

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.04.013

西安某电子工业污水厂扩建工程设计与低碳运行

孔海霞¹, 王安东¹, 雷海东¹, 李森¹, 刘英楠²

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司 西安分公司, 陕西 西安 710018; 2. 都创工程设计有限公司, 陕西 西安 710018)

摘要: 随着高新技术产业项目的落地,西安某电子工业聚集区污水处理需求与排放标准面临双重升级压力。针对一期工程处理能力不足、电子废水进水水质浓度低且出水标准严苛(地表水准Ⅳ类)的问题,西安某工业污水处理厂开展二期扩建工程,设计规模5.0万 m³/d,采用“预处理+Bardenpho五段可调生物池+高速气浮+转盘滤池+臭氧/次氯酸钠消毒兼接触强化氧化”工艺。通过生物池Bardenpho与A²/O工艺的灵活切换、消毒池兼具接触氧化功能以及智能加药系统,实现高效脱氮除磷,并具备较强的抗冲击负荷能力。运行数据显示,出水COD、TN、NH₃-N、TP稳定低于15、10、1.0和0.15 mg/L,单位处理成本低至0.78元/m³。单位碳排放仅为0.474 kgCO₂-eq/m³,其中,间接排放占比78.9%,较一期工程降低10.7%,可为黄河流域电子工业园污水处理厂“高标准、低碳化”提标改造提供可复制范本。

关键词: 电子废水; 地表水准Ⅳ类; 碳排放; Bardenpho工艺; 臭氧氧化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2026)04-0088-07

Design and Low-carbon Operation of a Wastewater Treatment Plant Expansion Project for the Electronics Industry in Xi'an

KONG Haixia¹, WANG Andong¹, LEI Haidong¹, LI Sen¹, LIU Yingnan²

(1. Xi'an Branch, North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Xi'an 710018, China; 2. Duchuang Engineering Design Co. Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: With the implementation of high tech industrial projects, a wastewater treatment plant in an electronics intensive zone in Xi'an is facing dual pressures of increasing treatment demand and stricter discharge standards. To address the insufficient capacity of the phase I project, as well as the low influent concentration of electronic wastewater and the stringent effluent requirements (surface water quasi-class IV standards), the wastewater treatment plant launched a phase II expansion project. The expansion has a design capacity of 5.0×10⁴ m³/d and the process adopted is “pretreatment+Bardenpho five stage adjustable biological tank+high speed air flotation+rotary disc filter+ozone/sodium hypochlorite disinfection with enhanced contact oxidation”. By enabling flexible switching between Bardenpho and A²/O modes in the biological tank, utilizing the disinfection tank for simultaneous contact oxidation, and adopting an intelligent dosing system, the project achieves efficient nitrogen and phosphorus removal while maintaining strong resistance to shock loads. Operational data show that effluent COD, TN, NH₃-N, and TP are consistently below 15 mg/L, 10 mg/L, 1.0 mg/L, and 0.15 mg/L, respectively. The unit

基金项目: 陕西省重点产业链项目(2022ZDLSF06-05)

通信作者: 孔海霞 E-mail: 50250667@qq.com

treatment cost is only 0.78 CNY/m³, and the unit carbon emission is merely 0.474 kgCO₂-eq/m³. Indirect carbon emissions account for 78.9% of the total, representing a 10.7% reduction compared to the phase I project. This case provides a replicable model for “high standard, low carbon” upgrading of wastewater treatment plants in electronic industrial parks along the Yellow River basin.

Keywords: electronic wastewater; surface water quasi-IV standards; carbon emissions; Bardenpho process; ozone oxidation

1 项目背景

随着某半导体企业和硅片企业等高新技术产业项目的落地,西安某电子工业聚集区的污水排放量持续增长,现有工业污水处理厂一期工程(规模 5.0 万 m³/d)的处理能力已接近饱和。电子废水水质呈“三低”特征:COD、BOD₅及 TN 均显著低于一期工程原设计进水水质^[1]。该低有机负荷特性导致生物池中碳氮比失衡(BOD₅/TN<1.5),反硝化碳源不足,需额外投加碳源以确保出水 TN 达标^[2]。与此同时,《陕西省黄河流域污水综合排放标准》(DB61/224—2018)中 A 标准要求出水 COD≤30 mg/L、NH₃-N≤1.5 mg/L、TP≤0.3 mg/L,相当于地表水Ⅳ类水质,相较于原《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准限值收严了 40%~60%^[3]。一期工程原有“A²/O+深度过滤”工艺面临脱氮效率不足的瓶颈,难以达到地表水Ⅳ类的高标准出水要求^[4]。

此外,污水处理厂作为碳排放的关键人为源,其减污降碳路径已经被纳入《减污降碳协同增效实施方案》(环综合[2022]42号)。因此,污水处理过程中的碳排放已经成为学者关注的热点,已有研究对城镇污水处理厂典型工艺开展了碳排放核算^[5-7],为减污降碳提供了理论依据。然而,目前针对处理电子废水的工业污水处理厂,其碳排放核算研究仍属空白。

基于上述挑战,此次二期扩建工程(近期规模 5.0 万 m³/d,远期 10.0 万 m³/d)采用以“Bardenpho 五段可调生物池+臭氧模块化氧化/消毒”为核心的技术路线。该工程通过工艺弹性设计和智慧化运营管理,在进水浓度较低(BOD₅≤50 mg/L)的条件下,出水水质仍能稳定达到地表水Ⅳ类,并同步开展了碳排放核算,可为黄河流域电子工业园污水处理厂“高标准、低碳化”提标改造提供可复制的技术范式。

2 工程概况

2.1 一期工程

西安某工业污水处理厂一期工程设计处理规模为 5.0 万 m³/d。实际运行数据显示,2020 年 1 月—6 月平均处理水量为 4.7 万 m³/d,负荷率达 94%;其中 31% 运行时段的处理水量超过 5.0 万 m³/d,峰值瞬时流量达 6.7 万 m³/d,表明系统已处于满负荷运行状态,实施扩建工程势在必行^[8]。一期工程污水处理工艺流程如图 1 所示。

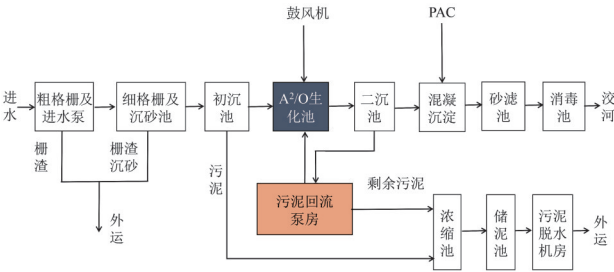


图 1 一期工程污水处理工艺流程

Fig.1 Process flow of wastewater treatment for phase I project

一期工程设计及实际进、出水水质见表 1。

表 1 一期工程设计及实际进、出水水质

Tab.1 Design and actual influent and effluent quality for phase I project

项目	COD	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TN	TP
设计进水	450	180	350	35	45	5
实际进水	31~127	11.2~44.8	66~184	6.7~20.2	13.5~24.8	0.5~1.7
设计出水	≤50	≤10	≤10	≤5(8)	≤15	≤0.5
实际出水	30	6	10	1.5	12	0.3

注: 括号外数值为水温>12℃时的控制指标,括号内数值为水温≤12℃时的控制指标。

由表 1 可知,实际进水 COD、BOD₅、TN 的平均值分别为 50.4、28.0、24.6 mg/L,较设计值分别降低 88.8%、84.4% 和 45.3%。扩建工程实施后,主要进水仍为园区企业预处理排水,其水质呈典型的低碳

氮比($\text{BOD}_5/\text{TN}<1.5$)与低浓度特征^[9]。为此,工艺设计增设了外源性碳源投加系统,从而确保生物脱氮效能。

2.2 二期扩建工程及设计水质

该扩建工程遵循“集约化开发、近远期统筹”原则,在不新增建设用地的前提下,通过厂区空间重组与功能模块化设计,新增近期处理能力 $5.0\text{万 m}^3/\text{d}$,并预留同等规模的远期扩容空间,扩建总规模 $10.0\text{万 m}^3/\text{d}$ 的污水处理系统。

① 新建单元

预处理系统:粗格栅及提升泵池、曝气沉砂池;生物处理系统:五段式 Bardenpho 生物池、二沉池;深度处理系统:高速气浮池、转盘滤池、接触消毒池(臭氧接触池);辅助设施:鼓风机房及变电电室、精准加药间、全流程除臭系统、标准化危废暂存间、巴氏计量槽。

② 改扩建单元

污泥处理系统:扩建污泥脱水机房;水力优化单元:改造细格栅间,扩建出水提升泵站。

出水水质执行 DB61/224—2018 中 A 标准(TN 除外),臭气排放同步满足 GB 18918—2002 中二级排放限值与《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—93)要求。各电子企业产生的工业废水经自建污水处理站预处理(重金属、色度等达标)后接入该扩建工程,其中工业废水占比 $70\%\sim 75\%$,生活污水占比 $25\%\sim 30\%$ 。

二期扩建工程设计进、出水水质见表 2,其中,设计进、出水 pH 均为 $6\sim 9$ 。

表 2 扩建工程设计进、出水水质

Tab.2 Design influent and effluent quality for the expansion project

项目	COD	BOD_5	SS	$\text{NH}_3\text{-N}$	TN	TP
进水	140	50	200	25	48	3
出水	≤ 30	≤ 6	≤ 10	≤ 1.5	≤ 12	≤ 0.3

2.3 二期扩建工程工艺方案

通过对进水水质特性进行分析,该工程适宜采用生物脱氮除磷工艺^[10-11]。对 A^2/O 、Bardenpho 和 MBBR 工艺进行比选: A^2/O 通常在高 C/N 条件下具有良好的脱氮除磷性能;MBBR 需投加载体,运行成本较高;而 Bardenpho 不仅可与 A^2/O 灵活切换,且针对该项目进水 TN 浓度较高、C/N(约 1.1)较低的特点,其后缺氧段可强化内源反硝化,减少碳源投加量。因此,选用以 Bardenpho 为核心的生物处理工艺。在深度处理方面,为确保电子废水中难降解有机物的稳定去除,在“高速气浮+转盘滤池”的基础上,增设臭氧接触强化氧化单元。综上,此次改扩建工程的污水处理工艺确定为“预处理+生物处理(Bardenpho 生物池)+深度处理(高速气浮+转盘滤池)+臭氧氧化”。污泥处理采用“污泥浓缩+板框脱水”工艺。臭气处理参考某地理式污水处理厂^[12],单一生物滤池对 H_2S 的去除率仅 85% ,而“生物滤池+离子氧化”组合工艺可将去除率提升至 98% ,且对挥发性有机物(VOCs)的去除率 $>90\%$ 。因此,采用“生物滤池+离子氧化”组合工艺,以确保尾气排放稳定达标。改扩建后的污水处理工艺流程如图 2 所示。

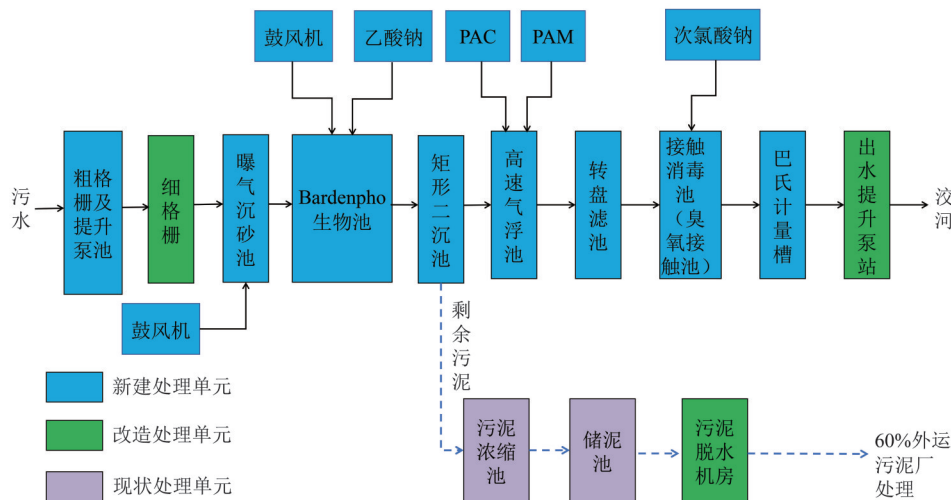


图 2 改扩建后污水处理工艺流程

Fig.2 Process flow of wastewater treatment after renovation and expansion

3 二期扩建工程主要构筑物设计

3.1 预处理系统

① 粗格栅及提升泵池

粗格栅渠按远期规模10万 m^3/d 进行土建设计,渠宽1.1 m,过栅流速0.56 m/s,设备按近期5万 m^3/d 安装。提升泵池采用地下式钢筋混凝土结构,尺寸9.0 m $\times$ 21.4 m $\times$ 13.5 m,与一期泵站通过DN1 200连通管连接,实现双系统互为备用,从而提升运行可靠性与维护便捷性。

② 细格栅及曝气沉砂池

细格栅间土建按远期规模10万 m^3/d 预留,近期增设转鼓式格栅,栅隙6 mm,过栅流速1.0 m/s,其具备集成式过滤-压榨-传输功能,可将栅渣含固率提升至35%~40%。曝气沉砂池沿用一期成熟工艺,砂粒去除率 $\geq 85\%$,油脂去除率 $\geq 75\%$,按近期规模5万 m^3/d 建设,设计水力停留时间为4 min,以确保砂粒、油脂和浮渣的有效去除。

3.2 生化处理系统

① 五段式Bardenpho生物池

生物池土建及设备均按照近期规模5万 m^3/d 设计,远期增加1座。考虑到工业废水水质的不确定性,为获得稳定的脱碳、脱氮和除磷效果,生物池采用五段可调式设计。各段水力停留时间设计为:厌氧区2.1 h、缺氧区4.2 h、好氧区7.4 h、后缺氧区2.8 h、后好氧区0.9 h。根据水质波动情况,可动态切换A²/O与Bardenpho模式。生物池主要设计参数为:污泥负荷0.12 kgBOD₅/(kgMLSS $\cdot$ d),TN负荷0.03 kgTN/(kgMLSS $\cdot$ d),TP负荷0.002 3 kgTP/(kgMLSS $\cdot$ d);污泥回流比100%,混合液回流比100%~200%,并结合碳源的精准投加,保障出水TN稳定达标。

② 矩形二沉池

设1座二沉池(5格),土建及设备均按近期规模5万 m^3/d 设计,远期增加1座。采用周进周出式矩形池型,单格尺寸68.0 m $\times$ 8.0 m $\times$ 5.2 m,表面水力负荷1.1 $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,该设计使沉淀效率较传统平流式沉淀池提升30%左右。池体配备智能吸泥机与套筒阀排泥系统,以满足排泥要求。

③ 鼓风机房及变配电室

鼓风机选型结合一期工程的实际运行经验,鉴于现状采用的单级离心高速风机运行稳定可靠,故

此次扩建工程沿用该类型风机。鼓风机房与变配电室采用一体化设计,总尺寸47 m $\times$ 14 m $\times$ 9 m,可节省占地15%。

3.3 污水深度处理与污泥处理系统

① 提升泵池及高速气浮池

新建提升泵池及高速气浮池各1座,土建及设备均按近期规模5万 m^3/d 设计,远期增加1座。提升泵池尺寸10.35 m $\times$ 4.70 m $\times$ 6.75 m。高速气浮池1座3组,单座尺寸21.5 m $\times$ 30.1 m $\times$ 5.3 m,同时,配套建设设备间1座,尺寸22.2 m $\times$ 6.0 m $\times$ 5.5 m。

② 转盘滤池

转盘滤池对气浮池出水进行深度过滤,主要去除残留悬浮颗粒等杂质,保障最终出水水质稳定达标。在室内设1座转盘滤池,土建及设备均按近期规模5万 m^3/d 设计,远期增加1座。运行状态包括过滤、反冲洗和排泥3种模式,滤池尺寸13.0 m $\times$ 8.4 m $\times$ 4.7 m,有效水深3.7 m,滤盘直径3 m,反洗周期1 h。

③ 接触消毒池(兼臭氧接触池)

接触消毒池采用矩形钢筋混凝土结构,设1座,分为2组,水力停留时间50 min。投加次氯酸钠进行消毒,该消毒池兼具氧化功能,通过臭氧氧化确保细菌学指标的稳定达标,并实现对难降解COD的有效控制。

④ 加药间

加药间包括聚合氯化铝(PAC)投加系统、聚丙烯酰胺(PAM)投加系统、次氯酸钠投加系统和乙酸钠投加系统,其土建按远期规模10万 m^3/d 建设,设备按近期规模5万 m^3/d 安装,尺寸44.0 m $\times$ 22.6 m $\times$ 6.5 m。设计要求储药罐具备高、低液位声光报警及低液位自动停泵功能,计量泵可根据进水流量及出水水质自动调节投加量,实现精准加药。

⑤ 巴氏计量槽及出水提升泵站

为满足扩建后全厂出水合并计量的需求,新建1座巴氏计量槽,设计规模15万 m^3/d ,尺寸26.2 m $\times$ 3.0 m $\times$ 3.2 m。同步实施出水提升泵站改造,在现状提升泵池内更换水泵,其提升能力按远期规模10万 m^3/d 设计。

⑥ 污泥脱水机房

此次对污泥脱水机房进行改造,土建按远期规模10万 m^3/d 设计,设备按近期规模5万 m^3/d 安装,改扩建后尺寸24.7 m $\times$ 6.8 m $\times$ 6.1 m。同时,新建污

泥调理池1座,尺寸15.00 m×7.90 m×9.55 m,脱水污泥含水率≤60%。

3.4 除臭系统

采用“生物滤池+离子氧化”双级除臭工艺,恶臭气体收集效率≥95%。臭气风量计算依据《城镇污水处理厂臭气处理技术规程》(CJJ/T 243—2016),按构筑物水面面积、封闭空间体积及设备逸散系数等参数综合确定。全厂除臭系统总规模76 000 m³/h,共设3套处理装置,臭气经处理后达标排放。生物除臭设备参数见表3。其中,3#除臭生物滤池的服务范围不仅涵盖此次污泥脱水机房改造及扩建所增加的臭气量,还纳入现状2座污泥浓缩池的臭气,实现了对污泥处理区臭气的集中、高效处理。

表3 生物除臭设备参数

Tab.3 Parameters of biological deodorization equipment

项目	参数	服务范围
1#离子除臭设备	3.6万 m ³ /h, 65 kW, 20 m×8 m	生物池
2#除臭生物滤池	1.5万 m ³ /h, 27 kW, 12 m×6 m	预处理系统
3#除臭生物滤池	2.5万 m ³ /h, 65 kW, 20 m×8 m	污泥脱水机房、污泥浓缩池

4 运行效果

4.1 污水处理效果

该项目已于2022年12月完工,2023年1月投入运行,二期平均处理水量47 988 m³/d。连续运行1年(2023年1月—12月)的进、出水水质见表4。

表4 实际进、出水水质

Tab.4 Actual influent and effluent quality

项目	COD	BOD ₅	NH ₃ -N	TN	TP	SS
进水	30.45~54.15	13~31	5.65~12.79	26.86~48.13	0.70~1.42	18~144
出水	9.16~14.44	0.2~1.0	0.20~0.29	5.79~9.99	0.03~0.13	2~4

监测数据表明,实际进水水质呈显著低C/N特征。COD、BOD₅、TP最高浓度分别为54.15、31和1.42 mg/L,而TN浓度持续处于高位(26.86~48.13 mg/L),导致C/N均值低至1.1(波动范围0.8~1.5)。面对进水水质波动及低C/N的双重挑战,该工艺系统表现良好,出水COD≤15 mg/L、TN≤10 mg/L、NH₃-N≤1.0 mg/L、TP≤0.15 mg/L,满足且优于设计出水水

质。其中TP去除率均值高达92.3%,证实该工艺对低C/N废水的较强适应性。当TN负荷波动达1.8倍时,系统仍可维持TN去除率≥77%,印证了其抗冲击负荷能力。

4.2 低碳化运行实施路径

该项目通过工艺调控与精准控制实现低碳化运行。

① 工艺调控:当进水TN>30 mg/L时,系统切换至Bardenpho模式。通过将后缺氧段的水力停留时间由2.8 h提升至4.2 h,提高内源反硝化效率,减少碳源投加量15%~20%,同时降低污泥产率5%~10%。

② 精准控制:控制好氧区溶解氧(DO)浓度在1.0~1.5 mg/L之间,通过DO在线监测仪的实时反馈,联动调节磁悬浮风机的曝气量,实现按需供氧。

该方案较传统曝气方式,可节能20%以上;在生物池进水处设置TN在线监测仪,根据实时进水TN负荷,精准控制乙酸钠投加量,从而避免碳源过量投加导致的碳排放。

5 扩建工程碳排放核算

该项目参考兰剑等^[2]的方法,对污水处理系统的碳排放进行测算,即碳排放由直接排放(生物处理过程产生的CH₄、N₂O)与间接排放(电能及药剂消耗对应的CO₂当量)构成。具体核算公式如下:

$$E_{\text{CH}_4} = (\text{TOW} \times B_a \times \text{MCF} - R) \times \text{GWP}_{\text{CH}_4} \times 10^{-3} \quad (1)$$

$$E_{\text{N}_2\text{O}} = N_E \times \text{EF}_{\text{N}_2\text{O}} \times (44/28) \times \text{GWP}_{\text{N}_2\text{O}} \times 10^{-3} \quad (2)$$

$$E_{\text{power}} = \sum_n P_n \times \text{EF}_p \times 10^{-3} \quad (3)$$

$$E_{\text{che}} = \sum_i Y_i \times \text{EF}_i \times 10^{-3} \quad (4)$$

式中: E_{CH_4} 、 $E_{\text{N}_2\text{O}}$ 分别为污水处理过程中CH₄和N₂O的碳排放量(以CO₂-eq计),t/a;TOW为污水中有机物总量(以COD计),kg/a; B_a 为CH₄最大生产能力(以CH₄/COD计),取0.6 kg/kg;MCF为CH₄修正因子,取0.165; R 为每年CH₄回收量(以CH₄计),kg/a; GWP_{CH_4} 为CH₄的全球变暖潜势(以CO₂-eq/COD计),取27; N_E 为污水总氮去除量,kg/a; $\text{EF}_{\text{N}_2\text{O}}$ 为污水N₂O排放因子,取4.17 kg/kg; $\text{GWP}_{\text{N}_2\text{O}}$ 为N₂O的全球变暖潜势(以CO₂-eq/N₂O计),取273; E_{power} 、 E_{che} 分别为电力消耗和药品消耗产生的碳排放量(以CO₂-eq

计),t/a; P_n 为排放单元 n 消耗的电能,kW·h; EF_p 为电力排放因子,取 $0.899\text{ kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$; Y_i 为 i 类药品的年使用量,t/a; EF_i 为 i 类药品的排放因子,PAC、乙酸钠和次氯酸钠的取值分别为 1.62 、 1.6 和 $1.4\text{ kg}/\text{kg}$ 。

污水处理环节碳排放核算的结果如图3所示。2023年该二期扩建工程在污水处理环节的碳排放总量为 $8\,298.5\text{ t}$,其中,直接排放和间接排放分别为 $1\,751.6$ 和 $6\,546.9\text{ t}$,二者较一期工程(2020年,提标前)分别降低了 327.2 和 $1\,452.5\text{ t}$ 。由图3(b)可知,二期扩建工程的单位碳排放总量为 $0.474\text{ kgCO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$,其中,间接排放占比 78.9% 。间接排放中电能消耗贡献率达 80.2% (主要来自水泵与风机运行),显著高于药剂消耗(包括絮凝剂PAC、消毒剂次氯酸钠及碳源乙酸钠)的碳排放占比(19.8%)。

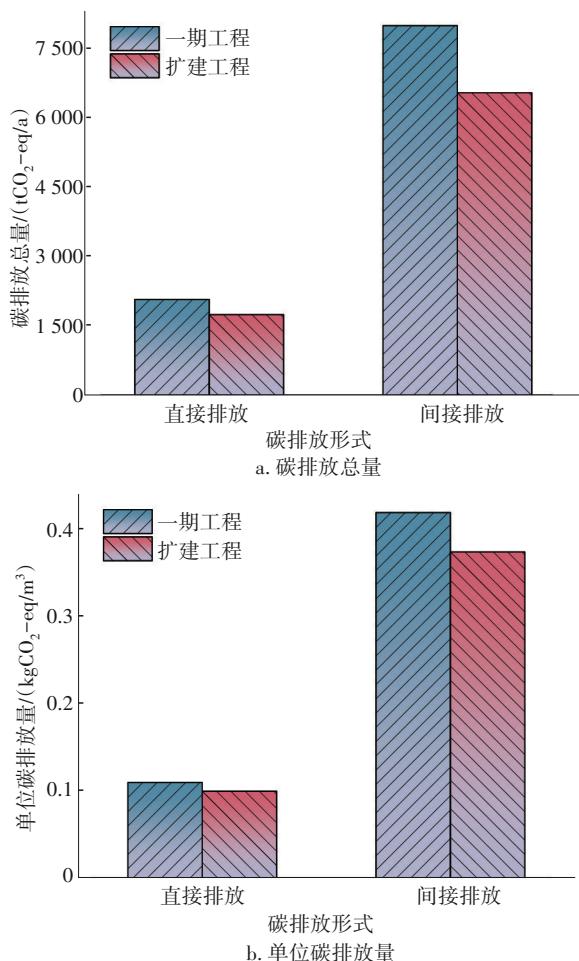


图3 污水处理环节碳排放核算

Fig.3 Carbon emission accounting in wastewater treatment

纵向对比显示,二期工程的单位间接排放量为

$0.374\text{ kgCO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$,较一期工程($0.419\text{ kgCO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$)降低了 10.7% ,这得益于水泵(效率提升)与磁悬浮风机(能耗降低)的能效优化。横向对比表明,该工程的单位间接排放量相较于传统 A^2/O 工艺($0.412\text{ kgCO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$)^[2]降低了 9.3% ,这凸显了该工程采用的五段式Bardenpho工艺,通过其与 A^2/O 模式的灵活切换,以及对设备运行与碳源投加的精准控制,在低碳运行方面所具备的显著优势。该研究结果证实,工艺革新与设备能效提升对污水处理厂碳减排具有协同增效作用。

6 工程总投资及运行成本

该项目工程总投资 $31\,626.28$ 万元,单位处理成本仅 $0.78\text{ 元}/\text{m}^3$ 。污水处理量达 $1\,752\text{ 万 m}^3/\text{a}$,可削减COD排放 411.7 t/a 、TN排放 573.1 t/a 、TP排放 15.8 t/a ,减排效益折合碳当量约 $3\,643.5\text{ tCO}_2\text{-eq/a}$,环境效益显著。

7 结语

针对西安市某工业污水处理厂面临的进水水质波动显著与地表水准IV类排放标准的双重挑战,二期扩建工程采用“预处理+Bardenpho五段可调生物池+高速气浮+转盘滤池+臭氧/次氯酸钠消毒兼接触强化氧化”的组合工艺。通过五段式Bardenpho生物池的灵活调控与外源碳源的精准投加,有效应对低C/N水质,出水TN稳定低于 10 mg/L ;通过高速气浮与转盘滤池的深度处理,高效去除悬浮物及胶体物质;通过臭氧消毒兼强化氧化单元,确保细菌学指标的稳定达标,并对难降解COD实现了有效控制。运行数据显示,出水COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、TN等关键指标稳定满足设计标准,且单位处理成本低至 $0.78\text{ 元}/\text{m}^3$,单位碳排放量仅为 $0.474\text{ kgCO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$,具有良好的环境效益和经济效益。

参考文献:

- [1] 李志刚,韩文杰,杨忠启,等.四川某CASS污水厂连续流MBBR准IV类提标方案设计[J].中国给水排水,2025,41(2):52-57.
LI Z G, HAN W J, YANG Z Q, et al. Scheme design for continuous flow class IV standard upgrading using MBBR process in a WWTP with CASS process in Sichuan[J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(2): 52-57 (in Chinese).
- [2] 兰剑,闫东杰,王永平,等.污水处理厂提标改造对碳

- 排放的影响[J]. 环境科学, 2025, 46(11): 6863-6869.
- LAN J, YAN D J, WANG Y P, et al. Effects of upgrading wastewater treatment plants on carbon emissions[J]. Environmental Science, 2025, 46(11): 6863-6869(in Chinese).
- [3] 徐西娥, 薛瑶瑶. 炼化污水总排水质提标升级改造技术总结[J]. 山东化工, 2024, 53(4): 270-273.
- XU X E, XUE Y Y. Summary of upgrading technology of refining and chemical effluent quality[J]. Shandong Chemical Industry, 2024, 53(4): 270-273(in Chinese).
- [4] 乔海兵, 赵志太, 李帅军, 等. 污水厂氧化沟改造为A²O+MBBR+O₃工艺提标设计[J]. 中国给水排水, 2023, 39(22): 60-65.
- QIAO H B, ZHAO Z T, LI S J, et al. Design of oxidation ditch upgraded to A²O, MBBR and O₃ process in a wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(22): 60-65 (in Chinese).
- [5] 黄来来, 郜龙威, 李瀚翔, 等. 苏州某污水处理厂GHG排放综合分析及减排路径[J]. 环境科学, 2025, 46(1): 118-128.
- HUANG L L, GAO L W, LI H X, et al. Comprehensive analysis and emission reduction pathway of GHG emissions at a wastewater treatment plant in Suzhou[J]. Environmental Science, 2025, 46(1): 118-128 (in Chinese).
- [6] 孟红旗, 李红霞, 赵爱平, 等. 市政污水厂典型A²O工艺低碳运行的系统性评估[J]. 环境科学, 2023, 44(2): 1174-1180.
- MENG H Q, LI H X, ZHAO A P, et al. Systematic evaluation of low-carbon operation of typical A²O processes in municipal sewage plant[J]. Environmental Science, 2023, 44(2): 1174-1180 (in Chinese).
- [7] 韩海成, 周东, 王亚宜, 等. 城市污水A²O处理系统好氧池N₂O和NO的释放特征及影响因素[J]. 中国环境科学, 2016, 36(2): 398-405.
- HAN H C, ZHOU D, WANG Y Y, et al. The emission characteristics of nitrous oxide and nitric oxide and related influence factors in an aeration tank of a municipal wastewater treatment plant using an A²O process[J]. China Environmental Science, 2016, 36(2): 398-405 (in Chinese).
- [8] 姚瑞珍, 周国胜, 杨新春, 等. 基于A²O工艺污水厂改造与提标工程设计[J]. 水处理技术, 2024, 50(2): 148-152.
- YAO R Z, ZHOU G S, YANG X C, et al. Design of sewage plant reconstruction and upgrading project based on the A²O process [J]. Technology of Water Treatment, 2024, 50(2): 148-152 (in Chinese).
- [9] 鲍任兵, 徐健, 杜敬, 等. 低温低C/N下改良Bardenpho工艺与多级AO工艺的比较[J]. 净水技术, 2023, 42(12): 80-87.
- BAO R B, XU J, DU J, et al. Comparison of modified Bardenpho and multi level AO processes under low C/N influent at low temperature [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(12): 80-87 (in Chinese).
- [10] 蒙小俊, 葛光环, 王亚萍, 等. 污水生物处理系统脱氮除磷细菌多样性及功能调控[J]. 工业水处理, 2024, 44(11): 17-26.
- MENG X J, GE G H, WANG Y P, et al. Diversity and functional regulation of nitrogen and phosphorus removal bacteria in wastewater biological treatment systems [J]. Industrial Water Treatment, 2024, 44(11): 17-26 (in Chinese).
- [11] 武岳. 低碳源城市污水A²O处理工艺脱氮除磷效能研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2024: 14-18.
- WU Y. Research on the Efficiency of Nitrogen and Phosphorus Removal for Urban Sewage A²O Treatment Process with Low Carbon Source [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2024: 14-18 (in Chinese).
- [12] 刘雪林, 尹利军, 康金郁, 等. 埋地式污水处理厂除臭工艺的选择及探讨[J]. 绿色科技, 2019(10): 83-85, 90.
- LIU X L, YIN L J, KANG J Y, et al. Discussion of deodorization process in underground wastewater treatment plant [J]. Journal of Green Science and Technology, 2019(10): 83-85, 90 (in Chinese).

作者简介: 孔海霞(1982—), 女, 山西忻州人, 硕士, 高级工程师, 主要从事给水排水领域的设计与研究工作。

E-mail: 50250667@qq.com

收稿日期: 2025-03-11

修回日期: 2025-03-27

(编辑: 沈靖怡)