

研究简报

碳氮比对 AAO-BAF 工艺运行性能的影响

张为堂¹, 薛晓飞^{1,2}, 庞洪涛², 张杰¹, 李冬¹, 彭永臻¹

(¹北京工业大学北京市水质科学与水环境恢复重点实验室, 北京 100124; ²北控水务(中国)投资有限公司, 北京 100124)

摘要: AAO-BAF 工艺由厌氧-缺氧-好氧反应器和曝气生物滤池组成, 属于外硝化反硝化除磷工艺。以实际生活污水为处理对象, 通过调节进水 COD 浓度(从 211 mg·L⁻¹ 增加到 675 mg·L⁻¹), 研究了进水 COD 和 TN 的比(C/N)对 AAO-BAF 工艺运行性能的影响。结果表明, 进水有机物浓度低或高, 可以通过限制厌氧释磷量或竞争 AAO 反应器缺氧区的 NO₃⁻, 从而影响工艺的反硝化除磷效果。当进水 C/N 大于 4, 小于 7 时, AAO-BAF 工艺对 COD、TN 和 PO₄³⁻ 的去除率分别可达 86%、78% 和 90% 以上。很高的 C/N (如 9.5) 会使缺氧区内存在大量挥发性脂肪酸(VFA), 导致普通反硝化菌迅速消耗反硝化聚磷菌(DPAOs)的电子受体 NO₃⁻。

关键词: AAO; 外硝化; 反硝化除磷; 生活污水; C/N

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20141719

中图分类号: X 703.1

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2015) 05—1925—06

Effect of C/N on performance of AAO-BAF process

ZHANG Weitang¹, XUE Xiaofei^{1,2}, PANG Hongtao², ZHANG Jie¹, LI Dong¹, PENG Yongzhen¹

(¹Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; ²Beijing Enterprises Water Group (China) Investment Limited, Beijing 100124, China)

Abstract: Combining anaerobic-anoxic-oxic reactor with an external nitrification biological aerated filter, the AAO-BAF process was used to treat domestic wastewater. Adjusting the influent COD concentration from 211 to 675 mg·L⁻¹, the effect of carbon-nitrogen ratio (C/N) on the performance of the AAO-BAF process was investigated. A low or high influent organic concentration had significant effect on the nutrients removal efficiency due to the deficient phosphorus release or nitrate competition in the anoxic zones of the AAO reactor between DPAOs and ordinary heterotrophic organisms. When C/N was between 4 and 7, the average removal efficiencies of COD, TN and PO₄³⁻ could reach more than 86%, 78% and 90% respectively. Large quantity of residual volatile fatty acid (VFA) would be transferred into the anoxic zones when C/N was very high (such as 9.5), which would cause rapid consumption of NO₃⁻ by ordinary heterotrophic organisms rather than denitrifying phosphorus accumulating organisms (DPAOs).

Key words: AAO; external nitrification; denitrifying phosphorus removal; domestic wastewater; C/N

引 言

污水的 C/N 是影响传统生物除营养物 (BNR)

工艺脱氮除磷效果的重要因素。在传统 BNR 工艺中引入反硝化除磷技术, 外加碳源量、污泥产量和曝气量能够分别降低 50%、50% 和 30%^[1-4]。采用

2014-11-18 收到初稿, 2014-12-31 收到修改稿。

联系人: 彭永臻。第一作者: 张为堂 (1978—), 男, 博士。

基金项目: 北京市科技计划项目 (D12110900010000); 北京市教委科研基地建设—科技创新平台。

Received date: 2014-11-18.

Corresponding author: Prof. PENG Yongzhen, pyz@bjut.edu.cn

Foundation item: supported by the Science and Technology Projects of Beijing (D12110900010000) and the Scientific Research Base and Scientific Innovation Platform of Beijing Municipal Education Commission.

AAO 反应器处理实际污水时,原水的 C/N 越低,反硝化除磷占总除磷的比例越高,但是过低的 C/N 会导致 TN 去除率低下^[5]。Kern-Jespersen 等^[6]的研究表明,聚磷菌缺氧条件下的反硝化吸磷率是聚磷菌体内聚羟基脂肪酸(PHA)储量的一级方程。

本文作者前期对 AAO-BAF 工艺的硝化液回流比、HRT、曝气量以及 AAO 反应器的容积比等进行了研究^[7-10],证明该工艺是一种运行稳定、处理效果好的外硝化反硝化除磷系统^[10-11]。AAO-BAF 工艺中,磷的去除主要在缺氧阶段通过反硝化除磷实现,受有机物浓度的影响很大。针对不同的进水有机物浓度,需要对该工艺进行运行优化分析,给出不同的运行策略。理论上讲,在厌氧池,为保证充分释磷,要有较高的有机物浓度;在缺氧池,为避免反硝化菌竞争硝酸盐氮,应有较低浓度的有机物。缺氧段存在的碳源会优先用于普通反硝化而使出水硝酸盐和亚硝酸盐的浓度降低,在提高脱氮效果的同时,减少了反硝化吸磷的电子受体。

本文以实际生活污水为处理对象,在前期 HRT 试验的基础上,通过 2 个月的连续运行,研究了进水 C/N 对反硝化除磷工艺运行性能的影响。

1 材料和方法

1.1 试验装置

AAO-BAF 双污泥反硝化除磷工艺如图 1 所示。

AAO 反应器主要完成反硝化除磷脱氮;BAF 的功能是完成氨氮的硝化,为 AAO 反应器中的 DPAOs 提供电子受体,属于外硝化单元。AAO 反应器包括 9 个依次连接的反应区,有效容积为 30 L。AAO 反应器的厌氧、缺氧和好氧区容积比为 2:6:1。AAO 反应器的 HRT 为 6 h,好氧格曝气量为 $60 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$,BAF 单元的曝气量为 $100 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 。整个试验分为 4 个阶段,分别记为 Run 1, 2, 3 和 4。BAF 出水回流比(R)和污泥回流比(r)分别设定为 300%和 100%。

1.2 试验用污水

试验用生活污水取自北京工业大学教师生活区的一个化粪池,该污水属于典型的低 C/N 生活污水。试验期间在原水水箱内加入适量乙酸钠,调节原污水 C/N 在 3.3~9.5 之间变化。各试验阶段主要水质指标见表 1。

1.3 分析方法

PO_4^{3-} , NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- 由流动注射分析仪测定 (Lachat Quik-Chem8000, Lachat Instrument, Milwaukee, USA)。TN 通过 TN/TOC 分析仪 (MultiN/C3100, Analytik Jena, AG)测定。COD 按照标准方法测定^[12]。

试验中,PHA 的测定采用气相色谱 (Agilent 6890N),以氢火焰离子化检测器进行检测^[13]。挥发性脂肪酸(VFAs)采用气相色谱仪(Agilent 6890N)

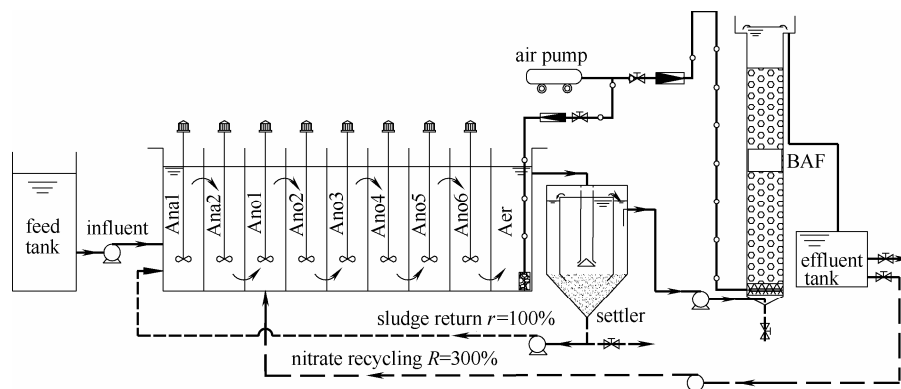


图 1 AAO-BAF 工艺流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of AAO-BAF process

表 1 试验用污水水质

Table 1 Characteristics of influent wastewater

Run	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	PO ₄ ³⁻ -P/mg · L ⁻¹	C/N
1	211	60.8	0.05	0.21	65.3	5.6	3.3
2	318	62.0	0.23	0.19	68.8	5.3	4.6
3	467	64.4	0.07	0.13	75.3	5.0	6.8
4	675	63.9	0.08	0.15	71.2	5.4	9.5

进行测定^[14]。

2 结果和讨论

2.1 AAO-BAF 工艺对有机物的去除性能

不同进水有机物浓度条件下, AAO-BAF 工艺对 COD 的去除效果见图 2。可以看出, 在进水 COD 浓度由 $211 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加至 $467 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的过程中 (Run1 到 Run3, C/N 由 3.3 增加至 6.8), 组合工艺对 COD 的去除率也持续增加至第 3 阶段的大于 90%。当继续增加进水有机物浓度至 COD 平均为 $675 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, C/N 为 9.5 时, 组合工艺对 COD 的去除率略有下降。

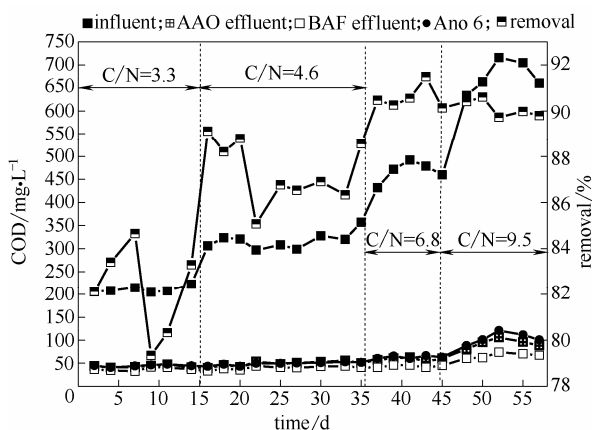


图2 AAO-BAF 工艺对有机物的去除性能

Fig.2 Variation of COD removal performance in AAO-BAF

当 C/N 为 3.3 和 4.6 时, AAO 反应器出水 COD 浓度小于 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 说明污水中大部分的有机物, 通过反硝化除磷过程, 可以在 AAO 反应器内得到有效的利用。前期研究结果也表明, 进水中约 80% 的 COD 可以在 AAO 反应器的厌氧和缺氧段得到有效利用^[8]。并且, 随着 C/N 的增加, AAO 反应器的出水 COD 浓度也有增加的趋势。当 C/N 为 6.8 和 9.5 时, AAO 反应器的出水 COD 浓度分别达到 60 和 $93 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。这对 BAF 的硝化性能以及稳定运行是不利的。AAO-BAF 工艺的进水 C/N 在 9.5 时, BAF 出水 COD 浓度均大于 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

第 22 d, 为了考察有机物在反应器内各功能区的转化情况, 对 AAO 反应器中 COD、VFA 和 PHA 进行了测定, 试验结果见图 3。当天, 原水 COD, TN 和 PO_4^{3-} 的浓度分别为 $299.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $66.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $4.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

由图 3 可知, 当进水 COD 浓度为 $299.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, AAO 反应器厌氧末的 COD 降低至 $89.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,

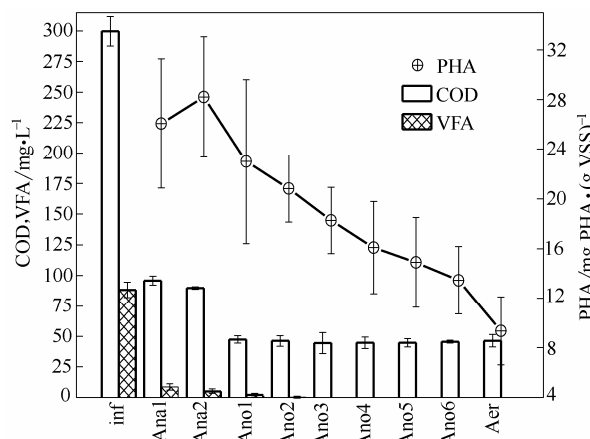


图3 AAO 反应器沿程各功能区 COD、VFA 和 PHA 的变化

Fig.3 Variations of COD, VFA and PHA in AAO reactor

AAO 的缺氧末 COD 浓度约为 $45.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。进水 VFA 浓度为 $85.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, AAO 的厌氧末 VFA 浓度下降到 $4.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。通过物料衡算, 可以得出厌氧段对 VFA 的利用率达到 89.5%。大量 VFA 在厌氧段被聚磷菌用于合成内碳源 PHA, 污泥中 PHA 含量达到 $28.2 \text{ mg PHA} \cdot (\text{g VSS})^{-1}$ 。进入缺氧区后, VFA 迅速降低 (缺氧 1 内 VFA 为 $1.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD 为 $48.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 而 PHA 则缓慢降低至好氧时的 $9.4 \text{ mg PHA} \cdot (\text{g VSS})^{-1}$ 。

容易得出, 在此 C/N 情况下 (4.5:1), 可以保证缺氧区内几乎不存在生物易利用有机物。反硝化区内的硝态氮能够被 DPAOs 迅速利用, 普通反硝化菌竞争电子受体 NO_3^- 的影响较小, 从而有利于 DPAOs 的富集和生化反应。当 C/N 继续增加, 例如增加至 9.5 时, 则会导致缺氧区内 VFA 的大量剩余。这样, 必然会导致普通反硝化菌迅速利用 VFA 消耗大量 DPAOs 的电子受体 NO_3^- , 而影响工艺的除磷性能。

需要指出的是, 随着进入 BAF 的有机物浓度的增加, BAF 的反冲洗周期变短, 运行 10 d 左右时, 氨氮便出现泄漏 [见图 4(a)], BAF 的下层滤料中生长了大量的微生物, 滤料出现板结现象, 严重影响了 BAF 的稳定运行。

2.2 进水 C/N 对氮去除性能的影响

如图 4 (a) 所示, 在 C/N 为 3.3 和 4.6 时, 氨氮得到了全部的氧化, 去除率接近 100%; 当 C/N 增加至 6.8 时, 氨氮去除率略有下降; 继续增加到 C/N=9.5 时, BAF 的硝化能力彻底恶化, 氨氮去除率迅速下降至约 70%, 出水氨氮浓度达到约 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。与此相对应, AAO 反应器出水氨氮浓度

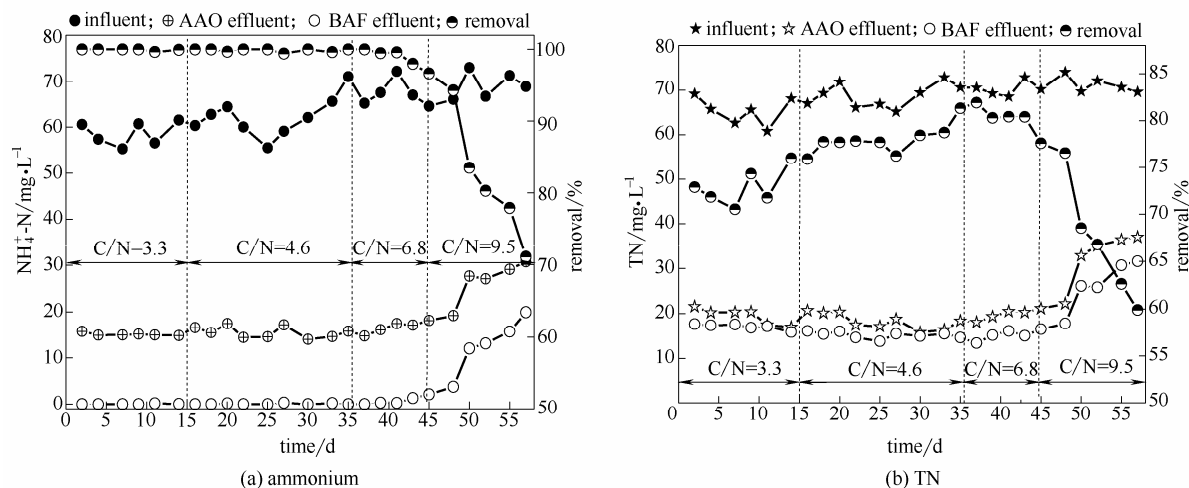
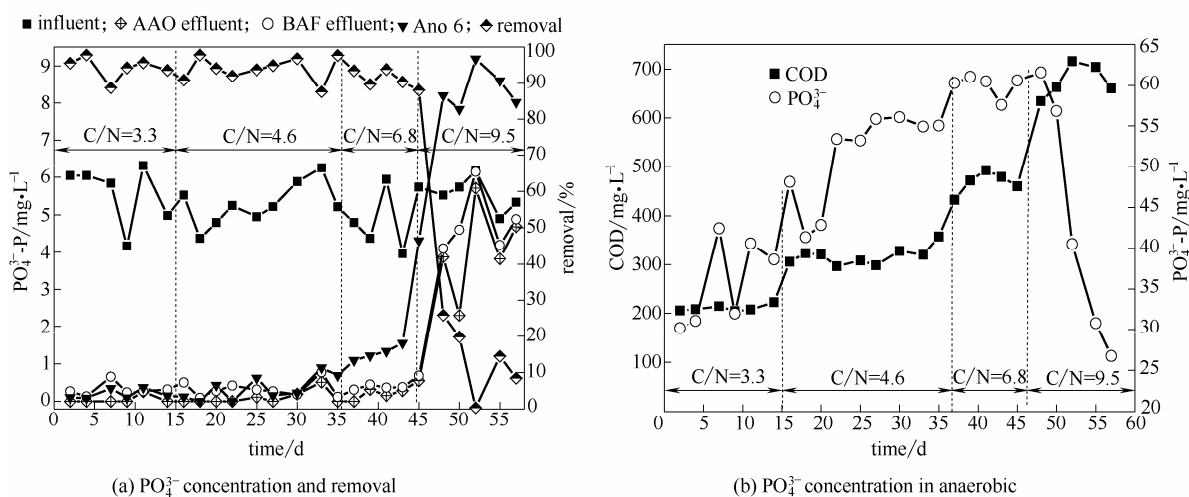


图 4 AAO-BAF 工艺的进出水氮浓度和去除率

Fig. 4 Variation profiles of nitrogen in influent and effluent and removal efficiency in AAO-BAF system

图 5 AAO-BAF 工艺对 PO_4^{3-} 的去除性能Fig. 5 Variation profiles of PO_4^{3-} and removal efficiency in AAO-BAF system

出现了积累, 由前几个阶段的约 $16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 达到了试验末的 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。

从图 4 (b) 可以看出, 与氨氮的去除规律稍有不同, 在 C/N 从 3.3 增加到 6.8 的过程中, TN 去除率从 74% 增加到 78%。当 C/N=9.5 时, 由于氨氮的不完全氧化, TN 的去除率也随之下降。这些结果表明, 增加 C/N 是一个改善 TN 去除率的有效策略, 但是前提是保证 BAF 单元的完全硝化。这就要求 AAO-BAF 工艺的进水 C/N 不宜超过 6.8, BAF 单元的进水 COD 不宜超过 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 相应的 BAF 进水 C/N 不宜超过 3。

2.3 进水 C/N 对磷去除性能的影响

较低的 C/N 有利于磷的去除。如图 5 (a) 所示, 试验期间进水磷浓度的变化不大, 在 C/N 从 3.3 增

大至 6.8 的过程中, 磷的去除率从 94% 降至 Run 3 的 91%。Kuba 等^[15]在考察 A_2NSBR 工艺的运行特征时, 发现其最佳 C/N 值为 3.4, 此时磷去除率几乎达到 100%。

当 C/N 增加至 9.5 时, 与氨氮和 TN 的去除率迅速恶化一样, PO_4^{3-} 去除率迅速下降至 10% 左右, 出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度达到约 $4.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。缺氧段和好氧段存在大量有机物时, DPAOs 不仅在缺氧区得不到电子受体, 不能充分发生缺氧吸磷反应; 同样, 在好氧区, 也由于有机物的存在 (C/N=9.5 时, AAO 出水 COD 浓度超过 $90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 好氧异养菌竞争溶解氧, DPAOs 的好氧吸磷也不充分, 甚至存在释磷行为, 也加剧了出水磷浓度的升高。

在本次试验中, 还记录了进水 C/N 对厌氧释磷

的影响, 结果见图 5 (b)。可以看出, 随着 AAO 反应器进水 C/N 的增加 (COD 浓度升高), 厌氧释磷量从最初的 $35.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 Run 4 阶段的平均 $56.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。但是, 当 C/N=9.5 时, 厌氧区的磷浓度出现了快速下降, DPAOs 没有完成充分释磷。这或许是过高的有机物浓度对聚磷菌的厌氧释磷产生了抑制作用^[16]。

聚磷菌的厌氧释磷不仅取决于进水中可快速生物降解的有机物的多寡, 还依赖充分的缺氧或好氧吸磷。当 C/N 增大至 6.8 时, AAO 反应器的第 6 缺氧区 (Ano 6) PO_4^{3-} 浓度出现升高趋势[图 5(a)]。这说明, 在较高浓度有机物的存在条件下, 缺氧区内出现了二次释磷现象; 但是, 此时由于释磷量不大, AAO 反应器的好氧区能够完成这部分磷的好氧吸收, 所以并没有影响 BAF 的出水磷浓度。AAO-BAF 工艺对磷去除率的恶化, 与该工艺的独特运行方式有关。该组合工艺中 AAO 反应器较大的缺氧好氧容积比的目的是实现充分的反硝化除磷, 所以好氧吸磷时间短, 不能够如 Run 3 阶段 (C/N=6.8) 完成剩余磷的好氧吸收。

在试验的 Run 4 阶段, 随着进水有机物浓度的增大, AAO 反应器的缺氧末和好氧末 COD 浓度分别超过了 100 和 $90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图 2), 而第 2 缺氧区的硝态氮浓度已经为零, 使缺氧区的二次释磷量大幅增加, 第 6 缺氧区浓度达到 $8 \sim 9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (见图 6)。

由图 6 还可以看出, 缺氧区内 PO_4^{3-} 和 NO_3^- 浓度有一定的相关性, 即 NO_3^- 浓度降低, 会导致 PO_4^{3-} 浓度升高。在碳氮比为 4.6 和 6.8 阶段, 缺氧区 6 内 NO_3^- 浓度由约 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低到 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 与此相对应, PO_4^{3-} 浓度逐渐由不足 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加

到约 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

从理论上讲, 磷去除率的恶化与缺氧区内没有充分的电子受体硝态氮有关。当进水 C/N 很高时, 厌氧段的可利用 VFA 超过了 DPAOs 合成 PHA 所需要的有机物量, 过剩有机物 (特别是 VFA) 在后续缺氧段很容易被普通异养菌用于反硝化脱氮, 而消耗本应用于 DPAOs 进行缺氧吸磷的电子受体, 降低缺氧吸磷量。有机物的存在不仅能降低 PAOs 的反硝化吸磷速率^[17], 对 PAOs 的好氧吸磷也有影响。PAOs 在好氧吸磷过程中可以吸收有机底物进行 PHB 的富集, 并伴随着磷的释放^[18-19]。唐旭光等^[20]研究表明, 在好氧环境中, 当有足够的 VFAs 存在时, 聚磷菌可利用其进行 PHAs 的合成, 而且速率明显高于厌氧状态下的合成速率。张红等^[21]采用 SBR 装置, 研究了有机物浓度对反硝化除磷的影响, 发现缺氧段 COD 浓度越高, 缺氧吸磷速率越低, 反硝化速率越高, 并且缺氧段存在外碳源会优先支持反硝化。

2.4 不同进水 C/N 时的运行与控制策略

在本试验条件下, 结合 TN 和 PO_4^{3-} 的去除特性, 从 AAO-BAF 工艺的运行控制角度讲, 组合工艺的适宜进水 C/N 应为 4.6~6.8, 此时 PO_4^{3-} 的去除率大于 90%, TN 的去除率达到 78%。当 C/N 不在此范围内时, 可考虑如下措施:

① 当 C/N 低于此值时, 需要根据进水水质和处理要求, 适当投加外碳源, 以去除过量的硝酸盐, 提高 TN 的去除率, 并强化 DPAOs 的厌氧释磷。

② 当设计 C/N 高于此值时, 缺氧区会存在多余的有机物, 为普通反硝化菌提供良好条件, 本来为 DPAOs 提供的电子受体硝态氮, 优先用于反硝化速率更高的普通反硝化菌, 导致 DPAOs 可利用的电子受体量减少。此时, 应按缺氧好氧容积比为 5:2 进行设计, 增加好氧吸磷的贡献率, 保障磷的去除。

③ 当 C/N 偶尔高于此值时, 在实际运行中, 还可以适当增加 BAF 出水的回流量, 或增加 AAO 反应器好氧区的曝气量, 分别提高缺氧段的电子受体量或好氧吸磷贡献率, 保障磷的去除。

3 结 论

研究表明 AAO-BAF 工艺具有稳定高效的反硝化除磷性能, AAO 反应器内可以富集大量的 DPAOs。本文研究了进水 C/N 对 AAO-BAF 工艺运行性能的影响, 得出如下结论。

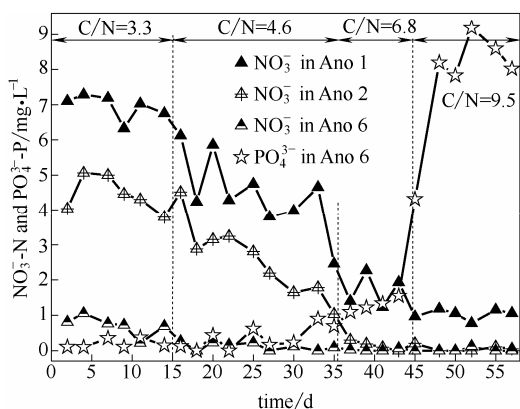


图 6 不同 C/N 时 AAO 反应器内 NO_3^- 和 PO_4^{3-} 的浓度变化

Fig.6 NO_3^- and PO_4^{3-} concentration in AAO reactor with different C/N

(1) 保证缺氧区内几乎不存在反硝化菌易利用的有机物, 缺氧区内的硝态氮才能够被 DPAOs 迅速利用。试验条件下, 从 AAO-BAF 工艺的优化控制角度讲, 组合工艺的适宜进水 C/N 为 4.6~6.8。

(2) 当进水 C/N 高于 6.8 时, 应增加 AAO 反应器好氧区的曝气量, 甚至在设计时按较大的缺氧好氧容积比 (如 5:2) 进行设计, 增加好氧吸磷的贡献率; 还可以增加 BAF 出水的回流量, 以适当增加缺氧段的电子受体。

(3) 当进水 C/N 低于 4.6 时, 需要根据进水水质和处理要求, 适当投加外碳源, 以去除过量的硝酸盐, 提高 TN 的去除率, 并强化 DPAOs 的厌氧释磷。

References

- [1] Zhou Y, Pijuan M, Yuan Z G. Development of a 2-sludge, 3-stage system for nitrogen and phosphorous removal from nutrient-rich wastewater using granular sludge and biofilms [J]. *Water Research*, 2008, **42**(12): 3207-3217
- [2] Carvalho G, Lemos P C, Oehmen A, Reis M. Denitrifying phosphorus removal: linking the process performance with the microbial community structure [J]. *Water Research*, 2007, **41**(19): 4383-4396
- [3] 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**(1-3): 534-544
- [4] Xu X Y, Liu G, Zhu L. Enhanced denitrifying phosphorous removal in a novel anaerobic/aerobic/anoxic (AOA) process with the diversion of internal carbon source [J]. *Bioresource Technol.*, 2011, **102**(22): 10340-10345
- [5] Wu Changyong(吴昌永), Peng Yongzhen(彭永臻), Peng Yi(彭轶), Li Xiaoling(李晓玲), Chen Zhiqiang(陈志强). Characteristics of denitrifying phosphorus removal in A₂O process [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*(哈尔滨工业大学学报), 2009, **41**(8): 46-49
- [6] Kernn-Jespersen J P, Henze M, et al. Biological phosphorus uptake under anoxic and aerobic conditions [J]. *Water Research*, 1993, **27**(4): 617-624
- [7] Chen Y Z, Peng C Y, Wang J H, Ye L, Zhang L C, Peng Y Z. Effect of nitrate recycling ratio on simultaneous biological nutrient removal in a novel anaerobic/anoxic/oxic (A₂O)-biological aerated filter (BAF) system [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(10): 5722-5727
- [8] Zhang W T, Peng Y Z, Ren N Q, Liu Q S, Chen Y Z. Improvement of nutrient removal by optimizing the volume ratio of anoxic to aerobic zone in AAO-BAF system [J]. *Chemosphere*, 2013, **93**(11): 2859-2863
- [9] Zhang Weitang(张为堂), Hou Feng(侯锋), Liu Qingsong(刘青松), Shao Yanqing(邵彦青), Xue Xiaofei(薛晓飞), Peng Yongzhen(彭永臻). Effect of HRT and aeration rate on the performance of the AAO-BAF system for denitrifying phosphorus removal [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2014, **65**(4): 1437-1442
- [10] Zhang W T, Hou F, Peng Y Z, Liu Q S, Wang S Y. Optimizing aeration rate in an external nitrification-denitrifying phosphorus removal (ENDPR) system for domestic wastewater treatment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, **245**: 342-347
- [11] Hu Z R, Sotemann S, Moodley R, Wentzel M C, Ekama G A. Experimental investigation of the external nitrification biological nutrient removal activated sludge (ENBNRAS) system [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2003, **83**(3): 260-273
- [12] APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [M]. 21st ed. Washington, DC: American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, 2005
- [13] Oehmen A, Keller-Lehmann B, Zeng R J, Yuan Z, Keller J. Optimisation of poly-beta-hydroxyalkanoate analysis using gas chromatography for enhanced biological phosphorus removal systems [J]. *Journal of Chromatography A*, 2005, **1070**(1-2): 131-136
- [14] Randall A A, Liu Y H. Polyhydroxyalkanoates form potentially a key aspect of aerobic phosphorus uptake in enhanced biological phosphorus removal [J]. *Water Research*, 2002, **36**: 3473-3478
- [15] Kuba T, Smolders G, van Loosdrecht M C M, et al. Biological phosphorus removal from wastewater by anaerobic-anoxic sequencing batch reactor [J]. *Water Science and Technology*, 1993, **27**(5-6): 241-252
- [16] Jun H, Shin H. Substrates transformation in a biological excess phosphorus removal system [J]. *Water Research*, 1997, **31**(4): 893-899
- [17] Zhang Licheng(张立成), Wu Chunrong(吴春蓉), Yuan Yashu(袁雅姝), Zheng Tieqiang(郑铁强). Research on the amount of carbon source to the nitrosation denitrifying dephosphorization of PAOs [J]. *Water and Wastewater Engineering*(给水排水), 2013(S1): 142-145
- [18] Guisasaola A, Pijuan M, Baeza J A, et al. Aerobic phosphorus release linked to acetate uptake in bio-P sludge: process modeling using oxygen uptake rate [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2004, **85**(7): 722-733
- [19] Ahn J, Daidou T, Tsuneda S, et al. Transformation of phosphorus and relevant intracellular compounds by a phosphorus accumulating enrichment culture in the presence of both the electron acceptor and electron donor [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2002, **79**(1): 83-93
- [20] Tang Xuguang(唐旭光), Wang Shuying(王淑莹), Peng Yongzhen(彭永臻), Zhang Jingqian(张婧倩), Li Jiedan(李捷旦). Effect of carbon source on phosphorus uptake in aerobic condition [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*(中南大学学报: 自然科学版), 2011, **42**(10): 3220-3224
- [21] Zhang Hong(张红), Zhang Chaosheng(张朝升), Rong Hongwei(荣宏伟), Zhang Kefang(张可方). Effect of carbon source concentration on denitrifying phosphorus removal [J]. *Journal of Guangzhou University*(广州大学学报), 2006, **5**(6): 73-76