

朱加勇, 杨喆程, 夏海霞, 等. 极端低温低负荷小型城镇生活污水处理厂的运行优化[J]. 净水技术, 2025, 44(4): 119–125, 149.

ZHU J Y, YANG Z C, XIA H X, et al. Operation optimization of small-scale town WWTPs under extreme low temperature and low load[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(4): 119–125, 149.

极端低温低负荷小型城镇生活污水处理厂的运行优化

朱加勇*, 杨喆程, 夏海霞, 张薛龙, 李 鹏

(北京恩菲环保股份有限公司, 北京 100038)

摘 要 【目的】近年来,我国北方城市的周边区域正处于快速开发阶段,但在开发初期,各区域配套建设的污水处理厂多面临着水温低、负荷小等问题,而国内相关的研究尚显不足。【方法】为探究低温低负荷条件下污水处理厂的运行优化思路,以北方某新建小型城镇生活污水处理厂为例,对比其设计规模以及建成投运后实际进水水质、水量情况,通过工艺设计研究及全流程跟踪试验,分析存在问题并提出技术改造方案。【结果】投运初期,该污水处理厂进水负荷不足设计水平的10%,极端进水水温仅为2℃,导致设备调控困难、微生物活性降低、生物脱氮除磷受到全面抑制,严重影响了污水处理厂的正常运行。通过对污水处理厂生化系统、曝气系统的优化改造,并新建升温供热系统,改善了微生物的生存环境,并大幅提高了污水厂的运行效率。设计改造完成后,生物池水温稳定在 $(15.1 \pm 1.3)^\circ\text{C}$,平均升温10.37℃,综合药耗相对改造前节省了46%,电耗节省45.5万kW·h/年,同时出水可达到《水污染物综合排放标准》(DB11/307—2013)规定的A排放限值要求。【结论】针对低温低负荷的小型城镇生活污水处理厂,可从减少运行池容、提高污泥负荷、增建升温供热系统等方面开展运行优化,达到稳定运行和节能降耗的目标。

关键词 地表水Ⅲ类 低温 低负荷 系统改造 节能降耗

中图分类号: TU992 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2025)04-0119-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.04.014

Operation Optimization of Small-Scale Town WWTPs under Extreme Low Temperature and Low Load

ZHU Jiayong*, YANG Zhecheng, XIA Haixia, ZHANG Xuelong, LI Peng

(Beijing Enfi Environmental Protection Co., Ltd., Beijing 100038, China)

Abstract [Objective] In recent years, the surrounding areas of cities in northern China have been undergoing rapid development. However, in early stage of development, many wastewater treatment plants (WWTPs) supporting the construction of various regions are faced with problems such as low water temperature and small load, while domestic research on this issue is still inadequate. [Methods] To explore the operational optimization of WWTPs under low temperature and low load conditions, taking a newly built small-scale urban domestic WWTP in the north as an example, comparing its design scale as well as the actual water quality and quantity of the inflow after its completion and operation. This study analyzed the existing problems and proposed technical reconstruction plans through process design research and full-process tracking experiments. [Results] During the initial operational period, the influent load of WWTP was less than 10% of the design capacity, and the extreme influent water temperature was only 2℃. This resulted in difficulties in equipment control, reduced microbial activity, and complete inhibition of biological nitrogen and phosphorus removal, severely affecting the normal operation of the WWTP. Through optimization and renovation of the biochemical and aeration systems, as well as the construction of a new heating system, the living environment for microorganisms was improved, and the operational efficiency of the WWTP was significantly enhanced. After the design and reconstruction were completed, the water temperature of the biological pool was stable at $(15.1 \pm 1.3)^\circ\text{C}$, and the average temperature rise was 10.37℃. Compared with before the reconstruction, the comprehensive chemical consumption was saved by 46%, and the power consumption was reduced by

[收稿日期] 2024-02-27

[通信作者] 朱加勇(1988—),男,注册公用设备工程师(给排水),研究方向为市政给排水,E-mail: 751374912@qq.com。

455 000 kW·h/a. At the same time, the effluent could meet the A emission limit requirements stipulated in the *Integrated Discharge Standard of Water Pollutants* (DB11/ 307—2013). [**Conclusion**] For small-scale urban domestic WWTPs under low temperature and low load conditions, operational optimization could be carried out by reducing the operational tank capacity, increasing the sludge load, and adding a heating system to achieve the goals of stable operation, energy saving, and consumption reduction.

Keywords class III surface water low temperature low load system reconstruction energy saving and consumption reduction

核心城市的溢出效应会带动周边地区经济的快速发展^[1],因而周边地区的污水处理厂在建设规划阶段会考虑人口的井喷式增长,导致预测污水量远大于近期实际污水量,造成新建污水处理厂初期运行困难^[2]。目前,针对新建污水处理厂运行初期的低负荷问题以及北方地区冬季水温低的状况,仍有待深入研究。本文以北方某环一线城市生活污水处理厂为例,其实际进水负荷不足设计负荷的 10%,导致其冬季处于极端的低温、低负荷运行状态,污水厂运行困难。通过因地制宜的工艺改造,实现节能

降耗的同时保障出水稳定达标,为对同类型污水处理厂的设计和运行提供借鉴思路。

1 项目概况

某镇位于环一线城市地区,为解决该区域生活污水排放问题,提升地区环境承载力,新建城镇生活污水处理厂 1 座。污水处理厂近期设计规模为 6 000 m³/d,远期设计规模为 13 000 m³/d,污水厂出水执行《水污染物综合排放标准》(DB11/ 307—2013)规定的 A 排放限值要求,设计进出水水质如表 1 所示。

表 1 设计进、出水水质
Tab. 1 Design of Influent and Effluent Quality

项目	BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹)	SS/(mg·L ⁻¹)	氨氮/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)
设计进水	250	400	300	35	50	6.5
设计出水	4	20	5	1.0(1.5)	10	0.2

注:12 月 1 日—3 月 31 日执行括号内的排放限值。

1.1 工艺流程

该污水处理厂预处理采用粗格栅、细格栅、曝气沉砂池、精细格栅等工艺,生化段采用多级缺氧-好氧-膜生物反应器(AO-MBR)工艺,深度处理采用臭氧催化氧化工艺,污水厂出水提升至人工湿地,水处理工艺流程如图 1 所示。

多级 AO-MBR 工艺设置前置缺氧区 1、厌氧区、

好氧区 1、缺氧区 2、好氧区 2、缺氧区 3、MBR 池,工艺流程如图 2 所示。

1.2 进水情况分析

该污水处理厂自 2021 年投运以来,长期处于低水量运行状态,且因项目地处严寒地区,冬季持续时间长、气温低,在冬季会面临极端低温低负荷的运行状况。以 2022 年实际运行数据为例,分析该厂进水

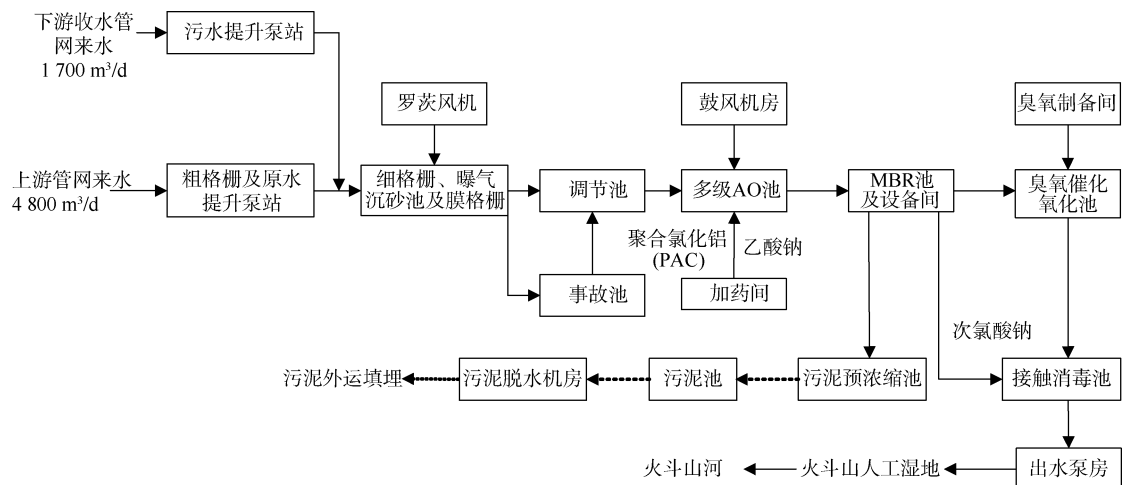


图 1 污水处理工艺流程

Fig. 1 Process Flow of Wastewater Treatment

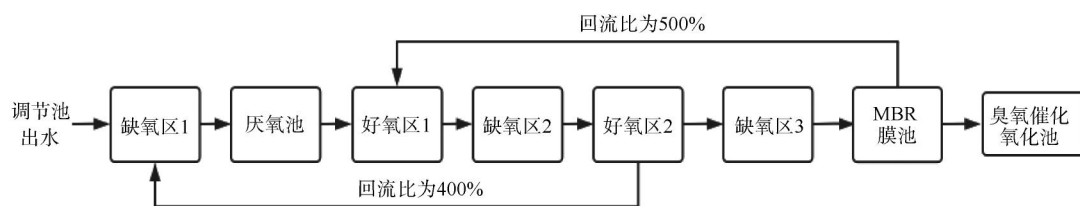


图2 多级AO池工艺流程

Fig. 2 Process Flow of Multi-Stage AO Tank

水量、水温及当地气温波动情况。如图3所示,该污水处理厂的进水量与季节变化呈强相关性^[3-4],2022年污水处理厂累计处理污水量为 $1.72 \times 10^5 \text{ m}^3$,日均进水量为 470 m^3 ;冬季进水量为全年最低,日均进水量降至 360 m^3 ,仅为设计水量的6%,生物池实际停留时间达到8.1 d,对现场的工艺调控造成很大困难。

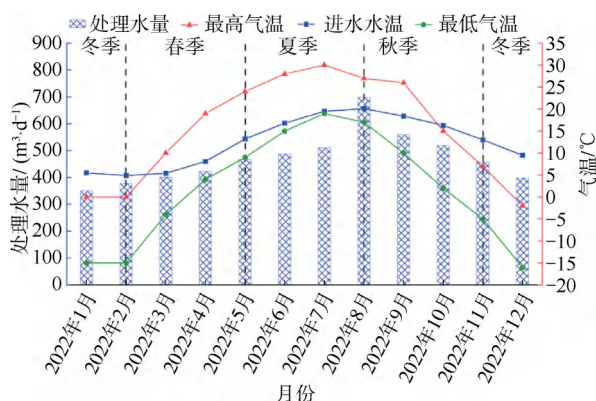


图3 水温水量变化

Fig. 3 Variation of Water Temperature and Quantity

2 存在的运行问题

(1) 进水负荷过低,设备调控困难

由于设备选型按设计进水量为 $6\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 考虑,此时进水负荷不足设计水平的10%,导致系统调控困难。即使采取了间歇运行的方式,设备产能仍大于实际需求,不仅造成系统效率低、能耗高,甚至影响了工艺系统的稳定运行。同时MBR池进水渠、回流渠流速过低,渠道内的污泥发生沉积、腐化,并产生厌氧发酵气体,使大块黑臭污泥上浮,影响感官和出水水质。

(2) 溶解氧难以控制,反硝化受到抑制

在缺氧条件下,反硝化菌利用碳源作为电子受体还原硝酸根(NO_3^-),该厂需通过外加碳源作为补充,以保障出水TN达标。经分析,处于低负荷运行状态,导致活性污泥的需氧量低于鼓风机的产气量,

好氧池溶解氧居高不下,加之混合液回流比过大,最终造成好氧池大量的残留溶解氧进入缺氧池,破坏了缺氧环境,使有机物氧化而未被反硝化菌利用,进而导致脱氮效率下降甚至丧失^[5-6],最终致使碳源消耗量大幅增加。

(3) 生物除磷效能低下,除磷药剂单耗过大

优化改造前PAC投加量为 42.6 mg/L ,混凝剂与进水总磷的摩尔比约为4:1,大于《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)规定的摩尔比为1.5~3.0,推测生物除磷可能未发挥效能,在低负荷、低食微比的环境下,不利于聚磷菌的生长形成,并在饥饿状态下聚磷菌又将摄取的磷释放回水中^[7],从而将导致生化除磷效能低下,造成除磷药剂单耗过大。过量投加PAC会导致碱度不足,进而限制硝化反应的进行,运行初期虽通过投加NaOH的方式实现了碱度的平衡,却进一步增加了水处理成本。同时,研究^[8-10]表明,国内PAC生产原料多为煤矸石、黏土矿、铝土矿,以上原料饱含 Ca^{2+} ,大量的投加PAC会造成过量的 Ca^{2+} 进入生产系统,导致碳酸钙结垢物的生成与富集,影响MBR膜的使用寿命。

(4) 冬季进水水温过低,影响微生物活性

根据我国生态环境部印发的《人工湿地水质净化技术指南》,项目所在地归为严寒地区。结合运行记录,受当地低温环境的影响,污水处理厂冬季进水水温为 $5 \sim 9 \text{ }^\circ\text{C}$,极端进水水温为 $2 \text{ }^\circ\text{C}$,污水经预处理阶段进入调节池后,水温会进一步降低,生物池进水温度为 $3 \sim 6 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在低温环境下,微生物的新陈代谢速率和活性降低,甚至进入休眠乃至死亡,硝化反应受到全面抑制,生化系统无法正常运行^[11-14]。微生物活性降低,亦会增加膜对有机物的分离负担,加速凝胶层的形成,进而加快膜污染程度。

3 措施与方法

3.1 工艺优化

针对进水负荷低导致的设备产能过大、生化系

统受影响的情况,对厂内曝气系统及生物池进行优化改造。

(1) 曝气系统优化

原设计空气悬浮鼓风机 4 台,其中好氧池曝气风机和 MBR 膜擦洗风机各 2 台,1 用 1 备,并设置独立供气干管。为解决供气量过大的问题,采用联通管将上述 2 根供气干管进行联通,改为单台好氧池曝气风机同时为好氧池和 MBR 膜供气,由于两者需气压力相差 19.6 kPa,通过联通管上增设调节阀,以实现气量合理分配。

(2) 生物池优化

原生物池设计南北两线,为解决进水负荷低的情况,选择北线生物池进行改造,于好氧区 1 和缺氧区 2 之间、好氧区 2 和缺氧区 3 之间增加闸门。原水管道增设超越管,调节池出水直接进入缺氧区 2、缺氧区 3 前端。新增 2 套潜污泵于 4#膜池代替原穿墙回流泵,将 MBR 池内混合液回流至缺氧区 2、缺氧区 3 前端。MBR 膜池进水渠、回流渠、3#膜池增设管式曝气器,如图 4 所示。

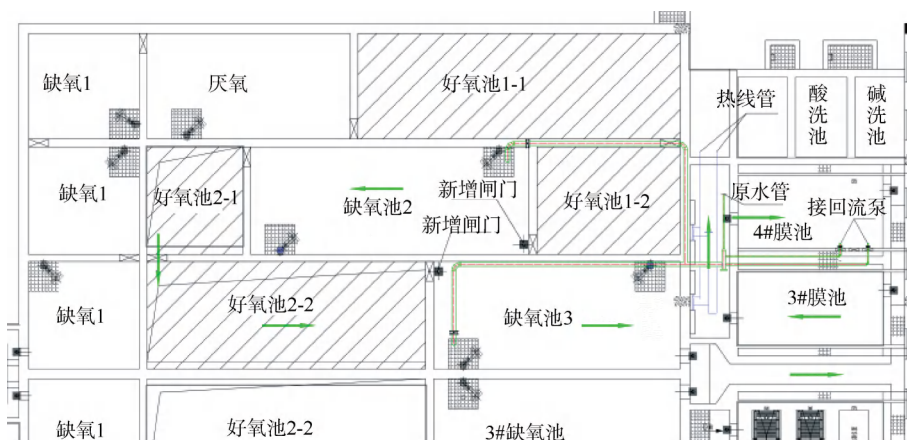


图 4 生物池改造方案

Fig. 4 Reconstruction Plan of Biological Tank

经上述改造,缩短了生物池停留时间,提高了系统负荷,并可根据进水水量的变化,通过启闭闸门改变工艺流程,当进水量低于 $400 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,按工艺流程一运行,进水量大于 $400 \text{ m}^3/\text{d}$ 且小于 $1000 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,按工艺流程二运行,进水量大于 $1000 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,可按原设计运行。

工艺流程一:关闭好氧区 2 和缺氧区 3 之间的闸门,调节池出水超越至缺氧区 3,3#膜池、进水渠、回流渠作为好氧区,4#膜池正常运行,新增潜污泵启动 1 台,将 4#膜池内混合液输送至缺氧区 3 前端,此模式工艺流程如图 5 所示,工艺设计参数如表 2 所示。

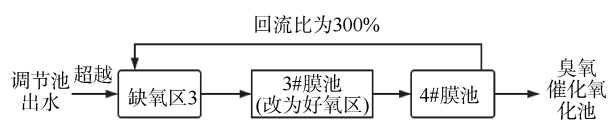


图 5 模式一工艺流程

Fig. 5 Process Flow of Mode 1

工艺流程二:关闭好氧区 1 和缺氧区 2 之间的闸门,调节池出水超越至缺氧区 2,3#膜池和 4#膜池轮换产水,新增潜污泵启动 2 台,将 4#膜池内混合液输送至缺氧区 2 前端,此时工艺流程如图 6 所示。

3.2 新建升温供热系统

针对水温过低的问题,考虑新增升温供热系统,提高污水运行温度,以改善微生物的生存环境,系统的供热量不应低于以下要求:供热量(Q) $\geq$ 环境传递散热(Q_1)+污水升温热(Q_2)+水蒸发散热(Q_3)-生化反应放热(Q_4)-机械传热(Q_5),其中 Q_5 和 Q_3 占比较小,一般可忽略不计^[15]。 Q_4 即污水有机物氧化、脱氮过程中物质分解转化释放热量,其数值的大小直接受进水水质影响,考虑实施方案的可靠性,暂不核减 Q_4 。综上所述,初步拟定污水系统设计 $Q \approx Q_1 + Q_2$,为利于后续工程设计选型,上述过程热量单位均取 kW,尝试构建热量衡算模型如式(1)~式(7)^[15-17]。

表 2 模式一工艺设计参数
Tab. 2 Process Design Parameters of Mode 1

项目	参数	项目	参数
缺氧区/m ³	341	停留时间/h	20.5
好氧区/m ³	234	停留时间/h	14
总池容/m ³	589	总停留时间/h	34.5
污泥质量浓度/(g·L ⁻¹)	3	污泥负荷/[kg BOD ₅ ·(kg MLSS) ⁻¹ ·d ⁻¹]	0.04
回流比	200%~300%	TN 负荷/[kg TN·(kg MLSS) ⁻¹ ·d ⁻¹]	0.03
好氧区气水比	10 : 1	好氧区供气量/(m ³ ·min ⁻¹)	2.8
膜擦洗供气量/(m ³ ·min ⁻¹)	23	总供气量/(m ³ ·min ⁻¹)	25.8

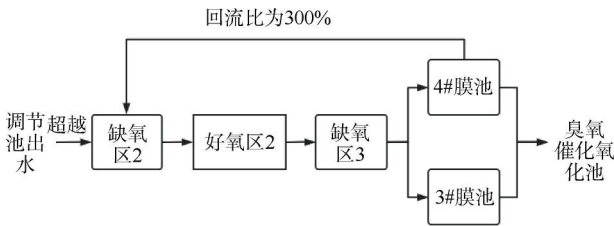


图 6 模式二工艺流程

Fig. 6 Process Flow of Mode 2

(1) 环境传递散热

$$Q_1 = \frac{F_1 K_1 \Delta T_1}{1000 \times B_1} + \frac{F_2 K_1 \Delta T_2}{1000 \times B_2} + \gamma \frac{F_3 K_1 \Delta T_3}{1000 \times B_3} + \frac{F_4 K_1 \Delta T_4}{1000 \times B_4} + \frac{F_5 K_2 \Delta T_5}{1000} \quad (1)$$

其中： Q_1 ——环境传递散热，kW；
 F_1 ——外侧为闲置水池的池壁面积，m²；
 F_2 ——外侧为环境空气的池壁面积，m²；
 F_3 ——埋入土壤部分的池壁面积，m²；
 F_4 ——池底面积，m²；
 F_5 ——池顶面积，m²；
 K_1 ——钢筋混凝土的导热系数，取 1.74 W/(m·K)；
 K_2 ——玻璃钢覆盖的传热系数，取 2.0 W/(m²·K)；
 B_1 ——隔墙厚度，取 0.35 m；
 B_2 、 B_3 ——池壁厚度，取 0.5 m；
 B_4 ——池底厚度，取 0.7 m；
 γ ——埋入土壤部分的池壁导热折减系数，本项目取 0.7。
 ΔT_1 、 ΔT_2 、 ΔT_3 、 ΔT_4 、 ΔT_5 ——内外温度差，按式(2)~式(6)计算。

$$\Delta T_1 = T_1 - \frac{T_2}{2} \quad (2)$$

$$\Delta T_2 = T_1 - T_3 \quad (3)$$

$$\Delta T_3 = T_1 - \frac{\frac{T_3 h}{2} + \frac{T_2 (H - h)}{2}}{H} \quad (4)$$

$$\Delta T_4 = T_1 - T_2 \quad (5)$$

$$\Delta T_5 = \frac{T_1 + T_3}{2 - T_3} \quad (6)$$

其中： T_1 ——生物池内设计温度，取 15 ℃；
 T_2 ——生物池底的环境温度，取 6 ℃；
 T_3 ——当地最冷月平均气温，取 -13.3 ℃；
 h ——当地冻土深度，取 1.26 m；
 H ——生物池地下部分高度，取 3 m。

(2) 污水升温热

$$Q_2 = \frac{1000 \times C_p \Delta T_0 Q_d}{86400} \quad (7)$$

其中： Q_2 ——污水升温热，kW；
 C ——水的比热容，取 4.2 kJ/(kg·K)；
 ρ ——水的密度，取 1.0 t/m³；
 ΔT_0 ——调节池水温与生物池设计水温的差值，调节池水温取 5 ℃；
 Q_d ——日均进水量，取 400 m³。

由于水温随污水处理厂进水量的增加而升高，故本项目仅核算工艺流程一的污水系统供热，代入相关设计参数后，核算 Q_1 为 33.3 kW， Q_2 为 194 kW，污水系统 Q 为 227.3 kW。

该污水处理厂原设计采暖负荷为 371.67 kW，新增污水 Q 为 227.3 kW，则污水厂冬季总热负荷为

598.97 kW, 污水处理厂配置 465 kW 燃气锅炉 2 套, 同时启用, 可满足使用需求。

升温供热系统的实施: 该系统由燃气锅炉、供回热管线、散热器、计量仪表、控制阀门、玻璃钢保温罩等构成, 于膜池回流渠内新增 8 组散热器, 用于生物池污水的间接加热, 散热器的供热管 (DN65) 自厂区主供热干管道引出, 并在接出位置设置流量平衡调节阀, 同时装设热量监测表, 用于监测瞬时、累计供热量, 生物池和膜池的表面采用玻璃钢覆盖保温, 减少散热量、降低能耗。

4 运行效果分析

2021 年 12 月完成改造及调试工作, 现已稳定运行近 3 年, 以调试完成运行初期的数据为例, 监测期内日最低气温为 $-19.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 平均气温为 $-10.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 调节池出水水温为 $(5.5 \pm 2.5)\text{ }^{\circ}\text{C}$, 生物池水温为 $(15.1 \pm 1.3)\text{ }^{\circ}\text{C}$, 平均升温 $10.37\text{ }^{\circ}\text{C}$, 达到了改善微生物生存环境的目的, 保证了微生物对污染物的稳定去除能力, 水温变化曲线如图 7 所示。监测期间进水量平均为 $350\text{ m}^3/\text{d}$, 污水实际升温热量为 175 kW, 生物池实际供热量为 $(156 \pm 25)\text{ kW}$, 两者数值接近, 表明污水实际供热 ($Q_{\text{实}} < Q_1 + Q_2$), 以上的差值即为 $Q_4 + Q_5 - Q_3$ 。

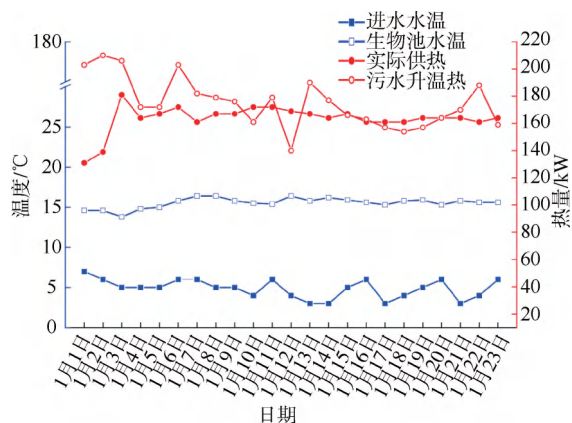


图 7 生物池进出水温变化曲线

Fig. 7 Changes of Influent and Effluent Temperature in Biological Tank

监测周期内, 生物池出水水质满足设计出水标准的要求, 处理效果较好, 如图 8 所示。

如图 8 所示, 改造完成后, 各项出水指标总体稳定, 仅出水 TN 波动略大。经分析, 出水 TN 最高点为图 8(a) 的 G 点 (13 mg/L), 随后 TN 逐步下降并趋于稳定, 该点与图 7 中生物池水温低点一致

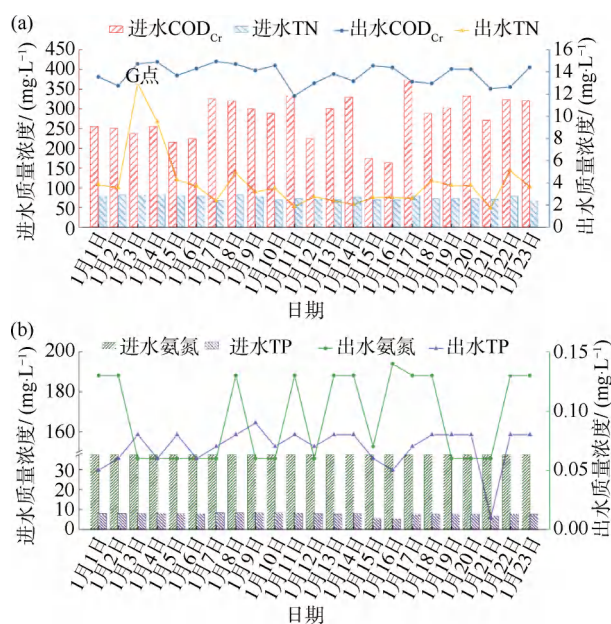


图 8 生物池进出水水质

Fig. 8 Quality of Influent and Effluent in Biological Tank

($13.8\text{ }^{\circ}\text{C}$)。一般来说, 反硝化菌、硝化菌的增殖速率和代谢速率都会随着温度下降而减弱, 其中硝化菌相对反硝化菌对温度的变化更敏感^[18-19], 而该污水处理厂反硝化成为生物池水温进一步下调的限制因素, 推测 MBR 池回流混合液中的溶解氧导致反硝化速率降低, 致使缺氧池利用率偏低。

药剂消耗方面, 根据日药品消耗和进水量记录, 改造前 PAC 投加量为 42.6 mg/L , 改造后 PAC 投加量为 $(23.5 \pm 4.7)\text{ mg/L}$; 改造前乙酸钠投加量为 386 mg/L , 改造后乙酸钠投加量为 $(206 \pm 19)\text{ mg/L}$, 吨水综合药耗相较改造前节约 46%。上述数据表明, 改造后该污水处理厂的生物脱氮除磷效能得以恢复、提高。

设备运行方面, 改造前潜水搅拌机运行 8 台、风机运行 2 台、回流泵运行 2 台, 改造后潜水搅拌机运行 2 台、风机运行 1 台、回流泵运行 1 台, 年节省电耗 45.5 万 $\text{kW}\cdot\text{h}$, 节能降耗效果显著。

5 结论

(1) 该城镇生活污水处理厂通过生化系统改造和新建升温供热系统, 达到了提升生物脱氮除磷效能和降碳节能的目标, 保障出水达到《水污染物综合排放标准》(DB11/307—2013) 规定的 A 排放限值要求。

(2) 基于该城镇生活污水处理厂改造前后的

运行数据,建议针对我国北方小型城镇污水处理厂面临的低温、低负荷问题,可从减少运行池容、提高污泥负荷、增建升温供热系统等方面开展设计优化。

(3)该城镇生活污水处理厂反硝化的效能是生物池水温进一步下调的限制因素,为进一步节能降耗,类似项目在设计优化时,反硝化效能可进一步挖潜提升。

(4)本项目在新建升温供热系统前,构建了供热衡算模型,该模型可为污水处理中的升温系统设计提供参考,但需根据实际情况对主要参数进行调整。

(5)升温供热系统的污水实际供热小于污水升温热与环境传递散热的和,推测是受生化反应放热和机械传热影响,因监测条件受限,未能开展深入研究。

参考文献

- [1] 宋璐平. 区域高质量发展评价与城市间溢出效应——基于珠三角、长三角两大湾区城市群数据分析[J]. 当代经济, 2023, 40(3): 44-50.
SONG L P. Evaluation of regional high quality development and interurban spillover effects: Based on data analysis of urban agglomeration in the Pearl River Delta and Yangtze River Delta [J]. Contemporary Economy, 2023, 40(3): 44-50.
- [2] 方佩珍, 徐旭东, 徐正启. 某污水处理厂低负荷运行问题的分析与调控措施[J]. 净水技术, 2018, 37(1): 77-81.
FANG P Z, XU X D, XU Z Q. Analysis and controlling measures of low-load operation problem for a wastewater treatment plant[J]. Water Purification Technology, 2018, 37(1): 77-81.
- [3] 张恒飞, 成雪夫, 田昊, 等. 基于 SARIMA 模型的农村供水工程用水量实时预测[J]. 水利水电快报, 2022(4): 42-45.
ZHANG H F, CHENG X F, TIAN H, et al. Real-time forecast of water consumption in rural water supply projects based on SARIMA model[J]. Water Resources and Hydropower Express, 2022(4): 42-45.
- [4] 杜佳岷, 冯骞, 叶小川, 等. 江苏太湖地区农村生活用水特征及影响因素研究——以宜兴市丁蜀镇方钱村为例[J]. 农学学报, 2021(9): 105-110.
DU J M, FENG Q, YE X C, et al. Characteristics and influencing factors of domestic water consumption in rural area of Taihu Lake, Jiangsu: A case study of Fangqian village, Dingshu Town, Yixing city[J]. Journal of Agriculture, 2021(9): 105-110.
- [5] 王垚, 达方华, 周澄, 等. 不同运行负荷下 C/N 比对 CANON

- 工艺脱氮效能影响[J]. 水处理技术, 2022(9): 97-102.
WANG Y, DA F H, ZHOU C, et al. Effect of C/N ratio on the nitrogen removal performance of CANON process under different operating loads[J]. Technology of Water Treatment, 2022(9): 97-102.
- [6] 原建光, 赵迎春. 工业园区污水处理厂低负荷条件下 A/O 脱氮工艺的优化[J]. 中国给水排水, 2017, 33(8): 136-138.
YUAN J G, ZHAO Y C. Optimization operation of nitrogen removal process A/O under low pollutant load condition in an industrial park wastewater treatment plant [J] China Water & Wastewater, 2017, 33(8): 136-138.
- [7] 孟凡凡, 丁志磊, 杨琴, 等. 污泥含量与回流方式对低负荷污水除氮磷的影响[J]. 水处理技术, 2019, 45(7): 119-121.
MENG F F, DING Z L, YANG Q, et al. Effect of sludge content and reflux mode on nitrogen and phosphorus removal efficiency in low load sewage[J]. Technology of Water Treatment, 2019, 45(7): 119-121.
- [8] 姚拓. 煤矸石与废盐酸制备 PAC 的节能环保工艺分析[J]. 中国资源综合利用, 2022(9): 77-79.
YAO T. Analysis of energy saving and environmental protection process for preparing PAC from coal gangue and waste hydrochloric acid [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2022(9): 77-79.
- [9] 吴良彪, 王建荣. 用高岭土和三氧化二铁制备聚合氯化铝铁工艺研究[J]. 江西化工, 2022(4): 83-87.
WU L B, WANG J R. Technological preparation of PAFC by Kaolin and ferric trioxide[J]. Jiangxi Chemical Industry, 2022(4): 83-87.
- [10] 陈金灿, 刘万里, 陈永军, 等. PVDF 超滤膜应用于工业废水处理的膜污染形成与控制[J]. 水处理技术, 2018, 44(6): 126-129.
CHEN J C, LIU W L, CHEN Y J, et al. The formation and control of membrane fouling occurred in the ultra-filtration process of PVDF membranes applied for industrial wastewater treatment plant[J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(6): 126-129.
- [11] 张涛, 余冉. 低温对市政污水生物处理的影响及对策[J]. 净水技术, 2022, 41(6): 24-29, 38.
ZHANG T, YU R. Influence and countermeasures of low temperature on biological process for municipal wastewater treatment[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(6): 24-29, 38.
- [12] 盛晓琳, 张念慈, 刘锐, 等. 低温硝化活性污泥的富集及其生物强化效果[J]. 净水技术, 2019, 38(12): 99-104.
SHENG X L, ZHANG N C, LIU R, et al. Effect of enrichment and bioaugmentation on nitrifying activated sludge under low temperature [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(12): 99-104.

(下转第 149 页)

- sludge by hydrothermal coupled low temperature drying [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(4): 153-9.
- [15] SUÁREZ-IGLESIAS O, URREA J L, OULEGO P, et al. Valuable compounds from sewage sludge by thermal hydrolysis and wet oxidation. A review [J]. Science of the Total Environment, 2017, 584/585: 921-934. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.140.
- [16] 丁付革,周正兵,甘雁飞. 柠檬酸催化强化疏浚底泥水热减量机理研究[J]. 中国港湾建设, 2023, 43(7): 78-83.
DING F G, ZHOU Z B, GAN Y F. Mechanism of citric acid catalyzed enhanced hydrothermal reduction of dredged mud [J]. China Harbour Engineering, 2023, 43(7): 78-83.
- [17] 张剑桥,何欣月,宁兹功,等. 液相循环水热法污泥减量及资源化利用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(6): 33-38.
ZHANG J Q, HE X Y, NING Z G, et al. Sludge reduction and resource utilization based on hydrothermal process with processing liquid recycling[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(6): 33-38.
- [18] 张会文,代晓炫,姜伟,等. 市政污泥的水热反应减量及水分赋存形态研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(7): 96-100.
ZHANG H W, DAI X H, JIANG W, et al. Reduction and water forms of municipal sludge treated by hydrothermal reaction [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(7): 96-100.
- [19] HUANG H J, YUAN X Z, ZENG G M, et al. Quantitative evaluation of heavy metals pollution hazards in liquefaction residues of sewage sludge [J]. Bioresour Technol, 2011, 102(22): 10346-10351.
- [20] WANG X D, CHI Q Q, LIU X, et al. Influence of pyrolysis temperature on characteristics and environmental risk of heavy metals in pyrolyzed biochar made from hydrothermally treated sewage sludge [J]. Chemosphere, 2019, 216: 698-706. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.10.189.
- [21] 郑楚鹏. 基于水热碳化的市政污泥品质提升与重金属稳定化的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
ZHENG C P. Study on quality improvement and heavy metals stabilization of sewage sludge based on hydrothermal carbonization [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [22] 方庭环. 河道底泥水热处理减量及稳定化研究[D]. 上海: 东华大学, 2020.
FANG T G. Research on the reduction and stabilization of river bottom sediment hydrothermal treatment [D]. Shanghai: Donghua University, 2020.
- [23] HARVEY O R, HERBERT B E, RHUE R D, et al. Metal interactions at the biochar-water interface: Energetics and structure-sorption relationships elucidated by flow adsorption-microcalorimetry [J]. Environment Science Technology, 2011, 45(13): 5550-5556.

(上接第125页)

- [13] 谭杰,董滨,戴晓虎. 温度对生物膜—活性污泥复合工艺硝化特性及硝化菌种群的影响[J]. 净水技术, 2016, 35(2): 21-25.
TAN J, DONG B, DAI X H. Influence of temperature on nitrification characteristics and nitrifying bacteria community in integrated fixed film-activated sludge process [J]. Water Purification Technology, 2016, 35(2): 21-25.
- [14] 李世文,王胜渊,于林静,等. 基于MBBR工艺的北方某污水厂运行效果及氮磷去除机理分析[J]. 净水技术, 2022, 41(9): 86-95.
LI S W, WANG S Y, YU L J, et al. Mechanism analysis of nitrogen and phosphorus removal in north WWTP based on MBBR process [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(9): 86-95.
- [15] 郝晓地,孙思辈,李季,等. 污水处理过程水温变化模型构建与验证[J]. 环境科学学报, 2022, 42(12): 1-11.
HAO X D, SUN S B, LI J, et al. Establishing and verifying a temperature model for the process of wastewater treatment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(12): 1-11.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. 建筑给水排水设计标准: GB 50015—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Design standard for building water supply and drainage: GB 50015—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范: GB 50736—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of heating ventilation and air conditioning of civil buildings: GB 50736—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [18] 魏小涵,毕学军,尹志轩,等. 温度和DO对MBBR系统硝化和反硝化的影响[J]. 中国环境科学, 2019, 39(2): 612-618.
WEI X H, BI X J, YIN Z X, et al. Effects of temperature and dissolved oxygen on nitrification and denitrification in MBBR system [J]. China Environmental Science, 2019, 39(2): 612-618.
- [19] 刘丽娅,刘丹丹,莫华荣,等. 城镇污水生物脱氮除磷研究进展[J]. 净水技术, 2023, 42(3): 49-59.
LIU L Y, LIU D D, MO H R, et al. Research progress of biological nitrogen and phosphorus removal in municipal wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(3): 49-59.