

窦志, 张耀元, 郭威, 等. 稻渔综合种养对土壤和水稻影响的研究进展 [J]. 华南农业大学学报, 2024, 45(6): 836-845.
DOU Zhi, ZHANG Yaoyuan, GUO Wei, et al. Research progress on the influence of integrated farming of rice and aquatic animal on soil and rice [J]. Journal of South China Agricultural University, 2024, 45(6): 836-845.

特约综述

稻渔综合种养对土壤和水稻影响的研究进展

窦志¹, 张耀元¹, 郭威¹, 陆静雯¹, 徐强¹, 汪本福², 高辉¹

(1 扬州大学 农学院/江苏省作物栽培生理重点实验室/江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心/

水稻产业工程技术研究院, 江苏 扬州 225009; 2 粮食作物种质创新与遗传改良湖北省

重点实验室/农业农村部作物分子育种重点实验室, 湖北 武汉 430064)

摘要: 近十几年来, 稻渔综合种养因经济效益良好、农产品更绿色优质, 规模迅速扩增, 模式不断丰富, 已经成为我国一种重要的稻作制度。稻渔综合种养的稻田土壤质量和水稻产量水平一直是政府和学界关注的焦点问题。本文综述了稻渔综合种养对稻田土壤性状和水稻产量的影响, 并对今后稻渔综合种养的相关研究进行了展望, 以期为保持稻渔综合种养模式下土壤健康和水稻产量稳定、促进稻渔综合种养产业高质量发展提供参考。

关键词: 稻渔综合种养; 土壤性状; 水稻产量; 绿色生态; 可持续发展

中图分类号: S964.2; S511

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2024)06-0836-10

Research progress on the influence of integrated farming of rice and aquatic animal on soil and rice

DOU Zhi¹, ZHANG Yaoyuan¹, GUO Wei¹, LU Jingwen¹, XU Qiang¹, WANG Benfu², GAO Hui¹

(1 Agricultural College of Yangzhou University/Jiangsu Key Laboratory of Crop Cultivation and Physiology/ Jiangsu Co-innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops/ Research Institute of Rice Industrial Engineering Technology, Yangzhou

225009, China; 2 Hubei Key Laboratory of Food Crop Germplasm and Genetic Improvement/Key Laboratory

of Crop Molecular Breeding, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430064, China)

Abstract: Due to considerable economic benefits and green and high quality agricultural products, the integrated farming of rice and aquatic animal, with the scale rapidly expanding and the model continuously enriched in the past decade, has become an important rice cropping system in China. Soil quality and rice yield level of the integrated farming of rice and aquatic animal have always been the focus issues for the government and researchers. This article reviewed the impact of integrated farming of rice and aquatic animal on soil properties and rice productivity, and put forward the research prospect of integrated farming of rice and aquatic animal in order to provide a reference for maintaining soil health and stabilizing rice yield under integrated farming of rice

收稿日期: 2024-08-01 网络首发时间: 2024-08-20 16:37:24

首发网址: <https://link.cnki.net/urlid/44.1110.S.20240820.1127.002>

作者简介: 窦志, 助理研究员, 博士, 主要从事稻渔综合种养和水稻高产优质高效栽培技术研究, E-mail: douzhi@yzu.edu.cn; 通信作者: 高辉, 教授, 博士, 主要从事稻渔综合种养和水稻高产优质高效栽培技术研究, E-mail: gaohui@yzu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD0300804); 江苏水稻产业技术体系项目 (JATS[2023]443); 湖北省第四批现代农业产业技术体系项目 (2023HBSTX4-01)

and aquatic animals, and there by promoting high-quality development of the industry integrated farming of rice and aquatic animal.

Key words: Integrated farming of rice and aquatic animal; Soil property; Rice yield; Green and ecological; Sustainable development

稻渔综合种养是指人类利用稻田湿地资源开展水稻种植和水产动物养殖的特色农业生产模式,实现稻渔共生、一水多用、一田两收乃至多收,增加了单位面积的食物和营养产出^[1-2],带动了农民就业,大幅增加了稻田经济效益^[3-4],提高了资源利用率^[5-6],减少了稻田化肥农药使用量^[1, 4, 6],具有良好的经济、社会和生态效益。近年来,我国稻渔种养规模迅速扩增,2022年全国稻渔综合种养面积达286.37万hm²,占全国水稻种植总面积的7.7%^[7];稻渔综合种养模式也不断丰富,引入了克氏原螯虾*Procambarus clarkii*、中华绒螯蟹*Eriocheir sinensis*、中华鳖*Trionyx sinensis*、虎纹蛙*Monopterus albus*、鳊鱼*Monopterus albus*、螺蛳*Margarya melanioides*等经济价值较高的水产动物^[8],为稻渔综合种养的发展和农民增收增添了新的活力,显著提升了农民从事农业生产的积极性,对于促进乡村产业兴旺具有重要的支撑作用。尽管稻渔综合种养表现出较单作水稻更高的经济效益,但稻渔综合种养的发展也面临着来自社会和学界的质疑,主要集中在2个方面:一是稻渔综合种养下稻田耕地质量是否会变差;二是稻渔综合种养水稻产量水平是否会下降。因此,土壤质量和水稻产量水平关系着稻渔综合种养产业能否健康持久发展。围绕这2个方面的议题,本文综述了稻渔综合种养对稻田土壤性状和水稻生产影响的研究进展,并对今后稻渔综合种养的相关研究提出展望,以期能为提高稻渔综合种养的水稻种植水平提供参考,助力稻渔综合种养产业高质量可持续发展。

1 稻渔综合种养对稻田土壤质量的影响

1.1 稻渔综合种养对土壤 pH 的影响

土壤 pH 是决定土壤肥力的重要因素,pH 动态变化关系着土壤中微生物活动、养分分解与转化、营养元素在土壤与作物之间的迁移,从而影响作物生长发育。研究表明,稻虾综合种养较水稻单作提高了土壤 pH^[9-11];随着稻虾种养生产年限的累计,pH 上升的幅度越来越大^[11-12]。Wu 等^[13]的研究结果显示,稻鳖共作增加了稻田土壤 pH;刘晏君等^[14]的

研究结果显示,在不同施肥处理方式下稻鳊种养土壤 pH 均高于水稻单作。

有别于水稻单作,稻渔综合种养下因动物养殖的需要,稻田水浆管理一般采取持续淹水灌溉,研究表明,持续淹水还原作用下会使土壤 pH 趋于中性,即淹水会使酸性和碱性土壤 pH 分别呈上升和下降趋势^[15-17]。当土壤的初始背景为酸性或弱酸性时,稻渔综合种养模式下土壤的 pH 升高可能与长期淹水灌溉有较大关系,因为持续淹水条件下土壤处于厌氧环境,使硝态氮、铁锰氧化物等氧化性物质接受电子发生还原,且淹水条件下黏粒的浓度降低,吸附性 H⁺与电极表面接触的机会减少,导致土壤 pH 增加^[16, 18]。蔡晨等^[12]研究认为,稻虾种养下土壤 pH 升高与使用生石灰清塘消毒和小龙虾脱壳带来大量钙质引起田间 H⁺上升有关。有别于水稻单作,稻渔综合种养下土壤 pH 的变化规律既要考虑土壤原本的酸碱度情况,也要关注生产措施,尤其是水产动物养殖措施,比如淹水灌溉、饲料投入、水草种植与还田等行为。

1.2 稻渔综合种养对土壤养分含量的影响

土壤有机质和氮磷钾含量是决定土壤肥力的核心因素,与土壤生产力密切相关。土壤中有机质和氮磷钾含量的时空变化与耕作方式、灌溉方式、养分管理等农事行为高度相关^[19-23]。已有不少学者通过大面积调查或专题试验的方式研究了不同地区、不同稻渔综合种养模式对土壤有机质和氮磷钾含量的影响。朱杰等^[24]研究发现,相较于水稻单作,稻虾共作2年后土壤中的硝态氮、全氮及全碳的含量显著提高。Huang 等^[25]的研究表明,稻虾共作会增加土壤中碳、氮、磷的含量,随着稻虾共作年限增加,土壤肥力提升趋势愈加明显,且与土壤水稳性团聚体、pH 和容重的变化密切相关;主成分分析和通径分析发现,投喂饲料是土壤碳、氮、磷含量提高的主要贡献因素,长期淹灌会通过影响 pH 间接影响土壤中养分的积累。蔡晨等^[12]比较了不同年限稻虾轮作下江汉平原稻田土壤理化性状的表现,结果显示长期稻虾轮作显著降低了0~20和20~40 cm 土层土壤容重,增加了氮、磷、钾等速效养分含量,提高了非毛管孔隙度、毛管孔隙度和总

孔隙度,从而改善了耕层土壤结构。赖政等^[10]研究发现,相较于水稻单作,稻虾种养提高了土壤有机质、有效磷和速效钾的含量;将克氏原螯虾引入稻田,稻虾种养新模式的土壤养分含量增幅高于克氏原螯虾只在环沟活动的传统稻虾种养模式。Arunrat 等^[26]研究了有机水稻生产转为稻鱼种养生产 2 年后稻田养分、土壤微生物多样性和群落组成的变化,发现土壤有机碳、总氮、有机质、有效磷的含量均显著高于原先的有机水稻生产;Teng 等^[27]通过 2 年的试验发现,与水稻单作相比,稻蛙模式可增加土壤中总氮、总磷和总钾的含量;Lin 等^[28]比较了水稻单作、稻鱼共作和稻蛙鱼共作下土壤养分含量在 9 年间的变化趋势,发现水稻单作条件下土壤有效磷含量随生产年限变长无明显变化,而长期实施稻鱼种养和稻蛙鱼种养均会逐渐增加土壤中总磷含量。Zhang 等^[29]进行了 6 年调查研究和 2 年田间试验发现,在稻鳖综合种养土壤中氮和磷的含量与水稻单作间无显著差异。刘晏君等^[14]研究了稻鳊种养 6 年后土壤养分含量的变化,结果显示稻鳊种养较水稻单作显著增加了土壤有机质含量,且稻鳊种养显著提升了土壤碱解氮、有效磷和速效钾等速效养分的含量。Bao 等^[6]研究认为,中华绒螯蟹的排泄物和脱壳是稻蟹共作下土壤有机质含量较水稻单作模式下增加的主要原因。

1.3 稻渔综合种养对土壤微量元素和重金属元素含量的影响

目前只有少数研究涉及到稻渔综合种养下土壤微量元素的响应。Yuan 等^[11]的研究结果显示,长期稻鳊综合种养增加了土壤中二价铁、二价锰的含量以及 Fe_o/Fe_d 和 Fe_p/Fe_d , 土壤中 Fe 元素含量过高不仅会导致作物生理代谢失调和生长发育受阻,还会导致土壤的质地更紧密,不利于水稻根系生长和土壤水分渗透。喻记新等^[30]研究了稻虾种养对土壤重金属元素含量的影响,结果表明稻虾种养增加了土壤中 Cu、As、Mg 和 Mn 的积累,降低了 Cd、Pb、Fe 和 Ca 的含量。

1.4 稻渔综合种养对土壤微生物群落的影响

土壤微生物在维持养分循环和土壤结构中扮演着重要作用,土壤微生物群落的组成和丰度受土壤 pH、氧含量和养分含量的共同影响。有研究表明,土壤微生物不仅影响了稻渔种养下水稻和水产动物的产量,还会引起病虫害的发生^[31-33]。Zhao 等^[34]比较了单独种稻、单独养鱼、稻鱼共作等不同模式连续生产多年土壤细菌群落组成的变化,结果显示,稻鱼种养的土壤细菌群落在第 5 年较其他模

式发生了明显的变化;冗余分析发现,土壤细菌群落的改变与速效氮含量变化密切相关。Zhang 等^[35]连续 4 年跟踪比较了水稻单作和稻虾种养下土壤微生物群落的变化特征发现,过度实施稻虾种养降低了土壤中硝化螺旋菌门 *Nitrospira*、芽单胞菌门 *Gemmatimonas*、放线菌 *Nocardioides* 等微生物的相对丰度。赖政等^[10]比较了稻虾种养新模式(无环沟, NRS)、稻虾种养传统模式(有环沟, TRS) 和水稻单作模式(CK)3 种模式下稻田土壤微生物多样性和群落结构的变化特征,结果显示,与 CK 和 TRS 相比, NRS 能显著提高土壤有机质、有效磷、速效钾含量以及土壤微生物多样性和丰富度;与 CK 相比, NRS 稻田土壤细菌优势菌门中的酸杆菌门 *Acidobacteriota*、绿弯菌门 *Chloroflexi* 和疣微菌门 *Verrucomicrobiota* 相对丰度分别增加 30.89%、36.38% 和 2.16%, 变形菌门 *Proteobacteria* 和脱硫菌门 *Desulfobacterota* 相对丰度分别降低 17.96% 和 58.59%;与 TRS 相比, NRS 稻田土壤细菌优势菌门中的脱硫菌门相对丰度增加 14.93%, 绿弯菌门、疣微菌门、变形菌门和酸杆菌门相对丰度分别降低 39.29%、37.42%、16.27% 和 6.81%;相关分析表明,土壤有机质、速效氮、有效磷、速效钾含量和 pH 是影响稻田土壤微生物群落结构的主要理化因子。Wu 等^[36]研究了 2 和 10 年稻虾综合种养对土壤性状的影响及其与水稻产量的关系,结果显示,不同年限稻虾综合种养均增加了土壤中总氮和有机质的含量,且 10 年的增幅更大。Zhang 等^[37]研究了 0、2、4、6、10 年等不同年限稻虾种养下土壤微生物群落和养分含量的变化,结果表明,随着共作时间增加,稻虾种养改变了优势类群的相对丰度,显著降低了放线菌和壶菌门的相对丰度,增加了变形菌门和厚壁菌门的相对丰度,10 年稻虾种养下土壤微生物种类的丰富度显著低于其他年限,并发现微生物群落的变化与铵态氮、硝态氮、水分和总碳含量的变化有关。刘晏君等^[14]对稻鳊种养下土壤微生物群落数量的变化进行了研究,结果表明,稻鳊种养+70% 施肥+秸秆还田的处理和稻鳊种养+70% 施肥+30% 有机肥的处理对于 0~20 cm 土层的土壤细菌拷贝数和真菌拷贝数均有明显提升作用,促进了土壤养分吸收和利用。Bao 等^[6]对稻蟹种养研究发现,河蟹在稻田中脱壳增加了土壤微生物种类,提高了土壤肥力。

1.5 稻渔综合种养对土壤物理性状的影响

土壤结构、孔隙度、水分、热量、空气等物理性质不仅对土壤肥力具有重要作用,还会影响作物根

系生长及其对养分的吸收利用。蔡晨等^[12]研究发现, 与中稻单作相比, 长期稻虾轮作模式会显著降低 0~20 和 20~40 cm 土层的土壤容重并提高总孔隙度, 但这 2 项指标并未随着稻虾轮作年限的延长无限下降和增长; 40~60 cm 土层的土壤容重和孔隙度未发生明显变化。刘晏君等^[14]发现稻鳊种养不同施肥处理下的土壤容重较水稻单作显著下降, 且土壤水稳性大团聚体、平均质量直径和几何平均直径显著上升。稻蟹共作的相关研究显示, 土壤孔隙度和容重的变化趋势与上述结果相似^[38-39]。有研究指出, 稻渔综合种养下动物活动搅动疏松了土壤, 是土壤孔隙度增加和容重下降的重要原因^[6, 40]。华中农业大学曹凑贵团队研究发现, 长期稻虾综合种养下土壤存在潜育化的风险, 与水稻单作相比, 长期稻虾共作下土壤颜色偏暗、结构更紧密、潜育化趋势明显, 且随着种养年限增加土壤颜色变暗和潜育层变厚的趋势愈发明显^[11, 41]。该团队对江苏省盱眙县稻虾综合种养的水稻种植方式进行调查发现, 水稻机插秧比例远低于当地传统的稻麦轮作; 通过对农民的调查交流和团队机插实践发现, 稻田长期灌水养虾使土壤持水量增加、更加黏重, 插秧机行走阻力大, 是机插秧使用率较低的重要原因^[42]。

2 稻渔综合种养对水稻生产的影响

2.1 稻渔综合种养对水稻种植方式的影响

随着农业适度规模经营的加快推进, 土地由小农户逐渐向新型经营主体流转, 同时农村大量劳动力向城市转移, 高效少人力的水稻机械化种植方式应用越来越广泛^[43], 而人工移栽、抛秧等种植方式具有秧苗成活率高、产量潜力高^[44]、抗倒伏能力强^[45]、对不良气候条件的适应性更好的优势, 也具有不小的应用规模。水稻直播稻株密度大且排列相对杂乱无序, 不利于动物在稻田里穿梭活动, 且直播稻杂草防控压力大, 往往化学除草剂用量较大, 这对动物安全构成了较大威胁, 因此直播很少被农民用于稻渔综合种养水稻种植。目前, 大多数稻渔综合种养模式水稻种植以机插秧和人工移栽为主; 在稻渔综合种养实际生产中, 水稻人工移栽比例要远高于水稻单作。人工移栽方式下, 水稻秧苗秧龄弹性大, 可实现早播晚栽, 向前延长水稻生育期; 手栽大苗可较早上深水, 构建适宜动物生长活动的深水环境, 方便较早引入动物进田形成稻渔共生; 人工移栽还可以灵活设置株行距以方便不同类型动物在稻田穿梭活动。不少稻渔综合种养模式主要分布在南方山地和丘陵地区, 这些地区田块面积小且

分布较为分散, 不利于大型农机作业。此外, 部分稻渔种养模式受长期深水灌溉和田间工程改造后田间高低落差的影响, 插秧机作业时容易陷入土壤中, 限制了机插秧在这些地区稻渔综合种养中的应用^[42]。

2.2 稻渔综合种养对稻田灌溉方式的影响

长期淹水条件下, 耕层氧气缺乏会使还原性物质积累增加, 对水稻根系产生毒害作用, 导致水稻养分吸收能力差, 光合物质转运受阻, 同时水稻抗倒性下降, 不利于水稻高产^[46-49]。研究和生产实践表明, 水稻高产应采取浅湿为主、适时适度晒田的灌溉方式, 这样可以控制无效分蘖、促进根系生长、调节植株内源激素水平, 有利于构建适宜的水稻群体、促进壮秆大穗形成和籽粒灌浆^[50-53]。除稻虾轮作以及稻蛙、稻螺等少数稻渔模式无需建立较深的水层外, 稻鱼、稻蟹、稻鳖、稻虾共作等大多数稻渔综合种养模式都需在水稻生长期建立较深的灌溉水层, 灌水深度 10~40 cm, 以营造适宜水产动物生长活动的深水或半深水环境^[4, 6, 54-56]。

2.3 稻渔综合种养对水稻施肥的影响

持续稻渔综合种养提高了土壤养分含量, 为水稻种植减少肥料的施用量创造了有利条件。Yuan 等^[57]对湖北潜江地区稻麦轮作和稻虾种养下的水稻施肥量进行了调查, 发现稻虾种养下水稻氮肥施用量不到当地稻麦轮作的一半; Dou 等^[42]对江苏盱眙县 208 名农民的稻虾种养农事管理行为调研结果显示, 稻虾种养下 90% 以上农民的施氮量均低于当地稻麦轮作下的施氮量; 表明稻虾种养下农民自发降低了肥料使用量, 这也间接反映了稻虾种养下水稻需肥较少。有研究表明, 稻虾种养^[57]、稻蟹种养^[39]、稻鱼种养^[58]、稻鳖种养^[59]等稻渔种养模式均可以在减少施肥量的条件下获得较理想甚至高于当地水稻单作施肥模式下的水稻产量。这些研究结果表明, 稻渔种养下减少施肥量是完全可行且必要的, 但关于稻渔综合种养下肥料类型、施肥方式、肥料运筹等的研究鲜见报道, 有待于试验研究进一步明确。

2.4 稻渔综合种养对水稻产量的影响

2.4.1 沟坑比对稻渔综合种养下水稻产量的影响

因水产动物繁殖、苗种孵化、避暑等生长需要, 部分稻渔综合种养模式需要在稻田开挖沟坑, 这必然减少了水稻实际种植面积, 开挖沟坑也被视为稻渔综合种养模式下威胁水稻产量的首要因素。已有一些学者围绕稻渔综合种养下沟坑占比与水稻产量的关系开展了研究。倪明理等^[60]通过多年定位试

验、以及对不同生态区农户调查和湖北省近 10 年统计年鉴资料分析等多种途径,分析了湖北省稻虾种养下水稻产量表现,结果表明,稻虾种养下单位净种植面积水稻产量高于水稻单作;在实际生产中沟坑占比控制在 10% 以内,稻虾种养不会造成水稻减产,还能增加小龙虾的产出和收入;但沟坑占比超过 10%,水稻产量会显著下降。浙江大学陈欣团队系统研究了稻鱼共作下沟坑参数与水稻产量的关系发现,适宜的沟坑比和沟坑形状不会显著影响水稻产量甚至还能利用边际效应提高水稻产量^[2, 61-62], Hu 等^[63] 的研究认为,稻鱼共作的水稻产量与沟坑比密切相关,只要把稻田沟坑和鱼的产量控制在合理的范围,稻鱼共作并不会造成水稻减产甚至还能利用沟坑带来的边际效应和鱼饲料提供的充足养分等有利因素提高水稻产量。可见,稻渔综合种养过度开挖沟坑会增加水稻减产的风险,而适度开挖沟坑却能发挥边际效应的增产作用、防范水稻产量下降,且有利于水产动物的生产。2023 年 12 月 28 日,国家标准《稻渔综合种养通用技术要求》^[64] 发布,明确稻渔综合种养沟坑占比不应超过 10%,规范了稻渔综合种养的田间工程改造范围,为发挥稻渔综合种养“稳粮兴渔”的作用提供了重要依据和支撑。

2.4.2 非沟坑比因素对稻渔综合种养下水稻产量的影响 在不设沟坑或不考虑沟坑占比影响的条件下,稻渔综合种养对水稻具有增产作用。Tsuruta 等^[65] 认为,鱼排泄物的施肥作用显著提高了单位面积颖花量和有效穗数,使稻鱼共作水稻产量较单作提高 20%。徐敏等^[66] 的研究表明,稻蟹种养下的水稻有效分蘖、结实率、穗粒数均较只种稻不养蟹模式有所增加,水稻增产达 11.5%;稻蟹种养下单穴栽 4 株的产量水平要优于单穴 1 株和单穴 2 株,表明合理密植是提高稻蟹种养下水稻产量的有效方法。丁伟华^[67] 对稻鱼、稻鳖、稻蟹、稻虾、稻鳅等 5 种主要稻渔种养模式示范试验区进行产量测定发现,5 种稻渔综合种养系统中的水稻平均产量与水稻单作无显著差异,而稻蟹模式、稻鳖模式的水稻产量甚至高于水稻单作,表明适度合理的稻渔种养不会降低水稻的产量,而且稳定性更高。张剑等^[68] 比较了水稻单作、稻鱼共作投喂饲料、稻鱼共作不投喂饲料下的水稻生长表现,发现水稻单作下千粒质量显著高于稻鱼共作,但稻鱼共作下因为有更充分的养分供应可以延长分蘖期,得到更多茎蘖数且在分蘖末期就已经开始了幼穗分化,缩短了无效分蘖死亡转移养分的时间,这使得稻鱼共作水稻在有

效穗数方面具有更明显的优势;同时,稻鱼共作处理下氮素养分供应更充分,叶片氮浓度均显著高于水稻单作,使光合作用转化的干物质能够满足谷物灌浆期的需求,保障了结实率不低于水稻单作,最终稻鱼共作投放和不投放饲料处理的水稻产量都显著高于水稻单作。彭成林等^[69] 研究了稻虾共作对直播水稻产量的影响,发现稻虾共作模式主要通过增加有效穗数提高了水稻产量,认为这与稻虾共作改善了土壤结构、增加了土壤养分含量有关。谷婕等^[70] 的研究结果表明,稻鳅种养显著提高了水稻产量和成熟期干物质质量。

也有一些研究认为,稻渔综合种养对水稻产量和生长发育具有一定负面效应。朱练峰等^[71] 的研究结果显示,稻蛙共作模式下的水稻产量小幅下降,减产的原因是有效穗数的显著降低; Vromant 等^[72] 通过 5 年 8 组的试验研究了越南稻鱼种养对水稻产量的影响,发现稻鱼种养下水稻产量有所下降;并分析了季节、灌溉水深、水稻品种、播种量、养殖密度、鱼的种类等多个因素的效应,发现深水灌溉和有效种植面积减少是水稻产量下降的主要因素。Wu 等^[36] 研究了 2 和 10 年稻虾综合种养对水稻产量的影响,发现 2 年稻虾种养下土壤养分含量适度提高,促进了水稻产量提升;10 年稻虾种养导致土壤中氮过载,破坏了水稻根际周边的固氮能力,降低了水稻产量。车阳等^[73] 以稻麦两熟模式下水稻生产方式为对照,分析了稻虾、稻鳖、稻鳅、稻鲢鱼、稻锦鲤、稻鸭等 6 种稻田种养模式下水稻产量形成特点,发现稻田综合种养模式下水稻产量较对照降低了 3.66%~7.54%,减产主要是由于穗数和每穗粒数的减少导致群体颖花量显著减少,主要生育时期干物质积累量较低和叶面积指数偏小,主要生育阶段光合势、群体生长率和净同化率较低,导致成熟期干物质积累量较少。Gao 等^[74] 基于稻渔综合种养灌溉模式研究了水稻生长中前期和中后期半深水灌溉对茎秆抗倒伏的影响,发现不同时期半深水灌溉均降低了水稻茎秆抗倒伏能力,认为稻渔综合种养长期深灌条件下水稻抗倒伏的问题应予以重视,进一步研究发现水稻茎秆抗倒能力下降主要与基部节间结构性物质积累减少、机械强度下降有关,而选用基部节间机械强度大的水稻品种可以降低半深水灌溉下的倒伏风险。

还有一些研究表明,稻渔综合种养和水稻单作下的产量接近,但减少了肥料和农药投入,具有更高的肥药利用率。Xie 等^[5] 比较了青田稻鱼共作与当地水稻单作模式下多年的水稻产量表现,发现

2种模式下水稻产量差异较小,但稻鱼共作较水稻单作农药和化肥投入量分别减少68%和24%。Zhang等^[29]比较了稻鳖共作与水稻单作连续6年的水稻产量,发现2种模式下的产量无显著差异,但稻鳖共作明显降低了农药和化肥的使用量。

与研究密度和水肥等传统种植因素对水稻产量的影响不同的是,稻渔综合种养系统与水稻单作系统存在多个因素的变量,不仅要考虑密度和水肥等种植管理措施的差异,还要考虑土壤地力变化的效应,以及动物投放类型、密度、饲料投入等养殖因素的差异,这也增加了分析稻渔综合种养下水稻产量变化因素的难度,造成不同研究的结果有所不同,建议稻渔综合种养下关于水稻产量的研究应从简到繁,先阐明稻渔综合种养几个核心因素对水稻产量的效应,比如土壤理化性状、灌溉方式、养殖密度、饲料投入、肥料用量等,再分析其综合效应,以明确具体稻渔种养模式下影响水稻产量的主要因素及贡献大小。

2.5 稻渔综合种养对水稻病虫草的影响

相比水稻单作,稻渔综合种养被认为是一种更绿色生态的稻作制度,“渔”的出现和养“渔”的措施可以抑制水稻病虫草发生和发展,减轻水稻植保对农药的依赖。

2.5.1 水稻病虫害

Xie等^[5]对浙江省青田县稻鱼共作系统多年的试验研究发现,田鱼冲撞稻秧致使稻飞虱 *Delphacidae* 落入水中,降低了其对水稻危害,同时田鱼在清晨冲撞稻株使水稻叶片露水坠入水中,减少了稻瘟病菌分生孢子产生和菌丝体生长,降低了稻瘟病发生率。Teng等^[27]的研究指出,稻蛙种养下蛙的活动取食明显降低了卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee 和稻飞虱的数量,减轻了这2种害虫对水稻的为害,通过取食虫子阻碍了其对病菌的传播,降低了纹枯病 *Rhizoctonia solani* 发生风险;此外,还通过取食叶蝉 *Cicadellidea* 阻断了其对水稻矮缩病病菌的传播,从而降低了矮缩病发生的可能性。李伟晶等^[75]研究发现,稻蟹共作显著降低了稻瘟病发病率和病情指数。Dou等^[42]对江苏省盱眙县稻虾综合种养的208个经营主体调查研究发现,稻虾种养的农户农药使用量相比水稻单作有所减少,这一方面是出于对农药威胁水产动物安全的考虑,但也从侧面反映了稻虾种养总体上对部分类型水稻病虫害的发生具有抑制效果。也有研究指出,稻虾种养的稻田相比单作稻田具有更高的相对湿度和适中的温度,导致稻曲病菌分生孢子的萌发速率显著高于水稻单作,从而增加了稻曲病

发生风险^[76]。

2.5.2 稻田杂草

Rothuis等^[54]的研究结果表明,稻鱼共作下水生杂草的生物量显著下降。李伟晶等^[75]的研究结果显示,稻蟹共生模式的杂草株防效和鲜质量防效均在90%以上,显著高于持续淹灌水稻单作和晒田水稻单作。Xie等^[5]研究表明,青田稻鱼共作系统中田鱼会取食甚至连根拔起部分杂草,使稻田杂草数量显著降低。郭瑶等^[77]发现,稻虾种养下稻田杂草总发生量低于水稻单作,通泉草 *Monochoria vaginalis*、空心莲子草 *Alternanthera philoxeroides*、鳢肠 *Alternanthera philoxeroides*、鸭舌草 *Monochoria vaginalis* 在稻虾综合种养下很少发生;短期稻虾共作对稻田杂草的抑制作用比长期稻虾共作更明显,长期稻虾共作会逐步形成新的杂草群落结构,需要采取相应的杂草防控措施。稻鱼共作一般要建立较深的水层以满足动物生长活动的需要,而深水灌溉一直以来也是杂草治理辅助的重要措施^[78-80]。但需要注意的是,也有一部分杂草具有耐淹性,仅通过建立水层并不能抑制其萌发或生长,如野荸荠 *Heleocharis plantagineiformis*、鸭舌草、水苋菜 *Ammannia baccifera*、李氏禾 *Leersia hexandra*、野慈姑 *Sagittaria trifolia* 等,因此,如何采取对动物安全的药剂或措施有效控制耐淹性杂草是稻渔绿色安全生产面临的重要问题。

稻渔综合种养对部分病虫草害具有良好的抑制作用,一个地区的水稻主要病虫害至少有5种以上,不同类型水稻病虫害的传播方式和诱发条件差异较大;杂草种类更是繁多,有不耐淹的也有耐淹的,有容易被动物取食的,也有动物不喜食用的。因此,稻渔综合种养对水稻病虫草发生的影响不能一概而论,对具体病虫草害应具体分析。此外,目前绝大多数研究只是关注到短期稻渔综合种养对水稻病虫草害发生情况的影响,稻渔种养下病虫草变化规律还缺乏多年限的长期研究,影响病虫草害发生的机理也有待阐明。

3 展望

3.1 进一步阐明稻渔综合种养下稻和水产动物之间的关系

稻渔综合种养下水稻植株具有遮阴作用,为水产动物生存创造了更适宜的温度环境,水产动物可以疏松土壤,促进水体溶氧和土壤肥力的释放,其排泄物也可作为有机肥料被水稻吸收利用,另外动物还可捕食害虫杂草等,减轻水稻病虫草的防控压力。但如果稻渔综合种养管理不当,也会对水稻生

长构成不利影响,比如水稻移栽后河蟹、鳖等动物过早进入稻田会发生踩踏、夹取稻苗等行为。不同动物的活动习性、营养需求、生长周期、水深要求存在较大差异,水稻和某种动物共生种养的效果和机理并不一定适用于和另外一种动物共生种养,迄今为止,大多数稻渔综合种养模式下水稻和水产动物究竟存在哪些互利之处尚缺乏试验论证分析,其中的机理更是鲜有报道,今后需对具体稻渔综合种养模式具体分析,阐明具体模式下稻渔互利共生和可能存在的矛盾,并通过农艺和渔艺技术优化调整扬“稻渔互利”之长、避“稻渔冲突”之短,争取稻渔综合种养整体生产力的更大化。

3.2 阐明稻渔综合种养对耕地的长期效应和机理

很多研究都关注到了稻渔综合种养下土壤性状的变化,一些研究指出稻渔综合种养对土壤性状的短期效应和长期效应并不完全一致,今后,需要进一步厘清长期实施某种稻渔综合种养模式后土壤性状指标的响应变化,并深入解析稻渔综合种养下土壤性状变化的机理,重点阐明具体模式下土壤性状的改变是由哪些生产措施引起的,如深水灌溉、投喂饲料、动物排泄、虾蟹类动物脱壳等,并解释其影响过程。此外,受水产动物价格波动、盲目扩张、技术水平不高、经营不善等因素的影响,不少稻田在开展了几年稻渔综合种养后又转换回传统的稻作制度,那么回归传统稻作制度后的土壤又会发生怎样的变化,目前还鲜有相关报道,这有待于研究关注。掌握稻渔综合种养模式及其生产技术对耕地的影响机制,可为优化稻渔综合种养农艺和渔艺技术措施、保障土壤健康提供方向。

3.3 培育和筛选适宜稻渔综合种养的水稻品种

种子是农业的芯片,培育和筛选适宜的水稻品种是提高稻渔综合种养下水稻生产力的主要抓手之一。适宜稻渔综合种养的水稻品种,除了要满足高产优质等现代水稻生产需具备的性状外,还普遍要求具有耐肥、耐淹、抗倒的优势^[81]。此外,还要根据具体稻渔综合种养模式下动物养殖的需求选择具有适宜株型、生育期等农艺特征的水稻品种,促进稻和水产动物互利共生,譬如稻虾轮作下应选择生育期较短的水稻品种,这样水稻可以较早收割使稻田能早上水繁育虾苗,以利于翌年早出苗早出虾出大虾。目前各地稻渔综合种养所使用的水稻品种一般来自于当地水稻单作生产中主栽的水稻品种,难以高度匹配稻渔综合种养模式,譬如华南地区流行的优质香稻品种食味好、有香气、市场价格高,深受意在打造中高端稻米品牌的农业经营主体欢迎,

但这类水稻品种往往抗倒性较差,不适宜大多数需深水灌溉的稻渔模式。随着稻渔综合种养面积的扩大,农民对高度适宜稻渔综合种养的水稻品种具有更强烈的需求。已有科研单位将适宜稻渔综合种养的水稻品种作为重要的育种目标,比如湖北省农业科学院培育了特别适宜湖北地区稻虾共作的水稻品种‘虾稻 1 号’。此外,从现有水稻品种中试验筛选也是获得稻渔综合种养水稻适宜品种的一种重要手段,已有不少研究针对不同地区的具体稻渔种养模式开展了水稻品种筛选研究^[82-86],为各地稻渔种养水稻品种选择提供了借鉴参考。

3.4 研发稻渔综合种养的水稻科学肥水管理技术

大量研究已充分证明,长期稻渔综合种养会显著增加土壤中有机质和氮等养分含量,这为稻渔综合种养水稻减肥创造了有利条件;另外,为避免动物误食中毒,一些稻渔综合种养模式不宜在动物进入稻田共作后再追施颗粒状的肥料。因此,稻渔综合种养下水稻施肥方案不能简单照搬当地水稻单作模式,应充分考虑稻渔综合种养下土壤肥力变化特征和保障动物安全,制定科学的施肥方案,包括肥料类型、施肥量、施肥方式、次数和时间等。已有研究进行了稻渔综合种养施肥技术的探索,比如有文献报道稻虾综合种养使用水稻缓混肥一次施用技术降低了施肥量和施肥次数,但水稻仍可获得较好的产量和品质^[33,87]。这种施肥方式一般采取种植前翻耕深施或机插秧同步侧深施的方式,使颗粒肥料不暴露在土壤表面,从而避免水产动物进田后误食肥料。未来应加强对稻渔综合种养下水稻养分供需规律的研究,研发更轻简高效和对动物安全的施肥技术。

大多数稻渔综合种养都要在水稻生长的一定阶段建立深水层,一般控制在 10~40 cm,以满足不同类型水产动物生长活动的需要。尽管深水灌溉有助于控制杂草和部分虫害,但也对水稻根系生长和茎秆充实产生一些不利影响,且过深的水层还会淹死水稻植株下部叶片。针对深水灌溉,稻渔综合种养不仅要选择耐淹抗倒的水稻品种,还要配套稻、渔生产协调的水浆管理方案,选择合适的深灌时间和灌水深度,在为水产动物提供良好水深环境的条件下尽可能降低深水灌溉对水稻生产的不利影响。

3.5 阐明稻渔综合种养下病虫害的发生规律及机理

一些稻渔综合种养模式对于部分水稻病虫害和稻田杂草发生具有较好的抑制效果,但绝大多数研究局限于对稻渔种养下病虫害发生程度的评价,缺

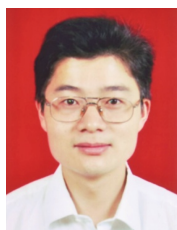
乏对于病虫害基数或发生率变化机理的探究,今后还需从动物取食和踩踏等活动行为、灌溉方式、耕作方式等角度进一步研究水稻病虫害和稻田杂草的变化规律,阐明具体稻渔综合种养模式对于具体或某一类病虫害的发生具有怎样的作用效果,为生产中精准减少农药使用、促进稻渔综合种养水稻绿色高效植保提供理论支撑。

参考文献:

- [1] AHMED N, TURCHINI G M. The evolution of the blue-green revolution of rice-fish cultivation for sustainable food production[J]. *Sustainability Science*, 2021, 16(4): 1375-1390.
- [2] XU Q, LIU T, GUO H L, et al. Conversion from rice-wheat rotation to rice-crayfish coculture increases net ecosystem service values in Hung-tse Lake area, east China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 319: 128883.
- [3] ISLAM A H M S, BARMAN B K, MURSHEDJAHAN K M. Adoption and impact of integrated rice-fish farming system in Bangladesh[J]. *Aquaculture*, 2015, 447: 76-85.
- [4] JIANG Y, CAO C G. Crayfish-rice integrated system of production: an agriculture success story in China: A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2021, 41(5): 68.
- [5] XIE J, HU L, TANG J, et al. Ecological mechanisms underlying the sustainability of the agricultural heritage rice-fish coculture system[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(50): e1381-e1387.
- [6] BAO J, JIANG H, LI X. Thirty years of rice-crab coculture in China: Research progress and prospects[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2022, 14(3): 1597-1612.
- [7] 于秀娟, 郝向举, 党子乔, 等. 中国稻渔综合种养产业发展报告(2023)[R]. 北京: 全国水产技术推广总站, 2023.
- [8] 唐建军, 李巍, 吕修涛, 等. 中国稻渔综合种养产业的发展现状与若干思考[J]. *中国稻米*, 2020, 26(5): 1-10.
- [9] SI G H, PENG C L, YUAN J F, et al. Changes in soil microbial community composition and organic carbon fractions in an integrated rice-crayfish farming system in subtropical China[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 2856.
- [10] 赖政, 肖力婷, 赖胜, 等. 稻虾种养新模式对稻田土壤肥力和微生物群落结构的影响[J]. *土壤学报*, 2023, 60(6): 1788-1798.
- [11] YUAN P L, WANG J P, LI C F, et al. Soil quality indicators of integrated rice-crayfish farming in the Jiangnan Plain, China using a minimum data set[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 204: 104732.
- [12] 蔡晨, 李谷, 朱建强, 等. 稻虾轮作模式下江汉平原土壤理化性状特征研究[J]. *土壤学报*, 2019, 56(1): 217-226.
- [13] WU B L, CHEN J, HUANG L, et al. Dynamics of soil fertility and microbial community response to stocking density in rice-turtle co-culture[J]. *Aquaculture Reports*, 2021, 20: 100765.
- [14] 刘晏君, 吕卫光, 白娜玲, 等. 稻鳢生态种养不同施肥处理对土壤理化及微生物性状的影响[J]. *土壤通报*, 2023, 54(6): 1384-1391.
- [15] SUN L N, CHEN S, CHAO L, et al. Effects of flooding on changes in Eh, pH and speciation of cadmium and lead in contaminated soil[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2007, 79: 514-518.
- [16] 贺前锋, 桂娟, 刘代欢, 等. 淹水稻田中土壤性质的变化及其对土壤酶活性影响的研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(12): 2260-2268.
- [17] 朱丹妹, 刘岩, 张丽, 等. 不同类型土壤淹水对 pH、Eh、Fe 及有效态 Cd 含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(8): 1508-1517.
- [18] 刘杰云, 张文正, 沈健林, 等. 水分管理及生物质炭对稻田土壤含水率及 pH 值的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(7): 44-50.
- [19] 孙瑞莲, 朱鲁生, 赵秉强, 等. 长期施肥对土壤微生物的影响及其在养分调控中的作用[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(10): 1907-1910.
- [20] BERNER A, HILDERMANN I, FLIESSBACH A, et al. Crop yield and soil quality response to reduced tillage under organic management[J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 101(1/2): 89-96.
- [21] 尹春梅, 谢小立. 灌溉模式对红壤稻田土壤环境及水稻产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 26-31.
- [22] KARLEN D L, KOVAR J L, CAMBARDELLA C A, et al. Thirty-year tillage effects on crop yield and soil fertility indicators[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 130: 24-41.
- [23] HUANG L H, LIANG Z, SUAREZ D L, et al. Impact of cultivation year, nitrogen fertilization rate and irrigation water quality on soil salinity and soil nitrogen in saline-sodic paddy fields in northeast China[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2016, 154: 632-646.
- [24] 朱杰, 刘海, 吴邦魁, 等. 稻虾共作对稻田土壤 nirK 反硝化微生物群落结构和多样性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(9): 1324-1332.
- [25] HUANG F, YANG S, NIE X B, et al. Effects of different nitrogen types on nitrogen use efficiency, field water quality, and soil microbial community in the rice-crayfish co-culture system[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2023, 23(2): 2741-2754.
- [26] ARUNRAT N, SANSUPA C, KONGSURAKAN P, et al. Soil microbial diversity and community composition in rice-fish co-culture and rice monoculture farming system[J]. *Biology*, 2022, 11(8): 1242.
- [27] TENG Q, HU X F, LUO F, et al. Influences of introducing frogs in the paddy fields on soil properties and rice growth[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16: 51-61.
- [28] LIN K M, WU J P. Effect of introducing frogs and fish on soil phosphorus availability dynamics and their relationship with rice yield in paddy fields[J]. *Scientific Re-*

- ports, 2020, 10(1): 21.
- [29] ZHANG J, HU L L, REN W Z, et al. Rice-soft shell turtle coculture effects on yield and its environment[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2016, 224: 116-122.
- [30] 喻记新, 李为, 刘家寿, 等. 稻虾综合种养对稻田土壤肥力和金属元素含量的影响[J]. *水产学报*, 2021, 45(3): 453-461.
- [31] 董稳军, 徐培智, 张仁陟, 等. 土壤改良剂对冷浸田土壤特性和水稻群体质量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(7): 810-816.
- [32] 郭乾坤, 梁国庆, 周卫, 等. 长期有机培肥提高红壤性水稻土生物学特性及水稻产量的微生物学机制[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(3): 492-501.
- [33] WANG Q S, YU K L, ZHANG H. Controlled-release fertilizer improves rice matter accumulation characteristics and yield in rice-crayfish coculture[J]. *Agriculture*, 2022, 12(10): 1674.
- [34] ZHAO Z, CHU C B, ZHOU D P, et al. Soil bacterial community composition in rice-fish integrated farming systems with different planting years[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 10855.
- [35] ZHANG Y, CHEN M, ZHAO Y Y, et al. Destruction of the soil microbial ecological environment caused by the over-utilization of the rice-crayfish co-cropping pattern[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 788: 147794.
- [36] WU Y Y, LI Y, NIU L H, et al. Nutrient status of integrated rice-crayfish system impacts the microbial nitrogen-transformation processes in paddy fields and rice yields[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 836: 155706.
- [37] ZHANG C M, MI W J, XU Y Z, et al. Long-term integrated rice-crayfish culture disrupts the microbial communities in paddy soil[J]. *Aquaculture Reports*, 2023, 29: 101515.
- [38] 刘鸣达, 安辉, 王厚鑫, 等. 不同稻蟹生产模式效益比较的初步研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2009(1): 53-56.
- [39] 陈晓云, 孙文涛, 于凤泉, 等. 稻蟹生态种养模式对稻田土壤肥力及生产效益的影响[J]. *土壤通报*, 2021, 52(5): 1165-1172.
- [40] 胡亮亮, 唐建军, 张剑, 等. 稻-鱼系统的发展与未来思考[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(3): 268-275.
- [41] 曹凑贵, 江洋, 汪金平, 等. 稻虾共作模式的“双刃性”及可持续发展策略[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(9): 1245-1253.
- [42] DOU Z, MI C S, LU H K, et al. Insights from farmers' rice culture practices under integrated rice-crayfish farming system in the Hongze Lake District of China[J]. *Agriculture*, 2023, 13(12): 2229.
- [43] 朱德峰, 张玉屏, 陈惠哲, 等. 中国水稻栽培技术发展展望[J]. *中国稻米*, 2021, 27(4): 45-49.
- [44] 金军, 薛艳凤, 于林惠, 等. 水稻不同种植方式群体质量差异比较[J]. *中国稻米*, 2006, 12(6): 31-33.
- [45] 李杰, 张洪程, 龚金龙, 等. 不同种植方式对超级稻植株抗倒伏能力的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(11): 2234-2243.
- [46] 张荣萍, 马均, 王贺正, 等. 不同灌水方式对水稻生育特性及水分利用率的影响[J]. *中国农学通报*, 2005, 21(9): 144-150.
- [47] 徐芬芬, 曾晓春, 石庆华, 等. 不同灌溉方式对水稻根系生长的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(1): 102-104.
- [48] ZHANG H, XUE Y G, WANG Z Q, et al. An alternate wetting and moderate soil drying regime improves root and shoot growth in rice[J]. *Crop Science*, 2009, 49(6): 2246-2260.
- [49] 杨建昌, 张建华. 水稻高产节水灌溉[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [50] 凌启鸿. 水稻精确定量栽培理论与技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [51] OHE M, OKITA N, DAIMON H. Effects of deep-flood-irrigation on growth, canopy structure and panicle weight yield under different planting patterns in rice[J]. *Plant Production Science*, 2010, 13(2): 193-198.
- [52] YANG J C, ZHANG J H. Crop management techniques to enhance harvest index in rice[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2010, 61: 3177-3189.
- [53] CHAPAGAIN T, RISEMAN A, YAMAJI E. Achieving more with less water: Alternate wet and dry irrigation (AWDI) as an alternative to the conventional water management practices in rice farming[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2011, 3(3): 3.
- [54] ROTHUIS A J, VROMANT N, XUAN V T, et al. The effect of rice seeding rate on rice and fish production, and weed abundance in direct-seeded rice-fish culture[J]. *Aquaculture*, 1999, 172(3/4): 255-274.
- [55] 丁伟华, 李娜娜, 任伟征, 等. 传统稻鱼系统生产力提升对稻田水体环境的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(3): 308-314.
- [56] 周榆淇, 邹冬生, 王安崇, 等. 长期淹水条件下稻鱼复合种养对土壤养分和酶活性的影响[J]. *农业现代化研究*, 2022, 43(5): 911-920.
- [57] YUAN P L, LI X H, NI M L, et al. Effects of straw return and feed addition on the environment and nitrogen use efficiency under different nitrogen application rates in the rice-crayfish system[J]. *Plant and Soil*, 2022, 475(1): 411-426.
- [58] 龙瑞平, 杨兆春, 穆家伟, 等. 稻鱼共作下氮肥减量后移对水稻生长和氮肥利用效率的影响[J]. *土壤*, 2022, 54(4): 708-714.
- [59] 徐涛, 刘方平, 倪才英, 等. 稻鳖共生体系中不同施肥类型对水稻产量和品质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(14): 61-65.
- [60] 倪明理, 邓凯, 张文宇, 等. 稻虾种养对水稻产量和粮食安全的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2022, 30(8): 1293-1300.
- [61] 吴雪, 谢坚, 陈欣, 等. 稻鱼系统中不同沟型边际弥补效果及经济效益分析[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(5): 995-999.

- [62] 唐建军, 陈欣, 胡亮亮, 等. 稻渔共生生态系统中沟坑问题与最大允许沟宽的推算及应用[J]. 中国水产, 2021(4): 58-61.
- [63] HU L L, ZHANG J, REN W Z, et al. Can the co-cultivation of rice and fish help sustain rice production?[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 28728.
- [64] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 稻渔综合种养通用技术要求: GB/T 43508—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023: 1-2.
- [65] TSURUTA T, YAMAGUCHI M, ABE S, et al Effect of fish in rice-fish culture on the rice yield[J]. Fisheries Science, 2011, 77(1): 95-106.
- [66] 徐敏, 马旭洲, 王武. 稻蟹共生系统水稻栽培模式对水稻和河蟹的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(9): 1828-1835.
- [67] 丁伟华. 中国稻田水产养殖的潜力和经济效益分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [68] 张剑, 胡亮亮, 任伟征, 等. 稻鱼系统中田鱼对资源的利用及对水稻生长的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(1): 299-307.
- [69] 彭成林, 袁家富, 贾平安, 等. 长期稻虾共作模式对不同施氮量下直播水稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 河南农业科学, 2020, 49(4): 15-21.
- [70] 谷婕, 吴涛, 王忍, 等. 稻鱼生态系统对水稻产量及其构成因素的影响[J]. 作物研究, 2019, 33(5): 378-381.
- [71] 朱练峰, 房伟平, 庄雪浩, 等. 稻蛙共作对土壤理化特性和水稻产量的影响[J]. 中国稻米, 2023, 29(5): 23-27.
- [72] VROMANT N, DUONG L T, OLLEVIER F. Effect of fish on the yield and yield components of rice in integrated concurrent rice-fish system[J]. Journal of Agricultural Science, 2002, 138(1): 63-71.
- [73] 车阳, 程爽, 田晋钰, 等. 不同稻田综合种养模式下水稻产量形成特点及其稻米品质 and 经济效益差异[J]. 作物学报, 2021, 47(10): 1953-1965.
- [74] GAO H, LI Y Y, ZHOU Y C, et al. Influence of mechanical transplanting methods and planting geometry on grain yield and lodging resistance of *Indica* rice Taoyouxiangzhan under rice-crayfish rotation system[J]. Agronomy, 2022, 12(5): 1029.
- [75] 李伟晶, 王洪媛, 张怡彬, 等. 稻蟹共生对稻田病虫草害和水稻产量的影响[J]. 湖北农业科学, 2023, 62(9): 64-69.
- [76] SONG J H, WANG Y, CHEN L R, et al. Higher relative humidity and more moderate temperatures increase the severity of rice false smut disease in the rice-crayfish co-culture system[J]. Food and Energy Security, 2022, 11(1): e323.
- [77] 郭瑶, 肖求清, 曹凑贵, 等. 稻虾共作对稻田杂草群落组成及物种多样性的影响[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(2): 17-24.
- [78] CHAUHAN B. Weed ecology and weed management strategies for dry-seeded rice in Asia[J]. Weed Technology, 2012, 26(1): 1-13.
- [79] JURAIMI A S, AHMAD HAMDANI M S, ANUAR A R, et al. Effect of water regimes on germination of weed seeds in a Malaysian rice field[J]. Australian Journal of Crop Science, 2012, 6(4): 598-605.
- [80] 史骏, 陈若霞, 湛江华, 等. 苗期水分管理对水稻分蘖及除草剂控草效应的影响[J]. 植物保护, 2022, 48(3): 299-304.
- [81] 曹凑贵, 蔡明历. 稻田种养生态农业模式与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [82] 朱元宏, 王新其, 姚洁, 等. 晚粳水稻新品种在蛙稻生态种养模式下的种植表现研究[J]. 现代农业科技, 2014, 11: 26-28.
- [83] 陈秀晨, 白一松, 王士梅, 等. 适宜稻原鳖共生模式的水稻品种筛选研究[J]. 湖北农业科学, 2018, 57(6): 29-30.
- [84] 唐茂艳, 王强, 陈雷, 等. 适合稻鱼系统的水稻品种筛选研究[J]. 中国稻米, 2019, 25(3): 129-131, 134.
- [85] 吴芸紫, 张华, 谢磊, 等. 20 个水稻品种稻虾栽培比较试验结果及评价[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(10): 15-17.
- [86] LI M J, HU X Y, HU R, et al. Evaluating rice varieties for suitability in a rice-fish co-culture system based on lodging resistance and grain yield[J]. Agronomy, 2023, 13(9): 2392.
- [87] XU Q, DAI L X, SHANG Z Y, et al. Application of controlled-release urea to maintain rice yield and mitigate greenhouse gas emissions of rice-crayfish coculture field[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2023, 344: 108312.



高 辉, 博士, 教授, 扬州大学水稻产业工程技术研究院院长、兼任中国作物学会栽培专业委员会秘书、中国水产学会稻渔综合种养专业委员会委员、中国稻渔综合种养产业协同创新平台专家。先后主持国家重点研发计划课题 2 项, 以及国家粮食丰产科技工程江苏水稻项目课题等 30 多项; 主编出版著作 1 部, 参编 4 部, 发表学术论文 60 余篇, 获国家版权局计算机软件著作权 22 项。参与制定 GB/T 43508—2023《稻渔综合种养通用技术要求》(排名第 4)。第 2 作者提交的“关于将‘稻田综合种养’建成稳粮兴渔的绿色高效产业的建议”报告获国务院及农业农村部领导批示, 并被农业农村部文件采纳。荣获 2005 年度教育部提名国家科学技术进步奖二等奖(排名第 21)、2006 年度省农业科技成果转化一等奖(排名第 12)、2011 年江苏省农业技术推广三等奖(排名第 7)、2018—2019 年度神农中华农业科技奖一等奖(排名第 18)、2020 年江苏省农业技术推广三等奖(排名第 2)、2020—2021 年度神农中华农业科技奖二等奖(排名第 10)等。