

设计经验

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.08.010

大型地下式污水处理厂工艺设计与运行效果分析

魏海娟

(上海城投水务<集团>有限公司, 上海 200002)

摘要: 上海白龙港污水处理厂新增一座规模为 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的地下式污水处理设施,设计采用预处理+AAO+高效沉淀池+滤布滤池工艺,设计出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准。2021年的实际运行数据表明,设计工艺对进水污染物的季节性波动呈现出较好的承受能力,各项污染物指标去除率均高于设计值,出水水质稳定,均优于一级A标准。基于物质流分析对主要处理单元的污染物去除能力进行评估,结果表明,预处理和生物处理阶段对污染物的去除率均能达到设计值。

关键词: 地下式污水处理厂; AAO工艺; 物质流分析

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)08-0060-06

Design of a Large Underground Wastewater Treatment Plant and Its Operation Performance Analysis

WEI Hai-juan

(Shanghai Chengtou Water Group Co. Ltd., Shanghai 200002, China)

Abstract: A new underground wastewater treatment facility with a designed capacity of $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ was built in Bailonggang wastewater treatment plant in Shanghai. The process consists of pretreatment, AAO, high-efficiency sedimentation tank and cloth media filter, and the effluent quality is required to meet the first level A limit specified in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002). The actual operation data in 2021 showed that the process demonstrated a good ability to withstand the seasonal fluctuations of influent pollutants, the removal rate of each pollutant was higher than the design value, and the effluent quality was always better than the first level A limit specified in the discharge standard. The assessment results of pollutant removal capacity of the main treatment units based on mass flow analysis showed that the removal rates of pollutants in pretreatment and biological treatment stage all reached the design values.

Key words: underground wastewater treatment plant; AAO process; mass flow analysis

地下式污水处理厂(以下简称“地下厂”)由于具有环境友好、占地面积小、美观等优点,已成为我国城市污水处理设施建设的重要发展方向^[1]。地下厂与传统地上式污水处理厂相比,存在建设难度

大,维护管理成本高,易发生受淹、受潮等问题,因此设计与运行经验总结对地下厂的推广应用具有重要意义。

针对地下厂设计的特点及难点,对上海市某大

基金项目:上海市2021年度“科技创新行动计划”项目(21DZ1209804)

型地下厂进行了研究。为响应上海市号召,白龙港污水处理厂采用减负增容达标的方式增设 $50\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的全流程地下污水处理厂。新建地下污水处理设施采用预处理+AAO+高效沉淀池+滤布滤池工艺,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准。自 2019 年 12 月开始通水试运行以来,工程取得了良好的效果,其运行经验可为其他地下厂提供参考。

1 设计进、出水水质

新建污水处理工程于 2017 年开始建设,地下箱体顶板覆土需达 2 m,设施上部地坪标高与厂区内现状标高一致。设计进、出水水质如表 1 所示。

表 1 设计进、出水水质
Tab.1 Design influent and effluent quality
mg·L⁻¹

项目	COD	BOD ₅	SS	TN	NH ₃ -N	TP
进水	360	160	140	45	40	5
出水	≤50	≤10	≤10	≤15	≤5(8)	≤0.5

注: 括号外数值为水温>12℃时的控制指标,括号内数值为水温≤12℃时的控制指标。

2 工艺设计

2.1 工艺流程

地下厂共包含 2 座地下箱体,每座箱体内设置 2 组 4 池的生物反应池,单组处理规模为 $12.5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。地下厂的进水来自上海市南干线,旱季时进水会全部进入地下厂,雨季时进水水量增大,超量水会通过厂外泵站调度到南线或中线后进入地上生物处理系统,保证地下厂进水水量的稳定。

地下厂进水以城镇生活污水为主,掺杂有少量工业废水,其进水水质变化范围较大。具体工艺流程如图 1 所示。

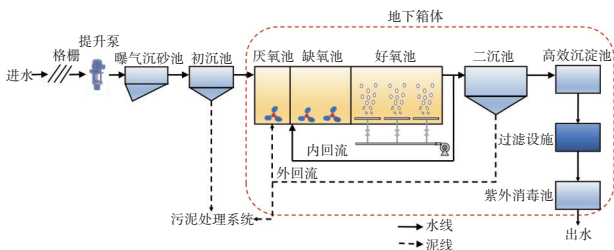


图 1 地下污水处理厂的工艺流程

Fig.1 Process flow chart of the underground wastewater treatment plant

预处理采用粗、细、超细格栅,曝气沉砂池和初沉池;二级生物处理采用传统 AAO 工艺;三级处理

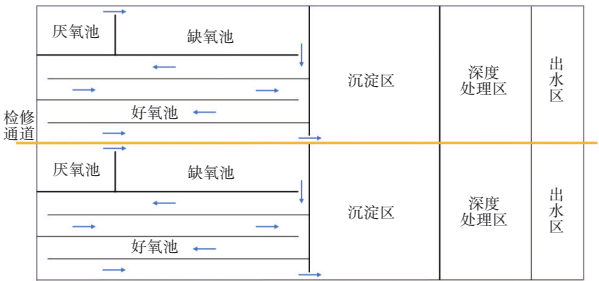
采用高效沉淀池和滤布滤池;尾水采用紫外消毒为主、次氯酸钠为辅的消毒方式;初沉污泥及剩余污泥经污泥提升泵房至污泥处理系统进行处理。

2.2 布局规划

由于地下厂的总平面规划不受风向的影响,因此在平面布置时主要考虑污水处理厂进、出水方向和用地情况。地下厂分为南北 2 座地下箱体,处理构筑物采用相同的布局(见图 2),东西走向的检修通道设置在每个处理系统中间。地下箱体的进水总管来自地上新建的初沉池,为便于进水总管的接入,将生物处理区布置在地下箱体西侧,沉淀区(二沉池)、深度处理区(中间提升泵房、高效沉淀池、过滤设施等)按处理流程顺序,由西向东布置,以便于水力衔接。为方便地下厂的出水管道与全厂区总出水管道相连,将尾水提升泵房布置在箱体东侧,缩短尾水排放箱涵长度。



a. 总平面透视图



b. 单组生物反应池的布局

图 2 地下厂透视和布局

Fig.2 Perspective view and layout of the underground wastewater treatment plant

3 主要构筑物及设计参数

3.1 格栅、曝气沉砂池、平流式初沉池

新建地上粗、细、超细格栅及曝气沉砂池 1 座(结合体),处理水量为 $50\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,平面尺寸为 $74.60\text{ m}\times 24.15\text{ m}$ 。设有 4 台粗格栅,每台格栅宽为

3 000 mm, 栅条净间距为20 mm。设有6台细格栅, 每台格栅宽为2 600 mm, 格栅间隙为6 mm, 栅前水深1.5 m, 过栅流速为0.65 m/s。设有12台超细格栅, 格栅间隙为3 mm。曝气沉砂池共2池, 有效水深为3.4 m, 峰值流量时停留时间为5 min, 曝气量为 $0.20 \text{ m}^3 \text{ 空气}/\text{m}^3 \text{ 污水}$ 。

曝气沉砂池后新建半地下式平流初沉池1座, 处理水量为 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 平面尺寸为 $174.8 \text{ m} \times 59.0 \text{ m}$ 。初沉池共1座16池, 单池处理规模约 $3.75 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 有效水深为3 m。设计峰值表面负荷为 $3.5 \sim 5.6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 水力停留时间为0.7 h。

3.2 生物反应池

新建2座地下生物反应池, 单座设置2组4池, 采用传统AAO工艺。土建及设备均按高峰流量配置, 单座平面尺寸为 $151.0 \text{ m} \times 254.0 \text{ m}$, 有效水深为6.0 m, 其中厌氧区、缺氧区、好氧区的有效容积分别为45 000、140 000、215 000 m^3 。总停留时间为16 h, 其中厌氧区、缺氧区、好氧区分别为1.8、5.6、8.6 h。系统设计泥龄为16.8 d, 产泥率为 $0.55 \text{ kgSS}/(\text{kgBOD}_5 \cdot \text{d})$, 污泥外回流比为100%, 混合液内回流比为200%。

3.3 二沉池

每座地下箱体设有二沉池2组4座, 单组处理规模为 $12.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。单座平面尺寸为 $78.0 \text{ m} \times 123.0 \text{ m}$, 有效水深为4.0 m, 设计峰值流量为 $2.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$, 设计峰值表面负荷为 $0.84 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 设计峰值停留时间为4.7 h。

3.4 高效沉淀池

每座地下箱体设置中间提升泵房及高效沉淀池4座, 单座平面尺寸为 $39.8 \text{ m} \times 30.2 \text{ m}$, 单座处理规模为 $6.25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 位于地下污水处理设施东北侧。每座中间提升房共设4台潜水轴流泵, 3用1备, 单台 $Q=1 355 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=60 \text{ kPa}$ 。每座高效沉淀池又分为2组, 每组可单独运行, 设有3个过程区, 即混合区、絮凝区和沉淀区。沉淀区有效水深为7.3 m, 水力停留时间为42 min, 设计峰值表面负荷为 $11 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

3.5 过滤、紫外消毒池及出水泵房

每座地下箱体设置过滤、紫外消毒池及出水泵房2座, 单座平面尺寸为 $60.8 \text{ m} \times 13.2 \text{ m}$, 处理规模为 $12.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 位于地下污水处理设施东侧。紫外消毒灯管剂量 $>25 \text{ mJ}/\text{cm}^2$, 设置16个模块组, 总功

率为384 kW。

3.6 配套建筑

① 鼓风机房

每座地下箱体内设置鼓风机房1座, 单座平面尺寸为 $52.2 \text{ m} \times 15.7 \text{ m}$, 位于地下污水处理设施东侧。每座鼓风机房设有6台单级高速离心鼓风机, 4用2备, 单台风量为 $270 \text{ m}^3/\text{min}$, 风压为0.075 MPa, 电机功率为450 kW。

② 储泥池

每座地下箱体内设置储泥池1座, 单座平面尺寸为 $8.8 \text{ m} \times 34.4 \text{ m}$, 共4格, 单格平面尺寸为 $8.8 \text{ m} \times 8.8 \text{ m}$, 有效水深为4.0 m, 停留时间为7.4 h, 位于地下污水处理设施东侧。

③ 加氯加药间

每座地下箱体内设置加氯加药间1座, 单座平面尺寸为 $12.60 \text{ m} \times 52.56 \text{ m}$, 位于高效沉淀池与二沉池之间。每座加药间的主要设备如下: 混凝剂储罐2套, 单套有效容积为 60 m^3 , 混凝剂投加泵2台, 单台 $Q=2 000 \text{ L}/\text{h}$, $P=1.5 \text{ kW}$; 次氯酸钠储罐2套, 有效容积分别为60和 30 m^3 , 次氯酸钠投加泵2台, 单台 $Q=1 000 \text{ L}/\text{h}$, $P=1.5 \text{ kW}$ 。

④ 除臭设施

曝气沉砂池设置除臭设施1座, 换气量为 $8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 总抽气量为 $13 840 \text{ m}^3/\text{h}$ 。初沉池段新建除臭设施1座, 换气量为 $3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 总抽气量为 $39 600 \text{ m}^3/\text{h}$ 。每座地下箱体的生物反应池设置2座除臭设施, 换气量为 $4 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 厌氧池和缺氧池总抽气量为 $131 840 \text{ m}^3/\text{h}$, 好氧池总抽气量为 $147 500 \text{ m}^3/\text{h}$ 。储泥池设置2座除臭设施, 换气量为 $10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 总抽气量为 $600 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

4 运行效果分析

4.1 总体运行效果

该地下厂于2019年12月开始通水试运行, 2021年每月实际处理水量与进、出水水质如表2所示。

地下厂进水水量除1月份外均高于设计值, 年均进水量为 $55.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 最大进水量为 $58.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 说明地下厂对高水量负荷具有良好的适应性。地下厂8月份的进水污染物浓度明显低于其他月份, 呈现出明显的季节性变化。设计工艺对进水污染物的波动呈现出较好的承受能力, 出水水质稳定, 均优于一级A标准。

表 2 2021 年每月处理水量与实际进、出水水质

Tab.2 Monthly treatment flowrate, and influent and effluent quality in 2021

月份	水量/ (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	COD/(mg·L ⁻¹)		SS/(mg·L ⁻¹)		NH ₃ -N/(mg·L ⁻¹)		TP/(mg·L ⁻¹)		TN/(mg·L ⁻¹)	
		进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水
1	48.9	324	20.84	145	5.55	27.05	0.63	4.33	0.14	29.89	9.14
2	53.7	384	19.35	175	5.29	27.69	0.49	4.47	0.11	31.41	8.74
3	56.2	355	18.14	166	5.21	25.09	0.46	4.18	0.11	28.05	8.79
4	57.4	335	21.13	165	5.29	27.34	0.43	3.82	0.11	31.06	8.95
5	57.7	340	17.03	165	5.00	28.44	0.22	4.69	0.10	31.68	8.99
6	58.1	265	17.94	131	5.10	24.97	0.20	3.56	0.12	28.55	7.83
7	57.5	282	15.60	136	5.10	24.27	0.17	3.96	0.19	27.46	8.59
8	56.2	233	16.51	110	5.06	19.58	0.17	2.92	0.18	22.59	7.37
9	56.0	291	18.90	135	5.10	20.69	0.14	3.30	0.16	23.86	7.85
10	55.6	294	17.60	136	3.83	23.12	0.19	4.06	0.17	25.97	7.91
11	56.0	306	16.23	141	3.45	25.48	0.18	3.75	0.17	28.60	8.14
12	56.6	364	16.13	165	3.27	30.62	0.25	4.61	0.13	34.13	9.85

4.2 基于物质流分析的污染物去除能力评估

物质流分析方法以物质守恒定理为基础,认为输入系统的物质的量等于输出系统的物质的量与系统内部产生废弃物的量之和。进入系统的主要元素为碳、氮、磷,随后经过预处理、生物处理、剩余污泥排放和三级处理离开系统。预处理中一部分碳、氮、磷元素会伴随初沉污泥和沙砾等大颗粒物质离开系统;生物处理中碳与氮元素主要通过活性污泥的作用生成尾气(如 CO₂、CH₄、N₂和 N₂O 等),还有一部分随剩余污泥的排放离开,同时带走大量的磷元素;三级处理中主要通过物化的方式使污染物浓度进一步降低。通过物质流分析,可对各处理单元去除污染物的质量进行计算^[2],明确各处理单元在实际运行中对污染物的去除能力。

2021 年 9 月对地下厂进行全流程水质调研分析,采样点分别设置在总进水口、曝气沉砂池末端、初沉池末端、厌氧池末端、缺氧池末端、好氧池末端、二沉池末端、高效沉淀池末端、内回流末端、外回流末端和总出水口。检测项目包括 COD、TN、TP、NH₃-N、NO₃⁻-N 和 NO₂⁻-N,检测方法均参照国家标准。

将水质分析结果与水量数据结合,开展全流程物质流计算分析(见图 3)。结果表明,进入地下厂污水处理系统的 TN 总量为 12 467 kg/d,经预处理去除了 9.4%。进入厌氧池后,进水与外回流挟带的硝酸盐在反硝化的作用下还原为氮气从污水中去除,占 TN 的 4.1%。缺氧池作为 AAO 工艺脱氮的主

要场所,硝酸盐和亚硝酸盐通过反硝化作用去除的量占进水 TN 的 61.0%。三级处理去除了 12.3% 的 TN。最终,进水 TN 中有 13.3% 未被去除,排入水环境。

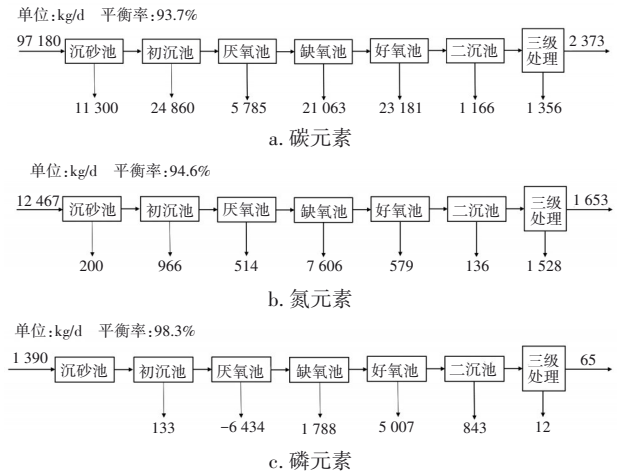


图 3 地下厂物质流分析

Fig.3 Mass flow analysis of the underground wastewater treatment plant

进入系统的 TP 总量为 1 390 kg/d,经预处理去除了 9.6%。在厌氧池中,聚磷菌厌氧释磷使 TP 增加了 6 434 kg/d,由此可知地下厂厌氧释磷的情况良好。在缺氧池中,反硝化除磷菌的存在^[3-4]去除了 1 788 kg/d 的 TP。进入好氧池后,污水中 5 007 kg/d 的磷被聚磷菌吸收。在二沉池中,由于污泥混合液中存在残留的溶解氧和硝酸盐,可通过好氧和缺氧吸磷效应进一步去除 843 kg/d 的磷。最终,生物处理阶段去除的 TP 均会随着剩余污泥的排出离开系

统。三级处理通过投加硫酸铝去除了12 kg/d的磷。最终,进水TP中有4.7%未被去除,排入水环境。

进入系统的COD总量为97 180 kg/d,经一级处理去除了37.2%,主要为颗粒态COD。反硝化作用需要消耗碳源,根据反硝化还原1 g NO_3^- -N需要消耗2.86 g COD进行换算^[5],则通过反硝化作用在厌氧池和缺氧池共去除了23.1%的COD。聚磷菌在厌氧池进行厌氧释磷时,会将原水中包含的以及微生物水解酸化形成的易挥发性有机酸吸收,与磷酸盐形成聚羟基脂肪酸酯^[6],为后续好氧池中的好氧吸磷提供动力,由此去除了4.5%的COD。好氧池主要通过好氧菌呼吸作用直接氧化以及微生物生长增殖去除23.9%的COD,其中有2.3%的COD会随剩余污泥排出。在二沉池中通过污泥的吸附作用去除了1.2%的COD。三级处理对COD的去除率为1.4%。最终,进水COD中有2.4%未被去除,随出水排入水环境。

实际运行过程中污染物的去除率与设计值对比见表3。其中,预处理阶段对COD、TN和TP的去除率分别为37.2%、9.4%和9.6%,COD实际去除率远高于设计值,TN和TP的去除率基本达到设计值;生物处理阶段对COD、TN和TP的去除率分别为52.7%、70.9%和86.6%,均超过设计值。从碳源角度而言,预处理阶段过高的COD去除率实际上会影响生物脱氮除磷效率,但该工程通过溶解氧和回流比调控可确保高效脱氮除磷。三级处理对COD、TN和TP的去除率分别为1.4%、12.3%和0.9%,均低于设计值。这主要是由于生物池的污染物去除效果较好,导致三级处理进水中的污染物浓度较低。

表3 污染物实际去除率与设计值的比较

Tab.3 Comparison of actual pollutant removal rates with design values %

项目		COD	TN	TP
预处理阶段	设计去除率	20	10	10
	实际去除率	37.2	9.4	9.6
生物处理阶段	设计去除率	50	70	70
	实际去除率	52.7	70.9	86.6
三级处理阶段	设计去除率	10	15	10
	实际去除率	1.4	12.3	0.9

5 工艺设计特点

① 空间布局充分利用地形,降低能耗与投资。在平面和高程布置时遵循竖向布置的原则^[7-8],

将地下箱体设置为2层,负一层为操作层,以辅助公用建筑为主,承担整个污水处理设施的正常巡视和设备检修;负二层为污水处理构筑物,对除高效沉淀池外的水池进行全加盖密封处理。采用无风管通风技术,大大缩小了风道面积,可减少0.4~0.6 m的建筑层高。

② 进水设置速闭闸,出水端设置闸阀和止回阀,避免事故发生。为防止地下污水厂突然停电时进水水位上升至地下箱体内操作平台,造成地下箱体被淹,进水设置速闭闸,断电时可快速闭闸断水,避免事故发生。为防止出口泵站集水井高水位倒灌淹没污水处理厂,尾水经泵加压提升后排放,排放管出水端设置闸阀和止回阀。

③ 组合式除臭工艺设计,营造良好的生产环境。本工程除臭执行上海市《城镇污水处理厂大气污染物排放标准》(DB 31/982—2016),在各新增臭源构筑物上建立相应的加盖密闭系统,盖板采用轻型骨架覆面材料。结合各臭气源的源强数据,地下厂采用组合式除臭工艺,如表4所示。

表4 各处理单元除臭工艺的选择

Tab.4 Selection of deodorization process for each unit

处理单元	臭气特点	除臭工艺
曝气沉砂池	厌氧状态, H_2S 浓度较高 ^[9]	药剂洗涤+生物滤池+物化法
初沉池		药剂洗涤+物化法
厌氧池和缺氧池	臭气浓度较低	两级生物滤池
好氧池	臭气浓度更低,除臭风量较大	土壤滤池
储泥池	厌氧状态, H_2S 浓度较高	化学洗涤+生物滤池+物化法

6 地下厂设计与运行注意事项

地下污水处理厂四周环境密闭,形成了具有建筑属性的三维空间,给其设计与运行带来了较大的难度。因此,针对地下厂的特点,在设计和运行中需要注意以下方面:

① 通风系统设计。由于处于封闭空间,地下厂需通过机械通风系统保证空气质量,有毒有害气体产量大的设施换气次数应不小于12次/h,生物反应池等换气次数应不小于6次/h。

② 倒灌与渗漏防护。由于地下厂容易出现雨水倒灌和渗漏现象^[7],故地下箱体内及周边的排水设施和排水管道应配备齐全,并定期检查是否堵

塞。为减少顶层渗水概率,设计采取完全缝、引发缝和后浇带混合使用,并在混凝土中掺加抗裂纤维的综合措施。

③ 腐蚀与防护。由于雨水渗入以及污水处理过程中产生的臭气会使管道的腐蚀现象加剧,因此,管道及建筑材料应选用耐腐蚀的新型材料,必要时可喷刷防腐涂料。同时,可以利用建筑外墙设计配水渠道,减少埋地管道的数量。

7 结语

上海白龙港污水处理厂新建的污水处理设施处于地下全封闭状态,对周边环境影响较小,可节约土地资源,适合应用于土地资源高度紧张、对环境要求高的地区。该设施采用预处理+AAO+高效沉淀池+滤布滤池工艺,2021年的实际运行数据表明,进水水质季节性变化较为明显,设计工艺对进水污染物的波动呈现出较好的承受能力,各项污染物指标去除率均高于设计值,出水水质稳定,均优于一级A标准。基于物质流分析对主要处理单元污染物去除能力的评估表明,预处理和生物处理阶段对污染物的去除率均能达到设计值。

参考文献:

- [1] 董磊,张欣,杨一烽.《城镇地下式污水处理厂技术规程》要点简析[J]. 中国给水排水, 2022, 20(6): 1-10.
- DONG Lei, ZHANG Xin, YANG Yifeng. Synopsis of key point for *Technical Specification for Urban Underground Wastewater Treatment Plant* [J]. China Water & Wastewater, 2022, 20(6): 1-10 (in Chinese).
- [2] LI J W, PENG Y Z, ZHANG L, et al. Quantify the contribution of anammox for enhanced nitrogen removal through metagenomic analysis and mass balance in an anoxic moving bed biofilm reactor[J]. Water Research, 2019, 160(1): 178-187.
- [3] 彭轶,彭永臻,吴昌永. A²/O 工艺中的反硝化除磷[J]. 环境工程学报, 2008, 2(6): 752-756.
- PENG Yi, PENG Yongzhen, WU Changyong. Denitrifying phosphorus removal in A²/O process [J]. Chinese Journal of Environment Engineering, 2008, 2(6): 752-756(in Chinese).
- [4] WANG K, ZHOU C, ZHOU H, et al. Comparison on biological nutrient removal and microbial community between full-scale anaerobic/anoxic/aerobic process and its upgrading processes [J]. Bioresource Technology, 2023, 374: 128757.
- [5] 许洲. 特大型污水处理厂沿程氮分布规律研究[J]. 中国给水排水, 2015, 31(21): 77-80.
- XU Zhou. Study on regularity of nitrogen distribution along treatment process in a super-sized wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(21): 77-80(in Chinese).
- [6] 韩芸,许松,董涛,等. 碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(2): 590-596.
- HAN Yun, XU Song, DONG Tao, et al. Effects of carbon sources, temperature and electron acceptors on biological phosphorus removal [J]. Environmental Science, 2015, 36(2): 590-596(in Chinese).
- [7] SHIN E, KIM H J, RHEE D S, et al. Spatiotemporal flood risk assessment of underground space considering flood intensity and escape route [J]. Natural Hazards, 2021, 109(2): 1539-1555.
- [8] 李鲁新. 全地下式市政污水处理厂设计和应用分析[J]. 工程技术研究, 2021, 24(6): 161-163,167.
- LI Luxin. Design and application analysis of fully underground municipal wastewater treatment plants [J]. Engineering and Technnlogical Research, 2021, 24(6): 161-163,167(in Chinese).
- [9] 于方田,宁靓,张东生. 城市污水处理厂含硫恶臭气体的产生与治理[J]. 中国给水排水, 2012, 28(8): 87-90.
- YU Fangtian, NING Liang, ZHANG Dongsheng. Generation and control of malodorous sulfur gases at wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(8): 87-90(in Chinese).

作者简介:魏海娟(1979—),女,陕西宝鸡人,博士,高级工程师,主要研究方向为污水污泥处理及资源化利用。

E-mail:weihj@shwwt.com

收稿日期:2023-09-25

修回日期:2023-12-17

(编辑:沈靖怡)