

设计经验

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2024. 18. 009

杭州市首座半地埋式污水处理厂工程设计

吴锦谢, 陈维航, 周海珊, 王闻婷, 单依雯, 徐挺
(杭州市水务集团有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 杭州市七格污水处理厂四期工程规模为 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 针对城市土地资源愈发稀缺、居民对环境要求日益增高等问题, 采用双层加盖的半地埋布置形式, 顶部为生态主题景观公园。污水处理采用具有脱氮除磷功能的“A+AAO生物处理+反硝化深床滤池+紫外线消毒”工艺, 出水水质稳定达到并优于一级A排放标准。该工程具有环境友好、土地集约、资源利用、工艺运行灵活等优点, 是杭州市首座半地埋式污水处理厂, 相比七格前三期地上式污水处理厂, 其单位处理水量占地面积减少31%。

关键词: 污水处理厂; 半地埋式; 生态主题景观公园; 脱氮除磷; 反硝化深床滤池
中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)18-0053-06

Engineering Design of the First Semi-underground Sewage Treatment Plant in Hangzhou

WU Jin-xie, CHEN Wei-hang, ZHOU Hai-shan, WANG Wen-ting, SHAN Yi-wen,
XU Ting
(Hangzhou Water Group Co. Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: The Qige sewage treatment plant phase IV project in Hangzhou has a daily capacity of $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$. To address challenges such as the urban land scarcity and heightened environmental expectations from residents, the facility is designed as a double-storey semi-underground structure with a covered top storey featuring an ecological themed landscape park. The sewage treatment process includes an A+AAO biological tank, denitrification deep bed filter, ultraviolet disinfection, ensuring nitrogen and phosphorus removal. The treated effluent quality exceeds the grade A standard specified in the discharge regulations. The project offers several advantages including environmental friendliness, land intensification, resource utilization, and flexible process operation. It marks Hangzhou's first semi-underground sewage treatment plant. Moreover, compared to the first three phases of the Qige sewage treatment plant aboveground, the area required per unit of treated sewage has been reduced by 31%.

Key words: sewage treatment plant; semi-underground; ecological themed landscape park; nitrogen and phosphorus removal; denitrification deep bed filter

1 工程概况

随着杭州城市化进程和经济建设的快速发展, 人口数量不断增加, 污水管网覆盖率逐年提升, 城市生活污水量也持续增加, 亟需新建或改扩建污水

处理厂。同时在城市土地资源愈发稀缺、居民对环境要求日益提高的背景下, 具有环境友好、土地集约、资源利用等优点的地理式污水处理厂^[1-2]在国内逐步得到认可和推广应用。

为解决杭州城市发展和建设带来的污水量增加的问题,更好地保护环境,综合考虑项目的可行性、经济性和环境风险等因素,在杭州市钱塘区下沙街道七格地块,新建杭州市首座半地理式污水处理厂——七格污水处理厂四期工程,设计处理规模为 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,接收来自杭州主城区和下沙经济开发区的污水,工程总占地面积 18.27 hm^2 ,顶部建有钱塘生态公园(占地面积 10.67 hm^2)。该工程于2016年6月开工建设,2019年9月投入运行。

2 设计水质及工艺流程

2.1 设计水质

设计进水水质与现状七格污水处理厂三期工程相同,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。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

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	COD	BOD ₅	SS	TN	NH ₃ -N	TP
进水	400	150	160	50	40	5
出水	50	10	10	15	5(8)	0.5

2.2 污水处理工艺流程

预处理工艺采用粗格栅+进水泵房+细格栅+曝气沉砂池+初沉池;生物处理工艺采用前置缺氧池+厌氧池+缺氧池+好氧池+矩形周进周出二沉池;深度处理工艺采用反硝化深床滤池;消毒工艺采用紫外线+次氯酸钠联合消毒;污泥处理工艺采用重力浓缩+化学调理+板框压滤;臭气处理工艺采用生物除臭滤池。具体工艺流程见图1。

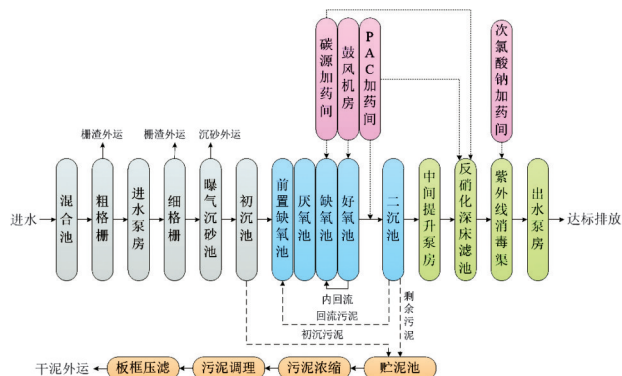


图1 污水处理厂工艺流程

Fig.1 Process flow chart of sewage treatment plant

3 主要建(构)筑物及设计参数

该工程主要工艺建(构)筑物包括半地理式箱

体及箱体外单体群两大部分,其中箱体包括预处理车间、初沉池、生物池、二沉池、中间提升泵房、剩余及回流污泥泵房、污泥处理车间、PAC加药间、碳源加药间、排水泵站、生物除臭滤池等;箱体外单体群包括鼓风机房、反硝化深床滤池及反冲洗设备间、紫外线消毒渠及出水泵房等。

箱体采用双层加盖的半地理布置形式,将污水处理构筑物组团布置为一个整体,箱体尺寸为 $332.8 \text{ m} \times 189.5 \text{ m} \times 14.5 \text{ m}$,地下部分为两层,其中污水处理构筑物位于箱体负一层,其底部绝对标高为 -2.9 m ,设计层高约 8.6 m ,巡视操作层位于箱体一层,底部绝对标高为 5.7 m ,为方便运行人员操作,设计层高约 5.9 m 。

箱体负一层构筑物加盖,盖板即为箱体一层底板,一层顶部加盖并进行覆土绿化,绿化覆土厚度 $1.0 \sim 1.8 \text{ m}$ 。地面部分设大型生态景观公园,与周边景观融为一体,为城市增加绿化面积的同时,也为周边居民提供一座集科普教育、体育运动等多功能为一体的休闲娱乐场所。建设形式竖向示意图2,污水处理厂鸟瞰图见图3。

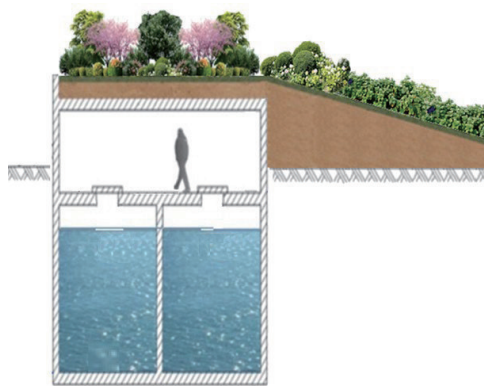


图2 建设形式竖向示意

Fig.2 Vertical diagram of construction form



图3 污水处理厂鸟瞰图

Fig.3 Aerial view of sewage treatment plant

3.1 一体化箱体工程

初沉池、生物池、二沉池等污水处理构筑物采用一体化箱体集约化设计^[3],沿箱体的负一层车道对称布置,分为两个处理单元,每个处理单元的规模为 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。一体化箱体污水处理功能分区见图4。

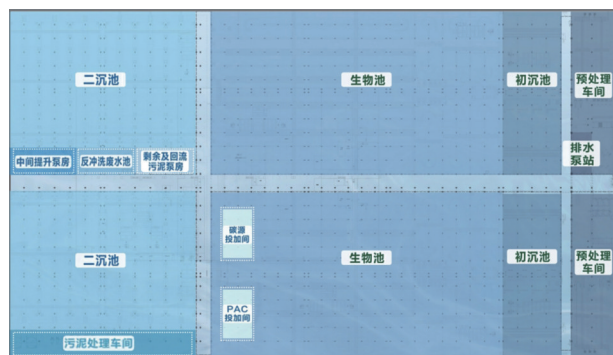


图4 一体化箱体污水处理功能分区

Fig.4 Sewage treatment function zoning of integrated box

3.1.1 粗格栅及进水泵房

设粗格栅6台,栅条间隙10 mm,栅渠宽度2.6 m,单台设计过栅流量 $0.752 \text{ m}^3/\text{s}$,单台功率3 kW;无轴螺旋输送栅渣压实一体机2台,单台功率4 kW。

设进水提升泵8台(6用2备),4台变频,单台流量 $2736 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程100 kPa,功率110 kW。

3.1.2 细格栅及曝气沉砂池

设内进流网板式细格栅8台,板孔间隙3 mm,渠道宽度900 mm,单台设计过栅流量 $0.76 \text{ m}^3/\text{s}$,单台功率1.1 kW;配套冲洗装置,栅渣压榨机4台,单台功率2.2 kW。细格栅可进一步去除污水中的漂浮物,特别是丝状、带状漂浮物,保证后续处理系统的正常运行。

曝气沉砂池为8格,设计停留时间7.55 min,水平流速 0.1 m/s ,曝气量 $0.2 \text{ m}^3 \text{ 空气}/\text{m}^3 \text{ 污水}$,采用链条式刮砂机,单台功率0.55 kW;设置罗茨鼓风机6台(4用2备),单台风量 $1080 \text{ m}^3/\text{h}$,单台功率30 kW;输砂泵8台;砂水分离器4台;渣水分离器2台。曝气沉砂池能有效去除原水中密度 $>2.65 \text{ g}/\text{cm}^3$ 、粒径 $>0.2 \text{ mm}$ 的无机砂粒,保证后续流程的正常运行。

3.1.3 初沉池

设矩形平流式初沉池2座,每座2组,每组4格,共16格,总设计流量 $4.51 \text{ m}^3/\text{s}$,表面负荷 $3.6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,沉淀时间1.1 h;横向链条刮泥机16台,纵

向链条式刮泥机4台,单台功率0.37 kW;潜水污泥泵8台,单台流量 $60 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程300 kPa,功率9 kW;渣水分离器4台。初沉池可去除污水中密度较大的固体悬浮颗粒,以减轻生物处理的有机负荷,提高活性污泥中微生物的活性。

3.1.4 生物池

为获得稳定的脱碳、脱氮和除磷效果,生物池采用A+AAO模式,设置回流污泥反硝化段(也称前置缺氧段)、厌氧段、缺氧段、兼氧段和好氧段。在厌氧段前加设回流污泥反硝化段,先一步去除水中的硝酸盐氮,为聚磷菌的释磷过程提供良好的条件,同时强化反硝化作用。

生物池共有2组,每组2座,每座处理规模 $7.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,前置缺氧段尺寸为 $41.1 \text{ m} \times 15.5 \text{ m}$,停留时间1.72 h;厌氧段尺寸为 $41.1 \text{ m} \times 14.8 \text{ m}$,停留时间1.39 h;缺氧段共两格,一格尺寸为 $41.1 \text{ m} \times 14.8 \text{ m}$,另一格尺寸为 $96.95 \text{ m} \times 14.8 \text{ m}$,停留时间4.56 h;兼氧段尺寸为 $14.8 \text{ m} \times 14.46 \text{ m}$;好氧段尺寸为 $111.8 \text{ m} \times 27.8 \text{ m}$,共分成4个廊道,停留时间7.87 h;每座生物池的有效水深7.3 m,有效容积 48825 m^3 ,总停留时间15.54 h。生物池结构示意见图5,生物池工艺流程见图6。

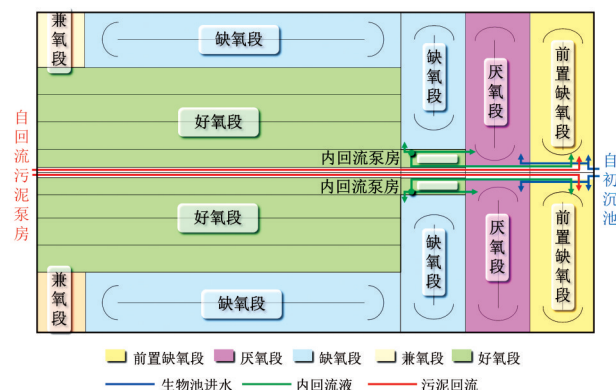


图5 生物池结构示意

Fig.5 Structure diagram of biological tank

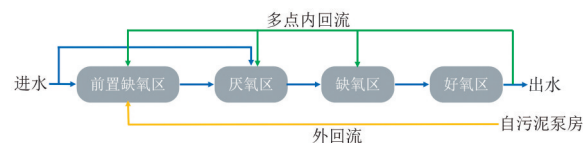


图6 生物池工艺流程

Fig.6 Process flow chart of biological tank

在生物池进水渠道设置16台不锈钢叠梁闸,以实现进水在前置缺氧段和厌氧段之间的分配。在

不同进水水质、不同季节情况下,随着生物脱氮和生物除磷所需碳源的变化,进水可按照12%、24%、48%、100%的比例进入前置缺氧段。

前置缺氧段、厌氧段和缺氧段中设置潜水推进器80台,可使混合液处于悬浮状态,防止污泥沉淀。其中前置缺氧段16台,单台功率4.5 kW;厌氧段16台,单台功率5.5 kW;缺氧段48台,单台功率5 kW。

兼氧段和好氧段中设置盘式微孔曝气器15 402个,单个空气流量4 m³/h,可为生物净化过程提供足量的空气;共设置16台电动空气控制阀,用于调节曝气量。

好氧段内回流区域设置混合液内回流泵16台(12用4备),单台流量3 900 m³/h,功率27 kW,设计最大内回流比350%;在内回流渠道共设置12台不锈钢电动渠道闸门,通过闸门的启闭将好氧段的混合液分别回流至前置缺氧段、厌氧段和缺氧段。

通过对内回流渠道闸门的控制,可在不改动土建的情况下,将A+AAO运行模式变形为AO或AAO模式,满足不同的脱氮除磷需求,以适应不同水质、不同季节的变化情况。

3.1.5 PAC加药间和碳源加药间

PAC加药间内设置PAC投加系统1套,加药泵6台(4用2备),单台流量300 L/h,扬程500 kPa。药剂投加位置分别为生物池出水及反硝化深床滤池进水混合池。

碳源加药间内设置碳源投加系统1套,加药泵6台(4用2备),单台流量2 100 L/h,扬程400 kPa。若运行时出现碳源不足,导致TN无法达标,则投加碳源于生物池缺氧段及反硝化深床滤池进水混合池处,以满足反硝化脱氮的碳源需求。

3.1.6 二沉池

设矩形周进周出二沉池2座,每座12格,设计流量4.51 m³/s,平均流量表面负荷1 m³/(m²·h),沉淀时间3.46 h;链条式刮泥机24台,单台功率0.37 kW,运行速度为0.3 m/min。

3.1.7 外回流及剩余污泥泵房

设外回流泵6台(4用2备),单台流量3 240 m³/h,功率55 kW,设计外回流比100%。设剩余污泥泵3台(2用1备),单台流量198 m³/h,功率18 kW。

3.1.8 中间提升泵房

设中间提升泵8台(6用2备),4台变频,单台流量2 736 m³/h,扬程120 kPa,功率130 kW。

3.2 箱体外工程

3.2.1 反硝化深床滤池

反硝化深床滤池2组,每组10格,设计流量4.51 m³/s,平均流量滤速6.25 m/h,石英砂均质滤料厚度2.44 m,粒径2~3 mm,天然鹅卵石垫层厚度450 mm,粒径8~40 mm。反硝化深床滤池能进一步去除水中的微小颗粒,同时具备化学除磷和生物反硝化脱氮的功能,可保证最终的出水水质。

设布气布水系统1套,反冲洗泵3台(2用1备),单台流量1 500 m³/h,功率75 kW;罗茨鼓风机4台(4用1备),单台风量4 602 m³/h,单台功率160 kW。滤池反冲洗采用先气冲后水冲的方式。

3.2.2 紫外线消毒渠

设置渠道4条(1条超越渠),设计流量4.51 m³/s;紫外线消毒装置3套,单套功率150 kW,可根据流量及紫外透光率的变化来调节输出功率,调节范围为50%~100%,紫外灯管设计使用寿命12 000 h。消毒渠能有效杀灭污水中的细菌,保证出水粪大肠菌群数<1 000个/L。

3.2.3 出水泵房

设出水泵6台(4用2备),2台变频,单台流量4 100 m³/h,扬程68 kPa,功率110 kW;DN1 600拍门2个。出水排至钱塘江,当钱塘江处于平均潮位时,出水通过拍门采用重力流排放;当钱塘江处于高潮位时,出水经出水泵提升后排入钱塘江。

3.2.4 次氯酸钠加药间

次氯酸钠加药间内设置次氯酸钠投加系统1套,加药泵4台,单台流量530 L/h,扬程500 kPa。次氯酸钠作为辅助消毒剂投加至紫外线消毒渠。

3.2.5 鼓风机房

设置单级离心式鼓风机4台(3用1备),单台风量21 000 m³/h,出口压力88 kPa,配套电机功率640 kW。

3.3 污泥处理工程

初沉污泥和二沉池剩余污泥排至贮泥池,由泵送至污泥深度处理系统,经过重力浓缩、化学调理、板框压滤后,出泥含水率<50%,由车辆直接外运进行焚烧处置。

3.4 除臭工程

采用生物滤池除臭工艺,将预处理段、生物处理段、污泥处理段的臭气分别送入各工艺段生物滤池除臭装置进行处理。预处理段设除臭装置2座,

总设计处理风量 40 000 m³/h;生物处理段设除臭装置 6 座,总设计处理风量 160 000 m³/h;污泥处理段设除臭装置 1 座,设计处理风量 40 000 m³/h。

臭气经处理达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)二级排放标准后,进入污水处理厂箱体的排风管道并通过排风百叶排到室外,消除对周边环境的不利影响。

4 工程特色及亮点

① 地理布置,集约用地。工程突破传统地上式污水处理厂的布置模式,采用集约化布局、地理式设计理念,实施组团化、集成化设计,对称布置于地下箱体内,箱体中间布置行车通道、检修通道和综合管廊等,不产生臭气的深度处理区及少量辅助建筑建在地面,大大提高了土地利用效率。与七格前三期地上式污水处理厂相比,采用半地理式污水处理厂的四期工程单位处理水量占地面积减少 31% 左右。

② 环境友好,以人为本。地理式箱体将污水处理设施转移到十余米深的地下空间,在地下加盖的全封闭环境中完成污水处理,有效杜绝了污水暴露;同时,生产过程中的臭气在地下通过负压抽吸装置单向输送至臭气处理系统分片集中外理后达标排放,最大限度地减少对周边环境空气质量和居民的影响。

③ 生态公园,一体两用。钱塘生态公园是杭州首座建在污水处理厂上的生态公园,公园下方运行着具有 30×10⁴ m³/d 处理能力的七格污水处理厂四期工程,被评选为浙江省园林式居住单位。“上园下厂”的建设模式为杭州城东市民增添了一处休闲娱乐的好去处,更为杭州市区域经济社会的发展插上了绿色生态的翅膀。钱塘生态公园有效破解了传统污水处理厂带来的“邻避”难题,将曾经的“邻避”工程变成受群众欢迎的“邻利”工程,开辟了杭州市基础设施建设“一体两用”的新模式。

④ 海绵理念,弹性蓄排。公园项目融入大量海绵城市设计理念,公园硬质面层采用透水材料,雨水就地渗入,减少路面积水;绿化中增加植草沟、雨水花园等蓄水区域,能迅速汇集并临时储存径流和下渗雨水,增强了应对和利用雨水的“水弹性”;设置湿地花园,汇集的雨水将作为水源补充水,滋养水生植物;同时,公园径流区域补水和绿化浇灌

用水均采用污水处理厂尾水,促进了水生态的良性循环。

⑤ 工艺模式,灵活切换。生物处理工艺采用 A+AAO 模式且具有多点进水及多点内回流功能。在常规 AAO 工艺前增加前置缺氧段,全部外回流污泥和约 10%~50% (根据实际情况进行调节) 的进水进入前置缺氧段,利用部分进水中的有机物作碳源去除外回流污泥中的硝酸盐氮,为后续厌氧池聚磷菌的释磷创造良好的环境,同时强化反硝化作用;多点进水可使进水碳源在前置缺氧段和厌氧段之间进行分配,强化碳源利用;多点内回流功能可将 A+AAO 运行模式变形为 AO 或 AAO 模式,以适应不同水质、不同季节的变化情况。

5 运行效果及成本分析

七格污水处理厂四期工程自建成投运以来,运行情况良好、稳定,出水水质优于设计标准,实际进、出水水质见表 2。

表 2 实际进、出水水质

Tab.2 Actual influent and effluent quality

mg·L⁻¹

项目	COD	BOD ₅	SS	TN	NH ₃ -N	TP
平均进水	278.2	107.6	119.1	34.9	26.4	4.35
平均出水	13.2	0.7	3.7	6.8	0.2	0.10

目前,国内半地理式污水处理厂单位投资约为 4 500~5 500 元/m³ (出水水质为国家一级 A 标准)^[4]。该工程总投资概算约 14.18 亿元,单位投资约 4 726.67 元/m³,工程投资成本较为合理。

地理式污水处理厂的运行费用普遍高于常规地上式污水处理厂,国内半地理式污水处理厂运行费用约为 0.7~1.3 元/m³^[5]。该工程单位总成本约 1.04 元/m³,单位经营成本约 0.78 元/m³,单位污水处理电耗 0.38 kW·h/m³,除磷药剂聚合氯化铝单位药耗 47.88 mg/L,碳源乙酸钠单位药耗 2.15 mg/L。

6 结论

① 该工程突破传统地上式污水处理厂的布置模式,采用集约化布局、半地理式设计理念,实施组团化、集成化设计,主要处理单元都集中在半地理式的双层箱体中,大大提高了土地利用效率。

② 该工程将污水处理设施转移到十余米深的地下空间,在地下加盖全封闭的环境中完成污水处理,辅以先进的生物除臭系统,有效控制了臭气

排放,最大限度地减小了对周边环境和居民的影响。

③ 该工程上盖生态主题景观公园,为周边社区居民提供了休闲活动的场地,开辟了城市污水处理设施建设“上园下厂”“一体两用”的环保新模式,化“邻避”为“邻利”。

④ 采用半地埋形式,相比七格前三期地上式污水处理厂,该工程单位处理水量占地面积减少了31%左右。

⑤ 生物处理采用A+AAO工艺,具有多点进水及多点内回流功能,可实现多种模式切换,强化系统脱氮除磷性能,能适应不同水质、不同季节的工况变化。

⑥ 主要处理构筑物均在地面以下、相对封闭的空间中,应重视照明、通风、消防、防汛等安全问题;由于层高、空间受限,设备的吊装、维修作业难度大,需考虑预留检修通道、改善维护检修工作环境;箱体结构集约化程度较高,改扩建的难度大幅增加,建议在设计初期综合考虑水质、水量冲击负荷以及再生水处理和将来水质再提标等因素。

参考文献:

- [1] 张韵,冯硕,王洋,等.城市地下供排水厂现状与发展趋势探讨[J].给水排水,2023,49(3):39-46,59.
- ZHANG Yun, FENG Shuo, WANG Yang, *et al.* Present status and development tendency of underground water and wastewater treatment plants [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49 (3): 39-46, 59 (in Chinese).
- [2] 王灿,王佳易,韩梦非.地下污水处理厂的恶臭污染

特征与技术需求分析[J].给水排水,2023,49(4):44-48.

WANG Can, WANG Jiayi, HAN Mengfei. Odor pollution characteristics and technical demands of underground wastewater treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49 (4): 44-48 (in Chinese).

- [3] 刘林富.多模式A²/O+高效沉淀+V型滤池用于地下式污水厂[J].中国给水排水,2023,39(10):62-66.
- LIU Linfu. Application of multi-mode A²/O, high efficiency precipitation and V-type filter combined process in underground wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39 (10): 62-66 (in Chinese).
- [4] 楚小龙.天津市某半地下式污水处理厂工程设计案例[J].净水技术,2020,39(1):34-37.
- CHU Xiaolong. Engineering design case of a semi-underground WWTP project in Tianjin [J]. Water Purification Technology, 2020, 39 (1): 34-37 (in Chinese).
- [5] 孔韡,王亮,汪炎,等.某城镇半地下式污水处理厂工程实例[J].工业用水与废水,2021,52(6):65-69.
- KONG Wei, WANG Liang, WANG Yan, *et al.* A project example of municipal semi-underground sewage treatment plant [J]. Industrial Water & Wastewater, 2021, 52(6): 65-69 (in Chinese).

作者简介:吴锦谢(1988-),男,浙江临海人,大学本科,工程师,主要研究方向为水处理运行及技术管理。

E-mail:125639664@qq.com

收稿日期:2023-07-27

修回日期:2023-08-22

(编辑:丁彩娟)