

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.06.017

四级 A/O+深度处理用于市政污水厂提标改造

叶丽丽, 赵健, 李丽, 刘晓瑞, 王昕蕾
(成都市兴蓉环境股份有限公司, 四川 成都 610095)

摘要: 四川省某市政污水处理厂提标改造工程由于用地紧张与改造资金受限,经过方案比选,确定采用四级 A/O+高密度沉淀池+反硝化滤池的深度处理组合工艺,改造后出水 COD、NH₃-N、TP、TN 分别降至 8.42、0.14、0.09、4.96 mg/L,较改造前分别降低 41.9%、76.7%、55.0% 和 45.5%,出水水质稳定达到《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB51/2311—2016),运行电耗仅为 0.35 kW·h/m³,实现了污染治理与碳减排的协同优化。实际工程运行效果表明,该组合工艺具有空间集约、运行稳定、节能高效等优势。

关键词: 四级 A/O 工艺; 高密度沉淀池; 反硝化滤池; 深度处理; 提标改造

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2026)06-0103-06

Application of Four-stage A/O + Advanced Treatment Combined Process in Upgrading and Reconstruction of Municipal Wastewater Treatment Plant

YE Lili, ZHAO Jian, LI Li, LIU Xiaorui, WANG Xinlei
(Chengdu Xingrong Environment Co. Ltd., Chengdu 610095, China)

Abstract: Taking the upgrading and reconstruction of a municipal wastewater treatment plant in Sichuan Province as an example, under the condition of limited land availability and budget restrictions, the advanced treatment combined process of four-stage A/O + high density sedimentation tank + denitrification filter was adopted. After the reconstruction, the effluent concentrations of COD, NH₃-N, TP, and TN were reduced to 8.42 mg/L, 0.14 mg/L, 0.09 mg/L, and 4.96 mg/L, respectively, which were 41.9%, 76.7%, 55.0%, and 45.5% lower than those before the reconstruction. The effluent quality stably meets the *Water Pollution Discharge Standards for Minjiang and Tuojiang River Basins in Sichuan Province*(DB51/2311-2016), with an energy consumption of only 0.35 kW·h/m³, achieving synergistic optimization of pollution control and carbon reduction. The operational results show that the combined process has advantages such as space efficiency, operational stability, energy-saving and high efficiency.

Keywords: four-stage A/O process; high density sedimentation tank; denitrification filter; advanced treatment; upgrading and reconstruction

多级 A/O 工艺基于分段进水脱氮技术,通过串联设置的缺氧/好氧(A/O)反应单元、污泥全流程回流及污水多节点分配机制,实现碳源定向分配与逐级反硝化^[1]。相较于传统活性污泥法,多级 A/O 工艺在抗负荷冲击、碳源定向分配、同步脱氮除磷效率及节省工程投资等方面具有显著优势^[2-3]。然而,以

多级 A/O 为主体的深度处理组合工艺在国内污水处理领域的工程化应用案例不多^[4],已投运项目以二级或三级 A/O 串联+深度处理为主,四级及以上应用案例相对有限。

四川省某市政污水处理厂提标改造工程由于用地紧张与改造资金受限,将现状 A/O+D 型滤池工艺

改造为四级A/O+高密度沉淀池+反硝化滤池的深度处理组合工艺,实现了提标改造目标,可为同类市政污水处理厂集约化改造提供参考。

1 工程概况及问题分析

该污水处理厂设计处理规模为10万m³/d,于2008年投入运行,主要处理服务范围内的生活污水,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,最终排放至沱江支流。为保护和改善岷江、沱江流域水环境,减少污染物排放量,确保水资源可持续利用,《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB51/2311—2016)规定了岷江、沱江流域排污单位水污染物的排放浓度限值。由于该污水处理厂原排放标准已不满足新标准要求,因此需进行提标改造。

1.1 原工艺流程及设计水质

该工程原污水处理工艺流程为粗格栅-细格栅-曝气沉砂池-改良A/O生化池-二沉池-D型滤池-紫外消毒,污泥处理采用机械转筛浓缩+离心脱水,污泥含水率降至80%后外运处置。

原设计进、出水水质与提标前实际出水水质见表1。可以看出,实际出水指标均能达到并优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。

表1 原设计水质及提标前实际出水水质

Tab.1 Original design quality and actual effluent quality before upgrading mg/L

项目	COD	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TP	TN
原设计进水	400	200	240	30	4	40
原设计出水	50	10	10	5	0.5	15
实际出水	14.5	2.4	5.0	0.6	0.2	9.1

1.2 存在的问题

该污水处理厂提标改造前主要存在以下问题:

① 进水水质波动较大。进水污染物浓度随季节变化幅度较大,雨季污染物浓度较低,旱季污染物浓度较高,COD、SS、TN、TP、NH₃-N等指标偶尔超出原设计水质,其中COD、SS和TP超标较多。

② 设备运行状况欠佳。污水处理厂粗、细格栅除渣效果不理想,曝气沉砂池撇渣效果不佳,生化池曝气盘易发生堵塞等现象。

③ 工艺参数设置不当。生化池内缺氧区水力停留时间过短,TN去除效果有限,且进水COD较低时,需投加大量碳源以保证出水TN达标。

2 改造思路

2.1 设计进、出水水质

污水处理厂进水水质的保证率通常设定为85%~90%,对应全年10%~15%的时间可能出现水质超出设计值的情况。根据该污水处理厂日报表统计数据,进水水质按85%保证率确定,并结合所在城市同类污水处理厂的设计水质,最终确定提标改造后的进水水质设计值。提标后出水水质需达到《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB51/2311—2016)中城镇生活污水处理厂排放标准,未列出的污染物按照《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准执行。提标后的设计进、出水水质及污染物去除率见表2。

表2 改造后设计进、出水水质

Tab.2 Design influent and effluent quality after upgrading

项目	COD	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TP	TN
进水/(mg/L)	400	200	260	40	6.5	50
出水/(mg/L)	30	6	10	1.5	0.3	10
去除率/%	92.5	97.0	96.2	96.2	95.4	80.0

污水B/C值是判断其可生化性的主要依据,通常认为B/C>0.45可生化性好,B/C>0.40可生化性较好^[5]。该工程污水B/C为0.50,表明可生化性好。实际进水B/C的年均值和月均值为0.40~0.52,与设计值较为吻合。此外,BOD₅/TN是评估生物脱氮可行性的关键参数,通常要求BOD₅/TN≥4。该工程污水BOD₅/TN为4,碳源略显不足。实测BOD₅/TN年均值为1.00~4.64,大部分时间BOD₅/TN<4.00,进水碳氮比持续偏低,导致出水TN达标率稳定性不足,全年有4个月的出水TN月均值为10 mg/L以上,需进行强化脱氮,因此TN是重点处理指标。受碳源不足制约,该工艺运行需优先保障脱氮效率,生物除磷能力受限,必须辅助化学除磷,同时出水TP稳定性依赖SS控制(SS≤5 mg/L),现状出水SS、TP月均值分别间歇性超出5、0.3 mg/L,因此SS和TP也是重点处理指标。

2.2 工艺选择

在市政污水处理厂提标改造中,二级生物处理+高密度沉淀池+反硝化滤池与MBR均为常用技术路线。MBR工艺具有污泥浓度高、抗冲击负荷能力强等优势,同时省去二沉池等后续处理设施,占地相对较少,但膜组件前期投资成本较高,后续运

行维护费用高。二级生物处理+高密度沉淀池+反硝化滤池的组合工艺通过单元协同作用,对有机物、氮、磷等污染物去除效果显著,系统运行平稳,管理维护成熟可靠,可超越高密度沉淀池,工艺灵活可变,无需大规模土建调整,整体投资和运营成本均较MBR工艺更具优势。在生物处理工艺中,相比于传统A²O工艺,多级A/O工艺冲击负荷承受能力强,总氮去除率更高,碳源利用率也得到同步优化^[6]。针对该工程投资有限、不新增用地以及进水水质波动大的特点,最终选择四级A/O+高密度沉淀池+反硝化滤池组合工艺作为改造工艺。

2.3 技术思路

针对该污水处理厂面临的上述问题,结合四川省水污染物排放标准,本着工艺成熟可靠、出水稳定达标、工程投资减少、运行费用降低的原则,采用原位提标改造技术,在不新增处理规模及不停产施工的条件下,实现出水水质升级。

① 预处理改造。原粗细格栅和沉砂池吸砂机破损严重,格栅除渣效果不佳,吸砂机故障率高且撇渣效果差。为满足除渣、排砂和撇渣要求并充分利用已有土建设施,对水下粗格栅、抓斗进行更换并增加抓斗下滑轨道,细格栅更换为除渣效果佳、抗砂性好、后期维修成本低的回转式孔板格栅,吸砂机仍采用桁车行走式且运行可靠的气提泵抽砂。

② 生物处理改造。原生物处理采用改良A/O工艺,缺氧区水力停留时间仅为2.0 h,致使回流混合液中的硝态氮难以充分反硝化,无法有效去除TN。对原生物池实施改造,采用四级A/O工艺,设置前端厌氧区与多级缺氧/好氧区串联运行,适当延长缺氧区停留时间,优化脱氮除磷效能,设多点配水系统,将进水分段注入厌氧区及各缺氧区前端,优化碳源配比,同时,将回流污泥全部引入厌氧区,强化聚磷菌释磷与反硝化菌脱氮功能,优化微生物生长环境,同步提升TN、TP去除率,确保出水水质稳定达标。另外,采用聚氯乙烯(PVC)管式微孔曝气器替代原有陶瓷微孔盘式曝气器,增大单位通气和量和服务面积,优化传氧效率,增强可靠性。

③ 增设深度处理。该污水处理厂提标改造后出水水质需达到新标准,现有二级处理+D型滤池出水无法稳定满足要求。考虑到厂区用地紧张,拆除D型滤池后修建高密度沉淀池,进一步去除二沉

池出水的SS和TP,同步建设深床反硝化滤池系统,集成SS截留与生物脱氮双重功能,通过投加乙酸钠补充碳源强化脱氮,降低出水TN。为优化工艺流程的灵活性与能耗效率,在高密度沉淀池前端增设超越管,若二沉池出水水质满足条件(SS≤15 mg/L、TP≤0.5 mg/L),则可切换至超越模式(超越高密度沉淀池),直接输送至反硝化滤池进行深度脱氮。

2.4 厂区平面设计

提标改造工程受限于厂区建设用地和投资规模,采用“利旧+新建”的集约化建设模式,所有新建和改造构筑物均布置在现有厂界范围内,将新增设施与现状功能分区精准对接,最大限度地降低对周边环境的影响。改造后厂区总平面布置见图1。

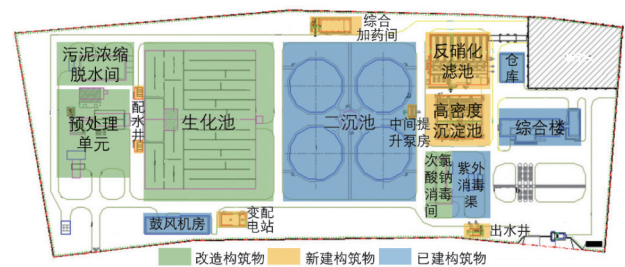


图1 改造后厂区总平面布置

Fig.1 General layout of the municipal wastewater treatment plant after upgrading

充分利用原有预处理单元,更换关键设备,改造生化池,在生化池前端新建配水井;拆除原有D型滤池,原位新建高密度沉淀池,在二沉池配水井西侧新建中间提升泵房,原D型滤池北侧绿地内修建反硝化滤池(下部设置应急消毒池);利用二沉池北侧闲置地块修建综合加药间,同时将原反冲洗泵房和加药间改造为仓库及次氯酸钠消毒间。

3 工程设计

3.1 工艺流程

污水处理厂提标改造工艺流程如图2所示。市政管网收集的污水首先进入粗格栅,筛除直径>25 mm的固体漂浮物,出水经泵房提升后进入细格栅截留纤维类悬浮物,随后进入曝气沉砂池,去除粒径≤0.2 mm的砂粒。曝气沉砂池出水进入改造后的生化池,生化池按四级A/O工艺运行,进水分别分配至厌氧区和各级缺氧区,碳源不足时在二、三级缺氧区投加乙酸钠作为补充,四级好氧区增设内回流泵将混合液回流至四级缺氧区强化生物脱氮。完成生物降解后,混合液进入二沉池完成固液分离,

经中间提升泵房提升进入新建的高密度沉淀池,投加聚合氯化铝(PAC)和聚丙烯酰胺(PAM)后进行混凝沉淀化学除磷。前端出水进入反硝化滤池,在外加碳源后进一步去除总氮、SS等污染物,最后经紫外线消毒达标排放。

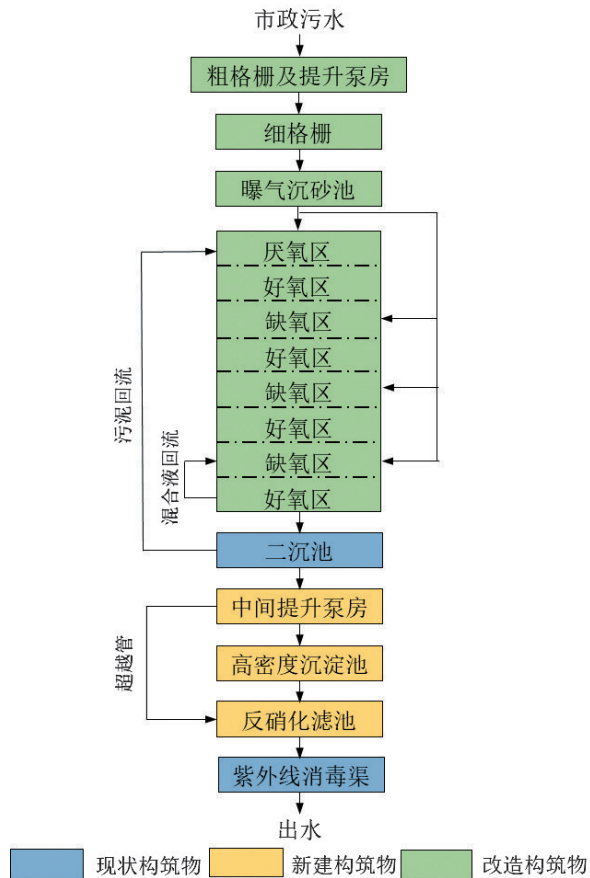


图2 污水处理厂提标改造工艺流程

Fig.2 Process flow of upgrading and reconstruction for the municipal wastewater treatment plant

3.2 主要构筑物及设计参数

① 改造粗格栅及提升泵房

在原土建基础上对粗格栅和抓斗进行更换,栅条间隙25 mm,安装角度 85° ,过栅流速0.6 m/s,抓斗宽1.2 m。已建提升泵房内潜水泵正常运行,仅在出水管上增加DN600电磁流量计。

② 改造细格栅及曝气沉砂池

土建部分保持原状,将原转鼓细格栅更换为回转孔板细格栅,栅条间隙6 mm,渠道宽度1.65 m,配套压渣机1台, $Q=8\text{ m}^3/\text{h}$, $N=2.2\text{ kW}$,格栅冲洗泵2台, $Q=15\text{ m}^3/\text{h}$, $H=60\text{ m}$, $N=4\text{ kW}$;曝气沉砂池更换吸砂机2台, $L=4.3\text{ m}$, $Q=30\text{ m}^3/\text{h}$,同时将曝气头更换

为164套棕刚玉中孔曝气头, $Q=7\text{ m}^3/\text{h}$ 。

③ 改造生化池

将原改良A/O生化池改造为四级A/O生化池,平面尺寸为 $102.3\text{ m}\times 82.0\text{ m}$,分2格,每格分为一级厌氧区、三级缺氧区和四级好氧区,每格前端设1座配水井,用管道将进水分别配送至厌氧区和各级缺氧区4个进水点。厌氧区水深6.1 m,缺氧区水深6.0 m,好氧区水深5.9 m,总水力停留时间11.5 h,按流程依次为0.68、1.34、0.85、1.93、0.90、2.05、1.17、2.58 h,一~四级A/O污泥浓度分别为7.36、6.13、5.26、4.60 g/L,总泥龄51.6 d,反硝化速率 $0.13\text{ kgNO}_3^-/\text{kgBOD}_5$ 。采用PVC管式微孔曝气器供气,所需供气量 $403\text{ m}^3/\text{min}$,气水比5.8:1,各级好氧区供气量所占比例分别为20.0%、27.5%、27.5%、25.0%,每级好氧区管式曝气器沿水流方向按照40%、33%、27%的比例分3段渐减布置,通气量 $14.5\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$,氧转移效率 $>30\%$,总长1806 m。混合液最大回流比50%,污泥最大回流比115%。设潜水搅拌机26台, $N=5.5\text{ kW}$;混合液回流泵5台, $Q=434\text{ L/s}$, $H=0.7\text{ m}$, $N=7.6\text{ kW}$;回流污泥泵4台, $Q=386\text{ L/s}$, $H=4.0\text{ m}$, $N=32.0\text{ kW}$ 。

④ 新建高密度沉淀池

高密度沉淀池1座,分2格,平面尺寸 $32.60\text{ m}\times 26.85\text{ m}$,分为混合区、絮凝区和沉淀区3个主要区域,混合区停留时间2.7 min,絮凝区停留时间10 min,最大表面负荷 $14.18\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,斜管倾角 60° ,斜长为1 m,直径80 mm。混合区搅拌机4台,直径1400 mm, $N=5.5\text{ kW}$;絮凝区搅拌机2台,直径3500 mm, $N=11\text{ kW}$;沉淀池刮泥机2台,直径16 m, $N=0.75\text{ kW}$;回流污泥泵4台, $Q=135\text{ m}^3/\text{h}$, $H=20\text{ m}$, $N=15\text{ kW}$;剩余污泥转子泵2台, $Q=135\text{ m}^3/\text{h}$, $H=20\text{ m}$, $N=15\text{ kW}$ 。

⑤ 新建反硝化滤池

反硝化滤池1座,平面尺寸 $42.54\text{ m}\times 36.97\text{ m}$,分8格,平均滤速5.47 m/h,峰值滤速7.11 m/h,强制滤速8.12 m/h,水反冲洗强度 $15\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,气反冲洗强度 $92\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$;采用恒水位过滤方式,最大过滤水头1.85 m,滤床厚度1.83 m,滤砂有效粒径1.70~3.35 mm,不均匀系数 ≤ 1.35 ,承托层采用粒径3~19 mm的天然卵石,厚度380 mm,分5层布置。设反洗水泵3台, $Q=715\text{ m}^3/\text{h}$, $H=10\text{ m}$, $N=30\text{ kW}$;废水排放泵2台, $Q=239\text{ m}^3/\text{h}$, $H=10\text{ m}$, $N=11\text{ kW}$;罗茨鼓

风机3台, $Q=74\text{ m}^3/\text{min}$, $P=0.07\text{ MPa}$, $N=132\text{ kW}$ 。

应急消毒池布置在反硝化滤池下部,平面尺寸 $42.54\text{ m}\times 19.52\text{ m}$,停留时间30 min。

4 不停水/短时停水施工方案

该污水处理厂采用双线并联配置,已建构筑物设计规模为 $10\text{ 万 m}^3/\text{d}$, $K_z=1.3$,单线最大污水处理量 $6.5\text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。提标改造时段选在旱季进水流量较小时,采用分阶段交替施工模式,通过单线停运改造,另一线持续运行保障污水处理连续性。在进水流量超过 $6.5\text{ 万 m}^3/\text{d}$ 以及工艺管线切改需要短时停水时,将超量污水调配至下游其他污水系统进行处理。

① 污水处理厂正常运行的同时,新建反硝化滤池、中间提升泵房和综合加药间。

② 对一组预处理+生化系统(粗格栅、细格栅、沉砂池、生化池)进行改造,另一组维持 $6.5\text{ 万 m}^3/\text{d}$ 的处理能力。待一组改造完成后,切换至改造后的生化池运行,同时启动另一组预处理+生化池的改造施工。

③ 新建二沉池集配水井至中间提升泵房、中间提升泵房至反硝化滤池、反硝化滤池至紫外线消毒渠的工艺管道,此阶段D型滤池仍在运行,施工基本不影响原污水处理厂的运行。

④ 拆除D型滤池,原位置新建高密度沉淀池,同步敷设高密度沉淀池至紫外线消毒渠的工艺管道。此阶段实施过程中,二沉池出水经反硝化滤池处理后进入紫外线消毒渠,确保出水水质达到一级A标准。

5 运行效果及经济分析

5.1 运行效果

该提标改造工程投入运行后,稳定可靠,2023年平均处理水量达到设计规模 $10\text{ 万 m}^3/\text{d}$,改造后实际进、出水水质见表3。可见,改造后COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、TN的去除效果明显提升,相应出水指标分别为 8.42 、 0.14 、 0.09 、 4.96 mg/L ,相较改造前分别减少 41.9% 、 76.7% 、 55.0% 和 45.5% ,稳定达到《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB51/2311—2016)中城镇污水处理厂污染物排放标准。

改造后污染物去除效果显著,平均出水TP、TN浓度分别低于 0.1 、 5 mg/L ,主要依托四级A/O+高密度沉淀池+反硝化滤池的协同脱氮除磷机制。首

先,四级A/O工艺通过多级反硝化设计强化脱氮,三级缺氧区实现硝态氮的逐级反硝化,四级好氧区末端混合液回流至四级缺氧区,深度脱除残余硝态氮;同时,采用115%污泥外回流比,将低硝态氮污泥回流至厌氧区前端,维持厌氧释磷环境并提升混合液悬浮固体浓度,强化微生物脱氮除磷效能;采用动态多点配水技术,将进水分配至厌氧区与各级缺氧区前端,并按进水水质实时调整分配比例,实现碳源定向投配,进一步提高脱氮效率,减少外碳源投加成本。其次,高密度沉淀池作为深度处理单元,通过投加混凝剂与磷酸盐反应生成不溶性沉淀物,结合絮凝和斜管沉淀工艺高效去除TP,同时通过截留悬浮物对颗粒态有机氮实现部分去除。最后,反硝化滤池作为工艺末端脱氮的保障,在缺氧环境下利用外加碳源作为电子供体,驱动反硝化菌将硝态氮逐步还原为氮气逸出,实现TN的深度脱除。该组合工艺通过“生物降解-化学沉淀-深度脱氮”三级屏障的全流程互补增效,既实现污染物的高效去除,又兼具经济性与可持续性。

表3 改造后实际进、出水水质

Tab.3 Actual influent and effluent quality after upgrading

项目	COD	$\text{NH}_3\text{-N}$	TP	TN
进水/(mg/L)	302.81	22.23	4.83	31.76
出水/(mg/L)	8.42	0.14	0.09	4.96
去除率/%	97.22	99.35	98.17	84.38

5.2 经济分析

该提标改造工程总投资约1.7亿元,其中新建及改造工程费用1.3亿元。污水处理电耗为 $0.35\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$,药耗为 $1.11\text{ t}/\text{万 m}^3$ (含乙酸钠、PAC、次氯酸钠、阳离子PAM)。该项目总规划占地约 7.2 hm^2 ,经工艺集约化设计,占地为 $0.72\text{ m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$ 。相较于《城市排水工程规划规范》(GB 50318—2017)推荐的 $1.05\sim 1.30\text{ m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$ 标准值,实际用地效率提升 $31\%\sim 45\%$ 。

6 结论

① 针对建设用地零新增与改造资金受限的双重约束,该污水处理厂提标改造工程采用原位集约化改造模式,充分利用原有构筑物,在新建改造合理布局的基础上,资源利用效率显著提升,用地指标为 $0.72\text{ m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$,有效降低了投资成本。

② 采用四级A/O+高密度沉淀池+反硝化滤池

为主体的深度处理工艺,通过构建四级生物反应区逐级降解有机物与脱氮、化学混凝强化除磷与末端滤池深度反硝化的协同作用,出水COD、NH₃-N、TP、TN分别为8.42、0.14、0.09、4.96 mg/L,相对于改造前分别降低41.9%、76.7%、55.0%和45.5%,出水水质稳定达到《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB51/2311—2016)。

③ 四级A/O+深度处理工艺应用于国内污水处理厂提标改造中的案例相对有限,该组合工艺具有空间集约、投资经济、运行稳定、节能高效等特点,COD、NH₃-N、TP、TN等污染物去除率分别达到97.22%、99.35%、98.17%、84.38%,运行电耗仅为0.35 kW·h/m³,实现了污染治理与碳减排的协同优化,可为用地受限、排放标准严格的同类型污水处理厂升级改造项目提供参考。

参考文献:

- [1] 王舜和,郭淑琴,魏新庆.分段进水多级A/O工艺计算与探讨[J].中国给水排水,2014,30(18):81-85.
WANG S H, GUO S Q, WEI X Q. Discussion on step-feed multi-stage A/O process calculation [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30 (18): 81-85 (in Chinese).
- [2] 张鹏翔,谭建国,姜斌,等.复合型多级AO+臭氧MBBR用于准IV类混合污水厂[J].中国给水排水,2025,41(2):47-51.
ZHANG P X, TAN J G, JIANG B, et al. Application of composite multi-stage AO, ozonation/MBBR in a quasi-category IV mixed wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41 (2): 47-51 (in Chinese).
- [3] 段凯波.改良型多级AO脱氮工艺在提标改造中的应用[J].净水技术,2023,42(5):77-83,115.
DUAN K B. Application of denitrification for modified multi-stage AO process in upgrading and reconstruction [J]. Water Purification Technology, 2023, 42 (5): 77-83, 115 (in Chinese).
- [4] 曾思雨,李甜,万剑梅,等.三级AO+深度处理组合工艺在中小型城镇污水厂中的应用[J].净水技术,2024,43(7):183-189,205.
ZENG S Y, LI T, WAN J M, et al. Application of combined process of three-stage AO + advanced treatment in small and medium-sized urban WWTPs [J]. Water Purification Technology, 2024, 43 (7): 183-189, 205 (in Chinese).
- [5] 余晓倩.都江堰市某市政污水处理厂提标改造工程实例[J].水处理技术,2024,50(8):149-152.
YU X Q. Design example of a sewage treatment plant upgrading project in Dujiangyan City [J]. Technology of Water Treatment, 2024, 50(8):149-152(in Chinese).
- [6] 刘增军,张开海,孙序营,等.多级AO用于高排放标准下低碳高氮生活污水处理[J].中国给水排水,2024,40(2):55-59.
LIU Z J, ZHANG K H, SUN X Y, et al. Application of multi-stage AO in the treatment of low carbon and high nitrogen domestic sewage with high discharge standard [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40 (2): 55-59 (in Chinese).

作者简介:叶丽丽(1989—),女,辽宁绥中人,硕士,工程师,研究方向为城市污水处理与回用。

E-mail:hikari129@foxmail.com

收稿日期:2025-03-27

修回日期:2025-04-27

(编辑:衣春敏)