

叶麦,童家歆.海水对虾养殖尾水处理技术与发展趋势[J].华中农业大学学报,2021,40(5):241-252.

DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.05.029

海水对虾养殖尾水处理技术与发展趋势

叶麦,童家歆

中海大学环境学院/浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室,南京 210098

摘要 随着我国海水对虾养殖规模的不断扩大,对虾养殖污染已成为我国近岸海域重要污染源之一。近年来相关文件的颁布对加快推进水产养殖业绿色发展提出了新的要求,总结我国近海对虾养殖尾水的处理现状并针对性提出适合我国对虾养殖尾水处理的集成技术具有重要环境生态意义。本文概述了我国对虾海水养殖产业的发展现状、海水养殖尾水特征以及海水养殖尾水对近岸海域造成的影响,结合案例和文献详述了对虾海水养殖尾水的植物、动物、微生物处理技术和资源化利用方法,分析了各集成技术的优缺点和应用潜力。最后基于我国海水养殖示范区尾水处理技术的应用现状,对未来对虾海水养殖尾水的排放管理和资源化利用进行了展望。

关键词 对虾养殖;生态技术;海水养殖;尾水处理;微生物;资源综合利用

中图分类号 X 55 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)05-0241-12

根据《2019年全国渔业统计年鉴》,2018年我国水产养殖总产量为4 991.1万t,海水养殖产量约为2 031.2万t,虾类约140.9万t,其中南美白对虾(*Penaeus vannamei*)占虾类养殖产量的79.3%^[1]。对比中国对虾和斑节对虾等养殖品种,南美白对虾有生长速度快、生态位较宽、饵料需求宽松、可以适应淡水和海水养殖等优势,养殖规模正逐年递增^[2-3]。

我国对虾海水养殖主要集中在东部沿海地区,广东省、广西壮族自治区、福建省、海南省、山东省等地区为主要产区^[1]。现阶段主要采用的养殖方式有海水池塘集约化养殖、沿海网箱养殖和工厂化养殖^[4]。比较成熟的产业化模式有南方的高位池精养模式和北方淡卤水精养模式。随着养殖面积的不断扩大和养殖量的提高,养殖海水污染、养殖区赤潮等现象频频发生,南美白对虾养殖业出现了苗种质量下降、养殖环境恶化、病害频发等问题^[5]。绝大多数养虾海域在开发时缺少科学规划,海产养殖业的尾水处理长期不受关注。近年来,在“五水共治”的大背景下,如何解析养殖尾水对周边水域及环境造成的影响以及开发有序高效的海产养殖废水治理技术

成为科学研究和工程实践关注的热点问题。

1 海水对虾养殖尾水特征及环境影响

1.1 海水对虾养殖尾水特征

2020年中华人民共和国生态环境部、国家统计局、中华人民共和国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。中国水产科学研究院提供的《中国渔业环境生态状况公报(2018)》显示,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。传统的水产养殖过程中产生的残饵、残骸、排泄物等使养殖区域产生大量内源污染。研究表明,在对虾类养殖过程中,投入饲料只有25%的氮和10%的磷可被虾类吸收,其余均进入养殖池塘^[6]。随着对虾养殖方式集约化和工厂化程度提升、养殖密度和投饵量大大增加,残饵量和养殖机体排泄物也相应增加^[7]。

由于长期以来海产养殖尾水处理受关注程度较低,较少有文献总结养殖尾水中各污染物的含量。Kumar等^[8]调查了印度东南沿海南美白对虾养殖

收稿日期:2021-04-19

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(B19020142)

叶麦,E-mail:yemail02@163.com

通信作者:童家歆,E-mail:frogtong01@gmail.com

池塘尾水理化特征,TP和 NO_3^- -N平均质量浓度分别为0.25和0.26 mg/L,尾水中钙、镁、 PO_4^{3-} -P、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N负荷较高,不同养殖池塘废水浓度差异显著;金若晨等^[9]分析了上海某养殖场对虾养殖水体水质,其中 COD_{Mn} 和 NO_3^- -N质量浓度分别为5.9和0.47 mg/L。Tangkitjawisut等^[10]研究表明养虾池塘 NO_2^- -N质量浓度一般维持在0.02~0.17 mg/L。可见,海水养殖对虾尾水具有盐度高、氮磷含量高、溶解性有机物含量高的特点,同时尾水中还存在抗生素、病原微生物、重金属等污染物质^[5]。

1.2 海水对虾养殖尾水造成的环境影响

水产养殖被认为是造成中国沿海地区局部水污染问题的重要因素之一,会给沿海生态系统带来富营养化、赤潮、生物多样性缺失等负面影响^[11]。崔毅等^[12]对黄渤海区历年氮磷营养水平和COD平均浓度与该海区海水养殖产量进行了相关性分析,发现水体中无机氮平均浓度与对虾养殖产量有显著正相关关系,海水养殖产量与赤潮次数呈较好正相关关系。Yang等^[13]估算发现2015年对虾养殖业(养殖面积1 639 hm^2 ,平均池塘水深1.4 m)向闽江河口附近海水中排放的TN和TP分别为30.45 t和2.40 t。假设以此数据估算全国的水产养殖业排污量(养殖面积 $2.57 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 、平均水深1.4 m^[14]),海产养殖池塘每年将向附近海域排放 $4.77 \times 10^4 \text{ t}$ 氮和 $3.75 \times 10^3 \text{ t}$ 磷,相当于中国主要入海河流营养负荷的5%,这些污染物加剧了沿海区域富营养化程度。据估算,近年来中国沿海因赤潮灾害造成的直接经济损失超过100亿元^[15]。为了有效控制养殖尾水中污染物排放对沿海生态带来的不利影响,2019年2月15日,我国农业农村部、生态环境部等发布了《关于加快推进水产养殖业绿色发展的若干意见(农渔发[2019]1号)》,提出要加强水产尾水监测,推动养殖尾水达标排放,加快推进水产养殖业绿色发展。系列政策的颁布对海产养殖尾水的处理处置提出了更高的要求,总结并研发适合我国近海海产养殖尾水的处理技术具有重要的环境生态意义。

2 海水对虾养殖尾水处理技术

2.1 海水对虾养殖尾水的物理和化学处理方法

针对海水对虾养殖尾水中的悬浮物和胶体等污染物,可采用机械过滤、絮凝膜分离和泡沫分离等物理方法予以去除。尾水中的溶解性有机质等污染物

可通过臭氧氧化法进行去除^[16]。不少专家学者针对对虾海水养殖尾水开发出了更多物理、化学处理技术,表1总结了部分海水对虾养殖尾水处理使用的物理、化学技术及案例,有一定应用潜力。由于催化剂制备困难、单一电极材料无法处理多种污染物、投资成本高等原因,催化氧化、电化学氧化法大部分仍处于实验室阶段,在大规模海水对虾养殖尾水处理过程中应用较少。实际操作过程中较少使用单一的物理或化学方法处理尾水,而常常将其与生态方法结合,以达到更好的净水效果。

2.2 海水对虾养殖尾水的生物处理方法

1)水生植物法。水生植物法主要利用部分水生植物可高效吸收有机物和营养盐、吸附悬浮物、富集重金属的特点,实现养殖尾水中污染物的有效去除。水生植物法生态兼容性较强,成本低廉,操作简单;但同时存在修复过程缓慢,对高污染负荷水体修复效果不佳等缺点^[24]。叶聪等^[25]选取水薹菜、羽衣甘蓝、生菜3种水培蔬菜浮植于规模化养虾池塘,结果发现水薹菜在3种蔬菜中对污染物去除效果最佳,对TN、TP、 COD_{Mn} 的去除率分别为72.2%、67.9%、34.6%,浮植方式对水薹菜生长情况影响较小;以绳结式将水薹菜等间距固定于尼龙绳上,以20 kg/667 m^2 的量种植于养虾池塘(覆盖塘面积10%,虾密度为5万尾/667 m^2),培养50 d后虾塘中的TN和TP的去除率分别为5.86%和3.73%,且对虾成活率和饵料系数显著优于对照塘。

生态浮床技术也已被引入海产养殖尾水的处理,其净化作用与植物种类、生物群落、浮床覆盖面积等因素有关^[26]。曾碧健等^[27]以海马齿(*Sesuvium portulacastrum*)构建生态立体修复浮床,分析了养殖池塘水质改善情况以及浮游动物群落结构变化;采用生态浮床的池塘中COD、TN以及底泥有机碳含量显著下降,水体透明度提升;实验区的浮游动物群落Shannon-Wiener多样性指数和Margalef种类丰富度指数均高于对照区,浮游动物密度显著增加。吴英杰等^[28]研究了北美海蓬子(*Salicornia bigelovii*)生态浮床对南美白对虾养殖水体的净化效果,发现当浮床面积覆盖率达到水域的50%时水体中TN、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、COD的去除效果最佳;25%和50%覆盖率的海蓬子生态浮床可以显著提高对虾产量。

水生植物法也常常与其他方法联合使用以处理

表 1 海水养殖尾水处理中使用的物理、化学技术

Table 1 Physical and chemical techniques used in mariculture wastewater treatment

类型 Type	方法 Method	优/缺点 Advantages/ Disadvantages	处理规模 Scale of treatment	处理效果 Results	参考文献 References
物理催化剂 Physical catalysts	纳米 863 生 物助长器	优点: 简化养殖工艺, 可减少抗 生素的使用 缺点: 有伽马射线超标的风险	处理每 667 m ² 虾池水面使用 2 台助长器	NH ₄ ⁺ -N、COD、NO ₃ ⁻ -N 低于对照组 215.37%、210.53%、60%, 在一定范围 内有抗菌灭藻的功效	[17-18]
	催化臭氧 氧化	优点: 反应速率快、氧化能力强、 反应过程易受控制 缺点: 催化剂难以制备、成本 较高	实验室阶段	臭氧投加量为 17.13 mg/L, 催化剂 S-Mn- CeO _x /γ-Al ₂ O ₃ 投 加 量 为 170.57 g, 氟苯尼考 (3.13 mg/L) 去 除率为 100%, 催化臭氧氧化体系对含 氟苯尼考废水中复杂的有机物去除效 果同样良好	[19]
高级氧化法 Advanced oxidation processes	电化学氧 化法	优点: 处理效率高、占地面积小、 减少污泥产生、可操作性强 缺点: 处理养殖尾水中复杂的污 染物成分所需电极材料以及反 应机制存在差异, 投资成本大	实验室阶段	加入芬顿试剂 40 mmol/L, TOC 去 除率最高 (97.3%); 阳极 pH 为 2.2 和 2.4 时, TOC 去除率最高 (77.1% 和 97.8%)	[20]
	光催化氧化	优点: 去除效率高、催化剂可循 环利用、绿色环保 缺点: 催化剂制备成本高、回收 困难, 光能利用率低	实验室阶段	CuO/ZnO 复合光催化剂投加量为 0.15 g/L, 盐酸四环素去除率可达 93.01%, 在模拟海水养殖废水中投加 0.4 g/L 纳 米 Fe ₂ O ₃ -SnO ₂ , NH ₄ ⁺ -N 去除率为 85.1%	[21-22]
化学生物方法结合 Chemical methods combined with biological methods	充电微生 物滴滤器	优点: 提高传统滴滤池的反硝化 效率, 可用于低 C/N 尾水 缺点: 反硝化效率仍不理想, 能 耗较高	实验室阶段	反应器上半部填充 PVC 颗粒、下半 部分填充石墨颗粒。NH ₄ ⁺ -N 和 NO ₃ ⁻ -N 去除率最高分别为 94 g N/(m ³ · d) 和 43 g N/(m ³ · d)	[23]

养殖尾水。秦文娟等^[29]研究表明, 大型藻类龙须菜 (*Asparagus schoberioides* Kunth) 和滤食性动物缢蛏 (*S. constricta*) 混养对集约化海水养殖对虾废水有良好的处理效果: 24 h 内混养组水体中 NH₄⁺-N、TN 和 TP 的去除率可分别达到 76.9%、71.7% 和 72.0%, 均高于单一植物或动物组。龙须菜作为生物过滤器, 对水体内的氮、磷营养盐有一定吸附作用, 同时可以调节尾水 pH 值, 为缢蛏生长创造更适宜的环境条件, 从而达到对尾水协同修复的效果。

2) 水生动物法。滤食性鱼类和贝类以水中浮游动物、藻类和有机碎屑为食, 可提高水体透明度、降低有机颗粒浓度, 是原位及异位修复养殖尾水的有效手段。黄琳等^[30]比较了 3 种滩涂滤食性贝类对南美白对虾养殖尾水的净化效果, 发现流水模式下, 高密度泥蚶和缢蛏能有效降低水体 SS, 泥蚶能有效降低 NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N, 文蛤和缢蛏能有效降低弧菌含量; 静水模式下, 3 种贝类均能有效降低水体 SS, 缢蛏和泥蚶对 NH₄⁺-N 去除作用显著; 3 种贝类混养的净化效果优于单一贝类处理。Lukwambe 等^[31]发现缢蛏的生物扰动可显著改变微生物群落

结构、系统发育群落内的拓扑特性和群落间相互作用。添加缢蛏的养殖尾水中氧化还原反应过程加快, 有效降低了循环水体的有机负荷。缢蛏中的酶 (碱性磷酸酶、脱氢酶、脲酶) 活性相比对照组显著升高, 沉积物中总有机氮和总磷浓度显著降低。在对虾封闭式内循环养殖系统中混养缢蛏被证实是一种管理成本低、净化效果好、有利于养殖增收的养殖模式, 2001 年以来, 该模式已在浙江省宁海县成功实践, 混养系统中对虾单位面积产量平均达到 12 090 kg/hm², 取得了良好的经济效益^[32]。

向养殖尾水中投加大型鱼类等水生动物可以有效控制水中藻类, 例如陈辉煌等^[33]发现混养鳊和银鲫的虾塘相比单一鱼种养殖的池塘中蓝藻生物量降低, 养殖前、中期均能使蓝藻生物量维持在相对较低的水平。多元混养方式还可降低虾塘的发病率和饲料系数, 提高养殖产量。近期研究表明向循环水养殖系统中投加水蚤可以实现尾水中藻类的有效去除, 如 Stevcic 等^[34]发现尾水中培养的水蚤在 48 h 内清除了超过 80% 的雨生红球菌 (*Haematococcus pluvialis*)、70% 的单针藻 (*Monoraphidium grif-*

fithii)以及20%的月牙藻(*Selenastrum* sp.),单针藻喂养水蚤的微藻-水蚤生物修复系统净化效率最高,喂养3 d后培养瓶中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度下降55.4%。

3)海水对虾养殖尾水的微生物修复技术。①微生态制剂和生物絮团。微生态制剂(probiotics)是对宿主有益的微生物或促进有益微生物生长的物质经特殊加工制成的制剂,其使用可以增强虾的非特异性免疫能力,提高虾对饲料的消化率,进而增强虾的抗病能力。使用微生态制剂代替抗生素可有效降低养殖尾水的药物残留,减少水体污染,是未来水产养殖业的重要选择之一。刘忆瀚等^[35]通过正交实验对比了3种微生态制剂组合对南美白对虾养殖尾水的处理效果,发现在干酪乳杆菌、侧孢芽孢杆菌、地衣芽孢杆菌投加量分别为 10^7 、 10^7 和 10^6 CFU/mL时处理效果最佳,投入养殖84 d后, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP的平均去除率分别达到24.4%、30.1%和9.8%。王枫林等^[36]证明了杀鱼假交替单胞菌2515可降低对虾养殖水体和对虾肠道中的弧菌数量,显著提高对虾成活率。李佳徽等^[37]发现凝结芽孢杆菌(*Bacillus coagulans* NJ17)可有效增加对虾体长,嗜酸乳杆菌(*Lactobacillus acidophilus* W2)可有效提高对虾抗病率并改善虾肠道微生物菌群组成及丰度。

光合细菌是一类具有原始光能合成体系的原核微生物,能够增加水体溶氧量,同化二氧化碳,利用水体中小分子有机物,对水体有一定净化作用^[38-40]。陆家昌等^[41]发现 3×10^3 CFU/mL的光合细菌投放量能有效降低南美白对虾养殖水体中有机物含量,抑制 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的产生,同时增强对虾溶菌、抗菌活力,促进对虾体质量增长。光合细菌沼泽红假单胞菌(*Rhodospseudomonas palusteris*)可以有效降低养殖尾水中COD、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 含量^[42]。陆诗敏等^[43]构建了一种硝化菌和光合细菌共生的对虾培养池,养殖持续100 d,50 m³水体成功养殖出南美白对虾220 kg,期间水体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度分别维持在1.2和0.5 mg/L以下。

生物絮团技术(bio-floc technology)借鉴了城市污水活性污泥处理方法的原理,通过添加碳源或益生菌,调节水体的C/N比值,将水体中氨氮等养殖代谢产物转化成菌体蛋白质,或通过细菌絮凝进入养殖生物食物链,以降低饲料系数并调控水质^[44]。Xu等^[45]研究了生物絮团技术对集约化南美白对虾养殖尾水的处理效果:在室内和室外2种条

件下进行南美白对虾超密集养殖,培养13周后,室内和室外对虾存活率分别为82.7%和81.3%,水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度均有下降;室外养殖的收获生物量、产量均显著高于室内养殖。雷柯柯等^[46]对比了2种碳源(甘蔗渣和稻壳粉)定向培育的悬浮生物絮团对南美白对虾工厂化养殖系统中水质的影响,发现2种碳源培育的生物絮团均能提高水体微生物的硝化速率,也有助于提升对虾的成活率和产量。鲍方剑等^[47]通过调整蔗糖添加量改变进水C/N比值,发现不添加蔗糖的对照组尾水中氮、磷、溶解氧含量高于实验组,绿藻丰度更高,更有利于形成生物絮团;而更高的C/N比可抑制藻类的过度繁殖,使微生物代谢速率加快,提高氮磷去除效率。

微生态制剂和生物絮团常用于循环水养殖系统(recirculating aquaculture system, RAS)以改良养殖系统水质。RAS的特点是系统封闭并对养殖用水进行循环,与传统养殖模式相比,在实现高密度养殖的同时高效率节水节地节能,是未来水产养殖的发展趋势^[48]。目前RAS系统在实验室水平和鱼类养殖生产中已经基本实现应用,但RAS设备投入和运行成本较高的特点限制了其在对虾工业化养殖的大规模推广^[49]。

②生物膜法。生物膜法常用于养殖尾水的异位处理,具有运行费用和能耗低、反应器容积小、对沉淀要求低等优点^[50]。章霞等^[51]对比了藤壶壳和聚乙烯2种滤料在不同碳氮比条件下的挂膜情况及其对海水养殖对虾尾水的处理效果,发现在选用藤壶壳作为滤料、C/N比值取20:1时可以取得较好的尾水处理效果和经济效益。王际英等^[52]比较了常见生物滤料和烧炼脱硫后的活化炉渣对养殖废水的处理效果,发现活化炉渣在海水养殖废水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 去除能力方面具有成本优势,适宜循环式海水养殖。

曝气生物滤池(biological aerated filters, BAF)常用于尾水的二级处理^[50]。滤料的性能是BAF工艺的关键,单一的生物滤料局限性较大,相比而言复合陶粒生物滤料原材料来源广泛、廉价易得,具有较好的经济效益和环境效益^[53]。不同曝气位置也会对BAF的去污效率产生影响,例如陈强等^[54]发现上向流生物滤池中,曝气装置位于滤池中下部对污染物的处理效果优于装置位于滤池底部的情况,连续运行30 d后,曝气装置位于中下部的曝气生物滤

池对于对虾养殖尾水中 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 DIN 的去除率分别达到 45.2%、88.9% 和 75.3%。

移动床生物膜反应器(moving-bed biofilm reactor, MBBR)结合了活性污泥法和生物接触氧化法两者的优点,生物固体量多且无需反冲洗和污泥回流,提供了运行及管理上的便利。针对 MBBR 系统中悬浮填料微生物附着慢、挂膜速度慢等问题,可采用生物强化等工程手段予以改进^[55]。Liang 等^[56]发现运用生物强化的 MBBR 反应器对养殖尾水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和磺胺甲恶唑去除效率高于非生物强化反应器,最高可达 94.70% 和 96.09%。Shitu 等^[57]评估了 MBBR 中新型海绵生物膜载体对 RAS 系统中尾水的净化效果,在最佳 HRT(6 h)和生物膜载体填充率(20%)条件下,系统的硝化效率和速率分别达到 91.6% 和 1.52 mg/(L·h),微生物群落分析表明该反应器具有良好的生物相容性与硝化性能。Tangkitjawisut 等^[10]使用了移动床生物膜序批式反应器(MBBSBR)和连续流移动床生物膜反应器接种富集亚硝化菌,发现低亚硝酸盐质量浓度($\text{NO}_2^-\text{-N}$ 0.1~0.5 mg/L)条件下可同时富集硝化螺旋菌和硝化杆菌,半饱和系数 K_s 较小(0.71~0.98 mg $\text{NO}_2^-\text{-N}$ /L),更适宜处理对虾海水养殖尾水,因此,MBBSBR 有潜力成为大范围处理海产养殖尾水的有效方法。

③膜生物反应器。膜生物反应器(membrane bioreactor, MBR)结合了生物处理技术与膜分离技术^[58],具有有机物承载率高、出水水质高、占地面积小等优点^[59]。张明星等^[60]将传统接触氧化法与 MBR 结合并构建新型 BCO-MBR 系统,用膜分离技术代替传统处理系统中的二沉池,用传统接触氧化法弥补 MBR 对溶解性有机物去除效果不佳的缺点,实现了海水养殖对虾尾水的良好处理效果:系统对 TOC 及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率在 80% 和 90% 以上,分别高出单独处理系统 5% 和 8%,且系统亚硝酸盐的积累不明显,溶解性微生物产量较低,不易产生膜污染。

近年来微藻处理和 MBR 技术耦合的方法逐渐受到关注。Ding 等^[59]针对微藻膜生物反应器结构单一、反应器内藻液流动性差的缺点,构建了带有内循环流化床(internal circulating fluidized bed)的微藻膜生物反应器(ICFB-MMBR)。运行 40 d 后,ICFB-MMBR 对海水对虾养殖废水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除效率最高可分别达到 55%、85% 和 80%,对 TN 的去除量最高达到 16.2 mg/(L·d)。

封闭式光生物反应器(photobioreactor, PBRs)是一种有效的微藻培养系统,然而为了获得高质量的微藻生物质,系统对环境和养殖条件的要求较为苛刻^[61]。微藻生长需要较高浓度的氮磷等营养盐物质,普通海水养殖尾水中营养盐浓度是微藻生物质生长的限制因子,而采用膜-光生物反应器(membrane-photobioreactor, MPBR)能有效解决这一问题。MPBR 反应器连续出水培养过程中微藻适应性良好,且生物量产生速率接近或高于高氮磷浓度废水中培养的微藻生物量。稳定运行阶段,小球藻 MPBR 反应器及衣藻 MPBR 反应器出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 可从进水中的 5.58 mg/L 分别降低至 0.29 和 0.31 mg/L,MPBR 对废水中 DIN 和 DIP 的去除率均达到 90% 以上^[62]。

4)人工湿地法。人工湿地具有成本及运行费用低廉、氮磷去除率高、易于维护等特点^[63]。陈昕等^[64]选取芦苇、香蒲、大米草 3 种耐盐碱植物对养殖尾水进行处理,3 种植物构建的人工湿地对 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及浊度均有一定的去除效果,去除率可达 70% 左右;大米草根系比表面积大、耐盐性好,是最适宜处理养殖尾水的人工湿地植物。吴俊泽等^[65]研究发现养殖尾水人工湿地表层基质与植物根部的脱氢酶与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率相关,硝酸还原酶与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除率相关,脲酶与 TN 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除率相关。高峰等^[66]以盐生红树植物秋茄构建人工湿地处理循环水养殖尾水,在盐度为 2.85% 的养虾废水中,秋茄人工湿地稳定运行阶段对 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率最高可达 73.8% 和 72.4%。使用高水力负荷建造人工湿地可以减少湿地与养殖池面积比,符合循环水养殖系统处理要求。Lin 等^[67]构建了一种高水力负荷人工湿地(1.57~1.95 m/d)处理对虾养殖尾水,SS、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 去除率最高分别可达 66%、66% 和 94%,为人工湿地在集约化循环水对虾养殖系统中的应用提供了可能。

2.3 养殖尾水资源化利用技术

在“五水共治”和污染防治进一步纵深发展的背景下,开展养殖尾水资源化综合利用是实现水产养殖绿色发展的必要途径。利用富含氮磷和溶解性有机物的养殖尾水培养微藻,并进一步获取微藻生物

质成为提升养殖尾水资源化利用水平的有效手段。Katayama 等^[68]在马来西亚海水养殖池塘中发现具有高脂质生产和高铵耐受性的新菌株,ω-3 不饱和脂肪酸含量较高的假微型海链藻(*T. weissflogii*)等耐铵菌株可以利用 NH_4^+ -N 合成生物质,同时净化养殖尾水。You 等^[69]提出了一种藻-菌耦合系统(bacterial-algal coupling system),可同时实现产酸发酵和微藻培养;使用稀释率为 10% 的发酵海水养殖尾水培养小球藻,可获得 5.6 g/L 的最大生物量,同时对 NH_4^+ -N、TP 和 COD 的去除率分别达到 54.0%、78.6% 和 82.8%。

然而目前要利用养殖尾水实现大规模栽培微藻还存在许多技术瓶颈,国内对于藻-菌共生在水产养殖系统应用中的研究也还处于初级阶段^[70]。微藻生物膜系统是一种在固体表面附着培养微藻的创新

技术,对水和能源的需求较少,可以解决传统栽培技术中如生物质产量低、生物质回收率低等问题,相比于传统的悬浮栽培系统更具优势。科研人员已在实验室内开展了技术和生态两方面的研究,微藻生物膜技术在水产养殖和废水处理等领域的应用已经得到了科学界的关注^[71]。研发以藻-菌共生体系等在内的生态技术实现对海产养殖尾水的资源化利用及生态处理符合社会发展的主流趋势,具有良好的前景。

2.4 海水对虾养殖尾水集成技术及应用潜势分析

经过对上述文献的归纳与分析,结合处理效率、经济成本、资源化利用程度、技术操作难易度等因素,提出以下适宜在我国沿海区域进行海水对虾养殖尾水处理的原位处理技术、异位处理技术和资源化利用技术,如表 2 所示。

表 2 优选的对虾养殖尾水生物处理技术

Table 2 Preferred biological treatment technologies for shrimp culture wastewater

类型 Types	处理方式 Methods	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
原位处理技术 In-situ processing techniques	水生植物、滤食性动物混养 Mixed-breeding aquatic plants and filter feeders	管理成本低,可收获经济动物和植物,降低尾水处理成本 Low management costs, economic animals and plants can be harvested, wastewater treatment costs reduction	需处理沉淀底泥中的营养物质 Need to treat the nutrients in the sediment
	定向培育生物絮团 Directed breeding of bio-floc	营养盐去除效率高,集约化养殖中换水率低、废水排放少,适用于循环水养殖系统 High nutrient removal efficiency, low water exchange rate and low wastewater discharge in intensive aquaculture, suitable for RAS	需要投加碳源,技术没有大面积应用,对于不同养虾规模、养殖环境下的絮团培育条件尚不明确 Need to cast carbon source, not applied on a large scale, floc cultivation conditions being not clear for different shrimp farming scale and culture environment
	生物强化的移动床生物膜反应器 MBBR	对虾塘中的抗生素、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 去除效率高 High efficiency for antibiotics, NO_3^- -N, NH_4^+ -N removal	需提取特定微生物,对抗生素的去除具有特异性,管理成本高 Need to extract specific microorganisms, specific for antibiotic removal, high management cost
异位处理技术 Ex-situ processing techniques	微藻膜生物反应器 ICFB-MMBR	除磷效率高,出水水质高,可收获微藻生物质,膜污染周期长 High P removal efficiency, high effluent water quality, harvestable microalgae biomass, long membrane fouling cycle	建设、管理成本相对较高 Relatively high construction and management costs
	高水力负荷人工湿地 Constructed wetland under high hydraulic load rates	相比一般人工湿地占地面积小,适用于循环水养殖系统,成本较低 Smaller land area than general constructed wetlands, suitable for RAS, low cost	不适用于土池养殖 Not suitable for soil pond culture
资源化利用技术 Resourcable utilization	微藻生物膜培养技术 Microalgae biofilm culture	可收获微藻生物质,对 SS、TP、COD 去除效率高,适用于小规模海水养殖尾水处理 Harvestable microalgae biomass, high efficiency for SS, TP, COD removal, suitable for small-scale mariculture wastewater treatment	实际应用较少,海水养殖尾水盐度过高可能会影响菌-藻耦合系统的生长 Little practical application, high salinity of mariculture tailwater may affect the growth of the coupled bacteria-algae system

需要指出的是,在大规模养殖过程中,单一方法对养殖尾水的净化效果有限,通常需要建立一套综合的处理方法,针对对虾海水养殖过程中 SS、无机

氮和 PO_4^{3-} -P 等主要污染物,采用沉淀、曝气、微生物制剂、生物湿地等耦合的处理工艺,有针对性地对污染物进行去除。随着养殖规模的扩大,传统养殖

方式造成的水资源耗竭和环境污染等问题,已成为限制我国水产养殖业可持续发展的主要因素。与传统养殖模式相比,在工厂化养殖中应用RAS系统可实现高密度养殖,同时高效节水、节地、节能,是一种资源节约型、环境友好型的生产方式,将成为今后水产养殖的发展趋势。在工厂化RAS系统中,可以有效整合各类处理技术的优势,形成更高效的综合处理技术。例如可以通过气泡浮选技术提高增氧效率、加快悬浮颗粒物的分离;采用生物滤池以及高效硝化反硝化细菌组合工艺能够在过滤SS的同时更有效地去除 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N,改善循环水品质。

3 海水对虾养殖尾水综合治理和排放管理展望

根据生态环境部颁布的《2019年中国海洋生态环境状况公报》,我国海域夏季呈富营养化状态的海域面积共42 710 km²,近岸海域局部污染仍比较严重,水产增养殖区等重要渔业区域水质仍待提高。对海水养殖尾水进行有效处理处置能有效降低养殖尾水的污染负荷,削减污染排放量,实现对养殖尾水排放的有效管控。展望我国海水养殖业的发展方向,很多渔业发达国家的政策和经验值得参考。例如日本在海水养殖产量上保持循序渐进的态势,自20世纪70年代开始严格按照养殖空间和水域环境控制海水养殖产量,管理上政府与行业协会共同治理;美国政府在20世纪80年代成立了由科学家、渔民、政府官员及其他海洋渔业从业人员参加的渔业协会,共同参与渔业管理;挪威在水产养殖、品质控制方面建立了完善的法律体系,制定了养殖许可制度,并针对执照设定养殖产量上限,分配饲料投喂额度以控制产量^[72-73]。我国可根据本国国情,完善法律条文以适应海水养殖产业复杂多变的新情况,建立渔业协会与政府的合作关系,引导海洋环境非政府组织(NGOs)相互协作,共同发展。

在多年的海水养殖尾水治理过程中,我国广西、江苏、山东等地已总结出多套适合我国国情的海水养殖尾水治理方案,体现治理实效的先进案例也可供其他地区借鉴推广。广西是我国对虾海水养殖的主要地区^[1],以防城港市为例,当前最普遍使用的养殖方式是海水池塘高密度养殖。集中连片海水池塘高密度养殖区的尾水综合治理模式通常为:生态渠

道+水生动植物混养+曝气增氧+生物膜+定期施用微生态制剂,另配设尾水水质监测监控系统使尾水外排达标^[74]。江苏南通如东县长沙镇采用生物处理与生态沟塘结合的尾水处理模式,充分利用水生植物、微生物、微生态制剂的净化优势对养殖尾水进行原位修复;大豫镇采用四级逐级过滤的尾水处理模式,结合物理方法与生物修复,适合大规模养殖企业,处理效率高,占地较少^[75]。山东东营现代农业示范区的牧渔归陆上海洋牧场项目实现了养殖尾水的回用,并投放益生菌及进行生物抑菌处理减少虾病害与抗生素污染^[76]。综上所述,我国可通过典型案例示范引领,推广海水养殖尾水治理的先进技术和生态养殖理念,走生态循环经济发展的道路,因地制宜地采用原位处理技术、异位处理技术、资源化利用技术等尾水处理集成技术,利用低营养级、非投饵型海产的碳汇效应,降低碳排放,实现海水养殖绿色发展。

参考文献 References

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局. 2019年全国渔业统计年鉴[M]. 北京:中国农业出版社, 2019. Fishery and Fishery Administration of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs. 2019 China fishery statistical yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019(in Chinese).
- [2] 潘英,王如才,罗永巨,等. 海水和淡水养殖南美白对虾肌肉营养成分的分析比较[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2001, 31(6): 828-834. PAN Y, WANG R C, LUO Y J, et al. Analysis of the nutritive composition in muscle of marine cultured and fresh-water cultured *Penaeus vannamei* [J]. Periodical of Ocean University of China (natural science edition), 2001, 31(6): 828-834 (in Chinese with English abstract).
- [3] 唐书悻. 南美白对虾养殖过程中池塘生态环境调控要点[J]. 海洋与渔业, 2016(12): 58-60. TANG S Y. Key points of pond ecological control during the culture of South American white shrimp [J]. Marine and fisheries, 2016 (12): 58-60 (in Chinese).
- [4] 朱文博,季本安,张守峰,等. 日照市南美白对虾养殖产业发展现状及对策[J]. 水产养殖, 2021, 42(1): 79-80. ZHU W B, JI B A, ZHANG S F, et al. Current situation and countermeasures for the development of South American white shrimp aquaculture industry in Rizhao City [J]. Journal of aquaculture, 2021, 42(1): 79-80 (in Chinese).
- [5] 张井增,马建军,孙志新,等. 南美白对虾产业发展及瓶颈综述[J]. 河北渔业, 2018(9): 48-51. ZHANG J Z, MA J J, SUN Z X, et al. A review of the development and bottlenecks of South American white shrimp industry [J]. Hebei fisheries, 2018

- (9):48-51(in Chinese).
- [6] 王成成,焦聪,沈珍瑶,等. 中国水产养殖尾水排放的影响与防治建议[J]. 人民珠江,2020,41(1):89-98. WANG C C, JIAO C, SHEN Z Y, et al. Effect of wastewater discharge of aquaculture and its prevention & treatment suggestion in China[J]. Pearl River, 2020, 41(1): 89-98(in Chinese with English abstract).
- [7] 李树国. 内陆水产养殖的水域污染及其防治对策[J]. 水产科学,2005(3):34-35. LI S G. Pollution of aquaculture in inland waters and its control[J]. Fisheries science, 2005(3): 34-35(in Chinese with English abstract).
- [8] KUMAR S, SANTHANAM P, KRISHNAVENI N, et al. Base-line assessment of water quality and ecological indicators in *Penaeus vannamei* farm wastewater along the Southeast Coast of India[J/OL]. Marine pollution bulletin, 2020, 160: 111579 [2021-04-19]. <https://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111579>.
- [9] 金若晨,江敏,孙世玉,等. 凡纳滨对虾养殖环境及肠道微生物群落特征分析[J]. 水产学报,2020,44(12):2037-2054. JIN R C, JIANG M, SUN S Y, et al. Microbial community in *Litopenaeus vannamei* intestine and its aquaculture environment[J]. Journal of fisheries of China, 2020, 44(12): 2037-2054(in Chinese with English abstract).
- [10] TANGKITJAWISUT W, LIMPIYAKORN T, POWTONG-SOOK S, et al. Differences in nitrite-oxidizing communities and kinetics in a brackish environment after enrichment at low and high nitrite concentrations[J]. Journal of environmental sciences, 2016, 42: 41-49.
- [11] PHAM T A, KROEZE C, BUSH S R, et al. Water pollution by intensive brackish shrimp farming in south-east Vietnam: causes and options for control[J]. Agricultural water management, 2010, 97(6): 872-882.
- [12] 崔毅,陈碧鹃,陈聚法. 黄渤海海水养殖自身污染的评估[J]. 应用生态学报,2005,16(1):180-185. CUI Y, CHEN B J, CHEN J F. Evaluation on self-pollution of marine culture in the Yellow Sea and Bohai Sea[J]. Chinese journal of applied ecology, 2005, 16(1): 180-185(in Chinese with English abstract).
- [13] YANG P, LAI D Y F, JIN B, et al. Dynamics of dissolved nutrients in the aquaculture shrimp ponds of the Min River estuary, China: concentrations, fluxes and environmental loads[J]. Science of the total environment, 2017, 603/604: 256-267.
- [14] CHEN Y, DONG S L, WANG F, et al. Carbon dioxide and methane fluxes from feeding and no-feeding mariculture ponds[J]. Environmental pollution, 2016, 212: 489-497.
- [15] 杨宇峰,王庆,聂湘平,等. 海水养殖发展与渔业环境管理研究进展[J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版),2012,33(5): 531-541. YANG Y F, WANG Q, NIE X P, et al. Mariculture development and environmental management of fisheries[J]. Journal of Jinan University(natural science & medicine edition), 2012, 33(5): 531-541(in Chinese with English abstract).
- [16] 宋红桥,顾川川,张宇雷. 水产养殖系统的尾水处理方法[J]. 安徽农学通报,2019,25(22):85-87. SONG H Q, GU C C, ZHANG Y L. Tail water treatment of aquaculture system[J]. Anhui agricultural science bulletin, 2019, 25(22): 85-87(in Chinese with English abstract).
- [17] 丁永良,中国式“3+2”对虾安全养殖纳米集成技术设施与工艺流程(上)[J]. 现代渔业信息,2010,25(10):5-9,16. DING Y L. Equipment of nano-integrated technology and technological process for Chinese mode “3+2” safe shrimp farming[J]. Modern fisheries information, 2010, 25(10): 5-9, 16(in Chinese).
- [18] 温俊强,蔡德文,丁永良,等. 强的纳米(Nanometer)863生物助长器在海水虾养殖中的试验总结报告[J]. 现代渔业信息,2003,18(10):12-15. WEN J Q, CAI D W, DING Y L, et al. Summary report on experiment of strong nanometer 863 biological assistant growth unit in sea shrimp farming[J]. Modern fisheries information, 2003, 18(10): 12-15(in Chinese).
- [19] 凌威. 催化臭氧氧化去除工厂化水产养殖废水中抗生素的研究[D]. 大连:大连理工大学,2019. LING W. Study on removal of antibiotics by catalytic ozonation from factory marine aquaculture wastewater[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019(in Chinese with English abstract).
- [20] VIRKUTYTE J, JEGATHEESAN V. Electro-Fenton, hydrogenotrophic and Fe^{2+} ions mediated TOC and nitrate removal from aquaculture system; different experimental strategies[J]. Bioresource technology, 2009, 100(7): 2189-2197.
- [21] ZHU W, YU X, TIAN S, et al. Photocatalytic degradation of tetracycline hydrochloride in mariculture wastewater by CuO/ZnO composite photocatalyst[J]. Environmental pollution & control, 2020, 42(3): 305-309, 316.
- [22] 金晓杰,刘继晨,张涛,等. 纳米 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ 光催化降解海水养殖废水中的氨氮[J]. 应用海洋学学报,2018,37(1):77-83. JIN X J, LIU J C, ZHANG T, et al. Photocatalytic degradation of ammonia nitrogen in mariculture wastewater by nanometer $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ [J]. Journal of applied oceanography, 2018, 37(1): 77-83(in Chinese with English abstract).
- [23] POUS N, KORTH B, OSSET-ALVAREZ M, et al. Electrifying biotrickling filters for the treatment of aquaponics wastewater[J/OL]. Bioresource technology, 2021, 319: 124221 [2021-04-19]. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124221>.
- [24] 周雨婷. 生物技术去除氨氮废水研究进展[J]. 应用化工,2019,48(11):2768-2772, 2777. ZHOU Y T. Research progress in biotechnology to remove ammonia nitrogen wastewater[J]. Applied chemical industry, 2019, 48(11): 2768-2772, 2777(in Chinese with English abstract).
- [25] 叶聪,戴习林,胡伟国. 水培蔬菜净化凡纳滨对虾养殖塘水质效果研究[J]. 广东农业科学,2014,41(21):121-127. YE C, DAI X L, HU W G. Study on purification effect of Ipomoea aquatica on water in *Litopenaeus vannamei* ponds[J]. Guangdong agri-

- cultural sciences, 2014, 41(21): 121-127 (in Chinese with English abstract).
- [26] 吕兑安, 程杰, 莫微, 等. 海水养殖污染与生态修复对策[J]. 海洋开发与管理, 2019, 36(11): 43-48. LÜ D A, CHENG J, MO W, et al. Pollution and ecological restoration of mariculture [J]. Ocean development and management, 2019, 36(11): 43-48 (in Chinese with English abstract).
- [27] 曾碧健, 岳晓彩, 黎祖福, 等. 生态浮床原位修复对海水养殖池塘浮游动物群落结构的影响[J]. 海洋与湖沼, 2016, 47(2): 354-359. ZENG B J, YUE X C, LI Z F, et al. Effect of ecological floating bed on zooplankton community structure in a mariculture pond [J]. Oceanologia et limnologia sinica, 2016, 47(2): 354-359 (in Chinese with English abstract).
- [28] 吴英杰, 马璐瑶, 陈琛, 等. 北美海蓬子生态浮床对养殖海水的净化和对虾的增产效果[J]. 环境工程学报, 2018, 12(12): 3351-3361. WU Y J, MA L Y, CHEN C, et al. Purification of aquaculture seawater and stimulation of shrimp yield by *Salicornia bigelovii* ecological floating beds [J]. Chinese journal of environmental engineering, 2018, 12(12): 3351-3361 (in Chinese with English abstract).
- [29] 秦文娟, 陆开宏, 郑忠明, 等. 龙须菜与缢蛏单养或混养对对虾集约化养殖尾水净化的效果[J]. 宁波大学学报(理工版), 2017, 30(4): 35-41. QIN W J, LU K H, ZHENG Z M, et al. Purification effect on the treatment efficiency of *Asparagus schoberioides* Kunth and *Sinonovacula constricta* Lamarck in monoculture or polyculture on the intensive marine shrimp culture tail-water [J]. Journal of Ningbo University (natural science & engineering edition) 2017, 30(4): 35-41 (in Chinese with English abstract).
- [30] 黄琳, 徐胜威, 王雪磊, 等. 3种滩涂贝类对凡纳滨对虾养殖尾水净化效果的比较研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2020, 33(6): 7-12. HUANG L, XU S W, WANG X L, et al. The purification effect of three types of tidal flats shellfish on the tail water of *Litopenaeus vannamei* culture [J]. Journal of Ningbo University (natural science & engineering edition), 2020, 33(6): 7-12 (in Chinese with English abstract).
- [31] LUKWAMBE B, YANG W, ZHENG Y, et al. Bioturbation by the razor clam (*Sinonovacula constricta*) on the microbial community and enzymatic activities in the sediment of an ecological aquaculture wastewater treatment system [J]. Science of the total environment, 2018, 643: 1098-1107.
- [32] 赵志东, 常抗美, 吴雄飞, 等. 养虾废水经贝类滤食净化后池塘主要水环境因子的变化分析[J]. 宁波大学学报(理工版), 2004, 17(1): 52-57. ZHAO Z D, CHANG K M, WU X F, et al. Analysis of main pond water factors after shrimp-culture sewage filtration by shellfish [J]. Journal of Ningbo University (natural science & engineering edition), 2004, 17(1): 52-57 (in Chinese with English abstract).
- [33] 陈辉煌, 陆开宏, 郑忠明, 等. 夏季混养鲮和银鲫对凡纳滨对虾低盐养殖池塘浮游藻类群落结构的影响[J]. 生态科学, 2014, 33(3): 459-466. CHEN H H, LU K H, ZHENG Z M, et al. Effects of polycultured *Aristichthys nobilis* and *Carassius auratus* on phytoplankton community structure in low salinity culture ponds of *Litopenaeus vannamei* in the summer [J]. Ecological science, 2014, 33(3): 459-466 (in Chinese with English abstract).
- [34] STEVCIC C, PULKKINEN K, PIRHONEN J. Efficiency of *Daphnia magna* in removal of green microalgae cultivated in Nordic recirculating aquaculture system wastewater [J/OL]. Algal research-biomass biofuels and bioproducts, 2020, 52: 102108 [2021-04-19]. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102108>.
- [35] 刘忆瀚, 蔺凌云, 尹文林, 等. 微生态制剂对凡纳滨对虾生长、酶活及养殖水质的影响[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(15): 96-101. LIU Y H, LIN L Y, YIN W L, et al. Effects of probiotics preparation on the growth, enzyme activities, aquatic water of *Litopenaeus vannamei* [J]. Journal of Anhui agricultural sciences, 2020, 48(15): 96-101 (in Chinese with English abstract).
- [36] 王枫林, 王秀华, 张宇哲, 等. 杀鱼假交替单胞菌 2515 的抗弧菌效果及在对虾养殖中的应用[J]. 中国水产科学, 2021, 28(7): 903-913. WANG F L, WANG X N, ZHANG Y Z, et al. Anti-vibrio effect of *Pseudoalteromonas piscida* 2515 and its application in shrimp culture [J]. Journal of fishery sciences of China, 2021, 28(7): 903-913 (in Chinese with English abstract).
- [37] 李佳徽, 王明阳, 田相利, 等. 三种不同乳酸菌对凡纳滨对虾生长、抗病力及肠道菌群结构的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, 51(4): 44-54. LI J H, WANG M Y, TIAN X L, et al. Effects of different lactic acid bacteria added to feed on the growth performance, disease resistance and intestinal microflora of *Litopenaeus vannamei* [J]. Periodical of Ocean University of China (natural sciences edition), 2021, 51(4): 44-54 (in Chinese with English abstract).
- [38] 张光明, 孟帆, 曹可凡, 等. 光合细菌污水资源化研究进展[J]. 工业水处理, 2020, 40(3): 1-6. ZHANG G M, MENG F, CAO K F, et al. Research progress in resource recovery of wastewater by photosynthetic bacteria (PSB) [J]. Industrial water treatment, 2020, 40(3): 1-6 (in Chinese with English abstract).
- [39] 刘庆辉, 余祥勇, 张鹤千, 等. 脱氮除磷益生菌对养殖尾水处理的研究进展[J]. 海洋渔业, 2020, 42(4): 502-512. LIU Q H, YU X Y, ZHANG H Q, et al. Review on the treatment of aquaculture wastewater by probiotics in removing nitrogen and phosphorus [J]. Marine fisheries, 2020, 42(4): 502-512 (in Chinese with English abstract).
- [40] 黄雪娇, 杨冲, 罗雅雪, 等. 光合细菌在水污染治理中的研究进展[J]. 中国生物工程杂志, 2014, 34(11): 119-124. HUANG X J, YANG C, LUO Y X, et al. Research progress of photosynthetic bacteria in water pollution governance [J]. China biotechnology, 2014, 34(11): 119-124 (in Chinese with English ab-

- stract).
- [41] 陆家昌,黄翔鹤,李活,等.光合细菌对养殖水质及凡纳滨对虾抗病力的影响[J].广东海洋大学学报,2009,29(6):87-91.LU J C,HUANG X H,LI H,et al.Effect of photosynthetic bacteria on water quality and anti-disease ability of *Litopenaeus vannamei* [J].Journal of Guangdong Ocean University,2009,29(6):87-91(in Chinese with English abstract).
- [42] 刘芳,王敏,杨慧,等.净化养殖水体紫色非硫光合细菌的筛选与鉴定[J].中国生物工程杂志,2008,28(8):91-95.LIU F,WANG M,YANG H,et al.Screening and identification of purple non-sulfur photosynthetic bacteria purifying aquaculture water[J].China biotechnology,2008,28(8):91-95(in Chinese with English abstract).
- [43] 陆诗敏,刘翀,刘兴国,等.硝化菌和光合细菌共生的对虾养殖尾水处理系统:CN110818067A[P].2020-02-21.LU S M,LIU C,LIU X G,et al.Nitrifying bacteria and photosynthetic bacteria symbiotic prawn culture tail water treatment system: CN110818067A[P].2020-02-21(in Chinese).
- [44] 罗亮,张家松,李卓佳.生物絮团技术特点及其在对虾养殖中的应用[J].水生态学杂志,2011,32(5):129-133.LUO L,ZHANG J S,LI Z J.Characteristics of bio-flocs technology and its further application in shrimp culture[J].Journal of hydroecology,2011,32(5):129-133(in Chinese).
- [45] XU W J,XU Y,SU H C,et al.Production performance, inorganic nitrogen control and bacterial community characteristics in a controlled biofloc-based system for indoor and outdoor super-intensive culture of *Litopenaeus vannamei* [J/OL].Aquaculture,2021,531:735749[2021-04-19].<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735749>.
- [46] 雷柯柯,单洪伟,左孝文,等.甘蔗渣和稻壳粉对凡纳滨对虾工厂化养殖系统悬浮生物絮团培育效果的影响[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2020,50(S1):30-40.LEI K K,SHAN H W,ZUO X W,et al.Studies on effects of bagasse and rice hull powder on suspended biological flocs development in *Litopenaeus vannamei* industrial culture system [J].Periodical of Ocean University of China(natural sciences edition),2020,50(S1):30-40(in Chinese with English abstract).
- [47] 鲍方剑,黄雷,陈伟,等.蔗糖输入对凡纳滨对虾养殖系统真核微生物群落的影响[J].水生生物学报,2021,45(1):172-181.BAO F J,HUANG L,CHEN W,et al.The effects of sucrose on microeukaryotic community in the shrimp aquaculture system[J].Acta hydrobiologica sinica,2021,45(1):172-181(in Chinese with English abstract).
- [48] 周子明,李华,刘青松,等.工厂化循环水养殖系统中生物填料的研究现状[J].水处理技术,2015,41(12):33-37.ZHOU Z M,LI H,LIU Q S,et al.Current situation of the research on biological media in recirculating aquaculture system[J].Technology of water treatment,2015,41(12):33-37(in Chinese with English abstract).
- [49] 朱林,车轩,刘兴国,等.简易式工厂化循环水对虾养殖系统构建及试验[J].农业工程学报,2020,36(15):210-216.ZHU L,CHE X,LIU X G,et al.Construction and experiment of simple industrial recirculating water shrimp culture system[J].Transactions of CSAE,2020,36(15):210-216(in Chinese with English abstract).
- [50] 美国水环境联合会.生物膜反应器设计与运行手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2013.American Water Environment Federation.Biofilm reactors[M].Beijing:China Architecture & Building Press,2013(in Chinese).
- [51] 章霞,柳敏海,徐志进,等.藤壶壳应用于对虾养殖尾水处理的初步研究[J].渔业现代化,2017,44(3):52-58.ZHANG X,LIU M H,XU Z J,et al.Preliminary study on application of balanite shells to treatment of shrimp aquaculture water[J].Fishery modernization,2017,44(3):52-58(in Chinese with English abstract).
- [52] 王际英,乔洪金,李宝山,等.活化炉渣作为生物滤料在循环式海水工厂化养殖中的应用[J].渔业现代化,2014,41(3):1-4,10.WANG J Y,QIAO H J,LI B S,et al.The application of modified cinder as biological substrate in marine recirculating aquaculture systems[J].Fishery modernization,2014,41(3):1-4,10(in Chinese with English abstract).
- [53] 胡涛,朱斌,马喜军,等.曝气生物滤池中滤料的应用研究进展[J].化工环保,2008,28(6):509-513.HU T,ZHU B,MA X J,et al.Progresses in the application of biological aerated filtering materials[J].Environmental protection of chemical industry,2008,28(6):509-513(in Chinese with English abstract).
- [54] 陈强,黎中宝,张艳艳,等.不同曝气位置曝气生物滤池(BAF)处理对虾养殖污水的试验研究[J].农业环境科学学报,2012,31(5):1028-1033.CHEN Q,LI Z B,ZHANG Y Y,et al.Biological aerated filters of different aeration locations for wastewater treatment during *Litopenaeus vannamei* culture [J].Journal of agro-environment science,2012,31(5):1028-1033(in Chinese with English abstract).
- [55] 仇天雷,王旭明,高敏,等.生物强化移动床生物膜反应器处理水产养殖循环水初步研究[J].淡水渔业,2016,46(4):65-70.QIU T L,WANG X M,GAO M,et al.Application of bioaugmentation with nitrifying bacteria in the rapid start-up of moving bed biofilm reactor in recirculating aquaculture system[J].Freshwater fisheries,2016,46(4):65-70(in Chinese with English abstract).
- [56] LIANG D H,HU Y Y,LIANG D M,et al.Bioaugmentation of moving bed biofilm reactor (MBBR) with *Achromobacter* JL9 for enhanced sulfamethoxazole (SMX) degradation in aquaculture wastewater[J/OL].Ecotoxicology and environmental safety,2021,207:111258[2021-04-19].<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111258>.
- [57] SHITU A,ZHU S M,QI W H,et al.Performance of novel sponge biocarrier in MBBR treating recirculating aquaculture

- systems wastewater: microbial community and kinetic study [J/OL]. *Journal of environmental management*, 2020, 275: 111264 [2021-04-19]. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111264>.
- [58] 高庭耀, 顾国维, 周琪. 水污染控制工程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015. GAO T Y, GU G W, ZHOU Q. Water pollution control engineering [M]. Beijing: Higher Education Press, 2015 (in Chinese).
- [59] DING Y, GUO Z, MEI J, et al. Investigation into the novel microalgae membrane bioreactor with internal circulating fluidized bed for marine aquaculture wastewater treatment[J/OL]. *Membranes*, 2020, 10(11): 353 [2021-04-19]. <https://doi.org/10.3390/membranes10110353>.
- [60] 张明星, 徐仲, 宋伟龙, 等. BCO-MBR 系统处理对虾养殖废水及膜污染研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2017, 33(2): 153-158, 162. ZHANG M X, XU Z, SONG W L, et al. Research on BCO-MBR system used for remove TOC and ammonia nitrogen in shrimp mariculture wastewater treatment[J]. *Journal of Harbin University of Commerce (natural sciences edition)*, 2017, 33(2): 153-158, 162 (in Chinese with English abstract).
- [61] NIE X, MUBASHAR M, ZHANG S, et al. Current progress, challenges and perspectives in microalgae-based nutrient removal for aquaculture waste: a comprehensive review[J/OL]. *Journal of cleaner production*, 2020, 277: 124209 [2021-04-19]. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124209>.
- [62] 崔伟, 高峰, 朱凤, 等. 利用膜-光生物反应器(MPBR)连续培养微藻去除海水养殖废水中营养盐的研究[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2019, 38(1): 68-75. CUI W, GAO F, ZHU F, et al. Continuous microalgae cultivation in aquaculture wastewater by membrane photobioreactor (MPBR) for nutrient removal[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (natural science edition)*, 2019, 38(1): 68-75 (in Chinese with English abstract).
- [63] 唐小双. 水力负荷、运行时间对人工湿地处理海水养殖尾水效果的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020. TANG X S. The effect of hydraulic loading and operation time on the removal effect in the constructed wetlands for mariculture tail water treatment[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [64] 陈昕, 罗安程, 葛川, 等. 人工湿地技术在南美白对虾海水养殖废水处理中的应用[C]//中国环境科学学会. 2013 中国环境科学学会学术年会论文集. 昆明: 中国环境科学学会, 2013: 571-576. CHEN X, LUO A C, GE C, et al. Application of artificial wetland technology in the treatment of mariculture wastewater of South American white shrimp [C] // Chinese Society for Environmental Sciences. Proceedings of the 2013 annual meeting of the Chinese Society of Environmental Sciences. Kunming: Chinese Society for Environmental Sciences, 2013: 571-576 (in Chinese).
- [65] 吴俊泽, 王艳艳, 李悦悦, 等. 海水人工湿地系统脱氮效果与基质酶活性的相关性[J]. 海洋科学, 2019, 43(5): 36-44. WU J Z, WANG Y Y, LI Y Y, et al. Enzyme activity in constructed marine wetlands[J]. *Marine sciences*, 2019, 43(5): 36-44 (in Chinese with English abstract).
- [66] 高峰, 杨朝晖, 李晨, 等. 秋茄人工湿地净化循环海水养殖废水效果[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 192-198. GAO F, YANG Z H, LI C, et al. Effect of saline aquaculture wastewater treatment by constructed mangrove wetland [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(17): 192-198 (in Chinese with English abstract).
- [67] LIN Y F, JING S R, LEE D Y, et al. Performance of a constructed wetland treating intensive shrimp aquaculture wastewater under high hydraulic loading rate[J]. *Environmental pollution*, 2005, 134(3): 411-421.
- [68] KATAYAMA T, NAGAO N, KASAN N A, et al. Bioprospecting of indigenous marine microalgae with ammonium tolerance from aquaculture ponds for microalgae cultivation with ammonium-rich wastewaters[J]. *Journal of biotechnology*, 2020, 323: 113-120.
- [69] YOU X T, ZHANG Z S, GUO L, et al. Integrating acidogenic fermentation and microalgae cultivation of bacterial-algal coupling system for mariculture wastewater treatment [J/OL]. *Bioresource technology*, 2021, 320: 124335 [2021-04-19]. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124335>.
- [70] 马瑞阳, 葛成军, 王珺, 等. 藻-菌单一及共生系统对海水养殖尾水的净化作用[J]. 中国水产科学, 2019, 26(6): 1126-1135. MA R Y, GE C J, WANG J, et al. Purification of mariculture wastewater by utilizing single and symbiotic systems of microalgae-bacteria treatment technology[J]. *Journal of fishery sciences of China*, 2019, 26(6): 1126-1135 (in Chinese with English abstract).
- [71] MANTZOROU A, VERVERIDIS F. Microalgal biofilms: a further step over current microalgal cultivation techniques[J]. *Science of the total environment*, 2019, 651: 3187-3201.
- [72] 方平, 徐瑞永, 孙昭宁. 渔业发达国家管理模式对中国海水养殖业的启示[J]. 世界农业, 2012(5): 63-66. FANG P, XU R Y, SUN Z N. Insights from the management models of developed fishery countries on China's mariculture industry [J]. *World agriculture*, 2012(5): 63-66 (in Chinese with English abstract).
- [73] 彭需. 我国海水养殖污染问题与其治理研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014. PENG P. The study of pollution and control in saltwater aquaculture in China [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [74] 纪东平, 赵乃乾, 吴一桂, 等. 浅析防城港市海水养殖尾水处理模式及其在水产养殖业绿色发展中的作用[J]. 中国渔业质量与标准, 2020, 10(3): 69-74. JI D P, ZHAO N Q, WU Y G, et al. Preliminary analysis on the processing mode of the tail water of mariculture and its role in the green development of aquacul-

- ture in Fangchenggang City[J]. Chinese fishery quality and standards, 2020, 10(3): 69-74 (in Chinese with English abstract).
- [75] 靳明建, 王超. 如东县四种南美白对虾养殖尾水处理模式的比较[J]. 河北渔业, 2019(11): 17-19, 62. JIN M J, WANG C. Four patterns of drainage treatment in farming of the prawn *Penaeus vannamei* in Rudong County[J]. Hebei fisheries, 2019(11): 17-19, 62 (in Chinese).
- [76] 王万冠, 赵海涛, 许欣, 等. 东营地区三种南美白对虾工厂化养殖尾水处理技术介绍[J]. 河北渔业, 2021(1): 22-24. WANG W G, ZHAO H T, XU X, et al. Introduction of three tailwater treatment technologies for factory farming of South America white shrimp in Dongying area [J]. Hebei fisheries, 2021(1): 22-24 (in Chinese).

Development trend and prospect of tail water treatment technology of shrimp mariculture

YE Mai, TONG Jiaxin

College of Environment, Hohai University/Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Nanjing 210098, China

Abstract With the continuous expansion of mariculture in China, the pollution of shrimp culture has become one of the important pollution sources in the coastal waters of China. In recent years, the promulgation of relevant documents such as *Several Opinions on Accelerating the Green Development of Aquaculture Industry* have put forward new requirements for accelerating the green development of aquaculture industry. It is of great environmental and ecological significance to summarize the current status and put forward integrated technology suitable for shrimp tail water treatment in China. This paper outlines the development status of the Chinese shrimp mariculture industry, the characteristics of mariculture wastewater and the impact of mariculture wastewater on Chinese offshore waters, details the plant, animal and microbial treatment technologies and resource utilization technologies for shrimp mariculture wastewater with cases and literature, and analyzes the advantages, disadvantages and application potential of each integrated technology. Based on the application status of tail water treatment technologies in mariculture demonstration areas in China, the future discharge management and resource utilization of shrimp mariculture wastewater are prospected.

Keywords shrimp culture; ecological technology; mariculture; wastewater treatment; microorganisms; comprehensive utilization of resources

(责任编辑:边书京)