

王 静, 付伟章, 葛晓红, 等. 玉米生物炭和改性炭对土壤无机氮磷淋失影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(12): 2810–2820.

WANG Jing, FU Wei-zhang, GE Xiao-hong, et al. Effects of corn biochar and modified carbon on leaching of inorganic nitrogen and phosphorus in soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(12): 2810–2820.

# 玉米生物炭和改性炭对土壤无机氮磷淋失影响的研究

王 静<sup>1</sup>, 付伟章<sup>1\*</sup>, 葛晓红<sup>1</sup>, 郑书联<sup>1</sup>, 薄录吉<sup>2</sup>

(1. 山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018; 2. 山东省农业科学院农业资源与环境研究所 农业农村部黄淮海平原农业环境重点实验室, 济南 250000)

**摘要:** 利用玉米秸秆为原料制作生物炭, 并用氯化铁进行改性, 考察了改性前后生物炭对硝态氮和磷的吸附等温和吸附动力学过程, 将生物炭和改性炭制作 3 cm 厚的物理隔离层, 施入土柱 50 cm 处, 通过淋溶实验, 研究生物炭改性前后对土壤无机氮磷淋失的影响。结果表明, 炭化温度为 500 °C 时, 铁炭比为 0.7 的生物炭和改性炭对氮磷的吸附能力最强。吸附动力学和等温吸附曲线分析表明: 生物炭改性后对硝态氮和磷的吸附增大, 生物炭和改性生物炭对硝态氮的最大吸附量分别为 0 mg·g<sup>-1</sup> 和 2.414 mg·g<sup>-1</sup>、对磷的最大吸附量分别为 1.723 mg·g<sup>-1</sup> 和 16.062 mg·g<sup>-1</sup>。与对照相比, 生物炭处理和改性炭处理硝态氮的淋失量分别降低 11.2% 和 31.6%, 磷的淋失量分别显著降低 33.1% 和 82.9%, 氨氮的淋失量分别显著降低 44.3% 和 68.6%。淋溶试验后对土壤残留养分分析表明, 隔离层的添加并不会对 0~50 cm 土层内 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 含量产生明显影响, 同时改性生物炭能有效减少 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 向更深土层中迁移, 表明土壤中添加改性生物炭能够有效降低土壤无机氮磷的淋失风险。

**关键词:** 改性生物炭; 吸附; 氮磷淋失; 物理隔离层

中图分类号: X712 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)12-2810-11 doi:10.11654/jaes.2018-0030

## Effects of corn biochar and modified carbon on leaching of inorganic nitrogen and phosphorus in soil

WANG Jing<sup>1</sup>, FU Wei-zhang<sup>1\*</sup>, GE Xiao-hong<sup>1</sup>, ZHENG Shu-lian<sup>1</sup>, BO Lu-ji<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China; 2. Key Laboratory of Agro-Environment in Huanghuaihai Plain, Ministry of Agriculture and Rural Areas, Shandong Agricultural Resource and Environmental Science Research Institute, Jinan 250000, China)

**Abstract:** In this study, biochar and modified biochar were used to investigate the adsorption kinetics of nitrate and phosphorus. A 3 cm-thick physical barrier of biochar and modified carbon was applied to a depth of 50 cm. The soil column leaching experiment was used to study the effect of biochar on the leaching of inorganic nitrogen and phosphorus in the soil. The results showed that when the carbonization temperature was 500 °C and the iron carbon ratio was 0.7, the adsorption capacity of the biochar and modified carbon to nitrogen and phosphorus was the strongest. In addition, the kinetics of adsorption isotherm biochars before and after modification were more in line with the Langmuir adsorption equation and dynamics equation of quasi secondary. Biochar modification before adsorption by nitrate into a modified maximum of 2.414 mg·g<sup>-1</sup>, biochar and modified carbon on phosphorus adsorption quantity biggest were 1.723 mg·g<sup>-1</sup> and 16.062 mg·g<sup>-1</sup>. Compared with the control, biochar and modified carbon leaching loss of nitrate nitrogen were decreased by 11.2% and 31.6%, the leaching amounts of phosphorus were significantly decreased by 33.1% and 82.9%, respectively, significantly reduced the amount of ammonia nitrogen leaching 44.3% and 68.6%. Analysis of soil residual nutrients after leaching test showed that the addition of isolation layer did not sig-

收稿日期: 2018-01-05 录用日期: 2018-04-27

作者简介: 王 静(1993—), 女, 硕士研究生, 从事农业面源污染控制研究。E-mail: 457372449@qq.com

\*通信作者: 付伟章 E-mail: sdaufwz@sdau.edu.cn

基金项目: 山东省重大科技创新工程项目(2017CXGC0223); 国家自然科学基金项目(41771324); 山东省自然科学基金项目(ZR2016DB28); 山东省农业科学院农业科技创新工程项目(CXGC2016B09)

**Project supported:** Major Scientific and Technological Innovation Project of Shandong Province (2017CXGC0223); The National Natural Science Foundation of China (41771324); Shandong Natural Science Foundation (ZR2016DB28); Agricultural Scientific and Technological Innovation Project of Shandong Academy of Agricultural Sciences (CXGC2016B09)

nificantly affect the contents of  $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{NH}_4^+$ -N and  $\text{PO}_4^{3-}$ -P in 0~40 cm soil layer, while the modified carbon could effectively reduce  $\text{NH}_4^+$ -N and  $\text{PO}_4^{3-}$ -P migrated to deeper soil layers, indicating that the leaching risk in soil by adding modified biochar can effectively reduce the inorganic nitrogen and phosphorus in soil.

**Keywords:** modified biochar; adsorption; nitrogen phosphorus loss; physical isolation

近年来,水体中(主要是地下水 and 地表水) $\text{NO}_3^-$ -N 的污染越来越受到国内外广泛关注<sup>[1]</sup>。世界各地水体尤其是地下水中 $\text{NO}_3^-$ -N 浓度增加异常迅速,其中一个重要原因是农业上过度地使用氮肥,同时磷肥施用过量后,较难移动的磷也会存在淋溶损失风险,从而污染地下水,造成水体富营养化<sup>[2-4]</sup>。因此,寻求一种有效的方法防止氮磷养分淋失已经迫在眉睫。

生物炭通常是指由生物质在完全或部分缺氧的情况下经热解炭化产生的一类高度芳香化难溶性固态物质<sup>[5-6]</sup>。生物炭具有较大的比表面积和较高的电荷密度,将其施入土壤中能提高土壤孔隙度、增强土壤保水保肥能力并促进土壤团聚体的形成,进而增加土壤的稳定性和对养分的吸附能力<sup>[7-8]</sup>。近年来,将生物炭用作土壤改良剂来减少养分淋失的研究日益增多<sup>[9-13]</sup>。生物炭能够减少土壤中氮磷养分淋失已得到广泛认可<sup>[14-16]</sup>。研究表明,生物炭还田可减少土壤中 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 的淋滤<sup>[17-18]</sup>。生物炭表面含有大量的负电荷,易与阴离子产生静电互斥,需要通过改性提高生物炭对阴离子的吸附能力。目前生物炭常用的改性方法主要有酸法、碱法和负载金属改性法,酸法和碱法改性生物炭过程中排放的酸碱会对环境产生危害,通过负载铁改性能有效避免这个问题,同时改性后的生物炭含有较多的阳离子能与含负电荷的阴离子结合,从而提高吸附能力。生物炭改性后施入土壤以减少养分淋失鲜有报道,并且生物炭都是与土壤按一定比例混合施入土壤耕层,这种方法虽然能有效地减少淋溶损失,但是生物炭比例固定且吸附位点有限,同时施入耕层,施肥之后生物炭很快达到饱和。本文首次提出物理阻隔层的方法,将生物炭和改性炭制成 3 cm 厚的阻隔层,施入土壤 50 cm 处,不仅能通过土壤持水能力减少部分养分迁移,而且隔离层能起到阻隔和吸附的双重功效,为生物炭的施用提供一种新思路,在实际生产应用过程中还需要更加深入的研究。

本文以玉米秸秆作为原料在不同温度下热解制备生物炭,并用  $\text{FeCl}_3$  进行改性负载铁处理,通过室内土柱淋溶实验,研究改性前后生物炭对无机氮和磷淋失的影响,为有效控制农田氮磷元素流失造成的面源

污染提供科学理论依据与技术支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 生物炭和改性炭的制备及理化性质表征

生物炭的原材料为玉米秸秆,用蒸馏水反复冲洗,烘干粉碎备用。把粉碎的秸秆粉末过 20 目筛后装入瓷坩埚加盖密封并称重,放入马弗炉中 400、500、600、700 °C 高温裂解 120 min,拿出冷却称重计算产率。

取上述秸秆生物炭浸泡于  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  HCl 中 1 h,然后加入蒸馏水过滤,一边滴加一边测定滤液 pH 直至滤液呈中性,将此秸秆生物炭在烘箱中 75 °C 烘干,取一定量上述烘干的秸秆炭,加入到  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{FeCl}_3$  溶液中,充分搅拌,试验中设铁与生物炭的质量比值分别为 0.28、0.42、0.56、0.70、0.84 共 5 个梯度,烘干后移入瓷坩埚置于 300 °C 马弗炉中煅烧 2 h,即得到改性生物炭。

生物炭和改性炭形貌特征采用扫描电镜分析仪进行观测分析,元素组成采用元素分析仪测定。

### 1.2 吸附实验

#### 1.2.1 生物炭最佳炭化温度的筛选

分别取 0.2 g 和 0.6 g 生物炭加入到体积为 50 mL 浓度为  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{KNO}_3$  和  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  溶液中,振荡 24 h 后分别测定溶液中剩余氮磷浓度,通过不同温度制备生物炭的吸附率筛选最佳炭化温度。

生物炭对氮和磷的吸附率(%)通过下列等式计算:

$$\text{吸附率} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $C_0$  为初始溶液浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $C_e$  为吸附平衡时溶液浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

#### 1.2.2 最佳改性炭配比筛选方法

取 0.6 g 改性炭加入到体积为 50 mL 浓度为  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{KNO}_3$  溶液中,取 0.2 g 改性炭加入到体积为 50 mL 浓度为  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  溶液中,振荡 24 h 后分别测定溶液中剩余氮磷浓度,吸附量最大者为最佳改性条件,吸附量为:

$$q_e = (C_0 - C_e) \times \frac{V}{m} \quad (2)$$

式中: $q_e$  为吸附平衡时的吸附量,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $V$  为溶液体

积, L;  $m$  为改性生物炭用量, g。

### 1.2.3 吸附动力学研究

取 0.2 g 生物炭和改性生物炭加入到体积为 50 mL 的  $\text{KNO}_3$  或  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  溶液中, 改性炭  $\text{KNO}_3$  溶液在振荡 1、5、10、20、30、90、180 min 后过滤,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  溶液为 5、15、30、60、90、120、150、180 min 后过滤; 生物炭在 1、3、5、7、12、14 h 取样过滤, 测定各滤液浓度, 计算吸附量。实验中氮浓度为  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 磷浓度为  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

准一级动力学方程其直线形式为:

$$\lg(q_e - q_t) = \lg q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (3)$$

式中:  $q_e$  和  $q_t$  分别为在平衡时刻和  $t$  时刻吸附剂的吸附量,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $k_1$  为准一级模型的吸附平衡速率常数,  $\text{min}^{-1}$ ;  $t$  为反应时间, min; 初始吸附速率  $h_{01} = k_1 q_e$ 。

准二级动力学方程其直线形式为:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4)$$

式中:  $k_2$  为准二级模型的吸附平衡速率常数,  $\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ , 初始吸附速率  $h_{02} = k_2 q_e^2$ 。

### 1.2.4 吸附等温线测定

分别取 0.2 g 生物炭和改性生物炭于 50 mL 的不同氮磷浓度的溶液中, 其中  $\text{KNO}_3$  溶液中 N 含量梯度分别为 5、7、10、15、20、30、40、50  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  溶液中 P 含量梯度为 40、50、60、70、80、90、100  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 恒温振荡 24 h, 采用 Langmuir 和 Freundlich 吸附方程研究它的吸附行为。

Langmuir 吸附方程:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{bQ_0} + \frac{C_e}{Q_0} \quad (5)$$

式中:  $b$  为吸附平衡常数,  $\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$ ;  $Q_0$  为 Langmuir 理论最大吸附量,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

Freundlich 吸附方程:

$$\ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (6)$$

式中:  $K_f$  和  $n$  是 Freundlich 常数, 分别代表吸附剂的吸附能力和吸附强度。

### 1.3 土柱淋溶实验

土壤取自山东省淄博市张店区良乡店褐土 0~50 cm 的土壤(土壤取样分为两部分, 0~20 cm 为一层进行取样, 30~50 cm 为一层进行取样), 将采集的土壤自然风干, 挑去肉眼可见的细根和石块后过 2 mm 筛, 全磷  $3.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全氮  $4.14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 有机质  $68.96 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , pH 7.36。

选用内径 8 cm、高 60 cm 的 PVC 管进行模拟淋溶实验, PVC 管内壁涂抹一层凡士林以减小土柱的边缘效应, 并依次从下往上装入实验材料, 将 100 目尼龙网置于淋溶柱底部出水口上, A 层装填 3 cm 厚 10 目石英砂(作为反滤层), 石英砂上方放置中速滤纸和尼龙网以防止阻塞出口, B 层加 3 cm 隔离层(见表 1), C 层装 30 cm 厚土壤, D 层填装混合土(有机肥和土壤按大棚正常施用比例), 上方保持 3 cm 水层。将土壤容重控制在  $1.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  左右, 以防止土壤过于紧实对淋溶产生影响; 在上部垫一层滤纸以防止水分淋溶对表层土壤的扰动, 淋溶土柱装置示意图见图 1。

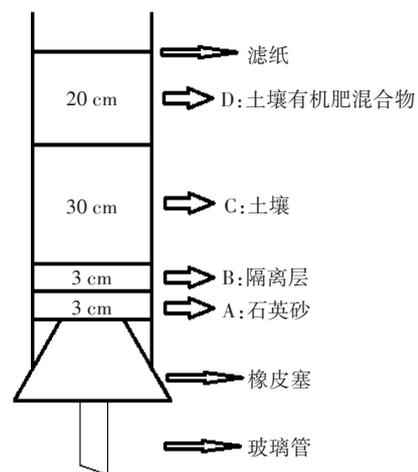


图 1 淋溶土柱装置图

Figure 1 Device of column for leaching soil

土柱填装完成后, 先加 1250 mL 蒸馏水使土柱中土壤水分接近饱和, 静置 12 h 后, 在土柱中加入 10 mL 尿素和磷酸二氢钾混合溶液, 混合溶液的含 N 量为  $1500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 含 P 量为  $420 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (按施用  $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  纯氮和  $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  纯磷计) 静置 1 h 后加 100 mL 蒸馏水, 此为第一次淋洗, 每隔 48 h 淋洗一次(共 10 次), 每次淋洗都加 100 mL 蒸馏水。在分析样品前, 采用量筒量取渗滤液体积, 然后过滤, 渗滤液放置在  $4 \text{ }^\circ\text{C}$  冰箱中保存, 通过流动分析仪测定滤液中硝态氮、氨氮和有效磷含量。实验处理见表 1。

表 1 实验处理

Table 1 Experimental treatment

编号	实验处理
CK	常规处理
C1	常规处理+秸秆粉末隔离层
C2	常规处理+生物炭隔离层
C3	常规处理+改性炭隔离层

土壤淋溶结束后,以10 cm为间隔对土壤进行取样分析,土壤中氨氮和硝态氮的含量采用 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 浸提,流动分析仪测定,土壤中有效磷采用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 浸提,流动分析仪测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 生物炭表征

#### 2.1.1 生物炭产率和元素组成

玉米生物炭400 °C时产率最高(表2),700 °C时产率最低,随着炭化温度的升高玉米秸秆生物炭的产率随之下降。随着炭化温度升高,在生物炭的制备过程中玉米秸秆水分大量蒸发,半纤维素和纤维素分解,其中的可挥发成分均以气体形式分解并带走,从而使得生物炭的量有所减少。

随着炭化温度的升高,生物炭的含C量逐渐升高,N、H、O的含量逐渐降低。C含量增加表明炭化程度增强,而H和O含量降低是因为热解过程它们以小分子有机物和水的形式析出。通常元素比(H/C)和(O+N)/C可分别用于描述生物炭的芳香性和极性,随着温度的升高,生物炭的芳香性和极性都显著降低。

#### 2.1.2 生物炭电镜分析

从图2中可以看出作物粉末表面较为光滑,也没有明显的孔隙结构;未经改性的秸秆生物炭的形状为

条形,内部是空心状,结构较为松散,表面粗糙;经改性后改性炭表面更加粗糙,含有大量的附着物,说明有铁附着在炭的表面及填充其孔隙中;而生物炭的表面,尤其是断面,则形成大量的孔隙,可以提高土壤的保水保肥能力。

### 2.2 生物炭对氮磷的吸附能力

#### 2.2.1 生物炭最佳炭化温度的筛选

如表3所示,在 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{NO}_3^- \text{--N}$ 浓度下,生物炭可以向溶液中释放 $0.25 \sim 0.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NO}_3^- \text{--N}$ ,同时未改性的生物炭并不具有吸附硝态氮的能力,所以根据生物炭对磷的吸附率进行最佳炭化温度的筛选。

由图3可知,原状秸秆粉末对磷的吸附率明显小于生物炭,且4个炭化温度下的生物炭的吸附效果随炭化温度先升高再降低,500 °C炭化的生物炭吸附效果最佳。原因是在该温度下生物质经过炭化过程,其原有的孔隙结构被保留下来,因而具有较大的孔隙度和比表面积,从而表现出较好的吸附特性,而低活化温度(400 °C)时,生物炭表面的挥发性物质并没有完全发生转变。在500 °C时,随着温度的升高,表面的挥发性物质挥发导致次生孔隙的增加,从而形成了具有高孔隙率的吸附剂并增大了对磷的吸附量。温度升高到600 °C时,高温导致生物炭表面开裂和结构的重组,降低了孔隙度,从而使得吸附量下降<sup>[9]</sup>。本实验后续所用生物炭为500 °C热解条件下所得到的生物炭。

表2 生物炭的产率、元素含量及元素比

Table 2 Yield, element content and element ratio of biochar

温度/°C	产率/%	元素含量/%				原子比	
		C	N	H	O	H/C	(O+N)/C
400	34.34	56.1	2.4	4.3	22.0	0.92	0.24
500	29.94	58.0	2.3	2.7	21.5	0.56	0.22
600	26.58	58.6	2.0	2.0	18.7	0.41	0.19
700	24.88	59.5	1.6	1.5	16.6	0.30	0.17

表3 不同炭化温度下生物炭对 $\text{NO}_3^- \text{--N}$ 的吸附量

Table 3 Adsorption of phosphorus on biochar under different carbonization temperature

温度	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C
Q ( $\text{NO}_3^-$ )	-0.41b	-0.25a	-0.36a	-0.38a

注:表中不同小写字母代表差异显著( $P < 0.05$ )。

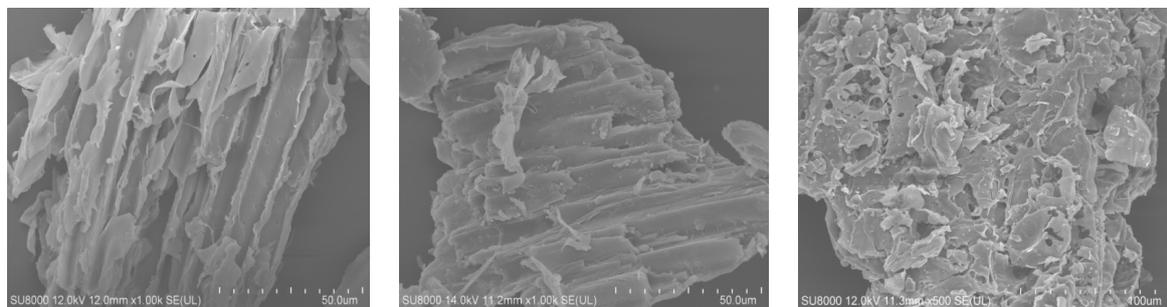


图2 作物粉末、生物炭、改性炭SEM图( $\times 1000$ 倍)

Figure 2 Typical SEM diagram of crop powder, biochar and modified carbon ( $\times 1000$  times)

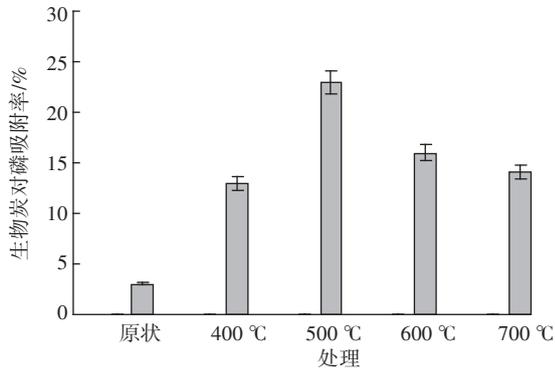


图3 不同炭化温度下生物炭对磷的吸附率

Figure 3 Adsorption rate of phosphorus on biochar under different carbonization temperature

### 2.2.2 最佳改性炭铁炭比

由表4可见,随着铁炭比增加,改性炭对硝态氮和磷的吸附量也逐渐增加,当铁炭比达到0.7时,吸附量达到最大,当铁炭比达到0.84后,吸附量反而有所下降,该结果说明过多的铁氧化物会阻塞秸秆炭的孔隙,减少硝酸根离子、磷酸根离子与铁氧化物的接触面,对吸附氮磷有负面影响。因此,确定改性生物炭最佳铁炭比为0.7。

### 2.2.3 生物炭和改性炭的吸附动力学

生物炭和改性炭对硝态氮和磷的吸附用动力学一二级方程进行拟合(图4~图6),拟合表明,生物炭对磷的吸附达到平衡所需时间大约为12 h,改性炭对氮和磷的吸附平衡时间为3 h,氯化铁改性生物炭能大大提高对氮和磷的吸附效率;3组吸附方程更符合准二级动力学方程,且 $R^2$ 的值都大于0.9,均很好地拟合了实验数据,与多人的吸附氮磷研究一致<sup>[20-21]</sup>。张继义在以小麦生物炭的吸附试验中发现小麦生物炭和改性炭对有效磷和硝态氮更符合二级动力学方程。改性生物炭对硝态氮和磷的吸附反应都符合二级方程反应,而准二级方程反应用来描述化学吸附过程,通过吸附剂和被吸附物之间共享或交换电子形成共价力结合,或者是通过离子交换进行结合<sup>[22]</sup>。

### 2.2.4 生物炭和改性炭的吸附等温线

生物炭和改性炭对硝态氮和磷的吸附等温线用Langmuir和Freundlich进行拟合(图7、图8)。结果表明,随着硝态氮和磷的初始浓度增加,生物炭和改性炭的吸附平衡量也逐渐增加。Langmuir模型中最大吸附量的拟合结果表明,生物炭由改性前不吸附硝态氮变成改性后的最大吸附量为 $2.414 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,生物炭和改性炭对磷的最大吸附量分别为 $1.723 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $16.062 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,改性炭对磷的吸附量是生物炭的9.32倍,分析表明生物炭改性后对硝态氮和磷的吸附效果增强。

Freundlich模型中吸附常数 $K_f$ 反应吸附剂吸附能力的强弱,指数 $1/n$ 反应吸附位点能量分布的特征。 $K_f$ 值越大,表明吸附能力越强; $1/n$ 值越小,表明吸附强

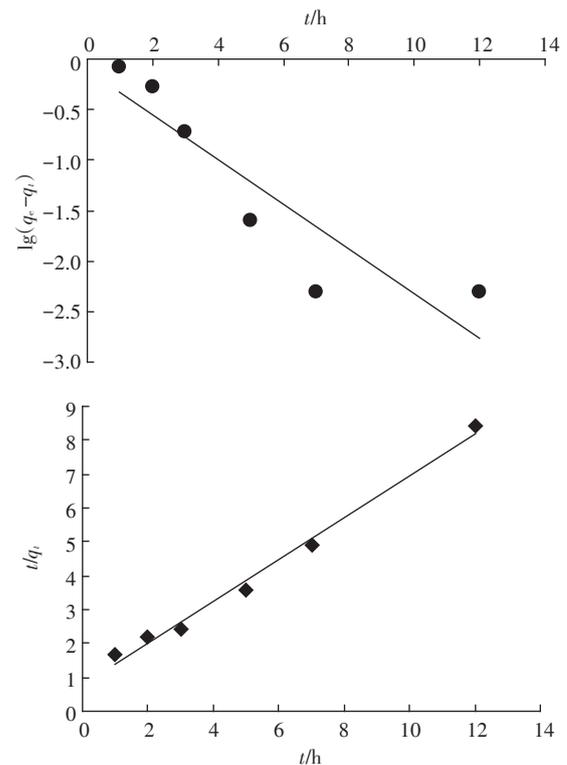


图4 生物炭对磷的吸附动力学方程

Figure 4 Kinetic equation of adsorption of phosphorus by biochar

表4 不同改性炭对硝态氮和磷吸附量的比较( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )

Table 4 Comparison of adsorption capacity of different modified carbon to nitrogen and phosphorus ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )

	铁炭比					
	0	0.28	0.42	0.56	0.7	0.84
硝态氮	0a	0.482±0.046b	1.203±0.083c	1.458±0.057d	1.754±0.045e	1.491±0.091d
磷	1.733±0.058a	4.553±0.174b	7.307±0.205c	8.280±0.090d	9.407±0.064e	8.683±0.095d

注:表中数据为3次重复的平均值,不同字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ , LSD方法)。

Note: Values are the means of three repeats, different small letters mean significant difference among different treatments ( $P < 0.05$ , LSD).

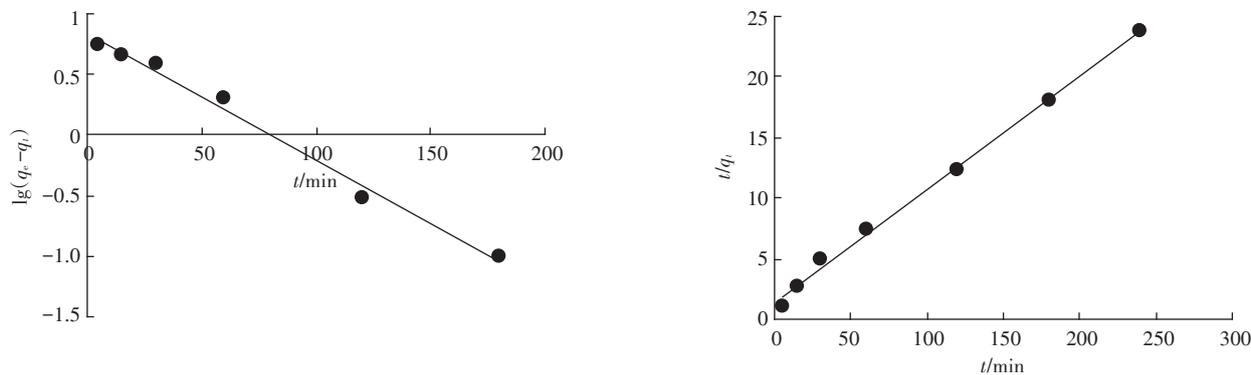


图5 改性炭对磷的吸附动力学方程

Figure 5 Kinetic equation of adsorption of phosphorus by modified carbon

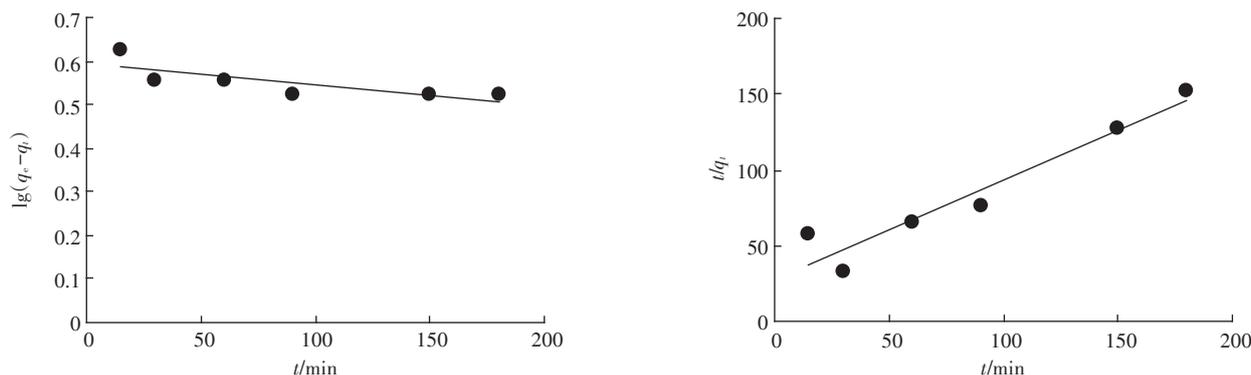


图6 改性炭对硝态氮的吸附动力学

Figure 6 Adsorption kinetics of nitrate by modified carbon

表5 生物炭和改性炭吸附氮和磷的动力学方程参数

Table 5 Kinetic equation parameters for the adsorption of nitrogen and phosphorus by biochar and modified carbon

吸附元素	生物炭类型	准一级动力学			准二级动力学		
		$k_1/\text{min}^{-1}$	$q_e/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$R^2$	$k_2/\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$	$q_e/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$R^2$
磷P	生物炭	0.009	0.779	0.757	0.008	1.618	0.989
磷P	改性炭	0.024	7.015	0.990	0.006	10.753	0.997
氮N	改性炭	0.053	1.144	0.596	0.016	1.513	0.926

度越大,尤其当 $0.1 < 1/n < 1$ 时,表明其易于吸附<sup>[23-25]</sup>。拟合结果表明,改性炭对硝态氮和磷吸附的 $K_f$ 值(0.322和4.854)大于生物炭(0.172);改性炭对硝态氮和磷吸附的 $1/n$ 值(0.55和0.29)小于生物炭(0.72)。因此Freundlich模型拟合分析也表明,生物炭改性后对硝态氮和磷的吸附效果增强。

### 2.3 生物炭和改性炭对土壤淋溶液中氮磷淋失的影响

#### 2.3.1 生物炭和改性炭对土壤淋溶液中磷淋失影响

4组实验随着时间的延长,淋溶液中磷的浓度逐渐降低,并最后趋于稳定(图9)。这主要是由于初始时生物炭和改性炭表面有大量的吸附位,但随着吸附的进行,吸附位减少,导致吸附量变少,最后到达平衡。CK和C1两组实验对磷的淋失情况大体相当,说

明粉末隔离层并不能起到明显地减少土壤中磷淋失的作用。C2淋溶液中磷含量随淋溶次数的增加呈急剧下降趋势,最后趋于稳定,淋溶液中磷含量约为 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,减少了33%淋溶损失。C3淋溶液中的磷含量显著低于其余3组处理,第3次淋溶液中磷含量就趋于平稳约为 $0.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,减少了83%淋溶损失。李际会等<sup>[26]</sup>在土壤中以2.5%、5%、10%的最佳比例改性炭,磷淋失量分别减少45%、59%、75%。对于磷的淋失量,物理隔离层的添加能优于生物炭与土壤混施的方法。改性炭对土壤磷素淋溶损失的影响取决于两方面,一方面改性炭表面或孔隙内附着大量的铁,增加了生物炭的孔隙率,增加了吸附量;另一方面铁氧化物对磷酸根离子存在很强的亲和力,对其有很强的

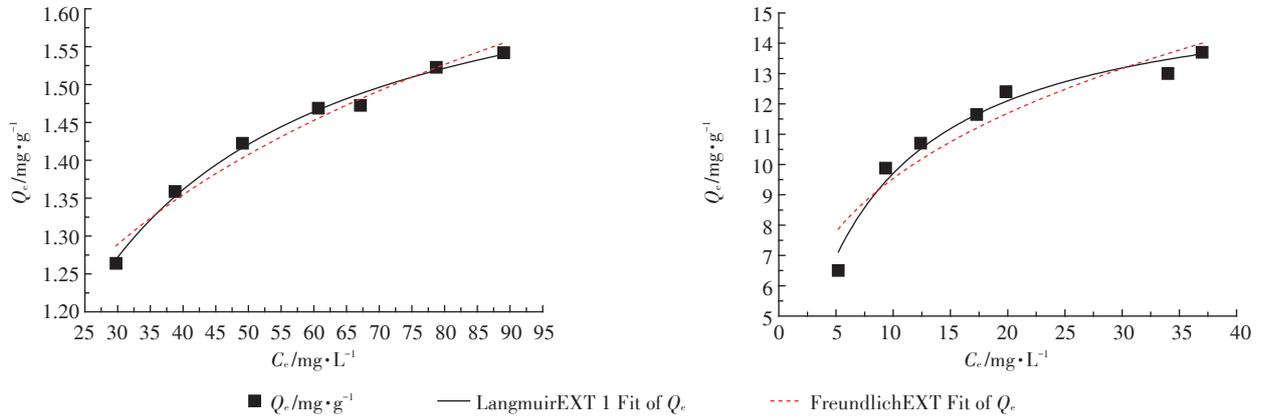


图7 生物炭和改性炭吸附磷等温线(左图为生物炭,右为改性炭)

Figure 7 Adsorption isotherms of phosphorus by biochar(left) and modified carbon(right)

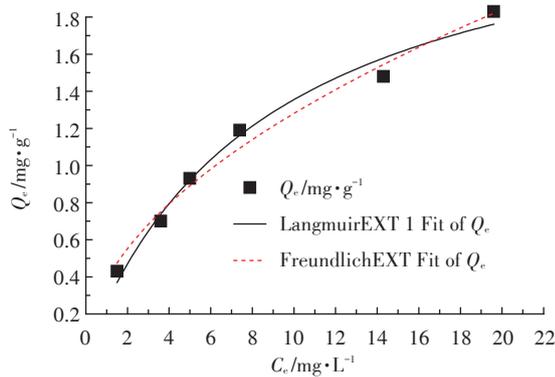


图8 改性炭吸附硝态氮等温线

Figure 8 Adsorption isotherms of nitrate nitrogen by modified carbon

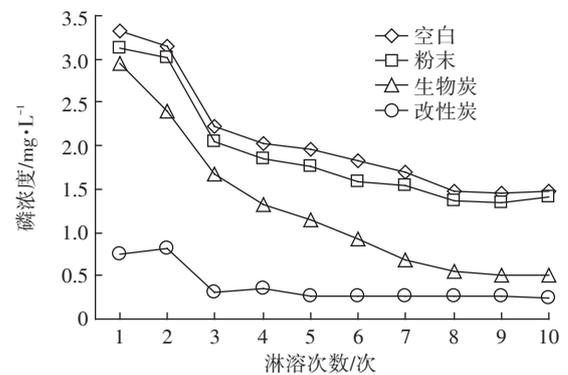


图9 不同处理淋溶液中的磷含量

Figure 9 Phosphorus content in different treatment solutions

选择吸附性<sup>[27]</sup>,改性炭通过如下等式吸附磷<sup>[28-29]</sup>,首先,  $Fe(OH)_3 + 3H^+ \rightleftharpoons Fe^{3+} + 3H_2O$ , 然后  $Fe^{3+} + H_2PO_4^- \rightleftharpoons FeH_2PO_4^+$ , 阳离子浓度高就能吸引更多的阴离子结合在生物炭表面,从而使改性炭能吸附更多的磷。因此土壤中添加最佳改性炭作为隔离层对磷有吸附保蓄作用,可减少磷淋失,提高磷在土壤中的保存量,这意味着施用最佳改性生物炭可以增大磷被作物利用的几率。

### 2.3.2 生物炭和改性炭对土壤淋溶液中 $NH_4^+-N$ 淋失的影响

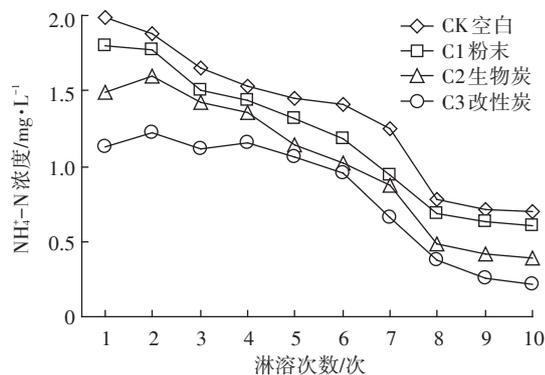
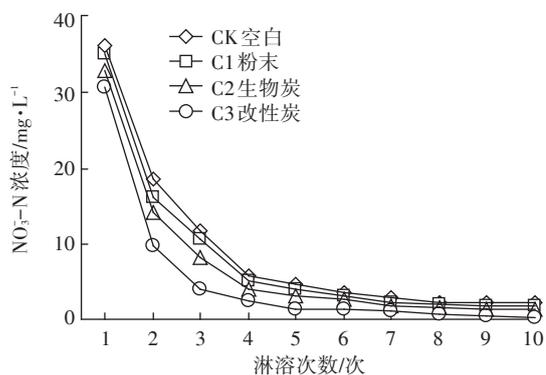
4组实验的淋溶液  $NH_4^+-N$  浓度都呈逐渐下降趋

势(图10),第8次淋溶后趋于稳定,淋溶液中  $NH_4^+-N$  浓度分别为  $CK > C1 > C2 > C3$ , 经过10次淋溶,4组实验淋溶液中  $NH_4^+-N$  浓度分别为:  $CK, 0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $C1, 0.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $C2, 0.39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $C3, 0.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。CK与C1两组实验对  $NH_4^+-N$  的淋失情况大体相当,说明粉末隔离层并不能起到明显地减少土壤中  $NH_4^+-N$  淋失的作用。而C2和C3分别减少了44.3%和68.6%的  $NH_4^+-N$  淋溶损失,  $NH_4^+-N$  为碱性阳离子,生物炭表面多为负电性,生物炭可能通过静电吸附的方式对  $NH_4^+-N$  进行吸附<sup>[30-31]</sup>。整个淋溶过程中,淋溶液中  $NH_4^+-N$  浓度比较低,淋失量较少。其原因是尿素中的N素大部分在生物酶的作用下转化为  $NO_3^- -N$  淋失了<sup>[32]</sup>。

表6 生物炭和改性炭吸附氮和磷的等温方程参数

Table 6 Isothermal equation parameters of adsorption of nitrogen and phosphorus by biochar and modified carbon

吸附元素	生物炭类型	Langmuir吸附方程			Freundlich吸附方程		
		$Q_0/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	$b/\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$	$R^2$	$K_f$	$n$	$R^2$
磷	生物炭	1.723	0.094	0.984	0.172	1.395	0.939
磷	改性炭	16.062	0.153	0.938	4.854	3.408	0.762
硝态氮	改性炭	2.414	0.101	0.950	0.322	1.816	0.930

图 10 不同处理淋溶液中的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量Figure 10 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N content in different treatment solutions图 11 不同处理淋溶液中的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量Figure 11 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N content in different treatment solutions

### 2.3.3 生物炭和改性炭对土壤淋溶液中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失影响

从图 11 可以看出,4组处理的淋溶液中在前4次淋溶时 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度急剧下降,最后都趋于平稳。在试验前期,硝化作用反应速率增加,因而导致初期淋溶液中硝态氮浓度较高,经过 8 d 左右,尿素完成转化,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 产量不再增加,因而淋溶液中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度急剧下降。随着淋溶次数的增加,土壤呈厌氧环境,微生物活动减弱,土壤硝化作用减弱,这就有利于土壤微生物发生还原反应<sup>[33-35]</sup>,抑制了土壤硝化作用,导致土柱中硝态氮淋溶液浓度降低。CK、C1 对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的处理大体相当。C2 减少了 11.2% 的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋溶损失,研究表明生物炭不吸附 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,淋溶液中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度降低原因是添加生物炭降低了淋溶液体积,因此生物炭对土壤淋溶液中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失量的影响是由于生物炭的添加增强了土壤的持水能力,进而提高了 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的固持作用。C3 减少了 31.6% 的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋溶损失,改性生物炭中含有铁的成分,改性炭通过如下等式吸附磷,Fe(OH)<sub>3</sub>+3H<sup>+</sup>⇌Fe<sup>3+</sup>+3H<sub>2</sub>O,Fe<sup>3+</sup>+H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>⇌FeH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>2+</sup>,而在吸附硝态氮过程中,当溶液处于高阴离子浓度情况下,改性生物炭对硝态氮的吸附反而有所增加,主要是由于改性生物炭表面形成了众多的 FeH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>2+</sup>,以致通过静电吸引方式,吸附更多的硝酸根离子<sup>[36]</sup>。因此,添加改性炭可以通过提高 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 在土壤中的存留时间和保存量,从而提高土壤氮素利用率<sup>[37-38]</sup>。

## 2.4 不同土层土壤中氮磷的含量

### 2.4.1 不同土层土壤中有效磷的含量

经过一段时间的淋溶,土壤中有效磷的浓度在 0~10、10~20、20~30 cm 和 30~40 cm 土层中含量大体相同(图 12),说明隔离层的添加并不会对 0~40 cm 的

土壤中的有效磷的浓度产生影响。相对于 40~50 cm 土层而言,添加粉末隔离层不会对土壤有效磷浓度产生影响,而添加生物炭和改性炭隔离层的土壤在 40~50 cm 的土层中有效磷浓度增加,一方面是生物炭和改性炭中含有大量的营养元素,能提高周围土壤中有效磷的浓度;另一方面土壤中淋失的有效磷不断向下迁移,生物炭和改性炭隔离层减少了有效磷的进一步迁移,使得靠近隔离层的土壤中有有效磷浓度升高。因此,生物炭和改性炭隔离层的添加能减少有效磷向更深土壤中迁移。

### 2.4.2 不同土层土壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的含量

各土层土壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的浓度如图 13 所示。土壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的浓度在 0~10、10~20、20~30 cm 和 30~40 cm 土层中含量大体相同,而添加生物炭和改性炭隔离层的土壤在 40~50 cm 的土层中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度增加,说明隔离层的添加并不会使土壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的含量减少,从而作物不会因土壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的减少而影响其生长,同时生物炭和改性炭隔离层的添加能减少 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 向更深土壤中迁移,说明生物炭和改性炭隔离

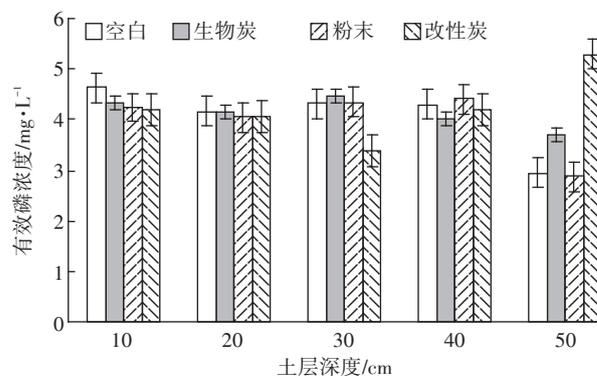
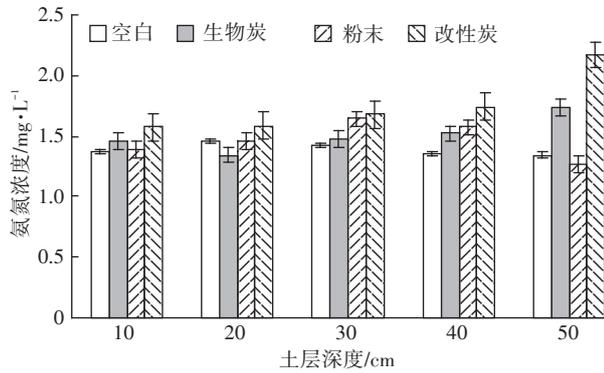


图 12 不同土层土壤中有效磷含量

Figure 12 Available P content in different soil layers

图13 不同土层土壤中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量Figure 13 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N content in different soil layers

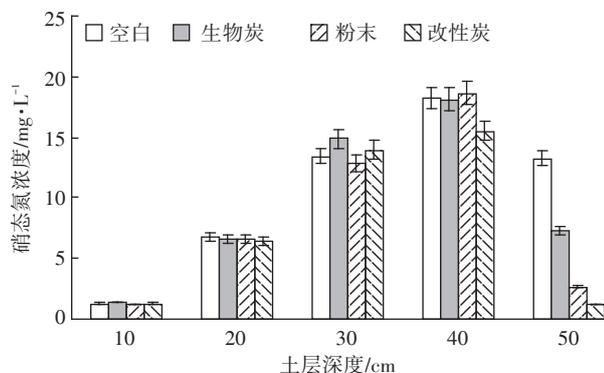
层的添加能有效减少土壤中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的淋溶损失。

#### 2.4.3 不同土层土壤中NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的含量

各土层土壤中NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的浓度如图14所示。在0~40 cm土层中,随着土壤深度的增加,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的浓度不断提高,是因为相对于有效磷和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N而言,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N带负电荷,不易被土壤颗粒吸附,随着淋溶逐渐向下迁移,从而0~10 cm土层中NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量较少。20~40 cm土层中的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量逐渐增加,是因为尿素中的N素大部分在生物酶的作用下转化为NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N使得土壤中NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量不断增加。同时NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N淋失量不断增加,40~50 cm土壤中的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量减少。与Güereña等<sup>[39]</sup>研究结果一致,主要原因是旱地土壤通气透气性好,施用尿素可促进硝化作用<sup>[40-41]</sup>,其他形式氮转化的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N很快因硝化作用转化为硝态氮,加之土壤和生物炭对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>吸附能力强,故土壤中的无机氮以NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N形式淋失量较少,主要以NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N形式存在,且遇到降水极易引起NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N淋失。

### 3 结论

(1)随着炭化温度的升高生物炭产率逐渐下降,

图14 不同土层土壤中NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量Figure 14 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N content in different soil layers

生物炭的含C量逐渐升高,N、H、O的含量逐渐降低,生物炭的芳香性和极性都显著降低。炭化温度为500℃时生物炭吸附能力最强。

(2)氯化铁改性生物炭,Fe<sup>3+</sup>与生物炭的质量比为0.70是生物炭的最佳改性条件,根据Langmuir吸附方程,最佳改性生物炭对硝态氮和磷的理论最大吸附量分别为2.414 mg·g<sup>-1</sup>和16.062 mg·g<sup>-1</sup>。

(3)土柱淋溶试验表明,最佳改性炭作为隔离层能显著减少土壤氮磷流失,最佳改性炭和生物炭与不添加任何物质的对照相比,硝态氮的淋失量分别显著降低了31.6%和11.2%,磷的淋失量分别显著降低了83%和33%,氨氮的淋失量分别显著降低了68.6%和44.3%。

#### 参考文献:

- [1] Liu A G, Ming J H, Ankumah R O. Nitrate contamination in private wells in rural Alabama[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 346 (1/2/3): 112-120.
- [2] 张彦浩, 钟佛华, 夏四清, 等. 硝酸盐污染饮用水的去除技术研究进展[J]. *环境保护科学*, 2009, 35(4): 50-53.  
ZHANG Yan-hao, ZHONG Fo-hua, XIA Si-qing, et al. Study progress on removal technologies of nitrate-contaminated drinking water[J]. *Environmental Protection Science*, 2009, 35(4): 50-53.
- [3] 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 旱地土壤施用生物炭减少土壤氮损失及提高氮素利用率[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(6): 54-61.  
GAO De-cai, ZHANG Lei, LIU Qiang, et al. Application of biochar in dryland soil decreasing loss of nitrogen and improving nitrogen using rate[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(6): 54-61.
- [4] 串丽敏, 赵同科, 安志装, 等. 土壤硝态氮淋溶及氮素利用研究进展[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(11): 200-205.  
CHUAN Li-min, ZHAO Tong-ke, AN Zhi-zhuang, et al. Research advancement in nitrate leaching and nitrogen use in soils[J]. *Chinese agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(11): 200-205.
- [5] 刘玉学, 刘微, 吴伟祥, 等. 土壤生物质炭环境行为与环境[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(4): 977-982.  
LIU Yu-xue, LIU Wei, WU Wei-xiang, et al. Environmental behavior and effect of biomass derived black carbon in soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(4): 977-982.
- [6] 李裕元, 邵明安. 模拟降雨条件下施肥方法对坡面磷素流失的影响[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(11): 1421-1424.  
LI Yu-yuan, SHAO Ming-an. Effects of phosphorus application methods on phosphorus loss on sloping land under simulated rainfall[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(11): 1421-1424.
- [7] 龚文, 张怀志, 李永梅, 等. 滇池流域原位模拟降雨条件下不同有机肥用量的农田氮素流失研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2010(2): 16-20.  
GONG Wen, ZHANG Huai-zhi, LI Yong-mei, et al. Study on nitrogen

- loss from different chicken manure application level under the in-situ simulated rainfall conditions in Dianchi lake watershed of Yunnan Province[J]. *Soil and Fertilizer Sciences*, 2010(2):16-20.
- [8] Galvez A, Sinicco T, Cayuela M L, et al. Shortterm effects of bioenergy by-products on soil C and N dynamics, nutrient availability and biochemical properties[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2012, 160:3-14.
- [9] Ding Y, Liu Y X, Wu W X, et al. Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2010, 213(1):47-55.
- [10] 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.
- [11] 刘玉学. 生物质炭输入对土壤氮素流失及温室气体排放特性的影响[D]. 杭州:浙江大学, 2011.  
LIU Yu-xue. Effect of biochar on the characteristic of nitrogen loss and greenhouse gas emission from soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [12] 杨放, 李心清, 邢英, 等. 生物炭对盐碱土氮淋溶的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5):972-977.  
YANG Fang, LI Xin-qing, XING Ying, et al. Effect of biochar amendment on nitrogen leaching in saline soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5):972-977.
- [13] Yao Y, Gao B, Zhang M, et al. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil[J]. *Chemosphere*, 2012, 89(11):1467-1471.
- [14] 杨帆, 李飞跃, 赵玲, 等. 生物炭对土壤氨氮转化的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5):1016-1020.  
YANG Fan, LI Fei-yue, ZHAO Ling, et al. Influence of biochar on the transformation of ammonia nitrogen in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5):1016-1020.
- [15] Guo Y J, Tang H, Li J D, et al. Effects of cow dung biochar amendment on adsorption and leaching of nutrient from an acid yellow soil irrigated with biogas slurry[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2014, 225:1820-1833.
- [16] 马琨, 陈欣, 王兆骞. 模拟暴雨下红壤坡面产流产沙及养分流失特征研究[J]. 宁夏农学院学报, 2004, 25(1):1-4.  
MA Kun, CHEN Xin, WANG Zhao-qian. The properties of runoff, sediment and nutrient loss under simulated rainstorm in slope land of red soil area[J]. *Journal of Ningxia Agricultural University*, 2004, 25(1):1-4.
- [17] 彭莉, 王莉玮, 杨志敏, 等. 降雨对农家堆肥氮磷流失的影响及其面源污染风险分析[J]. 环境科学, 2012, 33(2):407-411.  
PENG Li, WANG Li-wei, YANG Zhi-min, et al. Effects of rainfall on nitrogen and phosphorus loss from courtyard compost and its risk of nonpoint source pollution[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(2):407-411.
- [18] Cao X, Harris W. Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(14):5222-5228.
- [19] 王章鸿, 郭海艳, 沈飞, 等. 热解条件对生物炭性质和氮、磷吸附性能的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(9):2805-2812.  
WANG Zhang-hong, GUO Hai-yan, SHEN Fei, et al. Effects of pyrolysis conditions on the properties of biochar and its adsorption to N and P from aqueous solution[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(9):2805-2812.
- [20] Bhatnagar A, Ji M K, Choi Y H, et al. Removal of nitrate from water by adsorption onto zinc chloride treated activated carbon[J]. *Separation Science and Technology*, 2008, 43(4):886-907.
- [21] Malandrino M, Abollino O, Giacomino A, et al. Adsorption of heavy metals on vermiculite: Influence of pH and organic ligands[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2006, 299(2):537-546.
- [22] 张继义, 徐春梅, 李金涛, 等. 氯化锌法改性小麦秸秆制备生物炭质吸附剂及其对磷酸根的吸附效果[J]. 环境工程学报, 2013, 7(3):987-992.  
ZHANG Ji-yi, XU Chun-mei, LI Jin-tao, et al. Biomass adsorbents prepared from wheat straw by chemical modification with zinc chloride and its adsorption of phosphate[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(3):987-992.
- [23] 郎印海, 刘伟, 王慧. 生物炭对水中五氯酚的吸附性能研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(8):2017-2023.  
LANG Yin-hai, LIU Wei, WANG Hui. Adsorption efficiencies of pentachlorophenol from aqueous solution onto biochars[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(8):2017-2023.
- [24] Gong G, Ye S, Tian Y, et al. Preparation of a new sorbent with hydrated lime and blast furnace slag for phosphorus removal from aqueous solution[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 166(2/3):714-719.
- [25] Ozacar M. Contact time optimization of two-stage batch adsorber design using second-order kinetic model for the adsorption of phosphate onto alunite[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 137(1):218-225.
- [26] 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(2):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(2):220-225.
- [27] Saha B, Bains R, Greenwood F. Physicochemical characterization of granular ferric hydroxide (GFH) for arsenic (V) sorption from water[J]. *Separation Science and Technology*, 2005, 40(14):2909-2932.
- [28] Saha B, Griffin L, Blunden H. Adsorptive separation of phosphate oxyanion from aqueous solution using an inorganic adsorbent[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2010, 32(4):341-347.
- [29] Demiral H, Gunduzoglu G. Removal of nitrate from aqueous solutions by activated carbon prepared from sugar beet bagasse[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101:1675-1680.
- [30] 赵斌, 王红, 周大迈, 等. 片麻岩新成土中氮素淋溶迁移的模拟研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1):17-21.  
ZHAO Bin, WANG Hong, ZHOU Da-mai, et al. Simulation studies on nitrogen transport and leaching in the gneiss entisols[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(1):17-21.
- [31] 邢英, 李心清, 王兵, 等. 生物炭对黄壤中氮淋溶影响:室内土

- 柱模拟[J]. 生态学杂志, 2011, 30(11):2483-2488.
- XING Ying, LI Xin-qing, WANG Bing, et al. Effects of biochar on soil nitrogen leaching: A laboratory simulation test with yellow soil column [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(11):2483-2488.
- [32] Gundale M J, 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, 43:303-311.
- [33] 陈心想, 何绪生, 张 雯, 等. 生物炭用量对模拟土柱氮素淋失和田间土壤水分参数的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(1): 110-114, 139.
- CHEN Xin-xiang, HE Xu-sheng, ZHANG Wen, et al. Effects of quantity on nitrogen leaching in simulate soil columns and soil moisture parameters in field[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(1):110-114, 139.
- [34] Yan L G, Xu Y Y, Yu H Q, et al. Adsorption of phosphate from aqueous solution by hydroxy-aluminum, hydroxy-iron and hydroxy-iron-aluminum pillared bentonites[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 179(1/2/3):244-250.
- [35] 王承俊, 杨 放, 邢 英, 等. 生物炭对干旱区盐碱土淋溶的影响[J]. 四川环境, 2017, 36(2): 17-21.
- WANG Cheng-jun, YANG Fang, XING Ying, et al. Effect of biochar amendment on nitrogen leaching in saline soil in arid area[J]. *Sichuan Environment*, 2017, 36(2): 17-21.
- [36] 蔡祖聪, 赵 维. 土地利用方式对湿润亚热带土壤硝化作用的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(5):795-801.
- CAI Zu-cong, ZHAO Wei. Effects of land use types on nitrification in humid subtropical soils of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(5):795-801.
- [37] 盖霞普, 刘宏斌, 翟丽梅, 等. 玉米秸秆生物炭对土壤无机氮素淋失风险的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(2):310-318.
- GAI Xia-pu, LIU Hong-bin, ZHAI Li-mei, et al. Effects of corn-stalk biochar on inorganic nitrogen leaching from soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(2):310-318.
- [38] 李卓瑞, 韦高玲. 不同生物炭添加量对土壤中氮磷淋溶损失的影响[J]. 生态环境学报, 2016, 25(02):333-338.
- LI Zhuo-rui, WEI Gao-ling. Effects of biochar with different additive amounts on the leaching loss of nitrogen and phosphorus in soils[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(2):333-338.
- [39] Güereña D, Lehmann J, Hanley K, et al. Nitrogen dynamics following field application of biochar in a temperate North American maize-based production system[J]. *Plant Soil*, 2013, 365(1/2):239-254.
- [40] 肖 茜, 张洪培, 沈玉芳, 等. 生物炭对黄土区土壤水分入渗、蒸发及硝态氮淋溶的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16):128-134.
- XIAO Qian, ZHANG Hong-pei, SHEN Yu-fang, et al. Effects of biochar on water infiltration, evaporation and nitrate leaching in semi-arid loess area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(16):128-134.
- [41] 尹秀玲, 张 璐, 贾 丽, 等. 玉米秸秆生物炭对暗棕壤性质和氮磷吸附特性的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2016, 38(4):439-445.
- YIN Xiu-ling, ZHANG Lu, JIA Li, et al. Effects of corn straw biochar on properties of dark brown soil and adsorption characteristics of nitrogen and phosphorus in dark brown soil [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2016, 38(4):439-445.