



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

稻蟹共生系统温室气体排放特征及其影响因素

张怡彬, 徐洋, 王洪媛, 王绍蓬, 翟丽梅, 刘宏斌

引用本文:

张怡彬, 徐洋, 王洪媛, 王绍蓬, 翟丽梅, 刘宏斌. 稻蟹共生系统温室气体排放特征及其影响因素[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(5): 931–939.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0400>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

稻草还田下非稻季持续淹水对稻季CH₄和CO₂排放的影响

徐祥玉, 张敏敏, 彭成林, 佘国涵, 徐大兵, 袁家富

农业资源与环境学报. 2017, 34(2): 145–152 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0236>

投喂率对稻-黄颡鱼共作系统气态氮散失和饲料氮利用率的影响

吴俊男, 鲍婷, 王梦杰, 李凤博, 冯金飞, 方福平

农业资源与环境学报. 2022, 39(4): 749–757 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0110>

玉米秸秆不同还田方式下麦田温室气体排放特征

李新华, 朱振林, 董红云, 杨丽萍, 郭洪海

农业资源与环境学报. 2016, 33(2): 176–181 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0260>

长期施肥下黑土玉米田土壤温室气体的排放特征

高洪军, 张卫建, 彭畅, 张秀芝, 李强, 朱平

农业资源与环境学报. 2017, 34(5): 422–430 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0103>

不同水分条件下多种Mn肥对水稻Cd累积的影响

梁源芳, 李晓清, 吴启堂, 陈杨梅, 高婷, 林贤柯, 卫泽斌

农业资源与环境学报. 2022, 39(4): 734–740 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0179>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张怡彬, 徐洋, 王洪媛, 等. 稻蟹共生系统温室气体排放特征及其影响因素[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(5): 931-939.

ZHANG Y B, XU Y, WANG H Y, et al. Greenhouse gas emission characteristics and influencing factors of rice-crab symbiosis system[J].

Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022, 39(5): 931-939.



开放科学 OSID

稻蟹共生系统温室气体排放特征及其影响因素

张怡彬, 徐洋, 王洪媛*, 王绍蓬, 翟丽梅, 刘宏斌

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业农村部面源污染控制重点实验室, 北京 100081)

摘要:稻田是农业温室气体排放的重要来源。近年来,稻田综合种养模式发展迅速,但其对温室气体排放的影响具有较大争议。为明确我国东北地区典型稻田种养模式——稻蟹共生系统温室气体排放特征,在辽宁省盘锦市大洼区开展微区试验,设置持续淹水水稻单作、晒田水稻单作和稻蟹共生3种处理,开展了不同稻田生态系统下温室气体排放特征及其主要影响因素研究。结果表明:稻蟹共生能够降低稻田 N_2O 排放,与持续淹水水稻单作处理和晒田水稻单作处理相比,稻蟹共生处理 N_2O 排放量分别降低23.9%和16.7%。稻蟹共生对 CH_4 排放的影响则取决于水稻单作的水分管理模式。相比于持续淹水水稻单作处理,稻蟹共生处理使 CH_4 排放量降低13.5%;然而相比于晒田水稻单作处理,则使 CH_4 排放量增加34.0%。整体而言,与持续淹水水稻单作处理相比,稻蟹共生处理降低了13.6%的增温潜势;与晒田水稻单作处理相比,却增加了32.6%的增温潜势。冗余分析表明,在稻田生态系统中,温室气体排放主要受田面水溶解氧和pH以及土壤中 NO_3^- -N含量和pH的影响。综上,从温室气体减排潜力的角度看,与持续淹水水稻单作系统相比,稻蟹共生模式可以降低 N_2O 和 CH_4 等温室气体排放;而与晒田水稻单作系统相比,持续淹水的稻蟹共生模式会增加温室气体排放。

关键词:稻蟹共生; N_2O ; CH_4 ;增温潜势;稻田

中图分类号:S511;S966.16 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2022)05-0931-09 doi: 10.13254/j.jare.2021.0400

Greenhouse gas emission characteristics and influencing factors of rice-crab symbiosis system

ZHANG Yibin, XU Yang, WANG Hongyuan*, WANG Shaopeng, ZHAI Limei, LIU Hongbin

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Non-point Source Pollution Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China)

Abstract: Paddy fields are important sources of agricultural greenhouse gas (GHG) emissions. In recent years, the paddy field integrated planting and rearing model has developed rapidly, but its impact on GHGs has been controversial. The aim of this study was to clarify the GHG emission characteristics of rice-crab symbiosis in typical paddy fields in northeast China. Micro-area experiments with three treatments, rice monoculture with continuous flooding (RM-F), rice monoculture with alternation of wetting and drying (RM-D), and rice-crab symbiosis (RC), were set up in the Dawa area of Panjin City, Liaoning Province. The characteristics of GHG emissions and their main influencing factors in the different paddy ecosystems were studied. The results showed that rice-crab symbiosis could significantly reduce N_2O emissions from paddy fields. Compared with RM-F and RM-D, the RC treatment decreased 23.9% and 16.7% in N_2O emissions, respectively. The effect of rice-crab symbiosis on CH_4 emissions depended on the water management of the rice monoculture. Compared with the RM-F treatment, CH_4 emissions were 13.5% lower in the RC treatment. However, compared with the RM-D treatment, CH_4 emissions were 34.0% higher. In general, compared with the RM-F treatment, the RC treatment reduced the warming potential by 13.6%; however, compared with the RM-D treatment, it increased the warming potential by 32.6%. Redundancy analysis showed that GHG emissions in the paddy ecosystems were mainly affected by the dissolved oxygen and pH of the surface water and the NO_3^- -N content and pH of the soil.

收稿日期:2021-06-29 录用日期:2021-10-19

作者简介:张怡彬(1994—),女,广西贺州人,硕士研究生,从事农田温室气体减排研究。E-mail: zhangyibin10@126.com

*通信作者:王洪媛 E-mail: wanghongyuan@caas.cn

基金项目:现代农业产业技术体系建设专项

Project supported: The Earmarked Fund for China Agriculture Research System

<http://www.aed.org.cn>

Rice-crab symbiosis with continuous flooding can reduce GHG emissions (including N_2O and CH_4) in comparison to rice monoculture with continuous flooding, but it increases GHG emissions in comparison with rice monoculture with alternation of wetting and drying.

Keywords: rice-crab symbiosis; N_2O ; CH_4 ; warming potential; paddy field

由温室气体排放引起的全球变暖已成为当今全球性的环境问题。氧化亚氮(N_2O)和甲烷(CH_4)是两类主要的温室气体,其增温潜势分别是 CO_2 的265倍和28倍^[1-2]。农业活动产生的 N_2O 和 CH_4 分别约占人类活动排放的50%和60%^[3]。稻田生态系统不仅在保证我国粮食安全上发挥着重要作用,同时也是 N_2O 和 CH_4 的重要排放源^[4-5]。稻田 N_2O 排放量占氮肥总输入的2.3%^[6],且全球11%的人为 CH_4 产生量来自稻田^[7]。因此,降低稻田温室气体排放对减缓全球温室效应具有重要贡献。

稻田综合种养是一种稻田生态系统良性循环的高效养殖模式,一般采用水稻+水产/水禽互利共生^[8],实现“一水两用、一田双收、稳粮增效”^[9-10]。近年来在国家的大力支持和推广下稻田综合种类模式得到迅速发展,2019年底全国稻田种养面积达到233万 hm^2 ^[11]。目前,稻田综合种养模式对温室气体排放的影响研究主要集中在稻鸭、稻鱼以及稻虾等共生系统^[12-17]。与水稻单作相比,稻鸭共生表现出对 N_2O 排放的促进作用和对 CH_4 排放的抑制作用^[13,18];稻鱼共生系统表现出对 N_2O 的抑制作用和对 CH_4 排放的促进作用^[15,19];而稻虾轮作系统对温室气体排放的影响则存在较大争议,有研究认为,稻虾轮作系统会增加 N_2O 排放,降低 CH_4 排放^[14],但也有研究表明,稻虾轮作对 N_2O 和 CH_4 均具有减排效果^[16]。稻蟹共生是我国东北地区的典型综合种养模式,占我国稻田综合种养面积的5.94%^[11]。然而,目前关于稻蟹共生系统对稻田温室气体排放的影响研究还较少。

因此,本研究选择我国东北地区典型的稻蟹共生模式,以辽宁省盐碱地利用研究所实验基地为依托,设置持续淹水水稻单作、晒田水稻单作和稻蟹共生3种模式,开展不同稻田生态系统下 N_2O 和 CH_4 排放特征研究,对比分析稻蟹共生与不同水分管理措施水稻单作系统之间的温室气体排放差异性特征及关键环境因子,以期阐明稻蟹共生模式对稻田系统温室气体排放的影响特征提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

本研究田间试验在辽宁省盐碱地利用研究所实

验基地开展。该基地位于辽宁省盘锦市大洼区唐家乡刘家村(122°10' E, 41°02' N),属北温带亚湿润区大陆性季风气候,四季分明,雨量充沛,无霜期约175 d,年平均气温8.3℃,年平均降水量645 mm,降雨多集中在7—8月。试验地土壤类型为盐碱土,土壤基础理化性质:有机质含量 $10.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量 $0.51 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷含量 $9.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾含量 $25.61 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤容重 $1.34 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,pH为7.93。

1.2 试验设计

采用微区试验的方法,共设置持续淹水水稻单作(RM-F)、晒田水稻单作(RM-D)和稻蟹共生(RC)3个处理。其中,RM-F和RM-D处理均设置3个重复(2个处理共6个小区),RC处理设置4个重复,试验共10个小区,完全随机排列。所有小区试验开始前进行统一的常规田间操作,基础土壤一致,小区面积为 24 m^2 (6 m×4 m)。

所有处理化肥用量相等,均为 $\text{N } 210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 96.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O } 77.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。肥料类型为复合肥(28-15-12)和尿素($\text{N } 46\%$)。根据当地施肥习惯,水稻单作处理(RM-F和RM-D)复合肥($642.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)作为基肥一次性投入,尿素($65.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)作为追肥投入,基肥:追肥为8:2;稻蟹共生处理所有肥料作为基肥一次性投入;所有处理灌水深度一致,苗期田面水位为5~10 cm,分蘖期为10~15 cm。RM-D处理晒田7~10 d,其余处理无晒田过程。水稻的插秧与收获时间分别为2019年5月31日和2019年10月14日。水稻品种为盐丰47,河蟹品种为中华绒螯蟹,投入蟹苗为大眼幼体,每个小区的蟹苗投入量为1 800只,投入时间为2019年6月1日,收获时间为2019年10月8日。整个生育期,每个小区的螃蟹饲料投入量为2.33 kg,饲料含氮量为3.7%。田面水的取样频率与气体采集时间一致,土壤样品的采集时间分别为试验前和试验结束后。

1.3 温室气体的采集与测定

温室气体(N_2O 、 CH_4)采用密闭静态箱原位采集,用气相色谱法测定排放通量^[20]。取气装置是由PVC管制成的方箱,方箱尺寸为长60 cm、宽40 cm、高120 cm。方箱外面用锡箔纸包裹一层海绵,以避免阳光照射造成箱体内部温度的变化。采样前用方箱直接罩

住4株水稻植株,底部插入土壤中固定,利用田面水密封作用形成密闭环境。在施肥后的1、2、3、4、5、7 d取样,以后每隔7 d采集1次气体。需要说明的是,由于基地管理问题,8月24日—9月24日期间未能按计划进行气体样品采集,可能会对CH₄和N₂O排放总量有一定的影响,但不会影响各处理间的差异性。采样口位于箱体顶部,每次取样在上午9:00—11:00进行,盖上箱后分别在0、10、20、30 min采集气体100 mL于锡箔采气袋中,每次采气均记录温度和大气压,采集的气体用气相色谱仪(Agilent 7890A)测定N₂O和CH₄的浓度,气体浓度通过标准气体和待测气体峰面积进行计算。具体计算公式^[21]如下:

(1)气体排放通量:

$$F = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{273}{273 + T} \quad (1)$$

式中: F 为气体排放通量,N₂O的单位为 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,CH₄的单位为 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; ρ 为标准状态下气体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; V 为采样箱体积, m^3 ; A 为采样箱覆盖面积, m^2 ; $\Delta c/\Delta t$ 为单位时间内采样箱内气体浓度变化率; T 为采样过程中箱内的平均温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

(2)气体累积排放量:

$$M = \sum \left(\frac{F_{i+1} + F_i}{2} \right) \times (t_{i+1} - t_i) \times 24/100 \quad (2)$$

式中: M 为气体累积排放量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; i 为采样次数; t 为采样时间,d;100为单位转换系数。

(3)全球温室气体增温潜势(GWP):

$$GWP = (f_{\text{N}_2\text{O}} \times 265 + f_{\text{CH}_4} \times 28) / 1000 \quad (3)$$

式中: GWP 为全球增温潜势, $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以CO₂当量计); $f_{\text{N}_2\text{O}}$ 为总N₂O排放量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以N₂O计); f_{CH_4} 为总CH₄排放量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以CH₄计);265指N₂O的增温潜势是CO₂的265倍;28指CH₄的增温潜势是CO₂的

28倍。

1.4 田面水指标的测定

每次测定温室气体排放通量的同时进行田面水样品采集,并进行田面水水深(SD)、水温(ST)、溶解氧(DO)、氧化还原电位(Eh)、pH等指标的测定。NH₄⁺-N、NO₃⁻-N含量:田面水首先用滤纸过滤,然后用流动分析仪(AA3)测定;ST、DO、Eh及pH:采用水质多功能参数分析仪(Professional plus YSI)测定。

1.5 土壤样品的测定

分别在水稻插秧前和收获后,取样测定土壤理化指标^[22]。其中,有机质(SOM)采用重铬酸钾容量法-外加热法测定;全氮(TN)采用凯氏定氮法测定;全磷(TP)采用NaOH熔融-钼锑抗比色法测定;全钾(TP)采用NaOH熔融-火焰光度法测定;NH₄⁺-N、NO₃⁻-N采用0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂浸提-流动分析仪测定;微生物量碳(MBC)、微生物量氮(MBN)采用氯仿熏蒸-K₂SO₄浸提,Vario-TOC自动分析仪测定^[23]。

1.6 数据处理

所有数据均采用Microsoft Excel 2016、Canoco 5和AI软件处理并制图,并采用SPSS 19.0软件中单因素方差分析(One-way ANOVA)的Duncan检验统计处理之间的差异,显著水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 监测期自然条件

监测期间,采样时间段的最高温度为30.3 $^{\circ}\text{C}$,最低温度为10.8 $^{\circ}\text{C}$ (图1)。降雨主要集中在7月底和8月初,最大降雨量达到79.5 mm;生育期累积降雨量为539.7 mm,占全年降水量的87.6%。其间,由于长时间未下雨,田面水深下降,分别在6月1日(插秧期,灌水量0.5 m³)、6月18日(追肥期,灌水量0.8 m³)和7

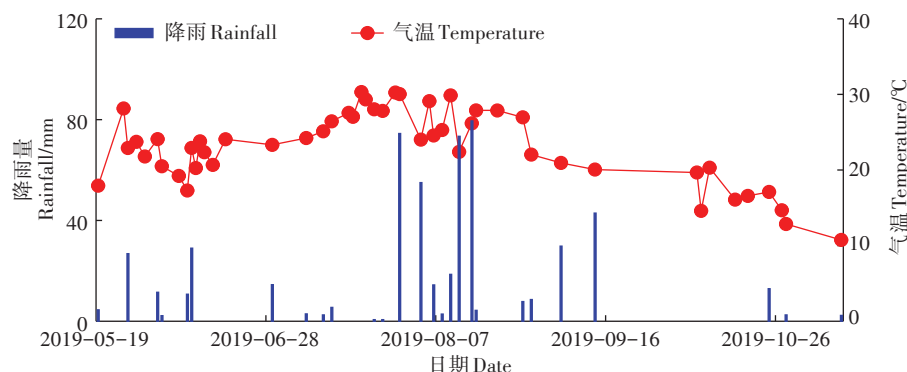


图1 监测期的降雨与日平均气温

Figure 1 Rainfall and daily mean temperature during monitoring period

月24日(抽穗期,灌水量 1.0 m^3)进行灌溉以补充水位。

2.2 N_2O 排放特征

水稻全生育期3个不同处理稻田 N_2O 排放表现出相同的变化趋势, RM-F处理的排放通量在追肥期相对较高(图2)。基肥期,三个处理都没有出现明显峰值,排放量均较低, N_2O 排放通量基本处于 $15.2\sim 35.0\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。追肥后,水稻单作和稻蟹共生处理均出现了一个波峰, RM-F处理和RC处理的最大峰值均出现在追肥后的第2天,分别为 $99.5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $55.1\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, RM-D处理的最大峰值则出现在追肥后的第3天,为 $50.8\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。值得注意的是,从追肥到7月24日(灌水),稻田 N_2O 排放一直处于较高的波动状态, N_2O 排放量占总排放量的 $57.6\%\sim 59.9\%$ 。较高排放水平的维持与田面水深的持续下降密切相关。之后 N_2O 排放基本稳定在较低水平,这一方面可能是由于前期投入的氮肥和饲料已被大量消耗;另一方面主要是因为后期为保证螃蟹的快速生长,田面水维持了较深的状态,抑制了 N_2O 排放。综上,研究区域水稻生长前期是稻田 N_2O 排放的主要排放时期。

2.3 CH_4 排放特征

水稻全生育期3个不同处理稻田 CH_4 排放亦表现出相同的变化趋势,并在排放高峰期表现出显著差异(图3)。在水稻生长前期(抽穗期之前),3个处理的 CH_4 排放量均较低, CH_4 排放通量基本处于 $0.26\sim 24.5\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。在水稻生长进入抽穗期后, CH_4 排放量占水稻整个生育期排放量的 $88.4\%\sim 94.3\%$, CH_4 排放出现了2个高峰。RM-D处理在第一个排放高峰期 CH_4 排放通量最高,为 $87.1\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; RM-F处理的略低,为 $73.5\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; RC处理的最低,仅为 $15.7\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。 CH_4 排放通量第二个高峰期出现在8月21日(进入雨季),此时RC处理最高,为 $37.9\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,而RM-D处理最低,仅为 $10.8\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

2.4 温室气体累积排放量及增温潜势

不同稻田系统水稻全生育期的温室气体排放结果(表1)表明, RC处理的 N_2O 累积排放量显著低于RM-F处理 23.9% ($P<0.05$), 低于RM-D处理 16.7% ($P>0.05$)。RC处理的 CH_4 累积排放量低于RM-F处理 13.5% ($P>0.05$), 却显著高于RM-D处理 34.0% ($P<0.05$)。这表明稻蟹共生模式能够降低稻田

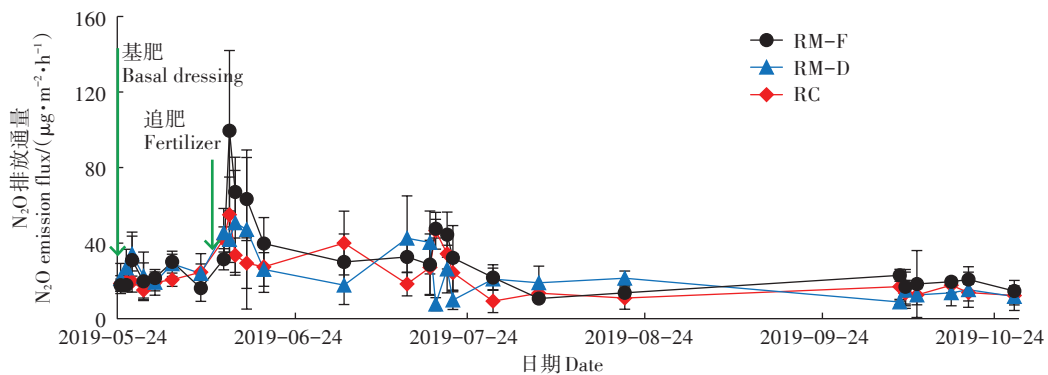


图2 稻田 N_2O 排放通量特征

Figure 2 Characteristics of N_2O emission from paddy field

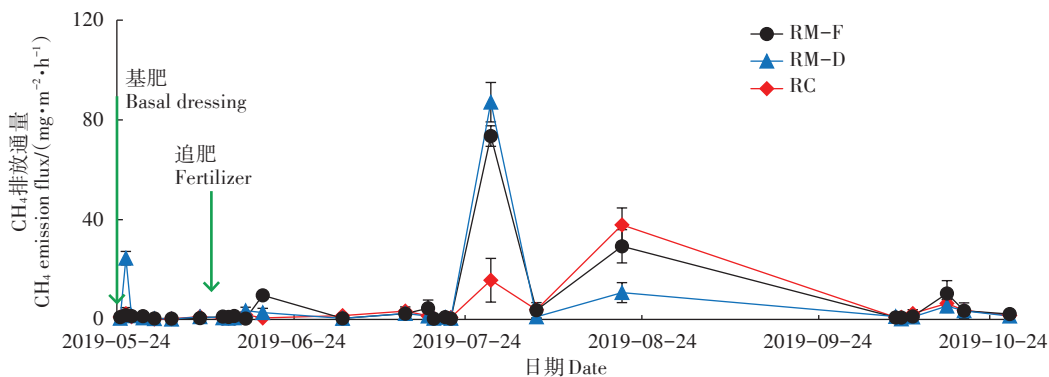


图3 稻田 CH_4 排放通量特征

Figure 3 Characteristics of CH_4 emission flux from paddy field

表1 稻田系统温室气体累积排放量及增温潜势

Table 1 Cumulative greenhouse gas emissions and warming potential of rice field system

处理 Treatment	N ₂ O 累积排放量 N ₂ O cumulative emission/(kg·hm ⁻²)	CH ₄ 累积排放量 CH ₄ cumulative emission/(kg·hm ⁻²)	全球增温潜势 Global warming potential/(t·hm ⁻²)
RM-F	0.92±0.11a	415.31±60.62a	11.87±1.72a
RM-D	0.84±0.08ab	268.20±25.59b	7.73±0.74b
RC	0.70±0.09b	359.36±38.10a	10.25±1.08ab

注:同列不同字母代表处理之间差异显著($P<0.05$)。
Note: Different letters in a column represent significant differences among treatments ($P<0.05$).

表2 温室气体排放与环境因子的相关性

Table 2 Correlation between greenhouse gases emission and environmental factors

项目 Item	N ₂ O	CH ₄	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	SD	ST	DO	pH
N ₂ O	1							
CH ₄	-0.161**	1						
NH ₄ ⁺ -N	-0.081	-0.097	1					
NO ₃ ⁻ -N	0.060	-0.144*	0.665**	1				
SD	-0.266**	0.217**	-0.074	-0.180**	1			
ST	-0.139*	0.499**	-0.084	-0.185**	0.115	1		
DO	-0.014	-0.090	0.004	0.133*	-0.252**	-0.253**	1	
pH	0.133*	-0.179**	0.021	0.175*	-0.364**	-0.417**	0.687**	1

注:SD 表示水深,ST 表示水温,DO 表示溶解氧含量;样本量为 171 个;*表示显著相关($P<0.05$),**表示极显著相关($P<0.01$)。
Note:SD represents water depth,ST represents water temperature,DO represents dissolved oxygen content; $n=171$;* represents significant correlation ($P<0.05$),and ** represents highly significant correlation($P<0.01$).

生态系统 N₂O 排放,与持续淹水水稻单作模式相比,其 CH₄ 累积排放量降低,但相比于晒田模式,CH₄ 累积排放量增加。不同处理的增温潜势表现为 RM-F>RC>RM-D,与持续淹水单作模式相比,稻蟹共生模式增温潜势降低 13.6%;而与晒田单作模式相比,稻蟹共生模式增温潜势增加 32.6%,但差异不显著。可见,相比于种养模式的改变,水分管理对增温潜势的调控作用更强。

2.5 环境因子与温室气体排放的相关性

Pearson 相关性分析(表 2)表明,N₂O 排放与田面水水深和水温呈显著负相关,与 pH 呈显著正相关;而 CH₄ 排放与田面水水深和水温呈极显著正相关($P<0.01$),与 NO₃⁻-N 含量和 pH 呈显著负相关。可见,田面水水深、水温以及 pH 等环境因子对 N₂O 和 CH₄ 排放的影响作用相反,这可能是水稻生长期 N₂O 和 CH₄ 排放表现出此消彼长关系的主要原因。

稻田土壤理化指标与温室气体排放之间的冗余分析(图 4)表明,土壤 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、SOM、MBC、MBN、TN、TP、TK、pH 等土壤生物化学指标对水稻生长期温室气体排放影响的解释率可达 83.10%。第一主成分和第二主成分的贡献率分别达 52.38% 和

30.72%。其中,pH(33.3%, $F=4.0$, $P=0.01$)和 NO₃⁻-N(20.0%, $F=3.0$, $P=0.042$)对温室气体排放的影响最大。

稻田田面水理化指标与温室气体排放之间的冗余分析(图 5)表明,田面水 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、DO、SD、ST、Eh 和 pH 等环境因子对水稻生长期温室气体排放影响的解释率可达 87.25%,第一主成分和第二主成分的贡献率分别达 54.88% 和 32.37%。其中,DO(35.6%, $F=4.4$, $P=0.012$)和 pH(26.7%, $F=5.0$, $P=0.014$)对温室气体排放的影响最大。

3 讨论

3.1 共生系统对 N₂O 排放的影响

稻田 N₂O 排放受外源碳氮供应水平的影响^[24],N₂O 排放峰值主要发生在施肥后^[25]。本研究结果表明稻田系统 N₂O 排放主要发生在追肥前期,基肥期和追肥后期 N₂O 排放一直处于较低水平。基肥期 N₂O 排放处于较低水平的主要原因是稻田系统淹水状态下 87% 的 N₂O 通过水稻植株排放^[26]。基肥期秧苗移栽前,N₂O 排放只能通过土壤向水体扩散,再向空气排放;而移栽初期,秧苗还未深入扎根,根系和通气组织尚未生长成熟,对 N₂O 的输出作用较小^[3]。追肥期

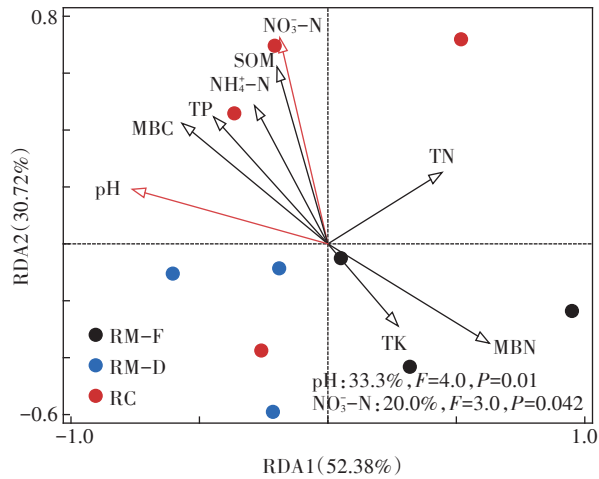


图4 土壤生物化学特征与温室气体累积排放量的冗余分析
Figure 4 Redundancy analysis of soil biochemical characteristics and cumulative greenhouse gas emissions

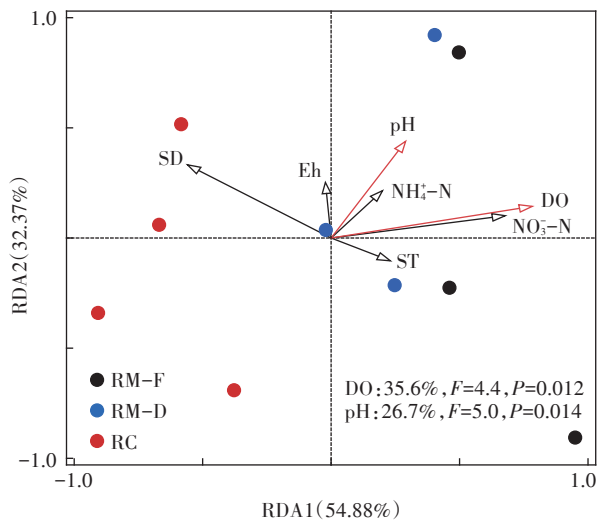


图5 田面水理化性质与温室气体排放通量的冗余分析
Figure 5 Redundancy analysis of physical and chemical properties of field surface water and greenhouse gas emission flux

前期,水稻植株已生长良好,开始分蘖,通气组织发达,为 N_2O 提供了良好的排放通道,导致 N_2O 排放量急剧增加,形成 N_2O 排放峰。追肥后期,特别是7月底之后, N_2O 排放量一直呈现较低水平,主要原因可能是此时试验基地进入高温多雨季节,大暴雨造成田面水位的急剧上升,形成严格厌氧环境,抑制了稻田 N_2O 的产生。并且,追肥前期稻田田面水及土壤中的 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量较高,能够为 N_2O 的产生提供充足的物质基础,而追肥后期田面水及土壤中养分含量较低,减少了 N_2O 的产生。侯玉兰^[3]和黄树辉等^[27]的研究也得到了相似的结果。值得注意的是,稻蟹共生

处理在整个水稻生长周期出现了多个峰值,这些峰值主要发生在饲料投喂后。据此推测, N_2O 排放峰值出现的原因可能是螃蟹饲料的投入增加了土壤中易利用碳氮养分的含量,增强了土壤微生物硝化反硝化过程 N_2O 的产生,从而促进了 N_2O 的排放^[14]。

与水稻单作处理相比,稻蟹共生处理能够有效降低稻田系统 N_2O 排放,减排量可达16.7%~23.9%。稻蟹共生模式下稻田 N_2O 排放降低的原因主要有两方面:一是螃蟹捕食水中杂草和浮萍绿藻等生物,杂草减少限制了淹水稻田 N_2O 通过植株通气组织向大气排放,而浮萍绿藻的减少会抑制光合作用,降低水中DO含量,强还原环境有利于 N_2 的产生,从而降低 N_2O 排放^[13];另一方面,随着螃蟹个体的生长,为保证螃蟹的生存空间,维持了较高的水位,同时,螃蟹通过呼吸作用大量消耗田面水中的氧气,使土壤处于严格厌氧环境,促进了 N_2O 向 N_2 的转化,进而抑制了 N_2O 的产生与排放^[3,27]。

不同处理的水分管理方式和种养模式不同,其对稻田系统田面水/土壤养分含量、pH、DO等关键环境因子的作用强度也不同,导致各处理 N_2O 排放量具有差异。水分管理措施是影响农田 N_2O 和 CH_4 排放的重要因素之一^[28]。本研究表明,水稻单作系统晒田过程能够降低8.7%的 N_2O 排放量,而且水稻生长过程中水位高度与 N_2O 排放通量之间呈极显著负相关。这主要是由于土壤水分变化会直接影响农田系统中硝化、反硝化和 N_2O 还原之间的平衡,从而影响 N_2O 排放^[29]。土壤pH可通过影响反硝化和硝化微生物的活性及相应的氮素转化过程间接影响 N_2O 的释放^[30-31]。本研究表明稻田 N_2O 排放与pH呈正相关,黄耀等^[32]和LI等^[33]的研究也得出类似结论。LI等^[33]认为,淹水期 N_2O 排放量与pH呈显著的相关性,排水后则无相关性;黄耀等^[32]研究发现当pH在5.6~8.6之间时,pH和 N_2O 排放呈显著正相关。

已有研究表明, N_2O 的排放会受到田面水中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量的显著影响^[21],然而在本研究中却未表现出显著相关性。这可能是由于本研究所处的东北稻区在施入基肥后会泡田7~10 d,然后再开始插秧,此时田面水中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量在经历过施肥后的高峰后,回归到相对较低的平稳期;而水田87%的 N_2O 通过水稻植株排放^[26]。因此,虽然田面水 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量较高,但是由于缺少水稻植株通气组织的传输,基肥期的 N_2O 排放量较低,最终导致田面水中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 与 N_2O 排放之间无显著的线性

相关。

3.2 共生系统对CH₄排放的影响

稻田CH₄排放是产甲烷菌产生CH₄和甲烷氧化菌最终氧化为CO₂的净效应^[34]。本研究结果表明稻田系统CH₄排放主要发生在水稻追肥后期,基肥期和追肥前期CH₄排放一直处于较低水平。已有研究表明稻田系统CH₄从产生到排放,主要通过水稻植株的运输、扩散和蒸腾作用这3个途径^[35-36]。因此,稻田CH₄排放的整个过程均受到水稻生长状况、温度、土壤特性等生物和非生物因素的影响。在基肥期和追肥前期,稻田未进行水稻移栽或处于移栽初期,秧苗尚未深入扎根,根系和通气组织尚不发达,且这段时期温度较低,植株生长缓慢,土壤微生物活性较低,这些都可能抑制稻田CH₄的排放。另外,在追肥前期,田面水位较低,未形成严格的厌氧环境,也不利于CH₄的产生。水分对稻田CH₄排放起到决定性的作用^[37]。水分通过影响土壤氧化还原电位、氧气供给、土壤微生物(最主要的是产甲烷菌)活性及CH₄扩散速率来实现对稻田CH₄排放的调控^[38]。追肥后期,试验地进入雨季,稻田系统CH₄排放的两个峰值分别出现在7月和8月,上述现象产生的原因可能是试验区CH₄排放受降雨影响较大,两次峰值均出现在强降雨之后,田间水深随着降雨量的增大而升高,从而促进了CH₄的排放。这也与Pearson相关性分析得到的田面水深与CH₄排放极显著相关的结果一致。同时,试验地的雨季伴随着高温天气,温度的升高有利于CH₄的排放。已有研究表明,CH₄排放与大气温度呈正相关^[39]。水稻进入抽穗期后,植株生命力最旺盛,CH₄主要通过植株通气组织向大气排放,故此时CH₄排放量较高^[40]。综上,在本研究区域,水稻生长中期是稻田CH₄排放的主要排放时期,同时降雨引起的水位上升和DO降低可能是造成CH₄排放通量剧增的重要原因。

水分管理是影响种养结合稻田CH₄排放的重要因素之一。与持续淹水水稻单作处理相比,稻蟹共生处理能够有效降低稻田系统CH₄排放,减排量可达13.5%。以往关于稻鸭共生和稻虾轮作的研究也得出相似的结论^[21],稻鸭共生可以降低稻田系统18%~25%的CH₄排放^[21];稻虾轮作可降低18%~41%的CH₄排放^[14,16]。共生系统CH₄排放量降低的原因,可能是动物活动促进了田面水和稻田土壤的交换,提高了甲烷氧化菌的活性,增强了CH₄氧化速率。而与晒田水稻单作处理相比,本研究的稻蟹共生系统增加了

34.0%的CH₄排放。主要原因是,相比晒田处理,稻蟹共生稻田一直处于持续淹水的严格厌氧环境,产甲烷菌的活性更强,从而增加了CH₄排放。BHATTACHARYYA等^[15]和DATTA等^[19]在稻鱼共生模式的研究中也得到了相同的结论。本研究表明,田面水水深、水温、pH以及NO₃-N含量是影响CH₄排放的主要因素。这些因素主要受水分管理的影响,不同水分管理措施会改变土壤含氧量,影响产甲烷菌活性,调控稻田CH₄排放。相比于持续淹水,干湿交替可显著降低季节性CH₄排放^[7,41-42]。

目前,关于稻蟹共生模式对稻田系统温室气体排放的影响研究较少。WANG等^[43]的研究表明,与常规水稻单作相比,稻蟹共生可以降低19.7%~28.2%的N₂O排放,增加29.2%~36.8%的CH₄排放量,这与本研究结果一致。本研究结果表明,与晒田水稻单作处理相比,稻蟹共生模式能够降低稻田系统16.7%的N₂O排放,增加34.0%的CH₄排放。而与持续淹水水稻单作处理相比,稻蟹共生模式能够降低稻田系统23.9%的N₂O排放和13.5%的CH₄排放。可见,在同样的水分管理方式下,稻蟹共生能够有效降低稻田系统N₂O和CH₄排放。同时,整个水稻生长期N₂O和CH₄排放表现出互为消长的关系。有研究认为导致稻田N₂O和CH₄排放互为消长的关键因素是土壤水分状况^[44-45]。追肥前期,田面水位较低,N₂O排放通量高,而CH₄排放通量低;进入高温雨季,稻田水位明显升高,此时N₂O排放通量降低,而CH₄排放通量明显增加。田面水水深、水温和pH以及土壤NO₃-N含量和pH是导致N₂O与CH₄排放互为消长的主要因素。Pearson相关性分析表明田面水深和水温的升高会抑制N₂O排放,但会促进CH₄排放;土壤NO₃-N含量、pH是田间温室气体排放的主要影响因子。

4 结论

(1)在相同的水分管理方式下,稻蟹共生能够有效降低稻田系统N₂O和CH₄排放;而相比于晒田水稻单作处理,持续淹水的稻蟹共生模式会降低N₂O排放、促进CH₄排放。整体而言,与持续淹水处理相比,稻蟹共生模式可降低13.6%的增温潜势;与晒田水稻单作处理相比,稻蟹共生模式则会增加32.6%的增温潜势。这表明相比于种养模式的改变,水分管理方式对增温潜势的影响作用更大。

(2)稻田系统N₂O和CH₄的排放呈互为消长关系,主要受田面水水深、水温和pH以及土壤NO₃-N

含量和pH的影响。田面水水深和水温的增加会抑制 N_2O 排放,但会促进 CH_4 排放;土壤 NO_3^- -N含量和pH是田间温室气体排放的主要影响因素。

参考文献:

- [1] 李玥,巨晓棠. 农田氧化亚氮减排的关键是合理施氮[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 842-851. LI Y, JU X T. Rational application of nitrogen is the key to reduce nitrous oxide emission in farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 842-851.
- [2] 夏龙,颜晓元,蔡祖聪. 我国农田土壤温室气体减排和有机碳固定的研究进展及展望[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 834-841. XIA L L, YAN X Y, CAI Z C. Research progress and prospect of greenhouse gas emission reduction and organic carbon fixation in farmland soils in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 834-841.
- [3] 侯玉兰. 崇明岛稻麦轮作田温室气体排放规律及排放量估算研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2013: 1-4. HOU Y L. Study on greenhouse gas emission law and emission estimation of rice-wheat rotation fields in Chongming Island[D]. Shanghai: East China Normal University, 2013: 1-4.
- [4] LIU W, HUSSAIN S, WU L, et al. Greenhouse gas emissions, soil quality, and crop productivity from a mono-rice cultivation system as influenced by fallow season straw management[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2015, 23(1): 315-328.
- [5] XU G, LIU X, WANG Q, et al. Effects of greenhouse cultivation and organic materials incorporation on global warming potential in rice fields[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2017, 24(7): 6581-6591.
- [6] ZHANG D, WANG H, PAN J, et al. Nitrogen application rates need to be reduced for half of the rice paddy fields in China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 265: 8-14.
- [7] RUNKLE B R K, SUVOCAREV K, REBA M L, et al. Methane emission reductions from the alternate wetting and drying of rice fields detected using the eddy covariance method[J]. *Environ Sci Technol*, 2019, 53(2): 671-681.
- [8] BASHIR M A, LIU J, GENG Y, et al. Co-culture of rice and aquatic animals: An integrated system to achieve production and environmental sustainability[J]. *Clean Prod*, 2020, 249: 119310.
- [9] 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 emission from rice paddy cultivation and recycling agriculture[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(5): 633-642.
- [10] 孟顺龙, 胡庚东, 李丹丹, 等. 稻渔综合种养技术研究进展[J]. 中国农学通报, 2018, 34(2): 146-152. MENG S L, HU G D, LI D D, et al. Research progress of rice and fishery integrated planting and breeding technology[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(2): 146-152.
- [11] 中国稻渔综合种养产业发展报告(2020)[J]. 中国水产, 2020(10): 12-19. China rice fishery comprehensive planting and breeding industry development report(2020)[J]. *China's Aquatic Product*, 2020(10): 12-19.
- [12] XU G, LIU X, WANG Q, et al. Integrated rice-duck farming mitigates the global warming potential in rice season[J]. *Sci Total Environ*, 2017, 575: 58-66.
- [13] 袁伟玲, 曹凑贵, 李成芳, 等. 稻鸭、稻鱼共作生态系统 CH_4 和 N_2O 温室效应及经济效益评估[J]. 中国农业科学, 2009, 42(6): 2052-2060. YUAN W L, CAO C G, LI C F, et al. Greenhouse effect and economic benefit assessment of CH_4 and N_2O in rice-duck and rice-fish co-cropping ecosystem[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2009, 42(6): 2052-2060.
- [14] SUN Z, GUO Y, LI C, et al. Effects of straw returning and feeding on greenhouse gas emissions from integrated rice-crayfish farming in Jiangnan Plain, China[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2019, 26(12): 11710-11718.
- [15] BHATTACHARYA P, SINHABABU D P, ROY K S, et al. Effect of fish species on methane and nitrous oxide emission in relation to soil C, N pools and enzymatic activities in rainfed shallow lowland rice-fish farming system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 176: 53-62.
- [16] 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 rice-shrimp co-cropping on greenhouse gas emissions from paddy fields after straw returning[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(11): 1591-1603.
- [17] 展茗, 曹凑贵, 汪金平, 等. 稻鸭复合系统的温室气体排放及其温室效应[J]. 环境科学学报, 2009, 29(2): 420-426. ZHAN M, CAO C G, WANG J P, et al. Greenhouse gas emission and its greenhouse effect in rice-duck complex system[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 29(2): 420-426.
- [18] 温婷, 赵本良, 章家恩. 稻鸭共作中 CH_4 和 N_2O 排放规律及影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7): 1442-1450. WEN T, ZHAO B L, ZHANG J E. CH_4 and N_2O emission and its influencing factors in rice-duck co-cropping[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(7): 1442-1450.
- [19] DATTA A, NAYAK D R, SINHABABU D P, et al. Methane and nitrous oxide emissions from an integrated rainfed rice-fish farming system of eastern India[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 129(1/2/3): 228-237.
- [20] ZHANG T, LIU H, LUO J, et al. Long-term manure application increased greenhouse gas emissions but had no effect on ammonia volatilization in a northern China upland field[J]. *Sci Total Environ*, 2018, 633: 230-239.
- [21] 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 rice fields in Erhai basin[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 39(7): 2306-2314.
- [22] 南京农业大学. 土壤农化分析[M]. 土壤农业出版社, 1983. Nanjing Agricultural University. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing:

- China Agricultural Press, 1983.
- [23] VANCE E, BROOKES P, JENKINSON D. Microbial biomass measurements in forest soils: Determination of K_c values and tests of hypotheses to explain the failure of the chloroform fumigation-incubation method in acid soils[J]. *Soil Biol Biochem*, 1987, 6(19): 689–696.
- [24] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 不同种类有机肥施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的综合影响[J]. 环境科学, 2003, 24(4): 7–12. ZOU J W, HUANG Y, ZONG L G, et al. Comprehensive effects of different organic fertilizers on CH_4 and N_2O emissions in paddy fields[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(4): 7–12.
- [25] 谢义琴, 张建峰, 姜慧敏, 等. 不同施肥措施对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015(3): 578–584. XIE Y Q, ZHANG J F, JIANG H M, et al. Effects of different fertilization measures on greenhouse gas emission from paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015(3): 578–584.
- [26] YAN X. Pathways of N_2O emission from rice paddy soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(3): 437–440.
- [27] 黄树辉, 吕军. 农田土壤 N_2O 排放研究进展[J]. 土壤通报, 2004, 35(4): 516–522. HUANG S H, LÜ J. Research progress on N_2O emission from farmland soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(4): 516–522.
- [28] TANG J, WANG J J, LI Z Y, et al. Effects of irrigation regime and nitrogen fertilizer management on CH_4 , N_2O and CO_2 emissions from saline-alkaline paddy fields in northeast China[J]. *Sustainability*, 2018, 10(2): 475.
- [29] VERHOEVEN E, BARTHEL M, YU L, et al. Early season N_2O emissions under variable water management in rice systems: Source-partitioning emissions using isotope ratios along a depth profile[J]. *Biogeosciences*, 2019, 16(2): 383–408.
- [30] 焦燕, 黄耀. 影响农田氧化亚氮排放过程的土壤因素[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(4): 457–466. JIAO Y, HUANG Y. Soil factors affecting nitrous oxide emission from farmland[J]. *Climate and Environmental Research*, 2003, 8(4): 457–466.
- [31] ŠIMEK M, COOPER J E. The influence of soil pH on denitrification: Progress towards the understanding of this interaction over the last 50 years[J]. *Eur J Soil Sci*, 2002, 53(3): 345–354.
- [32] 黄耀, 焦燕, 宗良纲, 等. 土壤理化特性对麦田 N_2O 排放影响的研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(5): 598–601. HUANG Y, JIAO Y, ZONG L G, et al. Effect of soil physical and chemical properties on N_2O emission from wheat field[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2002, 22(5): 598–601.
- [33] LI C F, CAO C G, WANG J P, et al. Nitrous oxide emissions from wetland rice-duck cultivation systems in southern China[J]. *Arch Environ Con Tox*, 2009, 56(1): 21–29.
- [34] MISHRA S, RATH A K, ADHYA T K, et al. Effect of continuous and alternate water regimes on methane efflux from rice under greenhouse conditions[J]. *Biol Fert Soils*, 1997, 24(4): 399–405.
- [35] CONRAD R, ROTHFUSS F. Methane oxidation in the soil surface layer of a flooded rice field and the effect of ammonium[J]. *Biol Fert Soils*, 1991, 12(1): 28–32.
- [36] YANG S S, CHANG E H. Effect of fertilizer application on methane emission/production in the paddy soils of Taiwan[J]. *Biol Fert Soils*, 1997, 25(3): 245–251.
- [37] 戴桂金, 杨知建, 肖润林. 农业生态系统温室气体排放研究进展[J]. 作物研究, 2011, 25(2): 176–178. DAI G J, YANG Z J, XIAO R L. Advances in research on greenhouse gas emissions from agroecosystems[J]. *Crop research*, 2011, 25(2): 176–178.
- [38] XU Y, ZHAN M, CAO C, et al. Effects of irrigation management during the rice growing season on soil organic carbon pools[J]. *Plant Soil*, 2017, 421(1/2): 337–351.
- [39] 上官行健, 王明星. 稻田甲烷排放影响因子的研究进展[J]. 中国农业气象, 1993, 14(4): 48–53. SHANGGUAN X J, WANG M X. Research progress on influencing factors of methane emission from paddy fields[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 1993, 14(4): 48–53.
- [40] KUMARASWAMY S, KUMAR R A, RAMAKRISHNAN B, et al. Wetland rice soils as sources and sinks of methane: A review and prospects for research[J]. *Biol Fert Soils*, 2000, 31(6): 449–461.
- [41] SAMOY-PASCUAL K, B. SIBAYAN E, S. GROSPÉ F, et al. Is alternate wetting and drying irrigation technique enough to reduce methane emission from a tropical rice paddy?[J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 2019, 65(2): 203–207.
- [42] MANEEPITAK S, ULLAH H, DATTA A, et al. Effects of water and rice straw management practices on water savings and greenhouse gas emissions from a double-rice paddy field in the Central Plain of Thailand[J]. *Eur J Agron*, 2019, 107: 18–29.
- [43] WANG A, MA X, XU J, et al. Methane and nitrous oxide emissions in rice-crab culture systems of northeast China[J]. *Aquaculture and Fisheries*, 2019, 4(4): 134–141.
- [44] 李晶, 王明星, 王跃思, 等. 农田生态系统温室气体排放研究进展[J]. 大气科学, 2003, 27(4): 740–749. LI J, WANG M X, WANG Y S, et al. Research progress on greenhouse gas emission from farmland ecosystem[J]. *Atmospheric Sciences*, 2003, 27(4): 740–749.
- [45] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 华东稻田 CH_4 和 N_2O 排放[J]. 大气科学, 1997, 21(2): 231–237. ZHENG X H, WANG M X, WANG Y S, et al. CH_4 and N_2O emissions from rice fields in east China[J]. *Atmospheric Sciences*, 1997, 21(2): 231–237.