

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.16.011

AAO+MBR工艺在高标准污水厂节地设计中的应用

韩佩君, 余 军, 胡新立, 张晓维, 胡 亮
(中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘 要: 茂名市某污水处理厂进水以城镇生活污水为主,设计规模为 $4.5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,出水水质执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的准Ⅳ类标准(TN除外), BOD_5 、SS及 NH_4^+-N 设计去除率均高达95%左右,用地指标为 $0.35\text{ m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$,仅为相关规范建议值的1/3。为了满足出水水质要求和用地限制,主体工艺采用AAO+MBR,相比混凝沉淀深度处理工艺节地效果明显;生化池设计污泥负荷为 $0.065\text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS}\cdot\text{d})$,好氧池设计污泥浓度为 $9\,000\text{ mg/L}$,设计气水比为4.9:1;采用三级污泥回流,设计回流比分别为300%、200%、100%;MBR采用浸没式中空纤维膜,双层膜架,在线清洗,设计膜通量为 $18.8\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$;吨水工程费用为2 250元/ m^3 ,其中设备购置费占40%。投入运行后,应对碳源不足时在缺氧池投加葡萄糖,当生物除磷效果不佳时在好氧池末端投加聚合氯化铝,实际出水水质可稳定达标。

关键词: 污水处理厂; 准Ⅳ类标准; 节地; AAO工艺; 膜生物反应器

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)16-0065-06

Utilization of AAO+MBR Process for Land Saving Design of a Wastewater Treatment Plant with High Discharge Standard

HAN Pei-jun, YU Jun, HU Xin-li, ZHANG Xiao-wei, HU Liang
(Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd.,
Wuhan 430010, China)

Abstract: The influent of a wastewater treatment plant in Maoming mainly consists of urban domestic sewage, with a design capacity of $4.5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$. The effluent quality is required to meet the quasi-class IV limit specified in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838—2002) (except TN), and achieves a remarkable 95% removal rates for BOD_5 , suspended solids (SS) and ammonia nitrogen (NH_4^+-N). The land use index is $0.35\text{ m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$, which is only 1/3 of the recommended value in the relevant code. To comply with the effluent quality requirements and land use restrictions, the main process employed AAO+MBR, which demonstrated a significant reduction in land usage compared to the coagulation and precipitation advanced treatment process. The design sludge load for the biochemical tank was $0.065\text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS}\cdot\text{d})$, the design sludge concentration for the aerobic tank was $9\,000\text{ mg/L}$, and the design gas-water ratio was 4.9:1. The three-stage sludge reflux system was utilized, with design reflux ratios of 300%, 200%, and 100% for each stage respectively. The membrane in MBR featured an immersed hollow fiber structure, a double-layer membrane frame, online cleaning, and a designed membrane flux of $18.8\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$. The project cost was 2 250 yuan/ m^3 , with equipment purchase cost accounting for 40%. After commissioning, glucose was added to the anoxic tank in case of insufficient carbon source, and polyaluminum chloride was dosed at the end of the aerobic tank if the biological

phosphorus removal performance was unsatisfactory, ensuring stable effluent quality that met the discharge standard.

Key words: wastewater treatment plant; quasi-class IV standard; land saving; AAO process; MBR

污水处理厂是重要的城镇基础设施,对减少污染物排放、保护城镇水环境发挥着重要作用。然而随着城镇人口的不断聚集,城镇规模逐渐扩大,城镇土地特别是核心区域的土地资源日益稀缺,对城镇污水处理厂的集约化布置要求日益凸显。地下式污水处理厂具有占地面积小、环境友好的优势,适用于节地设计,但是由于地下空间设计施工难度较大,导致其工程投资较地上式污水处理厂增加1/3~1/2以上,而且运维成本亦会上涨^[1]。因此,对于投资有限、用地受限的污水处理厂而言,还需要立足地上式污水处理厂自身的节地设计,以满足用地、投资和达标的要求。

1 污水处理厂概况

茂名市某污水处理厂的进水以城镇生活污水为主,一期工程规模为 $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (分两阶段安装,每阶段规模为 $2.25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$),主要包括预处理系统、二级处理及深度处理系统、污泥处理系统及辅助生产设施等,服务人口近10万人。设计进水水质参考周边地区如茂名市电白区、化州市及湛江市等已建污水处理厂的设计或实际进水水质;出水水质需要达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的准IV类水质标准(TN指标除外),具体如表1所示。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

项目	COD	BOD ₅	SS	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP
设计进水/(mg·L ⁻¹)	≤260	≤130	≤150	≤25	≤35	≤3.5
设计出水/(mg·L ⁻¹)	≤30	≤6	≤5	≤1.5	≤15	≤0.3
设计去除率/%	88.46	95.38	96.67	94.00	57.14	91.43

2 总体方案

2.1 工艺路线

污水厂的处理规模、进出水水质、用地限制等都会影响工艺选择。因该工程设计进水可生化性较好,故采用生物处理工艺;BOD₅:TN:TP并非

100:5:1,故需强化脱氮除磷^[2]。从污染物去除率来看,BOD₅、SS及NH₄⁺-N的设计去除率均在95%左右,去除要求很高;TP和COD的设计去除率均在90%左右,要求也较高;对TN的去除要求最低,为57%。从污染物排放限值来看,出水BOD₅、NH₄⁺-N和SS需分别降至6、1.5、5 mg/L以下,相对严苛。常规二级处理出水BOD₅、SS、NH₄⁺-N及TP指标难以达到GB 3838—2002的准IV类水质标准,需要在二沉池的基础上增设高效沉淀池、曝气生物滤池(BAF)等深度处理单元。

该工程一、二期规模合计 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,用地面积仅为 3.5 hm^2 ,用地指标为 $0.35 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$,远低于《城市排水工程规划规范》(GB 50318—2017)中的 $1.0 \sim 1.2 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ 和《城市污水处理工程项目建设标准》(建标 198—2022)中的 $0.8 \sim 1.0 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ 。絮凝沉淀和过滤原理的深度处理工艺占地面积较大,而膜生物反应器(MBR)和BAF工艺可以很好地节约用地,其中BAF由于运行管理等方面的原因,应用相对较少^[3]。MBR是一种将膜分离技术与传统生物处理工艺有机结合的新型高效污水处理工艺,具有较高的污泥浓度和较优的出水水质,可以减少生化池容积,节省用地,适用于用地紧张、出水标准严格的污水处理厂。在传统AAO工艺基础上用MBR替代二沉池及后续深度处理工艺,可以利用MBR较高的污泥浓度缩短水力停留时间(HRT),从而减少生化池占地,因此,传统AAO及其改良型工艺耦合MBR成为新建及改扩建污水处理厂广泛采用的新型工艺形式^[4]。综合上述分析,该工程主体处理工艺确定采用AAO+MBR。

2.2 工艺流程

工艺流程如图1所示。在预处理单元,粗、细格栅及曝气沉砂池主要用于去除进水中的悬(漂)浮物及砂砾,减轻后续生物处理负荷,避免设备磨损、管道淤积;膜格栅主要用于去除细小纤维,避免其进入MBR膜池后在膜表面聚集板结,使膜通量降低;二级处理采用AAO生化池;深度处理采用MBR

膜池及紫外消毒渠;污泥处理采用重力浓缩及机械脱水工艺。

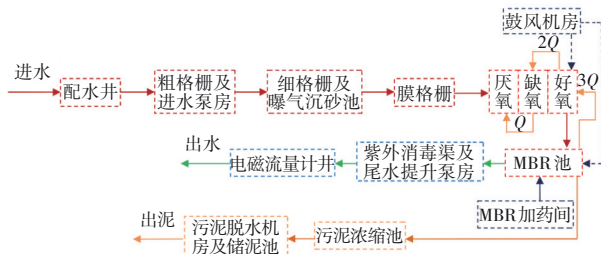


图1 工艺流程

Fig.1 Flow chart of treatment process

2.3 其他节地设计

除采用AAO+MBR耦合工艺以节省用地外,该工程还采用了其他节地设计措施:粗格栅与进水泵房合建,采用矩形湿式泵房;取消两座生化池之间的间距做共壁处理;MBR中膜的维护性清洗和恢复性清洗均采用在线清洗,不另设清洗池;尾水采用紫外消毒渠处理;鼓风机采用最节省空间的空气悬浮离心风机;厂区主干道宽度设为4 m,在满足防火间距和管道敷设的前提下尽可能减小构筑物间距;同时尽可能减小构筑物周边空地宽度,宜保持在3~5 m之间^[3]。

厂区平面布置如图2所示。

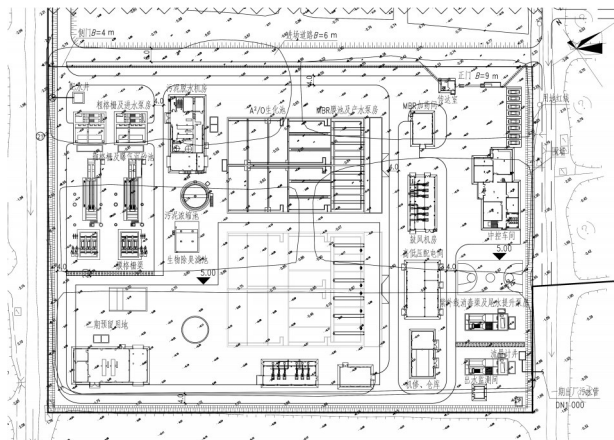


图2 厂区平面布置

Fig.2 Layout plan of sewage treatment plant area

3 工程设计

3.1 预处理系统

① 粗格栅及进水泵房

粗格栅与进水泵房合建,平面尺寸为14.6 m×14.6 m,深度为13.4 m。设置钢丝绳牵引式格栅除污机2套(栅条间隙为20 mm),每套格栅前后设置

铸铁镶铜闸门2套。一阶段设置潜污泵3台,2大1小;二阶段设置潜污泵2台,1大1小。

② 细格栅及曝气沉砂池

细格栅渠平面尺寸为8.70 m×3.40 m,高度为3.0 m;设置网板式阶梯格栅除污机2套(栅条间隙为6 mm),格栅前设置插板闸门2套;设置螺旋输送压榨一体机1套。曝气沉砂池平面尺寸为18.5 m×5.2 m,高度为4.05 m;设置电动镶铜铸铁闸门3台、桥式刮砂机(气提砂)1台、砂水分离器1台、罗茨鼓风机2台(1用1备)。

③ 膜格栅

膜格栅渠平面尺寸为10.9 m×7.70 m,高度为2.90 m。采用3台内进流网板格栅除污机(2用1备,栅条间隙为1 mm),配套中压及高压冲洗泵,格栅前后均设置渠道闸。

3.2 二级及深度处理系统

① AAO生化池

AAO生化池1座2组,设计水温为15℃,污泥龄为15 d;厌氧池、缺氧池和好氧池的设计污泥浓度分别为3 000、6 000、9 000 mg/L,生化池设计污泥负荷为0.065 kgBOD₅/(kgMLSS·d),设计容积负荷为0.47 kgBOD₅/(m³·d);设计硝化菌比生长速率为0.282 d⁻¹,硝化负荷为0.027 kgNH₃-N/(kgMLSS·d);设计脱氮速率为0.027 kgNO₃⁻-N/(kgMLSS·d)^[5],表观反硝化负荷为0.037 kgNO₃⁻-N/(kgMLSS·d)。设计水深为6 m,厌氧池、缺氧池及好氧池的设计HRT分别为1.02、2.18、2.2 h;好氧池的设计气水比为4.9:1。

MBR池较高的曝气强度不利于脱氮和释磷,不宜直接回流至缺氧池和厌氧池,故采用三级回流形式逐步降低溶解氧浓度,MBR至好氧池、好氧池至缺氧池、缺氧池至厌氧池的污泥回流比分别设为300%、200%、100%,污泥回流泵均为2台(1用1备)。此外,在保证硝化效果的同时,控制好氧池末端的溶解氧为1.5~2.5 mg/L,以便维持缺氧池的缺氧环境进行有效脱氮。每组生化池的厌氧区设置潜水搅拌机2台,缺氧区设置水下推流器4台,好氧区设置管式微孔曝气器360套[充氧能力为0.9~1.5 kgO₂/(套·h)]。

② MBR池及产水泵房

MBR池1座2组,每组3格,平面尺寸为37.6 m×11.2 m,设计水深为4.5 m,有效容积约为1 500 m³,

设计污泥浓度为12 000 mg/L。MBR池的HRT为0.8 h,加上前面好氧池的HRT(2.2 h),好氧总停留时间共计3.0 h。膜组件共60套,采用浸没式中空纤维膜,材质为聚偏氟乙烯(PVDF),膜孔径 $<0.1\ \mu\text{m}$,设计膜通量为 $18.8\ \text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,采用“产9停1”的运行模式(即产水9 min、停歇1 min),设计产水量为 $25\sim 45\ \text{m}^3/\text{h}$ 。采用双层膜架,脉冲风量为 $3.25\ \text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{片膜})$;膜采用在线清洗。膜池出水设置电动堰门以便控制水位。

MBR产水泵房1座,平面尺寸为 $41.5\ \text{m}\times 7.6\ \text{m}$,设置产水泵6台、反洗泵2台、膜池排空泵2台、剩余污泥泵2台、排污泵2台(以上泵均含1台备用)。

③ MBR加药间

为延缓膜污染速度,有效恢复膜通量,MBR膜池设计了多种清洗模式,包括维护性清洗和恢复性清洗药剂的投加^[6]。维护性清洗主要采用NaClO溶液,有效氯浓度为 $100\sim 200\ \text{mg/L}$,清洗用量为 $0.2\sim 1.5\ \text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{次})$,清洗频率为1~2次/周;恢复性清洗每3~6个月进行1次,根据污染情况组合使用NaClO溶液、碱液及柠檬酸,其中NaClO溶液浓度一般采用 $1\ 000\ \text{mg/L}$ 。设置 $10\ \text{m}^3$ 的NaClO储罐1座、维护性清洗NaClO加药泵2台(1用1备)、恢复性清洗NaClO加药泵2台, $10\ \text{m}^3$ 的酸液(柠檬酸可应对无机膜污染^[7])储罐1座、恢复性清洗酸加药泵2台, $10\ \text{m}^3$ 的碱液储罐1座、恢复性清洗碱加药泵2台,NaClO(碱)卸药泵2台、酸卸药泵2台(恢复性清洗泵、卸药泵均为1用1冷备)。

④ 紫外消毒渠及尾水提升泵房

紫外消毒渠1座2格,平面尺寸为 $18.7\ \text{m}\times 7.35\ \text{m}$;设计水温为 $15\sim 30\ ^\circ\text{C}$,要求进水SS为 $10\ \text{mg/L}$ (浊度为5 NTU)以下,出水粪大肠菌群控制目标为 $1\ 000$ 个/L以下;设计光波最低穿透率为65%。紫外消毒装置1套,共计16个模块,每个模块有5支灯管,共80支,单支灯管的功率为360 W,总配电为30 kW。

⑤ 生物除臭滤池

臭气浓度较大的场所主要是污水预处理单元(粗格栅及进水泵房、细格栅及曝气沉砂池、膜格栅)和污泥处理单元(包括污泥浓缩池、储泥池、污泥脱水机房),鉴于生化池及紫外消毒渠的臭气浓度较低,设计中仅考虑预处理及污泥处理单元的

除臭。

生物除臭滤池的处理风量为 $14\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$,表面负荷取 $200\ \text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ^[8]。其中,预洗池的尺寸为 $9.4\ \text{m}\times 1.5\ \text{m}\times 2.0\ \text{m}$,塑料填料厚度为0.5 m;生物滤池的尺寸为 $9.4\ \text{m}\times 8.0\ \text{m}\times 2.0\ \text{m}$,生物填料厚度为1.0 m,空塔停留时间为19.3 s;设置一座15 m的高空排放设施。

3.3 污泥处理系统

设计剩余污泥产量为 $5.14\ \text{t/d}$ (以干污泥计),初始含水率设计值取99.2%。储泥池1座2格,单格平面尺寸为 $3.0\ \text{m}\times 3.0\ \text{m}$,水深为3 m,每格设置一台7.5 kW的框架式搅拌机,储存高浓度污泥的同时兼作调理池。厢式隔膜压滤机2台,单机过滤面积为 $200\ \text{m}^2$,设计进泥含水率 $\leq 98\%$,出泥含水率 $\leq 60\%$,每天运行16 h。污泥调理剂采用聚丙烯酰胺(PAM),设计投加量为 $3\sim 3.5\ \text{kg/t}$ (以干污泥计)。

3.4 工程投资

一期总投资为13 486.03万元,工程静态投资为13 149.03万元,其中工程费用(含建筑工程费、设备购置费、安装工程费)为10 115.09万元,工程建设其他费用为2 463.80万元,预备费用为570.14万元;建设期利息为221.00万元,流动资金为116.00万元。吨水工程费用为2 250元/ m^3 ,其中设备购置费占比为40%。

4 实际运行效果

4.1 年度监测数据

根据2022年月报表在线监测数据,对全年实际进、出水水质数据进行整理统计,结果如表2所示。实际进水 BOD_5/COD 在 $0.36\sim 0.86$ 之间,平均为0.59。另外,根据运营方的反馈,TN在线监测仪表偶尔存在误差,与手动检测数值差别较大。

表2 2022年实际进、出水水质

Tab.2 Actual influent and effluent quality in 2022

项目		COD	NH_4^+-N	TN	TP
进水/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	最高	265.97	31.2	70.2	9.9
	平均	61.6	15.5	24.5	1.8
出水/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	最高	13.6	0.43	13.15	0.09
	平均	4.7	0.06	7.1	0.05
去除率/%	最高	99.1	99.9	98.2	99.9
	平均	86.5	99.2	63.4	94.5

4.2 实际运行分析

2022年运行负荷率尚未达到一阶段(2.25×10^4

m³/d)的60%,当地应加大污水管网的建设和管理力度^[9],扩大收水范围,确保污水设施充分发挥投资效益和运行效益。剩余污泥产量为0.70 t/10⁴ m³(以干污泥计),低于市政污水处理厂的常规值[剩余污泥(含水率以97%计)产量约占污水处理量的0.3%~0.5%]^[2],这与进水COD浓度常年较低有关。

按照90%和95%的保证率计算得到对应的进水COD分别为98、118 mg/L, NH₄⁺-N分别为26.3、27.5 mg/L, TN分别为49、56 mg/L, TP分别为3.2、3.5 mg/L。从全年数据总体来看,进水NH₄⁺-N/TN值为0.7左右,符合以生活污水为主的城镇污水特点,考虑到TN仪表的误差,采用进水NH₄⁺-N浓度统计值和NH₄⁺-N/TN值反推得到的进水TN统计值分别为37.6和39.3 mg/L。相对于设计进水水质,90%保证率对应的实际进水TP浓度合适, TN和NH₄⁺-N浓度略高,而有机物浓度偏低,不足设计进水浓度的50%,这可能与当地雨污混接、地下水位偏高等有关,下一步应加快推进雨污分流工作,开展污水管网修复工作。

进水BOD₅/COD为0.35以上,可生化性较好; BOD₅/TP平均值为20,生物除磷可取得较好的效果,但实际运行中仍然在好氧池末端(膜池进水前)投加了一定量的聚合氯化铝(PAC),通过协同沉淀进行化学除磷。PAC的投加可能对缓解膜污染有一定作用^[10],对MBR膜污染速度的影响仍需长期观察。BOD₅/TN平均值仅为1.5,需要外加碳源来强化生物脱氮,实际运行中在缺氧池投加葡萄糖碳源。当进水有机物浓度过低时,也会投加少量葡萄糖来提高进水BOD₅浓度,以维持生物池的污泥活性。将葡萄糖固体粉末溶解为25 g/L溶液后通过加药计量泵投加,年均投加量为52.75 mg/L。

从处理效果来看,出水COD、TN、NH₄⁺-N、TP等指标均可达标,相应的平均去除率也基本达到甚至超过了设计去除率。MBR工艺通过超滤膜分离技术,将污泥停留时间与水力停留时间分离,极大增加了反应区的污泥浓度,特别是截留了世代时间长、不易形成菌胶团的硝化菌,具有较强的污染物去除能力和抗冲击负荷能力。

4.3 运营成本

运营成本包括工资福利、药剂消耗、动力消耗、污泥处置费、维修费及其他管理费,具体见表3。MBR中的膜装置定期(按5年计)更换费用折算成吨

水费用为0.15元/m³。

表3 运营成本分析

Tab.3 Analysis of operation cost

项目	设计值	实际值
工资福利/(元·m ⁻³)	0.073	
药剂消耗	PAM:3 kg/t干泥	PAM:1.6 kg/t干泥
	调理剂:20 kg/t干泥	
	除磷药剂PAC:20 mg/L	PAC:24.5 mg/L
	次氯酸钠(10%):4 mg/L	次氯酸钠(10%):6 mg/L
	柠檬酸(50%):1 mg/L	葡萄糖(外加碳源):52.75 mg/L
动力消耗/(kW·h·m ⁻³)	0.48	0.83
污泥处置费/(元·t ⁻¹)	270	60
维修费/(元·m ⁻³)	0.18	
其他管理费/(元·m ⁻³)	0.029	
注: 由于实际处理水量偏低,故动力消耗实际值偏高;实际污泥处置费仅含运输费,未包含最终处置费用,且以湿污泥计。		

5 结论

① 对于城镇生活污水,经常规二级工艺处理后,出水水质难以达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的准Ⅳ类标准要求(TN除外),而采用混凝沉淀、过滤等作为深度处理工艺时基建费用高、占地大,无法满足日益严格的节地要求。因此,对于用地紧张、出水水质要求高的污水处理厂,可采用MBR作为固液分离及深度处理工艺。

② 采用MBR工艺时,相对于常规二级处理工艺,预处理阶段需在沉砂池后增设膜格栅以保护膜丝;对于脱氮除磷工艺,MBR池通常耦合在AAO工艺好氧池之后,出水经消毒后即可排放。

③ 采用AAO+MBR工艺时,为应对进水碳源不足情况,可在缺氧池投加碳源;在生物除磷效果不佳情况下,可在好氧池末端(膜池进水前)投加聚合氯化铝。MBR中膜的维护性清洗采用NaClO溶液,恢复性清洗根据污染情况可采用NaClO溶液、碱液及柠檬酸的组合。

④ 该项目的吨水工程费用为2 250元/m³,低于广东省常规脱氮除磷工艺(含深度处理)的3 000元/m³,其中设备购置费占比为40%,高于常规脱氮除磷工艺(含深度处理)。

⑤ 采用AAO+MBR作为主体工艺,可保证满足厂区用地指标0.35 m²/(m³·d⁻¹)的要求,远低于

《城市排水工程规划规范》(GB 50318—2017)中的 $1.0\sim 1.2\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$ 和《城市污水处理工程项目建设标准》(建标 198—2022)中的 $0.8\sim 1.0\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$,节地效果明显。

参考文献:

- [1] 邱维. 地下污水处理厂的适应性探讨[J]. 中国给水排水, 2017, 33(8): 26-31.
QIU Wei. Adaptability of underground wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(8): 26-31 (in Chinese).
- [2] 张自杰. 排水工程(下册)[M]. 5版. 北京:中国建筑工业出版社, 2015.
ZHANG Zijie. Drainage Engineering (Volume II) [M]. 5th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015 (in Chinese).
- [3] 陈燕波, 万年红. 城镇污水处理厂设计常用的节地措施[J]. 水工业市场, 2011(2): 53-55.
CHEN Yanbo, WAN Nianhong. Common land saving measures in urban sewage treatment plant design [J]. Water-Industry Market, 2011(2): 53-55 (in Chinese).
- [4] 鲍任兵, 马民, 徐健, 等. AAO及改良型工艺耦合MBR工艺应用研究综述[J]. 净水技术, 2022, 41(3): 26-31, 62.
BAO Renbing, MA Min, XU Jian, *et al.* Technological research overview on AAO and modified process coupled with MBR [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(3): 26-31, 62 (in Chinese).
- [5] 住房和城乡建设部. 室外排水设计标准: GB 50014—2021 [S]. 北京:中国计划出版社, 2021.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Standard for Design of Outdoor Wastewater Engineering: GB 50014—2021 [S]. Beijing: China Planning Press, 2021 (in Chinese).
- [6] 胡松, 阜崴, 姜若茜, 等. 地下式污水处理厂MBR膜污染分析及应对策略[J]. 给水排水, 2021, 47(5): 45-51.
HU Song, FU Wei, JIANG Ruohan, *et al.* Analysis and countermeasures of MBR membrane pollution in underground wastewater treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47 (5): 45-51 (in Chinese).
- [7] 林静芳, 张新颖, 张莉敏, 等. MBR工程长期运行中的膜清洗效果和膜性能变化[J]. 中国给水排水, 2022, 38(3): 67-73.
LIN Jingfang, ZHANG Xinying, ZHANG Limin, *et al.* Membrane cleaning effect and membrane performance change in MBR projects during long term operation [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38 (3): 67-73 (in Chinese).
- [8] 住房和城乡建设部. 城镇污水处理厂臭气处理技术规程: CJJ/T 243—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Technical Specification for Odor Control of Municipal Wastewater Treatment Plant: CJJ/T 243—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016 (in Chinese).
- [9] 李鑫, 胡媛, 苏时鹏. 中国城镇污水处理设施运营负荷率影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(2): 70-74.
LI Xin, HU Yuan, SU Shipeng. Analysis on the factors influencing the operating rate of urban sewage treatment facilities in China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(2): 70-74 (in Chinese).
- [10] 邱海明, 王巧英. 投加聚氯化铝对A/O-MBR运行性能的影响[J]. 给水排水, 2014, 40(S1): 206-210.
QIU Haiming, WANG Qiaoying. Effects of the addition of polymeric aluminium on the performance of A/O-MBR [J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40(S1): 206-210 (in Chinese).

作者简介:韩佩君(1992—),男,河南信阳人,硕士,工程师,主要从事市政给排水工程设计工作。

E-mail: 1556267763@qq.com

收稿日期:2023-03-26

修回日期:2023-06-08

(编辑:刘贵春)