

SBR 法交替缺氧好氧模式下短程硝化效率的优化

高春娣*,王惟肖,李 浩,焦二龙,彭永臻 (北京工业大学环境与能源工程学院,北京 100124)

摘要: 采用 SBR 法以实际生活污水为研究对象,通过交替缺氧好氧的运行模式实现了短程硝化的快速启动.在不同的缺/好氧时间比条件下考察了短程硝化的启动时间、污染物处理效果以及氨利用速率的变化.结果表明,在缺氧/好氧时间比为 1:1 和 2:1 条件下,分别用了 31,55d 使得两系统的亚硝酸盐积累率达到 90%,短程状态稳定.氨氮去除率达到 95%以上,COD 出水在 50mg/L 以下,总氮去除率提高 20%,污染物的去除效率有所提高.由全程到短程的转变期间,系统氨利用速率分别提高了 67.5%和 89.8%,同时提高了短程硝化的效率.期间,污泥沉降性较好,污泥容积指数稳定在 60~80mL/g.

关键词: 废水; 交替缺氧好氧; 短程硝化; 氨利用速率; 沉降

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2015)02-0403-07

Optimization of efficiency on partial nitrification under the mode of alternating anoxic/oxic in sequencing batch reactor. GAO Chun-di*, WANG Wei-xiao, LI Hao, JIAO Er-long, PENG Yong-zhen (College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China). *China Environmental Science*, 2015,35(2): 403~409

Abstract: Using Sequencing Batch Reactor (SBR) treating domestic wastewater, quick start of partial nitrification was carried out through the mode of alternating anoxic/oxic. Time of achieved partial nitrification, treatment efficiency and ammonia utilization rate were investigated in different ratio of anoxic/oxic time. The results showed that the ratio of anoxic/oxic time was 1:1 and 2:1, while two systems nitrite accumulation rate raised to 90% after 31 days and 55 days respectively, the state of partial nitrification was stable. Besides, ammonia removal efficiency was attained above 95% and the COD effluent concentration was less than 50mg/L. The total nitrogen removal was enhanced about 20%, and pollutants removal efficiency was increased. Form the complete nitrification to the partial nitrification, ammonia utilization rate increased 67.5% and 89.8% respectively, at the same time, efficiency of the partial nitrification was improved. Meanwhile, sludge had significantly better settling performance, sludge volume index was stable at 60~80mL/g.

Key words: waste water; alternating anoxic aerobic; partial nitrification; ammonia utilization rate; sedimentation

近年来,短程硝化反硝化已经成为水处理领域的研究重点和热点,对短程硝化的实现及相关内容进行了大量的研究^[1-2].与传统生物脱氮工艺相比,短程硝化反硝化工艺可节约 25%的供氧量,减少 40%的反硝化有机碳源(以甲醇计)^[3],反硝化速率高出了 63%,缺氧阶段产生的生物量下降了 30%^[4].通过温度、pH 值、游离氨、低溶解氧、实时控制、交替等方法可以抑制亚硝酸盐氧化菌(NOB)的生长,使氨氧化菌(AOB)在系统中占优势,进而实现亚硝化^[5].

交替工艺是指在一个周期内的反应阶段,缺氧好氧交替循环运行.它不仅在工业废水^[6]、豆制品

废水^[7]、垃圾渗滤液^[8]中有一定的应用,也可以用于生活污水^[9],并从实验室规模逐渐扩大到实际的污水处理厂,也可用于污水处理厂的升级改造^[10].不需要投加化学药剂,仅需要简单操作曝气的开关^[11]就可以实现交替工艺.Katsogiann 等^[12]采用先好氧 20min 后缺氧 1h 的运行模式,循环 3 次可以实现短程硝化.与传统模式相比,COD 和悬浮固体的去除率基本相同;在溶解

收稿日期: 2014-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478012);国家青年自然科学基金(51108005);北京市教育委员会科技计划项目(KM201410005009)

* 责任作者, 教授, gaochundi@bjut.edu.cn

氧为 2g/m^3 条件下,交替系统的脱氮效率为 71.10%,然而在传统系统上只有 24.37%^[13].从传统工艺转化为交替系统不需要添加任何投资费用^[13],可以在一定程度上减少曝气时间,节约能耗.目前,交替好氧缺氧工艺实现短程多以实时控制为主^[7,10,14],这对试验装置及设备的要求相对较高,投资较大,运行成本高,而以非实时控制为手段的研究较少^[11].同时,交替条件下主要研究的是温度、pH 值和溶解氧(DO)对实验效果的影响^[15],缺乏交替时间比对短程效率优化的研究^[11,16].

本研究在非实时控制的条件下,利用 AOB 与 NOB 生理特性的不同,采用序批式反应器(SBR),交替缺/好氧的运行模式处理实际生活污水,快速实现短程硝化,通过不同缺/好氧时间比来确定优化条件,包括实现短程的时间及其污染物处理效果,氨利用速率的改变,并考察期间污泥沉降性的变化情况.

1 试验材料与方法

1.1 试验装置及废水成分

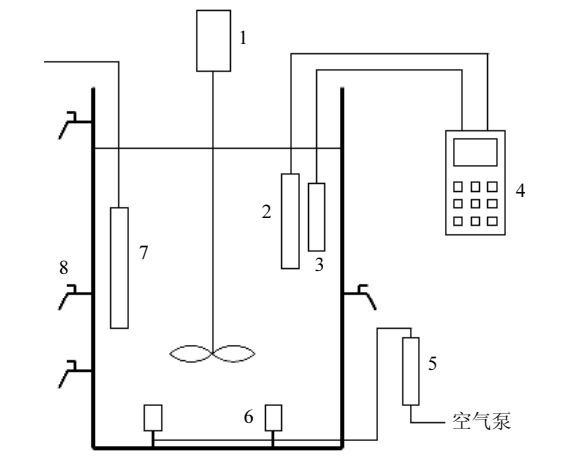


图 1 SBR 装置示意

Fig.1 Schematic diagram of SBR

1-搅拌器;2-溶解氧探头;3-pH 探头;4-溶解氧仪;5-转子流量计;6-空气头;7-加热棒;8-排水及取样口

本试验采用 2 个相同 SBR 反应器,均由有机玻璃制成,为圆柱体,有效体积为 8L,如图 1 所示.在反应器壁上有 3 个口,分别用于进水、排水和

排泥;以 3 个曝气砂头作为微孔曝气器,采用鼓风曝气的方式,并以转子流量计调节进气量.

试验所用的进水来自北京市某高校家属院,属于低 C/N 比城市生活污水,其进水 COD 浓度为 150~250mg/L,平均浓度为 188mg/L, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为 60~80mg/L,平均为 70mg/L, C/N 比约为 2.65, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度为 0~0.36mg/L, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度为 0~2.4mg/L, pH 值为 7.0~7.8.

1.2 污泥来源、驯化及试验运行

污泥取自实验室中试 SBR 工艺排放的剩余污泥,平均接种到两个 SBR 反应器中,按照传统 SBR 工艺缺氧 1h、好氧 4h 进行驯化,驯化后的污泥达到氨氮全部氧化,亚硝酸盐积累率几乎为 0,并且污泥具有良好的沉降性能,SV%为 20%~25%.

运行方式按照先缺氧后好氧的模式交替运行,交替循环 3 次后沉淀排水,其中 SBR1 缺/好氧时间比是 1:1,即缺氧搅拌 45min,好氧曝气 45min;SBR2 缺/好氧时间比是 2:1,即缺氧搅拌 60min,好氧曝气 30min.总反应时间为 270min,每天运行 2 个周期,温度为 25℃,排水比为 50%,污泥龄为 30 天,污泥浓度保持在 2500~3000mg/L.

1.3 分析方法

表 1 FISH 分析中采用的寡核苷酸探针

Table 1 16S rRNA-targeted oligonucleotide probes used in FISH analysis

探针	荧光染料	序列(5'-3')	FA(%)
EUB _{mix}	FITC	EUB338 GCTGCCTCCC	-
		GTAGGAGT	
		EUB338II GCAGCCACCC	
		GTAGGTGT	
EUB338III		GCTGCCACCC	
		GTAGGTGT	
Nso1225	CY3	CGCCATTGTATT	35
		ACGTGTGA	
NIT3	CY3	CCTGTGCTCCAT	40
		GCTCCG	

注:EUB_{mix}由EUB338, EUB338II, EUB338III按1:1:1比例混合而成;EUB_{mix}采用目标探针杂交所需的甲酰胺浓度

COD采用 COD 快速测定仪测定; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 采用纳氏试剂分光光度法; $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 采用 N-1-(萘

基)-乙二胺光度法; NO_3^- -N 采用麝香草酚分光光度法;SV%用 100mL 量筒 30min 沉降法.每个反应器内放置 Multi 340i 型(WTW 公司)便携式多功能测定仪,测定反应过程中的 pH 值、溶解氧质量浓度.分光光度计为 UV-1200 型紫外可见分光光度计(上海美谱达有限公司).荧光原位杂交(FISH)按照 Amann^[17]所述的操作方法进行,本实验中所用到的探针如表 1 所示,EUB_{mix} 探针针对几乎全部 Eubacteria, Nso1225 的目标菌为 Betaproteobacterial ammonia-oxidizing bacteria, NIT3 的目标菌为 Genus *Nitrobacteria*.

1.4 氨利用速率的测定

氨利用速率(AUR)通过测定混合液中起始的氨氮浓度,并间隔一定时间段测定混合液中氨氮的浓度,根据测定结果即可得到氨氮浓度随时间的变化曲线,利用曲线的斜率 r 和测定的混合液 MLVSS 值,由公式 $\text{AUR}=r/\text{MLVSS}$ 求得氨利用速率($\text{mgNH}_4^+-\text{N}/(\text{gVSS}\cdot\text{h})$).其中,采用人工配置混合液,以氯化铵为氮源,碳酸氢钠为碱度,并且保证氮源及碱度足量(设定氨氮浓度为 60mg/L , 0.5g/L NaHCO_3 每 $0.2\text{g/L NH}_4\text{Cl}$)^[18].将污泥清洗后与混合液混合,连续曝气 2h,温度为 25°C ,其间每隔 20min 取样测定氨氮浓度.为减小误差,进行 3 组平行试验.

2 结果与讨论

2.1 不同缺/好氧时间比条件下短程硝化的快速启动

经过 A/O 模式驯化,污泥处在全程状态,其亚硝酸盐积累率(NAR)几乎为 0,氨氮基本去除完全.后改为交替模式,SBR1、SBR2 分别采用缺/好氧时间比为 1:1 和 2:1 进行试验.2 个反应器中 NAR 变化如图 2 所示,其中前 6d 为全程驯化阶段结果,从第 7d 开始进行交替实验.

从图 2 可以看出,SBR1 反应器从改为交替模式后第 3d NAR 就达到了 50%,又经过 28d 后,积累率增长到 90%,并且长时间稳定运行,实现了短程硝化.而 SBR2 反应器,NAR 达到 50%用了 17d,增长到 90%用了 55d,比 SBR1 多用 24d.其原因认为如下,首先,因为交替运行模式中,短时间的曝

气只能提供一定 DO,在曝气初期系统中的 DO 浓度较低,限制了亚硝酸盐转化为硝酸盐的过程.其次,由于 SBR1 比 SBR2 每个循环的曝气时间长 15min,每个周期总曝气时间长 45min,使氨氧化过程更充分,亚硝酸盐浓度较高,积累较快,而 SBR2 曝气量以及曝气时间有限,亚硝酸盐积累较慢.因此,相较而言,在缺/好氧时间比为 1:1 条件下,能够快速启动短程硝化.

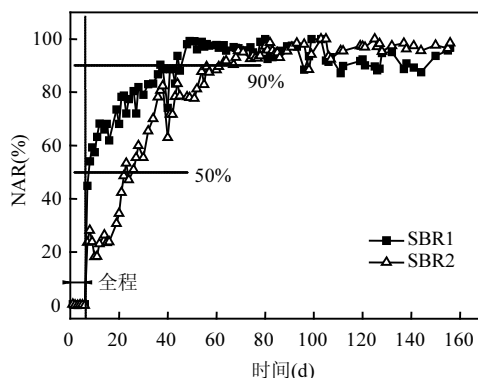


图 2 交替缺氧好氧模式下亚硝酸盐积累率变化
Fig.2 Variation of nitrite accumulation rate under the mode of alternating anoxic/oxic

在交替试验运行的后期,NAR 一直保持在较高水平,短程状态较为稳定.这是由于饱食饥饿特性使得 AOB 能够经受住溶解氧周期性的变化,逐渐成为优势菌群.这与 Chen 等^[19]的细胞损伤理论相吻合,微生物需要在好氧环境中产生更多的能量来修补在缺氧和底物不足等不利环境下受到的损伤,从而促使微生物快速增殖.在交替运行的缺氧阶段,降低快速生长的异养生物对氧的竞争力,使得溶解氧在硝化阶段能够更好的利用^[20].试验表明,交替缺/好氧模式可以提高短程硝化的启动效率.另外,在溶解氧浓度低时也有利于亚硝化细菌对基质的竞争从而有利于短程硝化的发生^[21].

2.2 交替模式对有机物去除效果的提高

如图 3 所示,在改变运行模式后,由于 SBR1 中曝气时间及 DO 均较为充足,氨氧化过程较为完全,氨氮去除率几乎没有受到影响,并保持较好的去除效果,总氮的去除率也从 50%提高到 70%

左右.而在 SBR2 中,由于曝气时间较短,从驯化时的 4h 缩短至 1.5h,活性污泥未能很快适应新的运行模式,导致氨氮去除效果不佳.然而,污泥经过 1 个多月的运行后,氨利用速率提高,氨氮基本去除完全,总氮去除率也逐步提高,并且能够稳定运

行.COD 去除率的变化并不明显,尽管进水 COD 随季节波动较大,但出水效果良好,SBR1 和 SBR2 的去除率分别为 79.0%和 79.31%,浓度基本在 50mg/L 以下,出水 COD 达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准^[22].

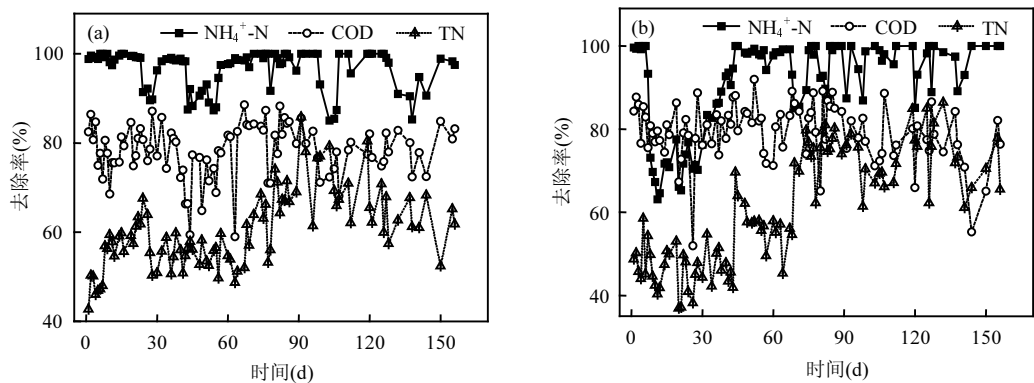


图 3 交替缺氧好氧模式下污染物去除率变化
Fig.3 Variation of pollutant removal efficiency under the mode of alternating anoxic/oxic
(a) SBR1;(b) SBR2

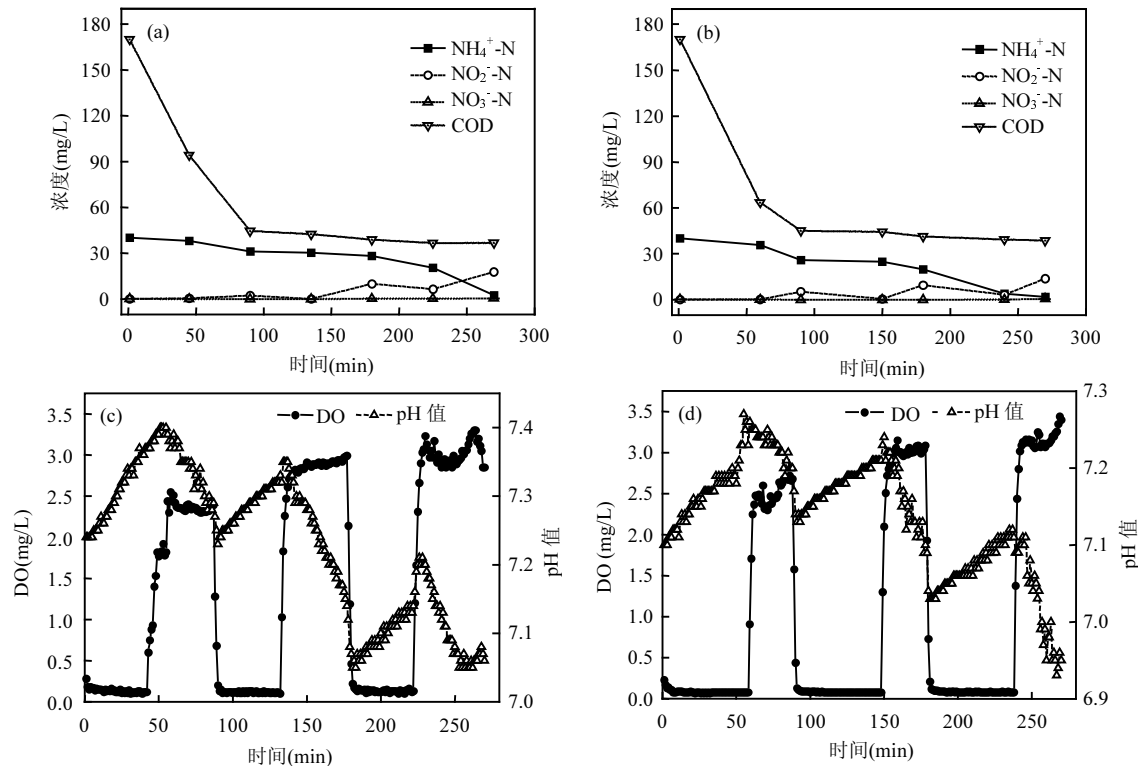


图 4 交替缺氧好氧模式下典型周期内各污染物浓度及 DO、pH 值变化
Fig.4 Variation of pollutant concentration and DO, pH in typical cycle under the mode of alternating anoxic/oxic
(a)SBR1 污染物;(b) SBR2 污染物;(c) SBR1 的 DO、pH 值变化;(d) SBR2 的 DO、pH 值变化

如图 4 所示,通过对全周期的考察可以发现,反硝化过程中 pH 值逐渐升高,随着硝化反应的进行,pH 值开始降低,DO 在 2.0mg/L 以上,在好氧阶段稳定在一个平台上,并有上升的趋势.COD 在前 90min 中就基本降解完成,氨氮在曝气阶段转变为亚硝酸盐,致使亚硝酸盐的浓度增加,而硝酸盐浓度几乎为 0.试验表明,在采用交替缺/好氧交替模式条件下,在交替前期,SBR1 的去除效率优于 SBR2,到后期污染物的去除效率均有所提高,并且短程硝化的状态保持良好.

2.3 交替模式下节能效率的提高

在交替模式下,随着亚硝酸盐的不断累积,在不同时期测定污泥的氨利用速率,其结果如图 5 所示.全程过程中的 SBR1 与 SBR2 的氨利用速率分别为 5.798,5.148mgNH₄⁺-N/(gVSS·h),经过一段时间的交替运行后,氨利用速率变快,SBR1 提高至 9.712mgNH₄⁺-N/(gVSS·h),提高了 67.5%;SBR2 提高至 9.772mgNH₄⁺-N/(gVSS·h),提高了 89.8%,最终 SBR2 略高于 SBR1.

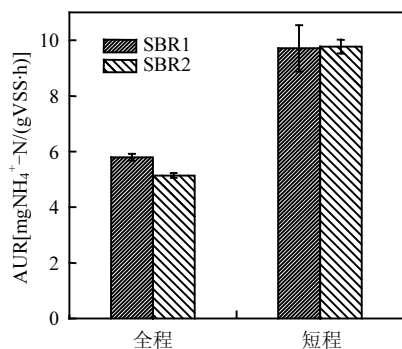


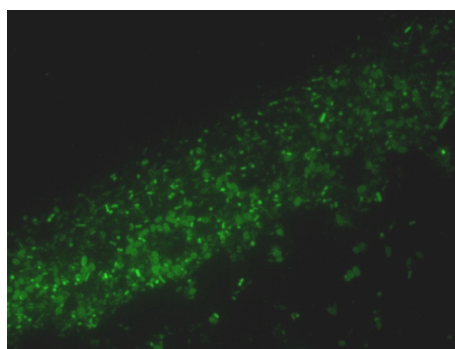
图 5 全程与短程下氨利用速率的变化

Fig.5 Variation of ammonia utilization rate under complete nitrification and partial nitrification

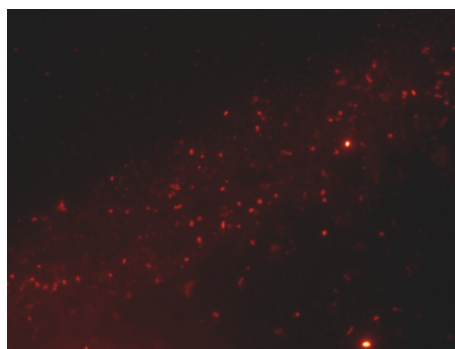
根据微生物的动力学研究,交替缺/好氧运行模式与传统模式相比,由于 AOB 与 NOB 种群结构的不同,其氧化、生长和衰减速率不同,导致 AUR 存在差异.SBR2 运行的一个周期中,曝气时间较短,在相同进水条件、氨氮出水同时为 0mg/L 条件下,AUR 比 SBR1 稍高.试验表明,交替运行条件下有利于筛选 AUR 较快的 AOB,使得氨氮在短时间内可以氧化完全.

从经济学角度考虑,由于曝气时间较短,所需要的曝气量也相对较少,如 SBR2,一个周期内总好氧时间仅有 1.5h 即可将氨氮氧化完全,从而可以节约能耗,提高节能效率,降低运行成本.并且,试验中 SBR2 的节能优化效果优于 SBR1.

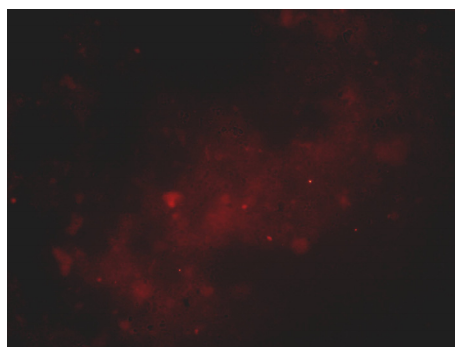
2.4 交替模式对污泥特性的影响



(a) EUB_{mix}



(b) Nso1225



(c) NIT3

图 6 短程状态下 Nso1225、NIT3 的荧光原位杂交照片

Fig.6 The image of Nso1225 and NIT3 under partial nitrification by FISH (1000times)

由全程硝化转为短程硝化的过程中,菌群结构发生改变,由 NOB 为优势菌种转变为 AOB,图 6 为

短程状态下 AOB 的 FISH 照片。从图 6(b)和(c)中可以看出,硝化细菌与氨氧化细菌的数量相比明显较少,说明 AOB 是优势菌种,实现了短程硝化。

在交替缺氧好氧运行模式下,污泥的沉降性能良好,出水较为清澈。污泥容积指数(SVI)有下降的趋势,并基本稳定在 60~80mL/g, SVI 变化如图 7 所示。在间歇曝气的运行条件下,能减少泡沫问题的产生,SVI 较低,但是不会消除^[23-24],亚硝酸盐积累、丝状菌是引起活性污泥系统 SVI 变化的主要原因^[25]。所以,在这种交替运行模式下,不易发生丝状菌污泥膨胀问题。

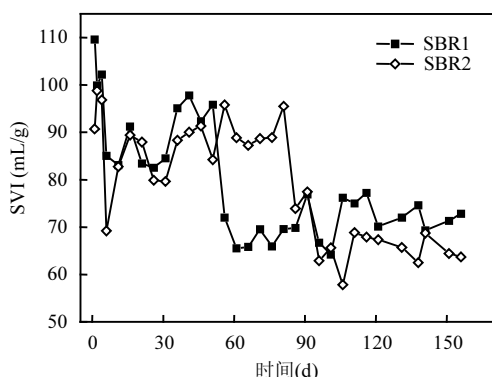


图 7 不同时间比下 SVI 随时间的变化情况

Fig.7 Variation of SVI at different time ratio

3 结论

3.1 采用先缺氧再好氧的交替运行模式有利于短程硝化的实现。本试验中,交替循环 3 次,在缺/好氧时间比为 1:1 和 2:1 条件下,分别用了 31, 55d 亚硝酸盐积累率达到了 90%,快速启动了短程硝化,提高了启动效率。

3.2 在交替缺/好氧模式下,具有较好的出水水质,氨氮去除率几乎在 95%以上,COD 出水低于 50mg/L,总氮去除率在 70%左右,提高了污染物去除效率,且 SVI 稳定在 60~80mL/g。

3.3 从全程到短程的过程中,时间比为 1:1 时可快速实现短程硝化,AUR 提高了 67.5%;而时间比为 2:1 时,短程硝化启动较慢,但 AUR 提高了 89.8%。不同缺/好氧时间比下氨利用速率均有所提高,而时间比为 2:1 时的氨利用速率稍高,均培

养出了较强的氨氧化菌,提高了节能效率。

参考文献:

- [1] Kornaros M, Dokianakis S N, Lyberatos G. Partial nitrification/denitrification can be attributed to the slow response of nitrite oxidizing bacteria to periodic anoxic disturbances [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010,44:7245-7253.
- [2] 王淑莹,黄惠珏,郭建华,等.DO 对 SBR 短程硝化系统的短期和长期影响 [J]. *北京工业大学学报*, 2010,36(8):1104-1110.
- [3] 高大文,彭永臻,潘 威.SBR 法短程硝化-反硝化生物脱氮工艺的研究 [J]. *环境污染治理技术与设备*, 2003,4(6):1-4.
- [4] Abeling U, Seyfried C F. Anaerobic-aerobic treatment of high-strength ammonia wastewater-nitrogen removal via nitrite [J]. *Water Science and Technology*, 1992,26(5/6):1007-1015.
- [5] Cruz Bournazou M N, Hooshier K, Arellano-Garcia H, Wozny G, Lyberatos G. Model based optimization of the intermittent aeration profile for SBRs under partial nitrification [J]. *Water Research*, 2013,15,47(10):3399-3410.
- [6] 曾 薇,彭永臻,王淑莹.SBR 工艺交替硝化反硝化运行方式的可行性研究 [J]. *环境科学学报*, 2004,24(4):576-580.
- [7] 高大文,彭永臻,王淑莹.交替好氧/缺氧短程硝化反硝化生物脱氮 I.方法实现与控制 [J]. *环境科学学报*, 2004,24(5):761-768.
- [8] Li H S, Zhou S Q, Huang G T, et al. Partial nitrification of landfill leachate with varying influent composition under intermittent aeration conditions [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2013,91(4):285-294.
- [9] Nardelli P, Gatti G, Eusebi A L, et al. Full-Scale Application of the Alternating Oxidic/Anoxic Process: An Overview [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2009,48:3526-3532.
- [10] Santinelli M, Eusebi A L, Cola E, et al. A Hybrid Denitrification Alternate Cycles Reactor To Enhance the Nitrogen Biological Removal in a Real Wastewater Treatment Plant [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2011,50(24):13947-13953.
- [11] Kornaros M, Marazioti C, Lyberatos G. A pilot scale study of a sequencing batch reactor treating municipal wastewater operated via the UP-PND process [J]. *Water Science and Technology*, 2008,58(2):435-438.
- [12] Katsogianni A N, Kornaros M, Lyberatos G. Enhanced nitrogen removal in SBRs bypassing nitrate generation accomplished by multiple aerobic/anoxic phase pairs [J]. *Water Science and Technology*, 2003,47(11):53-59.
- [13] Saziye B. Comparison between alternating aerobic-anoxic and conventional activated sludge systems [J]. *Water Research*, 2007May, 41(10):2220-2228.
- [14] Paolo B, Francesco F, Emanuela C, et al. Alternate cycles process for municipal WWTPs upgrading: ready for widespread application [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*,

- 2008,47(13):4387-4393.
- [15] 李亚峰,秦亚敏,谢新立,等.间歇曝气条件下短程硝化的实现及影响因素研究 [J]. 环境工程学报, 2011,5(7):1518-1521.
- [16] 苏东霞,李 冬,张肖静,等.曝停时间比对间歇曝气 SBR 短程硝化的影响 [J]. 中国环境科学, 2014,34(5):1152-1158.
- [17] Amann R, Ludwig W, Schleifer K H. Phylogenetic identification and in situ detection of individual microbial cells without cultivation [J]. Microbiological Reviews, 1995,59(1):143-169.
- [18] Dytczak M A, Londry K L, Oleszkiewicz J A. Activated sludge operational regime has significant impact on the type of nitrifying community and its nitrification rates [J]. Water Research, 2008,42(8/9):2320-2328.
- [19] Chen G H, Yip W K, Mo H K, et al. Effect of sludge fasting/feasting on growth of activated sludge cultures [J]. Water Research, 2001,35(4):1029-1037.
- [20] Dytczak M A, Londry K L, Siegrist H, et al. Ozonation reduces sludge production and improves denitrification [J]. Water Research, 2007,41:543-550.
- [21] 张 辉,白向玉,李 敬,等.间歇曝气短程硝化控制新途径的初步试验研究 [J]. 新疆环境保护, 2005,27(4):28-32.
- [22] GB18918—2002 城镇污水处理厂污染物排放标准 [S].
- [23] Paolo M, Donatella D. Testing the control of filamentous microorganisms responsible for foaming in a full-scale activated-sludge plant running with initial aerobic or anoxic contact zones [J]. Bioresource Technology, 1997,60:43-49.
- [24] 张功良,李 冬,张肖静,等.低温低氨氮 SBR 短程硝化稳定性试验研究 [J]. 中国环境科学, 2014,34(3):610-616.
- [25] 路聪聪,王淑莹,葛士建,等.苯酚对污水生物脱氮系统亚硝积累及污泥性能的影响 [J]. 化工学报, 2013,64(7):2641-2649.

作者简介: 高春娣(1973-),女,河北唐山人,教授,博士,主要从事污水处理理论与技术,污泥膨胀理论与控制方法.发表论文 20 余篇.

《中国环境科学》2009~2013 年发表的论文中 20 篇入选“领跑者 5000”提名论文

《中国环境科学》2009~2013 年发表的论文中有 20 篇入选“精品期刊顶尖论文平台——领跑者 5000”提名论文。“领跑者 5000(F5000)”平台由中国科学技术信息研究所于 2013 年建设,旨在集中展示中国精品科技期刊上发表的最高端的学术研究成果,将与国际和国内重要检索系统链接,扩大论文影响.该平台将与汤森路透公司合作,拟利用 WOK 国际检索系统平台,与 SCI 数据库在同一平台内实现文献链接和国际引文检索,在更大范围内向世界科技同行展示和推广中国最重要的科研成果.提名论文均为 2009~2013 年在学科领域内被引率排名居前的论文.此前《中国环境科学》2007~2012 年发表的论文中有 22 篇文章入选“领跑者 5000”提名论文.