



· 综述 ·

海水虾蟹环境适应与池塘生态工程化养殖

李健^{1,2*}, 李吉涛^{1,2}

(1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 海水养殖生物育种与可持续产出全国重点实验室, 山东 青岛 266071;
2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266071)

摘要: 池塘养殖是我国海水养殖的传统方式, 也是当前陆基海水养殖的主体。自 20 世纪 70 年代, 海水池塘养殖经历了粗放式、半集约、集约化和多营养层次生态养殖的发展历程。然而, 海水池塘养殖产业中仍存在养殖生物生态适应性机制不清、养殖系统产出不稳定、营养物质利用效率低等“瓶颈”问题, 严重制约了海水池塘养殖产业的发展。因此开展海水养殖虾蟹良种与生态环境的互作机制解析, 研发养殖生态系统结构优化和营养物质资源化高效利用技术, 搭建养殖信息采集与智能化管控平台, 创建生态工程化养殖新模式, 实现养殖系统高效可持续产出, 是我国海水池塘养殖产业绿色高质量发展的关键。

关键词: 海水池塘养殖; 生态适应性; 生态工程化; 研究现状; 发展趋势

中图分类号: S 965

文献标志码: A

我国的粮食安全战略及其生产体系, 正在面临生态环境和自然资源愈加紧迫的约束, 只有通过技术进步和产业结构的调整, 谋求新的发展路径, 才能实现国家粮食安全战略^[1]。而渔业作为国家粮食安全战略的重要组成部分, 2019 年农业农村部等 10 部委印发《关于加快推进水产养殖业绿色发展的若干意见》, 明确要求“转变养殖方式, 大力发展生态健康养殖, 提高养殖设施和装备水平”^[2]。

池塘养殖是我国海水养殖的传统方式, 也是当前陆基海水养殖的主体, 在海水养殖业中占有重要地位^[3]。自 20 世纪 70 年代以来, 经历了粗放式、半集约、集约化和多营养层次生态养殖的发展历程。我国海水池塘养殖对象主要为甲壳动物, 如中国明对虾 (*Fenneropenaeus chinensis*)、日本对虾 (*Penaeus japonicus*)、斑节对虾 (*P. monodon*)、凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*)、脊尾白虾

(*Exopalaemon carinicauda*) 和三疣梭子蟹 (*Portunus trituberculatus*)、拟穴青蟹 (*Scylla paramamosain*) 等^[4]。近年来, 我国海水池塘综合养殖类型逐渐丰富多样, 包括虾贝混养 [混养的贝类有菲律宾蛤仔 (*Ruditapes philippinarum*)、硬壳蛤 (*Mercentaria mercenaria*)、缢蛏 (*Sinonovacula constricta*)、文蛤 (*Meretrix meretrix*) 等]、虾鱼混养 (混养的鱼类有遮目鱼 (*Chanos chanos*)、鲮 (*Mugil cephalus*) 和梭鱼 (*Sphyraenus*) 等)、虾蟹混养 (混养三疣梭子蟹、拟穴青蟹等)、虾参混养 (混养刺参) 以及虾藻混养 [栽种江蓠 (*Gracilaria*) 等]^[5], 养殖面积约 42 万 hm²。2009 年至 2022 年, 我国海水池塘养殖总产量从 185 万 t 增加至 292.3 万 t, 仅次于筏式养殖 (682.3 万 t) 和底播养殖 (562.9 万 t), 不仅为人类提供了高档、丰富的优质动物蛋白, 也是出口创汇的优势种类^[6]。

近年来, FAO《世界渔业和水产养殖状况》

收稿日期: 2023-09-14 修回日期: 2023-10-20

资助项目: 国家重点研发计划 (2019YFD0900400); 国家虾蟹产业技术体系 (CARS-48); 中国水产科学研究院院级基本科研业务费 (2023TD50)

通信作者: 李健, 从事海水养殖研究, E-mail: lijian@ysfri.ac.cn



分别以“为全面实现粮食和营养安全做贡献”“实现可持续发展目标”“可持续发展在行动”“努力实现蓝色转型”为主题, 阐述了水产养殖可持续利用与发展的重要性和紧迫性。随着人口的增加和人民生活水平的提高, 对水产品的需求越来越大, 据联合国粮农组织(FAO)估算, 到2030年水产品需求比现在要增加600万t。但是目前海水池塘养殖产业中仍存在养殖生物生态适应性机制不清、养殖系统产出不稳定、营养物质利用效率低等关键问题, 严重制约了海水池塘养殖产业的发展。因此开展海水养殖虾蟹良种与生态环境的互作机制解析, 研发养殖生态系统结构优化、营养物质资源化高效利用技术, 搭建养殖信息采集与智能化管控平台, 创建生态工程化养殖新模式, 提升营养物质利用效率, 实现养殖系统高效可持续产出, 可为我国海水池塘养殖产业绿色高质量发展提供重要理论基础和技术支撑。

1 海水虾蟹生态适应性机制

1.1 海水虾蟹环境胁迫适应机制

温度是养殖过程中的主要水质指标, 虾蟹作为变温动物, 水温变化直接影响其新陈代谢、生长、蜕皮、繁殖和生存^[7]。生物温度耐受能力与其有氧代谢能力和范围紧密相关。在综合之前个体、组织、分子等不同水平研究的基础上, Verberk等^[8]提出了氧限制的热耐受性理论(OCLTT)。该理论指出, 生物需氧量与氧气供给能力之间的不平衡是限制生物温度耐受性的首要因素。目前, OCLTT理论已在岸蟹、凡纳滨对虾等虾蟹类高温耐受研究中得到证实。

盐度是影响水生动物渗透压的重要环境因子之一, 盐度的变化会引起甲壳动物机体渗透压的改变, 从而影响虾蟹的生长、繁殖和免疫^[9]。渗透调节对于甲壳动物维持渗透压稳态至关重要, 甲壳动物维持稳态主要分两个过程: 通过不等渗细胞外调节, 维持血淋巴渗透压、离子组成和细胞外体积; 通过细胞内等渗调节, 控制细胞内液体成分和体积。近年的研究发现, $\text{Na}^+/\text{K}^+-\text{ATPase}$ 、 $\text{Na}^+-\text{K}^+-2\text{Cl}^-$ 、碳酸酐酶等离子转运酶通过为甲壳动物鳃中的许多离子传输系统提供驱动力, 维持细胞内、细胞外渗透压和离子稳态^[10-11]。

氨氮是水产养殖系统中普遍存在的污染物, 当水体中的氨氮浓度过高时, 会影响虾蟹的生长、

代谢和免疫力, 并造成其生理功能紊乱, 甚至导致死亡^[12]。氨氮的毒性主要来源于 NH_3 , NH_3 具有较高的脂溶性, 极易穿过细胞膜后损伤水产动物的鳃组织并渗入血淋巴, 降低血蓝蛋白的载氧能力, 对甲壳动物产生毒害作用^[13]。应对氨氮胁迫时, 甲壳动物可以通过鳃上皮的各种通道蛋白将氨氮排出体外, 也能够将其转变为尿素或合成谷氨酸、谷氨酰胺等减少生物体内氨氮的积累从而降低毒性^[14]。

pH也是水产生物生存环境的重要生态因子, 高pH是盐碱水养殖中最主要的胁迫因子之一。细胞内 H^+ 的改变可能会破坏包括膜活性变化、通道蛋白、酶、细胞内信号事件在内的关键生物学过程, 以及蛋白质合成和代谢、渗透调节和氧转运^[15], 对水产动物构成巨大威胁^[16]。水环境pH增加或降低会影响虾蟹的胚胎发育、生长以及增加对病原微生物的易感性^[17]。甲壳动物对pH变化的适应调控离不开离子转运酶的作用, 包括 Na^+/H^+ 交换体、 $\text{Na}^+/\text{K}^+-\text{ATPase}$ 、 $\text{Na}^+-\text{K}^+-2\text{Cl}^-$ 、碳酸酐酶等^[18]。

此外, 盐碱水是分布于陆地区域的非海洋性咸水资源, 属于一种世界性的低产水资源, 仅中国就有4587万 hm^2 盐碱水域, 具有高盐度、高碱度、高pH以及复杂离子组成等特点, 严重制约水生动物的生存和生长。除了耐盐碱鱼类, 仅有少数甲壳动物经过驯化后在盐碱池塘成功养殖, 例如凡纳滨对虾、脊尾白虾、拟穴青蟹等^[19]。近年来的研究揭示了甲壳动物响应碳酸盐碱度胁迫的分子机制, 获得了耐盐碱虾类适应盐碱胁迫的候选基因, 发现碳酸酐酶、 $\text{Na}^+/\text{K}^+-\text{ATPase}$ 、 Na^+/H^+ 交换体、碳酸酐酶、 $\text{V}(\text{H}^+)-\text{ATPases}$ 、水通道蛋白4和11基因在凡纳滨对虾、脊尾白虾等高碳酸盐碱度适应离子调控中起着关键作用^[12,20-22]。

1.2 虾蟹免疫防御机制

随着养殖规模的不断扩大, 养殖环境污染严重, 虾蟹类疾病逐渐增多, 严重威胁养殖产业的发展, 虾蟹免疫防御机制也逐渐成为国内外学者研究的热点。甲壳动物仅具有先天免疫系统, 先天免疫通过信号转导触发多种体液和细胞免疫。首先是机体的模式识别受体(PRR)通过病原体表面的病原相关分子模式(PAMP)检测到病原入侵, 随后在细胞内触发特定的复杂信号通路以产生免疫反应。因此, 先天免疫的研究主要与模式识别

受体、免疫信号通路和效应分子的鉴定有关。在蟹类动物中鉴定到的模式识别受体主要包括 Toll 受体 (TLR)、凝集素、脂多糖等, 主要负责识别外来病原体的入侵。在模式生物果蝇中发现的 3 种主要类型的信号通路 (Toll 通路、IMD 通路和 JAK/STAT 信号通路) 也在蟹中被报道, 这 3 种

信号通路在针对不同入侵病原体的先天免疫防御中发挥了重要作用^[23-24]。Toll 通路诱导抗菌肽 (AMP) 表达对抗革兰氏阳性细菌和真菌; JAK/STAT 信号通路则参与了多种抗病毒和细菌的免疫反应; 而 IMD 通路激活 AMP 分泌对抗革兰氏阴性细菌 (图 1)^[23-24]。

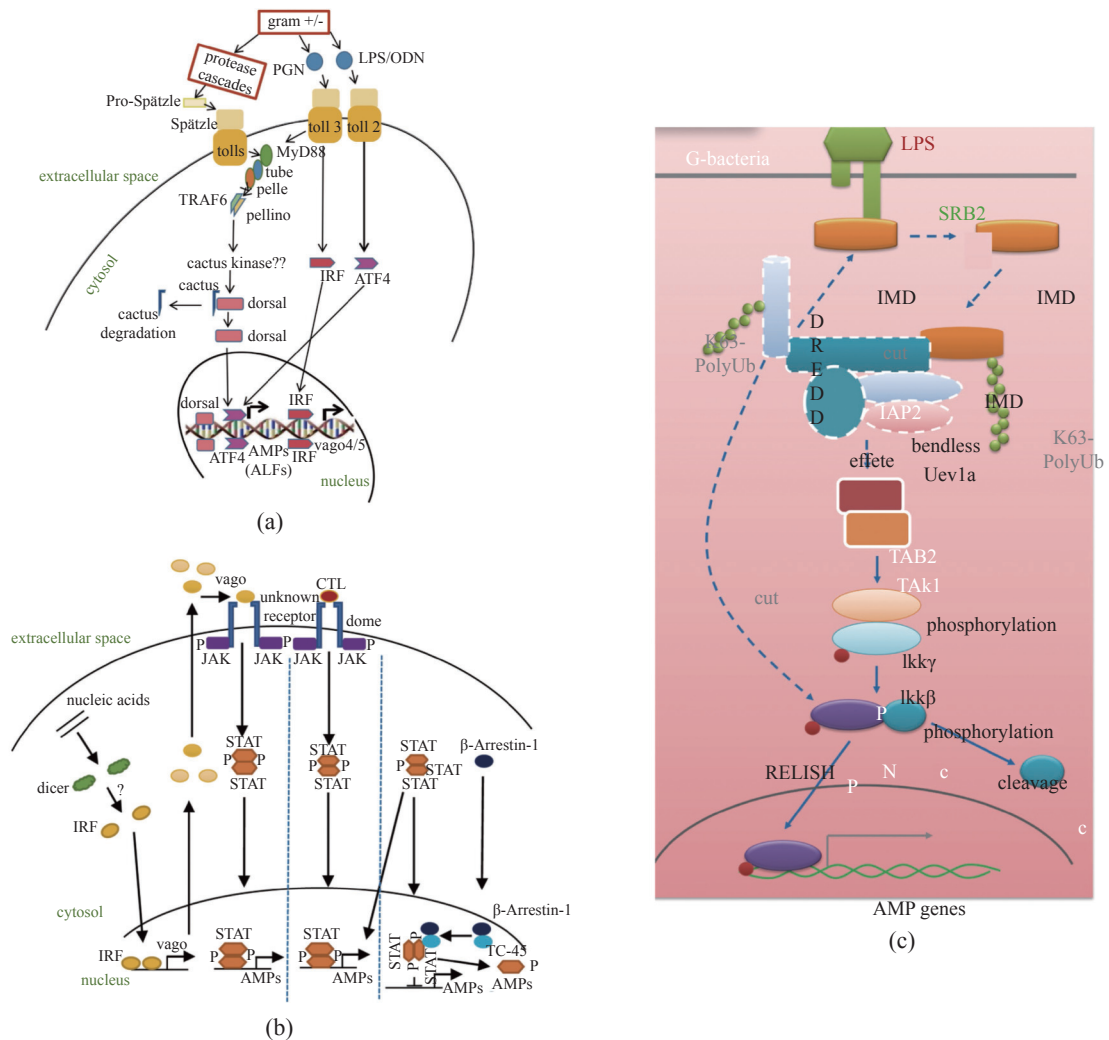


图 1 蟹中的免疫信号通路

(a) Toll 信号通路; (b) JAK/STAT 信号通路; (c) IMD 信号通路。

Fig. 1 Immune signaling pathway in shrimp and crab

(a) Toll signaling pathway; (b) JAK/STAT signaling pathway; (c) IMD signaling pathway.

1.3 蟹环境适应性新品种的培育

非生物胁迫包括温度、盐度、氨氮和 pH 等是蟹生长发育过程中需要应对和适应的不利环境因素。随着蟹基因组精细图谱的绘制、大量参与非生物胁迫适应性应答的主效基因挖掘以及蟹响应环境胁迫的生态适应性机制的揭示, 都为现代生物育种技术的研发和生态适宜性新品种

的培育奠定了基础。

尽管早在 1997 年美国就启动了水产基因组计划, 但是由于基因组测序和组装的困难, 在过去的几十年里, 对甲壳类动物高质量基因组的报道很少^[25]。随着第三代测序技术以及高复杂性序列组装策略的发展, 直到 2019 年, 第一个经济甲壳物种—凡纳滨对虾的基因组被破译^[26]。此后, 甲

壳类基因组数量不断增加, 中国明对虾^[27-28]、日本对虾^[29-30]、斑节对虾^[31-32]、三疣梭子蟹^[33-34]、中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*)^[35]、拟穴青蟹^[36]、扁足拟石蟹 (*Paralithodes platypus*)^[37]、红螯螯虾 (*Cherax quadricarinatus*)^[38] 等经济甲壳物种相继被破译, 为生物学和遗传学研究及其在水产养殖中的应用奠定了基础, 包括经济性状的遗传解析、全基因组关联分析和基因组选择等, 对虾蟹分子育种的发展做出了贡献, 加速了对水产养殖物种的遗传改良。

基于现代生物育种技术的研发, 结合传统群体、家系等选育方法, 我国相继培育出生长速度快、抗逆(病)能力强的国审虾蟹新品种 40 个, 其中虾类新品种 30 个, 蟹类新品种 10 个。虾类新品种中对虾科的新品种有 21 个, 主要覆盖凡纳滨对虾(12 个), 中国明对虾(6 个), 斑节对虾(2 个)和日本囊对虾 (*Marsupenaeus japonicus*)(1 个)。除对虾科以外, 还培育出青虾 (*Macrobrachium nipponense*)(4 个)、罗氏沼虾 (*M. rosenbergii*)(3 个)和脊尾白虾(2 个)等新品种, 培育的环境适应性性状主要包括抗白斑病和耐低盐、氨氮、高 pH 和低温等。培育的蟹类新品种主要包括中华绒螯蟹(6 个), 三疣梭子蟹(3 个)和拟穴青蟹(1 个), 具

有生长速度快、耐低盐和饲料转化率高优良性状。培育的这些新品种基本覆盖了我国海水、淡水、咸淡水和湖泊等养殖水域, 显著提高了虾蟹养殖过程中应对环境胁迫的能力, 保障虾蟹养殖产品的稳定生产和可持续供应^[39-40]。

2 海水虾蟹生态工程化养殖

2.1 海水池塘养殖生态系统结构特征

海水池塘养殖生态系统包括物理环境、化学环境和生物组成等多个层面, 物理和化学环境构成了养殖系统的物质基础, 生物与理化环境的交互作用构成海水养殖池塘生态系统(图 2)。池塘的物理和化学环境包括养殖池大小、底质、水深、光照, 以及与养殖息息相关的盐度、水温、溶解氧、pH、无机氮、无机磷等等。温度、低氧、盐度、氨氮、亚硝酸盐等环境因子会对虾蟹等养殖对象造成胁迫甚至致死, 养殖过程中需要密切关注。养殖水环境因子部分可以通过人工干预进行调节, 如机械增氧、水体交换等措施, 但更重要的是通过生物的作用进行综合调控。

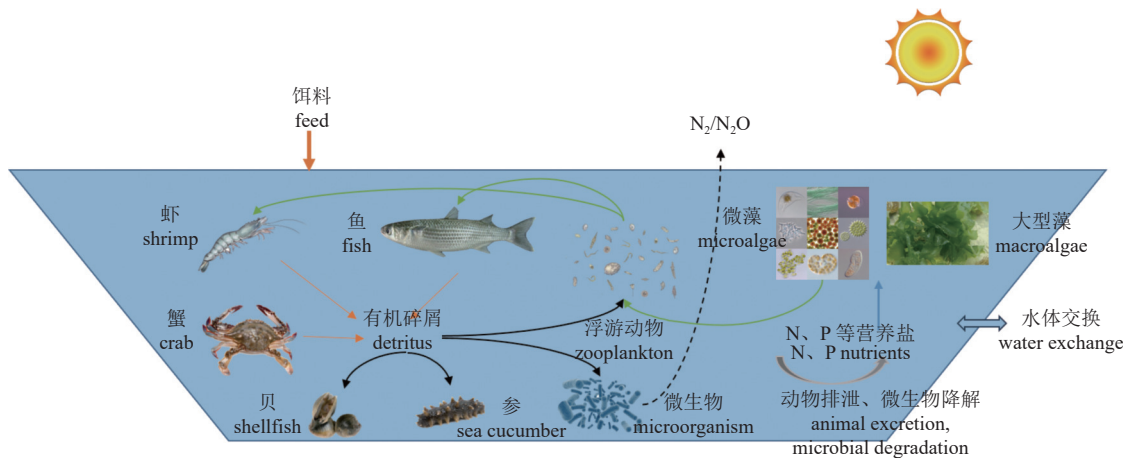


图 2 海水池塘生态系统组成结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of ecosystem structure of seawater pond

养殖过程投喂饵料中的大部分营养元素会以残饵粪便、代谢废物等形式流失到养殖水体和沉积物中, 养殖废物的积累会恶化养殖环境、威胁虾蟹健康养殖。传统单养池塘生态结构简单, 生物组成以虾蟹养殖对象为主, 养殖系统自我净化能力有限, 一般通过水体交换排出养殖废物、维持养殖水环境的稳定, 易引发周围水域环境的污染。多营养层次综合养殖的理念, 通过多种生物

的混合养殖实现养殖废物的转化、利用, 避免或削弱养殖废物的持续积累, 同时还能发挥生物防控的作用, 降低病害发生的可能^[41]。池塘生态系统生物组成以虾蟹等养殖对象为主, 还包括自然生长的浮游动物、浮游植物、底栖动物、微生物等^[42], 能量流动主要集中在 I、II 营养级^[43]。综合养殖模式生物群落结构更加复杂, 具有更完善的食物网, 物质传输效率和营养元素利用率更高^[44]。

浮游植物作为初级生产者既为养殖系统提供能量输入, 也为去除氮磷等养殖废物、维持养殖水环境的稳定发挥重要作用。硅藻门 (Bacillariophyta)、蓝藻门 (Cyanophyta)、裸藻门 (Euglenophyta)、绿藻门 (Chlorophyta)、甲藻门 (Pyrrophyta) 等是海水虾蟹养殖池塘的主要浮游植物类群, 随着季节变化浮游植物群落发生演替, 养殖前期优势种由甲藻演替为蓝藻和绿藻, 养殖后期演替为绿藻、隐藻和裸藻, 温度和光照是驱动浮游植物群落演替的主要因素, 除此之外, 浮游植物群落的组成结构和多样性还受到无机氮、无机磷、硅酸盐等因素的显著影响^[45]。角毛藻 (*Chaetoceros*)^[46]、海链藻 (*Thalassiosira*)^[47]、小球藻 (*Chlo-rococum*)^[48]、微拟球藻 (*Nannochloropsis*)^[49] 等作为虾蟹池塘的常见优势类群可被用来调控浮游植物群落、去除氮磷养殖废物、维持良好的养殖水环境。同时, 应关注蓝藻的变化, 尤其是养殖中后期。虽然蓝藻在去除氮磷等营养元素中发挥一定的积极作用, 但蓝藻的大量繁殖易导致缺氧, 部分蓝藻还会产生蓝藻毒素危害虾蟹的健康^[50]。浮游植物群落与养殖环境相互影响, 即可以用来调控养殖环境, 也可以作为反映池塘养殖水环境状况的生物指标^[51]。

微生物作为分解者是养殖池塘生态系统的重要组成部分, 可降解虾蟹等难以利用的养殖废物, 返回无机环境, 实现物质循环。海水养殖池塘水体微生物群落主要由变形菌门 (Pseudomonadota)、拟杆菌门 (Bacteroidota)、厚壁菌门 (Bacillota)、放线菌门 (Actinomycetota)、绿湾菌门 (Chloroflexi)、蓝细菌门 (Cyanobacteria) 等组成, 其中变形菌门为优势菌类群^[52-56]; 池塘沉积物微生物群落与养殖水体菌落相比组成结构更复杂、多样性更高, 主要由浮霉菌门 (Planctomycetes)、变形菌门、拟杆菌门等控制^[57]。微生物群落组成结构对于养殖系统的稳定至关重要, 乳酸菌、芽孢杆菌 (*Bacillus*)、硝化细菌、光合细菌、蛭弧菌 (*Bdellovibrio*) 等益生菌在虾蟹养殖过程中广泛应用, 益生菌一方面可以通过排斥竞争、产生抑制剂、竞争营养物质、干扰群体感应、提高免疫力等方式调控微生物群落、抑制潜在病原菌^[58], 另一方面可以降解、转化养殖废物, 促进物质循环。虾蟹作为优质蛋白来源, 其在养殖生产过程中伴随着含氮废物的污染问题, 养殖环境中的部分无机氮可通过浮游植物的自养同化作用去除, 大部分含氮废物

需要在微生物的参与下转化、去除, 包括矿化、硝化、反硝化、厌氧氨氧化等过程。池塘表层沉积物 (5~40 cm) 中的氮循环功能微生物在氮元素的转化、迁出过程中发挥重要作用^[59], 如亚硝化单胞菌 (*Nitrosomonas*) 和硝化螺菌 (*Nitrospira*) 等硝化细菌^[60]、海杆菌属 (*Marinobacter*) 等反硝化细菌^[61]。微生物群落组成结构在很大程度上决定了海水养殖池塘中虾蟹的健康、水质指标的控制、营养元素的循环等, 对于虾蟹养殖池塘的稳定至关重要。

2.2 营养物质资源化高效利用技术

虾蟹养殖池塘是一种人工营养型的小型生态系统, 物质和能量的主要来源是投入的饵料和肥料等, 传统的池塘养殖物种单一, 营养物质利用率不高。以对虾养殖池塘主要生源要素氮元素为例, 饲料 (含肥料) 氮约占系统总氮输入的 76.0%~93.7%, 而最终收获的对虾生物质仅占 5.8%~31.0%, 大量的饲料氮未被有效利用, 变成一种昂贵的“肥料”, 刺激了浮游植物和微生物的快速增长^[62]。海水鱼类摄入的饲料营养物质中仅有 13%~43% 氮、18%~36% 磷, 14%~38% 碳, 最终转化为鱼体生物质^[63]。水产养殖饵料营养转化率水平受养殖种类、投喂水平和管理、饲料组成、温度、个体规格等多方面因素影响^[64-67]。养殖过程中的残饵、残骸、排泄物等有机质分解产生大量无机化合物, 约占饲料氮 39%~63%、磷 18%~30%、碳 39%~70%, 导致内源污染, 不仅威胁养殖动物健康, 尾水直接排放也容易引起水域富营养化等环境问题。2020 年, 生态环境部、国家统计局、农业农村部共同发布的《第二次全国污染源普查公报》显示, 水产养殖业单位水产品养殖产量的排污强度分别为: 化学需氧量 13.6 kg/t、氨氮 0.45 kg/t、总氮 2.02 kg/t、总磷 0.33 kg/t。另据资料显示, 目前我国海水重点增养殖区的主要超标因子为无机氮和活性磷酸盐。

研究表明, 滤食性贝类、鱼类、以及底栖动物等对于水产养殖系统中悬浮有机质、无机氮等营养物质的循环利用发挥着重要作用。混养缢蛭的对虾成活率和产量分别比单养对虾池塘的成活率和产量提高 13.8% 和 35.4%, 氮利用率提高了 5.3%, 而同时混养罗非鱼和缢蛭的对虾三元综合养殖池塘的氮总利用率提高了 10.77%, 其中虾对氮的利用率也比单养池塘提高了 5.25%^[68]。中国

水产科学研究院黄海水产研究所近年来针对池塘多营养层次综合养殖开展了系列研究, 发现虾蟹池塘中混养菲律宾蛤仔、缢蛏、硬壳蛤等滤食性贝类可以显著改善养殖水环境, 提高氮固定、硝化、反硝化等关键氮循环反应速率, 有效转化养殖过程中产生的无机氮、活性磷酸盐等营养物质^[69]。藻沟虾明显促进日本对虾和中国明对虾生长, 尤其捕食能力稍强的日本对虾稚虾特定生长率可达对照组 2 倍, 对虾组织酚氧化酶等免疫酶活性显著增强, 降低了对虾感染 WSSV 后的死亡率^[70]。构建的“虾-蟹-贝-鱼”多营养层次综合养殖 (IMTA) 系统氮利用率较传统的对虾精养池塘提高 1 倍, 达到 43.8%, 养殖尾水氮磷排放减少 40% 以上, 实现亩效益 1.2 万元以上^[69]。

池塘养殖尾水主要属于有机污染, 氮磷含量较高、有毒物质极少、重金属含量也相对较低, 与工业污水相比安全程度较高, 可作为一种营养物质资源加以回收利用。近年来, 国内针对养殖尾水治理开展了大量的探索和研究, 建立了“三池两坝”“生态池塘”“人工湿地”“渔稻共作”“池塘底排污”“流水槽+”“工厂化循环水”等多种尾水处理模式, 基本原理主要是依靠物理、化学和生物等方法进行净化处理^[71]。其中, 生物处理技术主要是通过特定生物 (微生物、水生植物和水生动物等) 对氮磷污染物加以利用和转化, 从水体中去除, 由于其对环境友好、费用低、适用于各种易变化的水域条件, 被认为是最有发展前途的“绿色”技术, 其最大优点是使用不可再生材料和能源比较少, 并且不会对环境造成二次污染^[72]。

据估计, 饵料中碳、氮、磷营养要素在封闭式 IMTA 系统中转化为养殖动物生物质的潜力理论上分别为 65%~75%、65%、45%~75%^[63], 目前的池塘 IMTA 系统内部营养物质转化利用效率尚有较大的提升空间, 同时, 养殖尾水处理技术的净化效率也有待提高。因此, 聚焦池塘养殖生态系统营养物质转化途经和效率, 研发池塘养殖营养物质资源化利用与尾水净化技术, 对于推动海水池塘养殖产业绿色、高质量发展具有重要意义。

2.3 生态工程化养殖模式

海水池塘生态工程化养殖模式是对传统的粗放式或半精养池塘进行工程化的改造, 将池塘分成不同的区域, 利用工程设施或大型设备完成投饵、增氧、推水等关键生产环节, 在提高养殖效

率的基础上也尽可能促进营养物质的分级利用和循环转化。该模式借鉴了美国池塘跑道型水产养殖技术 (IRA), 并结合我国各地池塘条件转化而来。

在国家政策引导下, 以及“十三五”国家重点研发计划项目“海水池塘和盐碱水域生态工程化养殖技术与模式”等一系列研究课题的实施和推动下, 围绕产业和环境协调、水土资源高效利用的目标, 在我国沿海主要池塘养殖区构建了“虾 (蟹)-贝 (参/蛏)-鱼 (藻)”等多营养层次海水池塘生态工程化养殖模式, 不仅提高了海水池塘养殖经济效益和产品品质, 同时也减少尾水氮磷排放, 保护了美丽生态环境。在福建福州和宁德地区改造对虾养殖池塘, 设置微藻扩繁区、虾 (蟹) 养殖区、贝类养殖区, 各区间的空间相互独立, 通过水闸或管道串联。通过藻菌联合调控虾 (蟹) 养殖池塘水质, 利用自动投喂装置将虾 (蟹) 养殖池塘内饵料微藻投喂到贝类养殖池塘, 水体中微藻被贝类滤食后达标排放或循环回虾 (蟹) 养殖池塘; 对虾养殖池比传统养殖模式单茬亩产值提高 13.3%~33.0%; 贝类养殖池年亩产缢蛏 4 002~4 682 kg, 养殖贝类产值是普通海水池塘 2~3 倍; 虾-蛏循环养殖池塘水体营养盐降幅明显, 硝酸盐降低 37.9%, 磷酸盐降低 26.9%。在山东青岛地区, 将传统海参单养池塘进行优化升级, 增加虾蟹等高价值养殖物种, 并设置网箱移植石莼和耐高温浒苔等大型藻类, 构建多营养层次综合养殖模式, 实现海水池塘营养物质高效利用, 养殖参、虾、蟹产品规格大、品质优。刺参规格达 40~60 头/kg, 平均亩产 80 kg 以上 (1 亩为 667 m²), 较原有刺参单养模式提高 12.6% 以上, 日本对虾规格达 70~80 尾/kg, 增加经济效益 3 000 元/亩以上, 三疣梭子蟹规格可达 400~500 g/只, 增加经济效益 1 900 元/亩以上, 采用“参-虾 (蟹)-藻”养殖模式的平均综合经济效益提高 40% 以上; 此外, 收获的石莼等大型藻晒干后可加工成刺参饲料加以利用; 同时由于养殖池塘水质明显改善, 氮磷排放分别降低 45.8% 和 50%。在河北唐山地区, 在养殖池塘内建设机械化流水槽高密度养殖鲈和河豚等海水鱼, 集中收集大颗粒粪污, 其余可溶性有机质和无机盐等通过池塘净化区进行生物转化, 包括养殖硬壳蛤用于净化水质, 以及采用生物浮床的形式培养海马齿吸收营养盐。养殖红鳍东方鲀平均亩产量 76 kg, 亩产值约 5 472 元, 养殖鲈平均亩产量约 200 kg, 亩产值约 5 600 元, 硬壳蛤平均亩产 542 kg, 平均

亩产值约 3 796 元。养殖池塘单位成本约 4 920 元/亩, 单位效益约 9 948 元/亩, 对照池塘单位成本约 2 930 元/亩, 单位效益约 2 326 元/亩, 采用“鱼-贝-藻”生态工程化养殖模式后, 养殖亩效益高达传统模式 4.3 倍, 节约养殖用水量超 4 倍以上, 养殖尾水水质达到国家排放标准。

未来, 随着海水养殖设施设备技术和信息技术的不断发展与进步, 在海水池塘养殖生产中需要将智能化、自动化、工程化等设施装备与养殖工艺进行精准耦合, 实现信息化管理和智能化操作, 从而减轻人工劳动强度, 提高养殖生产效率, 推动传统池塘养殖业向工程化的智慧渔业发展。

3 展望

3.1 生态适应型良种培育

环境胁迫和病原感染是当前制约我国海水养殖绿色发展的关键因素, 持续的环境胁迫和病原感染直接影响到海水养殖虾蟹的生长、繁殖和存活等。近年来, 随着高通量测序技术的普及和分子育种技术的发展, 与环境适应性及抗病能力相关的分子遗传机制取得诸多研究进展。将这些研究成果通过分子育种手段应用到良种培育中是现代育种的一个趋势。海水养殖虾蟹长期处于特定的生态养殖系统中, 环境选择压力作用于表型以及与之相关的基因组区域, 造成基因组发生异质性的分化来适应环境压力。因此, 研究环境胁迫下重要海水养殖生物的遗传分化、遗传基础和环境因素之间的互作关系, 明确环境胁迫下海水养殖生物重要经济性状的遗传变化规律、性状间的相关性及关键生境影响因子, 能够为生态适应性良种培育以及提高海水生态养殖系统可持续产出提供重要理论依据。

今后的研究重点在于研究养殖生物生长、繁殖、抗逆和免疫等重要经济性状之间的关联性, 分析不同生境条件对性状产生影响的遗传机制, 定位不同养殖环境在养殖生物基因组上的选择信号, 揭示不同生境条件下养殖生物适应机制, 筛选出与各优良表型相对应的遗传分子标记。开展区域性实验对养殖生物生产性状的稳定性、适应性进行测试, 分析基因型和环境及其互作对性状的作用机制, 确定影响养殖生物适应性的关键环境因子, 鉴定筛选适宜不同生态养殖系统的种质资源。建立分子育种技术进行新品种培育, 加快

选育进展, 培育出适应不同生态环境的优良品种, 从而提高海水生态养殖系统可持续产出。

3.2 养殖全过程数字化管控

海水养殖经过粗放养殖、半精养养殖、集约化养殖、多营养层次生态养殖等阶段的发展, 养殖技术与工艺不断完善, 养殖综合效益逐步提高。随着机械化、自动化、信息化等技术的发展, 智能化将成为水产养殖未来发展的重要方向。目前, 传感器技术在温度、DO、pH 等常规水质指标的检测方面已趋于成熟, 养殖设备可实现数字化控制, 结合物联网技术的应用可实现养殖环境大数据的获取、监控与管理。机器视觉与图像识别技术的发展实现养殖对象图像的采集及特定情景下的性状识别, 在此基础上通过进行模型化数据训练与分析的深度学习, 实现养殖信息的智能化判断, 使得水质监测与预警、病害诊断与预警、养殖动物识别、个体行为分析等智能化分析成为可能。

投喂是水产养殖过程的重要工作, 自动投饵机的应用可以大幅降低人力依赖, 实现定时、定点、定量投喂, 但受养殖生物量、摄食状态、环境变化等诸多不确定因素的影响, 目前难以实现精准投喂。养殖生物量的评估, 可通过机器视觉、图像识别和机器学习技术的综合应用来实现养殖对象规格^[73]和数量的测定^[74-75], 这在规格较大的鱼类及清水养殖环境中相对易于实现, 但对于规格较小的虾类、浑浊的养殖环境而言难以实现。除了通过生物量确定投喂量, 还可以利用养殖对象的摄食行为来制定投喂策略。通过卷积神经网络 (CNN) 和递归神经网络 (RNN) 两种典型的深度学习模型, 对鱼类的摄食前后的行为进行分析, 判断鱼的摄食状态, 进而制定投喂策略^[76-77]。另一方面, 还可以通过深度学习对鱼的异常行为进行分析, 监测鱼的健康状态^[78-79]。养殖生物的健康状态直接影响摄食量, 疾病的诊断与健康管理的在很大程度上决定养殖的成败。通过主成分分析、K-means 聚类分析等算法开发图像识别和机器学习技术, 已在养殖生物病害检测和诊断方面开展了大量研究^[80-81], 可大幅提高养殖生物健康管理水平, 但目前的诊断适用范围和准确率有限。图像识别和深度学习技术对于养殖的精准投喂和管理具有很大的优势, 同时也面临着巨大的挑战, 一方面技术的建立需要大量的数据进行训练, 另

一方面养殖环境中水体浑浊程度、养殖对象的大小、养殖对象的自由活动及重叠等, 妨碍图像识别与深度学习技术的可靠性。

信息的综合应用可构建水产养殖的大数据, 用于养殖环境预测与预警、病害诊治与预警、异常行为检测与分析、智能化投喂等等。但目前大数据分析与应用技术缺乏, 与水产养殖领域的结合仍处于初级阶段, 智能算法简单, 不能满足复杂的养殖生产活动。提升水产养殖产业的智能化程度, 还需要在关键的智能化技术上取得突破, 增加深度学习、知识计算、群智计算和混合智能等技术在水产养殖上应用的深度和广度^[82], 构建基于多维度数据分析的智能化养殖管控平台, 综合提升养殖管理水平。养殖系统信息自动采集与智能化管控技术将大幅减少养殖业对人力的依赖, 全面提升对养殖过程和环境的管控水平, 提高水产养殖综合效益。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 罗茵. 渔业可持续发展要两手抓[J]. 海洋与渔业, 2019(7): 24-25.
Luo Y. Grasp both hands to achieve sustainable development of fishery[J]. Ocean and Fishery, 2019(7): 24-25 (in Chinese).
- [2] 关于加快推进水产养殖业绿色发展的若干意见[J]. 中国水产, 2019(3): 7-10.
Null. Several opinions on accelerating the green development of aquaculture industry[J]. China Fisheries, 2019(3): 7-10 (in Chinese).
- [3] 唐启升, 方建光, 张继红, 等. 多重压力胁迫下近海生态系统与多营养层次综合养殖[J]. 渔业科学进展, 2013, 34(1): 1-11.
Tang Q S, Fang J G, Zhang J H, *et al.* Impacts of multiple stressors on coastal ocean ecosystems and integrated multi-trophic aquaculture[J]. Progress in Fishery Sciences, 2013, 34(1): 1-11 (in Chinese).
- [4] 王岩. 海水池塘养殖模式优化: 概念、原理与方法[C]//中国水产学会第五届青年学术年会摘要集. 上海: 中国水产学会, 2004.
Wang Y. Optimization of aquaculture model in seawater ponds: concepts, principles and methods[C]//Shanghai: China Society of Fisheries, 2004 (in Chinese).
- [5] 张立斌. 几种典型海域生境增养殖设施研制与应用[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2010.
Zhang L B. Development and application of several new systems for culture and stock enhancement in typical habitats of sea areas[D]. Qingdao: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanography), 2010 (in Chinese).
- [6] 农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴(2023)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2023.
Fisheries and Fisheries Administration Bureau of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs. China fishery statistical yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2023 (in Chinese).
- [7] Ren X Y, Wang Q, Shao H X, *et al.* Effects of low temperature on shrimp and crab physiology, behavior, and growth: a review[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 8: 746177.
- [8] Verberk W C E P, Overgaard J, Ern R, *et al.* Does oxygen limit thermal tolerance in arthropods? A critical review of current evidence[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2016, 192: 64-78.
- [9] Zhang D, Guo X T, Wang F, *et al.* Effects of periodical salinity fluctuation on the growth, molting, energy homeostasis and molting-related gene expression of *Litopenaeus vannamei*[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2016, 15(5): 911-917.
- [10] Antunes C D, Lucena M N, Garçon D P, *et al.* Low salinity-induced alterations in epithelial ultrastructure, Na⁺/K⁺-ATPase immunolocalization and enzyme kinetic characteristics in the gills of the thinstripe hermit crab, *Clibanarius vittatus* (Anomura, Diogenidae)[J]. *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology*, 2017, 327(6): 380-397.
- [11] Fabri L M, Moraes C M, Costa M I C, *et al.* Salinity-dependent modulation by protein kinases and the FXVD2 peptide of gill (Na⁺, K⁺)-ATPase activity in the freshwater shrimp *Macrobrachium amazonicum* (Decapoda, Palaemonidae)[J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes*, 2022, 1864(10): 183982.
- [12] Ge Q Q, Wang J J, Li J T, *et al.* Effect of high alkalinity on shrimp gills: Histopathological alternations and cell specific responses[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2023, 256: 114902.

- [13] Zhao M M, Yao D F, Li S K, *et al.* Effects of ammonia on shrimp physiology and immunity: a review[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2020, 12(4): 2194-2211.
- [14] Morris S, Greenaway P, Adamczewska A M, *et al.* Adaptations to a terrestrial existence in the robber crab *Birgus latro* L. IX. Hormonal control of post-renal urine reprocessing and salt balance in the branchial chamber[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2000, 203(2): 389-396.
- [15] Schram J B, Hayes H G, Street E, *et al.* Juvenile Dungeness crab foraging behavior and lipid composition is altered more by food quantity than seawater pH in a multi-stressor experiment[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2023, 563: 151897.
- [16] Ceballos-Osuna L, Carter H A, Miller N A, *et al.* Effects of ocean acidification on early life-history stages of the intertidal porcelain crab *Petrolisthes cinctipes*[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2013, 216(8): 1405-1411.
- [17] 潘鲁青, 刘志, 姜令绪. 盐度、pH变化对凡纳滨对虾鳃丝Na⁺-K⁺-ATPase活力的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2004, 34(5): 787-790.
- Pan L Q, Liu Z, Jiang L X. The effect of salinity and pH changes on gill Na⁺-K⁺-ATPase activity of *Litopenaeus vannamei*[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2004, 34(5): 787-790 (in Chinese).
- [18] Ge Q Q, Wang J J, Li J T, *et al.* Highly sensitive and specific responses of shrimp gill cells to high pH stress based on single cell RNA-seq analysis[J]. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 2022, 10: 1031828.
- [19] 李春岭, 石延港, 宋学章, 等. 盐碱水质套养脊尾白虾三种模式对比试验[J]. 科学养鱼, 2018, 34(3): 50-51.
- Li C L, Shi Y G, Song X Z, *et al.* Comprehensive experiment among three polyculture models of ridgetail white prawn in saline alkaline water[J]. *Scientific Fish Farming*, 2018, 34(3): 50-51 (in Chinese).
- [20] 柳飞, 李健, 李吉涛, 等. 碳酸盐碱度对脊尾白虾生存、生长、繁殖及免疫酶活性的影响[J]. 中国水产科学, 2016, 23(5): 1137-1147.
- Liu F, Li J, Li J T, *et al.* Effects of carbonate alkalinity stress on the survival, growth, reproduction, and immune enzyme activities of *Exopalaemon carinicauda*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2016, 23(5): 1137-1147 (in Chinese).
- [21] 李明栋, 王佳佳, 葛倩倩, 等. 脊尾白虾水通道蛋白基因4和11在碱度胁迫过程中的作用[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(4): 51-60.
- Li M D, Wang J J, Ge Q Q, *et al.* The roles of aquaporin gene 4 and 11 of *Exopalaemon carinicauda* under alkalinity stress[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2022, 43(4): 51-60 (in Chinese).
- [22] Ge Q Q, Li J, Wang J J, *et al.* Characterization, functional analysis, and expression levels of three carbonic anhydrases in response to pH and saline-alkaline stresses in the ridgetail white prawn *Exopalaemon carinicauda*[J]. *Cell Stress and Chaperones*, 2019, 24(3): 503-515.
- [23] Patnaik B B, Baliarsingh S, Sarkar A, *et al.* The role of pattern recognition receptors in crustacean innate immunity[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2023, doi: 10.1111/raq.12829.
- [24] Shi X Z, Yang M C, Kang X L, *et al.* Scavenger receptor B2, a type III membrane pattern recognition receptor, senses LPS and activates the IMD pathway in crustaceans[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2023, 120(24): e2216574120.
- [25] Yuan J B, Yu Y, Zhang X J, *et al.* Recent advances in crustacean genomics and their potential application in aquaculture[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2023, 15(4): 1501-1521.
- [26] Zhang X J, Yuan J B, Sun Y M, *et al.* Penaeid shrimp genome provides insights into benthic adaptation and frequent molting[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 356.
- [27] Wang Q, Ren X Y, Liu P, *et al.* Improved genome assembly of Chinese shrimp (*Fenneropenaeus chinensis*) suggests adaptation to the environment during evolution and domestication[J]. *Molecular Ecology Resources*, 2022, 22(1): 334-344.
- [28] Yuan J B, Zhang X J, Wang M, *et al.* Simple sequence repeats drive genome plasticity and promote adaptive evolution in penaeid shrimp[J]. *Communications Biology*, 2021, 4(1): 186.
- [29] Kawato S, Nishitsuji K, Arimoto A, *et al.* Genome and transcriptome assemblies of the kuruma shrimp, *Marsupenaeus japonicus*[J]. *G3 Genes, Genomes, Genetics*, 2021, 11(11): jkab268.
- [30] Ren X Y, Lv J J, Liu M, *et al.* A chromosome-level gen

- ome of the kuruma shrimp (*Marsupenaeus japonicus*) provides insights into its evolution and cold-resistance mechanism[J]. *Genomics*, 2022, 114(3): 110373.
- [31] Uengwetwanit T, Pootakham W, Nookaew I, et al. A chromosome-level assembly of the black tiger shrimp (*Penaeus monodon*) genome facilitates the identification of growth-associated genes[J]. *Molecular Ecology Resources*, 2021, 21(5): 1620-1640.
- [32] Van Quyen D, Gan H M, Lee Y P, et al. Improved genomic resources for the black tiger prawn (*Penaeus monodon*)[J]. *Marine Genomics*, 2020, 52: 100751.
- [33] Lv J J, Li R H, Su Z C, et al. A chromosome-level genome of *Portunus trituberculatus* provides insights into its evolution, salinity adaptation and sex determination[J]. *Molecular Ecology Resources*, 2022, 22(4): 1606-1625.
- [34] Tang B P, Zhang D Z, Li H R, et al. Chromosome-level genome assembly reveals the unique genome evolution of the swimming crab (*Portunus trituberculatus*)[J]. *GigaScience*, 2020, 9(1): giz161.
- [35] Cui Z X, Liu Y, Yuan J B, et al. The Chinese mitten crab genome provides insights into adaptive plasticity and developmental regulation[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 2395.
- [36] Zhao M, Wang W, Zhang F Y, et al. A chromosome-level genome of the mud crab (*Scylla paramamosain* estampador) provides insights into the evolution of chemical and light perception in this crustacean[J]. *Molecular Ecology Resources*, 2021, 21(4): 1299-1317.
- [37] Tang B P, Wang Z K, Liu Q N, et al. Chromosome-level genome assembly of *Paralithodes platypus* provides insights into evolution and adaptation of king crabs[J]. *Molecular Ecology Resources*, 2021, 21(2): 511-525.
- [38] Chen H L, Zhang R, Liu F, et al. The chromosome-level genome of *Cherax quadricarinatus*[J]. *Scientific Data*, 2023, 10(1): 215.
- [39] 李健, 刘萍, 何玉英, 等. 中国对虾快速生长新品种“黄海1号”的人工选育[J]. *水产学报*, 2005, 29(1): 1-5.
- Li J, Liu P, He Y Y, et al. Artificial selection in the new breed of *Fenneropenaeus chinensis* named “Yellow Sea 1” based on fast growth trait[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2005, 29(1): 1-5 (in Chinese).
- [40] 李健, 何玉英, 王清印, 等. 中国对虾(*Fenneropenaeus chinensis*)“黄海3号”新品种的培育[J]. *渔业科学进展*, 2015, 36(1): 61-66.
- Li J, He Y Y, Wang Q Y, et al. Selective breeding of fast-growing and ammonia toxicity-resistant Chinese shrimp (*Fenneropenaeus chinensis*)[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2015, 36(1): 61-66 (in Chinese).
- [41] Chang Z Q, Neori A, He Y Y, et al. Development and current state of seawater shrimp farming, with an emphasis on integrated multi-trophic pond aquaculture farms, in China - a review[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2020, 12(4): 2544-2558.
- [42] Xu H L, Song W B, Warren A, et al. Planktonic protist communities in a semi-enclosed mariculture pond: structural variation and correlation with environmental conditions[J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2008, 88(7): 1353-1362.
- [43] 奉杰, 田相利, 董双林, 等. 基于EwE模型的三疣梭子蟹、凡纳滨对虾和梭鱼混养系统的能流分析[J]. *中国海洋大学学报*, 2018, 48(4): 24-36.
- Feng J, Tian X L, Dong S L, et al. Energy flux analysis of *Portunus trituberculatus*-*Litopenaeus vannamei*-*Liza haematocheli* polyculture system based on EwE model[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2018, 48(4): 24-36 (in Chinese).
- [44] 胡高宇, 张翔, 黄晓林, 等. 基于Ecopath模型的海水池塘主要养殖模式比较分析[J]. *上海海洋大学学报*, 2023, 32(4): 716-729.
- Hu G Y, Zhang X, Huang X L, et al. Comparative analysis of main breeding models of seawater pond based on Ecopath mode[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2023, 32(4): 716-729 (in Chinese).
- [45] Llarío F, Rodilla M, Escrivá J, et al. Phytoplankton evolution during the creation of a biofloc system for shrimp culture[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2019, 16(1): 211-222.
- [46] Schweitzer R, de Lorenzo M A, do Nascimento Vieira F, et al. Nursery of young *Litopenaeus vannamei* post-larvae reared in biofloc-and microalgae-based systems[J]. *Aquacultural Engineering*, 2017, 78: 140-145.
- [47] Huang C, Luo Y Y, Zeng G Q, et al. Effect of adding microalgae to whiteleg shrimp culture on water quality, shrimp development and yield[J]. *Aquaculture Reports*, 2022, 22: 100916.
- [48] Chen Y, Fu Z C, Shen Z Y, et al. Rapid production biofloc by inoculating *Chlorella pyrenoidosa* in a separate way[J]. *Water*, 2023, 15(3): 536.

- [49] Magnotti C, Lopes R, Derner R, *et al.* Using residual water from a marine shrimp farming BFT system. Part I: nutrient removal and marine microalgae biomass production[J]. *Aquaculture Research*, 2016, 47(8): 2435-2443.
- [50] Bownik A. Harmful algae: effects of cyanobacterial cyclic peptides on aquatic invertebrates—a short review[J]. *Toxicon*, 2016, 124: 26-35.
- [51] Xu H L, Min G S, Choi J K, *et al.* Temporal dynamics of phytoplankton communities in a semi-enclosed mariculture pond and their responses to environmental factors[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2010, 28(2): 295-303.
- [52] Xiong J B, Zhu J L, Wang K, *et al.* The temporal scaling of bacterioplankton composition: high turnover and predictability during shrimp cultivation[J]. *Microbial Ecology*, 2014, 67(2): 256-264.
- [53] Martinez-Cordova L R, Martinez-Porchas M, Porchas-Cornejo M A, *et al.* Bacterial diversity studied by next-generation sequencing in a mature phototrophic *Navicula* sp.-based biofilm promoted into a shrimp culture system[J]. *Aquaculture Research*, 2017, 48(5): 2047-2054.
- [54] Hou D W, Huang Z J, Zeng S Z, *et al.* Environmental factors shape water microbial community structure and function in shrimp cultural enclosure ecosystems[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017, 8: 2359.
- [55] 王琦. 海水多营养层次生态养殖池塘细菌群落分析及与环境因子相关性研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- Wang Q. Bacterial communities diversity in integrated multi-trophic ponds and correlation with environmental factors[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013 (in Chinese).
- [56] 吴定心. 微生物制剂对南美白对虾养殖体系微生态的影响及其与藻类关系的研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- Wu D X. Studies of effects on *Litopenaeus vannamei* bacterial ecology caused by probiotics application and mechanism of interaction between microalgae and probiotics[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017 (in Chinese).
- [57] Zeng Y H, Ma Y, Wei C L, *et al.* Bacterial diversity in various coastal mariculture ponds in Southeast China and in diseased eels as revealed by culture and culture-independent molecular techniques[J]. *Aquaculture Research*, 2010, 41(9): e172-e186.
- [58] Zorriehzaha M J, Delshad S T, Adel M, *et al.* Probiotics as beneficial microbes in aquaculture: an update on their multiple modes of action: a review[J]. *Veterinary Quarterly*, 2016, 36(4): 228-241.
- [59] Wang C X, Ju J J, Zhang H K, *et al.* Exploring the variation of bacterial community and nitrogen transformation functional genes under the pressure of heavy metals in different coastal mariculture patterns[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 324: 116365.
- [60] Srithep P, Khinthong B, Chodanon T, *et al.* Communities of ammonia-oxidizing bacteria, ammonia-oxidizing archaea and nitrite-oxidizing bacteria in shrimp ponds[J]. *Annals of Microbiology*, 2015, 65: 267-278.
- [61] Dineshkumar N, Saravanakumar C, Vasanth M, *et al.* Genetic and physiological characterization of denitrifying bacteria from brackishwater shrimp culture ponds of India[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2014, 92: 49-56.
- [62] Funge-Smith S J, Briggs M R P. Nutrient budgets in intensive shrimp ponds: implications for sustainability[J]. *Aquaculture*, 1998, 164(1-4): 117-133.
- [63] Nederlof M A J, Verdegem M C J, Smaal A C, *et al.* Nutrient retention efficiencies in integrated multi-trophic aquaculture[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2022, 14(3): 1194-1212.
- [64] Islam M S. Nitrogen and phosphorus budget in coastal and marine cage aquaculture and impacts of effluent loading on ecosystem: review and analysis towards model development[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, 50(1): 48-61.
- [65] Jackson C, Preston N, Thompson P J, *et al.* Nitrogen budget and effluent nitrogen components at an intensive shrimp farm[J]. *Aquaculture*, 2003, 218(1-4): 397-411.
- [66] Schneider O, Sereti V, Eding E H, *et al.* Analysis of nutrient flows in integrated intensive aquaculture systems[J]. *Aquacultural Engineering*, 2005, 32(3-4): 379-401.
- [67] Thoman E S, Ingall E D, Davis D A, *et al.* A nitrogen budget for a closed, recirculating mariculture system[J]. *Aquacultural Engineering*, 2001, 24(3): 195-211.
- [68] 刘剑昭, 李德尚, 董双林, 等. 养虾池半精养封闭式综合养殖的养殖容量实验研究[J]. *海洋科学*, 2000,

- 24(7): 6-11.
- Liu J Z, Li D S, Dong S L, *et al.* An experimental study on carrying capacity of closed semi extensive polycultur shrimp ponds[J]. *Marine Sciences*, 2000, 24(7): 6-11 (in Chinese).
- [69] Yuan S Y, Zhu W J, Neori A, *et al.* Benthic suspension-feeding clams affect sedimentary microbial communities and nitrogen cycling in seawater pond IMTA[J]. *Aquaculture*, 2023, 563: 738907.
- [70] 韩永望, 李健, 陈萍, 等. 强壮藻钩虾食性分析及其对温度、盐度变化的响应[J]. *渔业科学进展*, 2012, 33(6): 53-58.
- Han Y W, Li J, Chen P, *et al.* Analysis of the feeding habits of *Ampithoe valida* and its response to different temperature and salinity[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2012, 33(6): 53-58 (in Chinese).
- [71] 陈家长, 孟顺龙, 胡庚东, 等. 空心菜浮床栽培对集约化养殖鱼塘水质的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(2): 155-159.
- Chen J Z, Meng S L, Hu G D, *et al.* Effect of *Ipomoea aquatica* cultivation on artificial floating rafts on water quality of intensive aquaculture ponds[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(2): 155-159 (in Chinese).
- [72] 全国水产技术推广总站. 多营养层次综合养殖技术模式 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- National Aquatic Technology Promotion Station. Integrated multi-trophic level aquaculture technology mode[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2021 (in Chinese).
- [73] Malathi L, Harish B, Harishankar N, *et al.* Smart aquaculture fish feeding and water quality monitoring[C]//Proceedings of International Conference. Coimbatore: Coimbatore Institute of Engineering and Technology, 2018.
- [74] Raman V, Perumal S, Navaratnam S, *et al.* Computer assisted counter system for larvae and juvenile fish in malaysian fishing hatcheries by machine learning approach[J]. *Journal of Computers*, 2016, 11(5): 423-431.
- [75] Zhang S, Yang X T, Wang Y Z, *et al.* Automatic fish population counting by machine vision and a hybrid deep neural network model[J]. *Animals*, 2020, 10(2): 364.
- [76] Zhou C, Xu D M, Chen L, *et al.* Evaluation of fish feeding intensity in aquaculture using a convolutional neural network and machine vision[J]. *Aquaculture*, 2019, 507: 457-465.
- [77] Yang X T, Zhang S, Liu J T, *et al.* Deep learning for smart fish farming: applications, opportunities and challenges[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2021, 13(1): 66-90.
- [78] Saberioon M, Gholizadeh A, Cisar P, *et al.* Application of machine vision systems in aquaculture with emphasis on fish: state-of-the-art and key issues[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2017, 9(4): 369-387.
- [79] Mahesh S, Manickavasagan A, Jayas D S, *et al.* Feasibility of near-infrared hyperspectral imaging to differentiate Canadian wheat classes[J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 101(1): 50-57.
- [80] Chakravorty H, Paul R, Das P. Image processing technique to detect fish disease[J]. *International Journal of Computer Science and Security (IJCSS)*, 2015, 9(2): 121-131.
- [81] Divenly, Sivakami Karuppaiah K, Velusamy J. Fish diseases identification and classification using machine learning[J]. *Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research*, 2019, 5(6): 46-51.
- [82] 段青玲, 刘怡然, 张璐, 等. 水产养殖大数据技术研究进展与发展趋势分析[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(6): 1-16.
- Duan Q L, Liu Y R, Zhang L, *et al.* State-of-the-art review for application of big data technology in aquaculture[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural*, 2018, 49(6): 1-16 (in Chinese).

Environmental adaptation and ecological engineering pond aquaculture of marine shrimp and crab

LI Jian^{1,2*}, LI Jitao^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Mariculture Biobreeding and Sustainable Goods, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;

2. Function Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China)

Abstract: Pond aquaculture is a traditional method of mariculture in China, and it is also the main current land-based mariculture. Since the 1970s, seawater pond aquaculture has gone through a development process of extensive, semi-intensive, intensive, and multi-nutrient ecological aquaculture, forming a development pattern of multiple types, modes, and formats. However, there are still key problems in the current pond aquaculture industry, such as unclear ecological adaptability mechanisms of aquaculture organisms, unstable output of aquaculture systems, and low efficiency in nutrient utilization, which seriously restrict the development of pond aquaculture industry. We carried out an analysis of the interaction mechanism between improved varieties of marine aquaculture shrimp and crab and the ecological environment, developed technologies for optimizing the structure of aquaculture ecosystems, efficiently utilizing nutrient resources, established a platform for aquaculture information collection and intelligent control, created a new model of ecological engineering aquaculture, improved the efficiency of nutrient utilization, and achieved efficient and sustainable output of the aquaculture system, which may provide important theoretical basis and technical support for the green and quality development of pond aquaculture industry in China.

Key words: seawater pond aquaculture; ecological adaptability; ecological engineering; research status; development trends

Corresponding author: LI Jian. E-mail: lijian@ysfri.ac.cn

Funding projects: National Key R & D Program of China (2019YFD0900400); China Agriculture Research System (CARS-48); Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS (2023TD50)