

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.07.002

分段AO策略对AOA工艺脱氮性能的优化

周庆国^{1,2}, 马 舜², 陈东旭², 徐振生², 冯 姗², 刘 牡²,
苏 健², 吴 昊², 石夏莲², 杨家祥², 何 林², 赵彦钊²,
彭永臻³

(1. 西南交通大学 环境科学与工程学院, 四川 成都 611756; 2. 中铁建发展集团有限公司, 北京 100043; 3. 北京工业大学 城镇污水深度处理与资源化利用国家工程实验室, 北京 100124)

摘 要: 在天津张贵庄污水处理厂构建了处理规模为96 m³/d的AOA中试系统,连续运行226 d以评估分段AO控制策略对AOA工艺的强化效果。在低C/N(约为4.0)条件下,出水总氮稳定在8.1 mg/L,总氮去除率由62.1%提高至81.8%,在无需外加碳源的情况下表现出优异的脱氮性能。*Ca.Competibacter*的相对丰度明显增加,由第3天的0.1%上升至第220天的0.8%,表明分段AO运行策略有效促进了内源反硝化功能菌的富集,对脱氮具有促进作用。分段AO控制策略能够显著提升AOA系统在碳源受限条件下的脱氮性能,为该工艺的工程化应用提供了有力的技术支撑。

关键词: AOA工艺; 分段AO; 脱氮性能; 中试; 城市污水

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)07-0008-07

Enhanced Nitrogen Removal in a Pilot-scale AOA System via a Staged AO Operation Strategy

ZHOU Qingguo^{1,2}, MA Shun², CHEN Dongxu², XU Zhensheng², FENG Shan²,
LIU Mu², SU Jian², WU Hao², SHI Xialian², YANG Jiaxiang², HE Lin²,
ZHAO Yanchai², PENG Yongzhen³

(1. School of Environmental Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 2. China Railway Construction Development Group Co. Ltd., Beijing 100043, China; 3. National Engineering Laboratory of Urban Sewage Advanced Treatment and Resource Utilization Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: A pilot-scale anaerobic/aerobic/anoxic (AOA) system with a treatment capacity of 96 m³/d was constructed at Zhangguizhuang Wastewater Treatment Plant (WWTP) in Tianjin and operated continuously for 226 days to evaluate the effectiveness of a staged AO control strategy in enhancing AOA performance. Under low C/N conditions (approximately 4.0), the effluent total nitrogen (TN) remained stable at 8.1 mg/L, and the TN removal efficiency increased markedly from 62.1% to 81.8%, achieving excellent nitrogen removal without the need for external carbon source addition. The relative abundance of *Ca. Competibacter* increased substantially from 0.1% on day 3 to 0.8% on day 220, indicating that the

基金项目: 京津冀环境综合治理国家科技重大专项(2025ZD1203701)

通信作者: 彭永臻 E-mail: pyz@bjut.edu.cn

staged AO strategy facilitated the enrichment of key endogenous denitrifiers, which played an important role in the high TN removal efficiency. Overall, the staged AO configuration significantly enhanced the nitrogen removal performance of the AOA pilot-scale process under carbon-limited conditions, providing strong technical support for its future full-scale application.

Keywords: AOA process; staged AO; nitrogen removal performance; pilot-scale; municipal wastewater

随着城镇化的持续推进,城镇污水中氮、磷超标排放导致的水体富营养化问题日益突出,全国有69.5%的地表水呈现出不同程度的富营养化^[1],威胁饮用水水源安全和水生态系统稳定。随着《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的实施及“双碳”战略目标的提出,污水处理亟须实现稳定达标与低碳运行的协同提升^[2]。

传统的厌氧/缺氧/好氧(AAO)工艺^[3]应用广泛,但在低C/N条件下,厌氧区的聚磷菌与反硝化菌争夺碳源,导致缺氧区严重依赖外碳源脱氮。AAO工艺对回流比、溶解氧(DO)等参数高度敏感,在低负荷运行时易出现出水超标等问题^[4]。厌氧/好氧/缺氧(AOA)工艺是一种新型的生物脱氮技术^[5],因其“厌氧储碳-好氧硝化-缺氧反硝化”的反应路径而受到广泛关注。与传统的外源反硝化脱氮不同,AOA工艺将反硝化置于后端,通过厌氧/好氧/缺氧的协同作用实现高效脱氮^[6]。研究表明,AOA工艺在低C/N条件下表现出更高的反硝化效率与低能耗优势,其缺氧段不易受DO干扰,对进水水质波动的适应性也优于传统AAO工艺^[7]。

然而,在实际工程应用中,AOA工艺仍受到内源反硝化速率有限、运行稳定性不足以及对进水和水量波动适应性较弱等因素的制约^[8]。针对上述问题,强化AOA工艺脱氮性能和提升工程运行稳定性的分段AO运行模式被提出^[9]:通过在构型上对好氧区与缺氧区进行合理分段与串联布置,分段AO运行策略可有效缓解好氧区曝气强度偏高对缺氧反硝化过程的抑制作用,提高对内碳源的利用效率,同时增强系统在低负荷及水质波动条件下的运行稳定性。尽管相关研究已在实验室尺度对分段AO运行模式的可行性进行了验证^[10],但针对分段AO模式的中试规模运行效果及作用机理仍缺乏系统研究,因此有必要开展进一步的工程验证与机理分析。

依托天津张贵庄污水处理厂构建了处理规模为96 m³/d的AOA中试系统,开展分段AO运行模式的应用与机理研究,从氮素去除、内源碳利用与功能菌群响应等方面探究其性能提升机制,旨在探索低负荷城市污水碳、氮、磷协同去除的优化路径,为污水处理厂提标改造与低碳高效运行提供科学依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验装置与运行策略

中试装置见图1(An、O、A分别代表厌氧区、好氧区和缺氧区),总容积为90 m³,有效容积为75 m³,并设置厌氧/好氧交换格(2[#])以及缺氧/好氧交换格(6[#]、12[#]),可通过调控交换格的功能分区模式,自由调整厌氧、好氧、缺氧区的有效容积,进而实现各运行阶段不同的水力停留时间(HRT)比例。中试系统处理规模为96 m³/d, HRT保持在18.75 h,分为5个运行阶段,其中第一阶段以AOA模式运行并成功启动,之后调整为分段AO运行模式。

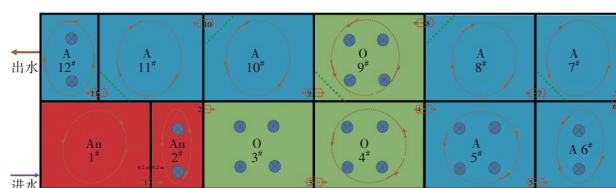


图1 中试装置示意

Fig.1 Diagram of pilot plant

1.2 试验用水与接种污泥

接种污泥来自天津张贵庄污水处理厂一期剩余污泥,接种后中试系统的平均污泥浓度(MLSS)为7 069 mg/L。试验用水取自该厂原水井,水温为11~27 °C,呈典型的低负荷特征:C/N维持在3.5~5.1, COD均值为205.8 mg/L,氨氮(NH₄⁺-N)为35.4~51.3 mg/L,磷酸盐(PO₄³⁻-P)为3.4~6.6 mg/L,而硝态氮(NO₃⁻-N)与亚硝态氮(NO₂⁻-N)均低于1 mg/L。试验分为5个阶段,运行时间分别为1~49、50~

136、137~158、159~208、209~226 d,运行方式分别为An:O:A、An:O1O2:A1A2:O3O4:A3~6(尾O)、An1An2:O1:A1:O2~4:A2~6、An1An2:O1:A1:O2O3:A2~7、An1An2:O1:A1:O2:A2~7(尾O),其中在阶段Ⅱ和Ⅴ,为了改善沉降性能设置了一小段尾端曝气,HRT为0.93 h。各阶段的进水水质特征见表1。

表1 各阶段的进水水质特征

Tab.1 Characteristic of municipal wastewater in each stage

阶段	各段HRT/h	COD/(mg/L)	TN/(mg/L)	平均C/N
I	1.78、6.35、10.62	214.2±32.7	50.0±7.4	4.4±0.8
II	1.78、6.35、10.62	229.1±68.1	51.2±7.6	4.4±0.9
III	2.62、6.36、9.77	261.5±23.9	52.1±6.3	5.1±0.5
IV	2.62、4.49、11.64	200.0±31.1	51.6±7.0	4.0±0.4
V	2.62、3.56、12.57	125.1±12.5	36.7±2.2	3.5±0.4

1.3 分析项目与检测方法

COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 采用哈希快速测定法测定, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的测定方法参考《水和废水监测分析方法》(第4版), $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 采用钼酸铵分光光度法测定,聚羟基烷酸酯(PHAs)采用气相色谱法测定,糖原(Gly)采用硫酸-萘酚比色法测定,微生物群落结构采用16S rRNA高通量测序技术进行分析。

2 结果与讨论

2.1 中试系统的营养物去除性能

2.1.1 长期去除特性

在5个运行阶段,C/N随着进水水质的变化略有波动(3.5~5.1),平均进水COD分别为214.2、229.1、261.5、200.0和125.1 mg/L,出水COD均低于30.0 mg/L,去除率稳定在85.0%以上。在此过程中,系统对氮、磷营养物的去除效果如图2所示。

在阶段Ⅰ,系统以AOA模式启动,出水TN为18.3 mg/L,TN去除率(NRE)仅为62.1%。随着出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度的增加,出水TN浓度也相应提高,而出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 稳定维持在4.5 mg/L左右,氨氮去除率(ARE)达90.0%,说明硝化过程趋于稳定,但后端反硝化不足是出水水质差的主要原因。在阶段Ⅱ采取分段AO的运行模式,NRE上升至69.1%,说明利用内碳源进行反硝化的效率有所提升,内源反硝化效果明显改善。

为进一步降低曝气能耗,提升脱氮性能,在阶段Ⅲ~Ⅴ逐步缩短好氧HRT。在阶段Ⅲ,厌氧区HRT延长为2.62 h,好氧区HRT为6.36 h,NRE增

至75.3%,厌氧区的延长使得COD转化为内碳源进行得更充分,但是出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度较高,为(9.3±4.2) mg/L,对系统脱氮产生了不利影响。为了优化中试系统的反硝化性能,在阶段Ⅳ将缺氧区的HRT延长至11.64 h,出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 降低至(6.9±2.2) mg/L,NRE高达81.8%,在低C/N条件下取得了极佳的脱氮效果。在阶段Ⅴ将好氧HRT进一步缩短至3.56 h,在C/N仅为3.5的情况下ARE高达98.4%,NRE维持在77.7%。系统转为分段AO运行后,脱氮性能显著优于AOA模式,为低C/N条件下强化脱氮提供了可靠的技术方案。

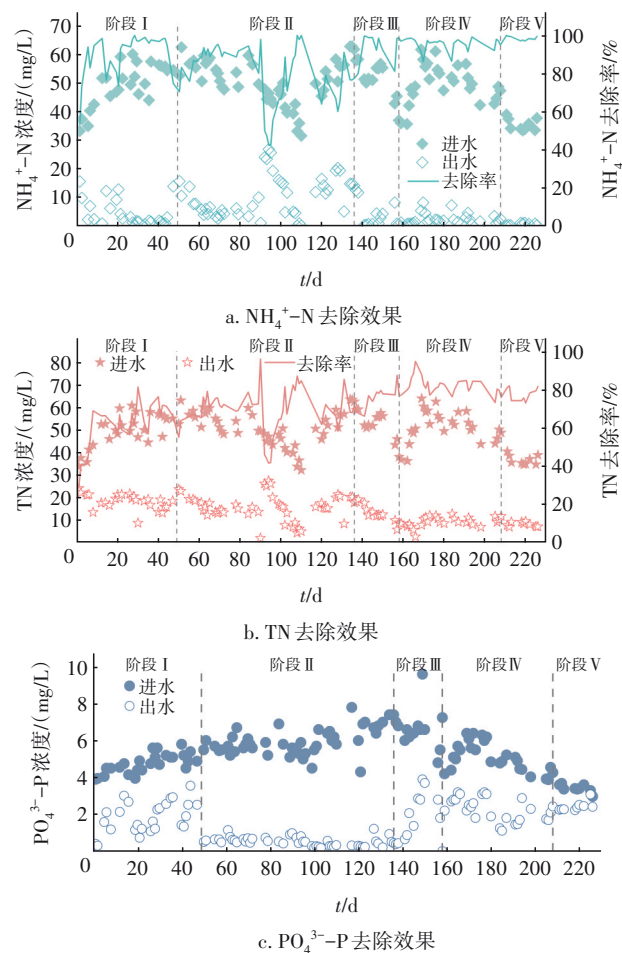


图2 营养物去除性能

Fig.2 Nutrient removal performance

出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度在阶段Ⅱ保持较低值(0.8 mg/L),但在阶段Ⅲ~Ⅴ有所升高(2.0 mg/L),推测主要原因在于分段AO模式下好氧区HRT的持续缩短使聚磷菌(PAOs)的吸磷时间不足,难以实现完整的“厌氧释磷-好氧吸磷”循环反应,导致残余 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 在出水中累积^[11]。

2.1.2 典型周期碳、氮转化特性

为揭示中试系统的碳、氮转化过程,对不同运行阶段的典型周期(第41、72、158和222天)沿程污染物变化情况进行监测,结果如图3所示。需要指出的是,阶段Ⅳ的结果与阶段Ⅴ相似,故未将其纳入典型周期的分析中。

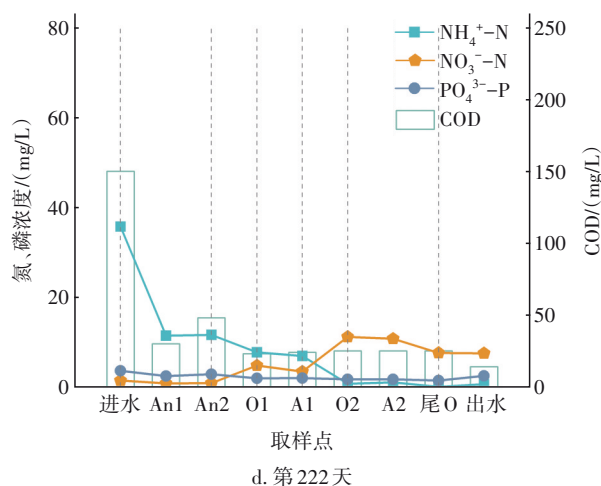
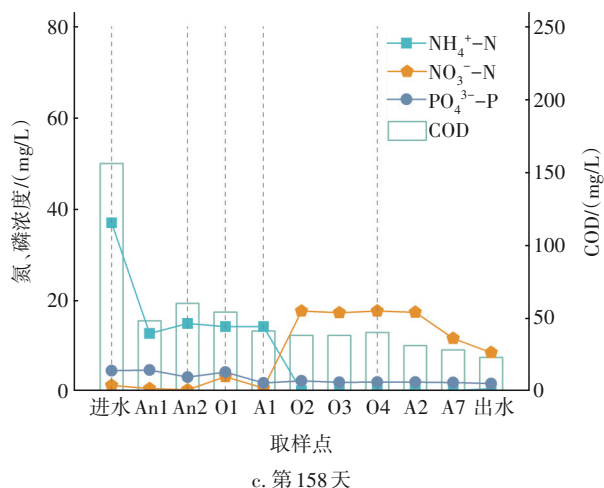
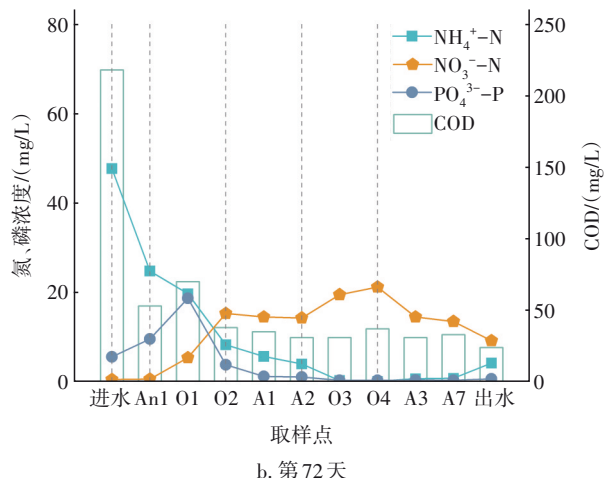
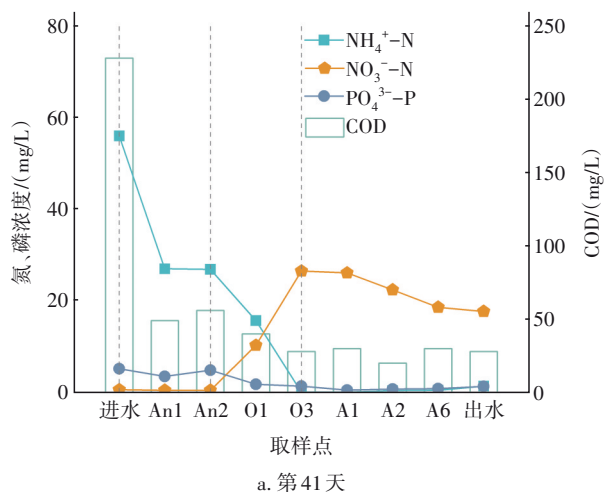


图3 典型周期营养物变化

Fig.3 Nutrient variations in a typical cycle

第41天,进水TN为56.6 mg/L,出水TN为19.1 mg/L,主要为 NO_3^- -N(17.7 mg/L),此时内源反硝化速率(EDNR)仅为0.16 mg/(gVSS·h),缺氧区反硝化能力明显不足。在第72天调整运行模式为分段AO,进水TN为48.2 mg/L,出水TN为13.4 mg/L,出水 NO_3^- -N下降至9.2 mg/L,内源反硝化活性有明显提升。

进入阶段Ⅲ和阶段Ⅴ后,好氧区HRT逐步缩短,系统仍保持良好的脱氮性能,在第158天出水 NH_4^+ -N低至0.5 mg/L, NO_3^- -N稳定在8.4 mg/L;第222天进水C/N低至3.6,出水 NH_4^+ -N仅为0.6 mg/L,出水TN为8.1 mg/L,表现出低进水负荷下的高脱氮性能。在此阶段EDNR有明显提升,表明分段AO模式通过增加缺氧HRT,延长内碳源利用时间,有效促进了内源反硝化活性提升。

2.2 内碳源转化机制

对中试系统各运行阶段(第30、94、156、191和220天)的内碳源含量进行检测,结果见图4。系统运行过程中内碳源含量在逐步累积,聚羟基烷酸酯(PHAs)被用来作为碳源的储备物,主要包括聚 β -羟基丁酸(PHB)和聚 β -羟基戊酸(PHV),PHAs含量由第30天的0.27 mmol/L上升至第220天的0.82 mmol/L,糖原(Gly)含量也由1.5 mmol/L提高至1.8 mmol/L。经计算,第30天的 $\Delta\text{PHAs}/\Delta\text{COD}$ 仅为0.05,说明在启动阶段糖原积累代谢(GAM)非常弱,进水COD仅有极小部分被细胞转化并储存为PHAs。随着运行模式由AOA调整为分段AO,该比值明显升高,在第191天和第220天分别增至0.09

和0.23,表明有更多的COD被储存为内碳源,内碳源储量的提升为后续缺氧段提供了稳定且充足的电子供体,是系统反硝化能力得以显著提升的重要原因。

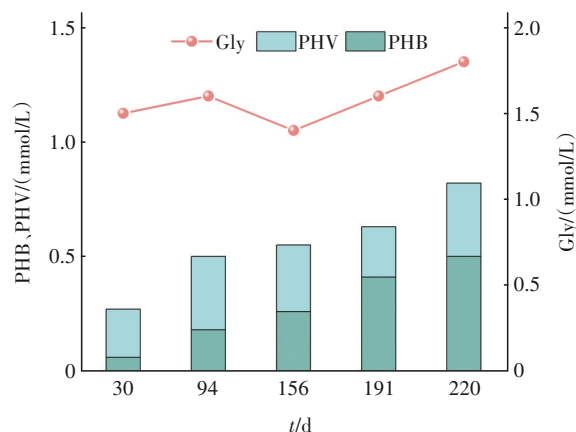


图4 内碳源含量变化

Fig.4 Changes in internal carbon sources concentration

在传统AOA模式下,好氧段消耗了部分内碳源用于脱氮和吸磷,导致缺氧段能够利用的内碳源不足,从而限制其内源反硝化的潜力^[12]。采用分段AO的控制策略后,好氧消耗的内碳源减少,使细胞能够积累更多的内碳源用于反硝化过程,GAM得到显著优化。

2.3 微生物群落结构分析

2.3.1 门水平微生物群落结构分布

在中试系统运行的初始阶段、阶段Ⅱ和阶段V(第3、93和220天)收集活性污泥样本进行微生物群落结构检测。如图5所示,在门水平上,假单胞菌门(Pseudomonadota)、芽孢杆菌门(Bacillota)和拟杆菌门(Bacteroidota)是系统中最丰富的三个菌门,其相对丰度之和达到80%左右。假单胞菌门的相对丰度最高,随着系统运行其相对丰度增加,第3天的相对丰度为24.4%,第93天的相对丰度迅速上升至51.4%,而后在阶段V其相对丰度维持在29.0%。其次为芽孢杆菌门和拟杆菌门,其中芽孢杆菌门的相对丰度由57.0%下降至29.4%,而拟杆菌门的相对丰度呈逐渐上升的趋势,由第3天的3.0%上升至第220天的29.4%。

系统中的优势菌门均包含与氮素转化相关的关键微生物,对强化污水生物处理具有积极作用^[13]。其中,芽孢杆菌门和拟杆菌门已被证明与多种氮代谢过程密切相关^[14],它们包含能够参与硝

化、反硝化等关键途径的功能菌,有助于提高系统整体的脱氮能力。此外,假单胞菌门亦被广泛报道含有固氮或反硝化能力的细菌,其营养需求较低、可利用碳源范围广、代谢灵活性高^[15],能够在低C/N条件下保持较强的氮素转化潜力,从而提高系统的脱氮效果。

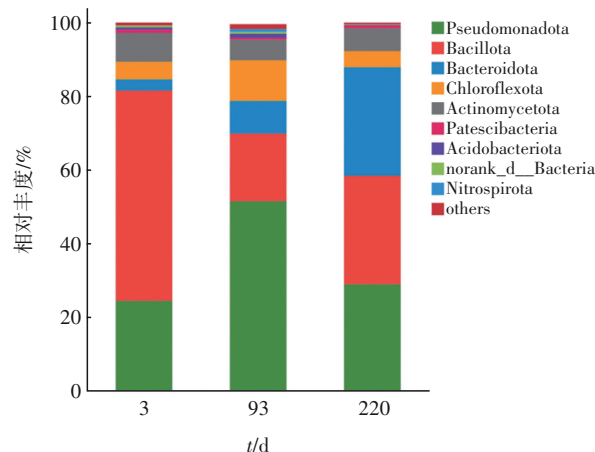


图5 门水平微生物群落结构变化

Fig.5 Changes in microbial community structure at phylum level

2.3.2 属水平微生物群落结构分布

在属水平上,反硝化菌(*Bacillus*)的相对丰度最高,在第220天达到2.3%(见图6)。

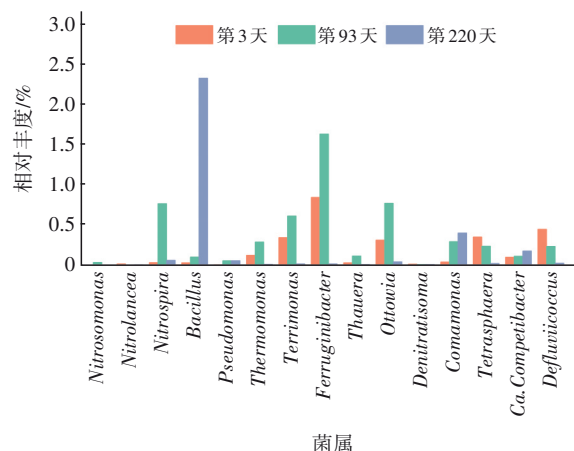


图6 属水平微生物群落结构变化

Fig.6 Changes in microbial community structure at genus level

除磷菌 *Tetrasphaera* 的相对丰度呈下降趋势,表明分段AO模式使系统内PAOs的“释磷-吸磷”代谢受到影响。NOB菌属 *Nitrospira* 逐渐被淘汰,在第220天时相对丰度仅为0.06%,NOB的淘汰减少了硝酸盐的生成,使硝化终点向亚硝酸盐偏移,从而

显著降低反硝化所需的电子量,提高了低C/N条件下的反硝化速率。此外,内源反硝化菌 *Ca. Competibacter* 被广泛认为是典型的聚糖菌(GAOs),以 NO_2^- 为电子受体的环境有利于其富集,其相对丰度在系统中明显增加,从第3天的0.1%逐渐增加至第220天的0.8%,有助于系统在低C/N条件下维持高效脱氮性能。微生物群落结构的演替表明分段AO控制策略有效促进了内源反硝化功能菌群的富集与活性提升,从微生物层面验证了分段AO运行模式对强化脱氮性能的积极作用。

2.4 经济性分析与工程化应用

以天津张贵庄污水处理厂中试系统为依托,对AOA工艺在传统运行模式与分段AO运行模式下的运行成本进行对比分析(按中试系统处理水量为96 m^3/d 折算,运行费用仅统计电费与外加碳源费用)。系统启动阶段(第1~49天)采用传统AOA运行模式,考虑低温(11~16 $^{\circ}\text{C}$)的影响,为实现系统快速启动并维持稳定脱氮效果,每日投加外碳源(25%的液体乙酸钠)约10 kg,碳源费用约10元,每日电费约30元,折算处理成本约为0.42元/ m^3 。系统稳定运行后切换为分段AO运行模式,在无需外加碳源条件下运行,且曝气强度得以优化,每日电费仅为27元,则处理成本约为0.28元/ m^3 ,较传统AOA运行模式降低了约33.3%。

上述对比反映了同一系统在不同运行策略下的成本差异,值得注意的是,若将分段AO的运行策略推广至工程规模,在精细化曝气控制与规模效应的作用下,单位水量曝气能耗仍有进一步下降空间,药剂费用有望大幅减少甚至完全替代传统加药模式,整体运行成本将会大幅下降。分段AO运行策略通过强化内碳源的储存与利用,可显著降低对外加碳源的依赖,从而减少碳源采购与投加系统运维等综合成本,同时削减了污泥产量与碳排放,具有节能、减排和绿色运行优势。因此,分段AO策略不仅在低C/N条件下实现了高效脱氮,其“少药剂、低能耗、高稳定性”的运行特征也突显出良好的工程应用价值,可作为传统工艺提标改造的重要技术路径,为污水处理厂在“双碳”背景下实现降本增效与绿色转型提供了可行方案。

3 结论

① 中试系统进水C/N维持在4.0,出水总氮稳

定在8.1 mg/L ,总氮去除率由62.1%提升至81.8%。采用分段AO控制策略,无需外加碳源即可实现稳定脱氮,同时显著增强了厌氧区内碳源储存能力($\Delta\text{PHAs}/\Delta\text{COD}$ 最高达0.23)。

② 系统的优势菌门为假单胞菌门、芽孢杆菌门和拟杆菌门,运行过程中 *Ca. Competibacter* 的相对丰度明显增加,从第3天的0.1%提高至第220天的0.8%,GAOs的富集有助于增强系统内碳源的储存与供给能力,从而对脱氮性能的提升产生积极影响。

③ 分段AO通过优化缺氧与好氧的空间分布,提高了碳源利用效率,实现了低C/N条件下的高效脱氮,并具备无需外加碳源、运行成本低等优势。

参考文献:

- [1] ZHOU J, LEAVITT P R, ZHANG Y, et al. Anthropogenic eutrophication of shallow lakes: is it occasional?[J]. Water Research, 2022, 221: 118728.
- [2] 王湘,徐茵玲,陈积义,等. 双碳视阈下城镇污水厂协同减污降数学模拟分析[J]. 中国给水排水, 2025, 41(13): 49-55.
WANG X, XU H L, CHEN J Y, et al. Mathematical simulation and case analysis of collaborative reduction of pollution and carbon emissions in urban wastewater treatment plants under perspective of carbon neutrality [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(13): 49-55 (in Chinese).
- [3] 申杰. 多级增强型AAO工艺在高标准集约化厂站的应用[J]. 中国给水排水, 2025, 41(10): 53-57.
SHEN J. Application of multi-stage enhanced AAO process in a high-standard intensive wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(10): 53-57 (in Chinese).
- [4] WU Y, PENG Z, WANG H, et al. Hydraulic retention time optimization achieved unexpectedly high nitrogen removal rate in pilot-scale anaerobic/aerobic/anoxic system for low-strength municipal wastewater treatment [J]. Bioresource Technology, 2024, 393: 130128.
- [5] GAO X, XUE X, LI L, et al. Balance nitrogen and phosphorus efficient removal under carbon limitation in pilot-scale demonstration of a novel anaerobic/aerobic/anoxic process [J]. Water Research, 2022, 223: 118991.
- [6] GONG X Z, YU D S, WANG X X, et al. Feasibility of reinforced post-endogenous denitrification coupling with

- synchronous nitrification, denitrification and phosphorus removal for high-nitrate sewage treatment using limited carbon source in municipal wastewater[J]. *Chemosphere*, 2021, 269: 128687.
- [7] 陈长乐, 王继苗, 陈群, 等. 连续流AOA工艺运行参数调控及脱氮除磷效能[J]. *中国给水排水*, 2025, 41(17): 1-10.
- CHEN C L, WANG J M, CHEN Q, et al. Operation parameter control and nutrient removal performance of continuous-flow AOA process [J]. *China Water & Wastewater*, 2025, 41(17): 1-10 (in Chinese).
- [8] GAO X, XU Z, PENG Y, et al. The nitrification recovery capacity is the key to enhancing nitrogen removal in the AOA system at low temperatures [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 818: 151674.
- [9] 古凌艳, 黄文章, 王维康, 等. AOA与多段AO工艺生物脱氮除磷性能的比较[J]. *中国给水排水*, 2024, 40(7): 1-5.
- GU L Y, HUANG W Z, WANG W K, et al. Comparison on the simultaneous biological nitrogen and phosphorus removal performance between pilot-scale plant with AOA process and full-scale plant with multi-stage AO process [J]. *China Water & Wastewater*, 2024, 40(7): 1-5 (in Chinese).
- [10] SHI X, LIU J, WU Y, et al. Novel control strategy employing anaerobic/aerobic/anoxic/aerobic/anoxic mode to enhance endogenous denitrification and anammox for municipal wastewater treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2024, 414: 131565.
- [11] 孙广垠, 潘晓敏, 马柏龙, 等. BER-BCO耦合工艺净化模拟微污染河水及除磷机理研究[J]. *水电能源科学*, 2024(4): 47-52.
- SUN G Y, PAN X M, MA B L, et al. Study of BER-BCO coupled process for purifying simulated micro-polluted river water and phosphorus removal mechanism [J]. *Water Resource and Power*, 2024 (4): 47-52 (in Chinese).
- [12] RUBIO-RINCÓN F J, LOPEZ-VAZQUEZ C M, WELLES L, et al. Cooperation between *Candidatus Competibacter* and *Candidatus Accumulibacter* clade I, in denitrification and phosphate removal processes [J]. *Water Research*, 2017, 120: 156-164.
- [13] DENG L, PENG Y, LI J, et al. Enhanced simultaneous nitrogen and phosphorus removal from low COD/TIN domestic wastewater through nitrification-denitrification coupling improved anammox process with an optimal anaerobic/oxic/anoxic strategy [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 322: 124526.
- [14] SHUKLA R, AHAMMAD S Z. Performance evaluation and microbial community structure of a modified trickling filter and conventional activated sludge process in treating urban sewage [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 853: 158331.
- [15] 王加龙, 刘驰, 雷丽, 等. 非共生固氮菌及其固氮作用[J]. *微生物学报*, 2022, 62(8): 2861-2878.
- WANG J L, LIU C, LEI L, et al. Asymbiotic nitrogen-fixing bacteria and their nitrogen fixation potential [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2022, 62(8): 2861-2878 (in Chinese).
-

作者简介:周庆国(1978—),男,江苏阜宁人,硕士,正高级工程师,主要研究方向为水污染控制与资源化利用。

E-mail: 1784531083@qq.com

收稿日期: 2025-12-17

修回日期: 2026-01-27

(编辑:李德强)

珍惜水, 爱护水, 以水促和平