

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.22.008

# AAAOA+MBR在市政污水厂节地设计中的应用

夏海霞<sup>1</sup>, 范新宇<sup>2</sup>, 张强<sup>1,3</sup>, 彭永立<sup>1</sup>, 李鹏<sup>1</sup>, 闫博<sup>1</sup>,  
李平<sup>4</sup>, 刘晨<sup>1</sup>, 李一<sup>1</sup>

(1. 北京恩菲环保股份有限公司, 北京 100038; 2. 北京华油能源技术服务有限公司, 北京 100038; 3. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 4. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 西北某污水处理厂现已满负荷运转, 由于用地受限, 扩容工作需在原厂址范围内开展。同时, 其出水需从《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级B标准提升至一级A标准。在用地指标仅 $0.125 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ 的条件下, 实现生物池+深度处理段新建 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的处理规模。为满足用地限制和出水水质要求, 秉持集成一体化建(构)筑物的设计理念, 选用AAAOA+MBR作为主体工艺, 同时采取增大生物池有效水深(8.0 m)、配套建筑物与构筑物合建等节地措施, 实现节约占地33.75%。污水处理厂投运后, 出水水质稳定且优于设计标准; 生物池实际需气量节约40%以上, 曝气风机电耗至少降低18%, 可为同类工程提供参考。

**关键词:** 市政污水处理厂; 节地; AAAOA; MBR; 气水比

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)22-0045-06

## Application of AAAOA+MBR Process in Land Saving Design of Municipal Wastewater Treatment Plant

XIA Hai-xia<sup>1</sup>, FAN Xin-yu<sup>2</sup>, ZHANG Qiang<sup>1,3</sup>, PENG Yong-li<sup>1</sup>, LI Peng<sup>1</sup>,  
YAN Bo<sup>1</sup>, LI Ping<sup>4</sup>, LIU Chen<sup>1</sup>, LI Yi<sup>1</sup>

(1. Beijing ENFI Protection Co. Ltd., Beijing 100038, China; 2. Beijing SPT Energy Technology Service Co. Ltd., Beijing 100038, China; 3. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. CSCEC AECOM Consultants Co. Ltd., Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** A municipal wastewater treatment plant (WWTP) located in Northwest China is currently operating at full capacity. Owing to spatial constraints, any expansion must be implemented within the existing site boundaries. Concurrently, the effluent quality requirements are being upgraded from the first level B limit to the first level A limit as stipulated in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918—2002). A new treatment capacity of  $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  for the biological tank combined with the advanced treatment unit was achieved, even under a low land use index of only  $0.125 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ . To comply with land use constraints and effluent quality standards, the AAAOA+MBR process was selected as the core treatment technology, in alignment with the design principle of integrated and unified structures. Additionally, space-efficient measures were implemented, including increasing the effective water depth of the biological tank to 8.0 m and co-constructing auxiliary buildings and facilities, resulting in a 33.75% reduction in land occupation. After the WWTP put into

operation, the effluent quality remained stable and was consistently superior to the design discharge standard. The actual air requirement of the biological tank was reduced by over 40%, while the power consumption of the aeration blower was decreased by no less than 18%, offering valuable reference for similar wastewater treatment projects.

**Key words:** municipal wastewater treatment plant; land saving; AAAOA; MBR; air/water ratio

作为支撑城市可持续发展的关键基础设施,污水处理厂对于确保城市水环境质量和生态稳定具有不可或缺的意义。然而,伴随城市化进程的迅猛发展和人口向城市的持续集聚,城市空间不断向外扩张,导致土地资源日趋短缺。在此背景下,市政污水处理厂在空间布局上面临着集约化的迫切需求。针对土地资源受限的污水处理厂,必须深入依托并实践节地设计理念<sup>[1]</sup>,通过科学规划布局、技术创新应用,以实现土地资源的高效利用、投资成本的精准控制以及污水处理效果的提升。

## 1 污水处理厂概况

西北某污水处理厂已满负荷运行,且出水执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级B标准。经提标改扩建后,处理能力由 $26 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 提升至 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,出水水质提升至GB 18918—2002中一级A标准。由于场地有限,故需尽可能整合各工艺单元以减少用地。工程整体提标改扩建思路包括:①预处理工艺段(含细格栅及曝气沉砂池、初沉池)原位拆除扩建,规模由 $26 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 扩容至 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ;②原二级处理工艺段提标后规模由 $26 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 降至 $22 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,原部分建筑物(如配电室、库房等)拆除合建,清出场地增加 $22 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的深度处理工艺段(磁混凝高效沉淀池+精密过滤器),同时新建 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的新增扩容工艺段;③消毒工艺段因占地不足,选择发展竖向空间,将紫外消毒渠建于接触消毒池顶部,实现全厂 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 规模的消毒需求;④污泥处理系统原位拆除改扩建,由重力浓缩+带式脱水机改造为离心浓缩机+板框压滤机,实现外运污泥含水率由80%降至60%的处理目标;⑤全厂提标改扩建过程中采取多种措施实现不停水施工,如预处理段通过安装临时超越管道等措施,在不停水条件下逐次拆除扩容细格栅及曝气沉砂池其中1座(原有2座)、拆除3座初沉池、原址新建2座初沉池;消毒系统通

过安装临时管道及切换阀门等措施,拆除原 $26 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的接触消毒池,原址新建 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的接触消毒池与紫外消毒相结合的消毒系统<sup>[2]</sup>;污泥系统通过对离心浓缩机的两次改造,在不停产条件下将污泥含水率由80%降至60%。

提标改扩建工艺流程见图1。值得注意的是,仅余 $10\,000 \text{ m}^2$ 空地可作为新增扩容工艺段(即二级处理+深度处理段)的建(构)筑物用地,无法沿用原位提标工艺,故需选用新的节地工艺。

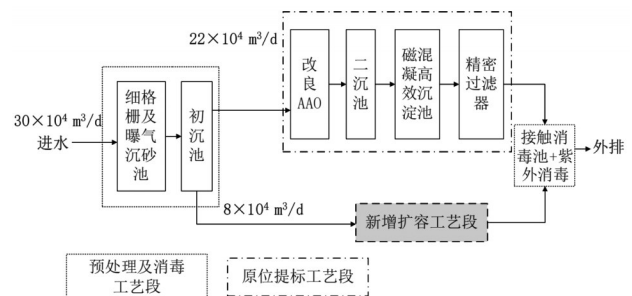


图1 提标改扩建工艺流程

Fig.1 Process flow of upgrading, renovation and expansion

## 2 总体方案

### 2.1 设计水质

新增扩容工艺段设计规模 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,按照污水处理厂实际运行数据95%的保证率确定进水水质,出水执行GB 18918—2002中一级A标准。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

项目	BOD <sub>5</sub>	COD	SS	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP
进水/(mg·L <sup>-1</sup> )	270	500	470	50	60	13
出水/(mg·L <sup>-1</sup> )	≤10	≤50	≤10	≤5(8)	≤15	≤0.5
去除率/%	96.3	90.0	97.9	90.0	75.0	96.2

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。

### 2.2 工艺路线

由于新增扩容段工程的可利用土地指标仅

0.125 m<sup>2</sup>/(m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>),因此需着重进行节地优化。基于污染物去除率要求与实际运行数据的综合分析,BOD<sub>5</sub>、SS及TP的平均设计去除率均超过95%,处理标准严格,其中TP应作为首要关注污染物;同时,COD和NH<sub>3</sub>-N的设计去除率维持在90%左右,亦体现出较高的处理要求。尽管TN的平均去除率要求相对较低,仅为75%,然而受反硝化过程的内在限制,TN的生物去除效率在实际操作中往往难以达到高效。鉴于此,采用强化脱氮除磷技术成为确保出水水质达标的必然选择<sup>[3]</sup>,该工程引入改良的AAO工艺(即AAAO工艺),以实现更高效的处理效果。

MBR作为一种高效的污水处理技术,通过将膜分离技术与传统生物处理工艺有机结合,具有污泥浓度高、出水水质优的特性。该技术可替代传统二沉池,显著节约土地资源<sup>[4]</sup>,尤其适用于用地受限的污水处理厂提标改造项目。

加介质高效沉淀技术通过投加可循环回收介质强化固液分离效能,其中磁混凝工艺因运行成本优势应用最为广泛<sup>[5-7]</sup>。磁混凝沉淀池表面负荷可达20~40 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h),占地仅60~100 m<sup>2</sup>/10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,适用于占地受限型污水处理厂的新改扩建。

根据工艺流程及单体工艺设计不同,形成3种方案:方案一,采用AAAO+二沉池+磁混凝沉淀池工艺,生物池水深6.5 m;方案二,采用AAAO+MBR工艺,生物池水深6.5 m;方案三,采用生物池AAAO+MBR工艺,生物池水深增至8.0 m,同时高度集成辅助建筑物,与构筑物合建,进一步优化占地面积,但土建费用相应有所增加。3种方案占地面积对比见表2。

表2 3种方案占地面积对比

Tab.2 Comparison of land occupation area among three schemes

项目		方案一	方案二	方案三
二级处理段面积/m <sup>2</sup>	AAAO生物池	8 228	8 228	6 686
	二沉池	2 400		
深度处理段面积/m <sup>2</sup>	磁混凝沉淀池	1 040		
	膜格栅间		209	
	MBR池		1 600	1 600
辅助建筑物面积/m <sup>2</sup>	MBR设备间		717	717
	鼓风机房	309	309	
	加药间	60	60	
	配电室	500	500	
面积合计/m <sup>2</sup>		12 537	11 624	8 286
占地指标/(m <sup>2</sup> ·m <sup>-3</sup> ·d)		0.157	0.145	0.104

由表2可知,方案三能够满足占地指标要求。综上,新增扩容段主体处理工艺采用AAAO+MBR。

### 2.3 工艺流程

改造处理工艺流程如图2所示。其中,新增扩容工艺段工艺路线为膜格栅间+AAAO生物池+MBR池。

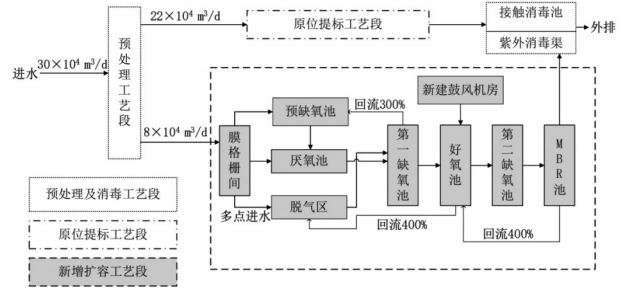


图2 改造处理工艺流程

Fig.2 Process flow of renovation treatment

### 2.4 布局特点

扩容工艺段的建(构)筑物设计基于对场区地形特征、交通流线以及处理功能需求的综合考量,同时与现有处理设施的布局紧密融合,遵循节约用地的原则,采用高效集约的建筑设计方案,具体表现如下:

① 一体化双层建(构)筑物设计。通过整合膜格栅间、AAAO生物池、MBR池、MBR设备间、鼓风机房及配电室等功能单元,形成平面尺寸75.3 m×119.0 m的紧凑结构,其中膜格栅间、鼓风机房、配电室等建筑物设置于生物池二层。此设计在实现竖向空间优化利用的同时,有效减少占地面积约1 795 m<sup>2</sup>。

② AA AO工艺“加池深、减面积”。若遵循常规6.5 m的水深设计,以保证污染物去除率为边界条件,生物池池容将达到8 228 m<sup>3</sup>,占总剩余空地的82.28%,严重限制后续工艺单元的空间布局。因此,在综合考虑占地面积、氧转移效率等因素后,将生物池水深增至8.0 m。调整后直接节约占地面积约1 542 m<sup>2</sup>,为后续工艺单元的设计提供必要的空间裕量。

③ 从源头减少无效水头损失。各工艺单元采用渠道或过水洞直接连通,既省去了连接管道,又有效规避了水头损失。扩容工艺段整体水头损失仅0.80 m(其中膜格栅处损失0.45 m)。较低的

水头损失可减小后续工艺段埋深,进而降低土建投资成本和施工复杂度。

④ 紫外消毒设施集成化设计。将紫外消毒渠整合至现有接触消毒池顶部,通过系统合并建设,避免新增占地需求,有效提升土地资源利用率。

扩容工艺段的总平面布置见图 3。

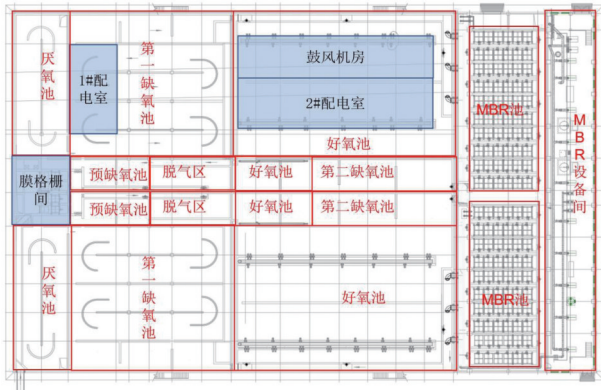


图 3 扩容工艺段总平面布置

Fig.3 General plan layout of expansion process section

### 3 工艺设计

#### 3.1 膜格栅间

膜格栅间平面尺寸 19.2 m×10.9 m, 安装内流膜格栅 4 台, 3 用 1 备, 单台  $Q=1\ 600\ \text{m}^3/\text{h}$ , 孔径 1 mm, 配套中压及高压冲洗系统。其中, 中压冲洗水泵 3 台, 2 用 1 备, 单台  $Q=16\ \text{m}^3/\text{h}$ 、 $H=790\ \text{kPa}$ ; 高压冲洗水泵 2 台, 1 用 1 备, 单台  $Q=0.9\ \text{m}^3/\text{h}$ 、 $H=12\ \text{MPa}$ 。

#### 3.2 AAAOA 生物池

采用 AAAOA 工艺, 设置多点进水以充分利用内生碳源。AAAOA 生物池 1 座 2 组, 平面尺寸 74.7 m×89.5 m。设计水温  $12\ ^\circ\text{C}$ , 污泥龄 10 d; 污泥浓度  $6\ \text{g/L}$ , 设计污泥负荷  $0.059\ \text{kgBOD}_5/(\text{kgMLSS}\cdot\text{d})$ ; 设计水深 8.0 m, 水力停留时间 15 h, 其中脱气池、预缺氧池、厌氧池、第一缺氧池、好氧池及第二缺氧池分别为 0.5、0.5、1.5、4.7、6.7、1.1 h。好氧池的设计气水比为 10.8:1, 曝气系统采用 PE 微孔曝气器, 通气量  $5\sim 25\ \text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$ , 氧利用率 >30%。

因 MBR 池曝气强度较高, 不利于脱氮释磷, 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。其中, MBR 至好氧池、好氧池至第一缺氧池、第一缺氧池至预缺氧池的最大污泥回流比分别为 400%、400% 和 300%, 污泥回流泵均为 3 台 (2 用 1 备), 在为第一缺氧池、厌氧池补

充污泥浓度的同时, 还可利用 MBR 冗余 DO 为前端好氧池补充氧气, 有利于进一步降低能耗。

#### 3.3 MBR 池及设备间

MBR 池 1 座 10 组 (8 用 2 备), 每组 2 格。单组膜池有效尺寸  $13.5\ \text{m}\times 6.3\ \text{m}$ , 有效水深 3.2 m, 单组有效容积约  $272\ \text{m}^3$ , 设计污泥浓度  $10\ \text{g/L}$ 。单组膜池设计安装膜组件 12 套, 实际安装 10 套, 冗余率 16.7%, 以应对后续水量增大的问题。膜丝采用 PVDF 的中空纤维膜, 设计通量  $23.29\ \text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ , 采用“产 12 停 1”的运行模式 (产水 12 min, 停歇 1 min), 设计擦洗风量  $300\ \text{m}^3/\text{min}$ 。膜组件采用在线原位清洗, 包含清水反冲洗与化学药洗。其中, 化学药洗包括日常维护性清洗 (MC) 与定期恢复性清洗 (RC) 两种模式, 具体见表 3。

表 3 化学药洗模式

Tab.3 Chemical agent cleaning mode

化学药洗模式	项目	次氯酸钠 (10.3%)	柠檬酸 (50%)
恢复性清洗	频率/(次·a <sup>-1</sup> )	2	2
	浸泡浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	1 000	2 000
维护性清洗	频率/(次·周 <sup>-1</sup> )	2	1
	加药浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	500	1 000

MBR 设备间 1 座, 平面尺寸  $74.7\ \text{m}\times 9.6\ \text{m}$ 。设置产水泵 10 台, 单台  $Q=551\ \text{m}^3/\text{h}$ 、 $H=150\ \text{kPa}$ ; 反洗水泵 2 台, 单台  $Q=729\ \text{m}^3/\text{h}$ 、 $H=100\ \text{kPa}$ ; 剩余污泥泵 4 台, 单台  $Q=100\ \text{m}^3/\text{h}$ 、 $H=120\ \text{kPa}$ 。

#### 3.4 鼓风机房

生物池顶部新建鼓风机房, 平面尺寸  $38.6\ \text{m}\times 8.0\ \text{m}$ 。生物池曝气及 MBR 膜组擦洗风机均采用磁悬浮离心风机, 其中, 生物池曝气风机 5 台, 4 用 1 备, 单台  $Q=150\ \text{m}^3/\text{min}$ 、 $H=92\ \text{kPa}$ 、 $N=350\ \text{kW}$ ; MBR 擦洗风机 4 台, 3 用 1 备, 单台  $Q=120\ \text{m}^3/\text{min}$ 、 $H=45\ \text{kPa}$ 、 $N=150\ \text{kW}$ 。

#### 3.5 紫外消毒渠

紫外消毒渠与接触消毒池合建, 集成于接触消毒池顶部, 设计 2 条渠道, 单条有效尺寸  $11.05\ \text{m}\times 1.00\ \text{m}$ , 有效紫外剂量  $17.66\ \text{mJ}/\text{cm}^2$ 。

### 4 投资分析

该提标改扩建工程总投资约 8.44 亿元, 折合单位投资约  $2\ 800\ \text{元}/\text{m}^3$ 。其中, 原位提标工艺段投资约 1.91 亿元, 折合单位投资约  $868\ \text{元}/\text{m}^3$  (生物池及鼓风机房为利旧改造, 若新建则单位投资约 1 100

元/m<sup>3</sup>);新增扩容工艺段(不含紫外消毒渠)工程投资约1.71亿元,折合单位投资约2138元/m<sup>3</sup>。投资方面,新增扩容工艺段较原位提标工艺段提高59.40%(若生物池及鼓风机房为新建,则提高48.55%);但从占地指标分析,新增扩容工艺段节约用地33.75%。

## 5 运行效果

### 5.1 处理效果

实际进、出水水质如表4所示。从全年数据分析来看,进水C/N达到8以上,可生化性较好。实际运行过程中,采用多点进水可有效减少碳源投加量,但如遇雨季进水有机物浓度较低时,仍需在第一缺氧池投加少量碳源(25%的乙酸钠约90 mg/L),以强化生物脱氮效果。从处理效果来看,平均出水水质均可稳定达标,且新增扩容工艺段出水水质优于原位提标工艺段,因此总出水中污染物浓度略高于新增扩容工艺段。

表4 实际进、出水水质

Tab.4 Actual influent and effluent quality

mg·L<sup>-1</sup>

项目	COD	TN	NH <sub>3</sub> -N	TP	SS
生物池进水	412.72	50.56	42.31	5.93	263.82
新增扩容工艺段出水	16.49	9.29	0.72	0.28	2.14
总出水	19.66	10.59	0.88	0.22	3.41

### 5.2 生物池供气量

通过近1年的运行跟踪,原位提标工艺段与新增扩容工艺段的生物池气水比见表5。

表5 生物池气水比

Tab.5 Air/water ratio of biological tank

项目	原位提标工艺段	新增扩容工艺段
气水比	冬春季	10~13
	全年平均	8~10
		4~7
		3~6

由表5可知,在进水水质相同的条件下,与原位提标工艺段(生物池+二沉池+磁混凝+精密过滤器)相比,新增扩容工艺段(生物池+MBR)通过增加有效水深并采用AAAO生物池工艺等优化设计,在实际运行中节能效果显著:生物池平均供气量仅为273.67 m<sup>3</sup>/min,曝气需气量节约40%以上,鼓风机耗电量至少降低18%。

通过对设计与运行因素的系统分析,确定生物池有效水深、后续工艺衔接方式、鼓风机选型及设备成新度为能耗控制的核心影响因素,其作用机制

如下:①生物池水深梯度效应。原位提标段生物池有效水深6.5 m,扩容段提升至8.0 m。水深增加使氧气传输路径延长18.8%,明显降低曝气能耗。②工艺协同降耗机制。扩容段采用MBR工艺与生物池耦合设计,通过膜组件气水反洗产生的回流量,实现曝气系统负荷优化。③鼓风机能效迭代。原位提标段沿用10年期多级离心鼓风机,而扩容段采用磁悬浮离心鼓风机,运行效率更高,噪声更低。④设备成新率影响。扩容段全新曝气系统(鼓风机+管网)处于能效峰值期,而原位提标段设备老化,风机效率较低,从而形成显著能耗差异。

## 6 结论

① 新增扩容工艺段采用AAAO+MBR的组合工艺,并高度集成附属建筑物,将占地指标降至0.104 m<sup>2</sup>/(m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>),相较于厂内相同功能(二级处理+深度处理段)的原位提标工艺段占地指标[0.157 m<sup>2</sup>/(m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>)],节约占地33.75%。

② 采用AAAO+MBR工艺可确保出水水质满足GB 18918—2002中一级A标准。为应对进水碳源不足情况,可在第一缺氧池投加碳源;在生物除磷效果不佳的情况下,可在膜池进水前投加PAC,协同沉淀进行化学除磷。

③ 采用AAAO工艺时,通过适当增加池深至8.0 m,并结合对风机选型与曝气管形式的综合考量,可实现双重效益:一方面,显著减小池体占地面积,节约占地30%以上,优化空间布局;另一方面,提高氧利用率,节约供气量40%以上,鼓风机耗电量至少降低18%,有效降低系统运行能耗。

④ 新增扩容工艺段(AAAO生物池+MBR池)单位投资约2138元/m<sup>3</sup>(不含紫外消毒渠),虽然投资略高,但从用地效率考量,该工艺段占地面积缩减达33.75%,显著提升土地利用效率,尤其适用于用地受限的改造项目。

## 参考文献:

- [1] 韩佩君,余军,胡新立,等. AAO+MBR工艺在高标准污水厂节地设计中的应用[J]. 中国给水排水, 2024, 40(16): 65-70.  
HAN Peijun, YU Jun, HU Xinli, et al. Utilization of AAO+MBR process for land saving design of a wastewater treatment plant with high discharge standard [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(16): 65-

- 70 (in Chinese).
- [ 2 ] 张强,夏海霞,彭永立,等. 兰州某大型污水厂原位提标改造工程设计实例[J]. 中国给水排水, 2025, 41(4): 69-74.
- ZHANG Qiang, XIA Haixia, PENG Yongli, *et al.* Design case of in-situ upgrading and reconstruction of a large-scale wastewater treatment plant in Lanzhou [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(4): 69-74 (in Chinese).
- [ 3 ] 白玉华,张欣宇,黄政鑫,等. AAO-MBR强化脱氮工艺用于内江市某污水厂提标改造[J]. 中国给水排水, 2020, 36(24): 87-91.
- BAI Yuhua, ZHANG Xinyu, HUANG Zhengxin, *et al.* AAO-MBR enhanced denitrification process for upgrading and reconstruction of a wastewater treatment plant in Neijiang [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(24): 87-91 (in Chinese).
- [ 4 ] 田海成,杨红红,焦文海,等. AAO+MBR组合工艺各工段设计要点[J]. 中国给水排水, 2023, 39(6): 71-77.
- TIAN Haicheng, YANG Honghong, JIAO Wenhai, *et al.* Key points for each section design of AAO and MBR combined process [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(6): 71-77 (in Chinese).
- [ 5 ] 杨平,徐康康,周家中,等. MBBR+磁混凝用于A<sup>2</sup>/O微曝氧化沟污水厂提标扩容[J]. 中国给水排水, 2023, 39(10): 67-74.
- YANG Ping, XU Kangkang, ZHOU Jiazhong, *et al.* Application of MBBR and magnetic coagulation process in upgrading and expansion of a WWTP with A<sup>2</sup>/O microporous aeration oxidation ditch[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(10): 67-74 (in Chinese).
- [ 6 ] 初振宇,李骏飞,林英,等. MBBR+磁混凝+反硝化滤池工艺用于全地下污水厂[J]. 中国给水排水, 2023, 39(12): 80-84.
- CHU Zhenyu, LI Junfei, LIN Ying, *et al.* Application of MBBR, magnetic coagulation and denitrification deep bed filter process in an underground wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(12): 80-84 (in Chinese).
- [ 7 ] 沈浩,杨忠启,汪凡,等. MBBR+磁混凝沉淀工艺用于用地受限污水厂改造[J]. 中国给水排水, 2023, 39(8): 112-119.
- SHEN Hao, YANG Zhongqi, WANG Fan, *et al.* Application of MBBR and magnetic coagulation precipitation process in retrofitting of a WWTP with limited construction land [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(8): 112-119 (in Chinese).

作者简介:夏海霞(1982- ),女,山东威海人,硕士,工程师,主要研究方向为水资源管理及污水处理技术。

E-mail: 121964637@qq.com

收稿日期:2025-03-11

修回日期:2025-06-07

(编辑:沈靖怡)

坚持以高水平保护支撑高质量发展,  
筑牢国家生态安全屏障