

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.11.004

## 不同 C/N 值对低氨氮污水短程硝化的影响

徐浩<sup>1</sup>, 李捷<sup>2</sup>, 罗凡<sup>1</sup>, 李浩<sup>1</sup>, 于翔<sup>1</sup>

(1. 广州市市政工程设计研究总院有限公司, 广东 广州 510060; 2. 广东首汇蓝天科技有限公司, 广东 广州 510075)

**摘要:** 为了考察碳源对低氨氮污水短程硝化的影响,采用序批式反应器(SBR),在水温为 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、pH 值为 7.8~8.2、DO 为 0.5~1.0 mg/L 条件下,成功驯化出稳定运行的短程硝化系统,并研究了不同碳氮比(C/N)对短程硝化系统的影响,同时对各条件下系统的菌种变化进行了定量分析。结果表明,随着原水 COD 浓度的增加,短程硝化效果受到的影响增大,氨氮去除率和亚硝酸盐积累率呈现下降趋势。当原水 C/N 值 $\leq 1.0$ 时,COD 浓度不会对短程硝化系统造成明显影响;但是,当原水 C/N 值增大到 2.0 和 3.0 时,氨氮去除率分别仅为 82.8%、71.58%,氨氧化菌(AOB)和亚硝酸盐氧化菌(NO<sub>2</sub>-OB)的比例从 38.1:1 降到 11.5:1,短程硝化受到严重影响,系统趋于崩溃。碳源浓度的增加对短程硝化系统逐步产生抑制作用,实际运行中应控制 C/N 值不大于 1.0。

**关键词:** 低氨氮污水; 短程硝化; 碳源; 碳氮比(C/N); 氨氧化菌(AOB)

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)11-0024-05

## Effect of Different C/N Ratios on Partial Nitrification of Low Ammonia Nitrogen Wastewater

XU Hao<sup>1</sup>, LI Jie<sup>2</sup>, LUO Fan<sup>1</sup>, LI Hao<sup>1</sup>, YU Xiang<sup>1</sup>

(1. Guangzhou Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Guangzhou 510060, China; 2. Guangdong Shouhui Lantian Engineering Technology Co. Ltd., Guangzhou 510075, China)

**Abstract:** To investigate the effect of carbon source on partial nitrification, a stable partial nitrification system was successfully established in a sequencing batch reactor (SBR) with water temperature of  $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ , pH of 7.8~8.2 and DO of 0.5~1.0 mg/L, effects of different C/N ratios on the partial nitrification system were explored, and the variation of microbial species in the partial nitrification system under different conditions were quantitatively analyzed. Increasing COD in the raw water would lead to a more obvious impact on the partial nitrification performance, and ammonia nitrogen removal efficiency and nitrite accumulation rate showed decreasing trends. When C/N ratio of the raw water was no more than 1.0, it had no obvious impact on the partial nitrification system. However, the removal rates of ammonia nitrogen were only 82.8% and 71.58%, and the ratio of AOB/NO<sub>2</sub>-OB decreased from 38.1:1 to 11.5:1 when C/N ratio of the raw water was increased to 2.0 and 3.0, indicating that the partial nitrification process was severely affected and tended to collapse. The increase of carbon source concentration gradually inhibited the stable operation of the partial nitrification system, so the C/N

基金项目: 广州市越秀区科技计划项目(2019-GX-002); 广州市市政工程设计研究总院有限公司企业项目(KY-2020-010)

通信作者: 李捷 E-mail: hitlijie@163.com

ratio should be controlled no more than 1.0 in actual operation.

**Key words:** low ammonia nitrogen wastewater; partial nitrification; carbon source; C/N ratio; ammonia-oxidizing bacteria (AOB)

当前,针对污水脱氮的新技术主要集中在短程硝化反硝化和厌氧氨氧化技术上,其原理是利用氨氧化菌(AOB)的生长特性将硝化过程控制在亚硝化阶段,然后结合厌氧氨氧化菌和反硝化菌直接还原亚硝态氮,从而完成氮的去除。与传统的生物脱氮技术相比,该新技术可减少20%的耗氧量、40%的耗碳量和50%的产泥量,具有减少反应器容积和节约基建费用等优点<sup>[1-3]</sup>。作为新技术的关键步骤,快速高效地实现短程硝化可为当前城市污水处理工艺提供新思路。在短程硝化系统中,溶解氧、温度和pH值是关键影响因素<sup>[4]</sup>,目前,国内外的研究大多是针对高氨氮高温废水,而这些废水中同时含有大量的有机物,但碳源对短程硝化的影响鲜有报道。因此,研究碳源对短程硝化的影响,对于不同水质条件下短程硝化的稳定运行、为新型生物脱氮工艺提供稳定的反应基质,具有重要的现实意义。笔者以低氨氮城市生活污水为研究对象,采用序批式活性污泥反应器(SBR),考察了不同碳氮比(C/N)对短程硝化系统的稳定性、亚硝态氮积累率和氨氧化菌的影响。

## 1 试验装置与方法

### 1.1 试验装置

试验采用序批式活性污泥法,装置如图1所示。

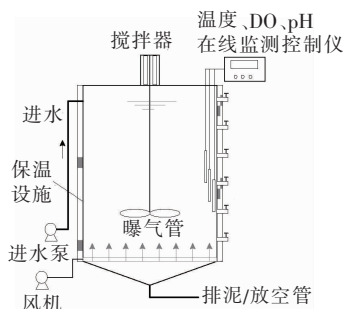


图1 SBR装置示意

Fig.1 Schematic diagram of SBR

反应器由不锈钢制成,高为100 cm、直径为80 cm,总有效容积为500 L,每个周期的处理水量为400 L。在反应器壁垂直方向设置4个出水口,间距为20 mm,底部出水口连接自控装置进行排水,上部出水口用于取样;底部设有排泥管;底部采用穿孔曝

气装置进行曝气,采用转子流量计调节曝气量,同时空压机连接时控装置进行实时控制;反应器外壁缠有电热保温丝,由温度控制仪控制反应器内的温度,用温度传感器在线监测水温的变化;反应器底部配置角钢支架进行固定。反应器可以实现连续运行。

### 1.2 接种污泥与试验用水水质

试验接种污泥取自广州市某污水处理厂的二沉池,此处污泥富含硝化菌。试验用水为模拟生活污水, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为30 mg/L、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为0.030~0.300 mg/L、pH值为7.1~7.2,碳源由蔗糖提供。

### 1.3 分析项目及方法

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ :纳氏试剂分光光度法; $\text{NO}_2^- - \text{N}$ :N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ :麝香草酚分光光度法;DO:WTW oxi330i多功能溶解氧在线测定仪;pH值、温度:starter3c型实验室pH计;COD:COD快速测定仪;MLSS:便携式污泥浓度计;氧化还原电位(ORP):哈希HQ-40d测定仪。

### 1.4 分子生物学检测方法

采用16S rDNA克隆文库分析方法对反应器中的微生物进行硝化菌的测定。

采用土壤总DNA提取试剂盒(上海生工)结合水体微生物总DNA提取技术,对样品中的微生物总DNA进行提取。为了尽可能获得大量的总DNA,提取试验一共随机采集了6个小样品,提取结束后才汇总混合成1个样品,通过nanodrop 2000检测其DNA浓度,并于-20℃保存备用。硝化基因的扩增及克隆测序采用25 μL体系,其中DNA模板及上、下游引物各1 μL,mixture buffer 12.5 μL,用去离子水补充至25 μL。扩增程序采用Touchdown策略:94℃、5 min预变性;94℃、1 min,65~49℃、1 min,72℃、45 s,20个循环,每个循环降低1℃;72℃、7 min;94℃、1 min,55℃或50℃、1 min,72℃、45 s,15个循环;72℃、7 min;其中,退火温度根据各引物的退火温度而定,并逐步优化。将PCR产物采用MiSeq 2×300bp测序平台进行测序<sup>[3]</sup>。

### 1.5 反应器的启动与运行

本次研究主要包括以下3部分内容:第1部分为短程硝化启动阶段,向SBR反应器内投加城市污

水厂二沉池污泥,维持污泥浓度为 $2\,500 \sim 3\,000\text{ mg/L}$ ,通过控制温度在 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、pH 值在 $7.8 \sim 8.2$ 、曝气量在 $1.5\text{ L/L}$ ,成功启动短程硝化系统;第2部分进行碳源的影响研究,在原水 COD 浓度分别为 $30\text{ mg/L}$  ( $\text{C/N} = 1.0$ )、 $60\text{ mg/L}$  ( $\text{C/N} = 2.0$ )、 $90\text{ mg/L}$  ( $\text{C/N} = 3.0$ )的条件下,对短程硝化系统中的亚硝态氮浓度变化情况进行跟踪监测;第3部分,在不同 COD 浓度条件下,对反应器污泥中各菌种的变化进行对比分析。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 短程硝化的启动及稳定运行

在短程硝化系统的启动阶段,对接种污泥连续曝气 $13\text{ d}$ ,并控制 DO 在 $2.5\text{ mg/L}$ 左右,旨在逐步淘洗掉活性污泥中的厌氧菌和异养菌;而后将水温控制在 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、pH 值为 $7.8 \sim 8.2$ 、DO 为 $0.5 \sim 1.0\text{ mg/L}$ 。此阶段,反应器进水 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 浓度分别为 $18$ 、 $28$ 、 $30\text{ mg/L}$ 。

接种污泥经过 $13\text{ d}$ 的过曝气后,污泥中存在大量的氨氧化菌(AOB)和亚硝酸盐氧化菌(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>),此阶段反应器内主要发生全程硝化反应。控制边界条件(温度、pH 值、DO),使之适宜 AOB 的生长,随着运行时间的推移,反应器内的硝化菌密度和分布发生了变化,AOB 所占比例增大;连续运行 $35\text{ d}$ 之后, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率稳定接近 $100\%$ , $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率稳定达到 $99\%$ ,至此反应器实现了短程硝化系统的稳定运行。图2为SBR反应器一个运行周期内“三氮”浓度的变化情况,在 $210\text{ min}$ 处, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累浓度达到最大值。

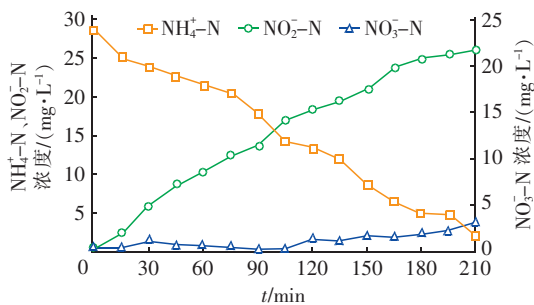


图2 稳定运行阶段 SBR 反应器中氮素转化情况

Fig. 2 Nitrogen transformation in SBR during stable operation period

### 2.2 碳源对短程硝化的影响

在短程硝化系统运行过程中,当 C/N 值过高时,会降低硝化反应速率,进而降低氨氮去除率,增

大总氮的损耗,造成资源浪费,影响整个系统的总氮去除效果<sup>[4-5]</sup>。由于短程硝化的 AOB 属于自养菌,受碳源的影响较大,较多的碳源会促进异养型细菌的增殖,抑制自养型硝化细菌的生长。而且反应器长时间保持高碳源,使硝化菌不能成为优势菌种,会导致污泥活性变差,出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度升高,影响硝化反应的进行<sup>[6]</sup>。试验过程中,维持其他运行条件不变,分别在原水 COD 浓度为 $30\text{ mg/L}$  ( $\text{C/N} = 1.0$ )、 $60\text{ mg/L}$  ( $\text{C/N} = 2.0$ )、 $90\text{ mg/L}$  ( $\text{C/N} = 3.0$ )的条件下,对稳定运行的短程硝化系统中  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的累积情况进行跟踪监测,结果如图3所示。

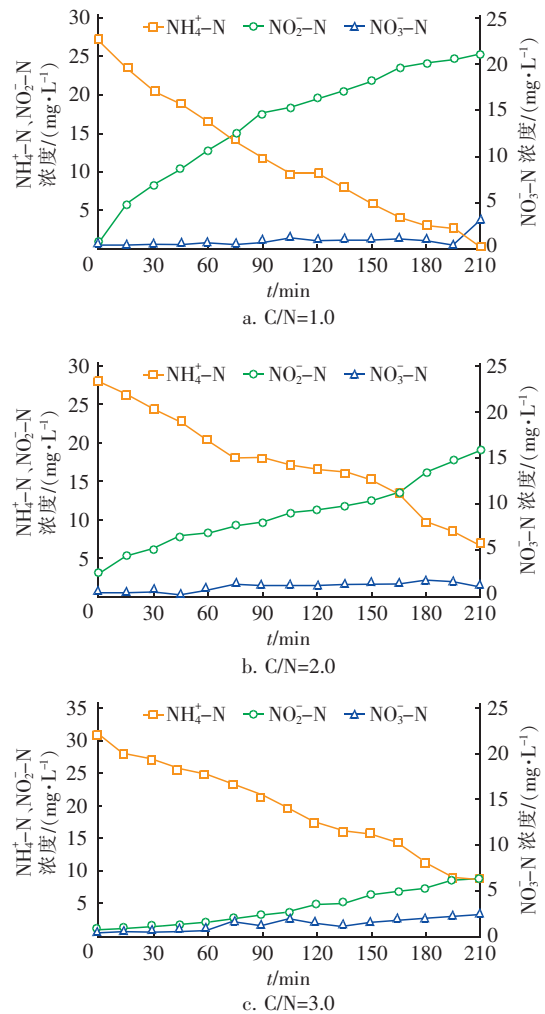


图3 不同 C/N 值下 SBR 单周期内的氮素变化情况

Fig. 3 Change of nitrogen in one cycle of SBR under different C/N ratios

由图3(a)可以看出,在此条件下, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 生成量为 $24.58\text{ mg/L}$ , $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率为 $98.9\%$ , $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率为 $92.8\%$ , $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累情况与不

投加碳源时类似,其 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度最大值出现在210 min处,所需时间与不投加碳源条件下相同。

由图3(b)可知,在此条件下, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的最大生成量为19.92 mg/L, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率为93.6%, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率为82.8%。 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率与氨氮去除率呈现明显下降趋势。在此情况下,对比进出水总氮发现,出水总氮浓度降低,总氮损失率达到13.25%,分析原因:反应器中的活性污泥是复杂的多菌种共存系统,随着原水中C/N值的提高,促进了异养好氧菌和异养反硝化菌的活性,一方面有机物会被异养好氧菌大量吸收,对AOB的生长产生了一定的抑制;另一方面,短程硝化产物 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 被异养反硝化菌利用,直接发生短程反硝化反应,从而导致反应器出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度降低。

由图3(c)可知,在此条件下, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 最大生成量为8.46 mg/L、积累率为79%, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率为71.58%,总氮损失率达到47.05%。随着C/N值的增加,反应器中的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率出现明显下降,并且随着运行时间的延长,短程硝化系统出现崩溃迹象。可见,对于稳定运行的短程硝化系统而言,一定浓度的COD将会对其产生很强的冲击,且这种冲击是不可逆的。

综上可知,在处理低氨氮污水的短程硝化系统中,当原水C/N值 $\leq 1.0$ 时,COD浓度不会对系统的稳定运行产生明显影响;但是,当原水C/N值增至2.0时,其氨氮去除率与亚硝态氮积累率会出现明显的下降趋势,并伴随着出水总氮损耗现象;进一步增加原水C/N值至3.0时,短程硝化系统趋于崩溃,且此过程不可逆。

### 2.3 PCR 数据分析

为了考察碳源对短程硝化系统的影响,对上述各运行条件下的污泥进行了同步采样,微生物测定结果显示,普通活性污泥的AOB/NOB为0.56:1,稳定运行的短程硝化系统的AOB/NOB为38.1:1;而当原水C/N值分别为1.0、2.0、3.0时,AOB/NOB分别为25.6:1、15.7:1、11.5:1。

活性污泥中的AOB/NOB是判断短程硝化是否启动成功的重要参数<sup>[7-8]</sup>。以上结果显示,在普通的活性污泥系统中,AOB/NOB为0.56:1;经过强化培养驯化,在稳定的短程硝化系统中,AOB/NOB为38.1:1;但随着原水COD浓度的增加、C/N值

的升高,AOB和NOB菌种的数量出现了明显变化。对比两种菌种在普通污泥中的比例可以看出,随着AOB/NOB的逐渐降低,反应器内异养菌开始大量增殖,当原水C/N值为3.0时,AOB/NOB降低到11.5:1,AOB菌种明显受到抑制,SBR短程硝化系统呈现崩溃迹象。由此也可以进一步验证,COD浓度的增加将会对稳定运行的短程硝化系统产生抑制作用,原水中的COD浓度对短程硝化系统的启动和稳定运行起着重要的作用。

### 3 结论与建议

① 当原水为自配水且不投加碳源时,短程硝化系统对氨氮的去除率接近100%、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率在99%以上,运行效果良好;当原水C/N值 $\leq 1.0$ 时,COD浓度不会对短程硝化系统造成明显影响;随原水COD浓度的增加,氨氮去除率和亚硝态氮积累率逐渐降低,当C/N值=3.0时,系统中AOB菌种已明显不占优势,氨氮去除率和亚硝态氮积累率分别仅为71.58%、79%,总氮损失率达到47.05%,短程硝化受到严重影响,系统趋于崩溃。因此,在实际运行中,应控制C/N值 $\leq 1.0$ 。

② COD浓度的增加对稳定运行的短程硝化系统的影响逐渐增大。随着原水COD浓度的增加,AOB/NOB从38.1:1降低到11.5:1,在C/N值达到3.0时,短程硝化系统中AOB的生长速率受到明显抑制。可见,COD浓度的增加对稳定运行的短程硝化系统会产生抑制作用。

### 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 Research, 2003, 37(6): 1371-1377.
- [2] 吴昌永, 陈志强, 彭永臻, 等. 实时控制下短程生物脱氮的实现及其稳定性研究[J]. 中国给水排水, 2006, 22(19): 39-43.  
WU Changyong, CHEN Zhiqiang, PENG Yongzhen, et al. Achievement and stability of shortcut biological nitrogen removal under real-time control[J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(19): 39-43 (in Chinese).
- [3] 徐浩, 李捷, 罗凡, 等. 低C/N比城市污水短程硝化特性及微生物种群分布[J]. 环境工程学报, 2017, 11(3): 1477-1481.

(下转第35页)