

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.10.015

含工业废水的改良 Bardenpho 污水厂运行效果

马宏林, 师旭军, 李平, 陈鑫, 李建, 华海洁, 苏蕊
(中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 西北地区含工业废水的城镇污水,采用复合式初沉池+改良 Bardenpho+高效沉淀池+V型砂滤池工艺处理。复合式初沉池采用平流沉淀池和斜管沉淀池的组合设计,改良 Bardenpho 工艺的进水流量比例为预缺氧段:厌氧段:缺氧 I 段=2.0:4.0:4.0。在低温条件下,构筑物采用地埋式、半地埋式或置于室内。当进水 COD、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 浓度分别为 65.07~535.17、17.12~53.56、13.09~46.42、1.57~7.18 mg/L 时,相应出水指标优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准,部分出水可长期作为生态补水及园林绿化用水。该工艺在冬季低温条件下运行良好,经营成本仅约 2.46 元/ m^3 。

关键词: 西北地区; 低温; 工业废水; 生活污水; 改良 Bardenpho 工艺

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)10-0091-07

Performance of WWTP Containing Industrial Wastewater Based on Improved Bardenpho Process

MA Hong-lin, SHI Xu-jun, LI Ping, CHEN Xin, LI Jian, HUA Hai-jie, SU Rui
(CSCEC AECOM Consultants Co. Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract: The urban sewage containing industrial wastewater in the northwest region is treated by a combined process including composite primary sedimentation tank, improved Bardenpho process, high-density tank, and V-type sand filter. The composite primary sedimentation tank integrates both flat-flow and inclined tube sedimentation tanks. The flow rate ratio of the improved Bardenpho process is 2.0:4.0:4.0 for the pre-anoxic section, anaerobic section, and anoxic I section. To accommodate low-temperature conditions, structures are designed to be either underground, semi-underground or located indoors. When influent COD, TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TP concentrations range from 65.07–535.17 mg/L, 17.12–53.56 mg/L, 13.09–46.42 mg/L, 1.57–7.18 mg/L, respectively, the effluent concentration is superior to the level A criteria in *Discharge Standards of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918–2002). Portions of this effluent can be utilized for long-term ecological water replenishment as well as garden irrigation. This treatment process demonstrates effective operation under winter's low-temperature conditions with an operating cost of only about 2.46 yuan/ m^3 .

Key words: northwest region; low-temperature; industrial wastewater; domestic sewage; improved Bardenpho process

近年来,工业项目逐步向园区集中,全国工业园区的开发数量和规模持续增加。以太阳能光伏企业

基金项目:兰州市科技局科技计划项目(2024-4-9)

为例,省级及以上光伏园区已超2 000家^[1],产生大量工业废水。在一些经济较发达地区,城镇污水收集管网接纳了大量工业废水,导致工业废水在污水处理厂进水中占比较大^[2]。相比于市政污水,各类工业废水由于来源不同,水质特征差异较大且指标浓度较高^[3],需经过处理达标后才可排入排水管网。部分企业产生的废水虽然浓度较低,可直接纳管排放^[4-6],但这些废水往往可生化性较差,残余的有机物大部分为难生物降解物质。目前,一些工业废水占比较高的城镇污水处理厂出水水质仍执行国家一级标准^[7],但这类污水处理厂由于进水组成复杂、难降解有机物含量较高,传统工艺无法满足出水稳定达标的要求。

西北地区冬季寒冷漫长,平均水温为4~15℃,污水处理易受低温限制^[8]。Bardenpho工艺是在传统AO工艺上进一步改进,由缺氧、好氧段串联而成的新工艺^[9-10]。污水分段进入各级缺氧段,为反硝化菌提供充足的碳源,且能减少前段出水的溶解氧

和pH对后级缺氧段的影响^[11]。基于此,针对含有大量工业废水的城镇污水,构建了复合式初沉池+改良Bardenpho+高效沉淀池+V型砂滤池的处理系统,探究其对城镇污水主要污染物的去除情况及降解特性,以期为低温环境下含工业废水的城镇污水处理提供参考。

1 项目背景

1.1 污水处理厂概况

某污水处理厂位于西北地区(海拔为1 400~1 500 m),该地区年平均气温7.5℃,属于典型的半沙漠大陆性气候,降水量为85.3 mm/a,蒸发量高达2 148.8 mm/a。一期设计规模为5 000 m³/d,包括2 300 m³/d的甜菜加工厂废水;随着上游工业园光伏类企业入驻增多,结合远期对排水量的预测,二期扩建后总规模为2.5×10⁴ m³/d,包括入园企业满足排入下水道标准的9 560 m³/d的工业废水和远期新增约5 000 m³/d生活污水。通过分析在建涉水企业排放水量与水质,确定最终设计进水水质见表1。

表1 进水水质

Tab.1 Influent quality

项目	COD/(mg·L ⁻¹)	BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	pH
光伏废水(9 560 m ³ /d)	150	60	30	8.0	70	6.0~9.0
农产品甜菜加工厂废水(2 300 m ³ /d)	500	350	45	8.0	70	—
现状95%累计频率值	867	—	49	8.5	70	7.5~8.0
加权平均值	683	205	47	8.1	70	7.5~8.0
设计值	680	205	50	8.5	70	7.5~8.0

二期进水主要包括新增园区废水9 560 m³/d、一期5 000 m³/d污水以及远期新增5 000 m³/d生活污水,远期新增5 000 m³/d的生活污水水质相对稳定,因此以园区废水排放水质与甜菜加工厂废水排放水质为主要依据,对不同企业水质、水量与现状进水水质95%的累计频率值进行加权平均以确定进水水质。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,并考虑将尾水回用。可以看出,脱氮除磷和有机物的降解是该项目的主要目标。

1.2 污水处理工艺

1.2.1 现状分析及工艺选择

一期采用A²O+加砂活性炭吸附高密池+转盘滤池的组合工艺,由于进水含砂量高、砂粒径小,旋流沉砂池对细砂的去除效果不佳,造成后续污水处理设备磨损、管道堵塞^[12],加之光伏废水在处理过程

中会产生大量钙离子,因此二期设计复合式初沉池进行脱钙处理和强化沉淀效果^[13]。园区企业排水量不稳定,水质波动较大,采用均质调节池调节水量、均化水质;根据进水“低碳、高氮”的特点,二级处理采用多点进水Bardenpho工艺,该工艺具有运行方式灵活、投资小,能充分利用原水中碳源和更好应对水质变化冲击等优势;深度处理采用高效沉淀池+V型砂滤池组合工艺,符合改造项目占地紧张的客观条件,且对TP和SS具有良好的去除效果,并能去除部分COD^[14]。此外,针对高海拔严寒低温环境,对构筑物采用埋地设计,或依据建筑结构体型系数、围护结构保温性能等,将部分构筑物设于室内保温防冻,并依据当地大气含氧量实测资料,采用容积式鼓风机,能较好地满足当地高海拔及水量波动的要求。通过以上综合分析,最终确定二期改造方案采用复合沉淀池+改良Bardenpho生物池+深

度处理(高效沉淀池+V型砂滤池),主要工艺流程见图1。

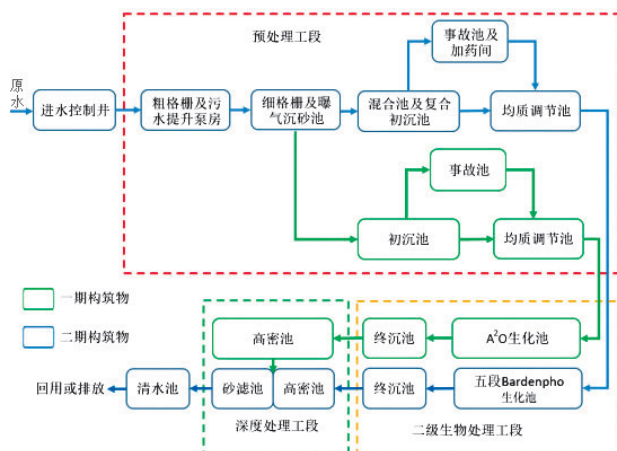


图1 工艺流程

Fig.1 Flow chart of treatment process

1.2.2 构筑物保留与改造设计

① 保留现状构筑物

保留一期辐流式沉淀池1座,处理水量 $5\,000\text{ m}^3/\text{d}$,直径15 m,平均表面水力负荷 $1.18\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,水力停留时间(HRT)为3.82 h。保留一期均质调节池1座,设计规模为 $5\,000\text{ m}^3/\text{d}$,前段为调节池,后段为水解酸化池,有效容积 $2\,500\text{ m}^3$,HRT=12 h。保留一期二沉池2座,单座处理水量 $2\,500\text{ m}^3/\text{d}$,直径15 m,有效水深3.5 m,平均时表面水力负荷为 $0.60\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,HRT=2 h,最大回流比为80%。保留一期清水池1座,消毒接触30 min,设计总容积 500 m^3 ,全地埋式。

② 改造现状构筑物

a. 改造一期A²/O生物池:一期设计规模 $5\,000\text{ m}^3/\text{d}$,分2组,HRT=27.3 h,总池容 $5\,693\text{ m}^3$,其中厌氧池HRT=2 h,有效容积 432 m^3 ;缺氧池HRT=9.3 h,有效容积 $1\,935\text{ m}^3$;好氧池HRT=16 h,有效容积 $3\,335\text{ m}^3$ 。污泥回流比为100%,混合液回流比为400%,池体埋深>6 m。本次改造包括配水井增加搅拌器,保证回流污泥和进水完全混合,调整南北两池配水堰高度一致,保证两侧配水均匀性,并设置桨叶式搅拌器。

b. 改造污水深度处理间:一期设置1座,处理能力 $5\,000\text{ m}^3/\text{d}$,包括活性炭接触池(HRT=13 min)、混凝池(HRT=3.8 min)、絮凝池(HRT=6 min)、沉淀池、纤维转盘滤池及加药间。沉淀池采用斜板沉淀, HRT=1.1 h,上升流速为23.2 m/h。纤维转盘滤

池直径2 m,滤速 $\leq 15\text{ m/h}$,有效过滤面积 34.2 m^2 ,瞬时反洗面积 0.114 m^2 ,反洗转速1 r/min,反洗周期1 h。加药间包括PAC、PAM、微砂、粉末活性炭等药剂的储存与投加,由于该地区冬季寒冷,构筑物设于室内。本次改造将一期高效沉淀池出水用潜污泵输送至新建砂滤池进行过滤处理,保证处理效果。

1.2.3 新建构筑物设计

新建均质调节池1座,设计规模为 $2.0\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,HRT=8 h,有效水深7.0 m。新建细格栅、曝气沉砂池(合建)设计规模 $2.5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,曝气沉砂池有效水深2.4 m,有效容积 363 m^3 ,HRT=12.0 min,曝气量为 $8.0\text{ L}/(\text{m}\cdot\text{s})$,采用桥式双槽吸砂机排砂。

新建初沉池2座,复合式,兼顾上游工业废水排水中钙离子的去除,前段为平流沉淀区,后段为上向流斜管沉淀区。混合池设2组,依次投加氢氧化钠、碳酸钠、PAC及PAM,氢氧化钠混合池混合时间为120.0 s,碳酸钠、PAC及PAM混合池混合时间为698.0 s。平流沉淀区沉淀时间35.10 min,斜管沉淀区斜管长度1.0 m,倾角为 60° ,上升流速3.7 m/h,复合式初沉池埋深为4 m。

新建2座改良Bardenpho生物反应池,单座处理规模 $1.0\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,每座分2格,单格设计规模 $5\,000\text{ m}^3/\text{d}$;生物池进水来自均质调节池,预缺氧、厌氧、缺氧1、好氧1、缺氧2、好氧2的停留时间分别为1.0、4.0、10.5、11.0、2.5、1.0 h,构筑物埋深6.1 m。改良Bardenpho工艺流程如图2所示。

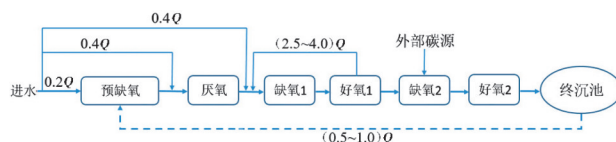


图2 改良Bardenpho工艺流程

Fig.2 Flow chart of improved Bardenpho process

深度处理单元主要由高效沉淀池和V型砂滤池组成,其中高效沉淀池单座设计流量为 $1.0\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,V型砂滤池考虑一期转盘滤池故障时,也能满足处理要求,按 $2.5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 设计。高效沉淀池分为2个系列,每个系列包括混合区、絮凝区及沉淀区。V型砂滤池共分4格,单格过滤面积 84 m^2 ,采用均质石英砂滤料,均时滤速3.10 m/h,强制滤速4.13 m/h,峰时正常滤速5.39 m/h,强制滤速7.19 m/h。该项目要求出水TP稳定在 0.5 mg/L 以下,因此设计化学

除磷,选用聚合氯化铝作为化学除磷药剂,投加点在高效沉淀池进水端。由于该地区冬季比较寒冷,构筑物要设于室内防冻,设计将高效沉淀池和砂滤池、回用水泵房各处理构筑物,加药间、配电室等附属生产间均设在一体化的污水深度处理间(室内)。新建二沉池2座,处理规模为 $2.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,采用周进周出辐流式沉淀池,直径32 m,沉淀时间2.5 h,有效水深2.90 m,平均时表面水力负荷 $0.52 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

2 运行效果及经济分析

2.1 COD的去除效果及分析

2024年1月—3月COD去除效果如图3所示。

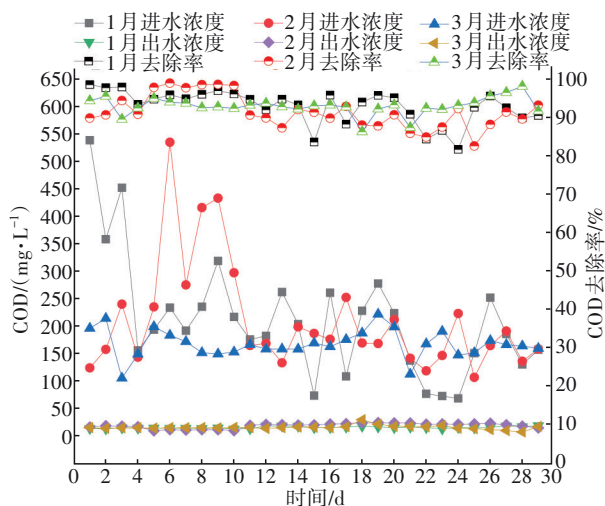


图3 2024年1月—3月COD去除效果

Fig.3 COD removal effect from January to March in 2024

通过调研获得2024年第一季度数据,1月上旬(1~14 d)日平均气温为 $-4.5 \sim 1.5^\circ\text{C}$,进水COD为 $152.51 \sim 535.17 \text{ mg/L}$,出水COD为 $9.31 \sim 14.81 \text{ mg/L}$,对应的COD去除率为 $91.57\% \sim 98.08\%$,平均去除率为 95.03% ;1月下旬(15~29 d)日平均气温为 $-16.5 \sim -0.5^\circ\text{C}$,进水COD为 $65.07 \sim 274.34 \text{ mg/L}$,出水COD为 $9.58 \sim 15.31 \text{ mg/L}$,对应的COD去除率为 $81.24\% \sim 95.34\%$,平均去除率为 90.07% 。2月日平均气温为 $-12.5 \sim 1.5^\circ\text{C}$,进水COD为 $103.31 \sim 531.52 \text{ mg/L}$,出水COD为 $6.05 \sim 20.84 \text{ mg/L}$,对应的COD去除率为 $82.11\% \sim 98.12\%$,平均去除率为 90.96% 。3月日平均气温为 $-6.0 \sim 12.5^\circ\text{C}$,进水COD为 $101.96 \sim 218.39 \text{ mg/L}$,出水COD为 $3.78 \sim 26.05 \text{ mg/L}$,对应的COD去除率为 $85.83\% \sim 97.65\%$,平均去除率为 92.48% 。1月日均气温低于

0°C ,1月下旬平均气温低于上旬平均气温,出水COD相差不大,说明改良Bardenpho工艺的多点进水强化了处理效果,有利于提高工艺抗低温的性能,也表明改良Bardenpho工艺对不同进水COD负荷具有很好的适应性^[15]。2月和3月气温相较1月有所上升,但出水COD有轻微上升,这主要是运行过程中投加部分碳源所致。1月和2月进水COD较高且波动较为明显,主要原因是在此期间西北地区季节性农产品甜菜加工废水排放量较大,导致进水COD上升,通过均质调节池进行水量水质调节,避免了对生物反应系统的冲击,保证出水水质达标。总体来看,在低温条件下,出水COD满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ类标准,出水回用于生态补水及园林绿化。

2.2 TN的去除效果及分析

2024年1月—3月TN去除效果如图4所示。

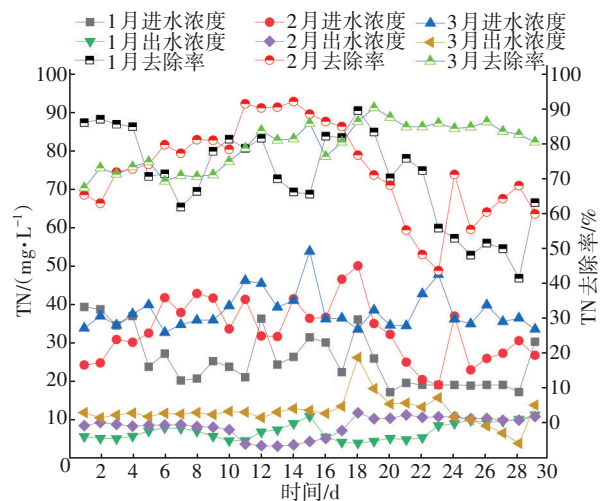


图4 2024年1月—3月TN去除效果

Fig.4 TN removal effect from January to March in 2024

1月日平均气温为 $-16.5 \sim 1.5^\circ\text{C}$,进水TN为 $17.12 \sim 40.13 \text{ mg/L}$,出水TN为 $4.48 \sim 11.32 \text{ mg/L}$,对应的TN去除率为 $71.79\% \sim 73.83\%$,平均去除率为 72.61% 。2月日平均气温为 $-12.5 \sim 1.5^\circ\text{C}$,进水TN为 $18.97 \sim 53.56 \text{ mg/L}$,出水TN为 $3.09 \sim 11.16 \text{ mg/L}$,对应的TN去除率为 $79.16\% \sim 83.71\%$,平均去除率为 81.21% 。3月日平均气温为 $-6.0 \sim 12.5^\circ\text{C}$,进水TN为 $33.69 \sim 47.62 \text{ mg/L}$,出水TN为 $3.82 \sim 15.06 \text{ mg/L}$,对应的TN去除率为 $68.37\% \sim 88.66\%$,平均去除率为 81.32% 。在运行过程中,为了提高脱氮效率,在回流口,即在第二缺氧段进水口投加固体碳

源(乙酸钠)维持稳定的碳氮比,可以看出,随着气温升高,TN去除率也随之上升,表明改良Bardenpho对氨氮的硝化具有良好的效果^[16]。在进水TN波动较大的情况下,前好氧池硝化反应较充分,在外加碳源的辅助下,反硝化效果良好,可较好地处理TN浓度变化大的污水。3月出现出水TN超过15 mg/L的情况,主要原因是内回流泵出现故障,运行中通过阀门切换进水,将进水提升至应急事故池,待恢复正常后再切换至原处理流程,确保出水水质稳定达标。总体来看,出水TN满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。

2.3 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果及分析

2024年1月—3月 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果如图5所示。

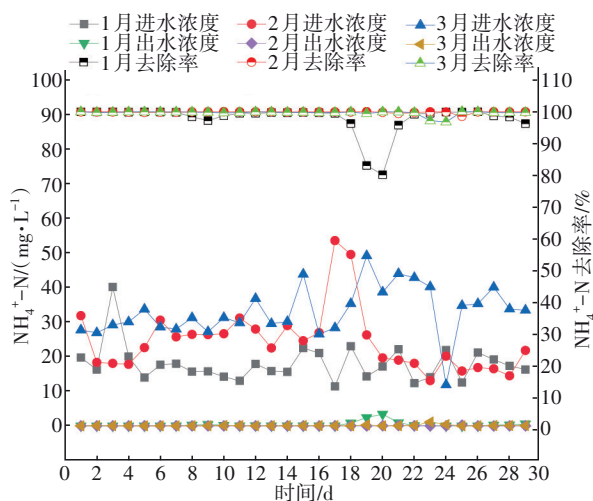


图5 2024年1月—3月 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果

Fig.5 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal effect from January to March in 2024

1月日平均气温为 $-16.5\sim 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为11.43~39.20 mg/L,平均为24.06 mg/L,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为0.01~3.42 mg/L,平均为0.37 mg/L,对应的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率为91.27%~99.82%,平均去除率为96.24%。2月日平均气温为 $-12.5\sim 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为13.09~46.42 mg/L,平均为24.54 mg/L,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为0.02~0.05 mg/L,平均为0.034 mg/L,对应的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率为99.01%~99.89%,平均去除率为99.83%。3月日平均气温为 $-6.0\sim 12.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为11.86~43.99 mg/L,平均为32.84 mg/L,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为0.01~0.30 mg/L,平均为0.12 mg/L,对应的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率为99.91%~99.95%,平均去除率为99.92%。可以看出,进水

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 总体变化趋势与TN相似,进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为13.09~46.42 mg/L,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均浓度均能达到1.0 mg/L以下,满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ类标准。

2.4 TP的去除效果及分析

2024年1月—3月TP去除效果如图6所示。

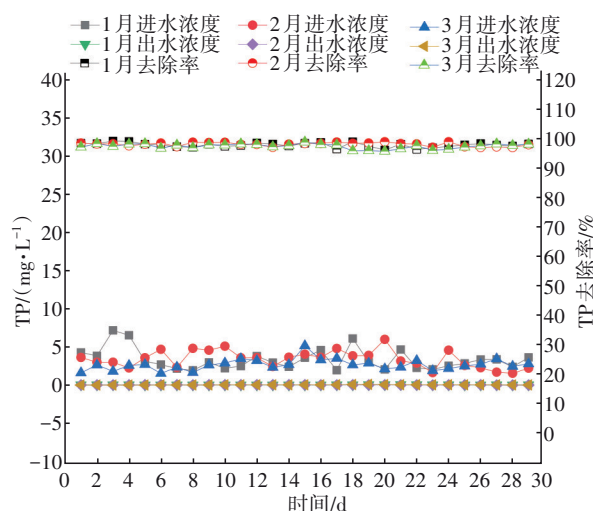


图6 2024年1月—3月TP去除效果

Fig.6 TP removal effect from January to March in 2024

1月日平均气温为 $-16.5\sim 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,进水TP为1.98~7.18 mg/L,平均为3.37 mg/L,出水TP为0.061~0.075 mg/L,平均为0.070 mg/L,对应的TP去除率为96.20%~98.91%,平均去除率为97.67%。2月日平均气温为 $-12.5\sim 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,进水TP为1.58~5.12 mg/L,平均为3.44 mg/L,出水TP为0.050~0.078 mg/L,平均为0.065 mg/L,对应的TP去除率为96.84%~98.65%,平均去除率为97.91%。3月日平均气温为 $-6.0\sim 12.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,进水TP为1.57~5.18 mg/L,平均为2.69 mg/L,测得出水TP为0.05~0.12 mg/L,平均为0.07 mg/L,对应的TP去除率为95.83%~98.64%,平均去除率为97.25%。为了提高TP的去除率,气温较低时,将固体碳源(乙酸钠)投加至厌氧池,可以看出,进水TP基本为1.57~7.18 mg/L,出水TP均可处理至0.1 mg/L。研究表明,改良Bardenpho的厌氧池能够为释磷菌创造较好的厌氧环境,原水也能够为释磷过程提供充足的碳源^[16],磷的充分释放对后续好氧段磷的吸收有益。综上说明,该工艺对TP的去除效果较好,出水TP可稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,且在大多数时间

内满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ类标准。

2.5 工程改造评价

采用复合式初沉池+改良 Bardenpho+高效沉淀池+V型砂滤池为主要工艺处理西北地区含工业废水的城镇污水,复合式初沉池增强了初沉效果,改良 Bardenpho 工艺通过优化进水流量比例,提高了脱氮除磷的效率,构筑物采用地埋式、半地埋式或建在室内的方式,有效应对西北地区低温条件,出水水质满足一级 A 排放标准,部分出水可长期作为生态补水及园林绿化用水,提高了再生水利用率。但该污水处理厂进水水质复杂,设计工艺流程较长,导致运行能耗较高,为应对水质波动,从节约碳源、降低能耗等角度,需对 Bardenpho 工艺多点进水精确控制。目前运行结果表明,该工艺性能优异,但伴随园区发展,在后期排放工业废水变化的情况下,仍需进一步探索运行模式,以确保在原水水质冲击情况下仍能实现出水的优质排放或回用。

2.6 经济分析

该改扩建工程总投资约 32 228 万元,其中污水处理厂工程费约 20 027 万元。经营成本主要来自药剂费(0.28 元/m³)、人工费(0.12 元/m³)、动力费(1.00 元/m³)、维修费(0.84 元/m³)及其他费用(0.22 元/m³),约为 2.46 元/m³,其他成本(折旧费、利息支出)约为 2.74 元/m³。其中动力费约 60% 来自中水回用,可通过收费补偿,所以实际总成本为 4.60 元/m³。

3 结论

① 西北地区某污水处理厂在低温条件下,构筑物采用地埋式、半地埋式或设在室内的方式,系统各项出水指标均满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准,部分出水可长期作为生态补水及园林绿化用水,通过中水费回收投资,经营成本约 2.46 元/m³。

② 在含工业废水的进水条件下,进水 COD 为 65.07~535.17 mg/L 时,出水 COD 为 3.78~26.05 mg/L,满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ类标准,可见该组合工艺对高浓度 COD 具有良好的降解效果。

③ 改良 Bardenpho 工艺通过设置多点进水和内回流点的调整,在低温条件下,出水 TN 和 TP 满足

《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准,且在大多数时间内,出水 TP 与 NH₄⁺-N 浓度满足地表水Ⅳ类标准。

参考文献:

- [1] 王俊杰,赵娇娇,孟旭超,等. 光伏光电行业含氟废水及污泥利用处置研究现状及展望[J]. 环境工程技术学报, 2018, 8(3): 333-342.
WANG Junjie, ZHAO Jiaojiao, MENG Xuchao, *et al.* Research status and prospect of fluorinated wastewater and sludge utilization in photovoltaic industry [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2018, 8 (3): 333-342 (in Chinese).
- [2] LEMAIRE R, YUAN Z G, BERNET N, *et al.* A sequencing batch reactor system for high-level biological nitrogen and phosphorus removal from abattoir wastewater [J]. Biodegradation, 2009, 20 (3): 339-350.
- [3] 王小兵,曾佳玮,汤钟. 高出水标准要求下高含氟工业废水处理实践[J]. 中国给水排水, 2022, 38(10): 83-89.
WANG Xiaobing, ZENG Jiawei, TANG Zhong. Practice of high fluorine industrial wastewater treatment under the requirement of high effluent standard [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38 (10): 83-89 (in Chinese).
- [4] 冯丽霞,牟洁,魏铮,等. 集成技术处理光伏行业生产废水工程实例[J]. 工业水处理, 2020, 40(5): 118-121.
FENG Lixia, MOU Jie, WEI Zheng, *et al.* A project example on integrated technology for production wastewater treatment of photovoltaic industry [J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40 (5): 118-121 (in Chinese).
- [5] 金月清,曾旭. 两级沉淀法处理液晶面板生产中含氟废水的研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(21): 109-112.
JIN Yueqing, ZENG Xu. Treatment of fluoride wastewater in liquid crystal panel production by two-stage precipitation method [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(21): 109-112 (in Chinese).
- [6] 张鹤清,朱帅,吴振军,等. 城镇污水处理厂“准Ⅳ类”标准提标改造技术简析[J]. 环境工程, 2019, 37(6): 26-30, 36.
ZHANG Heqing, ZHU Shuai, WU Zhenjun, *et al.*

- Analysis of “quasi-category IV” standard upgrading and reconstruction technology for municipal wastewater treatment plants[J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(6): 26–30, 36(in Chinese).
- [7] 张超,覃敏杰,徐冰心,等. 工业废水冲击负荷对污水厂AAO工艺运行影响的对策[J]. *净水技术*, 2017, 36(7): 67–70, 86.
- ZHANG Chao, QIN Minjie, XU Bingxin, *et al.* Countermeasure of impact load of industrial wastewater on operation of AAO process in WWTP [J]. *Water Purification Technology*, 2017, 36(7): 67–70, 86 (in Chinese).
- [8] 张吉宇,解雅东,吴琪,等. 低温条件下AAO污水处理系统脱氮效能分析及微生物群落特性[J]. *环境工程学报*, 2024, 18(2): 598–608.
- ZHANG Jiyu, XIE Yadong, WU Qi, *et al.* Nitrogen removal efficiency analysis and microbial community characteristics of AAO sewage treatment system at low temperature [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2024, 18(2): 598–608 (in Chinese).
- [9] PENG Y Z, GE S J. Enhanced nutrient removal in three types of step feeding process from municipal wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(11): 6405–6413.
- [10] 冉治霖,田文德,相会强. 一种改良型A²/O工艺脱氮除磷的影响因素研究[J]. *环境工程*, 2018, 36(6): 63–67.
- RAN Zhilin, TIAN Wende, XIANG Huiqiang. Research on influence factors of nitrogen and phosphorus removal in bi-bio-selective simultaneous phosphorus and nitrogen (BBSPN) process[J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(6): 63–67 (in Chinese).
- [11] YU T, QI R, LI D, *et al.* Nitrifier characteristics in submerged membrane bioreactors under different sludge retention times [J]. *Water Research*, 2010, 44(9): 2823–2830.
- [12] 崔健. 高原地区污水处理厂供气量计算探讨[J]. *给水排水*, 2012, 38(2): 41–46.
- CUI Jian. Discussion on the calculation of gas supply for sewage treatment plants in high-altitude areas[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2012, 38(2): 41–46 (in Chinese).
- [13] 樊艳丽,孔秀琴,牛佳雪. 钙离子浓度对活性污泥处理系统脱氮效果的影响[J]. *石油学报(石油加工)*, 2014, 30(5): 921–927.
- FAN Yanli, KONG Xiuqin, NIU Jiaxue. Influence of Ca²⁺ concentration on the nitrogen removal in activated sludge process [J]. *Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section)*, 2014, 30(5): 921–927 (in Chinese).
- [14] 关永年. BAF+高效沉淀池+V型滤池用于污水厂高标准提标改造[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(14): 66–70.
- GUAN Yongnian. Biological aerated filter, high efficiency sedimentation tank and V-type filter for upgrading and reconstruction of a high discharge standard wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(14): 66–70 (in Chinese).
- [15] 郭远凯,黎松强,吴馥萍. 改良Bardenpho工艺同步脱氮除磷处理小区生活污水[J]. *水处理技术*, 2008, 34(10): 57–59.
- GUO Yuankai, LI Songqiang, WU Fuping. Synchronous removal of phosphorus and nitrogen compound in domestic sewage by improved Bardenpho process [J]. *Technology of Water Treatment*, 2008, 34(10): 57–59 (in Chinese).
- [16] 朱泽龙,王琴. 改良型Bardenpho工艺处理生活污水的效果分析[J]. *煤炭与化工*, 2016, 39(12): 143–147.
- ZHU Zelong, WANG Qin. Performance analysis of modified Bardenpho process for treatment of municipal wastewater [J]. *Coal and Chemical Industry*, 2016, 39(12): 143–147 (in Chinese).

作者简介:马宏林(1988–),男,甘肃天水人,硕士,高级工程师,主要从事水污染控制工程的设计、咨询工作。

E-mail:641590382@qq.com

收稿日期:2024-08-07

修回日期:2024-10-28

(编辑:衣春敏)