

论述与研究

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.13.001

西安市第四污水处理厂 A^2/O 工艺的脱氮性能评价

田 敏¹, 崔 涛¹, 吕 恺², 赵文钊², 彭党聪²

(1. 西安市污水处理有限公司, 陕西 西安 710024; 2. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘 要: 通过对西安市第四污水处理厂 A^2/O 工艺中生物反应池(厌氧池、缺氧池、好氧池)以及二沉池中氮的组分及污泥硝化活性的测定,评价 A^2/O 工艺的脱氮性能。结果表明,二沉池作为 A^2/O 系统的分离单元,对总氮去除的贡献率高达 13% ~ 60%,脱氮机理主要是内源反硝化;污泥浓度对 TN 去除效果具有重要影响,当污泥浓度较高时,TN 平均去除率为 89%,当污泥浓度较低时,TN 平均去除率为 69%。二沉池中的内源反硝化脱氮可为我国城市污水处理厂高效生物脱氮工艺的设计、运行及提质增效提供参考。

关键词: A^2/O 工艺; 生物脱氮; 二沉池; 内源反硝化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)13-0001-06

Denitrification Performance Evaluation of A^2/O Process in Xi'an Fourth Wastewater Treatment Plant

TIAN Min¹, CUI Tao¹, LÜ Kai², ZHAO Wen-zhao², PENG Dang-cong²

(1. Xi'an Sewage Treatment Co. Ltd., Xi'an 710024, China; 2. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to evaluate the denitrification performance of A^2/O process in Xi'an Fourth Wastewater Treatment Plant, the nitrogen components and nitrification activity in the biological reaction tanks (anaerobic tank, anoxic tank and aerobic tank) and secondary sedimentation tank were determined. As the separation unit of the A^2/O process, the secondary sedimentation tank contributed as high as 13% - 60% of the TN removal, and the removal mechanism was endogenous denitrification. Sludge concentration had an important influence on the TN removal. When the sludge concentration was high, the average TN removal rate was 89%; when the sludge concentration was low, the average TN removal rate was 69%. The endogenous denitrification process in the secondary sedimentation tank can provide an important reference for design and operation of efficient biological nitrogen removal process and the improvement of effluent quality and treatment efficiency of WWTPs.

Key words: A^2/O process; biological nitrogen removal; secondary sedimentation tank;

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2019ZDLSF06-05)

通信作者: 彭党聪 E-mail: dcpeng@xauat.edu.cn

endogenous denitrification

作为污水处理中主要的生物脱氮除磷工艺, A^2/O 工艺在大中型城市污水处理厂得到了广泛应用。据不完全统计, 目前我国大中型城市污水处理厂 A^2/O 及其改进工艺比例高达 50% 以上。 A^2/O 工艺将生物脱氮(缺氧和好氧)和生物除磷(厌氧和缺氧)有机结合, 通过污泥在厌氧池、缺氧池、好氧池的顺序循环, 依次完成对有机物的吸收和释磷、反硝化及硝化等不同的生物过程, 从而达到对污水中有机物、氮和磷等污染物的同步降解和去除^[1]。

西安市第四污水处理厂作为我国最早建设的 A^2/O 工艺超大型(设计处理能力为 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$) 城市污水处理厂之一^[2], 虽然经历了 2012 年(厌氧池和缺氧池投加填料)和 2013 年(部分好氧池改为缺氧池, 改变污泥回流位置)两次改造^[3], 尤其是近期发现生物填料上稳定存在部分厌氧氨氧化(Anammox)菌^[4], 使得该污水厂的脱氮除磷效果备受关注, 但从工艺流程、生物反应器分区特征及混合液和污泥回流等关键环节看, 其生物反应特征仍属于典型的 A^2/O 工艺。Siegrist 等人^[5-6]研究发现, 二沉池存在反硝化脱氮, 脱氮占比为 15% ~ 30%, 而这一现象可能广泛存在于城市污水处理厂中。笔者通过对改造后的西安市第四污水处理厂一期工程 A^2/O 工艺中生物反应池(厌氧池、缺氧池、好氧池)以及二沉池中氮的组分、污泥硝化活性及硝化菌群结构的测定, 评价二沉池的脱氮性能, 以期为我国城市污水处理厂高效生物脱氮工艺的设计、运行及提质增效提供参考。

1 材料与方法

1.1 西安市第四污水处理厂简介

西安市第四污水处理厂一期工程设计规模为 $25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 采用两座并行的 A^2/O 生物反应池。主要设计参数如下: 厌氧池、缺氧池和好氧池的水力停留时间(HRT)分别为 2、2.6、6.4 h, 总 HRT 为 11 h; 污泥龄为 14 ~ 20 d。污泥回流比和混合液回流比分别为 100% 和 180%。缺氧池和厌氧池中安装潜水混合器, 保持污泥处于完全混合状态; 好氧池中安装刚玉盘式微孔曝气器进行曝气, 维持所需的溶解氧(DO)。厌氧池和缺氧池中设有 ORP 测定仪, 在线显示池内氧化还原电位。好氧池中设有溶解氧仪, 在线测定 DO 浓度, 并反馈至鼓风机, 随时调节

鼓风机送风量。

1.2 常规指标的分析方法

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 采用纳氏试剂分光光度法测定; TN 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 采用紫外分光光度法测定; MLSS 和 MLVSS 采用重量法测定。

1.3 硝化活性测定

硝化活性采用氧吸收速率法进行表征^[7]。测定方法如下: 取 1 000 mL 泥水混合物充分曝气, 曝气结束后, 取 800 mL 分别置于 2 个 400 mL 广口瓶中搅拌并记录 DO 浓度随时间的变化情况, 由此得到微生物内源呼吸速率(OUR)。然后向一份样品中加入 NH_4Cl 和 NaClO_3 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$: 20 mg/L; NaClO_3 : 0.02 mol/L) 并记录 DO 浓度变化, 测定氨氮氧化速率(AUR)。测定过程中添加 NaClO_3 的目的是抑制亚硝酸盐氧化菌(NO_B), 避免 NO_B 将氨氧化菌(AOB)氧化所得的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 进一步氧化, 保证 DO 均由 AOB 所消耗, 提高活性测定的准确性。向另一份样品中加入 NaNO_2 ($\text{NO}_2^- - \text{N}$: 20 mg/L) 并记录 DO 浓度变化, 测定亚硝态氮氧化速率(NUR)。测定结束后, 分别测定两个样品中的污泥浓度并计算硝化菌活性。

1.4 荧光原位杂交(FISH)

活性污泥样品的荧光原位杂交参照 Amann 等人^[8]的研究方法进行。杂交后的污泥样品采用激光共聚焦显微镜进行观察, 并在 100 倍物镜下采集图像。杂交中所用的 16S rRNA 探针如下: 探针 Eub338 (GCTGCCTCCGTAAGT)、Eub338 II (GCAGCCACCCGTAGGTGT)、Eub338 III (GCTGCCACCCGTAGGTGT) 标记 Real bacteria, 探针 Nso1225 (CGCCATTGTATTACGTGTGA) 标记 $\beta - \text{Proteobacteria}$ (为 AOB), 探针 Nsm156 (TATTAGCACATCTTTCGAT) 标记 *Nitrosomonas* spp., 探针 Nsv443 (CCGTGACCGTTTCGTTCCG) 标记 *Nitrospira* spp., 探针 Ntspa662 (GGAATTCGCGCTCCTCT) 标记 Genus *Nitrospira*, 探针 Nit3 (CCTGTGCTCCATGCTCCG) 标记 Genus *Nitrobacter*。

1.5 取样点及脱氮量计算

试验设计 7 个采样点(见图 1), 分别为生物池进水①、污泥回流②、厌氧池出水③、混合液回流④、缺氧池出水⑤、好氧池出水⑥和二沉池出水⑦。采

样时取 9:00、14:00 和 18:00 三个时刻的水样并等比例混合。

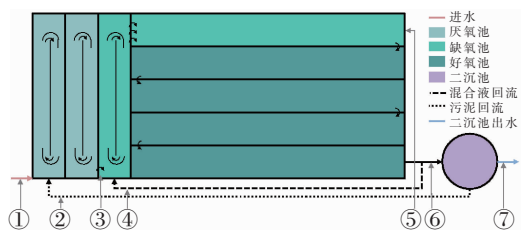


图 1 污水处理系统平面示意及取样点布置

Fig. 1 Plane of sewage treatment system and sampling points

为表征各处理单元对总氮的去除贡献,依据物料衡算采用以下方法计算各单元的脱氮量。

总氮去除率的计算方法:

$$\eta_{\text{TN}} = \frac{c_0^{\text{TN}} - c_e^{\text{TN}}}{c_0^{\text{TN}}} \quad (1)$$

氮的去除包括两部分:一部分为反硝化脱氮;另一部分为细胞增殖所消耗的氮。总脱氮量及各单元的脱氮量按以下公式计算。

总脱氮量:

$$\Delta w_{\text{TN}} = Qc_0^{\text{TN}} - Qc_e^{\text{TN}} \quad (2)$$

厌氧池的脱氮量:

$$\Delta w_{\text{TN}}^{\text{ana}} = Qc_0^{\text{NO}_3^- - \text{N}} + \alpha Qc_6^{\text{NO}_3^- - \text{N}} - (1 + \alpha) Qc_1^{\text{NO}_3^- - \text{N}} + \Delta G_{\text{TN}}^{\text{ana}} \quad (3)$$

缺氧池的脱氮量:

$$\Delta w_{\text{TN}}^{\text{ano}} = (1 + \alpha) Qc_1^{\text{NO}_3^- - \text{N}} + \beta Qc_2^{\text{NO}_3^- - \text{N}} - (1 + \alpha + \beta) Qc_3^{\text{NO}_3^- - \text{N}} + \Delta G_{\text{TN}}^{\text{ano}} \quad (4)$$

好氧池的脱氮量:

$$\Delta w_{\text{TN}}^{\text{aer}} = \Delta G_{\text{TN}}^{\text{aer}} \quad (5)$$

二沉池的脱氮量:

$$\Delta w_{\text{TN}}^{\text{cla}} = (1 + \alpha) Qc_4^{\text{NO}_3^- - \text{N}} - Qc_5^{\text{NO}_3^- - \text{N}} - \alpha Qc_6^{\text{NO}_3^- - \text{N}} + \Delta G_{\text{TN}}^{\text{cla}} \quad (6)$$

各反应池对总氮去除的贡献率 γ_i :

$$\gamma_i = \frac{\Delta w_{\text{TN}}^i}{\Delta w_{\text{TN}}} \quad (7)$$

式中: η_{TN} 为总氮去除率,%; Q 为进水流量, m^3/d ; α 为污泥回流比,本研究中为 100%; β 为混合液回流比,本研究中为 180%; Δw_{TN} 为总脱氮量, kg/d ; Δw_{TN}^i 为各处理单元的脱氮量, kg/d ; c_0^{TN} 为进水总氮浓度, mg/L ; c_e^{TN} 为二沉池出水总氮浓度, mg/L ; ΔG_{TN}^i 为各处理单元用于细胞合成的氮, kg/d ; $c_1^{\text{NO}_3^- - \text{N}}$ 为厌氧池出水硝态氮浓度, mg/L ; $c_2^{\text{NO}_3^- - \text{N}}$ 为回流混合液

硝态氮浓度, mg/L ; $c_3^{\text{NO}_3^- - \text{N}}$ 为缺氧池出水硝态氮浓度, mg/L ; $c_4^{\text{NO}_3^- - \text{N}}$ 为好氧池出水硝态氮浓度, mg/L ; $c_5^{\text{NO}_3^- - \text{N}}$ 为二沉池出水硝态氮浓度, mg/L ; $c_6^{\text{NO}_3^- - \text{N}}$ 为回流污泥的硝态氮浓度, mg/L 。

2 结果与讨论

2.1 A²/O 工艺的脱氮效果

对该污水处理厂进行了为期 9 个月的连续监测,总氮去除效果见图 2。测定期间,进水总氮浓度在 25 ~ 47 mg/L 之间,去除率为 59.88% ~ 93.82%。2018 年 12 月—2019 年 4 月,出水总氮浓度均在 5 mg/L 以下;2019 年 5 月以后,出水总氮浓度开始升高,但维持在 10 mg/L 左右。虽然出水总氮浓度发生了变化,但其仍在《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准限值范围内,可以达标排放。

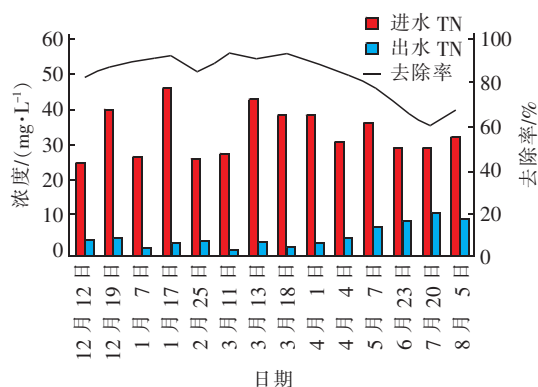


图 2 进出水总氮浓度及去除率的变化

Fig. 2 Variation of TN concentration in influent and effluent and TN removal efficiency

2.2 典型氮组分的沿程变化

图 3 为典型氮组分的沿程变化情况(冬季水温为 13 ~ 16 $^{\circ}\text{C}$,夏季水温为 16 ~ 23 $^{\circ}\text{C}$)。可以看出,当水温不同时,氮组分在部分处理单元内存在明显差异。在冬季,水温较低,硝化活性较低,氨氮不能完全被氧化,好氧池出水中氨氮浓度为 1 ~ 4 mg/L ,占总氮的比例为 30% ~ 50%,出水总氮由氨氮和硝态氮联合贡献;在夏季,水温较高,硝化活性较高,氨氮几乎完全被氧化为硝态氮,好氧池出水中氨氮浓度均在 1 mg/L 以下,占总氮的比例 < 10%,出水总氮主要由硝态氮贡献。对于回流混合液中的总氮浓度,冬季与夏季均呈现下降趋势,且最大降幅为 1 mg/L ;氨氮的减少是因为硝化菌利用剩余溶解氧继续进行硝化反应所致,而硝态氮的减少主要是因为

回流过程中反硝化的进行。对于二沉池出水,冬季出水总氮在 5 mg/L 以下,夏季出水总氮维持在 10 mg/L 左右,其主要原因是污泥浓度发生了变化。在 1 月—3 月(水温为 13.8 ~ 15.8 °C),为增强硝化能力,污水厂以长污泥龄运行,污泥浓度可达到 10 000 mg/L 以上,当污泥浓度较高时,污泥沉降性能变差,二沉池中泥位升高,这使得泥水分离过程中活性污泥与水中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 有较长的接触时间,内源反硝化过程也就能进行得更彻底。在 4 月—8 月(水温为 16.3 ~ 22.7 °C)硝化能力增强,相比 1 月—3 月,污水处理厂污泥龄缩短,污泥浓度维持在 6 000 ~ 7 000 mg/L 之间,污泥沉降性变好,活性污泥与水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的接触时间较短,出水总氮浓度升高。综上,各处理单元沿程氮组分会随水温的不同而发生变化。

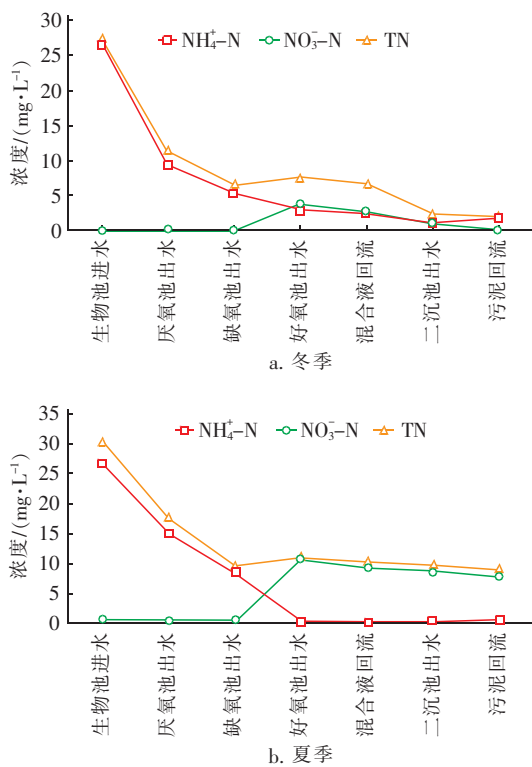


图3 典型氮组分的沿程变化

Fig. 3 Variation of nitrogen components along treatment process

2.3 各单元对总氮去除的贡献

氮的去除包括两部分,一部分为经反硝化所去除的氮,另一部分为用于细胞合成而去除的氮。为核算各处理单元对总氮去除的贡献,需确定每一处理单元用于细胞合成所去除的氮。在污水处理过程

中,用于细胞合成的氮大约为总氮去除量的 5% ~ 11%^[9-10],且这一过程主要发生在好氧池。依据各单元氮组分的测定结果,假定污水处理过程中用于同化作用的氮占 TN 的 8%,其中厌氧池和二沉池均为 0.5%、缺氧池和好氧池分别为 2% 和 5%,利用式(1)~(7)对各处理单元去除总氮的贡献进行计算,结果见图 4。可以看出,各单元对总氮去除的贡献占比随水温的不同而发生变化。当水温较低时,总氮的去除主要发生在缺氧池和二沉池,其最大脱氮占比分别为 81.45% 和 27.11%;当水温较高时,除缺氧池和二沉池外,厌氧池也起脱氮作用,相应的最大脱氮占比分别为 56.44%、59.93% 和 43.19%。厌氧池进行反硝化反应主要是因为回流污泥中含有硝态氮所致,硝态氮进入厌氧池后,厌氧池的厌氧状态发生变化,聚磷菌难以进行释磷过程,从而对除磷过程产生影响。二沉池作为 A²/O 系统的分离单元,当水温较低时,对总氮去除的贡献率为 13% ~ 27%;水温较高时,对总氮去除的贡献率为 23% ~ 60%,因此,二沉池对总氮的去除贡献不可忽略。

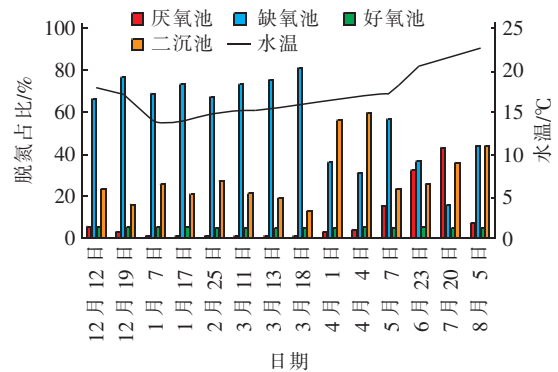


图4 各单元对总氮去除的贡献

Fig. 4 Contribution of each treatment unit to nitrogen removal

2.4 硝化活性及硝化菌群种群结构

2018 年 12 月—2019 年 8 月的污泥硝化活性测定结果如图 5 所示。可知,第四污水处理厂大部分时间内污泥硝化活性良好,AOB 活性最高为 2.58 mg/(gVSS · h)、最低为 0.72 mg/(gVSS · h)、平均为 1.60 mg/(gVSS · h),NOB 活性最高为 4.58 mg/(gVSS · h)、最低为 1.46 mg/(gVSS · h)、平均为 2.90 mg/(gVSS · h)。NOB 活性均高于 AOB 活性,NOB 平均活性约为 AOB 平均活性的 1.8 倍。2019 年 4 月—8 月,硝化菌活性相对较高,这与该时间段较高的水温更有利于硝化反应的进行有关。硝化菌

活性的变化直接影响好氧池出水氮组分的变化。冬季水温较低,硝化菌活性较低,氨氮不能完全氧化为硝态氮,使得好氧池出水含有一定氨氮;随着水温升高,硝化菌活性增强,好氧池出水氨氮占比减小,尤其在夏季,好氧池出水中的氮几乎全为硝态氮。

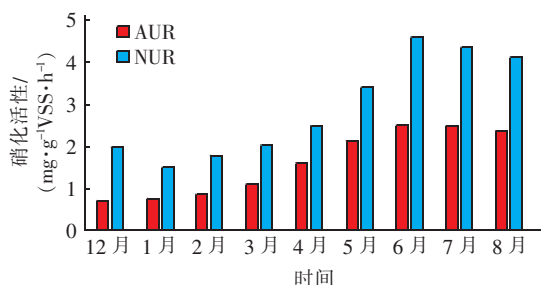


图 5 硝化活性的变化

Fig. 5 Variation of nitrification activity

通过 FISH 技术研究活性污泥絮体中硝化菌的分布情况,结果如图 6 所示(蓝色:总菌;青色:AOB;粉色:NOB)。在活性污泥絮体中,硝化菌以聚集体的形态存在,且主要生长在活性污泥絮体的内部,这是由于硝化菌相较于异养菌具有更低的氧亲和力与增长速率。同时,NOB 菌群通常位于 AOB 菌群的附近,这种空间结构不仅反映了硝化反应中 AOB 和 NOB 的协同作用及互营关系,也缩短了中间产物亚硝酸盐的扩散距离。利用 Image-pro plus 软件对污泥中硝化菌占比进行计算,结果显示,硝化菌所占份额较低,为微生物总量的 8.11%,其中 AOB 占 3.65%、NOB 占 4.46%。

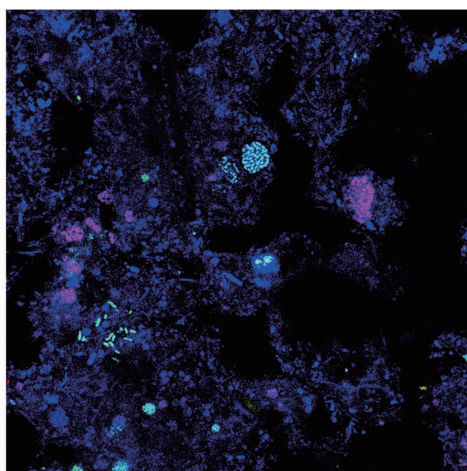


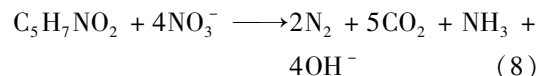
图 6 活性污泥絮体中硝化菌的 FISH 分析

Fig. 6 FISH analysis of nitrifying bacteria in activated sludge

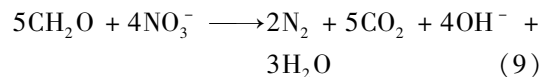
2.5 各单元脱氮路径分析

A²/O 工艺主要以硝化-反硝化为脱氮机理,其

中硝化过程主要是在好氧池进行,而反硝化过程进行的场所则随 DO 浓度的不同而发生变化,这就使得各单元脱氮路径也发生相应的变化。厌氧池是聚磷菌进行释磷过程的场所,当污泥回流中含有硝态氮时,厌氧池中优先进行反硝化,这一点已被大量试验和现场观测所证实^[10]。缺氧池是脱氮的主要场所,其脱氮路径主要包括生物反硝化(以氮气形式逸出)和细胞合成(以污泥的形式排出)。好氧池是进行硝化过程的主要场所,除进行硝化反应外,还起到除磷和降解剩余有机物的作用。好氧池内总氮的去除主要以细胞合成为主,其约占总氮去除量的 5%~8%。二沉池作为 A²/O 系统的分离单元,主要起泥水分离的作用,其对脱氮的贡献经常被忽略。钱亮等人^[3]也发现西安市第四污水处理厂二沉池存在反硝化脱氮,导致回流污泥中的硝态氮浓度降低。由于二沉池中的 COD 浓度已经很低,因此,其脱氮过程主要是利用内源碳(细胞体)进行反硝化,细胞体的化学结构通式为 C₅H₇NO₂,内源反硝化的化学计量反应方程式如下:



由式(8)可以看出,每去除 4 mol 的硝态氮,同时产生 1 mol 的氨氮。在对回流污泥中的氮组分进行检测时发现,随着硝态氮浓度的降低,氨氮浓度也会升高,但其增幅小于利用细胞体进行反硝化过程的理论值,这说明二沉池中的脱氮过程不光以细胞体作为反硝化的碳源,其还可利用污泥絮体内储存的有机物进行反硝化过程,以 CH₂O 为碳源进行反硝化时,其化学计量反应方程式如下:



由于二沉池的设计 HRT 一般为 2~2.5 h,而污泥停留时间更长,为内源反硝化创造了良好的条件,导致二沉池对整个处理系统的脱氮贡献较大。

3 结论

① 二沉池作为 A²/O 系统的分离单元,对总氮去除的贡献率高达 13%~60%,脱氮机理主要是内源反硝化。

② 污泥浓度对 TN 去除效果具有重要影响。当污泥浓度较高时,TN 平均去除率为 89%;当污泥浓度较低时,TN 平均去除率为 69%。

③ 二沉池中的内源反硝化脱氮可为我国城市

污水处理厂高效生物脱氮工艺的设计、运行及提质增效提供参考。

参考文献:

- [1] 彭党聪. 水污染控制工程[M]. 北京:冶金工业出版社,2010.
Peng Dangcong. Water Pollution Control Engineering [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010 (in Chinese).
- [2] 张欣蓓. 西安市第四污水处理厂工程项目后评估研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2013.
Zhang Xinbei. Study on the System of Post-project Assessment Using in the Xi'an Fourth WWTP [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013 (in Chinese).
- [3] 钱亮,贺北平,刘瑞东,等. 西安市第四污水处理厂一期工程升级改造经验总结[J]. 中国给水排水,2016, 32(2):74-78.
Qian Liang, He Beiping, Liu Ruidong, *et al.* Summary of experience in upgrading and reconstruction of first stage project of Xi'an Fourth WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(2):74-78 (in Chinese).
- [4] Li J, Peng Y, Zhang L, *et al.* Quantify the contribution of anammox for enhanced nitrogen removal through metagenomic analysis and mass balance in an anoxic moving bed biofilm reactor[J]. Water Res, 2019, 160: 178-187.
- [5] Siegrist H, Krebs P, Bühler R, *et al.* Denitrification in secondary clarifiers [J]. Water Sci Technol, 1995, 31(2):205-214.
- [6] Koch G, Pianta R, Krebs P, *et al.* Potential of denitrification and solids removal in the rectangular clarifier[J]. Water Res, 1999, 33(2):309-318.
- [7] 王建龙,吴立波,齐星,等. 用氧吸收速率(OUR)表征活性污泥硝化活性的研究[J]. 环境科学学报,1999, 19(3):225-229.
Wang Jianlong, Wu Libo, Qi Xing, *et al.* Characterization of nitrification activity of activated sludge by oxygen uptake rate (OUR) [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1999, 19(3):225-229 (in Chinese).
- [8] Amann R I, Krumholz L, Stahl D A. Fluorescent-oligonucleotide probing of whole cells for determinative, phylogenetic, and environmental studies in microbiology [J]. J Bacteriol, 1990, 172(2):762-770.
- [9] 付国楷,张春玲,喻晓琴,等. 低碳源城市污水厂碳源优化利用运行模式研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2012,39(8):61-66.
Fu Guokai, Zhang Chunling, Yu Xiaoqin, *et al.* Research on the optimum operation strategy for deficient carbon source urban sewage treatment plants [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2012, 39(8):61-66 (in Chinese).
- [10] 任武昂. 城市污水输送、处理过程中氮组分的迁变特性及转化规律研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2015.
Ren Wu'ang. The Study of Migration Characteristics and Transforming Discipline of Nitrogen Compounds in the Transportation and Treatment Process of Urban Wastewater [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015 (in Chinese).



作者简介:田敏(1977-),女,陕西西安人,大学本科,高级工程师,主要从事污水处理工艺运行管理方面的工作。

E-mail:1018756150@qq.com

收稿日期:2020-03-03