

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.19.010

# 基于仿真模拟的污水厂工艺优化及运行管理

匡科<sup>1</sup>, 常颖<sup>1</sup>, 孙伟<sup>1</sup>, 刘宝建<sup>1</sup>, 王广华<sup>2</sup>

(1. 广州市净水有限公司, 广东 广州 510163; 2. 广州市市政工程设计研究总院有限公司, 广东 广州 510060)

**摘要:** 基于活性污泥工艺模拟软件建立了某污水厂旱季和雨季时多级AO(多点进水)工艺的数学模型,经校核率定后优化了MLSS、进水比例和好氧池DO等运行参数,形成了旱季和雨季最佳的运行策略,使出水水质进一步提升,且降低了曝气和药剂投加的运营成本,达到了节能降耗的目标。结果表明,旱季和雨季生化池MLSS应分别控制在3.5~4和3~3.5 g/L范围内的较低水平;适当增加缺氧I区的进水比例;在保证不出现亚硝酸盐积累的情况下,尽量降低两个好氧区DO,且优先考虑调整好氧I区的DO。优化后,旱季出水氨氮、TN分别从0.10和8.03 mg/L降至0.06和7.24 mg/L,曝气量和硫酸铝药剂投加量分别减少14.3%和6.25%;雨季出水氨氮和TN分别从0.12和7.50 mg/L降低至0.06和6.77 mg/L,曝气量减少8.94%。

**关键词:** 污水厂; 工艺仿真; 节能减排; 运行优化; 季节性

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)19-0069-06

## Process Optimization and Operation Management of Wastewater Treatment Plant Based on Numerical Simulation

KUANG Ke<sup>1</sup>, CHANG Ying<sup>1</sup>, SUN Wei<sup>1</sup>, LIU Bao-jian<sup>1</sup>, WANG Guang-hua<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Sewage Purification Co. Ltd., Guangzhou 510163, China; 2. Guangzhou Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Guangzhou 510060, China)

**Abstract:** The mathematical model of multi-stage AO process (multi-point influent) of a wastewater treatment plant in the dry season and rainy season was established via activated sludge process simulation software. After calibration and verification, the operational parameters such as MLSS, proportion of the influent and DO of the aerobic tank were optimized, and the optimal operation strategy was formed in the dry season and rainy season, which further improved the effluent quality, reduced the operating costs of aeration consumption and chemical dosage, and achieved the goal of energy saving and consumption reduction. The MLSS of the biochemical tank should be controlled in the range of 3.5-4 g/L and 3-3.5 g/L in dry season and rainy season, respectively. The proportion of the influent introducing into the anoxic zone I should be increased appropriately. In addition, the DO of the two aerobic tanks should be reduced as much as possible while ensured that there was no accumulation of nitrite, and priority should be given to adjusting the DO of the aerobic zone I. After optimization in dry season, the effluent ammonia nitrogen and TN decreased from 0.10 mg/L and 8.03 mg/L to 0.06 mg/L and 7.24 mg/L, respectively, and the aeration intensity and aluminum sulfate dosage decreased by 14.3% and 6.25%,

通信作者: 王广华 E-mail: wanggh@gzmedri.com

respectively. In rainy season, the effluent ammonia nitrogen and TN decreased from 0.12 mg/L and 7.50 mg/L to 0.06 mg/L and 6.77 mg/L, respectively, and the aeration intensity decreased by 8.94%.

**Key words:** wastewater treatment plant; process simulation; energy conservation and emissions reduction; operation optimization; seasonality

目前,我国污水厂多采用中试或经验调试的传统方法来优化工艺参数,存在费用高、耗时长等问题,而近二十年来计算机仿真技术在国外城市污水处理工艺参数调试中得到了广泛应用:Elawwad等<sup>[1]</sup>利用活性污泥3号模型模拟干旱城市工业混合进水污水处理厂的工艺,很好地预测了所研究污水处理厂的运行性能;Ubay-Cokgor等<sup>[2]</sup>运用基于生物处理过程模型编制的BIOWIN软件对污水厂的运行进行模拟,并提出了有效的提标改造方案。该技术可利用成熟的反应机理数学模型,并结合实时获得的运行参数,通过计算机仿真建立污水处理系统,短时间内提高污水系统运行、处理的科学性和准确性<sup>[3]</sup>。

针对广州某污水厂运行工艺,笔者应用模拟软件就其主体工艺建立模型,并结合进水水质水量的季节性变化和运行数据对模型参数进行率定。在此基础上,对工艺运行参数进行优化,提出了最佳运行方案,以实现污水厂的节能减排。

## 1 污水厂概况

广州某污水厂采用多级AO(多点进水)工艺,其中好氧段采用精准曝气以精细化控制多个点位的溶解氧含量。其出水水质优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准和《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)V类水标准中的较严者。2021年进水水量和水质的变化如图1所示。

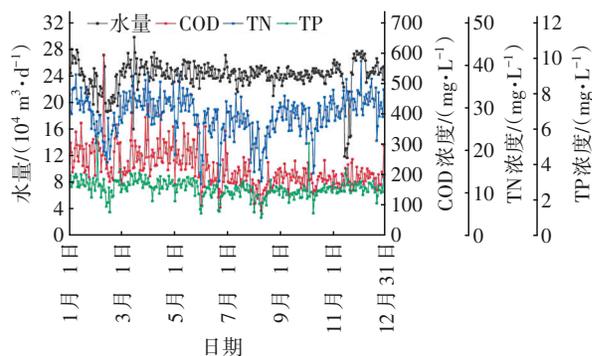


图1 2021年进水水量和水质的变化

Fig.1 Change of water quantity and quality in 2021

从图1可知,雨季(6月—10月)时,处理水量稳

定,且进水水质的污染物浓度较旱季(1月—5月、11月—12月)低,旱季、雨季具有较为明显的区别,后续进行模拟时需根据雨季和旱季特征对工艺运行参数进行明确划分。

## 2 模型的建立

采用BIOWIN软件建立污水厂生化处理单元和深度处理单元仿真系统。模型设置了厌氧区、缺氧I区、缺氧II区三点进水模式,根据好氧区DO监测情况,将生化单元中的好氧I区和好氧II区分成了3个池体串联,并配置了多点进水和除磷药剂投加系统;内回流模式为好氧II区回流到缺氧I区,外回流模式为二沉池回流到厌氧区。具体工艺流程如图2所示。

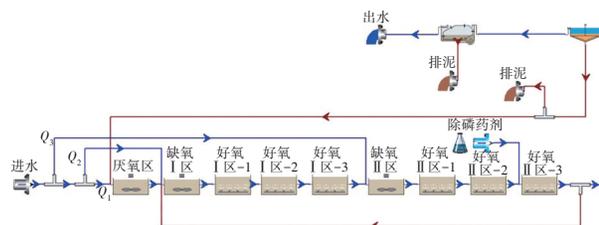


图2 污水厂工艺流程

Fig.2 Process flow of wastewater treatment plant

该厂旱季运行规模为 $23.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,进水比 $Q_1:Q_2:Q_3=47:30:23$ ,好氧区MLSS为 $4\ 119 \text{ mg/L}$ ,好氧I区1~3及好氧II区1~3的DO浓度分别为0.72、1.13、0.88、1.16、2.12、2.55 mg/L;雨季运行规模为 $24.11 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,进水比 $Q_1:Q_2:Q_3=48:30:22$ ,好氧区MLSS为 $3\ 106 \text{ mg/L}$ ,好氧I区1~3及好氧II区1~3的DO浓度分别为0.64、1.19、0.74、1.15、1.81、1.85 mg/L。

在建好的工艺模型中,输入该厂的进水水质、水量和工艺实际运行参数后,进行稳态模拟,根据模拟值与实际值的比较对模型进行校核和率定,模拟结果见表1。可以看出,基于软件建立的工艺模型的模拟结果与实际运行结果有较好的拟合度。分别针对旱季和雨季不同的进水水质条件和运行参数进行模拟,各个指标出水的绝对误差最大为

BOD<sub>5</sub>(0.43 mg/L),最小为TP和SS(均为0.01 mg/L),TN和氨氮的绝对误差均在0.1 mg/L以内,所有指标均在合理范围内。可见,该仿真模型能很好地体现污水厂的工艺过程及处理效果,拟合效果良好,能够进行后续工艺仿真优化研究。

表1 稳态模拟结果

Tab.1 Steady-state simulation results

		mg·L <sup>-1</sup>					
项目		COD	氨氮	TN	TP	SS	BOD <sub>5</sub>
旱季	实际进水	236.07	26.18	30.96	2.85	123.75	128.80
	实际出水	9.04	0.18	8.10	0.11	2.07	1.22
	模拟出水	9.19	0.10	8.03	0.12	2.04	1.54
	绝对误差	0.15	0.08	0.07	0.01	0.03	0.32
雨季	实际进水	182.12	21.80	26.33	2.43	95.82	96.62
	实际出水	8.66	0.15	7.48	0.14	1.83	1.13
	模拟出水	8.70	0.12	7.50	0.15	1.82	1.56
	绝对误差	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.43

### 3 工艺仿真优化分析

#### 3.1 污泥浓度

污泥浓度(MLSS)与污泥龄(SRT)密切相关,而SRT的设置决定活性污泥中微生物的种类,对整个处理系统脱氮除磷的竞争影响较大<sup>[4]</sup>。SRT常用计算公式为: $SRT=MLSS \times \text{曝气池有效容积} / (24 \times \text{每小时排泥体积} \times \text{排泥浓度})$ <sup>[5]</sup>。式中,MLSS×曝气池有效容积为总泥量,24×每小时排泥体积×排泥浓度为日排泥量。可以看出,当日排泥量不变时,SRT与MLSS呈线性正相关。在实际运行中,相较于SRT,MLSS指标更为直观,因此在旱季和雨季控制生化池MLSS的基础上,考察其对出水水质的影响。

旱季和雨季时MLSS对出水水质的影响如图3所示。可以看出,不同水质指标在旱季和雨季时的变化趋势相近。随着MLSS的升高,COD和氨氮浓度随之下降,但COD受MLSS的影响不明显,而氨氮的变化较大;同时TN浓度随着MLSS的升高呈现先上升后缓慢下降的趋势。进一步对硝酸盐和亚硝酸盐进行分析,发现当MLSS降低到一定值时开始出现亚硝酸盐积累,表明过低的MLSS导致SRT较短。由于硝化细菌世代周期长,当SRT过短时,自养菌的排放速率接近于生长速率,导致累积率较低。硝化过程是由氨氧化细菌(AOB)和亚硝酸盐氧化细菌(NO<sub>2</sub>-B)两类微生物共同完成的,氨氮在AOB和NO<sub>2</sub>-B的作用下,转化为亚硝态氮,并进一步被氧

化为硝态氮。由于AOB的世代周期比NO<sub>2</sub>-B的世代周期短,因此当SRT降低时,会出现氨氮被氧化为亚硝酸盐并积累的现象;另外由于磷素主要是依靠排泥从系统中去除,所以随着MLSS的升高,出水TP浓度逐渐升高。

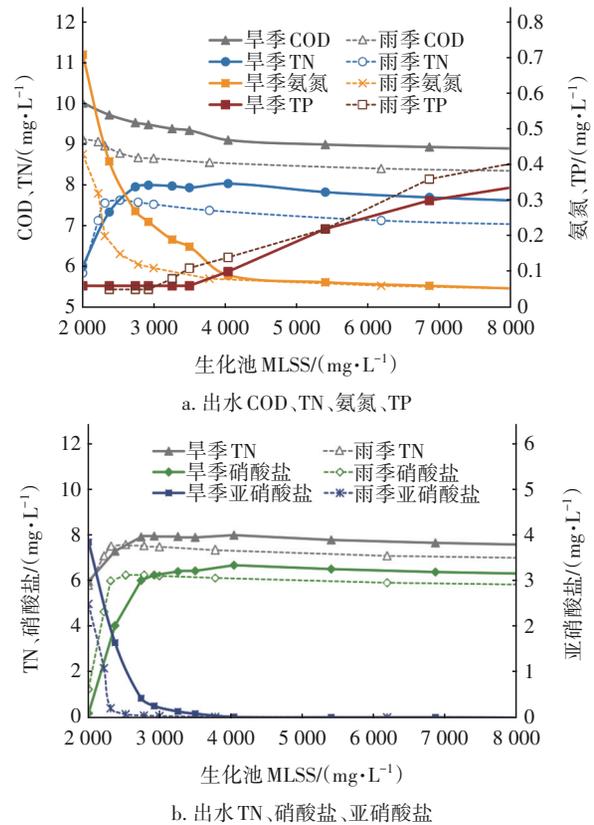


图3 旱季和雨季时MLSS对出水水质的影响

Fig.3 Effect of MLSS on effluent quality in dry and rainy seasons

旱季,当MLSS降低至3 000 mg/L时亚硝酸盐开始积累;而雨季,要降至2 500 mg/L。因此,为防止亚硝酸盐积累,同时尽量提高对TN的去除,旱季和雨季时生化池MLSS应分别控制在3 500~4 000和3 000~3 500 mg/L范围内。

#### 3.2 进水配比

多点进水可以充分利用原水中的碳源。缺氧区进水时,通过反硝化消耗大量可利用碳源,减少进入好氧区的碳源,提高对碳源的利用率;另一方面,消耗了污泥回流和硝化液回流所携带的剩余溶解氧,优化了脱氮除磷条件,从而提高处理效果<sup>[6]</sup>。首先考虑在固定厌氧区进水比例的基础上改变缺氧区的分配比例(见表2),考察其对出水水质的影响。

表2 旱季和雨季时各工况进水比例

Tab.2 Proportion of influent in each condition during dry and rainy seasons

项目	旱季进水比例			雨季进水比例		
	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$
现状	0.47	0.30	0.23	0.48	0.30	0.22
工况1	0.47	0.53	0.00	0.48	0.52	0.00
工况2	0.47	0.40	0.13	0.48	0.40	0.12
工况3	0.47	0.30	0.23	0.48	0.30	0.22
工况4	0.47	0.10	0.43	0.48	0.10	0.42
工况5	0.30	0.70	0.00	0.30	0.70	0.00
工况6	0.10	0.90	0.00	0.10	0.90	0.00

通过模型分析发现,缺氧 I 区和 II 区的进水配比对出水 TP、SS 和 BOD<sub>5</sub> 的影响较小,对 COD、氨氮和 TN 的影响如图 4 所示。可以看出,当  $Q_1$  不变时,随着  $Q_2$  的减少,出水 COD、TN 和氨氮浓度均增大,可见为了降低出水污染物浓度、提升水质,应增加  $Q_2$ ,即增大缺氧 I 区的进水比例。

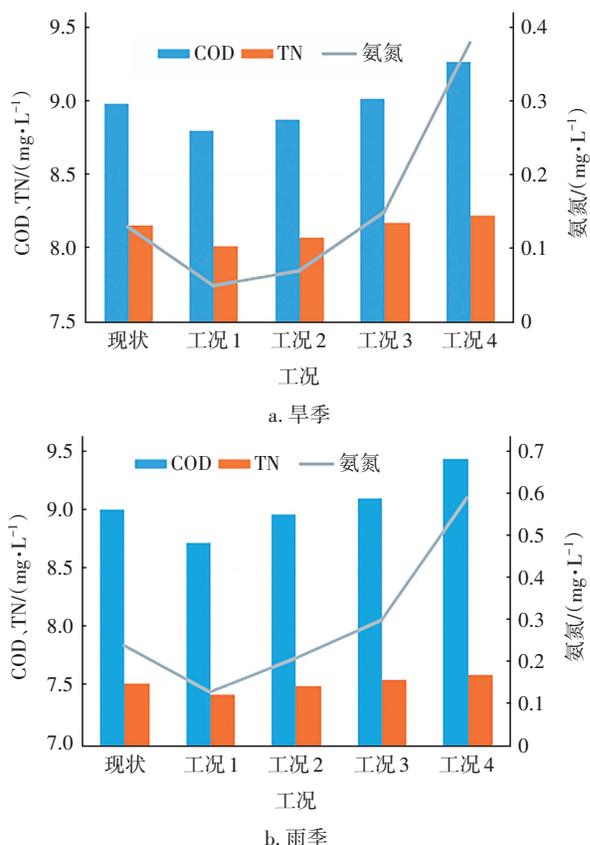


图4 旱季和雨季时缺氧 I 区与缺氧 II 区进水配比对出水水质的影响

Fig.4 Influence of influent ratio in anoxic zone I and anoxic zone II on effluent quality in dry and rainy seasons

在此基础上,保持缺氧 II 区进水量不变,调节厌氧区和缺氧 I 区的进水比例(见表 2 工况 1、5、6),结果表明该条件下对出水 COD、BOD<sub>5</sub>、SS、TP、氨氮的影响均较小,对雨季 TN 的影响较大。当厌氧区进水比例从 0.47 下降至 0.10 时,出水 TP 浓度基本没有变化,此时系统除磷主要依靠化学除磷,并辅以生物除磷。

旱季和雨季时厌氧区与缺氧 I 区进水配比对出水水质的影响如图 5 所示。可以看出,增大缺氧 I 区的进水比例同样有利于 TN 的去除,但会导致出水 COD 小幅增加。因此,为进一步提高 TN 去除率,可在保证 COD 达标的情况下适当增加缺氧 I 区的进水比例。同时为了满足聚磷菌对碳源的需求,厌氧区的进水比例不宜过低,综合模拟结果和相关文献发现<sup>[7]</sup>,厌氧区的进水比例以 0.3~0.4 为宜。

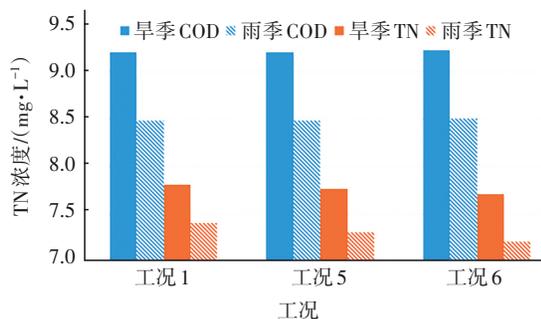


图5 旱季和雨季时厌氧区与缺氧 I 区进水配比对出水水质的影响

Fig.5 Influence of influent ratio in anaerobic zone and anoxic zone I on effluent quality in dry season and rainy season

### 3.3 好氧池 DO 浓度

DO 与出水水质的好坏有直接关系,同时也关系着运行成本。DO 供亚硝酸盐氧化菌和硝酸盐氧经菌将氨氮转化为硝酸盐,为缺氧池进行脱氮反应提供充足的原料。当 DO 达到一定浓度时,聚磷菌可充分吸收污水中的磷酸盐;另一方面,由于有混合液从好氧池回流至缺氧池,好氧池末端 DO 浓度会对缺氧池的反硝化进程产生影响<sup>[8]</sup>。通过以下两个步骤优化 DO:①采用正交试验确定 6 个布点 DO 与出水水质的相关性,得到 COD、氨氮、TN、亚硝酸盐的主效应图;②采用中心复合试验确定亚硝酸盐未发生积累时 DO 的取值范围,得到亚硝酸盐小于 0.27 mg/L(旱季)和 0.25 mg/L(雨季)的等值线图。

COD、氨氮、TN 和亚硝酸盐的主效应图如图 6

所示。其中好氧 I 三个池体编号为 1~3,好氧 II 三个池体编号为 4~6。可知,出水 COD 维持在 10 mg/L 以下,与池体 1~5 的 DO 呈负相关,与池体 6 的 DO 呈正相关。分析原因,微生物分解有机物需要消耗水中的 DO,高 DO 更有利于 COD 的去除,而池体 6 的位置连接二沉池,长时间过高的 DO 可能导致污泥被打散,部分细小颗粒上浮,进而引起二沉池进水悬浮物含量过高,从而引起出水 COD 升高。出水氨

氮与池体 1~6 中的 DO 均呈正相关,且维持在 0.5 mg/L 以下。出水 TN 与池体 1~6 中的 DO 均呈正相关,且池体 1~3 中的 DO 对出水 TN 的影响明显大于池体 4~6。此外,DO 的降低会引起亚硝酸盐的积累,且旱季的积累程度明显高于雨季。因此无论是旱季还是雨季,为进一步降低出水 TN,应在保证较低出水亚硝酸盐的情况下降低 DO 浓度,尤其是控制池体 1~3 的 DO 处在较低水平。

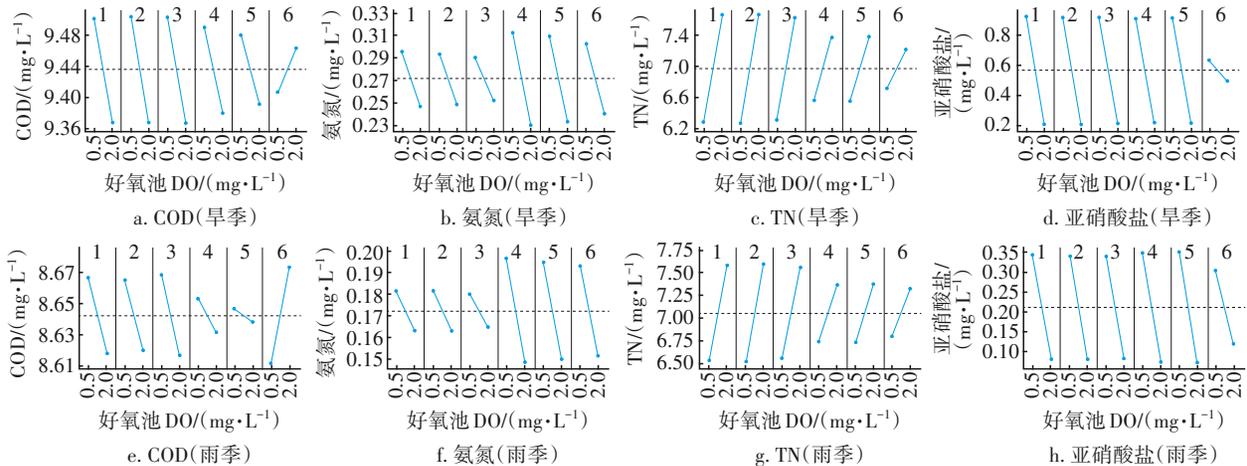


图6 COD、氨氮、TN和亚硝酸盐的主效应图

Fig.6 Main effect diagram of COD, ammonia nitrogen, TN and nitrite

旱季和雨季亚硝酸盐等值线图如图 7 所示(白色部分为满足亚硝酸盐旱季小于 0.27 mg/L、雨季小于 0.25 mg/L 的区域)。由图 7 可知,为不造成亚硝酸盐的积累,好氧 I (1~3)、好氧 II (4~6) 的 DO 应在白色区域内取值,而根据正交试验结果,需尽量保证好氧池的 DO 均在较低水平,因此建议在虚线附近取值,同时好氧 I 的 DO 取值应尽量小。综合以上分析,旱季好氧 I 的 DO 推荐值为 0.6~0.8 mg/L,好氧 II 中的 DO 推荐值为 1.1~1.3 mg/L;雨季好氧 I 中的 DO 推荐值为 0.5~0.7 mg/L,好氧 II 中的 DO 推荐值为 1.1~1.3 mg/L。

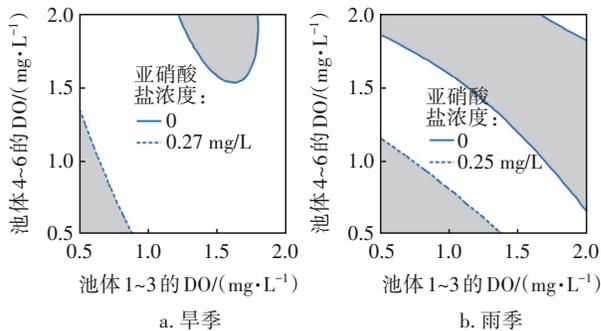


图7 旱季和雨季亚硝酸盐等值线图

Fig.7 Nitrite contour map in dry and rainy seasons

#### 4 优化结果

根据以上旱季和雨季最佳的运行方案,通过模型模拟得到优化结果,见表 3。可知,优化后,旱季出水氨氮和 TN 分别从 0.10 和 8.03 mg/L 降低至 0.06 和 7.24 mg/L,曝气量和硫酸铝药剂投加量分别减少 14.3% 和 6.25%;雨季出水氨氮和 TN 分别从 0.12 和 7.50 mg/L 降低至 0.06 和 6.77 mg/L,曝气量减少 8.94%。

表3 旱季和雨季优化结果

Tab.3 Optimization results of dry season and rainy season

项目	COD/ (mg·L <sup>-1</sup> )	氨氮/ (mg·L <sup>-1</sup> )	TN/ (mg·L <sup>-1</sup> )	TP/ (mg·L <sup>-1</sup> )	SS/ (mg·L <sup>-1</sup> )	BOD <sub>5</sub> / (mg·L <sup>-1</sup> )	生化池曝气量 变化率/%	除磷加药 量变化 率/%
旱季 现状模拟	9.19	0.10	8.03	0.11	2.04	1.54	—	—
旱季 优化结果	9.20	0.06	7.24	0.11	1.99	1.57	-14.3	-6.25
雨季 现状模拟	8.70	0.12	7.50	0.15	1.83	1.56	—	—
雨季 优化结果	8.54	0.06	6.77	0.14	1.81	1.46	-8.94	0

## 5 结论

① 旱季和雨季生化池 MLSS 应分别控制在 3 500~4 000 和 3 000~3 500 mg/L 范围内的较低水平;厌氧区的进水比例以 0.3~0.4 为宜,同时适当增加缺氧 I 区的进水比例;针对好氧两个区域多个点位的 DO,在保证较低出水亚硝酸盐的情况下尽量降低好氧池 DO 浓度,优先考虑调整好氧 I 区的 DO;旱季好氧 I、II 区 DO 推荐值分别为 0.6~0.8、1.1~1.3 mg/L;雨季推荐值分别为 0.5~0.7、1.1~1.3 mg/L。

② 基于优化措施的运行结果为:旱季出水氨氮、TN 分别从 0.10 和 8.03 mg/L 降至 0.06 和 7.24 mg/L,曝气量和硫酸铝药剂投加量分别减少 14.3% 和 6.25%;雨季出水氨氮和 TN 分别从 0.12 和 7.50 mg/L 降至 0.06 和 6.77 mg/L,曝气量减少 8.94%。

### 参考文献:

- [1] ELAWWAD A, ZAGHLOUL M, ABDEL-HALIM H. Simulation of municipal-industrial full scale WWTP in an arid climate by application of ASM3 [J]. *Journal of Water Reuse & Desalination*, 2017, 7(1/4): 37-44.
- [2] UBAY-COKGOR E, RANDALL C W, ORHON D. Evaluation of the performance of the Tyson Foods wastewater treatment plant for nitrogen removal [J]. *Water Science & Technology*, 2005, 51(11): 159-166.
- [3] 张凯歌, 李翠梅, 龚希博. Carrousel 氧化沟建模实例研究 [J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(5): 90-94.  
ZHANG Kaige, LI Cuimei, GONG Xibo. A modeling case study of Carrousel oxidation ditch [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(5): 90-94(in Chinese).
- [4] 范艳明. 污泥停留时间对除磷菌群结构的影响分析 [D]. 天津: 天津大学, 2014: 50-53.  
FAN Yanming. Analysis on the Influence of SRT on Microbial Community Constructure of Phosphorus

Removing Bacteria [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014:50-53(in Chinese).

- [5] 王少坡, 于静洁, 吕建波, 等. 活性污泥法中污泥龄应用问题探讨 [J]. *给水排水*, 2009, 35(S2): 118-122.  
WANG Shaopo, YU Jingjie, LÜ Jianbo, et al. Discussion on the application of sludge age in activated sludge process [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2009, 35(S2): 118-122(in Chinese).
- [6] 吕利平, 李航, 张欣, 等. 多点进水对前置预缺氧 A<sup>2</sup>/O 工艺脱氮除磷的影响 [J]. *中国给水排水*, 2021, 37(15): 8-13.  
LÜ Liping, LI Hang, ZHANG Xin, et al. Effect of step-feed on nitrogen and phosphorus removal of pre-anoxic A<sup>2</sup>/O process [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(15): 8-13(in Chinese).
- [7] 赵梦轲. 分段进水改良 AAO 工艺处理低 C/N 比生活污水的效果及优化控制 [D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2020: 26-28.  
ZHAO Mengke. The Effect and Optimal Control of Low C/N Ratio Domestic Sewage Treatment by Step-feed Improvement AAO Process [D]. Ma' anshan: Anhui University of Technology, 2020: 26-28(in Chinese).
- [8] 史彦伟, 刘牡, 赵有生, 等. 基于溶解氧控制的 A<sup>2</sup>/O 工艺节能降耗研究 [J]. *中国给水排水*, 2017, 33(1): 33-38.  
SHI Yanwei, LIU Mu, ZHAO Yousheng, et al. Energy-saving and consumption-reducing for A<sup>2</sup>/O process based on control of DO [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(1): 33-38 (in Chinese).

**作者简介:**匡科(1972-),男,湖南祁东人,博士,高级工程师,主要从事给排水技术研究及管理工作。

**E-mail:**1442285975@qq.com

**收稿日期:**2022-12-14

**修回日期:**2023-02-19

(编辑:任莹莹)