

节水灌溉下生物炭与有机肥添加对黑土区稻田净碳排放的影响

薛里^{1,2} 张忠学^{1,2} 齐智娟^{1,2} 韩羽^{1,2} 张作合³ 李铁成^{1,2} 杜思澄^{1,2}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;

2. 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;

3. 绥化学院农业与水利工程学院, 绥化 152061)

摘要: 为探寻节水灌溉条件下施入生物炭与有机肥对黑土区稻田净碳排放的影响,于2023年开展田间试验。试验设置常规淹灌(F)和控制灌溉(C)两种灌溉模式,同时在每种灌溉模式下设置生物炭还田(B)和有机肥还田(O)2种物料还田形式,以及无物料还田(N)作为对照组,共计6个处理。分析了两种灌溉模式下施入生物炭与有机肥对稻田土壤CH₄、CO₂、N₂O排放和水稻产量的影响,并结合土壤有机碳含量的变化,计算各处理的净温室气体排放量(NGHGE)。结果表明:在施入相同物料下,控制灌溉处理CH₄排放总量较常规灌溉减少71.06%~85.39%;CO₂、N₂O排放总量较常规灌溉分别增加41.89%~47.97%、27.56%~38.26%。与对照处理相比,生物炭施入使稻田N₂O、CH₄排放总量分别降低14.31%~23.90%、15.10%~23.83%,CO₂排放总量增加23.03%~26.63%;有机肥施入使稻田N₂O、CH₄、CO₂排放总量分别增加8.22%~12.09%、18.36%~19.22%、51.48%~53.48%。生物炭与有机肥施入均能增加土壤有机碳储量与水稻产量,且控制灌溉下增幅效果更加明显。控制灌溉处理NGHGE均显著小于常规灌溉($P < 0.05$),且在控制灌溉下,与对照处理相比,施入生物炭与有机肥处理NGHGE分别减少44.01%、6.38%。综合来看,控制灌溉下施入生物炭提高了水稻产量,同时增加了土壤有机碳储量,并有效减少了黑土区稻田净碳排放。该研究结果可为东北黑土区稻田制定节水、增产、固碳减排的水碳管理策略提供科学依据,对保障东北地区可持续农业发展具有重要意义。

关键词: 黑土区稻田; 节水灌溉; 生物炭; 有机肥; 有机碳; 温室气体

中图分类号: S511.4⁺1; S365

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)09-0382-09

OSID:



Effects of Biochar and Organic Fertilizer Addition on Net Carbon Emission of Paddy Field in Black Soil Area under Water-saving Irrigation

XUE Li^{1,2} ZHANG Zhongxue^{1,2} QI Zhijuan^{1,2} HAN Yu^{1,2} ZHANG Zuohe³ LI Tiecheng^{1,2} DU Sicheng^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Efficient Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

3. College of Agriculture and Hydraulic Engineering, Suihua University, Suihua 152061, China)

Abstract: In order to explore the effects of biochar and organic fertilizer on net carbon emission from paddy fields in black soil area under water-saving irrigation, a field experiment was carried out in 2023. Two irrigation modes, conventional flooding irrigation (F) and controlled irrigation (C), were set up in the experiment. At the same time, biochar returning (B) and organic fertilizer returning (O) were set up in each irrigation mode, and no material returning (N) was used as the control group, a total of six treatments. The effects of biochar and organic fertilizer on CH₄, CO₂, N₂O emissions and rice yield in paddy soil under two irrigation modes were analyzed. Combined with the change of soil organic carbon content, the net greenhouse gas emissions (NGHGE) of each treatment were calculated. The results showed that under the same material application, the cumulative CH₄ emission of controlled irrigation

收稿日期: 2024-06-14 修回日期: 2024-07-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2300303)

作者简介: 薛里(1999—),男,硕士生,主要从事农业节水理论与技术研究,E-mail: a13134552959@163.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

treatment was 71.06% ~ 85.39% lower than that of conventional irrigation. The cumulative emissions of CO₂ and N₂O were increased by 41.89% ~ 47.97% and 27.56% ~ 38.26%, respectively, compared with that of conventional irrigation. Compared with the control treatment, biochar application reduced the cumulative emissions of N₂O and CH₄ by 14.31% ~ 23.90% and 15.10% ~ 23.83%, respectively, and increased the cumulative emissions of CO₂ by 23.03% ~ 26.63%. The application of organic fertilizer increased the cumulative emissions of N₂O, CH₄, CO₂ by 8.22% ~ 12.09%, 18.36% ~ 19.22%, 51.48% ~ 53.48%, respectively. The application of biochar and organic fertilizer could increase soil organic carbon content and rice yield, and the increase effect was more obvious under controlled irrigation. The NGHGE of controlled irrigation treatment was significantly smaller than that of conventional irrigation ($P < 0.05$), and under controlled irrigation, compared with the control treatment, the NGHGE of biochar and organic fertilizer treatment was decreased by 44.01% and 6.38%, respectively. In summary, the application of biochar under controlled irrigation increased rice yield, increased soil organic carbon storage, and effectively reduced net carbon emissions from paddy fields in black soil areas. The results can provide a scientific basis for the formulation of water and carbon management strategies for water saving, yield increase, carbon sequestration and emission reduction in paddy fields in the black soil region of Northeast China, and it was of great significance for ensuring sustainable agricultural development in Northeast China.

Key words: black soil paddy fields; water-saving irrigation; biochar; organic fertilizer; organic carbon; greenhouse gases

0 引言

近年来,由于 CO₂、CH₄和 N₂O 等温室气体排放增加导致的全球变暖问题日益加剧^[1],且 IPCC 第六次报告^[2]表明:2030—2052 年间全球平均气温将可能上升 1.5℃。农业生产是温室气体的重要排放源之一,其中稻田生态系统的 N₂O、CH₄排放量分别占农业温室气体排放量的 11% 和 15%^[3]。黑龙江省作为我国水稻种植大省,2021 年水稻种植面积达 3.87 × 10⁶ hm²,占我国水稻种植面积的 12.92%^[4]。因此,研究寒地黑土稻田温室气体减排具有重要意义。

为了缓解农业水资源供需矛盾,节水灌溉技术已在我国东北地区大面积推广。大量研究表明^[5-7],与传统淹水灌溉相比,节水灌溉能改善根层土壤水、热、气状况,提高氧气含量,抑制稻田 CH₄ 排放,缓解全球增温潜势,同时还能增强水稻对土壤氮素的吸收与利用,减少稻田土壤氮素的淋溶损失^[8]。但应用节水灌溉技术会加速土壤有机质(SOM)分解,长期应用会导致土壤肥力下降^[9],尤其是在高肥力的黑土区,自身有机质含量较高,基质流失更加严重^[10]。因此,需配合适宜的碳管理模式来确保水土资源长期可持续利用。传统秸秆还田虽能提升土壤肥力,改善土壤理化性质,但也引起土壤碳排放激增,同时,由于东北黑土区受低温冷凉气候的影响,秸秆还田还表现出难以腐解等问题^[11]。将秸秆制备成生物炭或有机肥后还田,既能增加土壤有机质含量,又能通过改变微生物群落结构与土壤

微生物固持碳、氮的能力来调控温室气体排放^[12]。但目前大多研究主要关注生物炭或有机肥还田对温室气体排放的影响^[1,13-14],关于节水灌溉下生物炭与有机肥还田对温室气体排放与土壤固碳的综合效应影响研究较少。因此,在节水灌溉下开展生物炭与有机肥还田对东北黑土稻田净温室效应的影响研究具有重要意义。

本文通过 2023 年田间试验,测定水稻生长期 CH₄、CO₂、N₂O 排放通量和土壤有机碳含量的变化,并使用能够反映稻田温室效应的净温室气体排放量(NHGE)指标对黑土区稻田进行评价,以期为寒地黑土区稻田节水减排固碳水碳管理模式提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2023 年在黑龙江省水稻灌溉试验站进行,该试验站位于黑龙江省绥化市庆安县平安镇(46°57'28"N,127°40'45"E),是典型的寒地黑土分布区。试验地多年平均降水量为 550 mm,多年平均水面蒸发量 750 mm,无霜期 128 d,有效积温 2 532℃,作物水热生长期为 156 ~ 171 d。气候特征属寒温带大陆性季风气候,水稻生育期内空气温度和降雨量变化如图 1 所示。土壤 pH 值为 6.44,耕层土壤(0 ~ 20 cm)基础肥力为:有机质质量比 44.9 g/kg、全氮质量比 1.52 g/kg、全磷质量比 147.26 g/kg、全钾质量比 18.86 g/kg。

1.2 试验设计

采用灌溉模式与有机物料还田二因素全面试

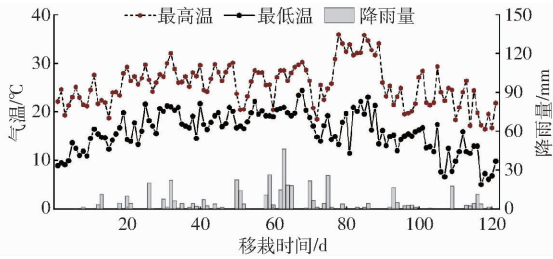


图1 水稻生育期内气温和降雨量日变化曲线

Fig. 1 Daily variation curves of air temperature and rainfall during rice growth period

验。灌溉模式设置为控制灌溉模式(C)与常规淹灌模式(F),两种灌溉模式水分管理标准见表1。有机物料还田设置2种形式,分别为有机肥还田(O, 2.5 t/hm²)和生物炭还田(B, 2 t/hm²),并设置无物料还田(N)处理作为对照组,共计6个处理,每个处理3次重复,共计18个试验小区,每个试验小区面积为100 m²(10 m × 10 m),采用随机抽取方式布置

表1 不同灌溉模式水分管理标准

Tab. 1 Water management of different irrigation modes

灌溉模式	控制指标	返青期	分蘖初期	分蘖中期	分蘖末期	拔节孕穗期	抽开期	乳熟期	黄熟期
控制灌溉	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	0	落干
	灌水下限	0	0	0.7θ _s	晒田	0.8θ _s	0.8θ _s	0.7θ _s	落干
常规淹灌	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	10 mm	10 mm	晒田	10 mm	10 mm	10 mm	落干

注:θ_s为根层土壤饱和含水率。

表2 各处理氮肥施用量

Tab. 2 Nitrogen fertilizer application rate of each treatment

灌溉模式	处理	有机氮肥施用量/ (kg·hm ⁻²)	无机氮肥施用量/ (kg·hm ⁻²)			总氮施用量/ (kg·hm ⁻²)
			基肥	蘖肥	穗肥	
常规淹灌	FO	33.0	16.5	22.0	38.5	110
	FN	0	49.5	22.0	38.5	110
	FB	15.2	34.3	22.0	38.5	110
控制灌溉	CO	33.0	16.5	22.0	38.5	110
	CN	0	49.5	22.0	38.5	110
	CB	15.2	34.3	22.0	38.5	110

1.3 土壤有机碳含量测定

在水稻种植前和收获后用环刀在各小区内按照“S”形分层取土样,土壤取样深度为0~60 cm,分为0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm取样,每个层次取3个平行样。将环刀用胶带密封后,装入样品袋中带回实验室,在105℃干燥至质量恒定,计算土壤容重。并取出部分土壤样品于东北农业大学农业农村部水资源高效利用重点实验室,使用总有机碳分析仪(Elementar vario TOC)测定各土层有机碳含量。

试验小区。各小区之间田埂向地下内嵌深40 cm塑料板,以防止各小区的水肥交换。钾肥(K₂O)施入量80 kg/hm²,在水稻移栽前与水稻8.5叶龄分两次施入,前后比例为1:1;磷肥(P₂O₅)施入量45 kg/hm²,作为基肥一次性施入。有机肥与生物炭按照等碳量原则在泡田之前施入稻田,并将有机肥与生物炭作为有机氮肥对基肥中尿素进行替代,见表2。供试水稻品种为当地主栽品种“绥粳18”,种植密度为24穴/m²,水稻品种、育秧、移栽、植保及用药等技术措施以及田间管理与当地农作习惯相同。有机肥基本理化性质为:全碳质量比410.0 g/kg、全氮质量比13.2 g/kg、木质素质量比5.58 g/kg、纤维素质量比16.22 g/kg;生物炭基本理化性质为:全碳质量比521.74 g/kg、全氮质量比7.6 g/kg、填充密度0.13 g/cm³、比表面积81.56 m²/g、总孔容积0.081 cm³/g、阳离子交换量44.74 cmol/kg。

水稻长期内土壤有机碳储量计算公式为

$$SOCS = \sum 20 \times 100 (SOC_e - SOC_i) B_d \quad (1)$$

式中 SOCS——土壤有机碳储量,kg/hm²

SOC_e——水稻收获后土壤有机碳质量比,g/kg

SOC_i——水稻种植前土壤有机碳质量比,g/kg

B_d——土壤容重,g/cm³

1.4 温室气体排放量测定与方法

CH₄、CO₂、N₂O排放量使用静态室-气相色谱法进行测定。静态室由有机玻璃制成的密闭性无底箱体和不锈钢底座组成,透明有机玻璃箱体外包裹一层铝箔,以减小太阳照射引起的箱内温度变化,箱体内配备空气温度计和电风扇。在水稻移栽前,将不锈钢底座布置在每个小区内,顶部留有密封槽。进行测量时,注入水密封凹槽,以避免箱体内气体和外部空气交换,气体采集时间为10:00—12:00,每隔10 min(0、10、20、30 min)用注射器抽取箱内气体,分别使用50 mL E-Switch气袋通过橡胶管收集4个气体样品,并且记录箱内温度变化。水稻生育前期静态箱高度为1 m,根据水稻生长情况,生育后期将箱体高度增加至1.1 m。水稻自移栽后每7 d

采集 1 次,在水稻生长旺盛期进行加测,如遇降雨天气延后进行样本采集,随后带回实验室用气相色谱仪(GC-2010PLUS 型,岛津公司,日本)检测分析 CH₄、CO₂、N₂O 浓度变化。

CH₄、CO₂、N₂O 排放通量计算公式为

$$F = \rho h \frac{dc}{dt} \frac{273}{273 + T} \quad (2)$$

式中 F ——CH₄、CO₂ 排放通量, mg/(m²·h); N₂O 排放通量, μg/(m²·h)

ρ ——标准状态 CH₄、CO₂、N₂O 密度, kg/m³

h ——静态箱内有效高度, m

dc/dt ——气体质量浓度变化率, mL/(m³·h)

T ——采样时静态箱内平均空气温度, °C

CH₄、CO₂、N₂O 排放总量计算公式为

$$E = 24 \sum_{i=1}^n \frac{F_i + F_{i+1}}{2} (D_{i+1} - D_i) \quad (3)$$

式中 E ——CH₄、CO₂、N₂O 排放总量, kg/hm²

F_i, F_{i+1} ——第 $i, i+1$ 次采样时 CH₄、CO₂ 排放通量, mg/(m²·h); N₂O 排放通量, μg/(m²·h)

D_i, D_{i+1} ——第 $i, i+1$ 次采样时间, d

1.5 水稻产量、全球增温潜势与温室气体排放强度

在水稻成熟期进行产量测算,在每个小区随机选取具有代表性的 10 株水稻植株,干燥后用手持水分测试仪(John Deere, Moline IL, 美国)测定谷物含水率,计算含水率为 14.5% 时的经济产量。

全球增温潜势(GWP)是将不同温室气体增温潜势换算为 CO₂ 排放当量,100 a 时间尺度全球增温效应计算公式为

$$GWP = 298E_{N_2O} + 34E_{CH_4} + E_{CO_2} \quad (4)$$

式中 GWP ——全球增温潜势, kg/hm²

E_{N_2O} ——N₂O 排放总量, kg/hm²

E_{CH_4} ——CH₄ 排放总量, kg/hm²

E_{CO_2} ——CO₂ 排放总量, kg/hm²

温室气体排放强度(GHGI)计算公式为

$$GHGI = \frac{GWP}{Y} \quad (5)$$

式中 $GHGI$ ——温室气体排放强度, kg/kg

Y ——水稻产量, kg/hm²

1.6 净温室气体排放量

NGHGE 作为综合评估给定生态系统温室气体排放量与土壤固碳量指标,其计算公式为^[15]

$$NGHGE = 298E_{N_2O} + 34E_{CH_4} - \frac{44}{12}SOCS \quad (6)$$

式中 $NGHGE$ ——净温室气体排放量, kg/hm²

式中 $SOCS$ 考虑了土壤异养呼吸碳损失量。

1.7 数据分析

采用 Excel 2016 进行数据处理, Origin 9.0 软件进行作图, 并利用 SPSS 17.0 进行统计分析, 采用 Duncan 法进行多组样本间差异显著性分析, 统计显著性假设为 $P = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 节水灌溉下生物炭与有机肥添加对 CH₄ 排放通量及排放总量的影响

两种灌溉模式下施入生物炭与有机肥对 CH₄ 排放通量与排放总量的影响如图 2(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同)所示。试验结果表明,在晒田期前,各处理 CH₄ 排放通量均呈现先增加后减小的变化规律,并在分蘖期出现第 1 个峰值,其中 FO、CO 处理 CH₄ 排放通量峰值较 FN、CN 处理分别增加 20.45%、9.85%; FB、CB 处理 CH₄ 排放通量峰值较 FN、CN 处理分别减少 7.09%、33.59%。进入晒田期后,稻田土壤具有较好的通气性,各处理 CH₄ 排放通量均达到最小值。晒田期结束,稻田复水施穗肥,各处理 CH₄ 排放通量迅速增加后又逐渐减小,并在拔节孕穗期出现第 2 个峰值,其中 FO、CO 处理 CH₄ 排放通量峰值较 FN、CN 处理分别增加 14.32%、

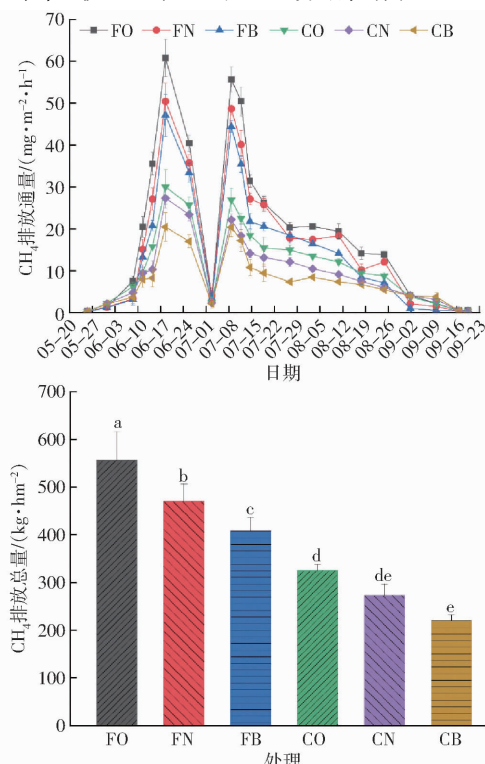


图 2 水稻生育期内不同处理 CH₄ 排放通量与 CH₄ 排放总量

Fig. 2 CH₄ emission flux curves and total CH₄ emissions of different treatments during rice growth period

21.18% ;FB、CB 处理 CH_4 排放通量峰值较 FN、CN 处理分别减少 9.61%、8.93%。

图 2 各处理 CH_4 排放总量变化范围为 220.23 ~ 556.16 kg/hm^2 , 常规灌溉模式下各处理 CH_4 排放总量均显著高于控制灌溉模式 ($P < 0.05$), 其中 FO、FN、FB 处理较 CO、CN、CB 处理分别增加 71.06%、72.30%、85.39%。相同灌溉模式下, 与对照组相比, 施入有机肥处理 CH_4 排放总量表现为增加, 而施入生物炭处理 CH_4 排放总量表现为降低, 其中 FO、CO 处理 CH_4 排放总量较 FN、CN 处理分别增加 18.36%、19.22% ;FB、CB 处理 CH_4 排放总量较 FN、CN 处理分别减少 15.09%、23.83%。

2.2 节水灌溉下生物炭与有机肥添加对 CO_2 排放通量及排放总量的影响

两种灌溉模式下施入生物炭与有机肥对 CO_2 排放通量与排放总量的影响如图 3 所示。试验结果表明, 各处理 CO_2 排放通量呈现相似的变化规律, 在水稻整个生育期内呈现 2 个主要峰值。返青期, 由于土壤温度较低, 且两种灌溉模式下稻田土壤均有水层, 各处理 CO_2 排放通量均处于较低水平。随着气温逐渐升高, 蘖肥施入, 各处理 CO_2 排放通量在分蘖期出现第 1 个峰值, 其中 FO、FB 处理 CO_2 排放通量峰值较 FN 处理分别增加 45.17%、40.17% ;CO、CB 处理 CO_2 排放通量峰值较 CN 处理分别增加 29.44%、18.10%。随着晒田期结束, 穗肥施入后, 各处理 CO_2 排放通量在拔节孕穗期出现第 2 个峰值, 其中 FO、FB 处理 CO_2 排放通量峰值较 FN 处理分别增加 28.52%、23.98% ;CO、CB 处理 CO_2 排放通量峰值较 CN 处理分别增加 39.52%、15.68%。

图 3 各处理 CO_2 排放总量变化范围为 1 781.67 ~ 3 880.08 kg/hm^2 。在相同灌溉模式下, 施入有机肥与生物炭处理的 CO_2 排放总量均显著高于对照处理 ($P < 0.05$), 其中 FO、FB 处理 CO_2 排放总量较 FN 处理分别增加 53.48%、23.04% ;CO、CB 处理 CO_2 排放总量较 CN 处理分别增加 51.48%、26.63%。在施入相同物料下, 控制灌溉模式下各处理 CO_2 排放总量均显著高于常规灌溉模式 ($P < 0.05$), 其中 CO、CN、CB 处理较 FO、FN、FB 处理分别增加 41.90%、43.76%、47.97%。

2.3 节水灌溉下生物炭与有机肥添加对 N_2O 排放通量及排放总量的影响

两种灌溉模式下施入生物炭与有机肥对 N_2O 排放通量与排放总量的影响如图 4 所示。试验结果表明, 各处理 N_2O 排放通量在水稻生育期内表现出

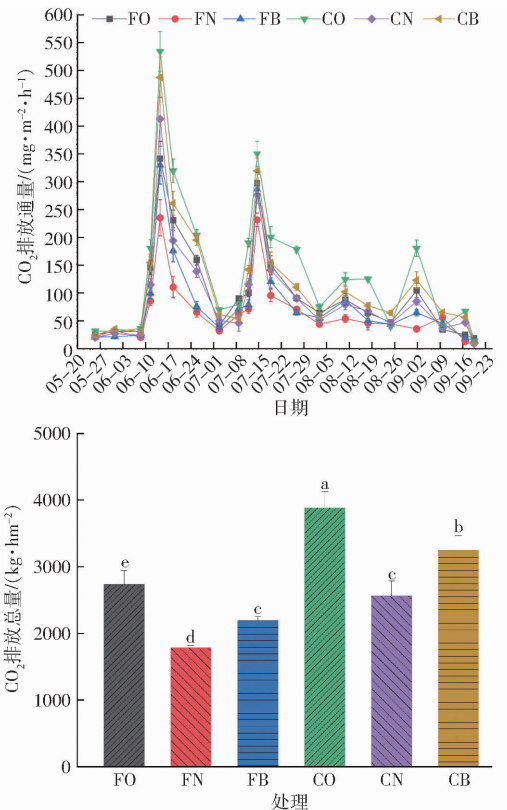


图 3 水稻生育期内不同处理 CO_2 排放通量与 CO_2 排放总量

Fig. 3 CO_2 emission flux curves and total CO_2 emissions of different treatments during rice growth period

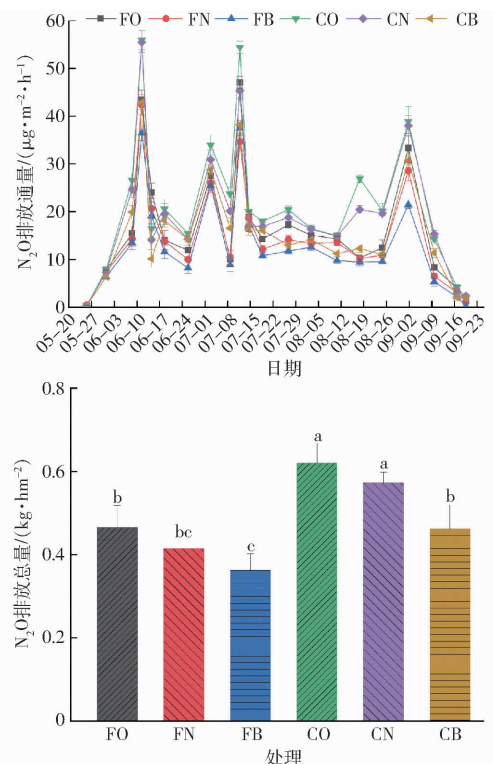


图 4 水稻生育期内不同处理 N_2O 排放通量与 N_2O 排放总量

Fig. 4 N_2O emission flux curves and total N_2O emissions of different treatments during rice growth period

较强的波动,其中 CO 处理 N_2O 排放通量峰值最高,为 $55.90 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。在分蘖期,FO、CO 处理 N_2O 排放通量峰值较 FN、CN 处理分别增加 2.62%、0.83%;FB、CB 处理 N_2O 排放通量峰值较 FN、CN 处理分别减少 16.13%、29.26%。在拔节孕穗期,FO、CO 处理 N_2O 排放通量峰值较 FN、CN 处理分别增加 35.70%、20.01%;FB、CB 处理 N_2O 排放通量峰值较 FN、CN 处理分别减少 8.14%、18.48%。在施入相同物料下,控制灌溉模式下各处理 N_2O 排放通量均高于常规灌溉模式,其中 CO、CB、CN 处理生育期内 N_2O 平均排放通量较 FO、FB、FN 处理分别高 28.74%、32.81%、20.96%。

图 4 各处理 N_2O 排放总量变化范围为 $0.32 \sim 0.61 \text{ kg}/\text{hm}^2$,当施入相同物料时,控制灌溉模式下各处理 N_2O 排放总量均高于常规灌溉模式,其中 CO、CB、CN 处理 N_2O 排放总量较 FO、FB、FN 处理分别高 33.49%、27.56%、38.26%。相同灌溉模式下,与对照处理相比,有机肥施入稻田表现出促进 N_2O 排放,生物炭施入稻田表现出抑制 N_2O 排放,其中 FO、CO 处理 N_2O 排放总量较 FN、CN 处理分别增加 19.09%、8.22%;FB、CB 处理 N_2O 排放总量较 FN、CN 处理分别减少 14.31%、23.90%。

2.4 节水灌溉下生物炭与有机肥添加对土壤有机碳储量的影响

两种灌溉模式下施入生物炭与有机肥对土壤有机碳储量的影响如图 5 所示。试验结果表明,各处理 0~60 cm 土壤有机碳储量为 $-245.6 \sim$

$413.8 \text{ kg}/\text{hm}^2$,其中 CO 处理土壤有机碳储量显著高于其他处理($P < 0.05$)。两种灌溉模式下,施入有机肥与生物炭处理土壤有机碳储量均为正值,表示为碳“汇”,而对照处理有机碳储量为负值,表示为碳“源”。相同灌溉模式下,施入有机肥处理土壤有机碳储量均显著大于其余各处理($P < 0.05$),其中 FO、CO 处理土壤有机碳储量较 FB、CB 处理分别增加 264.84%、239.74%。此外,土壤有机碳储量主要集中在 0~20 cm 土层,0~20 cm 土壤有机碳储量占 0~60 cm 土壤有机碳储量的 48.37%~78.89%,且随着土壤深度的增加,各处理土壤有机碳储量逐渐减小。

2.5 节水灌溉下生物炭与有机肥添加对水稻产量、GWP、GHGI 和 NGHGE 的影响

两种灌溉模式下施入生物炭与有机肥对水稻产量、GWP、GHGI 和 NGHGE 的影响如表 3 所示。结果表明,各处理 NGHGE 变化范围为 $7.18 \sim 17.73 \text{ t}/\text{hm}^2$ 。控制灌溉模式下各处理 NGHGE 均显著小于常规灌溉模式($P < 0.05$),且生物炭施入减少了控制灌溉稻田 NGHGE,有机肥施入增加了控制灌溉稻田 NGHGE。与对照处理相比,有机肥与生物炭施入均提高了水稻产量,施入有机肥处理 GWP 与 GHGI 表现为增加,而施入生物炭处理 GWP 与 GHGI 表现为降低。在施入相同物料下,与常规灌溉模式相比,控制灌溉模式下各处理产量增加 1.58%~10.79%,且 GWP 与 GHGI 分别减少 44.04%~49.00%、46.41%~64.71%。

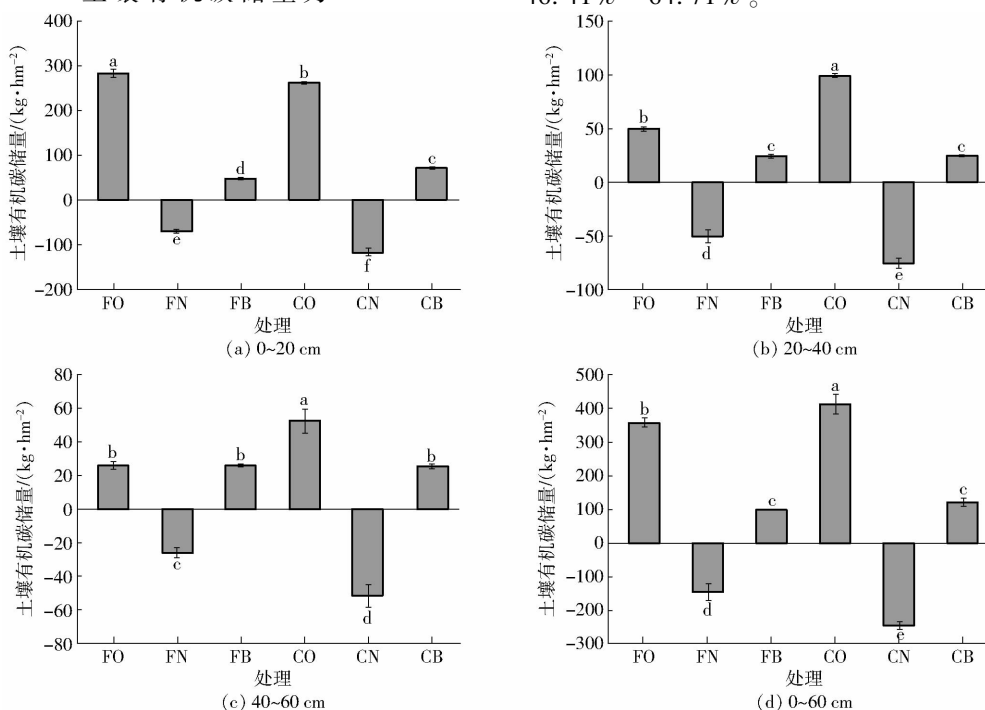


图 5 水稻生育期内不同处理稻田土壤有机碳储量

Fig. 5 Paddy soil organic carbon storage under different treatments during rice growth period

表3 不同处理水稻产量、GWP、GHGI和NGHGE
Tab.3 Rice yield, GWP, GHGI and NGHGE under different treatments

处理	产量/(t·hm ⁻²)	GWP/(t·hm ⁻²)	GHGI/(t·t ⁻¹)	NGHGE/(t·hm ⁻²)
FO	(8.21 ± 0.11) ^b	(21.78 ± 1.45) ^a	(2.65 ± 0.18) ^a	(17.73 ± 0.76) ^a
FN	(7.66 ± 0.23) ^c	(17.88 ± 1.91) ^b	(2.33 ± 0.09) ^b	(16.64 ± 1.73) ^a
FB	(8.25 ± 0.27) ^b	(16.18 ± 0.62) ^{bc}	(1.96 ± 0.07) ^c	(13.63 ± 1.67) ^b
CO	(8.34 ± 0.46) ^b	(15.12 ± 1.81) ^c	(1.81 ± 0.10) ^c	(9.72 ± 0.17) ^c
CN	(8.08 ± 0.21) ^{bc}	(12.00 ± 0.39) ^d	(1.49 ± 0.18) ^d	(10.34 ± 0.76) ^c
CB	(9.14 ± 0.27) ^a	(10.87 ± 0.57) ^d	(1.19 ± 0.04) ^e	(7.18 ± 0.08) ^d

注:同列数字后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 节水灌溉下生物炭与有机肥添加对温室气体的影响

CH₄是由产甲烷菌在厌氧条件下分解土壤有机质而产生^[16]。在本研究中,与常规灌溉模式相比,控制灌溉模式不需要长期建立水层,土壤通气性较好,氧气含量较高,产甲烷菌活性较弱^[17],进而有效抑制CH₄排放。且生物炭施入进一步抑制了稻田CH₄排放,这是由于生物炭疏松多孔结构可以改善土壤通气性,提高甲烷氧化菌活性^[18],使得产生的CH₄更易被氧化。但控制灌溉模式下与对照处理相比,有机肥施入会增加稻田CH₄排放,这是因为有机肥在分解过程中会消耗土壤中氧气,为产甲烷菌创造厌氧环境^[12],且有机肥施入会增加土壤有机碳含量,进而为产甲烷菌提供更多底物。而ZENG等^[19]在我国华南地区研究表明,控制灌溉模式下施入有机肥会增加稻田CH₄排放,这与本研究结果并不一致,产生差异的原因可能为:一方面有机肥种类和土壤环境不同,另一方面不同地区的气候因素存在空间差异^[20]。

稻田土壤CO₂主要由微生物呼吸与根呼吸两部分组成^[21]。本研究表明,在施入相同物料下,控制灌溉模式CO₂排放总量均高于常规灌溉模式,这是因为控制灌溉既能促进水稻植株根系生长,增强根呼吸作用,又能促进水稻根系释放出更多的根系分泌物,使得根际微生物的活性增强^[22],进而加强微生物呼吸作用。同时,有机肥与生物炭施入均增加稻田CO₂排放,这是由于外源碳的施入会对土壤中原有机碳产生激发效应^[23],加速矿化过程,进而增加CO₂排放,且有机肥施入引起的CO₂增量较生物炭高,这是由于有机肥施入会增加土壤中不稳定有机碳浓度,而生物炭具有芳香抗性结构,自身富含的有机碳稳定且难分解,仅有少量的碳可以被微生物利用^[24]。此外,有机肥好氧分解过程随着土壤含水率的降低而增加^[25],分解过程需要消耗大量氧气,控制灌溉能改善土壤通气状态^[26],二者交互作用使控制灌溉模式下施入有

机肥对CO₂的增幅效果更加明显。

N₂O作为土壤硝化与反硝化过程的中间产物,土壤含水率变化会对N₂O的产生与排放造成影响^[27]。本研究表明控制灌溉模式下各处理N₂O排放总量均高于常规灌溉模式,这与HAN等^[15]研究结果一致,这是因为硝化过程是产生N₂O的主要途径,控制灌溉模式为硝化细菌提供好氧环境,增强硝化过程^[28],同时控制灌溉模式能增强N₂O在土壤中的扩散过程^[29]。且研究发现有机肥施入增加了N₂O排放,这与HUANG等^[30]研究结果一致,造成N₂O排放增加的原因可能是因为有机肥施入会提高稻田土壤反硝化酶活性,增强土壤的硝化潜势^[31]。而在本研究中生物炭施入抑制了N₂O排放,这是因为生物炭通过吸附土壤溶液中的铵态氮与硝态氮,来减少硝化作用与反硝化作用的反应底物,与此同时,生物炭能调节土壤pH值,使反硝化过程进行得更加彻底,促进更多N₂O转化为N₂^[32],进而减少N₂O排放。

3.2 节水灌溉下生物炭与有机肥添加对GHGI与NGHGE的影响

本研究中,在施入相同物料下,控制灌溉模式较常规灌溉模式的GHGI降低46.41%~64.71%,这是因为CH₄排放量对GWP的贡献率最大,控制灌溉能通过抑制CH₄排放来降低GWP,同时,控制灌溉能增加根系土壤含氧量,增强水稻根系活力,提高水稻对养分的吸收^[33],进而增加水稻产量。有机肥与生物炭施入稻田均表现出增产的效果,而有机肥显著增加了GWP($P < 0.05$),生物炭通过抑制CH₄与N₂O排放,有效减小了GWP,因此,有机肥施入增加了GHGI,生物炭施入减小了GHGI。

NGHGE作为综合评估生态系统二氧化碳净交换量的指标,该指标正值和负值分别表示生态系统温室气体的“源”和“汇”^[34]。本研究各处理NGHGE均为正值,表明东北黑土区稻田生态系统为温室气体排放的“源”。且研究发现,应用控制灌溉模式可以使黑土区稻田NGHGE降低60.88%~

89.84%,一方面,控制灌溉模式能抑制 CH_4 排放来减少稻田生态系统的碳输出量,另一方面,控制灌溉模式下稻田土壤微生物种类更加丰富,该土壤环境有利于生物炭与有机肥中碳向土壤碳库转化^[35],进而提高稻田生态系统的碳输入量。虽然在本研究中控制灌溉模式下施入生物炭与有机肥均可以进一步降低 NGHGE,但有机肥仅通过增加 SOCS 来降低 NGHGE,而生物炭通过增加 SOCS 与减少 GWP 两方面共同作用来降低 NGHGE。因此,欲实现固碳减排的同时又能达到节水和增产的目的,应选择控制灌溉下生物炭还田的水碳管理模式。

4 结论

(1)控制灌溉模式有效抑制了稻田 CH_4 排放,

同时增加了 N_2O 与 CO_2 排放,生物炭施入减少了稻田 N_2O 排放,且表现出进一步抑制稻田 CH_4 排放的效果,但会引起激发效应增加稻田 CO_2 排放;有机肥施入增加了 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 排放。

(2)在对照处理下,控制灌溉模式土壤有机碳损失量高于常规灌溉模式,有机肥与生物炭施入均有效抑制土壤有机碳损失,并将稻田土壤变为碳“汇”,其中控制灌溉模式下施入有机肥与生物炭的土壤有机碳储量均高于常规灌溉模式,且水稻产量增幅效果也更加明显。

(3)有机肥施入增加了 GWP 和 GHGI,生物炭施入减少了 GWP 和 GHGI,且控制灌溉模式下施入生物炭处理的 GWP、GHGI 和 NGHGE 均为最低,稻田温室效应缓解效果最明显。

参 考 文 献

- [1] HAO He, LI Dandan, WU Zhurong, et al. Assessment of the straw and biochar application on greenhouse gas emissions and yield in paddy fields under intermittent and controlled irrigation patterns[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2024, 359:108745.
- [2] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis[M]//LEE J Y, MAROTZE J, BALA G, et al. Future global climate: scenario - 42 based projections and near-term information. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [3] XUE Sun, HAN Xingguo, PING Fan, et al. Effect of rice-straw biochar on nitrous oxide emissions from paddy soils under elevated CO_2 and temperature[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 628 - 629:1009 - 1016.
- [4] 王光耀,刘巍,雷波,等.不同节水灌溉方式下的黑龙江省水稻节水减排潜力评估[J].*节水灌溉*, 2023(11):34 - 38. WANG Guangyao, LIU Wei, LEI Bo, et al. Evaluation of water-saving and emission reduction potential of rice in Heilongjiang Province under different water-saving irrigation methods[J]. *Water Saving Irrigation*, 2023(11):34 - 38. (in Chinese)
- [5] 张忠学,韩羽,齐智娟,等.秸秆还田下水氮耦合对黑土稻田 CH_4 排放与产量的影响[J].*农业机械学报*, 2020, 51(7):254 - 262. ZHANG Zhongxue, HAN Yu, QI Zhijuan, et al. Effect of water and nitrogen coupling on CH_4 emission and rice yield in black soil paddy fields with straw returned to field[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(7): 254 - 262. (in Chinese)
- [6] 张作合,李铁成,张忠学,等.水炭运筹下稻田痕量温室气体排放与水氮利用关系研究[J].*农业机械学报*, 2022, 53(8): 379 - 387. ZHANG Zuohe, LI Tiecheng, ZHANG Zhongxue, et al. Relationship between trace greenhouse gas emission and water and nitrogen utilization under water biochar management in paddy fields[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(8): 379 - 387. (in Chinese)
- [7] NIE Tangzhe, HUANG Jianyi, ZHANG Zhongxue, et al. The inhibitory effect of a water-saving irrigation regime on CH_4 emission in Mollisols under straw incorporation for 5 consecutive years[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 278:108163.
- [8] 张忠学,陈鹏,聂堂哲,等.不同水氮调控模式对稻田土壤氮素分布与有效性的影响[J].*农业机械学报*, 2018, 49(11): 210 - 219. ZHANG Zhongxue, CHEN Peng, NIE Tangzhe, et al. Effects of different water and nitrogen regulation modes on nitrogen distribution and availability in paddy soil[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(11): 210 - 219. (in Chinese)
- [9] 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,2022. ZHANG Zuohe. Effects of biochar application on water and nitrogen utilization and greenhouse gas emissions in black soil paddy field[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [10] 马超.黑龙江省黑土地保护性耕作实施基本情况及问题研究[J].*中国农学通报*, 2022, 38(17):143 - 147. MA Chao. Basic situation and problems of conservation tillage in black soil in Heilongjiang Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(17): 143 - 147. (in Chinese)
- [11] 陈云峰,夏贤格,杨利,等.秸秆还田是秸秆资源化利用的现实途径[J].*中国土壤与肥料*, 2020(6):299 - 307. CHEN Yunfeng, XIA Xian'ge, YANG Li, et al. Straw returning is a realistic way of straw resource utilization[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(6): 299 - 307. (in Chinese)
- [12] RONLEY C C, SEUN T J, SONG R C, et al. Importance of biochar as a key amendment to convert rice paddy into carbon negative[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 873:162331.
- [13] 胡天怡,车佳玥,胡煜杰,等.秸秆还田和添加生物炭对热带地区稻菜轮作体系中淹水后土壤温室气体排放的影响[J].

环境科学,2024,45(3):1692-1701.

HU Tianyi, CHE Jiayue, HU Yujie, et al. Effects of straw returning and biochar addition on greenhouse gas emissions from high nitrate nitrogen soil after flooding in rice-vegetable rotation system in tropical China[J]. Environmental Science,2024,45(3):1692-1701. (in Chinese)

- [14] JIN H L, JEONG G L, SEUNG T J, et al. Straw recycling in rice paddy: trade-off between greenhouse gas emission and soil carbon stock increase[J]. Soil & Tillage Research,2020,199:104598.
- [15] HAN Yu, ZHANG Zhongxue, LI Tiecheng, et al. Straw return alleviates the greenhouse effect of paddy fields by increasing soil organic carbon sequestration under water-saving irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2023,287:108434.
- [16] LOFTON D D, WHALEN S C, HERSHEY A E, et al. Vertical sediment distribution of methanogenic pathways in two shallow Arctic Alaskan lakes[J]. Polar Biology, 2015, 38(6): 815-827.
- [17] 张忠学,余佩哲,杜思澄,等.不同水氮管理模式下黑土稻田碳固定与碳减排效应分析[J].农业机械学报,2023,54(4):366-375.
ZHANG Zhongxue, YU Peizhe, DU Sicheng, et al. Carbon fixation and carbon emission reduction effects of different water and nitrogen management modes in black soil paddy fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(4):366-375. (in Chinese)
- [18] 郭峻泓,娄运生,邢钰媛,等.生物炭配施硅肥对夜间增温稻田碳排放强度的影响[J].农业环境科学学报,2024,43(6):1421-1434.
GUO Junhong, LOU Yunsheng, XING Yuyuan, et al. Effect of biochar combined with silicate fertilization on carbon emission intensity in a rice field under nighttime warming[J]. Journal of Agro-Environment Science,2024,43(6):1421-1434. (in Chinese)
- [19] ZENG Yan, LI Fusheng. Impacts of nitrogen fertilizer substitution on greenhouse gas emission in a paddy field of South China under ridge irrigation[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition,2021,22:837-847.
- [20] 李铁成,张忠学,张作合,等.氮肥减施对节水灌溉稻田 NH_3 与 N_2O 排放及氮肥利用的影响[J].农业机械学报,2023,54(10):348-355.
LI Tiecheng, ZHANG Zhongxue, ZHANG Zuohe, et al. Effects of nitrogen fertilizer reduction on NH_3 and N_2O emissions and nitrogen fertilizer utilization in water-saving irrigated paddy fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(10):348-355. (in Chinese)
- [21] 张忠学,李铁成,齐智娟,等.水氮耦合对黑土稻田土壤呼吸与碳平衡的影响[J].农业机械学报,2020,51(6):301-308.
ZHANG Zhongxue, LI Tiecheng, QI Zhijuan, et al. Effects of water and nitrogen coupling on soil respiration and carbon balance in black paddy soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(6):301-308. (in Chinese)
- [22] YANG Shihong, XU Junzeng, LIU Xiaoyin, et al. Variations of carbon dioxide exchange in paddy field ecosystem under water-saving irrigation in Southeast China[J]. Agricultural Water Management,2016,166:42-52.
- [23] 李娜,滕培基,雷瑛莹,等.外源有机物添加种类对农田黑土有机碳激发效应的影响及作用机理[J].中国生态农业学报(中英文),2023,31(10):1588-1601.
LI Na, TENG Peiji, LEI Wanying, et al. Effects and mechanisms of addition of different types of exogenous organic materials on priming effect of organic carbon in arable black soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023,31(10):1588-1601. (in Chinese)
- [24] ZHANG Jing, JIANG Shenlong. Effects of biochar on soil microbial diversity and community structure in clay soil[J]. Annals of Microbiology,2022,72(1):1-14.
- [25] TANG Shuirong, CHENG Weiguo, HU Ronggui, et al. Simulating the effects of soil temperature and moisture in the off-rice season on rice straw decomposition and subsequent CH_4 production during the growth season in a paddy soil[J]. Biology and Fertility of Soils,2016,52(5):739-748.
- [26] 王长明,张忠学,吕纯波,等.不同灌溉模式寒地稻田 CH_4 和 N_2O 排放特征及增温潜势分析[J].灌溉排水学报,2019,38(1):14-20,68.
WANG Changming, ZHANG Zhongxue, LÜ Chunbo, et al. Analysis of CH_4 and N_2O emission characteristics and warming potential of paddy fields under different irrigation modes in cold region[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2019,38(1):14-20,68. (in Chinese)
- [27] 吴龙龙,田仓,张露,等.稻田水氮氧环境因子对水稻生长发育、光合作用和氮利用的调控研究进展[J].应用生态学报,2021,32(4):1498-1508.
WU Longlong, TIAN Cang, ZHANG Lu, et al. Research advance in the roles of water-nitrogen-oxygen factors in mediating rice growth, photosynthesis and nitrogen utilization in paddy soils[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021,32(4):1498-1508. (in Chinese)
- [28] 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-charcoal management on N_2O emission and nitrogen use efficiency in black paddy soil[J]. Transactions for the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(11):323-332. (in Chinese)

- sharding[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020,8(6):4291-4304.
- [23] 玄世昌,汤浩,杨武. 基于信誉积分的路况信息共享中共谋攻击节点检测方法[J]. 通信学报,2021,42(4):158-168.
XUAN Shichang, TANG Hao, YANG Wu. Method for detecting collusion attack node in road condition information sharing based on reputation point[J]. Journal on Communications, 2021,42(4):158-168. (in Chinese)
- [24] 伍德伦,饶元,许磊,等. 农产品区块链信息可信评估差异化共享模型设计与实现[J]. 农业工程学报,2022,38(11):309-317.
WU Delun, RAO Yuan, XU Lei, et al. Design and implementation of the trusted evaluation and differentiated sharing model for agricultural block chain information[J]. Transactions of the CASE,2022,38(11):309-317. (in Chinese)
- [25] 王红岩,刘钰洋,张晓伟,等. 基于层次分析法的页岩气储层地质工程一体化甜点评价:以昭通页岩气示范区太阳页岩气田海坝地区X井区为例[J]. 地球科学,2023,48(1):92-109.
WANG Hongyan, LIU Yuyang, ZHANG Xiaowei, et al. Geology-engineering intergration shale gas sweetspot evaluation based on analyti hierarchy process:application to Zhaotong Shale Gas Demonstration Discret,Tai Yang Shale Gas Field,Hai Ba Area,X wel region[J]. Earth Science, 2023,48(1):92-109. (in Chinese)
- [26] YU Y J, YANG S P, LIN T, et al. Effect of cold chain logistic interruptions on lipid oxidation and volatile organic compounds of salmon (*Salmo salar*) and their correlations with water dynamics[J]. Frontiers in Nutrition, 2020, 7:155.
- [27] 朱涛,姚翔,许玉壮,等. 基于 Fabric 的跨境汇款追踪平台实现[J]. 信息安全学报,2018,3(3):50-61.
ZHU Tao, YAO Xiang, XU Yuzhuang, et al. Cross-broder remittance tracing platform based on Fabric[J]. Journal of Cyber Security, 2018,3(3):50-61. (in Chinese)
- [28] 颜萌,马昌社. 高效的两方 ECDSA 门限方案[J]. 华南师范大学学报(自然科学版),2022,54(4):121-128.
YAN Meng, MA Changshe. An efficient threshold scheme for two-party ECDSA[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2022,54(4):121-128. (in Chinese)
- [29] 严都力,禹勇,李艳楠,等. ECDSA 签名方案的颠覆攻击与改进[J]. 软件学报,2023,34(6):2892-2905.
YAN Duli, YU Yong, LI Yannan, et al. Subversion attack and improvement of ECDSA signature scheme[J]. Journal of Software,2023,34(6):2892-2905. (in Chinese)
- [30] 孟吴同,张大伟. Hyperledger Fabric 共识机制优化方案[J]. 自动化学报,2021,47(8):1885-1898.
MENG Wutong, ZHANG Dawei, Optimization scheme for Hyperledger Fabric consensus mechanism[J]. Acta Automatica Sinica,2021,47(8):1885-1898. (in Chinese)

(上接第 390 页)

- [29] HE Tiantian, YUN Fei, LIU Tian, et al. Differentiated mechanisms of biochar- and straw-induced greenhouse gas emissions in tobacco fields[J]. Applied Soil Ecology,2021,166:103996.
- [30] HUANG Rong, WANG Yingyan, GAO Xuesong, et al. Nitrous oxide emission and the related denitrifier community: a short-term response to organic manure substituting chemical fertilizer [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 192: 110291.
- [31] DUAN Ran, LONG Xien, FENG Yue, et al. Effects of different fertilizer application methods on the community of nitrifiers and denitrifiers in a paddy soil[J]. Journal of Soils and Sediments,2018,18:24-38.
- [32] 王梦洁,蒋文婷,徐有祥,等. 长期生物炭添加对稻田土壤细菌和真菌反硝化 N_2O 排放的影响[J/OL]. 环境科学:1-13 [2023-12-19]. <https://doi.org/10.13227/j.hjx.202309176>.
WANG Mengjie, JIANG Wenting, XU Youxiang, et al. Effects of long-term biochar addition on N_2O emission from bacterial and fungal denitrification in paddy soil[J/OL]. Environmental Science:1-13 [2023-12-19]. <https://doi.org/10.13227/j.hjx.202309176>. (in Chinese)
- [33] 秦子元,张忠学,孙迪,等. 水氮耦合对黑土稻作产量与氮素吸收利用的影响[J]. 农业机械学报,2021,52(12):324-335,357.
QIN Ziyuan, ZHANG Zhongxue, SUN Di, et al. Effects of water and nitrogen coupling on rice yield and nitrogen absorption and utilization in black soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(12):324-335, 357. (in Chinese)
- [34] ZHANG M, LI B, XIONG Z Q. Effects of organic fertilizer on net global warming potential under an intensively managed vegetable field in southeastern China: a three-year field study[J]. Atmospheric Environment,2016,145:92-103.
- [35] 魏甲彬,成小琳,周玲红,等. 冬季施用鸡粪和生物炭对南方稻田土壤 CO_2 与 CH_4 排放的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文),2017,25(12):1742-1751.
WEI Jiabin, CHENG Xiaolin, ZHOU Linghong, et al. Effects of chicken manure and biochar on CO_2 and CH_4 emission in paddy fields in South China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017,25(12):1742-1751. (in Chinese)