

基于短程硝化反硝化污水厂处理能效提升研究

沈昌明

(上海同济环境工程科技有限公司, 上海市 200082)

摘要: 传统污水处理工艺能耗高、成本大等问题突出。短程硝化反硝化技术受到越来越多的关注。现剖析该技术在节省曝气量、降低污泥产量、节省碳源等方面的优势; 探讨其应用边界, 包括影响因素和运行控制条件。通过某污水厂工程实例, 改造曝气系统调控溶解氧后, 出水总氮明显下降, 去除率提升15.95%, 系统中约有71%的传统反硝化, 29%的短程反硝化。同时指出该技术在保证硝化过程、自控难度、溶解氧数据准确性等方面的挑战。该技术在实际情况具有应用潜力, 但需克服挑战, 以推动污水处理领域可持续发展。

关键词: 短程硝化反硝化; 溶解氧调控; 应用挑战

中图分类号: TU992.03*2

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)05-0167-05

Research on Treatment Efficiency Improvement of Wastewater Treatment Plant Based on Short-range Nitrification and Denitrification

SHEN Changming

(Shanghai Tongji Environmental Engineering Technology Co., Ltd. Shanghai 200082, China)

Abstract: Traditional sewage treatment processes are confronted with the prominent issues such as high energy consumption and high costs. The shot-range nitrification and denitrification technology has received more and more attention. The advantages of this technology in the aspects of saving aeration volume, decreasing sludge production and saving carbon sources are analyzed. Its application boundaries, including influencing factors and operation control conditions are discussed. Through an engineering case of a wastewater treatment plant (WWTP), after the reconstruction of aeration system to regulate the dissolved oxygen, the total nitrogen in the effluent has been significantly decreased, and the removal rate is improved by 15.95%. There are about 71% conventional denitrification and 29% short-range denitrification in the system. Meanwhile, it is pointed out the challenges faced by this technology in the guarantee of nitrification process, the difficulty of automatic control and the accuracy of dissolved oxygen data. This technology has the application potential in practical situations, but needs to overcome these challenges to promote the sustainable development of the sewage treatment field.

Keywords: short-range nitrification and denitrification; dissolved oxygen regulation; application challenges

0 引言

在城市化进程不断加速的当下, 市政污水产生量呈现出日益增长的态势, 如何有效处理这些污水, 已然成为环境保护领域的关键研究课题。传统的污水处理工艺, 在面对不断增多的污水时, 其弊端逐渐凸显, 例如能耗过高、污泥产量大以及处理成本高等问题, 严重制约了污水处理工作的高效开展。

在此背景下, 短程硝化反硝化技术作为一种新型的污水处理方法, 逐渐受到关注^[1-4]。该技术主要通过将氨氮氧化精准控制在亚硝酸盐阶段, 随后直

接进行反硝化反应。与传统工艺相比, 这一技术可显著缩短反应历程, 从而具有诸多优势。一方面, 能够有效减少曝气量, 进而降低能耗; 另一方面, 还能减少污泥产量, 从而削减污泥处理和处置过程中产生的成本。

因此, 短程硝化反硝化技术的研究愈发重要。这不仅对于提升污水处理效能、削减成本有着关键的现实价值, 而且能够为污水处理领域朝着可持续发展方向提供支撑。

1 短程硝化反硝化技术的优势

以上海地区为例, 24.3%的污水处理厂进水BOD₅/TKN值小于3, 27.0%的污水处理厂进水BOD₅/TKN值为3~4。再以江苏部分地区为例, 有研究表明,

收稿日期: 2025-02-12

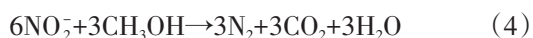
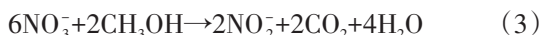
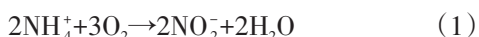
作者简介: 沈昌明(1980—), 男, 博士, 高级工程师, 从事水污染控制与绿色低碳相关研究与应用工作。

30.4% 污水处理厂的进水 BOD_5/TN 值大于 4, 21.7% 污水处理厂的进水 BOD_5/TN 值为 3~4, 39.1% 污水处理厂 BOD_5/TN 值为 2~3, 超过 60% 的污水处理厂进水碳源处于不足或相对不足的状态^[5], 大多污水厂进水存在高氮低碳的问题。

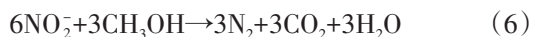
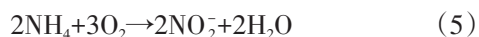
近年来,我国污水排放标准也在不断提升。在环保政策持续强化的背景下,污水处理厂排放限值体系逐步完善,其核心控制指标已由早期执行的一级 B、一级 A 标准体系,全面过渡至对标地表水环境质量标准 IV 类的精细化管控阶段。此类标准的迭代升级,不仅体现了水环境治理目标的提升,更对污水处理工艺优化、运行成本控制及技术适应性提出了系统性考验。其中苏州市为了提高环保管理水平,保护和改善环境质量,针对污水处理厂尾水排放制定了“苏州特别排放限值标准”。高标准的出水要求也给污水厂的高效运营带来了挑战。

传统和短程技术的化学反应方程式如式(1)~(6)所示。通过化学计量计算,每 1 g 氨氮(NH_4^+)氧化为亚硝酸盐(NO_2^-)的氧气(O_2)约为 3.43 g,而每 1 g NH_4^+ 完全氧化为硝酸盐(NO_3^-)的 O_2 约为 4.57 g,所以短程比传统可节省约 $(4.57-3.43) \div 4.57 \times 100\% \approx 25\%$ 的氧量。这一过程所需的 O_2 量大大减少,从而显著降低了曝气设备的运行时间和功率消耗,进而节省了大量的能耗^[7]。

传统硝化反硝化反应过程如下:



短程硝化反硝化反应过程如下:



在碳源利用方面,短程硝化反硝化技术同样具有优势。传统反硝化是将硝酸盐(NO_3^-)先还原为亚硝酸盐(NO_2^-),再进一步还原为氮气(N_2),这一阶段需要消耗大量的碳源。而短程反硝化是直接将亚硝酸盐还原为氮气,能够在较低的碳源投入下完成脱氮过程^[8-9]。从反应的化学计量关系可知,还原 1 g 硝酸盐为氮气理论上需要碳源(以甲醇计)约 2.47 g,而还原 1 g 亚硝酸盐为氮气理论上需要碳源(以甲醇计)约 1.53 g,因此短程反硝化相比传统反硝化节省碳源约近 40%。因此,污水处理厂在处理低碳高氮污水时,可减少外源碳源投加,降低成本^[10]。

2 短程硝化反硝化技术的应用边界

短程硝化反硝化技术应用于市政污水处理时,对处理规模并无限制,而且因其短程脱氮原理,对处理高氮低碳污水优势显著。目前,该技术大多用于小试及中试场景,实际工程化应用较少。

2.1 影响因素

硝化反硝化的反应过程主要由亚硝化菌和硝化菌控制,而这两种菌的生长速率则受多种因素影响。其中主要包括基质的类别与浓度、所处环境的温度、系统的 pH 值、溶解氧的把控等^[11]。

(1)温度。在高温环境中,硝化菌的生长速率明显低于亚硝化菌。因此,污水处理厂在夏季容易发生短程硝化反硝化过程,出水中的亚硝酸盐浓度比较高^[12]。

(2)pH 值。pH 值对短程硝化作用的影响主要体现在以下两个方面:其一,亚硝化菌的生长存在一个最为适宜的 pH 值环境条件,在该条件下,亚硝化菌的活性与生长态势最佳;其二,pH 值与游离氨浓度之间存在着紧密的关联。当 pH 值处于较高水平时,废水中游离氨的占比会显著上升。值得注意的是,相较于亚硝化菌,分子态游离氨氮对硝化菌的抑制效应更为显著,会在很大程度上限制硝化菌的代谢活动与生长繁殖^[13]。

(3)溶解氧(DO)。Bernet^[14]认为亚硝化菌与硝化菌对 O_2 的亲合程度各有差异。当 $DO < 1.0 \text{ mg/L}$ 时(低 DO 水平),两种菌的增值速率均降低,但硝化菌增值速率降幅 > 亚硝化菌增值速率降幅。当 $DO = 0.5 \text{ mg/L}$ 时(中 DO 水平),亚硝化菌 = 其 60% 正常增值速率,硝化菌 < 其 30% 正常增值速率。这种差异使得亚硝化菌在竞争中占据优势,成为菌群中的主体,从而实现亚硝态氮在体系内的有效累积^[15]。

(4)泥龄。以控制泥龄来达成短程反硝化,其必要条件是亚硝化菌的生长速率显著快于硝化菌,且亚硝化菌的最短停留时长比硝化菌更短。在实际操作中,只要将系统的泥龄调控在亚硝化菌与硝化菌最短停留时长的区间内,就能让亚硝化菌大量繁衍,保持较高浓度,而硝化菌则因无法适应这种环境逐渐被淘汰。这样一来,系统中亚硝酸氮的积累得以稳定维持,进而成功实现短程反硝化。

(5)有机物浓度。有机物的影响主要表现为异养菌与硝化菌对 DO 的竞争。在温度与 pH 值适宜的情况下,同时 DO 和氨供应充沛的情况下,有机物浓

度不会对硝化过程产生干扰。然而,一旦 DO 含量不足且有机物浓度偏高,由于异养菌对水中 DO 的摄取能力强于硝化菌,硝化菌的生长与繁殖便会受到抑制,进而使得硝化作用的正常进行遭到阻碍^[16]。

2.2 运行控制条件

针对以上影响因素,在实际运行中,污水厂主要可以从 DO 进行控制^[17-19]。低 DO 条件下,亚硝化过程速率超过硝化过程速率,反应池中出现亚硝酸盐累积,这为短程硝化反硝化创造了条件。

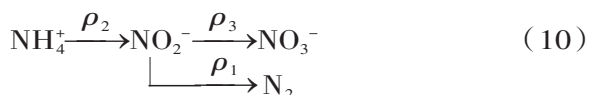
根据加拿大 Hydromantis 公司的二阶 mantis 模型^[20],在稳态条件下,对生长速率进行一定的简化,其中异养菌的生长速率 ρ_1 、亚硝化菌的生长速率 ρ_2 、硝化菌的生长速率 ρ_3 如下所示:

$$\rho_1 = \mu_{\text{H}} K_1 \left(\frac{K_{\text{AD}}}{K_{\text{AD}} + S_0} \right) X_{\text{BH}} \quad (7)$$

$$\rho_2 = \mu_{\text{AI}} K_2 \left(\frac{S_0}{K_{\text{OAI}} + S_0} \right) X_{\text{BAI}} \quad (8)$$

$$\rho_3 = \mu_{AA} K_3 \left(\frac{S_0}{K_{OAA} + S_0} \right) X_{BAA} \quad (9)$$

式中: μ_{H} 、 μ_{AI} 、 μ_{AA} 分别为异养菌、亚硝化菌、硝化菌的最大比生长速率; X_{BH} 、 X_{BAI} 、 X_{BAA} 分别为异养菌、亚硝化菌、硝化菌的生物量浓度; K_{AD} 、 K_{OAI} 、 K_{OAA} 分别是与底物相关的半饱和常数; S_0 为 DO 浓度; K_1 与可生物降解 COD 浓度、亚硝态氮浓度、氨氮浓度、硝态氮浓度有关; K_2 与氨氮、硝态氮浓度有关; K_3 与亚硝态氮、氨氮浓度有关。



由公式(7)~(10)可知,其中 ρ_2 决定了氨氮的去除情况,而 ρ_1 和 ρ_3 则决定了异养菌和硝化菌对DO的争夺情况,那么调控DO可以改变反应速率,促使短程反硝化反应的发生。随着DO的降低, ρ_2 也在降低,当DO=0.3 mg/L时, ρ_2 处于劣势,所以为保证氨氮的去除,DO值存在下限。另外,当DO=1.0 mg/L, ρ_1 明显高于 ρ_3 ,异养菌对水中的亚硝酸盐争夺强于硝化菌,当DO=0.5 mg/L, ρ_1 和 ρ_3 的数值相当, NO_2^- 可实现短程反硝化变成 N_2 。

2.3 评价方法

根据公式(1)~(4)的分析可得,传统反硝化时,去除 1 g NO_3^- -N 相当于 2.86 g O_2 ,去除 1 g COD 需要 $(1-Y_H)$ g O_2 ,也就是需要 $(1-Y_H)/2.86$ g NO_3^- -N,因此完成反硝化所需的 C/N 值如下式所示:

$$\text{COD/NO}_3^- - \text{N} = 2.86/(1 - Y_{\text{H}}) \quad (11)$$

而根据公式(5)、(6),短程反硝化时,去除1 g NO_2^- -N相当于1.72 g O_2 ,因此完成短程反硝化所需的C/N值如公式(12)所示:

$$\text{COD}/\text{NO}_3^- - \text{N} = 1.72/(1 - Y_{\text{H}}) \quad (12)$$

在缺氧条件下, COD 有 $Y_H \cdot \text{COD}$ 用于生长, $(1-Y_H) \text{COD}$ 用于反硝化, 综合来说, 所以 1 g COD 去除 N 量可由公式(13)、(14)计算得到。

$$k_1 = f_N Y_H + \frac{1 - Y_H}{2.86} \quad (13)$$

$$k_1 = f_N Y_H + \frac{1 - Y_H}{1.72} \quad (14)$$

3 实际应用分析

此次工程应用在市政污水厂开展,示范工程处理规模为 4×10^4 m³/d。该污水厂采用AAO工艺,出水标准为地表准IV类。

3.1 现状问题

(1)根据提标改造要求,该污水厂出水标准提高到地表准IV类,其中总氮内控标准提高到8 mg/L。

(2) BCOD 值(可生物降解 COD)通常为进水 COD_{cr} 浓度的 70%~80%,本次取值为 75%(以下 COD 均为 BCOD),该污水厂 2024 年 7 月 C/N 为 3.24~5.14,平均 C/N 为 4.27,内碳源不足支撑达到内控标准,投加碳源成本较高。

3.2 控制策略

(1)改造部分:本次主要通过改造曝气系统,增加风管阀门,增加DO仪表,通过自控系统调控生化池DO。

(2)控制部分:根据本文2.2节运行控制条件,本次主要通过控制生化池阶梯DO,通过调控DO值,调控亚硝化速率和硝化速率,给反应池中亚硝酸盐的累积提供条件,从而达到短程硝化反硝化的效果。

3.3 结果分析

(1) 脱氮效果

2024年7月进出水TN数据统计情况见图1所示。

由图1可知,未改造组的出水TN范围为6.03~11.39 mg/L,平均值为9.17 mg/L。改造组的出水TN范围为2.45~7.46 mg/L,平均值为4.28 mg/L,统计时间内,改造组均达到内控标准。未改造组的TN去除率为57.99%~82.28%,平均为69.95%;改造组的TN去除率为75.38%~92.39%,平均为85.89%,改造组的平均去除率比未改造组大15.95%。

(2) 数据分析

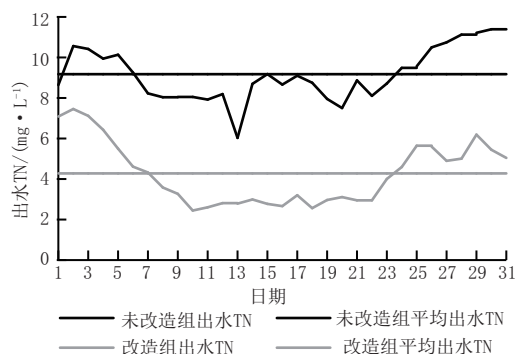


图1 出水TN数据图(2024年7月)

根据公式(12)、(13), f_N 为活性污泥百分比,通常为7%, Y_H 为缺氧污泥转化率,通常取0.5,通过计算可得,传统反硝化所需的C/N为4.77,短程反硝化所需的C/N比为3.07,2024年7月平均进水C/N为4.27,根据叉乘法计算可知,此次改造组中,约有71%的传统反硝化,29%的短程反硝化。根据理论计算公式可知,随着C/N比的降低,短程反硝化的占比随之升高,7月C/N比最低为3.24,此时,短程反硝化占比为90%。

4 短程硝化反硝化技术的挑战

(1)保证硝化过程。 NH_4^+ 被亚硝酸菌转化为 NO_2^- 的过程中,需要适宜的DO浓度,从而维持亚硝酸菌的代谢活动。亚硝酸细菌在DO处于一定范围时,能够高效地进行氨氮氧化反应。但这个适宜的DO浓度范围相对较窄,如果DO浓度过低,亚硝酸菌获取的氧气不足,氨氮氧化反应速率会减缓,导致氨氮氧化不完全;反之,若DO浓度过高,虽然能满足亚硝酸菌的需氧要求,但可能会刺激硝酸菌过度生长。硝酸菌会将 NO_2^- 进一步氧化为 NO_3^- ,这就打破了短程硝化反硝化中氨氮氧化停留在 NO_2^- 阶段的平衡,使得后续反硝化缺乏合适的底物,最终导致脱氮效率降低。

(2)实现精准实施自控。短程硝化反硝化过程复杂,涉及多种微生物和生化反应,要实现精准自控难度大。需要实时监测和调控多个参数,如温度、DO等。控制系统需要对这些参数进行全面、及时且精准的把握,从而根据反应进程及时调整控制策略。只有在自控上能实现精准,才能实现该工艺在实际工程中的应用和推广。

(3)DO数据的准确性较难保证,DO在短程硝化反硝化中至关重要,尤其是 $\text{DO} < 1.0 \text{ mg/L}$ 时,其数据准确性较难保证。常用的DO检测设备在低浓度区间的检测精度有限,易受水质、微生物絮体等因素干

扰。若DO数据不准确,会误导对反应进程的判断。当实际DO低于设定值但检测数据不准时,可能无法及时调整曝气量,导致亚硝酸菌因缺氧活性降低,或者硝酸菌在低氧下异常生长,破坏短程硝化的稳定,最终影响整个脱氮效果。

5 结语

短程硝化反硝化技术作为市政污水处理领域的创新方法,在应对当下污水处理难题中展现出显著优势,同时也面临一系列挑战。

在优势方面,该技术为低碳高氮污水的高效处理提供了新的处理方案。相较于传统生物脱氮技术,其在节能降耗方面效果显著。在实际工程应用中,经改造后,出水总氮平均值显著降低,平均去除率达85.89%,相较于未改造组提升了15.95%,通过理论计算,平均进水C/N为4.27时,改造组中约有71%的传统反硝化,29%的短程反硝化。通过短程反硝化技术改造,在大幅削减能耗与处理成本的同时,有效提高了碳源利用效率,有效缓解了低碳源污水脱氮的困境,为污水处理厂的可持续运营提供了有力支撑。

从挑战角度而言,在工程实践中,保证硝化过程的时候,精准调控反硝化过程难度较大。这主要归因于硝化细菌和亚硝酸细菌的生长特性存在显著差异,环境因素如温度、pH值、DO浓度、泥龄及有机物浓度等的波动,均会影响短程反硝化的进程。此外,实现精准自控亦充满挑战,其涉及对多个关键参数的实时监测与精确调控,以确保工艺的稳定运行。未来需在精准调控、检测技术优化及自控系统智能化等方面开展深入研究,以推动短程硝化反硝化技术在市政污水处理领域的广泛应用与持续发展,满足日益严格的环保要求与污水处理需求。

参考文献:

- [1] 景香顺,李鑫玮,张晓红,等.低碳源市政污水处理优化运行的研究与工程应用[J].给水排水,2019,11(45):33-37.
- [2] 巫方才.短程硝化-反硝化技术处理城市生活污水时运行特性研究[J].化学工程师,2022,36(8):50-53.
- [3] 张志文.短程硝化反硝化脱氮技术在污水处理中应用研究进展[J].工业微生物,2024,54(6):60-63.
- [4] 杜睿,彭永臻.城市污水生物脱氮技术变革:厌氧氨氧化的研究与实践新进展[J].中国科学:技术科学,2022,52(3):389-402.
- [5] 郭泓利,李鑫玮,任钦毅,等.全国典型城市污水处理厂进水水质特性分析[J].给水排水,2018,44(6):12-15.
- [6] 胡紫燕,刘少敏,郭方磊,等.短A-O工艺处理生活污水短程硝化反硝化的研究[J].当代化工研究,2022(17):159-161.

- [7] 乔韵青. 城市污水高效处理工艺的分析[J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(4): 78-79; 82.
- [8] 柳全龙, 范亚骏, 张森, 等. C/N 对短程反硝化 $\text{NO}_2\text{-N}$ 积累特性影响及机理分析[J]. 工业水处理, 2022, 42(6): 159-167.
- [9] 赖城, 张大超, Philip Antwi, 等. 短程反硝化/厌氧氨氧化工艺研究进展[J]. 环境污染与防治, 2021, 43(11): 1452-1459.
- [10] 冯灵芝. 短程硝化反硝化脱氮技术的研究进展[J]. 河南科技, 2010(1): 79-80.
- [11] 张义悦, 韦伟, 朱曙光. 低碳源城市污水脱氮处理方法研究进展[J]. 安徽建筑大学学报, 2021, 29(4): 58-63.
- [12] 苟梓希, 苏建, 袁春芳, 等. 短程反硝化耦合厌氧氨氧化工艺在废水处理中的应用研究[J]. 工业用水与废水, 2022, 53(4): 10-16; 27.
- [13] 马瑞婕, 刘永红, 梁继东, 等. 短程反硝化(PDN)-Anammox 生物脱氮工艺研究进展[J]. 应用化工, 2022, 51(6): 1775-1780.
- [14] Nicolas Bernet, Peng Dangcong, Jean-Philippe Delgenès, and René Moletta., Affiliations Nitrification at Low Oxygen Concentration in Biofilm Reactor. Journal of Environmental Engineering, 2001, 127(3): 266-271.
- [15] 彭永臻, 吴学蕾, 马勇. A/O 中试工艺中亚硝酸盐积累现象的消失与重现[J]. 环境化学, 2007(1): 17-20.
- [16] 巩有奎, 贾文振, 彭永臻. 不同碳源反硝化过程 $\text{NO}_2\text{-}$ 及 N_2O 积累特性[J]. 工业水处理, 2019, 39(9): 28-32.
- [17] 吴芳磊, 贺航运, 陈博涵, 等. 低 C/N 进水城镇污水厂低溶解氧运行效能及微生物变化[J]. 环境工程学报, 2022, 16(8): 2711-2719.
- [18] 鲍任兵, 徐健, 张云志, 等. 多级 AO 工艺短程硝化反硝化的启动与运行调控[J]. 净水技术, 2023, 42(9): 95-103.
- [19] 孙盼, 张萌, 郭磊艳, 等. 短程反硝化生物过程及工艺研究进展[J]. 中国给水排水, 2023, 39(6): 9-17.
- [20] Anderews J F. and Graef S P, Dynamic Modeling and Simulation of the Anaerobic Digestion Process. Anaerobic Biological Treatment Processes[J]. Advances in Chemistry Series, 105: 126-162.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴, 为您提供平台, 携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

