

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.02.008

四川某CASS污水厂连续流MBBR准Ⅳ类提标方案设计

李志刚¹, 韩文杰^{2,3}, 杨忠启^{2,3}, 周家中^{2,3}, 殷建文^{2,3}, 吴迪^{2,3}

(1. 中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610213; 2. 青岛思普润水处理股份有限公司, 山东 青岛 266510; 3. 青岛思普润水处理股份有限公司 青岛市绿色低碳生物膜与水环境恢复重点实验室, 山东 青岛 266510)

摘要: 四川某 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的CASS工艺污水厂需进行地表水准Ⅳ类提标改造, 面临进水负荷及出水水质同步提升问题。为此重新校核了进水水质, 采用MBBR工艺强化系统处理负荷, 将原CASS池划分为MBBR生化池和沉淀池, 改造D型滤池为砂滤池, 并新建深床滤池。改造后, 出水水质稳定优于地表水准Ⅳ类水, 且抗冲击能力显著加强, 出水氨氮、总氮、总磷分别达到 (0.53 ± 0.30) 、 (6.70 ± 1.40) 、 $(0.20\pm 0.05)\text{ mg/L}$; 吨水及吨污染物处理能耗分别增加10%和4%, 吨水碳源投加量增加15%, 吨污染物碳源消耗量下降8%。针对硝化, 该系统仍具备20%的水质提升及10%的水量提升潜力, 可进一步扩容或应对进水水质可能增加的风险。实践证明, MBBR可满足较大范围的提标或扩容需求, 其集约、高效、抗冲击等优势显著。

关键词: CASS工艺; MBBR工艺; 原位改造; 强化脱氮

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)02-0052-06

Scheme Design for Continuous Flow Class IV Standard Upgrading Using MBBR Process in a WWTP with CASS Process in Sichuan

LI Zhi-gang¹, HAN Wen-jie^{2,3}, YANG Zhong-qi^{2,3}, ZHOU Jia-zhong^{2,3},
YIN Jian-wen^{2,3}, WU Di^{2,3}

(1. Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute of China, Chengdu 610213, China; 2. Qingdao SPRING Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266510, China; 3. Qingdao Key Laboratory of Green and Low Carbon Biofilm and Water Environment Restoration, Qingdao SPRING Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266510, China)

Abstract: A wastewater treatment plant (WWTP) using CASS process with a capacity of $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ in Sichuan required upgrading to meet quasi-Ⅳ standards which is facing the problem of simultaneous improving influent loading and effluent quality. For this reason, the influent quality was checked again, and the moving bed biofilm reactor (MBBR) process was used to enhance treatment capacity, the original CASS tank was divided into a MBBR biochemical tank and a sedimentation tank, the D-type filter was transformed into a sand filter, and a new deep-filter was built. After the renovation, the effluent quality was stable and better than the quasi-Ⅳ standards, and the impact resistance was

基金项目: 成都市“揭榜挂帅”科技项目(2023-JB00-00005-SN); 泰山产业领军人才工程专项(tscx202211036); 青岛市高新技术企业上市培育库在库企业技术创新项目(23-2-2gqssyf-14-qive)

通信作者: 吴迪 E-mail: hitwudi@126.com

significantly enhanced. The effluent concentrations of ammonia nitrogen, total nitrogen, and total phosphorus were reduced to (0.53 ± 0.30) mg/L, (6.70 ± 1.40) mg/L and (0.20 ± 0.05) mg/L, respectively. The energy consumption per ton of water and per ton of pollutants only increased by 10% and 4%, respectively. The added carbon source per ton of water increased by 15%, while carbon source consumption per ton of pollutants decreased by 8%. For nitrification, the system retains the capacity for a 20% improvement in influent quality and a 10% increase in treatment volume, enabling future expansion or adaption to higher influent loads. This case study demonstrates that the MBBR technology can meet a large range of upgrading or expansion needs, with significant advantages such as intensification, efficiency, and shock resistance.

Key words: CASS process; MBBR process; in situ renovation; enhanced denitrification

CASS工艺在运行上难以实现严格意义上的厌/缺氧条件,因此脱氮除磷效率较低,出水水质难以满足污水厂日益严格的排放标准^[1]。大多数应用CASS工艺的污水厂在进行提标改造工程时会进行工艺变更^[2-5],在运行方式上通常将间歇进水改为AAO工艺连续进水,并通过划分严格的功能分区,提高脱氮除磷效率。由于AAO工艺仍基于活性污泥法,其作为微生物的混合培养系统,所有功能菌群不分种类,反复经历厌氧、缺氧、好氧循环,因此无法实现硝化或反硝化专性功能菌的高效富集,生化效率受到限制。在活性污泥系统中嵌入移动床生物膜(MBBR)工艺组成泥膜两相复合系统,利用悬浮载体专性富集功能菌的特性,可以大幅强化系统脱氮除磷效率。针对进水水质指标过高或对于出水总氮要求更为严格的情况,通过在传统AAO工艺基础上设置后缺氧区和后好氧区形成五段Bardenpho工艺,可以实现更好的脱氮效率^[4,6-7]。目前,在国内污水厂地表水准Ⅳ类提标改造政策要求下,Bardenpho耦合MBBR工艺应用前景广阔。

以四川某CASS工艺污水厂为例,阐述了其应用Bardenpho耦合MBBR工艺提标的改造思路、工艺路线、设计参数及实施后的运行效果,旨在为CASS工艺污水厂的原位提标改造提供思路。

1 工程概况

四川某污水厂设计处理能力为 10×10^4 m³/d,采用CASS工艺,原工艺流程为进水→粗格栅→提升泵房→细格栅→旋流沉砂池→CASS生化池→D形滤池→紫外线消毒→出水。

该厂CASS池8座,单座尺寸为50 m×25 m×7.2 m,有效水深为6.5 m,单座有效容积为8 206 m³,采

用微孔曝气。CASS池运行周期为4 h,包括曝气2 h、沉淀1 h、滗水1 h,换算成连续流对应的水力停留时间分别为7.55、3.78、3.78 h。

改造前该厂基本满负荷运行,出水水质稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级A标准。提标要求出水达到《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB 51/2311—2016),其中COD、BOD₅、氨氮、总磷等达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的Ⅳ类标准。

2 改造方案选择

2.1 改造难点

此次改造需关注进水水质指标提升、出水标准提高、占地受限等三大重点,本质即需要强化生化处理能力。

① 进水水质提升。受近年“强弱项、补短板”行动影响,改造后设计进水水质有所提高,主要体现在氨氮和TN上,其中进水氨氮由30 mg/L提升至50 mg/L, TN由37 mg/L提升至60 mg/L,分别提升67%和62%(见表1)。针对实际进水污染物负荷提高情况,虽然通过提高污泥浓度等措施能够勉强维持稳定达标,但面临较大的运行压力。

表1 改造前后设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality before and after renovation mg·L⁻¹

项目	BOD ₅	COD	NH ₃ -N	TN	TP	SS
改造前设计进水	20	350	30	37	4.0	220
改造前设计出水	10	50	5	15	0.5	10
改造后设计进水	18	400	50	60	4.2	250
改造后设计出水	6	30	1.5(3.0)	10	0.3	10

② 出水标准提高。提标要求出水氨氮进一步严格限制到1.5 mg/L(12℃以下为3.0 mg/L),现

况仅能维持到5 mg/L以下,有较大差距;同时,出水TN要求降至10 mg/L,TN去除面临较大压力,需同步强化硝化和反硝化性能。实际运行中,CASS工艺存在污泥沉降性能差等问题,沉淀期间进水扰动影响出水水质,调控手段单一,难以适应复杂多变的水质。

③ 占地受限。厂区周边无可征用扩建用地,因此改造过程只能利用厂区已有土地,需采用原池提标。

2.2 工艺比选

结合项目占地受限的实际情况,考虑将CASS改为连续流工艺,形成了如表2所示的三种改造方案。

表2 备选方案优缺点比较

Tab.2 Comparison of advantages and disadvantages of alternative solutions

方案	优点	缺点
方案一:MBR工艺(处理规模 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$)	出水稳定可靠;抗水质冲击能力强	投资及运行费用高;受膜通量限制,抗水量冲击能力差;膜系统配套各种设备,投加药剂种类较多,对运行管理要求较高;需废弃已有滤池
方案二:多段A/O+沉淀+反硝化滤池(处理规模 $8\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$)	改造方案简单,改造范围小,运行管理简单	改造后需减产;反硝化滤池需同时保障TN、TP和SS达标,运行压力比较大
方案三:MBBR+沉淀+深床滤池(处理规模 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$)	投资及运行费用低;出水稳定,抗水质、水量冲击能力强;运行管理简单	设计要求高,需重新规划功能分区以及载体投加量

方案一:CASS改为MBR工艺。该方案通过提高污泥浓度强化系统硝化、反硝化性能,提高了脱氮效率;此外,膜过滤可保证出水SS和TP稳定达标。由于膜工艺的应用,故停用原深度处理滤池。

方案二:CASS改为多段A/O+沉淀,并新建反硝化滤池。在原CASS池内划分出沉淀区,其余作为生化池,核算改造后处理规模仅为 $8\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$;对于深度处理单元,需将原 $4\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的D型滤池改建为 $2\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的反硝化滤池,并新建一座 $6\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的反硝化滤池,可进一步保障总氮的去除效果,同时实现SS及TP的稳定达标。

方案三:CASS改为MBBR+沉淀,并新建深床滤池。在原CASS池内划分出沉淀区,其余作为生化

池;延长缺氧停留时间,强化总氮去除效果;在好氧区镶嵌MBBR,强化硝化功能;将已有D型滤池改造为砂滤池($4\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$),另新建一座 $6\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的深床滤池,进一步保障出水水质。

通过技术与经济综合比较,并结合区域污水厂规划,最终选择MBBR方案,在满足 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 处理要求的同时,降低投资和运行费用。

3 工艺设计

3.1 工艺流程

项目设计水温为12℃,改造后工艺流程见图1。

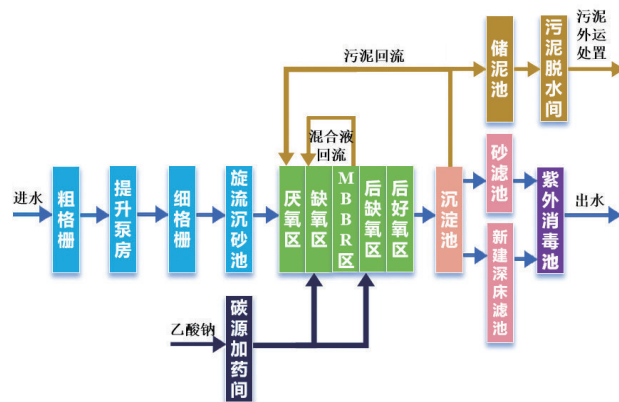


图1 改造后污水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of wastewater treatment process after renovation

3.2 设计参数

该项目涉及一、二期改造,设计规模均为 $5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,总设计规模为 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, $K_z=1.3$ 。

3.2.1 预处理单元

原有预处理单元能够满足改造后水质和水量负荷,因此无需改造,直接利旧。

3.2.2 生化处理和沉淀池单元

将原CASS生化池74%的池容划分为Bardenpho-MBBR生化池(见图2),每座池体生化区平面尺寸为 $37\text{ m}\times 25\text{ m}$ 。生化部分HRT为11.69 h,其中厌氧区为0.5 h、缺氧区为4.23 h、好氧区为4.23 h、后缺氧区为2.12 h、后好氧区为0.61 h。

生化池设计出水总氮为10 mg/L,生化段设计脱氮量为50 mg/L,前、后缺氧区分别承担35和15 mg/L,后缺氧区按照COD/TN为4的比例投加碳源进行脱氮;MBBR区投加有效比表面积 $>800\text{ m}^2/\text{m}^3$ 的SPR-Ⅲ型悬浮载体,载体填充率为36%。设计污泥浓度为4 000 mg/L,外回流比为150%。一、二期生化池

均更新鼓风机设备,风量不变,配备风机各3台,2用1备,单台最大运行风量为 $6\,250\text{ m}^3/\text{h}$,运行最大气水比为6:1。



图2 生化池功能区划

Fig.2 Functional zoning of biochemical tank

MBBR系统采用微动力混合池型,在不设置推流搅拌器的基础上,通过CFD模拟优化曝气管路的布置,即可实现悬浮载体的均匀流化,利用曝气剪切力控制生物膜厚度为 $100\sim 200\text{ }\mu\text{m}$ 。MBBR系统配套拦截筛网实现对载体的截留,筛网采用不锈钢材质,网孔直径为载体直径的70%。

沉淀区采用斜管沉淀池,单组尺寸长×宽为 $13\text{ m}\times 25\text{ m}$,核算水力停留时间约 3.91 h 。斜管区平均表面负荷为 $1.9\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,峰值流量表面负荷约 $2.5\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。斜管直径为 100 mm ,斜管斜长 1.2 m 。每座沉淀池配有桁架式刮渣机($L_k=11.8\text{ m}$,行走功率 $2\times 0.55\text{ kW}$,配套冲洗装置,增压水泵 $Q=18\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=180\text{ kPa}$ 、 $N=2.2\text{ kW}$),底部采用穿孔管进行排泥。沉淀池总水深(包括泥斗深度)为 6.35 m ,有效水深(不含泥斗深度)为 4.35 m 。每座沉淀池设2台跨度为 6 m 的反冲洗桁车,采用不锈钢集水槽(尺寸为 $0.5\text{ m}\times 0.6\text{ m}\times 5\text{ mm}$)出水。

3.2.3 深度处理单元

① 改造现状D型滤池为粗砂滤池,设计规模为 $4\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,主要承接80%的一期生化池出水。将D型滤池的纤维滤料改造为 1.5 mm 的粗砂均质滤料,增加滤层厚度至 1.8 m ,设计平均滤速为 7.2 m/h ,峰值滤速为 9.4 m/h ;改造滤池冲洗设备,水反冲洗强度为 $50\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,空气反冲洗强度为 $60\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。D型滤池中间H槽和进水堰采用 0.5 mm 不锈钢板加高 0.4 m ,拆除现有V型槽,新建不锈钢V型槽。

② 新建一座深床滤池,设计规模为 $6\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,主要承接100%的二期生化池出水及20%的一期生化池出水。深床滤池与中间提升泵房、集水池、反冲洗设备间合建,设计峰值滤速为 5.7 m/h ,过滤面积为 570 m^2 。考虑到进水中的难降解工业废水,按照最大总氮去除量为 6 mg/L 设计深床滤池。

3.2.4 其他单元

① 新建碳源车间:尺寸为 $9\text{ m}\times 6\text{ m}\times 6\text{ m}$,地下碳源储存池 200 m^3 ,碳源投加计量泵($Q=0\sim 1\,000\text{ L/h}$, $H=0.3\text{ MPa}$, $N=3.0\text{ kW}$)26套,17用9备。在每座生化池进水和后缺氧区进水处各设置2个碳源投加点,8座池体共计16个投加点,深床滤池设置1个投加点,全厂共17个投加点,每个投加点配套1台碳源加药计量泵。

② 新建储泥池:尺寸为 $5\text{ m}\times 10\text{ m}\times 5\text{ m}$,新增自吸式曝气机2台, $N=3\text{ kW}$ 。

③ 改建加药间:利用现有的加药间,拆除现状手动控制的3台计量泵设备,新增碱式硫酸铁计量泵12台,8用4备, $Q=500\text{ L/h}$, $H=0.6\text{ MPa}$, $N=1.5\text{ kW}$ 。按照生化池出水TP为 2.0 mg/L 计,化学除磷药剂PAC投加在斜管沉淀池进水端,按照每座生化池配套1处投加管路计,PAC($\text{Al}_2\text{O}_3\geq 10\%$)投加量为 60 mg/L 。新增1套消毒粉自动投加装置(可向2点投加),主要设备有全自动溶药装置1套、投药计量泵2台(1用1备)以及配套相关管路及阀门,总功率约 4.0 kW 。

4 实际运行效果及成本分析

该提标改造工程于2020年7月顺利完工,已稳定运行3.5年。改造后,该厂基本满负荷运行,出水稳定达到地表水准Ⅳ类标准。MBBR区悬浮载体生物膜生长状态如图3所示。

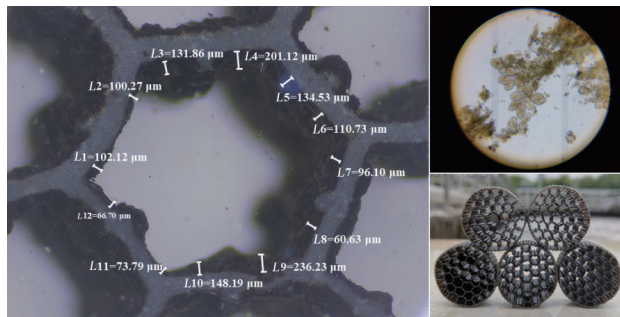


图3 MBBR区悬浮载体挂膜情况

Fig.3 Suspended carrier of MBBR tank

生物膜整体呈黑灰色,分布并不均匀,厚度为

(121.86±50.88) μm ,但大部分处于最佳范围(100~200) μm ,保证了良好的传质传氧效果。显微镜下可见生物膜生长有大量钟虫等缘毛目微生物,显示了系统处理效果良好。

对提标改造前后18个月的运行数据进行对比分析,结果如表4所示。改造后污水厂氨氮去除负荷较改造前提升33.35%,出水氨氮均值为0.53 mg/L,

最高仅为1.27 mg/L,且去除效果更加稳定。污水厂总氮去除负荷较改造前提升70.81%,且去除率均值达到(88.52±5.93)%,较改造前提升近20%,最大去除率超过了95.15%,生化段出水TN可稳定在9 mg/L以下。改造后同步实现了出水总磷及SS浓度的进一步下降,深度处理单元为出水SS的稳定达标提供了保障。

表4 污水处理厂改造前后实际进、出水水质

Tab.4 Actual influent and effluent quality before and after renovation of sewage treatment plant $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

项目		COD	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TN	TP
改造前	进水	190.45±64.56	81.44±25.12	1 048.32±608.70	33.53±9.08	42.48±8.53	2.73±0.70
	出水	21.18±3.81	6.54±0.60	6.07±2.61	1.09±0.53	12.84±1.11	0.25±0.05
改造后	进水	210.71±52.12	102.11±27.82	438.98±347.98	41.05±8.72	53.42±19.25	2.73±0.69
	出水	16.96±3.26	4.65±1.44	4.39±1.77	0.53±0.30	6.70±1.40	0.20±0.05

由于实际进水可生化性较好,因此前缺氧区主要利用原水碳源脱氮,且较好的TN去除效果降低了后缺氧脱氮压力。后缺氧区主要利用外投碳源脱氮,因涉及运行成本,于2021年5月20日—30日对后缺氧区外投碳源脱氮效率进行了分析。后缺氧区进、出水TN分别为(9.15±1.12)和(7.27±0.83) mg/L,进、出水溶解性COD分别为(32.46±5.44)和(33.35±4.19) mg/L,结合后缺氧区实际水量,核算后缺氧区可去除的TN为(4.69±0.47) mg/L,乙酸钠投加量为(80.70±10.22) mg/L,碳源费用合计0.10元/ m^3 。结合进、出水COD及TN浓度,核算通过外投碳源脱氮实际消耗的 $\Delta\text{COD}/\Delta\text{TN}$ 为3.83±0.89,与相关研究结果^[8-9]基本一致。由于后缺氧池出水TN已优于设计出水标准,因此深床滤池实际运行并未投加碳源,仅起到过滤作用。

在运行成本方面,改造后随着处理标准的提升及新建滤池带来的用电设备增加,改造后污水厂吨水及吨污染物处理能耗分别为(0.40±0.04) $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 和(1.56±0.44) $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$,较改造前分别提升10%和4%左右;改造后吨水及单位污染物碳源消耗量分别为(0.090±0.08) kg/m^3 和(1.90±1.00) kg/kg ,与改造前相比,吨水碳源消耗量提升15%、单位污染物碳源消耗量下降近8%,说明改造后提升了碳源利用率。改造后吨水以及单位污染物除磷药剂消耗量分别为(0.065±0.010) kg/m^3 和(27.99±9.84) kg/kg ,较改造前有所降低。

5 进一步扩容及水质提升应对分析

由于该项目好氧区悬浮载体填充率并未达到

文献报道的最高水平(67%)^[9],因此理论上系统仍存在一定的硝化负荷提升潜力。优先保证沉淀区停留时间,假设好氧区悬浮载体填充率提升至67%,核算发现,在保障出水氨氮稳定达标的情况下,进水氨氮最高可达60 mg/L,系统最高处理水量可提升至 $11\times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。相较于悬浮载体为36%的情况,载体填充率提升至67%后,其进水氨氮负荷和水量分别提高20%和10%。两者不一致,主要是总池容确定,沉淀池停留时间不变,水量提升会压缩生化池HRT(总HRT由10.58 h降至9.26 h,其中缺氧区为6.36 h,好氧MBBR区为2.90 h),而负荷提升则不会出现此情况(生化池总HRT不变,缺氧区为7.48 h,好氧MBBR区为3.10 h)。综上,该项目具有水质负荷20%提升和水量10%提升的潜力,为污水厂未来进一步负荷提升留有了余地。

6 结论与展望

四川某 $10\times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的CASS污水厂进行了一级A到地表水准Ⅳ类的连续流提标改造,CASS生化池原位改造为五段Bardenpho-MBBR+沉淀池,实现了进水负荷提升、出水水质提标及生化占地缩减的同步实施,改造后污水厂出水水质稳定优于地表水准Ⅳ类标准,系统抗冲击性能显著增强,同时提高了碳源及混凝剂的利用率。

从设计的角度看,该项目后期通过提高好氧区载体填料的填充率,理论上可进一步实现水质及水量负荷的提升(分别提升20%和10%)。随着城市的快速发展,缺地问题不断凸显,污水厂提标改造应从增量扩张向存量挖潜转变,MBBR工艺具备高

效、集约、抗冲击能力强等优势,在污水厂升级改造中应用前景广阔。

参考文献:

- [1] 俞勇,喻盛华,陈达钢,等. CAST工艺的脱氮除磷强化改造[J]. 中国给水排水,2020,36(12):125-128.
YU Yong, YU Shenghua, CHEN Dagang, *et al.* Improvement of nitrogen and phosphorus removal in CAST process [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(12): 125-128 (in Chinese).
- [2] 王洪刚,纪海霞,程树辉,等. 北方某污水厂CASS工艺升级改造设计[J]. 中国给水排水,2019,35(10):60-63.
WANG Honggang, JI Haixia, CHENG Shuhui, *et al.* Design of upgrading project of CASS process in a sewage treatment plant in northern China [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(10): 60-63 (in Chinese).
- [3] 高伟楠. A²O+MBR工艺用于北方某再生水厂提标扩建工程[J]. 中国给水排水,2020,36(12):91-95.
GAO Weinan. Application of A²O+MBR process in the upgrading and expansion project of a water reclamation plant in North China [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(12): 91-95 (in Chinese).
- [4] 崔天怀,程军,杨坤. 污水厂CASS工艺改为Bardenpho工艺不停水扩容改造[J]. 中国给水排水,2023,39(12):85-89.
CUI Tianhuai, CHENG Jun, YANG Kun. Design of a wastewater treatment plant expanded and reconstructed from CASS process to Bardenpho process without shutdown [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(12): 85-89 (in Chinese).
- [5] 吴飞,徐剑新,吕晨. CASS工艺园区污水处理厂提标改造为AAO+三级处理工艺后的运行效果对比分析[J]. 环境工程学报,2020,14(4):1129-1136.
WU Fei, XU Jianxin, LÜ Chen. Contrastive analysis of operation effect of the park sewage treatment plant with the upgraded and reconstructed AAO-tertiary treatment process from CASS process [J]. Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(4): 1129-1136

(in Chinese).

- [6] 王胤,吴嘉利,姚翔,等. 五段Bardenpho/生物滤池在氧化沟提标改造中的应用[J]. 中国给水排水,2022,38(10):74-78.
WANG Yin, WU Jiali, YAO Xiang, *et al.* Application of five-stage Bardenpho/biological filter in upgrading and reconstruction of oxidation ditch process [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(10): 74-78 (in Chinese).
- [7] 罗霖君. “五段式Bardenpho+MBR”工艺在处理高氮生活污水中的应用[J]. 水处理技术,2023,49(8):145-148, 152.
LUO Linjun. Application of “five-stage Bardenpho+MBR” process in treatment of high nitrogen domestic sewage [J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(8): 145-148, 152 (in Chinese).
- [8] 周小琳,樊星,毕学军,等. 两段式A/O-MBBR工艺生物脱氮中试与系统优化[J]. 中国给水排水,2021,37(19):72-77.
ZHOU Xiaolin, FAN Xing, BI Xuejun, *et al.* Pilot-scale test and system optimization of two-stage A/O-MBBR process for biological nitrogen removal [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(19): 72-77 (in Chinese).
- [9] 刘婧邈,毕学军,杨新慈,等. 低温条件下纯膜MBBR系统脱氮能力中试研究[J]. 中国给水排水,2023,39(19):19-26.
LIU Jingmiao, BI Xuejun, YANG Xinci, *et al.* Nitrogen removal performance of a pilot-scale pure moving bed biofilm reactor system at low temperature [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(19): 19-26 (in Chinese).

作者简介:李志刚(1982-),男,山东菏泽人,博士,高级工程师,主要从事市政给排水设计及相关科研工作。

E-mail:514410926@qq.com

收稿日期:2023-12-13

修回日期:2024-02-12

(编辑:丁彩娟)