



# 敏感地区城市污水处理厂工艺优化模拟及生产线应用

罗凡<sup>1</sup>, 于翔<sup>1,✉</sup>, 李浩<sup>1</sup>, 徐浩<sup>1</sup>, 李捷<sup>2</sup>

1. 广州市市政工程设计研究总院有限公司, 广州 510060; 2. 广东首汇蓝天工程科技有限公司, 广州 510655

**摘要** 本研究针对敏感地区城市污水处理厂高排放标准要求, 通过现场调研发现现状工艺存 MLSS 过高、曝气量过高、DO 过高、外回流比较低等问题。采用污水处理模拟软件构建了该厂改良 AAO 工艺模型, 经校核率定后考察了不同工艺参数对出水水质的影响。结果表明: 应增大排泥量使生化池 MLSS 降低至 5 000 mg·L<sup>-1</sup> 左右, 同步可降低曝气量控制 DO 降低至 1 mg·L<sup>-1</sup>, 适当提高外回流比例。基于优化方案运行后, 污水厂实际出水 COD 和 TN 浓度分别降低了 7.8% 和 22.5%, 除磷药剂 PAC 及 PAM 的投加量分别下降了 20% 和 11.5%。

**关键词** 改良 AAO; 工艺仿真模拟; 脱氮除磷; 优化运行; 节能降耗

近年来, 随着《水污染防治行动计划》(即“水十条”)和《关于加强固定污染源氮磷污染防治的通知》的颁布, 各类行业水污染物排放标准中针对环境地域敏感、承载力较弱的地区设定了特别排放限值, 加强了对环境敏感地域的污染物排放限制, 大幅提升了相关行业的环境准入门槛, 对部分重点流域制定了具备流域特征的污染控制标准, 以适应区域可持续发展<sup>[1]</sup>。目前大部分污水处理厂严格执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002), 其中一级 A 标规定了总氮(TN)、总磷(TP)的出水排放限值是 15、0.5 mg·L<sup>-1</sup>, 在此基础上, 一些环境敏感地区出台了更为严格的地方标准, 尤其是大幅提高了对出氮磷指标的要求(TN<5 mg·L<sup>-1</sup>, TP<0.05 mg·L<sup>-1</sup>)<sup>[2]</sup>。因此, 氮素、磷素排放标准的进一步控制和提升是污水厂提标改造的重要发展方向。由于污水处理工艺涉及的过程复杂, 现有工艺调整方式依靠人力和经验, 成本高、周期长, 工艺仿真因其便利性、安全性和准确性在污水处理厂工艺的设计和运行方面得到了重视和发展。以国际水协提出活性污泥模型(ASM)和厌氧硝化模型(ADM)为代表<sup>[3]</sup>, 多种污水处理厂全流程模拟软件应运而生, 包括 BioWin、GPS-X、WEST、EFOR、SIMBA、STOAT 和 ASIM 等软件, 其中 BioWin、GPS-X、WEST 应用最为广泛<sup>[4]</sup>。OMAR 等<sup>[5]</sup>使用 BioWin 软件模拟了科威特 Kabd 污水处理厂, 模型的出水化学需氧量(COD)、生化需氧量(BOD)和总悬浮固体(SS)的预测值与实际值之间存在高度相关性( $R^2=0.95\sim 0.99$ )。李天宇等<sup>[6]</sup>基于 Biowin 软件完成了改良型氧化沟工艺模型构建和修正, 通过优化污泥龄、内外回流比、溶解氧等常规运行参数确定污泥控制策略, 在满足出水稳定达标的前提下, 实现日均药剂投加量降低 46%, 运行电耗减少 840 kWh·d<sup>-1</sup>。柳蒙蒙等<sup>[7]</sup>采用了基于 ASM1 模型的 GPS-X 软件构建了 CASS 工艺提标改造模型, 对污水厂进行了升级改造, 实现了寒冷地区污水处理厂出水水质的稳定达标。多项研究结果表明, 工艺仿真在水处理工程的设计、运维和科学管理等多方面均能发挥重要作用。

本研究基于商业化污水厂仿真模拟软件对敏感地区某污水厂的“预缺氧-厌氧-缺氧-好氧”(改良 AAO)工艺进行主体工艺模型构建, 在运行现状的基础上, 优化各项运行参数, 提出最佳运行方案, 并为污水厂进一步提质增效提供研究方向。

收稿日期: 2024-05-16; 录用日期: 2024-08-27

基金项目: 广东省住房和城乡建设厅研究开发项目(020-K27-303295、020-K32-223713)

第一作者: 罗凡(1987—), 女, 博士, 高级工程师, 89491193@qq.com ✉通信作者: 于翔(1988—), 女, 硕士研究生, 工程师, 690544773@qq.com

## 1 现场调研

### 1.1 污水厂概况

敏感地区某污水厂采用改良 AAO 串联三级深度处理工艺。该厂设计规模  $6 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ ，生化池设计水力停留时间 (HRT) 为 16.8 h，其中预缺氧区、厌氧区、缺氧区、好氧区分别为 0.5 h、1.5 h、6.8 h、8.0 h。采用预缺氧区、厌氧区、缺氧区三点进水方式，内外两套回流系统分别为好氧池至缺氧池、二沉池至预缺氧池。设两个除磷加药点位：生化池的内回流回流渠，投加药剂为聚合氯化铝 (PAC)，该点投加量较少；三级深度单元，投加药剂为聚合氯化铝 (PAC) 和丙烯酰胺 (PAM)。

该厂生化池出水水质指标除 TP 外均已优于国家《城市污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002) 中的一级 A 标准，经深度处理后各项指标进一步降低，在所有指标均优于一级 A 标的同时，部分指标已达到或优于地方标准。由于该厂的深度处理单元采用物化方法，因此本次研究主要是针对生化单元进行仿真模拟以进一步提高系统脱氮和生物除磷效果，优化二沉池的出水水质，减少除磷药剂的投加量，降低深度处理的负担。

### 1.2 运行管理现状及问题

污水厂连续 12 个月进水水质如表 1 所示，可以看出，该厂进水水质水量波动大，且处理规模和污染物指标均低于设计值。

表 1 污水厂进水水质统计数据  
Table 1 Statistical data of influent quality

进水指标	COD/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\text{NH}_3\text{-N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	TN/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TP/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	水量/( $\times 10^4 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ )
设计值	350	30	40	6	6
最大	275.00	37.40	37.90	4.66	6.44
最小	75.00	9.29	13.80	0.59	1.96
平均	169	22.59	28.85	2.95	4.6
标准差	50.98	6.08	5.17	0.73	1.11

经现场调研和实时检测，得到如图 1 所示生化池污泥浓度 (MLSS) 及好氧池溶解氧 (DO) 的变化。可以看出，为了保障脱氮效果，生化单元 MLSS 控制在  $8\ 000 \sim 10\ 000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的范围内，经模型软件核算污泥龄 (SRT) 超过 40 d。生化池的微生物量过高，一方面不利于生物除磷进程，另一方面需要更多的曝气量来维持好氧池的污泥混合状态<sup>[8]</sup>，图 1 显示了好氧池 DO 普遍超过  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。高 DO 不仅造成了能耗的浪费，同时会随着回流混合液进入缺氧池，不利于反硝化生境，影响脱氮效果<sup>[9]</sup>。

## 2 工艺模拟

本研究采用的 BioWIN 商业软件以 ASM 为核心整合了国际现有的多种数学模型，包含了 50 多种组分和 80 多种物理化学生物反应<sup>[10-12]</sup>，能模拟整座污水处理厂的全部流程，追踪任意模型组分或状态变量在不同单元工艺中的变化<sup>[13]</sup>。此外，BioWIN 通过总结最新研究成果和实际污水处理厂测试，提供了比较符合实际的模型参数缺省值<sup>[3]</sup>。

基于该平台对污水厂生化处理单元进行模型的构建和矫正，具体步骤如下。

1) 根据污水厂实际工艺运行流程选择相应的工艺模块，由于实际池体为廊道式设计，具有明显推流式特

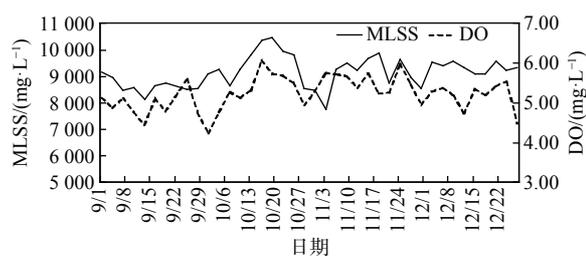


图 1 预缺氧区 MLSS 及好氧池 DO 的变化

Fig. 1 Variations of MLSS in the pre-anoxic zone and DO concentration in the aerobic tank

征, 不符合模型需要的完全混合的水力流态, 因此根据污水厂实际运行情况, 将缺氧区、好氧区分成了多个池体串联, 建立了改良 AAO 工艺仿真模型如图 2 所示。

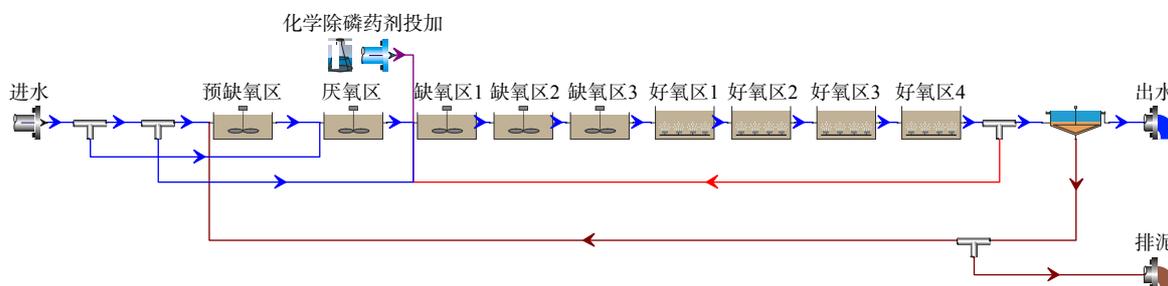


图 2 改良 AAO 工艺仿真模型

Fig. 2 Simulation model for the improved AAO process

2) 通过现场调研, 对污水厂连续一年运行现状进行分析, 得到该厂运行数据表 2 所示。其中, 由于两个除磷加药点的 PAC 投加量数据并未单独计量, 因此生化池内回流渠内 PAC 的投加量数据为估计值。

表 2 污水厂运行数据表

Table 2 Sewage plant operation data table

数据类型	进水水量/ (t·d <sup>-1</sup> )	好氧池 DO/ (mg·L <sup>-1</sup> )	多点进水比例/%			内回流比/ 外回流比/ %		生化池 MLSS/(mg·L <sup>-1</sup> )				PAC 投加量 (g·t <sup>-1</sup> )
			厌氧区	缺氧 I 区	缺氧 II 区	%	%	预缺氧区	厌氧区	缺氧 I 区	好氧区	
变化范围	1.96~6.44	4.23~6.07	0.08~0.53	0.25~0.68	0.12~0.27	183~223	89~119	7 741~ 10 463	7 105~ 9 441	4 710~ 5 765	4 321~ 5 599	—
均值	4.6	5.25	21	6.4	72.6	200	100	9 128	8 579	5 223	4 912	30

在初步建好的改良 AAO 工艺模型中, 输入相应工艺模块的构筑物容积及连续 12 个月的平均进水水质数据, 输入表 2 所示各项运行数据均值, 固定进水和运行条件以模拟实际工艺初始启动过程, 进行静态模拟。

3) 通过静态模拟进行敏感度分析, 确定影响权重较大的动力学参数和化学计量参数, 即显著性参数, 其余模型参数采用缺省值。模拟选用了模型中典型污水组分参数, 根据进水 NH<sub>3</sub>-N 和 TN 浓度修改了参数 Fna-氨含量(氨氮与总凯氏氮之比), 该参数缺省值为 0.66 g·g<sup>-1</sup>, 修正值为 0.783 g·g<sup>-1</sup>。通过实际运行情况和模拟模型结果进行对比分析, 确定其余各项参数均采用缺省值。最终模型模拟结果见表 3。

从表中可以看出, 基于污水模拟软件建立的工艺模型的模拟结果和实际运行结果的拟合度较高<sup>[14]</sup>。出水 COD、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP 的相对误差分别为 8%、43.33%、0.54%、8.86%; 出水 COD、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP 的绝对误差分别为 1.6、0.13、0.05 和 0.07 mg·L<sup>-1</sup>。NH<sub>3</sub>-N 的相对误差较大, 这是由于其出水指标数值较低, 即使绝对误差较小(仅为 0.13 mg·L<sup>-1</sup>)。其他指标的绝对误差较小, 同时相对误差在合理范围内(低于 10%)。由上述分析结果可知, 该模型能够较好的体现该污水处理厂改良 AAO 工艺的工艺流程及处理效果, 后续能够基于模型开展相关工艺优化研究<sup>[14]</sup>。

表 3 稳态模拟结果

Table 3 Steady-state simulation results

	mg·L <sup>-1</sup>			
出水水质	COD	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP
实际进水	169	22.59	28.85	2.95
生化池实际出水	20	0.3	9.32	0.79
模拟出水	18.4	0.43	9.27	0.72
绝对误差	1.6	0.13	0.05	0.07
相对误差	8.00%	43.33%	0.54%	8.86%
一级 A	50	5	15	0.5
地方标准	20	1.0	5	0.05

### 3 强化脱氮除磷的模拟优化研究

针对前述现场调研发现的运行问题,在满负荷条件下,从污泥浓度 (MLSS)、内回流比 (混合液回流)、外回流比 (污泥回流)、好氧池 DO 这 4 个控制参数进行优化。

#### 3.1 污泥浓度 (MLSS) 对污染物去除效果的影响

污泥浓度是指曝气池出口端混合液悬浮固体的含量,用来计量曝气池中活性污泥数量。而污泥龄 (SRT) 与污泥浓度密切相关,在进水 SS 一定的情况下,污泥浓度 (MLSS) 与 SRT 为正比关系。污泥龄决定活性污泥中微生物的种类,世代时间长于污泥龄的微生物在污泥中不能成为优势菌种。在活性污泥系统中,硝化菌的世代周期较长,SRT 越长,系统的脱氮效果越好;而生物除磷主要通过排放富磷剩余污泥来实现的,过长的 SRT 意味着系统排泥量的减少,不利于磷的去除。在实际运行中,MLSS 指标相较于 SRT 更为直观,因此,为达到最优的脱氮除磷效果,需在特定进水条件下优化生化池的 MLSS。

在现状工艺运行的条件下,基于模型模拟预缺氧区 MLSS 在 2 000~8 000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  范围内变化时工艺的出水水质,模拟结果见图 3、图 4。

由图 3 可见,随着 MLSS 的升高,COD、TP 去除率降低,TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$  去除率升高。其中 COD 的去除率始终在 94% 以上且变化较小,TN 去除率略有提升,TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$  的去除率变化较大。

由图 4 可知,当 MLSS 由 2 000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  升高至 8 000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,出水 TN 浓度由 9.83  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  下降至 9.27  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,当 MLSS 由 6 000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  升高至 8 000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的变化过程中,出水 TN 浓度下降速度开始变缓。同时,随着 MLSS 的升高,出水  $\text{NH}_3\text{-N}$  不断降低,当 MLSS 由 2 000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  升高至 4 000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右时,出水  $\text{NH}_3\text{-N}$  由 1.52  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  降至 0.5  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,变化幅度较大,当 MLSS 大于 4 000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, $\text{NH}_3\text{-N}$  的下降趋势变缓。其原因是随着系统 MLSS 的增加,世代周期长的硝化菌数量会相应增多,而 MLSS 增大到一定程度后,反硝化作用受生化池体积、碳源不足等因素的限制,TN 的去除效果难以进一步提高。

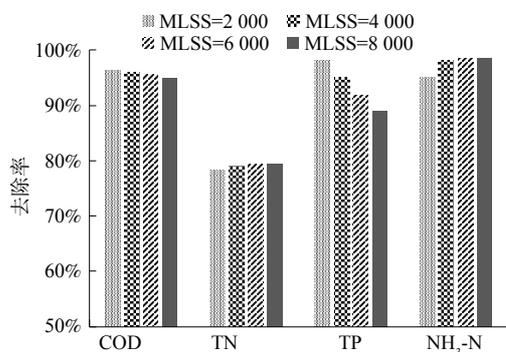


图 3 MLSS 对各出水水质指标去除率的影响

Fig. 3 Effect of MLSS on the removal efficiency of various effluent quality indicators

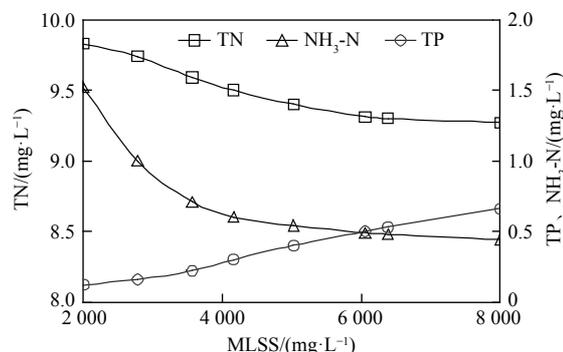


图 4 MLSS 对出水水质指标浓度的影响

Fig. 4 Effect of MLSS on the concentration of effluent quality indicators

另外,整个过程中出水 TP 浓度由 0.12  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  稳定上升至 0.72  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,MLSS 的变化对 TP 的去除影响明显。其原因硝化菌和聚磷菌之间存在碳源竞争,当 MLSS 升高时,优势菌会变成世代周期长的硝化菌,聚磷菌成为弱势菌种,系统除磷效率降低<sup>[15]</sup>。另外高 MLSS 也意味着排泥量减少,含磷污泥的排放量也随之降低;同时,高 MLSS 会导致二沉池中的污泥含量变高,可利用有机物的缺乏及低 DO 容易引起释磷现象的发生<sup>[15]</sup>,降低除磷效率。

由以上分析可知,当 MLSS 低于 4 000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, $\text{NH}_3\text{-N}$  去除效果不佳,而当 MLSS 升高至 6 000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右时,继续升高 MLSS 对氮素的去除意义不大,同时导致除磷效果明显下降,因此预缺氧区 MLSS 应维持在 4 000~6 000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

#### 3.2 内外回流比对污染物去除效果的影响

内回流即硝化液回流,过低会导致缺氧池的硝酸盐浓度不足,反硝化作用受到抑制,导致出水 TN 浓度上升;而当内回流比偏大时,大量回流液中携带溶解氧会改变缺氧池中的反硝化生境,抑制反硝化作用,大

幅降低 TN 去除率。外回流即污泥回流, 通过将二沉池的浓缩污泥回流至与缺氧池, 继而保证生化池各池体中有足够量的微生物, 能够维持活性污泥工艺处理效果的持续稳定。若生化池污泥浓度过低, 各类微生物含量过少, 大大影响污染物的去除效率。此外, 过高的内外回流比会增加回流泵的耗电量, 因此, 回流比的优化也是系统的节能减排重要措施。

在改良 AAO 现状工艺的条件下, 调节内回流比范围为 20%~300%, 调节外回流比范围为 20%~200%, 得到模拟结果如图 5 所示, 由于出水 COD 的变化较小且始终优于一级 A 标, 因此后续不对 COD 的变化进行分析。

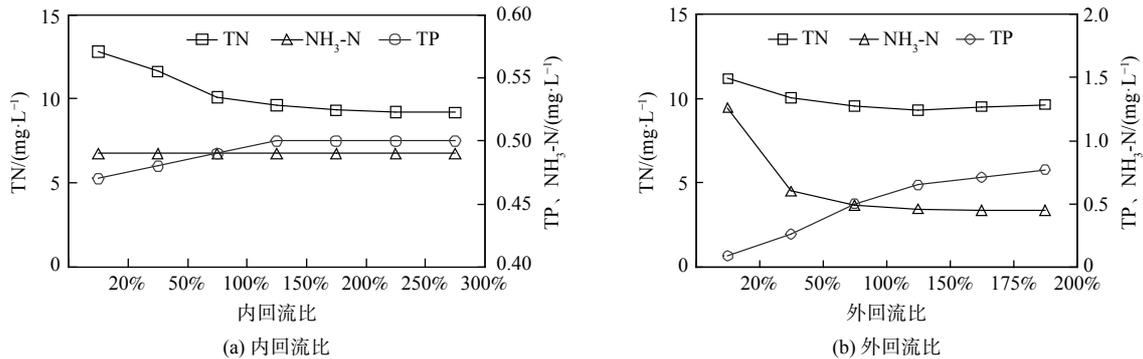


图 5 内外回流比对出水水质指标浓度的影响

Fig. 5 Effect of internal and external recycle ratios on effluent quality

如图 5 所示, 出水 TN 浓度随着内回流比的上升呈现逐渐下降的趋势, 从  $12.81 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  下降至  $9.17 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。其中内回流比由 20% 逐渐上升为 200% 的进程中, TN 下降幅度较大, 而内回流比大于 200% 时, TN 的变化幅度变缓, 其原因是废水中有限的碳源不能完全满足大量回流液中硝酸盐的反硝化需求。另外, 当内回流比从 20% 上升至 300% 时, 出水  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度一直在  $0.49 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右, 并未呈现出明显的变化, 表明内回流比对出水  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度影响很小。此外, 内回流比对出水 TP 的影响也有限, 出水 TP 浓度由  $0.47 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  增大至  $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 主要是由于从好氧池流出的消化液较多时, 好氧池聚磷菌的生长会受到抑制, 从而引起吸磷量逐渐降低。

图 5 外回流比对水质的影响曲线图显示, TN 的出水浓度随着外回流比增大稳定降低, 而当外回流比上升至 150%, TN 出水浓度降至  $9.31 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 之后, 随着外回流比的继续升高, 出水 TN 基本维持不变; 同样, 出水  $\text{NH}_3\text{-N}$  也随着外回流比增大而降低, 且降幅呈先大后小的趋势, 当外回流比由 20% 增大到 150% 时,  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度从  $1.26 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  下降至  $0.46 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 之后,  $\text{NH}_3\text{-N}$  出水浓度的下降幅度基本维持不变。其原因是大量污泥回流液带来的异氧菌会抑制硝化菌的生长, 从而限制硝化作用。另外, 随着外回流比的增加, 出水 TP 浓度从  $0.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  上升至  $0.77 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 这是因为随着外回流比不断增加, 好氧池中大幅增加的聚磷菌和异氧菌对 DO 的大量消耗 DO 降低, 不利于聚磷菌对磷的吸收。另外, 大量聚磷菌吸收的磷累积在二沉池污泥中, 当外回流比增大时, 剩余污泥不能得到及时排放, 导致回流污泥中的含磷量不断增加, 引起出水 TP 浓度的上升<sup>[11]</sup>。

### 3.3 不同 MLSS 条件下 DO 对出水水质的影响分析

基于以上分析, 污水厂实际运行的内回流比保持在 200% 左右, 外回流比调高至 150%, 预缺氧区 MLSS 在  $4\ 000\sim 6\ 000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右时出水水质最优, 因此, 在现状工艺的条件下, 设定 MLSS 的调节范围为  $4\ 000\sim 6\ 000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , DO 的调节范围为  $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\sim 5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 基于模型得到模拟结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出, 不同 MLSS 时, 各出水指标随 DO 的变化趋势基本相同。出水 TN 呈现先快速降低然后缓慢上升的趋势, 出水  $\text{NH}_3\text{-N}$  呈现先快速降低然后缓慢降低的趋势。主要由于氧是生物硝化作用中的电子受体, 硝化细菌在将  $\text{NH}_3\text{-N}$  转化成硝酸盐的过程中是一个耗氧的过程, 所以 DO 越高, 出水  $\text{NH}_3\text{-N}$  越低, TN 随之降低。当 DO 浓度过高时, 内回流液携带了大量的 DO 回流至缺氧池, 抑制了反硝化作用, 不利于 TN 的去除。同时, 生化池中的碳源有限, 硝化作用进程受阻, 出水  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度的降幅会越来越小, 此时需要更大的曝气量提升好氧池的 DO, 造成能源的浪费。因此过高和过低的 DO 都不利于 TN 的去除。

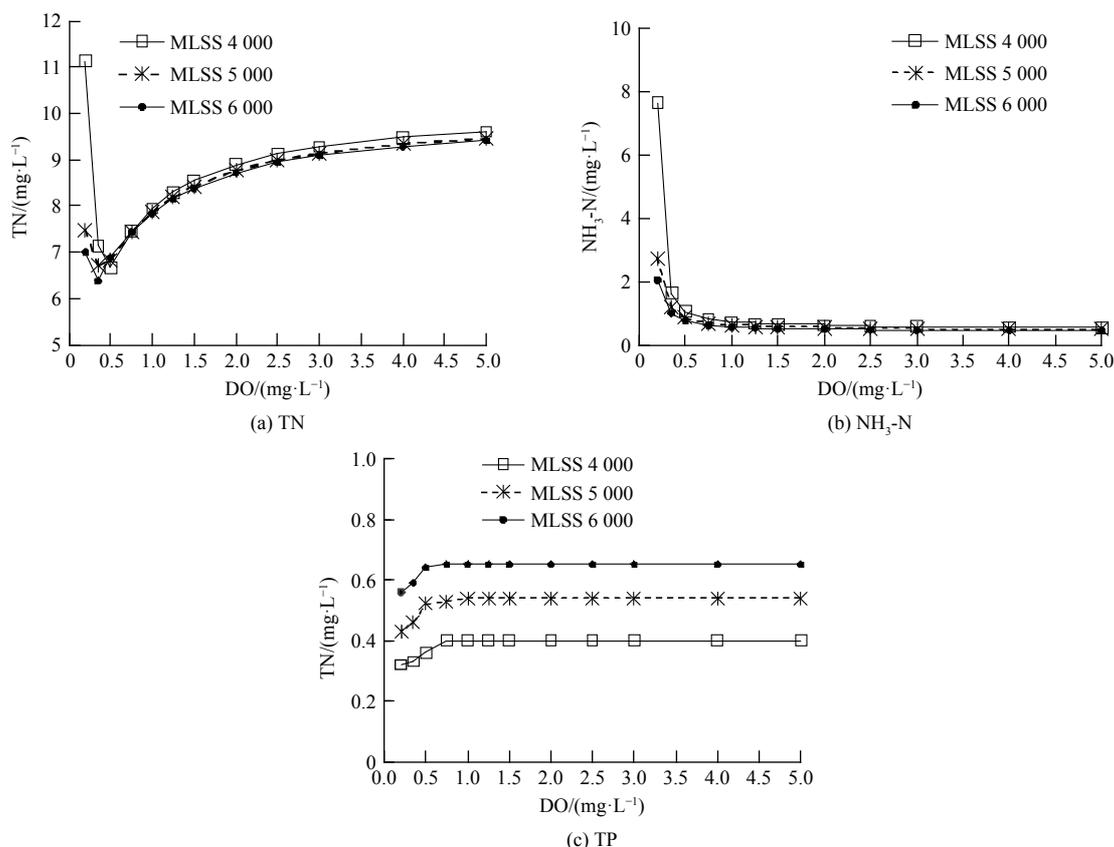


图 6 不同 MLSS 条件下 DO 对出水水质的影响

Fig. 6 Effect of DO on effluent quality at varying MLSS concentrations

TN 曲线图显示，当  $DO > 0.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时，3 条曲线几乎重合，此时 MLSS 的变化对出水 TN 的影响忽略不计；当  $DO < 0.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时，MLSS 越高出水 TN 越低。

$\text{NH}_3\text{-N}$  曲线图显示，当  $DO > 1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时，3 条曲线几乎重合，且此时出水  $\text{NH}_3\text{-N}$  变化趋于稳定，此时升高 DO 值对  $\text{NH}_3\text{-N}$  的去除影响不大，同时会大幅提高能源消耗；当  $DO < 1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时，MLSS 越高出水  $\text{NH}_3\text{-N}$  越低。

TP 曲线图显示， $DO < 1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时，出水 TP 随着 DO 的升高明显增加，这是由于高 DO 环境能促进硝化菌的生长，同时抑制聚磷菌的繁殖，继而降低聚磷菌对磷的吸收，导致出水 TP 浓度上升。 $DO > 1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时，出水 TP 浓度不再随着 DO 的增加而变化，MLSS 为 4 000、5 000、6 000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时出水 TP 浓度分别为 0.4、0.54、0.65  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

#### 4 优化结果

根据模型模拟分析，污水厂优化策略应为：内回流比保持在 200% 左右，外回流比调高至 150%，增大排泥量以降低 MLSS 至 4 000~6 000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，好氧池 DO 值降低至 0.8~1.5  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。根据实际运行情况确定优化后的运行参数为：内回流比为 200%、外回流比为 150%、好氧池 DO 为 1  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、MLSS 控制在 5 000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。得到模拟优化结果如下表 4 所示。

表 4 最终优化结果

Table 4 Final results of the optimization process

水质指标	模拟优化出水/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	优化前去除率/%	优化后去除率/%
COD	17.44	88.17	89.68
$\text{NH}_3\text{-N}$	0.54	98.67	97.61
TN	7.86	67.69	72.76
TP	0.54	73.22	81.69

由模拟优化结果可知：优化前后 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$  去除率变化较小，均优于地方标准；TN、TP 去除率分别增加了 5.06%、8.47%；优化后生化段 TN 出水可降至 8  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下，出水 TP 去除率有明显升高，为后

续深度处理减轻了负担。此外由于优化后好氧池 DO 大幅降低,好氧池曝气量减少了 64%。

根据以上优化策略调整污水厂实际生产线运行参数,得到优化运行后连续一个季度的出水 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP 浓度变化箱线图如图 7 所示,除磷药剂投加量变化如图 8 所示。

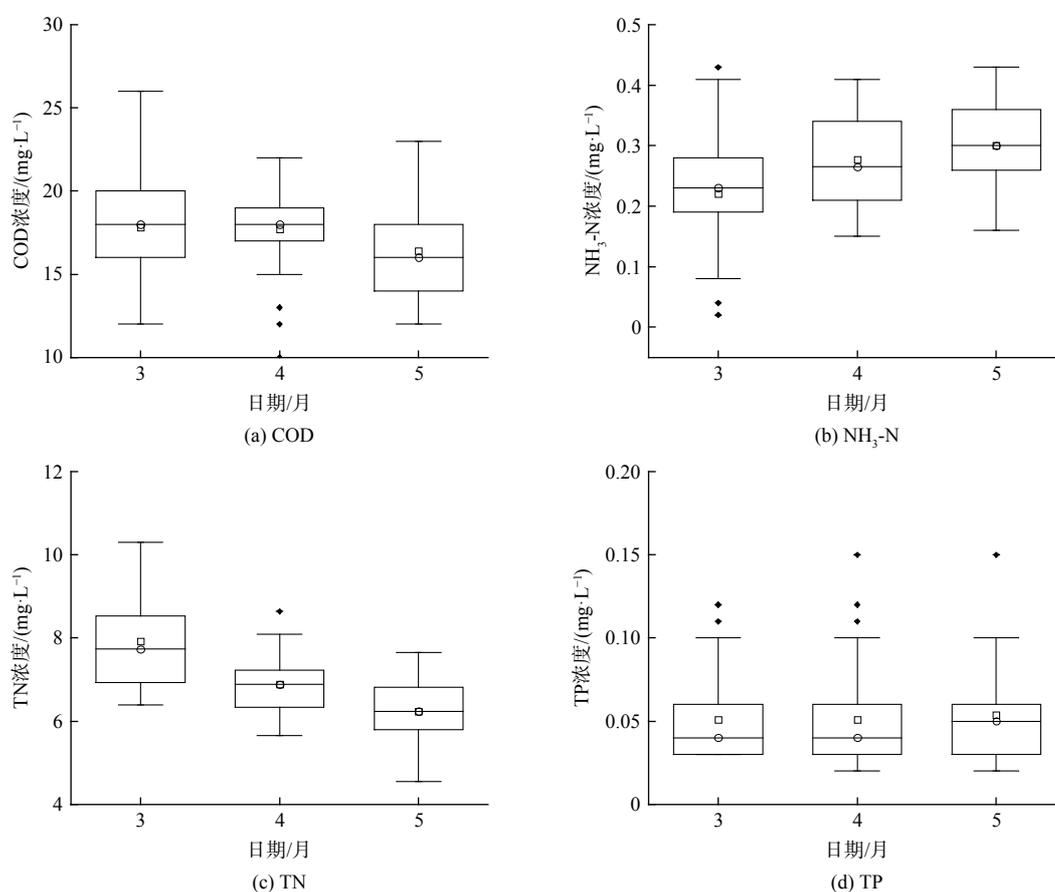


图 7 优化运行后出水水质箱线图

Fig. 7 Box plot of effluent quality after optimized operation

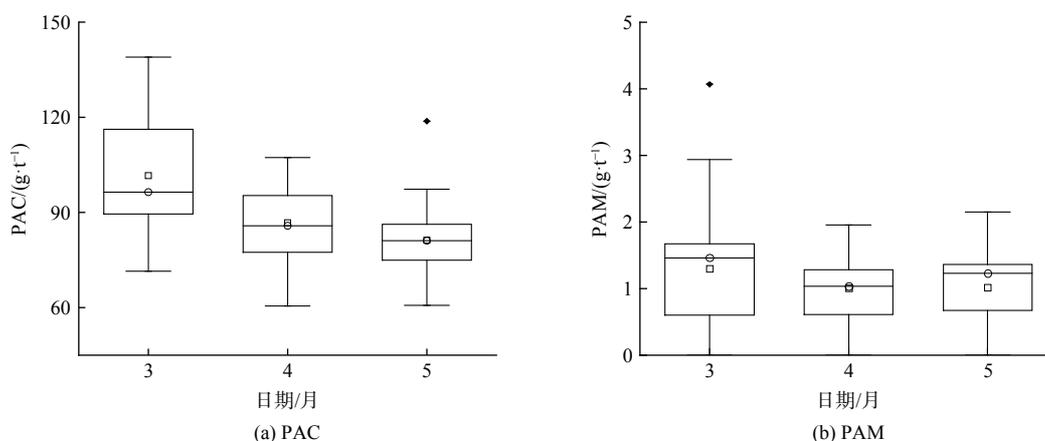


图 8 优化运行后除磷药剂投加量箱线图

Fig. 8 Box plot of phosphorus removal agent dosage after optimized operation

图 7 所示为该厂三级处理后的出水,由图可知:优化运行后全厂出水 COD、TN 均有明显下降, COD 月均值从  $17.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右降至  $16.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,降幅 7.8%, TN 月均值从  $8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右下降至

6.2 mg·L<sup>-1</sup>左右,降幅 22.5%;出水 NH<sub>3</sub>-N 有小幅上升,且一直稳定在 0.5 mg·L<sup>-1</sup>以下;出水 TP 基本稳定了 0.05 mg·L<sup>-1</sup>左右,变化幅度很小。

由图 8 可知,出水 TP 基本稳定的情况下,PAC 及 PAM 的投加量有明显下降趋势,其中 PAC 月均值从 101.6 g·t<sup>-1</sup>降至 81.2 g·t<sup>-1</sup>,降幅 20%,PAC 月均值从 1.13 g·t<sup>-1</sup>下降至 1 g·t<sup>-1</sup>,降幅 11.5%。

由于本工艺的设计水力停留时间较长,各区分配较为科学,因而从 DO 和 MLSS 等影响因素的变化对 TN 和 NH<sub>3</sub>-N 的影响较小,为进一步降低 TN、TP 以达到地方标准,后续有待对投加碳源和多点进水进行研究分析。

## 5 结论

本研究利用污水处理模型商业软件,完成了敏感地区某城市污水厂的改良 AAO 工艺模型系统的构建、校核和优化,经验证,模型的模拟结果与实际运行数据拟合度较高。在该模型的基础上,考察改良 AAO 在满负荷和设计水质条件下的运行情况,优化好氧池 DO、污泥浓度、内回流比、外回流比及多点进水分配等参数对出水水质的影响,得到了如下结论。

1) 基于现状模型,在更严格的地方标准考核要求下,出水指标中 COD、NH<sub>3</sub>-N 达到出水标准,TN、TP 未达到出水标准;

2) 模型模拟结果可知:现状运行的 MLSS 过高,对脱氮增效贡献不大且影响生物除磷效率;增大排泥量以降低 MLSS,在此基础上为维持系统的反硝化生境,好氧池 DO 也应降低;现状运行的内回流比在合理范围内,外回流比应适当升高,以提高 TN 的去除。

3) 优化后的运行参数为:内回流比 200%、外回流比 150%、好氧池 DO 1 mg·L<sup>-1</sup>、MLSS 控制在 5 000 mg·L<sup>-1</sup>左右。

4) 基于优化方案运行后,污水厂实际出水 COD、TN 浓度分别降低了 7.8% 和 22.5%,除磷药剂 PAC 及 PAM 的投加量分别下降了 20% 和 11.5%。

由于本工艺的设计水力停留时间较长,各区分配较为科学,因而从 DO 和 MLSS 等影响因素的变化对 TN 和 NH<sub>3</sub>-N 的影响不大,为进一步降低 TN、TP 以达到地方标准,后续有待对投加碳源和多点进水进行研究分析。

## 参考文献

- [1] 蔡木林,卢延娜,刘琰.城镇污水处理厂出水排放限值分级及提标成本研究[J].环境科学研究,2021,34(7):7.
- [2] 昆明市市场监督管理局.城镇污水处理厂主要水污染物排放限值:DB5301/T 43-2020[S].昆明:昆明市市场监督管理局,2020.
- [3] 沈童刚,邱勇,应启锋,等.污水处理厂模拟软件 BioWIN 的应用[J].给水排水,2009,45(S1):459-462.
- [4] 张行.基于 BioWin 的污水厂运行优化及达标改造技术研究[D].北京:北京建筑大学,2017.
- [5] OMAR A R, MOHAMED F H. Modelling of a wastewater treatment plant for process reliability and effluent reuse[J]. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2024, 19(2): 111-119.
- [6] 李天宇,高辉,王飞,等.生物建模在污水处理厂问题诊断与运行优化中的应用[J].环境工程学报,2021,15(10):3443-3454.
- [7] 柳蒙蒙,陈梅雪,齐嵘,等.面向寒冷地区城镇污水处理厂提标改造的 ASM 模拟优化及其应用[J].环境工程学报,2020,14(4):1119-1128.
- [8] 万太寅,蒋侠.市政污水处理厂 A<sup>2</sup>/O 工艺中高低污泥浓度与除磷脱氮效果的研究[J].环境与发展,2018,30(9):3.
- [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):4.
- [10] 张琛玥.基于 Biowin 模拟的 AAO-MBR 工艺运行优化研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [11] 何春求,周少奇.改良 A<sup>2</sup>/O-MBR 工艺仿真模拟及运行优化[J].中国给水排水,2022,38(15):8.
- [12] 沈烁,李海峰,康晓蕾. BioWin 污水处理模型对多级 AO 脱氮的模拟与应用[J].山东化工,2022(51):226-231.
- [13] 周传庭,唐建国,王寅.改良 A<sup>2</sup>O+MBBR 为主体的污水厂工艺设计及运行[J].中国给水排水,2021,37(6):76-80.
- [14] 罗凡,李捷.基于仿真模拟的污水处理厂提标改造方案[J].净水技术,2018,37(5):5.
- [15] 张艳.基于 ASM2D 模型对改良 A<sup>2</sup>/O 工艺的模拟与优化[D].广州:广东工业大学,2018.

(责任编辑:金曙光)

## Simulation and application of process optimization for urban wastewater treatment plants in environmentally sensitive area

LUO Fan<sup>1</sup>, YU Xiang<sup>1,\*</sup>, LI Hao<sup>1</sup>, XU Hao<sup>1</sup>, LI Jie<sup>2</sup>

1. Guangzhou Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510060, China; 2. Guangdong Shouhui Lantian Engineering Technology Co., Ltd., Guangzhou 510655, China

\*Corresponding author, E-mail:[690544773@qq.com](mailto:690544773@qq.com)

**Abstract** This study focused on the challenges faced by municipal wastewater treatment plants in sensitive areas to meet stringent effluent discharge standards. Site investigations revealed that the existing process suffered from problems such as excessively high MLSS, aeration rate, DO and low external recycle ratio. An improved AAO process model for the plant was constructed using wastewater treatment simulation software. After calibration and verification, the effects of different process parameters on effluent quality were investigated. The results showed that increasing the sludge discharge rate to reduce the MLSS in the biological tank to about  $5000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , simultaneously reducing the aeration rate to control DO to  $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , and appropriately increasing the external recycle ratio were effective measures. After implementing the optimized scheme, the actual effluent COD and TN concentrations at the WWTP decreased by 7.8% and 22.5%, respectively, while the dosages of PAC and PAM for phosphorus removal decreased by 20% and 11.5%, respectively.

**Keywords** improved AAO process; process simulation; nitrogen and phosphorus removal; optimized operation; energy conservation and consumption reduction