

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.04.013

大型地埋式污水处理厂减污降碳和韧性提升设计

周友飞, 邹伟国, 生骏, 胡维杰, 汉京超, 曹绎名
(上海市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

摘要: 以大型地埋式污水处理厂——太仓市城东水质净化厂工程为依托,开展减污降碳和韧性提升方案研究及实践。在箱体布置方面,通过协同设计和人性化设计考量,实现规整集约、分区合理的布局体系;针对MBR工艺的高能耗问题,创新应用国内最大规模的振动MBR工艺,同步提升出水水质并降低运行能耗;设置综合调蓄设施,助力污水处理系统韧性提升;同时通过精细化除臭设计,实现预处理区除臭和生物反应池曝气协同。以上措施方案作为标准高、能耗低、韧性好的地埋式污水处理厂关键技术,可以为同类项目提供参考。

关键词: 地埋式污水处理厂; 减污降碳; 韧性提升; 振动MBR工艺

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)04-0078-06

Design of Pollution Reduction, Carbon Reduction and Resilience Improvement for Large-scale Underground Wastewater Treatment Plant

ZHOU You-fei, ZOU Wei-guo, SHENG Jun, HU Wei-jie, HAN Jing-chao,
CAO Yi-ming

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: This paper introduced the practice of pollution reduction, carbon reduction and resilience improvement in the project of Chengdong water purification plant, a large-scale underground wastewater treatment plant in Taicang. The regular/intensive and rational partition layout of the tank was achieved through collaborative design and humanized design concept. The largest vibration MBR process in China was innovatively constructed to simultaneously upgrade the effluent quality and reduce the operation energy consumption, so as to solve the problem of high energy consumption of MBR process. The resilience of the wastewater treatment system was improved by setting up comprehensive regulating and storing facilities. In addition, the coordination between deodorization in pretreatment area and aeration in bio-reaction tank was realized through the refined deodorization design. The above measures as the key technologies of the underground wastewater treatment plant with high discharge standard, low energy consumption and good resilience, could provide reference for similar projects.

Key words: underground wastewater treatment plant; pollution and carbon reduction; resilience improvement; vibration MBR process

极端气候和能源过度消耗是当今人类面临的两大共性难题,城市的建设和扩张通常伴随着对各

类资源需求的增加,市政污水处理基础设施作为支撑城市建设的重要组成部分,需要结合城市空间布

基金项目:住房和城乡建设部国际合作课题(H20220011);上海市科委国际合作课题(21230731100)

局,从提升韧性和节能降耗上下功夫^[1]。韧性好和低碳的污水系统旨在构建高质量、高标准的污水收集及处理系统,使其响应乃至超前于城市规划建设,提升污水系统的综合服务及应急能力,同时降低整体能耗,助力碳达峰,推进碳中和^[2-3]。

以太仓市城东水质净化厂项目为依托,开展大型地理式污水厂减污降碳及韧性提升方案研究,旨在开发标准高、能耗低、韧性好的地理式污水处理厂关键技术,为同类项目提供参考,同时为韧性城市建设及减污降碳贡献力量。

1 项目概况

太仓市城东水质净化厂建设规模为 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,采用半地下式建设形式,出水水质执行《太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要水污染物排放限值》(DB 32/1072—2018)(其他区域)和苏州市特别排放限值(准IV类)要求。项目目前正在建设中,总投资近13亿元。

工程建设秉持“高标准、高颜值、高内涵”的目标要求,努力将污水厂打造成集“高效集约、低碳节能、安全韧性、绿色生态”为一体的国内一流水质净化厂。设计方案中坚持水、泥、气、声的全方位协同,采用精细化布局,功能组团清晰,运维便捷;设置综合调蓄设施,助力污水处理系统韧性提升;创新应用振动MBR工艺,最大程度实现污水处理过程碳减排;生态景观上,以“芯动新城”为主题,结合太仓新兴科技和文化脉络,打造一座集“文化展示、科普教育、体育运动、休闲娱乐”于一体的滨水科技文化主题场所。污水处理设计进、出水水质见表1,污水处理工艺流程见图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	410	180	220	45	35	4.5
出水	≤30	≤10	≤10	≤10	≤1.5(3)	≤0.3

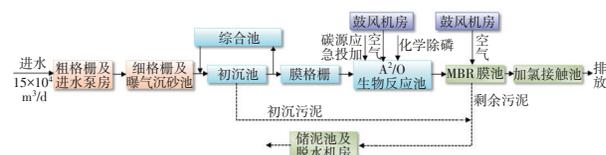


图1 污水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of wastewater treatment process

2 人性化布局,集约高效

箱体布置高度规整,轴网轴距整齐划一。常规地面式污水厂,单体布置以工艺功能为首要考虑因素,结构等专业进行配合设计。地理式污水厂在布局时,也常会陷入常规地面污水厂的设计逻辑。作为一个整体框架,地理式污水厂需实现工艺、结构、建筑等专业的功能和需求,应是各专业协同设计的成果,而非简单地以工艺为导向过度偏重其功能而忽视结构体系的对称性及功能布局的规整性,否则将会大大降低项目的整体品质。

设计过程中遵循各专业协同理念,反馈调节,以寻求最优化箱体布局。对于污水处理一体化箱体的结构轴网,综合工艺、结构、建筑及造价等各方面因素,横向及竖向轴网轴距整齐划一,分别采用8.8和7.8 m模数,局部通道及个别工艺单体根据其特殊性采用不同轴距。按此设计,将大大降低箱体结构设计和施工的难度,便于统一预制装配的实施,同时水流、泥流、人流、物流等各流线也显得简约而清晰。这一过程的实现,需各专业协同作业乃至适时让步,如按统一规程进行尺寸布置,工艺单体的实际尺寸相较于计算尺寸会存在偏差,对此,工艺参数可在规范允许的合理范围内适当调整,以满足整体布局要求。污水处理一体化箱体布局示意图见图2。

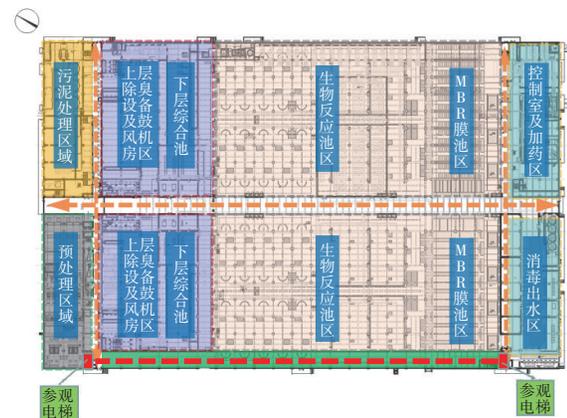


图2 污水处理一体化箱体布局示意

Fig.2 Layout diagram of wastewater treatment integrated structure

各功能区分区布局,箱体内部环境整洁。遵循功能分区原则,对臭气、噪声等区域进行集中布置。根据水流方向,预处理区集中布置于箱体左下角,自左向右依次为预处理区、二级生物处理区、MBR

膜池区及消毒出水区。污泥处理区设置于预处理区上方,整个箱体左侧为臭气集中区域;除臭及鼓风机房区毗邻预处理区及污泥处理区,便于整体臭气的集中收集处理及噪声集中;生物反应池区上方有大面积敞开空间,视野宽阔,可供巡检参观等;MBR膜池区及消毒出水区布置于最右侧,上部设置控制室和加药间,整体环境好,有利于生产人员的生产操作。

参观与生产分离,人性化设计考量。设置专门的参观通道,集中布置于箱体下方,贯穿整个污水处理工艺流程,游客可全过程体验水的净化之旅。参观通道与生产区用玻璃幕墙隔断,于通道内部进行科普展示。巡检生产通道呈十字交叉形布置,中间为生产主通道,路线简约,流线清晰。

3 振动 MBR, 标准高能耗省

3.1 振动 MBR 形式的选择

传统曝气 MBR 工艺采用底部曝气的方式去除膜丝表面的污垢,曝气的作用主要是产生大气泡,依靠气泡的快速提升冲刷膜表面,或在气泡上升的过程中造成污泥混合液的扰动,以减缓膜污染的发展和积累。但曝气大大增加了系统的能耗,并且会对膜丝产生一定的损伤,造成膜寿命缩短,提高了膜更换的成本^[4-6]。能耗和膜污染问题已经成为制约 MBR 工艺发展的瓶颈,新技术的发展应重点聚焦膜组器的抗污染性能及系统的节能降耗。

振动 MBR 和曝气 MBR 工艺的对比分析如图 3 所示。

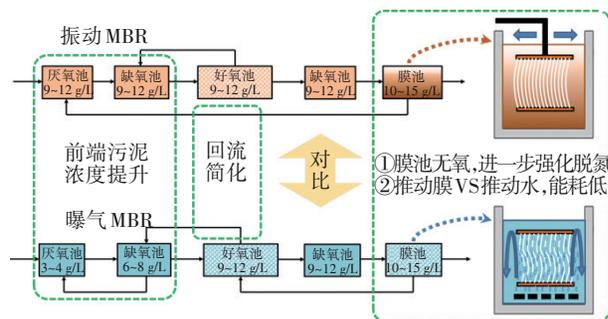


图 3 振动 MBR 和曝气 MBR 工艺对比分析

Fig.3 Comparison and analysis of vibration MBR and aeration MBR process

振动 MBR 工艺采用机械传动实现膜组器的往复运动,使膜丝与水体形成相对运动,在水的膜面流速比较低的情况下,依靠惯性力作用显著提高并

强化膜丝的抗污染性能,避免依赖大量曝气对膜设备进行擦洗。

振动 MBR 技术优势主要如下:

① 节能降碳。曝气 MBR 工艺因鼓风曝气导致膜池溶解氧浓度较高,对脱氮要求较高的工况将会额外消耗大量的外部电能和药剂。为克服污泥中溶解氧问题,传统 MBR 一般采用多级渐减回流膜池,而这又增加了水泵的电耗。与之相比,振动 MBR 工艺省去了鼓风曝气工艺及设备,仅依靠机械设备的往复振动;同时,振动 MBR 工艺因不存在溶解氧的问题,其回流方式与传统 AAO+二沉池工艺类似,回流泵能耗大大降低。

② 强化脱氮。采用振动工艺,MBR 膜池溶解氧浓度较低,在缺氧环境下微生物进一步脱氮。而传统曝气 MBR 因过度曝气使微生物内源代谢作用加强,污水中硝酸盐氮浓度升高。根据项目前期中试及国内相关工程案例经验,采用振动 MBR 工艺可使出水 TN 进一步降低至 5 mg/L 以下。

3.2 振动 MBR 系统工艺设计方案

本工程 MBR 膜池分两组,单组规模为 $7.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,对其中一组采用振动 MBR 工艺配置,对另一组采用曝气 MBR 形式。本工程采用的振动 MBR 系统为国内最大规模的振动 MBR 案例。MBR 系统布置剖面示意图 4。

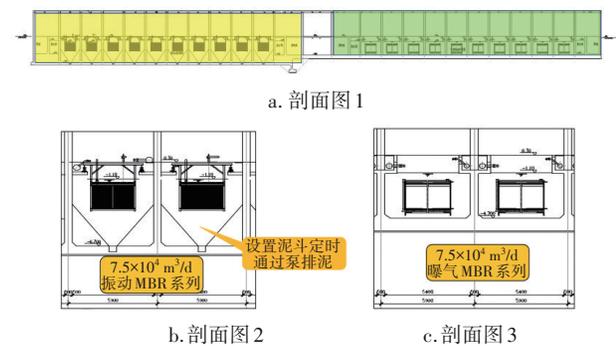


图 4 MBR 系统布置剖面示意

Fig.4 Layout profile diagram of MBR system

曝气 MBR 采用 AAO+MBR 工艺流程,采用三级渐减回流方式,膜池至好氧池的回流比为 500%,好氧池至缺氧池的回流比为 300%,缺氧池至厌氧池的回流比为 200%;曝气膜池共设置 14 条廊道,单条廊道膜组器按 8 套配置,预留 2 套备用位置,平均膜通量为 $15.33 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,高峰膜通量为 $19.93 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

振动 MBR 采用 AAOA+MBR 工艺流程,采用两级回流方式,膜池至厌氧池的回流比为 200%,好氧池至缺氧池的回流比为 400%;振动膜池共设置 16 条廊道,单条廊道膜组器按 9 套配置,预留 1 套备用位置,平均膜通量为 15.50 L/(m²·h),高峰膜通量为 20.15 L/(m²·h)。对于振动膜池污泥聚集回流问题,采用设置底部污泥流槽的方式,使污泥单向聚集浓缩。

振动 MBR 和曝气 MBR 的主要技术参数对比如表 2 所示。

表 2 主要技术参数对比

Tab.2 Main technical parameters comparison

项目	曝气 MBR	振动 MBR
工艺流程	厌氧-缺氧-好氧-缺氧-MBR	厌氧-缺氧-好氧-缺氧-MBR
回流方式	三级回流,总回流量约 1 000%	两级回流,总回流量约 600%
膜丝扰动方式	吹扫鼓风曝气扰动	传动装置周期机械摆动
装机功率/kW	1 430	820
设计出水水质	主要指标达地表水Ⅳ类标准,TN≤10 mg/L	主要指标达地表水Ⅳ类标准,TN≤5 mg/L

3.3 振动 MBR 与曝气 MBR 协同

在实际工程应用层面,安全、稳定运行为主要考虑因素。鉴于目前振动 MBR 工艺在国际、国内尚无大规模应用案例,因而本工程将振动 MBR 工艺与传统曝气 MBR 工艺进行系统融合,即振动 MBR 系统配备完善的曝气 MBR 工艺的土建及设备条件,以防当振动 MBR 系统运行不稳定时,能够快速向曝气 MBR 系统进行切换。

土建层面,振动膜系统与曝气膜系统的廊道尺寸一致,两者兼容;设备系统层面,为振动 MBR 系统预留了曝气擦洗风机及相应管路设计,曝气管路连接至每个膜组器处,预留阀门接口,远期根据需求通过软管与 MBR 组器进行连接。

3.4 振动 MBR 工艺工程案例

振动 MBR 工程案例,如北京窦店污水厂项目,总规模为 1.5×10⁴ m³/d,振动 MBR 规模为 0.75×10⁴ m³/d,出水执行北京市地标《水污染物综合排放标准》(DB 11/307—2013)B 排放限值,在 2021 年 3 月通水。北京窦店曝气 MBR 系统和振动 MBR 系统的综合比较见表 3。可知,振动 MBR 系统的装机容量降低了 36 kW,出水 TN 达 3.0~4.6 mg/L。

表 3 振动 MBR 和曝气 MBR 的综合比较

Tab.3 Comparison for vibration MBR and aeration MBR process

项目	曝气 MBR	振动 MBR
工艺流程	厌氧-缺氧-好氧-缺氧-MBR	厌氧-缺氧-好氧-缺氧-好氧-MBR
回流方式	三级回流: 膜池至好氧池 400%~500%; 好氧池至缺氧池 200%~400%; 缺氧池至厌氧池 100%~200%	两级回流: 膜池至厌氧池 200%; 好氧池至缺氧池 300%~500%
膜通量/(L·m ² ·h ⁻¹)	18~25	
膜运行周期	产水 7 min,停止 1 min	
主要设备及功率	共 88 kW: 吹扫风机,75 kW,1 台;膜池至好氧池回流泵,10 kW,1 台;缺氧池至厌氧池回流泵,3 kW,1 台	共 52 kW: 振动电机,15 kW,2 台;膜池至厌氧池回流泵,22 kW,1 台

4 综合调蓄,韧性提升

作为末端接纳设施,从上游污水收集系统来看,随着地区污水提质增效工作的开展,污水厂在旱季污水量的基础上,要适当考虑雨季截流污水的处理需求;同时,本项目污水厂服务范围内存在一定量工业企业,其收集污水中存在工业废水的影响。另一方面,地理式污水处理厂整体位于地下,一旦建成,进一步改造的空间小、难度大,其应对突发事件的能力相较于地上式污水处理厂需大大加强,在设计阶段应予以充分考虑。

本工程采用 MBR 工艺,对进水水量波动的抗冲击要求高,且工程出水水质标准较高。因此,综合考虑来水水量、水质存在的波动情况,同时结合地理式污水厂的自身工艺特点,设置综合池,助力污水厂韧性提升。

4.1 综合池的功能定位

① 削峰填谷,均化水质,改善 MBR 工艺的抗水量、水质冲击负荷能力,实现污水处理厂高标准出水水质要求下的稳定运行。

② 临时存储构筑物检修、清淤等工况下的放空水量。

③ 事故工况下水量的应急存储。

4.2 综合池位置方案论证

综合池位置的选择应达到技术经济综合最佳,方案一是设置在进水端,与进水泵房连通,但这种

方案下综合池的整体埋深较大,投资将大大增加;方案二是设置在预处理工艺后、生物处理前端,池体埋深较方案一抬高约6 m。

采用方案二布置综合池,工艺流程见图5。高峰流量下或当污水厂进水水质较差或受工业废水影响较大时,污水经预处理(粗细格栅、曝气沉砂、初沉池)处理后,由初沉池出水至综合池内调蓄存储;低峰污水进水时,综合池出水泵提至初沉池前端进行全流程处理。按照这种方式,综合池内水质相对原污水更为清洁,有利于其运行维护,减小清淤工作量。

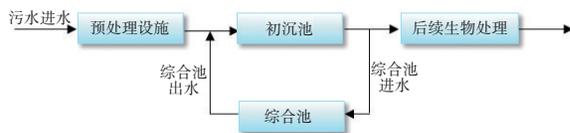


图5 污水综合调节池流程示意

Fig.5 Flow diagram of wastewater comprehensive regulating tank

4.3 竖向及池容方案论证

综合池调蓄污水来自初沉池出水,按水力高程计算,初沉池出水水位为0.82 m(相对标高,0.00相当于绝对标高4.50 m),因而综合池设计水位为0.82 m。底板与生物反应池相平,设计标高为-7.50 m,以保证生物反应池等池体的放空排水。

本工程污水处理规模为 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,综合池停留时间按8 h设计考虑,容积约 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。同时,本工程生物反应池分2座,共4组,各组均可实现独立运行。考虑1座生物反应池停运检修工况,其规模为 $7.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,停留时间为15.2 h,放空水容积约为 $4.75 \times 10^4 \text{ m}^3$,因此综合池可实现1座生物反应池的放空水储存。

5 精细化除臭,环境友好

根据需除臭构(建)建筑物的位置、臭源特性,对各需除臭区域进行系统分区控制。将其中环境相对较差的预处理区和初级处理区集中布置,二次封闭;对不同区域采用区别化的换气风量参数及换气次数,分量收集,在高效环保的前提下最大化地保证处理效果。

本工程对污水预处理区的臭气源加罩,对散发臭气的水面及设备进行除臭,污水预处理区域臭气污染物的主要指标如下:硫化氢为 $1 \sim 10 \text{ mg/m}^3$ 、氨为

$0.5 \sim 5.0 \text{ mg/m}^3$ 、臭气浓度为1 000~5 000。由于《城镇污水处理厂臭气处理技术规程》(CJJ/T 243—2016)对污水预处理区臭气源加罩外部的大空间除臭无具体要求,因此将除臭系统与生物反应池曝气系统组合,形成大空间除臭与生物反应池曝气协同,如图6所示。预处理区大空间臭气集中收集至生物反应池鼓风机房进风廊道,作为生物反应池鼓风机曝气气源,气体经鼓风机送入生物反应池内部,一方面为生化反应供氧,另一方面对臭气进行初步净化,从而减轻生物反应池臭气处理设施的负荷。

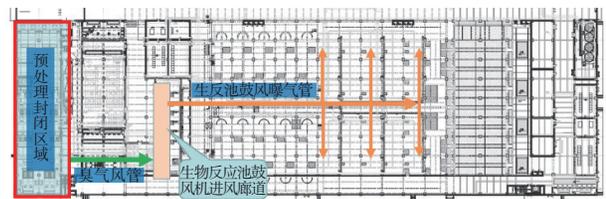


图6 预处理区臭气处理与生物反应池鼓风机曝气系统的协同

Fig.6 Coordination of deodorization system in pretreatment region and aeration system in bio-reaction tank

此项技术需明确臭气成分和风量与曝气系统的匹配程度:一是臭气组分是否符合鼓风机的进气需求;二是除臭需求与鼓气风量是否匹配;三是能否保证生物反应池曝气连续稳定。根据CJJ/T 243—2016,鼓风机要求进气硫化氢 $\leq 20.8 \text{ mg/m}^3$ ($25 \text{ }^\circ\text{C}$, $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$),对其余气体没有具体要求,预处理区大空间气体可以满足生物反应池鼓风机曝气的进气需求;生物反应池曝气量为 $18\,556.4 \text{ m}^3/\text{h}$,预处理区大空间体积约 $6\,000 \text{ m}^3$,生物反应池曝气量约相当于预处理区大空间3次/h的换气量,可满足预处理区的除臭换气要求,确保除臭效果。

此项技术的主要创新及优势如下:一是节省了预处理区独立的除臭设备投资,降低运行成本;二是利用生物反应池预处理臭气,减轻了臭气处理设备负荷,降低运行成本;三是通过设备投资和运行成本的节省,进一步节能降碳,减少污水厂温室气体排放。

6 结语

① 地理式污水处理箱体布局需遵循全专业协同原则,力求规整集约,利于预制装配,同时需考虑人性化设计要素。

② 振动MBR工艺是对传统曝气MBR工艺瓶颈的突破,助力节能减排和提质增效,在应用过程中需注重安全稳定。

③ 地理式污水厂的应急调蓄是重点,设置综合池削峰填谷,助力韧性提升,其设计应综合工艺功能、结构造价等全范围确定。

④ 除臭系统应力求精细化,分区控制理念很重要,同时可将臭气处理与污水处理协同,内循环除臭,实现系统联动,节能降耗。

参考文献:

- [1] 郝晓地,张益宁,李季,等. 污水处理能源中和与碳中和案例分析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(20): 1-8.
HAO Xiaodi, ZHANG Yining, LI Ji, *et al.* Case analysis of energy neutrality and carbon neutrality for wastewater treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(20): 1-8 (in Chinese).
- [2] 郝晓地,于文波,王向阳,等. 地下式污水处理厂全生命周期综合效益评价[J]. 中国给水排水, 2021, 37(7): 1-10.
HAO Xiaodi, YU Wenbo, WANG Xiangyang, *et al.* Life cycle comprehensive efficiency assessment on underground wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(7): 1-10 (in Chinese).
- [3] 刘智晓. 碳中和视角下城市可持续排水系统构建及评估指标体系[J]. 中国给水排水, 2022, 38(16): 1-15.
LIU Zhixiao. Establishment and evaluation index system of urban sustainable drainage system from the perspective of carbon neutrality [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(16): 1-15 (in Chinese).
- [4] 杨敏,颜秀勤,孙雁,等. A²O-MBR工艺城镇污水处理厂能耗特征与运行优化[J]. 给水排水, 2016, 42(12): 44-47.
YANG Min, YAN Xiuqin, SUN Yan, *et al.* Energy consumption characteristics and operation optimization of A²O-MBR in urban sewage treatment plant [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2016, 42(12): 44-47 (in Chinese).
- [5] 谷维梁,程方琳,宋朝媛,等. A²O-MBR工艺处理生活污水污染物去除及膜污染特性研究[J]. 水处理技术, 2015, 41(6): 87-90.
GU Weiliang, CHENG Fanglin, SONG Chaoyuan, *et al.* Characteristics of membrane pollution and pollutants removal from domestic sewage treated by A²O-MBR [J]. *Technology of Water Treatment*, 2015, 41(6): 87-90 (in Chinese).
- [6] 周友飞. 上海安亭污水处理厂三期全地下式扩建工程思考[J]. 给水排水, 2021, 47(2): 35-39.
ZHOU Youfei. Discussion on the phase III underground expansion project of Anting wastewater treatment plant in Shanghai [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(2): 35-39 (in Chinese).

作者简介:周友飞(1988-),男,安徽马鞍山人,硕士,高级工程师,国家注册公用设备(给水排水)工程师,从事污水、污泥处理工艺设计及研究工作。

E-mail:zhouyoufei@smedi.com

收稿日期:2023-02-14

修回日期:2023-06-13

(编辑:沈靖怡)

保护生态环境就是保护生产力

改善生态环境就是发展生产力