



江天, 郭佳旭, 周冉冉, 张鑫, 徐霄, 张卫峰, 田静. 优化减氮对稻田温室气体排放和产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(12): 72-81.
JIANG Tian, GUO Jiaxu, ZHOU Ranran, ZHANG Xin, XU Xiao, ZHANG Weifeng, TIAN Jing. The impact of optimized nitrogen reduction on greenhouse gas emissions and yield in paddy fields[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(12): 72-81.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.12.07

优化减氮对稻田温室气体排放和产量的影响

江天¹ 郭佳旭¹ 周冉冉¹ 张鑫² 徐霄² 张卫峰¹ 田静^{1*}

(1. 中国农业大学 资源与环境学院/国家农业绿色发展研究院, 北京 100193;

2. 衢州市美丽乡村建设中心, 浙江 衢州 323000)

摘要 为探究稻田固碳减排与高产稳产技术, 基于优化减氮定位试验, 选取不同施肥处理的一季稻田为研究对象, 设置不施氮肥、农民传统常规施肥、含脲酶抑制剂尿素减氮36%和生物炭基肥减氮36%这4个处理, 采用静态暗箱-气相色谱法, 对生育期内稻田土壤CH₄和N₂O的排放进行监测并测定水稻产量。结果表明: 与农民传统常规施肥相比, 减氮处理均降低了稻田CH₄的累积排放量, 其中含脲酶抑制剂尿素和生物炭基肥处理降幅分别为15.0%和68.9%。各处理土壤CH₄排放通量均呈单峰型曲线, 主要集中在水稻分蘖旺期。和农民传统常规施肥相比, 含脲酶抑制剂尿素处理降低稻田N₂O排放通量19.6%, 生物炭基肥处理增加7.8%。土壤N₂O排放高峰主要在分蘖旺期, 分蘖末期N₂O排放下降但仍处于较高水平。含脲酶抑制剂尿素处理降低全球增温潜势和温室气体排放强度15.9%和9.6%, 生物炭基肥处理无显著变化。与农民传统常规施肥相比, 含脲酶抑制剂尿素和生物炭基肥处理水稻产量并无显著差异。因此, 在优化减氮36%的基础上含脲酶抑制剂尿素和生物炭基肥可以维持稻田产量并降低温室气体排放, 尤其是含脲酶抑制剂尿素具有更高的减排潜力。该研究为稻田低碳生产管理提供了理论支撑和技术参考。

关键词 生物炭; 脲酶抑制剂; 稻田; 温室气体排放; 全球增温潜势

中图分类号 S363

文章编号 1007-4333(2024)12-0072-10

文献标志码 A

The impact of optimized nitrogen reduction on greenhouse gas emissions and yield in paddy fields

JIANG Tian¹, GUO Jiaxu¹, ZHOU Ranran¹, ZHANG Xin², XU Xiao²,
ZHANG Weifeng¹, TIAN Jing^{1*}

(1. College of Resources and Environment Sciences/National Academy of Agriculture Green Development, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Quzhou Beautiful Countryside Construction Center, Quzhou 323000, China)

Abstract In order to explore the technology for both carbon sequestration, emission reduction, high yield and stable yield in paddy field, one-season paddy field with different fertilization treatments was taken as the research object. Based on the optimized nitrogen reduction positioning test, four treatments were set up as follows: no nitrogen fertilizer, traditional conventional fertilization by farmers, nitrogen reduction of 36% by urease-containing inhibitor urea and 36% nitrogen reduction by biochar-based fertilizer. The emissions of CH₄ and N₂O in paddy soil were monitored during the growth period and the rice yield was determined by static chamber-gas chromatography. The results showed that: Compared with the traditional conventional

收稿日期: 2024-01-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(32071629);衢州市农业碳中和账户建设项目(衢农合2021-27);碳账户核算及减排固碳技术研究项目(衢农合2022-31)

第一作者: 江天(ORCID:0009-0006-0249-5635), 硕士研究生, E-mail: jt1123176@163.com

通讯作者: 田静(ORCID:0000-0002-8116-8520), 副教授, 主要从事土壤固碳机制与技术、土壤健康、土壤微生物结构与功能等研究, E-mail: tianj@igsnr.ac.cn

fertilization, the nitrogen reduction treatment reduced the cumulative emission of CH_4 in paddy field, and the urease-containing inhibitor urea and biochar-based fertilizer treatment decreased by 15.0% and 68.9%, respectively. The CH_4 emission flux of each treatment showed a unimodal curve, which was mainly concentrated in the peak tillering period of rice. Compared with the traditional conventional fertilization, the urease-containing inhibitor urea treatment reduced the N_2O emission flux of paddy field by 19.6%, and increased the biochar-based fertilizer treatment by 7.8%. The peak of soil N_2O emission was mainly in the peak tillering stage, and the N_2O emission decreased but remained at a high level at the end of tillering. Compared with the traditional conventional fertilization, the urease-containing inhibitor urea treatment reduced global warming potential and greenhouse gas emission intensity by 15.9% and 9.6%, respectively, and there was no significant change in biochar-based fertilizer treatment. There was no significant difference in rice yield between urease-containing inhibitor urea and biochar-based fertilizer compared with conventional fertilization. Therefore, urease-containing inhibitor urea and biochar-based fertilizer can maintain paddy yield and reduce greenhouse gas emissions on the basis of optimizing nitrogen reduction of 36%, especially urease-containing inhibitor urea. This study provides theoretical support and technical reference for low-carbon production management in paddy fields.

Keywords biochar; urease inhibitors; paddy field; greenhouse gas emissions; global warming potential

温室气体浓度不断上升导致全球气候变暖,预测在 21 世纪末全球气温可能会上升 1.8 至 5.8 $^{\circ}\text{C}$ ^[1]。温室气体甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)是大气中重要的温室气体成分,其全球增温潜势分别是 CO_2 的 28 倍和 298 倍^[2-3]。农业活动产生的温室气体占人为源温室气体排放总量的 10%~20%^[4],其增加引起的气温和降水变化会影响和改变作物生产潜力,进而改变生态系统的初级生产力和农业的土地承载力^[5]。我国作为世界上第 2 大水稻种植国,种植面积约占全球的 20%。每年稻田 CH_4 的总排放量约 8 t,占农业生产排放量的 30%; N_2O 的排放量约为 36 kg,占农业生产排放的 11%^[6-7]。恢复气候变化消减的土壤生产力、减少稻田温室气体排放和促进稻田可持续发展是当前农业面临的重要问题。因此,探讨稻田生态系统 CH_4 和 N_2O 减排规律及创新固碳减排技术措施对缓解全球增温和粮食安全具有重要意义。

氮肥施用是保证作物高产稳产的基础^[9],过量施用氮肥会加剧温室气体排放,亦降低作物产量。据报道,氮肥的添加有明显的增产效果,但其带来的更多碳底物释放导致稻田 CH_4 排放的增加^[8]。同时,过量施氮加剧土壤微生物的硝化和反硝化作用,进一步增加 N_2O 的排放^[9]。因此,减少氮诱导温室气体排放的同时保证产量是当前研究的重点。优化氮肥用量是减排的重要措施,通过限制硝化和反硝化作用底物的可利用性显著降低 CH_4 和 N_2O 的累积排放^[10-12]。此外,氮肥增效剂和土壤改良剂

也被广泛应用。其中,脲酶抑制剂通过抑制尿素水解过程中脲酶活性来降低氮素转化从而限制温室气体产生^[13]。有研究表明,脲酶抑制剂配施尿素有效减少 25%~48% 的 N_2O 排放^[14-16],但目前脲酶抑制剂对 CH_4 排放的有关研究仍未有定论^[17-19]。生物炭通过改善甲烷菌的厌氧环境可以促进 CH_4 的氧化作用进而抑制其排放^[20-22]。然而目前措施减排与增产效果仍存在一定局限性,已无法满足当下保证作物产量兼具环境安全的双需求。含脲酶抑制剂的脲铵氮肥作为一种新型氮肥为作物提供氮素的同时减少了温室气体排放。生物炭基肥是以生物质炭为载体,与常规化学肥料等材料科学复配而成的有机无机复合肥料。2 种便利型复合肥料在农业生产或温室气体减排方面潜力巨大,但鲜有研究探究含脲酶抑制剂尿素和生物炭基肥在减排和增产方面的协同作用。因此,本研究将含脲酶抑制剂尿素和生物炭基肥在优化减氮 36% 的基础上等氮施用,拟探究其对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响,同时对 2 种措施的减排增产效应,旨在为农业环境保护提供理论指导,进而为缓减全球气候变化和稳定作物产量提供新思路。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

本试验于 2022 年 7—11 月在浙江省衢州市中国农业大学衢州低碳农业科技小院试验田(28°49' N, 119°06' E)进行。该区位于衢江区东南边

陲,属于亚热带季风气候,年平均温度17℃,年降水量在980~2 000 mm,全年日照时数1 710~2 100 h。试验期间降雨量与气温变化如图1所示。土壤类型主要为水稻土,以黄筋泥田为主。耕作层较浅,地下水位低。0~20 cm土壤基本性状为:pH 5.7,有机质质量分数20.6 g/kg,全氮质量分数2.6 g/kg,碱解氮质量分数128.4 mg/kg,速效磷质量分数36.8 mg/kg,速效钾质量分数67.4 mg/kg。

1.2 试验设计

本试验采用随机区组设计,共4个处理,3次重复,小区面积为40 m²(8 m×5 m)。试验处理分别为:1)CK:只施用磷、钾肥;2)FFP:农民传统施肥,常规施氮,施氮总量为280 kg/hm²,*m*(基肥):*m*(分蘖肥)=5:5;3)NPK:含脲酶抑制剂脲铵氮肥,施氮总量为180 kg/hm²(减氮36%),*m*(基肥):*m*(分蘖肥)=5:5;4)CBF:生物炭基肥,施氮总量为180 kg/hm²(减氮36%),作为基肥一次性施入。各处理磷肥

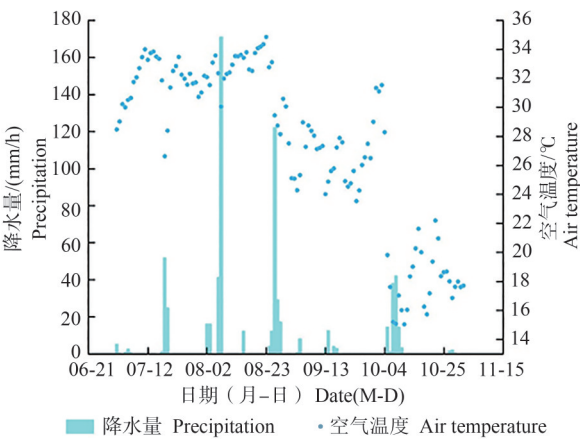


图1 2022年水稻生长季内气温和降雨量的动态变化
Fig.1 Dynamics of temperature and rainfall during the rice growing seasons in 2022

(过磷酸钙,P₂O₅≥12%)和钾肥(氯化钾,K₂O≥60%)插秧前作基肥一次性施入,总养分含量分别为75和120 kg/hm²(表1)。

表1 不同处理施肥量
Table 1 Amount of fertilizer applied in different treatments kg/hm²

处理 Treatment	缩写 Abbreviation	施肥时期 Fertilization period	氮肥施用量 Nitrogen fertilizer application	尿素或炭基肥物料施用量 Materials application
仅施磷钾肥 Only phosphorus and potassium	CK	基肥	—	—
农民传统常规施肥 Traditional conventional fertilization by farmers	FFP	基肥	140	304
		追肥	140	304
优化减氮(含脲酶抑制剂尿素) Optimize nitrogen reduction (Urea-containing urease inhibitor)	NPK	基肥	90	300
		追肥	90	300
优化减氮(炭基肥) Optimize nitrogen reduction (Carbon-based fertilizer)	CBF	基肥	180	1 286

本试验所用含脲酶抑制剂脲铵氮肥为中基安徽红四方肥业股份有限公司产出的‘赛料素’,即含有正丁基硫代磷酰三胺(N-(n-butyl) thiophosphoric triamide, NBPT)的脲铵氮肥,其中总氮(N)含量≥31%;生物炭基肥的养分含量(N-P₂O₅-K₂O)为14-14-12,其中生物质炭(以C计)含量≥6%,总养分含量≥40%。试验使用水稻品种为‘浙大粳优一

号’。水稻于2022年7月8日开始插秧,至当年11月收获。所有小区间筑高30 cm、宽30 cm的田埂,并覆塑料膜,独立排灌。前期浅水勤灌,待田间分蘖数达到预期穗数的80%时排水晒田7 d,收获前7 d停止灌水。病虫害和杂草防控主要由人工打药和无人机飞防配合,与当地做法一致。试验地前期为农民传统施肥持续水稻种植,试验前期进行土

壤异质性检验,未发现土壤异质性。为进一步减少土壤养分分布不均对本试验的影响,试验前对试验区进行翻耕并人工整平。

1.3 样品采集及分析

本试验采用静态暗箱-气相色谱法来采集和测定 CH_4 与 N_2O 气体。静态暗箱由底座与暗箱组成,其中暗箱由 PVC 板胶结制成,外部被带有铝箔纸的海绵包裹,暗箱尺寸为 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.6\text{ m}$,暗箱侧面设置采样口,同时在暗箱顶部设置圆形小孔以便插入电子温度计。底座由不锈钢制成,尺寸为 $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m} \times 0.3\text{ m}$,在采样前将底座埋入地下插入田面水中并确保暗箱倒扣时保持水平。

采样时,将暗箱放置在底座上,通过在底座凹槽中注水密封暗箱和底座,以隔绝箱内外气体流通。每隔 15 min 进行一次采样,共进行 3 次采样。采样过程中,打开箱顶部的风扇使箱内气体充分混匀,然后使用 50 mL 注射器缓慢抽取箱内气体 30 mL,重复 3 次排净注射器内空气等杂质,并把第 4 次抽取的气体注入 15 mL 真空玻璃瓶中,同时记录箱中的温度。采样时间段为北京时间上午 8:00 至 11:00。在水稻插秧(2022 年 7 月 8 日)和追施分蘖肥(2022 年 7 月 25 日)后的前两周,每隔 2 d 进行一次采样,之后改为每 7 d 进行一次。

采集的气体样品送至实验室,使用 Agilent 7890B 气相色谱仪测定 CH_4 和 N_2O 含量。 CH_4 使用火焰离子化检测器(Flame ionization detector, FID)测定,工作温度 $250\text{ }^\circ\text{C}$,高纯度 H_2 流量 60 mL/min ,高纯度空气流量 400 mL/min ; N_2O 使用微池电子捕获检测器(Electron capture detector, ECD)测定,工作温度 $300\text{ }^\circ\text{C}$,氦气流量 2 mL/min ,含有 $5\%\text{CH}_4$ 。

CH_4 和 N_2O 排放通量计算公式如下^[23]:

$$F = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{dc}{dt} \times \frac{273}{273 + T} \quad (1)$$

式中: F 为气体排放通量, $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; ρ 为标准大气压下 CH_4 或 N_2O 的气体密度, kg/m^3 ; V 为静态箱内体积, m^3 ; A 为静态箱底座面积, m^2 ; dc/dt 为静态箱内气体浓度随时间(h)变化速率; T 为采样时密闭箱的温度, $^\circ\text{C}$ 。根据插值法计算得到每天的气体排放通量累加后得到气体累计排放量。

全球增温潜势(Global warming potential, GWP)和温室气体排放强度(Greenhouse gas intensity, GHGI)是评价农业生产中产生温室气体对大气造成

影响程度的重要指标。GWP 是评估不同温室气体对气候变化潜在效应的一个相对指标, GHGI 是把 GWP 与作物产量相结合的综合温室效应评价指标^[24]。

GWP 计算公式如下^[24]:

$$\text{GWP} = E_1 \times 28 + E_2 \times 298 \quad (2)$$

式中: GWP 为全球增温潜势, kg/hm^2 ; E_1 为 CH_4 累计排放量, kg/hm^2 ; E_2 为 N_2O 累计排放量, kg/hm^2 。

GHGI 计算公式如下:

$$\text{GHGI} = \frac{\text{GWP}}{\text{Yield}} \quad (3)$$

式中: GHGI 为温室气体排放强度, kg/kg ; GWP 为全球增温潜势, kg/hm^2 ; Yield 为作物产量, kg/hm^2 。

于 2022 年 11 月 3 日水稻成熟后,人工收割水稻。收获时,各小区采用 4 m^2 取样,实打实收,并使用脱粒机对每个小区的水稻进行脱粒风干后按含水量 14% 测实产。土壤样品采集也在水稻收获后,用土钻(直径 5 cm)采集田间耕层($0\sim 20\text{ cm}$)的土样,每小区取 5 钻,混匀风干后过 2 mm 筛用于测定土壤理化性质。其中土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)和全氮(Total nitrogen, TN)测定采用土壤碳氮元素分析仪(Elementar Vario MAXCN, Germany)。土壤 pH 测定: $m(\text{土}):m(\text{水})=1:5$,摇床振荡 30 min ,静置后用便携式 pH 计(PHS-3C, 中国)测定。采用环刀法测定土壤容重^[25]。

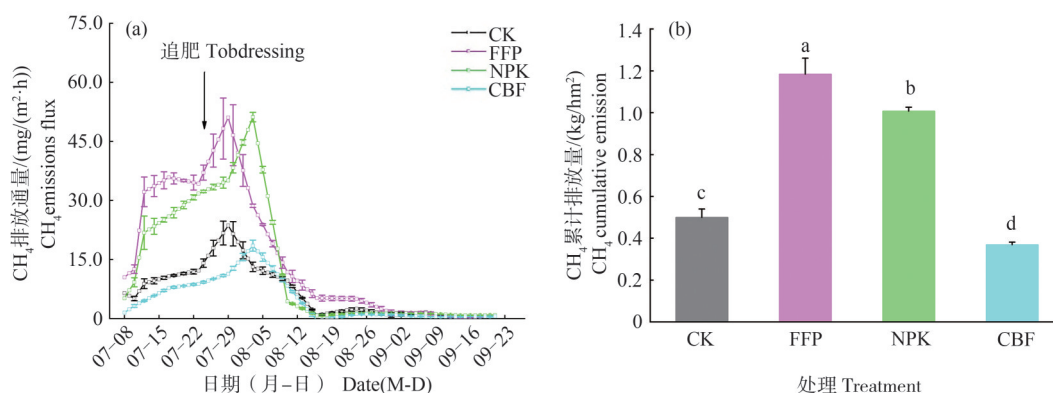
1.4 数据处理及分析

采用 Microsoft Excel 2022 软件整理原始数据,测量指标和多因素方差分析采用 SPSS 22.0 统计软件进行,采用 LSD 法进行显著性水平检验($P < 0.05$)并采用 Origin 8.5 绘制折线图和柱状图。

2 结果与分析

2.1 优化减氮对稻田 CH_4 排放的影响

所有处理下水稻 CH_4 排放趋势基本一致,主要集中在分蘖期(图 2(a))。总体趋势为从返青到分蘖期, CH_4 排放量迅速增加;分蘖期以后, CH_4 排放量急剧降低,并缓慢趋于平稳。各施肥处理中, CK 与 FFP 处理在分蘖期 7 月 29 日出现了 CH_4 排放通量峰值,分别为 23.6 和 $51.1\text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;而 NPK 与 CBF 处理则在 8 月 3 日达到 CH_4 排放通量最高峰值,分别为 51.2 和 $18.5\text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。与 FFP 相比,各处理均降低了生育期内土壤 CH_4 的排放。与 CK 处理相比, CBF 处理 CH_4 排放降低 26.2% 。



CK:不施氮肥;FFP:农民传统常规施氮;NPK:含脲酶抑制剂尿素;CBF:生物炭基肥。不同字母表示差异显著($P < 0.05$),相同字母表示差异不显著($P > 0.05$)。下同。

CK: No nitrogen fertilizer application; FFP: Farmers traditional nitrogen application; NPK: Urea enzyme inhibitor-containing urea; CBF: Biochar-based fertilizer. Different letters represent significant differences ($P < 0.05$), while the same letters represent no significant differences ($P > 0.05$). The same below.

图2 不同处理对水稻田CH₄排放通量(a)和累积排放量(b)的影响

Fig.2 Effects of different treatments on CH₄ flux emissions (a) and cumulative emissions (b) in paddy soil

水稻生育期内CH₄排放通量累加获得CH₄累积排放量(图2(b))。NPK和CBF处理的CH₄累积排放量分别为1.0和0.4 kg/hm²,相比于FFP,显著降低15.0%和68.9%($P < 0.05$);而相比于CK处理,NPK和CBF处理的CH₄累积排放量分别增加和减少了102%和26.2%。CK处理下水稻CH₄累积排放量为0.5 kg/hm²,CBF处理水稻CH₄排放累积量仍低于CK。

2.2 优化减氮对稻田N₂O排放的影响

在水稻生长期,N₂O排放通量波动较大(图3(a))。整体上,各处理呈现出先增加后减少并趋于

稳定的趋势。N₂O排放高峰主要在分蘖旺期(田间分蘖数达到预期穗数的80%)至末期,分蘖旺期时达到高峰,分蘖后期下降后趋于稳定,但仍处于较高排放水平。与CK相比,其他3个处理都增加了N₂O的排放通量,其中FFP、NPK和CBF分别增加了43.1%、20.2%和54.2%。相较于NPK处理,CBF处理N₂O累积排放量增加了28.2%。与此同时,CBF在分蘖旺盛前期8月3日达到N₂O排放峰值,为162.1 μg/(m²·h);而CK、NPK和FFP处理均在分蘖旺期8月10日达到N₂O排放峰值,分别为87.4、91.4和114.2 μg/(m²·h)。

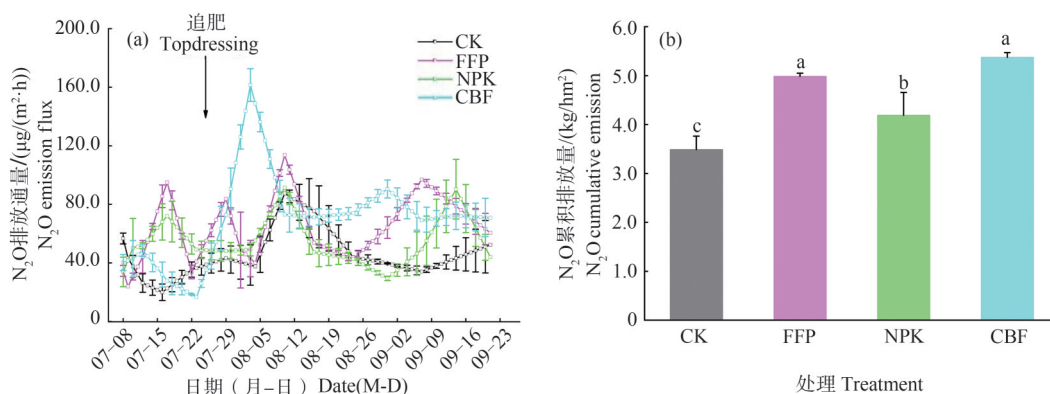


图3 不同处理对水稻田N₂O排放通量(a)和累积排放量(b)的影响

Fig.3 Effects of different treatments on N₂O flux emissions (a) and cumulative emissions (b) in paddy soil

将水稻生育期内每天N₂O排放通量累加后得到N₂O累积排放量(图3(b))。NPK处理N₂O累积排放量为4.2 kg/hm²,相较于FFP显著降低了

19.6%($P < 0.05$)。CBF处理N₂O累积排放量为5.4 kg/hm²,相较于FFP增加了7.8%。与CK相比,其他处理均显著增加了N₂O的排放($P < 0.05$),

N₂O 累计排放量在 FFP、NPK 以及 CBF 处理下分别增加了 43.1%、20.0% 和 54.0%。

2.3 优化减氮对稻田 GWP、GHGI 及产量的影响

施肥显著提高了水稻田 GWP(表 2)。与 CK 相比,FFP、NPK 和 CBF 处理 GWP 分别显著提高了 44.2%、21.2% 和 51.2% ($P<0.05$)。与 FFP 相比,NPK 显著减少 GWP 15.9% ($P<0.05$),CBF 无显著变化。CBF 处理具有最高的 GHGI,NPK 处理的 GHGI 最低,但各处理间并没有显著差异。氮肥施用促进水稻增产,其排序依次为 CBF>FFP>

NPK>CK。其中 CBF 处理水稻产量最高为 10 354.0 kg/hm²,较 CK 处理产量显著增加了 39.5% ($P<0.05$)。与 CK 相比,NPK 处理显著增加产量 25.0% ($P<0.05$),但 CBF、NPK 处理与 FFP 无显著差异。

2.4 不同处理对稻田土壤理化性状和温室气体排放的影响

不同处理对土壤养分的影响均不显著,可见仅 1 年的施肥处理并不能显著改变土壤理化性质(表 3)。仅 CBF 处理下土壤 pH 呈降低的效果,但不显著。

表 2 不同施肥模式对 CH₄和 N₂O 累积排放、GWP、GHGI 和产量的影响

Table 2 Seasonal cumulative CH₄ and N₂O emissions, GWP, GHGI and yield as affected by different fertilizer regimes

处理 Treatment	全球增温潜势/ (kg/hm ²) Global warming potential	水稻产量/ (kg/hm ²) Rice yield	温室气体排放强度/ (kg/kg) Greenhouse gas intensity
CK	1 052.3±84.9c	7 422.2±384.2b	142.2±18.5a
FFP	1 518.1±17.3a	9 985.1±722.0a	153.0±12.8a
NPK	1 276.1±139.0b	9 277.4±726.1a	138.1±16.4a
CBF	1 611.0±30.2a	10 354.0±978.1a	157.0±18.5a

注:CK:不施氮肥;FFP:农民传统常规施氮;NPK:含脲酶抑制剂尿素;CBF:生物炭基肥。同列数据不同字母表示差异显著($P<0.05$),相同字母表示差异不显著($P>0.05$)。下同。

Note: CK: No nitrogen fertilizer application; FFP: Farmers traditional nitrogen application; NPK: Urea enzyme inhibitor-containing urea; CBF: Biochar-based fertilizer. Within the same column, different letters represent significant differences ($P<0.05$), while the same letters represent no significant differences ($P>0.05$). The same below.

表 3 稻田土壤基本理化性质

Table 3 Basic physical and chemical properties of the studied paddy field soils

处理 Treatment	土壤有机碳/(g/kg) Soil organic carbon	全氮/(g/kg) Total nitrogen	碳氮比 C/N	pH	土壤容重/(g/cm ³) Soil bulk density
CK	20.8±0.1a	2.3±0.5a	9.2±0.2a	5.9±0.2a	1.0a
FFP	20.8±0.0a	2.2±0.3a	9.4±0.2a	5.9±0.2a	1.0a
NPK	20.9±0.1a	2.2±0.5a	9.4±0.3a	5.9±0.3a	1.0a
CBF	20.8±0.1a	2.3±0.6a	9.2±0.3a	5.6±0.3a	1.0a

3 讨 论

3.1 含脲酶抑制剂脲铵氮肥和生物炭基肥对稻田温室气体排放的影响

本研究表明,CH₄的排放高峰主要集中在水稻分蘖期,与前人研究结果一致^[26-27],含脲酶抑制剂脲

铵氮肥降低了稻田 CH₄排放,生物炭基肥表现出更好的 CH₄减排效果。水稻在移栽后处于淹水还原状态,为厌氧甲烷菌代谢提供了良好的环境,促使 CH₄大量产生^[28]。脲酶抑制剂可以有效阻断土壤中厌氧甲烷菌代谢产生 CH₄过程中的酶催化反应^[29],从而减少 CH₄的排放^[30-31]。生物炭基肥处理能有效抑

制土壤中 CH_4 的排放,主要有以下原因:生物炭提高了土壤通气性及土壤养分的供应,从而提高了 CH_4 的氧化活性^[28],降低 CH_4 排放。同时,生物炭也增加了土壤有机碳含量,进一步增强土壤中甲烷氧化菌对甲烷的氧化能力,进而降低了土壤中 CH_4 的排放^[32]。Hu等^[33]认为,硝酸盐给土壤甲烷氧化菌提供了大量 CH_4 氧化的底物,生物炭基肥促进土壤硝化作用,增加了土壤硝酸盐含量,进而增加对 CH_4 的氧化^[34]。据此可以推断提高土壤通气性是抑制土壤 CH_4 排放的关键因素。

本研究发现,与农民传统常规施肥相比,含脲酶抑制剂脲铵氮肥对 N_2O 具有良好的减排效果,生物炭基肥处理则没有显著变化。土壤 N_2O 主要来源于微生物参与的氮循环过程,即硝化和反硝化过程^[35]。施用脲酶抑制剂通过抑制尿素水解减少硝化和反硝化反应底物从而间接抑制 N_2O 的排放^[18]。Akiyama等^[36]研究则表明脲酶抑制剂降低温室气体的排放是暂时的,随着抑制效果的消失,排放通量会不同程度的增加。本研究发现稻田 N_2O 在分蘖旺期至后期具有较高排放量,分蘖后期 N_2O 排放下降但仍处于较高水平,与Akiyama等^[36]的研究结果一致。

先前的研究表明,生物炭抑制 N_2O 排放,显著降低累计排放量^[37],Spokas等^[38]也得出同样的结论。但本研究与其相反,生物炭基肥对 N_2O 的减排效果并不理想。其原因可能如下:生物炭基肥提高了土壤通气性,促进了异养硝化和反硝化作用,与氮肥配施增强了土壤的反硝化作用,导致 N_2O 排放较高^[39];生物炭基肥表面的官能团抑制 N_2O 的还原能力,增加 N_2O 排放^[40];同时,生物炭基肥稳定性碳源的输入增强了与水稻根系间有效态氮的竞争,加剧了土壤氮循环过程。

3.2 含脲酶抑制剂脲铵氮肥和生物炭基肥对水稻产量的影响

氮肥在作物增产方面表现出一定的积极性,大量研究表明农田氮肥施用提高作物对养分的吸收进而增加作物产量^[41-42]。然而,不同肥料的应用具有不同的增产效果,并且过量的氮肥添加可能对作物表现出一定的减产效果^[43-44]。张文学等^[45]研究表明,双季稻田在不减氮的基础上添加脲酶抑制剂,早、晚稻均出现增产效果。李长青等^[46]研究表明,与施用等氮量的尿素处理相比,脲酶抑制剂处理下

小麦-玉米的周年产量提高了13.3%,表明脲酶抑制剂具有明显的增产效果。本研究发现,与农民传统常规施肥相比,含脲酶抑制剂脲铵氮肥和生物炭基肥在减氮36%的基础上维持了水稻产量,即在减氮的基础上含脲酶抑制剂脲铵氮肥表现出的增产效果仍可以维持与高氮施用下的同等产量。杨依彬等^[47]研究发现,增效氮肥(含脲酶抑制剂)对水稻产量的效果与常规尿素处理的效果相类似,与本研究结果类似。推测原因可能是不同地区的土壤特性、施肥方式以及栽培管理等措施不同导致不同的施肥效果。此外,脲酶抑制剂的作用有一定时效性,受土壤温度、水分、质地及田间管理措施等外部因素影响,不同处理作用时效有所不同,其对作物产量的影响随之表现出一定差异^[48]。因此,本研究结果可能是由这些因素综合作用的结果,需要进一步研究加以验证。

已有研究表明,生物炭基肥可显著提高夏玉米和冬小麦产量,较单施氮肥处理平均增幅分别为10.0%和4.2%^[49]。本研究发现,与不施氮相比,炭基肥显著提高了作物产量,这与前人研究结果一致^[50-51]。与农民传统常规施肥相比,生物炭基肥具有增产趋势,但并未表现出显著性,这足以表明生物炭基肥在减氮的基础上具有稳产的能力。生物炭基肥具有比表面积大和吸附能力强等特点,能促进土壤对矿质氮的吸附,被吸附的氮素在作物各生育时期逐步释放,有利于维持氮素的供需平衡,减少肥料氮素的损失,提高土壤对氮素的吸附转化及作物对养分的吸收利用效率,进一步表现出增产效应^[52-53]。相似的,炭基肥增产效应的稳定性也将受到位点特异性的影响。

本研究仅基于1年的田间试验,结果受到多种因素的影响,未来需进行长期观测以保证试验效果的稳定性。此外本研究中生物炭基肥的施用增加了稻田 N_2O 排放,有关生物炭基肥对温室气体减排效应机理的工作仍需要进一步探索。

4 结 论

含脲酶抑制剂脲铵氮肥显著降低稻田 N_2O 排放,对 CH_4 排放无显著影响,降低了全球增温潜势。生物炭基肥显著降低稻田 CH_4 排放,增加 N_2O 排放,对全球增温潜势无显著影响。含脲酶抑制剂脲铵氮肥和生物炭基肥在减氮36%的基础上均稳定

了水稻产量,在温室气体减排和稳产协同方面表现出一定的协同作用。因此,采用新型复合肥料来进行优化减氮可促进水稻低碳生产并维持产量,推荐作为一种可持续农艺管理措施。

参考文献 References

- [1] 王绍武. 全球气候变暖的争议[J]. 科学通报, 2010, 55(16): 1529-1531
Wang S W. Controversy over global warming [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(16): 1529-1531 (in Chinese)
- [2] Wei H, Peng C H, Liu S R, Liu X J, Li P, Song H X, Yuan M S, Wang M. Variation in soil methane fluxes and comparison between two forests in China[J]. *Forests*, 2018, 9(4): 204
- [3] 王全成, 陈匆琼, 杨智杰, 刘小飞, 谢锦升, 杨玉盛. 模拟降水减少对中亚热带杉木人工林土壤甲烷吸收的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(10): 3517-3525
Wang Q C, Chen C Q, Yang Z J, Liu X F, Xie J S, Yang Y S. Effects of precipitation exclusion on soil methane uptake under *Cunninghamia lanceolata* plantation in mid-subtropical China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(10): 3517-3525 (in Chinese)
- [4] Ravishankara A R, Daniel J S, Portmann R W. Nitrous oxide (N₂O): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century[J]. *Science*, 2009, 326(5949), 123-125
- [5] Smith D M, Cusack S, Colman A W, Folland C K, Harris G R, Murphy J M. Improved surface temperature prediction for the coming decade from a global climate model[J]. *Science*, 2007, 317(5839), 796-799
- [6] 贾朝阳, 郭亮, 崔嵩, 付强, 刘东. 松花江流域NPP时空演变及其对极端气候的响应机制[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(1): 131-147
Jia Z Y, Guo L, Cui S, Fu Q, Liu D. Spatial-temporal evolution of NPP and its response to extreme climate in Songhua River Basin[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2024, 22(1): 131-147 (in Chinese)
- [7] Zhang D, Shen J, Zhang F, Yu E L, Zhang W F. Carbon footprint of grain production in China[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7
- [8] Liu X J, Zhang Y, Han W X, Tang A H, Shen J L, Cui Z L, Vitousek P, Erisman J W, Goulding K, Christie P, Fangmeier A, Zhang F S. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. *Nature*, 2013, 494(7438), 459-462
- [9] 周晶, 姜昕, 马鸣超, 赵百锁, 李俊. 长期施氮对土壤肥力及土壤微生物的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(6): 8-13
Zhou J, Jiang X, Ma M C, Zhao B S, Li J. Effects of long-term nitrogen fertilization on soil fertility and microorganism: A review [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016(6): 8-13 (in Chinese)
- [10] 祁乐, 高明, 郭晓敏, 牛海东, 李婷, 孙涛, 曹群玲, 汤稼豪. 生物炭施用量对紫色水稻温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(5): 2351-2359
Qi L, Gao M, Guo X M, Niu H D, Li T, Sun T, Cao Q L, Tang J H. Effects of biochar application rates on greenhouse gas emissions in the purple paddy soil [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(5): 2351-2359 (in Chinese)
- [11] Jiang M D, Xu P, Zhou W, Shaaban M, Zhao J S, Ren T, Lu J W, Hu R G. Prior nitrogen fertilization regulates CH₄ emissions from rice cultivation by increasing soil carbon storage in a rapeseed-rice rotation [J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 155, 103633
- [12] 王晓娇. 不同施肥措施下陇中黄土高原旱作玉米农田生态系统碳平衡及其土壤碳库稳定性研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021
Wang X J. Study on ecosystem carbon balance and stability of soil organic carbon pool in dryland corn farmland of the Loess Plateau of central Gansu province under different fertilization measures [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2021 (in Chinese)
- [13] 李新华, 朱振林, 董红云, 杨丽萍, 张锡金, 郭洪海. 氮肥减施对黄淮海地区麦田温室气体排放的影响[J]. 土壤与作物, 2016, 5(4): 215-222
Li X H, Zhu Z L, Dong H Y, Yang L P, Zhang X J, Guo H H. Effects of reduced N fertilizer application on greenhouse gas emission: From wheat fields in Huang-huai-hai Area [J]. *Soils and Crops*, 2016, 5(4): 215-222 (in Chinese)
- [14] 戴相林, 刘雅辉, 孙建平, 赵子婧, 左永梅, 耿雷跃, 张俊娥. 秸秆还田和氮肥减施对滨海盐渍土稻田温室气体排放及氮肥利用率的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29(4): 994-1005
Dai X L, Liu Y H, Sun J P, Zhao Z J, Zuo Y M, Geng L Y, Zhang J E. Combined effects of straw return and reduced nitrogen fertilizer application on greenhouse gas emissions and nitrogen use efficiency in a coastal saline paddy field [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2023, 29(4): 994-1005 (in Chinese)
- [15] Ly P, Duong V Q, Jensen L S, Pandey A, de Neergaard A. Effects of rice straw, biochar and mineral fertiliser on methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) emissions from rice (*Oryza sativa* L.) grown in a rain-fed lowland rice soil of Cambodia: A pot experiment [J]. *Paddy and Water Environment*, 2015, 13(4), 465-475
- [16] Svane S, Sigurdarson J J, Finkenwirth F, Eitinger T, Henrik K. Inhibition of urease activity by different compounds provides insight into the modulation and association of bacterial nickel import and ureolysis [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1), 8503
- [17] Dawar K, Zaman M, Rowarth J S, Blennerhassett J, Turnbull M H. Urease inhibitor reduces N losses and improves plant-bioavailability of urea applied in fine particle and granular forms under field conditions [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 144(1), 41-50
- [18] Zhao Z C, Wu D, Bol R, Shi Y F, Guo Y B, Meng F Q, Wu W L. Nitrification inhibitor's effect on mitigating N₂O emissions was weakened by urease inhibitor in calcareous soils [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 166, 142-150
- [19] 赵自超, 韩笑, 石岳峰, 吴文良, 孟凡乔. 硝化和脲酶抑制剂对华北冬小麦-夏玉米轮作固碳减排效果评价[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 254-262
Zhao Z C, Han X, Shi Y F, Wu W L, Meng F Q. Effect of nitrification and urease inhibitor on carbon sequestration and greenhouse gas emissions in winter wheat and summer maize rotation system in North China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(6): 254-262 (in Chinese)
- [20] Xu X, Boeckx P, Wang Y, Huang Y, Zheng X, Hu F, Cleemput O V. Nitrous oxide and methane emissions during rice growth and through rice plants: Effect of dicyandiamide and hydroquinone [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 36, 53-58
- [21] Boeckx P, Xu X, Cleemput O V. Mitigation of N₂O and CH₄ emission from rice and wheat cropping systems using dicyandiamide and hydroquinone [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2005, 72(1), 41-49
- [22] 姚凡云, 王立春, 多馨曲, 刘志铭, 吕艳杰, 曹玉军, 魏雯雯, 王永军. 不同氮肥对东北春玉米农田温室气体周年排放的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1303-1311
Yao F Y, Wang L C, Duo X Q, Liu Z M, Lv Y J, Cao Y J, Wei W W, Wang Y J. Effects of different nitrogen fertilizers on annual emissions of greenhouse gas from maize field in Northeast China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4): 1303-1311 (in Chinese)

- [23] Hawthorne I, Johnson M S, Jassal R S, Black T A, Grant N J, Smukler S M. Application of biochar and nitrogen influences fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O in a forest soil[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 192, 203-214
- [24] 陶甄, 李中阳, 李松旌, 李宝贵, 李嗣艺, 高峰, 刘源. 硝化抑制剂、脲酶抑制剂与生物炭复配对土壤温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(6): 1368-1379
- Tao Z, Li Z Y, Li S J, Li B G, Li S Y, Gao F, Liu Y. Impact of compound addition of biochar, nitrification inhibitor, and urease inhibitor on greenhouse gas emissions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(6): 1368-1379 (in Chinese)
- [25] 李诗, 张俊辉, 胡钧铭, 周凤珏, 李婷婷, 徐美花, 马洁萍, 陆展彩. 等氮替代施入生物炭对南方免耕早稻田温室气体排放的影响[J]. 中国农业气象, 2023, 44(10): 863-875
- Li S, Zhang J H, Hu J M, Zhou F J, Li T T, Xu M H, Ma J P, Lu Z C. Effect of isonitrogen substitution for biochar application on greenhouse gas emissions from southern No-till early rice fields[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2023, 44(10): 863-875 (in Chinese)
- [26] 郑士英, 杨彩玲, 徐世宏, 唐新莲, 张玉, 汪妮娜, 江立庚. 不同耕作方式与施氮水平下稻田 CH₄ 排放的动态变化[J]. 南方农业学报, 2018, 43(10): 1509-1513
- Zheng T Y, Yang C L, Xu S H, Tang X L, Zhang Y, Wang N N, Jiang L G. Dynamic changes of CH₄ emission from rice fields under different tillage patterns and nitrogen application levels[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2018, 43(10): 1509-1513 (in Chinese)
- [27] Chen Y, Li S Y, Zhang Y J, Li T T, Ge H M, Xia S M, Gu J F, Zhang H, Lv B, Wu X X, Wang Z Q, Yang J C, Zhang J H, Liu L J. Rice root morphological and physiological traits interaction with rhizosphere soil and its effect on methane emissions in paddy fields[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 129, 191-200
- [28] 单丽伟, 冯贵颖, 范三红. 产甲烷菌研究进展[J]. 微生物学杂志, 2003, 23(6): 42-46
- Shan L W, Feng G Y, Fan S H. Progress in genome and methanogenesis of methanogens[J]. *Journal of Microbiology*, 2003, 23(6): 42-46 (in Chinese)
- [29] 李健陵, 李玉娥, 周守华, 苏荣瑞, 万运帆, 王斌, 蔡威威, 郭晨, 秦晓波, 高清竹, 刘硕. 节水灌溉、树脂包膜尿素和脲酶/硝化抑制剂对双季稻温室气体减排的协同作用[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20): 3958-3967
- Li J L, Li Yu'e, Zhou S H, Su R R, Wan Y F, Wang B, Cai W W, Guo C, Qin X B, Gao Q Z, Liu S. Synergistic effects of water-saving irrigation, polymer-coated nitrogen fertilizer and urease/nitrification inhibitor on mitigation of greenhouse gas emissions from the double rice cropping system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(20): 3958-3967 (in Chinese)
- [30] 孙会峰, 周胜, 陈桂发, 付子斌, 刘国兰, 宋祥甫. 水稻品种对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(8): 1595-1602
- Sun H F, Zhou S, Chen G F, Fu Z S, Liu G L, Song X F. Effects of rice cultivars on CH₄ and N₂O emissions from rice fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(8): 1595-1602 (in Chinese)
- [31] Bodelier P, Roslev P, Henckel T, Frenzel P. Stimulation by ammonium-based fertilizers of methane oxidation in soil around rice roots [J]. *Nature*, 2000, 403, 421-424
- [32] 王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 伍延正, 符佩娇, 孟磊, 汤水荣. 椰糠生物炭对热区双季稻田 N₂O 和 CH₄ 排放的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(8): 3931-3942
- Wang Z J, Wang H H, Li J Q, Wu Y Z, Fu P J, Meng L, Tang S R. Effects of coconut chaff biochar amendment on methane and nitrous oxide emissions from paddy fields in hot areas[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(8): 3931-3942 (in Chinese)
- [33] Hu A, Lu Y H. The differential effects of ammonium and nitrate on methanotrophs in rice field soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 85, 31-38
- [34] Le M J, Pierre R. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2001, 37(1), 25-50
- [35] Liu H Y, Ding Y, Zhang Q C, Liu X M, Xu J M, Li Y, Di H J. Heterotrophic nitrification and denitrification are the main sources of nitrous oxide in two paddy soils[J]. *Plant and Soil*, 2019, 445(1), 39-53
- [36] Akiyama H, Yan X Y, Kazuyuki Y. Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N₂O and NO emissions from agricultural soils: Meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(6), 1837-1846
- [37] 赵光昕, 张晴雯, 刘杏认, 田秀平. 农田土壤硝化反硝化作用及其对生物炭添加响应的研究进展[J]. 中国农业气象, 2018, 39(7): 442-452
- Zhao G X, Zhang Q W, Liu X R, Tian X P. Nitrification and denitrification and its response to biochar addition in agricultural soil: A review[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(7): 442-452 (in Chinese)
- [38] Spokas K, Akoskinen W C, Baker J M, Reicosky D C. Impacts of woodchip biochar additions on greenhouse gas production and sorption/degradation of two herbicides in a Minnesota soil [J]. *Chemosphere*, 2009, 77, 574-581
- [39] Li B, Fan C H, Xiong Z Q, Li Q L, Zhang M. The combined effects of nitrification inhibitor and biochar incorporation on yield-scaled N₂O emissions from an intensively managed vegetable field in southeastern China[J]. *Biogeosciences*, 2015, 12, 2003-2017
- [40] Yuan D, Yuan H J, He X D, Hu H X, Qin S, Clough T, Wrage-Mönnig N, Luo J F, He X, Chen M, Zhou S G. Identification and verification of key functional groups of biochar influencing soil N₂O emission [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2021, 57, 447-456
- [41] 向友珍, 张威, 唐子竣, 付骏宇, 李志军, 张富仓. 减施氮肥和接种根瘤菌对大豆生理生长与氮素利用效率及产量的影响[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3): 340-351
- Xiang Y Z, Zhang W, Tang Z J, Fu J Y, Li Z J, Zhang F C. Effects of nitrogen fertilizer reduction and rhizobia inoculation on physiological growth, nitrogen use efficiency and yield of soybean[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(3): 340-351 (in Chinese)
- [42] 常甜, 谷晓博, 蔡文璟, 卢识宇, 郑小波, 李汶洛, 崔魁. 适宜种植密度和施氮量对提高冬小麦产量和水氮利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(24): 56-68
- Chang T, Gu X B, Cai W J, Lu S Y, Zheng X B, Li W L, Cui K. Effects of suitable fertilizer-N application rate and planting density on increasing yield, water and nitrogen use efficiency of winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(24): 56-68 (in Chinese)
- [43] 郑维维, 何超, 杨京平. 作物根际激发效应: 调控农田土壤碳动态及助力碳中和的关键因素[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2024: 1-19
- Zheng W W, He C, Yang J P. Rhizosphere priming effects of crop: A critical factor regulating carbon dynamics in farming land and achieving carbon neutrality[J]. *Journal of Zhejiang University: Agriculture & Life Sciences*, 2024: 1-19 (in Chinese)
- [44] 黄薇, 王圆媛, 刘超, 伍霖峰, 李琪, 胡正华. 大气 CO₂ 浓度升高背景下优化施氮对淹水稻田 CH₄ 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024: 1-16
- Huang W, Wang Y Y, Liu C, Wu Z R, Li Q, Hu Z H. Effects of

- optimized nitrogen application on CH₄ emissions from flooded paddy fields under elevated atmospheric CO₂ concentrations [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024: 1-16 (in Chinese)
- [45] 张文学, 孙刚, 何萍, 梁国庆, 余喜初, 刘光荣, 周卫. 双季稻田添加脲酶抑制剂 NBPT 氮肥的最高减量潜力研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 821-830
- Zhang W X, Sun G, He P, Liang G Q, Yu X C, Liu G R, Zhou W. Highest potential of subtracting nitrogen fertilizer through addition of urease inhibitor NBPT in double-cropping paddy fields [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(4): 821-830 (in Chinese)
- [46] 李长青, 纪萌, 马萌萌, 王硕, 刘欢, 孙志梅. 天然增效剂与化学抑制剂复配对小麦/玉米轮作体系产量、氮素利用及氮平衡的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34(9): 2391-2397
- Li C Q, Ji M, Ma M M, Wang S, Liu H, Sun Z M. Effects of combined natural synergists and chemical inhibitors on yield, nitrogen utilization and balance in wheat/maize rotation system [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(9): 2391-2397 (in Chinese)
- [47] 杨依彬, 程凤娟, 邓兰生, 张承林. 施用不同新型氮肥对广东地区水稻减肥增效对比研究[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(23): 175-178
- Yang Y B, Cheng F X, Deng L S, Zhang C L. Comparative study on fertilizer loss and efficiency improvement of rice in Guangdong Province by applying different new nitrogen fertilizers [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2021, 49(23): 175-178 (in Chinese)
- [48] Fan D J, He W T, Smith W N, Drury C F, Jiang R, Grant B B, Shi Y Y, Song D P, Chen Y H, Wang X X, He P, Zou G Y. Global evaluation of inhibitor impacts on ammonia and nitrous oxide emissions from agricultural soils: A meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(17), 5121-5141
- [49] 高鸣慧, 李娜, 彭靖, 陈坤, 高天一, 韩晓日. 秸秆和生物炭还田对棕壤团聚体分布及有机碳含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(11): 1978-1986
- Gao M H, Li N, Peng J, Chen K, Gao T Y, Han X R. Effects of straw and biochar returning on soil aggregates distribution and organic carbon content in brown soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(11): 1978-1986 (in Chinese)
- [50] 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[J]. 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 [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(5): 1352-1360 (in Chinese)
- [51] 曲晶晶, 郑金伟, 郑聚锋, 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[J]. 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 [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, 28(3): 288-293 (in Chinese)
- [52] 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[J]. 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 [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, 29(5): 671-675 (in Chinese)
- [53] 史多鹏, 叶子壮, 李杰, 许迎浩, 吕慎强, 王林权, 周春菊. 氮肥配施生物炭和脲酶抑制剂对夏玉米-冬小麦产量及氮素利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(4): 51-60
- Shi D P, Ye Z Z, Li J, Xu Y H, Lv S Q, Wang L Q, Zhou C J. Effects of nitrogen combined with biochar and urease inhibitor on yield and nitrogen utilization of summer maize-winter wheat system [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(4): 51-60 (in Chinese)

责任编辑: 董金波



第一作者简介: 江天, 中国农业大学资源与环境学院在读硕士研究生。研究方向为农田土壤固碳减排技术研发。参与国家自然科学基金、衢州市农业碳中和账户建设项目、碳账户核算及减排固碳技术研究项目等多个项目。



通讯作者简介: 田静, 中国农业大学资源与环境学院副教授, 博士生导师。主要研究领域为土壤碳氮循环过程、土壤健康等。以第一作者或通讯作者在 *Nature Communications*、*Global Change Biology* 和 *Soil Biology and Biochemistry* 等期刊上发表文章。参与编著专著 4 部。主持国家自然科学基金、国家重点研发项目子课题、农业农村部重点攻关项目子课题等项目 10 项。现任中国土壤学会土壤健康工作组委员, 植物营养与肥料学会养分循环专业委员会委员, 国际期刊 *European Journal of Soil Science*、*Land Degradation and Development* 副编辑等。