

间歇曝气对硝化菌生长动力学影响及 NO_2^- 积累机制

蒋轶锋¹, 陈浚¹, 王宝贞², 陈建孟¹

(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 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_{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(μ_m)和 NH_4^+ 的氧化速率不变.与此相反,亚硝酸盐氧化菌(NO₂)却不具备这种补偿特性,导致其 μ_m 和对 NO_2^- 氧化速率降低,引起了 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(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 NO_2^- Accumulation

JIANG Yi-feng¹, CHEN Jun¹, WANG Bao-zhen², CHEN Jian-meng¹

(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 NH_4^+ . The results shows that under the SRTs of 10, 5, 2.5 and 1.25 d, 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 NO_2^- accumulation ratios were only 14%, 21%, 31% and 34%. In addition, the corresponding removals of 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_{AOB}), which as a result compensated the decreased specific substrate utilization rate at low DO level and further led to the unchanged μ_m value and NH_4^+ oxidation rate. On the contrary, nitrite-oxidizing bacteria (NOB) was lack of the function of compensability, and it hence lowered the μ_m value and NO_2^- oxidation rate, and therefore resulted in an accumulation of NO_2^- in the effluent.

Key words: shortcut nitrification; dynamics; intermittent aeration; nitrite (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^[1-6].利用氨氧化菌(AOB)和亚硝酸盐氧化菌(NO₂)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^[1-9].尤其对于常温大流量低氨氮浓度废水,能长久稳定维持 NO_2^- 积累的途径亟待探索^[2,7,10].

近来的研究表明,供氧方式会对硝化过程产生影响^[11-14].在间歇曝气条件下,通过 SRT^[11]、反应器^[11,12]、进水水质^[12,13]、工艺参数^[14,15]等一些可控因素的改变,可实现稳定的短程硝化;但上述文献均未能进一步揭示 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 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(SBR₁ 和 SBR₂),有效容积 2 L,种泥取自另一硝化系统.运行周期 6 h,包括 5.5 h 反应、0.5 h 沉淀/排水/进水.SBR₁ 和 SBR₂ 分别采取不同的供氧方式:间歇曝气(曝气 15 min/搅拌 15 min 交替)或连续曝气;系统在室温下运行;pH 用 0.5 mol/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 1.25 d;沉淀后排除 1.6 L 上清液(包括剩余污泥),HRT 为 7.5 h.如表 1 所示.

表 1 SBR₁ 和 SBR₂ 的运行参数

Table 1 Operational parameters for the SBR ₁ and SBR ₂					
SBR ₁ (间歇曝气)	SRT/d	10	5	2.5	1.25
	运行时间/d	40	80	20	20
	DO/mg·L ⁻¹	0~6			
SBR ₂ (连续曝气)	SRT/d	10	5	2.5	1.25
	运行时间/d	40	80	20	20
	DO/mg·L ⁻¹	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),BOD₅ 89 ~ 165 (108),NH₄⁺-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^[16]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 1.25 d SRT 下运行稳定后,从反应器中取出污泥混合液 100、200、400 和 800 mL,洗净污泥后加入适量营养液^[17,18]和 40 mL 浓度为 50 mg/L 含 NH₄⁺ 或 NO₂⁻ 的溶液,最后用蒸馏水定容至 400 mL(分别稀释 4、2、1 和 0.5 倍),控制 VSS 在 800 mg/L 左右,避免反应速率过快影响测定.曝气 2 h 进行硝化试验,保持 pH 和温度与反应器相同,每隔 20 min 取样分析液相中 NO₂⁻ 和 NO₃⁻ 含量.以 NO₂⁻ 和 NO₃⁻ 生成总量之和或 NO₂⁻ 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 1.25 d 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^[17,23].

2 结果与分析

2.1 NH₄⁺ 氧化

良好的 NH₄⁺ 氧化性能是所有生物脱氮工艺运行的前提.间歇曝气导致 SBR₁ 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 NH₄⁺ 去除率和氧化率(出水中 NO₂⁻ 和 NO₃⁻ 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 NH₄⁺ 数量大致相等.由图 1 可知,SBR₁ 和 SBR₂ 对 NH₄⁺ 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 NH₄⁺ 去除没有明显区别,表明间歇曝气没有抑制亚硝化进行.NH₄⁺ 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 NH₄⁺ 去除率相同.同步反硝化作用引起 SBR₁ 中 NH₄⁺ 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 1.25 d 时,TN 去除率分别为 26%、40%、30% 和 18%^[17]).

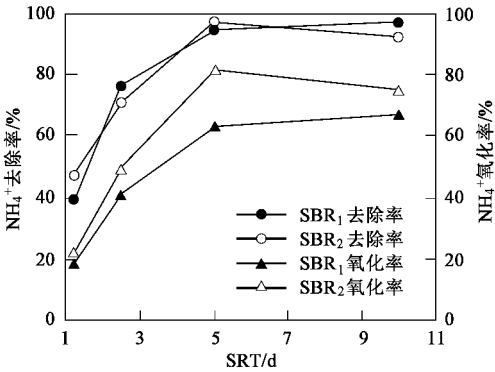


图 1 SBR₁ 和 SBR₂ 中 NH₄⁺ 的去除率和氧化率
Fig.1 Removal and oxidation rates of NH₄⁺ in the SBR₁ and SBR₂

NH₄⁺ 氧化受抑制导致 SBR₁ 和 SBR₂ 出水中 NH₄⁺ 含量随着 SRT 降低而升高,如图 2 所示,分别为 1、2、9、23 mg/L 和 3、1、11、20 mg/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、72 mg/L 和 28、20、38、87 mg/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 NH₄⁺ 氧化影响显然大于对 COD 去除影响,出水 NH₄⁺ 含量最高值为最低值的 23 倍(SBR₁),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 NH₄⁺ 氧化的影响.研究表明^[19-24],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 NH_4^+ 浓度, SBR₁ 中 AOB 才可能在较低的 SRT 时维持一定的增长速率.

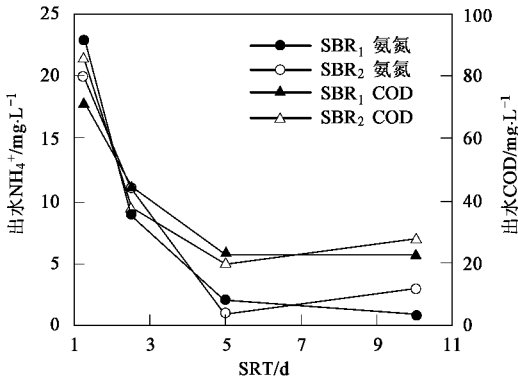


图 2 SBR₁ 和 SBR₂ 出水 NH_4^+ 和 COD 浓度
Fig.2 Concentrations of effluent NH_4^+ and COD in the effluent SBR₁ and SBR₂

2.2 NO_2^- 氧化

NO_2^- 氧化取决 2 个过程: NH_4^+ 的氧化和 NO_2^- 自身的氧化. 为便于分析, 笔者定义 NO_2^- 氧化率为出水中 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 NO_2^- 数量. 由于只有 NO_2^- 才能进一步被氧化成 NO_3^- , 因此 NO_2^- 氧化率应与 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 NO_2^- 硝化不利.

但低 SRT 对 NO_2^- 氧化的抑制效应明显强于对 NH_4^+ 氧化的影响(图 3), 这导致连续曝气系统出水有少量 NO_2^- 的累积. 如图 4, 在 SRT 10、5、2.5 和 1.25 d 下, 出水 NO_2^- 浓度分别为 4、6、6 和 3 mg/L, 占 NO_x^- 的 14%、21%、31% 和 34%. 与 SBR₂ 相比, 间歇曝气显然强化了这种抑制效应在 SBR₁ 中的表现, NO_2^- 氧化率与 NH_4^+ 氧化率差距拉大(图 3), 使得 NO_2^- 在出水中大量累积, 在相同 SRT 下 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 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

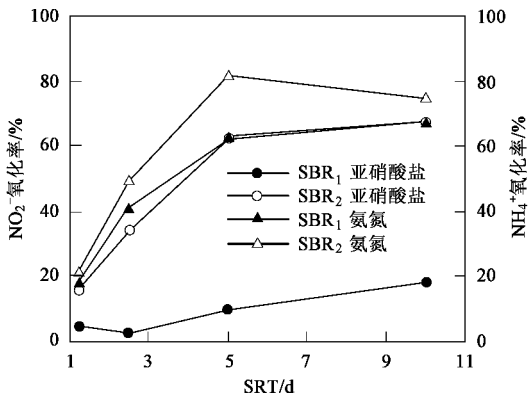


图 3 SBR₁ 和 SBR₂ 中 NO_2^- 与 NH_4^+ 的氧化率比较
Fig.3 Comparison of oxidation rates for $\text{NO}_2^-/\text{NH}_4^+$ in the SBR₁ and SBR₂

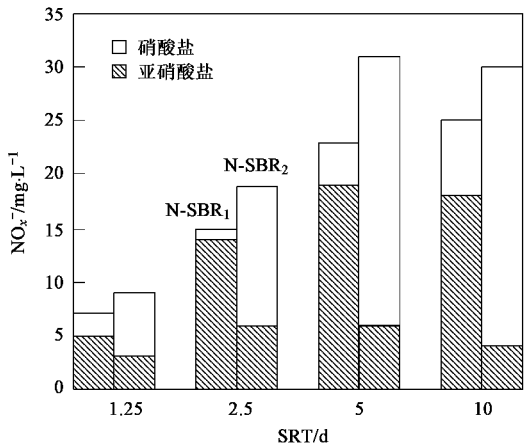


图 4 SBR₁ 和 SBR₂ 中出水 NO_2^- 与 NO_3^- 浓度
Fig.4 Concentrations of effluent $\text{NO}_2^-/\text{NO}_3^-$ in the SBR₁ and SBR₂

行数据, 研究采用以下动力学模型进行分析.

$$\mu = \frac{\mu_m \cdot S}{K + S} \tag{1}$$

式中, μ 、 μ_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).

$$\frac{1}{\theta} = \mu - b \tag{2}$$

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

式中, θ 、 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 NO_2^- 和 NO_3^- 含量之和或 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 NO_x^- 降

低,因此把进水中 TN 与出水中 NH_4^+ 含量的差值作为 S_2 值.式(3)可进一步转化为式(4):

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

(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):

$$S = \frac{S}{\frac{1}{\theta} + b} \cdot \mu_m - K$$

(5)

首先,把系统在不同 SRT 下的 PX 和 S_2 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_m 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_4^+ 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_m 和 K 值.图 5 例举了 SBR_1 和 SBR_2 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_m 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·(L·d) ⁻¹	系统	SRT/d			
		10	5	2.5	1.25
AOB	SBR_1	328	181	60	39
	SBR_2	201	142	64	34
NOB	SBR_1	39	16	4	3
	SBR_2	146	120	33	8

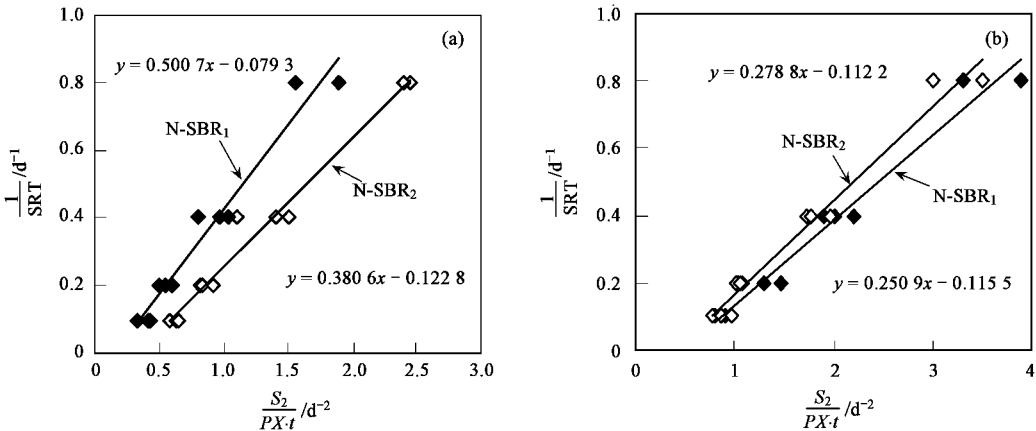


图 5 SBR_1 和 SBR_2 中 AOB (a) 和 NOB (b) 的 PY 、 b 估算

Fig.5 Estimation of PY and b for AOB (a) and NOB (b) in the SBR_1 and SBR_2

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^{-1}	b/d^{-1}	μ_m/d^{-1}	$K/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
AOB	SBR_1	0.50	0.08	0.67	4.6
	SBR_2	0.38	0.12	0.60	2.1
NOB	SBR_1	0.25	0.12	不能拟合	不能拟合
	SBR_2	0.28	0.11	不能拟合	不能拟合

2.4 NO_2^- 积累机制

表 2 直观显示了 NO_2^- 在间歇曝气 SBR_1 系统中高度积累的原因:间歇曝气对 PX_{AOB} 不产生影响,而 PX_{NOB} 却显著下降(与 SBR_2 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_4^+ 氧化和 NO_2^- 氧化过程的影响不同,最终导致

NO_2^- 的积累;且这种影响效应为 $2.5 \text{ d} > 5 \text{ d} > 1.25 \text{ d}$ (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_1 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_{AOB} 值从 SBR_2 的 0.38 上升至 SBR_1 的 0.50,表明 Y_{AOB} 上升了 1.32 倍;而 PY_{NOB} 值在 2 个系统中几乎相等,分别为 0.25 和 0.28,即 Y_{NOB} 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_{AOB} 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 NH_4^+ 的利用速率(即比氧化速率)下降; 但另一方面, AOB 通过 Y_{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 SBR_1 对 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 μ_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^[25]及 Carlucci 等^[26]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_{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 NO_2^- 的氧化速率下降(表 2), 从而造成显著 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 NO_2^- 积累的原因之一.^[1, 8, 15, 26]由此推断, 在间歇曝气系统中 NOB 的比增长速率 μ_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 SBR_1 的运行结果一样, 在较宽的 SRT 范围内(1.25 ~ 10 d), 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 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 SBR_1 和 SBR_2 中 K_{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 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 NH_4^+ 的浓度升高(图 2).

3 结论

(1) NO_2^- 在 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, 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 NH_4^+ 的氧化速率没有影响, AOB 可以通过产率系数 Y_{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 μ_m 减小, 生物量低于在相同

的 SRT 下的连续曝气系统, 从而使 NO_2^- 氧化速率下降以及 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, 宫正, 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] Slikkers 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): 1000-1007.
- [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] 蒋铁锋. 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 BABE[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)²SBR 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.