城镇给排水工程设计案例专栏

倪亮, 常莺娜, 师旭军. MBBR+反硝化深床滤池工艺在北方污水厂提标改造中的应用[J]. 净水技术, 2024, 43(12): 180-186,204.
NI L, CHANG Y N, SHI X J. Application of MBBR + denitrification deep bed filter process in upgrading and reconstruction of northern WWTP [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(12): 180-186,204.

MBBR+反硝化深床滤池工艺在北方污水厂提标改造中的应用

倪 亮[1],常莺娜[2,*],师旭军[2]
(1.上海市政工程设计研究总院<集团>第十市政设计院有限公司,甘肃兰州 730030;2.中国市政工程西北市政设计院有限公司,甘肃兰州 730000)

摘 要 西安某污水处理厂设计规模为 2×10^5 m^3/d,原处理工艺为"粗细格栅及旋流沉砂池预处理+ 厌氧-缺氧-好氧(AAO)生化池+高密度沉淀池+精密过滤器+氯消毒接触池",原出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准。为了符合《西安市城镇污水处理厂再生水化提标改造和加盖除臭工程三年行动方案(2018—2020 年)》的出水要求,采用移动床生物反应器(MBBR)+反硝化深床滤池工艺对污水厂进行升级改造。该工艺最大限度的利用了现有池体,并在不停水的前提下完成了提标改造,提标总投资为 26 976.01 万元,提标运行后吨水运行成本增加 0.105 元,其中电费为 0.056 元(生物池为 0.03 元,深度处理为 0.026 元),药剂费用为 0.049 元(乙酸钠碳源费为 0.045 元,聚合氯化铝(PAC)费用为 0.004 元)。改造完成后出水 COD_{Cr}、BOD_5、SS、氨氮、TN 及 TP 出水水质分别为 14.82~19.81、0.6~3.7、3.91~7.13、0.07~0.21、5.70~10.20 mg/L 及 0.13~0.21 mg/L。改造后 COD_{Cr}、BOD_5、SS、氨氮、TN 及 TP 的整体平均去除率分别为 97.13%、99.08%、98.98%、99.63%、85.54%及 97.75%。冬季氨氮及 TN 的出水稳定达标。此改造案例可为北方寒冷地区污水厂提标改造提供参考。

关键词 污水处理厂 提标改造 移动床生物反应器(MBBR) 反硝化深床滤池 低温
中图分类号:TU992 **文献标识码**:B **文章编号**:1009-0177(2024)12-0180-08
DOI:10.15890/j.cnki.jsjs.2024.12.020

Application of MBBR + Denitrification Deep Bed Filter Process in Upgrading and Reconstruction of Northern WWTP

NI Liang[1], CHANG Yingna[2,*], SHI Xujun[2]
(*1. Shanghai Municipal Engineering Design and Research Institute <Group> 10th Municipal Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730030, China*;
2. China Municipal Engineering Northwest Municipal Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract The design scale of a wastewater treatment plant (WWTP) in Xi'an is 2×10^5 m^3/d. The original treatment process is "pre-treatment of coarse and fine grids and swirling sedimentation tanks + anaerobic/anoxic/aerobic (AAO) biochemical tank + high-density sedimentation tank + precision filter + contact disinfection tank". The effluent quality meets the class A standard of the *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918—2002). In order to meet the effluent requirements of the *Three-Year Action Plan for the Renewal and Upgrading of the Reclaimed Water Treatment and Capacity Expansion Project of Xi'an Municipal Wastewater Treatment Plant* (2018—2020), WWTP is upgraded using the movingbed bio reactor(MBBR)+ denitrification deep-bed filter process. This process maximizes the use of existing tanks and achieves the upgrading without stopping the

[收稿日期] 2023-12-25
[基金项目] 甘肃省企业技术创新项目(GXHRC20240328-3);中国市政工程西北设计研究院有限公司科研课题(XBSZKY2204)
[作者简介] 倪亮(1991—),男,工程师,研究方向为净水及污水处理技术,E-mail:623885051@qq.com。
[通信作者] 常莺娜(1991—),女,硕士,高级工程师,研究方向为净水及污水处理设计,E-mail:1272950900@qq.com。

water supply. The total investment for the upgrading is 269.760 1 million yuan, after the standard lifting operation, the operating cost per ton of water increased by 0.105 yuan, including 0.056 yuan for electricity (biological pool is 0.03 yuan, deep processing is 0.026 yuan) and 0.049 yuan for chemicals (sodium acetate carbon source fee is 0.045 yuan, PAC fee is 0.004 yuan). After the reconstruction, COD_{Cr}, BOD_5, SS, ammonia nitrogen, TN and TP of effluent quality are from 14.82 mg/L to 19.81 mg/L, 0.6 mg/L to 3.7 mg/L, 3.91 mg/L to 7.13 mg/L, 0.07 mg/L to 0.21 mg/L, 5.70 mg/L to 10.20 mg/L and 0.13 mg/L to 0.21 mg/L, respectively. The overall average removal rates of COD_{Cr}, BOD_5, SS, ammonia nitrogen, TN and TP after reconstruction are 97.13%, 99.08%, 98.98%, 99.63%, 85.54% and 97.75%, respectively. The effluent of ammonia nitrogen and TN in winter meets stable standards. This reconstruction case can provide reference for the upgrading and reconstructing of WWTP in cold northern regions.

Keywords wastewater treatment plant upgrading and reconstruction moving bed bioreactor (MBBR) denitrification deep bed filter low temperature

为了全面提升水环境质量,打赢污水治理和水质提升的攻坚战,将西安变成宜居、宜业、宜游的城市,西安市人民政府办公厅于 2018 年 10 月印发了《西安市城镇污水处理厂再生水化提标改造和加盖除臭工程三年行动方案(2018—2020 年)》(以下简称《行动方案》)。《行动方案》要求到 2020 年,西安城镇污水处理厂出水水质达到《行动方案》的要求。某西安市污水处理厂设计规模为 2×10^5 m^3/d,于 2018 年建成投产运行,占地面积为 9.015 hm^2 (1 hm^2 = 10 000 m^2),污水厂出水执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准。依据《行动方案》出水要求,该污水厂出水重铬酸盐指数(COD_{Cr})、五日生化需氧量(BOD_5)、总磷(TP)、总氮(TN)及氨氮的去除率需进一步削减。此外,西安每年都有 5、6 个月处于低温的环境,这对于此次改造提出了更严峻的挑战。目前国内外污水厂提标改造的主要技术措施包括填料投加技术、污泥曝气再生技术、曝气生物滤池、核减处理规模以及生物池的工艺变形等[1]。

文章以西安某设计规模为 2×10^5 m^3/d 污水厂出水从一级 A 提升为《行动方案》中的排放标准为例,探讨移动床生物反应器(MBBR)及反硝化深床滤池在北方一级 A 污水厂提标改造中的实际应用,为国内尤其寒冷地区污水厂提标改造提供借鉴。

1 工程概况

西安某污水厂设计规模为 2×10^5 m^3/d,于 2018 年建成投产运行,占地面积为 9.015 hm^2,污水厂尾水执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 排放标准。现状污水处理工艺流程为:粗格栅及提升泵房→细格栅及水力旋流沉砂池→厌氧-缺氧-好氧(AAO)+二沉池→深度处理单元(高密度沉淀池+精密过滤器)→次氯酸钠消毒→再生回用或外排皂河。再生水主要用于厂区回用、浇洒绿地和道路等。原有厂区布置如图 1 所示。

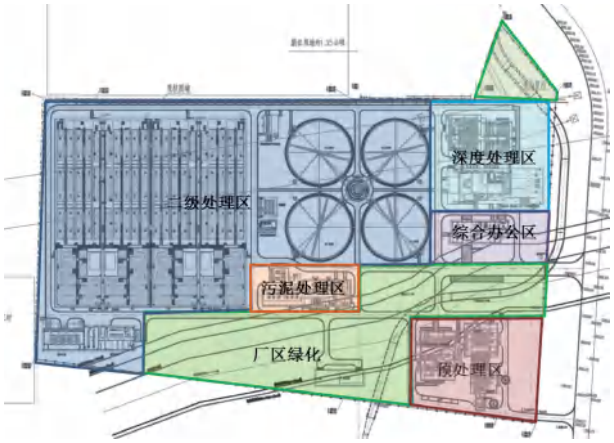

图 1 原有污水厂区布置

Fig. 1 Layout of Original WWTP Area

此次提升改造目标为出水标准从一级 A 提高到《行动方案》的出水要求。详细的进出水水质指标如表 1 所示。

提标前进水水质指标最大值数据取自污水厂 2018 年 7 月—2020 年 7 月实际进水水质。对数据按照 90%保证率统计后发现 SS 进水指标高于原设计值,其余指标均低于原设计值且与实际进水水质相差不大,故此次只提高了设计进水的 SS 值,其他进水指标不变。

2 改造难点分析

对 2018 年 7 月—2020 年 7 月提供的出水水质进行分析(表 2),污水厂出水 COD_{Cr}及 BOD_5 均能稳定达到一级 A 排放标准。但 SS、氨氮、TN 及 TP 有超标现象发生,氨氮及 TN 超标现象在 1 月—4 月、

表 1　实际和设计进出水水质

Tab. 1　Quality of Actual and Designed Influent and Effluent

项目	COD_{Cr}	BOD_5	SS	氨氮	TN	TP
原设计进水值/($mg\cdot L^{-1}$)	560	260	380	48	56	8
提标前进水最大值/($mg\cdot L^{-1}$)	515	232	519	39.1	56.7	5.03
提标设计进水值/($mg\cdot L^{-1}$)	560	260	463	48	56	8
提标前设计出水值/($mg\cdot L^{-1}$)	50	10	10	5	15	0.5
提标后设计出水值/($mg\cdot L^{-1}$)	30	6	10	1.5	12	0.3
本次需削减量/($mg\cdot L^{-1}$)(削减率)	20(40%)	4(40%)	0(0)	3.5(70%)	3(20%)	0.2(40%)

注:括号里是指本次处理的削减率。

表 2　改造前污水处理厂出水水质

Tab. 2　Effluent Quality of WWTP before Reconstruction

项目	COD_{Cr}	BOD_5	SS	氨氮	TN	TP
最大值/($mg\cdot L^{-1}$)	44	9	14	10.1	22.4	0.59
最小值/($mg\cdot L^{-1}$)	7.1	1	4	1.2	6.30	0.21
满足《行动方案》要求的达标率	53%	46%	45%	40%	11%	5%

11 月及 12 月尤为明显,这 6 个月份污水温度均低于 10 ℃。研究[2-3]表明,当污水温度从 20 ℃降低到 10 ℃时,污染物的生化去除率降低一半,自养型的硝化菌所受影响远大于异氧菌。此外,要达到此次《行动方案》的出水要求,除了 SS 外,上述所有指标均需进一步去除。故此次改造在进一步去除 COD_{Cr}、BOD_5 及 TP 的情况下,需着重考虑冬季低温条件下生物池脱氮的稳定性。

由于现有的深度处理过滤单元为精密过滤器,精密过滤器运行效果不稳定,SS 及 TP 超标现象时有发生,尤其在过滤器清洗前一段时间,过滤能力达到饱和,出水 SS 及 TP 易出现超标。

现状污水厂内部没有预留用地,如需新建建(构)筑物需要重新征地,根据污水厂区情况,只有东南向一片面积为 15 807.67 m^2 的空地可以征收使用,其他向均无可利用的地方,故此次改造新建的建(构)筑物面积不得超过可利用的空地面积。

业主要求本次改造施工过程中污水厂不能停止运行,此次改造不仅需要考虑建成后污水处理工艺的可行性而且要兼顾施工过程中污水厂不间断运行的要求。此外,原有的构筑物应尽量利用,不得过多拆除废弃,要尽量保留固定资产。

3　改造方案

3.1　强化 AAO 工艺

根据表 1 原水进水数据,BOD_5/COD_{Cr} = 0.46,说明原水可生化性较好。结合工程运行 2 年的出水数据,目前二级生物处理部分水质尚可,除了冬季氨氮、TN 超标现象时有发生外,其余时间 COD_{Cr}、BOD_5、TN 及氨氮值可以满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准,故对 AAO 池进行改造,进一步降低污水中的 COD_{Cr}、BOD_5、TN 及氨氮值,尤其要注重低温条件下对氨氮及 TN 的去除率。根据《行动方案》的要求,经过计算,原有缺氧段有效容积不能满足新的出水水质反硝化脱氮要求,好氧段有效容积也不能满足新的处理要求,故需对原有 AAO 池进行扩容或者采取其他强化措施。但目前二级生物处理构筑物四周都无法扩建,故此次不采取扩容的方式。

MBBR 以其微生物浓度更高、脱氮效率更高的特点,特别适用于在不增加占地的前提下对现有污水处理厂进行扩容和提高出水水质的升级改造[4]。张申旺等[4]在将污水厂改良式序列间歇反应器(MSBR)工艺升级改造为 MBBR 工艺后发现,出水 COD_{Cr}、BOD_5、TN 及氨氮质量浓度分别为 11 ~ 15、2.8 ~ 5.8、6.55 ~ 10.00、0.33 ~ 1.02 mg/L。刘娟等[5]

发现,MBBR 用于山东某污水处理厂改造后,出水 COD_{Cr} ≤30 mg/L,TN≤10 mg/L,氨氮≤1.5 mg/L。

胡友彪等[6]通过 MBBR 工艺在不同温度下对氨氮及 TN 的去除时发现,当温度从 23~25 ℃降低到 12~15 ℃时,氨氮的去除率从 97%降低到 95%,TN 的去除率从 96%降低到 92%。因为 MBBR 独特的生物结构具保存了较多的硝化反硝化菌,所以能适应温度变化,适于我国北方寒冷地区污水处理厂的改进升级。

此次考虑将现有生物池本次改造为 MBBR 池,通过在原有生物池投加一定数量的悬浮载体,提高生物池生物量及生物种类,高浓度的微生物量减少了生物池的池容,考虑到 MBBR 填料上同时存在好氧、缺氧和厌氧环境,去除有机物、硝化和反硝化能够同时在好氧段发生,通过计算填料有机物负荷及硝化负荷,将上述减少的池容改造为可缺可好调节区,此操作增加了反硝化时间,确保了低温条件下氨氮和总氮的去除效果,同时避免了新增池容。

3.2 新增深度处理单元

TN 的去除通常采用生物处理,TP 则可通过生物处理辅以化学处理去除[7],污水中的 SS 去除主要依靠过滤或者沉淀效果,深度处理作为污水处理厂的最后一道屏障通常被用来去除污水中剩余的 TN、TP 及 SS。

现状深度处理单元采用“高密度沉淀池+精密过滤器”,原设计按照出水 TP 按照≤0.5 mg/L 进行控制,不能满足新标准下出水 TP≤0.3 mg/L 的要求,需进一步强化,此次改造根据出水要求增加化学除磷的药剂投加量。项目进水 SS 指标为 463 mg/L,高于原设计值 380 mg/L,根据规范要求需设初沉池。但综合水厂运行 2 年的出水水质 SS 并未有明显的偏高,较高的 SS 未明显影响水厂运行。再者,此次提标对 SS 的消减量为 0,考虑本工程用地的限制,此次设计不考虑增加初沉池。SS 超标的现象主要是由于精密过滤器过滤效果不稳定,此次提标改造新增有稳定过滤功能的构筑物,保证出水 SS 不超标。为了进一步确保冬季水温低的情况下,TN 的处理效率依旧能够达标,此次在高密度沉淀池之后增设反硝化深床滤池。反硝化深床滤池集生物脱氮及过滤功能于一体[8],天津某污水处理厂提标改造工程的实践表明,废水经深床滤池处理后 TN 去除率可达到 50%~79%[9]。高效沉淀池+深床滤池联合处理工艺的出水 TP 平均质量浓度为 0.25 mg/L,平均去除率约为 83.2%[10]。

3.3 改造工艺流程

通过综合分析,此次污水厂提标改造方案为改造现状 AAO 生物反应池(通过投加填料改为 MBBR 池)+新增反硝化深床滤池(保留利用现状高密度沉淀池)。

通过在生化段好氧区投加填料,对 AAO 生物池进行改造,在现状总变电室增加电气设备,满足生物池新增填料流化鼓风系统的运行。在深度处理段增加反硝化深床滤池,补充外加碳源,确保尾水的稳定达标排放。配套新建二次提升泵房、碳源投加间、变配电室。其余建(构)筑物均保持现状不变。此次提标改造工艺流程如图 2 所示。

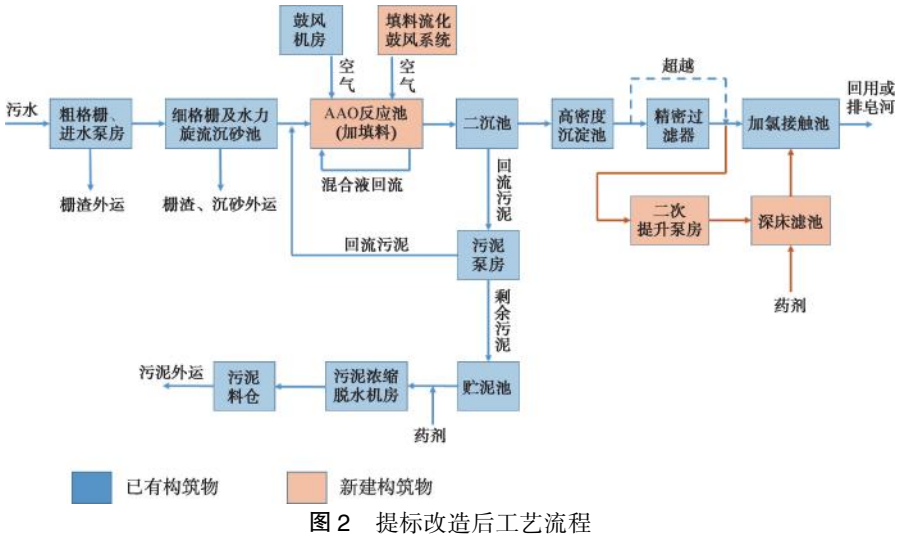

图 2 提标改造后工艺流程

Fig. 2 Process Flow after Upgrading and Reconstruction

4　工艺设计

4.1　AAO 池改造

现状单座 AAO 生反池(处理量为 5×10^4 m^3/d)各段的有效容积分别为厌氧段 $V_1=4\ 140\ m^3$、缺氧段 $V_2=12\ 756\ m^3$、好氧段 $V_3=20\ 114\ m^3$,设计水力停留时间分别厌氧/缺氧/好氧 = 2.0 h/6.10 h/9.65 h,总水力停留时间为 17.75 h。现状设计污泥质量浓度为 4.5 g/L、内回流比为 300%、外回流比为 100%,设计水温 $T=12$ ℃,根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)[11]的设计参数及《行动方案》的出水要求对原有 AAO 池容进行计算复核。

缺氧段进水 TN 质量浓度为 56 mg/L,出水质量浓度为 12 mg/L,污泥总产率系数 $Y_t=0.70$ kg SS/(kg BOD_5),脱氮速率 $K_{de(12)}=0.024$ (kg NO_3^--N)/(kg MLSS·d),则缺氧段有效容积需增至 14 258 m^3,缺氧段水力停留时间为 6.83 h。

好氧段进水氨氮质量浓度为 48 mg/L,出水为 1.5 mg/L,氮的半速率常数 $K_n=1.0$,好氧区设计污泥龄 $\theta=12$ d,则好氧段有效容积需增加至 23 697 m^3,好氧段水力停留时间为 14.96 h。生物池具体改造内容如下:

1)在好氧区第一廊道前端设置 3 台环流搅拌器,将该区域作为可缺可好可调节区,分隔出 0.677 h 作为缺氧区。

2)在好氧区第二、第三廊道投加填料,改造为 MBBR 池,填料区池容为 10 057 m^3。填料填充比为 17.4%(填料规格为 Φ25 mm×10 mm,比表面积为 800 m^2/m^3),填料区表面硝化负荷:≥0.5 g NO_3^--N/(m^2·d)(20 ℃),≥0.27 g NO_3^--N/(m^2·d)(12 ℃)。正常运行填料随水流推进至填料区末端,再通过填料回流装置输送至填料区进水端。填料区与非填料区用格网隔开,采用平面格网时,格网与水流方向垂直。格网处、池壁处设置防止填料堆积的穿孔管曝气冲刷装置,通过辅助穿孔管曝气系统、原曝气系统及填料回流系统保证 MBBR 区域填料的良好流化。为减少填料对池体的磨损,池壁局部采用不锈钢衬板作为防护层。

3)在好氧区第四廊道末端分隔出 0.677 h 作为缺氧区,降低回流混合液中的溶解氧浓度,减小溶解氧对缺氧区反硝化反应的影响。为防止该区域停止曝气后池底积泥,设置 3 台环流搅拌器。

4)辅助曝气系统加网前自清洗曝气管单池长度为 196 m,根据现场填料流化情况开启,平均每米辅助流化管出气量为 3.26 m^3/min,四池需气量为 42.68 m^3/min。为避免对现状的曝气系统产生影响,MBBR 辅助流化系统采用单独的气源,新增设的磁悬浮鼓风机供给。

具体改造如图 3 所示。

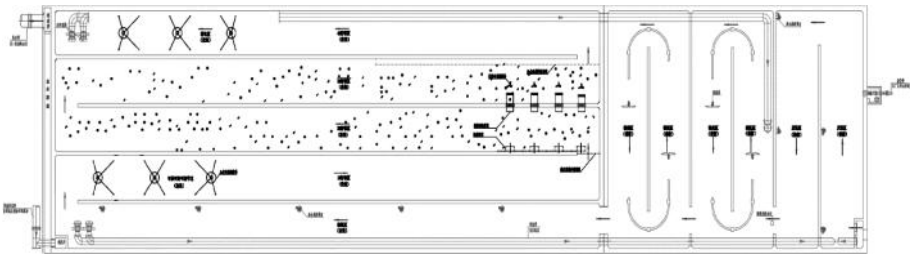

图 3　生物池改造示意图

Fig. 3　Schematic Diagram of Biological Pool Reconstruction

4.2　新建二次提升泵房及反硝化深床滤池

二次提升泵房与反硝化深床滤池合建,反硝化深床滤池 2 座,分 4 组,每组 5 格。提升泵房原水为原深度处理车间出水,加压后的水接入本次新建的深床滤池。设置 6 台潜水轴流泵(4 用 2 备),单台潜水泵流量为 2 708 m^3/h;扬程为 6.2~10.4 m;功率为 90 kW。单座反硝化深床滤池尺寸为 34.7 m×39.4 m×6.0 m;单格尺寸为 6.0 m×12.0 m×6.0 m;表面负荷(平均流量)为 $q_{ave}=5.79$ $m^3/(m^2\cdot h)$;表面负荷(高峰流量)为 $q_{max}=7.52$ $m^3/(m^2\cdot h)$。反硝化深床滤池采用气、水协同进行反冲洗,反冲洗流程分为 3 个阶段。

1)第一阶段:单独气洗,强度为 90~108 $m^3/(h\cdot m^{-2})$,冲洗时间为 1~2 min

2)第二阶段:气水同时洗,气洗强度为 108 $m^3/(h\cdot m^{-2})$,水洗强度为 8 $m^3/(h\cdot m^{-2})$,冲洗时间

为 6 min

3) 第三阶段：单独水洗，强度为 15 ~ 20 $m^3/(h \cdot m^{-2})$，冲洗时间为 5 min

反冲洗频率为 2~3 d，反冲洗水量占总水量的 2%，配套反冲洗罗茨风机、反冲洗水泵及废水排水泵。

4.3 新建碳源投加间

此次改造生物池完生物池 TP 去除率按照《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)[11] 下限 75% 考虑，故新建深度处理间进水 TP 质量浓度为 2.0 mg/L，提标改造后，出水 TP≤0.3 mg/L。由于生物池改为 MBBR 池，深度处理前端进水 TN 去除率按照《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)[11] 中间值考虑，即去除率为 75%，故深度处理间进水 TN 质量浓度为 15 mg/L，出水 TN≤12 mg/L。提标改造需要加大聚合氯化铝(PAC)及乙酸钠的投加量，经复核现状 PAC 投加泵可以满足新的加药需求，乙酸钠投加泵流量不能满足新的加药需求，此次设计新建碳源投加间，增加乙酸钠加药装置。增加 2 套乙酸钠溶液储罐，储存天数为 8 d。

为了节省占地，新增的碳源投加间设置于反硝化深床滤池间内，新增的反硝化深床滤池间占地面积为 3 886.61 m^2，未超过可以使用的土地面积。改造后的水厂占地情况如图 4 所示。

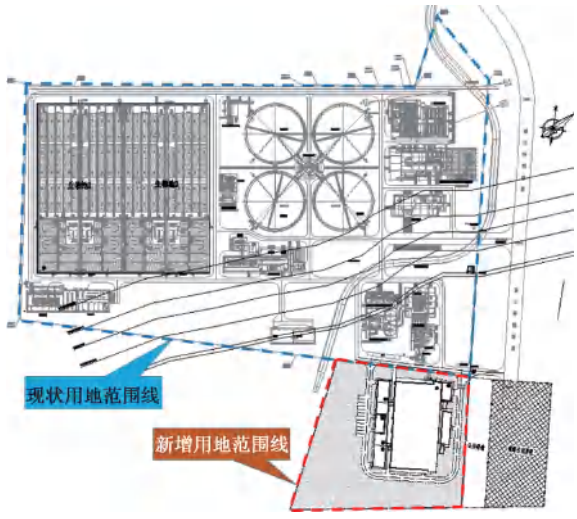

图 4 提标改造后水厂布置

Fig. 4 Layout of WWTP after Upgrading and Reconstruction

5 施工期间不停产措施

为保证提标改造期间出水达标，且尽量减少对生产运行的影响，统筹考虑多方面因素，拟定施工顺序如下。

1) 考虑到新增用地征地手续尚在办理中，故先进行生反池的改造。现状运行 3 座生反池，先对未运行的生反池进行改造，改造完成后切换污水至已改造生反池，然后改造其他组生反池，直至生反池全部改造完成。

2) 新增用地征地手续办理完成后，新建反硝化深床滤池间施工，待新建反硝化深床滤池间建成后，将现状深度处理单元出水改接至新建反硝化深床滤池间，新老管线割接时保留原有管线，增设切换井，可根据需要进行切换，原有的精密过滤器部分予以保留，在后续运行中若反硝化深床滤池进行维护或者原水 SS 超过进水设计标准时可用。

3) 现状厂区内新建工艺管道及附属设施可与其他分项施工同步进行，先完成主线敷设，待新建反硝化深床滤池间完成后再进行新老管道割接。

4) 切换井新建工艺管道与现状工艺管道连接时，为保证生产不停水，需设置 4 台临时提升泵[流量(Q) = 1 250 m^3/h，扬程(H) = 10 m，功率(N) = 75 kW]，将高效沉淀池中的水抽至接触池，待管道接通后，方可正常运行。

6 主要经济指标及运行效果

西安某设计规模为 2×10^5 m^3/d 的污水厂提标改造总投资为 26 976.01 万元，总吨水投资为 1 348.8 元。该水厂提标新建二次提升泵房及反硝化深床滤池、碳源投加间、变配电间，吨水占地面积为 0.194 m^2。提标后吨水运行成本增加 0.105 元，其中电费为 0.056 元(生物池为 0.03 元，深度处理为 0.026 元)，药剂费为 0.049 元(乙酸钠碳源费为 0.045 元，PAC 费用为 0.004 元)。

该工程自改造完成投产至今已运行 2 年有余，通过在低温期将好氧/缺氧调节区调整为缺氧区(其余时间为好氧区)，增加反硝化时间的运行方式，此次改造工程产水水质稳定达标，实际出水水质如表 3 所示。在投产运行的 2 年，每年均有 6 个月的低温持续期，即 1 月—4 月、11 月及 12 月，在这 6 个月，污水温度均低于 10 ℃，产水氨氮及总氮的质量浓度出水水质最大值分别为 0.21 mg/L 及 10.20 mg/L，。MBBR 及反硝化深床滤池对各种污染物的去除率如表 3 所示。运行结果表明，MBBR 承担了

主要的去除任务,尤其是 COD_{Cr} 和 TN。这主要是由于 MBBR 生物池内活性污泥质量浓度(MLSS)为 8 000~10 000 mg/L,远超改造前 4 000~5 000 mg/L 活性污泥质量浓度。反硝化深床滤池对各个污染物的去除率均低于 MBBR,但对于 TP、氨氮及 SS 的去除效果仍然显著。

图 5 为改造前后各 1 年的出水水质平均值。从表 3 可以看出经过提升改造后,污水厂的各项出水指标较改造前均有降低,且所有出水指标均优于《行动方案》的出水要求,此次提标改造效果显著。

表 3　提标改造后污水处理厂出水水质

Tab. 3　Effluent Quality of WWTP after Upgrading and Reconstruction

项目	COD_{Cr}	BOD_5	SS	氨氮	TN	TP
总出水水质/(mg·L^{-1})	14. 82~19. 81	0. 6~3. 7	3. 91~7. 13	0. 07~0. 21	5. 70~10. 20	0. 13~0. 21
MBBR 平均去除率	85. 89%	69. 26%	63. 24%	63. 21%	79. 39%	57. 50%
反硝化深床滤池平均去除率	11. 24%	29. 82%	35. 74%	36. 42%	6. 15%	40. 25%
工艺路线整体平均去除率	97. 13%	99. 08%	98. 98%	99. 63%	85. 54%	97. 75%

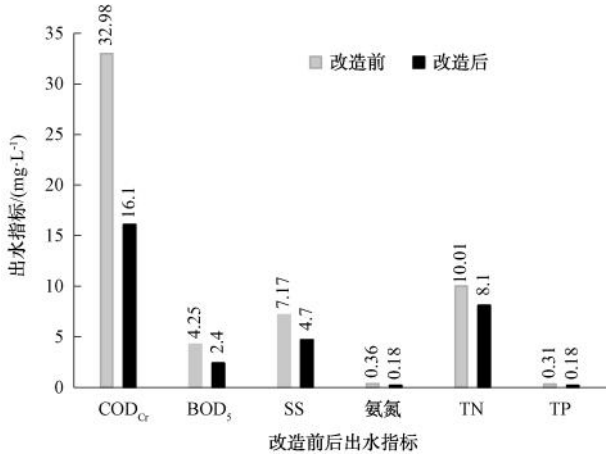

图 5　提标改造前后出水水质对比

Fig. 5　Comparison of Effluent Quality before and after Upgrading and Reconstruction

7　结论

1)为了满足西安某污水厂出水标准从一级 A 提高到《行动方案》要求的出水水质。采取了将现有 AAO 生物反应池加填料改造为 MBBR 池和新增反硝化深床滤池的工艺,确保了产水水质达标。

2)此次改造充分分析水厂提标改造前的实际运行情况,结合场地的用地限制,充分挖潜原系统处理能力,解除了用地受限的同时节约了投资。此次改造在不停水的前提下完成。

3)提标改造后水厂出水水质均在《行动方案》要求的出水水质指标限值以下,改造后的污水厂运行更稳定,在冬季低温条件下,出水水质依然能稳定达标,可为北方寒冷地区污水厂提标改造提供参考。

参考文献

[1] 姚瑞珍, 周国胜, 杨新春,等. 基于 A^2/O 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 A^2/O process [J]. Water Treatment Technology, 2024, 50(2): 148-152.

[2] 郑志佳, 白华清, 孟涛, 等. 低温下 MBBR 强化硝化原理分析和应用[J]. 中国给水排水, 2019, 35(23): 6-11.
ZHENG Z J, BAI H Q, MENG T, et al. Principle analysis and application of MBBR enhanced nitrification at low temperature [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(23): 6-11.

[3] 尚越飞, 宗倪, 齐嵘, 等. 典型城市污水生物处理工艺的冬季运行稳定性分析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(19): 78-84.
SHANG Y F, ZONG N, QI R, et al. Operation stability of typical urban sewage biological nutrients removal process in winter [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(19): 78-84.

[4] 张申旺, 杨硕, 张向阳, 等. 某污水处理厂 MSBR 工艺升级改造为 MBBR 工艺的工程应用[J]. 净水技术, 2023, 42(10): 173-178.
ZHANG S W, YANG S, ZHANG X Y, et al. Engineering application of upgrading and reconstruction of MSBR process to MBBR process in a WWTP[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(10): 173-178.

[5] 刘娟, 项绪文, 沈军, 等. Bardenpho+MBBR+磁絮凝沉淀用于污水厂升级改造[J]. 中国给水排水, 2023, 39(4): 70-74.
LIU J, XIANG X W, SHEN J, et al. Application of bardenpho, MBBR and magnetic flocculation and precipitation process in the upgrading and reconstruction of a wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(4): 70-74.

(下转第 204 页)

and pathways [J]. Chemosphere, 2017, 168: 1309-1316. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.11.134.

[9] LIU S Y, TANG L, WU M H, et al. Parameters influencing elimination of geosmin and 2-methylisoborneol by K_2FeO_4 [J]. Separation and Purification Technology, 2017, 182: 128-133. DOI: 10.1016/j.seppur.2017.03.013.

[10] 王莹莹, 王刚. 臭氧-活性炭工艺在东营某水厂升级改造中的应用[J]. 净水技术, 2024, 43(6): 179-185.
WANG Y Y, WANG G. Application of ozone-activated carbon process in the upgrading and transformation of a water plant in Dongying [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(6): 179-185.

[11] 许兵, 李珂, 刘佳, 等. 臭氧-生物活性炭工艺处理饮用水研究进展[J]. 净水技术, 2022, 41(12): 9-18, 25.
XU B, LI K, LIU J, et al. Research progress on treatment of drinking water by ozone-bio-activated carbon process [J]. Water purification technology, 2022, 41(12): 9-18, 25.

[12] 徐彦飞, 戴仲怡. 后置臭氧-生物活性炭工艺在水厂改造中的若干设计点探讨[J]. 净水技术, 2022, 41(12): 147-152.
XU Y F, DAI Z Y. Discussion on several design points of post-ozone-biological activated carbon process in water plant renovation [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(12): 147-152.

[13] 温成成, 董志龙, 李凯,等. 人工强制混合藻华控制研究进展:理论、技术与机制[J]. 中国环境科学, 2024, 44(10): 5801-5817.
WEN C C, DONG Z L, LI K, et al. Review on the control of algal blooms via artificial mixing: Theory, technologies, and mechanism [J]. Chinese Environmental Science, 2024, 44(10): 5801-5817.

[14] PENG J Y, WANG Q Y, LI Z B, et al. Pilot testing and engineering application of O_3/H_2O_2 process for 2-methylisoborneol and geosmin removal in drinking water treatment [J]. 2024, 60: 105140. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105140.

[15] 王赫, 彭锦玉, 王全勇, 等. 臭氧/生物活性炭流化床预处理对净水效率的影响[J]. 中国给水排水, 2023, 39(5): 46-52.
WANG H, PENG J Y, WANG Q Y, et al. Effect of ozone/biologically activated carbon fluidized bed pretreatment on water purification efficiency[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(5): 46-52.

[16] 钱勇, 张雪, 蒋福春, 等. 太湖水源水厂臭氧-生物活性炭工艺长期运行净化效能变化研究[J]. 给水排水, 2022, 48(11): 9-16.
QIAN Y, ZHANG X, JIANG F C, et al. Evaluation of long-term operation efficiency of ozone-biological activated carbon process in drinking water treatment plants with Taihu Lake as water source [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(11): 9-16.

(上接第 186 页)

[6] 胡友彪, 张文涛, 黄周,等. 温度对 MBBR 和 A/O 工艺中污染物去除效果比较[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(2): 178-181.
HU Y B, ZHANG W T, HUANG Z M. Comparison of effect of temperature on MBBR and A/O process for sewage treatment [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35 (2): 178-181.

[7] 都雪晨, 黄华玲, 靳斌斌, 等. MBBR 和 MBR 工艺在南方某用地受限污水处理厂扩建及提标改造中的应用[J]. 净水技术, 2023, 42(5): 164-171.
DU X C, HUANG H L, JIN B B, et al. Application of MBBR and MBR processes in extention and upgrading project of a southern WWTP under limited land use [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(5): 164-171.

[8] 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): 120-124.
BAI C Y, ZHANG Q X, ZHAO S, 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): 120-124.

[9] 黄勤超. 反硝化深床滤池在某污水处理厂提标改造工程中的应用[J]. 净水技术, 2021, 40(s1): 112-115, 235.
HUANG Q C. Application of denitrification deep bed filter in the upgrading and reconstruction project of a sewage treatment plant [J]. Water Purification Technology, 2021,40(s1): 112-115, 235.

[10] 李畅宇. 高效沉淀池与深床滤池联合处理工艺在某污水处理厂的调试及试运行[J]. 新型工业化, 2020, 10(4): 138-141.
LI C Y. Commissioning and trial operation of high-efficiency sedimentation tank and deep bed filter combined treatment process in a sewage treatment plant [J]. The Journal of New Industrialization, 2020, 10(4): 138-141.

[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 室外排水设计标准: GB 50014—2021 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Design standard for outdoor drainage: GB 50014—2021 [S]. Beijing: China Planning Press, 2021.