

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201707137

不同污泥龄厌氧氨氧化菌的脱氮效能及其动力学特性

张杰^{1,2}, 张泽文¹, 李冬¹, 郭跃洲¹, 李帅^{1,2}

(1. 水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室(北京工业大学), 北京 100124;

2. 城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090)

摘要: 为研究不同污泥龄(SRT)条件下厌氧氨氧化菌的脱氮效能和动力学特性, 采用一组SBR反应器研究梯度降低污泥龄过程中系统的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 去除负荷(N_r)和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 污泥负荷(N_s), 并对各阶段厌氧氨氧化过程动力学特性进行分析。结果表明, 污泥龄由21 d梯度降低到12 d, N_r 由 $0.590 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 降低到 $0.493 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 单位MLVSS N_s 由 $0.178 \text{ kg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 提升到 $0.297 \text{ kg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$, 系统整体的脱氮性能有所下降, 但单位质量的厌氧氨氧化菌脱氮效率显著提升; 采用莫诺(Monod)模型可以较好地模拟不同污泥龄运行阶段厌氧氨氧化菌的动力学行为, 动力学分析表明, 随着污泥龄的降低, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的最大比降解速率 $v_{\max}$ 由 0.406 d^{-1} 提高到 0.826 d^{-1} , 半饱和常数 K_s 由 23.3 mg/L 增加到 95.3 mg/L , 梯度降低污泥龄能够筛选纯化生长速率较快的厌氧氨氧化菌菌株, 提升 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的最大比降解速率, 但厌氧氨氧化菌对底物的亲和性会逐渐变差, 稳定性降低。

关键词: 污泥龄; 厌氧氨氧化; 亚硝酸盐去除负荷; 亚硝酸盐污泥负荷; 动力学特性; 最大比降解速率; 半饱和常数

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2018)08-0001-07

Nitrogen removal efficiency and kinetic characteristics of anammox bacteria at different sludge ages

ZHANG Jie^{1,2}, ZHANG Zewen¹, LI Dong¹, GUO Yuezhou¹, LI Shuai^{1,2}

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering (Beijing University of Technology), Beijing 100124, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and

Environment (Harbin Institute of Technology), Harbin 150090, China)

Abstract: The experiment was to explore the effect of different SRT on the nitrogen removal efficiency and kinetic characteristics of AnAOB by studying the variation of nitrite removal loads (N_r), nitrite sludge loads (N_s) and kinetic characteristics with gradient decrease of SRT in a SBR. The results showed that with SRT decreasing from 21 d to 12 d, N_r decreased from $0.590 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ to $0.493 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ while N_s increased from $0.178 \text{ kg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ to $0.297 \text{ kg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$, and the N-removal performance of the whole system was reduced but the N-removal efficiency of unit mass of AnAOB was significantly improved. The Monod model can well simulate the kinetic behavior of AnAOB at different SRT. The maximum specific degradation rate ($v_{\max}$) increased from 0.406 d^{-1} to 0.826 d^{-1} and the semi-saturated constant (K_s) increased from 23.3 mg/L to 95.3 mg/L , which indicated that gradually decreasing SRT can screen and purify AnAOB with faster grow rate, while the affinity for the substrate gradually deteriorated and the stability decreased.

Keywords: SRT; Anammox; N_r ; N_s ; kinetic characteristics; $v_{\max}$; K_s

厌氧氨氧化(anaerobic ammonium oxidation anammox)是20世纪90年代开发的一种新型生物脱氮工艺^[1-2],它是指在厌氧或缺氧条件下,厌氧氨氧化菌以氨氮为电子供体,以亚硝态氮为电子受体,将两者转化为氮气的过程^[3-4]。与传统的硝化一反硝化工艺相比,厌氧氨氧化工艺具有耗氧量低、污泥产量低、无需外加有机碳源和无二次污染等优点^[5-6],其生物脱氮反应式^[7]为



目前,关于厌氧氨氧化的脱氮技术已经取得了一定的研究成果和实践经验^[8-9],但是如何显著提高厌氧氨氧化菌的脱氮效能仍是制约其工程应用的关键。污泥龄是活性污泥处理系统设计、运行的重要参数,对系统的运行稳定性、出水水质和微生物的工作效能具有重要影响^[10],探究不同污泥龄对微生物工作效能和生长状况的影响具有重要意义。目前,国内对于污泥龄的研究主要集中于好氧污泥领域^[11-12],而针对厌氧氨氧化污泥的研究较少,且主要侧重于污泥龄对微生物脱氮性能的影响^[13-14],关

收稿日期: 2017-07-11

基金项目: 北京市优秀青年拔尖团队(2014000028833TD02)

作者简介: 张杰(1938—),男,博士生导师,中国工程院院士;

李冬(1976—),女,教授,博士生导师

通信作者: 李冬, lidong2006@bjut.edu.cn

于不同污泥龄条件下厌氧氨氧化菌动力学特性的研究较少。

本实验采用一组 SBR 反应器接种成熟厌氧氨氧化污泥,研究梯度降低污泥龄过程中系统的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 去除负荷和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 污泥负荷,以此来确定不同污泥龄对厌氧氨氧化反应器脱氮性能的影响。当前,莫诺模型广泛应用于污水中微生物降解动力学的研究^[15],已有学者初步证明该模型可用于描述厌氧氨氧化菌的动力学行为^[16-17],为了进一步确定不同污泥龄条件下厌氧氨氧化菌的动力学特性,选用莫诺模型分析不同阶段厌氧氨氧化过程的动力学行为,以期进一步明晰不同污泥龄条件下厌氧氨氧化菌的代谢速率和脱氮潜能。

1 实 验

1.1 实验装置

实验采用一组 SBR 反应器,如图 1 所示,反应器由有机玻璃精加工制成,内径 100 mm,高 700 mm,有效体积为 10.6 L。反应器器壁垂直方向上设有一排取样口,外壁用黑色材料包裹,避免反应器内藻类增殖以及阳光对厌氧氨氧化菌的影响,进水由蠕动泵从反应器底部打入,容积交换率为 2/3,水力停留时间为 8 h。为了探究常温条件下梯度降低污泥龄对厌氧氨氧化菌脱氮效能和动力学特性的影响,将反应器运行温度控制在 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。

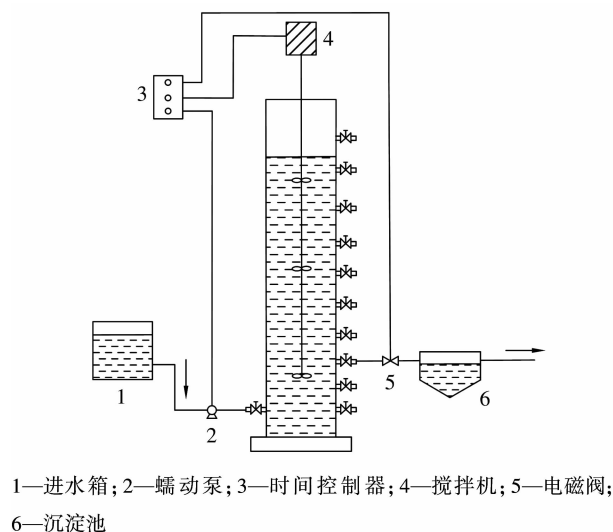


图 1 反应器装置

Fig. 1 Experimental equipment of the reactor

1.2 接种污泥和实验水质

接种污泥采用在氨氮质量浓度为 200 mg/L、亚硝酸盐氮质量浓度为 200 mg/L 的人工配水水质条件下稳定运行的 SBR 反应器中的成熟厌氧氨氧化污泥,污泥的 MLSS 为 5 320 mg/L,平均化学计量比为 1:1.22:0.25,对氨氮和亚硝酸盐氮的去除率均

在 80% 以上,总氮去除率为 78.5%,总氮去除负荷为 $1.05 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,接种体积为 10.0 L。

实验进水为人工模拟废水, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度均为 200 mg/L,无机碳由 NaHCO_3 提供,碳氮比为 5:1, KH_2PO_4 为 2.5 mg/L, CaCl_2 为 12.5 mg/L 以及 1.00 mL/L 的微量元素;微量元素组分为: EDTA (15 g/L), $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (0.25 g/L), $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0.42 g/L), $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (0.24 g/L), $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (0.98 g/L), H_3BO_4 (0.015 g/L), $\text{NiCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0.020 g/L), $\text{NaWO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0.060 g/L)。根据厌氧氨氧化的生物脱氮反应式^[7], $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的化学计量比理论值为 1:1.32,本实验将 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度比设置为 1:1,使 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 处于限基质状态,便于研究梯度降低污泥龄过程中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 污泥负荷与厌氧氨氧化菌的动力学特性。

1.3 实验方法

以 200 mg/L 的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度运行厌氧氨氧化反应器,以 21、18、15 和 12 d 的梯度降低系统的污泥龄,通过研究梯度降低污泥龄过程中系统的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 去除负荷和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 污泥负荷来确定不同污泥龄对厌氧氨氧化反应器脱氮性能的影响。选用莫诺模型分析厌氧氨氧化过程的动力学行为,以期明晰不同污泥龄条件下厌氧氨氧化菌的代谢速率和脱氮潜能。

1.4 分析项目及方法

氨氮测定采用纳氏试剂光度法;亚硝酸盐氮测定采用 N-(1 萘基)-乙二胺光度法;硝酸盐氮测定采用紫外分光光度法;pH、溶解氧 (DO) 以及温度测定采用便携式的 WTW pH/Oxi 340i 及在线式的 WTW pH296 Oxi296;MLSS 和 MLVSS 采用质量法进行测定。

2 结果与讨论

2.1 反应器脱氮性能以及生物量变化

梯度降低污泥龄过程中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 去除负荷、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 污泥负荷和 MLVSS 变化如图 2、3 所示。

第 1 阶段,污泥龄设置为 21 d。为了维持系统的污泥龄,每天定期从反应器内排出部分污泥,在该污泥龄运行条件下,当厌氧氨氧化菌世代周期为 14.5 d ($T_d = \ln(2) \cdot \text{SRT}$) 时,系统的生物量能够保持动态平衡^[18],所以,运行初期,世代周期大于 14.5 d 的菌种必然被淘洗出反应器,导致生物量下降。由图 2 可知,反应器运行至第 8 天,系统的

MLVSS 由 3 952 mg/L 降低到 3 420 mg/L,第 9 天之后,MLVSS 逐渐稳定;随着生物量趋于动态平衡,系统脱氮效果也逐步稳定,化学计量比保持在 1:1.29:0.25,第 20 天,出水的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度为 20.6 mg/L,与进水相比,去除率为 90.8%, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 去除负荷为 0.590 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,单位 MLVSS $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 污泥负荷为 0.178 $\text{kg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$.

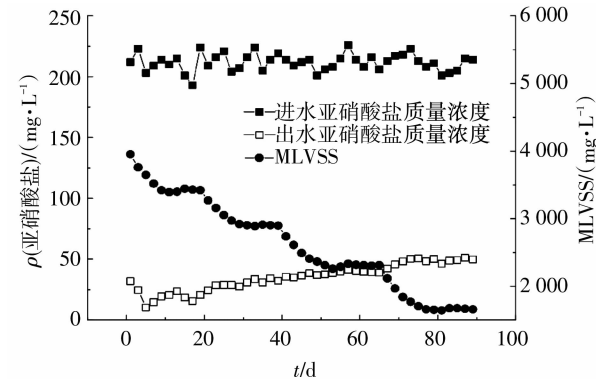


图 2 梯度降低污泥龄过程中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度和生物量变化

Fig. 2 Variation of $\text{NO}_2^- - \text{N}$ concentration and biomass in the process of reducing sludge age

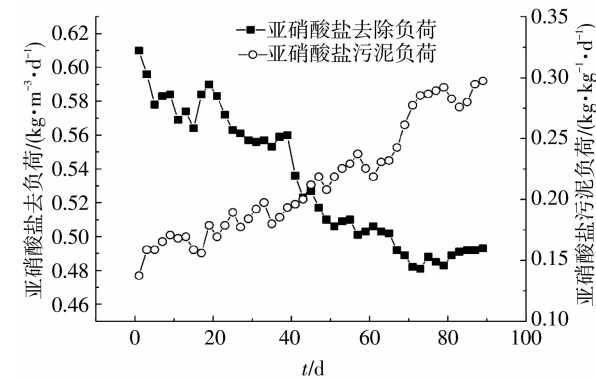


图 3 梯度降低污泥龄过程中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 负荷变化

Fig. 3 Variation of $\text{NO}_2^- - \text{N}$ loads in the process of reducing sludge age

从第 21 天开始,污泥龄降低到 18 d,加大每天从反应器内排出的污泥量.同第一阶段,运行初期,由于污泥龄的骤降,世代周期大于 12.5 d ($T_d = \ln(2) \cdot \text{SRT}$) 的厌氧氨氧化菌种被淘汰出反应器,导致系统的 MLVSS 逐渐下降,反应器运行至第 30 天,系统的 MLVSS 降低到 2 917 mg/L,第 31 天后,MLVSS 趋于稳定,化学计量比也随着脱氮效率的稳定保持在 1:1.31:0.24;由于厌氧氨氧化菌数量减少,导致系统整体的脱氮效率较第一阶段有所下降.由图 2、3 可知,第 40 天,出水的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度为 32.2 mg/L,去除率为 85.3%, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 去除负荷为 0.560 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,较第一阶段结束时分别降低了 5.5% 和 0.030 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$;由于污泥量的减少,系统的污泥负荷相应增加^[19],第 40 天的

$\text{NO}_2^- - \text{N}$ 污泥负荷为 0.193 $\text{kg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$,比第一阶段结束时提高了 0.015 $\text{kg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$.

第 3 阶段,污泥龄降低到 15 d.由于每日排泥量的增加,系统的 MLVSS 继续下降,于第 51 天稳定在 2 310 mg/L,此时的化学计量比为 1:1.34:0.27;污泥负荷的逐渐增加,极大促进了厌氧氨氧化菌的电子传递能力^[18],单位质量厌氧氨氧化菌的脱氮效率进一步提升,第 65 天, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 污泥负荷达到 0.232 $\text{kg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$,高于第 40 天的 0.193 $\text{kg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$;但是由于排泥量进一步增加,导致厌氧氨氧化菌的基数降低,系统整体的脱氮效果较第二阶段仍有所下降,第 65 天,出水的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度为 38.8 mg/L,去除率为 81.2%, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 去除负荷为 0.502 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,较第 40 天分别下降了 4.1% 和 0.058 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$.

第 65 天以后,将污泥龄继续降低到 12 d,系统的生物量以及脱氮效果的变化情况与第三阶段基本一致,该阶段化学计量比的平均值为 1:1.28:0.26.反应器运行至第 90 天,系统的 MLVSS 为 1 657 mg/L,出水的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度为 49.7 mg/L,去除率为 76.8%, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 去除负荷为 0.493 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,而 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 污泥负荷达到 0.297 $\text{kg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$,远高于第一阶段结束时的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 污泥负荷.实验结果表明,随着污泥龄的梯度降低, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 去除负荷逐渐减小,系统整体的脱氮性能逐渐下降,但是 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 污泥负荷显著提升;各反应阶段的化学计量比均非常接近理论值,说明不同污泥龄条件下,厌氧氨氧化反应均为系统的主导反应,所以, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 污泥负荷的提升也进一步表明厌氧氨氧化菌对亚硝酸盐的摄取率显著增加.

2.2 动力学特性分析

采用 Monod 模型来表征厌氧氨氧化菌的动力学行为.在不同污泥龄运行阶段,选取生物量和脱氮效率稳定后的运行数据,采用周期实验的方法研究厌氧氨氧化过程的动力学特性.根据 SBR 的基本运行模式^[20](进水、反应、沉淀、排水和闲置),选择在“反应”阶段进行周期实验,定时测定反应器内混合物的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度,利用 Monod 模型式^[21](1)拟合不同 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度下的厌氧氨氧化反应

$$\frac{Xt}{S_0 - S_e} = \left(\frac{K_s}{v_{\max}} \right) \left(\frac{1}{S_e} \right) + \frac{1}{v_{\max}}.$$

(1)

式中: X 为微生物质量浓度(mg/L); t 为反应时间; S_0 为进水中初始 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度(mg/L); S_e 为经反应时间 t 后,系统中残存的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度(mg/L);

K_s 为半饱和常数,当 $v = \frac{1}{2}v_{\max}$ 时的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度; $v_{\max}$ 为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 最大比降解速率(d^{-1}).

实验第 1 阶段,污泥龄为 21 d,反应周期为 8 h. 反应器运行稳定后,随机选择两个反应周期进行周期实验,结果如表 1 所示.

表 1 周期实验数据
Tab.1 Data of cycle test

周期一		周期二	
$t/$ min	ρ (亚硝酸盐)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$t/$ min	ρ (亚硝酸盐)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
0	209.0	0	210.0
30	182.3	30	183.4
60	156.1	60	156.4
90	135.8	90	136.4
120	112.6	120	113.2
180	80.9	180	80.3
240	54.8	240	53.8
300	32.6	300	33.6
360	28.3	360	28.6
480	16.2	480	16.3

采用 Monod 模型分别拟合两个周期不同 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度下的厌氧氨氧化反应,结果如图 4 所示. 拟合常数(R^2)分别为 0.989 和 0.981,平均值为 0.985,表明 Monod 模型同实测 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 数据拟合分析较好,可以将其用于本阶段亚硝酸盐降解规律的研究. 由图 4 的动力学方程式可知, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 最大比降解速率 $v_{\max}$ 分别为 0.403 和 0.408 d^{-1} ,平均 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 最大比降解速率为 0.406 d^{-1} ;半饱和常数 K_s 分别为 23.1 和 23.6 mg/L ,平均半饱和常数为 23.3 mg/L .

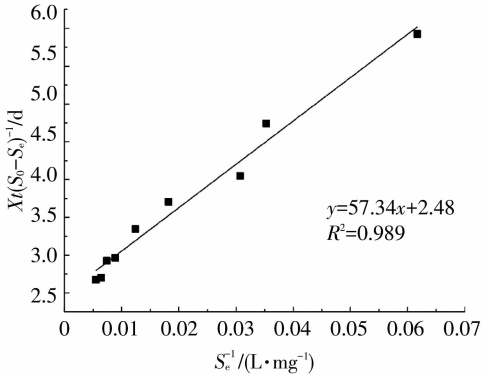
根据 $v_{\max}$ 和 K_s 的平均值,可以初步确定该阶段厌氧氨氧化反应的动力学模型为 $y = 57.31x + 2.46$. 其中, $a = 57.31$, $b = 2.46$,将其代入式(1)可得

$$\frac{Xt}{S_0 - S_e} = \frac{57.31}{S_e} + 2.46. \tag{2}$$

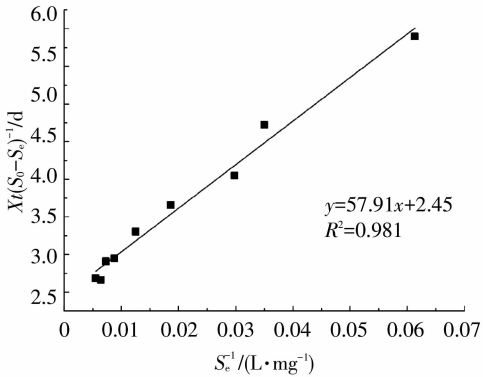
可用式(2)来预测第 1 阶段反应器运行稳定后出水的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度 S_e ,为了进一步验证式(2)的适用性,另外进行一组周期实验,其实测值和预测值对比结果见表 2. 可以看出,实测值和预测值的偏差均不超过 5%,表明该模型具有较高的预测精度.

为了明晰实验第 2~4 阶段厌氧氨氧化菌的动力学行为,采用第 1 阶段的实验方法,分别对后续阶段厌氧氨氧化的动力学过程进行分析,拟合结果如图 5~7 所示. 每一阶段动力学模型的拟合常数(R^2)

均在 0.970 以上,实验结果表明在第 2~4 阶段, Monod 模型同实测 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 数据拟合分析较好.



(a) 周期一



(b) 周期二

图 4 第 1 阶段周期实验下的厌氧氨氧化动力学

Fig. 4 Kinetics of ANAMMOX under cycle test in stage 1

表 2 实测值和预测值对比

Tab.2 Comparison of measured and predicted values

t/min	ρ (亚硝酸盐)/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		偏差/%
	实测值	预测值	
0	208.0	208.0	0
30	181.3	182.3	0.5
60	155.4	157.5	1.3
90	135.3	133.7	1.2
120	111.9	111.9	0
180	78.2	75.2	3.8
240	52.1	49.8	4.4
300	33.4	34.4	2.9
360	27.1	26.2	3.3
480	16.1	16.4	1.8

为了进一步验证模型的适用性,每个阶段增做一组周期实验,其实测值和预测值的对比结果见表 3. 每一阶段的偏差均小于 5%,证明该模型同样能够较好地表征第 2~4 阶段厌氧氨氧化菌的动力学行为,对反应器出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度的预测精度较高.

莫诺模型最重要的两个动力学参数分别为最大比降解速率 $v_{\max}$ 与半饱和常数 K_s . 由图 4~7 的动力

学方程式可知,在污泥龄分别为 21、18、15 和 12 d 时,厌氧氨氧化菌对亚硝酸盐的最大比降解速率 $v_{\max}$ 分别为 0.406、0.411、0.516 和 0.826 d^{-1} . 随着污泥龄的梯度降低, $v_{\max}$ 逐渐增大. 原因在于系统中的厌氧氨氧化菌菌种较多,其遗传特性存在本质区别^[20],导致其在生化反应中的电子传递能力差别较

大,进而影响厌氧氨氧化菌的生长速率和对底物的比降解速率^[18],随着污泥龄的逐渐降低,生长速率较慢的菌种被逐渐淘洗出反应器,当污泥龄降低到 12 d 时,系统中的剩余菌种大多为生长速率较快、活性较高的菌种,对亚硝酸盐的最大比降解速率达到了较高的水平.

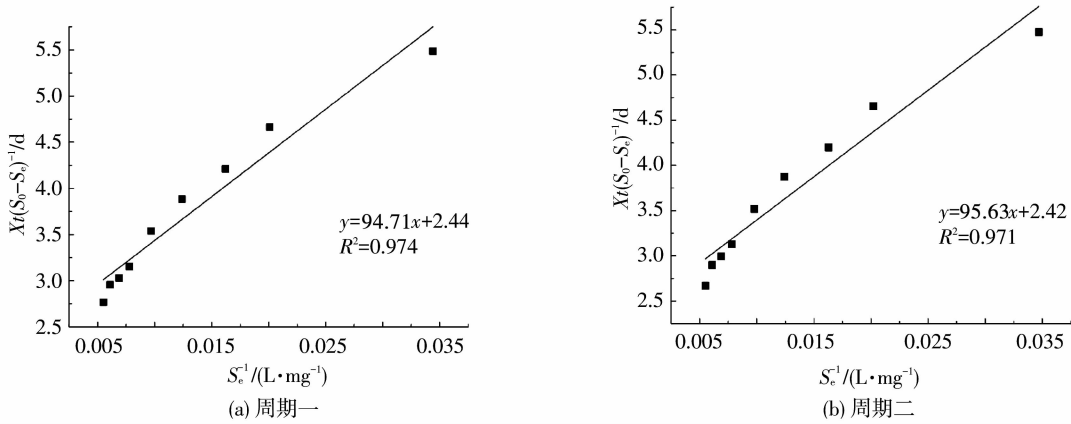


图 5 第 2 阶段周期实验下的厌氧氨氧化动力学
Fig. 5 Kinetics of ANAMMOX under cycle test in stage 2

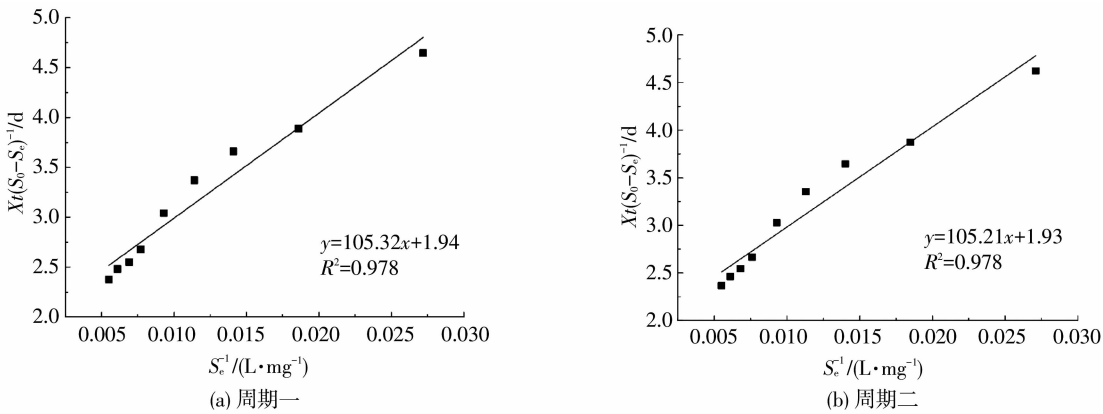


图 6 第 3 阶段周期实验下的厌氧氨氧化动力学
Fig. 6 Kinetics of ANAMMOX under cycle test in stage 3

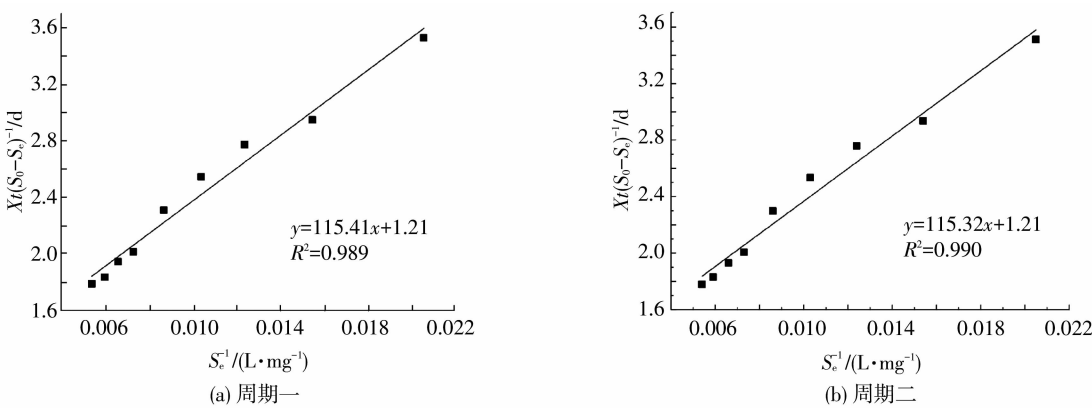


图 7 第 4 阶段周期实验下的厌氧氨氧化动力学
Fig. 7 Kinetics of ANAMMOX under cycle test in stage 4

梯度降低污泥龄的过程中,半饱和常数 K_s 变化明显. 当污泥龄为 21 d 时,由于污泥龄较长,系统中

营养物质缺乏,导致微生物内源呼吸加剧,EPS 分泌增加,厌氧氨氧化菌表面糖类随之增多,细菌表面亲

水基和疏水基的比例增大^[22],所以,厌氧氨氧化菌的亲水性较好,对亚硝酸盐的亲性和性较强, K_s 相对较小,为 23.3 mg/L,非常接近于 Tang 等^[23]的论证发现(亚硝酸盐半饱和和常数 $K_s = 23$ mg/L). 随着污泥龄的逐渐降低,厌氧氨氧化菌的亲水性逐渐降低,对亚硝酸盐的亲性和性也逐渐变差, K_s 逐渐增加. 当污泥龄降低到 12 d 时, K_s 上升到了 95.3 mg/L,远高于第一阶段的 23.3 mg/L,该污泥龄运行条件下,由于亲水性较低,厌氧氨氧化菌的稳定性也相对较差.

综上,Monod 模型能够较好地表征不同污泥龄条件下厌氧氨氧化菌的动力学行为,且对反应器出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度的预测精度较高;由动力学参数 $v_{\max}$ 和 K_s 的变化规律可知,梯度降低污泥龄能够筛选富集系统中生长速率较快的厌氧氨氧化菌种,当污泥龄降低到 12 d 时,系统整体的亚硝酸盐最大比降解速率达到了较高的水平;但是,污泥龄的降低会导致厌氧氨氧化菌的亲水性降低,对亚硝酸盐的亲性和性下降,厌氧氨氧化菌的稳定性也随之变差.

表 3 第 2-4 阶段实测值和预测值对比
Tab. 3 Comparison of measured and predicted values in stage 2-4

t/min	第 2 阶段			第 3 阶段			第 4 阶段		
	$\rho(\text{亚硝酸})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		偏差/%	$\rho(\text{亚硝酸})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		偏差/%	$\rho(\text{亚硝酸})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		偏差/%
	实测值	预测值		实测值	预测值		实测值	预测值	
0	208.0	208.0	0	205.0	205.0	0	207.0	207.0	0
30	183.9	187.5	1.9	184.5	185.6	0.6	188.0	188.4	0.2
60	165.0	168.3	2.0	165.6	166.6	0.6	168.9	170.5	0.9
90	145.8	150.0	2.9	147.8	149.9	1.4	153.2	154.4	0.8
120	128.9	132.7	2.9	132.2	134.5	1.7	137.9	139.7	1.3
180	103.2	101.1	2.0	108.9	106.4	2.3	116.5	113.1	2.9
240	81.2	77.4	4.7	89.4	85.1	4.8	97.5	93.5	4.1
300	62.0	59.4	4.2	69.4	67.4	2.9	81.4	78.4	3.7
360	48.1	47.1	2.1	54.7	54.8	0.2	65.2	67.2	3.1
480	30.9	31.8	2.9	37.3	38.9	4.3	49.1	49.6	1.0

3 结 论

1) 污泥龄由 21 d 梯度降低到 12 d,亚硝酸盐去除负荷由 0.590 kg/(m³ · d)降低到 0.493 kg/(m³ · d),系统整体的脱氮性能有所下降;亚硝酸盐污泥负荷由 0.178 kg/(kg · d)提升到 0.297 kg/(kg · d),单位质量的厌氧氨氧化菌脱氮效率显著提升.

2) 采用 Monod 模型能够较好地表征不同污泥龄条件下厌氧氨氧化菌的动力学行为,且对反应器出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度的预测精度较高. 实验测得了不同阶段 Monod 模型的动力学方程并得出了动力学参数,随着污泥龄的梯度降低,最大比降解速率 $v_{\max}$ 逐渐增大,半饱和和常数 K_s 也显著提升.

3) 梯度降低污泥龄能够筛选纯化系统中的厌氧氨氧化菌种,加速高活性菌种的富集,但是,厌氧氨氧化菌的稳定性会随之变差.

参考文献

[1] 田志勇,李冬,杨宏,等. 上向流厌氧氨氧化生物滤池的启动与脱氮性能[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(4): 509-515.

[2] 张正哲,姬玉欣,陈辉,等. 厌氧氨氧化工艺的应用现状和问题[J]. 生物工程学报, 2014, 30(12): 1804-1816. DOI: 10.13345/j. cjb. 140241.

[3] 任玉辉,王科,李相昆,等. 常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(11): 4218-4223. DOI: 10.13227/j. hjkx. 2014. 11. 025.

[4] 鲍林林,李刚强,李冬,等. 常温低基质下磷酸盐对厌氧氨氧化反应的影响[J]. 环境工程学报, 2013, 7(11): 4389-4392.

[5] 曾涛涛,李冬,邱文新,等. 低温厌氧氨氧化生物滤池群落结构分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(6): 6-10.

TIAN Zhiyong, LI Dong, YANG Hong, et al. Start-up and nitrogen removal performance of anaerobic ammonium oxidation bio-filter[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(4): 509-515.

ZHANG Zhengzhe, JI Yuxin, CHEN Hui, et al. Application and obstacles of ANAMMOX process [J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2014, 30(12): 1804-1816. DOI: 10.13345/j. cjb. 140241.

REN Yuhui, WANG Ke, LI Xiangkun, et al. Influence of alkalinity and DO on ANAMMOX bioreactor at normal temperature and low substrate concentration[J]. Environmental Science, 2014, 35(11): 4218-4223. DOI: 10.13227/j. hjkx. 2014. 11. 025.

BAO Linlin, LI Gangqiang, LI Dong, et al. Effect of phosphate on anammox at low substrate and normal temperature [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(11): 4389-4392.

ZENG Taotao, LI Dong, QIU Wenxin, et al. Community structure analysis of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) biofilter at low temperature [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(6): 6–10.

[6] 鲍林林, 赵建国, 李晓凯, 等. 常温低基质下 pH 和有机物对厌氧氨氧化的影响[J]. 中国给水排水, 2012, 28(13): 38–42.

BAO Linlin, ZHAO Jianguo, LI Xiaokai, et al. Influence of pH value and organic substance on anammox reactor at normal temperature and low substrate concentration [J]. China Water & Waste Water, 2012, 28(13): 38–42.

[7] 李冬, 田海成, 梁瑜海, 等. 水质条件对厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 含量的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(2): 6–12. DOI: 10.11918/j. issn. 0367–6234. 2017. 02. 002.

LI Dong, TIAN Haicheng, LIANG Yuhai, et al. Effect of water quality of influent on the content of extracellular polymeric substances in anammox granule sludge [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(2): 6–12. DOI: 10.11918/j. issn. 0367–6234. 2017. 02. 002.

[8] FURUKAWA K, TOKITOH H, LIEU P K. Single-stage nitrogen removal using anammox and partial nitritation (SNAP) for treatment of synthetic landfill leachate [J]. Japanese Journal of Water Treatment Biology, 2005, 41(2): 103–112.

[9] FERNANDEZ I, DOSTA J, ALVAREZ J M. A critical review of future trends and perspectives for the implementation of partial nitritation/anammox in the main line of municipal WWTPs [J]. Desalination and Water Treatment, 2016, 57: 27890–27898.

[10] 彭赵旭, 彭澄瑶, 何争光, 等. 污泥龄对低氧丝状菌活性污泥微膨胀系统的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(1): 245–251.

PENG Zhaoxu, PENG Chengyao, HE Zhengguang, et al. Impacts of sludge retention time on low oxygen limited filamentous sludge bulking system[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(1): 245–251.

[11] 王啟舟, 方振东, 龙向宇, 等. 污泥龄和溶解氧对微生物代谢产物组成和分布的影响[J]. 城市环境与城市生态, 2012, 25(6): 1–4.

WANG Qizhou, FANG Zhendong, LONG Xiangyu, et al. Effects of SRT and DO on composition and distribution of microbial metabolites [J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2012, 25(6): 1–4.

[12] 魏琛, 陆天友, 盛贵尚, 等. 污泥龄对高质量浓度含氮废水亚硝化稳定性的影响研究[J]. 环境工程, 2010, 28(1): 29–32. DOI:10.13205/j. hjgc. 2010. 01. 011.

WEI Chen, LU Tianyou, SHENG Guishang, et al. Influence of sludge retention time on nitrosation stability of high concentration nitric wastewater [J]. Environmental Engineering, 2010, 28(1): 29–32. DOI:10.13205/j. hjgc. 2010. 01. 011.

[13] 孙月鹏, 王火青, 孙广垠, 等. 不同污泥龄条件下多级 AO 工艺强化生物脱氮性能研究[J]. 水处理技术, 2014, 40(10): 47–52.

SUN Yuepeng, WANG Huoqing, SUN Guangyin, et al. Characteristics of enhanced biological nitrogen removal in multiple anoxic and aerobic processes under different sludge retention times [J]. Technology of Water Treatment, 2014, 40(10): 47–52.

[14] 李凌云, 彭永臻, 杨庆, 等. SBR 工艺短程硝化快速启动条件的优化[J]. 中国环境科学, 2009, 29(3): 312–317.

LI Linyun, PENG Yongzhen, YANG Qing, et al. Factors optimization of rapid start-up for nitrification in SBR process [J]. China Environmental Science, 2009, 29(3): 312–317.

[15] NI Shouqing, YUE Qinyan, GAO Baoyu, et al. Substrate removal evaluation of granular anammox process in a pilot-scale upflow anaerobic sludge blanket reactor[J]. Ecological Engineering, 2012, 38: 30–36.

[16] CHEN Tingting, ZHENG Ping, SHEN Lidong, et al. Kinetic characteristics and microbial community of anammox-EGSB reactor [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 190: 28–35.

[17] HUANG Xiaowu, WEI Qiaoyan, URATA K, et al. Kinetic study on nitrogen removal performance in marine anammox bacterial culture [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2014, 117(3): 285–291.

[18] LOTTI T, KLEEREBEZEM R, ABBAS B, et al. Faster through training: The anammox case[J]. Water Research, 2015, 81: 261–268.

[19] 王少坡, 于静洁, 吕建波, 等. 活性污泥法中污泥龄应用问题探讨[J]. 给水排水, 2009, 35: 118–122. DOI:10.13789/j. cnki. wwe1964. 2009. s2. 024.

[20] 姜端峰. 污水的 SBR 处理工艺浅析[J]. 资源与环境, 2017, 43(2): 151.

JIANG Ruifeng. Analysis of SBR treatment process of wastewater [J]. Resources and Environment, 2017, 43(2): 151.

[21] 张自杰, 林荣忱, 金儒霖. 排水工程下册[M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 118.

[22] 张景丽, 曹占平, 张宏伟. 污泥龄对膜生物反应性能的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(10): 2788–2793. DOI:10.13227/j. hjkx. 2008. 10. 015.

ZHANG Jingli, CAO Zhanping, ZHANG Hongwei. Effects of sludge retention time (SRT) on the characteristics of membrane bioreactor (MBR) [J]. Environmental Science, 2008, 29(10): 2788–2793. DOI:10.13227/j. hjkx. 2008. 10. 015

[23] TANG Chongjian, ZHENG Ping, CHAI Liyuan, et al. Thermodynamic and kinetic investigation of anaerobic bioprocesses on ANAMMOX under high organic conditions [J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 230: 149–157.

(编辑 刘 彤)