

## 技术总结

## 实时控制下短程生物脱氮的实现及其稳定性研究

吴昌永<sup>1</sup>, 陈志强<sup>1</sup>, 彭永臻<sup>1,2</sup>, 刘秀红<sup>1</sup>(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 北京工业大学  
环境与能源工程学院, 北京 100022)

**摘要:** 采用小试 SBR 反应器处理实际生活污水, 研究了实时控制条件下短程生物脱氮的实现和稳定性。结果表明, 系统在实时控制条件下运行 67 d, 实现了较为稳定的短程硝化反硝化, 亚硝酸盐积累率 ( $\text{NO}_2^- - \text{N}/\text{NO}_x^- - \text{N}$ ) > 80%; 在此基础上将系统改为定时运行, 短程硝化则逐步受到破坏, 证明了实时控制对短程硝化的维持具有重要作用。此外, 考察了在实时控制条件下温度和短时高氨氮负荷对短程生物脱氮稳定性的影响。结果表明, 在平均温度为 20 ℃ 时, 亚硝酸盐积累率有所降低但仍可稳定地维持在 60% 以上; 高  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  冲击负荷对短程生物脱氮系统的影响较小, 系统恢复能力较强, 恢复后的亚硝酸盐积累率 > 70%, 表明实时控制条件下的短程硝化反硝化具有一定的稳定性。

**关键词:** 生活污水; SBR; 短程生物脱氮; 实时控制; 定时控制**中图分类号:** X703.1 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2006)19-0039-05

## Achievement and Stability of Shortcut Biological Nitrogen Removal under Real-time Control

WU Chang-yong<sup>1</sup>, CHEN Zhi-qiang<sup>1</sup>, PENG Yong-zhen<sup>1,2</sup>, LIU Xiu-hong<sup>1</sup>

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract:** A lab-scale SBR was employed to treat domestic wastewater and investigate the achievements and stability of shortcut biological nitrogen removal under real-time control conditions. The results show that stable shortcut nitrification and denitrification can be achieved in 67 days under real-time control conditions. The nitrite accumulation rate ( $\text{NO}_2^- - \text{N}/\text{NO}_x^- - \text{N}$ ) is over 80%. Then, the reactor is operated under fixed-time control and the nitrite accumulation rate decreases gradually. It is demonstrated that the real-time control is important to the stability of the shortcut nitrification. The effects of temperature and high ammonia nitrogen loadings on the stability of shortcut nitrification and denitrification under real-time control conditions were investigated. The results show when the average temperature is 20 ℃, the nitrate accumulation rate decreases but still remains above 60%. High ammonia shock loadings have little effect on the biological system of shortcut nitrogen removal. The system has a strong restoration ability and the nitrite accumulation rate is over 70%. This shows the stability of the system under real-time control conditions.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50478040)

**Key words:** domestic wastewater; SBR; shortcut biological nitrogen removal; real-time control; fixed-time control

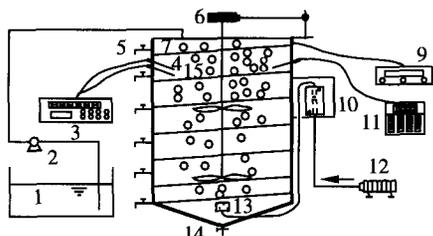
短程硝化反硝化生物脱氮工艺具有节省曝气能耗、缩短反应时间、节省反硝化碳源和减少污泥生成量等诸多优点<sup>[1-3]</sup>,近年来成为研究和开发的热点。短程生物脱氮工艺的关键在于亚硝酸盐的积累,而亚硝酸盐的积累受温度、pH、溶解氧(DO)和游离氨(FA)浓度等因素的影响<sup>[4]</sup>,故若不对其进行控制则难以实现稳定的短程生物脱氮。

通过过程控制手段实现和维持短程硝化反硝化是一种新的思路,近几年受到了广泛关注<sup>[2,5]</sup>。研究表明,在温度为 $(27 \pm 0.5)$  °C 的条件下通过实时控制,SBR 反应器内亚硝酸盐积累率可以稳定在 96% 以上<sup>[5]</sup>。但是目前很多试验都是采用配水进行的,而且对温度的控制比较严格,而采用实际生活污水在常规条件下对短程硝化反硝化进行研究的报道尚不多见且不系统。为此,笔者采用实际生活污水,系统研究了实时控制条件下的短程硝化反硝化的实现、维持及其稳定性,旨在为 SBR 短程生物脱氮工艺的工程应用和实时控制提供理论基础和技术依托。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验装置

试验装置如图 1 所示。



1.储水箱 2.进水泵 3.pH、ORP 测定仪 4.pH 探头 5.取出口  
6.搅拌器 7.加热电阻丝 8.DO 探头 9.温度控制仪  
10.转子流量计 11.DO 测定仪 12.空气压缩机 13.曝气器  
14.放空阀 15. ORP 探头

图 1 SBR 试验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of SBR

SBR 反应器由有机玻璃制成,上部为圆柱形,下部为圆锥体,高为 700 mm,直径为 200 mm,总有效容积为 12 L,排水体积为 8 L,充水比为 0.75。在反应器壁的垂直方向设置一排间隔为 10 cm 的取出口,用于取样和排水。底部设有放空管,用于放空和排泥。以曝气砂头作为微孔曝气器,由转子流量计调节曝气量。反应器外壁缠有电热保温丝,由温控仪控制反应器内的温度,通过热敏探头在线监测温

度的变化。pH、DO 和 ORP 探头置于反应器内,在线监测各个指标的变化,其中 pH 和 ORP 共用 1 台仪器监测。

### 1.2 生活污水水质

试验污水取自北京工业大学教工生活区的实际生活污水,其水质指标如表 1 所示。

表 1 生活污水水质

Tab. 1 Quality of domestic wastewater

项目	范围	均值
pH	7.35 ~ 7.93	7.56
COD/(mg · L <sup>-1</sup> )	123.3 ~ 392.5	182.0
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> - N/(mg · L <sup>-1</sup> )	65.4 ~ 105.7	79.1
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> - N/(mg · L <sup>-1</sup> )	0 ~ 1.03	0.09
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - N/(mg · L <sup>-1</sup> )	0 ~ 1.73	0.68
TN/(mg · L <sup>-1</sup> )	68.5 ~ 110.2	84.9
碱度(以 CaCO <sub>3</sub> 计)/(mg · L <sup>-1</sup> )	475.4 ~ 550.0	512.7

### 1.3 测试项目与分析方法

试验中的测试项目均采用国家环保总局发布的标准方法测定<sup>[6]</sup>。其中 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> - N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 采用离子色谱法测定,所用色谱仪为瑞士 Metrohm 761 compact IC,色谱柱为 metrosep A Supp 5;TOC 和 TN 采用德国耶拿 Multi TN/TOC 3000 测定;pH、ORP 和温度通过在线仪表 WTW InoLab level 2 测定;DO 通过在线仪表 WTW Multi 340i 测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 短程生物脱氮的实现

在温度为 $(28 \pm 0.5)$  °C、曝气量为 0.3 m<sup>3</sup>/h、MLSS 为 3 100 mg/L 的条件下实时控制 SBR 反应器的运行,其中曝气时间由 pH 曲线上的氨谷点和 DO 突跃点联合控制,反硝化时间由 pH 曲线上的硝酸盐峰和 ORP 曲线上的硝酸盐膝点联合控制<sup>[2,7]</sup>。经过多个周期的运行,系统内亚硝酸盐积累率稳定上升,最终形成了较稳定的短程硝化反硝化。图 2 是在实时控制期间亚硝酸盐积累率的变化情况。

由图 2 可以看出,系统的亚硝酸盐积累率缓慢稳定地上升,运行 67 d 后亚硝酸盐积累率 > 80%。分析认为实时控制条件下 SBR 内短程硝化反硝化的形成原因是:①通过在线参数的特征点能准确判定硝化终点,及时停止曝气,且硝化终点为 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 氧化成 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> - N 的终点。②系统在实时控制条件下长期运行,从细菌增长动力学的角度来看,系统环

境不利于亚硝酸盐氧化菌(NO<sub>B</sub>)的生长而有利于氨氧化菌(AOB)的生长,通过有规律地排泥使 AOB 逐渐占据优势,污泥中的微生物种类得到优化更新,表现在宏观处理效果上即为稳定的短程硝化,这也是一种污泥种群优化的思想<sup>[8]</sup>。

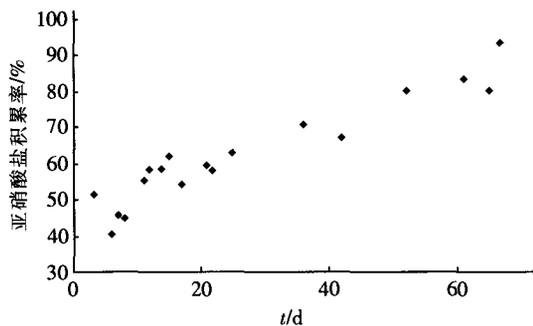
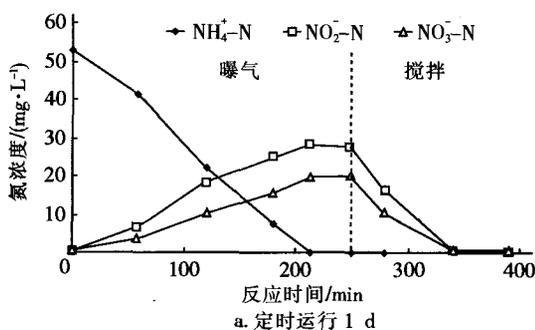


图 2 长时间运行下系统中亚硝酸盐积累率的变化

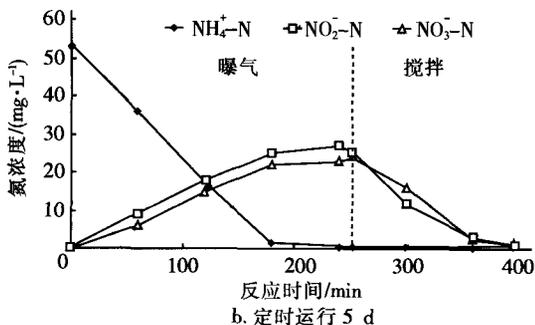
Fig. 2 Variation of nitrite accumulation rate for 67 days

### 2.2 定时控制下的短程硝化效果

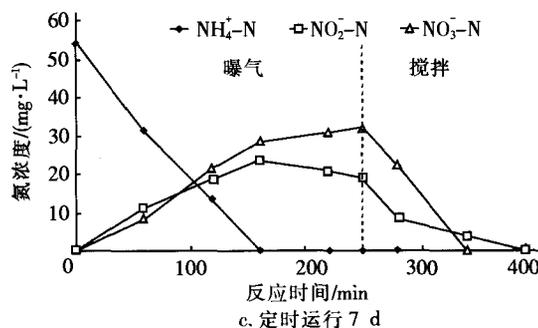
由于上述试验是在温度为(28 ± 0.5) °C 下采用实时控制实现的短程硝化反硝化,为了考察温度和实时控制运行模式对实现短程硝化的权重,故在此基础上将系统运行改为定时控制,考察在(28 ± 0.5) °C 下运行模式对短程硝化的影响。综合前期试验的运行数据,考虑到实际生活污水的水质变化,为保证硝化的完成,将硝化时间定为 250 min,反硝化时间定为 150 min,整个过程采用定时器控制,反应器共运行了 7 d。图 3 是系统运行 1、5 和 7 d 时,氮浓度在一个周期内随反应时间的变化。



a. 定时运行 1 d



b. 定时运行 5 d



c. 定时运行 7 d

图 3 定时运行下氮浓度随时间的变化

Fig. 3 Variation of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N with time under fixed-time control

由图 3 可以看出,当稳定的短程硝化反硝化系统采用定时控制时,难以精确控制氨氮氧化到亚硝化阶段,从而逐步造成对短程硝化的破坏,致使硝化结束时 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量越来越高;运行至第 7 天时的亚硝酸盐积累率只有 40.2%,但若为强化氨氮的亚硝化反应而缩短曝气时间又可能造成对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的硝化不彻底。这表明定时运行模式破坏了短程硝化,证明了实时控制对短程硝化的维持具有重要作用。

### 2.3 常温下的短程硝化效果

为考察实时控制条件下温度对短程硝化反硝化的影响,试验过程中对温度不进行控制(反应过程中平均温度约为 20 °C),使反应器运行一个月左右,期间系统内亚硝酸盐积累率如图 4 所示。

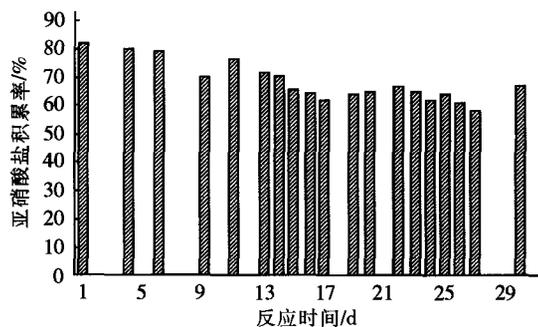


图 4 常温下系统内亚硝酸盐积累率的变化

Fig. 4 Variation of nitrite accumulation rate for 30 days (normal temperature)

由图 4 可以看出,当不控制温度时,系统内亚硝酸盐积累率有下降的趋势,运行至 18 d 时亚硝酸盐积累率降至 61.31%,但仍为短程硝化,此后系统的亚硝酸盐积累率虽有变化但幅度较小。这是由于实时控制对短程硝化的维持作用,使污泥种群中 AOB 和 NO<sub>B</sub> 的比例在动态更新时仍能维持在一个较稳

定的水平。

## 2.4 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 冲击负荷对短程硝化反硝化的影响

为考察  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  冲击负荷对短程硝化反硝化的影响,在生活污水中投加了  $\text{NH}_4\text{Cl}$  使原水中的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度为  $150 \text{ mg/L}$ 。在高  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  负荷冲击下系统第一个周期的在线参数及氮浓度随时间的变化如图 5 所示。

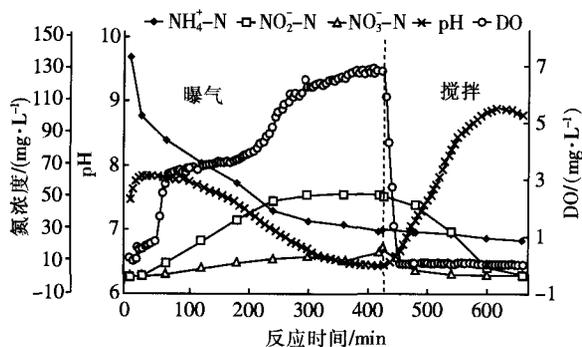


图 5 高  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  负荷下氮浓度和在线参数随时间的变化

Fig. 5 Variation of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$ ,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ , pH and DO at high ammonia loadings

由图 5 可以看出,在硝化过程中 pH 曲线出现特征点时氨氮的氧化并没有结束,剩余氨氮浓度仍高达  $28.97 \text{ mg/L}$ ,而且在 pH 曲线出现最低点时 DO 曲线也没有出现突跃。这是由于在试验周期中,曝气时间长达  $420 \text{ min}$ ,且 pH 值也一直降至  $6.43$ ,为避免 pH 值对活性污泥造成不良影响,在运行过程中人为停止了曝气而将其转入缺氧反硝化状态,导致“氨谷”控制点并没有出现,故在 DO 曲线对应点处也没有出现突跃。

硝化过程如此缓慢是由原水中碱度不足造成的。经测定,初始混合液的碱度为  $486.2 \text{ mg/L}$ (以  $\text{CaCO}_3$  计)。反应至  $420 \text{ min}$  停止曝气时氨氮浓度从  $137.22 \text{ mg/L}$  降至  $28.97 \text{ mg/L}$ ,按照理论计算,氧化  $108.25 \text{ mg/L}$  的氨氮需消耗  $772.91 \text{ mg/L}$  的碱度,大于混合液中的初始碱度,从而导致在恒定曝气量的条件下,系统中的溶解氧浓度不断升高(在停止曝气时 DO 高达  $6.82 \text{ mg/L}$ ),造成 pH 曲线上出现平台,但没有硝化终点的出现。因此通过 pH 的变化趋势来判断原水中的碱度是否充足,对实际污水处理过程中碱度的调节具有一定的指导意义。

系统在高氨氮负荷冲击下运行 3 d 后恢复了正常的进水,运行条件不变。图 6 是恢复正常进水后

连续 3 个周期内氮浓度随时间的变化。

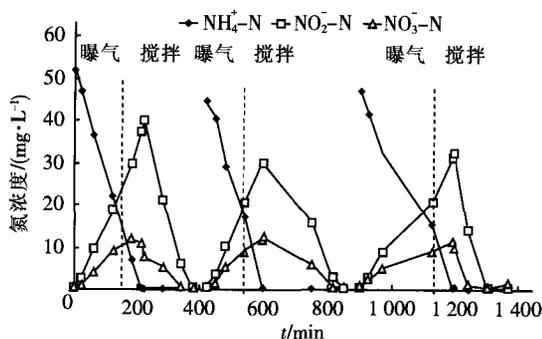


图 6 恢复进水后连续 3 个周期内氮浓度随时间的变化

Fig. 6 Variation of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  and  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  in 3 successive reaction cycles after high  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  loadings

由图 6 可以看出,恢复正常进水后,对氨氮的去除率又恢复到较高水平(几乎达到 100%);连续 3 个周期内亚硝酸盐积累率分别为 77.4%、71.4% 和 73.3%,比相同运行条件下的平均亚硝酸盐积累率(60.3%)高。分析认为这主要是因为冲击负荷下游离氨(FA)的浓度较高,在一定程度上抑制了硝化菌的活性且 FA 浓度没有达到抑制亚硝化菌活性的阈值。试验结果表明,短时间的高氨氮负荷冲击对短程硝化没有明显影响,实时控制状态下的短程硝化具有一定的稳定性。

## 3 结论

① 在  $(28 \pm 0.5) \text{ }^\circ\text{C}$  条件下采用 SBR 反应器处理实际生活污水,通过实时控制手段长期运行,系统内亚硝酸盐积累率稳定上升,最终亚硝酸盐积累率  $> 80\%$ 。系统在定时运行下的结果表明实时控制对短程生物脱氮的实现和维持具有积极作用。

② 反应器在平均温度为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  时采用实时控制手段运行,虽然亚硝酸盐积累率有下降的趋势,但经一个月的运行后系统内亚硝酸盐积累率能维持在 60% 以上,仍属于短程硝化反硝化。

③ 系统经短时间的高  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  负荷冲击后恢复较快,而且亚硝酸盐积累率并没有下降,表明实时控制条件下的短程硝化具有一定的稳定性。

## 参考文献:

- [1] Ruiz G, Jeison D, Chamy R. Nitrification with high nitrite accumulation for the treatment of wastewater with high ammonia concentration [J]. Water Res, 2003, 37(6):

- 1371 - 1377.
- [2] 高大文,彭永臻,杨庆,等. 应用实时控制实现和稳定短程硝化反硝化[J]. 中国给水排水,2003,19(12):1-5.
- [3] 宋学起,王淑莹,彭永臻,等. 以氯化和时间控制实现亚硝酸型硝化反硝化[J]. 高技术通讯,2004,1:95-99.
- [4] Bae W, Baek S, Chung J, *et al.* Optimal operational factors for nitrite accumulation in batch reactors[J]. Biodegradation,2001,12(5):359-366.
- [5] Wang S Y, Gao D W, Peng Y Z, *et al.* Nitrification-denitrification via nitrite for nitrogen removal from high nitrogen soybean wastewater with on-line fuzzy control [J]. Water Sci Technol,2004,49(5-6):121-127.
- [6] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法(第4版)[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [7] 刘秀红,王淑莹,高大文,等. 短程硝化的实现、维持与过程控制的研究现状[J]. 环境污染治理技术与设备,2004,5(12):7-10.
- [8] Yuan Z G, Blackall Linda L. Sludge population optimization: a new dimension for the control of biological wastewater treatment systems [J]. Water Res, 2002, 36: 482-490.

E-mail: czq0521@tom.com

收稿日期:2006-05-18

(上接第 38 页)

氧区后,迅速利用污水中的溶解氧氧化 PHB,并吸收污水中的磷酸盐。从图 2 可以看出,在 50% 的好氧反应时间内就已完成好氧吸磷量的 70% ~ 80%,且厌氧区的释磷速率和释磷量越大,好氧吸磷速率和吸磷量就越高,这说明厌氧释磷是好氧吸磷的前提。试验中还发现,反应池中的  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度有时可达 4 ~ 5 mg/L,会造成短时出水磷含量升高,而一旦  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度降低到 0.5 mg/L 以下,这种现象会很快消失,而且它对好氧吸磷的影响要比缺氧吸磷的大,这与 Mark 的试验结论是一致的<sup>[2]</sup>。因此在实际运行中,通过采取必要措施强化倒置  $\text{A}^2/\text{O}$  工艺厌氧区的厌氧程度,将非常有利于提高系统的除磷效率。

### 3 结论与建议

① 倒置  $\text{A}^2/\text{O}$  工艺在夏季运行时宜保持好氧区的溶解氧浓度为 1.5 ~ 2.0 mg/L,并沿水流方向渐减,这是由于硝化和吸磷反应主要的好氧区前端完成,在冬季运行时为保持微生物的活性,好氧区的溶解氧浓度应维持在较高水平,建议控制为 2.0 ~ 3.0 mg/L。

② 当控制污泥回流比为 200% ~ 300% 时,能够取得较好的脱氮除磷效果。而在实际运行中应根据氮、磷负荷确定污泥回流比,如所处理污水的氮负

荷较高,可采用较高的污泥回流比,而当磷负荷高时宜采用较小的污泥回流比。

③ 为保证生物脱氮除磷效果,建议控制倒置  $\text{A}^2/\text{O}$  工艺的污泥龄为 10 ~ 25 d,污泥负荷取 0.50 kgCOD/(kgMLSS · d)。

④ 经优化运行参数后,倒置  $\text{A}^2/\text{O}$  工艺的能耗较原设计工艺有一定程度的降低,对 COD、TN、TP 的去除率分别可达 90%、85%、85% 以上,最终处理出水的 COD ≤ 100 mg/L, TN ≤ 15 mg/L, TP ≤ 1.0 mg/L。

### 参考文献:

- [1] 周斌. 改良型  $\text{A}^2/\text{O}$  工艺的除磷脱氮运行效果[J]. 中国给水排水,2001,17(7):46-48.
- [2] Saitoa T M, Mino T, Satoh H, *et al.* Effect of nitrite on phosphate uptake by phosphate accumulating organisms [J]. Water Res,2004,38:3760-3768.

作者简介:王振江(1973-),男,河南鄢陵人,硕士、高级工程师,研究方向为水污染控制。

电话:(0)13969771358

E-mail:wangzhjy@163.com

收稿日期:2006-04-20