

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.13.007

双碳视阈下城镇污水厂协同减污降碳数学模拟分析

王 湘¹, 徐菡玲¹, 陈积义¹, 潘兆宇¹, 文字鸿¹, 陈 圆¹,
崔 佳¹, 刘 影¹, 刘 阳¹, 马晶伟²

(1. 湖南省建筑设计院集团股份有限公司, 湖南 长沙 410006; 2. 湖南大学 土木工程
学院, 湖南 长沙 410082)

摘 要: 污水处理作为全球十大温室气体排放行业之一, 如何实现协同减污降碳成为推动我国低碳减排进程的重要课题。采用活性污泥动力学模型结合城镇污水系统厂级碳核算方法, 以南方城市某污水处理厂为例, 给出了在水质达标条件下实现节能降耗和减少碳排放量的协同方法。利用BioWin软件建立某污水处理厂工艺模型, 出水COD、NH₃-N、TN和TP模拟结果与实测数据误差较小。当好氧池到缺氧池的回流比为225%、MBR池到好氧池的回流比为200%、好氧池DO浓度为2 mg/L时, 可降低出水NH₃-N和TP浓度, 并降低运行能耗, 预计节约电费30.75万元/a。同时, 优化工艺条件后预计可减少年碳排放量405.73 t (以CO₂计), 反哺实现厂界范围内综合碳减排3.5%, 且污染物削减碳排放强度降低。在双碳目标约束下, 城镇污水处理厂宜采用数学模拟技术探寻最佳工况条件, 平衡出水水质和能耗药耗成本, 实现减污降碳协同增效。

关键词: 碳中和; 活性污泥模型; A²O; MBR; 核算方法; 减污降碳

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)13-0049-07

Mathematical Simulation and Case Analysis of Collaborative Reduction of Pollution and Carbon Emissions in Urban Wastewater Treatment Plants under Perspective of Carbon Neutrality

WANG Xiang¹, XU Han-ling¹, CHEN Ji-yi¹, PAN Zhao-yu¹, WEN Yu-hong¹,
CHEN Yuan¹, CUI Jia¹, LIU Ying¹, LIU Yang¹, MA Jing-wei²

(1. Hunan Architectural Design Institute Group Co. Ltd., Changsha 410006, China; 2. College of
Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: As one of the top ten CO₂ emission industries in the world, how to achieve collaborative reduction of pollution and carbon emissions of the wastewater treatment plants has become an important topic to promote low-carbon emission reduction process in China. In this study, the activated sludge dynamic model combined with the factory-level carbon accounting method of urban sewage system was used, and a wastewater treatment plant (WWTP) in southern city was taken as an example to analyze how to achieve energy saving and carbon emission reduction under the condition that the water quality meets the standard. The results showed that the process model of a WWTP was established by using BioWin software, and the error between the simulated results of effluent COD, NH₃-N, TN and TP and the measured results was small. When the reflux ratio from the aerobic tank to the anoxic tank was 225%, the

通信作者: 马晶伟 E-mail: jma@hnu.edu.cn; 刘阳 E-mail: 156025843@qq.com

reflux ratio from the MBR tank to the aerobic tank was 200%, and the dissolved oxygen concentration in the aerobic tank was 2 mg/L, the effluent concentrations of ammonia nitrogen and TP could be decreased, and the energy consumption could be reduced, which was estimated that the electricity cost would be saved by 307 500 yuan per year. At the same time, the optimized process conditions were expected to reduce the annual carbon emissions of 405.73 t CO₂, and achieved a comprehensive carbon emission reduction of 3.5% within the plant boundary, and pollutant reduction carbon emission intensity was reduced. To achieve the goal of carbon peak and carbon neutralization, the mathematical simulation technology should be adopted in WWTPs to explore the best working conditions, balance the effluent quality and energy and drug consumption costs, and provide technical support for realizing the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction in wastewater treatment plants.

Key words: carbon neutralization; activated sludge model; A²O; MBR; accounting method; reduction of pollution and carbon emissions

随着水资源短缺和水污染状况日益严峻,我国对污水处理厂出水水质的要求日趋严格,对如何保证污水处理工艺的的稳定运行和节能降耗提出了新的要求。“十四五”时期,在我国践行“双碳”目标和水务行业推进数字化转型的背景下,应用更多精细化和智能化的控制手段对污水处理厂进行管理,既可实现污水处理工艺的协同减污降碳,又能提高污水处理厂的运营管理水平,为实现污水处理厂碳中和及智慧化奠定基础。近年来,国内外数学模型研究快速发展,针对污水处理厂复杂的污水处理过程,建立活性污泥数学模型并通过计算机软件仿真,正逐步成为污水处理厂同步实现减污降碳协同增效的重要工具^[1],通过模拟可以厘清污水处理厂内部可利用的资源分布,探寻合适的工况条件,平衡出水水质和能耗药耗成本,优化污水处理厂的工艺运行,以实现在水质达标条件下的节能降耗和减少碳排放量的目的^[2-3]。笔者以南方城市某污水处理厂 A²O+MBR 工艺为例,收集该厂的运行监测数据,补充测定特征水质数据,利用污水处理模拟软件 BioWin 建立并校正 A²O+MBR 工艺动力学模型,使参数率定后的模型能较好地模拟该工艺的处理效果,并针对工艺运行现状进行分析、比选和优化,对运行管理和减污降碳提供优化建议。

1 污水处理厂概况

南方城市某污水处理厂的设计规模为 14×10⁴ m³/d,于 2016 年建成投产,其进水基本为生活污水,设计进出水水质如表 1 所示,除总氮外,其他出水指标需达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—

2002)IV 类标准。

表 1 污水处理厂设计进出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality of WWTP mg·L⁻¹

项目	BOD ₅	COD	SS	NH ₃ -N	TN	TP
进水	100	290	170	22	27	2.5
出水	6	30	5	1.5	8	0.3

该厂采用 A²O+MBR 工艺,污水经粗格栅、中格栅、细格栅、旋流沉砂池和膜格栅预处理后进入厌氧池。生化段共设 2 组 A²O+MBR 生物反应池,厌氧池、缺氧池、好氧池和 MBR 池的有效水深分别为 3.9、3.9、6.0、3.7 m,面积分别为 807.7、1 944.4、1 366.6、1 065.2 m²。缺氧池到厌氧池、好氧池到缺氧池和 MBR 池到好氧池的回流比分别为 100%、300% 和 400%。MBR 池共设膜组件 156 台,膜组件采用 PVDF 中空纤维膜,总膜面积为 2 100 m²。

2 系统分析方法

2.1 水质检测方法

收集了该厂 2019 年 8 月—2020 年 7 月的历史水质数据用于模型校正,同时为了使模型的进水数据更接近实际工艺,于 2020 年 8 月 5 日—15 日对该污水处理厂进出水水质进行检测,进水采样点设在膜格栅出水口,出水采样点设在 MBR 池出水口。其中, COD、NH₃-N、NO₃⁻-N、TN、PO₄³⁻-P、TP、VSS、TSS、碱度等常规水质指标采用国家标准检测方法进行测定,采用玻璃电极法测定 pH,采用膜电极法测定 DO。测定结果显示,进水 NO₃⁻-N 和碱度相对较低,均值分别为 0.24 mg/L 和 3.86 mmol/L。

2.2 碳排放核算方法

参照课题组前期研究并根据本研究特点,选取污水处理厂厂级范围内的碳核算方法^[4-5]。模型优化后,电力消耗间接碳排放、去除TN产生的N₂O直接排放、去除COD产生的CH₄直接排放、去除化石源碳产生的化石源CO₂直接排放会随之改变,因此仅考虑模型优化前后上述碳排放量的比较分析。另为综合比较去除污染物的碳排放情况,参考现有文献^[6-7],计算单位污染物削减碳排放强度。相关核

CEI_{cr} =

$$\frac{CE_{W-CH_4} + CE_{W-N_2O} + CE_{W-fCO_2} + CE_{W-ec} + CE_{W-cc}}{Q_{in} \times \left[\begin{array}{l} 0.3 \times (COD_{in} - COD_{out}) + 0.1 \times (BOD_{in} - BOD_{out}) + 0.3 \times (NH_3 - N_{in} - NH_3 - N_{out}) + \\ 0.2 \times (TN_{in} - TN_{out}) + 0.1 \times (TP_{in} - TP_{out}) \end{array} \right]} \times 10^{-3} \quad (6)$$

式中:CE_{W-CH₄}为CH₄直接碳排放(均以CO₂计,下同),kg;Q为处理水量,m³;COD_{in}、COD_{out}分别为进出水COD浓度,mg/L;EF_{W-CH₄}为污水处理中CH₄排放因子,推荐值为0.004 0~0.007 5,该研究取平均值;f_{CH₄}为CH₄的全球变暖潜能,取28;CE_{W-N₂O}为N₂O直接碳排放,kg;TN_{in}、TN_{out}分别为进出水TN浓度,mg/L;EF_{W-N₂O}为污水处理中N₂O排放因子,取0.016;f_{N₂O}为N₂O的全球变暖潜能,取265;CE_{W-fCO₂}为化石源CO₂直接碳排放,kg;EF_{W-fCO₂}为污水处理中化石源CO₂排放因子,推荐值为0.014~0.063,该研究取平均值;CE_{W-ec}为电力消耗碳排放,kg;E_{ec}为污水处理电耗,kW·h;EF_{ec}为电力碳排放因子,取0.594 2 kg/(kW·h);CE_{W-cc}为药剂消耗碳排放,kg;E_{cc}为药剂投加量,kg;EF_{cc}为药剂碳排放因子,参照《城镇污水处理碳减排评估标准》(T/CUWA 5005—2023)选取;CEI_{cr}为单位污染物削减碳排放强度,kg/kg。

3 模型建立、校准及验证

3.1 进水特征化组分参数确定

实测进水数据在输入BioWin软件时,还需对其组分按照模型要求进行划分^[8]。根据BioWin对水质组分参数的要求,通过混凝过滤法测定进、出水的可溶解性COD^[9],结合常规水质测定结果,对模型中的污水特征化组分参数进行初步修正,经修正后的组分参数:易生物降解COD(含乙酸)与总COD的比(F_{bs})、氨氮与总凯氏氮的比(F_{nn})、磷酸盐与总磷的比(F_{po4})的默认值分别为0.16、0.66、0.50,实测值为0.34、0.84、0.66;其余水质参数均采用软件中

计算公式如下:

$$CE_{W-CH_4} = Q \times (COD_{in} - COD_{out}) \times EF_{W-CH_4} \times f_{CH_4} \times 10^{-3} \quad (1)$$

$$CE_{W-N_2O} = Q \times (TN_{in} - TN_{out}) \times EF_{W-N_2O} \times 44/28 \times f_{N_2O} \times 10^{-3} \quad (2)$$

$$CE_{W-fCO_2} = Q \times (COD_{in} - COD_{out}) \times EF_{W-fCO_2} \times 10^{-3} \quad (3)$$

$$CE_{W-ec} = E_{ec} \times EF_{ec} \quad (4)$$

$$CE_{W-cc} = E_{cc} \times EF_{cc} \quad (5)$$

的默认值。

3.2 工艺模型建立

在建模过程中为了简化工艺流程,省略了格栅、沉砂池等预处理设备,以及接触消毒池、加药间、出水提升泵房等与生化处理无关的构筑物,只取1组A²O池和MBR池及污泥排放部分进行建模,并输入模型参数,如图1所示。

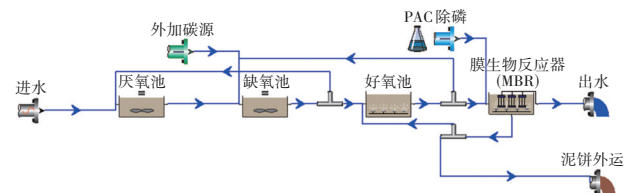


图1 A²O+MBR工艺模型

Fig.1 Diagram of A²O and MBR process model

3.3 参数灵敏度分析

首先通过对各参数进行灵敏度分析^[10],识别对模型模拟结果有明显影响的参数,随后采用试算的方法手动校正参数。相对灵敏度(RS)的计算公式如下:

$$RS = \left| \frac{(Y' - Y_0)/Y_0}{(P' - P_0)/P_0} \right| \quad (7)$$

式中:Y₀为初始变量值;Y'为变化后变量值;P₀为初始参数值;P'为变化后参数值(变化程度取P₀的10%)。

相对灵敏度(RS)的判定原则为:RS<0.25,影响程度很小;0.25≤RS<1,影响程度一般;1≤RS<2,影响程度显著;RS≥2,影响程度极大。本研究将所有

RS≥0.25 的参数判定为对模型模拟结果有影响,如表 2 所示。

表 2 参数灵敏度分析结果

Tab.2 Sensitivity analysis results of parameters

参数		影响水质参数	RS	影响程度
动力学参数	普通异养菌最大生长速率	BOD ₅	0.71	一般
	普通异养菌好氧衰减速率	BOD ₅	0.51	一般
	普通异养菌基质半饱和参数	BOD ₅	0.64	一般
	氨氧化菌最大生长速率	NH ₃ -N	2.22	极大
	氨氧化菌好氧衰减速率	NH ₃ -N	1.11	显著
	氨氧化菌基质(氨)饱和参数	NH ₃ -N	1.11	显著
	聚磷菌最大生长速率	TP	1.54	显著
化学计量学参数	普通异养菌好氧产率系数	BOD ₅	0.96	一般
		COD	0.26	一般
		SS	0.64	一般
		TN	0.53	一般
		NH ₃ -N	1.10	显著
进水组分	易生物降解 COD(含乙酸)与总 COD 的比 F_{bs}	SS	0.27	一般
		TP	1.11	显著
	溶解性不可生物降解 COD 与总 COD 的比 F_{us}	COD	0.72	一般
氨氮与总凯氏氮的比 F_{na}	NH ₃ -N	1.11	显著	

3.4 模型校正

利用灵敏度分析方法筛选出对模型结果影响较大的参数后,可采用估值的方式进行模型校正。针对出水模拟值与实测值的差异,先通过对 2019 年 8 月—2020 年 7 月的历史数据进行模拟,对相应参数进行校正,参数校正值如表 3 所示。参数经过校正后,在出水 COD、NH₃-N、TN、TP 实测值分别为 7.48、0.136、5.39、0.046 mg/L 的条件下,模拟值和相对偏差分别为 6.85、0.14、6.16、0.05 mg/L 和 8.42%、2.94%、14.29%、8.70%,说明模拟结果能够反映污水处理厂实际运行情况。

表 3 参数校正结果

Tab.3 Parameters correction results

参数	默认值	校正值
氨氧化菌最大生长速率/d ⁻¹	0.90	0.55
氨氧化菌基质(氨)饱和参数/(mg·L ⁻¹)	0.70	0.80
普通异养菌好氧产率系数/(mg·mg ⁻¹)	0.67	0.75
易生物降解 COD(含乙酸)与总 COD 的比 F_{bs}	0.16	0.32
氨氮与总凯氏氮的比 F_{na}	0.66	0.79

3.5 模型验证

经过模拟校正参数后,进一步通过对实验测试期间 2020 年 8 月 5 日—15 日的数据进行模拟来验证模型的准确性。结果表明,模拟出水 COD、NH₃-N、TN、TP 浓度曲线与实测出水浓度曲线的变化趋势吻合度较好,模型精度较高。

4 模拟预测分析

4.1 工艺运行参数优化

4.1.1 好氧池到缺氧池回流比优化

选用合适的回流比对提升出水水质、节约碳源和药耗具有重要意义,从而可促进污水处理厂的节能降碳^[1]。基于上述已建立的模型,对该厂的运行工况进行优化。好氧池到缺氧池共有 4 台回流泵,额定功率为 22 kW,当开启 4、3、2、1 台泵时,回流比分别为 300% (初始回流比)、225%、150%、75%。分别模拟不同回流比工况下的出水水质,结果如图 2 所示。

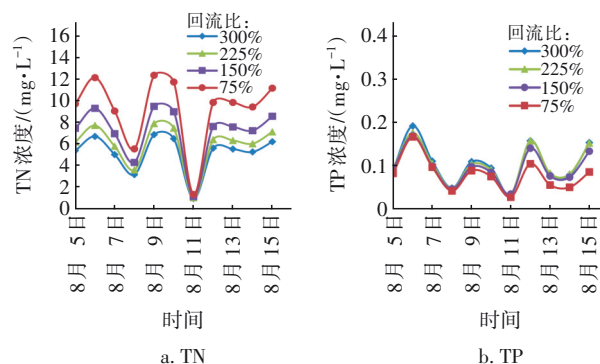


图 2 不同好氧池到缺氧池回流比的模拟结果

Fig.2 Simulation results after adjusting reflux ratio of aerobic tank to anoxic tank

调整好氧池到缺氧池回流比对 TN、TP 的去除有较大影响,而对其他水质指标的影响相对较小。由图 2 可知,当回流比为 300% 和 225% 时,对 TN 的去除效果相对较好,均在 8 mg/L 的出水标准以下,但 TP 的去除效果随着回流比的升高逐渐变差,说明提高回流比能够为反硝化菌提供更多的硝酸盐氮,促进反硝化反应,使脱氮效果变好;但由于反硝化菌和聚磷菌争夺有机基质,过多的硝酸盐氮回流会使更多的碳源被反硝化菌利用,从而抑制聚磷菌的释磷作用,使除磷效果变差^[10]。因此,要保证较好的脱氮除磷效果,同时兼顾系统的运行能耗,需要选择合适的回流比。综合考虑节能和出水水质等因素,当好氧池到缺氧池回流比为 225% 时,能使 TN

稳定达标,同时TP去除率也由94%提高至95%。

4.1.2 MBR池到好氧池回流比优化

污水处理厂MBR池到好氧池的污泥回流比是设计中的重要参数,污泥回流比过高会增加回流系统的负担,同时可能出现好氧池溶解氧不足的情况;回流比过低则会减少系统中活性污泥浓度而影响有机物的去除以及硝化过程。MBR池到好氧池共有4台回流泵,额定功率为16 kW,分别开启4、3、2、1台泵时回流比依次为400%(初始回流比)、300%、200%和100%,模拟不同工况下的出水水质,结果如图3所示。

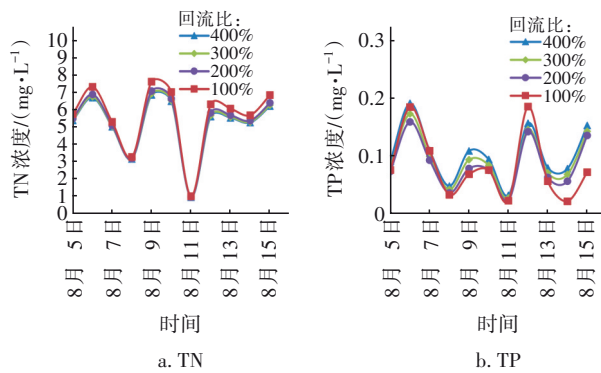


图3 不同MBR池到好氧池回流比的模拟结果

Fig.3 Simulation results after adjusting reflux ratio of MBR tank to aerobic tank

调整MBR池到好氧池回流比对出水TN、TP的影响相对较大,而对其他水质指标的影响相对较小。图3表明,回流比较高时,由于MBR池中DO浓度在6 mg/L以上,回流液中携带的大量溶解氧有利于好氧池中硝化菌的增殖,从而提高TN的去除率;随着回流比减小,TN去除效果下降,而降低回流比可缩短SRT,排泥量增大促进了除磷,因此TP的去除效果有所提高。综合考虑能耗与处理效果,控制回流比在200%为宜,能使TN稳定达标,同时使TP的去除率由95%提高至96%。

4.1.3 好氧池DO浓度优化

溶解氧对污水处理厂的能耗、碳源投加量及运行成本具有显著影响^[11],过高的DO浓度不仅影响反硝化与厌氧释磷,增加碳源投加量,也会造成曝气能耗过大,增加污水处理厂的运行成本,但DO过低不利于微生物生长,难以达到硝化反应的需要。现状好氧池的DO浓度为3 mg/L,模型设置不同的好氧池DO浓度工况,当好氧池的DO浓度为3、2、1 mg/L时,得到的模拟结果如图4所示。由图4可知,

好氧池DO浓度对NH₃-N的去除效果影响相对较大,对TP的去除效果影响次之,而对其他出水指标的影响较小。随着好氧池DO浓度的增加,硝化菌活性提高,促进了硝化反应,NH₃-N的去除率提高,而出水TP浓度增加,说明曝气过多会抑制聚磷菌的除磷能力^[12],并且过高的溶解氧也会通过硝化液回流带入缺氧池,从而影响反硝化脱氮效果,并增加了系统能耗。因此,综合考虑能耗与处理效果,可降低好氧池DO浓度至2 mg/L。

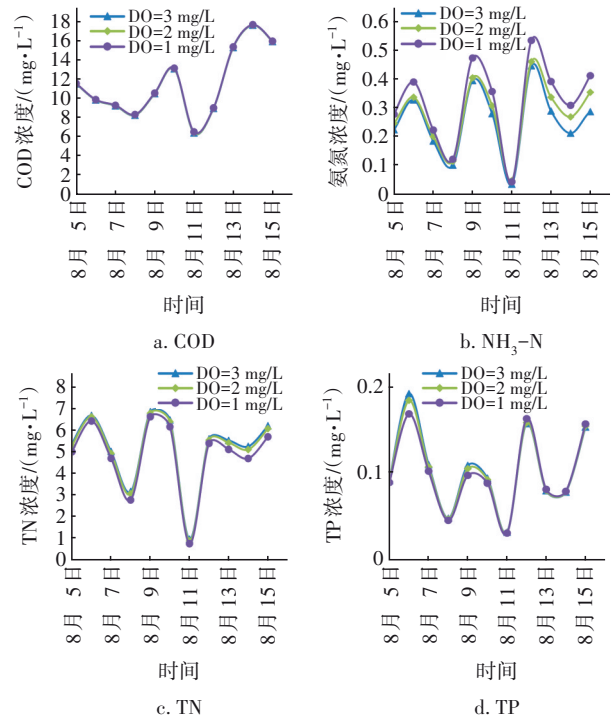


图4 不同好氧池DO浓度的模拟结果

Fig.4 Simulation results after adjusting DO concentration of aerobic tank

4.1.4 多因素组合优化前后水质对比

根据上述模拟结果,对工艺条件进行多因素组合模拟优化。当好氧池到缺氧池回流比为225%、MBR池到好氧池回流比为200%、好氧池DO浓度为2 mg/L时进行模拟,对优化前后的水质模拟结果进行对比分析。结果表明,优化前后出水COD浓度基本相同、氨氮浓度略有下降,TN、TP也依然能够达到设计出水水质标准(如图5所示)。因此,建议好氧池到缺氧池可仅开启3台回流泵,按照一般工商业电价为0.65元/(kW·h)计,可节约电费约12.53万元/a;MBR池到好氧池可以仅开启2台回流泵,可以节约电费约18.22万元/a,共计可以节约电费约

30.75 万元/a。

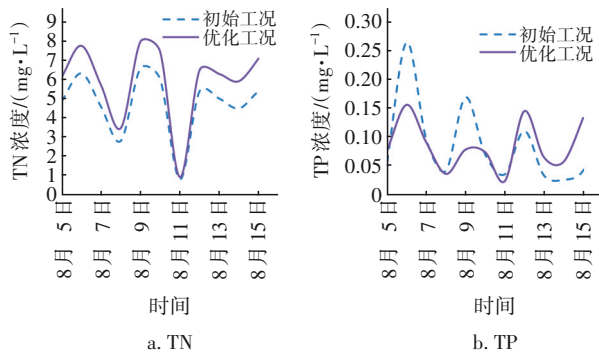


图5 优化前后的出水TN、TP模拟结果对比

Fig.5 Comparison of TN and TP simulation results before and after optimization

4.2 减碳效能分析

根据上述碳排放核算方法,对优化前后的污水处理碳排放量进行测算,其中直接碳排放强度结果对比如图6所示。

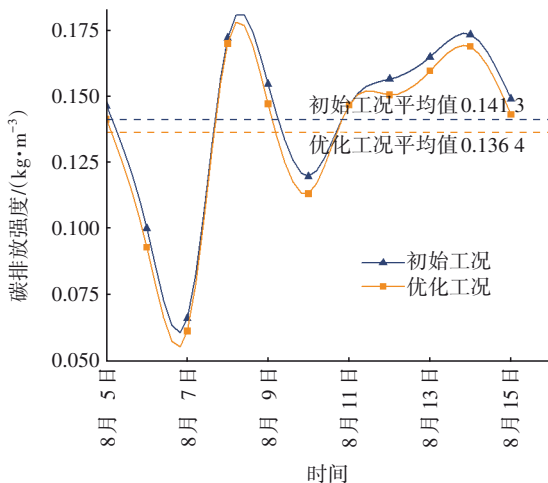


图6 优化前后的直接碳排放强度结果对比

Fig.6 Comparison of direct carbon intensity results before and after optimization

从图6可以看出,在出水污染物浓度满足排放标准的前提下,优化工况直接碳排放强度平均值略低于初始工况,以单组生物反应池处理水量为 $7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 计算,每年可减少直接碳排放量124.65 t。此外,根据前述研究,优化工况相比初始工况,可节省电量473 040 $\text{kW} \cdot \text{h}$,经核算可实现间接碳排放减量281.08 t,合计减碳量达405.73 t/a;根据污水处理厂2020年全年运行数据,可测算出全年运营阶段碳排放强度为 $0.4564 \text{ kg}/\text{m}^3$,优化工况后可减少约3.5%的碳排放量,减碳效能显著。同时,初始工况

下污染物削减碳排放强度为 $31.28 \text{ kg}/\text{kg}$,优化后污染物削减碳排放强度降至 $30.97 \text{ kg}/\text{kg}$,即削减等量污染物的情况下优化工况更具低碳优势。

5 结论与展望

① 采用BioWin软件建立了 $\text{A}^2\text{O}+\text{MBR}$ 工艺模型,并通过灵敏度分析对模型进行参数校准及验证,模拟输出与实测出水COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN和TP浓度吻合程度较好,说明模型能真实反映工艺运行的实际情况。

② 通过模型对工艺进行了优化,当好氧池到缺氧池的回流比为225%、MBR池到好氧池的回流比为200%、好氧池DO浓度为 $2 \text{ mg}/\text{L}$ 时,可在出水TN稳定达标的情况下,降低出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP浓度,且预计节约电费约30.75万元/a。

③ 优化工况下预计可以减少碳排放量405.73 t/a,反哺实现厂界范围内综合碳减排3.5%,且污染物削减碳排放强度降低,说明该工况具备低碳运行的潜力,为实现既有污水处理厂低碳化运维提供了新的减碳路径。

④ 该污水处理厂采用海绵城市建设理念,应用典型低碳设计策略,基于活性污泥动力学模型进行运行参数调控,节省了工程投资和土地费用,实施高品质再生水回用至周边湖泊秋冬枯水季补水,实现综合节能、节地、节约、降碳目标。未来在“双碳”目标下,可进一步探索活性污泥数学模型与碳排放核算方法在机理方面的深度结合,为实现污水处理厂的减污降碳协同增效提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 陈治池,何强,蔡然,等. 碳中和趋势下数学模拟在污水处理系统中的发展与综合应用[J]. 中国环境科学, 2022, 42(6): 2587-2602.
CHEN Zhichi, HE Qiang, CAI Ran, et al. Development and comprehensive application of mathematical simulation in sewage treatment system under the trend of carbon neutralization [J]. China Environmental Science, 2022, 42(6): 2587-2602 (in Chinese).
- [2] 陈广,安莹,周振,等. 基于数学模型的多模式AAO系统夏季高温运行优化研究[J]. 给水排水, 2019, 45(1): 121-126.
CHEN Guang, AN Ying, ZHOU Zhen, et al. Modelling of the multimode anaerobic/anoxic/aerobic system in

- summer for optimization [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2019, 45(1): 121-126 (in Chinese).
- [3] 何春求,周少奇. 改良 A²O—MBR 工艺仿真模拟及运行优化[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(15): 90-97.
HE Chunqiu, ZHOU Shaoqi. Simulation of modified A²O—MBR process and its operation optimization [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(15): 90-97 (in Chinese).
- [4] 刘然彬,于文波,张梦博,等. 城镇水务系统碳核算与减碳/降碳规划方法[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(8): 1-10.
LIU Ranbin, YU Wenbo, ZHANG Mengbo, *et al.* Carbon accounting and reduction planning in urban water sector [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(8): 1-10 (in Chinese).
- [5] 刘阳,施周,文字鸿,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 Yang, SHI Zhou, WEN Yuhong, *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 (in Chinese).
- [6] 张岳,葛铜岗,孙永利,等. 基于城镇污水处理全流程环节的碳排放模型研究[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(9): 65-74.
ZHANG Yue, GE Tonggang, SUN Yongli, *et al.* Research on carbon emission model based on the whole process of urban sewage treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(9): 65-74 (in Chinese).
- [7] 胡香,陈孔明,李涛. 城镇污水处理厂低碳运行评价指标体系的构建及应用[J]. *工业用水与废水*, 2023, 54(2): 39-44.
HU Xiang, CHEN Kongming, LI Tao. Construction and application of low-carbon operation evaluation index system for sewage treatment plant [J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2023, 54(2): 39-44 (in Chinese).
- [8] 傅金祥,梁伦彰,王勇勇. 基于 ASM2D 模型对改良 DAT-IAT 工艺模拟[J]. *给水排水*, 2020, 46(1): 134-139.
FU Jinxiang, LIANG Lunzhang, WANG Yongyong. Simulation and optimization of modified DAT-IAT process based on ASM2D model [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 46(1): 134-139 (in Chinese).
- [9] 宋项宁,郭亚逢,牟桂芹,等. 炼油污水 A/O 处理工艺模拟与优化[J]. *工业水处理*, 2017, 37(3): 78-81.
SONG Xiangning, GUO Yafeng, MOU Guiqin, *et al.* Simulation and optimization of A/O process for refinery wastewater treatment [J]. *Industrial Water Treatment*, 2017, 37(3): 78-81 (in Chinese).
- [10] 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, PENG 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).
- [11] 何胜杰,周利,朱佳,等. 低 B/C 污水对 A²O 工艺的冲击仿真模拟[J]. *环境工程*, 2022, 40(3): 81-88.
HE Shengjie, ZHOU Li, ZHU Jia, *et al.* Simulation of impact of low B/C sewage on an A²O process [J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40(3): 81-88 (in Chinese).
- [12] 陈佳,唐燕秋,陈建,等. 基于模型辅助优化 Carrousel 氧化沟工艺除磷效率研究[J]. *给水排水*, 2020, 46(8): 126-131.
CHEN Jia, TANG Yanqiu, CHEN Jian, *et al.* Study on phosphorus removal efficiency based on model-assisted optimization of Carrousel oxidation ditch process [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 46(8): 126-131 (in Chinese).

作者简介:王湘(1981-),女,湖南娄底人,博士,正高级工程师,主要从事市政工程及环境治理相关的科研与设计工作。

E-mail: wangxianghd@126.com

收稿日期:2024-05-20

修回日期:2024-06-18

(编辑:李德强)