

A₂N 系统中低碳污水的反硝化除磷优化及运行稳定性

张耀斌, 邢亚彬, 秦四飞, 全燮, 陈硕

(大连理工大学环境科学与工程系, 工业生态与环境工程教育部重点实验室, 大连 116024)

摘要:采用序批式生物移动床(SBMBBR), 通过优化反应条件可以取得较高的聚-β-羟基丁酸盐(PHB)富集效率, 通过双泥系统的操作, 可以实现低碳下的高效反硝化除磷. 在进水 COD 200 mg/L、pH 为中性的生活污水中, 并在搅拌速度为 80 r/min 下, 磷的去除率达到 83.7%, NO₃⁻-N 的去除率达到 81.4%, NO₂⁻-N 的去除率接近 100%, 取得较好的反硝化除磷作用. 较大的生物量是保证较高效率的反硝化除磷的关键之一. 采用双泥系统运行 SBMBBR, 可以获得稳定的、较高效率的脱氮除磷. 在 COD 为 140~170 mg/L, TN 为 34~42 mg/L 低碳氮比的实际废水处理中, 磷的去除率达到 89.2%, TN 的去除率达到 84.5%. 在处理过程中, 排泥中的磷量基本与进水中磷的量一致, 未发现磷的其它去除路径.

关键词:双泥系统; 反硝化除磷; 低碳污水; 聚-β-羟基丁酸盐; 序批式移动床生物膜反应器

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)04-1020-07

Optimization and Stability of Denitrifying Phosphorus Removal in a Two-Sludge System for Treating Wastewater with Low Carbon Source

ZHANG Yao-bin, XING Ya-bin, QIN Si-fei, QUAN Xie, CHEN Shuo

(Key Laboratory of Industrial Ecology and Environmental Engineering, Ministry of Education, Department of Environmental Science and Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Poly-β-hydroxybutyrate (PHB) could be efficiently accumulated under optimized conditions in a sequencing batch moving bed biological reactor (SBMBBR), and a high performance of denitrifying phosphorus removal in the reactor could be achieved by coupling with a two-sludge system. Denitrifying phosphorus removal achieved the highest efficiency under influent COD of 200 mg/L, neutral pH and stirring speed of 80 r/min. The removal rates of phosphorus, NO₃⁻-N and NO₂⁻-N reached 83.7%, 81.4% and above 100%, respectively. High biomass in the SBMBBR is one of keys to improve the performance in removal of nitrogen and phosphorus. When the SBMBBR was conducted under a two-sludge system, stable and high performance was obtained. Removal rates of phosphorus and TN reached 89.2% and 84.5% under the influent COD of 140-170 mg/L and TN of 34-42 mg/L, respectively. In the process, phosphorus content in excess sludge approached to that in the feeding, and other path of phosphorus removal was not found.

Key words: two-sludge system; denitrifying phosphorus removal; wastewater with low carbon source; poly-β-hydroxybutyrate (PHB); sequencing batch moving bed biofilm reactor

低碳源污水的脱氮除磷一直是困扰污水处理领域的难题. 有机碳源的不足与生物脱氮除磷对碳源的依赖之间的矛盾是造成城市污水氮磷处理率较低的主要原因. 同时, 在一般的生物脱氮除磷工艺中, 厌氧释磷和反硝化脱氮对碳源的竞争, 更加剧了这一矛盾. 因此, 在城市污水处理厂的排水中较难实现氮磷同时达标排放. 反硝化除磷技术利用反硝化聚磷菌(denitrifying phosphorus removing bacteria, DPB)在缺氧条件下, 以硝酸盐代替氧气为电子受体, 将反硝化脱氮和生物吸磷 2 个独立过程合二为一, 实现内碳源(如 PHB)同时供给反硝化、吸磷所需, 有效解决低碳源污水的营养物质处理难题^[1~3]. 在这一工艺中, 外碳源转化成内碳源的效率是影响处理效率的关键因素之一.

另一方面, 在反硝化除磷的工艺中, 需要在缺氧段投加硝酸盐作为电子供体. 在实际中, 可以采用双

泥系统^[4]解决硝酸盐的供应问题. 即, 污水经第一个反应器的厌氧处理阶段, 将有机物富集在污泥中, 含有氨氮的上清液被排入另一反应器中进行好氧硝化, 之后完成硝化的含硝酸盐的上清液被排到第一个反应器中, 进行缺氧的反硝化除磷.

目前, 国内外大部分反硝化除磷工艺采用厌氧-好氧活性污泥法(AO), 其工艺效率相对较低. 与之相比, 序批间歇式活性污泥法(SBR)有较多优势, 如无需回流污泥、易于自动化、污泥膨胀发生率低等. 单一的 SBR 法已经相当成熟, 被广泛应用于各类污水的处理. 而在 SBR 中投加生物悬浮填料, 形成生

收稿日期: 2010-04-24; 修订日期: 2010-06-30

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07208-004); 国家高技术研究发展计划(863)重点项目(2009AA06380)

作者简介: 张耀斌(1971~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为水污染控制工程, E-mail: zhangyb@dlut.edu.cn

物移动床 (MBBR) 以序批式运行的 MBBR 系统 (SBMBBR), 则可进一步提高生物量和污泥龄, 强化生物膜的脱氮除磷功能. 本课题组近期连续开展 SBMBBR 的脱氮除磷性能研究^[5-8], 显示出较好的效果.

本研究的重点是拟在与双泥系统耦合的 SBMBBR 中, 通过调控 PHB 的积累实现高效的脱氮除磷, 并对磷的平衡进行核算. 目前, 国内外这方面报道较少, 而这对进一步提高反硝化除磷效率, 增强低碳污水的营养物质的处理能力, 具有一定的实际意义. 本研究旨在通过优化反硝化除磷技术, 使低碳源污水的脱氮除磷效率得到提高, 进而实现氮磷同时达标排放的目标.

1 材料与方法

1.1 实验装置与水质

实验用反应器由 2 个 SBMBBR 反应器组成, 一个为厌氧-缺氧方式运行 (A₂-SBMBBR), 另一个为好氧硝化反应器 (N-SBMBBR). 它们均采用有机玻璃管制成 (φ110 mm × 300 mm), 总有效容积为 2L, 底部设有微孔曝气砂头, 采用转子流量计控制鼓风

曝气 (缺氧: 0.1 L/min; 厌氧: 0 L/min; 好氧硝化: 1.0 L/min); 在 SBMBBR 反应器顶部加盖, 利用机械搅拌器, 实现厌氧和缺氧条件下填料、污泥、废水的均匀混合. 经测定, 此状态下 A₂-SBMBBR 厌氧段、缺氧段 DO 分别为 < 0.1 mg/L 和 0.2 ~ 0.3 mg/L. 2 个反应器均采用改性聚乙烯填料 (φ10 mm × 10 mm 的空心圆柱, 内外表面作纹状处理, 孔隙率 84%) 作为生物膜的载体, 空床填充率为 50%. 采用定期排泥方式, 在沉淀排水后, 通过排泥口排放剩余污泥, 泥龄为 50 d 左右.

本实验分别采用模拟城市污水和实际城市污水. 模拟废水采用蔗糖作为碳源, 加入氮、磷以及其它元素^[6], 实际污水取自大连理工大学学生宿舍下水道. 具体水质指标见实验结果与讨论的相关部分.

具体运行方式如下: 污水进入 A₂-SBMBBR, 首先在厌氧段将有机物富集在污泥上 (用于缺氧反硝化除磷), 而上清液则排到 N-SBMBBR 中进行好氧硝化. 之后将硝化上清液排到 A₂-SBMBBR 中, 进行反硝化除磷. 反硝化除磷的优化是在 A₂-SBMBBR 中进行的. 具体运行见图 1.

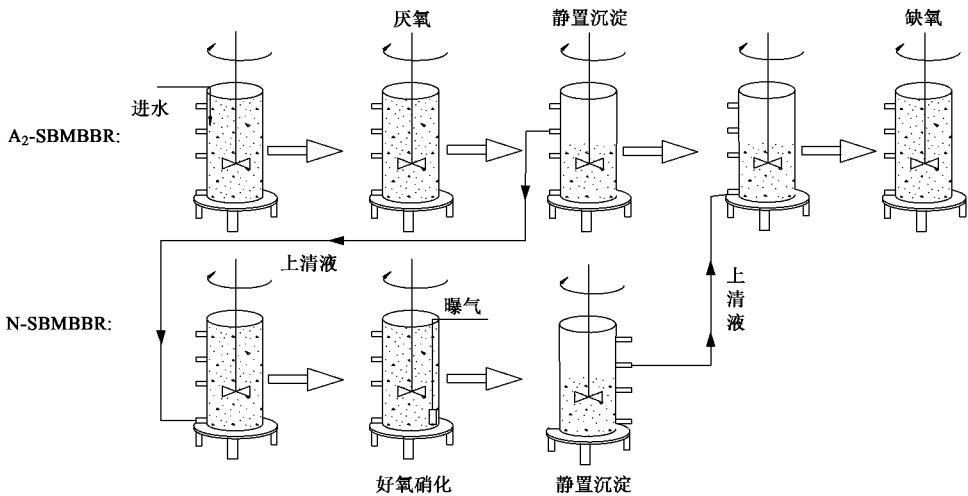


图1 A₂N-SBMBBR 双污泥系统

Fig. 1 Two-sludge system of A₂N-SBMBBR

1.2 生物膜的培养与驯化

实验污泥取自大连春柳河污水处理厂污泥回流池. A₂-SBMBBR 的反硝化聚磷菌的培养与驯化分 3 阶段进行^[8]. 第 1 阶段在厌氧/好氧条件下进行, 目的是进行挂膜并富集除磷菌, 历时 30 d; 第 2 阶段采用厌氧/沉淀排水/缺氧方式运行, 在厌氧结束后, 往反应器中加入含磷酸盐 30 mg/L、硝酸盐 30 mg/L、

无 COD 的模拟废水, 目的是消除残留 COD 在缺氧段的影响, 限制常规反硝化菌的生长; 第 3 阶段采用厌氧/缺氧交替运行方式. 按照反硝化聚磷菌占全部聚磷菌的比例可用缺氧与好氧吸磷速率的比值衡量的理论^[9], 3 阶段结束时, 反硝化聚磷菌占全部聚磷菌的比例为 71.3%, 说明其已成为反应器中的优势菌群.

N-SBMBBR 的启动包括挂膜与硝化能力的培养,整个启动时间为 45d. 启动期间的进水 COD、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度分别为 100 mg/L、50 mg/L (挂膜期间 COD 浓度为 300 mg/L),并投加营养盐与微量元素促进微生物的生长,曝气时间为 5 h.

1.3 分析项目及方法

COD:微波密封快速消解法; $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$:钼锑抗分光光度法; $\text{NO}_3^- \text{-N}$:紫外分光光度法;MLSS 采用烘干称重法.

PHB 的含量测定^[10,11]:采用紫外分光光度法. 在 1 个反应周期的不同时间,从反应器中取一定量的生物膜,离心后加入次氯酸钠溶液破坏细胞结构,离心,水洗,乙醇洗,热氯仿萃取,蒸去氯仿,加入 10 mL 浓硫酸,在 100℃ 下反应 10 min,冷却至室温,在 235 nm 下用紫外分光光度计测定吸光度,再根据标准曲线^[10,11]确定 PHB 的含量.

2 结果与讨论

2.1 反硝化除磷的部分操作条件的优化

2.1.1 COD 浓度对 PHB 转化与氮磷去除的影响

图 2(a)为在进水 COD 浓度分别为 200、300 和 400 mg/L 时,COD 浓度在厌氧段和缺氧段的变化.

由图 2(a)可见,厌氧段 COD 的出水浓度几乎均小于 100 mg/L,在缺氧段 COD 的出水浓度继续降低. 图 2(b)为在进水 COD 浓度不同时,PHB 在厌氧段以及在缺氧段加入 NO_3^- 后的变化. 由图 2(b)可知,在厌氧条件下,生物膜中的 PHB 逐步增加,而当在缺氧段加入 NO_3^- 后,PHB 开始持续降低. 图 2(c)为 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 浓度在厌氧段和缺氧段的变化. 由图 2(c)可知, $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 浓度在厌氧阶段不断升高,从进水的 6.9 mg/L 上升到 36~47 mg/L,而在进入缺氧阶段,加入 NO_3^- 后,浓度开始从峰值逐步分别降低到 1.24、0.65、2.9 mg/L,出水去除率分别为 81.8%、90.6%、58.0%. 而图 2(d)则显示在进水 COD 为 200、300 和 400 mg/L 时, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度在缺氧环境下不断降低,出水浓度分别为 5.62、3.65 和 4.57 mg/L,去除率分别为 81.3%、87.8% 和 84.8%.

从以上数据可以得出,在厌氧段,碳源充足,降低的 COD 大部分被转化成为 PHB,随着厌氧的进行,生物膜中的 PHB 逐步增加,溶液中 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 浓度不断升高,此阶段微生物积累 PHB 的能量来源是聚磷酸盐的释放. 在缺氧段,碳源不足,微生物降解 PHB 获得能量,用于反硝化吸磷所需,此阶段生物膜中的 PHB 含量以及溶液中 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度

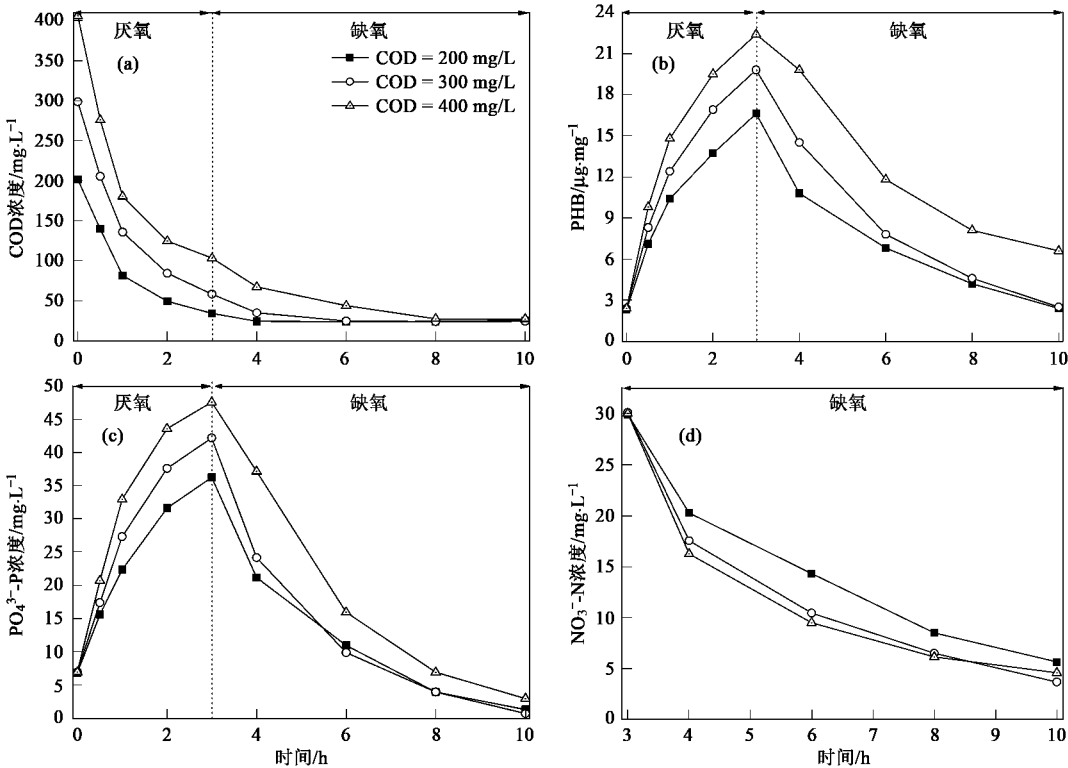


图 2 COD 浓度对反硝化除磷的影响

Fig. 2 Effect of influent COD on denitrifying phosphorus removal

都不断减少. 此外, 进水 COD 浓度越高, 厌氧段结束后生物膜中 PHB 的含量越大. 以上结果显示, 在低碳源下, 降低 COD 进水浓度没有使氮磷去除效率有明显降低, 这表明在较低浓度的 COD 进水时 (如 COD = 200 mg/L), 提高 PHB 的转化率, 依然有望得到较高的反硝化除磷效果.

2.1.2 pH 对磷释放的影响

pH 值对有机物平均吸收速率有明显影响^[12]. 由此可能影响到 PHB 的富集和反硝化除磷效率. 为了证实这点, 分别在污水反应器 pH 值呈偏酸性 (6.1 ± 0.1)、中性 (7.0 ± 0.1)、偏碱性 (7.9 ± 0.1) 下, 考察 pH 值对反硝化除磷的影响 (COD 为 200 mg/L). 由图 3 可以看出, 在以上 3 种条件下,

厌氧释磷量分别为 22.44、29.34 和 25.04 mg/L, 生物膜 (MLSS) 中 PHB 的含量分别为 14.1、16.7 和 15.2 μg/mg. PHB 的转化量与厌氧段的释磷量呈正相关性. COD 转化为 PHB 的量越多, 厌氧段的释磷量也越多. 在 pH 为 7 时, PHB 的转化量最高, 其释磷量也最高, 这也符合 Kuba 等^[13] 所提出的厌氧释磷过程的 pH 应严格控制在中性的观点. 一般认为, 厌氧段有效释磷量越多, 则缺氧段的吸磷量也相应增加, 反硝化除磷过程应尽可能地提高厌氧段的有效释磷量. 因此, 反应器在运行过程中应控制在中性条件下运行, 以使 COD 在厌氧段能转化为更多的 PHB, 供给缺氧段反硝化除磷所需.

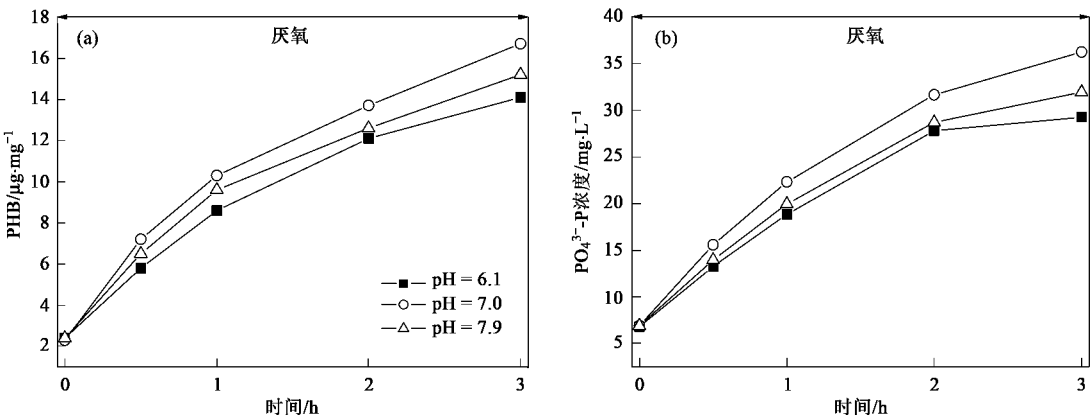


图 3 pH 对 PHB 的转化量和释磷量的影响

Fig. 3 Effect of pH on PHB accumulation and phosphorus release on the anaerobic stage

2.1.3 搅拌速度对反硝化除磷的影响

图 4(a) 为保持进水 COD、PO₄³⁻-P 和 NO₃⁻-N 浓度分别为 200、7 和 30 mg/L 左右, 搅拌速度在 50、80 和 120 r/min 的转速下 PO₄³⁻-P 浓度的变化. 由图 4(a) 可知, 在以上的搅拌速度下, 厌氧释磷量存在较大差别, 出水 PO₄³⁻-P 浓度分别 3.71、1.24 和 3.42 mg/L, PO₄³⁻-P 去除率分别为 46.2%、82.2% 和 50.5%, 并在 80 r/min 的搅拌速度下, 系统的除磷率最高. 笔者认为, 在厌氧与缺氧条件下, 反应器通过搅拌达到水质均匀, 因此搅拌速度影响传质效果, 而且搅拌速度影响到生物膜的脱落量, 从而影响处理效果.

图 4(b) 为搅拌速度在 50、80 和 120 r/min 的转速下, 生物膜量的浓度变化. 由图 4(b) 可知, 搅拌速度对系统中的生物膜量产生了较大影响, 在以上搅拌速度下, 生物膜量折算成 MLSS 分别为

6 275、7 146 和 5 360 mg/L. 笔者认为, 填料在 50 r/min 的搅拌条件下处于刚刚流化状态, 传质效果不理想, 不仅导致处理效果变差, 也影响到生物膜中微生物自身的代谢, 使得生物膜量下降. 在 120 r/min 的搅拌速度下, 系统虽然能达到充分的传质效果, 但由于搅拌速度过大, 对生物膜的冲击力过大, 导致生物膜的脱落量大于其生成量, 使得微生物总量减少, 处理效果变差. 值得注意的是, 即使在如此低的进水负荷下, 生物膜量依然可达到 7 000 mg/L 以上, 说明本反应器的生物负载量大, 远远超出一般生物膜法的生物量 (在 200 mg/L 时, 一般 MLSS 不超过 3 000 ~ 5 000 mg/L). 较厚的生物膜为溶解氧及其它底物在生物膜上的梯度分布创造了良好条件, 不仅使该生物移动床在时间尺度上保持厌氧-缺氧外, 在空间上也可体现脱氮除磷过程中对氧的差别需求.

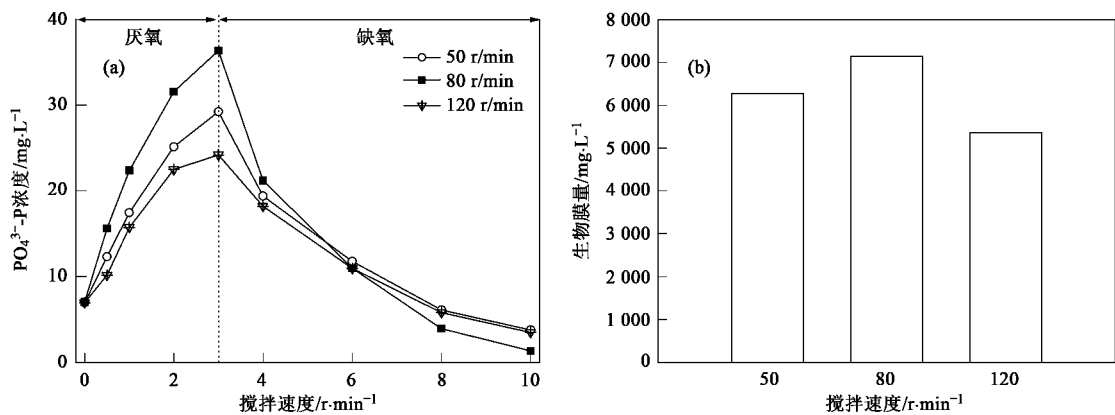


图4 不同搅拌速度下, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 与生物膜量的变化(COD=200 mg/L)

Fig. 4 Changes of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ and biomass under different stirring rates

2.2 双泥系统的脱氮除磷效率

2.2.1 生活污水的反硝化除磷

图5为在进水COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 分别为200、50、7 mg/L左右,且搅拌速率80 r/min和pH为7.0时,双泥系统下 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 以及 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的浓度变化.由图5可以看出,在 $\text{A}_2\text{-SBMBBR}$ 的厌氧反应结束后, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量为36.26 mg/L,COD降为34.3 mg/L, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度基本无变化.上清液经过在另一反应器(N-SBMBBR)的硝化后, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度降低到13.6 mg/L, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的浓度分别为25.8 mg/L、1.6 mg/L, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度有少量降低.将硝化后的污水重新转移到 $\text{A}_2\text{-SBMBBR}$ 中,继续进行缺氧过程, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 基本保持不变,为13.6 mg/L; $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 在缺氧1 h后基本趋于0,说明硝化反应产生的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 作为电子受体进行了反硝化除磷; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 由缺氧初期的25.8 mg/L降低为4.8 mg/L.缺氧结束后,出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度为1.12 mg/L, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率约为83.7%,TN约为17.6 mg/L,去除率约为64.0%,说明厌氧-缺氧-好氧方式运行($\text{A}_2\text{N-SBMBBR}$)双泥系统具有较好的反硝化除磷性能.

2.2.2 低碳氮比生活污水反硝化除磷的稳定处理

低碳氮比的实际生活污水的COD为140~170 mg/L, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 为5~8 mg/L, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为28~35 mg/L,TN为34~42 mg/L,属于典型的低碳氮比污水.将这一污水在 $\text{A}_2\text{N-SBMBBR}$ 进行了1个月左右的运行处理,结果见图6所示.结果显示,各项指标保持较高的处理效率.出水中COD浓度约为20 mg/L左右,平均去除率为86.1%; $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度约为

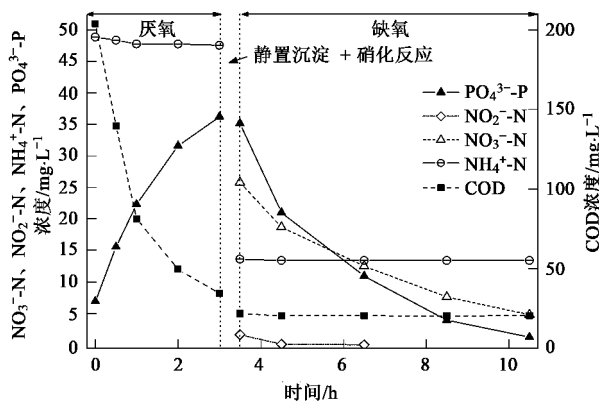


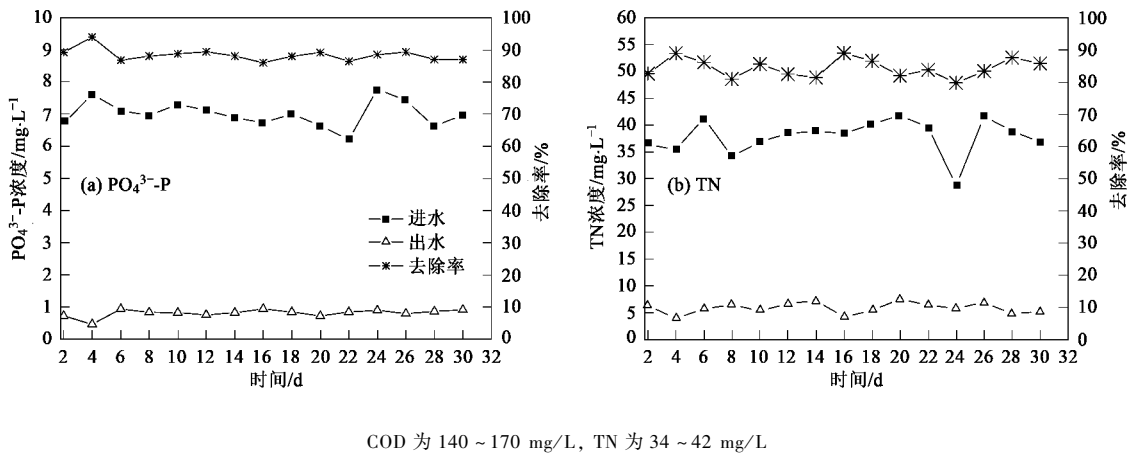
图5 $\text{A}_2\text{N-SBMBBR}$ 中的反硝化除磷效果

Fig. 5 Denitrifying phosphorus removal in $\text{A}_2\text{N-SBMBBR}$

0.75 mg/L左右,平均去除率为89.2%;TN浓度平均为5.54 mg/L,平均去除率为84.5%.综合以上实验结果,可以得出,应用 $\text{A}_2\text{N-SBMBBR}$ 双泥系统对实际低碳生活污水进行处理,可以获得稳定、较高的反硝化除磷处理效果.

3 反应器内磷的物料平衡核算

在生物除磷机制中,除磷菌在厌氧段释放磷,在好氧/缺氧段吸收磷,最终以剩余污泥的形式将磷排出系统,达到去除污水中磷的目的.但有研究表明^[14,15],自然界中存在磷酸盐还原菌,在厌氧环境中,将有机磷酸化合物和无机磷酸盐还原为气态磷化氢. Devai等^[16]报道了几个污水处理厂的磷物料衡算结果,发现出水TP总是低于进水TP;用气相色谱和质谱对污水厂释放的气体进行联合分析鉴定,发现气体中含有磷化氢(PH_3),并证实损失的磷



COD 为 140 ~ 170 mg/L, TN 为 34 ~ 42 mg/L

图 6 实际生活污水的去除效果

Fig. 6 Removal effect in a real domestic wastewater

中 25% ~ 50% 是以气态磷形式释放的. 本实验对反应器中的进出水中的磷含量进行长期(1 个月)的物料平衡核算,追踪反硝化除磷过程中磷的最终去向,确认反硝化除磷过程中是否还存在除污泥排放之外的其他形式. 每 2 d 检测一次进水和出水泥水混合物中的磷含量,检测方法为:把系统排出的泥水混和液混合均匀之后,取两次平行样进行检测,以平均值为最终结果. 检测结果如图 7 所示.

进水 TP 的平均值为 6.79 mg/L,出水泥水混合物 TP 的平均值为 6.53 mg/L,考虑到系统内微生物自身的利用以及磷含量的检测误差,系统内 TP 基本处于平衡状态. 由此可以认为,反应系统的反硝化除磷过程主要是以剩余污泥形式去除磷,磷的其他转化形式很微弱.

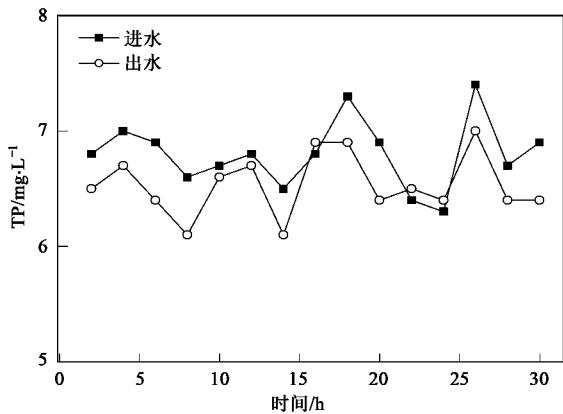


图 7 反应系统内 TP 的衡算

Fig. 7 Balance of TP between influent and effluent

4 结论

(1) 采用 SBMBBR 可以取得较高的 PHB 富集效率,通过双泥系统的操作,可以实现低碳下的高效

反硝化除磷. 进水 COD、pH 和搅拌速度影响着厌氧段 PHB 在生物膜上的积累. 200 mg/L 的 COD 进水、中性 pH 和搅拌速度为 80 r/min 下能取得较好的反硝化除磷作用,其中较大的生物量是保证较高效率的反硝化除磷的关键之一.

(2) 采用双泥系统可以解决缺氧段的硝酸盐供给问题,从而保证其实用性. 在对 COD 为 140 ~ 170 mg/L 的实际废水处理中,磷的去除率达到 89.2%, TN 的去除率达到 84.5%,并且稳定运行.

(3) 在处理过程中,排泥中的磷量基本与进水中磷的量一致,未发现磷的其它去除途径.

参考文献:

- [1] Juan M A, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Denitrifying phosphorus removal in a step-feed CAST with alternating anoxic-oxic operational strategy [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(9): 1169-1174.
- [2] Soejima K, Matsumoto S, Ohgushi S, *et al.* Modeling and experimental study on the anaerobic/aerobic/anoxic process for simultaneous nitrogen and phosphorus removal: The effect of acetate addition [J]. *Process Biochemistry*, 2008, **43**(6): 605-614.
- [3] Yang S, Yang F L, Fu Z M, *et al.* Simultaneous nitrogen and phosphorus removal by a novel sequencing batch moving bed membrane bioreactor for wastewater treatment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **175**(1-3): 551-557.
- [4] Ni B J, Yu H P. An approach for modeling two-step denitrification in activated sludge systems [J]. *Chemical Engineering Science*, 2008, **63**(6): 1449-1459.
- [5] 孙萍, 张耀斌, 全燮, 等. 序批式移动床生物膜反应器内同步短程硝化反硝化的控制[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(8): 1515-1518.
- [6] 吴广华, 张耀斌, 全燮, 等. 温度及反硝化聚磷对 SBMBBR 脱氮除磷的影响[J]. *环境科学*, 2007, **28**(12): 2484-2487.
- [7] 张耀斌, 吴广华, 邢亚彬, 等. COD 进水浓度对 SBMBBR 脱

氮除磷效果影响[J]. 大连理工大学学报, 2008, **48**(3): 329-333.

[8] 杨文婷, 沈耀良. SBR 中反硝化聚磷菌的培养驯化研究[J]. 环境科学与技术, 2009, **8**(32): 6-8.

[9] Soejima K, Matsumoto S, Ohgushi S, *et al.* Modeling and experimental study on the anaerobic/aerobic/anoxic process for simultaneous nitrogen and phosphorus removal: The effect of acetate addition[J]. Process Biochemistry, 2008, **43**(6): 605-614.

[10] 杨宇, 徐爱玲, 张燕飞, 等. 生物合成材料聚- β -羟基丁酸 (PHB)的研究进展[J]. 生命科学研究, 2006, **10**(4): 61-67.

[11] Jian Y, Jian P W. Metabolic flux modeling of detoxification of acetic acid by *Ralstonia eutropha* at slightly alkaline pH levels [J]. Biotechnol and Bioengineering, 2001, **73**(6): 458-464.

[12] Ahn J, Daidou T, Tsuneda S, *et al.* Selection and dominance mechanisms of denitrifying phosphate accumulating organisms in biological phosphate removal process[J]. Biotechnology Letters, 2001, **23**(24):2005-2008.

[13] Kuba T, Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Biological dephosphatation by activated sludge under denitrifying conditions: pH influence and occurrence of denitrifying dephosphatation in a full-scale wastewater treatment plant[J]. Water Science and Technology, 1997, **36**(12): 75-82.

[14] 郭夏丽. 厌氧生物除磷的基础研究[D]. 杭州:浙江大学, 2005.

[15] Jenkins R O, Morris T A, Craig P J, *et al.* Phosphine generation by mixed- and monoseptic-culture of anaerobie bacteria [J]. Science of The Total Environment, 2000, **250**(1-3):73-81.

[16] Devai I, Felfoldy L, Wittner I, *et al.* Detection of phosphine: new aspects of the phosphorus cycle in the hydrosphere [J]. Nature, 1988, **333**(26):343-345.