

新型短程硝化同步反硝化除磷工艺的运行调控

吴春英^{1,2}, 白 鹭¹

(1. 吉林化工学院 资源与环境工程学院, 吉林 吉林 132022; 2. 清华大学环境学院 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084)

摘 要: 新型短程硝化同步反硝化除磷工艺由厌氧(A_n)、好氧(O_1, O_2)、缺氧(A_1, A_2)、快速曝气(O_3)4个单元组成,在常温条件下可用于处理实际城市污水。在正常运行期间,不用控制进水pH值,且控制好氧1池的溶解氧(DO)浓度为1.5~2 mg/L、好氧2池的DO浓度为0.5~1 mg/L时,好氧2池出水亚硝酸盐浓度可以控制在5 mg/L以上,当水力停留时间(HRT)为9 h时,系统对氨氮、COD、总氮和磷酸盐的去除率分别为84.27%、82.31%、83.82%和87.41%,且出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。

关键词: 短程硝化; 反硝化除磷; 氨氧化细菌; 亚硝化率

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)11-0108-05

Operation and Regulation of a Novel Shortcut Nitrification Coupled with Simultaneous Denitrifying Phosphorus Removal Process

WU Chun-ying^{1,2}, BAI Lu¹

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132022, China; 2. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A novel shortcut nitrification process coupled with simultaneous denitrifying phosphorus removal consists of four units: anaerobic tank (A_n), aerobic tank (O_1, O_2), anoxic tank (A_1, A_2) and fast aeration tank (O_3), which is capable of treating practical municipal wastewater under normal temperature. Without controlling the influent pH during normal operation, dissolved oxygen of aerobic tank 1 decreased to 1.5–2 mg/L, and DO of aerobic tank 2 was still 0.5–1 mg/L, in which the effluent nitrite was always above 5 mg/L. When the hydraulic retention time (HRT) was 9 h, the removal efficiencies of ammonia nitrogen, COD, total nitrogen and orthophosphate were 84.27%, 82.31%, 83.82% and 87.41%, respectively, and the effluent quality met the first level A criteria of *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918–2002).

Key words: shortcut nitrification; denitrifying phosphorus removal; ammonium-oxidizing bacteria; nitrosation rate

污水中的氮、磷含量高是造成水体富营养化和生态环境恶化的主要因素^[1-2]。A²/O工艺以其良

基金项目: 吉林化工学院校级重大科研项目(2018028); 吉林省教育厅项目(20160136); 吉林市科技局科技创新项目(20163301)

好的脱氮除磷效果,在城市污水处理中得到了广泛的应用^[3-5]。对现有城市污水处理工艺和处理能力的调查发现, A^2/O 工艺的处理水量占总处理水量的70%以上,且能耗和物耗占运行费用的比例较大^[4-5]。目前,对短程硝化反硝化除磷工艺运行调控的研究较为少见。因此,研究 A^2/O 工艺短程硝化反硝化除磷工艺的稳态运行调控,对于提高城市污水处理厂节能降耗能力,以及污水处理厂重建或新建时的优化设计具有重要指导意义。

笔者以实际生活污水为研究对象,在实现系统出水水质达标的同时达到节能降耗的目的,考察游离氨(FA)浓度、水力停留时间(HRT)等因素对亚硝酸盐积累的影响,从而确保在常温低氧条件下工艺能够稳定运行,实现亚硝酸盐的稳定积累。

1 材料与方法

1.1 工艺流程

工艺流程如图1所示。反应装置的材料为有机玻璃,每个反应单元的操作体积为7 L,各单元之间用隔板隔开。沉淀池采用竖流式,直径为20 cm。试验过程中采用分段式进水,可以延长厌氧区的水力停留时间,从而使厌氧释磷作用更加充分。释磷后的厌氧出水一部分流至缺氧区,聚磷菌在充分释磷后在体内储存了大量聚羟基丁酸酯(PHB),有利于缺氧区以亚硝酸盐为电子受体的聚磷过程。另一部分厌氧出水流至好氧区,可以提高好氧单元内FA浓度,进而有利于亚硝酸菌的生长。除两个好氧单元外,每个反应单元均设有搅拌器,好氧单元底部安装有微孔曝气器,DO浓度由气体流量计控制。在线监测pH值和DO浓度,采用恒温加热棒调节反应器内的温度。

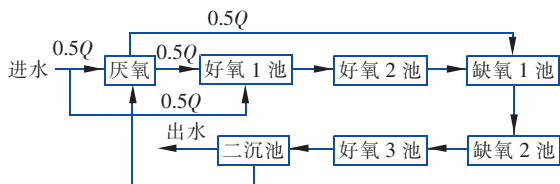


图1 工艺流程示意

Fig. 1 Schematic diagram of process flow

1.2 试验材料

该试验在某污水处理厂的水质分析中心完成,进水为实际生活污水,具体水质:COD、氨氮、TN、磷酸盐浓度分别为120~650、30~50、40~60、1~5

mg/L,相应的平均值分别为234.5、39.87、50.12和3.27 mg/L。试验装置的流量为100 L/d, HRT为9 h,反应器内的污泥浓度为2 000~4 000 mg/L,污泥龄(SRT)约为20 d,污泥回流比为100%。

接种污泥取自该污水厂的好氧池,采用间歇培养法进行培养。由于污泥取自好氧池,因此其硝化性能和活性较强。7 d后污泥絮体增大,沉降性能良好,出水无悬浮物,此时将污泥(MLSS约为2 200 mg/L)接种到反应器中。

在3 000 r/min的离心条件下分离待测水样,并用0.45 μm 微孔滤膜过滤。按照《水和废水监测分析方法》(第4版)的相关方法测定COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、磷酸盐等指标。pH值采用雷磁PHG-21D-1在线pH计测定,DO采用SJG-208溶解氧在线测定仪测定。

2 结果与讨论

2.1 稳定运行期DO的调控

该试验不控制进水pH值,仅通过调控DO浓度实现短程硝化的目的。DO作为影响氨氧化细菌(AOB)和亚硝酸盐氧化细菌(NO₂⁻)生长的重要因子,适当调整DO可以实现AOB的积累,从而建立优势种群。有研究表明^[6],较低的DO浓度更适合AOB的生长,且抑制NOB的生长。但过低的DO浓度会导致污泥中的丝状细菌大量增殖,致使污泥恶化;同时也降低了硝化速率,不利于硝化细菌的增殖,导致系统对污染物的去除率下降。该试验过程中,控制好氧1池的DO浓度为1.5~2 mg/L,好氧2池的DO浓度为0.5~1 mg/L,就可以达到较高的亚硝酸盐积累率,实现稳定的短程硝化。研究发现^[4,6],好氧池pH值要达到7.0以上,AOB才能正常增殖,短程硝化反应才可以顺利持久进行。尽管该试验中进水pH值波动较大,但好氧1池和好氧2池的pH值都明显较进水的低,且好氧2池的pH值较好氧1池的更低。按照硝化反应的特点,在反应过程中氨氧化细菌需要消耗碱度,导致体系的pH值变小;而由于好氧2池的溶解氧浓度更低,因此更适合AOB的生长。

成功启动反应装置后,继续保持较低的曝气量。在3个多月的稳定运行中,两座好氧池中溶解氧均保持较低浓度下的窄幅变动,好氧1池中DO浓度维持在1.5 mg/L左右,好氧2池中DO浓度维持在0.5 mg/L左右。

2.2 不同 HRT 下亚硝酸盐的积累情况

低氧条件下,考察不同 HRT 下好氧池中亚硝酸盐的变化,结果如图 2 所示。可以看出,HRT 不同时,亚硝酸盐浓度变化较大。不管是好氧 1 池还是好氧 2 池,在 HRT 为 9 h 的运行条件下,亚硝酸盐的积累量均高于 HRT 为 7 h 和 11 h 的,且 HRT 为 11 h 的亚硝酸盐积累情况要优于 HRT 为 7 h 的。但是 HRT 过长,也导致了日处理水量变小。从微生物学的角度考虑,由于 AOB 的世代周期较 NOB 短,因此在 SRT 不变的情况下,过长的 HRT 将起不到淘洗亚硝酸盐氧化细菌的作用,氨氧化细菌在种群中确立不了优势地位,所以亚硝化效果不佳。而过短的 HRT 将使氨氧化细菌也一起被淘洗掉,在系统中不能持续累积。所以合适的 HRT 不但会给 AOB 提供充分的基质,而且也会通过淘洗 NOB 使 AOB 成为优势菌种,从而使亚硝酸盐的积累浓度持续稳定地升高,最终达到峰值。

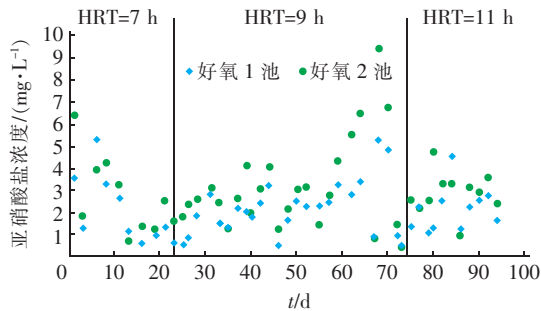


图 2 不同 HRT 下好氧池中亚硝酸盐的积累情况

Fig. 2 Accumulation of nitrite in aerobic units at different HRT

2.3 不同 HRT 下对氨氮的去除效果

图 3 为不同 HRT 下系统对氨氮的去除效果。可以看出,系统对氨氮的去除率随着 HRT 的增加而升高,当 HRT 为 7、9、11 h 时,系统对氨氮的去除率分别为 52.84%、84.27% 和 89.91%。出水氨氮浓度分别为 21.22、6.21 和 3.64 mg/L。分析原因,水力停留时间越长,氨氮被氧化的时间也越长,转化成了硝酸盐氮或亚硝酸盐氮,另外也有一部分被微生物同化为其自身的一部分。在 HRT 为 9 h 和 11 h 的条件下,出水氨氮浓度基本上都达到了排放标准,且当 HRT 为 9 h 时系统处理的水量更大,更有利于实际工程,更经济。氨氮的去除与 AOB 和 NOB 的数量密切相关,在该试验中由于氨氧化细菌是优势菌种,所以在较低溶解氧条件下系统对氨氮的去除

率依然较高。

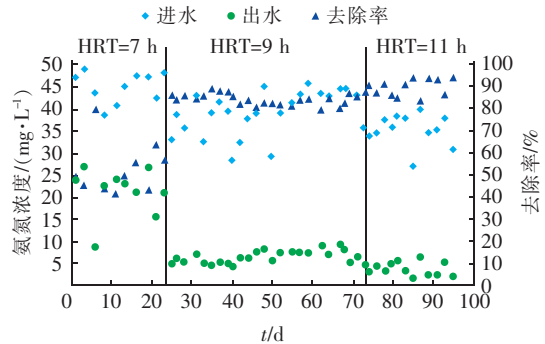


图 3 不同 HRT 下系统对氨氮的去除效果

Fig. 3 Removal effect of ammonia nitrogen at different HRT

2.4 不同 HRT 下对 COD 的去除效果

图 4 为不同 HRT 下系统对 COD 的去除效果。可以看出,进水 COD 在 100 ~ 350 mg/L 之间波动,但出水 COD 浓度为 20 ~ 85 mg/L。当 HRT 为 7、9、11 h 时,出水 COD 分别平均为 64.11、30.37 和 27.78 mg/L,对 COD 的平均去除率分别为 62.66%、82.31%、88.72%。可见,当 HRT 为 9 和 11 h 时,出水 COD 达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准。

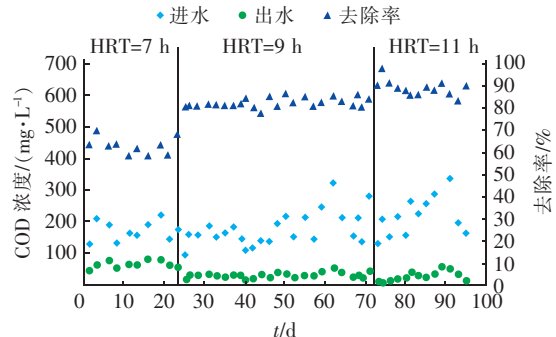


图 4 不同 HRT 下系统对 COD 的去除效果

Fig. 4 Removal effect of COD at different HRT

2.5 不同 HRT 下对总氮的去除效果

图 5 为不同 HRT 下系统对 TN 的去除效果。可以看出,HRT 对系统脱氮效果影响较大。当 HRT 为 7 h 时,进水 TN 平均浓度为 50.23 mg/L,出水 TN 平均浓度为 24.84 mg/L,且大多稳定在 25 mg/L 左右,平均去除率仅为 50.62%。当 HRT 为 9 h 时,进水 TN 浓度基本在 45 ~ 60 mg/L 之间,平均值为 49.2 mg/L,出水 TN 浓度为 5 ~ 10 mg/L,平均值为 7.97 mg/L,对 TN 的平均去除率为 83.82%,达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准。当 HRT 为 11 h 时,进水 TN

浓度为 35 ~ 60 mg/L, 平均值为 47.76 mg/L, 出水 TN 平均浓度为 6.23 mg/L, 达到一级 A 标准, TN 平均去除率为 86.8%。可见, 随着 HRT 的延长, 出水总氮浓度变小, 且当 HRT 为 9 h 时就能达标。同时, 系统对总氮的去除率也随着 HRT 的延长而增大。分析原因, 在比较长的水力停留时间下, 水中的 TN 可以被微生物充分同化和异化, 变成生物体内的细胞组成物质或氮气散逸到空气中。由于总氮主要包括氨氮和有机氮, 其中有机氮主要被系统内的微生物同化吸收, 所以对总氮的去除效果取决于对氨氮的去除。而本工艺的优势就在于可以在曝气池中氧气较低的情况下, 将水解后的总氮变为亚硝酸盐, 从而实现较好的脱氮效果。

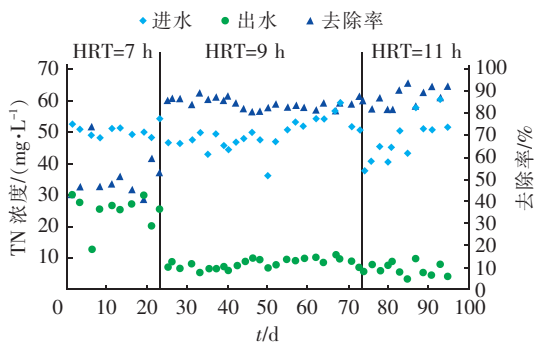


图5 不同 HRT 下系统对 TN 的去除效果

Fig. 5 Removal effect of TN at different HRT

2.6 不同 HRT 下对磷酸盐的去除效果

该反应装置设计了两种除磷方式, 常规厌氧/好氧除磷方式和厌氧/缺氧反硝化除磷方式。其中反硝化除磷不但节约了碳源, 实现了一碳两用, 而且将脱氮和除磷两个过程进行了耦合, 达到了同步去除的目的。图 6 为不同 HRT 下系统的除磷效果。可以看出, 当 HRT 为 7 和 11 h 时, 系统的除磷效果极不稳定, 大多数时间下出水磷酸盐浓度高于 1 mg/L。其中当 HRT 为 7 h 时, 出水磷酸盐平均浓度为 0.65 mg/L, 平均去除率为 78.41%; 当 HRT 为 11 h 时, 出水磷酸盐平均浓度为 1.47 mg/L, 平均去除率为 57.98%; 而当 HRT 为 9 h 时, 出水磷酸盐平均浓度能达到 0.39 mg/L, 达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 的一级 A 标准, 平均去除率为 87.41%。可见, 过长或过短的 HRT 都不利于生物除磷, 因为过短的 HRT 将导致水中的碳源不足, 故聚磷菌体内合成的 PHV (包括 PHA、PHB) 量少, 磷酸盐的释放不够充分, 所以在好氧段和缺氧

段吸收的磷就少, 即除磷率不高。

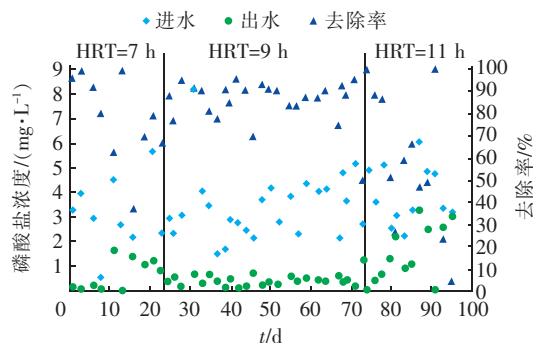


图6 不同 HRT 下系统的除磷效果

Fig. 6 Removal effect of orthophosphate at different HRT

2.7 游离氨浓度对亚硝酸盐积累的影响

游离氨在氨氮的生物硝化过程中起着很重要的作用, 它是 AOB 生长的基质^[4-5], 但当其浓度高于一定值后, 又会抑制 AOB 和 NOB, 且对 NOB 的抑制浓度更低。因此一定浓度的 FA 可以使 AOB 成为优势菌种, 出现亚硝酸盐的积累。FA 浓度的计算见式(1)^[6]。

$$[FA] = [NH_4^+ - N] \times 10^{pH} \div e^{6.344/(273 + T)} \quad (1)$$

从式(1)可以看出, FA 浓度决定于系统内的温度、氨氮浓度和 pH 值。本试验中, 由于进水的氨氮浓度和 pH 值很不稳定, 所以 FA 浓度起伏很大。在 HRT 为 9 h 条件下, FA 浓度对亚硝酸盐积累的影响如图 7 所示。可以看出, FA 浓度为 0.3 ~ 2 mg/L, 随着 FA 浓度的升高, 亚硝酸盐量增加。当 FA 浓度为 0.5 mg/L 以上时, FA 对 AOB 生长的促进作用明显。经计算, FA 浓度与亚硝化率存在着一定的线性关系: $y = 4.133x - 1.418$ (x 为 FA 浓度, y 为亚硝化率), 其中 $R^2 = 0.913$, 说明 FA 确实是影响亚硝酸盐积累的重要因素。

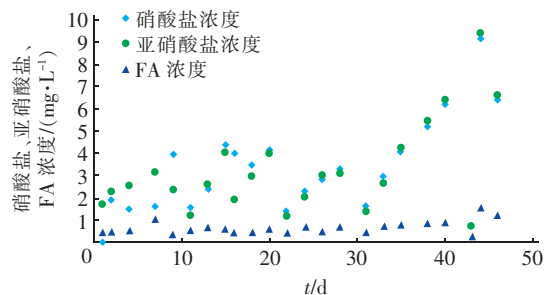


图7 FA 浓度对亚硝酸盐积累的影响

Fig. 7 Effect of FA concentration on accumulation of nitrite

3 结论

① 短程硝化成功启动后不调控进水 pH 值, 调节好氧 1 池溶解氧浓度为 1.5 ~ 2 mg/L、好氧 2 池溶解氧浓度为 0.5 ~ 1 mg/L, 进入到稳定运行期后, 当 HRT 为 9 h 时, 好氧池亚硝酸盐的积累效果最好。在此条件下, 系统对氨氮、COD、TN 和磷酸盐的去除率分别为 84.27%、82.31%、83.82% 和 87.41%, 且出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 的一级 A 标准。

② 本试验条件下, FA 浓度为 0.3 ~ 2 mg/L, 可促进氨氧化细菌的增殖, 且抑制亚硝酸盐氧化细菌的生长, 从而在好氧池中出现了亚硝酸盐的积累。

③ FA 浓度与亚硝化率存在一定的线性关系, $y = 4.133x - 1.418$, 其中 $R^2 = 0.913$ 。但由于 FA 浓度与诸多因素有关, 所以一般其只作为亚硝化积累效果好坏的一个间接参考指标。

参考文献:

- [1] 秦伯强, 许海, 董百丽. 富营养化湖泊治理的理论与实践[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
Qin Boqiang, Xu Hai, Dong Baili. The Principle and Practice of Eutrophic Lake Restoration and Management [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011 (in Chinese).
- [2] Wang C H, Zhu F, Zhao X, *et al.* The effects of N and P additions on microbial N transformations and biomass on saline-alkaline grassland of Loess Plateau of Northern China[J]. *Geoderma*, 2014, 213: 419 - 425.
- [3] Wang Y Y, Geng J J, Peng Y Z, *et al.* A comparison of endogenous processes during anaerobic starvation in anaerobic end sludge and aerobic end sludge from an anaerobic/anoxic/oxic sequencing batch reactor performing denitrifying phosphorus removal[J]. *Bioresour Technol*, 2012, 104: 19 - 27.
- [4] Zeng W, Li L, Yang Y Y, *et al.* Denitrifying phosphorus removal and impact of nitrite accumulation on phosphorus removal in a continuous anaerobic - anoxic - aerobic (A^2O) process treating domestic wastewater[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2011, 48(2): 134 - 142.
- [5] 吴昌永. A^2/O 工艺脱氮除磷及其优化控制的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
Wu Changyong. Optimazation of Biological Nitrogen and Phosphorus Removal in A^2/O Wastewater Treatment Process [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010 (in Chinese).
- [6] 支霞辉, 黄霞, 李朋, 等. 厌氧 - 好氧 - 缺氧短程硝化同步反硝化除磷工艺研究[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(9): 1806 - 1812.
Zhi Xiahui, Huang Xia, Li Peng, *et al.* Anaerobic - aerobic - anoxic shortcut nitrification coupled with simultaneous denitrifying phosphorus removal [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(9): 1806 - 1812 (in Chinese).



作者简介: 吴春英 (1973 -), 女, 吉林图们人, 博士, 副教授, 主要研究方向为生物脱氮处理以及污水资源化技术。

E-mail: chunyingwu.cn@gmail.com

收稿日期: 2018 - 12 - 22