

# 间歇曝气对硝化菌生长动力学影响及 $\text{NO}_2^-$ 积累机制

蒋轶锋<sup>1</sup>, 陈浚<sup>1</sup>, 王宝贞<sup>2</sup>, 陈建孟<sup>1</sup>

(1. 浙江工业大学生物与环境工程学院, 杭州 310032; 2. 哈尔滨工业大学市政与环境工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要: 采用间歇曝气方法处理低氨氮浓度生活污水, 在 SRT 10、5、2.5 和 1.25 d 条件下, SBR 反应器出水中  $\text{NO}_2^-$  含量(以 N 计, 下同)为 18、19、14 和 5 mg/L, 积累率达到 73%、85%、91% 和 78%, 而连续曝气 SBR 仅为 14%、21%、31% 和 34%; 同时氨氮去除率维持在 97%、95%、76% 和 39%, 与连续曝气 SBR 的 92%、97%、71% 和 47% 相当. 对硝化菌的生长动力学分析表明, 在间歇曝气硝化系统中, 氨氧化菌(AOB)可以通过产率系数( $Y_{\text{AOB}}$ )的增加来提高自身在反应器中的绝对生物量, 并补偿因间歇曝气引起的比底物利用速率下降, 从而使比增殖速率( $\mu_m$ )和  $\text{NH}_4^+$  的氧化速率不变. 与此相反, 亚硝酸盐氧化菌(NO<sub>2</sub>)却不具备这种补偿特性, 导致其  $\mu_m$  和对  $\text{NO}_2^-$  氧化速率降低, 引起了  $\text{NO}_2^-$  在出水中积累.

关键词: 短程硝化; 动力学; 间歇曝气; 亚硝酸盐( $\text{NO}_2^-$ )

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)01-0085-06

## Effect of Intermittent Aeration on Growth Kinetics of Nitrifiers and Mechanism for $\text{NO}_2^-$ Accumulation

JIANG Yi-feng<sup>1</sup>, CHEN Jun<sup>1</sup>, WANG Bao-zhen<sup>2</sup>, CHEN Jian-meng<sup>1</sup>

(1. College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China; 2. College of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** In order to investigate shortcut nitrification, an intermittent aeration SBR was employed to treat the domestic wastewater containing low concentration of  $\text{NH}_4^+$ . The results shows that under the SRTs of 10, 5, 2.5 and 1.25 d,  $\text{NO}_2^-$  produced in effluent were built up to 18, 19, 14 and 5 mg/L, respectively, with accumulation ratio of 73%, 85%, 91% and 78% respectively. As to the continuous aeration SBR, however, the  $\text{NO}_2^-$  accumulation ratios were only 14%, 21%, 31% and 34%. In addition, the corresponding removals of  $\text{NH}_4^+$  in the intermittent aeration SBR were maintained at a comparable level in contrast to those for the continuous aeration SBR, i. e., 97%, 95%, 76% and 39% vs 92%, 97%, 71% and 47%. By exploring the growth kinetics of nitrifiers, ammonia oxidizing bacteria (AOB) in the intermittent aeration system was capable of increasing its biomass in the reactor by an elevation in growth yield ( $Y_{\text{AOB}}$ ), which as a result compensated the decreased specific substrate utilization rate at low DO level and further led to the unchanged  $\mu_m$  value and  $\text{NH}_4^+$  oxidation rate. On the contrary, nitrite oxidizing bacteria (NOB) was lack of the function of compensability, and it hence lowered the  $\mu_m$  value and  $\text{NO}_2^-$  oxidation rate, and therefore resulted in an accumulation of  $\text{NO}_2^-$  in the effluent.

**Key words:** shortcut nitrification; dynamics; intermittent aeration; nitrite ( $\text{NO}_2^-$ )

以半硝化( $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-$ )为核心的短程脱氮技术是当前含氮废水处理的研究热点, 理论上可比传统技术减少 25% 硝化需氧量、40% 反硝化碳源、50% 污泥产量和反硝化池容积<sup>[1-6]</sup>. 利用氨氧化菌(AOB)和亚硝酸盐氧化菌(NO<sub>2</sub>)生长动力学的固有差异, 通过控制温度、DO、pH、游离氨(FA)、SRT 等因素可实现短程硝化, 但至今相关的理论还不清晰, 甚至相互矛盾<sup>[1-9]</sup>. 尤其对于常温大流量低氨氮浓度废水, 能长久稳定维持  $\text{NO}_2^-$  积累的途径亟待探索<sup>[2,7,10]</sup>.

近来的研究表明, 供氧方式会对硝化过程产生影响<sup>[11-14]</sup>. 在间歇曝气条件下, 通过 SRT<sup>[11]</sup>、反应器<sup>[11,12]</sup>、进水水质<sup>[12,13]</sup>、工艺参数<sup>[14,15]</sup>等一些可控因素的改变, 可实现稳定的短程硝化; 但上述文献均未进一步揭示  $\text{NO}_2^-$  积累的内在机制.

由此, 若通过控制供氧方式能获得短程硝化-反硝化, 便可对诸多面向低氨氮浓度废水处理的生物脱氮工艺进行改造. 鉴于间歇曝气引起的低氧环境以及单级生物脱氮系统中异养菌和自养菌的竞争关系, 本研究将对间歇曝气模式下单级生物脱氮系统处理生活污水的硝化性能展开讨论, 并重点对 AOB、NOB 的生长动力学及  $\text{NO}_2^-$  积累机制进行阐述.

收稿日期: 2008-01-29; 修订日期: 2008-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(20776134); 浙江省重大科技专项项目(2007C13081); 杭州市重大科技攻关项目(20062912A06)

作者简介: 蒋轶锋(1978-), 男, 博士, 主要研究方向为高效生物脱氮除磷技术. E-mail: jyf@zjut.edu.cn

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

2个相同的SBR平行运行(SBR<sub>1</sub>和SBR<sub>2</sub>),有效容积2L,种泥取自另一硝化系统.运行周期6h,包括5.5h反应、0.5h沉淀/排水/进水.SBR<sub>1</sub>和SBR<sub>2</sub>分别采取不同的供气方式:间歇曝气(曝气15min/搅拌15min交替)或连续曝气;系统在室温下运行;pH用0.5mol/L HCl/NaOH控制在7.3~8.0范围;SRT通过排除体积不等的污泥混合液控制在10、5、2.5和1.25d;沉淀后排除1.6L上清液(包括剩余污泥),HRT为7.5h.如表1所示.

表1 SBR<sub>1</sub>和SBR<sub>2</sub>的运行参数

Table 1 Operational parameters for the SBR<sub>1</sub> and SBR<sub>2</sub>

	SRT/d	10	5	2.5	1.25
SBR <sub>1</sub> (间歇曝气)	运行时间/d	40	80	20	20
	DO/mg·L <sup>-1</sup>	0~6			
SBR <sub>2</sub> (连续曝气)	SRT/d	10	5	2.5	1.25
	运行时间/d	40	80	20	20
	DO/mg·L <sup>-1</sup>	2~8			

试验用水为某小区生活污水,水质指标(mg/L,括号内为平均值):COD 187~327(248),BOD<sub>5</sub> 89~165(108),NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 20.1~40.9(29.7),TN 23~46(39.2),TP 4.4~6.1(4.7).

水质根据国家标准方法<sup>[16]</sup>进行监测;pH采用WTW MultiLine P3 pH/Oxi仪器测定.

### 1.2 生物量指数

在10、5、2.5和1.25d SRT下运行稳定后,从反应器中取出污泥混合液100、200、400和800mL,洗净污泥后加入适量营养液<sup>[17,18]</sup>和40mL浓度为50mg/L含NH<sub>4</sub><sup>+</sup>或NO<sub>2</sub><sup>-</sup>的溶液,最后用蒸馏水定容至400mL(分别稀释4、2、1和0.5倍),控制VSS在800mg/L左右,避免反应速率过快影响测定.曝气2h进行硝化试验,保持pH和温度与反应器相同,每隔20min取样分析液相中NO<sub>2</sub><sup>-</sup>和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量.以NO<sub>2</sub><sup>-</sup>和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>生成总量之和或NO<sub>2</sub><sup>-</sup>的减少量为纵坐标、时间为横坐标,作图可拟得直线,斜率的4、2、1和0.5倍即定义AOB和NOB在10、5、2.5和1.25d SRT下的生物量指数[PX, mg/(L·d)].PX为AOB或NOB生物量(X, mg/L)与比底物利用速率(P, 1/d)的乘积,能间接表征系统中硝化菌的数量<sup>[17,23]</sup>.

## 2 结果与分析

### 2.1 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>氧化

良好的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>氧化性能是所有生物脱氮工艺运行的前提.间歇曝气导致SBR<sub>1</sub>绝对好氧时间减少,可能会引起硝化速率的下降.图1为系统不同SRT下的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>去除率和氧化率(出水中NO<sub>2</sub><sup>-</sup>和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量之和与进水中TN含量的比值).由于进水水质一致,认为各系统在不同SRT下同化去除的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>数量大致相等.由图1可知,SBR<sub>1</sub>和SBR<sub>2</sub>对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>去除率随着SRT的减小而降低,分别为97%、95%、76%、39%和92%、97%、71%、47%,表明AOB正被逐步淘洗出系统,亚硝化由于AOB数量减少和系统有机负荷增加而受到抑制.2个系统对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>去除没有明显区别,表明间歇曝气没有抑制亚硝化进行.NH<sub>4</sub><sup>+</sup>氧化率能更直观反映各系统的亚硝化能力,如上分析,变化规律与NH<sub>4</sub><sup>+</sup>去除率相同.同步反硝化作用引起SBR<sub>1</sub>中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>氧化率在宏观上的下降,但并没有影响其总的变化趋势(在SRT 10、5、2.5和1.25d时,TN去除率分别为26%、40%、30%和18%<sup>[17]</sup>).

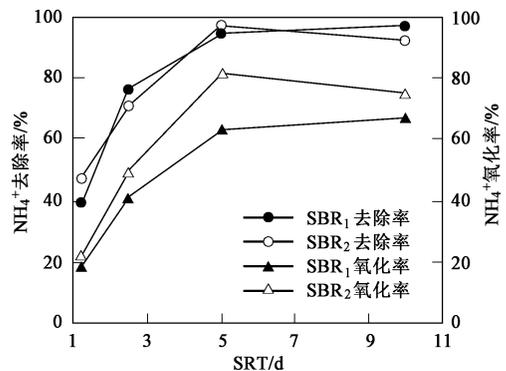


图1 SBR<sub>1</sub>和SBR<sub>2</sub>中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的去除率和氧化率

Fig. 1 Removal and oxidation rates of NH<sub>4</sub><sup>+</sup> in the SBR<sub>1</sub> and SBR<sub>2</sub>

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>氧化受抑制导致SBR<sub>1</sub>和SBR<sub>2</sub>出水中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>含量随着SRT降低而升高,如图2所示,分别为1、2、9、23mg/L和3、1、11、20mg/L.负荷的增加同时也引起出水COD含量上升,2个系统分别为23、23、45、72mg/L和28、20、38、87mg/L.结果显示,间歇曝气系统具有与连续曝气系统相似的活性污泥增长动力学.另外,SRT变化对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>氧化影响显然大于对COD去除影响,出水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>含量最高值为最低值的23倍(SBR<sub>1</sub>),而COD仅为3.1倍,表明在单级复合处理系统中,COD的存在加剧了SRT变化对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>氧化的影响.研究表明<sup>[19~24]</sup>,污泥中自养

菌和异养菌数量的比例随着 SRT 减小而降低, 液相中不断上升的 COD 浓度和絮体中逐渐增加的异养菌比例, 阻止了絮体内自养菌对 DO 的获得, 从而削弱了它与 DO 的亲合力. 因此, 只有通过不断提高液相中  $\text{NH}_4^+$  浓度,  $\text{SBR}_1$  中 AOB 才可能在较低的 SRT 时维持一定的增长速率.

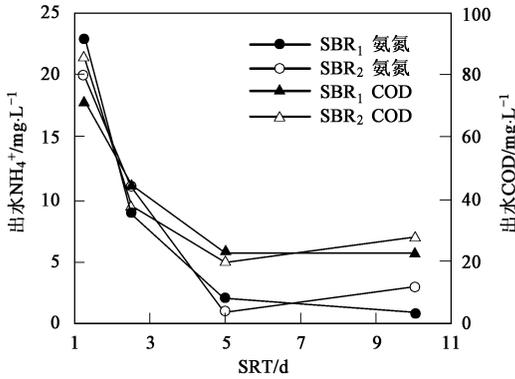


图 2  $\text{SBR}_1$  和  $\text{SBR}_2$  出水  $\text{NH}_4^+$  和 COD 浓度

Fig. 2 Concentrations of effluent  $\text{NH}_4^+$  and COD in the effluent  $\text{SBR}_1$  and  $\text{SBR}_2$

## 2.2 $\text{NO}_2^-$ 氧化

$\text{NO}_2^-$  氧化取决 2 个过程:  $\text{NH}_4^+$  的氧化和  $\text{NO}_2^-$  自身的氧化. 为便于分析, 笔者定义  $\text{NO}_2^-$  氧化率为出水中  $\text{NO}_3^-$  的含量与进水 TN 含量之比, 以表征系统在各个条件下被氧化的  $\text{NO}_2^-$  数量. 由于只有  $\text{NO}_2^-$  才能进一步被氧化成  $\text{NO}_3^-$ , 因此  $\text{NO}_2^-$  氧化率应与  $\text{NH}_4^+$  氧化率对应, 如图 3 所示, 两者的变化趋势相同, 即低 SRT (高有机负荷) 对  $\text{NO}_2^-$  硝化不利.

但低 SRT 对  $\text{NO}_2^-$  氧化的抑制效应明显强于对  $\text{NH}_4^+$  氧化的影响 (图 3), 这导致连续曝气系统出水有少量  $\text{NO}_2^-$  的累积. 如图 4, 在 SRT 10、5、2.5 和 1.25 d 下, 出水  $\text{NO}_2^-$  浓度分别为 4、6、6 和 3 mg/L, 占  $\text{NO}_x^-$  的 14%、21%、31% 和 34%. 与  $\text{SBR}_2$  相比, 间歇曝气显然强化了这种抑制效应在  $\text{SBR}_1$  中的表现,  $\text{NO}_2^-$  氧化率与  $\text{NH}_4^+$  氧化率差距拉大 (图 3), 使得  $\text{NO}_2^-$  在出水中大量累积, 在相同 SRT 下  $\text{NO}_2^-$  积累率达到 73%、85%、91% 和 78%.

## 2.3 硝化菌生长动力学

为从根本上阐明间歇曝气对硝化影响及出水中  $\text{NO}_2^-$  积累现象, 对硝化菌 (AOB 和 NOB) 生长动力学研究尤为必要. 本研究引入生物量指数 (PX) 概念, 通过静态试验间接确定 SBR 中 AOB 和 NOB 的生物量, 进而对其生长计量学和动力学进行讨论. 结合运

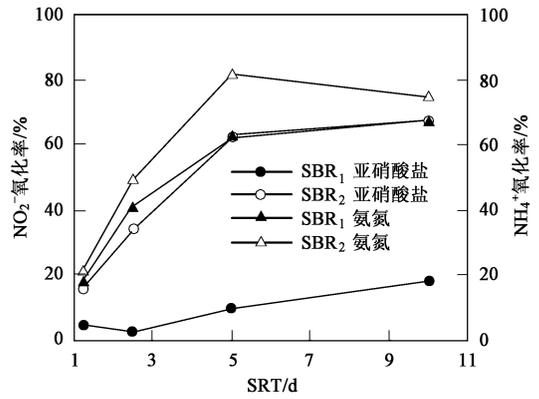


图 3  $\text{SBR}_1$  和  $\text{SBR}_2$  中  $\text{NO}_2^-$  与  $\text{NH}_4^+$  的氧化率比较

Fig. 3 Comparison of oxidation rates for  $\text{NO}_2^- / \text{NH}_4^+$  in the  $\text{SBR}_1$  and  $\text{SBR}_2$

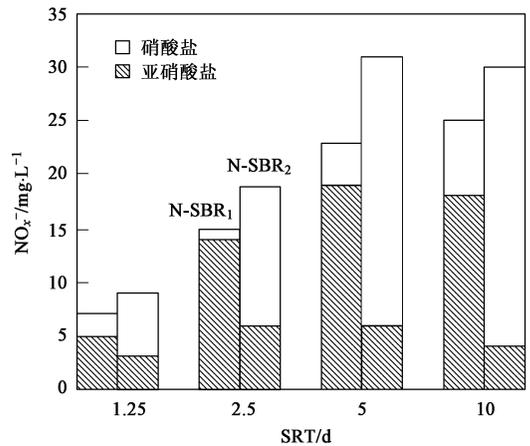


图 4  $\text{SBR}_1$  和  $\text{SBR}_2$  中出水  $\text{NO}_2^-$  与  $\text{NO}_3^-$  浓度

Fig. 4 Concentrations of effluent  $\text{NO}_2^- / \text{NO}_3^-$  in the  $\text{SBR}_1$  and  $\text{SBR}_2$

行数据, 研究采用以下动力学模型进行分析.

$$\mu = \frac{\mu_m \cdot S}{K + S} \quad (1)$$

式中,  $\mu$ 、 $\mu_m$ 、 $K$  和  $S$  分别为比增长速率 (1/d)、最大比增长速率 (1/d)、饱和常数 (mg/L) 和底物浓度 (mg/L).

$$\frac{1}{\theta} = \mu - b \quad (2)$$

$$\frac{1}{\theta} = Y \cdot q - b = \frac{Y \cdot S_2}{X \cdot t} - b \quad (3)$$

式中,  $\theta$ 、 $b$ 、 $Y$ 、 $q$  和  $X$  分别为泥龄 (d)、衰减系数 (1/d)、产率系数、表观比底物利用速率 (1/d) 和污泥浓度 (mg/L).

在分析 AOB 和 NOB 动力学时,  $S_2$  分别为系统出水中  $\text{NO}_2^-$  和  $\text{NO}_3^-$  含量之和或  $\text{NO}_3^-$  含量. 由于间歇曝气系统存在同步反硝化作用, 引起出水  $\text{NO}_x^-$  降

低,因此把进水中TN与出水中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>含量的差值作为S<sub>2</sub>值.式(3)可进一步转化为式(4):

$$\frac{1}{\theta} = \frac{P \cdot Y \cdot S_2}{P \cdot X \cdot t} - b \quad (4)$$

其中污泥产率指数(PY)整体作为待求变量.整理式(1)和(2),可得式(5):

$$S = \frac{S}{\frac{1}{\theta} + b} \cdot \mu_m - K \quad (5)$$

首先,把系统在不同SRT下的PX和S<sub>2</sub>代入式(4),作图可求得2个动力学常数,PY和b;然后,把b代入式(5),通过拟合一系列的S和θ值,即得另2个动力学常数μ<sub>m</sub>和K.表2为静态试验PX的测定结果,表明AOB和NOB的PX与SRT相关,在高SRT条件下,系统可保留更高的硝化菌生物量X,而比底物利用速率P认为是个常数(在静态试验中液

相中没有有机物存在,且NH<sub>4</sub><sup>+</sup>和DO充足,故P不受异养菌的抑制),因而表现为更大的PX值.接着对数据分别作图拟合,可依次求得2个系统中AOB和NOB的PY、b、μ<sub>m</sub>和K值.图5例举了SBR<sub>1</sub>和SBR<sub>2</sub>中AOB和NOB的PY、b计算过程,限于篇幅类似过程就不再赘述.2个系统中AON和NOB的PY、b、μ<sub>m</sub>和K值详见表3.

表2 不同SRT条件下AOB和NOB的生物量指数

Table 2 Biomass indexes for AOB and NOB under the different conditions of SRT

PX /mg <sup>+</sup> (L·d) <sup>-1</sup>	系统	SRT/d			
		10	5	2.5	1.25
AOB	SBR <sub>1</sub>	328	181	60	39
	SBR <sub>2</sub>	201	142	64	34
NOB	SBR <sub>1</sub>	39	16	4	3
	SBR <sub>2</sub>	146	120	33	8

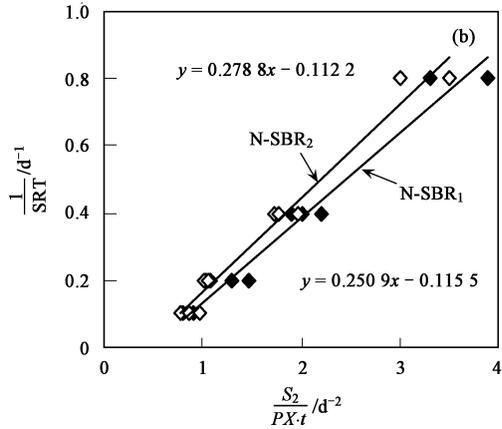
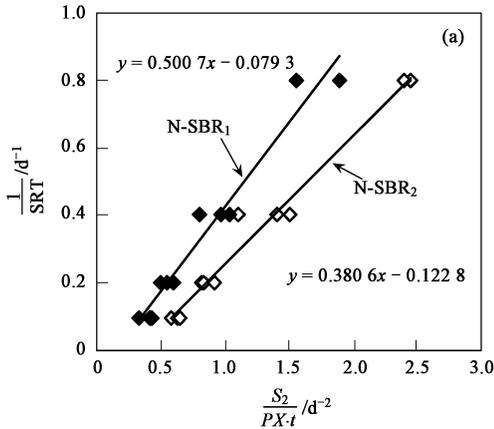


图5 SBR<sub>1</sub>和SBR<sub>2</sub>中AOB(a)和NOB(b)的PY、b估算

Fig. 5 Estimation of PY and b for AOB (a) and NOB (b) in the SBR<sub>1</sub> and SBR<sub>2</sub>

表3 间歇曝气对AOB和NOB生长动力学常数的影响

Table 3 Effect of intermittent aeration on the kinetic constants for AOB and NOB

系统	硝化菌	PY/d <sup>-1</sup>	b/d <sup>-1</sup>	μ <sub>m</sub> /d <sup>-1</sup>	K/mg·L <sup>-1</sup>
AOB	SBR <sub>1</sub>	0.50	0.08	0.67	4.6
	SBR <sub>2</sub>	0.38	0.12	0.60	2.1
NOB	SBR <sub>1</sub>	0.25	0.12	不能拟合	不能拟合
	SBR <sub>2</sub>	0.28	0.11	不能拟合	不能拟合

### 2.4 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 积累机制

表2直观显示了NO<sub>2</sub><sup>-</sup>在间歇曝气SBR<sub>1</sub>系统中高度积累的原因:间歇曝气对PX<sub>AOB</sub>不产生影响,而PX<sub>NOB</sub>却显著下降(与SBR<sub>2</sub>相比);由于PX实际上为系统在不同SRT下的硝化速率,因此间歇曝气对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>氧化和NO<sub>2</sub><sup>-</sup>氧化过程的影响不同,最终导致

NO<sub>2</sub><sup>-</sup>的积累;且这种影响效应为2.5 d > 5 d > 1.25 d (10 d),与图4相符.

这种影响也反映在AOB和NOB的生长动力学和计量学常数上(表3).首先,间歇曝气使SBR<sub>1</sub>中AOB产率系数Y增加,而对NOB不产生影响.由于P是一个常数,那么PY<sub>AOB</sub>值从SBR<sub>2</sub>的0.38上升至SBR<sub>1</sub>的0.50,表明Y<sub>AOB</sub>上升了1.32倍;而PY<sub>NOB</sub>值在2个系统中几乎相等,分别为0.25和0.28,即Y<sub>NOB</sub>值不变.其次,AOB在间歇曝气系统中具有更低的衰减系数b,相比连续曝气系统的0.12低33.3%;而NOB的b值分别为0.12和0.11,表明其在间歇曝气条件下的衰亡速度与连续曝气条件下相等;推测b<sub>AOB</sub>的降低是间歇曝气系统中的AOB产率升高的原因之一.在间歇曝气系统中,一定(时段)比

例的低 DO 环境会引起 AOB 活性降低, 导致其单位生物量对底物  $\text{NH}_4^+$  的利用速率(即比氧化速率)下降; 但另一方面, AOB 通过  $Y_{\text{AOB}}$  的升高增加了其在反应器中的生物数量, 弥补了比速率下降。这种对 AOB 正反两方面的作用, 使得间歇曝气模式在总体上并没有影响  $\text{SBR}_1$  对  $\text{NH}_4^+$  的去除速率。这种补偿特性也使得间歇曝气系统中 AOB 的比增长速率  $\mu_m$  没有受到明显影响, 与连续曝气系统的 0.60 相当。这与 Goreau 等<sup>[25]</sup> 及 Carlucci 等<sup>[26]</sup> 的报道一致。

与 AOB 相反, NOB 并不能通过在间歇曝气环境中增加自身  $Y_{\text{NOB}}$  的方法来补偿其在低 DO 时的比速率下降, 使系统总体上对  $\text{NO}_2^-$  的氧化速率下降(表 2), 从而造成显著  $\text{NO}_2^-$  积累。当然, AOB 和 NOB 对 DO 不同的亲和系数(分别 0.2~0.4 mg/L 和 1.2~1.5 mg/L)也是促进低 DO 下  $\text{NO}_2^-$  积累的原因之一<sup>[1,8,15,26]</sup>。由此推断, 在间歇曝气系统中 NOB 的比增长速率  $\mu_m$  会有一定程度的降低(未能通过拟合得到), 这对于短程硝化工艺 SRT 的选择具有十分重要的意义。正如  $\text{SBR}_1$  的运行结果一样, 在较宽的 SRT 范围内(1.25~10 d),  $\text{NO}_2^-$  积累率都维持在了很高的水平。这种优点可使间歇曝气工艺同时兼顾较高的硝化速率和  $\text{NO}_2^-$  积累率, 而不受制于许多类似工艺对条件近乎苛刻的限制(如 SHARON 工艺的高 pH 和高温)和运行缺点(如低 DO 下的污泥膨胀、短 SRT 下的污泥流失等)。

另外, 异养菌存在使单级脱氮系统  $\text{SBR}_1$  和  $\text{SBR}_2$  中  $K_{\text{AOB}}$  值维持在较高水平, 分别为 4.6 和 2.1 mg/L。其值增加表明, 在单级生物脱氮系统中, AOB 由于异养菌存在而对  $\text{NH}_4^+$  的亲合力下降, 为了维持一定的比增殖速率, 需要通过提高液相中基质的浓度才能实现, 导致出水中  $\text{NH}_4^+$  的浓度升高(图 2)。

### 3 结论

(1)  $\text{NO}_2^-$  在  $\text{SBR}_1$  中的高度累积表明, 间歇曝气对于类似生活污水等低氨氮浓度废水是一种有效实现短程硝化的方法, 在 1.25~10 d 较宽泛的 SRT 下,  $\text{NO}_2^-$  积累率达到了 73%~91%。

(2) 与连续曝气系统相比, 间歇曝气对  $\text{NH}_4^+$  的氧化速率没有影响, AOB 可以通过产率系数  $Y_{\text{AOB}}$  (反应器中 AOB 的绝对生物量) 的升高来补偿低 DO 环境引起的比底物利用速率的降低; 而 NOB 不具有这种补偿特性, 致使其  $\mu_m$  减小, 生物量低于在相同

的 SRT 下的连续曝气系统, 从而使  $\text{NO}_2^-$  氧化速率下降以及  $\text{NO}_2^-$  累积。

(3) 间歇曝气解决了先前短程硝化工艺对运行条件和进水水质的苛刻要求及运行缺点, 同时还可提高硝化系统对 TN 的去除效率。

#### 参考文献:

- [1] 王荣娟, 杨朝晖, 曾光明, 等. 不同供氧策略对反应器实现短程硝化厌氧氨氧化影响分析[J]. 环境科学学报, 2007, 27(11): 1809-1817.
- [2] 郭劲松, 方芳, 罗本福, 等. 生物膜 SBR 反应器中低氨氮浓度废水亚硝化启动试验研究[J]. 环境科学, 2007, 27(4): 686-690.
- [3] 遇光禄, 陈胜, 孙德智. 移动床生物膜反应器 SHARON 工艺半亚硝化特性[J]. 化工学报, 2008, 59(1): 201-207.
- [4] 孟军, 官正, 杨凤林, 等. 炭管膜曝气生物膜反应器亚硝化的启动试验研究[J]. 中国环境科学, 2008, 28(1): 87-91.
- [5] Sliemers A O, Derwort N, Gomez J L C, et al. Completely autotrophic nitrogen removal over nitrite in one single reactor[J]. Wat Res, 2002, 36(10): 2475-2482.
- [6] Terada A, Yamamoto Y, Igarashi R, et al. Feasibility of a membrane aerated biofilm reactor to achieve controllable nitrification[J]. Biochem Engin J, 2006, 28(2): 123-130.
- [7] 马勇, 彭永臻, 吴学蕾, 等. 应用在线控制优化污泥种群强化 A/O 工艺短程硝化[J]. 环境科学, 2007, 28(5): 1044-1049.
- [8] Blackburne R, Yuan Z G, Keller J. Partial nitrification to nitrite using low dissolved oxygen concentration as the main selection factor[J]. Biodegradation, 2008, 19(2): 303-312.
- [9] Kim J H, Guo X J, Park H S. Comparison study of the effects of temperature and free ammonia concentration on nitrification and nitrite accumulation[J]. Proc Biochem, 2008, 43: 154-160.
- [10] 马勇, 陈伦强, 彭永臻, 等. 实际生活污水短程/全程硝化反硝化处理中试研究[J]. 环境科学, 2006, 27(12): 2477-2482.
- [11] Pollice A, Tandoi V, Lestingi C. Influence of aeration and sludge retention time on ammonium oxidation to nitrite and nitrate[J]. Wat Res, 2002, 36: 2541-2546.
- [12] Li J P, Healy M G, Zhan X M, et al. Nutrient removal from slaughterhouse wastewater in an intermittently aerated sequencing batch reactor[J]. Biores Technol, 2008, 99(16): 7644-7650.
- [13] Shao L M, He P J, Li G J. In situ nitrogen removal from leachate by bioreactor landfill with limited aeration[J]. Waste Manag, 2008, 28(6): 1006-1007.
- [14] Lim B S, Choi B C, Yu S W, et al. Effects of operational parameters on aeration on/off time in an intermittent aeration membrane bioreactor[J]. Desalination, 2007, 202(1-3): 77-82.
- [15] 许朕, 杨朝晖, 曾光明, 等. 供氧充足环境下 SBBR 实现短程硝化的控制研究[J]. 环境科学, 2008, 29(7): 1860-1866.
- [16] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法[M]. (第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1997.
- [17] 蒋轶锋. 短程硝化除磷工艺特征及运行效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [18] Jiang Y F, Wang L, Wang B Z, et al. Dynamic response of

- denitrifying poly-P accumulating organisms batch culture to increased nitrite concentration as electron acceptor[J]. *J Environl Sci Heal Part A*, 2006, **62** (11): 2557-2570.
- [19] 丁莉芳, 王圣伟, 郭天赐, 等. 污泥水富集硝化菌和强化城市污水低污泥龄硝化[J]. *环境科学*, 2008, **29**(2): 332-337.
- [20] 苏俊峰, 马放, 高珊珊, 等. 异养型同步硝化处理氨氮废水及群落结构分析[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2007, **33**(6): 685-690.
- [21] Berends D, Salem S, van der Roest H, *et al.* Boosting nitrification with BA BE[J]. *Wat Sci Technol*, 2005, **52**(4): 63-70.
- [22] Kim D J, Kim S H. Effect of nitrite concentration on the distribution and competition of nitrite oxidizing bacteria in nitrataion reactor systems and their kinetics characteristics[J]. *Wat Res*, 2006, **40** (5): 887-894.
- [23] Hanaki K, Wantawin C, Ohgaki S. Effect of the activity of heterotrophs on nitrification in a suspended growth reactor[J]. *Wat Res*, 1990, **24**(3): 289-296.
- [24] Jiang Y F, Wang L, Wang B Z, *et al.* Biological nitrogen removal with enhanced phosphate removal in (AO)<sup>2</sup>SBR using single sludge system[J]. *J Environ Sci*, 2004, **16**(6): 1037-1040.
- [25] Goreau T J, Kaplan W A, Wofsy S C, *et al.* Production of nitrite and nitrate by nitrifier at reduced concentration of oxygen[J]. *Appl Environ Microbiol*, 1980, **40**: 526-532.
- [26] Caelucci A F, McNally P M. Nitrification by marine bacteria in low concentration of substrate and oxygen[J]. *Limnol Oceanogr*, 2004, **19**: 136-139.

## 欢迎订阅 2009 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国工程索引 EI;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA): Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA): Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS): Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2009 年为大 16 开本,70 元/册,全年 12 期。

国内统一刊号: CN11-1895/X 国际标准刊号: ISSN 0250-3301

国外发行代号: M 0205 国内邮发代号: 2-821

编辑部地址: 北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编: 100085

电话: 010-62941102; 传真: 010-62849343; E-mail: hjkx@rcees.ac.cn; 网址: www.hjkx.ac.cn