

稻田综合种养模式温室气体排放研究进展^①

倪远之

(上海市环境科学研究院, 上海 200233)

摘要: 稻田生态系统是大气中甲烷与氧化亚氮气体主要人为排放源之一, 水稻生产的低碳化转型对于我国实现碳中和目标具有重要意义。“十三五”以来, 稻田综合种养作为典型的生态循环农业模式迅速发展, 已逐步形成稻鸭、稻鱼、稻虾、稻蛙、稻蟹等多元化生产类型, 为我国保障粮食安全、促进农民增收和推进乡村振兴等方面发挥了重要作用。近年来, 诸多学者在综合种养模式对稻田温室气体排放的影响方面开展了较为广泛的研究。然而, 关于该模式对温室气体排放是促进效应还是抑制效应尚未形成统一结论, 不同共作类型下的排放也存在较大差异。本文系统梳理了当前稻田综合种养系统在温室气体减排机理、实际减排效果、主要影响因素以及碳足迹核算等方面的研究进展, 总结了当前亟待解决的科学及技术问题, 并对未来的研究方向予以展望, 以期为我国农业绿色低碳高质量发展提供科学支撑。

关键词: 稻田综合种养; 甲烷排放; 氧化亚氮排放; 碳足迹

中图分类号: X511; S966; X82 **文献标志码:** A

Research Progress on Greenhouse Gas Emissions from Rice-Animal Co-culture Systems

NI Yuanzhi

(Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

Abstract: The paddy field ecosystem represents a significant anthropogenic source of methane and nitrous oxide emissions. The low-carbon transition of rice production system is of great significance for China to achieve its carbon neutrality goal. Since the 13th Five-Year Plan period, the rice-animal co-culture system, as a typical ecological circular agriculture model, has been developing rapidly. Diversified production types such as rice-duck, rice-fish, rice-crayfish, rice-frog, and rice-crab have emerged, playing an important role in ensuring food security, increasing farmers' income, and promoting rural revitalization in China. In recent years, extensive studies have been carried out investigating the impact of the rice-animal co-culture system on greenhouse gas emissions from paddy fields. However, there is still no unified conclusion on whether this model promotes or inhibits greenhouse gas emissions. Additionally, there is a wide range of differences in emissions under different co-cultivation types. This paper provided a comprehensive review of the current research progress on rice-animal co-culture, focusing on the mechanism of greenhouse gas emission mitigation, emission reduction performance, influencing factors and carbon footprint assessment. This paper also summarized the scientific and technical problems that urgently need to be solved and outlines future research directions, aiming to offer scientific support for advancing green, low-carbon, and high-quality agricultural development in China.

Key words: Rice-animal co-culture; Methane emission; Nitrous oxide emission; Carbon footprint

稻田生态系统作为全球重要的生态系统之一, 不仅是粮食安全的重要保障, 同时也是人为源非二氧化碳温室气体甲烷(CH_4)与氧化亚氮(N_2O)排放的主要来源之一。根据生态环境部数据, 2021 年我国稻田 CH_4 排放总量为 885.1 万 t, 占我国人为源 CH_4 排放总量的 14.8%; 同时, 农用地 N_2O 排放量为 71.8 万 t,

占人为源 N_2O 排放总量的 34.2%^[1]。这些温室气体的排放不仅加剧了全球气候变化, 也对我国实现碳中和目标构成了重大挑战。因此, 推动水稻低碳化生产, 优化稻田管理措施, 减少 CH_4 和 N_2O 排放, 对于我国实现碳中和目标、应对气候变化以及保障粮食安全具有重要的战略意义。2022 年国家发展改革委联合

①基金项目: 上海市农业科技创新项目(K2023017)资助。

作者简介: 倪远之(1989—), 女, 南京人, 博士, 工程师, 主要从事低碳与循环农业研究。E-mail: niyz@saes.sh.cn

印发《农业农村减排固碳实施方案》，明确提出鼓励发展稻田综合种养等生态健康农田管理模式，作为实现种植业温室气体减排的重要路径。

稻田综合种养是利用稻田的浅水环境，在种植水稻后，选择生长适宜期将水产(或禽类)动物投放于稻田内实现水稻种植和水产(或禽类)动物养殖互利共生^[2-3]。利用养殖动物捕食、活动等习性可有效防控田间病虫草害的发生，进而减少化学农药的使用，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^[4]。稻田综合种养模式在全球范围内应用广泛，目前全球 117 个水稻生产国中约有 40% 的国家推广运用了该生产模式^[5]。“十三五”以来，我国大力推进生态农业体系建设，稻田综合种养作为典型的生态循环农业模式迅速发展，已逐步形成稻鸭、稻鱼、稻虾、稻蛙、稻蟹等多样化生产类型^[6]，为保障粮食和水产品供给、提高水土资源利用效率、促进农民增收和推进乡村振兴做出积极贡献。

近年来，关于稻田综合种养模式的研究主要集中在其对水稻产量与品质^[7]、面源污染与土壤质地等生态环境效益^[6-9]的影响方面，以及经济效益和生产技术等领域^[10-12]。然而对于该模式下温室气体排放的研究结论仍不一致^[3, 13-15]。在我国积极应对气候变化以及农业向低碳化、高质量方向发展的双重背景下，本文通过系统性梳理目前稻田综合种养系统在温室气体减排机理、实际减排效果以及碳足迹核算等方面的研究进展，全面总结了当前亟待解决的科学及技术问题，并对未来的研究方向予以展望，为稻田综合种养绿色低碳高质量发展提供理论支撑，助力我国“双碳”目标实现。

1 稻田温室气体的产生路径与主要影响因素

1.1 稻田甲烷

在水稻种植长期淹水造成的厌氧环境中，土壤中的有机肥、动物及微生物残体、植物凋落物、生物分泌物等有机质在产甲烷菌的代谢活动下生成大量 CH₄。稻田 CH₄ 的净排放取决于土壤中产甲烷菌和甲烷氧化菌活动的平衡结果，受到水分、有机质输入水平以及微生物生态等因素的共同调控^[16-17]。产甲烷菌是 CH₄ 产生的驱动者，其产生方式主要包括 3 个阶段：第一阶段，土壤中的有机质在水解酶的作用下被分解成脂肪酸和单糖等单体；第二阶段，这些单体物质进一步被分解为醇类和短链脂肪酸等小分子物质，小分子物质继续被分解生成乙酸 (CH₃COOH)、氢气 (H₂) 和二氧化碳 (CO₂)；第三阶

段，CH₃COOH、H₂ 和 CO₂ 最终在产甲烷菌的代谢作用下被原成 CH₄。另一方面，在土壤好氧层和根际好氧区^[18-19]，CH₄ 可以被甲烷氧化菌氧化为 CO₂ 和 H₂O。据估计，产甲烷菌产生的内源性高浓度 CH₄ 中，超过 80% 会在逸散到大气之前被甲烷氧化菌氧化^[20]。未被氧化的 CH₄ 则通过植株通气组织、气泡及分子扩散的形式排放至大气中，其中以植株为主要的传输途径^[16]。因此，任何减少产甲烷菌反应底物、破坏 CH₄ 产生所需的厌氧环境以及促进 CH₄ 氧化的稻田管理措施都会抑制稻田 CH₄ 排放^[21]。其中，水分管理和有机物料还田方式是影响稻田 CH₄ 排放的关键因素^[21]。

优化水分管理方面，与长期淹灌相比，中期烤田、干湿交替灌溉等节水灌溉措施具有显著的稻田 CH₄ 减排效果。由于减少了稻田淹水时间，从而改善土壤通气状况并提高土壤氧化还原电位 (Eh)，抑制产甲烷菌代谢活动，进而减少 CH₄ 的产生，同时促进甲烷氧化菌对 CH₄ 的氧化，总体上可降低 60% ~ 100% 的稻田 CH₄ 排放^[22-25]。需要注意的是，虽然节水灌溉模式和长期淹灌相比显著降低 CH₄ 排放，但是对于长期淹水的稻田，深灌水比浅灌水排放的 CH₄ 要少，水位深度是决定长期淹水稻田 CH₄ 通量大小的重要因素^[26]。一方面，深水灌溉减缓了稻田土壤和水层温度的上升，降低产甲烷菌的代谢水平；另一方面，深水灌溉削弱了稻田系统对 CH₄ 的传输，深水条件下 CH₄ 的气泡和液相扩散两条通道传输能力降低，且长期处于深水环境中致使水稻植株的通气组织对 CH₄ 传输能力减弱，深水阻隔导致 CH₄ 排放量下降^[2, 26]。此外，节水抗旱稻与常规水稻品种相比，对灌溉水量的需求大大降低，有效缩短淹水期，降低了 CH₄ 的产生^[23]。水稻覆膜栽培技术是将水稻直播或秧苗移栽至有地膜覆盖的地畦上，有效降低了灌溉用水，与常规灌溉移栽相比，覆膜移栽稻田在保持水稻稳产的同时，降低了 63% ~ 86% 的 CH₄ 排放量^[27-28]。

优化有机物料还田方式对调控稻田 CH₄ 排放同样重要。一方面，有机物料还田为产甲烷菌提供了丰富的代谢底物，促进稻田 CH₄ 的产生与排放；另一方面，有机物料在淹水条件下的快速分解使土壤 Eh 下降，厌氧状态加剧，产甲烷菌代谢速率升高，进一步促进 CH₄ 产生^[21, 29]。与秸秆全量还田相比，秸秆离田处置或腐熟后还田等秸秆利用措施可降低 60% ~ 78% 的稻田 CH₄ 排放^[22, 30]。相似地，动物有机肥的施用对稻田 CH₄ 的产生同样具有促进作用，

但是与新鲜施用相比,采用发酵腐熟后的有机肥对稻田 CH_4 排放的促进作用则显著降低^[31-32]。主要是由于其中易分解成分以沼气(当厌氧发酵时)或 CO_2 (当好氧发酵时)的形式被利用或散失,发酵产物中的有机质则不易被产甲烷菌利用,进而降低稻田 CH_4 产生率^[21]。此外,越来越多的研究观测到施用生物质炭对于稻田 CH_4 有很好的控制效果^[33-34]。由于生物质炭的多孔隙结构增加了土壤通气性、提升甲烷氧化菌丰度、抑制产甲烷菌的活性,进而抑制 CH_4 的产生与排放^[34]。

1.2 稻田氧化亚氮

农用地 N_2O 排放是土壤中微生物对于氮素养分硝化作用与反硝化作用的共同结果。硝化作用分为硝化阶段及亚硝化阶段,硝化阶段是指在土壤好氧区域中硝化细菌将铵盐(NH_4^+)或氨(NH_3)转化为亚硝酸盐(NO_2^-),亚硝化阶段是指 NO_2^- 被硝化细菌进一步氧化为硝酸根(NO_3^-)。当硝化作用氧化不完全时则会生成部分 N_2O 。反硝化作用是指在缺氧或厌氧状态下,土壤中的反硝化细菌将 NO_3^- 、 NO_2^- 逐步还原成一氧化氮(NO)、 N_2O 和氮气(N_2)的过程。IPCC 指南中,通过设定 1% 的排放系数以评估因氮素施用引起的田间 N_2O 排放量,其中稻田 N_2O 的排放系数(0.41%)低于旱地(1.05%)。总体而言,相较于旱地种植,稻田淹水造成的厌氧环境对于 N_2O 排放表现为抑制作用^[35]。此外,越来越多的研究揭示了 N_2O 排放与氮素输入量之间存在指数而非线性关系^[36],尤其当氮素投入量增加并超出作物需求时, N_2O 排放呈现出明显的指数增加趋势。

N_2O 排放控制主要通过抑制微生物硝化与反硝化作用实现。氮素输入量是决定农田 N_2O 排放量的关键因素,氮素输入减少将直接抑制土壤中的硝化作用或反硝化作用,降低 N_2O 生成率。遵循 4R(正确的氮肥品种 Right source、正确的氮肥施用量 Right rate、正确的肥料施用时间 Right time、正确的施肥位置 Right place)原则的精准施肥策略可显著提高作物对氮素的利用效率,减少硝化或反硝化作用底物,从而抑制 N_2O 生成^[21]。此外,硝化抑制剂可通过抑制氨氧化微生物活性,延缓 NH_4^+ 氧化为 NO_2^- 并抑制其进一步硝化为 NO_3^- ,从而降低稻田 N_2O 排放,减排效果为 28%~56%^[37-40]。施用缓释肥通过降低氮素的释放速率进而使作物在整个生长周期都能够有效地利用氮肥,减少氮素流失,从而降低 N_2O 的产生与排放^[41]。此外,近年来越来越多的研究揭示了生物质

炭施用对于稻田 N_2O 减排的效果,主要是由于生物质炭具有发达的孔隙结构,施用于土壤后增加土壤的孔隙度,而将 N_2O 滞留在了土壤孔隙中;生物质炭添加后还可以通过丰富土壤有机碳含量,提高土壤 pH,为微生物提供生产空间和能源等来增加细菌反硝化功能基因丰度和活性,促进完全反硝化,减少土壤 N_2O 排放^[42]。

2 生态综合种养对稻田温室气体排放的影响

目前,关于生态综合种养对稻田温室气体排放影响的研究主要集中在稻鸭、稻鱼、稻虾共作系统,部分研究关注稻蛙、稻蟹共作模式下的温室气体排放情况(表 1)。

2.1 对甲烷排放的影响

生态综合种养模式下 CH_4 排放降低的共性原因包括两方面(图 1):一是共作动物在水中的游动、觅食等活动促进了土壤、水体与大气间的气体交换,改善了原本严格厌氧的土壤和沉积物环境,提高了水中溶解氧(DO)含量和土壤 Eh,抑制了产甲烷菌活动,促进了甲烷氧化菌的代谢,产生显著的 CH_4 减排效果^[9, 46];二是动物觅食抑制了水生植物生长,杂草植株对 CH_4 的传输降低导致 CH_4 排放下降^[47]。这两者是引起稻蛙、稻鸭模式下 CH_4 排放降低的主要原因。稻蛙、稻鸭模式采用浅水灌溉^[66],即整个种植期田面水深度维持在 10 cm 以下,水分管理与常规水稻种植模式接近。Fang 等^[66]两年试验结果表明,在相同水分管理模式下,相比水稻单作,稻蛙共作模式能降低 23.6%~45.4% 的 CH_4 排放。Feng 等^[46]通过荟萃分析发现,与水稻单作相比,稻鸭共作模式可使田间 CH_4 排放降低 21.7%;Sun 等^[45]采用相同方法得出类似结论。更多的研究运用田间监测法评估稻鸭共作模式对稻田温室气体排放的影响,结果较为一致,即与常规水稻单作相比,稻鸭共作模式可降低 8.8%~44.8% 的稻田 CH_4 排放^[9, 47, 49-56]。研究表明,稻鸭共作显著减少稻田 CH_4 排放总量,尤其降低 CH_4 排放高峰期的排放速率与排放量,但是对于水稻排放峰值出现时间并没有显著影响^[55, 57]。然而,有学者指出鸭的活动对土壤和水体的扰动会使原本可能被氧化的 CH_4 得以释放,促进水体以气泡的形式将 CH_4 传输至水面进而逸散到大气中,但是稻鸭共作系统中普遍采用的静态箱采气方法无法捕捉到该活动对于稻田 CH_4 排放的影响,因此目前对稻鸭共作模式下 CH_4 的减排效果可能被高估^[47, 67]。

表 1 不同稻田综合种养模式对稻田温室气体排放的影响
Table 1 Summary of greenhouse gas emission mitigation performance of rice-animal co-culture systems

模式	研究方法/ 监测区域	监测年份	参照系统	CH ₄ 排放变化	N ₂ O 排放变化	全球增温潜势变化	参考文献
稻渔	荟萃分析	—	水稻单作	-86.80%	无显著影响	-12.90%	[43]
	荟萃分析	—	水稻单作	-37.02%	—	—	[44]
	荟萃分析	—	水稻单作	-12.50%	11.30%	—	[45]
稻鸭	荟萃分析	—	水稻单作	-21.70%	33.60%	—	[46]
	田间监测/湖北	2020—2021	水稻单作	-21.18%	76.14%	-25.45% ~ -19.53%	[47]
稻鸭	荟萃分析	—	水稻单作	-88.80%	171.0%	-11.30%	[43]
	田间监测/江苏	2015—2016	水稻单作	-13.97%	10.72%	-10.75%	[9]
	荟萃分析	—	水稻单作	-6.16%	—	—	[48]
	田间监测/湖北	2009—2010	水稻单作	-32.35%	上升 7.1 倍 ~ 16.5 倍	-28.10%	[49]
	田间监测/南京	2014—2015	水稻单作	-16.68% ~ -8.80%	4.23% ~ 15.20%	—	[50]
稻鱼	田间监测/武汉	2007	水稻单作	-19.30%	10%	—	[51]
	田间监测/武汉	2006—2007	水稻单作	-25.07% ~ -19.26%	13%	—	[52]
	田间监测/武汉	2008	水稻单作	—	6.68%	—	[53]
	田间监测/湖南	2002	水稻单作	-21.60%	—	—	[54]
	田间监测/湖南	2000—2001	水稻单作	-41.99%	—	—	[55]
	田间监测/湖南	2019	水稻单作	-44.80%	—	—	[56]
	荟萃分析	—	水稻单作	-24.90%	36.60%	-11.08%	[45]
	荟萃分析	—	水稻单作	-82.60%	减少	-12.50%	[43]
	荟萃分析	—	水稻单作	-20.79%	—	—	[48]
	田间监测/武汉	2006—2007	水稻单作	-26.78% ~ -13.55%	无显著影响	—	[52]
稻鱼	田间监测/武汉	2008	水稻单作	—	-6.93%	—	[53]
	田间监测/湖南	2004	水稻单作	-15.41%	—	—	[57]
	田间监测/湖南	2022—2023	水稻单作	25.51% ~ 42.27%	—	8.18% ~ 47.26%	[58]
	田间监测/浙江	2013	水稻单作	-26.26%	—	—	[59]
	田间监测/湖南	2019	水稻单作	-29.70%	—	—	[56]
	荟萃分析	—	水稻单作	11.60%	-10.20%	20.80%	[45]
	田间监测/湖北	2022	水稻单作	-13.06%	—	—	[60]
	田间监测/安徽	2021	水稻单作	-43.9% ~ -21.12%	10.3% ~ 43.1%	-36.9% ~ -18.1%	[61]
	田间监测/湖北	2014—2016	水稻单作	-35.11%	-7.62%	—	[62]
	田间监测/上海	2023	水稻单作	-27.4% ~ -9.0%	-27.2% ~ -13.4%	-27.32% ~ -9.17%	[63]
稻蟹	荟萃分析	—	—	-20.20%	41.20%	-18%	[45]
	田间监测/湖北	未说明	水稻单作	369.30%	-33.30%	347.20%	[14]
	田间监测/浙江	2017—2018	单虾养殖	-64.40%	-76.20%	—	[15]
稻蟹	田间监测/东北	2019	水稻单作 (持续淹水)	-13.50%	-23.90%	-13.60%	[64]
			水稻单作 (中期晒田)	34.01%	-16.70%	32.60%	
稻蛙	田间监测/上海	2018—2019	水稻单作	-45.4% ~ -23.6%	-25.33% ~ -1.84%	-48.11% ~ -18.74%	[65]
	田间监测/上海	2018—2019	水稻单作	58.13% ~ 131.18%	-63.12% ~ -41.06%	—	[13]

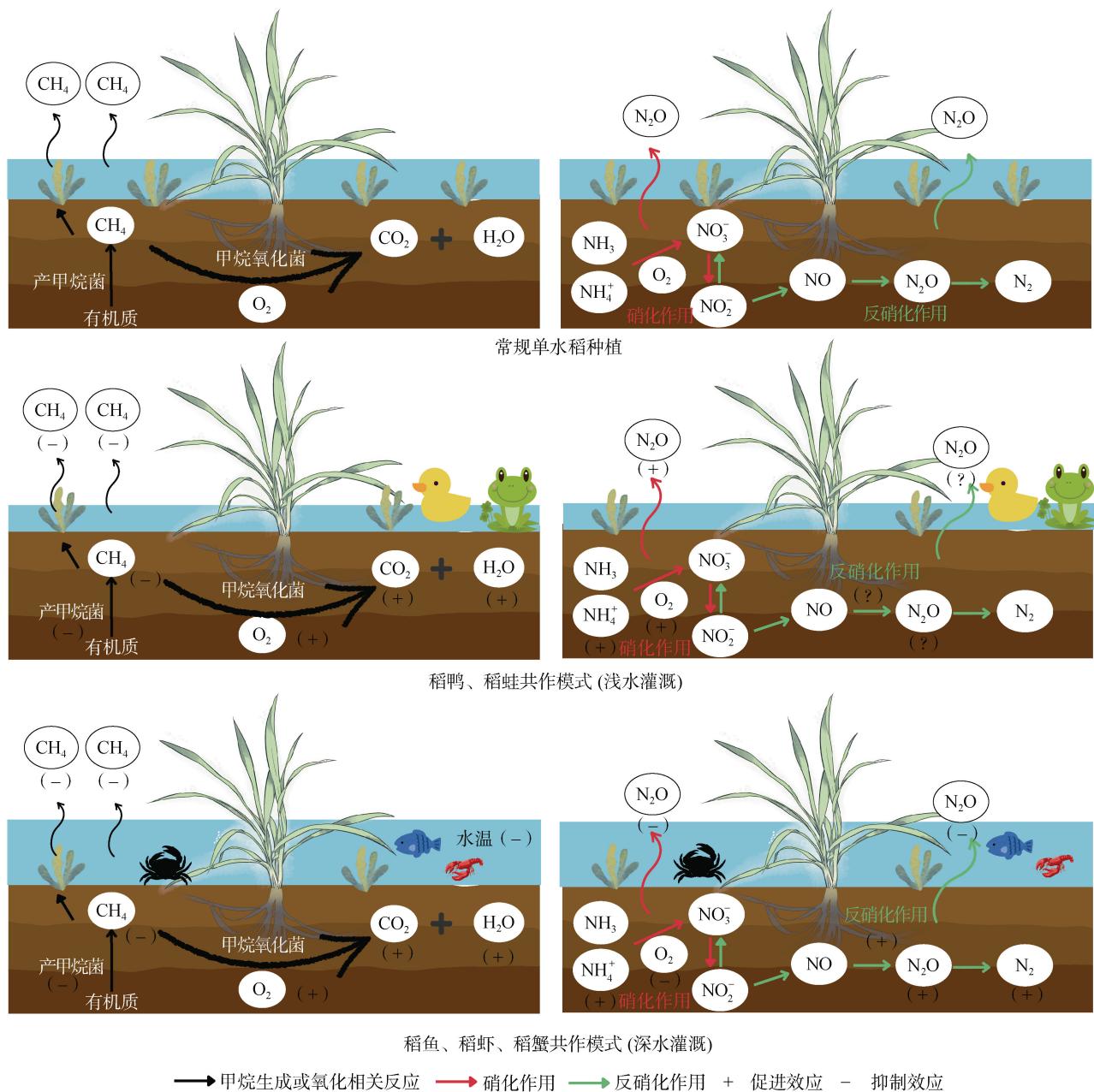


图1 生态综合种养对稻田甲烷与氧化亚氮排放的影响机制

Fig. 1 Mechanism analysis of CH_4 and N_2O emissions from paddy field with planting and breeding circular agricultural ecosystems

除共性原因外,稻鱼、稻虾、稻蟹模式下,稻田 CH_4 排放还受水层深度的影响。与稻鸭、稻蛙共作的浅水灌溉模式不同,稻鱼、稻虾、稻蟹等共作模式采用深水灌溉,利用稻田中下水层的空间和营养生态位,通常会维持 20~40 cm 的深度淹水环境^[2, 68]以保障共生动物的生长空间。虽然较高的水位会引起水中 DO 下降,但养殖鱼类的游动以及主流共作虾蟹品种(克氏原螯虾和中华绒螯蟹)在土壤中的掘洞行为,能够促进田面水、稻田土壤与外界的气体交换,进而提升水体 DO^[69]。在这两种作用的相互制衡下,土壤 DO 和 Eh 值总体不会发生显著变化。从另一角度来

看,深度淹水使水体中气泡、液相扩散作用以及水稻植株通气组织对 CH_4 的传输受到抑制,且减缓夏季水体升温,降低土壤温度,抑制产甲烷菌的活性,最终表现为对 CH_4 排放的抑制效应^[61-62, 70]。

现有研究中关于稻鱼、稻虾、稻蟹模式对稻田 CH_4 排放影响的研究结论存在不一致的情况。多数研究认为稻虾共作模式可降低田间 CH_4 排放,减排率为 9%~43.9%^[45, 60-63];但李青海等^[14]的研究中稻虾共作则表现出对稻田 CH_4 的增排效应,增幅高达 369.3%。基于荟萃分析方法的研究同样出现了不一致的结论,刘珂纯等^[48]认为和水稻单作相比,稻鱼共

作模式可降低 20.79% 稻田 CH_4 排放;然而 Sun 等^[45]的研究中稻鱼共作增加了 11.6% 的稻田 CH_4 排放。尽管多数研究都选取常规水稻单作作为参照系统,但是对于参照系统的水分管理设置不同,这是导致上述研究结论不一致的主要原因。当以节水灌溉的水稻单作模式作为参照系统时,生态综合种养模式往往会促进稻田 CH_4 排放。以稻鱼共作模式为例,袁伟玲等^[52]采用的常规管理方式中,水分管理模式与稻鱼共作处理一致,即整个养鱼期持续淹水,收鱼后(收稻前半个月)开始自然落干。而欧茜等^[58]的研究中,参照系统采用了当前水稻单作管理中更为常见的节水灌溉方式:浅水分蘖,寸水返青,分蘖末期晒田,孕穗期到乳熟期浅湿交替,成熟期干湿交替后排水落干。该模式已被证实与持续淹灌相比具有显著的 CH_4 排放控制效果。李清海等^[14]对比了中期晒田的水稻单作模式和长期淹水的稻虾共作模式下的稻田 CH_4 排放情况,发现长期淹水的稻虾共作模式下 CH_4 排放远高于中期晒田的水稻单作参照系统。张怡彬等^[64]同时对稻蟹共作、水稻单作(持续淹水)、水稻单作(中期晒田)这 3 种模式下的稻田 CH_4 排放进行比较后发现,以水稻单作(中期晒田)模式作为参照时,稻蟹共作表现出对 CH_4 排放的促进作用;而以水稻单作(持续淹水)模式作为参照时,稻蟹共作可使 CH_4 排放降低 13.5%。相较于种养模式的改变,稻田生态系统中的 CH_4 排放对水分管理方式的变化更为敏感。

2.2 对氧化亚氮排放的影响

与 CH_4 排放类似,探讨生态综合种养对稻田 N_2O 排放的影响时,可按水层深度将不同共作模式进行区分讨论。浅水灌溉主要应用于稻鸭及稻蛙两种生态综合种养模式。不论是基于荟萃分析或是田间监测的结果都表明,稻鸭共作模式在稻田 CH_4 减排的同时提升了 N_2O 排放^[9, 43, 45-47, 49-53]。一方面,鸭子的活动加速了水体、土壤及大气间的气体交换,水中 DO 上升,加速了 N_2O 生成与扩散释放;另一方面,鸭粪中较高浓度的 NH_4^+ 增加了稻田氮素输入,增加了硝化和反硝化作用的反应底物,硝化和反硝化作用增强,稻田 N_2O 排放上升^[9, 43, 46]。此外,也有学者认为共作系统中鸭对于水生植物的摄食降低了水生植物对于 DO 的消耗,DO 浓度上升促进了 N_2O 的生成^[56]。然而, Liu 等^[71]认为水生植物的存在对于稻田 N_2O 的排放没有显著影响。理论而言,稻蛙与稻鸭共作模式的淹水深度、动物行为方式相近,与单水稻种植相比对 N_2O 排放应表现为促进作用。但是, Fang 等^[65]和丁玉凌等^[13]的研究中,相较于水稻单作,稻蛙共作模

式下 N_2O 排放分别减排 1.84% ~ 25.33%(不同养殖密度下 N_2O 排放不同)和 41.06% ~ 63.12%(不同肥料配比下 N_2O 排放不同)。这主要是由于该两组研究中均在水稻种植期不同程度使用了有机肥替代化肥,因而产生了显著的 N_2O 减排效果^[13, 65]。

对于稻鱼、稻虾、稻蟹共作等深水灌溉的稻田综合种养模式,一方面水深增加降低了水中 DO 浓度;另一方面共作鱼、虾、蟹在水中的活动搅浑水体,减弱了水中藻类的光合作用,进一步降低 DO, 加剧水体和土壤中厌氧环境的形成,硝化作用受抑制,反硝化作用增强, N_2O 排放下降^[53]。Sun 等^[45]通过荟萃分析表明,稻鱼共作系统相较于水稻单作可降低 10.2% 的 N_2O 排放。李成芳等^[53]的田间监测试验结果也取得了相似的结论,与水稻单作相比,稻鱼共作降低 6.93% 的 N_2O 排放。穆红城等^[63]开展了单季稻-克氏原螯虾共作模式下两年的 N_2O 排放监测研究,结果显示与持续淹水的水稻单作模式相比,稻虾共作可降低 13.4% ~ 27.2% 的 N_2O 排放。有别于对 CH_4 排放影响结果的一致性,当选择中期烤田等优化水分管理的单稻种植模式为参照时,稻虾、稻蟹共作模式仍表现出显著的 N_2O 减排潜力,分别为 33.3% 和 16.7%^[14, 64]。

2.3 对全球增温潜势的影响

水稻种植生态系统中同时排放 CH_4 和 N_2O , 并且往往存在此消彼长的关系,通常使用全球增温潜势(GWP)为评价指标,以综合评估稻田生态系统中 CH_4 和 N_2O 排放对于气候变化的影响^[9, 14]。

虽然稻鸭共作模式引起 N_2O 排放的上升,但总体 N_2O 对于 GWP 的贡献远小于 CH_4 排放,该模式下 GWP 可降低 10.75% ~ 28.1%^[9, 43, 45, 47, 49]。排除因参照系统中水分管理设置不同对稻田综合种养模式下温室气体排放变化的影响,当水分管理方式相同时(即选择持续灌溉单稻种植为参照),稻虾、稻鱼、稻蟹模式对于稻田整体增温潜势变化表现为减缓效应^[44, 48-54, 56, 60-64]。但是相较于节水灌溉单稻种植模式,需要长期淹水的稻虾、稻蟹、稻鱼模式对于气候变化仍有较高影响^[14, 58, 64]。有限的关于稻蛙共作模式对 GWP 影响的研究中,该模式对于 CH_4 和 N_2O 均表现出减排效应,因此整体 GWP 显著低于单稻种植^[65]。总体而言,无论单稻种植或稻田综合种养模式下均排放 CH_4 和 N_2O 气体,并且往往呈现此消彼长的态势,但 CH_4 排放对 GWP 的贡献高于 N_2O , CH_4 的增减趋势决定稻田种植模式的改变对气候变化影响的趋势。

3 养殖管理条件对生态综合种养模式温室气体排放的影响

与水稻单作模式相同,稻田综合种养系统的温室气体排放受多种因素协同影响,其中CH₄排放与水稻生育期、水肥运筹,环境温度、DO、Eh、土壤有机碳含量、产甲烷菌及甲烷氧化菌活性等环境因子密切相关,N₂O排放与氮肥施用方式、环境温度、DO、pH、Eh等显著相关^[71]。对此,前人已进行了较为充分的论述^[23, 48],本文重点论述养殖管理条件对生态综合种养模式下CH₄及N₂O排放的影响。

3.1 共作品种

共作品种选择是稻田综合种养系统中重要的管理决策之一,同样影响CH₄、N₂O气体的产生与排放。在水稻品种选择方面,研究证实以渔稻1号为代表的高秆水稻通过根际泌氧促进了共作池塘底泥中CH₄氧化进而减少64.4%的CH₄排放,通过对池塘底泥中氮的吸收以及对反硝化过程的抑制效应减少76.2%的N₂O排放^[15]。理论而言,不同共作动物因活动方式、饲料需求等生理习性不同,对CH₄、N₂O的排放也有差异。以稻虾共作为例,同样养殖密度下水稻-澳龙共作模式下CH₄与N₂O排放显著高于水稻-克氏原螯虾模式^[61]。然而,目前对于其他共作模式下,不同动物品种对CH₄与N₂O排放影响的研究仍比较缺乏。

3.2 养殖密度

养殖密度是稻田综合种养模式下影响温室气体排放的关键管理因素之一^[43, 58, 72-73]。在适宜养殖密度范围内,共作系统中CH₄排放和GWP随着养殖密度上升而下降,更多的共生动物会摄食更多的好氧生物和杂草,稻田水中的DO水平升高,提升甲烷氧化菌活性。傅志强等^[74]通过设置每公顷150、225和300只鸭3组处理,发现CH₄排放随养鸭数量增加而下降,因为鸭子的活动改善了土壤通气状况,增加了水体的DO含量,提高土壤Eh,抑制产甲烷菌活性,进而减少CH₄产生与排放。罗加伟^[61]的研究表明当克氏原螯虾放殖密度为16 800尾/hm²,相较于8 400尾/hm²可获得更为显著的CH₄和GWP减排效果。Fang等^[65]的研究中稻蛙模式下温室气体减排效果随养殖密度升高而上升,与7 500~30 000只/hm²的养殖密度相比,60 000只/hm²时可获得最佳的CH₄与N₂O减排效果。欧茜等^[58]比较了两种投放密度下稻鱼共作系统CH₄排放,相较于3 000尾/hm²,6 000尾/hm²的投放密度可降低16.8%的周年CH₄排放。需要注意

的是,养殖密度过高则会带来CH₄、N₂O排放和GWP的上升。Hu等^[75]通过对鱼苗15万、30万及45万尾/hm²集约化养殖模式下的监测研究表明,CH₄和N₂O排放均随着养殖密度升高而上升,这可能是由于共作系统对CH₄和N₂O的排放同时存在正负两种效应,且两种效应相互制衡抵消,当养殖密度超过环境最大承载量时,过多的排泄物、残体、饲料引起环境中有机质和氮素输入量上升,削弱了共作模式对CH₄和N₂O的减排效应,导致CH₄和N₂O排放的升高。

3.3 淹水深度

稻田综合种养模式通常需要长期淹灌以满足水生动物的生长需要。作为长期淹灌的稻田,水位深度是决定长期淹水稻田CH₄通量大小的重要因素之一^[2, 26, 59, 64]。总体而言,稻田综合种养系统中温室气体排放与水深的关系较为复杂,在气体传输受阻、产甲烷菌与甲烷氧化菌活性变化、共作动物扰动等多重因素的影响下,一般深度淹水对CH₄排放主要表现为抑制效应。此外,水深的变化可能会影响水体的DO分布进而间接影响氮素转化和循环过程,从而改变N₂O的产生与排放。与长期淹灌的单水稻种植系统类似,稻鸭、稻鱼等共作模式下CH₄、N₂O累积排放量随着淹水深度而降低^[68, 75]。Wang等^[43]的试验结果表明,较高的降雨量水平引起田间水位升高,进而对产甲烷菌代谢产生抑制作用,共作系统中CH₄排放下降。也有学者认为将稻田水层深度控制在11.5 cm以下可有效降低稻鱼共作系统温室气体排放^[74]。

4 稻田综合种养系统碳足迹评估进展

近年来随着碳足迹评价在农业生产领域的运用,越来越多的学者采用全生命周期评价(LCA)方法对稻田综合种养系统碳足迹开展评估^[13, 70, 76-79],集中在稻虾、稻鱼以及稻蛙共作3种模式。基于现有的研究,稻虾共作模式的碳足迹为CO₂当量5 499.04~16 137.92 kg/hm²,相较于水稻单作系统碳足迹排放变化为-6.9%^[70]~+43.33%^[76];稻渔共作系统碳足迹为CO₂当量5 988.42~12 111 kg/hm²,相较于水稻单作系统碳足迹变化-16.19%^[77]~-5.99%^[80];稻蛙共作模式下碳足迹为CO₂当量5 632.99~5 985.2 kg/hm²^[13]。自然条件与管理模式的不同是造成碳足迹结果差异的主要原因^[76-77, 81]。此外,系统边界、排放因子、功能单位等LCA核算方法的选择对于碳足迹评估结果也有重要影响。

系统边界方面,稻田综合种养系统的碳足迹主要涵盖两部分:一是田间生产过程中CH₄与N₂O的直

接排放；另一方面则包括由于能源、物料等投入引起的间接温室气体排放，除水稻生产所需种子、肥料、农药、柴油、电力等能源物料外，还包括动物幼体以及饵料生产等引起的碳排放^[76-77, 81]，稻蛙系统中还需考虑为了防备蛙被鸟类或黄鼠狼吃掉所搭建的尼龙材质围网和天网生产所引起的碳排放^[13]。目前，多数关于稻田综合种养碳足迹的研究并没有考虑土壤有机碳的变化^[70, 76, 78]，仅丁玉凌等^[13]在核算稻蛙共作模式下碳足迹时核算了土壤有机碳。仅考虑碳排放时，稻蛙模式下单位面积碳足迹为 CO₂ 当量 10 128.15 ~ 11 367.67 kg/hm²，而考虑种植过程中紫云英、蛙粪等有机质输入引起的土壤有机碳增加后，单位面积碳足迹显著下降至 CO₂ 当量 5 632.99 ~ 5 985.2 kg/hm²^[13]。尽管该研究中使用一年的土壤有机碳变化的结果可能会造成对固碳效应的高估，但仍说明生态技术的固碳作用对于稻田综合种养模式碳足迹的降低具有不可忽视的贡献。

在评价稻田综合种养系统碳足迹下降潜力时，功能单位的选择至关重要。虽然稻田综合种养在 CH₄ 和 GWP 减排方面具有不可忽视的效果，但当以单位面积为功能单位时，该模式额外的饲料、电力能源消耗引起碳排放升高往往会削减其碳减排效应^[70, 76-77]。然而，当以单位产值、单位利润或单位营养密度为功能单位时，因稻田综合种养模式具有更高的经济产值和营养密度输出，碳足迹减排效应则会进一步凸显^[70, 76-77]。例如，刘金根等^[77]的研究中，尽管相较于水稻单作，稻虾模式可降低田间 9.4% 的 CH₄ 排放，但渔业养殖大幅增加了电力消耗、消毒剂使用、饵料投喂等引起的间接碳排放，导致稻鱼模式下单位面积碳足迹较水稻单作上升了 43.33%，当采用单位产值或单位利润碳足迹为功能单位时，稻鱼共作模式较水稻单作碳足迹下降 60.65%、45.02%。

从碳足迹评价结果来看，虽然 CH₄ 直接排放仍然是稻田综合种养模式碳足迹最主要的组成部分^[13, 70, 77]，但是由于农业生产资料生产加工和能源消耗引起的间接温室气体排放同样不容忽视。稻鱼、稻虾系统中还需关注水产养殖灌溉耗电和饲料生产引起的碳排放^[70, 77]，稻蛙系统中尼龙网生产所引起的碳排放占比较高^[13]。蒋榕等^[70]通过敏感性分析揭示了稻田综合种养系统碳足迹对 CH₄ 排放量、灌溉电力消耗、饲料投入最敏感，基于田间水肥运筹方式优化的 CH₄ 减排措施、光伏发电灌溉等低碳灌溉技术、低碳化饲料生产工艺等可作为未来稻田综合种养全生命周期碳减排的主要突破方向^[70, 78]。

由于国内现有的排放因子数据库中缺乏部分农业生产投入品的排放因子数据，如农药和水产动物饲料的排放因子，目前关于稻田综合种养系统碳足迹的核算工作主要依靠 Ecoinvent 等国际数据库开展，是制约评价结果准确性的主要因素^[77-78]。

5 结论与展望

近二十年间，国内外学者在稻田综合种养模式下温室气体排放评估方面开展了较为广泛的研究。稻田综合种养系统中温室气体排放受到气体传输路径、产甲烷菌与甲烷氧化菌活性、硝化作用、反硝化作用、共作动物的扰动、环境温度、土壤通气状况、Eh 及 DO 等多种复杂因素的协同影响。当水分管理方式一致时，与单水稻种植模式相比，稻田综合种养模式通常对 CH₄ 排放表现出抑制效应。在环境承载能力范围内，增加养殖密度能够进一步降低田间 CH₄ 的排放。尽管现有研究对于稻田综合种养模式下 N₂O 排放变化的结论存在不一致性，但以 GWP 作为评价指标来看，稻田综合种养系统在稻田温室气体减排方面的潜力不可忽视。为进一步挖掘稻田综合种养模式减排价值，建议在以下方面深化研究：

- 1) 开展稻田综合种养模式下温室气体排放的长期监测。当前关于稻田综合种养模式下温室气体排放的研究，多数仅包含一至两年的监测工作。然而，生态系统碳氮循环是一个长期且缓慢的过程，因此建议开展长期观测，以系统长时效地获取更具代表性的监测数据，阐明稻田综合种养系统温室气体排放规律，进而构建科学、精准的温室气体排放评估模型，为未来不同自然条件、管理模式下稻田综合种养系统温室气体排放评估提供方法学支撑。

- 2) 开展更广泛的共作模式下温室气体排放的监测与评估。目前，稻田综合种养模式下温室气体排放的研究集中在稻鸭、稻鱼、稻虾共作模式，在稻蟹、稻蛙共作等领域的研究相对有限。此外，深入探究不同养殖品种(例如不同种类的共作虾、共作鱼等)对于温室气体排放的影响；针对不同共作类型，结合当地土壤、气候等自然条件，平衡动植物产量和田间温室气体排放的关系，因地制宜地探索出适宜的养殖密度、淹水深度以及养分运筹模式，对于进一步挖掘稻田综合种养模式的温室气体减排潜力具有重要意义。

- 3) 逐步建立并完善我国碳足迹排放因子数据库，明确不同生产路径下农业生产投入品排放因子数据，以提高稻田综合种养模式碳足迹评估结果的准确性。此外，在稻田综合种养模式碳足迹评估工作中建

议涵盖土壤有机碳变化情况以更加客观、科学地评估稻田综合种养模式碳足迹。基于现有碳足迹评估结果,未来应在基于田间水肥运筹模式优化的CH₄减排措施、灌溉电力供给低碳化、农资生产工艺低碳化等方面的深化研究,以进一步降低我国稻田综合种养系统全生命周期碳排放。

参考文献:

- [1] 生态环境部. 中华人民共和国气候变化第一次双年透明度报告[R]. 北京: 生态环境部, 2024.
- [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] 章家恩, 韦生宝, 刘兴, 等. 稻渔综合种养研究进展与展望[J]. 华南农业大学学报, 2024, 45(6): 812–824, 808.
- [4] 陈璐, 陈灿, 黄璜, 等. 厢作免耕下生态种养对稻田CH₄和N₂O排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1354–1365.
- [5] Li Y F, Wu T Y, Wang S D, et al. Developing integrated rice-animal farming based on climate and farmers choices[J]. Agricultural Systems, 2023, 204: 103554.
- [6] 戴然欣, 赵璐峰, 唐建军, 等. 稻渔系统碳固持与甲烷排放特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(4): 616–629.
- [7] 张琴, 陈灿, 黄璜, 等. 稻-龟-鳖-鱼综合种养模式对稻田病虫草害和水稻产量、品质的影响[J]. 河南农业科学, 2024, 53(10): 37–47.
- [8] 吕明睿, 高子健, 张欣雨, 等. 不同稻蟹共作模式下的氮磷平衡及生态经济效益研究[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(1): 108–117.
- [9] 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[J]. 土壤, 2023, 55(6): 1279–1288.
- [10] 王强盛, 余坤龙, 倪雪颖, 等. 我国稻渔综合种养的发展过程及技术趋势[J]. 中国稻米, 2021, 27(4): 88–91.
- [11] 管卫兵, 刘凯, 石伟, 等. 稻渔综合种养的科学范式[J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5451–5464.
- [12] 于雪薇. 稻虾综合种养模式经济效益的空间差异及影响因素研究——基于湖南、湖北、江苏三省比较分析[D]. 南京: 南京农业大学, 2022.
- [13] 丁玉凌, 徐书含, 刘文超, 等. 稻蛙生态种养模式碳足迹评价[J]. 华南农业大学学报, 2024, 45(6): 939–948.
- [14] 李清海, 谢青芸, 叶佩. 稻虾种养模式下稻田温室气体排放规律研究[J]. 湖北农业科学, 2023, 62(10): 30–36.
- [15] Li F B, Qian H Y, Yang T, et al. Higher food yields and lower greenhouse gas emissions from aquaculture ponds with high-stalk rice planted[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(33): 12270–12279.
- [16] 张坚超, 徐镱钦, 陆雅海. 陆地生态系统甲烷产生和氧化过程的微生物机理[J]. 生态学报, 2015, 35(20): 6592–6603.
- [17] 陈浩田, 秦缘, 钟笑涵, 等. 水稻根系和土壤性状与稻田甲烷排放关系的研究进展[J]. 中国水稻科学, 2024, 38(3): 233–245.
- [18] Cai Y F, Zheng Y, Bodelier P L E, et al. Conventional methanotrophs are responsible for atmospheric methane oxidation in paddy soils[J]. Nature Communications, 2016, 7: 11728.
- [19] Frenzel P, Rothfuss F, Conrad R. Oxygen profiles and methane turnover in a flooded rice microcosm[J]. Biology and Fertility of Soils, 1992, 14(2): 84–89.
- [20] Fechner E J, Hemond H F. Methane transport and oxidation in the unsaturated zone of a Sphagnum peatland[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1992, 6(1): 33–44.
- [21] 夏龙龙, 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.
- [22] Wang J Y, Zhang X L, Xiong Z Q, et al. Methane emissions from a rice agroecosystem in South China: Effects of water regime, straw incorporation and nitrogen fertilizer[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2012, 93(1): 103–112.
- [23] 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.
- [24] 张学智, 王继岩, 张藤丽, 等. 中国农业系统甲烷排放量评估及低碳措施[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(3): 200–208.
- [25] 蔡炜, 秦缘, 陈浩田, 等. 干湿交替灌溉和生物质炭施用对稻田碳汇与甲烷排放的影响及其机理研究进展[J]. 中国稻米, 2024, 30(6): 7–14.
- [26] 李茂柏, 曹黎明, 程灿, 等. 水稻节水灌溉技术对甲烷排放影响的研究进展[J]. 作物杂志, 2010(6): 98–102.
- [27] Zhang G B, Yang Y T, Huang Q, et al. Reducing yield-scaled global warming potential and water use by rice plastic film mulching in a winter flooded paddy field[J]. European Journal of Agronomy, 2020, 114: 126007.
- [28] 张怡, 吕世华, 马静, 等. 水稻覆膜节水综合高产技术对稻田CH₄排放的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(6): 935–941.
- [29] Nie T Z, Chen P, Zhang Z X, et al. Effects of irrigation method and rice straw incorporation on CH₄ emissions of paddy fields in Northeast China[J]. Paddy and Water Environment, 2020, 18(1): 111–120.
- [30] 朱雅婷, 倪远之, 张敏, 等. 不同秸秆还田量对上海地区稻田甲烷排放的影响[J]. 浙江农业学报, 2023, 35(10): 2436–2445.
- [31] Pandey A, Mai V T, Vu D Q, et al. Organic matter and water management strategies to reduce methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in Vietnam[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 196: 137–146.
- [32] Yagi K, Minami K. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1990, 36(4): 599–610.
- [33] 张继宁, 张鲜鲜, 孙会峰, 等. “双碳”背景下生物炭基肥的研究现状及展望[J]. 浙江农业科学, 2023, 64(12): 2825–2830.

- [34] 王妙莹, 许旭萍, 王维奇, 等. 炉渣与生物炭施加对稻田土壤产甲烷菌群落结构的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(8): 2816–2828.
- [35] 张强, 巨晓棠, 张福锁. 应用修正的 IPCC2006 方法对中国农田 N₂O 排放量重新估算[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 7–13.
- [36] Shcherbak I, Millar N, Robertson G P. Global metaanalysis of the nonlinear response of soil nitrous oxide (N₂O) emissions to fertilizer nitrogen[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(25): 9199–9204.
- [37] 余锋. 脲酶/硝化抑制剂对水稻产量和温室气体排放的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2022.
- [38] 张闻汉, 陈照明, 张金萍, 等. 硝化抑制剂对稻田土壤氧化亚氮排放及硝化作用的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(4): 820–827.
- [39] 曾科, 王书伟, 朱文彬, 等. 不同硝化抑制剂对稻季 N₂O 排放、NH₃ 挥发和水稻产量的影响[J]. 土壤, 2023, 55(3): 503–511.
- [40] 陈云, 孟轶, 翁文安, 等. 硝化抑制剂双氰胺施用对水稻产量和温室气体排放的影响[J]. 中国稻米, 2024, 30(1): 26–29, 35.
- [41] 韩语燕, 白海霞, 段若男, 等. 大气 CO₂ 浓度和温度升高下小麦季施用缓释氮肥对大豆季 N₂O 排放的后效作用[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(3): 498–507.
- [42] 王梦洁, 蒋文婷, 徐有祥, 等. 长期生物炭添加对稻田土壤细菌和真菌反硝化 N₂O 排放的影响[J]. 环境科学, 2024, 45(8): 4923–4931.
- [43] Wang C, Shi X Y, Qi Z M, et al. How does rice-animal co-culture system affect rice yield and greenhouse gas? A meta-analysis[J]. Plant and Soil, 2023, 493(1): 325–340.
- [44] 李帅帅, 张雄智, 刘冰洋, 等. Meta 分析湖南省双季稻田甲烷排放影响因素[J]. 农业工程学报, 2019, 35(12): 124–132.
- [45] 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.
- [46] Feng L, Wang R Y, Wang R, et al. Life cycle assessment of rice-duck co-culture systems[J]. Ecosystem Health and Sustainability, 2024, 10: 166.
- [47] Du C C, Hu L L, Yuan S, et al. Ratoon rice-duck co-culture maintains rice grain yield and decreases greenhouse gas emissions in Central China[J]. European Journal of Agronomy, 2023, 149: 126911.
- [48] 刘珂纯, 王旭东, 赵鑫, 等. 我国稻田甲烷主要减排措施的技术效应与影响因素[J]. 吉林农业大学学报, 2022, 44(1): 61–70.
- [49] Sheng 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, 2018, 25(23): 22744–22753.
- [50] 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.
- [51] 展茗, 曹湊贵, 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.
- [52] 袁伟玲, 曹湊贵, 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.
- [53] 李成芳, 曹湊贵, 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.
- [54] 向平安, 黄璜, 黄梅, 等. 稻-鸭生态种养技术减排甲烷的研究及经济评价[J]. 中国农业科学, 2006, 39(5): 968–975.
- [55] 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, 23(5): 929–934.
- [56] 陈慧娜. 不同稻田生态种养模式对田间甲烷排放及土壤养分的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2020.
- [57] 刘小燕, 黄璜, 杨治平, 等. 稻鸭鱼共栖生态系统 CH₄ 排放规律研究[J]. 生态环境, 2006, 15(2): 265–269.
- [58] 欧茜, 熊瑞, 周文涛, 等. 稻鱼共生养鱼密度对稻田甲烷排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(9): 2174–2182.
- [59] 李娜娜. 中国主要稻田种养模式生态分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [60] 姜亚杰, 秦鹏铭, 李准, 等. 长期秸秆还田对稻虾共作系统稻季甲烷排放的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(9): 1451–1461.
- [61] 罗加伟. 稻虾共作下龙虾品种和密度对温室气体排放及碳足迹的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2023.
- [62] 徐祥玉. 三种中稻模式稻田温室气体排放及影响因子研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
- [63] 穆红城, 成永旭, 徐旭, 等. 不同小龙虾密度对养殖田块温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2025, 4(1): 204–216.
- [64] 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.
- [65] Fang K K, Gao H, Sha Z M, et al. Mitigating global warming potential with increase net ecosystem economic budget by integrated rice-frog farming in Eastern China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 308: 107235.
- [66] Fang K K, Dai W, Chen H Y, et al. The effect of integrated rice-frog ecosystem on rice morphological traits and methane emission from paddy fields[J]. Science of The Total Environment, 2021, 783: 147123.
- [67] Wang W, Wu X H, Deng Z M, et al. Can integrated rice-duck farming reduce CH₄ emissions [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(1): 1004–1008.
- [68] 王安崇. 稻-鱼复合种养中稻田环境对灌水深度和养鱼密度的响应[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2023.

- [69] 赵建婷, 方贤滔, 邹建文, 等. 稻虾共作模式下土壤甲烷产生与氧化潜力及其对温度的响应特征[J]. 土壤学报, 2024, 61(2): 539–548.
- [70] 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(10): 1577–1587.
- [71] Liu S W, Hu Z Q, Wu S, et al. Methane and nitrous oxide emissions reduced following conversion of rice paddies to inland crab-fish aquaculture in southeast China[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(2): 633–642.
- [72] 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.
- [73] Zhu Z, Zhu Y G, Chan F K S, et al. A systematic review of factors affecting the performance of the rice-aquaculture system and regional perspectives[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2024, 54(24): 1757–1776.
- [74] 傅志强, 黄璜, 廖晓兰, 等. 养鸭数量对 CH_4 排放的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2107–2114.
- [75] Hu Y, Yang T, Liu Y B, et al. High fish stocking density weakens the effects of rice-fish co-culture on water eutrophication and greenhouse gas emissions[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2022, 233(6): 222.
- [76] 丁维新, 袁俊吉, 刘德燕, 等. 淡水养殖系统温室气体 CH_4 和 N_2O 排放量研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 749–761.
- [77] 刘金根, 杨通, 冯金飞. 稻-虾(克氏原螯虾)综合种养模式的碳足迹分析[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(8): 1041–1049.
- [78] 戴林秀, 徐强, 彭翔, 等. 稻渔共作模式碳足迹评价及减排对策分析[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(9): 1971–1980.
- [79] 梅威, 武慧君, 方维鑫, 等. 稻虾共作模式碳氮足迹分析——以淮南市为例[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(12): 3022–3033.
- [80] 徐珂, 易小燕, 张英楠, 等. 哈尼梯田区稻鱼共作模式碳足迹和经济效益综合评价[J]. 生态学报, 2024, 44(23): 10619–10630.
- [81] 夏龙龙, 道超普, 朱春梧, 等. 中国粮食生产的温室气体减排策略以及碳中和实现路径[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1277–1288.