

稻虾共作模式下龙虾品种和养殖密度对 CH_4 和 N_2O 排放的影响

罗加伟, 钱开国, 徐博, 李虹颖, 刘少君, 熊启中, 李硕, 孙瑞波, 张朝春, 叶新新

引用本文:

罗加伟, 钱开国, 徐博, 李虹颖, 刘少君, 熊启中, 李硕, 孙瑞波, 张朝春, 叶新新. 稻虾共作模式下龙虾品种和养殖密度对 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(8): 1852–1859.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1177>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

厢作免耕下生态种养对稻田 CH_4 和 N_2O 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>

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>

稻鸭共作中 CH_4 和 N_2O 排放规律及影响因素

温婷, 赵本良, 章家恩

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1442–1450 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1389>

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>

作物-鱼共作对淡水养殖系统 N_2O 排放的影响

鲍婷, 王梦杰, 吴俊男, 刘耀斌, 李凤博, 冯金飞, 方福平

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1344–1353 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1367>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

罗加伟, 钱开国, 徐博, 等. 稻虾共作模式下龙虾品种和养殖密度对CH₄和N₂O排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(8): 1852–1859.

LUO J W, QIAN K G, XU B, et al. Effects of lobster species and breeding density on CH₄ and N₂O emissions under rice shrimp co-cropping[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(8): 1852–1859.

稻虾共作模式下龙虾品种和养殖密度对CH₄和N₂O排放的影响

罗加伟¹, 钱开国¹, 徐博¹, 李虹颖², 刘少君³, 熊启中¹, 李硕¹, 孙瑞波¹, 张朝春¹, 叶新新^{1*}

(1. 安徽农业大学资源与环境学院/安徽省绿色磷肥智能制造与高效利用工程研究中心/农田生态保育与污染防治安徽省重点实验室/江淮耕地资源保护与生态修复重点实验室, 合肥 230036; 2. 安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 合肥 230001; 3. 全国农业技术推广服务中心, 北京 100125)

摘要:为探究稻虾共作体系中不同龙虾品种和养殖密度对稻田温室气体排放的影响,本研究通过设置不同龙虾品种和养殖密度试验,采取密闭静态箱-气相色谱法研究稻虾共作对温室气体排放规律、排放量及综合增温潜势(*GWP*)的影响。结果表明:在整个稻虾共作期间,各处理CH₄和N₂O排放规律基本一致,均在拔节期出现排放高峰;CH₄累积排放量表现为DZ(水稻单作)>DA(水稻澳龙共作)>DD(水稻低密度克氏原螯虾共作)>DG(水稻高密度克氏原螯虾共作),而N₂O累积排放量表现为DG>DD>DA>DZ;*GWP*表现为DZ>DA>DD>DG,与DZ处理相比,DG、DD和DA处理*GWP*分别降低36.9%、30.7%和18.1%。土壤氧化还原电位、水体溶解氧、铵态氮、硝态氮与CH₄排放呈显著负相关($P<0.05$),与N₂O排放呈显著正相关($P<0.05$)。研究表明,稻虾共作降低稻田CH₄排放,增加N₂O排放,减少*GWP*,其中DG处理减缓*GWP*效果最好。在稻虾共作体系中,为了更有效降低稻田系统中温室气体的排放,需要考虑龙虾品种和养殖密度的选择。

关键词:稻虾共作;温室气体;综合增温潜势;养殖密度

中图分类号:S511;S966.12 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)08-1852-08 doi:10.11654/jaes.2022-1177

Effects of lobster species and breeding density on CH₄ and N₂O emissions under rice shrimp co-cropping

LUO Jiawei¹, QIAN Kaiguang¹, XU Bo¹, LI Hongying², LIU Shaojun³, XIONG Qizhong¹, LI Shuo¹, SUN Ruibo¹, ZHANG Chaochun¹, YE Xinxin^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University / Anhui Engineering and Technology Research Center of Intelligent Manufacture and Efficient Utilization of Green phosphorus Fertilizer / Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention/Key Laboratory of Jianghuai Arable Land Resources Protection and Eco-restoration, Hefei 230036, China; 2. Institute of Soil and Fertilizer, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230001, China; 3. National Agricultural Technology Extension Service Center, Beijing 100125, China)

Abstract: To explore the effects of different lobster species and breeding density on greenhouse gas (GHG) emissions in rice shrimp co-cropping system. In this study, the effects of rice shrimp co-cropping on fluxes of CH₄, N₂O, and global warming potential (*GWP*) were studied using the closed static chamber method. The results indicated that seasonal patterns of CH₄ and N₂O fluxes were similar in each

收稿日期:2022-11-17 录用日期:2023-03-11

作者简介:罗加伟(1997—),男,贵州修文人,硕士研究生,主要从事稻田生态种养研究。E-mail:luojiawei@stu.ahau.edu.cn

*通信作者:叶新新 E-mail:xyx@ahau.edu.cn

基金项目:安徽省教育厅重点项目(2022AH050886);安徽省科技重大专项(202103a06020012);安徽省杰出青年科学基金项目(2008085J13)

Project supported: Key Project of Anhui Provincial Department of Education(2022AH050886); Major Science and Technology Project of Anhui Province(202103a06020012); Science Foundation for Outstanding Youth of Anhui Province(2008085J13)

treatment, e. g., rice monoculture (DZ), rice co-cropping with *Cherax quadricarinatus* (DA), rice co-cropping with low-density *Procambarus clarkii* (DD), and rice co-cropping with high-density *Procambarus clarkii* (DG). The CH₄ and N₂O fluxes peaked in the jointing stage. The cumulative CH₄ emissions were in order of DZ>DA>DD>DG. The cumulative N₂O emission followed the order of DG>DD>DA>DZ. Compared with DZ, the GWP in DG, DD, and DA treatments decreased by 36.9%, 30.7%, and 18.1%, respectively. Soil Eh as well as concentrations of dissolved oxygen, ammonium, and nitrate were negatively correlated with CH₄ emissions ($P<0.05$), but positively correlated with N₂O emissions ($P<0.05$). Rice and shrimp co-cropping reduced CH₄ emissions, increased N₂O emissions, and decreased GWP. Moreover, the DG treatment was most effective in reducing GWP. The selection of lobster species and breeding density within a rice-shrimp co-cropping system should be considered to reduce greenhouse gas emissions more effectively in a paddy field system.

Keywords: rice-shrimp co-cropping; greenhouse gases; global warming potential; breeding density

甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)是大气中主要的温室气体,其全球增温潜势分别为二氧化碳(CO₂)的28倍和265倍^[1]。农业是CH₄和N₂O的主要排放源^[2]。我国水稻种植面积占全球的23%,位居第二;总产量占全球30%,位居第一。稻田是CH₄和N₂O的重要排放源^[3],降低稻田温室气体排放量对农业减排具有重大意义。

稻田综合种养循环农业模式是稻田生态系统物质、能量高效循环的种养模式^[4]。在稻渔共作系统中,不同养殖品种觅食行为和生存空间的差异,引起稻渔系统中CH₄和N₂O的排放差异显著。有研究表明,在稻鸭共作系统中,养鸭数量越多,水体溶解氧(DO)含量越高,CH₄排放减少^[5];崔荣阳等^[6]在洱海流域进行不同稻鸭密度共作对温室气体排放的试验表明,DO、硝态氮(NO₃⁻-N)、铵态氮(NH₄⁺-N)及土壤温度是引起温室气体CH₄和N₂O排放差异的主要因素,高密度养鸭降低CH₄排放,而增加N₂O排放。已有研究表明,不同稻虾共作体系下土壤碳库^[7]和氮利用效率^[8]的变化会影响温室气体的排放^[9-10];目前,我国稻虾共作体系中主要的养殖品种是小龙虾(克氏原螯虾 *Procambarus clarkii*)和淡水澳龙(四脊滑螯虾 *Cherax quadricarinatus*)^[11]。稻虾共作体系中龙虾品种和养殖密度的不同,可能会引起稻田中土壤有机质、氧化还原电位(Eh),pH和温度等的变化,进而影响温室气体排放。

本研究通过设置龙虾品种和养殖密度试验,采取PVC静态箱-气相色谱法,测定系统中CH₄和N₂O的排放通量和累积排放量及土壤Eh、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N和水体DO等理化因子,研究稻虾共作对温室气体排放规律、排放量及综合增温潜势(GWP)的影响,探明龙虾品种及养殖密度对稻田温室气体排放的影响,为稻虾共作模式温室气体减排提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验在安徽省铜陵市普济圩农场(31°58'33"N, 117°43'28"E)内进行,该地区平均海拔8~9 m,地下水位较高,属长江下游河湖冲积平原,属北亚热带湿润气候区,年降水量为1 200~1 400 mm,降雨主要集中在春夏两季,其降雨量占年降雨70%左右,年均日照时间为1 990 h,年平均气温为16.3℃。土壤类型为河湖沉积物发育而成的潜育型水稻土,试验前土壤有机质为20.7 g·kg⁻¹,pH为6.8,全氮为2.35 g·kg⁻¹,有效磷为9.24 mg·kg⁻¹。试验水稻品种为绿亿香糯,龙虾品种为克氏原螯虾和淡水澳龙。

1.2 试验设计及田间管理

试验设计:试验共设4个处理,分别为水稻单作(DZ)、水稻低密度克氏原螯虾共作(DD)、水稻高密度克氏原螯虾共作(DG)和水稻澳龙共作(DA),每个处理3个重复,共12个小区,每个小区1 330 m²。为防止处理间养分相互影响,各处理间修建宽0.6 m、高0.5 m的田埂,并用农用塑料薄膜包裹田埂,每个处理进出水口对角线布置。在DD、DG和DA处理四周开挖L型虾沟,虾沟宽4 m、深1.2 m。在虾沟岸边铺设尼龙网,尼龙网埋入地下0.6 m,露出地面0.4 m,用小木棍支撑,并用扎带连接固定,防止龙虾爬出田块。

田间管理:水稻于2021年7月播种,8月移栽,11月收割。各处理之间施用相同量的化肥,施用N、P₂O₅、K₂O分别为220、70、95 kg·hm⁻²,磷、钾肥一次性全部施用,翻耕混入土壤中作为基肥,氮肥60%作为基肥,40%在后期进行追肥施用,9月1日施用分蘖肥,10月5日施用穗肥;8月8日DD、DG和DA 3个稻虾处理稻田淹水15~20 cm,DZ处理稻田淹水8~10 cm,9月15日排水晒田,9月20日田面复水,DD、DG和DA 3个稻虾处理水深15~20 cm,DZ处理水深8~

10 cm, 11月3日排水晒田, 11月13日水稻收获。

稻虾共作模式中虾苗于2021年8月10日投放, DD投放密度为按照质量约为25 g的幼虾210 kg·hm⁻²; DG投放密度为420 kg·hm⁻²; DA投放密度为每尾6~8 cm的澳洲淡水龙虾13 000尾·hm⁻²。饲料的投放按照龙虾质量的2%~6%进行投喂, 其主要原料为豆粕、鱼粉、矿物质、花生粕、麦麸和微量元素; 饲料碳氮比为8, 整个稻虾共作季饲料碳、氮累积投入量为1 953.0 kg·hm⁻² (以C计) 和244.1 kg·hm⁻² (以N计)。根据实际情况调整投食量和投食频率, 水稻收割后进行龙虾捕捞。

1.3 气体样品采集与测定

CH₄和N₂O气体用静态箱在田间进行采集, 采用Bruker450-GC气相色谱仪对CH₄和N₂O气体进行测定。静态箱由聚氯乙烯(PVC)材料制成, 分为箱底、加高箱和箱盖3部分。箱底底面积为0.36 m², 箱底、加高箱和箱盖分别高25、60 cm和60 cm。箱底在水稻移栽前放于稻田中, 采集气体时盖上箱盖, 水稻过高时, 加上加高箱。箱体外部用铝箔纸包裹进行隔热。移栽后保持箱内箱外水稻种植密度一致。温室气体在2020年8月13日至11月10日进行采集, 每7~10 d收集一次气体, 采样时间为每日上午8:00—11:30。采气前, 盖上加高箱和箱盖后, 在底座和加高箱的水槽中加水进行密封, 在0、16、32、48 min时用100 mL注射器从静态箱中抽取气体注射到500 mL铝箔袋中保存, 尽快带回实验室进行分析测定。气体排放通量计算公式如下^[12]:

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

式中: F 是CH₄或N₂O排放通量, mg·m⁻²·h⁻¹或μg·m⁻²·h⁻¹; ρ 是CH₄或N₂O在标准状态下的气体密度, kg·m⁻³; V 是静态箱有效体积, m³; S 为箱底面积, m²; dC/dt 表示在密闭静态箱内CH₄或N₂O气体排放量随时间的变化值; T 为静态箱体在采样过程中的平均温度。

气体累积排放量用平均法进行计算, 即以连续两次采样气体排放通量的平均值与连续两次采样日间隔天数相乘作为该段时间累计排放量, 以此类推, 最后将每个时间段的累积排放量进行求和, 作为整个气体采集过程的气体累积排放量。CH₄、N₂O气体累积排放量计算公式如下^[6]:

$$F = \sum_{i=1}^n \left[\frac{f_i + f_{i-1}}{2} \times t \times 24 \times 0.01 \right] \quad (2)$$

式中: f_i 、 f_{i-1} 分别为第 i 次、第 $i-1$ 次采样时的气体排放

通量, mg·m⁻²·h⁻¹; t 为第 i 次和第 $i-1$ 次采样间隔时间, d; t 为气体采样次数; F 为整个采样时间段内气体累积排放量, kg·hm⁻²。

整个采样时间段内CH₄和N₂O累积排放量GWP(kg CO₂e·hm⁻²)的计算: 以100年影响尺度计, CH₄的GWP是CO₂的28倍, N₂O是CO₂的265倍^[13]。GWP计算公式如下:

$$GWP = F_{CH_4} \times 28 + F_{N_2O} \times 265 \quad (3)$$

式中: F_{CH_4} 、 F_{N_2O} 分别为CH₄、N₂O累积排放量, kg CO₂e·hm⁻²。

温室气体排放强度(GHGI, kg CO₂e·kg⁻¹)为GWP与产量的比值, 可以综合体现系统中粮食产量与GWP的关系^[14]。

1.4 土壤和田面水样品采集与测定

为减少采样对土壤和水体扰动引起的温室气体排放, 减少采土频率, 采集两次气体样品时采集一次土壤样品, 用不锈钢土钻在每个小区中采集3个点的0~20 cm土层土壤作为一个混合样, 土壤带回实验室风干, 经挑选、磨碎、过筛后, 测定可溶性有机碳(DOC)、NO₃-N、NH₄⁺-N等指标。在采样的同时, 在每个小区离静态箱箱底10 cm处插入土壤氧化还原电位计, 记录土壤Eh。

在采集土样时, 用便携式溶解氧仪和pH计测定水体中的DO和pH。

1.5 数据统计分析

所有数据采用Excel进行分析和归纳并进行图形绘制, 数据中各指标的显著性及相关性采用SPSS软件进行统计分析。

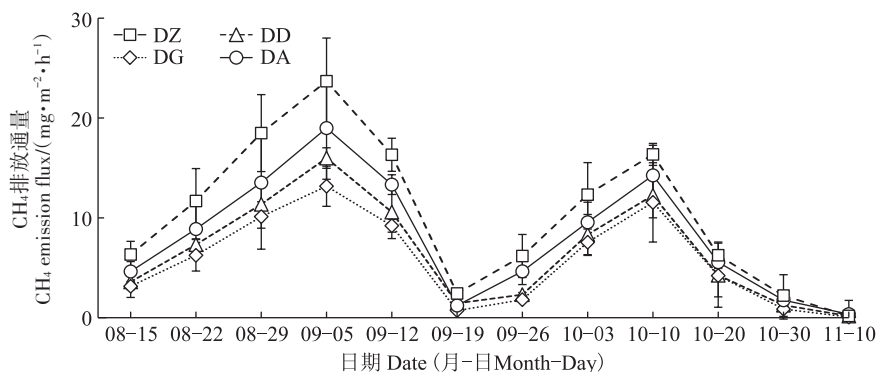
2 结果与分析

2.1 CH₄排放通量

如图1所示, 各处理CH₄排放规律基本一致, 试验期间出现两个峰值。在水稻分蘖拔节期达到第一个峰值, DZ处理排放峰值最高。排水晒田显著降低CH₄排放通量。随着田面覆水和穗肥、饲料施入, CH₄排放通量逐渐增加, 在灌浆期达到第二个峰值。试验期间, 各处理CH₄平均排放通量(mg·m⁻²·h⁻¹)规律为DZ(10.20±2.05) > DA(8.06±1.51) > DD(6.57±1.87) > DG(5.72±1.16); 与DZ处理相比, DG、DD和DA处理CH₄平均排放通量分别降低了43.9%、35.6%和21.0%。

2.2 N₂O排放通量

如图2所示, 整个种养期间, 各处理间N₂O排放通量基本一致, 出现两个峰值。在排水晒田期间, 同



DZ:水稻单作;DD:水稻低密度克氏原螯虾共作;DG:水稻高密度克氏原螯虾共作;DA:水稻澳龙共作。9月1日施用分蘖肥,10月5日施用穗肥;9月15日排水晒田,9月20日田面复水,11月3日排水晒田,11月13日水稻收获。下同。

DZ:rice monoculture;DD:rice co-cropping with low-density *Procambarus clarkii*;DG:rice co-cropping with high-density *Procambarus clarkii*;DA:rice co-cropping with *Cherax quadricarinatus*. Application of tillering fertilizer on September 1, ear fertilizer on October 5; the fields were drained and dried on September 15, the fields were rewetted on September 20, the fields were drained and dried on November 3, and the rice was harvested on November 13. The same below.

图1 2021年8—11月各处理间CH₄排放通量动态变化

Figure 1 CH₄ fluxes in the rice-shrimp co-cropping systems from August to October 2021

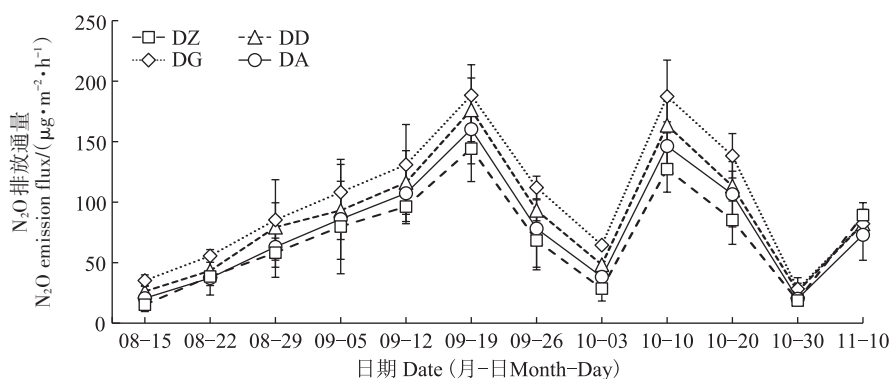


图2 2021年8—11月各处理间N₂O排放通量动态变化

Figure 2 N₂O fluxes in the rice-shrimp co-cropping systems from August to October 2021

时分蘖肥施入,N₂O排放通量达到第一个峰值,DG处理排放峰值最高;在10月10日左右,穗肥施入,N₂O排放通量达到第二个峰值。在整个水稻生育期期间,各处理N₂O平均排放通量($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)规律为DG(101.37 ± 21.05)>DD(88.45 ± 18.51)>DA(78.09 ± 15.87)>DZ(70.83 ± 13.16);与DZ处理相比,DG、DD和DA处理N₂O平均排放通量分别增加了43.1%、24.8%和10.3%。

2.3 温室气体累积排放量和GWP

如表1所示,不同处理N₂O累计排放量规律为DG>DD>DA>DZ,与DZ处理相比,DG、DD和DA处理N₂O累计排放量分别增加了40.7%、26.1%和11.7%。CH₄气体占GWP的84.2%~92.9%,不同处理间CH₄累计排放量与GWP规律均为DZ>DA>DD>DG。

2.4 水稻产量和GHGI

如表2所示,不同处理间水稻产量差异不显著,

表1 CH₄和N₂O累积排放量及GWP

Table 1 Cumulative emissions and warming potential of each treatment

处理 Treatment	CH ₄ / ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	N ₂ O/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	GWP/ ($\text{kg CO}_2\text{e}\cdot\text{hm}^{-2}$)
DZ	191.57±13.70a	1.37±0.14d	5 773.48±196.59a
DD	124.49±15.53c	1.73±0.23b	4 002.30±140.06c
DG	109.38±11.89d	1.93±0.31a	3 638.88±217.11d
DA	152.46±16.08b	1.53±0.09c	4 726.22±200.20b

注:DZ:水稻单作;DD:水稻低密度克氏原螯虾共作;DG:水稻高密度克氏原螯虾共作;DA:水稻澳龙共作。同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同。

Note: DZ: rice monoculture; DD: rice co-cropping with low-density *Procambarus clarkii*; DG: rice co-cropping with high-density *Procambarus clarkii*; DA: rice co-cropping with *Cherax quadricarinatus*. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$), The same below.

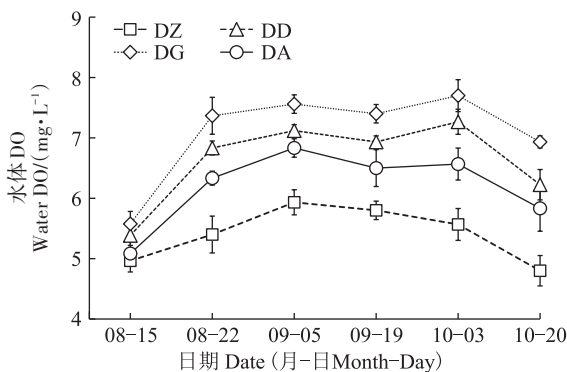
不同处理间 $GHGI$ 变化趋势为 $DZ > DA > DD \approx DG$ 。与 DZ 处理相比, DG 、 DD 和 DA 处理 $GHGI$ 分别降低了 40.1%、33.3% 和 21.1%, 稻虾共作可以在保证粮食安全的同时降低温室气体排放。

表2 各处理水稻产量及 $GHGI$ Table 2 Rice yield and $GHGI$ in each treatments

处理 Treatment	水稻产量 Rice yields/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	$GHGI$ ($\text{kg CO}_2\text{e} \cdot \text{kg}^{-1}$)
DZ	9 669.83±61.47a	0.60±0.07a
DD	10 055.03±403.81a	0.40±0.01c
DG	10 245.12±752.59a	0.36±0.05c
DA	10 028.35±155.43a	0.47±0.01b

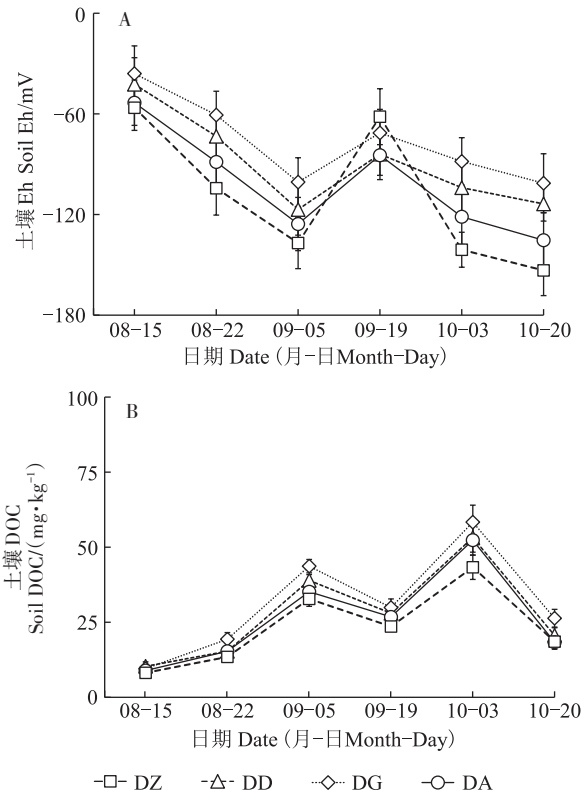
2.5 稻田环境因子

整个水体 DO 测量期间, 不同处理中平均水体 DO 值顺序为 $DG > DD > DA > DZ$ (图3); 与 DZ 处理相比, DG 、 DD 和 DA 3个稻虾共作处理都显著提高了水体中 DO 浓度, 平均 DO 浓度分别提高了 31.1%、22.5% 和 14.4%。

图3 2021年8—10月各处理中水体 DO 动态变化Figure 3 Dynamic changes of water DO in each treatments from August to October 2021

在整个测定时期内, 各处理间土壤 Eh 变化趋势基本一致, 即随着淹水时间增加, 土壤还原性增强, 在9月中旬排水晒田时, 土壤还原性减弱, 复水后, 土壤还原性继续增加。不同处理土壤 Eh 均值顺序为 $DG > DD > DA > DZ$ (图4A); 与 DZ 处理相比, DD 和 DG 两个处理显著提高了土壤 Eh 。

各处理土壤 DOC 稻季变化趋势基本一致 (图4B), 呈现先增加后降低再增加然后降低, 10月3日达到最大值, 其中 DG 处理值最高, 可能是因为龙虾饲料和龙虾排泄物施入到稻田中, 增加了土壤 DOC 值。

图4 2021年8—10月各处理中土壤 Eh 和土壤 DOC 动态变化Figure 4 Dynamic changes of soil Eh and soil DOC in each treatments from August to October 2021

各处理 NO_3^--N 、 NH_4^+-N 稻季动态变化基本一致 (图5), 都呈现先降低后增加再降低的动态变化, 在9月19日 NO_3^--N 、 NH_4^+-N 达到峰值, 其中 DG 处理值最高, 可能是因为分蘖肥和饲料的投入。

稻田温室气体排放通量与环境因子的相关性如表3所示, CH_4 的排放通量与水体 DO 、土壤 Eh 、 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 而 N_2O 的排放通量与水体 DO 、土壤 Eh 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。

3 讨论

3.1 稻虾共作对稻田 CH_4 排放的影响

与水稻单作处理相比较, 稻虾共作处理降低了稻田 CH_4 累积排放量。与 DZ 处理相比较, DG 、 DD 和 DA 处理下 CH_4 累积排放量降低了 42.9%、35.1% 和 20.4%。主要原因: 一是稻虾共作处理稻田淹水比水稻单作处理深, 较深的淹水降低了 CH_4 从土壤到大气的扩散速率^[15-17], 傅志强等^[18]的研究表明, 与常规灌溉相比, 灌水深度 20 cm 时 CH_4 排放量减少 6.1%; 二是较深的淹水降低水稻根系活力, 减弱水稻根区对 CH_4 的

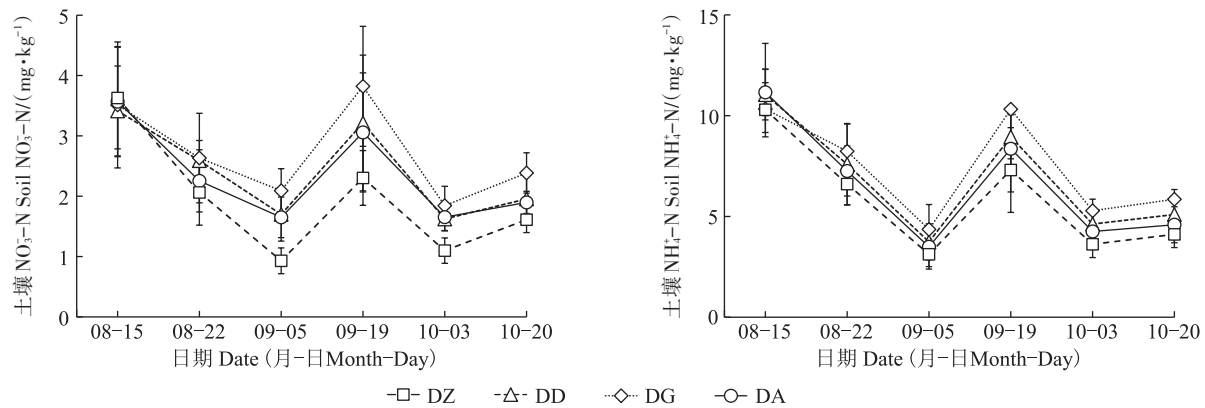


图5 2021年8—10月各处理中土壤NO₃-N和NH₄-N动态变化

Figure 5 Dynamic changes of soil NO₃-N and NH₄-N in each treatments from August to October 2021

表3 稻田温室气体排放通量与环境因子的相关性

Table 3 Correlation between greenhouse gas emission flux and environmental factors in rice field

	温度Temperature	pH	Eh	DO	NH ₄ -N	NO ₃ -N	CH ₄	N ₂ O
温度	1							
pH	-0.512	1						
Eh	0.156	0.208	1					
DO	0.293	0.084	0.945**	1				
NH ₄ -N	-0.121	0.247	0.794**	0.768**	1			
NO ₃ -N	-0.050	0.066	0.770**	0.727**	0.929**	1		
CH ₄	-0.145	-0.215	-0.991**	-0.951**	-0.848**	-0.817**	1	
N ₂ O	-0.118	-0.074	0.606*	0.613*	0.880**	0.857**	-0.665*	1

注:*显著相关 $P<0.05$, **极显著相关 $P<0.01$ 。
Note: * Significant correlation $P<0.05$, ** Significant correlation $P<0.01$.

再氧化能力和水稻植株对CH₄的传输能力^[19-21];三是稻虾共作中小龙虾在稻田中生活,其嬉戏、觅食、掘穴等活动会破坏土壤,有中耕的作用,加速根系泌氧,提高土壤中氧气含量^[10,22];四是小龙虾和鸭觅食稻田中杂草、浮游生物和水藻等,降低这些生物对稻田系统中氧气的消耗,提高稻田系统中DO含量^[4,6],增加土壤Eh,最终降低CH₄排放。

3个稻虾处理中,DG处理减少稻田CH₄排放最显著,可能是因为DG处理小龙虾密度大,小龙虾打洞能力比澳龙强^[23],打洞加速了土壤界面与空气交换的能力,提高土壤Eh,降低产甲烷菌活性,提高甲烷氧化菌活性,最终显著降低CH₄排放。

3.2 稻虾共作对稻田N₂O排放的影响

与DZ处理相比,DA、DD和DG处理N₂O累计排放量分别增加了11.7%、26.1%和40.7%。稻虾共作模式增加稻田N₂O排放的原因可能是:首先,克氏原螯虾为排氮型代谢动物,排泄物中含有大量NH₄-N,龙虾排泄物的投入补充了氮源,为硝化与反硝化作用

提供大量反应底物,促进硝化反硝化作用发生,从而促进中间产物N₂O的排放^[24-25];其次,小龙虾在田间的扰动,可能加速了溶解在水层中的N₂O的扩散和排放^[26];再次,稻田中小龙虾和鸭等刺激水稻生长,加速水稻根系泌氧^[4],同时小龙虾觅食杂草和浮游生物等^[6],减少氧气消耗,促进硝化作用进行,增加N₂O排放。

DG处理N₂O排放通量高于DD和DA处理,主要是因为:(1)DG处理小龙虾密度高,在稻田中活动强度高于DD和DA处理,加速了土壤与空气的流通交换,提高土壤和水层含氧量,提高土壤Eh,促进土壤硝化作用发生,为反硝化提供底物,从而导致N₂O大量产生^[22,27]; (2)DG处理小龙虾密度高,小龙虾排泄物量增加,为硝化作用提供了充足底物,促进N₂O的产生与排放。

3.3 稻虾共作对GWP的影响

GWP主要由CH₄和N₂O两种温室气体构成,本研究中,与DZ处理相比,稻虾处理降低CH₄排放,增加N₂O排放,最终降低GWP;CH₄气体占GWP的84.2%~

92.9%,说明稻田CH₄排放量是影响GWP变化的主要原因^[28],降低稻田CH₄排放对缓解温室气体GWP至关重要^[29]。

4 结论

(1)各处理间CH₄排放通量、CH₄累积排放量和GWP规律均为DZ>DA>DD>DG;N₂O排放通量和N₂O累积排放量规律为DG>DD>DA>DZ。与DZ相比,DG、DD和DA处理GWP分别降低了36.9%、30.7%和18.1%。与水稻单作相比,稻虾共作能降低CH₄排放,增加N₂O排放,但考虑GWP,稻虾共作能实现温室气体减排,其中DG处理最明显。

(2)土壤Eh、水体DO、NH₄⁺-N和NO₃⁻-N是引起稻田系统中CH₄和N₂O排放差异的主要因素。稻虾共作中引入龙虾可提高土壤Eh、水体DO、NH₄⁺-N和NO₃⁻-N,降低CH₄排放,增加N₂O排放。

(3)各处理间水稻产量无显著差异,兼顾水稻产量和温室气体排放,不同处理GHGI变化趋势为DZ>DA>DD≈DG。在稻虾共作体系中,为了更有效降低稻田系统中温室气体的排放,需要考虑龙虾品种和养殖密度的选择。

参考文献:

- [1] 周胜,张鲜鲜,王从,等.水分和秸秆管理减排稻田温室气体研究与展望[J].农业环境科学学报,2020,39(4):852-862. ZHOU S, ZHANG X X, WANG C, et al. Research and prospect of greenhouse gas emission reduction by water and straw management in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2020, 39(4):852-862.
- [2] 李熠凡,李烙布,李伏生.不同灌溉施氮模式对稻田甲烷和氧化亚氮排放的影响[J].灌溉排水学报,2021,40(12):44-53. LI Y F, LI L B, LI F S. Effects of different irrigation nitrogen application modes on methane and nitrous oxide emissions in paddy field[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(12):44-53.
- [3] 刘燕,姜运生,杨蕙琳,等.施硅对增温稻田CH₄和N₂O排放的影响[J].生态学报,2020,40(18):6621-6631. LIU Y, LOU Y S, YANG H L, et al. Effects of silicon application on the emission of CH₄ and N₂O in rice field with temperature increase[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(18):6621-6631.
- [4] SUN G, SUN M, DU L S, et al. Ecological rice-cropping systems mitigate global warming: a meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 789:147900.
- [5] 傅志强,黄璜,廖晓兰,等.养鸭数量对CH₄排放的影响[J].生态学报,2008,28(5):2107-2114. FU Z Q, HUANG H, LIAO X L, et al. Effects of duck breeding quantity on CH₄ emission[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5):2107-2114.
- [6] 崔荣阳,刘宏斌,毛昆明,等.洱海流域稻鸭共作对稻田温室气体排放和水稻产量的影响[J].环境科学学报,2019,39(7):2306-2314. CUI R Y, LIU H B, MAO K M, et al. Effects of rice-duck co-cropping on greenhouse gas emissions and rice yield in Erhai Lake Basin[J]. *Chinese Journal of Environmental Sciences*, 2019, 39(7):2306-2314.
- [7] 佘国涵,袁家富,彭成林,等.长期稻虾共作模式提高稻田土壤生物肥力的机理[J].植物营养与肥料学报,2020,26(12):2168-2176. SI G H, YUAN J F, PENG C L, et al. Mechanism of long-term rice-shrimp co-cropping to improve soil biological fertility in paddy field[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(12):2168-2176.
- [8] 寇祥明,韩光明,吴雷明,等.虾苗密度对稻虾共作模式下稻虾生长及氮磷利用的影响[J].扬州大学学报(农业与生命科学版),2020,41(2):22-27. KOU X M, HAN G M, WU L M, et al. Effects of shrimp seedling density on growth and nitrogen and phosphorus utilization of rice-shrimp under rice-shrimp co-cropping[J]. *Journal of Yangzhou University (Agriculture and Life Sciences Edition)*, 2020, 41(2):22-27.
- [9] 程琳.江汉平原易涝渍农田不同种植模式综合效益研究[D].荆州:长江大学,2015. CHENG L. Study on the comprehensive benefits of different planting patterns in waterlogging and damage prone farmland in Jiangnan Plain[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2015.
- [10] 徐祥玉,张敏敏,彭成林,等.稻虾共作对秸秆还田后稻田温室气体排放的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(11):1591-1603. XU X Y, ZHANG M M, PENG C L, et al. Effects of co-cropping of rice and shrimp on greenhouse gas emissions in paddy fields after straw returning[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(11):1591-1603.
- [11] 陶先法,李冰,喻召雄,等.稻虾共生模式对水稻结实期根分泌物及微生物的影响[J].水产学报,2022,46(11):2122-2133. TAO X F, LI B, YU Z X, et al. Effects of rice-shrimp symbiosis on root exudates and microorganisms in rice seed setting[J]. *Journal of Aquatic Sciences*, 2022, 46(11):2122-2133.
- [12] 徐祥玉,张敏敏,彭成林,等.稻草还田下非稻季持续淹水对稻季CH₄和CO₂排放的影响[J].农业资源与环境学报,2017,34(2):145-152. XU X Y, ZHANG M M, PENG C L, et al. Effects of continuous flooding in non-rice season on CH₄ and CO₂ emissions in rice season under straw returning[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(2):145-152.
- [13] 王天宇,樊迪,宋开付,等.巢湖圩区再生稻田甲烷及氧化亚氮的排放规律研究[J].农业环境科学学报,2021,40(8):1829-1838. WANG T Y, FAN D, SONG K F, et al. Emissions of methane and nitrous oxide from reclaimed rice fields in polder of Chaohu Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(8):1829-1838.
- [14] SHEN F F, CAO C G, LI C F. Integrated rice-duck farming decreases global warming potential and increases net ecosystem economic budget in central China[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2018, 25(23):22744-22753.
- [15] XU Y, ZHAN M, CAO C G, et al. Effects of irrigation management during the rice growing season on soil organic carbon pools[J]. *Plant and Soil*, 2017, 421:337-351.
- [16] 李成芳,寇志奎,张枝盛,等.秸秆还田对免耕稻田温室气体排放及土壤有机碳固定的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(11):2362-2367. LI C F, KOU Z K, ZHANG Z S, et al. Effects of straw

- returning on greenhouse gas emissions and soil organic carbon fixation in no-tillage paddy field[J]. *Journal of Agro-Environmental Sciences*, 2011, 30(11):2362-2367.
- [17] 蒋榕,徐强,李京咏,等. 稻虾共作模式碳足迹评价的敏感性和不确定性分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(10):1577-1587. JIANG R, XU Q, LI J Y, et al. Sensitivity and uncertainty analysis of the carbon footprint evaluation of rice and shrimp co-cropping models[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(10):1577-1587.
- [18] 傅志强,刘依依,龙攀,等. 深水免耕移栽稻草覆盖栽培模式对晚稻温室气体排放及产量的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(5):1263-1269. FU Z Q, LIU Y Y, LONG P, et al. Effects of deep-water no-tillage transplanting straw mulch cultivation on greenhouse gas emissions and yield of late rice[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(5):1263-1269.
- [19] 王强盛. 稻田种养结合循环农业温室气体排放的调控与机制[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(5):633-642. WANG Q S. Regulation and mechanism of greenhouse gas emissions from paddy field combined with cultivation and recycling agriculture[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(5):633-642.
- [20] 王楷,李伏生,方泽涛,等. 不同灌溉模式和施氮量条件下稻田甲烷排放及其与有机碳组分关系[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5):1012-1020. WANG K, LI F S, FANG Z T, et al. Methane emission and its relationship with organic carbon components in paddy field under different irrigation modes and nitrogen application rates [J]. *Journal of Agro-Environmental Sciences*, 2017, 36(5):1012-1020.
- [21] 丁维新,袁俊吉,刘德燕,等. 淡水养殖系统温室气体CH₄和N₂O排放量研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4):749-761. DING W X, YUAN J J, LIU D Y, et al. Research progress of greenhouse gases CH₄ and N₂O emissions in freshwater aquaculture systems [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4):749-761.
- [22] 侣国涵. 长期稻虾共作模式下稻田土壤肥力变化特征研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2017. SI G H. Changes of soil fertility in paddy field under long-term rice-shrimp co-cropping[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017.
- [23] 董方勇,谢文星,谢山,等. 克氏原螯虾洞穴的生态特征及其对水利工程安全影响的初步研究[J]. 水生生物学报, 2008, 32(6):952-954. DONG F Y, XIE W X, XIE S, et al. Preliminary study on ecological characteristics of *Procambarus clarkii* burrow and its influence on the safety of hydraulic engineering[J]. *ACTA Hydrobiologica Sinica*, 2008, 32(6):952-954.
- [24] 赵峥,岳玉波,张翼,等. 不同施肥条件对稻田温室气体排放特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11):2273-2278. ZHAO Z, YUE Y B, ZHANG Y, et al. Effects of different fertilization conditions on greenhouse gas emission characteristics of rice field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11):2273-2278.
- [25] 温小波,库天梅,罗静波. 温度、体重及摄食状态对克氏原螯虾代谢的影响[J]. 华中农业大学学报, 2003, 22(2):152-156. WENG X B, KU Y M, LUO J B. Effects of temperature, body weight and feeding state on metabolism of *Procambarus clarkii*[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2003, 22(2):152-156.
- [26] XU G C, LIU X, WANG Q S, et al. Integrated rice-duck farming mitigates the global warming potential in rice season[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 575:58-66.
- [27] HOU A X, CHEN G X, WANG Z P, et al. Methane and nitrous oxide emissions from a rice field in relation to soil redox and microbiological processes[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64:2180-2186.
- [28] DALI N, ELI S, CHENG K, et al. Management opportunities to mitigate greenhouse gas emissions from Chinese agriculture[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2015, 209:108-124.
- [29] 汤宏,沈健林,刘杰云,等. 稻秸的不同组分对水稻土甲烷和二氧化碳排放的影响[J]. 生态环境学报, 2016, 25(7):1125-1133. TANG H, SHEN J L, LIU J Y, et al. Effects of different components of rice straw on methane and carbon dioxide emissions from paddy soil [J]. *Journal of Ecology and Environment*, 2016, 25(7):1125-1133.