

山东省某污水处理厂准IV类提标扩建设计

王 婷, 卢立泉, 苏 童, 程 拓, 慕 杨, 田海成

[济南市市政工程设计研究院(集团)有限责任公司, 山东 济南 250003]

摘 要: 山东省某污水处理厂设计处理规模4万 m^3/d , 为满足当地日益增长的污水处理需求, 将污水处理厂扩建2万 m^3/d , 同时全厂出水水质由《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准提高至《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的IV类标准(总氮不大于10 mg/L)。扩建部分采用“预处理+AAO+沉淀池+粉末活性炭吸附池+磁混凝沉淀池+转盘滤池+消毒”处理工艺路线; 提标部分采用改造生化系统+粉末活性炭的工艺路线; 污泥采用高压带式连续脱水机, 含水率降低至65%以下, 出水 COD_{Cr} 、氨氮、TN、TP出水平均值分别为17.8、0.42、8.8、0.24 mg/L, 出水水质稳定优于设计标准。

关键词: 准IV类; 提标扩建; AAO; 磁混凝沉淀池

中图分类号: TU991.35

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)05-0294-06

Design of Quasi-Class IV Upgrading and Expansion of a Wastewater Treatment Plant in Shandong

WANG Ting, LU Liquan, SU Tong, CHENG Tuo, MU Yang, TIAN Haicheng

[Jinan Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Jinan 250003, China]

Abstract: The design treatment scale of a wastewater treatment plant (WWTP) in Shandong is 40 000 m^3/d . To meet the increasing local demand for wastewater treatment, the WWTP will be expanded by 20 000 m^3/d , while the effluent quality of the whole WWTP is upgraded from the Class 1A standard specified in the *Discharge Standard for Pollutants from Municipal Wastewater Treatment Plants* (GB 18918—2002) to the Class IV standard (total nitrogen not larger than 10 mg/L) outlined in the *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838—2002). The treatment process of "pretreatment + AAO + sedimentation tank + powdered activated carbon adsorption tank + magnetic coagulation sedimentation tank + disc filter + disinfection" is adopted in the expansion section. The process of reconstructed biological system + powdered activated carbon is used in the upgrading section. For sludge treatment, the high-pressure belt continuous dewatering machines are used to reduce the moisture content to below 65%. The average effluent concentrations of COD_{Cr} , ammonia nitrogen, TN and TP are 17.8 mg/L, 0.42 mg/L, 8.8 mg/L, and 0.24 mg/L, respectively. The effluent quality is stable and is better than the design standards.

Keywords: Quasi-class IV; upgrading and expansion; AAO; magnetic coagulation sedimentation tank

0 引 言

随着社会经济的迅速发展, 山东省某地一方面污水量日益增加; 另一方面, 山东省住房和城乡建设厅于2022年4月12日印发《山东省城市排水“两个清零、一个提标”工作方案》, 要求城市污水处理厂出水水质达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的IV类标准(总氮不大于10 mg/L)。因此山东某地污水处理厂亟需进行提标扩建^[1]。

收稿日期: 2025-11-03

作者简介: 王婷(1984—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事给排水设计工作。

通信作者: 慕杨(1993—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事给排水设计工作。电子信箱: shjymy@jnszy.com

1 工程概况

山东某污水处理厂设计处理规模4万 m^3/d , 分两期建设完成, 一期处理规模为2万 m^3/d , 采用预处理+改良型氧化沟工艺处理工艺; 二期处理规模为2万 m^3/d , 采用预处理+初沉池+AAO+沉淀池处理工艺, 同时新建4万 m^2/d 的折板絮凝沉淀+V型滤池深度处理工艺, 另外又对一期改良型氧化沟工艺进行改造采用AAO运行方式, 出水水质满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准, 尾水排入下游湿地。污泥脱水经带式压滤机脱水后含水率小于80%。

2 污水处理厂设计水质

污水厂现状设计规模 4 万 m³/d,平均进水量 3.8 万 m³/d,以当地生活污水为主。根据污水处理厂多年运行数据,进水水质统计结果见表 1。提标扩建设计进水水质以实际监测数据为参考,取实际进水 90% 涵盖率下的浓度为本次工程设计进水水质的基本参考值,且考虑到当地正在实施的雨污分流及提质增效工程,预测污水厂进水浓度较之前会有所提升,对 NH₃-N、TN 以及 TP 等指标设计进水浓度预留一定余量,同时根据当地要求提标扩建后污泥含水率不大于 65%。提标改造关键指标确定依次为 TN、NH₃-N、TP。

表 1 污水处理厂进水水质						
项目	COD _{cr}	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TN	TP
现状设计进水水质/ (mg·L ⁻¹)	420	200	200	30	45	3
实际进水平均水质/ (mg·L ⁻¹)	217	87	103	28.6	37.6	3.4
90% 涵盖率下进水 水质/(mg·L ⁻¹)	300	125	188	42	53	5.76
现状设计出水水质/ (mg·L ⁻¹)	50	10	10	5(8)	15	0.5
实际出水平均水质/ (mg·L ⁻¹)	15.6	3.6	2.2	1.07	8.3	0.23
实际出水不能满足 提标标准百分比/%	0	0	0	20	30.6	4.6
提标扩建设计进水 水质/(mg·L ⁻¹)	420	180	200	50	60	6.0
提标扩建设计出水 水质/(mg·L ⁻¹)	30	6	10	1.5(3)	10(12)	0.3

3 提标扩建方案

3.1 扩建方案

在新的设计进、出水水质标准下,各个指标去除率为: COD_{cr}≥92.8%, BOD₅≥96.7%, SS≥95%, NH₃-N≥97%, TN≥83.3%, TP≥95%。同时又考虑到污水处理厂主要处理当地生活污水,生化性较好,因此扩建工程采用“预处理+AAO+沉淀池+粉末活性炭吸附池+磁混凝沉淀池+转盘滤池+消毒”处理工艺流程。

3.2 提标方案

3.2.1 生化系统改造

污水处理厂现状一、二期生化系统停留时间较长,但停留时间分配不合理,缺氧池停留时间较短,且内回流比例较小,因此无法满足新设计进、出水水质标准下的 TN 稳定达标,因此需要对污水处理厂现状

一、二期生化系统停留时间进行重新分配,以满足 TN 达标需要,生化系统现状具体参数见表 2。NH₃-N 达标则主要是通过增大曝气解决。

表 2 污水处理厂现状一、二期 AAO 参数		
项目	一期生化系统	二期生化系统
厌氧区停留时间/h	1.74	1.50
缺氧区停留时间/h	3.6	4.11
好氧区停留时间/h	15.89	17.2
内回流比	200%	180%

3.2.2 增加 COD 达标保障工艺

现状污水处理厂 COD 出水水质良好,出水平均值约为 15.6 mg/L,基本能够满足新的设计出水水质要求,因此本次提标扩建仅在现状工艺基础上增加一套粉末活性炭投加系统用于 COD 达标保障。

3.3 污泥系统改造方案

本次提标扩建工程要求污泥含水率由 80% 降低至 65%,为节约项目投资,污泥系统改造拟利用现状污泥脱水机房。由于现状污泥脱水机房用于带式脱水机使用,房间高度相对较低,无法满足常规高压隔膜压滤机的安装要求。因此,污泥系统改造考虑采用占地面积较小的高压带式连续脱水机用于替换现状带式脱水机以实现污泥含水率 65% 的要求^[11]。

4 工艺设计

4.1 工艺流程

本次提标改造扩建工程工艺流程见图 1。

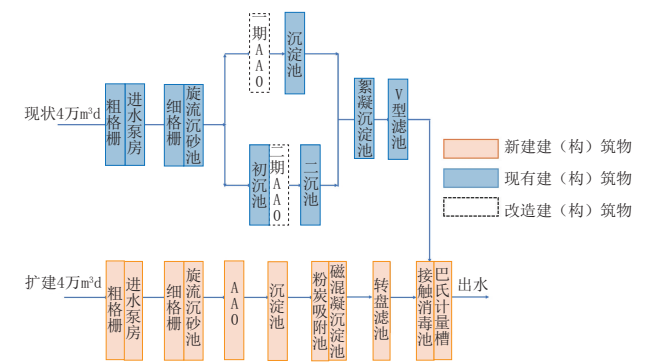


图 1 污水处理厂工艺流程图

4.2 总平面设计

由于现状厂区与扩建厂区在进水上实现了互联互通,因此扩建厂区处理构筑物采用单组单格的思路,同时扩建工程充分与现状厂区进行结合,加药系统、污泥处理系统均利用现状厂区现有建筑物,增加相关设备与污泥浓缩池 1 座,在扩建厂区内预留出远期发展用地,见图 2。

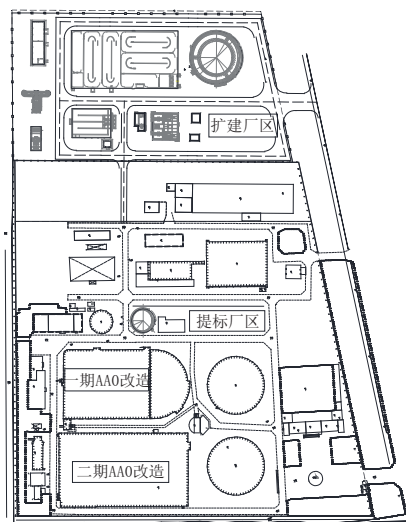


图2 污水处理厂平面布置图

4.3 主要设计参数

4.3.1 扩建部分

(1) 粗格栅及进水泵房

设计流量: $Q_{\max}=0.36 \text{ m}^3/\text{s}$ (变化系数 1.56)。粗格栅为钢丝牵引式格栅除污机 2 套, 格栅宽度 800 mm, $b=20 \text{ mm}$, 安装角度 75° , $N=1.5 \text{ kW}$ 。配套皮带输送机 1 台, 带宽 500 mm, $L=3.6 \text{ m}$, $N=1.5 \text{ kW}$ 。进水泵房设置水泵 3 台, $Q=650 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=12.0 \text{ m}$, $N=45 \text{ kW}$ 水泵 3 台, 2 用 1 备, 2 台变频。

(2) 细格栅及旋流沉砂池

设计流量: $Q_{\max}=0.36 \text{ m}^3/\text{s}$ (变化系数 1.56), 2 条渠道。细格栅参数: 阶梯孔板格栅, $B=1000 \text{ mm}$, 栅条间隙为 5 mm, 功率 $N=1.5 \text{ kW}$, 安装角度 75° 。旋流沉砂池单池直径 2.43 m, 有效水深 1.50 m, 水力表面负荷 $140.2 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$, 设计停留时间 $t=38.5 \text{ s}$ 。主要设备: 旋流除砂器 2 套, 砂水分离器 1 套 ($Q=5\sim12 \text{ L/s}$, $N=0.37 \text{ kW}$)。

(3) A/A/O 反应池及污泥回流泵房

设计流量: $Q_{\text{ave}}=0.23 \text{ m}^3/\text{s}$ (变化系数 1.0), 1 座 1 池。每池分六区: 预缺氧区、厌氧区、缺氧区、好氧区、后置缺氧区、后置好氧区。各区停留时间如下: 预缺氧区 0.58 h, 厌氧区 1.65 h, 缺氧区 7.24 h, 好氧区 8.29 h, 后置缺氧区 1.83 h, 后置好氧区 0.49 h。污泥负荷 $N_s=0.14 \text{ kgBOD}_5/\text{kgMLSS} \cdot \text{d}$, 污泥产率 $0.80 \text{ kgDS}/\text{kgBOD}_5 \cdot \text{d}$, 污泥浓度 $\text{MLSS}=4.0 \text{ g/L}$, 泥龄 $\varphi=16.0 \text{ d}$, 有效水深 $H=6.0 \text{ m}$ 。设计污泥回流比 100%, 混合液回流比 300%, 最大标准需氧量 $346 \text{ kgO}_2/\text{h}$ 。

(4) 沉淀池

设计流量: $Q_{\max}=0.36 \text{ m}^3/\text{s}$ (变化系数 1.56), 1 座

1 池, 单池直径 $\phi=36 \text{ m}$, 表面负荷 $q=1.28 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$, 池周边水深 $H=4.0 \text{ m}$ 。主要设备: 周边传动单管吸泥机, 1 套, $D=36 \text{ m}$, $N=0.55 \text{ kW}$ 。

(5) 粉末活性炭吸附池及磁混凝沉淀池

设计规模为 $2 \text{ 万 m}^3/\text{d}$, 变化系数 $K=1.56$, 1 座 2 池。主要设计参数: 炭吸附池平面尺寸: $4.75 \text{ m} \times 4.75 \text{ m}$, 有效水深: 6.00 m , 反应时间 12.50 min ; 混凝反应池平面尺寸: $1.95 \text{ m} \times 1.95 \text{ m}$, 有效水深: 5.95 m , 反应时间 2.09 min ; 加载反应池平面尺寸: $1.95 \text{ m} \times 1.95 \text{ m}$, 有效水深: 5.90 m , 反应时间 2.09 min ; 絮凝反应池平面尺寸 (单格尺寸): $2.50 \text{ m} \times 2.50 \text{ m}$, 有效水深: 5.85 m , 反应时间 3.38 min ; 沉淀池表面负荷: $13.05 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ (均值), $20.36 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ (峰值), 沉淀池平面尺寸: $7.0 \text{ m} \times 7.0 \text{ m}$ 。

(6) 转盘滤池

设计流量: $Q_{\max}=0.36 \text{ m}^3/\text{s}$ (变化系数 1.56)。滤池峰值滤速 10.32 m/h , 滤池平均滤速 6.6 m/h , 滤池滤盘直径 3 m, 滤池滤盘数量 10 个, 有效过滤面积 126 m^2 , 瞬时反洗面积 0.25 m^2 , 反洗周期 $0.5\sim2.0 \text{ h}$ 。

(7) 接触消毒、巴氏计量槽

接触消毒及回用水池采用钢筋混凝土结构。接触消毒池来水有两路, 一路设计流量为 $2 \text{ 万 m}^3/\text{d}$, 变化系数 $K=1.56$ 采用重力接入; 一路由现状厂区接入, 设计流量 $4 \text{ 万 m}^3/\text{d}$, 采用压力提升接入, 设计停留时间 30 min , 设计容积为 1600 m^3 。主要设备: 提升泵 3 台 (2 用 1 备, 变频), $Q=833 \text{ m}^3/\text{h}$ $H=1.0 \text{ m}$ $N=7.5 \text{ kW}$; 回用水泵 2 台 (1 用 1 备, 变频), $Q=45 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=32 \text{ m}$, $N=15 \text{ kW}$; 巴氏计量槽, 喉宽 750 mm 。

(8) 鼓风机房及变配电室

框架结构单层厂房, 鼓风机房与变配电室合建, 为 AAO 生物反应池提供氧气。设计总供气量 $126 \text{ m}^3/\text{min}$, 鼓风机房内空气悬浮离心鼓风机 3 台。大风机鼓风机供气量 $84 \text{ m}^3/\text{min}$, $P=75 \text{ kPa}$, $N=124 \text{ kW}$, 1 台, 变频控制; 小风机鼓风机供气量 $42 \text{ m}^3/\text{min}$, $P=75 \text{ kPa}$, $N=83 \text{ kW}$, 2 台, 1 用 1 备, 变频控制。

(9) 加药间改造

利用现状一、二期加药加药间, 放置本次扩建工程加药设备。投加 PAC、PAM 主要是为了去除生化部分难以去除的 SS、COD、TP。投加次氯酸钠作用是辅助消毒。混凝剂采用 PAC, 平均投加量 40 mg/L , 10% 原液进行投加。投加采用隔膜计量泵 3 台, 2 用 1 备。助凝剂采用聚丙烯酰胺 (PAM), 平均投加量 1.0 mg/L , 投加浓度为 $0.1\% \sim 0.2\%$ 。PAM 溶液由自动

制药装置进行制备,投加采用加药螺杆泵 3 台,2 用 1 备。采用次氯酸钠接触消毒,次氯酸钠投加量为 10 mg/L,氯离子浓度为 10%。次氯酸钠投加采用隔膜计量泵 3 台,2 用 1 备。

(10)碳源加药间

投加葡萄糖作用是为反硝化补充外加碳源外加碳源采用葡萄糖,平均投加量 80 mg/L,25% 原液直接进行投加。投加采用隔膜计量泵 2 台,1 用 1 备。加药间外设置 $\varphi=3.2\text{ m}$ 储罐 1 个,用于储存液体葡萄糖溶液,容积为 40 m³。

4.3.2 提标部分

(1)一期生化系统改造

设计流量 2 万 m³/d,主要改造内容:

- a. 将现状好氧区分隔一区域作为缺氧区 2,新分隔出的缺氧区 2 停留时间为 4.6 h。
 - b. 更换混合液回流点位置,将回流比增加至 300%,回流点设置在缺氧区 2 中。
 - c. 新建进水渠道,在现状厌氧区进水点基础上,增加缺氧区 1、缺氧区 2 两个进水点。
 - d. 根据风机风量重新布置曝气,曝气形式采用微孔盘式曝气器。
- 改造后 AAO 反应池分四区:厌氧区、缺氧区 1、缺氧区 2、好氧区。各区停留时间如下:厌氧区为 1.74 h,缺氧区 1 为 4.6 h,缺氧区 2 为 3.6 h,好氧区为 11.29 h,回流比为 300%,见图 3。

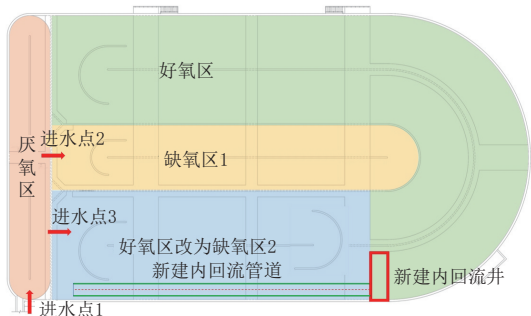


图3 一期生化池改造示意图

主要设备:潜水推流器 2 台,单台参数 $D=2\,500\text{ mm}$, $n=42\text{ rpm}$, $N=4.3\text{ kW}$;内回流泵 2 台,单台参数 $Q=1\,250\text{ m}^3/\text{h}$ $H=1.0\text{ m}$ $N=10\text{ kW}$;微孔盘式曝气器 $3.8\text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{个}$,共 1 731 个。

(2)二期生化系统改造

设计流量 2 万 m³/d,主要改造内容如下。

- a. 将现状好氧区分隔出一区域作为缺氧区 2,新分隔出的缺氧区 2 停留时间为 3.89 h。
- b. 更换混合液回流点位置,将回流比增加

至 300%。

- c. 新建进水渠道,在现状厌氧区进水点基础上,增加缺氧区 1、缺氧区 2 两个进水点。
- d. 根据风机风量重新布置曝气,曝气形式采用微孔盘式曝气器。

改造后 AAO 反应池分四区:厌氧区、缺氧区 1、缺氧区 2、好氧区。各区停留时间如下:厌氧区为 1.5 h,缺氧区 1 为 4.11 h,缺氧区 2 为 3.89 h,好氧区为 13.31 h,回流比为 300%,见图 4。

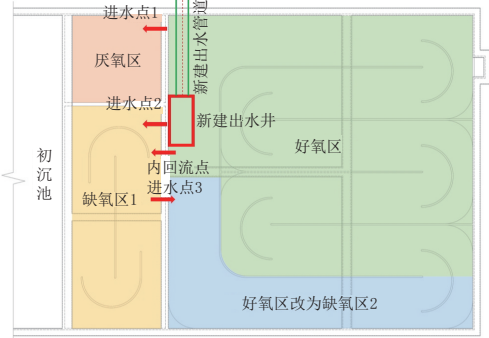


图4 二期生化池改造示意图

主要设备:立轴搅拌器 4 台,单台参数 $D=4\,000\text{ mm}$, $N=2.2\text{ kW}$;内回流泵 2 台,单台参数 $Q=1\,250\text{ m}^3/\text{h}$, $H=1.0\text{ m}$, $N=10\text{ kW}$;微孔盘式曝气器 $3.9\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{个})$, EPDM 共 1 711 个。

(3)粉末活性炭加药系统

设计规模 4 万 m³/d,干式投加,投加量为 50 mg/L,加药点均为现状絮凝沉淀池,加药系统采用 1 用 1 备设置。配置 20 m³料仓容积 1 座,粉末活性炭投加装置投加能力 10 ~ 150 kg/h, $N=15\text{ kW}$,1 套。

4.3.3 污泥系统改造部分

(1)污泥浓缩池

本工程设计干污泥量 $W=12\text{ t/d}$,为污水厂提标和扩建后的总污泥量;进泥含水率 99.2%,污泥量 $Q=1\,500\text{ m}^3/\text{d}$;出泥含水率 98%,本次工程新建浓缩池共 1 座,直径 $\phi=16\text{ m}$,污泥固体负荷 $q=59.7\text{ kg}/\text{m}^2\cdot\text{d}$,浓缩时间 12.9 h。

(2)污泥脱水机房改造

设计处理干污泥量 12 t/d,增加带宽 2 m 的高压带式连续脱水机 2 套,脱水后污泥含水率小于 65%,工作时间 12 h。

主要设备:高压带式连续脱水机 2 台,带宽 2 m, $N=20\text{ kW}$;PAM 投加系统一套;污泥进料泵(螺杆泵) 2 台 $Q=40\text{ m}^3/\text{h}$, $H=30\text{ m}$, $N=11.25\text{ kW}$;冲洗泵 2 台 $Q=20\text{ m}^3/\text{h}$, $H=80\text{ m}$, $N=5.5\text{ kW}$;石灰投加系统 1 套;三氯化铁投加系统 1 套。

5 技术特点

(1) 提标扩建相结合, 扩建厂区处理构筑物采用单组单格的思路, 同时扩建工程充分与现状厂区进行结合, 加药系统、污泥处理系统均利用现状厂区现有建筑物, 增加相关设备, 在扩建厂区内预留出远期发展空间, 节约投资。

(2) 本次提标扩建通过“先扩建, 再提标”的实施顺序, 通过先建成通水扩建厂区, 将部分污水通过扩建工程进行处理, 以此来实现对现状厂区一、二期生化系统逐组的停产改造, 不影响污水处理厂正常运行, 不产生城市污水溢流问题。

(3) 为应对来水总氮浓度增长, 扩建工程生化系统采用改良 Bardenpho 工艺, 强化脱氮除磷, 抗冲击

负荷能力强^[12-15]。在缺氧区和后置缺氧区均设置有碳源投加点, 可根据进出水 TN 浓度, 调节外加碳源投加量和投加点, 保障 TN 出水。

(4) 一、二期生化系统改造设置钢制渠道实现生化系统的多点进水, 在缺氧区进水, 进水中的有机物可作为反硝化所需的碳源可以充分利用原水的碳源, 以达到节省碳源目的。

6 运行效果

项目 2023 年 9 月投产运行以来, 各项指标实测值见图 5。该工程出水 COD_{cr} 、氨氮、TN、TP 出水平均值分别为 17.8、0.42、8.8、0.24 mg/L, 出水水质稳定优于设计标准。

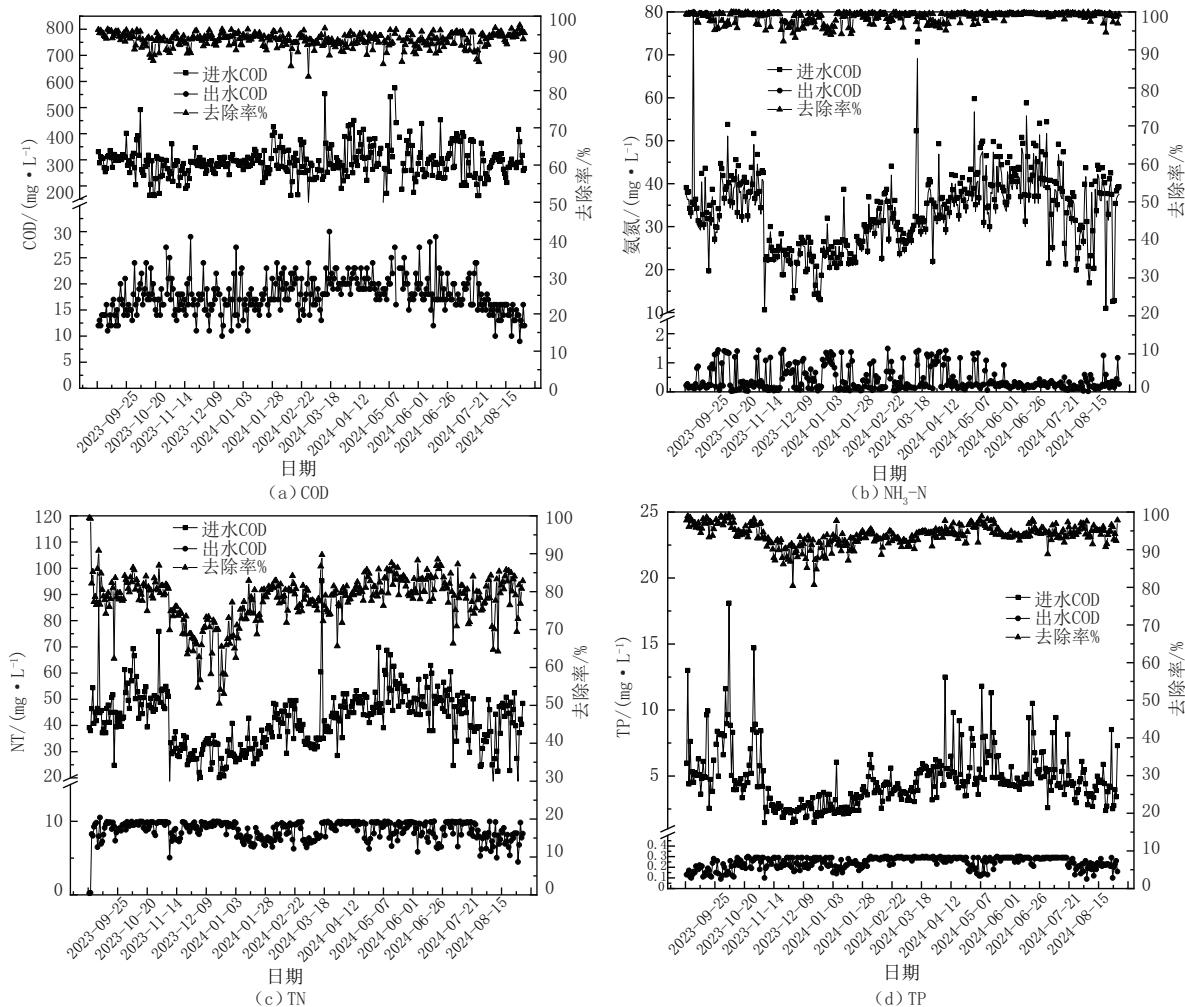


图5 提标扩建后污水处理厂实际进出水水质情况

7 结语

本项目提标扩建工程规模为 $6 \text{万 m}^3/\text{d}$, 根据进水水质和出水水质要求, 扩建部分采用“预处理+AAO+沉淀池+粉末活性炭吸附池+磁混凝沉淀池+转盘滤

池+消毒”处理工艺路线; 提标部分采用改造生化系统+粉末活性炭的工艺路线; 污泥采用高压带式连续脱水机, 含水率降低至 65% 以下。该项目的实施有效缓解了当地污水处理能力不足引发的溢流污染问题, 为下游湿地生态系统提供了稳定的补水水源。

本项目在工艺路线选择及扩容空间预留等方面的实践经验,对相关污水处理提标扩建项目具有一定的技术参考价值。

参考文献:

[1] 王婷,王磊,邱立平,等.污水处理厂准Ⅳ类提标及扩建设计[J].山东建筑大学学报,2024,39(6):123-130.
 [2] 朱强,张晗,张为堂,等.多段AAO+深床反硝化滤池在城市污水处理厂提标扩容的设计[J].水处理技术,2022,48(6):147-151;156.
 [3] 乔晓娟,王胤,傅驿凯,等.某污水处理厂提标扩建工艺设计及运行分析[J].中国给水排水,2025,41(4):113-118.
 [4] 余波,马娇,李箫宁,等.某污水处理厂准Ⅳ类提标改造运行效能及碳排放分析[J].工业水处理,2024,44(10):222-230.
 [5] 刘浩,臧海龙,耿安锋,等.青岛李村河污水处理厂类Ⅳ类标准提标扩建工程设计[J].中国给水排水,2023,39(2):52-57.
 [6] 刘义忠,周知.汤汪污水处理厂扩建、提标及再生水回用工程特点解析[J].净水技术,2024,43(增刊2):216-224.

[7] 安冬.无为市城东污水处理厂提标改造及扩建工程设计[J].广东化工,2024,51(22):112-113.
 [8] 赵白恩,康增彦,王维红.新疆某污水处理厂提标改扩工程案例[J].水处理技术,2023,49(5):141-144.
 [9] 李晓斌,焦文海,王磊,等.山东某污水处理厂提标扩建工程方案分析[J].环境与发展,2024,36(6):70-76.
 [10] 高伟楠,田萌,程树辉,等.华南某污水厂原厂扩容提标设计探讨[J].工业水处理,2025,45(10):213-218.
 [11] 田海成,杨曦凯,朱强,等.低含水率要求下地下式污水处理厂污泥处理工艺比选[J].给水排水,2024,60(增刊1):170-175.
 [12] 王磊,慕杨,田海成.改良Bardenpho工艺的设计与运行效果分析[J].城市道桥与防洪,2024(2):128-131.
 [13] 田海成,慕杨,孙阳,等.污水处理厂鼓风机房技术改造设计要点及案例分析[J].工业用水与废水,2023,54(5):53-56.
 [14] 张雨欣,范忠祥,刘长远,等.大连某污水处理厂(一期)提标改造及工艺优化[J].水处理技术,2025,51(12):145-149.
 [15] 窦娜莎,张奇,宋菲菲,等.青岛李村河污水处理厂提标扩容工程设计与应用研究[J].水处理技术,2025,51(11):149-152.

(上接第244页)

[8] 陈建勋,罗彦斌,万利,等.超大跨度公路隧道研究现状与面临的挑战[J].筑路机械与施工机械化,2018,35(6):36-44.
 [9] 吴胜忠.城市核心区地下道路立交大跨分岔隧道结构与选型[J].公路交通技术,2018,34(增刊1):126-132.
 [10] 张红卫,刘为民,龚航里,等.大跨度折板拱形隧道大体积混凝土结构温度应变测量与分析[J].建筑技术开发,2018,45(17):19-21.
 [11] 高频.城市明挖长隧道的结构设计[J].科技经济导刊,2016,565(11):11-13.
 [12] 刘亮.城市隧道结构设计研究[J].建筑技术开发,2019,46(14):33-35.
 [13] 毕强,吴金刚.大跨分岔式隧道结构设计关键技术研究[J].隧道建设,2011,31(6):668-677.
 [14] 刘明保,聂永明,乐贵平,等.某明挖大跨区间预应力密排框架箱

形结构的抗裂控制[J].建筑科学,2012,28(增刊1):308-311.
 [15] 刘发前.超大跨度地下矩形隧道结构型式及经济性分析[J].地下空间与工程学报,2018,14(3):792-798.
 [16] 杨旭.明挖法隧道标准矩形结构与折板拱结构选取分析[J].北方交通,2021,335(3):78-82.
 [17] 港珠澳大桥主体工程协同管理创新成果 隧道篇 交通运输[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2023.
 [18] 李英,汉斯·德维特.港珠澳大桥沉管隧道技术难点和创新[J].南方能源建设,2017,4(2):1-16.
 [19] JTG/T 3371—2022 公路水下隧道设计规范[S].
 [20] GB/T50010—2010 混凝土结构设计标准(2015年版)[S].
 [21] 段进涛,董毓利,朱三凡,等.港珠澳大桥沉管隧道的横截面承载力分析[J].华侨大学学报(自然科学版),2020,41(1):8-18.