

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

石芳永¹ 宋奔奔² 傅松哲³ 张延青¹ 刘志培³ 刘 鹰^{2*}

(¹ 青岛理工大学, 266033)

(² 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

(³ 中国科学院微生物研究所, 北京 100101)

摘要 生物滤器是循环水养殖系统的关键水处理单元,主要用于去除水体中水溶性的氮化物。采用人工模拟海水养殖废水,在系统运行的水力停留时间 HRT 为 1h,水温为 18~25℃,气水比为 3:1,初始 C/N=3:1, pH 为 8.05~8.53 条件下,对竹子填料浸没式生物滤器的挂膜过程和稳定运行阶段系统去除氨氮的运行特性,以及挂膜过程中的硝化细菌群落变化进行了实验研究。结果表明,在较低的 NH_4^+-N 浓度条件下,采用竹子填料的生物滤器有较快的挂膜速度,挂膜成功后滤料表面上生长的氨氧化细菌和亚硝酸氧化细菌的数量分别为 4.5×10^5 、 1.5×10^5 (光面) 和 1.1×10^6 CFU/ml (粗面)。具有较高且稳定的氨氮去除效果,氨氮去除效率达到 80%,出水浓度小于 0.06 mg/L,满足海水循环养殖系统中的应用要求。

关键词 海水生物滤器 竹子填料 氨氮去除 硝化细菌 养殖废水

中图分类号 X55 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2009)01-0092-05

Pilot study on ammonium removal efficiency and nitrifying bacteria variety in marine biofilter charged with bamboo substrate

SHI Fang-yong¹ SONG Ben-ben² FU Song-zhe³
ZHANG Yan-qing¹ LIU Zhi-pei³ LIU Ying^{2*}

(¹ Qingdao Technological University, 266033)

(² Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071)

(³ Institute of Microbiology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

ABSTRACT Biofilter is the key water treatment unit of marine RAS (Recirculating Aquaculture System), and it plays an important role in water-soluble nitrogen removal. A pilot-scale experiment study was systematically carried out with synthetic aquaculture wastewater. The performances of ammonia removal in start-up and steady-state period were examined in the ma-

国家自然科学基金项目(30671620)、江苏省科技成果转化专项资金项目(BA2005039)、国家 863 计划项目(2006AA100305)和国家科技支撑计划项目(2006BAD09A03)共同资助

* 通讯作者。E-mail:yingliu@ms.qdio.ac.cn

收稿日期:2008-06-18;接受日期:2008-08-08

作者简介:石芳永(1983-),男,硕士研究生,主要从事环境工程研究。E-mail:shifangyong0806@yahoo.com.cn, Tel:13864866484

rine biofilters packed with bamboo medium. The hydraulic retention time, temperature, gas/water ratio, C/N and pH were 1 hour, 18~25°C, 3:1, 3:1 and 8.05~8.53, respectively. Results showed that marine biofilter packed with bamboo substrate enabled the nitrifying bacteria to grow rapidly, and the number of ammonia-oxidizing bacteria and nitrite-oxidizing bacteria was 4.5×10^5 CFU/ml, 1.5×10^5 CFU/ml (smooth) and 1.1×10^6 CFU/ml (crude) in steady-state period, respectively. The ammonia removal rate of biofilter was highly efficient. The ammonia nitrogen concentration in the effluent of bamboo biofilters was below 0.06 mg/L, which was much lower than the toxic level for almost all the aquaculture species.

KEY WORDS Marine biofilters Bamboo medium NH_4^+ -N removal
Nitrifying bacteria Aquaculture wastewater

随着海水养殖业的快速发展,养殖废水的任意排放已成为导致海洋环境污染的重要原因之一。工厂化封闭循环水养殖因其对环境污染小、产品优质、养殖生产受自然条件限制少,正成为海水养殖业发展的重要方向之一(冯志华等 2004)。在密度养殖水体中,鱼虾排泄物和残饵在细菌的分解作用下会产生 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 等对鱼类有害的物质,非离子态的氨(NH_3 -N)即使很低浓度也会对生物产生毒害作用(Chen *et al.* 2006),而亚硝酸盐作为氨转化为硝酸盐的中间产物,亦是诱发水生生物暴发性疾病的重要环境因子,因此采用循环水养殖,必须处理养殖过程中产生的各类有害物,以免影响养殖生物的正常生长,以及随意排放所造成的环境污染(王园园等 2004)。浸没式生物滤器作为污水生物处理关键技术单元,具有占地面积省、处理效率高和运行管理方便等优点。生物滤器通过反应器内微生物群体的生物氧化作用和生物絮凝作用、颗粒填料的吸附截留过滤作用以及微生物生态系统的食物链分级捕食作用等(杜茂安等 2001),可以高效去除污水中的氨氮、有机物和 SS 等。同时生物滤器中微生物固定生长的特点使微生物在反应器内能够获得较长的停留时间,因此亚硝化细菌和硝化细菌有足够的时间进行积累,从而使其对氨氮具有良好的去除效果,但由于海水的高盐度和养殖废水的寡营养及相对低温,增加了养殖废水的处理难度(宋志文等 2006),研究适合海水废水处理的生物滤器正成为研究热点(Simonel *et al.* 2002)。

本文研究了竹子填料(专利号:ZL02158870.8)的浸没式生物滤器(张延青等 2007)在挂膜阶段和稳定运行阶段除氮性能以及微生物群落变化,以期为海水工厂化封闭循环水养殖系统生物滤器的设计和生产管理提供理论依据。试验结果表明,竹子填料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,在海水养殖废水的处理中具有广阔的应用前景。

1 实验装置和方法

1.1 实验装置

实验系统示意图如图 1 所

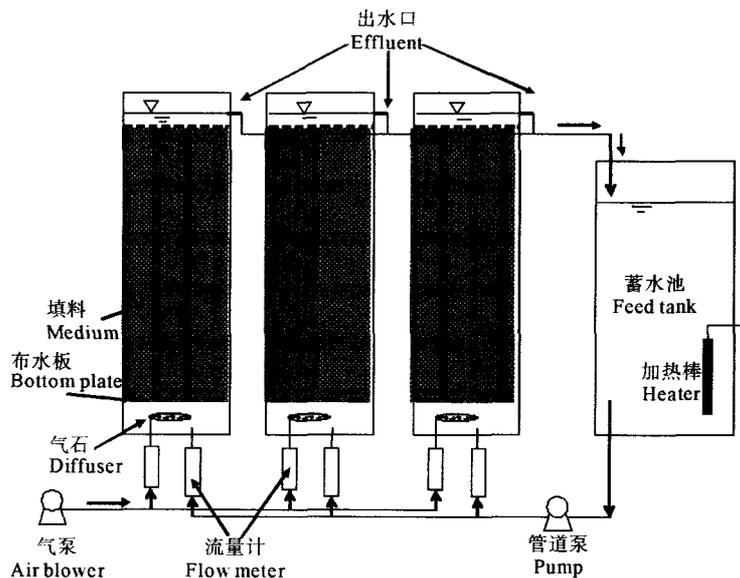


图 1 实验生物滤器

Fig. 1 Schematic diagram of biofilter system

示;实验生物滤器为圆柱形,直径为 $\phi 40$ cm、高为140 cm,用PVC材料制作,底部有气水混合室,内置进水口和曝气头,反应器采用上流式气水同向,出水流入蓄水池,循环运行。

人工模拟养殖废水由管道泵经蓄水池从反应器底部泵入,空气由气泵通过生物滤器底部的曝气盘进行曝气,每个生物滤器的进水和进气由液体流量计和气体流量计分别独立精确控制。

实验系统闷曝3 d后开始连续进水。挂膜阶段,通过人工投加 NH_4Cl 和葡萄糖来控制蓄水池中的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和COD浓度,采用 Na_2CO_3 调节pH维持在7.6~7.8,实验系统通过加热棒和温控仪维持实验系统温度在18~24 $^\circ\text{C}$,通过液体流量计和气体流量计调节,使系统水力停留时间HRT为1 h,气水比为3:1。实验生物滤器内装填的填料为竹球,近纺锤体形,直径为7.5 cm,高9.2 cm,周长为27 cm,重量为15 g,表观密度为 $0.385 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,比表面积约为 $9.009 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 。

1.2 模拟养殖废水

实验水为人工模拟海水养殖废水(Zhu *et al.* 1999),通过在蓄水池中连续投加 NH_4Cl 等营养物质,使其 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度维持在0.08~0.15 mg/L、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度小于0.002 mg/L,COD浓度为2 mg/L(见表1)。

1.3 水质及微生物指标采样方法和检测方法

在实验的挂膜和稳定运行阶段,分别从蓄水池中及生物滤器顶部的出水口采样,每日测定其氨氮和亚硝酸盐浓度,并计算氨氮去除效率,计算方法如下:

$$\text{去除率}(\%) = (\text{进水浓度} - \text{出水浓度}) / \text{进水浓度}$$

水质分析指标包括氨氮、亚硝酸盐、COD、溶解氧、pH值及温度,具体测定方法参考海洋监测规范(GB/T17378.3-1998)。填料表面生物膜中的氨氧化细菌和亚硝化氧化菌数量采用MPN法(Matulewich *et al.* 1975)。

2 结果和讨论

2.1 挂膜阶段氨氮去除效果

系统挂膜阶段进出水口的氨氮变化及去除率如图2所示。

图2的结果表明,采用竹子作为填料的生物滤器,在处理人工模拟养殖废水中有较好的除氮性能。挂膜初期系统进水氨氮浓度在0.08~0.11 mg/L、亚硝酸盐浓度为0 mg/L时,系统出水氨氮浓度小于0.06 mg/L并逐渐降低,在10 d后逐渐降低至0.02 mg/L左右,氨氮去除率从最初的40%上升至80%。这个阶段出水中亚硝酸盐浓度也保持较低水平,小于0.004 mg/L,表明氨氮转换率较高。从第11天起,逐步增大进水氨氮负荷,系统去除氨氮性能出现波动,出水氨氮浓度升高,去除率也有所下降,同时出现亚硝酸盐积累现象;继续运行14 d以后,系统恢复正常,出水氨氮浓度不断降低,去除率逐渐上升至87%,亚硝酸盐浓度也恢复到正常水平;系统运行约28 d时,出水氨氮和亚硝酸盐水平很低,氨氮去除效果高效且稳定,挂膜成功,相对于同样应用于海水养殖废水生物处理的沙子、活性炭和沸石填料

表1 人工模拟养殖废水营养液成分

Table 1 Synthetic nutrient of marine wastewater

成分 Ingredient	含量 Composition(g)
氯化铵 NH_4Cl	1 377
碳酸氢钠 NaHCO_3	3 500
硫酸镁 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	36
磷酸氢二钠 Na_2HPO_4	159
磷酸二氢钾 KH_2PO_4	153
三氯化铁 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	5

注:100 g上述物质的混合物中含有氨氮8.64g NH_3

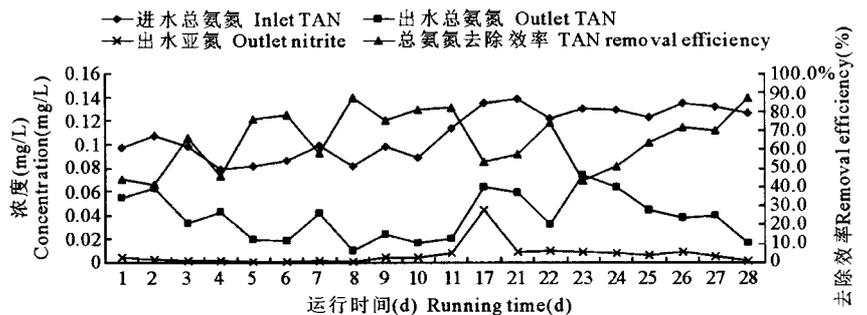


图2 挂膜阶段氨氮去除效果

Fig. 2 Ammonia removal rate during the start-up period

生物滤器,其生物膜熟化的培养时间为 90 d,本系统挂膜时间大大缩短(何 洁等 2003)。

2.2 稳定运行阶段

系统稳定运行阶段进出水口的氨氮变化及去除率如图 3 所示。

图 3 的结果表明,系统稳定运行阶段,进水氨氮浓度维持在 0.1~0.13 mg/L 时,出水氨氮浓度能保持在 0.02 mg/L 以下,去除率达 87%~95%,同时亚硝酸盐浓度也能维持较低水平,小于 0.002 mg/L,均低于大多数海水养殖鱼类的安全浓度,系统除氮性能稳定,能满足海水循环养殖系统的要求。在系统稳定运行阶段,生物滤器的氨氮去除速率约为 2.15 g/m³·d,表明即使在极低的氨氮负荷条件下,竹子填料生物滤器仍有高效的氨氮去除速率。

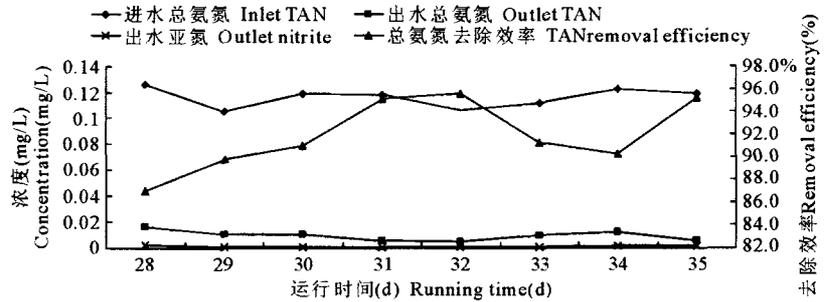


图 3 稳定运行阶段氨氮去除效果

Fig. 3 Ammonia removal rate during the steady-state period

2.3 硝化细菌数量变化情况

生物滤器运行期间载体填料上氨氧化细菌和亚硝酸氧化细菌的变化情况如图 4 和图 5 所示。

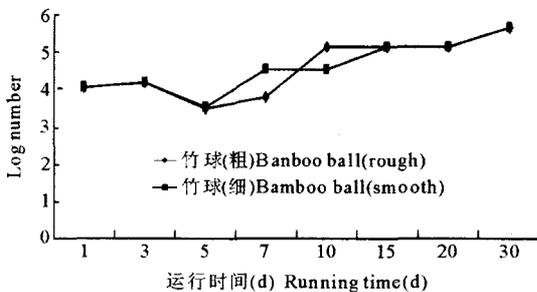


图 4 生物滤器运行期间载体填料上氨氧化细菌的变化情况

Fig. 4 The number variations of ammonia-oxidizing bacteria in the BAF

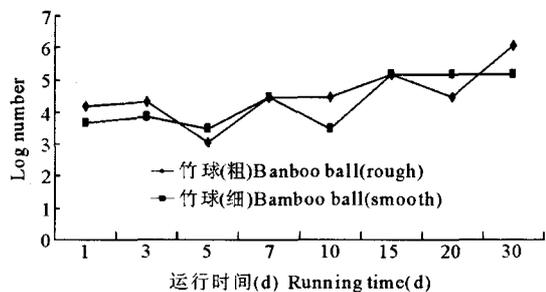


图 5 生物滤器运行期间载体填料上亚硝酸氧化细菌的变化情况

Fig. 5 The number variations of nitrite-oxidizing bacteria in the BAF

在系统挂膜期间,对填料表面不同部位生物膜中的氨氧化细菌(亚硝化细菌)和亚硝酸氧化细菌(硝化细菌)数量进行了分析,包括光滑的竹青表面和粗糙的竹黄表面。图 4 的结果表明,在系统挂膜阶段,氨氧化细菌菌群能迅速建立,并随着系统运行而数量逐渐增多,在挂膜的第 30 天,光面和毛面的氨氧化细菌数量都达到 4.5×10^5 CFU/ml。同时图 5 的结果表明,亚硝酸氧化菌也能迅速建立,随着系统运行而数量逐渐增多,光面和毛面的亚硝酸氧化细菌的数量分别为 1.5×10^5 和 1.1×10^6 CFU/ml。

同时,由图 4 图 5 可知,在系统挂膜初期氨氧化细菌和亚硝酸氧化细菌的数量有一定波动,且当进水氨氮负荷增大时,增长会受到一定限制,数量增加变缓,氨氮转化率下降,并出现亚硝酸盐的积累。在挂膜后期,两种细菌的数量增多并趋于稳定,氨氮去除效率较高且稳定,出水氨氮和亚硝酸盐很低。在挂膜过程中硝化细菌的数量变化会随氨氮负荷等条件的变化而变化,并进一步影响氨氮的去除和亚硝酸盐的积累。

这表明在高盐度寡营养的养殖废水处理中,作为生物填料的竹球,自身提供的有机营养物质和其特殊的孔

隙结构可使得硝化细菌迅速建立并具有稳定的附着能力,从而表现出良好的氨氮去除效果。同时,从图4和图5也可以看出,竹青和竹黄在氨氧化细菌和亚硝酸氧化菌在数量上没有显著性的差异。

3 结论

(1)采用竹子作为填料的生物滤器在处理人工模拟养殖废水时,能较为迅速地成功挂膜,氨氮去除效率逐步升高,并具有良好的抗冲击负荷能力。

(2)在系统稳定运行阶段,系统去除氨氮性能稳定,去除率高,能保证稳定的出水。出水氨氮浓度小于0.03 mg/L,满足循环水养殖系统中一般鱼类的可接受浓度水平。

(3)对竹球填料应进一步改性优化,使之有更适合的比表面积及良好的化学稳定性,开发适合海水封闭循环水养殖废水处理的高效生物填料。

参 考 文 献

- 王园园,洋进明,谢可军,苗香雯,崔绍荣. 2004. 工厂化水产养殖废水处理的研究与展望. 中国农机化, 5:54~56
- 冯志华,余志明,刘 鹰,刘志培. 2004. 封闭循环海水育苗系统生物滤器的应用. 中国环境科学, 24(3):350~354
- 杜茂安,邱立平. 2001. 曝气生物滤池处理生活污水的试验研究. 哈尔滨建筑大学学报, 34(4):34~36
- 宋志文,王 玮,赵丙辰,孙贤凤. 2006. 海水养殖废水的生物处理技术研究进展. 青岛理工大学学报, 7(1):13~16
- 张延青,王 森,刘 鹰. 2007. 利用竹球作为曝气生物滤池填料处理高浓度含氮海水的实验研究. 农业环境科学学报, 26(4):1 287~1 291
- 何 洁,刘长发,王 海,赵冰海. 2003. 3种载体生物滤器对养殖废水处理效果. 中国水产科学, 10(3):242~245
- Matulewich, V. A., Strom, P. F., and Finstein, M. S. 1975. Length of incubation for enumerating nitrifying bacteria present in various environments. *Appl. Microbiol.* 29(2):265~268
- Chen, S., Ling, J., and Blancheton, J. P. 2006. Nitrification kinetics of biofilm as affected by water quality factors. *Aquacultural Engineering*, 34, 179~197
- Simonel, I. S. 2002. Factors influencing the nitrification efficiency of fluidized bed filter with a plastic bead medium. *Aquacult. Eng.* 26, 41~59
- Zhu, S., and Chen, S. 1999. An experimental study on nitrification biofilm performances using a series reactor system. *Aquacult. Eng.* 20, 245~259