

# 小麦秸秆生物质炭对水稻产量及晚稻氮素利用率的影响

曲晶晶<sup>1</sup>, 郑金伟<sup>1</sup>, 郑聚锋<sup>1</sup>, 张旭辉<sup>1</sup>, 李恋卿<sup>1①</sup>, 潘根兴<sup>1</sup>, 纪雄辉<sup>2</sup>, 余喜初<sup>3</sup> (1. 南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 江苏 南京 210095; 2. 湖南省土壤肥料研究所, 湖南 长沙 410125; 3. 江西省红壤研究所, 江西 进贤 331717)

**摘要:** 选择湖南长沙红黄泥水稻土和江西进贤红壤性水稻土为供试土壤, 研究小麦秸秆制生物质炭在 20、40 t · hm<sup>-2</sup> 施入量水平下与氮肥配施对早、晚稻产量及晚稻氮素利用率的影响。结果表明, 生物质炭与氮肥配施情况下, 2 个试验点不同生物质炭施用量处理间早稻产量均无显著差异, 但进贤试验点生物质炭施用量为 20 和 40 t · hm<sup>-2</sup> 处理晚稻产量分别比未施生物质炭对照提高 5.18% 和 7.95%, 而长沙试验点 3 个处理间晚稻产量无显著差异。在相同氮素水平下, 当生物质炭施用量为 40 t · hm<sup>-2</sup> 时, 2 个试验点土壤有机碳含量与未施生物质炭对照相比最高增幅均在 55% 以上; 施用生物质炭可提高酸性或弱酸性土壤 pH 值, 降低土壤容重; 施用生物质炭也可显著提高水稻氮肥利用率, 在 40 t · hm<sup>-2</sup> 施用水平下, 长沙和进贤试验点水稻氮肥吸收利用率分别提高 20.33 和 17.58 个百分点, 进贤试验点氮肥农学效率提高 39.81%。在酸性土壤中施用生物质炭可提高氮肥利用率, 保持水稻产量稳定或有一定的增产效果。

**关键词:** 秸秆; 生物质炭; 水稻土; 水稻; 产量; 氮素利用效率

**中图分类号:** X705; S156.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673 - 4831(2012)03 - 0288 - 06

**Effects of Wheat-Straw-Based Biochar on Yield of Rice and Nitrogen Use Efficiency of Late Rice.** QU Jing-jing<sup>1</sup>, ZHENG Jin-wei<sup>1</sup>, ZHENG Ju-feng<sup>1</sup>, ZHANG Xu-hui<sup>1</sup>, LI Lian-qing<sup>1</sup>, PAN Gen-xing<sup>1</sup>, JI Xiong-hui<sup>2</sup>, YU Xi-chu<sup>3</sup> (1. Institute of Resources, Ecosystem and Environment for Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Soil and Fertilizer Institute, Hunan Province, Changsha 410125, China; 3. Jiangxi Institute of Red Soil, Jiangxi Province, Jinxian 331717, China)

**Abstract:** Biochar prepared out of wheat straw was applied in reddish yellow paddy soil in Changsha of Hunan and red paddy soil in Jinxian of Jiangxi in a field experiment to explore for effects of biochar applied at a rate of 20 and 40 t · hm<sup>-2</sup>, separately on yields of early and late rice and nitrogen recovery efficiency of late rice. It was found that the early rice didn't respond much in yield to the combined application of nitrogen fertilizer and biochar, regardless of rate, in the two experiment sites, and neither the late rice in the experiment site of Changsha did, but the late rice at the experiment site of Jinxian did, increasing by 5.18% and 7.95%, separately, in the two treatments of 20 and 40 t · hm<sup>-2</sup> biochar. With the same N application rate, the treatments of 40 t · hm<sup>-2</sup> biochar in both experiment sites increased soil organic carbon by 55% or more over the control. Application of the biochar was found to increase pH in acid or weakly acid soil, lower soil bulk density and also increase nitrogen use efficiency of rice by 20.33 and 17.58 percentage point in the treatments of 40 t · hm<sup>-2</sup> biochar in the experiment sites of Changsha and Jinxian, respectively and nitrogen agronomic efficiency by 39.81% in Jinxian. The experiment demonstrates that biochar amendment in acid soil can stabilize or even increase rice yield and improve nitrogen use efficiency.

**Key words:** straw; biochar; paddy soil; rice; rice yield; nitrogen use efficiency

自 20 世纪 80 年代以来, 我国农业秸秆总量迅速增加, 秸秆露天焚烧现象也越来越严重<sup>[1-3]</sup>。据统计, 我国秸秆焚烧量超过  $2 \times 10^8$  t · a<sup>-1</sup>, 因秸秆焚烧而损失的氮、磷、钾相当于全国化肥总产量的 60% 左右<sup>[4]</sup>。因此, 推进秸秆综合利用产业化发展, 是我国农业和农村废弃物资源化利用面临的战略挑战。

生物质炭 (biochar) 是作物秸秆在限氧条件下

经低温热解炭化产生的一类高度芳香化难溶性固态物质<sup>[5]</sup>, 将其施入土壤可增加土壤有机质含量。生物质炭具有高度稳定性, 因而可提高碳在土壤中的封存时间。有研究表明将生物质炭施入土壤 100

收稿日期: 2011 - 11 - 21

基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项 (200903003)

① 通信作者 E-mail: lqli@njau.edu.cn

a 后仍会有至少 40% 的碳存留在土壤中<sup>[6]</sup>, 而且施用生物质炭可显著降低稻田土壤  $N_2O$  的排放<sup>[7-8]</sup>, 可将其作为当前农业固碳减排的有效措施<sup>[9]</sup>。此外, 生物质炭可提供作物生长所需要的氮、磷、钾、钙、镁等营养元素<sup>[10-12]</sup>。生物质炭具有大量的孔洞结构以及巨大的表面积和表面负电荷<sup>[13]</sup>, 具有超强的保留养分的功能, 能吸附水、土壤或沉积物中的无机离子及极性或非极性有机化合物, 促进植物对营养元素的吸收, 提高肥料的利用率<sup>[14-16]</sup>, CHAN 等<sup>[17]</sup> 研究发现生物质炭能够显著提高氮肥的利用效率。生物质炭与其他有机或无机肥料配合施用可提高作物产量<sup>[18-22]</sup>。目前, 已有的生物质炭稻田试验大多集中在对温室气体减排效应的研究方面<sup>[23-25]</sup>, 而有关施用生物质炭对水稻氮肥利用率的影响研究还较少。因此, 笔者研究在稻田施用生物质炭对水稻产量、土壤性状以及氮素利用率的影响, 以期为实现农业和农村废弃物的循环利用提供参考, 同时该研究对土壤固碳和改良及减少氮肥损

失也具有重要意义。

## 1 材料与与方法

### 1.1 试验区概况

野外试验点有 2 个: (1) 湖南省长沙县干杉乡大屋组 (28°08'18" N, 113°12'0" E), 海拔 42 m, 年均气温 17.1 °C, 年均降水量 1 500 mm, 土壤类型属于第四纪红色黏土发育的红黄泥水稻土, 典型的双季稻作区; (2) 江西省进贤县高桥村红壤研究所内 (116°20'24" N, 28°15'30" E), 海拔 26 m, 年均气温 17.7 °C, 年均降水量 1 400 mm, 土壤类型为第四纪红色黏土发育的潴育型水稻土, 双季稻作区。试验初始土壤基本化学性质见表 1。生物质炭基本理化性质为: 比表面积 (按过 0.85 mm 孔径筛计) 16.66  $m^2 \cdot g^{-1}$ , 容重 0.23  $g \cdot cm^{-3}$ , pH 值 9.85,  $w$  (有机碳) = 466.10  $g \cdot kg^{-1}$ ,  $w$  (全氮) = 4.30  $g \cdot kg^{-1}$ ,  $w$  (全磷) = 55.63  $g \cdot kg^{-1}$ ,  $w$  (全钾) = 15.87  $g \cdot kg^{-1}$ 。

表 1 供试水稻土表层 (0~20 cm) 土壤基本化学性质

Table 1 Basic chemical properties of the soils in the surface layer (0–20 cm) of the paddy fields studied

试验点	土壤类型	pH 值	$w/(g \cdot kg^{-1})$		$w/(mg \cdot kg^{-1})$		
			有机碳	全氮	速效磷	速效钾	碱解氮
长沙	红黄泥水稻土	6.21	18.76	1.79	10.07	99.33	151.03
进贤	红壤性水稻土	4.89	17.70	1.59	41.67	152.99	129.15

### 1.2 试验设计及田间管理

于 2010 年 4—11 月早、晚稻种植期间进行试验, 每个试验点均设 0、20 和 40  $t \cdot hm^{-2}$  3 个生物质炭施用水平 (表 2), 6 个处理, 每处理 3 个重复, 小区排布采用随机设计方法。长沙试验点小区面积为 8.8  $m^2$ , 早稻品种为中嘉早 17 号, 晚稻品种为 V227, 基本苗数为 25 万株  $\cdot hm^{-2}$ ; 进贤试验点小区

面积为 20  $m^2$ , 早稻品种为优工 98, 晚稻品种为汕优 96, 基本苗数为 30 万株  $\cdot hm^{-2}$ , 小区间用塑料薄膜隔离。生物质炭于早稻种植前施入, 早稻收割时留 5 cm 高残茬, 水稻插秧前田间均保持淹水状态。氮肥为尿素, 按 60% 作基肥施入, 其余均分别于分蘖期、抽穗期施入, 磷、钾肥施用量与当地习惯施用量相同, 耕作管理措施与当地大田相同。

表 2 不同处理的生物质炭施用量和施肥量

Table 2 Fertilizer and biochar application rates of different treatments

处理	生物质炭施用量/ ( $t \cdot hm^{-2}$ )	红黄泥水稻土施肥量/( $kg \cdot hm^{-2}$ )			红壤性水稻土施肥量/( $kg \cdot hm^{-2}$ )		
		N	$P_2O_5$	$K_2O$	N	$P_2O_5$	$K_2O$
C0N0	0	0	90	90	0	225	150
C1N0	20	0	90	90	0	225	150
C2N0	40	0	90	90	0	225	150
C0N1	0	240	90	90	300	225	150
C1N1	20	240	90	90	300	225	150
C2N1	40	240	90	90	300	225	150

### 1.3 土样的采集与测定<sup>[26]</sup>

土壤样品于晚稻收获后按对角线采样法在每个试验小区内用土钻取 0~20 cm 土层具有代表性

的样点 5 个, 混合均匀, 自然风干后磨细分别过 0.85 和 0.15 mm 孔径筛备用。用环刀法测定土壤容重。采用常规分析方法测定土壤理化性质: pH 值

采用电位法,  $V(\text{水}):m(\text{土})=5:1$ ;全氮采用凯氏定氮法;有机碳含量采用重铬酸钾容量法-外加加热法。

#### 1.4 水稻产量及其构成的测定

分别测定晚稻的有效穗数和千粒重以及早、晚稻产量。有效穗数测定方法:各试验小区选取长势一致的20株水稻植株,自抽穗期始,每周记录其穗数,直至达到稳定;千粒重测定方法:各小区随机取200粒种子用天平称量,计算1000粒水稻种子的质量;早、晚稻产量按各小区单打单收实测结果计。

#### 1.5 肥料的氮素利用率及农学利用率的计算

施入土壤的氮肥可转化为土壤氮肥力,其中的部分氮被作物吸收,氮肥吸收利用率(%)指作物地上部分吸收的氮素来自肥料的部分占施氮量的比例,计算公式为:氮肥吸收利用率=(施氮肥作物收获时地上部吸氮总量-未施氮肥作物收获时地上部吸氮总量)/化肥氮的投入量。

氮肥农学效率指单位施氮量相对无氮区所增加的作物籽粒产量,计算公式为:氮肥农学效率=(施氮肥区作物产量-无氮肥区作物产量)/施

氮量。

#### 1.6 数据处理

采用 Excel 2003 软件对试验数据进行统计处理,采用 SPSS 13.0 软件进行单因素方差分析和多重比较(LSD 检验)。

## 2 结果与分析

### 2.1 施用生物质炭对水稻产量的影响

由表3可知,生物质炭的施用可显著提高晚稻穗数和千粒重,2个试验点均以C2N1处理为最高。进贤试验点C2N1处理千粒重较C0N1处理提高7.17%,而长沙试验点2个处理间差异未达显著水平。在未施氮肥条件下,施用生物质炭对2个试验点早、晚稻产量均无显著影响,而生物质炭与氮肥配施可显著提高进贤试验点晚稻产量,C1N1和C2N1处理较C0N1处理分别提高5.18%和7.95%,而长沙试验点上述3个处理间早、晚稻产量均无显著差异。

表3 生物质炭对水稻穗数和产量的影响

Table 3 Effect of biochar amendment on number of panicles and rice yield

处理	穗数/(万·hm <sup>-2</sup> )		千粒重/g		早稻产量/(t·hm <sup>-2</sup> )		晚稻产量/(t·hm <sup>-2</sup> )	
	长沙	进贤	长沙	进贤	长沙	进贤	长沙	进贤
C0N0	275±0 <sup>c</sup>	360±5.3 <sup>c</sup>	25.25±0.65 <sup>c</sup>	25.50±0.44 <sup>c</sup>	5.08±0.07 <sup>b</sup>	5.60±0.16 <sup>b</sup>	6.38±0.40 <sup>b</sup>	6.67±0.14 <sup>c</sup>
C1N0	270±4.1 <sup>c</sup>	360±4.1 <sup>c</sup>	26.03±0.15 <sup>b</sup>	26.43±0.36 <sup>b</sup>	5.29±0.44 <sup>b</sup>	5.83±0.60 <sup>b</sup>	6.36±0.20 <sup>b</sup>	6.63±0.13 <sup>c</sup>
C2N0	295±4.1 <sup>d</sup>	390±8.7 <sup>c</sup>	26.33±0.15 <sup>b</sup>	26.62±0.28 <sup>b</sup>	5.00±0.15 <sup>b</sup>	5.86±0.52 <sup>b</sup>	6.36±0.71 <sup>b</sup>	6.80±0.18 <sup>c</sup>
C0N1	365±4.1 <sup>c</sup>	510±12.4 <sup>b</sup>	27.33±0.15 <sup>a</sup>	26.50±0.26 <sup>b</sup>	7.30±0.43 <sup>a</sup>	6.37±0.36 <sup>ab</sup>	7.85±0.26 <sup>a</sup>	7.92±0.29 <sup>b</sup>
C1N1	443±16.5 <sup>b</sup>	540±30.0 <sup>b</sup>	27.63±0.15 <sup>a</sup>	27.07±0.15 <sup>b</sup>	7.62±0.32 <sup>a</sup>	6.60±0.60 <sup>ab</sup>	7.74±0.52 <sup>a</sup>	8.33±0.14 <sup>a</sup>
C2N1	470±8.2 <sup>a</sup>	570±17.3 <sup>a</sup>	28.03±0.42 <sup>a</sup>	28.40±0.35 <sup>a</sup>	7.11±0.63 <sup>a</sup>	7.28±0.81 <sup>a</sup>	8.17±0.13 <sup>a</sup>	8.55±0.18 <sup>a</sup>

同列数据后英文小写字母不同表示处理间某指标差异显著( $P < 0.05$ )。各处理生物质炭施用量和施肥量见表2。

### 2.2 施用生物质炭对土壤理化性状的影响

表4显示,施用生物质炭可降低土壤容重,在未施氮肥条件下,与对照(C0N0)相比,2个试验点C2N0处理土壤容重均显著下降至最低水平。施用生物质炭可提高土壤pH值,在相同氮素水平下,2个试验点均以C2N0和C2N1处理pH值为最高,与对照相比,生物质炭施用量为40 t·hm<sup>-2</sup>时,土壤pH值均提高约0.3。施用生物质炭可增加土壤总有机碳含量,在相同氮素水平下,生物质炭施用量为40 t·hm<sup>-2</sup>时,长沙试验点土壤总有机碳含量与未施生物质炭对照相比最高增幅达55.73%,进贤试验点最高增幅达70.01%;生物质炭用量为20 t·hm<sup>-2</sup>时,仅长沙试验点在施氮量为240 kg·hm<sup>-2</sup>条件下提高27.59%,其他情况下无显著差异。进贤试验点C2N0处理土壤全氮含量比C0N0处理增加

9.14%,长沙试验点C1N1处理比C0N1处理增加8.48%。

### 2.3 施用生物质炭对水稻吸氮量及氮素利用效率的影响

表5显示,施用生物质炭可显著提高水稻的氮肥吸收利用率和农学利用率。2个试验点与氮肥配施处理晚稻植株茎叶、穗吸氮量基本上随生物质炭用量的增加而增加,其中长沙试验点C1N1和C2N1处理茎叶吸氮量和进贤试验点C1N1和C2N1处理穗吸氮量与C0N1处理间差异更具规律性。长沙试验点C2N1处理水稻氮肥吸收利用率较C0N1处理提高20.33个百分点;进贤试验点C1N1和C2N1处理水稻氮肥吸收利用率较C0N1处理分别提高7.21和17.58个百分点,氮肥农学效率分别提高35.97%和39.81%。

表4 施用生物质炭对土壤理化性状的影响

Table 4 Effect of biochar amendment on soil physical and chemical properties

处理	土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )		pH 值		w(有机碳)/(g·kg <sup>-1</sup> )		w(全氮)/(g·kg <sup>-1</sup> )	
	长沙	进贤	长沙	进贤	长沙	进贤	长沙	进贤
C0N0	0.91±0.05 <sup>a</sup>	1.20±0.04 <sup>a</sup>	5.92±0.14 <sup>b</sup>	5.14±0.02 <sup>b</sup>	18.51±0.75 <sup>d</sup>	16.37±0.18 <sup>c</sup>	1.61±0.01 <sup>c</sup>	1.75±0.06 <sup>d</sup>
C1N0	0.82±0.09 <sup>a</sup>	1.12±0.09 <sup>a</sup>	6.16±0.07 <sup>ab</sup>	5.16±0.03 <sup>b</sup>	20.55±1.52 <sup>cd</sup>	18.10±0.86 <sup>c</sup>	1.68±0.05 <sup>abc</sup>	1.80±0.02 <sup>cd</sup>
C2N0	0.78±0.03 <sup>b</sup>	1.04±0.12 <sup>b</sup>	6.22±0.09 <sup>ab</sup>	5.46±0.03 <sup>a</sup>	25.14±3.25 <sup>ab</sup>	27.83±0.32 <sup>a</sup>	1.70±0.07 <sup>abc</sup>	1.91±0.02 <sup>a</sup>
C0N1	0.87±0.04 <sup>a</sup>	1.19±0.02 <sup>a</sup>	6.01±0.06 <sup>ab</sup>	4.88±0.05 <sup>c</sup>	18.05±1.20 <sup>d</sup>	16.48±0.54 <sup>c</sup>	1.65±0.06 <sup>bc</sup>	1.83±0.02 <sup>bc</sup>
C1N1	0.81±0.03 <sup>ab</sup>	1.09±0.07 <sup>ab</sup>	6.15±0.02 <sup>ab</sup>	4.99±0.13 <sup>c</sup>	23.03±1.42 <sup>bc</sup>	19.29±0.66 <sup>c</sup>	1.79±0.09 <sup>a</sup>	1.89±0.02 <sup>ab</sup>
C2N1	0.79±0.03 <sup>ab</sup>	1.11±0.07 <sup>a</sup>	6.29±0.15 <sup>a</sup>	5.12±0.01 <sup>b</sup>	28.11±2.14 <sup>a</sup>	25.43±2.89 <sup>b</sup>	1.73±0.09 <sup>ab</sup>	1.89±0.04 <sup>ab</sup>

同列数据后英文小写字母不同表示处理间某指标差异显著( $P < 0.05$ )。各处理生物质炭施用量和施肥量见表2。

表5 不同处理对晚稻吸氮量及氮素吸收利用效率的影响

Table 5 Effects of different biochar treatments on N use efficiency and total N uptake by rice

处理	茎叶吸氮量/(kg·hm <sup>-2</sup> )		穗吸氮量/(kg·hm <sup>-2</sup> )		氮肥吸收利用率/%		氮肥农学效率/(kg·kg <sup>-1</sup> )	
	长沙	进贤	长沙	进贤	长沙	进贤	长沙	进贤
C0N0	20.85±3.76 <sup>c</sup>	24.50±1.86 <sup>c</sup>	72.88±13.57 <sup>bc</sup>	84.01±9.44 <sup>d</sup>				
C1N0	16.77±0.79 <sup>c</sup>	25.88±3.94 <sup>c</sup>	74.38±1.29 <sup>bc</sup>	110.52±20.76 <sup>c</sup>				
C2N0	23.09±4.58 <sup>c</sup>	24.86±2.65 <sup>c</sup>	59.79±4.67 <sup>c</sup>	85.29±2.73 <sup>d</sup>				
C0N1	52.11±6.83 <sup>b</sup>	61.08±7.51 <sup>b</sup>	122.97±21.19 <sup>a</sup>	157.75±9.25 <sup>b</sup>	33.90±1.90 <sup>b</sup>	36.77±3.85 <sup>c</sup>	5.81±1.06 <sup>a</sup>	4.17±0.83 <sup>b</sup>
C1N1	73.34±3.94 <sup>a</sup>	95.50±18.82 <sup>a</sup>	115.29±2.98 <sup>ab</sup>	172.83±4.94 <sup>b</sup>	40.61±3.75 <sup>b</sup>	43.98±0.65 <sup>b</sup>	6.04±0.24 <sup>a</sup>	5.67±0.29 <sup>a</sup>
C2N1	82.61±8.25 <sup>a</sup>	74.74±9.49 <sup>b</sup>	130.43±22.49 <sup>a</sup>	198.50±8.48 <sup>a</sup>	54.23±6.00 <sup>a</sup>	54.35±4.35 <sup>a</sup>	7.52±2.45 <sup>a</sup>	5.83±0.01 <sup>a</sup>

同列数据后英文小写字母不同表示处理间某指标差异显著( $P < 0.05$ )。各处理生物质炭施用量和施肥量见表2。

### 3 讨论

施用生物质炭能明显改变稻田土壤的理化性质,显著提高土壤有机碳、全氮含量,增加土壤 pH 值,降低土壤容重,为水稻生长提供更优条件。生物质炭本身含碳量在 50% 以上,高度芳香化结构使其具有更高的生物化学和热稳定性<sup>[6]</sup>,施用生物质炭可显著提高土壤稳定性碳库贮量。当生物质炭 pH 值为 9.85,施用量为 40 t·hm<sup>-2</sup> 时,可显著提高酸性较强的进贤红壤性水稻土的 pH 值。MBAGWU 等<sup>[27]</sup> 研究发现,将 450 g·kg<sup>-1</sup> 阔叶树的生物质炭施入不同质地的土壤后,土壤 pH 值从 5.4 增至 6.6。此外,生物质炭的容重为 0.23 g·cm<sup>-3</sup>,大量施用可有效降低土壤容重,促进作物根系生长<sup>[28]</sup>,增加生物量,增强植株对水分和养分的吸收能力,进一步提高植株对不良环境的适应能力,这对于改良黏质土壤质地具有重要作用。

氮素是决定水稻产量最重要的因素<sup>[29]</sup>,在缺氮肥情况下是制约水稻生长的主要因子。生物质炭含有一定量的有效氮,但笔者试验中供试生物质炭有效氮含量仅为 12.6~32.2 mg·kg<sup>-1</sup>,将其单独施入水稻田远不能满足水稻生长对氮的需求。ASAI 等<sup>[30]</sup> 发现在不施氮肥情况下施用生物质炭,水稻叶片叶绿素含量会降低,从而降低作物产量。在未施氮肥条件下,2 个试验点不同生物质炭施用量处理

间早、晚稻产量均无显著差异。生物质炭与氮肥配施对进贤试验点早稻产量无显著影响,但能显著提高晚稻千粒重和产量,而长沙试验点早、晚稻产量均未显著增加。MAJOR 等<sup>[31]</sup> 2003 年在哥伦比亚热带草原氧化土中施用生物质炭后,发现除第 1 年外,后 3 a 玉米产量连续提高,且玉米增产与玉米吸收的钙、镁呈显著正相关关系。江西红壤酸性较强,土壤中钙、镁等盐基离子淋失强烈,生物质炭中丰富的钾、钙、镁等可能对其水稻增产起了重要作用。此外,产量的增加可能与施用生物质炭提高土壤 pH 值,在一定程度上减轻红壤中铝的毒害有关<sup>[32-33]</sup>。同时,由于生物质炭 C/N 比值较高,其对产量的影响与氮肥施用量及土壤本身的含氮量水平密切相关。ASAI 等<sup>[30]</sup> 研究发现与氮肥配合施用生物质炭,水稻产量随其用量的增多而增加,但当生物质炭施用量达 16 t·hm<sup>-2</sup> 时,水稻因氮素缺乏而致产量不再增加。进贤红壤性水稻土肥力明显高于长沙红黄泥水稻土,且其氮肥施用量也高于后者,这可能也是进贤试验点施用生物质炭后水稻增产的重要原因,但是水稻产量并不是无限制的随生物质炭用量的增加而增加。此外,有研究表明生物质炭的增产效应仅可持续约 3 a<sup>[31]</sup>,具有一定的时效性。由此可见,生物质炭的产量效应受生物质炭本身的特性、施用时间、作物和土壤的类型、土壤肥力特征以及农田施肥管理措施等多方面因素的综合影响。

施用生物质炭可有效提高水稻氮素吸收利用率和农学利用率。LEHMANN<sup>[34]</sup>对巴西亚马逊河流域 TP(terra preta) 土壤的研究发现,在生物质炭和肥料配施情况下,土壤对  $\text{NH}_4^+$  的吸附与固持作用明显增强,水稻对氮素的利用效率显著提高。这可能是由于生物质炭含有丰富的有机大分子和发达的孔隙结构,施入土壤后较易形成大的团聚体,且能够通过提高土壤的阳离子交换量来增强对阳离子的吸附,从而可有效控制土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 的淋失,提高土壤的保肥能力,而这部分养分又可在植物生长过程中不断释放,供植物吸收利用<sup>[32,35-36]</sup>。由此可见,生物质炭对土壤中的氮素具有吸持和缓释的作用,可有效提高作物对氮肥的吸收利用率,减少氮肥流失,达到农业生产的稳产增产、资源循环利用和环境污染控制的多重效果。

#### 4 结论

生物质炭施入土壤后能不同程度地降低土壤容重,提高酸性或弱酸性土壤的 pH 值以及土壤有机碳、全氮等养分含量。生物质炭与化肥的适量配合施用可保持水稻产量稳定或在一定程度上有增产效果,同时可有效提高作物对氮肥的吸收利用率,减少氮素流失。但是生物质炭对水稻产量和氮肥利用率的影响因生物质炭特性、土壤状况以及作物种类和肥料管理措施等因素而存在诸多不确定性,其影响机理还有待建立生物质炭长期定位试验以进行系统深入的研究。

#### 参考文献:

- [1] 曹国良,张小曳,王亚强,等. 中国区域农田秸秆露天焚烧排放量的估算[J]. 科学通报,2007,52(15):1826-1831.
- [2] 苏继峰,朱彬,周韬,等. 秸秆焚烧导致南京及周边地区2次空气污染事件的成因比较[J]. 生态与农村环境学报,2012,28(1):37-41.
- [3] 厉青,张丽娟,吴传庆,等. 基于卫星遥感的秸秆焚烧监测及对空气质量影响分析[J]. 生态与农村环境学报,2009,25(1):32-37.
- [4] 花莉,张成,马宏瑞,等. 秸秆生物质炭土地利用的环境效益研究[J]. 生态环境学报,2010,19(10):2489-2492.
- [5] GAUNT J L, LEHMANN J. Energy Balance and Emissions Associated With Biochar Sequestration and Pyrolysis Bioenergy Production[J]. Environmental Science and Technology, 2008, 42(11): 4152-4158.
- [6] LEHMANN J, GAUNT J. Biochar Sequestration in Terrestrial Ecosystems: A Review[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2006, 11(2): 403-427.
- [7] ZHANG A-Feng, CUI Li-qiang, PAN Gen-xing. Effect of Biochar Amendment on Yield and Methane and Nitrous Oxide Emissions From a Rice Paddy From Tai Lake Plain, China[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2010, 139(4): 469-475.
- [8] CAVIGELLI M A, ROBERTSON G P. Role of Denitrifier Diversity in Rates of Nitrous Oxide Consumption in a Terrestrial Ecosystem[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2001, 33(3): 297-310.
- [9] 潘根兴,张阿凤,邹建文,等. 农业废弃物生物黑炭转化还田作为低碳农业途径的探讨[J]. 生态与农村环境学报,2010,26(4):394-400.
- [10] GASKIN J W, STEINER C, HARRIS K, et al. Effect of Low-Temperature Pyrolysis Conditions on Biochar for Agricultural Use[J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(6): 2061-2069.
- [11] CHUN Y, SHENG G Y, CHIOU C T, et al. Compositions and Sorptive Properties of Crop Residue-Derived Chars[J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(17): 4649-4655.
- [12] 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.
- [13] 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(5): 1719-1730.
- [14] MIZUTA K, MASTUMOTO T, HATATE K, et al. Removal of Nitrate Nitrogen From Drinking Water Using Bamboo Powder Charcoal[J]. Bioresource Technology, 2004, 95(3): 255-257.
- [15] KWON S, PIGNATELLO J. Effect of Natural Organic Substances on the Surface and Adsorptive Properties of Environmental Black Carbon(Biochar): Pseudo Pore Block Age by Model Lipid Components and Its Implications for  $\text{N}_2$ -Probed Surface Properties of Natural Sorbets[J]. Environmental Science and Technology, 2005, 39(20): 932-97939.
- [16] SMERNIK R J, KOOKANA R S, SKJEMSTAD J O. NMR Characterization of  $^{13}\text{C}$  Benzene Sorbed to Natural and Prepared Charcoals[J]. Environmental Science and Technology, 2006, 40(6): 1764-1769.
- [17] CHAN K Y, VAN ZWIETEN L, MESZAROS I, et al. Agronomic Values of Green Waste Biochar as a Soil Amendment[J]. Australian Journal of Soil Research, 2007, 45(8): 629-634.
- [18] 刘瑾, 邹建国. 生物燃料的发展现状和前景[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1339-1353.
- [19] GLASER B, LEHMANN J, 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.
- [20] GLASER B. Manioc Peel and Charcoal: A Potential Organic Amendment for Sustainable Soil Fertility in the Tropics[J]. Biology and Fertility of Soils, 2005, 41(1): 15-21.
- [21] ISWARAN V, JAUHRI K S, SEN A. Effect of Charcoal, Coal and Peat on the Yield of Moong, Soybean and Pea[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1980, 12(2): 191-192.
- [22] SON T K, LEE J E, KIM S K, et al. Effect of a Mixture of Charcoal and Pyrolygneous Acid Applied to the Soil at Different Fertilizer Levels on the Growth and Yield of Rice[J]. Japanese Journal of Crop Science, 2003, 72(3): 345-349.
- [23] RONDON M, RAMIREZ J A, LEHMANN J. Charcoal Additions Re-

- duce Net Emissions of Greenhouse Gases to the Atmosphere [C] // Proceedings of the 3<sup>rd</sup> USDA Symposium on Greenhouse Gases and Carbon Sequestration in Agriculture and Forestry. Baltimore, MD, 2005, March 21 - 24; 208.
- [24] KNOBLAUCH C, MARIFAAT A A, HAEFELE M S. Biochar in Rice-Based System; Impact on Carbon Mineralization and Trace Gas Emissions [C/OL]. [2012 - 01 - 21]. <http://www.biocharinternational.org/?008/conference/Posters>.
- [25] YANAI Y, TOYOTA K, OKAZAKI M. Effects of Charcoal Addition on N<sub>2</sub>O Emissions From Soil Resulting From Rewetting Air-Dried Soil in Short-Term Laboratory Experiments [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, 53(2): 181 - 188.
- [26] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 36 - 37.
- [27] MBAGWU J S C, PICCOLO A, SPALLACCI P. Effects of Field Applications of Organic Wastes From Different Sources on Chemical, Biological and Structural Properties of Some Italian Surface Soils [J]. *Bioresource Technology*, 1991, 37(1): 71 - 78.
- [28] POST W M, PENG T H, EMANUEL W R, *et al.* The Global Carbon Cycle [J]. *American Scientist*, 1990, 78(4): 310 - 326.
- [29] 罗雅慧, 李赛慧. 水稻施肥技术 [J]. *现代农业科技*, 2007, 17(126): 172.
- [30] 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.
- [31] MAJOR J, RONDON M, MOLINA D, *et al.* Maize Yield and Nutrition During 4 Years After Biochar Application to a Colombian savanna Oxisol [J]. *Plant and Soil*, 2010, 333(1): 117 - 128.
- [32] LEHMANN J, DASILVA J P, RONDON M, *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 and Soil*, 2003, 249(2): 343 - 357.
- [33] YAMATO M, OKIMORI Y, WIBOWO I F, *et al.* Effects of the Application of Charred Bark of *Acacia mangium* on the Yield of Maize, Cowpea and Peanut, and Soil Chemical Properties in South Sumatra, Indonesia [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2006, 52(4): 489 - 495.
- [34] LEHMANN J. Biochar (Black Carbon) Stability and Stabilization in Soil [C] // *Soil Science: Confronting New Realities in the 21<sup>st</sup> Century*. Bangkok: 7<sup>th</sup> World Congress of Soil Science, 2002: 1 - 12.
- [35] GLASER B, HAUMAIE L, GUGGENBERGER G, *et al.* Black Carbon in Soils; The Use of Benzene Carboxylic Acids as Specific Markers [J]. *Organic Geochemistry*, 1998, 29(4): 811 - 819.
- [36] GLASER B, GUGGENBERGER G, HAUMAIER L, *et al.* Black Carbon in Terra Preta Soils of the Brazilian Amazon Region [R]. LPI Contribution, Report, 1999: 100.

**作者简介:** 曲晶晶 (1986—), 女, 山东威海人, 硕士生, 主要研究方向为农田土壤碳氮循环。E-mail: qujingjing\_0917@126.com