

# 一种新型滤料在循环养殖水处理中的应用

宋协法 曹涵 彭磊  
(中国海洋大学水产学院, 青岛 266003)

**摘要** 实验研究了填充新型无剩余污泥悬浮型生物滤料的曝气生物滤池处理养殖废水的挂膜情况及水力停留时间(HRT)变化对曝气生物滤池处理效果及运行特性的影响。结果表明,含氨氮和亚硝酸氮浓度较高的模拟养殖污水用活性污泥挂膜,大约1个月就能使生物滤池启动。当模拟养殖污水氨氮起始浓度在2 mg/L左右时最佳水力停留时间(HRT)为0.6 h循环6 d能使氨氮浓度降到0.03 mg/L左右,亚硝酸氮有短期积累问题,但最终都能被降到0.05 mg/L以下。水力停留时间影响氨氮的去除时间,从而影响亚硝酸氮的积累。水力停留时间(HRT)对有机物(COD<sub>Mn</sub>)去除影响不大,且该种滤料对有机物(COD<sub>Mn</sub>)去除效果较差,去除率在28%左右。

**关键词** 新型生物滤料 循环养殖水处理 水力停留时间(HRT) 曝气生物滤池

中图分类号 S953 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2007)12-0027-05

## Application of a new plastic filter in treatment of aquaculture water for reuse

Song Xiefa Cao Han Peng Lei  
(Fisheries College, Ocean University of China, Qingdao 266003)

**Abstract** Biological aerated filter(BAF) packed with new suspension plastic filter was used for treatment of aquaculture water for reuse, and the establishment of its function and the hydraulic retention time(HRT) how to affect its treatment effect were investigated. The result shows that activate sludge cultivated the BAF filled in simulation culture wastewater, it only takes about one month to establish the BAF function, and that condition of HRT 0.6 h, as well as the influent NH<sub>4</sub>-N being 1.98 mg/L is the best of the three HRTs. The biofilter system circulated six days can make the influent NH<sub>4</sub>-N come down to 0.03 mg/L. The nitrite-N has a short time accumulation, but also can be dropped to 0.05 mg/L at last. HRT affect the removal of NH<sub>4</sub>-N, and then affect the removal of nitrite-N. The removal of COD<sub>Mn</sub> is affected insignificantly by HRT, and the removal rate of COD<sub>Mn</sub> is about 28% in this system.

**Key words** biological aerated filter(BAF); aquaculture wastewater treatment; hydraulic retention time(HRT); new suspension plastic filter

近几年,随着水环境污染的日益加剧,水产养殖逐步从粗放型养殖向集约型养殖发展,集约型养殖中养殖生物产生的代谢产物、残饵及残骸是水质的主要污染源。水处理技术成为养殖成功与否的关键。生物膜法因具有生污泥少、运行管理方便、动力消耗少等特点,在海水养殖废水处理方面得到了广泛应用<sup>[1-3]</sup>。曝气式生物滤池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<sup>[4-6]</sup>。

本文研究了采用填充新型无剩余污泥悬浮型生物滤料的曝气生物滤池在不同水力停留时间下对有机物、氨氮和亚硝化氮的去除能力,为无剩余污泥悬浮型生物滤料在曝气生物滤池中的应用与设计提供

理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

本实验装置如图1所示。本试验采用3个曝气式生物滤池并联运行的方式,每个曝气生物滤池(BAF)采用直径50 cm、高为1.5 m的pp塑料板焊接成圆柱状筒。滤料采用青岛中科海水处理设备有限公司提供的无剩余污泥悬浮型生物滤料。滤料为塑料球型,中空且有叶片,呈多面空心球状,其比表

基金项目:国家高技术研究发展计划“863”项目(2003AA620304)

收稿日期:2007-04-25; 修订日期:2007-09-05

作者简介:宋协法(1964~),男,博士,教授,主要从事设施渔业研究。E-mail: yuchuan@ouc.edu.cn

面积为  $600(\text{m}^2/\text{m}^3)$ 、密度  $0.85(\text{kg}/\text{m}^3)$ 、孔隙率  $>99\%$ 。

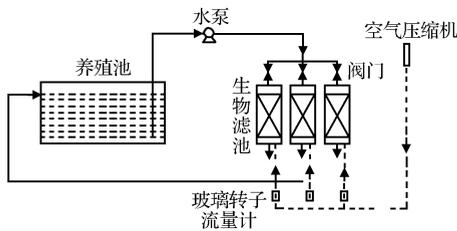


图1 试验装置

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

## 1.2 实验方案设计

### 1.2.1 循环水养殖水质要求

国外学者 Losordo 等<sup>[7]</sup> 提出循环水养殖所必需达到的一些主要的水质指标。其水质要求如下:氨氮  $0.02 \sim 0.5 \text{ mg/L}$ ,亚硝酸氮  $\leq 0.2 \text{ mg/L}$ ,  $\text{BOD} \leq 5 \text{ mg/L}$ ,  $\text{SS} \leq 10 \text{ mg/L}$ ,硝酸氮  $\leq 1000 \text{ mg/L}$ ,  $\text{pH} 6 \sim 9$ 。

### 1.2.2 试验用水水质

本试验用水采用模拟养殖污水,模拟养殖污水是将葡萄糖、氯化铵、磷酸氢二钠、磷酸氢二钾、一水硫酸锰按比例溶解后加入海水。模拟养殖污水水质范围波动很小,其水质指标如下:氨氮  $1.96 \sim 1.98 \text{ mg/L}$ ,亚硝酸氮  $0.065 \sim 0.078 \text{ mg/L}$ ,  $\text{COD}_{\text{Mn}} 8.65 \sim 8.84 \text{ mg/L}$ ,  $\text{pH} 7.6 \sim 8.0$ ,盐度  $30\text{‰}$ 。

在生物滤池启动阶段为了保证氨氧化菌和硝化细菌在生物膜中处于优势地位,生物滤池启动实验用水是在模拟养殖污水中加入氨盐和亚硝酸盐使氨氮和亚硝酸氮处于较高的浓度,生物滤池启动水质如下:氨氮  $4.28 \text{ mg/L}$ ,亚硝酸氮  $0.15 \text{ mg/L}$ ,  $\text{COD}_{\text{Mn}} 8.87 \text{ mg/L}$ ,  $\text{pH} 7.4$ ,盐度  $3\text{‰}$ 。

### 1.2.3 生物滤池启动

本试验采用活性污泥挂膜法启动生物过滤器。接种污泥取自中国水产科学研究院黄海水产研究所青岛大麦岛育苗厂养殖池底。将接种污泥和模拟养殖污水混匀加入生物滤池中。静置 1 d 使污泥与滤料充分接触,然后曝气 3 d 后打开阀门换入有较高氨氮和亚硝酸氮浓度的生物滤池启动水。启动期间每隔 2 d 取样测定氨氮和亚硝酸氮浓度。启动阶段每天测定  $\text{pH}$  值、 $\text{DO}$  值及盐度。使  $\text{pH}$  值维持在  $7 \sim 8$  之间,  $\text{DO}$  值在  $6 \text{ mg/L}$  左右,盐度控制在  $30\text{‰}$  左右。温度控制在  $24 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

### 1.2.4 不同水力停留时间下生物滤池的处理效果

在生物滤池正常运行期间,设定 3 个水力停留

时间,分别是  $0.4 \text{ h}$ 、 $0.6 \text{ h}$  和  $0.8 \text{ h}$ 。水力停留时间 (HRT) 是通过调节进水阀门的开度来实现。每天在 3 个生物滤池总进水处和总出水处取水样测量氨氮浓度、亚硝酸氮浓度。 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  每隔 1 d 测定一次,当一个水力停留时间试验结束后重新更换新的模拟养殖污水进行下一个水力停留时间的实验,在每个水力停留时间试验期间加入适量模拟养殖污水保证总量基本不变。每天测定  $\text{pH}$  值、 $\text{DO}$  值及盐度。使  $\text{pH}$  值维持在  $7 \sim 8$  之间,  $\text{DO}$  值在  $6 \text{ mg/L}$  左右,盐度控制在  $30\text{‰}$  左右。温度控制在  $24 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

## 1.3 水质指标的检测方法

氨氮:苯酚-次氯酸盐比色法。

亚硝酸氮:磺胺-萘乙二胺比色法。

$\text{pH}$ : Orion 3 star 多功能  $\text{pH}$  计 (Thermo electron corporation USA)。

溶氧 ( $\text{DO}$ ): YSI 溶氧仪 (YSI incorporation USA)。

盐度: ATAGO 手持盐度计 (ATAGO CO, LTD Japan)。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 生物滤池启动阶段

海水养殖废水因其水质和对处理水的要求不同于一般的生活污水和工业污水。所以当用生物膜法处理海水养殖废水时其功能的启动要长于一般的生活污水和工业污水。Nijhof<sup>[8]</sup> 实验得出海水建立生物过滤器硝化功能需要  $40 \sim 80 \text{ d}$  的结果,作者认为这与其所加入的营养成分、量及生物滤料不同有很大的关系。

本试验生物滤池启动阶段氨氮、亚硝酸氮的变化情况见图 2。

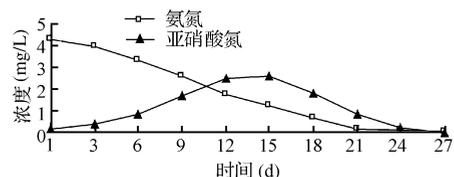


图2 生物滤池启动阶段氨氮、亚硝酸氮的变化

Fig.2 Fluctuations of ammonia and nitrite during the biofilter establishment

从图 2 中可以看出,氨氮浓度在试验启动的前 21 d 一直有下降的趋势,前几天下降缓慢,从试验的第 12 d 开始到试验的第 21 d 下降非常快。最后

氨氮浓度趋于稳定不变。亚硝酸氮浓度开始是缓慢升高达到最高值然后缓慢降低。一般认为在海水处理中当亚硝酸氮浓度快速下降时认为生物滤池启动成功<sup>[9]</sup>。本试验采用活性污泥启动法,大约 27 d 左右亚硝酸氮就降到 0.031 mg/L,可以认为启动成功。

## 2.2 不同水力停留时间对氨氮去除效果的影响

在工厂化循环水养殖中,对水中氨氮浓度要求严格,氨对鱼的毒性很强,通过鳃和皮肤很快进入血液,可以干扰鱼体正常的三羧酸循环、改变鱼体渗透压以及降低鱼体对水中氧的利用能力。因此在循环水养殖水处理中快速降低氨氮浓度也是比较关键的。本试验设定水力停留时间分别为 0.4 h、0.6 h 和 0.8 h 其处理模拟养殖废水中氨氮情况如图 3 所示。

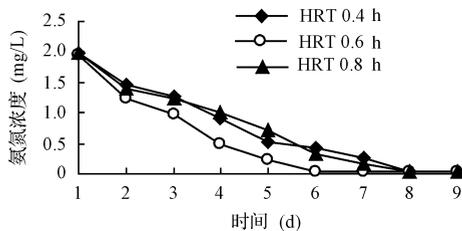


图 3 不同水力停留时间对氨氮的去除效果

Fig. 3 Removal effect of  $\text{NH}_4\text{-N}$  by difference HRT

图 3 可知,当系统运行至第 9 d 时,每个水力停留时间都能使氨氮浓度降至 0.035 mg/L 以下,氨氮的去除率都在 98% 以上。根据与循环水养殖的水质要求相比较,3 个水力停留时间下经过几天处理都达到了循环水养殖对氨氮的浓度要求。且 3 个水力停留时间都是前 5 d 氨氮浓度降低得比较快,以后逐渐减缓。从图 3 可以看出,水力停留时间为 0.6 h 时,生物滤池对氨氮的去除明显要快于其他两个水力停留时间,且当系统运行至第 6 d 时氨氮浓度降至 0.032 mg/L。而当水力停留时间为 0.4 h 时对氨氮的去除最慢,系统运行至第 8 d 时氨氮浓度才达到 0.035 mg/L。水力停留时间为 0.8 h 时虽然对氨氮去除要稍快于水力停留时间为 0.4 h,但明显慢于水力停留时间为 0.6 h 时氨氮的去除。其也是在运行至第 8 d 才使氨氮浓度降到 0.035 mg/L。从图 3 中可以看出,在水力停留时间为 0.4 h 和 0.8 h 下,氨氮浓度波动比水力停留时间为 0.6 h 要大。从图 3 还可以看出,此生物水处理系统对处理水中氨氮浓度有一个最低限。如图 3 所示,当氨氮浓度

低于 0.035 mg/L 时氨氮浓度几乎不再发生变化。

不同的水力停留时间对氨氮的处理效果有显著的影响。Kim 等<sup>[10]</sup>通过实验得出在一定水温、总氨氮浓度条件下,水力停留时间对氨氮去除率的影响是双曲线,即存在着氨氮去除率最大的水力停留时间。通过实验可知,在温度、pH 值不变的前提下,生物滤池在水力停留时间为 0.6 h 时均取得最佳的除氨氮效果,水力停留时间为 0.4 h 和 0.8 h 的氨氮去除速度比 0.6 h 时的氨氮去除速度都要低,这说明在循环养殖水处理中存在着一个最佳水力停留时间  $\text{HRT}^*$ ,这和 Kim 得出的结论相符合。当水力停留时间小于  $\text{HRT}^*$  (氨氮去除率最大时的水力停留时间)时,氨氮的去除率开始受到基质扩散与接触的限制;从生物膜微生态环境角度考虑,水力停留时间降低必将导致水力负荷和气流剪切力的增加,使得异氧菌生长迅速,生物膜更新速度加快,系统的生物膜振荡性加强,这就使得世代时间长,对生长环境要求苛刻的氨氧化菌在竞争中处于不利地位。而当水力停留时间过长,单位时间与生物膜接触的基质有限即氨氮的负荷过低使得生物滤池的处理功能得不到充分的发挥,这也使得生物滤池对氨氮去除速度变慢。刘飞等<sup>[11]</sup>在实验中也曾说明这个问题,当水力停留时间大于  $\text{HRT}^*$  时,氨氮的去除率开始受到基质浓度降低过快的限制,形象的比喻是,过长的水力停留时间可能使得生物反应器一段时间内“空转”。找到去除氨氮效果最好的水力停留时间可以为生产企业节约开支、提高滤池效率。

## 2.3 不同水力停留时间对亚硝酸氮去除效果的影响

亚硝酸盐能迅速渗透到鱼体,使血液中和氧结合的亚铁血红蛋白失活,使之成为铁血红蛋白,从而失去携带氧的功能,即使有较高的溶解氧也会使鱼缺氧死亡。所以在养殖水中要保持较低的亚硝酸盐浓度。本试验也研究了不同水力停留时间下对亚硝酸氮的去除情况,其处理结果如图 4 所示。

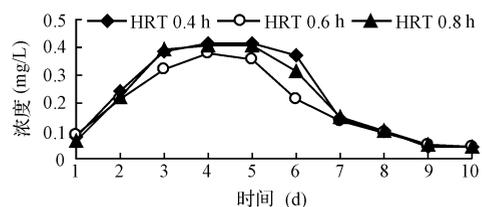


图 4 不同水力停留时间对亚硝酸的去除效果

Fig. 4 Removal effect of  $\text{NO}_2\text{-N}$  by difference HRT

通过图4可知,在3个水力停留时间下都有一定的亚硝酸氮积累,亚硝酸氮浓度开始上升最高值可达0.41 mg/L,并且都要持续一段时间。经过9 d运行,在3个水力停留时间下亚硝酸氮浓度都降到0.04 mg/L。通过与表1比较可知3个水力停留时间下经过几天的运行都能达到循环水养殖的亚硝酸氮浓度要求。水力停留时间为0.4 h时亚硝酸氮积累最为严重,从系统运行开始第3 d亚硝酸氮浓度就在0.40 mg/L上下,并持续到第7 d才降至0.13 mg/L,运行至第9 d亚硝酸氮浓度降至0.04 mg/L。亚硝酸氮积累在水力停留时间为0.8 h时没有水力停留时间为0.4 h时严重,在高浓度的持续时间要比水力停留时间为0.4 h要短,从第6 d开始亚硝酸氮浓度就开始下降。亚硝酸氮积累最轻的是水力停留时间为0.6 h。在这个水力停留时间下亚硝酸氮的最高浓度为0.37 mg/L,比水力停留时间为0.4 h和0.8 h的0.42 mg/L和0.41 mg/L要低。并且在水力停留时间为0.6 h时系统运行到第5 d时亚硝酸氮浓度开始下降。

目前关于亚硝酸氮的积累的研究报道很多,Laanbroek等<sup>[12]</sup>认为,由于氨化细菌和消化细菌在比增长速率和饱和氧常数等方面的不同,使其在生物膜中处于不同的空间位置,所以在一定的条件下生物反应器中会出现亚硝酸氮的积累。从生物膜体系来看,异养菌和氨氧化细菌对氧的争夺能力都要强于硝化细菌,故硝化细菌的代谢优势区只能存在于亚硝酸盐和溶解氧较高,而有机物和氨氮浓度较低的区域。邱立平等<sup>[13]</sup>报道关于亚硝酸氮积累形成的原因主要包括游离氨浓度过高、溶解氧不足和有机物浓度过高等。本试验在系统运行过程中控制了溶解氧的变化,使溶解氧一直维持在一定的范围且有机物的变化不大。所以可以认为,在本次试验中不同水力停留时间引起的亚硝酸氮的浓度变化不同,是因为不同的水力停留时间对氨氮的去除速度不同使进入生物滤池的氨氮浓度不同,从而影响亚硝酸氮的积累。水力停留时间为0.6 h时对氨氮的去除速度最快,使得进入生物滤池的氨氮浓度降低快,所以亚硝酸氮积累没有水力停留时间为0.4 h和0.8 h严重。

#### 2.4 不同水力停留时间对有机物(COD<sub>Mn</sub>)去除效果的影响

在工厂化循环养殖中,有机物(COD<sub>Mn</sub>)主要来源于鱼的代谢、残饵等,如果有有机物(COD<sub>Mn</sub>)浓度过

高会使水中溶解氧下降,从而影响鱼的生长。所以在工厂化循环水养殖水处理中对有机物(COD<sub>Mn</sub>)去除也是一个很重要的指标。本试验也研究不同水力停留时间下这种新型滤料对有机物(COD<sub>Mn</sub>)的去除情况,试验为隔天取样。其结果列于图5。

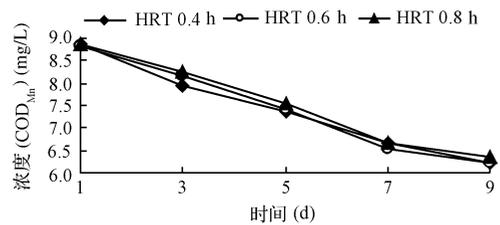


图5 不同水力停留时间对有机物(COD<sub>Mn</sub>)的去除效果

Fig.5 Removal effect of COD<sub>Mn</sub> by difference HRT

通过图5可知,此生物滤池中填充的生物滤料对有机物(COD<sub>Mn</sub>)的去除率不高。系统处理9 d后3个水力停留时间的去除率分别是29.7%、29.6%和28.1%。3个水力停留时间下有机物(COD<sub>Mn</sub>)的去除率几乎相同。由此我们可以看出水力停留时间对有机物(COD<sub>Mn</sub>)的去除影响不大。从生物膜微生态环境角度考虑异氧菌和氨氧化菌存在着生长竞争,在本试验启动阶段氨氮的浓度很高,约为5 mg/L。这就使得异氧菌的生长受到了限制。从而使得有机物(COD<sub>Mn</sub>)的去除率不高。

### 3 结论

(1) 水力停留时间对氨氮去除有显著影响,总氨氮浓度一定条件下,水力停留时间对氨氮去除率的影响是双曲线,即存在着氨氮去除率最大的水力停留时间。本试验得出填充了新型无剩余污泥滤料的生物滤池对氨氮的最佳水力停留时间为0.6 h。

(2) 3个水力停留时间下都有一定的亚硝酸氮积累。但经过9 d循环处理都能降到0.04 mg/L左右。且在3个水力停留时间中,水力停留时间为0.6 h时亚硝酸氮的积累没有与其他两个水力停留时间严重。

(3) 填充了此种滤料的生物滤池对有机物(COD<sub>Mn</sub>)的去除效果不佳,且水力停留时间对其处理有机物(COD<sub>Mn</sub>)影响不大。

通过本试验我们可以得出这种新型滤料处理养殖废水能达到很好的效果。其处理养殖废水的最佳水力停留时间为0.6 h。但如果养殖废水中有机物(COD<sub>Mn</sub>)的浓度过高应该进行预处理降低有机物

( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ) 的浓度。

### 参 考 文 献

- [1] 宋协法,宋伟华,田树川,等. 集约化养殖水处理系统研究. 浙江海洋学院学报, **2003**, 22(1): 35 ~ 39
- [2] 陈学锋. 工厂化养鱼基础设施的配置. 北京水产, **2003**, (4): 33 ~ 35
- [3] Huguenin J. E., Colt J. Design and operating guide for aquaculture seawater systems. Amsterdam: Elsevier Amsterdam, **1989**. 168 ~ 170
- [4] 张杰,曹相生,孟雪征. 曝气生物滤池的研究进展. 中国给水排水, **2002**, 18(8): 26 ~ 29
- [5] 李汝琪,钱易,孔波,等. 曝气生物滤池去除污染物的机理研究. 环境科学, **1999**, 20(6): 49 ~ 52
- [6] Pujol P., Lemmel H., Groudsilles M. A keypoint of nitrification in an upflow biofiltration reactor. Water Science Technology, **1998**, 38(3): 43 ~ 49
- [7] Losordo T. M., Masser M., Rakocy J. Recirculating aquaculture tank systems. Southern Regional Aquaculture Center (SRAC) Pub., **1992**, 51: 1 ~ 8
- [8] Nijhof M. B. Fixed film nitrification characteristics in seawater recirculation fish culture systems. Aquac., **1990**, 87(2): 133 ~ 143
- [9] 蔡云龙,臧维玲,姚庆祯,等. 四种滤料去除氨氮的效果. 上海水产大学学报, **2005**, 14(2): 138 ~ 142
- [10] Kim S. K., Kong I., Lee B. H., *et al.* Removal of ammonium-N from a recirculation aquacultural system using an immobilized nitrifier. Aquacult. Eng., **2000**, 21: 139 ~ 150
- [11] 刘飞,胡光安,韩舞鹰. 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, **2004**, 34(1): 3 ~ 5
- [12] Laanbroek H. J., Gerards S. Competition for limiting amounts of oxygen between nitrosomonas europaea and nitrobacteria winogradskyi grown in mixed continuous cultures. Arch Microbiology, **1993**, 159: 453 ~ 459
- [13] 邱立平,马军,张立昕. 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, **2004**, 26(6): 433 ~ 436