

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.08.041

水炭运筹下稻田痕量温室气体排放与水氮利用关系研究

张作合^{1,2} 李铁成^{2,3} 张忠学^{2,3} 李凯¹ 李浩宇¹ 孔凡丹¹

(1. 绥化学院农业与水利工程学院, 绥化 152061; 2. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;

3. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 为揭示寒地黑土稻田痕量温室气体的排放规律,以及稻田痕量温室气体排放与水分利用效率(WUE)及氮肥吸收利用率(NUE)间的关系,设置干湿交替灌溉和传统淹水灌溉2种水分管理模式,以及4个生物质炭施用量水平(0、2.5、12.5、25 t/hm²),以传统淹水灌溉作为对比,应用¹⁵N示踪技术,研究水炭运筹下寒地黑土稻田甲烷和氧化亚氮排放的季节变化规律,明确稻作水氮利用与甲烷和氧化亚氮排放的关系,并计算温室气体的全球增温潜势(GWP)和排放强度(GHGI)。结果表明:生物质炭施用量相同时,传统淹水灌溉模式的甲烷排放通量显著高于干湿交替灌溉模式($P < 0.05$),而氧化亚氮排放通量均低于干湿交替灌溉模式。干湿交替灌溉模式的甲烷总排放量显著低于传统淹水灌溉模式($P < 0.05$),而氧化亚氮总排放量高于传统淹水灌溉模式,施加生物质炭对稻田甲烷、氧化亚氮减排效果显著;干湿交替灌溉模式下稻田痕量温室气体的GWP、GHGI显著低于传统淹水灌溉模式($P < 0.05$),施加生物质炭可以降低稻田痕量温室气体的GWP、GHGI。干湿交替灌溉模式的WUE显著高于传统淹水灌溉模式($P < 0.05$),适量施入生物质炭可以增加WUE和氮肥整体、基肥、蘖肥、穗肥的NUE。两种灌溉模式稻田痕量温室气体的GWP和GHGI与WUE均呈显著负相关($P < 0.05$);两种灌溉模式稻田痕量温室气体的GWP、GHGI与氮肥整体、基肥、蘖肥、穗肥的NUE均呈显著或极显著负相关。

关键词: 稻田; 生物质炭; 甲烷; 氧化亚氮

中图分类号: S511; S14-3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2022)08-0379-09

OSID:



Relationship between Trace Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Utilization under Water Biochar Management in Paddy Fields

ZHANG Zuohe^{1,2} LI Tiecheng^{2,3} ZHANG Zhongxue^{2,3} LI Kai¹ LI Haoyu¹ KONG Fandan¹

(1. College of Agriculture and Hydraulic Engineering, Suihua University, Suihua 152061, China

2. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

3. Key Laboratory of Effective Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to reveal the emission law of trace greenhouse gases from black soil paddy fields in cold regions and the relationship between trace greenhouse gas emission from paddy fields and water use efficiency and nitrogen absorption and utilization efficiency, two water management modes of dry wet alternate irrigation and traditional flooding irrigation and four biochar application levels (0 t/hm², 2.5 t/hm², 12.5 t/hm² and 25 t/hm²) were set. Compared with traditional flooding irrigation, ¹⁵N tracer technology was applied to study the seasonal variation of methane and nitrous oxide emissions from black soil paddy fields in cold regions under water biochar management, clarify the relationship between rice water and nitrogen utilization and methane and nitrous oxide emissions, and calculate the global warming potential (GWP) and emission intensity (GHGI) of greenhouse gases. The results showed that when the biochar application rate was the same, the methane emission flux of the traditional flooding irrigation mode was significantly higher than that of the dry wet alternate irrigation mode ($P < 0.05$), while the

收稿日期: 2021-08-11 修回日期: 2021-08-30

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(LH2021E118)、国家自然科学基金面上项目(52079028)和黑龙江省省属高等学校基本科研业务费基础研究项目(YWK10236200143)

作者简介: 张作合(1988—),男,副教授,东北农业大学博士后,主要从事农业节水理论与技术研究,E-mail: zhangzuohe@126.com

通信作者: 张忠学(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhangzhongxue@163.com

nitrous oxide emission flux was lower than that of the dry wet alternate irrigation mode. The total emission of methane in the dry wet alternate irrigation mode was significantly lower than that in the traditional flooding irrigation mode ($P < 0.05$), while the total emission of nitrous oxide was higher than that in the traditional flooding irrigation mode. The application of biochar had a significant effect on the emission reduction of methane and nitrous oxide in paddy fields. The GWP and GHGI of trace greenhouse gases in paddy fields under dry wet alternate irrigation mode were significantly lower than those under traditional flooding irrigation mode ($P < 0.05$). The application of biochar could reduce the GWP and GHGI of trace greenhouse gases in paddy fields. The water use efficiency of dry wet alternate irrigation mode was significantly higher than that of traditional flooding irrigation mode ($P < 0.05$). Proper application of biochar could increase the water use efficiency and the absorption and utilization rate of fertilizer as a whole, base fertilizer, tiller fertilizer and ear fertilizer. GWP and GHGI of trace greenhouse gases in paddy fields under the two irrigation modes were significantly negatively correlated with water use efficiency ($P < 0.05$). GWP and GHGI of trace greenhouse gases in paddy fields under the two irrigation modes were significantly or extremely significantly negatively correlated with the absorption and utilization rate of fertilizer as a whole, base fertilizer, tiller fertilizer and panicle fertilizer.

Key words: paddy field; biochar; methane; nitrous oxide

0 引言

全球气候变暖问题已经受到世界各国的高度关注,农业生产活动是甲烷、氧化亚氮等非二氧化碳温室气体排放最主要途径之一,其中稻田是甲烷、氧化亚氮的主要排放源^[1]。研究表明,甲烷和氧化亚氮总排放量中分别有10%~27%、12%~17.9%来自稻田^[2-3],甲烷和氧化亚氮在大气中的浓度虽远低于二氧化碳,但在100年尺度上甲烷和氧化亚氮的GWP分别是二氧化碳的28、265倍,对温室效应的贡献率分别为15%和5%^[4]。因此,减少稻田温室气体排放量是缓解全球气候变暖最为有效的方法之一。近些年来,节水灌溉技术在各国的广泛应用,使水资源供需矛盾问题得到了有效地缓解。该技术的应用能够显著减少稻田甲烷排放量,但增加了稻田氧化亚氮排放量^[5],同时使稻田有机质分解加速,长期应用会导致土壤肥力降低,迫切需要开展与之相适应的碳管理方式,来实现土壤资源的可持续利用。传统的土壤碳管理措施如秸秆还田等,在显著增加土壤中有机碳及土壤肥力的同时,导致土壤碳排放的激增。同时由于东北地区受低温冷凉气候的影响,秸秆还田技术面临许多技术问题,如还田的秸秆当年难以腐烂,影响下年出苗率,病害增加等^[6]。而新型生物质炭施用技术能够提高土壤有机质含量^[7],有利于土壤营养的释放和氮素的保留^[8],增加水稻的产量^[9],同时减少甲烷和氧化亚氮的排放^[10]。

生物质炭对稻田甲烷、氧化亚氮排放的影响已得到广泛研究^[11-14]。刘玉学等^[11]在稻田中施加生物质炭,发现甲烷和氧化亚氮的累积排放量较对照处理显著降低($P < 0.05$),分别降低64.2%~

78.5%和16.3%~18.4%。蒋晨等^[12]研究表明,施用生物质炭可有效减少甲烷排放,且甲烷的排放通量随着生物质炭用量的增加逐渐减少。李松等^[13]发现生物质炭施用可以使稻田甲烷和氧化亚氮累积排放量减少,但过量生物质炭(超过20 t/hm²)对甲烷减排效果下降。祁乐等^[14]研究紫色水稻土中施加生物质炭对稻田甲烷和氧化亚氮排放的影响,发现甲烷排放通量显著减小($P < 0.05$),而对氧化亚氮无明显减排作用。上述研究对生物质炭是否可以减少稻田甲烷和氧化亚氮排放得到的结论较为一致,但不同地域的作用效果差别很大。另外,文献^[15]研究了不同水炭运筹下稻田氧化亚氮排放规律,但只分析了氧化亚氮排放量与氮肥利用率之间的关系,关于甲烷排放与氮肥利用率之间的关系尚未进行研究。

本文以传统淹水灌溉作为对比,应用¹⁵N示踪技术,研究水炭运筹下稻田甲烷和氧化亚氮排放规律,以及稻作水氮利用对稻田痕量温室气体排放的影响,并计算稻田痕量温室气体的全球增温潜势(GWP)、排放强度(GHGI)。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在庆安国家灌溉试验重点站(127°40'45"E, 46°57'28"N)进行,该站位于黑龙江省绥化市庆安县和平镇,是典型的寒地黑土水稻种植区。多年平均气温约为2.9℃,多年平均降水量约为550 mm,多年平均水面蒸发量约为750 mm。作物水热生长期为156~171 d,全年无霜期128 d左右。水稻生长期气温和降雨量日变化曲线如图1所示。

水稻秸秆制成生物质炭的转化率为1/3,即每公顷

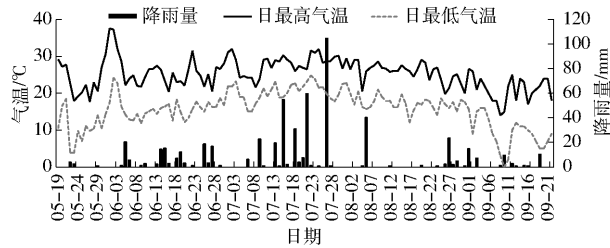


图 1 水稻生长期气温和降雨量日变化曲线

Fig. 1 Daily variation curves of air temperature and precipitation

稻草可制成 2.5 t 的秸秆生物质炭。生物质炭的碳、氮含量分别为 42.72%、1.26%, pH 值为 8.86。供试土壤 pH 值为 6.40, 其他主要理化性质(质量比计): 有机质为 41.80 g/kg, 全氮为 1.51 g/kg, 碱解氮为 148.27 mg/kg, 全磷为 15.61 g/kg, 速效磷为 24.22 mg/kg, 全钾为 19.86 g/kg, 速效钾为 156.13 mg/kg。供试水稻品种为绥粳 18, 插秧密度为 25 穴/m²。

表 1 稻田各生育期水分管理

Tab. 1 Water management during each growth period of rice field

灌溉模式	控制指标	返青期	分蘖前期	分蘖中期	分蘖后期	拔节孕穗期	抽穗开花期	灌浆期	成熟期
传统淹水灌溉 (F)	蓄水上限	50 mm	100 mm	100 mm	晒田	100 mm	100 mm	100 mm	落干
	灌水上限	30 mm	50 mm	50 mm	晒田	50 mm	50 mm	50 mm	落干
	灌水下限	0	0	0	晒田	0	0	0	落干
干湿交替灌溉 (D)	蓄水上限	50 mm	50 mm	50 mm	晒田	50 mm	50 mm	50 mm	落干
	灌水上限	30 mm	30 mm	30 mm	晒田	30 mm	30 mm	30 mm	落干
	灌水下限	θ_s	$0.85\theta_s$	$0.85\theta_s$	晒田	$0.85\theta_s$	$0.85\theta_s$	$0.7\theta_s$	落干

注: θ_s 为根层土壤饱和含水量, 晒田期 10 d, 稻田土壤含水量不低于 $0.6\theta_s$ 。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 肥料吸收利用率

根据文献[16]的方法分别计算各期氮肥的吸收利用率(NUE)。

1.3.2 耗水量

水稻阶段耗水量计算式为

$$ET_i = \Delta W_i + I_i + P_i - R_i \quad (1)$$

式中 ET_i ——生育期阶段耗水量, mm

ΔW_i ——生育期阶段储水量差值, mm

I_i ——生育期阶段灌水量, mm

P_i ——生育期阶段降雨量, mm

R_i ——生育期阶段排水量, mm

i 表示生育阶段, i 为 1、2、3、4、5 分别代表分蘖期、拔节孕穗期、抽穗开花期、灌浆期和成熟期。

水稻生育期总耗水量计算式为

$$ET_{total} = \sum ET_i \quad (2)$$

式中 ET_{total} ——生育期总耗水量, mm

水分利用效率 WUE 计算式为

$$WUE = \frac{Y}{ET_{total}} \quad (3)$$

1.2 试验设计

设置传统淹水灌溉 (F) 和干湿交替灌溉 (C) 两种水分管理模式(表 1)。生物质炭施用量设 4 个水平, 即 0 t/hm² (B0)、2.5 t/hm² (B1)、12.5 t/hm² (B2)、25 t/hm² (B3)。共计 8 个处理, 每个处理 3 次重复, 共 24 个方形试验小区 (10 m × 10 m)。秸秆生物质炭在表层土壤中施入, 并均匀混合; 纯氮施入量 110 kg/hm², 分为基肥 (50%)、蘖肥 (20%)、穗肥 (30%) 3 个阶段施入; K₂O 施入量 80 kg/hm², 分基肥 (50%) 和穗肥 (50%) 2 个阶段施入; P₂O₅ 施入量 45 kg/hm², 作为基肥一次性全部施入, 并根据各阶段的施入比例计算尿素、过磷酸钙和硫酸钾的实际施入量。试验小区内设置 ¹⁵N 示踪微区, 在每个小区内预埋 4 m² 无底钢制方形框, 微区内施用丰度为 10.22% 的 ¹⁵N 标记尿素 (上海化工研究院生产), 其他条件与所在小区相同。

式中 Y ——水稻经济产量, kg/hm²

1.3.3 甲烷、氧化亚氮样品采集

甲烷、氧化亚氮的排放通量采用人工静态暗箱—气象色谱法定位观测。静态箱结构如图 2 所示, 静态箱由上部箱体(材料为 5 mm 透明有机玻璃, 根据株高变化选用 60 cm 和 120 cm 高度的箱体)和下部不锈钢底座(顶端密封槽宽 2 cm、深 5 cm, 底部设置通气孔)构成, 预埋底座和温度传感器。按照静态箱结构示意图安装采气管(入箱 20 cm)、三通

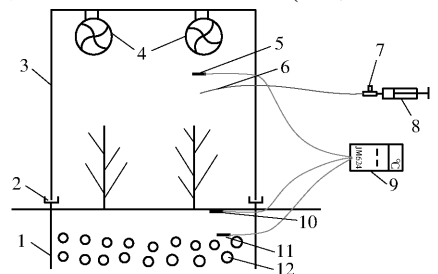


图 2 静态箱结构示意图

Fig. 2 Static box structure diagram

1. 底座 2. 密封水槽 3. 箱体 4. 风扇 5. 箱内温度传感器
6. 采气管 7. 三通阀 8. 注射器 9. 测温表 10. 地表温度传感器
11. 10 cm 土壤湿度传感器 12. 通气孔

阀和注射器(60 mL),三通阀另一个孔与采气袋连接。采气时,将水注入不锈钢底座的密封槽中来避免箱体中的气体与外界发生交换。田间气体采样按照生育期划分时段,采集气样的时间为当日的10:00—14:00之间^[15,17]。每隔7~10 d采样一次,特殊情况增加气样采集次数。采样时,箱密封放置后静止2~3 min,使箱内气体混合均匀。每个处理分别在第0、10、20、30分钟各采集1次气体,一个气体样品为前后连续采集的两个气袋,并同步记录气温、地温和箱内温度。

1.3.4 气体样品测定

甲烷、氧化亚氮样品采用气相色谱(岛津GC-17A型,日本)检测甲烷、氧化亚氮浓度。

稻田甲烷、氧化亚氮排放通量计算式为

$$F = \rho H \frac{dc}{dt} \frac{273}{273 + T} \frac{P}{P_0} \quad (4)$$

式中 F ——甲烷的排放通量($\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)或氧化亚氮的排放通量($\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)

ρ ——标准状态下甲烷、氧化亚氮的密度,分别为0.714、1.964 g/m^3

H ——箱体有效高度,m

dc/dt ——采样过程中采样箱内甲烷或氧化亚氮浓度变化率, $\text{mL}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

T ——采样箱内的平均温度, $^{\circ}\text{C}$

P_0 ——标准大气压

P ——采样箱内气压,取 $P = P_0$

甲烷、氧化亚氮总排放量(kg/hm^2)^[18]计算式为

$$E_c = 0.01 \times 24 \times$$

$$\left[\frac{F_1 + F_n}{2} + \sum_{i=1}^n \frac{F_i + F_{i+1}}{2} (t_{i+1} - t_i) \right] \quad (5)$$

式中 n ——生育期观测次数

F_i ——第 i 次采样时甲烷、氧化亚氮排放通量, $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

F_{i+1} ——第 $i+1$ 次采样时甲烷、氧化亚氮排放通量, $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

其中 $t_{i+1} - t_i$ 为第 i 次到 $i+1$ 次采样的时间间隔,d。

1.3.5 GWP 和 GHGI

全球增温潜势 GWP(二氧化碳的 GWP 为 1)以 100 a 为时间尺度,单位质量的甲烷和氧化亚氮气体的 GWP 分别为二氧化碳的 28、265 倍,计算式为

$$\text{GWP} = 28f_{\text{CH}_4} + 265f_{\text{N}_2\text{O}} \quad (6)$$

式中 f_{CH_4} $f_{\text{N}_2\text{O}}$ ——稻田生态系统在水稻本田期甲烷、氧化亚氮的排放量

温室气体排放强度 GHGI,即单位产量的全球增温潜势(kg/kg),计算式为

$$\text{GHGI} = \text{GWP}/Y \quad (7)$$

1.3.6 产量

水稻成熟期进行测产。

1.3.7 气象数据

由 DZZ2 型自动气象站自动记录。气体采样时用温度计测定土表温度、5 cm 土层温度和 10 cm 土层温度。

2 结果与分析

2.1 不同水炭运筹下稻田甲烷、氧化亚氮排放规律

图 3 为水炭运筹下相同灌溉模式不同处理的甲烷排放通量变化曲线。比较干湿交替灌溉和传统淹水灌溉模式甲烷排放通量的变化曲线得到,干湿交替灌溉模式甲烷排放通量有 3 次峰值出现,而传统淹水灌溉模式只出现 2 次排放峰值。两种灌溉模式所有处理中甲烷的排放通量最高峰值均出现在插秧后第 65 天的拔节孕穗期。干湿交替灌溉模式水稻本田生长期甲烷排放通量最大值为 23.51 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,而传统淹水灌溉模式甲烷排放通量最大值为 45.13 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;干湿交替灌溉模式甲烷排放通量最小值为 0.50 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,而传统淹水灌溉模式甲烷排放通量最小值为 0.86 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。生物质炭施用量相同时,传统淹水灌溉模式各处理甲烷的排放通量较大,而干湿交替灌溉模式较小。

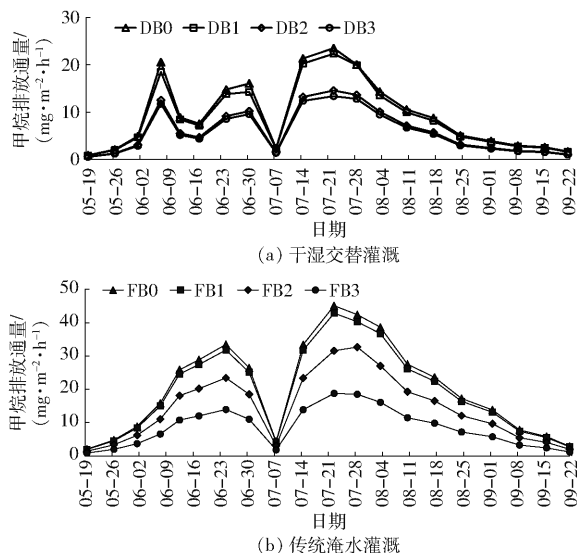


图 3 水稻本田生长期各处理甲烷排放通量变化曲线

Fig. 3 Changes of methane emission flux of different treatments in rice growth period

图 4 为水炭运筹下相同灌溉模式不同处理的氧化亚氮排放通量变化曲线。比较干湿交替灌溉和传统淹水灌溉模式氧化亚氮排放通量的变化曲线得到,干湿交替灌溉模式各处理氧化亚氮排放通量在整个生育期剧烈波动,而常规灌溉模式各处理氧化

亚氮排放通量波动较为和缓。干湿交替灌溉和传统淹水灌溉模式氧化亚氮排放通量最高峰值出现时间和数值都不同,传统淹水灌溉模式氧化亚氮的排放通量最高峰值在分蘖期晒田时出现,而干湿交替灌溉模式氧化亚氮的排放通量最高峰值则在拔节孕穗期出现。干湿交替灌溉模式水稻本田生长期氧化亚氮排放通量最大值为 $58.37 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,而传统淹水灌溉模式氧化亚氮排放通量最大值为 $41.03 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;干湿交替灌溉模式氧化亚氮排放通量最小值为 $0.62 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,而传统淹水灌溉模式氧化亚氮排放通量最小值为 $-7.75 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。生物质炭施用量相同时,干湿交替灌溉模式各处理氧化亚氮的排放通量均高于传统淹水灌溉模式。

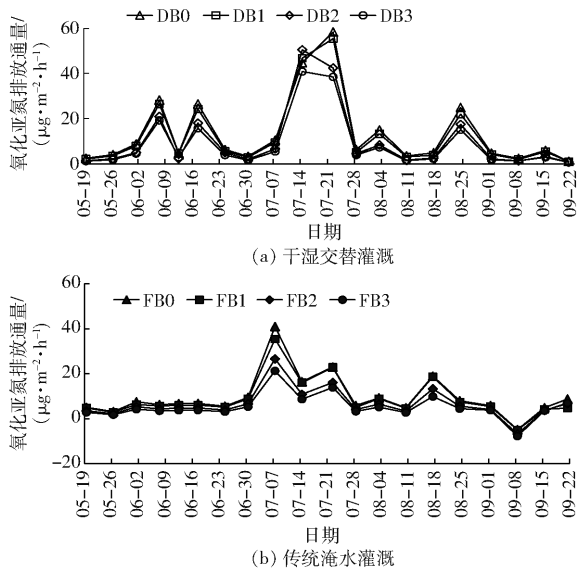


图 4 水稻本田生长期各处理氧化亚氮排放通量变化曲线
Fig. 4 Changes of nitrous oxide emission flux of different treatments in rice growth period

2.2 不同水炭运筹下稻田甲烷、氧化亚氮排放总量、GWP 和 GHGI

由表 2 可知,生物质炭施用量相同时,稻作传统

淹水灌溉模式的甲烷总排放量显著高于干湿交替灌溉模式 ($P < 0.05$),施加生物质炭可以明显减少稻田甲烷排放量。生物质炭施用量相同时,稻作干湿交替灌溉模式氧化亚氮总排放量高于传统淹水灌溉模式,施加生物质炭可以明显减少稻田氧化亚氮排放量。虽然单位氧化亚氮排放所产生的 GWP 远大于甲烷,但氧化亚氮排放所产生的 GWP 仅为甲烷的 1% 左右。干湿交替灌溉模式产生的 GWP 小于传统淹水灌溉模式,且氧化亚氮排放产生的 GWP 在二者所产生 GWP 总量中所占的比例较小,因此各处理 GWP 的变化趋势与单位产量甲烷排放量的变化趋势基本一致。生物质炭施用量相同时,稻作干湿交替灌溉模式所产生的 GWP 显著低于传统淹水灌溉模式 ($P < 0.05$),施加生物质炭可以明显减少稻田 GWP。干湿交替灌溉模式和传统淹水灌溉模式水稻本田生长期的 GHGI 分别在 $0.58 \sim 1.04 \text{ kg}/\text{kg}$ 和 $0.86 \sim 2.23 \text{ kg}/\text{kg}$ 范围内变化。干湿交替灌溉和传统淹水灌溉模式的 GHGI 最大值的处理是 DB0 和 FB0,而 GHGI 最小值的处理是 DB2 和 FB3。比较干湿交替灌溉和传统淹水灌溉模式之间稻田 GHGI 可知,生物质炭施用量相同时,稻作干湿交替灌溉模式的 GHGI 显著低于传统淹水灌溉模式 ($P < 0.05$),分别降低 53.47%、54.04%、59.86% 和 30.19%。施加生物质炭可以明显减少水稻本田生长期的 GHGI,稻作干湿交替灌溉模式下 DB1、DB2、DB3 处理的 GHGI 较 DB0 处理分别降低 6.75%、43.54%、42.31%,稻作传统淹水灌溉模式下 FB1、FB2、FB3 处理的 GHGI 较 FB0 处理分别降低 5.58%、34.56%、61.55%。试验结果表明,生物质炭施用量相同时,稻作干湿交替灌溉模式所产生的 GWP、GHGI 显著低于传统淹水灌溉模式 ($P < 0.05$),施加生物质炭可以明显减少稻田痕量温室气体甲烷、氧化亚氮的 GWP、GHGI。

表 2 各处理的 GWP 和 GHGI
Tab. 2 GWP and GHGI for each treatment

处理	甲烷总排放量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	氧化亚氮总排 放量/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	甲烷的 GWP/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	氧化亚氮的 GWP/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	GWP 总量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	GHGI/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
DB0	299.05 ^c	0.43 ^a	8 373.40 ^c	113.95 ^a	8 487.35 ^c	8 196.30 ^d	1.04 ^c
DB1	281.69 ^c	0.40 ^b	7 887.32 ^c	106.00 ^b	7 993.32 ^c	8 277.64 ^d	0.97 ^d
DB2	190.44 ^d	0.32 ^c	5 332.32 ^d	84.80 ^c	5 417.12 ^d	9 265.87 ^a	0.58 ^e
DB3	178.03 ^d	0.28 ^d	4 984.84 ^d	74.20 ^d	5 059.04 ^d	8 468.38 ^e	0.60 ^e
FB0	639.87 ^a	0.30 ^c	17 916.36 ^a	79.50 ^c	17 995.86 ^a	8 086.22 ^e	2.23 ^a
FB1	607.91 ^a	0.27 ^d	17 021.48 ^a	71.55 ^d	17 093.03 ^a	8 134.80 ^e	2.10 ^a
FB2	452.24 ^b	0.20 ^e	12 662.72 ^b	53.00 ^e	12 715.72 ^b	8 730.77 ^b	1.46 ^b
FB3	267.77 ^{cd}	0.16 ^f	7 497.56 ^{cd}	42.40 ^f	7 539.96 ^{cd}	8 811.43 ^b	0.86 ^d

注:同列数字后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$),下同。

2.3 不同水炭运筹下稻作的水分利用效率和氮肥利用率

由表 3 可知,两种灌溉模式各处理水稻的耗水量分别在 5 024.47 ~ 6 037.99 m³/hm²和 6 946.37 ~ 7 740.81 m³/hm²范围内变化。生物质炭施用量相同时,干湿交替灌溉模式各处理水稻的耗水量显著低于传统淹水灌溉模式($P < 0.05$)。生物质炭施用量相同时,稻作干湿交替灌溉模式的 WUE 显著高于传统淹水灌溉模式($P < 0.05$),分别提高 30.77%、27.52%、40.65% 和 28.35%。稻作干湿交替灌溉模式下 DB1、DB2、DB3 处理的 WUE 较 DB0 处理分别提高 2.21%、27.21%、19.85%。稻作传统淹水灌溉模式下 FB1、FB2、FB3 处理的 WUE 较 FB0 处理分别提高 4.81%、18.27%、22.12%。试验结果表明,生物质炭施用量相同时,稻作干湿交替灌溉模式的 WUE 显著高于传统淹水灌溉模式($P < 0.05$),施加生物质炭能够提高 WUE。

表 3 各处理的水分利用效率

Tab.3 Water use efficiency of different treatments

处理	耗水量/ (m ³ ·hm ⁻²)	产量/ (kg·hm ⁻²)	水分利用效率/ (kg·m ⁻³)
DB0	6 037.99 ^d	8 196.30 ^d	1.36 ^d
DB1	5 935.51 ^d	8 277.64 ^d	1.39 ^d
DB2	5 353.90 ^e	9 265.87 ^a	1.73 ^a
DB3	5 204.47 ^e	8 468.38 ^e	1.63 ^b
FB0	7 740.81 ^a	8 086.22 ^e	1.04 ^e
FB1	7 486.03 ^b	8 134.80 ^e	1.09 ^e
FB2	7 075.41 ^e	8 730.77 ^b	1.23 ^e
FB3	6 946.37 ^e	8 811.43 ^b	1.27 ^e

由表 4 可知,干湿交替灌溉模式下 31.07% ~ 40.56% 的肥料-¹⁵N 被稻株吸收,生物质炭施用量相同时,较传统淹水灌溉提高了 5.20% ~ 11.91%;当生物质炭施加量为 0 ~ 12.5 t/hm²时,两种灌溉模式稻株对肥料-¹⁵N 的 NUE 均随着生物质炭施入量的增加而增大。干湿交替灌溉模式有 15.55% ~ 20.45% 的基肥-¹⁵N 被稻株吸收,且对基肥-¹⁵N 的 NUE 低于传统淹水灌溉模式,适量的施入生物质炭可以增加稻株对基肥-¹⁵N 的 NUE;传统淹水灌溉模

式稻株对基肥-¹⁵N 的 NUE 随着生物质炭施入量的增加而增大。干湿交替灌溉模式适量施入生物质炭可以增加稻株对基肥-¹⁵N 的 NUE,且在生物质炭施用量相同时高于传统淹水灌溉,分别提高了 13.92%、18.12%、19.32% 和 2.08%;传统淹水灌溉模式稻株对基肥-¹⁵N 的 NUE 随着生物质炭施入量的增加而增大。施加适量的生物质炭可以增加稻株对穗肥-¹⁵N 的 NUE,生物质炭施用量相同时干湿交替灌溉模式高于传统淹水灌溉模式;传统淹水灌溉模式稻株对穗肥-¹⁵N 的 NUE 随着生物质炭施入量的增加而增大。

表 4 稻田整体及各期肥料氮素的吸收利用率

Tab.4 Nitrogen absorption and utilization efficiency of fertilizer in whole and each stage of paddy field

处理	整体	基肥	蘖肥	穗肥
DB0	31.07 ^e	15.55 ^f	36.09 ^e	53.61 ^f
DB1	32.95 ^d	16.22 ^f	37.64 ^d	57.70 ^e
DB2	40.56 ^a	20.45 ^e	44.91 ^a	71.18 ^a
DB3	38.02 ^b	19.56 ^d	42.45 ^b	65.82 ^b
FB0	29.54 ^f	17.11 ^e	31.68 ^f	48.82 ^e
FB1	29.98 ^f	17.33 ^e	31.86 ^f	49.82 ^e
FB2	36.25 ^e	21.56 ^b	37.64 ^d	60.39 ^d
FB3	38.78 ^b	23.31 ^a	41.59 ^c	63.91 ^c

2.4 稻田 GWP 和 GHGI 与氮肥吸收利用率的相关性分析

表 5 为两种灌溉模式稻田痕量温室气体的 GWP 和 GHGI 与 NUE 之间的相关性。干湿交替灌溉模式下稻田痕量温室气体的 GWP 与 WUE、以及 GWP 与氮肥整体、基肥、蘖肥、穗肥的 NUE 呈显著负相关($P < 0.05$);稻田痕量温室气体的 GHGI 与 WUE 呈显著负相关($P < 0.05$),与氮肥整体、基肥、蘖肥、穗肥的 NUE 呈极显著负相关($P < 0.01$)。传统淹水灌溉模式下稻田痕量温室气体的 GWP 与 WUE、以及 GWP 与氮肥整体、蘖肥、穗肥的 NUE 呈显著负相关($P < 0.05$),与基肥的 NUE 呈极显著负相关($P < 0.01$);稻田痕量温室气体的 GHGI 与 WUE、以及 GHGI 与氮肥整体、蘖肥的 NUE 呈显著

表 5 稻田痕量温室气体的 GWP 和 GHGI 与水氮利用率的相关系数

Tab.5 Correlation coefficients between GWP and GHGI of trace greenhouse gases and water and nitrogen utilization in paddy fields

灌溉模式	GWP					GHGI				
	WUE	NUE				WUE	NUE			
		整体	基肥	蘖肥	穗肥		整体	基肥	蘖肥	穗肥
干湿交替灌溉	-0.966 *	-0.933 *	-0.934 *	-0.951 *	-0.925 *	-0.975 *	-0.984 **	-0.985 **	-0.996 **	-0.978 **
传统淹水灌溉	-0.945 *	-0.917 *	-0.963 **	-0.905 *	-0.899 *	-0.931 *	-0.937 *	-0.993 **	-0.947 *	-0.975 **

注: * 为 0.05 水平显著; ** 为 0.01 水平极显著。

负相关($P < 0.05$),与基肥、穗肥的 NUE 呈极显著负相关($P < 0.01$)。

3 讨论

在东北寒地黑土水稻种植区,节水灌溉技术被广泛应用。生物质炭施用量相同时,稻作干湿交替灌溉模式甲烷总排放量显著高于传统淹水灌溉模式($P < 0.05$)。水稻分蘖末期,为了巩固水稻有效分蘖,会通过晒田措施来改善土壤环境,增强根系活力,控制稻株的无效分蘖,减少肥料浪费。短时间内稻田土壤含水量迅速下降,土壤的通气性增强,迅速增加了耕层土壤 O_2 含量,致使耕层土壤处于强氧化状态,导致产甲烷菌活性降低和数量减少,因此,本研究在晒田期两种灌溉模式各处理的甲烷排放均急剧减小。生物质炭影响稻田甲烷排放的主要原因包括:生物质炭影响土壤水分含量、提高土壤 O_2 含量及氧化还原电位(Eh)数值、改变微生物所需碳源供应量。土壤水分是影响稻田甲烷排放的关键因素之一^[19]。通常情况下,土壤 O_2 含量、甲烷扩散、产甲烷菌和甲烷氧化菌的活性均受土壤含水量的影响。稻田土壤水分较少时,产生的甲烷被甲烷氧化菌氧化导致排放量减少;水分较多时,有机物会进行厌氧分解,导致甲烷大量排放。总的来看,生物质炭对稻田土壤含水量的调节受生物质炭施入量及自身保水性、土壤类型及性质等因素的影响。水稻土在厌氧培养和好氧培养下甲烷排放量分别为 $1.18 \sim 118 \text{ g/g}$ 和 $0.41 \sim 136 \text{ } \mu\text{g/g}$ ^[20],二者之间的甲烷排放量差异显著($P < 0.05$)。施入稻田的生物质炭与土壤黏粒的结合,提高了土壤总孔度,增加了稻田土壤 O_2 含量^[21-23],极大地提高了甲烷被甲烷氧化菌氧化的几率,从而减少甲烷排放。低氧化还原电位(小于 -150 mV)是甲烷产生的必要条件^[24],Eh 越低,产甲烷量越大。只有稻田土壤 Eh 低于 -150 mV 时才能生成甲烷,当 Eh 从 -200 mV 降到 -300 mV 时,甲烷生成量增加了 10 倍左右,而排放量却增加了 17 倍以上^[25]。稻田施加生物质炭可以增加土壤 O_2 含量,提高土壤的 Eh,抑制甲烷生成^[21-23]。同时生物质炭中含有大量 K 元素,K 元素也有增加 Eh 的作用^[26],也可以抑制甲烷生成。另外,生物质炭会吸附土壤活性有机质,导致产甲烷菌的碳源减少^[12]。施用生物质炭改善了农田土壤理化性质^[27],缩短了稻株根系形态建成时间,促进了前期根系生长,延缓后期根系衰老,有利于根系对水分和氮素的吸收,从而促进根系组织结构发育^[28]。施加适量生物质炭提高了根系生理活性,促进根系对水分和矿物质元素的吸收,提高了稻作的水分利用效

率和肥料的氮素吸收利用率^[29]。

IPCC 报告(2013 年)显示,单位产量氧化亚氮产生的温室气体效应是 CO_2 的 265 倍,而单位产量甲烷产生的温室气体效应是 CO_2 的 28 倍^[4]。两种灌溉模式相比,干湿交替灌溉模式虽然增加了单位产量氧化亚氮的排放量,但却降低了单位产量甲烷的排放量,而单位产量氧化亚氮排放量只有甲烷排放量的 1% 左右,所以稻田痕量温室气体的 GWP、GHGI 主要由甲烷排放量决定。相同生物质炭施用量下干湿交替灌溉模式稻田痕量温室气体的 GWP、GHGI 显著低于传统淹水灌溉模式($P < 0.05$),施加生物质炭可以有效地减少 GWP、GHGI。GHGI 是一项重要的指标,它将温室效应与作物产量相结合进行综合温室效应评价^[30-31]。前人的研究大多侧重于相关指标对温室气体排放总量和 GWP 影响分析^[11-14],而关于 GHGI 的相关评价研究不多。本研究中,水炭运筹下稻作水氮利用率与稻田甲烷、氧化亚氮的 GWP 和 GHGI 有着密切的关系,相关分析结果表明:两种灌溉模式稻田痕量温室气体的 GWP 和 GHGI 与 WUE 均呈显著负相关($P < 0.05$);两种灌溉模式稻田痕量温室气体的 GWP、GHGI 与氮肥整体、基肥、蘖肥和穗肥的 NUE 均呈显著或极显著负相关。

在高肥力的寒地黑土区,关于水氮利用对甲烷、氧化亚氮排放的影响研究较少。本试验基于 ^{15}N 示踪技术研究稻田甲烷和氧化亚氮排放规律,以及稻作水氮利用对稻田痕量温室气体排放的影响,但对生物质炭的长期效应缺乏系统研究。

4 结论

(1) 干湿交替灌溉和传统淹水灌溉模式所有处理中甲烷排放通量最高峰值均出现在插秧后第 65 天的拔节孕穗期,生物质炭施用量相同时,传统淹水灌溉模式各处理甲烷排放通量较大,而干湿交替灌溉模式较小。传统淹水灌溉模式氧化亚氮排放通量最高峰值在分蘖期晒田时出现,而干湿交替灌溉模式氧化亚氮排放通量最高峰值则在拔节孕穗期出现,生物质炭施用量相同时,稻作干湿交替灌溉模式各处理氧化亚氮排放通量均明显高于传统淹水灌溉模式。

(2) 生物质炭施用量相同时,稻作干湿交替灌溉模式的甲烷总排放量较传统淹水灌溉显著降低($P < 0.05$),生物质炭施用量相同时,稻作干湿交替灌溉模式氧化亚氮总排放量高于传统淹水灌溉模式,施加生物质炭可以明显减少稻田甲烷、氧化亚氮排放量。生物质炭施用量相同时,稻作干湿

交替灌溉模式所产生的 GWP、GHGI 显著低于传统淹水灌溉模式 ($P < 0.05$), 施加生物质炭可以明显减少稻田痕量温室气体甲烷、氧化亚氮的 GWP、GHGI。

(3) 生物质炭施用量相同时, 稻作干湿交替灌溉模式的 WUE 显著高于传统淹水灌溉模式 ($P < 0.05$), 施加生物质炭可以提高 WUE。传统淹水灌溉模式稻作对基肥- ^{15}N 、蘖肥- ^{15}N 、穗肥- ^{15}N 的 NUE 随着生物质炭施入量的增加而增大。干湿交替灌溉模式对基肥- ^{15}N 的 NUE 低于传统淹水灌溉模式, 适量施入生物质炭可以增加稻株对基肥- ^{15}N 的 NUE; 干湿交替灌溉模式适量施入生物质炭可以增加稻株对蘖肥- ^{15}N 和穗肥- ^{15}N 的 NUE, 且相同生物质炭施

用水平下高于传统淹水灌溉。

(4) 干湿交替灌溉模式下稻田痕量温室气体的 GWP 与 WUE、以及 GWP 与氮肥整体、基肥、蘖肥、穗肥的 NUE 呈显著负相关 ($P < 0.05$); 稻田痕量温室气体的 GHGI 与 WUE 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 与氮肥整体、基肥、蘖肥、穗肥的 NUE 呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。传统淹水灌溉模式下稻田痕量温室气体的 GWP 与 WUE、以及 GWP 与氮肥整体、蘖肥、穗肥的 NUE 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 与基肥的 NUE 呈极显著负相关 ($P < 0.01$); 稻田痕量温室气体的 GHGI 与 WUE、以及 GHGI 与氮肥整体、蘖肥的 NUE 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 与基肥、穗肥的 NUE 呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。

参 考 文 献

- [1] YAN Xiaoyuan, AKIYAMA H, YAGI K, et al. Global estimations of the inventory and mitigation potential of methane emissions from rice cultivation conducted using the 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23(2): 112 - 118.
- [2] ZOU J W, HUANG Y, QIN Y M, et al. Changes in fertilizer-induced direct N_2O emissions from paddy fields during rice-growing season in China between 1950s and 1960s [J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(21): 229 - 242.
- [3] 吴家梅, 纪雄辉, 彭华, 等. 不同有机肥对稻田温室气体排放及产量的影响 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(4): 162 - 169.
WU Jiamei, JI Xionghui, PENG Hua, et al. Effects of different organic fertilizers on greenhouse gas emissions and yield in paddy soils [J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(4): 162 - 169. (in Chinese)
- [4] IPCC. Special report on emissions scenarios, working group III, Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [5] HOU H J, PENG S Z, XU J Z, et al. Seasonal variations of CH_4 and N_2O emissions in response to water management of paddy fields located in Southeast China [J]. *Chemosphere*, 2012, 89(7): 884 - 892.
- [6] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景 [J]. *中国农业科学*, 2013, 46(16): 3324 - 3333.
CHEN Wenfu, ZHANG Weiming, MENG Jun. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(16): 3324 - 3333. (in Chinese)
- [7] YILANGAI R M, MANU A S, PINEAU W, et al. The effect of biochar and crop veil on growth and yield of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) in Jos, North central Nigeria [J]. *Current Agriculture Research Journal*, 2014, 2(1): 37 - 42.
- [8] GENESIO L, MIGLIETTA F, BARONTI S, et al. Biochar increases vineyard productivity without affecting grape quality: results from a four years field experiment in Tuscany [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 201: 20 - 25.
- [9] MOHAN D, ABHISHEK K, SARSWAT A, et al. Biochar production and applications in soil fertility and carbon sequestration—a sustainable solution to crop-residue burning in India [J]. *RSC Advances*, 2018, 8(1): 508 - 520.
- [10] THANGARAJAN R, BOLAN N S, KUNHIKRISHNAN A, et al. The potential value of biochar in the mitigation of gaseous emission of nitrogen [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 612: 257 - 268.
- [11] 刘玉学, 王耀锋, 吕豪豪, 等. 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 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(8): 2166 - 2172.
LIU Yuxue, WANG Yaofeng, LÜ Haohao, et al. Effects of biochar application on greenhouse gas emission from paddy soil and its physical and chemical properties [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(8): 2166 - 2172. (in Chinese)
- [12] 蒋晨, 麻培侠, 胡保国, 等. 生物质炭还田对稻田甲烷的减排效果 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29(15): 184 - 191.
JIANG Chen, MA Peixia, HU Baoguo, et al. Effect of biochar returning to paddy field on CH_4 emission reduction [J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(15): 184 - 191. (in Chinese)
- [13] 李松, 李海丽, 方晓波, 等. 生物质炭输入减少稻田痕量温室气体排放 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(21): 234 - 240.
LI Song, LI Haili, FANG Xiaobo, et al. Biochar input to reduce trace greenhouse gas emission in paddy field [J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(21): 234 - 240. (in Chinese)
- [14] 祁乐, 高明, 郭晓敏, 等. 生物炭施用量对紫色水稻土温室气体排放的影响 [J]. *环境科学*, 2018, 39(5): 2351 - 2359.
QI Le, GAO Ming, GUO Xiaomin, et al. Effects of biochar application rates on greenhouse gas emissions in the purple paddy soil [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(5): 2351 - 2359. (in Chinese)
- [15] 张作合, 张忠学, 李铁成, 等. 水炭运筹对黑土稻田 N_2O 排放与氮肥利用的影响 [J]. *农业机械学报*, 2021, 52(11): 323 - 332.
ZHANG Zuohe, ZHANG Zhongxue, LI Tiecheng, et al. Effects of water and biochar management on N_2O emission and nitrogen

- use efficiency in black soil paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 323–332. (in Chinese)
- [16] 张作合,张忠学. 稻作水炭运筹下氮肥吸收转运与分配的¹⁵N示踪分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11):239–249. ZHANG Zuohe, ZHANG Zhongxue. ¹⁵N tracer-based analysis of effects of water and biochar management on nitrogen absorption, transport and distribution in rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11):239–249. (in Chinese)
- [17] 王孟雪,张忠学. 适宜节水灌溉模式抑制寒地稻田 N₂O 排放增加水稻产量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15):72–79. WANG Mengxue, ZHANG Zhongxue. Optimal water-saving irrigation mode reducing N₂O emission from rice paddy field in cold region and increasing rice yield[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(15):72–79. (in Chinese)
- [18] 王聪,沈健林,郑亮,等. 猪粪化肥配施对双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及其全球增温潜势的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(8):3120–3127. WANG Cong, SHEN Jianlin, ZHENG Liang, et al. Effects of combined applications of pig manure and chemical fertilizers on CH₄ and N₂O emissions and their global warming potentials in paddy fields with double-rice cropping[J]. Environmental Science, 2014, 35(8):3120–3127. (in Chinese)
- [19] 李海防,夏汉平,熊艳梅,等. 土壤温室气体产生与排放影响因素研究进展[J]. 生态环境, 2007, 16(6):1781–1788. LI Haifang, XIA Hanping, XIONG Yanmei, et al. Mechanism of greenhouse gases fluxes from soil and its controlling factors: a review[J]. Ecology and Environment, 2007, 16(6):1781–1788. (in Chinese)
- [20] 徐华,蔡祖聪,八木一行. 水稻土 CH₄ 产生潜力及其影响因素[J]. 土壤学报, 2008, 45(1):98–104. XU Hua, CAI Zucong, YAGI K. Methane production potentials of rice paddy soils and its affecting factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(1):98–104. (in Chinese)
- [21] 杨敏,刘玉学,孙雪,等. 生物质炭提高稻田甲烷氧化活性[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17):145–151. YANG Min, LIU Yuxue, SUN Xue, et al. Biochar improves methane oxidation activity in rice paddy soil[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(17):145–151. (in Chinese)
- [22] 肖亚楠,杨士红,刘晓静,等. 生物炭施用对节水灌溉稻田甲烷排放的影响[J]. 节水灌溉, 2017(10):52–55, 60. XIAO Ya'nan, YANG Shihong, LIU Xiaojing, et al. Effect of biochar application on CH₄ emission from paddy field under water saving irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2017(10):52–55, 60. (in Chinese)
- [23] 杨士红,刘晓静,罗童元,等. 生物炭施用对节水灌溉稻田温室气体排放影响研究进展[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(10):5–9.
- [24] 丁维新,蔡祖聪. 土壤有机质和外源有机物对甲烷产生的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(10):1672–1679. DING Weixin, CAI Zucong. Effects of soil organic matter and exogenous organic material on methane production in and emission from wetlands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(10):1672–1679. (in Chinese)
- [25] 李道西. 农田水管理下的稻田甲烷排放研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(1):133–135. LI Daoxi. Variations of methane emission of paddy fields under farmland water management[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(1):133–135. (in Chinese)
- [26] CHAN K Y, XU Z. “Biochar: nutrient properties and their enhancement” in biochar for environmental management[M]. London: Earthscan, 2009:69.
- [27] 尚杰,耿增超,陈心想,等. 施用生物炭对旱作农田土壤有机碳、氮及其组分的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3):509–517. SHANG Jie, GENG Zengchao, CHEN Xinxiang, et al. Effects of biochar on soil organic carbon and nitrogen and their fractions in a rainfed farmland[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(3):509–517. (in Chinese)
- [28] 张作合,张忠学,李铁成,等. 水炭运筹下水稻根系对氮素吸收利用的¹⁵N示踪分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6):295–304. ZHANG Zuohe, ZHANG Zhongxue, LI Tiecheng, et al. ¹⁵N tracer analysis of nitrogen uptake and utilization by rice roots under water and biochar management[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6):295–304. (in Chinese)
- [29] 李合生. 现代植物生理学[M]. 3版. 北京:高等教育出版社, 2012:163–211.
- [30] 张作合. 黑土稻田施加生物炭对水氮利用及温室气体排放的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2021. ZHANG Zuohe. Effects of biochar application on water and nitrogen utilization and greenhouse gas emissions in black soil paddy fields[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [31] 张忠学,陈鹏,陈帅宏,等. 黑土区节水灌溉对各期肥料氮素在土壤中残留的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11):240–250. ZHANG Zhongxue, CHEN Peng, CHEN Shuaihong, et al. Effects of water-saving irrigation on residues of different period fertilizer nitrogen in black soils[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11):240–250. (in Chinese)