

污泥龄对 A/A/O 工艺反硝化除磷的影响

徐伟锋¹, 陈银广², 张芳², 顾国维²

(1. 上海电力学院环境工程系, 上海 200090; 2. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:以实际生活污水培养驯化污泥的小试规模 A/A/O 工艺为研究对象, 进行了污泥龄(SRT)为 8、10、12 和 15 d 时对反硝化除磷的影响研究. 结果表明, 随着污泥龄的延长, 反硝化除磷对系统除磷所起的作用越大, 反硝化聚磷菌缺氧利用单位 PHAs 的反硝化数量和吸磷量也迅速增加, 聚磷菌好氧利用单位 PHAs 的吸磷量并没有受到影响, 以 SRT 为 12 d 时反硝化除磷和系统脱氮除磷效果为最好. 结果还表明, 去除单位氮所需 COD 数量随污泥龄的延长呈减少趋势, 而去除单位磷所需 COD 数量呈增大趋势. 对于我国典型的城市污水而言, SRT 为 12 d 和 15 d 时去除单位氮和磷所需的外碳源数量较 8 d 时要低, 从而使反硝化除磷作用可真正地达到节省碳源和能源的目的.

关键词:生物脱氮除磷; 反硝化除磷; 污泥龄; 实际生活污水

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)08-1693-04

Effect of SRT on Denitrifying Phosphorus Removal in A/A/O Process

XU Wei-feng¹, CHEN Yin-guang², ZHANG Fang², GU Guo-wei²

(1. Department of Environmental Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on a laboratory-scale anaerobic-anoxic-oxic process acclimated with municipal wastewater, effect of SRT on denitrifying phosphorus removal occurred in the system was investigated. The results indicate that the contribution of anoxic denitrifying phosphorus removal to total phosphorus removal becomes larger with prolonging the sludge retention time. DNPAOs' denitrification and P uptake capacities per anoxic PHAs utilized are quickly increased, while PAOs' P uptake capacity per aerobic PHAs utilized is rarely influenced by SRT. When SRT is set at 12 days, anoxic phosphorus uptake efficiency and biological nutrient removal efficiency are best. The results also show that the COD amount required for removing per nitrogen decreases and for removing per phosphorus increases with prolonging the sludge retention time. For the national typical municipal wastewater, the COD amount required for removing per nitrogen and phosphorus under SRT of 12 and 15 days is less than that of under SRT of 8 days, which indicates that anoxic denitrifying phosphorus removal can really decrease the demand of carbon and energy sources.

Key words: biological nutrient removal; denitrifying phosphorus removal; sludge retention time; municipal wastewater

近年来, 国内外学者对反硝化除磷现象进行了大量的研究. 在研究该现象时, 大多采用乙酸、丙酸或葡萄糖为碳源、厌氧/缺氧交替运行的序批式反应器来富集反硝化聚磷菌(DNPAOs), 并进行机理方面的研究^[1~6]; 而目前对连续流工艺中缺氧反硝化除磷研究还不是很多, 并且合成污水与实际污水中的成分差别较大, 试验结果并不能完全反映实际情况, 能真正应用到污水处理工艺中的研究成果很少. 因此, 本实验对以实际生活污水为碳源的 A/A/O 工艺反硝化除磷进行了研究.

尽管反硝化除磷现象在 A/A/O 工艺并没有被认识到, 但当研究者在其它一系列工艺系统中发现并确定该现象时, A/A/O 工艺构造实际上也是有利于 DNPAOs 的富集. 在 A/A/O 工艺中, 可通过适当调整工艺参数使 DNPAOs 的富集程度达到最大, 采取的措施有 2 个: ① 增加混合液回流比便于在缺氧段为 DNPAOs 提供足够的电子受体 NO_3^- -N; ② 调整污

泥龄(SRT)使 DNPAOs 的缺氧吸磷量达到最大. 本试验只考察了第 2 条措施对 A/A/O 工艺中反硝化除磷特性的影响.

1 材料与方法

1.1 试验装置

A/A/O 工艺反应器总有效容积为 12.5 L(厌氧、缺氧、好氧体积比为 1:1:3), 3 个反应器由圆筒形有机玻璃制成, 在各反应区内均设有搅拌器以防止污泥沉淀, 如图 1 所示. 接种污泥取自上海市某污水处理厂, 采用上海市某小区的实际生活污水为进水碳源, 待脱氮除磷效果稳定后开始试验.

1.2 分析项目

收稿日期: 2006-09-18; 修订日期: 2006-10-25
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50138010); 上海市重点学科建设项目(P1304)
作者简介: 徐伟锋(1978~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: steve78107@163.com

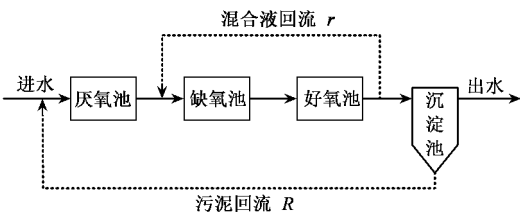


图1 A/A/O 工艺流程

Fig.1 Schematic flowchart of A/A/O process

试验中常规指标分析均按国家标准方法测定^[7];聚羟基链烷酸(PHAs)测定方法详见文献[8].

1.3 试验方法

在运行过程中,通过改变好氧池中的排泥量来考察 SRT 为 8、10、12 和 15 d 时对反硝化除磷的影响.试验期间工艺参数为:总水力停留时间 8.0 h, DO 2.0~3.0 mg/L,污泥回流比 75%,混合液回流比 200%,水温 20℃.

表1 不同 SRT 下各污染物的去除效果¹⁾/mg·L⁻¹

Table 1 Removal of various pollutants under four different SRTs/mg·L⁻¹

指标	SRT = 8 d			SRT = 10 d			SRT = 12 d			SRT = 15 d		
	进水	出水	去除率/%	进水	出水	去除率/%	进水	出水	去除率/%	进水	出水	去除率/%
COD	380.6	48.6	87.2	384.6	62.8	83.7	368.4	61.9	83.2	382.1	60.7	84.1
NH ₄ ⁺ -N	56.3	0.0	100	53.4	0.8	98.5	54.8	0.0	100	55.6	0.4	99.3
NO ₂ ⁻ -N	0.0	4.1	—	0.0	3.1	—	0.0	1.4	—	0.0	1.0	—
TN	64.0	27.3	57.3	64.8	23.6	63.6	62.0	22.1	65.4	64.3	23.8	63.0
TP	7.0	0.8	88.6	7.4	0.9	87.8	7.0	0.6	91.4	6.8	2.2	67.6
MLSS	2 590			2 800			3 160			3 460		

1)数据为 3 次试验的平均值

2.2 吸磷能力比较

根据不同 SRT 工况下的试验结果,使用物料平衡方法对各反应器内的 PHAs、磷和硝态氮变化量进行了计算,如表 2 所示.由表 2 可看出,在 A/A/O 系统缺氧段内出现了磷的吸收和反硝化反应;并且根

2 结果与讨论

2.1 生物脱氮除磷性能

表 1 是 COD、氮和磷在不同 SRT 工况下的试验结果.由表 1 可见,COD 去除几乎不受 SRT 长短的影响,去除率达 83%~88%,出水浓度基本达到我国城镇污水处理厂排放标准规定的一级标准^[9];NH₄⁺-N 去除率几乎达到 100%,可达到一级排放标准中 A 标准;TN 去除率随着 SRT 的延长呈上升趋势;但当 SRT 为 8 和 10 d 时,出水中出现 NO₂⁻-N 的积累,表明硝化反应的第 2 步受到抑制.在 SRT 为 8、10 和 12 d 时,出水 TP 浓度均低于 1.0 mg/L,达到一级排放标准中 B 标准;但 SRT 为 15 d 时出水磷浓度较高,只符合二级排放标准.综合考虑有机物去除、脱氮和除磷效果,以 SRT 为 12 d 时处理效果最佳.

据缺氧段内 PHAs 的变化量,得出这是由 DNPAOs 所作用的结果.在本试验的不同 SRT 运行工况下,系统都出现了反硝化除磷现象,只是由反硝化除磷作用所去除的磷对系统除磷所做的贡献大小不同而已,下面将对此详细分析.

表2 4种工况下各反应器内 PHAs、P 和 NO₃⁻-N 变化量¹⁾/mg·d⁻¹

Table 2 PHAs, P and nitrate change in each reactor under four SRTs/mg·d⁻¹

反应器	SRT = 8 d			SRT = 10 d			SRT = 12 d			SRT = 15 d		
	PHAs	P	NO ₃ ⁻ -N	PHAs	P	NO ₃ ⁻ -N	PHAs	P	NO ₃ ⁻ -N	PHAs	P	NO ₃ ⁻ -N
厌氧池	3 470	- 1 285	470	3 658	- 1 488	501	3 759	- 1 912	539	3 705	- 2 127	481
缺氧池	- 1 170	74	415	- 1 729	452	389	- 2 034	1 024	569	- 2 167	1 073	586
好氧池	- 2 109	1 455	—	- 1 861	1 287	—	- 1 594	1 127	—	- 1 603	1 146	—

1)“—”表示 PHAs 的消耗和磷的释放

PHAs 是生物除磷系统中除磷菌最主要的能量来源,与吸磷有着密切的联系,将吸磷与 PHAs 结合起来则更能从本质上反映出 DNPAOs 的缺氧吸磷能力和聚磷菌(PAOs)的好氧吸磷能力.根据表 2 中的

数据,可计算出不同 SRT 工况下除磷菌的吸磷能力,如图 2 所示.由图 2 可见,DNPAOs 缺氧利用单位 PHAs 的吸磷量随着污泥龄的延长而迅速增加,从 SRT 为 8 d 时的 0.06(P/PHAs)增加到 15 d 时的 0.50

(P/PHAs).这是因为在污泥龄较短时,系统排放量增加,MLSS 浓度较低,厌氧区内微生物的有机负荷就相对较高,使除磷菌不能完全吸收污水中的有机物,仍有部分有机物进入缺氧区(由表 3 可见,当 SRT 为 8 d 时只有约 74% 有机物在厌氧段内被消耗,约有 21.5% 有机物在缺氧区被消耗),此时外碳源和内碳源 PHAs 就共存于缺氧环境,从而抑制了 DNPAOs 对 PHAs 的利用,进而影响了磷的缺氧吸收.随着污泥龄的延长,微生物对厌氧段内有机物的吸收量呈增加趋势,对缺氧段内的吸收量呈减少趋势,使微生物在缺氧段内几乎没有可利用的外碳源, DNPAOs 只能利用 PHAs 作为碳源、以硝态氮为电子受体进行同时吸磷和反硝化作用.可见,在污泥龄较短时,外碳源与内碳源会共存于环境中,则反硝化作用所需的碳源首先由外碳源 COD 提供,使微生物对内碳源

表 3 4 种工况下各反应器 COD 去除量及占总去除量的比例

污泥龄/d	厌氧池		缺氧池		好氧池	
	COD 去除量	所占比例/%	COD 去除量	所占比例/%	COD 去除量	所占比例/%
	/mg·d ⁻¹		/mg·d ⁻¹		/mg·d ⁻¹	
8	9 089	73.9	2 639	21.5	569	4.6
10	9 946	81.9	1 190	9.8	1 008	8.3
12	10 185	89.8	223	1.9	932	8.3
15	10 972	90.0	187	1.5	1 039	8.5

从图 2 还可看出,PAOs 好氧利用单位 PHAs 的吸磷量并没有随着污泥龄的延长而呈较大范围内的变化,均约为 0.70 (P/PHAs).这说明无论污泥龄在一定范围内如何变化,PAOs 在好氧条件下氧化单位 PHAs 的吸磷能力并没有受到影响.但由于进入好氧池时 PAOs 体内的 PHAs 浓度并不相同,从而影响了好氧吸磷速率.试验中发现当 SRT 为 8 d 时进入好氧池时 PAOs 体内 PHAs 含量(PHAs/SS)为 24.5 mg/g,此时吸磷速率为 3.0 mg/(g·d),出水 TP 浓度为 0.8 mg/L;而当 SRT 为 15 d 时 PHAs 含量(PHAs/SS)为 20.7 mg/g,吸磷速率仅为 1.8 mg/(g·d),出水 TP 浓度为 2.2 mg/L.另外,缺氧除磷对整个系统除磷所起的贡献变化相对较大,从 SRT 为 8 d 的 8.4% 迅速增加到 12 d 的 41.6%,此后进一步延长至 15 d 时基本没有增加.可见缺氧除磷作用在连续流 A/A/O 工艺中受污泥龄长短的影响较大.

经上述讨论可得出,随着污泥龄的延长,反硝化除磷就越来越明显,对整个系统的除磷贡献也越大,导致除磷菌缺氧利用 PHAs 的数量就越多,降低了进入好氧段时 PHAs 含量,进而影响好氧吸磷速率和除磷效果,但并不会影响好氧吸磷能力.

的利用率大大下降;在污泥龄较长时,只有少量剩余有机物从厌氧区进入缺氧区,则增强了 DNPAOs 的缺氧吸磷作用.

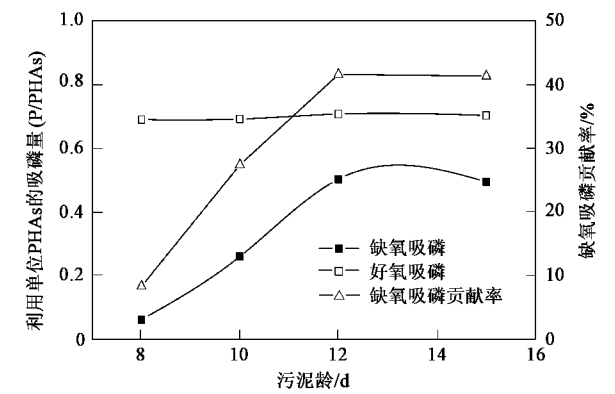


图 2 污泥龄与利用单位 PHAs 的吸磷量的关系

Fig.2 Relationship between SRTs and P uptake/PHAs utilization

2.3 反硝化作用比较

本研究还考察了通过反硝化除磷作用被去除的硝态氮数量.文献[10]认为,在理论上还原 1 mg NO₃⁻-N 需消耗 2.86/(1 - Y_H) mg COD(Y_H 为产率系数).本试验通过氧呼吸速率(OUR)的方法测得 A/A/O 工艺中 Y_H 为 0.623,则还原 1 mg NO₃⁻-N 需消耗 7.59 mg COD.因而,根据表 2 中缺氧段内硝态氮去除量和表 3 中缺氧段内 COD 去除量,可知各工况下缺氧段由外碳源 COD 引起的 NO₃⁻-N 去除量和由

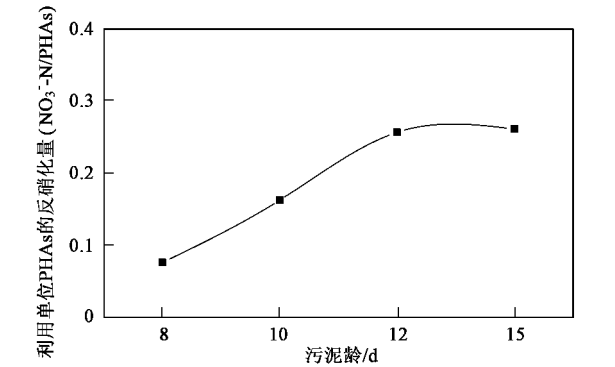


图 3 4 种工况缺氧条件下 PHAs 和反硝化之间的关系

Fig.3 Relationship between anoxic PHAs and denitrification under four sludge ages

反硝化除磷作用(该作用需消耗 PHAs)所去除的 NO_3^- -N 数量,从而可得出 PHAs 和由反硝化除磷作用所去除的 NO_3^- -N 二者之间的关系,其结果如图 3 所示.由图 3 可见,DNPAOs 缺氧利用单位 PHAs 的反硝化数量受污泥龄长短的影响相对较大,从 SRT 为 8 d 时的 $0.08(\text{NO}_3^-$ -N/PHAs)迅速增加至 12 d 时的 $0.26(\text{NO}_3^-$ -N/PHAs),此后进一步延长至 15 d 时变化不大.这说明当 SRT 为 12 d 时,缺氧池已没有可利用的外碳源,这点与表 3 对应起来,DNPAOs 只能利用内碳源进行吸磷和反硝化作用.

2.4 碳源需求量比较

对碳、氮和磷在各反应器内进行物料平衡计算,可得出各工况下去除单位氮和磷所需 COD 的数量,具体如表 4 所示.从表 4 可以看出,COD/N 值随着污泥龄的延长呈逐渐减少,而 COD/P 值呈增大趋势.这可从 2.2 节中得出,当 SRT 为 8 d 时 A/A/O 工艺并没有发生明显的缺氧反硝化现象,系统脱氮基本上只能由反硝化菌以进水 COD 为碳源而得到去除;当 SRT 为 12 d 和 15 d,系统出现了明显的反硝化除磷现象,一部分氮仍由反硝化菌去除,其余部分由反硝化聚磷菌通过反硝化除磷作用去除.对于我国典型的城市污水而言,进水总氮浓度远高于总磷浓度,所需的脱氮量要高于除磷量.因而,在同等条件下,当 SRT 为 12 d 和 15 d 时去除单位氮和磷所需的外碳源 COD 数量较 8 d 时要低,从而使反硝化除磷作用可真正地达到节省碳源和能源的双重目的.

表 4 不同污泥龄工况下去除单位氮和磷所需的 COD

指标	污泥龄/d			
	8	10	12	15
COD/N	6.2	5.4	4.0	4.1
COD/P	28.2	30.3	32.7	33.6

在本研究的整个试验运行过程中,A/A/O 工艺一直存在反硝化除磷现象.从工艺结构上来说,UCT 工艺和双泥系统 A_2N 工艺比 A/A/O 工艺更有利于培养和富集反硝化聚磷菌.尽管如此,本研究发现仍可以通过调整污泥龄参数,使系统中反硝化聚磷菌的缺氧吸磷量达到最高,从而节省碳源需求量和曝气量.经过以上讨论,认为在 A/A/O 工艺中实现反硝化除磷最主要的一点是,通过控制工艺参数,使厌氧池中绝大部分有机物被除磷菌充分利用并将其合成为 PHAs,进入缺氧池的 COD 浓度尽可能地低,从

而使反硝化菌几乎没有可利用的外碳源.在外碳源缺乏的条件下,除磷菌只能利用内碳源进行反硝化作用,使得在厌氧段内贮存大量 PHAs 的反硝化聚磷菌成为优势菌种,达到使用同一种碳源实现同时脱氮和除磷的目的.

3 结论

污泥龄长短对连续流 A/A/O 工艺中反硝化除磷性能的影响较大,同时还会影响去除单位氮和磷所需的 COD 数量.在短污泥龄时(8 d)几乎没有反硝化除磷作用,随着污泥龄的延长,缺氧吸磷在系统除磷中所起的作用也越来越大,但污泥龄过长时(15 d)会降低除磷效率.从污水处理的效果和经济 2 方面考虑,在本试验条件下以污泥龄为 12 d 时反硝化除磷和系统脱氮除磷效果为最好.

参考文献:

[1] Meinhold J, Pedersen H, Arnold E, *et al.* Effect of continuous addition of an organic substrate to the anoxic phase on biological phosphorus removal [J]. *Water Sci Technol*, 1998, **38**(1): 97 ~ 105.

[2] Sudiana I M, Mino T, Satoh H. Metabolism of enhanced biological phosphorus removal and non-enhanced biological phosphorus removal sludge with acetate and glucose as carbon source [J]. *Water Sci Technol*, 1999, **39**(6): 29 ~ 35.

[3] Jeon C O, Park J M. Enhanced biological phosphorus removal in a sequencing batch reactor supplied with glucose as a sole carbon source [J]. *Water Res*, 2000, **34**(7): 2160 ~ 2170.

[4] Kishida N, Kim J, Tsuneda S, *et al.* Anaerobic/oxic/anoxic granular sludge process as an effective nutrient removal process utilizing denitrifying polyphosphate-accumulating organisms [J]. *Water Res*, 2006, **40**(1): 97 ~ 105.

[5] Tsuneda S, Ohno T, Soejima K, *et al.* Simultaneous nitrogen and phosphorus removal using denitrifying phosphate-accumulating organisms in sequencing batch reactor [J]. *Biochemical Eng J*, 2006, **27**(1): 191 ~ 196.

[6] Zeng R J, Saunders A M, Yuan Z, *et al.* Identification of comparison of aerobic and denitrifying phosphate-accumulating organisms [J]. *Biotechnol Bioeng*, 2003, **83**(2): 140 ~ 148.

[7] 国家环境保护总局编. 水与废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

[8] 徐伟锋, 陈银广, 顾国维, 等. A^2/O 污水处理工艺中基质转化机理研究 [J]. *环境科学*, 2006, **27**(11): 2228 ~ 2232.

[9] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局发布. 城镇污水处理厂污染物排放标准(GB 18918-2002) [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.

[10] Katarzyna K, Bram K. A method to estimate denitrification potential for predenitrification systems using NUR batch test [J]. *Water Res*, 1999, **33**(10): 2291 ~ 2300.