

A/A 系统反硝化除磷的强化及其稳定性研究

王振, 袁林江*, 刘爽

(西安建筑科技大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055)

摘要: 利用厌氧/缺氧(A/A)SBR, 试验研究了选择和富集反硝化除磷菌(DPB)的条件. 结果表明, 采用电子供体和电子受体充分分开的两段进水方式运行, 当厌氧段进水 COD 与缺氧段投加硝酸盐质量浓度为 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 值约为 7.0 时, DPB 可快速成为系统中的优势菌群, 系统可达到良好的反硝化聚磷效果; 将前述系统改变为一段进水方式运行后, 系统仍具有良好的反硝化聚磷效果. 在进水磷浓度同为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下, 在缺氧段投加磷的运行方式比在厌氧段投加磷的运行方式更能提高系统的除磷能力.

关键词: 厌氧/缺氧 SBR; 反硝化聚磷菌; 进水方式; 磷负荷

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)10-2975-06

Improvement of Denitrifying Dephosphatation in an Anaerobic/Anoxic Sequencing Batch Reactor and Its Stability

WANG Zhen, YUAN Lin-jiang, LIU Shuang

(Key Laboratory of Northwest Water Resources, Environment and Ecology of Ministry of Education, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: An anaerobic/anoxic sequencing batch reactor (A/A SBR) was conducted to investigate the conditions for screening and enrichment of denitrifying phosphorus removing bacteria (DPB). The results showed that, when the concentration of COD in influent of anaerobic stage, the concentration of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ in influent of anoxic stage and pH value were 300 mg/L , 50 mg/L and 7.0 respectively, DPB could become dominant populations quickly in the system in two-time feeding mode, and the reactor performed well for denitrifying phosphorus removal. The A/A SBR still performed well by shifting the system to one-time feeding mode. With the same concentration of phosphate of $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in the influent, the phosphorus removal with adding the phosphate just before the beginning of anoxic stage proved to be better than that of directly increasing the phosphate concentration in the influent.

Key words: anaerobic/anoxic sequencing batch reactor (A/A SBR); denitrifying phosphorus removing bacteria; feeding mode; phosphate loading

生物反硝化聚磷技术是目前污水除磷脱氮研究领域的重点和热点. 近年来, 不断有研究发现, 在实际的 A^2/O 工艺运行中, 缺氧池中的硝酸盐在进行反硝化的同时磷酸盐浓度也降低. 有研究证实^[1~4], 一部分聚磷菌既可以利用氧气, 又可在缺氧条件下利用硝酸盐作为电子受体吸磷, 即存在所谓的反硝化聚磷菌(DPB), 从而使聚磷和反硝化这 2 个独立的过程在 DPB 的参与下仅在缺氧环境下就可同时完成. 反硝化聚磷脱氮工艺与传统 A^2/O 等工艺相比, 不仅节省了对碳源的需要, 使产生的剩余污泥量大幅度减少, 且聚磷在缺氧条件下完成可节省曝气所需要的能源^[5~8].

基于反硝化聚磷理论, 先后提出了 A_2N 和 Dephanox 等采用侧流硝化/厌氧/缺氧的新型生物脱氮除磷工艺, 来实现污水氮磷的高效低耗去除^[9]. 但是从现有的实践以及研究成果看, 单纯的反硝化除磷都远较好氧除磷速率慢、除磷效率低, 而且污泥在经历长期的厌氧/缺氧环境交替后, 除磷效率都会下降, 出现反硝化聚磷难以持久的现象^[4~6], 从而制约

了反硝化聚磷在生物脱氮除磷工程的应用. 在厌氧/缺氧交替的系统中, 如何长久实现反硝化聚磷, 维持反硝化聚磷的活性、保持反硝化聚磷菌的优势等问题值得研究.

笔者采用人工废水和 SBR 反应器, 研究了系统中反硝化聚磷菌活性的变化, 探讨了反硝化聚磷菌选择和富集的条件以及影响反硝化聚磷系统稳定运行的因素, 以期反硝化聚磷脱氮工艺设计以及厌氧/缺氧(A/A)环境下如何长久实现反硝化聚磷、维持反硝化聚磷菌的活性、保持反硝化聚磷菌的优势提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 反应器

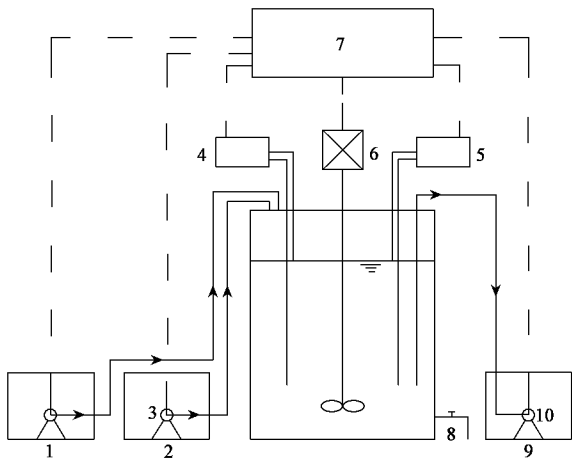
收稿日期: 2008-11-16; 修订日期: 2009-01-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(50878180, 50008014)

作者简介: 王振(1985~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为废水的生物资源化处理和环境的可持续性, E-mail: 61967991@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: yuanlinjiang@xauat.edu.cn

采用有效容积为 5 L 的 SBR 反应器组成一套模拟处理系统,系统装置如图 1 所示.



1. 进水桶(无水乙酸钠溶液); 2. 进水桶(KH_2PO_4 、 KNO_3 溶液);
3. 进水泵; 4. 液位计; 5. 液位计; 6. 机械搅拌器;
7. 控制面板; 8. 排泥管; 9. 出水桶; 10. 出水泵

图 1 A/A 系统试验装置

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

1.2 接种污泥

取运行良好的西安市邓家村污水处理厂的 A^2/O 回流段活性污泥作为接种污泥.原污泥的浓度为 9.420 g/L , VSS/SS 为 0.79 . 取 1.6 L 污泥经清水淘洗 2 次后加入反应器,而后按试验设计进行运行.

1.3 人工废水

采用人工配水.人工废水的组成主要为无水乙酸钠(碳源)、硝酸钾(氮源)和磷酸二氢钾(磷源).进水质水质见表 1.

1.4 反应器运行

反应器每天运行 3 个周期,每个周期 8 h ,按照

厌氧/缺氧交替模式连续运行.每个周期 2 次进水 2 次排水,即两段进水方式.运行方式为:第 1 次瞬间进水(配水 1) 3 L 后厌氧搅拌 2.5 h ,之后沉淀 45 min ,瞬间排水 3 L ,之后第 2 次瞬间进水(配水 2) 3 L 后缺氧搅拌 4 h ,沉淀 45 min 后瞬间排水.系统泥龄控制在 15 d 左右,反应器中的 MLSS 控制在约 $3\,500\text{ mg/L}$.

表 1 进水质

人工配水	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$			备注
	COD	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	
配水 1	200 ~ 500			第 1 次进水
配水 2		25 ~ 75	20 ± 5	第 2 次进水

1.5 分析方法

分析方法参考文献[10],具体见表 2.

表 2 分析方法

Table 2 Analysis methods			
分析项目	检测方法	分析项目	检测方法
$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	钼锑抗分光光度法	MLSS/MLVSS	重量法
TP	过硫酸钾消解法	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	紫外分光光度法
$\text{NO}_2^- - \text{N}$	N -(1-萘基)-乙二胺分光光度法	DO	YSL5000 溶解氧分析仪
COD	重铬酸钾法	pH	pH200 型在线 pH 计

2 结果与讨论

2.1 A/A 系统中反硝化聚磷菌的选择和富集

根据反硝化聚磷菌的特性^[11~14],为实现稳定的反硝化聚磷,系统启动后分 3 个阶段进行调控:第 1 阶段选择厌氧段的最佳投配 COD 浓度;第 2 阶段选择缺氧段的最佳投配 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度;第 3 阶段选择最佳的 pH 值.

图 2 所示为系统启动至达到稳定共 136 d 间除磷性能的变化.

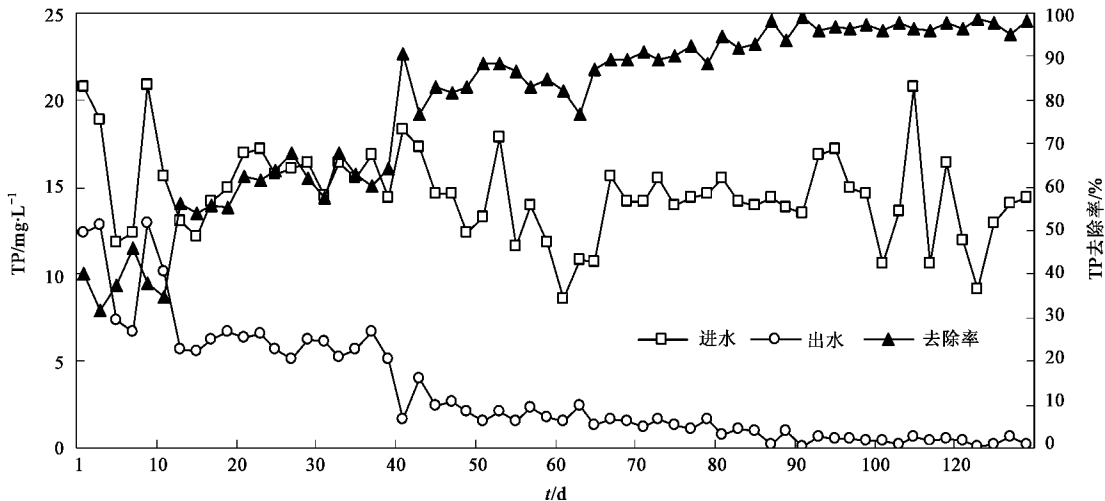


图 2 系统除磷性能的变化

Fig.2 Phosphorus removal in the system

从图 2 可以看出,在接种污泥后,反应器运行之初系统的除磷能力较弱,除磷率低于 50%。随着两段进水运行方式时间的延长以及对系统运行条件优化,系统对磷的去除率大幅度提高至 95% 以上,说明反硝化聚磷菌在 A/A 系统中得到了有效地富集。

2.1.1 系统厌氧段对投加 COD 浓度的选择

本试验的 A/A 系统采取两段进水方式运行,即每个周期 2 次进水 2 次排水,此种运行方式降低了 COD 与硝酸盐共存的可能性,有利于强化聚磷菌的选择优势。分别在厌氧段初始投加 COD 浓度为 200、300、400 和 500 mg/L 的废水,考察了不同 COD 浓度对系统厌氧释磷的影响。试验结果如图 3 所示。

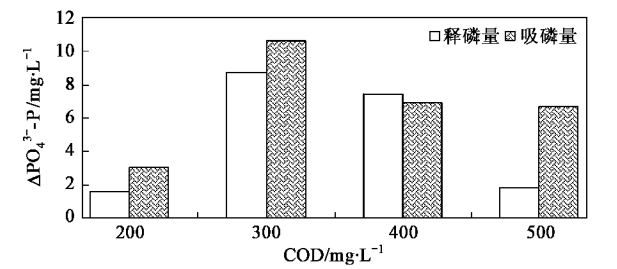


图 3 不同 COD 浓度时磷的吸收与释放情况

Fig.3 Amounts of PO₄³⁻-P release and uptake at different COD concentrations

由图 3 可知,厌氧段初始投加 COD 浓度在 300 ~ 400 mg/L 时,反硝化聚磷菌具有较大的释磷速率,说明厌氧段初始,由于基质过剩,释磷速率和碳源浓度不再相关,而是以微生物固有的特性速率进行,因而此时释磷速率大致相同。当碳源浓度(以 COD 计)为 200 mg/L 时,由于碳源浓度较低,系统厌氧段释磷不充分。当碳源浓度过高时(500 mg/L),根据中间产物学说^[15~16],过量的底物分子与酶分子结合生成大量无活性的中间产物,且降低了酶的激活剂的有效浓度,使反应速率降低,释磷速率反而下降,因而不能单纯采用增大碳源浓度的方法来提高释磷速率。在缺氧段,系统内聚磷菌胞内 PHB 含量高,则在缺氧段的聚磷量也较高^[17~19],由图 3 可知,当碳源浓度为 300 mg/L 时,系统中聚磷菌可充分在胞内合成 PHB,且在厌氧段末期基本没有碳源剩余,系统的厌氧释磷量和缺氧聚磷量都达到了较好的效果,即厌氧释磷越充分,越有利于系统缺氧段对磷的吸收。

2.1.2 系统缺氧段对投加 NO₃⁻-N 浓度的选择

在 A/A 系统厌氧释磷结束后(系统厌氧段进水 COD 值浓度为 300 mg/L),考察缺氧环境下不同的 NO₃⁻-N 浓度对反硝化聚磷的影响。分别取缺氧段初

始投加的 NO₃⁻-N 浓度为 25、50、75 mg/L。试验结果如图 4 和图 5 所示。

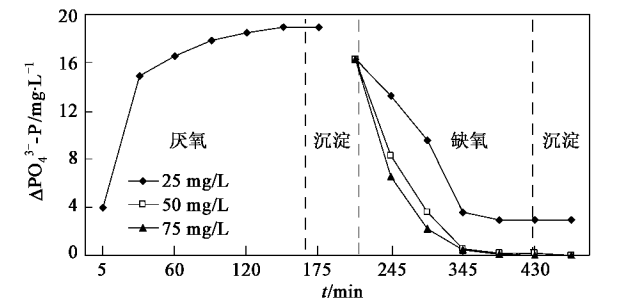


图 4 不同硝酸盐浓度时磷的去除情况

Fig.4 Phosphorus uptake at different NO₃⁻-N concentrations

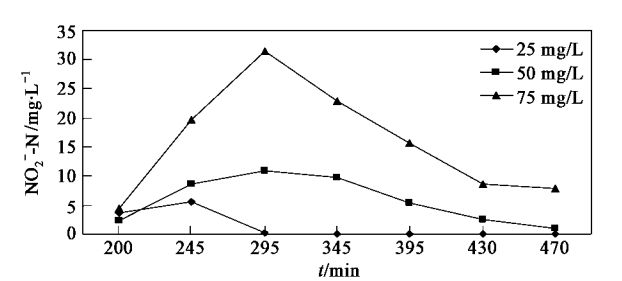


图 5 不同硝酸盐浓度时亚硝酸盐变化曲线

Fig.5 Profiles of NO₂⁻-N concentrations at different NO₃⁻-N concentrations

由图 4 可知,在硝酸盐浓度为 25 mg/L 时,缺氧结束时系统中磷浓度为 2.96 mg/L,共 13.35 mg/L 磷在缺氧环境中被吸收,表现出较好的反硝化除磷性能。出水中较高的磷浓度是由于作为电子受体的硝酸盐已经消耗完毕,存储于反硝化聚磷菌细胞内的 PHB 因为缺乏电子受体而不能继续被氧化,不能再产生能量来继续吸收水中的磷。当硝酸盐浓度分别为 50 和 75 mg/L 时,系统达到理想的反硝化除磷效果,出水的磷浓度分别为 0.14 mg/L 和 0.10 mg/L。在 3 种情况下,缺氧结束时系统中硝酸盐浓度分别为 0、0.98 和 7.92 mg/L,由此可见较高的硝酸盐浓度有利于反硝化除磷效率及反应速率的提高。但从图 5 中可以看出,当缺氧段初始硝酸盐浓度为 75 mg/L 时,使得在缺氧段有一定浓度的亚硝酸盐积累,缺氧段末期剩余的硝酸盐也会导致出水中营养物质的增加,同时也必将影响下一周期的厌氧释磷,导致反硝化除磷效率的下降^[20]。因此,当缺氧段初期投加的 NO₃⁻-N 浓度为 50 mg/L 时,系统的反硝化除磷效果最佳,既可防止由于电子受体的缺乏而出现的内源二次释磷现象,又可避免因为硝酸盐过剩而影响下一周期的反硝化除磷效果。

2.1.3 系统对 pH 值的选择

pH 值对厌氧释磷/缺氧聚磷的影响如图 6 所示.可以看出,当系统 pH 值为 6.0 时,厌氧段结束后,磷浓度上升了 2.82 mg/L,厌氧段释磷速率为 0.32 g/(kg·h).在 pH 值为 7.0 的条件下,厌氧反应结束时磷浓度上升了 9.77 mg/L,厌氧释磷速率为: 1.12 g/(kg·h).其原因是当 pH 值在 8.0 以下时,从生物除磷代谢角度来看,随着 pH 值的升高,细菌将消耗更多质子移动力(PMF).为维持恒定的 PMF,细胞需分解体内贮存的聚磷物,从而增强聚磷污泥的释磷能力^[21~24].但当 pH 值为 8.0~9.0 时,磷酸盐浓度的上升量减小,在厌氧段磷浓度分别上升了 8.49 和 6.41 mg/L.主要原因是 $\text{pH} \geq 8.0$ 时会引起磷酸盐的沉淀,导致释磷效果不好. Kuba 等^[6]在研究 pH 值对 A_2N 处理效果的影响时指出, pH 值对反硝化聚磷有一定影响,在 pH 值为 8.0 时,会出现磷酸盐的沉淀而影响厌氧释磷,这也与本试验结果吻合.因此, pH 值对系统厌氧释磷的效果影响较大,在一定范围内, pH 值高对厌氧释磷有促进效果,但当 $\text{pH} \geq 8.0$ 时会出现磷酸盐沉积而影响厌氧释磷.

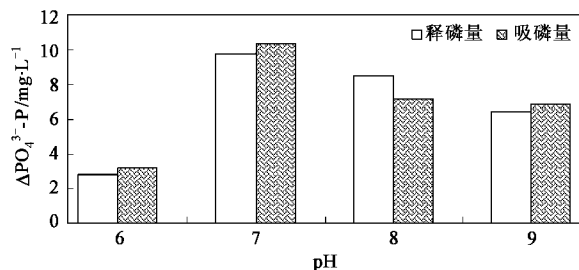


图 6 不同 pH 值时磷的吸收和释放情况

Fig.6 Amounts of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ release and uptake at different pH

系统在缺氧段 pH 值为 6.0 和 7.0 时,聚磷速率分别为 0.23 和 0.74 g/(kg·h),体系的聚磷速率和反硝化速率表现出良好的同步性,且 pH 值为 7.0 时,系统的聚磷速率要大于 pH 值为 6.0 时的系统.所以可以推断,当 pH 在 6.0~7.0 的范围时,随着其 pH 值的不断增加,系统的聚磷速率和聚磷量也在不断提高^[25~27].但当 $\text{pH} = 8.0$ 时,系统厌氧段已开始发生磷酸盐的沉淀,使得缺氧段的聚磷量减少.因此,当 $\text{pH} \geq 8.0$ 时,由于系统发生化学沉淀作用而影响了系统的聚磷量^[28],对反硝化聚磷过程产生不利影响.总之,对于厌氧/缺氧(A/A)反硝化除磷系统,应将其 pH 值控制在 7.0 左右.合适的运行条件,有助于 A/A 系统完成 DPB 的选择和富集,达到良好的反硝化除磷效果.

2.2 A/A 系统稳定运行后的反硝化除磷效果

系统稳定运行后,在厌氧/缺氧条件下一个典型周期内各物质浓度变化结果见图 7.

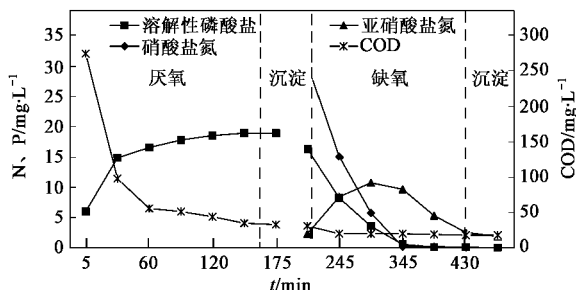


图 7 A/A 系统内磷、硝态氮和 COD 浓度变化情况

Fig.7 Changes in concentrations of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and COD in the A/A process

由图 7 可知, A/A 系统在 2.5 h 厌氧期内, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度由 5.99 mg/L 上升为 18.99 mg/L, 释磷速率为 1.48 g/(kg·h), 且在前 25 min 释磷速率最快, 为 6.10 g/(kg·h); 在缺氧期 4 h 内, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度由 16.31 mg/L 下降为 0.14 mg/L, 磷的去除率为 99.14%, 核算缺氧聚磷速率为 1.16 g/(kg·h). 前 95 min 聚磷速率最快, 达 2.29 g/(kg·h). $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度在前 95 min 内也由 30.45 mg/L 降至 5.76 mg/L. 缺氧段结束时, 硝氮的去除率达 96.78%, 核算反硝化速率为 2.10 g/(kg·h). 在缺氧期内, 硝酸盐还原和磷酸盐吸收呈现出良好的同步性.

由上述结果推断, A/A 系统中的反硝化聚磷菌得到了很好的驯化和富集, 达到了良好的反硝化除磷效果. 此 A/A 系统之所以能够快速富集反硝化聚磷菌正是由于其特殊的两段进水运行方式, 使其起到了“生物选择器”的作用. 它一方面可以充分做到碳源(电子供体)和硝酸盐(电子受体)的分开, 能避免其它菌和反硝化聚磷菌之间对电子供体和受体的竞争^[29], 使得聚磷菌(主要是 DPB)在厌氧区获得了竞争优势, 从而能使聚磷菌群体在系统中得到选择性增殖, 另一方面也可在进水浓度一定的情况下提高污泥的营养负荷, 加快细菌增殖的速度, 最终使系统达到良好的反硝化聚磷效果.

2.3 A/A 系统以一段进水方式运行时的反硝化除磷效果

两段进水方式运行的 A/A 系统在快速富集 DPB 后, 可将系统改变为实践当中的传统的一段进水运行方式, 即将厌氧期和缺氧期之间的沉淀排水阶段去掉, 以解决第 1 次排出的高磷废水难以回用的问

题,其他运行条件同上.根据磷酸盐的投加方式不同将一段进水运行方式分为 2 种: I 厌氧段初始投加磷酸盐; II 缺氧段初始投加磷酸盐.这 2 种运行方式和两段进水运行方式(方式 III)下缺氧段的聚磷情况如图 8 所示.

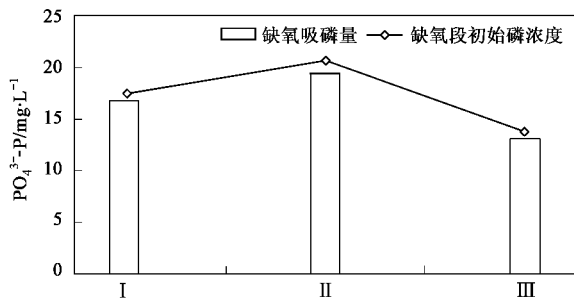


图 8 不同运行方式下的缺氧聚磷情况

Fig.8 Amounts of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ uptake in anoxic stage with different operating modes

由图 8 可知,DPB 占优势的 A/A 系统以一段进水方式运行后,依然具有较好的反硝化聚磷效果,这是因为 I 和 II 运行方式同 III 运行方式相比,在厌氧段末期都具有低的 COD 浓度,但是由于一段进水运行方式没有厌氧期和缺氧期之间的沉淀排水阶段,所以在缺氧段初期磷酸盐的浓度较 III 运行方式高,使得前 2 种运行方式的缺氧聚磷量大于 III 运行方式. I 和 II 2 种运行方式相比, I 是直接提高了进水磷浓度即在厌氧段开始前加磷, II 则是在缺氧段开始前加磷,所以两者在厌氧段的初始磷质量浓度存在显著差异, I 运行方式中较高的初始磷质量浓度一定程度上对厌氧段释磷有所抑制,则随后的缺氧聚磷也就会受到影响.因此,总的来说,提高系统磷负荷都将会有利于生物的除磷系统^[30-32],而同为提高磷负荷,缺氧加磷运行方式要比厌氧加磷运行方式更加利于 DPB 的快速富集,这亦说明两段进水此种诱导方式可以应用于实践.

3 结论

(1)两段进水运行方式对 A/A 系统的反硝化除磷可以起到很好的强化作用,可达到快速富集 DPB 的目的.

(2)优化系统运行条件有助于 A/A 系统快速富集 DPB,系统 pH 值控制在 7.0 左右, COD:N:P 为 300:50:20 时,反硝化除磷效果最佳,所用碳源最少, C、N、P 的去除率均在 95% 以上.

(3)富集 DPB 的 A/A 系统改为一段进水方式运

行后也具有良好的反硝化除磷效果,提高系统的磷负荷有利于缺氧段聚磷.缺氧加磷、提高磷负荷运行方式要比厌氧加磷运行方式更能提高系统的除磷能力.

参考文献:

- [1] Bortone G, Marsili Libelli S, Tilche A, *et al.* Anoxic phosphate uptake in the DEPHANOX process [J]. *Wat Sci Tech*, 1999, **40**(4-5): 177-185.
- [2] Wachtmeister A, Kuba T, van Loosdrecht M C M, *et al.* A sludge characterization for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge [J]. *Wat Res*, 1997, **31**(3): 471-478.
- [3] Mino T, Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Microbiology and biochemistry of the enhanced biological phosphate removal process [J]. *Wat Res*, 1998, **32**(11): 3193-3207.
- [4] Ahn J, Daidou T, Tsuneda S, *et al.* Characterization of denitrifying phosphate-accumulating organisms cultivated under different electron acceptor conditions using polymerase chain reaction-denaturing gradient gel electrophoresis assay [J]. *Wat Res*, 2002, **36**: 403-412.
- [5] Kuba T, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of denitrify dephosphatation and denitrification in a two-sludge system [J]. *Wat Res*, 1996, **30**(7): 1702-1710.
- [6] Kuba T, Smolder 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.
- [7] Merzouki M, Bernet N, Delgenes J P, *et al.* Biological denitrifying phosphorus removal in SBR: effect of added nitrate concentration and sludge retention time [J]. *Wat Sci Tech*, 2001, **43**(3): 191-194.
- [8] Kerm-Jespersen J P, Henze M. Biological phosphorus uptake under anoxic and aerobic condition [J]. *Wat Res*, 1993, **27**(4): 617-624.
- [9] 王亚宜, 彭永臻, 李探微, 等. A₂N 连续流双泥系统反硝化除磷脱氮试验研究 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2004, **36**(8): 1046-1049.
- [10] 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. 243-248.
- [11] HAO X D, Van Loosdrecht M C M, Meijer S C F, *et al.* Model-based evaluation of denitrifying P removal in a two-sludge system [J]. *J Environ Eng*, 2001, **127**(2): 112-118.
- [12] 罗宁. 双泥生物反硝化吸磷脱氮系统工艺的试验研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2003. 11-39.
- [13] Andrew J S, David J. Enhanced biological phosphorus removal from wastewater by biomass with different phosphorus content, part I: Experimental results and comparison with metabolic models [J]. *Wat Environ Res*, 2003, **75**(6): 485-498.
- [14] Hood C R, Randall A A. A biochemical hypothesis explaining the response of enhanced biological phosphorus removed biomass to organic substrates [J]. *Wat Res*, 2001, **35**(11): 2758-2766.
- [15] 周群英, 高廷耀. 环境工程微生物学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. 77-87.
- [16] 李军, 杨秀山, 彭永臻. 微生物与水处理工程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002. 137-145.

- [17] Mino T, Arun V, Tsuzuki Y, *et al.* Effect of phosphorus accumulation on acetate metabolism in the biological phosphorus removal process [A]. In: Ramadori R(eds). Advances in Water Pollution Control 4: Biological Phosphate Removal from Wastewaters [C]. Oxford: Pergamon Press, 1987. 27-38.
- [18] Comeau Y, Hall K J, Hancock R E M, *et al.* Biochemical model for enhanced biological phosphorus removal[J]. Wat Res, 1986, **20**: 1511-1521.
- [19] Lim S J, Choi D W, Lee W G, *et al.* Volatile fatty acids production from food wastes and its application to biological nutrient removal [J]. Bioprocess Eng, 2000, **22**: 543-545.
- [20] 杨永哲, 王蔚蔚, 王磊. 反硝化聚磷诱导过程中聚磷速率的变化特性分析[J]. 西安建筑科技大学学报, 2003, **35**(3): 251-253.
- [21] Bond P L, Keller J, Blackall L L. Anaerobic phosphorus release from activated sludge with enhanced biological phosphorus removal: a possible mechanism of intracellular pH control[J]. Biotech Bioeng, 1999, **63**: 507-515.
- [22] Filipe C D M, Daigger G T, Grady Jr C P L. Stoichiometry and kinetics of acetate uptake under anaerobic condition by an enriched culture of phosphorus-accumulation organisms at different pH [J]. Biotech Bioeng, 2001, **76**: 32-43.
- [23] Liu W T, Mino T, Matsuo T, *et al.* Biological phosphorus removal process-effect of pH on anaerobic substrate metabolism[J]. Wat Sci Tech, 1996, **34**: 5-32.
- [24] Smolders G J F, Van Der Meij J, Van Loosdrecht M C M, *et al.* Model of the anaerobic metabolism of the phosphorus removal process, stoichiometry, kinetics and the effect of pH[J]. Biotech Bioeng, 2001, **76**: 17-31.
- [25] Oehmen A, Vives M T, Lu H B, *et al.* The effect of pH on the competition between polyphosphate-accumulation organisms and glycogen-accumulating organisms [J]. Wat Res, 2005, **39**(15): 3727-3737.
- [26] Filipe C D M, Daigger G T, Grady C P L. A metabolic model for acetate uptake under anaerobic conditions by glycogen accumulating organisms: stoichiometry, kinetics and the effect of pH[J]. Biotech Bioeng, 2001, **76**: 17-31.
- [27] Filipe C D M, Daigger G T, Grady C P L. Effects of pH on the rates of aerobic metabolism of phosphorus-accumulating and glycogen-accumulating organisms[J]. Wat Environ Res, 2001, **73**: 213-222.
- [28] Kuba T, Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Biological dephosphatation by activated sludge under denitrifying conditions: pH influence and occurrence of denitrifying dephosphatation in a full-scale waste water treatment plant [J]. Wat Sci Tech, 1999, **36**(12): 75-82.
- [29] Ng W J, Ong S L, Hu J Y. Denitrifying phosphorus by anaerobic/anoxic sequencing batch reactor [J]. Wat Sci Tech, 2001, **3**(43): 139-146.
- [30] Liu W T, Nakamura K, Matsuo T, *et al.* Internal energy-based competition between polyphosphate and glycogen- accumulating bacteria in biological phosphorus removal reactors-effect of P/C feeding ratio [J]. Wat Res, 1997, **31**(6): 1430-1438.
- [31] Sudiana I M, Mino T, Satoh H, *et al.* Metabolism of enhanced biological phosphorus removal and non-enhanced biological phosphorus removal sludge with acetate and glucose as carbon source [J]. Wat Sci Tech, 1999, **39**(6): 29-35.
- [32] Schuler A J, Jenkins D. Enhanced biological phosphorus removal from wastewater by biomass with different phosphorus contents, part I: experimental results and comparison with metabolic models [J]. Wat Environ Res, 2003, **75**(6): 485-498.