

稻-鱼系统的发展与未来思考*

胡亮亮¹ 唐建军¹ 张 剑¹ 任伟征¹ 郭 梁¹ Matthias Halwart²
李可心³ 朱泽闻³ 钱银龙³ 吴敏芳⁴ 陈 欣^{1**}

(1. 浙江大学生命科学学院 杭州 310058; 2. 联合国农业和粮食组织渔业和水产养殖部 罗马 00153;
3. 农业部国家水产技术推广站 北京 100125; 4. 浙江省青田县农业局 青田 323900)

摘 要 耕地和淡水是保证全球食物可持续供应所必不可少的资源, 如何有效利用有限的水土资源、在保障食物供给的同时降低农业生产过程对资源环境的负面影响, 是当今世界农业面临的重大挑战。稻-鱼系统(本文的“鱼”是水产生物的统称)是通过有效利用水土资源同时产出稻谷和水产品的重要农业方式, 对保障区域食物供给和保护当地资源和环境有重要作用。近几十年来全球稻鱼-系统迅速发展, 至目前全球六大洲的稻作区共28个国家都有了稻-鱼系统的分布; 在中国稻-鱼系统也正由原来传统、规模小、养殖单一的模式逐渐发展为规模化、专业化、机械化和养殖多样化的模式。大量研究表明, 稻-鱼系统可实现水稻产量稳定和获得水产品, 稻-鱼系统同时具有化肥农药减量和农业面源污染降低等效应; 稻-鱼系统也有助于解决水产单一养殖而产生的面源污染。虽然全球1.63亿hm²稻田面积90%以上具有发展稻-鱼系统的潜力, 但目前稻-鱼系统的比例仍很低, 我国稻-鱼系统面积也仅占稻田面积的4.48%。因此, 保障稳产高效可持续的稻-鱼系统发展, 需要对不同稻作区发展稻-鱼系统的生态经济可行性和适应性进行评估, 同时必须建立新的技术体系(田间设施、种养结合技术、农业机械等), 并适当扩大规模和创建品牌以增加农民收益。

关键词 水稻生产 水产养殖 稻-鱼系统 生态效应 技术体系

中图分类号: Q143 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2015)03-0268-08

Development of rice-fish system: Today and tomorrow

HU Liangliang¹, TANG Jianjun¹, ZHANG Jian¹, REN Weizheng¹, GUO Liang¹, Matthias HALWART²,
LI Kexin³, ZHU Zewen³, QIAN Yinlong³, WU Minfang⁴, CHEN Xin¹

(1. College of Life Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Department of Fisheries and Aquaculture, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Rome, Italy; 3. National Aquaculture Technical Extension Station, Ministry of Agriculture, Beijing 100125, China; 4. Qingtian Agriculture Bureau of Zhejiang Province, Qingtian 323900, China)

Abstract Land and freshwater resources are essential for ensuring global sustainable food supplies. The world agriculture currently faces great challenge on how to secure food supply with scarce land and freshwater resources without negatively impacting the environment. Rice-fish system (where ‘fish’ denotes a wide range of aquatic animals including fish, prawn, shrimp, crabs, soft shell turtles, etc.) is one of the successful models for producing both rice and fish by efficient use of land and freshwater resources. Rice-fish system has contributed to local food security, poverty alleviation and environmental conservation. In the last decades, rice-fish system experienced a fast development in the world. Recently, rice-fish system is practiced in 28 countries (including Japan, Egypt, India, Indonesia, Thailand, Vietnam, Philippines, Bangladesh, Myanmar and Malaysia). Rice-fish system has a long history in China and has played an important role in providing rice and fish for local consumption. Over the last 60 years, Chinese rice-fish system has steadily developed and changed from small-scale traditional farming to large-scale modern farming with specialization and commercialization to ensure sustainability. Studies have shown that rice-fish system can have high yields of rice and fish and

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2011CB100406)和国家自然科学基金项目(31270485)资助

** 通讯作者: 陈欣, 主要研究方向为农业系统中生物的互惠及其效应。E-mail: chen-tang@zju.edu.cn

胡亮亮, 主要研究方向为农业系统中生物的互惠及其效应。E-mail: zjuhull@126.com

收稿日期: 2015-01-07 接受日期: 2015-01-23

thereby optimizes the benefits of scarce land and water resources as a result of complementary and synergistic interactions between fish and rice. Rice-fish system also decreases pesticide use due to lowering the incidence of diseases, insect pests and weeds in rice fields. Meanwhile, rice-fish system reduces nitrogen fertilizer application through complementary use of nitrogen by rice and fish, and enhances soil nutrient availability for rice crop. Rice-fish system also resolves certain problems induced by freshwater aquaculture because nutrients in effluents resulting from fish production are absorbed by rice crops and are therefore not wasted or would not become a pollution source. Although most areas of global rice fields are suitable for developing rice-fish system, the adoption rate and scale of rice-fish system in the world remain low. In China, there is only 4.48% of the total well-irrigated rice paddies co-cultured with fish. Therefore, to ensure sustainable development of rice-fish system, more efforts are needed. These efforts include: 1) potential assessment of rice paddy for rice-fish system (e.g. water supply and water quality in rice fields), evaluation of new fish species for rice field culture and selection of rice varieties for rice-fish co-culture; 2) development of technology packages for culturing rice and fish, optimization of fertilization rates and fertilization methods for rice and optimum feeding rates and methods for fish; 3) developing field configurations for rice culture and aquaculture; 4) optimization of rice planting patterns for rice-fish farming, determination of the carrying capacity and optimization of stocking densities; 5) development of suitable machines for rice-fish system; and 6) assisting farmers to create identity product brands acceptable to consumers and society.

Keywords Rice production; Freshwater aquaculture; Rice-fish system; Ecological effect; Technological package

(Received Jan. 7, 2015; accepted Jan. 23, 2015)

耕地和淡水是保证全球食物可持续供应必不可少的资源, 如何有效利用有限的水土资源、在保障食物供给的同时降低农业生产过程对资源环境的负面影响, 是当今世界农业面临的重大挑战^[1]。水稻是全球粮食安全的重要组成部分^[2-3], 全球稻田面积 1.63 亿 hm^2 ^[4], 主要分布在东亚和东南亚国家和地区^[2]。全球稻田面积中 90% 以上处于不同程度的浅水状态之下, 浅水环境不仅是许多水生生物天然的栖息场所, 而且为养殖鱼、虾、蟹和鳖等水产动物提供了良好的条件^[5], 也为稻田水产养殖提供了良好基础。在东南亚的一些国家, 利用稻田水土资源将水稻栽培与水产养殖相结合形成的稻-鱼农耕模式(本文的“鱼”是指水产生物的统称, 下同)具有悠久的历史^[5-6]。水稻和水产动物种养在同一片土地, 同时生产出碳水化合物(稻米)和动物性蛋白(鱼)^[7], 被认为是世界上将动物饲养和农作物种植相结合的最佳典范, 在提高人们营养水平和减轻贫困方面发挥着重要的作用^[5]。在中国, 稻-鱼系统也具有上千年的历史, 分布于浙江南部的“青田稻鱼共生系统”2005 年被联合国粮农组织列入首批“全球重要农业文化遗产”。近 20 年以来, 世界和中国的稻田系统迅速发展, 成为淡水水产养殖的重要方式之一^[8]。但目前稻-鱼系统的比例仍很低, 在中国稻-鱼系统面积仅占水稻总种植面积的 4.48%^[9]。如何合理利用稻田资源发展稻-鱼系统、在保证水稻生产的同时进行水产养殖, 仍需从原理上加以深入研究, 同时也需要建立相应的技术体系(包括水稻的栽培技术和水产养殖技术)。为此, 本文综述了全球和中国稻-鱼系统的发展和研究, 并对稻-鱼系统未来发展若干问题进行了分析。

1 世界和中国稻-鱼系统的发展

稻-鱼系统在全球都有分布^[5], 在亚洲尤其是东南亚国家有着悠久历史。据报道, 稻田养鱼在东南亚有 6 000 年的历史, 我国浙江永嘉、青田等县的稻田养鱼历史可追溯到 1 200 年前^[10]。从 20 世纪初开始, 印度尼西亚、马来西亚、菲律宾、印度、日本、印度、马达加斯加、苏联、匈牙利、保加利亚、美国以及一些亚洲国家都进行了稻田养鱼的尝试。至 20 世纪中期, 全球六大洲的稻作区共 28 个国家都有了稻-鱼系统的分布^[11], 其中近年来以印度尼西亚、孟加拉、越南、马来西亚、印度、泰国、埃及、菲律宾、日本等国家的发展较快^[5,12-13](图 1)。例如, 2014 年印度尼西亚设定了在全国范围内实现 100 万 hm^2 稻田养鱼的目标, 而孟加拉国也已经将发展稻田养鱼作为粮食安全保障的国家战略^[14]。稻田养鱼的生产方式与当地的文化、经济和生态环境相结合, 在保护当地生物资源多样性和维持农业可持续发展方面有着重要作用。



●稻-鱼系统 Rice-fish system

图 1 全球稻-鱼系统分布图(修改自 Halwart 和 Gupa, 2004^[5])

Fig. 1 Global distribution of rice-fish system (modified from Halwart and Gupa, 2004^[5])

中国拥有全球 1/5 的人口, 但人均耕地面积和可再生水资源仅为世界水平的 1/10 和 1/4(图 2a), 而占中国主食 1/2 的水稻(图 2b)和为中国提供大约 1/3 水产品的淡水养殖(图 2c)均依赖于短缺的耕地和淡水资源。中国水稻种植面积 3 049 万 hm^2 , 仅次于印

度排在全球第二, 中国同时也是全球最大的淡水养殖生产地^[15]。在中国历史上, 水稻种植和水产养殖的结合有着悠久的传统并且受到极大的重视, 稻-鱼系统为中国尤其是山丘地区粮食安全保障和贫困的减轻作出了巨大贡献^[10,16]。

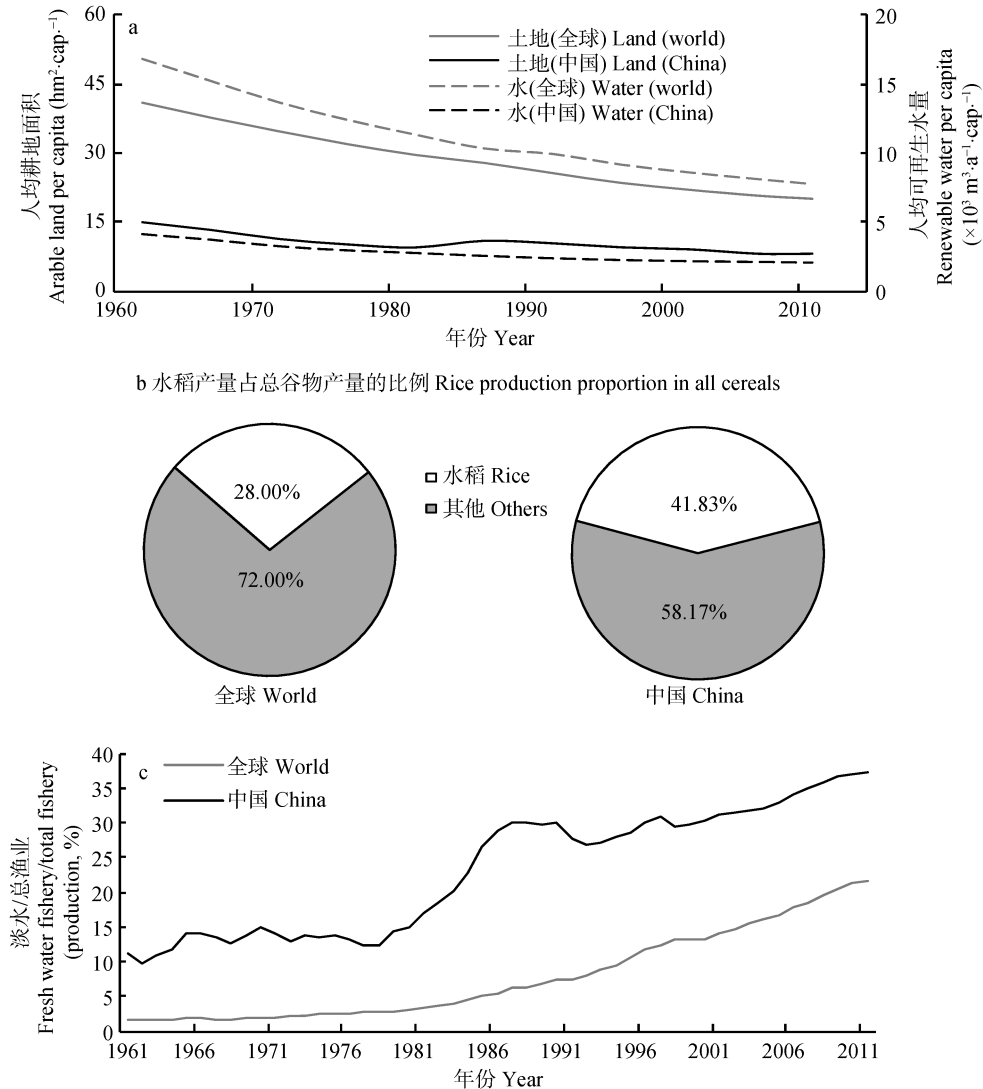


图 2 全球和中国的人均耕地面积和可再生水资源(a)、水稻占所有谷类(包括水稻、小麦、玉米、大麦等)产量的比例(b)和淡水养殖占总渔业产量的比例(c)的变化(联合国粮农组织统计数据库, 2013^[15])

Fig. 2 Per capita arable land and renewable water resources (a), rice production as a percentage of the total cereals production (including rice, wheat, maize and barely, etc) (b) and freshwater aquaculture production as a percentage of the total fisheries production (c) in China and worldwide (FAO Statistical Databases 2013^[15])

在过去的 60 多年中, 中国的稻-鱼系统(面积和产量)稳步发展(图 3), 经历了 3 个快速发展时期。第 1 个快速发展时期是 20 世纪 50 年代, 稻田养鱼面积大幅度增加, 至 1959 年, 稻田养鱼面积达 $6.66 \times 10^5 \text{ hm}^2$ (图 3A); 20 世纪 80 年代早期至 2000 年代中期, 是稻田养鱼的第 2 个快速发展时期, 例如 1985—2000 年期间, 稻田养鱼面积由 $6.49 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 增至 $15.32 \times 10^5 \text{ hm}^2$ (图 3B), 稻田养鱼的单产也由 1985 年的 $125 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增至 2000 年的 $487 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 2007 年以来, 中国稻田

养鱼进入一个新的发展时期, 稻田养鱼由原来传统、规模小、养殖单一的模式逐渐发展为规模化、专业化、机械化和养殖多样化的模式(表 1), 稻-鱼系统面积稳定在 $1.55 \times 10^5 \text{ hm}^2$ (图 3C)。此外, 根据各稻作区的自然资源特点以及各地的市场需求, 农业部全国水产推广总站进行为期 5 年的试验与示范, 形成了适合各个稻作区的多样化的稻-鱼模式(稻-鱼模式、稻-鳖模式、稻-蟹模式、稻-虾模式和稻-鳅模式等)(图 4)。

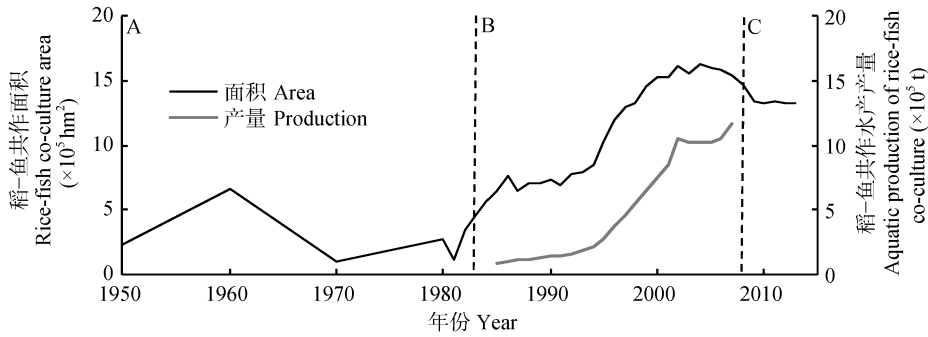


图 3 自 1950 年以来中国稻田养鱼面积和水产产量变化趋势
Fig. 3 Changes in areas and aquatic productions of rice-fish system since 1950 in China

表 1 传统稻-鱼系统和现代稻-鱼系统的比较
Table 1 Comparison between traditional rice-fish system and current rice-fish system

项目 Item	传统稻-鱼系统 Traditional rice-fish system	现代稻-鱼系统 Current rice-fish system
农户 Farmer	个体户 Family household	家庭农场、合作社、农业公司 Family farm, farmer cooperative, agriculture company
规模 Scale	小规模、自给自足 Small scale, self sufficient	大规模、商业品牌 Large scale, commercial brand
水产生物 Fish species	鲤鱼 Carp	鲤鱼、蟹、虾、中华鳖、泥鳅 Carp, crab, shrimp, soft-shell turtle, loach
技术 Techniques	传统种养技术 Traditional culture	机械化、专业化、规模化和信息化技术相结合 Modern technology
目标 Objectives	增加食物供给, 促进农村经济发展 Increase food supplies and enhance rural economies	增加食物供给, 促进经济, 保护资源, 减少对环境的负面影响 Increase food supplies, enhance economies, conserve resources, and reduce negative environmental impact

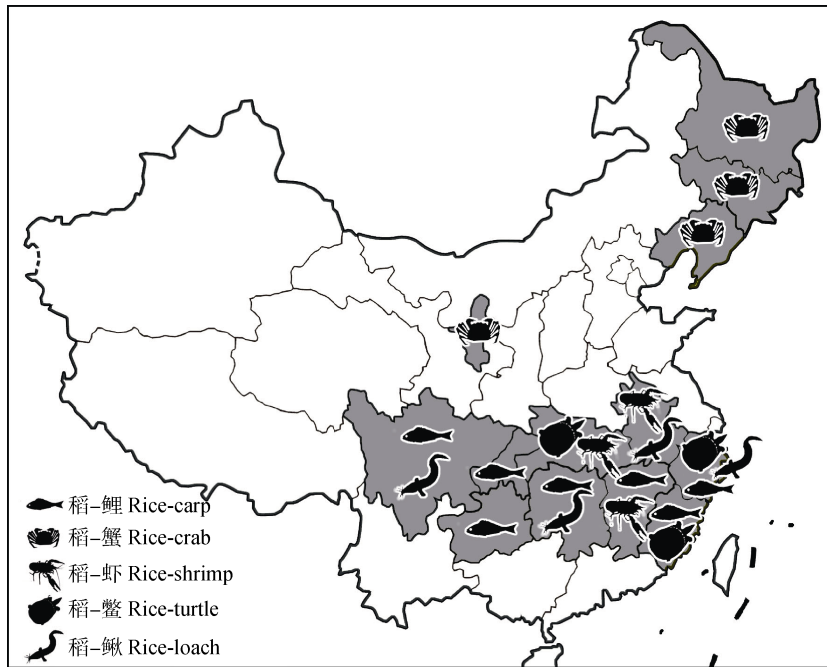


图 4 中国稻作区主要稻-鱼系统不同模式示范点分布
Fig. 4 Map of demonstration sites of different models of rice-fish system in the main rice-growing areas of China

2 稻-鱼系统的研究

与水稻单种系统和水产生物单养方式不同, 稻-鱼种养结合模式是将水稻和水产生物两大类生物置于同一生长空间, 使得水稻生长与水产生物活动以及生物之间的相互作用等过程发生变化, 这些变

化将对水稻产量、稻田资源利用和环境产生明显影响^[17-21]。

2.1 水稻产量

稻鱼系统中水产生物的引入是否和如何影响水稻的产量一直是人们关心的问题。目前大多数的研究发现, 与水稻单种比较, 稻-鱼系统中水稻产量保

持不变或有增加的趋势,如 Frei 和 Becker^[2]对稻田养殖罗非鱼(*Tilapia mossambica*)的研究发现,共作的水稻产量显著高于水稻单种。Gurung 和 Wagle^[22]对尼泊尔稻田养鱼的研究也得到了相同的结果。Ahmed 等^[23]对孟加拉稻-虾共作发现,稻-虾共生会提高水稻产量。Li 等^[24]及吕东锋等^[25]对稻-蟹共生的研究都发现,中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)的放养密度对水稻产量也没有显著影响。Xie 等^[26]以稻-鱼系统为例,进行了 6 年的定位观测和田间试验,发现在鱼产品产量 375~450 kg·hm⁻²的水平下,水稻产量保持稳定,而且对农药和化肥的依赖性低;通过田间试验,进一步研究了提高稻田鱼产量后,对水稻产量和经济效益的影响,发现稻田鱼产量在 1 500 kg·hm⁻² 以下,仍能保持稳定的水稻产量,且经济效益大大提高。吴雪等^[27]研究表明,虽然稻田养殖水产动物时,大多需要为水产动物让出 10% 左右的空间(如沟、坑),但由于水稻的边行效应可弥补沟、坑占用面积的损失,因而未显著降低水稻的产量。Ren 等^[28]对国际上近 20 年来发表的稻-鱼系统与水稻产量相关论文进行了整合分析(meta-analysis),发现与水稻单作系统比较,在不同情况下(如不同水产生物类型)稻-鱼系统对水稻产量产生显著的正效应。

2.2 化肥农药减量

水稻的集约化生产需要大量的化肥农药投入,稻-鱼系统能否通过生物之间的相互作用和资源的互补利用达到化肥农药的减量效应也是稻鱼系统研究中需要回答的问题之一。大量研究表明,稻-鱼系统在许多情况下农药的使用量大大减少,甚至无农药使用,化肥用量也显著减少。如 Berg^[29]对越南 120 个农户的调查表明,稻-鱼系统农药的使用比水稻单作系统降低 43.8%。在印度尼西亚,稻-鱼系统无除草剂使用,杀虫剂的用量仅为水稻单作系统的 23.24%^[30]。在浙江南部稻-鱼系统分布区,为期 6 年的田间取样观测表明,与水稻单作系统比较,稻-鱼系统在产量不降低的情况下,农药和化肥使用量分别降低 68%和 24%^[26]。

研究表明,稻-鱼系统在降低化肥和农药使用量的情况下,仍能获得较高的产量,其主要原因是稻田引入水产生物后,生物之间的相互作用产生了效应。一方面,稻-鱼系统中,水产生物可控制水稻病虫害的发生,进而减少农药的使用。例如,稻飞虱主要在水稻基部取食为害,水产动物的活动可以使植株上的害虫落水,进而取食落水虫体,减少稻飞虱的危害。同时,水产动物在稻田中可通过取食或搅动等将杂草去除,控制率可达 39%~100%^[26,31]。

如 Rothuis 等^[32]的研究表明,与水稻单作比较,稻田养鱼系统杂草生物量明显减低。另一方面,稻鱼系统中,水产生物(如鱼、虾、鳖、蟹等)的活动搅动土壤,增加了土壤孔隙度,从而使营养物质更易接触水稻须根而被高效利用。Vromant 等^[33]报道稻田养鱼可增加水稻 10%的生物量,衰老的稻叶落入土壤,补充了土壤有机质库,间接促进了水稻对营养元素的吸收。Steffens^[34]和 Terjesen 等^[35]的研究则证实鱼排泄物中的氮有 75%~85%都是以铵离子的形态存在,而铵离子是水稻的主要氮摄入形式,因此,鱼能够将环境中原本不易被水稻吸收利用的氮形式转变成易于被水稻吸收利用的有效氮形式。此外,稻-鱼共作和鱼单作投喂的鱼饲料中分别仅有 11.1%和 14.2%的氮被鱼所同化,在稻-鱼共作中,水稻籽粒和秸秆中 31.8%的氮来自投喂饲料,鱼体内氮总量的差值表明化肥中 2.1%的氮进入了鱼的体内^[26]。

2.3 稻田水体环境

稻-鱼系统中,水产生物的养殖需要一定饲料的投入,尤其是养殖密度提高后是否会导致农业面源污染亦受关注。一些研究发现,稻田养鱼后,田面水氮、磷元素的浓度显著增加。如 Oehme 等^[36]研究发现,稻-鱼系统中水体的 NH₄⁺和 NO₂⁻的含量均高于水稻单种系统,稻-鱼系统中投饵越多,田面水养分含量越高。王昂等^[37]研究发现稻-蟹共作模式中,水体硝酸盐和磷酸盐含量都显著高于水稻单作系统。而一些研究发现,稻-鱼系统可降低氮素流失。例如 Li 等^[38]和 Datta 等^[39]研究发现,与水稻单种系统相比,稻-鱼系统 NH₃挥发和 NO₃-N 淋溶下降。黄毅斌等^[40]¹⁵N 示踪研究表明,鱼排泄物有 17%~29%被水稻吸收,从而降低氮素在水体的停留。丁伟华等^[41]的研究表明,稻-鱼系统中,当鱼目标产量增至 3 000 kg·hm⁻² 时,水体总磷和 NH₄⁺-N 含量显著提高,面源污染风险增加;但养鱼目标产量为 2 250 kg·hm⁻² 时经济效益和环境效益都最佳,并且不会造成明显的水体污染物增加。可见,合理的稻-鱼系统,能够解决淡水养殖导致的一些问题,原本由水产养殖流失的养分被水稻吸收利用从而减少了资源的浪费和水体污染^[41-42]。

3 未来发展思考

大量研究已表明,稻-鱼系统在保障粮食安全,保护资源和环境方面具有重要意义。当今世界农业面临资源短缺、环境恶化和食物安全等重大挑战,因而稻-鱼系统获得很好的发展机遇。首先,由于海洋捕捞渔业对海洋生物多样性的影响,使得水产养

殖成为满足鱼产品需求的重要途径, 内陆淡水养殖也日益受到重视。其次, 淡水和耕地作为限制性资源日趋紧张。水产养殖和水稻种植的结合是提高有限的淡水和耕地利用效率的方式之一。第三, 和其他产业相比, 水稻种植经济效益低下的问题日益突出, 农户水稻种植的积极性受影响, 而稻-鱼系统可降低农药化肥的投入, 在不降低水稻产量的同时收获水产品, 显著地增加农民的收益, 大大促进了农户种植水稻的热情, 从而稳定了水稻生产。最后, 人们关于有机食品或绿色食品的意识正在逐步增强。稻-鱼系统在生产过程中较少使用或不使用化学品, 因而产出的稻米或水产品受到消费者的青睐。

但是, 虽然全球 1.63 亿 hm^2 稻田面积中 90% 以上的稻田具备发展稻鱼的条件^[16], 目前稻-鱼系统的比例仍很低; 在中国拥有灌溉条件良好的稻田中, 进行水产养殖的比例也仅占 4.48%^[9]。利用稻田资源发展高产高效、环境友好的稻-鱼系统, 仍面临很多挑战, 需要进行如下几个方面的探讨。

3.1 稻-鱼系统的区域性

虽然具有良好灌溉和水源条件的稻田均可发展稻-鱼种养模式, 但不同水产生物对温度、土壤、水质、稻田状态要求有所不同, 不同区域的稻作区发展稻-鱼系统的模式也不尽相同。例如, 中华绒螯蟹要求水体和土壤的pH在7.0以上才能正常完成其生活史; 又如中华绒螯蟹和中华鳖(*Pelodiscus sinensis*)对温度的要求不同, 前者最适水温为20~24 °C, 而后者最适水温为27~33 °C, 生态幅狭窄; 此外, 中华绒螯蟹、小龙虾(*Procambarus clarkii*)等水产生物有打洞穴的习性, 会破坏梯田式稻田的保水性。因此, 发展稻-鱼系统宜根据稻作区具体的情况选择适合的稻-鱼共作模式。此外, 不同稻作区发展稻-鱼模式, 也要考虑当地的市场需求和消费习惯。

3.2 种养结合的技术体系

与水稻单种和水产生物单养方式不同, 稻-鱼系统中两大类生物共存同一空间, 因而稻-鱼系统的种养技术在田间设施、品种选择、种养密度、肥水管理、饲料喂养等方面都将发生根本性的变化, 可持续稻-鱼系统的发展需要建立新的技术体系来支持。这一新的技术体系包括以下几个方面: 1) 田间布局。引入水产生物的稻田系统, 需要建立利于水产生物避难的田间设施(如沟、坑等)及防逃措施。如何设计沟、坑比较关键, 研究表明沟和坑面积比例小于 10%将不影响水稻产量, 十字沟、环形沟等均较好提供避难所, 且产生很好的边际效应^[27]。2) 品种

选择。选择适于深水的水稻品种和适于浅水的水产生物系对稻-鱼系统的良好发展很重要。此外, 水稻品种还应考虑高产、优质、耐肥、抗倒伏、抗病虫害等。3) 水稻种植方式和密度。研究表明, 稻-鱼系统中水稻适当稀疏种植(如大垄双行)既利于水产生物在稻田的活动, 也利于水稻群体通风透光^[43-44]。4) 稻田肥料管理。稻-鱼系统中, 由于投入的饲料未能完全被水产生物利用, 残留在稻田的饲料被分解后释放出来的氮、磷养分可被水稻利用, 因而应减少水稻肥料的投入。研究表明, 在水产生物(田鲤鱼)目标产量为 1 500 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 情况下, 由于水稻利用饲料中的部分氮素, 可节省 37%肥料氮^[42]。5) 新型农业机械。稻鱼系统种养结合, 对农田设施和农业机械提出新的要求, 如及时研制和配套适于稻鱼系统的水稻带水收割机、大垄双行插秧机、稻田开沟机等。

3.3 规模化和品牌产品的创建

适当扩大规模、实行规模化种养是发展可持续现代稻-鱼系统的重要因素之一, 规模化稻-鱼系统模式利于农民提高水稻和水产品数量、质量和商品化程度, 同时也利于新技术(如新品种、新种养技术、新农业机械的采用等)的推广应用。

由于通常稻-鱼系统农药化肥的使用大幅度减少(一些情况下甚至不用化肥农药), 饲料以农家饲料为主(不含抗生素等), 因而稻-鱼系统产出较高质量的水稻和鱼产品。如何让这些产品得到关注和消费者的接受, 产品获得较好的价格, 也是促进稻-鱼系统稳步发展的关键。实践表明, 创建品牌是较好的途径之一。目前稻-鱼系统的稻米品牌有蟹田香米、蟹稻米、龙虾米、鱼米香、稻花鱼大米等, 水产生物的品牌有田鲤鱼、清溪乌鳖、红田鱼、稻田河蟹等。这些品牌的创建明显提高了产品的价格, 经营者积极性得到提高, 进而也促进稻-鱼系统的稳定发展。

参考文献

- [1] Foley J A, Ramankutty N, Brauman K A, et al. Solutions for a cultivated planet[J]. Nature, 2011, 478(7369): 337-342
- [2] Frei M, Becker K. Integrated rice-fish culture: Coupled production saves resources[J]. Natural Resources Forum, 2005, 29(2): 135-143
- [3] Liesack W, Schnell S, Revsbech N P. Microbiology of flooded rice paddies[J]. FEMS Microbiology Reviews, 2000, 24(5): 625-645
- [4] Monfreda C, Ramankutty N, Foley J A. Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological

- types, and net primary production in the year 2000[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22(1), doi: 10.1029/2007GB002947
- [5] Halwart M, Gupa M V. Culture of Fish in Rice Fields[M]. Italy: FAO, 2004
- [6] Ruddle K. Traditional integrated farming systems and rural development: The example of ricefield fisheries in Southeast Asia[J]. *Agricultural Administration and Extension*, 1982, 10(1): 1–11
- [7] Schuster W H. Fish culture in conjunction with rice cultivation[J]. *World Crops*, 1955, 7: 11–14, 67–70
- [8] Miao W M. Recent developments in rice-fish culture in China: A holistic approach for livelihood improvement in rural areas[M]//De Silva S S, Davy F B. *Success Stories in Asian Aquaculture*. German: Springer, 2010: 15–40
- [9] 李娜娜. 中国主要稻田种养模式生态分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 27
Li N N. Ecological analysis of representative rice-based ecosystems in China[D]. Hangzhou: Zhejiang University: 27
- [10] 游修龄. 稻田养鱼——传统农业可持续发展的典型之一[J]. *农业考古*, 2006(4): 222–224
You X L. Rice-fish culture: A typical model of sustainable traditional agriculture[J]. *Agricultural Archaeology*, 2006(4): 222–224
- [11] Coche A G. Fish culture in rice fields a world-wide synthesis[J]. *Hydrobiologia*, 1967, 30(1): 1–44
- [12] Little D C, Surintaraseree P, Innes-Taylor N. Fish culture in rainfed rice fields of northeast Thailand[J]. *Aquaculture*, 1996, 140(4): 295–321
- [13] MacKay K T. *Rice-Fish Culture in China*[M]. Ottawa: International Development Research Centre, 1995
- [14] 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
- [15] FAO. FAOSTAT[EB/OL]. 2013. <http://faostat3.fao.org/home/E>
- [16] Halwart M. Biodiversity and nutrition in rice-based aquatic ecosystems[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2006, 19(6/7): 747–751
- [17] 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
- [18] Frei M, Razzak M A, Hossain M M, et al. Methane emissions and related physicochemical soil and water parameters in rice-fish systems in Bangladesh[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 120(2/4): 391–398
- [19] 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
- [20] Vromant N, Nam C Q, Ollevier F. Growth performance and use of natural food by *Oreochromis niloticus* (L.) in polyculture systems with *Barbodes gonionotus* (Bleeker) and *Cyprinus carpio* (L.) in intensively cultivated rice fields[J]. *Aquaculture Research*, 2002, 33(12): 969–978
- [21] Vromant N, Nhan D K, Chau N T H, et al. Effect of stocked fish on rice leaffolder *Cnaphalocrocis medinalis* and rice caseworm *Nymphula depunctalis* populations in intensive rice culture[J]. *Biocontrol Science and Technology*, 2003, 13(3): 285–297
- [22] Gurung T B, Wagle S K. Revisiting underlying ecological principles of rice-fish integrated farming[J]. *Our Nature*, 2005, 3(1): 1–12
- [23] Ahmed N, Allison E H, Muir J F. Rice fields to prawn farms: A blue revolution in southwest Bangladesh?[J]. *Aquaculture International*, 2010, 18(4): 555–574
- [24] Li X D, Dong S L, Lei Y Z, et al. The effect of stocking density of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) on rice and crab seed yields in rice-crab culture systems[J]. *Aquaculture*, 2007, 273(4): 487–493
- [25] 吕东锋, 王武, 马旭洲, 等. 稻蟹共生系统河蟹放养密度对水稻和河蟹的影响[J]. *湖北农业科学*, 2010, 49(7): 1677–1680
Lü D F, Wang W, Ma X Z, et al. The effect of stocking density of Chinese mitten crab on yields of rice and crab in rice-crab culture system[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2010, 49(7): 1677–1680
- [26] 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): E1381–E1387
- [27] 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
Wu X, Xie J, Chen X, et al. Edge effect of trench-pond pattern on rice grain and economic benefit in rice-fish co-culture[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(5): 995–999
- [28] Ren W Z, Hu L L, Zhang J, et al. Can positive interactions between cultivated species help to sustain modern agriculture?[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2014, 12(9): 507–514
- [29] Berg H. Rice monoculture and integrated rice-fish farming in the Mekong Delta, Vietnam-economic and ecological considerations[J]. *Ecological Economics*, 2002, 41(1): 95–107
- [30] Dwiyan E, Mendoza T C. Determinants of productivity and profitability of rice-fish farming systems[J]. *Asia Life Sciences*, 2008, 17(1): 21–42
- [31] Frei M, Becker K. A greenhouse experiment on growth and yield effects in integrated rice-fish culture[J]. *Aquaculture*, 2005, 244(1/4): 119–128
- [32] 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
- [33] Vromant N, Chau N T H, Ollevier F. The effect of rice seeding rate and fish stocking on the floodwater ecology of the rice field in direct-seeded, concurrent rice-fish systems[J]. *Hydrobiologia*, 2001, 445(1/3): 151–164
- [34] Steffens W. *Principles of Fish Nutrition*[M]. German: Ellis

- Horwood Ltd, 1989
- [35] Terjesen B F, Chadwick T D, Verreth J A J, et al. Pathways for urea production during early life of an air-breathing teleost, the African catfish *Clarias gariepinus* Burchell[J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2001, 204(12): 2155–2165
- [36] 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
- [37] 王昂, 王武, 马旭洲, 等. 养蟹稻田水环境部分因子变化研究[J]. *湖北农业科学*, 2011, 50(17): 3514–3519
Wang A, Wang W, Ma X Z, et al. Study on the changes of water environmental factors in rice-crab culture system[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2011, 50(17): 3514–3519
- [38] Li C F, Cao C G, Wang J P, et al. Nitrogen losses from integrated rice-duck and rice-fish ecosystems in southern China[J]. *Plant and Soil*, 2008, 307(1/2): 207–217
- [39] 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(1/3): 228–237
- [40] 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
- Huang Y B, Weng B Q, Tang J Y, et al. Effect of rice-azolla-fish system on soil environment of rice field[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2001, 9(1): 74–76
- [41] 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
Ding W H, Li N N, Ren W Z, et al. Effects of improved traditional rice-fish system productivity on field water environment[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(3): 308–314
- [42] Hu L L, Ren W Z, Tang J J, et al. The productivity of traditional rice-fish co-culture can be increased without increasing nitrogen loss to the environment[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 177: 28–34
- [43] 孙富余, 于凤泉, 李志强, 等. 稻蟹种养生产中水稻优化栽植方案初探[J]. *辽宁农业科学*, 2009(2): 39–41
Sun F Y, Yu F Q, Li Z Q, et al. Optimization of rice planting in rice-crab system[J]. *Liaoning Agricultural Science*, 2009(2): 39–41
- [44] 王永亮, 冯春, 刘洪宇. 辽宁台安县稻田养蟹[J]. *黑龙江科技信息*, 2013(19): 288
Wang Y L, Feng C, Liu H Y. Culture of crab in rice field in Taian, Liaoning[J]. *Heilongjiang Technology Information*, 2013(19): 288