

SBR 中生物除磷颗粒污泥的反硝化聚磷研究

刘小英¹, 赵红梅², 彭党聪^{1*}, 穗贤杰¹

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 长安大学环境科学与工程学院, 西安 710054)

摘要:反硝化聚磷菌(DNPAOs)可利用厌氧储存的聚-3-羟基丁酸(PHB)以硝酸盐和亚硝酸盐为电子受体进行过量吸磷和反硝化,从而达到在低碳源下脱氮除磷的双重目的.本试验在 SBR 反应器中,采用厌氧/缺氧/好氧(A/A/O)交替运行的方式,将富集聚磷菌(PAOs)的颗粒污泥成功地诱导为具有反硝化聚磷能力的颗粒污泥.诱导结束后 P 的去除率在 90% 以上,NO_x-N 的去除率在 93% 以上,厌氧段释磷量在 25~33 mg/L,缺氧段每去除 1g NO_x-N 吸收 P 约 1.3 g;典型周期运行结果显示,厌氧段最大比释磷速率(SRPR)为 18.39 mg/(g·h),缺氧段最大比吸磷速率(SUPR)为 23.72 mg/(g·h),最大比反硝化速率(SDNR)为 18.19 mg/(g·h),好氧段最大 SUPR 为 17.15 mg/(g·h);颗粒污泥中 DNPAOs 的数量由诱导前的 14.9% 增加到 80.7%.与除磷颗粒污泥相比,反硝化聚磷颗粒污泥沉速提高 0.16~0.7 倍,比重提高 0.003 1.

关键词:序批式反应器; A/A/O; 颗粒污泥; 反硝化聚磷

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)08-2254-06

Denitrifying Phosphate Uptake of Biological Phosphorous Removal Granular Sludge in SBR

LIU Xiao-ying¹, ZHAO Hong-mei², PENG Dang-cong¹, SUI Xian-jie¹

(1. School of Environmental & Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The denitrification and excessive P removal can be realized by denitrifying phosphate-accumulating organisms (DNPAOs) under low carbon condition. DNPAOs use poly-3-hydroxy-butyrate (PHB) as electron donor, and use nitrate and nitrite as electron acceptor during the denitrifying phosphate uptake. In this study the biological phosphorus removal granular sludge was induced into the denitrifying and phosphate uptake granular sludge under an anaerobic/anoxic/aerobic alternating operation (referred to as an A/A/O) in a sequencing batch reactor (SBR). When the system is stable, the P and N removal ratio is over 90% and 93% respectively; the release phosphorus is 25-33 mg/L at anaerobic stage; 1g NO_x-N approximately takes up P 1.3 g at anoxic stage. In the typical cycle the anaerobic maximum specific release phosphorus rate (max. SRPR) is 18.39 mg/(g·h); the anoxic max. specific uptake phosphorus rate (SUPR) and the max. specific denitrification rate (SDNR) is 23.72 mg/(g·h) and 18.19 mg/(g·h) respectively; the aerobic max. SUPR is 17.15 mg/(g·h). The fraction of DNPAOs rises from 14.9% to 80.7%. Compared with the physical-chemical property of the biological phosphorus removal granular sludge, the settling velocity and the specific gravity of the denitrifying phosphate uptake granular sludge is elevated 0.16-0.7 times and 0.003 1 respectively.

Key words: sequencing batch reactor (SBR); A/A/O; granular sludge; denitrifying phosphate uptake

序批式反应器(SBR)可以在同一反应器内进行各种生化反应,而且各个反应阶段可以自由转换.据报道,在 SBR 中可以培养出厌氧、缺氧、好氧的颗粒污泥^[1~7].颗粒污泥具有沉速快、活性高、污泥浓度和容积负荷高等优点.

反硝化聚磷是由 DNPAOs 同时完成过量吸磷和反硝化而达到脱氮除磷的双重目的^[8~10].DNPAOs 具有与 PAOs 相类似的代谢特征^[11,12],即在厌氧环境中将外碳源转化为胞内储存物(PHAs),在缺氧段以硝酸盐(或亚硝酸盐)取代氧作为电子受体,进行硝酸盐(或亚硝酸盐)呼吸,在完成反硝化的同时过量摄磷,从而使生物除磷与反硝化脱氮有机地合二为一^[13,14].反硝化聚磷具有低碳耗、低能耗的优点.

显然,如果将颗粒污泥和反硝化聚磷二者结合

起来进行废水的生物处理,将会对废水生物处理技术有重要意义.本试验正是基于这一点,在 SBR 中采用厌氧/缺氧/好氧(A/A/O)运行方式将具有除磷能力的颗粒污泥逐渐诱导为具有反硝化聚磷能力的颗粒污泥,探讨在 A/A/O 运行方式下,反硝化聚磷颗粒污泥的脱氮除磷性能.

1 材料与方法

1.1 试验设备与操作条件

试验用 SBR 反应器材质为普通玻璃,高 31.5

收稿日期: 2007-06-22; 修订日期: 2007-08-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(50478047)

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

* 通讯联系人, E-mail: dcpeng@xauat.edu.cn

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(图 1)。反应器每周期运行时间为 4 h, 包括进水、反应、沉淀、排水和闲置 5 个阶段, 其中反应阶段又分为厌氧、缺氧、好氧 3 个阶段。2 L 人工配制废水(其组成见表 1 和表 2)在厌氧阶段开始 1 min 内注入反应器, 为保证厌氧末端 COD 浓度在 25 mg/L 以下, 厌氧段时间范围在 70 ~ 105 min。在缺氧阶段开始 1 ~ 5 min 内将 7 ~ 35 mL 硝酸盐浓溶液经蠕动泵注入反应器, 使反应器内硝酸盐氮的起始浓度分别为 5 mg/L 和 10 mg/L。缺氧段和好氧段的时间分配随着反硝化聚磷菌的不断被诱导而变化, 总的趋势是缺氧段时间不断增加而好氧段时间不断减少, 使缺氧段末端 NO_x-N 浓度维持在 1 mg/L 以下。为了保证一定的水流剪切力, 在整个反应阶段都进行搅拌, 其速度为 300 r/min; 好氧段曝气量控制在 0.08 ~ 0.15 m³/h 之间, 反应器内曝气强度为 20 ~ 37.5 m³/(m³·h); 每天在某一周期好氧结束前从反应器内人工排出 200 ~ 300 mL 泥水混合物, 控制污泥停留时间(SRT)在 10 d 左右。沉淀时间为 3 ~ 5 min。反应器内温度为 25℃ ± 2℃, pH 值为 7.0 ~ 8.5, 厌氧段、缺氧段以及好氧段 DO 分别为 0、0 ~ 0.3、2 ~ 4 mg/L。

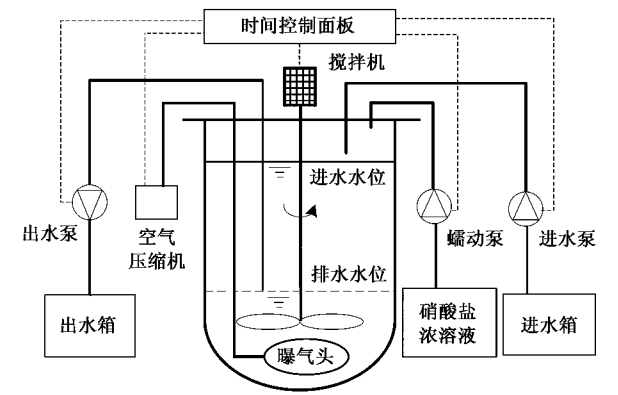


图 1 序批式反应器示意

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

1.2 试验用水

试验用水采用自来水人工配制, NaAc、NH₄Cl、KH₂PO₄、NaNO₃ 和微量元素采用蒸馏水配制成浓溶液进行投加, 其中, NaAc 作为微生物的碳源, NH₄Cl 作为微生物的氮源, 组成见表 1。微量元素浓溶液的配制浓度见表 2。

1.3 试验方法

本试验在富集 PAOs 的颗粒污泥(粒径为 1.0 ~

表 1 试验废水组成

Table 1 Composition of the synthetic wastewater

组分	NaAc (以 COD 计)	NH ₄ Cl (以 N 计)	KH ₂ PO ₄ (以 P 计)	NaNO ₃ (以 N 计)	微量元素/废水
浓度	300 mg/L	13 mg/L	10 mg/L	5 ~ 10 mg/L	1 mL/15 L

表 2 微量元素组成/mg·L⁻¹

Table 2 Composition of the trace elements/mg·L⁻¹

组分	浓度	组分	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		

1.5 mm, 沉速为 25 ~ 30 m/h)反应器(该状态运行 14.6 个月)中, 改变运行条件为 A/A/O, 在保证厌氧段 COD 被充分降解, 同时释放大 量磷酸盐的前提下, 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, 将富集 PAOs 的颗粒污泥逐渐诱导为富集 DNPAOs 的颗粒污泥。在整个诱导期间对反硝化吸磷能力进行了监测, 并对反硝化聚磷颗粒污泥的特性进行了研究。

1.4 分析方法

(1)PHB 采用改进的 Braunegg 方法测定^[15] 取反应器内泥水混合物 50 mL (MLSS 在 3 000 mg/L 左右), 离心弃去上清液, 清洗 3 次后, 将泥样用蒸馏水定容至 20 mL, 经超声破胞(500 W, 30 min)后, 取适量样品于 HACH 管中。将 2 mL 3% 的酸化甲醇和 2 mL 氯仿依次加入 HACH 管中, 然后在 100℃ 消解 240 min, 在消解过程中每隔 15 min 将 HACH 管拿出小心振荡。消解结束后待 HACH 管冷却至室温后剧烈振荡 20 min, 最后进行离心分层, 取氯仿层样品经 0.45 μm 膜过滤后取 2 μL 注入气相色谱(GC)进行测定。GC(Trace 2000)采用氢火焰离子化检测器(FID), 检测器温度 220℃, 采用 Agilent 公司生产的 DB-FFAP 强极性色谱柱(30 m × 0.32 mm × 0.25 μm), 进样口温度 190℃, 分流比为 1/10, 载气为氮气。

(2)污泥中 TP 的测定 取上述超声消解后的适量样品按国家标准方法测定^[16]。

(3)污泥中糖原的测定 取上述超声消解后的适量样品按照修正后的 Oehmen 方法消解后^[17], 采用蒽酮比色定糖法进行测定^[18]。

(4)颗粒污泥粒径 按式 $d = (4A/\pi)^{1/2}$ 计算, 式中, A 为颗粒污泥的投影面积; 沉速采用标准沉降筒实验法.

(5)比重 按 $(P - W)/[(R - W) - (Q - P)] \times F$ 计算, 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℃ 水以及瓶的重量, Q 为离心后一定体积 4℃ 水和瓶的重量, F 为温度校正因子^[19].

(6)其它指标 磷酸盐(以 P 计)、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、氨氮、COD 以及反应器内 SVI 等均按国家标准方法测定^[16].

2 结果与讨论

2.1 诱导期间 A/A/O 系统 N 和 P 的历时变化

图 2 为试验期间颗粒污泥系统 N、P 以及厌氧

段释磷量的变化. 从中可以看出, 缺氧段硝酸盐氮的初始浓度在 5 mg/L 时, 缺氧段末端 NO_3^- -N 在 19 d 时降低为 0.61 mg/L, NO_2^- -N 15 d 时降低到 0.87 mg/L; 提高缺氧段硝酸盐氮初始浓度为 10 mg/L 后, 缺氧段末端 NO_3^- -N 一直维持在 1 mg/L 以下, NO_2^- -N 重新升高到 3.7 mg/L, 之后又缓慢下降, 在 51 d 时降到 0.08 mg/L, 在随后的运行时间内缺氧末端 NO_x -N 维持在 1 mg/L 以下. 与此同时, 在整个运行期间系统出水 PO_4^{3-} -P 在 1 mg/L 以下; 厌氧段释磷量在运行 60 d 内呈下降趋势, 尤其是当提高缺氧段硝酸盐浓度后, 下降速度加快, 最终厌氧段释磷量由 79.5 mg/L 下降为 28.2 mg/L, 在随后的 35 d 内稳定在 25 ~ 33 mg/L. 综上所述, 反应器在运行 60 d 后, NO_x -N 和 P 的去除率分别在 93% 和 90% 以上, 厌氧段释磷量稳

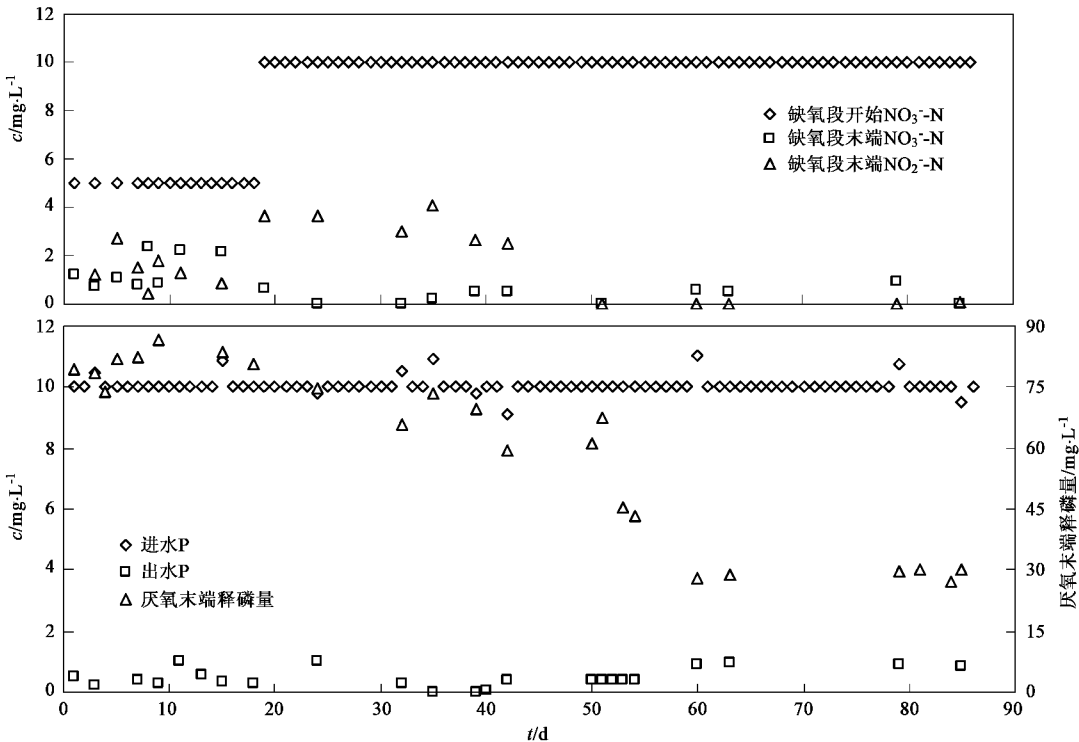


图 2 诱导期间 N 和 P 的历时变化
Fig.2 Changes of N and P during the induction

定在 25 ~ 33 mg/L, 反应器进入稳定运行状态.

2.2 诱导期间缺氧段 P 的吸收和 N 的去除

在整个试验期间, 缺氧段 NO_x -N 和 P 的去除效果发生了显著变化(图 3). 在开始运行的 18 d 内, 缺氧段进水硝酸盐浓度为 5 mg/L(图 2)时, NO_x -N 的去除率接近 100%, 吸磷量为 16.6 mg/L, $\Delta P/\Delta \text{NO}_x$ -N 变化剧烈, 最高为 4.79, 最低为 1.61, 其中:

$$\frac{\Delta P}{\Delta \text{NO}_x\text{-N}} = \frac{\text{缺氧段吸磷量}(\text{mg})}{\text{缺氧段 } \text{NO}_x\text{-N 的去除量}(\text{mg})} \quad (1)$$

当提高硝酸盐浓度为 10 mg/L 时, NO_x -N 去除率达到 93% 以上, 吸磷量变化比较剧烈, 最后稳定在 13 mg/L 左右, $\Delta P/\Delta \text{NO}_x$ -N 变化趋势与吸磷量的变化趋势一致, 最终稳定在 1.3 左右. 据报道, 缺氧段采用瞬时投加硝酸盐进行吸磷时 P/NO_3^- -N 为 1.22^[20].

可见,与反硝化聚磷絮状污泥相比,反硝化聚磷颗粒污泥具有较强的反硝化吸磷能力.

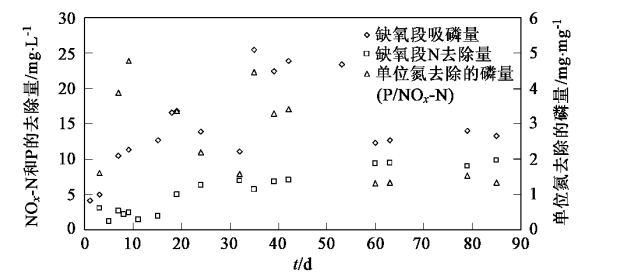


图3 诱导期间缺氧段 $\text{NO}_x\text{-N}$ 和P的去除量以及 $\text{P}/\text{NO}_x\text{-N}$ 的历时变化

Fig.3 Changes of $\text{NO}_x\text{-N}$, P and $\text{P}/\text{NO}_x\text{-N}$ at anoxic stage during the induction

2.3 典型周期水质和污泥中 PHB 和 TP 的变化

颗粒污泥系统在 A/A/O 条件下稳定运行时,典型周期反应器内各指标变化情况见图 4.可以看出,厌氧段伴随着 COD 快速下降,反应器内磷酸盐浓度迅速上升,COD 最大比降解速率为 $58\text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$ (以 VSS 计,下同),最大比释磷速率为 $18.39\text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$ [A/O 运行条件下厌氧段最大比释磷速率为 $68.5\text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$], $\Delta\text{P}/\Delta\text{COD}$ 的比值为 0.32,其中:

$$\frac{\Delta\text{P}}{\Delta\text{COD}} = \frac{\text{厌氧段释放磷的总量}(\text{mg})}{\text{厌氧段降解 COD 的量}(\text{mg})} \quad (2)$$

该值低于 Smolders 等^[21]和 Filipe 等^[22]得到的数值,它们分别为 0.47 和 0.55,厌氧段 $\Delta\text{PHB-COD}/\Delta\text{COD}$ 为 0.5,其中:

$$\frac{\Delta\text{PHB-COD}}{\Delta\text{COD}} = \frac{\text{厌氧段合成的 PHB 的量}(\text{mg})}{\text{厌氧段消耗的 COD 的量}(\text{mg})} \quad (3)$$

低于 Smolders 等^[21]在厌氧释磷过程代谢方程中得到的 $(\text{PHB-COD})0.89\text{ mg}/\text{mg}$.缺氧段硝酸盐浓度 20 min 内快速下降为 $1.83\text{ mg}/\text{L}$,亚硝酸盐氮最高达到 $3.43\text{ mg}/\text{L}$,以硝酸盐为主要电子受体时最大比反硝化速率为 $18.19\text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$,缺氧最大比吸磷速率为 $23.72\text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$ [在 A/O 运行条件下好氧段最大比吸磷速率为 $36.8\text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$],以亚硝酸盐为主要电子受体时最大比反硝化速率为 $1.45\text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$,最大比吸磷速率为 $2.74\text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$,缺氧段 $\Delta\text{PHB-COD}/\Delta\text{P}$ 为 4.29,其中:

$$\frac{\Delta\text{PHB-COD}}{\Delta\text{P}} = \frac{\text{缺氧段或好氧段 PHB 的消耗量}(\text{mg})}{\text{缺氧段或好氧段吸磷量}(\text{mg})} \quad (4)$$

好氧段最大比吸磷速率为 $17.15\text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$, $\Delta\text{PHB-}$

$\text{COD}/\Delta\text{P}$ 为 4.29,污泥中 P 的含量为 4.82%(以 SS 计,下同),低于 A/O 运行条件下泥中 P 的含量(一般在 6%~9%).由此可见,好氧段和缺氧段 $\Delta\text{PHB-COD}/\Delta\text{P}$ 远远大于文献中报道的 0.20^[23],这是由于反应器内聚糖菌(GAOs)消耗大量 PHB 用来合成糖原引起的,好氧段结束后污泥中糖原的含量在 20%(以 VSS 计,下同)左右;缺氧段吸磷速率比好氧段吸磷速率大,这与颗粒污泥中 PHB 的含量以及反应器内磷酸盐的浓度有关.

进水中的磷通过排泥和出水排出反应器.已知排泥水混合物的量为 270 mL,反应器出水 SS 为 50 mg/L,SS 为 3 661 mg/L,VSS/SS 为 68%,出水总磷浓度为 4.31 mg/L,这样对反应器的磷进行物料衡算:

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

式中,6 为每天运行的周期数.

$$\begin{aligned} \text{TP}_{\text{effluent}} &= 3\,661\text{ mg/L} \times 0.27\text{ L/d} \times 4.82\% \\ &\quad + 4.31\text{ mg/L} \times 2\text{ L/个} \times 6\text{ 个/d} \\ &= 99.36\text{ mg/d} \end{aligned} \quad (6)$$

在误差允许范围内得到:

$$\text{TP}_{\text{influent}} = \text{TP}_{\text{effluent}} \quad (7)$$

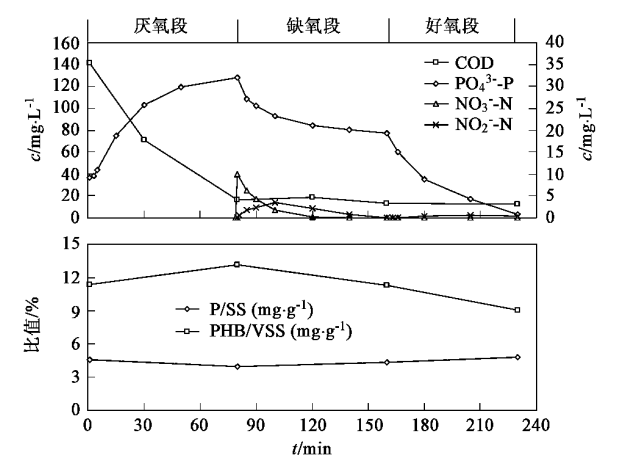


图4 SBR 中典型周期内水质和泥中 PHB 和 TP 含量的变化

Fig.4 Water quality and the PHB & TP of sludge during typical cycle in SBR

2.4 反硝化聚磷颗粒污泥中 DNPAOs 数量的估计

具有生物除磷功能的微生物分为 2 类,一类微生物在有氧或缺氧的条件下均可以吸磷,即 DNPAOs;另一类微生物只能在有氧的条件下才可以吸磷,即 non-DNPAOs.根据 DNPAOs 在缺氧和好氧条件下具有几乎相同的吸磷速率,而 non-DNPAOs 在缺氧条件下吸磷

速率受到抑制这一事实,缺氧吸磷速率与好氧吸磷速率之比可以反映 DNPAOs 对磷去除量地贡献,它间接反映了 DNPAOs 在 PAOs 中的份额^[24-27].

该杯罐试验在诱导前后分别从 SBR 中的好氧末端取适量的泥水混合物,经过厌氧段充分释磷后将颗粒污泥均匀地分到 2 个相同的反应器内,分别进行缺氧吸磷和好氧吸磷试验.图 5 为诱导前后颗粒污泥分别在好氧和缺氧条件下吸磷情况.可以看出,诱导前颗粒污泥好氧最大比吸磷速率为 $34.1 \text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$,缺氧最大比吸磷速率为 $5.1 \text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$,因此,富集 PAOs 的颗粒污泥中 DNPAOs 占总 PAOs 的

的份额为 14.9% [图 5(a)];在诱导结束后,颗粒污泥好氧最大比吸磷速率为 $17.1 \text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$,缺氧最大比吸磷速率为 $13.8 \text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$,因此,颗粒污泥中 DNPAOs 占总 PAOs 的份额为 80.7% [图 5(b)].2 个数值均比报道的 11% 和 64% 高^[26],其原因是颗粒污泥内部的微环境对微生物自我选择引起的.

在诱导结束后缺氧最大比吸磷速率比诱导前提高了 1.7 倍,这充分说明此时系统中 DNPAOs 的数量显著提高;而好氧最大比吸磷速率大幅度下降,仅仅是诱导前的 0.5 倍,究其原因这是由于硝酸盐和亚硝酸盐的抑制作用引起的.

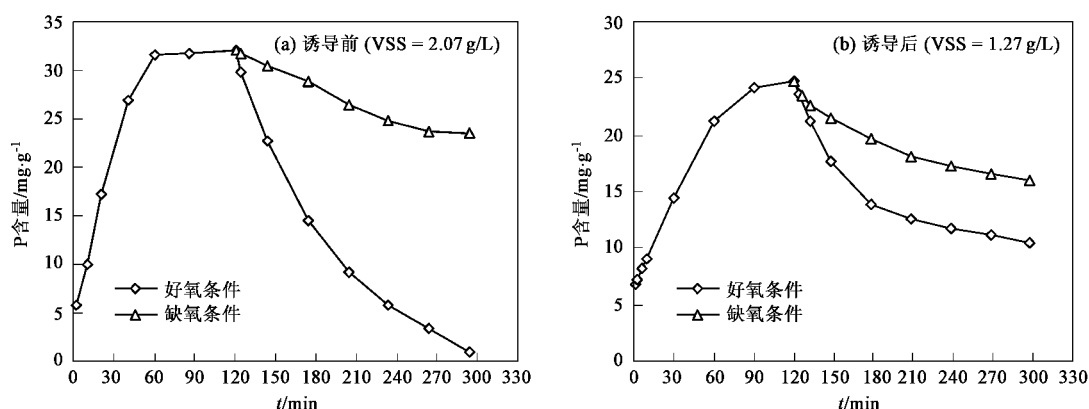


图 5 诱导前后颗粒污泥分别在 A/O 和 A/A 条件下磷的吸收

Fig.5 Phosphorus uptake under A/O and A/A conditions with the granular sludge

2.5 反硝化聚磷颗粒污泥理化特性

反硝化聚磷颗粒污泥颜色为米黄色,粒径在 $1.0 \sim 1.5 \text{ mm}$ 之间,沉速在 $29 \sim 51 \text{ m/h}$ 之间,含水率为 94%,比重为 1.047 0;反应器内 SVI 在 50 mL/g 以下.与成熟的除磷颗粒污泥相比^[28],颗粒污泥的粒径分布和含水率没有变化,但污泥颗粒沉速提高 $0.16 \sim 0.7$ 倍,污泥的比重上升 0.003 1.

3 结论

(1)通过 A/A/O 交替运行方式可以将强化生物除磷颗粒污泥诱导为富集 DNPAOs 的反硝化除磷颗粒污泥.该系统 P 去除率在 90% 以上, $\text{NO}_x\text{-N}$ 去除率在 93% 以上,缺氧段每去除 $1 \text{ g NO}_x\text{-N}$ 约吸收 P 1.3 g.

(2)生物反硝化聚磷颗粒污泥中存在着以亚硝酸盐氮为电子受体的 PAOs,其吸磷速率比以硝酸盐为电子受体的 PAOs 的吸磷速率小.

(3)DNPAOs 在 A/A/O 运行状态下最大比释磷速率和最大比吸磷速率都比 PAOs 在 A/O 运行状态

下厌氧段的最大比释磷速率和好氧最大比吸磷速率小.

(4)强化生物除磷颗粒污泥反应器中, DNPAOs 约占全部 PAOs 的 14.9%;经过 A/A/O 交替运行方式培养驯化后 DNPAOs 的份额提高到 80.7%.

(5)反硝化聚磷颗粒污泥的粒径在 $1.0 \sim 1.5 \text{ mm}$ 之间,沉速在 $29 \sim 51 \text{ m/h}$ 之间,含水率为 94%,比重为 1.047 0,反应器内 SVI 在 50 mL/g 以下.

参考文献:

- [1] 李亚新,田扬捷. ASBR 反应器中污泥颗粒化的工艺条件[J]. 中国给水排水, 2003, 19(8): 40-43.
- [2] 戴步峰. SBR 中缺氧颗粒污泥的培养和特性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006.
- [3] Peng D C, Nicolas B, Jean-Philippe D, et al. Aerobic granular sludge-A case report[J]. Wat Res, 1999, 33(3): 890-893.
- [4] Sung S, Danue R R. Laboratory studies on the anaerobic sequencing batch reactor[J]. Wat Environ Res, 1995, 67(3): 294-301.
- [5] Peng D C, Wang Y, Wang H, et al. Biological denitrification in a sequencing batch reactor[J]. Wat Sci Tech, 2004, 50(10): 67-72.

- [6] Morgenroth E, Shedenent T. Aerobic granulation in a sequencing batch reactor[J]. *Wat Res*, 1997, **31**(12):3191-3194.
- [7] 杨麒, 李小明, 曾光明, 等. SBR 系统中同步硝化反硝化好氧颗粒污泥的培养[J]. *环境科学*, 2003, **24**(4):94-98.
- [8] 郝晓地, 汪慧贞, 钱易, 等. 欧洲城市污水处理技术新概念——可持续生物除磷脱氮工艺(上)[J]. *给水排水*, 2002, **28**(6): 6-11.
- [9] Mino T. Microbiology and biochemistry of the enhanced biological phosphate removal process[J]. *Wat Res*, 1998, **32**(11):3193-3207.
- [10] van Loosdrecht M C M. Biological phosphorus removal processes[J]. *Microbiol Biotech Nol*, 1997, **48**(2):289-296.
- [11] Ahn J, Daidou T, Tsuneda S, *et al.* Metabolic behavior of denitrifying phosphate-accumulating organisms under nitrate and nitrite electron acceptor conditions[J]. *J Biosci Bioeng*, 2001, **92**: 442-446.
- [12] Tsuneda S, Ohno T, Soejima K, *et al.* Simultaneous nitrogen and phosphorus removal using denitrifying phosphate-accumulating organisms in a sequencing batch reactor[J]. *Biochem Eng J*, 2006, **27**:191-196.
- [13] Kuba T, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of denitrifying dephosphatation and nitrification in a two-sludge system[J]. *Wat Res*, 1996, **30**(7):1702-1710.
- [14] Kuba T, Smolders G, van Loosdrecht M C M, *et al.* Biological phosphorus removal from wastewater by anaerobic-anoxic sequencing batch reactor[J]. *Wat Sci Tech*, 1993, **27**(5-6):241-252.
- [15] 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.
- [16] 国家环保局. 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.
- [17] 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**: 3727-3737.
- [18] 陈钧辉, 陶力, 朱婉华, 等. 生物化学实验 [M]. (第三版). 北京: 科学出版社, 2003.
- [19] 王芳. SBAR 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.
- [20] Pen Y Z, Wang X L, Li B K. Anoxic biological phosphorus uptake and the effect of excessive aeration on biological phosphorus removal in the A²O process[J]. *Desalinat*, 2006, **189**: 155-164.
- [21] Smolders G J F, Vander M J, Van Loosdrecht M C M, *et al.* Model of the anaerobic metabolism of the biological phosphorus removal process: Stoichiometry and pH influence[J]. *Biotech Bioeng*, 1994, **43**:461-470.
- [22] Filipe C D M, Daegger G T, Grady J C P L. Stoichiometry and kinetics of acetate uptake under anaerobic conditions by an enriched culture of phosphorus accumulating organisms at different pHs[J]. *Bioeng Biotech*, 2001, **76**(1):32-43.
- [23] Henze M, Gujer W, Mino T, *et al.* Activated sludge model No. 2 [A]. In: IAWQ Scientific and Technical Reports No. 3 [C]. London: IAWQ, 1995.
- [24] Wachtmeister A, Kuba T, van Loosdrecht M C M, *et al.* A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge[J]. *Wat Res*, 1997, **31**(3):471-478.
- [25] Meinhold J, Filipe C D M, Daggar G T, *et al.* Characterization of the denitrifying fraction of phosphate accumulating organisms in biological phosphate removal process[J]. *Wat Sci Tech*, 1999, **39**(1):31-42.
- [26] 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.
- [27] 李勇智, 彭水臻, 王淑滢, 等. 强化生物除磷体系中的反硝化除磷[J]. *中国环境科学*, 2003, **23**(5): 543-546.
- [28] 刘小英, 于莉莉, 彭党聪, 等. 接种污泥对 SBR 生物除磷系统污泥颗粒化的影响[J]. *中国给水排水*, 2007, **23**(15):4-8.