

稻鸭共作中 CH_4 和 N_2O 排放规律及影响因素

温婷, 赵本良, 章家恩

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1389>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

淡水养殖系统温室气体 CH_4 和 N_2O 排放量研究进展

丁维新, 袁俊吉, 刘德燕, 陈增明

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 749–761 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1388>

水旱轮作系统中土壤 CH_4 和 N_2O 排放研究进展

熊丽萍, 吴家梅, 纪雄辉, 彭华, 李尝君

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 863–871 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0101>

水分和秸秆管理减排稻田温室气体研究与展望

周胜, 张鲜鲜, 王从, 孙会峰, 张继宁

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 852–862 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0060>

氮肥模式对稻田温室气体排放和产量的影响

张枝盛, 汪本福, 李阳, 杨晓龙, 胡杨, 王冷菲, 程建平

农业环境科学学报. 2020, 39(6): 1400–1408 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1185>

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

夏龙龙, 颜晓元, 蔡祖聪

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 834–841 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0108>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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.



开放科学 OSID

稻鸭共作中CH₄和N₂O排放规律及影响因素

温 婷, 赵本良*, 章家恩*

(华南农业大学资源环境学院, 广东省生态循环农业重点实验室, 农业部华南热带农业环境重点开放实验室, 广东省现代生态农业与循环农业工程技术研究中心, 广州 510642)

摘 要: 稻鸭共作是目前稻田种养中的一种典型模式, 其主要特点是利用鸭子在稻田内的活动, 实现经济效益和生态效益的双赢。鸭子的存在丰富了生物多样性, 充分利用了稻田生态位。鸭子的持续运动、觅食、排泄等活动会影响稻田温室气体甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)的排放和全球增温潜势(GWP)。本文结合稻鸭共作中鸭子对稻田环境的扰动行为, 从水体、土壤、CH₄和N₂O转化功能菌及种植技术等角度, 总结探讨了稻鸭共作中温室气体CH₄和N₂O产生、输送和释放的过程与机理。针对当前稻鸭共作温室气体排放研究中存在的问题, 提出了一系列建议和展望, 以期为稻田种养温室气体减排的研究提供参考。

关键词: 稻鸭共作; 温室气体; 排放途径; 生物扰动

中图分类号: X51 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)07-1442-09 doi:10.11654/jaes.2019-1389

Emission pathways and influencing factors for CH₄ and N₂O from rice-duck farming

WEN Ting, ZHAO Ben-liang*, ZHANG Jia-en*

(College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Eco-Circular Agriculture, Key Laboratory of Agro-Environment in the Tropics, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Engineering Research Center for Modern Eco-agriculture and Circular Agriculture, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Rice-duck farming is one of the primary planting-breeding models in practice which provides both economic value and ecological benefits through duck activities in paddy fields. Not only can the ducks enrich the biodiversity in paddy fields, but also the ecosystem niche is fully utilized. The continuous movement, feeding activities, and duck excretions in paddy fields influence methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) emissions and weaken the global warming potential of the ecosystem. Therefore, the study discussed the process of greenhouse gas production, transport and release in rice-duck farming with respect to the responses of water, soil, the functional bacterial community in CH₄, N₂O transformation and the planting techniques in rice-duck farming based on the perturbation of ducks' activities on paddy environment. Considering the current research weaknesses in rice-duck farming, the study put forward a series of suggestions on mitigation of greenhouse gas emission in the planting-breeding models to provide scientific reference for future research.

Keywords: rice-duck farming; greenhouse gas; emission pathways; biological disturbance

收稿日期: 2019-12-18 录用日期: 2020-03-31

作者简介: 温 婷(1992—), 女, 山西人, 硕士研究生, 主要从事农业生态学研究。E-mail: 775127294@qq.com

*通信作者: 赵本良 E-mail: blzhao@scau.edu.cn; 章家恩 E-mail: jeanzh@scau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(31770484, U1701236); 广东自然科学基金项目(2016A030313410); 广东科技计划项目(2015B090903077, 2016A02010094, 2019B030301007); 广东高校青年教师计划(YQ2015026); 广州市科技计划项目(201506010042, 201604020062)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (31770484, U1701236); Natural Science Foundation of Guangdong Province (2016A030313410); Science and Technology Program of Guangdong Province (2015B090903077, 2016A02010094, 2019B030301007); Guangdong Funds for Young Teachers (YQ2015026); Guangzhou Science and Technology Program (201506010042, 201604020062)

温室气体甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)的排放已成为近年来全球气候变化的研究热点。由于CH₄和N₂O的单位分子增温潜势分别是CO₂的28倍和265倍^[1],且其浓度分别以每年约0.6%和0.2%~0.3%的速度增长^[2],因此,二者对地球生态系统的能量收支与全球变暖有着重要的影响。农业活动是CH₄和N₂O的一个重要来源,其产生的CH₄和N₂O分别占全球人为排放总量的45%~50%和20%~70%^[3-4]。水稻种植作为重要的农业生产方式,全球种植面积超过1.35亿hm²^[3]。我国是世界上水稻种植面积最大的国家之一,约2 900万hm²,分别占世界水稻种植面积的28%和全国耕地总面积的27%左右^[4]。稻田释放出的CH₄占农业活动总排放量的5%~19%^[5-8],N₂O占11.4%^[5,9]。因此,减少稻田CH₄和N₂O的排放量这一重要问题受到国际社会的普遍关注。

稻田种养是一种在传统稻田养殖基础上构建的生态循环农业模式,如稻鸭、稻鱼、稻鸭鱼等^[10-11],其中,稻鸭共作已在中国农耕文化中传承千余年^[12],它将水稻(种植)与鸭子(养殖)有机结合,使稻田生境由“静”变“动”,丰富了稻田生物多样性,充分利用稻田的时空生态位。鸭子好动、勤觅食的生活习性,具有搅动土壤、中耕、除草作用,并增加了土壤养分、改善了作物群体的通风透光条件,产生显著的经济效益和社会效益^[13-15]。近年来,国内外对稻田CH₄和N₂O排放的研究,大都集中在种植方式、品种选用、秸秆还田、施肥措施及水分管理等方面^[16-21]。而对于稻鸭共作中的温室气体排放规律和作用机制仍缺乏系统总结。为此,本文分析了稻鸭共作中CH₄和N₂O的排放效应特征,从养殖动物对水、土、植株及微生物等层面分析了影响CH₄和N₂O排放的相关因素,旨在为稻鸭共作的温室气体排放研究提供参考。

1 稻鸭共作CH₄排放及其影响因素

1.1 稻鸭共作中CH₄的产生与排放情况

稻田是CH₄的主要排放源之一。全球稻田多半是以淹水的形式存在,稻田灌水期间需要保持一定的水层,水层将土壤与大气隔离,形成了有利于CH₄产生的厌氧环境。当土壤氧化还原电位(Eh)小于-160 mV且有碳源供应时^[22],产甲烷菌的活性提高,不断分解有机碳产生CH₄^[23-24]。淹水土壤CH₄的产生有两条主要途径^[25-26]:一个是在专性矿质化学营养产甲烷菌的参与下,以H₂或有机分子作为H供体还原CO₂形成CH₄,即:CO₂+4H₂→CH₄+2H₂O;另一个是在甲基营养

产甲烷菌的参与下,对乙酸的脱甲基作用,即:CH₃COOH→CH₄+CO₂,这是CH₄形成的主要途径^[27]。厌氧环境中,水稻植株根系分泌物和脱落物为主的有机物质和土壤有机质是CH₄排放的基础^[28]。尽管稻田土壤整体以淹水还原条件为主,但在土水界面及根土界面也存在氧化区域,导致土壤中产生的CH₄在排放至大气前有大约50%~90%被氧化^[29-34]。因此,稻田CH₄的排放是土壤中CH₄产生、氧化和传输的最终结果(图1)。稻田中产生的CH₄除去水稻根际和土、水界面氧化及土壤中CH₄被吸附后的剩余量以稻株输送、液相扩散和气泡逸出的形式传向大气,这些过程受到水稻生长状况、气温、土壤有机质、土壤氧化还原电位、土壤酸碱度等因素影响^[13,35-36]。当水稻处于分蘖期时,发达的根系以及发育良好的通气组织提高了稻株排放CH₄的效率,达到排放高峰;乳熟期时土壤中部分有机质及养分的消耗使得产甲烷菌的底物减少^[37],该时期的排放峰值低于分蘖期。

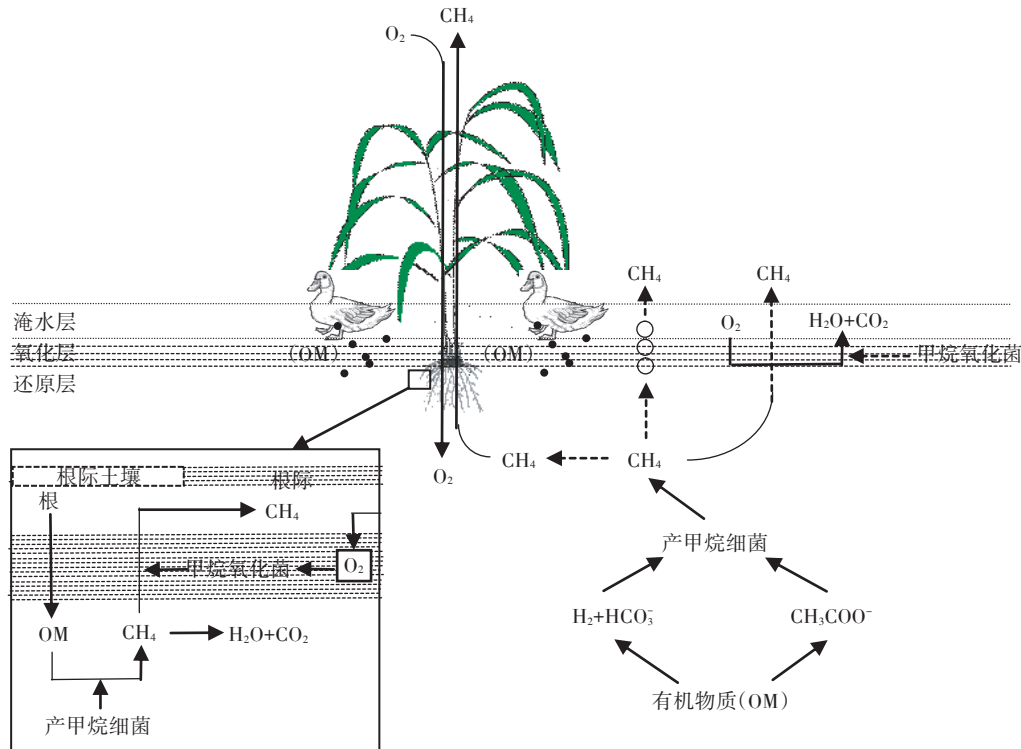
稻鸭共作相比水稻单作能够减少CH₄排放,尤其在CH₄排放高峰期的减排效果最为明显。研究表明,稻鸭共作中CH₄排放高峰时期是分蘖期和乳熟期^[13,38]。稻鸭共作CH₄排放量介于水稻单作的0.7~0.9倍^[30],机插水稻条件下的稻鸭共作CH₄排放量比常规水稻减少约8%~16%^[39],免耕条件下的养鸭稻田比不养鸭稻田CH₄排放量减少约10%^[40],宽窄行栽插水稻条件下的稻鸭共作CH₄年排放通量比水稻单作减少约25%^[41],常规条件下稻鸭共作的CH₄排放量减少约20%~30%^[38-39,42]。

1.2 稻鸭共作中CH₄排放影响因素

1.2.1 水体溶解氧和电导率对稻鸭共作中CH₄排放的影响

在稻鸭共作中,鸭子活动提高了稻田水体的溶解氧含量,进而抑制了CH₄的产生和释放。主要原因在于:鸭子头部在水面以上,其呼吸作用不消耗水体的溶解氧,反而鸭子搅动田面水会使水体溶解氧增多,虽然鸭子取食减少了水体藻类^[36,43],在一定程度上抑制水生植物光合释氧,但总体上鸭子对水体溶氧含量的正效应远大于负效应。研究表明,与水稻单作(5.81±1.00) mg·L⁻¹相比,稻鸭共作中水体溶解氧含量(7.09±1.83) mg·L⁻¹明显增加^[44],CH₄的产生和排放量减少。

在水稻分蘖前期,稻鸭共作中稻田水体电导率低于采用基肥法的水稻单作,其原因在于鸭子小,粪便量少,水体营养物质浓度低^[45],但到后期,鸭子长大,

图1 稻鸭共作CH₄的产生与排放过程Figure 1 Production and emission of CH₄ in rice-duck farming system

粪便量增多且活动量增强,在提高水体溶解氧的同时增加了土壤有机物质含量,从而增加了甲烷氧化菌的数量及活性,氧化了部分CH₄^[39,46]。

1.2.2 土壤氧化还原电位对稻鸭共作中CH₄排放的影响

土壤氧化还原电位(Eh)是影响稻田甲烷排放的重要因素。单一种植时,稻田淹水一段时间后随着土壤氧化还原电位的迅速下降,CH₄排放量迅速增加^[47-48]。但在稻鸭共作中,鸭子频繁地踩踏土壤和田间觅食,不仅起到了中耕松土作用,还增强了土壤的氧化特性。鸭子的引入使土壤Eh上升,进而在一定程度上抑制了CH₄的形成^[36]。特别是,中期水层变浅或短期烤田时,鸭子活动使得进入土壤表层的氧气增多,土壤氧化还原电位开始升高,这更有利于CH₄的氧化,从而减少了CH₄的排放。

1.2.3 土壤微生物对稻鸭共作中CH₄排放的影响

鸭子活动影响了稻田CH₄排放高峰期甲烷功能菌的数量。单一种植时,水稻分蘖盛期生长旺盛,光合作用强,根系分泌的大量碳水化合物、有机酸和氨基酸等被土壤发酵型细菌分解,为产甲烷菌提供丰富底物,使得水稻分蘖盛期的产甲烷菌数量显著增加;在稻鸭共作中,鸭子的活动使得产甲烷菌菌体数量低

于水稻单作,通过稀释培养法和滚管法计数发现,稻鸭共作中土壤产甲烷菌数量比单作降低20.0%~96.9%和33.3%~98.1%^[49]。甲烷氧化菌的活动有助于降低CH₄排放,其氧化能力一般大于CH₄在土壤中的扩散能力,在土壤氧充足的条件下,绝大部分的CH₄都会被氧化^[45,50]。水稻根系的径向泌氧可以形成根际氧化层,在稻鸭系统共作中,鸭子对水稻植株地上部的机械刺激促进了水稻根系泌氧能力^[51],有助于氧化层的扩大,增强甲烷氧化菌活性。鸭子的觅食、游动等行为使得大气氧也在水层扩散,在水土界面形成了很薄的氧化层,为甲烷氧化菌的活动进一步提供了条件,当土壤生成的CH₄扩散到该区域时,平均80%的CH₄都会被甲烷氧化菌氧化^[52]。

1.2.4 稻田水位深度和土壤温度对稻鸭共作中CH₄排放的影响

水位深度和土壤温度是决定CH₄排放通量大小的主要原因^[53]。研究表明,稻田内水体越深,CH₄排放量越少^[48]。在稻鸭共作中,鸭子的投放以及稻田水层的加深导致水体及土壤温度更加均匀,当土壤温度低于大多数甲烷菌微生物活动最适温度(35℃~37℃)时,产甲烷菌活性减弱,有机质分解减缓,从而减少了CH₄的产生^[54-56]。深水改变CH₄的传输路径和传输效率,削

弱气泡和液相扩散两条通道传输CH₄的能力,导致CH₄的排放量降低。同时深水也影响水稻植株的呼吸速率和蒸腾速率,从而减少以植株为主要通道的CH₄排放量^[57],导致总CH₄排放量减少。

1.2.5 水稻种植及鸭子放养密度对稻鸭共作中CH₄排放的影响

水稻种植和鸭子放养密度对稻鸭共作的CH₄排放影响显著。研究表明,稻鸭共作中采用大株稀植、宽行宽株的栽插方式可以方便鸭子在植株间穿行和避免稻株损伤^[58-59]。水稻植株是稻田CH₄排放的途径之一,稀植会降低CH₄的排放。另外,稻田中鸭子放养密度和CH₄排放量成反比。与单作相比,每667 m²中投放10只和20只鸭子的稻田CH₄排放量分别降低了21.73%和44.29%。稻田内鸭子数量的增加提高了对稻田生境的扰动,高溶解氧含量降低了土壤还原物质含量,使得土壤中CH₄排放量随之显著减少^[60]。

2 稻鸭共作N₂O排放及其影响因素

2.1 稻鸭共作中N₂O产生与排放情况

稻田土壤的硝化作用、反硝化作用、硝态氮异化还原成铵作用(DNRA)等都能产生N₂O。土壤中硝化和反硝化作用可同时在适宜的土壤环境中发生,并都产生N₂O。其中自养硝化作用是产生N₂O的主要过程,而N₂O是反硝化过程的一种中间产物,在不同的环境条件下,N₂O可以积累或被还原为N₂。硝化作用通过两种方式产生N₂O:一是在氨氧化过程中,经过一系列反应形成中间产物N₂O;二是在氧胁迫的条件下,某类特定的硝化细菌将NO₂⁻还原成N₂O,即硝化细菌的反硝化,这一机制不仅可以减弱NO₂⁻对氧气的消耗,还可以消除因NO₂⁻的累积所引起的毒害作用。反硝化作用主要由一些反硝化细菌完成,在厌氧条件下,异氧

反硝化细菌以氮氧化物为最终电子受体,有机碳为电子供体进行电子传递氧化磷酸化作用,并将硝酸盐、亚硝酸盐还原为气态产物(N₂、N₂O和NO)的过程^[61]。

与CH₄相似,稻田N₂O排放也是N₂O产生、转化和传输3个过程综合表现的结果(图2)。由于土壤结构复杂性和组成异质性,硝化和反硝化作用可以同时发生。与CH₄不同的是,稻田全年皆有可能排放N₂O。在水稻生长季的持续淹水期间,N₂O主要通过水稻植株排放^[62]。在稻田无水时,N₂O主要通过直接扩散途径排向大气。N₂O的释放量取决于硝化和反硝化这两种作用的反应速率、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是否具有淹水层^[63]。

稻鸭共作中,稻田N₂O排放途径与水稻单作类似^[41]。然而,由于稻鸭共作系统中鸭子的存在,食物链结构发生改变,引起土壤微生物及有机物等因素的响应,使得稻鸭共作各阶段的N₂O排放通量、排放速率与水稻单作产生差异。研究表明,稻鸭共作中N₂O的排放量明显升高,约是水稻单作的1~1.3倍^[18,38,41],这可能与不同施肥方式下的水土环境和微生物活性等条件有关。

2.2 稻鸭共作中N₂O排放影响因素

2.2.1 水体溶解氧对稻鸭共作中N₂O排放的影响

稻鸭共作中水体溶解氧含量的升高促进了N₂O的产生。水稻常规单作中,稻田溶解氧主要来源于大气中氧的溶解和水稻根系泌氧,两者都会改变稻田水体溶解氧的分布。在长期淹水环境下,稻田土壤表层和水稻根际会存在好氧/厌氧界面,但是氧浓度有限^[64-65]。但在稻鸭共作中,除去本身存在的氧化层外,鸭子的活动会强化大气中氧气向水体的渗入,改变界面的氧浓度差。研究表明,稻鸭共作中水体的溶

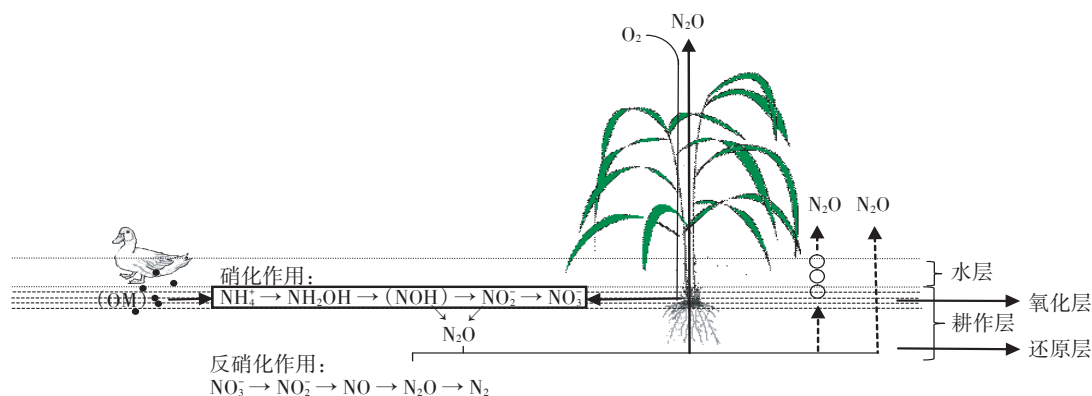


图2 稻鸭共作N₂O的产生与排放过程

Figure 2 Production and emission of N₂O in rice-duck farming system

解氧比水稻单作高9%~15%^[41,66-67]。加上鸭子的取食抑制稻田杂草、浮游生物和其他好氧生物的生长,消耗的水体溶解氧减少,促进水体中 NH_4^+ 氧化为 N_2O 。同时,在单作的静态淹水条件下,水溶性 N_2O 扩散和传输速度慢,但稻鸭中鸭子频繁搅动水层促进了水溶性 N_2O 的释放^[66]。

2.2.2 土壤硝化反硝化作用对稻鸭共作中 N_2O 排放的影响

稻鸭共作中土壤硝化作用增强。在常规水稻单作条件下,长期淹水环境使非根际土中土壤氧含量极低,土壤硝化细菌丰度较低,硝化作用受抑制, N_2O 的排放极少^[65,68-69]。然而,稻鸭共作中鸭子的活动促进了更多的氧气与水土环境接触,为好氧硝化过程提供氧,提高了土壤中硝化细菌的活性,有利于 N_2O 的产生。鸭子的中耕作用、踩踏所导致的杂草腐烂还田及过腹还田效应增加土壤的有效养分含量^[67],可以促进水稻生长,而研究发现在淹水条件下87.3%的 N_2O 可以通过水稻植株排放,这种促生效应可能会提高水稻植株的 N_2O 排放量^[70]。鸭子的粪便含有高浓度的 NH_4^+-N ,为硝化细菌提供了充足的底物,有利于产生更多的 N_2O ,且鸭子频繁的活动强化了对土壤还原层的扰动,使深层的 N_2O 得以释放^[36,66,71]。

稻鸭共作中土壤反硝化作用减弱。反硝化作用需要较严格的无氧条件^[72]。在水稻单作中,淹水稻田土壤反硝化产生的 N_2O 在 N_2O 还原酶的作用下还原为 N_2 , N_2O 的排放量微小。在稻鸭共作中,鸭子搅动水土增加了土壤氧含量,反硝化酶的活性受到抑制,减少对 N_2O 的消耗,导致其排放量增加。

2.2.3 土壤温度对稻鸭共作中 N_2O 排放的影响

土壤温度影响土壤中功能微生物的活性,从而影响硝化和反硝化作用速率^[73]。土壤温度升高有利于硝化和反硝化作用,但低温显著抑制硝化和反硝化细菌及其酶的活性^[74]。研究表明,在单作水稻的生育期内,10 cm土层温度在15~30℃时适宜硝化和反硝化作用的发生,但并未引起 N_2O 显著排放增加^[75]。在稻鸭共作中,鸭子对土壤的扰动使得水体和土壤进行更多热量交换,土壤表层温度的波动和水体温度的变化存在更大的同步性,进而加剧了土壤 N_2O 的排放。

2.2.4 施肥种类对稻鸭共作中 N_2O 排放的影响

肥料种类对稻鸭共作中 N_2O 排放有着显著影响。相比单作稻田,稻鸭共作一般以施用有机肥为主,除此之外,鸭子的排泄物等也可培肥土壤。研究表明,有机物料还田条件下的稻鸭共作比水稻单作的 N_2O

排放量高8%~23%,绿肥还田和沼渣还田 N_2O 增排最为显著^[76-78],只施无机肥的稻鸭共作中 N_2O 排放量介于单作的6%~10%^[39,41,78-79]。绿肥和沼渣含N量较高,增加了土壤N含量,较低的C/N提高了分解效率,为硝化和反硝化作用提供了氮源。鸭子排放含有大量 NH_4^+ 的粪便, NH_4^+ 被氧化,为 N_2O 释放提供了条件^[63]。

3 稻鸭共作中 CH_4 和 N_2O 的增温潜势综合效应

全球增温潜势(GWP)用来估计不同温室气体对气候系统的潜在效应^[63]。在稻田生态种养系统中,养殖动物的各种行为活动,改变了稻田生态系统中的水土环境、物质循环和C、N转化过程,进而影响到稻田 CH_4 和 N_2O 的排放通量。因此,稻田种养系统对温室效应的贡献需要从全球增温潜势(GWP)的综合效应来进行全面评估。

从目前的大多数研究结果来看,稻鸭共作减缓GWP的能力是水稻单作系统的1~1.6倍^[80]。与水稻常规单作相比,稻鸭共作降低了 CH_4 的排放,而在一定程度上增加了 N_2O 的排放,但相对于 CH_4 ,增加的 N_2O 量较少,且85.83%~96.22%的GWP是由 CH_4 排放产生的,因此,稻鸭共作降低 CH_4 排放量对减缓GWP发挥着重要作用^[39]。

除了稻鸭共作系统外,其他稻田种养模式也具有类似的促进稻田温室气体综合效应减缓的作用。例如,在稻鱼系统中, CH_4 排放量的增加导致GWP由水稻单作的78%~81%增加到91%,相反,由 N_2O 排放量的减少导致GWP从水稻单作的19%~22%降低到9%^[81],总体上该模式也发挥着减缓全球增温潜势的作用。又如,在稻田养小龙虾系统中,GWP较水稻单作系统减少了9.45%,且主要是通过降低 CH_4 排放来实现的^[6]。

可见,稻田生态种养系统有助于减缓 CH_4 和 N_2O 的排放及其全球增温潜势,而且多样化的种养减少了病虫害的发生,改善稻田的生态环境,降低了化学农药的使用和农业面源污染,保护农业生物多样性与农田生态环境,更为重要的是生产多元化的健康农产品,提升农业的生态-经济-社会效益。

4 结语与展望

稻田是温室气体的重要排放源之一,我国是水稻生产大国,稻鸭共作模式在我国日益受到欢迎。这类技术模式在生产健康农产品的同时,也为我国稻田节

能减排提供了一条新的路径,这方面的研究也日益受到关注。然而,随着近年来稻田种养类型的多样化,形成的共作生态系统也更趋于复杂化,由于不同品种鸭子的生长特性与活动行为、范围等各不相同,加之水稻生产管理方式(如施肥、灌水、耕作方式等)也千差万别,因此,今后需围绕稻鸭共作对全球增温潜力的影响与机理,在以下几个方面开展长期而深入的研究:

(1)加强稻鸭共作系统碳氮循环和相关功能微生物在温室气体排放过程中的机理研究。碳氮循环是农田生态系统最基本的生态过程,稻鸭共作中由于鸭子的引入,碳氮循环更加复杂。采用¹³C和¹⁵N的示踪技术可以定量地区分外源及土壤原有的碳氮(碳源/碳汇),明确大气沉降、肥料、饲料和灌溉等物料投入、植物(水稻、杂草、藻类、凋落物、秸秆等)-动物(养殖动物、昆虫)-微生物(如土壤微生物)之间的生物转化过程对CO₂、CH₄和N₂O排放的贡献,揭示稻鸭共作中碳氮转化分配的规律及微生物利用特征。稻鸭共作中产甲烷菌、甲烷氧化菌、硝化和反硝化细菌等的功能基因作用复杂,可能存在与水稻单作模式不同的土壤微生物种类和数量,其功能微生物结构、多样性存在差异,因此采用高通量测序、荧光定量PCR等分子生物学技术分析研究与温室气体排放相关的土壤功能菌群的种类、结构、多样性及基因丰度,有利于深入揭示生态种养系统中温室气体的产生和排放的过程与机理。

(2)加强对规模化稻鸭共作中温室气体排放的长期定位监测研究。农业产业生态转型的现实需求,使得稻鸭共作已逐步从“小农户”生产向“大农场”转变。生产规模的扩大对稻鸭共作中温室气体排放的研究提出了挑战,采用传统箱法技术测定规模化稻鸭共作中温室气体的排放量存在不确定性。因此,采用涡度相关技术进行稻鸭共作的长期定位观测,全面摸清稻鸭共作中温室气体排放的动态特征(昼夜变化、季节变化、水稻生育期变化和年际变化)和面上整体效应情况及其时空变化特征,可为我国大面积发展稻鸭共作提供科学的决策依据。

(3)大力开展稻鸭模式减排温室气体的配套技术示范与推广研究。以温室气体减排和绿色高效生产为目标,通过大量的田间对比优选试验,开展稻鸭共作中鸭子品种筛选、水稻与鸭子数量配比、水肥管理以及最佳株行距配比等技术集成与模式优化研究,获取技术参数,并建立有利于温室气体减排与健康农产

品生产的技术规程,在此基础上,进行大面积的示范与推广,实现既保障粮食安全,又能缓解稻田温室气体排放的环境友好型发展目标。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2014: The physical science basis. Contribution of Working Group to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. 2014.
- [2] Simpson I J, Edwards G C, Thurtell G W. Variations in methane and nitrous oxide mixing ratios at the southern boundary of a Canadian boreal forest[J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(7):1141-1150.
- [3] Vergé X P C, De Kimpe C, Desjardins R L. Agricultural production, greenhouse gas emissions and mitigation potential[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2007, 142(2/3/4):255-269.
- [4] 李成芳,曹凑贵,展茗,等. 稻鸭共作生态系统中氧化亚氮排放及温室效应评估[J]. 中国农业科学, 2008(9):2895-2901.
LI Cheng-fang, CAO Cou-gui, ZHAN Ming, et al. Nitrous oxide emission from rice-duck complex ecosystem[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008(9):2895-2901.
- [5] IPCC. Climate change 2007: The physical sciences basis: Working group I contribution to the forth assessment report of the IPCC[R]. 2007.
- [6] 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 Xiang-yu, ZHANG Min-min, PENG Cheng-lin, et al. Effect of rice-crayfish co-culture on greenhouse gases emission in straw-puddled paddy fields[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(11):1591-1603.
- [7] 张广斌,马静,徐华,等. 中国稻田CH₄排放量估算研究综述[J]. 土壤学报, 2009, 46(5):907-916.
ZHANG Guang-bin, MA Jing, XU Hua, et al. Literature review on estimation of methane emission from paddy fields in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(5):907-916.
- [8] 黄满堂,王体健,赵雄飞,等. 2015年中国地区大气甲烷排放估计及空间分布[J]. 环境科学学报, 2019, 39(5):1371-1380.
HUANG Man-tang, WANG Ti-jian, ZHAO Xiong-fei, et al. Estimation of atmospheric methane emissions and its spatial distribution in China during 2015[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(5):1371-1380.
- [9] 昭日格图,张玉旭. 农耕地温室效应气体产生的现状及测定方法[J]. 中国园艺文摘, 2016, 32(4):217-220.
ZHAO Ri-ge-tu, ZHANG Yu-xu. Current status and determination methods of greenhouse gas generation in farmland[J]. *Chinese Horticulture Abstracts*, 2016, 32(4):217-220.
- [10] 王强盛,黄丕生,甄若宏,等. 稻鸭共作对稻田营养生态及稻米质量的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(4):639-645.
WANG Qiang-sheng, HUANG Pei-sheng, ZHEN Ruo-hong, et al. Effect of rice-duck mutualism on nutrition ecology of paddy field and rice quality[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(4):639-645.

- [11] 禹盛苗, 欧阳由男, 张秋英, 等. 稻鸭共育复合系统对水稻生长与产量的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(7): 1252-1256.
YU Sheng-miao, OUYANG You-nan, ZHANG Qiu-ying, et al. Effects of rice-duck farming system on *Oryza sativa* growth and its yield [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(7): 1252-1256.
- [12] 梁玉刚, 胡雅林, 陈亦沙, 等. 稻鸭共育对水稻生长后期农艺性状及产量的影响[J]. 作物研究, 2019(5): 382-387.
LIANG Yu-gang, HU Ya-lin, CHEN Yi-sha, et al. Effect of rice-duck farming on agronomic characters and yield in the late growth stage[J]. *Crop Research*, 2019(5): 382-387.
- [13] 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.
- [14] 郑永华, 邓国彬. 稻鱼鸭复合生态经济效益的初步研究[J]. 应用生态学报, 1997, 8(4): 431-434.
ZHENG Yong-hua, DENG Guo-bin. Economic benefits of rice-fish-duck complex ecosystem: A preliminary study[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(4): 431-434.
- [15] Edar E, Yabuki R, Takayama K. Comparative studies on behavior, weeding and pest control of duck free ranged in paddy fields[J]. *Jpn Poult Sci*, 1996, 33: 261-267.
- [16] Li C, Qiu J, Frolking S, et al. Reduced methane emissions from large-scale changes in water management of China's rice paddies during 1980-2000[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(20): 31-33.
- [17] Lu J, Li X. Review of rice-fish-farming systems in China one of the globally important ingenious agricultural heritage systems (GIAHS) [J]. *Aquaculture*, 2006, 260(1/2/3/4): 106-113.
- [18] Yang S S, Lai C M, Chang H L, et al. Estimation of methane and nitrous oxide emissions from paddy fields in Taiwan[J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(8): 1916-1922.
- [19] 马秀梅, 朱 波, 杜泽林, 等. 冬水田休闲期温室气体排放通量的研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6): 1199-1202.
MA Xiu-mei, ZHU Bo, DU Ze-lin, et al. CH₄, CO₂ and N₂O emissions from the year-round flooded paddy field at fallow season[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6): 1199-1202.
- [20] 任万辉, 许 黎, 王振会, 等. 中国稻田甲烷产生和排放研究 I. 产生和排放机理及其影响因子[J]. 气象, 2004, 30(6): 3-7.
REN Wan-hui, XU Li, WANG Zhen-hui, et al. A review on study of methane emission from rice field in China I. Mechanism and affecting factors[J]. *Meteorological Monthly*, 2004, 30(6): 3-7.
- [21] 唐海明, 肖小平, 帅细强, 等. 双季稻田种植不同冬季作物对甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(5): 1481-1489.
TANG Hai-ming, XIAO Xiao-ping, SHUAI Xi-qiang, et al. Effects of different winter covering crops cultivation on methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) emission fluxes from double-cropping paddy field [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(5): 1481-1489.
- [22] 颜晓元, 蔡祖聪. 淹水土壤中甲烷产生的影响因素研究进展[J]. 环境科学进展, 1996, 4(2): 24-32.
YAN Xiao-yuan, CAI Zu-cong. Research progress on influencing factors of methane production in flooded soil[J]. *Advance in Environment Science*, 1996, 4(2): 24-32.
- [23] Wang Z P, Lindau C W, Delaune R D, et al. Methane emission and entrapment in flooded rice soils as affected by soil properties[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1993, 16(3): 163-168.
- [24] 蔡祖聪. 土壤质地、温度和 Eh 对稻田甲烷排放的影响[J]. 土壤学报, 1998, 35(2): 145-153.
CAI Zu-cong. Effects of soil texture, temperature and Eh on methane emissions from rice fields[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(2): 145-153.
- [25] Neue H U, Scharpenseel H W. Gaseous products of the decomposition of organic matter in submerged soils[M]. Los Banos: International Rice Research Institute (IRRI), 1984: 311-328.
- [26] Papen H, Renneberg H. Microbial processes involved in emissions of radioactively important trace gases[C]//Transactions of 14th the World Congress of Soil Science, Kyoto: IUSS, 1990, 2: 232-237.
- [27] Strayer R F, Tiedje J M. Kinetic parameters of the conversion of methane precursors to methane in a hypereutrophic lake sediment[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1978, 36(2): 330-340.
- [28] 蔡祖聪, 徐 华, 马 静. 稻田生态系统 CH₄ 和 N₂O 排放[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
CAI Zu-cong, XU Hua, MA Jing. Emissions of CH₄ and N₂O from paddy field ecosystems[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Holzapfel-Pschorn A, Seiler W. Methane emission during a cultivation period from an Italian rice paddy[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1986, 91(D11): 11803-11814.
- [32] Holzapfel-Pschorn A, Conrad R, Seiler W. Effects of vegetation on the emission of methane from submerged paddy soil[J]. *Plant & Soil*, 1986, 92(2): 223-233.
- [33] Sass R L, Fisher F M, Wang Y B, et al. Methane emission from rice fields: The effect of floodwater management[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1992, 6(3): 249-262.
- [34] Schütz H, Seiler W, Conrad R. Processes involved in formation and emission of methane in rice paddies[J]. *Biogeochemistry*, 1989, 7(1): 33-53.
- [35] 杨志辉, 黄 璜, 王 华, 等. 稻鸭复合生态系统稻田土壤质量研究[J]. 土壤通报, 2004, 3(2): 117-121.
YANG Zhi-hui, HUANG Huang, WANG Hua, et al. A study on soil quality of paddy fields in rice-duck composite ecosystem[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 3(2): 117-121.
- [36] 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, 19(4): 23-26, 44.
WANG Hua, HUANG Huang, YANG Zhi-hui, et al. Integrated benefits of rice-duck complex ecosystem[J]. *Rural Eco-Environment*, 2003(4): 23-26, 44.
- [37] 马艳芹, 钱晨晨, 孙丹平, 等. 施氮水平对稻田温室气体排放的影

- 响[J]. 农业工程学报, 2016, 2: 128-134.
- MA Yan-qin, QIAN Chen-chen, SUN Dan-ping, et al. Effect of nitrogen fertilizer application on greenhouse gas emissions from soil in paddy field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 2: 128-134.
- [38] 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.
- [39] Xu G H, 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.
- [40] 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.
- XIANG Ping-an, HUANG Huang, HUANG Mei, et al. Studies on technique of reducing methane-emission in a rice-duck ecological system and the evaluation of its economic significance[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(5): 968-975.
- [41] 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.
- [42] Cai Z C, Xing G X, Yan X Y, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilisers and water management[J]. *Plant and Soil*, 1997, 196(1): 7-14.
- [43] 汪金平, 曹凑贵, 金晖, 等. 稻鸭共生对稻田水生生物群落的影响[J]. 中国农业科学, 2006(10): 2001-2008.
- WANG Jin-ping, CAO Cou-gui, JIN Hui, et al. Effects of rice-duck farming on aquatic community in rice fields[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006(10): 2001-2008.
- [44] 展茗, 曹凑贵, 汪金平, 等. 稻鸭共作对甲烷排放的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(12): 2666-2672.
- ZHAN Ming, CAO Cou-gui, WANG Jin-ping, et al. Effects of rice-duck farming on paddy field's methane emission[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(12): 2666-2672.
- [45] 全国明, 章家恩, 陈瑞, 等. 稻鸭共作对稻田水体环境的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9): 2023-2028.
- QUAN Guo-ming, ZHANG Jia-en, CHEN Rui, et al. Effects of rice-duck farming on paddy field water environment[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(9): 2023-2028.
- [46] 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.
- [47] Yagi K, Minami K. Effects of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy field[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1999, 35(4): 599-610.
- [48] 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, 2016, 6: 98-102.
- LI Mao-bo, CAO Li-ming, CHENG Can, et al. Research progress on the effects of rice water-saving irrigation technology on methane emissions[J]. *Crops*, 2016, 6: 98-102.
- [49] 邓晓. 稻-鸭复合系统土壤中甲烷细菌数量及其活性研究[D]. 湖南农业大学, 2003, 56.
- DENG Xiao. Studies on the amounts and activity of methanogens in the soil of rice-duck complex ecosystem[D]. Hunan Agricultural University, 2003, 56.
- [50] 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]. *Journal of Sustainable Agriculture*, 2014, 38(3): 264-282.
- [51] Zhao B L, Zhang J E, Lv X, et al. Methane oxidation enhancement of rice roots with stimulus to its shoots[J]. *Plant Soil and Environment*, 2013, 59(4): 143-149.
- [52] 黄昌勇, 谢正苗, 徐建民. 土壤化学研究与应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997: 7-14.
- HUANG Chang-yong, XIE Zheng-miao, XU Jian-min. Research and application of soil chemistry[M]. Beijing: China Environment Press, 1997: 7-14.
- [53] Bellisario L M, Bubier J L, Moore T R. Controls on CH₄ emissions from a northern peat land[J]. *Global Bio geochemistry Cycles*, 1999, 13(1): 81-91.
- [54] Rajagopal B S, Belay N, Daniels L. Isolation and characterization of methanogenic bacteria from rice paddies[J]. *FEMS Microbiol Ecol*, 1988, 53: 153-158.
- [55] Schutz H, Seiler W, Conrad R. Influence of soil temperature on methane emission from rice paddy fields[J]. *Biogeochem*, 1990, 11: 77-95.
- [56] Parashar D C, Gupta P K, Rai J, et al. Effect of soil temperature on methane emission from paddy fields[J]. *Chemosphere*, 1993, 26: 247-250.
- [57] 傅志强, 黄璜, 陈灿, 等. 稻-鸭复合系统中灌水深度对甲烷排放的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2006, 32(6): 632-626.
- FU Zhi-qiang, HUANG Huang, CHEN Can, et al. Effect of irrigation depths on methane emission in rice-duck complex ecosystems[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2006, 32(6): 632-636.
- [58] 王坚钢, 许德美, 周燕, 等. 稻鸭共作有机稻生产中几个关键技术问题的探讨[J]. 中国稻米, 2016, 22(1): 65-67.
- WANG Jian-gang, XU De-mei, ZHOU Yan, et al. Discussion on key problems of organic rice production in rice-duck farming system[J]. *Chinese Rice*, 2016, 22(1): 65-67.
- [59] 杨宝林. 有机水稻稻鸭共作技术[J]. 江苏农业科学, 2012, 11: 67-68.
- YANG Bao-lin. Organic rice-duck farming technology[J]. *Jiangsu Agricultural Technology*, 2012, 11: 67-68.

- [60] 傅志强, 黄 璜, 廖晓兰, 等. 养鸭数量对CH₄排放的影响[J]. 生态学报, 2008, 5(28):2107-2114.
FU Zhi-qiang, HUANG Huang, LIAO Xiao-lan, et al. The effect of ducks on CH₄ emission from paddy soil mechanism research in the rice-duck ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 5(28):2107-2114.
- [61] 宋文质, 王少彬, 苏维瀚, 等. 我国农田土壤的主要温室气体CO₂、CH₄和N₂O排放研究[J]. 环境科学, 1996, 17(1):85-88.
SONG Wen-zhi, WANG Shao-bin, SU Wei-han, et al. A study on the emissions of CO₂, CH₄ and N₂O from farmland soil in China[J]. *Environmental Science*, 1996, 17(1):85-88.
- [62] Yan X, Shi S, Du L, et al. Pathways of N₂O emission from rice paddy soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(3):437-440.
- [63] 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 the greenhouse gas emission from the planting-breeding circular agriculture ecosystem in paddy[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(5):633-642.
- [64] Zhang J P, Zhou X H, Chen L, et al. Comparison of the abundance and community structure of ammonia oxidizing prokaryotes in rice rhizosphere under three different irrigation cultivation modes[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2016, 32(5):1-14.
- [65] 胡继杰, 朱练峰, 钟 楚, 等. 溶解氧对稻田土壤氮素转化及水稻氮代谢影响研究进展[J]. 生态学杂志, 2017, 36(7):2019-2028.
HU Ji-jie, ZHU Lian-feng, ZHONG Chu, et al. Effects of dissolved oxygen on nitrogen transformation in paddy soil and nitrogen metabolism of rice: A review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(7):2019-2028.
- [66] Li C, Cao C, Wang J, et al. Nitrous oxide emissions from wetland rice-duck cultivation systems in southern China[J]. *Archives of Environment Contamination & Toxicology*, 2009, 56(1):21-29.
- [67] 梁开明, 章家恩, 林田安, 等. 一稻两鸭共作对稻田土壤养分动态的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(5):769-776.
LIANG Kai-ming, ZHANG Jia-en, LIN Tian-an, et al. Dynamics of soil nutrients under rice-duck farming system with two-batch-duck raising[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(5):769-776.
- [68] Fujii C, Nakagawa T, Onodera Y, et al. Succession and community composition of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in bulk soil of a Japanese paddy field[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, 56:212-219.
- [69] 邹建文, 黄 耀, 宗良纲, 等. 稻田CO₂、CH₄和N₂O排放及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2003, 23(6):758-764.
ZOU Jian-wen, HUANG Yao, ZONG Liang-gang, et al. A field study on CO₂, CH₄ and N₂O emission from rice paddy and impact factors[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(6):758-764.
- [70] 夏仕明, 陈 洁, 蒋玉兰, 等. 稻田N₂O排放影响因素与减排研究进展[J]. 中国稻米, 2017, 23(2):5-9.
XIA Shi-ming, CHEN Jie, JIANG Yu-lan, et al. Research progress on influence factors and emission reduction of rice field N₂O[J]. *China Rice*, 2017, 23(2):5-9.
- [71] Van Cleemput O. Biogeochemistry of nitrous oxide in wetlands, current topics in wetland biogeochemistry[J]. *Agriculture & Food Sciences*, 1994, 1:3-14.
- [72] Robson R L, Postgate J R. Oxygen and hydrogen in biological nitrogen fixation[J]. *Annual Review of Microbiology*, 1980, 34:183-207.
- [73] 欧阳学军, 周国逸, 黄忠良, 等. 土壤酸化对温室气体排放影响的培育实验研究[J]. 中国环境科学, 2005, 25(4):465-470.
OUYANG Xue-jun, ZHOU Guo-yi, HUANG Zhong-liang, et al. The incubation experiment studies on the influence of soil acidification on greenhouse gases emission[J]. *China Environment Science*, 2005, 25(4):465-470.
- [74] 黄 耀, 焦 燕, 宗良纲, 等. 土壤理化特性对麦田N₂O排放影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(8):1748-1752.
HUANG Yao, JIAO Yan, ZONG Liang-gang, et al. N₂O emission from wheat cultivated soils as influenced by soil physico-chemical properties[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 28(8):1748-1752.
- [75] 赵苗苗, 张文忠, 裴 瑶, 等. 农田温室气体N₂O排放研究进展[J]. 作物杂志, 2013, 4:25-31.
ZHAO Miao-miao, ZHANG Wen-zhong, PEI Yao, et al. Research advances on N₂O emission in agricultural soil[J]. *Crops*, 2013, 4:25-31.
- [76] Xu G C, Liu X, Wang Q S, et al. Effects of screen house cultivation and organic materials incorporation on global warming potential in rice fields[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(7):6581-6591.
- [77] 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.
- [78] 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. Effects and cycling characteristics of carbon and nitrogen under integrated rice-duck farming ecosystem[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(10):393-396.
- [79] 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.
- [80] 展 茗, 曹凑贵, 汪金平, 等. 复合稻田生态系统温室气体交换及其综合增温潜势[J]. 生态学报, 2008, 28(11):5461-5468.
ZHAN Ming, CAO Cou-gui, WANG Jin-ping, et al. Greenhouse gases exchange of integrated paddy field and their comprehensive global warming potentials[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11):5461-5468.
- [81] 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 Ecosystem & Environment*, 2009, 129(1):228-237.