

改良 A^2/O 工艺处理生活污水的脱氮除磷效果

王 琼¹, 庞雪玲¹, 史彦伟², 温沁雪¹, 陈志强¹

(1. 哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 北控水务集团有限公司, 北京 100142)

摘 要: 在不改变污水厂总反应体积的情况下, 为改善传统 A^2/O 工艺处理生活污水的脱氮除磷效果, 通过减少缺氧池体积、在厌氧池前设置预缺氧池的方法建立了改良 A^2/O 工艺。试验结果表明, 改良 A^2/O 工艺去除颗粒性 COD 的效果更好, 可使较多的颗粒性 COD 转化为溶解性 COD, 且更易于满足脱氮除磷对碳源的需求, 适宜处理低碳源污水。改良 A^2/O 工艺厌氧段出水 TP 为 29.11 mg/L、PHA 含量为 7.7 mg/gMLSS, 而传统 A^2/O 工艺厌氧段出水 TP 为 18.05 mg/L、PHA 含量为 6.1 mg/gMLSS, 厌氧段释磷效果较好, 可见改良 A^2/O 工艺相比于传统 A^2/O 工艺有更好的碳源利用能力和除磷能力。

关键词: 改良 A^2/O 工艺; 传统 A^2/O 工艺; 生活污水; 脱氮除磷; 碳源

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)23-0100-05

Nitrogen and Phosphorus Removal in Domestic Sewage by Modified A^2/O Process

WANG Qiong¹, PANG Xue-ling¹, SHI Yan-wei², WEN Qin-xue¹, CHEN Zhi-qiang¹

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Beijing Enterprises Water Group Limited, Beijing 100142, China)

Abstract: Without changing the total reaction volume of the wastewater treatment plant, a modified A^2/O process was established by reducing the volume of the anoxic tank and setting pre-anoxic tank before anaerobic tank, to improve the nitrogen and phosphorus removal efficiency of the traditional A^2/O process for the treatment of domestic sewage. The results showed that the modified A^2/O process had better particle COD removal efficiency, and more particle COD could be transformed into soluble COD. The modified A^2/O process was easier to meet the demand of carbon source for nitrogen and phosphorus removal, which was suitable for the treatment of low carbon sewage. The effluent TP and PHA of the anaerobic tank in the modified A^2/O process were 29.11 mg/L and 7.7 mg/gMLSS, while the effluent TP and PHA of the anaerobic tank in the traditional A^2/O process were 18.05 mg/L and 6.1 mg/gMLSS, which indicated that the modified A^2/O process had better phosphorus removal efficiency. Therefore, the modified A^2/O process had better carbon source utilization capacity and phosphorus removal efficiency than the traditional A^2/O process.

Key words: modified A^2/O process; traditional A^2/O process; domestic sewage; nitrogen

and phosphorus removal; carbon resource

传统 A²/O 工艺具有结构简单、水力停留时间短、不易产生污泥膨胀、运行费用低等优点,在我国城镇污水厂已得到广泛应用^[1]。在厌氧池前设置预缺氧池则可以降低污泥回流液中硝酸盐对厌氧释磷效果的影响,这种方法称为改良 A²/O 工艺。由于已经运行的污水处理厂难以选择适宜地点建设预缺氧池,因此能否利用原有生化池的池容进行工艺改造,并提升原位氮、磷去除能力,成为相关领域科研人员关注的热点^[2]。

笔者以模拟生活污水为研究对象,在相同进水水质、水量和水力停留时间条件下,分析改良 A²/O 工艺和传统 A²/O 工艺的除污效果,研究改良 A²/O 工艺对颗粒性 COD 的去除情况,并对比改良 A²/O 工艺和传统 A²/O 工艺对磷、COD 及氮的去除效果。

1 材料与方法

1.1 试验材料

改良 A²/O 工艺和传统 A²/O 工艺的接种污泥来源于哈尔滨市某污水厂,该污泥具有一定的脱氮除磷效果,接种后控制反应器的污泥浓度约为 2 500 mg/L。

改良 A²/O 装置和传统 A²/O 装置的有效容积均为 12 L。改良 A²/O 工艺的预缺氧、厌氧、缺氧、好氧段有效容积分别为 2、2、2 和 6 L,传统 A²/O 工艺的厌氧、缺氧、好氧段有效容积分别为 2、4 和 6 L,工艺流程如图 1 所示。

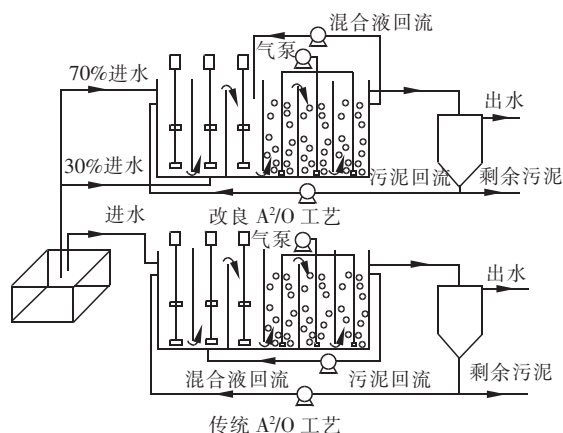


图 1 改良 A²/O 工艺和传统 A²/O 工艺的流程

Fig. 1 Flow chart of modified A²/O and traditional A²/O process

改良 A²/O 工艺为两点进水,预缺氧池和厌氧

池的进水量分别占总进水量的 70% 和 30%。工艺运行参数:HRT 为 12 h,SRT 为 12 ~ 15 d,污泥回流比为 80%,混合液的回流比为 250%,好氧区 DO 为 1.5 ~ 3.5 mg/L。污泥浓度为(2 500 ± 500) mg/L。

试验用水为 50% 生活污水和 50% 人工合成污水,混合后的进水水质:COD 为 246.2 ~ 435 mg/L、总氮为 29.8 ~ 39.5 mg/L、氨氮为 26.4 ~ 36.9 mg/L、总磷为 4.1 ~ 7.3 mg/L。

1.2 分析方法

COD、TN、TP、NH₄⁺ - N、NO₃⁻ - N、NO₂⁻ - N 等指标均按照《水和废水监测分析方法》(第 4 版)进行测定。直接测定原水为总 COD(即 COD_{tot}),原水经过 4.4 μm 滤纸过滤后测定为滤液 COD(即 COD_p),原水用 0.45 μm 滤膜过滤后测定为溶解性 COD(即 COD_{dis}),COD_{tot} 与 COD_p 的差值为颗粒性 COD(即 COD_{ss}),COD_p 与 COD_{dis} 的差值为胶体 COD(即 COD_{col})^[3]。污泥样品中聚羟基烷酸酯(PHA)含量的测定采用气相色谱法。

试验过程中磷的物料平衡计算见公式(1) ~ (3)。

$$G = C_b - \frac{C_a \times R + C_0 \times 0.7}{1 + R} \quad (1)$$

$$U = \frac{C_b \times (1 + r) + C_d \times r}{1 + R + r} - C_c \quad (2)$$

$$T = 1 - \frac{C_c \times (1 + R + r)}{C_b \times (1 + r) + C_d \times r} \quad (3)$$

式中,C₀ 为进水磷的浓度;C_a 为预缺氧段末磷的浓度;C_b 为厌氧段末磷的浓度;C_c 为缺氧段末磷的浓度;C_d 为好氧段末磷的浓度;R 为污泥回流比;r 为混合液回流比;G 为改良 A²/O 工艺厌氧段释放磷量,mg/L;U 为改良 A²/O 工艺或传统 A²/O 工艺缺氧段吸收磷量,mg/L;T 为改良 A²/O 工艺或传统 A²/O 工艺缺氧段磷的去除率,%。

传统 A²/O 工艺的厌氧段释放磷量(G')按式(4)计算。

$$G' = C_b - \frac{C_0}{1 + R} \quad (4)$$

2 结果与讨论

2.1 改良 A²/O 工艺预缺氧段的作用

装置稳定运行期间,每 2 d 在厌氧池末端取样

一次,20 d 的检测数据表明,当平均进水 COD_{ss} 为 125.44 mg/L 时,改良 A^2/O 工艺厌氧池的平均出水 COD_{ss} 浓度为 50.58 mg/L,对 COD_{ss} 的平均去除率为 59.68%。而传统 A^2/O 工艺厌氧池的平均出水 COD_{ss} 浓度为 79.86 mg/L,对 COD_{ss} 的平均去除率为 36.34%。可见,改良 A^2/O 工艺对 COD_{ss} 的去除率较传统 A^2/O 工艺提高了 23.34%。改良 A^2/O 工艺可更好地去除颗粒性 COD,当颗粒性 COD 转化为溶解性 COD 后,更易于满足去除氮、磷时对碳源的需求,比较适宜低碳源污水的处理。

2.2 对磷的去除效果

2.2.1 稳定运行时对磷的去除效果

改良 A^2/O 工艺和传统 A^2/O 工艺对总磷的去除效果表明,在平均进水总磷为 6.1 mg/L 条件下,改良 A^2/O 工艺的平均出水总磷为 0.51 mg/L,对总磷的平均去除率为 91.64%,而传统 A^2/O 工艺的平均出水总磷为 0.89 mg/L,对总磷的平均去除率为 85.41%。可以看出,传统 A^2/O 工艺较改良 A^2/O 工艺对总磷的去除率降低了 6.23%,这是因为改良 A^2/O 工艺为多段进水,污泥回流到预缺氧区,回流污泥中的硝态氮在预缺氧区利用进水中的 COD 进行反硝化,减少了或基本消除了进入厌氧区的硝态氮,降低了反硝化菌与聚磷菌对碳源的竞争,并且减少了回流污泥中携带的 $\text{DO}^{[4]}$,因此改良 A^2/O 工艺较传统 A^2/O 工艺在厌氧池具有更好的释磷条件。

2.2.2 沿程 TP 的去除及反硝化除磷效果

稳定运行期间,考察两个反应装置各单元总磷的变化。结果表明,改良 A^2/O 工艺的进水、预缺氧、厌氧、缺氧、好氧 1、好氧 2、好氧 3 和出水的 TP 浓度分别为 6.98、29.32、29.11、4.27、0.84、0.67、0.58、0.51 mg/L,传统 A^2/O 工艺的进水、厌氧、缺氧 1、缺氧 2、好氧 1、好氧 2、好氧 3 以及出水的 TP 浓度分别为 6.98、18.05、11.16、5.45、1.2、1.1、0.9、0.9 mg/L。

可以看出,改良 A^2/O 工艺较传统 A^2/O 工艺的厌氧段释磷高出 11.06 mg/L。由于聚磷菌的释磷能力越强相应的吸磷能力也就越强,对总磷的去除效果越好,因此改良 A^2/O 工艺出水 TP 浓度低于传统 A^2/O 工艺的出水 TP 浓度。

生物除磷工艺就是选择一类能把挥发性脂肪酸储存成 PHA 的微生物,像聚磷菌(PAOs),其过量摄取外部环境的磷储存在菌体内,最后以剩余污泥的

形式排出系统,以达到除磷的目的。本试验监测了各反应池 PHA 的变化情况,如图 2 所示。可以看出,改良 A^2/O 工艺厌氧段 PHA 含量为 7.7 mg/gMLSS,传统 A^2/O 工艺厌氧段 PHA 含量为 6.1 mg/gMLSS。对于本试验,在装置运行稳定且处理效果达标期间[PAOs 相对于聚糖菌(GAOs)为优势菌群],PHA 的含量越高越有利于磷的去除,因此改良 A^2/O 工艺的除磷效果优于传统 A^2/O 工艺。

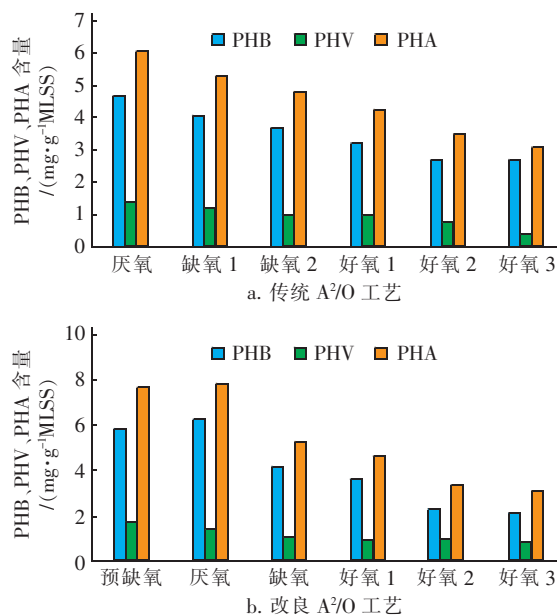


图2 传统 A^2/O 工艺和改良 A^2/O 工艺典型周期内的沿程 PHA 变化

Fig. 2 Change of PHA in typical cycle by traditional A^2/O and modified A^2/O process

试验中还发现,两套反应器在缺氧区均发生了磷浓度降低的现象,这是反硝化除磷的作用。有研究表明,挥发性脂肪酸(VFA)在生物除磷过程中具有重要作用,提高厌氧段的 VFA 浓度是生物除磷系统中的关键参数^[5,6]。在改良 A^2/O 工艺中,部分污水先进入预缺氧段,转化成更容易利用的 VFA,以提高后续反硝化除磷作用。有研究表明,在处理低碳氮比污水时,通过反硝化除磷可以提高对 TN 的去除率^[7]。本试验中,通过典型周期的 TP 浓度变化可以看出,改良 A^2/O 工艺的 G 为 13.36 mg/L, U 为 8.25 mg/L, T 为 66.7%,而传统 A^2/O 工艺的 G 为 14.17 mg/L, U 为 2.63 mg/L, T 为 34.1%,改良 A^2/O 工艺缺氧段对磷的去除率较传统 A^2/O 工艺提高了 32.6%。因此,改良 A^2/O 工艺能提供相对于传统 A^2/O 工艺更适合反硝化除磷菌生长的环

境,更适合处理碳源含量相对较低的污水。

2.3 对 COD 和氮的去除效果

2.3.1 对 COD 的去除效果

试验结果表明,平均进水 COD 为 305.28 mg/L,改良 A²/O 工艺平均出水 COD 为 38.71 mg/L,对 COD 的平均去除率为 87%;传统 A²/O 工艺平均出水 COD 为 39.88 mg/L,对 COD 的平均去除率也约为 87%。可见,改良 A²/O 工艺和传统 A²/O 工艺出水 COD 浓度都能达到一级 A 标准。在处理生活污水时,进水 COD 一般都不高,装置稳定运行期间,一般都能达到出水 COD 要求。

2.3.2 对氮的去除效果

试验结果表明,平均进水总氮为 33.9 mg/L,改良 A²/O 工艺平均出水总氮为 13.2 mg/L,对总氮的平均去除率为 61%,而传统 A²/O 工艺平均出水总氮为 9.5 mg/L,对总氮的平均去除率为 72%,可见两个反应器在稳定运行期间都能达到出水标准。但对比两个反应器可以看出,传统 A²/O 工艺较改良 A²/O 工艺的出水总氮浓度降低了 3.7 mg/L,对总氮的平均去除率则提高了 11%。这是因为在保证整体 HRT 相同,且好氧区 HRT 也相同的情况下,改良 A²/O 工艺增加了预缺氧区,所以在传统 A²/O 工艺的缺氧段延长了 2 h 的停留时间,这样传统 A²/O 工艺的反硝化时间更长,在缺氧段可利用碳源充足的条件下,对 TN 的去除效果较改良 A²/O 工艺好。

图 3 为装置稳定运行期间对氮的去除效果。

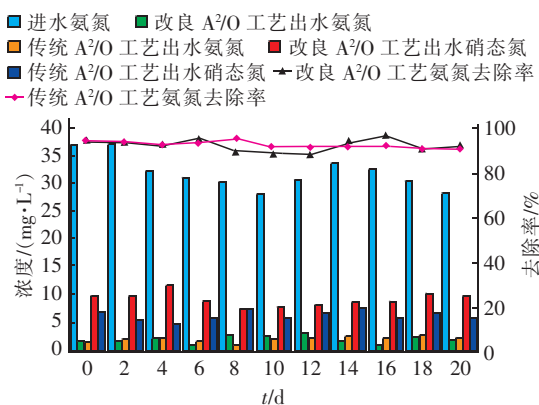


图 3 稳定运行期间传统 A²/O 工艺和改良 A²/O 工艺对氮的去除效果

Fig. 3 Removal efficiency of nitrogen by traditional A²/O and modified A²/O process during stable operation period

由图 3 可以看出,两套反应器的进水氨氮最大值为 36.87 mg/L,平均进水氨氮为 31.97 mg/L,改

良 A²/O 工艺的平均出水氨氮浓度为 2.42 mg/L,对氨氮的平均去除率为 92%;而传统 A²/O 工艺的平均出水氨氮浓度也为 2.42 mg/L,对氨氮的平均去除率也为 92%。去除氨氮的硝化细菌是在有氧条件下将氨氮转化成亚硝态氮和硝态氮,因此在好氧水力停留时间相同的条件下,改良 A²/O 工艺和传统 A²/O 工艺对氨氮的去除效果相同。

改良 A²/O 工艺的平均出水亚硝态氮为 0.2 mg/L,传统 A²/O 工艺的平均出水亚硝态氮为 0.26 mg/L,可见反应器中并没有出现亚硝态氮积累的情况,且出水亚硝态氮浓度相近。从图 3 还可以看出,改良 A²/O 工艺的平均出水硝态氮为 9.46 mg/L,传统 A²/O 工艺的平均出水硝态氮为 6.64 mg/L。可见,传统 A²/O 工艺的平均出水硝态氮浓度相较于改良 A²/O 工艺降低了 2.82 mg/L,这是因为在传统 A²/O 工艺缺氧区中相对延长了 2 h 的停留时间,在碳源充足的情况下,延长反硝化时间可以强化对硝态氮的去除效果。同时也解释了传统 A²/O 工艺的出水 TN 浓度低于改良 A²/O 工艺的原因。

3 结论

① 在相同运行条件下,改良 A²/O 工艺对 COD_{ss}的平均去除率相较于传统 A²/O 工艺提高了 23.34%,因此提高了污水的可生化性,改善了后续生物处理效果。

② 改良 A²/O 工艺的预缺氧段减少或基本消除了 DO 和硝酸盐对聚磷菌厌氧释磷的影响,且降低了反硝化菌和聚磷菌对碳源的竞争,通过计算也发现,改良 A²/O 工艺的反硝化除磷作用强于传统 A²/O 工艺,缺氧段对磷的去除率提高了 32.6%,节省了碳源、曝气量等,因此改良 A²/O 工艺对磷的总体去除效果要优于传统 A²/O 工艺。

③ 在相同 HRT 条件下,适当缩短缺氧池的停留时间,将传统 A²/O 工艺原位改造为改良 A²/O 工艺可以显著提升对总磷的去除能力,但对总氮的去除效果稍有下降。

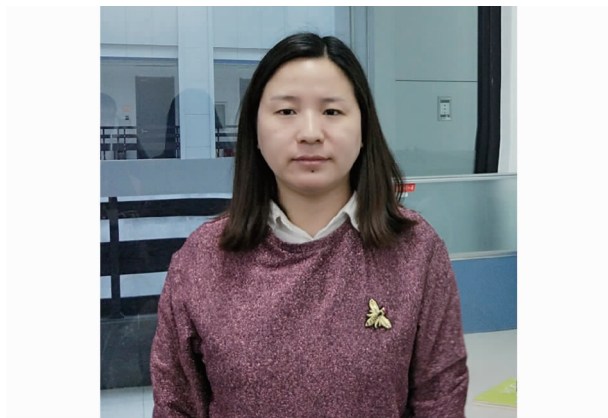
参考文献:

- [1] 刘新超,贾磊,俞勤,等. AAO 工艺在不同 HRT 和回流比条件下对实际污水的处理效果[J]. 环境工程, 2017,35(1):51-54.
- Liu Xinchao, Jia Lei, Yu Qin, et al. Treatment effects of actual sewage by anaerobic/anoxic/aerobic process in dif-

- ferent HRT and reflux ratio conditions[J]. Environmental Engineering, 2017, 35(1): 51–54 (in Chinese).
- [2] 黄春. 改良 A²/O 工艺在寒冷地区城市污水处理中的应用[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(4): 119–120, 186.
- Huang Chun. Application of improved A²/O technology in sewage treatment in cold regions[J]. Environmental Science and Management, 2010, 35(4): 119–120, 186 (in Chinese).
- [3] Al-Jamal W, Mahmoud N. Community onsite treatment of cold strong sewage in a UASB-septic tank[J]. Bioresour Technol, 2009, 100(3): 1061–1068.
- [4] Fernández F J, Castro M C, Villasenor J, *et al.* Agro-food wastewaters as external carbon source to enhance biological phosphorus removal[J]. Chem Eng J, 2011, 166(2): 559–567.
- [5] Carvalho G, Lemos P C, Oehmen A, *et al.* Denitrifying phosphorus removal: Linking the process performance with the microbial community structure[J]. Water Res, 2007, 41(19): 4383–4396.
- [6] 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.

- [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(1/3): 534–544.



作者简介: 王琼(1990–), 女, 河南郑州人, 博士研究生, 主要研究方向为水污染控制理论与技术。

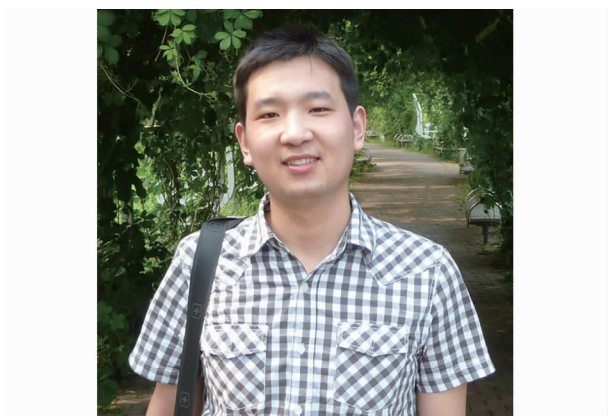
E-mail: 1066818200@qq.com

收稿日期: 2018–05–23

(上接第99页)

- Wu Changyong, Chen Zhiqiang, Peng Yongzhen, *et al.* Achievement and stability of shortcut biological nitrogen removal under real-time control[J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(19): 39–43 (in Chinese).
- [2] 解庆林, 李小霞, 李艳红, 等. SBR 反应器内短程硝化系统快速启动及影响因素研究[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(2): 134–137.
- Xie Qinglin, Li Xiaoxia, Li Yanhong, *et al.* Startup and factors affecting of partial nitrification in sequencing batch reactor[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 32(2): 134–137 (in Chinese).
- [3] 卞伟, 李军, 赵白航, 等. 硝化污泥中 AOB/NOB 对硝化特性的影响[J]. 中国环境科学, 2016, 36(8): 2395–2401.
- Bian Wei, Li Jun, Zhao Baihang, *et al.* The effect of AOB/NOB in nitrifying sludge on nitrification characteristics[J]. China Environmental Science, 2016, 36(8): 2395–2401 (in Chinese).
- [4] 彭永臻, 杨岸明, 李凌云, 等. 短程硝化最优曝气时间控制与硝化种群调控[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(2): 101–104.

Peng Yongzhen, Yang Anming, Li Lingyun, *et al.* Optimal control of aeration duration and nitrifying population regulation for partial nitrification[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(2): 101–104 (in Chinese).



作者简介: 徐浩(1986–), 男, 山东滨州人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为污水深度脱氮技术。

E-mail: xuhaoemail@163.com

收稿日期: 2018–07–18