

周鹏, 赵晓娟. 城镇污水处理厂原位精确生物脱氮控制技术与工程应用[J]. 净水技术, 2026, 45(8): 119-126.

Zhou P, Zhao X J. *In-Situ* precise biological nitrogen removal control technology and engineering application for urban WWTPs[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(8): 119-126.

城镇污水处理厂原位精确生物脱氮控制技术与工程应用

周 鹏, 赵晓娟*

(中原环保股份有限公司, 河南郑州 450000)

摘 要 【目的】为解决城镇污水处理厂进水碳氮比(C/N)失衡引发的脱氮效率偏低、碳源投加浪费及工艺调控滞后等核心行业痛点,提升低C/N污水的脱氮处理效能,推动污水处理行业绿色低碳与智能化升级,本文开展相关技术体系研发。【方法】提出基于“在线实时监测-多参数协同建模-动态精准调控”的原位精确生物脱氮技术体系,通过集成高精度硝酸盐氮在线监测仪、改良型动态碳源需求预测算法及可编程逻辑控制器(PLC)多参数协同控制模型,构建以碳源投加量与内/外回流比联动调控为核心的智能控制系统,并在10万m³/d规模城镇污水处理厂开展为期12个月的工程验证。【结果】该技术体系综合成效显著:①脱氮稳定性大幅提升,出水总氮(TN)质量浓度日均值极差从4.00 mg/L降至1.50 mg/L,方差从1.04 (mg/L)²降至0.18 (mg/L)²,波动控制精度提升64.4%,出水TN稳定达标;②碳源利用效率显著优化,在进水C/N降低27.3%的苛刻工况下,碳源投加单耗减少17.6%,万吨水碳源成本下降17.4%,有效降低运行成本;③综合效益突出,在线监测替代人工检测实现年节约检测成本11.68万元,同时调控响应时间提前6~8 h,大幅缩短水质波动应对周期,有效规避水质超标风险。【结论】综上,该智能控制系统通过算法优化与工艺参数的深度耦合,突破了低C/N污水脱氮的技术瓶颈,为低C/N污水高效脱氮提供了可行的智能化解决方案,契合污水处理行业数字化、绿色化发展趋势,具有重要的工程应用价值与广阔的推广前景。

关键词 原位精确生物脱氮; 低碳氮比; 可编程逻辑控制器智能调控; 动态碳源预测; 多参数协同控制

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)08-0119-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.08.012

In-Situ Precise Biological Nitrogen Removal Control Technology and Engineering Application for Urban WWTPs

Zhou Peng, Zhao Xiaojuan*

(Zhongyuan Environmental Protection Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract [Objective] To address the core industry pain points such as low denitrification efficiency, carbon source dosage waste, and lagging process regulation caused by the imbalanced carbon-to-nitrogen ratio (C/N) in the influent of urban wastewater treatment plants (WWTPs), improve the denitrification efficiency of sewage with low C/N, and promote the green, low-carbon and intelligent upgrading of the sewage treatment industry, this paper develops the relevant technical system. [Methods] An *in-situ* precise biological denitrification technology system based on "real-time online monitoring-multi-parameter collaborative modeling-dynamic precise regulation" was proposed. By integrating a high-precision online nitrate nitrogen monitor, an improved dynamic carbon source demand prediction algorithm, and a programmable logic controller (PLC) multi-parameter collaborative control model, an intelligent control system centered on the linked regulation of carbon source dosage and internal/external reflux ratio was constructed. A 12-month engineering verification was carried out in an urban WWTP with a capacity of 100 000 m³/d. [Results] The technical system achieved remarkable comprehensive effects: ① The stability of denitrification was significantly improved, the daily average range of effluent total nitrogen (TN) decreased from 4.00 mg/L to 1.50 mg/L, the variance decreased from 1.04 (mg/L)² to 0.18 (mg/L)², the fluctuation control accuracy increased by 64.4%, and the effluent TN stably met the standard; ② The carbon source utilization

[收稿日期] 2025-12-26

[作者简介] 周鹏(1984—),男,高级工程师,主要从事城镇污水处理及再生利用等工作, E-mail: zhoupeng@zhongyuanep.com。

[通信作者] 赵晓娟(1986—),女,高级工程师,主要从事城镇污水处理及再生利用等工作, E-mail: zhaoxiaojuan@zhongyuanep.com。

efficiency was significantly optimized. Under the harsh operating condition where the influent C/N ratio decreased by 27.3%, the unit consumption of carbon source dosage decreased by 17.6%, and the carbon source cost per 10 000 tons of water decreased by 17.4%, effectively reducing the operation cost; ③ The comprehensive benefits were prominent: online monitoring replaced manual detection, saving 116 800 yuan in annual detection cost; the regulation response time was advanced by 6–8 hours, greatly shortening the response cycle to water quality fluctuations and effectively avoiding the risk of water quality exceeding the standard. [Conclusion] In summary, through the in-depth coupling of algorithm optimization and process parameters, the intelligent control system breaks through the technical bottleneck of denitrification for sewage with low C/N, provides a feasible intelligent solution for efficient denitrification of sewage with low C/N, conforms to the digital and green development trend of the sewage treatment industry, and has important engineering application value and broad promotion prospects.

Keywords *in-situ* precise biological nitrogen removal; low carbon to nitrogen ratio (C/N); programmable logic controller (PLC) intelligent regulation; dynamic carbon source prediction; multi-parameter collaborative control

“双碳”目标下,污水处理厂提质增效需求凸显,受工业废水混入、生活污水成分波动等因素的影响,多数污水处理厂进水碳氮比(C/N)偏低,生物反硝化碳源供给不足,需依赖外碳源投加以保障达标,既增加运行成本又存在二次污染风险^[1-2]。传统生物脱氮工艺依赖人工经验调控,存在显著缺陷:一是响应滞后,人工检测周期为2~4 h,无法匹配水质水量动态变化;二是碳源浪费,“宁多勿少”策略使碳源费用占运行成本30%以上;三是脱氮不稳,单一参数调控难以平衡硝化-反硝化反应,出水总氮(TN)波动大。

为解决上述问题,国内外学者开展了相关研究:吴宇行等^[3]提出动态碳源需求预测算法,实现了碳源投加量的精准核算,日均乙酸钠投加量同期相比降低21.2%,月均节省药剂费用4.72万元;陈健^[4]构建“前馈+反馈+末端校验”复合控制模型,实现对碳源投加的精准控制,吨水碳源投加量同比下降48.3%;陆漾等^[5]基于硝酸盐氮(NO_3^- -N)在线监测数据,建立碳源投加与内回流比联动调控策略,提升了脱氮过程的稳定性,每月可节约46.8万元的碳源费用,每年碳减排量可达430 t。现有研究仍存在不足:一方面,预测模型多忽视污泥活性等核心要素,复杂工况精度受限;另一方面,调控策略难以实现碳源投加与内外回流比的全维度协同。

为此,本文以低C/N污水处理厂为对象,融合在线监测、多参数算法与可编程逻辑控制器(PLC)控制技术,构建原位精确生物脱氮智能控制系统。研究重点突破三方面技术:①耦合污泥活性、溶解氧(DO)等参数建立动态碳源预测模型,提升复杂工况精度;②开发碳源投加与回流比联动算法,实现多参数协同;③通过工程验证明确系统应用效能。本文

旨在为污水处理厂高效经济脱氮提供支撑,推动行业向智能调控转型。

1 系统构建与核心控制方法

1.1 工程基础条件

本文依托某城镇污水处理厂,设计处理规模为10万 m^3/d ,实际平均处理量为6.5万 m^3/d ,采用“AAO+斜板高效沉淀+纤维转盘滤池+次氯酸钠消毒”工艺,如图1所示。核心处理单元生化反应池有效容积为13 400 m^3 ,设计水力停留时间为16.5 h,污泥龄控制在15~25 d,好氧区DO质量浓度控制在2~3 mg/L,缺氧区DO质量浓度控制在0.2~0.5 mg/L,污泥质量浓度为4 300~4 800 mg/L,均值为4 550 mg/L。出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)^[6]的一级A标准,其中TN排放限值为15 mg/L。

1.2 系统核心控制方法与实现路径

1.2.1 系统构成与调控逻辑

原位精确生物脱氮的高效实现依赖硝化与反硝化两大微生物过程的紧密协同。在好氧功能区,氨氧化细菌(AOB)首先通过酶促反应将氨氮转化为亚硝酸盐氮(NO_2^- -N),随后亚硝酸盐氧化细菌(NO_B)将 NO_2^- -N氧化至 NO_3^- -N。此阶段需维持2~3 mg/L的DO及15~25 d的污泥龄,以保障硝化菌活性。在缺氧功能区,反硝化细菌以有机碳源为电子供体,逐步将 NO_3^- -N还原为氮气(N_2),此过程需将DO质量浓度严格控制在0.5 mg/L以下,并精准调控碳源与 NO_3^- -N的比例。本工程应用系统通过实时调控碳源投加量与内外回流比,优化上述反应的物料平衡与环境条件,实现脱氮效率与稳定性的同步提升。

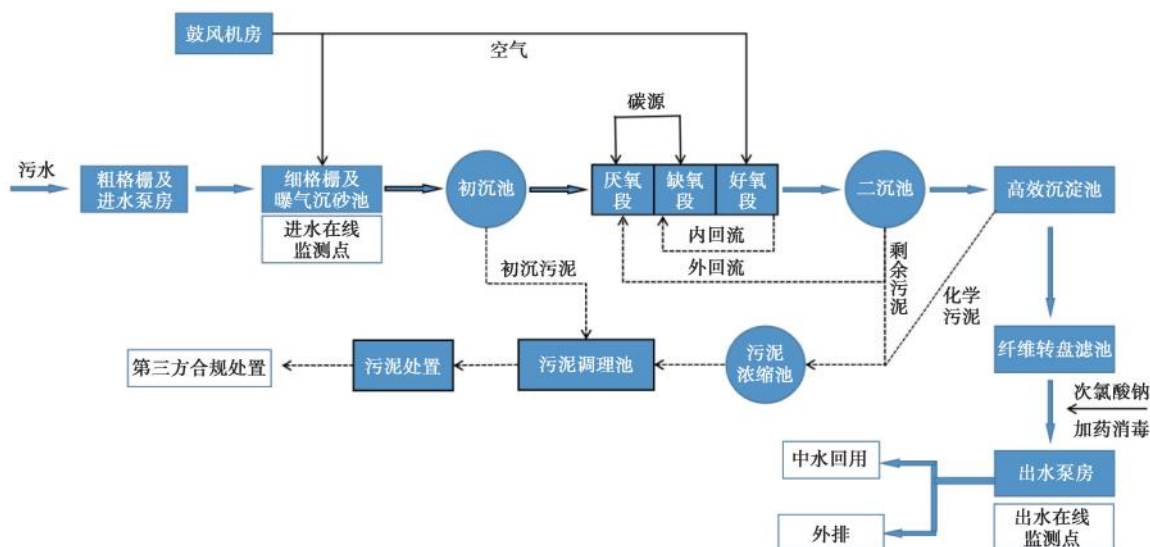


图 1 工艺流程

Fig. 1 Process Flow

1.2.2 核心控制算法与公式

生物脱氮系统的整体效能核心受制于反硝化反应效率,其反应速率易受底物浓度、污泥活性、温度及 DO 等多因素动态影响,成为工艺调控的关键瓶颈。由于好氧区硝化反应通常较为彻底,NO₂⁻-N 含量极低可忽略,总硝态氮近似等于 NO₃⁻-N;且好氧区出水总凯氏氮(TKN)质量浓度稳定在 0.5~3.0 mg/L,因此反硝化过程的监测可通过精准追踪缺氧区末端与好氧区末端的 NO₃⁻-N 含量实现^[7]。

从脱氮机理来看,缺氧区出水在流经好氧区的全过程中,TN 总量保持不变。TN 可拆解为总硝态氮(含 NO₃⁻-N 与 NO₂⁻-N,后者可忽略)与 TKN(含总氨氮与总有机氮,二者浓度均较稳定)。基于这一特性,结合在线监测获取的缺氧区出水总硝态氮、好氧区出水 NO₃⁻-N 及 TKN 数据,可建立缺氧区与好氧区出水 TN 的平衡关系,如式(1)^[7]。

$$(1+R_{外}+R_{内}) \times B + (R_{外}+R_{内}) \times d + (A-e) = (1+R_{外}+R_{内}) \times (C+d) \quad (1)$$

其中:A——生物池进水 TN,mg/L;

B——缺氧区出水总硝态氮实际质量浓度,mg/L;

C——好氧区出水总硝态氮实际质量浓度,mg/L;

d——好氧区出水 TKN 实际质量浓度,mg/L;

e——生物池进水总硝态氮实际质量浓度,mg/L;

R_外——外回流实际回流比;

R_内——内回流实际回流比;

(1+R_外+R_内)×B——缺氧区出水中的总硝态氮,mg/L;

(R_外+R_内)×d——缺氧区出水中来自内外回流的 TKN,mg/L;

(A-e)——缺氧区出水中来自生物池进水的 TKN,mg/L;

(1+R_外+R_内)×(C+d)——好氧区出水的 TN,mg/L。

在活性污泥处理工艺体系中,NO₂⁻-N 含量极低可忽略,总硝态氮可用 NO₃⁻-N 替代;同时生物池进水 NO₃⁻-N 稳定在 0.5~2.0 mg/L,好氧区出水总氨氮多低于 2 mg/L、总有机氮稳定在 0.5~3.0 mg/L,上述参数均可通过实测校准获取经验值。基于此,可推导出生物池进水 TN 浓度的实用计算式,如式(2)^[7]。

$$A = (C-B) \times (1+R_{外}+R_{内}) + d + e \quad (2)$$

为实现脱氮过程的精准调控,分别建立外回流比、内回流比及碳源投加量的控制算法,具体如下。

(1)外回流比控制算法:核心目标是维持生化反应池污泥浓度稳定,基于好氧区活性污泥浓度与外回流污泥浓度的比例关系推导,如式(3)^[7]。

$$R'_{\text{外}} = \frac{X}{X_{\text{外}} - X} \times 100\% \quad (3)$$

其中: X ——好氧区活性污泥质量浓度,mg/L;
 $X_{\text{外}}$ ——外回流活性污泥质量浓度,mg/L;
 $R'_{\text{外}}$ ——目标外回流比。

(2)内回流比控制算法:依据生物池进水 TN、各区域 NO_3^- -N 目标浓度差,优化硝化与反硝化过程的物料平衡,如式(4)^[7]。

$$R'_{\text{内}} = \left(\frac{A - d - e}{C' - B'} - R'_{\text{外}} - 1 \right) \times 100\% \quad (4)$$

其中: B' ——缺氧区出水 NO_3^- 目标质量浓度,mg/L;
 C' ——好氧区出水 NO_3^- 目标质量浓度,mg/L;
 $R'_{\text{内}}$ ——目标内回流比。

(3)碳源投加量控制算法:结合进水流量、实际 TN 去除率与目标去除率差值,动态核算反硝化碳源需求,如式(5)^[7]。

$$D = K \times Q \times (\eta_{\text{目标}} - \eta_{\text{实际}}) \times \frac{A - e - d}{1\,000} \times L_x \quad (5)$$

其中: D ——碳源投加量,kg/h;

K ——碳源投加修正系数,取 0.5~2.0;

Q ——进水流量, m^3/h ;

$\eta_{\text{目标}}$ ——TN 目标去除率;

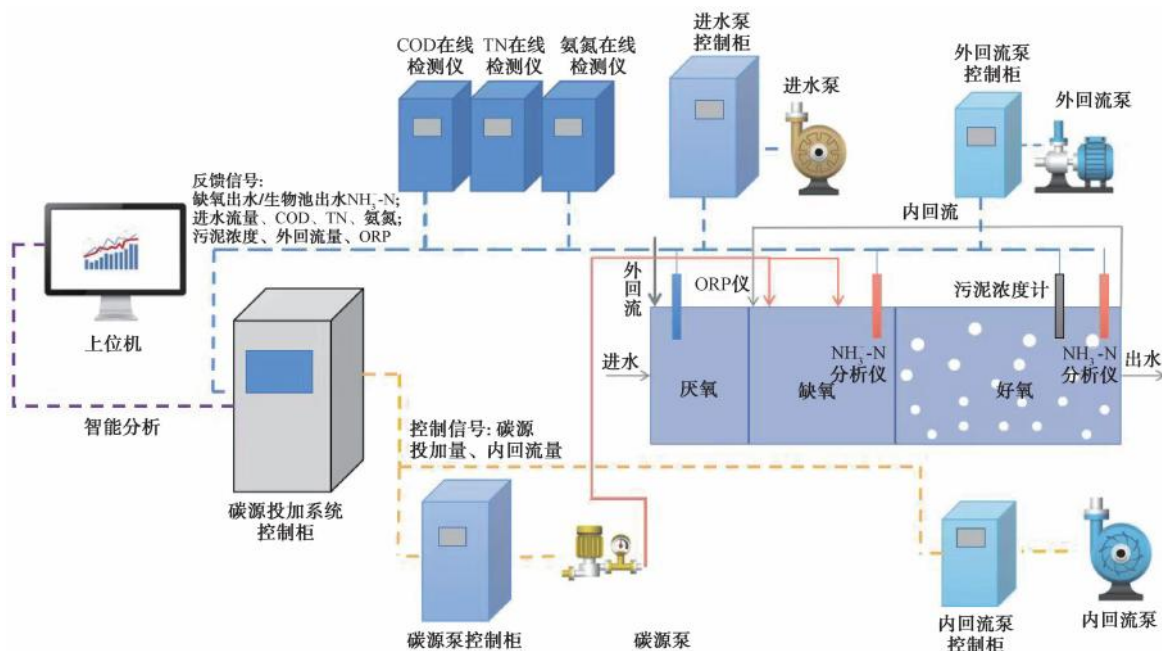
$\eta_{\text{实际}}$ ——TN 实际去除率;

L_x ——反硝化单位质量 NO_3^- 需要消耗的碳源质量,kg COD/(kg NO_3^- -N)。

结合工程实践经验^[7],实际生产中碳源投加修正系数 K 的常规取值为 0.5~2.0,反硝化单位质量 NO_3^- -N 对应的 L_x 取值通常在 5~15 kg COD/(kg NO_3^- -N),具体数值需根据污水水质、碳源纯度及污泥活性等实际工况动态调整。

1.2.3 关键技术特点

系统采用“监测-建模-决策-执行-反馈”的闭环调控流程(图2):①在线监测设备实时采集 NO_3^- -N 质量浓度、污泥浓度、流量等参数;②PLC 控制系统调用多参数协同控制算法,预设目标值进行数据运算,生成碳源投加量及内外回流比调控指令;③执行设备(碳源投加泵、内外回流泵)根据指令调整运行参数;④监测设备实时反馈调控效果,算法动态修正调控指令,确保脱氮过程持续优化。整个调控流程响应时间 $\leq 5\text{ min}$,实现脱氮过程的实时精准控制。



注:COD—化学需氧量;ORP—氧化还原电位。

图2 控制系统设备

Fig.2 Equipments of Control System

1.2.4 多参数协同机制

相较于现有研究多聚焦单一参数调控或部分参数组合,本文的碳源投加与回流比联动算法实现了“物理参数-化学参数-生物参数”的全维度覆盖与协同。物理参数包括进水流量、水力停留时间;化学参数涵盖进水 COD、TN、氨氮、 NO_3^- -N 含量及好氧区/缺氧区 DO 含量;生物参数核心为污泥活性,外回流比与污泥活性联动,通过外回流比稳定好氧区污泥浓度在设定值,同步以“镜检观察+反硝化速率”综合量化污泥活性对脱氮性能的影响。

多参数协同控制算法遵循“菌群保障-底物优化-需求匹配”优先级,实现脱氮效能与成本最优。首先通过外回流比调控,维持好氧区活性污泥质量浓度为 3 500~5 000 mg/L,为硝化反应提供足量功能菌;再调节内回流比,优化 NO_3^- -N 底物分配,保障缺氧区 NO_3^- -N 供给;最后精准匹配碳源投加量,满足反硝化需求,达成“底物-菌群-环境”动态平衡。算法同时约束外回流比、内回流比、碳源投加量及好氧/缺氧区 DO 等工艺参数,遵循出水 $\text{TN} \leq 15$ mg/L 的水质要求,以“经济成本最低+脱氮稳定性最优”为双目标优化调控。

1.2.5 碳源投加精准调控与模型优化

碳源投加量的精准把控,核心取决于 TN 目标去除率与实际去除率的差值——该差值与碳源投加量呈正相关,差值越大,所需碳源投加量相应增加。通过调控碳源输送泵的运行参数,可实现碳源的精准补给,既充分进行反硝化反应保障脱氮效果达标,又能避免碳源过量投加造成的浪费。

为提升复杂工况下碳源需求预测精度,研究中引入污泥活性与 DO 协同修正机制,构建多参数耦合的碳源预测模型。采用反硝化比耗氧速率作为污泥活性的核心量化指标,通过实验室模拟反硝化实验实现精准表征。试验采集生化池水样,选取 25 L 磁力搅拌装置与曝气设备共同搭建模拟平台,严格复刻生化池缺氧-好氧区的环境参数(缺氧区 DO 质量浓度为 0.2~0.5 mg/L、好氧区 DO 质量浓度为 2.0~3.0 mg/L,污泥浓度匹配实际工况)。此外,实时监测 DO、 NO_3^- -N、氨氮、TN 等指标的动态变化,通过计算 NO_3^- -N、TN 去除率及反硝化速率[单位为 $\text{mg NO}_3^- \cdot \text{N} / (\text{g VSS} \cdot \text{L} \cdot \text{h})$],同步评价功能区脱氮效能,为污泥活性量化提供双重验证。

进一步对模型进行优化。首先,基于实验室模拟数据,构建污泥活性、DO 与碳源需求的相关性基础模型,明确各参数权重系数。其次,通过耦合污泥活性实时监测数据与 DO 调控参数,修正碳源投加计算误差。最终要确保模型预测精度控制在 $\pm 5\%$ 以内,以至于在复杂工况下仍能精准匹配反硝化碳源需求,提升模型的工程适配性。

1.2.6 设备响应时间分析

本系统依托“监测-建模-决策-执行-反馈”闭环调控流程,将响应时间严格控制在 ≤ 5 min,远优于传统人工调控 2~4 h 的滞后性,主要考虑以下三方面:一是适配反硝化反应时效性,反硝化细菌消耗碳源还原 NO_3^- -N 的过程动态性强,短时间供需失衡便会导致脱氮效率下降,5 min 内快速调控可确保碳源与 NO_3^- -N 质量浓度比稳定在适宜范围;二是应对水质水量波动,污水处理厂常面临工业废水冲击、降雨径流等突发工况,短时间内能及时抵消扰动影响,避免出水超标;三是匹配系统调控逻辑,系统以 5 min 为间隔捕捉水质参数变化率,实现算法对反应趋势的精准适配。

为解决调控响应时间短(≤ 5 min)可能导致的设备频繁调节问题,本系统采用以下平衡策略:①设置参数调节死区,当监测参数变化幅度小于 5%时,暂不启动调控指令,避免无效调节;②采用阶梯式调节模式,设备参数调整分 3~5 个阶梯逐步趋近目标值,每个阶梯间隔 1~2 min,降低设备启停与转速突变的冲击;③优化设备控制逻辑,对回流泵等大型设备,设定最小调节周期(如 15 min 内最多调整 2 次),同时结合设备运行状态反馈(如电机温度、振动值)动态调整调节频率,当设备运行负荷接近额定值时,适当扩大调节死区;④选用变频调速性能优异的设备,并加强设备日常维护保养,定期检查轴承、密封等关键部件,延长设备使用寿命。通过上述措施,在保障调控精度的同时,有效降低了设备频繁调节的负面影响,工程验证期间设备故障率较传统调控模式下降 30%。

2 工程应用效果与分析

为全面验证原位精确生物脱氮智能控制系统的实际应用效能,本文以 10 万 m^3/d 规模污水处理厂为依托,基于 12 个月连续监测数据(覆盖四季气候、水质水量波动、降雨冲击等典型工况),通过对

比系统投运前后碳源投加效率、脱氮效果稳定性及经济运营效益,重点分析该技术在低 C/N 等复杂工况下的适配性与优越性。以下从碳源投加优化、脱氮效果与稳定性、经济与运营效益 3 个方面展开详细分析。

2.1 碳源投加优化效果

系统投运前后 12 个月的连续监测数据如图 3

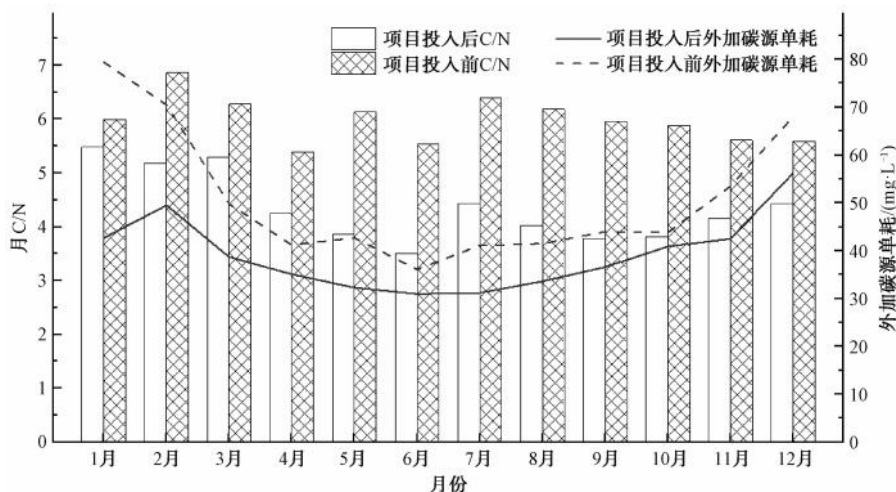


图3 系统投入前后月 C/N、外加碳源投加对比

Fig. 3 Comparison of Monthly C/N and External Carbon Source Dosage before and after System Commissioning

碳源投加效率提升的核心机制包括。

(1)精准匹配碳源需求:传统工艺因无法实时掌握反硝化速率,碳源投加量通常高于实际需求的 10%~20%,从而导致浪费;本系统通过实时监测 NO_3^- -N 质量浓度与污泥活性,动态核算碳源需求,投加误差控制在 $\pm 5\%$ 以内,避免过量投加。

(2)优化反硝化反应条件:通过联动调控内回流比与碳源投加量,使缺氧区 C/N 维持在 4~6 的适宜范围,提升反硝化细菌代谢活性,碳源利用率从 65%提升至 78%。

(3)动态修正调控参数:基于进水水质与污泥活性变化,实时调整碳源投加修正系数 K 与活性,确保碳源投加与反应需求同步,即使在进水 C/N 大幅降低的情况下,仍能维持高效反硝化反应。

2.2 脱氮效果与稳定性分析

系统改造投运前后出水 TN 稳定性对比箱线图如图 4 所示。改造投运前采用人工调控模式,出水 TN 日均值介于 9.60~13.60 mg/L,极差为 4.00 mg/L,方差为 $1.04 (\text{mg/L})^2$,主要因为人工采样检测周期长,无法及时捕捉水质水量的变化;以及调控依赖

所示,碳源投加效率得到显著优化。投运前,进水 C/N 为 5.38~6.86(均值为 5.98),年累计对应碳源投加单耗为 68 mg/L;而投运后,在进水 C/N 降至 3.50~5.48(均值为 4.35,降幅为 27.3%)的苛刻条件下,年累计碳源投加单耗降至 56 mg/L,降幅达 17.6%,体现了系统对低 C/N 污水的适配能力与碳源节约潜力。

经验,碳源投加与回流比匹配性较差,导致硝化-反硝化反应失衡。改造投运后,出水 TN 日均值稳定在 12.50~14.00 mg/L,极差降至 1.50 mg/L,方差降至 $0.18 (\text{mg/L})^2$,稳定性提升 64.4%。

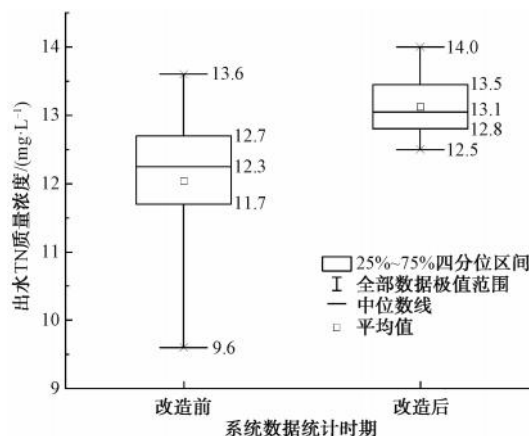


图4 系统改造前后出水 TN 稳定性对比箱线图

Fig. 4 Box Plot of Effluent TN Stability before and after System Reconstruction

系统改造前后出水 TN 浓度及标准偏差变化图如图 5 所示。改造后系统出水 TN 浓度均值有所上

升,但波动幅度显著收窄,稳定性大幅提升。改造前 TN 浓度则波动剧烈,受工况扰动影响明显。二者浓度变化趋势同步,表明均受同类外部因素调控,而改造措施有效弱化了外部因素的影响幅度。

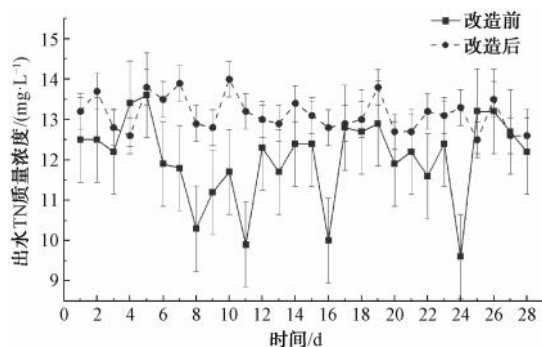


图5 改造前后出水 TN 浓度及标准偏差变化

Fig. 5 Variation of TN Concentration and Standard Deviation before and after Reconstruction in Effluent

由图 3~图 5 可知,投运后出水 TN 均值从 12.04 mg/L 升至 13.13 mg/L,并非系统脱氮能力下降,而是受进水水质恶化影响。投运期间进水 TN 均值较前期升高 8.24%(从 35.20 mg/L 升至 38.10 mg/L),进水 C/N 降低 27.3%,反硝化底物供应不足。在此苛刻条件下,系统通过以下机理实现稳定达标:①实时监测缺氧区与好氧区 NO_3^- -N 质量浓度,动态调整内回流比,确保反硝化底物充足;②引入污泥活性修正系数,优化碳源投加量,提升反硝化反应速率;③基于生物池关键过程指标与末端出水水质的强关联性,通过捕捉反硝化反应的“过程偏差”实施前瞻性预调控。此外,反硝化反应主要在缺氧区完成,而生物池出水需经二沉池沉淀、深度处理单元净化后才能最终外排,该处理流程存在 6~8 h 的时间滞后性。为此,系统摒弃传统依赖末端出水数据反推调控的模式,转而通过在线监测生物池内 NO_3^- -N 质量浓度、污泥浓度、DO 等“反应中间状态”参数,结合改良型动态碳源需求预测算法,精准预判后续 6~8 h 的水质演变趋势,提前下发调控指令,从根本上规避了调控滞后引发的脱氮效率波动问题。后续可通过优化缺氧区 DO 控制(降至 0.1~0.3 mg/L)、延长缺氧区水力停留时间等措施,进一步提升脱氮效率。

2.3 经济与运营效益分析

2.3.1 直接成本节约

直接成本节约共计约 40.98 万元/a,主要体现

在以下几个方面。

检测成本节约:传统工艺日均人工检测 NO_3^- -N 4 次,单次检测费用 80 元,年度 365 d 检测成本为 11.68 万元;系统投运后,采用全光谱 NO_3^- -N 监测仪(无耗材、寿命超 10 a),无需人工采样送检,实现检测成本全额节约,同时数据获取延迟从 2~4 h 缩短至 5 min,为调控及时性提供保障。

碳源成本降低:如表 1 所示,改造前万吨水碳源成本为 700.6 元,改造后降至 578.7 元,降幅为 17.4%。按实际日均处理量 6.5 万 m^3 计算,改造前碳源累计单耗为 68 mg/L,改造后碳源累计单耗为 56 mg/L,每吨碳源成本为 1 030 元,年度按照 365 d 计算,年节约碳源成本约为 29.3 万元,经济效益显著。

表 1 碳源成本分析

Tab. 1 Cost Analysis of Carbon Sources

项目	改造前	改造后
年度进水总量/t	2 394.997 万	2 228.302 万
年度碳源消耗总量/t	1 629.170	1 251.865
碳源累计单耗/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	68	56
碳源单价/(元 $\cdot \text{t}^{-1}$)	1 030	1 030
总成本/元	167.8 万	128.9 万
万吨水碳源成本/元	700.6	578.7

运营效率提升:减少人工采样、数据记录、工艺调整等繁琐环节,单厂年减少人工工时约为 1 460 h,劳动强度降低 40%;同时,系统实现脱氮过程自动化控制,降低了人为操作误差,有效规避了环境风险。

2.3.2 智能控制系统全生命周期成本构成

1) 系统搭建费用

系统搭建费用合计 64 万元,具体构成:(1)核心监测设备选用 NO_3^- -N 分析仪 2 台,分别安装于缺氧区与好氧区,价格为 12.5 万元/台,含控制器、传感器电缆、T304 材质安装支架及仪表箱立杆等全套配置,共计 25 万元。该设备采用紫外可见光全光谱分析技术,无耗材和超声波自动清洗,测量相对误差小于 $\pm 5\%$,使用寿命超过 10 a。(2)软件搭建费用涵盖 PLC 多参数协同控制模型开发、算法嵌入、上位机界面定制及数据对接调试,共计 12 万元。(3)配套硬件改造包括信号传输模块、控制柜升级、碳源投加泵与内外回流泵变频改造,共计 15 万元。(4)安装集成费用含设备吊装、管路改造、电路铺设

及系统联调,共计 12 万元。

2) 年度运维成本

年度运维成本约为 0.264 万元,10 a 累计为 2.64 万元。(1)设备运维方面,分析仪无耗材消耗,仅需每季度校准 1 次,单次费用为 80 元,2 台年均校准费用为 640 元,日常仅需定期清理探头上的絮体,较为简便。(2)软件维护方面,年度算法优化、故障排查及数据安全维护费用为 0.2 万元;人工运维方面,由现有技术人员兼职完成,不产生额外人工成本。

综上所述,全生命周期 10 a 累计成本为 66.64 万元,年均综合成本为 6.66 万元。

2.3.3 投资回收期分析

依托设备寿命长、无耗材等优势,长期运维支出低,基于年均 40.98 万元的直接成本节约,投资回收期 $64(\text{万元})/[40.98(\text{万元/a})-0.264(\text{万元/a})]=1.57\text{ a}$,经济可行性突出。

3 结论与展望

3.1 结论

本工程构建的原位精确生物脱氮智能控制系统,通过 NO_3^--N 在线监测、多参数协同算法与执行设备联动,实现了脱氮过程的实时精准调控,解决了传统工艺调控滞后、碳源浪费等问题。

工程验证表明,在进水 C/N 降低 27.3% 的不利条件下,系统仍能保障脱氮稳定性,出水 TN 日均值极差从 4.00 mg/L 降至 1.50 mg/L,方差从 $1.04(\text{mg/L})^2$ 降至 $0.18(\text{mg/L})^2$;同时碳源投加单耗减少 17.6%,万吨水碳源成本下降 17.4%,综合效益显著。

系统的核心优势在于:①引入污泥活性修正系数,提升了碳源需求预测精度;②开发碳源投加与内外回流比联动调控算法,实现多参数协同优化;③构建闭环调控流程,调控响应时间 $\leq 5\text{ min}$,提前 6~8 h 预判水质变化;④通过设置调节死区、阶梯式调节等策略,平衡了调控精度与设备使用寿命。

3.2 展望

未来可从以下方面进一步优化系统性能:①引入机器学习算法(如反向传播神经网络、随机森林),融合更多环境参数(如温度、pH),提升碳源需求预测精度;②开发 DO 与碳源投加的协同调控策

略,进一步优化反硝化反应条件;③开展不同规模、不同水质条件下的工程验证,扩大技术应用范围。该系统为城镇污水处理厂低 C/N 污水脱氮提供了智能化解决方案,对推动污水处理行业数字化、绿色化发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 李传举,丁强,刘杰,等.碳源智能投加控制系统构建及应用效能评估[J].给水排水,2023,49(4):118-123.
Li C J, Ding Q, Liu J, et al. Construction and application efficiency evaluation of carbon source intelligent dosing control system[J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(4): 118-123.
- [2] 张帅,矫忠直,周俊强,等.精确反硝化除氮加药控制系统在污水厂的应用[J].广东化工,2023,50(15):139-141.
Zhang S, Jiao Z Z, Zhou J Q, et al. Application of precise denitrification and nitrogen removal dosing control system in sewage plant[J]. Guangdong Chemical Industry, 2023, 50(15): 139-141.
- [3] 吴宇行,王晓东,陈宁,等.典型城镇污水处理厂碳源智能投加控制生产性试验[J].环境工程,2022,40(6):212-218,271.
Wu Y H, Wang X D, Chen N, et al. Full-scale study of an intelligent carbon dosing control system in a typical urban wastewater treatment plant[J]. Environmental Engineering, 2022, 40(6): 212-218, 271.
- [4] 陈健.污水处理厂碳源精准投加自控系统建设与运用[J].海峡科学,2024,10(214):58-61,70.
Chen J. Construction and application of automatic control system for accurate addition of carbon source in sewage treatment plants[J]. Straits Science, 2024, 10(214): 58-61, 70.
- [5] 陆漾,沈怡.改良 AAO 工艺精细化脱氮控制技术在某污水处理厂的应用[J].净水技术,2024,43(12):119-127.
Lu Y, Shen Y. Application of improved AAO process for refined denitrification control technology in a WWTP[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(12): 119-127.
- [6] GB 18918—2002 城镇污水处理厂污染物排放标准[S].
GB 18918—2002 Discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plant[S].
- [7] 吴江伟,楚金喜,赵晓娟,等.一种原位精确生物脱氮污水处理控制方法:CN202310082051.2[P].2023-04-28.
Wu J W, Chu J X, Zhao X J, et al. A control method for in-situ precise biological denitrification in sewage treatment; CN202310082051.2[P]. 2023-04-28.