

# FNA 对短程反硝化除磷系统运行的影响

李 微<sup>1</sup>, 曾 飞<sup>1</sup>, 刘 静<sup>2</sup>, 高明杰<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 大连兆和环境科技股份有限公司, 辽宁 大连 116000)

**摘 要** 目的 研究不同游离亚硝酸(FNA)质量浓度对短程反硝化除磷系统的运行效能的影响. 方法 利用成功启动的短程反硝化除磷 SBR 反应器, 分析不同 FNA 质量浓度在缺氧反应段脱氮除磷和碳源的利用效果以及厌氧比释磷速率和缺氧比吸磷速率的变化. 结果 FNA 质量浓度为  $1.46 \times 10^{-3}$  mg/L 时, 系统的反硝化和除磷效果最佳; FNA 质量浓度为  $2.19 \times 10^{-3}$  mg/L 时, 系统几乎无除磷效果但反硝化反应仍可发生; 随 FNA 质量浓度的升高, PHB 的合成量和消耗量表现为先增多后减少. 结论 系统内厌氧释磷量与缺氧吸磷量两者之间存在与 FNA 质量浓度变化不相关的线性关系.

**关键词** 反硝化除磷; FNA; 抑制; 去除率

中图分类号 X703.1

文献标志码 A

## The Effect of FNA on the Operation of Short – Cut Denitrification and Phosphorus Removal System

LI Wei<sup>1</sup>, ZENG Fei<sup>1</sup>, LIU Jing<sup>2</sup>, GAO Mingjie<sup>1</sup>

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Dalian Zhaohe Environmental Technology Co. Ltd., Dalian, China, 116000)

**Abstract:** The purpose of the experiment is to study the effect of different FNA mass concentrations on the performance of short-range denitrifying phosphorus removal system. The method of this experiment is to use the stable sequencing batch reactor to analyze the effects of different FNA mass concentrations on nitrogen and phosphorus removal and available carbon source in the anaerobic reaction zone, as well as the change of anaerobic phosphorus release rate and anaerobic phosphorus uptake rate. The results of the experiment showed that when the FNA mass concentration was  $1.46 \times 10^{-3}$  mg/L, the effects of denitrification and phosphorus removal of the system were the best. When the FNA mass concentration was  $2.19 \times 10^{-3}$  mg/L, the system has almost no phosphorus removal, and the denitrification still occurred. With the increase of FNA mass concentration, the PHB production and consumption increased firstly and then decreased. The results showed that there was a linear relationship between anaerobic phosphorus released and anaerobic

收稿日期: 2018-10-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508342); 国家科技重大专项(2015ZX07202012); 辽宁省教育厅科研项目(LJZ2016014)

作者简介: 李微(1982—), 女, 副教授, 博士, 主要从事污水处理方面研究.

phosphorus absorbed in the system, which was not correlated with the concentration of FNA.

**Key words:** denitrifying phosphorus removal; FNA; inhibition; removal rate

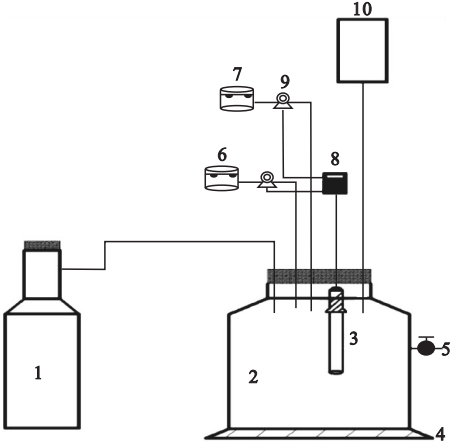
氮、磷的排放过量是导致水体富营养化的主要诱因. 短程反硝化聚磷菌(Denitrifying poly-phosphate accumulating organisms, DPAOs)可以在厌氧/缺氧交替运行环境中,以亚硝酸盐氮为电子受体进行除磷,同时具有反硝化脱氮的功能. 利用亚硝酸盐氮为电子受体的短程反硝化聚磷菌与利用  $O_2$  和硝酸盐氮为电子受体相比具有运行周期短、吸磷速率快、节省耗氧量、缩短反应时间的优势<sup>[1-5]</sup>. 然而在目前的污水生物处理表明亚硝酸盐的存在一直被认为是影响系统处理效果的不利因素,过量的亚硝酸盐会对微生物的细胞壁或细胞膜产生严重的损害,破坏微生物的新陈代谢等生命活动从而产生抑制作用<sup>[6-11]</sup>. 近年来,在污水生物处理过程中对于亚硝酸盐抑制微生物的新陈代谢的研究甚多,有学者提出在污水生物处理过程中,亚硝酸盐并非真正的抑制剂,对微生物的增殖和产能具有抑制作用的是亚硝酸盐的质子化产物——游离亚硝酸(Free Nitrous Acid, FNA)<sup>[12]</sup>. Y. Zhou 等<sup>[13]</sup>在对聚磷菌的反硝化和缺氧吸磷能力的研究中也发现,FNA 才是真正的抑制剂,对缺氧吸磷产生抑制作用,当 FNA 质量浓度(以  $HNO_2 - N$  计)达到  $0.002\text{ mg/L}$  时,聚磷菌的吸磷作用受到抑制,当 FNA 质量浓度(以  $HNO_2 - N$  计)达到  $0.02\text{ mg/L}$  时,吸磷作用则完全被抑制. 笔者以  $NO_2^- - N$  为电子受体,在 SBR 反应器中,采用三阶段驯化法实现了 DPAOs 的驯化与富集. 在此基础上,继续在厌氧/缺氧交替运行的条件下,利用稳定运行的短程反硝化除磷系统,改变缺氧段投加的亚硝酸盐质量浓度,分析了 FNA 对缺氧吸磷性能的抑制作用.

### 1 试验

#### 1.1 试验装置

试验采用有效容积为 2L 的广口瓶模拟

厌氧/缺氧交替运行的 SBR 反应器(见图 1),污泥取自稳定运行的  $A^2$ SBR 反应器. 静态反应瓶连接氮气瓶,以保证系统的厌氧环境,通过滴加亚硝酸盐溶液实现缺氧环境. 反应瓶侧边设接样口,置于时控开关控制的恒温磁力搅拌器上,使泥水在反应过程中能够混合充分,同时保证系统处于恒温状态.



1. 氮气瓶;2. 静态反应瓶;3. pH 计;4. 恒温磁力搅拌器;  
5. 接水口;6. 酸性缓冲液;7. 碱性缓冲液;  
8. pH 在线监测仪;9. 蠕动泵;10. 亚硝酸盐加药瓶。

图 1 静态厌氧/缺氧反应装置

Fig. 1 Static anaerobic/anoxic installation

1.2 试验用水水质

试验采用人工配制模拟生活污水,主要成分由磷酸二氢钾、氯化铵、氯化钙、硫酸镁、无水乙酸钠、微量元素等提供,碳酸氢钠调节进水 pH 为 7.5~7.8,水质成分如表 1 所示.

表 1 模拟生活污水成分

Table 1 Composition of simulative domesticsewage

mg/L			
$\rho(\text{COD})$	$\rho(\text{NH}_4 - \text{N})$	$\rho(\text{TP})$	$\rho(\text{微量元素})$
170~220	10~15	9~12	1

微量元素为  $\rho(\text{FeCl}_3) = 1.50\text{ g/L}$ ,  $\rho(\text{H}_3\text{BO}_3) = 15\text{ g/L}$ ,  $\rho(\text{CoCl}_2) = 0.15\text{ g/L}$ ,  $\rho(\text{CuSO}_4) = 0.03\text{ g/L}$ ,  $\rho(\text{MnCl}_2) = 0.06\text{ g/L}$ ,  $\rho(\text{NaMoO}_4) = 0.06\text{ g/L}$ ,  $\rho(\text{ZnSO}_4) =$

0.12 g/L, $\rho$ (乙二胺四乙酸)=10.00 g/L.

1.3 分析项目与方法

常规分析项目及分析方法如表 2 所示.

表 2 主要分析项目及测定方法

分析项目	分析方法
pH	上海雷磁 PHS-25pH 计
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	N-(1-萘基)-乙二胺光度法
TP	钼锑抗分光光度法
COD	快速密闭催化消解法
MLSS	滤纸称重法
聚 β 羟基丁酸(PHB)	紫外分光光度法
DO	HQ40d 型便携数字显示测氧仪

2 试验运行过程

利用稳定运行的 SBR 反应器,系统按瞬时进水 30min、厌氧 2 h、缺氧 2 h、沉淀 30 min、排水 30 min 的运行模式每天运行 3 个周期,进水水质如表 1 所示. 试验系统分为 5 个工况,各工况通过投加亚硝酸钠溶液使各工况下系统内初始 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 质量浓度如表 3 所示.

表 3 各工况初始 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 质量浓度

Table 3 Initial NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N mass concentration under different operating conditions

工况	$\rho(\text{NO}_2^- - \text{N})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
I	8
II	14
III	20
IV	25
V	30

每个工况各运行 30 d,共 150 d. 试验过程中 FNA 质量浓度计算式为

$$\rho(\text{FNA}) = \rho(\text{NO}_2^- - \text{N})/K_a \times 10\text{pH}, \quad (1)$$

$$K_a = \exp[-2\,300/(273 + t)]. \quad (2)$$

式中: $\rho(\text{FNA})$ 为游离亚硝酸质量浓度,mg/L; $K_a$ 为亚硝酸钠电离平衡常数; $\rho(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 为亚硝酸盐氮质量浓度,mg/L;pH 为系统内 pH; $t$ 为系统温度,℃.

计算得 5 个工况下 FNA 质量浓度(见表 4). 反应器污泥 MLSS 质量浓度维持在

3 400 mg/L 左右,控制厌氧段 pH 值为 8.0,缺氧段 pH 值为 7.5,温度为 24 ℃,污泥龄为 24d. 笔者把反应器运行稳定时,某个周期的测试结果定义为典型反应周期. 在不同 FNA 质量浓度下,研究典型反应周期内短程反硝化除磷系统内各物质的质量浓度变化情况.

表 4 各工况 FNA 质量浓度

Table 4 FNA mass concentration under different conditions

工况	$\rho(\text{FNA})/10^{-3}(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
I	0.58
II	1.02
III	1.46
IV	1.82
V	2.19

3 结果与分析

3.1 不同 FNA 质量浓度下典型反应周期的除磷效果

在各工况条件下,系统稳定运行时的除磷效果因 FNA 质量浓度的不同而差异较大. 图 2 为各系统在不同工况下运行的典型周期内 TP 质量浓度变化,短程反硝化除磷过程中的厌氧释磷段和缺氧吸磷段都受到 FNA 质量浓度变化的影响.

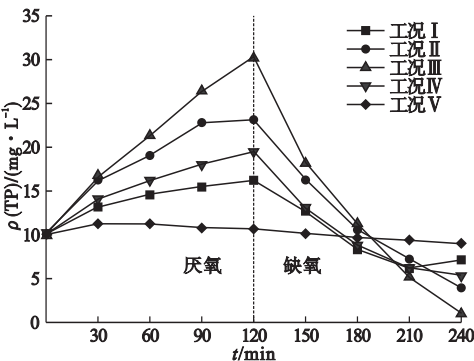


图 2 不同 FNA 质量浓度下典型反应周期内 TP 质量浓度变化情况

Fig. 2 Variation of TP concentration during a typical cycle under different concentration FNA

工况 I 中,FNA 质量浓度为  $0.58 \times 10^{-3}$  mg/L,反应进行到 210 min 时,混合液内 TP 质量浓度出现不降反增的现象,这是由于

反应进行到 210 min 时电子受体几乎被完全消耗,反硝化除磷过程停止,贮存在 DPAOs 体内的磷又重新释放到系统内,即发生了“二次释磷”现象. 工况Ⅲ中,向系统内投加  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  质量浓度为 20 mg/L, FNA 质量浓度为  $1.46 \times 10^{-3}$  mg/L, 系统的释磷量和吸磷量都达到最佳状态,出水中 TP 质量浓度为 1.09 mg/L,说明在此条件下, FNA 未达到抑制质量浓度,不会对反硝化除磷过程产生抑制作用. 对比工况Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ, FNA 质量浓度由  $0.58 \times 10^{-3}$  mg/L 增至  $1.46 \times 10^{-3}$  mg/L, 厌氧释磷量从 6.31 mg/L 增加到 20.07 mg/L, 缺氧除磷量从 9.08 mg/L 增加到 29.15 mg/L, 说明 FNA 质量浓度低于  $1.46 \times 10^{-3}$  mg/L 时, 系统厌氧释磷量和缺氧吸磷量都与 FNA 质量浓度呈正相关, 因为当  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  投加质量浓度过低时, 除磷电子受体不足, 缺氧吸磷反应不充分, 进而会影响到下一个周期的厌氧释磷. 工况Ⅳ中,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  质量浓度增加至 25 mg/L, FNA 质量浓度为  $1.82 \times 10^{-3}$  mg/L, 系统的释磷量和吸磷量降至 9.34 mg/L 和 14.14 mg/L, 反应结束系统出水 TP 质量浓度升高至 5.41 mg/L, 去除率仅为 47.01%. 工况Ⅴ时  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  质量浓度增至 30 mg/L, FNA 质量浓度为  $2.19 \times 10^{-3}$  mg/L, 此条件下系统几乎不发生释磷和吸磷反应, 出水中 TP 质量浓度高至 9.05 mg/L, 与厌氧段进水中 TP 质量浓度 10.21 mg/L 无显著差异. 试验结果表明短程反硝化除磷的效果受 FNA 质量浓度影响较大. 当 FNA 质量浓度为  $1.46 \times 10^{-3}$  mg/L 时, 系统除磷效果稳定良好; 但若 FNA 质量浓度继续增大, 除磷系统开始恶化, 当 FNA 质量浓度增加至为  $2.19 \times 10^{-3}$  mg/L 时, 系统几乎不发挥除磷作用, 系统出水中 TP 质量浓度与厌氧初始进水的质量浓度无显著差异, 此时 FNA 对除磷系统严重抑制.

3.2 不同 FNA 质量浓度下典型反应周期的反硝化效果

在反硝化脱氮除磷过程中, 除磷效果与脱氮效果具有一定的相关性. 缺氧段 DPAOs 分解体内的内碳源聚  $\beta$  羟基丁酸 poly- $\beta$ -hydroxybutyric acid, PHB) 产生能量, 以  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  为电子受体过量吸磷, 来合成体内的糖原和聚磷<sup>[14]</sup>. 因此, 在不同 FNA 质量浓度情况下, 研究运行周期内  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的质量浓度变化情况, 有利于弄清亚硝酸盐在反硝化除磷过程中的影响和作用. 图 3 为各系统稳定运行后, 不同 FNA 质量浓度条件下, 缺氧段  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的质量浓度变化情况.

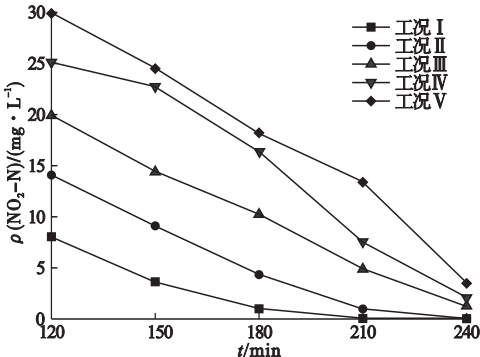


图 3 不同 FNA 质量浓度下典型反应周期内  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  质量浓度变化情况

Fig. 3 Variation of  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  concentration in a typical cycle under different concentration FNA

由图 3 可知, 在不同工况下各反应器稳定运行时, 系统内  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的去除效果受到 FNA 质量浓度的影响. 工况Ⅰ中, 缺氧段 FNA 质量浓度为  $0.58 \times 10^{-3}$  mg/L 时, 反应时间至 210 min 时, 系统几乎检测不到  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的存在, 其质量浓度仅为 0.06 mg/L, 即系统对  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的去除率接近 100%. 与图 2 中 TP 质量浓度变化相对应, 出水中 TP 质量浓度为 7.23 mg/L, 可知此工况缺氧段投加  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  质量浓度过低, 电子受体不足, 因此反硝化除磷效果不佳. 工况Ⅱ中 FNA 质量浓度为  $1.02 \times 10^{-3}$  mg/L, 系统的  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  去除量为 14.02 mg/L, 可见仍可去除大部分  $\text{NO}_2^- - \text{N}$ , 系统出水中  $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、



TP 质量浓度分别为 0.08 mg/L、4.07 mg/L, 系统除磷效果随着  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  质量浓度的增加而提高, 系统内  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  以电子受体方式被 DPAOs 有效利用. 工况 III 中系统的  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  去除量增加至 18.75 mg/L, 出水中  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  质量浓度为 1.22 mg/L, 去除率达到 93.89%, 此时相对应的吸磷量达到最大, 出水中 TP 质量浓度最低, 为 1.09 mg/L. 说明此时反硝化作用和除磷作用同步提升. 工况 IV 的 FNA 质量浓度继续提升至  $1.82 \times 10^{-3}$  mg/L 时, 系统  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的去除量继续增加, 达到 23.03 mg/L, 由于投加质量浓度较高, 出水中  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  质量浓度略有增高, 为 2.05 mg/L, 但此时系统的缺氧除磷量开始下降. 工况 V 中 FNA 质量浓度为  $2.19 \times 10^{-3}$  mg/L, 系统  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的去除量达到最大, 为 26.68 mg/L, 但除磷效果极差, TP 的出水与进水质量浓度已无明显差异. 出现这种现象的原因是, DPAOs 的活性被高质量浓度的 FNA 抑制, 其他反硝化微生物成为系统优势菌种.

试验结果表明, 缺氧段 FNA 的质量浓度同时影响  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  和 TP 的去除效果. FNA 质量浓度为  $1.46 \times 10^{-3}$  mg/L 时, 系统反硝化和除磷效果同时达到较好状态. 随着 FNA 质量浓度增加至  $2.19 \times 10^{-3}$  mg/L, 系统除磷完全被抑制, 但反硝化作用正常进行. 根据试验数据分析, 系统在缺氧段的  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  消耗量与吸磷量不完全符合理论的比例, 这可能是当缺氧段  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  质量浓度过高时, 一些常规反硝化菌与 DPAOs 竞争电子受体的原因.

### 3.3 不同 FNA 质量浓度下典型反应周期的 COD 去除效果及 PHB 变化情况

COD 是短程反硝化除磷过程中的一项重要水质监测指标, 它反映系统碳源的消耗情况; PHB 作为胞内聚合物, 缺氧段的反硝化吸磷和糖原合成的能量驱动都来自 PHB 的分解, 同时其质量浓度变化也反映 DPAOs

对外碳源的转化利用情况. DPAOs 在厌氧段吸收污水中的短链脂肪酸合成细胞内碳源 PHB, 缺氧时分解 PHB 以  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  为电子受体进行反硝化除磷反应. 反硝化和除磷两个过程之间存在对电子受体  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的竞争问题,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的消耗与碳源浓度有关, 所以监测 COD、PHB 的质量浓度变化情况对反硝化除磷过程有着积极的影响. 不同 FNA 质量浓度条件下, COD、PHB 的质量浓度变化情况如图 4 所示.

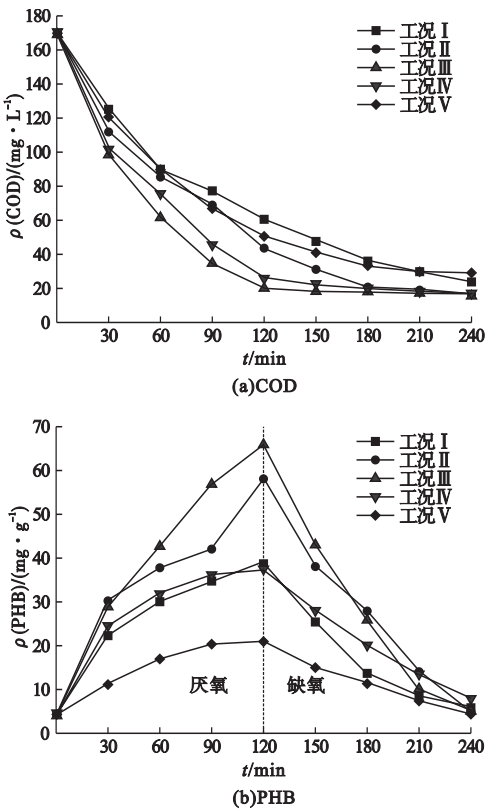


图 4 不同 FNA 质量浓度下典型反应周期内 COD、PHB 质量浓度变化情况

Fig. 4 Variation of COD、PHB concentration during a typical cycle under different concentration FNA

图(4)a 可以看出, 在不同 FNA 质量浓度条件下, 各系统在典型反应周期内 COD 的质量浓度变化趋势相似, 但单位时间去除速率和去除量不同. 厌氧段有机物被 DPAOs 吸收转化, 所以 COD 大部分在厌氧段被去除, 剩余小部分进入缺氧段继续被降解吸收.

对比工况Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ,系统FNA质量浓度由 $0.58 \times 10^{-3}$  mg/L提升至 $1.46 \times 10^{-3}$  mg/L时,系统厌氧段结束时COD去除量由109.76 mg/L增加至150.09 mg/L,去除率由64.45%增加至88.20%。工况Ⅲ时,FNA质量浓度为 $1.46 \times 10^{-3}$  mg/L,厌氧段结束出水中COD质量浓度为20.08 mg/L,此时厌氧段对COD的去除较为彻底,缺氧段没有过多的剩余碳源被其他异养菌利用。由图2可知,此时系统的除磷效率最佳。对比工况Ⅳ、Ⅴ,FNA质量浓度为 $1.82 \times 10^{-3} \sim 2.19 \times 10^{-3}$  mg/L,厌氧段COD去除量逐渐降低,厌氧出水中COD质量浓度分别为26.11 mg/L、50.57 mg/L,可见FNA质量浓度为 $2.19 \times 10^{-3}$  mg/L时,碳源相对过剩,结合图2可知,TP质量浓度无显著变化,说明此条件下DPAOs几乎丧失活性,而剩余的外碳源进入缺氧段,依然可以被其他异养微生物如常规反硝化细菌吸收利用,所以缺氧出水的COD质量浓度较厌氧段有所降低。

图(4)b为不同工况条件下,系统内PHB质量浓度的变化情况,明显看出FNA的质量浓度对PHB的合成与消耗影响较大,典型周期反应结束后,PHB质量浓度基本恢复至初始水平。当系统缺氧段FNA质量浓度由 $0.58 \times 10^{-3}$  mg/L增加至 $1.46 \times 10^{-3}$  mg/L时,厌氧段PHB的合成量由39.03 mg/g上升至66.03 mg/g,缺氧段的消耗量也由33.04 mg/g增加至60.83 mg/g。结合系统的除磷及反硝化效果可以看出,工况Ⅲ中,FNA质量浓度为 $1.46 \times 10^{-3}$  mg/L条件下,DPAOs为系统内的优势菌种,厌氧段进水中的外碳源大部分被DPAOs转化为PHB储存在细胞内,并在缺氧阶段分解PHB利用 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 作为电子受体,高效完成反硝化除磷过程。工况Ⅳ提高FNA质量浓度为 $1.82 \times 10^{-3}$  mg/L,系统PHB的合成量和消耗量都有所下降,但COD的去除并未受到较大影响,结合TP去除率下降情况分析原

因,可能是由于FNA质量浓度上升,对DPAOs产生了轻微抑制作用,进水中的外碳源除了被DPAOs吸收转化为PHB储存体内外,还有部分被反硝化菌吸收发生反硝化作用。工况Ⅴ的FNA质量浓度继续增加至 $2.19 \times 10^{-3}$  mg/L时,PHB的合成和消耗量分别降至16.66 mg/g和16.65 mg/g,PHB是缺氧吸磷的能量驱动,所以此条件下系统几乎无除磷效果。

试验结果证明,系统厌氧段的COD去除效果、PHB的合成量及缺氧段PHB的消耗量都受到系统缺氧段FNA质量浓度的影响。FNA质量浓度过低,即亚硝酸盐短缺,除磷电子受体不足;FNA质量浓度过高,则会对DPAOs产生抑制作用,其他微生物种群占据系统优势地位,与DPAOs在厌氧段竞争外碳源转化为自身内部能源物质,但却不能在缺氧段完成吸磷过程。因此,FNA质量浓度的选择对反硝化除磷过程至关重要。

3.4 厌氧释磷量对缺氧吸磷量的影响

在短程反硝化除磷过程中,缺氧吸磷量与厌氧释磷量之间存在正相关关系,即DPAOs在厌氧段的释磷量越大,在缺氧段的吸磷量越多。系统在各工况下,厌氧段的释磷量和缺氧段的吸磷量变化如表5所示。

表5 不同FNA质量浓度下系统内的厌氧释磷量与吸磷量

mg/L		
FNA 质量浓度/ $10^{-3}$	厌氧释磷量	缺氧吸磷量
0.58	6.00	10.08
1.02	13.11	19.12
1.46	20.07	29.15
1.82	9.34	14.14
2.19	0.72	1.72

通过胞内聚合物的分解与合成、能量的释放与贮存,使厌氧释磷量与缺氧吸磷之间产生联系。在厌氧段,DPAOs分解Poly-P

产生能量,表现为厌氧释磷,同时吸收污水中的外碳源转化合成为 PHB 贮存于体内,作为缺氧段反硝化吸磷的能量来源. 因此,较高的厌氧释磷量可使 DPAOs 体内贮存较多的 PHB,而较多的 PHB 作为能源物质可以在缺氧段为系统带来了较多的吸磷量.

根据表 5 不同 FNA 质量浓度下系统内的厌氧释磷量与吸磷量,对厌氧释磷量和缺氧吸磷量进行线性拟合,得到线性拟合方程  $y = 1.3988x + 1.06643$ ,  $R^2 = 0.99811$ ,厌氧释磷量与缺氧吸磷量的线性拟合曲线如图 5 所示. 由拟合结果可以明显看出系统内厌氧释磷量与缺氧吸磷量呈显著的线性关系,且此种联系与 FNA 的质量浓度无关.

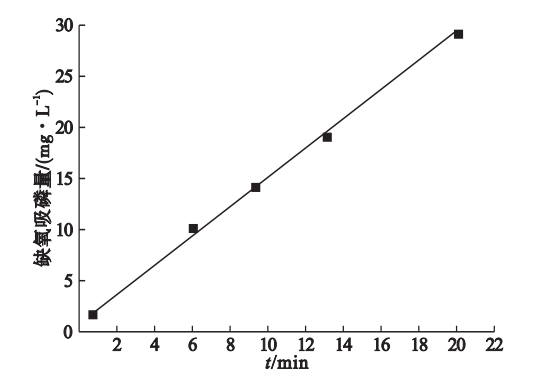


图 5 厌氧释磷量与缺氧吸磷量的线性拟合曲线  
Fig. 5 The linear fitting curve between the amounts of phosphorus release & uptake

3.5 不同质量浓度 FNA 对系统比释/吸磷速率的影响

图 6 为在不同 FNA 质量浓度条件下,各系统稳定运行的典型反应周期内的比释磷速率和比吸磷速率的变化情况,从图 6 可以看出,随着 FNA 质量浓度的增加,反应器混合液的比释磷速率和比吸磷速率都呈现先升高后降低的趋势,说明低质量浓度的 FNA 不仅不会抑制 DPAOs 的厌氧释磷和缺氧吸磷能力,反而促进了系统对污水的高效脱氮除磷,这一现象可以通过 FNA 的解偶联作用解释. C. Hellinga 等<sup>[15]</sup>对荧光假单胞菌进行研究,证实 FNA 作为亚硝酸的质子形式,能够穿透细胞膜进入细胞内部,并且可以在膜两侧进

行往复运动而不产生能量,但 FNA 透过细胞膜后,它的解偶联作用使胞外驱动质子的能量增加,因此,DPAOs 需要提高呼吸速率,分

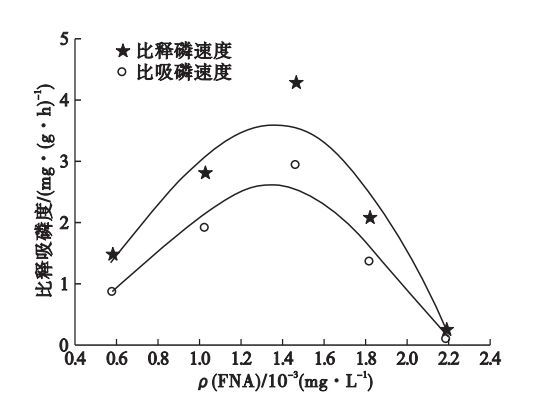


图 6 不同质量 FNA 浓度下系统的比释磷速率和比吸磷速率  
Fig. 6 Specific anaerobic phosphate release rate and specific aerobic phosphate uptake rate under different FNA levels

解更多的 Poly - P 以维持质子驱动力的恒定. 另外由图 6 可知,比吸磷速率曲线变化趋势更加明显,说明 FNA 对缺氧吸磷的影响大于厌氧释磷. 当 FNA 质量浓度高于  $1.46 \times 10^{-3} \text{ mg/L}$  时,系统的比释磷速率和比吸磷速率都开始呈现下降趋势. 由于 FNA 对亚硝酸还原酶的翻译产生了不利影响,从而抑制了能量产生,使 DPAOs 体内糖原、Poly - P 的合成和细胞自身生长代谢受到影响<sup>[16]</sup>.

4 结 论

(1) 试验中采用的 FNA 质量浓度范围对 COD 降解没有影响;FNA 质量浓度在低于  $1.46 \times 10^{-3} \text{ mg/L}$  时,系统缺氧反硝化吸磷反应结束的出水中几乎无  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  积累,且除磷能力随着 FNA 质量浓度增加而提高, FNA 大于  $1.82 \times 10^{-3} \text{ mg/L}$  时,系统内逐步出现  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的积累,同时抑制 DPAOs 缺氧吸磷;提高 FNA 质量浓度的初期系统除磷能力下降,随系统运行略有恢复. 说明 FNA 对系统除磷性能的抑制具有一定程度的可逆性.

(2) FNA 质量浓度为  $1.46 \times 10^{-3} \text{ mg/L}$

时,系统的反硝化和除磷效果最佳;FNA 质量浓度增加至  $2.19 \times 10^{-3}$  mg/L,系统几乎无除磷效果,而反硝化反应仍可发生,证明反硝化细菌对于 FNA 的耐受性大于 DPAOs;PHB 的合成量和消耗量随 FNA 质量浓度的升高表现为先增多后减少,拐点发生在 FNA 质量浓度为  $1.46 \times 10^{-3}$  mg/L 时。

(3)通过分析不同 FNA 质量浓度下系统内厌氧释磷量与缺氧吸磷量的变化情况发现,两者之间存在一种不以 FNA 质量浓度变化而变化的线性相关关系,线性拟合方程为  $y = 1.3988x + 1.06643$ ,  $R^2 = 0.99811$ 。

## 参考文献

- [1] ZHENG X, SUN P, HAN J, et al. Inhibitory factors affecting the process of enhanced biological phosphorus removal (EBPR)-A mini-review [J]. *Process biochemistry*, 2014, 49 (12): 2207 - 2213.
- [2] JABARI P, MUNZ G, OLESZKIEWICZ J A. Selection of denitrifying phosphorus accumulating organisms in IFAS systems: comparison of nitrite with nitrate as an electron acceptor [J]. *Chemosphere*, 2014, 109: 20 - 27.
- [3] 李微,王宇佳,祝雷,等.污泥龄对 A/A 工艺反硝化除磷效能的影响[J]. *工业水处理*, 2015, 35(7): 55 - 59.  
(LI Wei, WANG Yujia, ZHU Lei, et al. Effect of SRT on the denitrifying dephosphatation capacity of A/A process [J]. *Industrial water treatment*, 2015, 35(7): 55 - 59.)
- [4] ZAFIRIAI S I, NTOUGIAS S, NIKOLAIDS C, et al. Denitrifying polyphosphate accumulating organisms population and nitrite reductase gene diversity shift in a DEPHANOX-type activated sludge system fed with municipal wastewater [J]. *Journal of bioscience & bioengineering*, 2011, 111(2): 185 - 192.
- [5] WANG Z, MENG Y, FAN T, et al. Phosphorus removal and  $N_2O$  production in anaerobic/anoxic denitrifying phosphorus removal process: long-term impact of influent phosphorus concentration [J]. *Bioresource technology*, 2015, 179: 585 - 594.
- [6] 杨莹莹,曾薇,刘晶茹,等.亚硝酸盐对污水生物除磷影响的研究进展[J]. *微生物学通报*, 2010, 37(4): 586 - 593.  
(YANG Yingying, ZENG Wei, LIU Jingru, et al. Effect of nitrite on biological phosphorus removal in wastewater [J]. *Microbiology China*, 2010, 37(4): 586 - 593.)
- [7] 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(7): 340 - 347.
- [8] 王振,孟圆,向衡.  $NO_2^- - N$  对反硝化除磷系统运行效能的影响[J]. *广东化工*, 2016, 43 (17): 11 - 14.  
(WANG Zheng, MENG Yuan, XIANG Heng. Effect of  $NO_2^- - N$  on the operation performances of denitrifying phosphorus removal process [J]. *Guangdong chemical industry*, 2016, 43(17): 11 - 14.)
- [9] 李璐,马娟,宋相蕊. FNA 在污水生物脱氮除磷中的抑制效应[J]. *工业水处理*, 2014(6): 5 - 9.  
(LI Lu, MA Juan, SONG Xiangrui. Inhibitory effect of free nitrous acid (FNA) on wastewater biological Denitrification and dephosphorization [J]. *Industrial water treatment*, 2014(6): 5 - 9.)
- [10] ZHOU Y, OEHMEN A, LIM M, et al. The role of nitrite and free nitrous acid (FNA) in wastewater treatment plants [J]. *Water research*, 2011, 45(15): 4672 - 4682.
- [11] 裴宁,赵俊山,王成彦,等.亚硝酸盐对反硝化除磷菌抑制机理研究[J]. *哈尔滨商业大学学报(自然科学版)*, 2009, 25(4): 415 - 418.  
(PEI Ning, ZHAO Junshan, WANG Chengyan, et al. Inhibition mechanisms of nitrite on denitrifying phosphorus accumulating organisms [J]. *Journal of Harbin university of commerce (natural sciences edition)*, 2009, 25(4): 415 - 418.)
- [12] PIJUAN M, YE L, YUAN Z G. Free nitrous acid inhibition on the aerobic metabolism of poly-phosphate accumulating organisms [J]. *Water research*, 2010, 44(20): 6063 - 6072.
- [13] ZHOU Y, PIJUAN M, ZENG R J, et al. Free nitrous acid inhibition on nitrous oxide reduction by a denitrifying-enhanced biological phosphorus removal sludge [J]. *Environmental science & technology*, 2008, 42(22): 8260 - 8265.
- [14] 徐厚平,韩冰,崔波.产聚  $\beta$ -羟基丁酸酯菌株 LY-1 的发酵条件优化[J]. *食品与机械*, 2012, 28(3): 14 - 16.  
(XU Houping, HAN Bing, CUI Bo. Study on fermentation conditions of strain for accumulating poly- $\beta$ -hydroxybutyrate [J]. *Food & machinery*, 2012, 28(3): 14 - 16.)
- [15] HELLINGGA C, LOOSDRECHT M CM V, HEIJNRN J. Model based design of a novel process for nitrogen removal from concentrated flows [J]. *Mathematical modelling of systems*, 1999, 5(4): 351 - 371.
- [16] YOSHIDA Y, KIM Y, SAITO T, et al. Development of the modified activated sludge model describing nitrite inhibition of aerobic phosphate uptake [J]. *Water science & technology a journal of the international association on water pollution research*, 2009, 59(4): 621 - 630.  
(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)