

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.17.018

# 再生水厂臭氧系统效能评估与优化

许 骐<sup>1,2</sup>, 李魁晓<sup>1,2</sup>, 王 刚<sup>1,2</sup>, 王 慰<sup>1,2</sup>, 李鹏飞<sup>1</sup>, 姜大伟<sup>1,2</sup>,  
王浩楠<sup>1,2</sup>

(1. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100022; 2. 北京市污水资源化工程技术研究中心, 北京 100124)

**摘要:** 为了科学评估再生水厂臭氧系统的运行效能,支撑再生水厂科学调整运行策略,以实现提升水质和节能降耗的目标,基于技术指标、经济指标、可靠性指标和环境指标,结合水厂实际运行数据进行分析,利用层次分析法(AHP)构建了包含4个准则和11项指标的臭氧系统效能综合评估体系。以北京市中心城区某再生水厂为例开展了评估体系应用研究,对2套臭氧系统进行定量测试评估。结果表明,M系统的水质达标率和仪表故障率得分分别是G臭氧系统的4.0和7.7倍,综合得分高88.2%,运行效能明显更优。

**关键词:** 再生水厂; 臭氧系统; 层次分析法; 效能评估体系

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)17-0126-06

## Performance Evaluation and Optimization of Ozone System in a Reclaimed Water Plant

XU Qi<sup>1,2</sup>, LI Kui-xiao<sup>1,2</sup>, WANG Gang<sup>1,2</sup>, WANG Wei<sup>1,2</sup>, LI Peng-fei<sup>1</sup>,  
JIANG Da-wei<sup>1,2</sup>, WANG Hao-nan<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100022, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Wastewater Resource, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Using analytic hierarchy process (AHP), a comprehensive evaluation system comprising four criteria and eleven indicators was established based on technical, economic, reliability, and environmental indicators, in conjunction with a reclaimed water plant's actual operational data, enabling a systematic and quantitative assessment of the ozone system's operational performance. The aim is to scientifically evaluate the operational efficiency of the ozone system in the reclaimed water plant, assist the plant in making data-driven adjustments to its operational strategies, and achieve the objectives of enhancing water quality while conserving energy and reducing resource consumption. This paper applied and evaluated the evaluation system through quantitative testing and analysis of two ozone treatment systems of a reclaimed water plant located in the central urban area of Beijing. The scoring of the M system's water quality compliance rate and the instrument failure rate were 4.0 times and 7.7 times that of the G system, respectively. Additionally, the comprehensive score of the M system was 88.2% higher, indicating significantly better operational performance.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3041300)

通信作者: 李魁晓 E-mail: kuixiao\_li@163.com

**Key words:** reclaimed water plant; ozone system; analytic hierarchy process; performance evaluation system

城市污水具有水量稳定、水质可控、就近可取的特点,经过深度处理工艺净化后可成为再生水,作为“城市第二水源”补给环境、工业和市政杂用等多种用途<sup>[1]</sup>。臭氧是一种强氧化剂,已被广泛应用于市政污水、工业废水处理等领域。臭氧氧化具有反应速度快、副产物产生量少等优点,能够氧化污水中的有机物,提高出水可生化性,同时具有脱色和消毒的能力<sup>[2]</sup>。因此,臭氧氧化工艺在越来越多的污水处理厂提标改造和新建再生水厂工程中得到应用<sup>[3]</sup>。

然而,在臭氧系统运行过程中,工作人员一般根据经验进行工艺运行管理和调控,导致运行管理效率低下,同时存在运行能耗高和出水水质波动大等一系列问题。为了减少人为主观判断对臭氧系统运行产生的影响,进一步提高水处理过程中臭氧系统的运行管理水平,支撑绿色低碳和节能降耗的目标,亟待建立一套科学的臭氧系统运行效能评估体系。

目前,国内外研究人员针对水处理工艺的评价方法主要包括主成分分析法、层次分析法(AHP)、聚类分析法、费用模型评价和模糊综合评价等<sup>[4-5]</sup>。其中,层次分析法具有评估流程简洁、定量和定性相结合等优点,已被广泛应用于我国水处理领域的技术评估<sup>[6]</sup>。此外,层次分析法也被用于评估氯/紫外工艺的运行效能,以得到工艺最优运行参数范围<sup>[7]</sup>。目前针对臭氧系统运行方面的评估体系和方法较少,《水回用导则 污水再生处理技术与工艺评价方法》(GB/T 41017—2021)对水处理技术评估方法和评价指标体系进行了说明,但是其不具有针对性,难以有效指导臭氧系统在实际生产过程中的运行调控。

笔者基于再生水厂实际的运行经验,并结合评估指标的可实施性,提出了一套臭氧系统运行效能评估体系,在考虑技术可行性和经济性的同时,该体系还兼顾了可靠性和环境影响,有助于提高再生水厂臭氧系统运行管理效率,从而达到保障出水水质和降低运行成本的目标。

## 1 臭氧系统效能评估体系的构建

通过分析实际再生水厂臭氧系统的运行日志和运行数据,并结合相关文献调研、一线操作人员和行业专家提出的意见,筛选出了影响臭氧系统运行效能的主要因素,从技术指标、经济指标、可靠性指标和环境指标 4 个方面,建立了一套由 3 个层次 11 项指标构成的臭氧系统效能评估体系。利用该评估体系对北京市中心城区某再生水厂的臭氧系统效能进行了全面、系统的评估,找出了实际运行中存在的问题,并提出了针对性的优化策略,旨在为再生水厂臭氧系统平稳、高效的运行提供技术支撑和实施范例。

### 1.1 综合评估体系指标的筛选与构建

基于层次分析法,构建臭氧系统效能综合评估体系三层评估框架,分别为目标决策层(A层)、准则层(B层)和指标层(P层)。A层设置为臭氧系统效能综合评估,旨在表达评估指标体系的总目标,即评估对象;B层反映总目标中该类性能的综合评估结果,分为技术指标( $B_1$ )、经济指标( $B_2$ )、可靠性指标( $B_3$ )和环境指标( $B_4$ ) 4 项准则;P层共设置 11 项指标,即  $P_1 \sim P_{11}$ 。

技术指标:水质达标率( $P_1$ ),在污水深度处理过程中,臭氧系统的主要功能是对污水进行脱色,以提高出水的感官效果,主要水质考核指标为色度,同时臭氧也具备一定的氧化、消毒、灭活微生物的能力,有条件的水厂可以考虑将臭氧单元进水和出水的粪大肠菌群浓度作为辅助监测指标;水质波动率( $P_2$ ),是指一定周期内出水污染物的标准偏差与算数平均值之比;臭氧利用率( $P_3$ ),是指实际臭氧用量与臭氧投加量之间的比值,臭氧利用率是判断臭氧是否过量、投加系统是否配气均匀的参考依据,具体计算方法如式(1)~(3)所示<sup>[8]</sup>;反馈信号数量( $P_4$ ),是指臭氧投加量的反馈控制,如依据水量、水质色度监测、水中溶解臭氧浓度监测等信号实现联动控制。

$$M_i = Q_g \times C_{g,in} \quad (1)$$

$$M_a = Q_g \times (C_{g,in} - C_{g,out}) - C_{l,out} \times Q_v \quad (2)$$

$$\eta = M_a / M_i \quad (3)$$

式中： $M_i$ 为臭氧投加量，g/h； $Q_g$ 为气流量， $m^3/h$ ； $C_{g,in}$ 为臭氧接触池进气臭氧浓度， $g/m^3$ ； $M_a$ 为实际臭氧利用量，g/h； $C_{g,out}$ 为臭氧接触池出气臭氧浓度， $g/m^3$ ； $C_{l,out}$ 为臭氧接触池出水中剩余臭氧浓度， $g/m^3$ ； $Q_v$ 为处理水流量， $m^3/h$ ； $\eta$ 为臭氧利用率。

经济指标：生产单位臭氧电耗( $P_5$ )，是指臭氧发生器每生产 1 kg 臭氧所需的用电量，通过调整工艺参数和操作条件，如温度、压力、气体流量等，可以提高臭氧发生器的效率，并降低能耗；生产单位臭氧药耗( $P_6$ )，是指臭氧发生器每生产 1 kg 臭氧所消耗的氧气量；设备维护费( $P_7$ )，主要包括设备维护保养、配件定期更换等费用。

可靠性指标：仪表故障率( $P_8$ )，主要用来反映设备配套的臭氧浓度监测仪、气体流量计、臭氧泄漏报警仪、氧气泄漏报警仪以及水中臭氧浓度监测仪等在线仪表的故障情况；臭氧产量达标率( $P_9$ )，是指臭氧发生器实际臭氧产量达到设定产量天数的百分比。

环境指标：环境臭氧浓度( $P_{10}$ )，应重点关注尾气破坏间和臭氧接触池顶部呼吸阀附近的臭氧浓度，通常臭氧会对人体的眼和呼吸器官产生强烈的刺激作用，根据《用人单位职业病防治指南》(GBZ/T 225—2010)要求，工作场所最大臭氧允许浓度为  $0.3\text{ mg}/m^3$ ；氮气添加量( $P_{11}$ )，在臭氧制备过程中，为提高氧气源臭氧发生器制备臭氧的效率，需向气源中添加  $0.5\% \sim 5\%$  的氮气，但是在制备臭氧高压放电过程中，部分氮原子会电离成激发态与氧气反应，并产生  $N_2O^{[9]}$ ， $N_2O$  是一种温室气体，产生的温室效应较  $CO_2$  高 265 倍<sup>[10]</sup>。

综上所述，基于层次分析法所构建的臭氧系统效能综合评估体系结构见图 1。

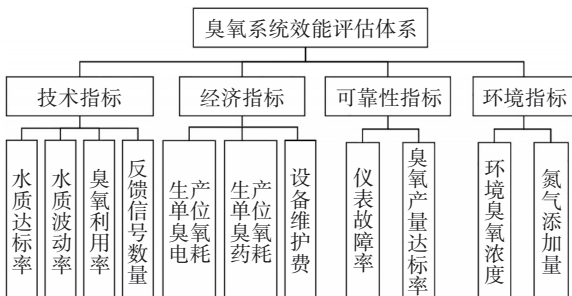


图 1 臭氧系统效能综合评估体系

Fig.1 Comprehensive evaluation system for the efficiency of ozone system

### 1.2 判断矩阵和指标权重的确定

采用判断矩阵法确定各层次、各因素之间的权重，即将同一层级的指标利用 1~9 标度法进行两两比较。制定再生水厂臭氧系统效能综合评估体系权重打分表，根据从再生水厂收集的实测数据，并结合本领域 5 位专家的意见，以保证权重的科学性与专业性，赋予相应的权重值。为考察权重值的合理性，需要对判断矩阵进行一致性检验，具体见式(4)、(5)。

$$CI = \frac{\lambda_{max} - N}{N - 1} \tag{4}$$

$$CR = CI/RI \tag{5}$$

式中：CI 为一致性指标； $\lambda_{max}$  为最大特征根；N 为矩阵阶数；CR 为一致性比例；RI 为随机一致性指标，当阶数为 3、4、5、6、7、8、9 时，RI 分别为 0.58、0.90、1.12、1.24、0.32、1.41、1.45。

构造 A-B 之间的判断矩阵(见表 1)，求得最大特征根  $\lambda_{max}=4.058$ ，特征向量  $W=(0.545\ 4, 0.237\ 3, 0.109\ 5, 0.107\ 8)$ ，即( $B_1, B_2, B_3, B_4$ )分量的权重值。根据式(4)可得  $CI=0.019\ 3$ ，根据式(5)可得  $CR=0.022 < 0.1$ 。因此，A-B 矩阵的一致性符合要求，权重值可使用。同理，对于其他各层次元素构造的判断矩阵(见表 2~5)，一致性均符合要求。

表 1 判断矩阵 A-B

Tab.1 Judgment matrix A-B

A	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$
$B_1$	1	3	5	4
$B_2$	1/3	1	2	3
$B_3$	1/5	1/2	1	1
$B_4$	1/4	1/3	1	1

表 2 判断矩阵  $B_1$ -P

Tab.2 Judgment matrix  $B_1$ -P

$B_1$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$
$P_1$	1	5	5	6
$P_2$	1/5	1	2	2
$P_3$	1/5	1/2	1	2
$P_4$	1/6	1/2	1/2	1

表 3 判断矩阵  $B_2$ -P

Tab.3 Judgment matrix  $B_2$ -P

$B_2$	$P_5$	$P_6$	$P_7$
$P_5$	1	5	6
$P_6$	1/5	1	2
$P_7$	1/6	1/2	1

表 4 判断矩阵  $B_3-P$

Tab.4 Judgment matrix  $B_3-P$

$B_3$	$P_8$	$P_9$
$P_8$	1	1/3
$P_9$	3	1

表 5 判断矩阵  $B_4-P$

Tab.5 Judgment matrix  $B_4-P$

$B_4$	$P_{10}$	$P_{11}$
$P_{10}$	1	3
$P_{11}$	1/3	1

对影响再生水厂臭氧系统效能的所有因素进行排序,P层指标对应A层的权重总排序见表6。

表 6 P层各指标对A层总排序权值

Tab.6 Weighting of each indicator in layer P for the overall ranking column in layer A

项目	要素及权重				P层权重值
	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	
	0.545 4	0.237 3	0.109 5	0.107 8	
水质达标率 $P_1$	0.621 6	0	0	0	0.339 0
水质波动率 $P_2$	0.171 9	0	0	0	0.093 8
臭氧利用率 $P_3$	0.124 6	0	0	0	0.068 0
反馈信号数量 $P_4$	0.081 9	0	0	0	0.044 7
生产单位臭氧电耗 $P_5$	0	0.722 5	0	0	0.171 5
生产单位臭氧药耗 $P_6$	0	0.174 1	0	0	0.041 3
设备维护费 $P_7$	0	0.103 3	0	0	0.024 5
仪表故障率 $P_8$	0	0	0.250 0	0	0.027 4
臭氧产量达标率 $P_9$	0	0	0.750 0	0	0.082 1
环境臭氧浓度 $P_{10}$	0	0	0	0.750 0	0.080 9
氮气添加量 $P_{11}$	0	0	0	0.250 0	0.027 0

由表6可以看出,水质达标率 $P_1$ 所占权重值最高(0.339 0),表明在评估再生水厂臭氧系统效能时,应重点关注出水水质是否达到设计要求。权重占比第二位的是 $P_5$ ,占比为0.171 5。在污水处理行业绿色低碳发展的背景下,臭氧系统作为高能耗单元,优选制备单位臭氧能耗低的臭氧发生器,以降低运行能耗,这是提高再生水厂臭氧系统运行效能的关键因素。此外, $P_2$ 权重占比也较高,如何保障臭氧系统出水水质稳定,对水厂运行和管理提出了更高的要求。

### 1.3 评估指标评分标准的设置

以臭氧制备及处理系统设计资料和再生水厂实际运行数据为基础,结合相关标准和行业规范,确定定量评估标准,采用十分制来表示各项指标在每个等级分项内获得的分值,具体见表7。

表 7 定量指标评分标准

Tab.7 Quantitative indicator scoring criteria

评估指标	分值				
	0~2	2~4	4~6	6~8	8~10
水质达标率/%	<60	60~80	80~90	90~95	>95
水质波动率/%	>80	60~80	40~60	20~40	<20
臭氧利用率/%	<80	80~85	85~90	90~95	>95
反馈信号数量/个	<1	1~2	2~3	3~4	>4
生产单位臭氧电耗/(kW·h·kg <sup>-1</sup> )	>18	14~18	10~14	7~10	<7
生产单位臭氧药耗/(kgO <sub>2</sub> ·kg <sup>-1</sup> )	>16	14~16	12~14	10~12	<10
设备维护费/(元·kg <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup> )	>2 500	2 000~2 500	1 500~2 000	1 000~1 500	<1 000
仪表故障率/%	>60	40~60	20~40	10~20	<10
臭氧产量达标率/%	<60	60~80	80~90	90~95	>95
环境臭氧浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	>0.4	0.3~0.4	0.2~0.3	0.1~0.2	<0.1
氮气添加量/%	>4.0	2.0~4.0	1.0~2.0	0.5~1.0	<0.5

### 1.4 指标归一化和综合得分计算方法

为了使不同评分标准的指标之间具备可比性,对各指标进行归一化处理,采用极差化法实现指标样本的归一化,按式(6)、(7)计算。

$$\varphi_i(k) = \frac{x_i(k) - \min x_i}{\max x_i - \min x_i} \quad i=1,2,\dots,n; k=1,2,\dots,m \quad (6)$$

$$\varphi_i(k) = \frac{\max x_i - x_i(k)}{\max x_i - \min x_i} \quad i=1,2,\dots,n; k=1,2,\dots,m \quad (7)$$

式中: $\varphi_i(k)$ 表示 $k$ 系统第 $i$ 个指标的归一化值; $\max x_i$ 、 $\min x_i$ 分别表示 $i$ 指标在系统中的最大值与最小值。

式(6)适用于值越大得分越高的指标;式(7)适用于值越小得分越高的指标。

再生水厂臭氧系统效能评估综合得分的具体计算方法如下:

$$S = \sum_{i=1}^{11} (W_i \times r_i) \quad (8)$$

式中: $S$ 为再生水厂臭氧系统效能评估综合得分; $W_i$ 为第 $i$ 项指标的权重值; $r_i$ 为第 $i$ 项指标的评分结果。

## 2 评估体系应用研究

### 2.1 再生水厂臭氧系统概况

北京地区某再生水厂的二级处理工艺为改良AAO活性污泥法,深度处理采用反硝化生物滤池+超滤膜+臭氧接触池+紫外消毒+次氯酸钠消毒工艺。臭氧单元分为两套系统(G系统与M系统),共设置6台臭氧发生器,分别为3台G臭氧发生器和3台M臭氧发生器,设计最大臭氧投加量为5 mg/L。臭氧接触池建于膜过滤车间和紫外消毒渠之间,土建结构相连,设计停留时间为14.3 min。接触池的臭氧尾气通过顶部尾气破坏系统处理达标后排放。

在进行臭氧系统效能评估前,该再生水厂臭氧系统开启1台G臭氧发生器和1台M臭氧发生器,臭氧投加量设置为2 mg/L,臭氧产量根据水量波动自动调整。

### 2.2 数据分析与处理

通过分析该再生水厂的历史数据和运行维护记录,并结合现场调研和取样监测,得到各指标数据,见表8。

表8 不同臭氧系统的指标数据

Tab.8 Data of each indicator for different ozone systems

类别	指标	臭氧系统	
		M	G
技术指标	水质达标率/%	100	65
	水质波动率/%	10.2	52.1
	臭氧利用率/%	92.3	82.5
	反馈信号数量/个	2	1
经济指标	生产单位臭氧电耗/(kW·h·kg <sup>-1</sup> )	8.01	7.83
	生产单位臭氧药耗/(kgO <sub>2</sub> ·kg <sup>-1</sup> )	10	10
	设备维护费/(元·kg <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup> )	1 100	1 750
可靠性指标	仪表故障率/%	0	86
	臭氧产量达标率/%	100	70
环境指标	环境臭氧浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	0.06	0.06
	氮气添加量/%	1.0	1.0

根据构建的再生水厂臭氧系统运行效能综合评估体系中11项指标,综合分析该厂2套臭氧系统的运行数据,结合所建立的评估指标标准,根据式(6)、(7)对不同臭氧系统的各指标进行归一化,确定各指标的特征化结果和得分(见表9)。

根据前述各指标的权重值和式(8)进行综合得分计算,得到M臭氧系统综合得分为8.85,G臭氧系统综合得分为4.70。从指标分类得分情况来看,两

套臭氧系统的经济指标和环境指标得分较接近,但在技术指标和可靠性指标方面M臭氧系统得分明显高于G臭氧系统。分析G臭氧系统可靠性指标得分较低的原因:①仪表故障率高,该臭氧系统配备了7台在线监测仪表,仅有1台能够正常使用和上传数据,造成臭氧产量和投加量不明确,系统处于“黑箱”控制状态;②臭氧产量达标率偏低,通过更换G系统在线臭氧浓度监测仪,得出实际臭氧投加量为1.19 mg/L,仅为设定值2 mg/L的59.5%。

表9 不同臭氧系统各指标得分

Tab.9 Scores of each indicator for different ozone systems

类别	指标	臭氧系统	
		M	G
技术指标	水质达标率 $P_1$	10.00	2.50
	水质波动率 $P_2$	8.98	4.79
	臭氧利用率 $P_3$	6.92	3.00
	反馈信号数量 $P_4$	4.00	2.00
经济指标	生产单位臭氧电耗 $P_5$	8.01	7.83
	生产单位臭氧药耗 $P_6$	8.00	8.00
	设备维护费 $P_7$	7.60	5.00
可靠性指标	仪表故障率 $P_8$	10.00	1.30
	臭氧产量达标率 $P_9$	10.00	3.00
环境指标	环境臭氧浓度 $P_{11}$	8.80	8.80
	氮气添加量 $P_{12}$	8.00	8.00

通过与G臭氧系统厂家沟通,确认该问题产生的原因如下:自控系统控制逻辑为根据臭氧投加量设定值,优先控制设备启动台数,再分配各台臭氧发生器的臭氧产量,若设定臭氧投加量为2 mg/L,系统默认启动2台臭氧发生器,分配至单台臭氧发生器投加量信号为1 mg/L,但现场实际只开启1台臭氧发生器,另2台为停机状态,导致实际臭氧投加量比设定值偏低。此外,臭氧系统在线仪表处于故障状态,无法掌握真实的臭氧投加量,导致G臭氧系统的技术指标得分也较低。

## 3 结论

① 聚焦再生水厂臭氧系统的运行管理,建立了一套定量评估臭氧系统运行效能的方法体系,从技术指标、经济指标、可靠性指标和环境指标等多个方面对臭氧系统运行进行量化评价,有助于提升再生水厂臭氧系统的运行管理水平。

② G臭氧系统整体运行效能偏低,需调整臭氧系统运行策略,建议临时关闭G臭氧系统,优先运

行 M 臭氧系统,并通过臭氧投加管路的连通管向 G 系统臭氧接触池提供臭氧,待 G 臭氧自控系统完成优化后再恢复。

③ 提高对臭氧系统进、出水水质的监测频率,掌握臭氧单元水质变化规律,适时调整臭氧投加量,或增加控制臭氧系统的反馈信号,例如利用在线色度、水中溶解臭氧浓度监测仪表,动态反馈调整臭氧投加量。

④ 定期校准和更换在线监测仪表探头,保证臭氧设备运行数据准确、可靠,定期核算臭氧利用率,掌握系统运行状况,必要时对臭氧接触池进行泄空检查,及时发现臭氧接触池内曝气盘堵塞或脱落的情况,有助于节省运行能耗、延长尾气破坏器使用寿命和降低臭氧对厂区环境的影响。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 徐傲,巫寅虎,陈卓,等.北京市城镇污水再生利用现状与潜力分析[J].环境工程,2021,39(9):1-6,47.
- XU Ao, WU Yinhu, CHEN Zhuo, *et al.* Municipal wastewater reclamation in Beijing: state-of-the-art and future potential [J]. Environmental Engineering, 2021, 39(9): 1-6,47(in Chinese).
- [ 2 ] SHI Q, CHEN Z, WEI F Q, *et al.* Identification of surrogates for rapid monitoring of microbial inactivation by ozone for water reuse: a pilot-scale study[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 424:127567.
- [ 3 ] 李魁晓,时玉龙,于丽昕,等.新冠肺炎疫情期间城镇再生水厂协同消毒工艺运行实践[J].给水排水,2020,46(4):48-53.
- LI Kuixiao, SHI Yulong, YU Lixin, *et al.* Practice of synergistic disinfection process in water reclamation plants during COVID-19 epidemic [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(4): 48-53 (in Chinese).
- [ 4 ] 熊焱,齐香汝,金文杰,等.基于层次分析法的 A/O 工艺夏冬季节能耗评价[J].环境工程,2014,32(4):148-152.
- XIONG Yan, QI Xiangru, JIN Wenjie, *et al.* Energy consumption evaluation of A/O process in winter and summer based on AHP[J]. Environmental Engineering, 2014, 32(4): 148-152(in Chinese).
- [ 5 ] 邓仁健,任伯帆,陈军.小型污水厂工艺选择的多层

次模糊灰关联聚类分析[J].中国给水排水,2010,26(11):64-67.

DENG Renjian, REN Bozhi, CHEN Jun. Selection of technology for small sewage treatment plant based on multi-level fuzzy grey relational clustering analysis [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(11): 64-67(in Chinese).

- [ 6 ] 孟繁宇,樊庆铤,纪楠,等.城市污水处理厂综合评价指标体系构建与应用研究[J].环境与可持续发展,2012,37(2):84-90.

MENG Fanyu, FAN Qingxin, JI Nan, *et al.* Construction and application of comprehensive evaluation index system for municipal sewage treatment plants [J]. Environment and Sustainable Development, 2012, 37(2): 84-90(in Chinese).

- [ 7 ] 张静怡,贺斌,陈莉,等.基于改进层次分析法的氯/紫外工艺效能评估方法[J].中国给水排水,2022,38(23):38-42.

ZHANG Jingyi, HE Bin, CHEN Li, *et al.* Performance assessment method of chlorine/UV process based on improved analytic hierarchy process [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(23): 38-42 (in Chinese).

- [ 8 ] CHU L B, XING X H, YU A F, *et al.* Enhanced ozonation of simulated dyestuff wastewater by microbubbles[J]. Chemosphere, 2007, 68(10): 1854-1860.

- [ 9 ] 袁定琨.介质阻挡放电活性分子臭氧发生的基础特性研究[D].杭州:浙江大学,2019.

YUAN Dingkun. Basic Research on Ozone Production from Dielectric Barrier Discharge [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019 (in Chinese).

- [ 10 ] 郝晓地,杨振理,于文波,等.污水处理过程 N<sub>2</sub>O 排放:过程机制与控制策略[J].环境科学,2023,44(2):1163-1173.

HAO Xiaodi, YANG Zhenli, YU Wenbo, *et al.* N<sub>2</sub>O emission from the processes of wastewater treatment: mechanisms and control strategies [J]. Environmental Science, 2023, 44(2): 1163-1173 (in Chinese).

**作者简介:**许骐(1994- ),男,安徽黄山人,硕士,研发工程师,主要研究方向为污水深度处理与再生水安全利用。

**E-mail:** xuqi2975@163.com

**收稿日期:** 2024-09-06

**修回日期:** 2024-09-28

(编辑:任莹莹)