

施用生物炭对云南烟区典型土壤养分淋失的影响

李江舟¹, 张庆忠^{2*}, 娄翼来², 张立猛¹, 杜章留², 刘杏认², 王一丁²

(1.云南省烟草公司玉溪市公司, 云南 玉溪 653100; 2.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要: 土壤养分尤其是氮、钾的淋失是制约云南烟叶生产可持续发展的重要因素之一。近些年来的一些研究表明, 生物炭在减少土壤养分淋失方面有着很好的应用效果。然而, 关于生物炭在云南植烟土壤上的应用效果研究报道较少。本文基于土柱淋洗模拟试验, 研究了添加生物炭对南方紫色土、赤红壤和黄棕壤硝态氮、磷、钾养分淋失的影响, 以为生物炭的合理广泛应用提供理论依据。研究结果显示, 添加生物炭后, 紫色土、赤红壤和黄棕壤的硝态氮淋洗总量分别减少 16%、14% 和 22%; 紫色土、赤红壤的磷素淋洗总量分别减少 41% 和 32%, 黄棕壤磷素淋洗总量变化不明显; 紫色土和黄棕壤的钾素淋洗总量分别增加 19% 和 23%, 赤红壤的钾素淋洗总量变化不明显。研究表明, 施用生物炭是控制云南植烟土壤氮磷淋失的有效措施。

关键词: 生物炭; 养分淋失; 紫色土; 赤红壤; 黄棕壤

中图分类号: X522

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2015)01-0048-06

doi: 10.13254/j.jare.2014.0213

Effects of Biochar Addition on Nutrient Leaching Loss of Typical Tobacco-planting Soils in Yunnan Province, China

LI Jiang-zhou¹, ZHANG Qing-zhong^{2*}, LOU Yi-lai², ZHANG Li-meng¹, DU Zhang-liu², LIU Xing-ren², WANG Yi-ding²

(1.Yunnan Yuxi Tobacco Company, Yuxi 653100, China; 2.Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The leaching loss of soil nutrients especially of nitrogen and potassium is generally serious in Yunnan tobacco planting region, which greatly limits sustainable development in tobacco production. In recent years some studies indicate that biochar application is effective in reducing soil nutrient leaching losses. However, few reports are available on biochar application effects on tobacco planting soils in Yunnan Province. In order to provide scientific basis for extensive and proper application of biochar, calcareous purple soil, lateritic red soil and yellow brown soil were selected to investigate the effects of biochar addition on nitrate (NO_3^- -N), phosphorus (P) and potassium (K) leaching by using a soil column incubation experiment. Results showed that compared with no biochar control, biochar addition significantly decreased total NO_3^- -N leaching by 16%, 14% and 22% for calcareous purple soil, lateritic red soil and yellow brown soil respectively. Biochar addition reduced total P leaching by 41% and 32% for calcareous purple soil and lateritic red soil respectively, but not for yellow brown soil comparing with no biochar control. Total K leaching was increased by 19% and 23% for calcareous purple soil and yellow brown soil respectively, but not for lateritic red soil under the biochar addition. Our data indicated that in general biochar application is an effective option for reducing NO_3^- -N and P leaching losses of tobacco planting soil in Yunnan Province.

Keywords: biochar; nutrient leaching; calcareous purple soil; lateritic red soil; yellow brown soil

农田土壤养分淋失可导致土壤肥力下降、资源浪费, 进而给经济效益造成损失, 其中氮(N)、磷(P)的淋失还给水体环境带来潜在威胁。所以, 如何采取措施减少土壤养分淋失、提高养分利用率, 是人们长期以来关注的问题。生物炭(biochar)是生物质在低氧环

境下, 经过高温(300~700℃)热解而得到的一类具有比表面积大、孔隙多、吸附和稳定性强等特点的高度芳香化富碳物质。近年来, 生物炭作为一种功能材料在农业上的应用引起广泛关注, 其在土壤耕性改良、肥力提升及污染修复等方面呈现可观潜力^[1-6]。另外, 有研究表明, 在沙土中添加山核桃壳制成的生物炭不仅能提高土壤 pH 值, 增加土壤有机碳、P、K、Ca 等含量, 还能减少土壤 P、Ca 等养分的淋失^[7]; 在施用有机肥的土壤中, 添加橡木和山核桃木制成的生物炭能减少 N、P 的淋失^[8]; 在淋溶土及变性土中添加畜禽粪及

收稿日期: 2014-08-25

基金项目: 中国烟草总公司云南省烟草公司科技计划项目(2013YN19)

作者简介: 李江舟(1983—), 男, 新疆克拉玛依人, 博士, 主要从事烟草烟栽培与养分管理研究。E-mail: lijiaangzhou1983@163.com

* 通信作者: 张庆忠 E-mail: ecologyouth@126.com

桉木制成的生物炭后,土壤 N 的气态损失和淋溶损失均显著减少^[9];李际会等^[10]对我国北方潮褐土的研究发现,改性生物炭能够有效降低土壤 N、P 的淋失风险。可见,生物炭在控制土壤养分淋失方面有着很好的应用前景。

在我国云南烟区,由于水热充沛、土壤矿物风化程度高、土壤偏酸和有机质含量低以及不合理过量施肥等原因,土壤养分淋失问题尤为突出,这严重制约了当地烟叶的可持续生产。本研究以云南烟区的紫色土、赤红壤和黄棕壤 3 种典型土壤为研究对象,通过土柱淋洗模拟试验,研究了添加玉米秸秆生物炭对土壤硝态氮、磷、钾养分淋失的影响,以期生物炭的合理广泛应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自云南省玉溪市烟田耕层土壤,分别为紫色土、赤红壤和黄棕壤,土壤经风干等处理后过 2 mm 筛备用,其基本性质见表 1。供试生物炭为玉米秸秆在 360 ℃条件下不完全燃烧 24 h 制成的黑色粉末,其基本性质为:密度 0.28 g·cm⁻³,pH 值为 8.40,碳含量 649 g·kg⁻¹,全氮 10.1 g·kg⁻¹,硝态氮 6.16 mg·kg⁻¹,全磷 10.8 g·kg⁻¹,全钾 9.64 g·kg⁻¹,将生物炭粉碎后过 2 mm 筛,烘干备用。试验所用的氮、磷、钾肥料分别为尿素、过磷酸钙和硫酸钾,其氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)含量分别为 46%、18%和 50%。

1.2 试验设计

采用土柱模拟的方法进行研究,试验于 2014 年 6—8 月在中国农科院温室内进行。试验设不加生物炭对照 CK(5 kg 土+氮磷钾肥)和添加生物炭(5 kg 土+氮磷钾肥+0.5 kg 生物炭)2 个处理,生物炭添加水平根据以往研究经验设计^[1-4]。肥料添加量均为 30 g N、25 g P₂O₅、75 g K₂O,按当地植烟农民习惯设计,每个处理重复 3 次。

将土、生物炭和肥料按所需比例混匀后,填充到高 40 cm、内径 16 cm 的底部封闭只留一出水孔的 PVC 管中。土壤容重控制在 1.1 g·cm⁻³ 左右,以防止土壤

过紧实对淋溶产生影响;在上部铺一层滤纸以防止水分淋溶对表层土壤的扰动;土柱底层铺一层 10 cm 厚浓酸洗过的玻璃珠与石英砂,以防止底层土壤流失。土柱填装完后,加水至田间持水量的 70%预培养 2 d,之后每隔 4 d 用蒸馏水定量定时淋洗 1 次,共淋洗 14 次。收集每一次的淋溶液并测定其体积和硝态氮、磷、钾含量。

1.3 测定指标、方法及数据分析

淋洗液中硝态氮、磷和钾的含量分别采用酚二磺酸比色法、钼锑抗比色法和火焰光度计法测定,计算每一次淋洗的以及累积的养分淋失量,测定结果均换算成单位质量干土的淋失量(以 N、P、K 计,mg·kg⁻¹)。淋洗结束后测定土壤 pH 值。利用 SPSS 13.0 软件进行数据的方差分析。

2 结果与讨论

2.1 生物炭对土壤硝态氮淋失的影响

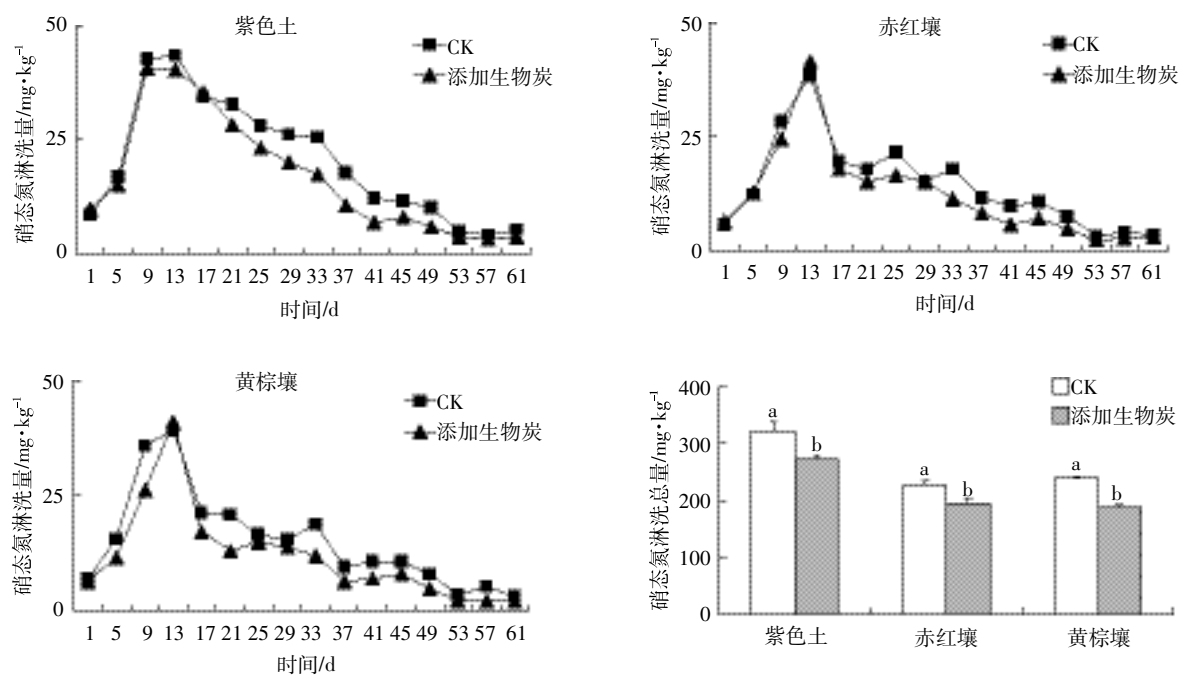
3 种土壤硝态氮淋洗量在培养试验前期均迅速增加,在培养的第 9~13 d 达到峰值,之后逐渐下降,53 d 后趋于平稳(图 1)。总的来说,3 种土壤在培养的中间阶段(17~53 d),添加生物炭处理土壤硝态氮淋洗量在各取样时期均显著低于对照处理。从土壤硝态氮累计的总淋洗量来看,3 种土壤均表现为添加生物炭处理土壤硝态氮淋洗总量显著低于对照处理,抑制率分别为:紫色土 16%、赤红壤 14%、黄棕壤 22%,尤其以黄棕壤上的效果最明显。

土壤硝态氮淋溶受复杂的生物化学过程所控制,首先土壤有机氮经微生物矿化作用形成氨,氨经质子化作用生成铵态氮,铵态氮在硝化细菌作用下发生氧化反应生成硝态氮,硝态氮随水垂直迁移后发生淋溶。生物炭的绝大多数表面吸附点位归属于羧酸基和酚基功能团^[11],这些负电荷表面点位不能吸附硝态氮,然而生物炭具有强大的吸附铵态氮以及可溶性有机氮的能力^[8],所以我们认为,生物炭施入土壤后,主要是通过增加铵态氮以及可溶性有机氮的吸附,延长其滞留时间,进而缓解了硝态氮的形成过程以及淋溶损失。此外,生物炭施入土壤后,也可能对土壤氮素转化

表 1 供试土壤基本性质

Table 1 Basic properties of the investigated soil

土壤	有机碳 /g·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	速效氮 /mg·kg ⁻¹	速效磷 /mg·kg ⁻¹	速效钾 /mg·kg ⁻¹	pH (H ₂ O)
紫色土	18.1	1.18	104	8.84	142	6.14
赤红壤	16.6	1.27	88.7	6.76	164	6.04
黄棕壤	18.7	1.22	84.4	9.92	141	5.89



竖线代表标准差;不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同

Bars represent standard errors; different letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below

图 1 3 种土壤不同处理下硝态氮各时期淋洗量及累计淋洗总量

Figure 1 Nitrate leaching amount at stages and total amount for three soils under treatments of control and biochar addition

的酶以及微生物产生吸附作用,降低有关酶及微生物与尿素等有机氮及铵态氮的亲力和接触机会,从而延缓了尿素等有机氮的矿化及铵态氮向硝态氮的转化,减少硝态氮的形成及淋溶损失^[12]。Laird 等^[8]、Singh 等^[9]、李际会等^[10]以及 Knowles 等^[13]在其他类型土壤上的研究也得出与本研究一致的结果,不仅如此,Beck 等^[14]的研究表明施用生物炭能显著减少农田径流氮的损失。显然,施用生物炭对农田土壤氮素流失的抑制作用具有一定的普遍性。

2.2 生物炭对土壤磷素淋失的影响

总的来说,随培养时间延长,3 种土壤的磷淋洗量均呈现先增加后降低的趋势,尤以紫色土和赤红壤上的变化较为明显(图 2)。在整个培养期间,紫色土和赤红壤磷淋洗量均表现为添加生物炭处理显著低于对照处理,从淋洗总量来看,2 种土壤上的抑制率分别为 41%和 32%,尤以紫色土上的效果更明显。在黄棕壤上,添加生物炭处理和对照处理之间的磷淋洗量差异不明显。

尽管人们普遍认为磷素在土壤中的移动性较差^[15],但磷素在土壤剖面下层中的高量累积现象确实有很多报道^[16-18]。本研究发现,在施用磷肥条件下,土壤磷素的淋溶损失十分明显。添加生物炭对土壤磷素淋溶

损失影响的作用途径可能取决于两方面:一方面生物炭本身对磷酸盐及可溶性有机磷可能具有强烈的吸附固定作用^[8];另一方面生物炭本身偏碱性,施入后导致本研究 3 种偏酸土壤的 pH 值均显著升高(图 3),进而可能增加磷的有效性。这两种作用途径,前者有利于控制磷的淋失,而后者则有利于促进磷的淋失,所以最终的结果取决于二者的平衡。在本研究的紫色土和赤红壤上,前者的作用可能多于后者,所以添加生物炭降低磷的淋失;而对于黄棕壤,二者的作用可能相当,所以正负作用相互抵消后表现为添加生物炭对土壤磷淋失没有显著影响。Novak 等^[7]、Laird 等^[8]以及李际会等^[10]在其他类型土壤上的研究均发现,施用生物炭能够显著减少土壤磷素的淋失,这与本研究的紫色土和赤红壤上的结果一致,但与黄棕壤上的结果不同,这说明施用生物炭对土壤磷素淋失的影响作用表现出不确定性,受土壤类型的影响。

2.3 生物炭对土壤钾素淋失的影响

3 种土壤的钾素淋洗量随培养时间延长均呈现先增加后降低的趋势(图 4)。总的来说,在整个培养期间,紫色土和黄棕壤钾素淋洗量均表现为添加生物炭处理显著高于对照处理,从淋洗总量来看,两种土壤上的增加幅度分别为 19%和 23%。在赤红壤上,添

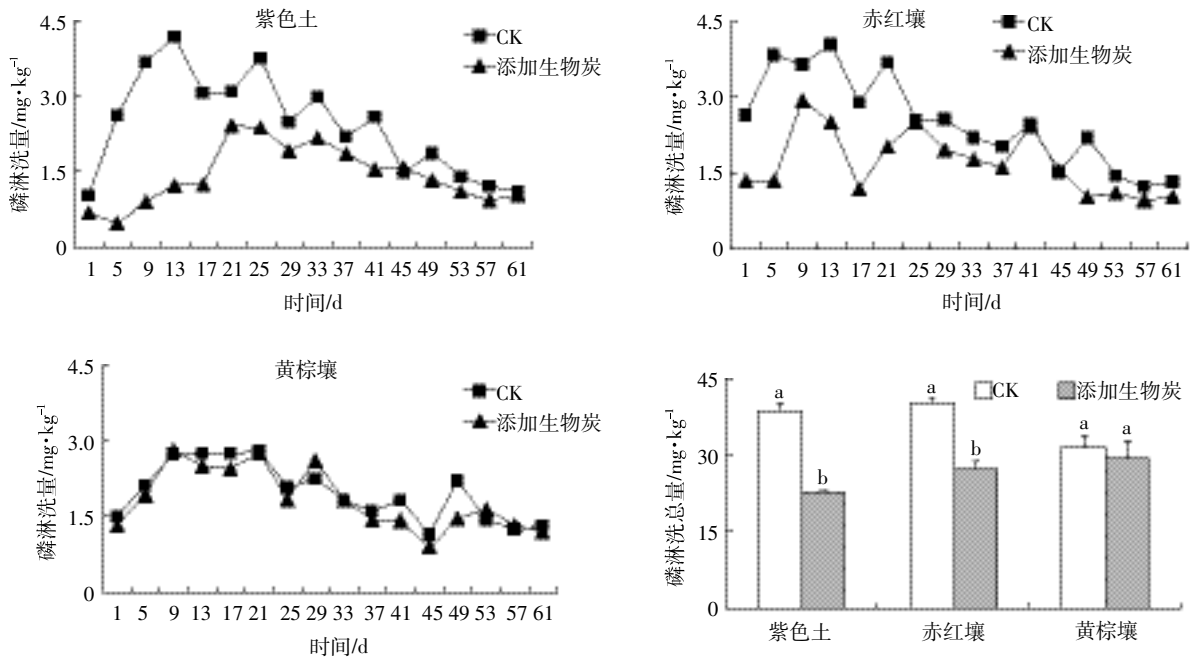


图 2 3 种土壤不同处理下磷素各时期淋洗量及累计淋洗总量

Figure 2 Phosphorus leaching amount at stages and total amount for three soils under treatments of control and biochar addition

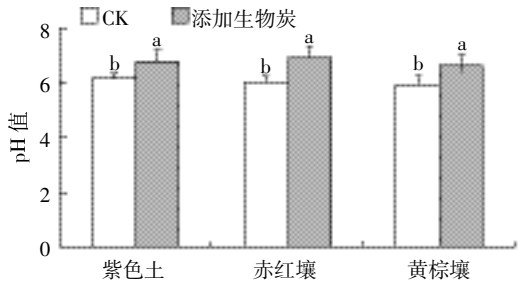


图 3 3 种土壤淋洗结束后不同处理下土壤 pH 值

Figure 3 The pH value at the end of the leaching experiment for three soils under treatments of control and biochar addition

加生物炭处理和对照处理之间的钾素淋洗量在各取样时期均差异不明显,淋洗总量亦无显著差异。

一方面,生物炭的表面吸附点位以及微孔理论上可以直接对钾素产生强烈的吸附作用;另一方面,pH 值可以通过影响钾素的固定与释放、吸附与解吸来影响溶液中的钾素浓度,进而影响钾素迁移,钾的固定量一般随土壤 pH 值的升高而增加^[9],所以添加生物炭后的土壤 pH 值升高可能有利于减少钾素淋失。然而,本研究结果显示添加生物炭后,尽管可能直接增加了对钾素的吸附固定,也显著提高了土壤 pH 值(图 3),但赤红壤钾素淋失量并没有减少,对于紫色土和黄棕壤的钾素淋失量更是发生显著增加。分析认为,这可能是由于生物炭本身携带一定量的钾素,其

有效性亦可能较高,具体原因有待深入研究^[8]。Laird 等^[8]在其他类型土壤上的研究发现,施用生物炭能够显著增加土壤钾素的淋失,这与本研究的紫色土和黄棕壤上的结果一致,但与赤红壤上的结果不同,可见施用生物炭对土壤钾素淋失的作用效果受到土壤类型的影响。

3 结论

基于土柱淋洗模拟试验,研究了添加生物炭对云南烟区 3 种土壤硝态氮、磷、钾养分淋失的影响。结果表明,添加生物炭后,紫色土、赤红壤和黄棕壤的硝态氮淋洗总量分别减少 16%、14%和 22%;紫色土、赤红壤的磷素淋洗总量分别减少 41%和 32%,黄棕壤磷素淋洗总量变化不明显;紫色土和黄棕壤的钾素淋洗总量分别增加 19%和 23%,赤红壤的钾素淋洗总量变化不明显。总的来说,施用生物炭是控制云南植烟土壤氮、磷淋失的有效措施。结合以往相关研究结果,生物炭对土壤氮素淋失的抑制作用具有普遍性,然而对土壤磷素和钾素淋失的影响作用具有不确定性,与土壤类型有关。为了进一步明确施用生物炭对土壤硝态氮、磷、钾养分淋失影响的机制和不确定性原因,今后应当加强土壤微生物及酶活性分析、土壤 pH 值以及养分量(尤其是钾素)控制等试验研究。

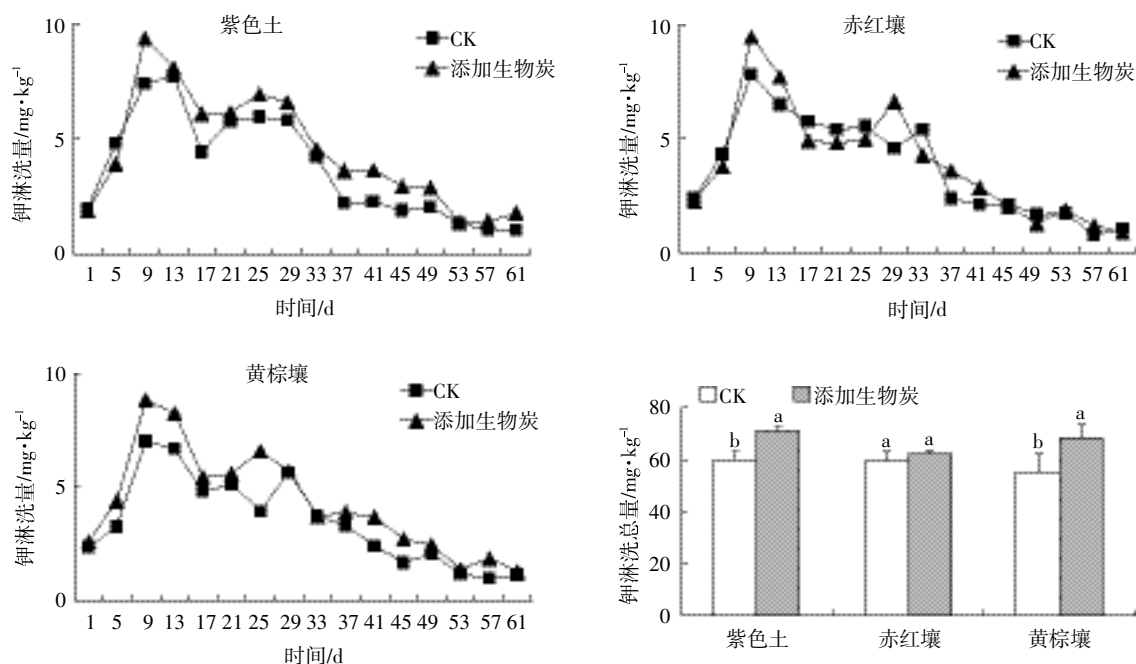


图 4 3 种土壤不同处理下钾素各时期淋洗量及累计淋洗总量

Figure 4 Potassium leaching amount at stages and total amount for three soils under treatments of control and biochar addition

参考文献:

- [1] 黄 剑, 张庆忠, 杜章留, 等. 施用生物炭对农田生态系统影响的研究进展[J]. 中国农业气象, 2012, 33: 232-239.
HUANG Jian, ZHANG Qing-zhong, DU Zhang-liu, et al. Research advances in effects of biochar application on agroecosystem[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2012, 33: 232-239. (in Chinese)
- [2] 陈红霞, 杜章留, 郭 伟, 等. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、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: 2930-2934.
CHEN Hong-xia, DU Zhang-liu, GUO Wei, 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: 2930-2934. (in Chinese)
- [3] 郭 伟, 陈红霞, 张庆忠, 等. 华北高产农田施用生物炭对耕层土壤总氮和碱解氮含量的影响[J]. 生态环境学报, 2011, 20: 425-428.
GUO Wei, CHEN Hong-xia, ZHANG Qing-zhong, et al. Effects of biochar application on total nitrogen and alkali-hydrolyzable nitrogen content in the topsoil of the high-yield cropland in North China Plain[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20: 425-428. (in Chinese)
- [4] 张万杰, 张庆忠, 李志芳, 等. 生物炭和氮肥配施对菠菜产量和硝酸盐含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30: 1946-1952.
ZHANG Wan-jie, ZHANG Qing-zhong, LI Zhi-fang, et al. Impacts of biochar and nitrogen fertilizer on spinach yield and tissue nitrate content from a pot experiment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30: 1946-1952. (in Chinese)
- [5] Zhang Q, Wang Y, Wu Y, et al. Effect of biochar amendment on soil thermal conductivity, reflectance, and temperature[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 77: 1478-1487.
- [6] Jeffery S, Verheijen F G A, van der Velde M, et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 144: 175-187.
- [7] Novak K M, Busscher W J, Laild D L, et al. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil[J]. *Soil Science*, 2009, 174: 105-112.
- [8] Laird D, Fleming P, Wang B, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010, 158: 436-442.
- [9] Singh B P, Hatton B J, Singh B, et al. Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39: 1224-1235.
- [10] 李际会, 吕国华, 白文波, 等. 改性生物炭的吸附作用及其对土壤硝态氮和有效磷淋失的影响[J]. 中国农业气象, 2012, 33: 220-225.
LI Ji-hui, LÜ Guo-hua, BAI Wen-bo, et al. Effect of modified biochar on soil nitrate nitrogen and available phosphorus leaching[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2012, 33: 220-225. (in Chinese)
- [11] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70: 1719-1730.
- [12] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, et al. Biochar effects on soil biota: A review[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43: 1812-1836.
- [13] Knowles O A, Robinson B H, Contangelo A, et al. Biochar for the mitigation of nitrate leaching from soil amended with biosolids[J]. *The Science of the Total Environment*, 2011, 409: 3206-3210.
- [14] Beck D A, Johnson G R, Spolek G A. Amending greenroof soil with biochar to affect runoff water quantity and quality[J]. *Environmental*

- Pollution*, 2011, 159: 2111–2118.
- [15] 吕家珑, Fortune S, Brookes P C. 土壤磷淋溶状况及其 Olsen 磷 “突变点”研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22: 142–146.
- LÜ Jia-long, Fortune S, Brookes P C. Research on phosphorus leaching from soil and its Olsen-P “Threshold Volume”[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22: 142–146. (in Chinese)
- [16] 于群英, 李孝良, 李粉茹. 安徽省土壤无机磷组分状况及施肥对土壤磷素的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20: 57–62.
- YU Qun-ying, LI Xiao-liang, LI Fen-ru, et al. Contents of soil inorganic phosphorus fractions in Anhui Province and effects of fertilization on soil phosphorus[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20: 57–62. (in Chinese)
- [17] 刘利花, 杨淑英, 吕家珑, 等. 长期不同施肥土壤中磷淋溶 “阈值”研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2003, 31: 123–126.
- LIU Li-hua, YANG Shu-ying, LÜ Jia-long, et al. Studies on “threshold value” of phosphorus leaching in long-term different fertilization soils [J]. *Journal of Northwest Science-Technology University of Agriculture and Forestry*, 2003, 31: 123–126. (in Chinese)
- [18] Vander Melen D T, Breeuwsma A, Beers P C M. Agricultural nutrient losses to surface water in the Netherlands: Impact, strategies, and perspective[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27: 4–11.
- [19] 占丽平, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 土壤钾素运移的影响因素研究进展[J]. 土壤, 2012, 44: 548–553.
- ZHAN Li-ping, LI Xiao-kun, LU Jian-wei, et al. Research advances on influence factors of soil potassium movement[J]. *Soils*, 2012, 44: 548–553. (in Chinese)