

污水处理与回用

王秋懿^{1,*}, 刘姝睿, 孙鹏, 等. 基于 Simuwater 仿真模拟的污水厂提标改造工艺方案优化与应用[J]. 净水技术, 2026, 45(5): 63-71, 99.

Wang Q Y, Liu S R, Sun P, et al. Optimization and application of upgrading and reconstruction process schemes for WWTP based on Simuwater simulation[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(5): 63-71, 99.

基于 Simuwater 仿真模拟的污水厂提标改造工艺方案优化与应用

王秋懿^{1,*}, 刘姝睿¹, 孙鹏², 刘海江², 李士松¹, 乔琛¹

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074; 2. 张家口建发水务集团有限公司, 河北张家口 075000)

摘要 【目的】 文章目的是为满足国家“双碳”目标下日益严格的污水处理排放标准, 指导污水处理厂提标改造的工艺设计, 解决污水处理厂进水水质复杂、碳源利用不足以及低温运行导致的出水氮磷指标波动大、水质难以稳定达标的突出问题。【方法】 基于河北省某污水处理厂的提标改造需求, 采用 Simuwater 软件构建不同处理工艺流程的仿真模型, 对包括改良型 Bardenpho 工艺、约翰内斯堡 (JHB) 工艺及其组合工艺等在内的提标工艺进行污水处理效果分析。【结果】 在相同进水条件但不同进水温度 (10、15、20 °C) 下, 改良型 Bardenpho 和反硝化深床滤池组合工艺展现出较优的污水处理效能, 可使核心出水指标稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB12/599—2015) 中的 A 标准, 故选择该组合工艺作为污水处理厂的提标工艺。在水温为 10 °C 时, 该提标工艺较原厌氧-缺氧-好氧 (AAO) 工艺对总氮 (TN) 和氨氮的去除率可分别提升 69.5% 和 73.6%, 有效解决原工艺在低温条件下脱氮能力不足的核心问题。该提标工艺于 2023 年在污水处理厂正式投运, 实际运行数据显示, 2024 年出水化学需氧量 (COD)、氨氮、TN、总磷 (TP) 的达标率分别达到 97.26%、100.00%、98.62%、98.90%, 出水水质较改造前显著提升且稳定达标。【结论】 将 Simuwater 仿真模拟技术和工程实践相结合, 可为污水处理厂提标改造提供科学依据, 所确定的组合工艺在实际应用中有效保证了该污水处理厂安全稳定运行, 可为其他类似污水处理厂开展提标改造工程提供可借鉴的实践经验。

关键词 污水处理厂 (WWTP) 提标改造 仿真模拟 改良型 Bardenpho 工艺 工艺优化

中图分类号: TU992 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2026)05-0063-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.05.009

Optimization and Application of Upgrading and Reconstruction Process Schemes for WWTP Based on Simuwater Simulation

Wang Qiuyi^{1,*}, Liu Shurui¹, Sun Peng², Liu Haijiang², Li Shisong¹, Qiao Chen¹

(1. China Municipal Engineering North China Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300074, China;

2. Zhangjiakou Jianfa Water Group Co., Ltd., Zhangjiakou 075000, China)

Abstract [Objective] This paper aims to meet the increasingly stringent wastewater treatment discharge standards under "dual carbon" goals, guide the process design of wastewater treatment plant (WWTP) upgrading and reconstruction, and address the issue of unstable effluent quality in the WWTP caused by complex influent characteristics, insufficient carbon source utilization, and low-temperature operation. [Methods] Based on the upgrading requirements of a municipal WWTP in Hebei Province, Simuwater software was utilized to establish the process models of different treatment processes to analyze the treatment efficiencies of the modified Bardenpho process, Johannesburg (JHB) process, and their combined processes. [Results] The combined process integrating the

[收稿日期] 2025-04-21

[基金项目] 国家重点研发计划 (2022YFC3203204)

[通信作者] 王秋懿 (1992—), 男, 主要从事城市智慧水务关键技术研发与集成工作, E-mail: qiuyi6@outlook.com。

modified Bardenpho process with denitrifying deep-bed filter consistently achieved optimal performance under varying influent temperatures (10 °C, 15 °C, and 20 °C), ensuring stable compliance of key effluent quality indices with the class A standards specified in the *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (DB12/ 599—2015). Therefore, this combination process was chosen as the upgrading process for the WWTP. At 10 °C, this upgrading process improved the removal efficiencies of total nitrogen (TN) and ammonia nitrogen by 69.5% and 73.6% respectively compared to the original anaerobic-anoxic-oxic (AAO) process, effectively resolving the core problem of insufficient nitrogen removal in the original system under low temperature conditions. The upgrading process was officially implemented at the WWTP in 2023. Actual operation data showed that in 2024, the removal rates of the effluent chemical oxygen demand (COD), ammonia nitrogen, TN, and total phosphorus (TP) reached 97.26%, 100.00%, 98.62%, and 98.90%, respectively, indicating significant and stable improvements in effluent quality. [**Conclusion**] The application of Simuwater simulation technology combined with engineering practices provides a scientific basis for the upgrading and reconstruction of the WWTP. The identified combined process ensures safe and stable operation in practical applications, offering referable practical experience for other similar WWTPs upgrading and reconstruction projects.

Keywords wastewater treatment plant (WWTP) upgrading and reconstruction simulation modified Bardenpho process process optimization

近年来,国家深入推进生态文明建设,环保政策持续加码。为落实“双碳”目标及节能减排战略部署,生态环境部要求污水处理企业实现减污降碳协同增效,明确将《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的出水标准从一级 B 全面提升至一级 A 及以上水平。在此背景下,全国多数污水处理厂亟需通过工艺优化、设施升级等系统性提标改造工程,满足更严格的污染物控制要求,以实现出水水质稳定达标排放。传统的污水处理厂工艺设计和运行计算往往基于经验公式和历史数据,提标工艺的比选过程较为繁琐,且结果缺乏直观性,难以准确预测和评估工艺处理效果,很大程度上制约了提标改造工作的高效开展,需借助先进的技术手段来突破困境。随着计算机技术的不断发展,模型仿真模拟技术在污水处理领域应用逐渐广泛,利用仿真模型对污水处理过程进行高精度模拟,通过调整模型参数和输入条件,可直观展示不同工艺方案在特定条件下的出水处理效果,为污水厂提标改造提供有力的参考和科学依据。Kim 等^[1]将简化的 ASM2 模型应用于首尔某污水厂的工艺调整,通过调节曝气时间,使出水氨氮浓度达标的同时降低曝气能耗,每年可为污水厂节约电费约 600 美元。Wu 等^[2]基于 ASM3 模型利用 WEST 软件对焦化污水处理厂好氧-缺氧/好氧(O-A/O)工艺运行中的溶解氧(DO)浓度和污泥回流比等参数进行优化调整,可提高化学需氧量(COD)和氨氮的去除效果,同时降低污水处理厂总运行成本约 12.7%。陆谢娟等^[3]基于 ASM 模型利用 BioWin 软件对武汉市某污水处理厂

的改良厌氧-缺氧-好氧(AAO)工艺进行模拟优化,通过调整分段进水比、内外回流比等运行参数,优化后的水厂出水水质可稳定达标。刘乐乐等^[4]利用 STOAT 软件模拟分析不同回流比下北方某污水厂 AAO 工艺的处理效果以得出最优运行工况,结果显示当污泥回流比为 80%,混合液回流比为 400%时,污水厂氮磷去除效率明显提升。

本文以河北省某污水处理厂为例,针对其提标改造需求,基于 ASM2D 模型应用 Simuwater 软件对不同提标工艺的处理效果进行仿真模拟,为污水处理厂工艺优化设计和提标改造开辟新路径,以期为污水处理厂的提标改造实践提供有益的参考和借鉴。

1 设计背景

1.1 污水处理厂概况

河北省某污水处理厂一期工程设计规模为 10 万 m³/d,采用 AAO 处理工艺(图 1),原设计进水 COD、五日生化需氧量(BOD₅)、总氮(TN)、氨氮、总磷(TP)、悬浮物(SS)质量浓度分别为 500、240、80、60、10、500 mg/L,设计出水需达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准。原生物池分为 2 组池体,每池可单独运行。单池 AAO 工艺总水力停留时间(HRT)为 13.18 h,总池容为 54 900 m³,厌氧池、缺氧池、好氧池的 HRT 分别为 1.50、4.50、7.18 h。

从近几年污水处理厂的实际运行情况来看,出水 TN、氨氮、TP 等指标均不能稳定达到一级 A 标准,主要存在的问题分析如下。

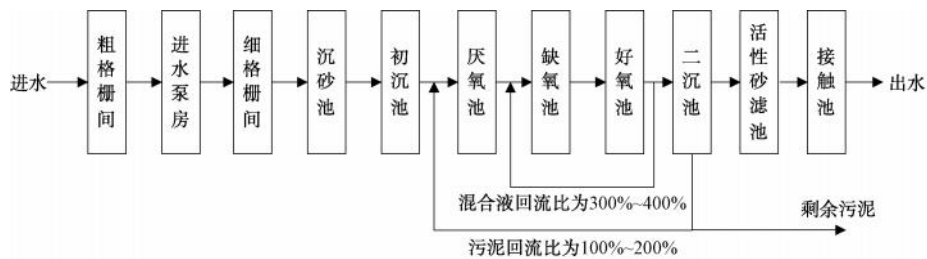


图1 污水处理厂原处理工艺(单池)

Fig. 1 Original Treatment Process of WWTP (Single Group)

(1) 进水浓度高,水质波动大

该污水处理厂的进水主要包括化工废水、制药废水等,其水质特征表现为 COD、氨氮及有机氮浓度较高,且时常受到高浓度冲击负荷的影响。高浓度进水增加了反硝化对碳源的需求,同时硝化细菌的活性和 DO 供应可能不足,导致硝化和反硝化过程不完全,严重影响硝化系统的脱氮效果。

(2) 进水碳氮比偏低,碳源利用能力不足

该污水处理厂进水中存在较高比例的难降解工业废水,碳氮比较低,原 AAO 工艺抗冲击能力差且碳源利用能力差,需投加较多碳源以维持出水达标排放。污泥回流至厌氧区时携带较高浓度的硝态氮,造成反硝化菌与聚磷菌对原水碳源的竞争加剧^[5],聚磷菌的释磷过程受到抑制,降低生物除磷效率,导致出水 TP 浓度难以稳定达标。

(3) 冬季进水温度较低,影响脱氮效率

该污水处理厂冬季(12月底—次年3月底)进水温度多为 10~11℃,部分时段甚至低于 10℃。通常情况下,当水温低于 15℃时,硝化细菌的代谢活性显著降低,硝化速率大幅下降,加之原生物处理单元设计 HRT 不足,导致系统对氮的脱除效率降低^[6],易出现冬季运行不稳定,出水氨氮、TN 超标的现象。

1.2 设计进出水水质

鉴于该污水处理厂长期稳定运行的经验,本项目进水水质的确定以实际监测水质统计数据为基础,同时综合考虑该城市同类污水处理厂的实际进水水质特征及城市未来发展规划。根据德国 ATV-DVK-A131E 标准^[7],若具备 40 d 及以上的实测数据,设计进水水质通常可按照 85% 保证率来确定。同时有研究^[8]表明,采用 85% 保证率下的进水水质指标作为设计依据,既能够确保绝大部分进水水质满足设计要求,又可避免设计进水指标过高而导致

污水处理厂设计余量不足的问题。此外,该地区环保部门强化排污监管,要求工业企业废水排放严格执行《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962—2015),废水必须在污水厂内经处理达标后方可排入下水道;部分高污企业搬迁退市,且该市正在规划建设化粪池内沉积物集中处理处置厂。受上述环保举措影响,预计该污水处理厂的进水 COD、TN 等指标未来将会进一步降低。基于此,本项目以原设计进水水质为基础,参考实际运行中 85% 保证率的进水水质指标,对原设计进水水质进行了部分指标的优化调整。调整后的进水水质指标如表 1 所示。

表 1 设计进水水质指标
Tab. 1 Designed Influent Quality Indices

水质指标	设计值
COD/(mg·L ⁻¹)	500
BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	230
TN/(mg·L ⁻¹)	70
氨氮/(mg·L ⁻¹)	60
TP/(mg·L ⁻¹)	8
SS/(mg·L ⁻¹)	320

根据河北省环境保护局(现河北省生态环境厅)“关于严格执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》的通知”(冀环科函[2007]327号)等文件要求,该污水处理厂出水水质需满足一级 A 标准。然而,由于出水排入的河流流量较小且具有季节性,自然净化能力有限,为有效减轻对河流及地下水体的污染,出水水质应满足景观水体要求,且不应依赖水体的自净能力。因此,在提标改造设计中,除执行一级 A 标准外,还需考虑进一步提升排放标准的可能性。

随着京津冀一体化进程的推进,污水处理标准逐步趋于统一。目前,北京市、天津市及河北省均已

出台高于国家排放标准的污水处理厂地方标准。本着适度超前、节约后期成本的原则,该污水处理厂出水水质参照天津市地方标准《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB12/ 599—2015)中的 A 标准,以确保出水水质满足区域环境保护的长远需求。设计出水质指标如表 2 所示。

表 2 设计出水水质指标
Tab. 2 Designed Effluent Quality Indices

水质指标	设计值
COD/(mg·L ⁻¹)	30
BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	6
TN/(mg·L ⁻¹)	10
氨氮/(mg·L ⁻¹)	1.5(3.0)
TP/(mg·L ⁻¹)	0.3
SS/(mg·L ⁻¹)	5

注:氨氮每年 11 月 1 日—次年 3 月 31 日执行括号内的排放限值。

2 模型构建与模拟分析

污水处理厂的提标改造应充分利用现有设施,通过最小化改造工程量、投资成本及运行费用,实现出水水质的提升目标。基于该污水处理厂的运行问题及提标改造需求,结合出水水质标准要求,确定提标改造的总体思路和目标为:采用具备高效脱氮除磷功能的污水处理工艺,强化生物处理效能,充分利用内碳源并合理投加外碳源,最大限度在生物处理阶段完成生物脱氮,同步实现生物除磷。

本项目通过构建不同处理工艺模型,模拟预测污水处理效果,为提标改造提供科学依据与技术支撑,助力实现出水水质的高效提升。

2.1 工艺选择

本项目通过提升改造污水区二级生物处理工艺,在无新建占地条件下进行优化改造,增强二级处理工艺的脱氮除磷效果,控制出水 TN、TP 稳定达标。研究^[9-12]表明,改良型 Bardenpho 工艺和约翰内斯堡(JHB)工艺作为 AAO 工艺的改良工艺,具备良好的脱氮除磷效率。本项目拟选择改良型 Bardenpho 工艺和 JHB 工艺作为提标工艺进行对比分析。

改良型 Bardenpho 工艺在传统 AAO 工艺基础上增设 1 个缺氧池和 1 个好氧池,第二缺氧池利用第一好氧池产生的硝酸盐和剩余碳源进行反硝化脱氮,通过 2 次反硝化过程提高系统的脱氮效率,同时

减少了回流污泥中硝酸盐的含量,降低对厌氧释磷过程的干扰,使聚磷菌能够获得更充足的优质碳源,从而实现更高效的释磷效果。该工艺通过多级反应区的协同作用,在增强系统脱氮除磷能力的同时,实现了碳源的梯级高效利用^[13]。

JHB 工艺在传统 AAO 工艺的厌氧池前设置了一个预缺氧池,污水以一定的分配比例分别进入预缺氧池和厌氧池,通过多段进水的方式缓解反硝化菌和聚磷菌的碳源竞争问题,为反硝化提供充足的碳源,提高内部碳源利用率;二沉池的污泥回流至预缺氧池,可减少污泥回流携带的硝态氮对厌氧池厌氧环境的破坏,强化厌氧池的释磷效果,从而提高整个系统的脱氮除磷效果^[14]。

此外,考虑到该污水处理厂收水范围内存在较多的化工和制药企业,进水 TN、氨氮含量较高,随着近年来国内污水处理厂氮磷排放标准的提高,未来该污水厂可能会有水质提标的需要。为进一步保证脱氮除磷效果,在二级生物处理后增设反硝化深床滤池作为深度处理单元,同时实现过滤去除 SS、化学除磷和生物反硝化脱氮,以保证出水各项指标稳定达标。

2.2 模型构建及校正

2.2.1 工艺建模

利用 Simuwater 软件,基于 ASM2D 模型构建污水处理厂原 AAO 工艺、改良型 Bardenpho 工艺、JHB 工艺的概化模型,二沉池模型选用 Vitasovic/Takacs 模型。此外考虑到该污水处理厂出水 TN 长期不达标的实际情况,为进一步探索提标改造方案的有效性,在改良型 Bardenpho 工艺和 JHB 工艺的基础上增设反硝化深床滤池,同步建立组合工艺模拟流程。各工艺模型的流程如图 2 所示。

2.2.2 模型参数率定

基于该污水处理厂原 AAO 工艺流程在 Simuwater 软件中进行建模(图 3)。根据 AAO 工艺“厌氧-缺氧-好氧”的串联反应池布局,选择圆形辐流式沉淀池模块作为二沉池,在 Simuwater 软件中根据上下游关系对生化池、沉淀池、回流泵、加药器等各模型单元的进出口进行连接,按照实际工艺运行工况参数进行参数输入,包括进水组分及流量、池容、回流比、排泥量等,设置模拟参数进行稳态模拟。

鉴于该污水处理厂 2021 年进水水质基本与设计进水水质要求相符,为校准模型参数,选取 2021

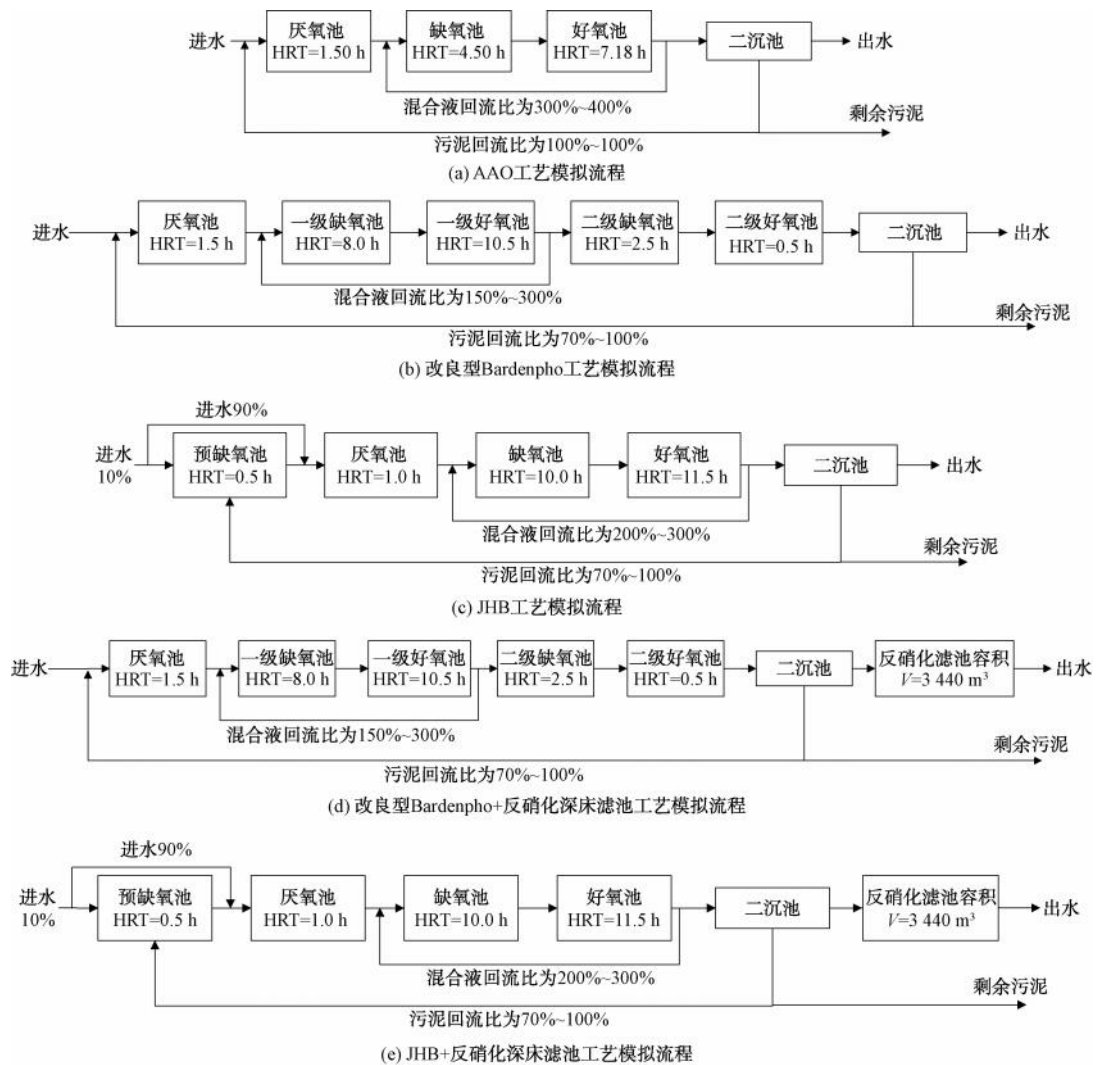


图 2 不同处理工艺的模拟流程

Fig. 2 Simulation Flow of Different Treatment Processes

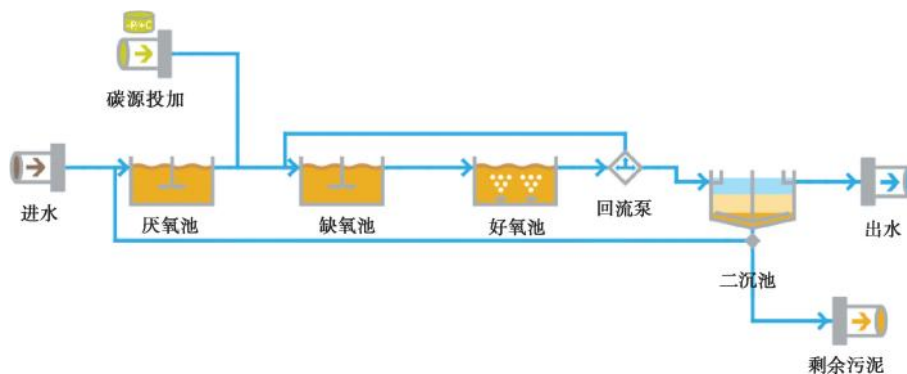


图 3 原 AAO 工艺概化模型

Fig. 3 The Generalized Model of Original AAO Process

年全年进水监测数据,经数据异常值剔除、缺失值插补等清洗后,取各水质指标的年算术平均值作为原

AAO 运行工艺模型输入值(表 3),其余参数按 Simuwater 模型默认值设定^[15]。

表 3 污水处理厂 2021 年全年平均进水水质参数
Tab. 3 Average Influent Quality Parameters for the WWTP in 2021

水质参数	指标值
进水流量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	105 045.6
COD/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	426.1
BOD ₅ /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	199.3
TN/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	72.1
氨氮/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	62.5
TP/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	9.2
SS/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	177.8

根据模型初次模拟结果和实测值的对比,发现 COD、氨氮、TN、TP 的模拟结果和实际存在较大偏差,需校核模型。模型参数的灵敏度分析结果表明,对出水指标影响较大的参数有异养菌的最大生长速率 μ_{H} 、自养菌的最大生长速率 μ_{AUT} 、自养菌的衰减

速率常数 b_{AUT} 、氨氮(营养物)的饱和系数 K_{NH_4} 和氧的饱和系数 K_{O_2} ,其中 μ_{H} 对出水 COD 和 TP 有一定影响,与自养菌相关的参数 μ_{AUT} 、 b_{AUT} 、 K_{NH_4} 、 K_{O_2} 对出水氨氮和 TN 的影响较大,说明自养菌的生长和代谢在脱氮过程中起到重要作用。对上述模型参数进行校准^[3],调整结果如表 4 所示。调整参数前后的出水水质参数如表 5 所示。

表 4 模型参数校准
Tab. 4 Calibration of Model Parameters

参数	名称	默认值	修改值
$\mu_{\text{H}}/\text{d}^{-1}$	异养菌的最大生长速率	6.0	6.1
$\mu_{\text{AUT}}/\text{d}^{-1}$	自养菌的最大生长速率	1.0	0.9
$b_{\text{AUT}}/\text{d}^{-1}$	自养菌的衰减速率常数	0.15	0.14
$K_{\text{NH}_4}/(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	氨氮(营养物)的饱和系数 (以 N 计)	1.00	0.95
$K_{\text{O}_2}/(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	氧的饱和系数(以 O ₂ 计)	0.50	0.45

表 5 模型校准前后工艺模拟值
Tab. 5 Simulation Values of Process before and after Model Calibration

项目	COD	BOD ₅	氨氮	TN	TP
实测出水水质/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	32.19	7.49	4.21	22.57	2.65
校正前模拟值/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	40.53	7.54	7.87	40.71	0.62
校正前误差	25.91%	0.67%	86.94%	80.37%	76.60%
校正后模拟值/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	32.71	7.45	3.93	24.49	2.82
校正后误差	1.62%	0.53%	6.65%	8.51%	6.42%

一般而言,当稳态模拟时,模拟值与实测值总体相差 5%~20%^[16]。参数调整后,模拟值与实测值的相对误差均<9%(表 5),证明模型精度较高,可用于实际工艺运行模拟。

2.2.3 模型验证

基于实际运行需求,选取 COD、氨氮作为关键出水指标,利用污水厂 2021 年 6 月份的每日进出水数据进行动态验证,动态拟合结果如图 4 所示,校准

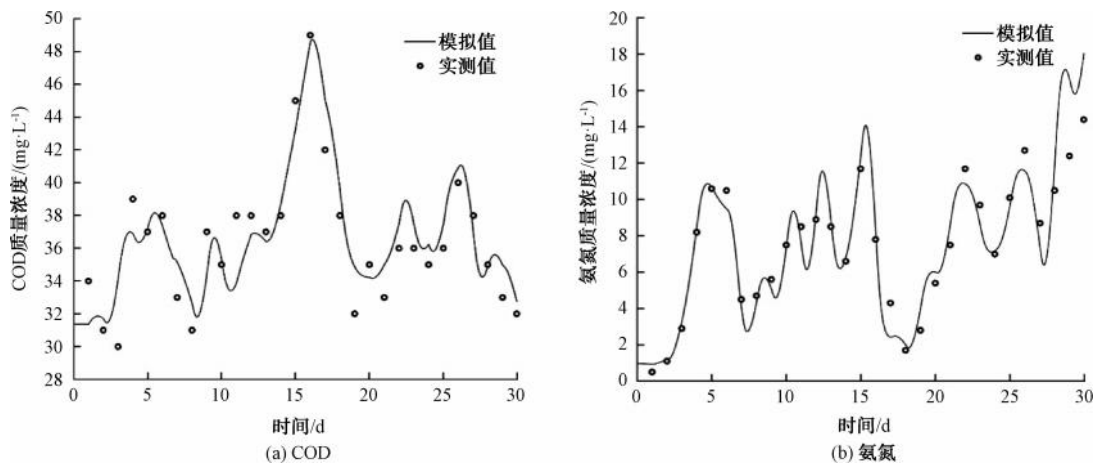


图 4 模型动态验证

Fig. 4 Model Dynamic Verification

后模型的出水水质模拟结果与实测值吻合度较高,进一步说明了 Simuwater 模型可对污水处理厂工艺运行规律进行有效表征。

2.3 工艺模拟分析

以不同进水温度(10、15、20 °C)作为输入条件,在设计进水水质下,对原 AAO 工艺(以下简称“原

工艺”)、改良型 Bardenpho 工艺(以下简称“方案一”)、JHB 工艺(以下简称“方案二”)、改良型 Bardenpho 和反硝化深床滤池组合工艺(以下简称“方案三”)、JHB 和反硝化深床滤池组合工艺(以下简称“方案四”)的出水指标情况进行综合分析。不同工艺方案在不同温度下的处理效果如图 5 所示。

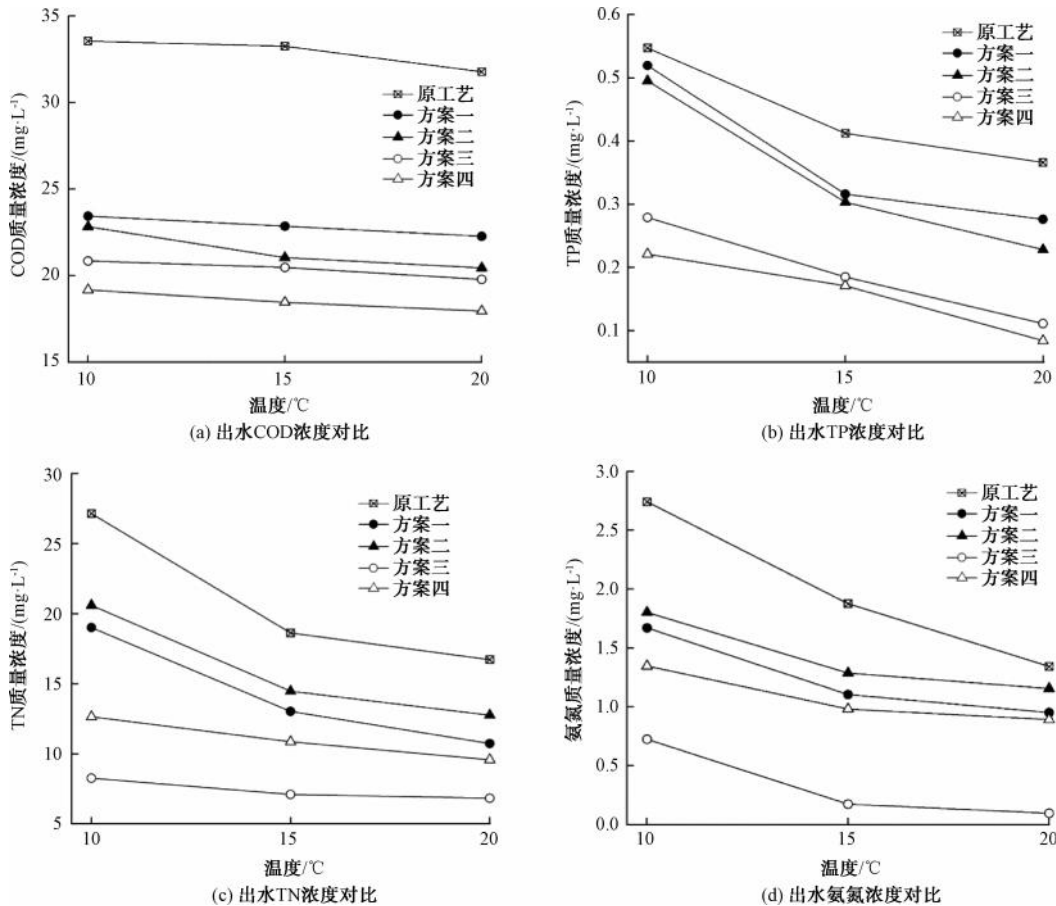


图 5 不同进水温度下各工艺的出水指标情况

Fig. 5 Effluent Indices for Each Process at Different Temperatures

由图 5 可知,在设计进水水质条件下,原污水厂工艺出水各项指标均无法达到该污水厂提标后的出水标准[即《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB12/ 599—2015)中的 A 标准]。提标工艺方案一和方案二的出水效果较原工艺均有所提升。从 COD、TP 指标来看,方案二出水指标较低,去除有机物及磷的能力较强,可能是因为多段进水方式形成了污泥浓度梯度变化,使得污染物降解更加彻底^[17],同时可削减污泥回流携带的硝态氮对厌氧池释磷效果的影响。从 TN 和氨氮指标来看,出水指标值随温度变化浮动较大,可能是因为水温会影响

硝化和反硝化细菌活性,从而影响 TN 和氨氮的去除效率,但综合来看,方案一在各个温度条件下的脱氮性能显著优于方案二。以 20 °C 水温为例,方案一的二级缺氧池出水硝态氮质量浓度较一级好氧池出水降低了 1.61 mg/L,证明改良型 Bardenpho 工艺与 JHB 工艺相比,增加的二级缺氧池可提升整体反硝化效率,实现深度脱氮。

虽然方案一和方案二的出水效果有所改善,但受低温影响,TN、氨氮、TP 的去除率仍存在波动,部分存在不达标现象。考虑到该污水处理厂冬季进水温度低,为使出水达标,还需进一步加强工艺脱氮除

磷效果。如图 5 所示,与原工艺、方案一和方案二相比,方案三和方案四在不同进水温度下的出水指标更优。分析其原因,一方面反硝化深床滤池内填料可增加生物膜表面积,有效改善低温条件下前端生物处理单元悬浮污泥活性不足的问题,同时利用滤池中的生物膜进行反硝化作用,进一步去除二沉池出水中残留的硝态氮,补充和强化单一工艺生物处理单元的脱氮效果;另一方面滤料表面的生物膜可进一步吸附去除 TP。这种协同作用使得方案三和方案四在不同温度条件下稳定实现优质的出水效果,有效解决了单一工艺在低温等不利条件下处理效果波动的问题。为进一步对比验证低温进水条件下 2 种组合工艺的处理效果,以水温为 10 ℃ 的进水工况为例,方案三和方案四较原工艺对 COD、TN、氨氮、TP 的去除效率可分别提升 37.8%、69.5%、73.6%、49.0%和 42.8%、53.4%、50.8%、59.5%,相比来看,方案三的各项出水指标均可满足达标排放要求,且在 TN 和氨氮的去除效果上优于方案四。考虑到较低水温条件下,方案四的出水 TN 存在无

法达到提标后出水指标要求 (≤ 10 mg/L) 的风险,故本次提标工艺拟定为方案三,即改良型 Bardenpho 和反硝化深床滤池组合工艺,可有效解决该污水处理厂冬季低温运行时原工艺脱氮能力不足的核心问题,同时确保出水 TP 达标,从而保障污水处理厂的稳定运行和达标排放。

3 应用实例

污水处理厂提标改造工艺于 2022 年开工建设,于 2023 年完工并投运。为排除改造期间因施工扰动产生的波动数据干扰,本项目选取提标改造前(2021 年)与稳定运行后(2024 年)的水质监测数据开展对比分析,如图 6 所示。结果表明,经提标改造后,2024 年污水处理厂出水处理效果较 2021 年有大幅提升,出水 COD、氨氮、TN、TP 的达标率[按《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB12/ 599—2015)中的 A 标准计]分别为 97.26%、100.00%、98.62%、98.90%,表明提标改造工艺有效优化了污水处理流程,显著增强了污染物去除能力,确保出水水质稳定达标。

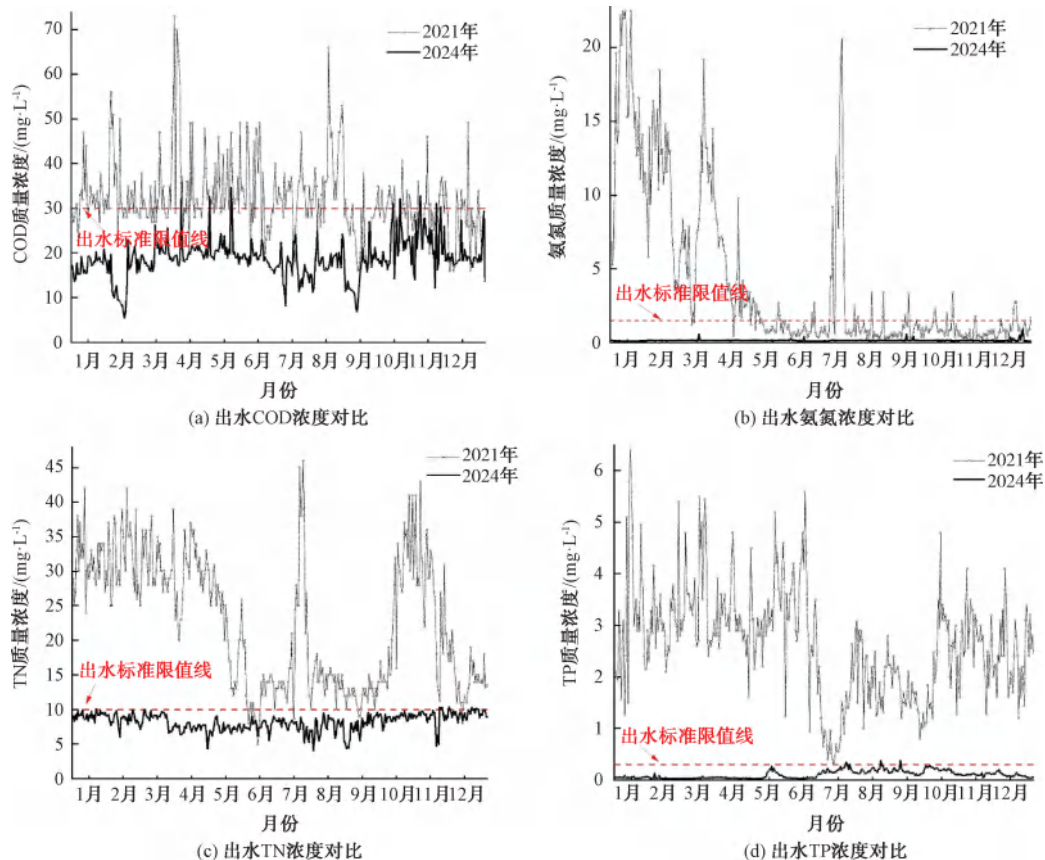


图 6 2021 年与 2024 年污水处理厂出水指标对比

Fig. 6 Comparison of Effluent Indices of WWTP in 2021 and 2024

4 结论

(1) 以河北省某污水处理厂为示例, 利用 Simuwater 软件构建包括原处理工艺和一系列改良工艺的动态模拟模型, 通过模型稳态模拟和动态验证对模型参数进行校准。结果表明, 模型模拟值与实测值的相对误差均 $<9\%$, 模型精度较高, 可用于模拟实际工艺情况。

(2) 在相同进水条件但不同进水温度(10、15、20 $^{\circ}\text{C}$)下, 改良型 Bardenpho 和反硝化深床滤池组合工艺展现出较优的污水处理效能, 可使出水各项指标满足提标标准, 有效解决原工艺脱氮能力不足的核心问题, 故选择改良型 Bardenpho 工艺和反硝化深床滤池组合工艺作为该污水处理厂的提标工艺。

(3) 提标改造工艺于 2023 年正式投运, 运行至今污水厂出水水质可以稳定满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB12/ 599—2015) 中的 A 标准。

参考文献

- [1] Kim H, Lim H, Wie J, et al. Optimization of modified ABA2 process using linearized ASM2 for saving aeration energy [J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 251: 337-342. DOI: 10.1016/j.cej.2014.04.076.
- [2] Wu X H, Yang Y, Wu G M, et al. Simulation and optimization of a coking wastewater biological treatment process by activated sludge models (ASM) [J]. Journal of Environmental Management, 2016, 165: 235 - 242. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.09.041.
- [3] 陆谢娟, 陈慧, 谢仕君, 等. 基于 BioWin 的改良 AAO 工艺模拟与优化[J]. 给水排水, 2020, 46(S1): 552-557.
Lu X J, Chen H, Xie S J, et al. BioWin-based simulation and optimization of improved AAO process [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(S1): 552-557.
- [4] 刘乐乐, 郭五珍, 曾旭升, 等. 基于 STOAT 污水厂 AAO 工艺不同回流比的模拟与优化[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2024, 42(4): 49-56.
Liu L L, Guo W Z, Zeng X S, et al. Simulation and optimization of different reflux ratio of AAO process in STOAT wastewater plant [J]. Journal of Foshan University (Natural Science Edition), 2024, 42(4): 49-56.
- [5] 郑春霞, 王侧容, 张漫漫, 等. 反硝化聚磷菌及其脱氮除磷机理研究进展[J]. 生物工程学报, 2023, 39(3): 1009-1025.
Zheng C X, Wang C R, Zhang M M, et al. Denitrifying phosphate accumulating organisms and its mechanism of nitrogen and phosphorus removal [J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2023, 39(3): 1009-1025.
- [6] 于雪, 孙洪伟, 李维维, 等. 温度对硝化杆菌(*Nitrobacter*)活性动力学影响[J]. 环境科学, 2019, 40(3): 1426-1430.
Yu X, Sun H W, Li W W, et al. Effect of temperature on the activity kinetics of *Nitrobacter* [J]. Environmental Science, 2019, 40(3): 1426-1430.
- [7] 德国水资源污水与固废管理协会. ATV-DVK-A 131 一段式活性污泥法工艺设计规范[M]. 姚刚, 庞洪涛, 施汉昌, 译. 北京: 清华大学出版社, 2021.
ATV-DVK-A 131 Dimensioning of single-stage activated sludge plants [M]. Yao G, Pang H T, Shi H C, Translation. Beijing: Tsinghua University Press, 2021.
- [8] 鞠兴华, 王社平, 彭党聪. 城市污水处理厂设计进水水质的确定方法[J]. 中国给水排水, 2007, 23(14): 48-51.
Ju X H, Wang S P, Peng D C. Determination methodology for design influent quality of municipal wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(14): 48-51.
- [9] 胡宝明, 李亮, 祁佳, 等. 改良 A²/O 工艺对低 C/N 废水脱氮除磷的应用综述[J]. 工业水处理, 2022, 42(10): 46-52.
Hu B M, Li L, Qi Q, et al. A review of modified A²/O process application for nitrogen and phosphorus removal from low C/N wastewater [J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(10): 46-52.
- [10] Song Y Y, Li H B, Han Y, et al. Landfill leachate as an additional substance in the Johannesburg-Sulfur autotrophic denitrification system in the treatment of municipal wastewater with low strength and low COD/TN ratio [J]. Bioresource Technology, 2020, 295: 122287. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122287.
- [11] 周国标, 周鹏飞, 雷睿, 等. 传统 A²/O 城市污水处理中存在的工艺问题及其优化控制策略[J]. 水处理技术, 2017, 43(6): 11-17, 23.
Zhou G B, Zhou P F, Lei R, et al. Problems and optimal control strategies of the conventional A²/O process for urban sewage treatment [J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(6): 11-17, 23.
- [12] 姚伟涛, 肖社明, 张永祥. 改良 Bardenpho 工艺处理低 BOD₅/TN 混合污水工程设计[J]. 中国给水排水, 2018, 34(14): 67-70.
Yao W T, Xiao S M, Zhang Y X. Project design of modified bardenpho process for treatment of low BOD₅/TN mixed wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(14): 67-70.
- [13] 刘晓鹏, 马明华, 孟令八, 等. Bardenpho 与 AAO 工艺脱氮除磷效果对比分析[J]. 给水排水, 2024, 50(S1): 163-165, 169.
Liu X P, Ma M H, Meng L B, et al. Comparative analysis of

(下转第 99 页)

- Chemical Industry, 2024, 53(4): 969-973.
- [9] 路恒, 王超, 张彬, 等. 我国市政污泥处理处置行业政策现状及存在的问题探讨[J]. 建设科技, 2024(2): 78-80.
Lu H, Wang C, Zhang B, et al. Discussion on policy status and existing problems of municipal sludge treatment and disposal industry in China [J]. Construction Science and Technology, 2024(2): 78-80.
- [10] 何磊. 南方某市污泥处理处置现状及对策研究[J]. 城市道桥与防洪, 2025(8): 205-210.
He L. Study on present situation and countermeasures of sludge treatment and disposal in a southern city [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2025(8): 205-210.
- [11] 魏伟. 污水厂污泥处理处置与资源化技术概述[J]. 当代化工研究, 2025(17): 82-84.
Wei W. Overview of sewage plant sludge treatment, disposal and resource utilization technology [J]. Modern Chemical Research, 2025(17): 82-84.
- [12] 宋雨荷. 城市污水处理厂中污泥的资源化利用技术研究[J]. 环境与生活, 2025(8): 70-72.
Song Y H. Study on resource utilization technology of sludge in municipal sewage treatment plant [J]. Green Living, 2025(8): 70-72.
- [13] 于金旗, 孙磊, 刘然彬, 等. 污水处理厂减污降碳技术探讨[J]. 水处理技术, 2024, 50(4): 18-25.
Yu J Q, Sun L, Liu R B, et al. Discussion on pollution reduction and carbon reduction technology in sewage treatment plant [J]. Technology of Water Treatment, 2024, 50(4): 18-25.
- [14] 李雅, 裴璐瑶, 王建科, 等. 市政污泥热压脱水特性研究[J]. 环境科学与技术, 2025, 48(10): 128-134.
Li Y, Pei L Y, Wang J K, et al. Research on the characteristics of hot-press dewatering of municipal sludge [J]. Environmental Science & Technology, 2025, 48(10): 128-134.
- [15] 李丽萍, 颜蓓蓓, 王智, 等. 污泥脱水技术研究进展及碳排放比较分析[J]. 中国环境科学, 2024, 44(6): 3259-3269.
Li L P, Yan B B, Wang Z, et al. Comparative analysis of sludge dewatering technology from research progress and carbon emission [J]. China Environmental Science, 2024, 44(6): 3259-3269.
- [16] 刘阳, 施周, 文宇鸿, 等. 城镇污水系统碳核算方法研究及典型工艺减碳路径分析[J]. 给水排水, 2024, 50(1): 37-45.
Liu Y, Shi Z, Wen Y H, et al. Research on carbon accounting method of urban sewage system and analysis of typical process carbon reduction path [J]. Water & Wastewater Engineering, 2024, 50(1): 37-45.
- [17] 韩景超, 张振洲, 李金波, 等. 我国污泥处理处置行业政策及标准发展现状研究及建议[J]. 环境与发展, 2024, 36(3): 1-6.
Han J C, Zhang Z Z, Li J B, et al. Research and suggestions on the development of policies and standards for sludge treatment and disposal industry in China [J]. Environment and Development, 2024, 36(3): 1-6.
- [18] Pan Y, Li P, Song K, et al. New model for evaluating greenhouse gas emissions from sludge treatment based on fossil and biogenic carbon migration [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 425: 138845. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138845.
- [19] Twagirayezu E, Luo X, Fan L Z, et al. Operational data-based greenhouse gas analysis for wastewater and sludge treatment at a megacity level [J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 532: 146894. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.146894.
- [20] Jin L Y, Zhang G M, Zheng X. Effects of different sludge disintegration methods on sludge moisture distribution and dewatering performance [J]. Journal of Environmental Sciences, 2015, 28: 22-28. DOI: 10.1016/j.jes.2014.06.040.
- [21] Wang H M, Liu X M, Zhang Z Q. Approaches for electroplating sludge treatment and disposal technology: Reduction, pretreatment and reuse [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 349: 119535. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119535.
- [22] Liu Y, Zhou J Z, Lu S F, et al. Towards the New Era of sewage sludge management in China: Status, challenges, and perspectives [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, 198: 107201. DOI: 10.1016/j.psep.2025.107201.

(上接第 71 页)

- Bardenpho and AAO process for nitrogen and phosphorus removal [J]. Water & Wastewater Engineering, 2024, 50(S1): 163-165, 169.
- [14] 樊杰, 陶涛, 游桂林, 等. A-A²/O 工艺处理低浓度城市污水的效果分析[J]. 中国给水排水, 2008, 24(23): 16-19.
Fan J, Tao T, You G L, et al. Performance analysis of A-A²/O process for treatment of low-strength municipal wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(23): 16-19.
- [15] 邓仁健, 宋雨佳, 任伯帆, 等. 基于灵敏度分析的 ASM2d 数学模型参数集校核方法[J]. 中国给水排水, 2022, 38(11): 83-90.
Deng R J, Song Y J, Ren B Z, et al. Check method of ASM2d mathematical model parameter set based on sensitivity analysis [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(11): 83-90.
- [16] Melcer H. Methods for wastewater characterization in activated sludge modeling [M]. London: IWA Publishing, 2005.
- [17] 龚晓露. 大型污水处理厂集约式多段 AAO 低耗工艺设计[J]. 净水技术, 2023, 42(12): 162-168.
Gong X L. Design of integrated multi-stage AAO process with low consumption for large WWTP [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(12): 162-168.