

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.04.019

Bardenpho 工艺用于某污水处理厂提标改造

郭强¹, 刘新安¹, 王社平^{1,2}, 高荣宁¹, 孟令八³, 杨永维¹,
李权¹

(1. 西安市政设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068; 2. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 3. 西安净水处理有限责任公司 第五再生水厂, 陕西 西安 710021)

摘要: 西安市某污水处理厂总处理规模为40万m³/d, 污水处理采用预处理+A/A/O生化反应池+纤维转盘滤池+接触消毒工艺。该污水处理厂毗邻奥体中心等场馆, 周边环境敏感, 因此本次提标改造工程将出水标准由《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准提高至《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的准Ⅳ类标准, 同时进行加盖除臭。将原A/A/O工艺改造为五段Bardenpho工艺, 重新划分功能分区; 深度处理采用高效沉淀池+V型滤池+臭氧接触池。提标改造工程建成运行以来, 出水水质稳定达标, 通过加盖除臭、优化景观设计等措施消除了“邻避”效应。

关键词: 污水处理厂; 提标改造; 准Ⅳ类标准; 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)04-0126-06

Application of Bardenpho Process in the Upgrading of a Wastewater Treatment Plant

GUO Qiang¹, LIU Xin'an¹, WANG Sheping^{1,2}, GAO Rongning¹, MENG Lingba³,
YANG Yongwei¹, LI Quan¹

(1. Xi'an Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Xi'an 710068, China;
2. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. The Fifth Wastewater Reclamation Plant, Xi'an Water Purification Co. Ltd., Xi'an 710021, China)

Abstract: The wastewater treatment plant in Xi'an has a total treatment capacity of 400 000 m³/d, the process of which consists of pre-treatment, A/A/O biochemical reaction tank, fiber disc filter, and contact disinfection. Located near the Olympic Sports Center and other venues, the plant is situated in a sensitive environmental area. The upgrading project will improve the effluent standard from the first level A of *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002) to the quasi-Ⅳ standard of *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002), while also implementing odor control measures. The A/A/O process will be upgraded to the five-stage Bardenpho process, with a redefined functional zoning. Advanced treatment will employ a high-efficiency sedimentation tank + V-type filter + ozone contact tank process. Since its completion and operation, the plant has consistently met effluent quality standards. Measures such as odor control and optimized landscape design have alleviated the NIMBY effect.

Keywords: wastewater treatment plant; upgrading; quasi-IV standard; Bardenpho process; ozone oxidation

1 项目概况

西安市某污水处理厂一期工程(规模为20万 m^3/d)始建于2008年,于2010年投产运行;二期工程(规模为20万 m^3/d)于2017年建成投产运行,两期工程总处理规模达到40万 m^3/d 。污水处理工艺为预处理+A/A/O生化反应池+二沉池+纤维转盘滤池+接触消毒,污泥处理工艺为污泥浓缩+离心脱水外运,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,一、二期工程建成运行后出水稳定达标,运行效果良好。

2018年,按照《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)》的要求,对该厂进行提标改造,将出水水质提升到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的准IV类标准,进一步减少排入灞河、渭河流域的污染物质,提升区域水环境质量。为满足工程运行的可靠性及经济性要求,合理确定设计进水水质至关重要。2018年5月—2019年7月,对进厂管网的进水水质进行了实测和分析,按照实际进水水质

90%保证率确定设计进水水质,具体见表1。

表1 提标改造设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

mg/L						
项目	BOD ₅	COD	SS	NH ₃ -N	TN	TP
设计进水	290	490	450	45	65	8
设计出水	6	30	10	1.5	12	0.3

2 运行现状分析

该污水处理厂一、二期工程建成运行后水质稳定达标,运行效果良好。针对新的出水水质标准,在非常有限的用地条件下,如何合理选取经济、合理的工艺保证BOD₅、TN和TP的稳定达标,是提标改造工程的重点和难点。

对现状污水处理厂一年的实际出水数据进行统计分析(见表2),对照提标改造设计出水水质标准,现状处理设施可实现出水SS达标,COD、NH₃-N和TN的达标率较高,BOD₅和TP的达标率较低,提标改造的目标是进一步提高BOD₅和TP的去除率,并保障TN去除的稳定性。

表2 现状污水处理厂实际出水水质年均值

Tab.2 Annual average values of actual effluent quality of current wastewater treatment plant

mg/L						
项目	BOD ₅	COD	SS	NH ₃ -N	TN	TP
一期工程出水	4~9	10~44	2~9	0.12~4.13	4.4~14.8	0.06~0.49
二期工程出水	4~9	9~40	2~9	0.08~3.72	4.3~14.2	0.03~0.48

① BOD₅。该污水处理厂设计进水BOD₅达290 mg/L,工艺设计重点应考虑脱氮除磷对碳源的有效利用,在此基础上采用相对较低的污泥负荷、提供足够的氧气,使活性污泥充分吸附、降解有机物,强化二级处理效果,保证出水BOD₅稳定达标。

② TN。实际进水碳源较为充足,设计考虑充分挖掘生化处理工艺本身的碳源利用,对现状池容进行合理分区、适当增加缺氧池容积和水力停留时间;同时为保障冬季低温时的生物脱氮效果,设计在缺氧池增加碳源投加点。

③ TP。该厂TP去除率最高要求达到96.5%,为了降低药剂投加量,强化除磷效果,将原设置在生化反应池出口处的除磷药剂投加点调整至深度处理单元。

④ SS。现状出水SS基本达到提标改造要求,但纤维转盘滤池进水SS负荷高、反冲洗水量大、出水SS不稳定;鉴于TP的去除要求及COD、SS之间存在相关性^[1],设计拆除现状纤维转盘滤池,在二沉池后增设混凝沉淀+过滤单元,强化去除SS、TP及COD。

⑤ COD。对西安市实际运行的6座污水处理厂出水溶解性不可降解COD进行了检测^[2],结果表明85%的数值在20 mg/L及以下,15%的数值在20 mg/L以上。相关研究^[3-5]表明,当进水中溶解性不可降解COD超过20 mg/L时,出水COD难以稳定低于30 mg/L。因此,常规沉淀、过滤工艺并不能完全消除出水COD超标的风险。为确保出水水质长期、稳定达标,设计采用臭氧氧化工艺去除溶解性不可

降解COD。

3 工程设计

3.1 工艺流程

提标改造将A/A/O生化反应池改造为五段Bardenpho工艺,以提高生物处理单元的处理效率,强化脱氮功能;新增高效沉淀池、V型滤池、臭氧接触池等深度处理单元,以确保出水稳定达标。改造后工艺流程见图1。

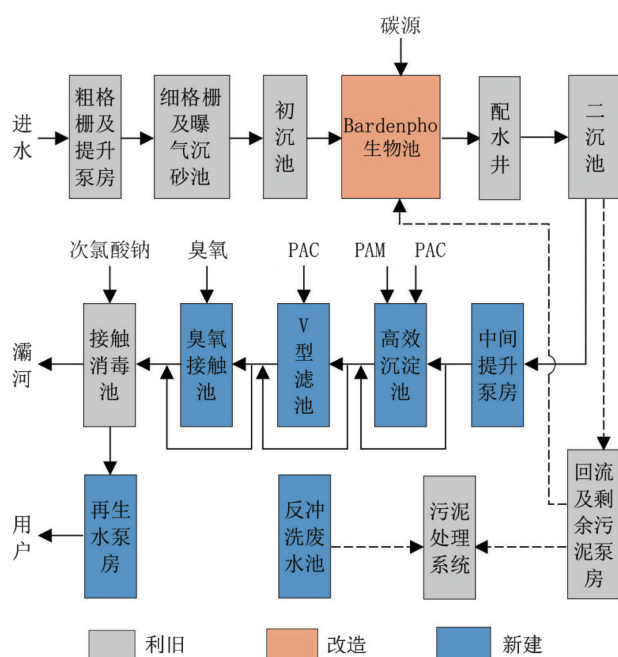


图1 改造后污水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of wastewater treatment process after upgrading

3.2 生化池改造

本次拟对生化反应池进行工艺改造。在总停留时间已定的情况下,采用BioWin模拟软件对现状A/A/O及拟改造的Bardenpho^[6]两种工艺进行模拟,通过重新分配不同反应区水力停留时间,使各功能分区的处理能效达到最大化,同时模拟最佳硝化液回流量和回流泵位置,结果见图2。

现状A/A/O生化反应池总停留时间16.59 h,其中厌氧区2.02 h,缺氧区5.53 h,好氧区9.04 h。BioWin软件按照五段Bardenpho工艺对生化反应池重新分区进行数值模拟,各区域停留时间:厌氧区2.02 h,前缺氧区4.11 h,后缺氧区1.93 h,好氧区7.31 h(含好/缺氧变化区1.42 h),后好氧区1.22 h。同时,将硝化液回流点由原好氧区末端调整至后缺

氧区中段。

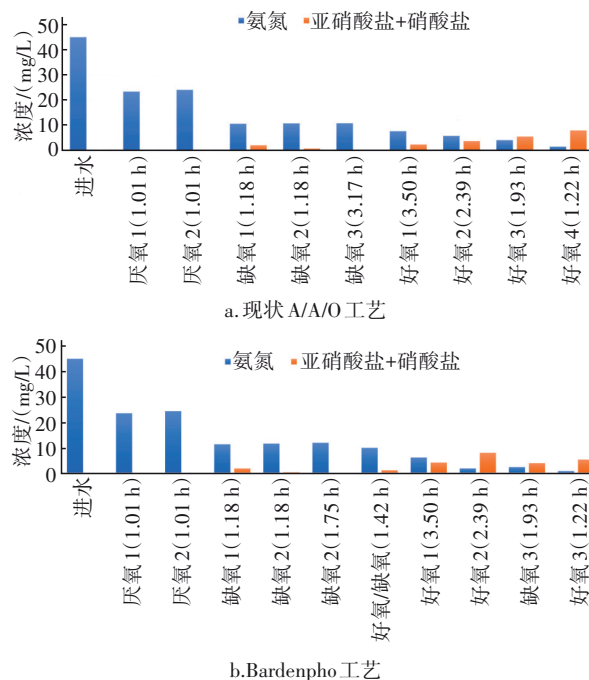


图2 现状A/A/O工艺和Bardenpho工艺数值模拟

Fig.2 Data simulation of current A/A/O process and Bardenpho process

反应分区调整后,前缺氧区利用原水中碳源对硝化液回流及污泥回流的 NO_3^- -N进行反硝化,理论脱氮效率为80%;后缺氧区利用内碳源对前好氧区出水中的 NO_3^- -N进行反硝化,后好氧区将 NH_3 -N进一步硝化为 NO_3^- -N。模拟结果表明,生化反应池出水硝态氮(NO_3^- -N和 NO_2^- -N)由8.09 mg/L降为5.41 mg/L, NH_3 -N也由1.67 mg/L降为0.89 mg/L。由于后缺氧区内碳源反硝化速率显著低于前缺氧区,在后缺氧区设置碳源投加点,当进水碳源较低时可通过较小的碳源投加量提高反硝化效率。

改造后生化反应池硝化液回流比为100%~300%,外回流比为50%~100%,污泥浓度为3.5 g/L,总污泥龄为14.86 d,总污泥负荷为0.081 $\text{kgBOD}_5/(\text{kgMLSS}\cdot\text{d})$ 。生化反应池可按照Bardenpho模式运行,也可灵活切换至A/A/O模式运行。

生化反应池主要改造内容(见图3):

① 在缺氧区后段以及好氧区后段增加3道隔墙,将生化反应池分为5个相对独立分区,即厌氧区-缺氧区-好氧区-后缺氧区-后好氧区;在好氧区前段设置好氧/缺氧变化区,可通过对曝气器、搅拌器的启闭来实现好氧/缺氧的灵活切换。平时以好

氧区模式运行,当需要强化反硝化脱氮时,可转化为缺氧区模式运行,增加缺氧区的停留时间。

② 为了增强混合效果,防止污泥沉积,除保留原潜水搅拌器外,还在厌氧及缺氧区增加双曲面搅拌器。

③ 为减少内回流硝化液的溶解氧对缺氧区反硝化效果的影响,将生化反应池硝化液回流泵由原好氧区末端移至现后缺氧区中段。

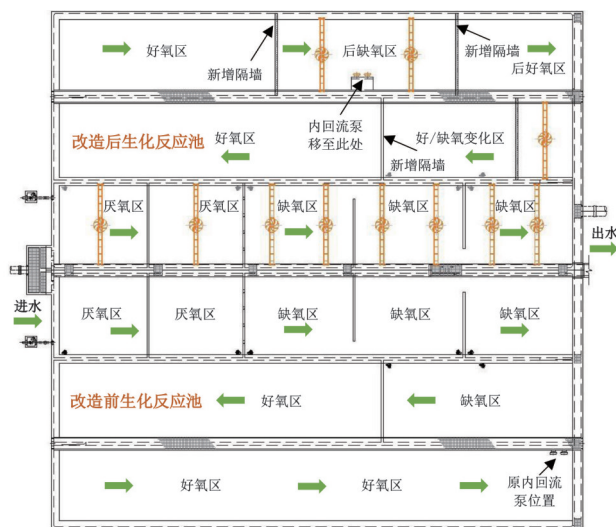


图3 生化反应池改造示意

Fig.3 Schematic diagram of biological reaction tank after upgrading

3.3 提标新建

提标改造工程建设用地紧张,厂区建筑密度高达64%,整体建(构)筑物布局紧凑,处理单元高度集约。选择集约高效的处理工艺,如高效沉淀池以微砂为载体强化混凝效果,可大大减少建设用地。

结合污水处理厂实际进水水质波动等情况,高效沉淀池、V型滤池、臭氧接触池均设置超越管(渠),可根据实际需求独立超越。如在V型滤池前端设置微絮凝池,二沉池出水水质较好时,出水超越高效沉淀池;在微絮凝池投加絮凝剂,经微絮凝反应后进入V型滤池过滤,以保证出水总磷、SS等达标;臭氧处理系统作为保障措施,大多数情况下经沉淀、过滤后可达到设计出水标准,故可超越臭氧接触池运行。

① 中间提升泵房。一、二期工程各设置1座中间提升泵房,平面尺寸14.3 m×9.9 m,泵房集水池有效容积373 m³,泵房最大设计流量为26万 m³/d,均设置4台潜水轴流泵(3用1备)。

② 高效沉淀池。采用加砂高效沉淀池^[7],设1座4组,设计最大流量52万 m³/d。混合池混合时间2.5 min,单池有效容积223.6 m³;絮凝池絮凝时间7.0 min,单池有效容积633.6 m³;沉淀池表面水力负荷33.0 m³/(m²·h),单池沉淀区面积163.68 m²,沉淀池直径15.0 m;聚合氯化铝(PAC,10%浓度)投加量100~150 mg/L,聚丙烯酰胺(PAM,0.1%浓度)投加量0.6~1.2 mg/L;排泥量19 968 m³/d,设污泥泵房2座,每座泵房内设污泥泵6台,4用2备。

③ V型滤池。设计最大流量52万 m³/d,分2个系列,每系列分为2组,每组6格,对称布置。滤池总计24格,单格过滤面积120 m²。平均流量时设计滤速为5.79 m/h,峰值流量时设计滤速为7.52 m/h。每组V型滤池进水端设置1组微絮凝池,混合时间1.0 min,絮凝时间3 min。若超越高效沉淀池(或高效沉淀池出水需要二次加药)时,可在微絮凝池投加絮凝剂后进入V型滤池过滤。

④ 臭氧处理系统。臭氧处理系统主要由液氧站、臭氧制备间、臭氧接触池以及尾气破坏间组成,设计规模40万 m³/d。采用液氧作为臭氧发生器的气源制备臭氧。臭氧处理系统按设计去除5 mg/L的COD计,臭氧投加量为20 mg/L,臭氧产量为360 kgO₃/h;臭氧接触池接触时间45 min,接触渠道采用3段式,臭氧投加比例分别为40%、30%和30%。当通过沉淀、过滤可使COD稳定达标时,可超越臭氧接触池运行,节省能耗。臭氧接触池顶覆土绿化。由于用地紧张,设计液氧站与厂区道路及建筑物之间的防火间距按《氧气站设计规范》(GB 50030—2013)的最小值控制。

4 施工工序

由于提标改造工程建设用地紧张,施工条件相对较差,且一、二期接触消毒池均设有独立的巴氏计量槽及计量系统,根据环保要求,污水处理厂仅能设置1套出水水质监测系统,一、二期工程如何不停产(或减少停产时间),以及合理安排各工艺单元的建设时序,是需要考虑的实际问题。

设计在各碰管接口处设置不同种类的改排井,采用蛙人水下作业、水下绳锯、充气橡胶气囊等施工措施,在分系列、分组停水的情况下仅用数小时完成碰管,保证了施工期间污水零超越排放漏河。

提标改造工程总平面布置见图4。

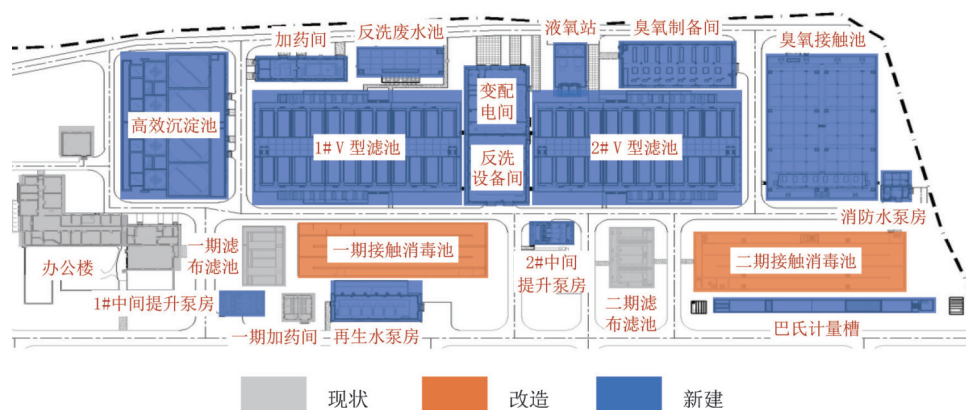


图4 提标改造工程总平面布置

Fig.4 General layout plan of upgrading project

提标改造施工工序:

① 按照埋深由深到浅、先构筑物后建筑物的原则,分批次建设中间提升泵房、高效沉淀池、V型滤池、臭氧接触池、反冲洗废水池、反冲洗设备间、变配电间、消防水泵房、臭氧制备间、液氧站、加药间等。

② 建设巴氏计量槽前、后端的改排井,将总出水管临时迁移至巴氏计量槽南侧,然后建设巴氏计量槽,与总出水管接通。

③ 建设构筑物之间连接管道,确保提标改造部分通水运行。

④ 将1#中间提升泵房进水管与一期工程纤维转盘滤池进水管相接,将再生水泵房进水管与一期接触消毒池出水管相接,碰管完成后,一期工程的污水可通过1#中间提升泵房→1#高效沉淀池→1#V型滤池→臭氧接触池→二期接触消毒池→巴氏计量槽→出水,同时对一期接触消毒池进行改造。

⑤ 将2#中间提升泵房进水管与二期工程纤维转盘滤池进水管相接,碰管完成后二期工程的污水可通过2#中间提升泵房→2#高效沉淀池→2#V型滤池→臭氧接触池→一期接触消毒池→巴氏计量槽→出水,同时对二期接触消毒池进行改造。

⑥ A/A/O生化反应池的改造在整体施工过程中穿插分组实施。

5 运行效果及经济分析

对该工程建成后2023年1月—12月的实际进、出水水质进行统计,结果见表3。实际运行过程中,臭氧处理系统作为保障出水水质的措施,仅在少数情况下启用。

实际运行监测数据表明,进水(90%保证率)

BOD₅、COD、NH₃-N、TN、SS、TP分别达到265、480、45、60、515、10 mg/L,对应的出水(90%保证率)指标分别为4.0、17.5、0.46、10.1、7.8、0.15 mg/L,这表明在进水浓度偏高且波动较大的条件下,出水水质完全达标且稳定。其中对TN和NH₃-N的处理效果主要得益于生化反应缺氧区水力停留时间的延长以及碳源的有效利用,而深度处理主要针对SS和TP进行强化去除,并对COD进行协同去除。

表3 实测进、出水水质

Tab.3 Actual influent and effluent quality mg/L

项目	BOD ₅	COD	SS	NH ₃ -N	TN	TP
进水平均水质	175.1	324.7	323.6	36.1	49.5	7.4
出水平均水质	3.7	13.8	3.0	0.3	8.2	0.1

该工程总投资约43 613.3万元,其中工程费约35 739.3万元。高效沉淀池投加10%浓度的液体PAC,平均投加量约56 mg/L;阴离子PAM平均投加量约0.58 mg/L;生物池碳源采用乙酸钠溶液,实际仅在冬季1月—2月投加,平均投加量约42.6 mg/L。深度处理运行费用约0.33元/m³(不启动臭氧处理系统为0.19元/m³)。

6 结论

西安市某污水处理厂基于运行现状调整工艺并增加深度处理单元,结合现状场地紧张的实际情况优化施工顺序,实现了不停水提标改造。实际运行结果表明,改造工艺设计合理,出水水质稳定达标。

① 该工程占地面积约2.5 hm²,仅为《城市污水处理工程项目建设标准》(建标198—2022)推荐面积(8 hm²)的31%,设计采用高负荷加砂高效沉淀池工艺,在满足必要的运行、消防通道宽度的前提

下,紧凑布置建(构)筑物,工艺流畅。

② 在生化反应池容积一定的条件下,将 A/A/O 工艺改为 Bardenpho 工艺,通过合理划分反应区与设备优化,将缺氧区分为两段,碳源投加点由原缺氧区调整至后缺氧区,提高了碳源利用率;硝化液回流泵由原好氧区末端调整至后缺氧区中段,进一步降低了缺氧区的氧化还原电位,提高了反硝化脱氮率;设置缺氧/好氧可变区,增强了运行的灵活性,兼顾 TN 和有机物的去除,提高了系统抗水质冲击能力。

③ 该污水处理厂周边环境敏感,为解决“邻避”效应突出的问题,采用高效沉淀池+V 型滤池+臭氧接触多效屏障处理保障出水水质达标;针对产生臭气单元进行加盖除臭,从源头控制臭气外逸;同时对臭氧接触池等进行池顶覆土绿化,提升污水处理厂的景观效果。

④ 通过合理规划施工顺序、临时导改、分组实施等措施实现不停水改造,施工期间未发生污水溢流排河问题。

参考文献:

- [1] 郭泓利,李鑫玮,任钦毅,等. 全国典型城市污水处理厂进水水质特征分析[J]. 给水排水, 2018, 44(6): 12-15.
- GUO H L, LI X W, REN Q Y, et al. Analysis on characteristics of influent water quality of typical municipal sewage treatment plants in China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(6): 12-15 (in Chinese).
- [2] 陈莉荣,王利平,彭党聪. ASM 模型易降解 COD 的物理化学测定法[J]. 中国给水排水, 2004, 21(6): 97-98.
- CHEN L R, WANG L P, PENG D C. Physical-chemical method for determination of readily biodegradable COD in ASM model[J]. China Water & Wastewater, 2004, 21(6): 97-98 (in Chinese).
- [3] 高群丽,张耀宗,孙锦程,等. 臭氧氧化技术深度处理市政污水实验研究[J]. 华北理工大学学报(自然科学版), 2022, 44(3): 103-110.
- GAO Q L, ZHANG Y Z, SUN J C, et al. Experimental research on advanced treatment of municipal wastewater by ozone oxidation technology [J]. Journal of North China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 44(3): 103-110 (in Chinese).
- [4] 施祖辉. 臭氧工艺处理不可降解可溶性 COD 的应用[J]. 城市道桥与防洪, 2013(4): 121-124, 14.
- SHI Z H. Application of ozone technology to treat non-degradable soluble COD [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2013(4): 121-124, 14 (in Chinese).
- [5] 张庆五,季娟. A/O 处理工艺中出水 COD_{Cr} 与 SS 相关性的探讨[J]. 市政技术, 2009, 27(1): 63-64.
- ZHANG Q W, JI J. Discussion on the relevance between COD_{Cr} & SS in the activated sludge A/O process [J]. Journal of Municipal Technology, 2009, 27(1): 63-64 (in Chinese).
- [6] 宋田翼. Bardenpho+生物滤池(DN+CN)用于污水处理厂准Ⅳ类出水提标[J]. 中国给水排水, 2020, 36(22): 106-109.
- SONG T Y. Bardenpho + biofiltration (DN + CN) process used in wastewater treatment plant with effluent of quasi-Ⅳ water standard[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(22): 106-109 (in Chinese).
- [7] 夏莉,彭建国,刘文彬. ACTIFLO 高密度沉淀池应用于污水厂升级改造[J]. 水处理技术, 2021, 47(2): 137-140.
- XIA L, PENG J G, LIU W B. Application of ACTIFLO high-density sedimentation tank in upgrading of sewage treatment plant [J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(2): 137-140 (in Chinese).

作者简介:郭强(1976—),男,陕西西安人,本科,高级工程师,主要研究方向为水污染防治理论与技术。

E-mail:904574@163.com

收稿日期:2024-07-25

修回日期:2024-08-28

(编辑:衣春敏)