

单级好氧除磷工艺与厌氧/好氧除磷工艺的对比研究

杨帆^{1,3}, 王冬波^{1,3}, 李小明^{1,2,3*}, 杨麒^{1,3}, 邓莹^{1,3}, 罗琨^{1,3}, 邹正军^{1,3}, 曾恬静^{1,3}, 邓嫔⁴

(1. 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082; 2. 广西大学环境学院, 南宁 530004; 3. 环境生物与控制教育部重点实验室(湖南大学), 长沙 410082; 4. 湖南有色金属研究院, 长沙 410015)

摘要:以 A/O 工艺和单级好氧除磷工艺为研究对象, 利用生活污水中存在最广泛的乙酸钠作为单一碳源, 对比研究了 2 组 SBR (A/O 工艺, SBR1; 单级好氧除磷工艺, SBR2) 的除磷效果. 连续进行 3 个月的研究表明, 2 组 SBR 在稳定除磷阶段的除磷率和单位污泥的除磷水平分别为 91.72% 和 3.23 mg·g⁻¹ (SBR1) 与 71.70% 和 2.91 mg·g⁻¹ (SBR2). 进一步研究还发现: 在 SBR1 中 PHA 合成的同时伴随着糖原质的消耗, 而在 SBR2 中 PHA 合成的同时伴随糖原质的积累, 这意味着单级好氧除磷工艺中 PHA 的合成无需糖原质的参与; 在静置阶段, 2 组 SBR 都表现出了很明显的释磷现象, 但 SBR2 具有更高的释磷水平(释磷量分别为 2.6 mg·L⁻¹ 和 13.28 mg·L⁻¹). SBR1 和 SBR2 体现出不同的除磷能力的原因很有可能是 2 组 SBR 的微生物在代谢过程中储能物质在消耗和存贮的循环过程中存在差异.

关键词:单级好氧除磷工艺; A/O 工艺; 模拟城市生活污水; SBR; 糖原质; 聚磷酸盐

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)11-3379-07

Comparison Study on Phosphorus Removal Between Single-stage Oxidic Process and Anaerobic/Aerobic Process

YANG Fan^{1,3}, WANG Dong-bo^{1,3}, LI Xiao-ming^{1,2,3}, YANG Qi^{1,3}, DENG Ying^{1,3}, LUO Kun^{1,3}, ZOU Zheng-jun^{1,3}, ZENG Tian-jing^{1,3}, DENG Pin⁴

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. College of Environment, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control (Hunan University), Ministry of Education, Changsha 410082, China; 4. Research Institute of Hunan Nonferrous Metals, Changsha 410015, China)

Abstract: To compare the efficiency of phosphorus removal between anaerobic/aerobic process (SBR1) and single-stage oxidic process (SBR2), two SBRs were conducted using acetate as the sole carbon source which is the most extensive substrate in municipal wastewater. The results obtained from three months experiment showed that the phosphorus removal efficiency and the TP removed on a unit MLSS were 91.72%, 3.23 mg·g⁻¹ (SBR1) and 71.70%, 2.91 mg·g⁻¹ (SBR2) respectively during steady operation. The further study found that a significant increase of PHA associated with an decrease of glycogen in SBR1 while a significant synthesis of PHA increased with the accumulation of glycogen in SBR2, indicating glycogen was not essential for the synthesis of PHA in single-stage oxidic process. Furthermore, obvious phosphorus release was observed in both SBRs during idle period, but the content of phosphorus released in SBR2 (13.28 mg·L⁻¹) was significantly higher than that in SBR1 (2.6 mg·L⁻¹). The possible reason for SBR1 and SBR2 exhibited different phosphorus removal efficiencies was that microorganisms in both SBRs had different cyclic storage and consumption process of energy storages during metabolic process.

Key words: Single-stage oxidic process; A/O process; simulated municipal wastewater; SBR; glycogen; poly-phosphate

水体中营养物质(主要为氮磷,特别是磷)浓度值超出自然水体背景值可能会引起水体中藻类(主要为蓝藻)和光合细菌的大量快速繁殖,并最终导致水体富营养化^[1~4]. 强化生物除磷(EBPR)因具有很少采用甚至不采用化学药剂的特点且被认为是目前最为经济有效和环境可持续性的除磷方法^[5~8],而被广泛运用于生活污水除磷^[3,10]. 众所周知,传统 EBPR(即厌氧/好氧工艺, A/O)的基本原理是通过厌氧释磷与好氧摄磷的交替组合的途径选择性富集一类具有“超量吸磷”并转化为细胞体内聚磷酸盐的微生物(聚磷菌, PAOs),并最终通过排放剩余

污泥方式实现生物除磷^[2,10]. A/O 工艺在实际应用中早已获得了较好的除磷效果. 文献[8]对荷兰的 12 座典型生物处理污水处理厂的长期运行进行分析得出:在稳定运行期间,所有污水处理厂总磷的去除效率均大于 85%,而且出水磷酸盐浓度,以加权平均形式表达也均达到了地方标准;然而,其中有 4

收稿日期: 2010-12-19; 修订日期: 2011-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078128); 湖南省研究生科研创新项目(CX2009B079)

作者简介: 杨帆(1986~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: yfqi@hnu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: xmli@hnu.edu.cn

座污水厂大约有 1 a 的时间以动态的平均形式表达的出水磷酸盐浓度未达到标准,甚至另有 2 座污水厂分别有 2 a 和 1 a 的时间出水不能达标. 传统 EBPR 的 PAOs 会受到一些环境因素(如硝酸盐、pH 和碳源种类等)的干扰而影响除磷效果^[2, 3, 5]. 这些表明传统 EBPR 的稳定性和可靠性尚存在问题.

现有工艺的任何改善都会对大量日常污水的处理产生切实的经济和生态效益. 目前许多研究者通过研究 EBPR 系统中存在的微生物及其生物化学机制试图使其成为一种更具可靠性的处理工艺^[11, 12];而其他研究者侧重于工艺改善以获得磷去除的高效性或经济性^[13, 14]. 从 2005 年研究内循环 SBR 反应器无厌氧段同步脱氮除磷过程中观察到磷的高效去除(去除率达到 95.6%),本课题组一直致力于研究这种有别于传统除磷理论的现象,并将其命名为单级好氧生物除磷工艺^[19-25]. 以葡萄糖(葡萄糖是被传统 A/O 工艺广泛认为不利于除磷的碳源)作为单一基质,深入研究证明了这种除磷工艺是一种真实有效的生物除磷过程,其除磷特征为:在无厌氧段直接曝气条件下,某些特定的微生物大量合成糖原质却无 PHA 合成也能将废水中磷酸盐合成聚磷^[20, 21].

单级好氧除磷作为一种新型的 EBPR 工艺,其具有被运用于污水处理厂而成为一种简单而有效的除磷工艺的潜在价值. 然而,单级好氧除磷工艺与传统 A/O 工艺相比是否具有某些更好的潜在优势尚不明确. 因而,本研究以生活污水中存在最多最广泛的乙酸盐作为单一碳源^[3],深入对比单级好氧生物除磷与 A/O 工艺在相同条件下的除磷特性,以期为日后工程应用提供必要的参考.

表 1 人工模拟废水组成

Table 1 Components of the synthetic wastewater

乙酸钠(以 C 计) /mmol·L ⁻¹	磷酸二氢钾(以 P 计) /mg·L ⁻¹	氯化铵 /mg·L ⁻¹	硫酸镁 /mg·L ⁻¹	氯化钙 /mg·L ⁻¹	微量元素 /mL
15	12	40	10	5	0.6

制硝化作用对本实验的影响.

1.3 分析方法

溶解氧(DO):便携式溶解氧仪法^[27];pH:玻璃电极法^[27];总磷(TP):钼锑抗分光光度法^[27];混合液悬浮固体与混合液挥发性悬浮固体(MLVSS):重量法^[27];COD:重铬酸钾法^[27];糖原质:苯酚-硫酸法^[20-24];PHA:气相色谱法^[20-24],色谱分析仪型号为安捷伦 6890N.

2 结果与分析

2.1 SBR 实验影响因素的控制

1 材料与方法

1.1 实验装置及运行方法

实验以 2 个体积为 2L 的玻璃烧杯作为 SBR 反应容器(分别称为 SBR1、SBR2). 接种的活性污泥取自长沙市第二污水处理厂,并控制初始活性污泥浓度(MLSS)均在 4 000 mg·L⁻¹左右.

2 组 SBR 每天运行 3 个周期(8 h). 单个周期的具体运行方式如下.

SBR1:进水→厌氧(2 h)→好氧(4 h)→静置(2 h)→出水

SBR2:进水→好氧(4 h)→静置(4 h)→出水

由于在静置阶段活性污泥会发生厌氧释磷,但释放的磷主要在泥相中,另一方面为对比研究 SBR1 和 SBR2 在静置过程中厌氧阶段的释磷特征以及方便日常实验操作,而有意使 SBR 工艺的沉淀出水阶段置于静置阶段末. 进水 1 L 后,2 组 SBR 的有效体积均为 1.8 L. SBR1 的厌氧阶段采用磁力搅拌器搅拌,搅拌强度达到使活性污泥处于悬浮状态即可. 好氧曝气阶段 2 组 SBR 采用 2 台相同的鼓风曝气机进行曝气,曝气量控制在 3 L·min⁻¹. 在好氧阶段末排出泥水混合物 100 mL 使污泥平均停留时间(MSRT)均控制在 18 d. 在静置阶段结束后两反应器均排水约 1 L,即水力停留时间(HRT)约 14 h.

1.2 污水水质

本实验进水采用人工合成废水,并选取乙酸钠作为外加碳源. 2 组 SBR 的进水成分及浓度均相同(见表 1). 其中,微量元素主要成分及浓度见文献[26]. 实验运行时添加 0.5 mL 硝化抑制剂用以抑

污水的组成成分(如:COD、VFA 含量、离子浓度、磷负荷、pH 和污泥负荷等)以及不同运行参数(如:温度、DO 和 pH 等)对 EBPR 能否成功运行有重要的影响^[5]. SBR1 和 SBR2 进水相同见表 1,即 2 组 SBR 污水初始组成成分相同.

在运行参数中,文献表明较高的 pH 有利于 A/O 工艺中厌氧释磷,不同的温度条件也会对 PAOs 的竞争优势产生一定的影响等^[2, 3, 5];并且在单级好氧除磷工艺中,丁艳等^[25]的研究也表明较高的 pH 具有更好的除磷效果. 然而,SBR1 和 SBR2 在运行过程中的温度和 pH 并没有维持在某个特定的理

想值,这恰与实际污水处理过程相符. EBPR 系统中硝化和反硝化作用是 pH 中的变化主要原因^[28]. 图 1 反映出 SBR1 和 SBR2 在第 40 d 和第 70 d 分别测得的周期内运行的 DO 和 pH 变化,且 2 次测得的相同参数的变化基本吻合. 这表明 2 组 SBR 的 DO 和 pH 在实验期间都分别维持在相同的条件运行. 可以看出 SBR1 和 SBR2 在初始时刻 $\text{pH} = 7.4 \pm 0.08$,但 SBR1 的 pH 表现出厌氧阶段略有降低,下降幅度为

0.25,但随后的好氧阶段迅速从 7.12 上升到 8.60,这与文献[28]变化趋势相符. SBR2 在好氧阶段 pH 直接从初始值 7.37 迅速上升至 8.54,最后的静置阶段 SBR1 和 SBR2 分别下降到 7.89 和 7.87. SBR1 和 SBR2 与文献[28]在好氧阶段的初始阶段都有一个明显的 DO 为 0 ($\leq 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)的过程. SBR1 和 SBR2 相应的 pH 和 DO 的变化差异可以反映出 A/O 和单级好氧生物除磷工艺对相同初始条件的不同响应.

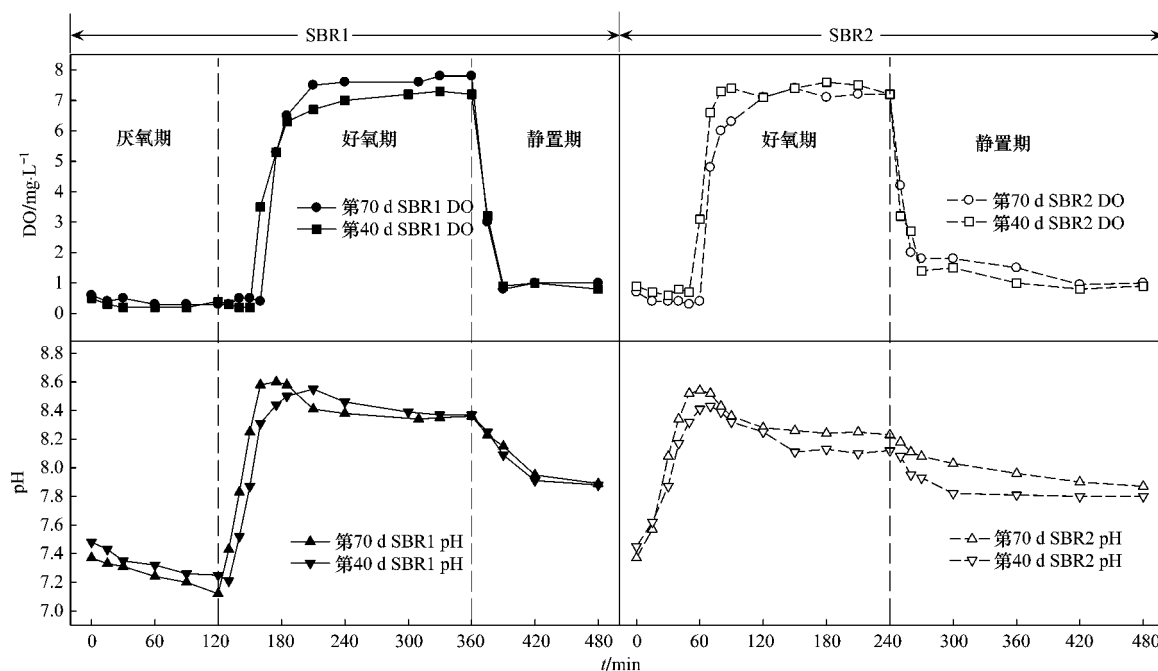


图 1 SBR1 和 SBR2 在第 40 d 和第 70 d 的周期内 pH 和 DO 变化

Fig. 1 Profiles of pH and DO in two SBRs during one cycle of day 40 and day 70 experiments

2.2 SBR1 和 SBR2 运行效果比较

为对比分析 2 种不同工艺的稳定性和优异性,本 SBR 实验进行了 3 个月对比研究. 图 2 是 SBR 反应器在长期运行过程中 TP 的变化,可以明显看出 SBR1 和 SBR2 经过 35 d 的驯化期后,除磷效果基本稳定. 传统除磷理论认为 PAOs 的生长相对比较缓慢,以及实现厌氧吸收底物和分解聚磷酸盐所必须的酶需要环境诱导^[1,2]. 单级好氧除磷工艺可能也存在相类似的情况. 这意味着 SBR1 和 SBR2 需要 2 倍 MSRT 的驯化时间进入稳定阶段. 在驯化过程中, SBR1 和 SBR2 去除率从最初的分别为 46.2% 和 38.9%,至第 25 d 的 P 去除率上升至接近稳定阶段,分别为 81.1% 和 68.1%. 然而,在第 26 ~ 35 d 都出现了一个很明显的异常波动,并伴随的是污泥沉降性能变差,去除率甚至低于起初的去除率(分别为 41.3% 和 34.9%). 由于 2 组 SBR 都出现了相

同程度的恶化,所以这个异常的波动可能是由于环境温度的变化所致,但具体的确切原因有待考证. 经过此波动后 2 组 SBR 的除磷性能基本稳定. 表 2 显示 SBR 稳定运行阶段的平均除磷率和平均出水磷浓度分别为 91.72% 和 $1.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (SBR1) 与 71.70% 和 $3.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (SBR2). 这表明在相同条件下,以乙酸钠作为碳源,传统 A/O 的除磷能力优于单级好氧除磷,但 SBR2 稳定期常规运行期间平均除磷 $8.38 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 目前国内外城市生活污水中进水磷浓度大多在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右甚至只有 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[8],因而单级好氧除磷工艺仍具有应用于实际污水除磷的价值.

2.3 经济技术分析

对于不同工艺的评价,除了工艺之间的运行效果比较(如本实验的除磷效果),建设和运行成本也是一个重要的评价内容. 表 3 将传统 A/O 工艺与新

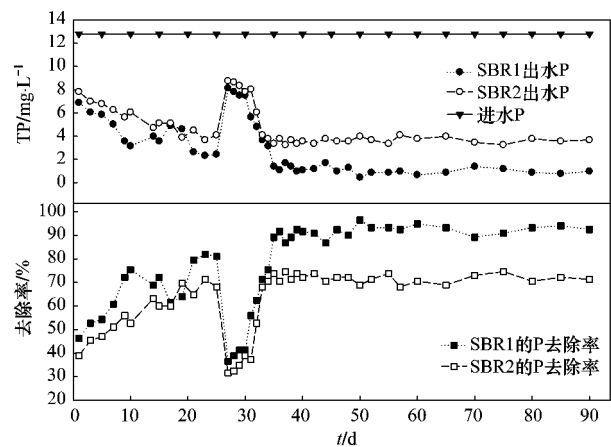


图2 SBR1 和 SBR2 90 d 运行过程中 TP 去除
Fig.2 Removal of TP in SBR1 and SBR2 during 90 days operation

表2 SBR1 和 SBR2 稳定运行阶段运行效果

Table 2 Summary of performance parameters in two SBRs during steady-state operation						
反应器	最高去除率 /%	最低去除率 /%	最高出水浓度 /mg·L ⁻¹	最低出水浓度 /mg·L ⁻¹	平均去除率 /%	平均出水浓度 /mg·L ⁻¹
SBR1	94.8	90.0	1.28	0.67	91.72	1.06
SBR2	74.6	68.1	4.08	3.2	71.70	3.62

表3 A/O工艺与单级好氧除磷工艺经济技术分析

Table 3 Economical and technical analyses between A/O and single-stage oxic process		
项目	A/O工艺 (SBR1)	单级好氧除磷 工艺(SBR2)
除磷效率/%	91.72	71.70
HRT/h	14	14
稳定性	容易受到外界条件如硝酸盐和葡萄糖的干扰	硝酸盐和葡萄糖对其无明显干扰
管理维护	较为复杂(需要维持厌氧阶段的厌氧条件)	较为简单(无厌氧阶段)

阶段或营养物的缺乏等的外界干扰条件影响而易出现除磷效果的波动^[2]. 有文献表明:厌氧阶段回流 25 mg 硝态氮至有效体积为 3.6 L 的反应器中,磷的释放量减少 30%^[18],而磷在厌氧阶段的释放量直接关系到好氧阶段磷的吸收量^[5],因而控制好氧阶段的硝化作用对厌氧阶段的影响对 A/O 工艺除磷成功运行十分关键. 本实验为降低好氧阶段硝化作用对 A/O 工艺影响又考虑到需要保持相同的进水条件,进水相同地都添加了硝化抑制剂. 实际污水处理厂为达到相同的目的采用的是对 A/O 工艺进行改良组合,如 UCT 工艺、DEPHANOX 工艺以及五阶段 Bardenpho 工艺等,但增加的是回流途径和处理过程,这无疑大大增加了管理维护成本. 此外,葡萄糖被认为不利于 A/O 除磷工艺的碳源^[3]. 但 Wang 等^[21]在未添加抑制剂并以葡萄糖作为碳源的条件

型单级好氧除磷工艺进行了经济和技术对比分析. 在除磷效果方面,2 组 SBR 的长期运行效果对比可知 A/O 除磷具有较高的除磷能力;在稳定性方面,2 种工艺在本实验中没有体现出明显的差异;在建设成本方面,2 组 SBR 具有相同的 SRT 即具有相同的反应器容积,因而建设成本相同,但实际 A/O 工艺为了增加污水日处理量而增加了处理周期使得静置时间低于 2 h,同时所需要的反应器容积减小使得建设成本降低. 但在管理维护,单级好氧生物除磷工艺占据一定的优势. 与传统 A/O 工艺相比,单级好氧除磷工艺明显“缺失”了一步厌氧段,这就降低了单级好氧除磷运行管理维护而具有相对较低的运行成本. EBPR 系统受到暴雨、过量硝酸盐进入厌氧

下,单级好氧除磷工艺的除磷率仍达到 90% 以上. 因而单级好氧除磷工艺的管理维护成本较低并具有更好的潜在除磷效果稳定性.

3 讨论

图 3 是 2 组 SBR 在第 55 ~ 80 d 内 MLSS 和 MLVSS/MLSS 变化图. 可以看出 MLSS 表现出的差异较小,其平均值为 3 309 mg·L⁻¹ (SBR1) 与 3 243 mg·L⁻¹ (SBR2). 另一方面,在第 59 d 测得 2 组 SBR 周期除磷量分别为 11.5 mg·L⁻¹ 和 8.8 mg·L⁻¹ 而 MLSS 分别为 3 574 mg·L⁻¹ 和 3 024 mg·L⁻¹,这表明单位 MLSS 去除磷能力 SBR1 (以 P 计, 3.23 mg·g⁻¹) 稍高于 SBR2 (以 P 计, 2.91 mg·g⁻¹),另一方面,图 3 显示 2 组 SBR 的 MLVSS/MLSS 中 SBR1 低于 SBR2,这也意味着 SBR1 的单位重量的污泥内聚磷水平高于 SBR2^[29].

长期运行效果显示出 SBR1 的除磷效果明显好于 SBR2,出现这种现象的内在原因是:传统 EBPR 即 A/O 工艺通过 PAOs 在厌氧条件下消耗聚磷酸盐而提供能量(即厌氧释磷),吸收外界碳源并以糖原质提供还原当量合成 PHA,好氧阶段 PAOs 以 PHA 作为能源物质,大量吸收环境中的磷酸盐合成聚磷酸盐(即“超量吸磷”),同时合成糖原质,最后通过排除部分富含聚磷酸盐污泥的方式实现最终除磷^[1~3]. 但也有文献表明,三羧酸循环(TCA)也为

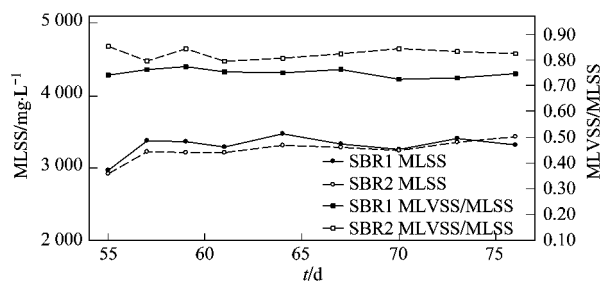


图3 第55~80 d期间内 MLSS 与 MLVSS/MLSS 变化

Fig. 3 Changes of MLSS and MLVSS in SBR1 and SBR2 between day 55 and day 80 experiment

PHA 合成提供一部分还原当量^[16]. 然而,前期研究表明单级好氧生物除磷工艺以乙酸钠作为外界碳源时,PAOs 在外碳源消耗阶段期间主要通过 TCA 循环作为能量和还原当量来源,迅速合成主要的储能物质 PHA,同时糖原质和聚磷酸盐也有少量合成;在外碳源消耗完后以分解 PHA 作为能量来源大量合成聚磷酸盐(即“超量吸磷”),同时糖原质也发生少量累积,最终通过排泥方式实现生物除磷^[23, 24].

第40 d、第59 d和第80 d做了2组 SBR 典型周期内 TP、COD、糖原质与 PHA 变化的重复实验. 图4和5是根据第59 d做出的实验图,这2组图体现了这2种生物除磷工艺不同的新陈代谢方式. 厌氧期,以A/O工艺运行的 SBR1 如图4,TP 从初始时刻浓度为 $16.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 迅速上升,直到第90 min 释磷量达到整个厌氧期总释磷量的 96.2%,紧接着的第90~120 min 释磷速度明显降低即二次释磷(Chen 等^[6]的研究中厌氧期释磷也存在二次释磷),期间总释磷量为 $33.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 使得水相中 TP 达到最高值 $49.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;与此同时伴随的是 PHA 的合成(以 C 计合成量为 $8.7 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)、糖原质的消耗(以 C 计消耗量为 $3.52 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)以及大部分 COD 的去除(去除量占总去除量的 81%). 好氧期, SBR1 的主要变化有水相中 TP 的快速降低(下降幅度为 $48.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、PHA 的消耗 $9.35 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、糖原质的合成 $6.15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 以及部分 COD 的去除(去除量占总去除量的 19%).

如图5所示,在 SBR2 运行的无厌氧期的单级好氧除磷工艺中,TP 从初始时刻的 $26.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降到出水的 $4.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (下降幅度为 $22.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),而此过程伴随的是 PHA 的先合成 $5.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 后减少 $7.6 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,以及 COD 在 60 min 后即实现去除相当进水的 93% 和糖原质合成 $1.7 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$. 对于 A/O 工艺厌氧阶段 PAOs 能否快速摄取环境中

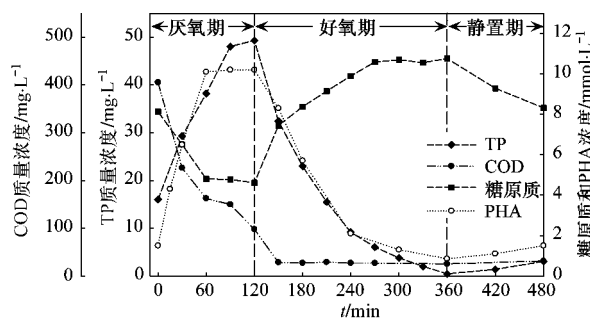


图4 第59 d SBR1 典型周期内 TP、COD、糖原质与 PHA 的变化

Fig. 4 Variations of TP, COD and sludge glycogen as well as sludge PHAs during one cycle in SBR1 of day 59 experiment

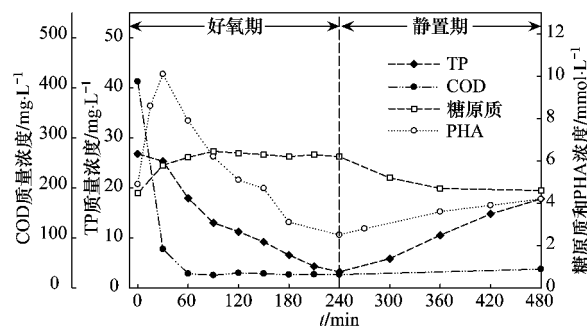


图5 第59 d SBR2 典型周期内 TP、COD、糖原质与 PHA 的变化

Fig. 5 Variations of TP, COD and sludge glycogen as well as sludge PHAs during one cycle in SBR2 of day 59 experiment

的有机底物是 EBPR 成功的关键,而底物的吸收取决于 PAOs 体内的聚磷酸盐与糖原质的含量,前者提供能量来源而后者主要提供合成 PHA 的还原当量以及少部分的能量^[3, 10],也有文献表明,外碳源通过三羧酸循环也为 PHA 的合成提供一部分还原当量但其贡献量只有约 30%^[15];对于 SBR2 糖原质在整个好氧阶段并没有出现有减少,这表明在单级好氧除磷工艺中通过三羧酸循环已经替代糖原质为 PHA 的合成提供还原当量. 所以, SBR2 的糖原质合成量远远低于 SBR1 的原因可能是糖原质在不同工艺所发挥的作用不同,在 A/O 工艺好氧阶段需要合成较多的糖原质,以弥补厌氧阶段的消耗量实现糖原质的代谢循环以及维持厌氧阶段氧化还原的平衡.

静置期, SBR2 的静置时间是 SBR1 的 2 倍,这是由于单级好氧生物除磷在较长时间的外基质缺乏静置期中, PAOs 由于具有维持自身生命能量来源的聚磷酸盐,从而在 EBPR 系统中占据主导地位,并在下一周期的好氧期中诱导 PAOs 过量摄取环境中的

磷酸盐以补充静置期消耗的聚磷酸盐,从而平衡磷的代谢循环^[24].通过对比2组SBR的静置期可以观察到另一个明显的差异,即SBR2的释磷量和释磷速率分别为 $13.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $3.32 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$,明显相应高于SBR1($2.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.3 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$).这表面上是由于SBR2静置时间长以及较高的释磷率引起.然而,在图4和图5中可以看出更深层次的原因,进入静置期的初始时刻SBR1的糖原质处于较高的含量,而有研究表明^[30],在聚磷酸盐和糖原质同时存在时,微生物将优先消耗糖原质.因此在长时间的静置以及较低水平的糖原质贮备的条件下,SBR2释磷量和释磷速率都远高于SBR1.这也是导致SBR2初始时刻TP含量远高于SBR1的初始时刻以及进水TP的原因.

在聚磷菌的新陈代谢过程中,贮存的聚磷酸盐、糖原质和PHA都起着非常重要的作用^[8].传统除磷理论认为PAOs的新陈代谢过程的明显特征是糖原质和聚磷酸盐的消耗和存贮的循环过程^[8].本实验虽未直接测定细胞内的聚磷酸盐,但通过水相中TP的变化可在一定程度上予以反映出.因而,SBR1和SBR2在代谢过程中明显地表现出这3种重要化合物消耗和存贮的循环过程的差异,这可能是导致2组SBR表现出不同除磷能力的重要原因.

SBR1和SBR2的实验研究表明,以乙酸钠作为碳源,A/O工艺除磷性能优于单级好氧除磷工艺;但单级好氧除磷工艺无厌氧阶段且前期研究表明在未添加抑制剂并以葡萄糖作为碳源条件下,单级好氧除磷工艺的除磷率仍达到90%以上.这表明单级好氧除磷工艺具有相对简单的除磷过程以及在某些方面具有更好的潜在除磷稳定性的优势.为进一步研究单级好氧除磷工艺的潜在优势,下一阶段的研究将运用于处理实际生活废水,并对新型EBPR系统从微生物学和分子生物学角度深入研究其除磷机制.

4 结论

2组SBR分别以A/O工艺与单级好氧生物除磷工艺运行.运行结果显示A/O工艺(SBR1)具有较高的除磷效果(稳定运行阶段除磷率分别为91.72%与71.70%).SBR2也达到了良好的除磷效果(稳定运行期平均除磷量达 $8.60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),这表明单级好氧生物除磷工艺具有应用于实际污水除磷工艺或作为A/O工艺一种辅助除磷工艺的价值.SBR1和SBR2表现出不同的除磷能力的原因可能是2组

SBR的微生物在代谢过程中储能物质在消耗和存贮的循环过程中存在差异.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] De-Bashan L E, Bashan Y. Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997-2003) [J]. *Water Research*, 2004, **38**(19): 4222-4246.
- [3] Oehmen A, Lemos P C, Carvalho G, *et al.* Advances in enhanced biological phosphorus removal: from micro to macro scale [J]. *Water Research*, 2007, **41**(11): 2271-2300.
- [4] Xie L Q, Xie P, Li S X, *et al.* The low TN:TP ratio, a cause or a result of *Microcystis* blooms? [J]. *Water Research*, 2003, **37**(8): 2073-2080.
- [5] Mulkerrins D, Dobson A D W, Collieran E. Parameters affecting biological phosphate removal from wastewaters [J]. *Environment International*, 2004, **30**(2): 249-259.
- [6] Chen Y G, Randall A A, McCue T. The efficiency of enhanced biological phosphorus removal from real wastewater affected by different ratios of acetic to propionic acid [J]. *Water Research*, 2004, **38**(1): 27-36.
- [7] Oehmen A, Saunders A M, Vives M T, *et al.* Competition between polyphosphate and glycogen accumulating organisms in enhanced biological phosphorus removal systems with acetate and propionate as carbon sources [J]. *Journal of Biotechnology*, 2006, **123**(1, 3): 22-32.
- [8] 祝贵兵, 彭永臻. 生物除磷设计与运行手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [9] Broughton A, Pratt S, Shilton A. Enhanced biological phosphorus removal for high-strength wastewater with a low rbCOD:P ratio [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(5): 1236-1241.
- [10] Mino T, Vanloosdrecht M C M, Heijnen J J. Microbiology and biochemistry of the enhanced biological phosphate removal process [J]. *Water Research*, 1998, **32**(11): 3193-3207.
- [11] Pantelis K, Parsons S A, Pearce P, *et al.* An internal carbon source for improving biological nutrient removal [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(1): 149-154.
- [12] Pijuan M, Oehmen A, Baeza J A, *et al.* Characterizing the biochemical activity of full-scale enhanced biological phosphorus removal systems: a comparison with metabolic models [J]. *Biotechnology Bioengineering*, 2008, **99**(1): 170-179.
- [13] Fu Z M, Yang F L, An Y Y, *et al.* Simultaneous nitrification and denitrification coupled with phosphorus removal in an modified anoxic/oxic-membrane bioreactor (A/O-MBR) [J]. *Biochemical Engineering*, 2009, **43**(2): 191-196.
- [14] Zhang H M, Wang X L, Xiao J N, *et al.* Enhanced biological nutrient removal using MUCT-MBR system [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(3): 1048-1054.
- [15] Pereira H, Lemos P C, Reis M A, *et al.* Model for carbon

- metabolism in biological phosphorus removal processes based on in vivo ^{13}C -NMR labelling experiments [J]. *Water Research*, 1996, **30**(9):2128-2138.
- [16] Chuang S H, Ouyang C F. The biomass fractions of heterotrophs and phosphate-accumulating organisms in a nitrogen and phosphorus removal system [J]. *Water Research*, 2000, **34**(8):2283-2290.
- [17] Merzouki M, Delgenes J P, Bernet N, *et al.* Polyphosphate-accumulating and denitrifying bacteria isolated from anaerobic-anoxic and anaerobic-aerobic sequencing batch reactors [J]. *Current Microbiology*, 1999, **38**(1):9-17.
- [18] Kuba T, Murnleitner E, van Loosdrecht M C M, *et al.* A metabolic model for biological phosphorus removal by denitrifying organisms [J]. *Biotechnology Bioengineering*, 1996, **52**(6):685-695.
- [19] 王冬波, 李小明, 曾光明, 等. 内循环 SBR 反应器无厌氧段实现同步脱氮除磷[J]. *环境科学*, 2007, **28**(3):534-539.
- [20] 王冬波, 李小明, 杨麒, 等. SBR 无厌氧段实现生物除磷[J]. *环境科学*, 2008, **29**(7):1867-1873.
- [21] Wang D B, Li X M, Yang Q, *et al.* Biological phosphorus removal in sequencing batch reactor with single-stage oxic process [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(13):5466-5473.
- [22] 刘医璘, 王冬波, 李小明, 等. 2 种典型基质作为碳源对单级好氧生物除磷影响的研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(1):124-128.
- [23] 王冬波, 李小明, 杨麒, 等. 碳源对 SBR 单级好氧工艺中微生物摄磷能力的影响及其机理研究[J]. *中国科学 B 辑: 化学*, 2009, **39**(6):560-568.
- [24] Wang D B, Li X M, Yang Q, *et al.* The probable metabolic relation between phosphate uptake and energy storages formations under single stage oxic condition [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(17):4005-4011.
- [25] 丁艳, 王冬波, 李小明, 等. pH 值对 SBR(序批式反应器)单级好氧生物除磷的影响[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(3):333-338.
- [26] Smolders G J F, Van der Meij J, Van Loosdrecht M C M, *et al.* Stoichiometric model of the aerobic metabolism of the biological phosphorus removal process [J]. *Biotechnology Bioengineering*, 1994, **44**(7):837-848.
- [27] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [28] AkIna B S, Ugurlu A. Monitoring and control of biological nutrient removal in a sequencing batch reactor [J]. *Process Biochemistry*, 2005, **40**(8):2873-2878.
- [29] Oehmen A, Vives M T, Lu H B, *et al.* The effect of pH on the competition between polyphosphate-accumulating organisms and glycogen accumulating organisms [J]. *Water Research*, 2005, **39**(15):3727-3737.
- [30] Lu H B, Keller J, Yuan Z G. Endogenous metabolism of *Candidatus Accumulibacter phosphatis* under various starvation conditions [J]. *Water Research*, 2007, **41**(21):4646-4656.