

丙酸的加入对厌氧-低氧同时生物除磷脱氮系统的影响

李洪静, 陈银广*, 顾国维

(同济大学环境科学与工程学院污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 2 个实验室规模的序批式反应器(SBRs)在厌氧-低氧($0.15 \sim 0.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)条件下运行, 以比较丙酸的加入对同时生物除磷脱氮系统的影响. 结果表明, 无论是丙酸与乙酸的混合酸(碳摩尔比为 1.5/1)作为碳源(SBR1), 还是乙酸作为单独碳源(SBR2), 系统都发生同步硝化反硝化和磷的去除(SNDPR), 并且氨氮被全部氧化, 系统中没有亚硝酸盐的大量累积. 与 SBR2 相比, SBR1 中厌氧阶段磷释放量少, 聚羟基戊酸(PHV)合成量高, 好氧末磷剩余量少, 硝态氮累积少, 因此 SBR1 中总氮和总磷的去除率(分别为 68% 和 95%)比 SBR2(分别为 51% 和 92%)高, 加入丙酸有助于 SNDPR 系统保持较好的除磷、脱氮效果.

关键词: 序批式反应器; 厌氧-低氧; 硝化反硝化同时除磷; 丙酸; 乙酸

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)08-1681-06

Addition of Propionic Acid on Simultaneous Biological Phosphorus and Nitrogen Removal in Anaerobic-Low Dissolved Oxygen System

LI Hong-jing, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Two lab-scale sequencing batch reactors (SBRs) were operated under conditions of anaerobic-low dissolved oxygen (DO) ($0.15 \sim 0.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), and the influences of addition of propionic acid on simultaneous biological nitrogen and phosphorus removal system were investigated. The results showed that the simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal (SNDPR) occurred in both SBR1 (acetic and propionic acid as mixed carbon source with the carbon molar ratio of 1.5/1) and SBR2 (acetic acid as sole carbon source), and ammonia was completely oxidized during the aerobic period without substantive nitrite accumulation. Compared with SBR2, SBR1 showed less anaerobic phosphorus release and more polyhydroxyvalerate (PHV) synthesis, but the aerobic end phosphorus and nitrate concentrations were lower. The total nitrogen and phosphorus removal efficiencies were higher in SBR1 (68% and 95%, respectively) than in SBR2 (51% and 92%, respectively) suggesting that the addition of propionic acid to SNDPR system would be helpful.

Key words: sequencing batch reactor (SBR); anaerobic-low dissolved oxygen; simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal (SNDPR); propionic acid; acetic acid

污水中氮和磷的去除是防止水体富营养化的一项重要措施. 污水中氮和磷的去除, 可分别通过同步硝化反硝化^[1]和增强生物除磷^[2]的方法达到. 同步硝化反硝化可以在较低的溶解氧条件下将污水中的氮去除, 但对于该系统中磷的变化却研究得很少^[3]; 厌氧-好氧增强生物除磷可将污水中的磷有效去除, 但好氧阶段的溶解氧浓度一般都较高(大于 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 且对其中氮的变化研究得不多^[4]. 最近, Zeng 等^[5]报道在厌氧-好氧反应器中溶解氧浓度很低的情况下能同时发生硝化、反硝化及磷的去除, 这种组合工艺称为同步硝化反硝化除磷(SNDPR). 然而 Meyer 等^[5]进一步研究表明, SNDPR 系统中在好氧末有大量的 NO_3^- -N 累积^[6]; Lemaire 等^[7]在对 SNDPR 反应器的出水分析时, 也发现了 NO_3^- -N 的存在. 这些研究表明, SNDPR 系统中均发生了不完全

的同步硝化反硝化现象. 此外, 这些研究都使用乙酸钠作为有机碳源, 尽管实际污水中还含有相当多的丙酸.

Chen 等^[8]在对厌氧-好氧(溶解氧大于 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)增强生物除磷系统进行研究时发现(由于加入硝化抑制剂且没有加入硝酸盐, 因而无硝化和反硝化现象发生), 乙酸废水中丙酸含量的提高(丙酸与乙酸的碳摩尔比分别为 0.16/1 和 2.06/1)对增强生物除磷的效果产生显著影响. 废水中丙酸的加入是否对具有 SNDPR 的生物处理系统产生影响, 在

收稿日期: 2006-12-14; 修订日期: 2007-01-21

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20060247006); 上海市“曙光计划”项目(05SC26)

作者简介: 李洪静(1976~), 女, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为水污染控制方法及机理, E-mail: lihongjing980824@yahoo.com, lihongjing2371@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yg2chen@yahoo.com

国内外的文献中鲜见报道。

本文比较了厌氧-低氧 SNDPR 系统中,以乙酸为单独有机碳源与丙酸和乙酸混合酸作为碳源的除磷脱氮效果,并对过程中与氮和磷去除相关的一些重要的微生物中间代谢物进行了研究。

1 材料与方法

1.1 反应器设置与运行

接种污泥取自上海市某污水处理厂,微生物在实验室规模的厌氧-低氧序批式反应器(SBR)中富集,SBR 反应器的工作容积为 3.5 L.每昼夜运行 3 个周期,每个周期 8 h,其中厌氧阶段 2 h,好氧 3 h,沉淀 1 h,排水 10 min,闲置 110 min.在厌氧阶段前 7 min,1.75 L 人工配水由蠕动泵加入;在好氧阶段,空气用开关控制系统结合在线溶解氧测定仪使溶解氧(DO)自动控制在 0.15~0.45 mg·L⁻¹.剩余污泥每天排放量是 175 mL,以保持污泥平均停留时间在 20 d 左右.当沉淀结束后,排出 1.75 L 上清液.2 个 SBR 反应器放置在(21±1)℃的恒温室中,污泥浓度(MLSS)维持在3 500 mg·L⁻¹左右,挥发性悬浮固体(MLVSS)为2 200 mg·L⁻¹左右.经过 3 个月的驯化,系统达到稳定。

1.2 人工配水组成

1 号序批式反应器(SBR1)以乙酸和丙酸混合酸为碳源,每 L 污水加入量为 0.102 mL 乙酸及 0.127 mL 丙酸,丙酸和乙酸碳摩尔比为 1.5/1;2 号序批式反应器(SBR2)以乙酸为单独碳源,每 L 污水加入量为 0.282 mL 乙酸.容积为 1.75 L 的人工配制污水由 100 mL 溶液 A 和 1.65 L 溶液 B 组成,每 L 溶液 A 含:1 g MgSO₄·7H₂O;0.45 g CaCl₂·H₂O;2.34 g NH₄Cl;0.5 g 蛋白胨和 6 mL 营养液;每 L 溶液 B 含:29 mg KH₂PO₄和 33 mg K₂HPO₄.每 L 营养液含:1.5 g FeCl₃·6H₂O;0.15 g H₃BO₃;0.03 g CuSO₄·5H₂O;0.18 g KI;0.12 g MnCl₂·4H₂O;0.06 g Na₂MoO₄·2H₂O;0.12 g ZnSO₄·7H₂O;0.15 g CoCl₂·6H₂O和 10 g 乙二胺四乙酸(EDTA).2 套 SBR 的进水 pH 用 2 mol/L NaOH 调为 8.0,进水有机酸 COD 均为 300 mg·L⁻¹,NH₄⁺-N 为 35 mg·L⁻¹,PO₄³⁻-P 为 12 mg·L⁻¹.

1.3 测定方法

微生物细胞内糖原含量的变化采用蒽酮比色法测定^[9].乙酸和丙酸采用气相色谱法测定^[10](色谱仪型号为 HP 5980II 型).聚羟基烷酸(PHAs)采用气

相色谱法测定^[11](色谱仪型号为 Agilent 4890 型),测得的聚羟基丁酸(PHB)和聚羟基戊酸(PHV)作为总 PHAs 的量^[8].pH、MLSS、MLVSS、COD、正磷(PO₄³⁻-P)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)、亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)、总氮(TN)等参数测定参见 APHA 的方法^[12].

反应器中 NO_x-N 产生速率的计算见式(1)^[13]

$$R_{\text{NO}_x-\text{Prod}}[\text{mg}(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}]=\frac{\text{NO}_{x_1}-\text{NO}_{x_0}}{t} \quad (1)$$

式中,NO_{x₁}为好氧末反应器中 NO₃⁻-N 和 NO₂⁻-N 浓度,单位为 mg·L⁻¹;NO_{x₀}为厌氧末 NO₃⁻-N 和 NO₂⁻-N 浓度,单位为 mg·L⁻¹;t 为好氧时间,单位为 h.

2 结果

2.1 SBR1 系统

SBR1 系统中 1 个反应周期内氮、磷、乙酸、丙酸、糖原、PHB 及 PHV 随厌氧和好氧时间的变化如图 1 所示.从图 1 中可以看出:①在有机酸(乙酸和丙酸)存在的厌氧阶段,出现明显的 PO₄³⁻-P 释放,同时约 13%的 NH₄⁺-N 被去除,但没有 NO₂⁻-N 的积累,细胞内贮存的糖原不断地降解,聚磷菌分解胞内的聚磷酸盐和糖原产生 ATP,吸收污水中的挥发性脂肪酸(VFA),同时出现 PHB 和 PHV 的合成.在厌氧阶段的前 35 min 内乙酸和丙酸都被消耗完,此时释磷量为 46.50 mg·L⁻¹,而厌氧 2 h 后释磷量达到最大,为 54.32 mg·L⁻¹,糖原的降解量也达到最大,降解量以 C 计,为 7.66 mmol·L⁻¹,厌氧末 PHV 的合成量明显高于 PHB;②在随后的好氧(低氧)阶段,NH₄⁺-N 随时间增加明显减少,同时出现 NO₃⁻-N 的不断积累,NO₂⁻-N 的最高累积浓度为 0.45 mg·L⁻¹.此外,PO₄³⁻-P 浓度随时间延长而逐渐降低,磷的最大吸收量为 54.02 mg·L⁻¹.由于低氧阶段没有易利用的外碳源(乙酸和丙酸)的存在,微生物将利用内碳源(主要是 PHB 及 PHV)作为其生长、反硝化和磷吸收的能源和碳源,在厌氧阶段合成的 PHB 和 PHV 被分解,糖原被重新合成.从 SBR1 和 SBR2 中 1 个反应周期内 pH 变化特征(图 2)可知,SBR1 中厌氧始 pH 为 7.54,厌氧末 pH 降为 7.35;好氧阶段前 1 h 内,由于 CO₂ 的溢出,pH 明显增加,最高达 7.92,随后下降,到好氧末降为 7.36.

2.2 SBR2 系统

图 3 为 SBR2 系统中 1 个反应周期内氮、磷、乙

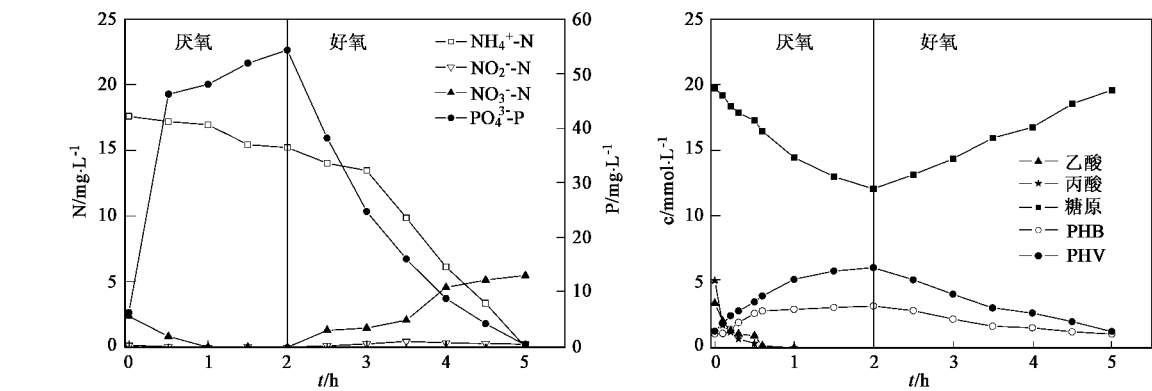


图1 SBR1 中氮、磷、乙酸、丙酸、糖原、PHB 及 PHV 在 1 个反应周期内随厌氧和好氧时间的变化

Fig.1 Variations of nitrogen, phosphorus, acetic, propionic, glycogen, PHB and PHV with anaerobic and aerobic time in SBR1 during one cycle

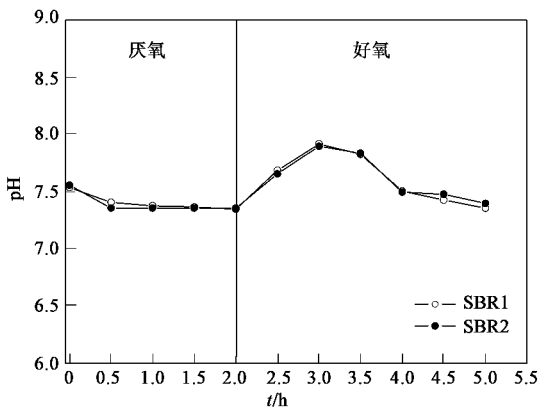


图2 SBR1 和 SBR2 中 1 个反应周期内 pH 的变化

Fig.2 Variation of pH in SBR1 and SBR2 during one cycle

酸、糖原、PHB 及 PHV 随厌氧和好氧时间的变化. 可见, ①在有有机酸(乙酸)存在的厌氧情况下, 出现明显的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 释放, 同时约 16% 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 被去除, 未见 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的积累, 细胞内贮存的糖原不断地降解, 为 PHAs (PHB + PHV) 的合成提供还原能. 乙酸在厌氧段的前 40 min 内全部被消耗, 此时释磷量为 $57.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 厌氧 2 h 后释磷量达到最大, 为 $72.43 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 糖原的降解量也达到最大, 降解量以 C 计, 为 $7.82 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 而厌氧末 PHB 的合成量则明显高于 PHV; ②在随后的好氧(低氧)阶段, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 随时间的增加明显减少, 同时出现 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的不断积累, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的最高积累浓度为 $1.04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 此外, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度随时间延长而逐渐降低, 磷的最大吸收量为 $71.98 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 在没有易利用的外碳源(乙酸)存在的好氧阶段, 微生物将利用内碳源 (PHB 及 PHV) 作为其生长、反硝化和磷吸收的能源和碳源, 在厌氧阶段合成的 PHB 和 PHV 被分解, 糖原被合

成. 由图 2 可知, SBR2 中厌氧始的 pH 为 7.56, 到厌氧末降为 7.36; 好氧阶段前 1 h 内, pH 明显升高到 7.90, 比 SBR1 略低, 随后逐渐下降到 7.40.

3 分析与讨论

3.1 SBR1 和 SBR2 中硝化、反硝化及氮去除的比较

由表 1 可知, SBR1 和 SBR2 中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率均为 100%, 表明其硝化能力都很强. SBR1 中厌氧开始的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度分别为 2.36 和 $0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 厌氧末 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 全部去除, 同时去除了约 13% 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$. 而 SBR2 中厌氧开始的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度分别为 2.93 和 $0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 厌氧末 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 也全部降解, 同时约有 16% 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 被去除. 分析其原因, 可能是由于微生物发生了厌氧氨氧化, 即利用 NH_4^+ 作为电子供体将 NO_3^- 和 NO_2^- 转化为 N_2 . 由于 SBR2 中厌氧始的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度均高于 SBR1, 厌氧条件下微生物能够利用更多的 NH_4^+ 作为电子供体将 NO_3^- 和 NO_2^- 转化为 N_2 , 因此, 厌氧段 SBR2 中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率高于 SBR1. 由于该过程是自养的, 不需要消耗外碳源(乙酸和丙酸), 2 个 SBR 反应器中厌氧段乙酸和丙酸的降解将全部用于合成 PHAs, 进而用于好氧段磷的吸收.

表 1 中也表明, 好氧末 SBR1 中 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的累积浓度为 $0.24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度为 $5.48 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 反应器中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的产生速率为 $1.91 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$, TN 去除率为 68%. 而 SBR2 中好氧末同样没有明显的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 累积 ($0.33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度为 $8.37 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 反应器中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的产

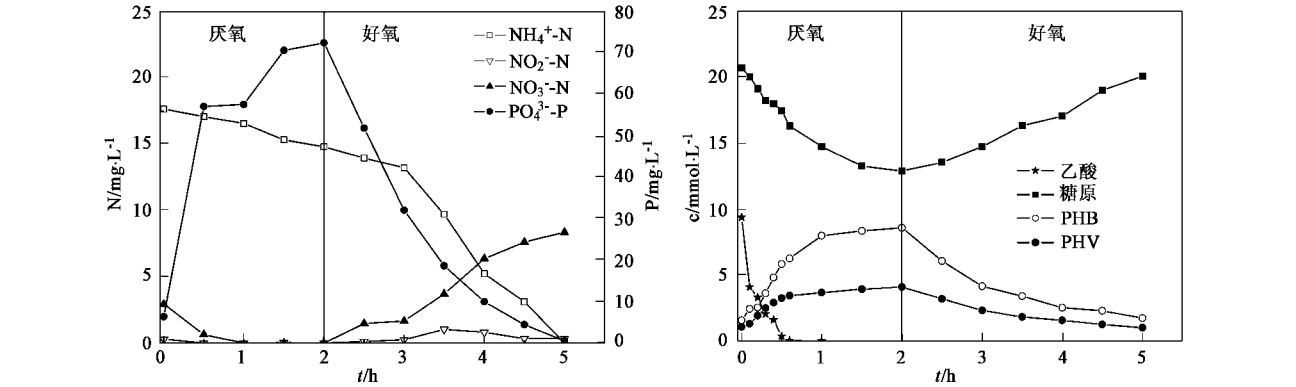


图3 SBR2 中氮、磷、乙酸、糖原、PHB 及 PHV 在 1 个反应周期内随厌氧和好氧时间的变化

Fig.3 Variations of nitrogen, phosphorus, acetic, glycogen, PHB and PHV with anaerobic and aerobic time in SBR2 during one cycle

生速率为 $2.9\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$, TN 去除率为 51%. 理论分析表明, SBR1 中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 全部转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 时, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的浓度应为 $17.63\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 但实际测得好氧末 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度是 $5.48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; SBR2 中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 全部转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 时, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的浓度应为 $17.65\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 实际测得好氧末 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度是 $8.37\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 因此可推测, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的累积是造成 2 个反应器中 TN 去除率差别的主要原因. 相比 SBR1, SBR2 好氧末 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度有所增加, 反应器中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的产生速率大, 因此, SBR2 的反硝化能力低于 SBR1.

表1 SBR1 和 SBR2 中硝化、反硝化及氮的去除率比较

Table 1 Comparison of nitrification, denitrification and nitrogen removal in SBR1 and SBR2

项目	SBR1	SBR2
厌氧始反应器中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	17.63	17.65
厌氧始反应器中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2.36	2.93
厌氧始反应器中 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.15	0.3
好氧末 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0	0
好氧末 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.24	0.33
好氧末 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	5.48	8.37
$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率/%	100	100
反应器中 TN 的去除率/%	68	51

3.2 SBR1 和 SBR2 中 COD 的去除率及磷释放、吸收和去除率比较

2 个 SBR 反应器中 COD 的去除率及磷释放、吸收和去除率比较见表 2. SBR1 中好氧末 COD 为 $35\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, COD 的去除率为 90%; SBR2 中好氧末 COD 为 $45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, COD 去除率为 88%, 略低于 SBR1. 可能的原因是 SBR1 的进水有机碳源为丙酸和乙酸的混合酸, SBR2 中的碳源仅为乙酸, 而厌氧阶段相同

浓度的丙酸和乙酸, 丙酸的降解速率相对较快.

由表 2 可知, 投加了丙酸的 SBR1 中厌氧释磷少、好氧吸磷量较少, 但好氧末磷含量较低, 为 $0.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 磷去除率为 95%. 而 SBR2 中厌氧释磷量 and 好氧吸磷量均高于 SBR1, 但好氧末磷含量也较高, 为 $0.45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 磷的去除率为 92%, 略低于 SBR1.

表2 SBR1 和 SBR2 中 COD 的去除率及磷释放、吸收和去除率比较

Table 2 Comparison of COD removal, phosphorus release, uptake and removal in SBR1 and SBR2

项目	SBR1	SBR2
厌氧始总 COD 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	366	367
好氧末 COD 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	35	45
COD 的去除率/%	90	88
厌氧始反应器中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	6.25	6.30
厌氧释磷量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	54.32	72.43
好氧吸磷量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	54.02	71.98
好氧末磷含量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.3	0.45
反应器中磷($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)的去除率/%	95	92

3.3 丙酸投加对硝化、反硝化及氮、磷去除的影响

上述研究表明, SBR1 和 SBR2 中确实在 DO 浓度为 $0.15\sim0.45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的条件下, 发生了同时除磷、硝化及反硝化^[5]. 但投加了丙酸的 SBR1 中 TN、TP 去除率高, 硝态氮的累积少, 反应器中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的产生速率低, 其同时硝化反硝化和除磷的能力好于 SBR2. Zeng 等^[5] 的试验结果显示, 厌氧始反应器中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为 $22\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 单独用乙酸钠做碳源的同步硝化反硝化除磷 SBR 系统中无 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的累积. 但 Meyer 等^[6] 的研究表明, 同样用乙酸钠做碳源, 厌氧始反应器中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为 $13.72\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 好氧末反应器中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的累积浓度为 $4.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 而 Lemaire 等^[7] 研究得出的结论是, 碳

源也为单一乙酸钠, 厌氧始反应器中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 $12.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 在 5 个月的试验中, 只有前 2 个月的出水中无 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的累积, 而在后 3 个月的出水水质检测中, 均发现了 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的存在, 且稳定在 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右. 但是上述的研究中进水的有机碳源单一, 而实际污水中还含有大量的丙酸. Chen 等^[8] 的研究结果表明, 乙酸废水中丙酸含量的提高对增强生物除磷的效果能够产生显著影响, 但在其配制水样中加入了硝化抑制剂, 不存在硝化作用, 同时没有加入硝酸盐, 也不存在反硝化作用. 因此, 以上结果并不能完全反映实际情况.

在本研究中无论是用乙酸做单独碳源, 还是乙酸和丙酸混合酸做碳源, 反应器中均出现了 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的累积. SBR1 厌氧始 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 $17.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 好氧末 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的累积浓度为 $5.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; SBR2 厌氧始 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 $17.65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 好氧末 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的累积浓度为 $8.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 表明加入了丙酸的 SBR1 中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的累积明显减少. SBR1 和 SBR2 中好氧末磷的去除率分别为 95% 和 92%, 表明丙酸的投加对除磷率有一些提高. 由于本研究是在低氧条件下的同时除磷脱氮, 系统中不但存在增强生物除磷, 同时存在缺氧反硝化除磷, 因此 2 个 SBR 系统的除磷率与以往单独的增强生物除磷效果不相同^[8]. 在本研究的 2 个 SBR 中, 在厌氧初始阶段提供碳源, 因此碳源被聚磷菌选择性地吸收并贮存为 PHAs. 在接下来的低氧阶段, 由于系统的低氧环境及微生物菌胶团中好氧和缺氧区的存在, 为同步硝化和反硝化除磷创造了条件. 然而, 在单一的污泥系统中要实现硝化、反硝化和增强生物除磷这 3 种不同的生物过程, 需要多种细菌菌群的联合作用. SBR2 的污水中仅含有单一碳源乙酸钠, 微生物生物多样性差, 从而降低了同步硝化和反硝化的能力, 使其好氧末 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的累积浓度增加.

图 1 和图 3 表明, SBR1 在厌氧末 PHV 的合成量高于 SBR2, 而高的 PHV 含量导致好的生物除磷效果已被以往的研究证实^[8]. 笔者认为 SBR1 中 PHAs 所含 PHV 量高可能是其 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的累积明显减少的另一个主要原因. 由于在厌氧末, 外碳源(乙酸和丙酸)被全部消耗, 在好氧阶段, 混合溶液中不存在易被利用的溶解性碳源, 细胞内的 PHAs 不断地被消耗, 为磷酸盐的吸收提供能量及为反硝化提供碳源. 因此推测, PHV 可能是一种更加慢速氧化的内碳源, 从而减慢碳源被氧气直接氧化的速率, 延

长了反硝化细菌利用碳源的时间, 有利于反硝化的进行. 可见, 提高微生物体内 PHV 的产量, 可能是提高低氧条件下反硝化进行的一个策略.

4 结论

(1) 不论碳源是乙酸还是丙酸和乙酸的混合酸, 同时硝化、反硝化和除磷(SNDPR)都能发生, 且在好氧(低氧)阶段没有亚硝酸盐的大量累积.

(2) 与纯乙酸作为碳源的 SBR2 系统相比, 丙酸/乙酸碳摩尔比为 1.5/1 的 SBR1 中, 厌氧末磷的释放量少, PHV 的合成量高; 好氧末磷的剩余量少, 硝态氮的累积少.

(3) 以丙酸和乙酸作为碳源的 SBR1 系统中, 氮和磷的去除率(分别为 68% 和 95%)均高于以乙酸作单一碳源的 SBR2(分别为 51% 和 92%). 因此, 在 SNDPR 系统中投加丙酸有助于保持较好的除磷、脱氮效果.

参考文献:

- [1] Yoo K, Ahn K H, Lee H J, *et al.* Nitrogen removal from synthetic wastewater by simultaneous nitrification and denitrification (SND) via nitrite in an intermittently-aerated reactor [J]. *Water Research*, 1999, **33**: 145 ~ 154.
- [2] Zeng R J, Saunders A M, Yuan Z G, *et al.* Identification and comparison of aerobic and denitrifying polyphosphate-accumulating organisms [J]. *Biotechnology Bioengineering*, 2003, **83**: 140 ~ 148.
- [3] Mosquera-Corral A, de Kreuk M K, Heijnen J J, *et al.* Effect of oxygen concentration on N-removal in an aerobic granular sludge reactor [J]. *Water Research*, 2005, **39**: 2676 ~ 2686.
- [4] Oehmen A, Yuan Z, Blackall L L, *et al.* Comparison of acetate and propionate uptake by polyphosphate accumulating organisms and glycogen accumulating organisms [J]. *Biotechnology Bioengineering*, 2005, **91**: 162 ~ 168.
- [5] Zeng R J, Lemaire R, Yuan Z, *et al.* Simultaneous nitrification, denitrification, and phosphorus removal in a lab-scale sequencing batch reactor [J]. *Biotechnology Bioengineering*, 2003, **84**(2): 710 ~ 178.
- [6] Meyer R L, Zeng R J, Giugliano V, *et al.* Challenges for simultaneous nitrification, denitrification, and phosphorus removal in microbial aggregates: mass transfer limitation and nitrous oxide production [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2005, **52**: 329 ~ 338.
- [7] Lemaire R, Meyer R, Taske A, *et al.* Identifying causes for N_2O accumulation in a lab-scale sequencing batch reactor performing simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal [J]. *Journal of Biotechnology*, 2006, **122**: 62 ~ 72.
- [8] Chen Y, Randall A A, McCue T. The efficiency of enhanced biological phosphorus removal from real wastewater affected by acetic to propionic acid ratio [J]. *Water Research*, 2004, **38**: 27 ~ 36.

[9] Jenkins D, Richard M G, Daigger G T. Manual on the causes and control of activated sludge bulking and foaming [M]. (2nd edition). Florida: Lewis Publishers, 1993.

[10] Chen Y, Chen Y, Xu Q, *et al*. Comparison between acclimated and unacclimated biomass affecting anaerobic-aerobic transformations in the biological removal of phosphorus [J]. Process Biochemistry, 2005, **40**: 723 ~ 732.

[11] Braunnegg G, Sonnleitner B, Lafferty R M. A rapid gas chromatographic method for the determination of poly-β-hydroxybutyric acid in microbial biomass [J]. Eur J Appl Microbiol Biotechnology, 1978, **6**: 29 ~ 37.

[12] APHA. Standard methods for the examination of water and waste water [J]. (19th edition). Washington, DC: American Public Health Association, 1995.

[13] Third K A, Burnett N, Cord-Ruwisch R. Simultaneous nitrification and denitrification using stored substrate (PHB) as the electron donor in an SBR [J]. Biotechnology Bioengineering, 2003b, **83**: 706 ~ 720.

《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部决定自 2006 年 8 月 1 日起开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址:<http://www.hjkx.ac.cn>). 该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能,欢迎广大作者、读者和审稿专家使用.自 2006 年 8 月 1 日起,我刊所有来稿都将通过网站编辑信息管理系统进行.作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面上给出的提示投稿即可.如果您在使用过程中有问题,请及时与我刊编辑部联系.

邮政地址:北京市海淀区双清路 18 号《环境科学》编辑部
邮 编:100085
电 话:010-62941102,010-62849343
传 真:010-62849343
E-mail:hjkx@rcees.ac.cn
网 址:www.hjkx.ac.cn

《环境科学》编辑部