

两段曝气生物滤池的同步硝化反硝化特性

王春荣¹,王宝贞^{1*},王琳² (1.哈尔滨工业大学水污染控制研究中心,黑龙江 哈尔滨 150090; 2.中国海洋大学环境科学与工程学院,山东 青岛 266003)

摘要: 采用两段曝气生物滤池进行了实际生活污水的试验研究,控制 A 段水力负荷在 $22.01\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,气水比为 6:1,研究了 B 段气水比分别为 3:1、2:1 和 1:1 时,反应器的运行情况.结果表明,两段曝气生物滤池处理生活污水的出水稳定,当 B 段反应器的气水比为 2:1 时,去除效果最佳.B 段具有明显的同步硝化反硝化特征,当气水比较低时主要进行短程的同步硝化反硝化.对 B 段反应器 0.9m 高度处的生物膜进行了静态试验,结果表明,生物膜的比硝化速率为 $1.458\text{mg NH}_3\text{-N}/(\text{gMLSS}\cdot\text{h})$;当 DO 和 pH 值等影响因子适宜的情况下,有机碳源的存在不影响硝化作用的进行;反硝化过程中,对亚硝酸进行反硝化的速率比对硝酸盐进行反硝化的速率高 1.15 倍,缩短了反硝化所需时间.

关键词: 两段曝气生物滤池;同步硝化反硝化;短程硝化反硝化;气水比

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2005)01-0070-05

The simultaneous nitrification and denitrification characteristics of two-stage biological aerated filter. WANG Chun-rong¹, WANG Bao-zhen¹, WANG Lin² (1. Water Pollution Control Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China 2. School of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China). *China Environmental Science*, 2005,25(1): 70~74

Abstract: The two-stage biological aerated filter (BAF) was adopted to carry out the experimental study of actual domestic wastewater, the hydraulic loading of $22.01\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ and the air/water ratio of 6:1 at A-stage were controlled, when air/water ratio was 3:1, 2:1 and 1:1 respectively at B-stage, the operation state of reactor was studied. The effluent quality was stable and excellent, and the removal effect of every pollutants was the best when the air/water ratio was 2:1 at B-stage reactor. B-stage possessed marked of simultaneous nitrification and denitrification characteristics. Short-cut simultaneous nitrification and denitrification was carried out mainly when air/water ratio was lower. Static experiment was carried out for biofilm at 0.9-meter height of B-stage reactor. The specific nitrification rate of the biofilm was $1.458\text{mg NH}_3\text{-N}/(\text{gMLSS}\cdot\text{h})$; the existence of organic carbon source did not affect the operation of nitrification under the adaptable state of affecting factors, such as DO and pH, et al. In denitrification process the denitrification rate over nitrite was 1.15 times higher of that over nitrate, thus, the denitrification time was also shortened.

Key words: Two-stage biological aerated filter; simultaneous nitrification and denitrification; short-cut nitrification and denitrification; air/water ratio

曝气生物滤池(BAF)已广泛用于生产性实践^[1,2],目前已成为污水生物处理工艺(如滴滤池和活性污泥处理工艺)的又一替代方案,具有占地面积小,处理能力及抗冲击负荷能力强等优点.BAF 运行灵活,根据不同的组合可以实现多种处理目的^[3,4].

本实验利用 BAF 的优点,采用两段 BAF 进行生活污水的试验研究,通过控制运行条件使 A 段反应器主要进行 COD 和 SS 的去除,然后在 B 段实现脱氮处理,旨在研究 B 段反应器的同步硝

化反硝化特性,并找到最佳的运行工况.

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

试验装置见图 1,反应器由有机玻璃制成,外形为圆柱形,直径 10cm,A 段高 1.8m, B 段高 2m,有效容积分别为 9.8L 和 11.8L.两反应器均装有

收稿日期: 2004-05-31

基金项目: 黑龙江省 2002 年杰出青年专家基金资助

* 责任作者, 教授, baozhen@public.hl.hr.cn

火山岩填料,粒径 3~5mm,孔隙度 62.5%,堆积密度 $0.628 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,实际密度 $1.673 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,填料体积分别占总体积的 67%和 70%.

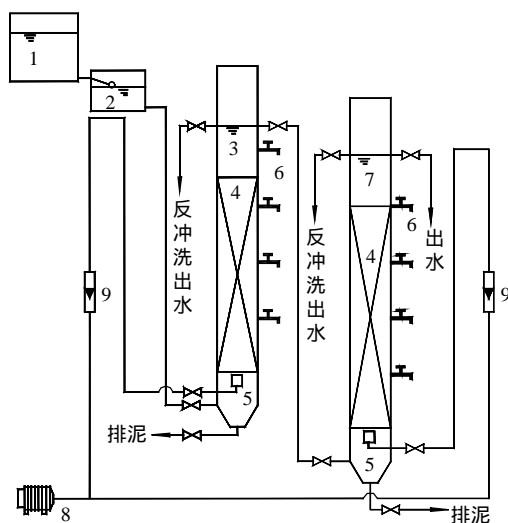


图 1 试验装置示意

Fig.1 Diagram of experimental system

- 1.高位水箱 2.平衡水箱 3.A 段反应器 4.填料 5.扩散器
6.取样口 7.B 段反应器 8.曝气泵 9.流量计

1.2 试验水质及试验方法

试验用水为哈尔滨工业大学二校区家属区生活污水,其主要水质参数见表 1.

表 1 生活污水的水质情况

Table 1 The quality of domestic wastewater

| 参数 | 范围 | 平均值 |
|--------------------------|-------------|-------|
| SS(mg/L) | 60.21~98.64 | 75.8 |
| COD(mg/L) | 145.6~330.2 | 236.5 |
| NH ₃ -N(mg/L) | 34.30~40.38 | 38.20 |
| TN(mg/L) | 38.18~49.22 | 45.10 |
| DO(mg/L) | 0.9~1.6 | 1.2 |
| pH 值 | 6.5~8.2 | 7.2 |

两反应器均从底部进水,气水同向.A 段反应器启动时投加适量 SBR 池沉降污泥作为种泥,闷曝 3d 后连续进水,负荷控制在 $9.17 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,系统运行 15d 后挂膜成功.B 段反应器在此试验前,一直进行高氨废水脱氮处理,已经连续运行 18 个

月,其中微生物主要以硝化菌为主.经过 15d 的启动运行具有良好的脱氮效果.系统启动后,A 段反应器在 $22.01 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 的水力负荷下运行,气水比为 6:1,水温为 15~21℃.B 段反应器气水比分别控制为 3:1、2:1 和 1:1.稳定运行后测定各反应器进、出水及各取样口处的 COD、SS、NH₃-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TN、pH 值和 DO.所有分析项目均按标准方法进行.

2 结果与讨论

2.1 两段反应器污染物的去除情况

由图 2 可见,A 段负荷及气水比固定时,COD 的去除较稳定,平均去除率为 73.2%,出水平均浓度为 52.8mg/L; B 段反应器主要以脱氮为主,随气水比的降低,COD 去除率变化较明显,气水比为 3:1、2:1、1:1 时,COD 平均去除率分别为 54.5%、61.1%和 46.85%.

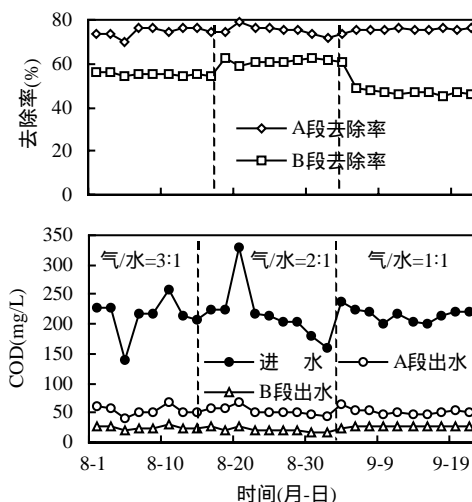


图 2 BAF 各段 COD 浓度及去除效果的变化情况

Fig.2 The COD concentration and removal efficiency in each of BAF reactor

由图 3 可见,A 段反应器对氨氮的去除率较低,仅为 30%,出水氨氮平均浓度为 27.54mg/L;不同气水比下,B 段反应器对氨氮的去除效果较好,出水氨氮浓度均低于 3mg/L;随着 B 段气水比的减小,氨氮去除率略呈下降趋势,这是因为氨氮的

去除是好氧过程,水中溶解氧充足有利于氨氮的氧化.

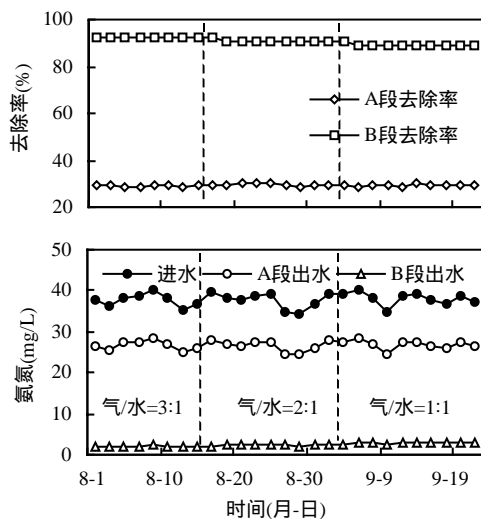


图3 BAF 各段氨氮浓度及去除效果的变化情况

Fig.3 The $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration and removal efficiency in each of BAF reactor

由图 4 可见,A 段反应器对 TN 基本上没有去除;TN 的去除主要发生在 B 段,当气水比为 3:1,2:1,1:1 时,平均去除率分别为 58.62%, 71.75% 和 59.17%.分析认为,B 段反应器因限制曝气,为同步硝化反硝化提供了有利条件,当气水比较大时,溶解氧穿透生物膜较深,生物膜的兼氧及厌氧层薄,因此反硝化效果不好,出水 TN 浓度较高;随着气水比的降低,生物膜内的厌氧层加厚,反硝化效果变好;但当气水比继续降低时,因硝化作用进行的不彻底致使 TN 去除率又出现了反弹.

由图 5 可见,因氨氮的部分氧化,A 段出水中亚硝酸盐含量介于 0.54~0.64mg/L,而硝酸盐含量则介于 35.4~42.4mg/L;B 段出水中,硝酸盐含量随气水比的降低呈减小趋势,且在气水比为 2:1 时,达到最小值.而亚硝酸盐含量则不同,随着气水比的减小呈增加趋势,且在气水比为 1:1 时,出水亚硝酸盐累积达到 2.49mg/L.硝酸盐含量减小表明 B 段发生了反硝化作用,而亚硝酸盐累积又表明随气水比的降低,出现了短程硝化.

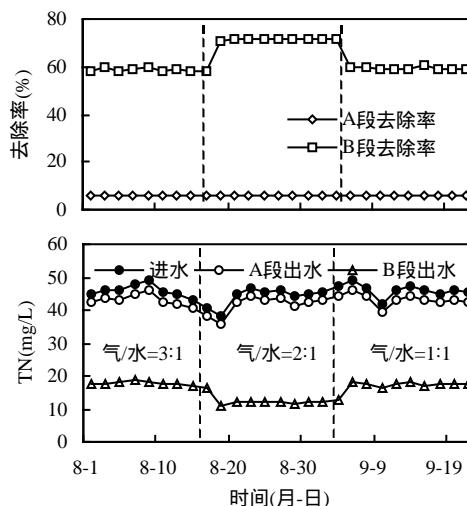


图4 BAF 各段 TN 浓度及去除效果的变化情况

Fig.4 The TN concentration and removal efficiency in each of BAF reactor

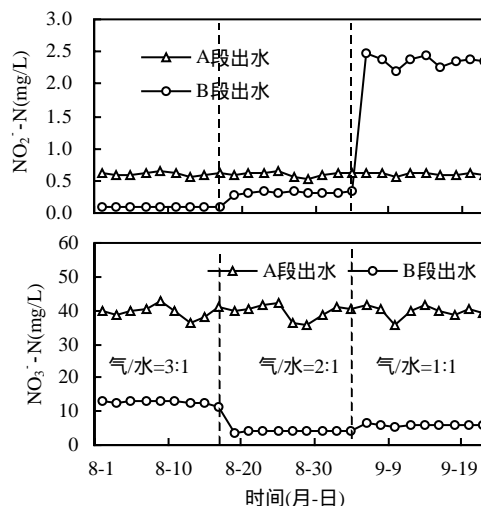


图5 BAF 各段出水的 $\text{NO}_x\text{-N}$ 浓度

Fig.5 The effluent $\text{NO}_x\text{-N}$ concentration in each of BAF reactor

综上所述,两段 BAF 处理生活污水出水稳定,均能达到 $\text{COD } 30\text{mg/L}$, $\text{NH}_3\text{-N } 3\text{mg/L}$,而且当 B 段反应器气水比为 2:1 时,具备同步硝化反硝化的最佳条件,各项污染物去除效果良好.当 A 段运行条件不变时,A 段出水的 COD/TN 比接近于 2.5:1,从总的出水效果看,B 段反硝化所需碳源不是限制因素.另外,当 B 段气水比高于 2:1 时,

反应器内溶解氧充足,致使硝化效果良好,而反硝化作用受到抑制,由于部分 COD 继续发生氧化,出水氨氮和 COD 去除率相对较高,而 TN 和 $\text{NO}_x\text{-N}$ 浓度偏高;当气水比过低时,反应器内供氧不足,尽管具备良好的反硝化条件,但硝化效果不佳,导致出水氨氮偏高,相应的 TN 去除率下降,并伴有亚硝酸盐的部分累积。

2.2 B 段反应器内的同步硝化反硝化特性

2.2.1 B 段反应器中含氮化合物的空间变化 气水比为 2:1 时,对 B 段各含氮化合物浓度沿水流方向的空间变化进行了研究,采样均为稳定运行后测得,试验结果见图 6。氨氮的氧化主要发生在反应器底部 0~0.6m,此处硝酸盐部分降低,亚硝酸盐大幅度增加,在 0.6m 处亚硝酸盐含量累积达到 20.56mg/L,表明此期间短程硝化作用明显。随着水流继续上升,硝酸盐、亚硝酸盐和 TN 均大幅度减少,表明在 0.6~1.2m 以反硝化作用为主,具有明显的短程硝化反硝化特征。

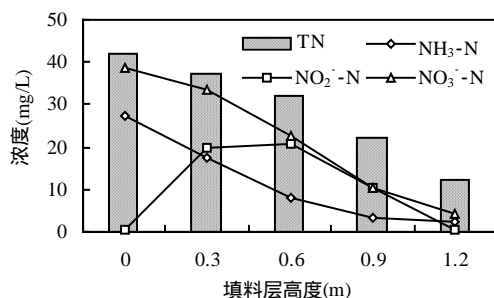


图 6 B 段氮化物沿水流方向的空间变化

Fig.6 The spatial variations of nitrogen compound along the flow at B-stage

2.2.2 静态试验 从 B 段反应器 0.9m 处取 1300mL 填料,其中 100mL 进行烘干称重,得出生物膜量约为 0.45g/100mL 填料。其余 1200mL 填料分成 4 等分分别加到 4 个 1000mL 的烧杯中。其中 2 个烧杯以氯化铵为氮源,初始 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度为 20mg/L;以淀粉为碳源,初始 COD 分别为 0 和 50mg/L, MLSS 4000mg/L, DO 0.8~1.0mg/L, pH 6.8~7.6,水温 19℃。目的是考察生物膜的比硝化速率及有机物的存在对硝化反应的影响(图 7)。

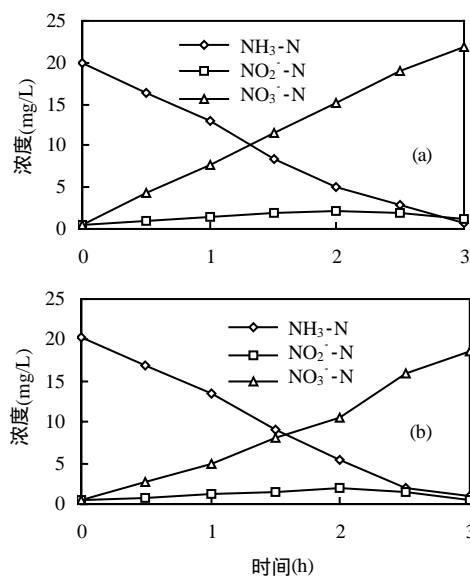


图 7 硝化过程中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的变化

Fig.7 Variations of ammonium, nitrite and nitrate during nitrification

(a) COD=0, (b) COD=50mg/L

由图 7 可见,没有外加碳源时,氨氮含量的降低是由硝化作用完成的。3h 内氨氮含量从 20mg/L 降至 2.5mg/L,得出反应器中生物膜的比硝化速率为 1.458mg $\text{NH}_3\text{-N}/(\text{gMLSS}\cdot\text{h})$;加入碳源后 3h 内,氨氮的含量也从 20mg/L 降至 2.5mg/L。整个过程中,氨氮含量的降低基本上呈线性变化。分析认为,此期间如果反应器中 pH 值、DO 等因子较为合适,异养菌对有机物的降解和硝化菌对氨氮的硝化作用是可以同时进行的。

另外 2 个烧杯中,分别加入乙酸钠和少量淀粉,初始 COD 为 40mg/L,此外 1 个烧杯中加入 30mg/L 的 $\text{NO}_3\text{-N}$,另 1 个烧杯中加入 20mg/L 的 $\text{NO}_2\text{-N}$,实验参数为 MLSS 4000mg/L, DO 0.3~0.5mg/L, pH 6.8~7.8,水温 19℃。目的是观察反硝化过程中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的变化情况及比反硝化速率(图 8)。

由图 8 可见,当 DO 控制在 0.3~0.5mg/L 时,反硝化依然能够进行,当投加 30mg/L 硝酸盐氮时,7h 内硝化过程基本完成,出水硝酸盐降至 4.02mg/L,亚硝酸盐为 0.98mg/L,而且在末期反硝

化进行的越来越不明显,平均比反硝化速率为 $0.881 \text{ mg NO}_x\text{-N}/(\text{gMLSS}\cdot\text{h})$;当投加 20 mg/L 亚硝酸盐时,反硝化过程基本在 4.5 h 内完成,出水硝酸盐和亚硝酸盐含量分别为 1.39 mg/L 和 0.65 mg/L ,平均比反硝化速率为 $1.018 \text{ mg NO}_x\text{-N}/(\text{gMLSS}\cdot\text{h})$;以上试验结果表明,如果反硝化过程从亚硝酸盐开始,其比反硝化速率将提高 1.15 倍。

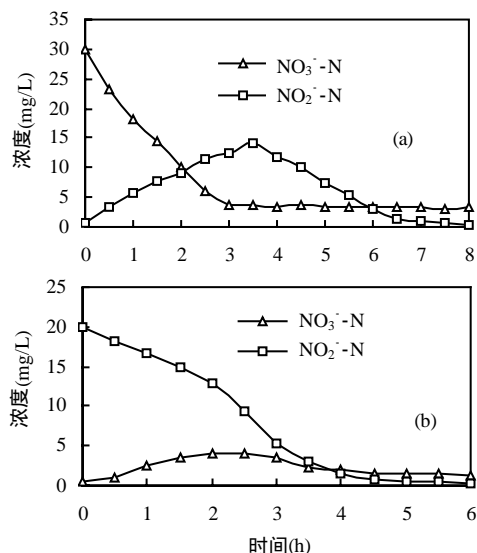


图 8 反硝化过程中 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的变化
Fig.8 Variations of nitrite and nitrate during denitrification

(a) $\text{NO}_3^-\text{-N}=30 \text{ mg/L}$, (b) $\text{NO}_2^-\text{-N}=20 \text{ mg/L}$



图 9 填料的电镜扫描照片($\times 5000$)
Fig.9 SEM photograph of media ($\times 5000$)

2.2.3 填料的电镜照片分析 由图 9 可见,填料表面及内部的生物膜较厚,主要以丝状菌为骨架,其上附着大量的球菌和部分杆菌,形成密集的生物网,导致溶解氧向生物膜内传递受到较大阻力,

有利于生物膜内厌氧微环境的形成,为同步硝化反硝化的发生提供了适宜的环境。

3 结论

3.1 两段 BAF 进行生活污水处理,出水优质稳定,均能达到 $\text{COD } 30 \text{ mg/L}$, $\text{NH}_3\text{-N } 3 \text{ mg/L}$,当 B 段气水比为 $2:1$ 时,各污染物去除效果最佳。

3.2 B 段反应器具有明显的短程同步硝化反硝化特征,对其中生物膜进行静态试验表明,生物膜的比硝化速率为 $1.458 \text{ mg NH}_3\text{-N}/(\text{gMLSS}\cdot\text{h})$,有机碳源的存在不会影响硝化作用的进行.而反硝化过程中,从亚硝酸盐直接进行反硝化,其比反硝化速率要比从硝酸盐进行反硝化快 1.15 倍,大大缩短反硝化所需时间。

3.3 对 B 段反应器的填料进行电镜扫描,表明填料内部生物膜厚,主要以丝状菌为骨架,其上附着大量的球菌和部分杆菌,形成密集的生物网为同步硝化反硝化创造了有利的生存环境。

3.4 与单级 BAF 相比,两段 BAF 实现了脱碳、脱氮微生物的分离,使其各自生长在最佳环境下,充分发挥最大潜力,出水效果良好.另外,两段 BAF 具有良好的抗冲击负荷能力,进水水质发生波动对 B 段出水的影响不大。

参考文献:

- [1] Westerman P W, Bicudo J R, Kantardjieff A. Upflow biological aerated filters for the treatment of flushed swine manure [J]. *Bioresource Technology*, 2000,74(3):181-190.
- [2] Lacalle M L, Villaverde S, Fdz-polanco F, *et al.* Combined anaerobic/aerobic (UASB+UBAF) system for organic matter and nitrogen removal from a high strength industrial wastewater [J]. *Wat. Sci. Tech.*, 2001,44(4):255-262.
- [3] Chudoba P, Pujol R. A three-stage biofiltration process: performances of a pilot plant [J]. *Wat. Sci. Tech.*, 1998,38(8-9): 257-265.
- [4] 郑俊,程寒飞,王晓炎.上流式曝气生物滤池工艺处理生活污水 [J]. *中国给水排水*, 2001,17(1):51-53.

作者简介:王春荣(1978-),女,内蒙古赤峰人,哈尔滨工业大学在读博士生,主要研究方向为污水生物处理.发表论文 5 篇。