

城市污水短程硝化的快速启动试验研究

徐浩, 李捷, 罗凡, 李浩

(广州市市政工程设计研究总院有限公司, 广东 广州 510060)

摘要: 以低 C/N 值城市生活污水作为研究对象, 以污水厂二沉池回流污泥作为接种污泥, 采用 SBR 反应器, 分析短程硝化快速启动的方法及其主要控制条件。试验结果表明, 对接种污泥持续曝气(DO 约为 2.5 mg/L)13 d 后, 在 SBR 反应器采用连续恒量供氧方式、水温为 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、pH 值为 7.8~8.2 的条件下, 反应器连续运行 35 d, 成功实现了低 C/N 值城市生活污水的高效短程硝化, 亚硝态氮积累率达到 94%。对培养过程中活性污泥的菌种变化跟踪检测表明, SBR 反应器稳定运行后, AOB/NOB 的菌种比例达到 38.1:1。对曝气量进行优化后发现, 控制曝气量为 $1.5 L_{\text{气}}/(L_{\text{水}} \cdot h)$, 历时 4 h 即可实现短程硝化最大化积累。

关键词: 城市污水; 短程硝化; 序批式反应器; AOB/NOB; 曝气量

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)23-0096-05

Rapid Start-up of Short-cut Nitrification Process for Treatment of Urban Sewage

XU Hao, LI Jie, LUO Fan, LI Hao

(Guangzhou Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Guangzhou 510060, China)

Abstract: The rapid start-up method and the main control conditions of short-cut nitrification were explored in a SBR for the treatment of low C/N ratio urban sewage. The reactor was inoculated with returned sludge from a secondary sedimentation tank in an urban wastewater treatment plant. The results showed that high-efficiency short-cut nitrification for the treatment of low C/N ratio urban sewage was successfully achieved after 35 days of continuous operation, in which the nitrite accumulation rate reached 94%. The operational conditions included: continuous aeration (DO was about 2.5 mg/L) of the inoculated sludge for 13 days, continuous and constant oxygen supply in the SBR, temperature of $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ and pH of 7.8-8.2. According to detection results of the changes of strains in the activated sludge during the cultivation process, the ratio of AOB to NOB reached 38.1:1 after the stable operation of the SBR. Through the aeration optimization strategy, the maximum accumulation of nitrite of the short-cut nitrification was achieved in 4 hours when the aeration rate was $1.5 L_{\text{gas}}/(L_{\text{liquid}} \cdot h)$.

Key words: urban sewage; short-cut nitrification; SBR; AOB/NOB; aeration rate

短程硝化作为生物自养脱氮工艺的前提, 受到国内科研人员的关注。当前, 针对短程硝化的研究

主要采用 SBR 工艺, 并通过控制溶解氧、温度、pH 值等边界条件来实现。吴昌永等^[1]采用 SBR 工艺

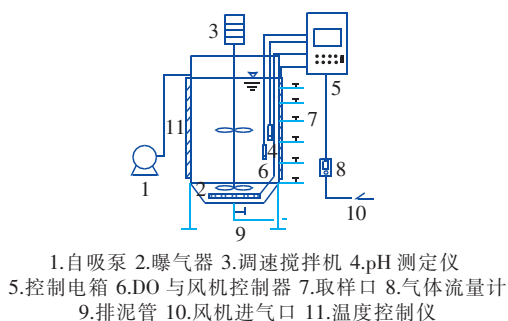
处理生活污水,当温度为 $(28 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 、曝气量为 $0.3\text{ m}^3/\text{h}$ 时,驯化67 d后,亚硝态氮积累率稳定在80%以上;解庆林等^[2]在进水氨氮浓度为 $280 \sim 300\text{ mg/L}$ 、HRT为12 h、pH值为 $7.5 \sim 8.5$ 、温度为 $(28 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、溶解氧浓度为 $0.8 \sim 1.2\text{ mg/L}$ 条件下,可使亚硝态氮积累率高达95%。但是,上述研究均为实验室小试规模,且处理对象多为高氨氮废水,对于生活污水短程硝化的快速启动及其稳定运行的研究较少。

笔者以低C/N值城市生活污水为研究对象,通过控制污泥驯化、曝气量、曝气周期,并探索适宜温度、DO浓度和pH值范围,提出了一种快速、稳定启动短程硝化的方法。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

试验装置采用序批式活性污泥法,试验装置如图1所示。SBR短程硝化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。每个周期处理的水量为400 L。在反应器壁垂直方向设置一排出水口,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,并连接空压机,采用转子流量计调节曝气量。空压机通过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反应器内水温的变化。SBR反应器底部通过角钢支架进行固定。



1.自吸泵 2.曝气器 3.调速搅拌机 4.pH测定仪
5.控制电箱 6.DO与风机控制器 7.取样口 8.气体流量计
9.排泥管 10.风机进气口 11.温度控制仪

图1 SBR反应器示意

Fig.1 Schematic diagram of SBR reactor

1.2 接种污泥与试验用水水质

接种污泥取自广州市某污水处理厂二沉池,该污泥富含硝化细菌。试验用水为模拟生活污水,具体水质: $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 $30 \sim 35\text{ mg/L}$ 、COD为 $150 \sim 200$

mg/L 、 BOD_5 为 $110 \sim 145\text{ mg/L}$ 、pH值为 $7.1 \sim 7.2$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为 $0.03 \sim 0.30\text{ mg/L}$ 。

1.3 分析项目及测定方法

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 采用纳氏试剂光度法测定; $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 采用N-(1-萘基)-乙二胺光度法测定; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 采用麝香草酚分光光度法测定;DO采用多功能溶解氧在线测定仪测定;pH值、温度采用starter3c型实验室pH计测定;COD采用COD快速测定仪测定;MLSS采用便携式污泥浓度计测定;ORP采用哈希HQ-40d测定仪测定。

试验过程中,对反应器中各阶段的污泥都采用16S rDNA克隆文库分析方法测定硝化细菌,以分析微生物的变化。

1.4 反应器的启动与运行

试验分为三个阶段:第一阶段为好氧曝气阶段,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 $2\,500 \sim 3\,000\text{ mg/L}$,而后连续曝气运行13 d(DO约为 2.5 mg/L);第二阶段为培养驯化阶段,SBR反应器运行周期设定为8 h(进水0.5 h、曝气6 h、沉淀1 h、出水0.5 h),并维持反应器温度为 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$,pH值为 $7.8 \sim 8.2$,连续曝气[曝气量为 $1.5\text{ L}_{\text{气}}/(\text{L}_{\text{水}} \cdot \text{h})$],运行时间为第14~21天,并实时在线监测DO、ORP、pH值;第三阶段为短程硝化运行参数优化阶段,温度为 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$,pH值为 $7.8 \sim 8.2$,曝气量为 $1.5\text{ L}_{\text{气}}/(\text{L}_{\text{水}} \cdot \text{h})$,在第22~27天运行过程中,进水、曝气、沉淀、出水时间分别为0.5、5、1、0.5 h,在第28~35天运行过程中,进水、曝气、沉淀、出水时间分别为0.5、4、1、0.5 h。

2 结果与讨论

2.1 短程硝化的启动分析

试验过程中,不同阶段反应器中氮的变化如图2所示。由图2(a)可以看出,接种污泥经过13 d的曝气后,污泥中存在大量的氨氧化细菌(AOB)和亚硝态氮氧化细菌(NO₂⁻)。曝气时间缩至6 h后,氨氮去除率较高,达到93%左右,但氨氮氧化为亚硝态氮后进一步被氧化为硝态氮,因此 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率较低。此阶段反应器内主要发生硝化反应。由图2(b)可以看出,在控制边界条件为适宜AOB生长时,随着反应器内硝化细菌密度和分布的变化,完全去除氨氮所需的曝气时间减少至5 h(氨氮去除率可达到97%),相较于NOB,AOB所占比例逐渐增加,因此该阶段 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率逐渐升高,最高达

到47.9%。由图2(c)可知,曝气时间缩短至4 h时,增大AOB所占的比例,连续运行7 d后,氨氮去除率接近100%, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率达到94%,实现了氨氮氧化率高、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率高的短程硝化过程。

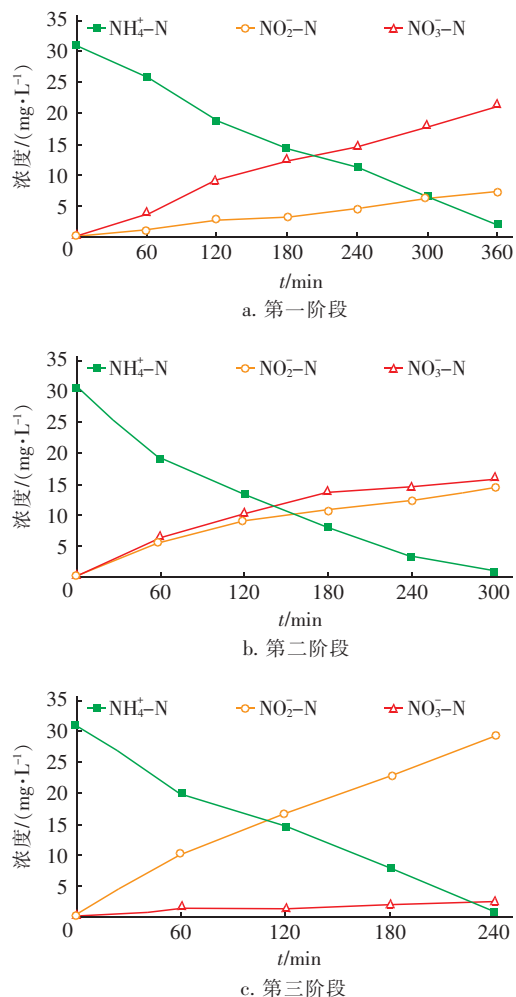


图2 不同阶段反应器中氮的变化

Fig. 2 Change of nitrogen at different stages

综上所述,经过35 d的运行,在低C/N值条件下,采取SBR反应器能快速实现短程硝化,运行过程分为两步。步骤一,连续曝气13 d,以去除污泥中的杂质、异养菌和厌氧菌等。步骤二,控制污水温度为 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、pH值为7.8~8.2、曝气量为 $1.5 \text{ L}_{\text{air}}/(\text{L}_{\text{水}} \cdot \text{h})$,采取连续曝气的运行方式,依次调整运行工况为:①进水0.5 h+连续曝气搅拌6 h+沉淀1 h+出水0.5 h,连续运行8 d;②进水0.5 h+连续曝气搅拌5 h+沉淀1 h+出水0.5 h,连续运行6 d;③进水0.5 h+连续曝气搅拌4 h+沉淀1 h+出水0.5 h,连续运行8 d。步骤二的目的是逐渐调整运行工况,为AOB的富集和亚硝态氮的累积创造较

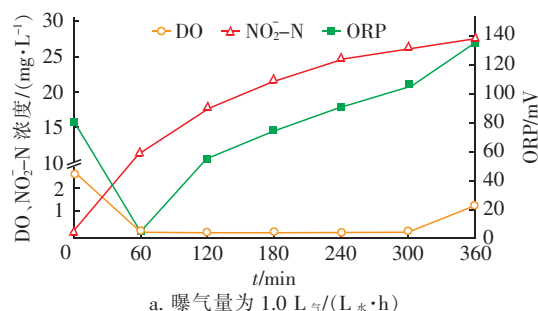
为适宜的外部环境。

2.2 启动过程中微生物菌群的分布

为了考察短程硝化工艺启动过程中硝化细菌的变化趋势,试验对接种污泥、过曝气后污泥、短程硝化稳定运行后的污泥进行了高通量测序,明确了AOB和NOB的代表性细菌。硝化污泥中AOB/NOB(A/N)为短程硝化能否启动成功的重要标志,短程硝化的启动过程实质就是不断提高A/N。当A/N为1:1时,亚硝态氮氧化速率最高;当A/N为1:0时,亚硝态氮积累最大,因此要实现短程硝化的稳定运行,其理论上限是使得A/N接近于1:0^[3]。试验结果表明,接种污泥(即传统活性污泥)中A/N仅为0.14:1,这是由于接种污泥取自二沉池,该污泥历经了完全硝化过程,因而NOB比例较高。过曝气后污泥的A/N降低至0.11:1,表明在高DO条件下,对DO亲和力更高的NOB更有优势。而通过控制边界条件(pH值、温度和DO等)实现短程硝化启动并稳定运行后,污泥中AOB占比相较于NOB来说具有明显的优势,A/N达到38.1:1。可以看出,传统活性污泥经过上述3个阶段后,可使AOB占有明显优势,且培养驯化全过程仅历时35 d,可为低C/N值城市污水短程硝化的启动培养提供参考。

2.3 短程硝化供氧分析

AOB氧饱和常数一般为0.2~0.4 mg/L,NOB为1.2~1.5 mg/L。AOB相较于NOB对DO有更强的亲和力,在低氧环境下,AOB的竞争力强于NOB,由于通过曝气来调节DO浓度,因此合理控制曝气量成为短程硝化成功启动的重要因素。为了提高硝化速率、缩短反应时间,考察不同曝气量条件下亚硝态氮积累率,并在确定最佳曝气量的基础上优化曝气时间。本试验将曝气量分别调整为1.0、1.5、2.0 $\text{L}_{\text{air}}/(\text{L}_{\text{水}} \cdot \text{h})$,反应器内DO、ORP与亚硝态氮浓度的变化如图3所示。



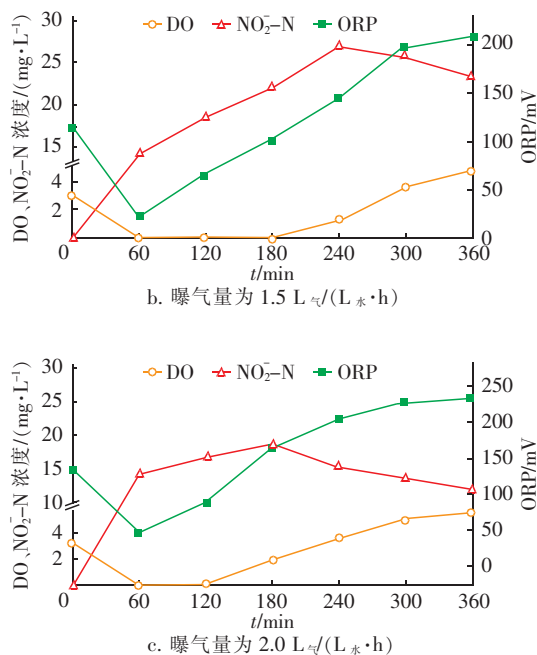


图3 不同曝气量下DO、ORP和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度的变化

Fig. 3 Variation of DO, ORP and $\text{NO}_2^- - \text{N}$ concentration under different aeration conditions

有研究表明,在短程硝化运行过程中,当 $\text{DO} > 1.0 \text{ mg/L}$ 时, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 开始逐渐被氧化,在实现 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 最大积累后,DO会出现明显的突跃,因此DO的突变点可以作为短程硝化完成的重要标志^[4]。本试验所用原水为人工配制,原水DO约为 3.0 mg/L 。由图3可以看出,当曝气量为 $1.0 \text{ L}_{\text{air}}/(\text{L}_{\text{水}} \cdot \text{h})$ 时,DO的突变点出现在反应器运行360 min处,此时对应的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 生成量为 27.52 mg/L 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率为95%。当曝气量为 $1.5 \text{ L}_{\text{air}}/(\text{L}_{\text{水}} \cdot \text{h})$ 时,DO的突变点出现在240 min处,此时对应的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 生成量为 27.02 mg/L 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率为94%。进一步提高曝气量至 $2.0 \text{ L}_{\text{air}}/(\text{L}_{\text{水}} \cdot \text{h})$ 时,实现短程硝化的时间明显缩短,DO的突变点出现在180 min处,而此时 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 被氧化现象明显, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的生成量相应下降至 18.71 mg/L 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率为64%。

从图3还可以看出,ORP与DO呈正相关性。初始阶段,尽管进水DO保持较高水平,但是此时由于硝化细菌的耗氧速率明显大于供氧速率,因此DO一直维持较低的浓度,ORP呈现逐渐下降的趋势,而随着反应过程中亚硝态氮的增加,ORP则缓

慢上升,在达到亚硝态氮最大化积累后,ORP变化趋势达到最大并趋于平缓,而此时的耗氧速率开始小于供氧速率,从而出现DO快速突升。因此,可以通过ORP最大值与DO的突变点来确定短程硝化的终点。

结合以上分析,控制曝气量为 1.0 、 $1.5 \text{ L}_{\text{air}}/(\text{L}_{\text{水}} \cdot \text{h})$ 条件下,均可实现 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的高效积累。而当曝气量为 $1.5 \text{ L}_{\text{air}}/(\text{L}_{\text{水}} \cdot \text{h})$ 时,实现 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 最大化积累所需时间为4 h,低于曝气量为 $1.0 \text{ L}_{\text{air}}/(\text{L}_{\text{水}} \cdot \text{h})$ 的6 h,且运行过程中反应器均维持较低的DO浓度(约为 0.01 mg/L)。而当曝气量为 $2.0 \text{ L}_{\text{air}}/(\text{L}_{\text{水}} \cdot \text{h})$ 时,出现 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 被氧化现象,不利于 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积累。因此,确定最佳供氧方式如下:曝气量为 $1.5 \text{ L}_{\text{air}}/(\text{L}_{\text{水}} \cdot \text{h})$,曝气时间为4 h。

3 结论

① 在污水温度为 $(30 \pm 1) ^\circ\text{C}$ 、pH值为 $7.8 \sim 8.2$ 、曝气量为 $1.5 \text{ L}_{\text{air}}/(\text{L}_{\text{水}} \cdot \text{h})$ 条件下,可以成功实现低C/N值城市生活污水的短程硝化,亚硝态氮积累率达到94%。短程硝化稳定运行后,A/N接近 $38.1:1$,表明AOB成为反应器中的优势硝化菌种,NOB的生长受到了抑制。

② 短程硝化的过程控制方法宜采用:第一阶段,接种活性污泥浓度为 $2\,500 \sim 3\,000 \text{ mg/L}$,DO约为 2.5 mg/L ,连续曝气运行13 d;第二阶段控制反应器温度为 $(30 \pm 1) ^\circ\text{C}$,pH值为 $7.8 \sim 8.2$,曝气量为 $1.5 \text{ L}_{\text{air}}/(\text{L}_{\text{水}} \cdot \text{h})$,采取连续曝气的运行方式,运行周期采用进水0.5 h + 曝气搅拌6 h + 沉淀1 h + 出水0.5 h;第三阶段根据出水氨氮的降解速率,逐渐缩短反应周期(进水0.5 h + 曝气搅拌5 h + 沉淀1 h + 出水0.5 h,进水0.5 h + 曝气搅拌4 h + 沉淀1 h + 出水0.5 h)。

③ 曝气量对AOB的富集和生长具有极大的影响,在短程硝化启动阶段,当曝气量为 $1.5 \text{ L}_{\text{air}}/(\text{L}_{\text{水}} \cdot \text{h})$ 时,可以最快实现短程硝化最大化积累,且通过ORP最大值与DO的突变点可以确定短程硝化的终点。

参考文献:

- [1] 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.

(下转第104页)