

· 试验研究 ·

# 生物炭对干旱区盐碱土磷淋溶的影响

王承俊<sup>1</sup>, 杨 放<sup>1,3</sup>, 邢 英<sup>2</sup>, 李心清<sup>3</sup>

(1. 四川省地矿局成都水文地质工程地质队, 成都 610072; 2. 贵州师范大学, 贵阳 550001;  
3. 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 550002)

**摘要:** 以干旱区绿洲盐碱土为研究对象, 探索玉米秸秆生物炭对磷淋溶的影响。采用室内土柱淋洗试验, 设置 0% , 1% , 5% 和 10% (w/w) 四个生物炭添加比例; 模拟大气降雨, 定期收集淋洗液, 分析其中有效磷和总磷的含量。结果显示, 与对照组 0% 相比, 5% 和 10% 添加比例分别增加了土壤有效磷淋失量 610% 和 630%; 增加总磷淋失量分别达到 432% 和 438%; 土壤中有效磷增加量为 96% 和 143%。我们的研究表明生物炭施用于干旱区绿洲盐碱土能明显增加土壤中磷的有效性, 从而提高磷的利用效率 (5% 添加比例较为合适)。

**关键词:** 生物炭; 玉米秸秆; 盐碱土; 有效磷; 总磷

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 1001-3644(2017)02-0017-05

DOI:10.14034/j.cnki.schj.2017.02.004

## Effect of Biochar on Phosphorus Leaching from Saline Soil in Arid Area

WANG Cheng-jun<sup>1</sup>, YANG Fang<sup>1,3</sup>, XING Ying<sup>2</sup>, LI Xin-qing<sup>3</sup>

(1. Chengdu Hydrogeological & Engineering Geological Team, Chengdu 610072, China;

2. Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** By applying biochar made of corn stover in the saline soil collected in Kashgar oasis, Xinjiang autonomous region, we measured the concentrations of available phosphorus and total phosphorus in the leachate of the soil at different precipitation amount in the laboratory. The biochar was mixed thoroughly with the soil at 0%, 1%, 5% and 10% (w/w) ratio and transferred individually into plastic columns. Deionized water was applied on the top of the soil columns imitating natural precipitation on event basis and the leachate was collected regularly. Results showed that the leaching of available phosphorus was increased by 610% and 630% at the treatments 5% and 10%, respectively; the leaching of total phosphorus was increased by 432% and 438% at the treatments 5% and 10%, respectively. Our study indicate that biochar application (5% is a suitable addition rate) in the saline soil in arid areas can significantly improve the availability of phosphorus, thus enhance phosphorus use efficiency.

**Keywords:** Biochar; corn stover; saline soil; available phosphorus; total phosphorus

磷是植物生长所必需的营养元素, 农业土壤磷肥利用率低会造成资源浪费和地下水富营养化等问

题。提高磷肥的利用效率是当前农业和环境研究的热点之一。土壤中的可溶性磷酸盐易被土壤矿物吸附, 影响土壤中磷有效性的因素包括土壤 pH 值、有机质含量等<sup>[1]</sup>。当前, 磷肥的当季利用率较低, 大概介于 5% ~ 30% 之间, 根据不同的作物类型差异较大<sup>[2]</sup>。以新疆棉田为例, 棉花的当季利用率仅仅介于 16% ~ 26% 之间<sup>[3-4]</sup>。与此同时, 中国的磷肥产量和施用量均领先于其他国家, 磷肥施用量从 2000 年的 831 万 t 上升到 2010 年的 1 312 万 t, 增加了 57.9%。大量的磷在土壤中积累不仅造成资源浪费, 加重环境负担, 引发环境水体富营养

收稿日期: 2016-12-21

基金项目: 中国科学院战略性科技先导专项(XDA05070400); 贵州省科学技术基金(黔科合 J 字[2013]2218 号); 贵州省农业攻关计划项目(黔科合 NY 字[2011]3079 号); 中科院地合作和科技支疆项目; 国家重大科学研究计划(2013CB956700-2); 贵州省国际科技合作计划项目(黔科合外 G 字[2012]7050 号); 中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部博士资助项目”。

作者简介: 王承俊(1977-), 男, 海南儋州人, 1999 年毕业于成都理工大学水文地质与工程地质专业, 高级工程师, 研究方向为水文地质、工程地质、环境地质。

通讯作者: 邢 英 xy31034@163.com。

化,而且长期过量的施磷肥会导致土壤中 Cd、Pb 等重金属元素超标<sup>[5-6]</sup>。因此,寻求增加磷肥利用率从而减少磷肥施用量的科学方法,提高磷素在土壤、尤其是根际层中的积累量具有重要的实际意义。

由于在土壤改良和固碳减排等方面巨大的应用潜力,生物炭技术引起了国内外的广泛关注<sup>[7-10]</sup>。已有研究表明,由生物质在高温厌氧热解条件下产生的生物炭(Biochar)能通过改变土壤的 pH 值、阳离子交换量(CEC)以及有机质状况,从而改变土壤磷素的有效性,影响土壤磷素的溶解性<sup>[11-12]</sup>。Laird 等对美国中部典型农业土壤的研究发现,橡木生物炭的添加增加了表层土壤中有效磷(Mehlich III)的含量<sup>[13]</sup>。Chan 等研究了添加家禽粪便生物炭对南威尔士典型农业土壤中有效磷含量的影响,发现生物炭添加明显增加了土壤中有效磷的含量,同时增加了作物对磷的吸收<sup>[14]</sup>。郎印海对辽河口农业土壤的研究表明柚皮生物炭的施用可减少土壤对磷的固定,提高土壤磷的有效性<sup>[15]</sup>。曾爱等对北方石灰土的研究表明,土壤有效磷含量呈现随着生物炭施用量的增大而先增加后降低的趋势<sup>[16]</sup>。关连珠等研究发现施用玉米秸秆生物炭不但可以促进土壤中磷素的有效化,而且可以减少土壤对磷的固定,提高磷肥的利用率<sup>[17]</sup>。

新疆维吾尔自治区是我国重要的粮食和水果产区,区内土壤盐碱化问题严重,尤其在南疆地区;降雨少和特殊的地质水文等自然因素导致了区内土壤有效磷养分缺乏,施用生物炭能否增加土壤磷素的有效性,改善土壤肥力,还缺乏相关研究。基于此,本研究将玉米秸秆生物炭施用于南疆绿洲农业典型的盐碱土,通过室内土柱淋洗试验,探索生物炭对磷素淋失的影响。争取为提高区内盐碱土磷素利用率探索一条有效的思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 试供土壤和生物炭

试供土壤采自喀什农技推广中心试验耕地(39°23'45"N, 75°58'43"E)。土壤类型为盐化灌淤土《中国土壤分类系统》,为新疆绿洲农业典型耕作土壤类型。土壤基本理化性质如下: pH 值 7.62,总磷(T-P)和有效磷(A-P)含量分别为 289.7mg/kg 和 26.5 mg/kg,黏粒、粉粒、砂粒含量分别为 2.98%、42.28%和 54.74%, C/N 为 17.6。

生物炭制备原料是玉米秸秆。碳化过程的升温速率为 18℃/min,限氧,最高温是 550℃停留时间为

30min,研磨过 2 mm 筛。生物炭基本理化性质如下: pH 值为 10.45, A-P 含量为 153.1 mg/kg C/N 为 62.6。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 实验设计

土柱分为 4 个处理: ① C0: 碳土比 0% (w/w); ② C1: 碳土比 1% (w/w); ③ C5: 碳土比 5% (w/w); ④ C10: 碳土比 10% (w/w); 每个处理设 3 个重复。据蔬菜基地常规施肥量,每个土柱添加普钙  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  0.197 g, 磷肥施用量相当于 0.13 g  $\text{P}_2\text{O}_5/\text{kg soil}$ 。

#### 1.2.2 淋洗试验装置

室内土柱试验采用 PVC 管作为淋洗土柱,底面积和高度分别为 60 cm<sup>2</sup> 和 30 cm。低端铺上过滤石英砂(厚度 3 cm, 粒径 3 mm),用尼龙网将圆柱管底部封紧。每个土柱土壤质量为 900g。将相应比例的生物炭与土壤混匀,压实。

#### 1.2.3 淋溶试验

结合田间实际灌水量和样品测试需要,每个土柱每天添加相当于降水量 10mm 的去离子水,持续 6 天,待到有淋洗液淋出时,降雨量升高至每天 20mm,持续 4 天,这时搜集到的淋洗液为一个样(140mm)。之后每天添加相当于 10mm 降水量的去离子水,持续 25 天;每 5 天的淋洗液为一个样(50mm)。每次收集到的淋洗液用洗净塑料瓶(100mL)装好,保存至冰箱(0℃~4℃)待测。

#### 1.2.4 测试方法

土壤和生物炭的 C 和 N 采用元素分析仪(Vario Macro CNS; Elementar, Germany)测定。土壤和生物炭 pH 值使用 pioneer 65 型便携式多参数仪(雷迪美特,法国)测定,土壤和生物炭 pH 测定溶液分别采用土水比 1:2.5 (w/v) 和炭水比 1:10 (w/v)。淋洗液中的 A-P 的测定是将采集的淋滤液样品经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后,采用钼锑抗分光光度法测试过滤液中可溶态磷含量; T-P 的测定则是在 120℃~124℃的条件下用过硫酸钾作氧化剂消解水样将其他形态的磷酸盐转化为正磷酸盐后,用钼锑抗分光光度法进行测定。土壤中 A-P 的测定采取的方法是 0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提,然后用钼锑抗分光光度法进行测定。分光光度法所采用仪器为 Thermo AquaMate 紫外多功能水质分析仪(美国, Thermo 公司)。

#### 1.2.5 数据处理

试验数据采用 origin 8.0 和 SPSS 17.0 软件进行统计分析。各处理之间的显著性差异采用单因素方差分析法(one-way ANOVA),显著性水平为 0.05。

## 2 结 果

### 2.1 生物炭对土壤 A-P 淋失的影响

如图 1, C0、C1、C5 和 C10 四个土柱的 A-P 淋失量分别是 0.21mg、0.40mg、1.46mg 和 1.50mg。与 C0 相比, C1、C5 和 C10 的淋失量分别增加了 94%、610% 和 630%, 其中 C1、C5、C10 三者与 C0 之间达到了显著性差异 ( $P < 0.05$ ),

而 C5 和 C10 之间差异不显著 (图 1 (A))。四个土柱 A-P 的淋失量均显示出随时间逐渐降低。其中 C0 和 C1 土柱 A-P 的淋失到第 20 天 (240 mm) 将至较低水平, 之后又有小幅上升的趋势; 而 C5 和 C10 的 A-P 在整个试验期间淋失较为均匀, 在第 20 天 (240 mm) 之后下降不明显。

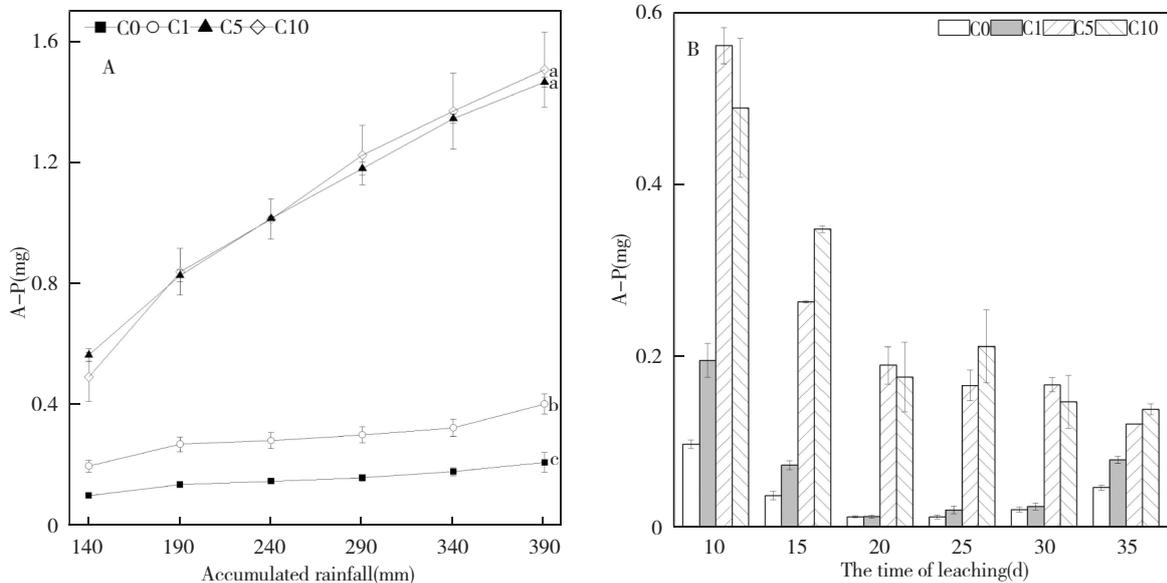


图 1 生物炭对土壤 A-P 淋失的影响 (A: 累积 A-P 淋失量; B: 分次数 A-P 淋失量; 字母相同表明彼此之间不存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ))

Fig. 1 Effects of biochar on A-P leaching (A: accumulated A-P leaching amount; B: the A-P leaching amount at different times; values with same letters means no significant difference ( $P < 0.05$ ))

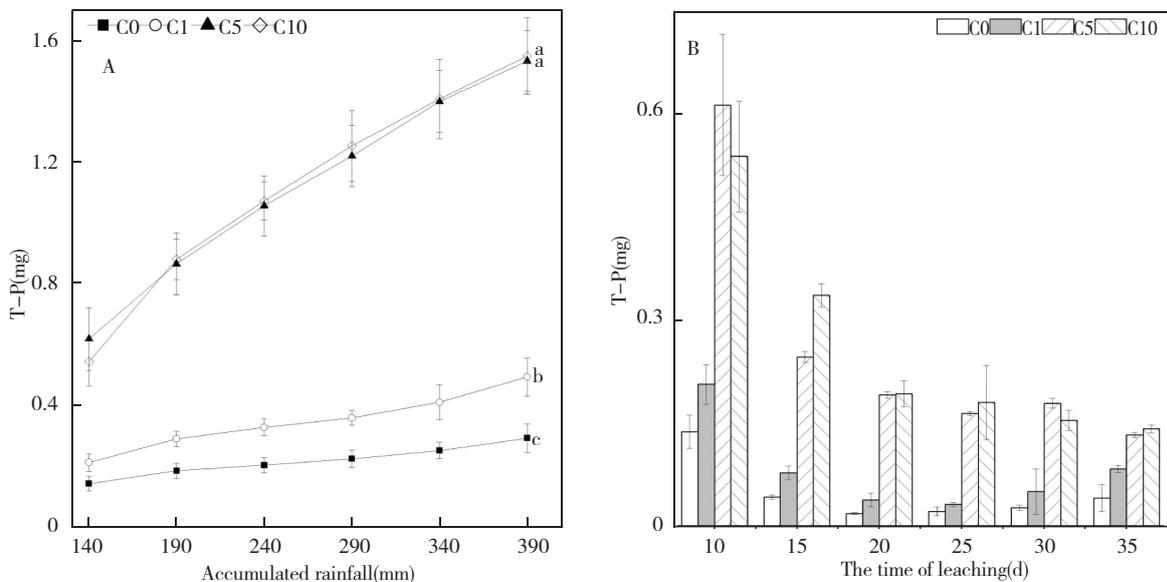


图 2 生物炭对土壤 T-P 淋失的影响 (A: 累积 T-P 淋失量; B: 分次数 T-P 淋失量; 字母相同表明彼此之间不存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ))

Fig. 2 Effects of biochar on total P leaching (A: accumulated A-P leaching amount; B: the A-P leaching amount at different times; values with same letters means no significant difference ( $P < 0.05$ ))

## 2.2 生物炭对土壤 T-P 淋失的影响

在本试验中, T-P 的淋失趋势与 A-P 基本一致。C0、C1、C5 和 C10 四个土柱的 T-P 淋失量分别是 0.29、0.49、1.53 和 1.54 mg。与 C0 的 T-P 淋失量相比, C1、C5 和 C10 三个土柱的淋失量分别增加了 70%、432% 和 438% (图 2) 且 C0 与另外三者之间均达到了显著性差异 ( $P < 0.05$ )。C0 和 C1 两个土柱的 T-P 的淋失也是呈现先降低, 再逐渐升高的趋势; 而 C5 和 C10 则呈现逐渐下降的趋势, 在第 20 天 (240 mm) 后趋于平稳。

## 2.3 生物炭对土壤中 A-P 和 T-P 含量的影响

在试验结束后对四个土柱进行了土壤采样, 分析了土壤中 A-P 和 T-P 的含量。如图 3 所示, C0、C1、C5 和 C10 四个土柱 A-P 含量分别是 20.4、24.5、39.9 和 49.5 mg/kg, T-P 含量分别是 315.2、302.9、311.5 和 344.5 mg/kg。与 C0 相比, C1、C5 和 C10 的 A-P 含量分别增加了 16.7%、95.6% 和 142.6%; 且 C5、C10 与 C0、C5 之间达到了显著性差异 ( $P < 0.05$ ); C1 和 C5 的 T-P 含量比 C0 略低, 但未达到显著性差异; 而 C10 的 T-P 含量则显著高于前三者。

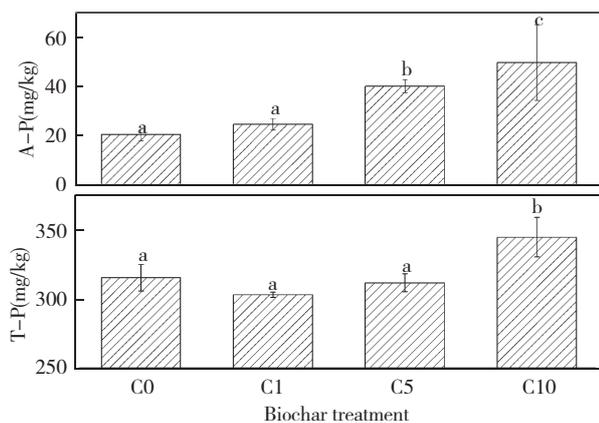


图 3 不同处理 A-P 和 T-P 的含量 (字母相同表明彼此之间不存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ))

Fig. 3 The contents of A-P and T-P at different biochar treatments (Values with same letters means no significant difference ( $P < 0.05$ ))

## 3 讨论

### 3.1 淋洗液中 A-P 和 T-P 含量

由结果可以看出, 生物炭的施用显著提高了土柱淋洗液中 A-P 浓度, 说明了添加生物炭增强了土壤磷的有效性, 使 P 从固定态中溶解释放出来, 增强了 P 的活性。添加生物炭影响土壤有效磷含量主要取决于 3 方面: ①某些生物炭本身较高的有

效磷含量会直接增加土壤中 A-P 的含量<sup>[18]</sup>; ②生物炭呈碱性, 其施入土壤后可能会增加土壤 pH 值, 随着 pH 的升高, 土壤对  $H_2PO_4^-$  的吸附量降低, 从而增加土壤中磷的生物有效性<sup>[19~21]</sup>; ③生物炭对磷酸盐及可溶性有机磷可能具有吸附固定作用<sup>[13]</sup>; 这三个途径, 前两者有利于增加土壤有效磷含量并促进磷素的淋失, 而后者则有利于控制土壤磷素的淋失。

本研究中, 生物炭的 A-P (153.1 mg/kg) 含量较土壤 (26.5 mg/kg) 更高, 其施用也必然会增加土壤中 A-P 含量, 但是 C5 和 C10 的累积 A-P 淋失量较为接近说明了生物炭本身所含的高 A-P 仅仅是土壤 A-P 含量升高的因素之一。此外, 生物炭的 pH 值 (10.45) 较土壤 pH 值 (7.62) 更高, 其施用必定会增加土壤的 pH 值, 见文献<sup>[22]</sup>。

此外, 各处理中 A-P 的淋失量随时间的延长逐渐增加, 且 C5 和 C10 的土壤累积 A-P 淋失量增加速度较快, 而 C0 和 C1 处理的土壤中 A-P 淋失量增加则较为缓慢。这说明了随着生物炭施用量的增大, 土壤中磷的活化速率也增加了。

淋洗液中 T-P 的变化趋势与 A-P 一致, 这是因为 A-P 所占 T-P 比例较大。值得一提的是随着生物炭添加比例的上升, 淋洗液中 A-P 所占 T-P 的比例逐渐上升, C0、C1、C5 和 C10 中累积 A-P 淋失量占累积 T-P 淋失量的比例依次为 72.4%、81.6%、95.4% 和 97.4%; 这也说明了生物炭的添加能够增加土壤中磷的活化速率。

### 3.2 土壤 A-P 含量

试验结束时土壤中 A-P 含量结果说明, 生物炭的添加明显增加了土壤中 A-P 的含量, 其中 C5 和 C10 较 C0 增加率均超过了 4 倍。由于土壤中磷的转化与土壤 pH 值、有机质含量、孔隙度、微生物状况等因素有关, 已有研究已经证明生物炭施用会增加土壤 pH 值和孔隙度并改善土壤有机质和微生物状况<sup>[23~28]</sup>, 这可能是添加生物炭增加土壤 A-P 含量的间接原因。曾爱等研究了添加生物炭对小麦生长期内壤土中 A-P 含量的影响, 结果显示 1 000 kg/km<sup>2</sup> 的添加比例能够明显增加土壤 A-P 含量<sup>[16]</sup>。刘世杰和奚森也曾报道了松枝生物炭能够增加黑土中 A-P 含量, 从而促进玉米对土壤中磷的吸收<sup>[29]</sup>。

添加玉米秸秆生物炭不仅可以提高土壤中供磷能力, 而且可以提高磷肥利用效率, 从而对于降低磷肥使用量有重要的意义; 同时生物炭的施用可能

增强土壤中外来磷素的活性, 增大磷素的环境风险(面源污染)。因此, 在田间应用生物炭时, 应充分评估其应用潜力和风险。

## 4 结 论

试验结果表明, 玉米秸秆生物炭显著增加土壤中 A-P 和 T-P 的淋失量。与空白 C0 相比, C5 和 C10 的 A-P 淋失量增加率分别达到了 610% 和 630%; T-P 淋失量增加率达到了 432% 和 438%; 土壤中的 A-P 含量增加率达到了 95.6% 和 142.6%。生物炭施用于干旱区典型耕作土壤能增加土壤中磷素的有效性, 从而增强了土壤的供磷能力, 这对于改良土壤以及减少磷肥使用量有积极的作用, 5% 的生物炭添加比例的改良效果最为理想。

## 参考文献:

- [1] 陈心想, 生物炭对土壤性质、作物产量及养分吸收的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2014.
- [2] 程明芳, 何萍和金继运. 我国主要作物磷肥利用率的研究进展[J]. 作物杂志, 2010, 4(1): 12-14.
- [3] 尹飞虎, 康金花, 黄子蔚, 等. 棉花滴灌随水施滴灌专用肥中磷素的移动和利用率的<sup>32</sup>P 研究[J]. 西北农业学报, 2005, 14(6): 199-204.
- [4] 刘洪亮, 曾胜河, 施敏, 等. 棉花膜下滴灌施肥技术的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2004, 9(2): 30-31.
- [5] Sheppard S C, CA G, MI S, et al. Risk indicator for agricultural inputs of trace elements to Canadian soils[J]. Journal of Environmental Quality, 2009, 38(3): 919-932.
- [6] 陈芳, 董元华, 安琼, 等. 长期肥料定位试验条件下土壤中重金属的含量变化[J]. 土壤, 2005, 37(3): 308-311.
- [7] Ameloot N, Neve S, Jegajeevagan K, et al. Short-term CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions and microbial properties of biochar amended sandy loam soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2013, 57: 401-410.
- [8] Biederman L A and 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.
- [9] Nelissen V, Rutting T, Huygens D, et al. Maize biochars accelerate short-term soil nitrogen dynamics in a loamy sand soil[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2012, 55: 20-27.
- [10] Wang J Y, Zhang M, Xiong Z Q, et al. Effects of biochar addition on N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> emissions from two paddy soils[J]. Biology and Fertility of Soils, 2011, 47(8): 887-896.
- [11] 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.
- [12] Gundale M J and DeLuca T H. Charcoal effects on soil solution chemistry and growth of *Koeleria macrantha* in the ponderosa pine/Douglas-fir ecosystem[J]. Biology and Fertility of Soils, 2007, 43(3): 303-311.
- [13] Laird D, Fleming P, Wang B Q, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil[J]. Geoderma, 2010, 158(3-4): 436-442.
- [14] Chan K Y, Van Zwieten L, Meszaros I, et al. Using poultry litter biochars as soil amendments[J]. Australian Journal of Soil Research, 2008, 46(5): 437-444.
- [15] 郎印海, 王慧, 刘伟. 柚皮生物炭对土壤中磷吸附能力的影响[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2015, 45(4): 078-084.
- [16] 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.
- [17] 关连珠, 禅忠祥, 张金海, 等. 炭化玉米秸秆对棕壤磷素组分及有效性的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(10): 2050-2057.
- [18] Glaser B, Lehmann J and Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal - a review[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, 35(4): 219-230.
- [19] 李江舟, 张庆忠, 姜翼来, 等. 施用生物炭对云南烟区典型土壤养分淋失的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 1(1): 48-53.
- [20] 陈铭, 刘更另, 孙富臣. 溶液 pH 对红壤吸持磷机理的影响[J]. 环境化学, 1995, 14(4): 306-310.
- [21] 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(2): 105-112.
- [22] 王荣梅, 杨放, 许亮, 等. 生物炭在新疆棉田的应用效果研究[J]. 地球与环境, 2014, 4(6): 8.
- [23] Lehmann J, Major J, Rondon M, et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol[J]. Plant and Soil, 2010, 333(1-2): 117-128.
- [24] Van Zwieten 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, 2010, 327(1-2): 235-246.
- [25] Warnock D D, Lehmann J, Kuyper T W, et al. Mycorrhizal responses to biochar in soil - concepts and mechanisms[J]. Plant and Soil, 2007, 300(1-2): 9-20.
- [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] Luo Y, Durenkamp M, De Nobili M, et al. Short term soil priming effects and the mineralisation of biochar following its incorporation to soils of different pH[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2011, 43(11): 2304-2314.
- [28] Uzoma K C, Inoue M, Andry H, et al. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition[J]. Soil Use and Management, 2011, 27(2): 205-212.
- [29] 刘世杰, 龚森. 黑碳对玉米生长和土壤养分吸收与淋失的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 79-82.