

陈欣, 胡中元, 赵璐峰, 等. 中国南方地区稻鱼共生系统的研究进展与思考 [J]. 华南农业大学学报, 2024, 45(6): 825-835.
CHEN Xin, HU Zhongyuan, ZHAO Lufeng, et al. Progress and prospect on the rice-fish system in southern China[J]. Journal of South China Agricultural University, 2024, 45(6): 825-835.

特约综述

中国南方地区稻鱼共生系统的研究进展与思考

陈欣¹, 胡中元¹, 赵璐峰¹, 郝向举², 李坚明³, 何金钊³, 胡亮亮¹, 唐建军¹

(1 浙江大学 生命科学院, 浙江 杭州 310058; 2 全国水产技术推广总站, 北京 100125;

3 广西壮族自治区水产技术推广站, 广西 南宁 530022)

摘要: 稻田的水热环境是鲤科 Cyprinidae 鱼类天然适生生境, 由此演育出了稻鱼共生系统。我国南方山丘区的稻鱼共生系统具有悠久的历史, 是利用当地水热和景观条件而发展起来的独特稻作系统, 对增加稻田产出、稳定农民收入、保护当地生物资源起着重要作用。本文概述了我国南方山丘区稻鱼共生系统的发展历程; 从稻鱼共生系统的生产力、有害生物的控制和农药减量、土壤碳氮保持和肥料减量、甲烷产生和氧化及排放、水资源利用与保护以及遗传多样性保育等方面综述了稻鱼共生系统的研究进展; 分析了我国南方山丘区稻鱼共生产业发展的潜力和可持续发展的路径, 并对稻鱼共生系统今后的研究方向进行了展望。

关键词: 稻鱼共生系统; 生态过程; 遗传多样性; 保育; 发展潜力; 可持续发展; 南方山丘区

中图分类号: S964.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2024)06-0825-11

Progress and prospect on the rice-fish system in southern China

CHEN Xin¹, HU Zhongyuan¹, ZHAO Lufeng¹, HAO Xiangju², LI Jianming³, HE Jinzhao³, HU Liangliang¹, TANG Jianjun¹

(1 College of Life Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2 National Fisheries Technology Extension Center, Beijing 100125, China; 3 Aquaculture Technology Extension Station of Guangxi, Nanning 530022, China)

Abstract: A paddy field with shallow water provides a suitable environment for aquatic animals such as cyprinid fish, which makes it possible to develop the rice-fish coculture system. Raising fish in paddy field has a long history in hilly regions of southern China. The rice-fish coculture system has become an important rice farming system in this area, which plays an important role in increasing productivity, stabilizing farmers' income, and preserving local genetic resources. In this paper, we outlined the development of rice-fish coculture system in southern China, reviewed the recent studies on ecological functions of the rice-fish coculture system (e.g. productivity, pest control and pesticide reduction, soil carbon and fertility maintenance with low fertilizers, methane emission and oxidation, water resource use and the local genetic diversity preservation). The potential and possible approaches for the sustainable development of rice-fish coculture were discussed. The future researches on rice-fish coculture were prospected.

Key words: Rice-fish coculture system; Ecological process; Genetic diversity; Conservation; Extension potential;

收稿日期: 2024-05-14 网络首发时间: 2024-06-25 16:09:53

首发网址: <https://link.cnki.net/urlid/44.1110.s.20240625.0943.002>

作者简介: 陈欣, 教授, 博士, 主要从事农业生态学领域研究, E-mail: chen-tang@zju.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (U21A20184); 广东省重点研发计划 (2021B0202030002); 浙江省重点研发计划 (2022C02058)

稻鱼共生是在水稻生长季节将水稻 *Oryza sativa* 种植和鱼类(如鲤科 Cyprinidae 鱼类等)养殖结合在同一稻田里的农作方式,是稻田水产养殖(即稻渔综合种养)的最主要、最经典模式^[1-2]。稻鱼共生系统采用种养耦合的方式合理利用稻田的水土空间和养分,发挥水稻和鱼类之间的生态互惠作用和资源互补利用,实现稻田生态系统的多功能性^[3-6]。稻鱼共生系统在全球稻作区均有分布。21 世纪初开始,孟加拉、老挝、越南和印度尼西亚、马来西亚、菲律宾、印度、日本、马达加斯加、美国以及一些非洲国家都进行了稻鱼共生的尝试,已成为支持稻作区小农户可持续发展的重要方式^[7-14]。我国稻田资源丰富,90% 以上的稻田处于不同程度的淹水状态,且水稻生长季节热量充沛,水热资源有利于稻鱼共生系统的发展^[15]。稻鱼共生在我国南方稻作区有着悠久的发展历史,是适应当地自然资源和社会条件逐渐发展起来的农业模式,在提高当地稻田生产力、保护生物多样性和维持农业可持续发展等方面的作用得到世界范围内的普遍认同^[4,16]。分布于南方山丘区的“浙江青田稻鱼共生系统”“贵州从江侗乡稻鱼鸭系统”分别于 2005 和 2011 年被联合国粮农组织 (FAO) 等列为“全球重要农业文化遗产系统”,“广西桂西北山地稻鱼复合系统”于 2021 年被农业农村部列为“中国重要农业文化遗产系统”。

我国南方地区(包括湖南、四川、浙江、福建、江西、贵州、云南、重庆、广东和广西等)稻田镶嵌分布在山地丘陵中,其中的稻鱼共生系统构筑成了南方地区山地丘陵上一个个微小的“鱼米之乡”。本文对我国南方地区稻鱼共生系统分布和特点进行了总结,综述了稻鱼共生系统的生态系统功能、过程和机理等方面的研究进展,分析了南方地区稻鱼共生的产业发展潜力和路径,提出了稻鱼共生系统今后的研究方向,为稻鱼共生系统的可持续发展提供参考。

1 南方地区的稻鱼共生系统

中国南方地区多为山地丘陵,地处热带亚热带季风气候区,水热资源丰富且同步,是重要的水稻种植区域。该区域耕地面积占总面积 11%~29%,稻田面积占耕地面积的 23%~83%。与平原地区的稻田连片分布形式不同,梯田是南方山丘区稻田的重要形式,如全球重要农业文化遗产系统云南哈尼梯

田、广西龙胜龙脊梯田、福建尤溪联合梯田、江西崇义客家梯田、湖南新化紫鹊界梯田等,均为重要稻作系统(图 1)。

南方山丘区的稻鱼共生系统具有悠久的历史,其发展与自然资源条件、社会经济文化密切相关^[4]。在浙南、闽北、粤北、湘西南、桂西北和黔东南及川渝等区域分布的各种类型稻鱼共生系统,虽然养殖的鱼类和种养方式有所不同,但实践上具有类似的原理和起源过程。例如浙江青田稻鱼共生系统,起源于浙南山丘地带,地处亚热带季风气候,温暖湿润,气候宜人,雨量充沛,年平均气温 18.3℃、日照 1 712~1 825 h、降雨量 1 400~2 100 mm、无霜期 180~280 d,为稻鱼共生系统的发展提供了优良的水热条件^[4]。

“九山半水半分田”是浙南山区的景观格局。在特定的资源禀赋条件下,人们利用有限的土地资源和当地丰富的水热和生物资源进行稻鱼共养,形成并稳定延续成适宜当地自然环境的稻鱼共生系统。贵州从江侗乡稻鱼鸭系统,起源于贵州黔东南少数民族地区(从江县、台江县、荔波县、榕江县等地),属于黔南温热双、单季稻作区,水热资源丰富(年平均气温 13.8~18.7℃、降水量 1 050~1 250 mm、相对湿度 80%)。人们在长期的生产实践中,利用当地独特土著生物资源(如田鱼、鸭等)与水稻生产结合,形成立体型稻鱼鸭共生系统^[17-18]。广西三江、融水、全州、靖西、那坡的山地稻鱼复合系统,是侗、苗、瑶、壮等少数民族在长期适应自然环境和农业生产实践中形成的与当地自然生态系统相适宜的田鱼复合系统(稻-田鱼系统和荷-田鱼系统),包含了丰富的地方农家水稻品种(黑米、糯米、红米等)和田鱼地方种群(全州禾花鲤、三江晒江鲤、融水金边鲤、靖西和那坡乌背鲤等)^[4],莲荷也有特点。

稻鱼共生系统是南方山丘区重要的稻渔综合种养模式,2022 年全国稻鱼共生系统面积 100 万 hm²,其中,四川、贵州、湖南、云南、广西 5 省(区)面积共计 80 万 hm²,占全国稻鱼模式应用面积的 80%;浙江、福建、江西、四川、贵州、湖南、云南、重庆、广东、广西 10 省(区)面积共计 87 万 hm²,约占 87%^[2],稻鱼共生系统主要分布在保水性好的稻作梯田,与平原稻作区的稻鱼共生系统不同,农户经营规模较小,多采用传统种养方式。对该区域内稻鱼共生系统典型的 13 个县(浙江青田、永嘉、瑞安、景宁等县市,福建武夷山市,湖南辰溪县,广东连山和连南县,广西三江、融水、全州、靖西和那坡

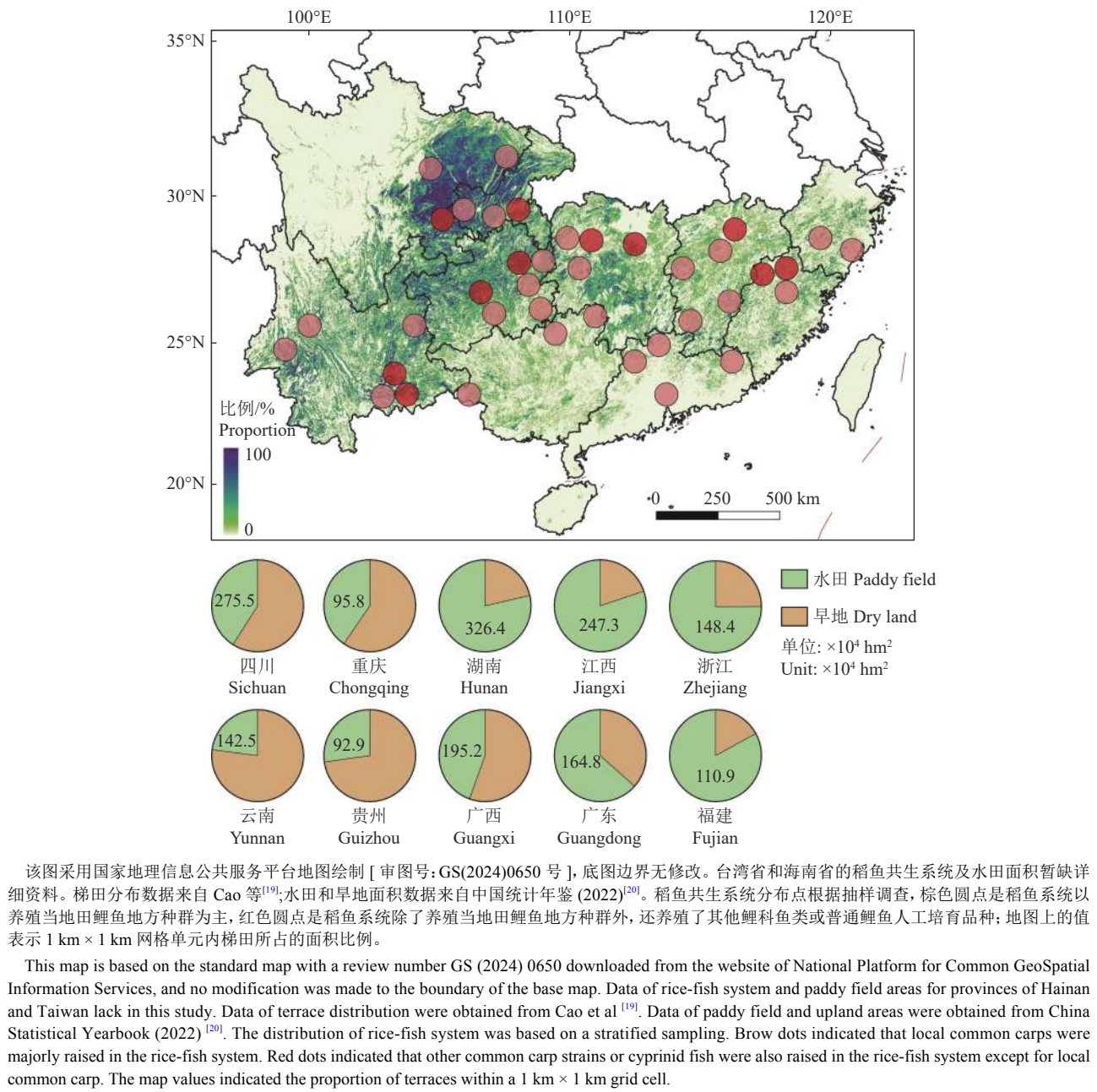


图1 中国南方地区主要省市(自治区)梯田和稻鱼系统分布图及稻田比例

Fig. 1 Map and pie charts describing the distribution of terraces and rice-fish systems in the main provinces of southern China

等,贵州从江等)进行调查取样研究表明,从事稻鱼共生系统的农户,每户稻田面积平均约0.267 hm²,小规模、流水灌溉、辟筑梯田是其主要特征。

南方山丘区的稻鱼共生系统是充分利用当地自然资源条件而发展起来的独特稻作系统,增加了稻田产出、稳定了农民收入、利用和保护了当地生物资源。稻鱼共生系统中鲤科鱼类最为常见^[21]。2022—2023年的调查研究表明,长期适应稻田环境的鲤鱼*Cyprinus carpio*种群有青田田鱼、武夷山稻花鱼、湖南辰溪稻花鲤、广西全州禾花鲤、三江晒江鲤、融水金背鲤等,人工培育的鲤鱼品种(如荷包

鲤、建鲤、福瑞鲤等)以及鲤科的其他物种(如草鱼、鲫鱼等)。鲤科鱼类对浅水、高温、低温和缺氧等具有较强的忍耐力,适合稻田环境的养殖^[21-23];鲤科鱼类是一种杂食性鱼类,摄食和消化器官构造特征不仅有助于其摄食水草、丝状藻类、植物种子和有机腐屑,也有助于其摄食螺蛳、摇蚊幼虫、水蚯蚓等动物,既能够充分利用稻田环境中的潜在生产力,还能发挥耕田除草、控制害虫的功能^[6,24]。鲤科鱼类具有显著的底层鱼类特征,在利用头部挖掘底泥取食时可以对稻田起着松土、增肥、通气的作用^[25-27];水稻能为鲤鱼提供良好的庇荫条件(躲避鸟

兽天敌和酷暑天的水体降温) 和食物来源 (如水稻根部和叶片能够直接作为有机碎屑被取食)^[24]。

2 稻鱼共生系统的研究现状

近 20 年来, 国内外围绕稻鱼共生系统的生产力、有害生物的控制、土壤碳固持和甲烷排放以及遗传多样性保育等方面, 开展了大量研究, 阐明了稻鱼共生系统效应及其生态学机理, 逐渐形成了稻鱼共生理论^[3-4, 6, 25-27]。

2.1 稻田生产力

稻鱼共生系统水稻和鱼的产量一直受到关注, 也是稻鱼共生产业发展的首要问题, 国内外对此进行了大量研究。Frei 等^[28]对稻田养殖罗非鱼 *Oreochromis mossambicus* 的研究发现, 稻鱼共作的水稻产量显著高于水稻单作; Gurung 等^[29]对尼泊尔稻田养鱼的研究也得到了相同的结果。Tsuruta 等^[30]研究表明, 稻鱼共作水稻产量较水稻单作提高了 20%; 赵璐峰^[27]对分布于浙江、福建、贵州、湖南、四川和广西等南方 6 个省 (区) 的稻鱼共生系统进行了研究, 结果表明, 稻鱼系统水稻产量与水稻单作之间差异不显著, 稻鱼系统水稻产量平均为 7.38 t/hm²。赵璐峰^[27]、谢坚^[31]、胡亮亮^[32]、郭梁^[33]等长期田间试验研究表明, 当田鱼目标产量低于 1.5 t/hm² 时, 稻鱼共生水稻产量与水稻单作无显著差异, 但水稻产量的稳定性指数比水稻单作系统的高。蔡淑芳等^[34]研究结果表明, 与水稻单作相比, 稻鱼共作显著提高了水稻产量, 平均增加率约为 17.2%; 田间沟单侧布局、鱼苗投放规格 40 g/尾、密度 1 尾/m² 以及生物量控制在 30 g/m² 以内时, 稻鱼共生系统水稻产量显著高于水稻单作。

胡中元^[35]对 2005—2023 年公开发表的稻鱼共生系统试验研究结果进行了分析, 采用成对样本 (水稻单作 vs 稻鱼共生系统) 计算稻鱼共生系统相对于水稻单作系统的水稻产量变化 (Y), 计算公式如下:

$$Y = \frac{Y1 - Y2}{Y2} \times 100\%,$$

式中, Y1 和 Y2 分别为稻鱼共生系统与水稻单作的水稻产量 (kg/hm²)。Y 为正值表明与水稻单作系统相比, 稻鱼共生系统提高了水稻产量; 负值则表明稻鱼共生系统水稻产量低于水稻单作。结果 (图 2) 表明, 在 103 组成对数据中, 稻鱼共生系统水稻产量与水稻单作没有显著差异 ($t=0.017\ 10$, $P=0.986\ 4$); 稻鱼共生系统 68% 的样本水稻产量呈增加趋势, 32% 的样本水稻产量呈下降趋势。稻鱼共生系统水

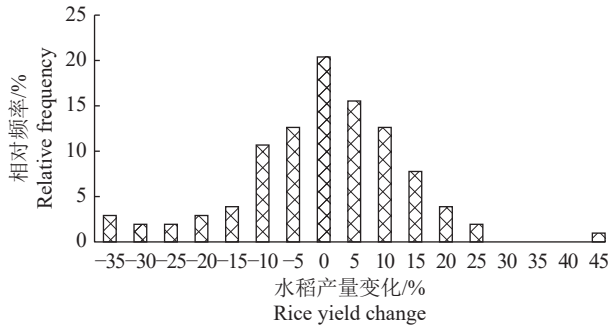


图 2 与水稻单作相比稻鱼共生系统的水稻产量变化^[35]

Fig. 2 Changes of rice yield in rice-fish system compared to rice monoculture system

稻产量效应受田间条件、水稻品种、肥药管理、鱼苗投放和投喂管理的影响。

稻鱼共生系统鱼的产量因养殖鱼的品种类群和养殖密度的不同有较大差异^[28]。Rothuis 等^[36]报道, 稻田混养罗非鱼和鲤鱼, 鱼产量可达到 474.1 kg/hm²。吴雪^[37]和李娜娜^[38]的研究表明, 水稻产量 6.00~6.75 t/hm²、田鱼目标产量 750~2 250 kg/hm² 时可产生共生效应, 水稻产量与水稻单作系统相比没有显著变化, 但增获一定数量的鱼产量。赵璐峰^[27]对南方 6 个省 (区) 稻鱼共生系统的调查研究表明, 稻鱼共生系统的鱼产量在 0.27~2.54 t/hm² 之间, 平均为 1.07 t/hm²。

稻鱼共生可在不影响水稻产量的同时增加鱼的产出, 从而提高了稻田系统的生产力。稻鱼共生系统生产力的提高需要水稻种植和鱼养殖协同进行, 包括水稻种植密度和鱼养殖的合理配置。Hu 等^[39]采用成对样本分析方法对南方 6 个省 (区) 67 对样本 (水稻单作 vs 稻鱼共生系统) 分析表明, 稻鱼共生系统模式的水稻增产率均随着田鱼产量的增加而呈现先增加后降低的变化趋势; 田鱼产量 (x) 和水稻产量变化率 (y) 的拟合曲线方程为 $y = -5.31x^2 + 11.19x$, 并得到稻鱼共生系统确保水稻不减产的田鱼产量理论阈值最高为 2.106 t/hm²。

2.2 农药减量与有害生物控制

与水稻单作相比, 稻鱼共生系统显著减少了农药的使用量, 甚至可以完全不使用农药。Berg 等^[40]对越南 120 个农户的调查研究表明, 稻鱼共生系统农药的使用量比水稻单作降低了 43.8%。Dwiyanan 等^[41]研究表明, 印度尼西亚的稻鱼共生系统农药的使用量仅为水稻单作的 23.2%。Chen 等^[42]对水稻单作、传统稻鱼共作 (无配合饲料的投入、低密度养殖) 和提升的稻鱼共作 (有配合饲料的投入、养殖密度提高) 农药使用情况进行了分析, 结果表明, 水稻单作农药的使用量明显高于传统稻鱼共生系统和提升

的稻鱼共生系统,传统稻鱼共生系统和提升的稻鱼共生系统在水稻整个生长期均没有使用除草剂。Xie 等^[3]通过野外调查和田间试验发现,在相同水稻产量下,稻鱼共生系统农药使用量比水稻单作降低了 68%。胡亮亮^[32]对分布于中国稻作区的稻鱼共生系统研究表明,稻鱼共生系统的农药使用量仅为水稻单作的 60.24%。

稻鱼共生系统可显著减少农药使用量,这与病虫害有害生物的发生程度显著降低有关。Vromant 等^[43]证明了稻鱼共生对稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* 的防治效果; Sinhababu 等^[44]发现鲤鱼以褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 为食; Vromant 等^[45]发现鱼类减少了稻田中 *Nymphula depunctalis* 的种群数量; Frei 等^[46]发现鱼类显著减少了双翅目 *Diptera* 昆虫的数量。Xie 等^[3]观测发现,田鱼活动过程中碰撞水稻,导致稻飞虱会掉落到水面,掉落在水面的稻飞虱被田鱼进一步取食,使 26% 左右的稻飞虱得到控制。Ji 等^[47]对 1985—2022 年期间发表的 150 对样本(水稻单作 vs 稻鱼共生系统)研究结果表明,与水稻单作相比,稻鱼共生系统显著降低虫害的发生;稻鱼共生系统中,田鱼可取食水稻基部叶鞘纹枯病的病原菌菌核和菌丝,从而减少了病菌侵染来源,降低了纹枯病的发生。此外,鱼在田间窜行活动,可以改善田间通风透气状况、增加水体的溶氧,从而促进稻株的根茎生长,增强抗病能力。肖筱成等^[48]的调查研究结果表明,稻鱼共生系统的纹枯病病情指数比水稻单作平均减少了 1.87。Xie 等^[3]通过 5 年的田间试验发现,稻鱼共生系统的纹枯病和稻瘟病发生程度均比水稻单作的低。

鱼类在稻田中可通过取食或搅动影响杂草群落,从而达到控草效果。Rothuis 等^[49]研究发现,鱼类以稻田中沉水类和浮水类的杂草为食,可使杂草生物量最高减少 100%; Frei 等^[28]发现,罗非鱼和鲤鱼的取食作用可以使稻田中丝状藻类完全消失; Sinhababu 等^[50]研究发现,稻田养殖鲤科鱼类,稻田杂草生物量比水稻单作降低 23%~63%。Xie 等^[3]和 Guo 等^[5]的研究表明,稻鱼共生系统的杂草生物量比水稻单作降低 60% 以上; Nayak 等^[51]的比较试验也表明,与水稻单作相比,稻鱼共生系统和稻鱼鸭共生系统的杂草发生程度均显著降低。

2.3 氮肥减量与稻田土壤碳氮维持

稻鱼共生系统能否可以在维持产量和土壤肥力的情况下降低肥料投入的问题一直受到关注。郭梁^[33]对南方稻鱼共生系统的成对采样(稻鱼共生系统 vs 水稻单作)研究表明,与水稻单作相比,稻鱼

共生系统的肥料氮输入降低了 23%。定位试验结果表明,在相同低化肥氮素投入情况下,稻鱼共生系统水稻产量显著高于水稻单作,且每年可产出田鱼平均产量为 1.57 t/hm²^[5,52]。赵璐峰^[27]对南方稻鱼共生系统的成对采样(稻鱼共生系统 vs 水稻单作)研究表明,与水稻单作相比,稻鱼共生系统水稻平均产量稳定在 7.38 t/hm²,可产出田鱼产量约 1.08 t/hm²,且化肥氮素投入降低了 23%。与水稻单作相比,稻鱼共生系统土壤总有机碳、总氮和碱解氮含量提高,土壤碳氮比维持稳定。赵璐峰^[27]的长期定位试验表明,水稻单作和稻鱼共生系统(无或有饲料投喂)的水稻产量无显著性差异,但稻鱼共生系统可产出田鱼,无或有饲料投喂的田鱼产量分别达 0.27 和 0.74 t/hm²;水稻单作、稻鱼共生系统土壤总碳和总氮含量无显著差异,土壤碳氮比维持稳定;与水稻单作相比,稻鱼共生系统土壤轻组有机碳和颗粒有机碳比例显著提高。Ren 等^[53]的研究也表明,稻鱼共生系统可以提高土壤肥力和细菌群落的稳定性。

稻鱼共生系统中,通过田鱼转化稻田资源以及水稻与田鱼之间互补利用氮素等养分是水稻产量和土壤碳氮维持且用肥减量的重要机理。一方面,田鱼取食和转化稻田的土著生物以及输入饲料的过程中,部分碳氮等元素通过排泄途径再返回稻田土壤,被水稻植株进一步利用。赵璐峰^[27]采用稳定性同位素¹³C 和¹⁵N 进行食谱分析表明,在有饲料投喂条件下,田鱼食谱中饲料贡献率为 53.32%,田间生物资源贡献率为 46.68%;无饲料投喂的稻鱼共生系统中,田间植物源食物占田鱼食谱的 56.04%,而动物源食物占 43.96%。进一步分析氮素的运转发现,田鱼食物中的氮素通过排泄和排遗的方式释放进入稻田环境中,无饲料投喂的稻鱼共生系统田鱼氮素日释放在不同水稻生长时期保持稳定,其中,排泄氮占氮素释放总量的 71.73%、粪便氮占 28.27%;有饲料投喂的稻鱼共生系统田鱼氮素日释放在随着田鱼生长以及饲料投入的增加持续增长,其中,排泄氮占氮素释放总量的 86.63%、粪便氮仅占 13.37%。在稻鱼共生系统中,田鱼体内的碳氮比保持稳定;田鱼驱动了系统碳氮比的变化,饲料投喂显著降低了田鱼粪便碳氮比,当田鱼饲料的碳氮比为 7.29 时,有、无饲料投喂的田鱼粪便碳氮比分别为 11.48 和 17.24。

稻鱼共生系统中,水稻和田鱼可以互补利用稻田环境的氮素(包括饲料氮和肥料氮)等资源,氮素在稻田内循环利用从而提高氮素利用效率。郭梁^[33]

采用稳定性同位素¹⁵N 示踪研究水稻和田鱼对输入氮素互补利用结果发现, 水稻增加了系统对饲料氮素的利用率达 9.61%, 田鱼增加了系统对化肥氮素的利用率达 0.24%; 在水稻整个生长季, 饲料氮素投入量为 79.18 kg/hm², 其中, 9.61% 随水稻地上部分的收获离开系统、10.08% 被田鱼同化 (氮素被浮游动植物等水生生物吸收进而被田鱼取食和同化)、59.76% 保留在稻田表层 (10 cm) 土壤中; 试验结束后土壤¹⁵N 积累量明显增加。化肥氮素投入量为 75 kg/hm² 时, 5.8% 随水稻地上部分的收获离开系统、0.24% 被鱼同化、7.8% 保留在稻田表层 (10 cm) 土壤中。水稻和田鱼对肥料氮素和饲料氮素的互补利用提高了氮素的利用率, 使稻鱼共生系统在肥料输入下降的情况下仍能保持土壤氮素含量稳定。

2.4 稻田甲烷排放和甲烷氧化

甲烷 (CH₄) 的产生和氧化是稻田生态系统碳循环的重要组成部分, 稻田是 CH₄ 产生的重要来源地。稻鱼共生对稻田 CH₄ 排放的影响, 不同研究的结果存在较大的差异^[54]。Frei 等^[46, 55] 的温室和田间试验均显示, 稻鱼共生增加了稻田 CH₄ 排放, 稻鱼共生系统的平均 CH₄ 排放通量显著高于水稻单种系统; Datta 等^[56] 在印度东部克塔克实地测量了稻鱼共生系统和水稻单作的 CH₄ 排放通量, 结果表明, 稻鱼共生系统 CH₄ 排放通量增加了 74%~112%。但也有一些研究发现, 稻鱼共生对 CH₄ 排放影响不显著。袁伟玲等^[57] 发现, 与水稻单作比较, 稻鱼共生系统显著降低了水稻整个生育期稻田 CH₄ 排放, CH₄ 排放通量减少了 12%~16%; 展茗等^[58] 研究表明, 稻鱼共生系统的 CH₄ 排放通量比水稻单作减少 6.4%; 刘小燕等^[59-60] 的研究表明, 稻鱼共生系统比水稻单作系统的 CH₄ 排放通量减少了 15% 左右; Huang 等^[61] 通过整合分析表明, 稻鱼共生系统 CH₄ 排放通量比水稻单作降低了 11%; Zhao 等^[6] 对青田稻鱼共生系统的研究表明, 稻鱼共生系统水稻全生育期 CH₄ 排放通量与水稻单作系统无显著差异。

上述稻鱼共生系统 CH₄ 排放研究结果的差异可能与试验地点的自然条件 (土壤、气候) 以及试验过程中的田间管理措施 (水分管理、施肥、饲料投入、品种和密度等) 不同有关。稻田的浅水厌氧环境是 CH₄ 产生的重要场所, 水分管理会影响土壤的氧化还原状况, 进而影响稻田 CH₄ 排放。研究表明, 间歇性灌溉可以减少土壤淹水时间和强度, 显著地降低了 CH₄ 的产生和排放^[62-64]。与水稻单作相比, 稻鱼共生系统水层较深且保持时间较长, 导致

土壤强厌氧环境, 以 CH₄ 为主要能量来源的产 CH₄ 古菌丰度增加是 CH₄ 排放增加的主要原因之一。Zhao 等^[6] 和陈佳等^[65] 的研究表明, 稻鱼共生系统产 CH₄ 菌的功能基因 *mcrA* 丰度显著高于水稻单作。在同等稻田水分管理条件下, 施肥、饲料投入、鱼类群及放养密度等也是影响 CH₄ 产生和排放的重要因素。Bhattacharyya 等^[66] 研究了 4 个鱼种类对稻鱼共生系统中 CH₄ 排放的影响发现, 与水稻单作相比, 稻鱼共生系统 CH₄ 排放通量增加了 26%, 鱼的种类对 CH₄ 的排放有显著影响, 稻田养殖普通鲤鱼 *Cyprinus carpio* 的 CH₄ 排放通量最大, 比水稻单作高 36%。李娜娜^[38] 的研究表明, 与水稻单作相比, 无饲料投入的稻鱼共生系统 CH₄ 排放通量降低了 26%; 但随着饲料投入的增加, CH₄ 排放通量提高。Hu 等^[67] 的研究表明, 稻鱼共生系统随着田鱼放养密度增加, 温室气体 (如 CH₄) 排放明显提高。

稻鱼共生系统的饲料投入提高了土壤和水中有有机物含量, 鱼类排泄物导致土壤表层有机质和氮素含量显著提高, 从而影响 CH₄ 产生和排放^[27, 68]。鱼对水中浮游动物的取食会减少浮游动物对溶解氧的消耗, 促进了 CH₄ 的氧化过程, 从而减少 CH₄ 排放^[69]。鱼类的生物扰动可能促进了土壤气体交换, 提高土壤透气性和水层溶解氧含量, 并通过改变土壤微生物的环境条件从而影响 CH₄ 产生与排放^[38, 65]。水产动物在水中的活动使水体浑浊, 较高的浊度降低了水体光合作用, 导致水中溶解氧含量下降^[70]; 降低了土壤氧化还原电位 (Eh), 强化了土壤的厌氧^[53]; 提高了产 CH₄ 菌的活性, 可能增加 CH₄ 排放^[55]。水产动物的生物扰动也会使土壤中固持的 CH₄ 被释放出来^[45, 55]。但赵璐峰^[27] 的模拟扰动试验发现, 扰动对 CH₄ 排放通量的影响不显著。

CH₄ 的产生和氧化是稻田 CH₄ 排放的 2 个重要环节, 其中, CH₄ 有氧氧化过程主要发生在土壤表层 0~1 cm 的好氧区域^[71], 而稻鱼共生系统中田鱼活动 (游弋、取食、排泄等) 也主要发生在土壤表层, 因而推断田鱼会影响土壤表层 CH₄ 氧化过程 (CH₄ 氧化微生物、氧化潜势)。赵璐峰^[27] 模拟扰动试验发现, 田鱼游弋带来的扰动并不影响土壤表层 CH₄ 氧化。Zhao 等^[6] 通过 5 年的田间和模拟试验以及培养试验, 揭示了稻鱼共生系统田鱼通过觅食作用引起的营养级联效应以及驱动的氮素运转, 进而调控表层土壤 CH₄ 氧化的机理。一方面, 田鱼参与运转的氮素积累在土壤表层, 促进土壤 CH₄ 氧化。稳定性同位素¹⁵N 示踪证明, 田鱼参与运转的氮素在土壤表层积累; ¹⁵N-DNA-SIP 进一步发现, 积

累在土壤表层的田鱼排泄氮被 CH_4 有氧化细菌利用; 中宇宙模拟试验发现, 田鱼排泄的氮可提高土壤表层 CH_4 氧化细菌的丰度和 CH_4 氧化速率。另一方面, 田鱼取食作用引起的营养级联效应促进了土壤 CH_4 氧化。稳定性同位素 (^{15}N 和 ^{13}C) 对田鱼食谱分析表明, 田鱼广泛觅食栖息于稻田的生物类群 (如浮游动物、浮游植物等), 其中的一些浮游动物类群 (如水蚤 *Daphnia* spp.) 会取食土壤 CH_4 氧化细菌; 稻田中田鱼的取食降低了食 CH_4 菌的浮游动物水蚤的密度, 从而提高了 CH_4 氧化菌的丰度和 CH_4 氧化速率。

2.5 遗传多样性保育

南方地区的稻鱼共生系统保育有丰富的水稻地方品种和遗传多样性。青田稻鱼共生系统所在的丽水市保育有丰富农家品种, 其中, 籼稻 54 个、粳稻 15 个、糯稻 23 个, 主要有 ‘仰天曲’ ‘长城谷’ ‘猪毛族’ ‘野猪芒’ ‘珍珠糯’ ‘红壳糯’ 等^[72]。青田稻鱼共生系统的调查表明, 与水稻单作区域相比, 稻鱼共生系统所在区域仍种植少量传统品种如糯稻、粳稻、芒稻和红米等, 传统水稻品种面积占水稻种植总面积的 5.28%, 这些传统品种与现代水稻品种镶嵌分布^[4, 32]。对贵州从江侗乡稻鱼鸭系统和广西桂西北山地稻鱼复合系统的调查

研究表明, 25 个自然村分布有水稻品种 217 个, 其中, 糯稻品种 113 个; 采用微卫星分子标记方法对这些水稻地方品种多样性进行遗传多样性分析表明, 多态性位点比例为 100%, 基因遗传多样性指数变异范围为 0.587~1.352^[73]。

南方地区的稻鱼共生系统保育的另一重要遗传资源是田鲤鱼多样性。研究表明, 南方山丘区传统稻鱼共生系统中保育了丰富的鲤鱼种群 (表型多样性和遗传多样性)^[26, 74-78]。罗崎月^[78] 对南方地区的主要传统稻鱼系统进行了调查分析表明, 南方传统稻鱼系统主要分布在水源丰富的山丘区, 利用稻田浅水环境以及与稻田连接的坑塘等小水面形成了独特的稻鱼系统和田鱼地方种群 (表 1); 对分布于青田、武夷山、辰溪、连山、全州、三江、融水、靖西、那坡、从江、台江等区域中的传统稻鱼系统中的 1 100 条田鱼样本进行采样, 微卫星分子标记方法的分析结果表明, 田鱼种群整体的遗传多样性较高, 期望杂合度 (He) 为 0.69~0.82, 等位基因数 (Na) 为 9.56~11.67, 均显著高于现代养殖鲤鱼品种的遗传多样性 (Na 为 5.37 和 He 为 0.62); 遗传结构和距离分析表明, 不同采样区域的田鱼存在明显的种群结构, 并且种群间的遗传距离和地理距离服从距离隔离模型 (Isolation by distance model)。

表 1 我国南方地区传统稻鱼系统中的田鱼地方种群
Table 1 Local common carp populations of the traditional rice-fish systems in southern China

序号 No.	田鱼地方名称 Local name of common carp	稻鱼系统所在地 Location of the rice-fish system	地理坐标位置 Geographic coordinate position
1	青田田鱼	浙江青田	27°25'N, 118°41'E
2	武夷山稻花鱼	福建武夷山	27°75'N, 117°67'E
3	辰溪稻花鱼	湖南辰溪	27°53'N, 109°54'E
4	连山禾花鱼	广东连山	24°17'N, 112°02'E
5	全州禾花鲤	广西全州	25°29'N, 110°37'E
6	晒江田鲤	广西三江	25°22'N, 108°53'E
7	融水金背鲤	广西融水	25°04'N, 109°14'E
8	靖西黑背鲤	广西靖西	22°51'N, 105°56'E
9	那坡橘红鲤	广西那坡	23°24'N, 105°50'E
10	从江田鱼	贵州从江	25°55'N, 106°65'E

2.6 水资源利用与保护

我国南方地区的稻鱼共生系统是充分利用梯田蓄涵的雨水资源、在种植水稻的同时养殖鲤科鱼类发展而来的, 梯田上建立的稻鱼共生系统使山丘区水资源得到最大化利用^[4]。稻鱼共生系统也使得梯田水资源得到有效保护。罗康隆^[79] 对侗乡梯田的实地调查表明, 养鱼的梯田蓄水更深, 人们更关

注梯田的保水性, 可以有效防止梯田塌方漏水和枯干。在青田稻鱼共生系统分布区, 人们围绕稻鱼共生系统的延续和发展, 积累了丰富的田间水管理经验, 设计出 “十三闸” 引灌水系统, 集水区内各个田块得到较为均匀的灌溉水分配, 水资源在田块间循环利用, 各个田块的水稻和鱼均可较好生长^[4]。杨星星等^[80] 对青田稻鱼共生系统的研究表明, 稻田

水深在 15~25 cm 范围内,水稻和田鱼生长对水需求的矛盾得到协同解决,水稻和田鱼均获得较高产量。有研究表明,田鱼目标产量在 450~1 500 kg/hm² 之间,可产生较大共生效应,水资源得到有效利用,稻田水环境保持良好^[37-38]。此外,稻鱼共生系统中,田鱼可取食水稻基部枯落叶片和其他水生生物、水稻和田鱼互补利用氮磷等元素,对稻田水体起到净化作用^[3,25]。

3 南方地区稻鱼共生产业发展的思考

3.1 稻鱼共生系统发展潜力

水稻和水产品是亚洲国家(尤其是中国)膳食结构的重要组成部分。随着社会经济的发展,两者的需求量均在不断增加。随着全球捕捞业发展空间的缩小,水产品产量提高的途径将主要来自于养殖,但水产养殖业的发展受到水土资源的限制及集约化发展所引发的环境等问题对产业的反向约束。因此,利用稻田发展稻鱼共生产业对增加水产品供应(尤其对南方山丘区的水产品供应)意义重大。

从稻田和水热资源的角度,我国南方稻作区均适合发展稻鱼共生系统。但发展稻鱼共生系统还需考虑当地的生产条件(如灌溉、种苗供给等)和市场及社会经济条件(如产品需求、交通运输及市场拓展)。胡亮亮等^[15]研究了南方 10 省区(湖南、四川、浙江、福建、江西、贵州、云南、重庆、广东和广西)稻田发展稻鱼共生系统的潜力,从自然资源条件和社会经济条件进行分析,确定出 4 种类型:类型 1 为最适合推广发展稻鱼共生系统的区域,推荐集约化发展,稻田面积(S) 3.59×10⁶ hm²(占比 29.56%)、最大鱼产量(P) 3.77 t/hm²;类型 2 为适合推广发展的区域,推荐集约化发展, S 为 2.05×10⁶ hm²(占比 16.85%)、 P 为 2.15 t/hm²;类型 3 为适合推广发展的区域,推荐半集约化, S 为 2.94×10⁶ hm²(占比 24.20%)、 P 为 1.85 t/hm²;类型 4 为最不适合推广发展的区域,不推荐发展稻鱼共生系统。

根据胡亮亮等^[15]的数据,进一步分析可见,南方各省区发展稻鱼共生系统的潜力不同,因而其发展策略应有差异。如湖南、四川、江西、广东、浙江和重庆现有稻鱼共生系统面积远远没有达到上述类型 1 的稻田面积,这些稻田可着力发展集约型稻鱼模式;广西和福建现有稻鱼系统面积与类型 1 面积之间差距较小,可在已有稻鱼共生系统中提高生产力水平,从粗放型和半粗放型模式向集约型模式转型;云南和贵州现有稻鱼面积已远超类型 1 的面积,根据上述分类标准,云南和贵州稻田 98% 以上

都属于类型 3 和类型 4,但因其少数民族人口比例大,稻鱼共生系统是当地保障粮食安全和提高农村生活水平的重要生计手段之一,因而可选择在自然条件较好的类型 3 稻田中大力推广粗放型和半粗放型为主的模式。

3.2 稻鱼共生产业发展路径

与稻渔综合种养的其他模式发展不同,南方山丘区未来稻鱼共生产业是在传统稻鱼共生的基础上提升和发展,将优秀的传统农耕技术与现代农业技术结合、小规模与适度规模结合是其发展的重要途径。

3.2.1 利用当地资源(水稻和鱼)发展多样化的稻鱼共生模式 南方山丘区蕴藏有长期适应了当地的气候和土壤环境条件的品种资源,如糯稻、红米、黑米等水稻地方品种以及青田田鱼、武夷山稻花鱼、全州禾花鲤、三江稻田鲤鱼、融水金边鲤、靖西黑背鲤和那坡橘红鲤等田鱼地方种群,充分利用这些地方资源发展稻鱼共生产业,形成特色稻和鱼的品牌,可提高稻田效益,实现农民创收。同时,结合“全球重要农业文化遗产系统”和“中国重要农业文化遗产系统”活态保护的策略,发展提升多样化稻鱼共生模式。例如,近年来广西桂西北地区的“稻-再生稻-鱼”“稻-鱼-螺”“稻-鱼-菇”“稻+鱼+瓜果”等多样化的模式,并形成特色大米、鱼干、鱼罐头等品牌。

3.2.2 适度规模并采用现代农业技术和经营管理方式 中国南方地区多山丘地,稻田以梯田和小块田为主,经营以小规模的家庭农户为主,大面积连片稻田少,机械化播种收获程度低。随着农村劳动力的转移,劳动力短缺,通过新型经营主体(如家庭农场、合作社等)适当扩大稻鱼共生系统经营规模,由经验为主的粗放型和半粗放型的经营模式向技术为主导的集约型转变,是发展稻鱼共生产业和提高稻鱼共生系统生产效率的路径之一。随着稻鱼共生产业的发展,新的农业支持体系和新的农业管理体系等亟需建立,这一新的农业体系包括适于稻鱼共生体系的品种(包括水稻品种和田鱼品种)、肥料(有机无机结合)、饲料(增加漂浮性)、农药(低毒、无毒和高效性)、新型农机(包括农用无人机)研制与有效供应。新的农业管理体系包括人才(稻和鱼综合型技术人才及营销人才)和市场培育(消费习惯引导)、土地使用政策、农业和环境保护的奖惩机制,以及针对稻鱼共生体系的农业保险等。

3.3 稻鱼共生系统研究展望

稻鱼共生系统的效应与机理已初步阐明,但随

着稻鱼共生系统生产力的提升和产业化发展,基础理论和技术方面仍需从以下几个方面深入研究:

1) 基础研究方面,水稻和田鱼相互适应规律和协同作用机制、稻田养殖田鱼承载力、碳源碳汇调节、生态服务价值等方面的研究仍有待研究;2) 技术装备方面,目前基本沿用水稻单作的肥料和农机具,而适于稻鱼共生系统的新型肥料和新型饲料、智能化和精准化机械和装备亦有待开发。此外,需要研究建立稻鱼共生系统中稻田的养殖承载力、水体和土壤环境、温室气体排放等监测评估指标体系和模型,以保障稻鱼共生产业的可持续发展。

参考文献:

- [1] 陈欣,唐建军,胡亮亮,等.生态型种养结合原理与实践[M].北京:中国农业出版社,2019.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 陈欣,唐建军,胡亮亮,等.青田稻鱼共生系统生态学基础及保护与利用[M].北京:科学出版社,2020.
- [5] GUO L, ZHAO L F, YE J L, et al. Using aquatic animals as partners to increase yield and maintain soil nitrogen in the paddy ecosystems[J]. *eLife*, 2022, 11: e73869.
- [6] ZHAO L F, DAI R X, ZHANG T J, et al. Fish mediate surface soil methane oxidation in the agriculture heritage rice-fish system[J]. *Ecosystems*, 2023, 26(8): 1656-1669.
- [7] HALWART M, GUPTA M V. Culture of fish in rice fields[M]. 2004, Rome: FAO.
- [8] AHMED N, GARNETT S T. Integrated rice-fish farming in Bangladesh: Meeting the challenges of food security[J]. *Food Security*, 2011, 3(1): 81-92.
- [9] 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.
- [10] COLEMAN R A, GAUFFRE B, PAVLOVA A, et al. Artificial barriers prevent genetic recovery of small isolated populations of a low-mobility freshwater fish[J]. *Heredity*, 2018, 120(6): 515-532.
- [11] FREED S, BARMAN B, DUBOIS M, et al. Maintaining diversity of integrated rice and fish production confers adaptability of food systems to global change[J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2020, 4: 576179.
- [12] AHMED N, HORNBuckle J, TURCHINI G M. Blue-green water utilization in rice-fish cultivation towards sustainable food production[J]. *AMBIO*, 2022, 51(9): 1933-1948.
- [13] MARIYONO J. Sustainable intensification practices of fish-rice co-culture in Java, Indonesia: Technical, socio-economic and environmental features[J]. *Journal of Agribusiness in Developing and Emerging Economies*, 2023. doi: 10.1108/JADEE-09-2022-0208.
- [14] SATHORIA P, ROY B. Sustainable food production through integrated rice-fish farming in India: a brief review[J]. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 2022, 37(5): 527-535.
- [15] 胡亮亮,赵璐峰,唐建军,等.稻鱼共生系统的推广潜力分析:以中国南方10省为例[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(7): 981-993.
- [16] KOOHANFKAN P, FURTADO J. Traditional rice-fish systems as globally important agricultural heritage systems (GIAHS)[J]. *International Rice Commission Newsletter*, 2004, 53: 66-74.
- [17] 张丹,闵庆文.贵州从江侗乡稻-鱼-鸭系统[M].北京:中国农业出版社,2015.
- [18] ZHANG Y, GUAN C Y, LI Z Y, et al. Review of rice-fish-duck symbiosis system in China: One of the globally important ingenious agricultural heritage systems (GIAHS)[J]. *Sustainability*, 2023, 15(3): 1910.
- [19] CAO B, YU L, NAIPAL V, et al. A 30 m terrace mapping in China using Landsat 8 imagery and digital elevation model based on the Google Earth Engine[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(5): 2437-2456.
- [20] 中国统计年鉴编辑委员会.中国统计年鉴[M].北京:中国农业出版社,2022.
- [21] 郭梁,任伟征,胡亮亮,等.传统稻鱼系统中“田鲤鱼”的形态特征[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 665-672.
- [22] 吴碧银,许建,曹顶臣,等.鲤低氧适应性状的全基因组关联分析[J]. *渔业科学进展*, 2022, 43(2): 98-106.
- [23] CHENG X B, LI F, KUMILAMBA G, et al. Transcriptome analysis in hepatopancreases reveals the response of domesticated common carp to a high-temperature environment in the agricultural heritage rice-fish system[J]. *Frontiers in Physiology*, 2023, 14: 1294729.
- [24] MORTILLARO J M, DABBADIE L, RAMINOHARISOA A E, et al. Trophic functioning of integrated rice-fish farming in Madagascar: Insights from stable isotopes ($\delta^{13}\text{C}$ & $\delta^{15}\text{N}$)[J]. *Aquaculture*, 2022, 555: 738240.
- [25] 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.
- [26] REN W Z, HU L L, GUO L, et al. Preservation of the genetic diversity of a local common carp in the agricultural heritage rice-fish system[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(3): E546-E554.
- [27] 赵璐峰.稻鱼共生对稻田系统碳氮及土壤甲烷氧化的影响[D].杭州:浙江大学,2022.
- [28] FREI M, BECKER K. Integrated rice-fish culture: Coupled production saves resources[J]. *Natural Resources Forum*, 2005, 29(2): 135-143.
- [29] GURUNG T B, WAGLE S K. Revisiting underlying ecological principles of rice-fish integrated farming for environmental, economical and social benefits[J]. *Our*

- Nature, 2005, 3(1): 1-12.
- [30] 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.
- [31] 谢坚. 农田物种间相互作用的生态系统功能: 以全球重要农业文化遗产“稻鱼系统”为研究范例[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [32] 胡亮亮. 农业生物种间互惠的生态系统功能[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [33] 郭梁. 稻渔系统土壤氮素的维持及其生态学机理[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [34] 蔡淑芳, 黄献光, 黄惠珍, 等. 稻鱼共作对水稻产量效应的 Meta 分析[J]. *水生生物学报*, 2022, 46(12): 1924-1931.
- [35] 胡中元. 稻田复合种养的生态系统功能与服务[D]. 杭州: 浙江大学, 2024.
- [36] ROTHUIS A J, NHAN D K, RICHTER C J, et al. Rice with fish culture in the semi-deep waters of the Mekong Delta, Vietnam: A socio-economical survey[J]. *Aquaculture Research*, 1998, 29(1): 47-57.
- [37] 吴雪. 稻鱼系统养分循环利用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [38] 李娜娜. 中国主要稻田种养模式生态分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [39] 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.
- [40] BERG H, TAM N T. Use of pesticides and attitude to pest management strategies among rice and rice-fish farmers in the Mekong Delta, Vietnam[J]. *International Journal of Pest Management*, 2012, 58(2): 153-164.
- [41] DWIYANA E, MENDOZA T C. Determinants of productivity and profitability of rice-fish farming systems[J]. *Asia Life Sciences*, 2008, 17(1): 21-42.
- [42] CHEN X, WU X, LI N N, et al. 2011. Globally important agricultural heritage system (GIAHS) rice-fish system in China: An ecological and economic analysis [C]/LI P P. *Advances in Ecological Research*, Zhenjian: Jiangsu University Press, 2021: 126-137.
- [43] VROMANT N, ROTHUIS A J, CUC N T T, et al. The effect of fish on the abundance of the rice caseworm *Nymphula depunctalis* (Guenee) (Lepidoptera: Pyralidae) in direct seeded, concurrent rice-fish fields[J]. *Biocontrol Science and Technology*, 1998, 8(4): 539-546.
- [44] SINHABABU D P, MAJUMDAR N. Evidence of feeding on brown plant hopper, *Nilaparvata lugens* (Stall) by common carp, *Cyprinus carpio* var. *communis* L.[J]. *Journal of the Inland Fisheries Society of India*, 1985, 13(2): 16-21.
- [45] VROMANT N, NHAN D K, CHAU N T H, et al. Effect of stocked fish on rice leafhopper *Cnaphalocrocis medinalis* and rice caseworm *Nymphula depunctalis* populations in intensive rice culture[J]. *Biocontrol Science and Technology*, 2003, 13(3): 285-297.
- [46] FREI M, KHAN M A M, RAZZAK M A, et al. Effects of a mixed culture of common carp, *Cyprinus carpio* L., and *Nile tilapia*, *Oreochromis niloticus* (L.), on terrestrial arthropod population, benthic fauna, and weed biomass in rice fields in Bangladesh[J]. *Biological Control*, 2007, 41(2): 207-213.
- [47] 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: rtad014.
- [48] 肖筱成, 谌学珑, 刘永华, 等. 稻田主养彭泽鲫防治水稻病虫害草害的效果观测[J]. *江西农业科技*, 2001(4): 45-46.
- [49] 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.
- [50] SINHABABU D P, SANJOY SAHA S, SAHU P K. Performance of different fish species for controlling weeds in rainfed lowland rice field[J]. *Biocontrol Science and Technology*, 2013, 23(12): 1362-1372.
- [51] NAYAK P K, PANDA B B, DAS S K, et al. Weed control efficiency and productivity in rice-fish-duck integrated farming system[J]. *Indian Journal of Fisheries*, 2020, 67(3): 62-71.
- [52] GUO L, HU L L, ZHAO L F, et al. Coupling rice with fish for sustainable yields and soil fertility in China[J]. *Rice Science*, 2020, 27(3): 175-179.
- [53] 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.
- [54] 戴然欣, 赵璐峰, 唐建军, 等. 稻渔系统碳固持与甲烷排放特征[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(4): 616-629.
- [55] 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.
- [56] 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(1/2/3): 228-237.
- [57] 袁伟玲, 曹凑贵, 李成芳, 等. 稻鸭、稻鱼共作生态系统 CH₄ 和 N₂O 温室效应及经济效益评估[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(6): 2052-2060.
- [58] 展茗, 曹凑贵, 汪金平, 等. 复合稻田生态系统温室气体交换及其综合增温潜势[J]. *生态学报*, 2008(11): 5461-5468.
- [59] 刘小燕. 稻鸭鱼生态种养对稻田甲烷减排及水稻栽培环境改善的功能研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2004.
- [60] 刘小燕, 黄璜, 杨治平, 等. 稻鸭鱼共栖生态系统 CH₄ 排放规律研究[J]. *生态环境*, 2006(2): 265-269.
- [61] HUANG M, ZHOU Y E, GUO J P, et al. Co-culture of

- rice and aquatic animals mitigates greenhouse gas emissions from rice paddies[J]. *Aquaculture International*, 2024, 32(2): 1785-1799.
- [62] ZHANG L, LI L L, TANG Q Y, et al. Intermittent irrigation as a solution for reduced emissions and increased yields in ratoon rice systems[J]. *Plant and Soil*, 2024, 501: 225-236.
- [63] 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: 108-116.
- [64] 王楷, 李伏生, 方泽涛, 等. 不同灌溉模式和施氮量条件下稻田甲烷排放及其与有机碳组分关系[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(5): 1012-1020.
- [65] 陈佳, 赵璐峰, 戴然欣, 等. 稻鱼共生系统的土壤产甲烷和甲烷氧化微生物群落[J]. *生态学杂志*, 2023, 42(12): 2961-2971.
- [66] BHATTACHARYYA P, SINHABABU D P, ROY K S, et al. Effect of fish species on methane and nitrous oxide emission in relation to soil C, N pools and enzymatic activities in minted shallow lowland rice-fish farming system[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2013, 176: 53-62.
- [67] HU Y, YANG T, LIU Y B, et al. High fish stocking density weakens the effects of rice-fish co-culture on water eutrophication and greenhouse gas emissions[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2022, 233(6): 222.
- [68] 丁姣龙, 陈璐, 王忍, 等. 鱼排泄物与分泌物对水稻土壤酶活性及土壤养分的影响[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2021, 44(2): 74-79.
- [69] VROMANT N, CHAU N T H. Overall effect of rice biomass and fish on the aquatic ecology of experimental rice plots[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2005, 111(1/2/3/4): 153-165.
- [70] YUAN W L, CAO C G, LI C F, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice-duck and rice-fish complex ecosystems and the evaluation of their economic significance[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2009, 8(10): 1246-1255.
- [71] CONRAD R, ROTHFUSS F. Methane oxidation in the soil surface-layer of a flooded rice field and the effect of ammonium[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1991, 12(1): 28-32.
- [72] 何建清, 潜祖琪, 郑建初, 等. 丽水稻作[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [73] 唐露. 重要传统农业贵州从江稻鱼鸭系统的水稻遗传多样性[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [74] YE Y Y, REN W Z, ZHANG S X, et al. Genetic diversity of fish in aquaculture and of common carp (*Cyprinus carpio*) in traditional rice-fish coculture[J]. *Agriculture-Basel*, 2022, 12(7): 997.
- [75] LIANG Z Q, ZOU L, TIAN L, et al. Genetic origin and differentiation of ten paddy field-farmed *Cyprinus carpio* strains in China[J]. *Aquaculture*, 2022, 561: 738573.
- [76] ZHONG Z X, FAN J J, SU H H, et al. Genetic sources and diversity of the paddy field carp in the Pearl River basin inferred from two mitochondrial loci[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 10: 896609.
- [77] JI D, SU X, YAO J J, et al. Genetic diversity and genetic differentiation of populations of golden-backed carp (*Cyprinus carpio* var. Jinbei) in traditional rice fields in Guizhou, China[J]. *Animals*, 2022, 12(11): 1377.
- [78] 罗崎月. 传统稻鱼共生系统田鱼的遗传多样性[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- [79] 罗康隆. 侗乡鱼米[M]. 北京: 北京美术摄影出版社, 2020.
- [80] 杨星星, 谢坚, 陈欣, 等. 稻鱼共生系统不同水深对水稻和鱼的效应[J]. *贵州农业科学*, 2010(2): 73-74.



陈欣, 博士, 浙江大学二级教授, 博士生导师。主讲本科课程《生态学》《生态学基础及实验》等课程; 国家级一流课程《基于稳定性同位素技术的生态系统氮素运转虚拟仿真实验》负责人; 线

上线下混合型实验教材《生态学实验》(高等教育出版社, 2021) 副主编。长期研究生物之间相互作用的生态系统功能及其在农业上的应用, 聚焦稻鱼共生系统; 担任国际重要学术期刊《Agriculture, Ecosystems and Environment》副主编、中国水产学会稻渔综合种养专业委员副主任、“科创中国”稻渔生态种养产业服务团团长; 主持国家自然科学基金项目(面上项目、国际合作项目重点、区域创新联合重点项目)、国家重点研发计划、浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划等科研项目; 研究结果发表在《Science》《PNAS》《Frontiers in Ecology and the Environment》《Global Change Biology》《Journal of Ecology》《Soil Biology and Biochemistry》《eLife》《Ecosystems》等国内外学术期刊上; 出版《生态型种养结合原理与实践》和《青田稻鱼共生系统生态学基础及保护与利用》等专著; 曾荣获国家科学技术进步奖二等奖(第9完成人)、教育部科技进步一等奖(第1完成人)、广西科学技术合作奖(第1完成人)及神农中华农业科技奖二等奖(第1完成人)。

【责任编辑 周志红】