

海水高位池养殖尾水处理技术研究进展

石维维

中海（广州）工程勘察设计有限公司 广东 广州 51000

【摘要】：随着海水高位池养殖规模的扩大，尾水污染问题已成为制约产业可持续发展的关键瓶颈。本文系统梳理了物理、化学、生物及生态处理技术的核心进展，分析了新型集成技术（如 MABR 工艺、电氧化-微生物耦合技术）的应用潜力，总结了高盐度、低碳氮比等技术挑战，并探讨了未来智能化、碳减排协同的发展方向。研究表明，生物法与生态修复技术的耦合是当前主流趋势，而耐盐菌种筛选、碳源调控及模块化装备创新将成为技术突破的重点。

【关键词】：高位池养殖；海水；尾水处理

DOI:10.12417/2705-0998.26.12.021

1 引言

海水高位池养殖作为一种高效模式，在我国沿海地区被广泛采用。它利用天然高位海岸沙丘构建池塘，创造了有利的养殖环境并带来可观经济效益^[1,2]。但伴随高效率而来的是不容忽视的环境压力：大量营养盐和有机物含量高的养殖尾水持续排入近岸海域，对脆弱的滨海及浅海生态系统造成日益严重的威胁。监测数据表明，尾水中氨氮浓度可达 5-30 mg/L，总磷达 0.5-5 mg/L，均远超《海水养殖尾水排放标准》(SC/T 9101-2007) 要求。这些过量的营养物质输入，是引发近海富营养化、赤潮频发、底层缺氧及生物多样性丧失等生态问题的重要推手。

处理此类尾水存在较大技术障碍，核心在于其特殊水质：高盐度 (>20 g/L) 严重削弱常规生物处理系统中微生物（特别是淡水菌群）的活性；低碳氮比 (C/N<5) 则导致生物脱氮过程因碳源不足而效率低下。

因此，为应对海水高位池养殖尾水的高盐、低碳氮比及复杂成分，亟需超越传统技术框架，积极探索和构建一套强适应、高效率、低消耗、环境友好的绿色尾水处理技术体系。这不仅是产业可持续发展的关键需求，更是当前迫在眉睫的技术任务。

2 海水高位池养殖尾水的特点

(1) 高污染负荷：高位池养殖普遍采用高密度模式，致使尾水中污染物负荷显著升高，主要包含高浓度有机氮、胶体磷等组分。此类污染物环境风险突出，且大幅增加处理难度。

(2) 高盐度特性：尾水盐度通常维持在 25-35 g/L，严重抑制常规微生物代谢活性。

(3) 成分复杂性：尾水含多元污染物，包括有机物、氮磷营养盐、高浓度悬浮物 (SS>200 mg/L) 以及弧菌等潜在致病菌。

(4) 集中排放特征：单次换水率可达池塘容积的 30%-50%，对受纳水体或处理设施形成显著冲击负荷。

3 海水高位池养殖尾水处理技术

3.1.物理处理技术

物理法主要通过机械分离、吸附及自然沉淀等机制去除悬浮物及部分溶解性污染物，其核心技术包括：

(1) 机械分离：采用微滤机等固液分离设备截留大颗粒污染物。典型如微滤机（滤网孔径 60-80 μm ），可去除 85% 以上悬浮物。

(2) 泡沫分离：利用气泡吸附作用清除 50 μm 以下的微小颗粒及可溶性有机物，适用于细粒径悬浮物去除。

(3) 砂滤：通过滤料层截留颗粒物，常作为初级过滤单元。

(4) 重力沉降：基于固液密度差实现分离，悬浮颗粒在重力作用下沉降富集，属被动式分离技术。

3.2 化学处理技术

(1) 絮凝沉淀技术

通过投加絮凝剂（如明矾、聚合氯化铝等），在高效除磷（总磷去除率>80%）的同时可同步去除悬浮物。典型聚合氯化铝投加量为 20-50 mg/L。

技术缺陷：药剂成本较高，且残留化学污泥易引发二次污染。

(2) 臭氧氧化技术

在 2-5 mg/L 投加量下可实现>99%的弧菌灭活率，接触时间需控制在 10 分钟内以防止残余臭氧产生生物毒性。

技术局限：高能耗设备与运行成本制约规模化应用。

3.3 生物处理技术

(1) 生物膜法

基于填料介质（悬浮球、珊瑚石等）构建微生物附着载体，利用生物膜富集效应提升水体微生物浓度及代谢活性。陈小红^[3]对不同填料生物膜对海水养殖尾水氮污染物处理能力进行探究，研究表明珊瑚石、悬浮球填料能够实现脱氮菌属的高效富集，海水养殖尾水具有良好的脱氮能力，是较为理想的生物填料。

(2) 微生物强化技术

添加耐盐高效微生物菌剂，促进尾水中污染物的降解。滕峪^[4]通过在中国水产科学研究院黄海水产研究所实验室中海水螺旋藻培养体系中菌株进行筛选，通过传统的分离技术对微生物进行分离纯化获得嗜碱兼性好氧反硝化菌株（*Marinobacter* sp.B3），通过在实验条件下，72h 硝酸盐氮和总氮的去除效率分别达到 94.83%和 99.18%。

3.4 生态处理技术

(1) 人工湿地

通过垂直潜流湿地中好氧-缺氧环境的交替，总氮去除效率达到 75%-97%。人工湿地具有耗能低、投资小和耐冲击负荷强等优点，在净化海水养殖尾水方面有较好的应用前景，其中填料、耐盐植物、水力运行参数等是净化的关键所在。此外，Chen^[5]等通过增强湿地表层的 DO 含量，控制进、出水流量使表层基质不充满水，从而形成了部分饱和垂直潜流人工湿地，取得了良好的脱氮效果，对总无机氮(TIN)的去除率最高可以达到 97.3%。

(2) 多营养层级养殖

通过构建“藻类-贝类-水生植物”多元生物群落，实现营养盐级联利用：

藻类吸收溶解态氮磷

贝类滤食有机颗粒物

植物根系吸附残留污染物

形成闭合物质循环，显著降低尾水污染负荷。

王海航^[6]在“藻-贝-植”联合处理海水养殖尾水研究中发现尾水中化学需氧量、总氮、总磷平均浓度从 7.49mg/L、5.95mg/L、1.19mg/L 下降到 2.95mg/L、2.23mg/L 和 0.32mg/L，去除率分别为 60.61%、62.48%和 72.83%。

4 新型集成技术与应用案例

4.1 MABR 强化三池两坝技术

MABR 强化型三池两坝技术模式是基于三池两坝的工程设计，即采用生态沟渠（或暗管）—沉淀池—过滤坝—曝气池—过滤坝—生态池的工艺流程，并在曝气池安装膜曝气生物膜反应器（MABR）。

新型复合 MABR 曝气生物膜复氧技术是一种创新水处理工艺，通过微米级复合材料实现空气高效切割与生物降解技术的协同作用。其核心机制在于：空气经曝气生物膜形成微气泡，为附着于膜外表面的微生物菌群持续供氧；微生物膜在富氧环境下近距离吸附分解水中的氨氮及有机物，从而实现水质净化。该技术兼具高效增氧与深度净化双重功能，可显著增强水体生态系统自修复能力，推动生态修复进程。

经王宇^[7]在基地试验论证：新模式同传统三池两坝养殖模式一样可以达到 SC/T 9101-2007 排放标准，并且相比传统模式在净化效果上有进一步提升，TP、TN、NH₄⁺-N、CODMn 的净化提升率分别为 85.35%、13.09%、25.67%、14.44%。

4.2 电氧化-微生物耦合技术

大连海洋大学团队开发的生物电氧化法^[8]。电氧化-微生物耦合技术利用曝气生物滤器与电化学阳极氧化组合，解决了海水养殖尾水处理中会存在启动周期长、易受环境影响等问题。微生物与电氧化法相结合除了通过间接氧化的方式去除污染物，还可以通过低电流改变微生物群落结构和功能，在一定程度上强化脱氮性能，实现稳定高效地脱氮。电化学刺激对细胞的生物膜的结构、细胞形态、细胞行为、新陈代谢和生命过程均有影响，随着细胞质膜通透性的提高，营养物质的过膜转移被促进，细菌代谢分泌出细胞内容物和细胞外糖蛋白，以此影响 ATP 的合成和生产。海水是天然的高含盐水体，电导率较高，高电导率也决定了电氧化处理海水养殖水先天优势，电化学与微生物相结合脱氮可以有效避免生物法亚硝氮积累问题，又弥补电化学法对水体 pH 的影响问题，其中氨氮去除率>88%，能耗 0.04kWh/m³，无 pH 波动（pH 7.0-7.5）

5 技术挑战与优化方向

5.1 高盐度抑制微生物活性

高盐度对生物脱氮过程有显著抑制作用，当盐度>20 g/L 时，微生物细胞内外的渗透压梯度导致细胞脱水或破裂，降低硝化和反硝化菌的活性，从而导致氨氮和总氮的去除效率降低，因此筛选获取可耐受高盐环境胁迫的反硝化微生物可解决该问题。

在含盐沉积物或水体中筛选分离得到耐盐菌种，如翁南海等^[9]在青海察尔汗盐湖沉积土壤样品分离得到的耐盐反硝化细菌，该菌株能利用硝态氮进行反硝化作用，在盐度为 4%的反

硝化培养基中, 24h 内对硝态氮去除率达到 54.6%, 48h 内去除率达到 91.3%。

5.2 低碳氮比限制反硝化效率

当前污水脱氮处理工艺往往以生物法为核心, 其原理是含氮污染物在各类微生物的氨化作用、硝化作用以及反硝化作用下转化为氮气排出, 从而实现废水中含氮污染物的降解。其中反硝化过程需要有机碳源作为电子供体, 将硝酸盐或亚硝酸盐还原为氮气。低碳氮比意味着污水中可利用的有机碳源相对较少, 无法满足反硝化菌进行充分反硝化反应的需求, 同时碳氮比过低会限制微生物的生长和代谢活性, 反硝化菌在碳源不足时, 其生长繁殖速度减慢, 数量减少, 进而导致反硝化反应的速率降低。

任星豪^[10]通过向异养反硝化体系中引入低浓度硫化物诱导硫自养-异养协调反硝化体系成功启动, 在 (C/N=3) 中实现了硫自养反硝化和异养反硝化协同脱氮, 总氮的去除效率达到 99.64%。

6 未来发展趋势

6.1 技术集成

未来将更加注重生物、物理和化学处理技术的有机结合, 形成一体化的处理技术装备。例如, 将机械过滤、生物净化和化学氧化等技术集成, 发挥各自优势, 提高尾水处理效率。

6.2 碳减排协同

将尾水处理与资源回收相结合, 实现水资源的循环回用。例如, 通过深度处理后的尾水可用于养殖水体的再利用, 减少对新鲜水资源的依赖。同时, 处理过程中产生的微生物、藻类等可作为饵料、生物燃料或肥料, 实现资源的高效利用。

推广多营养层级综合养殖模式, 通过不同生物之间的协同

作用, 实现污染物的自然净化。例如, 在养殖区域中增加滤食性贝类、藻类等生物, 它们可以吸收尾水中的营养物质, 减少污染物排放, 同时提高养殖系统的生态稳定性和经济效益。

6.3 智能化与精准控制

智能化监测与控制: 利用物联网、大数据和自动化控制技术, 对海水养殖尾水处理过程进行实时监测和精准控制。通过传感器网络实时监测尾水的水质参数, 如氨氮、亚硝酸盐、溶解氧等, 并根据监测数据自动调整处理工艺, 确保处理效果的稳定性和可靠性。

优化养殖工艺: 结合多学科前沿技术, 如水文学、生态环境学等, 优化海水养殖工艺, 简化处理流程, 减少能源消耗和物耗。例如, 通过精准投喂饲料、优化养殖密度等措施, 从源头减少污染物的产生, 降低尾水处理的难度和成本。

6.4 政策推动与标准完善

政策支持与监管加强: 随着国家对海洋环境保护的重视, 相关政策将更加严格, 推动海水养殖尾水处理技术的发展和运用。例如, 各地将出台更严格的尾水排放标准, 要求养殖企业必须配备有效的尾水处理设施, 确保达标排放。

碳减排与生态补偿: 在碳减排的大背景下, 海水养殖尾水处理技术将与碳减排目标相结合。通过优化处理工艺, 减少能源消耗和温室气体排放, 同时探索建立生态补偿机制, 鼓励养殖企业采用环保型尾水处理技术。

7 结论

海水高位池尾水处理技术正从单一手段向多技术耦合转型, 其中生物-生态联合工艺展现出显著优势。未来需聚焦耐盐微生物资源开发、低碳氮比调控机制及智能化装备研发, 以实现高效、低耗的绿色治理目标, 为海水养殖业可持续发展提供科技支撑。

参考文献:

- [1] 牛金中,武沛文,宋大伟,等.湛江地区对虾养殖模式调查与分析(上)[J].科学养鱼,2017(7):1-3.
- [2] 牛金中,武沛文,宋大伟,等.湛江地区对虾养殖模式调查与分析(下)[J].科学养鱼,2017(8):1-3.
- [3] 陈小红,许贻斌,林永青,等.不同填料生物膜对海水养殖尾水的脱氮效能及微生物群落分析[J].大连海洋大学学报,2024,36(20):356-357.
- [4] 滕峪.海水兼性好氧反硝化菌 *Marinobacter* sp. B3 的分离鉴定及脱氮性能研究[D].辽宁:大连海洋大学,2024.
- [5] Chen J, Gao M, Zhao Y, et al. Nitrogen and sulfamethoxazole removal in a partially saturated vertical flow constructed wetland treating synthetic mariculture wastewater[J]. Bioresource Technology, 2022, 358: 127401.
- [6] 王海航,王杨才,黄呈伟等.“藻—贝—植”联合处理对虾大棚海水养殖尾水研究[J].中国水产,2024(6):82-84.
- [7] 王宇,吴宁,罗鑫等.MABR 强化三池两坝技术在水产养殖尾水治理上的应用研究[J].中国水产,2024(12):96-98.
- [8] 高怡菲,隗陈征,李伊晗等.生物—电氧化法去除海水养殖循环水污染物[J].水产学报,2020,44(7):1137-1146.
- [9] 翁南海,张磊,卢静等.一株耐盐反硝化细菌的筛选鉴定及其在高盐废水脱氮中的应用[J].江苏海洋大学学报,2023,32(3):31-37.
- [10] 任星豪.硫自养-异养协同反硝化处理低 C/N 废水效能及微生物特征研究[D].广东:华南理工大学,2023.