

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.01.014

A/A/O 污水处理工艺脱氮效果模拟及优化

张芸蓓^{1,2}, 马民³, 宫玲³, 吴限¹, 曾勇³, 李贝³,
罗凡¹, 陶涛¹

(1. 华中科技大学 环境科学与工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 武汉市规划设计有限公司, 湖北 武汉 430014; 3. 武汉市城市排水发展有限公司, 湖北 武汉 430070)

摘要: 针对武汉某污水处理厂因进水总氮浓度高、碳氮比值低而导致脱氮效果不稳定的问题,基于ASDM模型建立了该污水处理厂A/A/O工艺模型,并利用历史数据对脱氮效果进行了优化模拟。分别对硝化液回流比(0~600%)、好氧段DO(1~6 mg/L)、缺氧段DO(0.005~0.2 mg/L)、温度(16~29 ℃)等工艺运行参数进行了模拟分析,通过模型模拟筛选出的最优运行参数如下:硝化液回流比为100%,好氧段DO为1 mg/L,污泥回流比为65%,排泥量为550 m³/d,且缺氧段DO浓度越低越有利于脱氮。根据以上结论并结合该污水处理厂实际情况,确定如下优化实施方案:硝化液回流比为300%,好氧段DO为3 mg/L以下,同时关闭硝化液回流点前的曝气头以降低缺氧段DO,并按90 kg/d投加碳源(以COD计)。该污水处理厂按照上述方案实际运行2个月,脱氮效果明显提高,出水总氮达标率达到100%。

关键词: A/A/O工艺; BioWin软件; 脱氮效果; 溶解氧; 碳氮比

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)01-0088-07

Simulation of Denitrification of A/A/O Process and Its Optimization

ZHANG Yun-bei^{1,2}, MA Min³, GONG Ling³, WU Xian¹, ZENG Yong³, LI Bei³,
LUO Fan¹, TAO Tao¹

(1. School of Environmental Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Wuhan Planning and Design Co. Ltd., Wuhan 430014, China; 3. Wuhan Urban Drainage Development Co. Ltd., Wuhan 430070, China)

Abstract: To solve unstable denitrification caused by high total nitrogen and low BOD₅/TN ratio in influent of a wastewater treatment plant (WWTP) in Wuhan, an A/A/O process model was established based on activated sludge/anaerobic digestion model (ASDM), and the denitrification was optimized and simulated by using historical data. The influencing factors, such as reflux ratio of nitrifying liquid (0-600%), dissolved oxygen (DO) in aerobic zone (1-6 mg/L), DO in anoxic zone (0.005-0.2 mg/L) and temperature (16-29 ℃), were simulated and analyzed. The optimal operational parameters were as follows: reflux ratio of nitrification liquid of 100%, DO in aerobic zone of 1 mg/L, sludge reflux ratio of 65%, and sludge discharge amount of 550 m³/d. It was found that low DO in the anoxic zone was more conducive to nitrogen removal. According to the above conclusions and the actual situation of the WWTP, the optimized plan was determined as follows: nitrifying liquid reflux ratio of 300%, DO in the aerobic

通信作者: 罗凡 E-mail: fl4021@hust.edu.cn

zone of less than 3 mg/L, closing aerator before the nitrifying liquid reflux point to reduce DO in anoxic zone, and carbon source dosage (calculated by COD) of 90 kg/d. After two months of actual operation, the denitrification performance was improved obviously, and 100% of the total nitrogen samples reached the discharge standard.

Key words: A/A/O process; BioWin software; denitrification performance; dissolved oxygen; C/N ratio

目前,大多数污水处理厂依靠经验进行运行参数的优化,不仅人力、物力及财力消耗较大,还可能无法达到理想效果。近年来,基于活性污泥模型软件开始应用于污水处理厂的设计、运行和管理等方面,取得了较好效果^[1-2]。借助模拟结果可以较准确地排查污水处理工艺存在的问题,提供有针对性的优化整改方案^[3-4]。BioWin 软件内嵌的 ASDM 数学模型将国际水协的 4 套活性污泥模型(ASM1~3 与 ASM2D)全部整合,并集成了厌氧消化模型、pH 平衡、气体转移和化学沉淀等模型,在国内外应用广泛^[5]。为解决武汉市某污水处理厂 A/A/O 工艺脱氮

不稳定的问题,采用 BioWin5.3 对该工艺脱氮影响因素进行分析,并提出优化运行方案。

1 项目概况

武汉某污水处理厂采用 A/A/O 工艺,工程设计规模为 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,其设计进出水水质见表 1。各生物段停留时间如下:预缺氧区为 0.5 h,厌氧区为 1.5 h,缺氧区为 4.5 h,好氧区为 8.0 h。具体工艺流程见图 1。该污水厂实际进水水质部分超出设计值,约有 30% 的进水 TN 超过设计值,且有 75% 的进水 BOD_5/TN 值 < 3 ,属于碳源不足污水^[6]。数据显示,该污水厂出水 TN 不能稳定达标。

表 1 污水厂进出水水质

Tab.1 Influent and effluent quality of WWTP

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	COD	BOD_5	SS	TN	$\text{NH}_3\text{-N}$	TP
设计进水水质	≤ 300	≤ 120	≤ 200	≤ 35	≤ 30	≤ 4
历史进水水质	140~400	47~156	116~322	18.5~45.52	10.05~40.89	0.93~5.42
历史出水水质	12~35.1	4.55~9.88	5~9	11.25~19.5	0.04~4.54	0.03~0.46
出水一级 A 标准	≤ 50	≤ 10	≤ 10	≤ 15	≤ 5	≤ 0.5

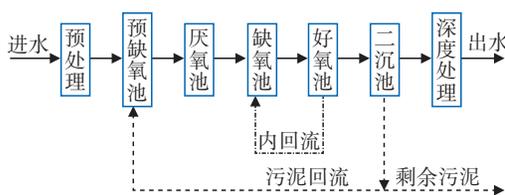


图 1 污水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of sewage treatment process

2 模型建立、校准及验证

2.1 进水组分测定

连续 24 d 采集该污水处理厂水样,分别检测进水氨氮、凯氏氮、总 COD、溶解性 COD (ffCOD)、 BOD_5 和出水 ffCOD。其中,ffCOD 采用物理化学法(硫酸锌絮凝+ $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤)^[7]测定,乙酸采用离子色谱法测定,凯氏氮、氨氮、COD 和 BOD_5 均采用国家标准方法测定。

通过物料平衡计算得出各 COD 组分值并换算

为模型进水组分参数值,其平均值如下:快速降解型 COD(包括乙酸)含量(F_{bs})为 0.2008 gCOD/g 总 COD,乙酸含量(F_{ac})为 0.3497 gCOD/g 快速降解 COD,溶解态生物不可降解型 COD 含量(F_{us})为 0.0309 gCOD/g 总 COD,颗粒状生物不可降解型 COD 含量(F_{up})为 0.2185 gCOD/g 总 COD,氮含量(F_{na})为 0.8287 g 氨氮/g 总凯氏氮,颗粒态有机氮含量(F_{nox})为 0.5674 g 氮/g 有机氮。

2.2 模型构建

采用 BioWin5.3 对构筑物中的 1 组 ($3.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,不含格栅及沉砂池)进行建模,根据实际水流情况采用 6 个生物反应器单元构建 A/A/O 池,二沉池选用理想沉淀池单元,深度处理简化为点沉淀池单元。

各单元的物理参数按实际构筑物尺寸设定,构建的模型如图 2 所示。

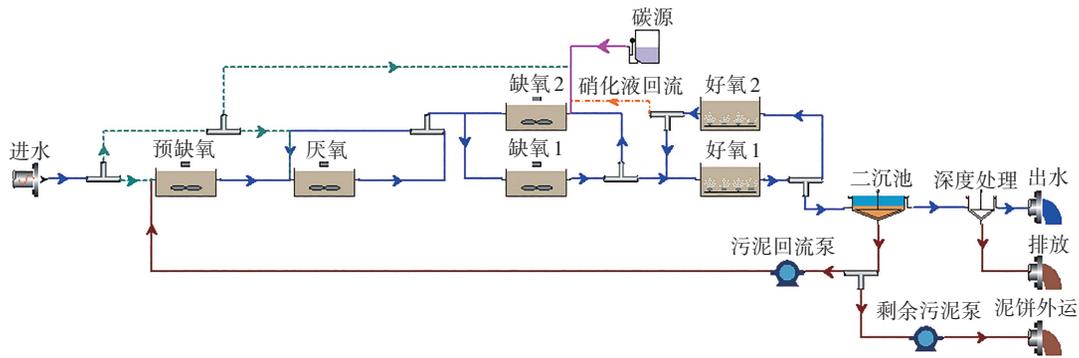


图2 A/A/O 工艺模型

Fig.2 A/A/O process model

2.3 模型校准及验证

采用该污水厂 2017 年 5 月—12 月的历史进水量、水质作为进水单元输入数据,按实际运行数据输入好氧池溶解氧浓度、污泥回流比、硝化液回流比和剩余污泥排放量。进水组分采用 2.1 节的数据,其余模型参数采用默认值。由于该污水处理厂历史絮凝剂投加量未准确计量,故此次模拟不考虑除磷效果。动态模拟结果表明,出水各指标的模拟值与实测值变化趋势基本一致,相符度较高。

采用该污水厂 2018 年 3 月—6 月实测进水水质和实际运行参数作为动态验证模拟的输入数据,对比出水指标模拟值与实测值,结果见图 3。

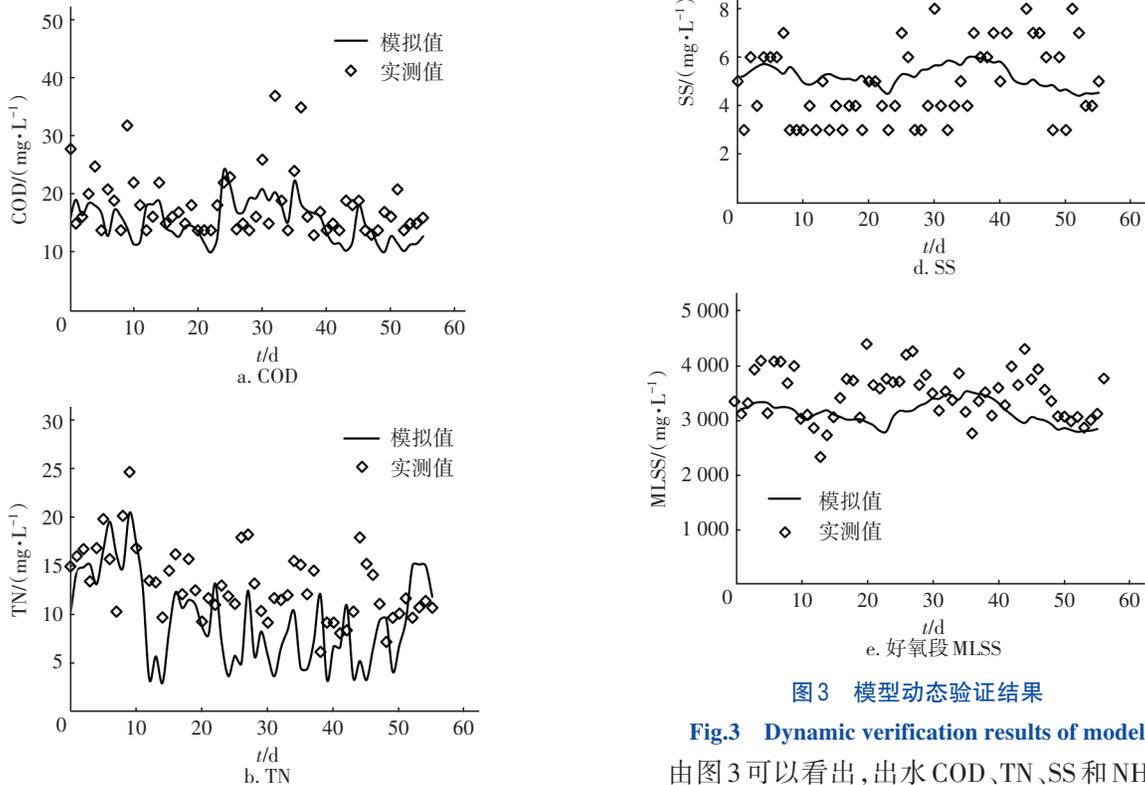


图3 模型动态验证结果

Fig.3 Dynamic verification results of model

由图3可以看出,出水 COD、TN、SS 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的

预测值与实测值变化趋势一致,好氧段 MLSS 的预测值与实测值基本相符,表明模型预测结果较为可靠,可用于预测 A/A/O 工艺出水水质。

3 运行影响因素模拟

3.1 硝化液回流比

硝化液回流比对脱氮效果影响较大,该污水厂每组生化池设置 2 台硝化液回流泵,全开时回流比约为 600%。在现状其他参数不变的基础上,模拟硝化液回流比对出水总氮达标率的影响,结果见图 4。当硝化液回流比为 0~100% 时,增大硝化液回流比,出水总氮达标率显著提高;而硝化液回流比 > 100% 后,出水总氮达标率反而缓慢下降,这与吕贞等^[8]、孙永利等^[9]的研究结果一致。

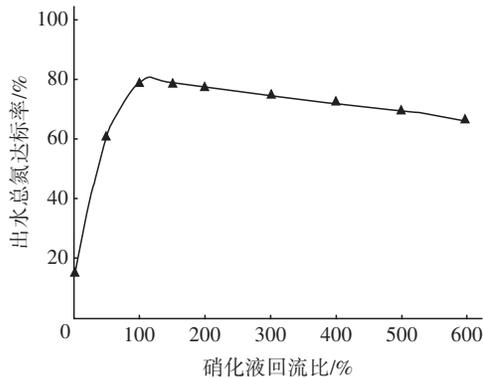


图 4 硝化液回流比对出水总氮达标率的影响

Fig.4 Effect of nitrifying liquid reflux ratio on effluent TN reaching standard rate

硝化液回流比及好氧段 DO 改变对缺氧段 DO 的影响见图 5。

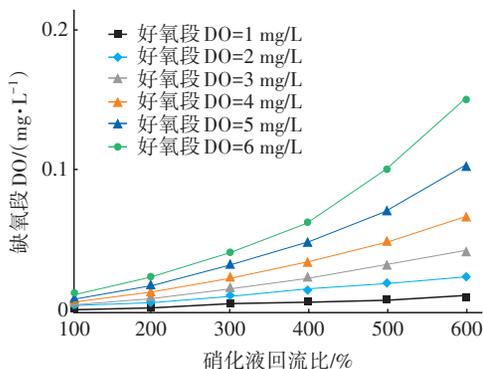


图 5 硝化液回流比对缺氧段 DO 的影响

Fig.5 Effect of nitrifying liquid reflux ratio on DO in anoxic stage

由图 5 可以看出,提高好氧段 DO、增大硝化液回流比均会增大缺氧段 DO,破坏缺氧环境进而影

响脱氮效果,在好氧段 DO 浓度较高时尤为明显。此外,在现有运行工况条件下,单独调整硝化液回流比对出水其余指标的达标率基本无影响。

3.2 DO

好氧段 DO 过低可能会破坏微生物的生长规律,DO 过高会导致有机物分解过快而使微生物缺乏营养,活性污泥易于老化,结构松散。此外,DO 过高,曝气能耗也较大。历史数据表明,该污水厂好氧段 DO 浓度 80% 控制在 1.84~6.33 mg/L,平均为 3.79 mg/L,保持其他参数不变(硝化液回流比设置为 100%),模拟不同好氧段 DO 条件下的出水氨氮、总氮达标情况。结果表明,即使好氧段 DO 的设定值较低(1 mg/L),对氨氮的去除效果仍然很好,出水氨氮 100% 达标。Keene 等^[10]的研究也表明,在较低 DO 条件下,硝化性能也能继续保持较高水平。

在现状其他参数不变的基础上,模拟缺氧段 DO 从 0.01 mg/L 增加到 0.2 mg/L 时,出水总氮达标率的变化情况。结果表明,随着缺氧段 DO 浓度增大,出水总氮达标率从 77% 逐渐下降至 23%,这与 Li 等^[11]的研究结果一致,即低 DO 有利于反硝化。该污水厂实测缺氧段 DO 在 0.175 mg/L 左右,这可能与该工艺采用穿墙泵直接回流方式有关,此时总氮达标率模拟值(25%)较低,表明缺氧段 DO 是影响总氮达标率的重要因素。好氧段 DO 会影响缺氧段 DO,从而影响系统脱氮效果,当好氧段 DO 设置为 1 mg/L 时,与现状工况(DO 为 1.84~6.33 mg/L)相比,出水总氮达标率可提高约 4.22%。改变好氧段 DO,对出水 SS 和 COD 的达标率基本无影响。

3.3 温度

温度过低会抑制氨氧化菌(AOB)和硝化菌(NO_B)的比增长速率和活性^[12],极大地抑制硝化作用,使系统反硝化过程中硝酸盐氮供应不足,反硝化效率下降。在历史温度范围 16.65~29.53 °C 内(硝化液回流比设置为 100%),模拟不同温度对出水总氮达标率的影响,结果如图 6 所示。可知,缺氧段 DO 与好氧段 DO 比值随温度的上升而下降,说明温度越高,缺氧段 DO 受好氧段 DO 的影响越小。同时,在一定范围内,提高水温有利于提高出水总氮达标率,当温度保持在 20 °C 时,相比 16 °C 时出水总氮达标率提高了 0.93%,平均每提高 1 °C,出水总氮达标率可提高约 0.23%。

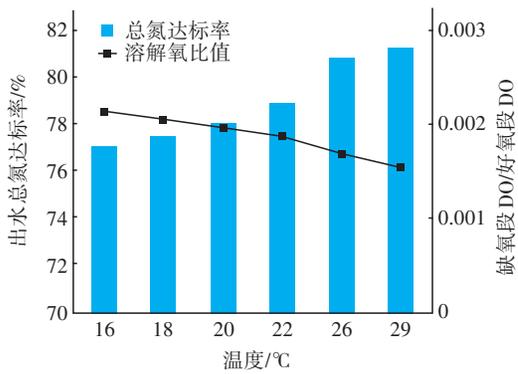


图 6 温度对出水总氮达标率的影响

Fig.6 Effect of temperature on effluent TN reaching standard rate

3.4 污泥回流比

污泥回流是为了补充曝气池流失的活性污泥,使曝气池内的悬浮固体浓度保持相对稳定。但应控制好回流污泥量,避免过量的硝酸盐氮进入厌氧池而导致反硝化菌与释磷菌竞争碳源^[13]。该污水厂现状污泥回流比设置为 50% 左右,在现状其他参数不变的基础上(硝化液回流比设置为 100%),不同污泥回流比对出水水质达标率的影响见图 7。

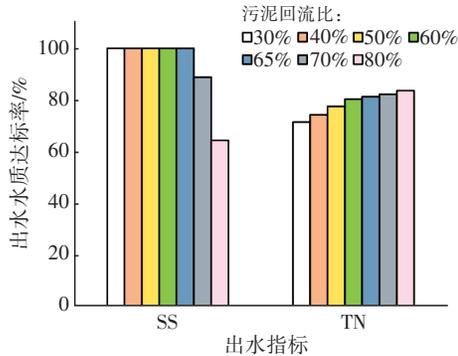


图 7 污泥回流比对出水水质达标率的影响

Fig.7 Effect of sludge reflux ratio on effluent quality reaching standard rate

由图 7 可知,增大污泥回流比能够有效提高出水总氮达标率,但污泥回流比过大会使系统悬浮固体浓度提高而降低出水 SS 达标率,因此 SS 成为污泥回流比调整的上限因素。当污泥回流比为 65% 时,SS 达标率可达 100%,与现状工况相比,出水总氮达标率可提高约 3.76%。

3.5 排泥量

排泥量会影响处理系统的污泥浓度及污泥龄,由模型模拟可知,当系统排泥量从 400 m³/d 增至 1 000 m³/d 时,好氧池中 MLSS 浓度由 3 600 mg/L 降

至 1 700 mg/L。排泥量过大会降低好氧池中 MLSS 浓度,使出水 COD 和 BOD₅ 浓度上升,但排泥量过小也会造成好氧池中污泥老化、处理效率下降的问题。历史数据表明该污水厂排泥量约为 600 m³/d。在现状其他参数不变的基础上,设置硝化液回流比为 100%,模拟排泥量对出水水质达标率的影响,结果如图 8 所示。可知,排泥量增大有利于出水 SS 达标,但总氮达标率略有降低。因而在出水 SS 达标的基础上选择最小的排泥量,即 550 m³/d,总氮达标率较 600 m³/d 排泥量时提高了 0.94%。

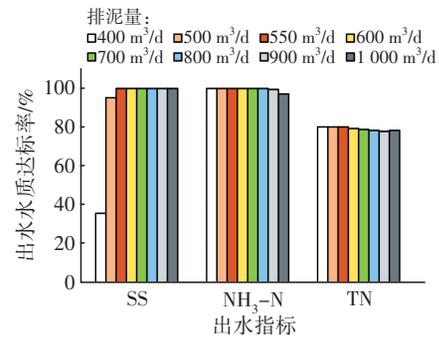


图 8 排泥量对出水水质达标率的影响

Fig.8 Effect of sludge discharge amount on effluent quality reaching standard rate

3.6 碳源

该污水厂进水碳氮比有 75% 以上小于 3,缺少碳源会抑制反硝化过程。通过外加碳源提高进水 C/N 值,可以促进反硝化,提高总氮去除率。在其他工艺参数不变的基础上,设置硝化液回流比为 100%,根据不同进水水质,模拟碳源投加量(折算成 COD 当量)对出水总氮达标的影响,结果见图 9。

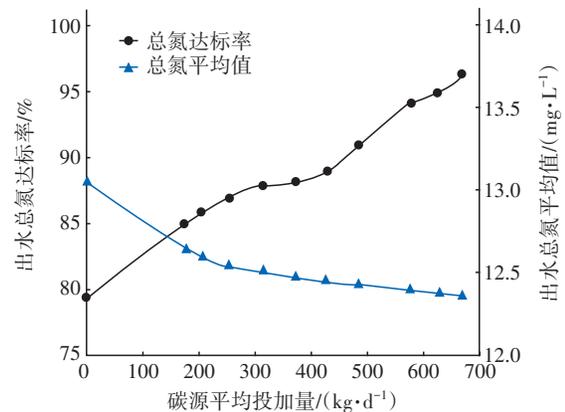


图 9 碳源投加量对出水总氮达标率的影响

Fig.9 Effect of carbon source dosage on effluent TN reaching standard rate

由图9可知,在不改变其他运行参数的基础上,随着碳源投加量的增加,出水总氮达标率呈上升趋势。相比不投加碳源,投加 700 kg/d 碳源时总氮达标率可提升约 16.9%,脱氮效果显著。

4 优化方案验证

根据模型模拟结果,并结合污水厂实际情况,确定如下优化实施方案:根据实际进水水质情况将碳源投加量设定为 90 kg/d,将硝化液内回流比调整为 300%,好氧段 DO 控制在 3 mg/L 以下,将好氧池末端硝化液回流处部分曝气器关闭以降低缺氧段 DO,污泥回流比采用 50%,排泥量约 600 m³/d。2019 年 3 月—5 月期间实际运行数据见图 10。

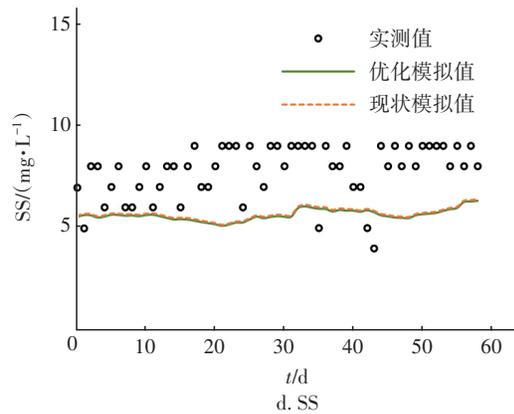
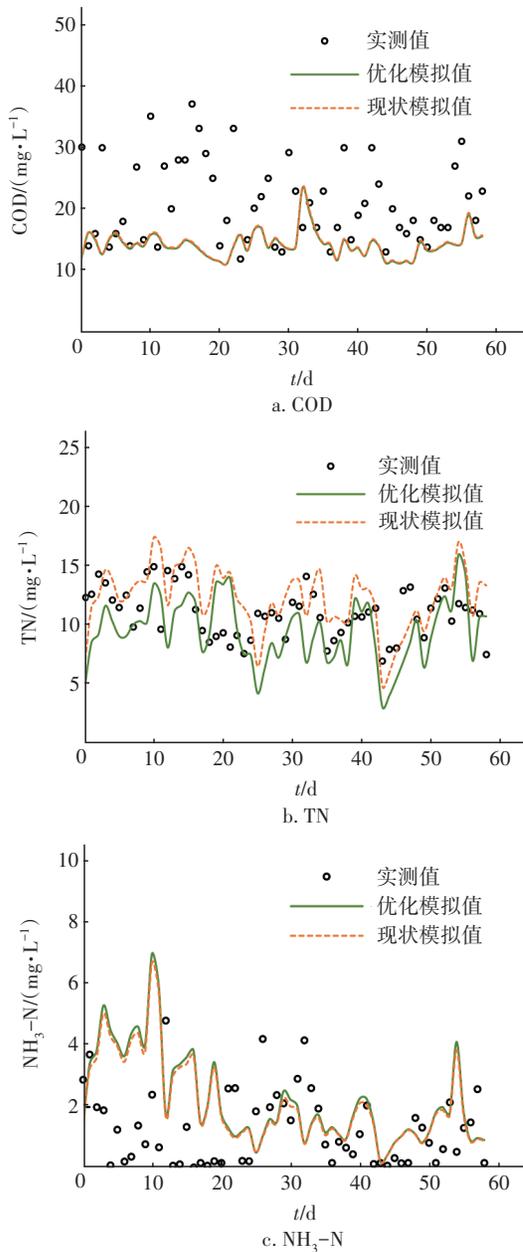


图 10 优化方案验证结果

Fig.10 Verification results of optimization scheme

由图 10 可知,优化方案仅对出水 TN 浓度有影响。优化后总氮模拟达标率为 98.31%,模拟超标时进水总氮大幅高于进水设计值。但实测数据表明,出水总氮达标率为 100%,这可能是模拟过程中将进水瞬时值作为全天平均值造成的。相比现状运行参数模拟结果,优化后总氮达标率提高了 10.17%。可以看出,经过优化调整,该污水厂脱氮效果得到显著提升,且出水氨氮、COD 和 SS 实际达标率也均为 100%。

5 结论

① 选择合理的工艺运行参数可改善 A/A/O 系统的脱氮效果。模拟表明,对于该污水厂 A/A/O 工艺,分别设置硝化液回流比为 100%、好氧段 DO 为 1 mg/L、污泥回流比为 65%、排泥量为 550 m³/d,同时投加碳源,能大幅提高出水总氮达标率。在此基础上,并结合污水处理厂实际情况确定优化实施方案,通过水厂实际运行验证,该优化方案可有效提高出水总氮达标率,表明该模型对污水厂的运行优化具有指导作用。

② 通常认为反硝化过程溶解氧控制在 0.5 mg/L 以下为宜,但模拟表明缺氧段 DO 越低越利于脱氮。A/A/O 池型的硝化液回流常采用节能且流量大的穿墙泵,但是好氧段 DO 对缺氧段 DO 影响较大,建议在硝化液回流前段设非曝气区,降低对缺氧段的冲击,稳定脱氮效果。

参考文献:

- [1] 黄宇,刘胜军,陈阳,等. 仿真模拟在污水处理厂升级改造方案优化比选中的应用[J]. 给水排水, 2016, 42(9): 125-127.

- HUANG Yu, LIU Shengjun, CHEN Yang, *et al.* Application of simulation in the optimization selection of upgrading and reconstruction scheme of wastewater treatment plant [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2016, 42(9): 125-127(in Chinese).
- [2] 陈浩林,彭轶,安东,等. 基于BioWin软件对多级A/O工艺的运行优化[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(19): 60-66.
- CHEN Haolin, PENY Yi, AN Dong, *et al.* Operation optimization of multi-stage A/O process based on BioWin software [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(19): 60-66(in Chinese).
- [3] 庞洪涛,邱勇,薛晓飞,等. 悬浮填料生物膜工艺的模拟诊断与优化[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(3): 23-27.
- PANG Hongtao, QIU Yong, XUE Xiaofei, *et al.* Simulation-based diagnosis and optimization of suspended carrier biofilm process [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(3): 23-27(in Chinese).
- [4] 伊学农,暴鹏,付彩霞. GPS-X软件对乙二醇生产废水处理工艺的模拟[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(3): 82-84.
- YI Xuenong, BAO Peng, FU Caixia. GPS-X simulation of ethylene glycol wastewater treatment process [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(3): 82-84(in Chinese).
- [5] VITANZA R, COLUSSI I, CORTESI A, *et al.* Implementing a respirometry-based model into BioWin software to simulate wastewater treatment plant operations [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2016, 9: 267-275.
- [6] 张智,陈杰云,李勇,等. 处理低碳源污水的倒置A²O工艺强化脱氮技术研究[J]. *中国给水排水*, 2009, 25(13): 7-9,12.
- ZHANG Zhi, CHEN Jieyun, LI Yong, *et al.* Nitrogen removal from low-carbon wastewater by reversed A²O process [J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25(13): 7-9,12(in Chinese).
- [7] HU Z Q, CHANDRAN K, SMETS B F, *et al.* Evaluation of a rapid physical-chemical method for the determination of extant soluble COD [J]. *Water Research*, 2002, 36(3): 617-624.
- [8] 吕贞,董阳,施亚栋,等. A-A²O工艺回流系统控制优化研究[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(19): 36-39.
- LÜ Zhen, DONG Yang, SHI Yadong, *et al.* Study on optimization of return system in A-A²O process [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(19): 36-39(in Chinese).
- [9] 孙永利,李鹏峰,隋克俭,等. 内回流混合液DO对缺氧池脱氮的影响及控制方法[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(21): 81-84.
- SUN Yongli, LI Pengfeng, SUI Kejian, *et al.* Impact of dissolved oxygen in internal reflux mixture on nitrogen removal in anoxic tank and its control measures [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(21): 81-84(in Chinese).
- [10] KEENE N A, REUSSER S R, SCARBOROUGH M J, *et al.* Pilot plant demonstration of stable and efficient high rate biological nutrient removal with low dissolved oxygen conditions [J]. *Water Research*, 2017, 121: 72-85.
- [11] LI S, FEI X, CHI Y, *et al.* Integrated temperature and DO effect on the lab scale A²O process: performance, kinetics and microbial community [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2018, 133: 170-179.
- [12] 孙豆豆. 强化A/O工艺低温脱氮效能与菌群特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2015.
- SUN Doudou. Study on the Nitrification Efficiency of Hybrid A/O Process at Low Temperature and the Corresponding Microbial Properties of Flocs and Biofilms [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015(in Chinese).
- [13] GUERRERO J, GUIASOLA A, BAEZA J A. The nature of the carbon source rules the competition between PAO and denitrifiers in systems for simultaneous biological nitrogen and phosphorus removal [J]. *Water Research*, 2011, 45(16): 4793-4802.

作者简介:张芸蓓(1994-),女,湖北襄阳人,硕士,工程师,从事废水处理理论与技术研究和城市市政基础设施规划工作。

E-mail: taikong.yunbei@foxmail.com

收稿日期:2021-07-15

修回日期:2021-08-31

(编辑:任莹莹)