

刘旭,王淑莹,彭永臻,等.2012.SBR 双颗粒污泥系统脱氮除磷性能研究[J].环境科学学报,32(7):1537-1541

Liu X, Wang S Y, Peng Y Z, et al. 2012. Characteristics of nitrogen and phosphorus removal by using two granular sludge process in sequencing batch reactors[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 32(7): 1537-1541

SBR 双颗粒污泥系统脱氮除磷性能研究

刘旭,王淑莹*,彭永臻,吴蕾,朱云鹏

北京工业大学环境与能源工程学院,北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室,北京 100124

收稿日期:2011-09-10 修回日期:2011-11-04 录用日期:2011-11-17

摘要:以模拟废水为研究对象,对 SBR 双颗粒污泥系统的脱氮除磷性能进行了考察.试验结果表明,A₂N 双颗粒污泥系统能使硝化菌和聚磷菌分别在各自最佳的环境中生长,有利于系统脱氮除磷的稳定和高效运行,可控制性也得到了提高.在 COD 为 300 mg·L⁻¹条件下,系统对 COD 的平均去除率达到 78.8%,大部分 COD 被聚磷菌用来合成 PHA;当溶解氧控制在 3.55~4.90 mg·L⁻¹和 5.60~6.60 mg·L⁻¹之间时,硝化 SBR 对氨氮的去除率分别为 87.0%和 94.5%.除磷 SBR 仅设置缺氧段时,磷去除率为 72%;增设后曝气段后,磷去除率增至 85%.NO_x⁻-N(NO₂⁻-N + NO₃⁻-N)的去除主要发生在缺氧段,在反硝化除磷时作为电子受体被去除,平均去除率为 90.6%.

关键词:反硝化除磷;反硝化除磷菌;双污泥工艺;好氧颗粒污泥;SBR

文章编号:0253-2468(2012)07-1537-05 中图分类号:X703 文献标识码:A

Characteristics of nitrogen and phosphorus removal by using two granular sludge process in sequencing batch reactors

LIU Xu, WANG Shuying*, PENG Yongzhen, WU Lei, ZHU Yunpeng

School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environmental Recovery Engineering, Beijing 100124

Received 10 September 2011; received in revised form 4 November 2011 accepted 17 November 2011

Abstract: By using synthetic wastewater, the characteristics of denitrifying phosphorus removal process in a lab-scale two-sludge anaerobic/anoxic/nitrification SBR (A₂NSBR) aerobic granular system was studied. The result showed that the two-sludge system ensured the denitrifying and dephosphorus bacteria to grow at their optimal states, which was favorable for the stability of nitrogen and phosphorus removal efficiency. When the influent COD was controlled at 300 mg·L⁻¹, the COD removal efficiency was 78.8%. Most of the COD was stored as PHA in polyphosphate accumulating organisms (PAOs). When DO was controlled at 3.55~4.90 mg·L⁻¹ and 5.6~6.6 mg·L⁻¹ in nitrification SBR, the NH₄⁺-N removal efficiency reached 87.0% and 94.5%, respectively. It was also demonstrated that the removal efficiency of phosphorus was only 72% when there was only settled anoxic phase in A/A/O SBR, while it increased to 85% when post-aeration stage was added. Most of the NO_x⁻-N (NO₂⁻-N + NO₃⁻-N) reduction occurred in the anoxic phase, during which NO_x⁻-N was electron acceptors and PHA was electron donors. On average NO_x⁻ removal efficiency was 90.6%.

Keywords: denitrifying phosphorus removal; denitrifying phosphorus removal bacteria; two-sludge process; aerobic granular sludge; sequencing batch reactor

1 引言(Introduction)

传统的除磷方法是聚磷菌(Polyphosphate accumulating organisms, PAOs)经过厌氧放磷后,在曝气环境中以氧气作为电子受体过量吸磷,反硝化除磷则是反硝化聚磷菌(Denitrifying polyphosphate accumulating organisms, DNPAOs)利用 NO₃⁻-N 或

NO₂⁻-N 作为电子受体,胞内 PHA 为电子供体,以“一碳两用”的方式进行同步脱氮除磷.而双污泥工艺系统很好地利用了反硝化除磷原理,系统分别设置厌/缺氧反应器和好氧反应器,污水首先在厌/缺氧反应器中在厌氧条件下利用环境中的有机物合成 PHA,同时释放磷酸盐,然后富含磷和氨氮的上清液进入好氧反应器进行硝化反应,硝化结束后,

基金项目:国家自然科学基金(No. 50808004);北京市教委科技创新平台项目

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 50808004) and the Project of Scientific Research Base and Scientific Innovation Platform of Beijing Municipal Education Commission

作者简介:刘旭(1986—),男,E-mail:liuxu-528@emails.bjut.edu.cn; *通讯作者(责任作者),E-mail:wsy@bjut.edu.cn

Biography: LIU Xu (1986—), male, E-mail:liuxu-528@emails.bjut.edu.cn; * Corresponding author, E-mail:wsy@bjut.edu.cn

上清液回流至厌氧/缺氧反应器进行反硝化除磷. 双污泥系统将硝化和除磷分开, 为生长速率较慢的硝化菌提供一个相对稳定的环境, 有利于富集硝化菌, 提高硝化效率. 同时, 该工艺还有效地解决了硝化菌和聚磷菌之间的竞争矛盾, 使其在各自最佳的生长环境下生长, 更有利于脱氮除磷的高效进行. 在国外, 有研究者曾以养猪废水为对象, 对双污泥工艺进行了研究 (Bortone *et al.*, 1994), 随后又有学者分别采用生活污水和模拟废水进行了研究 (Sorm *et al.*, 1996; kuba *et al.*, 1996; Bernet *et al.*, 2000). 有关双污泥工艺的研究国内也有报道, Wang 等 (2009) 使用生活污水考察了进水污染物比率和水力停留时间对系统去除污染物的影响, 其他一些学者也做了同样的研究 (张杰等, 2005; 王亚宜等, 2008; 高大文等, 2009). 然而这些研究所用的反应器构造装置没有解决出水中氨氮浓度高的问题, 必需进行超越污泥回流, 而且试验用泥为絮状污泥, 需要分别设置沉淀池, 最终出水还要设置二沉池, 这样就延长了反应周期, 且增大了占地面积.

因此, 本试验以模拟废水为研究对象, 好氧颗粒污泥为介质, 利用其生物量大、沉降性能好的优势, 以增大排水比, 减小反应器体积, 缩短反应时间和水力停留时间, 而且将双污泥工艺、反硝化除磷技术和颗粒污泥技术有机地结合起来, 充分发挥三者的优点, 以实现废水中氮和磷的高效去除.

2 材料与方 法 (Materials and methods)

2.1 试验用水水质和污泥来源

试验用水采用模拟废水, 以 NH_4Cl 和 KH_2PO_4 分别作为氮源和磷源, 具体配方见表 1. 由表 1 可知, 试验用水 C/P/N = 300/14. 1/50, 试验中, 使用乙酸钠和丙酸交替提供 COD, 每 42 个周期换一次碳源.

表 1 配水组成

Table 1 Composition of the feed

废水成分	数值 /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	营养液成分	数值 /($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
COD	300.0	$\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.50
K_2HPO_4	39.7	H_3BO_3	0.15
KH_2PO_4	30.9	$\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.03
NH_4Cl	190.0	KI	0.18
$\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	79.5	$\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.12
$\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	171.0	$\text{Na}_2\text{MoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.06
NaHCO_3	200.0	$\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.12
蛋白胨	48.0	$\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.15
营养液	28.65	EDTA	10.00

注: 废水成分中营养液的单位为 $\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$.

试验所用污泥为已驯化的好氧颗粒污泥, 厌氧/缺氧/好氧 SBR (A/A/O SBR) 所用颗粒污泥中粒径大于 0.9 mm 的占 77.9%, MLSS 为 710 ~ 1976 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 硝化 SBR (Nitrification SBR) 所用颗粒污泥中粒径大于 0.9 mm 的占 82.4%, 硝化效率达 100%, MLSS 为 684 ~ 1695 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

2.2 双污泥系统试验装置及控制方法

双污泥系统由两段 SBR 组成, 具体如图 1 所示, 即 A/A/O SBR 和硝化 SBR. 两个 SBR 反应器均为圆柱形, 由有机玻璃制成, 高 50 cm, 直径 20 cm, 总体积 10 L, 有效容积为 10 L, 每次进水 7 L, 排水比 7/3, 在反应器壁上的垂直方向设置一排间距 10 cm 的取样口. 由温度控制仪控制反应器内温度, 使温度保持为 25 $^{\circ}\text{C}$. 使用 Multi 340i 型便携式多功能 pH 和 DO 测定仪在线测定反应过程中的 pH 和 DO 值. 采用机械搅拌为颗粒污泥提供剪切力, 以黏砂块作为微孔曝气器, 采用鼓风机曝气.

双污泥系统的反应过程如下: ①由蠕动泵将 7 L 模拟废水加入到 A/A/O SBR 中, 泥水充分混合后厌氧释磷 150 min, 沉淀 2 min 后, 将上清液排到中间水箱 (Tank 1); ②由蠕动泵将含磷和氨氮的污水引入硝化 SBR 中, 充分混合后, 硝化 180 min, 硝化结束后静沉 2 min, 而后将上清液排入中间水箱 (Tank 2); ③然后由蠕动泵将含磷、亚硝态氮和硝态氮的废水引入 A/A/O SBR, 充分混合后, 缺氧吸磷 120 min, 为了进一步去除污水中的磷, 在缺氧结束后曝气 60 min. 反应过程中, 进水、搅拌、曝气、静沉、排水均由智能控制器控制.

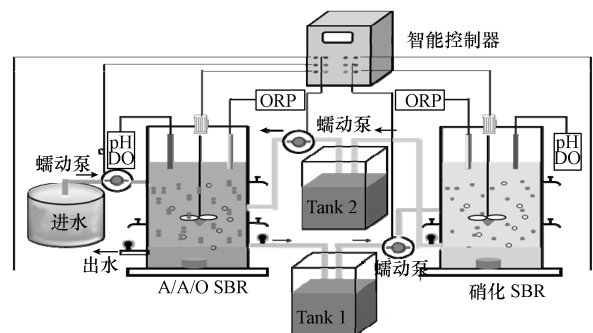


图 1 双污泥系统工艺图

Fig. 1 Schematic diagram of the two-sludge system

2.3 检测方法

COD、 NH_4^+-N 、MLSS 分别采用重铬酸钾法、纳氏试剂光度法和重量法测定; $\text{NO}_2^- -\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} -\text{P}$ 用 QuikChem8500 Seris2 流动注射分析仪测

定; pH 和 DO 由 WTW Multi pH/Oxi340i 测定仪测定。

3 结果与讨论 (Results and discussion)

3.1 系统对 COD 的去除效果

由图 2 可知, 进水 COD 为 $93.3 \sim 387.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均为 $212.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 出水 COD 为 $7.23 \sim 153.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均为 $43.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, COD 去除率为 $16.9\% \sim 96.4\%$, 平均去除率为 78.8% 。出水 COD 平均值能够达到城镇污水处理厂污染物排放标准 (GB 18918—2002) 一级标准。系统对 COD 的去除主要发生在厌氧段, 用于合成 PHA, 在缺氧段, PHA 作为反硝化除磷的电子供体。张杰等 (2005) 在进行连续流双污泥系统反硝化除磷研究时, 进水 COD 为 $115 \sim 325 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 厌氧池和缺氧池 MLSS 为 $2100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, COD 负荷为 $0.055 \sim 0.150 \text{ mg}\cdot\text{mg}^{-1}$ (以每 mg MLSS 中的 COD 计), 然而 COD 平均去除率为 81.78% 。而彭永臻等 (2004) 在研究连续流双污泥系统反硝化除磷脱氮特性时, 系统平均进水 COD 为 $308 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, COD 平均去除率达 93% , 但其厌氧池和缺氧池 MLSS 在 $4000 \sim 4700 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, COD 负荷仅为 $0.066 \sim 0.077 \text{ mg}\cdot\text{mg}^{-1}$ 。而本试验 COD 负荷为 $0.15 \sim 0.42 \text{ mg}\cdot\text{mg}^{-1}$, 远高于以上研究中的 COD 负荷。由此可见, 对 COD 的高效去除是本试验双污泥颗粒系统的优势之一, 而 COD 在硝化 SBR 内也有小部分的去除。

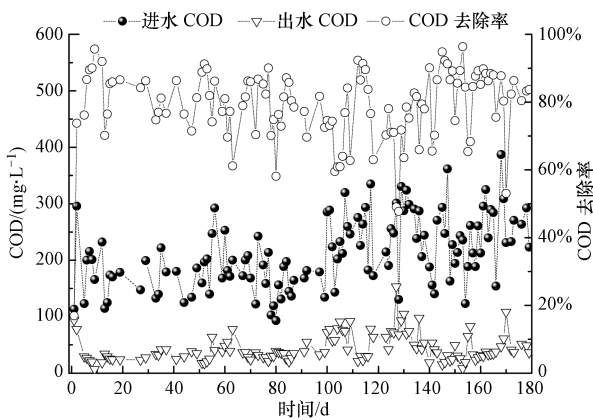


图 2 双污泥系统 COD 去除效果图

Fig. 2 COD removal efficiency of two-sludge system

3.2 硝化 SBR 的运行效果

由图 3 可知, 硝化 SBR 的运行分为两个阶段, $0 \sim 132 \text{ d}$ 为第一阶段, DO 浓度范围为 $3.55 \sim 4.90 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $133 \sim 190 \text{ d}$ 为第二阶段, DO 浓度范围为

$5.6 \sim 6.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。进水 NH_4^+-N 平均浓度为 $26.40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水 NH_4^+-N 平均浓度为 $2.88 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均去除率为 89% 。在第一阶段, 试验启动初期, 硝化 SBR 颗粒污泥硝化性能良好, 氨氮去除率达到 100% 。这是由于试验启动污泥为已驯化颗粒污泥, 接种时其硝化性能优越。随着试验的进行, 硝化效率下降, 分析其原因, 首先可能是硝化 SBR 进水中仍有小部分 COD, 因此, 异养菌会在有限的 DO 条件下与氨氧化菌竞争溶解氧; 其次可能是颗粒污泥粒径较大, 溶解氧受传质影响, 导致颗粒内部硝化菌得不到充足的溶解氧, NH_4^+-N 总体氧化效率逐渐下降, 第一阶段仅为 87% ; 第二阶段, 调整溶解氧后, 硝化效率逐渐提高, 达到 94.5% 。王亚宜等 (2003) 研究 A_2N 反硝化除磷工艺及其影响因素时, 采用生物膜硝化池, 设置 DO 为 $4 \sim 6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 进水氨氮平均浓度为 $51.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 系统的硝化率接近 100% , 硝化效果优于本试验的双污泥系统, 但其 MLSS 为 $3900 \sim 5000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 且硝化时间为 $240 \sim 300 \text{ min}$, 比氨氧化速率为 $0.030 \sim 0.055 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, 本试验中比氨氧化速率为 $0.10 \sim 0.25 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, 明显高于前者, 因此, 本试验所用好氧颗粒污泥具有更高的硝化效率。而且, 由于硝化过程在厌氧释磷后, 高的磷浓度为硝化菌的生长提供了充足的磷源, 有利于硝化菌的生长, 对硝化过程有利, 这与单污泥反硝化除磷系统相反, 单污泥反硝化除磷系统是在很低的磷浓度情况下进行的 (Kuba *et al.*, 1996)。而 Tsuneda 等 (2006) 用 SBR 反应器研究单污泥系统同步脱氮除磷工艺时, 采用厌氧-好氧-缺氧过程, 硝化段也能得到充足的磷, 但需要补充 $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的碳源来抑制好氧段对磷的吸收, 以此来保

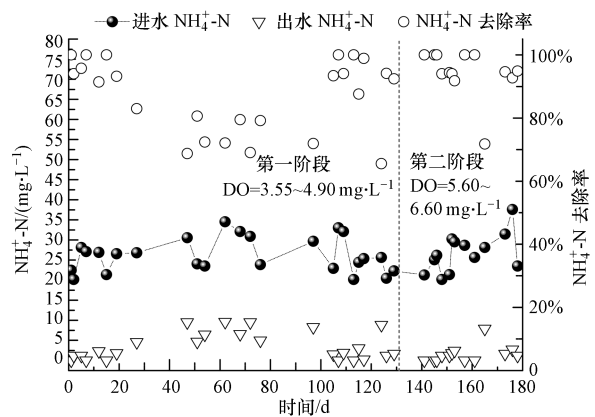


图 3 硝化 SBR 中 NH_4^+-N 去除效果

Fig. 3 NH_4^+-N removal efficiency of nitrification SBR

证较好的硝化效果. 而本试验所用双污泥系统将硝化与除磷分开, 二者相互独立, 且不需外加碳源, 这是该试验双污泥系统的另一个优点.

3.3 除磷 SBR 的运行效果

试验中, 进水平均磷浓度为 $8.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 厌氧末出水平均磷浓度为 $11.44 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 4), 释磷率仅为 33%, 分析其原因可能是颗粒污泥粒径较大, 传质限制导致释磷率较低. 对磷的吸收分为两个阶段, 1~50 d 仅设置缺氧段, 缺氧末平均磷浓度为 $2.40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均去除率为 72%; 为了提高磷的去除率, 从第 51 d 开始, 增加 1 h 的后曝气段, 平均 DO 浓度为 $1.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 第 51~180 d, 缺氧末平均磷浓度为 $4.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 比第一阶段缺氧末磷的吸收效果稍差, 可能是增加曝气后反硝化除磷菌占除磷菌的比例下降的缘故, 但曝气末平均磷浓度降为 $1.29 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 总除磷效率明显提高, 平均去除率上升为 85%. Meihold 等 (1999) 研究认为, 亚硝酸盐浓度大于 $8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时会完全抑制缺氧吸磷过程; Saito 等 (2004) 研究认为, 亚硝酸盐不仅会抑制缺氧吸磷, 还会抑制好氧环境下聚磷菌对磷的吸收. 因此, 在本试验中, 缺氧段对磷去除率不高的原因可能是回流至除磷 SBR 的水中亚硝态氮浓度过高, 抑制了缺氧吸磷, 导致出水磷浓度较高. 张杰等 (2005) 在研究连续流双污泥系统反硝化除磷时, 其缺氧池除磷率达到 90%, 然而其进水磷浓度为 $2.5 \sim 6.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 低于本试验, 且其缺氧池 MLSS 为 $2100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 也高于本试验除磷污泥浓度.

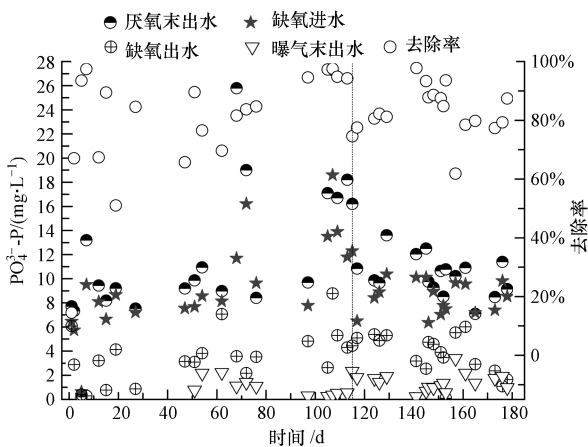


图 4 双污泥系统 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除效果

Fig. 4 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ removal efficiency of two-sludge system

3.4 反硝化除磷中氮的去除效果

如图 5 所示, $\text{NO}_x^- \text{-N}$ ($\text{NO}_2^- \text{-N} + \text{NO}_3^- \text{-N}$) 平均进

水浓度为 $13.70 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均出水浓度为 $1.26 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均去除率为 90.6%. 氮主要在反硝化除磷过程中被去除, 反硝化除磷菌以体内的 PHA 为电子供体, 以 $\text{NO}_x^- \text{-N}$ 为电子受体, 过量吸磷同时将 $\text{NO}_x^- \text{-N}$ 转化为 N_2 排出反应器. 高大文等 (2009) 在两段 SBR 双污泥系统的短程硝化/反硝化除磷研究中发现, N/P 为 2.2 时, 系统对磷酸盐的去除率达到 91%, 低于 2.2 时则效果变差, 因此, N/P 要在 2.2 以上才能保证较好的反硝化除磷效果. 由前面分析可知, 本试验中进水 N/P 为 3.5, 对磷酸盐的去除取得了较好的效果, 与其试验具有相似的规律.

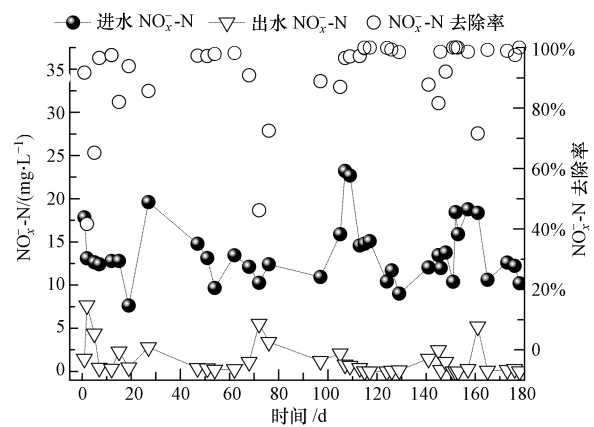


图 5 A/A/O SBR 中 $\text{NO}_x^- \text{-N}$ ($\text{NO}_2^- \text{-N} + \text{NO}_3^- \text{-N}$) 去除效果

Fig. 5 $\text{NO}_x^- \text{-N}$ ($\text{NO}_2^- \text{-N} + \text{NO}_3^- \text{-N}$) removal efficiency of A/A/O SBR

Kuba 等 (1996) 采用双污泥系统进行反硝化除磷研究时, 硝化系统氨氮去除率接近 90%, 此情况下 COD 和氮的去除比率为 $3.8 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$, $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 醋酸为去除 $15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ P 和 $105 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 提供了充足的 COD. 在本试验中, 进水 C/N 为 6, 比上述研究中的高, 但对 COD 的去除率达到了 78.8%, 而 $\text{NO}_x^- \text{-N}$ 平均去除率为 90.6%, 说明 C/N 能够满足反硝化除磷对碳源的需求, 但 COD 和氮的去除率比上述研究中低. 因此, 在本试验所用颗粒污泥系统中, 理论上应存在 C/N 临界值, 即聚磷菌在厌氧段利用 COD 合成 PHA 的量正好在缺氧段被反硝化除磷完全利用, 当进水 C/N 比高于此值时, 会出现 PHA 剩余而电子受体不足的情况, 造成对磷的吸收不彻底, 进而导致磷的去除率不高. 因此, 研究 C/N 对两段 SBR 双污泥颗粒系统反硝化除磷的影响, 对该工艺在污水处理中的应用具有重要意义.

系统对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 TN 的去除效果如图 6 所示. 可以看出, 出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 平均浓度为 $7.76 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,

然而出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度呈现先上升后下降的趋势,这是因为随着试验的进行,硝化 SBR 中好氧颗粒污泥硝化性能下降,未硝化的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 回流至 A/A/O SBR,导致系统出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度升高.从图 6 还可以看出,TN 去除率呈现出先下降而后上升的规律,这是因为出水 TN 中大部分为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,受 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度影响,出水 TN 浓度随之变化,然而双污泥颗粒系统对 TN 的去除率达到了 70.8%,出水 TN 平均浓度为 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

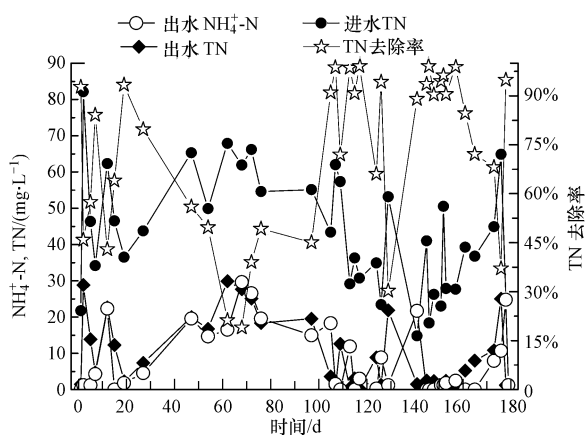


图 6 双污泥系统中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 TN 去除效果

Fig. 6 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TN removal efficiency of two-sludge system

4 结论 (Conclusions)

1) 经过 180 d 的运行,硝化 SBR 在 2 h 内实现 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 第一阶段去除率为 87.0%,第二阶段去除率为 94.5%,比氨氧化速率为 $0.10 \sim 0.25 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$,系统出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为 $7.76 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,与非颗粒污泥为介质的双污泥系统相比具有更高的效率和更好的去除效果.

2) 在 C/N 为 6.0 时,除磷 SBR 对 COD 的去除率为 78.8%,出水 COD 为 $43.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的最高去除率为 85%, $\text{NO}_x^-\text{-N}$ ($\text{NO}_2^-\text{-N}$ + $\text{NO}_3^-\text{-N}$) 的平均去除率也达到了 90.6%,出水 TN 为 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.因此,SBR 双颗粒污泥系统在处理废水污染物方面具有很大的潜力.

责任作者简介:王淑莹(1953—),女,教授,博士生导师,研究方向为:水质科学与水环境恢复工程、城市污水生物处理的技术与应用、污水脱氮除磷的新工艺与新技术. E-mail: wsy@bjut.edu.cn.

参考文献 (References):

Bernet N, Delgenes N, Akunn J C, *et al.* 2000. Combined anaerobic-

aerobic SBR for the treatment of piggery wastewater[J]. *Water Res*, 34 (2):611-619

Bortone G, Malaspina F, Stante L, *et al.* 1994. Biological nitrogen and phosphorus removal in an anaerobic/anoxic sequencing batch reactor with separated biofilm nitrification [J]. *Water Sci Technol*, 30 (6): 303-313

高大文,李幸,李强,等. 2009. 两段 SBR 双污泥系统的短程硝化/反硝化除磷研究[J]. *中国给水排水*, 25(17): 31-34

Gao D W, Li X, Li Q, *et al.* 2009. Shortcut nitrification/denitrifying phosphorus removal in two-stage SBR two-sludge system [J]. *China Water & Wastewater*, 25(17):31-34 (in Chinese)

Meinhold J, Arnold E, Isancs S. 1999. Effect of nitrite on anoxic phosphate uptake in biological phosphate removal activated sludge [J]. *Water Res*, 33(8):1871-1883

Kuba T, van Loosdrecht, Heijnen J J. 1996. Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of denitrifying dephosphatation and nitrification in a two-sludge system [J]. *Water Res*, 30(7):1702-1710

彭永臻,王亚宜,顾国维,等. 2004. 连续流双污泥系统反硝化除磷脱氮特性[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 32(7):933-938

Peng Y Z, Wang Y Y, Gu G W, *et al.* 2004. Characterization of denitrifying dephosphorus removal in continuous-flow anaerobic/anoxic-nitrifying two-sludge process[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 32(7):933-938 (in Chinese)

Sorm R, Bortone G, Saltarelli R, *et al.* 1996. Phosphate uptake under anoxic conditions and fixed-film nitrification in nutrient removal activated sludge system[J]. *Water Res*, 30(7): 1573-1584

Saito T, Brdjanovic D, Van Loosdrecht. 2004. Effect of nitrite on phosphate uptake by phosphate accumulating organisms[J]. *Water Res*, 38(17):3760-3768

Satoshi T, Takashi O, Koichi S, *et al.* 2006. Simultaneous nitrogen and phosphorus removal using denitrifying phosphate-accumulating organisms in a sequencing batch reactor [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 27:191-196

王亚宜,杜红,彭永臻. 等. 2003. A_2N 反硝化除磷脱氮工艺及其影响因素[J]. *中国给水排水*, 19(9): 8-11

Wang Y Y, Du H, Peng Y Z, *et al.* 2003. A_2N process for denitrifying phosphorus and nitrogen removal and its affecting factors[J]. *China Water & Wastewater*, 19(9):8-11 (in Chinese)

王亚宜,彭永臻,殷芳芳,等. 2008. 双污泥 SBR 工艺反硝化除磷脱氮特性及影响因素[J]. *环境科学*, 29(6):1526-1532

Wang Y Y, Peng Y Z, Yin F F, *et al.* 2008. Characteristics and affecting factors of denitrifying phosphorus removal in two-sludge sequencing batch reactor [J]. *Environmental Science*, 29(6): 1526-1532 (in Chinese)

Wang Y Y, Peng Y Z, Stephenson T, *et al.* 2009. Effect of influent nutrient ratios and hydraulic retention time (HRT) on simultaneous phosphorus and nitrogen removal in a two-sludge sequencing batch reactor process[J]. *Bioresource Technology*, 100:3506-3512

张杰,李相昆,黄荣新,等. 2005. 连续流双污泥系统反硝化除磷实验研究[J]. *现代化工*, 25:115-120

Zhang J, Li X K, Huang R X, *et al.* 2005. Study on denitrification phosphorus removal in continuous flow two sludge system [J]. *Modern Chemical Industry*, 25:115-120 (in Chinese)