

单污泥 SBR 工艺的反硝化除磷特性

马 斌¹, 彭永臻^{1,2}, 祝贵兵³, 彭赵旭¹

(1 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2 北京工业大学 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100022; 3 中国科学院 生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 利用单污泥 SBR 工艺处理模拟生活污水, 考察了该工艺对有机物、总氮、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除特性, 以及 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累对工艺性能的影响。结果表明: 单污泥 SBR 工艺可以稳定高效地去除水中的有机污染物和总氮, 对其平均去除率分别为 81.49% 和 93.07%; 但除磷效果不稳定, 对此可采用实时控制策略加以解决。在单污泥 SBR 工艺的前好氧段发生了 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积累, 平均积累率为 21.25%, 此积累现象未对反硝化产生抑制作用, 并可使工艺进步节省碳源和曝气量。

关键词: 单污泥 SBR 工艺; 反硝化除磷; 实时控制; $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2009)09-0025-04

Characteristics of Denitrifying Phosphorus Removal in Single-sludge SBR Process

MA Bin¹, PENG Yong-zhen^{1,2}, ZHU Guibing³, PENG Zhao-xu¹

(1 School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090 China; 2 Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 3 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract The single-sludge SBR process was used to treat synthetic domestic wastewater and the removal characteristics of organic pollutants, total nitrogen and $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ and the effect of nitrite accumulation on the performance of the process were investigated. The results show that organic pollutants and total nitrogen can be effectively removed from wastewater and their removal rates are 81.49% and 93.07% respectively. However, phosphorus removal is unstable, and it is improved through the use of real-time control strategy. The nitrite accumulation occurs in the first aerobic phase of the single-sludge SBR system, and the average nitrite accumulation rate is 21.25%. Nitrite accumulation does not inhibit denitrification, and it allows the SBR process to save carbon source and aeration rate.

Key words single-sludge SBR process; denitrifying phosphorus removal; real-time control; nitrite accumulation

在传统生物脱氮除磷系统中, 脱氮和除磷存在 碳源竞争、对污泥龄要求不同等矛盾, 因此很难达到

基金项目: 国家自然科学基金—海外青年学者合作研究基金资助项目 (50628808); 城市水资源与水环境国家重点实验室开放研究项目 (QAK200802); 国家“十一五”科技支撑计划重点项目 (2006BAC19B03)

稳定高效的脱氮除磷效果^[1]。近年来反硝化聚磷菌(DPAOs)的发现在一定程度上缓解了这些矛盾: DPAOs在反硝化的同时进行除磷,实现了“一碳两用”,解决了脱氮和除磷对碳源的竞争问题; DPAOs利用硝酸盐替代氧作为电子受体,节省了曝气量; DPAOs增殖速率低,剩余污泥排放量少,降低了后续污泥处理的费用^[2,3]。

反硝化除磷工艺分为单污泥和双污泥两种类型。双污泥工艺将硝化菌与 DPAOs分离在两个不同的系统中,这使得工艺运行复杂,处理费用增加。单污泥工艺使硝化菌与 DPAOs共存于一个系统中,运行操作简单方便,但目前对单污泥反硝化除磷的研究较少。笔者采用单污泥 SBR 反硝化除磷工艺处理模拟生活污水,考察了其对 COD、TN、 $PO_4^{3-}-P$ 的去除特性,以及 $NO_2^- - N$ 积累对工艺除磷的影响,旨在为该工艺的推广应用奠定理论基础。

1 材料与方

1.1 试验装置

试验所用 SBR 反应器由有机玻璃制成,上部为圆柱形,下部为圆锥体,高为 500 mm,直径为 200 mm,有效容积为 12 L。沿反应器壁垂直方向隔 10 cm 设置一个取样口(兼有排水作用),反应器底部设有排泥管。用粘砂块作为微孔曝气头,采用鼓风曝气方式,应用转子流量计对曝气量进行计量。反应器设有搅拌桨,其作用为:当反应器处于非曝气状态或曝气量较小时进行搅拌,以保证泥水混合均匀,防止污泥沉降造成泥水分离。通过在线传感仪实时监测 DO、pH 值和温度的变化。在反应器内壁上设置恒温加热棒,控制混合液的温度为 $(24 \pm 0.3) ^\circ C$ 。

1.2 试验水质

采用醋酸钠、 NH_4Cl 、 KH_2PO_4 、 $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 、 $NaHCO_3$ 、 $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 与自来水配制模拟生活污水,同时加入微量元素液^[4]。配水水质如表 1 所示。

表 1 模拟生活污水的水质

Tab 1 Quality of synthetic wastewater $mg \cdot L^{-1}$

项目	COD	$NH_4^+ - N$	$NO_3^- - N$	TN	$PO_4^{3-} - P$	碱度
数值	270.76~309.83	18.38~27.76	< 1	18.46~27.94	10.27~11.83	200~450

1.3 分析项目及方法

COD 重铬酸钾法; $NH_4^+ - N$: 纳氏试剂分光光度法; $NO_3^- - N$: 麝香草酚分光光度法; $NO_2^- - N$: N-(1-萘基)-乙二胺光度法; TN: 过硫酸钾氧化-紫

外分光光度法; 溶解性磷酸盐: 氯化亚锡还原光度法; MLSS: 滤纸称量法; pH 值: WTW ino lab level 2 在线仪。

1.4 试验方法

接种污泥取自按 A/O 方式运行的 SBR 除磷系统,静态试验显示其中已经存在反硝化聚磷菌,且 DPAOs 占总聚磷菌(PAOs)的比例为 41.78%。SBR 的运行方式: 第一阶段(前 10 个周期)以 AOA 方式运行,即厌氧(2 h)、好氧(1.5 h)、缺氧(3 h); 第二阶段(后 20 个周期),考虑缺氧段吸磷不充分的可能,增加了短时好氧段以 AOA 方式运行,即厌氧(2 h)、好氧(1.5 h)、缺氧(2.5 h)、好氧(0.5 h)。运行期间 SBR 反应器内的 MLSS 为 3100~3630 mg/L。

2 结果与讨论

2.1 对有机物的去除特性

单污泥 SBR 工艺对 COD 的去除效果见图 1。

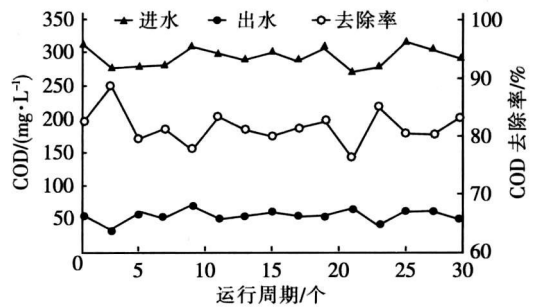


图 1 单污泥 SBR 工艺对 COD 的去除效果

Fig 1 COD removal in single-sludge SBR process

原水 COD 为 270.76~309.83 mg/L(平均为 293.31 mg/L),出水 COD 为 31.56~69.15 mg/L(平均为 54.33 mg/L),已经达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)的一级 B 标准。此时系统对 COD 的去除率为 76.12%~88.60%,平均为 81.49%,可见该系统能高效稳定地去除污水中的有机污染物。

典型周期内 COD 浓度随时间的变化如图 2 所示,可知 COD 的去除主要发生在厌氧段。模拟生活污水的 COD 为 303.78 mg/L,加入 SBR 反应器经稀释和污泥吸附后, COD 降为 177.48 mg/L; 在厌氧段,聚磷菌吸收有机物合成聚 β 羟基链烷酸(简称 PHA),出水 COD 降为 52.68 mg/L^[5]; 而在前好氧段、缺氧段以及后好氧段中, COD 基本无变化,后好氧段出水 COD 为 50.18 mg/L。这说明, COD 主要

在厌氧段被去除, 用于合成内碳源 (PHA), 为缺氧吸磷做准备。

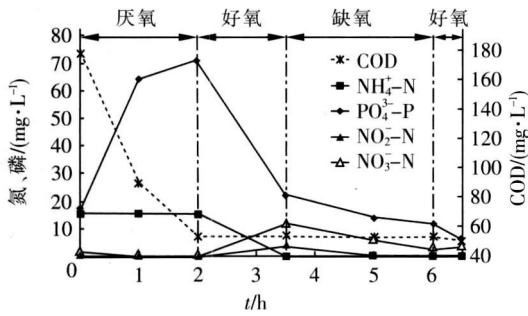


图 2 典型周期内污染物浓度的变化

Fig 2 Variation of pollutants in a typical cycle

有机物在厌氧段得到有效去除, 对系统正常运行有重要意义: ①只有在厌氧段大量地利用有机物来合成 PHA, 才能确保缺氧段有足够的贮存物作为电子供体实现反硝化吸磷^[5]; ②厌氧段对 COD 的去除率越大, 对后续好氧段的硝化作用和缺氧段的反硝化作用就越有利; ③由于大部分 COD 直接以厌氧产物或经过缺氧呼吸的形式被去除, 减少了后续好氧段氧化的有机物量, 故可较传统活性污泥法节省供氧量。

2.2 对氮、磷的去除特性

试验期间进水 TN 为 18.46~27.94 mg/L (平均为 23.15 mg/L), 出水总氮为 0.08~4.04 mg/L (平均为 1.61 mg/L), 系统对 TN 的去除率为 81.32%~99.59% (平均为 93.07%)。

模拟生活污水的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 26.36 mg/L, 加入反应器经稀释和污泥吸附后, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度变为 15.62 mg/L。厌氧段末的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 14.98 mg/L, 仅降低了 0.64 mg/L, 这是因为厌氧段主要是微生物的同化作用利用氨氮。在前好氧段氨氮被转化为硝态氮和亚硝态氮, 硝化率达 100%。但此时氮仅是形式上的变化, 总氮值并没有改变。在缺氧段, DPAOs 以 PHA 为碳源进行反硝化吸磷, 将硝态氮还原为氮气, 从而实现了真正意义上的生物脱氮。

单污泥 SBR 工艺对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除效果如图 3 所示。可见, 原水 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度为 10.27~11.83 mg/L, 平均为 11.07 mg/L; 厌氧段末的 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度为 52.76~78.24 mg/L, 平均为 65.07 mg/L; 出水 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度为 0.57~6.57 mg/L, 变化范围较大, 稳定性差。

伴随着 COD 的吸收, 厌氧段的释磷很充分; 对

于好氧段而言, 在进行硝化的同时也进行了好氧吸磷, 吸磷量平均为 50.47 mg/L。可见, 系统除磷效果不稳定主要在于缺氧段的反硝化除磷功能没有充分发挥出来, 分析原因如下: 进水氨氮浓度变化较大, 当进水氨氮浓度较低时, 经好氧硝化产生的硝态氮量较少, 反硝化需要的时间就较短, 而 SBR 以固定缺氧段时间运行, 反硝化结束后系统仍处于缺氧环境, 就会发生二次释磷, 导致系统吸磷效果不稳定。若能准确判断缺氧段反硝化的终点, 避免缺氧段时间过长, 则可改善系统除磷效果的稳定性。YANG 等的研究表明, 采用实时控制策略监测反硝化过程中 pH 变化曲线的特征点, 可以准确判断反硝化作用的终点^[6]。因此在进水氨氮含量变化较大的情况下, 可通过实时监测 pH 值的变化来判断反硝化的终点, 避免二次释磷, 进而改善系统除磷效果的稳定性。

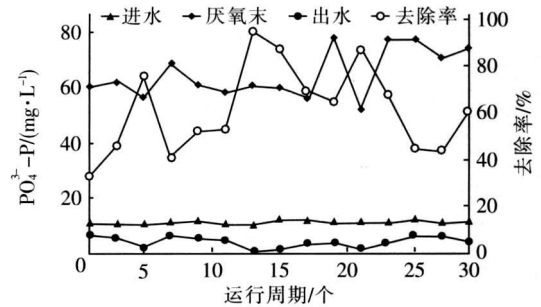


图 3 单污泥 SBR 工艺对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除效果

Fig 3 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ removal in single-sludge SBR process

2.3 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累对系统的影响

高守有等^[7]的研究表明, 以实际生活污水为处理对象, SBR 工艺在低溶解氧条件下运行时可使 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率 > 95%。而在本研究中, 周期内前好氧段的 DO 大多低于 1 mg/L, 也可能出现 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积累。为此对 1 月 10 日—24 日 (后 20 个周期) 前好氧段出水中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积累情况进行了考察, 结果表明: 前好氧段末的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度为 0.45~3.55 mg/L, 平均为 2.86 mg/L, 积累率为 15.54%~26.36%, 平均为 21.25%。同时缺氧段出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ < 0.33 mg/L, 表明 DPAOs 可利用 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 作为电子受体而不会对反硝化产生抑制作用。1 月 14 日前好氧段的曝气装置出现了故障, 导致曝气量增大为原来的 2 倍, 亚硝酸盐积累率随之下降。

这种亚硝酸盐积累的现象也使得该工艺具有一定的优势: ①节省曝气量, 从而降低运行费用^[8-10];

②反硝化以亚硝酸盐作为电子受体,可以节省聚磷菌体内的 PHA,进而节省碳源,在处理低 C/N 值污水时能发挥其优势^[11];③降低污泥产率,减少剩余污泥的后续处理费用^[12]。

3 结论

① 采用单污泥 SBR 工艺处理模拟生活污水,出水 COD 为 31.56~69.15 mg/L,平均为 54.33 mg/L,对 COD 的去除率为 76.12%~88.60%,平均为 81.49%,且对 COD 的去除主要发生在厌氧段;出水总氮为 0.08~4.04 mg/L,平均为 1.61 mg/L,系统对 TN 的去除率为 81.32%~99.59%,平均为 93.07%;出水 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 为 0.57~6.57 mg/L,变化范围较大,处理效果不稳定,对此可采用实时控制策略来加以改善。

② 在单污泥 SBR 工艺的前好氧段发生了 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累的现象,积累率为 15.54%~26.36%,平均为 21.25%。但 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积累并未对缺氧吸磷产生抑制作用,这使得该工艺可进一步节省曝气量和碳源。

参考文献:

- [1] 王亚宜,彭永臻,王淑莹,等.反硝化除磷理论、工艺及影响因素[J].中国给水排水,2003,19(1):34-37.
- [2] Kuba T, van Loosdrecht M C M, Heijnen J. Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of nitrification in a two-sludge system [J]. *Water Res*, 1996, 30(7): 1702-1710.
- [3] Kuba T, Mumleitner E, van Loosdrecht M C M, et al. A metabolic model for biological phosphorus removal by denitrifying organisms [J]. *Biotechnol Bioeng*, 1996, 52(6): 685-695.
- [4] Smolders G J van der M J van Loosdrecht M C M, et al. Stoichiometric model of the aerobic metabolism of the biological phosphorus removal process [J]. *Biotechnol*

- Bioeng*, 1994, 44(7): 837-848.
- [5] Randall A, Liu Y H. Polyhydroxyalkanoates form potentially a key aspect of aerobic phosphorus uptake in enhanced biological phosphorus removal [J]. *Water Res*, 2002, 36(14): 3473-3478.
- [6] YANG Qing, PENG Yongzhen, LIU XiuHong et al. Nitrogen removal via nitrite from municipal wastewater at low temperatures using real-time control to optimize nitrifying communities [J]. *Environ Sci Technol*, 2007, 41(23): 8159-8164.
- [7] 高守有,彭永臻,王淑莹,等.低溶解氧短程硝化及同步脱氮研究[J].高技术通讯,2006,16(10):1067-1072.
- [8] PENG Yongzhen, ZHU Guibing. Biological nitrogen removal with nitrification and denitrification via nitrite pathway [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2006, 73: 15-26.
- [9] Khin T, Annachatre A. Novel microbial nitrogen removal processes [J]. *Biotechnol Adv*, 2004, 22: 519-532.
- [10] PENG Yongzhen, ZHANG Shujun, ZENG Weij et al. Organic removal by denitrification and methanogenesis and nitrogen removal by nitrification from landfill leachate [J]. *Water Res*, 2008, 42(4-5): 883-892.
- [11] 王爱杰,吴丽红,任南琪,等.亚硝酸盐为电子受体反硝化除磷工艺的可行性[J].中国环境科学,2005,25(5):515-518.
- [12] WANG Xiaolian, WANG Shuying, PENG Yongzhen. Anoxic biological phosphorus uptake in A^2O process [J]. *Chinese J Chem Eng*, 2005, 13(4): 516-521.

作者简介:马斌(1982-),男,山东莘县人,博士研究生,研究方向为污水脱氮除磷新技术及过程控制策略。

电话:15810548086

E-mail: mady7802@163.com

收稿日期:2008-12-30

落实科学发展观

节约保护水资源