

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.11.002

反硝化除磷的启动特性及亚硝酸盐浓度的影响

李 成¹, 郭之晗¹, 黄慧敏², 韦佳敏³, 李 勇¹

(1. 苏州科技大学 环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009; 2. 维尔利环保科技集团股份有限公司, 江苏 常州 213125; 3. 江苏理工学院 化学与环境工程学院, 江苏 常州 213001)

摘 要: 以模拟生活污水为处理对象,采用序批式反应器(SBR)单污泥系统,通过A/O、A/A/O、A/A三阶段运行的方式,研究了反硝化除磷的启动条件,并考察了亚硝酸盐浓度的影响。结果表明,丙酸钠为反硝化除磷菌(DPBs)的理想碳源,通过控制短污泥龄(SRT)驯化聚磷菌(PAOs),再延长SRT至25 d富集DPBs,系统运行45 d即成功启动了反硝化除磷工艺, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率稳定在80%以上。启动成功后,DPBs占PAOs的比例从28.5%升至75.8%。在富集完PAOs后,可利用 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 作为电子受体的浓度仅为4 mg/L,达到8 mg/L时则会出现吸磷抑制现象;而DPBs富集完成后, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 抑制浓度阈值提高至12 mg/L,此时净吸磷量仅有8.58 mg/L。

关键词: 反硝化除磷; 污泥龄; 亚硝酸盐; 吸磷速率

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)11-0008-07

Start-up Characteristics of Denitrifying Phosphorus Removal Process and Effect of Nitrite Concentration

LI Cheng¹, GUO Zhi-han¹, HUANG Hui-min², WEI Jia-min³, LI Yong¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. WELLE Environmental Group Co. Ltd., Changzhou 213125, China; 3. School of Chemical and Environmental Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

Abstract: A sequencing batch reactor (SBR) single sludge system fed with simulated domestic wastewater was operated through three stages of A/O, A/A/O and A/A process. The start-up conditions of denitrifying phosphorus removal process and the influence of nitrite concentration on the start-up were investigated. Sodium propionate was an ideal carbon source for denitrifying phosphorus-removing bacteria (DPBs). By controlling short sludge retention time (SRT) to promote the growth of phosphorus accumulating bacteria (PAOs) and extending SRT to 25 days to enrich DPBs, the denitrifying phosphorus removal process was successfully started after 45 days of operation, and the removal rate of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ was always more than 80%. After successful start-up, the proportion of DPBs in PAOs increased from 28.5% to 75.8%. After the enrichment of PAOs, the concentration of available electron acceptor ($\text{NO}_2^-\text{-N}$) was only 4 mg/L, and phosphorus absorption was inhibited when $\text{NO}_2^-\text{-N}$ reached 8 mg/L. However, after the enrichment of DPBs, the threshold of $\text{NO}_2^-\text{-N}$ inhibition increased to 12 mg/L, and the net phosphorus

uptake was only 8.58 mg/L.

Key words: denitrifying phosphorus removal; sludge retention time; nitrite; phosphorus uptake rate

反硝化除磷工艺是通过反硝化除磷菌(DPBs)在缺氧条件下利用 NO_x^- -N为电子受体,将厌氧段合成的聚 β -羟基链烷酸脂(PHA)氧化,产生的能量用于磷的过量吸收,实现同步脱氮除磷的工艺^[1]。反硝化除磷工艺实现了“一碳两用”^[2],消除了聚磷菌和硝化菌关于污泥龄(SRT)的矛盾以及聚磷菌和常规异养菌对碳源竞争的矛盾,减少了30%的曝气能耗、50%的碳源需求以及污泥产量,适合我国低C/N值生活污水处理的现状。

反硝化除磷工艺的成功启动关键在于通过控制厌氧-缺氧交替的条件,驯化出一类在缺氧状态下以 NO_x^- -N为电子受体的DPBs。而DPBs的培养可以通过在时间或空间上的分配,使其经历厌氧-缺氧交替的环境。SBR是典型的单污泥工艺,可以调整反应周期,易于控制反应条件,并且其结构高效简洁,有利于维持稳定的反硝化除磷条件^[3]。目前关于反硝化除磷的研究大多以 NO_3^- -N作为电子受体,而以 NO_2^- -N作为电子受体时,由于质子化的亚硝酸盐即游离亚硝酸(FNA)的生物毒性较强,会抑制DPBs的活性^[4]。但研究表明^[5],当 NO_2^- -N浓度较低时,DPBs仍能够以 NO_2^- -N为电子受体在缺氧段进行吸磷,并且和 NO_3^- -N作为电子受体相比具有节省曝气量、反应速率快等优点,因此以 NO_2^- -N为电子受体的研究日益受到关注。

笔者采用SBR反应器,以模拟生活污水为处理对象,通过控制好氧及缺氧时间,探讨DPBs的快速富集条件及处理效能,并考察亚硝酸盐浓度对反硝化除磷的影响,以期为实际工程应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验用SBR反应器见图1,内径为15 cm、高为45 cm,有效容积约为6.2 L,进水通过时间控制器瞬时加入,反应器侧面设置4个取样口,用以取样及排水,每个周期的排水量为3.1 L,pH控制在7.5左右。缺氧环境通过一次性投加硝酸钠溶液来维持,内置搅拌器使反应器内混合均匀。好氧段曝气通过气体流量计控制DO浓度在2 mg/L左右。

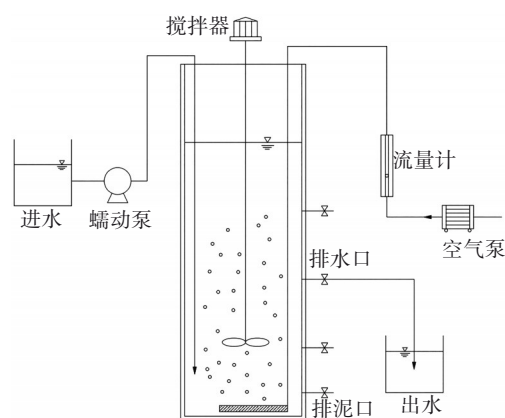


图1 SBR装置

Fig.1 Schematic diagram of SBR

1.2 实验用水和接种污泥

实验用水为人工模拟生活污水,COD、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N、TN、 PO_4^{3-} -P浓度分别为157.21~212.66、8.42~13.94、0~0.11、0~0.15、10.23~14.71、9.41~11.54 mg/L,pH为7.5~8.0。实验接种污泥为某污水处理厂二沉池活性污泥,其硝化及除磷能力良好,MLSS为4 030 mg/L,SVI为76 mL/g,沉降性能良好。

1.3 实验方法

根据聚磷菌(PAOs)的分类研究认为DPBs与PAOs是一种微生物^[6],并且对主要PAOs菌属即*Candidatus Accumulibacter*的研究揭示,其可利用氧气、 NO_x^- -N作为电子受体进行吸磷,因此利用 NO_x^- -N除磷的DPBs是PAOs的一部分。

系统采用三阶段富集DPBs,分别记为阶段Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ。阶段Ⅰ采用A/O运行方式,主要完成常规PAOs的富集,运行15 d,每天运行3个周期,共45个周期,每个周期包括:厌氧搅拌1.5 h,好氧曝气5.5 h,进水、沉淀和出水共计1 h;阶段Ⅱ采用A/A/O运行方式,使DPBs逐渐成为优势菌群,为DPBs的富集创造过渡条件,运行15 d,每天运行4个周期,共60个周期,每个周期包括:厌氧搅拌1.5 h,缺氧搅拌3 h,好氧曝气0.5 h,进水、沉淀和出水共计1 h;阶段Ⅲ采用A/A运行方式,运行15 d,每天运行4个周期,共60个周期,每个周期包括:厌氧搅拌1.5 h,缺

氧搅拌3.5 h,进水、沉淀及出水共计1 h。通过排放反应周期末混合液来控制DPBs的SRT,在DPBs的驯化过程中,根据厌氧末COD浓度及出水 NO_3^- -N浓度进行调整,避免常规反硝化菌同时利用COD与 NO_3^- -N进行反硝化脱氮。按照理想的除磷理论,若COD和 NO_3^- -N同时存在,异养菌则会与DPBs竞争电子供体及电子受体^[7],从而抑制DPBs的增殖。阶段I、II、III的SRT分别为10、15、25 d,pH均在7.5~8.0范围,温度均控制在 $(25\pm 2)^\circ\text{C}$ 。

1.4 分析项目与方法

NO_2^- -N、 NO_3^- -N、COD、 PO_4^{3-} -P、 NH_4^+ -N、TN等采用国家标准方法测定,MLSS、MLVSS采用称重法测定。根据文献[8]中的方法确定DPBs占PAOs的比例,记为 $f_{\text{DPBs/PAOs}}$ 。具体方法:控制反应器初始COD和 PO_4^{3-} -P浓度分别为200和10 mg/L,pH为 7.5 ± 0.1 ,厌氧反应90 min后,将混合液平均分为2份,放入2个SBR反应器中,其中一份为好氧环境,通过曝气控制DO在2.0 mg/L,另一份加入适量硝酸钠溶液,反应时间皆为210 min。通过测定结果分别按照式(1)~(3)计算系统的好氧最大吸磷速率(K_{aer})、缺氧最大吸磷速率(K_{ano})以及比反硝化速率(D_{ano}),根据 K_{ano} 与 K_{aer} 之比可粗略计算出 $f_{\text{DPBs/PAOs}}$ 。

$$K_{\text{aer}} = \frac{P_{\text{o},t1} - P_{\text{o},t2}}{(t_2 - t_1) \times \text{MLVSS}} \quad (1)$$

$$K_{\text{ano}} = \frac{P_{\text{a},t1} - P_{\text{a},t2}}{(t_2 - t_1) \times \text{MLVSS}} \quad (2)$$

$$D_{\text{ano}} = \frac{N_{\text{a},t1} - N_{\text{a},t2}}{(t_2 - t_1) \times \text{MLVSS}} \quad (3)$$

式中: $P_{\text{a},t1}$ 、 $P_{\text{a},t2}$ 分别为 t_1 和 t_2 时刻好氧环境下的 PO_4^{3-} -P浓度,mg/L; $P_{\text{o},t1}$ 、 $P_{\text{o},t2}$ 分别为 t_1 和 t_2 时刻缺氧环境下的 PO_4^{3-} -P浓度,mg/L; $N_{\text{a},t1}$ 、 $N_{\text{a},t2}$ 分别为 t_1 和 t_2 时刻的 NO_3^- -N浓度,mg/L。

2 结果与讨论

2.1 启动条件的探索及优化

反硝化除磷的启动过程具有较多的控制条件,例如:碳源种类和浓度、电子受体浓度等。为了快速启动反硝化除磷工艺,进行了一些准备实验,从而确定最佳的启动条件,保证反应器顺利运行。

2.1.1 碳源种类及浓度的确定

碳源种类对厌氧释磷及缺氧吸磷具有一定的影响,因为DPBs只能利用挥发性脂肪酸(VFA)作为

碳源^[9]。在接种污泥投入反应器后,分别以乙酸钠、丙酸钠、葡萄糖为碳源进行厌氧释磷及缺氧吸磷,结果如图2所示。可知,以乙酸钠为碳源时厌氧释磷量最高,丙酸钠次之,葡萄糖最低,但是吸磷过程中以丙酸钠为碳源时平均吸磷速率(以P/VSS计)为 $4.6 \text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$,反而略高于乙酸钠为碳源时的 $4.23 \text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$,葡萄糖为碳源时的吸磷速率仍最低,仅为 $1.72 \text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$,这与李观元^[10]的研究结果一致。Carvalho等^[2]的研究表明,在DPBs的驯化过程中,以乙酸盐为碳源的SBR反应器去除好氧段后以A/A方式运行时系统出现崩溃现象,而以丙酸盐为碳源的SBR反应器成功富集了DPBs。因此本研究确定碳源为丙酸钠。

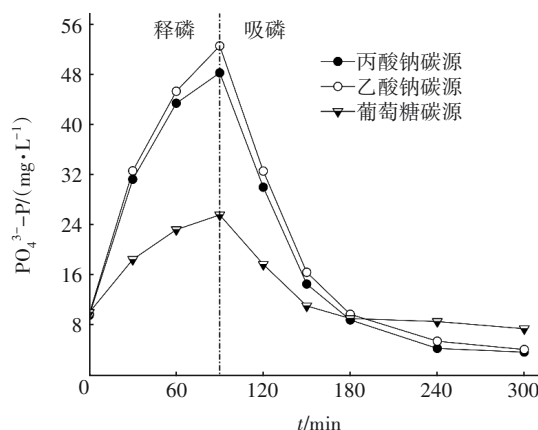


图2 不同碳源种类下释磷及吸磷情况

Fig.2 Phosphorus release and absorption at different carbon sources

不同丙酸钠碳源浓度(以COD计)下的释磷情况如图3所示。

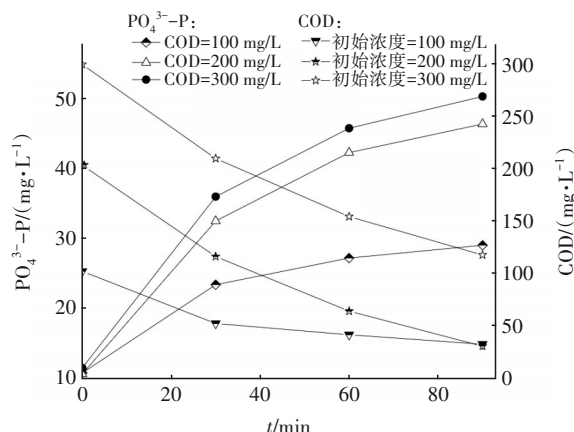


图3 不同COD浓度下的释磷情况

Fig.3 Phosphorus release at different COD concentrations

由图3可知,当COD为100 mg/L时,释磷速率及释磷量最低,净释磷量为18.29 mg/L;而当COD升至300 mg/L时,释磷速率较COD为200 mg/L时并无显著增加,净释磷量从35.80 mg/L增至38.86 mg/L,并未随COD浓度的增加而线性增长,并且有较多剩余COD。综上,厌氧前丙酸钠投加浓度以200 mg/L为宜,碳源大部分在厌氧段被聚磷菌有效利用,有利于聚磷菌淘汰反硝化菌而成为优势菌群。

2.1.2 电子受体浓度的确定

在碳源合理的情况下, NO_3^- -N浓度是决定除磷效能的重要因素。过高的 NO_3^- -N负荷会使得出水 NO_3^- -N剩余较多,进而影响下一周期厌氧段的释磷;而 NO_3^- -N负荷过低会使得电子受体不足,聚磷菌无法继续摄磷,且可能会出现磷反释的现象。因此,在进入阶段II的A/A/O驯化之前,对 NO_3^- -N的投加浓度进行试探性研究。根据相关研究^[11-12],缺氧段平均利用1 mg NO_3^- -N可大约吸收0.98~2.44 mg的 PO_4^{3-} -P,即其N/P值在0.41~1.02之间。根据此比例,厌氧结束后分别投加20、30、40、50 mg/L的 NO_3^- -N,反硝化吸磷效果如图4所示。

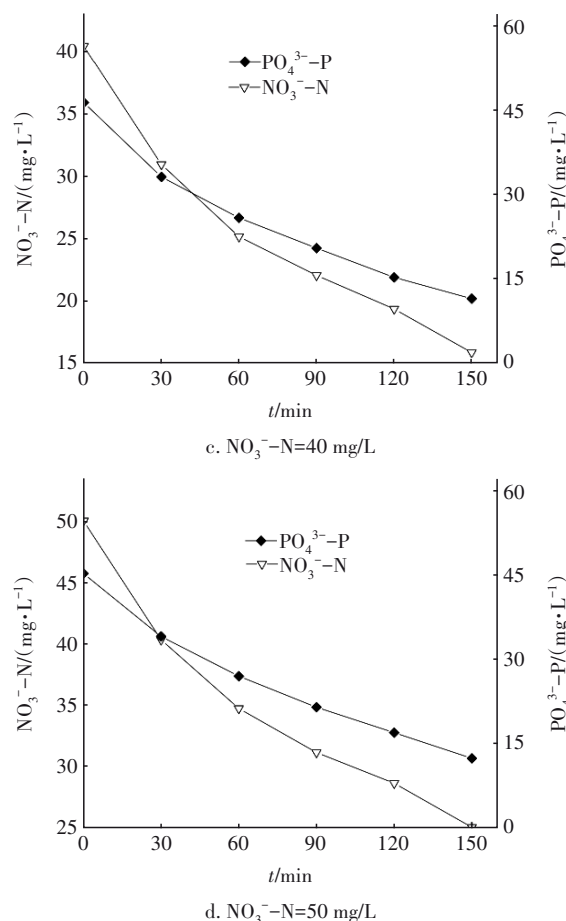
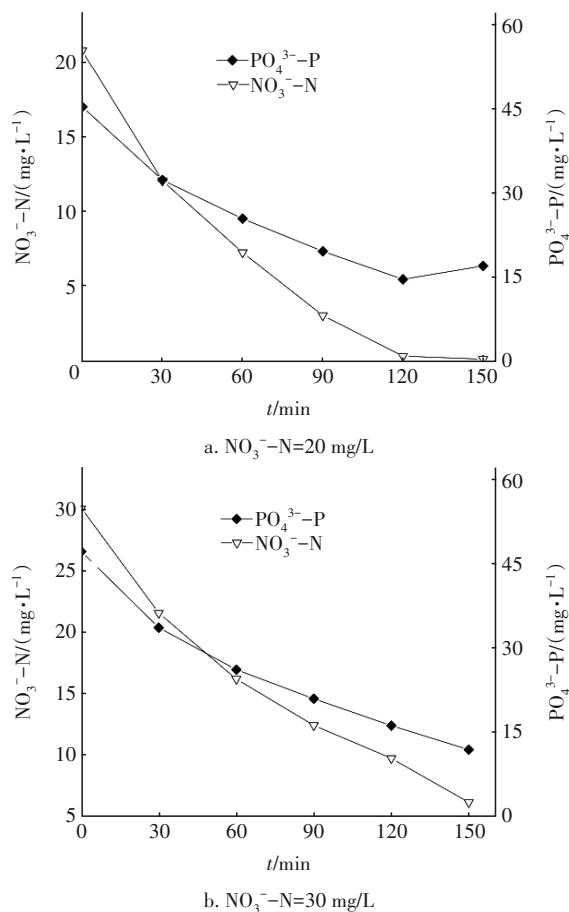


图4 NO_3^- -N的浓度对反硝化吸磷的影响

Fig.4 Effect of NO_3^- -N concentration on denitrification absorption of phosphorus

如图4所示,当 NO_3^- -N浓度为20 mg/L时,由于电子受体不足,吸磷受到影响,并且出现了磷反释现象;而当 NO_3^- -N浓度为40和50 mg/L时, NO_3^- -N出现了大量剩余,且 PO_4^{3-} -P浓度并未持续降低,主要是因为接种污泥中DPBs未占主导地位,反硝化除磷效率较低;而当 NO_3^- -N浓度为30 mg/L时, NO_3^- -N大部分被DPBs利用,虽然 PO_4^{3-} -P仍有剩余,但是经过后续30 min好氧曝气可以顺利去除。综上,该阶段在缺氧段投加30 mg/L的 NO_3^- -N为宜。

2.2 DPBs的培养驯化

2.2.1 启动过程中磷的去除效果

启动过程中磷的去除特性如图5所示。阶段I在厌氧/好氧条件下运行,以好氧吸磷为主,控制SRT为10 d。该阶段下常规反硝化菌等异养菌与PAOs竞争碳源,导致PAOs转化PHA的量有限,吸磷效率较低,所以运行初期净释磷量较低。从图5可以看出,随着A/O方式的运行及短泥龄的淘洗,

PAOs逐渐占据主导地位,净释磷量及净吸磷量逐步增加,分别从8.54、15.33 mg/L升至29.22、38.30 mg/L,出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度稳定在1 mg/L以下,据此PAOs的富集过程完成。

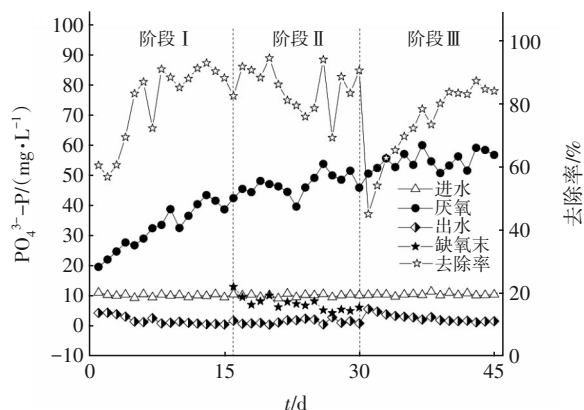


图5 启动过程中磷的去除特性

Fig.5 Removal characteristics of phosphorus during start-up period

阶段Ⅱ, PAOs在活性污泥体系中的比例已经大大增加,厌氧释磷量继续上升,但是好氧段仅有30 min,好氧吸磷作用受到抑制。缺氧段刚开始运行时, PAOs无法迅速适应低DO环境,活性降低,使得缺氧末期的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度甚至高于进水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度,缺氧吸磷效果较差。但是缺氧吸磷作用的存在可以证明DPBs与PAOs为同一种微生物^[6],可以利用氧气、硝酸盐作为电子受体进行吸磷。随着缺氧段的逐步驯化, PAOs活性增加使得缺氧吸磷能力增加,缺氧吸磷量从29.49 mg/L增至39.87 mg/L,且好氧吸磷比例逐步降低,从38.2%降至13.2%,缺氧吸磷逐步成为主要的吸磷方式。同时将此阶段的SRT延长至15 d^[13-14],防止SRT过短使得DPBs逐渐被淘汰出去而降低了除磷效率。

阶段Ⅲ完全去除好氧曝气部分后,延长SRT至25 d。随着运行时间的增加,出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度及去除率整体呈先上升后下降的趋势,表明无好氧曝气的存在仍然能够富集DPBs,这与Carvalho等^[2]的研究结果一致。在该阶段,缺氧段平均每去除1 mg $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 约需要0.79 mg的 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 作为电子受体,高于Lv等^[11]的实验结果(每去除1 mg $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 约需要1.02 mg的 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$),这与实验条件不同有一定关系,但是也说明了该反应器内DPBs的活性较好。富集完成后 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率稳定在80%以上,说明通过该阶段的驯化,反硝化除磷系统启动成功。

2.2.2 DPBs的富集

启动过程中DPBs的动力学特性如图6所示。根据本次除磷批次实验可知,在未经缺氧段驯化的阶段Ⅰ,好氧吸磷速率为10.86 mg/(g·h),以 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 为电子受体的缺氧吸磷速率为3.09 mg/(g·h), DPBs占PAOs的比例($f_{\text{DPBs/PAOs}}$)仅为28.5%。随着系统的运行及SRT逐步延长, DPBs和PAOs在系统内的富集速率有所提高,而且DPBs的富集速率高于PAOs,强化了缺氧除磷效果^[15],比反硝化速率 D_{ano} (以N/VSS计)由3.12 mg/(g·h)提高至8.88 mg/(g·h)。经长期厌氧/缺氧条件驯化后, DPBs得到了高度富集, $f_{\text{DPBs/PAOs}}$ 升至75.8%,因此推测DPBs已成为优势菌群。

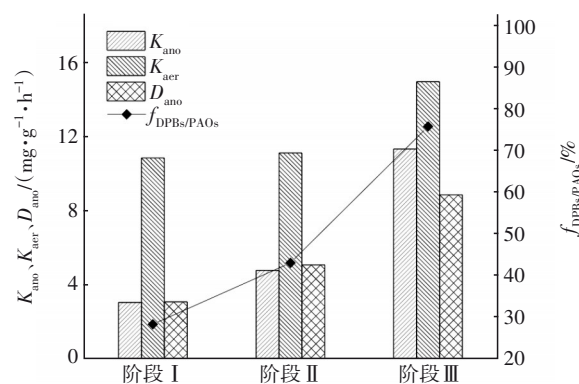


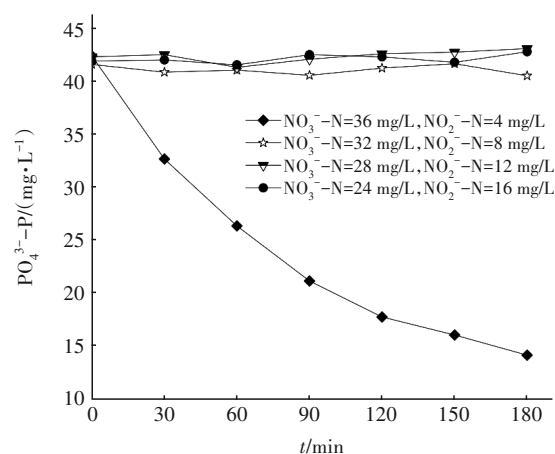
图6 启动过程中反硝化聚磷菌的动力学特性

Fig.6 Kinetic characteristics of DPBs during start-up period

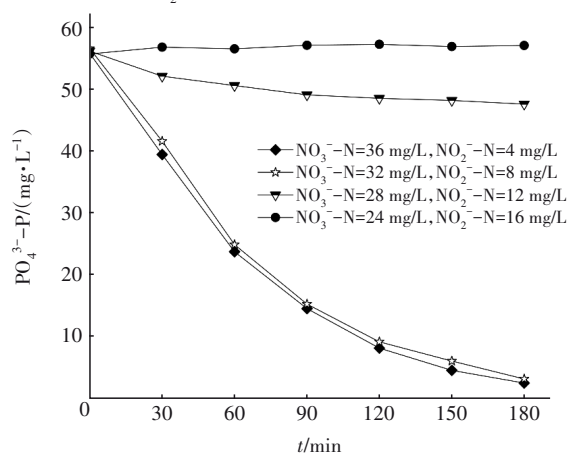
2.3 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 浓度对反硝化除磷的影响

以 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 作为电子受体一直存在其抑制浓度阈值的分歧, $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 浓度对吸磷的抑制主要因污泥本身菌群结构及环境而存在差异,而且反硝化除磷过程常出现 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 与 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 共存的情况,因此有必要研究 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 浓度对反硝化除磷的影响。图7(a)和(b)分别为阶段Ⅱ开始运行前及系统启动完成后的批次实验结果。该结果表明,当 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 为4 mg/L、 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 为36 mg/L时,吸磷速率较快,随着 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 浓度的提高,吸磷速率出现明显抑制,说明其对未经 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 驯化的接种污泥产生了抑制,这可能是因为:① $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 对磷吸收的影响是由于质子化的亚硝酸盐即FNA,它的毒性会对细胞膜和能量生成产生影响^[16];②FNA抑制反硝化酶活性和磷的吸收^[5], Zeng等^[17]研究表明, FNA完全抑制时, PHA的降解主要用于使亚硝酸盐还原从而解除抑制,而不

是用于磷的吸收。



a. NO_2^- -N 对阶段 II 运行前反硝化除磷的影响



b. NO_2^- -N 对启动完成后反硝化除磷的影响

图 7 NO_2^- -N 对启动前后反硝化除磷的影响

Fig.7 Effect of NO_2^- -N on denitrifying phosphorus removal before and after start-up period

在 DPBs 富集完成后,当 NO_2^- -N 为 4 和 8 mg/L 时,吸磷速率较快;当 NO_2^- -N 升至 12 mg/L 时,吸磷速率大幅下降,净吸磷量仅有 8.58 mg/L;当 NO_2^- -N 为 16 mg/L 时则出现了完全抑制现象,这与赵伟华等^[18]的研究结果一致。在该条件下,观测到 NO_2^- -N 浓度有轻微的降低,这可能是因为在缺氧环境下存在聚糖菌引起的内源反硝化^[19]。

3 结论

① 采用 SBR 反应器,以 A/O、A/A/O、A/A 三阶段运行并逐渐延长污泥龄,以丙酸钠为理想碳源(其 COD 浓度为 200 mg/L),以 NO_3^- -N 为单一电子受体(其浓度为 30 mg/L),运行 45 d 实现了 DPBs 的富集,成功启动反硝化除磷系统, PO_4^{3-} -P 去除率稳定在 80% 以上。

② 反硝化除磷系统启动成功后,DPBs 占 PAOs 的比例为 75.8%,比反硝化速率 D_{ano} 由 3.12 mg/(g·h) 提高至 8.88 mg/(g·h),缺氧段平均每利用 1 mg NO_3^- -N 可吸收约 1.26 mg PO_4^{3-} -P。

③ 当电子受体不足时,缺氧段出现磷反释现象,而在电子受体充足的情况下, PO_4^{3-} -P 浓度则无上升现象。在富集完 PAOs 后,可利用 NO_2^- -N 作为电子受体的浓度仅为 4 mg/L,达到 8 mg/L 时则会出现吸磷抑制现象;而 DPBs 富集完成后 NO_2^- -N 抑制浓度阈值可提高至 12 mg/L。

参考文献:

- [1] WANG Y Y, GENG J J, REN Z J, *et al.* Effect of anaerobic reaction time on denitrifying phosphorus removal and N_2O production [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102 (10): 5674-5684.
- [2] CARVALHO G, LEMOS P C, OEHMEN A, *et al.* Denitrifying phosphorus removal: linking the process performance with the microbial community structure [J]. *Water Research*, 2007, 41(19): 4383-4396.
- [3] 何理, 高大文. 基于反硝化聚磷菌的颗粒污泥的培养 [J]. *中国环境科学*, 2014, 34(2): 383-389.
HE Li, GAO Dawen. Cultivate of granular sludge based on denitrifying phosphate accumulating bacteria [J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(2): 383-389 (in Chinese).
- [4] ZHOU Y, GANDA L, LIM M, *et al.* Response of poly-phosphate accumulating organisms to free nitrous acid inhibition under anoxic and aerobic conditions [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 116: 340-347.
- [5] 韦佳敏, 刘文如, 程洁红, 等. 反硝化除磷的影响因素及聚磷菌与聚糖菌耦合新工艺的研究进展 [J]. *化工进展*, 2020, 39(11): 4608-4618.
WEI Jiamin, LIU Wenru, CHENG Jiehong, *et al.* Influencing factors of denitrifying phosphorus removal and advance research on novel process of coupling PAOs and GAOs [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020, 39(11): 4608-4618 (in Chinese).
- [6] 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]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2004, 70 (9): 5383-5390.
- [7] NG W J, ONG S L, HU J Y. Denitrifying phosphorus

- removal by anaerobic/anoxic sequencing batch reactor [J]. *Water Science and Technology*, 2001, 43 (3): 139-146.
- [8] WACHTMEISTER A, KUBA T, VAN LOOSDRECHT M C M, *et al.* A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge [J]. *Water Research*, 1997, 31(3): 471-478.
- [9] 乔卫敏, 周振, 王罗春, 等. 反硝化聚磷菌应用现状及其影响因素分析[J]. *水处理技术*, 2013, 39(9): 6-9.
- QIAO Weimin, ZHOU Zhen, WANG Luochun, *et al.* Application status and influencing factors analysis of the denitrifying phosphorus accumulating bacteria [J]. *Technology of Water Treatment*, 2013, 39(9): 6-9 (in Chinese).
- [10] 李观元. 以丙酸为碳源的反硝化除磷工艺运行特性及影响因素研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- LI Guanyuan. Operation Characteristics and Affecting Factors of Denitrifying Phosphatation Process Fed with Propionic [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010 (in Chinese).
- [11] LV X M, SHAO M F, LI C L, *et al.* Operation performance and microbial community dynamics of phosphorus removal sludge with different electron acceptors [J]. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 2014, 41(7): 1099-1108.
- [12] 张建华, 王淑莹, 张森, 等. 不同反应时间内碳源转化对反硝化除磷的影响 [J]. *中国环境科学*, 2017, 37(3): 989-997.
- ZHANG Jianhua, WANG Shuying, ZHANG Miao, *et al.* Effect of conversion of internal carbon source on denitrifying phosphorus removal under different reaction time [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(3): 989-997 (in Chinese).
- [13] BELLI T J, BERNARDELLI J K B, COSTA R E D, *et al.* Effect of solids retention time on nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater in a sequencing batch membrane bioreactor [J]. *Environmental Technology*, 2016, 38(7): 806-815.
- [14] 杨杰, 李冬, 罗亚红, 等. SBR后置缺氧反硝化除磷的启动及去除性能[J]. *中国环境科学*, 2016, 36 (5): 1376-1383.
- YANG Jie, LI Dong, LUO Yahong, *et al.* The start-up and performance of denitrifying phosphorus removal process in a post-anoxic SBR system [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(5): 1376-1383 (in Chinese).
- [15] 王朝朝, 闫立娜, 李思敏, 等. SRT对UCT-MBR反硝化除磷性能与膜污染行为的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(6): 1715-1723.
- WANG Zhaozhao, YAN Lina, LI Simin, *et al.* Influence of sludge retention time on denitrifying dephosphatation propensity and membrane fouling behavior in a UCT-MBR process [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(6): 1715-1723 (in Chinese).
- [16] ZHENG X, SUN P, LOU J, *et al.* The long-term effect of nitrite on the granule-based enhanced biological phosphorus removal system and the reversibility [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 132: 333-341.
- [17] ZENG W, WANG A, ZHANG J, *et al.* Enhanced biological phosphate removal from wastewater and clade-level population dynamics of "*Candidatus Accumulibacter phosphatis*" under free nitrous acid inhibition: linked with detoxication [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 296: 234-242.
- [18] 赵伟华, 李健伟, 王梅香, 等. 前置 A_2NSBR 系统硝化和反硝化除磷的特性 [J]. *中国环境科学*, 2019, 39 (11): 4660-4665.
- ZHAO Weihua, LI Jianwei, WANG Meixiang, *et al.* Nitrification and denitrifying phosphorus removal performance in the pre- A_2NSBR system [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(11): 4660-4665 (in Chinese).
- [19] ZHANG W H, HUANG Y, WANG M X, *et al.* Post-endogenous denitrification and phosphorus removal in an alternating anaerobic/oxic/anoxic (AOA) system treating low carbon/nitrogen (C/N) domestic wastewater [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 339: 450-458.

作者简介: 李成(1994-), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 研究方向为水污染控制技术与理论。

E-mail: 964230391@qq.com

收稿日期: 2021-06-23

修回日期: 2021-11-02

(编辑: 刘贵春)