

# 短好氧泥龄下 $A^2/O$ 和 BAF 联合工艺的脱氮除磷特性

缪佳<sup>1</sup>, 丁永伟<sup>1</sup>, 王琳<sup>1,2</sup>, 赵庆良<sup>1</sup>, 王宝贞<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2 中国海洋大学  
环境科学与工程学院, 山东 青岛 266003)

**摘要:** 采用小试装置,研究了短好氧污泥龄下  $A^2/O$  和 BAF 联合工艺处理低 C/N 和 C/P 污水时的脱氮除磷特性。结果表明,通过提高  $A^2/O$  工艺段的厌氧区有机负荷和缺氧区硝酸盐负荷对反硝化聚磷菌 (DPAOs) 进行选择 and 强化后,其在聚磷菌 (PAOs) 中的比例维持在 28% 左右,工艺具有部分反硝化除磷能力,能够减少脱氮除磷过程中对碳源的总需求量。但在联合工艺中,好氧除磷仍是主要的除磷方式。在  $A^2/O$  工艺段内,好氧污泥龄在满足好氧 PAOs 存活的同时,还必须满足抑制硝化细菌生长的要求,且为了保证工艺对磷的整体去除效果,混合液在好氧区的接触时间须大于 30 min。此外,以保证缺氧区出水中含有 1~4 mg/L 的硝态氮为原则来控制 BAF 出水的回流量,可达到较好的脱氮除磷效果。该联合工艺结合了活性污泥工艺和生物膜工艺的优点,运行稳定,出水水质优良,不仅适合于新建污水处理厂,也特别适合于不能脱氮除磷污水处理厂的技术改造。

**关键词:**  $A^2/O$  工艺; 曝气生物滤池; 好氧污泥龄; 脱氮除磷; 反硝化除磷; 反硝化聚磷菌

中图分类号: X703.1 文献标识码: C 文章编号: 1000-4602(2006)07-0069-05

## Nitrogen and Phosphorus Removal Characteristics in Combined Short Aerobic SRT $A^2/O$ and BAF Process

MIAO Jia<sup>1</sup>, DING Yong-wei<sup>1</sup>, WANG Lin<sup>1,2</sup>, ZHAO Qing-liang<sup>1</sup>,  
WANG Bao-zhen<sup>1</sup>

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

**Abstract:** A bench-scale study on the performance of combined short aerobic SRT  $A^2/O$  and BAF process for treating the wastewater with lower C/N and C/P ratio was conducted with the emphasis on nitrogen and phosphorus removal characteristics. The results indicate that the ratio of DPAOs to PAOs can be maintained at 28% through optimizing the organic loads in the anaerobic zone and the nitrate loads into the anoxic zone to promote the development of DPAOs. The combined process has some anoxic phosphorus uptake capacity, which can decrease the total carbon source demand for nitrogen and phosphorus removal. However, the aerobic phosphorus over-uptake is the main mechanism of phosphorus removal in the combined process. Demands for the development of aerobic PAOs and the restraint on the nitrifier growth simultaneously must be met by the aerobic SRT in the  $A^2/O$  system. The contact time in the aerobic zone is more than 30 minutes, which ensures efficient phosphorus removal in the combined process. The adequate BAF effluent return rate is controlled with 1-4 mg/L of nitrate in the anoxic zone effluent.

of A<sup>2</sup>/O system to achieve optimal nitrogen and phosphorus removal efficiencies. The combined process unites the inherent characteristics of both activated sludge process and biofilm process and has the advantages of stable operation, and high quality of final effluent, which is fit not only for newly-built WWTPs, but also upgrading of the existing WWTPs without biological nitrogen and phosphorus removal capacity.

**Key words:** A<sup>2</sup>/O process; biological aerated filter; aerobic SRT; nitrogen and phosphorus removal; denitrifying phosphorus removal; DPAOs

众多研究已经证明,反硝化聚磷菌 (Denitrifying Phosphate-Accumulating Organisms, DPAOs) 作为聚磷菌 (Phosphate-Accumulating Organisms, PAOs) 的一部分,不但能够以氧气作为电子受体氧化其胞内的 PHB 来进行磷的吸收,而且能够以硝酸盐或亚硝酸盐作为电子受体氧化其胞内的 PHB 同时实现反硝化脱氮和除磷<sup>[1,2]</sup>,后者实现了碳源的最有效利用,这为低 C/N 和 C/P 污水的生物脱氮除磷提供了一种新的思路。

尽管在采用前置反硝化工艺 (如 UCT 工艺) 的污水处理厂中,曾发现由于 DPAOs 存在导致的反硝化除磷现象,但是这种现象并不普遍<sup>[3,4]</sup>。除了进水中易生物降解基质含量过低的原因外<sup>[3]</sup>,Hu 等认为影响 DPAOs 在系统中存活的主要因素是缺氧反应器中的硝酸盐负荷<sup>[1]</sup>,也就是说缺氧反应器中硝酸盐的负荷必须超过普通异养菌反硝化的潜在需求,才能使 PAOs 有机会利用“过量”的硝酸盐,在系统中形成 DPAOs 并发挥其反硝化除磷作用。此外,尽可能减少好氧时间和污泥在好氧/缺氧状态下交替存在的频率,采用将硝化过程和反硝化除磷过程完全分开的双污泥工艺 (如 DephanoX, A<sub>2</sub>NSBR 等) 等均有利于 DPAOs 作用的发挥。

以上述研究成果为基础,设计了一种短好氧污泥龄 A<sup>2</sup>/O 和曝气生物滤池 (BAF) 联合工艺来处理中低浓度的污水,期望发挥 DPAOs 的特性来实现低 C/N 和 C/P 污水的生物脱氮除磷。

### 1 试验装置和方法

#### 1.1 试验装置

试验装置及流程如图 1 所示。

A<sup>2</sup>/O 工艺段共分为 6 格 (每格容积为 4 L),其中厌氧区、缺氧区和好氧区的容积分别为 8、12 和 4 L,模拟实际生产的推流式运行。厌氧和缺氧区内设有搅拌器,好氧区内用粘砂块作为曝气装置并进行鼓风曝气。

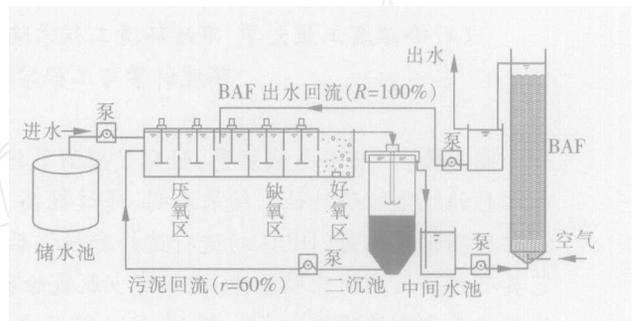


图 1 试验装置及流程

Fig 1 Schematic diagram of pilot test of combined A<sup>2</sup>/O and BAF system

BAF 工艺段采用上向流,滤料是直径为 3~4 mm 的轻质陶粒,底部设有卵石承托层,采用粘砂块作为曝气装置。BAF 装填滤料部分的规格: Ø150 mm, H=1 500 mm,有效容积为 26.5 L。

试验装置的进水、污泥回流 (r=60%) 与 BAF 出水回流 (R=100%) 均用蠕动泵来完成。表 1 是该联合工艺的技术参数。

表 1 短好氧污泥龄 A<sup>2</sup>/O 和 BAF 联合工艺的技术参数

Tab 1 Technological parameters of combined short aerobic SRT A<sup>2</sup>/O and BAF process

参数	数值	参数	数值
进水流量 Q / (L · h <sup>-1</sup> )	2.85	好氧区 DO 浓度 / (mg · L <sup>-1</sup> )	2~4
污泥回流量 / (L · h <sup>-1</sup> )	1.71	二沉池接触时间 / h	3.37
BAF 出水回流量 / (L · h <sup>-1</sup> )	2.85	中间水池接触时间 / h	2.02
厌氧区水力停留时间 / h	2.81	BAF 段空床 HRT / h	9.30
厌氧区接触时间 / h	1.75	BAF 段空床接触时间 / h	4.65
缺氧区水力停留时间 / h	4.21	BAF 段 DO 浓度 / (mg · L <sup>-1</sup> )	2~3
缺氧区接触时间 / h	1.08	出水池接触时间 / h	2.63
好氧区水力停留时间 / h	1.40	A <sup>2</sup> /O 工艺段总 SRT / d	9~10
好氧区接触时间 / h	0.54	A <sup>2</sup> /O 工艺段好氧区 SRT / d	1.3
A <sup>2</sup> /O 工艺段总 HRT / h	8.42	水温 /	23 ± 3

注: 接触时间根据进水流量 Q 及污泥回流量或 BAF 出水回流量计算。

#### 1.2 试验步骤

在厌氧环境下,PAOs 胞内 PHB 的积累水平决定其在好氧或缺氧环境下对磷的吸收能力;在缺氧

环境下,硝酸盐负荷的高低将影响 DPAOs 在 PAOs 中的比例和系统反硝化除磷的效果。因此,在进水流量、污泥回流量和 BAF 出水回流量恒定的前提下,采用固定进水 C/N 值的方式,在磷不受限制的情况下,逐渐增大进水 COD 和 TN 浓度,以提高 PAOs 在厌氧区中胞内 PHB 的积累水平和 BAF 出水回流至 A<sup>2</sup>/O 缺氧区中硝酸盐的量,同时提高对 DPAOs 的选择及强化程度。根据进水 COD 和 TN 浓度,共进行了 4 段试验。表 2 记录了每段试验的运行条件, ~ 试验段内进水 COD 和 TN 浓度逐渐增加, 试验段和 试验段的条件基本相同,以考察 DPAOs 在系统 PAOs 中的比例对反硝化除磷的影响。

表 2 各试验段的运行条件及进水水质情况

Tab 2 Influent quality and operation condition in each test stage

试验运行时段	运行时间/周	COD / (mg · L <sup>-1</sup> )	TN / (mg · L <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> - N / (mg · L <sup>-1</sup> )	TP / (mg · L <sup>-1</sup> )	TSS / (mg · L <sup>-1</sup> )
	1 ~ 6	207 ~ 226	46 ~ 59	37 ~ 44	10 ~ 13	27 ~ 37
	7 ~ 15	286 ~ 323	62 ~ 81	56 ~ 77	11 ~ 16	33 ~ 46
	15 ~ 23	408 ~ 431	91 ~ 110	78 ~ 94	15 ~ 19	26 ~ 36
	23 ~ 33	204 ~ 231	44 ~ 52	35 ~ 48	11 ~ 17	35 ~ 49

### 1.3 试验水质及分析方法

采用南方某小城镇污水处理厂(传统 A<sup>2</sup>/O 工艺)沉砂池出水作为试验用水。因该厂沉砂池出水中的一些主要污染物浓度较低,很难进行生物脱氮除磷的正常试验,所以通过添加淀粉、NaAc、NH<sub>4</sub>Cl、KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 和 NaHCO<sub>3</sub> 来调节各项污染物的浓度及碱度,以达到试验所要求的值(见表 2)。水质分析采用国家标准分析方法<sup>[5]</sup>。

### 1.4 试验启动和好氧污泥龄控制

取该污水厂曝气池内的污泥进行接种,按照试验段 的水质条件启动,约 30 d 后系统进入稳定运行状态。通过在 A<sup>2</sup>/O 工艺段的好氧区直接排放混合液的方法来排放剩余污泥,控制 A<sup>2</sup>/O 工艺段的污泥龄为 9 ~ 10 d。在忽略二沉池及污泥回流管线中污泥量的前提下, A<sup>2</sup>/O 工艺段好氧污泥龄 ( $\theta_{c,AER}$ ) 约为 1.3 d。

### 1.5 污泥定性间歇试验

为了更详细地研究该联合工艺中污泥的脱氮除磷特性,在每个试验段的末期,取 A<sup>2</sup>/O 工艺段厌氧

区内的混合液 1 200 mL,在密闭状态下搅拌 1 h;然后将其等分为两份,一份直接曝气以维持好氧条件,另一份加入硝酸钾(初始 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 浓度约 27 mg/L)进行缺氧搅拌。控制水温在 (23 ± 2) °C,定时取 50 mL 混合液水样,用定性滤纸过滤后快速测定滤液中 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> - N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 和 TP 的浓度。

## 2 试验结果

### 2.1 联合工艺的除污效果

对于 A<sup>2</sup>/O 工艺段,随进水碳、氮负荷的升高 [COD 平均容积负荷从 0.6 kgCOD / (m<sup>3</sup> · d) 升高至 1.2 kgCOD / (m<sup>3</sup> · d), TN 平均容积负荷从 0.14 kgN / (m<sup>3</sup> · d) 升高至 0.28 kgN / (m<sup>3</sup> · d)],出水 COD < 60 mg/L,且 COD 的去除主要发生在厌氧区。TN 的去除率约为 50% ~ 60%,出水 TN 中以 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 为主,NO<sub>x</sub><sup>-</sup> - N 所占比例较小。此外,若不考虑 TN 和 TP 的转化,仅考虑污泥回流和 BAF 出水回流的稀释作用,则 TN、TP 的变化与两者的实际变化相比而言, TN 主要在缺氧区得到去除, TP 主要在好氧区得到去除。在试验段 、 和 中,部分 TP 在缺氧区中也得到去除,而试验段 中缺氧区却对 TP 没有去除效果。与 BAF 工艺段相比, A<sup>2</sup>/O 工艺段对 TP 的去除中起主要作用,且对 TP 的去除效果随碳、氮负荷的升高而增强。

BAF 工艺段对 TN 的去除效果较差,但其出水中 TN 以 NO<sub>x</sub><sup>-</sup> - N 为主, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 几乎完全被去除,表明 BAF 具有很强的硝化能力。TP 和 COD 在 BAF 工艺段中也得到部分去除,且由于 BAF 对悬浮物有较好的去除效果,其出水 SS < 10 mg/L。BAF 的反冲洗周期为 4 周左右,这表明前置的 A<sup>2</sup>/O 工艺段为后续 BAF 工艺段的稳定运行起到了良好的预处理作用。

### 2.2 污泥定性间歇试验结果

图 2 是各试验段中, A<sup>2</sup>/O 工艺段厌氧区的污泥在好氧和缺氧条件下对磷吸收的间歇试验结果。

由图 2 可知,试验段 中污泥没有反硝化除磷的能力,而试验段 、 和 中的污泥均具有一定的反硝化除磷能力; 4 个试验段的污泥均有好氧除磷能力,且明显大于相应的反硝化除磷能力。随有机负荷的升高, ~ 试验段内污泥的反硝化和好氧除磷能力均有所增强,且污泥的除磷过程主要在试验开始后的 30 min 内完成。

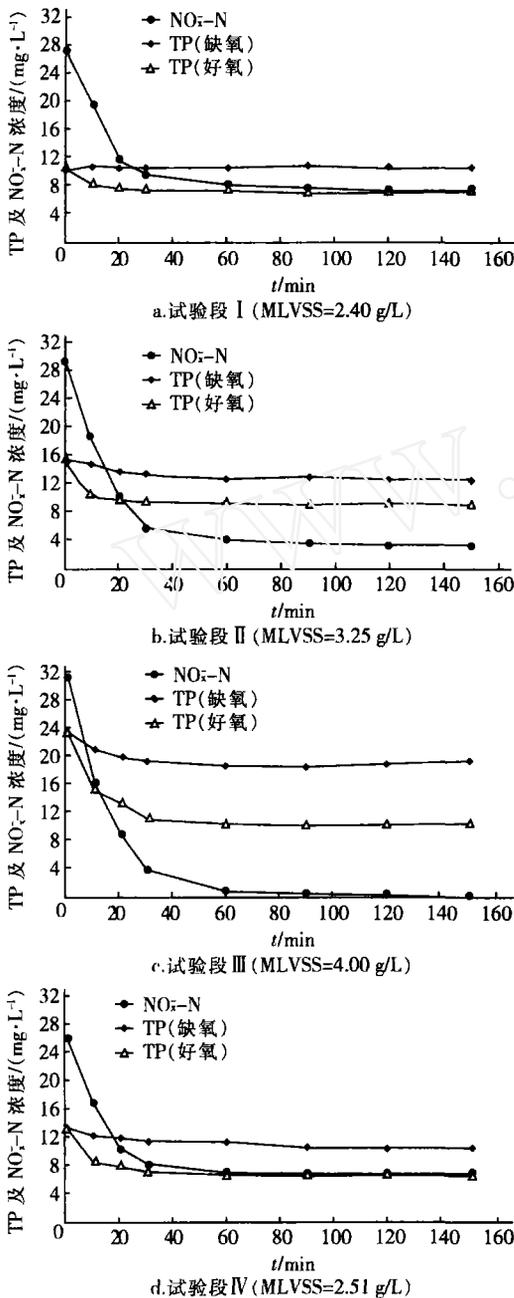


图 2 在好氧和缺氧条件下污泥定性间歇试验结果  
Fig 2 Phosphorus uptake tests for sludge characterization under aerobic and anoxic conditions

### 3 讨论

该联合工艺的特性决定了 A<sup>2</sup>/O 工艺段的污泥同时具有反硝化和好氧除磷的能力,在 A<sup>2</sup>/O 工艺段,由于缺氧区置于好氧区之前,必然存在对 DPAOs 的优先选择。但同时必须注意,由于 A<sup>2</sup>/O 工艺段好氧区的设置,对专一以氧气为电子受体的 PAOs 也具有显著的选择优势,使它在整个除磷过程

中占主要地位,保证了工艺对磷的整体去除效果。

表 3 是根据图 2 的试验结果和各试验段平均进出水水质得出的系统脱氮除磷能力的有关数据,其中 DPAOs 在 PAOs 中的比例的计算采用了 A. Wachmeister 等建议的方法<sup>[6]</sup>。

表 3 系统脱氮除磷特性的有关数据

Tab 3 Calculated data on nitrogen and phosphorus removal characteristics based on test results

指标	试验段	试验段	试验段	试验段
进水 COD/TP (均值)	18.6	20.4	23.4	17.0
进水 COD/TKN (均值)	4.1	4.2	4.1	4.5
比好氧除磷速率 / (gP · kg <sup>-1</sup> MLVSS · h <sup>-1</sup> )	3.60	5.43	7.54	6.41
比缺氧除磷速率 / (gP · kg <sup>-1</sup> MLVSS · h <sup>-1</sup> )	0	1.61	2.55	1.82
比反硝化速率 / (gN · kg <sup>-1</sup> MLVSS · h)	19.86	17.44	16.73	18.74
DPAOs PAOs/%	0	29.7	33.8	28.4
进水 COD/TP	48.6	39.1	38.1	37.2
进水 COD/TN	7.6	7.8	7.8	7.6

注: 比好氧除磷速率、比缺氧除磷速率、比反硝化速率均指 20 min 内的平均值。

从表 3 可以看出,试验段 中的污泥不具备反硝化除磷能力,其好氧除磷能力也最弱 [比好氧除磷速率为 3.60 gP/(kgMLVSS · h)],这是由于较低的有机负荷限制了系统对 PAOs 的选择,同时缺氧区低硝酸盐负荷更限制了对 DPAOs 的选择。在试验段、中,随碳、氮负荷的升高,其污泥的好氧和反硝化除磷速率均升高,这说明有机负荷和缺氧区硝酸盐负荷的升高有利于提高污泥好氧和反硝化的除磷能力。同时结合该联合工艺的除污效果可知,试验段 ~ 中第一缺氧池的溶解性 COD < 60 mg/L,且在后续的反应池中变化幅度较小,这说明在试验进水水质条件下,采用这种工艺组合形式能够“胁迫”PAOs 利用其在厌氧段储存的 PHB 进行反硝化除磷,造成了对 DPAOs 的选择。在试验段中,虽然工艺控制条件和试验段的类似,但是污泥的好氧和反硝化除磷速率均大于后者,DPAOs 在 PAOs 中的比例维持在 28% 左右,这说明 DPAOs 在经过强化后能够在系统中维持并发挥效能。尽管不同试验段的污泥除磷特性存在差异,但是污泥的反硝化速率变化很小 [16.73 ~ 19.86 gN/(kgMLVSS · h)],这说明只要进水中 C/N 值恒定,BAF 出水回

流量不是限制反硝化过程的因素(以 A<sup>2</sup>/O 工艺段出水含有 NO<sub>x</sub><sup>-</sup>-N 为标准),污泥除磷特性的变化不影响系统的反硝化效果。从工艺对氮和磷的整体去除效果来看,COD/TP 值从试验段的 48.6 降为试验段的 37.2,COD/TN 值在各试验段间的变化很小,这说明 DPAOs 的存在能够减少脱氮除磷过程对碳源的总需求量。

与主要依靠 DPAOs 的反硝化除磷工艺(如 Dephanox, A<sub>2</sub>NSBR 等)相比,该 A<sup>2</sup>/O 工艺段中缺氧区的硝酸盐负荷较低,这不利于 DPAOs 在系统中存活和发挥作用,因此该联合工艺仍以好氧除磷过程为主。在传统的单泥生物脱氮除磷工艺中(如 UCT,传统 A<sup>2</sup>/O 工艺等),硝化细菌的比生长速率最小,PAOs 的生长速率介于硝化细菌和其他异养细菌之间,因此只要系统好氧污泥龄的选择满足了硝化细菌的需要,也就能够满足 PAOs 的要求。但是,在此 A<sup>2</sup>/O 工艺段中,由于限制硝化反应的发生,好氧污泥龄的确定应当以满足 PAOs 在系统中存活而不发生硝化反应为原则。图 3 是温度对 PAOs 和硝化细菌所对应的最小好氧污泥龄的影响<sup>[7]</sup>,以此作为该联合工艺设计和运行时好氧污泥龄选择的参考。

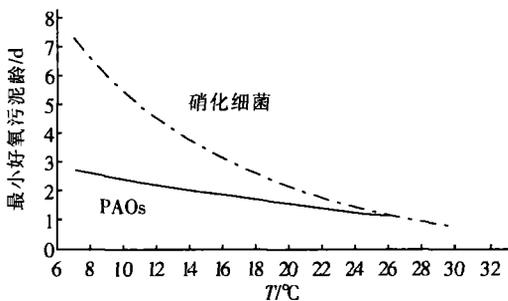


图 3 温度对 PAOs 和硝化细菌最小好氧污泥龄的影响

Fig 3 Effect of temperature on minimum aerobic SRT of PAOs and nitrifiers

由于好氧除磷主要在 30 min 内完成,因此应控制 A<sup>2</sup>/O 工艺段好氧区的接触时间(考虑污泥回流量和 BAF 出水回流量的影响) 30 min。BAF 出水回流是为了向 A<sup>2</sup>/O 工艺段的缺氧区提供硝酸盐,回流比越大则缺氧区硝酸盐的负荷越高,越有利于 DPAOs 的存活和反硝化除磷过程的进行。但是过高的回流比会将大量氧气携带至缺氧区抑制反硝化过程,同时过量的硝酸盐会随回流污泥进入厌氧区,干扰胞内多磷酸盐的水解和 PAOs 胞内 PHB 的合成。此外,当硝酸盐全部被消耗后,缺氧环境变为厌

氧环境,会出现磷的释放现象。因此,以保证缺氧区出水中含有 1~4 mg/L 的硝态氮来控制 BAF 出水的回流量,从而达到最优的脱氮除磷效果。

#### 4 结论

A<sup>2</sup>/O—BAF 联合工艺结合了活性污泥工艺和生物膜工艺的优点,运行稳定,容易控制,出水水质优良。

DPAOs 在经过强化后,其在 PAOs 中的比例维持在 28% 左右,工艺具有部分反硝化除磷能力,能够减少脱氮除磷过程对碳源的总需求量。

好氧除磷在联合工艺的除磷过程中占据主要地位。A<sup>2</sup>/O 工艺段好氧污泥龄的确定必须满足好氧 PAOs 在系统中生存且同时不发生硝化反应的要求。控制混合液在好氧区的接触时间 30 min,以保证工艺对磷的整体去除效果。

以保证 A<sup>2</sup>/O 工艺段缺氧区出水中含有 1~4 mg/L 的硝态氮为原则来控制 BAF 出水的回流量,从而达到最优的脱氮除磷效果。

#### 参考文献:

- [1] Hu Z R, Wentzel M C, Ekama G A. Anoxic growth of PAOs in biological nutrient removal activated sludge systems[J]. *Wat Res*, 2002, 36: 4927 - 4937.
- [2] Meinhold J, A mold E, Isaacs S. Effect of nitrite on anoxic phosphate uptake in biological phosphorus removal activated sludge[J]. *Wat Res*, 1999, 33 (8): 1871 - 1883.
- [3] Kuba T, Van Loosdrecht M C M, Brandse F A, et al. Occurrence of denitrifying phosphorus removal bacteria in modified UCT-type wastewater treatment plants[J]. *Wat Res*, 1997, 31 (4): 777 - 786.
- [4] Østgaard K, Christensson M, Lie E, et al. Anoxic biological phosphorus removal in a full-scale UCT process[J]. *Wat Res*, 1997, 31 (11): 2719 - 2726.
- [5] 国家环保局. 水和废水监测分析方法(第 4 版)[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [6] Wachtmeister A, Kuba T, Van Loosdrecht M C M, et al. A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removal sludge[J]. *Wat Res*, 1997, 31 (3): 471 - 478.
- [7] Grady C P L, Daigger G T, Lim H C. *Biological Wastewater Treatment*(2nd edition)[M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1998.

电话: (0) 13148722506

E-mail: miao jia0716@126.com

收稿日期: 2005 - 12 - 07