

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20220820001

http://www.yykxjz.cn/

董寅, 李冰, 贾睿, 侯谄然, 刁维旭, 朱健. 长江流域 2 种水产养殖模式的生命周期环境影响评价. 渔业科学进展, 2024, 45(1): 23-32

DONG Y, LI B, JIA R, HOU Y R, DIAO W X, ZHU J. Life cycle environmental impact assessment on two aquaculture models in the Yangtze River Basin. Progress in Fishery Sciences, 2024, 45(1): 23-32

长江流域 2 种水产养殖模式的 生命周期环境影响评价*

董寅¹ 李冰^{1,2①} 贾睿² 侯谄然² 刁维旭¹ 朱健^{1,2①}

(1. 南京农业大学无锡渔业学院 江苏 无锡 214081; 2. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心
农业农村部稻渔综合种养生态重点实验室 江苏 无锡 214081)

摘要 本研究以长江流域内的池塘养殖和稻渔综合种养 2 种水产养殖模式为对象,应用生命周期评价方法,分析 2 种养殖模式对能源消耗(EU)、全球变暖潜势(GWP)、酸化潜势(AP)、富营养化潜势(EP)以及水资源消耗(WU) 5 种环境指标的影响,并探究 2 种主要输入因子(饲料和电力供应)和养殖过程对各环境指标的影响,从而评价 2 种养殖模式对环境影响的差异。生命周期评价结果标准化处理和加权评估显示,稻渔综合种养模式的 WU、EP、GWP、AP 和 EU 值分别为 11.650、0.770、0.141、0.096 和 0.003,总环境影响指数(TEII)为 12.660;池塘养殖模式的 WU、EP、GWP、AP 和 EU 值分别为 31.453、1.187、0.210、0.174 和 0.007,TEII 为 33.031。与稻渔综合种养模式相比,池塘养殖模式的各项环境指标均较高。对环境影响的贡献率分析表明,饲料供应对 EU、GWP 和 AP 的贡献率最高,EP 主要受饲料供应和养殖过程的共同影响,而 WU 主要集中在养殖过程中,电力供应主要影响 EU、GWP 和 AP。生命周期评价的结果表明,与池塘养殖模式相比,稻渔综合种养模式显示出更友好的环境效益,在我国长江流域具有较大的发展空间。2 种养殖模式的贡献率分析表明,改进饲料生产工艺、建立精准投喂技术、应用先进的尾水处理技术和适当提高养殖密度是我国长江流域水产养殖环境友好生产的关键。

关键词 稻渔综合种养;池塘养殖;生命周期评价;环境影响

中图分类号 X828 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2024)01-0023-010

长江流域是我国重要的水产养殖区域,2020 年淡水养殖产量达 1 800 多万 t,约占全国淡水养殖总产量的 58% (农业农村部渔业渔政管理局等, 2021)。过去 30 年,该流域内水产养殖产生的总磷和总氮排放持续增长(高立方等, 2021),为长江水体中氮磷的重要来源,引起了水体富营养化及氮磷比例失衡(孙策策等,

2022)。因此,该流域内水产养殖引起的环境问题受到广泛关注。

池塘养殖模式和稻渔综合种养模式是我国最主要的 2 种水产养殖模式,广泛分布于长江流域各地区。2020 年池塘养殖模式产量近 2 280 万 t,约占全国淡水养殖总产量的 73.8%。此外,随着技术创新和模式推广,

* 财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系(CARS-45-25)、国家重点研发计划(2019YFD0900305)和中国水产科学研究院基本科研业务费(2020TD60)共同资助。董寅, E-mail: 2836456303@qq.com

① 通信作者:朱健, E-mail: zhuj@ffrc.cn; 李冰, E-mail: libing@ffrc.cn

收稿日期: 2022-08-20, 收修改稿日期: 2022-10-24

稻渔综合种养面积和产量逐年升高(徐跑, 2021), 已成为我国第二大水产养殖模式。2020年养殖面积为 $2.5626 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 产量达325.39万t。与池塘养殖模式相比, 稻渔综合种养可提高土地和水资源利用率, 具有明显的生态效益。同时, 通过水稻和水生动物的互利共生实现氮磷元素的高效循环利用(管卫兵等, 2020)。

生命周期评价(life cycle assessment, LCA)是一种用于评价产品、服务或系统在其整个生命周期的潜在环境影响的方法, 最早广泛应用于工业领域, 通过将产品或服务对各环境指标的影响进行量化, 可直观了解生产过程中每一个环节对环境的影响, 从而找到降低环境影响的最佳措施。由于生命周期评价方法比传统的环境影响评价方法更直观、更有效, 近10年来已逐渐应用于水产养殖领域, 被认为是评估水产品生产过程环境影响最有效的方法之一(Biermann *et al.*, 2019)。早期的研究主要聚焦于水产养殖系统中特定品种的生命周期环境影响, 如巴沙鱼(*Pangasianodon hypophthalmus*)集约化养殖(Bosma *et al.*, 2011)以及大马哈鱼(*Oncorhynchus tshawytscha*)商业化养殖的环境影响(McGrath *et al.*, 2015)。由于水产养殖复杂性的增加, 系统边界逐渐扩展, 评估内容已涉及到水产品加工、饲料生产以及不同模式、区域或养殖策略的比较(Hou *et al.*, 2022)。研究者基于LCA分析评价了秘鲁鳀鱼(*Coilia mystus*)和罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)的生产过程以及南美鱼粉和鱼油的加工过程(Avadi *et al.*, 2020)。虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)不同养殖模式的LCA分析显示, 工厂化循环水养殖模式对环境的影响小于工厂化流水和网箱养殖模式(陈中祥, 2011)。蒋榕等(2022)应用LCA法比较稻虾共作和水稻单作2种模式的碳足迹, 结果表明, 稻虾共作模式的环境效益要优于水稻单作。根据现有的水产养殖生命周期清单(LCI)数据库, 已建立了多个物种养殖过程中温室气体、氮和磷排放以及淡水和土地利用的标准化评价方法(Gephart *et al.*, 2021)。此外, 在水产养殖生命周期中, 饲料供应、电力供应以及养殖过程的水消耗和污染物排放等是影响环境的关键因素(Song *et al.*, 2019; Parker, 2018; Dullah *et al.*, 2020)。

值得注意的是, 目前的研究主要聚焦于单一养殖品种在不同养殖模式下的环境影响, 而针对整个流域内水产养殖业对环境的影响的评价少有报道。因此, 本研究以长江流域内的池塘养殖和稻渔综合种养模式为对象, 探究这2种模式以及饲料生产、电力生产和养殖过程对环境的影响, 同时, 分析各种环境主要因素, 以期为长江流域水产养殖提高资源利用效率、降低环境影响和优化养殖模式提供建议, 为实现

水产养殖业可持续发展提供科学基础。

1 材料与方法

1.1 调查方案

本研究在长江流域设置20个水产养殖监测点, 包括5个稻渔综合种养模式监测点和15个池塘养殖模式监测点, 监测时间为2017—2019年。本研究中, 稻渔综合种养模式监测点位于长江流域推广面积最多的地区。各监测点基本情况见表1。监测点均安排专人进行养殖结构和生产要素数据监测, 主要包括养殖模式、养殖品种、养殖密度、投放鱼苗量、产量、饲料投喂量、用电量和用水量等数据。在养殖期间只进水、不排水, 养殖结束后统计废水排出量。每年在放苗前及养殖结束后测定水体营养盐含量, 包括氨氮、总磷和总氮, 采样点数量和位置需根据实际情况进行调整。

1.2 研究方法

1.2.1 生命周期评价目标和范围的确定 分析长江流域水产养殖活动对不同环境指标的影响, 并比较2种养殖模式对环境的影响的大小。本研究设置的水产养殖生命周期评价系统边界见图1。饲料生产过程消耗电力、排放废气及废渣; 饲料原料种植过程中消耗淡水资源; 水产养殖过程需要电能进行投饵和增氧等活动, 据中国生命周期基础数据库(Chinese Life Cycle Database, CLCD)显示, 电力生产消耗化石能源并向外界排放各种污染物; 养殖过程中也向水体排放氮、磷等各种污染物。由于本研究关注的是成鱼(或成虾)养殖过程对环境的影响, 因此, 养殖厂的基础设施建设、消费者行为、产品运输以及苗种培育等过程并未纳入本研究的生命周期评价范围。

1.2.2 生命周期清单数据来源 本研究数据主要通过现场监测和问卷调查获取。池塘养殖模式的生产特点为养殖过程中只进水、不排水, 养殖结束后排放尾水; 使用投饵机投喂人工配合饲料, 电力消耗主要来源于投饵机和增氧机的使用。稻渔综合种养为人工投喂, 且饲料投喂量较低, 不使用增氧机, 无电力消耗。

根据养殖水体营养盐浓度及尾水排放量估算养殖期间污染物的排放量。稻渔综合种养是一种以稻为主、兼顾养鱼的养殖模式, 实现了“一水两用”。养殖环沟约占整个稻田面积的10%, 养殖消耗水资源以实际养殖水体计算。

养殖过程中, CH_4 排放量根据Xu等(2022)报道的方法计算, 公式如下:

$$\text{CH}_4 \text{ Emission} = \text{emission factor} \times \text{area} \times \text{day}$$

表 1 监测点基本信息
Tab.1 Basic information of monitoring points

养殖模式 Breeding model	监测点名称 Name of monitoring sites	监测点信息 Information of monitoring sites	养殖信息 Breeding information
稻渔综合种养模式 Integrated rice-fish farming	庐江放马滩龙虾养殖专业合作社	31°07'N, 117°22'E, 2 hm ² , 无增氧机, 人工投喂	单养克氏原螯虾 <i>Procambarus clarkia</i>
	荆香缘生态农业基地	30°24'N, 112°26'E, 6 hm ² , 无增氧机, 人工投喂	单养克氏原螯虾 <i>P. clarkia</i>
	邛崃沃盛源生物科技研究中心	30°19'N, 103°38'E, 10 hm ² , 无增氧机, 人工投喂	主养鲤 <i>Cyprinus carpio</i> , 搭配鲫 <i>Cyprinus auratus</i>
	播州区石板镇池坪村基地	27°33'N, 106°44'E, 15 hm ² , 无增氧机, 人工投喂	单养鲤 <i>C. carpio</i>
池塘养殖模式 Pond culture	荆门市同鑫农业稻田综合种养基地	30°49'N, 112°12'E, 2.8 hm ² , 无增氧机, 人工投喂	单养克氏原螯虾 <i>P. clarkia</i>
	黄泥湖渔场	30°09'N, 116°56'E, 15 hm ² , 90 台增氧机和 30 台投饵机	混养草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i> 和 鳊 <i>Aristichthys nobilis</i>
	泰州市淤溪镇淤马水产养殖场	32°35'N, 120°01'E, 0.7 hm ² , 6 台增氧机和 1 台投饵机	主养草鱼 <i>C. idellus</i> , 搭配鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>
	上海海丰水产养殖有限公司	33°15'N, 120°37'E, 4 hm ² , 18 台增氧机和 1 台投饵机	主养异育银鲫 <i>Carassius auratus gibelio</i> , 搭配鲢 <i>H. molitrix</i> 和 鳊 <i>A. nobilis</i>
	湖南渔缘生物科技有限公司	28°16'N, 113°0'E, 5 hm ² , 22 台增氧机和 10 台投饵机	主养草鱼 <i>C. idellus</i> , 搭配鲢 <i>H. molitrix</i>
	漳泊湖渔场	30°12'N, 112°03'E, 0.7 hm ² , 9 台增氧机和 2 台投饵机	主养黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i> , 搭配鲢 <i>H. molitrix</i> 和 鳊 <i>A. nobilis</i>
	江苏水仙实业有限公司	33°11'N, 119°16'E, 1.2 hm ² , 7 台增氧机和 2 台投饵机	主养草鱼 <i>C. idellus</i> , 搭配团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i> 、 鲫 <i>C. auratus</i> 和 鲢 <i>H. molitrix</i>
	上海海锋水产养殖专业合作社	30°52'N, 121°23'E, 0.43 hm ² , 6 台增氧机和人工投喂	单养凡纳滨对虾 <i>Penaeus vannamei</i>
	上海泖田湿地生态农业投资有限公司	30°56'N, 121°07'E, 0.5hm ² , 5 台增氧机和 3 台投饵机	单养团头鲂 <i>M. amblycephala</i>
	武汉市思博水产养殖专业合作社	30°44'N, 114°48'E, 0.8 hm ² , 5 台增氧机和 2 台投饵机	主养黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i> , 搭配鲢 <i>H. molitrix</i> 和 鳊 <i>A. nobilis</i>
	浠水县望天湖渔场	30°24'N, 115°03'E, 0.7 hm ² , 3 台增氧机和 1 台投饵机	主养草鱼 <i>C. idellus</i> , 搭配鲢 <i>H. molitrix</i> 、 鳊 <i>A. nobilis</i> 和 鲫 <i>C. auratus</i>
	太湖农场养殖场	30°21'N, 112°13'E, 8 hm ² , 10 台增氧机和 5 台投饵机	主养团头鲂 <i>M. amblycephala</i> , 搭配草鱼 <i>C. idellus</i>
	南京市高淳区青松水产养殖专业合作社	31°15'N, 118°49'E, 1 hm ² , 5 台增氧机和人工投喂	主养中华绒螯蟹 <i>Eriocheir sinensis</i> , 搭配青虾 <i>Macrobrachium nipponense</i> 、 鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>
	鄱阳湖农牧渔产业发展股份有限公司	28°45'N, 116°01'E, 1.33 hm ² , 12 台增氧机和 1 台投饵机	主养草鱼 <i>C. idellus</i> , 混养鲢 <i>H. molitrix</i> 和 鳊 <i>A. nobilis</i>
	缓阳县渔缘水产养殖专业合作社	27°56'N, 107°06'E, 2 hm ² , 10 台增氧机和 8 台投饵机	主养鲤 <i>C. carpio</i> , 搭配鲫 <i>C. auratus</i> 、 草鱼 <i>C. idellus</i> 和 鲢 <i>H. molitrix</i>
成都市新津县文件乡张场社区五组	30°29'N, 103°45'E, 4.5 hm ² , 20 台增氧机和 17 台投饵机	主养大口黑鲈 <i>Micropterus salmoides</i> , 混养鲢 <i>H. molitrix</i> 和 鳊 <i>A. nobilis</i>	

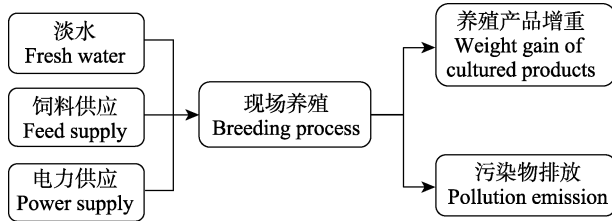


图 1 水产养殖生命周期评价系统边界
Fig.1 LCA system boundary of aquaculture

式中, emission factor 为单位面积每天的 CH₄ 排放量, area 为养殖区域的面积, day 为养殖天数, 稻渔综合种养模式和池塘养殖模式的 CH₄ 排放因子分别为 1.62 和 2.90 kg CH₄/(hm²·d)。

N₂O 的排放量参考 Ma 等(2018)报道的数据, 即饲料中 0.54%的总氮(TN)转换为 N₂O 排向大气中, 计算公式为:

$$N_2O \text{ Emission} = \text{Feed} \times \text{concent}_N \times \text{emission factor}$$

式中, Feed 为投喂的饲料量, concent_N 为饲料中总氮的含量, emission factor 为 N_2O 排放因子。

本研究以获得 1 t 水产养殖产品增重为功能单位, 2 种养殖模式系统边界内的生命周期清单见表 2。如表 2 所示, 输入主要包括苗种、用水量、用电量和饲料使用量, 输出主要包括水产品增重、向淡水排放的总氮、总磷以及氨氮量, 向大气排放的 CH_4 和 N_2O 量。

1.2.3 生命周期影响评价 水产养殖过程需消耗淡水和电力资源。同时, 电力生产需消耗煤炭等化石能源。因此, 本研究将水资源消耗(water use, WU)和能源消耗(energy use, EU)作为评价指标。此外, 养殖尾水排放易造成水体富营养化, 加剧附近水域的环境问题(楼倩等, 2020)。养殖过程中直接排放 CH_4 和

N_2O , 同时, 电力生产过程中也会向环境排放温室气体, 并伴随着较多 SO_2 、 NO_x 和 NH_3 等气体的排放, 进而造成酸雨。因此, 本研究亦将富营养化潜势(eutrophication potential, EP)、全球变暖潜势(global warming potential, GWP)和酸化潜势(acidification potential, AP)作为环境影响评价指标。

饲料供应产生的环境影响参考陈丽娇等(2019)和 Pelletier 等(2007)的研究。电力供应的相关数据使用 eBalance 软件内置的 CLCD 数据库。利用 eBalance 软件进行建模, 获得每个监测点的环境影响评价结果。将特征化的结果进行基准化及加权处理, 进而比较不同的影响类型指标。基准化处理时, 基准值采用全球人均环境影响潜值(Sleeswijk *et al*, 2008), 权重系数参考陈丽娇等(2019)的数据。

表 2 2 种模式 2017—2019 年间生命周期单位产量(每获得 1 t 养殖成品增重)的平均投入和输出(平均值±标准差)

Tab.2 Average input and output per unit of production (weight gain of 1 ton of farmed product) over the life cycle from 2017 to 2019 of two models (Mean±SD)

项目 Items	养殖模式 Breeding model	
	稻渔综合种养 Integrated rice-fish farming	池塘养殖 Pond culture
输入 Input		
苗种 Fry/kg	142±44	176±38
用水 Water use/m ³	770±168	2 093±580
用电 Electricity use /(kW/h)		1 264±340
饲料 Feed/kg	958±325	1 603±342
输出 Output		
水产品增重 Product weight gain/kg	1 000	1 000
氨氮 Ammonia nitrogen/kg	0.78±0.20	1.77±0.74
总氮 Total nitrogen/kg	2.51±0.45	7.65±1.23
总磷 Total phosphorus/kg	1.14±0.31	0.94±0.25
甲烷 Methane/kg	87.14±1.94	54.09±17.34
N_2O /kg	0.24±0.09	0.40±0.09

1.2.4 数据统计与分析 所有数据表示为平均值±标准差(Mean±SD), 并使用 SPSS25.0 统计软件对 2 个模式的环境影响结果进行 Wilcoxon 秩和检验, $P < 0.05$ 时差异显著。

2 结果与分析

2.1 生命周期评价结果

利用 eBalance 软件建模, 并对 2 种模式在 2017—2019 年间的养殖活动进行生命周期影响评价, 结果见表 3。2 种养殖模式的生命周期评价结果显示, 稻渔综合种养模式对环境的各项影响(EU、GWP、AP、EP 和 WU)均低于池塘养殖模式。

2.2 标准化和加权评估结果

将 2 种养殖模式的生命周期评价结果进行基准化和加权评估, 计算结果为无量纲, 结果见表 4。稻渔综合种养模式生命周期内的 EU、GWP、AP、EP 和 WU 以及总环境影响指数均显著小于池塘养殖 ($P < 0.05$)。由于水产养殖的特点, 2 种养殖模式的 WU 对环境的影响均远高于其他环境影响指标。除 WU 以外, 在 2 种养殖模式的养殖生产中, EP 是最大的环境影响类型, EU 是最小的环境影响类型。

2.3 环境影响指标的贡献率分析

2 种养殖模式生产过程中各输入因子(饲料供应、电

力供应)和养殖过程对环境的影响指标的贡献率分析如表 5 所示。稻渔综合种养模式没有电力消耗, 生命周期中的电力供应可以忽略不计, 仅包括饲料供应和养殖过程。

由表 5 可知, 稻渔综合种养模式中, 饲料供应对

EU、GWP、AP 和 EP 的贡献高于养殖过程, 但 WU 主要集中于养殖阶段。同样, 池塘养殖模式中, EU、GWP、AP 和 EP 也主要来源于饲料供应。2 种养殖模式中, 养殖过程对 EP 的贡献率高于 40%。

表 3 2 种模式 2017—2019 年间的生命周期评价结果(每获得 1 t 养殖成品增重)(平均值±标准差)
Tab.3 LCA results of the two models for the period 2017—2019 (weight gain of 1 ton of farmed product) (Mean±SD)

养殖模式 Breeding model	能源消耗 EU/(10 ⁴ MJ)	全球变暖潜势 GWP/(10 ³ kg CO ₂ -eq)	酸化潜势 AP/(kg SO ₂ -eq)	富营养化潜势 EP/(kg PO ₄ ³⁻ -eq)	水资源消耗 WU/(10 ⁵ kg)
稻渔综合种养 Integrated rice-fish farming	6.01±1.05 ^a	8.09±1.61 ^a	35.94±6.29 ^a	12.06±3.17 ^a	7.89±1.72 ^a
池塘养殖 Pond culture	11.37±2.01 ^b	12.04±2.27 ^b	65.06±5.98 ^b	18.60±3.92 ^b	21.29±5.84 ^b

注: 同列数据上标不同表示组间存在显著差异($P < 0.05$), 下同。

Note: Data in each column with different superscripts are significantly different ($P < 0.05$). The same below.

表 4 2 种模式 2017—2019 年间环境影响潜值基准化和加权评估后的结果(平均值±标准差)
Tab.4 Results of the benchmarking and weighted assessment of the environmental impact potential between the two models from 2017 to 2019 (Mean±SD)

养殖模式 Breeding model	能源消耗 EU	全球变暖潜势 GWP	酸化潜势 AP	富营养化潜势 EP	水资源消耗 WU	总环境影响指数 TEII
稻渔综合种养 Integrated rice-fish farming	0.003±0.001 ^a	0.141±0.032 ^a	0.096±0.019 ^a	0.770±0.226 ^a	11.650±2.544 ^a	12.660±2.532 ^a
池塘养殖 Pond culture	0.007±0.001 ^b	0.210±0.040 ^b	0.174±0.017 ^b	1.187±0.259 ^b	31.453±8.630 ^b	33.031±8.658 ^b

表 5 2 种养殖模式各阶段对环境影响的贡献率
Tab.5 Contribution rate (CR) of each stage of two breeding models to environmental impact

养殖模式 Breeding model	项目 Project	能源消耗 EU		全球变暖潜势 GWP		酸化潜势 AP		富营养化潜势 EP		水资源消耗 WU		总环境影响指数 TEII	
		EU	贡献率 CR/%	GWP	贡献率 CR/%	AP	贡献率 CR/%	EP	贡献率 CR/%	WU	贡献率 CR/%	TEII	贡献率 CR/%
稻渔综合种养 Integrated rice-fish farming	饲料供应 Feed supply	0.003	100.00	0.098	69.21	0.096	100.00	0.414	53.80	0.280	2.39	0.891	7.04
	养殖过程 Breeding stage	0.000	0.00	0.043	30.79	0.000	0.00	0.356	46.20	11.370	97.61	11.769	92.96
	合计 In total	0.003	100.00	0.141	100.00	0.096	100.00	0.770	100.00	11.650	100.00	12.660	100.00
池塘养殖 Pond culture	电力供应 Power supply	0.001	11.81	0.017	7.87	0.014	7.93	0.021	1.78	0.053	0.17	0.106	0.32
	饲料供应 Feed supply	0.006	88.19	0.168	80.12	0.160	92.07	0.686	57.81	0.497	1.58	1.517	4.59
	养殖过程 Breeding stage	0.000	0.00	0.025	12.01	0.000	0.00	0.480	40.41	30.903	98.25	31.408	95.09
	合计 Total	0.007	100.00	0.210	100.00	0.174	100.00	1.187	100.00	31.453	100.00	33.031	100.00

3 讨论

本研究以长江流域内 20 个监测点的水产养殖系统为例,建立各稻渔综合种养和池塘养殖模式的投入与产出清单,并计算能源足迹与水足迹,分析 2 种养殖模式对环境的影响。基于生命周期评价显示,2 种养殖模式对环境指标的影响集中于 WU、EP 和 GWP。由于水产养殖的特性,WU 为环境影响最主要的指标。其次,由于水产养殖中水生动物粪便和残饵的排放,易引起水环境富营养化(楼倩等, 2020),因此,EP 被认为是评价环境影响的主要指标之一。此外,水产养殖直接排放 CH₄ 和 N₂O 等温室气体(Fang *et al.*, 2022),水产养殖的电力供应间接排放温室气体,因此,GWP 为评价环境影响广泛应用的指标。比较凡纳滨对虾(*Penaeus vannamei*)的 2 种养殖模式发现,其环境影响指标大小依次为 WU、EP、GWP、AP 和 EU(陈丽娇等, 2019),其中,池塘养殖模式 WU、EP 和 GWP 约占总环境影响的 90%。同样,在大菱鲆的 2 种养殖模式比较研究中发现,环境影响从高到低依次为 EP、GWP、AP 和 EU(王杰等, 2014)。类似地,本研究的 LCA 结果显示,池塘养殖和稻渔综合种养中各环境影响指标由大到小依次为 WU、EP、GWP、AP 和 EU,其中,WU、EP 和 GWP 占 99%以上,表明长江流域内,水产养殖除消耗大量的水资源外,还显著影响水环境富营养化和全球变暖趋势。

我国淡水养殖模式较多,如池塘养殖、湖泊养殖、稻渔综合养殖和工厂化养殖等。基于生命周期评价的不同养殖模式(主要为单一品种)对环境的影响已陆续开展(李静, 2016)。Biermann 等(2019)研究显示,鲤(*Cyprinus carpio*)有机生产模式对 WU、GWP、臭氧消耗以及电离辐射的影响低于传统养殖模式。比较大西洋鲑(*Salmo salar*)不同养殖模式发现,网箱养殖模式的环境性能优于陆基流水养殖模式(Ayer *et al.*, 2009)。本研究中,生命周期评价结果表明,稻渔综合种养模式的各环境影响指标及总环境影响指数均低于池塘养殖模式,表明稻渔综合种养具有更友好的环境效益。在稻渔综合种养中,化肥和农药的使用量低于水稻单作(管卫兵等, 2020),降低了它们对环境的负面影响。Xu 等(2022)研究显示,化学肥料的减少将每公顷稻田的 GWP 从 1 525 kg CO₂-eq 降到 901 kg CO₂-eq。稻田中浮游动植物、害虫和杂草等天然饵料可以代替部分人工饲料的投入(杨帅帅等, 2023),从而降低饲料生产和各种污染物排放引起的 GWP、AP 和 EP。基于稻虾共作模式的研究表明,该模式下的 EU、GWP 和 EP 低于虾单作模式(Xu *et al.*, 2022)。同样地,本研

究也表明,这些指标在稻渔综合种养模式中低于池塘养殖模式。研究结果还显示,稻渔综合种养模式中总氮的排放量是池塘养殖模式的 32.81%,可能是由于稻渔综合种养模式中,鱼类排出的粪便可以作为肥料被水稻吸收利用,相较于池塘养殖可以减少污染物的排放,缓解水体的富营养化。

水产养殖生命周期中,饲料供应、电力供应和养殖过程对环境的影响存在明显的差异。对虾养殖过程中,饲料和电力消耗是影响大多数环境指标的关键环节(Cortes *et al.*, 2021)。Naylor 等(2021)认为,饲料对环境造成的污染占水产养殖过程总污染的 90%以上。大西洋鲑养殖过程中,GWP、AP 和 EU 的贡献主要来源于饲料供应(90%以上),EP 主要来源于养殖阶段和饲料供应(Pelletier *et al.*, 2009)。Sherry 等(2020)研究也证实,饲料供应是 GWP 和 AP 的主要来源。与此类似,本研究结果表明,饲料供应在 2 种养殖模式生命周期中对 EU、GWP、AP 和 EP 的贡献率最大。对墨西哥 38 家半集约化养虾场的生命周期评价研究表明,WU 和 EP 的主要来源是养殖过程(Cortes *et al.*, 2021)。鲤养殖的生命周期评价研究发现,EP 的主要来源是养殖过程(Biermann *et al.*, 2019)。本研究表明,2 种养殖模式的养殖过程主要影响 WU 和 EP。此外,增氧机和投饵机等设备的使用需消耗电力,因此,电力供应也是水产养殖生命周期评价关注的重要因素。河鲈(*Perca fluviatilis*)循环水养殖模式的生命周期中,电力供应主要影响 EU、GWP 和 AP (Cooney *et al.*, 2021)。大西洋鲑循环水养殖的生命周期评价研究显示,AP、GWP、EP 和 EU 主要来源于电力供应(Song *et al.*, 2019)。本研究表明,电力供应主要影响 EU、GWP 和 AP。不同养殖模式各阶段对环境的影响不同,如虹鳟网箱养殖过程中,环境影响指标贡献率主要为养殖污染排放(87.45%)和饵料生产(10.16%);而在工厂化循环水养殖模式中,环境影响指标贡献率主要为电力生产(75.25%)和饵料生产(23.76%)(陈中祥等, 2011),其主要原因在于不同养殖模式造成养殖过程中的生产投入与污染物排放之间的差异。此外,研究表明,克氏原螯虾(*Procambarus clarkia*)单作和稻虾共作 2 种模式的不同阶段对各环境指标的影响存在差异(Xu *et al.*, 2022)。本研究结果显示,2 种养殖模式的总环境影响指数均主要来源于养殖阶段,其中,水资源消耗对总环境影响指数的贡献率最大(90%以上),其次为饲料供应。

由于缺乏相关数据,本研究未将所有涉及到的生命周期评价影响指标考虑在内,例如,养殖过程的土地资源利用状况、农业生产中大量使用的农药及杀虫

剂造成的淡水生态毒性。此外, 农业的生命周期评价易受产地的影响(徐湘博等, 2021)。因此, 未来的研究将聚焦于更多的环境评价指标以及长江流域不同地区水产养殖的环境影响差异。由于我国目前还缺乏完善的标准化和加权体系, 因此, 难以避免标准化和加权处理过程中的主观性和不确定性(Miao *et al.*, 2021)。

4 结论

稻渔综合种养模式各项环境影响指标均低于池塘养殖模式, 以较低的环境影响成本提供更多的营养需求, 是一种环境友好型农业生产方式, 在长江流域内有较大的发展空间。

WU 是水产养殖业的主要制约因素, 且是最大的环境影响指标。除 WU 外, 池塘养殖模式和稻渔综合种养模式主要的环境影响指标为 EP, 其次是 GWP、AP 和 EU。

水产养殖生命周期内的淡水资源消耗主要集中在养殖阶段, 在不影响养殖动物生长性能的前提下, 合理的放养密度对水资源利用至关重要。在水产养殖过程中的环境污染(GWP、AP 和 EP)主要来源于饲料供应, 因此, 改进饲料生产工艺、建立精准投喂技术, 可以减少饲料供应对环境的影响。此外, 建立先进的尾水处理系统可以有效缓解水产养殖对水体富营养化的影响。

参 考 文 献

- AVADI A, VAZQUEZ-ROWE I, SYMEONIDIS A, *et al.* First series of seafood datasets inecoinvent: Setting the pace for future development. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2020, 25(7): 1333–1342
- AYER N W, TYEDMERS P H. Assessing alternative aquaculture technologies: Life cycle assessment of salmonid culture systems in Canada. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17: 362–373
- BIERMANN G, GEIST J. Life cycle assessment of common carp (*Cyprinus carpio* L.)—A comparison of the environmental impacts of conventional and organic carp aquaculture in Germany. *Aquaculture*, 2019, 501: 404–415
- BOSMA R, ANH P T, POTTING J. Life cycle assessment of intensive striped catfish farming in the Mekong Delta for screening hotspots as input to environmental policy and research agenda. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2011, 16(9): 903–915
- Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. *China fishery statistical yearbook 2021*. Beijing: China Agriculture Press, 2021, 17–36 [农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2021 中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2021, 17–36]
- CHEN L J, YANG H Y, ZHANG J Y, *et al.* Environmental life cycle assessment of different *Penaeus vannamei* systems in northern China. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(8): 986–991 [陈丽娇, 杨怀宇, 张静怡, 等. 中国北方南美白对虾不同养殖模式环境影响生命周期评价. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(8): 986–991]
- CHEN Z X, CAO G B, HAN S C. Life cycle assessment of rainbow trout aquaculture models in China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(10): 2113–2118 [陈中祥, 曹广斌, 韩世成. 中国虹鳟养殖模式的生命周期评价. *农业环境科学学报*, 2011, 30(10): 2113–2118]
- COONEY R, TAHAR A, KENNEDY A, *et al.* The dilemma of opportunity in developing a life cycle assessment of emerging aquaculture systems — a case study of a Eurasian perch (*Perca fluviatilis*) hatchery recirculating aquaculture system. *Aquaculture*, 2021, 536: 736403
- CORTES A, CASILLAS-HERNANDEZ R, CAMBESES-FRANCO C, *et al.* Eco-efficiency assessment of shrimp aquaculture production in Mexico. *Aquaculture*, 2021, 544: 737145
- DULLAH H, MALEK M A, HANAFIAH M M. Life cycle assessment of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) farming in Kenyir Lake, Terengganu. *Sustainability*, 2020, 12(6): 2268
- FANG X T, ZHAO J T, WU S, *et al.* A two-year measurement of methane and nitrous oxide emissions from freshwater aquaculture ponds: Affected by aquaculture species, stocking and water management. *Science of the Total Environment*, 2022, 813: 151863
- GAO L F, WU J Y, GE X D, *et al.* Pollution load characteristics of freshwater aquaculture in the Yangtze River Economic Belt. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2021, 40(3): 64–74 [高立方, 吴静颖, 葛小东, 等. 长江经济带淡水养殖污染负荷特征分析. *华中农业大学学报*, 2021, 40(3): 64–74]
- GEPHART J A, HENRIKSSON P J G, PARKER R W R, *et al.* Environmental performance of blue foods. *Nature*, 2021, 597(7876): 360–365
- GUAN W B, LIU K, SHI W, *et al.* Scientific paradigm of integrated farming of rice and fish. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(16): 5451–5464 [管卫兵, 刘凯, 石伟, 等. 稻渔综合种养的科 学范式. *生态学报*, 2020, 40(16): 5451–5464]
- HOU H C, ZHANG Y, MA Z, *et al.* Life cycle assessment of tiger puffer (*Takifugu rubripes*) farming: A case study in Dalian, China. *Science of the Total Environment*, 2022, 823: 153522
- JIANG R, XU Q, LI J Y, *et al.* Sensitivity and uncertainty

- analysis of carbon footprint evaluation: A case study of rice-crayfish coculture in China. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(10): 1577–1587 [蒋榕, 徐强, 李京咏, 等. 稻虾共作模式碳足迹评价的敏感性和不确定性分析. *中国生态农业学报*, 2022, 30(10): 1577–1587]
- LI J. Life cycle assessment (LCA) of environmental impact for aquaculture. Master's Thesis of Shanghai Ocean University, 2016, 1–31 [李静. 基于 LCA 的水产养殖环境影响评价. 上海海洋大学硕士研究生学位论文, 2016, 1–31]
- LOU Q, GUO C J, DAI T T, *et al.* Researches on eutrophication characteristics and quality evaluation of typical aquaculture pond around Poyang Lake in summer. *Freshwater Fisheries*, 2020, 50(1): 44–50 [楼倩, 郭春晶, 代涛涛, 等. 夏季环鄱阳湖区典型养殖水体富营养化特征与评价. *淡水渔业*, 2020, 50(1): 44–50]
- MA Y C, SUN L Y, LIU C Y, *et al.* A comparison of methane and nitrous oxide emissions from Inland mixed-fish and crab aquaculture ponds. *Science of the Total Environment*, 2018, 637/638: 517–512
- MCGRATH K P, PELLETIER N L, TYEDMERS P H. Life cycle assessment of a novel closed-containment salmon aquaculture technology. *Environmental Science and Technology*, 2015, 49(9): 5628–5636
- MIAO J Y, WANG X H, BAI S W, *et al.* Distance-to-target weighting factor sets in LCA for China under 2030 vision. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 314: 128010
- NAYLOR R L, HARDY R W, BUSCHMANN A H, *et al.* A 20-year retrospective review of global aquaculture. *Nature*, 2021, 591(7851): 551–563
- PARKER R. Implications of high animal by-product feed inputs in life cycle assessments of farmed Atlantic salmon. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2018, 23(5): 982–994
- PELLETIER N, TYEDMERS P, SONESSON U, *et al.* Not all salmon are created equal: Life cycle assessment (LCA) of global salmon farming systems. *Environment Science and Technology*, 2009, 43(23): 8730–8736
- PELLETIER N, TYEDMERS P. Feeding farmed salmon: Is organic better? *Aquaculture*, 2007, 272: 399–416
- SHERRY J, KOESTER J. Life cycle assessment of aquaculture stewardship council certified Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Sustainability*, 2020, 12(15): 6079
- SLEESWIJK A W, VAN OERS L, GUINÉE J B, *et al.* Normalization in product life cycle assessment: An LCA of the global and european economic systems in the year 2000. *Science of the Total Environment*, 2008, 390(1): 227–240
- SONG X Q, LIU Y, PETTERSEN J B, *et al.* Life cycle assessment of recirculating aquaculture systems: A case of Atlantic salmon farming in China. *Journal of Industrial Ecology*, 2019, 23(5): 1077–1086
- SUN C C, WU W T, LIU J, *et al.* The contribution of freshwater aquaculture for nitrogen and phosphorus production in the Changjiang River and its impact on estuarine environment. *Progress in Fishery Sciences*, 2023, 44(1): 35–46 [孙策策, 吴文涛, 刘军, 等. 淡水养殖对长江氮磷输出的贡献及其河口环境效应. *渔业科学进展*, 2023, 44(1): 35–46]
- WANG J, ZHANG Y Q, SUN G X, *et al.* Life cycle assessment (LCA) of environmental impact for two turbot culture types. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42(14): 4380–4383 [王杰, 张延青, 孙国祥, 等. 基于生命周期评价 (LCA) 的 2 种大菱鲆养殖模式对环境影响对比研究. *安徽农业科学*, 2014, 42(14): 4380–4383]
- XU P. Development and prospect of integrated rice-fish farming in China: A review. *Journal of Dalian Ocean University*, 2021, 36(5): 717–726 [徐跑. 中国稻鱼综合种养的发展与展望. *大连海洋大学学报*, 2021, 36(5): 717–726]
- XU Q, PENG X, GUO H L, *et al.* Rice-crayfish coculture delivers more nutrition at a lower environmental cost. *Sustainable Production and Consumption*, 2022, 29: 14–24
- XU X B, SUN M X, ZHANG L X. Reasearch progress on agricultural life cycle assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(1): 422–433 [徐湘博, 孙明星, 张林秀. 农业生命周期评价研究进展. *生态学报*, 2021, 41(1): 422–433]
- YANG S S, ZHU S C, ZHANG D D, *et al.* Effects of two feeding modes on the culture performance and physiological metabolism of juvenile Chinese mitten crabs (*Eriocheir sinensis*) reared in a rice field. *Progress in Fishery Sciences*, 2023, 44(4): 188–200 [杨帅帅, 朱筛成, 张冬冬, 等. 2 种饵料模式对稻田养殖中华绒螯蟹幼蟹养殖性能和生理代谢的影响. *渔业科学进展*, 2023, 44(4): 188–200]

(编辑 马璀璨)

Life Cycle Environmental Impact Assessment on Two Aquaculture Models in the Yangtze River Basin

DONG Yin¹, LI Bing^{1,2①}, JIA Rui², HOU Yiran², DIAO Weixu¹, ZHU Jian^{1,2①}

(1. Wuxi Fisheries College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081, China;

2. Key Laboratory of Integrated Rice-Fish Farming Ecology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China)

Abstract With the rapid development of aquaculture in China in recent decades, the country now faces environmental problems, such as high energy consumption and severe environmental pollution. The Yangtze River Basin is the most important area for freshwater aquaculture production in China, accounting for more than half of the total production. The environmental issues induced by aquaculture have received widespread consideration in this area. However, the freshwater farming-induced environmental issues in the Yangtze River Basin were rarely evaluated in prior research. Life cycle assessment (LCA) is a valid tool for assessing environmental impacts and resources and is widely deployed in the industrial sector. It can quantify the impact of a product or service on different environmental indicators at various stages of the production process, thereby aiding in the identification of the best measures to reduce environmental impacts. The LCA is more effective than traditional environmental impact assessment methods; thus, it has been gradually applied in other fields, such as agriculture and aquaculture, in recent years. In aquaculture, LCA has been used to evaluate the environmental impact of various farming models or species in a laboratory setting. However, little attention has been paid to large-scale systems, such as the Yangtze River Basin. The two most important farming models in China are the pond farming model and the integrated rice-fish farming model. Among them, the integrated rice-fish farming model is regarded as environmentally friendly and an important step towards realizing the sustainable development of aquaculture in terms of the efficient utilization of water and land resources. Therefore, in this study, the environmental effects of pond farming and integrated rice-fish farming models were investigated in the Yangtze River Basin using the LCA method. A total of 20 monitoring points were established in the Yangtze River Basin, including 5 for integrated rice-fish farming and 15 for pond culture. In the integrated rice-fish farming model, the life cycle consists of two stages: Feed supply and breeding. In pond culture, the life cycle consists of three stages: Feed supply, power supply, and breeding. We analyzed the values of energy use (EU), global warming potential (GWP), acidification potential (AP), eutrophication potential (EP), and water use (WU) in the pond farming and integrated rice-fish farming models using the LCA method, assessed the contribution rate of each phase for environmental indices, and compared the environmental impact of the two farming models. In order to establish the inputs and outputs of an aquaculture system, experimental measurements and surveys were conducted to collect data. The collected data mainly included feed consumption, electricity consumption, water consumption, total phosphorus and total nitrogen emissions, and greenhouse gas (CH₄ and N₂O) emissions. The data were analyzed by the LCA software eBalance. In this study, the weight gain of 1 ton of aquaculture products served as the functional unit, and the results were standardized and evaluated in order to compare the environmental impacts of various impact indicators. The results showed that the

① Corresponding author: ZHU Jian, E-mail: zhuj@ffrc.cn; LI Bing, E-mail: libing@ffrc.cn

standardized and weighted evaluation values of WU, EP, GWP, AP, and EU in the integrated rice-fish farming model were 11.650, 0.770, 0.141, 0.096, and 0.003, respectively, and the total environmental impact indicator was 12.660. In the pond farming model, the values of WU, EP, GWP, AP, and EU were 31.453, 1.187, 0.210, 0.174, and 0.007, respectively, and the total environmental impact indicator was 33.031. The environmental impacts of integrated rice-fish farming were lower than those of pond farming. The contribution rate analysis of the three stages of the life cycle to environmental impact showed that the contribution rates of EU, GWP, and AP in the feed supply stage were higher than those in the power supply and breeding stages. EP was primarily associated with the feed supply stage and pollutant discharge stages of the breeding process, and WU was principally concentrated on the breeding stage. Overall, the LCA results showed that the integrated rice-fish farming model had a more environmentally friendly effect than the pond farming model, which indicates that the Yangtze River Basin has considerable development potential. WU was the most influential environmental impact indicator and the main restriction factor in aquaculture; it was mainly associated with the breeding stage. Therefore, moderately increasing stocking density was an effective strategy for reducing water resource consumption and improving water resource utilization rates. In addition to WU, the main environmental impact index of the pond culture model and integrated rice-fish farming models comprised EP, followed by GWP, AP, and EU. The contribution rate analyses of the two models showed that the aquaculture-induced environmental impacts could be mitigated by improving feed production technology, establishing accurate feeding technologies, applying advanced effluent water treatment technologies, and appropriately increasing stocking density in the Yangtze River Basin. In summary, in this study, we compared the environmental impacts between the pond culture and integrated rice-fish farming models in the Yangtze River Basin using the LCA method. In addition, we analyzed the differences between environmental impacts at different production stages. These data served as a reference for the sustainable development and optimization of aquaculture in the Yangtze River Basin.

Key words Integrated rice-fish farming; Pond culture; Life cycle assessment; Environmental impact