

章家恩, 韦生宝, 刘兴, 等. 稻渔综合种养研究进展与展望 [J]. 华南农业大学学报, 2024, 45(6): 812-824.
ZHANG Jiaen, WEI Shengbao, LIU Xing, et al. Research progress and prospect of integrated rice-fish coculture[J]. Journal of South China Agricultural University, 2024, 45(6): 812-824.

特约综述

稻渔综合种养研究进展与展望

章家恩, 韦生宝, 刘兴, 孙道琳, 石兆基

(华南农业大学 资源环境学院/广东省现代生态农业与循环农业工程技术研究中心/
农业农村部华南热带农业环境重点实验室, 广东 广州 510642)

摘要: 稻渔综合种养是我国当前正在鼓励、支持和大力推广应用的绿色低碳农业发展模式, 生产实践面积日益扩大, 相关的理论与实践研究成果不断增加, 新技术、新模式、新情况和新问题不断涌现。本文对我国稻渔综合种养的发展现状、重要研究领域及相关进展进行了综述, 分析了稻渔综合种养生产亟待解决的关键问题, 即科学化与精准化问题、标准化与套餐化问题、轻简化与智慧化问题、多功能化与产业化问题。并对稻渔综合种养研究和产业化发展进行了展望, 具体包括: 1) 稻渔综合种养技术模式的定位化、网络化和长期化试验观测研究; 2) 稻渔综合种养关键/配套/接口技术创新及其系统集成研究; 3) 稻渔综合种养技术的标准化、智慧化与产业化研究; 4) 稻渔综合种养增汇减排与绿色低碳发展研究。为更好地推进我国稻渔综合种养的相关研究以及稻田生态产业的高质量发展提供参考。

关键词: 生态种养; 稻鱼共生; 生物多样性; 低碳农业; 温室气体排放

中图分类号: S964.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2024)06-0812-13

Research progress and prospect of integrated rice-fish coculture

ZHANG Jiaen, WEI Shengbao, LIU Xing, SUN Daolin, SHI Zhaoji

(College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University/Guangdong Engineering Technology Research Centre of Modern Ecoagriculture and Circular Agriculture/Key Laboratory of Agro-Environment in the Tropics, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Integrated rice-fish coculture is a green and low-carbon agricultural development model which is currently encouraged, supported, vigorously promoted and applied with an expanding production practice area in China. In the meantime, there are increasingly relevant theoretical and practical research findings, along with some new emerging technologies, modes, situations and issues. This paper reviewed the development status, key research fields and related progress of integrated rice-fish coculture in China, and analyzed the key issues and development directions to be solved urgently for scientification & precision, standardization & package, smartization & simplification and multifunction & industrialization of integrated rice-fish coculture at present. The prospects for the future research and industrialization of integrated rice-fish coculture were put forward in

收稿日期: 2024-09-09 网络首发时间: 2024-10-23 08:43:18

首发网址: <https://link.cnki.net/urlid/44.1110.s.20241022.1109.002>

作者简介: 章家恩, 教授, 博士, 主要从事农业生态、土壤生态和生物入侵等研究, E-mail: jeanzh@scau.edu.cn

基金项目: 广东省重点领域研发计划 (2021B0202030002); 广东省现代农业产业技术体系创新团队建设项目 (2022KJ105)

four aspects including the long-term and networking field observation researches on technologies and models of the integrated rice-fish coculture, the innovation and integration of key/supporting/interfacing technologies and optimal coculture systems, the standardization, smartization and industrialization of technologies for integrated rice-fish coculture, and the carbon/nitrogen sink enhancement, emission reduction and green and low-carbon development. This paper could provide references for better promoting relevant research of integrated rice-fish culture as well as the high-quality development of paddy eco-industry in China.

Key words: Ecological farming; Rice-fish coculture; Biodiversity; Low-carbon agriculture; Greenhouse gas emission

水稻 (*Oryza sativa* L.) 是世界上超半数人口的主粮作物。联合国粮食及农业组织 (FAO) 相关数据显示, 全球水稻种植面积已超过 1.6 亿 hm^2 , 年总产量达 7.8 亿 $\text{t}^{[1]}$ 。随着全球人口的不断增长和经济社会的快速发展, 到 2050 年水稻产量需增加 30% 才能满足需求^[2]。中国是世界上最大的水稻生产国和消费国, 2021 年水稻种植面积约占全球水稻种植面积的 18.2%, 产量约占全球总产量的 27.2%, 全国 60% 以上的人口以大米为主食^[1-3]。因此, 稳定水稻种植面积和提高水稻产量对于保障中国乃至世界粮食安全都至关重要。过去几十年, 得益于水稻育种与品种改良、大量的农用化学品投入以及对灌溉设施、推广教育服务和补贴的投资^[4-5], 全球水稻产量稳步增长。然而, 相关研究表明, 仅水稻生产就消耗掉了全球 30% 的灌溉用水、14% 的化肥用量和 10% 的杀虫剂用量^[6-8]。长期过量使用化肥和农药造成了诸如土壤酸化、生物多样性降低、农业面源污染和水体富营养化等生态环境问题^[9-11]。水稻生产是温室气体排放的重要来源, 由此产生的甲烷 (CH_4) 和氧化亚氮 (N_2O) 排放量分别占全球农业温室气体排放量的 30% 和 11%^[12-13]; 此外, 水稻生产的劳动力成本高、经济效益低, 导致农民种植水稻的积极性不断降低^[14]。当前在水稻单一化和“石油农业”生产方式所引发的生态环境问题和经济效益低的双重压力下, 水稻粮食安全及可持续发展面临着严峻挑战, 水稻优质丰产、绿色高效及低碳健康生产日益受到关注。

稻渔综合种养是在稻田中将水稻种植和鱼类动物养殖相结合的“一水多用”“一田多收”农业模式, 起源于水稻-野生鱼共生系统 (鱼大多由地表径流或人工灌溉从河溪或水库随水流入, 而非人工养殖)。全球 117 个水稻生产国中有 47 个国家推广应用稻田种养模式, 约占全球水稻生产国的 40%^[15]。稻田种养模式主要集中在亚洲地区, 其水稻及水产品产量占全球 90% 以上^[16]。中国、印度、

印度尼西亚、孟加拉、越南、菲律宾、泰国、日本、韩国和伊朗等均开展了稻田种养^[15-16], 北美的美国^[17], 南美的巴西^[18], 欧洲的西班牙和德国^[19-20], 非洲的加纳^[21] 和尼日利亚^[22] 也有报道。中国的稻田养鱼起源于汉代, 迄今有 2 000 多年历史, 是世界上最早开展稻田养鱼的国家^[23]。解放前我国稻田养鱼基本上都处于自然发展状态, 自新中国成立以来, 我国的稻田养鱼大致经历了恢复发展阶段 (1953 年至 20 世纪 70 年代末)、技术体系建立阶段 (20 世纪 80 年代初至 90 年代初)、快速发展阶段 (20 世纪 90 年代初至 2000 年前后)、转型升级发展阶段 (2000—2011 年)、新一轮高效发展阶段 (2012 年至今)。“十三五”和“十四五”期间, 我国稻渔综合种养产业蓬勃发展, 种养面积稳步扩大^[24]。2016—2018 年连续 3 年“中央 1 号文件”和相关规划均明确表示支持发展稻田综合种养。2022 年农业农村部印发《关于推进稻渔综合种养产业高质量发展的指导意见》, 进一步促进了稻渔综合种养产业的大力发展, 使之逐渐从数量增长型向质量效益型转变, 进入高质量发展新阶段^[24-25]。随着稻渔综合种养产业的不断发展壮大, 新技术和新模式不断涌现, 新问题和新情况也不断出现, 相关科学研究、技术研发和推广应用也在全面开展。为了更好地推进我国稻渔综合种养科学化和产业化发展, 本文对该领域的发展现状、研究进展及亟待解决的科学问题和生产实践问题进行了总结, 并对重点研究方向及产业发展进行了展望。

1 中国稻渔综合种养发展现状

1.1 稻渔综合种养的主要类型及分布格局

稻渔综合养分的类型丰富多彩。目前, 国内外尚未形成有关稻渔综合养分的分类体系。从现有的稻渔综合种养生产实践来看, 可以从地貌类型、田间工程、稻/鱼品种组合、耕作生产方式等多维度、多层次、多应用场景建立分类体系。从地貌类型来

看, 稻渔综合种养可分为平原、山区和丘陵梯田 3 种类型; 从田间工程来看, 可分为沟坑、微沟、平田和组合等类型。从水稻种类和特性来分, 可分为早/中/晚稻养鱼、籼/粳稻养鱼、常规稻/杂交稻养鱼等类型。按照稻田养殖的动物分类, 从广义上讲, 稻渔综合种养一般可分为稻鱼(鲤鱼、鲫鱼、草鱼、罗非鱼等)共生、稻虾(小龙虾、南美白对虾、日本沼虾、罗氏沼虾、红螯螯虾、中华小长臂虾、凡纳滨对虾、刀额新对虾等)共生/轮作、稻蟹(中华绒螯蟹等)共生、稻鳖(乌龟)共生/轮作、稻蛙(虎纹蛙、黑斑蛙、牛蛙、美国青蛙等)共生、稻鳝共生、稻鳅(泥鳅、大鳞副泥鳅、龙江花鳅等)共生、稻贝(珍珠蚌)共生、稻螺(中华圆田螺、环棱螺等)共生、稻禾虫共生, 以及水稻与其他鱼类物种组合类型。根据水稻种植与水产养殖的结合方式, 可分为单季稻养鱼、双季稻养鱼、水旱轮作养鱼、水稻免耕养鱼等, 以及共作、连作、轮作、共作+连作等综合种养模式^[24]。

由于各地稻田资源、水资源、稻作模式不同以及水产养殖产业基础和水产养殖品种的生态适应性不同, 我国逐渐形成了稻虾、稻鱼、稻蟹等三大种养主产区, 以及稻鳅、稻鳖、稻蛙、稻螺等小品种种养点状分布的发展格局。从种养面积来看, 稻虾、稻鱼、稻蟹综合种养在生产上成为主流生产模式, 2023 年稻虾综合种养面积占全国稻田种养面积的 56.37%, 稻鱼综合种养面积占比为 31.39%, 稻蟹综合种养面积占比为 5.90%, 稻鳅、稻螺、稻蛙综合种养面积分别占 0.56%、0.27% 和 0.27%, 其他占 5.25%^[26]。

1.2 稻渔综合种养的生产规模

20 世纪 80 年代以来, 我国稻渔综合种养面积和水产品产量总体上呈增长趋势, “十三五”以后, 稻渔综合种养面积和水产品产量均出现大幅度快速提升(表 1)。2023 年, 我国有稻渔综合种养面积统计的省(区、市) 28 个, 北京、西藏、青海 3 个省(区、市) 未见统计, 另未包括港澳台地区。全国稻渔综合种养面积 299.36 万 hm^2 , 面积超 6.67 万 hm^2 的省份 10 个, 依次为湖北、安徽、湖南、四川、江苏、贵州、江西、云南、辽宁、河南, 这 10 个省面积总和占全国的 87.51%, 其中, 湖北、安徽、湖南、四川均超过 33.3 万 hm^2 ; 全国稻渔综合种养水产品产量 416.65 万 t, 占全国淡水养殖水产品产量的 12.20%, 水产品产量超 10 万 t 的省份 7 个, 依次为湖北、安徽、湖南、四川、江苏、江西、浙江, 这 7 个省水产品产量总和占全国的 89.74%^[26]。

表 1 1982—2023 年我国稻渔综合种养面积和水产品产量
Table 1 Area and production of integrated rice-fish coculture in China from 1982 to 2023

年份	面积/万 hm^2	产量/万t	年份	面积/万 hm^2	产量/万t
1982	33.11	1.72	2003	161.95	101.44
1983	38.80	4.30	2004	163.61	104.02
1984	46.11	6.88	2005	155.59	101.45
1985	55.85	8.61	2006	145.17	106.60
1986	67.23	10.33	2007	150.89	116.05
1987	70.53	10.33	2008	140.47	116.06
1988	68.15	12.05	2009	134.48	120.36
1989	70.23	12.92	2010	127.67	122.08
1990	71.10	12.92	2011	126.52	123.80
1991	71.17	14.64	2012	136.65	133.25
1992	73.65	17.23	2013	151.65	143.56
1993	78.15	19.81	2014	149.29	147.86
1994	83.05	22.39	2015	150.16	155.82
1995	96.03	32.70	2016	148.40	162.84
1996	110.61	41.29	2017	168.27	194.75
1997	125.61	49.02	2018	202.48	233.31
1998	137.01	57.61	2019	234.66	291.33
1999	149.99	67.07	2020	246.01	317.06
2000	154.09	77.38	2021	264.41	355.69
2001	156.56	91.12	2022	286.37	387.22
2002	162.28	104.87	2023	299.36	416.65

1.3 稻渔综合种养的区域分布

我国稻渔综合种养分布范围广, 基本覆盖华中、华东、西南、华南、东北和西北等各水稻产区, 但由于受气候和生态环境、水稻生产、鱼类动物适应性、种养习惯、劳动力状况和消费市场等方面综合影响, 水稻种植区和各省(市、区)稻渔综合种养面积和水产品产量规模发展很不平衡^[27]。从综合种养面积来看, 华中单双季稻区、西南单双季稻区和东北单季稻区是稻渔综合种养的主要分布区, 其中, 华中单双季稻区占绝对优势(图 1)。在稻鱼品种组合等方面呈现明显的区域差异, 其中, 稻虾连作/共作模式主要分布在湖北、安徽、湖南、江苏、江西、河南、四川、浙江、重庆、广西等省(市、区); 稻鱼共作模式主要分布在浙江、福建、江西、湖南、四川、贵州、云南、广西、黑龙江、吉林等省(区); 稻鳅共作模式主要分布在河南、浙江、江苏、河北、湖北、重庆、天津、湖南、安徽等省(市); 稻蟹共作模式主要分布在黑龙江、吉林、辽宁、天津, 其余主要分布于长江中下游地区; 稻鳖共作、轮作模式主要

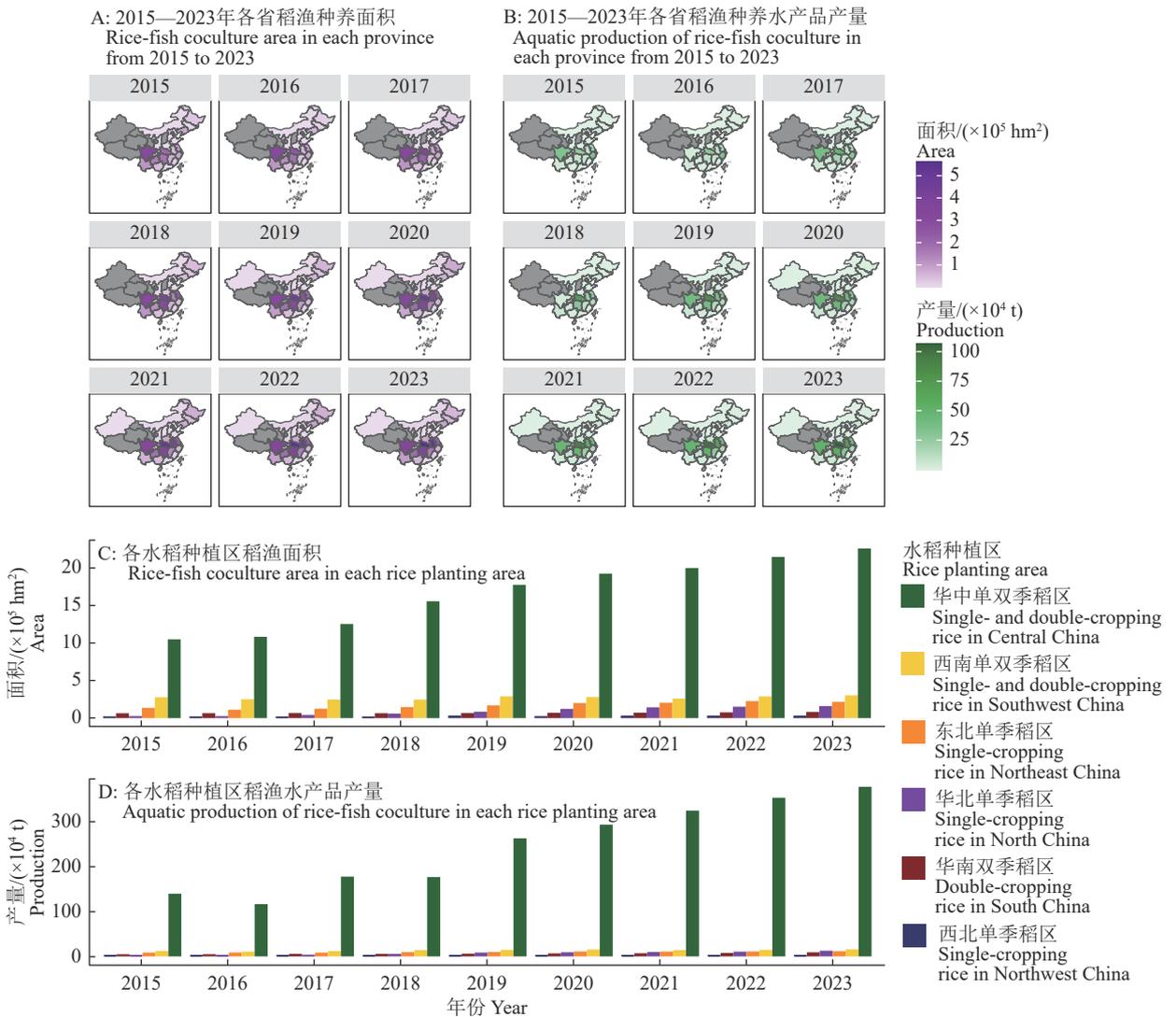


图 1 2015—2023 年中国主要省(区、市)及水稻种植区的稻渔综合种养面积和水产品产量的时空变化

Fig. 1 The spatio-temporal changes of area and production of integrated rice-fish coculture in the provinces and main rice planting regions in China from 2015 to 2023

分布在浙江、湖北、福建以及江苏、天津等省(市)^[24, 26]。

1.4 稻渔综合种养的综合效益

据统计,全国单一种植水稻每 667 m² 的平均纯收益不足 200 元。2017 年全国稻渔综合种养测产和产值分析表明,稻渔综合种养的经济效益明显提升,比单种水稻每 667 m² 的平均收益可增加 90% 以上^[24]。Cui 等^[16] 的研究结果表明,开展稻渔综合种养 (2 212 美元/hm²) 比单种水稻 (1 019 美元/hm²) 的平均净收入几乎翻了一番;不同种养系统中,多品种养殖动物组合种养系统的净利润较水稻单作提高了 393%,其次是稻虾共作系统 (+197%) 和稻鱼共作系统 (+98%);水稻单作向稻渔综合种养转变后氮利用效率提高 6%,向大气中排放的氨减少 9%,更多的氮被固定在水稻、水体和土壤中,平均农药使用量减少 67%。稻渔综合种养通

过利用水稻和动物的生态位互补促进了系统内的物质循环,从而提高资源利用效率^[28]。Yu 等^[29] 通过 Meta 分析发现,稻渔综合种养显著降低水稻病虫害发生率,甲烷排放降低 14.8%。

从社会效益来看,稻渔综合种养具有稳定粮食生产的作用。据统计,我国稻渔综合种养面积由 2015 年的 150.16 万 hm² 发展到 2023 年的 299.33 万 hm²,稻渔综合种养可观的经济效益大大调动了农民种植水稻的积极性^[24, 26]。以小龙虾养殖为例,2023 年全国稻虾种养面积 168.67 万 hm²,占小龙虾养殖总面积的 85.76%^[30];2022 年小龙虾产业综合产值高达 4 580 亿元^[31]。稻虾共生作为典型的稻渔综合种养模式在解决稻田撂荒闲置、增加农民收入、扩展水产养殖空间、保障水产品供给、稳定粮食生产等方面发挥了积极作用。

2 稻渔综合种养系统的功能效应研究进展

相对于水稻单一化生产系统, 稻渔综合种养是将鱼类等水生动物引入稻田, 充分利用稻田的空间和时间生态位, 发挥鱼类动物在中耕松土、搅水增氧、养分转化、捕虫吃草、排便肥土、食菌防病、触

碰促生等方面的活动或行为作用, 优化稻田生态系统的结构, 激活和强化稻田在涵养水源、小气候调控、节肥节药、节能降耗、节地降本、增汇减排、生物多样性保育、稳粮增效等方面的生态服务功能(图 2)。近年来, 围绕稻鱼种养系统的结构和功能、效应与过程等重点领域开展了大量的研究, 并取得了一定的进展。

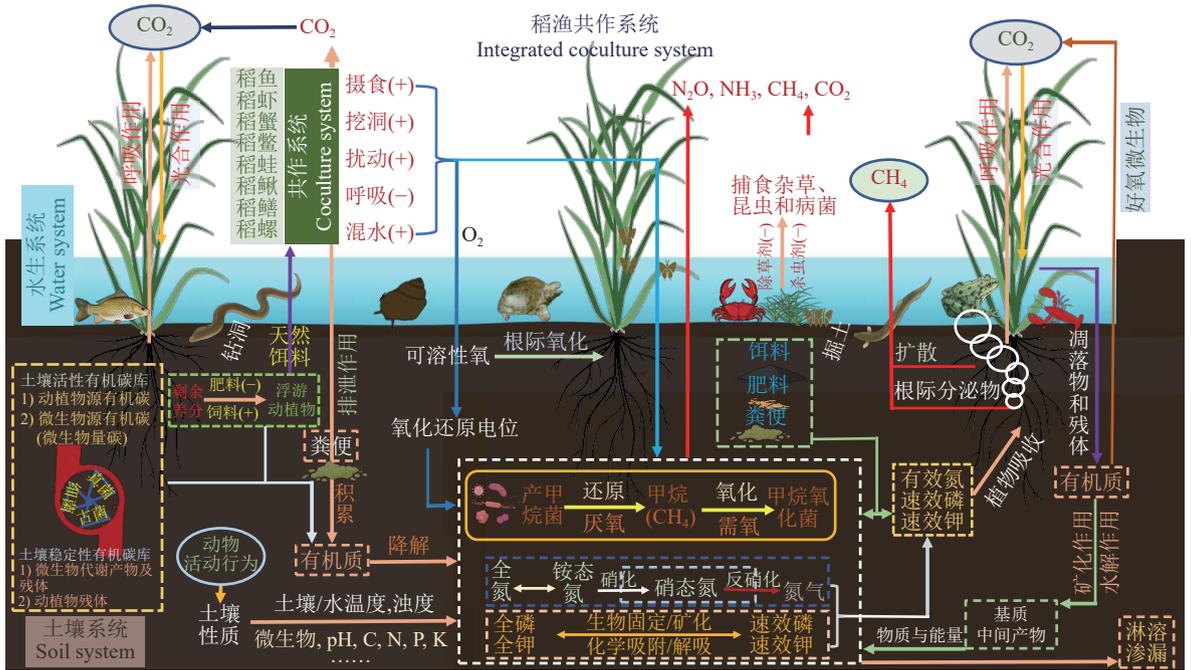


图 2 稻渔综合种养系统的结构与功能示意图

Fig. 2 Schematic structure and function of integrated rice-fish coculture system

2.1 能量与物质多级利用效率研究

能量流动与物质循环是生态系统的基本功能, 也是有关农田生态系统的重要研究内容。稻田中存在大量的细菌、浮游植物、浮游动物以及部分底栖动物, 在水稻单一化生产中, 因未被充分利用而造成了日光能的直接或间接损失^[32]。在稻鱼共作系统中, 水产动物能够有效利用这部分浪费的生物质能量, 并转化为经济价值, 不仅能够促进水稻增产, 还能获取多重经济效益。在鱼类单一养殖系统中, 只有少量的饲料养分被同化到鱼体中^[33]; 而稻田种养系统中未被消耗的饲料中的养分会被分解释放, 然后被水稻或其他植物吸收利用^[34]; 此外, 未被养殖动物同化的饲料会通过粪便排泄物释放, 继而被水稻植物和其他生物利用。一个运行良好的稻鱼共生系统中作物秸秆、饲料、浮游动植物、鱼粪可充分转化为养分, 实现物质循环和能量的多级利用, 进而提高产量^[35]。钟波^[36]研究表明在稻田内养殖泥鳅可提高生态系统能量转换率和物质转化率, 可持续性较高。Dong 等^[37]基于 Ecopath 模型方法建立稻虾

系统食物网模型的研究发现, 稻虾系统的食物网结构不稳定、简单、线性, 认为稻虾种养模式仍需进一步改进。可见, 相比于单一化水稻生产和单一化水产养殖系统, 尽管稻渔综合种养提升了稻田物质和能量的利用率, 但若物种组配结构不相宜、物料投入(水-肥-药-饲)比例不合理、技术管理不配套, 也不一定能实现农田生态系统能量和物质转化利用的最优化和最大化。因此, 稻渔综合种养生态系统的能流、物流仍将是今后需要研究的重点方向。

2.2 水稻病虫害草害防控效应研究

稻渔综合种养在一定程度上可减轻和防控水稻病虫害的发生, 是实现水稻病虫害绿色防控的重要手段。稻田中养殖动物的穿行碰撞、除草、清理病残叶片等行为会增加田间通风透光能力、降低田间湿度、限制菌丝的正常生长、降低病菌的蔓延和扩展, 从而减轻水稻病害的发生与危害^[38-39]。陈欣等^[40]研究表明, 稻鱼共作中鱼的游动和触碰等行为能够抖落水稻叶片上的露珠, 减少稻瘟病孢子

萌发和菌丝穿透。与水稻单作相比,稻鱼共作可以使纹枯病发病率减少 2.40%~28.99%、稻瘟病发病率减少 8.38%^[41-42]。稻田种养能有效减轻和控制水稻虫害的发生。相比于水稻单作,稻虾共作可减少 30.38% 的二化螟和三化螟及 51.48% 的褐飞虱^[43],稻鱼共作可减少 34.56%~65.10% 的稻飞虱^[42, 44-45]。吴敏芳等^[46]研究表明,稻鱼共作可以减少稻纵卷叶螟幼虫和成虫的密度,显著降低水稻卷叶率,鱼虽然对稻纵卷叶螟较难产生直接作用,但鱼的活动会对稻田环境产生干扰,间接影响蛾的产卵,而且,因触碰和撞击掉落入水中的幼虫也会被鱼取食。稻田杂草也是造成水稻减产的重要因素之一。稻田综合种养通过向稻田食物链中增加杂食性的水产(禽)动物来减轻杂草危害,把鸭子、鱼、虾等物种引入稻田可以有效降低杂草生物量,使杂草群落的物种多样性降低,改变杂草的群落结构,有利于减轻杂草的发生危害^[47-48]。稻渔综合种养对水稻病虫害具有一定的防控和改善作用,但并非对所有的病虫害均有防控作用。今后,需进一步优化稻鱼系统食物链结构,加强对病虫害的防控过程、机理和阈值的研究以及病虫害防控配套技术的组装与集成研究。

2.3 稻田土壤地力提升研究

稻田种养可以通过动物残体、粪便以及饲料增加土壤有机质以及全量养分(全碳、全氮、全磷和全钾)的含量^[28, 49-50]。稻田种养系统中水生动物的活动可以改善土壤物理结构与微生态环境(如土壤空气、质地和结构),增加土壤氮磷有效性,进而提高作物对土壤养分利用效率^[28, 34]。养殖动物排泄物中富含磷和铵态氮,75%~85% 氮素能被植物吸收利用^[51-52]。养殖动物对土壤-水界面的扰动可能导致土壤中被固定养分向水中释放和扩散,从而提高养分有效性^[28]。稻田生态种养还可以影响稻田土壤微生物的多样性与关键类群,当水稻单作向长期稻虾/鳖共作转变时,土壤细菌网络的复杂性、微生物多样性和关键类群的多样性增加^[53-54]。与常规单一稻作相比,为保证水产动物的正常生长,稻渔综合种养的稻田通常长期处于淹水状态,这种情形可能会加速土壤的潜育化过程^[55]。有研究表明,在进行 6 年的稻虾共作后,土壤中总还原物质、活性还原物质、 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 含量均明显提高,土壤潜育化加剧^[56-57]。可见,由于特定的水肥管理方式,稻渔综合种养可能会导致土壤结构、有机质赋存、养分持续动态供给、地力提升等方面的负面影响,对此需引起重视。今后应进一步加强稻田土壤肥力持续提升的

配套技术及其与稻鱼共作的适配协同性研究。

2.4 稻田温室气体排放研究

稻田是温室气体重要排放源之一。稻田种养模式可以通过养殖的动物活动增加稻田水体溶解氧含量、提高土壤氧化还原电位,从而减少 CH_4 排放^[58-59]。这些动物还可以通过影响水稻植株的生长及形态特性间接影响 CH_4 排放。Fang 等^[60-62]研究表明在稻蛙共作系统中,青蛙平均日累积跳动次数可达 124 次,跳动距离长达 18.05 m,蛙的扰动可增加田面水可溶性氧和土壤剖面中氧气含量,促进土壤中甲烷氧化菌对 CH_4 的氧化,从而降低 CH_4 排放, CH_4 的排放量随着养蛙密度的提高而降低;青蛙的扰动降低了稻田土壤中产甲烷菌的丰度,提高了 II 型甲烷氧化菌的丰度。与水稻单作相比,稻虾共作通过增加土壤 NH_4^+-N 含量促进 N_2O 排放,小龙虾在田间的活动提高了土壤氧化还原电位,从而减少稻田 CH_4 排放,总体上全球增温潜势降低^[29, 58]。Guo 等^[63]研究表明,由于 *mcrA* 丰度较低、*pmoA* 丰度较高,稻虾共作稻田的 CH_4 排放显著降低,而 N_2O 排放量处理间差异不显著;稻渔系统中的沟渠也贡献了相当一部分的温室气体排放,沟渠 CH_4 排放量比稻虾共作田面显著提高了 334.5%,且当沟渠面积占系统总面积的比例低于 13.9% 时,稻虾共作系统相较于水稻单作才能降低全球增温潜势。也有研究表明,稻鱼共作由于鱼类动物的呼吸耗氧以及排便、有机肥的施用和作物秸秆返田后的腐解等过程,反而增加稻田温室气体的排放^[64-65]。可见,不同水产动物生长生活特性及行为的差异可能导致稻田生态系统和水土环境的显著变化,最终影响稻田温室气体的减排和增排状况。为更好地强化稻田种养对稻田温室气体的减排效应,需要根据田间资源禀赋,选择适宜的水产动物进行养殖,同时做好相应的田间水肥管理、耕作措施和水稻品种选配等多方面的配套技术。

2.5 水稻产量和品质影响研究

不同稻田种养模式对水稻生长性状与群体形态建成的影响存在差异,这主要取决于不同养殖动物对水稻生长作用的形式以及强度。稻田种养可通过影响水稻群体形态建成从而影响产量。稻鱼共作的水稻分蘖数和成穗数高于水稻单作模式^[66-67],而且稻鱼共作还可改善水稻的光合特性,促进水稻产量的提高^[68]。稻田种养通过改善水稻根系生长促进产量的形成。稻鳅共育模式下水稻拥有更发达的根系,泥鳅活动疏松表土,提高土壤通透性,从而刺激水稻根系生长^[69]。稻蛙共作可增加水稻根系直径、

生物量和体积,从而促进水稻的生长^[61]。稻鱼、稻蟹和稻鳖鱼共作模式下水稻的总根数、根长、根体积、干物质质量、根系活力、超氧化物歧化酶活性均显著高于水稻单作^[70]。也有研究表明稻田种养会对水稻生长产生负面影响,稻蛙共作降低水稻的有效分蘖数、结实率、每穗粒数,从而导致水稻减产^[71];在稻虾共作模式中水稻生育前期的群体茎蘖数较常规稻单作少,最终穗数也略低于常规稻单作模式,这可能与小龙虾对水稻苗的啃食以及掘土影响水稻根系生长有关^[72]。稻渔综合种养因养殖动物的不同以及对农药和化肥减量化施用的特定要求,也会导致水稻减产,因此,需进一步加强稻鱼品种之间的适配、结构优化、肥料施用的优化运筹和病虫害综合防控等配套技术的研究。

稻田生态种养生产出的稻米加工品质、外观品质、营养品质、蒸煮品质、食味品质和卫生品质均有所提升,稻米的垩白粒率、精米率、直链淀粉含量等性状都有不同程度的改善^[73-75];稻鱼、稻虾、稻蟹和稻鳖共作均能够提高稻米精米率,降低垩白度和垩白粒数^[68, 76-80];稻虾共作能够提高稻米蛋白质含量^[81];稻鱼共作可以促进香稻香气前体物质的形成^[82];稻渔综合种养因农药和化肥减量化施用明显降低水稻籽粒中重金属和农药的残留,进而提高稻米的品质^[83-84]。但也有报道稻鱼共作对稻米营养品质的影响不显著^[85]。总体而言,稻田种养对水稻品质有积极影响,但需结合产地环境、水稻品种、水肥管理及养殖动物活动行为等因素,深入研究促进稻米品质提升的相关作用机制和调控路径。

2.6 稻田面源污染风险研究

水稻单作通常为追求高产而大量使用化肥和农药,引起的面源污染制约着农业的可持续生产^[86]。稻田种养有助于培肥土壤、减轻病虫害发生,从而减少或替代化肥、农药等农用化学品的投入,降低了水稻生产带来的面源污染风险^[16, 87]。但也有生产者为了获得更高的水稻和水产品产量而增加氮肥或饲料投入,可能会加剧稻田养分过剩和水体面源污染的风险。与水稻单作相比,稻田种养系统在水稻生育期内田面水体总氮、总磷、铵态氮和硝态氮含量有所增加^[29];与稻麦轮作相比较,稻虾共作模式下农田水的总氮、溶解有机氮和铵态氮含量显著高于稻麦轮作模式,稻麦轮作模式的氮径流损失较稻麦轮作模式增加 103%~85%,沟渠沉积物中铵态氮含量显著提高,稻虾共作系统存在较大的环境风险^[88]。稻田生态种养系统中水产动物活动可改善水土环境,增加稻田的有机质和养分有效

性,有利于作物对养分的吸收利用,但同时也存在稻田氮磷等养分过剩和面源污染的风险。因此,如何兼顾并协调稻田中水稻和养殖动物的营养需求,同时降低稻田及周边的水环境污染风险,是今后在理论和生产实践上需要深入系统开展研究的重要内容。

3 稻渔综合种养亟待解决的关键问题

3.1 科学化与精准化问题

稻渔综合种养是一个多物种共存、多物料投入、具有多重交互作用的复杂生态系统。生物因子(作物-病虫草-浮游生物-鱼类动物-其他生物)、生态环境因子(光-温-水-土-气)、生产投入品(肥料-饲料-药料等)以及管理措施(灌溉-栽培-耕作-机械使用等)之间相互关联,“牵一发而动全身”。目前有关稻田种养的研究大多是在某个区域生态环境条件下,按照一定的试验目的、设计和田间条件完成的,这些案例研究得到的结果和技术参数往往不具有普遍性。因此,如何保证获取到稻渔综合种养过程中具有科学性和精准化的研究结果,是今后需要研究的关键科技问题,包括:1) 水稻品种(如早、中、晚稻等)和鱼类品种(如鱼、虾、蟹等)之间的适配及其优化配置的比例参数确定,以及时空结构的优化布局与安排;2) 饲料投放-鱼类动物排泄-肥料施用-作物秸秆还田-土壤增汇与养分供给-作物产量品质响应等之间的动态平衡与协同机制;3) 鱼类动物-病虫草害-符合安全规定的农药投入-辅助防控措施之间的协同增效机制与调控阈值;4) 农田排灌-田面水层-水稻生长-田鱼生长-温室气体排放-农田水体面源污染等之间的优化运筹与动态调控。这些问题的科学化、系统化与精准化研究,需要通过多学科交叉、长期定位试验、动态监测、大数据分析和模型模拟技术等方法手段,以获取稻渔综合种养系统各要素间关联变化与协同调控的“整体图景”(图 3)。

3.2 标准化与套餐化问题

稻渔综合种养技术模式最终是要通过示范推广走向生产一线,需要不同的生产者去实践应用。由于当前我国农业生产主体已逐步多元化,既有小农户,也有专业大户、家庭农场、农民专业合作社、农业企业等新型经营主体,这些生产主体在农田土地规模、生产目标、资金投入、技术装备、人员配备、基础设施配套、品牌打造、市场营销、防御风险等方面均存在着较大差异。同时,稻渔综合种养技术模式在实际生产应用时也存在时空尺度效应、规模效益

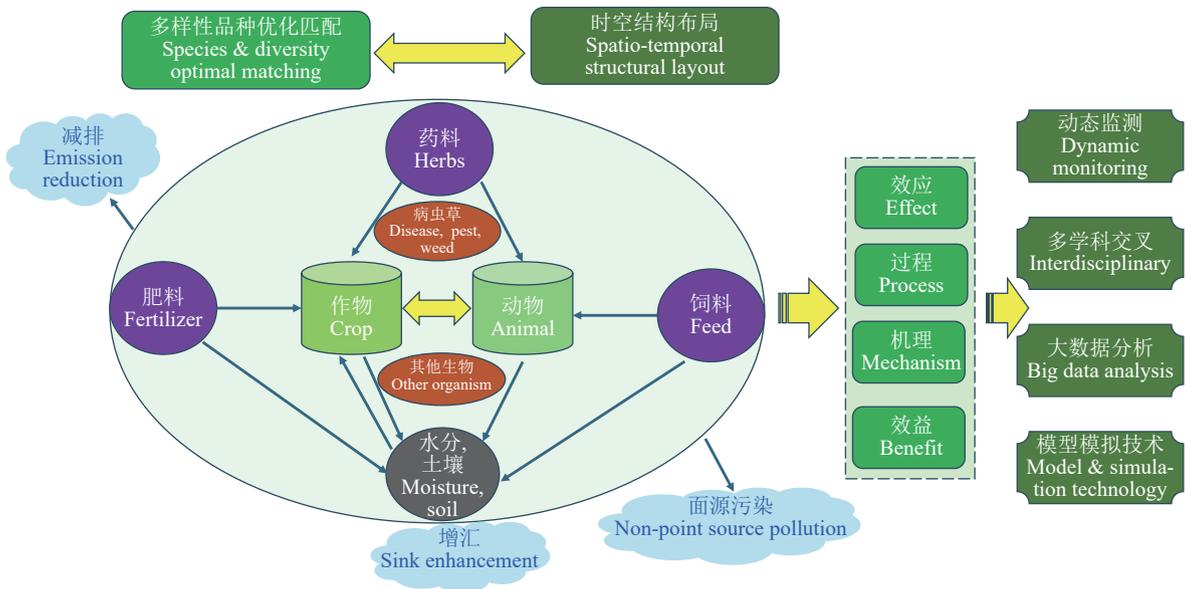


图 3 稻渔综合种养系统的联动过程与协同调控研究框架

Fig. 3 Research framework for linkage process and coordinated regulation of integrated rice-fish coculture system

和因地制宜等相关问题和要求, 因此, 研发建立的稻渔综合种养模式及相应的生产技术规程和标准不能“放之四海而皆准”, 不一定能够满足各类生产者的需求。同时, 现行的生产技术标准大多注重通用性(技术参数较为粗放), 而缺少个性化和特色化选择。因此, 在今后的稻田种养生产技术标准制定工作中, 需要做到面向产地生态环境设计、面向生产者主体设计和面向消费者市场设计, 形成符合多元化需求的定制“标准”。同时, 要将稻渔综合种养技术模块化, 形成一系列技术菜单或定制化“套餐”, 供不同类型和不同生产目的的生产者选择使用。

3.3 轻简化与智慧化问题

随着城镇化和农业劳动力的不断减少, 以及农业机械化和现代化的快速发展, 农业劳动力将逐渐变得“稀缺”, 劳动力成本也势必增加^[89]。因此, 稻渔综合种养技术模式的创新研究和转化应用也需要顺应现代农业和未来经济社会发展的客观需求, 走轻简化、机械化、智慧化和高效化的发展道路。当前, 稻田生态种养技术模式与轻简化、智能化生产还有较大差距, 这也是稻渔综合种养技术现阶段难以大面积推广应用的难点所在。今后的研究中, 需加大稻渔综合种养模式中“生态-农艺-渔艺-农机-智能装备-信息化”等适配与接口技术的系统集成研究, 包括: 1) 稻渔综合种养生态环境-病虫害-作物生长-水分状况-土壤养分-温室气体排放等的全程全天候监测-数据采集传输-系统分析处理-决策支持关键技术研究; 2) 稻渔综合种养模式中水稻“耕种养管收”农艺技术、水产动物的渔艺

技术与农机智能化的全程适配与集成研究, 以及无人农场技术等接口应用与创新研发; 3) 农用化学品(农药、化肥等)的生态替代、减量化施用的轻简生产技术; 4) 适时自动排灌技术、适时自动投喂技术以及自动防鸟技术(防止鸟捕食田鱼)等; 5) 节约化与替代化田间工程建设及少耕/免耕技术, 如少沟种养技术、免挖沟坑/免起垄种养技术、直播稻/再生稻/多年生稻种养技术、水稻免耕种养技术等研究(图 4)。

3.4 多功能化与产业化问题

产业的生态化与生态的产业化是实现农业绿色发展和提质增效的必然要求和必由之路。稻渔综合种养具有优越的生态-生产-生活的多功能性(即“三生”功能), 因此, 需要以稻田生态种养模式为载体, 以产业化为目标, 同步拓展其“三生”功能, 打造新业态(如生态休闲农业、碳中和产业、绿色餐饮业、渔米产品加工业、稻渔相关电子商务、冷链物流、稻鱼文化等), 推进多产融合, 实现生态效益、经济效益和社会效益的协调统一与整体提升。具体而言, 在稻渔综合种养研究中, 重点做好以下 2 个方面的配套技术与决策咨询研究工作: 1) 研究构建“稻渔综合种养”产前、产中、产后有效链接和延伸的全产业链技术体系, 形成有机结合、相互促进、多方共赢的稻渔综合种养产业化机制与多元化运行模式(如企业化生产、公司+农户、农业生产托管、其他新型经营主体等); 2) 推广和发展壮大“综合种养”产业, 开展有利于支撑稻田生态种养产业发展的社会化服务体系构建的实践探索和相关配套优惠政策法规的研究, 如科技服务体系、生产服

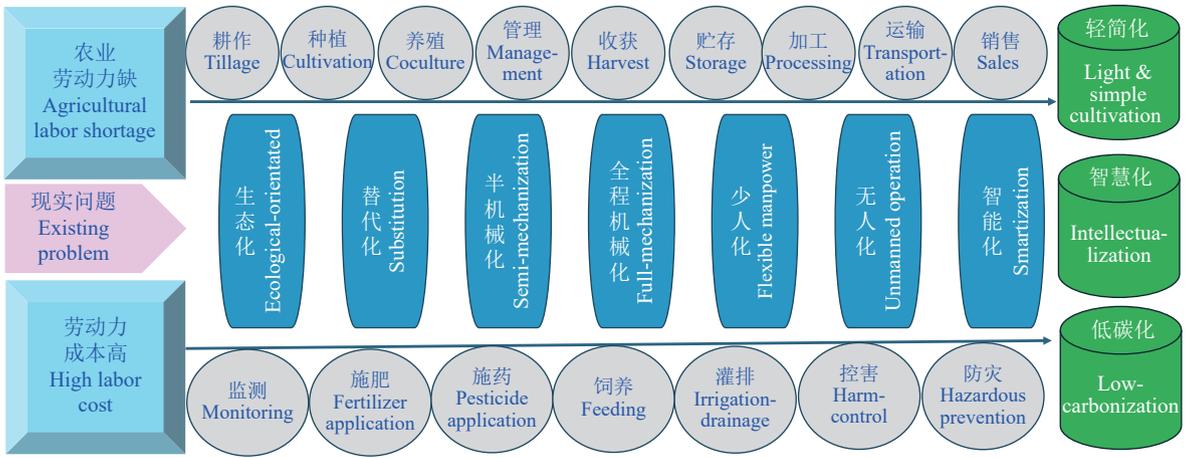


图 4 稻渔综合种养轻简化与智慧化发展方向

Fig. 4 Development of rice-fish integrated coculture to light & simple and smart cultivation direction

务体系、加工服务体系、物流服务体系、市场服务体系、金融服务体系、政策法律服务体系、绿色碳交易服务体系等的研究与探索实践。

4 稻渔综合种养研究展望

4.1 稻渔综合种养技术模式的定位化、网络化和长期化试验观测研究

纵观当前的稻渔综合种养相关研究,尚存在诸多不足,主要包括:1) 由于稻渔综合种养类型(如不同水稻品种和鱼类动物品种的多元化组合)丰富多样,不同研究项目涉及的研究目的、研究地点、试验设计、试验方案、条件控制和研究方法各不相同,因此,得到有关基础科学问题与共性关键技术的研究结果往往不一致,甚至是相反的结论,研究结果之间的参照性和可比性差;2) 短期研究多、长期研究少,个案研究多、共性研究少,局部性和片段性研究多、大尺度和长期变化综合监测研究少;3) 基础理论研究与实践脱节,技术模式较多依赖于经验总结,科学性和精准性不高。今后,可考虑在全国主要水稻产区选取稻渔综合种养研究的优势单位、重点区域和典型模式,建立全国范围的定位化、网络化和长期化试验观测研究基地,采取系统化、一体化的技术路线、研究方法、试验方案和技术规范,开展科学问题、关键技术的长期性和动态性试验观测研究,长期监测和系统研究稻渔综合种养生态系统的结构与功能、过程与效应/效益以及内外部联动作用与协同调控机制,创新研发稻渔综合种养绿色生产的共性关键技术。

4.2 稻渔综合种养关键/配套/接口技术创新及系统集成研究

稻渔综合种养是一项系统工程,涉及到水稻种植与水产动物养殖结合及田间综合管理技术,主要

包括水稻栽培技术、水产品养殖技术、种养茬口衔接技术、施肥技术、病/虫/鸟/螺/草害综合防控技术、稻田水质调控技术、田间工程技术、水产品捕捞技术、稻鱼产品质量控制技术、农业废弃物的资源化利用技术、稻田生态环境监测技术等方面。开展上述常规的生态种养技术研发,加强稻-鱼品种的优化组配、稻田生物多样性培育及功能强化技术、农药/化肥/饲料等减量化或替代化技术、农艺-渔艺-农机一体化适配接口技术、稻渔综合种养全程轻简化/机械化/无人化/智能化技术、田基集约化水产养殖与稻田生态种养耦合技术、原位与异位联用的生态种养技术等核心关键技术的创新研究与协同攻关。在此基础上,根据集约化、个性化、产业化等多元化生产目标,开展稻渔综合种养全产业链的关键/配套/接口技术的系统集成与模式试验示范研究,为稻渔综合种养的大规模推广应用提供体系化、范例式的技术模式支撑。

4.3 稻渔综合种养技术的标准化、智慧化与产业化研究

标准化、智慧化与产业化是推广应用稻田综合种养的必然要求和方向。自“十三五”开始重视稻田生态种养标准的编制工作以来,一批技术标准相继发布实施。2017年,我国首个稻渔综合种养类行业标准《稻渔综合种养技术规范:通则》^[90](以下简称《通则》)发布。《通则》对沟坑占比、水稻产量、种养环境和产品质量等技术指标和要求进行了规范统一,成为规范稻渔综合种养产业发展重要依据。2020年,农业农村部针对稻虾、稻鳖、稻鳅、稻蟹等规模较大、技术模式相对成熟的主导种养模式发布了相应的行业标准^[91]。据统计,目前我国有关稻田种养的各类标准共计225项,其中,国家标准1项、行业标准8项、地方标准216项,包括通则类

标准 13 项、稻虾类标准 73 项、稻蟹类标准 31 项、稻鱼类标准 26 项、稻鸭类标准 22 项、稻鳖类标准 16 项、稻鳅类标准 12 项、稻蛙类标准 7 项、稻鳝类标准 1 项、稻螺类标准 1 项、小品种和品种混养类标准 23 项。这些标准的发布实施,促进了稻渔综合种养产业的规范有序发展。为了满足不同生产者和消费者的个性化需求,今后需进一步加大稻渔综合种养技术和模式的模块化、菜单化、套餐化、定制化的研究和设计,同时,面向现代农业和未来经济社会发展需求,加大稻渔综合种养轻简化、智慧化、信息化和产业化生产技术等高阶性、现代化生产标准的研究与制定工作,加大稻鱼种养的水产品、优质稻米品牌产品标准的编制,推行区域公共品牌建设,同时,建立区域公共品牌的共建共享机制,加大各类相关标准的技术培训和指导服务,搭建“产—加—销”一体化产业化支撑体系,全面推进稻渔综合种养技术的标准化、智慧化、产业化与现代化发展。

4.4 稻渔综合种养增汇减排与绿色低碳发展研究

应对全球气候变化和防控农业面源污染是国内外关注的重要研究课题。稻田是温室气体排放和面源污染的重要来源之一。当前的研究表明,稻渔综合种养对稻田温室气体排放和农业面源污染的影响存在“两面性”,甚至存在相反的结论,因此,稻渔综合种养系统的温室气体减排、面源污染风险防控、生物多样性保育及产业绿色发展问题也将是该领域需要继续加以研究的重要内容。今后,要通过定位化、网络化和长期化的台站与基地之间的对比综合研究,加强对稻渔综合种养系统生态服务功能(价值)与过程机理的全面系统研究,加强稻渔综合种养系统温室气体产生与排放关键过程、作物—根系—土壤—微生物互作机理、土壤 C/N 等源汇转换的过程机理与调控路径、水土环境与面源污染的有效调控阈值及优化运筹管理技术的深入研究,加强对稻田固碳减排关键技术、农用化学品减量化或替代化技术、农田面源污染防控技术、生物多样性保护与病虫害综合防控匹配技术的创新研发,创建气候智慧型 and 生态环境智慧型的多样化稻渔综合种养技术模式,大力开展稻田生态种养生产的生态补偿和碳交易等政策与市场支持机制的研究,有序、有力、有效地推进稻渔综合种养的现代化绿色低碳发展。

参考文献:

- [1] FAO. Food and agriculture data[DB/OL]. (2023-12-23)[2024-08-08]. <https://www.fao.org/faostat/en/#home>.
- [2] VAN ITTERSUM M K. Crop yields and global food security: Will yield increase continue to feed the world?[J]. *European Review of Agricultural Economics*, 2016, 43(1): 191-192.
- [3] CHEN W F, XU Z J, TANG L. 20 years' development of super rice in China: The 20th anniversary of the super rice in China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(5): 981-983.
- [4] CASSMAN K G. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1999, 96(11): 5952-5959.
- [5] SWANSON B E. Global review of good agricultural extension and advisory service practices[M]. Rome: FAO, 2008.
- [6] TIMMER C P, BLOCK S, DAWE D. Long-run dynamics of rice consumption, 1960-2050[C]//PANDEY D, BYERLEE D, DAWE D, et al. Rice in the global economy: Strategic research and policy issues for food security. Philippines: IRRI, 2010: 139-174.
- [7] GRUBE A, DONALDSON D, KIELY T L, et al. Pesticides industry sales and usage 2006 and 2007 market estimates[R]. Washington, D C: Office of Pesticide Programs, Office of Chemical Safety and Pollution Prevention, U. S. Environmental Protection Agency, 2011.
- [8] HEFFER P, GRUERE A, ROBERTS T. Assessment of fertilizer use by crop at the global level 2014-2014/15[R]. Paris: International Fertilizer Association (IFA) and International Plant Nutrition Institute (IPNI), 2017.
- [9] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [10] FOLEY J A, RAMANKUTTY N, BRAUMAN K A, et al. Solutions for a cultivated planet[J]. *Nature*, 2011, 478(7369): 337-342.
- [11] ZHANG X, DAVIDSON E A, MAUZERALL D L, et al. Managing nitrogen for sustainable development[J]. *Nature*, 2015, 528(7580): 51-59.
- [12] SOLOMON S. Climate change 2007: The physical science basis: Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [13] LINQUIST B, VAN GROENIGEN K J, ADVIENTO-BORBE M A, et al. An agronomic assessment of greenhouse gas emissions from major cereal crops[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(1): 194-209.
- [14] 李俊杰, 李建平. 水稻生产成本效益国际比较及中国发展前景[J]. *中国稻米*, 2021, 27(4): 22-30.
- [15] LI Y F, WU T Y, WANG S D, et al. Developing integrated rice-animal farming based on climate and farmers choices[J]. *Agricultural Systems*, 2023, 204: 103554.

- [16] CUI J, LIU H, WANG H, et al. Rice-animal co-culture systems benefit global sustainable intensification[J]. *Earths Future*, 2023, 11(2): e2022EF002984.
- [17] HALWART M, GUPTA M V. Culture of fish in rice fields[M]. Penang: FAO and the World Fish Center, 2004.
- [18] DE SOUSA A M B, SANTOS R R S, MORAES F H R, et al. Exploring the potential for sustainable weed control with integrated rice-fish culture for smallholder irrigated rice agriculture in the Maranhão Lowlands of Amazonia[J]. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 2012, 27(2): 107-114.
- [19] FREI M, BECKER K. A greenhouse experiment on growth and yield effects in integrated rice-fish culture[J]. *Aquaculture*, 2005, 244(1/2/3/4): 119-128.
- [20] CLAVERO M, LÓPEZ V, FRANCH N, et al. Use of seasonally flooded rice fields by fish and crayfish in a Mediterranean wetland[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2015, 213: 39-46.
- [21] DARTEY P K A, BAM R K, OFORI J N. Preliminary studies in rice-fish culture in a rainfed lowland ecology in Ghana[J]. *Ghana Journal of Agricultural Science*, 1999, 32(1): 123.
- [22] NNAJI J C, MADU C T, RAJI A. Profitability of rice-fish farming in Bida, North Central Nigeria[J]. *Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 2013, 8(1): 148-153.
- [23] 李荣福, 杜雪地, 徐忠香, 等. 中国稻田渔业起源与历史分析[J]. *中国渔业经济*, 2023, 41(3): 113-126.
- [24] 中国稻渔综合种养产业发展报告 (2018)[J]. *中国水产*, 2019(1): 20-27.
- [25] 农业农村部. 农业农村部关于推进稻渔综合种养产业高质量发展的指导意见[J]. *河南水产*, 2022(6): 38-39.
- [26] 中国稻渔综合种养产业发展报告 (2024) 全文发布[J]. *中国水产*, 2024(8): 12-17.
- [27] 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)[J]. *中国水产*, 2023(8): 19-26.
- [28] OEHME M, FREI M, RAZZAK M A, et al. Studies on nitrogen cycling under different nitrogen inputs in integrated rice-fish culture in Bangladesh[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 79(2): 181-191.
- [29] YU H Y, ZHANG X C, SHEN W Y, et al. A meta-analysis of ecological functions and economic benefits of co-culture models in paddy fields[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2023, 341: 108195. .
- [30] 中国小龙虾产业发展报告 (2024)[J]. *中国水产*, 2024(7): 14-20.
- [31] 于秀娟, 郝向举, 杨霖坤, 等. 中国小龙虾产业发展报告 (2023)[J]. *中国水产*, 2023(7): 26-31.
- [32] 倪达书, 汪建国. 稻鱼共生生态系统中物质循环及经济效益[J]. *水产科技情报*, 1985(6): 1-4.
- [33] JI Z J, ZHAO L F, ZHANG T J, et al. Coculturing rice with aquatic animals promotes ecological intensification of paddy ecosystem[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2023, 16(6): rtad014.
- [34] XIE J, HU L L, TANG J 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): 1381-1387.
- [35] LIU J F, ZHANG Q, WANG Q Y, et al. Gross ecosystem product accounting of a globally important agricultural heritage system: The Longxian rice-fish symbiotic system[J]. *Sustainability*, 2023, 15(13): 10407.
- [36] 钟波. 稻-鳅生态系统能值分析[J]. *中国稻米*, 2013, 19(3): 48-50.
- [37] DONG S P, GAO Y F, GAO Y P, et al. Evaluation of the trophic structure and energy flow of a rice-crayfish integrated farming ecosystem based on the Ecopath model[J]. *Aquaculture*, 2021, 539: 736626.
- [38] 甄若宏, 王强盛, 张卫建, 等. 稻鸭共作对水稻条纹叶枯病发生规律的影响[J]. *生态学报*, 2006, 26(9): 3060-3065.
- [39] 张亚, 廖晓兰, 刘薇, 等. 鸭粪提取物对水稻纹枯病菌的影响及其有效成分分析[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(1): 102-105.
- [40] 陈欣, 唐建军. 农业系统中生物多样性利用的研究现状与未来思考[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(1): 54-60.
- [41] 曹志强, 梁知洁, 赵艺欣, 等. 北方稻田养鱼的共生效应研究[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(3): 405-408.
- [42] 谢坚, 刘领, 陈欣, 等. 传统稻鱼系统病虫害控制[J]. *科技通报*, 2009, 25(6): 801-805.
- [43] 陈文辉, 彭亮, 刘莹莹, 等. 江汉平原稻虾综合种养模式经济效益和生态效益分析[J]. *湖北农业科学*, 2019, 58(14): 160-166.
- [44] 黄毅斌, 翁伯奇, 唐建阳, 等. 稻-萍-鱼体系对稻田土壤环境的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2001, 9(1): 74-76.
- [45] 李锡勇, 黄婕. 水稻免耕养鱼田稻飞虱消长观察试验初报[J]. *广西农学报*, 2005, 20(6): 7-9.
- [46] 吴敏芳, 郭梁, 张剑, 等. 稻鱼共作对稻纵卷叶螟和水稻生长的影响[J]. *浙江农业科学*, 2016, 57(3): 446-449.
- [47] 魏守辉, 强胜, 马波, 等. 稻鸭共作及其它控草措施对稻田杂草群落的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(6): 1067-1071.
- [48] 张峥, 卜德孝, 强胜. 不同稻田综合种养模式下杂草长期控制效果的调查[J]. *植物保护学报*, 2022, 49(2): 693-704.
- [49] 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.
- [50] NAYAK P K, NAYAK A K, PANDA B B, et al. Ecological mechanism and diversity in rice based integrated farming system[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 91: 359-375.
- [51] CHAKRABORTY, CHAKRABORTY. Effect of dietary protein level on excretion of ammonia in Indian major

- carp, *Labeo rohita*, fingerlings[J]. *Aquaculture Nutrition*, 1998, 4(1): 47-51.
- [52] LAZZARI R, BALDISSEROTTO B. Nitrogen and phosphorus waste in fish farming[J]. *Boletim Do Instituto De Pesca*, 2008, 34(4): 591-600.
- [53] LI P, WU G G, LI Y J, et al. Long-term rice-crayfish-turtle co-culture maintains high crop yields by improving soil health and increasing soil microbial community stability[J]. *Geoderma*, 2022, 413: 115745.
- [54] REN L P, LIU P P, XU F, et al. Rice-fish coculture system enhances paddy soil fertility, bacterial network stability and keystone taxa diversity[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2023, 348: 108399.
- [55] 钟松雄,尹光彩,陈志良,等.水稻土中砷的环境化学行为及铁对砷形态影响研究进展[J]. *土壤*, 2016, 48(5): 854-862.
- [56] YUAN P L, WANG J P, LI C F, et al. Long-term rice-crayfish farming aggravates soil gleying and induced changes of soil iron morphology[J]. *Soil Use and Management*, 2022, 38(1): 757-770.
- [57] ZHANG Z, DU L S, XIAO Z Y, et al. Rice-crayfish farming increases soil organic carbon[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2022, 329: 107857.
- [58] 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.
- [59] CHEN Y T, LIU C H, CHEN J, et al. Evaluation on environmental consequences and sustainability of three rice-based rotation systems in Quanjiao, China by an integrated analysis of life cycle, emergy and economic assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 310: 127493.
- [60] FANG K K, GAO H, SHA Z M, et al. Mitigating global warming potential with increase net ecosystem economic budget by integrated rice-frog farming in eastern China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2021, 308: 107235.
- [61] FANG K K, DAI W, CHEN H Y, et al. The effect of integrated rice-frog ecosystem on rice morphological traits and methane emission from paddy fields[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 783: 147123.
- [62] FANG K K, CHEN H Y, DAI W, et al. Microbe-mediated reduction of methane emission in rice-frog crop ecosystem[J]. *Applied Soil Ecology*, 2022, 174.
- [63] GUO L J, LIN W, CAO C G, et al. Integrated rice-crayfish farming system does not mitigate the global warming potential during rice season[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 867: 161520.
- [64] 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, Ecosystems & Environment*, 2009, 129(1): 228-237.
- [65] 欧茜,熊瑞,周文涛,等.稻鱼共生养鱼密度对稻田甲烷排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(9): 1-12.
- [66] 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.
- [67] 刘许辉,张红禄,贾青云,等.桂北高寒山区稻田生态种养下水稻及鱼生长试验[J]. *农业与技术*, 2022, 42(16): 18-21.
- [68] 王奇,李妹娟,章家恩,等.稻鱼共作对水稻叶绿素荧光特征及产量的影响[J]. *作物杂志*, 2021(6): 145-151.
- [69] 李艳蕾,晏群.稻鳅共生种养模式试验研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2018, 39(5): 54-60.
- [70] 周江伟,刘贵斌,吴涛,等.不同种养模式对水稻根系生长和产量性状的影响[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(13): 55-58.
- [71] 郭天荣,刘瑞琪,曾晴,等.稻蛙种养对水稻功能叶片和籽粒养分含量及产量构成的影响[J]. *分子植物育种*, 2022, 20(15): 5205-5212.
- [72] 姚义,张明伟,陈京都,等.稻虾共作模式下不同栽插密度对丰优香占群体结构及产量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(3): 66-71.
- [73] 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.
- [74] 甄若宏,王强盛,何加骏,等.稻鸭共作对水稻产量和品质的影响[J]. *农业现代化研究*, 2008, 29(5): 615-617.
- [75] 陈灿,黄璜,郑华斌,等.稻田不同生态种养模式对稻米品质的影响[J]. *中国稻米*, 2015, 21(2): 17-19.
- [76] 王强盛,黄丕生,甄若宏,等.稻鸭共作对稻田营养生态及稻米品质的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(4): 639-645.
- [77] 安辉,刘鸣达,王厚鑫,等.不同稻蟹生产模式对稻蟹产量和稻米品质的影响[J]. *核农学报*, 2012, 26(3): 581-586.
- [78] 陈灿,郑华斌,黄璜,等.稻田养鳅模式对稻米品质和经济效益的影响[J]. *中国稻米*, 2015, 21(4): 124-127.
- [79] 纪力,邵文奇,陈富平,等.连年规模稻鸭共养对稻田土壤性状、稻米产量及品质的影响[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(13): 1-7.
- [80] 张印,余政军,王忍,等.鸭品种对稻鸭共生系统土壤理化性质、水稻产量及经济效益的影响[J]. *河南农业科学*, 2021, 50(12): 23-31.
- [81] 董明辉,顾俊荣,李锦斌,等.稻虾生态种养和机插密度对优良食味粳稻产量与品质的影响[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(17): 1-12.
- [82] 彭翔,戴林秀,李京咏,等.稻田综合种养对长江中下游地区水稻产量和稻米品质影响的文献研究[J]. *中国稻米*, 2022, 28(4): 55-60.
- [83] 王龙根,张家宏,谢成林,等.扬州市生态稻田养殖鱼产品农药残留分析研究[J]. *现代农业科技*, 2016(7): 293.
- [84] 王冬武,何志刚,易继华,等.镉污染稻田“虾稻轮作-稻鱼共生”安全利用模式试验总结[J]. *当代水产*, 2023, 48(3): 64-66.

- [85] WANG Q, LI M J, ZHANG J E, et al. Suitable stocking density of fish in paddy field contributes positively to 2-acetyl-1-pyrroline synthesis in grain and improves rice quality[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 103(10): 5126-5137.
- [86] XIA L L, LAM S K, CHEN D L, et al. Can knowledge-based N management produce more staple grain with lower greenhouse gas emission and reactive nitrogen pollution? A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(5): 1917-1925.
- [87] BASHIR M A, WANG H Y, SUN W T, et al. The implementation of rice-crab co-culture system to ensure cleaner rice and farm production[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 316: 128284.
- [88] DU F L, HUA L L, ZHAI L M, et al. Rice-crayfish pattern in irrigation-drainage unit increased N runoff losses and facilitated N enrichment in ditches[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 848: 157721.
- [89] 李双双, 刘卫柏, 蒋健. 农业机械化可以解决农业劳动力短缺吗?[J]. *中国农机化学报*, 2024, 45(7): 316-322.
- [90] 稻渔综合种养技术规范(通则)[J]. *中国水产*, 2018(5): 81-83.
- [91] “十三五”中国稻渔综合种养产业发展报告[J]. *中国水产*, 2022(1): 43-52.



章家恩, 博士, 华南农业大学二级教授, 博士生导师。主要从事农业生态学、土壤生态学和入侵生态学等方面的科研和教学工作, 荣获“全国优秀教师”称号, 是广东省“千百十工程”国家级培养对象、广东省珠江学者特聘教授、广东特支计划领军人才、广东省现代农业产业技术体系岗位专家。兼任中国生态学学会常务理事、中国生态学学会农业生态专业委员会主任, 中国土壤学会土壤生态专业委员会委员、广东省生态学会副理事长、广东省可持续发展协会副理事长、广东省未来预测研究会副理事长, 《生态科学》编委会副主任以及《中国生态农业学报》《华南农业大学学报》等杂志编委。近年来, 共承担国家(省、部)级科研项目 50 多项, 已发表学术论文 300 多篇, 主编教材和专著 10 多部, 参编 10 多部; 申报发明专利和实用新型专利 60 多项, 其中, 已授权 40 多项; 获省部级科研与教学成果奖励 10 项。

【责任编辑 周志红】