

竹环填料生物滤器在两种海水鱼养殖废水处理中的运行效果及微生物群落分析

徐 洋^{1,3}, 高喜燕², 张延青¹, 刘志培², 刘 鹰³

(1. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 中国科学院 微生物研究所, 北京 100101; 3. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071)

摘要:以点带石斑鱼(*Epinephelus malabaricus*)、半滑舌鲷(*Cynoglossus semilaevis*)养殖排放水为处理对象,在生产现场研究了竹环填料生物滤器处理高盐度、低氨氮负荷海水养殖废水的运行效果以及挂膜阶段和稳定运行阶段微生物群落变化规律。结果表明,点带石斑鱼养殖废水进水氨氮质量浓度为0.93~1.33 mg/L,氨氮去除率达到27%~39%,挂膜时间需45 d;半滑舌鲷养殖废水进水氨氮质量浓度为0.38~0.52 mg/L,氨氮去除率达到20%~30%,挂膜时间需65 d。另外,对生物滤器挂膜阶段和稳定运行阶段的氨氧化细菌数量和亚硝酸氧化细菌数量进行了统计,氨氧化细菌的数量在点带石斑鱼和半滑舌鲷养殖排放水处理系统中分别达到 10^4 ~ 10^5 CFU/mL和 10^3 CFU/mL,亚硝酸氧化细菌数量则分别达到 10^4 CFU/mL和 10^3 CFU/mL,并分析了温度、进水氨氮负荷、反硝化作用对半滑舌鲷养殖废水生物滤器亚硝酸盐积累现象的影响。

关键词:竹环填料生物滤器;海水养殖废水;氨氮去除率;微生物群落

中图分类号: Q93

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2010)03-0026-06

近年来,海水养殖业在全球范围内发展迅速,养殖废水的任意排放造成的养殖区环境污染现象已越来越引起关注^[1]。在海水鱼类工厂化循环水养殖系统中,生物膜工艺对控制养殖废水中的 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N等有害物质起着十分关键的作用。微生物的代谢作用可以转化废水中的氨氮和有机物,其中化能异养细菌可以分解水体中残留的碳水化合物、蛋白质、脂肪等有机物,硝化细菌和反硝化细菌可以利用并转化对养殖动物具有毒害的氨氮和亚硝酸盐氮。

生物滤器作为海水工厂化循环水养殖系统的核心单元在国内外得到了广泛研究,研究内容从填料的选择^[2]到生物滤器的设计与优化^[3],从硝化细菌的筛选与驯化^[4]到硝化动力学模型的建立^[5],并对各种不同类别的生物反应器生物膜中亚硝化细菌、硝化细菌的数量和空间分布也有了深入的研究^[6]。但有关生物滤器在海水工厂化循环水养殖系统废水处理中的实际运行效果方面的研究还少见报道。

实验采用竹环^[7]作为生物滤器填料,粒径为8~12 mm,表观密度为 (0.45 ± 0.001) g/cm³,真密度

为 (0.71 ± 0.001) g/cm³,比表面积为 (0.90 ± 0.035) m²/g。有研究表明,在人工模拟海水养殖废水条件下,采用竹子作为填料的生物滤器有较快的挂膜速度,挂膜成熟后具有较高且稳定的氨氮去除率,氨氮去除率达到80%^[8]。而竹子作为一种天然植物材料,其特殊的孔隙结构和成分、较大的比表面积适合细菌的挂膜生长,且价廉、取材方便。

1 材料及方法

1.1 实验鱼类

实验在天津市海发珍品实业发展有限公司水处理车间现场进行,分别以点带石斑鱼(*Epinephelus malabaricus*)和半滑舌鲷(*Cynoglossus semilaevis*)两种海水鱼工厂化循环水养殖排放水为研究对象。点

收稿日期: 2009-08-20; 修回日期: 2009-11-20

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2006AA100305); 国家科技支撑计划资助项目(2006BAD09A03); 国家自然科学基金资助项目(30972267)
作者简介: 徐洋(1985-),男,吉林通化人,硕士研究生,主要从事环境工程学研究; E-mail: xuyang_8549@163.com; 刘鹰,通信作者, E-mail: yinliuocas@gmail.com

带石斑鱼养殖密度为 25~30 kg/m², 成鱼体质量为 600~1000 g, 体长为 35~40 cm; 半滑舌鲷养殖密度为 20~25 kg/m², 成鱼体质量为 1 500~2 000 g, 体长为 40~60 cm。

1.2 实验装置

实验装置为 3 套平行运行的生物滤器, 文中所有实验数据为 3 套生物滤器的平均值, 图 1 为装置示意图。生物滤器为圆柱形, 用 PVC 材料制作, 从底部到顶部每隔 20 cm 设置一个采样口, 共 4 个出水采样口, 生物滤器直径为 15 cm、高度为 100 cm, 采用上流式, 填料装填高度为 80 cm, 填料质量为 3.4 kg。

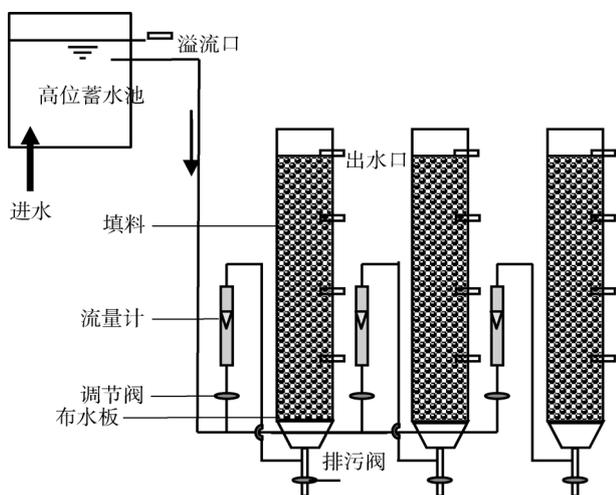


图 1 实验生物滤器示意图
Fig. 1 The experimental biofilter system

实验生物滤器闷曝 3 d 后开始连续进水。实验用水为点带石斑鱼、半滑舌鲷养殖池排放水, 由管道泵入高位水箱后进入生物滤器, 每个生物滤器的流量通过液体流量计分别独立精确控制。其中点带石斑鱼养殖废水中的 NH₄⁺-N 质量浓度为 0.93~1.33

mg/L, NO₂⁻-N 质量浓度为 0.12~0.29 mg/L, 溶解氧为 7~9 mg/L, pH 为 7.1~7.4, 温度为 23~24 ℃, 盐度为 29~30; 半滑舌鲷养殖废水中的 NH₄⁺-N 质量浓度为 0.38~0.52 mg/L, NO₂⁻-N 质量浓度为 0.026~0.046 mg/L, 溶解氧为 8~9 mg/L, pH 为 7.6~7.9, 温度为 18~19 ℃, 盐度为 23~25, 水力停留时间均为 30 min。

1.3 水质及微生物指标采样方法和检测方法

在实验生物滤器的挂膜和稳定运行阶段, 分别从滤器进水口及顶部出水口采样, 检测氨氮和亚硝酸盐氮质量浓度变化, 并计算氨氮去除率, 公式如下:

$$\text{氨氮去除率}(\%) = (\text{进水氨氮质量浓度} - \text{出水氨氮质量浓度}) / \text{进水氨氮质量浓度}$$

水质分析指标包括: 氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、溶解氧、pH 值、温度及盐度。具体方法参考海洋监测规范^[9]。

在系统运行过程中对生物膜进行采样。总异养细菌数量用菌落形成单位(CFU)法进行检测, 使用海洋琼脂 2216 培养基, 自养氨氧化细菌(Ammonia Oxidation Bacterium, 简称 AOB)和亚硝酸氧化细菌(Nitrite Oxidation Bacterium, 简称 NOB)采用 MPN 法(Most Probable Number, 简称 MPN)进行测定。

2 结果与分析

2.1 竹环填料生物滤器处理点带石斑鱼养殖废水的氨氮及亚硝酸盐氮去除情况

采用竹环填料生物滤器处理点带石斑鱼养殖废水, 在挂膜阶段及稳定运行阶段进出水口的氨氮变化、去除率情况如图 2 所示, 亚硝酸盐氮变化如图 3 所示。

实验系统在挂膜阶段和稳定运行阶段的进水氨氮质量浓度 0.93~1.33 mg/L、亚硝酸盐氮质量浓度

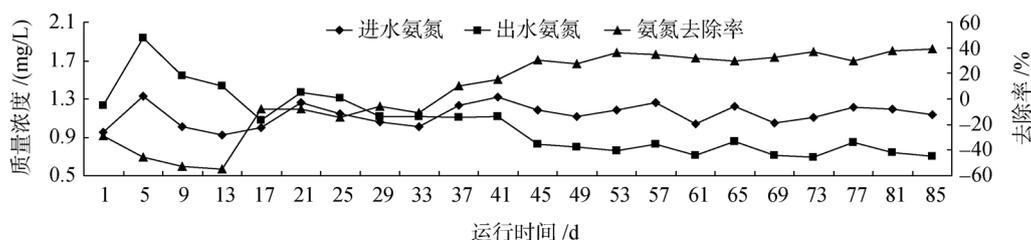


图 2 竹环填料生物滤器处理点带石斑鱼养殖废水的氨氮去除率
Fig. 2 Ammonia removal rates from biofilter-treated *Epinephelus malabaricus* aquaculture wastewater

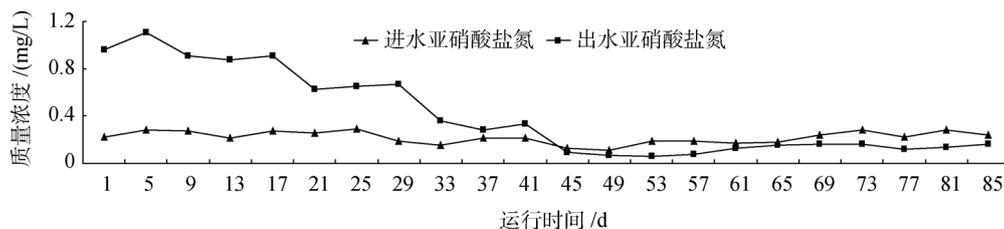


图3 竹环填料生物滤器处理点带石斑鱼养殖废水的亚硝酸盐氮变化

Fig. 3 Variations of nitrite concentrations of biofilter-treated *Epinephelus malabaricus* aquaculture wastewater

0.12~0.29 mg/L。实验以实际养殖废水为处理对象, 水体受车间日常管理中的投饵、换水、分鱼、倒池影响而出现水质波动现象。挂膜阶段实验生物滤器出水氨氮、亚硝酸盐氮浓度极不稳定, 并出现出水浓度高于进水的现象。作者认为, 由于硝化细菌在寡营养、高盐度的海水养殖废水中生长速度较慢, 在系统挂膜初期处于弱势菌, 而异养微生物生长速度较快, 其相对强烈的氨化作用可能导致系统出水氨氮升高。系统连续运行 45 d 后, 出水氨氮质量浓度明显低于进水, 稳定在 0.9 mg/L 以下, 最低至 0.7 mg/L, 氨氮去除率稳定在 27%~39%, 挂膜完成, 出水亚硝酸盐氮稳定在 0.06~0.11 mg/L, 亚硝酸盐氮积累现象消失。

在本实验中, 氨氮去除率为 27%~39%, 低于同样材料处理人工模拟海水养殖废水氨氮去除率^[8], 这可能是由于养殖废水中的氨氮完全由残饵、粪便

分解而来, 比起人工模拟养殖废水投加的铵盐 (NH₄Cl) 更难于被微生物利用。人工投加的铵盐极易溶于水, 可被生物膜上的微生物较快地利用, 而残饵、粪便等含氮物质大多以悬浮物形式被截留在生物膜上, 溶解速率较慢, 即实际养殖水体中生物膜上的微生物对氨氮利用率偏低, 导致本实验生物滤器处理养殖废水氨氮去除率相对较低。

2.2 竹环填料生物滤器处理半滑舌鲷养殖废水的氨氮及亚硝酸盐氮去除情况

采用竹环填料生物滤器处理半滑舌鲷养殖废水, 在挂膜阶段及稳定运行阶段生物滤器进出水口的氨氮变化、去除率如图 4 所示, 亚硝酸盐氮变化如图 5 所示。

实验生物滤器系统在挂膜阶段和稳定运行阶段进水氨氮质量浓度为 0.38~0.52 mg/L、亚硝酸盐氮质

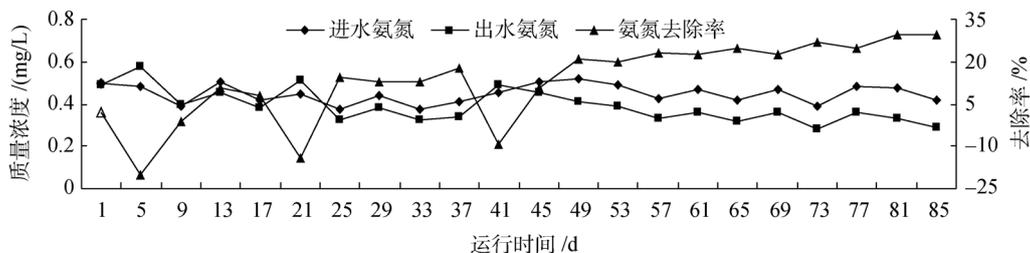


图4 竹环填料生物滤器处理半滑舌鲷养殖废水的氨氮去除率

Fig. 4 Ammonia removal rates of biofilter-treated *Cynoglossus semilaevis* aquaculture wastewater

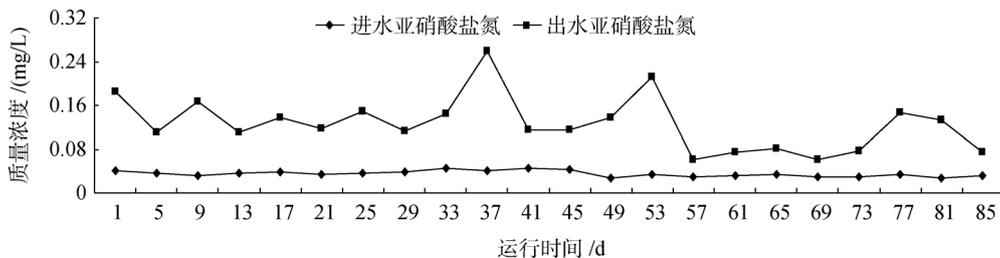


图5 竹环填料生物滤器处理半滑舌鲷养殖废水的亚硝酸盐氮变化

Fig. 5 Variations of nitrite concentrations of biofilter-treated *Cynoglossus semilaevis* aquaculture wastewater

量浓度为 0.027~0.045 mg/L, 挂膜阶段系统出水氨氮、亚硝酸盐氮浓度极不稳定, 连续运行 65 d 后挂膜完成, 出水氨氮质量浓度稳定在 0.41 mg/L 以下, 最低至 0.28 mg/L, 去除率稳定在 20%~30%。但系统亚硝酸盐积累现象严重, 和石斑鱼养殖废水处理系统不同, 挂膜成熟以后亚硝酸盐积累现象仍然存在, 并在系统运行的 85 d 内一直呈不规律变化。

2.3 实验生物滤器生物膜功能种群微生物数量的变化

竹环填料生物滤器处理点带石斑鱼养殖废水时, 填料表面的功能细菌(异养菌, 氨氧化细菌, 亚硝酸氧化细菌)的数量变化如图 6 所示。实验结果表明, 实验生物滤器点带石斑鱼水处理系统, 从挂膜阶段到稳定运行阶段, 生物膜上的异养菌数量一直保持在 $10^6 \sim 10^7$ CFU/mL, 氨氧化细菌的数量从挂膜初期开始缓慢上升, 在系统挂膜成熟的第 45 天左右达到 $10^4 \sim 10^5$ CFU/mL, 最终保持在 10^5 CFU/mL, 亚硝酸氧化细菌的数量缓慢上升并保持在 10^4 CFU/mL, 保证了挂膜完成后, 氨氮稳定的去除率和亚硝酸盐氮较低的出水浓度。总体上看, 氨氧化细菌和亚硝酸氧化细菌的数量和人工模拟养殖废水中硝化细菌的数量相比^[8], 建立的比较理想, 使得反应器在第 45 天左右挂膜成熟, 而且亚硝酸氧化细菌的数量保证了系统在稳定运行阶段亚硝酸盐氮的降低, 没有形成亚硝酸盐的积累。

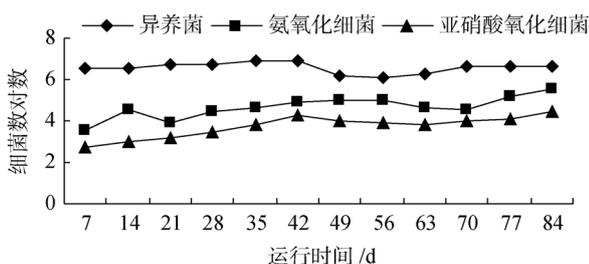


图 6 竹环填料生物滤器处理点带石斑鱼养殖废水填料表面生物膜细菌数量

Fig. 6 Bacteria number of biofilm in the bioreactor for *Epinephelus malabaricus* wastewater treatment

竹环填料生物滤器处理半滑舌鲷养殖废水填料表面功能细菌的数量如图 7 所示。和点带石斑鱼养殖废水实验生物滤器相比, 生物膜上的异养菌数量稳定保持在 10^7 CFU/mL 左右, 表明两种废水处理系

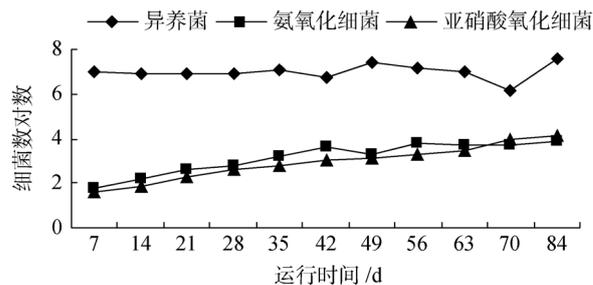


图 7 竹环填料生物滤器处理半滑舌鲷养殖废水填料表面生物膜细菌数量

Fig. 7 Bacteria number of biofilm in the bioreactor for *Cynoglossus semilaevis* wastewater treatment

统中异养菌的数量相差不大。但氨氧化细菌和亚硝酸盐氧化细菌的数量却存在很大差异, 二者的数量增长比较缓慢, 在为期 85 d 的系统运行过程中, 数量级最终只上升并保持在 10^3 CFU/mL 左右, 系统挂膜时间大大延长, 第 65 天才有了稳定的氨氮去除率。

2.4 实验生物滤器亚硝酸盐积累的影响因素分析

采用竹环填料生物滤器处理点带石斑鱼养殖废水, 在生物滤器挂膜阶段存在亚硝酸盐积累现象, 挂膜成熟以后亚硝酸盐氮出水浓度降低, 亚硝酸盐积累现象消失。

采用竹环填料生物滤器处理半滑舌鲷养殖废水, 在生物滤器挂膜阶段以及稳定运行阶段都存在严重的亚硝酸盐积累现象。在硝化过程中造成亚硝酸盐积累的影响因素很多, 包括 pH 值、溶解氧、氨负荷和游离氨浓度、反冲洗等^[10]。由于实验中半滑舌鲷养殖水体温度低(18~19 ℃), 氨氮负荷低(0.38~0.52 mg/L), 运行过程中溶氧沿程变化明显, 所以作者尝试就上述几个因素对亚硝酸盐积累的影响进行分析。

2.4.1 温度

半滑舌鲷的最佳养殖水温为 18~22 ℃, 和点带石斑鱼养殖水温 24~28 ℃ 相比, 其养殖水温偏低, 而微生物的新陈代谢与生长繁殖受温度影响很大。亚硝酸氧化细菌的最佳生长温度为 28~36 ℃, 比异养菌和氨氧化细菌稍高^[11], 对低温更为敏感, 这种情况下, 亚硝酸细菌的种群建立比较困难, 在系统稳定运行阶段, 氨氮转化为亚硝酸盐氮的过程比较明

显, 而亚硝酸盐氮转化为硝酸盐氮则成为了硝化反应的限制步骤, 使得系统在稳定运行阶段也有亚硝酸盐积累现象。

2.4.2 进水氨氮负荷

半滑舌鲷养殖废水的氨氮质量浓度为 0.38~0.52 mg/L, 相比于点带石斑鱼养殖废水 0.93~1.33 mg/L 的进水氨氮质量浓度范围, 其氨氮负荷偏低, 氨氮作为硝化反应的底物, 其浓度高低也直接影响硝化反应的进行程度。

2.4.3 反硝化作用

针对半滑舌鲷养殖废水处理中的亚硝酸盐积累现象, 用 MPN 法对生物膜中反硝化细菌数量进行了检测。反硝化作用中, 反硝化细菌能够在硝酸盐还原酶和亚硝酸盐还原酶的作用下使 NO_3^- 逐步转变为 NO_2^- 、 NO 、 N_2O 和 N_2 ^[12]。实验发现, 生物膜中存在着 $10^3\sim 10^4$ CFU/mL 的反硝化细菌, 并从中分离得到 6 株具有反硝化功能的细菌。经鉴定, 这 6 株细菌分别是, 耐冷芽孢杆菌(*Bacillus psychrotolerans*), 嗜冷杆菌属(*Psychrobacter* sp.) TSBY-70, 需钠弧菌(*Vibrio natriegens*), 微球菌属(*Micrococcus* sp.) V7, 罗氏菌属(*Rothia* sp.) ZHT413, 假单胞菌属(*Pseudomonas* sp.) hyss56。实验证明, 它们可以高效地利用 NO_3^- , 并且通过水质监测, 系统中的硝酸盐也有一定的去除效果。另外, 生物滤器沿程溶氧变化规律非常明显: 从底部向上, 溶氧平均值从 7 mg/L 降至 1.53 mg/L, 并且系统进水硝酸盐氮质量浓度较高, 在 3.58~6.55 mg/L, 这都为反硝化细菌代谢创造了条件。由于反硝化作用的中间过程有 NO_2^- 的生成, 所以容易造成亚硝酸盐的积累。

3 结论

以竹环作为填料的生物滤器在海水鱼类工厂化循环水养殖水处理系统中可以发挥良好的处理效率, 对氨氮去除效果明显, 其中点带石斑鱼生物滤器氨氮去除率为 27%~39%, 半滑舌鲷生物滤器氨氮去除率为 20%~30%, 对亚硝酸盐氮也有一定的去除

效果。

实验生物滤器的挂膜时间长短与处理水体的水质关系密切, 温度、氨氮负荷对挂膜时间具有一定的影响, 低温、低氨氮负荷养殖废水挂膜时间大大延长。

低温、低氨氮负荷以及反硝化作用是实验中亚硝酸盐积累现象的主要原因。

参考文献:

- [1] 刘鹰. 欧洲循环水养殖技术综述[J]. 渔业现代化, 2006, 6: 47-49.
- [2] 何洁, 刘长发, 王海, 等. 3 种载体生物滤器对养殖废水处理效果[J]. 中国水产科学, 2003, 10(3): 242-245.
- [3] Eding E H, Kamstra A, Verreth J A J, *et al.* Design and operation of nitrifying trickling filters in recirculating aquaculture: A review[J]. *Aquacultural Engineering*, 2006, 34: 234-260.
- [4] 王光玉, 马放, 魏琦峰, 等. 海洋硝化菌群的富集驯化和筛选的初步研究[J]. 海洋水产研究, 2008, 29(1): 76-80.
- [5] Chen G H, Ozaki H, Terashima Y. Modelling of the simultaneous removal of organic substances and nitrogen in a biofilm[J]. *Water Sci Technol*, 1989, 21: 791-804.
- [6] Lydmark P, Lind M, Sörensson F, *et al.* Vertical distribution of nitrifying populations in bacterial biofilms from a full-scale nitrifying trickling filter[J]. *Environ Microbiol*, 2006, 8: 2 036-2 049.
- [7] 刘鹰, 王玲玲. 一种载体填料及其制备方法[P]. 中国专利: ZL 02158870.8, 2004-10-20.
- [8] 石芳永, 宋奔奔, 傅松哲, 等. 竹子填料海水曝气生物滤器除氮性能和硝化细菌群落变化研究[J]. 渔业科学进展, 2009, 30(1): 92-96.
- [9] GB17378.7-2007, 海洋监测规范[S].
- [10] 马军, 邱立平. 曝气生物滤池中亚硝酸盐积累及其影响因素[J]. 环境科学, 2003, 24(1): 84-89.
- [11] 谢冰, 徐亚同. 废水生物处理原理和方法[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007. 107.
- [12] 任延丽, 靖元孝. 反硝化细菌在污水处理作用中的研究[J]. 微生物学杂志, 2005, 25(2): 88-92.

Analysis of the performance characteristics and microbial community of bamboo ring-packed biofilters in two marine fish wastewater treatments

XU Yang^{1,3}, GAO Xi-yan², ZHANG Yan-qing¹, LIU Zhi-pei², LIU Ying³

(1. Environment and Municipal Engineering Institute, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China; 2. Institute of Microbiology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Received: Aug., 20, 2009

Key words: bamboo medium biofilter; marine aquaculture wastewater; ammonia removal rate; microbial community

Abstract: The performance characteristics and microbial community of biofilter packed with bamboo ring were investigated in *Epinephelus malabaricus* wastewater and *Cynoglossus semilaevis* wastewater with high salinity and low ammonia. It was found that the ammonia removal rate of *E. malabaricus* wastewater was 27%~39%, when the inlet ammonia concentrations were 0.93~1.33 mg/L, and the biofilm development needed about 45 days; while the ammonia removal rate of *C. semilaevis* wastewater was 20%~30%, when the inlet ammonia concentrations were 0.38~0.52 mg/L, and the biofilm development needed about 65 days. In addition, the number of AOB and NOB during the start-up and steady state of the biofilter were counted, the number of AOB in *E. malabaricus* wastewater bioreactor and *C. semilaevis* wastewater bioreactor reached to 10^4 ~ 10^5 CFU/mL and 10^3 MPN/mL, respectively; and the NOB number reached to 10^4 CFU/mL and 10^3 CFU/mL, respectively. The influences of temperature, inlet ammonia concentration, and denitrification on the nitrite accumulation in *C. semilaevis* wastewater were analyzed.

(本文编辑: 谭雪静)

(上接第 10 页)

Evaluation of environment quality in the northeast mariculture zone in Jiaozhou Bay

ZHAO Zeng-xia^{1,2}, WANG Fang¹, LIU Qun², ZHANG Guang-tao²

(1. Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. Jiaozhou Bay Marine Ecosystem Research Station, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Received: May., 26, 2009

Key words: mariculture waters; Jiaozhou Bay; seawater quality assessment; eutrophication; organic pollution appraisal

Abstract: Based on seasonal investigation data from the northeast mariculture zone in Jiaozhou Bay, the quality of seawater was evaluated with single factor evaluation, eutrophication index and organic pollutants index. Seawater was seriously polluted by dissolved inorganic nitrogen and phosphorus all through the year. However, concentration of dissolved oxygen (DO) was found to be higher than the 1st class concentration of Chinese National Seawater Standard throughout the year, while that of COD was higher than 1st class concentration in summer and autumn but only higher than 2nd class concentration in spring and winter. Seawater quality was worst near the Licun River estuary, where eutrophication was observed in all seasons and organic pollutants indices varied from slight to heavy pollution. No organic pollution was found near the Hongdao Island area, and eutrophication was observed only in spring and autumn. It was suggested that environment quality in this area was influenced mainly by land-source pollution, correlating to different removal efficiency of organic and inorganic materials during sewage treatment.

(本文编辑: 梁德海)