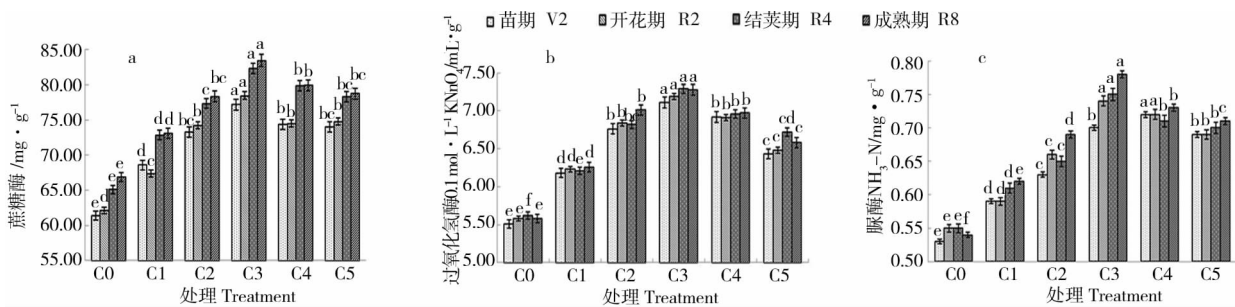


图1 不同量生物炭处理大豆根际土壤酶活性变化

Fig. 1 The enzyme activities of soybean rhizosphere soil with different amount biochar

2.3 生物炭对大豆根际土壤微生物数量的影响

由图2可以看出,与对照不施生物炭处理相比,施入生物炭处理土壤中细菌数量平均提升1.95倍,其中苗期和开花期以C4处理细菌数量最高,结荚期和成熟期以C3处理细菌数量最高,各时期平均为对照C0的1.95倍;施用生物炭土壤中真菌数量可提高1.65倍,开花期和成熟期以C4处理真菌数量最多,苗期以C5处理最多,结荚期以C3处理最多,各时期平均为对照处理的1.69倍;施用生物炭

平均可增加土壤中放线菌数量1.69倍,在大豆生长的4个关键时期均以C4处理的放线菌数量最多,施用生物炭处理土壤放线菌数量平均是对照处理的1.65倍。随着大豆生育时期的推进,3种菌的数量呈现相似的动态变化。对于添加生物炭处理,细菌、真菌、放线菌的数量均高于未添加生物炭对照,表明土壤中添加适量的生物炭处理能够提高土壤中细菌、真菌和放线菌的数量。

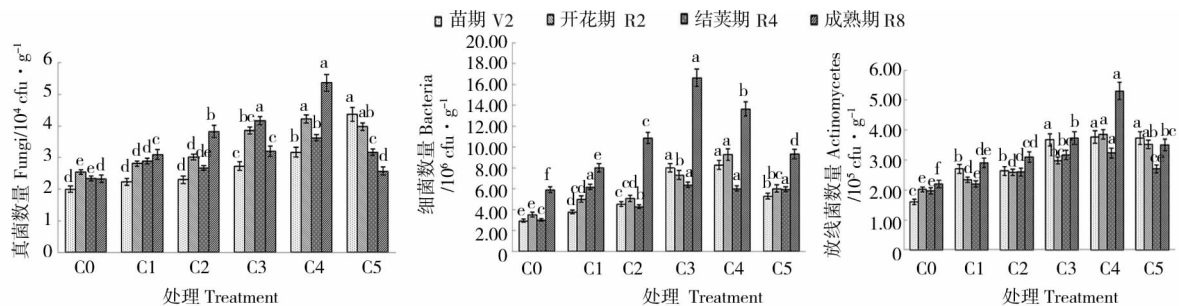


图2 不同量生物炭处理大豆根际土壤细菌、真菌及放线菌数量变化

Fig. 2 The number of bacteria, fungi and actinomycetes of soybean rhizosphere soil with different amount of biochar

3 结论与讨论

生物炭可以提高土壤的养分含量。由于生物炭一般呈碱性,向土壤中施入生物炭可提高土壤的pH^[11-12],因此生物炭可以用作酸性土壤的改良剂来中和土壤酸度。生物炭可提高土壤有机碳含量可能与生物炭中碳含量高,对土壤中有机碳含量影响较明显有关。Lehmann等^[13]研究也认为,生物炭是具有稳定芳香环结构的碳,虽然其分子化学结构不同于有机质或腐殖质,但施入土壤同样可提高土壤有机碳含量,起到改良培肥土壤的作用。同时,生物炭中含有大量植物所需的营养元素^[14-16],且对营养元素有一定的吸附作用^[17-18],因此生物炭可改善大豆根际的化学性质,提高肥料利用率^[19-20],进而提高土壤肥力。

生物炭可以增加土壤酶的活性,这与Bailey等^[21]的研究结果一致。土壤酶参与催化土壤中所

有的生物化学过程,如有机物分解、养分物质循环等^[22]。土壤酶活性可以反映土壤中生物化学反应的活跃程度、土壤微生物的活性以及养分物质循环状况,是土壤质量的重要指标。它对土壤受到的干扰比较敏感,能够反映不同条件下土壤质量的变化^[23]。试验结果表明,当土壤中施用一定量的生物炭时,对土壤蔗糖酶、过氧化氢酶和水解酶活性起到促进作用,进而对土壤有机碳的积累和土壤的新陈代谢起到促进作用。

生物炭可以增加土壤中微生物的数量,生物炭具有多孔性及高芳香烃结构容易成为土壤微生物的栖息地,给土壤微生物生长提供场所和养分^[24]。有学者认为生物炭可以提供给微生物寄居场所,使其躲避土壤中较大生物取食,进而增加微生物在土壤中的数量^[25]。试验结果表明,施入一定量的生物炭可以显著增加土壤中细菌的数量,放线菌和真菌的数量也有所增加,变化规律与细菌相似但不相同,土壤向“细菌型”发展,而细菌型土壤被一些学

者认为是土壤肥力提高的标志^[5]。生物炭可以增加土壤中微生物的数量其原因可能是添加生物炭改变了大豆的根际环境,为微生物提供了更适宜生长繁殖的环境,其机理还有待于进一步研究。

本研究表明生物炭可以提高酸性土壤 pH,增加土壤有机碳、碱解氮、有效磷、速效钾的含量,增强土壤酶的活性,增加土壤中微生物的数量。生物炭对土壤环境的影响是复杂的、多方面的,其机理还有待于进一步长期的研究。

参考文献

- [1] 陈温福,张伟明,孟军,等. 生物炭应用技术研究[J]. 中国工程科学,2011(2):83-89. (Chen W F, Zhang W M, Meng J, et al. Biochar application technology research[J]. Engineering Sciences, 2011(2):83-89.)
- [2] 陈红霞,杜章留,郭伟,等. 华北集约农田施用生物质炭对土壤容重,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 H X, Du Z L, Guo W, 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] 袁金华,徐仁扣. 稻壳制备的生物炭对红壤和黄棕壤酸度的改良效果[J]. 生态与农村环境学报,2010,26(5):472-476. (Yuan J H, Xu R K. Effects of rice-hull-based biochar regulating acidity of red soil and yellow brown soil[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26(5):472-476.)
- [4] 周建斌,邓丛静,陈金林,等. 棉秆炭对镉污染土壤的修复效果[J]. 生态环境,2008,17(5):1857-1860. (Zhou J B, Deng C J, Chen J L, et al. Cotton carbon repair effect of cadmium contaminated soil[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(5):1857-1860.)
- [5] Zwieter L, Kimber S, Morris S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. Plant and Soil, 2009, 327(1-2):235-246.
- [6] 张阿凤,潘根兴,李恋卿. 生物黑炭及其增汇减排与改良土壤意义[J]. 农业环境科学学报,2009,28(12):2459-2463. (Zhang A F, Pan G X, Li L Q. Biochar and the effect on C stock enhancement, emission reduction of greenhouse gases and soil reclamation[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(12):2459-2463.)
- [7] 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.
- [8] 许光辉. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京:中国农业出版社,1986. (Xu G H. Handbook of soil microbiology analysis method[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986.)
- [9] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1987. (Guan S M. Soil enzyme and its research methods[M]. Beijing: Agriculture Press, 1987.)
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2008. (Bao S D. Soil agro-chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008.)
- [11] Lehmann J, Rondon M. Biochar soil management on highly weathered soils in the humid tropics[C]//Norman U, Andrew S B, Cheryl P, et al. Biological Approaches to Sustainable Soil Systems, 2006:518-530.
- [12] Yuan J H, Xu R K, Zhang H, et al. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures[J]. Bioresource Technology, 2010, 102(3):3488-3497.
- [13] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems: a review[J]. Mitig Adapt Strategy Global Change, 2006, 11:395-419.
- [14] Brewer C E, Schmidt K, Satrio J A, et al. Characterization of biochar from fast pyrolysis and gasification systems[J]. Environmental Progress and Sustainable Energy, 2009, 28(3):386-396.
- [15] Lee J W, Kidder M, Evans B R, et al. Characterization of biochars produced from cornstovers for soil amendment[J]. Environment Science and Technology, 2011, 44:7970-7974.
- [16] 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, 2010, 174:105-112.
- [17] Laird D, Fleming P, Wang B, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a midwestern agricultural soil[J]. Geoderma, 2010, 158(3-4):436-442.
- [18] 周桂玉, 窦森, 刘世杰. 生物质炭结构性质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. (Zhou G Y, Dou S, Liu S J. The structural characteristics of biochar and its effects on soil available nutrients and humus composition[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(10):2075-2080.)
- [19] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann T J, et al. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered central Amazonian upland soil[J]. Plant and Soil, 2007, 291:275-290.
- [20] 何绪生, 张树清, 余雕, 等. 生物炭对土壤肥料的作用及未来研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(15):16-25. (He X S, Zhang S Q, She D, et al. Effects of biochar on soil and fertilizer and future research[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(15):16-25.)
- [21] 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, 2012, 43(2):296-301.
- [22] Burns R G. Soil enzymes[M]. New York: Academic Press, 1978.
- [23] Shukla G, Varma A. Soil enzymology[M]. New York: Springer, 2011.
- [24] Knicker H. How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review[J]. Biogeochemistry, 2007, 85:91-118.
- [25] Liang B, Lehmann J, Sohi S P, et al. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil[J]. Organic Geochemistry, 2010, 41(2):206-213.