

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.04.020

四川某AAO工艺污水处理厂提质增效改造实例

董明甫¹, 孔海霞², 张林¹, 陈春梅¹, 余波³, 何文光¹,
尹天平¹, 赵茂杰¹

(1. 四川安州发展集团有限公司, 四川 绵阳 622651; 2. 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 710016; 3. 绵阳师范学院 资源环境工程学院, 四川 绵阳 621000)

摘要: 四川省某污水处理厂一期工程原采用AAO主体工艺,现根据进厂废水水质进一步优化工艺设计参数,确保出水氨氮、总氮及COD指标达到《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB 51/2311—2016),总磷达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅲ类标准(总磷<0.2 mg/L),其余指标达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,处理后的达标废水经管道就近引至干河子排放。该提质改造项目拟对原有AAO池、外回流等进行改造优化、增设活性炭吸附池。实施改造后运行8个月,监测结果显示全年平均出水 $\text{NH}_3\text{-N}\leq 1.5\text{ mg/L}$ 、 $\text{TN}\leq 4.6\text{ mg/L}$ 、 $\text{TP}\leq 0.1\text{ mg/L}$ 、 $\text{COD}\leq 20\text{ mg/L}$,改造后出水水质均优于改造前,达到设计排放标准;节能降耗效果明显,碳排放强度同比降低20%以上。

关键词: 污水处理厂; 工业园区; AAO工艺; 提质增效; 节能降耗; 碳减排

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)04-0119-07

Quality and Efficiency Enhancement Retrofit Project of a WWTP Using AAO Process in Sichuan

DONG Ming-fu¹, KONG Hai-xia², ZHANG Lin¹, CHEN Chun-mei¹, YU Bo³,
HE Wen-guang¹, YIN Tian-ping¹, ZHAO Mao-jie¹

(1. Sichuan Anzhou Development Group Co. Ltd., Mianyang 622651, China; 2. Xi'an Branch, North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Xi'an 710016, China; 3. College of Resources and Environmental Engineering, Mianyang Teachers' College, Mianyang 621000, China)

Abstract: AAO was the primary process originally in the phase I project of a wastewater treatment plant (WWTP) in Sichuan Province and the process parameters were further optimized based on the influent quality. The effluent ammonia nitrogen, total nitrogen, and chemical oxygen demand could meet the stipulated requirements specified in *Discharge Standard of Water Pollutant in Sichuan Minjiang River and Tuojiang River Basin* (DB 51/2311—2016). The effluent total phosphorus should comply with level Ⅲ criteria (<0.2 mg/L) in the *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838—2002), while the remaining effluent indicators should adhere to the first level A criteria in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918—2002). The treated wastewater was directed for

discharge into Ganhezi River through a pipeline. The project's objective was to renovate and optimize the original AAO tank, external reflux system, and introduce an additional activated carbon adsorption unit. After 8 months of operation, the results indicated that the annual average effluent $\text{NH}_3\text{-N}$, TN, TP, and COD were no more than 1.5 mg/L, 4.6 mg/L, 0.1 mg/L, and 20 mg/L, respectively. The effluent quality after retrofit surpassed the design discharge standards. The energy efficiency and consumption reduction are notable. Moreover, the carbon emission intensity was reduced by over 20% year-on-year.

Key words: WWTP; industrial park; AAO process; quality and efficiency enhancement; energy saving and consumption reduction; carbon emission reduction

随着城市的不断发展和经济的快速增长,四川某工业园区内企业的污(废)水排放量及其水质出现了显著波动,给该园区工业污水处理厂的污水达标排放造成了较大压力。因此,为达到增效改造并满足达标排放的目标,需要在现有设备设施的基础上,开展工艺优化以及必要的工艺段增删工作^[1-3]。此举旨在提升该污水处理厂对关键指标如COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP等的去除效能,确保污水能够达标排放,同时减少能源消耗,降低生产成本。

1 项目概况

1.1 处理规模和水质

该污水处理厂位于某工业园区下游,占地面积约2.67 hm²,设计处理规模为1.4×10⁴ m³/d,2020年建成,2021年投入运行,总投资1.5亿元,环保投资545.93万元。设计进水为70%生活污水、30%工业废水,出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN及COD执行《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB 51/2311—2016),TP执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅲ类标准(TP≤0.2 mg/L),其余指标执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,处理达标后的废水就近引至干河子排放。改造前工艺流程见图1。

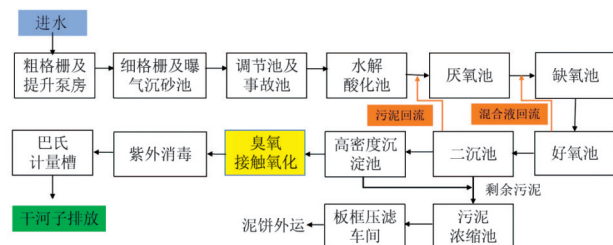


图1 改造前污水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of sewage treatment before reconstruction

① 进水水质、水量

该污水处理厂2023年1月—4月的进水水质如

表1所示。其中COD、BOD₅、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP等关键指标受工业废水排放占比的影响较大,由于工业园区部分企业废水的违规排入,偶尔会导致进水指标严重超标,例如某日进水COD高达1 347 mg/L;某日进水BOD₅低至1.2 mg/L,月均值为50.5 mg/L,B/C比值仅为0.28,可生化性很差;某日进水TN高达168.9 mg/L、进水TP高达15.2 mg/L,给污水处理稳定达标排放带来了巨大压力。因此,对该污水处理厂进行提质改造刻不容缓。

表1 2023年1月—4月实际进水水质和设计关键指标

Tab.1 Actual influent quality and design key indicators from January to April in 2023

项目	COD	BOD ₅	$\text{NH}_3\text{-N}$	TN	TP
设计进水水质	≤330	≤180	≤35	≤50	≤6
设计出水水质	≤50	≤10	≤5(8)	≤15	≤0.2
实际进水指标范围	19.7~1 347	1.2~84.1	1.53~161.8	1.79~168.9	0.22~15.2
实际进水指标均值	180.9	50.5	47.1	54.6	5.63

从处理水量来看,该污水处理厂实际处理水量远低于设计水量,如图2所示。

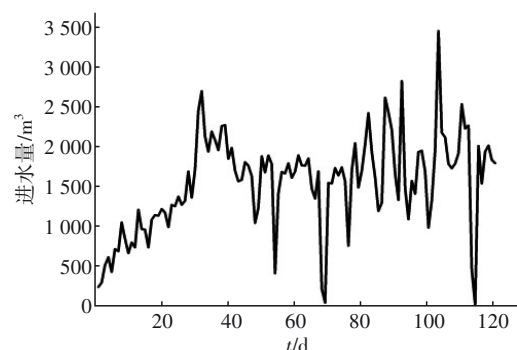


图2 2023年1月—4月处理水量统计

Fig.2 Water volume statistics from January to April,2023

从图2可知,2023年1月—4月该污水处理厂的

进水水量最大值为 $3\,459\text{ m}^3/\text{d}$,最小值为 $810\text{ m}^3/\text{d}$,平均为 $1\,705\text{ m}^3/\text{d}$,按一期 $7\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 设计产能算,进水量负荷仅约 24.36%。

② 二沉池出水水质

该污水处理厂 2023 年 1 月—4 月的突出问题是二沉池出水 TN 和 COD 超标。二沉池出水 TN 平均值为 9.7 mg/L ,最高为 16.8 mg/L ,最低为 2.69 mg/L ;出水 COD 平均值为 40.1 mg/L ,最高为 64.8 mg/L ,最低为 22.0 mg/L 。此前,当出水指标超标时,该污水处理厂通过高密度沉淀池末端的提升泵将超标水回流到粗格栅前端,与新进污水混合后通过二期的调节池、生化池以及二沉池进行多次循环处理,直至出水水质达标,导致药剂费用约 $3.58\text{ 元}/\text{m}^3$,电费约为 $2.34\text{ 元}/\text{m}^3$ 。因此,该污水处理厂面临的最大问题是难降解 COD 的稳定达标以及脱氮除磷效率较低。

1.2 升级改造的目的

目前 AAO 工艺在我国生活污水处理中应用十分广泛,可有效脱氮除磷和去除有机物,且具有工艺流程简单、成本相对较低、出水水质稳定等一系列优势^[4]。但在面临工业废水处理时,AAO 工艺还不能完全满足排放要求。面对这样的情况,可采取“AAO+深度处理”工艺,以实现污水处理效率的提升^[5]。

原工艺设计没有考虑污水水质大幅波动的情况,对进水水质指标预测偏低,随着该工业园区的发展,污水量也会发生一定的变化,原处理工艺出水水质很难稳定达标,不能满足排污许可要求。为解决难降解 COD 的稳定达标和脱氮除磷效率低等问题,首先启动臭氧接触氧化处理难降解 COD,去除效率仅为 10% 左右,效果不明显,主要原因是采用无压力半敞开多格仓池体,在臭氧接触过程中逸散速度快、臭氧利用率低;取二沉池出水进行活性炭实验,在活性炭添加量约 $0.3\sim 0.4\text{ kg}/\text{m}^3$ 时,难降解 COD 去除率约 40%,且能较稳定地满足 COD 达标排放要求;芬顿法处理难降解 COD 问题产生的污泥量太大,经过比选,最终确定采用投加活性炭的方式解决难降解 COD 长时间不能稳定达标的难题。其次,通过调整内外回流比提高生化系统脱氮除磷效率;最后,根据水量和运行负荷调整运行模式,达到节能减排的效果。

2 工艺改造设计与实施

2.1 工艺改造内容

2.1.1 增设一套活性炭吸附装置

改造前,该污水处理厂运营过程中频发 COD 超标现象,迫使厂区采取内循环方式,以应对难降解 COD 的达标排放问题。然而,此措施成效有限,导致污水处理厂一度陷入无法正常运转的困境。为解决该问题,在二沉池与高密度沉淀池之间增设活性炭吸附系统,通过精确控制活性炭的投加量,依托活性炭的吸附性能,实现了对难降解 COD 的有效去除。

2.1.2 精准控制内、外回流

原设计外回流比 100%,外回流泵 3 台,2 用 1 备, $Q=146\text{ m}^3/\text{h}$, $H=60\text{ kPa}$, $N=5.5\text{ kW}$;内回流比 200%~300%,内回流泵 4 台,每池设 2 台, $Q=292\text{ m}^3/\text{h}$, $H=12\text{ kPa}$, $N=7.5\text{ kW}$ 。

在实际运行中,内、外回流均采用定频提升泵控制回流且无流量计,流量大小无法精确控制,其中内回流泵流量为 $183\text{ m}^3/\text{h}$,外回流泵流量为 $139\text{ m}^3/\text{h}$,加之进水水量波动较大,更多的时间低于设计处理水量,导致内、外回流量比例不可控。改造后,在内、外回流的管道上加装管道流量计、变频器用于精准调节内、外回流比,可以根据水量变化及时调整运行参数^[5],同时使设备不再长时间处于满负荷运行状态,既降低了设备的能耗,又提高了脱氮除磷的效果。

2.1.3 改变生化池的运行模式

该污水处理厂改造前无论进水量多少均采用两条线并列运行,系统长期处于低负荷运行状态,污泥颜色深、暗、灰黑^[6],水力停留时间过长,导致能耗、药耗均较高。为了降低药剂的投加量、单位水量的能耗,在每年 10 月至次年的 4 月处理水量均低于 $3\,500\text{ m}^3/\text{d}$ 的情况下,将生化池的运行模式调整为单线运行,减少一套生化系统的运行,达到节能降耗的效果。

2.2 改造后工艺流程

对该改造工程的用地、污水处理效果、改造工期和运行成本等进行综合考量,结合其他改造工程经验,将原处理工艺升级为粗格栅及提升泵房+细格栅及曝气沉砂池+AAO 生化池+二沉池+活性炭吸附池+高密度沉淀池+紫外线消毒巴氏计量槽的新

工艺,见图3。

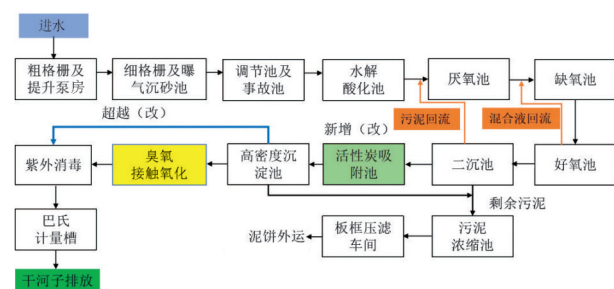


图3 改造后污水处理工艺流程

Fig.3 Process flow of sewage treatment after reconstruction

2.3 主要构筑物及运行参数

该污水处理厂AAO生化池为钢筋混凝土结构,1座,分2组,每组平面尺寸为26.2 m×48.7 m,总深为6.3 m,有效水深为5.5 m。

每组设计流量为292.7 m³/h, MLSS为2 500~4 500 mg/L, MLVSS为1 750~3 150 mg/L, 污泥负荷为0.1 kgBOD₅/(kgMLSS·d), 泥龄为14 d, 水力停留时间(HRT)为21.86 h(厌氧区3.34 h、缺氧区6.69 h、好氧区11.83 h)。

在实际运行中,按2023全年平均水量约为2 000 m³/d计,运行两条生产线,实际HRT为77.09 h,导致停留时间过长,运行负荷仅为28.57%。另外,在内外回流比的控制方面也无法满足设计要求,即两池的总流量为83.33 m³/h时,外回流泵(139 m³/h)启用其中1台,其回流比约166%;每池的流量为41.67 m³/h,内回流泵流量为183 m³/h,其内回流比约439%。

为确保生化系统高效稳定运行,将运行参数进行了优化:一方面采用单线运行模式,将HRT降至37 h,提高运行负荷至57.14%;另一方面增加内外回流变频控制。首先,将外回流比范围精确调控在40%~70%。基于2 000 m³/d的进水量,进水流量约83.33 m³/h,按外回流比60%进行控制,将外回流量控制在约50 m³/h。减少外回流,确保厌氧段回流硝酸盐或亚硝酸盐浓度减小,从而减少了溶解性BOD₅的消耗,进而降低有机碳源的消耗。同时降低硝酸盐、亚硝酸盐的浓度,更有利于降低氧化还原电位,进而强化聚磷菌的释磷过程,最终在好氧段提升磷的去除效果。其次,将内回流比控制在200%~300%,同样以2 000 m³/d的进水量为基准,即进水流量为83 m³/h。若按内回流比为300%计算,内回流

量应达到249 m³/h,但实际流量仅为183 m³/h,可见内回流量偏低。这一不足直接导致脱氮效率下降,出水TN超标。为解决此问题,本次改造实施变频改造,并启用2台内回流泵,实现了对内回流比的精确控制,实际流量控制在220~280 m³/h,从而有效提升脱氮效率。

2022年12月新增1座活性炭吸附池,尺寸为12 m×3 m,有效池深2.55 m,有效池容91.8 m³,施工完成并投入使用。在生化池改造完成之前,二沉池最高出水COD≤70 mg/L,活性炭的投加量为0.386 kg/m³,混合搅拌电机转速为44 r/min,出水COD可以稳定控制在45 mg/L以下;在生化池改造完成之后,二沉池出水最高COD≤55 mg/L,活性炭的投加量为0.051 kg/m³,混合搅拌电机转速为44 r/min,出水COD可以稳定控制在30 mg/L以下。

此外,供气量被严格控制在约600 m³/h,气水比维持在(4~7):1的适宜范围内。曝气池中的DO调控在2~3 mg/L之间,以确保微生物的正常代谢活动。

在污泥管理方面,污泥浓度稳定在3 500~4 200 mg/L。产生的剩余污泥流量为80 m³/d,剩余污泥浓度约9 000 mg/L,控制污泥龄约16 d,以维持系统的稳定与高效运行。

3 运行效果分析

3.1 关键指标去除率

该提质增效改造工程于2022年11月动工,其中活性炭吸附池的改造于2022年12月底完成,生化池改造于2023年5月完工并投入运行(改造不停运)。对2023年1月—12月的运行数据进行分析,生化池改造后NH₃-N、TN、TP、COD去除率都得到明显改善,具体数据见表2。

由表2可以看出,改造后NH₃-N、TN、TP、COD的生化去除率分别由原来的93.3%、82.0%、82.0%和72.1%提升到96.4%、90.0%、85.0%和79.7%。其中TN和COD去除率变化最明显,分别提升了8和7.6个百分点;TP、NH₃-N的去除率略有上升,分别提升了3和3.1个百分点。二沉池出水TP在改造之前均值为0.65 mg/L,数据指标普遍高于出水标准,改造后均值为0.46 mg/L,约50%以上的时间出水达标;COD与TP情况类似,经过后端的活性炭吸附和高效沉淀池的化学除磷等方式处理后均达标排

放,但药剂投加量明显降低,具体见图 4。

表 2 2023 年 1 月—12 月关键指标去除率统计(多月均值)

Tab.2 Statistics on the removal rate of key indicators from January to December in 2023 (multi-month average)

项目		NH ₃ -N	TN	二沉池 TP	TP	二沉池 COD	COD
改造前	1 月—4 月进水/(mg·L ⁻¹)	41.21	53.78	3.59	0.65	143.65	40.1
	1 月—4 月出水/(mg·L ⁻¹)	2.78	9.74	0.65	0.11	40.1	29.26
	1 月—4 月去除率/%	93.3	82.0	82.0	83.1	72.1	51.2
改造后	5 月—12 月进水/(mg·L ⁻¹)	39.16	51.11	4.35	0.46	126.39	25.65
	5 月—12 月出水/(mg·L ⁻¹)	1.40	4.60	0.46	0.09	25.65	15.48
	5 月—12 月去除率/%	96.4	90.0	85.0	80.4	79.7	39.6

注: 进水 TP 为高密度沉淀池的进水指标,出水 TP 为污水处理厂排口在线监测指标,进水 COD 为高密度沉淀池的进水指标,出水 COD 为污水处理厂排口在线监测指标。

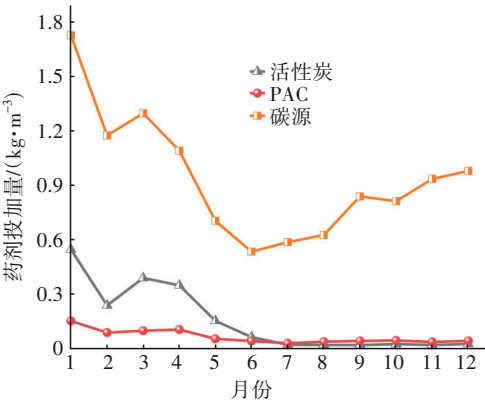


图 4 改造前后药剂投加量

Fig.4 Amount of agent dosage before and after modification

对比生化池改造前(2023 年 1 月—4 月)和改造后(2023 年 5 月—12 月)的药剂投加情况,改造前后碳源的投加量平均值分别为 1.32、0.755 kg/m³,月平均投加量降低 42.80%,虽然 6 月—12 月的碳源投加量呈上升趋势,主要为了将出水 TN 控制更低(改造前出水 TN 为 9.7 mg/L 降至改造后的 4.6 mg/L),对碳源的投加量进行了适当提高;改造前后 PAC 的投加量平均值分别为 0.118、0.048 kg/m³;改造前后活性炭的投加量平均值分别为 0.386、0.051 kg/m³。

3.2 药剂成本

实施提质增效后,在达标排放的前提下,通过控制药剂使用量,药剂成本大幅降低,具体数据见图 5。

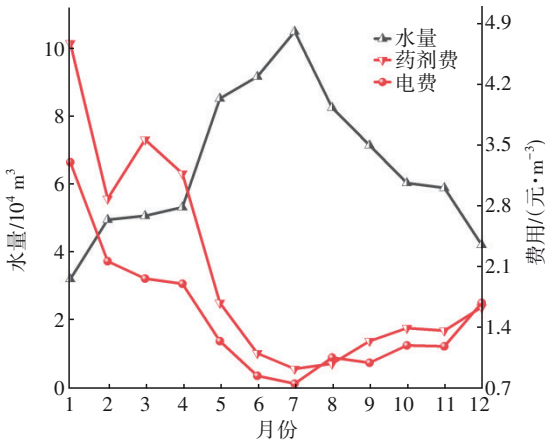


图 5 2023 年 1 月—12 月污水处理厂处理水量及吨水成本
Fig.5 Treatment capacity of sewage treatment plant and water cost per ton from January to December in 2023

从图 5 可以看出,改造后(2023 年 5 月—12 月)与改造前(2023 年 1 月—4 月)相比:改造后药剂成本由 3.58 元/m³降至 1.30 元/m³,降幅高达 63.69%;改造前后的电费成本分别为 2.34、1.13 元/m³,电费降幅达 51.71%。药剂成本与电费的巨大降幅原因主要有 3 点:①超越臭氧接触氧化池,9 月—12 月生化池采用单线运行,极大地降低了用电量,但由于其间水量也明显降低,药耗也有一定程度的降低,但是两者下降的比例有差异,导致吨水成本略微上升;②生化池加装变频器和流量计以后,通过精确调整内、外回流比以及对曝气管的清洗与更换等方式,显著提高了脱氮效果(见表 2)、降低了碳源投加量;③生化池的生化功能得到强化和提升,出水端 COD 明显降低,活性炭使用量大幅减少,同时生化池除磷效果提升后,高效沉淀池的除磷剂用量大大减少,吨水药剂成本显著降低。

3.3 碳减排效果

3.3.1 直接碳排放核算

该污水处理厂的直接碳排放包括 AAO 生化池生化反应 CH₄、N₂O 排放以及出水排入受纳水体所产生的 CH₄、N₂O^[7],其中化石燃料燃烧和污泥处置的碳排放未进行计算。污水处理厂产生的直接碳排放强度的计算方法及公式参考《提标升级对乡镇污水处理厂碳排特征的影响》^[8]。改造前污水处理过

程中直接碳排放强度计算结果如图6黑色线条区域所示。2022年1月—2023年4月,直接碳排放强度均较高,在2023年5月改造完成后即红色线条区域,同期比较2022年,直接碳排放强度明显降低,月均降低最高为26%,最低降幅5%,2023年5月—12月直接碳排放强度总量同比降低14%。

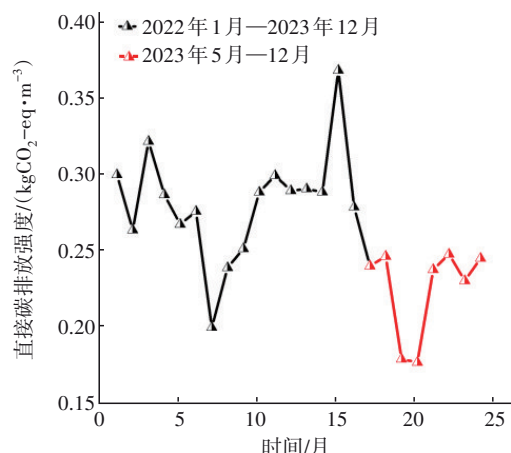


图6 改造前后直接碳排放强度

Fig.6 Direct carbon intensity before and after reconstruction

3.3.2 间接碳排放核算

对该污水处理厂间接碳排放的核算分为两部分:电耗和物耗。其中电耗包括各种泵、风机系统、配药加药系统、脱泥系统以及其他处理环节中的电能消耗^[9]。电耗与物耗的碳排放强度的计算方法及公式参考《提标升级对乡镇污水处理厂碳排特征的影响》^[8]。

根据该污水处理厂2022年1月—2023年12月连续2年的运行数据统计,2023年5月改造完成后,间接碳排放的统计结果如图7所示。

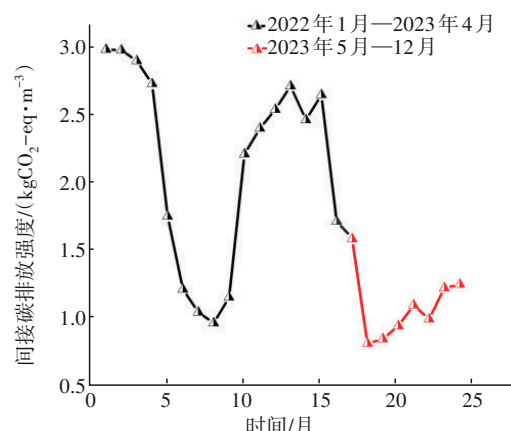


图7 改造前后间接碳排放强度

Fig.7 Indirect carbon emission intensity before and after reconstruction

由图7可知,2022年1月—4月和10月—12月的间接碳排放强度均值分别为2.9和2.4 kgCO₂-eq/m³,而2023年10月—12月改造后的间接碳排放强度均值为1.2 kgCO₂-eq/m³;即便是在6月—9月的雨季,改造后的间接碳排放强度值也有15%的降幅。

对比2022年与2023年5月—12月的间接碳排放数据,改造后明显降低,月均降低最高为55%,最低降幅2%,2023年5月—12月间接碳排放强度总量同比降低34%。

4 经济技术指标分析

该提质增效工程总投资为426万元。经过调整运行模式以及超越臭氧接触氧化池后的运行状况对比发现,吨水电费明显降低(改造前均价为2.34元/m³,改造后均价为1.13元/m³)。2023年5月—12月共计节约电费64.1万元、节约药剂费用132.9万元。投资成本预计1.5~2年收回。

5 结论与展望

通过对污水处理厂关键水质指标的分析,结合现场各工艺单元的运行情况,实现了提质改造设计目标:首先,新增活性炭吸附池解决了难降解COD的稳定达标问题;其次,通过增加变频器和流量计精确控制回流比,提升了脱氮除磷效率;第三,优化生化池运行模式,根据水量调整运行线路,降低电耗和药剂成本;最后,改造后碳排放量显著减少,直接和间接碳排放强度分别降低14%和34%。为了更好地达到碳减排效果,从控制运行的角度,利用智慧化手段做到精准控制,在满足达标排放的同时可进一步提质增效。

参考文献:

- [1] 刘平波,张俊,王家乐,等. BioDopp工艺应用于污水厂提标改造工程实例探讨[J]. 工业水处理, 2022, 42(1): 163-166.
LIU Pingbo, ZHANG Jun, WANG Jiale, et al. Case analysis on the application of BioDopp technology in upgrading of sewage treatment [J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(1): 163-166 (in Chinese).
- [2] 杨磊三,李骏飞,周炜峙,等. 基于系统性理念的污水处理厂提标改造案例分析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(18): 101-106.
YANG Leisan, LI Junfei, ZHOU Weizhi, et al. Case analysis of a WWTP upgrading and retrofitting project

- based on systematic concept [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(18):101-106(in Chinese).
- [3] 魏爱书,牛晓君. MABR工艺在污水处理站提标改造中的应用[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(6):2174-2180.
- WEI Aishu, NIU Xiaojun. Application of MABR in upgrading and reconstruction of a wastewater treatment station [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(6):2174-2180(in Chinese).
- [4] 高靖伟,侯锋,江乐勇,等. 安康江南半地下再生水厂改良AAO+深度处理工艺设计[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(22):61-66.
- GAO Jingwei, HOU Feng, JIANG Leyong, *et al.* Design of modified AAO and advanced treatment process in Ankang Jiangnan semi-underground reclaimed water plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(22):61-66(in Chinese).
- [5] 叶梓聪. 城镇生活污水处理厂中“AAO+深度处理工艺”的应用研究[J]. *皮革制作与环保科技*, 2022, 3(10):123-125.
- YE Zicong. Application research of “AAO+deep treatment process” in urban domestic sewage treatment plant [J]. *Leather Manufacture and Environmental Technology*, 2022, 3(10):123-125(in Chinese).
- [6] 张建丰. 活性污泥法工艺控制[M]. 2版. 北京:中国电力出版社, 2011:3-23.
- ZHANG Jianfeng. *Activated Sludge Process Control* [M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2011:3-23(in Chinese).
- [7] 中国城镇供水排水协会. 城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2022:104-110.
- China Urban Water Association. *Technical Guidelines on Carbon Accounting and Emission Reduction Pathways for Urban Water Systems* [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022: 104-110 (in Chinese).
- [8] 刘思玉,张建强,白华清,等. 提标升级对乡镇污水处理厂碳排放特征的影响[J]. *环境工程技术学报*, 2023, 14(3):798-807.
- LIU Siyu, ZHANG Jianqiang, BAI Huaqing, *et al.* Impacts of upgrading on carbon emission characteristics of township wastewater treatment plants [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 14(3):798-807(in Chinese).
- [9] 宁礼哲,张哲,蔡博峰,等. 2020年中国区域和省级电网温室气体排放因子研究[J]. *环境工程*, 2023, 41(3):222-228.
- NING Lizhe, ZHANG Zhe, CAI Bofeng, *et al.* Research on China's regional and provincial electricity GHG emission factors in 2020 [J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41(3):222-228(in Chinese).
- 作者简介:董明甫(1975-),男,四川绵阳人,硕士,高级工程师,主要研究方向为化工材料及无机化工。
- E-mail:412116518@qq.com
- 收稿日期:2024-07-31
- 修回日期:2024-09-12

(编辑:衣春敏)

加快推动发展方式绿色低碳转型,
因地制宜发展新质生产力,
积极稳妥推进碳达峰碳中和