

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.08.011

高标准全地下式生物医药园区污水处理厂工程设计

李志刚, 田伟峰, 聂楠, 王雪原

(中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610213)

摘要: 成都生物城污水处理厂一期工程设计规模 $5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,采用全地下式建设型式,进水中工业废水占比约65%,成分复杂,要求出水水质主要指标达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类标准。针对项目高标准要求,设计采用“预处理+水解酸化+A²/O—MBR+臭氧催化氧化+人工湿地”工艺,将主要处理构筑物置于地下箱体内,地面为人工湿地公园。该项目已投入运营近3年,出水水质稳定达标,湿地公园环境效益显著,示范效果突出,可为类似生物医药园区污水处理厂的建设提供参考。

关键词: 生物医药废水; 全地下式污水处理厂; 人工湿地

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)08-0065-06

Design of a High-standard Entirely Underground Wastewater Treatment Plant in a Biomedical Park

LI Zhi-gang, TIAN Wei-feng, NIE Nan, WANG Xue-yuan

(Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute of China, Chengdu 610213, China)

Abstract: The design capacity of the phase I project of biomedical park wastewater treatment plant in Chengdu is $5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, utilizing an entirely underground construction model. Approximately 65% of the influent consists of industrial wastewater, which presents a complex composition. The effluent quality must comply with the class Ⅲ limit specified in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002). In accordance with the stringent requirements of the project, the design incorporated a comprehensive process comprising pretreatment, hydrolytic acidification, A²/O—MBR, ozone catalytic oxidation, and constructed wetland. The primary treatment facilities were situated within an underground box, while the surface area was developed as a constructed wetland park. The project has been operational for nearly three years, during which the effluent quality has consistently remained stable and met the limit specified in the discharge standard. The wetland park demonstrates significant environmental benefits and exemplary effects, providing valuable reference for constructing similar wastewater treatment plants in biomedical parks.

Key words: biomedical wastewater; entirely underground wastewater treatment plant; constructed wetland

基金项目: 成都市“揭榜挂帅”科技项目(2023-JB00-00005-SN)

通信作者: 李志刚 E-mail: 514410926@qq.com

1 项目概况

成都天府国际生物产业城为生物医药产业新城,主导产业为生物医药(药品、医疗器械及相关产业)、生物服务、生物医学工程以及智慧健康。生物城污水处理厂服务范围涵盖整个园区,处理对象为生活污水及园区企业经预处理后排放的工业废水。污水处理厂厂址东侧为锦江,对排放水质要求高,西侧、南侧为绕城高速防护绿带,北侧为区界南路,因此,项目需打造出1座出水水质好、生态环境优的高标准全地下式生物医药园区污水处理厂。

2 项目设计

2.1 设计规模

生物城为新建园区,采用循序渐进、滚动开发的方式建设。根据规划,生物城污水处理厂一期建设土建规模 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,设备安装及湿地规模 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

2.2 设计进、出水水质

生物城污水处理厂为园区配套环保设施,建成前没有企业投运外排废水,无实测废水水质资料。预测一期工程污水量中工业废水占比65%,生活污水占比35%,设计进水水质根据二者各自的水量、排污水质进行加权计算,其中工业废水水质依据企业项目环评要求的污染物排放标准并结合企业内部自建环保预处理设施情况等因素综合确定。根据环评要求,出水水质主要指标需达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类标准,总氮执行《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB 51/2311—2016)。具体设计进、出水水质见表1。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

项目	COD	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TN	TP
进水	400	200	250	30	40	5.0
出水	≤20	≤4	≤10	≤1.0	≤10	≤0.2

2.3 工艺流程

考虑到园区入驻企业类型多样,废水水质、水量波动大,经企业内部预处理后可生化性较差、成分复杂以及出水水质要求高的现实背景^[1],该工程需选择合适的生化强化措施、经济高效的深度处理工艺来保障出水水质稳定达标。

在二级生化处理改良式A²/O强化除磷脱氮的

基础上,前端增设水解酸化工艺改善废水可生化性并降低生物抑制物的影响,后端采用节地MBR膜过滤工艺替代传统二沉池,高效进行固液分离,有利于培养世代周期长的专性细菌,保证生化出水稳定可靠,同时降低后续臭氧用量。深度处理采用臭氧催化氧化工艺,强化对出水中残留的酚、醛、烃等难降解有机物以及色度、臭味的去除,同时出水DO浓度的提升有利于低分子有机物在后续人工湿地中进一步去除。人工湿地采用垂直流人工湿地型式,优化植物选择、填料配比并辅以菌剂投加,强化湿地净化效果,确保出水水质稳定达标。各处理单元出水水质指标见表2,生物城污水处理厂工艺流程见图1。

表2 各处理单元出水水质指标

Tab.2 Effluent quality indicators of each treatment

项目	COD	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TN	TP
水解酸化池出水	≤280	≤180	≤175	≤30	≤36	≤4.5
生化MBR出水	≤50	≤10	≤10	≤5	≤15	≤0.5
臭氧催化氧化出水	≤30	≤6	≤10	≤3	≤15	≤0.5
人工湿地出水	≤20	≤4	≤10	≤1.0	≤10	≤0.2

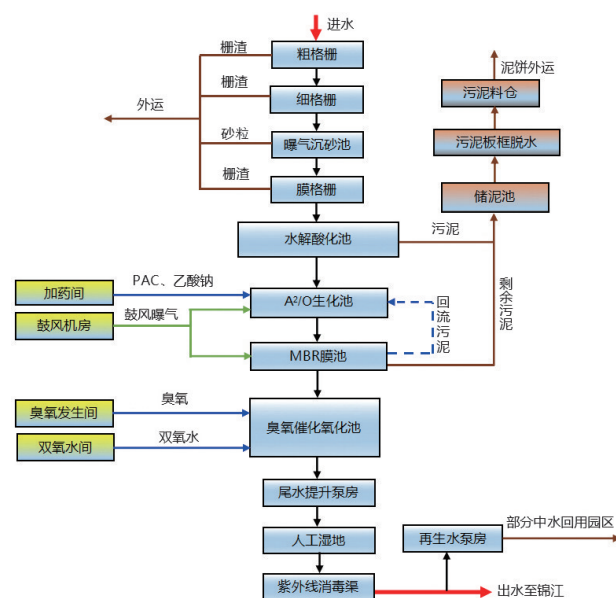


图1 污水处理厂工艺流程

Fig.1 Process flow of the WWTP

2.4 总体布局

项目要求减小污水处理厂建成后对周边环境的影响,同时与园区整体景观风貌相匹配,因此,污水厂采用全地下式建设型式,将污水处理核心构筑

物集约化布置于地下箱体内,地上叠建湿地公园。生物城污水处理厂一期工程占地 8.0 hm^2 (地下占地 2.2 hm^2),其中地面管理及生产辅助建(构)筑物区占地 2.0 hm^2 ,湿地公园占地 6.0 hm^2 。污水处理厂总平面布置见图2。

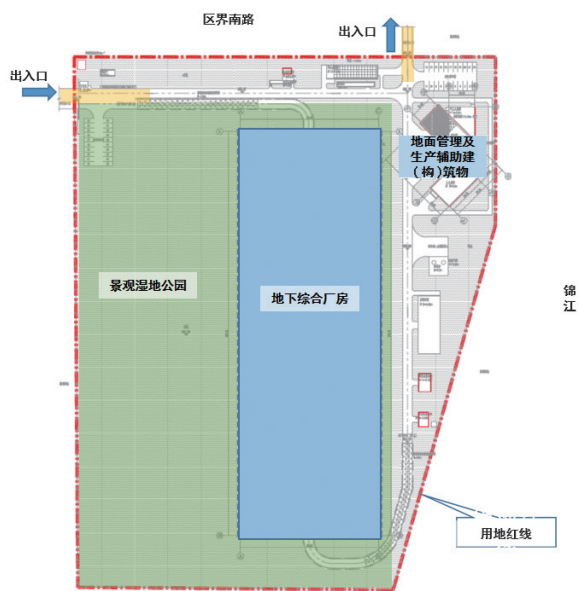


图2 污水处理厂总平面布置

Fig.2 General layout plan of the WWT

地面管理及生产辅助建(构)筑物区设有门禁,将生产区与公园区域隔离,便于生产管理。该区建设内容包括综合楼、紫外线消毒渠、再生水泵房、液氧站及臭氧发生间等,其中综合楼为三层建筑,建筑面积约 $2\,800\text{ m}^2$,内设中控、化验、管理等办公用房及综合展厅。

湿地公园实景如图3所示。



图3 湿地公园实景

Fig.3 Scene of wetland park

湿地公园区在充分考虑地下综合箱体功能需求的基础上,合理设计地面功能性人工湿地布局;将人防楼梯、尾气排放塔、通风井进行艺术化处理

并搭配入口广场、生态水池、健康步道、空中栈桥、观景挑台、科普景墙等小品提升地面景观的层次感和立体感;同时合理种植净水植物,兼种观赏性植物,对外开放打造成集科普、休闲、宣传于一体的景观湿地公园。

污水处理综合箱体尺寸为 $253.5\text{ m}\times 86.6\text{ m}\times 15.9\text{ m}$,共两层,负一层为设备操作层,布置有污泥处理车间、变配电间、鼓风机房、加药间、碳源投加间、消防控制中心及除臭设备等;负二层为污水处理池及检修巡视管廊(见图4)。污水处理箱体平面布置不受风向影响,故根据污水厂进水、出水方向和用地情况进行设计。生物城污水处理厂进水管位于厂区西北侧,因此将粗格栅、细格栅、曝气沉砂池、膜格栅等预处理设施布置在地下厂房的西北侧;污泥处理车间布置于预处理区东侧,便于对外运输;厂区中部区域为污水二级处理区,南侧为深度处理区。污水经深度处理后提升至地面人工湿地进一步处理,由于出水受纳水体锦江位于厂区东侧,故将出水井布置在厂区东侧,就近排入锦江。

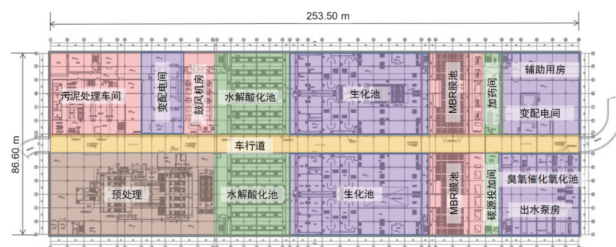


图4 地下箱体平面布置

Fig.4 Layout plan of the underground box

2.5 竖向布置

生物城污水处理厂厂址现状地形北高南低,地面标高由 449.7 m 坡向 446.0 m 。为充分利用进厂水头,避免增加尾水的提升高程,同时满足地下箱体操作层必需的设备吊装高度及箱体顶部覆土栽种植物的要求,另结合厂区土方平衡计算结果,将场地标高统一填高至 451.7 m ,高于受纳水体锦江200年一遇洪水位 1.5 m ,满足防洪要求。

地下箱体结构层数2层,操作层标高 441.30 m ,层高 8.4 m ;底板标高最低 433.8 m ,最大埋深 17.9 m 。

2.6 工艺设计

① 预处理区

粗格栅渠设置回转式粗格栅机2台,栅距 20

mm;一期细格栅渠设置回转网孔板式细格栅除污机3台,2用1备,栅距5 mm;一期曝气沉砂池设置桥式刮砂机2台,行走速度1~2 m/min;一期膜格栅渠设置转鼓式超细格栅机3台,2用1备,孔径1 mm。

② 水解酸化池

设2座水解池,单座土建按 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 建成,设备按一期规模 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 安装。采用升流式复合水解型式,通过点对点确保布水均匀,中部设斜板酶浮填料,提高生物量并改善泥水分离效果。水力停留时间5.6 h,上升流速1.15 m/h,设置多点布水器24套;酶浮填料120套,倾角 60° 。

③ 生化池

设2座生化池,一期仅运行1座;每座生化池分2格,有效水深6 m。采用改良式A²/O工艺,总水力停留时间11.7 h,其中预缺氧区0.5 h、厌氧区2.0 h、缺氧区3.2 h、好氧区4.0 h、多功能区2.0 h(可根据运行需要调整为好氧或缺氧区);MLSS=8.0 g/L;污泥龄18.5~24.4 d,污泥负荷为0.053~0.064 kgBOD₅/(kgMLSS·d),气水比5.44:1,采用管式微孔曝气。进水通过进水渠可分配至预缺氧区、厌氧区、缺氧区,充分利用进水碳源。为避免膜池回流污泥DO过高影响缺氧反硝化进行,设计采用逐级回流的方式^[2],即膜池至好氧区起端回流比300%~400%(回流污泥,充分利用DO),好氧区末端至缺氧区起端回流比200%~400%(脱氮)、缺氧区末端至预缺氧区起端回流比150%~300%(除磷)。

④ MBR膜池及膜设备间

MBR膜池及膜设备间合建,设2座,一期只运行1座。采用PVDF带支撑中空纤维膜,过滤孔径 $<0.4 \mu\text{m}$,每座设置10条廊道,每条廊道设4个膜位,膜通量 $\geq 18 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。膜区污泥浓度10.0 g/L,吹扫最大气水比11:1,风量调节范围30%~100%。在线清洗采用NaClO液体,投加浓度为200 mg/L;维护性清洗一般1~2次/a。膜设备间配置产水/反洗泵、混合液回流泵、废水排放泵、空压机系统、真空系统、膜清洗系统、废液中和药剂投加系统、辅助化学除磷药剂投加系统和消毒系统。

⑤ 臭氧催化氧化池

臭氧催化氧化池1座,分2组,每组可单独运行。设计水力停留时间1.0 h,有效水深6.4 m。臭氧最大投加量36 mg/L,双氧水投加量0~20 mg/L,UV催化模块的紫外线透过率65%、UV强度50%~

100%可调。

⑥ 出水泵房

一期设单级单吸卧式离心泵3台,2用1备,将地下箱体处理后的尾水提升至地面人工湿地进一步处理。

⑦ 人工湿地

采用垂直潜流功能性人工湿地,共分为11个处理单元,每个湿地有效面积介于200~5 400 m²,湿地净化总面积33 600 m²。设计BOD₅表面负荷0.001 5 kgBOD₅/(m²·d),布水负荷0.74 m³/(m²·d)。通过进水管向各处理单元输水,各单元进水依次通过进水管、支管、穿孔管实现支状管网表层布水,出水依次通过穿孔管、支管、主管实现支状管网底层集水,最终通过出水干管汇集至末端紫外线消毒渠。所有进水主管、出水主管、干管上均设有阀门,可对各处理单元实现分区控制。

综合箱体上部湿地总高度1.9 m,从上到下分别为0.20 m超高、0.25 m上部碎石层(种植植物,进水布水)、1.05 m填料层、0.15 m生物陶粒层(出水集水)、0.25 m下部碎石层;其他区域湿地总高度增至2.65 m,对应填料层厚度1.35 m、生物陶粒层0.60 m。生物陶粒层、填料层每层铺设完毕后,表面均匀抛洒固体硝化菌、固体反硝化菌、生根菌、芽孢杆菌以及果壳型柱状活性炭等辅助物质,强化污染物去除效果。

人工湿地栽种有风车草、美人蕉、香蒲、芦苇、鸢尾、千屈菜、蜘蛛兰等净水植物,植物选配兼具景观分区效果。

⑧ 紫外线消毒渠

紫外线消毒渠土建按 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 一次建成,设备按 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 规模安装。设置紫外线消毒系统1套,共56根紫外线灯管,同时包括配电中心、系统控制中心、水位控制器、低水位传感器、在线自动清洗系统等配套设施。项目出水40%用于生物城园区再生水回用(城市杂用、工业冷却、景观湖补水、公园绿化等),剩余作为生态补水排放锦江。

⑨ 鼓风机房

采用螺杆式鼓风机,风量调节范围30%~100%。一期设置3台用于生化池鼓风,其中2台 $Q=73 \text{ m}^3/\text{min}$ 、 $P=70 \text{ kPa}$ 、 $N=110 \text{ kW}$,1台 $Q=42 \text{ m}^3/\text{min}$ 、 $P=70 \text{ kPa}$ 、 $N=75 \text{ kW}$;设置3台用于MBR膜池表面扫洗,2用1备,单台 $Q=98 \text{ m}^3/\text{min}$ 、 $P=47 \text{ kPa}$ 、 $N=110$

kW。

⑩ 污泥浓缩脱水间

一期设计干污泥量为7.5 tDS/d,带式浓缩机1台,进泥含水率99.2%,滤带宽2.2 m;隔膜板框压滤机2台,进泥含水率97.5%~98%,出泥含水率≤60%,滤板尺寸1 500 mm×1 500 mm,过滤面积350 m²,压榨压力1.6 MPa。

⑪ 臭氧发生间

一期设置臭氧发生器2台,单台设计臭氧产量25.0 kg/h,质量浓度10%,采用液氧制备。

⑫ 除臭和通风设计

除臭设计依据就近收集、相对集中处理的原则,将臭气处理划分为3个大区域,即预处理及污泥脱水区、一期生化池及膜池区、二期生化池及膜池区。臭气处理排放标准执行《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—93)二级标准,处理达标后尾气通过15 m高的排放塔高空排放。

通风设计采用全面排风与局部排风相结合的送排风方式。箱体地下一层操作间、地下二层处理池以及各处理工段车间,采用自然补风、机械排风兼排烟系统;防烟楼梯间及其前室设置机械加压送风设施,确保防烟楼梯间内机械加压送风防烟系统的余压值为40~50 Pa。

2.7 结构设计

因污水处理综合箱体的平面尺寸为253.50 m×86.60 m,其长、宽均超出规范规定的设缝长度,故应采取设不完全变形缝(引发缝)措施。结合平面布置及地下分层情况,地下箱体沿纵向设置4道引发缝,沿横向设置1道引发缝。

因箱体埋深较大,负一层及负二层建(构)筑物的基础均落在泥岩及泥质砂岩层上,故箱体采用天然地基基础,以泥岩及泥质砂岩层为基础持力层;该项目厂址毗邻锦江,地下水位高,箱体的结构抗浮措施为利用自重及配重(顶板覆土、底板吊重)和预应力扩大头锚杆抗浮。

2.8 基坑支护设计

地下箱体开挖深度约10.4~17.9 m,基坑尺寸333.0 m×262.0 m。场地四周较为空旷,上部土层为填土层和卵石层,采用二阶或三阶放坡,土钉喷锚支护,局部放坡空间受限处采用土钉墙支护或钻孔灌注桩+锚索支护。

2.9 消防设计

针对地下箱体的消防设计,进行了消防专项论证,确定了“重点部位重点设防”等设计思路。地下箱体耐火等级为一级,按戊类厂房标准划分防火分区,负一层分为4个防火分区和3个无人值守区,负二层分为2个防火分区和1个无人值守区,单个防火分区最大面积≤2 000 m²,单个无人值守区最大面积≤5 000 m²。

地下厂房采用湿式自动喷水灭火系统,火灾危险等级按中危险Ⅰ级设计,持续喷水时间1 h;各部位均设置磷酸铵盐干粉灭火器,配电间设置气体灭火系统。

3 实际运行效果

3.1 处理水量

随着生物城园区招商引资工作的推进及入驻企业的不断投运,污水处理厂进水水量逐步增加。运营统计资料显示,2023年—2024年处理水量为(1.10~2.40)×10⁴ m³/d,日平均处理量为1.58×10⁴ m³/d,尚未达到处理规模,原因是园区采用滚动发展模式分片区开发,近年引入的企业以科研、研发、孵化为主,均属于低耗排水、高附加值的高端制药企业,其洁净生产水平也远低于传统医药行业。日处理量变化系数较大,主要是由于园区废水占比较大,受园区企业运行工况影响较大。

3.2 实际进、出水水质

自2022年6月正式投运以来,该污水处理厂的进、出水水质见表3。

表3 实际进、出水水质

Tab.3 Actual influent and effluent quality

项目	COD	NH ₃ -N	TN	TP
95%保证率进水/(mg·L ⁻¹)	157	22.9	24.9	4.62
出水/(mg·L ⁻¹)	3.66~12.80	0.03~0.11	2.54~5.74	0.06~0.13
去除率/%	92~98	99.5~99.9	77~90	97~99

进水水质实测值均低于设计值,水质冲击的问题基本不存在^[3],这主要归功于生物城严格执行规划环评要求,对引入的生物制药类企业要求内部自建污水预处理设施,含化学合成工艺的企业经处理后的废水需达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)一级标准,排放的有毒有害类污染物需达到相应行业排放标准,其余制药企业经处理后的废水需达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)三级

标准,方可排入园区集中式污水处理厂。在此过程中加强环保监督,杜绝企业偷排、漏排现象。另外持续优化并提升产业门槛,严控废水排放量大且难以处理的生物医药企业入园,要求化学合成类和发酵类制药项目的单位产品排水量不超过 $1\,000\text{ m}^3/\text{t}$,且废水总排放量不超过当期污水厂处理能力的10%,同时园区内禁止引入单纯中间体生产(以中间体为最终产品)、抗生素类发酵及合成制药、维生素类发酵及合成制药、激素类制药、生物炼制工艺制造生物基化学品项目,从源头避免对污水处理厂造成水质冲击。

该项目已投入运营近3年,设计的工艺流程能够灵活应对各种情况,工艺运行效果稳定,出水水质全面优于设计指标。园区入驻企业众多,虽然排水成分复杂,但工业废水已通过企业内部的预处理设施进行处理,废水中COD、BOD₅、氮、磷等污染物均得到一定程度的去除,运营单位可根据进水水质灵活调整运行工况。

4 技术经济指标

该工程设计总投资5.84亿元(含地面景观公园建设),其中工程费用4.67亿元。由于该工程具有规模偏小、进水成分复杂、出水标准高、景观要求高等特点,同时设备分期安装未能形成足额产能,土建单方造价较同类项目偏高。经运行数据分析,污水处理厂年经营成本约1350万元,单位经营成本 $2.34\text{ 元}/\text{m}^3$,单位耗电量 $0.68\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$,较预设运行指标有一定程度降低。

5 结语

① 该工程为生物医药园区集中式污水处理厂,废水成分复杂;出水标准高,除TN外其余检测指标均需达到地表水Ⅲ类水质要求。设计采用“预处理+水解酸化+A²/O-MBR+臭氧催化氧化+人工湿地”工艺,项目已投入运营近3年,出水水质稳定达标,证明工艺方案稳定有效。

② 受区位及周边景观要求,该污水处理厂采用全地下式建设型式,将主要处理构筑物置于地下综合箱体内,通过合理布置工艺处理单元、通风、除臭系统,并对伸出地面的人防楼梯、尾气排放塔、通风井进行艺术化处理,减少了对地面人工湿地公园的影响,实现了污水治理与城市绿化景观的和谐统一。

参考文献:

- [1] 刘立国,谢长血,范加良,等. 臭氧氧化/AO/臭氧氧化/BAF工艺处理医药工业园区污水[J]. 中国给水排水, 2017,33(10):63-65.
LIU Liguang, XIE Changxue, FAN Jialiang, et al. Ozone oxidation/AO/ozone oxidation/BAF process for pharmaceutical industrial park wastewater treatment[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(10): 63-65 (in Chinese).
- [2] 戴红,陈艾,薛文文,等. 泸州某Phoredox+MBR工艺地下污水处理厂工程设计方案[J]. 中国给水排水, 2020,36(10):52-57.
DAI Hong, CHEN Ai, XUE Wenwen, et al. Design scheme of underground wastewater treatment plant using Phoredox+MBR in Luzhou [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(10): 52-57 (in Chinese).
- [3] 潘智民,庄晓杰. 低浓度工业园区污水处理厂存在的问题及其对策[J]. 广州化工, 2021,49(4):99-101.
PAN Zhimin, ZHUANG Xiaojie. Advancement on low concentration industrial park wastewater treatment plant and its countermeasures [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2021, 49(4): 99-101 (in Chinese).

作者简介:李志刚(1982-),男,山东菏泽人,博士,高级工程师,主要研究方向为市政给排水工艺设计及应用。

E-mail:514410926@qq.com

收稿日期:2024-06-21

修回日期:2024-08-12

(编辑:沈靖怡)