

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.06.013

多级A/O+臭氧氧化工艺用于污水厂准Ⅲ类水提标改造

王靖¹, 杨毅², 白文龙¹, 陈乐¹, 郑逸心¹, 夏四清²

(1. 内蒙古东源环保科技股份有限公司, 内蒙古鄂尔多斯 014399; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 鄂尔多斯市某污水处理厂原设计规模为 $6.0\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, 主体工艺采用氧化沟+二沉池+混凝沉淀池+砂滤池, 设计出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。由于污水厂出水的受纳水体下游为水源地, 需对现状污水处理工艺进行提标改造, 使出水水质达到地表水准Ⅲ类标准。为此, 根据污水厂实际处理水量, 将设计规模调整为 $4.5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, 将现状氧化沟工艺改造为多级A/O(A/A/O/A/O)运行模式, 并在一级好氧池投加填料, 强化处理能力的同时提高冬季抗冲击负荷能力, 另外新建臭氧接触池进行深度处理。改造后, 系统的抗冲击负荷能力增强, 出水水质稳定, 出水COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP平均浓度分别为12.8、0.14、0.08 mg/L, 优于地表水Ⅲ类标准; 出水TN平均浓度为9.4 mg/L, 满足再生水回用和尾水排放要求。

关键词: 污水处理厂; 提标改造; 臭氧氧化; 地表水准Ⅲ类标准

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)06-0083-06

Application of Multi-stage A/O and Ozonation Combined Process for Upgrading and Reconstruction of a Wastewater Treatment Plant to Class Quasi-III Standard for Surface Water

WANG Jing¹, YANG Yi², BAI Wen-long¹, CHEN Le¹, ZHENG Yi-xin¹,
XIA Si-qing²

(1. Inner Mongolia Dongyuan Environmental Protection Technology Co. Ltd., Ordos 014399, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The original design scale of a wastewater treatment plant (WWTP) in Ordos City is $6.0\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$. The primary treatment process incorporates oxidation ditch, followed by secondary sedimentation tank, coagulation sedimentation tank, and sand filter. The effluent quality is designed to meet first level A criteria specified in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002). Given that the receiving water body downstream of the WWTP serves as the drinking water source, it is imperative to upgrade the existing wastewater treatment process to ensure that the effluent quality meets the class quasi-III standard specified in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002). In accordance with the actual treatment capacity of the WWTP, the design capacity scale was adjusted to $4.5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$. The existing oxidation ditch process was

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3201300)

通信作者: 夏四清 E-mail: siqingxia@tongji.edu.cn

modified to the multi-stage A/O (A/A/O/A/O) system, and fillers were introduced into the primary-aeration tank to enhance treatment efficiency and improve resistance to shock loads in winter. Additionally, a new ozone contact tank was constructed for advanced treatment. Following the reconstruction, the system's resistance to shock loads was significantly enhanced and the effluent quality was stable. The average concentrations of COD, $\text{NH}_3\text{-N}$ and TP in the effluent were 12.8 mg/L, 0.14 mg/L, and 0.08 mg/L, respectively, all of which were lower than the class III limits specified in the surface water standard. Additionally, the average concentration of TN in the effluent was 9.4 mg/L, satisfying the requirements for both reclaimed water reuse and tailwater discharge.

Key words: wastewater treatment plant; upgrading and reconstruction; ozonation; class quasi-III standard for surface water

随着我国水环境治理力度的不断增强,《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级A标准已无法满足当前日益严格的水环境保护要求。在此背景下,对污水处理厂进行提标改造已成为提升出水水质、满足更高水质标准的关键举措^[1-5]。鄂尔多斯市位于典型的半干旱气候区,年降水量较少,干旱季节河道常出现断流现象,水环境承载能力极为有限。该市某污水处理厂出水的接纳水体下游为重要的水源地,当地环保部门明确要求该污水处理厂进行提标改造,以确保出水水质达到地表准Ⅲ类水质标准,并满足再生水回用和尾水排放的双重需求。针对北方地区特有的气候条件,尤其是鄂尔多斯市冬季严寒和昼夜温差较大的特点,对该污水厂进行提标改造时,参考北京市《城镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB 11/890—2012)中的A标准,并结合实际情况对排放标准进行合理调整。在此基础上,TN排放限值被确定为10(12) mg/L,以实现水环境保护与水资源循环利用的协同目标。

1 工程概况

1.1 污水处理厂简介

鄂尔多斯市某污水处理厂于2012年建成投运,设计规模为 $6.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,主体工艺采用氧化沟+二沉池+混凝沉淀池+砂滤池(见图1),出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。污泥经机械脱水处理后(含水率降至80%左右),交由专业公司进行后续处理与处置。采用生物除臭,在生物池内安装含有组合生物填料的培养箱。

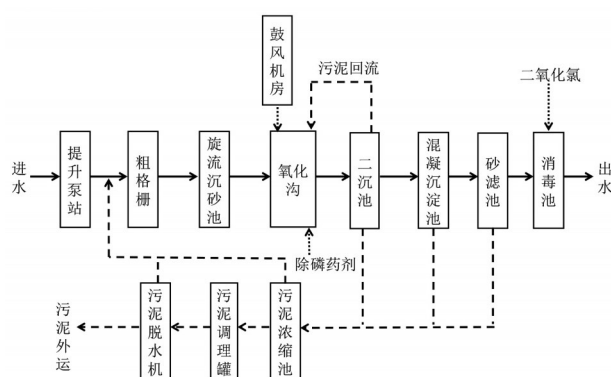


图1 原污水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of original wastewater treatment process

1.2 存在的问题

对2019年11月—2020年10月的进、出水水质数据进行分析,结果如下。

① COD: 污水处理厂进水COD为179.1~599.0 mg/L(平均值为451.7 mg/L),波动较大,经原工艺处理后,出水COD下降至4.5~35.3 mg/L,满足国家一级A排放标准要求,但与地表水Ⅲ类标准($\text{COD} \leq 20.0 \text{ mg/L}$)相比,达标率仅为58.3%。

② $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN: 进水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为40.2~68.9 mg/L(平均值为53.1 mg/L),经处理后,出水氨氮降为0.02~1.3 mg/L(平均值为0.18 mg/L),去除率高达99.66%,与地表水Ⅲ类标准($\text{NH}_3\text{-N} \leq 1.0 \text{ mg/L}$)相比,达标率为95.8%。进水TN为42.1~76.9 mg/L(平均值为61.4 mg/L),经处理后,出水TN降至8.0~14.9 mg/L,符合国家一级A排放标准,但相较于出水浓度低于10 mg/L的提标改造要求,达标率仅为45.4%。

③ TP: 进水TP为2.1~6.0 mg/L(平均值为

5.3 mg/L),经处理后,出水TP降为0.007~0.27 mg/L(平均值为0.093 mg/L),去除率为98.2%,与地表水Ⅲ类标准($TP \leq 0.2$ mg/L)相比,达标率为86.0%。该污水处理厂需要结合生物法和化学法来去除TP。为了更好地满足提标改造要求,建议根据实际进水TP浓度适当增大除磷药剂的投加量^[6]。

以上运行数据表明,出水COD、 NH_3-N 、TN、TP等指标均能满足国家一级A标准,但与地表水Ⅲ类标准相比,达标率较低,特别是TN和COD。因此,需要对原有污水处理工艺进行升级改造,以满足更加严格的排放标准,其中应重点提升COD和TN的去除效果。

2 改造方案

2.1 改造方案的选择

该污水处理厂的进水主要包括城区的市政生活污水和工业企业的生产废水两大部分。首先需要对生化池进行改造,将原有的氧化沟工艺改为多级A/O(A/A/O/A/O)工艺。A/O交替可以减少内回流,降低能耗,避免丝状菌膨胀,提高抗冲击负荷能力和脱氮效能。改造后的一级好氧区采用MBBR(移动床生物膜反应器)工艺,该工艺通过增加生物量能有效提升系统的处理能力,并增强其抗温度波动的能力。该项目出水水质要求较高,COD出水限值为20 mg/L,仅依靠生物处理工艺难以达标,因此需要引入高级氧化技术。常见的去除COD的高级氧化技术有Fenton氧化、 ClO_2 催化氧化和臭氧催化氧化等。相比较而言,臭氧催化氧化技术对有机污染物具有极强的氧化能力,能够高效去除COD;同时,该技术不会产生有毒有害的中间产物,符合安全环保的要求^[7]。另外,与臭氧非均相催化氧化技术相比,臭氧均相催化氧化技术去除有机污染物的能力虽然较弱,但是考虑到实际污水中的COD易催化降解,选择均相催化,具有运行成本较低、对池体构造要求简单、建设投资成本较低等优点^[8]。因此,该改造项目计划引入臭氧均相催化氧化工艺,以进一步提升污水处理厂的出水水质,满足新的排放标准要求。

2.2 设计规模及进、出水水质

该污水处理厂的原设计处理能力为 6.0×10^4 m³/d,但在实际运营中,日均处理量为 4.2×10^4 m³/d,鉴于排放标准的提高,改造时将设计规模调整为

4.5×10^4 m³/d。另外,由于该污水处理厂出水排放流域的水功能区划等级被划定为《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅲ类水体,作为该水域的补充水源之一,污水处理厂的出水水质目标被设定为基本达到地表水Ⅲ类标准(TN指标除外)。为此,确定改造项目的设计进水COD、BOD₅、 NH_3-N 、TN、TP、SS浓度分别为550、285、55、60、5、200 mg/L,设计出水浓度分别为20.0、4.0、1.0(1.5)、10(12)、0.2、5.0 mg/L(括号内为水温 ≤ 12 °C时的数据),冬季的设计水温为10 °C。

2.3 工艺流程

综合考虑处理效果、用地条件和运维成本等因素,提标改造时力求在最大程度上利用原有的处理设施,以节省工程建设成本。为此,在原有处理工艺上进行升级,改造后的工艺流程如图2所示。

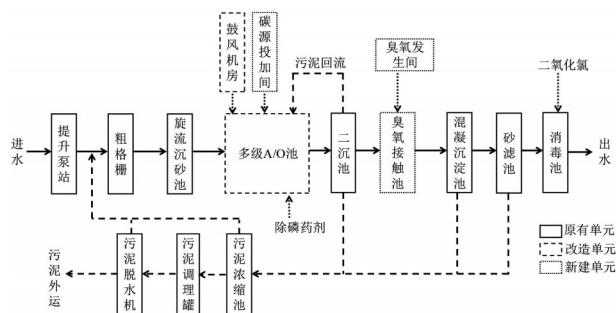


图2 改造后的污水处理工艺流程

Fig.2 Flow chart of wastewater treatment process after reconstruction

2.4 改造的工程内容

① 生化池改造

原有生化池为氧化沟工艺,设计处理规模为 6.0×10^4 m³/d,3座,每座生化池均按厌氧区、缺氧区和好氧区划分,其中厌氧区的水力停留时间(HRT)为1.36 h,缺氧区为3.57 h,好氧区为14.79 h。为提升污水处理效果并增强冬季抗冲击负荷能力,改造时将生化池的工艺结构调整为A/A/O/A/O运行模式。改造后,生化池的设计处理规模为 4.5×10^4 m³/d,设计MLSS为4 g/L,泥龄(SRT)为20 d,功能区划分如下:厌氧区(HRT=1.79 h)、一级缺氧区(HRT=8.59 h)、MBBR好氧区(HRT=9.3 h)、二级缺氧区(HRT=3.07 h)、二级好氧区(HRT=3.05 h),总HRT为25.8 h。一级缺氧池的设计脱氮速率为0.018 kgNO₃⁻-N/(kgMLSS·d),一级反硝化混合液回流比设定为185%;一级好氧池(投加填料后)混合液中

的硝化菌比生长速率设计值为 $0.283\ 2\ \text{d}^{-1}$, 安全系数 F 设计值为 2.6, 填料比表面积设计值为 $800\ \text{m}^2/\text{m}^3$, 填料的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 面积负荷设计值为 $0.55\ \text{gNH}_3\text{-N}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 填料的 BOD_5 面积负荷设计值为 $5\ \text{gBOD}_5/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。经过 A/A/O 工艺单元处理后, 进入后续 A/O 工艺单元的 TN 浓度设计值为 $20\ \text{mg/L}$ 。二级缺氧池 (外加碳源) 的设计脱氮速率值为 $0.02\ \text{kgNO}_3^-\text{-N}/(\text{kgMLSS}\cdot\text{d})$ 。填料为聚乙烯材质, 密度为 $0.95\ \text{g}/\text{cm}^3$, 粒径为 $20\ \text{mm}$, 填充比 $<20\%$ 。设置硝化液回流泵 9 台 (6 用 3 备), 单台 $Q=667\ \text{m}^3/\text{h}$ 、 $H=50\ \text{kPa}$ 、 $P=18.5\ \text{kW}$ 。

② 曝气系统改造

改造前生化反应池采用表面转盘曝气, 为了提高氧转移效率和生化处理效率、降低能耗、节约运行成本, 在 MBBR 拦截筛网处设置穿孔曝气管, 预防填料堆积, 其余采用微孔曝气。新建鼓风机房 1 座, 为 3 座生化反应池底部曝气系统提供气源, 鼓风机房尺寸为 $L\times B\times H=25.5\ \text{m}\times 8.5\ \text{m}\times 6.9\ \text{m}$ 。改造后生化反应池的曝气总量为 $426\ \text{m}^3/\text{min}$ 。选用 4 台磁悬浮鼓风机 (3 用 1 备), 单台 $Q=142\ \text{m}^3/\text{min}$ 、 $H=55\ \text{kPa}$ 、 $P=150\ \text{kW}$ 。

③ 新建碳源投加间

原氧化沟工艺无碳源投加系统, 故新建碳源投加间 1 座。碳源原料采用复合碳源成品 (液体, COD 浓度为 $450\ \text{g/L}$)。共设置 2 座碳源储罐 ($\text{DN}3\ 000\times 4.0\ \text{m}$), 供 3 路加药管线使用。采用 6 台 (3 用 3 备) 变频机械隔膜泵进行加药, 单台 $Q=1.5\ \text{m}^3/\text{h}$ 、 $H=300\ \text{kPa}$ 、 $P=2.2\ \text{kW}$ 。

④ 新建臭氧发生器间

新建臭氧发生间 1 座, 平面尺寸为 $15.6\ \text{m}\times 9.0\ \text{m}$, 配置 3 台臭氧发生器 (2 用 1 备), 单台臭氧产量为 $25\ \text{kg}/\text{h}$ 、功率为 $187.5\ \text{kW}$, 以满足最大去除 $12\ \text{mg/L}$ COD 的设计需求, 臭氧投加量设定为 $14.4\ \text{mg/L}$ 。臭氧投加量可依据污水厂中控室提供的实时水流量信号或预设的 COD 浓度实现动态调节与反馈控制。臭氧发生器采用密闭式循环冷却系统, 设置 2 台热交换器, 同时设置 6 台循环冷却水泵, 单台 $Q=200\ \text{m}^3/\text{h}$ 、 $H=200\ \text{kPa}$ 、 $P=4.0\ \text{kW}$ 。另外, 设置氧压机 3 台 (2 用 1 备), $P=18.5\ \text{kW}$; 空压机 2 台 (1 用 1 备), $P=18.5\ \text{kW}$ 。

⑤ 新建臭氧接触池

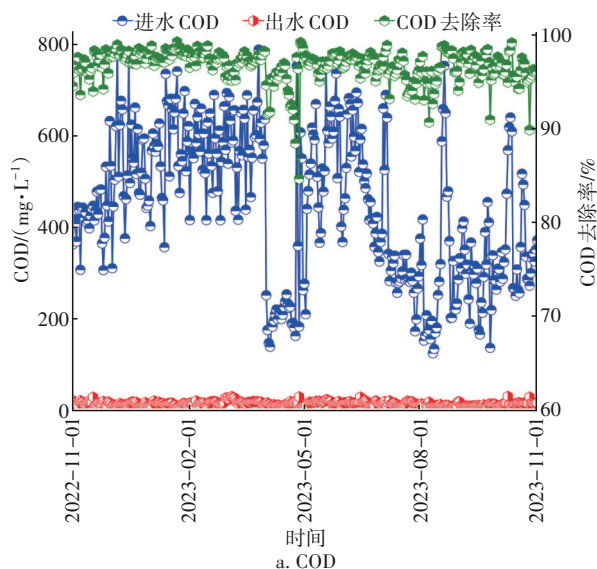
新建臭氧接触池 1 座, 设计规模为 $4.5\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 。

在臭氧接触池中进水与臭氧混合, 进行氧化、脱色、消毒反应, 臭氧接触池的尺寸为 $L\times B\times H=41.60\ \text{m}\times 16.80\ \text{m}\times 10.1\ \text{m}$, 分为两格, 从中间进水渠进水、两侧出水渠出水, 采用 H_2O_2 催化臭氧氧化工艺, 分三段设计, 三段臭氧投加比例依次为 50%、25%、25%。接触氧化时间为 $60\ \text{min}$, 按照 COD 去除量 $\geq 12\ \text{mg/L}$ 设计。由于臭氧在水中的半衰期较短, 仅为 $20\ \text{min}$ 左右, 反应室内布置微气泡曝气系统, 采用热接触媒式臭氧尾气处理装置对未反应完全的臭氧进行收集处理。受用地限制, 有效水深设计为 $8.0\ \text{m}$, 为了节省投资同时考虑施工条件, 在臭氧接触池前设置泵提升 $2\sim 3\ \text{m}$, 使池体埋深不至于过大。设置高效臭氧溶气装置 4 台, $P=0.4\ \text{kW}$; 流程定制泵 5 台 (4 用 1 冷备), $Q=200\ \text{m}^3/\text{h}$ 、 $H=240\ \text{kPa}$ 、 $P=45\ \text{kW}$; 均相催化反应器 2 套, $P=12\ \text{kW}$; 尾气破坏器 3 套 (2 用 1 备), $P=9.2\ \text{kW}$; 排泥泵 2 台 (1 用 1 备), $Q=100\ \text{m}^3/\text{h}$ 、 $H=110\ \text{kPa}$ 、 $P=5.5\ \text{kW}$ 。

3 改造后的运行效果与分析

该污水处理厂自 2021 年 5 月开始进行提标改造, 于 2021 年 11 月完成改造工作。经调试和试运行后, 选择 2022 年 11 月—2023 年 10 月的进、出水水质数据进行分析, 具体见图 3。

由图 3 可以看出, 在 12 个月 (包括冬季) 的稳定运行期间, 出水水质基本达到预期设计目标, 解决了改造前出水 COD、TN 等指标不能稳定达到新标准的问题, 并且处理效果不受进水水质波动的影响, 表明改造后的污水处理工艺具备较强的应对水质和水量冲击负荷的能力。



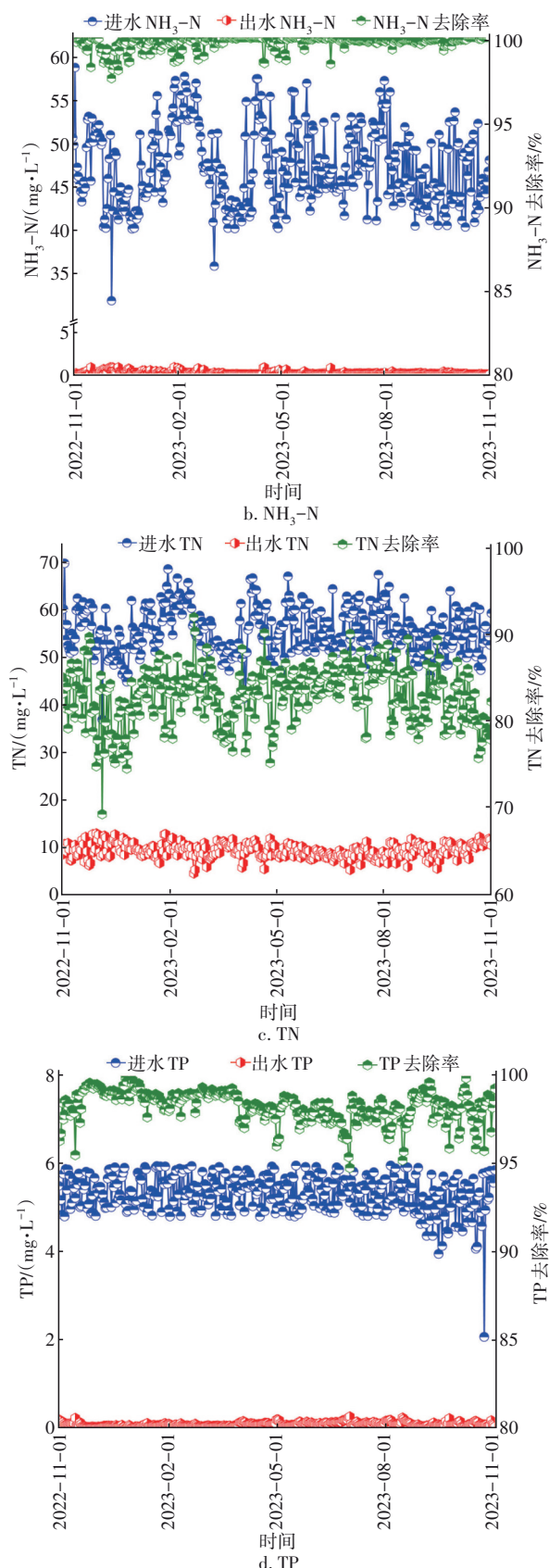


图3 改造后对污染物的去除效果

Fig.3 Removal effect of pollutants after reconstruction

① COD指标:进水COD为115.8~788.1 mg/L,经过多级A/O系统处理后,COD下降为14.45~22.34 mg/L(平均为18.67 mg/L)。在后续的 H_2O_2 催化臭氧氧化系统中,臭氧投加量根据需去除的COD量来确定,在实际运行过程中 O_3/COD 值为0.45~0.69(平均为0.54), H_2O_2 与 O_3 的投加量之比为1.5。最终出水COD为3.3~18.6 mg/L(平均为12.8 mg/L),稳定达到地表水Ⅲ类标准。

② $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TN指标:进水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为31.8~58.5 mg/L,出水为0.01~0.83 mg/L(平均为0.14 mg/L),去除率为97.72%~99.95%,满足地表水Ⅲ类标准。进水TN为36.9~69.8 mg/L,出水为4.5~12.9 mg/L(平均为9.4 mg/L),去除率为74.5%~93.3%,基本满足设计标准要求。TN的达标率在冬季有所下降,原因主要是当温度 $<15^\circ\text{C}$ 时,微生物活性下降,导致反硝化速率降低。此时为了保证处理效果,需适当延长污泥停留时间,并降低进水负荷。

③ TP指标:进水TP浓度较高,基本在4.0~5.9 mg/L之间(除个别异常数据外),经过生化系统处理后,TP下降为0.16~2.03 mg/L(平均为0.52 mg/L),仅依靠生物除磷难以满足高标准排放要求。因此需要后续混凝沉淀池进一步除磷。最终污水厂出水TP降为0.006~0.19 mg/L(平均为0.08 mg/L),去除率达到94.8%~99.9%,满足地表水Ⅲ类标准要求。

4 经济分析

该污水处理厂提标改造工程的建设投资成本为7 126万元,单位处理成本为1.66元/ m^3 。具体处理成本分项如下:电耗成本为0.69元/ m^3 ,碳源药剂成本为0.41元/ m^3 ,除磷药剂成本为0.012元/ m^3 ,消毒药剂成本为0.18元/ m^3 ,污泥处理费用为0.24元/ m^3 ,臭氧处理费用为0.13元/ m^3 。

5 结论

鄂尔多斯市某污水处理厂提标改造工程在原氧化沟工艺的基础上,通过重新布置功能区,改造为多级A/O(A/A/O/A/O)工艺,并于一级好氧池投加填料,同时新建臭氧接触池作为深度处理单元。改造后,系统的抗冲击负荷能力提升,出水COD、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP平均浓度分别为12.8、9.4、0.14、0.08 mg/L,稳定达到地表水Ⅲ类标准,为该市污水厂处理效能的提升提供了良好的示范,对推动地区污水处理技术的提升与优化具有积极作用。

参考文献:

- [1] 梅小乐, 代博, 杨红, 等. MBBR+SBR 工艺用于寒冷地区污水处理厂升级改造[J]. 中国给水排水, 2019, 35(20): 92-95.
MEI Xiaole, DAI Bo, YANG Hong, *et al.* Application of MBBR and SBR process in WWTP upgrading project in cold region [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(20): 92-95 (in Chinese).
- [2] 柏春荫, 张庆习, 赵帅, 等. BAF+高效沉淀池+反硝化深床滤池用于准IV类提标[J]. 中国给水排水, 2023, 39(12): 119-124.
BAI Chunyin, ZHANG Qingxi, ZHAO Shuai, *et al.* Application of BAF, high-efficiency sedimentation tank and DDBF in upgrading of WWTP for quasi-IV standard [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(12): 119-124 (in Chinese).
- [3] 付尧, 张丽婷, 苏大雄. 多重叠组工艺用于污水厂原址准IV类提标扩容[J]. 中国给水排水, 2023, 39(24): 87-92.
FU Yao, ZHANG Liting, SU Daxiong. Multi-overlapping process for upgrading and expansion of wastewater treatment plant to surface water quasi IV discharge standard within the existing land [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(24): 87-92 (in Chinese).
- [4] 梁硕, 负丹丹, 王艳芝, 等. 诸城银河污水厂深度处理改造及工艺调试[J]. 中国给水排水, 2024, 40(10): 101-106.
LIANG Shuo, YUN Dandan, WANG Yanzhi, *et al.* Advanced treatment renovation and process commissioning of Zhucheng Yinhe WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(10): 101-106 (in Chinese).
- [5] 李双菊, 程瑞丰, 柳佳然, 等. 后置反硝化滤池和活性炭接触池的提标工程设计[J]. 中国给水排水, 2024, 40(18): 96-102.
LI Shuangju, CHENG Ruifeng, LIU Jiaran, *et al.* Upgrading engineering design of post-denitrification filter and activated carbon contact tank [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(18): 96-102 (in Chinese).
- [6] 赵俊娜, 王建伟, 马景春, 等. 污水处理厂化学除磷精确投加系统及应用研究[J]. 中国给水排水, 2024, 40(12): 110-113.
ZHAO Junna, WANG Jianwei, MA Jingchun, *et al.* Research on precise dosing system for chemical phosphorus removal and its application in a WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(12): 110-113 (in Chinese).
- [7] 高群丽. 臭氧用于污水厂深度处理的运行与优化研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2022.
GAO Qunli. Study on Operation and Optimization of Ozone in Advanced Treatment of Wastewater [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2022 (in Chinese).
- [8] 刘伟刚, 张欢, 刘欣, 等. 泥膜共生/臭氧催化氧化工艺在污水处理厂提标改造中的应用[J]. 净水技术, 2024, 43(4): 178-189.
LIU Weigang, ZHANG Huan, LIU Xin, *et al.* Application of integrated fixed film activated sludge/catalytic ozonation processes in upgrading and reconstruction of WWTP [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(4): 178-189 (in Chinese).

作者简介:王靖(1985-),男,内蒙古鄂尔多斯人,硕士,高级工程师,主要从事污水处理厂运行与管理工作。

E-mail:jing16888@hotmail.com

收稿日期:2024-12-21

修回日期:2025-01-02

(编辑:刘贵春)