

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.06.015

王强盛, 刘欣, 许国春, 等. 稻鸭共作对不同栽培环境稻季 CH₄ 和 N₂O 排放的影响. 土壤, 2023, 55(6): 1279–1288.

稻鸭共作对不同栽培环境稻季 CH₄ 和 N₂O 排放的影响^①

王强盛, 刘欣, 许国春, 余坤龙, 张慧

(南京农业大学现代农作制度与生态循环农业实验室, 南京 210095)

摘要: 稻田是大气温室气体甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)的重要排放源, 稻田温室气体减排一直是农业生态研究的热点。本研究采用裂区设计, 在露地和网室两种栽培环境条件下, 以无鸭子放养的常规稻作和秸秆不还田处理为对照, 在等养分条件下分析了秸秆全量还田与稻鸭共作模式对土壤氧化还原电位、CH₄ 排放量、产 CH₄ 潜力及 CH₄ 氧化潜力、N₂O 排放量及 N₂O 排放高峰期土壤反硝化酶活性、全球增温潜势、水稻产量的影响。结果表明: 麦秆还田增加土壤产 CH₄ 潜力, 提高 CH₄ 排放量, 降低土壤反硝化酶活性、土壤氧化还原电位和 N₂O 排放量, 整体上导致全球增温潜势上升 96.89% ~ 123.02%; 稻鸭共作模式由于鸭子的不间断活动提高了土壤氧化还原电位, 降低了土壤产 CH₄ 潜力, 并显著降低了 CH₄ 排放量, 其全球增温潜势较无鸭常规稻作模式下降 8.72% ~ 14.18%; 网室栽培较露地栽培显著提高土壤氧化还原电位, 降低土壤产 CH₄ 潜力和反硝化酶活性, 减少稻田 CH₄ 和 N₂O 排放量, 从而降低全球增温潜势 6.35% ~ 13.14%。总体上, 稻田 CH₄ 氧化潜力是产 CH₄ 潜力的 9.46 倍 ~ 12.20 倍, 稻鸭共作和秸秆还田均能增加水稻产量, 网室栽培较露地栽培减少水稻产量 1.19% ~ 5.48%。稻鸭共作不仅减缓全球增温潜势, 结合秸秆还田能增加水稻产量, 具有广泛的推广应用价值。

关键词: 稻鸭共作; 秸秆还田; 栽培环境; CH₄ 和 N₂O 排放; 全球增温潜势

中图分类号: S153 **文献标志码:** A

Effects of Rice-Duck Farming on CH₄ and N₂O Emissions in Rice Season Under Different Cultivation Environments

WANG Qiangsheng, LIU Xin, XU Guochun, YU Kunlong, ZHANG Hui

(Laboratory of Modern Farming System and Ecological Circular Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Rice cultivation is an important source of CH₄ and N₂O. Greenhouse gas emission reduction in rice field has always been a hot topic in agro-ecological research. In this study, under two conditions of open field cultivation and insect-proof net cultivation, the effects of rice-duck (RD) farming and wheat straw returning on greenhouse gas emission and related soil physiochemical properties of paddy field were investigated by a split-zone experiment. The treatments included conventional rice farming with inorganic nitrogen fertilization (CR+IN), RD farming with inorganic nitrogen fertilization (RD+IN), conventional rice farming with wheat straw returning (CR+WS) and RD farming with wheat straw returning (RD+WS), and the emissions of CH₄ and N₂O, methanogenic potential and CH₄ oxidation potential, soil denitrifying enzyme activity, and global warming potential of paddy fields were determined. The results showed that straw returning increased methanogenic potential and CH₄ emission from paddy field, but decreased soil denitrifying enzyme activity, soil redox potential and N₂O emission. As a whole, the global warming potential of straw returning increased by 96.89%–123.02%. In RD farming, due to the uninterrupted activities of ducks, redox potential of paddy soil was increased, CH₄ production potential and CH₄ emission of paddy field was reduced, global warming potential decreased by 8.72%–14.18% compared with conventional rice without ducks. The insect-proof net cultivation significantly increased redox potential of paddy soil, decreased methanogenic potential and soil denitrifying enzyme activity of paddy field, reduced the emissions of CH₄ and N₂O from paddy field and the global warming potential by 6.35%–13.14%. On the whole,

①基金项目: 江苏省现代农业产业技术体系项目(JATS[2022]482、JATS[2021]482)、南京碳达峰碳中和科技创新项目(202211008)、江苏省重点研发计划项目(BE2018333)和中央财政农业技术推广项目(TG(16)006)资助。

作者简介: 王强盛(1971—), 男, 江苏东台人, 博士, 主要研究方向为稻田综合种养、农田轮作休耕和生态循环农业。E-mail: qswang@njau.edu.cn

CH₄ oxidation potential of paddy soil was 9.46–12.20 times as high as methanogenic potential. RD farming and straw returning could increase rice yield. However, insect-proof net cultivation reduced rice yield by 1.19%–5.48%. In a word, RD farming could not only slow down the global warming potential, but also increase rice yield combined with straw returning, which had extensive application value.

Key words: Rice-duck (RD) farming system; Straw returning; Cultivation environments; CH₄ and N₂O emission; Global warming potential

全球变暖已成为不争的事实,而人为活动造成的温室气体排放很可能是气候改变的主要原因。甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)是仅次于二氧化碳(CO₂)的最重要的温室气体。以 100 年为时间尺度进行测算,CH₄和 N₂O 的增温效应分别是 CO₂ 的 28 倍和 265 倍^[1],这对全球气候变暖起着非常重要的作用。据估计,农业源温室气体排放量约占全球人为活动产生的温室气体排放总量的 10%~12%,农业产生的 CH₄和 N₂O 分别约占全球温室气体 CH₄和 N₂O 排放总量的 50%和 60%,水稻(*Oryza sativa*)是主要的粮食作物,同时稻田也是 CH₄和 N₂O 排放的重要来源^[2]。因此,在保证稻田高产稳产的同时,采取有效生产措施减少稻田温室气体排放,对缓解全球变暖至关重要。

稻田生态系统具有较大的温室效应缓解潜力,生产实践中可通过采取适当的措施提高土壤碳库储量或减少 CH₄和 N₂O 排放,从而降低温室气体的增温潜势^[2]。秸秆还田是一种低投入、可持续的秸秆资源利用方式。在农业生产中,秸秆还田能够有效促进农田养分的循环利用,增加土壤的养分含量,提高土壤生产力,进而提高作物产量^[3]。但施用秸秆会增加稻季 CH₄和 N₂O 温室气体排放及综合增温潜势^[4]。稻鸭共作农作系统是我国大多数水稻生态区种养结合的主要模式之一。在该模式中,可通过鸭子的不间断活动达到控制稻田病虫害、减少化肥农药施用、增强土壤肥力、促进水稻生长的目的,进而提高水稻经济效益和生态效益。大多数研究显示,稻鸭共作能够降低稻田 CH₄排放,但增加 N₂O 排放^[1,5]。自进入 21 世纪以来,防虫网覆盖在生态有机水稻生产中得以应用,这不仅改变了稻田微生境,而且有效阻断了灰飞虱等虫害对水稻植株的入侵,减少了化学农药的施用^[6],具有较好的绿色防控效应^[7]。而目前有关网室栽培对稻田温室气体排放的影响未见报道。鉴于此,本研究在两种栽培环境(露地栽培和网室栽培)条件下,探究稻鸭共作对秸秆全量还田稻田 CH₄和 N₂O 排放量、稻田土壤氧化还原电位变化、产 CH₄ 潜力及 CH₄ 氧化潜力、N₂O 高峰期土壤反硝化酶活性、

全球增温潜势和水稻实际产量的影响程度及关联效应,以揭示稻田生态系统全球增温潜势的主导因子及生态减排途径,为稻田综合种养温室气体有效减排提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验地点

试验于 2015—2016 年在南京农业大学试验农场(32°34'N, 120°24'E)进行。该农场属北亚热带海洋季风性湿润气候,全年平均气温 14.5 °C,水稻生长季平均气温为 22.5 °C,全年平均降水量 1 025 mm,全年太阳总辐射为 4.99×10⁹ J/m²,水稻生长季太阳辐射总量为 3.01×10⁹ J/m²。试验地前茬为小麦(*Triticum aestivum*),土壤质地为黏土,耕作层有机质含量 24.6 g/kg, pH 6.3,全氮含量 1.26 g/kg,速效氮含量 97.2 mg/kg,有效磷含量 24.3 mg/kg,速效钾含量 95.7 mg/kg。

1.2 试验设计

采用裂区试验设计,设置露地栽培和网室栽培两种栽培环境,再分别设置氮磷钾等养分的 4 个处理:常规稻作+无机氮肥(CR+IN),常规稻作+秸秆还田(CR+WS),稻鸭共作+无机氮肥(RD+IN)和稻鸭共作+秸秆还田(RD+WS)。网室栽培采用钢架结构外套防虫网覆盖,网架净高度 2.5 m,面积 8 hm²,防虫网筛孔为 0.6 mm。有机物还田量为 6 000 kg/hm²,在整地时施入,每个处理投入当季稻田的 N、P₂O₅、K₂O 量分别为 300、150、150 kg/hm²。氮肥运筹为 15% 作基肥,45% 作分蘖肥(水稻移栽后 7 d 和 14 d 后等量施入),40% 作穗肥;磷肥全部作基肥;钾肥 50% 作基肥,50% 作促花肥。

供试水稻品种为南粳 9108,5 月 24 日播种,6 月 15 日移栽,机插水稻基质育秧的秧龄为 3.5 叶,机插株行距为 13.3 cm×30 cm,每穴 4 苗。田间小区面积为 200 m²(16 m×12.5 m),各处理重复 3 次,小区间筑埂隔离,薄膜包埂,单独灌排。田间水分采用干干湿湿的灌溉方式。水稻移栽后 17 d 将育雏 1 周的鸭苗以每公顷 225 只的密度放养于稻鸭共作区,四周用尼龙网作 1 m 高围栏防止鸭子外逃,并在共作

区的角落建一个鸭舍，抽穗期时将鸭子收回。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 气象条件 水稻生长期(6—10月)的气温和降雨量通过当地气象站获得。图 1 显示了两年间水稻生育

期试验地点的日均气温和日降雨量。与露地栽培相比，两年间网室栽培的日均气温分别下降 2.54% 和 2.08%。2016 年露地栽培和网室栽培日均气温较 2015 年同期分别上升 3.73% 和 4.23%，总降雨量增加 40.66%。

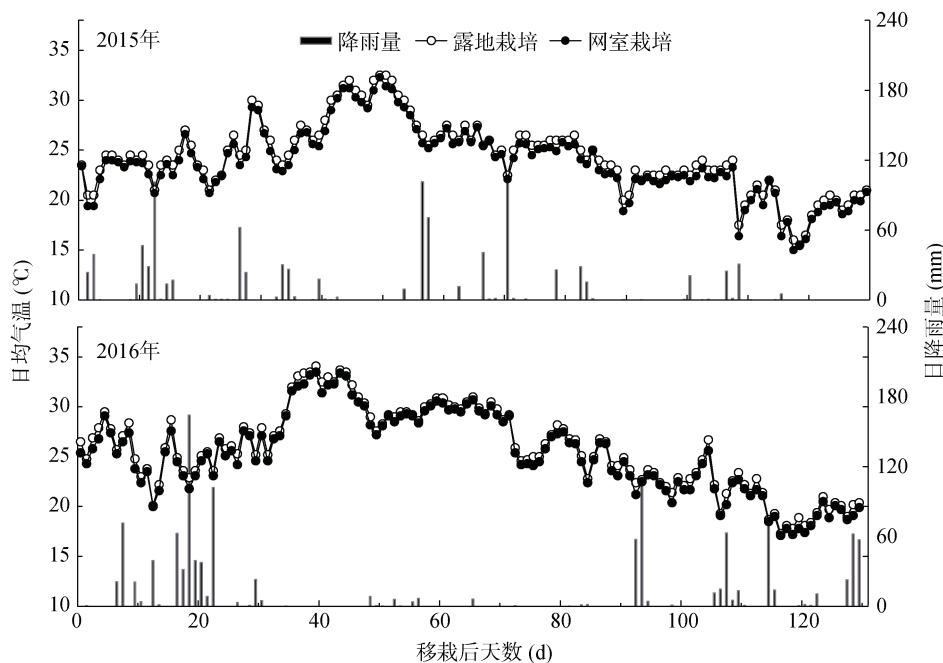


图 1 水稻生育期的日均气温和降雨量

Fig. 1 Daily mean temperature and precipitation in rice season in 2015 and 2016

1.3.2 CH₄ 和 N₂O 排放 稻田 CH₄ 与 N₂O 采集和测定采用静态箱—气相色谱法^[1]。自水稻移栽后 3 d 起 1 周取气 1 次，中期晒田期间 2 d 取气 1 次。气体采集时间为上午 8:00—10:00，分别在罩箱后 0、5、10、15 min 后用 50 mL 注射器抽取箱内气体样品，并将气体转移至真空玻璃瓶中。每个处理的 3 次重复同时取样。气样采集完毕后立即送回实验室用气相色谱仪 (Agilent 7890A) 分析 CH₄ 和 N₂O 浓度。利用 FID 检测分析 CH₄ 浓度，ECD 检测分析 N₂O 浓度。CH₄ 测定载气为氮气，N₂O 测定载气为氩气和 CH₄ 组成的混合气体。柱箱和 FID 检测器温度分别为 55 °C 和 200 °C。根据不同时间间隔采集的温室气体浓度的线性变化(相关性大于 0.90)，计算排放通量。气体排放通量计算公式^[1]为：

$$F = \rho \times h \times (dc/dt) \times [273 / (273 + T)] \quad (1)$$

式中： F 为气体排放通量($\text{mg}/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h})$)； ρ 为标准状态下气体的密度(kg/m^3)； h 为采样箱的净高度，即箱顶至水面的距离(m)； dc/dt 为单位时间内采样箱内气体的浓度变化率；273 为气态方程常数； T 为采样过程中采样箱内的平均温度($^{\circ}\text{C}$)。

全球增温潜势(Global Warming Potential, GWP)

的计算：基于 100 年时间尺度，CH₄ 和 N₂O 全球增温潜势分别是 CO₂ 的 28 倍和 265 倍^[1]，通过计算不同处理排放 CH₄ 和 N₂O 的 CO₂ 当量(CO₂-eq)获得。公式如下：

$$\text{GWP} = Q_{\text{CH}_4} \times 28 + Q_{\text{N}_2\text{O}} \times 265 \quad (2)$$

式中：GWP 为全球增温潜势(CO₂-eq, kg/hm^2)， Q_{CH_4} 和 $Q_{\text{N}_2\text{O}}$ 分别代表 CH₄ 和 N₂O 排放量(kg/hm^2)。

1.3.3 土壤氧化还原电位和反硝化酶活性 气体采集时用 pH/mV 原位仪(pH 3110, WTW, Weilheim, Germany)同步测定 10 cm 深度土壤氧化还原电位(Eh)，每个小区选取 5 个点测定。土壤反硝化酶活性(Denitrifying Enzyme Activity, DEA)在水稻移栽后 45 d 进行 5 点取样，采用乙炔抑制法^[8]测定。

1.3.4 土壤产 CH₄ 潜力、CH₄ 氧化潜力 土壤产 CH₄ 潜力和 CH₄ 氧化潜力测定参照王受屹等^[9]、Conrad 等^[10]方法。土壤取样在水稻移栽后 30 d 进行，每个小区取 5 个点土样混匀。

土壤产 CH₄ 潜力(Methanogenic Potential, MP)：称取 15 g 鲜土，置于 300 mL 血清瓶中，调至水土质量比为 2 : 1，通入惰性气体进行稀释，使之处于严格厌氧条件下，置于 30 °C 培养，于不同时间采用气

相色谱仪 (Agilent 7890A) 分析测定瓶内 CH_4 浓度。

土壤 CH_4 氧化潜力 (Methanogenic Oxidation Potential, MOP): 300 mL 血清瓶中加入 12 g 鲜土, 然后用异丁基橡胶塞密封, 再注入 1.5 mL 纯 CH_4 , 28 °C 培养, 在培养的不同时间测血清瓶中 CH_4 的残留量。

1.3.5 水稻产量 在水稻成熟期每个小区收割 50 m², 测定水稻产量。

1.4 数据处理与统计分析

采用 SPSS19.0 软件以及 Office 2007 对数据进行处理和统计分析, LSD 法进行处理间显著性检验; 采用 Origin 8.1 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 稻田 CH_4 和 N_2O 排放通量

图 2 为稻鸭共作对秸秆还田稻季 CH_4 排放通量的影响。随着水稻的不断生长, 稻田 CH_4 排放通量逐渐增加, 在移栽后 30 d 左右 CH_4 的排放通量达到最大值, 之后 CH_4 排放通量显著下降, 在移栽后 60 d 左右出现一个小的排放高峰, 之后保持较低水平直至

水稻收获。秸秆还田显著增加了 CH_4 排放通量, 与无机氮肥处理相比, 两年间分别上升 101.22% ~ 116.55% 和 105.19% ~ 129.82%。与无鸭的常规稻作处理相比, 稻鸭共作显著降低了稻田平均 CH_4 排放通量, 两年间分别降低 7.53% ~ 13.65% 和 4.23% ~ 14.51%。与露地栽培相比, 网室栽培显著降低稻田平均 CH_4 排放通量, 两年间分别下降 6.66% ~ 11.11% 和 7.00% ~ 13.11%。

图 3 为稻鸭共作对秸秆还田稻季 N_2O 排放的影响。 N_2O 排放通量在稻田处于淹水状态时维持较低水平, 在中期晒田时急剧上升。水稻生育期 N_2O 平均排放通量为 39.34 ~ 73.13 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。秸秆还田显著降低了稻田平均 N_2O 排放通量, 与无机氮肥处理相比, 两年间秸秆还田处理稻田平均 N_2O 排放通量分别下降 18.42% ~ 24.87% 和 11.44% ~ 27.57%。稻鸭共作显著增加了稻田平均 N_2O 排放通量, 与无鸭的常规稻作相比, 两年间稻田 N_2O 排放通量分别上升 6.33% ~ 16.05% 和 3.74% ~ 17.69%。与露地栽培相比, 网室栽培降低了稻田 N_2O 排放通量 4.64% ~ 17.29%。

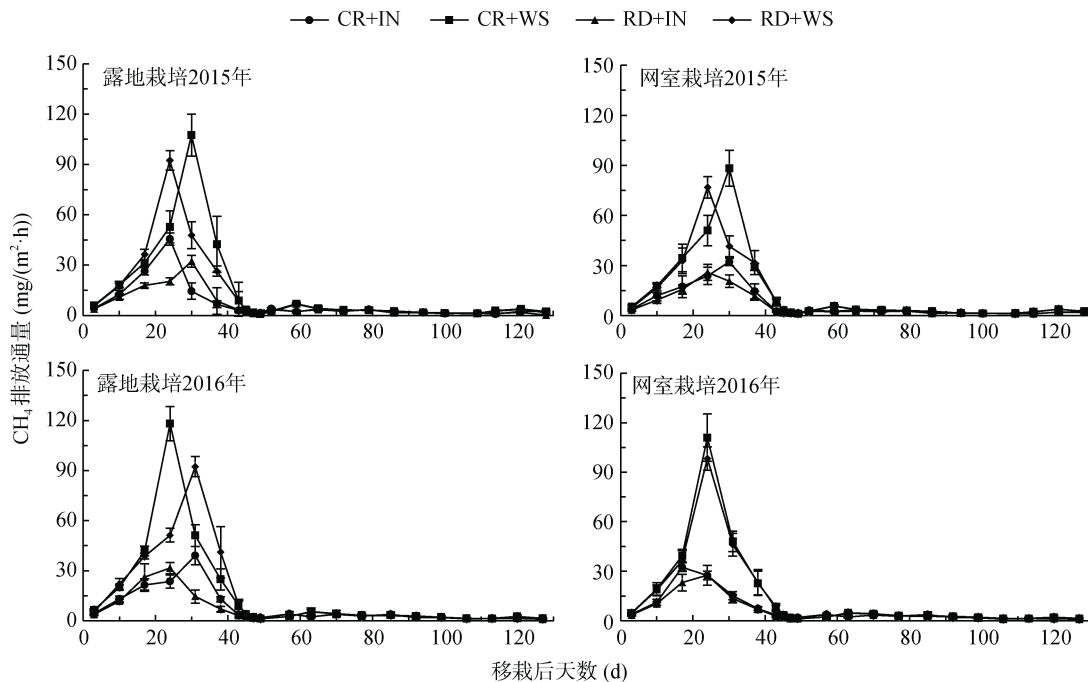


图 2 稻鸭共作对稻季 CH_4 排放的影响

Fig. 2 Effects of rice-duck farming on CH_4 emission flux in rice season

2.2 稻田土壤氧化还原电位

不同栽培环境条件下, 稻鸭共作对秸秆还田稻田土壤 Eh 的影响见图 4。在移栽后 20 d 之内, 稻田土壤 Eh 逐渐下降, 中期晒田后逐渐上升, 之后再下降, 移栽 60 d 后, 呈现出持续增加的趋势。与无机氮肥处理相比, 秸秆还田处理降低了稻田土壤 Eh, 两年

间稻田土壤 Eh 分别下降 24.20 ~ 38.02 mV 和 16.75 ~ 29.41 mV。稻鸭共作提高了稻田土壤 Eh, 与无鸭的常规稻作相比, 两年间稻田土壤 Eh 分别上升 5.80 ~ 11.30 mV 和 5.61 ~ 10.06 mV。与露地栽培相比, 网室栽培两年间稻田土壤 Eh 分别上升 9.17 ~ 24.94 mV 和 5.81 ~ 17.83 mV。

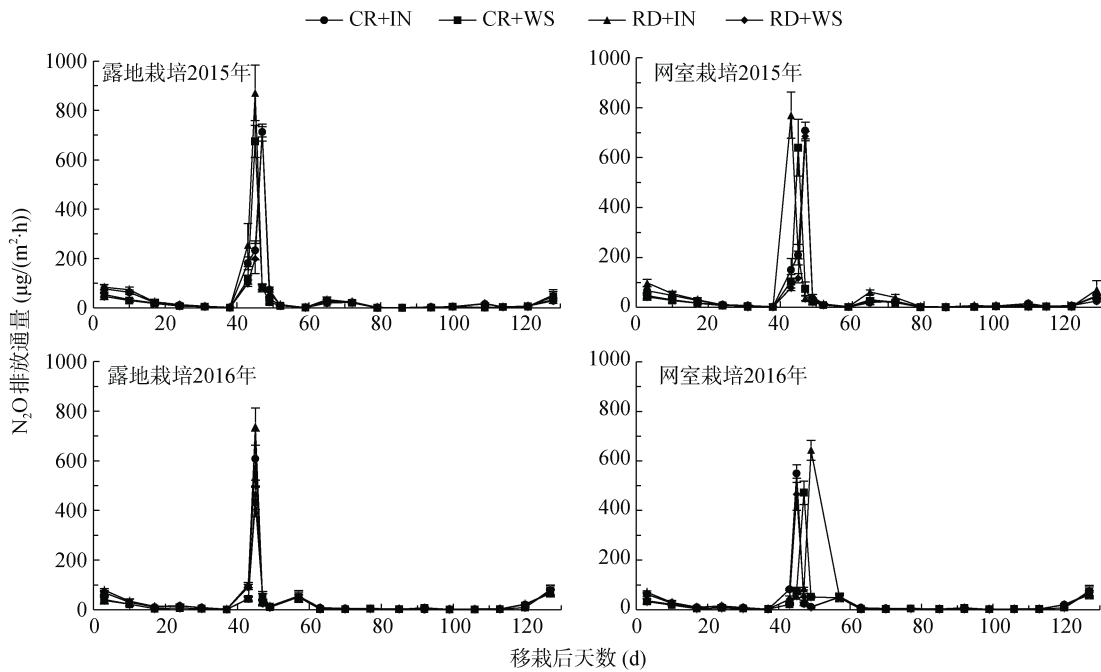


图 3 稻鸭共作对稻季 N₂O 排放的影响
Fig. 3 Effects of rice-duck farming on N₂O emission flux in rice season

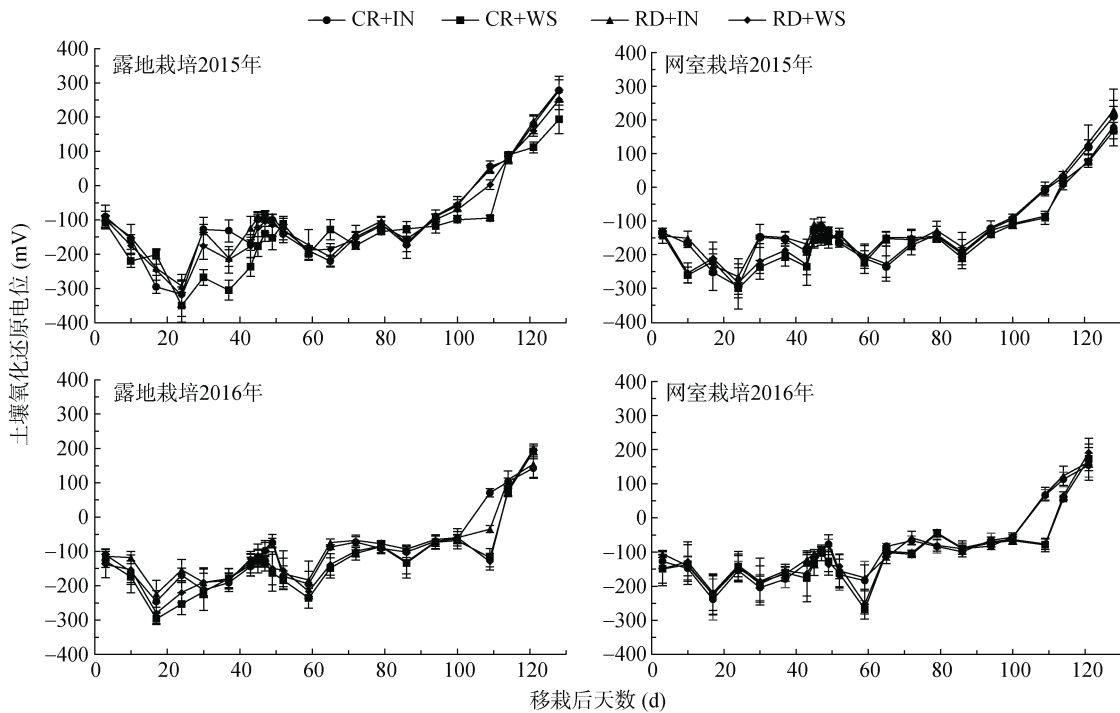


图 4 稻鸭共作对稻季土壤氧化还原电位的影响
Fig. 4 Effects of rice-duck farming on soil redox potential in rice season

2.3 水稻产量及稻田 CH₄、N₂O 排放的全球增温潜势

表 1 显示了稻鸭共作和秸秆还田对不同栽培环境稻田 CH₄、N₂O 总排放量及全球增温潜势的影响。由表 1 可知，秸秆还田显著增加了稻田 CH₄ 总排放量和全球增温潜势，两年间稻田 CH₄ 总排放

量分别上升 102.39% ~ 118.43% 和 107.19% ~ 131.30%，全球增温潜势分别上升 96.89% ~ 110.51% 和 103.16% ~ 123.02%，但显著降低了稻田 N₂O 总排放量，两年间稻田 N₂O 总排放量分别下降 23.25% ~ 41.17% 和 14.67% ~ 51.56%。与无鸭的常规稻作相比，稻鸭共作显著降低了稻田 CH₄

总排放量和全球增温潜势,两年间稻田 CH₄ 总排放量分别下降 8.72% ~ 14.50% 和 5.11% ~ 14.18%, 全球增温潜势分别下降 8.45% ~ 12.64% 和 4.92% ~ 13.38%。网室栽培和露地栽培对稻田 N₂O 排放总量影响无明显规律。与露地栽培相比,网室栽培模式显著降低了稻田 CH₄ 总排放量和全球增温潜势,两年间稻田 CH₄ 的总排放量分别下降 6.65% ~

11.17% 和 6.86% ~ 13.26%, 全球增温潜势分别下降 6.35% ~ 11.12% 和 6.82% ~ 13.14%。

从水稻产量来看,秸秆还田处理水稻产量高于秸秆不还田处理,高出 4.67% ~ 8.60%; 稻鸭共作较常规稻作实际产量提高 1.13% ~ 4.99%; 网室栽培降低了水稻实际产量,两年间分别下降 1.19% ~ 4.49% 和 1.87% ~ 5.48%。

表 1 稻鸭共作对稻季 CH₄ 和 N₂O 排放总量、全球增温潜势(GWP)以及水稻产量的影响
Table 1 Effects of rice-duck farming on total CH₄ and N₂O emissions, global warming potential (GWP) and rice yield

试验年份	栽培环境	处理	CH ₄ 排放量(kg/hm ²)	N ₂ O 排放量(kg/hm ²)	GWP (CO ₂ -eq, kg/hm ²)	产量(kg/667m ²)
2015	露地	CR+IN	222.82 ± 10.52 c	1.09 ± 0.12 b	6 527.8 ± 160.2 c	636.7 ± 13.9 b
		CR+WS	473.93 ± 20.48 a	0.80 ± 0.07 c	13 483.2 ± 332.1 a	671.3 ± 14.7 a
		RD+IN	192.30 ± 12.71 c	1.20 ± 0.12 ab	5 702.5 ± 138.6 c	645.2 ± 14.3 b
		RD+WS	420.04 ± 20.26 b	0.92 ± 0.08 bc	12 004.1 ± 292.1 a	697.6 ± 13.4 a
	网室	CR+IN	208.01 ± 10.14 c	0.99 ± 0.08 b	6 086.5 ± 148.6 cd	608.1 ± 12.2 c
		CR+WS	420.99 ± 20.25 b	0.74 ± 0.06 c	11 983.7 ± 294.5 ab	642.6 ± 13.1 b
		RD+IN	177.84 ± 9.42 c	1.36 ± 0.12 ab	5 340.5 ± 123.2 d	637.5 ± 11.9 b
		RD+WS	384.28 ± 19.47 b	0.80 ± 0.07 c	10 971.7 ± 241.3 b	667.3 ± 13.6 ab
2016	露地	CR+IN	238.84 ± 10.91 c	0.83 ± 0.07 bc	6 906.5 ± 168.6 c	627.6 ± 12.6 c
		CR+WS	494.84 ± 21.92 a	0.66 ± 0.05 c	14 031.4 ± 342.7 a	659.4 ± 14.8 b
		RD+IN	204.97 ± 9.07 c	0.92 ± 0.08 b	5 982.2 ± 146.5 cd	634.7 ± 11.6 c
		RD+WS	469.57 ± 20.37 ab	0.73 ± 0.06 bc	13 341.7 ± 331.4 a	689.3 ± 13.2 a
	网室	CR+IN	207.16 ± 9.12 cd	0.75 ± 0.07 bc	5 999.3 ± 145.2 cd	593.2 ± 11.1 d
		CR+WS	460.91 ± 21.27 ab	0.64 ± 0.05 c	13 074.8 ± 322.8 ab	628.7 ± 12.7 c
		RD+IN	184.33 ± 8.46 d	1.28 ± 0.11 a	5 500.1 ± 135.5 d	622.8 ± 11.6 c
		RD+WS	426.35 ± 20.28 b	0.62 ± 0.06 c	12 103.0 ± 299.5 b	657.4 ± 13.4 b

注:表中同列不同小写字母表示不同年份及栽培环境下各处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著;下同。

2.4 土壤产 CH₄ 潜力、CH₄ 氧化潜力和反硝化酶活性

稻田土壤产 CH₄ 潜力和 CH₄ 氧化潜力见表 2, 可见, 秸秆还田处理的产 CH₄ 潜力显著高于无机氮肥处理, 稻鸭共作与常规稻作差异不显著。CH₄ 氧化潜力在不同处理间差异显著, 网室栽培的土壤 CH₄ 氧化潜力

各处理高于对应的露地栽培; 不同处理间的土壤 CH₄ 氧化潜力为常规稻作+秸秆还田(CR+WS)>稻鸭共作+秸秆还田(RD+WS)>稻鸭共作+无机氮肥(RD+IN)>常规水稻+无机氮肥(CR+IN)。总之, 稻田土壤的 CH₄ 氧化潜力是产 CH₄ 潜力的 9.46 倍 ~ 12.20 倍; 网室栽培增大了土壤 CH₄ 氧化潜力, 降低 CH₄ 的排放通量。

表 2 稻鸭共作对稻田土壤产 CH₄ 潜力和 CH₄ 氧化潜力的影响(μg/(g·h))
Table 2 Effects of rice-duck farming on soil methanogenic potential and CH₄ oxidation potential

栽培环境	处理	2015 年		2016 年	
		产 CH ₄ 潜力	CH ₄ 氧化潜力	产 CH ₄ 潜力	CH ₄ 氧化潜力
露地	CR+IN	1.21 ± 0.03 b	13.08 ± 0.26 d	1.21 ± 0.03 b	12.67 ± 0.26 d
	CR+WS	1.43 ± 0.03 a	14.31 ± 0.28 bc	1.42 ± 0.03 a	13.83 ± 0.29 bc
	RD+IN	1.19 ± 0.02 b	13.50 ± 0.27 cd	1.18 ± 0.02 b	13.08 ± 0.27 cd
	RD+WS	1.42 ± 0.02 a	13.85 ± 0.29 c	1.42 ± 0.03 a	13.44 ± 0.28 c
网室	CR+IN	1.21 ± 0.03 b	14.10 ± 0.27 bc	1.21 ± 0.03 b	13.77 ± 0.29 bc
	CR+WS	1.42 ± 0.03 a	15.38 ± 0.31 a	1.43 ± 0.03 a	14.98 ± 0.31 a
	RD+IN	1.19 ± 0.02 b	14.52 ± 0.30 b	1.18 ± 0.02 b	14.19 ± 0.29 b
	RD+WS	1.42 ± 0.03 a	14.85 ± 0.29 a	1.41 ± 0.03 a	14.54 ± 0.30 ab

图 5 显示了不同栽培环境条件下稻鸭共作对水稻移栽后 45 d 稻田土壤反硝化酶活性的影响。由图 5 可知，秸秆还田显著降低土壤反硝化酶活性，两年间分别较无机氮肥处理降低 7.29 ~ 8.39 和 7.20 ~ 8.29 μg/(g·h)。稻鸭共作显著增强了土壤反硝化酶活性，两年间分别较常规稻作提高 8.80 ~ 12.48 和 10.29 ~ 12.37 μg/(g·h)。网室栽培降低了土壤反硝化酶活性，两年间分别较露地栽培减少 9.02 ~ 11.99 和 9.11 ~ 11.51 μg/(g·h)。

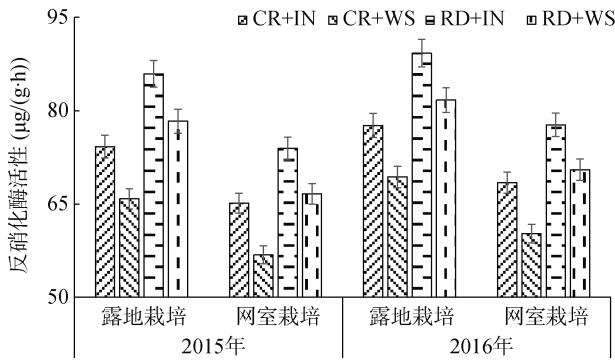


图 5 稻鸭共作对稻季土壤反硝化酶活性的影响
Fig. 5 Effects of rice-duck farming on soil denitrifying enzyme activity in rice season

2.5 稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的生态因子与水稻产量的相关性

表 3 显示，在本试验条件下，稻田 CH₄ 排放总量与土壤产 CH₄ 潜力、CH₄ 氧化潜力、全球增温潜势 (GWP) 和水稻产量显著正相关，特别是与产 CH₄ 潜力、GWP 及水稻产量相关性较高；与 N₂O 排放总量、土壤反硝化酶活性显著负相关。N₂O 排放总量与产 CH₄ 潜力和 GWP 显著负相关，与土壤反硝化酶活性显著正相关。GWP 与 N₂O 排放总量显著负相关，可能是因为在 GWP 计算中 CH₄ 占比最大，其波动对 GWP 影响很大，而 N₂O 对其影响很小。产 CH₄ 潜力与 CH₄ 氧化潜力、GWP 和水稻产量显著正相关。CH₄ 氧化潜力与土壤反硝化酶活性显著负相关。土壤反硝化酶活性与 GWP 显著负相关，而与水稻产量显著正相关。GWP 与水稻产量显著正相关，说明在水稻产量提高的同时，全球增温潜势有增大的趋势，水稻生产中应注重减排，以降低 GWP。秸秆还田增加稻田生态系统 GWP 和水稻实际产量，稻鸭共作降低 GWP 但提升水稻产量，网室栽培较露地栽培由于遮光、增湿和降温导致降低 GWP 和水稻产量(图 6)。

表 3 稻田生态系统 CH₄ 和 N₂O 排放生态因子与水稻产量的相关性 (n=48)
Table 3 Correlation among CH₄ and N₂O emission related factors and rice yield

	CH ₄ 排放量	N ₂ O 排放量	产 CH ₄ 潜力	CH ₄ 氧化潜力	反硝化酶活性	GWP	水稻产量
CH ₄ 排放总量	1.000						
N ₂ O 排放总量	-0.753**	1.000					
产 CH ₄ 潜力	0.966**	-0.694**	1.000				
CH ₄ 氧化潜力	0.412**	0.180	0.535**	1.000			
反硝化酶活性	-0.457**	0.611**	-0.434	-0.600**	1.000		
GWP	0.999**	-0.746**	0.967**	0.414**	-0.452**	1.000	
水稻产量	0.655**	0.185	0.707**	0.110	0.303*	0.660**	1.000

注：*和**分别表示在 P<0.05 和 P<0.01 水平显著相关。

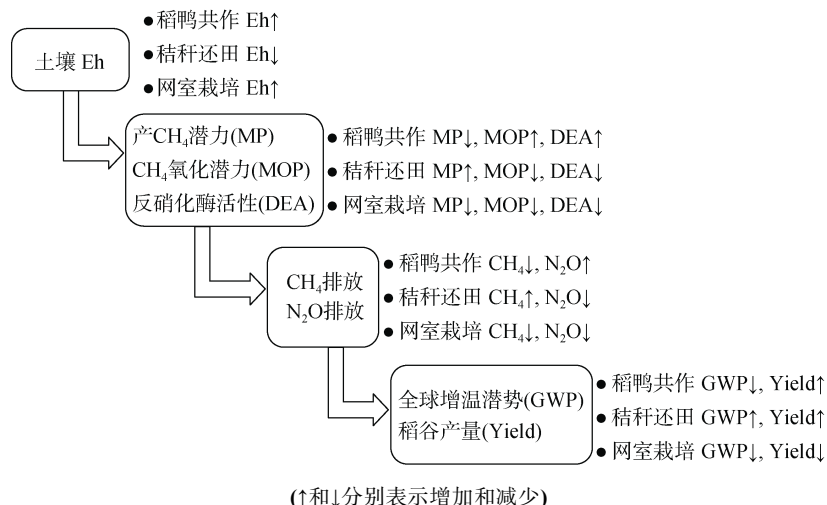


图 6 本试验条件下稻田生态系统 CH₄ 和 N₂O 排放的影响机制
Fig. 6 Mechanism of CH₄ and N₂O emissions from rice paddy under the experimental conditions

3 讨论

3.1 稻田 CH₄ 和 N₂O 产生和排放的生态机制

稻田 CH₄ 是产甲烷菌在利用土壤中碳水化合物的代谢过程中产生的, 稻田 CH₄ 排放是 CH₄ 形成、氧化和排放共同作用的结果^[1,11]。本研究结果表明, 稻田 CH₄ 的排放分别在分蘖期和抽穗期呈现出大、小两个排放峰值, 这与 Huang 等^[12]研究结果基本一致。主要是因为一方面, 水稻分蘖期秸秆全量还田和浅水促蘖, 水稻植株呼吸旺盛, 并随着植株的生长, 根系逐渐壮大, 根系的分泌物也逐渐增加^[13], 从而促进产甲烷菌生长, 有利于稻田 CH₄ 的产生; 另一方面, 低的氧化还原电位是 CH₄ 产生的必要条件, 不断的淹水条件造成土壤处于厌氧环境, 从而导致土壤的氧化还原电位降低, CH₄ 产生量增加。水稻灌浆后期, 稻田干湿灌溉增强了土壤通气性, 使土壤氧化还原电位上升, 导致土壤厌氧细菌繁殖受到抑制, 从而降低了稻田 CH₄ 排放^[2]。

稻田生态系统 N₂O 排放主要是土壤微生物的硝化作用和反硝化作用的结果, 具有产生、转化和传输等过程; N₂O 的释放量取决于硝化和反硝化的反应速率、N₂O 在反应产物中的比例、N₂O 逸散进入大气前在土壤中的扩散程度及土壤水层^[2]。土壤耕作方式、施肥管理、灌溉制度、微生境因子等是影响稻田土壤 CH₄ 和 N₂O 产生和排放过程的重要因素^[14]。温度不仅影响 N₂O 的产生和释放, 而且影响土壤 N₂O 的扩散和运移^[15]。本研究表明, 稻田土壤在淹水状态下 N₂O 排放通量处于较低水平, N₂O 排放峰值出现在中期晒田时期。本试验中期晒田时的大气日平均气温在 28 ~ 33 °C, 有利于微生物的硝化和反硝化作用, 土壤反硝化酶活性增强, 进而有利于 N₂O 的产生。氧气含量是影响硝化和反硝化的重要因素。水层深度是 N₂O 产生的决定性因子^[16]。稻田排干为 N₂O 创造了一个良好的有氧环境, 提高了稻田土壤的氧化还原电位, 较高的氧化还原电位有利于铵态氮转化过程中 N₂O 的形成^[17], 而淹水状态下, 由于土壤氧含量不足, 从而抑制了 N₂O 的形成与释放。

本试验结果显示, 无论是露地栽培还是网室栽培, 稻田 N₂O 排放高峰较 CH₄ 排放晚 2 周左右; 与相应的无机氮肥处理比较, 秸秆还田稻田 CH₄ 高峰值增幅在 188.79% ~ 264.26%; N₂O 高峰值减少 6.40% ~ 37.25%。稻鸭共作较无鸭放养的常规稻作 CH₄ 高峰值下降 2.52% ~ 18.43%, N₂O 高峰值增加 4.81% ~ 23.93%。网室栽培较露地栽培相应的 CH₄ 高峰值以

下降为主, 减少幅度 4.84% ~ 11.85%, N₂O 高峰值减少 2.40% ~ 13.19%。

3.2 稻鸭共作与秸秆还田对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响

本试验结果表明, 无论是露地栽培还是网室栽培, 秸秆还田增大了稻田土壤产 CH₄ 潜力, 降低了 CH₄ 氧化潜力, 从而增加了稻田 CH₄ 的排放(图 2)。这主要是由于秸秆还田后秸秆逐渐腐解, 秸秆的可溶性有机物质释放到土壤中, 为产甲烷菌提供了大量的碳源和养分, 增加了土壤中的微生物数量和活性, 从而使 CH₄ 产生量迅速增加^[18]; 并且秸秆中高的碳氮比为土壤中产甲烷菌的活动提供了丰富的碳源, 从而有利于 CH₄ 的释放^[19]。本试验中, 秸秆还田处理 CH₄ 排放量是无机氮肥处理的 2.02 倍 ~ 2.31 倍。本试验还表明, 秸秆还田降低土壤反硝化酶活性而减少稻田 N₂O 的排放, 一方面可能是因为秸秆还田腐解过程中土壤微生物迅速增加, 加速了土壤中氧气的消耗, 同时秸秆还田为反硝化细菌的活动提供了充足的碳源, 有利于 N₂O 通过反硝化作用转化为氮气, 从而减少 N₂O 的释放^[20]; 另一方面可能是因为秸秆还田会引起土壤微生物对氮源的争夺利用, 从而减少硝化和反硝化过程中间产物 N₂O 的释放^[21]。但 Shang 等^[22]研究认为, 多年的秸秆还田增加了土壤碳、氮的供应, 为稻田土壤硝化和反硝化作用提供了充足的碳、氮反应底物, 从而提高了 N₂O 的排放, 这与本试验结果相反, 可能是试验土壤条件及碳氮固持能力不同所致。

稻鸭共作降低了稻田土壤产 CH₄ 潜力, 从而显著降低了稻田 CH₄ 的排放, 这主要是由于一方面鸭子抑制了稻田杂草、浮游生物和其他稻田需氧生物的生长, 导致被有机体消耗的氧气减少^[2]; 一方面鸭子的不间断活动增加了土壤与氧气的接触, 提高了土壤氧化还原电位, 增加了土壤甲烷氧化的几率, 促使土壤产生的 CH₄ 氧化较快; 另一方面鸭子清除了水稻田间无效分蘖和杂草, 从而减少了因其腐烂分解产生的 CH₄ 排放, 且鸭子的活动增强了水稻根系活力, 对水稻生长具有明显促进作用^[3]。

本研究还表明, 稻鸭共作增强了土壤反硝化酶活性而增加了稻田 N₂O 的排放。这可能是由于鸭子的栖息和觅食等活动加速了水体和土壤的交换, 加快了水溶性 N₂O 的扩散速度, 从而促进了 N₂O 的释放。另外, 鸭子的活动增加了土壤与水体的溶解氧含量, 促使鸭粪便中高浓度的铵离子进入土壤后被迅速硝

化,提高了土壤中硝酸根离子的含量,同时鸭粪含有丰富的氮源,这为土壤反硝化微生物提供了底物和能量,从而提高了 N₂O 排放。

3.3 栽培环境对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响

本试验表明,网室栽培水稻的田间温度较露地通常下降 1~1.5 °C,但湿度增大 5~10 个百分点,因而网室栽培是较为复杂的过程^[1]。网室栽培降低了稻田土壤产 CH₄ 潜力,提高了土壤 CH₄ 氧化潜力,从而降低稻田 CH₄ 排放。首先,网室栽培提高了土壤氧化还原电位,CH₄ 的排放量随土壤氧化还原电位的增加而降低^[2]。其次,水稻根系分泌物及植株脱落物为土壤产甲烷菌提供了底物条件而影响甲烷产生^[23],防虫网覆盖降低了太阳辐射强度,也降低了水稻群体生物量,从而影响产甲烷菌活性,导致稻田 CH₄ 排放量降低。再次,网室栽培的温度低于外界大气温度,有利于降低稻田 CH₄ 的排放^[24-25]。稻田 CH₄ 排放通量与相对湿度呈极显著或显著负相关^[26],网室栽培稻田湿度增加也有助于 CH₄ 减排。同时,网室栽培的土壤反硝化酶活性下降,从而减少稻田 N₂O 的排放量,最终降低了稻田生态系统的全球增温潜势。但本试验表明,网室栽培降低了稻田 CH₄ 氧化潜力,也减少了水稻产量,因此,在水稻生产上还需优化管理,以实现降低全球增温潜势和增产的目的。

4 结论

由于鸭子在稻田不间断的活动,稻鸭共作提升了稻田土壤氧化还原电位,产 CH₄ 潜力有下降趋势,土壤反硝化酶活性上升,水稻全生育期 CH₄ 排放总量下降,N₂O 排放增加,整体上全球增温潜势下降,水稻产量增加。秸秆还田导致稻田土壤氧化电位下降,产 CH₄ 潜力上升,土壤反硝化酶活性下降,CH₄ 排放量增加而 N₂O 排放量降低,水稻全生育期全球增温潜势和水稻产量均上升。网室栽培较露地栽培,土壤氧化还原电位和 CH₄ 氧化潜力上升,产 CH₄ 潜力、土壤反硝化酶活性和全球增温潜势下降,水稻产量较露地栽培降低 1.19%~5.48%。总之,稻鸭共作和秸秆还田能较好地减轻全球增温潜势和增加水稻总产量,网室栽培虽能降低全球增温潜势,但有降低水稻产量的风险。

参考文献:

[1] Xu G C, Liu X, Wang Q S, et al. Effects of greenhouse cultivation and organic materials incorporation on global warming potential in rice fields[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(7): 6581-6591.

- [2] 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.
- [3] Liu X, Xu G C, Wang Q S, et al. Effects of insect-proof net cultivation, rice-duck farming, and organic matter return on rice dry matter accumulation and nitrogen utilization[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 47.
- [4] 杭玉浩, 王强盛, 许国春, 等. 水分管理和秸秆还田对稻麦轮作系统温室气体排放的综合效应[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(11): 1844-1855.
- [5] 温婷, 赵本良, 章家恩. 稻鸭共作中 CH₄ 和 N₂O 排放规律及影响因素[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(7): 1442-1450.
- [6] Mekhmandarov Y, Pirkner M, Achiman O, et al. Application of the surface renewal technique in two types of screenhouses: Sensible heat flux estimates and turbulence characteristics[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 203: 229-242.
- [7] 杨国英. 网室栽培对水稻产量和品质形成特性的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2013.
- [8] 刘庆, 魏建兵, 吴志峰, 等. 广州市流溪河河岸带土壤反硝化作用的多尺度影响因子[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(10): 3069-3077.
- [9] 王爻屹, 韩琳, 史奕, 等. FACE 对水稻土产甲烷菌和甲烷氧化菌群及其活性的影响[J]. *土壤*, 2006, 38(6): 768-773.
- [10] Conrad R, Ji Y, Noll M, et al. Response of the methanogenic microbial communities in Amazonian oxbow lake sediments to desiccation stress[J]. *Environmental Microbiology*, 2014, 16(6): 1682-1694.
- [11] Wang S, Shi F M, Li P F, et al. Effects of rice straw biochar on methanogenic bacteria and metabolic function in anaerobic digestion[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 6971.
- [12] Huang Y, Wang H, Huang H, et al. Characteristics of methane emission from wetland rice-duck complex ecosystem[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 105(1/2): 181-193.
- [13] Tawarayama K, Horie R, Wagatsuma T, et al. Metabolite profiling of shoot extract, root extract, and root exudate of rice under nitrogen and phosphorus deficiency[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2018, 64(3): 312-322.
- [14] 薛建福, 濮超, 张冉, 等. 农作措施对中国稻田氧化亚氮排放影响的研究进展[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 1-9.
- [15] 刘惠, 赵平, 林永标, 等. 华南丘陵地区农林复合生态系统晚稻田甲烷和氧化亚氮排放[J]. *热带亚热带植物学报*, 2006, 14(4): 269-274.
- [16] Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, et al. Impacts of soil moisture on nitrous oxide emission from croplands: A case study on the rice-based agro-ecosystem in Southeast China[J]. *Chemosphere - Global Change Science*, 2000, 2(2): 207-224.
- [17] Sander B O, Samson M, Buresh R J. Methane and nitrous oxide emissions from flooded rice fields as affected by water and straw management between rice crops[J]. *Geoderma*, 2014, 235/236: 355-362.

- [18] 戴志刚, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 272–276.
- [19] Das S, Adhya T K. Effect of combine application of organic manure and inorganic fertilizer on methane and nitrous oxide emissions from a tropical flooded soil planted to rice[J]. *Geoderma*, 2014, 213: 185–192.
- [20] Zou J W, Huang Y, Jiang J Y, et al. A 3-year field measurement of methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in China: Effects of water regime, crop residue, and fertilizer application[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(2): GB2021.
- [21] 谢婉玉, 王永明, 纪红梅, 等. 秸秆还田种类对稻田 N_2O 排放及硝化反硝化微生物的影响[J]. 土壤, 2022, 54(4): 769–778.
- [22] Shang Q Y, Yang X X, Gao C M, et al. Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice-cropping systems: A 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(6): 2196–2210.
- [23] Tokida T, Fumoto T, Cheng W, et al. Effects of free-air CO_2 enrichment (FACE) and soil warming on CH_4 emission from a rice paddy field: Impact assessment and stoichiometric evaluation[J]. *Biogeosciences*, 2010, 7(9): 2639–2653.
- [24] 郭家宏, 范熠, 张西美. 温度对不同生态系统土壤甲烷氧化过程和甲烷氧化细菌的影响[J]. 中国农业气象, 2022, 43(6): 427–439.
- [25] 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.
- [26] 卢廷超, 徐培智, 张仁陟, 等. 保护性耕作模式下早稻田甲烷排放特征[J]. 南方农业学报, 2017, 48(8): 1395–1401.