

不同电子受体对反硝化除磷菌缺氧吸磷的影响

刘建广, 付昆明, 杨义飞, 张维健

(山东建筑大学市政与环境工程学院, 济南 250101)

摘要: 利用厌氧/缺氧/好氧交替运行模式培养和富集反硝化除磷污泥, 通过在缺氧段分别投加不同浓度的硝酸盐和亚硝酸盐, 进行了反硝化除磷菌(DPB)在不同电子受体条件下的缺氧吸磷试验. 结果表明, 在保证有足够的硝酸盐电子受体的情况下, DPB 的缺氧吸磷速率几乎不受硝酸盐浓度的影响, 在试验条件下, 缺氧阶段每消耗 1 mg NO_3^- -N 吸收约 1 mg PO_4^{3-} -P; 在一定浓度条件下, 亚硝酸盐能够作为电子受体参与 DPB 反硝化吸磷, DPB 在较低亚硝酸盐浓度(NO_2^- -N 在 5 ~ 20 mg/L 范围)下的缺氧吸磷速率高于以硝酸盐为电子受体时的缺氧吸磷速率, 并且缺氧吸磷速率在这个范围内随 NO_2^- -N 浓度的升高而降低; 亚硝酸盐对 DPB 缺氧吸磷的抑制程度随其浓度的增加而增强, 当 NO_2^- -N ≥ 35 mg/L 时, DPB 的缺氧吸磷反应几乎完全停止.

关键词: 硝酸盐; 亚硝酸盐; 缺氧吸磷; 反硝化除磷

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)07-1472-05

Effect of Electron Acceptors on Anoxic Phosphorus Uptake of DPB

LIU Jian-guang, FU Kun-ming, YANG Yi-fei, ZHANG Wei-jian

(School of Public Works & Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China)

Abstract: The test of anoxic phosphate uptake of denitrifying phosphorous removal bacteria (DPB) which was cultivated during the anaerobic/anoxic/aerobic processes was conducted at the various situations of electron acceptors. The various concentrations of nitrate or nitrite were added during the anoxic stage respectively. The conclusions stated that the anoxic phosphate uptake of DPB was rarely influenced by the concentration of nitrate with the adequate nitrate as electron acceptors. It takes 1 mg PO_4^{3-} -P when the consumption of NO_3^- -N is 1 mg. The nitrite could be regarded as the electron acceptor to participate into the activities of denitrifying phosphorous removal. Compared with the nitrate, the phosphorous uptake rate of DPB with nitrite was rather higher at a low concentration (NO_2^- -N with the concentration range of 5 ~ 20 mg/L). Furthermore, the rate of anoxic phosphorous uptake was increased with the decreased concentration of NO_2^- -N. The restraining effects related to the anoxic phosphors uptake of DPB was increased as the increase of nitrite concentration. Hence, the anoxic phosphorous uptake of DPB was entirely inhibited when the concentration of NO_2^- -N was higher than 35 mg/L.

Key words: nitrate; nitrite; anoxic phosphorus uptake; denitrifying phosphorus removal

在传统生物同时脱氮除磷系统中, 生物脱氮和除磷是分别由污泥中同时存在的硝化菌、反硝化菌和聚磷菌等菌群来完成, 因此, 传统脱氮除磷工艺存在一些缺陷. 一方面, 由于这些菌群的世代期不同, 工艺设计中为了满足硝化菌的世代期的需要, 一般采取较长的污泥龄, 而这影响了生物除磷的效果; 另一方面, 反硝化菌与聚磷菌存在着对碳源的竞争, 一般城市污水中的 BOD 不能同时满足两者对碳源的需要, 因此, 不能同时取得较好的脱氮、除磷效果.

自 20 世纪 90 年代以来, Kuba 等^[1]提出了反硝化除磷的概念, 很多研究^[2~5]发现, 在厌氧/缺氧交替的运行条件下, 可以富集得到兼有反硝化作用和除磷作用的反硝化除磷菌, 在没有 O_2 的条件下, 该微生物能利用 NO_3^- 作为电子受体进行摄磷; Kerm-Jespersen 等^[6]把反硝化除磷菌分为 2 类: 1 类仅仅可以利用 O_2 作为电子受体, 而另 1 类既可以用 O_2 又可以利用硝酸盐作为电子受体. 由于反硝化除磷菌

实现了“一碳两用”, 克服了传统脱氮除磷工艺碳源不足的缺点, 另外, 反硝化除磷工艺采用将硝化菌与反硝化除磷菌分开的双污泥系统, 两者可以采用适宜细菌自身特点的污泥龄, 从而可以取得较好的脱氮和除磷效果. 反硝化除磷技术由于其能节省 50% 的 COD、30% 的需氧量和降低 50% 的污泥产量^[7]而备受瞩目. 由于工艺中的硝化系统已很成熟, 研究的热点主要在反硝化除磷菌污泥系统.

近年来, 亚硝酸盐能否作为反硝化除磷菌的电子受体, 以及它对缺氧吸磷的抑制程度, 目前也还没有定论. 本试验目的就是探讨亚硝酸盐对缺氧吸磷的影响程度, 并对亚硝酸盐对缺氧吸磷是否构成抑制、抑制程度等问题做进一步的研究.

收稿日期: 2006-07-27; 修订日期: 2006-10-31

基金项目: 山东建筑大学校内基金项目

作者简介: 刘建广(1964 ~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: liujg@sdjzu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 试验设备与试验用水

试验采用 SBR 反应器,反应器由有机玻璃制成,体积为 15 L. 厌氧和缺氧期采用电动搅拌器搅拌,好氧期采用微孔曝气头曝气(图 1).

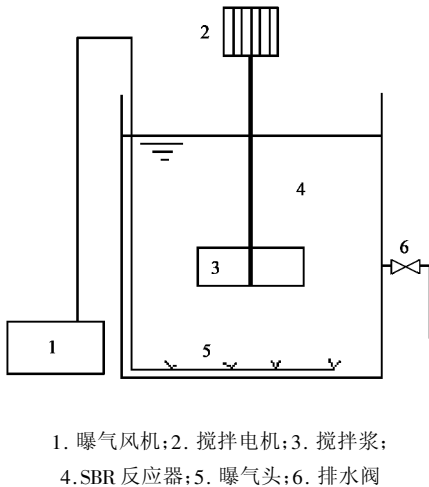


图 1 SBR 试验装置示意

Fig.1 Schematic of SBR

试验用水采用人工配水,配水由自来水溶解 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 和红糖制成. 由于红糖和自来水中本身就含有一些微量元素,故不需要再添加微量元素,用配制的 NaOH 溶液和 HCl 溶液调整 pH. 人工配水的主要水质指标见表 1.

表 1 人工配水水质

Table 1 Quality of synthetic water

COD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	pH	$\text{PO}_4^{3-}-\text{P}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
200~400	9.0~13.5	7.0~7.5	10~15

1.2 分析项目和和方法

水质分析项目有 COD、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 、 $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- -\text{N}$ 、MLSS, 采用国家标准分析方法^[8], pH 值测定采用 PHS-3B 型 pH 计, DO 采用 HI9143 型溶解氧仪.

2 结果与讨论

2.1 反硝化除磷菌的培养

本试验的污泥取自济南水质净化一厂的曝气池. 污泥培养分 2 个阶段,第 1 个阶段是传统聚磷菌的培养与富集,第 2 阶段为反硝化除磷菌的培养. 有资料显示^[9],经过对传统除磷菌的诱导培养,反硝化除磷菌与全部聚磷菌的比例可由初始的 10% 左右上升到 56.8%,缺氧吸磷量占总吸磷量的 94.8% .

第 1 阶段运行模式为厌氧-好氧交替运行,时间分别为厌氧 2 h、好氧 3 h,好氧段的溶解氧控制在 2 ~ 3 mg/L . 每天运行 2 个周期,污泥龄控制在 15 ~ 22 d, MLSS = 4 000 mg/L . 运行 60 d 以后,聚磷菌明显得到了富集. 最终出水 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 达到 1 mg/L 以下,除磷率达到了 93%,结果见图 2. 从图 2 看出,厌氧运行结束时,混合液中 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度从初始的 9.1 mg/L 上升到 25.9 mg/L ,取得了较好的释磷效果. 经过好氧吸磷, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度又降低到 0.7 mg/L . 可见,培养出的聚磷菌具有较好的释磷与吸磷功能,污泥中聚磷菌的浓度已达到工艺要求.

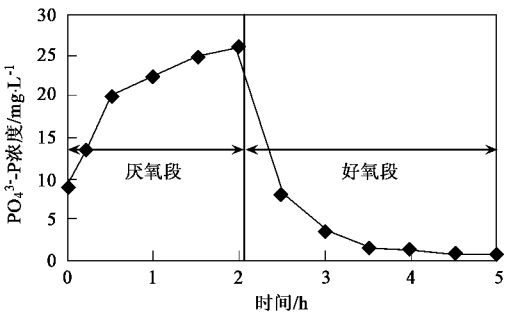


图 2 厌氧-好氧运行模式下磷酸盐浓度随时间的变化

Fig.2 Variation of phosphate concentration under anaerobic/aerobic process

第 2 阶段的运行模式为厌氧-缺氧-好氧,时间分别为厌氧 2 h、缺氧 3 h、好氧 1 h. 在缺氧段投加硝酸盐,使初始 $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 约为 50 mg/L . 每天运行 2 个周期,污泥龄控制在 15 ~ 22 d, MLSS = 4 000 mg/L . 随运行时间的增加,反硝化除磷菌得到富集,运行第 40 d 时的摄磷效果见图 3. 从图 3 看出,在厌氧运行结束后,由于除磷菌的释磷作用,混合液中 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度

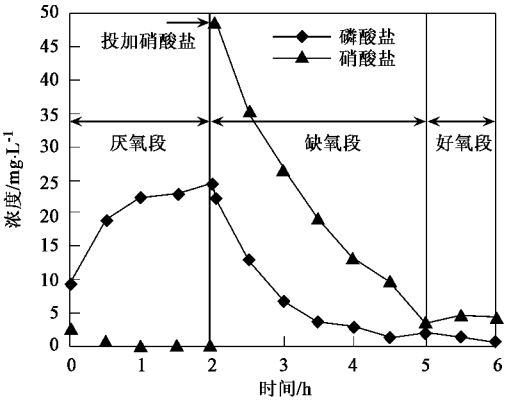


图 3 厌氧-缺氧-好氧运行模式下磷酸盐与硝酸盐浓度随时间的变化

Fig.3 Variation of phosphate and nitrate concentration under anaerobic-anoxic-aerobic process

达到 25 mg/L,加入硝酸盐进行缺氧反应后, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 被细胞吸收而降低到 1 mg/L 以下,说明污泥中反硝化除磷菌浓度已达到工艺的需要.

2.2 不同电子受体条件下的摄磷试验

试验分为 2 组:1 组投加不同浓度的硝酸盐(试验 I),另 1 组投加不同浓度的亚硝酸盐(试验 II),2 组试验所用污泥取自同一 SBR 反应器.保持进水水质条件不变,在 SBR 反应器中首先厌氧反应 2 h,然后分别取出相同体积的混合液放入烧杯或锥形瓶中(保证每个瓶中的污泥浓度和污泥量相同,同时测定 SBR 反应器中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度和溶解性 COD.由于剩余的 COD 浓度已较低,不会影响缺氧反硝化除磷试验结果,因为少量外源 COD 发生的反硝化只影响硝酸盐的消耗量,对 DPB 缺氧吸磷的测定结果不产生影响;另外,实际的污水处理工艺中,进入缺氧区的污泥混合液也会残留少量有机物,因此,在本试验中不对污泥进行清洗),进行缺氧阶段的反应,分别加入 2 种不同的电子受体进行缺氧摄磷试验,反应过程中用 HCl 溶液控制混合液 pH 不超过 7.2.

试验 I:取 6 个 1 L 烧杯,编号为 1~6 号,加入相同体积的厌氧混合液,置于六联搅拌器下,转速为 100 r/min,温度为 25℃.在搅拌开始前,向 6 个烧杯中分别准确加入 1、2、3、5、7、10 mL KNO_3 溶液($\text{NO}_3^- \text{-N} = 10 \text{ g/L}$),则烧杯中混合液初始 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度分别为 10、20、30、50、70、100 mg/L.分别在搅拌时间为 1、2、3 h 时取样,测定其 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的浓度.

试验 II:取 6 个容积为 250 mL 锥形瓶,编号为 1~6 号,加入相同体积的厌氧混合液,分别准确加入 0.2、0.4、0.6、0.8、1.4、2.0 mL 亚硝酸盐溶液($\text{NO}_2^- \text{-N} = 6.25 \text{ g/L}$),则混合液中初始的 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 分别为 5、10、15、20、35、50 mg/L.搅拌 10 min,测定 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的浓度.

2.2.1 投加硝酸盐的缺氧吸磷试验

投加硝酸盐为电子受体的试验 I 的摄磷试验结果见图 4 和图 5.图 4 为 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度随时间的变化,图 5 为 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度随时间变化情况.

由图 4、5 可以发现,当初始 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度 < 30 mg/L 时,1 h 之内,硝酸盐已经完全耗尽,由于 1 号没有足够的电子受体 NO_3^- ,因此, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 也只能部分地吸收,由 31.65 mg/L 降低到 15.64 mg/L,并在以后的 2 h 内有所释磷.当 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度 $\geq 30 \text{ mg/L}$ 时,在第 1 h 内,各试验瓶中反硝化除磷菌摄取的磷量基

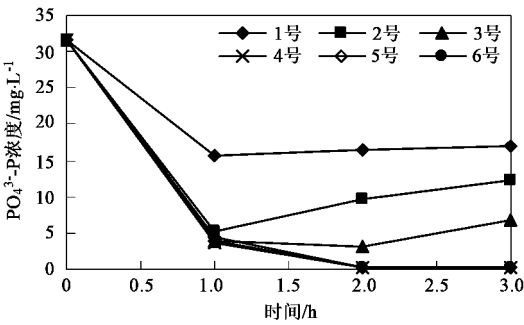


图 4 磷酸盐浓度随时间的变化
Fig.4 Variation of phosphate concentration under various nitrate conditions

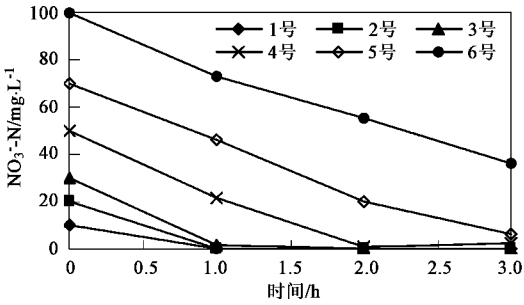


图 5 硝酸盐浓度随时间的变化
Fig.5 Variation of concentrations of nitrate

本相同,这说明只要保证有足够的硝酸盐作电子受体,吸磷速率受硝酸盐浓度的影响不大.它们的平均吸磷速率为 27.43 mg/(L·h),但要得到较高的除磷效率,缺氧反应时间应在 2 h 左右.在 1 h 以后,2 号和 3 号混合液 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度有所升高,可能是由于 2 号和 3 号的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 被耗尽,混合液处于较严格的厌氧状态,反硝化除磷菌发生了释磷反应.

经过 2 h 反应,4~6 号已基本将 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 摄取完毕,但 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度仍随着时间降低,也就是继续发生反硝化反应.可能有 2 方面的原因:① 反硝化除磷菌仍具有普通反硝化菌的特性,在不摄磷的情况下仍然可以进行反硝化作用;② 污泥中存在的普通反硝化菌进行反硝化.经测定,5 号与 6 号中的 COD 下降了约 10 mg/L,从 COD 的变化可看出,摄磷完毕后污泥中存在普通反硝化反应.

从图 5 可以看出,在有足够的硝酸盐存在的条件下,不同浓度下 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 变化曲线几乎是平行的,这说明反硝化速率几乎不受硝酸盐浓度的影响,平均反硝化速率为 27.70 mg/(L·h).因此,每吸收 1 mg $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 约消耗 1 mg $\text{NO}_3^- \text{-N}$.

本试验结果与许多研究人员的结果有所不同.

Kerm-Jespersen 等^[6]在研究固定生物膜反应器反硝化除磷时,缺氧段消耗 1 mg NO₃⁻-N 可吸收 2.0 mg PO₄³⁻-P,李志勇等^[10]得到的单位 NO₃⁻-N 反硝化吸磷的比例为 0.80 mg/mg,邹华等^[11]得到的缺氧段 PO₄³⁻-P 吸收量与 NO₃⁻-N 消耗量的比值是 1.51. 试验结果之所以不同,可能是由于不同研究人员培养的污泥不同,污泥中普通的反硝化菌与反硝化除磷菌的比例不同以及发生外源碳源反硝化造成的.

2.2.2 投加亚硝酸盐的缺氧吸磷试验

试验Ⅱ投加 NO₂⁻-N, 10 min 后的吸磷量与反硝化量见图 6. 图 6 中吸磷量为 PO₄³⁻-P 浓度的变化值,反硝化量表示 NO₂⁻-N 浓度的变化值.

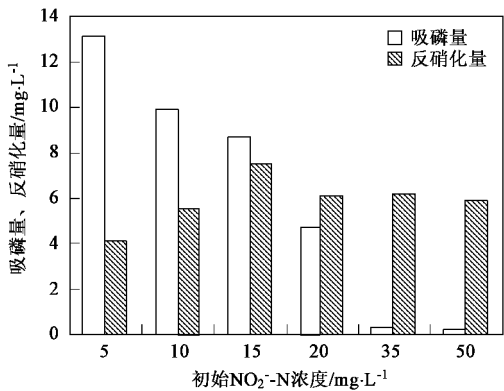


图 6 不同 NO₂⁻-N 浓度下的吸磷量与反硝化量

Fig. 6 Phosphate uptake and nitrite removal under different NO₂⁻-N concentration

由图 6 可以看出,NO₂⁻-N 对反硝化除磷菌产生了较大影响.当 NO₂⁻-N 浓度为 5 mg/L 时,经过 10 min 就有大量的 PO₄³⁻-P 被吸收,吸磷量达到了 13.1 mg/L.随着 NO₂⁻-N 浓度的升高,吸磷量逐渐减小,但 NO₂⁻-N 的消耗量逐渐增加;亚硝酸盐对反硝化除磷菌摄磷的抑制随 NO₂⁻-N 浓度增加而增强,当 NO₂⁻-N 的浓度为 20 mg/L 时,吸磷量减小到 4.7 mg/L,仅为初始 NO₂⁻-N 浓度为 5 mg/L 时的 36%,但磷的吸收依然是非常明显的.当 NO₂⁻-N 浓度 ≥ 35 mg/L,反硝化除磷菌的活性受到严重抑制,摄磷作用几乎完全被抑制,几乎不吸磷.可以推测,NO₂⁻-N 浓度在 20 ~ 35 mg/L 范围,亚硝酸盐对反硝化除磷菌的摄磷作用有明显的抑制.若经过一定时间的驯化,随着时间的延长,反硝化除磷菌是否会对亚硝酸盐的抑制作用逐渐适应,还需进一步实验研究.

当 NO₂⁻-N 浓度为 5 mg/L 时,最初 10 min 吸磷速

率达到了 78.6 mg/(L·h),明显高于以硝酸盐为电子受体时的速度.随着亚硝酸盐浓度的升高,对反硝化除磷菌的抑制作用不断增强,吸磷速率随之下降,当 NO₂⁻-N 为 20 mg/L 时,吸磷速率为 28.2 mg/(L·h),依然大于以硝酸盐为电子受体的吸磷速度.这与 Lee 等^[12]的观点相同,在存在低浓度的亚硝酸盐作电子受体的情况下,吸磷速率要比用硝酸盐作电子受体时快.根据这一结果,对工艺的运行意义是很大的,在城市污水水质条件下,可以将硝化反应器的硝化反应控制在短程硝化,减少曝气量和运行能耗.

而与摄磷受较强抑制形成鲜明对比的是,反硝化作用受到的影响较小,在一定范围内,NO₂⁻-N 去除量随 NO₂⁻-N 初始浓度增加而提高,当 NO₂⁻-N 为 15 mg/L 时,反硝化量最大,为 7.52 mg/L;当亚硝酸盐浓度达到 50 mg/L 时,反硝化量依然能达到 5.91 mg/L.究其原因,可能是污泥中存在 2 类反硝化菌,1 类是反硝化除磷菌,能同时进行反硝化和吸磷,另 1 类是单纯的反硝化菌,只能进行反硝化而不能吸磷,而反硝化除磷菌与单纯的反硝化菌相比,可能更容易受到亚硝酸盐的抑制.当然,还有另外一种可能是,对于反硝化除磷菌来讲,它的摄磷性能与反硝化性能相比,更容易受到亚硝酸盐的抑制,当 NO₂⁻-N 浓度较高时,摄磷反应被抑制,而反硝化反应仍在进行,这需要进行进一步的研究探讨.

以亚硝酸盐作为反硝化除磷过程中的电子受体的研究文献较少,并且在结论上有较大的差异. Kuba 等^[7]最早进行了用亚硝酸盐作电子受体的研究,他们认为一定量的 NO₂⁻-N(大约 5 ~ 10 mg/L)的积累强烈抑制除磷菌吸磷活性;Meinhold 等^[13]认为在反应体系中 NO₂⁻-N 的浓度小于 4 mg/L 的情况下,亚硝酸盐可以作为电子受体进行缺氧吸磷,但是当 NO₂⁻-N 的浓度大于 8 mg/L 时,反硝化吸磷就完全被抑制,而且,这种抑制作用不是暂时的,而是会延长至后续的几个小时;Lee 等^[8]研究了单泥系统的 SBR 反应器,发现亚硝酸盐作电子受体时,NO₂⁻-N 的浓度达到 10 mg/L 时,对缺氧吸磷没有影响;Hu 等^[14]认为,对于除磷工艺来讲,亚硝酸盐可作为电子受体,NO₂⁻-N 的最高抑制浓度为 115 mg/L.以上这些差别,应该是由于不同的反应条件,如 pH、温度、MLSS、污泥性质等众多原因所造成的.

目前,有研究者把亚硝酸盐对聚磷菌的影响归因于自由亚硝酸^[15],即 HNO₂,它的毒性能对细胞膜和能量生成产生影响. Sijbesma 等^[16]和 Yarbrough

等^[17]报道说亚硝酸盐能在很大的细菌种群范围内抑制细菌生长和能量生成;许多研究表明,亚硝酸盐的毒性很大程度上依赖于 pH 的变化,亚硝酸盐的毒性是由于 NO₂⁻ 与 H⁺ 结合形成 HNO₂,它能够穿过细胞膜,降低了胞内的 pH,进而降低了需要产生质子动力势的 pH 梯度,影响了 ATP 的合成.而通常的聚磷合成路径是通过 ATP/ADP 来反映的,亚硝酸盐限制了 ATP 的合成,必然导致了 ATP/ADP 低下,影响了聚磷的合成,在宏观上也就表现出亚硝酸盐对缺氧吸磷的抑制.

试验发现,最后的好氧阶段对工艺的运行非常重要,一方面可以提高除磷效果,另一方面是提高了污泥的絮凝沉降性,这对工程运行是非常重要的,下一步还需针对曝气时间及强度对污泥的影响进行深入研究.

3 结论

(1)在有足够硝酸盐作电子受体的情况下,缺氧吸磷几乎不受 NO₃⁻-N 浓度的影响.对于本试验所使用的污泥来说,每消耗 1 mg NO₃⁻-N 吸收约 1 mg PO₄³⁻-P.

(2)亚硝酸盐能够作为电子受体参与反硝化除磷.在 NO₂⁻-N 浓度较低(5~20 mg/L)的条件下,吸磷速率高于以硝酸盐为电子受体的缺氧吸磷速率,缺氧吸磷速率在这个范围内随 NO₂⁻-N 浓度的升高而降低.

(3)亚硝酸盐对除磷菌的吸磷抑制作用较强,对单纯反硝化的抑制作用较小.

(4)亚硝酸盐对反硝化除磷菌吸磷的抑制随 NO₂⁻-N 浓度增加而增强,当 NO₂⁻-N ≥ 35 mg/L 时,缺氧吸磷几乎完全停止.

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] 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 Engin J*, 2006, **27**(3): 191 ~ 196.

[4] Zeng R J, Lemaire R, Yuan Z H, *et al.* Simultaneous nitrification denitrification and phosphorus removal in a lab-scale sequencing batch reactor[J]. *Biotechnol Bioeng*, 2003, **84**(2): 170 ~ 178.

[5] Tsuneda S, Miyauchi R, Ohno T, *et al.* Characterization of denitrifying polyphosphate-accumulating organisms in activated sludge based on nitrite reductase gene[J]. *J Biosci Bioeng*, 2005, **99**(4): 403 ~ 407.

[6] Kerm-Jespersen J P, Henze M. Biological phosphorus uptake under anoxic and aerobic conditions[J]. *Wat Res*, 1993, **27**(4): 617 ~ 624.

[7] 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 Sci Tech*, 1996, **30**(7): 1702 ~ 1710.

[8] 国家环保局《水和废水检测分析方法》编委会. 水和废水检测分析方法[M]. (第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1989. 106 ~ 362.

[9] 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.

[10] 李勇智, 王淑滢, 吴凡松, 等. 强化生物除磷体系中的反硝化聚磷菌的选择与富集[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(1): 45 ~ 49.

[11] 邹华, 阮文权, 陈坚. 硝酸盐作为生物除磷电子受体的研究[J]. *环境科学研究*, 2002, **15**(3): 38 ~ 41.

[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 systems [J]. *Wat Res*, 2001, **35**(16): 3968 ~ 3976.

[13] Meinhold J, Arnold E, Isaacs S. Effect of nitrite on anoxic phosphate uptake in biological phosphorus removal activated sludge [J]. *Wat Res*, 1999, **33**(8): 1871 ~ 1883.

[14] Hu J Y, Ong S L, Ng W J, *et al.* A new method for characterizing denitrifying phosphorus removal bacteria by using three different types of electron acceptors [J]. *Wat Res*, 2003, **37**(14): 3463 ~ 3471.

[15] Weon S Y, Lee C W, Lee S I, *et al.* Nitrite inhibition of aerobic growth of *Acinetobacter* sp.[J]. *Wat Res*, 2002, **36**(18): 4471 ~ 4476.

[16] Sijbesma W F H, Almeida J S, Reis M A M, *et al.* Uncoupling effect of nitrite during denitrification by *Pseudomonas fluorescens*: An *in vivo* 31P-NMR study[J]. *Biotechnol Bioeng*, 1996, **52**(1): 176 ~ 182.

[17] Yarbrough J M, Rake J B, Eagon R G. Bacterial inhibitory effects of nitrite: inhibition of active transport, but not of group translocation, and of intracellular enzymes [J]. *Appl Envir Microbial*, 1980, **39**(4): 831 ~ 834.