

生物活性滤池对水中氨氮和亚硝酸盐氮去除效果研究

张萍萍, 花日茂*, 徐 微, 张妍妍, 胡晓璇

(安徽农业大学资源与环境学院, 安徽省农产品安全重点实验室, 合肥 230036)

摘 要: 为明确生物活性滤池对水中氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和亚硝酸盐氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)的去除效果及影响因素, 采用连续流生物活性滤池装置开展试验研究。试验期间进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在 $0.69 \sim 1.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度为 $0.06 \sim 0.38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 试验装置处理规模为 $180 \text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$ 。结果表明, 挂膜成功时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 去除效率分别为 $71.32\% \sim 77.78\%$ 和 $87.1\% \sim 98.6\%$; 稳定运行期间异养菌和硝化细菌空间竞争较弱, 表现在沿程对 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 去除效果集中在 35 cm 以上的空间; 在低于 5°C 状况运行, 生物活性滤池对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 有稳定的去除, 而 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 去除效果出现明显降低。

关键词: 生物活性滤池; 氨氮; 亚硝酸盐; 生物活性

中图分类号: X383

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2013)01-0116-04

Removal efficiency of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_2^-\text{-N}$ in the biological aerated filter for drinking water

ZHANG Ping-ping, HUA Ri-mao, XU Wei, ZHANG Yan-yan, HU Xiao-xuan

(Anhui Provincial Key Laboratory of Agro-Food Safety, School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

Abstract: A continuous flow device was used to determine the removal of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ in the water through biological aerated filter (BAF) system, and its influence factors were also analyzed. During the experiment, the value of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ was $0.69 \sim 1.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, and the value of $\text{NO}_2^-\text{-N}$ was $0.06 \sim 0.38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in raw water. The charge of BAF was $180 \text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$. The results demonstrated that the removal rates of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_2^-\text{-N}$ were $71.32\% \sim 77.78\%$ and $87.1\% \sim 98.6\%$ in the end of biofilm formation; the competition between autotrophic bacteria and nitrifying bacteria in the space was weaker during stable operation as BAF removed COD_{Mn} , $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_2^-\text{-N}$ mainly in the top of 35 cm ; below 5°C , the removal rate of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ was stable but that of $\text{NO}_2^-\text{-N}$ was descended.

Key words: BAF; $\text{NH}_4^+\text{-N}$; $\text{NO}_2^-\text{-N}$; biological activity

饮用水源中的氮一般以有机氮、氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮的形式存在, 其中以氨氮及硝酸盐氮所占的比例最大。常规处理对氨氮的去除率较低, 处理后的水中若含有较高的氨氮, 会增加氯消毒的需氧量(理论消耗量为 $7.6 \text{ mg Cl}_2/\text{mg NH}_4^+\text{-N}$)。在管网系统中, 由于氨氮不完全硝化会生成大量的亚硝酸盐氮, 对人体健康造成危害^[1]。生物活性炭滤池被证明是能同时去除可降解有机物、氨氮和亚硝酸盐氮的有效工艺^[2]。

作者考察了滤池中微生物富集期间、滤池稳定运行期间、不同温度条件下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的去

除效果以及沿层硝化菌和异养菌的空间分布, 为生物活性滤池运行参数的优化与控制提供参考。

1 试验装置和方法

1.1 工艺流程

试验装置如图 1 所示。于 2011 年 8 月 3 日启动, 为保证挂膜成功后的稳定运行, 采用自然挂膜的方式。

生物强化活性滤池由 $\Phi 80 \text{ cm}$ 的有机玻璃柱制成, 根据填料不同分为 3 层, 从上到下依次是活性炭滤料层, 高 60 cm (粒径范围 $0.5 \sim 1.5 \text{ mm}$); 石

收稿日期: 2012-05-31

基金项目: 安徽省高等学校优秀青年人才基金(2012SQRL065ZD)和安徽生态省建设省级引导资金项目共同资助。

作者简介: 张萍萍, 女, 硕士研究生。

* 通信作者: 花日茂, 男, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: rimaohua@ahau.edu.cn

英砂滤料层, 高 40 cm (粒径范围 0.5~1.2 mm); 沙砾承托层, 高 40 cm。运行时滤池不曝气水流采用下向流。

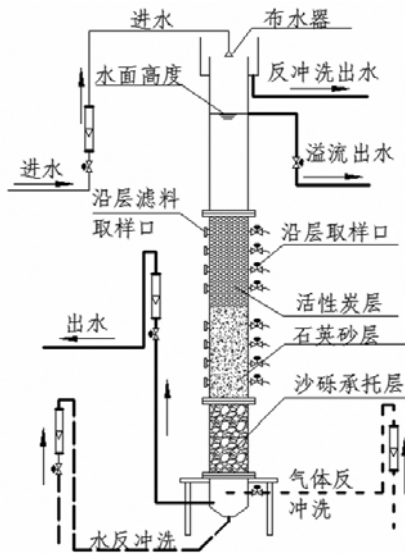


图 1 试验装置

Figure 1 Schematic diagram of experimental set-up

表 1 原水水质

Table 1 Quality of raw water during the experiment $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$			
COD_{Mn}	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_2^-\text{-N}$	DO
4.05~6.48	0.69~1.25	0.06~0.38	4.25~7.15

1.2 原水水质

试验进水是根据一般微污染水源水的水质状况, 采取配水的方式模拟常规沉淀处理后的水, 水质如表 1 所示。

1.3 水质测定方法

各项水质指标按《水和废水监测分析方法》中提供的标准方法进行测定; 生物活性采用耗氧速率法(OUR)的分析^[3]。

2 结果与分析

2.1 挂膜期间氨氮和亚硝酸盐氮的变化

从图 2 和图 3 可知: 在微生物驯化富集开始的 1 个月, 氨氮和亚硝酸盐氮的去除率有较大的波动, 特别是 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 存在严重的积累现象。 COD_{Mn} 的去除达到稳定的时间则相对较快, 如图 4。主要因为对于一般的微污染原水而言, 生物膜中的微生物可以分为去除有机物的异养细菌和进行硝化作用去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的硝化细菌, 后者是自养细菌, 生长速率要远远小于一般的异养细菌, 而组成硝化细菌菌群的亚硝化细菌和硝化细菌中, 后者的生长

速率又小于前者^[7]。因此, 生物膜形成期间, 以有机物去除率为前提, 待有机物去除率稳定后, 考察亚 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的去除率, 当去除率均稳定在一定范围内时, 可以认定生物膜成熟。在近 50 d 的富集后滤池内的硝化效果才稳定, 表明挂膜成功。

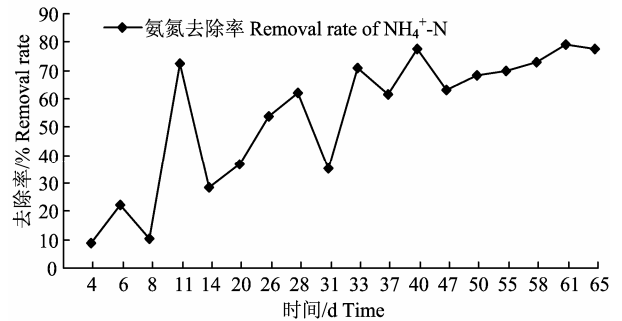


图 2 挂膜阶段氨氮的去除率

Figure 2 Removal rate of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ during biofilm formation

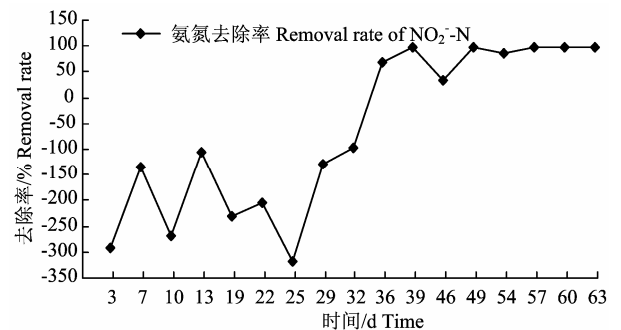


图 3 挂膜阶段亚硝酸盐氮的去除率

Figure 3 Removal rate of $\text{NO}_2^-\text{-N}$ during biofilm formation

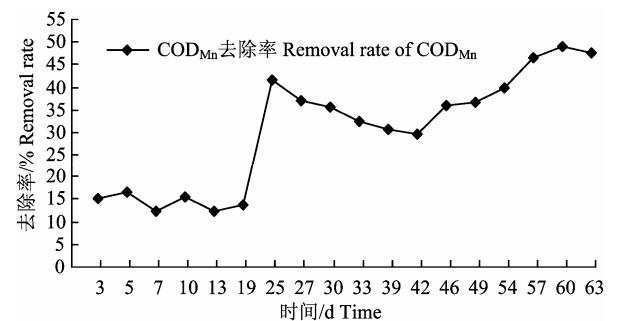


图 4 挂膜阶段 COD_{Mn} 的去除率

Figure 4 Removal rate of COD_{Mn} during biofilm formation

2.2 稳定期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的沿层去除效果

稳定运行期间的活性生物滤池停留时间 15 min, 进水水质如表 1, 进水温度 25~15℃。

从试验可知, 在进水端 35 cm 的范围内反应器对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率为 75.8%, 占总去除率的 93.7%;

NO₂⁻-N 在上层出现了积累现象但是在 35 cm 左右处去除率为 90.8%，占总去除率的 95.2%。这是因为在这段范围内 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 和溶解氧(DO)的浓度比较高，很快传递到硝化菌所在的生物膜的次外膜，进行硝化作用。在 35~100 cm 这一范围内，系统对 NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 的去除率占总去除率的 6.3% 和 9.2%。这是因为一方面在此范围底物浓度低；另一方面在这一范围内 DO 浓度 (<2 mg·L⁻¹) 比较低，而硝化菌又是一种严格的好氧菌，理论计算得使一分子的 NH₄⁺-N 完全氧化成硝态氮需消耗 2 分子的氧，即 4.57 mg·mg⁻¹ 硝酸盐氮，其中从 NH₄⁺-N 转化为 NO₂⁻-N 需要约 3.43 mg·mg⁻¹ 亚硝酸盐氮^[8]，而且其吸取水中溶解氧的能力比异养菌差，当水中溶解氧浓度不足或氧透过膜到达硝化菌表面的传递速率下降时，硝化反应会受到影响，表现为滤池对氨氮的去除率较低^[9]。

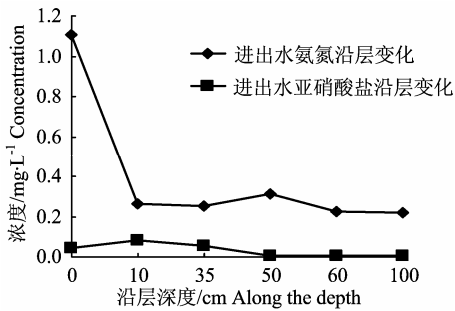


图 5 滤柱中 NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 浓度

Figure 5 NH₄⁺-N and NO₂⁻-N concentrations along the BAF

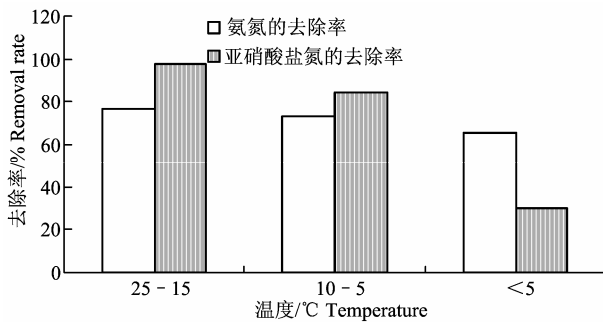


图 6 温度对 NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 去除效果的影响

Figure 6 Removal effect of NH₄⁺-N and NO₂⁻-N at different temperature

Paul 等人^[10]利用氧化还原微电极和溶解氧微电极研究发现，虽然好氧化作用沿生物膜厚度方向均存在，但异养细菌氧化作用发生在生物膜最外层，而硝化作用更多地发生在生物膜次外层。在饮用水处理中，由于进水中的基质浓度比较低，属于贫营养环境，一般情况下 DO 比较充足，所以 2 种微生物

的生长最终都受基质浓度的限制，对空间和 DO 的竞争并不明显。同时，在饮用水生物处理中硝化细菌繁殖过程中形成的有机物产物和硝化细菌可以作为异养细菌的主要基质，并且硝化细菌通过辅助作用还可以提高异养细菌对微量有机污染物的降解，这样硝化细菌可以促进异养细菌生长^[11]。

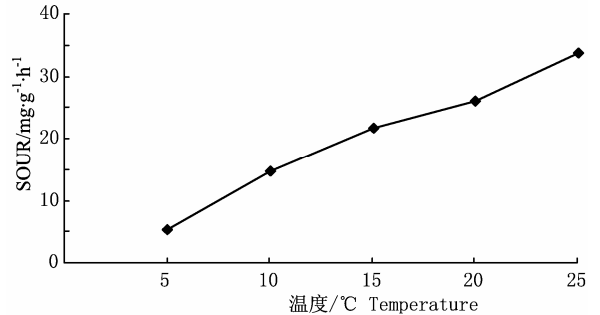


图 7 不同温度下生物活性炭的 SOUR

Figure 7 SOUR of biofilm in BAC at different temperature

2.3 温度对 NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 去除效果的影响

由图 6 可知，温度降低对氨氮的去除效果影响不明显，而亚硝酸盐氮 25~15℃ 下的去除率平均在 95% 左右，当低于 5℃ 时仅为 38%，这主要和代谢的微生物种类有关。

为了考察温度对生物活性炭滤池生物活性的影响，取炭层上部的滤料进行了不同水温下的比耗氧速率(SOUR, specific oxygen uptake rate)试验，并计算出单位体积滤料的比耗氧速率(SOUR)值，见图 7。

造成几个温度区间去除负荷差异的原因如下：从微生物的生理特性来说，硝化菌大多适宜在常温下生存，部分硝化菌如亚硝化杆菌(Nitrosomonas)和亚硝化球菌(Nitrosococcus)适合于 2~40℃ 的水温，硝化杆菌(Nitrobacter)适合 5~40℃ 水温条件^[12]。桑军强^[13]试验结果表明，在 5℃ 时的微生物活性(用耗氧速率 OUR 表征)是 10℃ 时的 65% 左右；0.5℃ 时微生物的活性是 10℃ 时的 25.1%。在低于 5℃ 以后，硝化菌的活性及种类将大大受到限制，生长速率甚至会降至 0^[14]，而亚硝化作用不受影响，出现 NO₂⁻-N 去除效果的降低，与图 6 的结果规律相似。

3 小结

在近 50 d 的富集后，滤池内的硝化效果才稳定，氨氮去除率稳定在 80% 以上，亚硝酸盐氮的去除率达到 90% 以上，表明生物滤池微生物的驯化富集成功。

在饮用水生物处理反应器运行期间，滤池沿层

对氨氮、亚硝酸盐氮的去除集中在 35 cm 以上的滤料范围内, 其中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率为 75.8%, 占总去除率的 93.7%; $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 在上层出现了积累现象, 但是在 35 cm 左右处去除率为 90.8%, 占总去除率的 95.2%。

温度对氨氮的去除影响较小, 生物滤池对氨氮有较稳定的去除效果; 而硝化菌在小于 5℃ 条件下, 活性会明显下降, 表现对亚硝酸盐氮去除率的下降。水温在小于 5℃ 时, 生物活性炭滤池对亚硝酸盐氮的去除能力相当于 5~10℃ 时去除能力 50% 左右。

参考文献:

- [1] Csanady M. Nitrite formation and bacteriological deterioration of water quality in distribution networks [J]. *Water Supply*, 1992, 10(3): 39-43.
- [2] 龙小庆, 富良, 顾玉其, 等. 活性滤池去除微污染水中有机物和氨氮[J]. *中国给水排水*, 2002, 18(8): 44-45.
- [3] Urfer D, Huck P M. Measurement of biomass activity in drinking water biofilters using a respirometric method[J]. *Wat Res*, 2001, 35(6): 1469-1477.
- [4] 袁建磊, 张立秋, 肖峰, 等. 生物活性炭滤池中亚硝酸盐积累影响因素研究[J]. *哈尔滨商业大学学报: 自然科学版*, 2008, 24(1): 40-46.
- [5] 马文漪, 杨柳燕. 环境微生物工程[M]. 南京: 南京大学出版社, 1998.
- [6] 于鑫, 乔铁军, 张晓健, 等. 饮用水生物滤池中亚硝酸盐氧化细菌的生长规律[J]. *应用与环境生物学报*, 2003, 9(3): 318-321.
- [7] Hagopian D S, Riley J G. A close look at the bacteriology of nitrification[J]. *Aquacult Engin*, 1998, 18(4): 223-244.
- [8] 王健, 陆少鸣. BAF+常规工艺中砂滤池净水效果研究[J]. *环境工程学报*, 2010, 4(3): 599-602.
- [9] 崔康平, 彭书传, 周元祥. 上流式曝气生物滤池脱氮性能研究[J]. *合肥工业大学学报: 自然科学版*, 2005, 28(4): 374-378.
- [10] Paul O, Gaspar J, Ruther P. Advanced silicon microstructures, sensors and systems[J]. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2007, 2(3): 199-215.
- [11] 王占生, 刘文君. 微污染源饮用水处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [12] 王毓仁. 提高废水生物硝化效果的理论探讨及工艺对策[J]. *给水排水*, 1994, 20(8): 25-28.
- [13] 桑军强, 王占生. 低温条件下生物陶粒反应器运行特性研究[J]. *环境科学*, 2003, 24(2): 112-115.
- [14] 姚重华. 废水处理计量学导论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.