

王希明, 刘莹, 彭永臻. 2010. 后曝气池 HRT 对改进型 A_2N 工艺脱氮除磷性能的影响 [J]. 环境科学学报, 30(9): 1772 - 1777

Wang X M, Liu Y, Peng Y Z. 2010. Effect of re-aerobic tank HRT on the nutrient removal performance of a modified A_2N process [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 30(9): 1772 - 1777

后曝气池 HRT 对改进型 A_2N 工艺脱氮除磷性能的影响

王希明, 刘莹, 彭永臻*

北京工业大学 环境与能源学院, 北京 100124

收稿日期: 2009-12-17

修回日期: 2010-03-04

录用日期: 2010-04-20

摘要: 对 A_2N 连续流工艺进行改进, 在后曝气池中填加生物膜填料, 以生活污水为处理对象, 考察了后曝气池水力停留时间 (HRT) 对后曝气池内同步硝化反硝化 (SND) 以及对改进后的 A_2N 工艺除磷脱氮性能的影响. 后曝气池 HRT 为 1.3 h 时, 总磷 (TP) 平均去除率为 90%, 总氮 (TN) 平均去除率为 75%, 但平均出水氨氮浓度较高 (为 $8.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 后曝气池内基本未发现 SND 现象. 后曝气池 HRT 为 2.3 h 时, TN 平均去除率达到 80%, TP 平均去除率高达 95%, 出水平均氨氮浓度较低 ($2.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 后曝气池内同步硝化反硝化去除的 TN 量为 $2.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 后曝气池 HRT 为 4h、6h 时, 工艺 TP 平均去除率逐渐下降至 60%, 由于可利用的 COD 值较低, 同步硝化反硝化去除的 TN 并未随 HRT 延长而有明显增长, TN 去除率也逐渐降至接近 60%. 试验证明在后曝气池内填加生物膜并合理调控 HRT, 可强化工艺的脱氮除磷效果.

关键词: 反硝化除磷; A_2N 工艺; 反硝化聚磷菌; 后曝气池; 水力停留时间

文章编号: 0253-2468(2010)09-1772-06

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

Effect of re-aerobic tank HRT on the nutrient removal performance of a modified A_2N process

WANG Ximing, LIU Ying, PENG Yongzhen*

School of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124

Received 17 December 2009;

received in revised form 4 March 2010;

accepted 20 April 2010

Abstract: Biofilm was added to the re-aerobic tank of an A_2N denitrifying phosphorous removal process in order to enhance nutrient removal performance. The effect of re-aerobic tank hydraulic retention time (HRT) on the nutrient removal performance and simultaneous nitrification and denitrification (SND) in the re-aerobic tank were investigated in this modified process treating domestic wastewater. High average total phosphorus (TP) removal efficiency of 90% and average total nitrogen (TN) removal efficiency of 75% could be achieved at a re-aerobic tank HRT of 1.3 h. However, average effluent ammonium concentration was high ($8.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) and SND was not observed. The average TP removal and TN removal efficiencies were 95% and 80%, respectively, at a re-aerobic tank HRT of 2.3 h. Correspondingly, the effluent ammonium concentration was below $2.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and the net amount of TN removed via SND in the re-aerobic tank was $2.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. After prolonging the re-aerobic tank HRT to 4 h and 6 h, the average TN and TP removal efficiencies decreased to 60%. The TN loss via SND did not increase distinctly with increasing of re-aerobic tank HRT, since less degradable COD was available in the re-aerobic tank. We demonstrated that the nutrient removal performance can be enhanced by adding biofilm and selecting a proper HRT in the re-aerobic tank.

Keywords: denitrifying and phosphorous removal; A_2N process; denitrifying and phosphorous removal bacteria; re-aerobic tank; hydraulic retention time (HRT)

基金项目: 北京高校人才强教计划高层次人才资助项目 (No. PHR20090502); 北京市教委科技创新平台项目 (No. PXM2008_014204_050843)

Supported by the Funding Project for Academic Human Resources Development in Institutions of Higher Learning Under the Jurisdiction of Beijing Municipality (No. PHR20090502) and the Project of Scientific Research Base and Scientific Innovation Platform of Beijing Municipal Education Commission (No. PXM2008_014204_050843)

作者简介: 王希明 (1985—) 男, E-mail: 60228388@163.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: pyz@bjut.edu.cn

Biography: WANG Ximing (1985—), male, E-mail: 60228388@163.com; * Corresponding author, E-mail: pyz@bjut.edu.cn

1 引言(Introduction)

A_2N 连续流工艺是基于反硝化除磷理论开发的新工艺,采用生物膜法和活性污泥法相结合的双污泥系统. 在厌氧段,反硝化聚磷菌(DPAOs)水解胞内的聚磷(poly-P),以 PO_4^{3-} 的形式释放入泥水混合液中,DPAOs 利用水解聚磷产生的能量吸收污水中的挥发性脂肪酸合成聚- β -羟基烷酸(PHA)储存在胞内. 泥水混合液进入中沉池进行快速分离,上清液进入生物膜硝化池进行硝化作用,沉淀污泥进入缺氧段. 在缺氧段,DPAOs 利用胞内储存的 PHA 为电子供体,以生物膜硝化池出水中的 NO_3^- 为电子受体,完成反硝化脱氮和过量吸磷反应. 泥水混合液之后进入后曝气池,以氧气为电子受体进行好氧吸磷,将残留的 PO_4^{3-} 从污水中去除,同时活性污泥中的硝化菌将超越污泥中携带进入缺氧池中的部分氨氮氧化为硝酸盐(Kuba *et al.*, 1996; Torrico *et al.*, 2008; 令云芳等,2006). 泥水混合液最后进入终沉池进行泥水分离,上清液排放,沉淀污泥一部分回流至厌氧区,剩余污泥被排放.

中沉池沉淀污泥中携带进入缺氧池的氨氮,一部分在后曝气池被氧化为硝酸盐,但在后续的处理工艺中这部分 TN 并未被去除,这是造成该工艺 TN 去除效果不佳的重要原因.

后曝气池不仅能去除污水中残余的 PO_4^{3-} ,而且能对反硝化吸磷过程中产生的氮气小气泡进行吹托,改善污泥的沉淀性能(王春英等,2008). 国外有学者利用 SBBR,控制池内溶解氧(DO),在 SBBR 发生了同步的硝化、反硝化和除磷反应,并且取得了很好的实验效果(Tsuneda *et al.*, 2006). 在后曝气池中填加生物膜填料,控制后曝气池溶解氧(DO)浓度和 HRT,后曝气池也能具备发生同步的硝化、反硝化和除磷反应的条件,这为改善该工艺的 TN 出水水质提供了一个新的思路.

目前对 A_2N 连续流工艺的研究,多是对 C/N、N/P 等工艺运行条件进行优化,直接针对改善工艺

TN 去除效果的研究较少. 笔者通过对 A_2N 连续流工艺进行改进,在后曝气池中加入生物膜填料,控制后曝气池 DO 和调节 HRT,在后曝气池中创造产生同步的硝化、反硝化和除磷反应所需的条件,以实际生活污水为处理对象,研究了后曝气池 HRT 对改进后的 A_2N 连续流工艺脱氮除磷性能以及后曝气池内同步硝化反硝化效果的影响.

2 试验材料和方法(Materials and methods)

2.1 试验装置与试验用水

试验装置由有机玻璃制成,主要包括厌氧池、好氧硝化池、缺氧池和后曝气池 4 个反应器以及两个竖流式沉淀池(图 1). 厌氧池、好氧硝化池、缺氧池的有效容积分别为 6.5L、14L、10L,后曝气池最大容积 14L,中沉池和终沉池容积分别为 7.2L 和 4.9L.

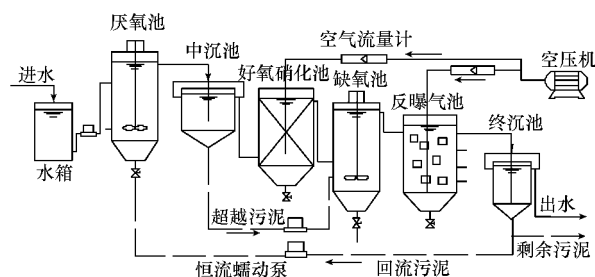


图 1 改进型 A_2N 连续流工艺的流程图

Fig. 1 Flow chart of the modified A_2N process

厌氧池和缺氧池安装有搅拌器. 好氧硝化池和后曝气池采用粘砂块微孔曝气头曝气. 好氧硝化池填加碳纤维作为填料,利用碳纤维上挂有的生物膜进行硝化作用. 工艺中水流按重力流运转,进水流量、超越污泥流量和回流污泥流量分别用 3 台恒流蠕动泵控制. 利用空气流量计控制曝气量维持好氧硝化池的溶解氧浓度为 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 后曝气池中填加的是海绵立方体填料,DO 控制为 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

试验采用北京工业大学生活区化粪池污水,水质见表 1.

表 1 进水水质
Table 1 Influent quality

统计值	COD ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	NH_4^+ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	NO_3^- ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TN ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	pH
范围(均值)	181.6 ~ 342.8 (259.6)	53.3 ~ 76.5 (64.6)	0.5 ~ 1.5 (0.9)	54.6 ~ 77.4 (65.6)	5.3 ~ 8.4 (6.6)	6.8 ~ 7.4 (7.2)

2.2 试验方案

试验采用具有良好的反硝化吸磷性能的 A_2N 连续流工艺的污泥. 稀释原水调节进水 TN 为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 投加适量丙酸调节进水 COD 至 $280 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 投加适量 KH_2PO_4 调节进水 TP 为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 进水流量为 $42 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$, 超越污泥和回流污泥的流量均为进水流量的 30%. 通过改变后曝气池出水口位置的方法调节后曝气池 HRT, 研究不同后曝气池 HRT 条件下, 后曝气池中同步硝化反硝化去除的 TN 量的变化以及改进后的 A_2N 工艺的脱氮除磷性能的变化. 试验方案见表 2.

表 2 试验方案

Table 2 Experimental scheme

试验阶段	后曝气池有效容积/L	后曝气池 HRT/h	运行周期/d
第 1 阶段	2.3	1.3	20
第 2 阶段	4.0	2.3	20
第 3 阶段	7.0	4	20
第 4 阶段	10.5	6	20

2.3 分析项目与方法

NH_4^+ 采用纳氏试剂分光光度法; NO_3^- 采用麝香草酚分光光度法; NO_2^- 采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法; TN 采用过硫酸钾氧化消解-紫外分光光度法; 溶解性 TP、溶解性磷酸盐采用钼锑抗分光光度法; DO、温度采用 WTW Level 2 型 DO 测定仪测定.

3 试验结果 (Experimental results)

3.1 后曝气池 HRT 对改进型 A_2N 工艺除磷性能的影响

3.1.1 后曝气池 HRT 对 TP 去除率的影响 由图 2 可见, 进水 TP 浓度通过调节可以稳定在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 出水 TP 浓度则随后曝气池 HRT 变化而变动较大. 第 1 阶段, 后曝气池 HRT 为 1.3h, 此时的平均 TP 出水浓度约为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均去除率达到 90%. 第 2 阶段, 后曝气池 HRT 为 2.3h, 此时平均 TP 出水浓度可以达到 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 平均去除率升至 95% 左右. 第 3 阶段, 后曝气池 HRT 为 4h, 平均 TP 出水浓度逐渐升高至 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均去除率逐渐降至 70% 左右, 在此后曝气池 HRT 条件下, 工艺的除磷性能已经开始恶化. 第 4 阶段, 后曝气池 HRT 为 6h, TP 平均出水浓度升至 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上, 并且有进一步升高的趋势, 平均去除率逐渐下降至 60% 左右, 工艺的除磷性能进一步恶化.

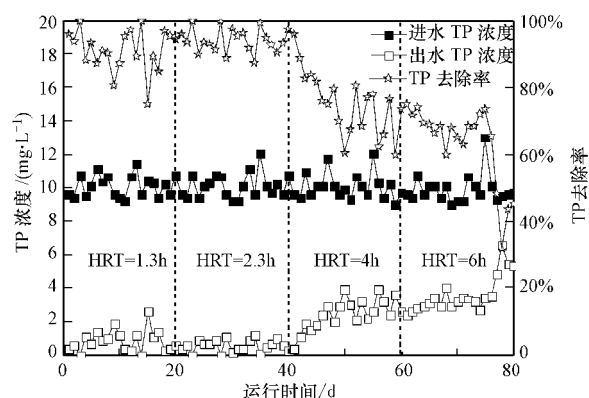


图 2 后曝气池 HRT 对 TP 去除率的影响

Fig. 2 Effect of different re-aerobic tank HRT on TP removal efficiency

随着后曝气池 HRT 的延长, 改进后的 A_2N 工艺的 TP 去除率先上升后逐渐下降. 在后曝气池 HRT 为 2.3h 时, TP 平均去除率最高, 除磷效果最好. 后曝气池 HRT 高于 4h 以后, TP 去除率逐渐下降, 除磷性能逐渐恶化.

3.1.2 后曝气池 HRT 对改进型 A_2N 工艺厌氧释磷量、缺氧吸磷量、好氧吸磷量的影响 由图 3 可见, 第 1 阶段, 平均厌氧释磷量约为 $25.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 缺氧吸磷量约为 $30.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 好氧吸磷量约为 $3.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 此时 TP 平均去除率为 90% 左右 (图 2). 第 2 阶段, 平均厌氧释磷量、平均缺氧吸磷量与第 1 阶段相近, 好氧吸磷量约为 $4.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 平均 TP 去除率达到 95% 以上 (图 2). 第 3 阶段, 厌氧释磷量逐渐下降, 平均厌氧释磷量为 15.3

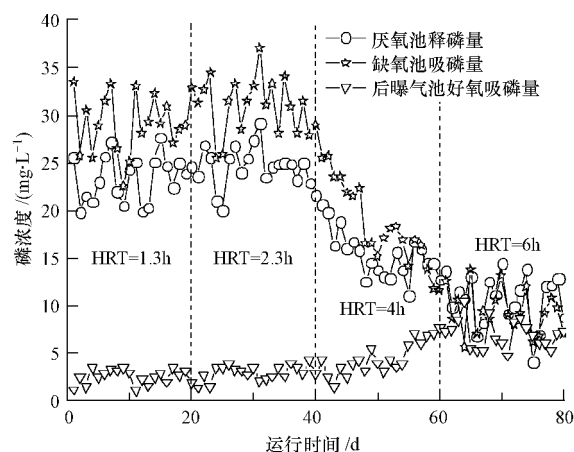


图 3 后曝气池 HRT 对厌氧释磷量、缺氧吸磷量 and 好氧吸磷量的影响

Fig. 3 Effect of different re-aerobic tank HRT on anaerobic P release, anaerobic phosphorus uptake and aerobic P uptake

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 缺氧吸磷量也随厌氧释磷量的下降而下降, 平均缺氧吸磷量为 $17.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 好氧吸磷量上升至 $4.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 此时 TP 去除率已经开始下降, 平均 TP 去除率为 70% 左右(图 2)。第 4 阶段, 厌氧释磷量进一步下降至 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 缺氧吸磷量也有明显的下降, 而好氧吸磷量上升至 $6.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 好氧除磷量占总除磷量比例升高至 40% 左右。此时工艺的 TP 去除率已经降至 60% 左右, 并且有进一步恶化的趋势(图 2)。

在第 1 阶段和第 2 阶段, 后曝气池 HRT 较短, 工艺的除磷性能较好, TP 平均去除率能够维持 90% 以上。第 3 阶段、第 4 阶段, 随着后曝气池 HRT 的延长, 长好氧曝气时间对反硝化聚磷菌的生长繁殖产生了影响, 厌氧释磷量、缺氧吸磷量在降低, 工艺的除磷性能逐渐下降。

维持后曝气池 $\text{HRT} < 2.3 \text{ h}$, 可以获得较高的厌氧释磷量、缺氧吸磷量以及较好的 TP 去除率。后曝气池 HRT 高于 4h 之后, 工艺的除磷性能会逐渐恶化。

3.2 后曝气池 HRT 对改进型 A_2N 工艺的脱氮性能的影响

3.2.1 后曝气池 HRT 对工艺 TN 去除率的影响

由图 4 可见, 第 1 阶段, 平均出水 TN 浓度为 $13.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 去除率为 75% 左右, 出水平均氨氮浓度为 $8.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。第 2 阶段, 出水 TN 平均浓度降低到 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, TN 的去除率也升至 80% 以上, 出水平均氨氮浓度为 $2.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 TN 以硝酸盐为主。第 3 阶段, 出水 TN 浓度有所升高, 平均值为 $16.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均 TN 去除率也下降至 70% 左右, TN 去除性能开始恶化, 出水 TN 全部为硝酸盐。第 4

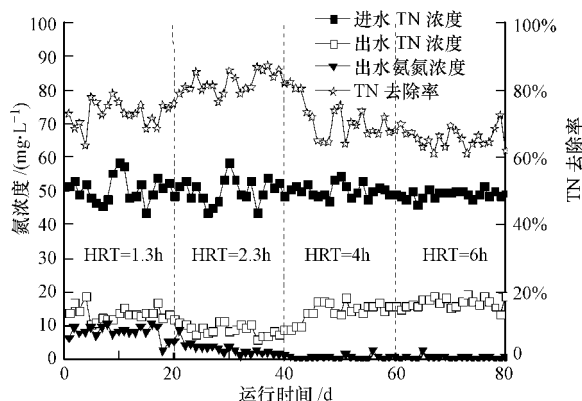


图 4 后曝气池 HRT 对 TN 去除率、出水氨氮浓度的影响

Fig. 4 Effect of different re-aerobic tank HRT on TN removal efficiency and effluent ammonia concentration

阶段, 出水平均 TN 升至 $18.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均 TN 去除率较第 3 阶段进一步下降, 工艺的脱氮性能恶化。

第 1 阶段 TN 去除率较高, 但出水中氨氮浓度过高。第 2 阶段, TN 去除率有所升高, 出水平均氨氮浓度降低, 同时也有很好的除磷效果(图 2)。第 3 阶段和第 4 阶段 TN 去除率在下降, TP 去除率也在下降(图 2)。过长的后曝气池 HRT 引起了工艺的脱氮除磷性能恶化。后曝气池 HRT 延长, 厌氧释磷量的减少, 厌氧释磷量的下降影响到了 PHA 的合成, 造成缺氧池中反硝化吸磷过程中电子受体减少, 使反硝化进行得不充分, 导致了出水中的 TN 浓度升高。将后曝气池 HRT 控制在 2.3h 能获得较好的 TN 去除效果以及较低的出水氨氮浓度。

3.2.2 后曝气池 HRT 对同步硝化反硝化去除的 TN 量的影响 由图 5 可见, 第 1 阶段, 后曝气池 HRT 为 1.3h 时, 后曝气池中 TN 损失很少, TN 损失的平均浓度较低 ($0.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 未见明显的同步硝化反硝化现象, 后曝气池内硝化作用进行得不充分, 此时出水 TN 以氨氮为主(图 4)。第 2 阶段, 后曝气池内同步硝化反硝化去除的 TN 平均浓度上升至 $2.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 后曝气池内硝化作用进行得较为充分, 出水 TN 中以硝酸盐为主。第 3 阶段, 后曝气池内同步硝化反硝化去除的 TN 量上升量较少, 平均值为 $2.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 TN 基本为硝酸盐。第 4 阶段, 后曝气池内去除的 TN 平均量为 $3.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 较第 3 阶段上升不明显, 此时出水 TN 也以硝酸盐为主。

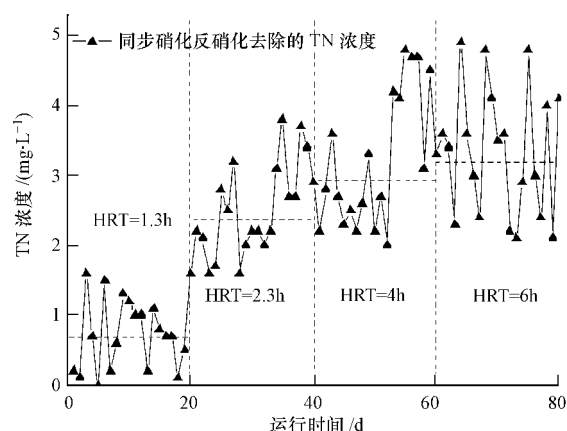


图 5 后曝气池 HRT 对后曝气池内去除的 TN 量的影响

Fig. 5 Effect of different re-aerobic tank HRT on TN removal in the re-aerobic tank

通过控制后曝气池内 HRT、DO 等条件, 后曝气池内产生了 TN 损失, 同步硝化反硝化去除的 TN 随

后曝气池 HRT 延长而增加,但是由于后曝气池中可利用的 COD 浓度较低,后曝气池内同步硝化反硝化去除的 TN 量在 HRT 高于 4h 之后,增长不明显.维持后曝气池 HRT 为 2.3h,即可获得较好的同步硝化反硝化 TN 去除效果.

4 讨论(Discussion)

后曝气池 HRT 对改进型 A_2N 连续流工艺脱氮除磷性能有明显的影响.首先,后曝气池 HRT 为 1.3h 时,虽可以获得较好的除磷效果,但出水平均氨氮浓度较高(为 $8.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),并且 TN 平均出水浓度较高.后曝气池 HRT 为 4h、6h 时,相比后曝气池 HRT 为 1.3h 条件下,厌氧释磷量的下降明显,厌氧释磷量分别降至 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,虽然好氧吸磷量上升,TP 去除率降至 70% 左右,但厌氧释磷量明显下降、除磷效果已经恶化.厌氧释磷量下降影响到了污泥在厌氧池中吸收有机物合成的 PHA,PHA 是反硝化吸磷过程的电子供体,厌氧释磷量的下降会影响缺氧池中的反硝化吸磷过程,因而在延长后曝气池 HRT 至 4h、6h 之后,TN 平均去除率降至 65% 左右.后曝气池 HRT 为 2.3h 时,TP 平均去除率达到 95%,TN 平均去除率达到 80%,出水平均 TN $\leq 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均出水氨氮浓度较低($2.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),此时工艺可以维持很好的脱氮除磷效果.国内有学者通过 SBR 实验得出 DO 对反硝化聚磷菌的存活没有决定性影响的观点(方茜等,2008),与本实验结果不一致,分析认为,可能是其 SBR 实验运行周期数较少或者曝气时间较短导致 DO 对 DPAOs 的产生的影响不明显所致.

后曝气池 HRT 为 1.3h 时,后曝气池内 TN 损失量较少,硝化作用进行地也不充分,导致出水中氨氮浓度较高.后曝气池 HRT 增加到 2.3h 时,后曝气池内的硝化反应进行得相对充分,同步硝化反硝化去除的 TN 量为 $2.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.后曝气池 HRT 延长至 4h、6h 时,由于在后曝气池泥水混合液中可利用的 COD 不足,后曝气池内同步硝化反硝化去除的 TN 的量维持在 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,并未随着后曝气池 HRT 的延长有较大幅度的增加.

维持改进型 A_2N 连续流工艺后曝气池 HRT 为 2.3h,可以获得很好的 TN、TP 去除效果、以及较好的后曝气池同步硝化反硝化效果.进一步提高 A_2N 工艺的 TN 去除效果以及维持该工艺稳定运行的控制条件是今后深入研究的方向.

5 结论(Conclusions)

1) 后曝气池 HRT 对改进型 A_2N 连续流工艺的除磷性能影响较大.后曝气池 HRT 为 1.3h、2.3h 时,厌氧释磷量可以维持在 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,TP 平均去除率可以维持在 90% 以上.后曝气池 HRT 逐渐延长 6h 后,厌氧释磷量逐渐下降到 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,TP 平均去除率也降至 60% 左右.

2) 后曝气池 HRT 对改进型 A_2N 连续流工艺脱氮性能的影响:后曝气池 HRT 为 1.3h 时,TN 平均去除率为 75% 左右,但是氨氮出水浓度较高($8.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$).后曝气池 HRT 为 4h、6h 时,TN 去除率降至 60% 左右,脱氮性能恶化.后曝气池 HRT 维持在 2.3h 时,TN 平均去除率为 80% 左右,平均出水氨氮浓度较低($2.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),脱氮效果较好.

3) 后曝气池 HRT 对同步硝化反硝化去除的 TN 量的影响:后曝气池 HRT 为 1.3h、2.3h、4h、6h 时,后曝气池内同步硝化反硝化去除的 TN 量分别为 $0.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $2.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $2.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $3.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.后曝气池中缺乏可利用的 COD 是限制后曝气池中同步硝化反硝化去除 TN 量增长的主要因素.维持后曝气池 HRT 为 2.3h 可以获得较好的 SND 效果.

责任作者简介:彭永臻(1949—),男,工学博士、教授,国家教学名师,全国模范教师,主要从事污水处理与过程控制、脱氮除磷等研究.

参考文献(References):

- 方茜,张朝升,张可方,等.2008.溶解氧对反硝化聚磷菌的影响研究[J].中国给水排水,24(1):35—39
- Fang Q, Zhang C S, Zhang K F, et al. 2008. Effect of dissolved oxygen on denitrifying phosphorus removal bacteria [J]. China Water and Waste Water, 24(1):35—39 (in Chinese)
- Kuba T, VanLoosdrecht M C M, Heijnen J J, et al. 1996. Phosphorus and nitrogen removal with minimal cod requirement by integration of denitrifying dephosphatation and nitrification in a two-sludge system [J]. Water Research, 30(7):1702—1710
- 令云芳,王淑莹,王伟,等.2006.厌氧段 HRT 对 A_2N 工艺反硝化除磷脱氮效果的影响[J].水处理技术,37(2):7—11
- Ling Y F, Wang S Y, Wang W, et al. 2006. Effect of anaerobic HRT on A_2N denitrifying phosphorus removal process [J]. Technology of Water Treatment, 37(2):7—11 (in Chinese)
- Tsuneda S, Ohno T, Soejima K, et al. 2006. Simultaneous nitrogen and

- phosphorus removal using denitrifying phosphate-accumulating organisms in a sequencing batch reactor [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 27(3): 191—196
- Torrico V, Kuba T. 2008. Optimization of internal bypass ratio for complete ammonium and phosphate removal in a dephanox-type two-sludge denitrification system [J]. *Journal of Environmental Engineering-ASCE*, 134(7): 536—542
- 王春英. 2008. 反硝化除磷工艺中二次曝气作用分析 [J]. *江苏环境科技*, 21(4): 72—74
- Wang C Y. 2008. Analysis of secondary aeration's effect on denitrifying dephosphatation process [J]. *Jiangsu Environmental Science and Technology*, 21(4): 72—74 (in Chinese)
- 张立秋, 韦朝海, 张可方, 等. 2008. 常温下 SBBR 反应器中短程同步硝化反硝化的实现 [J]. *工业用水与废水*, 39(4): 1—5
- Zhang L Q, Wei C H, Zhang K Y, *et al.* 2008. Realization of shortcut simultaneous nitrification denitrification in SBBR at normal temperature [J]. *Industrial Water & Wastewater*, 39(4): 1—5 (in Chinese)