

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.07.012

基于BioWin对AAO-MBR工艺的生物除磷优化

欧阳卓明¹, 罗凡¹, 孙先昌¹, 刘颖¹, 周爱姣¹, 曾丽虹²

(1. 华中科技大学环境科学与工程学院, 湖北武汉 430074; 2. 武汉市生态环境科技中心, 湖北武汉 430014)

摘要: 针对武汉市某污水处理厂的AAO-MBR工艺, 基于BioWin 6.0建立污水厂全流程水质动力学模型。对污水进行表征并根据STOWA协议校准模型。使用一整年数据的动态模拟对模型精确度进行验证, 结果显示该模型的精度是可以接受的。针对该AAO-MBR工艺出水TP不稳定的问题, 对好氧区DO浓度、系统排泥量、各级回流量等不同工况分别进行模拟, 结果表明, 根据进水温度分时段调整工艺运行工况, 当水温在20℃以上时, 降低好氧区曝气量, 减小混合液回流量与系统排泥量; 当水温在20℃以下时, 维持现状运行工况, 以保证出水总氮与氨氮浓度达到国家一级A标准。在此优化策略下, 模型模拟结果显示, 在不投加除磷药剂情况下, 系统的生物除磷率均值从42%提高到59%, 同时全年的氨氮和总氮达标率均为100%。

关键词: AAO-MBR工艺; BioWin模拟; 生物除磷; 工艺优化; 影响因素

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)07-0082-07

Optimization of Biological Phosphorus Removal in AAO-MBR Process Using BioWin Simulation

OUYANG Zhuo-ming¹, LUO Fan¹, SUN Xian-chang¹, LIU Ying¹, ZHOU Ai-jiao¹, ZENG Li-hong²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Wuhan Ecological Environment Science and Technology Center, Wuhan 430014, China)

Abstract: Targeting the anaerobic-anoxic-oxic membrane bioreactor (AAO-MBR) process at a wastewater treatment plant in Wuhan, a water quality dynamic model for the entire process was developed utilizing BioWin 6.0. The wastewater was characterized and the model was calibrated in accordance with the STOWA protocol. The accuracy of the model was validated through dynamic simulation utilizing a full year's dataset. The results indicated that the model demonstrated satisfactory performance. To address the issue of unstable TP removal in the AAO-MBR process, simulations were conducted under different operating conditions with varying the dissolved oxygen (DO) in the oxic zone, sludge discharge of the system, and the reflux rates at various stages of the process. Based on the influent temperature, the process operation parameters were adjusted accordingly during different periods. When the influent temperature exceeded 20℃, the aeration rate in the oxic zone, the reflux rate of the mixed liquor and sludge discharge were decreased. Conversely, when the influent temperature was below 20℃, current operating conditions

通信作者: 罗凡 E-mail: fl4021@hust.edu.cn

were maintained to ensure that the total nitrogen and ammonia nitrogen in the effluent met the first level A criteria specified in the national discharge standard. Under this optimization strategy, the model simulation results indicated that the mean biological phosphorus removal efficiency of the system was increased from 42% to 59%, while the annual compliance rate of ammonia nitrogen and total nitrogen in the effluent both reached 100%.

Key words: AAO-MBR process; BioWin simulation; biological phosphorus removal; process optimization; influencing factor

AAO-MBR 工艺将 AAO 工艺中的二沉池用 MBR 池替代,具有占地小、出水水质好等优点,但在运行管理难度大、碳排放量高及生物除磷效果不佳等问题^[1-2]。近年来,学者们通过应用活性污泥数学模型成功实现了 MBR 强化生物除磷过程的仿真,并将其应用到对 AAO-MBR 工艺的运行优化中^[3]。笔者以武汉市某污水处理厂 AAO-MBR 工艺为研究对象,针对该工艺生物除磷效果不佳的现状,基于 BioWin 6.0 建立 AAO-MBR 工艺模型,并根据 STOWA 协议校准模型,对好氧区溶解氧(DO)浓度、系统排泥量、各级回流量等不同工况分别进行模拟优化,以期获得生物除磷的最佳运行参数,提升污水处理效果。

1 项目概况

武汉市某污水处理厂采用 AAO-MBR 工艺,设计规模为 20×10⁴ m³/d,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准。生物池设 2 座,每座分两组,单组生物池的处理水量为 5×10⁴ m³/d。厌氧池、缺氧池、好氧池和膜池的水力停留时间(HRT)分别为 1.38、3.01、4.10 和 1.33 h。与传统 AAO+二沉池工艺采用污泥和混合液分别回流的方式不同,AAO-MBR 工艺采用由膜池到好氧池、再由好氧池到缺氧池,最后由缺氧池到厌氧池的混合液逐级回流方式,具体见图 1。

该污水厂进水 COD、BOD₅、TN、氨氮、TP、TSS 分别为 63~260(127)、24~126(59)、8.1~28.4(18)、4~24(14.68)、1.12~7.94(2.12)、44~288(123) mg/L (括号内为均值),进水 pH 为 6.84~7.49、均值为 7.15,进水 BOD₅/COD、BOD₅/TN、BOD₅/TP 分别在 0.4~0.6、2~5、20~40 之间。监测数据表明,进水属于较易生物降解的污水,虽然 BOD₅/TN 低于 3 的占比为 39%,对冬季生物脱氮影响较大,但 BOD₅/TP 均值为 28.93,表明进水具有较好的生物除磷基础。

但在实际运行过程中,系统整体生物除磷效率较低,主要依靠化学除磷控制出水 TP 浓度。

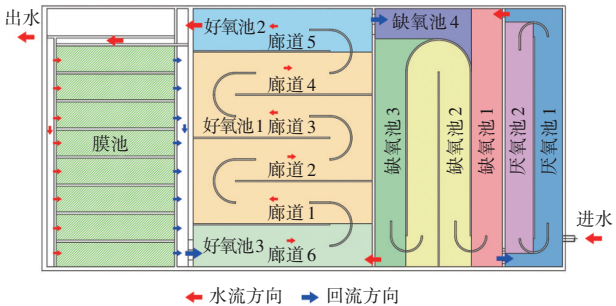


图 1 AAO-MBR 工艺生物池的平面图

Fig.1 Plan of biological tank in AAO-MBR Process

2 模型构建

2.1 模型构建

对生物池各段的 DO 浓度进行现场实测发现,膜池 DO 均值为 6 mg/L,好氧池 DO 均值为 2 mg/L,好氧池回流至缺氧池过渡廊道(缺氧池 4)的 DO 均值为 0.7 mg/L,其余构筑物的 DO 均为 0 mg/L。按 DO 浓度及循环控制将生物池进行细分,各部分尺寸及 DO 浓度设置如表 1 所示。

表 1 构筑物模型尺寸设置
Tab.1 Size setting of structure model

单元名称	分区名称	面积/m ²	体积/m ³	深度/m	DO/(mg·L ⁻¹)
AAO 生物池	厌氧池 1	256.2	1 614.06	6.3	0
	厌氧池 2	201.1	1 266.93	6.3	0
	缺氧池 1	252.6	1 566.12	6.2	0
	缺氧池 2	430.5	2 669.10	6.2	0
	缺氧池 3	229.8	1 424.76	6.2	0
	缺氧池 4	100.1	620.62	6.2	0.7
	好氧池 1	945.5	5 673.00	6.0	2
	好氧池 2	238.5	1 431.00	6.0	2
	好氧池 3	237.8	1 426.80	6.0	2
MBR	膜池	773.0	2 782.80	3.6	6

采用 BioWin 6.0 建立污水处理厂全流程水质动力学模型,如图 2 所示。

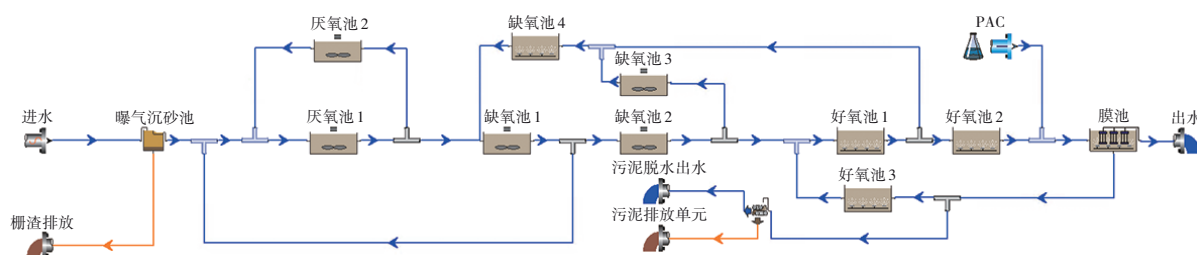


图2 AAO-MBR工艺模拟流程

Fig.2 Simulation of AAO-MBR process

2.2 进水水质表征

对 10 种进水水质组分,即快速降解型 COD (Fbs)、乙酸 (Fac)、溶解态不可生物降解型 COD (Fus)、颗粒状不可生物降解型 COD (Fup)、氨 (Fna)、颗粒态有机氮 (Fnox)、溶解性不可生物降解型凯氏氮 (Fnus)、颗粒状不可生物降解型 COD 中氮 (FupN)、磷酸盐 (Fpo4) 和颗粒状不可生物降解型 COD 中磷 (FupP), 进行多次检测, 根据平均值对污水处理厂进水水质进行表征, 设定相关模型参数如表 2 所示 (TCOD 表示总 COD, TKN 表示总凯氏氮, KN 表示凯氏氮, ON 表示有机氮)。

表2 进水组分测定值与模型中设定值

Tab.2 Measured and set values of influent components in model

项目	模型默认值	参考范围	测定范围	组分设定值
Fbs/(gCOD·g ⁻¹ TCOD)	0.160	0.05~0.25	0.138~0.290	0.221
Fac/(gCOD·g ⁻¹ TCOD)	0.150	—	0.068~0.133	0.107
Fus/(gCOD·g ⁻¹ TCOD)	0.050	0.04~0.16	0.050~0.149	0.060
Fup/(gCOD·g ⁻¹ TCOD)	0.130	0.07~0.22	0.107~0.408	0.140
Fna/(gNH ₃ -N·g ⁻¹ TKN)	0.660	0.50~0.75	0.741~0.965	0.840
Fnox/(gN·g ⁻¹ ON)	0.500	—	0.132~0.630	0.301
Fnus/(gKN·g ⁻¹ TKN)	0.020	0~0.07	0.011 3~0.034 7	0.020
FupN/(gN·g ⁻¹ COD)	0.035	0.03~0.07	0.002~0.900	0.043
Fpo4/(gPO ₄ ³⁻ -P·g ⁻¹ TP)	0.500	0.50~0.85	0.318~0.709	0.555
FupP/(gP·g ⁻¹ COD)	0.011	0.02~0.03	0.018~0.029	0.022

2.3 模型校准及验证

进水水质数据采用 2020 年—2021 年的历史数据进行设置, 污泥排放量按 787 m³/d 设置, PAC 投加量按月平均投加量设置。采用 2020 年出水水质数据作为模型校准数据, 采用 2021 年出水水质数据作为模型验证数据。采用纳什效率系数 (NSE) 和相对平均偏差 (RMD) 表征模型质量, 调参前后模型动态模拟结果对比见表 3。所有出水水质指标实测值与

模拟值的相对误差均在 20% 以内, 且纳什效率系数大于 -5, 说明模型预测准确度较高。

表3 模拟值与实测值对比

Tab.3 Comparison of simulated and measured values

项目	COD	氨氮	总氮	TP	TSS
NSE	-0.41	-4.67	-4.21	-1.52	-4.62
RMD/%	18.79	19.08	17.72	11.92	19.26

2.4 AAO-MBR工艺生物除磷模拟

采用校准与验证后的模型, 模拟 AAO-MBR 工艺在不投加化学药剂时的出水 TP 浓度, 实测值与模拟值如图 3 所示。可知, 出水 TP 浓度模拟值略低于实测值, 这可能是因为残留在生物池中的铝盐和铁盐对生物除磷有抑制作用, 但总体误差较小, 表明模型对 AAO-MBR 工艺生物除磷具有良好的预测性。

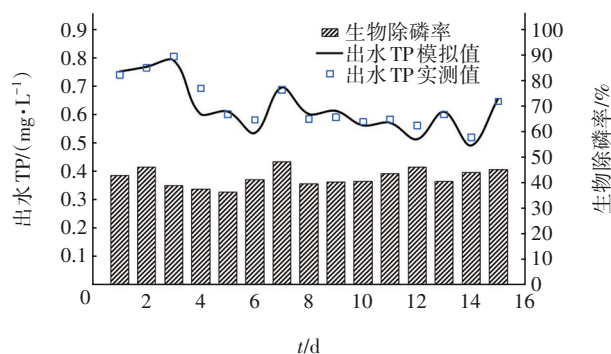


图3 AAO-MBR工艺进水TP与不投药出水TP

Fig.3 TP in influent and effluent of AAO-MBR process without dosing

曹斌等人^[4]研究表明, AAO-MBR 工艺的生物除磷率最高可达到 88.4%。根据图 3 数据计算得到的平均生物除磷率仅为 42%, 对比之下生物除磷率较低。与该污水厂 A/O 工艺相比, AAO-MBR 工艺的实际投药量也明显偏大。

3 生物除磷优化模拟

在污水处理中,温度、碳源、污泥龄等因素对生物除磷过程影响较大,生产运行过程中可通过控制曝气强度、调整剩余污泥排放量和混合液回流量等措施改善工艺的生物除磷效果。

3.1 整体降低好氧区DO控制值

溶解氧在好氧阶段作为聚磷菌(PAOs)的电子受体参与好氧吸磷过程,主要影响PAOs细胞内聚磷的生成速率^[5]。充足的溶解氧有利于PAOs在好氧段超量吸磷,但是过量曝气会导致PAOs细胞内的聚羟基丁酸酯(PHB)消耗过快,使得PAOs生长缓慢,在与聚糖菌(GAOs)的竞争中失去优势^[6]。在AAO-MBR工艺中,膜池由于需要过量曝气维持膜通量,DO浓度通常较高。优化中将好氧区的DO浓度分别设置为6、5、4、3、2、1、0.5、0.25、0.1、0.05和0.01 mg/L,分别对应GP-1~GP-11共11种工况。以2020年全年进水水质数据为动态模拟的输入数据,计算各工况下全年出水TP及氨氮平均值,模拟结果如图4所示。当DO>2 mg/L时,DO控制值的减少对出水水质影响较小;当DO从2 mg/L降至0.5 mg/L时,出水TP平均值随着DO的减少而呈下降趋势;当DO降至0.5 mg/L以下时,出水TP平均值迅速下降。出水TP平均值下降的同时,由于硝化不充分,出水硝态氮平均值大幅下降,而氨氮平均值大幅上升。当DO降至0.5 mg/L时,出水TP平均值从1.26 mg/L降至1.24 mg/L,降低了1.58%,此时刚刚能够满足出水氨氮全年达标。

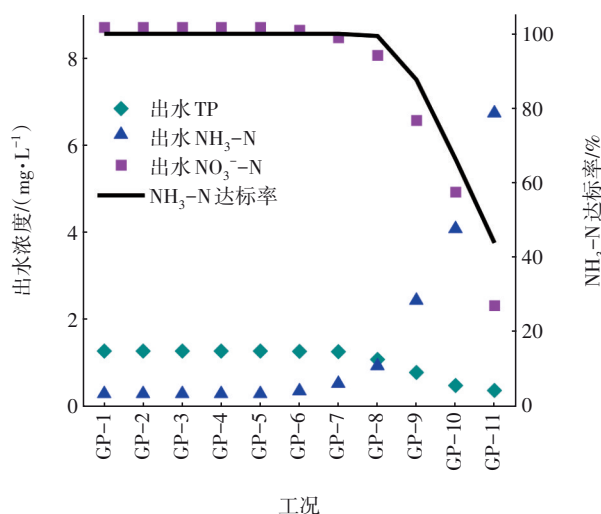


图4 不同DO工况下的出水水质

Fig.4 Effluent quality under different DO conditions

3.2 分段控制好氧区DO浓度

如果将该AAO-MBR工艺中的MBR池视作好氧区,则厌氧区、缺氧区、好氧区的HRT分别为1.38、3.01和5.43 h,满足设计规范对AAO工艺水力停留时间的规定。但研究发现^[7],在某些污水处理厂的AAO工艺中,减少好氧区域、增加缺氧和厌氧停留时间,有助于出水氮、磷浓度的降低。朱星等人^[8]也发现,延长缺氧区水力停留时间可以提高倒置AAO-MBR工艺的脱氮除磷效果。因此,考虑通过控制好氧区6条廊道的曝气管阀门,并在廊道中设置推流器,来控制好氧区廊道的DO浓度,以优化工艺运行。按照廊道的实际尺寸对模型进行重新建模,具体如图5所示。

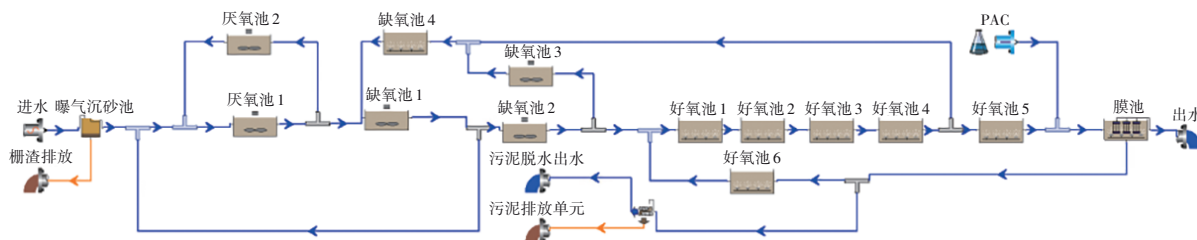


图5 重新建模后的AAO-MBR工艺模型示意

Fig.5 Schematic diagram of AAO-MBR process model after re-modeling

模拟中,处于曝气状态的好氧池DO设置为2 mg/L,处于不曝气状态的好氧池DO设置为0 mg/L,如图6所示,设置GPG-1~GPG-64共64种工况,其中GPG-64为6条廊道均曝气,即现状工况。对这64种工况分别进行模拟,模拟结果如图7所示。可以看出,随着关闭曝气的生物池数量增加,出水TP

平均值呈下降趋势,但全年的氨氮达标率也逐渐下降。GPG-43~GPG-64这22种工况2020年全年出水氨氮的达标率均可以达到100%。其中,GPG-43工况的不投药出水TP平均值最低为1.01 mg/L,相比现状工况降低了19.8%,但出水氨氮平均值相比现状工况升高了150%。

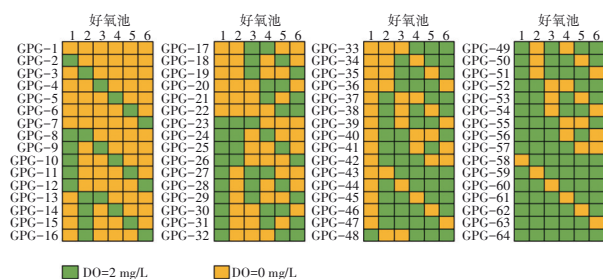


图6 DO工况矩阵示意

Fig.6 Matrix of DO conditions

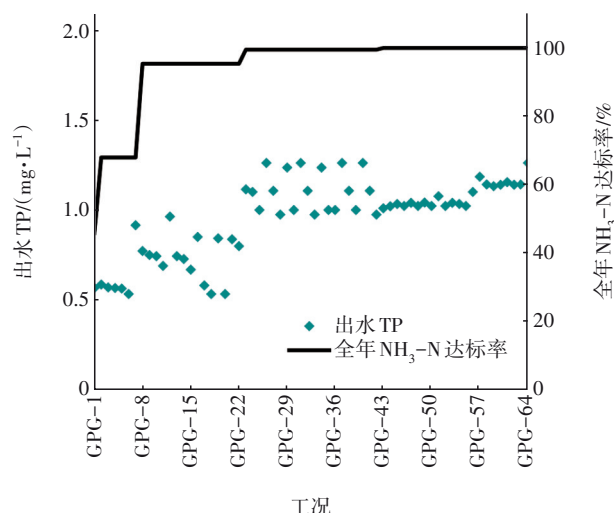


图7 64种DO工况的模拟结果

Fig.7 Simulation results of 64 DO conditions

3.3 调整排泥量

生物除磷系统排出的剩余污泥量会影响污泥龄,研究发现^[9],反应器的污泥龄越长,活性污泥的最大释磷和吸磷速率、消耗单位乙酸所释放的磷酸盐量以及污泥含磷量就越小。现状工艺条件下,污水处理厂2020年全年日均污泥排放量为787 m³/d,污泥龄为11.13 d,排泥泵最大排泥量为1 200 m³/d,因此设置排泥量为100~1 200 m³/d的GS-1~GS-12共12种不同工况,对应不同的污泥龄、排泥质量和模拟出水水质结果,具体如表4所示。可知,随着排泥量逐渐增大,排出系统的富磷污泥也相应增加,系统污泥龄下降。模拟结果表明,随着排泥量逐渐增大,不投药出水TP平均值逐渐减小,GS-12为最佳工况,此时出水TP平均值为1.14 mg/L,相比现状工况降低了9.5%,此时系统污泥龄为7.32 d,在文献通常认为的合理控制范围下限。但是排泥量增大会导致生物池的MLSS降低,同时缩短了污泥龄,从而降低了硝化菌和反硝化菌的数量。模拟结果显示,增大排泥量会导致出水氨氮浓度升高,但仍

能保证全年达标。

表4 不同排泥量工况下的污泥龄、排泥质量和模拟出水水质

Tab.4 Sludge age, sludge discharge weight and simulated effluent quality under different sludge discharge quantity

工况	排泥量/(m ³ ·d ⁻¹)	好氧池MLSS/(mg·L ⁻¹)	污泥龄/d	排泥质量/(kg·d ⁻¹)	出水总磷/(mg·L ⁻¹)	出水氨氮/(mg·L ⁻¹)	全年氨氮达标率/%
GS-1	100	22 412	87.31	2 241	1.67	0.066	100
GS-2	200	13 525	43.67	2 705	1.56	0.071	100
GS-3	300	9 799	29.09	2 940	1.47	0.085	100
GS-4	400	7 709	21.86	3 084	1.41	0.102	100
GS-5	500	6 393	17.45	3 197	1.36	0.124	100
GS-6	600	5 479	14.59	3 287	1.32	0.150	100
GS-7	700	4 807	12.51	3 365	1.28	0.181	100
GS-8	787	4 351	11.13	3 424	1.25	0.218	100
GS-9	900	3 881	9.74	3 493	1.22	0.263	100
GS-10	1 000	3 547	8.77	3 547	1.19	0.316	100
GS-11	1 100	3 268	7.98	3 595	1.16	0.377	100
GS-12	1 200	3 033	7.32	3 640	1.14	0.448	100

3.4 调整回流流量

该AAO-MBR工艺无单独的污泥回流,仅有混合液逐级回流方式。减少好氧池至缺氧池的回流量,可以减少硝态氮的回流,为前端厌氧释磷提供环境基础。同时混合液回流还会对与生物除磷有竞争关系的生物脱氮造成影响,从而间接影响生物除磷。该工艺中,膜池至好氧池(M-O)设置了4台穿墙泵(单台 $Q=85\ 680\text{ m}^3/\text{d}$,3用1备),现状运行仅开启1台;好氧池至缺氧池(O-A)设置了3台穿墙泵,缺氧池至厌氧池(A-A)设置了2台穿墙泵,标称流量均为100 008 m³/d,现状运行分别开启2台和1台。根据每级回流开启的泵数量,共设置24种不同的硝化液回流工况,具体如表5所示。这24种工况的模拟结果如图8所示。可知,在不同回流工况下,模型预测的出水TP平均值在1.24~1.31 mg/L之间小范围波动。其中,GN-23工况(每一级回流泵均只开启1台)出水TP平均值最低为1.247 mg/L,比现状工况GN-21的出水TP平均值低1.0%,而出水总氮平均值仅上升了2.3%。模拟结果表明,虽然各工况的出水总氮与氨氮达标率均能达到100%,但回流量的调整对提高生化除磷效果并不显著,从节能角度出发,维持最低回流量即可。

表5 回流工况设置
Tab.5 Setting of reflux condition 台

工况 编号	开启泵数			工况 编号	开启泵数		
	M-O	O-A	A-A		M-O	O-A	A-A
GN-1	4	3	1	GN-13	2	3	1
GN-2	4	3	2	GN-14	2	3	2
GN-3	4	2	1	GN-15	2	2	1
GN-4	4	2	2	GN-16	2	2	2
GN-5	4	1	1	GN-17	2	1	1
GN-6	4	1	2	GN-18	2	1	2
GN-7	3	3	1	GN-19	1	3	1
GN-8	3	3	2	GN-20	1	3	2
GN-9	3	2	1	GN-21	1	2	1
GN-10	3	2	2	GN-22	1	2	2
GN-11	3	1	1	GN-23	1	1	1
GN-12	3	1	2	GN-24	1	1	2

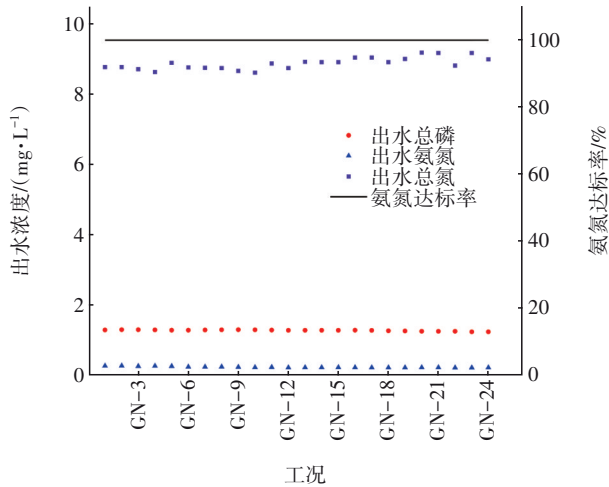


图8 不同回流工况下的模拟结果

Fig.8 Simulation results under different reflux conditions

3.5 根据水温调整工艺参数

生物除磷与脱氮存在对碳源的竞争,研究表明,当水温控制在20℃以下时,PAOs增殖速度最快,有利于生物除磷^[10];随着水温从5℃上升到25℃时,PAOs的聚磷能力呈下降趋势^[11];当水温从20℃上升到35℃时,强化生物除磷系统中的优势菌群会由PAOs转化为GAOs,生物除磷效果下降^[12];而当水温介于21~33.2℃时,缺氧池的反硝化率稳定在36%~40%,远高于水温为12.5~20℃时的12.1%^[13]。该AAO-MBR工艺的实际运行数据也表明,当水温>20℃时生物脱氮效果更好,而当水温<20℃时生物除磷效果更好,具体如图9所示。

为了保证出水氨氮达标的前提下提高系统生物除磷效率,按照进水温度是否大于20℃进行分时

段调控。低温时段,维持现状工况,以确保脱氮效果。当水温>20℃时,针对DO、污泥排放量和混合液回流量3个不同因素进行工况的排列组合,模拟共计64×12×24=18 432种工况,选择全年出水氨氮和总氮达标时生物除磷效果最佳的组合工况。结果表明,GPG18+GS7+GN23为生物除磷率最高的组合工况,即关闭好氧区的第1、2、4、6廊道曝气,排泥量设置为700 m³/d,污泥回流泵开启台数为1、1、1。好氧区的曝气关闭,形成了好氧-缺氧的间隔,有利于反硝化反应的进行,同时降低了回流液中的硝态氮浓度,有利于厌氧释磷。不投药情况下,出水TP平均值从1.26 mg/L降至0.89 mg/L,生物除磷率从42%提高至59%。

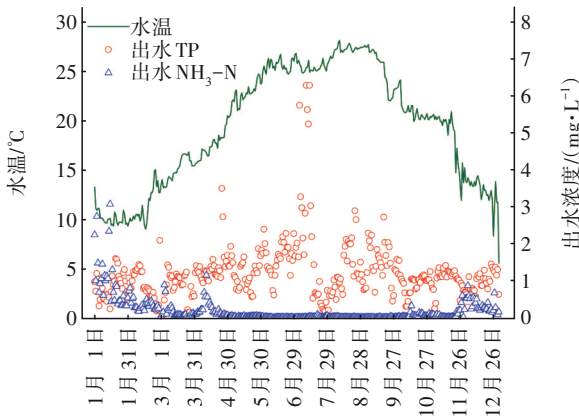


图9 出水TP和氨氮浓度随水温的变化

Fig.9 Change in effluent TP and ammonia nitrogen concentrations with water temperature

4 结论与建议

① 按水温分时段调整污水处理厂运行参数,当水温在20℃以上时,关闭好氧区的第1、2、4、6廊道曝气,排泥量设置为700 m³/d,各级污泥回流泵开启台数均为1;当水温在20℃以下时,维持现状工况。在此优化策略下,AAO-MBR工艺的生物除磷率从42%提高至59%。

② 在AAO-MBR工艺中,可适当降低好氧池的HRT,提高缺氧池的HRT,同时设置曝气头和推流搅拌器实现部分区域的灵活曝气。

参考文献:

[1] 呼永锋,梁梅,张永祥,等. A²/O+MBR工艺运行效果与碳排放特征研究[J]. 中国环境科学, 2021, 41(9): 4439-4446.
HU Yongfeng, LIANG Mei, ZHANG Yongxiang, et al.

- Study on operation efficiency and carbon emission characteristics of A²/O+MBR process [J]. China Environmental Science, 2021, 41(9): 4439-4446 (in Chinese).
- [2] 于洁, 王素兰, 史思, 等. 基于污泥减排的A²/O-MBR工艺除磷效果研究[J]. 水处理技术, 2012, 38(10): 70-74.
YU Jie, WANG Sulan, SHI Si, *et al.* Study based on the sludge reduction of phosphorus removal effect for A²/O-MBR process[J]. Technology of Water Treatment, 2012, 38(10): 70-74 (in Chinese).
- [3] 何春求, 周少奇. 改良A²/O-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 A²/O-MBR process and its operation [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(15): 90-97 (in Chinese).
- [4] 曹斌, 黄霞, 北中敦, 等. A²/O-膜生物反应器强化生物脱氮除磷中试研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(3): 22-26.
CAO Bin, HUANG Xia, BEI Zhongdun, *et al.* Pilot test on enhanced biological nitrogen and phosphorus removal by using A²/O-MBR [J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(3): 22-26 (in Chinese).
- [5] 彭赵旭, 霍明昕, 彭永臻, 等. DO对除磷过程的长期影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(4): 42-46.
PENG Zhaoxu, HUO Mingxin, PENG Yongzhen, *et al.* Long-term effects of DO on phosphorus removal process [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(4): 42-46 (in Chinese).
- [6] IZADI P, ELDYASTI A. Understanding microbial shift of enhanced biological phosphorus removal process (EBPR) under different dissolved oxygen (DO) concentrations and hydraulic retention time (HRTs) [J]. Biochemical Engineering Journal, 2021, 166: 107833.
- [7] 李茂侨. 长缺氧A-AAO工艺在城镇污水处理厂中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
LI Maoqiao. Application Research of A-AAO Process with Long Anoxic Retention Time in Sewage Treatment Plants [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016 (in Chinese).
- [8] 朱星, 郑晓英, 朱宁伟. 延长缺氧区水力停留时间提高倒置AAO/MBR组合工艺的脱氮效果[J]. 净水技术, 2017, 36(1): 67-72.
ZHU Xing, ZHENG Xiaoying, ZHU Ningwei. Effect of reversed AAO/MBR combined processes on improvement of denitrification by prolonging HRT in anoxic zone [J]. Water Purification Technology, 2017, 36(1): 67-72 (in Chinese).
- [9] 史西凤. 污泥龄对EBPR系统除磷性能的影响[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
SHI Xifeng. Impact of SRT on Phosphorus Removal Performance in EBPR Systems [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021 (in Chinese).
- [10] 彭艺艺, 孟宪翠, 刘广钊, 等. 影响生物除磷效果的几点因素探讨[J]. 中国给水排水, 2013, 29(1): 84-87.
PENG Yiyi, MENG Xianhui, LIU Guangzhao, *et al.* Discussion on factors affecting biological phosphorus removal effect [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(1): 84-87 (in Chinese).
- [11] REN N, KANG H, WANG X, *et al.* Short-term effect of temperature variation on the competition between PAOs and GAOs during acclimation period of an EBPR system [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering in China, 2011, 5(2): 277-282.
- [12] PANSWAD T, DOUNGCHAI A, JIN A. Temperature effect on microbial community of enhanced biological phosphorus removal system[J]. Water Research, 2003, 37(2): 409-415.
- [13] 赵丰, 戴兴春, 黄民生. 温度对A²/O工艺脱氮影响的研究[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(3): 49-53.
ZHAO Feng, DAI Xingchun, HUANG Minsheng. Influence of temperature on nitrogen removal in A²/O process [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(3): 49-53 (in Chinese).
-
- 作者简介:** 欧阳卓明(1999-), 男, 江西宜春人, 硕士研究生, 主要研究方向为污水处理技术。
E-mail: oyzm_personal@163.com
收稿日期: 2024-01-06
修回日期: 2024-03-04

(编辑: 刘贵春)