

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

引用本文:

陈璐, 陈灿, 黄璜, 等. 厢作免耕下生态种养对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1354–1365.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0015>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同遮阴处理下施肥对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响

王坤, 姜运生, 邢钰媛, 刘健

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 464–472 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0953>

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>

水氮耦合对设施土壤 N_2O 和 NO 排放的影响

吕金东, 张丽媛, 虞娜, 邹洪涛, 张玉玲, 张玉龙

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1366–1376 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1217>

不同水稻品种甲烷排放与土壤酶的关系

周文涛, 戈家敏, 王勃然, 龙攀, 徐莹, 傅志强

农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2675–2682 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0517>

紫云英还田对早稻直播稻田温室气体排放的影响

聂江文, 王幼娟, 吴邦魁, 刘章勇, 朱波

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2334–2341 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0195>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈璐, 陈灿, 黄璜, 等. 厢作免耕下生态种养对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1354–1365.

CHEN Lu, CHEN Can, HUANG Huang, et al. Effects of ecological planting symbiosis on CH_4 and N_2O emissions from rice fields under wide ridge cultivation with no-tillage[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(6): 1354–1365.



开放科学 OSID

厢作免耕下生态种养对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响

陈璐¹, 陈灿^{1,2*}, 黄璜^{1,2*}, 任勃³, 王忍¹, 梁玉刚⁴, 周晶¹

(1. 湖南农业大学农学院, 长沙 410128; 2. 湖南省稻田生态种养工程技术研究中心, 长沙 410128; 3. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 4. 湖南省农业科学院水稻研究所, 长沙 410125)

摘要:为明确厢作免耕养鸭、养鱼模式对双季稻田 CH_4 、 N_2O 排放量及其增温潜势(GWP)和温室气体排放强度(GHGI)的影响,了解稻田厢作免耕养殖的温室气体排放情况,本研究设置厢作免耕养鸭(W-RD)、厢作免耕养鱼(W-RF)、厢作免耕(W-CK)、平作翻耕养鸭(F-RD)、平作翻耕养鱼(F-RF)和平作翻耕(F-CK)6个处理进行大田对比试验,采用密闭静态箱法收集 CH_4 和 N_2O 的排放量,探究双季早晚稻田 CH_4 和 N_2O 的累积排放量、GWP 和 GHGI。结果表明:早稻 CH_4 累积排放量在分蘖末期-孕穗期阶段排放最多,晚稻 CH_4 累积排放量主要集中在返青-分蘖末期阶段,相对于晚稻,早稻 CH_4 排放量占双季稻总排放量的 61.60%~77.00%。早稻和晚稻的 N_2O 累积排放量均在分蘖末期-孕穗期阶段排放最多,W-CK 处理 N_2O 累积排放量最高为 $7.85 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, F-RF 处理最低为 $2.64 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,且 W-CK 与 F-RF 处理达到显著差异;厢作免耕各处理早晚稻累积 N_2O 排放的 CO_2 当量均显著高于平作翻耕各处理,且厢作免耕与平作翻耕各处理均显著低于 CK 处理。双季稻全球增温潜势(总 GWP)和双季稻温室气体排放强度(总 GHGI)均以 F-CK 处理最高(总 GWP 为 $25\,258.08 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 总 GHGI 为 $4\,501.41 \text{ kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{kg}^{-1}$),以 W-RF 处理最低(总 GWP 为 $14\,819.94 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 总 GHGI 为 $2\,322.83 \text{ kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{kg}^{-1}$),W-RF 处理总 GWP 和总 GHGI 分别低于 F-CK 处理 41.33%、48.40%,均达到显著差异。双季水稻总产量中 W-RF 和 F-RF 处理显著高于其他处理,W-RF 和 F-RF 处理周年水稻总产量分别为 13.36 、 $13.20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。综上所述,厢作免耕养鱼模式(W-RF)与其他处理相比既可保证水稻高产又可降低 GWP 和 GHGI,而厢作免耕养鸭模式(W-RD)对稻田温室气体排放的影响还需要进一步研究。

关键词:稻鸭共生;稻鱼共生;厢作免耕;甲烷;氧化亚氮

中图分类号:X16;S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)06-1354-12 doi:10.11654/jaes.2021-0015

Effects of ecological planting symbiosis on CH_4 and N_2O emissions from rice fields under wide ridge cultivation with no-tillage

CHEN Lu¹, CHEN Can^{1,2*}, HUANG Huang^{1,2*}, REN Bo³, WANG Ren¹, LIANG Yu-gang⁴, ZHOU Jing¹

(1. College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Hunan Province Rice Field Ecological Planting Engineering Technology Research Center, Changsha 410128, China; 3. College of Resources & Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 4. Rice Research Institute of Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract: To clarify the impact of no-tillage rice integrated farming modes on methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O) emissions, as well as the global warming potential (GWP) and greenhouse gas intensity (GHGI), different farming modes were applied in this study, including two rice-animal coupling modes and two tillage methods, to provide a theoretical reference for greenhouse gas emissions from farming under no-tillage in paddy fields. Six treatments were used, including wide-ridge cultivation with no-tillage rice-duck farming, wide-ridge cultivation with no-tillage rice-fish farming (W-RF), wide-ridge cultivation with no-tillage control check (W-CK), flattened plowing

收稿日期:2021-01-06 录用日期:2021-04-25

作者简介:陈璐(1996—),女,湖南资兴人,硕士研究生,从事稻田生态种养研究。E-mail:2608083492@qq.com

*通信作者:陈灿 E-mail:CC973@126.com;黄璜 E-mail:hh863@126.com

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划项目(2018YFD0301003)

Project supported: The Major Research Plan of the National Natural Science Foundation of China (2018YFD0301003)

planting rice-duck farming (F-RD), flattened plowing planting rice-fish farming (F-RF), and flattened plowing planting control check (F-CK). CH₄ and N₂O emissions were collected by the closed static box method, and the cumulative emissions, GWP, and GHGI of double-cropping early rice and late rice fields were analyzed. Results showed that the CH₄ cumulative emissions of early rice were the highest in the late tillering stage to the booting stage, the cumulative CH₄ emissions of late rice were mainly concentrated in the re-greening stage to late tillering stage, and the CH₄ emissions of early rice accounted for 61.60% to 77.00% of the annual emissions. The N₂O cumulative emissions of early rice and late rice were the highest at the late tillering stage to the booting stage, the highest annual N₂O cumulative W-CK emissions were 7.85 kg·hm⁻², and the lowest of F-RF were 2.64 kg·hm⁻², with a remarkable difference. The annual N₂O emission equivalent CO₂ quality of wide ridge cultivation was significantly higher than that of the flatten plowing planting; both were significantly lower than the CK treatment. According to the GWP analysis, F-CK showed the highest total GWP and total GHGI of double-cropping rice, with a total GWP of 25 258.08 kg·hm⁻² and a total GHGI of 4 501.41 kg CO₂-eq·kg⁻¹. W-RF was the lowest with a total GWP of 14 819.94 kg·hm⁻², and the total GHGI was 2 232.83 kg CO₂-eq·kg⁻¹. The total GWP and GHGI of W-RF were lower than those of F-CK by 41.33% and 48.40%, respectively, with significant differences. The W-RF and F-RF modes in the total annual rice yield were significantly higher than others, at 13.36 t·hm⁻² and 13.20 t·hm⁻², respectively. In summary, W-RF ensures high yields and reduces the GWP and GHGI of rice fields.

Keywords: rice-duck farming; rice-fish farming; wide-ridge cultivation with no-tillage; methane; nitrous oxide

氧化亚氮(N₂O)和甲烷(CH₄)作为温室气体的重要组成部分,可导致全球气候变暖^[1]。稻田作为N₂O和CH₄的重要排放源,其中CH₄年排放量占全球CH₄总排放量的6%左右^[2]。大量研究表明,耕作方式、肥料用量、灌溉用水等稻作生产管理措施均可影响稻田N₂O和CH₄的排放量^[3-5],其中耕作方式主要通过改变土壤紧实度、透气性、水分和碳源等影响稻田N₂O和CH₄排放^[3],但是学者对于耕作方式影响稻田温室气体排放量的研究结果却不一致,Zhang等^[6]研究认为翻耕与免耕下稻田N₂O排放量差异不显著,也有学者认为免耕下稻田N₂O排放量增加^[7-8]。免耕或少耕作为农业耕作新技术的重要组成部分,有着稳定土壤结构、提高土壤有机质、巨大固碳潜力等优势^[9]。姜勇等^[10]研究认为,稻田免耕的土壤有机碳的滞留时间较翻耕平均可以提升1倍,进而有利于提高土壤有机质含量。而土壤有机碳含量、土壤有机质含量及碳储量的增加有利于土壤肥力的提高^[11],进而促进水稻根系对养分的吸收、转运和利用,从而为水稻地上部生长和产量形成奠定基础^[12],然而免耕能够增加土壤湿度,降低土壤温度,对土壤硝化起到反作用,并且土壤C/N较高,促进土壤反硝化作用,加之免耕具有较高的土壤碳储量,最终导致土壤温室气体排放量增加^[13-14]。因此,如何兼顾土壤有机质、碳库含量增加与温室气体减排成为稻作可持续生产所面临的紧迫问题。

稻田厢作免耕栽培是指在水田中按一定规格开沟作厢,在同一块耕地上多年保持固定厢沟格局不变并连续进行免耕栽培^[15],将水稻栽插在厢面上,沟内

灌水,并按水稻不同生育阶段调节水位高低,实行浸润灌的一种新型种稻方法。它能够合理地解决种稻与蓄水养鱼、养鱼与晒田、化肥和农药施用、杂草和病虫害防治等方面的问题,水稻与水产增产显著,又较传统稻田生态种养方便管理操作,便于机械化^[16]。与平作翻耕栽培相比,稻田厢作免耕栽培能够增加作物对养分的吸收能力,保持土壤结构稳定,有利于培肥地力,增加土壤的通气性^[17-19]。

稻田综合种养是在种植水稻后,选择水稻生长适宜期将水产(禽类)动物投放在稻田内,实现水稻种植和水产(禽类)动物养殖互利共生,利用养殖动物捕食、活动等习性可有效防控田间病虫害的发生,进而减少化学农药的使用,从而有利于生产出优质的稻米和水产品,具有显著的经济、生态和社会效益,也是维持农业可持续发展、实施稻作供给侧改革和乡村振兴的有效途径^[20-22]。稻鸭和稻鱼共生作为稻作文化的重要组成部分,已在我国农耕文化中传承千余年^[23-24],其中稻鱼共生和稻鱼鸭共生分别于2005年和2011年被联合国粮农组织列入全球重要文化遗产系统。大量研究证实,稻鸭和稻鱼共生均具有稳定水稻产量^[25]、改善土壤结构、土壤养分状况,增加土壤速效N、速效P、速效K和土壤有机质含量^[26],改善土壤物理状况、土壤透气性,减小土壤容重,增大土壤总孔隙度^[27-29],提高水体含氧量^[30-31],增加土壤微生物种群及其丰富度等诸多优势^[32-35]。稻鸭和稻鱼共生还具有减排温室气体的作用^[36-38],养鸭可降低CH₄排放^[25,37],增加N₂O排放^[39-40],减缓全球增温潜势;稻田养鲫鱼^[39]、免耕稻鳖鱼、免耕稻鱼、免耕稻鳖全生育期的

CH_4 、 N_2O 排放量比水稻单作都有减少^[41]。稻-禽类和稻-水产类在各地比较普遍,推广面积较大,水分管理是影响稻田温室气体的重要因素,而稻-禽类和稻-水产类的稻田水位相差较大,对稻田温室气体排放的影响大不相同。为进一步发挥稻田免耕、稻鸭和稻鱼共生技术模式的优势,本研究采用双季水稻厢作免耕和平作翻耕两种模式研究稻鸭和稻鱼共生对 CH_4 、 N_2O 排放量以及全球增温潜势(GWP)和温室气体排放强度(GHGI)的影响,以期进一步探明厢作免耕对稻鸭和稻鱼共生温室气体排放的影响,从而为稻田免耕下开展养殖的温室气体排放提供一定理论借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与供试材料

1.1.1 试验基地概况

试验于2020年3—11月在湖南省长沙县路口镇明月村科研基地进行,该地区属亚热带季风湿润气候。年降水量1 300~1 500 mm,无霜期260~300 d,年平均气温为16~20℃,≥10℃的有效积温5 000~5 500℃,为南方典型的双季稻生产区,试验田土壤有机质含量为36.56 g·kg⁻¹,全氮含量为0.95 g·kg⁻¹,全磷含量为0.68 g·kg⁻¹,全钾含量为9.28 g·kg⁻¹,碱解氮含量为95.81 mg·kg⁻¹,速效磷含量为30.78 mg·kg⁻¹,速效钾含量为125.46 mg·kg⁻¹,pH为5.89。

1.1.2 供试材料

供试早、晚稻水稻品种均为常规稻中早39。放养动物:鱼以放养工程鲫鱼为主,配养适量的本地草鱼,鸭的品种为绿头鸭。

1.2 试验设计与田间管理

1.2.1 试验设计

试验设厢作免耕养鸭(W-RD)、厢作免耕养鱼(W-RF)、厢作免耕对照(W-CK)、常规平作养鸭(F-RD)、常规平作养鱼(F-RF)和常规平作对照(F-CK)[W:厢作免耕栽培(Wide ridge cultivation with no-tillage);F:平作翻耕栽培(Flatten plowing planting);RD:稻鸭共作(Rice-duck farming);CK:空白对照(Control check);RF:稻鱼共作(Rice-fish farming)],共计6个处理,每个处理设置一个360 m²的大区,每个大区设置3个小区,每个小区面积为120 m²,每个大区之间用宽40 cm、高50 cm左右的田埂隔开,小区之间采用宽30 cm、高40 cm的田埂隔开,并覆膜,每个大区用高150 cm的尼龙网隔开,以防鱼、鸭外逃及鱼、鸭的天敌进入稻田。厢作免耕栽培为在早稻移栽前,不

行耕作,将稻田整理成厢,其中厢的规格为厢面180~200 cm,沟宽40 cm,深40 cm,早稻收割后清理厢沟,移栽晚稻;平作翻耕模式的早稻和晚稻均采用旋耕机进行整田,养鱼试验田挖宽50 cm、深75 cm的“田”字沟,并在试验田中间开挖一个长、宽、深各100 cm的鱼凼。水稻移栽规格为:每穴插4株,株距20 cm,行距25 cm。鲫鱼苗与草鱼苗规格为5~6 cm或质量0.1 kg左右,鲫鱼和草鱼投放比例为10:1,其中鲫鱼苗投放5 000尾·hm⁻²,草鱼投放500尾·hm⁻²;鸭苗为两周龄的雏鸭,投放150只·hm⁻²。

1.2.2 田间管理

早稻于3月27日播种育秧,4月27日移栽,5月22日投放鱼苗和鸭苗,7月2日回收鱼、鸭,7月17日收获水稻;晚稻于6月24日播种育秧,7月23日移栽,8月14日放鱼、放鸭,10月10日收鱼、收鸭,10月25日收获水稻。

养鸭处理需要在田间四角搭建鸭棚,以便投喂饲料和供鸭休息,养鸭和养鱼处理每日采用定时、定点、定质、定量的方式投喂饲料,每日傍晚投喂一次(鱼的饲料为玉米粉,早期投喂量为12 kg·hm⁻²,根据鱼的生长情况逐渐增加投喂量至25 kg·hm⁻²;鸭的饲料为稻谷,早期投喂量为6 kg·hm⁻²,根据鸭的生长情况逐渐增加投喂量至12 kg·hm⁻²;饲料投喂后以2 h左右吃完为宜,投喂量视鸭和鱼的摄食情况适时添减),饲料投喂初期采用人工辅助喂食方法引导鸭、鱼在全田活动,以利于均匀作业,鸭、鱼各时期在田间的活动区域相同,定时观察鸭、鱼的活动情况并检查田间设施,防止天敌进入。水稻整个生育期内,所有处理均不喷施任何化学药剂,肥料总用量为纯N 160 kg·hm⁻²、P₂O₅ 96 kg·hm⁻²和K₂O 120 kg·hm⁻²。复合肥料的养分含量为N:P₂O₅:K₂O=15:15:15,总养分≥45%,尿素的养分含量为总氮含量≥46.40%。早稻和晚稻整田前施入基肥,基肥施用量为氮肥总量的70%、钾肥总量的80%和全量的磷肥,分蘖期追施氮肥总量的30%和剩余的20%钾肥,后期不再追肥。厢作免耕的水稻与养鱼、养鸭不产生用水矛盾,各处理可根据水稻各时期需水量控制水位;F-RD处理放鸭后,厢面水位保持在鸭的脚刚好触碰到泥土的高度,随着鸭的生长适当加深水位;F-RF处理放鱼后,结合鱼的活动所需水位,前期以便秧苗扎根、分蘖,保持6~8 cm的水位,中期加深田面水位至12~15 cm以便水稻抽穗,后期水稻水位不超过10 cm,F-CK处理田间水分以传统水稻单作模式管理。鱼、鸭收获后将水排干为水

稻收割做准备。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 CH₄和N₂O

稻田CH₄和N₂O气体样品采用静态暗箱法采集,并通过气相色谱法进行检测分析。取样箱包括箱体和底座两个部分,箱体规格为长50 cm,宽50 cm,箱高120 cm,底座规格为长50 cm,宽50 cm,高度为20 cm,气体箱外覆盖泡沫板并用胶带固定,箱内安装温度传感器和12 V的小风扇。采样箱底座在水稻移栽时按试验要求(每个小区放置3个取样箱,随机摆放)插入各小区,底座插入土壤20 cm与土层表面保持齐平。待水稻生长稳定后开始取样,每4~6 d取1次稻田气体样品,选择晴朗天气8:00—11:00(进行田间监测的最佳时段^[42])取样,直至水稻成熟期结束,早稻季、晚稻季各取11次稻田气体样品。取样时在扣上取样箱之前,在底座凹槽放水,使箱内密闭不与箱外空气串流,扣上取样箱后,连接温度传感器和小风扇的电源,打开风扇,使箱内气体充分均匀后用接有三通阀的50 mL针筒与取气箱连接取样,连续取体积约45 mL的气体样4次,每次取样时间间隔10 min,每次取样均记录箱体内温度和取样时间。在湖南省农业科学院环境研究所采用Agilent 7890 A气相色谱仪检测分析气体样品。

1.3.2 计算公式

稻田温室气体排放通量计算公式^[43]:

$$F = \rho \times 273 / (273 + T) \times H \times dC/dt \quad (1)$$

式中: F 为排放通量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; ρ 为标准大气压下的CH₄和N₂O密度,分别为 $0.714 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $1.98 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; 273为气态方程常数; T 为取样过程中取样箱内的平均温度, $^{\circ}\text{C}$; H 表示取样箱箱罩的净高度,m; dC/dt 为取样箱内温室气体浓度的变化率^[43]。

季节累积排放量计算公式^[43]:

$$C = \sum_{i=1}^n (F_{i+1} + F_i) / 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \quad (2)$$

式中: C 为温室气体排放总量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$; n 表示气体检测总次数; i 为检测次数; F 为温室气体排放通量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; $t_{i+1} - t_i$ 为相邻两次取气间隔时间,d。双季稻累积排放量是早稻季累积排放量和晚稻季累积排放量之和。

全球增温潜势(Global warming potential, GWP)计算公式^[41]:

$$\text{GWP} = 34 \times (\text{CH}_4) + 298 \times (\text{N}_2\text{O}) \quad (3)$$

式中: GWP 为N₂O和CH₄综合增温潜势, $\text{kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{hm}^{-2}$; CH₄和N₂O排放折算为CO₂当量,以100年时间

尺度为计,CH₄和N₂O的增温潜势分别是CO₂的34倍和298倍^[41],与IPCC第五次评估报告相比^[41],CH₄和N₂O的CO₂当量倍数提高,反映了CH₄和N₂O对温室气体的贡献有所上升。

温室气体排放强度(Greenhouse gas intensity, GHGI)计算公式^[43]:

$$\text{GHGI} = \text{GWP} / Y \quad (4)$$

式中: Y 为该处理单位面积平均产量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,是综合评价试验各处理温室效应的指标^[45]。

1.4 数据处理

数据处理和图表绘制在Microsoft Excel 2010下进行,采用SPSS 24.0软件和Microsoft Excel 2010进行数据的统计分析,采用最小显著差法(LSD)进行显著性检验。

2 结果与分析

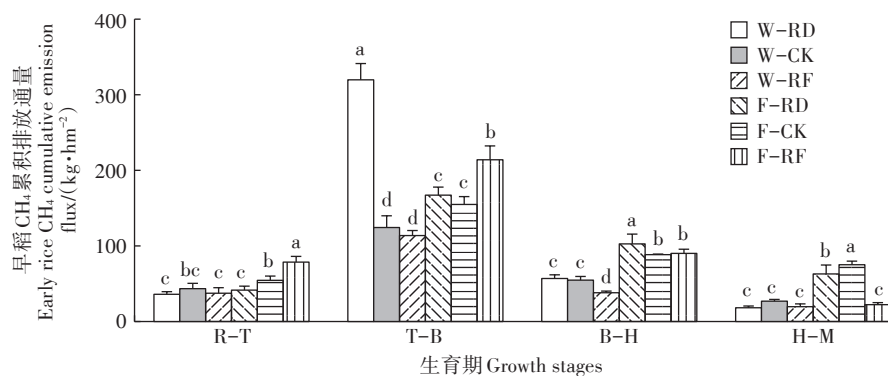
2.1 厢作免耕栽培下生态种养对稻田CH₄排放的影响

2.1.1 早稻季CH₄排放量

由图1可知,早稻厢作免耕和平作翻耕的6个处理CH₄排放通量均表现先升高后降低的趋势,且在分蘖末期至孕穗期的稻田CH₄排放量最多,占水稻生育期排放总量的41.51%~74.22%,孕穗-齐穗期占13.20%~27.43%,返青期-分蘖末期占8.35%~19.40%;齐穗-成熟期排放量最小。返青期-分蘖末期CH₄排放通量,厢作免耕RD、CK、RF处理相比平作翻耕RD、CK、RF处理均有减少,降幅分别为13.40%、20.20%、52.40%,其中W-RF与F-RF处理达到显著差异。分蘖末期-孕穗期CH₄排放通量,除RD处理外,厢作免耕CK、RF处理相比平作翻耕的CK、RF处理均有减少,且达到显著差异,降幅分别为19.64%、46.85%。孕穗期-齐穗期厢作免耕的RD、CK、RF处理的CH₄排放通量相比平作翻耕各处理均显著降低,降幅分别为44.61%、38.15%、57.71%。齐穗期-成熟期厢作免耕的RD、CK、RF处理的CH₄排放通量相比平作翻耕各处理均有所降低;其中W-RD处理的CH₄排放通量最小,为 $18.22 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,相比F-RD处理降幅最大,降幅为71.08%。

2.1.2 晚稻季CH₄排放量

由图2可以看出,晚稻厢作免耕和平作翻耕的6个处理CH₄排放通量均表现为前高后低的趋势,且在返青期-分蘖末期阶段的稻田CH₄排放量最多,占整个生育阶段排放总量的23.90%~48.91%;其次是分蘖末期-孕穗期阶段,占21.93%~33.44%;然后是孕



R-T:返青期-分蘖末期;T-B:分蘖末期-孕穗期;B-H:孕穗期-齐穗期;H-M:齐穗期-成熟期;不同字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同
R-T:re-greening stage-late tillering stage;T-B:late tillering stage-booting stage;B-H:Booting stage-full heading stage;
H-M:Full-heading stage-mature stage. Different letters indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$. The same below

图1 早稻不同生育阶段CH₄累积排放通量

Figure 1 CH₄ cumulative emission flux in different growth stages of early rice

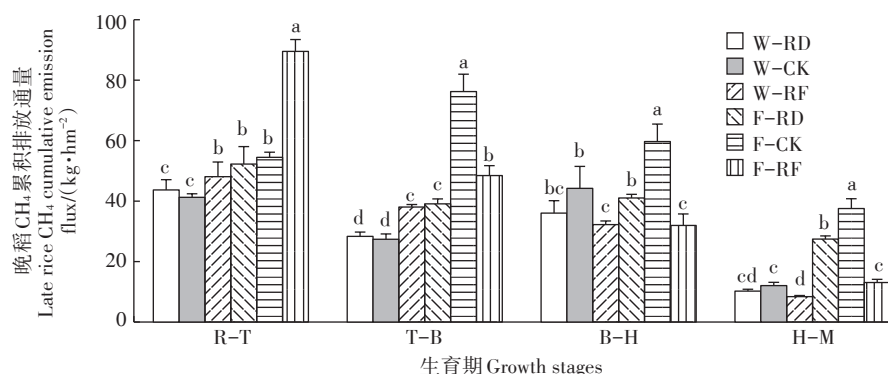


图2 晚稻不同生育阶段CH₄累积排放通量

Figure 2 CH₄ cumulative emission flux in different growth stages of late rice

穗期-齐穗期,占17.47%~35.41%;齐穗期-成熟期排放量最小。除孕穗期-齐穗期外其他3个时期,W-RD、W-CK、W-RF处理CH₄排放通量较F-RD、F-CK、F-RF处理均显著降低,其中返青期-分蘖末期阶段降幅分别为16.37%、24.30%、46.29%,分蘖末期-孕穗期阶段降幅分别为27.49%、64.08%、21.50%,齐穗期-成熟期阶段降幅分别为62.73%、67.92%、35.68%。孕穗期-齐穗期厢作免耕CH₄排放通量除RF处理外, RD、CK处理相比平作翻耕的RD、CK处理均有降低,降幅分别为12.19%、25.93%,其中W-CK与F-CK处理的CH₄排放通量差异显著。

2.2 厢作免耕栽培下生态种养对稻田N₂O排放的影响

2.2.1 早稻季N₂O排放量

由图3可知,早稻季N₂O排放通量整体表现为前高后低的趋势,在返青期-分蘖末期阶段的稻田N₂O排放量最多,占整个生育阶段排放总量的24.3%~52.21%,其次是分蘖末期-孕穗期阶段,占17.99%~47.96%;然后是孕穗期-齐穗期,占6.55%~42.96%;齐

穗期-成熟期排放量最小。CK处理在返青期-齐穗期厢作免耕稻田N₂O排放量均较平作翻耕增加,其中以分蘖末期-孕穗期阶段增幅最高,达472.60%,在齐穗期-成熟期阶段厢作免耕稻田N₂O排放量较平作翻耕降低,降幅为39.67%。RD处理在返青期-分蘖末期阶段与分蘖末期-孕穗期阶段厢作免耕稻田N₂O排放量较平作翻耕降低,降幅分别为15.69%、7.16%,在孕穗期-齐穗期与齐穗期-成熟期厢作免耕稻田N₂O排放量较平作翻耕增加,增幅分别为31.13%、24.39%。RF处理在返青期-分蘖末期阶段与分蘖末期-孕穗期阶段厢作免耕稻田N₂O排放量较平作翻耕降低,降幅分别为14.13%、1.76%,在孕穗期-齐穗期与齐穗期-成熟期厢作免耕稻田N₂O排放量较平作翻耕增加,增幅分别为738.18%、101.02%。

2.2.2 晚稻季N₂O排放量

由图4可知,晚稻的6个处理N₂O排放通量均表现为先升高后降低的趋势,且在分蘖末期-孕穗期阶段的稻田N₂O排放量最多,占整个生育阶段排放总量

的22.91%~60.60%;其次是孕穗期-齐穗期,占18.38%~38.36%;然后是齐穗期-成熟期,占9.61%~32.44%;返青期-分蘖末期排放量最小。CK处理在水稻各生长发育阶段厢作免耕稻田N₂O排放量较平作翻耕均显著增加,其中以齐穗期-成熟期阶段增幅最高,达327.51%。RD处理在返青期-分蘖末期阶段厢作免耕稻田N₂O排放量较平作翻耕显著降低,降幅为40.23%,在分蘖末期-孕穗期阶段、孕穗期-齐穗期阶段、齐穗期-成熟期阶段厢作免耕稻田N₂O排放量均较平作翻耕增加,增幅分别为188.65%、58.42%、53.62%,在分蘖末期-孕穗期阶段差异显著。RF处理在返青期-分蘖末期阶段与分蘖末期-孕穗期阶段厢作免耕稻田N₂O排放量较平作翻耕显著增加,增幅分别为49.93%、213.77%,在孕穗期-齐穗期与齐穗期-成熟期厢作免耕稻田N₂O排放量较平作翻耕显著降低,降幅分别为36.71%、45.37%。

2.3 厢作免耕栽培下生态种养的温室效应分析

2.3.1 不同处理对早稻产量和温室气体排放的影响

不同处理对早稻产量和温室气体排放的影响见表1,早稻CH₄累积排放量以F-RF处理最高,为

484.82 kg·hm⁻², W-RF处理最低,为248.80 kg·hm⁻²; W-CK、W-RF处理较F-CK、F-RF处理显著降低,分别降低了32.58%、48.68%。早稻N₂O累积排放量以W-CK处理最高,为3.01 kg·hm⁻², F-CK处理最低,为1.40 kg·hm⁻²; W-CK、W-RF处理较F-CK、F-RF处理显著增加,分别增加了115.0%、50.98%。从各个处理CH₄和N₂O的综合GWP可看出,CH₄排放占GWP的91.84%~97.31%,是GWP的主要贡献者;各处理综合GWP大小排列为W-RD>F-RF>F-CK>F-RD>W-CK>W-RF,其中W-CK、W-RF处理显著低于F-CK、F-RF处理。GHGI大小排列为W-RD>F-RD>F-RF>F-CK>W-CK>W-RF,其中W-CK、W-RF处理显著低于F-CK、F-RF处理。早稻产量大小排列为F-RF>F-CK>W-RD>W-CK>W-RF>F-RD,其中W-RF处理显著低于F-RF处理。早稻W-RD处理与F-RD处理之间的CH₄累积排放量、N₂O累积排放量、GWP、水稻产量及GHGI均无显著差异。

2.3.2 不同处理对晚稻产量和温室气体排放的影响

由表2可知,晚稻CH₄累积排放量表现为F-CK>F-RF>F-RD>W-RF>W-CK>W-RD;厢作的W-RD、

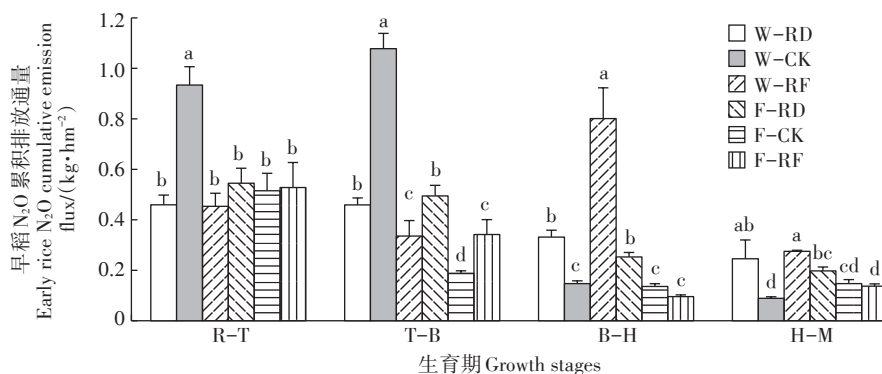


图3 早稻不同生育阶段N₂O累积排放通量

Figure 3 N₂O cumulative emission flux in different growth stages of early rice

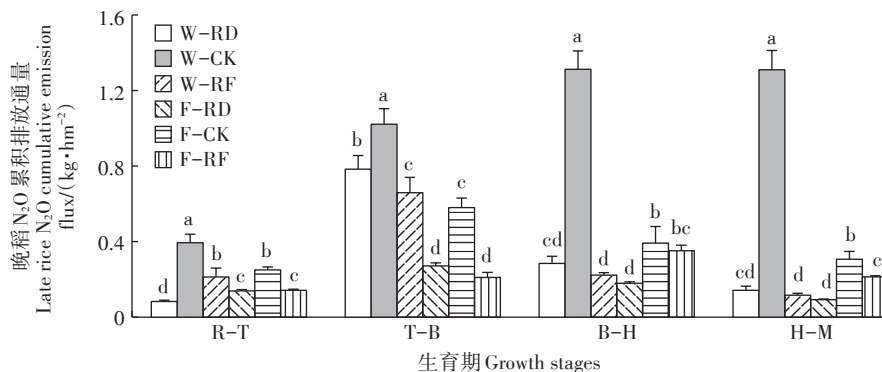


图4 晚稻不同生育阶段N₂O累积排放通量

Figure 4 N₂O cumulative emission flux in different growth stages of late rice

W-CK、W-RF处理CH₄排放通量较对应平作的F-RD、F-CK、F-RF处理,分别减少了25.24%、44.10%、30.64%,均达到显著性差异。晚稻N₂O累积排放量以W-CK处理最高,为4.84 kg·hm⁻²,F-RD处理最低,为0.82 kg·hm⁻²;W-RD、W-CK、W-RF处理N₂O累积排放量与对应的F-RD、F-CK、F-RF处理相比,分别增加了85.37%、164.48%、28.83%,均达到显著性差异。从各个处理CH₄和N₂O的综合GWP可看出,早稻CH₄占GWP的78.33%~96.43%,是GWP的主要贡献者;各处理综合GWP大小排列为F-CK>F-RF>F-RD>W-CK>W-RF>W-RD,W-RD、W-CK、W-RF处理的综合GWP较对应的F-RD、F-CK、F-RF处理,分别减少了21.26%、32.57%、28.14%,均达到显著性差异;GHGI表现为F-CK>F-RD>F-RF>W-CK>W-RD>W-RF,W-RD、W-CK、W-RF处理的综合GHGI较对应的F-RD、F-CK、F-RF处理,分别减少了35.73%、46.66%、38.67%,均达到显著性差异。晚稻产量表现为W-RF>W-RD>F-RF>W-CK>F-RD>F-CK,厢作产量整体高于平作;W-RD、W-CK、W-RF处理的产量较对应的F-RD、F-CK、F-RF处理,分别增加了

22.24%、26.35%、16.54%,均达到显著性差异。

2.3.3 双季稻田总温室气体排放

从表3的各个处理CH₄和N₂O排放的CO₂当量可看出,所有处理中CH₄是总GWP的主要贡献者,占总GWP的86.74%~96.83%。N₂O排放的CO₂当量以W-CK处理的最高,对两者总GWP的贡献为13.26%,显著高于其他处理。双季稻田总CH₄的CO₂当量大小排列为F-CK>F-RF>W-RD>F-RD>W-CK>W-RF,W-CK、W-RF处理较F-CK、F-RF处理显著降低,分别降低了37.01%、43.01%。双季稻田总N₂O的CO₂当量大小排列为W-CK>W-RF>W-RD>F-CK>F-RD>F-RF,平作翻耕的F-RD、F-CK、F-RF处理N₂O的CO₂当量与对应厢作免耕的W-RD、W-CK、W-RF处理比较均显著降低,分别减少了19.24%、58.94%、29.42%。总GWP大小排列为F-CK>F-RF>W-RD>F-RD>W-CK>W-RF,W-CK、W-RF处理较F-CK、F-RF处理显著降低,分别降低了30.14%、40.32%。水稻总产量大小排列为W-RF>F-RF>W-RD>W-CK>F-CK>F-RD,厢作的W-RD、W-CK、W-RF处理总产量分别较对应平作的F-RD、F-CK、F-

表1 不同处理对早稻产量和温室气体排放的影响

Table 1 Effects of different treatments on early rice yield and greenhouse gas emissions

处理 Treatments	温室气体累积排放量 Cumulative greenhouse gas emissions/(kg·hm ⁻²)		全球增温潜势 GWP/(kg CO ₂ -eq·hm ⁻²)	水稻产量 Rice yield/(t·hm ⁻²)	温室气体排放强度 GHGI/(kg CO ₂ -eq·kg ⁻¹)
	CH ₄	N ₂ O			
W-RD	484.71±35.08a	1.91±0.17c	17 050.91±1 141.82a	5.99±0.21bc	2 850.59±249.13a
W-CK	296.79±31.47b	3.01±0.19a	10 986.92±1 019.46b	5.96±0.21bc	1 847.41±213.75c
W-RF	248.80±18.00b	2.31±0.21b	9 147.23±551.98b	5.83±0.30bc	1 570.26±58.30c
F-RD	432.37±41.68a	1.96±0.16c	15 284.29±1 428.95a	5.61±0.28c	2 735.41±363.67ab
F-CK	440.24±26.85a	1.40±0.16d	15 384.69±871.22a	6.28±0.30ab	2 449.85±27.41b
F-RF	484.82±34.61a	1.53±0.25d	16 939.03±1 113.05a	6.73±0.28a	2 515.47±134.72ab

注:同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different letters in the same column indicate significant differences among treatments at 0.05 level. The same below.

表2 不同处理对晚稻产量和温室气体排放的影响

Table 2 Effects of different treatments on late rice yield and greenhouse gas emissions

处理 Treatments	温室气体累积排放量 Cumulative greenhouse gas emissions/(kg·hm ⁻²)		全球增温潜势 GWP/(kg CO ₂ -eq·hm ⁻²)	水稻产量 Rice yield/(t·hm ⁻²)	温室气体排放强度 GHGI/(kg CO ₂ -eq·kg ⁻¹)
	CH ₄	N ₂ O			
W-RD	144.81±8.67d	1.52±0.15bc	5 377.51±258.47d	6.54±0.27b	821.79±14.68c
W-CK	153.38±12.05d	4.84±0.31a	6 658.00±325.87c	6.09±0.17b	1 094.36±77.58b
W-RF	154.29±8.56d	1.43±0.14c	5 672.72±293.28d	7.54±0.38a	752.57±13.76c
F-RD	193.69±8.77c	0.82±0.03d	6 829.53±290.8c	5.35±0.20c	1 278.75±90.62b
F-CK	274.39±14.86a	1.83±0.18b	9 873.39±463.50a	4.82±0.19d	2 051.56±167.04a
F-RF	222.44±13.77b	1.11±0.07d	7 894.50±488.56b	6.47±0.40b	1 227.08±151.43b

表3 不同处理对双季稻田温室效应的影响

Table 3 Effects of different treatments on annual greenhouse effect of rice field

处理 Treatments	CO ₂ 当量 CO ₂ equivalent/(kg CO ₂ -eq·hm ⁻²)		总GWP	总产量	总GHGI
	CH ₄ 排放 CH ₄ emission	N ₂ O排放 N ₂ O emission	Total GWP/(kg·hm ⁻²)	Total yield/(t·hm ⁻²)	Total GHGI/(kg CO ₂ -eq·kg ⁻¹)
W-RD	21 403.75±986.86b	1 024.67±67.15bc	22 428.42±938.77b	12.53±0.23b	3 672.39±234.46b
W-CK	15 305.84±711.24c	2 339.08±49.37a	17 644.92±758.39c	12.05±0.21b	2 941.77±136.23c
W-RF	13 705.10±589.11c	1 114.85±102.65b	14 819.94±489.24d	13.36±0.27a	2 322.83±49.51d
F-RD	21 286.27±1 127.98b	827.54±45.42d	22 113.82±1 146.24b	10.96±0.42c	4 014.15±321.76b
F-CK	24 297.64±1 410.21a	960.44±79.49c	25 258.08±1 332.14a	11.10±0.14c	4 501.41±187.04a
F-RF	24 046.66±1 435.95a	786.86±56.58d	24 833.53±1 379.38a	13.20±0.66a	3 742.55±265.61b

注:总GHGI是指某一处理全年总GWP(kg CO₂-eq·hm⁻²)与全年稻谷产量(t·hm⁻²)的比值。

Note: The total GHGI refers to the ratio of total GWP(kg CO₂-eq·hm⁻²) to annual rice yield(t·hm⁻²) for a given treatment.

RF处理,增加了14.32%、8.56%、1.21%。不同处理总GHGI大小排列为F-CK>F-RD>F-RF>W-RD>W-CK>W-RF, W-CK、W-RF处理较F-CK、F-RF处理显著降低,分别降低了34.65%、37.93%。

3 讨论

3.1 厢作免耕栽培下稻鸭和稻鱼共生双季稻田CH₄排放的影响

耕作方式能够通过影响土壤结构、肥力水平和生化反应强度等直接或间接地对稻田N₂O和CH₄排放量产生影响^[46]。然而有关耕作方式对稻田CH₄排放量多少的结论却并不一致,多数学者认为,少耕或免耕较翻耕可保持相对稳定的土壤结构,避免了翻耕对土壤结构的破坏而导致土壤CH₄氧化程度的降低,进而降低土壤CH₄汇集强度,起到减少稻田CH₄排放的作用^[47-49]。本研究结果表明,常规厢作免耕以及养鸭、养鱼模式下CH₄累积排放量整体均低于常规平作翻耕、养鸭和养鱼模式,主要原因一方面可能是稻田整理成一条条厢面和厢沟后,厢沟淹水,厢面保持干湿交替的状态,有利于土壤与大气的交换,进而使土壤氧化还原电位得到提高,破坏甲烷菌的生存条件,使甲烷的形成和排放得到抑制^[50],另一方面可能是厢作免耕通过鸭、鱼的活动,能够降低土壤容重和紧实度,增加土壤孔隙度,从而改善土壤结构,使得土壤透气性得到改善,对CH₄也起到减排作用。同时鸭和鱼在稻田不间断的活动,能够扰动土壤和水体,提高土壤氧化还原和生化反应强度,丰富有氧微生物群落,进而加快产生降解CH₄菌。陈建^[51]和卢廷超等^[52]的研究结果也表明,免耕处理稻田CH₄排放通量低于常规耕作处理。

本研究结果表明,晚稻的CH₄累积排放量低于早稻,可能是由于早稻前的冬闲期稻田长时间持续淹

水,早稻季生育早期的CH₄排放显著增加,且南方上半年雨水丰沛,水稻在生育后期持续淹水,使稻田处于有利CH₄产生的极端厌氧环境,而晚稻生育阶段降雨整体较早稻减少,稻田土壤通透性增大,抑制了产CH₄菌的活性,从而减少了晚稻季CH₄排放^[53]。

3.2 厢作免耕栽培下稻鸭和稻鱼共生双季稻田N₂O排放的影响

本研究结果表明,早晚稻厢作免耕处理N₂O排放量整体高于平作翻耕。免耕或少耕较传统翻耕下N₂O排放量高低的结论不一致,有些学者认为,免耕促进土壤N₂O排放^[54];其他学者认为,免耕能够降低土壤N₂O的排放量^[55],还有些学者认为,不同耕作方式下N₂O排放量差异不明显^[56]。诸多学者得出以上矛盾结果主要与N₂O排放量不确定性有很大关系。

厢作免耕和平作翻耕下养鸭、养鱼模式N₂O排放规律有所不同,多位学者研究认为稻鸭共作增加了稻田N₂O排放,这与本研究中F-RD处理结果相同,W-RD处理结果相反。许国春等^[28]认为,稻鸭共作的全生育期稻田N₂O排放量比常规稻作高5.88%~12.46%;展茗等^[40]研究指出,稻鸭共作稻田N₂O排放量比常规稻作显著增加了10%。盛锋^[57]研究表明,与常规稻作处理相比,稻鸭共作处理N₂O排放量提高6.1~15.5倍,差异显著。稻鸭共作增加了稻田N₂O排放,一是稻鸭共作稻田水层深度较浅,鸭子的活动搅动土层和水层,增加了土壤与大气交换的频率,从而使土壤的氧化还原状况得到改善,导致增加N₂O释放^[58];二是在稻鸭共作阶段,一只鸭子的排泄物约10 kg,相当于纯N 47 g、纯P 70 g,因此鸭子的排泄物可以为硝化和反硝化作用提供反应底物,能促进N₂O的排放^[59]。李成芳等^[60]研究表明,在水稻全生育期间,稻鱼共生的稻田N₂O排放量较常规稻作降低6.9%;袁伟玲等^[39]两年试验表明,稻鱼共生的稻田整个生育

期 N_2O 年排放通量相比于常规稻作减少了 8%; Bhattacharyya 等^[61]研究表明,与常规稻作相比,稻-鳊鱼共作可降低 N_2O 排放量 9%。以上学者通过研究认为稻鱼共作能使稻田 N_2O 排放量降低,与本研究结果相同。稻鱼共作能使稻田 N_2O 排放量降低的原因可能是:与常规稻作相比,稻田养鱼为满足鱼的生存需要较深的水层,鱼的活动搅浑了田面水,抑制了水体藻类的光合作用,同时鱼的呼吸作用消耗氧气,降低了溶氧量,使得水层-土壤界面呈还原状态,因此减少了 N_2O 的排放。

有研究认为,稻田 N_2O 排放与硝化和反硝化反应有着密切的关系,而以上生化反应又受肥料用量、灌溉用水、土壤温度、土壤微生物等多种因素的影响^[38],从而致使不同措施下稻田 N_2O 排放并无明显的规律;也有学者认为,不同耕作方式下稻田 N_2O 排放量的多少主要表现在长时间尺度上,短期试验研究所得出的结论并不具有充分的代表性^[62]。因此,不同耕作方式耦合养鸭、养鱼下稻田 N_2O 的长期定位研究是十分必要的,其潜在温室效应也不能完全忽略。

3.3 厢作免耕栽培下稻鸭和稻鱼共生的稻田温室效应

不同温室气体对气候系统的潜在效应可用 GWP 来估计^[36]。稻田综合种养模式中饲养动物的生活习性及其不间断活动可改变稻田生态系统的土壤结构、肥力水平、水体环境、生物多样性以及 C、N 等物质循环,使得稻田 CH_4 和 N_2O 的排放通量发生改变^[63]。因此,厢作免耕下养鸭、养鱼的种养系统对温室效应的影响需从 GWP 的综合效应来进行全面评估。有研究认为,稻鸭共生能够减缓 GWP,稻鸭共生系统中 CH_4 排放占 GWP 的 85% 以上,较常规水稻单作显著降低 CH_4 排放量^[64]。本研究结果表明厢作免耕各处理均较平作翻耕的产量提高,与梅佐有^[65]的研究结果相同,其增产原因可能是厢作免耕有提高土温和土壤昼夜温差、改善田间小气候和土壤理化性状等优势,能够有效控制无效分蘖的产生,促进根系生长,有利于高产群体构建,达到增产效果。本研究结果表明 W-RF 和 F-RF 处理的产量显著高于其他处理,与刘贵斌^[66]和谷婕等^[67]研究结果相同,增产原因可能是稻鱼共生模式为水稻的生长提供了适宜的环境(温度、水),保证了水稻的有效穗数,延长了灌浆时间。本研究结果表明,厢作免耕总 GWP 和总 GHGI 整体均低于平作翻耕,其中总 GWP 厢作免耕下 W-RF 处理最低,平作翻耕为 F-RD 最低,厢作免耕和平作翻耕的总 GHGI 均以 RF 处理最低。厢作免耕养鸭和养鱼的早晚季稻田

总增温潜势和温室气体排放强度低于平作翻耕,主要是鸭子和鱼在稻田频繁活动,对植株、土壤和水体起到扰动,利于水稻透风透光,增强土壤通气性及水体流动,降低土壤和水体表层 pH 和温度,提高 Eh^[68],鸭子和鱼可取食稻田杂草、绿藻、浮游动植物等,增加土壤和水体溶解氧浓度,降低水体发生富营养化的风险,稻田土壤和水体的生态环境得到改善^[69],从而使得厌氧菌的数量和繁殖速率得到控制,并且甲烷氧化菌的活性得到提高^[37]。另外厢作免耕开挖的厢沟便于鱼和鸭的生长,可实现厢面保持干湿交替的状态,提高土壤含氧量和氧化还原电位,有利于抑制产甲烷菌的活性,提高甲烷氧化菌活性,减少稻田 CH_4 的排放量,同时改善土壤硝化和反硝化反应的生化环境,抑制稻田 N_2O 的排放,从而降低 CH_4 和 N_2O 双季稻总增温潜势和排放强度^[5]。然而,由于免耕、稻鸭、稻鱼共生均能显著影响土壤固碳的能力,并且稻田 CH_4 和 N_2O 排放量受到温度、水分、田间管理措施等因素的影响,因此长期开展厢作免耕下养鸭、养鱼的全球增温潜势效应和温室气体排放强度的研究是十分必要的。

4 结论

(1) 早稻和晚稻 CH_4 累积排放量分别在分蘖末期-孕穗期和返青期-分蘖末期达到最高,其中早稻 CH_4 排放量占双季稻稻田总排放量的 61.60%~77.00%, N_2O 累积排放量均在分蘖末期-孕穗期阶段排放最多。

(2) 厢作免耕双季稻稻田总 CH_4 排放的 CO_2 当量整体低于平作翻耕,厢作免耕各处理双季稻稻田总 N_2O 排放的 CO_2 当量均显著高于平作翻耕各处理。

(3) 双季稻中厢作免耕养鱼模式(W-RF)的双季稻稻田总全球增温潜势和温室气体排放强度均最低,同时早稻和晚稻的产量均最高,因此,厢作免耕养鱼模式(W-RF)在保证水稻产量稳定的前提下,还可降低全球增温潜势和稻田温室气体排放强度。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis[M]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2013.
- [2] IPCC. Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability[M]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2014.
- [3] 冯珺珩, 黄金凤, 刘天奇, 等. 耕作与秸秆还田方式对稻田 N_2O 排放、水稻氮吸收及产量的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(8): 1250-1259. FENG Jun-heng, HUANG Jin-feng, LIU Tian-qi, et al. Effects of tillage and straw returning methods on N_2O emission from paddy fields, nitrogen uptake of rice plant and grain yield[J]. Acta Agro-

- nomica Sinica, 2019, 45(8): 1250-1259.
- [4] 田伟, 伍延正, 汤水荣, 等. 不同施肥模式对热区晚稻田CH₄和N₂O排放的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2426-2434. TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, et al. Effects of different fertilization modes on greenhouse gas emission characteristics of paddy fields in hot areas[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(5): 2426-2434.
- [5] 李思宇, 陈云, 李婷婷, 等. 水分养分管理对稻田温室气体排放影响的研究进展[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2019, 40(6): 16-23. LI Si-yu, CHEN Yun, LI Ting-ting, et al. Effects of water and nutrient management on greenhouse gas emission in paddy fields[J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2019, 40(6): 16-23.
- [6] Zhang Z S, Chen J, Liu T Q, et al. Effects of nitrogen fertilizer sources and tillage practices on greenhouse gas emissions in paddy fields of central China[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 144: 274-281.
- [7] Zhang J S, Zhang F P, Yang J H, et al. Emissions of N₂O and NH₃, and nitrogen leaching from direct seeded rice under different tillage practices in central China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 140(1/2): 164-173.
- [8] Philippe R. No-till only increases N₂O emissions in poorly-aerated soils[J]. *Soil & Tillage Research*, 2008, 101(1): 97-100.
- [9] 成臣, 曾勇军, 杨秀霞, 等. 不同耕作方式对稻田净增温潜势和温室气体强度的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(6): 1887-1895. CHENG Chen, ZENG Yong-jun, YANG Xiu-xia, et al. Effect of different tillage methods on net global warming potential and greenhouse gas intensity in double rice-cropping systems[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(6): 1887-1895.
- [10] 姜勇, 庄秋雨, 梁文举. 农田生态系统土壤有机碳库及其影响因子[J]. 生态学杂志, 2007(2): 278-285. JIANG Yong, ZHUANG Qiu-li, LIANG Wen-ju. Soil organic carbon pool and its affecting factors in farm land ecosystem[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007(2): 278-285.
- [11] 张国, 王效科. 我国保护性耕作对农田温室气体排放影响研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 872-881. ZHANG Guo, WANG Xiao-ke. Impacts of conservation tillage on greenhouse gas emissions from cropland in China: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 872-881.
- [12] 周佳民, 徐世宏, 江立庚. 免耕对水稻根系生长及根际环境的影响(II)免耕对水稻根系保护酶活性的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(14): 118-121. ZHOU Jia-min, XU Shi-hong, JIANG Li-geng. Influence of no tillage on root growth and rhizosphere environment in rice(II) influence of no tillage on activities of antioxidant enzymes in root[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(14): 118-121.
- [13] Venterea R T, Maharjan B, Dolan M S. Fertilizer source and tillage effects on yield-scaled nitrous oxide emissions in a corn cropping system[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2011, 40(5): 1521-1531.
- [14] Lal R. Agricultural activities and the global carbon cycle[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 70(2): 103-116.
- [15] 吴科学, 王友萍, 吴天顺, 等. 稻田固定厢沟免耕栽培技术[J]. 四川农业科技, 2008(2): 29. WU Ke-xue, WANG You-ping, WU Tian-shun, et al. No-tillage cultivation techniques in fixed furrow of paddy field[J]. *Sichuan Agricultural Science and Technology*, 2008(2): 29.
- [16] 魏朝富, 车福才, 高明, 等. 垄作稻田和垄作养鱼稻田土壤结构与肥力特征研究[J]. 生态学杂志, 1989, 8(1): 22-26. WEI Chao-fu, CHE Fu-cai, GAO Ming, et al. Studies on soil structure and soil fertility in ridged paddy field and ridged piscicultural paddy field[J]. *Journal of Ecology*, 1989, 8(1): 22-26.
- [17] 赵建红, 李玥, 孙永健, 等. 灌溉方式和氮肥运筹对免耕厢沟栽培杂交稻氮素利用及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(3): 609-617. ZHAO Jian-hong, LI Yue, SUN Yong-jian, et al. Effects of irrigation and nitrogen management on nitrogen use efficiency and yield of hybrid rice cultivated in ditches under no-tillage[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(3): 609-617.
- [18] 曹凑贵, 汪金平, 李成芳, 等. 油茬中稻固定厢沟免耕抛秧全程好气栽培方法: 200910272552[P]. 2010-04-21. CAO Cou-gui, WANG Jin-ping, LI Cheng-fang, et al. The whole process aerobic cultivation method of oil stubble mid-season rice in fixed compartment furrow with no-tillage and throwing seedlings: 200910272552[P]. 2010-04-21.
- [19] 汪金平, 何圆球, 柯建国, 等. 厢沟免耕秸秆还田对作物及土壤的影响[J]. 华中农业大学学报, 2006(2): 123-127. WANG Jin-ping, HE Yuan-qiu, KE Jian-guo, et al. Effect of ditch no-tillage and straw recycling on rice yield, soil bulk density and organic matter[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2006(2): 123-127.
- [20] 余开, 宋迁红, 赵永锋. 江苏省稻渔综合种养现状与产业化发展思考[J]. 中国农学通报, 2020, 36(23): 161-164. YU Kai, SONG Qian-hong, ZHAO Yong-feng. The status quo and industrialization of rice-aquaculture integrated cultivation in Jiangsu[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(23): 161-164.
- [21] 王强盛, 韦琮, 薄雨心, 等. 稻田综合种养技术的绿色效应与发展途径[J]. 中国稻米, 2019, 25(3): 11-14. WANG Qiang-sheng, WEI Cong, BO Yu-xin, et al. Green effects and development measures of the combination of planting and breeding technology in paddy field[J]. *China Rice*, 2019, 25(3): 11-14.
- [22] 隆斌庆, 陈灿, 黄璜, 等. 稻田生态种养的发展现状与前景分析[J]. 作物研究, 2017, 31(6): 607-612. LONG Bin-qing, CHEN Can, HUANG Huang, et al. Analysis on the development status and prospects of ecological rice cultivation[J]. *Crop Research*, 2017, 31(6): 607-612.
- [23] 闵庆文, 何露, 孙业红, 等. 中国GIAHS保护试点: 价值、问题与对策[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(6): 668-673. MIN Qing-wen, HE Lu, SUN Ye-hong, et al. On the value, conservation and sustainable development of GIAHS pilot sites in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(6): 668-673.
- [24] 陈灿, 郑华斌, 黄璜, 等. 新时期传统稻鱼生态农业文明发展的再思考[J]. 作物研究, 2016, 30(6): 619-624. CHEN Can, ZHENG Hua-bin, HUANG Huang, et al. Rethinking of traditional rice-fish eco-agriculture civilization development in the new period[J]. *Crop Research*, 2016, 30(6): 619-624.
- [25] 黄璜, 杨志辉, 王华, 等. 湿地稻-鸭复合系统的CH₄排放规律[J]. 生态学报, 2003(5): 929-934. HUANG Huang, YANG Zhi-hui, WANG Hua, et al. A study on the pattern of methane emission in wetland rice-duck complex ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003(5): 929-934.

- [26] 杨志辉, 黄璜, 王华. 稻-鸭复合生态系统稻田土壤质量研究[J]. 土壤通报, 2004(2): 117-121. YANG Zhi-hui, HUANG Huang, WANG Hua. Paddy soil quality of a wetland rice-duck complex ecosystem[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004(2): 117-121.
- [27] 邝雪梅, 刘小燕, 余建波, 等. 稻-金鱼共栖生态系统土壤理化性状研究[J]. 淡水渔业, 2005(3): 33-35. KUANG Xue-mei, LIU Xiao-yan, YU Jian-bo, et al. Study on soil physical and chemical properties of rice-goldfish symbiosis ecosystem[J]. *Freshwater Fisheries*, 2005(3): 33-35.
- [28] 许国春, 刘欣, 王强盛, 等. 稻鸭种养生态系统的碳氮效应及其循环特征[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(10): 393-396. XU Guo-chun, LIU Xin, WANG Qiang-sheng, et al. Carbon and nitrogen effects and cycling characteristics of rice-duck breeding ecosystem[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(10): 393-396.
- [29] 禹盛苗, 朱练峰, 欧阳由男, 等. 稻鸭种养模式对稻田土壤理化性状、肥力因素及水稻产量的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 151-156. YU Sheng-miao, ZHU Lian-feng, OUYANG You-nan, et al. Influence of rice-duck farming system on soil physical properties, fertility factors and yield in paddy fields[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(1): 151-156.
- [30] 白远飞, 田飞, 余顺波. 稻田养鸭密度对水稻病虫害及经济效益的影响[J]. 湖南农业科学, 2014(19): 20-23. BAI Yuan-fei, TIAN Fei, YU Shun-bo. Effects of density of ducks raising in paddy fields on economic benefits and control of diseases, insect pests and weeds in rice[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2014(19): 20-23.
- [31] 张承元, 单志芬, 赵连胜. 略论稻田养鱼与农田生态[J]. 生态学杂志, 2001(3): 24-26. ZHANG Cheng-yuan, SHAN Zhi-fen, ZHAO Lian-sheng. Outline of rice paddy pisciculture and cropland ecology[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2001(3): 24-26.
- [32] 兰国俊, 胡雪峰, 程畅, 等. 稻鸭共生对土壤养分和水稻病虫害防控的影响[J/OL]. 土壤学报, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20200826.0919.002.html>. LAN Guo-jun, HU Xue-feng, CHENG Chang, et al. Effects of raising duck in paddy field on soil nutrients and rice pests and diseases control[J/OL]. *Acta Pedologica Sinica*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20200826.0919.002.html>.
- [33] 张军, 刘菁, 陈长青. 有机稻鸭共作对土壤理化性状和细菌群落空间分布的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(3): 822-829. ZHANG Jun, LIU Jing, CHEN Chang-qing. Effects of organic rice-duck farming on soil physicochemical properties and spatial distribution of bacterial community[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(3): 822-829.
- [34] 吕广动, 黄璜, 梁玉刚, 等. 紫云英还田+稻鱼共生对水稻土壤养分及产量的影响[J]. 西南农业学报, 2020, 33(8): 1729-1735. LÜ Guang-dong, HUANG Huang, LIANG Yu-gang, et al. Effects of Chinese milk vetch returning to field coupled with rice-fish symbiosis on soil nutrients and rice yield[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 33(8): 1729-1735.
- [35] 张剑, 胡亮亮, 任伟征, 等. 稻鱼系统中田鱼对资源的利用及对水稻生长的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(1): 299-307. ZHANG Jian, HU Liang-liang, REN Wei-zheng, et al. Effects of fish on field resource utilization and rice growth in rice-fish coculture[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(1): 299-307.
- [36] 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 Qiang-sheng. Regulation and mechanism of greenhouse gas emissions of circular agriculture ecosystem of planting and breeding in paddy[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(5): 633-642.
- [37] 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 Rong-yang, LIU Hong-bin, MAO Kun-ming, et al. Effects of rice-duck mutualism on greenhouse gas emissions and rice yields from paddy fields in Erhai basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(7): 2306-2314.
- [38] 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. WEN Ting, ZHAO Ben-liang, ZHANG Jia-en. Emission pathways and influencing factors for CH₄ and N₂O from rice-duck farming[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(7): 1442-1450.
- [39] 袁伟玲, 曹凑贵, 李成芳, 等. 稻鸭、稻鱼共作生态系统CH₄和N₂O温室效应及经济效益评估[J]. 中国农业科学, 2009, 42(6): 2052-2060. YUAN Wei-ling, CAO Cou-gui, LI Cheng-fang, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice-fish and rice-duck complex ecosystems and the evaluation of their economic significance[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(6): 2052-2060.
- [40] 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 Ming, CAO Cou-gui, WANG Jin-ping, et al. Greenhouse gas emissions from an integrated rice-duck system and its global warming potentials (GWPs)[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(2): 420-426.
- [41] 周江伟, 刘贵斌, 陈灿, 等. 免耕“稻鳖鱼”共生模式的环境经济学分析[J]. 湖南农业科学, 2017(8): 98-102. ZHOU Jiang-wei, LIU Gui-bin, CHEN Can, et al. Environmental economics analysis of no-tillage rice-turtle-fish symbiosis model[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2017(8): 98-102.
- [42] 彭程琳, 崔远来, 才硕, 等. 水肥管理对鄱阳湖流域稻田温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(16): 85-93. PENG Zeng-lin, CUI Yuan-lai, CAI Shuo, et al. Effects of different water and fertilizer managements on greenhouse gas emissions of rice fields in Poyang Lake Basin[J]. *Transactions of the CSAE*, 2020, 36(16): 85-93.
- [43] 杨丹, 叶祝弘, 肖珣, 等. 化肥减量配施有机肥对早稻田温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2443-2450. YANG Dan, YE Zhu-hong, XIAO Xun, et al. Effects of chemical fertilizer reduction and organic fertilizer use on the greenhouse gas emissions of early rice fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11): 2443-2450.
- [44] Maucieri C, Zhang Y, Mc Daniel M D, et al. Short-term effects of biochar and salinity on soil greenhouse gas emissions from a semi-arid Australian soil after re-wetting[J]. *Geoderma*, 2017, 307: 267-276.
- [45] Herzog T, Baumert K A, Pershing J. Target: Intensity. An analysis of greenhouse gas intensity targets[R]. Washington D. C.: World Resources Institute, 2006: 37.
- [46] Zheng X H, Han S H, Huang Y, et al. Re-quantifying the emission factors based on field measurements and estimating the direct N₂O

- emission from Chinese croplands[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(2):1-19.
- [47] 白小琳, 张海林, 陈阜, 等. 耕作措施对双季稻田CH₄与N₂O排放的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1):282-289. BAI Xiao-lin, ZHANG Hai-lin, CHEN Fu, et al. Tillage effects on CH₄ and N₂O emission from double cropping paddy field[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1):282-289.
- [48] 李成芳, 曹凑贵, 汪金平, 等. 不同耕作方式下稻田土壤CH₄和CO₂的排放及碳收支估算[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12):2482-2488. LI Cheng-fang, CAO Cou-gui, WANG Jin-ping, et al. CH₄ and CO₂ emissions from paddy soils and assessment of carbon budget in different tillage systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12):2482-2488.
- [49] 甘德欣. 稻鸭共栖免耕减排甲烷机制及综合效益研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2003. GAN De-xin. A study on the mechanism of mitigating methane and ingredient benefits of no-tillage in rice-duck complex system[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2003.
- [50] 刘敬宗, 王树军. 水稻田减少甲烷排放的具体措施——窄厢深沟减氮免耕[J]. 四川农业科技, 2016(5):44-45. LIU Jing-zong, WANG Shu-jun. Specific measures to reduce methane emissions in rice fields—narrow compartments and deep trenches, nitrogen reduction and no tillage[J]. *Sichuan Agricultural Science and Technology*, 2016(5):44-45.
- [51] 陈建. 不同氮肥类型和耕作方式对稻田温室气体排放及土壤碳库的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016. CHEN Jian. Effects of different fertilizer sources and tillage practices on GHG emissions and soil carbon pool in paddy fields[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016.
- [52] 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. LU Ting-chao, XU Pei-zhi, ZHANG Ren-zhi, et al. Characteristics of CH₄ emission in early rice paddy field under conservation tillage[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2017, 48(8):1395-1401.
- [53] 徐华, 蔡祖聪, 李小平. 烤田对种稻土壤甲烷排放的影响[J]. 土壤学报, 2000(1):69-76. XU Hua, CAI Zu-cong, LI Xiao-ping. Effect of curing field on methane emission from rice-growing soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000(1):69-76.
- [54] Steinbach H S, Alvarez R. Changes in soil organic carbon contents and nitrous oxide emissions after introduction of no-till in pampean agroecosystems[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(1):3-13.
- [55] Gregorich E G, Rochette P, St-Georges P, et al. Tillage effects on N₂O emission from soils under corn and soybeans in Eastern Canada[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2008, 88(2):153-161.
- [56] 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等. 耕作方式和稻草还田对双季稻田CH₄和N₂O排放的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11):216-224. QIN Xiao-bo, LI Yu-e, WAN Yun-fan, et al. Effect of tillage and rice residue return on CH₄ and N₂O emission from double rice field[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(11):216-224.
- [57] 盛锋. 稻鸭共育对稻田环境的影响及效益评估[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019. SHENG Feng. Effects of rice-duck farming on rice field environment and its benefit evaluation[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019.
- [58] 王华, 黄璜, 杨志辉, 等. 湿地稻-鸭复合生态系统综合效益研究[J]. 农村生态环境, 2003(4):23-26, 44. WANG Hua, HUANG Huang, YANG Zhi-hui, et al. Integrated benefits of paddy rice-duck complex ecosystem[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2003(4):23-26, 44.
- [59] 沈晓昆. 无公害优质稻米生产新技术——稻鸭共作[J]. 农业装备技术, 2003(2):18-19. SHEN Xiao-kun. New technology for the production of pollution-free high-quality rice-rice and duck co-cultivation[J]. *Agricultural Equipment & Technology*, 2003(2):18-19.
- [60] 李成芳, 曹凑贵, 汪金平, 等. 稻鸭稻鱼共作生态系统N素平衡的研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4):1326-1334. LI Cheng-fang, CAO Cou-gui, WANG Jin-ping, et al. Studies on nitrogen cycling in integrated rice-duck, rice-fish ecosystems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4):1326-1334.
- [61] Bhattacharyya 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 and Environment*, 2013, 176:53-62.
- [62] Six J, Stephen M O, Breidt F J, et al. The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practiced in the long term[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(2):155-160.
- [63] Zhang J, Hu L L, Ren W Z, et al. Rice-soft shell turtle coculture effects on yield and its environment[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 224:116-122.
- [64] 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.
- [65] 梅佐有. 杂交水稻半旱式垄作、厢作与不同方式平作增产效应分析[J]. 农技服务, 1997(12):14-17. MEI Zuo-you. Analysis on the yield-increasing effect of hybrid rice semi-dry ridge cultivation, box cultivation and different flat cultivation methods[J]. *Agricultural Technology Service*, 1997(12):14-17.
- [66] 刘贵斌. 垄作稻鱼鸡共生对水稻产量及农田环境的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2018. LIU Gui-bin. Effect of rice-fish-chicken symbiosis on rice yield and paddy field environment under rice ridge cultivation[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2018.
- [67] 谷婕, 吴涛, 王忍, 等. 稻鱼生态系统对水稻产量及其构成因素的影响[J]. 作物研究, 2019, 33(5):378-381. GU Jie, WU Tao, WANG Ren, et al. Effects of rice-fish ecosystem compound breeding model on rice yield and its component factors[J]. *Crop Research*, 2019, 33(5):378-381.
- [68] Liang K M, Zhang J E, Song C X, et al. Integrated management to control golden apple snails (*Pomacea canaliculata*) in direct seeding rice fields: An approach combining water management and rice-duck farming[J]. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 2014, 38(3):264-282.
- [69] Teng Q, Hu X F, Cheng C, et al. Ecological effects of rice-duck integrated farming on soil fertility and weed and pest control[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(10):2395-2407.