

A²O 工艺中的反硝化除磷及其强化

吴昌永¹, 彭永臻^{1, 2}, 彭轶¹, 李晓玲¹, 陈志强¹

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 哈尔滨 150090 hit_changyong@163.com;

2. 北京工业大学 环境与能源工程学院, 北京 100124)

摘要: 为研究 A²O 工艺中的反硝化除磷现象及影响因素, 采用 52.5 L 的 A²O 反应器处理实际污水. 结果表明: 正常运行的 A²O 工艺中存在反硝化除磷现象, 在系统 HRT 为 8 h 污泥回流比为 70% 和内回流比为 250% 的情况下, A²O 系统中缺氧区吸磷占总吸磷量的 36% 左右, 序批试验表明, 此时反硝化除磷菌占总除磷菌的 35.4%. 原水的 C/N 比越低, 反硝化除磷的比例越高, 但是过低的 C/N 比会导致 TN 去除率低下. 将缺氧区和好氧区的容积比从 1/1 扩大到 5/8, 延长反硝化除磷反应的时间, TN 去除率可从 62% 提高到 70% 左右, 相比单纯提高内回流比更节能. 强化 A²O 工艺中的反硝化除磷, 为传统 A²O 工艺在处理低 C/N 比污水时提高脱氮除磷效率提供了一个新思路.

关键词: 污水处理; 反硝化除磷; A²O 工艺; C/N 比

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0367-6234(2009)08-0046-04

Characteristics of denitrifying phosphorus removal in A²O process

WU Chang-yong¹, PENG Yong-zhen^{1, 2}, PENG Yi¹, LI Xiaoling¹, CHEN Zhi-qiang¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090 China hit_changyong@163.com; 2. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract To investigate the occurrence and characteristics of denitrifying phosphorus removal, a lab-scale A²O reactor with working volume of 52.5 L was employed to treat municipal wastewater. The effects of influent COD/TN ratio and the volume ratio of anoxic zone to aerobic zone on denitrifying phosphorus removal were studied. Results show that 36% of total soluble phosphorus can be removed in the anoxic reactor when the HRT is 8 h, sludge recycle ratio is 70% and internal recycle ratio is 250%. Results of batch experiment show that more than 35.4% of phosphorus accumulating organisms (PAOs) in the A²O system can be denitrified. The ratio of anoxic phosphorus uptake increases with the decrease of influent COD/TN ratio. Denitrifying phosphorus removal can also be enhanced by increasing the ratio of anoxic zone to aerobic zone from 1/1 to 5/8. Meanwhile, the TN removal efficiency is increased from 62% to 70%. It is a more energy-efficient way compared with the increase of internal recycle ratio, which can increase the ratio of anoxic phosphorus uptake. Enhancing the denitrifying phosphorus removal in A²O process is an effective way to enhance biological nutrient removal in treating municipal wastewater with low C/N ratio.

Key words wastewater treatment; denitrifying phosphorus removal; A²O process; C/N ratio

收稿日期: 2008-04-01.

基金项目: 国家“十一五”重大科技专项课题(2008ZX07317-007-105); 北京市高校人才强教深化计划高层次人才资助项目(HR20090502); 北京市教委科研基地-科技创新平台项目(PXM2008-014204-050843); 国家重点实验室开放基金项目(QAK200802).

作者简介: 吴昌永(1980-), 男, 博士研究生;

彭永臻(1949-), 男, 教授, 博士生导师.

A²O 工艺是一种结构上最为简单的同步脱氮除磷污水处理工艺, 在该工艺中会同时发生到硝化、反硝化、释磷和吸磷等多个生化反应, 且每一个反应对微生物的组成、基质类型及环境条件的要求均不相同, 因此, 要在一个系统中同时完成脱氮和除磷过程, 不可避免地会遇到一些矛盾和冲突, 如碳源、污泥龄、硝酸盐、硝化和反硝化容量、

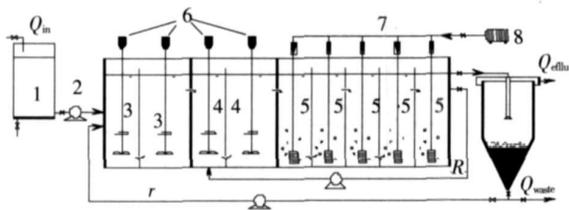
释磷和吸磷的容量等问题^[1,2]. Kuba发现在具有前置反硝化构造的 MUCT 污水厂中存在反硝化除磷现象^[3]. 王晓莲等^[4,5]采用啤酒配制的废水, 对 A²O 中的缺氧问题进行初步研究, 结果表明, 和传统的 A²O 工艺相比, 具有反硝化除磷功能的 A²O 工艺的污染物去除效率更高, 而且能够节省大约 25% 的曝气量. 然而其试验中其内回流比高达 350%, 在节省曝气量的同时也大大提高了内回流的能耗, 且试验采用啤酒配制的污水, 进水碳源也较为充足, 得出的结论具有一定的局限性. 目前低碳氮比生活污水较为常见, 这类污水的脱氮除磷也一直是难点^[6].

本研究应用 A²O 工艺, 详细研究其中的反硝化除磷特性及污水的碳氮比对反硝化除磷的影响, 并且采用实际生活污水作为处理对象, 使得研究更有实际意义. 在不同的水质条件下, 通过改变缺氧区和好氧区的容积比来强化反硝化除磷, 也避免了单纯通过提高内回流比来刺激反硝化除磷带来的动力消耗增加. 为 A²O 工艺处理不同水质的污水提供了设计、运行理论和技术依托.

1 试验

1.1 试验装置与运行工况

A²O 试验装置如图 1 所示. 装置用有机玻璃制成, 由合建式厌氧-缺氧-好氧反应器和二沉池组成. 合建式反应器有效容积为 52.5 L, 反应器分为 9 个格室, 前 2 个格为厌氧段, 随后的 2 个格为缺氧段, 剩下的 5 个格为好氧段, 厌氧区、缺氧区和好氧区的体积比为 1:1:2 改变体积比的情况下, 扩大缺氧区容积, 厌氧区、缺氧区和好氧区的体积比为 5/5/8 厌氧和缺氧区用搅拌桨提供充分的搅拌, 好氧区通过固定在底端的曝气头供氧同时促进液体混合. 反应器温度通过温控装置控制在 21~22 °C. 二沉池有效容积为 26 L



1 进水箱; 2 进水泵; 3 厌氧区; 4 缺氧区; 5 好氧区; 6 搅拌器; 7. 气体流量计; 8 曝气泵

图 1 A²O 工艺示意图

试验进水、回流污泥和消化液内回流均采用蠕动泵控制. 主要运行工况如下: 进水量为 157.5 L/d 反应区相应 HRT 为 8 h, SRT 通过排

泥控制在 15 d 左右, MLSS 在 3500~4000 mg/L, 污泥回流比为 70%, 内回流比为 250%. 试验所用污泥取自哈尔滨某 A/O 工艺污水处理厂, 种泥脱氮效果较好.

1.2 试验用水与分析方法

本试验所用污水取自哈尔滨工业大学二校区教工生活区, 并根据试验的需要对原污水水质进行了调节, 采用啤酒作为调节 COD 的碳源以避免采用单一成分化学药品带来的局限性. 氮和磷分别采用 NH₄Cl 和 KH₂PO₄. 原生活污水的水质指标平均为: COD 372.8 mg/L; NH₄⁺-N: 41.3 mg/L; PO₄³⁻-P: 3.86 mg/L, 原水中 PO₄³⁻-P 的质量浓度始终调节在 7.5~10 mg/L 之间.

试验测定的常规指标有: MLSS, MLVSS, COD, NH₄⁺-N, TN, NO₂⁻-N, NO₃⁻-N, PO₄³⁻-P, TP, pH, DO, ORP 和总碱度等. 其中 pH, DO 和 ORP 采用德国 WTW-340 进行测定, 其他指标采用国家环保总局颁布的标准分析方法测定. PHA 的测定采用 Tong 推荐的方法并做了相应改进^[7]. 试验结果均采用重现性较好的数据.

确定聚磷菌 (PAOs) 中反硝化除磷菌 (DPAOs) 比例方法按照 Wachmeister 等人^[8]推荐的方法进行. 取适量好氧末端污泥, 加入 4 L 的 SBR 反应器, 先采用乙酸钠为碳源 (COD = 300 mg/L) 的污水进行 2 h 的厌氧反应, 然后污泥平均分成两份, 一份足量曝气好氧运行 3 h, 另一份加入 50 mg/L 的 NO₃⁻-N 缺氧运行 3 h, 缺氧最大吸磷速率和好氧最大吸磷速率的比值 K_{anox}/K_{aer} 反映了系统中 DPAOs 占 PAOs 的比例.

根据物料平衡计算系统中的缺氧吸磷量 (mg/L), 计算公式如下:

$$P_{an} = \frac{Q_R c_0 + (Q_{in} + Q_r) c_a}{Q_{in} + Q_R + Q_r} - c_{an}$$

其中: Q_{in} 为进水流量 (L/h); Q_R 为消化液回流量 (L/h); Q_r 为污泥回流量 (L/h); c_a 为厌氧区末端 PO₄³⁻-P 质量浓度 (mg/L); c_{an} 为厌氧区末端 PO₄³⁻-P 质量浓度 (mg/L); c_0 为厌氧区末端 PO₄³⁻-P 质量浓度 (mg/L).

2 结果与讨论

2.1 A²O 工艺中的反硝化除磷现象

试验启动后, 采用所取生活污水进行驯化, 期间并未调节污水水质, 经过 50 d 左右的驯化, 系统脱氮除磷性能较为稳定, COD, NH₄⁺-N 和 PO₄³⁻-P 的去除率稳定在 86.8%、97.5% 和 95.5% 以上. 对系统的磷酸盐进行物料平衡分析,

发现在稳定运行的 A²O 工艺中存在反硝化除磷现象,反硝化除磷菌的出现并不需要特别的培养.图 2 给出沿程各物质质量浓度的典型变化.

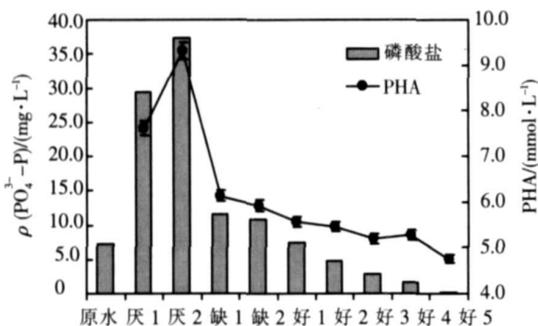


图 2 PO₄³⁻ - P 和 PHA 的典型沿程变化

根据图 2 中的数据,减去回流的稀释作用,经磷的物料平衡计算得到缺氧区的吸磷量为 9.1 mg/L, 占总吸磷量的 36% 左右. 同样,对 PHA 质量浓度进行物料平衡计算也可得到约 38% 的 PHA 在缺氧段被用来吸磷,证明系统中的确存在反硝化除磷现象.

取此时系统好氧末端的污泥,按照文献 [8] 中的方法进行序批试验,结果如图 3 所示.根据图 3 的数据,计算出缺氧最大吸磷速率和好氧最大吸磷速率的比值 K_{anox} / K_{aer} 在 0.354 左右,即系统除磷菌中约 35.4% 的是反硝化除磷菌,这也和上面计算得出的结果相近.

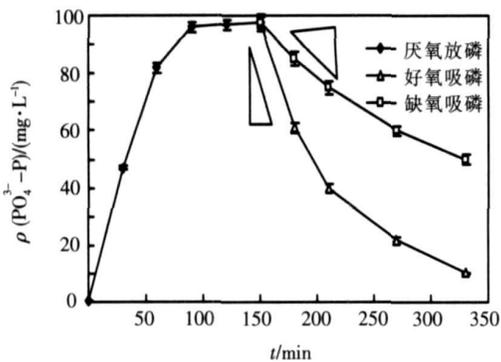


图 3 厌氧放磷和缺氧-好氧吸磷序批试验结果

2.2 碳氮比对 A²O 中反硝化除磷的影响

根据 Hu 等人提出的理论^[9],在前置反硝化的工艺中实现反硝化除磷,缺氧区的硝酸盐负荷要大于普通的异养反硝化能力,这是由于普通的异养反硝化菌对硝酸盐的竞争比反硝化除磷菌具有优势.因此,当缺氧区存在外碳源时,将以普通的异养反硝化为主而不是以吸磷反硝化为主.所以,进水的碳氮比(本文以 COD/TN 计算,简称为 C/N)对 A²O 中的反硝化除磷有很大的影响.

图 4 给出的是不同的 C/N 比情况下 A²O 系统内的反硝化除磷占总除磷的百分比.从图 4 可

以看出,随着 C/N 比的增加,反硝化除磷的比例是逐渐下降的.比如在 C/N 比为 3.86 时,反硝化除磷的比例为 62%,而当 C/N 比增加到 12.52 时,反硝化除磷的比例反而下降到了 23.6%.结果和上面的解释是一致的,即当系统中的碳源较为缺乏时,在缺氧区没有可利用的外碳源进行反硝化,这将会刺激具有吸磷能力的菌种利用内碳源,即 PHA 进行反硝化,也就是反硝化除磷.

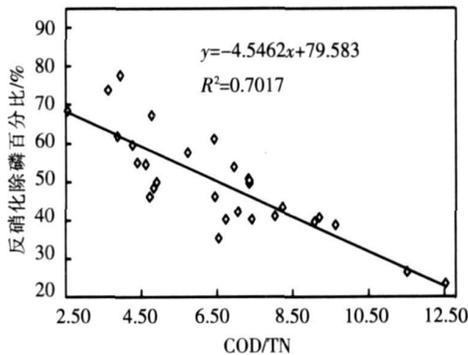


图 4 不同 C/N 比对 A²O 中反硝化吸磷比例的影响

2.3 缺氧好氧区体积比对 A²O 中反硝化除磷的影响

在 2.2 进行的试验中,虽然低 C/N 比情况下反硝化除磷的比例较高,但是由于系统要同步脱氮除磷,碳源的严重缺乏大大影响了 TN 的去除效率,在 C/N 比低于 4 的情况下,虽然反硝化除磷的比例高达 60% 以上,但是 TN 的去除率只有 60% 左右,这也是由于内源反硝化的效率较低所致^[10].通过提高内回流比,增加缺氧区的硝酸盐负荷对 A²O 中的反硝化除磷进行强化,文献 [5] 已经进行了研究.本研究旨在不提高内回流比的情况下扩大缺氧区的容积,使得反硝化除磷菌适合的生境得以扩大,延长反硝化吸磷的时间,从而提高低 C/N 比污水的脱氮除磷效率.整个试验在 C/N 比为 5 以下的条件下进行,厌氧区的体积保持不变,缺氧和好氧区的体积比从 1/1 增加到 5/8 结果如图 5 所示.

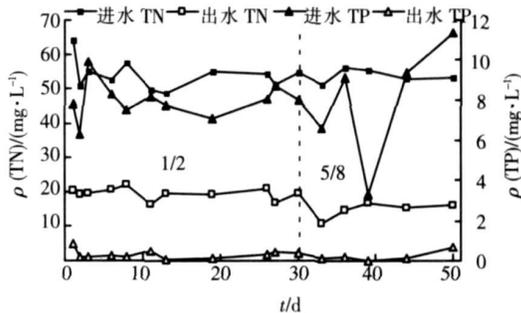


图 5 不同缺氧好氧容积比下的 TN 和 TP 去除率

从图 5 可以看出,当缺氧区容积变大后,TP

去除仍然维持在 96% 以上, 由于缺氧区反硝化除磷进行的时间延长, TN 去除率也有所提高, 从原来的 62.2% 提高到 70.7%, 出水 TN 平均为 15.6 mg/L, 较调整前的 20 mg/L 有所降低. 经计算, 反硝化除磷对整个系统除磷的贡献在 60% 以上. 适当扩大缺氧区的容积, 比提高内回流比在节能方面更具有意义.

3 结 论

1) 正常运行的 A²O 系统中存在反硝化除磷现象, 并不需要特别的培养. 在 HRT=8 h 污泥回流比为 70%, 内回流比为 250% 的运行工况下处理实际污水, 约 35.4% 的磷是通过缺氧区去除的.

2) 在运行工况不变的情况下, C/N 比越低, 缺氧吸磷占总吸磷的比例越大. 但是太低的 C/N 比会导致整个系统的 TN 去除率偏低. 在 C/N 比低于 4 的情况下, 虽然反硝化除磷的比例高达 60% 以上, 但是 TN 去除率却只有 62% 左右.

3) 在低 C/N 比条件下, 适当扩大缺氧区和好氧区的容积比, 从原来的 1/2 扩大到 5/8 能强化 A²O 系统中的反硝化除磷, 而且 TN 的去除率也上升到 70% 左右. 这比单纯提高内回流比节省了能耗, 更有意义.

参考文献:

- [1] 华光辉, 张波. 城市污水生物除磷脱氮工艺中的矛盾关系及对策 [J]. 给水排水, 2000, 26(12): 1-4.
- [2] 张杰, 臧景红. A²O 工艺的固有欠缺和对策研究 [J]. 给水排水, 2003, 29(3): 22-26.

- [3] KUBA T, LOOSDRECHT van M C M, BRANDSE F A, *etal* Occurrence of denitrifying phosphorus removing bacteria in modified UCT- type wastewater treatment plants [J]. Water Res 1997, 31(4): 777-786.
- [4] WANG X, WANG S, PENG Y. Anoxic biological phosphorus uptake in A²O process [J]. Chinese J Chem Eng 2005, 13(4): 516-521.
- [5] 王晓莲, 王淑莹, 马勇, 等. A²O 工艺中反硝化除磷及过量曝气对生物除磷的影响 [J]. 化工学报, 2005, 56(8): 1565-1570.
- [6] 马培舜, 王海玲, 成丽华, 等. 昆明的城市污水处理现状及发展 [J]. 中国给水排水, 2003, 19(4): 19-22.
- [7] TONG J, CHEN Y. Enhanced biological phosphorus removal driven by short-chain fatty acids produced from waste activated sludge alkaline fermentation [J]. Environ Sci Technol 2007, 41: 7126-7130.
- [8] WACHTM EISTER A, KUBA T, LOOSDRECHT van M C M. A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge [J]. Water Res 1997, 31(3): 471-478.
- [9] HU Z, WENTZEL M C, EKAMA G A. Anoxic growth of phosphate-accumulating organisms (PAOs) in biological nutrient removal activated sludge systems [J]. Water Res 2002, 36: 4927-4937.
- [10] BERNAT K, WOJNOWSKA B, DOBRZYŃSKA A. Denitrification with endogenous carbon source at low C/N and its effect on P(3HB) accumulation [J]. Water Res 2008, 99: 2410-2418.

(编辑 刘 彤)