

优化减氮与施用生物炭对双季稻土壤温室气体排放及产量的影响

李丹丹, 何昊, 潘非凡, 杨书运

引用本文:

李丹丹, 何昊, 潘非凡, 杨书运. 优化减氮与施用生物炭对双季稻土壤温室气体排放及产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(11): 2625–2634.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0050>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

巢湖圩区再生稻田甲烷及氧化亚氮的排放规律研究

王天宇, 樊迪, 宋开付, 张广斌, 徐华, 马静

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1829–1838 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0181>

生物基包膜抑制型尿素对土壤温室气体排放及小青菜产量的影响

刘楚桐, 陈松岭, 邹洪涛, 叶旭红, 陈春羽, 雷洋, 张玉龙

农业环境科学学报. 2021, 40(3): 677–684 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0658>

厢作免耕下生态种养对稻田CH₄和N₂O排放的影响

陈璐, 陈灿, 黄璜, 任勃, 王忍, 梁玉刚, 周晶

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1354–1365 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0015>

秸秆还田条件下灌溉方式对双季稻产量及农田温室气体排放的影响

成臣, 杨秀霞, 汪建军, 程慧煌, 罗亢, 曾勇军, 石庆华, 商庆银

农业环境科学学报. 2018, 37(1): 186–195 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0893>

稻麦轮作下秸秆不同利用方式还田对稻田甲烷排放的影响

张熙栋, 严玲, 周伟, 吴秋玲, 杨波, 马煜春

农业环境科学学报. 2021, 40(3): 685–692 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李丹丹, 何昊, 潘非凡, 等. 优化减氮与施用生物炭对双季稻土壤温室气体排放及产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(11): 2625–2634.
LI D D, HE H, PAN F F, et al. Effects of biochar application on greenhouse gas emissions and yield in a double-season rice cropping system under various optimized nitrogen reduction conditions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(11): 2625–2634.

优化减氮与施用生物炭对双季稻土壤 温室气体排放及产量的影响

李丹丹¹, 何昊^{1,2}, 潘非凡¹, 杨书运^{1*}

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘要:为探究在不同优化减氮条件下施用生物炭对双季稻土壤温室气体排放和水稻产量的影响, 采用静态箱-气相色谱法监测水稻生长期土壤 CH_4 和 N_2O 排放通量, 测定土壤理化指标及水稻产量。试验设置 5 个处理: 常规施氮(CF)、优化减氮 15%(OF15%)、优化减氮 15%+生物炭(OF15%+B)、优化减氮 30%(OF30%)、优化减氮 30%+生物炭(OF30%+B)。结果表明: 与 CF 相比, 各处理均降低了双季稻土壤 CH_4 和 N_2O 的累积排放量, 降幅分别为 9.59%~39.60% 和 20.12%~41.61%; 其中 OF30%+B 与 OF15%+B 处理 CH_4 的减排效果最佳, 分别达 39.60% 与 31.53%; OF30%+B 处理 N_2O 的减排效果最佳, 达到 41.61%, 其次为 OF30% 和 OF15%+B 处理, 分别达 34.56% 与 28.14%。各处理均降低双季稻系统土壤温室气体产生的全球增温潜势, 降幅为 9.54%~39.27%; OF15%+B 产量最高, 与 CF 相比增加了 2.83%, 而 OF30% 与 OF30%+B 存在一定的减产风险, 分别减产了 5.85% 与 4.20%; 相对于 CF, 各处理的温室气体排放强度(GHGI)均有所降低, 其中 OF30%+B 降低了整个双季稻系统 GHGI 的 36.74%, 效果最佳, 其次为 OF15%+B 处理, 降幅为 33.09%, 两者具有降低 GHGI 的巨大潜力; 施用生物炭可增加土壤 pH、有机质以及 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量, 改善土壤肥力, 这可能是生物炭调节温室气体排放的重要原因。研究表明, 在各处理中 OF15%+B 处理水稻产量最高, 温室气体减排潜力较大, 有利于农业可持续发展。

关键词: 温室气体排放; 生物炭; 水稻; 优化减氮; 产量

中图分类号: S511.42 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2023)11-2625-10 doi:10.11654/jaes.2023-0050

Effects of biochar application on greenhouse gas emissions and yield in a double-season rice cropping system under various optimized nitrogen reduction conditions

LI Dandan¹, HE Hao^{1,2}, PAN Feifan¹, YANG Shuyun^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: This study aimed to investigate the effects of biochar application on greenhouse gas emissions and rice yield in a double-season rice cropping system under different optimized nitrogen reduction conditions. Five treatments were set up: conventional nitrogen fertilizer application (CF), optimized reduced nitrogen fertilizer 15% (OF15%), optimized reduced nitrogen fertilizer 15% + biochar (OF15%+B), optimized reduced nitrogen fertilizer 30% (OF30%), and optimized reduced nitrogen fertilizer 30% + biochar (OF30%+B). Static chamber gas chromatography was used to monitor CH_4 and N_2O emission fluxes during rice growth, and determine the soil physicochemical indicators and rice yield. The results showed that compared with CF, all treatments reduced the cumulative CH_4 and N_2O emissions from

收稿日期: 2023-01-29 录用日期: 2023-04-04

作者简介: 李丹丹(1998—), 女, 湖北松滋人, 硕士研究生, 主要从事应用气象学研究。E-mail: 1104813422@qq.com

*通信作者: 杨书运 E-mail: yangshy@ahau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0301301)

Project supported: Key Research and Development Program of China(2017YFD0301301)

double-season rice soils by 9.59%–39.60% and 20.12%–41.61%, respectively. Among them, the best reduction in CH_4 was achieved by OF30%+B and OF15%+B treatments, reaching 39.60% and 31.53%, respectively. The best effect of N_2O reduction in the OF30%+B treatment reached 41.61%, followed by the OF30% and OF15%+B treatments, reaching 34.56% and 28.14%, respectively. All the treatments reduced the global warming potential produced by soil greenhouse gases in the double-season rice system by 9.54%–39.27%. The OF15%+B achieved the highest yield, increasing by 2.83% compared with CF, whereas OF30% and OF30%+B had some risk of yield reduction, decreasing by 5.85% and 4.20%, respectively. The greenhouse gas emission intensity (*GHGI*) was reduced in all treatments relative to CF, with OF30%+B effectively reducing the *GHGI* of the entire double-season rice system by 36.74%, followed by OF15%+B treatment with a reduction of 33.09%, both of which have a great potential to reduce *GHGI*. The application of biochar increased soil pH, soil organic matter content, soil nitrate, and ammonium nitrogen content, and improved soil fertility, which may be crucial for biochar to regulate soil greenhouse gas emissions. Overall, the OF15%+B rice yield is the highest among the treatments and has the greatest greenhouse gas reduction potential for sustainable agricultural development.

Keywords: greenhouse gas emission; biochar; rice; optimal nitrogen reduction; yield

温室气体的大量排放对于气候变化具有深远影响,给全球农业生产带来巨大的风险和挑战^[1]。农业源是人为温室气体排放的重要来源之一,占全球温室气体排放量的17%,其中农业种植是 CH_4 和 N_2O 等非 CO_2 温室气体排放的主要途径,二者的增温效应分别是 CO_2 的28倍和265倍,从1980年到2018年我国农业非 CO_2 温室气体排放量增加了34%^[1]。我国作为水稻种植大国,水稻种植面积占全国耕地的27%,然而传统的淹水灌溉模式以及氮肥的施用,为产甲烷菌以及硝化反硝化细菌提供了生存条件与反应底物,因此稻田温室气体的排放一直在谷物种植系统中占据主导地位^[2–4]。双季稻包括早稻与晚稻,是广泛分布于南亚以及东南亚的主要水稻种植模式,据统计,双季稻区占全国水稻总种植面积的40%^[5–6]。探究双季稻减排增效模式,对于确保水稻可持续性生产具有重要意义。

施用氮肥是提高土壤肥力、保证水稻生产的重要农艺措施^[7–8]。我国每公顷耕地的氮肥施用量达到国际公认化肥施用安全上限($225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)的1.98倍,引发了诸如氮素流失、温室气体排放加剧等问题,因此如何控制氮肥的施用是农业可持续的重点^[9–10]。我国每年水稻残余秸秆量约为620 t,焚烧与丢弃的处理方式造成资源浪费与环境污染^[11–12]。秸秆等有机物在无氧或限氧条件下高温裂解可以生成生物炭,生物炭的多孔结构、强吸附力以及高pH值等特点被证实可以提高土壤肥力、增加氮肥利用效率,进而提高作物产量和品质,这为农业秸秆资源的循环利用提供了新的途径^[13–14]。随着国内外研究的深入,通过施用生物炭调控农田土壤温室气体的排放备受关注^[15]。王冠丽等^[16]的研究表明,在科尔沁玉米农田,施用 $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 生物炭在保证产量的前提下能显著降低21.4%

的 CH_4 和 N_2O 累积排放量;Sriphirom等^[17]的研究表明,生物炭的多孔结构有利于提高稻田土壤孔隙度,破坏产甲烷菌的生存环境,降低9%~21%的 CH_4 排放量;但考虑到土壤性质、作物种类以及生物炭施用量的不同,生物炭对于温室气体的影响存在显著差异^[18–20]。对于稻田温室气体减排,优化减氮配施生物炭的应用前景广阔。Yang等^[21]的研究表明,使用 $4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 富氮生物炭代替部分氮肥,可以有效改变碳氮循环的主要细菌类群,降低温室气体排放;何大卫等^[22]发现,减施氮肥(施氮量 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)条件下配合施炭 $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 可以提高土壤肥力,显著增加产量;但也有研究认为,减氮配施生物炭对稻田 CH_4 的排放影响不显著^[23]。因此,如何因地制宜地确定氮肥与生物炭施用比例仍需进一步研究。

巢湖地区位于长江中下游核心地区,具有丰富的水热资源,是重要的水稻种植区。本研究以巢湖地区典型的双季稻农田为研究对象,探究不同氮肥施用量前提下,配施生物炭对温室气体排放以及产量的影响,同时监测并分析水稻生育期内土壤理化性质的变化趋势与特点,讨论其与温室气体排放潜在的、可能的联系机制,以期为我国双季稻系统低碳种植提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验于2022年在安徽省巢湖农业环境试验站进行($31^\circ 39' \text{N}$, $117^\circ 41' \text{E}$)。该地区海拔17 m,为典型的亚热带季风气候,年平均温度 16°C ,年降雨量1 046 mm,全年无霜期247 d,气候温和,热量条件丰富。试验地点土壤有机质含量为 $27.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤pH值为6.31,土壤全氮、有效磷和速效钾含量分别为

1.27 g·kg⁻¹、15.80 mg·kg⁻¹和140.30 mg·kg⁻¹,物理性黏粒含量为488 g·kg⁻¹。

1.2 试验设计

研究共设置5个处理:常规施氮(CF,氮肥施用量为220 kg·hm⁻²)、氮肥减量15%(OF15%,氮肥施用量为187 kg·hm⁻²)、氮肥减量15%+生物炭(OF15%+B,生物炭施用量为250 kg·hm⁻²)、氮肥减量30%(OF30%,氮肥施用量为154 kg·hm⁻²)、氮肥减量30%+生物炭(OF30%+B,生物炭施用量为250 kg·hm⁻²)。各处理均设3个重复,共15个小区,每个小区面积为30 m²(5 m×6 m)。

氮、磷、钾肥分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾。氮肥按基肥:分蘖肥:穗肥=5:2:3施用,磷肥和钾肥施水平分别为75 kg·hm⁻²和70 kg·hm⁻²,均作为基肥一次性施用。本试验所用生物炭购于河南立泽环保科技有限公司,为水稻秸秆在500℃高温裂解后的产物,秸秆与生物炭的产率比为30:1,生物炭基本理化性质如下:pH值为9.14、氮含量为1.63%、碳含量为58.59%、比表面积为3.07 m²·g⁻¹、灰分为26.27%、平均孔径为10.27 nm、粒径<1 mm。生物炭与土壤翻拌均匀作为基肥一次性施用。

水稻移栽前灌水泡田,施基肥沉实2 d后插秧。早稻品种为早籼310,水稻移栽时间为5月11日,收获时间为7月30日;晚稻品种为皖稻90,水稻移栽时间为8月2日,收获时间为10月15日。水稻移栽密度为33万丛·hm⁻²,水稻生长前期水位为3 cm,分蘖盛期排水晒田7 d抑制分蘖,之后复水至10 cm,收获前7 d排水晒干。水稻生育期间适当进行病虫害防控,并且去除杂草以保证水稻正常生长。

1.3 温室气体采集与测定

采用静态箱-气相色谱法采集与测定温室气体。气体的采集需要在天气稳定且无田间管理的情况下进行,两次采样时间间隔4 d,各处理采集3个样本。下雨后、施肥前后及烤田期间需要加测。采样箱为内径30 cm、高100 cm的PVC圆桶,桶外侧包裹保温材料以维持桶内温度稳定。水稻移栽前安放内径30 cm、高15 cm的底座,底座位于水稻植株之间。每次采样时将底座凹槽内加水密封,盖上采样箱。采集时间为9:00—11:00,分别于0、10、20、30、40 min时利用注射器收集气体样品。同时采样箱顶部设有带橡胶塞的圆口,可在采样期间测量桶内温度。

气体样本在24 h内带回实验室通过气相色谱仪

测定CH₄和N₂O的浓度。CH₄和N₂O排放通量的计算公式如下:

$$F = \rho \times V/A \times (dc/dt) \times 273/T$$

式中: F 为CH₄或N₂O的排放通量,单位为mg·m⁻²·h⁻¹(CH₄)或μg·m⁻²·h⁻¹(N₂O); ρ 为标准状态下CH₄或N₂O的密度,其值为0.714 kg·m⁻³(CH₄)或1.25 kg·m⁻³(N₂O); V 为密封箱内有效体积,指箱内淹水表面至箱顶的空间体积,单位为m³;A为密封箱所覆盖的土壤面积,单位为m²;dc/dt为单位时间内采样箱内CH₄或N₂O的浓度变化,单位为μL·L⁻¹·h⁻¹(CH₄)或nL·L⁻¹·h⁻¹(N₂O); T 为密封箱内温度,单位为K。根据内插加权法计算稻田CH₄和N₂O累积排放总量,双季稻系统累积排放量为早稻季和晚稻季累积排放量之和。

1.4 全球增温潜势与温室气体排放强度的计算

水稻种植过程中产生的温室气体CH₄和N₂O,参考IPCC 2014折算为CO₂e当量(CO₂e),折算系数分别为28和265。全球增温潜势计算公式如下:

$$GWP = 28 \times f_{CH_4} + 265 \times f_{N_2O}$$

式中: GWP 为全球增温潜势,单位为kg CO₂e·hm⁻²;f_{CH₄}和f_{N₂O}分别为水稻种植过程中CH₄和N₂O气体的排放总量,单位为kg·hm⁻²。

水稻成熟后,各小区随机选取1 m²长势一致的水稻进行测产,将取样测产的水稻置于自然通风处风干,室内进行考种,测定谷物产量。温室气体排放强度计算公式为:

$$GHGI = GWP/Y$$

式中: $GHGI$ 为碳排放强度,单位为kg CO₂e·t⁻¹;Y为水稻总产量,单位为kg·hm⁻²。

1.5 土壤理化性质测定

在水稻生育期内,于每月大致相同日期,晴朗天气下,用不锈钢土壤采集器采集0~20 cm土层土样,各处理在3个小区中各采集1个点,混合3个点作为一个混合样,土样分成两份分别进行干燥和冷冻,集中测定相关土壤理化性质。土壤有机质(SOM)含量采用Vario EL III元素分析仪(德国Elementar公司)测定,土壤pH值采用电位法(水土比2.5:1)测定;土壤在氯化钾溶液浸提后,采用靛酚蓝比色法和紫外分光光度法测定土壤NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量。

1.6 数据处理与分析

试验数据均以3个重复的平均值表示,利用Excel 2017和SPSS 20.0软件进行数据处理和方差分析。对不同处理数据采用单因素方差分析,利用LSD法进行多重比较。利用Origin 2021软件制图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对CH₄排放的影响

CH₄排放主要集中在水稻生长分蘖盛期,在稻田排水晒田期间CH₄排放通量极低,在灌溉复水后CH₄排放量整体低于晒田之前(图1)。整个双季稻种植系统中,CH₄排放存在多个峰值,在施基肥后达到最大峰,其次为施分蘖肥后。由图2可知,与早稻相比,晚稻的CH₄累积排放量略高出4.42~56.76 kg·hm⁻²;与CF相比,各处理均能降低CH₄的累积排放量,早稻及晚稻的降低幅度分别为2.98%~34.90%与15.19%~43.58%。对于早稻,除OF15%处理,其余各处理CH₄累积排放量均较CF显著降低($P<0.05$);对于晚稻,各处理CH₄累积排放量均显著降低。减氮配施生物炭处理与相同水平施氮处理相比,CH₄累积排放量降低了17.90%~25.60%(早稻)和20.10%~23.00%(晚稻)。

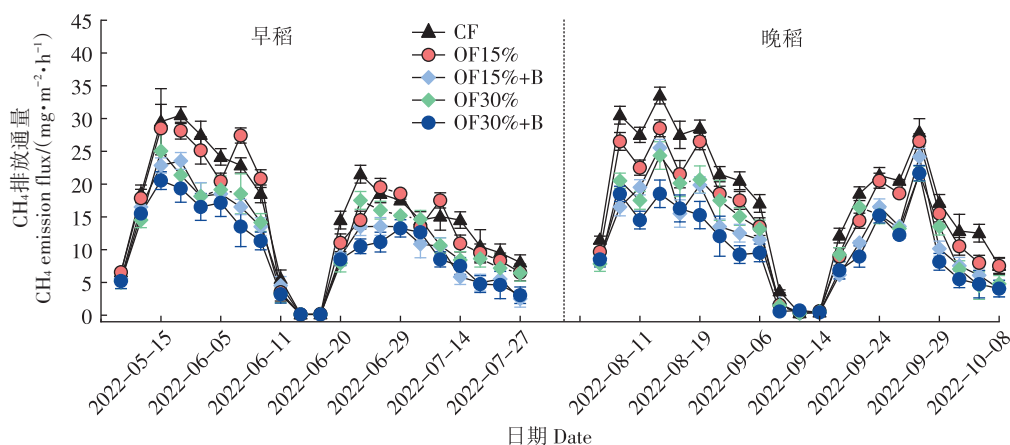
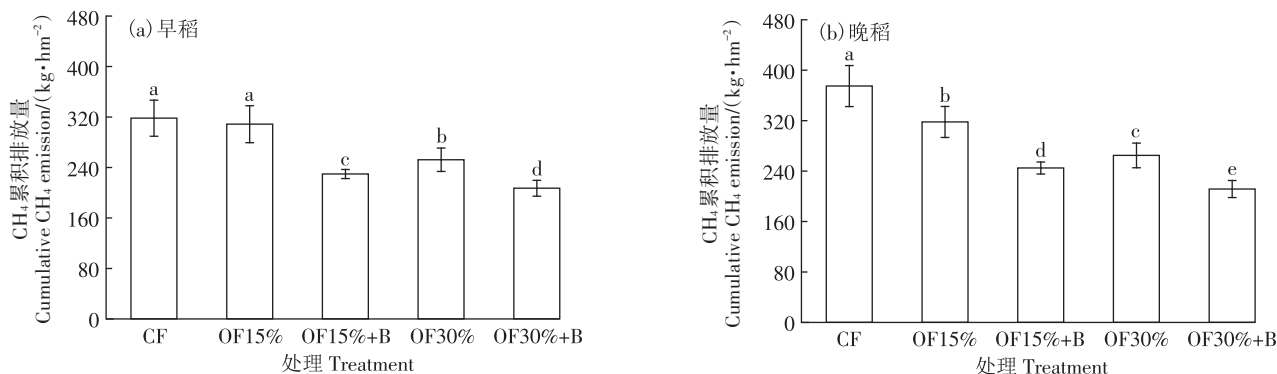


图1 不同处理下双季稻系统CH₄排放通量的变化

Figure 1 Changes of CH₄ emission flux in a double rice cropping system under different treatments



不同小写字母表示不同处理间差异达显著水平($P<0.05$)。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

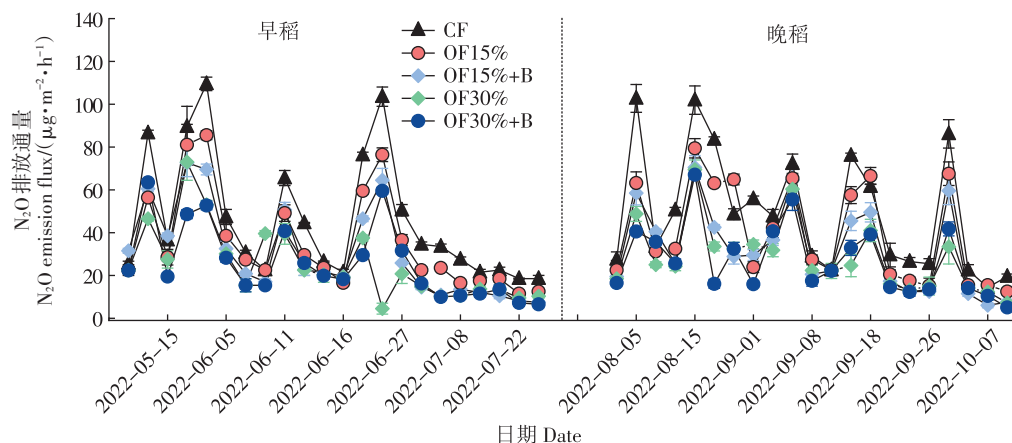
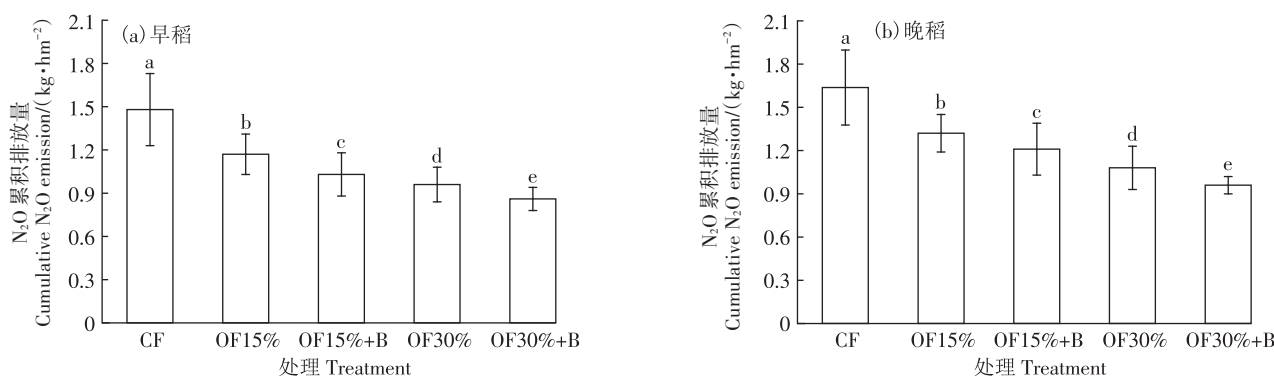
图2 不同处理下双季稻系统的CH₄累积排放量

Figure 2 Cumulative CH₄ emission in a double rice cropping system under different treatments

对于整个双季稻系统,OF30%+B对于CH₄的减排效果最佳,达到了39.60%,其次为OF15%+B和OF30%,达到了31.53%和29.37%,而OF15%减排效果最低,仅为9.59%。

2.2 不同处理对N₂O排放量的影响

如图3所示,水稻生育期内存在多个N₂O排放通量峰值,其中在施肥后、排水晒田以及灌溉复水的初期尤为明显,CF的峰值较高,减施氮肥处理能降低峰值幅度。其中早稻N₂O排放通量范围为2.32~112.86 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,晚稻的排放通量范围为2.15~102.72 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。由图4可知,N₂O累积排放量随着施氮量的降低而下降,并且施用生物炭能进一步促进减排效果。与CF相比,OF30%+B降低N₂O累积排放量效果最佳,早稻与晚稻分别降低了41.89%与41.36%,并且整个双季稻系统降低了41.61%;其次为OF30%与OF15%+B,两处理使整个双季稻系统的N₂O累积排

图3 不同处理下双季稻系统N₂O排放通量的变化Figure 3 Changes of N₂O emission flux in a double rice cropping system under different treatments图4 不同处理下双季稻系统的N₂O累积排放量Figure 4 Cumulative N₂O emission in a double rice cropping system under different treatments

放量分别降低 34.56% 与 28.14%; OF15% 降幅最低, 为 20.12%。

2.3 不同处理对全球增温潜势、谷物产量和温室气体排放强度的影响

由表1可知,对于双季稻种植系统,CH₄排放所产生的GWP是总GWP的主要贡献者,在早稻季与晚稻季分别占94.93%~95.81%与95.53%~96.28%。相较于CF,优化减氮处理减少整个双季稻系统9.54%~25.45%的GWP,但可能也存在一定的减产风险。在早稻季,与CF相比,OF15%与OF30%的产量分别降低了0.48%与8.29%;对于晚稻,OF15%保证了稳产,而OF30%与CF相比水稻产量显著降低了5.85%。在一定程度减氮处理下添加生物炭可以稳定产量。对于整个双季稻种植系统,OF15%+B产量最高,与CF产量相比高2.83%,OF15%产量与CF产量无显著差异。OF30%+B产量虽然比OF30%高2.62%,但与CF相比降低了4.20%。与CF相比,各处理的GHGI均有

所降低,降幅为2.62%~30.64%(早稻)与10.15%~36.74%(晚稻)。总体而言,OF30%+B降低了整个双季稻系统GHGI的36.74%,效果最佳,其次为OF15%+B,降幅为33.09%,OF30%与OF15%降幅分别为20.31%与10.15%。

2.4 土壤理化性质

水稻种植期间,土壤pH值呈轻微波动(图5a),各处理水稻土壤pH均值变化范围为6.24~6.43(早稻)和6.21~6.34(晚稻)。添加生物炭处理pH值高于其他处理,与CF处理pH均值相比,OF15%+B与OF30%+B分别增加了0.55%~1.03%和0.14%~0.87%。土壤有机质含量随水稻生长呈下降趋势(图5b),相对于CF,生物炭处理显著提高了土壤有机质含量,而减氮处理无明显影响,此外晚稻各处理土壤有机质含量的起始值略高于早稻。

土壤氮含量随氮肥施用量的减少而降低(图5c、图5d),水稻土壤NH₄⁺-N含量与NO₃⁻-N含量在施肥后

表1 不同处理对双季稻全球增温潜势、谷物产量和温室气体排放强度的影响

Table 1 Grain yield, yield-scaled GWP, and GHGI in the double rice cropping system under different treatments

项目 Item	处理 Treatment	CH ₄ 增温潜势	N ₂ O增温潜势	全球增温潜势	产量	温室气体排放强度
		Global warming potential of CH ₄ /(kg CO ₂ e·hm ⁻²)	Global warming potential of N ₂ O/(kg CO ₂ e·hm ⁻²)	GWP/(kg CO ₂ e·hm ⁻²)	Yield/(kg·hm ⁻²)	GHGI/(kg·kg ⁻¹)
早稻季	CF	8 908.2a	392.2a	9 300.4a	6 946.2b	1.34a
	OF15%	8 642.3b	378.1b	9 020.4b	6 913.1b	1.31ab
	OF15%+B	6 430.9d	339.6c	6 770.5d	7 012.5a	0.97c
	OF30%	7 063.6c	318.1d	7 381.8c	6 431.5d	1.15b
	OF30%+B	5 798.9e	310.0e	6 108.9e	6 572.5c	0.92c
晚稻季	CF	10 497.6a	433.9a	10 931.4a	7 129.3c	1.53a
	OF15%	8 902.5b	378.1b	9 280.6b	7 231.8b	1.28b
	OF15%+B	6 855.8d	320.7c	7 176.4d	7 461.9a	0.96d
	OF30%	7 414.7c	286.2d	7 700.9c	6 712.5e	1.15c
	OF30%+B	5 922.7e	254.4e	6 177.1e	6 915.4d	0.89d
总生长季	CF	19 405.8a	826.1a	20 231.8a	14 075.5b	1.44a
	OF15%	17 544.8b	756.2b	18 301.0b	14 144.8b	1.29ab
	OF15%+B	13 286.7d	660.2c	13 946.9d	14 474.4a	0.96c
	OF30%	14 478.4c	604.3d	15 082.7c	13 144.0d	1.15b
	OF30%+B	11 721.6e	564.4e	12 286.0e	13 487.9c	0.91c

注:不同小写字母表示不同处理间差异达显著水平($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$).

各处理均出现明显峰值,但总体呈下降趋势。各处理NH₄⁺-N含量变化范围为7.05~29.05 mg·kg⁻¹(早稻)和8.58~32.52 mg·kg⁻¹(晚稻),NO₃⁻-N含量变化范围为0.44~2.18 mg·kg⁻¹(早稻)和0.50~2.18 mg·kg⁻¹(晚稻)。与CF相比,OF15%和OF30%土壤NH₄⁺-N平均含量分别降低了5.99%~11.90%和14.89%~20.80%,而土壤NO₃⁻-N平均含量分别降低了12.64%~15.76%和16.35%~25.73%。但减氮配施生物炭处理水稻土壤NH₄⁺-N含量与NO₃⁻-N含量分别比相同水平减氮处理高2.04~4.44 mg·kg⁻¹和0.13~0.35 mg·kg⁻¹。

3 讨论

在整个双季稻种植期间,CH₄排放量主要集中在水稻生长分蘖旺盛期,此时水稻根系分泌物增加,为产甲烷菌的生长提供了物质条件^[24]。在稻田排水晒干期间,土壤通透性增强,CH₄排放量几乎为零。复水后CH₄排放通量逐渐提升,但总体排放量低于排水晒干前,这可能是由于土壤干燥过程破坏了极端厌氧环境,使部分产甲烷菌丧失活性^[25]。与CF相比,OF15%和OF30%土壤NH₄⁺-N平均含量降低了5.99%~20.80%,而土壤NO₃⁻-N平均含量降低了12.64%~25.73%,且降幅随着氮肥施用量的减少而增加。减施氮肥限制了土壤产甲烷菌反应所需的氮底

物即土壤NH₄⁺-N和NO₃⁻-N的含量,进而降低了CH₄累积排放量,这与相关研究结果一致^[26-28]。通常情况下,土壤有机物含量与土壤CH₄排放量之间呈明显的正相关关系,因此在生物炭施用后存在短暂的CH₄激发效应^[29]。晚稻各处理土壤有机质含量起始值略高于早稻,同样在晚稻中观察到的CH₄累积排放量比早稻高,可能是由于残留的秸秆根系在水田的厌氧环境中分解,为产甲烷微生物提供了额外的活性碳代谢底物^[28]。生物炭的多孔结构增加了土壤的孔隙度,使氧气容易进入,同时提高了土壤的pH值,破坏了产甲烷细菌生存所需的严格厌氧以及酸性环境^[30-31]。与CF处理pH均值相比,OF15%+B与OF30%+B的pH值分别增加了0.55%~1.03%和0.14%~0.87%,同时减少了整个双季稻系统31.53%~39.60%的CH₄累积排放量。Wu等^[32]的研究得出在稻田中添加生物炭促进CH₄的氧化速率,减少CH₄排放;Chen等^[33]的研究也表明,生物炭可以提高甲烷氧化菌的细菌丰度,促进CH₄氧化,减少CH₄排放。在整个双季稻系统中,减氮配施生物炭处理与相同水平施氮处理相比,CH₄累积排放量降低了17.90%~25.60%。生物炭作为一种多孔高碳化合物,其添加进一步降低了CH₄排放量,土壤碳氮比的变化可能是调节土壤CH₄排放的因素之一。

稻田N₂O的排放主要集中在施肥后及稻田干湿

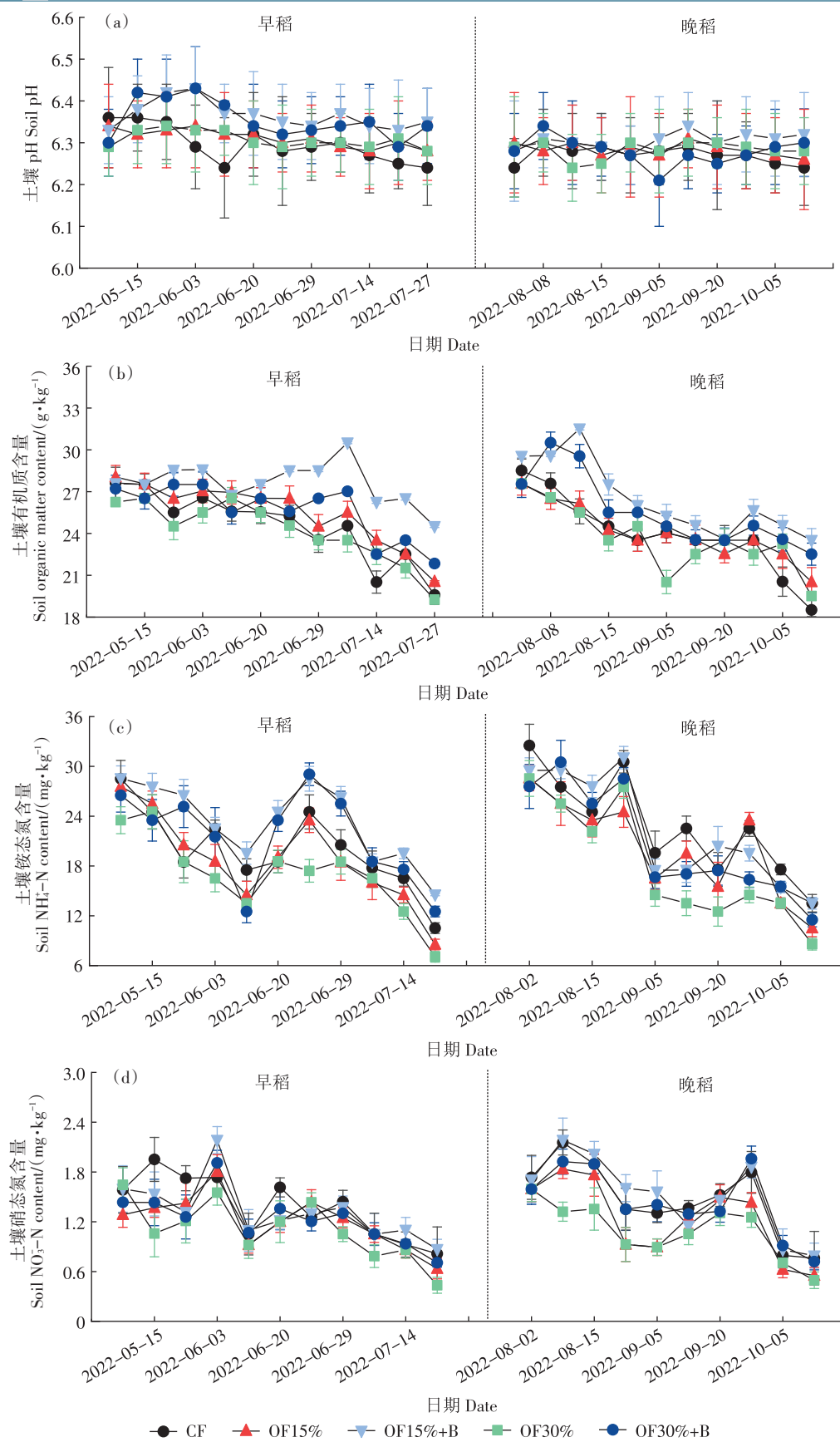


图5 不同处理下双季稻土壤理化性质的变化

Figure 5 Changes of soil physicochemical properties of double-cropping rice under different treatments

交替变化阶段,施肥为土壤提供了过量的氮源,并且干湿交替刺激了硝化与反硝化作用,稻田排水晒干与复水阶段极大促进了 N_2O 的排放^[19,34]。土壤pH值对微生物丰度有直接影响,生物炭具有较高的碱性,土壤pH值的增加提高了 N_2O 还原酶活性,以上进程均有利于土壤 N_2O 的减排^[35-36]。OF15%+B和OF30%+B在提高pH值的同时,使整个双季稻系统的 N_2O 累积排放量减少了28.14%~41.61%。除此之外,由于生物炭具有显著的吸附特性,其表面可以大量吸附 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,减氮配施生物炭处理水稻土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量分别比相同水平减氮处理高2.04~4.44 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和0.13~0.35 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,从而降低了对硝化菌和反硝化菌的有效性并降低了 N_2O 排放^[37]。Wang等^[38]在两年的水稻实验中也发现,在水稻土壤中施用40 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭使土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量分别增加了60.77%和26.14%,生物炭的施用有利于稻田可持续发展。

在本研究中, CH_4 的排放为双季稻种植系统GWP的主要贡献者,这也印证了相关研究中稻田 CH_4 的减排更加刻不容缓^[10,19,39]。晚稻温室气体所产生的GWP明显高于早稻,这可能与早稻秸秆残留增加土壤有机质含量有关^[40]。氮肥减施处理造成温室气体排放量下降,从而导致整个双季稻系统GWP下降了9.54%~25.45%。总体而言,氮肥施用量与GWP呈正相关,优化减氮处理减排效果显著,由于我国水稻种植氮素施用背景值较高,短期内适当减氮对水稻产量有一定促进作用^[41-42]。对于整个双季稻种植系统,OF15%与CF产量无显著差异。而适宜的减氮配施生物炭可以显著提高水稻产量,OF15%+B产量相较于CF增加了2.83%。然而本研究也证实,氮作为水稻生长的重要营养元素,过多减氮处理可能导致产量甚至品质的下降,OF30%产量与CF相比降低了5.85%~8.29%。然而在相同施氮水平下添加生物炭,对水稻产量有积极的作用,对于整个双季稻种植系统,OF30%+B与OF30%相比产量增加了2.62%。在后续研究中可对这一影响进行长期观测,以确定最佳施氮量。由于各地区土壤肥力与供氮能力不同,单纯减施氮肥不利于水稻生产长期可持续发展,施用生物炭可以缓解温室气体排放并替代部分氮肥^[23,43]。GHGI取决于全球增温潜势与作物产量的相对变化,与CF相比,各处理均降低了GHGI。OF30%+B、OF15%+B和OF30%显著降低了GHGI,在整个双季稻系统中降幅分别达到了36.74%、33.09%和20.31%。但考虑到OF15%+B在降低GHGI的同时,增加了水稻产量,因此更加推荐在双

季稻种植系统中采用OF15%+B模式。

4 结论

双季稻温室气体排放具有一定的季节性特征,秸秆残留加速了土壤的厌氧环境,因此晚稻 CH_4 和 N_2O 的累积排放量均高于早稻。减施氮肥处理表现出良好的温室气体减排潜力,但氮肥减量30%可能存在减产的风险。相比之下,生物炭的添加提高了土壤pH值,进一步减少温室气体排放,同时增加土壤有机质和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量,改善土壤肥力,提高水稻产量。总体而言,氮肥减量15%+生物炭处理取得了良好的减排效果且水稻产量在各处理中为最高,这表明生物炭替代15%氮肥减量具有巨大的减排潜力,有利于农业可持续发展。

参考文献:

- [1] CRIPPA M, SOLAZZO E, GUIZZARDI D, et al. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions[J]. *Nature Food*, 2021, 2(3): 198-209.
- [2] CHEN M, CUI Y, JIANG S, et al. Toward carbon neutrality before 2060: trajectory and technical mitigation potential of non- CO_2 greenhouse gas emissions from Chinese agriculture[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 368: 133186.
- [3] YANG J D, WU X, BAI H, et al. A meta-analysis of management practices for simultaneously mitigating N_2O and NO emissions from agricultural soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 213: 105142.
- [4] LIANG H, XU J, HOU H, et al. Modeling CH_4 and N_2O emissions for continuous and noncontinuous flooding rice systems[J]. *Agricultural Systems*, 2022, 203: 103528.
- [5] 汪勇, 吕茹洁, 黎星, 等. 生物炭与氮肥施用对双季稻田温室气体排放的影响[J]. 中国稻米, 2021, 27(1): 20-26. WANG Y, LÜ R J, LI X, et al. Effects of biochar and nitrogen incorporation on greenhouse gas emissions in double rice-cropping system[J]. *China Rice*, 2021, 27(1): 20-26.
- [6] 彭术, 张文钊, 侯海军, 等. 氮肥减量深施对双季稻产量和氧化亚氮排放的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(1): 153-160. PENG S, ZHANG W Z, HOU H J, et al. Effects of reduction and deep placement of nitrogen fertilizer on rice yield and N_2O emissions from double cropping paddy field[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(1): 153-160.
- [7] ZHAO X, WANG W, XIE Z, et al. Comparative analysis of metabolite changes in two contrasting rice genotypes in response to low-nitrogen stress[J]. *The Crop Journal*, 2018, 6(5): 464-474.
- [8] 白志刚, 张均华, 黄洁, 等. 氮肥运筹对水稻氮代谢及稻田土壤氮素迁移转化的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(11): 3440-3448. BAI Z G, ZHANG J H, HUANG J, et al. Effects of nitrogen regime on nitrogen metabolism of rice and nitrogen transformation and translocation in paddy soils[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(11): 3440-3448.
- [9] 赵雪雁, 刘江华, 王蓉, 等. 基于市域尺度的中国化肥施用与粮食产

- 量的时空耦合关系[J]. 自然资源学报, 2019, 34(7): 1471–1482. ZHAO X Y, LIU J H, WANG R, et al. Spatial-temporal coupling relationship between chemical fertilizer application and grain yield in China at city scale[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(7): 1471–1482.
- [10] 夏龙龙, 颜晓元, 蔡祖聪. 我国农田土壤温室气体减排和有机碳固定的研究进展及展望[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 834–841. XIA L L, YAN X Y, CAI Z C. Research progress and prospect of greenhouse gas mitigation and soil carbon sequestration in croplands of China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 834–841.
- [11] CAO G, ZHANG X, ZHENG F. Inventory of black carbon and organic carbon emissions from China[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(34): 6516–6527.
- [12] 马晓轩, 蔡红珍, 付鹏, 等. 中国农业固体废弃物秸秆的资源化处置途径分析[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 168–174. MA X X, CAI H Z, FU P, et al. Analysis of the reutilization methods for agricultural waste of straw in China[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2016, 25(1): 168–174.
- [13] KANG S W, YUN J J, PARK J H, et al. Effects of biochar and barley straw application on the rice productivity and greenhouse gas emissions of paddy field[J]. *Applied Biological Chemistry*, 2021, 64(1): 92.
- [14] ABHISHEK K, SHRIVASTAVA A, VIMAL V, et al. Biochar application for greenhouse gas mitigation, contaminants immobilization and soil fertility enhancement: a state-of-the-art review[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 853: 158562.
- [15] LIU X, MAO P, LI L, et al. Impact of biochar application on yield-scaled greenhouse gas intensity: a meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 656: 969–976.
- [16] 王冠丽, 孙铁军, 刘廷玺, 等. 施用生物炭对干旱区玉米农田碳足迹的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(11): 2650–2658. WANG G L, SUN T J, LIU T X, et al. Effects of biochar on carbon footprint of corn fields in arid regions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(11): 2650–2658.
- [17] SRIPHIROM P, TOWPRAYOON S, YAGI K, et al. Changes in methane production and oxidation in rice paddy soils induced by biochar addition[J]. *Applied Soil Ecology*, 2022, 179: 104585.
- [18] CAYUELA M L, SÁNCHEZ-MONEDERO M A, ROIG A, et al. Biochar and denitrification in soils: when, how much and why does biochar reduce N₂O emissions?[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3(1): 1732.
- [19] 张卫红, 李玉娥, 秦晓波, 等. 长期定位双季稻田施用生物炭的温室气体减排生命周期评估[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 132–140. ZHANG W H, LI Y E, QIN X B, et al. Estimation on GHG emission reduction in double cropping rice paddy with application of biochar in long-term period using LCA method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(20): 132–140.
- [20] PETTER F A, BORGES DE LIMA L, MARIMON JÚNIOR B H, et al. Impact of biochar on nitrous oxide emissions from upland rice[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 169: 27–33.
- [21] YANG X, WANG W, CHEN X, et al. Effects of N-enriched biochar on ecosystem greenhouse gas emissions, rice yield, and bacterial community diversity in subtropical rice paddy soils[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2022, 113: 103440.
- [22] 何大卫, 赵艳泽, 高继平, 等. 生物炭和氮肥配施对梗稻产量形成、氮肥当季效应及其后效的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(12): 2114–2124. HE D W, ZHAO Y Z, GAO J P, et al. Effects of biochar application combined with nitrogen fertilizer on yield formation of japonica rice and the immediate and residual effects of nitrogen[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(12): 2114–2124.
- [23] 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. XIANG W, WANG L, LIU T Q, et al. Effects of biochar plus inorganic nitrogen on the greenhouse gas and nitrogen use efficiency from rice fields[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(22): 4634–4645.
- [24] ZHU Z, GE T, LIU S, et al. Rice rhizodeposits affect organic matter priming in paddy soil: the role of N fertilization and plant growth for enzyme activities, CO₂ and CH₄ emissions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 116: 369–377.
- [25] HE H, ZHANG T, YAO Y, et al. Tillage methods on greenhouse gas emissions and yields of rice-wheat rotation system in east China polder area[J]. *International Journal of Plant Production*, 2021, 15(3): 485–498.
- [26] 姜珊珊, 庞炳坤, 张敬沙, 等. 减氮及不同肥料配施对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. 中国环境科学, 2017, 37(5): 1741–1750. JIANG S S, PANG B K, ZHANG J S, et al. Effects of reduced nitrogen and combined application of different fertilizers on CH₄ and N₂O emissions in paddy fields[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(5): 1741–1750.
- [27] ZHONG Y, WANG X, YANG J, et al. Exploring a suitable nitrogen fertilizer rate to reduce greenhouse gas emissions and ensure rice yields in paddy fields[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 565: 420–426.
- [28] YE R, HORWATH W R. Influence of rice straw on priming of soil C for dissolved organic C and CH₄ production[J]. *Plant and Soil*, 2017, 417(1): 231–241.
- [29] LIU X, ZHOU J, CHI 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: 20–28.
- [30] YANG M, HOU Z, GUO N, et al. Effects of enhanced-efficiency nitrogen fertilizers on CH₄ and CO₂ emissions in a global perspective[J]. *Field Crops Research*, 2022, 288: 108694.
- [31] 张如鑫, 屈忠义, 杨威, 等. 生物炭对盐渍化土壤周年温室气体排放及冻融效应的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(10): 1565–1576. ZHANG R X, QU Z Y, YANG W, et al. Effects of biochar on annual greenhouse gas emissions and freeze-thaw effects in saline soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(10): 1565–1576.
- [32] WU Z, SONG Y, SHEN H, et al. Biochar can mitigate methane emissions by improving methanotrophs for prolonged period in fertilized paddy soils[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 253: 1038–1046.

- [33] CHEN J, LIU X, ZHENG J, et al. Biochar soil amendment increased bacterial but decreased fungal gene abundance with shifts in community structure in a slightly acid rice paddy from southwest China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2013, 71:33–44.
- [34] 张广斌, 马静, 徐华, 等. 稻田甲烷产生途径研究进展[J]. 土壤, 2011, 43(1):6–11. ZHANG G B, MA J, XU H, et al. Advances on methanogenic pathways in rice fields[J]. *Soils*, 2011, 43(1):6–11.
- [35] AAMER M, HASSAN M U, SHAABAN M, et al. Rice straw biochar mitigates N₂O emissions under alternate wetting and drying conditions in paddy soil[J]. *Journal of Saudi Chemical Society*, 2021, 25(1):101172.
- [36] 王月玲, 耿增超, 王强, 等. 生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(9):3634–3641. WANG Y L, GENG Z C, WANG Q, et al. Influence of biochar on greenhouse gases emissions and physico-chemical properties of loess soil[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(9):3634–3641.
- [37] 易琼, 逢玉万, 张木, 等. 不同施肥模式下硝化抑制剂DCD与生物炭对菜地N₂O排放和土壤特性的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(8):1336–1341. YI Q, PANG Y W, ZHANG M, et al. Effects of nitrification inhibitor DCD and biochar on N₂O and soil properties under different fertilization models in vegetable field[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2017, 26(8):1336–1341.
- [38] WANG Y, HU Z, LIU C, et al. Methane emissions in japonica rice paddy fields under different elevated CO₂ concentrations[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2022, 122(2):173–189.
- [39] KIM G W, LIM J Y, ISLAM BHUIYAN M S, et al. Investigating the arable land that is the main contributor to global warming between paddy and upland vegetable crops under excessive nitrogen fertilization[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 346:131197.
- [40] LIU J, JIANG B, SHEN J, et al. Contrasting effects of straw and straw-derived biochar applications on soil carbon accumulation and nitrogen use efficiency in double-rice cropping systems[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 311:107286.
- [41] 柳瑞, 高阳, 李恩琳, 等. 减氮配施生物炭对水稻生长发育、干物质积累及产量的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(5):926–932. LIU R, GAO Y, LI E L, et al. Effects of reduced nitrogen and biochar application on plant growth, dry matter accumulation and rice yield[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2020, 29(5):926–932.
- [42] ZHUANG Y, RUAN S, ZHANG L, et al. Effects and potential of optimized fertilization practices for rice production in China[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2022, 42(2):32.
- [43] JEFFERY S, VERHEIJEN F G A, KAMMANN C, et al. Biochar effects on methane emissions from soils: a meta-analysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 101:251–258.

(责任编辑:李丹)