

陈永志, 彭永臻, 王建华, 等. 2010 A²/O 曝气生物滤池工艺处理低 C/N 比生活污水脱氮除磷 [J]. 环境科学学报, 30(10): 1957-1963
Chen Y Z, Peng Y Z, Wang JH, *et al.* 2010. Biological phosphorus and nitrogen removal in low C/N ratio domestic sewage treatment by a A²/O-BAF combined system [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 30(10): 1957-1963

A²/O-曝气生物滤池工艺处理低 C/N 比生活污水脱氮除磷

陈永志, 彭永臻*, 王建华, 张良长

北京工业大学北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100124
收稿日期: 2009-12-20 修回日期: 2010-03-07 录用日期: 2010-05-05

摘要: 以低 C/N 比实际生活污水为研究对象, 重点考查了 A²/O-曝气生物滤池生化系统的脱氮除磷特性. 同时, 考虑到 A²/O 工艺的主要功能是除磷及反硝化, 而曝气生物滤池则以硝化为目的. 因此, 通过缩短 A²/O 的泥龄, 可将硝化过程从 A²/O 中分离出去, 让曝气生物滤池完成硝化, 实现硝化菌和聚磷菌的分离, 并解决了硝化菌和聚磷菌泥龄之间的矛盾. 试验结果表明, 该生化系统可实现有机物、氮和磷的同步去除. 在平均 C/N 比为 4.2, 内回流比 R 为 250% 的条件下, 平均进水 COD、TN、TP 分别为 239.9、57.3 和 5.1 mg L⁻¹, 平均最终出水 COD、TN、TP 分别为 34.1、13.3 和 0.1 mg L⁻¹, 去除率分别为 85.8%、76.9% 和 98.3%. 曝气生物滤池对氨氮几乎保持了 100% 的去除率. 序批试验表明, 反硝化聚磷菌占聚磷菌的比例为 40.5%.

关键词: A²/O-曝气生物滤池工艺; 脱氮除磷; 泥龄; 内循环回流比; 低 C/N 比; 反硝化除磷

文章编号: 0253-2468(2010)10-1957-07 中图分类号: X703.1 文献标识码: A

Biological phosphorus and nitrogen removal in low C/N ratio domestic sewage treatment by a A²/O-BAF combined system

CHEN Yongzhi, PENG Yongzhen*, WANG Jianhua, ZHANG Liangchang

Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environmental Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124

Received 20 December 2009; received in revised form 7 March 2010; accepted 5 May 2010

Abstract The behavior of biological phosphorus (P) and nitrogen (N) removal in a lab scaled anaerobic/anoxic/oxic (A²/O)-biological aerated filter (BAF) combined system were investigated during the treatment of real domestic sewage with low C/N ratio. In order to solve the conflict of sludge retention time (SRT) between nitrifiers and polyphosphate accumulating organisms (PAOs), a short SRT was applied in the A²/O reactor to wash out the nitrifiers. Therefore, in the system, the A²/O reactor was mainly used for P removal and denitrification and the BAF reactor was used for nitrification. The experimental results clearly showed that COD, N and P can be simultaneously removed in this combined system. When the C/N ratio was 4.2 and the internal recycle ratio was 250%, the concentrations of COD, total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) were reduced from 239.9 mg L⁻¹, 57.3 mg L⁻¹ and 5.1 mg L⁻¹ in the raw waste water to 34.1 mg L⁻¹, 13.3 mg L⁻¹ and 0.1 mg L⁻¹ in the effluent respectively. The removal efficiencies of COD, TN and TP reached to 85.8%, 76.9% and 98.3%, respectively. In addition, almost 100% ammonium nitrogen removal efficiency was achieved in the BAF reactor. Batch tests showed that the population of denitrifying phosphate accumulating organisms (DPAOs) was up to 40.5% of the total PAOs.

Keywords the A²/O-BAF combined process; biological phosphorus and nitrogen removal; sludge retention time (SRT); the internal recycle ratio (R); the low C/N ratio; denitrifying phosphorus removal

1 引言 (Introduction)

氮、磷等营养元素的过量排放是引起封闭水

体、湖泊及缓流水域富营养化的重要原因, 因此, 有关氮、磷的排放标准日趋紧缩 (Lee *et al.*, 2009; 彭永臻等, 2009). 目前, 脱氮除磷的主要工艺有 A²/O

基金项目: 国家“十一五”重大科技专项课题 (No. 2008ZX07317-007-105, 2008ZX07209-003); “城市水资源与水环境国家重点实验室”开放基金项目 (No. QAK200802)

Supported by the National Key Science and Technology Special Projects (No. 2008ZX07317-007-105, 2008ZX07209-003) and the State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment (HIT) (No. QAK200802)

作者简介: 陈永志 (1969-), 男, 博士研究生, E-mail: cy@emails.bjut.edu.cn; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: py@bjut.edu.cn

Biography: CHEN Yongzhi (1969-), male Ph.D. candidate, E-mail: cy@emails.bjut.edu.cn; * Corresponding author, E-mail: py@bjut.edu.cn

(厌氧/缺氧/好氧)工艺、Bardenpho(厌氧/好氧/厌氧/好氧)工艺、UCT(厌氧/缺氧/好氧,污泥回流至缺氧段)工艺和 MUCT(厌氧/缺氧/缺氧/好氧)工艺等。在以上连续流工艺中, A^2/O 作为现有最简单的同步脱氮除磷工艺广泛应用于国内外大型污水处理厂 (Metcalf *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2006)。然而, A^2/O 工艺内在固有的缺欠就是硝化菌、反硝化菌和聚磷菌在有机负荷、泥龄以及碳源需求上存在着矛盾和竞争, 很难在同一系统中同时获得氮、磷的高效去除, 因而阻碍了生物脱氮除磷技术的推广应用 (张杰等, 2003)。曝气生物滤池以其模块化设计灵活、占地面积小、硝化效果稳定等优点越来越受到人们的青睐 (Moore *et al.*, 2001; Taira *et al.*, 2003; Jinwoo *et al.*, 2006; Ha *et al.*, 2007), 但曝气生物滤池也存在工作周期短、反冲洗频率高、容易发生堵塞现象等缺点 (李军等, 2008; 李雨霏等, 2009)。另外, 我国城镇污水 C/N 比低, 加上运行过程中硝化菌、反硝化菌和聚磷菌泥龄方面存在的矛盾以及其他诸多因素, 导致 95% 以上的城镇污水处理厂处理后出水不能达到国家一级 A 标准。针对这样的问题, A^2/O 曝气生物滤池生化系统结合二者优点, 通过缩短 A^2/O 工艺的泥龄, 将硝化过程从 A^2/O 工艺中分离出去, 用曝气生物滤池实现硝化, 使 A^2/O

工艺在短泥龄条件下运行, 不要求其有硝化功能, 主要发挥其除磷和反硝化效果好的优点; 而曝气生物滤池在长泥龄条件下运行, 有利于硝化菌的生长, 并不影响 A^2/O 的除磷效果。同时, 该工艺前置反硝化构造可为反硝化聚磷菌提供适宜的生存环境, 最大限度地解决低 C/N 比生活污水碳源缺乏的难题 (Kuba *et al.*, 1996; Barker *et al.*, 1996; Hu *et al.*, 2003), 而且该工艺流程较简单, 总的水力停留时间不长, 是一种很有发展前途的同步脱氮除磷工艺。

基于此, 本文以低 C/N 比实际生活污水为研究对象, 重点考查 A^2/O -曝气生物滤池工艺的脱氮除磷特性。同时, 通过缩短 A^2/O 工艺的泥龄, 实现磷的高效去除; 并通过增大内回流比, 强化系统的反硝化除磷效果, 以实现同步脱氮除磷, 最终为该工艺在实际污水厂的推广应用奠定理论基础。

2 试验材料与方法 (Materials and methods)

2.1 试验装置及运行程序

A^2/O -曝气生物滤池生化系统由 A^2/O 反应器、二沉池、曝气生物滤池 (BAF) 反应器顺序连接组成, 试验装置如图 1 所示。

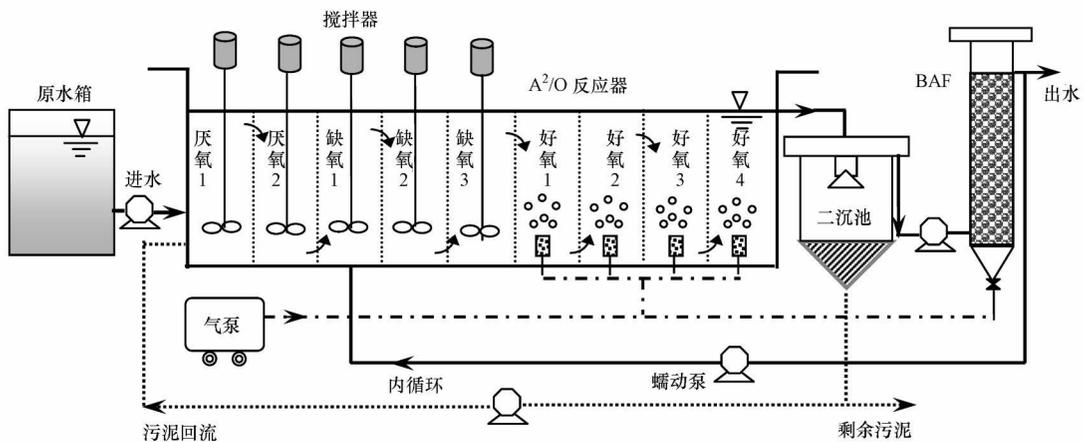


图 1 A^2/O -曝气生物滤池生化系统

Fig. 1 Schematic diagram of the A^2/O -BAF biological system

原水箱由聚氯乙烯塑料制作而成, 容积为 240 L。合建推流式 A^2/O 反应器由无色有机玻璃构成, 有效容积为 30L, 均分为 9 个格室, 前 2 个格室为厌氧段, 随后的 3 个格室为缺氧段, 剩余的 4 个格室为好氧段。厌氧段和缺氧段采用搅拌器搅拌, 好氧段各格室的底端以黏砂块为微孔曝气器, 采用鼓风机曝

气, 转子流量计调节曝气量。二沉池采用竖流式, 体积为 20L。曝气生物滤池采用上向流, 装填 2~3mm 粒径的轻质陶粒填料, 底部设有承托层, 用黏砂块作曝气装置并鼓风机曝气, 转子流量计控制曝气量。曝气生物滤池为圆柱形, 内径 D 为 100mm, 填料层高度 H 为 1.67m, 有效容积为 13L, 空隙率 r 为

20%。系统进水量、污泥回流量、内循环回流量、曝气生物滤池进水量均由蠕动泵控制。

生活污水从原水箱首先进入 A²/O 的厌氧段,同时进入该段的还有从二沉池过来的回流污泥,进行厌氧反应;之后混合液进入缺氧段,同步进入该段的还有从曝气生物滤池通过内循环回流来的硝化液,实现脱氮及反硝化除磷;随后进入好氧段,进行剩余磷的吸收和吹脱氨气;经过二沉池的澄清作用,含有氨氮的上清液进入曝气生物滤池,完成硝化反应,出水的一部分回流到 A²/O 的缺氧段,另一

部分排放。

2.2 A²/O 反应器与试验用水

A²/O 内接种污泥为取自北京高碑店污水处理厂的回流污泥。加入种泥后,原生活污水采用连续进水的方式运行,1周后开始排泥,同时将曝气生物滤池的出水通过内循环回流到 A²/O 的缺氧段,以后逐渐增大进水量直至设计水量,经过 1 个多月时间的驯化,逐步培养成具有稳定脱氮除磷性能的活性污泥。试验采用北京工业大学教工住宅小区化粪池生活污水,试验期间的原水水质特点见表 1。

表 1 原水水质特点

Table 1 The influent characteristics

数据类型	T/°C	pH	COD /(mg L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N /(mg L ⁻¹)	NO ₂ ⁻ -N /(mg L ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N /(mg L ⁻¹)	TN /(mg L ⁻¹)	C/N	TP /(mg L ⁻¹)
范围	21~27	7.3~7.6	188.0~311.4	42.5~59.8	0~0.22	0~0.94	46.7~64.5	3.1~5.9	4.2~7.0
均值	24	7.4	239.9	52.6	0.004	0.01	57.3	4.2	5.1

2.3 曝气生物滤池反应器

曝气生物滤池以间歇方式启动挂膜,每天将活性污泥和生活污水的混合液注入滤池后闷曝气 24 h,次日排空后重新注入种泥和生活污水,如此循环 1 周后,采用 A²/O 出水作为曝气生物滤池进水。连续运行 20d 后,氨氮去除率达到 80%,1 个月之后氨氮去除率几乎达到 100%。图 2 为曝气生物滤池内

陶粒填料挂膜前所拍摄的电镜扫描照片 (SEM, HITACHI S-4300 日本日立)以及运行稳定后的挂膜照片。从图 2b 可以看出,硝化菌以球菌为主,附着生长在填料表面。微生物电镜扫描挂膜照片和运行结果表明,曝气生物滤池挂膜良好,对氨氮有彻底、高效的去除效果。

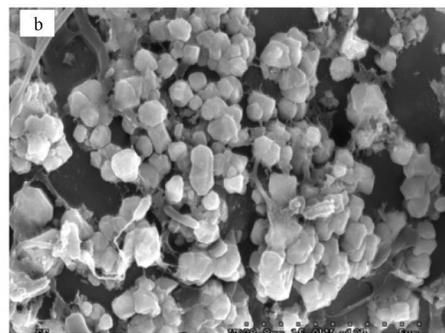
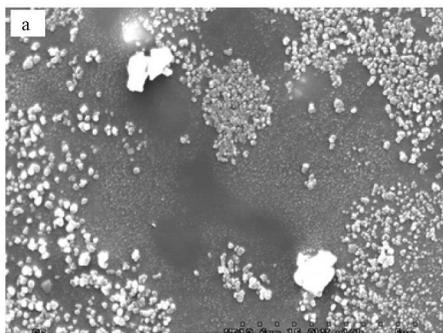


图 2 曝气生物滤池内陶粒填料表面挂膜前后电镜扫描照片 (a 挂膜前填料表面, b 挂膜后填料表面)

Fig. 2 SEM images of ceramic media in the BAF (a Before biofilm, b After biofilm)

2.4 分析项目及方法

NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TN、TP、COD、混合液污泥浓度 (MLSS) 按照标准方法测定 (APHA, 2005); pH、DO 和温度采用 WTW 340i 测定仪 (德国) 在线测定。

2.5 试验条件与运行环境

A²/O 曝气生物滤池生化系统在室温 (25~30°C) 条件下运行。A²/O 的进水流量为 126 L·d⁻¹,

水力停留时间 (HRT) 为 5.7 h, 污泥回流比 100%, MLSS 为 3.0 g L⁻¹ 左右, 好氧段 DO 维持在 1~2 mg L⁻¹, 厌氧、缺氧段 DO 为 0.1 mg L⁻¹。曝气生物滤池的 HRT 为 0.5 h, DO 维持在 4~5 mg L⁻¹。

2.6 试验运行方案

在 A²/O 曝气生物滤池生化系统中, 聚磷菌和反硝化菌等异养菌泥龄短, 硝化菌等自养菌泥龄长。A²/O 工艺在短泥龄条件下运行, 通过快速排放

含磷量高的剩余污泥,实现磷的高效去除.曝气生物滤池在长泥龄条件下运行,而且污水中绝大部分可降解有机物已在 A^2/O 工艺中得到有效去除,有利于自养型硝化菌的生长及氨氮的高效去除.通过增大内回流比,提高进入缺氧段的硝酸盐氮负荷,可以充分利用反硝化聚磷菌的反硝化除磷潜力,有利于同步脱氮除磷.基于以上观点,试验过程中通过快速排泥将 A^2/O 工艺的泥龄缩短为10 d.试验开始后的第1~21 d内回流比 R 为200%;第25~45 d内回流比 R 为250%;第49~65 d内回流比 R 增大为300%.

2.7 A^2/O 曝气生物滤池系统中缺氧段反硝化除磷量的计算

根据物料平衡,缺氧段除磷量的计算公式如下:

$$\Delta C_{ano} = \frac{C_{eff} \times Q_R + C_{ana} (Q_{in} + Q_{sh})}{Q_{in} + Q_R + Q_{sh}} - C_{ano}$$

式中, ΔC_{ano} 为缺氧段除磷量($mg \cdot L^{-1}$); C_{eff} 为最终出水TP浓度($mg \cdot L^{-1}$); Q_{in} 、 Q_R 和 Q_{sh} 分别为进水流量、内回流量和污泥回流量($L \cdot d^{-1}$); C_{ana} 和 C_{ano} 分别为厌氧段末端和缺氧段末端TP浓度($mg \cdot L^{-1}$).

2.8 反硝化聚磷菌占聚磷菌比例的序批试验

在试验稳定运行期间,根据Wachmeister等(1997)推荐的方法,计算反硝化聚磷菌占总聚磷菌中的比例.具体方法是:从 A^2/O 好氧段取活性污泥2L,离心分离后用蒸馏水清洗2遍,除去COD;然后用蒸馏水定容至2L,采用乙酸钠为碳源,使COD为 $100 mg \cdot L^{-1}$ 左右,厌氧反应120 min反应结束后,离心分离,再将活性污泥清洗2遍,除去剩余COD.然后将其等分为2份,1份好氧曝气,使DO维持在 $2 \sim 3 mg \cdot L^{-1}$;另1份加入 KNO_3 溶液,使初始 NO_3^- 浓度为 $50 mg \cdot L^{-1}$ 左右,缺氧搅拌,反应时间均为120 min.缺氧最大除磷速率与好氧最大除磷速率的比值即为反硝化聚磷菌和聚磷菌的比例.

3 试验结果 (Experimental results)

3.1 A^2/O 曝气生物滤池生化系统对有机物的去除特性

试验期间系统内COD的变化规律如图3所示.由图3可知,进水COD在 $188.0 \sim 311.4 mg \cdot L^{-1}$ 之间波动,平均进水COD为 $239.9 mg \cdot L^{-1}$,平均最终出水COD为 $34.1 mg \cdot L^{-1}$,COD去除率为85.8%,实现了有机物的高效去除.系统内COD的去除由 A^2/O 和曝气生物滤池共同完成,两者的贡献率分别

为84.5%和1.3%.其中,COD在 A^2/O 中的去除由3部分组成,一部分在厌氧段被聚磷菌存储于胞内合成聚- β -羟基链烷酸脂(PHAs)同时释磷,另一部分作为缺氧段反硝化脱氮所需碳源,最后一部分用于维持好氧异养菌生长.计算得出,厌氧段、缺氧段和好氧段对COD去除的贡献率大小分别为73.0%、9.0%和2.5%.

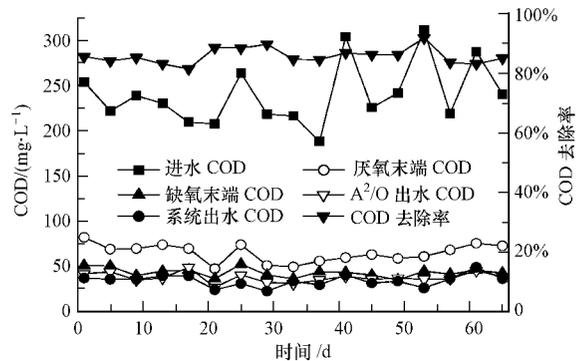


图3 系统对COD的去除规律

Fig. 3 Evolution of COD removal in the A^2/O -BAF system

3.2 氮在 A^2/O 曝气生物滤池生化系统中的转化规律

氮在系统中的迁移转化规律如图4所示.由图4a可知,在整个试验过程中,生化系统维持了稳定的氨氮去除率,系统平均进水氨氮浓度为 $52.6 mg \cdot L^{-1}$,平均最终出水氨氮浓度仅为 $0.2 mg \cdot L^{-1}$,氨氮去除率为99.6%,系统对氨氮具有彻底的去除效果;系统对TN的去除分为3个阶段,第1阶段(1~21 d)内回流比为200%,平均最终出水TN浓度为 $17.3 mg \cdot L^{-1}$,TN去除率为69.7%,出水TN不能满足国家一级A排放标准;第2阶段(25~45 d)增大内回流比为250%,平均最终出水TN浓度下降到 $13.3 mg \cdot L^{-1}$,TN去除率达到76.9%,比第1阶段的去除率比提高了7.2%,能耗相应增加了25%,出水TN浓度能够满足国家一级A排放标准;第3阶段(49~65 d)继续增大内回流比为300%,平均最终出水TN浓度为 $12.9 mg \cdot L^{-1}$,TN去除率为77.5%,去除率比第2阶段仅提高了0.6%,而能耗却增加了20%,因此,采用内回流比为250%的条件更具有实际意义.

对于前置反硝化脱氮系统,决定脱氮效果的主要因素有两个,一个是进入缺氧段的可利用有机碳源的量,包括外碳源和内碳源聚羟基链烷酸酯(PHAs),另一个是缺氧段提供的硝酸盐氮浓度.在

内回流比较低时(如 200% 和 250%),原生活污水中可利用的有机碳源经过厌氧段聚磷菌利用之后,还有部分剩余,反硝化菌在碳源充足的条件下,能以这部分有机碳源为电子供体,以硝酸盐氮为电子受体,进行反硝化脱氮,表现为 TN 去除率有一个明显的上升.当内回流比升高到 300% 时,尽管回流到 A²/O 缺氧段的硝酸盐氮负荷增大,但缺氧段可利用的有机碳源有限,故反硝化不彻底,表现为 TN 去除率比内回流比为 250% 时仅提高 0.6%. 吴昌永等(2008)研究指出,当缺氧段用于异养反硝化的有机碳源不足时,反硝化主要靠内碳源 PHA_s. 由于内源反硝化的效率较低,速率较慢,因此,脱氮效率不可能很高. 王亚宜等(2008)研究发现,低 C/N 比污水要同步获得良好的脱氮和除磷效果较为困难.

图 4b 是 TN、氨氮和硝酸盐氮浓度在 A²/O 曝气生物滤池生化系统内的沿程变化规律(数据均为平均值). 由图 4b 可知,原水中的氨氮经厌氧段和缺氧段后有所下降,这部分氨氮的下降除了很小一部分用于微生物的同化作用外,大部分由稀释作用引起(厌氧段污泥回流(稀释比为 100%)和缺氧段内循环回流,1~21 d 稀释比为 200%; 25~45 d 稀释比为 250%; 49~65 d 稀释比 300%). 经曝气生物滤池的硝化作用,氨氮转化为硝酸盐氮,表现为氨氮浓度大幅度下降(接近 0 mg L⁻¹),而硝酸盐氮浓度急剧增大,平均硝酸盐氮浓度上升至 14.0

mg L⁻¹,硝化效率接近 100%;但此时仅是氮形态上的转化,只有将硝酸盐氮回流到缺氧段,通过反硝化作用,氮以氮气的形态被吹脱出系统, TN 浓度才能减少,实现真正意义上的脱氮作用. 但从图 4b 可以发现,由于进水 C/N 比值较低,反硝化可利用有机碳源不足,缺氧段硝酸盐氮并没有被反硝化完全,剩余硝酸盐氮还维持在 3.0 mg L⁻¹左右. 氨氮在好氧段也有小幅度的降低,主要被好氧异养菌用于同化作用.

3.3 磷在 A²/O 曝气生物滤池生化系统内的转化规律

磷在系统内的沿程变化规律如图 5 所示. 由图 5 可知,3 种内回流比条件下进水 TP 浓度分别为 4.6、5.2 和 5.7 mg L⁻¹,厌氧释磷后 TP 浓度升高至 21.6、35.6 和 35.1 mg L⁻¹,缺氧段 TP 浓度下降至 5.6、2.3 和 1.4 mg L⁻¹,说明系统存在反硝化除磷现象,经过好氧段除磷,平均最终出水 TP 浓度分别为 0.2、0.1 和 0.2 mg L⁻¹.

根据物料平衡,计算得出 3 种内回流比时反硝化除磷量分别为 5.2、15.2 和 16.2 mg L⁻¹,即随着内回流比的增大,反硝化除磷量呈增大趋势. Hu 等(2002)研究发现,在反硝化除磷过程中,反硝化异养菌和反硝化聚磷菌会争夺有限的电子受体硝酸盐氮,反硝化异养菌的反硝化速率是反硝化聚磷菌的 3 倍,如果进入缺氧段的硝酸盐氮负荷低于反硝化异养菌的反硝化潜力,那么反硝化异养菌将淘汰反硝化聚磷菌而独自利用有限的硝酸盐氮;反之,反硝化聚磷菌将有机会利用过剩的硝酸盐氮在系统中稳定存在.

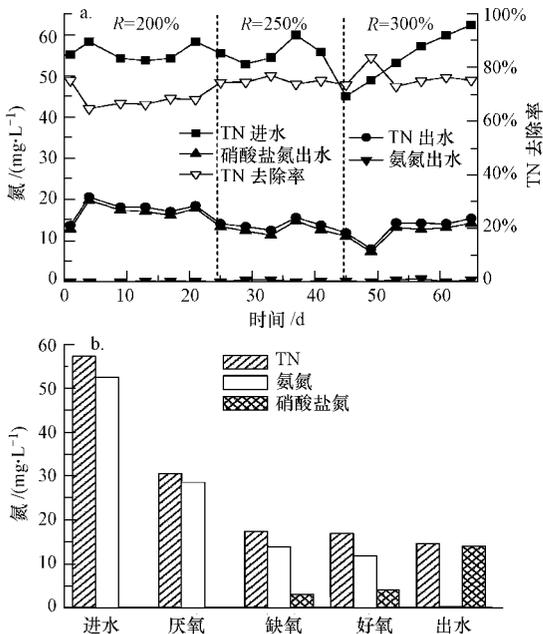


图 4 氮在系统中的转化规律

Fig 4 Evolution of nitrogen removal in the A²/O-BAF system

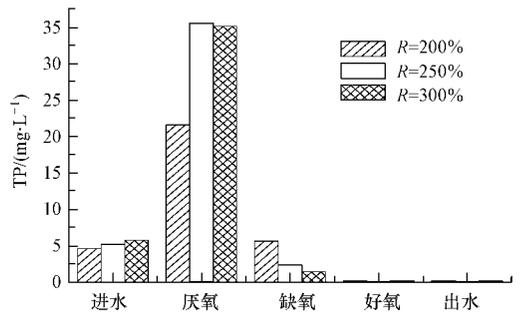


图 5 TP 的沿程变化规律

Fig 5 Evolution of TP removal in the A²/O-BAF

生化系统独特的运行方式有利于磷的高效去除,主要原因有 3 个: ①硝化菌和聚磷菌的分离使 A²/O 工艺在短泥龄条件下运行,通过快速排泥实

现磷的高效去除;②在理想状态下,由于 A^2/O 工艺不承担硝化功能,回流污泥中不含有硝酸盐氮,厌氧段成为真正意义上的厌氧环境,为聚磷菌充分释磷及合成内碳源 PHAs 提供了最佳的外界环境;③曝气生物滤池在长泥龄条件下运行,有利于硝化效果的稳定和氨氮的彻底去除,同时为缺氧段提供了充足的硝酸盐氮,为反硝化除磷提供了必要条件。

低 C/N 比的水质特点也为反硝化除磷提供了条件.在低 C/N 比情况下,70% 以上的 COD 在厌氧段被利用,其中,大部分被聚磷菌吸收并合成内碳源 PHAs 进入缺氧段,反硝化异养菌可利用的有机碳源有限,这样就会刺激反硝化聚磷菌利用内碳源 PHAs 进行反硝化,同时过量吸磷,实现了“一碳两用”。

3.4 反硝化聚磷菌占聚磷菌比例的序批试验结果

聚磷菌厌氧释磷、好氧/缺氧吸磷规律如图 6 所示,计算得出反硝化聚磷菌 (DPAOs) 占聚磷菌 (PAOs) 的比例为 40.5%,进一步证实了系统中存在反硝化除磷现象。

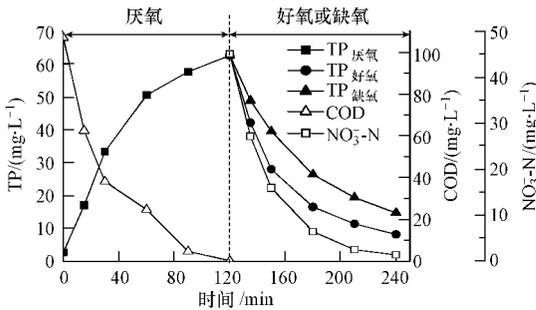


图 6 厌氧释磷和缺氧-好氧吸磷序批试验结果

Fig 6 Phosphorus release and uptake under anaerobic-anoxic/oxic conditions

4 结论 (Conclusions)

1) A^2/O 曝气生物滤池生化反应系统在泥龄为 10 d 的条件下,可把硝化过程从 A^2/O 工艺中分离出去,让曝气生物滤池实现硝化, A^2/O 在短泥龄条件下运行,有利于除磷及反硝化脱氮;曝气生物滤池在长泥龄条件下运行,不但不影响系统的脱氮和除磷效果,反而有利于硝化效果的稳定和氨氮的高效去除,同时还为缺氧段提供充足的电子受体硝酸盐氮,为反硝化除磷提供了条件。

2) 内回流比 R 为 200%、250% 和 300% 时, TN 去除率分别为 69.7%、76.9% 和 77.5%。其中, $R = 250%$ 时的 TN 去除率比 $R = 200%$ 时提高了 7.2%。

能耗相应增加了 25%; $R = 300%$ 时的 TN 去除率比 $R = 250%$ 时仅提高了 0.6%,而能耗却增加了 20%,因此,采用内回流比为 250% 的条件更具有实际意义。

3) 在 C/N 比为 4.2 内回流比为 250%、平均进水 COD 为 $239.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、TN 为 $57.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、TP 为 $5.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下,平均最终出水 COD 为 $34.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、TN 为 $13.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、TP 为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,去除率分别为 85.8%、76.9% 和 98.3%,曝气生物滤池对氨氮几乎保持了 100% 的去除率.系统实现了 COD、TN、TP 和氨氮的同步去除,以上指标均达到我国城镇污水厂排放标准规定的一级 A 标准 (GB18918-2002)。

4) COD 的去除由 A^2/O 和曝气生物滤池共同完成,两者的平均贡献率分别为 84.5% 和 1.3%。

5) 系统内存在反硝化除磷现象,反硝化聚磷菌 (DPAOs) 占聚磷菌 (PAOs) 的比例为 40.5%。

6) 随着内回流比的增大,反硝化除磷量呈增大趋势,但好氧段仍然承担部分除磷功能。

责任作者简介: 彭永臻 (1949—), 男, 工学博士, 教授, 主要从事污水处理与过程控制、脱氮除磷等研究. E-mail: pyz@bjut.edu.cn

参考文献 (References):

- APHA. 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (21st edition) [M]. Washington DC: American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation (2): 55-58; (4): 108-133; (5): 14-18
- Barker P S, Dold P L. 1996 Denitrification behaviour in biological excess phosphorus removal activated sludge system [J]. Water Res 30(4): 769-780
- Ha J H, Ong S K. 2007. Nitrification and denitrification in partially aerated biological aerated filter (BAF) with dual size and media [J]. Wat Sci Tech 55(1-2): 9-17
- Hu J Y, Ong S L, Ng W J et al. 2003. A new method for characterizing denitrifying phosphorus removal bacteria by using three different types of electron acceptors [J]. Wat Res 37: 3463-3741
- Hu Z R, Wentzel M C, Ekama G A. 2002. Anaerobic growth of phosphate-accumulating organism (PAOs) in biological nutrient removal activated sludge system [J]. Wat Res 36: 4927-4937
- Jinwo J, Taina H, Hiroshi T, et al. 2006. Development of biological filter as tertiary treatment for effective nitrogen removal. Biological filter for tertiary treatment [J]. Wat Res 40: 1127-1136
- Kuba T, Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. 1996. Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of

- denitrifying dephosphatation and nitrification in a two-sludge system [J]. *Wat Res* 30(7): 1702—1710
- Lee H, Han J Yun Z. 2009 Biological and phosphorus removal in UCT-type MBR process [J]. *Wat Sci Tech*, 59(11): 2093—2099
- 李军, 刘伟岩, 杨晓冬, 等. 2008 曝气生物滤池应用和研究中的几个关键问题 [J]. *中国给水排水*, 24(14): 10—14
- Li J, Liu W Y, Yang X D, *et al*. 2008. Key problems in application and research of BAF [J]. *China Water & Wastewater* 24(14): 10—14 (in Chinese)
- 李雨霏, 韩洪军, 张凌瀚. 2009 前置反硝化曝气生物滤池调试中出现的问题及解决措施 [J]. *中国给水排水*, 25(12): 92—95
- Li Y F, Han H J, Zhang L H. 2009. Problems and solutions in commissioning of pre-denitrification biological aerated filter [J]. *China Water & Wastewater*, 25(12): 92—95 (in Chinese)
- Metcalf & Eddy, Inc. 2003. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse* (4th edition) [M]. New York, McGraw-Hill 799—800
- Moore R, Quamby J, Stephenson T. 2001 The effects of media size on the performance of biological aerated filters [J]. *Wat Res* 35 (10): 2514—2522
- 彭永臻, 马斌. 2009. 低 C/N 比条件下高效生物脱氮策略分析 [J]. *环境科学学报*, 29(2): 225—230
- Peng Y Z, Ma B. 2009. Review of biological nitrogen removal enhancement technologies and processes under low C/N ratio [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 29(2): 225—230 (in Chinese)
- Taira H, Hiroshi T, Naoyuki K. 2003 Advanced treatment of sewage by pre-coagulation and biological filtration process [J]. *Wat Res* 37: 4259—4269
- Wachmeister A, Kuba T, Van loosdrecht M C M, *et al*. 1997. A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removal sludge [J]. *Wat Res* 31(3): 471—478
- Wang X L, Peng Y Z, Wang S Y, *et al*. 2006 Influence of wastewater composition on nitrogen and phosphorus removal and process control in A²/O process [J]. *Bioprocess Biosyst Eng* 28: 397—404
- 王亚宜, 彭永臻, 殷芳芳, 等. 2008. 双污泥 SBR 工艺反硝化除磷脱氮特性及影响因素 [J]. *环境科学*, 29(6): 1526—1532
- Wang Y Y, Peng Y Z, Yin F F, *et al*. 2008. Characteristics and affecting factors of denitrifying phosphorus removal in two-sludge sequencing batch reactor [J]. *Environmental Science*, 29(6): 1526—1532 (in Chinese)
- 吴昌永, 彭永臻, 彭轶. 2008. A²/O 工艺处理低 C/N 比生活污水的试验研究 [J]. *化工学报*, 59(12): 3126—3131
- Wu C Y, Peng Y Z, Peng Y. 2008. Biological nutrient removal in A²/O process when treating low C/N ratio domestic wastewater [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering* 59(12): 3126—3131 (in Chinese)
- 张杰, 臧景红, 杨宏, 等. 2003. A²/O 工艺的固有缺欠和对策研究 [J]. *给水排水*, 29(3): 22—26
- Zhang J, Zang J H, Yang H, *et al*. 2003. A study on the inherent shortcomings and countermeasures of the A²/O process [J]. *Water & Wastewater Engineering* 29(3): 22—26 (in Chinese)