

侯会静,杨雅琴,韩正砥,等. 节水灌溉的稻田温室气体排放研究综述[J]. 江苏农业科学,2019,47(16):19-24.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.16.005

节水灌溉的稻田温室气体排放研究综述

侯会静^{1,2}, 杨雅琴¹, 韩正砥¹, 李占超¹, 杨士红³

(1. 扬州大学水利与能源动力工程学院,江苏扬州 225009; 2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西杨凌 712100;

3. 河海大学水利水电学院,江苏南京 210098)

摘要:二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)是3种主要的温室气体,大气中温室气体浓度的持续升高导致全球变暖和臭氧层破坏问题日益严峻。稻田生态系统是温室气体重要排放源。随着水稻节水灌溉技术的大面积推广应用,节水灌溉对稻田温室气体排放产生的影响受到了广泛的关注。本文综述了节水灌溉的稻田温室气体的排放特征及减排措施,为节水灌溉稻田温室气体排放的后续研究指明了方向,也为我国稻田节能减排的综合调控提供了科学指导和技术支撑。

关键词:节水灌溉;稻田;温室气体排放;减排措施

中图分类号: S274 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)16-0019-05

温室气体引起的全球变暖和臭氧层破坏是当今世界备受关注的环境问题^[1]。二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)是大气中3种主要的温室气体。由于CO₂、CH₄、N₂O等温室气体的排放,全球气候暖化效应在1990年至2012年间增加了32%。自工业化时代以来,人类活动引起的全球温室气体排放持续增加,2011年大气中CO₂、CH₄、N₂O的浓度分别达到391、1 803、324 nL/L,分别比工业化前的浓度增加了40%、150%、20%^[2]。农田生态系统是温室气体的重要排放源,农业活动产生的CH₄和N₂O分别占全球人为排放总量的52%、60%^[3-4],CO₂是农业温室气体排放的主要成分之一,其在稻田生态系统的排放也不容忽视^[5-6]。在我国,水稻种植面积占全球的20%,总产量占全球的30%^[7]。因此,研究我国稻田的温室气体排放量,对制定农田温室气体减排措施和缓解全球变暖等具有重要的理论及现实意义。

自20世纪80年代以来,各种水稻节水灌溉技术得到了大面积的推广应用。在水稻某些生育期,稻田田面在一段时间内保持无水层或土壤含水量低于其饱和含水量,此时田间的土壤水分状况不同于传统的淹水灌溉稻田^[8-9]。节水灌溉稻田土壤水分状况的改变导致了其温室气体排放不同于传统淹水稻田。随着水稻节水灌溉技术的大面积推广应用,节水灌溉对稻田温室气体排放产生的影响受到了广泛的关注,并成为相关学科的研究热点。目前,国内外针对节水灌溉稻田温室气体排放的研究已经取得了一些进展和成果,本文综述了节水灌溉的稻田温室气体排放的国内外研究进展,提出了当今研究中的不足之处,为节水灌溉稻田温室气体排放的后续研究指明了方向,也为我国稻田节能减排的综合调控提供科学指导和技术支撑。

1 节水灌溉对稻田温室气体排放的影响

1.1 节水灌溉对稻田CH₄排放的影响

稻田是CH₄的主要排放源之一,而随着水稻种植面积的不断增加,稻田CH₄排放量将进一步增大^[10]。国内外学者针对稻田CH₄排放的排放特征及影响因素进行了大量研究,发现稻田CH₄排放主要受土壤理化特性、水稻生长及其品种、施肥种类、耕作制度、土壤水分状况及水分管理等因素的影响^[11-16]。水分管理是影响稻田CH₄排放的最重要因素之一^[13,17-18],通过影响土壤通透性及氧化还原状态,影响稻田CH₄的产生、排放及氧化^[19]。

淹水(至少是水分饱和)是稻田产生和实质性排放CH₄的先决条件,大量的研究表明水稻生长期持续淹水有利于CH₄的产生和排放,节水灌溉能够明显减少稻田CH₄的排放量^[20-22]。与持续淹水相反,晒田及干湿交替的水分管理模式抑制了稻田CH₄的产生,能大量减少稻田CH₄的排放^[12,20,23]。例如,在减少70%的灌溉用水的情况下,田间试验结果证实干湿交替灌溉比持续淹水灌溉减少了97%的稻田CH₄排放量^[20]。我国江苏省昆山排灌试验站2009—2011年的田间试验结果表明,控制灌溉较常规灌溉可以极显著减少稻田CH₄排放量($P < 0.01$),减少幅度可达83.5%^[24-25]。研究证实,间歇灌溉也可以显著减少稻田的CH₄排放量,但不同研究中间歇灌溉对稻田CH₄排放量的减少幅度存在较大差异。例如,我国江苏省句容市2007年的田间试验结果显示,与持续淹水相比,间歇灌溉将季节性CH₄生产潜力降低了45%,但将CH₄的部分氧化率提高了45%~63%,从而使稻田季节性CH₄排放量减少71%^[26]。韩国江原道省2010年的试验结果表明,连续淹水的稻田中排出了大量的CH₄(14.5 mol/m²),而淹水较少的稻田CH₄排放量减少30%~60%^[27]。在寒地黑土稻田中进行试验时发现,CH₄排放分蘖期达到峰值,实施水田淹灌的CH₄累计排放量为6.46 g/m²,间歇灌溉的累计排放量为5.47 g/m²^[28]。2012—

收稿日期:2018-04-18

基金项目:国家重点研发计划(编号:2016YFC0400201);国家自然科学基金青年科学基金(编号:51309192)。

作者简介:侯会静(1984—),女,山东泰安人,博士,副教授,主要从事节水灌溉与农田环境效应研究。E-mail: hjhou@yzu.edu.cn。

2013 年在中国吉林省西部的田间试验结果显示,与连续淹水灌溉相比,间歇灌溉稻田的平均 CH_4 排放通量较低(耕作期为 1 年和 57 年的稻田分别减少了 22.81% 和 23.62%)^[29]。研究 3 种灌溉管理形式[normal amount (NA), 70% of NA (NA 70%), 30% of NA (NA 30%)] 对水稻生长季 CH_4 排放的影响时发现,NA 70% 使 CH_4 排放量减少 30.3% ~ 53.3%,而 NA 30% 使 CH_4 排放量相对 NA 减少 51.0% ~ 76.7%^[30]。节水地面覆盖水稻生产系统(water-saving ground cover rice production system, 简称 GCRPS) 的年 CH_4 排放量可减少 69%^[31]。在 15 cm 阈值干湿交替灌溉(alternate wetting and drying at 15 cm threshold for irrigation, 简称 AWD15) 条件下, CH_4 排放量比传统灌溉降低 37.4% ~ 45.7%,同时减少了灌溉水量,且水稻产量变化不大^[32]。

1.2 节水灌溉对稻田 N_2O 排放的影响

旱地和非饱和水稻土是 N_2O 排放的重要产生源,节水灌溉稻田 N_2O 排放是农田温室气体排放研究的热点之一。关于水稻节水灌溉模式对 N_2O 排放季节变化的影响,前人已经做了大量的研究^[8,20,33]。结果表明,持续淹水稻田 N_2O 排放量很低,很多研究中对其忽略不计^[34],这也是早期关于农田 N_2O 排放的研究主要集中在旱作农田的原因;晒田及干湿交替可以加剧稻田 N_2O 排放^[35-36],但 N_2O 排放量的增加幅度由晒田及土壤脱水程度决定^[37]。节水灌溉较持续淹水灌溉显著增加了稻田 N_2O 排放量^[18]。田间试验结果证实了节水灌溉较持续淹水灌溉增加了 533% 的稻田 N_2O 排放量^[35];控制灌溉较常规灌溉增加了 135.4% ~ 136.9% 的稻田 N_2O 排放量^[8,24]。与常规稻田相比,利用节水地覆盖水稻生产系统(GCRPS) 技术的稻田,每年的 N_2O 排放量和粮食产量分别增加 40% 和 9%^[31]。间歇灌溉稻田的 N_2O 累积排放量为 68.47 mg/m²,较淹灌稻田 N_2O 累积排放量增加了 85.66%^[28]。此外,在 90% 含水孔隙率(WFPS) 时的土壤 N_2O 累积排放量分别为 40% WFPS 和 60% WFPS 时的 7.84 倍和 1.44 倍^[38]。

水稻节水灌溉模式的应用能够明显减少稻田 CH_4 的排放量,同时增大了稻田 N_2O 排放量,两者之间具有明显的“消-长”关系^[1]。已有研究结果表明,节水灌溉较持续淹水灌溉减少了 78% 的 CH_4 排放量,但增加了 533% 的稻田 N_2O 排放量,综合增温潜势减少了 78%^[35]。控制灌溉模式可减少 81.2% ~ 82.8% 的稻田 CH_4 排放量,增加 121.8% ~ 144.3% 的 N_2O 排放量,综合增温潜势减少了 15.0% ~ 34.8%^[1]。

1.3 节水灌溉对稻田 CO_2 排放的影响

稻田 CO_2 净通量是经稻田排放(土壤呼吸与植物呼吸) 与 CO_2 固定(植物光合作用) 之后稻田与大气之间的 CO_2 通量。我国农业系统总体趋势是 CO_2 排放量逐渐增加,但是固碳速率却很低^[39]。土壤水分通过影响土壤通气状况来影响 CO_2 排放,土壤含水量的多少可直接影响 CO_2 在土壤水中的溶解量以及在土壤孔隙中的扩散速率,进而影响 CO_2 排放。由于传统灌溉稻田长期处于淹水厌氧状态,稻田 CO_2 净通量、土壤呼吸变化及其变化程度相对较小,因此,已有对农田 CO_2 排放的研究主要集中在北方旱田,针对稻田的研究相对较少。

田间试验结果证实,不同土壤水分条件下稻田 CO_2 通量日变化趋势相似,呈“U”型变化,水稻生育前期复水后稻田 CO_2 通量值较复水前大,水稻生长中后期,土壤水分状况对稻田 CO_2 通量的日变化影响较小^[40]。与连续淹水灌溉相比,间歇灌溉稻田的 CO_2 排放通量更高(耕作期为 1 年和 57 年的稻田分别增加了 24.84% 和 32.39%)^[29]。在无外加碳源条件下,节水灌溉稻田土壤有机碳含量降低,且土壤溶解性有机碳含量增加^[41-42]。土壤干湿交替可以加速碳的矿化作用^[43]。土壤有机碳含量的变化势必会引起碳排放的改变,但节水灌溉对稻田生态系统 CO_2 排放影响的研究很少,仅有少数研究涉及节水灌溉对稻田土壤 CO_2 排放的影响。例如,利用土壤碳通量自动测量系统研究间歇灌溉对稻田土壤 CO_2 排放的影响时发现,间歇灌溉的稻田土壤 CO_2 排放量较持续淹水稻田减少了 65% ~ 104%^[18]。

2 稻田温室气体减排措施

随着大气中温室气体浓度的增加和全球变暖的加剧,迫切需要开展农田生态系统温室气体减排措施的研究来缓解环境、生态和社会的压力。关于农田温室气体减排措施的研究已有很多,主要集中在水分管理、肥料管理、固碳措施和抑制剂的应用等方面^[24,44-46]。

2.1 稻田 CH_4 减排措施

水稻生长期以间歇灌溉、干湿交替灌溉等节水灌溉模式取代传统淹水灌溉,可以有效地减少稻田 CH_4 排放。例如,间歇灌溉能够增强土壤通气性,有利于提高土壤的氧化还原电位,从而抑制产甲烷菌的活动,并减少稻田 CH_4 的排放^[47]。研究不同水分管理措施对稻田温室气体的排放影响时发现,与持续淹灌(CF) 相比,淹水-湿式间歇灌溉(flooded and wet intermittent irrigation, 简称 FWI) 和淹水-干旱间歇灌溉(flooded and dry intermittent irrigation, 简称 FDI) 的灌溉方式分别使 CH_4 排放量减少了 60% 和 83%^[18]。泰国巴真府水稻研究中心(Prachin Buri Rice Research Center, 简称 PRRC) 3 年的稻田田间试验结果显示,干湿交替灌溉(alternate wetting and drying, 简称 ADW) 和现场特定干湿交替灌溉(site-specific AWD, 简称 AWDS) 分别比持续灌溉减少了 42% 和 34% 的总用水量(灌溉+降雨量),且干湿交替灌溉的稻田平均 CH_4 排放量比持续灌溉稻田减少 49%^[48]。此外,研究秸秆还田和生活污水灌溉对 CH_4 排放的综合影响时发现,与自来水灌溉处理相比,生活污水灌溉可减少秸秆还田 24.5% ~ 26.6% 的 CH_4 排放量^[49]。

通过合理的施肥措施可以在不降低水稻产量的基础上减少稻田 CH_4 的排放量。大量研究发现,以沼渣肥和堆肥等低 C/N 的有机肥代替稻草、绿肥等新鲜高 C/N 比的有机肥可以大大地减少稻田 CH_4 排放^[50-51],无机肥深施也可以减少稻田 CH_4 排放^[52]。长期施用无机肥有助于增加水稻季节的 CH_4 排放量,施用无机肥可以使净年度全球增温潜势(global warming potential, 简称 GWP) 略有增加,而无机/有机肥联合施用则显著提高了无机肥的使用量^[44]。除此之外,以施用 0%、0.25%、0.5%、1% 或 1.5% 二甲基吡唑磷酸酯(dimethylpyrazole phosphate, 简称 DMPP) 水平的氮肥和尿素的稻田进行对比试验,结果发现与单独施用尿素肥料相比,所有的 DMPP 处理都

显著降低了 CH_4 排放量,使其从 54% 降至 34%^[53]。

已有研究表明,研制和应用各种 CH_4 抑制剂或添加剂也是减少稻田 CH_4 排放的可能途径,肥料型的 CH_4 抑制剂如碳化钙胶囊能使稻田 CH_4 排放量降低 90.8%^[54]。此外,以正常剂量除草剂的联合施用代替单独施用可以大大地降低稻田 CH_4 排放量。虽然单独施用除草剂 0.6% 苄嘧磺隆 (bensulfuron-methyl, 简称 BSM) 或 6.0% 丙草胺可以减少种植了水稻的淹水土壤中的 N_2O 和 CH_4 排放,但与单独施用除草剂相比,它们在正常剂量下的联合施用可以保持较低的排放并显著提高的谷物产量^[55]。在水稻生长季节,丁草胺 (butachlor) 的应用显著减少了 58% 的稻田 CH_4 排放量 ($P = 0.022$)^[56]。研究还发现,施用秸秆时生物炭通过降低产甲烷古细菌的有效碳含量来抑制 CH_4 排放,高温生物炭的抑制作用强于低温生物炭;低温生物炭 (BC300) 在不施秸秆的情况下,降低了土壤氧化还原电位 (Eh),增加了产甲烷古细菌的丰度,促进了 CH_4 的排放,而高温生物炭 (BC500、BC700) 对 CH_4 排放影响不大^[57]。

除上述措施之外,有研究者提出利用免耕技术来减少 CH_4 排放,调整耕作方式使土壤充分保持好氧状态,能够有效减少水稻生长季节 CH_4 排放量。研究耕作措施对稻田 CH_4 排放量的影响时发现,免耕 (NT) 显著降低了 10% ~ 36% 的 CH_4 排放量^[58]。研究耕作系统对双季稻耕作体系中 CH_4 排放影响的试验结果表明,与常规耕作 (CT)、旋耕 (RT) 处理相比,免耕显著降低了稻田 CH_4 的排放量 ($P < 0.05$)^[59]。通过田间试验研究耕作方式对稻田温室气体排放量的影响时发现,与常规耕作相比,免耕显著降低了 27.3% 的 CH_4 排放量^[60]。水稻生长初期对稻田进行加气处理是减少 CH_4 排放量的一种有效的措施,且已有研究证实水稻生长初期对稻田进行加气,减少了 13.3 ~ 16.2% 的 CH_4 排放量^[7]。

2.2 稻田 N_2O 减排措施

通过改善养分的管理方式,提高氮肥的利用效率,可以直接减少氮肥施用所造成的土壤 N_2O 排放量^[61]。已有研究表明,氮肥深施、与有机肥混施、少量频施、叶面喷施氮肥等方式也可以减少 N_2O 排放^[62]。施用缓释/控释氮肥可以有效地减少农田 N_2O 排放量^[63]。与碳酸氢铵和尿素相比,长效碳酸氢铵能减少 76% 左右的 N_2O 排放量,缓释尿素能减少 58% 左右的 N_2O 排放量^[64]。只有当缓释/控释氮肥的氮素释放速率与作物对氮的需求速率需求比较同步时,缓释/控释肥才能降低 N_2O 的排放,否则可能增加 N_2O 的排放量。合成氮肥在稻田 N_2O 排放中起主要作用,不同处理下的 N_2O 排放总量从大到小为合成氮肥 > 粪肥 > 秸秆,合成氮肥、粪肥、秸秆分别占 N_2O 直接排放总量 (2000—2007 年) 的 78%、15%、6%^[65]。研究不同碳 (C)/氮 (N) 比的有机残留物作为化肥的替代物,对热带夏季稻田中 N_2O 的排放和作物产量影响的结果表明,与常规氮肥、稻草 (RS)、家禽粪肥 (poultry manure, 简称 PM) 和甘蔗渣 (SCB) 相比,10 t/hm² 的牛粪 (CD) 施用导致季节性稻田 N_2O 排放量最大限度地减少 15%^[45]。

施用尿酶抑制剂、硝化抑制剂、苄嘧磺隆抑制剂可以减少稻田 N_2O 排放量。我国 97% 以上的化学氮肥是尿素、碳酸氢铵等铵态氮肥,尿酶抑制剂和硝化抑制剂对于减缓稻田 N_2O

排放量的潜力巨大^[66]。氢醌和双氰胺是目前研究较多的尿酶/硝化抑制剂组合,与尿素混施应用于稻田生态系统可减少 10% ~ 60% 的 N_2O 排放量^[67-68]。在水稻生长季节,苄嘧磺隆的应用显著减少了 27% 的稻田 N_2O 排放量^[56]。

随着农业技术的进步,通过使用土壤添加剂来减少温室气体的排放,也得到了逐渐广泛的认可。在有氧条件下,植物材料的土壤改良剂添加,无论其 C/N 比如何,都会增加土壤 N_2O 生产量;在厌氧的条件下,植物材料的添加可能会减少高达 95% 的土壤 N_2O 排放量,这可能是由于 NO_3^- 硝化作用受到限制^[69]。稻田土壤 N_2O 的产生主要通过氧化还原过程和电子转移来调节,研究证实,Fe (II) 所贡献的电子与硝酸盐接受 N_2O 产生的电子的比例分别为 Fe (II) 浓度较低和较高的 2 种土壤中的 43.7% 和 130.7%,超过 100% 的比率意味着由高 Fe (II) 浓度贡献的电子超过 N_2O 生产的电子需求,这导致 N_2O 进一步还原为 N_2 ^[70]。

推广秸秆直接还田和秸秆覆盖技术,可以充分利用农作物秸秆,也能达到很好的保水保肥效果,也能抑制 N_2O 的释放。因为作物秸秆具有低含氮量和高 C/N 的特点,它们在分解过程中净同化无机氮,减少土壤进行硝化和反硝化作用基质;因此,随着秸秆施用量的增加,净同化的无机氮进一步增加, N_2O 排放进一步减少。合理地安排通气和麦秸还田的时间可以有效减少稻田 N_2O 排放量。通过田间试验研究麦秸还田对温室气体排放的影响时发现,不同的水分条件下,麦秸的掺入使得稻田 N_2O 排放量减少了 19% ~ 42%^[71]。

2.3 稻田 CO_2 减排措施

近年来生物炭的利用是农田土壤固碳减排研究中的热点。在研究生物炭对稻田土壤中 CO_2 排放量的影响时发现,秸秆炭 (straw charcoal) 在减少水稻土 CO_2 排放方面比竹炭 (BC) 更有效^[46]。已有研究结果表明,生物炭施用能明显改变土壤的理化性质和微生物活性,进而减少农田 CO_2 的排放量^[72]。除此之外,鸡粪还田配施生物炭处理下稻田土壤 CO_2 累积排放量显著低于鸡粪还田处理。通过降低土壤呼吸速率来减小稻田土壤 CO_2 的排放也是值得探讨的方法^[73]。已有研究表明,控制土壤体积含水率可以有效减小稻田土壤呼吸速率。在处理间水分差异较大的生育阶段,控制灌溉稻田土壤呼吸日变化幅度较大,且速率和变化幅度均要大于常规灌溉稻田,土壤呼吸速率随着土壤体积含水率的增加表现为先增后减,在土壤体积含水率为 43% 时,土壤呼吸速率达到最大值^[74]。

关于稻田 CO_2 减排措施的研究较少,有少数研究涉及到耕作方式对稻田 CO_2 排放量的影响,但试验结果存在较大差异。例如,在中国湖北省武穴市进行的 2 年田间试验发现,免耕显著增加了 22% ~ 40% 的稻田 CO_2 排放量^[58]。但是,在中国湖北省武穴市华中农业大学研究农场通过田间试验研究耕作措施对稻田温室气体排放的影响时却发现,与常规耕作相比,免耕反而显著降低了 38.8% 的 CO_2 排放量^[60]。因此,稻田 CO_2 的减排措施有待进一步的研究。

3 展望

稻田的主要温室气体是 CO_2 、 CH_4 、 N_2O ,但已有的节水灌溉稻田温室气体排放的研究主要关注 CH_4 和 N_2O ,较少地研

究节水灌溉稻田 CO₂ 净通量,对节水灌溉稻田 3 种温室气体排放进行综合研究的报道并不多见。节水灌溉稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的综合排放研究对于准确评估我国稻田的综合温室效应具有重要意义。

评价某种减排措施对稻田温室气体的减排效果时应该评价其对 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的综合效应,而已有研究大多只关注该减排措施对 1 种或 2 种气体的影响效果,缺乏其对 3 种温室气体排放的综合影响效应,这就可能导致错误的减排措施的提出。由此,后续研究应该在综合考虑 3 种温室气体综合排放的基础上制定合理的减排措施。

参考文献:

- [1] 彭世彰,侯会静,徐俊增,等. 稻田 CH₄ 和 N₂O 综合排放对控制灌溉的响应[J]. 农业工程学报,2012(13):121–126.
- [2] IPCC. Climate change: the physical science basis: contribution of working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University Press,2013.
- [3] Smith P, Martino D, Cai Z C, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 2008,363(1492):789–813.
- [4] Wang J Y, Zhang M, Xiong Z Q, et al. Effects of biochar addition on N₂O and CO₂ emissions from two paddy soils [J]. Biology and Fertility of Soils,2011,47(8):887–896.
- [5] Zou J W, Huang Y, Lu Y Y, et al. Direct emission factor for N₂O from rice – winter wheat rotation systems in southeast China [J]. Atmospheric Environment,2005,39(26):4755–4765.
- [6] 谭秋成. 中国农业温室气体排放:现状及挑战[J]. 中国人口·资源与环境,2011,21(10):69–75.
- [7] Li X L, Yuan W P, Xu H, et al. Effect of timing and duration of midseason aeration on CH₄ and N₂O emissions from irrigated lowland rice paddies in China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems,2011,91(3):293–305.
- [8] 侯会静,陈 慧,杨士红,等. 水稻控制灌溉对稻麦轮作农田 N₂O 排放的调控效应[J]. 农业工程学报,2015,31(12):125–131.
- [9] Peng S Z, Hou H J, Xu J Z, et al. Lasting effects of controlled irrigation during rice – growing season on nitrous oxide emissions from winter wheat croplands in Southeast China[J]. Paddy and Water Environment,2013,11(1/2/3/4):583–591.
- [10] Hadi A, Inubushi K, Yagi K. Effect of water management on greenhouse gas emissions and microbial properties of paddy soils in Japan and Indonesia[J]. Paddy and Water Environment,2010,8(4):319–324.
- [11] Baruah A, Baruah K K, Gorh D, et al. Effect of organic residues with varied carbon – nitrogen ratios on grain yield, soil health, and nitrous oxide emission from a rice agroecosystem[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis,2016,47(11):1417–1429.
- [12] Hao Q J, Jiang C S, Chai X S, et al. Drainage, no – tillage and crop rotation decreases annual cumulative emissions of methane and nitrous oxide from a rice field in southwest China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment,2016,233:270–281.
- [13] Leon A, Kohyama K, Yagi K, et al. The effects of current water management practices on methane emissions in Japanese rice cultivation [J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change,2017,22(1):85–98.
- [14] Ly P, Vu Q D, Jensen L S, et al. Effects of rice straw, biochar and mineral fertiliser on methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) emissions from rice (*Oryza sativa* L.) grown in a rain – fed lowland rice soil of Cambodia: a pot experiment [J]. Paddy and Water Environment,2015,13(4):465–475.
- [15] Oertel C, Matschullat J, Zurba K, et al. Greenhouse gas emissions from soils a review[J]. Chemie der Erde – Geochemistry,2016,76(3):327–352.
- [16] Yuan Y, Dai X Q, Wang H M, et al. Effects of land – use conversion from double rice cropping to vegetables on methane and nitrous oxide fluxes in southern China[J]. Plos One,2016,11(5):147–154.
- [17] Win K T, Nonaka R, Win A T, et al. Effects of water saving irrigation and rice variety on greenhouse gas emissions and water use efficiency in a paddy field fertilized with anaerobically digested pig slurry[J]. Paddy and Water Environment,2015,13(1):51–60.
- [18] Xu Y, Ge J Z, Tian S Y, et al. Effects of water – saving irrigation practices and drought resistant rice variety on greenhouse gas emissions from a no – till paddy in the central lowlands of China [J]. Science of the Total Environment,2015,505:1043–1052.
- [19] 李香兰,徐 华,李小平,等. 水分管理影响稻田甲烷排放研究进展[J]. 农业环境科学学报,2009,28(2):221–227.
- [20] Lagomarsino A, Agnelli A E, Linquist B, et al. Alternate wetting and drying of rice reduced CH₄ emissions but triggered N₂O peaks in a clayey soil of central Italy[J]. Pedosphere,2016,26(4):533–548.
- [21] Minamikawa K, Fumoto T, Iizumi T, et al. Prediction of future methane emission from irrigated rice paddies in central Thailand under different water management practices[J]. Science of the Total Environment,2016,566–567:641–651.
- [22] Miniotti E F, Romani M, Said – Pullicino D, et al. Agro – environmental sustainability of different water management practices in temperate rice agro – ecosystems[J]. Agriculture Ecosystems & Environment,2016,222:235–248.
- [23] Minamikawa K, Fumoto T, Itoh M, et al. Potential of prolonged midseason drainage for reducing methane emission from rice paddies in Japan: a long – term simulation using the DNDC – Rice model [J]. Biology and Fertility of Soils,2014,50(6):879–889.
- [24] Hou H J, Peng S Z, Xu J Z, et al. Seasonal variations of CH₄ and N₂O emissions in response to water management of paddy fields located in southeast China[J]. Chemosphere,2012,89(7):884–892.
- [25] 彭世彰,和玉璞,杨士红,等. 控制灌溉稻田的甲烷减排效果[J]. 农业工程学报,2013,29(8):100–107.
- [26] Zhang G B, Ji Y, Ma J, et al. Intermittent irrigation changes production, oxidation, and emission of CH₄ in paddy fields determined with stable carbon isotope technique[J]. Soil Biology & Biochemistry,2012,52(8):108–116.
- [27] Berger S, Jang I, Seo J, et al. A record of N₂O and CH₄ emissions and underlying soil processes of Korean rice paddies as affected by different water management practices [J]. Biogeochemistry,2013,115(1/2/3):317–332.
- [28] Wang F Q, Guo W, Zhu S J, et al. Study on CH₄ and N₂O emissions from water – saving irrigation in phaeozem paddy fields in cold areas [J]. Journal of Environmental Biology,2016,37(5):1077–1085.
- [29] Tang J, Wang J J, Li Z Y, et al. Effects of irrigation regime and nitrogen fertilizer management on CH₄, N₂O and CO₂ emissions from

- saline – alkaline paddy fields in northeast China[J]. Sustainability, 2018,10(2):1–15.
- [30] Sun H F, Zhou S, Song X F, et al. CH₄ emission in response to water – saving and drought – resistance rice (WDR) and common rice varieties under different irrigation managements[J]. Water Air and Soil Pollution, 2016, 227(2):1–12.
- [31] Yao Z, Du Y, Tao Y, et al. Water – saving ground cover rice production system reduces net greenhouse gas fluxes in an annual rice – based cropping system[J]. Biogeosciences, 2014, 11(22):6221–6236.
- [32] Liang K M, Zhong X H, Huang N R, et al. Grain yield, water productivity and CH₄ emission of irrigated rice in response to water management in south China[J]. Agricultural Water Management, 2016, 163:319–331.
- [33] Liu G, Yu H Y, Zhang G B, et al. Combination of wet irrigation and nitrification inhibitor reduced nitrous oxide and methane emissions from a rice cropping system[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(17):17426–17436.
- [34] Johnson – Beebout S E, Angeles O R, Alberto M C R, et al. Simultaneous minimization of nitrous oxide and methane emission from rice paddy soils is improbable due to redox potential changes with depth in a greenhouse experiment without plants[J]. Geoderma, 2009, 149(1/2):45–53.
- [35] Ahn J H, Choi M Y, Kim B Y, et al. Effects of water – saving irrigation on emissions of greenhouse gases and prokaryotic communities in rice paddy soil[J]. Microbial Ecology, 2014, 68(2):271–283.
- [36] Mazza G, Agnelli A E, Orasen G, et al. Reduction of global warming potential from rice under alternate wetting and drying practice in a sandy soil of northern Italy[J]. Italian Journal of Agrometeorology, 2016, 2(2):35–44.
- [37] Peng S Z, Hou H J, Xu J Z, et al. Nitrous oxide emissions from paddy fields under different water managements in southeast China[J]. Paddy and Water Environment, 2011, 9(4):403–411.
- [38] Shang F Z, Ren S M, Yang P L, et al. Effects of different irrigation water types, N fertilizer types, and soil moisture contents on N₂O emissions and N fertilizer transformations in soils[J]. Water Air and Soil Pollution, 2016, 227(7):1–18.
- [39] 沈仕洲, 王 风, 薛长亮, 等. 施用有机肥对农田温室气体排放影响研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2015(6):1–8.
- [40] 刘笑吟, 吴勇强, 刘诗梦, 等. 节水灌溉稻田不同土壤水分条件下水碳通量日变化特征[J]. 中国农村水利水电, 2016(8):93–96, 101.
- [41] 杨士红, 彭世彰, 徐俊增. 控制灌溉稻田部分土壤环境因子变化规律[J]. 节水灌溉, 2008(12):1–4, 8.
- [42] Xu J Z, Yang S H, Peng S Z, et al. Solubility and leaching risks of organic carbon in paddy soils as affected by irrigation managements[J]. Scientific World Journal, 2013(4):1–9.
- [43] Harrison – Kirk T, Beare M H, Meenken E D, et al. Soil organic matter and texture affect responses to dry/wet cycles; effects on carbon dioxide and nitrous oxide emissions[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2013, 57:43–55.
- [44] Shang Q Y, Yang X X, Gao C M, et al. Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice – cropping systems: a 3 – year field measurement in long – term fertilizer experiments[J]. Global Change Biology, 2011, 17(6):2196–2210.
- [45] Baruah A, Baruah K K, Bhattacharyya P. Comparative effectiveness of organic substitution in fertilizer schedule; impacts on nitrous oxide emission, photosynthesis, and crop productivity in a tropical summer rice paddy[J]. Water Air and Soil Pollution, 2016, 227(11):1–13.
- [46] Liu Y X, Yang M, Wu Y M, et al. Reducing CH₄ and N₂O emissions from waterlogged paddy soil with biochar[J]. Journal of Soils and Sediments, 2011, 11(6):930–939.
- [47] 李道西. 农田水管理下的稻田甲烷排放研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(1):133–135.
- [48] Chidthaisong A, Cha – un N, Rossopa B, et al. Evaluating the effects of alternate wetting and drying (AWD) on methane and nitrous oxide emissions from a paddy field in Thailand[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2018, 64(1):31–38.
- [49] Xu S S, Hou P F, Xue L H, et al. Treated domestic sewage irrigation significantly decreased the CH₄, N₂O and NH₃ emissions from paddy fields with straw incorporation[J]. Atmospheric Environment, 2017, 169:1–10.
- [50] 焦 燕, 黄 耀, 宗良纲, 等. 土壤理化特性对稻田 CH₄ 排放的影响[J]. 环境科学, 2002, 23(5):1–7.
- [51] Lu W F, Chen W, Duan B W, et al. Methane emissions and mitigation options in irrigated rice fields in southeast China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2000, 58(1/2/3):65–73.
- [52] Rath A K, Swain B, Ramakrishnan B, et al. Influence of fertilizer management and water regime on methane emission from rice fields[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 1999, 76(2/3):99–107.
- [53] Yin S, Zhang X X, Jiang Z D, et al. Inhibitory effects of 3, 4 – dimethylpyrazole phosphate on CH₄ and N₂O emissions in paddy fields of subtropical China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, 14(10):1–12.
- [54] 李玉娥, 林而达. 减缓稻田甲烷排放的技术研究[J]. 农业环境与发展, 1995(2):38–40.
- [55] Das S, Ghosh A, Adhya T K. Nitrous oxide and methane emission from a flooded rice field as influenced by separate and combined application of herbicides bensulfuron methyl and pretilachlor[J]. Chemosphere, 2011, 84(1):54–62.
- [56] Jiang J Y, Chen L M, Sun Q, et al. Application of herbicides is likely to reduce greenhouse gas (N₂O and CH₄) emissions from rice – wheat cropping systems[J]. Atmospheric Environment, 2015, 107:62–69.
- [57] Cai F, Feng Z J, Zhu L Z. Effects of biochar on CH₄ emission with straw application on paddy soil[J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18(2):599–609.
- [58] Li C F, Zhou D N, Kou Z K, et al. Effects of tillage and nitrogen fertilizers on CH₄ and CO₂ emissions and soil organic carbon in paddy fields of central China[J]. Plos One, 2012, 7(5):1–9.
- [59] Zhang H L, Bai X L, Xue J F, et al. Emissions of CH₄ and N₂O under different tillage systems from double – cropped paddy fields in southern China[J]. Plos One, 2013, 8(6):1–11.
- [60] Zhang Z S, Cao C G, Guo L J, et al. Emissions of CH₄ and CO₂ from paddy fields as affected by tillage practices and crop residues in central China[J]. Paddy and Water Environment, 2016, 14(1):85–92.

王裕玉,徐钢春,聂志娟,等. 水产动物饲料中动物蛋白源替代鱼粉研究进展[J]. 江苏农业科学,2019,47(16):24-29.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.16.006

水产动物饲料中动物蛋白源替代鱼粉研究进展

王裕玉,徐钢春,聂志娟,邵乃麟,徐 跑

(中国水产科学研究院淡水渔业研究中心/农业农村部淡水渔业和种质资源利用重点实验室,江苏无锡 214081)

摘要:由于动物蛋白源在营养组成上与鱼粉相似,且具有来源广泛和价格低廉等特点,因而具有成为水产饲料中鱼粉替代物的潜力。本文综述了国内外水生生物对动物蛋白源的应用情况、影响水生生物对动物蛋白源利用的制约因素以及提高应用效果的方法,以期对动物蛋白源的研究和应用提供参考。

关键词:水产动物饲料;动物蛋白源;鱼粉;生长性能;消化率;研究进展;综述

中图分类号: S963.32⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)16-0024-06

蛋白质是水产饲料中的主要营养物质,也是决定饲料成本的关键因素。大多数水产动物,尤其是肉食性鱼类对饲料中的蛋白质含量要求较高(40%~50%)^[1]。鱼粉含有高质量的蛋白质和必需氨基酸(EAA),富含 $\omega-3$ 不饱和脂肪酸,碳水化合物含量低,具有良好的适口性以及较高的消化吸收率等特点,因而一直以来是水产饲料中应用最广泛的优质蛋白源^[2-3]。近年来,受过度捕捞、环境污染及飓风等不良气候

的影响,海洋渔业资源衰减,全球每年的鱼粉产量维持在 650 万 t 左右,这个数值在未来甚至有可能下降^[4],而当今世界水产养殖业却以每年平均 11% 的速度增长^[1],据估算,到 2020 年,全球水产饲料中对鱼粉的需求量将超过总的鱼粉供应量^[5],这种供需不平衡的矛盾,导致了鱼粉价格和养殖成本不断上涨,从而严重制约了水产养殖业的可持续发展。此外,鱼粉中含有较多的磷而不能被水产动物利用,如果用量超过水产动物的需求量,多余的磷排放会造成养殖水体磷污染。因此,从经济利益和生态效益的角度出发,当务之急是寻找到能够部分或完全替代鱼粉的蛋白源。

动物器官和肌肉组织中含有高含量的蛋白质,既有存在于羽毛、毛发和蹄中的不可溶性蛋白,又有存在于血清和血浆中的可溶性蛋白。常见的动物性蛋白源有肉骨粉、禽副产品粉、血粉、羽毛粉、鱼类副产品和其他廉价动物资源,它们在营养组成上与鱼粉相似,价格低廉,更为重要的是,与植物蛋白源相比较,动物蛋白源不含抗营养因子以及碳水化合物,因此

收稿日期:2018-05-13

基金项目:现代农业产业技术体系建设专项资金(编号:CARS-46);
江苏省农业科技自主创新资金[编号:CX(16)1004];江苏省水产
三新工程项目(编号:D2016-18)。

作者简介:王裕玉(1983—),男,山东日照人,博士,助理研究员,主要
研究方向为水产营养生理与生态养殖。E-mail:wangyy@ffrc.cn。
通信作者:徐 跑,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为鱼类
遗传育种、淡水名特水产品养殖、工程化循环水养殖。E-mail:
xup13806190669@163.com。

[61]胡小康,苏 芳,巨晓棠,等. 农田土壤温室气体减排措施研究
进展[C]//2010 年全国低碳农业研讨会论文集. 北京:中国农
学会,2010:203-206.

[62]Yan X,Du L,Shi S,et al. Nitrous oxide emission from wetland rice
soil as affected by the application of controlled-availability
fertilizers and mid-season aeration[J]. *Biology and Fertility of
Soils*,2000,32(1):60-66.

[63]李方敏,樊小林,刘 芳,等. 控释肥料对稻田氧化亚氮排放的
影响[J]. *应用生态学报*,2004(11):2170-2174.

[64]李 虎,王立刚,邱建军. 农田土壤 N₂O 排放和减排措施的研究
进展[J]. *中国土壤与肥料*,2007(5):1-5.

[65]Gao B,Ju X T,Zhang Q,et al. New estimates of direct N₂O
emissions from Chinese croplands from 1980 to 2007 using localized
emission factors[J]. *Biogeosciences*,2011,8(10):3011-3024.

[66]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,2009:161-170.

[67]Xing G X,Shi S L,Shen G Y,et al. Nitrous oxide emissions from
paddy soil in three rice-based cropping systems in China[J].
Nutrient Cycling in Agroecosystems,2002,64(1/2):135-143.

[68]熊正琴,邢光熹,施书莲,等. 轮作制度对水稻生长季节稻田氧

化亚氮排放的影响[J]. *应用生态学报*,2003,14(10):1761-1764.

[69]Li X C,Hu F,Shi W. Plant material addition affects soil nitrous
oxide production differently between aerobic and oxygen-limited
conditions[J]. *Applied Soil Ecology*,2013,64(1):91-98.

[70]Wang M L,Hu R G,Zhao J S,et al. Iron oxidation affects nitrous
oxide emissions via donating electrons to denitrification in paddy
soils[J]. *Geoderma*,2016,271:173-180.

[71]Li X L,Ma J,Yao Y J,et al. Methane and nitrous oxide emissions
from irrigated lowland rice paddies after wheat straw application and
midseason aeration[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*,2014,
100(1):65-76.

[72]杨士红,刘晓静,罗童元,等. 生物炭施用对节水灌溉稻田温室
气体排放影响研究进展[J]. *江苏农业科学*,2016,44(10):
5-9.

[73]魏甲彬,成小琳,周玲红,等. 冬季施用鸡粪和生物炭对南方稻
田土壤 CO₂ 与 CH₄ 排放的影响[J]. *中国生态农业学报*,2017,
25(12):1742-1751.

[74]杨士红,王乙江,徐俊增,等. 节水灌溉稻田土壤呼吸变化及其
影响因素分析[J]. *农业工程学报*,2015,31(8):140-146.