内循环对 A^2/O-曝气生物滤池工艺脱氮除磷特性影响

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试验室，北京 100124）

摘要：在原水温度为 15℃和 C/N 为 4.9 的条件下，以实际生活污水为研究对象，重点考察了内回流比为 100%、200%、300%和 400%时小试规模 A^2/O-曝气生物滤池工艺脱氮除磷特性. 结果表明，该生化系统可实现有机物、氮和磷的同步深度去除. 在总 HRT 为 8.0 h、SRT 为 15 d、污泥回流比为 100%和 MLSS 为 4.0 g·L^{-1}的条件下，平均出水 COD、TP 和 NH_4^+-N 浓度分别小于 50.0、0.5 和 1.0 mg·L^{-1}；在平均进水 TN 浓度分别为 70.9、72.1、70.6 和 73.3 mg·L^{-1}的条件下，平均出水 TN 浓度分别为 24.8、16.5、9.6 和 8.7 mg·L^{-1}，TN 去除率分别为 65.0%、77.1%、86.4%和 88.1%. 内回流比与 COD、TP 和 NH_4^+-N 的去除没有明显相关性，而 TN 去除率随内回流比的增大呈升高趋势，但升高幅度呈递减规律. 缺氧反硝化能力和反硝化吸磷量亦随内回流比的增大而增大. 序批试验表明，反硝化聚磷菌占总聚磷菌的 40.5%.

关键词：A^2/O-曝气生物滤池工艺；内回流比；深度脱氮除磷；反硝化除磷；去除率；低 C/N
中图分类号：X703.1　**文献标识码**：A　**文章编号**：0250-3301(2011)01-0193-06

Effect of Internal Recycle Ratio on Nitrogen and Phosphorus Removal Characteristics in A^2/O-BAF Process

CHEN Yong-zhi, PENG Yong-zhen, WANG Jian-hua, ZHANG Liang-chang
(Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environmental Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The behaviors of biological phosphorus (P) and nitrogen (N) removal in a lab-scaled anaerobic/anoxic/oxic-biological aerated filter (A^2/O-BAF) combined system were investigated during the treatment of real domestic wastewater with the temperature at 15℃, the C/N ratio of 4.9 and internal recycle ratio of 100%, 200%, 300% and 400%. Experimental results clearly showed that COD, N and P can be simultaneously deeply removed in this combined system. When the total HRT was 8.0 h, SRT was 15 d, sludge recycle ratio was 100% and MLSS was 4.0 mg·L^{-1}, the concentrations of COD, total phosphorus (TP) and ammonia nitrogen could be reached to less than 50.0, 0.5 and 1.0 mg·L^{-1} in the effluent, respectively. The concentrations of total nitrogen (TN) could be reduced from 70.9, 72.1, 70.6 and 73.3 mg·L^{-1} in the raw wastewater to that of 24.8, 16.5, 9.6 and 8.7 mg·L^{-1} in the effluent, respectively. The removal efficiencies of TN were 65.0%, 77.1%, 86.4% and 88.1%, respectively. There was no distinct relationship between the internal recycle ratio and the removal efficiencies of COD, TP and ammonia nitrogen. However, the removal efficiencies of TN increased with the increasing of the internal recycle ratio, the rising rate was descending. Both the capacity of denitrifying and phosphorus removal in anoxic zone increased simultaneously with the increasing of the internal recycle ratio. Batch tests indicated that the population of denitrifying polyphosphate-accumulating organisms (DPAOs) was up to 40.5% of the total phosphate-accumulating organisms (PAOs).

Key words: A^2/O-BAF combined system; internal recycle ratio; deeply biological nitrogen and phosphorus removal; denitrifying phosphorus removal; removal efficiency; low C/N

氮磷等营养元素过量排放所导致的“富营养化”已经给人们的正常生产生活构成严重威胁[1,2]. 生物法脱除氮磷因具有独特的经济优势而被广泛采用[3~5]. A^2/O 作为最简单、最常用的同步生物脱氮除磷工艺被广泛应用于国内外大型污水处理厂[6,7]. 然而，A^2/O 存在硝化菌泥龄长与聚磷菌和反硝化菌泥龄短、聚磷菌和反硝化菌基质竞争以及回流污泥中硝酸盐抑制厌氧释磷等问题，阻碍着生物脱氮除磷技术的应用和氮磷的高效去除[8]. 曝气生物滤池以其灵活的模块化设计、占地面积小、硝化效果稳定等优点越来越受到人们的青睐[9~12]. 但曝气生物滤池存在工作周期短、反冲洗频率高、容易发生堵塞问题[13,14]. 我国城镇污水存在 C/N 低[15,16]，加上工艺本身存在的上述问题，导致 95%以上的城镇污水处理厂处理水不能达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)的一级 A 排放标准.

收稿日期：2010-01-15；修订日期：2010-03-26
基金项目：国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07317-007-05，2008ZX07209-003)；“城市水资源与水环境国家重点实验室”开放基金项目(QAK200802)
作者简介：陈永志(1969～)，男，博士研究生，主要研究方向为污水生物处理新理论与新技术，E-mail：cyz@emails.bjut.edu.cn
* 通讯联系人，E-mail：pyz@bjut.edu.cn

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

A^2/O-曝气生物滤池工艺集 A^2/O 和曝气生物滤池优势于一体，成功解决了传统 A^2/O 中的固有矛盾. 通过缩短 A^2/O 的泥龄，把泥龄长的硝化菌从 A^2/O 中分离出去，泥龄短的聚磷菌和反硝化菌呈悬浮状态生长于 A^2/O 中，泥龄长的硝化菌以生物膜状固着生长在曝气生物滤池填料上；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，不但不影响系统除磷功能，反而更有利于硝化反应的彻底进行，还可为 A^2/O 的缺氧段提供充足的电子受体，保证反硝化反应的处理效果. 同时，由于 A^2/O 内不发生硝化反应，在理想状态下，回流污泥中不含有硝态氮，为聚磷菌厌氧释磷创造了有利环境. 本工艺前置反硝化构造为反硝化聚磷菌提供了适宜的生存环境，最大限度地缓解了低 C/N 生活污水碳源缺乏的难题[17~22]，为实现有机物和氮磷的同步、深度去除创造了条件，而且该工艺流程简单，总的水力停留时间不长，是一种很有发展前途的深度脱氮除磷工艺.

1 材料与方法

1.1 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、曝气生物滤池反应器顺序连接组成，系统试验装置如图 1 所示.

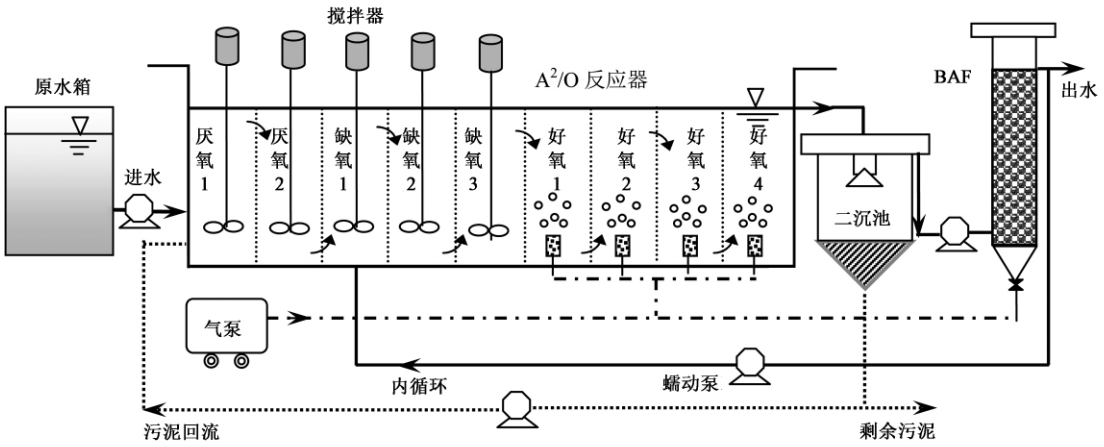


图 1 A^2/O-曝气生物滤池生化系统

Fig. 1 Schematic diagram of 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 30 L，均分为 9 个格室，依次为厌氧、缺氧、好氧段，体积比 2∶3∶4，厌氧、缺氧段安装搅拌器并轻缓搅拌，好氧段以黏砂块为微孔曝气器，采用鼓风曝气，转子流量计调节曝气量. 二沉池采用竖流式，体积为 20 L. 曝气生物滤池采用上向流，装填2 ~ 3 mm 粒径的轻质陶粒填料，底部设有卵石承托层，用黏砂块作曝气装置并鼓风曝气，转子流量计控制曝气量. 曝气生物滤池规格为 $\phi = 100$ mm，填料层高度 $H = 1.6$ m，有效容积为 13 L. 系统进水流量、污泥回流量、内循环回流量、曝气生物滤池进水流量均由蠕动泵控制.

生活污水从原水箱通过蠕动泵进入 A^2/O 反应器的厌氧段，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，进行反硝化脱氮除磷，然后在好氧段完成剩余磷的吸收和部分 COD 的降解；经过二沉池的澄清作用，含有 NH_4^+-N 的上清液进入曝气生物滤池，完成硝化反应，出水一部分回流到 A^2/O 的缺氧段，另一部分排放.

1.2 接种污泥与试验用水

A^2/O 中接种污泥取自北京高碑店污水处理厂的回流污泥. 经过 50 d 的驯化，系统达到稳定. 试验采用北京工业大学教工住宅小区化粪池生活污水，试验期间的进水水质特点见表 1.

表 1 试验期间的进水水质特点

Table 1 The influent characteristics

项目	范围	均值
t /℃	14 ~ 16	15
pH	7.3 ~ 7.6	7.4
COD/mg·L^{-1}	211 ~ 466	343
NH_4^+-N/mg·L^{-1}	65.5 ~ 71.3	67.9
NO_2^--N/mg·L^{-1}	0 ~ 0.22	0.004
NO_3^--N/mg·L^{-1}	0 ~ 0.94	0.01
TN/mg·L^{-1}	66.8 ~ 74.1	70.4
C/N	3.0 ~ 6.7	4.9
TP/mg·L^{-1}	4.1 ~ 13.0	5.8

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.3　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柱后曝气 24 h,第 2 d 排空后重新注入活性污泥和生活污水,如此循环 1 周后,采用 A^2/O 出水作为曝气生物滤池进水,2 个月后NH_4^+-N去除率几乎达到 100%. 图 2(a)为曝气生物滤池内陶粒填料挂膜前所拍摄的电镜扫描(scanning electron microscope,SEM,HITACHI S-4300,日本日立)照片,图 2(b)为运行稳定后陶粒填料的挂膜照片. 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试验结果表明,曝气生物滤池挂膜良好,对 NH_4^+-N 有彻底、高效的去除效果.

1.4　分析项目及方法

COD、NH_4^+-N、NO_2^--N、NO_3^--N、TN、TP、MLSS 按照标准方法测定[23],pH、DO 和温度 t 采用 WTW340i 测定仪(德国)在线测定.

1.5　试验条件与运行环境

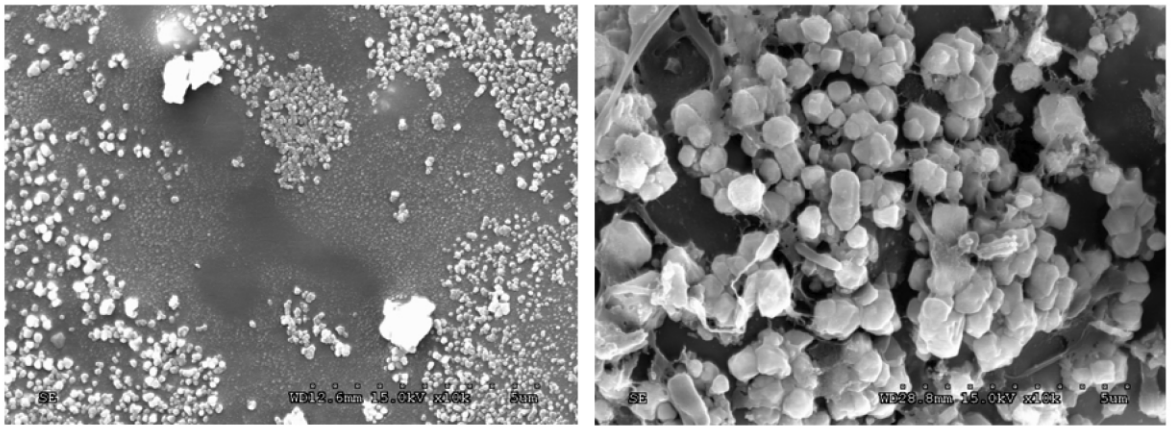
A^2/O-曝气生物滤池生化系统在室温(15 ~ 18℃)条件下运行. A^2/O 进水流量为 96 $L\cdot d^{-1}$,HRT 为 7.5 h(其中厌氧段 1.7 h,缺氧段 2.5 h,好氧段 3.3 h),SRT 控制在 15 d,MLSS 为 4.0 $g\cdot L^{-1}$,厌氧、缺氧段 DO 为 0.1 $mg\cdot L^{-1}$,好氧段 DO 维持在 1 ~ 2 $mg\cdot L^{-1}$;厌氧段氧化还原电位为 -330 ~ -350 mV,缺氧段为 -150 ~ -200 mV,好氧段为 20 ~ 25 mV. 曝气生物滤池 DO 维持在4 ~ 5 $mg\cdot L^{-1}$,HRT 为 0.5 h.

1.6　试验运行方案

增大内回流比 R 从 100% 增大至 400%,每种内回流比条件运行 1 个 SRT,中间稳定 0.5 个 SRT 后,再进行下一个回流比的测定.

1.7　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 Wachtmeister 等[24]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 2 L,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 2 L,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. 然后将之等分为 2 份,1 份好氧曝气,使 DO 维持在 2 ~ 3 $mg\cdot L^{-1}$,另 1 份加入 KNO_3 溶液,使初始 NO_3^--N浓度为 50 $mg\cdot L^{-1}$左右,缺氧搅拌,反应时间均为 120 min. 缺氧最大吸磷速率和好氧最大吸磷速率的比值即为反硝化聚磷菌和聚磷菌的比例.



(a) 挂膜前填料表面 (×10 000)　　(b) 挂膜后填料表面 (×10 000)

图 2　曝气生物滤池内陶粒填料挂膜前后电镜扫描照片

Fig. 2　SEM images of ceramsite media in BAF

2　结果与讨论

2.1　不同内回流比工况下 A^2/O-曝气生物滤池生化系统脱氮除磷规律

不同内回流比工况下各污染物去除效果见表 2. 可以看出,COD、TP 和NH_4^+-N的去除率与内回流比之间没有明显的相关性,在 4 种内回流比条件下,出水 COD、TP 和NH_4^+-N平均质量浓度分别小于 50、0.5 和 1.0 $mg\cdot L^{-1}$,均达到一级标准中 A 标准;在平均进水 TN 浓度分别为 70.9、72.1、70.6 和 73.3 $mg\cdot L^{-1}$的条件下,出水 TN 分别为 24.8、16.5、9.6 和 8.7 $mg\cdot L^{-1}$,TN 去除率分别为 65.0%、77.1%、86.4% 和 88.1%,即随着内回流比的增大 TN 去除率呈增大趋势,但增大幅度呈递减规律. 当内回流比为 200% 时,出水 TN 满足一级排放标准中 B 标准,内回流比为 300% 和 400% 时,出水 TN 均满足一级排放标准中 A 标准.

2.2　不同内回流比条件下 COD 在 A^2/O-曝气生物

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2 不同内循环回流比工况下各污染物的去除效果

Table 2 Removal of various pollutants under different internal return ratios

指标	$R=100\%$			$R=200\%$			$R=300\%$			$R=400\%$		
	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
	/mg·L^{-1}	/mg·L^{-1}	/%	/mg·L^{-1}	/mg·L^{-1}	/%	/mg·L^{-1}	/mg·L^{-1}	/%	/mg·L^{-1}	/mg·L^{-1}	/%
COD	359.1	44.6	87.6	273.1	46.2	83.1	374.1	39.4	89.5	298.7	39.3	86.8
NH_4^+-N	67.0	0.0	100%	68.1	0.9	98.6	67.2	0.2	99.7	69.9	0.9	98.8
NO_3^--N	0.1	24.4	—	0.2	16.1	—	0.0	9.3	—	0.0	8.2	—
TN	70.9	24.8	65.0	72.1	16.5	77.1	70.6	9.6	86.4	73.3	8.7	88.1
TP	5.7	0.3	94.7	5.9	0.2	96.6	5.9	0.1	98.3	5.9	0.1	98.3

滤池生化系统中的沿程变化规律

COD 的沿程变化规律如图 3 所示，可以看出，由于采用原生活污水为进水，不同内回流比条件下进水 COD 有所波动. 4 种内回流比时的平均进水 COD 分别为 359.1、273.1、374.1 和 298.7 mg·L^{-1}，平均最终出水 COD 分别为 44.6、46.2、39.4 和 39.3 mg·L^{-1}，去除率分别为 87.6%、83.1%、89.5% 和 86.8%，实现了有机物的高效去除. 同时可以看出，COD 在厌氧段降低幅度最大，主要被聚磷菌合成内碳源聚-β-羟基链烷酸脂(PHAs)，PHAs 作为能量的贮备，为聚磷菌缺氧/好氧过量吸磷提供能源；缺氧段 COD 降低幅度次之，在缺氧条件下，反硝化菌以有机碳源为电子供体，以硝酸盐氮为电子受体，发生反硝化反应；好氧段 COD 降幅较小，主要用于维持好氧异养菌的新陈代谢；COD 在曝气生物滤池中也得到部分去除，可能是由于其中除了自养型的硝化菌之外，还有好氧异养菌存在的原因. 以内回流比为 400% 时为例，A^2/O 的厌氧、缺氧、好氧段和曝气生物滤池对 COD 的去除率分别为 70.0%、13.4%、1.6% 和 1.8%.

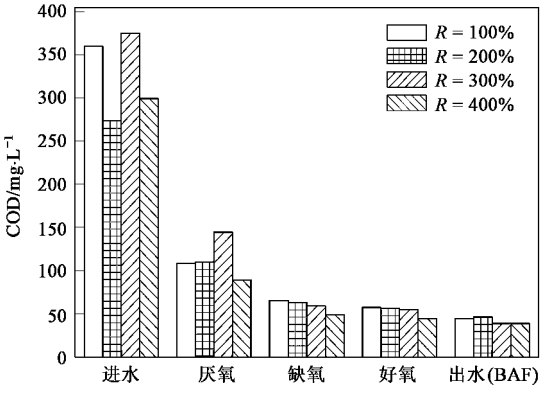


图 3 COD 的沿程变化规律

Fig. 3 Evolution of COD in A^2/O-BAF system at different internal recycle ratios

2.3 内回流比对缺氧反硝化能力的影响

生物法脱氮分 2 步完成，首先是 NH_4^+-N 通过硝化反应(NH_4^+-N⟶NO_3^--N)转化为硝酸盐氮，实现其形态的转变，其次通过反硝化(NO_3^--N⟶N_2)，将硝酸盐氮还原为氮气，实现氮的真正去除. 由于本系统是前置反硝化，出水以硝酸盐氮为主，因此缺氧反硝化效果决定总氮的去除率. 根据物料平衡计算缺氧段硝酸盐氮的去除量，计算公式如下：

$$\Delta c_{ano} = \frac{c_{eff}Q_R + c_{ana}(Q_{in} + Q_{slu})}{Q_{in} + Q_R + Q_{slu}} - c_{ano}$$

式中，Δc_{ano} 缺氧段硝酸盐氮的去除量(mg·L^{-1})；c_{eff} 为系统出水硝酸盐氮浓度(mg·L^{-1})；Q_{in}、Q_R 和 Q_{slu} 分别为进水流量、内回流量和污泥回流量(L·d^{-1})；c_{ana} 和 c_{ano} 分别为厌氧段和缺氧段末端硝酸盐氮浓度(mg·L^{-1}).

计算得出内回流比从 100% 增大至 400% 时，缺氧段反硝化能力(NO_3^--N/MLSS·t)分别为 0.63、0.83、0.95 和 0.98 g/(g·d)，即随着内回流比的增大，缺氧反硝化能力呈逐渐升高的趋势，但升高幅度却呈递减规律. 吴昌永等[25]认为，在内回流比较低时(100% ~300%)，回流到缺氧段的硝酸盐负荷相对较低，硝酸盐成为反硝化的限制因子；内回流比较高时(400%)，回流到缺氧段的硝酸盐负荷近于饱和，但是，由于进水 C/N 较低，缺氧段可利用的有机碳源有限(内回流比为 400% 时，仅有 13.4% 的 COD 可供反硝化异养菌利用)，因此，碳源不足成为影响反硝化效果的主要原因，造成硝酸盐的“穿透现象”；再者就是随着内回流比的增大，硝化液中携带的大量 DO 破坏了缺氧环境，也会削弱反硝化能力.

2.4 内回流比对反硝化吸磷的影响

图 4 给出了不同内回流比条件下 TP 的沿程变化规律. 可以看出，系统存在明显的反硝化吸磷现象. 经物料衡算得出 4 种内回流比条件下缺氧吸磷量(TP/MLSS·t)分别为 1.00、1.15、1.23 和 1.28

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

g/(g·d),缺氧出水 TP 浓度分别为 12.6、6.8、5.2 和 3.6 mg·L^{-1},经过好氧段吸磷之后,出水 TP 分别下降至 0.3、0.2、0.1 和 0.1 mg·L^{-1},均能满足一级排放标准中 A 标准,实现了深度除磷.影响缺氧反硝化吸磷的主要因素有 3 个,一个是反硝化聚磷菌的数量,由活性污泥本身的特性决定;二是聚磷菌在厌氧段合成的内碳源 PHAs,由污水的 C/N 和挥发性脂肪酸(VFAs)决定.本工艺厌氧段在系统之首,有利于聚磷菌优先利用 VFAs 合成 PHAs,对反硝化吸磷有利;三是缺氧段提供的电子受体硝酸盐氮,主要通过内循环提供.同时,王晓莲等[26]还指出,缺氧条件下反硝化聚磷菌和反硝化异养菌会争夺电子受体硝酸盐氮,反硝化异养菌的反硝化速率明显高于反硝化聚磷菌,如果进入缺氧段的硝酸盐负荷低于反硝化异养菌的反硝化潜力,反硝化异养菌将淘汰反硝化聚磷菌,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,所以,内回流比增大有利于反硝化吸磷.

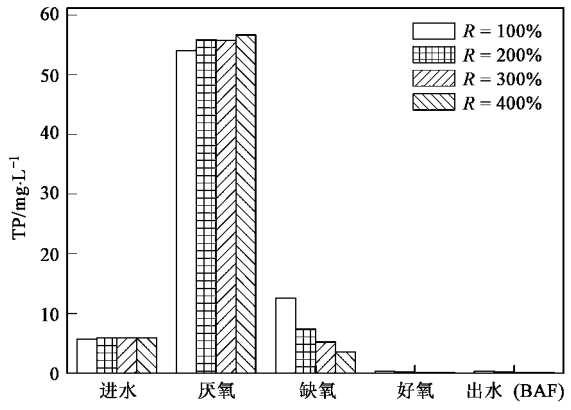


图 4　不同内循环回流比条件下 TP 的沿程变化规律

Fig. 4　Evolution of TP in A^2/O-BAF system at different internal recycle ratios

2.5　反硝化聚磷菌占聚磷菌比例的序批试验

聚磷菌厌氧释磷、好氧/缺氧吸磷规律如图 5 所示.计算得出反硝化聚磷菌(DPAOs)占聚磷菌(PAOs)的比例为 40.5%.说明经过驯化,DPAOs 占有较高的比例,缺氧吸磷能力较强.

2.6　A^2/O-曝气生物滤池工艺的经济性分析

与传统 A^2/O 工艺相比,本工艺总的 HRT 不长,不需要增大系统的有效容积;处理低 C/N 污水不需额外投加碳源;除磷效果好,勿需投加化学药剂.但工艺流程较长,曝气生物滤池中填料需要一定的经济成本.该工艺运行时间不长,详细的经济学分析尚需进一步研究.

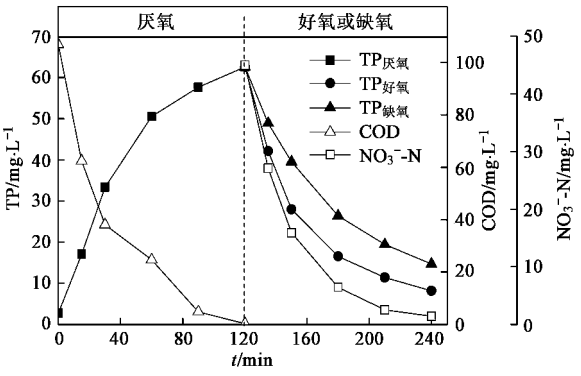


图 5　厌氧释磷和缺氧-好氧吸磷序批试验结果

Fig. 5　Phosphorus release and uptake under anaerobic-anoxic/oxic conditions

3　结论

(1)COD、TP 和 NH_4^+-N 的去除与内回流比之间没有明显的相关性,出水 COD、TP 和 NH_4^+-N 分别小于 50、0.5 和 1.0 mg·L^{-1},均满足国家一级 A 标准.

(2)在 4 种内回流比时平均进水 TN 浓度分别为 70.9、72.1、70.6 和 73.3 mg·L^{-1}的条件下,平均出水 TN 浓度分别为 24.8、16.5、9.6 和 8.7 mg·L^{-1},TN 去除率分别为 65.0%、77.1%、86.4% 和 88.1%,TN 去除率随内回流比的增大呈升高趋势,但升高幅度却呈递减规律,内回流比为 200% 时出水满足国家一级 B 标准,内回流比为 300% 和 400% 时出水均满足国家一级 A 标准.

(3)内回流比从 100% 增大至 400% 时,缺氧段反硝化能力分别为 0.63、0.83、0.95 和 0.98 g/(g·d);缺氧吸磷量分别为 1.00、1.15、1.23 和1.28 g/(g·d),均呈增大趋势.

(4)反硝化聚磷菌占总聚磷菌的比例为 40.5%.

参考文献:

[1] Karakashev D, Schmidt J E, Angelidaki I. Innovative process scheme for removal of organic matter, phosphorus and nitrogen from pig manure [J]. Water Res, 2008, **42**: 4083-4090.

[2] Wang Y L, Yu S L, Shi W X, *et al*. Comparative performance between intermittently cyclic activated sludge-membrane bioreactor and anoxic/aerobic-membrane bioreactor [J]. Bioresource Technol, 2009, **100**: 3877-3881.

[3] 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]. Water Res, 2002, **36**: 403-412.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[4] Peng Y Z, Wang X L, Li B K. Anoxic biological phosphorus uptake and the effect of excessive aeration on biological phosphorus removal in the A^2O process [J]. Desalination, 2006, **189**: 155-164.

[5] Fan J, Tao T, Zhang J, *et al*. Performance evaluation of a modified anaerobic/anoxic/oxic (A^2/O) process treating low strength wastewater [J]. Desalination, 2009, **249**(2): 822-827.

[6] Wang X L, Peng Y Z, Wang S Y, *et al*. Influent of wastewater composition on nitrogen and phosphorus removal and process control in A^2O process [J]. Bioprocess Biosystem Eng, 2006, **28**: 397-404.

[7] Ma Y, Peng Y Z, Wang X L. Improving nutrient removal of the AAO process by an influent bypass flow by denitrifying phosphorus removal [J]. Desalination, 2009, **246**: 534-544.

[8] **张杰, 臧景红, 杨宏, 等**. A^2/O **工艺的固有缺欠和对策研究** [J]. **给水排水**, 2003, **129**(13): 22-26.

[9] Rebecca M, Joanne Q, Tom S. The effects of media size on the performance of biological aerated filters [J]. Water Res, 2001, **35**(10): 2514-2522.

[10] Taira H, Hiroshi T, Naoyuki K. Advanced treatment of sewage by pre-coagulation and biological filtration process [J]. Water Res, 2003, **37**: 4259-4269.

[11] Jinwoo J, Taira H, Hiroshi T, *et al*. Development of biological filter as tertiary treatment for effective nitrogen removal: Biological filter for tertiary treatment [J]. Water Res, 2006, **40**: 1127-1136.

[12] HaJ H, Ong S K. Nitrification and denitrification in partially aerated biological aerated filter (BAF) with dual size and media [J]. Water Sci Technol, 2007, **55**(1-2): 9-17.

[13] **李军, 刘伟岩, 杨晓冬, 等**. **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**, 2008, **24**(14): 10-14.

[14] **李雨霏, 韩洪军, 张凌瀚**. **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**, 2009, **25**(12): 92-95.

[15] Wang Y Y, Pan M L, Yan M, *et al*. Characteristics of anoxic phosphors removal in sequence batch reactor [J]. J Environ Sci, 2007, **19**: 776-782.

[16] Peng Y Z, Hou H X, Wang S Y. Nitrogen and phosphorus removal in pilot-scale anaerobic-anoxic oxidation ditch system [J]. J Environ Sci, 2008, **20**: 398-403.

[17] Barker P S, Dold P L. Denitrification behaviour in biological excess phosphorus removal activated sludge system [J]. Water Res, 1996, **30**(4): 769-780.

[18] 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]. Water Res, 1996, **30**(7): 1702-1710.

[19] HuJ 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]. Water Res, 2003, **37**: 3463-3741.

[20] Wang Y Y, Peng Y Z, Li T W, *et al*. Phosphorus removal under anoxic conditions in a continuous-flow A_2N two-sludge process [J]. Water Sci Technol, 2004, **50**(6): 37-44.

[21] Guisasola A, Qurie M, Del Mar V M. Failure of an enriched nitrite-DPAO population to use nitrate as an electron acceptor [J]. Process Biochem, 2009, **44**: 689-695.

[22] Wang Y Y, Peng Y Z, Stephenson T. Effect of influent nutrient ratios and hydraulic retention time (HRT) on simultaneous phosphorus and nitrogen removal in a two-sludge sequencing batch reactor process [J]. Bioresource Technol, 2009, **100**: 3506-3512.

[23] APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [M]. (21st edition). Washington, DC, APHA/AWWA/WEF, 2005.

[24] Wachtmeister A, Kuba T, Van loosdrecht M C M *et al*. A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removal sludge [J]. Water Res, 1997, **31**(3): 471-478.

[25] **吴昌永, 彭永臻, 彭轶**. A^2O **工艺处理低** C/N **比生活污水的试验研究** [J]. **化工学报**, 2008, **59**(12): 3126-3131.

[26] **王晓莲, 王淑莹, 王亚宜, 等**. **强化** A^2/O **工艺的反硝化除磷性能的运行控制策略** [J]. **环境科学学报**, 2006, **26**(5): 722-727.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net