植物营养与肥料学报 2015,21(4):1075-1080 doi: 10.11674/zwyf.2015.0428
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

不同生物炭添加量下植烟土壤养分的淋失

李江舟[1], 娄翼来[2], 张立猛[2], 王一丁[2], 张丽敏[3], 张庆忠[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农业清洁流域团队,北京 100081;
3 贵州大学农学院,贵州贵阳 550025)

摘要:【目的】我国南方植烟土壤养分淋失严重尤其是氮、钾,不仅造成资源浪费和潜在环境威胁,还严重制约了烟叶的可持续生产。生物炭比表面积大、孔隙多、稳定性强,施入土壤后可增加对养分的吸附,延长肥效和减少养分损失。本文研究了添加不同水平生物炭对植烟土壤硝态氮、磷、钾养分淋失的影响,为充分发挥生物炭提高养分利用率的作用提供依据。**【方法】**采用土柱淋洗模拟方法,试验共设 5 个处理,包括不施肥对照(CK)、氮磷钾肥(NPK)、氮磷钾肥 +10% 生物炭(10% B)、氮磷钾肥 +20% 生物炭(20% B)、氮磷钾肥 +40% 生物炭(40% B),每个处理重复 4 次,随机排列。**【结果】**不同生物炭添加量下,土壤硝态氮、磷、钾的淋失量在培养期间呈先增加后减少的趋势。与 NPK 处理相比,添加生物炭处理在培养 21 天之后减少了硝态氮淋失量,在整个培养期间延缓和减少了磷的淋失量;与 NPK 处理相比,10% B、20% B 和 40% B 处理硝态氮淋失总量分别显著降低 13%、18% 和 25%,磷素淋失总量分别显著降低 46%、61% 和 73%,10% B 和 20% B 处理的钾素淋洗量略高,但差异未达显著水平,而 40% B 处理的钾素淋洗量则显著高于前 3 个处理,比 NPK 处理高 47%。培养结束后,由于生物炭本身偏碱性,随着生物炭添加量的增加,土壤 pH 显著升高。表明添加生物炭条件下,土壤硝态氮淋失量的减少主要是生物炭的吸附作用所致;磷素淋失量的减少除了与生物炭的吸附作用有关外,也可能与土壤 pH 的升高有关;钾素淋失量的增加可能与生物炭本身携带的钾素有关。施用生物炭对土壤硝态氮、磷、钾养分淋失影响的机制还需进一步验证。**【结论】**施用生物炭能够有效减少植烟土壤硝态氮和磷素的淋溶损失,进而节约氮、磷肥料和提高养分利用效率,降低地下水污染风险,促进烟叶可持续优质生产,在一定范围内其施用量越高效果越好。生物炭的适宜添加量还需综合考虑氮磷钾 3 个元素的淋失而继续试验。

关键词: 生物炭; 植烟土壤; 养分淋失
中图分类号: S147.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)04-1075-06

Leaching loss of nutrients in tobacco-planting soil under different biochar adding levels

LI Jiang-zhou[1], LOU Yi-lai[2], ZHANG Li-meng[2], WANG Yi-ding[2], ZHANG Li-min[3], ZHANG Qing-zhong[2*]
(*1 Yuxi Tobacco Company, Yunnan Province, Yuxi 653100, China; 2 Agricultural Clear Watershed Group, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3 College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China*)

Abstract:【Objectives】 Leaching loss of soil nitrogen and potassium is generally serious in tobacco cropping regions of Southern China, which leads to fertilizer waste and potential environmental pollution, and greatly limits sustainable production of tobacco. Biochar is porous and stable, and has large surface area. The addition of biochar to soil may increase the adsorption of nutrients and elongate the fertilizer effects. In this study, the leaching loss of main soil nutrients were investigated under different biochar addition levels. **【Methods】** Tobacco-planting soil was used in a soil column incubation experiment. Five treatments were designed: no fertilizer (CK); only N, P, K fertilizers (NPK); NPK + 10% biochar of the soil amount (10% B); NPK + 20% biochar (20% B) and NPK +

收稿日期: 2014-03-21 **接受日期:** 2014-09-17 **网络出版日期:** 2015-05-06
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)资助。
作者简介: 李江舟(1983—),男,新疆克拉玛依人,博士,主要从事烤烟栽培与养分管理方面的研究。E-mail: lijiangzhou1983@163.com
* 通信作者 E-mail: ecologyouth@126.com

40% biochar (40% B). Each treatment was replicated four times, and the NO_3^--N, soluble P and soluble K contents in the leaching water were measured after different days of biochar addition.【**Results**】As normal, the leaching amounts of NO_3^--N, P and K are increased firstly and then decreased during the incubation In the 21st day of incubation, the leaching amount of NO_3^--N and P in NPK treatment was significantly lower than those in the treatments with biochar. Compared to the NPK treatment, the total leaching of NO_3^--N in 10% B, 20% B and 40% B treatments were significantly decreased by 13%, 18% and 25%; the total leaching of P decreased by 46%, 61% and 73%, respectively, the total leaching of K in 10% B and 20% B treatments were slightly higher, but not statistically significant. The leaching of K in 40% B treatment was significantly higher than those in the other two biochar added treatments, and was 47% higher than the NPK treatment. At the end of the incubation, the soil pH increased with increasing biochar addition rates. Therefore, it was supposed that the decrease in NO_3^--N leaching was mainly attributed to adsorption of biochar. Besides adsorption functions of biochar, the decrease in P leaching maybe due its decreased mobility caused by the increased soil pH, and the increase in K leaching could be the increase in total K input with biochar addition.【**Conclusions**】Biochar addition could effectively reduce the leaching losses of NO_3^--N and P in soil, but not reduce that of K. Further researches are needed for the proper addition levels of biochar in the comprehensive consideration of nutrient leaching and efficiency.

Key words: biochar; tobacco-planting soil; nutrient leaching

农田土壤养分淋失可导致土壤肥力下降、资源浪费,进而给农学以及经济效益造成损失,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[1-5]。如在沙土中添加山核桃壳制成的生物炭不仅能提高土壤 pH,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[6];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[7];在淋溶土及变性土中添加畜禽粪及桉木制成的生物炭后,土壤氮的气态损失和淋溶损失均显著减少[8]。

在我国南方烟区,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,严重制约了烟叶的可持续生产。故而,本研究以云南玉溪植烟土壤为研究对象,通过土柱淋洗模拟试验,研究了添加不同水平玉米秸秆生物炭对植烟土壤硝态氮、磷、钾养分淋失的影响,以期为生物炭在改良植烟土壤方面的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自云南玉溪市代表性烟田的表层(0—20 cm)土壤,土壤类型为红壤,其基本性质为:有机碳含量 17.8 g/kg、全氮 1.64 g/kg、全磷 0.87 g/kg、全钾 8.74 g/kg、速效氮 127 mg/kg、速效磷 18.7 mg/kg、速效钾 212 mg/kg、pH 6.08(H_2O),土壤经风干等处理后过 2 mm 筛备用。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,其密度为 0.28 g/cm^3,pH 为 8.40,碳含量 649 g/kg,全氮 10.1 g/kg,硝态氮 6.16 mg/kg,全磷 10.8 g/kg,全钾 9.64 g/kg,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(P_2O_5)、钾(K_2O)含量分别为 46%、18% 和 50%。

1.2 试验设计

采用土柱(5 kg 土)模拟方法进行研究,试验于 2013 年 10～12 月在中国农科院温室内进行。试验设 5 个处理:1)CK; 2)氮磷钾肥(NPK);3)NPK + 0.5 kg 生物炭(10% B);4)NPK + 1 kg 生物炭(20% B);5)NPK + 2 kg 生物炭(40% B)。后 4 个处理的肥料添加量均为 N 30 g、P_2O_5 25 g、K_2O 75 g,每个处理重复 4 次。

将土、生物炭和肥料按所需比例混匀后,填装到高 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 天,之后每隔 4 天用蒸馏水定量定时淋洗一次,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)。淋洗结束后测定土壤 pH 值。利用 SPSS13.0 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

从图 1 可以看出,CK 处理的土壤硝态氮淋洗量在整个培养时期趋于平稳,而其他处理在试验前期,土壤硝态氮淋洗量迅速增加,在第 9 天达到峰值,之后逐渐下降,53 天后趋于平稳。不同处理之间相比,NPK 处理土壤硝态氮淋洗量在各个时期均显著高于 CK,其中差异水平在前期逐渐增强,到第 9 天达到最大,之后逐渐降低,53 天后趋于稳定;在培养的 21 ～ 53 天之间,添加生物炭各处理土壤硝态氮淋洗量显著低于 NPK 处理,且降低程度随生物炭添加量的增加而呈略微增加趋势。从土壤硝态氮累计总的淋洗量来看,CK 处理最低,仅为 22.7 mg/kg, NPK 处理最高,达 325 mg/kg;与 NPK 处理相比, 10% B、20% B 和 40% B 处理土壤硝态氮累计总的淋洗量分别显著降低 13%、18% 和 25%。

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属于羧酸基和酚基功能团[9],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[7],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有关的酶以及微生物体产生吸附作用,降低相关酶及微生物与尿素等有机氮及铵态氮的亲和力和接触机会,从而延缓了有机氮的矿化及铵态氮向硝态氮的转化,进而减少硝态氮的形成过程及淋溶损失。

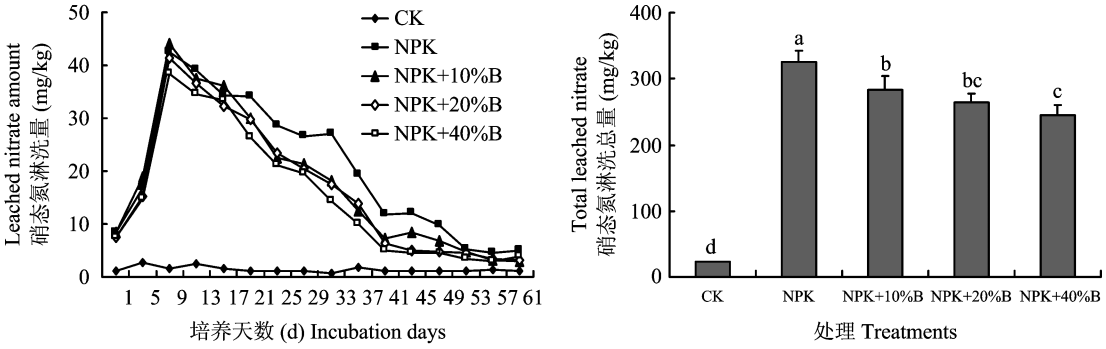

图 1　不同处理土壤硝态氮各时期淋洗量及累计淋洗总量

Fig. 1　Amounts of leached nitrate in soils at different incubation days and total leaching amount under different treatments

[注(Note): 柱上不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

Different letters above the bars indicate significant differences among treatments($P<0.05$).]

2.2　生物炭对土壤磷素淋失的影响

图 2 显示了不同处理土壤磷素各时期淋洗量及累计淋洗总量。从中可以看出,CK 处理的土壤磷素淋洗量在整个培养时期趋于平稳,而其他处理均呈现先增加后降低的趋势,其中 NPK 处理的变异幅度最大,并在第 9 天出现高峰值,其余三个添加生物炭处理的变异幅度低于 NPK,且高峰时期从 10% B 处理的 25 天推迟到 40% B 处理的 41 天,53 天后各处理土壤磷素淋洗量均趋于平稳。不同处理之间相比较,CK 处理的土壤磷淋洗量在各个时期均处于

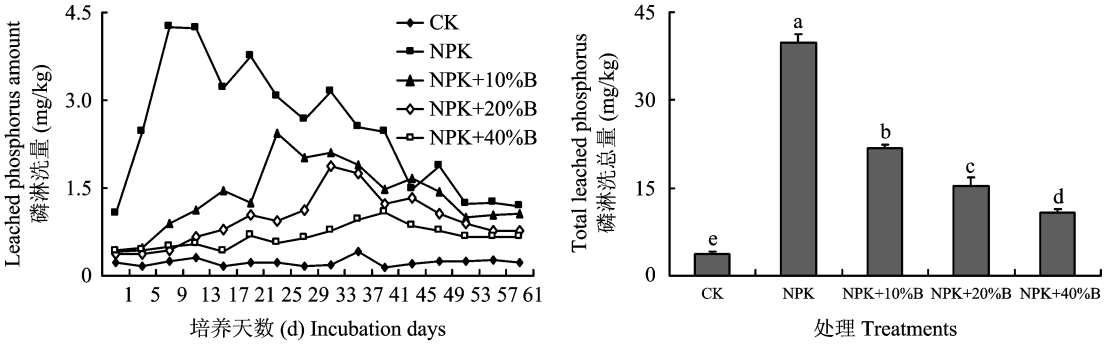

图2 不同处理土壤磷素各时期淋洗量及累计淋洗总量

Fig. 2 Amounts of leached phosphorus in soils at different incubation days and total leaching amount under different treatments

[注(Note):柱上不同字母表示差异显著($P<0.05$)Different letters above the bars indicate significant differences among treatments($P<0.05$).]

最低水平,NPK 处理最高,添加生物炭处理显著低于 NPK 处理,且降低幅度随着添加量的增加呈升高趋势,此外降低幅度随时间呈先升高后降低的趋势。就磷的累计淋洗总量而言,CK 处理最低,仅为 3.67 mg/kg,NPK 处理最高,达 39.9 mg/kg;与 NPK 处理相比,10% B、20% B 和 40% B 处理土壤硝态氮累计总的淋洗量分别显著降低 46%、61% 和 73%。

尽管人们普遍认为磷素在土壤中的移动性较差[10],但磷素在土壤剖面下层中的高量累积现象确实有很多报导[7]。刘利花等对塿土上的长期施肥土壤磷素淋溶趋势的研究证实,当土壤速效磷含量超过 23 mg/kg 时,就有磷素淋溶的可能[12]。本研究 CK 处理土壤的有效磷含量仅为 18.7 mg/kg,但亦有一定的磷素发生淋溶。荷兰的相关研究发现,磷饱和土壤会引起大量磷淋溶到地下水,其量取决于土壤磷素饱和度、施磷量和地下水深度[13]。本研究发现,施入磷肥以后,土壤磷素淋溶量迅速增加;而添加生物炭又有效抑制了磷素的淋溶损失,这说明生物炭对磷酸盐及可溶性有机磷具有强烈的吸附固定作用[7]。此外,土壤磷素有效性受 pH 值的影响,通常情况下酸性土壤 pH 值升高,碱性土壤 pH 值降低,土壤磷素有效性增加。而本研究土壤虽属南方酸性土壤,但是烟叶生产中长期施石灰后已控制土壤酸碱度趋于中性,所以添加生物炭后进一步显著提高土壤 pH 值(图 3)可能会促进土壤磷素的固定,进而减少磷的淋失。

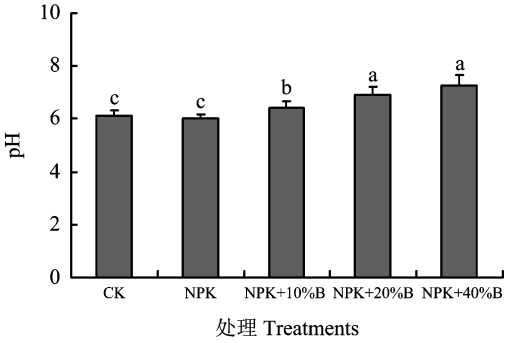

图3 淋洗结束时不同处理土壤 pH 值

Fig. 3 Soil pH at the end of incubation

[注(Note):柱上不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$) Different letters above the bars indicate significant differences among treatments($P<0.05$).]

2.3 生物炭对土壤钾素淋失的影响

从图 4 可以看出,CK 处理的土壤钾素淋洗量在整个培养时期趋于平稳,而其他处理在试验前期,土壤钾素淋洗量迅速增加,在第 9 天达到高峰值,之后逐渐下降,57 天后趋于平稳。不同处理之间相比较,CK 处理的土壤钾淋洗量在各个时期均处于最低水平,NPK + 40% B 处理最高,低量生物炭处理(10% B、20% B)在各时期均略微高于 NPK 处理,高量生物炭处理(40% B)则显著高于 NPK 处理。从钾的累计淋洗总量来看,CK 处理最低,仅为 11.2 mg/kg,40% B 处理最高,达 94.4 mg/kg,显著高于 NPK 处理,增加幅度 47%;10% B、20% B 处理土壤钾累计淋洗总量略高于 NPK 处理,但差异未达显著水平。

一方面生物炭的表面吸附点位以及微孔理论上可以对钾素产生强烈的吸附作用,另一方面土壤 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[14],所以添加生物炭后的土壤 pH 值升高可能有利于钾素淋失。然而,本研究结果显示,添加生物炭后,尽管可能增加了对钾素的吸附固定,也显著提高了土壤 pH 值

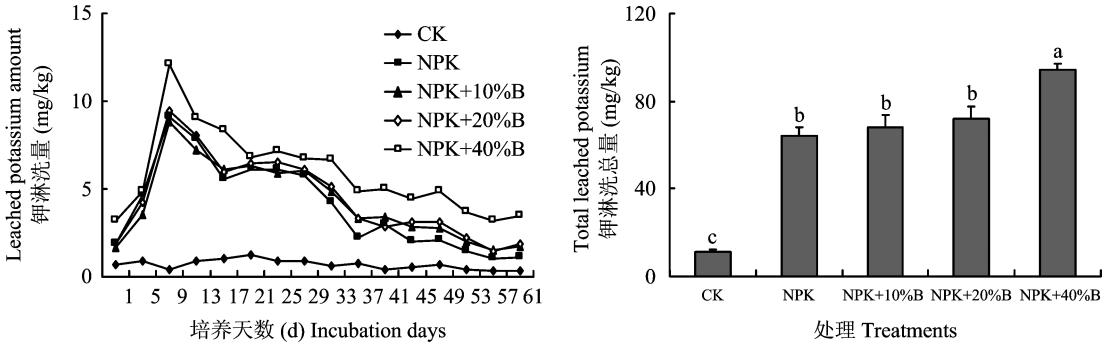

图 4　不同处理土壤钾素各时期淋洗量及累计淋洗总量

Fig. 4　Amounts of leached potassium in soils at different incubation days and total amount under different treatments

[注(Note): 柱上不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

Different letters above the bars indicate significant differences among treatments($P<0.05$).]

(图 3),但土壤钾素淋失量反而也显著增加,Laird 等人在其他类型土壤上的研究也得出同样的结果[7]。分析认为,这可能是由于生物炭本身携带一定量的钾素[7],其有效性亦可能较高,确切原因有待深入研究。

3　结论

施用生物炭能够有效减少植烟土壤硝态氮和磷的淋溶损失,节约肥料,提高养分利用效率,降低环境风险,促进烟叶可持续优质生产。

由于不同原料以及不同炭化条件对于生物炭的性质影响很大,进而可能影响其施用效果,一种生物炭的结果很难得出全面的结论;另外,由于时间短,且在本试验中放大了生物炭的施用量,所以不能依据此试验结果提出适宜的生物炭用量。为了深入了解生物炭对土壤氮磷钾淋失的影响机制和实际应用方法,需要进一步进行不同生物炭土壤微生物、土壤 pH 控制试验以及生物炭钾素有效性定量控制试验研究。

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 J, Zhang Q Z, Du Z L *et al*. Research advances in effects of biochar application on agroecosystem[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33: 232-239.

[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 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: 2930-2934.

[3] 郭伟, 陈红霞, 张庆忠, 等. 华北高产农田施用生物质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 W, Chen H X, Zhang Q Z *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.

[4] 张万杰, 张庆忠, 李志芳, 等. 生物质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 W J, Zhang Q Z, Li Z F *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.

[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] 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.

[7] Laird D, Fleming P, Wang B *et al*. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil[J]. Geoderma, 2010, 158: 436-442.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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 J L, 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.

[11] 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 Q Y, Li X L, Li F R *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.

[12] 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 L H, Yang S Y, Lü J L *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.

[13] Vander Melen D T, Breeuwsma A, Bcers 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.

[14] 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 L P, Li X K, Lu J W *et al*. Research advances on influence factors of soil potassium movement[J]. Soils, 2012, 44: 548-553.