

特别报道

## MBR 工艺在高标准尾水小型污水处理厂的应用

祝雄涛<sup>1</sup>, 于 洋<sup>2,\*</sup>, 李德良<sup>3</sup>, 陈兴祥<sup>4</sup>

(1. 广州市城建规划设计院有限公司, 广东广州 510280; 2. 通化师范学院, 吉林通化 134001; 3. 广州正清水处理工程有限公司, 广东广州 510053; 4. 广州中恒城市规划勘测设计有限公司, 广东广州 510440)

**摘要** 【目的】 目前, 小型污水处理厂普遍面临进水污染物浓度高、尾水排放标准严格、水量和水质波动大、冲击负荷高、持续稳定达标难度大等难题。【方法】 北方某污水处理厂的设计规模为 1 万  $m^3/d$ , 借鉴类似案例, 通过采用膜生物反应器 (MBR) 工艺、延长各段停留时间、提高混合液悬浮固体 (MLSS) 浓度、加大污泥回流比、缺氧区投加碳源等强化工艺措施, 提高对污染物的去除效率, 确保出水水质稳定达标。【结果】 即使进水某些水质指标超过设计值, 经运行调整后, 出水水质可满足达标排放。【结论】 所采用的工艺与强化处理措施适用于进水污染物浓度高、尾水排放标准严格的污水处理厂, 可为相关工程提供借鉴经验。

**关键词** 小型污水处理厂 膜生物反应器 (MBR) 工艺 高标准尾水 碳源 厌氧-缺氧-好氧 (AAO) 停留时间 混合液悬浮固体 (MLSS) 污泥回流

### Application of MBR Process in High Standard Polishing Effluent Small-Scale WWTPs

ZHU Xiongtao<sup>1</sup>, YU Yang<sup>2,\*</sup>, LI Deliang<sup>3</sup>, CHEN Xingxiang<sup>4</sup>

(1. Guangzhou Urban Construction Planning and Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510280, China;

2. Tonghua Normal University, Tonghua 134001, China;

3. Guangzhou Zhengqing Water Treatment Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510053, China;

4. Guangzhou Zhongheng Urban Planning, Survey and Design Co., Ltd., Guangzhou 510440, China)

**Abstract** [Objective] At preset, small wastewater treatment plants (WWTPs) generally face problems such as high pollutant concentration in influent, strict effluent discharge standards, as well as large fluctuations in water volume and water quality, high shock loads, and great difficulty in achieving continuous and stable compliance. [Methods] The designed capacity of a certain WWTP in the north is 10 000 cubic meters per day. By drawing on similar cases, enhanced process measures such as adopting the membrane bio-reactor (MBR) process, extending the retention time of each section, increasing the mixed liquor suspended solids (MLSS) concentration, raising the sludge return ratio, and adding carbon sources in the anoxic zone are adopted to improve the removal efficiency of pollutants and ensure the stable compliance of effluent quality. [Results] Even if some water quality indices of the influent exceed the design values, after operation adjustment, the effluent quality can meet the discharge standards. [Conclusion] The adopted process and enhanced treatment measures are applicable to WWTPs with high influent pollutant concentrations and strict polishing effluent discharge standards, and can provide reference experience for related projects.

**Keywords** small scale wastewater treatment plant (WWTP) membrane bio-reactor (MBR) process high standard polishing effluent carbon source anaerobic-anoxic-oxic (AAO) retention time mixed liquor suspended solids (MLSS) sludge recirculation

水资源在人类生产生活中占据至关重要的地位。然而, 工业废水和生活污水的排放对河流湖泊

[收稿日期] 2024-12-23

[作者简介] 祝雄涛(1978—), 男, 高级工程师, 主要从事给水与排水工程设计管理和技术指导、把关, 包括水厂设计、给排水管网设计、城市内涝治理、顶管施工工艺等工作, E-mail: 14378163@qq.com。

[通信作者] 于洋(1991—), 女, 助理研究员, 主要从事教学和研究工作, E-mail: 15011578155@163.com。

造成严重威胁。即使经过处理,若处理标准偏低或未能达标,仍会引发污染,对水资源造成极大的危害,并严重威胁人们的生产生活及身心健康。在水源保护区附近建设污水处理厂,以及将污水处理厂的尾水用于河涌补水和景观用水时,必须严格把控尾水水质,确保高标准排放,以保障水资源不受损害和饮用水安全<sup>[1-2]</sup>,同时确保河涌补水和景观用水符合相关要求。

小型污水处理厂面临进水水量和水质波动变化较大的问题,这对生物处理系统造成较大冲击,影响其稳定运行<sup>[3]</sup>。此外,进水污染物浓度较高,而尾水排放标准严格,使得小型污水处理厂实现稳定达标运行更为困难。因此,选择合适的工艺并确保良好

运行至关重要<sup>[4-5]</sup>。在研究类似案例的基础上,基于与进出水质最为接近的案例,采纳其工艺技术并加以强化和改进,以期实现进水污染物浓度高、尾水排放指标低的处理效果。

## 1 工程概况

北方某小型污水处理厂,设计规模为 10 000 m<sup>3</sup>/d。进厂污水主要来源于生活污水,辅以少量工业废水。鉴于尾水排放标准严格,设计出水水质指标为总氮(TN)≤15 mg/L,其余主要指标均需满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类标准。

### 1.1 设计进出水水质

设计进出水水质如表 1 所示。

表 1 设计进出水质(单位:mg/L)  
Tab. 1 Designed Water Quality of Influent and Effluent (Unit: mg/L)

项目	五日生化需氧量(BOD <sub>5</sub> )	化学需氧量(COD)	悬浮物(SS)	TN	氨氮	总磷(TP)	pH 值
进水	250	500	400	60	35	6	6~9
出水	≤6	≤30	≤5	≤15	≤1.5	≤0.3	6~9

### 1.2 现有技术概况

目前,国内已建成的部分运行良好的污水处理厂,其设计出水水质的主要指标按照尾水排放要求

能够达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类标准。与本工程相近的案例,其进水与出水水质对比如表 2 和表 3 所示。

表 2 工程案例进水水质对比(单位:mg/L)  
Tab. 2 Comparison of Influent Water Quality in Engineering Cases (Unit: mg/L)

项目	BOD <sub>5</sub>	COD	SS	TN	氨氮	TP
本工程进水	250.0	500.00	400.0	60.00	35.00	6.00
案例 1 进水	200.0	400.00	240.0	50.00	40.00	4.50
案例 2 进水	58.0~289.4 (151.3)	80.20~853.70 (255.40)	44.0~940.0 (259.1)	30.30~90.80 (58.10)	29.20~76.50 (44.90)	3.90~16.60 (7.60)
案例 3 进水	163.0	306.36	365.0	32.82	23.47	5.62

注:表中括号内数值为平均值。

表 3 工程案例出水水质对比(单位:mg/L)  
Tab. 3 Comparison of Effluent Water Quality in Engineering Cases (Unit: mg/L)

项目	BOD <sub>5</sub>	COD	SS	TN	氨氮	TP
本工程出水	≤6.00	≤30.0	≤5	≤15.00	≤1.50	≤0.30
案例 1 出水	≤6.00	≤30.0	≤10	≤15.00	≤1.50	≤0.30
案例 2 出水	0.56~5.65 (3.34)	7.9~31.3 (24.5)	2~8 (4)	0.18~1.46 (0.70)	1.26~14.8 (11.20)	0.09~0.40 (0.20)
案例 3 出水	<6.00	<30.0	<5	<10.00	<1.50	<0.30

注:表中括号内数值为平均值。

案例 1<sup>[6]</sup>:成都某污水处理厂改造扩建工程,设计规模为 15 万 m<sup>3</sup>/d,采用膜生物反应器(MBR)工艺。与本工程相比,出水指标完全相同,但进水主要

指标 TN、TP、BOD<sub>5</sub> 以及 COD 存在较大差异。

案例 2<sup>[7]</sup>:北方某再生水厂提标扩建工程,设计规模为 3 万 m<sup>3</sup>/d,采用 MBR 工艺,并附加臭氧接触

氧化。与本工程相比,其出水指标的最高值 COD、SS、TP 均高于本工程设计值,且在 MBR 工艺后增设了臭氧接触氧化工艺。

案例 3<sup>[8]</sup>:深圳市坂雪岗水质净化厂二期工程,设计规模为  $1.2 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ ,采用 MBR 工艺。与本工程相比,其出水指标除 TN  $\leq 10 \text{ mg/L}$  外,其他指标完全相同,但进水主要指标均低于本工程设计值。

本文通过分析,这些污水处理厂的进水水质主要指标(如 COD、TN、氨氮)相较于本工程普遍较低,或已采用深度处理工艺。

## 2 工艺选择与主要设计

### 2.1 工艺选择

本工程进水的主要指标: TN 质量浓度为  $60 \text{ mg/L}$ ; TP 质量浓度为  $6 \text{ mg/L}$ ; COD 质量浓度为  $500 \text{ mg/L}$ ; 出水指标要求 TN 质量浓度  $\leq 15 \text{ mg/L}$ ; 其余主要指标需达到《地表水环境质量标准》(GB

3838—2002) IV 类标准,导致进水污染物浓度与尾水排放标准均呈现“双高”现象。

借鉴上述 3 个案例,MBR 工艺具备抗冲击负荷能力强等优势<sup>[9]</sup>。同时,对污染物的去除率较高,有利于处理高浓度进水,满足高标尾水排放的要求。为此,结合本工程实际情况,设计采用 MBR 工艺,并采取增加碳源投加、延长水力停留时间、提高混合液悬浮固体(MLSS)浓度和加大污泥回流比等措施确保满足本项目进出水水质中有机物、TN、氨氮的要求。此外,MBR 工艺通过膜过滤截留,可确保出水 SS 质量浓度  $\leq 5 \text{ mg/L}$ ; 采用生物除磷结合化学除磷,可满足出水磷酸盐(HP)  $\leq 0.3 \text{ mg/L}$  的要求。膜池定期排放剩余污泥,剩余污泥经浓缩、脱水后外运处理。同时,MBR 工艺无需设置二沉池,可减少占地面积,有利于北方保温措施的实施。工艺流程如图 1 所示,MBR 生化池内部流程如图 2 所示。

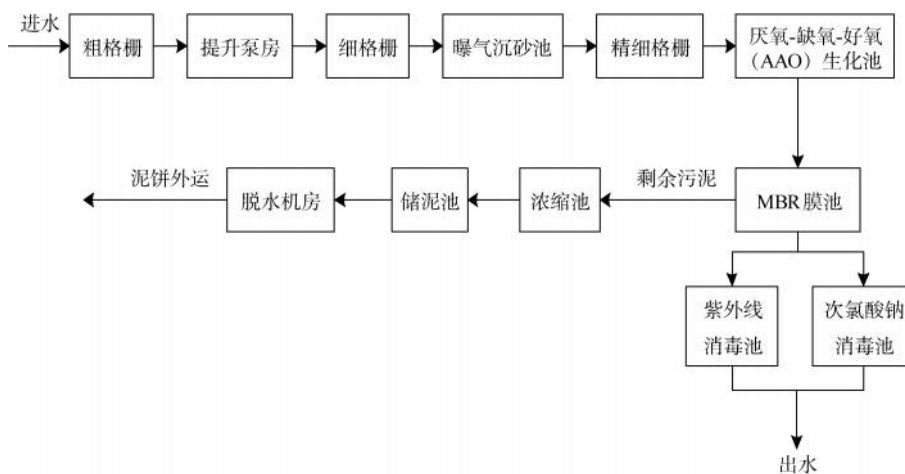


图 1 污水处理工艺流程

Fig. 1 Process Flow of Wastewater Treatment

### 2.2 主要工艺设计

#### 2.2.1 主要设计与参数

本工程借鉴上述案例及相关工程经验,针对进水污染物浓度高、尾水排放标准严格,且进水水量和水质波动较大,稳定达标运行困难,缺乏可借鉴的实际案例等难题,采取如下措施。

(1) 延长 AAO 工艺总水力停留时间。AAO 工艺的总水力停留时间设定为  $17.38 \text{ h}$ 。其中:厌氧段为  $2.5 \text{ h}$ ; 缺氧段为  $4.5 \text{ h}$ ; 好氧段为  $10.38 \text{ h}$ 。

(2) 提高 MLSS 浓度。一般 AAO 工艺的 MLSS 质量浓度为  $3000 \sim 4000 \text{ mg/L}$ , 本工程设计采用  $6000 \sim 8000 \text{ mg/L}$ 。

(3) 增强污泥回流。本工程设定好氧区-缺氧区的回流比为  $300\%$ , 膜池-好氧区的回流比为  $400\%$ 。

(4) 优化 MBR 膜池设计。MBR 工艺的膜通量为  $17.5 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 膜池的 MLSS 质量浓度控制为  $8000 \sim 10000 \text{ mg/L}$ 。

(5) 在缺氧区投加碳源。

#### 2.2.2 主要构筑物设计

本工程设计规模为  $10000 \text{ m}^3/\text{d}$ , 相对较小, 采用厌氧池、缺氧池、好氧池与 MBR 膜池合建为 1 个构筑物, 这不仅有利于运行管理, 还能节省占地、并方便实施保温措施。

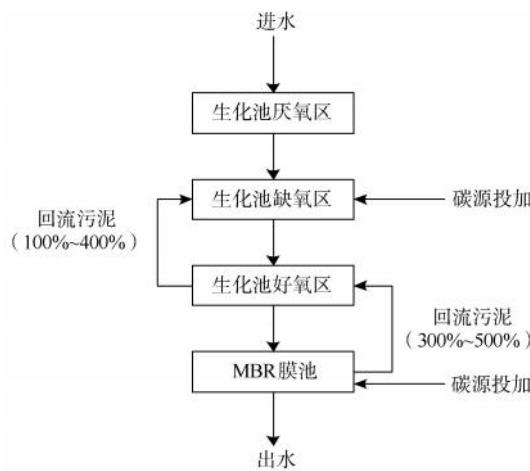


图 2 MBR 生化池内部流程

Fig. 2 Internal Process of MBR Biochemical Tank

该构筑物共分 2 组,每组含 1 个厌氧池(区)、1 个缺氧池(区)、1 个好氧池(区)和 2 个膜池(区),总计 2 个厌氧池、2 个缺氧池、2 个好氧池和 4 个膜池。厌氧池、缺氧池、好氧池的有效深度均为 6 m,膜池的有效深度为 3.5 m。每个膜池的尺寸为 12.0 m×4.0 m×4.0 m,且每个膜池内安装 5 个膜箱。

在构筑物中,厌氧区的尺寸为 12.00 m×12.00 m×6.50 m,缺氧区为 18.00 m×12.00 m×6.50 m,好氧区为 43.50 m×12.00 m×6.50 m,膜池为 12.0 m×4.0 m×4.0 m;总长度为 85.5 m,总高度为 6.5 m,膜池部分的总高度为 4.5 m,共 2 组。

仪表配置方面,在进水格栅后设置取样点,通过取样泵抽取进水输送至在线水质检测仪表室进行检测,仪表配置包括 pH/T(表示 pH 和温度的仪表盘)、SS、COD、TN、氨氮、TP;在消毒池出水渠设置取

样点,通过取样泵抽取出水输送至在线水质检测仪表室进行检测,仪表配置包括 pH/T、SS、COD、TN、氨氮、TP。

### 3 运行效果分析

对 2022 年 5 月—2023 年 3 月的污水处理厂进水及出水水质检测结果进行分析,尽管在某些时段进水的 COD 和氨氮浓度超过设计标准,但通过有效调整和运行,经 MBR 工艺处理后,该污水处理厂的各项出水水质均稳定达到设计指标要求。

主要运行参数如下:进水量为 1 624~8 394 m<sup>3</sup>/d;好氧区溶解氧(DO)为 2.5~4.0 mg/L;缺氧区 DO 质量浓度为 0.1~1.2 mg/L;膜池 DO 质量浓度为 4.0~6.0 mg/L;厌氧区 MLSS 质量浓度为 6 000~8 000 mg/L;缺氧区 MLSS 质量浓度为 6 000~8 000 mg/L;好氧区 MLSS 质量浓度为 6 000~8 000 mg/L;膜池 MLSS 质量浓度为 8 000~10 000 mg/L;好氧区-缺氧区回流比为 300%;膜池-好氧区回流比为 400%;缺氧区碳源投加量为 40~20 mg/L;膜池碳源投加量为 30~80 mg/L;TN 质量浓度大于 40 mg/L、氨氮质量浓度大于 30 mg/L 时,缺氧区开始投加碳源;COD 质量浓度大于 260 mg/L 时,膜池开始投加碳源。

#### 3.1 对 COD 的去除效果及稳定性分析

如图 3 所示,污水处理厂进水 COD 质量浓度为 130~518 mg/L,平均 COD 质量浓度为 258.55 mg/L,设计进水质量浓度为 500 mg/L,尽管部分进水 COD 浓度超过设计值,但出水 COD 浓度仍能稳定达标;出水 COD 质量浓度为 7~28 mg/L,平均质量浓度为 16.91 mg/L, COD 平均去除率为 92.48%。

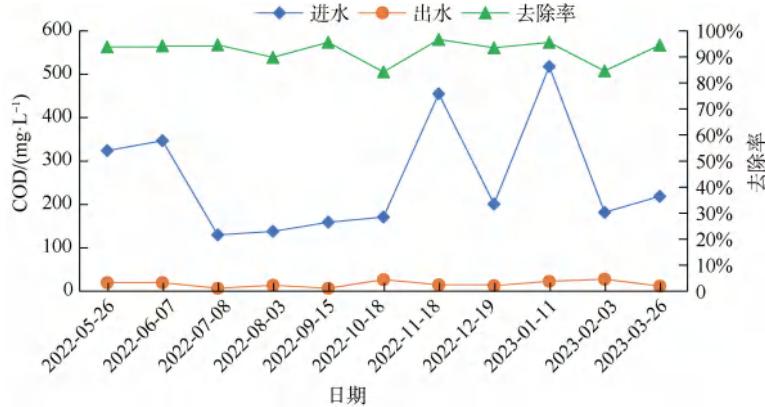


图 3 COD 的去除效果

Fig. 3 Removal Effect of COD

由图 3 可知,在进水 COD 质量浓度超过 500 mg/L 的设计标准且进水中含有部分工业废水的情况下,出水质量浓度仍能稳定维持在 7~28 mg/L,显示出较好的处理效果。

### 3.2 对氨氮的去除效果及稳定性分析

如图 4 所示,污水处理厂进水中氨氮质量浓度为

10.06~46.00 mg/L,进水氨氮平均质量浓度为 29.32 mg/L,设计进水氨氮质量浓度为 35 mg/L,其中部分进水氨氮质量浓度超过设计值,最高达到 46 mg/L。经过处理后,出水中氨氮质量浓度为 0.05~0.28 mg/L,平均质量浓度为 0.13 mg/L,氨氮平均去除率为 99.5%,稳定满足设计要求。

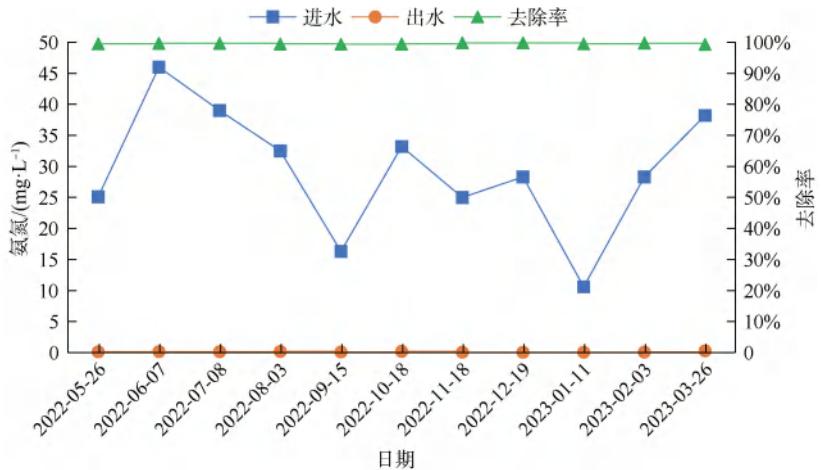


图 4 氨氮的去除效果

Fig. 4 Removal Effect of Ammonia Nitrogen

### 3.3 对 TN 的去除效果及稳定性分析

如图 5 所示,污水处理厂进水 TN 质量浓度为 21.2~51.5 mg/L,进水 TN 平均质量浓度为 42.71 mg/L,设计进水 TN 质量浓度为 60 mg/L,未超

过设计标准。污水处理厂出水 TN 质量浓度为 3.0~8.7 mg/L,平均出水质量浓度为 5.88 mg/L,TN 平均去除率为 85.70%。由图 5 可知,经过处理后的出水稳定满足设计出水 TN 质量浓度≤15 mg/L 的要求。

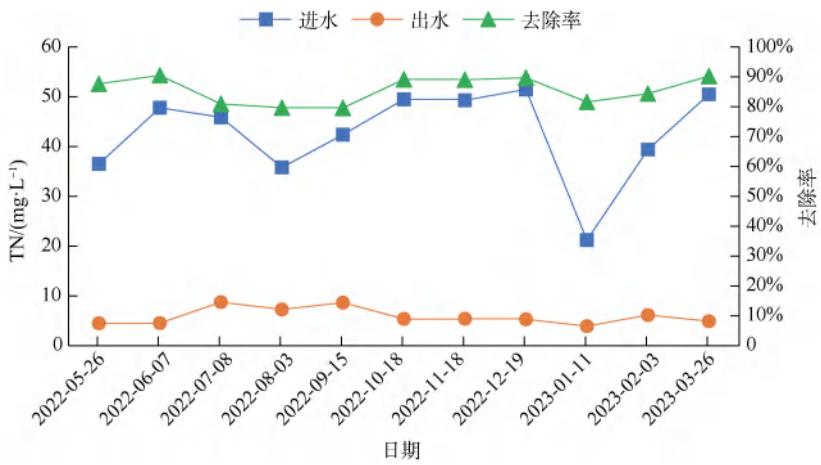


图 5 TN 的去除效果

Fig. 5 Removal Effect of TN

### 3.4 对 TP 的去除效果及稳定性分析

如图 6 所示,污水处理厂进水 TP 质量浓度为 1.32~10.03 mg/L,进水 TP 平均质量浓度为 4.39 mg/L,设计进水 TP 质量浓度为 6 mg/L,部分

进水 TP 超过设计值,但经过处理后可稳定达标。污水处理厂出水 TP 质量浓度为 0.12~0.26 mg/L,平均质量浓度为 0.18 mg/L,TP 平均去除率为 92.86%。由图 6 可知,经处理后的出水可稳定满足

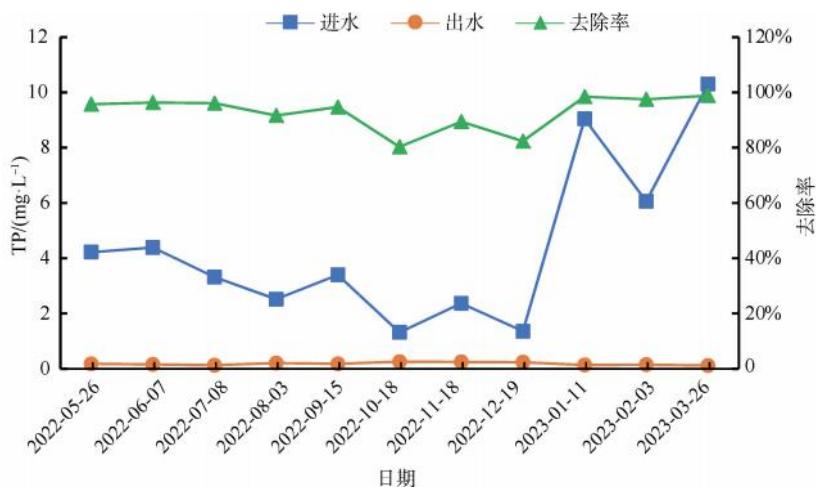


图 6 TP 的去除效果

Fig. 6 Removal Effect of TP

TP≤0.3 mg/L 的设计要求。

基于上述分析可知,本工程之所以能够实现上述良好的处理效果,主要得益于以下因素:AAO 工艺的水力停留时间长达 17.38 h,其中厌氧段为 2.5 h、缺氧段为 4.5 h、好氧段为 10.38 h;MLSS 质量浓度较高,维持在 6 000~8 000 mg/L;好氧区-缺氧区与膜池-好氧区的回流比较分别高达 300% 和 400%。水力停留时间的延长,增加了生化反应时间,促进微生物对有机物的分解更为彻底。较高的 MLSS 质量浓度可以有效降低生物负荷,提升降解有机物的效率,尤其增强了对低浓度、难降解有机物的分解能力。较好的好氧区-缺氧区回流比,有效补充了反硝化所需的碳源;而膜池-好氧区的高回流比,则进一步强化了微生物对难降解有机物的分解转化。

此外,在缺氧区投加碳源,补充了反硝化所需的

碳源,有效提升了微生物对污水中氮的分解转化能力,提高了 TN 的去除率。在调试过程中,尝试在膜池投加碳源,成功解决了出水中 COD 不达标的问题。运行过程中,通过持续投加碳源,进一步确保了出水 COD 的达标。

#### 4 经济性分析

2022 年 5 月—2023 年 4 月,污水处理厂在生产运行过程中所消耗的主要原材料(包括用电和处理药剂),统计情况如表 4 所示。由表 4 可知,污水处理厂运行的平均每吨水主要成本为 1.345 7 元,其中电费为 0.957 1 元,药剂费为 0.388 6 元。生产运行主要成本中,用电费用占比最高为 71.12%,处理药剂费用占比为 28.88%。药剂费用中,碳源药剂与聚合氯化铝(PAC)占比较大,碳源药剂占比为 44.42%,PAC 占比为 43.77%,其他药剂占比较小,为 11.81%。

表 4 主要原材料消耗成本统计  
Tab. 4 Statistics on the Consumption Costs of Major Raw Materials

项目	处理水量/m <sup>3</sup>	耗电量/(kW·h)	碳源药剂/kg	PAC/kg	聚丙烯酰胺(PAM)/kg	次氯酸钠/kg	氢氧化钠/kg
2022 年 5 月	172 226	176 140	16 440	6 275	75	0	0
2022 年 6 月	163 977	164 890	13 130	7 800	300	0	0
2022 年 7 月	187 344	190 320	17 148	7 450	225	6 620	0
2022 年 8 月	179 205	182 830	15 246	9 150	325	0	0
2022 年 9 月	143 553	146 610	14 882	12 000	250	0	0
2022 年 10 月	130 680	135 880	13 978	11 375	50	0	0
2022 年 11 月	141 862	148 080	13 024	13 425	75	496	825

(续表4)

项目	处理水量/m <sup>3</sup>	耗电量/(kW·h)	碳源药剂/kg	PAC/kg	聚丙烯酰胺(PAM)/kg	次氯酸钠/kg	氢氧化钠/kg
2022 年 12 月	175 215	182 080	15 056	10 325	175	0	0
2023 年 1 月	71 603	72 940	14 550	6 100	300	0	0
2023 年 2 月	75 177	76 600	16 080	7 600	225	0	0
2023 年 3 月	163 195	168 110	12 332	4 875	300	0	0
2023 年 4 月	170 106	177 840	3 664	4 675	300	0	0
合计	1 774 143	1 822 320	165 530	101 050	2 600	7 116	825

## 5 结论

(1) 该项目在经过充分的调研和论证后,借鉴了相关类似案例,采用了 MBR 工艺。同时,通过增加 AAO 工艺各阶段水力停留时间、提高 AAO 工艺生化池的 MLSS 浓度、好氧区到厌氧区采用较大的污泥回流比、增加膜池到好氧区的污泥回流比,以及在调试过程中尝试投加碳源以解决膜池出水 COD 不达标的问题。

(2) 该项目构建的处理系统能够有效应对进水水量和水质的较大波动,处理效果良好,可稳定达到设计指标要求。

(3) 针对污染物浓度较高且含有部分工业废水的进厂污水,该项目采用二级生物处理工艺,稳定达到高标排放要求,工艺简单,可为类似工程项目提供借鉴经验。

## 参考文献

- [ 1 ] 刘映月,王琪. 湖北省工业污水处理厂运行成本分析及控制[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(s1): 204-207.  
LIU Y Y, WANG Q. Operation cost analysis and control of an industrial wastewater treatment plant in Hubei Province [J]. Environmental Science and Technology, 2020, 43 (s1): 204-207.
- [ 2 ] 张伟,潘芳,张海行,等. 污水处理提质增效“一厂一策”方案的编制思考[J]. 中国给水排水, 2023, 39(2): 32-37.  
ZHANG W, PAN F, ZHANG H X, et al. Reflection on the compilation of “one plant, one policy” scheme for quality and efficiency improvement of sewage treatment [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(2): 32-37.
- [ 3 ] 郭泓利,李鑫玮,任钦毅,等. 全国典型城市污水处理厂进水水质特征分析[J]. 给水排水, 2018, 44(6): 12-15.  
GUO H L, LI X W, REN Q Y, et al. Analysis on characteristics of influent water quality of typical municipal sewage treatment plants in China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44 (6): 12-15 .
- [ 4 ] 孙永利,吴凡松,李文秋,等. 城市生活污水集中收集率和污水处理厂进水浓度问题的思考[J]. 给水排水, 2023, 49 (1): 41-46.  
SUN Y L, WU F S, LI W Q, et al. Reflections on the centralized collection rate of municipal sewage pollutants and the influent concentration of wastewater treatment plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(1): 41-46.
- [ 5 ] 朱世泰,申丽芬,王广华. 广州市中心城区污水处理厂进水水质分布规律研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(19): 49-53.  
ZHU S T, SHEN L F, WANG G H. Distribution of influent quality of sewage treatment plants in Guangzhou City Center [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(19): 49-53.
- [ 6 ] 白玉华,马林伟,贾韬,等. AAO-MBR 工艺用于污水处理厂的不停产扩能提标改造[J]. 环境工程, 2021, 39(4): 20-24.  
BAI Y H, MA L W, JIA T, et al. Application of AAO-MBR process for non-stop capacity expansion and upgrading of a wastewater treatment plant [J]. Environmental Engineering, 2021 (4): 20-24.
- [ 7 ] 高伟楠. AAO +MBR 工艺用于北方某再生水厂提标扩建工程[J]. 中国给水排水, 2020, 36(12): 91-95.  
GAO W N. Application of A<sup>2</sup>O + MBR process in the upgrading and expansion project of a water reclamation plant in North China [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36 (12): 91-95.
- [ 8 ] 王雪,戴仲怡,张晓临,等. AAO+MBR 工艺用于集约化高排放标准半地下式污水厂[J]. 中国给水排水, 2020, 36 (4): 53-56.  
WANG X, DAI Z Y, ZHANG X L, et al. Application of A<sup>2</sup>/O+ MBR process in intensive high discharge standard semi-underground wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36 (4): 53-56.
- [ 9 ] 关晓琳,武克亮,徐斌,等. AAO-MBR 工艺深度处理液晶废水工程应用[J]. 工业水处理, 2016, 36(10): 97-99.  
GUAN X L, WU K L, XU B, et al. Example of engineering application of A<sup>2</sup>O-MBR process to the advanced treatment of TFT-LCD wastewater[J]. Industrial Water Treatment, 2016, 36 (10): 97-99.