

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2013.01100

国内外工厂化循环水养殖研究进展

王峰^{1,2,3}, 雷霖霖², 高淳仁², 黄滨², 翟介明⁴

1. 中国海洋大学 水产学院, 山东 青岛 266003;
2. 青岛市海水鱼类种子工程与生物技术重点实验室, 中国水产科学研究院 黄海水产研究所, 山东 青岛 266071;
3. 青岛农业大学 海洋科学与工程学院, 山东 青岛 266109;
4. 莱州明波水产有限公司, 山东 莱州 261418

摘要: 工厂化循环水养殖模式是一种新型的高效养殖模式, 以养殖用水净化后循环利用为核心特征, 节电、节水、节地, 符合当前国家提出的循环经济、节能减排、转变经济增长方式的战略需求。本文以循环水养殖模式应用实践为主线, 结合近几年养殖模式的科学研究和产业发展, 围绕养殖管理与应用, 分别对水循环系统对化学物质的承载力、水循环率、主要养殖种类、养殖效果和最适养殖密度等运营管理环节进行了总结和探讨, 为今后建立适用于中国国情的工厂化循环水养殖模式管理标准提供参考。

关键词: 循环水养殖; 养殖模式; 养殖管理

中图分类号: S954

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2013)05-1100-12

中国是世界上从事水产养殖历史最悠久的国家之一。南方的“鱼塍”和北方的“港养”方式已经延续了数百年之久。中国的池塘综合养殖(池塘生态养殖)历史悠久, 经验丰富。建国以来, 随着国家对农业工作的重视和水产工作者的努力, “水、种、饵、密、混、轮、防、管”八字精养法为池塘综合养殖高产模式奠定了基础^[1]。具体来说, 就是在“水”(优良的水质环境条件)、“种”(质优体健的苗种)、“饵”(营养全面、适口的饵料)物质基础上, 采取“密”(合理的放养密度)、“混”(多种鱼类及其他水生动物的混养)、“轮”(轮捕轮放始终保持密度合理)的方法, 同时掌握养殖周期和养殖节令, 加强“防”(防止浮头泛池、防治病害)、“管”(精心科学的饲养管理)措施, 以实现整体结构合理、功能协调, 达到优质和高效生产的目的^[2]。但经过多年

发展, 总结其养殖效果, 发现依然存在水质调控不易、富营养化严重、单位水体养殖产量不高等劣势, 尤其还易受气温季节限制、风暴潮侵袭等突发因素的影响, 发展空间受到较大制约。

20世纪末期, “温室大棚+深井海水”工厂化流水养殖模式以其灵活高效、不受季节控制、经济适用的优势, 焕发了巨大的生命力, 迅速地推动了以大菱鲆为首的鲆鲽鱼类产业的发展, 并掀起了国内第四次水产养殖浪潮^[3-4]。这种养殖模式实现了生产工厂化, 有利于组织生产和管理, 而且克服了季节限制和突发恶劣天气的风险, 大幅提高了单位水体养殖产量, 开创了我国工业化养鱼的雏形。

2012年中国水产品总产量达到5 906万t, 其中养殖产量4 305万t, 已经连续24年居世界第一

收稿日期: 2013-02-19; 修订日期: 2013-05-30.

基金项目: 农业公益性行业科研专项(nyhyzx07-046); 国家鲆鲽类产业技术体系建设专项资金(nycytx-50); 农业公益性行业科研专项(201003024).

作者简介: 王峰(1977-), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为鱼类繁殖、循环水养殖模式. E-mail: randy966@163.com

通信作者: 雷霖霖(1935-), 中国工程院院士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为海水鱼类生态、繁殖和增养殖技术.

E-mail: leijl@ysfri.ac.cn

位^[5]。但经过 10 多年的发展,随着养殖规模的不断提升,水资源的无节制利用,流水养殖模式面临水质资源破坏、病害逐年增多、食品安全需求、沿海工业用地挤压和国家倡导节能减排等压力,其发展已经面临一个瓶颈,亟待转变。在此基础上,一种新的养殖模式——工厂化循环水养殖模式应运而生。工厂化循环水养殖模式是以养殖用水净化后循环利用为核心特征,节电、节水、节地,符合当前国家提出的循环经济、节能减排、转变经济增长方式的战略需求^[6]。

工厂化循环水养殖模式建立在生物学、环境科学、机电工程、信息科学、建筑科学等多学科发展的基础上,是多学科的交汇和应用,其产生和发展不是偶然的,是人类综合利用现代科学技术改造自然,服务社会的结果。养殖废水属于微污染水,但用于循环利用,其对水质处理的要求却高,因此,在生产上,需采用多种手段,对养殖废水进行处理。此种处理包括物理、化学、生物等过程,一般包括微滤机、弧形筛、泡沫分离、臭氧消毒、生物滤池、紫外线杀菌、加热恒温、纯氧增氧等环节。此外,在整个养殖模式的建立过程中,水循环系统对化学物质的承载力、水循环率、主要适宜养殖种类、养殖效果和最佳养殖密度等养殖管理环节均需要进行大量的实验和实践,本文将近年国内外关于这方面的研究做一总结,为适应中国国情的工厂化循环水养殖模式养殖管理标准的建立提供一些参考。

1 水循环系统对化学物质的承载力

养殖系统的稳定性与水循环系统的承载力密切相关,而承载力又决定了养殖系统的生产力。为了更好地将循环水养殖模式应用于生产,水产工作者围绕着重金属离子、福尔马林、硝酸盐、致病弧菌等对水循环系统稳定构成威胁的因素做了大量研究。

程波等^[7]研究了 Cu^{2+} 对循环水养殖系统(RAS)水质、凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)生长的影响。结果表明,在 0.3 mg/L Cu^{2+} 质量浓度污染下,RAS 仍能提供较好的水质条件,获得较高的产量

和较低的饵料转化率,所养对虾符合无公害水产品要求。Martins 等^[8]研究了 RAS 对养殖用水和尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)组织中重金属离子的浓缩效果。研究表明,RAS 中 As、Fe、Mn、Ni 和 Zn 等重金属离子随着水交换率的减小而浓度增加;养殖水体中重金属离子的积累并不会转化为鱼类肝和组织中的积累;RAS 中单位鱼体质量金属离子的含量低于人类食用所要求的安全水平,不会对人体造成毒害。

李湘萍等^[9]以欧鲈(*Dicentrarchus labrax*)为受试鱼探讨长时间低剂量福尔马林对鱼类及 RAS 的影响,结果显示 30 mg/L 福尔马林处理组欧鲈存活率(98%)和增重率(350.26%)与对照组之间无显著性差异; 60 mg/L 福尔马林处理使欧鲈肝受到一定程度的损伤,欧鲈出现了轻度逆境胁迫; 90 mg/L 福尔马林处理的水体中亚硝酸盐氮的浓度升高,其去除率显著降低。

Pedersen 等^[10]研究了过氧化氢(H_2O_2)作为消毒剂在商业化 RAS 中的应用。研究表明, H_2O_2 在 RAS 中显著地降低了氨氮的移除效率,硝化作用的恢复需要 7 d; H_2O_2 的使用虽然可以改进水质且不影响鱼的生长,但会迅速导致生物滤膜上微生物的消解。综合考虑, H_2O_2 会导致生物滤膜崩溃而不能应用于 RAS。Pedersen 等^[11]还对过氧乙酸(PAA)在 RAS 中的应用做了总结。PAA 作为过氧化合物因其具有的杀菌功能而被认为是甲醛的代替物用于水产养殖。商品 PAA 一般由乙酸和 H_2O_2 混合而成,这样可保持其化学稳定性,且其在水中的降解非常快,这有助于保护环境。研究表明,PAA 的降解速率与水中有机质浓度大小密切相关;PAA 瞬时消耗超过 0.2 mg/L ,而半衰期只有几分钟。实践证明 PAA 在寄生虫病防治中存在见效快且对环境污染小的特点。

van Bussel 等^[12]研究了硝酸盐对大菱鲂(*Psetta maxima*)幼鱼的生长生理的影响。研究表明,大菱鲂的健康、生长和食物利用效果与硝酸盐浓度密切相关;当硝酸盐质量浓度超过 125 mg/L 时,其生长受到影响,当硝酸盐质量浓度达到 250 mg/L 时,其生理机能受到影响;当硝酸盐质量浓

度超过 500 mg/L 时, 大菱鲂体内平衡会被打破。Rodrigues 等^[13]研究了军曹鱼(*Rachycentron canadum*)幼鱼在硝酸盐中的急性毒性影响。研究表明, 硝酸盐对军曹鱼幼鱼的平均致死浓度为 1 829 mg/L, 急性中毒会产生鳃、食道和脑损伤。

付松哲等^[14]通过研究鱼类 RAS 中弧菌生长模型得出结论: 温度是影响弧菌生长最关键的因素; 15℃以下, C/N 比对弧菌生长无显著影响; 预警系统的建立依赖于现场微生物数据的准确测定。

2 水循环率对养殖生物生长、生理和生态的影响

工厂化循环水养殖模式的主要优势是节能减排、安全高效。而 RAS 日循环次数既涉及降低能耗需求, 也涉及 RAS 中养殖对象的生长、生理状态, 因此寻找最合适的水循环次数从而既能保证养殖对象适宜的水环境, 又能做到系统能耗最低是亟需解决的问题。

田喆等^[15]研究了 RAS 中不同水循环次数对大菱鲂生长和水质变化的影响。结果表明, 提高水循环次数可降低系统中氨氮和亚硝酸氮的积累速度, 减小水中有害物质对大菱鲂的胁迫作用, 从而促进大菱鲂的生长, 但对化学需氧量(COD)的去除没有显著影响。李琦等^[16]设计了 3 个循环量对高位池 RAS 调控凡纳滨对虾养殖水质的效果进行研究, 结果表明, 60 m³/h 循环水处理系统对改善水质效果最好。

孙国祥等^[17]研究了流速对 RAS 中大菱鲂生长、摄食以及水质氮素的影响。结果表明, 大菱鲂特定生长率、增重率、摄食量随流速增大先快速上升后缓升趋稳, 饲料系数则相反; 养殖水体中总氨氮、非离子氨及亚硝酸氮浓度随流速的增大先快速下降后缓降趋稳; 根据流速对特定生长率、水体总氨氮二者的影响, 得出养殖的生态适宜流速为 625 L/h, 再结合流速对水循环动力的影响, 得出养殖的生态经济适宜流速为 480 L/h。

Davidson 等^[18]研究了在 RAS 中低水流交换下虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)的生长状态。研究发现, 在低水流交换的条件下, 虹鳟出现游速加快, 侧游行为加重的情况; 在近似于零水流交换的情

况下, 出现畸形、死亡和不正常的游泳行为等状况; 对水质参数进行检测, 发现氨氮的积累跟这些状况发生有关。

Oca 等^[19]研究了循环水养殖池的流动形态, 他认为其与流速、水深、进水量和出水量都密切相关。圆形养殖池以其能提供稳定的水流、均质的溶氧分配和新陈代谢以及自净特点而被推崇。Oca 等对不同设计参数对水流速度分配的影响作了研究, 并通过测定靠近池壁和围绕中心轴的单位质量的角度动量建立了一个模型来预测其速度分配情况, 模型的值取决于进水处和出水处的水流速度、进水口流速、池径、水深、养殖池粗糙度、进水管状况和池底平滑程度等特定参数。

3 主要养殖对象

国内工厂化循环水养殖模式是在普通流水养殖模式的基础上升级改造发展起来的, 其发展和应用主要集中在北方鲆鲽类产业。目前, 辽宁省、河北省、天津市和山东省现有的循环水养殖面积约 3.2×10⁵ m², 循环水养殖面积只占工厂化养殖总面积的 6.72%。循环水养殖总产量中, 半滑舌鳎约占 43%, 大菱鲂占 24%, 其他经济鱼类占 33%。2007—2011 年的 5 年间, 中国鲆鲽类循环水养殖面积由 2×10⁴ m² 上升至 3.2×10⁵ m², 增长 16 倍, 发展潜力巨大^[20]。工厂化循环水养殖模式的实质是根据养殖生物的生理生态条件, 为其模拟提供一种最适宜的外界水质环境。因此, 这种养殖模式不仅可以应用于多种鱼类, 也可构筑条件用于虾蟹、海参、贝类等品种的养殖。国内外水产工作者围绕这一主题进行了很多探索和实践。

宋协法等^[21]设计了生物承载量 45 t、养殖密度 45 kg/m³ 的 RAS 来养殖半滑舌鳎(*Areliscus semilaevis*), 并对养殖水质和养殖效果进行了分析评价。研究表明, RAS 水处理效果达到了半滑舌鳎的水质要求, 实验期间总饵料系数达到 1.1, 与传统养殖模式相比, 提高了养殖产量。曹广斌等^[22]进行了虹鳟养殖实验, 突破了养殖水体氨氮低温处理技术, 形成了低温微生物驯化处理和臭氧催化氧化处理新方法, 建立了节约水资源、减

少污染的封闭 RAS 集成技术。实验表明, 在空气增氧的条件下, 将冷水性鱼类进行循环水养殖, 养殖密度可达到 38 kg/m^3 , 各项水质指标符合鱼类正常生长要求。李林春等^[23]构建了节能型 RAS, 在 8 个月的老虎斑(*Epinephelus fuscoguttatus*)养殖实验期间, 利用生物膜降解和植物吸收的综合生态净化作用, 实现水循环利用率 88%, 石斑鱼养成密度 19.74 kg/m^3 , 日增重与增重倍数分别为 1.14 g/尾 和 11.55 倍。结果显示, 系统具有节省投资、运行节能等特点。

齐巨龙等^[24]利用 RAS 对欧洲鳗鲡(*Anguilla anguilla*)进行高密度养殖实验。结果表明, 均重 55.6 g 的欧洲鳗鲡养殖 159 d, 达到 143.2 g , 成活率达 99.7%, 养殖密度从 13.0 kg/m^3 提高到 32.8 kg/m^3 。循环水养殖模式养殖鳗鲡, 创造了最适的水环境理化条件, 在快速生产绿色安全水产品的同时能够有效节水和减少污水排放。徐继松等^[25]采用具有气泡反冲洗型珠子过滤器的 RAS 对日本鳗鲡(*Anguilla japonica*)和美洲鳗鲡(*Anguilla rostrata*)进行了苗种培育研究, 2 种鳗苗的放养密度约为传统模式的 8~10 倍, 实验期间换水量为 20%~45%。结果显示, 日本鳗苗和美洲鳗苗成活率均超过 96.74%, 高于传统模式。该研究表明, RAS 适用于日本鳗苗和美洲鳗苗的培育, 并具有节能、减排和无药残等优点。

王资勋等^[26]构建高产量 RAS 用于黄尾鲮(*Mugil soiuy*)的养殖, 年总产量可达 2 011 t。该养殖模式不仅具有产量大、经济效益高的优点, 同时能高效节约利用水土资源。所兴等^[27]采用 RAS 进行鲟养殖实验, 结果表明 RAS 适合鲟常年快速生长, 5 cm 的鱼种长到 2.4 kg 的商品鱼仅需 24 个月, 养殖周期大大缩短, 且提高了水资源和能源的利用率。郭浩等^[28]采用 RAS 进行虹鳟、鲟和鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)阶梯养殖实验, 在不更换新水的情况下, 系统连续运行 30 d, 除总磷指标外, 养殖水体 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均符合地表水 Ⅲ类用水标准。Abbink^[29]研究了水温和 pH 对黄尾鲮(*Seriola lalandi*)幼鱼生长、生理的影响。研究表明, 在循环水养殖模式下, 最佳养殖水温

为 26.5°C , 此时有最大的食物摄取量和最佳的食物转化率(FCR); 当养殖水温由 21°C 增加到 26.5°C , 鱼的 30 d 增重率将增加 54%; pH6.58 将导致死亡, 并且会因为不能适应导致生理紊乱, 最终使生长停滞。

Batzina 等^[30]研究了 RAS 不同底质颜色对黄鳍鲷(*Sparus aurata*)生长和行为的影响, 发现蓝色、红棕色底质可促进黄鳍鲷的生长并且减少了其侵略性, 绿色与对照组之间没有明显差别; 蓝色和红棕色底质可以作为环境改良措施提高黄鳍鲷的生长性能和动物福利。

张宇雷等^[31]构建 RAS 用于吉富罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)养殖实验, 研究结果显示, 罗非鱼生长情况良好, 最高养殖密度可达到 104.2 kg/m^3 。饵料系数 1.4, 成活率 92.2%; 氨氮浓度维持在平均 1.09 mg/L , 溶解氧在 $4\sim 9 \text{ mg/L}$ 范围内, pH $6.45\sim 7.41$ 。系统养殖运行成本约 25 元/kg, 节水效果显著, 日耗水仅为 $0.3\sim 0.5 \text{ m}^3$ 。

Drengstig 等^[32]采用陆基循环水养殖模式生产欧洲龙虾(*Homarus gammarus* L.)。这套 RAS 设计了可移动的生物滤床用来净化水质, 精确投喂的自动解决方案, 适用的龙虾暂养装置, 大规模期幼苗培育的机器人支持系统及日常监测的图像处理程序。

魏小岚等^[33-34]以凡纳滨对虾为实验对象, 综合比较分析, 认为 RAS 能提高水体溶解氧浓度, 维持水体 pH 稳定平衡, 降低水体可溶性固体(SS)和叶绿素 a(Chl-a)浓度; $40 \text{ m}^3/\text{h}$ 的循环量对提高对虾养殖效果最好。杨菁等^[35]构建了一种高效经济保持藻类生长的 RAS, 用于开展凡纳滨对虾养殖实验。获得良好的水生态环境调控效果, 系统产量 4.6 kg/m^2 , 饲料系数 1.14, 每生产 1 kg 虾耗水 $1\ 000 \text{ L}$ 、耗电 $2.16 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。管崇武等^[36]利用移动床生物滤器水处理技术和藻类净化技术, 构建工厂化 RAS, 并进行凡纳滨对虾养殖实验。结果表明, 养殖期间水质指标符合养殖要求; 对虾生长情况良好, 经过 92d 的养殖, 养殖密度达到 4.96 kg/m^3 ; 成活率 80.9%, 饲料系数 1.34, 取得了健康、经济、高产、高效的养殖结果。

Wakabayashi 等^[37]研究了循环水养殖模式下水母作为九齿团虾(*Ibacus novemdentatus*)叶状幼体食物来源的生长发育情况。研究表明,水母作为唯一食物来源可以满足九齿团虾正常的生长发育需求;九齿团虾适用于在循环水养殖条件下大规模培育。

吴垠等^[38]设计了多层抽屉式 RAS 养殖皱纹盘鲍(*Haliotis discus hannai*),分析了养殖期间系统的水质指标和耗能量,及不同养殖密度下幼鲍的生长率和成活率。结果表明,该系统适宜的幼鲍养殖密度为流水式养鲍密度的 6~9 倍;实验过程中水温、溶解氧、pH 值、盐度、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 指标均达到幼鲍生长条件, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 基本稳定在 0.023~0.065 mg/L 和 0.014~0.041 mg/L 范围内;实验总耗电量 688.88 kW·h,其中海水加热占总耗电量 19.62%,约是流水式养殖加热耗能的 1/7。该研究表明,多层抽屉式循环水养鲍系统是一种安全、高效、节能减排的养殖模式。

Kuhn 等^[39]尝试将东方牡蛎(*Crassostrea virginica*)饲养于陆基零排放的 RAS,使用人工合成海水,并培养两种海洋微藻作为其食物。结果表明,牡蛎的总成活率大于 99%,并且保持稳定生长,其高度、宽度和厚度的生长速度分别为 1.3、1.1 和 0.33 mm/周。保持水质的关键环节是硝化作用以及适时补充碳酸钙以保持生物生长所需微量元素以及保持水体合适的碱度。

Garr 等^[40]利用 RAS 对濒临灭绝的佛罗里达苹果螺(*Pomacea paludosa*)的繁育进行了研究,研究主要围绕利用药物缓解密闭状态下的苹果螺的应激状态,从而使其正常交配提高雌性率。研究中共用到了 7 种化学溶剂,最终发现苯坐卡因(对氨基苯酸乙酯)混在甲醇中能起到最佳的效果;不同雌雄亲螺配比对产卵率、雌性率的影响差异显著。

Pietrak 等^[41]研究发现在蓝贻贝(*Mytilus edulis*)与鱼类共生的富营养化的 RAS 中,贝类可将爱德华氏菌等鳃弧菌在其体内浓缩 100 倍,且可通过粪便形式将其排出体外;而如果大西洋鳕(*Gadus morhua*)暴露在含爱德华氏菌的粪便中,其感染率

会增加 70%。研究表明,贻贝可以降低在富营养化养殖系统中鱼类致病的几率。Van Khoi 等^[42]研究了蓝贻贝与西方国王明虾(*Penaeus latisulcatus*)在同一 RAS 的共生情况。研究发现,蓝贻贝能够显著滤除循环系统内的总氮、总悬浮颗粒和细菌总数;可溶性无机氮、磷酸盐和总磷随着蓝贻贝放养密度增大而呈增高趋势;与蓝贻贝的共生并没有改变虾的存活和生长,但蓝贻贝的生长率明显受其放养密度影响;蓝贻贝与西方大虾在 RAS 内的最佳放养密度比例为 2:1。

Van Khoi 等^[43]构建了西方国王明虾(*Penaeus latisulcatus*)和石莼(*Ulva lactuca*)的综合性封闭 RAS,并计较了不同明虾石莼放养量比例与仅放养明虾的区别。研究表明,石莼的总氮滤除效率为 59%~81%。随着养殖密度的增大,石莼中的 C:P 比随之减小;大约 6.5%~29.7%的氮氮和 1.6%~13.5%的输入的磷被固定于石莼生长。

Dalsgaard 等^[44]总结了过去 20~30 年中北欧国家在 RAS 设计、建造和管理适应于不同养殖种类方面的实践经验,主要包括:大西洋鲑(*Salmo salar*)、虹鳟、欧洲鳗、暗斑梭鲈(*Stizostedion lucioperca*)、红点鲑(*Salvelinus alpinus*)、鲟(Order *Acipenseriformes*)、尼罗罗非鱼和欧洲龙虾(*Homarus gammarus*)。他提出,高投资作为可持续 RAS 发展的主要挑战之一要求大规模集约化生产来降低投资成本和运营成本。除了包括悬浮颗粒处理和有效率的脱氮工艺等末端处理,RAS 的大多数工艺应用已经比较成熟,已经适应于各种生物的养殖。采用复合养殖系统为目标顾客群生产更多的引进种类是成功运作小规模集约化 RAS 的可行的首要的选择。

4 养殖动物对循环水养殖模式的适应

循环水养殖模式是一种新兴的具有极大发展潜力的养殖模式,研究该模式中养殖动物的适应性特点及规律对实际生产和循环水养殖模式的推广具有莫大意义。

王峰等^[45]研究了半滑舌鳎 RAS 养殖水体中溶氧、氨氮、亚硝酸氮 24 h 随摄食和代谢的变化

规律。结果表明,半滑舌鲷摄食后的呼吸频率显著高于摄食前;投喂前、后 2.5 h 内,水中溶氧一直处于下降趋势,摄食 2.5 h 后,水中溶氧处于稳定的上升趋势;投喂后,氨氮、亚硝酸氮浓度显著增高,2.5 h 后达到峰值,随后缓慢降低,在下次投喂前 0.5 h 达到最低值。说明半滑舌鲷摄食对循环水养殖水质的影响具有规律性,对循环水养殖模式进行合理设计可以满足半滑舌鲷对水质的基本要求。王振华等^[46]开展了 RAS 吉富罗非鱼氮收支和对水质情况的初步研究。结果显示,摄食氮有 50.00% 转化为生长氮,32.61% 转化为排泄氮,17.39% 转化为粪氮;58% 的粪氮为悬浮颗粒物,42% 为可沉淀颗粒物。

李勇等^[47]研究蛋白质营养与饱食度对工厂化养殖半滑舌鲷幼鱼生长和养殖水环境的影响。结果表明,随蛋白质水平和饱食度升高,增重率显著提高;随蛋白水平升高,肝和肠道蛋白酶活力增强,随饱食度升高,肝和肠道中消化酶活力各组均降低;通过日增氮量与日总有害氮排泄量的回归分析与模拟测算,确定生态适宜性饱食度为 90%。陈义明等^[48]研究了溶解氧、氨氮和亚硝酸氮对大菱鲆幼鱼生长和代谢的影响,发现过饱和溶解氧能够大大降低氨氮对大菱鲆幼鱼的毒性作用,同时能够加快其生长,提高其摄食、代谢水平。

傅雪军等^[49]测定了半滑舌鲷 RAS 和流水养殖系统(FTS)水质指标以及鱼的生长、免疫和消化指标。结果表明,RAS 中生物滤池 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、COD 及 SS 平均去除率分别为 58.13%、19.47%、10.47%、25.36% 和 30.30%;RAS 中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度极显著低于 FTS 中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度;半滑舌鲷 RAS 增重达 2.85 g/d,饵料系数 1.08,而 FTS 增重 2.01 g/d,饵料系数 1.33;半滑舌鲷胃和肠中的淀粉酶活力 RAS 极显著高于 FTS,胃蛋白酶和胰蛋白酶活力显著高于 FTS。RAS 在水质处理效率和养殖效果方面显示了较大的优势。

Attramadal 等^[50]比较了在 RAS 和 FTS 两种条件下大西洋鳕的鱼苗生长状况,发现 RAS 相比于 FTS 可提供更多样化并且状态稳定的微生物菌落组成,且在 RAS 中各养殖池中菌落组成一致性较

高,而 FTS 中各养殖池菌群构成差异较大,这给一些致病性细菌更多的暴发机会;实践证明,尽管 RAS 中水质在理化指标上要低于 FTS,可是在 RAS 中的鱼苗生长状态要优于 FTS 中的鱼苗。

李勇等^[51]研究了流速、温度对封闭循环水养殖系统中大菱鲆摄食效应的影响与投喂模型。研究表明,大菱鲆日均摄食量、特定生长率随流速增大先快速上升后缓升趋稳,饲料系数则相反;养殖水体中总氨氮、非离子氨及亚硝酸氮浓度随流速的增大先快速下降后缓降趋稳;养殖的生态适宜流速为 625 L/h;生态经济流速为 480 L/h;总氨氮排泄随温度增加先升高后降低,在 24 h 呈昼夜周期性变化,摄食后 6~9 h 出现氨氮排泄高峰。摄入 1 kg 风干饲料平均排出 2.72% 总氨氮,摄入 1 kg 饲料氮平均排出 33.7% 总氨氮;封闭循环水高密度养殖大菱鲆成鱼适宜温度范围为 16~18 °C,日均摄食率为 0.52%~0.55%,特定生长率为 0.63~0.71%/d。Davidson 等^[52]研究了不同蛋白来源的饲料投喂虹鳟对水质、残饵和养殖效果的影响,发现不同蛋白来源对虹鳟的生长、FCR 和成活率影响不显著。总磷和养殖对象颜色在投喂鱼粉蛋白组时达到最佳;水体总氨氮(TAN)、总可溶性固体物(TSS)和生物需氧量(BOD)在投喂谷物蛋白组时达到最佳;研究证明谷物蛋白在循环水系统低交换量时具有一定优势。

王以尧等^[53]研究在相同投喂量下,不同投喂频率(3、6、8 次/d)对 RAS 水体氨氮水平及生物滤器氨氮去除效率的影响。结果表明,随着投喂频率增高,养殖水体氨氮变异系数由 14.9% 逐渐减弱到 0,但总体平均浓度基本保持稳定;投喂后,生物滤器氨氮去除效率由 67.02% 升高到 85.71%;采用 8 次/d 投喂频率时,养殖水体氨氮浓度更稳定,生物滤器氨氮去除效率更高。

Blancheton 等^[54]认为现在 RAS 发展方向是更大型化的养殖规模以提供不同种类鱼苗和更大单位的成鱼养殖空间。这既是经济问题也是生产工艺问题,需要形成一种工业化的养殖模式来确保产品质量和风险最低。在这个环节中,了解 RAS 中的关键生物机制尤其是决定微生物菌群发

展和它们与鱼之间的相互关系是非常重要的。其对 RAS 中各环节细菌群落组成及它们与鱼之间的相互影响做了总结,并把它作为系统管理的主要工具之一。

挪威 Nofima Centre for Recirculation in Aquaculture(NCRA)专门研究大西洋鲑在 RAS 中对环境和营养的需求。Terjesen 在这个实验中心研究了循环水养殖模式下水质环境对大西洋鲑的影响机制。水质净化效果随不断增加的日投喂量而被进行评估,研究发现,氨氮和 CO_2 指标不但达到预定值,且超出设定的理论投喂容量的 134%,这个实验对估算 RAS 的饵料承载容量和精准渔业生产有着重要的意义^[55]。NCRA 重点研究鱼类在 RAS 中对环境和营养的需求,如 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 CO_2 对大西洋鲑的安全浓度,它们与营养元素之间以及其他水质指标及微生物菌群之间的关系等。

5 最适养殖密度

每个 RAS 因为设计工艺差异、养殖对象及规格大小不同,其水处理能力会有很大差异,所以其最大养殖容纳量也会存在差别。如何既能物尽其用,获得养殖系统最大的生产效益,又能保证生产运营安全,这需要设计合理的放养策略和最佳的放养密度。

朱建新等^[56]研究了大菱鲂幼鱼在 RAS 中养殖密度对其摄食、生长、饲料利用率及免疫机能的影响。结果表明,大菱鲂生长速度与养殖密度呈负相关;大菱鲂的饵料系数与养殖密度呈正相关;养殖密度对大菱鲂的免疫指标碱性磷酸酶(AKP)、酸性磷酸酶(ACP)及肝系数的影响不大。宋红桥^[57]研究了高体革鲂(*Scortum barcoo*)在 RAS 中的生长情况。养殖密度为 40 kg/m^3 ,成活率为 97.7%,特定生长率为 0.93%/d。生物过滤器经过 28 d 挂膜成功后,系统水处理效果保持稳定,水质指标维持在较低水平, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ < 2.0 mg/L, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ < 0.2 mg/L。罗国芝等^[58]在 RAS 中研究了养殖密度对高体革鲂苗种的影响。综合检测指标的结果,体质量 50~100 g 的高体革鲂(*Scortum barcoo* McCulloch et Waite)幼鱼适宜的养殖密度

是 260 尾/m^3 ^[58]。Pedersen 等^[59]研究了循环水养殖模式下投喂量、放养密度对虹鳟的养殖效果,研究发现,鱼成活率 100%,FCR 在 0.91~0.95 之间,投喂量对 FCR 影响不显著,FCR 与水中氨氮、亚硝酸氮和有机物含量呈正相关。

Duy 等^[60]研究了循环水养殖模式下水交换量、盐度、放养密度和饵料组成对斑节对虾(*Penaeus monodon*)幼虾成活率和生长率的影响。研究表明,水量日交换 5%~10%,投喂高蛋白颗粒饲料(蛋白质 55%)和鲜料(75%鱿鱼,15%牡蛎和 10%灰蛤)取得了最好的养殖效果;盐度 20~23,养殖密度 10 尾/m^2 最有利于虾的生长;盐度 20~23 条件下的成活率显著优于盐度 32~33。

鱼类在 RAS 中的生长是动态的,所以其养殖密度总是在不断地变化着。而且,不同的 RAS 其水处理工艺存在各个环节的差别,所以不但不同种类、不同规格的养殖对象的最佳养殖密度不一样,同一种养殖对象在不同 RAS 中最佳养殖密度也会存在一定差异,即使在同一 RAS 中,也会因为投喂策略、管理方式的不同而有差别。所以,实际生产中,最佳养殖密度是一个相对的、不断变化的值,这方面的应用应结合实际,与 RAS 的承载力、水处理工艺、设备老化程度、管理投喂策略结合起来。

6 对循环水养殖模式的几点思考

6.1 水循环系统的稳定性是工厂化循环水养殖模式的重中之重

工厂化循环水养殖模式的最大特点就是可以实现无季节差别的全天候高效生产,实现这个预期效果离不开科学合理的水处理工艺设施,但同时也离不开科学有序的运营管理。水循环系统运转的稳定性跟水循环系统的总水量平衡、生物滤池的定期维护、过滤设施的定期清洗、水质的有效监测、合理的饲料投喂策略、适宜的养殖密度、合理的养殖管理措施等都是分不开的。所以,水循环系统的稳定性是一个综合考量的指标,也是实现工厂化循环水养殖模式稳定生产运营的关键环节。

在中国已有的工厂化循环水养殖容量中, 规模较大的养殖企业均或多或少暴发了 RAS 崩溃的现象, 究其原因, 还是水循环系统的稳定性不够所致。具体表现为养殖对象大规模感染致病菌, 出现活力低下、体表溃烂、肝脾肿大、爆发性死亡的现象, 往往短时间内给经营者带来重大损失。因为循环水养殖模式是高效养殖, 养殖密度是一般流水养殖模式的数倍, 在水循环系统稳定的状况下, 其高效高产优势可以正常发挥, 一旦出现水循环系统自净能力受阻, 水质恶化, 所带来的风险和损失也是成倍增长的。所以, 工厂化循环水养殖模式不同于传统养殖模式, 要求管理运营人员素质较高, 要对整个 RAS 各个环节非常熟悉和了解, 能够及时地掌控和反馈系统运行情况。同时要求养殖企业建立完善的水质监测监管体系和规范科学的养殖管理体系。

6.2 工厂化循环水养殖模式的应用范围应当大力拓展

动物的生长受内部遗传因素和外部环境因素双重调节^[61-62]。工厂化循环水养殖模式即是集外部环境调控之大成, 为养殖对象提供最优良的生长环境, 从而克服季节因素、地域因素实现全年不间断生长。其不但保证了养殖对象食品卫生安全, 而且可以提高单位养殖水体生产能力 3~5 倍。符合当前国家循环经济、节能减排、转变经济增长方式的战略需求, 代表了当前水产养殖先进生产力的发展方向。

目前, 国内循环水养殖模式已在高档鱼类如半滑舌鳎、大菱鲆、石斑鱼、红鳍东方鲀(*Takifugu rubripes*)、虹鳟等品种上有很好的应用, 国外主要应用于大西洋鲑、虹鳟、欧洲鳗、暗斑梭鲈、红点鲑、鲟、尼罗罗非鱼^[44], 均创造了巨大的商业利润。除了鱼类之外, 已经越来越多地将此种养殖模式应用于虾类、刺参、贝类等品种。欧洲龙虾、凡纳滨对虾、九齿团虾、梭子蟹、皱纹盘鲍、东方牡蛎、佛罗里达苹果螺等均在循环水养殖模式中有了很好的尝试与应用^[32-40], 只是养殖规模和养殖效率还有待提高。不仅如此, 有些水产工作者在循环水养殖模式下还做了鱼贝共生、虾贝

共生、虾藻共生等的有益尝试^[41-43], 对水质控制、氮磷转化利用、提高综合效益等也做了相应的探讨, 为工厂化循环水养殖模式的发展提出了新的方向。

工厂化循环水养殖模式不仅可以在养殖种类上拓展, 在养殖空间上也可以大力开拓。绍兴一家企业已实现用全人工配置海水养殖大菱鲆, 开创了循环水养殖应用前景。在国家开创现代农业的大力支持下, 随着人民生活水平的提高, 工厂化循环水养殖模式的发展空间将越来越大, 假以时日, 在中国西部边陲新疆、西藏实现海鲜的就地供给是完全可以实现的。

6.3 工厂化循环水养殖模式的发展应注重节能减排、环境友好

普通流水养殖模式的养殖用水是从 20~60 m 的地下通过电能昼夜不停地抽提上来, 简单地用于养鱼后就排向大海, 不但造成水资源的浪费, 而且带走了热量, 是对地热资源的不合理开发。同时, 每月消耗的电能是一个庞大数字, 以一个普通的 20 个 6 m×6 m×1 m 池子的标准养鱼棚为例, 每月消耗的电量为 1~2 万 kW·h, 电费达万元/月以上。而且不经任何处理的养殖废水直接排入海中, 造成近海的富营养化和病菌的滋生, 对环境造成很大破坏。相比普通流水养殖模式, 工厂化循环水养殖模式可以实现水体循环利用, 日均水利用率在 95%以上, 大量节省了水资源和地热能源。可是因为现在国内相关水处理设备性能还不完善, 使用寿命短、处理效率不高、节能效果也不好, 同时水处理工艺和养殖运营的管理水平也有待提高, 造成国内循环水养殖企业生产运营成本高昂, 产品价格缺乏竞争力, 导致部分循环水车间处于基本维持和补贴运营状态, 甚至生产陷入停顿。因此, 采用多种措施和手段, 降低能耗, 降低生产运营成本, 是今后工厂化循环水养殖模式发展和推广的必须举措。具体的措施和方法有: 在系统工艺设计中应贯彻“一级抽提、重力流循环”思路, 最大限度地减少多级抽提带来的能耗和水头损失; 尽量使用能耗低的水处理设备, 部分使用低扬程水泵; 尽量使用成熟绿色能源代替

电能,如太阳能、地热、光伏、风能、生物质能等;实现科学合理的工业化、标准化生产管理,挖掘工厂化循环水养殖模式生产潜能,实现全年满负荷养殖生产,降低单位产品生产成本等。

普通开放养殖模式生产过程中的养殖废水直接外排,大量无机和有机营养元素如氨氮、磷酸盐、溶解性有机碳和有机颗粒直接进入环境^[63-64],从而造成水域环境的恶化,进而引发水质污染、病害滋生,水产品的卫生和安全等一系列问题成为限制水产养殖业可持续发展的首要问题。工厂化循环水养殖模式可以实现全封闭式生产,排放可控,而且污染终产物还可以作为堆肥直接肥田^[65]。但从世界范围内看,工厂化循环水养殖模式发展的历史较短,水处理工艺及养殖管理还不完善,有时是受成本控制限制,所以还不能做到完全的“零排放”,所以在实际生产运营中,每日还是要排出一定量的污染物,如何科学地处理这些“污染物”是摆在水产工作者面前的一个重要问题。而且,涉及生物过滤环节,会有 N_2 、 N_2O 和 CO_2 的排出, N_2O 和 CO_2 是典型的温室气体,且 N_2O 对臭氧层有明显的破坏作用^[66],如何减少和限制这种对环境的不良影响,也是工厂化循环水养殖模式生产推广需要克服的一个问题。

尽管如此,工厂化循环水养殖模式仍然是未来最具发展潜力的陆基循环水养殖模式,是中国开创现代水产业的重要组成部分。随着核心装备的国产化、水处理工艺的成熟化、养殖管理的科学化,集“装备工程化、技术现代化、生产工厂化、管理工业化”为一体的现代工业化养殖产业新模式将会被建立^[4],水产业的转型升级,海淡水养鱼大产业的架构^[3],才能够实现,而中国水产业将进入工业化养殖新时代,届时,中国不仅是世界水产大国,也同样会是世界水产强国。

参考文献:

- [1] 中国淡水养鱼经验总结委员会. 中国淡水鱼类养殖学[M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 1973.
- [2] 陆忠康. 简明中国水产养殖百科全书[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 2.
- [3] 雷霖霖. 中国海水养殖大产业架构的战略思考[J]. 中国水产科学, 2010, 17(3): 600-609.
- [4] 雷霖霖. 迎接鲆鲽类工业化养殖新时代——鲆鲽类走工业化养殖发展之路的战略思考[J]. 科学养鱼, 2010 (10): 1-4.
- [5] 农业部渔业局. 中国渔业统计年鉴 2012 [R]. 北京: 中国农业出版社, 2012: 5.
- [6] Timmons M B, Ebeling J M. The role for recirculating aquaculture systems[J]. AES News, 2007, 10(1): 2-9.
- [7] 程波, 刘鹰, 杨红生, 等. Cu 污染条件下封闭循环水养虾系统的效能[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 248-254.
- [8] Martins C I M, Eding E H, Johan A J. The effect of recirculating aquaculture systems on the concentrations of heavy metals in culture water and tissues of Nile tilapia *Oreochromis niloticus*[J]. Food Chem, 2011, 126: 1001-1005.
- [9] 李湘萍, 刘鹰, 程江峰. 低剂量福尔马林对循环水养殖欧鲈及生物滤器的影响[J]. 中国农业科技导报, 2011(6): 140-146.
- [10] Pedersen L-F, Pedersen P B. Hydrogen peroxide application to a commercial recirculating aquaculture system[J]. Aquacult Eng, 2012, 46: 40-46.
- [11] Pedersen L-F, Meinelt T, David L. Straus peracetic acid degradation in freshwater aquaculture systems and possible practical implications [J]. Aquacult Eng, 2013, 53: 65-71.
- [12] van Bussel C G J, Schroeder J P, Wuertz S, et al. The chronic effect of nitrate on production performance and health status of juvenile turbot (*Psetta maxima*) [J]. Aquaculture, 2012, 326-329: 163-167.
- [13] Rodrigues R V, Schwarz M H, Delbos B C, et al. Acute exposure of juvenile cobia *Rachycentron canadum* to nitrate induces gill, esophageal and brain damage[J]. Aquaculture, 2011, 322-323: 223-226.
- [14] 付松哲. 鱼类封闭循环水养殖系统弧菌生长模型研究[R]. 第三届水产工业化养殖技术暨封闭循环水养殖技术国际研讨会. 2012, 10: 7.
- [15] 田喆, 张延青, 刘鹰, 等. 不同水循环率对大菱鲆生长和水质的影响研究[J]. 渔业现代化, 2010(6): 1-5.
- [16] 李琦, 李纯厚, 颜晓勇, 等. 对虾高位池循环水养殖系统对水质调控效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2011(12): 2579-2585.
- [17] 孙国祥, 李勇. 流速对封闭循环水养殖大菱鲆生长、摄食及水质氮素的影响[J]. 海洋科学, 2011, 35(5): 53-60.
- [18] Davidson J, Good C, Welsh C, et al. Abnormal swimming behavior and increased deformities in rainbow trout *On-*

- corhynchus mykiss* cultured in low exchange water recirculating aquaculture systems[J]. *Aquacult Eng*, 2011, 45(3): 109–117.
- [19] Oca J, Masalo I. Flow pattern in aquaculture circular tanks: Influence of flow rate, water depth, and water inlet & outlet features [J]. *Aquacult Eng*, 2013, 52: 65–72.
- [20] 雷霖霖. 国家鲢鳙类主产区养殖模式调研工作报告[R]. 国家鲢鳙鱼类产业技术体系 2011 总结报告, 2011: 12.
- [21] 宋协法, 李强, 彭磊, 等. 半滑舌鳎封闭式循环水养殖系统的设计与应用[J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2012, 10: 26–32.
- [22] 曹广斌, 蒋树义, 韩世成, 等. 冷水性鱼类循环水养殖系统设计及养殖虹鳟试验研究[J]. *水产学杂志*, 2010, 23(3): 44–48.
- [23] 李林春, 陈方平, 阎希柱, 等. 节能型循环水养殖系统的构建与生产成本分析[J]. *渔业现代化*, 2012(5): 11–15.
- [24] 齐巨龙, 赖铭勇, 王茂元, 等. 鳊循环水高密度养殖试验研究[J]. *上海海洋大学学报*, 2012(2): 212–217.
- [25] 徐继松, 关瑞章, 陈学豪, 等. 循环水养殖系统培育日本鳊和美洲鳊苗种的研究[J]. *渔业现代化*, 2012(3): 23–27, 45.
- [26] 王资勋, 黄帅. 黄尾鲮鱼循环水计划高产养殖模式[J]. *河北渔业*, 2011, 211(7): 40–41.
- [27] 所兴, 罗治远, 张飞. 鲟鱼工厂化循环水养殖技术[C]//中国水利技术信息中心. 2012 第四届全国现代生态渔业与水环境综合治理技术汇总. 中国水利技术信息中心, 2012: 3.
- [28] 郭浩, 马伟芳, 韩东梅, 等. 循环水养殖系统水质变化特征的中试研究[J]. *环境工程学报*, 2012(6): 1952–1956.
- [29] Abbink W, Garcia A B, Roques J A C, et al. The effect of temperature and pH on the growth and physiological response of juvenile yellowtail kingfish *Seriola lalandi* in recirculating aquaculture systems[J]. *Aquaculture*, 2012, 330–333: 130–135.
- [30] Batzina A, Karakatsouli N. The presence of substrate as a means of environmental enrichment in intensively reared gilthead seabream *Sparus aurata*: Growth and behavioral effects[J]. *Aquaculture*, 2012, 370–371: 54–60.
- [31] 张宇雷, 吴凡, 王振华, 等. 超高密度全封闭循环水养殖系统设计及运行效果分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 15: 151–156.
- [32] Drengstig A, Bergheim A. Commercial land-based farming of European lobster (*Homarus gammarus* L.) in recirculating aquaculture system (RAS) using a single cage approach[J]. *Aquacult Eng*, 2013, 53: 14–18.
- [33] 魏小岚, 李纯厚, 颀晓勇, 等. 对虾高位池循环水养殖水体悬浮物等环境因子的变化特征[J]. *安全与环境学报*, 2012(1): 11–15.
- [34] 李纯厚, 魏小岚, 王学锋, 等. 池塘循环水对虾养殖模式的技术特点及发展趋势[J]. *广东农业科学*, 2011, 24: 105–108.
- [35] 杨菁, 倪琦, 张宇雷, 等. 对虾工程化循环水养殖系统构建技术[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(8): 136–140.
- [36] 管崇武, 刘晃. 凡纳滨对虾工厂化循环水养殖试验研究[J]. *渔业现代化*, 2010, 38(4): 21–26.
- [37] Wakabayashi K, Sato R, Ishii H, et al. Culture of phyllosomas of *Ibacus novemdentatus* (Decapoda: Scyllaridae) in a closed recirculating system using jellyfish as food [J]. *Aquaculture*, 2012, 330–333: 162–166.
- [38] 吴垠, 孙建明, 柴雨, 等. 多层抽屉式循环水幼鲍养殖系统及养殖效果[J]. *农业工程学报*, 2012, 13: 185–190.
- [39] Kuhn D D, Angier M W, Barbour S L, et al. Culture feasibility of eastern oysters (*Crassostrea virginica*) in zero-water exchange recirculating aquaculture systems using synthetically derived seawater and live feeds[J]. *Aquacult Eng*, 2013, 54: 45–48.
- [40] Garr A L, Posch H, McQuillan M, et al. Development of a captive breeding program for the Florida apple snail, *Pomacea paludosa*: Relaxation and sex ratio recommendations[J]. *Aquaculture*, 2012, 370–371: 166–171.
- [41] Pietrak M R, Molloy S D, Bouchard D A, et al. Potential role of *Mytilus edulis* in modulating the infectious pressure of *Vibrio anguillarum* 02 β on an integrated multi-trophic aquaculture farm [J]. *Aquaculture*, 2012, 326–329: 36–39.
- [42] Van Khoi L, Fotedar R. Integration of blue mussel (*Mytilus edulis* Linnaeus, 1758) with western king prawn (*Penaeus latisulcatus* Kishinouye, 1896) in a closed recirculating aquaculture system under laboratory conditions[J]. *Aquaculture*, 2012, 354–355: 84–90.
- [43] Van Khoi L, Fotedar R. Integration of western king prawn (*Penaeus latisulcatus* Kishinouye, 1896) and green seaweed (*Ulva lactuca* Linnaeus, 1753) in a closed recirculating aquaculture system[J]. *Aquaculture*, 2011, 322–323: 201–209.
- [44] Dalsgaard J, Lund I, Thorarinsdottir R, et al. Farming different species in RAS in Nordic countries: Current status and future perspectives [J]. *Aquacult Eng*, 2013, 53: 2–13.
- [45] 王峰, 雷霖霖, 高淳仁, 等. 循环水养殖半滑舌鳎成鱼摄食活动对主要水质因子的影响[J]. *渔业现代化*, 2012(4): 8–11, 21.

- [46] 王振华, 刘晃. 循环水养殖罗非鱼氮收支及对水质影响的初步研究[J]. 渔业现代化, 2011(5): 12-16.
- [47] 李勇, 王美琴, 高婷婷, 等. 封闭循环水养殖半滑舌鳎蛋白质的生态营养需要量[J]. 水产学报, 2010, 34(11): 1719-1727.
- [48] 陈义明, 宋协法. 溶解氧、氨氮和亚硝酸氮对大菱鲂 (*Scophthalmus maximus*) 幼鱼生长代谢的影响[R]. 第三届水产工业化养殖技术暨封闭循环水养殖技术国际研讨会. 2012, 10: 9.
- [49] 傅雪军, 马绍赛, 朱建新, 等. 封闭式循环水养殖系统水处理效率及半滑舌鳎养殖效果分析[J]. 环境工程学报, 2011, 5(4): 745-751.
- [50] Attramadal K J K, Salvesen I, Xue R, et al. Recirculation as a possible microbial control strategy in the production of marine larvae [J]. Aquacult Eng, 2012, 46(1): 27-39.
- [51] 李勇. 流速、温度对封闭循环水养殖大菱鲂的摄食效应和投喂模型研究[R]. 第三届水产工业化养殖技术暨封闭循环水养殖技术国际研讨会. 2012, 10: 7.
- [52] Davidson J, Good C, Barrows F T, et al. Comparing the effects of feeding a grain- or a fish meal-based diet on water quality, waste production, and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* performance within low exchange water recirculating aquaculture systems[J]. Aquacult Eng, 2013, 52(1): 45-57.
- [53] 王以尧, 罗国强, 张哲勇, 等. 投喂频率对循环水养殖系统氨氮浓度的影响[J]. 渔业现代化, 2011(1): 7-11.
- [54] Blancheton J P, Attramadal K J K, Michaud L, et al. Insight into bacterial population in aquaculture systems and its implication review article[J]. Aquacult Eng, 2013, 53: 30-39.
- [55] Terjesen B F, Summerfelt S T, Nerland S, et al. Design, dimensioning, and performance of a research facility for studies on the requirements of fish in RAS environments [J]. Aquacult Eng, 2013, 54: 49-63.
- [56] 朱建新, 赵霞, 曲克明, 等. 封闭循环水系统中养殖密度对大菱鲂生长和免疫的影响[J]. 渔业现代化, 2011, 38(4): 1-5.
- [57] 宋红桥. 高体革鲂工厂化循环水养殖试验研究[J]. 渔业现代化, 2010, 37(5): 4-8.
- [58] 罗国芝, 刘刚, 谭洪新. 半封闭循环水养殖系统中高体革鲂养殖密度研究[J]. 上海海洋大学学报, 2012(2): 218-224.
- [59] Pedersen L F, Suhr K I, Dalsgaard J, et al. Effects of feed loading on nitrogen balances and fish performance in replicated recirculating aquaculture systems [J]. Aquaculture, 2012, 338-341: 237-245.
- [60] Duy H N, Coman G J, Wille M, et al. Patrick sorgeloos effect of water exchange, salinity regime, stocking density and diets on growth and survival of domesticated black tiger shrimp *Penaeus monodon* (Fabricius, 1798) reared in sand-based recirculating systems[J]. Aquaculture, 2012, 338-341: 253-259.
- [61] Ihssen P E, Booke H E, Casselman J M, et al. Stock identification: materials and methods[J]. Can J Fish Aquat, 1981, 38: 1838-1855.
- [62] 楼允东. 鱼类育种学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [63] Piedrahita R H. Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation[J]. Aquaculture, 2003(226): 35-44.
- [64] Sugiura S H, Marchant D D, Wiggins T, et al. Effluent profile of commercially used low-phosphorus fish feeds[J]. Environ Poll, 2006(140): 95-101.
- [65] van Rijn J. Waste treatment in recirculating aquaculture systems[J]. Aquacult Eng, 2013, 53: 49-56.
- [66] Hu Z, Lee J W, Chandran K, et al. Nitrogen transformations in intensive aquaculture system and its implication to climate change through nitrous oxide emission[J]. Biores Technol, 2013(130): 314-320.

Review of industrial recirculating aquaculture research at home and abroad

WANG Feng^{1,2,3}, LEI Jilin², GAO Chunren², HUANG Bin², ZHAI Jieming⁴

1. College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

2. Marine Fish Breeding and Biotechnology Laboratory, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, Qingdao 266071, China;

3. College of Marine Science and Engineering, Qingdao Agriculture University, Qingdao 266109, China;

4. Laizhou Mingbo Aquatic Co.Ltd, Laizhou 261418, China

Abstract: Recirculating aquaculture systems, i.e. re-using water after purification recycling, are efficient, economic, and environmentally friendly. In addition, they comply with the strategic needs for circular economy, energy conservation and emission reduction, and changing mode of economic growth proposed by the state. This article based on recirculating aquaculture application and practice combined with aquaculture research and industrial development, focused on breeding management and application, water circulation system carrying capacity, water cycle ratio, main breeding animals, breeding effect, perfect breeding density, and other aspects of operations management. The findings are summarized and discussed to provide a corresponding reference for the future establishment of standard breeding management for recirculating aquaculture systems in China.

Key words: recirculating aquaculture; aquaculture mode; aquaculture management

Corresponding author: LEI Jilin. E-mail: leijl@ysfri.ac.cn