

曝气生物滤池的微生物种群优化与分布

彭永臻, 王海东, 王淑莹

(北京工业大学 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100022)

摘 要: 为研究反应器内的微生物种群关系,以强化污水脱 N 处理,本试验采用上流式曝气生物滤池,以生活污水为原水,在水力负荷、pH 值以及溶解氧(DO)方面对微生物进行生化反应和结构优化的影响情况进行了研究. 试验结果表明,污染物负荷对 2 级滤池的种群竞争具有重要作用,适当地控制负荷可使反应器在各自的优化状态下运行. $\text{pH} < 8.5$ 对维持长时间短程硝化可行性不大,但是控制 $\rho(\text{DO}) < 1.8 \text{ mg/L}$,在一定负荷时,利用在较低的 $\rho(\text{DO})$ 条件下氨氧化菌的比增殖速率比亚硝酸盐氧化菌的比增殖速率高的特点,亚硝酸盐积累率可以达到 84%,有利于短程硝化反硝化反应器的工艺设计.

关键词: 脱 N; 负荷; 溶解氧(DO); pH; 曝气生物滤池; 微生物种群

中图分类号: X 703.1

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2006)06-0542-05

硝化与有机物降解是污水生化处理过程中非常重要的反应,同时氨氧化菌与亚硝酸盐氧化菌的竞争及空间分布涉及到近年来成为热点的短程硝化反硝化过程和同步硝化反硝化生化过程^[1]. 因此,深入了解影响硝化细菌生长和作用的相关因素,研究其不同条件下与异养菌的竞争关系,对于反应器在强化脱 N 方面的优化设计具有十分重要的意义.

曝气生物滤池是近年来发展较快的生物膜工艺,已有研究表明,曝气生物滤池可以在 1 个单独的或 2 个连续运行的反应器内高效去除有机物及进行硝化作用^[2-3]. 然而此工艺仍然面临着有机碳严重限制硝化细菌生化作用的问题. 一些研究在 C 与 N 之比(设为 R ,以 $\rho(\text{C}):\rho(\text{N})$ 计)方面阐述了硝化细菌种群被异养菌替代的动力学行为^[4],还有研究阐述了 $\rho(\text{DO})$ 在短程硝化反硝化以及同步硝化反硝化过程中的作用^[5]. 本试验在水力负荷、温度方面研究硝化菌与异养菌之间的竞争关系,并研究了氨氧化菌、亚硝酸盐氧化菌和异养菌在同一个反应器及不同反应器中的比生物活性,以及 pH 值、 $\rho(\text{DO})$ 对这几种生物种群进行生化反应和种群结构优化的影响.

1 试验设备与方法

本实验设计了 2 个上流式曝气生物滤池 (UBAF) 反应器,见图 1. 2 个试验滤柱柱高均为 3 m,直径 100 mm;内部均充填约 14.13 L 直径为 2~3 mm 的黏土陶粒作为生物膜介质,第 1 级反应器主要进行碳氧化,第 2 级反应器进行硝化,2 个滤柱串联运行.

试验用水为北京工业大学校区内的生活污水, R 较低,约为 3:1. 具体水质如表 1 所示, pH 值为 7.2~7.8,温度均为 14~28 ℃.

除进出水外,一般在滤柱上每隔 30 cm 取 1 个水

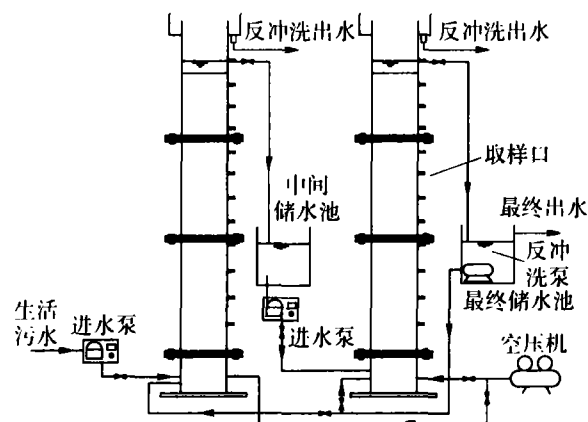


图 1 二段上流式曝气生物滤池示意图

Fig.1 Schematic of the two-stage submerged filter

收稿日期: 2006-02-14.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50521140075); 国家自然科学基金项目(50478084).

作者简介: 彭永臻(1949-),男,黑龙江哈尔滨人,教授.

样. 水样的有机物的质量浓度, 分别以 COD(Chemical Oxygen Demand, 化学需氧)及 BOD₅(5-day Biochemical Oxygen Demand, 5 日生化需氧)计, $\rho(\text{COD})$ 、 $\rho(\text{BOD}_5)$ 、 $\rho(\text{SS})$ (SS 为出水悬浮固体)、 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 、 $\rho(\text{NO}_2^-)$ 、 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 根据标准方法分析测定. 温度、pH、 $\rho(\text{DO})$ 由 WTW 便携式仪器来测定. 固体填料取样点与水取样点相同, 对于固体填料上的附着生物质量以重量法直接测定, 结果表示为单位质量填料附着的生物质量(mg/g). 以比耗氧速率 v (单位时间内单位质量微生物消耗 O₂ 的质量, mg/(g·h))来表征生物膜中好氧微生物的活性, 试验时设定相同的 DO 起始质量浓度($\rho_0(\text{DO})$), 并使每种底物质量浓度都可保证微生物进行生化反应时符合 0 级反应动力学. 在耗氧速率测定过程中通过在不同时间分别投加氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的选择性生物抑制剂 NaClO₃ 和 ATU(丙烯基硫脲), 可分别得到异养菌、氨氧化菌以及亚硝酸盐氧化菌的比耗氧速率.

表 1 UBAF 进水水质

Tab.1 Influent characteristics of UBAF						mg·L ⁻¹
$\rho(\text{COD})^{(1)}$	$\rho(\text{BOD}_5)^{(1)}$	$\rho(\text{TN})^{(2)}$	$\rho(\text{NH}_4^+)^{(2)}$	$\rho(\text{NO}_2^-)^{(2)}$	$\rho(\text{NO}_3^-)^{(2)}$	碱度
160~315	85~175	60~100	55~90	0.05~0.30	0.05~0.84	320~560

滤柱反冲洗时间由柱内水头损失的大小来控制, 一般在滤柱水头损失达到 80 cm 的时候进行反冲洗, 反冲洗过程为: 先以流量为 50 m/h 的气体单独气洗 2 min, 然后再以流量 50 m/h 的气体与流量为 40 m/h 的水联合反冲 5 min, 最后停止气洗, 用最终出水中流量为 40 m/h 的水冲洗滤柱 3 min. 在正常进水前将反冲洗水排出.

2 试验结果与讨论

2.1 负荷对生化反应及微生物生长的影响

负荷对反应器内各菌种分布具有重要影响. 本试验以实际生活污水为原水, 通过水力负荷变化来调整反应器进水负荷(η). 试验结果表明, 第 1 级反应器有机物的容积负荷(以 COD 计)可以达到 9.4 kg/(m³·d), 此时出水 $\rho(\text{COD}) < 60 \text{ mg/L}$, 去除率(θ_{COD})达到 76%, 出水 NH₄⁺ 去除率($\theta_{\text{NH}_4^+}$)为 25%; 进水有机负荷(以 COD 计) $\eta_{\text{COD}} < 1.9 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时, NH₄⁺ 则可以达到完全硝化. 对于第 2 级反应器, 其 NH₄⁺ 的去除效果与第 1 级反应器的进水负荷密切相关. 在第 1 级反应器进水有机物负荷(η_{COD})为 3.1、11.3 kg/(m³·d)时, 沿 2 级反应器的柱高有机物的降解与 NH₄⁺ 硝化的效果见图 2.

比较 2 图可知, 单独考察第 1 级反应器时, η_{COD} 加大使得 NH₄⁺ 的硝化开始点沿滤床高度逐渐上升, 有机物的降解特性沿滤床高度发生了改变: 当负荷较小时, 有机物降解主要集中在滤床中下部, 并且在此

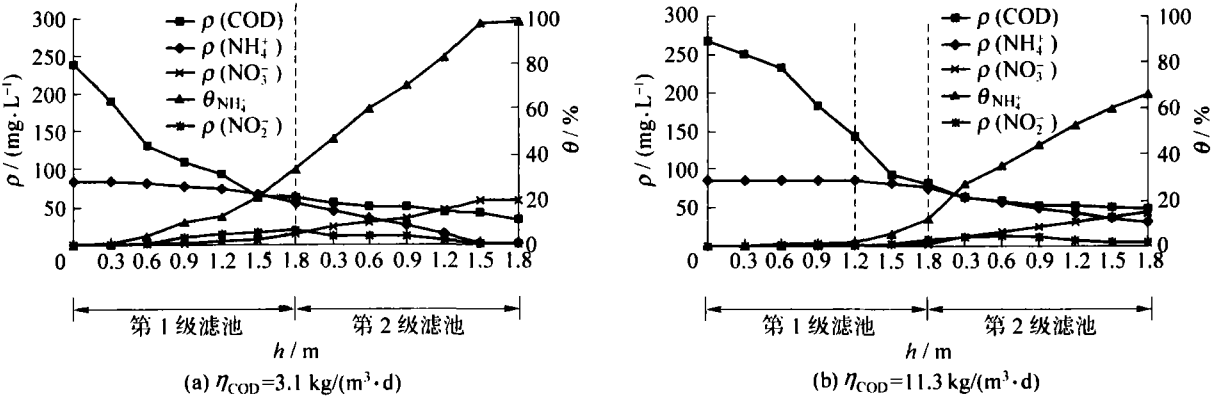


图 2 ρ (有机物)与 $\rho(\text{N})$ 随柱高变化曲线

Fig. 2 Profiles of organic matter and nitrogen concentration through the two filters

有较高降解速率;随着负荷的加大,异养菌逐渐占据滤池较高处,表现为有机物降解速率随高度变化逐渐变得不很明显.较高的 η_{COD} 导致第1级反应器内有机物降解不完全而第2级反应器受进水残余有机物的影响,硝化速率下降.第1级反应器出水进入第2级滤柱后, NH_4^+ 的硝化速率明显加快,显示了单独驯化的硝化滤柱在硝化 NH_4^+ 上的优势,即有机物降解与 NH_4^+ 的硝化分别在2个柱内进行,能够充分发挥各自的优点.

图3为第1级反应器 η_{COD} 为3.1、11.3 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时,沿2级反应器柱高的微生物活性.由图可知,在不同负荷下,氨氧化菌与亚硝酸盐氧化菌活性均有沿柱高逐渐增高的趋势,并在 NH_4^+ 氧化70%时达到最高值;而且高负荷时的活性要高于低负荷时的活性.

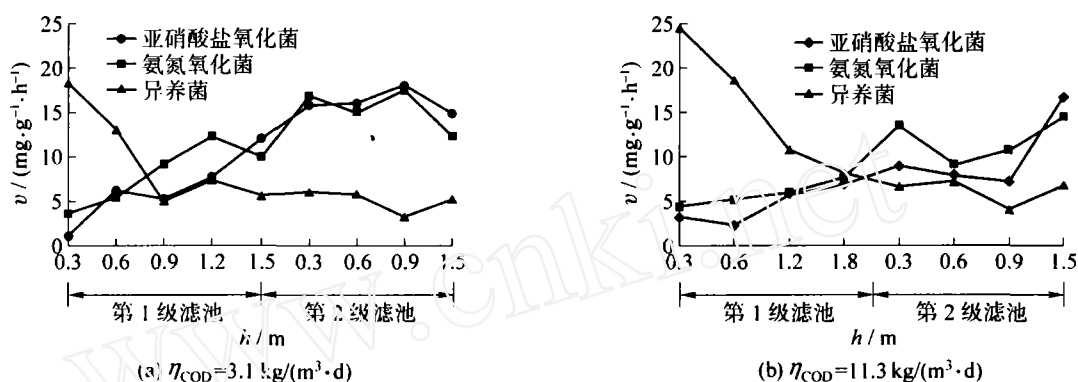


图3 微生物活性随柱高变化曲线

Fig.3 Profiles of the activities of microorganisms through the two filters

异养菌的生物活性变化表明生长较快的异养菌通常占据了反应器的进口区,其活性随负荷增加而增高,且在高负荷下其活性随柱高衰减的速度低于低负荷的时候.

生物量在不同负荷下总是沿柱高逐渐降低,但是高负荷下的生物量高于低负荷时的生物量.负荷较高时,多数情形下氨氧化菌的活性沿柱高要高于亚硝酸盐氧化菌,因此可以通过运行上的适当控制,实现UBAF的短程硝化.

2.2 pH值对不同微生物种群生长的影响

pH值对微生物生长的影响主要体现在其与温度条件相结合,对水中以非离子态存在的游离氨(FA)以及 HNO_2 的质量浓度起主要作用.有研究表明,pH>7.5时,系统中 NO_2^- 的积累与 $\rho(\text{FA})$ 密切相关^[6].本试验考察了在一定pH值范围内反应器内 NH_4^+ 氧化及 NO_2^- 积累的情况,间接观察在不同pH条件下各种微生物的不同生长特性.

图4是在2个平行运行的第1级反应器内分别考察不同pH值条件下反应器出水的 NO_2^- 积累率(以 μ 表示,定义为 $\rho(\text{NO}_2^-) : \rho(\text{NO}_3^-)$ 的值, $\rho(\text{NO}_3^-)$ 为出水 $\rho(\text{NO}_2^-)$ 与 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 之和),试验在pH值为7.5~8.0时在一个柱内进行,而在pH值为8.5~9.0时在另一个柱内进行.由于严格控制操作条件,可认为2个柱的结果具备可比性.由图可知,pH值在7.5~9.0,均对 NH_4^+ 的降解产生影响.表现在随运行时间的延长, μ 值增大,且随着pH值的升高,出水的 μ 值加大.但除在pH=9.0时呈上升趋势外,在pH值为7.5~8.5时分别运行20 d至1个月后, μ 值逐渐降低,显示亚硝酸盐氧化菌逐渐适应了FA的抑制,活性逐渐增强.这点与Villaverde的研究结果有类似之

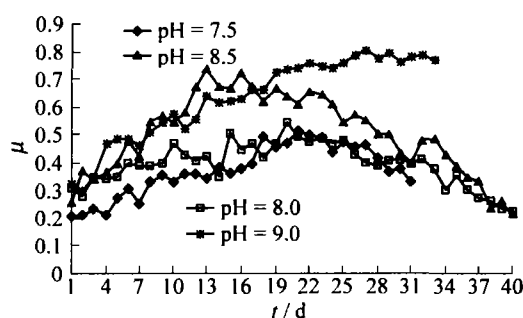


图4 不同pH值下第1级反应器出水 μ 值

Fig.4 Effluent nitrite accumulation of the first filter at different pH values

处,但是,可能由于其研究以不含有有机物的人工配制含N污水为对象,其研究结果显示pH值对亚硝酸盐氧化菌的影响相对于本试验所用实际生活污水更为敏感^[7].虽然在pH=8.0与pH=8.5时,在一段时间内 μ 值高于pH=7.5时,但是却早于pH=7.5时开始下降.这可能是由于pH=7.5阶段仍处于生物膜培养阶段,亚硝酸盐氧化菌仍在继续生长,造成其较长时间的积累.由此也可看出,pH值不太高时,利用FA抑制获得较长时间的短程硝化不太可行.

图5表示在pH=7.5和pH=9.0时反应器内 $\rho(\text{FA})$ 与各高度处 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 与有机物的降解情况.由图可知,pH值较高时(9.0),FA的抑制作用对 NH_4^+ 氧化影响较大,但对有机物降解影响不大.pH=9.0时出水 $\rho(\text{NO}_2^-)$ 呈现增加状态,1个月后 μ 值可达近0.80,但同时 NH_4^+ 氧化也受到抑制,使 $\theta_{\text{NH}_4^+}=50\%$.第2级反应器 $\rho(\text{COD})$ 进水较低,相应硝化点较低,在反应器中部时就已经低于FA抑制的初始值^[8],所以出水 μ 值与第1级相比较小.

2.3 DO的影响

DO是影响有机物氧化与硝化过程的重要因素之一.已有研究表明, $\rho(\text{DO})$ 较低时易发生 NO_2^- 积累^[9].氨氧化菌的氧饱和常数一般为0.2~0.4 mg/L,而亚硝酸盐氧化菌的为1.2~1.5 mg/L, $\rho(\text{DO})$ 较低时,氨氧化菌对DO的亲合力强于亚硝酸盐氧化菌,因此可能形成 NO_2^- 的大量积累.

试验将 $\eta_{\text{NH}_4^+}$ (以 NH_4^+ 计)固定为0.4 kg/(m³·d),严格控制系统的反冲洗操作条件及周期以控制反应器排泥.如图6所示,在前3个星期内一直保持系统的 $\rho(\text{DO})$ 在0.9~1.7 mg/L内,则 μ 值可达0.59.加大曝气量,使 $\rho(\text{DO})$ 升至2.0~4.5 mg/L, μ 值显著减小,此时提高进水pH值至8.5, μ 值小幅增大后又开始减小,说明在此 $\rho(\text{DO})$ 下只调整pH值不能维持 NO_2^- 的积累.再控制反应器 $\rho(\text{DO})$ 在0.8~1.8 mg/L,不再调整进水pH值,则 μ 值又开始增大,最大可达0.84.这是因为在 $\rho(\text{DO})$ 较低时,氨氧化菌的比增殖速率比亚硝酸盐氧化菌的比增殖速率高,通过控制运行条件,亚硝酸盐氧化菌被逐渐淘洗出反应器,生物膜种群优化,由氨氧化菌占据优势.

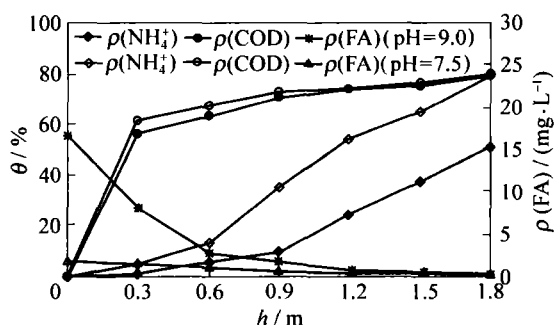


图5 反应器内 $\rho(\text{FA})$ 与各高度处 NH_4^+ 与有机物降解曲线

Fig. 5 Profiles of free ammonia concentration and ammonia and organic matter through the filter

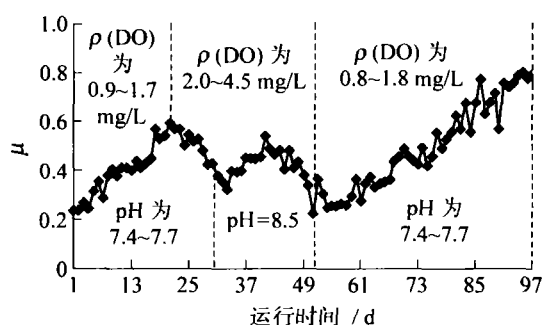


图6 第1级反应器在不同 $\rho(\text{DO})$ 及pH值下的亚硝酸盐积累

Fig. 6 Effluent nitrite accumulation of the first filter at different $\rho(\text{DO})$ and pH values

3 结论

本试验通过考察pH值、 $\rho(\text{DO})$ 以及水力负荷等运行参数对上流式曝气生物滤池中生化反应及生物活性的影响研究了生物膜中硝化菌与异养菌种群之间的竞争关系.试验结果表明:

1) 较高的有机物负荷导致在第1级反应器内的硝化开始点沿柱高上升,而单独驯化的硝化滤柱在 NH_4^+ 氧化上具备一定优势.

2) 在负荷较高时,氨氧化菌的活性沿柱高在多数情形下高于亚硝酸盐氧化菌.异养菌的生物活性变化表明生长较快的异养菌通常占据了反应器的进口区.

3) 在 $\text{pH} < 8.5$ 时利用 FA 抑制获得较长时间的短程硝化较为困难。 $\text{pH} = 9.0$ 时由于 FA 的抑制作用,出水 $\rho(\text{NO}_2^-)$ 呈现增加状态,1 个月后 μ 值可达 0.80,同时 $\theta_{\text{NH}_4^+}$ 只有 50%,但对有机物降解影响不大。

4) 在 $\eta_{\text{NH}_4^+} = 0.4 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时,按本试验所采取方式控制系统的反冲洗操作条件及反冲洗周期以控制反应器排泥,同时控制反应器 $\rho(\text{DO})$ 在 $0.8 \sim 1.8 \text{ mg/L}$, NO_2^- 的 μ 值最大可达 0.84。

参考文献:

- [1] FDZ-POLANCO F, VILLAYERDE S, GARCIA P A. Nitrite accumulation in submerged biofilters-combined effects[J]. Wat Sci Tech, 1996, 34(3-4): 371-378.
- [2] PUJOL R, LEMMEL H, GOUSAILLES M. A keypoint of nitrification in an upflow biofiltration reactor[J]. Wat Sci Tech, 1998, 38(3): 43-49.
- [3] CHUDOB A P, PUJOL R. A three-stage biofiltration process; performances of a pilot plant[J]. Wat Sci Tech, 1998, 38(8-9): 257-265.
- [4] OHASHI A, VIRAJ DE SILVA D G, MOBARRY B, et al. Influence of substrate C/N ratio on the structure of multi-species biofilms consisting of nitrifiers and heterotrophs[J]. Wat Sci Tech, 1995, 32(3): 75-84.
- [5] 高大文, 彭永臻, 王淑莹. 高氮豆制品废水的亚硝酸型同步硝化反硝化生物脱氮工艺[J]. 化工学报, 2005, 56(4): 699-704.
GAO Da-wen, PENG Yong-zhen, WANG Shu-ying. Nitrogen removal from high nitrogen soybean wastewater by simultaneous nitrification and denitrification via nitrite[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2005, 56(4): 699-704. (in Chinese)
- [6] SURMACZ-GORSKA J, GERNAEY K, DEMUYNCK C. Nitrification monitoring in activated sludge by oxygen uptake rate (OUR) measurements[J]. Wat Res, 1996, 30(5): 1228-1236.
- [7] VILLAYERDE S, FDZ-POLANCO F, GARCIA P A. Nitrifying biofilm acclimation to free ammonia in submerged biofilters. Start-up influence[J]. Wat Res, 2000, 34(2): 602-610.
- [8] VILLAYERDE S, GARCIA P A, FDZ-POLANCO F. Influence of pH over nitrifying biofilm activity in submerged biofilters [J]. Wat Res, 1997, 31(5): 1180-1186.
- [9] PICIOREANU C, VAN LOOSDRECHT M C M, HEIJNEN J J. Modelling the effect of oxygen concentration on nitrite accumulation in a biofilm airlift suspension reactor[J]. Wat Sci Tech, 1997, 36(1): 147-156.

Microorganism Population Optimization and Distribution in Biological Aerated Filter

PENG Yong-zhen, WANG Hai-dong, WANG Shu-ying

(Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: In order to study the relationship of microorganisms in bioreactor and enhance nitrogen removal, influence of pH, dissolved oxygen and applied loading on biochemical reaction and population optimizing were studied. The experimental results show that controlling loading could make two stage filters operated at the optimized conditions respectively due to population competition. Maintaining long time shortcut nitrification is not likely to be feasible when the pH value is below 8.5. Nevertheless, utilizing the characteristic that specific growth rate of ammonia oxidizer is higher than nitrite oxidizer at low dissolved oxygen concentrations, the nitrite accumulation could be up to 84% at the certain loading if the concentration of dissolved oxygen in the system is controlled below 1.8 mg/L. It is beneficial to the design of the shortcut nitrification-denitrification reactors.

Key words: nitrogen removal; loading; dissolved oxygen; pH; biological aerated filter; microorganism population