

SBR 中除磷颗粒污泥的培养和 A/O 及 A/A/O 颗粒污泥工艺除磷特性研究

刘小英¹, 姜应和¹, 郭超², 彭党聪²

(1. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 武汉 430070; 2. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要:以絮状活性污泥为接种污泥, 乙酸钠为碳源, 在 SBR 反应器内采用水力筛选的方法进行生物除磷颗粒污泥培养, 然后诱导为反硝化聚磷颗粒污泥, 探讨 2 种颗粒污泥除磷特性。结果表明, 在厌氧/好氧(A/O)交替运行条件下, 82d 后培养出生物除磷颗粒污泥, 污泥颜色呈淡黄色, 粒径为 0.5~1.5 mm, 沉速为 20~30 m/h, 含水率为 94%, 密度为 1.043 9, SVI 在 50 mL/g 以下; 437 d 时污泥最大比释磷速率(SRPR)为 67.7 mg/(g·h), 最大比吸磷速率(SUPR)为 43.2 mg/(g·h), 污泥中总磷的含量(TP/SS)为 6.5%; 448 d 时改变运行条件为厌氧/缺氧/好氧(A/A/O)进行反硝化聚磷试验, 653 d 时反硝化聚磷颗粒污泥最大 SRPR 为 30 mg/(g·h), 最大缺氧 SUPR 为 27.9 mg/(g·h), TP/SS 为 6.3%。生物除磷颗粒污泥和反硝化聚磷颗粒污泥具有较强的除磷能力。

关键词: SBR; 颗粒污泥; 生物除磷

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)09-2655-06

Formation of the Phosphorus Removal Granular Sludge and Phosphorus Removal Characteristics of the Anaerobic/Oxic and Anaerobic/Anoxic/Oxic Granular Sludge Process in SBR

LIU Xiao-ying¹, JIANG Ying-he¹, GUO Chao², PENG Dang-cong²

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. School of Environmental & Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Phosphorous removal & denitrifying phosphate uptake of the granular sludge was investigated in this study. Inoculated with flocculation sludge, the granulation of the biological phosphorous removal sludge was realized in a sequencing batch reactor (SBR) fed with sodium acetate by means of hydraulic selection under an anaerobic/oxic alternating operation (referred to as an A/O). Then the biological phosphorous removal granular sludge was induced into the denitrifying phosphate uptake granular sludge under an anaerobic/anoxic/oxic alternating operation (referred to as an A/A/O). The properties of the two kinds of granular sludge were studied. The biological phosphorus removal granular sludge was completed on the 82nd day. The biological phosphorus removal granule sludge showed some characteristics, e.g. pallideflavens in color, 0.5~1.5 mm in diameter, 20~30 m/h in settling velocity, 94% in water content, 1.043 9 in specific gravity, and below 50 mL/g in SVI. The max. specific release phosphorus rate (SRPR), the max. specific uptake phosphorus rate (SUPR) and the phosphorus content of the MLSS (TP/SS) was 67.7 mg/(g·h), 43.2 mg/(g·h) and 6.5% respectively on the 437th day. On the 448th day the operation of the reactor was changed into A/A/O. The max. SRPR, the max. anoxic SUPR and the TP/SS of the denitrifying phosphate uptake granular sludge was 30 mg/(g·h), 27.9 mg/(g·h) and 6.3% respectively on the 653rd day. The two kinds of granular sludge had potential to carry out phosphorus removal.

Key words: SBR; granular sludge; biological phosphorus removal

颗粒污泥具有活性高、沉降性能好和抗冲击负荷能力强等优点。目前, 许多文献报道了具有除碳、脱氮、除磷及同时脱氮除磷等功能的颗粒污泥, 其形成与有机负荷、水流剪切力、接种污泥、反应器构型以及沉淀时间等因素有关^[1~10]。

研究结果显示, 采用厌氧/好氧(A/O)交替运行的工艺系统可以获得良好的除磷效果, 而采用厌氧/缺氧(A/A)、厌氧/缺氧/好氧(A/A/O)等工艺时, 反硝化聚磷菌(DNPAOs)缺氧段以硝酸盐或亚硝酸盐为电子受体进行吸磷, 系统也可以获得良好的除磷效果^[11, 12]。采用颗粒污泥进行生物除磷不仅可以使反

应器容积和沉淀时间减半, 而且随着进水磷浓度的提高, 颗粒污泥除磷能力和结构更紧密^[13~15]; 采用颗粒污泥进行反硝化聚磷可以改善反应器的泥水分离效果, 节约碳源和能源, 减少污泥产量^[16~19]。但颗粒污泥这种污泥形态是否影响反应器的除磷能力还有待进一步研究。

本试验在 SBR 反应器中, 采用 A/O 交替运行方

收稿日期: 2008-10-15; 修订日期: 2009-02-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(50378076); 武汉理工大学博士科研启动基金项目(471-38650493)

作者简介: 刘小英(1975~), 女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为污水的脱氮除磷。E-mail: xy2000225@sohu.com

式和水力筛选的方法, 将絮状接种污泥(无除磷能力) 培养为生物除磷颗粒污泥. 该颗粒污泥反应器连续运行 447 d 后, 改变运行条件为 A/A/O, 采用不断提高缺氧段硝酸盐初始浓度和延长缺氧段时间的策略, 将生物除磷颗粒污泥逐渐诱导为反硝化聚磷颗粒污泥. 在整个试验期间, 对生物除磷污泥颗粒化进程及 2 种颗粒污泥的厌氧释磷、吸磷能力进行监测, 探讨其除磷特性.

1 材料与方法

1.1 试验设备与操作条件

试验用 SBR 反应器材质为钢化玻璃, 高 31.5 cm, 直径 16 cm, 总容积 5 L, 有效容积 4 L, 反应器顶盖为不锈钢, 顶盖上有各种孔径的预留孔(见图 1). 反应器每周期运行包括进水、反应、沉淀、排水和闲置 5 个阶段. 为保证一定的水流剪切力, 整个反应阶段都进行搅拌; 每天在某周期反应结束前从反应器内人工排出泥水混合物用来控制污泥停留时间(即 SRT). 本研究分生物除磷和反硝化聚磷 2 个试验阶段, 分别命名为运行阶段 I 和运行阶段 II, 其运行参数见表 1. 其中, 在运行阶段 II, 缺氧段时间不断增加而好氧段时间不断减少.

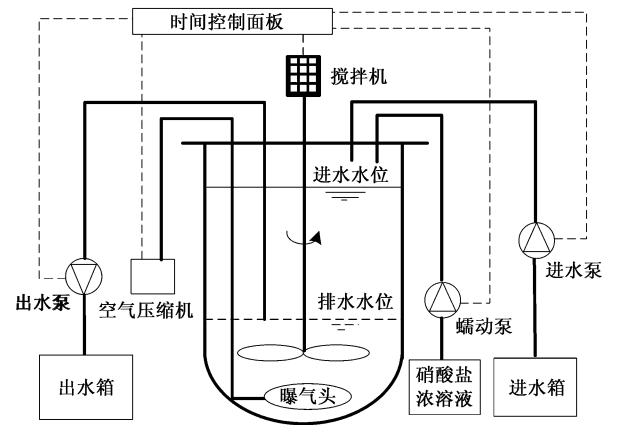


图 1 SBR 示意
Fig.1 Schematic diagram of the SBR used in this study

1.2 试验废水

试验废水采用自来水人工配制, 其组份及浓度见表 2, 微量元素的组成见表 3.

1.3 接种污泥

接种污泥取至西安市北石桥污水处理厂中试试验多级 A/O 脱氮工艺第三级好氧末端, 污泥颜色呈深褐色, 结构松散[见图 2(a)]. 取该污泥(MLSS 约为 8 000 mg/L) 2 L, 经淘洗后闷曝 24 h 接种到 SBR 反

表 1 反应器各运行阶段操作参数		
Table 1 Operation parameters during the different stages in SBR		
参数	运行阶段 I	运行阶段 II
每周期运行时间/h	4~ 6	4
进水时间/min	1	1
厌氧段时间/min	70~ 120	70~ 90
好氧段时间/min	120~ 180	30~ 120
缺氧段时间/min	—	30~ 105
NO ₃ -N 瞬时进样时间/min	—	1~ 5
沉淀时间/min	3~ 55	3~ 5
排水时间/min	3	3
搅拌速度/r·min ⁻¹	150~ 300	300
好氧段曝气量/m ³ ·h ⁻¹	0.08~ 0.15	0.08~ 0.15
曝气强度/m ³ ·(m ³ ·h) ⁻¹	20~ 37.5	20~ 37.5
厌氧段 DO 浓度/mg·L ⁻¹	0	0
缺氧段 DO 浓度/mg·L ⁻¹	—	0~ 0.3
好氧段 DO 浓度/mg·L ⁻¹	2~ 4	2~ 4
排泥量占总体积分数	3/80~ 1/10	1/20~ 3/40
温度/℃	25±2	25±2
pH 值	7.0~ 8.5	7.0~ 8.5
进、排水量/L	2	2

表 2 试验废水组成		
Table 2 Composition of the synthetic wastewater		
组分	运行阶段 I	运行阶段 II
NaAc(以 COD 计)	250~ 350 mg/L	300~ 350 mg/L
NH ₄ Cl(以 N 计)	15 mg/L	13 mg/L
KH ₂ PO ₄ (以 P 计)	10 mg/L	10 mg/L
NaNO ₃ (以 N 计)	—	5~ 20 mg/L
微量元素	1 mL/15 L(废水)	1 mL/15 L(废水)

表 3 微量元素组成/mg·L ⁻¹			
Table 3 Composition of the trace element/mg·L ⁻¹			
组分	质量浓度	组分	质量浓度
FeSO ₄ ·7H ₂ O	3 000	H ₃ BO ₃	20
MnSO ₄ ·4H ₂ O	26	NiCl ₂ ·6H ₂ O	36
CoCl ₂ ·6H ₂ O	50	EDTA 二钠盐	50
CuCl ₂ ·2H ₂ O	7	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·4H ₂ O	21
ZnCl ₂	24		

应器中进行试验.

1.4 分析方法

磷酸盐(以 P 计)、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、氨氮、COD、反应器内 MLSS、MLVSS、SVI、颗粒污泥中的金属含量以及总磷等均按国家标准方法测定^[20]; 污泥的形态和结构采用显微摄像系统和电子扫描显微镜观察得到; 粒径通过数码相机拍照, 直接读出粒径尺寸; 沉速采用标准沉降筒实验法; 比重按式(1) 计算.

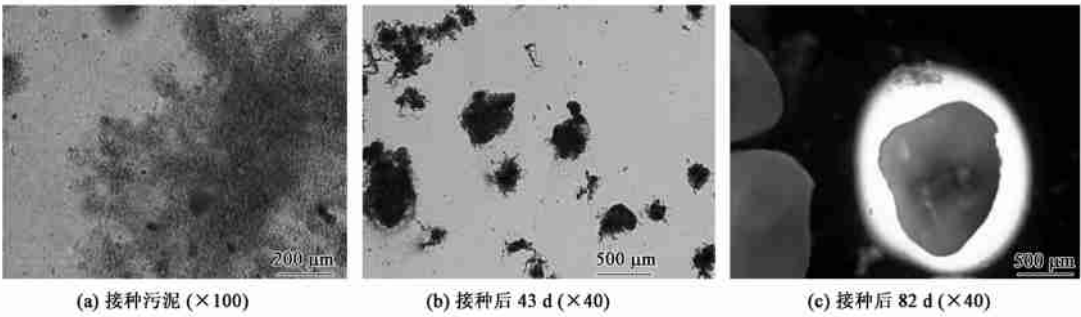


图 2 污泥形态变化
Fig. 2 Sludge morphology

比重 = $\frac{(P - W)}{(R - W) - (Q - P)} \times F$ (1)

式中, P 为离心后泥和瓶的重量, W 为干燥瓶的重量, R 为离心后一定体积泥、4℃水和瓶的重量, Q 为离心后一定体积 4℃水和瓶的重量, F 为温度校正因子^[21]; 聚-β-羟基丁酸 (poly-β-hydroxybutyric acid, PHB) 采用改进的 Braunnegg 方法测定^[22]; 污泥中糖原按修正后的 Oehmen 方法测定^[23]。

2 结果与分析

2.1 生物除磷颗粒污泥的形成及特性研究

首先在反应器中培养出生物除磷颗粒污泥, 再进一步研究其除磷能力。

2.1.1 颗粒污泥的形成

接种污泥为典型的絮状污泥, 性状良好, 无丝状菌[见图 2(a)]; 接种后 43 d 反应器内观察到有颗粒污泥产生, 其边缘清晰, 但直径较小, 最大仅为 0.4 mm[见图 2(b)]; 82 d 后反应器内均为形态规则的颗粒污泥, 直径在 0.5~1.5 mm 之间[见图 2(c)], 污泥呈浅黄色, 沉速为 20~30 m/h, 含水率为 94%, 密度为 1.043 9, SVI 在 50 mL/g 以下, 污泥中 Ca、Mg 和 Fe 的含量分别为 11.4、3.2 和 0.2 mg/g。

颗粒污泥形成过程中, 反应器在不同沉降时间下出水 SS、SVI、MLSS、SRT 以及污泥负荷 F/M (COD/VSS·t) 的变化见图 3。当沉淀时间为 55 min 时, 反应器出水 SS 在 15 mg/L 以下, 该沉淀时间下大量的絮状污泥仍然停留在反应器中, 没有起到水力筛选的作用; 缩短沉淀时间 30 min 后, 出水 SS 提高到 80 mg/L 后又缓慢下降到 20 mg/L; 缩短沉淀时间为 20 min 时, 反应器内观察到有颗粒污泥出现, 此时大量沉淀性能差的污泥被洗出反应器, MLSS 和 SVI 分别下降到 2 548 mg/L 和 28 mL/g; 继续缩短沉淀时间为 10 min 时, 出水 SS 为 20 mg/L; MLSS 上升到 4 000~

5 000 mg/L; 随着人工排泥和污泥的流失(由于出水 SS), SRT 在 20 d 左右。

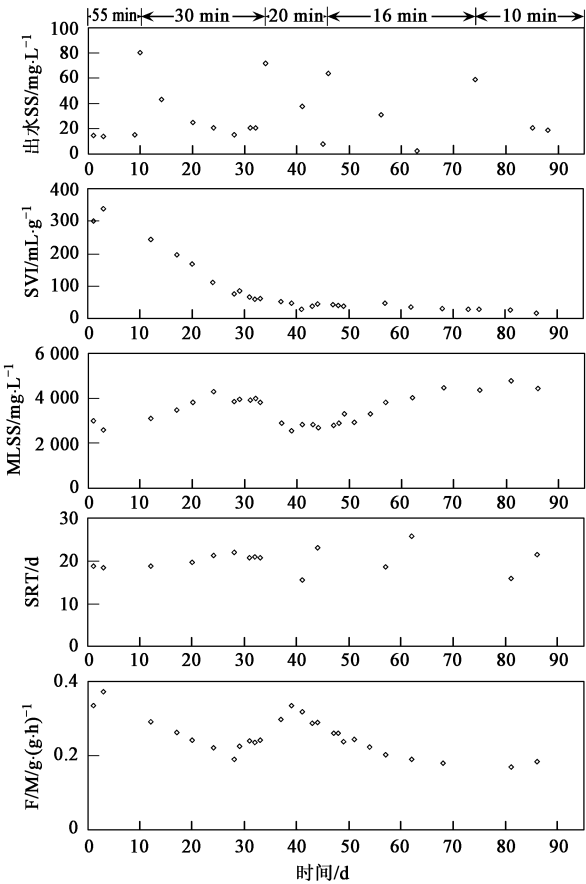


图 3 生物除磷污泥颗粒化过程中各运行参数的变化
Fig. 3 Courses of parameters during biological phosphorus removal sludge granulation

综上所述, 在该试验条件下, 采用水力筛选的方法, 43 d 形成颗粒污泥, 82 d 污泥达到完全颗粒化。

2.1.2 除磷特性研究

生物除磷颗粒污泥反应器稳定运行时, 污泥表现出良好的除磷能力。图 4 为反应器运行第 437 d 时 1 个周期内各参数的变化。厌氧段聚磷菌(PAOs)

利用聚磷(Poly-P)水解产生的能量将外碳源合成PHB,表现为COD由161.6 mg/L降低为31.9 mg/L,污泥中总磷的含量(TP/SS)由6.2%减小到4.5%,相应的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 升高到69.7 mg/L,污泥中PHB的含量(PHB/VSS)由2%增加到3.6%.厌氧段污泥的最大比释磷速率 $\text{SRPR}[P/(VSS \cdot t)]$ 为67.7 mg/(g·h),COD的最大降解速率为94.8 mg/(g·h),平均每吸收1 g COD可以释放0.5 g 磷,PHB的最大合成速率 $[\text{COD}/(VSS \cdot t)]$ 为36.6 mg/(g·h);好氧段污泥的最大比吸磷速率即SUPR为43.2 mg/(g·h),TP/SS为6.5%(通常,普通絮状污泥的TP/SS为1.5%~2.3%,絮状生物除磷污泥的TP/SS为2%~7.3%^[24]),PHB的最大降解速率为25.7 mg/(g·h).

对反应器进出总磷进行物料衡算:

$$\begin{aligned} \text{TP}_{\text{influent}} &= 9.8 \text{ (mg/L)} \times 2 \text{ (L/个)} \times 6 \text{ (个/d)} \\ &= 117.6 \text{ mg/d} \end{aligned} \tag{2}$$

式中,6为每天运行的周期数.

$$\begin{aligned} \text{TP}_{\text{effluent}} &= 3\,534 \text{ (mg/L)} \times 0.37 \text{ (L/d)} \times 6.5 \text{ (\%)} \\ &\quad + 2.3 \text{ (mg/L)} \times 2 \text{ (L/个)} \times 6 \text{ (个/d)} \\ &= 112.6 \text{ mg/d} \end{aligned} \tag{3}$$

式中,2.3 mg/L为出水的TP浓度.

在误差允许范围内得到:

$$\text{TP}_{\text{influent}} = \text{TP}_{\text{effluent}} \tag{4}$$

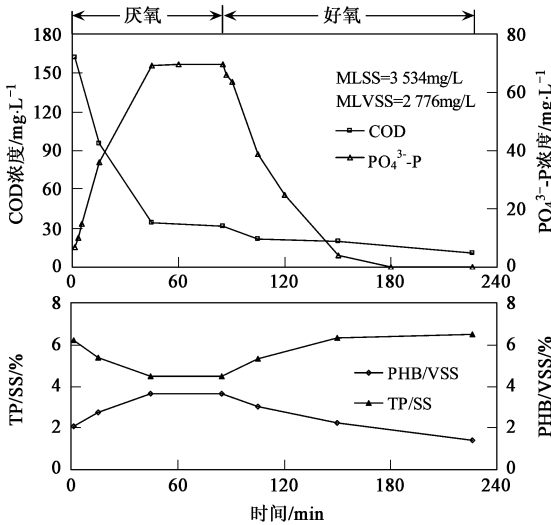


图4 反应器运行第437 d 1个周期内各参数变化

Fig. 4 Cycle changes of parameters on day 437 in SBR

2.2 反硝化聚磷颗粒污泥的除磷特性研究

生物除磷颗粒污泥反应器448 d时,在厌氧末端瞬时投加一定量的硝酸盐,通过逐渐延长缺氧段时间和提高硝酸盐浓度的方法将颗粒污泥诱导为反

硝化聚磷颗粒污泥.

该试验共运行274 d,获得的反硝化聚磷颗粒污泥颜色为黄色,粒径在1.0~2.0 mm之间,沉速在29~51 m/h之间,含水率为94%,密度为1.047 0,污泥中Ca、Mg和Fe的含量分别为44.3、27和0.2 mg/g.与成熟的生物除磷颗粒污泥相比,污泥的粒径分布和含水率没有显著变化,但污泥沉速提高0.2~0.7倍,污泥的比重上升0.003 1.这是因为反硝化聚磷颗粒污泥在缺氧段溶液中的pH值升高,在颗粒污泥内部就会产生更高的pH值,使部分金属盐沉积,因而污泥的颜色变深,沉速加快.

图5为反硝化聚磷颗粒污泥反应器试验期间氮和磷的变化.在80%以上的运行时间内氮和磷的去除率为75%和88%,系统表现出良好且稳定的脱氮除磷效果.在整个试验期间,随着时间的推移厌氧段的释磷量逐渐下降,到507 d时由87 mg/L降至33 mg/L;当缺氧段初始 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 为5 mg/L时,缺氧末端 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 经过15 d降到0.7 mg/L,逐渐提高初始 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 为10、15以及20 mg/L,缺氧末端 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 基本维持在1 mg/L以下,但缺氧末端 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 出现反复,每次都会重新上升到2 mg/L左右,然后再缓慢下降到1 mg/L以下.

反硝化聚磷颗粒污泥运行653 d时1个周期内各参数的变化见图6.厌氧段DNPAOs利用Poly-P和糖原水解产生的能量将外碳源合成PHB.污泥的最大SRPR为30 mg/(g·h),COD的最大去除速率为133.2 mg/(g·h),平均每吸收1 g COD可以释放0.2 g 磷,PHB的最大合成速率为42 mg/(g·h).

缺氧段DNPAOs以PHB为碳源和能源,吸收溶液中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 并合成Poly-P和糖原.缺氧段 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 由16.6 mg/L降至1 mg/L以下,对应的PHB/VSS由2.2%降至0.9%.与此同时, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 由起始时的36.4 mg/L缺氧段结束时降至11.5 mg/L,TP/SS由5.6%增加到6.1%,糖原/VSS由14%升高到15.4%.污泥的最大SUPR为27.9 mg/(g·h),PHB的最大降解速率为10.8 mg/(g·h).由此可见,反硝化聚磷颗粒污泥比生物除磷颗粒污泥的吸磷能力差,其原因是微生物利用氧为电子受体的吸磷能力比利用硝酸盐为电子受体的吸磷能力强(根据本试验长期研究结果显示,每去除1 g 氮可以吸收1.4 g 磷,而理论上DNPAOs去除1 g 氮相当于转移0.36 mol 电子,因此转移1 mol 电子吸收0.13 mol 磷;Kuba等^[25]以氧为电子受体进行生物除磷时发现,转移1 mol 电子吸

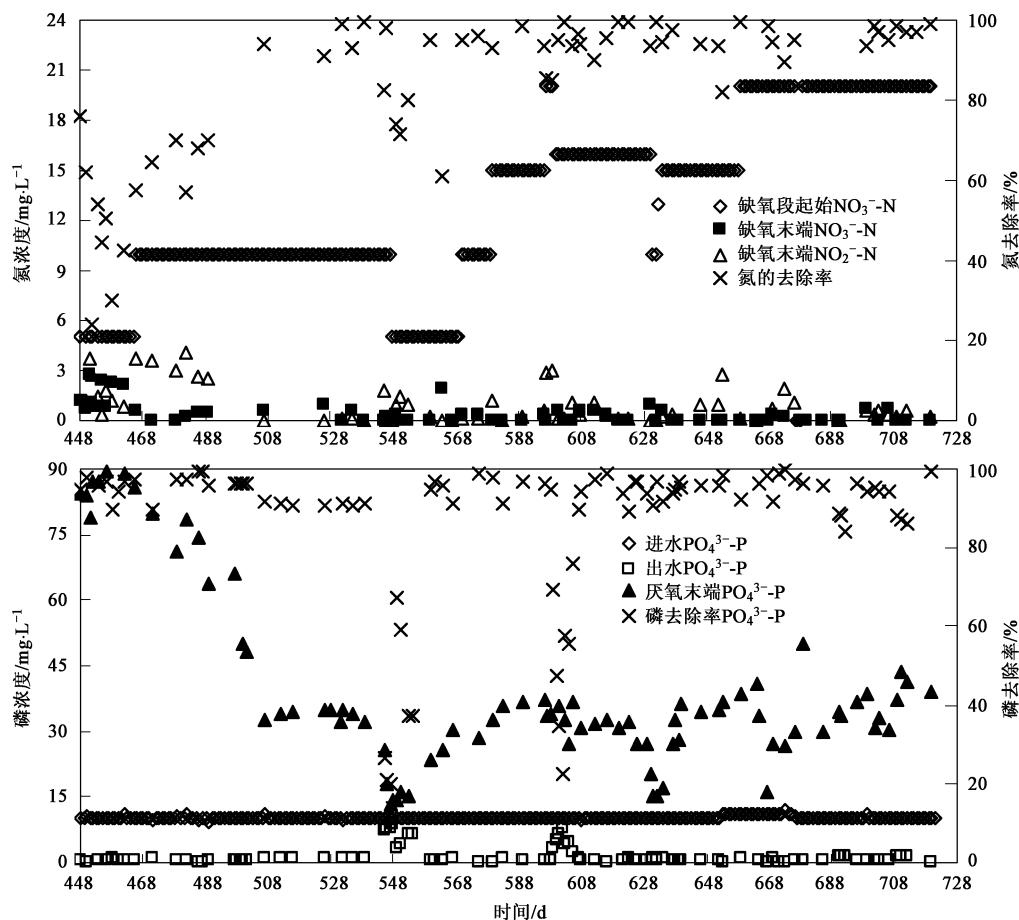


图 5 反硝化聚磷颗粒污泥试验期间氮和磷的历时变化

Fig. 5 Courses of nitrogen and phosphorus with the denitrifying phosphate uptake granular sludge in SBR

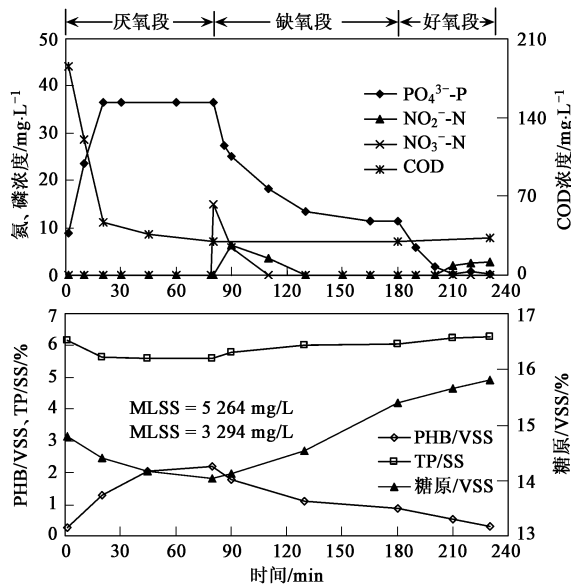


图 6 反应器运行 653 d 时 1 个周期内各参数变化

Fig. 6 Cycle changes of parameters on day 653 in SBR

收 0.23 mol 磷)。

好氧段 DNPAOs 消耗 PHB 利用氧为电子受体进一步吸磷,同时合成糖原。好氧结束时 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 为 0.2 mg/L, 污泥的 PHB/VSS 减小了 0.6%, TP/SS 达到 6.3%, 糖原/VSS 达到 15.8%。最大 SUPR 仅为 10.1 $\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 。

对反应器进出总磷进行物料衡算:

$$\begin{aligned} \text{TP}_{\text{influent}} &= 9.7 \text{ (mg/L)} \times 2 \text{ (L/个)} \times 6 \text{ (个/d)} \\ &= 116.4 \text{ mg/d} \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \text{TP}_{\text{effluent}} &= 5264 \text{ (mg/L)} \times 0.25 \text{ (L/d)} \times 6.3\% \\ &\quad + 2.5 \text{ (mg/L)} \times 2 \text{ (L/个)} \times 6 \text{ (个/d)} \\ &= 112.9 \text{ mg/d} \end{aligned} \tag{6}$$

在误差允许范围内得到:

$$\text{TP}_{\text{influent}} = \text{TP}_{\text{effluent}} \tag{7}$$

3 结论

(1) 在 SBR 反应器中以醋酸钠为基质, 絮状污泥为接种污泥, 采用 A/O 交替运行方式, 利用水力

筛选的方法经过 82 d 培养出生物除磷颗粒污泥。成熟的生物除磷颗粒污泥颜色为淡黄色, 粒径为 0.5 ~ 1.5 mm, 含水率为 94%, 密度为 1.043 9, SVI 在 50 mL/g 以下。

(2) 在该试验条件下培养的生物除磷颗粒污泥具有除磷能力强和沉降性能好的特点。污泥的最大 SRPR 为 67.7 mg/(g·h), 最大 SUPR 为 43.2 mg/(g·h), TP/SS 为 6.5%, 沉速为 20~30 m/h。

(3) 生物除磷颗粒污泥在 A/A/O 操作条件下, 诱导为反硝化聚磷颗粒污泥。该颗粒污泥最大 SRPR 为 30 mg/(g·h), 最大缺氧 SUPR 为 27.9 mg/(g·h), TP/SS 为 6.3%。由此可见, 反硝化聚磷颗粒污泥具有较强的除磷能力。

参考文献:

- [1] Lettinga G, van Velsen A, Hobma S, *et al.* Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological waste especially for anaerobic treatment [J]. *Biotechnol Bioeng*, 1980, **22**: 699-734.
- [2] Beun JJ, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Aerobic granulation in a sequencing batch airlift reactor [J]. *Wat Res*, 2002, **36**(3): 702-712.
- [3] Kim S H, Choi H C, Kim I S. Enhanced aerobic floe-like granulation and nitrogen removal in a sequencing batch reactor by selection of settling velocity [J]. *Wat Sci Tech*, 2004, **50**(1): 57-62.
- [4] 由阳, 彭铁, 袁志国, 等. 富含聚磷菌的好氧颗粒污泥的培养与特性[J]. *环境科学*, 2008, **29**(8): 2242-2248.
- [5] Qin L, Liu Y, Tay J H. Effect of settling time on aerobic granulation in sequencing batch reactor [J]. *Biochem Engin J*, 2004, **21**(1): 47-52.
- [6] Peng D C, Nicolas B, Jean-Philippe D, *et al.* Aerobic granular sludge: A case report [J]. *Wat Res*, 1999, **33**(3): 890-893.
- [7] Beun JJ, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Aerobic granulation [J]. *Wat Sci Tech*, 2000, **41**(4-5): 41-48.
- [8] Van Benthum W A J, Garrido-Fernandez J M, Tjihuis L, *et al.* Formation and detachment of biofilms and granules in a nitrifying biofilm airlift suspension reactor [J]. *Biotechnol Prog*, 1996, **12**(6): 764-772.
- [9] 卢然超, 张晓健, 张悦, 等. SBR 工艺运行条件对好氧污泥颗粒化和除磷效果的影响[J]. *环境科学*, 2001, **22**(2): 87-90.
- [10] Liu Y, Tay J H. The essential role of hydrodynamic shear force in the formation of biofilm and granular sludge [J]. *Wat Res*, 2002, **36**(7): 1653-1665.
- [11] Kong Y H, Nielsen J L, Nielsen P H. Microautoradiographic study of *Rhodocyclus*-related polyphosphate-accumulating bacteria in full-scale enhanced biological phosphorus removal plants [J]. *Appl Environ Microbiol*, 2004, **70**(9): 5383-5390.
- [12] Lee D S, Jeon C O, Park J M. Biological nitrogen removal with enhanced phosphate uptake in a sequencing batch reactor using single sludge system [J]. *Wat Res*, 2001, **35**(16): 3968-3976.
- [13] Dulekgurgen E, Ovez S, Artan N, *et al.* Enhanced biological phosphate removal by granular sludge in a sequencing batch reactor [J]. *Biotechnol Lett*, 2003, **25**(9): 687-693.
- [14] Lin Y M, Liu Y, Tay J H. Development and characteristics of phosphorus-accumulating microbial granules in sequencing batch reactors [J]. *Appl Microbiol and Biotech*, 2003, **62**(4): 430-435.
- [15] Liu Y, Lin Y M, Tay J H. The elemental compositions of P-accumulating microbial granules developed in sequencing batch reactors [J]. *Process Biochem*, 2005, **40**(10): 3258-3262.
- [16] Murnleitner E, Kuba T, van Loosdrecht M C M, *et al.* An integrated metabolic model for the aerobic and denitrifying biological phosphorus removal [J]. *Biotechnol Bioeng*, 1997, **54**(5): 434-450.
- [17] Shoji T, Satoh H, Mino T. Quantitative estimation of the role of denitrifying phosphate accumulating organisms in nutrient removal [J]. *Wat Sci Tech*, 2003, **47**(11): 23-29.
- [18] Kishida N, Kim J, Tsuneda S, *et al.* Anaerobic/oxic/anoxic granular sludge process as an effective nutrient removal process utilizing denitrifying polyphosphate-accumulating organisms [J]. *Wat Res*, 2006, **40**(12): 2303-2310.
- [19] Carvalho G, Lemos P C, Oehmen A, *et al.* Denitrifying phosphorus removal: linking the process performance with the microbial community structure [J]. *Wat Res*, 2007, **41**(19): 4383-4396.
- [20] 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.
- [21] 王芳. SBR 中好氧颗粒污泥的培养及其特性研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2004. 33-34.
- [22] Braunegg G, Sonnleitner B, Lafferty R M. A rapid gas chromatographic method for the determination of poly-β-hydroxybutyric acid in microbial biomass [J]. *Appl Microbiol Biotech*, 1978, **6**: 29-37.
- [23] Oehmen A, Teresa M, Lu H B, *et al.* The effect of pH on the competition between polyphosphate accumulating organisms and glycogen-accumulating organisms [J]. *Wat Res*, 2005, **39**(15): 3727-3737.
- [24] 郑兴灿, 李亚新. 污水除磷脱氮技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. 193.
- [25] Kuba T, Smolders G, Heijnen J J, *et al.* Biological phosphorus removal from wastewater by anaerobic anoxic sequencing batch reactor [J]. *Wat Sci Tech*, 1993, **27**(5-6): 241-252.