



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

向伟¹, 王雷¹, 刘天奇¹, 李诗豪¹, 翟中兵³, 李成芳^{1,2}

(¹华中农业大学植物科学技术学院/农业农村部长江中游作物生理生态与耕作重点开放实验室, 武汉 430070; ²长江大学/湖北省主要粮食作物协同创新中心, 湖北荆州 434023; ³鄂东南现代农业展示中心, 湖北武穴 435415)

摘要:【目的】生物炭作为比表面积大、富含多种营养元素的一种物质已被广泛应用于农业生产。弄清生物炭与化肥氮配合施用对稻田温室气体排放和氮肥利用率的综合影响, 为合理使用生物炭提供科学依据。【方法】在武穴市花桥镇进行两年大田试验, 设置4个处理, 即不施氮肥(CK)、常规施氮(180 kg·hm⁻²)(IF)、常规施氮+10 t·hm⁻²生物炭(IF+C)、减氮30%+10 t·hm⁻²生物炭(RIF+C)。采用静态箱-气相色谱法对2018和2019年水稻生长季节稻田CH₄和N₂O排放通量进行监测, 并测定水稻产量, 探讨生物炭配施不同量无机氮对稻田CH₄和N₂O排放、水稻产量以及氮肥利用率的影响。【结果】(1) 稻季CH₄和N₂O排放呈现明显的季节性变化规律。CH₄排放峰值主要出现在分蘖期和齐穗期, N₂O排放峰值主要出现在氮肥施用和排水后。2018和2019年稻季各处理CH₄排放通量分别为0.01—48.97 mg·m⁻²·h⁻¹和0.36—18.08 mg·m⁻²·h⁻¹, N₂O排放通量分别为-0.002—0.17 mg·m⁻²·h⁻¹和0.01—0.28 mg·m⁻²·h⁻¹。2018年各处理CH₄和N₂O的平均排放通量分别为6.17—7.16 mg·m⁻²·h⁻¹和0.02—0.04 mg·m⁻²·h⁻¹, 2019年的分别为5.16—5.83 mg·m⁻²·h⁻¹和0.05—0.08 mg·m⁻²·h⁻¹。(2) 与CK相比, 无机氮肥的施用对CH₄排放没有影响, 但显著提高了N₂O排放, 增幅为32.6%—113.0%。与IF处理相比, 生物炭与无机氮配施(IF+C、RIF+C)显著降低N₂O排放, 在2018年降幅为33.4%—43.1%, 2019年为37.0%—39.5%, 但对CH₄排放的影响不显著, 因此对全球增温潜势的影响不显著。生物炭与无机氮配施处理IF+C与RIF+C间CH₄和N₂O排放差异不显著。CH₄排放是综合增温潜势(GWP)的主要贡献者, 对GWP的贡献达84.4%—95.2%。(3) 氮肥施用显著提高水稻产量, 增幅达4.0%—6.0%。与IF处理相比, 生物炭处理(IF+C、RIF+C)显著增加水稻产量, 增幅达9.9%—11.9%。生物炭与无机氮配施处理IF+C与RIF+C间水稻产量差异不显著。与IF处理相比, IF+C、RIF+C处理氮肥利用率显著增加了7.7%—8.1%, 且RIF+C的氮肥偏生产力两年分别增加了57.1%、52.3%。【结论】减氮30%配施生物炭能有效地降低稻田N₂O排放、增加水稻产量、提高氮肥利用率, 是一项可持续的农艺措施。但生物炭对稻田温室气体减排的效应还要进一步研究探讨。

关键词: 生物炭; CH₄; N₂O; 增温潜势; 氮肥利用率; 水稻产量

Effects of Biochar Plus Inorganic Nitrogen on the Greenhouse Gas and Nitrogen Use Efficiency from Rice Fields

XIANG Wei¹, WANG Lei¹, LIU TianQi¹, LI ShiHao¹, ZHAI ZhongBing³, LI ChengFang^{1,2}

(¹College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Cultivation in the Middle Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070; ²Yangtze University/ Collaborative Innovation Center of Major Grain Crops in Hubei Province, Jingzhou 434023, Hubei; ³Modern Agriculture Exhibition Center in Southeast Hubei Province, Wuxue 435415, Hubei)

收稿日期: 2020-03-21; 接受日期: 2020-05-28

基金项目: “十三五”国家重点研究计划(2017YFD0301403)、国家自然科学基金(31671637)、湖北省自然科学基金(2018CFB608)

联系方式: 向伟, E-mail: 754771491@qq.com. 通信作者李成芳, Tel: 027-87103061; E-mail: lichengfang@126.com

Abstract: 【Objective】 Biochar has been widely used in agricultural production due to large specific surface area and high concentrations in a variety of nutrients. The aim of this study was to investigate effects of biochar plus Inorganic nitrogen on the greenhouse gas and nitrogen use efficiency from rice fields, so as to provide a scientific basis for the proper use of biochar. 【Method】 A 2-years field trials in Huanqiao town Wuxue city were set up to investigate the effects of biochar combined with different amounts of inorganic nitrogen on CH_4 and N_2O emissions, grain yield and nitrogen use efficiency from paddy fields. Four treatments included no nitrogen (CK), conventional inorganic nitrogen ($180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) (IF), conventional inorganic nitrogen+ $10 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ biochar (IF+C), and 30% reduction of inorganic nitrogen+ $10 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ biochar (RIF+C). The CH_4 and N_2O emission fluxes from paddy soils were determined by static chamber-gas chromatography method, and the grain yield was also determined. 【Result】 (1) There were obvious seasonal trends in CH_4 and N_2O emissions during the rice growing seasons of 2018 and 2019. The CH_4 fluxes peaked at the tillering and heading panicle stages, and the N_2O fluxes peaked just after N fertilization and field drainage. The CH_4 fluxes ranged from $0.01 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ to $48.97 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ in 2018 and $0.36 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ to $18.08 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ in 2019, and the N_2O fluxes were -0.002 - $0.17 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ in 2018, and 0.01 - $0.28 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ in 2019. Average CH_4 fluxes were 6.17 - $7.16 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ in 2018 and 5.16 - $5.83 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ in 2019, and average N_2O fluxes were 0.02 - $0.04 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ in 2018 and 0.05 - $0.08 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ in 2019. (2) Compared with CK, the application of inorganic nitrogen fertilizers did not affect CH_4 emissions, but increased N_2O emissions by 32.6%-113.0%. Compared with IF, biochar treatments (IF+C and RIF+C) did not affect CH_4 emissions, but significantly decreased N_2O emissions by 33.4%-43.1% in 2018 and by 37.0%-39.5% in 2019. There was no difference in global warming potential (GWP) between IF and biochar treatments. No significant differences in CH_4 and N_2O emissions were observed between IF+C and RIF+C. CH_4 emissions played in a dominant in GWP, accounting for 84.4%-95.2% of the seasonal GWP. (3) Nitrogen fertilization significantly increased rice grain yields by 4.0%-6.0%. Compared with IF treatment, biochar treatments (IF+C and RIF+C) significantly increased rice grain yield by 9.9%-11.9%. There was no significant difference in rice grain yield between IF+C and RIF+C. Compared with IF treatment, IF+C and RIF+C treatment significantly increased nitrogen use efficiency by 7.7%-8.1%. Nitrogen partial productivity under RIF+C was increased by 57.1% and 52.3% in two years, respectively. 【Conclusion】 The treatment of biochar + 30% reduction of inorganic nitrogen was a sustainable agronomic measure to effectively reduce N_2O emission and to increase rice yield and nitrogen use efficiency in rice fields. However, the mitigating effect of biochar on greenhouse gas emission from rice fields should be further studied.

Key words: biochar; CH_4 ; N_2O ; global warming potential; nitrogen use efficiency; rice yield

0 引言

【研究意义】随着世界人口的不断增加, 人类活动加剧, 全球气候发生了巨大改变。大气 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的含量显著增加^[1], 其中全球农业生态系统每年排放的温室气体占人为活动所排放的温室气体的 $1/10$ — $1/8$ ^[2]。随着人口的增多, 为解决人多地少的矛盾, 增施化肥已经成为粮食增产的重要手段。但氮肥大量施用, 作物产量未明显增加, 反而造成一系列的环境问题^[3]。【前人研究进展】生物炭是一种比表面积大、孔隙度高^[4], 富含有多种营养元素的高含碳物质^[5-6], 其能明显改善土壤的理化性质, 降低土壤容重以及改变土壤 pH^[7]。同时, 生物炭具有强吸附性, 可以吸附土壤离子^[8-9], 且作为肥力元素的载体, 避免肥料的流失, 延长肥效期^[10], 因此其被广泛应用于农业生产。然而, 由于生物炭氮肥配施比例、生物炭类型与热裂解条件、土壤本身理化性质的差异, 生物炭与化肥配施对作物产量和氮肥利用率产生的影响也不尽相同^[11]。因此, 适宜的生物炭与化肥比例配施需要根

据具体土壤类型来确定^[7]。曲晶晶等^[12]通过大田试验发现, 单施生物炭 ($20 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 或 $40 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) 对水稻产量无显著影响, 而生物炭配施氮肥 ($300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 能提高水稻产量、氮肥利用率, 并减少氮素流失。张爱平等^[13]通过大田试验指出, $9 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭配施无机氮肥 ($300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 较单施无机氮肥可使水稻增产 44.89%, 并且水稻产量因子和氮肥利用率均有显著增加。然而, ASAI 等^[14]通过田间试验发现, 无机氮肥 ($50 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 配施生物炭 ($4 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$), 水稻产量不增反减。此外, 生物炭与无机氮配施对稻田温室气体排放影响的研究结果也存在争议。FENG 等^[15]通过在稻田中添加 $24 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 在不同温度 (300°C 、 400°C 、 500°C) 裂解生成的生物炭, 发现其与无机氮肥 ($250 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 配施能有效地降低稻田 CH_4 排放。XIE 等^[16]通过微区试验则发现, 2%生物炭和无机氮肥 ($40 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 配施对始成土和老成土稻田 CH_4 排放均未产生明显影响。李露等^[17]发现无论是 $20 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 还是 $40 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的生物炭配施氮肥都能显著地减少稻麦轮作系统 N_2O 排放, 其中 $40 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭配施氮肥的减排效

果最好。而廖萍等^[18]研究发现, 20 t·hm⁻²生物炭与无机氮(120 kg·hm⁻²)配施对早晚稻田 N₂O 排放无显著影响。【本研究切入点】目前国内外已有大量有关生物炭配施无机氮肥对稻田温室气体排放或氮肥利用率影响的研究, 然而其研究结果不一致^[15-19], 且较少综合分析生物炭与无机氮肥配施对稻田温室气体排放和氮肥利用率的影响。因此, 探明生物炭配施无机氮肥对稻田温室气体排放和氮肥利用率的综合影响, 对于水稻可持续生产具有重要的意义。【拟解决的关键问题】本研究通过两年的大田试验, 探究生物炭与无机氮配施对稻田温室气体排放、水稻产量与氮肥利用率的影响, 旨在为农业环境保护提供理论指导, 进而为减缓全球气候变化提供新思路。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验于 2018 年 5 月至 2019 年 10 月进行。试验点位于武穴市花桥镇兰杰村(115°30'E, 29°55'N), 所用水稻品种为黄华占(*Oryza sativa* L.)。该区地属长江中游稻区, 海拔 20 m, 亚热带季风气候, 年均温 16.8℃, 年降雨量 1 278.7—1 442.6 mm, 泥沙田, 潜育型水稻土, 为第四纪红土沉积物发育。试验点土壤(0—20 cm 土层)基本理化性质为 pH 6.27、容重 1.12 g·cm⁻³、有机碳 22.7 g·kg⁻¹、全氮 1.63 g·kg⁻¹、铵态氮 50.75 mg·kg⁻¹和硝态氮 2.31 mg·kg⁻¹。本试验所用生物炭为江苏艾格尼斯环境科技有限公司提供, 以果壳、椰壳为原料, 采用高温水蒸汽活化工艺在 450℃下生产, 经过破碎或筛选以后处理精加工制成的颗粒活性炭。其基本性质见表 1。

表 1 生物炭基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of biochar used					
pH	全氮 Total N (%)	全碳 Total C (%)	比表面积 Specific surface area (m ² ·g ⁻¹)	灰分 Ash (%)	孔径 Pore diameter (nm)
9.45	1.02	44.81	27.31	5.11	8.12

1.2 试验设计

本试验完全随机区组设计, 共 4 个处理, 分别为不施氮肥(CK)、常规施氮(IF)、常规施氮+10 t·hm⁻²生物炭(IF+C)、减氮 30%+10 t·hm⁻²生物炭(RIF+C)。3 次重复, 小区面积为 5 m×6 m=30 m², 小区田埂用黑色薄膜包裹防止串水串肥, 每个小区设独立的灌水

口。此外, 处理间种植 1 m 保护行, 进一步防止处理间水肥互串。

6 月初育秧, 7 月初进行人工移栽, 10 月初进行收获, 每穴 3 株, 插秧尺寸为 25 cm×25 cm。水稻移栽前进行土壤翻耕, 深度 15—20 cm。对于 IF 和 IF+C 处理, 水稻生育期施肥水平为 180 kg N·hm⁻²、90 kg P₂O₅·hm⁻²和 180 kg K₂O·hm⁻²; 其中对于氮肥, 50%做基肥, 20%做分蘖肥, 30%做穗肥, 而磷肥、钾肥为底肥一次性施入; 对于 IF+C 处理, 10 t·hm⁻²生物炭与氮肥用量的 50%作为基肥在移栽前一起通过翻耕混入土壤; 对于 RIF+C 处理, 氮肥总量较 IF+C 处理减少 30%, 施肥方式与其他肥料施用量、生物炭施用量均与 IF+C 处理一致; 对于 CK 处理, 不施用氮肥和生物炭, 90 kg P₂O₅·hm⁻²磷肥和 180 kg K₂O·hm⁻²钾肥为底肥一次性施入。水稻生长期间, 田间水位保持在 3—5 cm。在分蘖盛期排水晒田一周用以控无效分蘖, 之后复水, 水稻收获前 10 d 排水晒干。

1.3 植株采集与氮肥利用率计算

在成熟期每小区随机划定一个 1 m² 区域, 用以统计水稻分蘖数, 计算得到平均分蘖数后, 于成熟期根据平均分蘖数随机选取 8 兜具有代表性的水稻植株, 杀青、烘干、称重。同时, 收割每个小区中央 5 m² 水稻, 脱粒, 风干, 按 13.5%水分含量折算产量。

植株全氮采用浓硫酸-高氯酸消煮法^[20]测定。采用如下的方法计算氮肥利用率和氮肥偏生产力^[21]:

吸氮量(kg·hm⁻²)=Σ各部位干物质重(茎、叶、穗)×各部位含氮量;

氮肥利用率(%)=(施肥处理地上部吸氮量-不施肥处理地上部吸氮量)/施氮量;

氮肥偏生产力(kg·kg⁻¹)=籽粒产量/施氮量。

1.4 温室气体采集与测定

稻田 CH₄、N₂O 排放采用静态暗箱-气相色谱法测定^[22]。采样箱箱体由聚乙烯材料制成(直径 0.38 m, 箱高 50 cm 或 110 cm, 依据株高选择)。箱外包裹一层铝膜珍珠棉保温膜, 箱体顶部连接一个三通阀用于采气。同时, 箱内顶部安置 4 个小风扇以充分混合箱内气体, 并安装一个温度计用以测定箱内温度。水稻移栽后每 7—10 d 采样一次。采样的具体日期和频率视肥料的施用和降水适当调整。选择 8: 00—11: 00 采气用以测定当日气体通量。采集时, 将采样箱放入已事先插入土壤 5 cm 深处的不锈钢底座(外缘四周凹槽, 内径 2.5 cm, 高 8 cm), 采集气体前加水注入底

槽用以密封。静态箱放置完毕后, 分别在第 0、10、20、30 min 使用 20 mL 注射器进行一次气体收集, 每次采集 20 mL, 将采集的气体注入事先抽真空的玻璃小瓶中, 同时记载采样箱内的温度和高度, 带回室内用气相色谱仪进行浓度测定。气体通量按如下公式进行计算:

$$F = \rho \times h \times dc/dt \times 273 / (273 + T)$$

式中, F 为 CH_4 或 N_2O 排放通量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); ρ 为标准状态下 CH_4 或 N_2O 密度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$); h 为密闭箱到水面的距离 (m); dc/dt 为 CH_4 或 N_2O 浓度的变化率; T 为采样过程中箱内平均温度 ($^{\circ}\text{C}$)。 N_2O 或 CH_4 累积排放量采用内插法测定^[21], 具体计算公式为:

$$\text{CE} = \sum [(F_i + F_{i+1}) / 2 \times 10^{-3} \times d \times 24 \times 10]$$

式中, CE 是气体 (N_2O 或 CH_4) 累积排放量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), F_i 和 F_{i+1} 为两个连续相邻采样时期的气体排放通量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), d 是两个连续相邻采样时间所相隔的天数。

在 100 年时间尺度上, CH_4 和 N_2O 的增温潜势分别为 28 和 265^[1], 因此全球增温潜势 $\text{GWP} (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ 按以下公式计算:

$$\text{GWP} = (\text{CE}_{\text{CH}_4} \times 28) + (\text{CE}_{\text{N}_2\text{O}} \times 265)。$$

1.5 数据处理与统计分析

运用 Microsoft Excel 2016 对原始数据进行整理。

采用 SPSS 17.0 软件的 One-way ANOVA 对处理间测量指标的进行差异分析, 采用 General Linear Model 程序的 Repeated Measures 对温室气体排放通量进行重复测量方差分析, 并采用 Duncan 法进行显著性水平检验 ($P < 0.05$)。所有测定结果数据均以 3 次重复的平均值 \pm 标准差来表达。

2 结果

2.1 生物炭与无机氮配施对稻田 CH_4 排放的影响

从图 1 可知, 在水稻全生育期, CH_4 排放主要集中在分蘖期和齐穗期。在水稻分蘖盛期, CH_4 排放达到最大峰值, 随后晒田控无效分蘖, CH_4 排放明显减少。在稻田复水后, CH_4 排放逐渐增加。水稻收获前的落干期, CH_4 排放明显降低。然而 2019 年由于后期雨水较多, CH_4 排放不减反增。2018 和 2019 年稻季各处理 CH_4 排放通量变化分别为 0.01—48.97 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 0.36—18.08 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。重复测定方差分析结果显示, 2018 年 CH_4 排放受时间、时间与处理交互作用显著影响, 2019 年受时间显著影响 (表 2, $P < 0.01$)。2018 年 CK、IF、IF+C、RIF+C 处理 CH_4 平均排放通量分别为 (6.21 \pm 2.09)、(6.17 \pm 1.89)、(7.16 \pm 1.79)、(6.52 \pm 2.08) $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 2019 年分别为 (5.24 \pm 1.64)、(5.16 \pm 1.70)、(5.83 \pm 1.64)、(5.71 \pm 1.73) $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

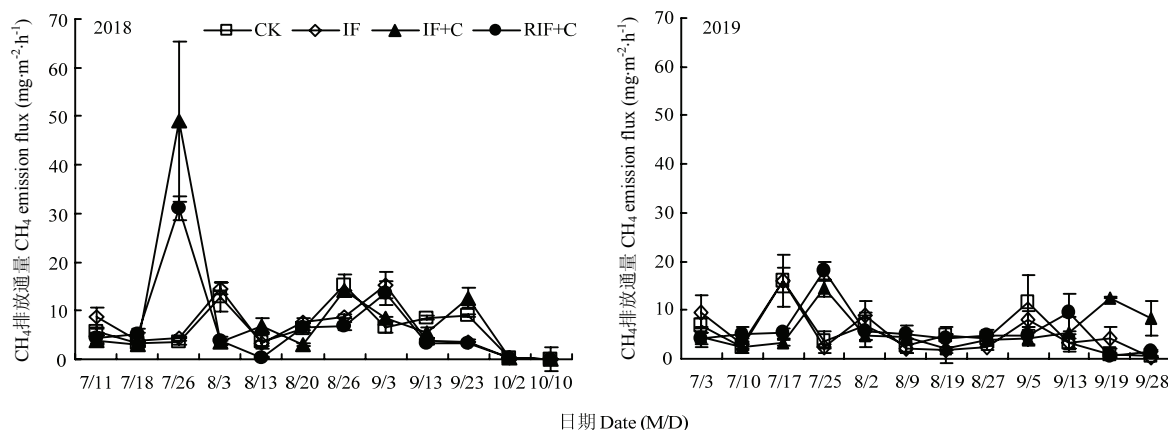


图 1 2018 和 2019 年稻季不同处理 CH_4 排放通量的变化

Fig. 1 Changes in N_2O emission fluxes from paddy fields under different treatments in 2018 and 2019

2.2 生物炭与无机氮配施对稻田 N_2O 排放的影响

在氮肥施用和排水后即出现 N_2O 排放峰值, 之后随时间迅速回落, 并保持平稳波动 (图 2)。在基肥施用后, 稻田 N_2O 排放增加; 在分蘖期追

肥后, N_2O 排放出现了一个小高峰; 随后在齐穗期追肥和中期烤田的双重作用下, 出现了第三个 N_2O 排放峰值; 复水之后 N_2O 排放逐渐减少了, 而在水稻收获前, 由于排水落干, 又出现了一个 N_2O

排放小高峰。在整个生育期，N₂O 排放通量呈现出常规施氮处理>生物炭处理>CK 的趋势。2018 年和 2019 年稻季各处理 N₂O 排放通量变化分别为 -0.002—0.17 和 0.01—0.28 mg·m⁻²·h⁻¹。重复测定方差分析结果显示，2018 年 N₂O 排放随时间、处理、时间与处理交互之间影响差异显著（表 2，*P*<0.01）。2018 年 CK、IF、IF+C、RIF+C 处理 N₂O 平均排放通量分别为（0.02±0.01）、（0.04±0.01）、（0.02±0.01）、（0.02±0.01）mg·m⁻²·h⁻¹，与 CK 相比，IF、IF+C、RIF+C 处理 N₂O 平均排放通量分别增加 113.7%、18.7%、1.5%；与 IF 处理相比，IF+C、RIF+C 处理 N₂O 平均排放通量分别降低 44.5%、52.5%。重复测定方差分析结果显示，2019 年 N₂O 排放受时间、时间与处理交互作用的显著影响（表 2，*P*<0.05）。CK、IF、IF+C、RIF+C 处理 N₂O 平均排放通量分别为（0.06±0.02）、（0.08±0.03）、（0.05±0.02）、（0.05±

0.02）mg·m⁻²·h⁻¹，与 CK 相比，IF+C、RIF+C 处理 N₂O 平均排放通量分别降低 14.1%、15.6%；与 IF 处理相比，IF+C、RIF+C 处理 N₂O 平均排放通量分别降低 37.0%、38.1%。

2.3 稻田温室气体累积排放量、综合温室效应与产量

无机氮施用、生物炭与无机氮配施均对 CH₄ 排放没有显著影响（表 2 和 3）。与 CK 相比，无机氮肥的施用显著提高了 N₂O 排放，增幅为 32.6%—113.0%。与 IF 处理相比，生物炭与无机氮配施（IF+C、RIF+C）显著降低了 N₂O 排放，在 2018 年降幅为 33.4%—43.1%，在 2019 为 37.0%—39.5%。同时，生物炭与无机氮配施处理 IF+C 与 RIF+C 间 N₂O 排放差异不显著，且与 CK 相当。由表 3 还可知，2019 年 N₂O 排放明显高于 2018 年。

稻田 CH₄ 排放是综合增温潜势（GWP）的主要贡献者，对 GWP 的贡献达 84.4%—95.2%（表 3）。由于

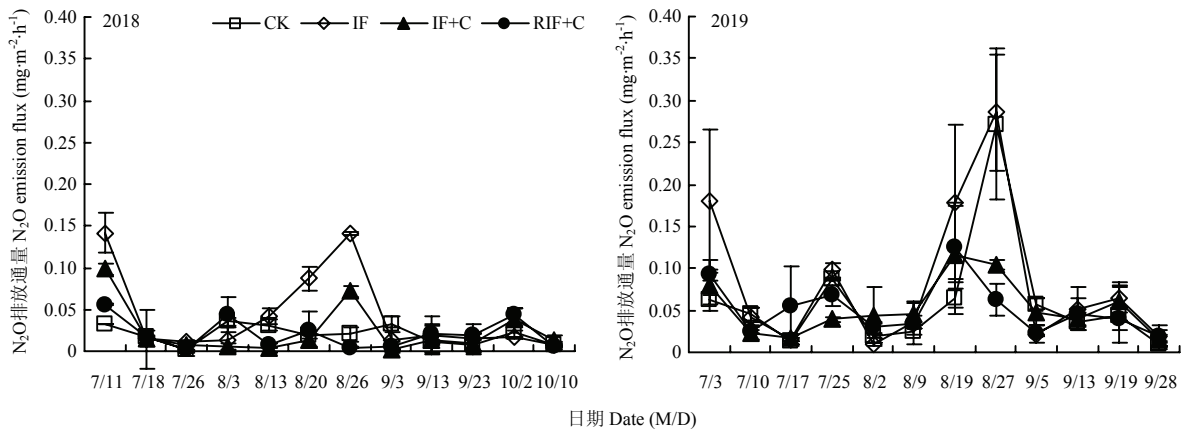


图 2 2018 和 2019 稻季不同处理稻田 N₂O 排放通量的季节变化
Fig. 2 Changes of N₂O emission fluxes under different treatments in rice seasons of 2018 and 2019

表 2 2018 年和 2019 年不同处理下 CH ₄ 、N ₂ O 排放通量的重复测定方差分析									
Table 2 Repeated measurements analysis of variance of CH ₄ and N ₂ O emission fluxes under different treatments in 2018 and 2019									
气体 Gas	处理 Treatment	2018				2019			
		<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
CH ₄	时间 Time	12	420.63	7.57	<0.001	12	74.19	3.31	<0.001
	处理 Treatment	4	74.62	1.34	0.263	4	9.38	0.42	0.74
	时间×处理 Time×Treatment	48	156.33	7.44	<0.001	48	6.22	0.39	0.76
N ₂ O	时间 Time	12	0.015	8.32	<0.001	12	0.031	9.5	<0.001
	处理 Treatment	4	0.01	5.589	0.001	4	0.006	1.72	0.17
	时间×处理 Time×Treatment	48	0.003	1.90	0.009	48	0.005	1.62	0.04

表 3 不同处理稻田温室气体累积排放量、综合温室效应及水稻产量的变化

Table 3 Changes in cumulative greenhouse gas emissions, GWP and yield from rice fields under different treatments

年份	处理	CH ₄ 累积排放量	N ₂ O 累积排放量	综合增温潜势	水稻产量
Year	Treatment	Cumulative CH ₄ emission (kg·hm ⁻²)	Cumulative N ₂ O emission (kg·hm ⁻²)	Global warming potential (kg·hm ⁻²)	Yield (t·hm ⁻²)
2018	CK	77.62±5.27 a	0.39±0.01 b	2275.53±151.57 a	8.99±0.22 b
	IF	76.84±5.42 a	0.82±0.17 a	2369.47±108.77 a	9.33±0.15 b
	IF+C	84.93±4.67 a	0.50±0.03 b	2510.01±130.66 a	9.69±0.26 ab
	RIF+C	78.66±1.71 a	0.48±0.00 b	2330.26±47.84 a	10.26±0.35 a
2019	CK	58.45±9.80 a	0.73±0.06 ab	1829.64±258.60 a	8.76±0.21 c
	IF	57.12±4.14 a	0.96±0.02 a	1855.01±115.35 a	9.29±0.23 bc
	IF+C	59.51±5.65 a	0.61±0.04 b	1827.38±167.35 a	10.31±0.30 a
	RIF+C	62.04±5.88 a	0.58±0.07 b	1891.93±179.76 a	9.83±0.18 ab

同一列不同字母表示在 5%水平上差异显著 Different letters in a column mean significant differences at $P<0.05$

各处理 CH₄ 累积排放量无明显差异，因此各处理 GWP 差异不显著。氮肥施用显著提高水稻产量，增幅达 4.0%—6.0%。与 IF 处理相比，IF+C 处理水稻产量显著提高了 9.9%—11.9%。总体上，与 IF 处理相比，减氮配施生物炭处理 RIF+C 水稻产量显著提高。而生物炭与无机氮配施处理 IF+C 与 RIF+C 间水稻产量差异不显著。

2.4 生物炭与无机氮配施对稻田氮肥利用率的影响

与 IF 处理相比，IF+C 处理水稻吸氮量显著增加，两年分别增加 10.2%、10.4%（表 4）。生物炭与无机氮配施后，氮肥利用率显著提升，IF+C、RIF+C 处理较 IF 处理 2018 年分别增加 7.7%、8.6%，2019 年分别增加 7.7%、8.1%。与 IF 相比，RIF+C 处理显著增加氮肥偏生产力，两年分别增加了 57.1%、52.3%。

表 4 不同处理水稻吸氮量、氮肥利用率及氮肥偏生产力的变化

Table 4 Changes in rice nitrogen uptake, nitrogen utilization and fertilizer partial productivity of different treatments under different treatments

年份	处理	吸氮量	氮肥利用率	氮肥偏生产力
Year	Treatment	Nitrogen uptake (kg·hm ⁻²)	Nitrogen use efficiency (%)	Nitrogen agronomic efficiency (kg·kg ⁻¹)
2018	CK	78.46±5.77 c	—	—
	IF	135.80±4.26 b	31.85±4.10 b	51.82±0.82 b
	IF+C	149.58±3.04 a	39.51±2.93 a	52.78±1.42 b
	RIF+C	129.40±1.24 b	40.42±1.70 a	81.40±2.75 a
2019	CK	80.5±7.29 c	—	—
	IF	134.69±5.25 b	30.13±2.92b	51.82±0.82 b
	IF+C	148.63±0.50 a	37.85±0.47 a	52.78±1.42 b
	RIF+C	128.62±3.14 b	38.16±4.31 a	81.40±2.75 a

同一列不同字母表示在 5%水平上差异显著 Different letters in a column mean significant differences at $P<0.05$

3 讨论

3.1 稻田 CH₄ 排放

本研究表明，CH₄ 排放具有明显的季节变化，排放高峰主要集中在分蘖期与齐穗期（图 1）。淹水环境下，产甲烷菌活性增加^[23]，而甲烷排放到大气中主要是通过植株的通气组织进行排放^[24]。在水稻分蘖期，水稻生长旺盛，通气组织发达，因此大量 CH₄

通过排放茎秆通气组织排放到大气（图 1）。在中期烤田期，田间水分被排干，这可能导致田间厌氧环境被破坏，产甲烷菌活性降低^[23]，CH₄ 排放逐渐减少。在齐穗期，旺盛的根系生长产生大量根系分泌物，为产氧化菌提供了丰富的底物^[25]；同时，该时期超过 30℃ 气温有利于产甲烷菌活性提高^[26]，因此在齐穗期出现了一个 CH₄ 排放峰值。在收获前稻田水分完全排干，田间基本观测不到 CH₄ 的产生。2018 年稻季由于

雨水较多, 长期淹水促使土壤长期处于厌氧环境, 产甲烷菌活性高^[23], 因此 2018 年稻季 CH_4 排放量多于 2019 年。2019 年水稻生长后期连续的降雨, 田间淹水且排水不畅, 甲烷氧化菌活性受抑制, 而产甲烷菌活性得到促进^[23], 因此在收获前田间 CH_4 排放不减反增。

在整个稻季, CK 与常规施氮处理间 CH_4 排放量差异不显著(表 2 和表 3)。氮肥添加会导致大量 NH_4^+ 进入土壤, 促进甲烷氧化菌的活性^[27], 降低 CH_4 排放。同时, 氮肥施用促进作物生长, 导致根系分泌物大量产生, 为产甲烷菌提供丰富的底物^[28], 因此两方面的共同作用导致不施氮肥与施氮肥处理间 CH_4 排放差异不明显。与常规施肥处理相比, 生物炭处理(IF+C 和 RIF+C) CH_4 排放量略有增加, 但未达显著水平(表 3)。WANG 等^[29]通过在大田和盆栽试验均发现, 稻壳生物炭(10、25、50 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$) 配施氮肥(200 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 对稻田 CH_4 排放量没有显著影响。这可能一方面是生物炭本身具有抑制甲烷氧化菌活性的化学物质, 有利 CH_4 排放^[30-31]。同时, 生物炭可能会增加土壤微生物生物量及活性, 从而加速原土壤有机质的分解, 为产甲烷菌提供底物^[32]。另一方面, 生物炭呈碱性, 在生物炭施入土壤后, 土壤 pH 得到了提高, 而大多数的甲烷氧化菌最适 pH 为偏中性, 因此甲烷氧化菌的活性得到了促进, 甲烷排放减少^[33]。生物炭的多孔隙结构会改善土壤通气性, 降低土壤容重^[34], 降低产甲烷菌活性而提高甲烷氧化菌活性^[33], 进一步减少 CH_4 产生。程功等^[35]通过在玉米地中添加玉米秸秆生物炭(15、30、45 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 发现, 玉米生物炭的添加能促进土壤对 CH_4 的吸收, 其中 15 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭处理下土壤对 CH_4 吸收效果最好。因此, 在多种因素共同作用下, 生物炭处理下 CH_4 累积排放量虽有增加, 但增加不显著。这与 ZHANG 等^[36]生物炭施用会明显促进稻田 CH_4 排放的结果不一致, 可能与不同的生物炭类型、热解条件、土壤特性等有关^[37]。本研究施用的生物炭是果壳、椰壳在 450℃ 下裂解生成的, 而 ZHANG 等^[36]所使用的生物炭是小麦秸秆在 350—550℃ 下裂解产生的; 另一方面, ZHANG 等^[36]施氮量(300 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$) 偏大于本研究(180 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

3.2 稻田 N_2O 排放

本研究结果表明, 在氮肥施用后或者中期晒田时出现 N_2O 排放高峰, 而在其他时期 N_2O 排放一直维持在较低水准(图 2)。宋开付等^[38]通过大田试验发现, N_2O 排放高峰均出现在氮肥施用后, 且 N_2O 排放

量与土壤含水量密切相关。我们的研究也表明, 土壤 N_2O 排放对氮肥和土壤水分敏感。在基肥施用后, 氮肥施用为硝化与反硝化微生物提供了大量底物^[38], 同时水稻刚移栽时土壤通气情况较好, 因此大量 N_2O 排放; 在中期烤田, 土壤通气情况得到明显改善, 以及齐穗期追肥的双重作用下, N_2O 出现排放高峰, 随后肥效消失, N_2O 排放下降。在水稻收获前的落干期, 土壤通气情况的改善使得土壤处于好氧状态, 硝化作用速率促进^[39], N_2O 排放再次出现一个排放小高峰(图 2)。2019 年相比 2018 年由于雨水较少, 田间水分灌溉不充分, 因此 2019 年 N_2O 排放量整体高于 2018 年(表 3)。

与 IF 相比, 生物炭处理(IF+C 和 RIF+C) 稻田 N_2O 排放明显降低(表 3), 这与大多数的研究结果一致^[19]。有研究表明, 生物炭的多孔结构会改善土壤通气情况, 从而抑制反硝化作用产生的 N_2O 排放^[34]; 同时, 生物炭通过增强氧化亚氮还原酶的活性, 促进 N_2O 向 N_2 转换, 从而减少 N_2O 排放^[40]。有研究表明, 生物炭吸附性比较强, 将土壤中的无机氮吸附, 减少硝化与反硝化作用的底物, 从而降低 N_2O 的排放^[41]。因此生物炭处理下 N_2O 排放降低。在相同的施炭量条件下 IF+C、RIF+C 处理之间 N_2O 排放量差异不大(表 3)。刘玉学等^[42]在浙江海宁的研究发现, 与水稻秸秆生物炭(3.75 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$) 与化学氮肥(180 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 配施处理相比, 水稻秸秆生物炭(3.75 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$) 与减氮 30%(126 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 配施处理的土壤容重明显降低, 但稻田 N_2O 排放量无显著变化, 这与本研究的结果一致。生物炭本身为一种多孔材料, 具有较大的比表面积, 养分吸收能力强, 施入稻田后能增强对氮肥产生的 NH_4^+-N 等的吸附^[42]。有研究表明, 当施氮量 $\geq 60 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 生物炭减少土壤 N_2O 排放的效果随施氮量的增加而降低^[43]。本试验常规施氮量和刘玉学等^[43]的均为 180 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 因此, 在减氮 30% 的情况下, IF+C、RIF+C 处理间 N_2O 排放量差异不大。

3.3 水稻产量和 GWP

总体上, 与 IF 相比, 生物炭与无机氮肥配施处理(IF+C、RIF+C) 产量显著增加(表 3)。这可能是由于生物炭含有多种植株所需要的营养元素, 在土壤的作用下会逐渐释放出来而被植株利用^[44]; 而且生物炭可以改善土壤理化性质, 从而间接提高土壤肥力, 提高土壤生产力, 增加水稻产量^[41]。陈琳等^[45]将 450 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以 4 种原料(小麦、玉米、花生壳、生活废弃物)制成的生物质炭与尿素(51 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 混合制作炭

基复混肥进行田间试验研究,发现与常规复混化肥相比,炭基肥处理施氮量减少 19.94%,但水稻的经济产量提高了 6.70%以上,其中小麦秸秆炭基肥处理增产幅度最高,达 39.34%。宋大利^[46]等研究发现,生物炭(7.5、22.5 t·hm⁻²)与氮肥(150、225、300 kg·hm⁻²)配施可以增加土壤有机质、全氮含量,提高作物产量,300 kg·hm⁻²氮处理产量低于 225 kg·hm⁻²氮处理,且随施氮量的增加其产量呈先增加后降低的趋势。这与本研究在第一年得到的结果一致,即 RIF+C 处理产量最高(表 3)。这可能是生物炭激发了土壤微生物活性和促进土壤养分循环^[46],提高了作物产量。但由于化肥、生物炭配施比例以及土壤本身理化性质的差异,生物炭与化肥配施对作物产生的影响也不尽相同。张斌等^[19]通过大田试验发现,与单施氮肥处理(240 kg·hm⁻²)相比,生物炭(20、40 t·hm⁻²)配施氮肥(240 kg·hm⁻²)处理在两年内水稻产量无明显变化;但单施生物炭时,施炭量过高反而会抑制作物生长,降低作物产量。这可能是生物炭含有有毒物质可以抑制作物生长,而生物炭配施氮肥可以减缓生物炭对作物生长的抑制^[47]。张晗芝等^[48]通过田间盆栽试验也发现,小麦秸秆制成的生物炭(2.4、12、48 t·hm⁻²)与 112.5 kg·hm⁻²氮肥配施,对苗期玉米的生长均有不同程度的抑制,随着玉米的生长,抑制作用也逐渐减少。本研究表明,IF+C 与 RIF+C 处理产量差异不显著(表 3)。这可能与试验地土壤肥力较高(土壤略酸性,有机碳含量较高,全氮含量高达 0.16%)有关。高悦等^[49]通过大田试验研究指出,在生物炭与无机氮配施下,氮肥减量 25%后土壤中总氮和碱解氮含量没有减小。因此,土壤高肥力一定程度上抵消了减氮 30%的作用。

稻田 GWP 主要由 CH₄ 的排放量决定^[50],在本研究中,CH₄ 对 GWP 的贡献占到了 84.4%—95.2%,因此,生物炭处理下 N₂O 的排放量虽然显著减少,各处理的 GWP 差异也不显著。CH₄ 的排放量主要与水分管理有关^[51],生物炭虽然可以影响稻田 CH₄ 的排放,但影响不显著。因此,对于稻田温室气体减排的研究中应该重点关注 CH₄ 的排放^[52]。

3.4 水稻氮肥利用率

本研究结果显示,在相同施氮量下,生物施用可以显著提高氮肥利用率(表 4)。同时,RIF+C 处理在减 30%无机氮的情况下,与 CK 相比,其水稻吸氮量显著增加,与 IF 处理相比吸氮量差异不大(表 4)。可见,在生物炭处理下,土壤可利用的氮素明显增加。

这可能是生物炭施入土壤后改变了土壤的透气性^[34],提高土壤含氧量,从而抑制厌氧微生物的活动,减少氮的气态损失^[21];同时,生物炭具有较强的保水性,减少氮素通过流失和淋溶等途径的损失^[53];并且生物炭对 NH₄⁺-N 的吸附力较强,从而使土壤肥力得以保持^[9]。此外,生物炭本身也含有多种植物所需要的营养元素,如 N、P、K 等,在土壤中各种生化反应下可缓慢释放一部分养分被植物吸收^[54]。王悦满等^[55]通过土柱试验发现,0.5%裂解生物炭施用可以提高水稻产量、籽粒吸氮量、收获指数、氮肥偏生产力以及氮肥利用率。睦锋等^[56]研究发现,20 t·hm⁻²的生物炭施用量下,第一年的水稻地上部氮素吸收和产量未受影响,但第二年的水稻地上部氮素吸收和产量呈明显增加趋势。曲晶晶等^[12]报道,生物炭(小麦秸秆裂解产生)与无机氮配施可显著提高水稻氮肥利用率,在 40 t·hm⁻²生物炭施用水平下,不同试验点水稻氮肥吸收利用率提高了 17.6%—20.3%。IF+C 与 RIF+C 处理氮肥利用率没有显著差异(表 4),这可能与本试验地土壤较高,土壤肥力一定程度弥补减氮 30%的影响。

对于氮肥偏生产力,只有 RIF+C 处理相对于 IF 处理显著增加,这可能与生物炭与化肥的配施比例不同,对土壤中可吸收氮素含量的影响也不同。王智慧等^[57]通过田间试验发现,80%常规施肥配施 20%生物炭(108 kg·hm⁻²)相比常规施肥(360 kg·hm⁻²),作物产量明显增加,肥料的减少并未降低作物产量,可能是由于生物炭比表面积巨大以及吸附力强,对土壤中的肥力元素有一定吸附固持作用,从而减少了土壤中氮、磷、钾等养分的流失,增加了植株可利用的养分离子。因此,过量施肥反而不利于作物对氮肥的吸收,适量的氮肥和生物炭配比对作物的生长效果更好,合适的氮肥生物炭比例是提升氮肥利用率的关键点。由此可见,生物炭配施无机氮对土壤氮素具有固持和缓释的作用,可有效地提高水稻对氮肥的吸收利用率;同时,降低反硝化作用底物,减少温室气体 N₂O 排放,达到水稻生产的稳产增产、资源高效利用和缓解环境污染的多种作用。然而,生物炭作用因其特性、土壤状况和肥料管理因素存在诸多不确定性,其与无机氮配施对稻田温室气体排放和氮肥利用率的影响研究还有待进一步深入。

4 结论

生物炭配施无机氮显著降低了稻田 N₂O 排放,但

对稻田 CH_4 的排放影响不显著。减氮+生物炭处理与常规施氮+生物炭处理间温室气体排放无显著差异。生物炭配施无机氮肥提高了水稻产量和氮肥利用率。本研究指出, 减无机氮 30%配施生物炭处理, 提高了氮肥的利用率, 降低 N_2O 排放量, 增加水稻产量。因此一个可持续的农艺措施, 值得推广。但是, 生物炭和化肥的配施对稻田 CH_4 排放没有影响, 因此有关生物炭的温室气体的减排效应还需要进一步探索。

References

- [1] STOCKER T, QIN D, PLATTNER G K, TIGNOR M, ALLEN S K, BOSCHUNG J, NAUELS A, XIA Y, BEX V, MIDGLEY P M. *IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to The Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [2] SMITH P, MARTINO D, CAI Z C, GWARY D, JANZEN H, KUMAR P, MCCARL B, OGLE S, MARA F, RICE C, SCHOLLES B, SIROTKO C, HOWDEN M, MCALLISTER T, PAN G, ROMANENKOV V, SCHNEIDER U, TOWPRAYOON S. Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 118(1): 6-28.
- [3] FENG Y F, SUN H J, XUE L H, LIU Y, GAO Q, LU P K, YANG L Z. Biochar applied at an appropriate rate can avoid increasing NH_3 volatilization dramatically in rice paddy soil. *Chemosphere*, 2017, 168: 1277-1284.
- [4] WROBEL-TOBISZEWSKA A, BOERSMA M, SARGISON J, ADAMS P, SINGH B, FRANKS S, BRICH C J, CLOSE C. Nutrient changes in potting mix and eucalyptus nitens leaf tissue under macadamia biochar amendments. *Journal of Forestry Research*, 2018, 29(2): 383-393.
- [5] LEIGH D, BURREL, ZEHETNER F, RAMPAZZO N, WIMMER B, SOIA G. Long-term effects of biochar on soil physical properties. *Geoderma*, 2016, 282: 96-102.
- [6] HENSLEY M D, GU S, HAGAN E B. Biochar production potential in Ghana—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(8): 3539-3551.
- [7] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景. *中国农业科学*, 2013, 46(16): 3324-3333.
CHEN W F, ZHANG W M, MENG J. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(16): 3324-3333. (in Chinese)
- [8] LAIRD D, FLEMING P, WANG B Q, HORTON R, KARLEN D. Biochar impact on nutrient leaching from a midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 2010, 158(3): 436-442.
- [9] MIZUTA K, MATSUMOTO T, HATATE Y, KEIICHI N, TOMOKI N. Removal of nitrate-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal. *Bioresource Technology*, 2004, 95(3): 255-257.
- [10] MARK P, MCHENRY. Soil organic carbon, biochar, and applicable research results for increasing farm productivity under Australian agricultural conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2011, 42(10): 1187-1199.
- [11] OLMO M, ALBURQUERQUE J A, BARRON V, CAMPILLO M C, CALLARDO A, FUENTES M, VILLAR R. Wheat growth and yield responses to biochar addition under Mediterranean climate conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(8): 1177-1187.
- [12] 曲晶晶, 郑金伟, 郑聚峰, 张旭辉, 李恋卿, 潘根兴, 纪雄辉, 余喜初. 小麦秸秆生物质炭对水稻产量及晚稻氮素利用率的影响. *生态与农村环境学报*, 2012, 28(3): 288-293.
QU J J, ZHENG J W, ZHENG J F, ZHANG X H, LI L Q, PAN G X, JI X H, YU X C. Effects of wheat-straw-based biochar on yield of rice and nitrogen use efficiency of late rice. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, 28(3): 288-293. (in Chinese)
- [13] 张爱平, 刘汝亮, 高霁, 张晴雯, 陈哲, 惠锦卓, 杨世琦, 杨正礼. 生物炭对宁夏引黄灌区水稻产量及氮素利用率的影响. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(5): 1352-1360.
ZHANG A P, LIU R L, GAO J, ZHANG Q W, CHEN Z, HUI J Z, YANG S Q, YANG Z L. Effects of biochar on rice yield and nitrogen use efficiency in the Ningxia yellow river irrigation region. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(5): 1352-1360. (in Chinese)
- [14] ASAI H, SAMSON B K, STEPHAN H M, STEPHAN H M, HAEFELE M, SONGYIKHANGSUTHOR K, HOMMA K, KIYONO Y, INOUE Y, SHIRAIWA T, HORIE T. Biochar amendment techniques for upland rice production in northern Laos 1. soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. *Field Crops Research*, 2009, 111(1/2): 81-84.
- [15] FENG Y Z, XU Y P, YU Y C, XIE Z B, LIN X G. Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 46: 80-88.
- [16] XIE Z B, XU Y P, LIU G, ZHU J G, TU C, JAMES E, AMONETTE, CADISCH G, JEAN W H Y, HU S J. Impact of biochar application on nitrogen of rice, greenhouse gas emission and soil organic dynamics in two paddy soil of China. *Plant and Soil*, 2013, 370: 527-540.
- [17] 李露, 周自强, 潘晓健, 李博, 熊正琴. 氮肥与生物炭施用对稻麦

- 轮作系统甲烷和氧化亚氮排放的影响. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1095-1103.
- LI L, ZHOU Z Q, PAN X J, LI B, XIONG Z Q. Combined effects of nitrogen fertilization and biochar incorporation on methane and nitrous oxide emissions from paddy fields in rice-wheat annual rotation system. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(5): 1095-1103. (in Chinese)
- [18] 廖萍, 睦锋, 汤军, 曾勇军, 吴自明, 石庆华, 黄山. 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. 核农学报, 2018, 32(9): 1821-1830.
- LIAO P, SUI F, TANG J, ZENG Y J, WU Z M, SHI Q H, HUANG S. Effects of biochar amendment on the global warming potential and greenhouse gas intensity in a double rice-cropping system. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(9): 1821-1830. (in Chinese)
- [19] 张斌, 刘晓雨, 潘根兴, 郑聚锋, 池忠志, 李恋卿, 张旭辉, 郑金伟. 施用生物质炭后稻田土壤性质、水稻产量和痕量温室气体排放的变化. 中国农业科学, 2012, 45(23): 4844-4853.
- ZHANG B, LIU X Y, PAN G X, ZHENG J F, CHI Z Z, LI L Q, ZHANG X H, ZHENG J W. Changes in soil properties, yield and trace gas emission from a paddy after biochar amendment in two consecutive rice growing cycles. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(23): 4844-4853. (in Chinese)
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000: 44-49.
- BAO S D. *Soil and Agrochemistry Analysis*. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 44-49. (in Chinese)
- [21] 董玉兵, 吴震, 李博, 许欣, 熊正琴. 追施生物炭对稻麦轮作中麦季氨挥发和氮肥利用率的影响. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1258-1267.
- DONG Y B, WU Z, LI B, XU X, XIONG Z X. Effects of biochar reapplication on ammonia volatilization and nitrogen use efficiency during wheat season in a rice-wheat annual rotation system. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(5): 1258-1267. (in Chinese)
- [22] LI C F, ZHANG Z S, GUO L J, CAI M L, CAO C G. Emissions of CH₄ and CO₂ from double rice cropping systems under varying tillage and seeding methods. *Atmospheric Environment*, 2013, 80(12): 438-444.
- [23] CONRAD R. Microbial ecology of methanogens and methanotrophs. *Advances in Agronomy*, 2007, 96: 1-63.
- [24] JEFFERY S, VERHEIJEN F, KAMMANN C, ABALOS D. Biochar effects on methane emissions from soils: A meta-analysis. *Soil Biology & Biochemistry*, 2016, 101: 251-258.
- [25] LIU T Q, LI S H, GUO L G, CAO C G, LI C F, ZHAI Z B, ZHOU J Y, MEI Y M, KE H J. Advantages of nitrogen fertilizer deep placement in greenhouse gas emissions and net ecosystem economic benefits from no-tillage paddy fields. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 263: 121322.
- [26] 刘芳, 李天安, 樊小林. 华南地区覆膜旱种稻田甲烷排放及其与土壤水分和温度的关系. 农业工程学报, 2013, 29: 110-116.
- LIU F, LI T A, FAN X L. Methane emission and its relationship with soil temperature and moisture during rice growth in film mulching upland rice field in south China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29: 110-116. (in Chinese)
- [27] SCHIMMEL J. Global change: rice, microbes and methane. *Nature*, 2000, 403(6768): 375-377.
- [28] FAN D J, LIU T Q, SHENG F, LI S H, CAO C G, LI C F. Nitrogen deep placement mitigates methane emissions by regulating methanogens and methanotrophs in no-tillage paddy fields. *Biology and Fertility of Soils*, 2020, <https://doi.org/10.1007/s00374-020-01447-y>.
- [29] WANG J Y, PAN X J, LIU Y L, ZHANG X L, XIONG Z Q. Effects of biochar amendment in two soils on greenhouse gas emissions and crop production. *Plant and Soil*, 2012, 360: 287-298.
- [30] KNOBLAUCH C, MAARIFAT A, PFEIFFER E, HAEFELE S. Degradability of black carbon and its impact on trace gas fluxes and carbon turnover in paddy soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(9): 1768-1778.
- [31] SINGLA A, INUBUSHI K. Effect of biochar on CH₄ and N₂O emission from soils vegetated with paddy. *Paddy and Water Environment*, 2014, 12(1): 239-243.
- [32] ZHANG A, BIAN R, PAN G, CUI L, HUSSAIN Q, LI L, ZHENG J, ZHENG J, ZHANG X, HAN X, YU X. 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. *Field Crops Research*, 2012, 127: 153-160.
- [33] 谢军飞, 李玉娥. 农田土壤温室气体排放机理与影响因素研究进展. 中国农业气象, 2002(4): 48-53.
- XIE J F, LI Y E. A review of studies on mechanism of greenhouse gas (GHG) emission and its affecting factors in arable soils. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2002(4): 48-53. (in Chinese)
- [34] SONG X Z, PAN G X, ZHANG C, ZHANG L, WANG H L. Effects of biochar application on fluxes of three biogenic greenhouse gases: a meta-analysis. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2016, 2(2): 10.1002/ehs2.1202.
- [35] 程功, 刘廷玺, 李东方, 段利民, 王冠丽. 生物炭和秸秆还田对干旱区玉米农田土壤温室气体通量的影响. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(07): 1004-1014.

- CHENG G, LIU T X, LI D F, DUAN L M, WANG G L. Effects of biochar and straw on greenhouse gas fluxes of corn fields in arid regions. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(7): 1004-1014. (in Chinese)
- [36] ZHANG A F, CUI L Q, PAN G X, LI L Q, HUSSAIN Q, ZHANG X H, ZHENG J W, CROWLEY D. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 139: 469-475.
- [37] 刘杰云, 邱虎森, 沈健林, 汤宏, 王聪. 不同生物质炭对稻田土壤 CH₄ 排放的影响研究进展. *生态与农村环境学报*, 2016, 32 (4) : 525-530.
- LIU J Y, QIU H S, SHEN J L, TANG H, WANG C. Research progress on the effects of different biomass charcoal on soil CH₄ emissions in paddy fields. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(4) : 525-530. (in Chinese)
- [38] 宋开付, 于海洋, 张广斌, 徐华, 吕世华, 马静. 川中丘陵区覆膜再生稻田 N₂O 排放规律研究. *农业环境科学学报*, 2019, 38(6): 1381-1387.
- SONG K F, YU H Y, ZHANG G B, XU H, LÜ S H, MA J. N₂O emissions from ratoon paddy fields covered with plastic film mulching in the hilly area of central Sichuan, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(6): 1381-1387. (in Chinese)
- [39] YUAN J H, XU R K, ZHANG H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3): 3488-3497.
- [40] CASE S D C, MCNAMARA N P, REAY D S, STOTT A W, GRANT H K, WHITAKER J. Biochar suppresses N₂O emissions while maintaining N availability in a sandy loam soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 81(2): 178-185.
- [41] 吴震, 董玉兵, 熊正琴. 生物炭施用 3 年后对稻麦轮作系统 CH₄ 和 N₂O 综合温室效应的影响. *应用生态学报*, 2018, 29(1): 141-148.
- WU Z, DONG Y B, XIONG Z Q. Effects of biochar application three-years ago on global warming potentials of CH₄ and N₂O in a rice-wheat rotation system. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1): 141-148. (in Chinese)
- [42] 刘玉学, 王耀锋, 吕豪豪, 陈义, 唐旭, 吴春艳, 钟哲科, 杨生茂. 生物质炭化还田对稻田温室气体排放及土壤理化性质的影响. *应用生态学报*, 2013, 24(8): 2166-2172.
- LIU Y X, WANG Y F, LÜ H H, CHEN Y, TANG X, WU C Y, ZHONG Z K, YANG S M. Effects of biochar application on greenhouse gas emission from paddy soil and its physical and chemical properties. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(8): 2166-2172. (in Chinese)
- [43] 罗晓琦, 冯浩, 刘晶晶, 张阿凤. 生物炭施用下中国农田土壤 N₂O 排放的 Meta 分析. *中国生态农业学报*, 2017, 25(09): 1254-1265.
- LUO X Q, FENG H, LIU J J, ZHANG A F. Meta-analysis on farmland soil N₂O emissions under biochar application in China. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(9): 1254-1265. (in Chinese)
- [44] DONG D, FENG Q, MCGROUTHER K, YANG M, WANG H L, WU W X. Effects of biochar amendment on rice growth and nitrogen retention in a waterlogged paddy field. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(1): 153-162.
- [45] 陈琳, 乔志刚, 李恋卿, 潘根兴. 施用生物质炭基肥对水稻产量及氮素利用的影响. *生态与农村环境学报*, 2013, 29(5): 671-675.
- CHEN L, QIAO Z G, LI L Q, PAN G X. Effects of biochar-based fertilizers on rice yield and nitrogen use efficiency. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, 29(5): 671-675. (in Chinese)
- [46] 宋大利, 刁向银, 黄绍敏, 张水清, 袁秀梅, 黄伏森, 刘阳, 王秀斌. 秸秆生物炭配施氮肥对潮土土壤碳氮含量及作物产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(2): 369-379.
- SONG D L, XI X Y, HUANG S M, ZHANG S Q, YUAN X M, HUANG F S, LIU Y, WANG X B. Effects of combined application of straw biochar and nitrogen on soil carbon and nitrogen contents and crop yields in a fluvo-aquic soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(2): 369-379. (in Chinese)
- [47] LI B, FAN C H, ZHANG H, CHEN Z Z, SUN LY, XIONG Z Q. Combined effects of nitrogen fertilization and biochar on the net global warming potential, greenhouse gas intensity and net ecosystem economic budget in intensive vegetable agriculture in southeastern China. *Atmospheric Environment*, 2015, 100: 10-19.
- [48] 张晗芝, 黄云, 刘钢, 许燕萍, 刘金山, 卑其诚, 蔺兴武, 朱建国, 谢祖彬. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响. *生态环境学报*, 2010(11): 2713-2717.
- ZHANG H Z, HUANG Y, LIU G, XU Y P, LIU J S, BEI Q C, LIN X W, ZHU J G, XIE Z B. Effects of biochar on corn growth, nutrient uptake and soil chemical properties in seeding stage. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010(11): 2713-2717. (in Chinese)
- [49] 高悦, 张爱平, 杜章留, 刘汝亮, 洪瑜, 胡世民, 杨正礼. 优化施氮条件下添加生物炭对宁夏灌区土壤条件和水稻生长的影响. *中国农业气象*, 2019, 40(5): 327-336.
- GAO Y, ZHANG A P, DU Z L, LIU R L, HONG Y, HU S M, YANG Z L. Effects of biochar on soil conditions and rice growth in Ningxia irrigated area under optimized nitrogen application conditions. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2019, 40(5): 327-336. (in Chinese)

- Chinese)
- [50] QIN X, LI Y, HONG W, LIU C, LI J L, WAN Y F, GAO Q Z, FAN F L, LIAO Y L. Long-term effect of biochar application on yield-scaled greenhouse gas emissions in a rice paddy cropping system: A four-year case study in south China. *Science of the Total Environment*, 2016, 569: 1390-1401.
- [51] DONG H B, YAO Z S, ZHENG X H, MEI B L, XIE B H, WANG R, DENG J, CUI F, ZHU J G. Effect of ammonium-based, non-sulfate fertilizers on CH₄ emissions from a paddy field with a typical Chinese water management regime. *Atmospheric Environment*, 2011, 45: 1095-1101.
- [52] PITTELKOW C M, ADVIENTO-BORBE M A, HILL J E, KESSEL C V, BRUCE A. Yield-scaled global warming potential of annual nitrous oxide and methane emissions from continuously flooded rice in response to nitrogen input. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 177: 10-20.
- [53] LAIRD D A, FLEMING P, DAVIS D D, HORTON R, WANG B Q, DOUGLAS L, KARLEN. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 2010, 158(3/4): 443-449.
- [54] HAEFELE S M, KONBOON Y, WONGBOON W, AMARANTE S, MAARIFAT A A, PFEIFFER E M, KNOBLAUCH C. Effects and fate of biochar from rice residues in rice-based systems. *Field Crop Research*, 2011, 121(3): 430-440.
- [55] 王悦满, 冯彦房, 杨林章, 刘杨, 侯朋福, 李辉信, 薛利红. 水热及裂解生物炭对水稻产量及氮素利用率的影响. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(8): 755-761.
- WANG Y M, FENG Y F, YANG L Z, LIU Y, HOU P F, LI H X, XUE L F. Effects of hydrochar and pyrochar on rice yield and nitrogen use efficiency. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(8): 755-761. (in Chinese)
- [56] 睦锋, 廖萍, 黄山, 曾勇军, 石庆华. 施用生物炭对双季水稻产量和氮素吸收的影响. *核农学报*, 2018, 32(10): 2062-2068.
- SUI F, LIAO P, HUANG S, ZENG Y J, SHI Q H. Effects of biochar amendment on yield and nitrogen uptake in a double rice-cropping system. *Journal of Nuclear Agricultural*, 2018, 32(10): 2062-2068. (in Chinese)
- [57] 王智慧, 唐春, 赵长江, 杨克军, 李佐同, 王洪义, 殷大伟. 生物炭与肥料配施对土壤养分及玉米产量的影响. *玉米科学*, 2018, 26(6): 146-151, 159.
- WANG Z H, TANG C, ZHAO C J, YANG K J, LI Z T, WANG H Y, YIN D W. Effects of biochar and chemical fertilizer interaction on soil nutrient and maize yield. *Journal of Maize Sciences*, 2018, 26(06): 146-151, 159. (in Chinese)
- (责任编辑 李云霞)