

¹⁵N 示踪法研究生物炭施用对水稻—土壤系统氮肥去向的影响

陈照明¹, 王强¹, 刘晓霞², 林海忠³, 何杰³, 俞巧钢¹, 马军伟¹

(1.浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021;

2.浙江省耕地质量与肥料管理总站, 杭州 310020; 3.浙江省台州市黄岩区农业技术推广中心, 浙江台州 318020)

摘要:为探究施用水稻秸秆生物炭对水稻产量、氮肥利用率、氮肥残留及损失的影响,采用盆栽试验结合¹⁵N示踪技术,分析了施用水稻秸秆生物炭对水稻生物量、氮素积累量、肥料氮去向以及氨氧化微生物的影响。研究共设置5个处理:不施氮肥(N0)、单施化肥(CF)、施化肥配施0.5%生物炭(BC1)、施化肥配施1%生物炭(BC2)和施化肥配施2%生物炭(BC3)。结果表明:与CF处理相比,BC2和BC3处理均显著提高水稻产量,增产率分别为19.3%和22.0%。施用生物炭显著增加水稻氮素积累量和表观利用率。施用生物炭的水稻籽粒肥料氮积累和总肥料氮积累量较CF处理分别提高18.6%~23.4%和18.5%~26.5%。然而,施用生物炭处理与CF处理之间的籽粒土壤氮吸收量没有显著差异。BC1、BC2和BC3处理的氮肥利用率分别为30.4%、28.5%和29.3%,均显著高于CF处理(24.1%)。施用生物炭有利于肥料氮在土壤中的残留,从而减少损失。因此,施用生物炭的肥料氮损失率(25.7%~27.5%)显著低于单施化肥处理(38.4%)。与CF处理相比,高量施用生物炭(BC3)显著降低氨氧化细菌的*amoA*基因拷贝数,但施用生物炭对氨氧化古菌丰度没有显著影响。综上所述,施用水稻秸秆生物炭是提高水稻产量和氮肥利用率,同时还是有效减少氮素损失的一种有效措施。

关键词:生物炭;水稻;氮肥利用率;氮肥去向

中图分类号:S158.3

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)02-0331-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.02.042

Effects of Biochar Application on Fate of Nitrogen Fertilizer in Rice—Soil System by the ¹⁵N Tracer Method

CHEN Zhaoming¹, WANG Qiang¹, LIU Xiaoxia²,

LIN Haizhong³, HE Jie³, YU Qiaogang¹, MA Junwei¹

(1. Institute of Environmental Resource, Soil and Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021; 2. Zhejiang Cultivated Land Quality and Fertilizer Administration Station, Hangzhou 310020; 3. Huangyan Agricultural Technology Extension Center, Taizhou, Zhejiang 318020)

Abstract: This study aimed to investigate the effects of rice straw-derived biochar application on rice grain yield, nitrogen use efficiency (NUE), and fate of fertilizer N. A pot experiment was conducted to assess the effects of rice straw-derived biochar application on rice biomass, N accumulation, as well as fate of urea-N using ¹⁵N tracing method and ammonia oxidizers. Five treatments were included: no N application (N0), chemical fertilizer application only (CF), CF+0.5% biochar (BC1), CF+1% biochar (BC2), and CF+2% biochar (BC3). The results showed that BC2 and BC3 treatments significantly increased rice grain yield by 19.3% and 22.0%, compared to CF treatment, respectively. Application of biochar significantly enhanced the N accumulation of rice and N apparent use efficiency compared to CF treatment. The fertilizer N uptake by grain and rice plant was 18.6%~23.4% and 18.5%~26.5% greater in biochar application than in CF treatment, respectively. While, no significant difference was observed in the soil N uptake by grain between BC treatments (BC1, BC2, and BC3) and CF treatment. The ¹⁵N use efficiency was 30.4%, 28.5%, and 29.3% in the BC1, BC2, and BC3 treatments, respectively, which were all significantly higher than that in

收稿日期:2021-10-10

资助项目:浙江省自然科学基金项目(LQ19C150005);浙江省重点研发计划项目(2019C02017, 2020C02030-06, 2021C02035);黄岩区农业绿色发展先行先试支持体系建设服务项目(HY202001)

第一作者:陈照明(1986—),男,博士,助理研究员,主要从事农田氮素循环机理研究。E-mail:zhmchen@aliyun.com

通信作者:王强(1979—),男,博士,副研究员,主要从事作物营养与高效施肥技术研究。E-mail:qwang0571@126.com

CF treatment (24.1%). Application of straw-derived biochar increased the fertilizer N residual in soil and reduced the N loss, compared to CF treatment. Thus, the ratio of fertilizer N loss was greatly lower in BC treatment (25.7%~27.5%) than in CF treatment (38.4%). Higher application of biochar (BC3) significantly decreased the AOB *amoA* gene copies, compared to CF treatment. While, no significant difference was found in AOA abundance between the BC and CF treatments. Overall, application of rice straw-derived biochar is an effective practice to increase rice yield and NUE, and reduce the N loss in the rice production.

Keywords: biochar; rice; nitrogen use efficiency; fate of fertilizer N

水稻(*Oryza Sativa* L.)是我国最重要的粮食作物之一,对保障国内粮食安全具有重要的意义^[1-2]。施用氮肥是提高水稻产量的主要手段^[3]。为追求水稻高产,农民往往施用大量的化肥,尤其是氮肥^[4]。然而,氮肥大量施用并未明显提高水稻产量,反而引起一系列环境问题,同时还会造成资源浪费^[5]。因此,如何在保证水稻产量的前提下提高水稻氮肥利用率同时减少氮肥损失,是目前水稻生产上亟需解决的问题。

生物炭是由有机物料在厌氧或无氧条件下经高温裂解制备而成的固体^[6]。生物炭具有较高的碳含量,性状比较稳定,不易被土壤微生物分解^[7]。因此,生物炭施入土壤中可以改善土壤物理化学性状,提高土壤肥力^[8]。此外,生物炭还具有丰富的多微孔结构和较大比表面积的特点,可以吸附固定肥料,进而提高养分利用率,减少肥料损失^[9]。有研究^[10-11]表明,施用生物炭能够提高作物产量,改善土壤状况,提升土壤肥力。张爱平等^[12]采用田间试验发现,与只施氮肥处理相比,生物炭配施氮肥显著提高水稻产量,且产量随生物炭施用量增加而增加。但是 Liu 等^[13]认为,施用生物炭对于水稻增产的作用很有限。这是因为生物炭对水稻产量的影响受生物炭种类、土壤类型、施用年限及气候条件等因素的影响^[11,14]。此外,生物炭对水稻氮素吸收影响的研究也存在矛盾的地方。有研究^[15]认为,由于生物炭含碳量高,施入土壤后促进微生物对氮的固持,从而减少作物对氮素的吸收,最终导致作物减产。然而,陈曦等^[16]研究认为,施用生物炭可以提高稻田土壤的铵态氮和硝态氮含量,满足水稻生长发育的氮素需求。

目前国内外对生物炭施用下水稻产量、氮肥利用率、土壤肥力的影响的研究较多,然而对于施用生物炭对肥料氮在土壤—水稻系统中定量分配相关研究还不多。因此,探明水稻秸秆生物炭施用对水稻氮肥利用率、氮肥残留及损失的影响,对于水稻氮肥高效利用具有重要意义。本研究利用稳定同位素(¹⁵N)示踪技术研究水稻秸秆生物炭使用对肥料氮在水稻—土壤系统中去向的影响,旨在为水稻绿色生产提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试土壤采集自浙江省台州市,当地主要种植方式为水稻—西兰花轮作。在西兰花收获后取 0—20 cm 耕层土壤,自然风干后过 2 mm 筛,备用。该区域土壤为滩涂土壤,成土母质为新浅海沉积物。供试土壤的基本理化性质为:pH 7.3,有机质含量 37.2 g/kg,全氮含量 1.3 g/kg,碱解氮含量 160.5 mg/kg,有效磷含量 23.6 mg/kg,速效钾含量 185.1 mg/kg。供试生物炭以水稻秸秆为原料,在厌氧条件下经 500 °C 高温裂解而成。水稻秸秆生物炭的基本理化性质为:pH 9.4,有机碳含量 670.0 g/kg,全氮含量 14.2 g/kg。供试水稻品种为“甬优 1540”,由宁波种子有限公司提供;供试¹⁵N 标记的氮肥为尿素(46% N,丰度 10.15%),由上海化工研究院提供;供试磷、钾肥分别为过磷酸钙(12% P₂O₅)和氯化钾(60% K₂O),市售。

1.2 试验设计

试验于 2020 年 7—11 月在浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所温室内进行。试验共设置 5 个处理:(1)不施氮肥(N0);(2)单施化肥(CF);(3)施肥+施用 0.5% 生物炭(BC1);(4)施肥+施用 1% 生物炭(BC2);(5)施肥+施用 2% 生物炭(BC3)。每个处理重复 3 次。采用塑料桶(直径 20 cm,高 20 cm)进行盆栽试验。每桶装入过 2 mm 筛的土壤 6 kg(干重)。对于 N0 处理,磷钾肥作基肥一次混匀施用;对于剩余 4 个处理(CF 处理和施用生物炭处理),氮肥分 2 次施用(基肥:穗肥为 5:5),磷钾肥作基肥一次施入。处理 2~处理 5 的氮肥、磷肥和钾肥施用量一致,分别为 N 180 mg/kg 干土、P₂O₅ 50 mg/kg 干土和 K₂O 120 mg/kg 干土。相应的肥料、生物炭和土壤混匀后,填入桶中;随后加入蒸馏水,使土壤保持淹水状态,平衡 2 天后进行水稻移栽,每盆移栽 2 株。在水稻整个生育周期,除晒田期和收获前 1 个星期,桶内田面水保持 3~5 cm 高度。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 植株样品采集及¹⁵N 丰度测定 在水稻成熟后采集植株样品,将水稻植株样品分为籽粒、秸秆和根三部分。新鲜植株样品在烘箱内 105 °C 下杀青 30

min, 然后在 70 °C 下烘至恒重, 测定干物质质量。烘干的水稻样品粉碎后过 0.15 mm 的筛子, 备用。籽粒和秸秆的全氮与 ^{15}N 丰度采用元素分析仪 (Costech ECS 4024, Costech 分析技术公司, 意大利) 耦合同位素质谱仪 (Delta V Advantage, 赛默飞世尔科技公司, 美国) 进行测定。

1.3.2 土壤样品采集及 ^{15}N 丰度测定 在水稻样品采集后, 将塑料桶内土壤全部倒出混合均匀, 取 50 g 土壤样品, 样品分为 2 部分: 一部分置于室内自然风干, 剩余部分土壤样品保存在 -20 °C 冰箱里, 用于 DNA 的提取。风干后的土壤样品研磨后过 0.15 mm 筛子, 用于全氮和 ^{15}N 丰度的测定。土壤全氮和 ^{15}N 丰度采用元素分析仪 (Costech ECS 4024, Costech 分析技术公司, 意大利) 耦合同位素质谱仪 (Delta V Advantage, 赛默飞世尔科技公司, 美国) 进行测定。

1.3.3 土壤总 DNA 提取及实时荧光定量 PCR 称取 0.5 g 新鲜土壤, 利用 Fast DNA SPIN Kit for Soil 试剂盒, 按照说明书来提取土壤总 DNA。使用 CFX96 Real-Time System (Bio-Rad Laboratories, USA) 进行定量 PCR (qPCR)。氨氧化细菌的引物序列为 amoA-1F (GCGGGTTTCTACT-GGTGGT) 和 amoA-2R (CCCCTTCGGGAAAGCCTTCTTC)^[17]; 氨氧化古菌的引物分别为 crenamoA23f (ATG-GTCTGGCTWAGACG) 和 crenamoA616r (GC-CATCCATCTGTATGTCCA)^[18]。qPCR 的反应体系为 20 μL : 包含 10 μL 的 SYBR Premix Ex Taq (Takara Biotechnology, 日本)、各 0.3 μL 的正向和反向引物、1 μL 的模板和 8.4 μL 的灭菌水。阴性对照采用灭菌水作为模板。每个样品重复 3 次。

1.4 计算公式

氮肥表观利用率、氮肥利用率、氮肥残留率及损失率等相关指标计算公式^[19]为:

氮肥表观利用率 (%) = (施氮区植株总氮积累量 - 不施氮区植株总氮积累量) / 施氮量 \times 100%

植株氮素来自肥料氮的比例 (%) = (植株 ^{15}N 丰度 - 0.366) / (氮肥 ^{15}N 丰度 - 0.366) \times 100%

植株中来自肥料的氮量 (g/盆) = 植株氮积累量 \times 植株氮素来自肥料氮的比例 / 100

氮肥利用率 (%) = 植株吸收的肥料氮量 / 施氮量 \times 100%

土壤中氮肥残留量 (g/盆) = 土壤全氮含量 \times 土壤干重 \times (土壤 ^{15}N 丰度 - 0.366) / (氮肥 ^{15}N 丰度 - 0.366) / 1000

氮肥残留率 (%) = 土壤中氮肥残留量 / 施氮量 \times 100%

氮肥损失量 (g/盆) = 施氮量 - 植株吸收的肥料

氮量 - 土壤中肥料氮残留量

氮肥损失率 (%) = 氮肥损失量 / 施氮量 \times 100%

1.5 数据分析

试验数据采用 Excel 2016 进行整理, 采用 SPSS 20.0 软件进行统计分析, 以 Duncan 法进行多重比较, 差异显著性水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 施用水稻秸秆生物炭对水稻生物量的影响

由表 1 可知, 施用氮肥显著提高水稻产量、秸秆生物量和总生物量。与 CF 处理相比, 施用 1% 生物炭 (BC2) 和 2% 生物炭 (BC3) 分别增加水稻产量 19.3% 和 22.0%; 而 BC1 处理对水稻产量没有显著影响。BC1 处理的水稻秸秆生物量最高, 且显著高于 CF 处理、BC2 处理和 BC3 处理。施用生物炭处理相较于常规施肥处理提高水稻根生物量 60.0% ~ 95.0%。施用水稻生物炭的水稻总生物量为 79.2 ~ 82.8 g/盆, 均显著高于常规施肥处理 (CF)。

表 1 施用水稻生物炭对水稻籽粒产量、秸秆、根及总生物量的影响 单位: g/盆

处理	籽粒	秸秆	根	总生物量
N0	22.3 \pm 1.5c	18.0 \pm 2.9c	1.4 \pm 0.2c	41.8 \pm 1.2c
CF	37.2 \pm 5.3b	28.0 \pm 1.1b	2.0 \pm 0.1bc	67.2 \pm 5.2b
BC1	40.8 \pm 3.9ab	38.1 \pm 2.4a	3.9 \pm 1.1a	82.8 \pm 4.4a
BC2	44.3 \pm 1.9a	31.6 \pm 1.9b	3.2 \pm 1.1ab	79.2 \pm 2.6a
BC3	45.3 \pm 2.0a	31.9 \pm 1.8b	3.9 \pm 1.1a	81.2 \pm 1.1a

注: 表中数据为平均值 \pm 标准差; 同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.2 施用水稻秸秆生物炭对水稻氮素累积的影响

由表 2 可知, 施用氮肥显著提高水稻籽粒、秸秆、根及总的氮素累积量。生物炭施用处理的籽粒氮素累积量为 0.50 ~ 0.52 g/盆, 且均显著高于 CF 处理 (0.42 g/盆)。BC1 处理的秸秆氮素累积量最高, 且显著高于其他处理; 但是剩余施肥处理间 (CF、BC2 和 BC3 处理) 没有显著差异。与常规施肥相比, 生物炭施用显著增加水稻根系的氮素累积量。生物炭施用处理 (BC1、BC2 和 BC3) 的总氮素累积量分别为 0.76, 0.69, 0.70 g/盆, 较 CF 处理分别增加 28.6%, 16.3%, 18.1%。施用生物炭相较于 CF 处理氮肥表观利用率增加 38.9% ~ 68.4%。

表 2 施用水稻生物炭对水稻氮素累积量和氮肥表观利用率的影响

处理	单盆氮素累积量/g				氮肥表观利用率/%
	籽粒	秸秆	根	总	
N0	0.23 \pm 0.02c	0.10 \pm 0.02c	0.008 \pm 0.001c	0.34 \pm 0.04c	—
CF	0.42 \pm 0.07b	0.16 \pm 0.00b	0.012 \pm 0.002b	0.59 \pm 0.07b	22.9 \pm 6.8b
BC1	0.52 \pm 0.07a	0.22 \pm 0.03a	0.023 \pm 0.005a	0.76 \pm 0.05a	38.6 \pm 4.9a
BC2	0.50 \pm 0.02a	0.17 \pm 0.02b	0.022 \pm 0.006a	0.69 \pm 0.03a	31.2 \pm 2.5a
BC3	0.51 \pm 0.02a	0.16 \pm 0.02b	0.024 \pm 0.007a	0.70 \pm 0.03a	32.9 \pm 2.6a

2.3 施用水稻秸秆生物炭对水稻肥料氮和土壤氮吸收的影响

由表 3 可知,施用生物炭处理相较于 CF 处理显著提高了籽粒对肥料氮的吸收,对土壤氮的吸收也有所提高,但未达到显著水平。对于水稻秸秆肥料氮和土壤氮的吸收,均是 BC1 处理最高,且显著高于其他处理。高量生物炭处理(BC3)的根系肥料氮吸收量

表 3 施用水稻秸秆生物炭对水稻肥料氮和土壤氮吸收的影响

单位:g/盆

处理	肥料氮吸收量				土壤氮吸收量			
	籽粒	秸秆	根	总	籽粒	秸秆	根	总
CF	0.20±0.02b	0.058±0.006b	0.003±0b	0.26±0.03b	0.22±0.05a	0.10±0b	0.009±0.002b	0.33±0.04b
BC1	0.23±0.02a	0.088±0.012a	0.006±0.002ab	0.33±0.01a	0.28±0.05a	0.13±0.01a	0.017±0.004a	0.43±0.04a
BC2	0.24±0.01a	0.066±0.011b	0.006±0.002ab	0.31±0.02a	0.26±0.01a	0.10±0.01b	0.016±0.005ab	0.38±0.01ab
BC3	0.24±0.01a	0.065±0.006b	0.007±0.002a	0.32±0.01a	0.27±0.01a	0.10±0.01b	0.017±0.005a	0.38±0.02ab

2.4 施用水稻秸秆生物炭对肥料氮去向的影响

从表 4 可以看出,施用生物炭的氮肥利用率分别为 30.4%,28.5%和 29.3%,均显著高于 CF 处理的 24.1%。37.5%~45.8%的氮肥残留在土壤中,且与 CF 处理相比,施用生物炭(BC1 处理除外)显著提高土壤中

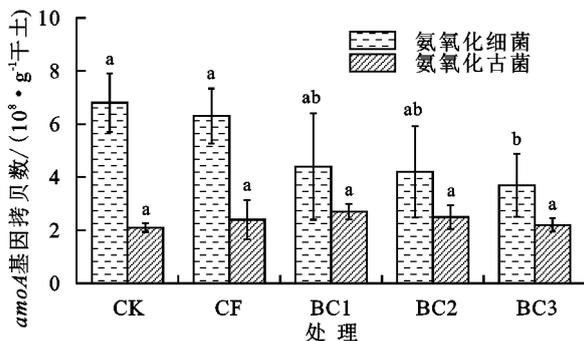
显著高于 CF 处理,但低量和中量生物炭处理(BC1 和 BC2)与 CF 处理之间无显著差异。生物炭施用处理(BC1、BC2 和 BC3)的水稻根系土壤氮吸收量为 0.016~0.017 g/盆,高于 CF 处理的 0.009 g/盆。与 CF 处理相比,BC1 处理显著促进水稻对土壤氮的吸收。然而,BC2 和 BC3 处理的水稻中总土壤氮吸收量与 CF 处理均无显著差异。

表 4 施用水稻秸秆生物炭对肥料氮(¹⁵N)去向的影响

处理	水稻肥料氮吸收量/ (g·盆 ⁻¹)	氮肥 利用率/%	肥料氮残留量/ (g·盆 ⁻¹)	残留率/%	氮肥损失量/ (g·盆 ⁻¹)	氮肥 损失率/%
CF	0.26±0.03b	24.1±2.8b	0.40±0.03b	37.5±2.7b	0.41±0.01a	38.4±0.9a
BC1	0.33±0.01a	30.4±1.2a	0.45±0.03ab	42.1±2.4ab	0.30±0.03b	27.5±2.9b
BC2	0.31±0.02a	28.5±1.4a	0.49±0.10a	45.8±1.7a	0.28±0.10b	25.7±9.7b
BC3	0.32±0.01a	29.3±1.0a	0.48±0.01a	44.9±0.8a	0.28±0.01b	25.8±1.0b

2.5 施用水稻秸秆生物炭对氨氧化微生物的影响

从图 1 可以看出,氨氧化细菌(3.7×10⁸~6.8×10⁸/g 干土)的 *amoA* 基因拷贝数高于氨氧化古菌(1.5×10⁸~2.7×10⁸/g 干土)。与 CF 处理相比,BC3 处理显著降低氨氧化细菌的 *amoA* 基因拷贝数,但 B1 和 B2 处理对氨氧化细菌 *amoA* 基因拷贝数没有显著影响。施用生物炭处理(BC1、BC2 和 BC3)与 CF 处理间的氨氧化古菌 *amoA* 基因拷贝数没有显著差异。CK 处理与 CF 处理之间的氨氧化微生物丰度没有显著差异。



注:不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

图 1 施用水稻秸秆生物炭对氨氧化细菌和古菌 *amoA* 基因拷贝数的影响

肥料氮的残留量和残留率,这说明施用生物炭有较好的保肥性。CF、BC1、BC2 和 BC3 处理的氮肥损失量分别为 0.41,0.30,0.28,0.28 g/盆。施用生物炭处理相较于 CF 处理氮肥损失率降低 28.5%~33.0%。

3 讨论

生物炭在农业生产上已有广泛的应用,但应用效果不尽相同。有研究^[5,20]表明,施用生物炭可以促进水稻生长,提高水稻产量。也有报道^[21]认为,施用生物炭不会提高水稻产量,甚至还可能引起水稻减产。这是因为生物炭对水稻产量的影响会受土壤类型、生物炭种类、生物炭施用年限、气候等因素的影响^[5,22]。有研究^[23]认为,生物炭具有较高的 C/N,施入土壤后会引引起土壤速效氮的微生物固持,从而影响水稻早期生长发育养分供应不足,最终引起减产。结果表明,施用生物炭处理比单施化肥处理增加 9.9%~22.0%的水稻产量(表 1)。类似地,Dong 等^[24]采用田间试验研究发现,与单施尿素相比,尿素配施生物炭显著提高水稻产量 12.9%。生物炭能够改善土壤环境、提高土壤养分含量、促进水稻生长,从而提高水稻产量^[10,14,25]。眭锋等^[1]认为生物炭通过影响稻田土壤氮素有效性,从而影响水稻的产量。

本研究显示,施用水稻秸秆生物炭显著增加水稻籽粒氮素积累量和总氮积累量。张爱平等^[12]对宁夏引黄灌区水稻研究发现,施用生物炭配施尿素相较于

单施尿素显著提高水稻地上部总吸氮量,且随生物炭施用量增加而增加;向伟等^[26]也研究认为,与施用化肥处理相比,施用化肥配施 10 t/hm² 生物炭显著增加水稻总吸氮量 10.2%~10.4%,使得施用生物炭处理的氮肥表观利用率显著高于单施化肥处理。在本研究中,施用生物炭处理的氮肥表观利用率为 31.2%~38.6%,显著高于 CF 处理的 22.9%(表 2),这与张爱平等^[12]研究结果一致;同时韩晓日等^[27]研究发现,施用生物炭显著提高玉米氮肥表观利用率。此外,笔者采用¹⁵N 示踪技术研究发现,施用生物炭显著促进水稻对肥料氮的吸收。这可能的原因是生物炭具有多孔结构,还具有较大的比表面积,前期能够固定铵态氮和硝态氮,后期可以释放无机氮供作物吸收利用,从而提高氮肥利用率^[28-29]。同时,结果显示生物炭处理的 AOB *amoA* 基因拷贝数低于 CF 处理。施用生物炭还可能通过降低 AOB 丰度来抑制土壤硝化作用,从而减少氮肥损失,最终提高水稻氮肥利用率。Wang 等^[30]研究认为,施用生物炭能够降低 AOB 丰度和多样性而抑制土壤硝化作用,从而促进作物生长和氮肥利用。王鸿浩等^[31]研究发现,施用生物炭显著降低 AOB 丰度,但提高 *nosZ* 基因丰度,从而减少稻田土壤 N₂O 排放损失。本研究还证明施用生物炭提高肥料氮在土壤中的残留,起到保肥的效果。

在本研究中,对于施用生物炭处理,采用差减法得到的氮肥表观利用率(31.2%~38.6%)高于¹⁵N 示踪法计算得到的(28.5%~30.4%);然而,在 CF 处理中,2 种方法计算得到的氮肥利用率相似。这说明施用生物炭促进肥料氮(¹⁵N)的吸附固持,同时也促进土壤氮的矿化^[17]。固持的肥料氮在水稻生长发育过程中能不断释放出来供水稻吸收利用,从而提高水稻中肥料氮的积累量。施用生物炭还可通过吸附铵态氮来减少稻田氨挥发损失,从而提高氮肥利用率^[32]。此外,本研究还显示,施用生物炭有增加水稻对土壤氮吸收利用的趋势(表 3)。当然,水稻所吸收的未标记 N 中可能有一小部分来自水稻秸秆生物炭。但是,Xie 等^[33]利用¹⁵N 标记的小麦秸秆生物炭进行盆栽试验研究表明,生物炭中所含的氮素生物有效性极低,仅有 2% 能被水稻吸收利用。本研究表明,与 CF 处理相比,施用生物炭显著降低氮肥损失率。许堃等^[29]研究发现,施用生物炭相较于不施用生物炭显著提高油菜中肥料氮的积累量,减少肥料氮的损失。生态碳具有的孔隙结构可以延长肥料氮的释放,以供作物吸收利用,提高氮肥利用、减少氮肥损失^[34]。Huang 等^[35]采用¹⁵N 示踪技术研究发现,与单施化肥处理相比,施用生物

炭减少氮肥损失率 9~10 个百分点。

4 结论

(1)施用水稻秸秆生物炭相较于单施化肥可以提高水稻产量,增产率为 9.9%~22.0%,且较高生物炭施用量(1%和 2%)的增产效果更明显。

(2)施用生物炭不仅提高水稻氮素积累量,还提高氮肥表观利用率。与单施化肥处理相比,施用生物炭促进水稻对肥料氮的吸收,提高肥料氮的利用率。

(3)施用水稻秸秆生物炭还增加肥料氮在土壤中的留存,同时显著降低氮肥的损失率。

(4)施用生物炭可能通过降低氨氧化细菌的丰度来抑制土壤硝化作用,从而减少氮肥损失,提高氮肥的作物吸收利用,不过该机制还需进一步进行研究。

参考文献:

- [1] 睦锋,廖萍,黄山,等.施用生物炭对双季水稻产量和氮素吸收的影响[J].核农学报,2018,32(10):2062-2068.
- [2] 梁传斌,李建国,沈枫,等.移栽密度和施用生物炭对水稻产量的影响[J].中国土壤与肥料,2021,23(2):240-247.
- [3] 柳瑞,Hafeez A,李恩琳,等.减氮配施稻秆生物炭对稻田土壤养分及植株氮素吸收的影响[J].应用生态学报,2020,31(7):2381-2389.
- [4] Xu N, Tan G C, Wang H Y, et al. Effect of biochar additions to soil on nitrogen leaching, microbial biomass and bacterial community structure[J].European Journal of Soil Biology,2016,74(3):1-8.
- [5] 荣飞龙,蔡正午,覃莎莎,等.酸性稻田添加生物炭对水稻生长发育及产量的影响:基于 5 年大田试验[J].生态学报,2020,40(13):4413-4423.
- [6] Clough T J, Condon L M. Biochar and the nitrogen cycle: Introduction[J].Journal of Environment Quality,2010,39(4):1218-1223.
- [7] Zhao X, Wang J W, Wang S Q, et al. Successive straw biochar application as a strategy to sequester carbon and improve fertility: A pot experiment with two rice/wheat rotations in paddy soil[J].Plant and Soil,2014,378(1/2):279-294.
- [8] Zhang A, Bian R, Pan G X, et al. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles[J].Field Crops Research,2012,127(3):153-160.
- [9] Liu Q, Zhang Y H, Liu B J, et al. How does biochar influence soil N cycle? A meta-analysis[J].Plant and Soil,2018,426(1/2):211-225.
- [10] Ding Y, Liu Y G, Liu S B, et al. Biochar to improve soil fertility. A review[J].Agronomy for Sustainable Development,2016,36(2):36-55.

- [11] Biederman L A, Harpole W S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: A meta-analysis[J]. *GCB Bioenergy*, 2013, 5(2): 202-214.
- [12] 张爱平, 刘汝亮, 高霁, 等. 生物炭对宁夏引黄灌区水稻产量及氮素利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(5): 1352-1360.
- [13] Liu X Y, Zhou J S, Chi Z Z, et al. Biochar provided limited benefits for rice yield and greenhouse gas mitigation six years following an amendment in a fertile rice paddy[J]. *Catena*, 2019, 179(8): 20-28.
- [14] Huang M, Fan L, Jiang L G, et al. Continuous applications of biochar to rice: Effects on grain yield and yield attributes[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(3): 563-570.
- [15] 陈盈, 张满利, 刘宪平, 等. 生物炭对水稻齐穗期叶绿素荧光参数及产量构成的影响[J]. *作物杂志*, 2016, 32(3): 94-98.
- [16] 陈曦, 江贻伟, 丁洁, 等. 生物炭施用对节水灌溉稻田土壤氮素含量及脲酶活性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(19): 268-274.
- [17] Bello M O, Thion C, Gubry-Rangin C, et al. Differential sensitivity of ammonia oxidising archaea and bacteria to matric and osmotic potential[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 129: 184-190.
- [18] Rotthauwe J, Witzel K, Liesack W. The ammonia monooxygenase structural gene *amoA* as a functional marker: Molecular fine-scale analysis of natural ammonia-oxidizing populations[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, 63(12): 4704-4712.
- [19] Zhang A F, Cui L Q, Pan G X, et al. 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.
- [20] 杨星莲, 刘磊, 廖萍, 等. 生物炭对双季水稻产量和土壤性状的持续效应[J]. *江西农业大学学报*, 2021, 43(3): 497-503.
- [21] 王悦满, 冯彦房, 杨林章, 等. 水热及裂解生物炭对水稻产量及氮素利用率的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(8): 755-761.
- [22] 史登林, 王小利, 刘安凯, 等. 黄壤稻田土壤微生物量碳氮及水稻品质对生物炭配施氮肥的响应[J]. *环境科学*, 2021, 42(1): 443-449.
- [23] 廖萍, 睦锋, 汤军, 等. 施用生物炭对双季稻田综合温室效应和温室气体排放强度的影响[J]. *核农学报*, 2018, 32(9): 1821-1830.
- [24] Dong D, Feng Q, McGrouther K, et al. Effects of biochar amendment on rice growth and nitrogen retention in a waterlogged paddy field[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(1): 153-162.
- [25] 黄雁飞, 陈桂芬, 熊柳梅, 等. 不同秸秆生物炭对水稻生长及土壤养分的影响[J]. *南方农业学报*, 2020, 51(9): 2113-2119.
- [26] 向伟, 王雷, 刘天奇, 等. 生物炭与无机氮配施对稻田温室气体排放及氮肥利用率的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(22): 4634-4645.
- [27] 韩晓日, 葛银凤, 李娜, 等. 连续施用生物炭对土壤理化性质及氮肥利用率的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2017, 48(4): 382-398.
- [28] 王洪媛, 盖霞普, 翟丽梅, 等. 生物炭对土壤氮循环的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2016, 36(19): 5998-6011.
- [29] 许堃, 党秀丽, 董旭, 等. ¹⁵N 示踪法研究生物炭施用对油菜氮素吸收和转运的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 197-207.
- [30] Wang Z Y, Zong H Y, Zheng H, et al. Reduced nitrification and abundance of ammonia-oxidizing bacteria in acidic soil amended with biochar [J]. *Chemosphere*, 2015, 138: 576-583.
- [31] 王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 等. 不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N₂O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2021, 42(8): 3943-3952.
- [32] Wang Z Y, Chen L, Sun F L, et al. Effects of adding biochar on the properties and nitrogen bioavailability of an acidic soil [J]. *European Journal of Soil Science*, 2017, 68(4): 559-572.
- [33] Xie Z B, Xu Y P, Liu G, et al. Impact of biochar application on nitrogen nutrition of rice, greenhouse-gas emissions and soil organic carbon dynamics in two paddy soils of China[J]. *Plant and Soil*, 2013, 370(1/2): 527-540.
- [34] 吴佩聪, 张鹏, 单颖, 等. 秸秆炭化还田对热带土壤-水稻体系氮挥发的影响[J]. *浙江农业学报*, 2021, 33(4): 678-687.
- [35] Huang M, Yang L, Qin H D, et al. Fertilizer nitrogen uptake by rice increased by biochar application[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(6): 997-1000.