

折流曝气生物滤池中污染物与微生物 沿程变化规律

严子春^{1,2*} 何强³ 龙腾锐³ 张涵³

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院 甘肃 兰州 730070)

(2. 兰州交通大学寒旱地区水资源综合利用教育部工程研究中心 甘肃 兰州 730070)

(3. 重庆大学城市建设与环境工程学院 重庆 400045)

摘要: BBAF 滤池是一种新型曝气生物滤池, 为考察其中污染物与微生物沿程变化规律, 分析了不同厚度滤层对有机物、氨氮等污染物的去除效果, MPN 法测定了具有代表性滤层厚度处的异养菌和硝化菌数量; 通过镜检观察研究了 BBAF 滤池中微生物种群的沿程分布特点。研究表明: BBAF 滤池中 COD 浓度随滤层厚度增加逐渐降低, 前 4 个单池对 COD 有很好的去除效果, 但对氨氮的去除作用较弱, 其中的微生物以异养菌为主; 第 5、6、7 单池中, 有机负荷较低, 促进了硝化菌增殖, 提高了硝化效果。BBAF 滤池的各单池之间存在浓度梯度, 使不同滤层中形成了微生物优势种属, 有利于 BBAF 滤池达到最佳运行效果。

关键词: 折流曝气生物滤池, 滤层厚度, 有机物去除, 硝化作用, 微生物种群分布

Variation of Pollutants Concentration and Microorganism Population Along Baffled Biological Aerobic Filter

YAN Zi-Chun^{1,2*} HE Qiang³ LONG Teng-Rui³ ZHANG Han³

(1. School of Environmental & Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

(2. Engineering Research Center for Cold and Arid Regions Water Resource Comprehensive Utilization of Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

(3. Faculty of Urban Constructive & Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Baffled Biological Aerated filter (BBAF) is an innovative biofilter for wastewater treatment. The aim of this work is to investigate the variation of pollutants concentration and microorganism population along the depth of media. Removal efficiency of organic pollutants and ammonia along the media depth of baffled biological aerobic filter were measured. Quantity of heterotrophic bacteria and nitro bacteria in representative depth of media was examined with MPN test, and microorganism population of each filter was studied by means of microscopic observation. The characteristics of microorganism population distribution in BBAF was studied by means of microscopic observation. The results

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划资助(No. IRT0966); 甘肃省自然科学基金项目(No. 3ZS042-B25-046); 兰州交通大学“青蓝”人才工程基金资助项目(No. QL-05-05A)

* 通讯作者: Tel: 86-931-4956170; E-mail: yanzichun@mail.lzjtu.cn

收稿日期: 2010-04-22; 接受日期: 2010-07-30

© 中国科学院微生物研究所期刊联合编辑部 <http://journals.im.ac.cn>

show that COD concentration decreases gradually with the increase depth of media layer. The front four filters have good performance on organic pollutants removal, but performance on ammonia removal is weak, indicating that heterotrophic bacteria is dominating microorganism in these filters. In conditions of lower organic loads bring about a higher growth of nitrobacteria increases the nitrification efficiency in filter five to filter seven. Because the existence of concentration gradient in different filters of BBAF, dominant microorganism population might be formed along the depth of filter media layer and favored the improving treatment efficiency of BBAF.

Keywords: Baffled biological aerobic filter, Depth of filter media layer, Organic matter removal, Nitrification, Distribution of microorganism population

曝气生物滤池是近年来广泛受到重视的一种污水处理技术, 具有处理效率高、占地面积小、抗冲击负荷能力强等特点^[1-2], 但传统曝气生物滤池容易发生堵塞, 运行周期较短, 一般 1-2 d 就需要进行反冲洗^[3], 反冲洗用水量较大^[4], 且频繁反冲洗对繁殖速度较慢的硝化菌不利^[5]; 因此, 曝气生物滤池对进水悬浮物的要求较高($SS \leq 60 \text{ mg/L}$)^[6-7], 一般通过对进水预处理减少反冲洗次数^[8]。折流曝气生物滤池(Baffled biological aerated filter, 简称 BBAF)是针对以上问题与不足开发的一种新型曝气生物滤池, 整池由隔墙分隔而成的若干上向流和下向流单池交替组合串联而成, 单池中可使用不同类型滤料, 从滤池进水到出水, 粒径级配沿程由大到小, 不同单池可形成不同功能分区^[9]。试验表明, BBAF 滤池有效减缓了堵塞问题, 提高了整个滤层的纳污能力, 反冲周期可达 6-7 d, 具有稳定的处理效果^[10-11]。曝气生物滤池的滤层厚度与处理效果密切相关^[12-13], 本文研究 BBAF 滤池中污染物和微生物的沿程变化规律, 以便更为合理地设置功能分区、优化设计参数, 为进一步工程应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 折流曝气生物滤池系统

BBAF 试验装置如图 1 所示, 由 7 个单池组成, 第一单池为厌氧池, 其余为好氧池。整池长、宽、高分别为 1.528 m、0.580 m、1.840 m; 单池长、宽、高分别为 0.200 m、0.580 m、1.500 m; 为减少水头损失逐级积累, 3 个水流翻越隔板的高度逐级递减, 高度差为 0.050 m; 单池上部敞开可直接取样, 池底和滤层中间位置也设置有取样口。

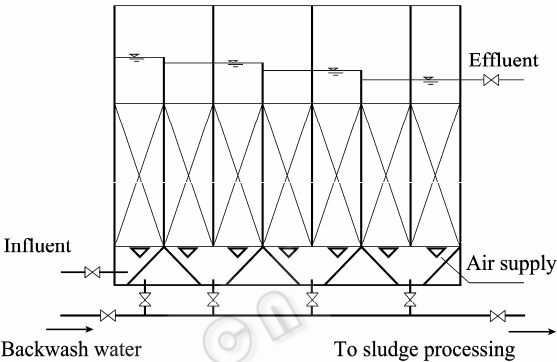


图 1 BBAF 滤池试验装置
Fig. 1 Schematic diagram of BBAF

1.2 滤料类型

沸石是一种性能优良的滤料^[14], BBAF 滤池的第 2 至 7 单池采用了白银斜发沸石滤料, 第 1 单池使用重庆大学开发的厌氧催化滤料, 每个单池中滤层厚度为 0.800 m, 填装位置和粒径分布见表 1。

表 1 BBAF 滤池中的滤料粒径 Table 1 Filter media size in different units of filter							
单池序号 Serial number of filter	1	2	3	4	5	6	7
粒径分布 Size distribution (mm)	15-20	8-15	8-15	5-8	5-8	5-8	3-5

1.3 试验条件与水质

试验在重庆城南污水处理厂进行, 试验用水为该厂初沉池出水, 水质见表 2。试验期间, 水温 $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, 水力负荷 $1.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 气水比 8 : 1, 气水联合反冲洗使用气冲强度 $6 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、水冲强度 $8 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

1.4 分析方法

水质指标中 COD 测定采用重铬酸钾比色法(使用 HACH DR5000 水质分析仪)^[15], 其余水质指标均采用国家标准方法^[16]; 硝化细菌、亚硝化细菌通过

表 2 试验用污水水质 Table 2 Water quality of municipal sewage								
水质指标 Water quality index	COD (mg/L)	BOD ₅ (mg/L)	NH ₃ -N (mg/L)	TN (mg/L)	NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	SS (mg/L)	TP (mg/L)	pH
变化范围 Variation range	206–627	90.7–243	49.4–55.2	50.0–80.7	0–1.5	101–199	4.15–6.94	6.7–7.9

液体稀释法(MPN 法)测定^[17];微生物相通过 MOTIC 生物显微镜观察。

2 结果与分析

2.1 BBAF 滤池中污染物浓度沿程变化规律

2.1.1 BBAF 滤池沿程有机物去除效果分析: 试验期间, 气水比为 10 : 1, 水力负荷为 17.4 m³/(m²·d); 在滤层长度方向上以 0.8 m 为步长, 取样分析污水中 COD 浓度变化, 对应的滤层厚度分别为 0、0.8 m、1.6 m、2.4 m、3.2 m、4.0 m、4.8 m、5.6 m。不同进水有机物浓度下沿程 COD 去除率与滤层厚度的关系如图 2 所示。

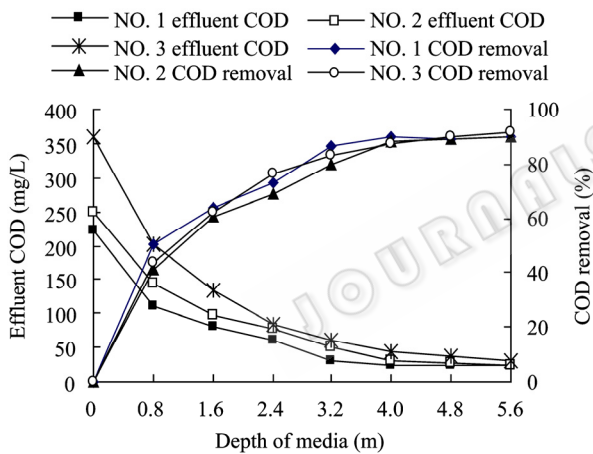


图 2 COD 沿滤层厚度去除效果
Fig. 2 COD removal effect along depth of media

图 2 显示, 3 次测定时, 进水 COD 浓度分别为 223、249、359 mg/L, 滤层对 COD 去除趋势一致, COD 浓度随滤层厚度增加逐渐降低, 前 4 个单池对 COD 去除量较大, 其中的微生物以异养菌为主; 其中第 1 单池中 COD 去除最明显, 约占了总去除率的一半, 同时测得此单池对 SS 的去除率达 53.4%, 由此可知, 大量非溶解性有机物被滤料物理截留在了第 1 单池滤层中, 同时厌氧区的微生物也对 COD 起到了降解作用, 该结果与苏德林采用曝气生物滤池处理油田废水的研究结论相似^[18]。当污水经前 4 个单池处理后, COD 浓度已降到很低, 3 次测定分别为

30、50、59 mg/L, 因此在第 5、6、7 单池中异养菌较难成为优势菌群。

2.1.2 BBAF 滤池沿程氨氮去除与氮形态转化分析: 为进一步了解 BBAF 滤池去除污染物的过程, 分析处理效果与微生物之间的关系, 试验采用气水比为 10 : 1, 水力负荷为 17.4 m³/(m²·d), 在滤层长度方向上以 0.4 m 为步长, 取样测定了污水中氨氮、硝氮和亚硝氮的浓度变化, 结果如图 3 所示。

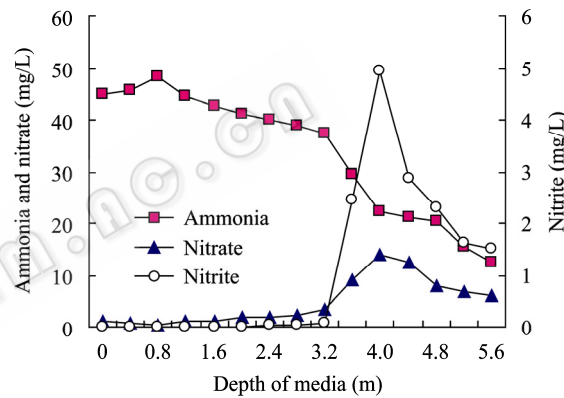


图 3 流程长度与氮的形态转化
Fig. 3 Morphological changes of nitrogen along the length of filter

从图 3 可知, 污水流经第 1 单池(0–0.8 m)过程中, 部分有机氮在氨化细菌的作用下转化为氨氮, 因此导致氨氮浓度有所升高; 随后的 3 个单池(0.8 m–3.2 m)对氨氮的去除作用较弱, 主要是因为有机物浓度较高, 异养菌占优势。污水流过第 5、6、7 单池单池(3.2 m–5.6 m)时, 氨氮浓度依次降低, 说明该段硝化能力良好, 该段滤层中可能硝化菌数目较多, 需测定验证; 而硝氮和亚硝氮浓度均表现为先上升后下降, 硝氮和亚硝氮浓度增加后, 使处于厌氧或缺氧的生物膜内层的反硝化菌数量增加, 因而又使硝氮和亚硝氮浓度逐渐下降。

为验证 BBAF 滤池去除氨氮过程中硝化菌的沿程分布特点, 选择了具有代表性的 3 个滤层位置, 采用 MPN 法测定了相应位置处单位体积滤料上的硝化菌数, 以便分析其变化规律。滤层厚度分别为

2.4 m、4.0 m、5.6 m (分别在 BBAF 滤池的第 3、5、7 单池上部), 取一定量的带生物膜的滤料, 加 50 mL 蒸馏水后超声分散细菌制得待测菌液, 采用 5 个稀释度, 测得硝化菌数结果见表 3。

表 3 单位体积滤料上的硝化菌数 Table 3 The number of nitrobacteria per unit media volume		
滤层厚度 Depth of media (m)	亚硝酸菌数 Nitrosomas (CFU/cm ³)	硝酸菌数 Nitrobacteria (CFU/cm ³)
2.4	4.91×10^3	1.96×10^3
4.0	9.00×10^6	9.00×10^4
5.6	9.26×10^5	6.61×10^4

对表 3 中 3 个滤层厚度处的硝化菌数进行对比分析, 很明显滤层厚度 2.4 m 处的硝酸菌和亚硝酸菌数相对较少, 证实此处因有机物浓度较高, 硝化

菌的生长增殖受到抑制; 滤层厚度 4.0 m 和 5.6 m 处硝化菌数量都相对较高, 与图 3 显示的较好的氨氮去除效果一致; 而 5.6 m 处硝化菌比 4.0 m 处的数量有所降低, 主要是受氨氮浓度降低的影响。另外, 滤层厚度 4.0 m 处测定亚硝酸菌数量较大, 与图 3 显示的在滤层厚度 4.0 m 处亚硝氮浓度达到最大值的试验结果一致。

2.2 BBAF 滤池中的微生物种群沿程分布特点

由于 BBAF 滤池在运行期间, 第 1 单池设为厌氧区, 主要起水解酸化的作用, 在镜检中观察到的微生物个体小、活动能力弱, 不易辨认, 故未纳入分析范围。镜检主要在 BBAF 滤池的第 2 至 7 单池上部滤料层取滤料观测生物膜中微生物情况, 结合表 3 中硝化菌数测定结果, 整理得出的表 4 反映了 BBAF 滤池中微生物种群沿程分布的特点。

表 4 BBAF 滤池中微生物种群分布特点 Table 4 Characteristics of microorganism population distributing in BBAF	
滤层厚度 Depth of media (m)	微生物种群分布特点 Characteristics of microorganism population distributing
0.8	鞭毛虫纲中的变形滴虫、聚屋滴虫, 肉足虫纲中的点滴筒变虫, 游泳型纤毛虫中的草履虫、牟氏管叶虫; 丝状菌较多; 指状菌胶团数量众多。
1.6	鞭毛虫纲中的变形滴虫, 肉足虫纲中的点滴筒变虫、辐射变形虫较多; 草履虫、片状漫游虫、肾形虫等游泳型纤毛虫较多; 出现固着型纤毛虫, 如沟钟虫、吸管虫属, 但数量较少; 丝状菌出现较多; 指状菌胶团数量较多。
2.4	钟虫、吸管虫、累枝虫、盖虫等固着型纤毛虫数量众多, 是主要微生物类群; 有少量游泳型纤毛虫, 如草履虫。
3.2	钟虫、吸管虫、累枝虫、盖虫等固着型纤毛虫数量众多, 是主要微生物类群; 出现线虫和轮虫等微型后生动物。
4.0	固着型纤毛虫数量较多, 出现大量的半圆表壳虫、磷壳虫属、滴虫属微生物, 存在较多的硝化细菌和亚硝化细菌。
4.8	以固着型纤毛虫为主, 特别是小口钟虫、集盖虫; 表壳虫属微生物较多, 存在较多的硝化细菌和亚硝化细菌。

BBAF 滤池在整体上表现为推流态^[9], 各单池之间存在明显的浓度梯度, 污染物负荷逐级递减。第 2、3 单池有机负荷较高, 硝化菌生长增殖受到抑制^[19], 存在大量以有机物为食的鞭毛虫、点滴筒变虫和分解有机物的细菌, 生物膜颜色呈深褐色; 第 4、5 单池的污水中有机物浓度降低, 生物膜颜色仍然为褐色, 其中大量的细菌为着生型纤毛虫提供了食物, 因此, 钟虫、吸管虫、累枝虫等固着型纤毛虫数量众多; 随着有机物浓度的进一步下降, 第 6、7 单池中鞭毛虫类开始减少, 而较多出现了表壳虫属微生物, 同时测出了大量硝化细菌, 硝化性能较好, 与须藤隆一研究得出的当褐色生物膜中有大量磷壳虫属和普通表壳虫存在时硝化进行得非常充分的结论一致^[20]。

由此可见, 不同滤料厚度处污染物负荷不同,

微生物种群明显存在差别, 各单池中可形成优势菌群, 与升流式曝气生物滤池中 COD 沿滤料层高度逐渐减小, 沿程优势微生物依次分别为异养菌、硝化菌的研究结果基本一致^[21]。适应水质后的优势菌群具有各自的最佳生长增殖条件, 各自得到最快降解速度, 有利于 BBAF 滤池达到最佳运行效果。

3 结论

BBAF 滤池中 COD 浓度随滤层厚度增加逐渐降低, 前 4 个单池对 COD 的去除量较大, 但对氨氮的去除作用较弱, 其中的微生物以异养菌为主。污水流过第 5、6、7 单池时, 氨氮浓度依次降低, 该段滤层中有机物浓度较低, 硝化菌为优势菌群, 数目较多。

通过 MPN 法测定 3 个滤层厚度处的硝化菌数量

并进行了对比分析,滤层厚度 2.4 m 处的硝酸菌和亚硝酸菌数相对较少;滤层厚度 4.0 m 处和 5.6 m 处硝化菌数量都相对较高,与通过对污水处理效果分析得出的微生物沿程分布特点一致。

BBAF 滤池中各单池之间存在浓度梯度,硝化菌数测定镜检观察表明,各单池中微生物群落结构明显存在差别,可形成不同优势种群,非常有利于 BBAF 滤池中微生物新陈代谢功能的充分发挥和污染物的降解。

参 考 文 献

- [1] Hong-Duck Ryu, Sang-Ill Lee. Comparison of 4-stage biological aerated filter (BAF) with MLE process in nitrogen removal from low carbon-to-nitrogen wastewater. *Environmental Engineering Science*, 2009, **26**(1): 163–170.
- [2] Won-Seok Chang, Hung-Thuan Tran, Doo-Hyun Park, *et al.* Ammonium nitrogen removal characteristics of zeolite media in a biological aerated filter (BAF) for the treatment of textile wastewater. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2009, **15**(4): 524–528.
- [3] 牛学义. 生物滤床污水处理工艺的应用范围和效率. 给水排水, 1999, **25**(7): 26–29.
- [4] Jinshui Yang, Weijie Liu, Baozhen Li, *et al.* Application of a novel backwashing process in upflow biological aerated filter. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(3): 362–366.
- [5] 王舜和, 郭淑琴. 不同功能曝气生物滤池的设计要点. 给水排水, 2008, **34**(3): 47–51.
- [6] Bo Liu, Dongdong Yan, Qi Wang, *et al.* Feasibility of a two-stage biological aerated filter for depth processing of electroplating-wastewater. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(17): 3891–3896.
- [7] Taira Hidaka, Hiroshi Tsuno, Naoyuki Kishimoto. Advanced treatment of sewage by pre-coagulation and biological filtration process. *Water Research*, 2003, **37**(17): 4259–4269.
- [8] Farabegoli G, Chiavola A, Rolle E. The biological aerated filter (BAF) as alternative treatment for domestic sewage. Optimization of plant performance. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **171**(1/3): 1126–1132.
- [9] 严子春, 何强, 龙腾锐, 等. 折流曝气生物滤池的特征与处理效能试验研究. 环境工程学报, 2008, **2**(10): 1327–1331.
- [10] 张涵, 龙腾锐, 严子春, 等. 新型折流曝气生物滤池处理城市污水. 中国给水排水, 2005, **21**(4): 40–42.
- [11] 陈垚, 翟俊, 龙腾锐. 折流式曝气生物滤池处理小城镇污水的工艺设计. 中国给水排水, 2007, **23**(8): 38–41.
- [12] 杨跃, 张金松, 黄文章, 等. 复合式曝气生物滤池中污染物浓度沿程变化规律. 中国给水排水, 2009, **25**(9): 49–52.
- [13] Francisco Osorio, Ernesto Hontoria. Optimization of material height in a submerged biological aerated filter. *Journal of environmental engineering*, 2001, **127**(11): 655–671.
- [14] 严子春, 王萍, 刘斐文, 等. 沸石-活性炭组合工艺处理微污染原水研究. 给水排水, 2002, **28**(1): 36–38.
- [15] 江建军, 徐月芳, 施建兵. 利用 HACH 仪器开发低浓度 COD 的测试方法. 环境监测管理与技术, 2006, **18**(3): 23–25.
- [16] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法. 第 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 210–284.
- [17] 马放, 任南骥, 杨基先, 等. 污染控制微生物学试验. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002: 32–40.
- [18] Delin Su, Jianlong Wang Kaiwen Liu, *et al.* Kinetic performance of oil-field produced water treatment by biological aerated filter. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2007, **15**(5): 591–594.
- [19] Liping Qiu, Shoubin Zhang, Guangwei Wang, *et al.* Performances and nitrification properties of biological aerated filters with zeolite, ceramic particle and carbonate media. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(19): 7245–7251.
- [20] 须藤隆一. 水环境净化及废水处理微生物学. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988: 339–340.
- [21] 李方, 杨波, 田晴, 等. 滤层高度对升流式曝气生物滤池硝化性能的影响. 水处理技术, 2008, **34**(10): 46–49.