

硝化 - 反硝化滤池处理海水养殖对虾废水研究

黄维¹, 安乐², 刘芳², 董伟¹, 刘湛¹

¹武汉坤健生态环境规划设计有限公司, 湖北 武汉

²亿利生态修复股份有限公司, 北京

收稿日期: 2022年9月5日; 录用日期: 2022年10月3日; 发布日期: 2022年10月10日

摘要

采用硝化 - 反硝化滤池处理对虾养殖废水现有处理工艺未达标排水, 在广东某养殖基地开展实验。针对废水高无机氮的特点, 探究硝化 - 反硝化工艺的可行性、评估耐盐硝化菌剂的作用及摸索碳源添加量。结果表明, 与未添加菌剂相比, 添加硝化菌剂可将硝化滤池启动时间由11 d缩短至5 d, 但稳定运行后对氨氮去除无影响; 反硝化滤池最佳葡萄糖添加量为40 mg/L, 出水无机氮、COD_{Mn}分别为1.10~1.92 mg/L、3.98~17.30 mg/L, 稳定满足《海水养殖尾水排放要求》修订稿(征求意见稿)二级排放标准, 处理成本0.17元/m³, 技术、经济上均具有可行性。

关键词

海水养殖废水, 硝化 - 反硝化滤池, 耐盐硝化菌剂, 碳源

Study on the Treatment of Shrimp Mariculture Wastewater by Nitrification-Denitrification Filter

Wei Huang¹, Le An², Fang Liu², Wei Dong¹, Zhan Liu¹

¹Wuhan Kunjian Eco-Environmental Planning & Design Co., Ltd., Wuhan Hubei

²Elion Ecological Restoration Co., Ltd., Beijing

Received: Sep. 5th, 2022; accepted: Oct. 3rd, 2022; published: Oct. 10th, 2022

Abstract

The nitrification-denitrification filter was adopted to treat shrimp wastewater, which was not up to the standard by using the existing treatment technology. Experiments were conducted in a

breeding base in Guangdong. According to the characteristics of high inorganic nitrogen in wastewater, the feasibility of nitrification-denitrification process, the role of salt tolerant nitrifying bacteria and actual amount of carbon source were investigated. The results show that, the start-up time of nitrifying filter can be shortened from 11 days to 5 days by adding nitrifying bacteria, and there is no better effect on ammonia nitrogen removal in stable operation. The optimal glucose dosage in denitrification filter was 40 mg/L, the inorganic nitrogen and COD_{Mn} in the effluent were 1.10~1.92 mg/L and 3.98~17.30 mg/L, respectively, which all steadily reached the Grade II in requirement for Water Drainage Standard for Sea Water Mariculture (Revised Draft). The treatment cost per ton wastewater was 0.17 yuan/m³, which is technically and economically feasible.

Keywords

Mariculture Wastewater, Nitrification-Denitrification Filter, Salt Tolerant Nitrifying Bacteria, Carbon Source

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

南美白对虾肉质细嫩, 营养丰富, 是养殖虾类产量最高的三大品种之一[1] [2] [3], 2018 年我国南美白对虾海水养殖面积达 16.70 万 hm², 产量 111.75 万吨[4]。该虾养殖具有高密度、高投饵量、高水质需求、高排泄的特点, 放养密度可达 187.5 万尾/hm² [5], 平均每天投饵料 4~6 次, 投饵量为池虾总重量的 3%~5%, 饵料蛋白质含量 40%左右[6] [7]。环境对对虾的生长影响很大[8] [9], 水中氨氮、亚硝酸盐氮不应高于 0.79 mg/L、1.91 mg/L [10]。剩余饵料及排泄物导致养殖水氨氮、亚硝酸盐氮剧增, 有些高达 2.90 mg/L、6.67 mg/L [11], 造成大量废水产生, 污染物排放量巨大[12] [13] [14] [15]。

广东某对虾养殖基地, 采用封闭式循环水养殖方式, 日排放废水 10,000~15,000 m³。废水中无机氮高达 7.80~11.23 mg/L, 现有处理工艺为: 格栅 + 沉淀池 + 滤布滤池 + 加药除磷池, 对无机氮的处理效果不佳, 难以满足《海水养殖尾水排放要求》修订稿(征求意见稿)二级标准。国内外利用硝化 - 反硝化工艺去除无机氮的研究较多, 均取得较好效果[16] [17] [18] [19]。拟增加硝化 - 反硝化滤池强化无机氮的去除, 为探究工艺的可行性、评估市售耐盐硝化菌剂的作用及摸索实际碳源需求量, 在基地内开展小试验, 为实际工程改造提供指导。

2. 实验部分

2.1. 工艺流程与实验装置

硝化 - 反硝化工艺实验流程见图 1。

实验装置由硝化滤池、中间水池、反硝化滤池、清水池、碳源补加池组成。硝化滤池直径 250 mm, 高 2.0 m, 自下而上为 10 cm 承托层(粒径 1~3 cm 鹅卵石), 1.5 m 滤料层(粒径 3~5 mm 火山岩, 孔隙率 60%), 分两组, 编号 1、2, 均配有曝气、进水及反冲洗装置。硝化滤池中保持较高的溶解氧, 填料上的硝化细菌成为优势菌种, 可有效的去除氨氮。反硝化滤池直径 250 mm, 高 2.0 m, 自下而上为 10 cm 承托层(粒径 0.5~1 cm 卵石), 1.5 m 滤料层(粒径 0.5~1.2 mm 石英砂, 孔隙率 45%), 分 4 组, 编号 a、b、c、d, 均配有进水、驱氮、反冲洗、碳源补加装置。反硝化滤池中补充碳源, 同时控制溶解氧含量, 为反硝化细

菌创造生长条件，将硝酸盐、亚硝酸盐转化为气态氮。

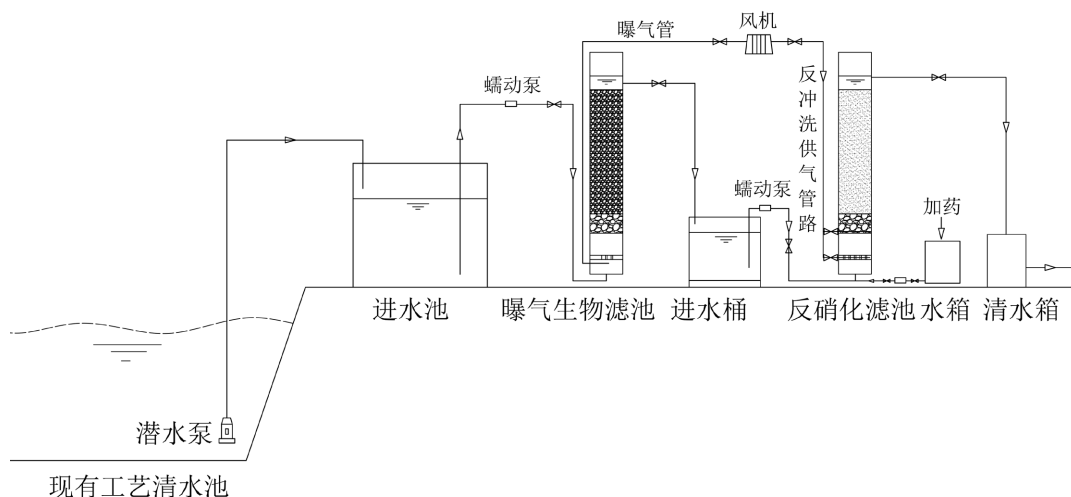


Figure 1. Nitrification-denitrification process flow diagram

图 1. 硝化 - 反硝化工艺流程示意图

2.2. 进水水质

实验装置进水取自基地现有工艺清水池，因实验期间清水池无机氮较低，按业主要求在装置进水池中添加氯化铵使进水无机氮在 10.00 mg/L 左右，实际进水水质见表 1。

Table 1. Influent water quality

表 1. 进水水质

水质指标	数据
COD _{Mn} (mg/L)	5.20~10.40
氨氮(mg/L)	6.38~11.28
亚硝酸盐氮(mg/L)	0.02~3.34
硝酸盐氮(mg/L)	0.01~0.85
pH 值	7.17~8.13

2.3. 实验方法

硝化滤池均接种现有沉淀池污泥，污泥与进水混合，MLSS 1000 mg/L，注入滤池，闷曝 24 h，排空，重新注入混合液，闷曝 24 h，重复 3 次，接种成功[16]。而后，硝化滤池连续进水，停留时间 0.7 h，溶解氧 3~5 mg/L，利用装置出水人工反冲洗，3 d 一次，每次 5 min。1 号滤池按 10 mg/L 连续投加市售耐盐硝化菌剂，2 号不加，出水均排入中间水池，混合后进入反硝化滤池。中间水池添加现有沉淀池污泥，MLSS 100 mg/L，混合液连续进入反硝化滤池，a、b、c、d 四组补充葡萄糖作碳源，浓度：20 mg/L、30 mg/L、40 mg/L、50 mg/L，污泥添加 3 d，接种成功。进入连续进水阶段，停留时间 1.5 h，驱氮、反冲洗利用装置出水人工进行，驱氮 0.5 d 一次，每次 3 min，反冲洗 2 d 一次，每次 5 min。

2.4. 水质测试

装置开始运行后，每日取样测试，指标包括 COD_{Mn}、氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、pH 值，测试

方法均取自《海洋监测规范第4部分：海水分析》(GB 17378.4-2007)。

3. 结果与讨论

3.1. 耐盐硝化菌剂对硝化滤池启动及运行效果的影响

外部补充生物菌剂具有加快启动速度、减小波动、提高出水水质的效果[20][21]，但菌剂在海水中的应用较少。本研究在1号硝化滤池中连续添加10 mg/L耐盐硝化菌剂，并与未添加的2号对比，在停留时间0.7 h，溶解氧3~5 mg/L条件下，研究菌剂对反应器启动及氨氮去除效果的影响，结果见图2、图3。

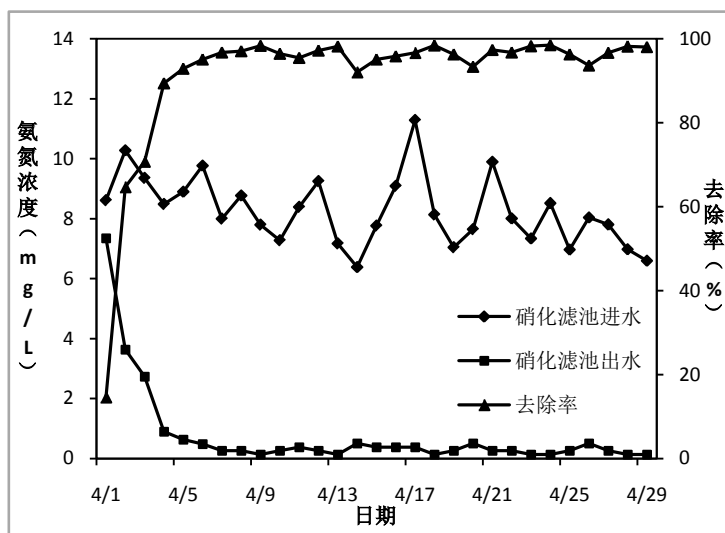


Figure 2. Removal effect of ammonia nitrogen by No. 1 nitrification filter
图 2. 1号硝化滤池对氨氮的去除效果

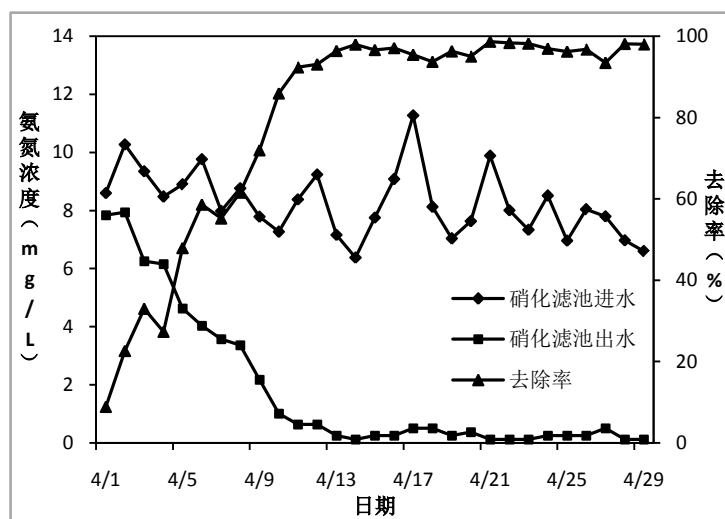


Figure 3. Removal effect of ammonia nitrogen by No. 2 nitrification filter
图 3. 2号硝化滤池对氨氮的去除效果

从图2、图3可知，1号硝化滤池出水氨氮5 d即可达到1.00 mg/L以下，最终稳定在0.13~0.51 mg/L，去除率高达92.01%~98.47%；2号硝化滤池出水氨氮11 d才达到1.00 mg/L以下，最终稳定在0.13~0.51

mg/L, 去除率也高达 93.46%~98.69%。由此可知, 添加菌剂使硝化滤池启动时间大幅度缩短, 因菌剂硝化速率大于 $500 \text{ mg 氨氮}/(\text{L}\cdot\text{h})$, 启动期间添加菌剂大幅度提高了硝化菌群数量以利于挂膜, 从而缩短了启动时间。稳定运行期, 添加菌剂对氨氮去除效果几乎没有影响, 这是因为实验期间温度 $25^{\circ}\text{C}\sim 31^{\circ}\text{C}$, 非常有利于硝化细菌的生长, 滤料表面生物膜已稳定成熟, 对氨氮的去除效果很好, 菌剂添加已无提升的空间。

3.2. 葡萄糖碳源对无机氮去除效果的影响

适宜的碳源含量是反硝化菌群脱氮的必要条件, 本研究在 a、b、c、d 四组反硝化滤池中分别按 20 mg/L 、 30 mg/L 、 40 mg/L 、 50 mg/L 浓度添加葡萄糖, 停留时间 1.5 h , 研究碳源添加量对无机氮去除效果的影响, 结果见图 4~8。

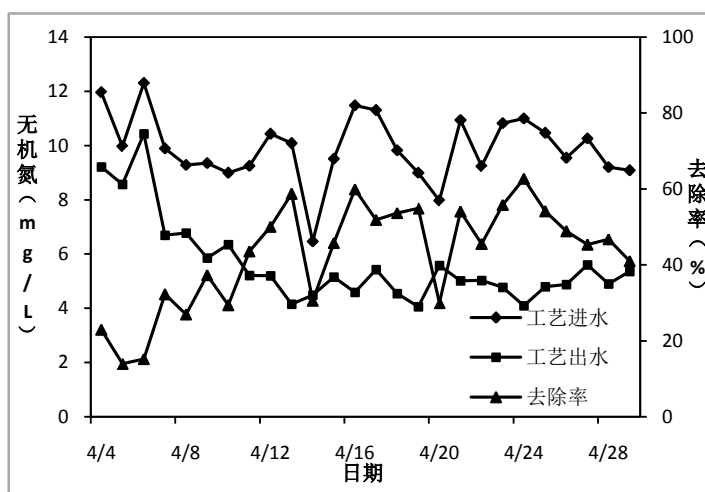


Figure 4. Removal effect of inorganic nitrogen by adding 20 mg/L carbon source

图 4. 碳源添加 20 mg/L , 工艺对无机氮的去除效果

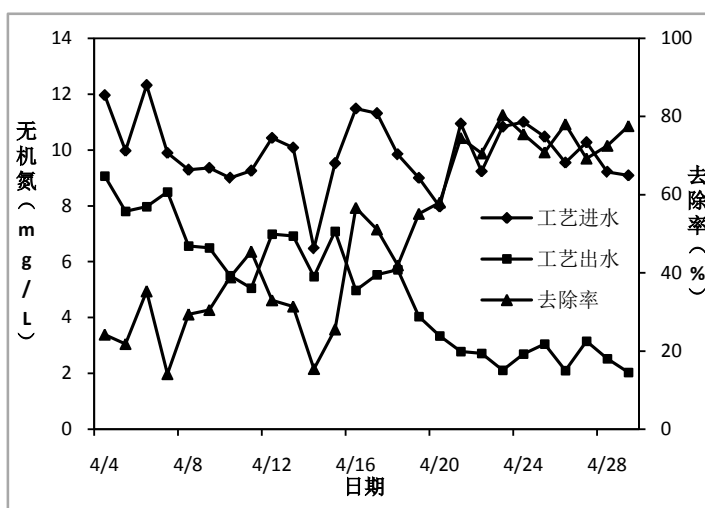


Figure 5. Removal effect of inorganic nitrogen by adding 30 mg/L carbon source

图 5. 碳源添加 30 mg/L , 工艺对无机氮的去除效果

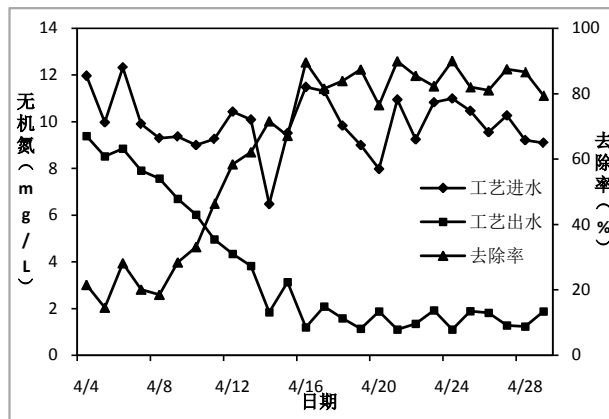


Figure 6. Removal effect of inorganic nitrogen by adding 40 mg/L carbon source

图 6. 碳源添加 40 mg/L, 工艺对无机氮的去除效果

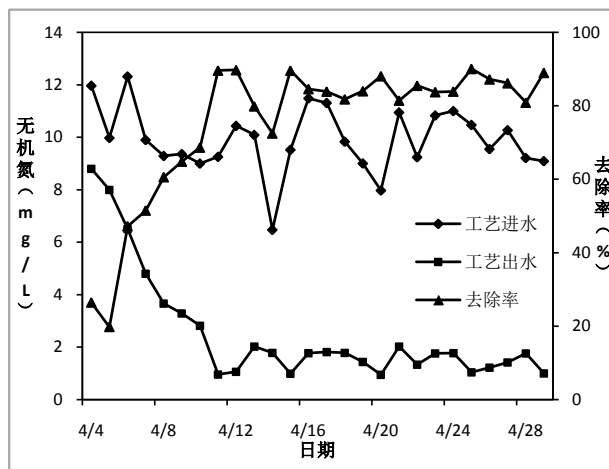


Figure 7. Removal effect of inorganic nitrogen by adding 50 mg/L carbon source

图 7. 碳源添加 50 mg/L, 工艺对无机氮的去除效果

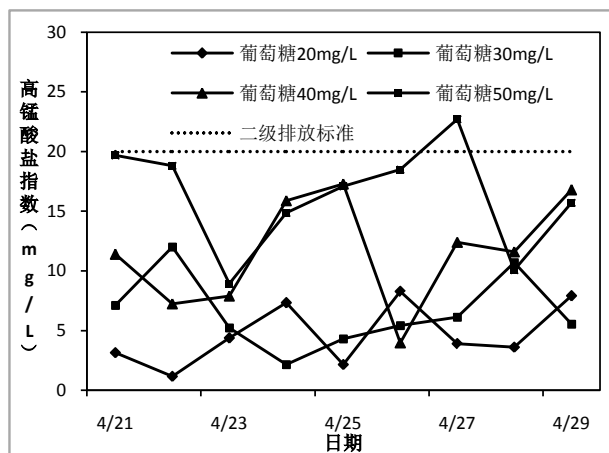


Figure 8. Permanganate number index in effluent

图 8. 工艺出水高锰酸盐指数

从图 4-8 可知,葡萄糖添加量由 20 mg/L 增加到 40 mg/L,出水无机氮浓度呈下降趋势,由 4.10~5.58 mg/L 下降到 1.10~1.92 mg/L,去除率由 30.01%~62.73%增加到 76.54%~90.00%,出水 COD_{Mn} 由 1.17~8.28 mg/L 增加到 3.98~17.30 mg/L,无机氮和 COD_{Mn} 满足《海水养殖尾水排放要求》修订稿(征求意见稿)中二级标准。葡萄糖添加量 50 mg/L,出水无机氮浓度仍稳定在 1.00~1.77 mg/L,已无下降趋势,出水 COD_{Mn} 最大值已达 22.71 mg/L,超出二级标准。因而,添加葡萄糖的最佳浓度为 40 mg/L。添加量低于 40 mg/L 时,碳源不足,反硝化过程缺乏电子供体,微生物活性受到抑制;高浓度碳源不但不能进一步促进无机氮的去除,反而导致出水 COD_{Mn} 超标。添加 40 mg/L 葡萄糖,对应 COD 为 42.80 mg/L,本实验脱氮过程 COD/N = 8.07 - 4.69。分析认为除反硝化细菌对碳源利用存在利用系数以外,因进入反硝化滤池的溶解氧较高,消耗掉一部分碳源,造成实际 COD/N 偏高。

3.3. 技术与经济可行性分析

针对对虾养殖废水原处理工艺排水无机氮浓度高、COD_{Cr} 低的特点,采用硝化-反硝化滤池对现有工艺排水进一步处理,无机氮及 COD_{Mn} 稳定满足《海水养殖尾水排放要求》修订稿(征求意见稿)中二级标准,在技术上是可行的。

经初步核算,规模 15,000 m³/d 的硝化-反硝化滤池处理设施平均运行功率 95 kW,电费按 0.6561 元/kW·h 计算,则电费为 0.10 元/m³;工业葡萄糖 1.40 元/kg,药剂费为 0.06 元/m³;硝化-反硝化滤池自动化程度高,按 1 名工人配备,人工费为 0.01 元/m³,合计处理费为 0.17 元/m³,经济上是可行的。

4. 结论

耐盐硝化菌剂对处理对虾养殖海水的硝化滤池进行强化是可行的,但只在启动阶段有作用,稳定运行阶段添加的意义不大。实际工程中,硝化菌剂可在系统受到温度、水量、水质冲击,处理效果变差时作为应急手段采用。

硝化-反硝化滤池对海水养殖对虾废水中的无机氮有良好的去除效果,硝化段水力停留时间 0.7 h,反硝化段 1.5 h,反硝化滤池中葡萄糖的最佳添加量为 40 mg/L,出水无机氮可维持在 1.10~1.92 mg/L,去除率 76.54%~90.00%,出水 COD_{Mn} 可维持在 3.98~17.30 mg/L,二者均可实现达标排放,处理费 0.17 元/m³,在技术和经济上皆可行。

参考文献

- [1] 蔡激扬,朱兰娟,华正江. 杭州地区南美白对虾饲养条件初探[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(11): 2100-2102.
- [2] 李世凯,江敏,戴习林,等. 凡纳滨对虾池塘水质及对虾肌肉品质的对比分析[J]. 上海海洋大学学报, 2012, 21(6): 955-964.
- [3] 王静,车斌,孙琛,等. 我国南美白对虾不同养殖模式管理效率研究[J]. 中国渔业经济, 2019, 37(1): 84-90.
- [4] 农业农村部渔业渔政管理局,全国水产技术推广总站,中国水产学会. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019: 22+50.
- [5] 李倩,周志明,杭小英,等. 南美白对虾不同养殖密度水质变化规律与养殖效益的分析[J]. 中国农学通报, 2014(30): 100-104.
- [6] 冯晓,宋瑞强,崔达铭,等. 南美白对虾池塘高密度养殖技术[J]. 现代农业科技, 2013(23): 283+287.
- [7] 鲍胜华,胡荣芳. 南美白对虾多品种搭配生态养殖技术[J]. 水产养殖, 2019, 40(5): 22-24.
- [8] 王年斌,韩家波,周遵春,等. 虾池水环境因子与虾病爆发的相关性分析[J]. 水产科学, 2004, 23(12): 5-8.
- [9] Lemonnier, H., Lantoine, F., Courties, C., et al. (2016) Dynamics of Phytoplankton Communities in Eutrophying Tropical Shrimp Ponds Affected by Vibriosis. *Marine Pollution Bulletin*, **110**, 449-459. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.015>
- [10] Crab, R., Avnimelech Y., Defoirdt, T., et al. (2007) Nitrogen Removal Techniques in Aquaculture for a Sustainable

- Production. *Aquaculture*, **270**, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.05.006>
- [11] 张龙, 陈钊, 汪鲁, 等. 凡纳滨对虾循环水养殖系统应用研究[J]. 渔业现代化, 2019, 46(2): 7-14.
- [12] Cardoso-Mohedan, J.-G., Bernardello, R., Sanchez-Cabeza, J.-A., *et al.* (2016) Reducing Nutrient Impacts from Shrimp Effluents in a Subtropical Coastal Lagoon. *Science of the Total Environment*, **571**, 388-397. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.140>
- [13] Yang, P., Lai, D.Y.F., Jin, B.S., *et al.* (2017) Dynamics of Dissolved Nutrients in the Aquaculture Shrimp Ponds of the Min River estuary, China: Concentrations, Fluxes and Environmental Loads. *Science of the Total Environment*, **603-604**, 256-267. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.074>
- [14] Alonso-Rodriguez, R. and Paez-Osuna, F. (2003) Nutrients, Phytoplankton and Harmful Algal Blooms in Shrimp Ponds: A Review with Special Reference to the Situation in the Gulf of California. *Aquaculture*, **219**, 317-336. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(02\)00509-4](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(02)00509-4)
- [15] 张树, 李由明, 王平, 等. 对虾养殖水体的研究现状分析[J]. 畜牧与饲料科学, 2017, 38(3): 55-58.
- [16] 卢立泉, 邱立平, 刘盼盼, 等. 接种 BAF 处理海水养殖废水低温启动及微生物特性[J]. 中国环境科学, 2017, 37(7): 2574-2582.
- [17] 段金明, 江兴龙, 陈宏静, 等. 生物强化生物滤池去除海水养殖废水中氨氮[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(1): 37-42.
- [18] Virender, S., Banu, O., Saurabh, M., *et al.* (2022) Simultaneous Partial Nitrification, ANAMMOX and Denitrification (SNAD)—A Review of Critical Operating Parameters and Reactor Configurations. *Chemical Engineering Journal*, **433**, Article ID: 133677. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133677>
- [19] Su, B.S., Liu, Q., Liang, H.L., *et al.* (2022) Simultaneous Partial Nitrification, Anammox, and Denitrification in an Upflow Microaerobic Membrane Bioreactor Treating Middle Concentration of Ammonia Nitrogen Wastewater with Low COD/TN Ratio. *Chemosphere*, **295**, Article ID: 133832. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133832>
- [20] 雷太平, 王艺林, 车凯, 等. COD 菌剂及助剂强化处理石化废水工程应用[J]. 工业水处理, 2018, 38(4): 97-99.
- [21] 袁子程, 赵振, 兰善红. 某生物菌剂脱氮除磷效果试验研究[J]. 广东化工, 2019, 46(9): 50-52.