

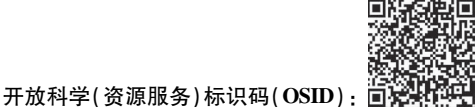
稻鸭共作技术研究进展

江峰^{1,2}, 剧成欣¹, 戴其根^{1,3*}, 霍中洋^{1,3}, 王建平², 郭树林², 周庆高², 王长春² (1.扬州大学农学院, 江苏扬州 225009; 2.江苏省农垦农业发展股份有限公司, 江苏盐城 224200; 3.扬州大学农业部长江流域稻作技术创新中心, 江苏扬州 225009)

摘要 稻鸭共作技术不仅可以减少化肥和农药的施用, 还能有效控制稻田病虫害的危害, 是对我国传统农业的继承与发展, 也是我国农业可持续发展的重要模式。综述了稻鸭共作技术对水稻生产和稻米品质的影响, 对稻田病虫害的影响, 对土壤、水体和大气等稻田生态系统的影响, 并展望了稻鸭共作技术今后的研究方向, 为稻鸭共作技术的理论和实践发展提供借鉴。

关键词 稻鸭共作; 植物保护; 稻田生态系统

中图分类号 S-3 **文献标识码** A
文章编号 0517-6611(2019)18-0013-04
doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.18.003



Research Progress of Rice-Duck Mutualism Technology
JIANG Feng^{1,2}, JU Cheng-xin¹, DAI Qi-gen^{1,3} et al (1. Agricultural College of Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009; 2. Suken Integration of Agricultural Development (SKIAD) Limited Company, Yancheng, Jiangsu 224200; 3. Innovation Center of Rice Cultivation Technology in Yangtze Valley, Ministry of Agriculture, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009)

Abstract Rice-duck mutualism technology can not only reduce the use of chemical fertilizers and pesticides, but also control the damage of paddy field diseases, insect pests and weeds effectively. It is the inheritance and development of traditional agriculture, and also an important model of sustainable agricultural development in China. In this paper, the effects of rice-duck mutualism technology on rice production and rice quality, the effects of rice-duck mutualism technology on diseases, insect pests and weeds, and the effects of rice-duck mutualism technology on soil, water and atmospheric ecosystems in paddy fields were reviewed, the future research directions of rice-duck mutualism technology were prospected, which provided a reference for the theoretical and practical development of rice-duck mutualism technology.

Key words Rice-duck mutualism; Plant protection; Paddy-field ecosystem

关于稻田养鸭的最早记录可追溯到春秋战国时期的灭蝗活动, 至明清时期形成稻鸭共作技术, 并于 20 世纪 60、70 年代在我国一些省份进行推广^[1-2]。日本福冈农民古野隆雄在学习中国稻田养鸭的基础上, 于 1988 年提出稻鸭共育模式, 并因此获得山崎农业奖^[3]。稻鸭共作技术起源自我国, 并在日本得到完善, 然后在亚洲进行推广应用, 是稻禽有机生产的新途径和新方法, 已经在亚洲的多个产稻国取得了显著成效^[4]。我国既是世界上最大的水稻生产国, 也是最大的水禽生产国, 稻鸭共作技术在新世纪以来得到了快速发展, 全国稻作区的多个省市都开展了稻鸭共作技术方面的研究和应用^[5-6]。

近年来, 绿色环保观念越来越深入人心, 稻鸭共作技术也越来越受到人们的关注和重视。稻鸭共作技术不仅可以减少化肥和农药的施用, 还能有效控制稻田病虫害的危害, 是对我国传统农业的继承与发展, 也是我国现代农业发展的重要模式^[7-8]。稻鸭共作技术作为一种有机农业生产方式, 是以水稻稻田为基础, 以优质水稻为中心, 其特点是家鸭野养, 通过种养相结合的方式生产绿色无公害稻、鸭产品的稻田立体种养系统^[9]。该系统通过鸭子捕食害虫、踩食杂草等减少杀虫剂和除草剂的使用, 通过鸭子粪便的施用减少化肥的施用量, 并通过鸭子活动产生混水效果来刺激水稻生长,

实现以田养鸭, 以鸭促稻, 以鸭护稻, 使鸭和水稻共栖生长^[10]。

稻鸭共作技术是对我国传统农业的继承和发展, 并在东亚和东南亚的一些国家得以完善和推广, 也被称为是“亚洲共同的农业技术”^[5-6, 11]。稻鸭共作技术是水稻、水禽可持续发展的新途径和新方法, 实现稻鸭双丰收, 使生产效益和生态效益大大提高。综述了近年来稻鸭共作技术在水稻生产、病虫害防控和稻田生态方面的科研进展, 以期对相关研究者提供借鉴和参考, 并更好地推动我国乃至亚洲稻鸭共作技术的应用和发展。

1 稻鸭共作技术对水稻生产的影响

1.1 稻鸭共作技术对水稻植株生长的影响 稻鸭共作技术能够增加稻田水稻产量, 确保净收益和大米供应能力^[12]。稻鸭共作技术可以在一定程度上降低水稻株高, 并减少水稻地上部的生物产量, 同时增加水稻的根冠比和地下部的生物产量, 促进水稻地下部根系的生长发育, 培育健壮根系从而提高水稻的抗倒伏能力^[13]。有研究表明, 稻鸭共作技术不仅提高了水稻中后期叶片的叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量, 有效防止了水稻后期的早衰现象, 延长了水稻的光合作用持续时间, 还提高了叶绿素 a 和叶绿素 b 的比值, 表明稻鸭共作技术使水稻的光能利用效率也得到一定的提高^[13]。对水稻叶片的一些生理指标进行测定发现, 应用稻鸭共作技术后, 水稻叶片中对水稻生长发育不利的物质如丙二醛和脯氨酸含量等降低, 对水稻生长发育有利的物质如超氧化物歧化酶和过氧化氢酶等的活性提高, 上述研究表明稻鸭共作技术对延缓水稻叶片衰老和提高植株的抗性等方面都具有积极的作用^[14]。梁玉刚等^[15]研究发现, 稻鸭共作技术降低了分蘖

基金项目 国家重点研发计划项目(2018YFD0300804); 江苏省重点研发计划项目(BE2018355)。
作者简介 江峰(1989—), 男, 安徽宁国人, 农艺师, 硕士, 从事农产品安全与农业技术推广研究。* 通信作者, 教授, 博士, 博士生导师, 从事作物高产高效栽培理论及技术、作物产品质量安全与清洁生产研究。
收稿日期 2019-05-08

后期和抽穗期水稻植株地面部位的宽度,增加了同一植株 2 个最大开张心叶和最大开张稻穗之间的距离,使植株保持了一定的松散度。另外,稻鸭共作技术还增加了水稻顶部 2 张叶片的叶长、叶开角和披垂度,降低了倒 3 和倒 4 叶的叶开角和披垂度,有利于水稻形成上披下挺的株型结构,增强水稻顶部高效叶片的生物学功能,从而提高水稻的光能利用效率,促进干物质的生产和积累。鸭子活动对水稻的形态建成有重要的影响,但关于此方面的研究多是田间观察描述和推理,黄兆祥等^[16]通过不同强度的机械刺激来模拟稻鸭共作系统中鸭子活动对水稻形态建成的影响,发现在机械刺激之后,水稻植株的伸长生长得到抑制,水稻茎秆不同节间的长度分布也发生了改变,尤其是降低了水稻基部第 2 节间的长度,使水稻的株高降低。也有研究发现,稻鸭共作技术不仅降低了水稻株高,而且增加了水稻茎秆粗度,对培育健壮植株具有重要的促进作用。稻鸭共作技术还能促进水稻植株分蘖,提高茎蘖成穗率,增加单位面积的有效穗数,并提高结实率等产量构成因素,进而促进水稻最终产量的形成^[13,16]。

1.2 稻鸭共作技术对稻米品质的影响 伴随着生活水平的提高,除了对产量要求以外,人们对稻米质量的要求也越来越高,不仅要吃饱,而且要吃得好。水稻的产量与品质是生产者普遍关心的重要问题,也是稻鸭共作技术能否大面积推广应用的关键^[6]。由于稻鸭共作的稻米化肥农药污染较轻,属于无公害食品,因此稻鸭共作技术作为一项种养结合、生态高效的农业生产技术在全国得到重点推广。除了增加有效穗数和粒重之外,稻鸭共作技术还能增加水稻的粒宽,进而提高稻米的碾磨和外观品质。鸭粪等有机肥的施用改善了稻米的蒸煮与食味品质,增加了稻米的胶稠度和籽粒中锰元素的富集^[17]。稻鸭共作稻田的稻米与常规稻作相比,直链淀粉含量、蛋白质含量和氨基酸含量均有不同程度的降低^[17-18]。由于生产过程基本不施用化肥和农药,稻鸭共作稻田水稻的安全卫生品质也得到了保障^[18]。稻鸭共作技术还减少了化肥和农药带来的农业面源污染,改善了生态环境,减少或消除了农药在稻米上的残留,提升了稻米的卫生品质^[19]。因此,稻鸭共作技术是具有良好发展前景的控害技术,值得推广应用,尤其是适合在有机稻米生产中推广应用。

2 稻鸭共作技术对稻田病虫害草害的影响

2.1 稻鸭共作技术对稻田病害的影响 稻鸭共作技术在学习上的一个重要优势是其对稻田病虫害草害的控制^[6]。稻鸭共作技术能够有效降低稻田多种病害的发生。例如每公顷放养 300 只左右的鸭子,可使稻田纹枯病的病株减少近 50% 以上^[20]。进一步研究其原因发现,一方面通过鸭子食用菌丝菌核,减少了病菌侵染的来源;另一方面,通过鸭子食用腐烂的病株,及时清除病源,抑制病情的扩散^[21]。稻鸭共作技术对稻瘟病也有明显的抑制效果,抑制率可达 50% 以上,鸭子并不对稻瘟病菌产生直接作用,而是通过鸭子引起的稻田生态条件的改变进而抑制稻瘟病的发生和发展^[22]。孙国俊等^[23]研究表明,稻鸭共作技术能够对条纹叶枯病进行有效

的控制,原因是稻鸭共作技术显著减少了分蘖期稻田灰飞虱的数量,减少了条纹叶枯病传播的媒介,对稻田拔节孕穗期条纹叶枯病的防治效果达 40% 左右。在稻鸭共作技术对稻田病害的防控机理方面还需进一步深入研究。

2.2 稻鸭共作技术对稻田虫害的影响 据研究调查,稻鸭共作技术能显著降低稻田害虫基数,基本上消灭稻田中的稻飞虱、稻象甲和稻纵卷叶螟等害虫,对稻飞虱的防治效果最为明显,基本可代替化学防治^[24]。也有研究发现,稻鸭共作技术对稻飞虱和稻叶蝉的控制效果达 98.5% 和 100%,同时对二化螟和三化螟也有一定的控制效果^[25]。稻鸭田的水位与常规稻作田相比一般较深,水稻基部露出水面的部位较少,大大缩减了害虫的生存空间;而且稻鸭田通常密度不高,基部光照通风条件较好,不利于害虫的生存和繁衍;再辅以鸭子的直接取食,能够对稻田害虫起到十分好的防治效果^[20]。鸭子在捕食害虫的同时,也少量捕食蜘蛛等天敌,对害虫的控制效果优于仅受同等数量蜘蛛控制时的情况^[26],提高了稻田天敌与害虫的比例^[27]。稻鸭共作技术处理的稻田中,优势天敌类群园蛛、微蛛和狼蛛的优势度指数显著高于常规区和空白区,能够更为有效地发挥天敌对田间害虫的控制作用^[28]。稻鸭共作对二化螟等水稻虫害也有一定的控制作用,但生物防治效果与常规农药的化学防治效果相比有一定的差距。在生产上推广稻鸭共作技术的同时应协同使用杀虫灯和生物农药等多种物理防治和生物防治措施,以减轻病虫害危害造成的损失^[19]。

2.3 稻鸭共作技术对稻田草害的影响 稻鸭共作可有效地控制稻田杂草发生危害,其生物控草效果优于施用一次化学除草剂的效果,可有效降低稻田杂草的种群数量,可以替代除草剂,达到减少农药使用量、延缓杂草抗药性的目的^[24]。诸多研究均表明了稻鸭共作技术对杂草的防控效果。例如张志东等^[29]研究表明,与化学除草剂相比,稻鸭共作技术对鸭舌草、节节菜以及空心莲子草的防效更好。王献志^[30]研究也指出,稻鸭共作技术对莎草等杂草的防控效果比化学农药的除草效果高 10% 左右,防控效果高达 95% 以上。而且稻鸭共作技术对鸭舌草等化学除草剂难以防除的恶性杂草也有比较好的防控效果^[20]。鸭子既可以直接取食杂草,还能将部分杂草踩入泥中使其腐烂,并将杂草的种子踩到泥土深处从而抑制杂草种子的萌发^[20,24]。魏守辉等^[31]对稻鸭共作稻田杂草群落组成和物种的多样性进行了长期的研究,结果表明稻鸭共作技术改变了稻田杂草的群落结构,提高了群落均匀度,并持续降低了稻田杂草群落的物种多样性,进而对杂草的发生危害进行限制。对稻鸭共作稻田土壤杂草种子库进行研究发现,稻鸭共作技术能够改变杂草种子库土壤剖面中的垂直分布格局和大小,进而影响杂草种子的萌发与生长^[6]。

3 稻鸭共作技术对稻田生态系统的影响

3.1 稻鸭共作技术对土壤生态的影响 稻鸭共作技术对稻田土壤微生物群落数量及代谢、土壤养分含量的提高等都具有十分积极的作用^[32-37]。研究发现^[32],在水稻生长的中后

期,稻田土壤中可培养的微生物总数以及细菌、真菌和放线菌数量在稻鸭共作技术模式下得到显著的增长,土壤微生物群落的碳源利用能力和整体代谢活性也得到显著提高,进而增强了水稻生长中后期的微生物功能多样性。与常规稻作模式相比,稻鸭共作技术模式能够减小土壤碱解氮的消耗,还能在一定程度上增加土壤中全氮和全钾的含量^[33]。对水稻收获后稻田有机质含量进行测定发现,稻鸭共作稻田的土壤有机质含量与生产前期相比有不同程度的增加,同时对照常规稻作稻田的土壤有机质含量与生产前期相比有所下降,稻鸭共作技术不仅弥补了水稻生长对土壤有机质的消耗,还能够改良土壤的质地^[33-34]。李妹娟等^[34]研究发现,采用不同的水稻品种混作养鸭,对田间土壤养分状况和稻米品质的改善效果更好。对于一些受到污染的地块,长期应用稻鸭共作技术以后,土壤的理化性质能够不断发生变化,水稻耕作层中的有害物质逐渐减少,土壤污染状况得以修复^[35]。有研究表明,在现有的养分投入水平下,稻田土壤的自持能力较差,对外部投入的依赖性较高,土壤存在严重氮磷亏缺现象^[36]。稻鸭共作技术能够有效降低土壤磷的亏缺量,鸭粪中的磷素在土壤磷循环利用方面发挥了重要作用^[36-37]。稻鸭共作技术还能提高能流循环指数,增加稻田生态系统的稳定性,使稻田食物链结构趋向复杂化^[38]。这些研究结果对稻鸭共作稻田进一步优化养分综合管理模式等具有重要的指导意义。

3.2 稻鸭共作技术对水体生态的影响 鸭子排放的粪便是稻田水体养分的一个重要来源。应用稻鸭共作技术后,稻田水体中的铵态氮、硝态氮和磷含量均有不同程度的提高,因此应防止稻田水外溢,避免氮磷流失的风险和对外界水体造成不利的影响^[39]。也有研究表明,稻鸭共作技术主要提高了田面水中铵态氮的含量,而硝态氮的含量无明显变化,使得稻田田面水全氮含量增加,进而导致水稻总吸氮量的提高^[40]。稻鸭种养生态系统中,鸭的存在抑制了稻田水生生物水藻的生长,减少了其对土壤和水体氮的吸收,从而提高了有效肥力的供应^[41]。稻鸭共作技术还能够改善水体的理化性质并提高水体对水稻生长的养分供应能力,这是因为稻田表层水体电导率和氧化还原电位的提高,以及水体温度与酸碱度的降低所致^[42]。稻鸭共作技术减少了稻田水生生物的生物量及数量,尤其是藻类群落数量的减少更为明显,绿藻、硅藻和原生动物的优势度显著降低,一些优势种群的增长得到抑制,亚优势种的数量增加,从而提高稻田水体生物多样性指数,进而维持稻田水体系统的稳定^[43]。

3.3 稻鸭共作技术对大气生态的影响 稻鸭共作技术不仅能够维持和保育土壤肥力,还兼顾了农田生态系统温室效应的控制,更有利于稻田系统各项生态服务功能的充分发挥^[26]。有研究认为,稻鸭共作技术同时减少了甲烷和氧化亚氮的排放^[44],进而缓解了全球变暖趋势;稻鸭共作技术可以显著减少甲烷的排放,同时增加氧化亚氮的排放,由于甲烷的减少量要远大于氧化亚氮的增加量,因此变暖趋势得到缓解^[45];稻田甲烷的排放与土壤中溶解性有机碳、微生物碳

和土壤温度显著相关,稻鸭共作技术通过改善土壤氧化还原状况从而显著减少甲烷的排放量^[46]。也有研究认为稻鸭共作系统能够减少甲烷排放,主要是通过鸭子活动增加土壤的溶氧量,抑制杂草和浮游生物的呼吸作用,同时避免杂草和无效分蘖的腐烂分解^[47]。上述研究表明应用稻鸭共作技术对全球温室效应具有一定的减缓作用。

4 稻鸭共作技术的研究展望

稻鸭共作技术是对我国传统农业的继承和发展,在发挥稻田生产功能的同时兼顾了稻田的生态功能。该技术不仅改善了稻田生态系统,而且还提升了农产品品质和效益,确保了稻作生产的可持续发展。稻鸭共作技术是未来农业发展的一个重要方向和技术途径。为了保障稻鸭共作技术的推广与应用,尚需开展以下几个方面的研究与实践。

4.1 稻鸭共作技术的标准化研究 稻鸭共作技术在国内外都已经进行了若干年的研究和发展,但不同的国家和地区使用稻鸭共作技术模式各不相同,缺乏相对统一的操作技术规程,致使许多农户按照经验法进行稻鸭生产,给鸭、稻市场带来了不利的影响。因此,需要开展对适宜于不同地区稻鸭共作标准化生产技术规程方面的研究^[1]。

4.2 稻鸭共作技术的创新与集成 稻鸭共作技术需要大量的劳动力投入,例如鸭子放养管理和田埂围栏制作等都需要专人监督和管理,由于农村劳动人口向城镇的大量转移,劳动力缺乏将极大地制约稻鸭共作技术的发展^[48]。在控制稻田病虫害方面,鸭子能够控制的高度在 60 cm 左右,植株顶部的病虫难以触及而较难控制,而且在稻田收鸭之后水稻还有 30~60 d 的籽粒灌浆期,即使实行一稻两鸭,也不能完全控制稻田病虫害的为害,加上水稻灌浆期不利气候条件的经常发生,会导致田间环境的改变,从而易于病虫害发生和流行。另外,由于鸭子长时间生活在野外环境中,其抗病能力必然会受到影响,高温也会导致鸭子生活力的下降,要实时关注鸭病的预防和病鸭的治疗^[47]。创新和集成稻鸭共作技术显得尤为重要。例如将水稻机械化生产等关键技术结合到稻鸭共作技术中^[49],进而实现稻鸭共作的轻简化、规模化生产等。在此方面,仍需要开展大量的研究工作,这是关系到稻鸭共作技术能否被大面积推广应用的关键。

4.3 稻鸭共作技术的机理与调控 现有研究都表明稻鸭共作技术能够增加产量、提高稻米品质和改善稻田生态等,但这些仅为表观结果,对于稻鸭共作技术的增产增效、控制温室气体排放等机理和过程的研究仍处于植株和生理层面,对此方面的分子生物学机理还缺乏深入研究。如长期稻鸭共作的土壤微生物机理和分子生态研究^[32],土壤甲烷菌类活性与温室气体排放的关系等^[47]。在生产上需要开展稻鸭共作技术对土壤肥力、温室气体排放、稻田生物多样性维持等调控措施方面的研究,使稻鸭共作技术的优势得到充分发挥。

参考文献

- [1] 卢跃红,魏红江,张曦,等.国内外稻鸭共生的研究现状[J].云南农业大学学报,2006,21(1):81-85.
- [2] 赵灿,戴伟民,李淑顺,等.连续 13 年稻鸭共作兼秸秆还田的稻麦连作

- 麦田杂草种子库物种多样性变化[J].生物多样性,2014,22(3):366-374.
- [3] 王文博.稻鸭共作及沼液施用对水稻产量和稻田系统养分平衡的影响[D].南京:南京农业大学,2014.
- [4] 沈晓昆.日本稻鸭共作人物记[J].农业装备技术,2015,41(1):63-64.
- [5] 沈晓昆,王志强,戴网成,等.国内外稻鸭共作动态[J].中国禽业导刊,2006(3):11.
- [6] 章家恩.近 10 多年来我国鸭稻共作生态农业技术的研究进展与展望[J].中国生态农业学报,2013,21(1):70-79.
- [7] 高旺盛,陈源泉,梁龙.论发展循环农业的基本原理与技术体系[J].农业现代化研究,2007(6):731-734.
- [8] 张银贵,李莲,黄奇,等.稻鸭共作药剂减控技术的研究与应用[J].中国稻米,2013,19(2):56-57,59.
- [9] 张孝安.稻鸭共作技术在中国的应用与普及现状[J].世界农业,2007(4):51-54.
- [10] 张帆,隋鹏,陈源泉,等.“稻鸭共生”生态系统稻季 N、P 循环[J].生态学报,2011,31(4):1093-1100.
- [11] 郑建初,谭淑豪,刘华周,等.中国稻鸭共作系统的理论与技术现状及其发展策略[J].江苏农业科学,2005(5):1-5.
- [12] HOSSAIN S T, SUGIMOTO H, AHMED G J U, et al. Effect of integrated rice-duck farming on rice yield, farm productivity and rice-provisioning ability of farmers[J]. Asian journal of agriculture and development, 2005, 23(1):79-86.
- [13] 章家恩,许荣宝,全国明,等.稻鸭共作对水稻植株生长性状与产量性状的影响[J].资源科学,2011,33(6):1053-1059.
- [14] 章家恩,许荣宝,全国明,等.稻鸭共作对水稻生理特性的影响[J].应用生态学报,2007,18(9):1959-1964.
- [15] 梁玉刚,黄璜,李静怡,等.规模化稻鸭共育对水稻株型结构及产量形成的影响[J].生态学报,2016,35(10):2752-2758.
- [16] 黄兆祥,章家恩,梁开明,等.模拟稻鸭共作系统中鸭子机械刺激对水稻形态建成的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(6):717-722.
- [17] 全国明,章家恩,杨军,等.稻鸭共作对稻米品质的影响[J].生态学报,2008,28(7):3475-3483.
- [18] 王建林,李婕,曹元元.稻鸭共生有机栽培模式对黄河三角洲稻米品质的影响[J].应用生态学报,2016,27(7):2315-2320.
- [19] 王伟,张建军,陈恩会,等.稻鸭共作对水稻病虫害草害的控制效果评价[J].金陵科技学院学报,2017,33(4):48-52.
- [20] 王岳钧,怀燕,许剑锋.稻田综合种养模式对水稻病虫害草害的控制作用及机理[J].浙江农业学报,2018,30(6):1016-1021.
- [21] 沈建凯,黄璜,傅志强,等.规模化稻鸭生产对早稻病虫害变化规律及经济效益的影响[J].作物研究,2009,23(3):161-166.
- [22] 戴志明,杨华松,张曦,等.云南稻-鸭共生模式效益的研究及综合评价(三)[J].中国农学通报,2004,20(4):265-267,273.
- [23] 孙国俊,蒋林忠,蒋小春,等.稻鸭共作对水稻条纹叶枯病的控制效果[J].江苏农业科学,2007(6):93-94.
- [24] 杨治平,刘小燕,黄璜,等.稻田养鸭对稻鸭复合系统中病、虫、草害及蜘蛛的影响[J].生态学报,2004,24(12):2756-2760.
- [25] LONG P, HUANG H, LIAO X L, et al. Mechanism and capacities of reducing ecological cost through rice-duck cultivation[J]. Journal of the science of food and agriculture, 2013, 93(12):2881-2891.
- [26] 秦钟,章家恩,骆世明,等.稻鸭共作系统中稻纵卷叶螟种群控制的模拟[J].农业工程学报,2010,26(11):283-289.
- [27] 甄若宏,王强盛,张卫建,等.稻鸭共作对稻田主要病、虫、草的生态控制效应[J].南京农业大学学报,2007,30(2):60-64.
- [28] 秦钟,章家恩,张锦,等.稻鸭共作系统中主要捕食性天敌的结构及多样性[J].生态学杂志,2011,30(7):1354-1360.
- [29] 张志东,李春,柳光富,等.稻鸭共育对稻田主要有害生物和水稻产量影响的研究[J].中国植保导刊,2012,32(3):21-23.
- [30] 王献志.“稻鸭共育”对稻田病虫草害的控制效果分析[J].安徽农学通报,2016,22(1):37-39.
- [31] 魏守辉,强胜,马波,等.长期稻鸭共作对稻田杂草群落组成及物种多样性的影响[J].植物生态学报,2006,30(1):9-16.
- [32] 章家恩,许荣宝,全国明,等.稻鸭共作对土壤微生物数量及其功能多样性的影响[J].资源科学,2009,31(1):56-62.
- [33] 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.
- [34] 李妹娟,周念,章家恩,等.不同水稻品种混作养鸭对土壤养分动态的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(2):211-220.
- [35] 禹盛苗,朱绪峰,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.
- [36] 张帆.“稻鸭共生”养分归还特征及水稻植株对氮、磷的吸收[J].中国生态农业学报,2012,20(3):265-269.
- [37] 张帆,陈源泉,高旺盛.“双季稻·鸭”共生生态系统稻季磷循环[J].生态学杂志,2012,31(6):1383-1389.
- [38] XI Y G, QIN P. Emergy evaluation of organic rice-duck mutualism system[J]. Ecological engineering, 2009, 35(11):1677-1683.
- [39] 赵学敏,徐云连,吴蔚君,等.稻鸭共育对稻田培肥及氮磷流失的影响[J].中国稻米,2018,24(2):10-13.
- [40] 李成芳,曹凑贵,徐拥华,等.稻鸭与稻鱼生态系统土壤微生物量 N 和土壤酶活性动态[J].生态学报,2008,28(8):3905-3912.
- [41] 甄若宏,王强盛,周建涛,等.稻鸭萍共作复合生态系统的物能特征分析[J].中国生态农业学报,2009,17(3):574-579.
- [42] 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.
- [43] 曹凑贵,汪金平,金晖,等.稻鸭共育对稻田水体藻类群落的影响[J].水生生物学报,2007,31(1):146-148.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] ZHAN M, CAO C G, WANG J P, et al. Dynamics of methane emission, active soil organic carbon and their relationships in wetland integrated rice-duck systems in Southern China[J]. Nutrient cycling in agroecosystems, 2011, 89(1):1-13.
- [47] 刘欣,王强盛,许国春,等.稻鸭共作农作系统的生态效应与技术模式[J].中国农学通报,2015,31(29):90-96.
- [48] SUH J. Theory and reality of integrated rice-duck farming in Asian developing countries: A systematic review and SWOT analysis[J]. Agricultural systems, 2014, 125:74-81.
- [49] 章家恩,陆敬雄,张光辉,等.稻鸭共作生态农业模式的功效及存在的技术问题探讨[J].农业系统科学与综合研究,2006,22(2):94-97.

(上接第 9 页)

- [158] LI H X, QIU T, HUANG G D, et al. Production of gamma-aminobutyric acid by *Lactobacillus brevis* NCL912 using fed-batch fermentation[J]. Microb Cell Fact, 2010, 9(1):1-9.
- [159] HUANG J, MEI L H, SHENG Q, et al. Purification and characterization of glutamate decarboxylase of *Lactobacillus brevis* CGMCC 1306 isolated from fresh milk[J]. Chinese J Chem Eng, 2007, 15(2):157-161.
- [160] PENG C L, HUANG J, HU S, et al. A two-stage pH and temperature control with substrate feeding strategy for production of gamma-aminobutyric acid by *Lactobacillus brevis* CGMCC 1306[J]. Chinese J Chem Eng, 2013, 1190-1194.
- [161] LIN L, HU S, YU K, et al. Enhancing the activity of glutamate decarboxylase from *Lactobacillus brevis* by directed evolution[J]. Chinese J Chem Eng, 2014, 22(11/12):1322-1327.
- [162] 龚福明,柳晓坚,李瑞然.植物乳杆菌 ym-4-3 发酵合成 γ -氨基丁酸的条件优化[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2017,42(4):63-72.
- [163] 李杰.生物合成 γ -氨基丁酸酵母菌谷氨酸脱羧酶基因的克隆及表达[D].金华:浙江师范大学,2009.
- [164] 赵安琪.微生物发酵法高效生产 γ -氨基丁酸的研究[D].无锡:江南大学,2017.