

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.14.019

基于运行诊断的多级AO工艺分段进水优化与效能提升

齐宇轩¹, 丁 静¹, 曹效鑫¹, 郑凯凯², 吴东立³, 涂 强³,
艾 朝³, 谢 丰³, 周少奇⁴

(1. 信开环境投资集团有限公司, 北京 101101; 2. 江南大学 环境与生态学院, 江苏 无锡 214122; 3. 自贡信开水环境治理有限公司, 四川 自贡 643000; 4. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘 要: 针对自贡市某污水处理厂多级AO工艺在低碳氮比进水条件下的碳源分配失衡问题,本研究基于历史运行数据与生化段沿程测试,系统解释了一级好氧池有机负荷过高与二级缺氧池反硝化碳源不足的矛盾现象。通过活性污泥比硝化速率定量分析,提出分段进水分配比例的优化计算方法,并实施工程改造,将原水分流至二级缺氧池,实现碳源精准分配。运行结果表明,二级缺氧池分水50%后,系统脱氮效果显著增强,生化出水硝态氮较对照系列降低1.95 mg/L,一级好氧池的溶解氧和比硝化速率明显提升。同期乙酸钠投加量由17.18 mg/L降至10.55 mg/L,平均节省碳源费用19万元/a。

关键词: 低碳氮比; 多级AO工艺; 比硝化速率; 分段进水; 碳源分配

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2026)14-0130-08

Optimization of Step-feed and Efficiency Improvement in a Multi-stage AO Process Based on Operational Diagnosis

Qi Yuxuan¹, Ding Jing¹, Cao Xiaoxin¹, Zheng Kaikai², Wu Dongli³, Tu Qiang³,
Ai Zhao³, Xie Feng³, Zhou Shaoqi⁴

(1. Xinkai Environmental Investment Group Co. Ltd., Beijing 101101, China; 2. School of Environment and Ecology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 3. Zigong Xinkai Water Environmental Treatment Co. Ltd., Zigong 643000, China; 4. School of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Addressing the carbon source allocation imbalance in a multi-stage AO process at a wastewater treatment plant in Zigong under low influent C/N ratio conditions, this study systematically explained the contradictory issues of excessive organic loading in the primary aerobic zone and insufficient carbon source for denitrification in the secondary anoxic zone, based on historical operational data and biochemical process profiling. Through quantitative analysis of the specific nitrification rate of the activated sludge, an optimized calculation method for determining the step-feed distribution ratio was

基金项目: 贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2023]115)

通信作者: 曹效鑫 E-mail: 75945865@qq.com

developed. Corresponding engineering modifications were implemented to redirect a portion of the raw influent to the secondary anoxic zone, achieving precise carbon source redistribution. Operational results demonstrated that after diverting 50% of the influent to the secondary anoxic zone, the system's nitrogen removal efficiency was significantly enhanced. The effluent nitrate nitrogen concentration decreased by 1.95 mg/L compared to the parallel control train, while the dissolved oxygen concentration and specific nitrification rate in the primary aerobic zone increased markedly. Consequently, the sodium acetate dosing rate decreased from 17.18 mg/L to 10.55 mg/L, yielding an annual saving of approximately 190 000 CNY in carbon source costs. This research provides a theoretical framework and a practical case study for the optimization and control of carbon source allocation in wastewater treatment plants treating low C/N ratio wastewater.

Keywords: low C/N ratio; multi-stage AO process; specific nitrification rate; step-feed; carbon source distribution

在我国市政污水处理厂的运行实践中,低碳氮比(C/N)进水条件下的生物脱氮是一项挑战。由于进水碳源普遍不足,多数污水处理厂需依赖外投碳源以维持系统的脱氮效能。多级AO工艺通过多点位进水,优化碳源在系统中的分配与利用,尤其适用于低C/N的进水水质^[1-3]。目前,多级AO工艺进水流量分配的常见方法为等比例法和变比例法^[4]。等比例进水法操作简便,能够快速确定各级缺氧段的进水流量^[5],而变比例进水法则更注重碳源的高效利用。刘长荣等^[6]从每一段缺氧池内碳源与硝态氮完全反应的角度进行理论推导,提出为实现最佳脱氮效果,各段进水流量应呈等比数列关系。然而,在实际应用中发现,末段进水流量往往不满足等比数列且难以达到预期的总氮(TN)去除效果。针对这一问题,权国卿等^[7]通过引入流量总和约束条件建立TN去除率与系统参数的显式关系,使其既保持等比数列特性,又满足TN去除率的要求。值得注意的是,上述流量分配方式均在工艺设计阶

段基于固定水质参数进行计算推导,而实际污水处理厂进水水质持续波动,污泥活性也会不断变化,这些因素将对配水方法的有效性产生影响。

本文以自贡市贡井区某污水处理厂多级AO工艺为例,提出一种基于实际活性污泥比硝化速率来推导分段进水比例的方法,根据理论计算结果实施分段进水,优化碳源分配,强化系统脱氮能力。

1 污水处理厂概况

该污水处理厂设计处理规模为2万m³/d,生化处理系统由2个系列组成,单系列处理能力为1万m³/d。该厂于2019年对原改良AAO工艺进行提标改造,改造后生化处理采用多级AO工艺,出水水质执行《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB51/2311—2016)。污水预处理单元为粗格栅-细格栅-曝气沉砂池,生化处理采用多级AO+二沉池,深度处理单元包括高效沉淀池-反硝化生物滤池-纤维转盘滤池-紫外线消毒渠,工艺流程如图1所示。该厂设计与实际进、出水水质见表1。

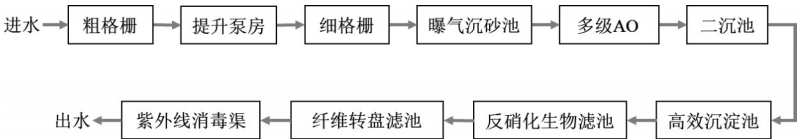


图1 污水处理厂工艺流程

表1 设计与实际进、出水水质

项目	BOD ₅	COD	悬浮物(SS)	氨氮(NH ₄ ⁺ -N)	TN	总磷(TP)
进水(设计值)	180	340	250	35	45	5
实际进水(90%保证率)	148	367	86	39.6	42.6	4.72
出水(设计值)	6	30	10	1.5(3)	10	0.3
实际出水(范围)	0.7~3.5	8.8~27.0	3~8	0.10~0.94	1.0~9.7	0.03~0.29

注:括号外数值为水温≥12℃的控制指标,括号内数值为水温<12℃的控制指标。

该厂生化段各处理单元池容设置存在明显差异。其中,预缺氧池、厌氧池和一级好氧池的设计水力停留时间分别为0.86、0.76和3.18 h,池容相对较小;二级缺氧池和二级好氧池的设计水力停留时间分别为4.23、7.53 h,池容相对较大。生化池进水经重力流分配后分别进入预缺氧池和厌氧池,随后依次流入一级好氧池、二级缺氧池和二级好氧池,最终进入二沉池。受原有改良AAO工艺构筑物及回流系统布置条件限制,改造后系统沿用原工艺的单一硝化液内回流设置,即由二级好氧池末端回流至二级缺氧池前端;同时设置1处污泥外回流,由二沉池回流污泥输送至预缺氧池前端。全厂长期运行的气水比均值为3.5,二级缺氧池前端设有乙酸钠(COD当量为0.45 kg/kg)投加点。

2 测试指标及方法

常规水质检测项目包括COD、TN、 NH_4^+-N 、硝酸盐氮(NO_3^--N)、 BOD_5 ,采用《水和废水监测分析方法》中的标准方法测定,溶解氧(DO)采用便携式溶氧仪测定。

生化段的沿程测试分析是评估污水处理运行效果并指导调控的重要依据。为探究该污水处理厂生化段的实际运行特性,在预缺氧池、厌氧池、一级好氧池、二级缺氧池及二级好氧池末端采集24 h混合水样,采样点分布如图2所示。生化段沿程数据经多次测试验证,并选取代表性数据进行分析。

各单元污染物的进水浓度采用理论计算方式确定,以预缺氧池进水TN为例,计算式如下:

$$C_1 = \frac{Q_1 C_2 + Q_2 C_3}{Q_1 + Q_2} \quad (1)$$

式中: C_1 为预缺氧池进水TN,mg/L; C_2 为进水TN,mg/L; C_3 为外回流TN,mg/L; Q_1 为预缺氧池进水量, m^3/h ; Q_2 为外回流量, m^3/h 。

各单元污染物去除量与进水总量之比为该单元污染物去除贡献。以预缺氧区TN去除贡献(η_{TN})为例,计算式如下:

$$\eta_{\text{TN}} = \frac{(C_1 - C_4)(Q_1 + Q_2)}{C_2 Q_3} \quad (2)$$

式中: η_{TN} 为预缺氧区TN去除贡献; Q_3 为生化池进水流量, m^3/h ; C_4 为预缺氧池出水TN,mg/L。

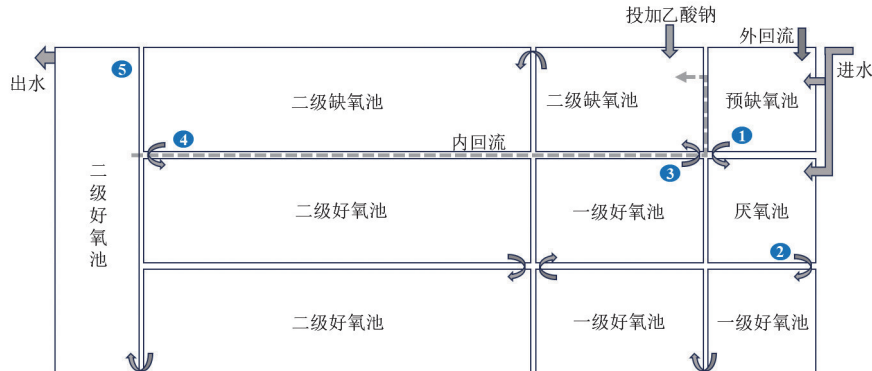


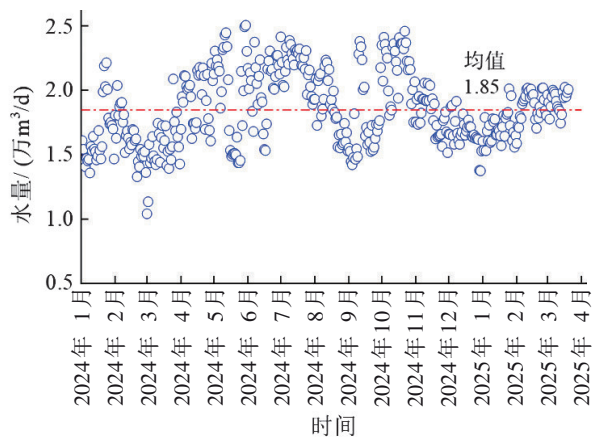
图2 采样点位置

3 问题诊断与分析

3.1 历史进水水质

对该污水处理厂2024年1月1日—2025年3月20日的历史运行数据进行整理分析,结果如图3所示。

由图3(a)可知,受雨污合流管网的影响,污水处理厂日处理水量受降水影响较大,全年均值为1.85万 m^3/d ,变异系数为15.1%,其中2024年6—7月平均处理水量为2.11万 m^3/d ,最高可达2.50万 m^3/d ,超设计水量25%。冬季平均处理水量仅为1.64万 m^3/d ,进水负荷为82%。



a. 处理水量

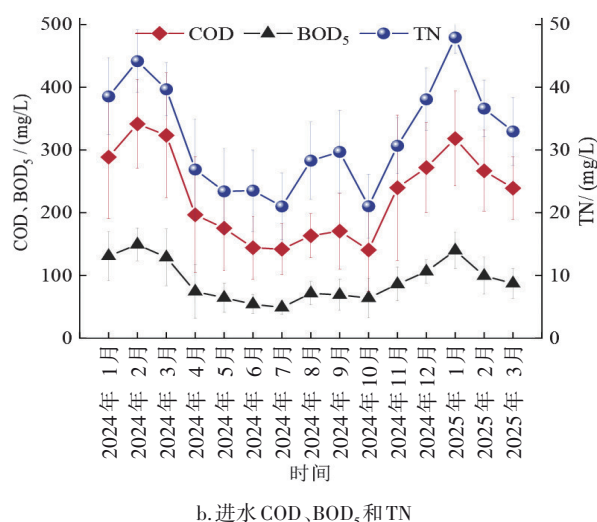


图3 2024年1月—2025年3月进水量和水质

图3(b)为进水COD、BOD₅和TN月均值统计,平均浓度分别为228、92、32.2 mg/L。其中,B/C均值为0.4,可生化性较好且全年变化幅度较小。C/N为2.8,变异系数为12.7%。一般认为,系统实现较稳定生物脱氮所需的C/N通常不低于4.0。由于该厂实际进水C/N明显偏低,进水碳源难以满足脱氮需求,因此需持续投加外碳源以保障出水TN稳定达标,运行成本较高。

3.2 沿程测试分析

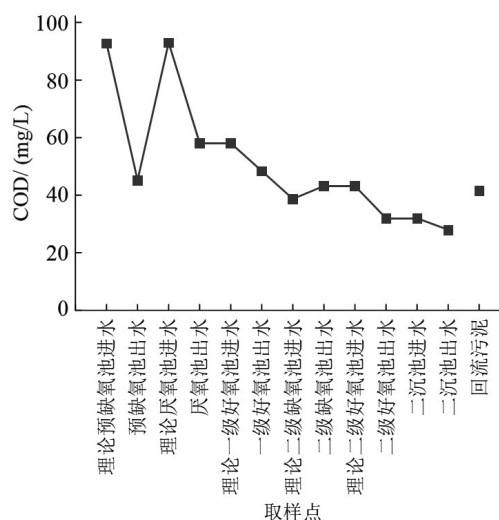
对该污水处理厂生化功能区目标污染物进行沿程测试分析(见图4),系统评价各功能单元的实际运行状态^[8-9]。

从图4(a)沿程COD变化分析可知,预缺氧池和厌氧池COD分别去除48、35 mg/L,去除贡献率分别为29.6%、32.7%,而作为反硝化脱氮的关键单元,二级缺氧池理论进水COD仅为39 mg/L,可利用的碳源较少,去除硝态氮2.2 mg/L。同时,一级、二级好氧池也分别去除10、11 mg/L的COD,表明实际运行中碳源存在分配不合理与利用不充分的现象。值得注意的是,回流污泥中COD明显升高,同时硝态氮降低6.4 mg/L,据此判断二沉池底部发生污泥水解并产生可利用碳源供反硝化使用。

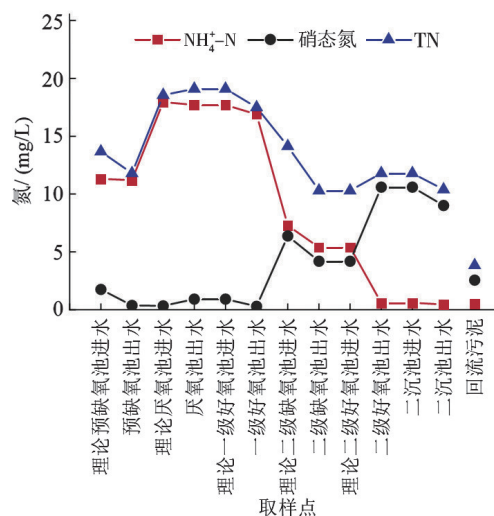
图4(b)沿程氮浓度的监测数据显示,进水TN以NH₄⁺-N为主,占比达82.7%,平均为11.3 mg/L。预缺氧池通过反硝化作用去除进水和回流污泥中的硝态氮,使进入厌氧池的硝态氮降至0.34 mg/L,为后续生物释磷创造了良好条件。一级好氧池的NH₄⁺-N去除量为0.8 mg/L,去除贡献率为4.5%,同

时TN也去除1.6 mg/L。一级好氧池溶解氧仅为0.11 mg/L,表明该单元存在同步硝化反硝化作用。相比之下,二级好氧池承担了NH₄⁺-N去除的主要任务,去除量为4.8 mg/L,贡献率达到65.8%,成为硝化反应的核心单元。

综上,当前污水处理厂面临进水碳源总量不足且分配不均的问题,生化池前端负荷过高,一级好氧池的氨氮容积负荷高达0.2 kg/(m³·d),同时二级缺氧池进水碳源较少,影响系统反硝化脱氮的能力。因此,亟须优化分水比例,将有限的碳源合理分配,进一步强化脱氮效果。



a. 沿程COD变化



b. 沿程氮变化

图4 生化处理过程沿程水质变化

4 优化措施与效果

4.1 分段进水比例计算

多级AO工艺流程如图5所示。定义各段流量

分配比 $\alpha_x=Q_x/Q$,其中, Q 为总进水流量, α_1 、 α_2 和 α_3 分别为预缺氧池、厌氧池和二级缺氧池进水比例。系统内回流比为 r ,外回流比为 R ;进水SS和回流污泥浓度分别为 $C_{in,SS}$ 和 $C_{R,MLSS}$,可通过在线仪表进行数

据采集;进水氨氮、外回流氨氮、一级好氧出水氨氮和二级好氧出水氨氮分别为 C_{in,NH_4^+-N} 、 C_{R,NH_4^+-N} 、 C_{O_1,ef,NH_4^+-N} 和 C_{O_2,ef,NH_4^+-N} ,可采用沿程测试数据;一、二级好氧池的池容分别为 V_{O_1} 和 V_{O_2} 。

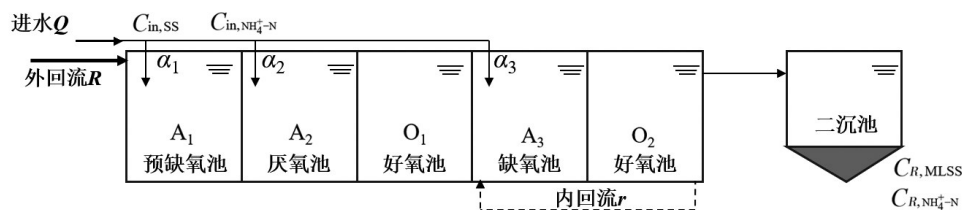


图5 多级AO工艺流程

首先,计算一、二级好氧池的污泥浓度 S_{O_1} 和 S_{O_2} :

$$S_{O_1} = [(\alpha_1 + \alpha_2)C_{in,SS} + RC_{R,MLSS}] / (\alpha_1 + \alpha_2 + R) \quad (3)$$

$$S_{O_2} = [(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)C_{in,SS} + RC_{R,MLSS}] / (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + R) \quad (4)$$

接着,计算一、二级好氧池的进水 NH_4^+-N ,即, C_{O_1,in,NH_4^+-N} 和 C_{O_2,in,NH_4^+-N} :

$$C_{O_1,in,NH_4^+-N} = [(\alpha_1 + \alpha_2)C_{in,NH_4^+-N} + RC_{R,NH_4^+-N}] / (\alpha_1 + \alpha_2 + R) \quad (5)$$

$$C_{O_2,in,NH_4^+-N} = [\alpha_3 C_{in,NH_4^+-N} + (\alpha_1 + \alpha_2 + R)C_{O_1,ef,NH_4^+-N} + rC_{O_2,ef,NH_4^+-N}] / (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + R + r) \quad (6)$$

进一步计算一、二级好氧池的实际水力停留时间 h_{O_1} 和 h_{O_2} :

$$h_{O_1} = V_{O_1} / (\alpha_1 + \alpha_2 + R)Q \quad (7)$$

$$h_{O_2} = V_{O_2} / (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + R + r)Q \quad (8)$$

将式(3)~(8)分别代入比硝化速率计算公式, f 为混合液挥发性悬浮固体(MLVSS)与混合液悬浮固体(MLSS)的比值,可得:

$$F_{O_1} = (C_{O_1,in,NH_4^+-N} - C_{O_1,ef,NH_4^+-N})h_{O_1} / fS_{O_1} \quad (9)$$

$$F_{O_2} = (C_{O_2,in,NH_4^+-N} - C_{O_2,ef,NH_4^+-N})h_{O_2} / fS_{O_2} \quad (10)$$

式中: F_{O_1} 、 F_{O_2} 分别为一、二级好氧池的比硝化速率, $mgNH_4^+-N/(gVSS \cdot h)$ 。

根据在线仪表和化验室数据得到污水处理厂实际运行状态下好氧池中活性污泥的比硝化速率,同时也可根据目标比硝化速率进行反推,得到所需分水比例。在实际运行中,一、二级好氧池的比硝化速率受各级进水条件的影响存在差异,而两者活

性污泥来源相同,其最大硝化潜力基本一致。因此,选取两者中较大的比硝化速率数值作为流量分配核算的依据。具体而言,在该厂多级AO工艺中,二级好氧池的池容更大、水力停留时间更长,其硝化能力可充分保障。分水比例仅需以确保一级好氧池实现完全硝化为目标进行设定,而将剩余进水全部分配至二级缺氧池,即可确保好氧池均满足完全硝化要求。

根据沿程测试数据计算可得,一、二级好氧池现状比硝化速率分别为0.22、1.68 $mgNH_4^+-N/(gVSS \cdot h)$,选取二级好氧池的比硝化速率数值作为该厂活性污泥的最大硝化潜力,如表2所示。

表2 好氧池比硝化速率

处理单元	比硝化速率 $mgNH_4^+-N/(gVSS \cdot h)$		
	现状	二级缺氧池分水37%	二级缺氧池分水为50%
一级好氧池	0.22	1.68	1.22
二级好氧池	1.68	0.68	0.92

当二级缺氧池的进水量占总进水量的37%,即 $(\alpha_1 + \alpha_2) : \alpha_3 = 63\% : 37\%$ 时,一级好氧池的比硝化速率理论上达到1.68 $mgNH_4^+-N/(gVSS \cdot h)$ 。为了增强整个系统对现场水质、水量波动的适应能力,计算可知50%:50%的分水比例也满足一、二级好氧池的完全硝化需求,因此最终选定该比例进行现场测试验证。

4.2 工程改造与实施

根据理论计算结果实施分段进水工程改造,将厌氧池DN500玻璃钢进水管增设支管,采用DN300碳钢管道连接至二级缺氧区进口。在厌氧区和二级缺氧区的进水管分别安装球阀,控制进

水流量实现灵活配水。在通往二级缺氧区的管道上安装电磁流量计,并制作检修平台便于后期维护,管道采用水池面敷设,打孔穿墙。管道改造方案及现场施工见图6。改造工期共22 d,费用总计为9.7万元。

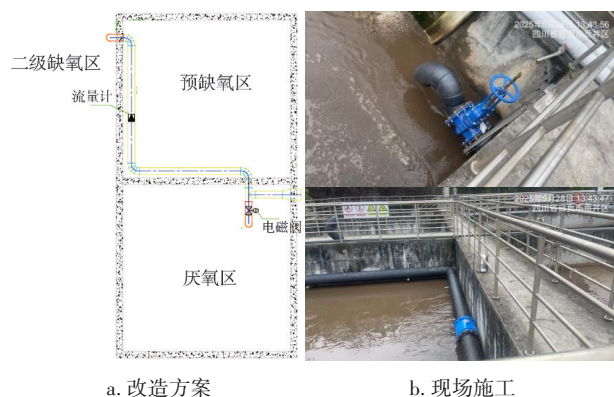


图6 管道改造方案及现场施工

4.3 运行效果对比

基于计算结果与工程现状,将生化池2个系列设为试验组与对照组。试验系列将二级缺氧池的分段进水比例设定为50%,对照系列则维持原进水模式。

分段进水运行效果对比见图7。

图7(a)显示,分段进水后,出水硝态氮变化显著。分段进水前,对照系列出水硝态氮为6.2 mg/L,较试验系列低1.05 mg/L;分水比例为50%后,试验系列出水硝态氮降至9.12 mg/L,较对照系列(11.07 mg/L)低1.95 mg/L。在50%分水比例下,更多进水碳源被引入二级缺氧池用于反硝化,从而强化脱氮效果,硝态氮进一步降低。

由图7(b)可知,试验组和对照组2个系列生化出水氨氮虽无显著变化,但一级好氧池的氨氮去除贡献率明显改善。

图7(c)展示了分段进水前后一级好氧池DO变化:无分水时,试验组和对照组2个系列一级好氧池末端DO均为0.11 mg/L;分段进水后,试验系列DO较对照组明显提升。通过分水降低前端生化池负荷,一级好氧池的曝气状态逐步改善,污泥活性提升^[10]。相应地,图7(d)中一级好氧池活性污泥的比硝化速率也显著提高,分水前试验系列污泥的比硝化速率为0.22 mgNH₄⁺-N/(gVSS·h),与对照系列接近;分段进水实施后,试验系列污泥的比硝化速率达到1.3 mgNH₄⁺-N/(gVSS·h),与理论计算结果相近,超过对照系列的0.59 mgNH₄⁺-N/(gVSS·h)。

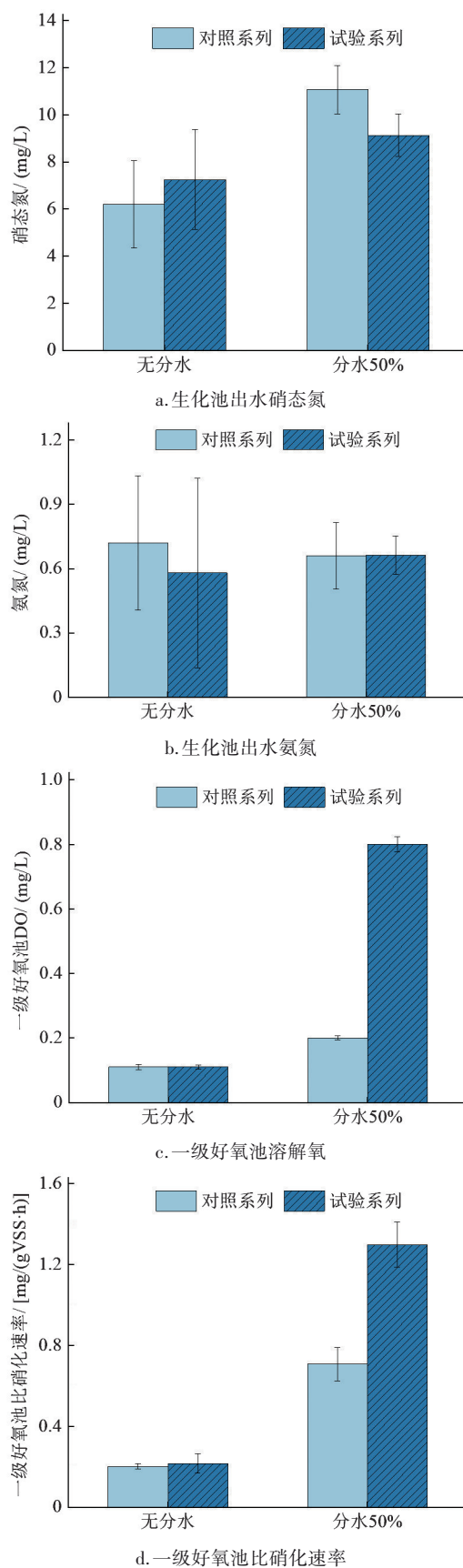


图7 分段进水运行效果对比

1.95 mg/L,一级好氧池DO与比硝化速率均明显提高,系统整体脱氮能力得到改善。乙酸钠投加量由17.18 mg/L降至10.55 mg/L。经测算,平均可节约碳源费用19万元/a,工程改造投资回收期短,经济效益显著。

③ 研究形成了一套针对污水处理厂运行优化的方案,涵盖问题诊断、理论计算、工程改造与运行调控,可为同类污水处理厂的工艺优化与运行管理提供参考。

参考文献:

- [1] 孙事昊,庞洪涛,张璐晶,等. 等污泥负荷不等池容多级AO的设计计算及优势分析[J]. 中国给水排水, 2024, 40(14): 85-94.
- [2] 张璐晶,江乐勇,庞洪涛,等. 生物膜强化多级AO工程智能设计与运行[J]. 中国给水排水, 2024, 40(18): 103-112.
- [3] 石凤,刘胜军,马炳勇,等. 多段多级AO工艺在污水处理厂升级改造中的应用[J]. 给水排水, 2011, 37(6): 34-37.
- [4] 王舜和,郭淑琴,魏新庆. 分段进水多级A/O工艺计算与探讨[J]. 中国给水排水, 2014, 30(18): 81-85.
- [5] 李常留,张兴文,徐鹏飞. 阶段流入式多级A/O生物脱氮工艺设计及应用[J]. 环境工程, 2010, 28(2): 45-48.
- [6] 刘长荣,李红,常建一. 分点进水多级A/O污水处理工艺设计计算探讨[J]. 给水排水, 2011, 47(1): 9-13.
- [7] 权国卿,王舜和,宋杰. 分段进水多级AO工艺设计方法探讨及优化[J]. 给水排水, 2023, 49(9): 43-49.
- [8] 魏翔,李怀波,郑凯凯,等. 无锡锡北污水处理厂运行评估及优化改造方案[J]. 中国给水排水, 2024, 40(3): 95-100.
- [9] 李怀波,郑凯凯,王燕,等. 基于全流程分析的低碳氮比进水污水处理厂运行调控[J]. 环境工程, 2021, 39(3): 97-102.
- [10] Kao C K, Zhang Q, Li J W, et al. Rapid start-up and metabolic evolution of partial denitrification/anammox process by hydroxylamine stimulation: nitrogen removal performance, biofilm characteristics and microbial community [J]. Bioresource Technology, 2025, 418: 131959.
- [11] Chai H X, Xiang Y, Chen R, et al. Enhanced simultaneous nitrification and denitrification in treating low carbon-to-nitrogen ratio wastewater: treatment performance and nitrogen removal pathway [J]. Bioresource Technology, 2019, 280: 51-58.

作者简介:齐宇轩(1997—),男,河北保定人,硕士,工程师,主要研究方向为市政污水处理及资源化。

E-mail:qiyuxuan@sdic.com.cn

收稿日期:2026-03-03

修回日期:2026-04-30

(编辑:衣春敏)

强化依法治水,携手共护母亲河