

# 循环水养殖系统生物挂膜的消氨效果及影响因素分析

傅雪军<sup>1,2</sup>, 马绍赛<sup>1\*</sup>, 曲克明<sup>1</sup>, 周勇<sup>1,2</sup>, 徐勇<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>农业部海洋渔业资源可持续利用重点开放实验室, 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071)

(<sup>2</sup>上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306)

**摘要:** 针对工厂化循环水养殖系统, 利用海水中的自然净化微生物挂膜, 挂膜成功后, 形成了很好的硝化作用, 进行不同水温、进水氨氮浓度、水力停留时间(HRT)影响因素实验。结果表明: 相同的进水氨氮浓度, 随着水温的升高, 不同水温之间氨氮浓度变化差异显著( $P<0.05$ ), 在 28 ℃ 水温时, 经过生物膜 120h 的净化处理, 进水氨氮浓度降低到最低; 随着进水氨氮浓度和 HRT 的增大, 氨氮去除率及特殊去除率也不断的增大, 但在同一进水氨氮浓度下, 氨氮特殊去除率随着水力停留时间的延长反而降低。

**关键词:** 循环水养殖系统; 生物滤池; 挂膜; 影响因素; 水力停留时间

Ammonia removal of bio-film and its impact factors in recirculation aquaculture systems

FU Xue-jun<sup>1,2</sup> MA Shao-sai<sup>1</sup> QU Ke-ming<sup>1</sup> ZHOU YONG<sup>1,2</sup> XU Yong<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory for Sustainable Utilization of Marine Fisheries Resources, Ministry of Agriculture, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, Qingdao 266071)

(<sup>2</sup> College of Fisheries & Life science, Shanghai Ocean University, 201306)

**ABSTRACT** Bio-film was successfully formed by making use of the natural purifying microbe in the sea for the industrial recirculation aquaculture systems. The nitrification impact factors, including water temperatures, influent ammonia-nitrogen concentrations and hydraulic retention time (HRT) were also explored. The results showed that at the same influent ammonia-nitrogen concentration and HRT, the ammonia-nitrogen concentrations changed significantly at different water temperatures ( $P<0.05$ ). When the water temperature was 28 ℃, after purified by bio-film for 120 hours, the influent ammonia-nitrogen concentration dropped to the lowest concentration. The ammonia-nitrogen removal rate and the specific ammonia removal rate were gradually increased as the influent ammonia-nitrogen concentration and HRT increased. However, at the same ammonia-nitrogen concentration, the specific ammonia-nitrogen removal rate decreased as HRT was prolonged.

**KEY WORDS** Re-circulating aquaculture systems Bio-filter Bio-film formation Impact factors Hydraulic retention time (HRT)

近年来, 我国的海水养殖业发展迅速, 养殖产量已连续多年位居世界首位, 养殖方式已慢慢由粗放、半精养型向集约化、高密度、高产出养殖模式转变, 但高密度集约化养殖其水产动物的大量粪便、分泌物以及残饵的累积, 使养殖水体中的 $\text{NH}_4^+$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N等含氮污染物的浓度增高, 导致养殖动物易于发病甚至死亡, 从而造成了水产养殖业的总产和单产下降、养殖成本增加(丁彦文等 2000); 如此同时养殖本身带来的能源、水资源大量消耗以及废水排放带来的问题等已成为限制水产养殖业可持续发展的重要原因之一。在工厂化循环水高密度集约化养殖系统中, 保持水温和各种理化指标的稳定, 高效在线去除各种水溶性有害污染物质, 特别是去除对养殖动物有强烈毒性的氨氮和亚硝氮(丁爱中等 2000), 是最重要环节。养殖废水的处理与循环利用是工厂化循环水养殖系统的最主要特点, 通过高效的水处理单元保持养殖用水的循环利用, 是维持生产正常进行的核心技术, 其中生物滤池对控制整个系统中的 $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N浓度起着关键作用(Nijhof M et al. 1990)。生物滤池对 $\text{NH}_4^+$ -N、

国家科技支撑计划项目(2006BAD09A03); 国家 863 计划项目(2006AA100305); 科技部农业科技成果转化资金项目(2007GB23260387)

收稿日期: 2009-01-09; 接受日期: 2009-03-27

\*通讯作者: E-mail: mass@ysfri.ac.cn, Tel: 0532-85813271

作者简介: 傅雪军(1984-), 男, 硕士研究生, 主要从事渔业环境与生物修复研究。E-mail: fuxuejun721@163.com, Tel: 13589341431

NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N的处理效果受诸多因素的影响,如滤料类型、水温、水力停留时间、底物浓度、有机负荷、溶氧、pH、碱度、反冲洗时间、生物膜厚度与年龄等(张杰等 2002;李汝琪等 1999; Pujol P et al 1998),其中温度、水力停留时间、进水氨氮浓度对生物滤池去除氨氮效率有很大的影响。

本文重点探讨了水温、进水氨氮浓度、水力停留时间(HRT)对挂膜成熟的生物滤池去除氨氮的影响,以期确定生物滤池运行的适宜条件,为工厂化循环水养殖系统中最优设计和生物滤池的正常运转及维护管理提供实验依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验材料

采用圆柱形的玻璃钢水槽作为实验生物滤池,其直径为1.0m,高为1.0m,有效体积为600L。生物载体是利用聚乙烯及聚丙烯纤维丝条(直径为0.5mm,比表面积为360m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)加工成弹性刷状生物载体,在水中呈均匀辐射状伸展,具有一定的柔韧性和刚性,使气、水、净化微生物之间充分接触,使净化微生物能均匀地附着在每一根纤维丝条上,从而获得巨大的比表面积。

### 1.2 生物滤池挂膜

利用微生态制剂(含有芽孢杆菌、乳酸菌、酵母菌等有益菌,有效活菌含量≥25亿/克)辅助海水中的自然净化微生物进行生物挂膜。实验用水是利用水泵抽取舌鳎养殖池的水,其水质指标为:氨氮0.14~0.17mg/L,亚硝氮0.015~0.032mg/L,硝氮0.31~0.36mg/L,磷酸盐0.046~0.058mg/L, COD<sub>Mn</sub> 5.28~5.36 mg/L, pH7.96~8.22,盐度30。在生物滤池启动阶段,为了保证净化生物能快速的挂膜,添加营养物质:葡萄糖、氯化铵、亚硝酸钠、磷酸二氢钾、磷酸二氢钠、硫酸锰,使氨氮为5mg/L,亚硝氮为0.08mg/L, pH在8.0±0.5, DO≥6mg/L,温度在20~24。每隔一天测定一次滤池中氨氮、亚硝氮浓度的变化。

### 1.3 影响氨氮去除因素实验设置

实验设置16、20、24、28和32五个不同温度组,通过加热棒加热控制生物滤池水温。生物滤池稳定2天后,设置进水氨氮浓度为1mg/L,通过调节蠕动泵流量使水力停留时间控制在36min,测定24、48、72、96、120h内滤池中氨氮浓度的变化。另外设置不同进水氨氮浓度组(0.25 mg/L、0.50 mg/L、1.0 mg/L和2.0mg/L)和不同水力停留时间(18min、36min和54min)的双因子实验,测定氨氮去除率(Ammonia removal rate, NR%)和氨氮特殊去除率(Specific ammonia removal rate, SNR, mg TAN/m<sup>2</sup>-day)。

$$NR=(TAN_i-TAN_e)/TAN_i*100\%;$$

$$SNR=(TAN_i-TAN_e)*Q*24/A$$

TAN<sub>i</sub>、TAN<sub>e</sub>分别指进、出水总氨氮浓度(mg/L),Q为水体经过生物滤池的速度(L/h),A为悬挂在生物滤池中载体总表面积(m<sup>2</sup>)(Kuo-Feng et al 2004)。

### 1.4 数据处理及水质指标检测方法

数据处理采用 Origin7.5 软件。水质指标的检测依据《海洋监测规范》(GB 12763.4-2007):氨氮采用次溴酸盐氧化法,亚硝酸盐采用萘乙二胺分光光度法, pH 采用复合电极法,溶氧采用 RSS-5100 型溶氧仪,温度采用温度计。

## 2 结果与分析

### 2.1 净化微生物挂膜阶段氨氮、亚硝氮浓度变化

生物膜培养过程中,随着净化微生物不断的扩繁与生长,对氨氮的去除能力不断增强,氨氮浓度发生显著变化。在初始氨氮浓度为 5mg/L 时,经过 2 天的时间,净化微生物将氨

氨浓度降低到 0.63mg/L，挂膜第 2~20 天氨氮浓度缓慢变化，降低到 0.41mg/L，随后氨氮浓度下降速度加快，第 40 天其浓度低于 0.05mg/L，最终氨氮浓度稳定在 0.025mg/L 左右。亚硝氮浓度变化是先经过快速升高然后缓慢下降过程，第 12 天后出现峰值，然后在峰值上稳定 7 天左右，即亚硝氮的积累，这与邱立平等 (2004) 报道过高的氨氮浓度易于亚硝氮的积累现象相符，这说明亚硝化作用造成亚硝酸氮的积累大于硝化作用对亚硝酸氮的消耗，最终浓度稳定在 0.025mg/L，表明硝化细菌群已建立成熟，硝化作用显著。生物膜将氨氮氧化为亚硝氮最终氧化为硝氮需要 45 天的时间(图 1)，这与 Harayama K(1974)和 Forste JR.M (1974) 研究结果相符，最终生物滤池硝化功能建立成熟。

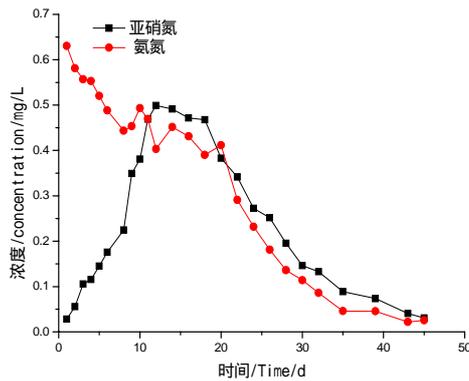


图 1 生物膜培养过程中氨氮、亚硝氮浓度变化

Fig.1 Ammonia-nitrogen and nitrite-nitrogen concentration changes during cultivation of biofilm

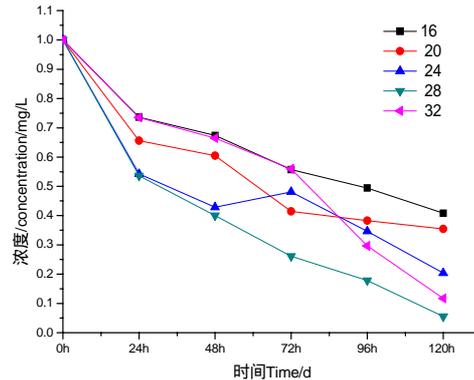


图 2 温度对生物膜去除氨氮的影响

Fig. 2 Effects of bio-film preparation at varied temperature on ammonia nitrogen removal

## 2.2 氨氮去除影响因素实验

### 2.2.1 温度对氨氮去除的影响

温度的变化对生物膜的增长及其活性、生化反应速率、以及水体中氧气浓度有很大影响 (冯志华等 2004)。当温度低于一定值时，净化微生物细胞膜呈凝胶状态，营养物质的运输受阻，细胞会因缺乏营养而停止生长；但是当温度高于一定值时，细胞的某些组分，如蛋白质和核酸开始变性，细胞也就难以生长甚至导致死亡 (郑平等 2004)。一般而言，硝化细菌的繁殖速率较低，在低温条件下繁殖速率更低，适合硝化细菌生长繁殖的温度在 25~35 范围内 (李辉华等 2005)。从图 2 中可看出，相同的进水氨氮浓度 (1mg/L)，随着水温的升高和时间的延长，氨氮浓度下降速度加快，28 水温其氨氮浓度降低最快，经过生物膜 120h 的净化处理，最终氨氮浓度为 0.055mg/L，而 16、20、24、32 水温其最终氨氮浓度分别为 0.41mg/L、0.35mg/L、0.20mg/L、0.12mg/L，不同水温之间氨氮浓度变化呈显著性差异 ( $P < 0.05$ )，生物膜在 28 水温去除氨氮效果更显著。这与大多数人认为硝化细菌在 16~32 范围内对氨氮的去除效果最好相一致 (Susumu et al 1987；王磊等 1997；赵兴利等 1999)，该净化微生物生长环境的最适温度在 28 左右。

### 2.2.2 不同进水氨氮浓度和不同水力停留时间对氨氮的去除效果

氨氮浓度变化对其去除率及特殊去除率产生显著影响，有研究表明，在海水浸没式生物滤池中，当氨氮浓度  $> 2\text{mg/L}$ 、 $\text{DO} > 5\text{mg/L}$  时，硝化反应仅受其自身反应速率的限制 (Bovendeur.J et al 1987)，本实验设置进水氨氮浓度  $\leq 2\text{mg/L}$ ，生物滤池曝气充分，DO 保持在 5mg/L 以上，氨氮去除率及其特殊去除率如图 3 和 4 所示。在一定的 HRT 条件下，随着进水氨氮浓度的增大，其去除率和特殊去除率也不断增大，越高的进水氨氮浓度，其去除率和特殊去除率越大。同时在一一定的进水氨氮浓度下，氨氮去除率随着水力停留时间的延长而不断增大，但其特殊去除率随着 HRT 的延长却减小。进水氨氮浓度为 2mg/L、HRT 为 54min，

其去除率最大,为 69.49%,特殊去除率为 53.38 mg TAN/m<sup>2</sup>-day,而在相同的进水氨氮浓度, HRT 为 18min,其氨氮特殊去除率显著高于 HRT 为 54min 时特殊去除率,为 127.19mg TAN/m<sup>2</sup>-day,表明进水氨氮浓度和 HRT 对其去除率和特殊去除率影响显著( $P < 0.05$ ),氨氮去除率最大时的 HRT 并不是特殊去除率最大时的 HRT\*。在循环水养殖系统

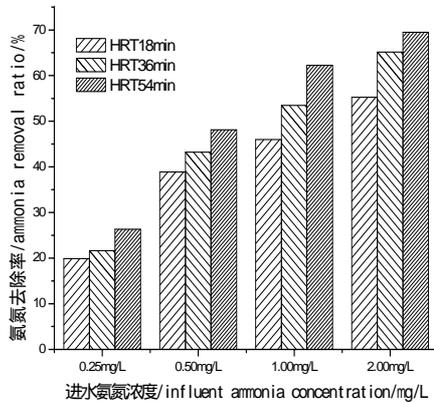


图 3 进水氨氮浓度、水力停留时间与氨氮去除率关系

Fig. 3 Relationship between influent ammonia concentration, HRT and ammonia removal ratio

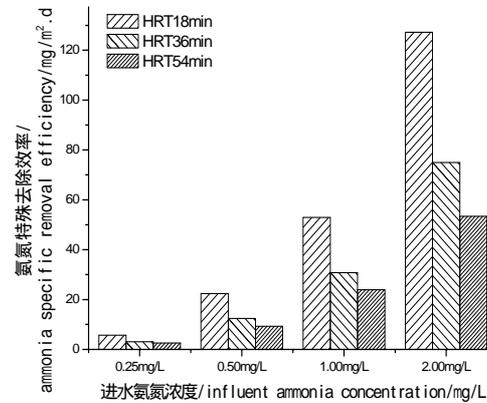


图 4 进水氨氮浓度、水力停留时间与氨氮特殊去除率的关系

Fig. 3 Relationship between influent ammonia concentration, HRT and specific ammonia removal ratio

中,氨氮特殊去除率代表着生物膜的净化能力。较短的 HRT 对氨氮特殊去除率较大,但水流速率过大情况下,对生物膜冲刷较大,影响生物膜的活性且能耗大。较长的 HRT 对氨氮去除率较大,但会使生物滤池中氨氮浓度处在一个不必要的低浓度状态,影响生物膜的稳定性,这将从总体上影响硝化作用速率。有研究指出,水力停留时间对氨氮去除影响呈双曲线关系(许保玖等 2000;刘飞等 2004),即存在一个使氨氮去除最大的水力停留时间(HRT\*),当水力停留时间小于 HRT\* 时,氨氮去除效率受到氨氮浓度的扩散和接触的限制;当水力停留时间大于 HRT\* 时,氨氮去除率受到氨氮浓度降低过快的限制,使生物滤池氨氮浓度处在一个低浓度下,从而影响硝化反应的速率,即过长的水力停留时间可能使生物膜反应器在一段时间内“空转”。因此,调节水力停留时间对生物滤池的正常运转具有十分重要的意义。

### 2.3 生物膜运行条件分析

养殖废水属于低浓度废水,适宜的水力负荷不但会提高生物膜与底物接触的几率,使溶解氧和营养物质及时达到生物膜表面以及扩散传递到生物膜内,且可保持附着的具有降解活性的生物膜不被冲刷脱落。而生物膜浓度主要由废水中的有机底物浓度决定,这个浓度又由水力负荷、载体类型和微生物性质等控制(许保玖等 2000)。因此,循环水养殖系统中生物膜运行应主要考虑到水温、水力停留时间、进水氨氮浓度因素影响。本实验在不同水温、进水氨氮浓度、水力停留时间影响因素条件下,测定了氨氮浓度变化及其去除率和特殊去除率。结果表明,随着进水氨氮浓度、HRT 的增加,氨氮去除率也不断的增加,但在同一氨氮浓度下, HRT 越长,其氨氮特殊去除率反而降低,即 HRT 越短,氨氮特殊去除率越高。但在越短的 HRT 条件下,系统循环量大,能耗高,且对滤池中的生物膜有很大的冲刷磨损作用,影响生物膜处理氨氮效果的稳定性,不利于循环水养殖系统的运行;随着水温的升高,进水氨氮浓度显著降低,且 28℃ 水温氨氮浓度降低最快,但实际系统生产运行时不可能达到如此高的水温,所以考虑一个适宜的水温对生物膜运行很有必要。综合考虑上述因素,根据所做的模拟循环水系统实验,认为循环水养殖系统生物膜运行的 HRT 为 36min,系统运行水温在 20℃ 以上时具有很好的氨氮去除效果。当然,生物膜运行条件的确定还需根据系

统运行条件的具体情况来定。

### 3 小结

在实验条件下,设置五个温度,随着温度的升高,对氨氮的去除率不断升高,表明温度对生物膜去除氨氮产生显著影响( $P<0.05$ ),得出了净化微生物生长的最适温度为 28 。一般在水温 $>20$  时,可以满足净化微生物的生长要求,能较好的降低氨氮浓度。

水力停留时间对氨氮的去除有显著影响( $P<0.05$ ),总氨氮浓度一定情况下,水力停留对氨的去除影响呈双曲线关系,即存在一个对氨氮去除率最大的 HRT \*。本实验过程中,在不同进水氨氮浓度下,随着水力停留时间的增大,氨氮去除率不断增大,但氨氮特殊去除率却降低,得出生物膜运行的适宜 HRT 为 36min。

### 参考文献：

- 丁彦文,艾红.2000.微生物在水产养殖中的应用.湛江海洋大学学报,20(1):68~73.
- 丁爱中,陈繁忠,雷剑全,等.2000.光合细菌调控水产养殖业水质的研究.农业环境保护,19(6):339~341.
- 王磊,兰淑澄.1997.固定化硝化菌去除氨氮的研究.环境科学,18(2):18~23.
- 李汝琪,钱易,孔波,等.1999.曝气生物滤池去除污染物的机理研究.环境科学,20(6):49~52.
- 李辉华,朱学宝,谭洪新,等.2005.闭合循环系统中固定化活性污泥降解氨氮的研究.环境科学与技术,28(1):16~18.
- 许保玖,龙腾锐.2000.当代给水与废水处理原理(第二版).北京:高等教育出版社,78~111.
- 刘飞,胡光安,韩舞鹰.2004.水力停留时间、水温与氨氮浓度对浸没式生物滤池氨氮去除速率的效应.淡水渔业,34(1):3~5.
- 郑平,徐向阳,胡宝兰.2004.新型生物脱氮理论与技术.北京:科学出版社,187~190.
- 赵兴利,兰淑澄.1999.固定化硝化菌去除废水中氨氮的研究.环境科学,20(1):39~42.
- 冯志华,愈志明,等.2004.封闭循环海水育苗系统生物滤池的应用.中国环境科学,24(3):350~354.
- 邱立平,马军,张立昕.2004.水力停留时间对曝气生物滤池处理效能及运行特性的影响.环境污染与防治,26(6):433~436.
- 张杰,曹相生,孟雪征.2002.曝气生物滤池的研究进展.中国给水排水,18(8):26~29.
- Bovendeur J, Eding E.H, Henken A.M. .1987. Design and performance of a water recirculation system for high-density culture of the African Catfish .Aquaculture, 63(4):329~353.
- Forste JR M. .1974. Study on nitrification in marine biological filters. Aquaculture, 4:387~397.
- Harayama K. .1974. Water control in filtration in close culture systems. Aquacultur, 12:369~385.
- Kuo-Feng Tseng, Kuo-Lin Wu. 2004. The ammonia removal cycle for a submerged biofilter used in a recirculating eel culture system. Aquacultural engineering, 31:17~30.
- Nijhof M ,Bovendeur .1990.Fixed film nitrification characteristics in sea-water recirculation fish culture systems .Aquaculture, 87(2):133~143.
- Pujol P, Lemmel H. Groudsilles M. .1998. A key point of nitrification in an upflow bio-filtration reactor. Water Science Technology, 38(3):43~49.
- Susumu H, Furukawa K.1987. Immobilization of activated sludge by PVA-boric method.Biotech Bioeng, 30:52~59.