

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.17.008

响应曲面法优化双波长紫外/次氯酸钠去除臭味物质

张宇峰^{1,2}, 陈 飒³, 曹宇安³, 任鹏飞¹, 张欣然², 宋楚琪³,
梁祺峰³, 陈荣超³, 杨 昊⁴

(1. 广州市市政工程设计研究总院有限公司, 广东 广州 510060; 2. 中山大学 环境科学与工程学院, 广东 广州 510006; 3. 中山公用水务投资有限公司, 广东 中山 528400;
4. 西安工业大学 材料与化工学院, 陕西 西安 710000)

摘要: 为解决饮用水厂普遍面临的藻源臭味污染问题,在广东省某水厂开展双波长紫外/次氯酸钠高级氧化体系去除典型臭味物质2-甲基异莰醇(2-MIB)的中试研究。结果表明,双波长紫外/次氯酸钠对2-MIB的去除率高达94.9%,原水pH、次氯酸钠投加量和紫外剂量是重要影响因素。利用响应曲面法构建了以2-MIB去除率为响应值的数值拟合模型,预测准确率在97%以上。基于构建的拟合模型,提出了2-MIB初始浓度分别为20、50、100 ng/L时的双波长紫外/次氯酸钠高级氧化最优工艺条件,在保证出水2-MIB浓度稳定低于10 ng/L国标要求下,成本仅增加0.18~0.34元/m³。双波长紫外/次氯酸钠高级氧化技术具有占地少、启闭灵活、运行管理容易等优点,对于受季节性臭味污染的中小型水厂极具优势。

关键词: 臭味物质; 2-甲基异莰醇; 双波长紫外/次氯酸钠; 响应曲面法

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)17-0057-06

Optimization of UV/VUV/Chlorine Advanced Oxidation for Removal of Odor Compounds by Response Surface Methodology

ZHANG Yu-feng^{1,2}, CHEN Sa³, CAO Yu-an³, REN Peng-fei¹, ZHANG Xin-ran²,
SONG Chu-qi³, LIANG Qi-feng³, CHEN Rong-chao³, YANG Hao⁴

(1. Guangzhou Municipal Engineering Design & Research Institute, Guangzhou 510060, China;
2. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006,
China; 3. Zhongshan Public Water Investment Co. Ltd., Zhongshan 528400, China; 4. School
of Materials and Chemical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710000, China)

Abstract: To address the algal odor issue in drinking water treatment plants, this work conducted a pilot study on the removal of the typical odor substance 2-methylisoborneol (2-MIB) using a dual-wavelength ultraviolet (254 nm and 185 nm) / sodium hypochlorite advanced oxidation system (UV/VUV/chlorine) at a water treatment plant in Guangdong Province. The results indicated that the removal rate of 2-MIB by UV/VUV/chlorine system could reach up to 94.9%. The pH of the raw water, the dosage of sodium hypochlorite, and the UV dose were important influencing factors. Using response surface methodology, a numerical fitting model was constructed with the removal rate of 2-MIB as the response

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(22376230); 企业技术开发(委托)项目(SYSU-38000-20240319-0001)
通信作者: 张欣然 E-mail: zhangxinr@mail.sysu.edu.cn

value, achieving a prediction accuracy of over 97%. For the common three levels of 2-MIB pollution in water treatment plants (20 ng/L, 50 ng/L, and 100 ng/L), optimal conditions for UV/VUV/chlorine have been proposed. Under the condition that the 2-MIB concentration in the effluent remained stable and below the national standard requirement of 10 ng/L, the cost per cubic meter of water only increases by 0.18–0.34 yuan. The application of UV/VUV/chlorine technology has the characteristics of small footprint, flexible operation, and easy management, making it highly advantageous for small- and medium-sized water treatment plants that are affected by seasonal odor pollution.

Key words: odor compounds; 2-MIB; UV/VUV/chlorine; response surface methodology

近年来,饮用水源藻类污染引起的嗅味问题已成为饮用水处理领域的共性难题之一。典型嗅味物质2-甲基异苈醇(2-MIB)在痕量水平(ng/L)便会产生土腥味和霉味,严重影响饮用水的气味和口感,使消费者对水质信任度下降并导致大量投诉。2023年正式实施的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)规定2-MIB浓度限值为10 ng/L,这对水处理工艺提出了更高的要求。但是,由于2-MIB的化学结构稳定且赋存水平低,常规工艺对2-MIB的去除率不足20%,且常用预氧化方法(次氯酸钠、高锰酸钾等)的强化去除效果也不明显^[1]。当水中嗅味污染物浓度在50 ng/L以上时,仅采用常规工艺难以保证出厂水2-MIB达标^[2]。

高级氧化(AOPs)是去除嗅味物质的重要手段^[3-5]。其中,紫外与次氯酸钠耦合体系(紫外/次氯酸钠)由于管道式紫外装置安装简便、次氯酸钠采购管理便捷而更具实际应用潜力。研究表明,紫外/次氯酸钠通过产生羟基自由基($\cdot\text{OH}$)和活性氯自由基($\text{Cl}\cdot$ 等)能高效去除水中难降解污染物^[6]。Wang等将紫外/次氯酸钠高级氧化用于加拿大某水厂的嗅味污染去除,其去除效果与紫外/双氧水相当(60%以上)^[7]。并且紫外/次氯酸钠体系的参数控制合理,也不存在消毒副产物生成的隐患。值得注意的是,紫外/次氯酸钠体系不需要额外淬灭剩余双氧水(剩余量约80%),能显著降低成本。由于目前我国大多数水厂均采用次氯酸钠作为预氧化剂和消毒剂,相比于过氧化氢等其他氧化剂更容易采购和监管。因此,紫外/次氯酸钠高级氧化技术应用于嗅味污染控制具有可行性。

目前,紫外高级氧化研究大多在实验室进行,并采用去离子水制备样品,与实际工程应用脱节,因而亟须在实际场景下开展试验,以得到更为贴近

实际的效果和结论。相比于单一254 nm波长紫外光,双波长紫外(254 nm和185 nm)能够同时光解次氯酸钠和水分子,产生更多的羟基自由基和活性氯自由基,光能利用率更高。为此,在广东省某水厂构建了双波长紫外/次氯酸钠高级氧化中试装置(规模为1 m³/h),并采用水厂原水开展试验。同时,利用响应面方法构建多因子交互作用的数学模型,进而基于统计学原理提出双波长紫外/次氯酸钠降解嗅味物质的多变量优化策略^[8],以为紫外/次氯酸钠体系去除嗅味物质的参数优化和工程应用提供参考。

1 材料及方法

1.1 原水水质

以广东省某水厂原水为研究对象,高锰酸盐指数(COD_{Mn})为0.8~1.6 mg/L, pH为7.5~8.5,总有机碳(TOC)为2.30~2.91 mg/L, DO为3.92~9.19 mg/L,碱度为82.57~93.80 mg/L。由于受降雨和高温等影响,试验期间原水嗅味物质2-MIB浓度在100~200 ng/L波动。

1.2 试验药剂

2-MIB标准品(100 mg/L)购于上海安谱瑾世有限公司;次氯酸钠(NaClO)购于上海阿拉丁化学试剂有限公司,分析纯;95%~98%浓硫酸(H_2SO_4)购自福晨(天津)化学试剂有限公司,分析纯;氢氧化钠(NaOH)购自国药集团化学试剂有限公司,分析纯。

1.3 双波长紫外/次氯酸钠高级氧化中试装置

中试装置处理量为1 m³/h,含常规工艺(混凝-沉淀-过滤)和双波长紫外/次氯酸钠高级氧化深度处理工艺,中试流程见图1。原水经混凝、沉淀以及砂滤处理后进入1 m³蓄水池。紫外/次氯酸钠高级氧化中试装置包含进水泵、流量调节阀、加药蠕动泵、管道混合器、压力表、中控柜、AOPs反应器、光强

检测器;配备12支双波长紫外灯管(单支功率为84 W),紫外线剂量为0~2 000 mJ/cm²;加药流量为0~140 mL/min。开启水泵和加药泵即为试验开始,次氯酸钠投加量由加药泵控制。进水先通过混合器与次氯酸钠充分混合,再进入紫外反应装置,稳定运行后取样并在1 d内完成2-MIB浓度测定。

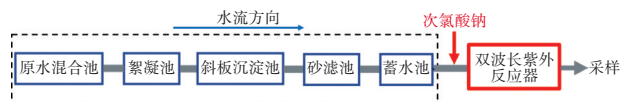


图1 中试流程

Fig.1 Flow chart of pilot-scale plant

1.4 检测方法

2-MIB采取顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术(SPME-GC-MS)进行检测,以1,2-二氯苯-D4为内标物。GC-MS分析条件:气相色谱柱为HP-5MS(30 m×250 μm×0.25 μm),离子检测模式,前进样口温度为250 °C,离子源温度为230 °C;初始温度为60 °C并保持2 min,以15 °C/min升温至100 °C后,再以8 °C/min升至250 °C并保持2 min。有效氯浓度采用DPD分光光度法(HJ 586—2010)测定;pH采用SD335便携式pH计测定。

2 结果与讨论

2.1 对2-MIB的去除效果

2.1.1 不同氧化工艺的去除效果对比

考察了单独次氯酸钠氧化、单独紫外辐照以及双波长紫外/次氯酸钠高级氧化三种工艺对2-MIB的去除效果。在次氯酸钠投加量为3 mg/L、紫外剂量为2 000 mJ/cm²、原水pH为7.8的条件下,单独氯化反应后2-MIB浓度不降反升(由174.9 ng/L提高到186.2 ng/L),这是由于次氯酸钠的氧化作用使藻细胞破裂,细胞内2-MIB被释放出来^[9-10]。

单独采用双波长紫外辐照时,2-MIB浓度由167.8 ng/L降低至119.1 ng/L,去除率为29%,其主要原因是双波长紫外光解水产生少量的双氧水和·OH,对2-MIB有一定的氧化去除作用。值得注意的是,双波长紫外/次氯酸钠对2-MIB的去除率达到了71.1%(浓度由186.4 ng/L降至53.8 ng/L),高于单独次氯酸钠处理和单独紫外辐照,表现出协同效应。在双波长紫外/次氯酸钠高级氧化体系中,水分子和次氯酸钠被紫外光解生成了羟基自由基(·OH)和活性氯自由基(RCS),是促进2-MIB去除的关键因素^[11]。

2.1.2 去除2-MIB的影响因素分析

在嗅味物质初始浓度为200 ng/L时,进一步探究了双波长紫外/次氯酸钠降解2-MIB的关键参数,包括pH、次氯酸钠投加量以及紫外剂量。在紫外剂量为2 000 mJ/cm²和次氯酸钠投量为3 mg/L的条件下,当pH为6.0、7.7、8.5和9.4时2-MIB去除率分别为93.7%、66.3%、46.6%和35.4%,可见该体系去除2-MIB的效能对pH具有高度依赖性,酸性环境更有利于去除嗅味物质。在酸性环境下,活性氯以次氯酸形态存在而非次氯酸根离子,次氯酸光解产生的·OH和RCS更多,促进了2-MIB降解^[12]。一般而言,实际高藻水体的pH为7.4~8.5,在该偏碱性条件下对2-MIB也能取得较好的去除效果。

双波长紫外/次氯酸钠体系对2-MIB的去除率随次氯酸钠投量增加而逐步升高,在次氯酸钠投加量为1、2、3和6 mg/L时,去除率分别为46.9%、62.3%、69.2%和72.6%。虽然次氯酸钠是紫外/次氯酸钠体系中自由基的来源,但是过量的次氯酸钠会与污染物竞争自由基,甚至导致藻细胞破裂和胞内物质释放^[13],因此当次氯酸钠投加量由3 mg/L提高至6 mg/L时,2-MIB去除率并没有明显提升。

设定次氯酸钠投量为3 mg/L,调节紫外剂量分别为1 000、1 300、1 500、2 000 mJ/cm²,双波长紫外/次氯酸钠对2-MIB的去除率依次为50.8%、56.7%、62.4%、70.6%。对比发现双波长紫外单独辐照时2-MIB的去除率仅由24.5%分别提高至26.5%、27.7%、29.0%,说明增加紫外剂量的主要作用是促进活性自由基(·OH和RCS)的产生。可见,2-MIB通过紫外光解、·OH和RCS氧化等多重途径被强化去除,上述三个工艺条件直接影响了自由基生成和转化,从而影响2-MIB的去除。

2.2 去除2-MIB的响应曲面分析

2.2.1 响应曲面法试验设计

在解析双波长紫外/次氯酸钠去除2-MIB体系中pH、次氯酸钠投加量、紫外剂量三个关键因素单独影响的基础上,利用响应曲面法的中心复合试验设计(CCD试验)分析三因素间的交互作用,并建立以2-MIB去除率为响应值的数值拟合模型。其中,pH(因素A)为6.0~9.4、次氯酸钠投加量(因素B)为0~4 mg/L、紫外剂量(因素C)为0~2 000 mJ/cm²,设计了3因素5水平共计20组试验。试验设计及结果如表1所示。

表 1 CCD 试验因子设计及结果

Tab.1 CCD experiment design and data

组别	A	B/(mg·L ⁻¹)	C/(mJ·cm ⁻²)	2-MIB 去除率/%
1	8.5	3	1 500	48.41
2	6.9	3	500	49.62
3	7.7	2	2 000	59.89
4	7.7	2	0	12.11
5	8.5	1	1 500	30.05
6	7.7	2	1 000	55.17
7	8.5	3	500	34.41
8	8.5	1	500	12.69
9	7.7	4	1 000	64.10
10	6.9	3	1 500	71.42
11	7.7	2	1 000	55.17
12	7.7	2	1 000	55.17
13	6.0	2	1 000	75.45
14	6.9	1	1 500	48.65
15	7.7	0	1 000	16.19
16	7.7	2	1 000	55.17
17	7.7	2	1 000	55.17
18	7.7	2	1 000	55.17
19	6.9	1	500	33.49
20	9.4	2	1 000	18.10

2.2.2 回归方程与数据分析

利用 Design Expert 软件对双波长紫外/次氯酸钠体系去除 2-MIB 的试验数据进行拟合,得到关于 2-MIB 去除率(Y)的二次多项式回归方程:

$$Y = 37.06A + 24.99B + 73.00C + 0.18AB + 1.80AC + 0.82BC - 3.87A^2 - 4.08B^2 - 22.00C^2 - 114.69 \quad (1)$$

二次多项式模型的统计显著性由 F 值和 P 值确定, F 值越大则因素项越显著, P < 0.050 0 时因素项具有显著性^[14]。根据方差分析结果(见表 2),模型 F 值为 38.42、P < 0.000 1,表明该模型对双波长紫外/次氯酸钠降解 2-MIB 的拟合效果极显著,可有效反映各自变量与响应值之间的关系。并且,模型的相关系数 R²=0.971 9,表明响应面上 97.19% 的变化可以通过此模型来预测。同时,模型的变异系数为 9.81% (<10%),表示试验数据波动范围较小,试验结果可靠且精确度较高。以 2-MIB 去除率的实测值为横轴、预测值为竖轴作图,发现数据点沿 45° 斜线两侧均匀分布,表明该模型预测值与实测值之间有良好的线性关系,具有优异的拟合优度与统计可靠性。

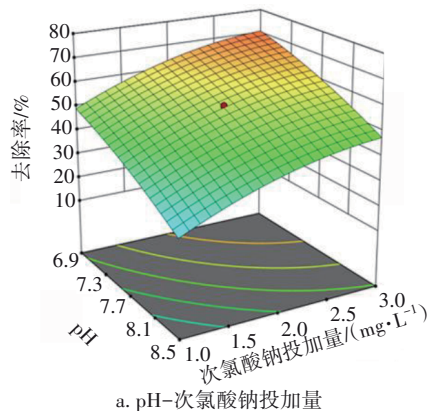
表 2 回归方程方差分析

Tab.2 Regression equation variance analysis

类别	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
Model	6 827.04	9	758.56	38.42	< 0.000 1
A	2 336.63	1	2 336.63	118.34	< 0.000 1
B	1 909.69	1	1 909.69	96.72	< 0.000 1
C	1 678.54	1	1 678.54	85.01	< 0.000 1
AB	0.174 0	1	0.174 0	0.008 8	0.927 1
AC	3.92	1	3.92	0.198 5	0.665 4
BC	1.34	1	1.34	0.068 1	0.799 4
A ²	137.58	1	137.58	6.97	0.024 8
B ²	415.99	1	415.99	21.07	0.001 0
C ²	654.35	1	654.35	33.14	0.000 2
残差	197.45	10	19.75	—	—
失拟	197.45	5	39.49	—	—
纯误差	0.00	5	0.00	—	—
总偏差	7 024.49	19	—	—	—

2.2.3 因素效应分析

在单因素方面, pH、次氯酸钠投加量以及紫外剂量这三个因素的 P 值均小于 0.000 1,意味着三个因子对 2-MIB 的去除有极显著的影响,这与单因素试验结果相符合。根据 F 值,单因子影响的强度排序为:pH>次氯酸钠投加量>紫外剂量,这说明 pH 对 2-MIB 去除率的主导作用最为显著。在复合影响方面,三因素之间的交互效应均不显著(P>0.050 0),相比之下 pH 与紫外剂量的交互作用最强(F 值=0.198 5),其次为次氯酸钠投加量与紫外剂量的交互作用(F 值=0.068 1)。说明实际工程中应该着重关注紫外剂量的调控,可以提升交互影响效应。为了更直观地考察初始 pH、次氯酸钠投加量和紫外剂量之间的交互作用对 2-MIB 去除效果的影响,绘制双波长紫外/次氯酸钠降解 2-MIB 的三维响应曲面图,结果见图 2。可见, pH 越低、次氯酸钠投加量越高或紫外剂量越高, 2-MIB 的去除率越高。



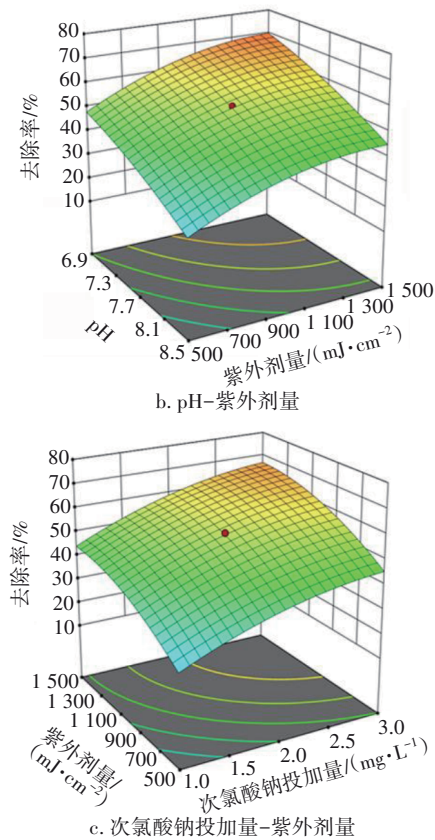


图2 复合因子对双波长紫外/次氯酸钠降解2-MIB效果的响应曲面

Fig.2 Response surfaces of each factor on degradation of 2-MIB by UV/VUV/chlorine

2.3 预测模型的验证及应用

利用2.2.2节得到的2-MIB去除率数值拟合模型,在综合考虑运行成本和去除效果的基础上,确定双波长紫外/次氯酸钠降解2-MIB的最佳工艺条件为:pH=7.7、次氯酸钠投加量=3.0 mg/L、紫外剂量=1500 mJ/cm^2 。在该反应条件下,双波长紫外/次氯酸钠工艺对2-MIB去除率的预测值为66.81%。采用水厂原水进行验证,得到三组平行试验的2-MIB去除率分别为62.07%、63.57%和61.10%,均值为 $(62.25\pm 1.25)\%$,预测值与实测值的相对误差为6.8%~8.5%(平均误差为7.0%),说明模型的预测精度较高。

在此基础上,利用拟合方程分别预测2-MIB浓度为20、50、100 ng/L时的最优工艺条件,目标是在低运行成本的同时保证出厂水2-MIB<10 ng/L。工艺条件和吨水处理成本如表3所示,初始2-MIB浓度为20 ng/L时的吨水处理成本最低为0.1845元,随着初始2-MIB浓度增高至100 ng/L,吨水处理成

本上涨至0.3416元。虽然该工艺会使水处理成本略有增加,但相比增设其他强化处理措施的投资和运行总成本(如臭氧/活性炭深度处理),双波长紫外/次氯酸钠高级氧化仍是一种极具应用潜力的强化除臭技术方案。

表3 不同工况下双波长紫外/次氯酸钠的模拟反应条件及成本

Tab.3 Simulation reaction conditions and costs of UV/VUV/chlorine under various working conditions in real water

2-MIB浓度/(ng·L ⁻¹)	反应条件			去除率/%	吨水成本/元
	pH	紫外剂量/(mJ·cm ⁻²)	次氯酸钠投量/(mg·L ⁻¹)		
20	7.5	1300	3.00	66.3	0.1845
50	6.5	1400	3.34	83.9	0.2746
100	6.0	2000	3.31	94.9	0.3416

注: 电费为0.88元/(kW·h),次氯酸钠价格为818元/t。

3 结论

① 双波长紫外/次氯酸钠高级氧化技术对藻源嗅味污染物具有良好的去除效果。以实际水厂原水为处理对象,2-MIB的最高去除率达94.9%。

② 原水pH、次氯酸钠投加量、紫外剂量均对2-MIB去除率具有显著影响,顺序为:pH>次氯酸钠投加量>紫外剂量。三个因素的复合影响均不显著,pH与紫外剂量的交互效应相对较高。

③ 基于响应面分析法构建了双波长紫外/次氯酸钠降解2-MIB的数值拟合模型,其在实际工况下具备较好的预测精度,预测值与实测值的相对误差仅为6.8%~8.5%,可用于工艺条件的筛选和优化。

④ 利用预测模型可以优化双波长紫外/次氯酸钠高级氧化的工艺条件。当原水中2-MIB初始浓度为20~100 ng/L时,在保证出水2-MIB稳定低于10 ng/L的国标要求下,吨水处理成本仅增加0.18~0.34元。对于受季节性嗅味污染的中小型水厂,此技术极具优势。

参考文献:

- [1] MENG T, SU X, SUN P. Degradation of geosmin and 2-methylisoborneol in UV-based AOPs for photoreactors with reflective inner surfaces: kinetics and transformation products [J]. Chemosphere, 2022, 306: 135611.
- [2] 郭庆园,王春苗,于建伟,等. 饮用水中典型嗅味问

- 题及其研究进展[J]. 中国给水排水, 2020, 36(22): 82-88.
- GUO Qingyuan, WANG Chunmiao, YU Jianwei, *et al.* Typical odor and taste problems in drinking water and their research progress [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(22): 82-88 (in Chinese).
- [3] ZHANG Y, XUE S, LI Y, *et al.* Nanobubble-enabled foam fractionation to remove algogenic odorous micropollutants[J]. *Water Research*, 2024, 267: 122540.
- [4] 王永强, 李桂芳, 宋武昌, 等. UV/H₂O₂工艺对常规砂滤出水中有机物的去除特性[J]. 中国给水排水, 2022, 38(17): 60-66.
- WANG Yongqiang, LI Guifang, SONG Wuchang, *et al.* Removal characteristics of organic matter in conventional sand filtered water by UV/H₂O₂ process [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(17): 60-66 (in Chinese).
- [5] 冯星灿, 张宇玲, 江晓铭, 等. 高级氧化工艺对饮用水控藻除嗅的研究进展[J]. 净水技术, 2024, 43(5): 53-60.
- FENG Xingcan, ZHANG Yuling, JIANG Xiaoming, *et al.* Research progress of advanced oxidation process for algae control and odor removal in drinking water [J]. *Water Purification Technology*, 2024, 43(5): 53-60 (in Chinese).
- [6] 张宇峰, 张欣然, 曹宇安, 等. 高级氧化降解饮用水中嗅味物质土臭素和2-甲基异茨醇的研究进展[J]. 化学通报, 2023, 86(12): 1451-1458.
- ZHANG Yufeng, ZHANG Xinran, CAO Yu'an, *et al.* Research progress on advanced oxidative degradation of odor substances such as geosmin and 2-methylisoborneol in drinking water [J]. *Chinese Chemical Bulletin*, 2023, 86(12): 1451-1458 (in Chinese).
- [7] WANG D, BOLTON J R, ANDREWS S A, *et al.* UV/chlorine control of drinking water taste and odour at pilot and full-scale[J]. *Chemosphere*, 2015, 136: 239-244.
- [8] 孙宇, 王永磊, 沈虎, 等. 基于微气泡阻垢的纳滤制备直饮水工艺优化[J]. 中国给水排水, 2025, 41(3): 43-49.
- SUN Yu, WANG Yonglei, SHEN Hu, *et al.* Optimization of nanofiltration for preparation of direct drinking water based on microbubble scale inhibition [J]. *China Water & Wastewater*, 2025, 41(3): 43-49 (in Chinese).
- [9] 苏晓, 韩宏大, 胡建坤, 等. 预氧化联合PAC强化混凝沉淀去除引滦水中2-MIB[J]. 中国给水排水, 2023, 39(21): 27-33.
- SU Xiao, HAN Hongda, HU Jiankun, *et al.* Pre-oxidation combined with powdered activated carbon enhanced coagulation-sedimentation for removal of 2-methylisoborneol in water from Luanhe diversion project [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(21): 27-33 (in Chinese).
- [10] 杨舒, 吴梦怡, 王慕, 等. 太湖某饮用水厂嗅味物质迁移特征解析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(1): 57-63.
- YANG Shu, WU Mengyi, WANG Mu, *et al.* Analysis of migration characteristics of odor substances in a drinking water plant in Taihu Lake [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(1): 57-63 (in Chinese).
- [11] 袁雨瑾, 肖习羽, 李青松, 等. VUV/UV/NaClO及UV/NaClO去除百里香酚:降解机制及水质影响因素[J]. 高校化学工程学报, 2024, 38(2): 328-340.
- YUAN Yujin, XIAO Xiyu, LI Qingsong, *et al.* Removal of thymol by VUV/UV/NaClO and UV/NaClO: degradation mechanism and influencing factors of water quality [J]. *Journal of Chemical Engineering of Universities*, 2024, 38(2): 328-340 (in Chinese).
- [12] 张焱. 真空紫外/氯技术去除饮用水致嗅物质2-MIB和GSM的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
- ZHANG Yi. Research on the Removal of Odor-causing Substances 2-MIB and GSM in Drinking Water by Vacuum Ultraviolet/Chlorine Technology [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018 (in Chinese).
- [13] LI L, ZHU C, XIE C, *et al.* Kinetics and mechanism of *Pseudoanabaena* cell inactivation, 2-MIB release and degradation under exposure of ozone, chlorine and permanganate[J]. *Water Research*, 2018, 147: 422-428.
- [14] 张立成, 冯锴, 刘澈, 等. UV/O₃工艺处理电子工业TMAH废水[J]. 中国给水排水, 2024, 40(9): 63-68.
- ZHANG Licheng, FENG Kai, LIU Che, *et al.* UV/O₃ process for treating wastewater containing TMAH from electronics industry [J]. *China Water & Wastewater*, 2024, 40(9): 63-68 (in Chinese).

作者简介:张宇峰(1998-),男,广东惠阳人,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制。

E-mail: wxyzocean21@163.com

收稿日期:2025-06-04

修回日期:2025-06-17

(编辑:李德强)