

## 外源竹炭对土壤硝酸根离子的吸附效应

沈 泉<sup>1</sup>, 沈 颖<sup>1,2</sup>, 徐秋芳<sup>2</sup>, 王炆波<sup>2</sup>

(1. 浙江省长兴县林业局, 浙江 长兴 313100; 2. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 临安 311300)

**摘要:** 生物质炭巨大的活性表面, 可吸附土壤中的硝酸根等阴离子养分。采用竹炭作为试验材料, 以自然土壤和人为耕作土壤为试验土壤, 用硝酸钾溶液浇施模拟施肥, 通过离子色谱测定浇施后所得滤液中硝酸根离子的含量, 分析竹炭对土壤中硝酸根离子的吸附效果。试验设计如下: 自然土壤加入的竹炭百分比为 0, 1%, 2%, 3%, 4% (竹炭直径 <1 mm), 耕作土壤加入的竹炭百分比为 0, 1%, 3%, 5% (竹炭直径为 1~2 mm), 2 种竹炭颗粒 (1~2 mm 和 <1 mm) 比较试验时加入的竹炭量为 3%。结果表明: 土壤中加入竹炭对硝酸根离子的吸附有一定的作用, 前 2 次淋洗表现为吸附作用随着竹炭比例的增加而增强, 但只有加入的竹炭量超过 3% 后, 吸附效果没有显著提高 ( $P > 0.05$ )。在加入等量 (3%) 竹炭时, 前 2 次淋洗时颗粒直径为 1~2 mm 的竹炭吸附效果好于 <1 mm 的竹炭, 细粒与对照没有差异, 第 3 次淋洗时竹炭处理与对照差异显著 ( $P < 0.05$ ), 但不同颗粒之间差异消失。竹炭的施入比例和颗粒直径均能影响其对土壤中阴离子的吸附效果。建议生产上采用 3% 比例、颗粒直径为 1~2 mm 的竹炭, 以减少硝酸根离子的淋失。图 3 表 4 参 19

**关键词:** 土壤学; 竹炭; 吸附作用; 硝酸根离子; 颗粒直径; 比例

**中图分类号:** S156.2; X5-3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-0756(2014)04-0541-06

## Bamboo char adsorption efficiency on soil nitrate anions

SHEN Quan<sup>1</sup>, SHEN Ying<sup>1,2</sup>, XU Qiufang<sup>2</sup>, WANG Yangbo<sup>2</sup>

(1. Forest Enterprise of Changxing County, Changxing 313100, Zhejiang, China; 2. School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

**Abstract:** Biochar with a huge active surface area can absorb anions, such as nitrate, in soils. To test adsorption efficiency of bamboo char on nitrate anions of soils, two types of soils (natural and cultivated) and two sizes of bamboo char particles [1-2 mm with bamboo char percentages of 0 (control, ck), 1%, 3%, and 5% and <1 mm with percentages of 0 (ck), 1%, 2%, 3%, and 4%] were used. For comparison of the two particle sizes, the 3% bamboo char treatment was utilized. A potassium nitrate solution ( $KNO_3$ ) was mixed in the soil and then leached with ion-free water. After, the  $NO_3^-$  concentration was determined with ion chromatography. Results showed no significant increase in absorption capacity efficiency ( $P > 0.05$ ) for soils with more than 3% bamboo char. For the first two leachings, when soils treated with equivalent amounts of bamboo charcoal (3%) were compared to ck, the soil with the 1-2 mm size bamboo char had a significantly higher ( $P < 0.05$ ) absorption capacity for nitrate anions than the <1 mm and ck. During the third leaching, significant differences ( $P < 0.05$ ) were observed between ck and soils with bamboo char (both <1 mm and 1-2 mm size). Thus, absorption efficiency of anions was related to both proportion and particle diameter of bamboo charcoal with 3% bamboo char at 1-2 mm diameter being the most economical rate to reduce soil nitrate leaching. [Ch, 3 fig. 4 tab. 19 ref.]

收稿日期: 2013-11-01; 修回日期: 2013-12-16

基金项目: 国家科技重大水专项子课题专题 (2008ZX07101-006-06)

作者简介: 沈泉, 高级工程师, 从事森林培育及林业技术推广研究。E-mail: cxsq123@163.com。通信作者: 沈颖, 从事农业资源利用研究。E-mail: shenyng1988@126.com

**Key words:** soil science; bamboo-charcoal; absorption effect;  $\text{NO}_3^-$ ; particle diameter; proportion

农业面源污染是指农业生产活动中, 氮素和磷素等营养物质、农药以及其他有机或无机污染物质, 通过地表径流和渗漏所形成的水环境污染<sup>[1]</sup>。《2007年中国环境绿皮书》显示: 全国饮用不安全水质的人数已达到3.2亿人, 其中60%的地区是由于地表水污染导致的饮用水质不达标, 而造成这种现象最主要的原因就是农业面源污染<sup>[2-3]</sup>。第一次全国污染源普查公报显示, 2007年通过农业面源污染排放的总氮为270.46万t, 总磷为28.47万t, 分别占同期全国排放的57.19%和67.27%<sup>[4]</sup>。另据统计, 目前中国氮肥利用率仅为30%~40%, 有20%~50%的氮肥以硝态氮形式经土壤淋溶进入地下水, 引起地下水硝酸盐污染<sup>[5]</sup>, 并影响着土壤肥力和土壤环境质量。因此, 长期过量施用氮肥是造成中国农业面源污染的首要原因, 而硝态氮的淋溶被认为是导致中国农业面源污染加剧的主要原因之一<sup>[6]</sup>。生物质炭是由纤维素、半纤维素和少量木质素经不同程度分解炭化而形成的固体产物<sup>[7]</sup>, 生物质炭化是将不稳定的有机碳转变为稳定性碳的过程, 以生物炭代替生物秸秆补充到土壤中可以显著减少二氧化碳的排放, 同时又能提高土壤的肥力。因此, 生物炭在全球碳地球化学循环、气候变化和环境系统中发挥着重要作用<sup>[8]</sup>。生物炭巨大的活性表面可吸附土壤中的硝酸根等阴离子养分<sup>[9]</sup>。将竹炭作为土壤改良剂施入土壤可减少硝态氮在土壤中的淋洗量, 有可能成为应对农业面源污染的一条重要途径, 对防治农田土壤养分流失、缓解中国日趋严重的农业面源污染具有重大的现实意义。鉴于此, 本研究以养分水平较低的自然土壤和养分水平较高的耕作土壤为研究对象, 通过对比2种土壤加入不同比例、不同粒径竹炭后的硝酸根离子淋洗量, 揭示竹炭对硝酸根离子的吸附效果, 找出最佳的竹炭施用类型以及合理的施用量, 从而为利用竹炭控制农业面源污染提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试土壤

在本底养分水平不同的情况下, 为了解混入竹炭后土壤吸附硝酸根离子的效果, 主要采用2种试验土壤: 土壤本底养分水平较低的自然土壤——浙江农林大学校园内红壤(于2011年8月5日采集)和土壤本底养分水平较高的人为耕作土——临安市太湖源镇雷竹 *Phyllostachys violascens* 林地红壤(于2011年10月10日采集), 分别过2 mm筛。表1为供试土壤的化学性质。

表1 供试土壤的化学性质

Table 1 Chemical properties of two soils used in this experiment

供试土壤	pH值	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )
自然土	4.33	18.48	0.303	8	0.8
人为耕作土	5.40	56.45	1.113	37	4.9

### 1.2 试验方法

1.2.1 不同比例竹炭对自然土壤中硝酸根离子的吸附 试验设5个处理, 3次重复·处理<sup>-1</sup>, 采用颗粒直径<1 mm的竹炭, 按质量百分比, 分别加入0, 1%, 2%, 3%, 4%的竹炭(表2)。将土壤和竹炭充分混匀后装入衬有砂网(为防止淋洗时土壤进入滤液影响试验结果的准确性)的花盆, 将其置于接有试管的大漏斗上, 并将1.5 g硝酸钾溶液溶解到150 mL蒸馏水中, 一次性均匀地浇施到各个处理中(没有淋出液), 随后加入100 mL蒸馏水, 有少量淋出液, 之后间隔0.5 h加入2次100 mL蒸馏水, 合计淋洗的蒸馏水量为300 mL。由于每个处理的淋出液体积不同, 将淋出液定容至100 mL, 用0.45 μm滤膜抽滤, 再用离子色谱测定滤液中硝酸根离子的质量浓度。在第1次淋洗10 d后进行第2次淋洗, 间隔0.5 h加入100 mL蒸馏水, 共计3次300 mL蒸馏水, 在第2次淋洗30 d后进行第3次淋洗。

1.2.2 不同比例竹炭对人为耕作土中硝酸根离子的吸附 总结自然土壤的试验后, 调整了试验方案(表3), 竹炭颗粒直径改为1~2 mm, 加入竹炭质量百分比为0, 1%, 3%, 5%的4个处理, 重复3次·处理<sup>-1</sup>。调整方案的理由是自然土壤的试验中1%和2%, 3%和4%的竹炭比例过于接近, 相邻的处理间差异不明显(特别是第1次淋洗结果), 淋洗实验方法与1.2.1基本相同, 但3次淋洗间隔均为10 d。

表 2 自然土壤不同比例竹炭吸附试验设计

Table 2 Design of adsorption experiment using the natural soil

处理	加入竹炭百分比/%	自然土质量/g	竹炭/g	竹炭直径/mm
1	0	1 500	0	<1
2	1	1 485	15	<1
3	2	1 470	30	<1
4	3	1 455	45	<1
5	4	1 440	60	<1

表 3 人为耕作土壤不同比例竹炭吸附试验设计

Table 3 Design of adsorption experiment using cultivated soil

处理	加入竹炭百分比/%	人为耕作土质量/g	竹炭/g	竹炭直径/mm
1	0	1 500	0	1~2
2	1	1 485	15	1~2
3	3	1 455	45	1~2
4	5	1 425	75	1~2

1.2.3 不同颗粒直径竹炭对硝酸根离子的吸附 由前 2 次的试验发现，加入同样百分比的竹炭，粒径为 1~2 mm 的竹炭对硝酸根离子的吸附效果好于粒径 <1 mm 的竹炭，因为不在同一批试验，土壤类型也不同，不能完全确定 2 种粒径的吸附效果差异。为了进一步确认不同颗粒直径(1~2 mm 与 <1 mm)竹炭对土壤吸附硝酸根离子的效果差异，于 2011 年 11 月 10 日用同一种人为耕作土、以 3% 的竹炭比例作进一步试验。试验设 3 个处理，3 次重复·处理<sup>-1</sup>(表 4)，淋洗实验方法与 1.2.2 相同，3 次淋洗间隔均为 10 d。

表 4 不同粒径竹炭吸附试验设计

Table 4 Design of adsorption experiment using two sizes of bamboo char particle

处理	加入竹炭百分比/%	土壤质量/g	竹炭/g	竹炭直径/mm
1	0	1 500	0	无
2	3	1 455	45	1~2
3	3	1 455	45	<1

1.3 数据处理

一般性数据，采用 Excel 软件进行统计分析，并用 DPS 软件进行显著性分析(LSD 法)。

2 结果与分析

2.1 不同比例竹炭对自然土壤中硝酸根离子的吸附效果

图 1 为自然土壤中加入不同比例竹炭的硝酸根离子吸附试验结果。第 1 次淋洗结果表明：对照和 1% 及 2% 比例之间硝酸根离子淋出量没有差异，说明低施用量的竹炭对硝酸根离子的吸附作用不大，而加入 3% 和 4% 比例竹炭处理的硝酸根离子淋出量显著低于对照，说明竹炭加入的比例大于 3% 时土壤中硝酸根离子淋出量下降，但 3% 和 4% 比例间统计上没有呈现显著差异。因此，从总体上看，随着竹炭施用量的增加，竹炭对硝酸根离子的吸附作用显著提高，但施用量与吸附作用没有呈线性正相关。周志红等<sup>[10]</sup>的研究表明：在适当施用量条件下，生物质炭对硝态氮和有机氮的淋失作用具有显著的影响，可以显著降低硝态氮的淋失量。加入少量竹炭处理的自然土壤硝酸根离子淋出量与对照差异不明显，这可能是由于用 150 mL 硝酸钾溶液浇施土壤时硝酸根溶液没

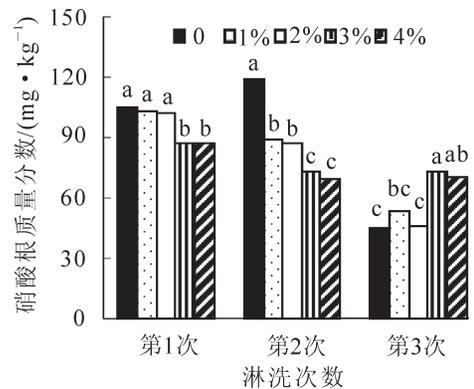


图 1 自然土不同比例竹炭 3 次淋洗液中硝酸根质量分数

Figure 1 Nitrate concentration in leachate after three respective leaching by using natural soil with different ratios of bamboo char

有渗透到整个土壤中(下层土壤没有湿润),下层土壤中的竹炭没有发挥作用,加入的离子集中在上层土壤中,而在加蒸馏水淋洗过程中,下层竹炭也没能很好地吸附快速下渗的硝酸根离子。

第2次淋洗(第1次淋洗后10 d)结果发现:加竹炭处理的硝酸根离子淋出量均显著低于( $P < 0.05$ )对照,降低率分别为:25.65%,27.02%,38.66%,42.18%,且淋出液中的硝酸根离子淋出量与加入的竹炭百分比呈反相关(图1)。李松等<sup>[11]</sup>曾研究过竹炭对饮用水溶液中硝酸盐的吸附特性及影响因素(粒径为0.06~0.15 mm,投入量为:1.0~5.0 g·L<sup>-1</sup>饮用水),发现竹炭对硝酸根离子的吸附效果在很大程度上与竹炭用量有关,这与本研究结果相一致。1%与2%,3%与4%之间没有明显差异,显著差异( $P < 0.05$ )主要存在于1%,2%与3%,4%之间。这说明竹炭的施用可以降低土壤中硝酸根的淋失作用,但要达到这一目的,其施用量应达到一定的水平,3%比例是一个关键点。

第3次淋洗(第2次淋洗后30 d)结果发现:加入竹炭比例较高的2个土壤处理(3%和4%)淋出的硝酸根离子质量浓度反而高于对照、1%和2%处理,这可能是由于土壤中的部分竹炭被一些真菌和细菌等微生物分解<sup>[12]</sup>,再加上土壤长时间干燥,减弱了竹炭的吸附功能,导致前期吸附硝酸根较多的3%和4%处理淋出的硝酸根离子也越多。

对照,1%,2%,3%,4%竹炭处理的3次淋出液硝酸根离子合计折合成质量分别为0.027 0,0.024 6,0.023 6,0.023 4,0.022 7 g,加入1%,2%,3%,4%竹炭处理分别比对照下降了9.04%,12.75%,13.31%和16.01%,淋出的硝酸根离子质量浓度与加入的竹炭比例呈现反相关。

## 2.2 不同比例竹炭对人为耕作土中硝酸根离子的吸附效果

图2为人为耕作土不同比例竹炭的硝酸根离子吸附试验结果。第1次淋洗结果表明:随着加入竹炭百分比的增加,滤液中硝酸根离子的质量分数明显减少,但加入1%粒径为1~2 mm的竹炭与对照没有明显差异,3%和5%之间也没有显著差异,而3%和5%明显低于对照和1%处理,这说明加入竹炭低于3%比例时吸附作用不明显,这一结果与自然土壤的第1次吸附试验结果相一致。第2次淋洗结果发现,与对照相比,加入粒径为1~2 mm的3%和5%的处理均能显著减少硝酸根离子的淋出量( $P < 0.05$ ),降低率分别为:22.49%和31.03%,而1%比例竹炭处理的硝酸根离子淋出量与对照没有差别,粒径<1 mm的3%处理也没有显著低于对照。第3次淋洗结果发现,加入竹炭处理(1%,3%,5%)的硝酸根离子淋出量均显著低于( $P < 0.05$ )对照(0.010 6 g),相应的降低率依次为:34.78%,38.55%,38.32%,但加竹炭处理之间没有差别。

对照,1%,3%,5%竹炭处理3次淋出液硝酸根离子合计折合成质量分别为0.035 3,0.031 5,0.025 9,0.022 7 g,加入1%,3%,5%比例竹炭处理分别比对照下降了10.75%,26.70%,35.76%,这说明加入的竹炭越多,硝酸根离子的淋失量越少,竹炭的施入比例与土壤对硝酸根离子的吸附作用呈正相关。这是由于生物质炭表面不仅具有负电荷也具有正电荷<sup>[13]</sup>,还具有巨大的比表面积,对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>等无机离子具有很强的吸附特性<sup>[14-15]</sup>,可有效减少土壤养分的流失以及降低农田土壤氮的挥发<sup>[16-17]</sup>。Mizuta等<sup>[18]</sup>发现竹炭可以有效吸附地表和地下水中的硝酸根。

比较2种土壤的淋溶试验发现,未加竹炭的人为耕作土壤的硝酸根离子淋出量(0.035 3 g)高于自然土壤(0.027 0 g),原因可能是人为耕作土壤本底养分水平较高,土壤中原有的硝酸根离子也被淋洗出土壤,同时人为耕作土壤有机质较高,微生物矿化和硝化作用也可产生硝酸根离子。

## 2.3 不同颗粒直径竹炭对硝酸根离子的吸附效果

图3为加入不同颗粒直径竹炭的人为耕作土壤吸附硝酸根离子3次淋洗试验结果。第1次和第2次淋洗结果表明,加入同为3%的粒径<1 mm的竹炭处理,淋出的硝酸根离子明显多于( $P < 0.05$ )粒径为1~2 mm竹炭处理,说明粒径为1~2 mm的竹炭吸附效果好,证实了前面2次结果的差异。而第3次淋

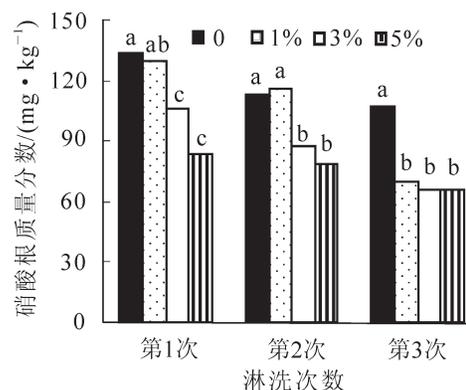


图2 人为耕作土不同比例竹炭3次淋洗液中硝酸根质量分数

Figure 2 Nitrate concentration in leachate after three respective leaching by using cultivated soil with different ratios of bamboo char

洗结果发现, 不同粒径竹炭处理的硝酸根离子淋出量虽然均显著低于( $P < 0.05$ )对照, 但加竹炭处理之间没有显著差异。高海英等<sup>[19]</sup>应用红外光谱法研究发现, 硝酸铵与竹炭材料的吸附仅是物理上的结合而未发生化学反应, 因此, 竹炭对硝酸根离子的吸附主要是物理吸附作用。随着竹炭由粗变细, 原来的内表面减少而外表面增加。在加入等量(3%)竹炭时, 粒径 1~2 mm 的竹炭比粒径 <1 mm 的竹炭吸附效果好, 原因可能是: 一方面, 细颗粒竹炭与土壤混合后, 大部分竹炭的外表面位置被土壤胶体占据, 无法通过物理方法吸收硝酸根离子, 竹炭粒径越细, 被土壤细粒覆盖的表面就越多, 从而导致了竹炭对硝酸根离子的吸附功能减弱。高海英等<sup>[19]</sup>在制备生物质炭基硝酸铵时发现, 由于竹炭所含灰分含量远高于木炭灰分含量, 因而通过吸附作用负载到竹炭上的硝酸铵含量却低于木炭的负载量, 这可能与灰分元素占据了生物质炭的一些吸附点位有关。另一方面, 由于较大颗粒竹炭的内部多孔性, 有部分溶有硝酸根的液体被闭蓄孔隙内部, 从而减少了硝酸根离子的淋失量, 使之吸附能力增加。因此, 就竹炭吸附硝酸根等阴离子而言, 加入土壤的竹炭粒径不能太细。

### 3 结论

土壤中加入竹炭可减少硝酸根离子的淋失, 无论是低养分水平的自然土壤, 还是高养分水平的人为耕作土壤, 硝酸根的 3 次淋出量总量均随着竹炭比例的增加而下降, 但前 2 次淋洗时, 竹炭比例超过 3% 后吸附效果没有明显呈比例提高。粒径 1~2 mm 的竹炭吸附效果好于等量(3%)粒径 <1 mm 的竹炭。建议生产上采用 3% 比例、颗粒直径为 1~2 mm 的竹炭, 来减少硝酸根离子的淋失。

### 参考文献:

- [1] 李斌. 农业面源污染与防治对策[J]. 吉林农业, 2005(8): 22 - 25.  
LI Bin. Agricultural non-point source pollution and control measures [J]. *Jilin Agric*, 2005(8): 22 - 25.
- [2] 杨东平. 2006 年: 中国环境的转型与博弈[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2007: 5 - 6.
- [3] 张劲, 李兆华, 朱联东, 等. 农业面源污染现状及其控制对策的研究进展[J]. 农业环境与发展, 2009 (3): 1 - 4.  
ZHANG Jin, LI Zhaohua, ZHU Liandong, *et al.* Advances in the study of the status of agricultural non-point source pollution and control measures [J]. *Agro-Environ Dev*, 2009 (3): 1 - 4.
- [4] 杨爱玲, 朱颜明. 地表水环境非点源污染研究[J]. 环境科学进展, 1999, 7(5): 60 - 62.  
YANG Ailing, ZHU Yanming. The study of non-point source pollution of surface water environment [J]. *Adv Environ Sci*, 1999, 7(5): 60 - 62.
- [5] 徐力刚, 王晓龙, 崔锐, 等. 不同农业种植方式对土壤中硝态氮淋失的影响研究[J]. 土壤, 2012, 44(2): 225 - 331.  
XU Ligang, WANG Xiaolong, CUI Rui, *et al.* Study of nitrate nitrogen leaching characteristics in different agricultural planted farmland [J]. *Soils*, 2012, 44(2): 225 - 331.
- [6] 吴殿鸣, 薛建辉, 罗英, 等. 杨麦间作系统硝态氮淋失的原位研究[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2012, 36(2): 20 - 23.  
WU Dianming, XUE Jianhui, LUO Ying, *et al.* Study on nitrogen leaching in polar-wheat intercropping ecosystem by in situ analysis [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2012, 36(2): 20 - 23.
- [7] 刘焕荣, 江泽慧, 任海青, 等. 竹炭吸附性能及其利用进展[J]. 竹子研究汇刊, 2009, 28(2): 1 - 5.  
LIU Huanrong, JIANG Zehui, REN Haiqing, *et al.* Advance in the study on absorption performance and application of bamboo charcoal [J]. *J Bamboo Res*, 2009, 28(2): 1 - 5.

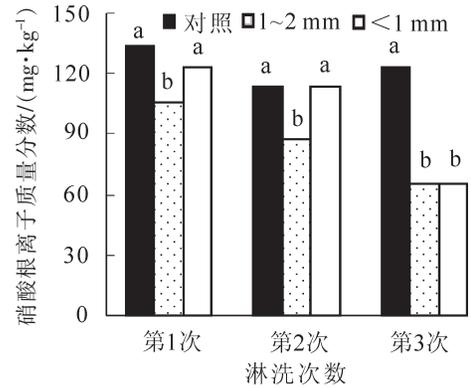


图3 不同粒径竹炭人为耕作土壤3次淋洗液中硝酸根离子质量分数

Figure 3 Nitrate concentration in leachate after three respective leaching by using cultivated soil with two sizes of bamboo char particle

- [8] DELUCA T H, MACKENZIE M D, GUNDALE M J, *et al.* Wildfire-produced charcoal directly influences nitrogen cycling in forest ecosystems [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2006, **70**: 448 – 453.
- [9] 刘玮晶, 刘焯, 高晓荔, 等. 外源生物质炭对土壤中铵态氮素滞留效应的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(5): 962 – 968.  
LIU Weijing, LIU Ye, GAO Xiaoli, *et al.* Effects of biomass charcoals on retention of ammonium nitrogen in soils [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2012, **31**(5): 962 – 968.
- [10] 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. Effect of biochar amendment on nitrogen leaching in soil [J]. *Earth & Environ*, 2011, **39**(2): 278 – 284.
- [11] 李松, 曾林慧, 陈英旭. 竹炭对饮用水中硝酸盐的吸附特性及影响因素研究[J]. 净水技术, 2007, **26**(4): 65 – 68.  
LI Song, ZENG Linhui, CHEN Yingxu. Study of bamboo charcoal in the absorption of nitrate in drinking water and its' influential factors[J]. *Water Purif Technol*, 2007, **26**(4): 65 – 68.
- [12] 钟哲科, 李伟成, 刘玉学, 等. 竹炭的土壤环境修复功能[J]. 竹子研究汇刊, 2009, **28**(3): 5 – 9.  
ZHONG Zheke, LI Weicheng, LIU Yuxue, *et al.* Soil environmental remediation functions of bamboo charcoal[J]. *J Bamboo Res*, 2009, **28**(3): 5 – 9.
- [13] 何旭生, 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 Xusheng, ZHANG Shuqing, SHE Diao, *et al.* Effects of biochar on soil and fertilizer and future research[J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2011, **27**(15): 16 – 25.
- [14] LEHMANN J, da SILVA J P Jr, STEINER C, *et al.* Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments [J]. *Plant Soil*, 2003, **249**(2): 343 – 357.
- [15] LEHMANN J, da SILVA J P Jr, RONDON M, *et al.* Slash-and-char: a feasible alternative for soil fertility management in the central Amazon[C]// ASHMAN M R. *Proceedings of the 17th World Congress of Soil Science*. Bangkok: WCSS, 2002: 1 – 12.
- [16] 刘玉学, 刘微, 吴伟祥, 等. 土壤生物质炭环境行为与环境效应[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(4): 977 – 982.  
LIU Yuxue, LIU Wei, WU Weixiang, *et al.* Environmental behavior and effect of biomass-derived black carbon in soil [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2009, **20**(4): 977 – 982.
- [17] 何志平, 韩牡丹, 庞林江. 竹炭对水相中硝酸盐的吸附行为及机理研究[J]. 食品与机械, 2010, **26**(3): 68 – 72.  
HE Zhiping, HAN Mudan, PANG Linjiang. Adsorption behavior and mechanism of the bamboo-carbon for nitrate in aqueous solution[J]. *Food & Mach*, 2010, **26**(3): 68 – 72.
- [18] MIZUTA K, MASTUMOTO T, HATATE Y, *et al.* Removal of nitrate-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal [J]. *Bioresour Technol*, 2004, **95**(3): 255 – 257.
- [19] 高海英, 陈心想, 张雯, 等. 生物质炭及炭基硝酸铵肥料理化性质研究[J]. 干旱地区农业研究, 2012, **30**(2): 14 – 20.  
GAO Haiying, CHEN Xinxiang, ZHANG Wen, *et al.* A study on physicochemical properties of biochar and biochar-based ammonium nitrate fertilizers [J]. *Agric Res Arid Areas*, 2012, **30**(2): 14 – 20.