

# 水力负荷对处理海水和养殖废水的无纺布滤器性能的影响

张俊新<sup>1,2</sup>, 刘长发<sup>1,2</sup>, 魏海峰<sup>1,2</sup>, 赵不凋<sup>3</sup>, 周小燕<sup>4</sup>

(1. 大连水产学院海洋环境工程学院, 辽宁 大连 116023; 2. 农业部海洋水产增养殖学与生物技术重点开放实验室, 辽宁 大连 116023; 3. 大连民族学院生命科学学院, 辽宁 大连 116600; 4. 农业部农业机械试验鉴定总站, 北京 100021)

**摘要:** 采用水产养殖中最常用的生物滤池工艺, 以无纺布为填料处理模拟海水养殖废水和牙鲆养殖废水。通过改变水力负荷, 研究了水力负荷对滤器性能的影响, 并比较了以沸石、煤渣和塑料短管为填料的试验结果。结果表明, 以无纺布为填料的滤器处理模拟海水养殖废水的氨氮容积负荷可达  $1.75 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ ; 亚硝酸盐负荷可达  $0.10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ ; 处理牙鲆养殖废水时, 氨氮和亚硝酸盐氮的负荷分别达 2.52 和  $2.34 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ 。增大水力负荷可提高滤器的硝化性能。本试验中, 最佳水力负荷高于处理生活污水的普通生物滤池的参数。

**关键词:** 海水; 水产养殖废水; 无纺布; 水力负荷

中图分类号: X703.3 文献标识码: A 文章编号: 1672-2043(2008)01-0323-04

## Influence of Hydraulic Loading Rate on the Non-woven Fabric Filter Performance Treating Marine and Aquaculture Wastewater

ZHANG Jun-xin<sup>1,2</sup>, LIU Chang-fa<sup>1,2</sup>, WEI Hai-feng<sup>1,2</sup>, ZHAO Bu-diao<sup>3</sup>, ZHOU Xiao-yan<sup>4</sup>

(1. College of Marine Environmental Engineering, Dalian Fisheries University, Dalian 116023, China; 2. Key Laboratory of Mariculture & Biotechnology, Ministry of Agriculture, PRC, Dalian Fisheries University, Dalian 116023, China; 3. College of Life Science, Dalian Nationalities University, Dalian 116600, China; 4. China Agricultural Machinery Testing Center, Beijing 100021, China)

**Abstract:** The artificial marine wastewater and Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*) cultivation wastewater were treated with biofilter process often used in aquaculture by using non-woven fabric as media. The influence of hydraulic loading rate on filter performance was investigated by adjusting hydraulic loadings, and using zeolite, cinder and polythene pipes as the control media. The results showed that the removal rates of ammonia-N and nitrite-N in treated artificial marine wastewater with non-woven fabric filter were  $1.75 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$  and  $0.10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ , respectively, while they reached  $2.52 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$  and  $2.34 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$  in Japanese flounder cultivation wastewater. The nitrification performance of filter would be better with the increase of the hydraulic loading rate. The optimized ranges of hydraulic loadings in our tests were above those of common biofilter for treating municipal sewage.

**Keywords:** marine wastewater; aquaculture wastewater; non-woven fabric; hydraulic loading rate

随着生活水平的提高, 人们对水产品的需求量日增。工厂化高密度养殖的生产方式可适应此种需求, 也成为渔业现代化的标志之一。但目前, 水环境质量的恶化, 高品质养殖用水水源枯竭; 同时粗放型养殖

产生的废水不经任何处理, 混杂大量残饵粪便, 直接排入附近水体, 构成养殖生产的自身污染。传统工厂化养殖的直取直排系统向循环水养殖系统 (recirculating aquaculture system, RAS) 转化, 将成为未来发展的必然趋势。

养殖废水具有污染物浓度低、废水排放量大的特点<sup>[1]</sup>。针对养殖水产品最敏感的两个指标: 氨氮和总悬浮固体 (TSS), 循环水养殖系统中的水处理回用采取生物膜法的处理工艺, 以适应低浓度的污染物环境。填料类型和水力负荷为生物膜法中非常重要的两个

收稿日期: 2007-03-27

基金项目: 欧盟第五框架计划国际合作项目 ZAFIRA (ICA4-CT-2001-10025); 辽宁省教育厅高校科研项目 (20102135)

作者简介: 张俊新 (1975-), 男, 吉林通化人, 硕士, 讲师, 主要研究方向为农业生物环境工程及科学。

E-mail: junxin\_zhang@dlfu.edu.cn

通讯作者: 刘长发 E-mail: liuef@dlfu.edu.cn

工艺参数。对于低浓度污水,提高生物量的方法是提高处理效率的重要途径<sup>[2,3]</sup>。填料选择主要应考虑利于大量微生物附着和耐受一定的水力条件。文献表明,在污水处理中以无纺布作为填料可大大增加附着生物量<sup>[4,5]</sup>。水力负荷直接影响处理系统的启动和处理效率,进而影响工程设计中的工艺设计参数和运行费用。

本试验采用在水产养殖中使用较成熟的生物膜法工艺——生物滤池(biofilter),选用无纺布为填料进行试验并考察处理性能,研究和讨论水力负荷对养殖废水处理单元性能的影响,以期为实际的工程设计和运行维护提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 废水

#### 1.1.1 模拟废水

取大连水产学院附近黑石礁海域的海水(砂滤后的平均水质为:氨氮  $110.4 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 盐度 31.6, pH=8.07)。采用  $\text{NH}_4\text{Cl}$  和蛋白胨模拟养殖废水中的主要污染物,将海水中两种物质的含量调整为: $\text{NH}_4\text{Cl}$   $19.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 蛋白胨  $18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (其中 TOC 为  $9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[6]</sup>。

#### 1.1.2 牙鲆养殖废水

取自实际运行的小型牙鲆养殖循环系统排放的废水,其中氨氮含量  $1.43 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 亚硝酸盐  $0.14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , TOC  $7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

### 1.2 实验装置

所用生物滤器装置见图 1 所示。滤器为直径 0.20 m、高 1.50 m 的 PVC 柱(径高比 1:7.5),每个滤柱内容积约 41.5 L,填料的填充体积约为 36 L。原水(raw water)水箱尺寸 91 cm×45 cm×50 cm,盛水有效体积约 170 L;滤柱采用上向流,进水量由阀门控制;温度由温控仪自动控制在 21~23 °C 之间;回水管线中

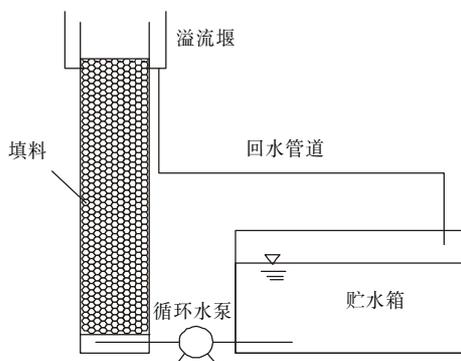


图 1 硝化滤器试验装置示意图

Figure 1 The schematic diagram of nitrification filter

有回流水可跌水补氧。

### 1.3 填料

无纺布:将工业无纺布特制成 1.30 m 幅宽,填充进滤器内作为填料,填充视密度约为  $0.7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

对比填料:采用沸石、炉渣和塑料短管 3 类填料。(1)沸石:采用斜发沸石,平均粒径约 1.0 cm,用自来水清洗。(2)炉渣:用自来水浸泡 7 d,每天测定 pH 值,直至稳定后测定溶解浸泡液体中重金属含量如下: $C_{\text{Zn}}=6.25\times 10^{-6} \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $C_{\text{Cu}}=1.1\times 10^{-5} \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ; Pb 和 Cd 含量均为未检出;离子含量:  $32.167 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (以  $\text{SO}_4^{2-}$  计),硫化物未检出。(3)塑料短管:将给水用聚乙烯管截成长为 1.0 cm 的小圆柱体(内径:0.8 cm,外径:1.2 cm);用海水清洗。

### 1.4 测定方法

氨氮和亚硝酸盐按照《海洋监测规范》GB 17378.4—1998 测定。流量采用时间-体积法多次测定取平均值。

### 1.5 试验步骤

#### 1.5.1 挂膜成熟的无纺布滤器性能测定

在挂膜成熟期,处理模拟废水,水力负荷(滤器单位水力横断面通过的流量)参照何洁等<sup>[6]</sup>采用的流量计算而得,为  $10.31 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。引入模拟废水开始试验,定时测定系统内氨氮浓度。

#### 1.5.2 水力负荷对无纺布滤器性能的影响

通过改变无纺布滤器的模拟废水的流量( $20\sim 160 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$ ),考察水力负荷变化对无纺布滤器性能的影响。相邻水力负荷试验的时间间隔为 2~3 d。在每个确定的水力负荷下测定处理 24 h 模拟废水后系统中氨氮和亚硝酸盐浓度。从小到大依次调整滤器的流量。24 h 后氨氮和亚硝酸盐达到最低浓度的为硝化性能最佳,对应的水力负荷为最佳水力负荷。

#### 1.5.3 最佳水力负荷时无纺布滤器的性能测定

在最佳水力负荷条件下,运行 24 h,每隔 1 h 测定系统氨氮和亚硝酸盐氮变化情况。

#### 1.5.4 无纺布滤器处理牙鲆养殖废水的性能测定

引入牙鲆养殖废水,测定无纺布滤器的处理性能。测定过程同模拟废水试验,测定结果与人工配置的模拟海水废水比较。

#### 1.5.5 其他填料滤器的水力负荷对性能影响的对比试验

分别调节挂膜成熟的煤渣、沸石和塑料短管滤器的水力负荷,测定其对硝化性能的影响,与无纺布滤

器进行对比。测定过程同无纺布滤器。

## 2 结果与讨论

### 2.1 挂膜成熟的无纺布滤器性能测定

于2005年6月2日和6月5日用挂膜成熟的无纺布滤器处理模拟废水,滤器的硝化性能(水力负荷 $10.31 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )见图2。由图2可见,两次测定的曲线重合性较好,表明滤器中的生物膜功能稳定。

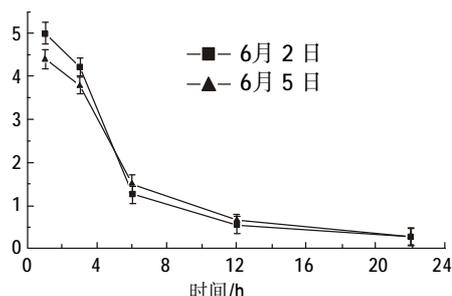


图2 成熟的无纺布滤器氨氮去除性能曲线  
Figure 2 Ammonia nitrogen removal curve of stable non woven fabric filter

### 2.2 水力负荷对无纺布滤器性能的影响

试验曲线见图5,试验数据列于表1中(无纺布滤器)。由图5和表1可见,最佳水力负荷为 $4.13 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

### 2.3 最佳水力负荷时无纺滤器的性能测定

调整无纺布滤器至最佳水力负荷 $4.13 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,加密测定处理模拟废水时氨氮和亚硝酸盐浓度随时间的变化情况。取样间隔1h,试验结果见图3。

由图3可见,经过13h,系统中的氨氮和亚硝酸盐浓度已降低至 $0.14$ 和 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。计算得到的无纺布滤器氨氮负荷为 $1.75 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ ;亚硝酸盐负荷为 $0.10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ 。单程去除率分别为44.1%和48.3%(氨氮和亚硝酸盐平均浓度分别在 $0.52$ 和 $0.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下)。而Al-Hafedh(2003)的研究结果表明滚筒状塑料介质性能最好,氨氮和亚硝酸盐负荷为 $3.46$ 和 $0.77 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ ;单程去除率为25.5%和26.3%(氨氮和亚硝酸盐平均浓度分别为 $0.92$ 和 $0.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )<sup>[7]</sup>。可见,本研究选用的无纺布滤器的性能各项指标均高于Al-Hafedh的结果。可能是由于本研究中选用的无纺布具有立体网状结构,能够为硝化菌提供更适宜的生长微环境,因而在较高的处理负荷下仍有良好的性能。

### 2.4 无纺布滤器处理牙鲆养殖废水的性能测定

测定结果表明,牙鲆废水中氨氮和亚硝酸盐浓度

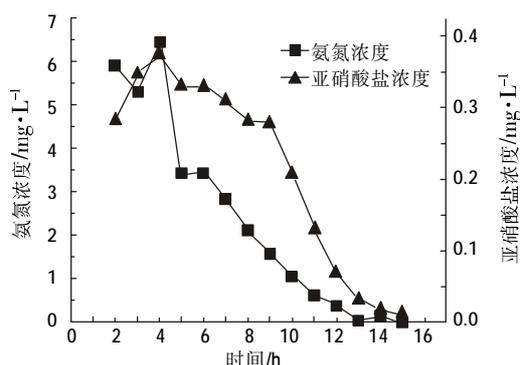


图3 无纺布滤器处理模拟废水的氨氮和亚硝酸盐去除曲线  
Figure 3 The removal of ammonia nitrogen and nitrite in simulated marine wastewater treated by non woven fabric filter

较低(氨氮 $1.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,亚硝酸盐 $0.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )。无纺布滤器处理牙鲆废水的连续测定曲线见图4。经计算氨氮的处理负荷可达 $2.52 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ ,亚硝酸盐可达 $2.34 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ ,均高于模拟废水处理效率。试验用模拟废水比实际牙鲆废水浓度略大,但结果却显示牙鲆废水处理效率较高。这可能由于牙鲆废水含氮有机物等成分复杂,营养成分比例得当,适于细菌生长繁殖。

对比图3和4可见,牙鲆养殖废水与模拟废水试验曲线的变化趋势基本一致。虽然用人工配置的废水成分简单,但生物滤器处理含氮有机物废水的过程皆为:含氮有机物经过脱氨基化作用生成氨氮,此过程为异养过程,反应迅速;氨氮在硝化菌的作用下生成亚硝酸盐和硝酸盐,此过程由自养硝化菌完成,反应速度主要取决于硝化菌的数量和活性。整个过程综合表现为氨氮和亚硝酸盐先略升高,然后降低。图3和4中曲线变化趋势的类似性也说明用蛋白胨和氯化铵模拟养殖废水是适宜的。

### 2.5 其他填料滤器的水力负荷对性能影响的对比试验

通过试验发现,水力负荷对其他填料滤器性能也

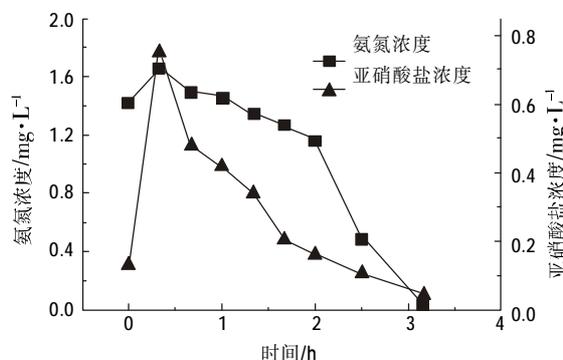


图4 无纺布滤器处理牙鲆废水的氨氮和亚硝酸盐去除曲线  
Figure 4 Removal of ammonia nitrogen and nitrite in Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*) culture wastewater treated by non woven fabric filter

有较大影响。煤渣、沸石和塑料管滤器的性能曲线见图5。不同填料对应的最佳水力负荷见表1。

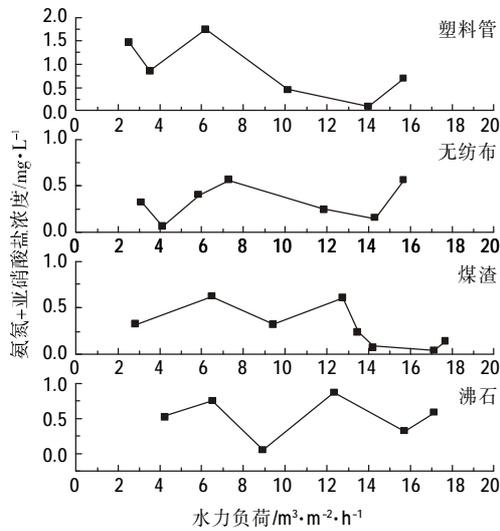


图5 水力负荷对不同填料滤器的硝化功能的影响  
Figure 5 The influence of hydraulic loading on nitrification of filters with different stuffing

表1 不同填料对应的最佳水力负荷

Table 1 The optimized hydraulic loading of different stuffing

填料	孔隙率 / %	最佳流量 / $mL \cdot s^{-1}$	最佳水力负荷 / $m^3 \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$	最低点 氨氮+亚硝酸盐 / $mg \cdot L^{-1}$
沸石	57	78	8.9	0.53+0.01
煤渣	73	138	15.8	0.04+0.00
无纺布	45	36	4.1	0.06+0.00
塑料管	69	122	14.0	0.06+0.05

生物膜的厚度主要由废水中的有机底物浓度决定,这个厚度又由水力负荷、填料类型和微生物性质等控制<sup>[6]</sup>。因此对于处理低浓度废水的滤器,生物膜本身不厚,不需通过水力强度冲刷掉老化的微生物膜以降低生物膜厚度,提高生物膜活性。养殖废水即属于低浓度废水,适宜的水力负荷不但会提高微生物与底物接触的几率,使溶解氧和营养物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微生物不被冲刷脱落。最佳水力负荷是两者的最佳平衡点。

工程设计中,普通生物滤池的水力负荷为  $1 \sim 3 m^3 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ,高负荷生物滤池为  $5 \sim 40 m^3 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ,塔式生物滤池的水力负荷可达  $80 \sim 200 m^3 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ <sup>[9]</sup>。本试验中,水力负荷数值基本处于高负荷生物滤池的范围内。无纺布滤器的最佳水力负荷略低,可能与无纺布的孔隙率低有关,较低的孔隙率使水流不易通过。

在以往的试验中,Forster (1974)发现,当水力负

荷从  $10.25$  增加到  $246 m^3 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$  时,被氧化的氨氮总量增加<sup>[10]</sup>。Nijhof (1995)的研究结果表明,在  $75$ 、 $150$  和  $300 m \cdot d^{-1}$  3 个水力负荷中, $300 m \cdot d^{-1}$  时的硝化速率最高。认为在一定的氨氮浓度和较宽范围的滤器几何尺寸条件下,水力负荷对硝化滤器的性能有关键性影响。较高水力负荷可使滤器获得较高的硝化速率<sup>[11]</sup>。本试验与他们的结论一致。

### 3 结论

(1)无纺布作为填料的滤器硝化性能较好。在海水的盐度抑制下,处理模拟废水氨氮负荷可达  $1.75 g \cdot m^{-3} \cdot h^{-1}$ ,亚硝酸盐负荷可达  $0.10 g \cdot m^{-3} \cdot h^{-1}$ ;处理牙鲆养殖废水负荷分别可达  $2.52$  和  $2.34 g \cdot m^{-3} \cdot h^{-1}$ ,高于模拟废水处理效果。

(2)水力负荷对无纺布滤器和沸石、煤渣、塑料短管滤器都有一定的影响。低浓度的海水养殖废水处理的最佳水力负荷较高,降低水力负荷(水力停留时间长)不能取得更好的效果。

(3)用蛋白胨和氯化铵模拟养殖废水是适宜的。

### 参考文献:

- [1] Cripps S J. Minimizing outputs: treatment [J]. *Journal of applied ichthyology*, 1994, 10 (4):284-294.
- [2] Leka, Odd-Ivar, Helge Kleppe. Efficiency of nitrification in trickling filters using different filter media [J]. *Aquacultural Engineering*, 2000, 21: 181-199.
- [3] 陆 斌,葛景信,张芳西,等.水产养殖污水的净化与回用研究[J]. *华东工业大学学报*, 1997, 19 (1):54-58.
- [4] 王 晋,马文林.新型固定床生物膜反应器硝化性能的研究[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2001, 2 (1):90-93.
- [5] 金冬霞,田 刚,施汉昌.无纺布填料处理污水试验及机理[J]. *环境科学*, 2002, 23 (3):63-67.
- [6] 何 洁,刘长发,张红霞,等.三种载体上生物膜的硝化性能[J]. *中国水产科学*, 2003, 10 (1):65-68.
- [7] Al-Hafedh, Yousef S, Aftab Alam, et al. Performance of plastic biofilter media with different configuration in a water recirculation system for the culture of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. *Aquacultural Engineering*, 2003, 29: 139-154.
- [8] 许保玖,龙腾锐.当代给水与废水处理原理[M].第二版,北京:高等教育出版社, 2000.
- [9] 北京市市政工程设计研究总院编.给水排水设计手册(第5册) [M].第二版,北京:中国建筑工业出版社, 2004.
- [10] Forsle J R M. Studies on nitrification in marine biological filters [J]. *Aquaculture*, 1974, 4:387-397.
- [11] Mark Nijhof. Bacterial stratification and hydraulic loading effects in a plug-flow model for nitrifying trickling filters applied in recirculating fish culture systems [J]. *Aquaculture*, 1995, 134: 49-64.