

水源与饮用水保障

付雨, 陈本耀, 解文玉, 等. UV/H₂O₂ 高级氧化工艺去除饮用水中嗅味物质的中试[J]. 净水技术, 2025, 44(12): 39-46, 66.

FU Y, CHEN B Y, XIE W Y, et al. Pilot test of UV/H₂O₂ AOP for odorous and taste substances removal in drinking water [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(12): 39-46, 66.

UV/H₂O₂ 高级氧化工艺去除饮用水中嗅味物质的中试

付雨¹, 陈本耀^{2,*}, 解文玉¹, 赵学志¹, 郑群¹, 郑春源¹, 韩京龙³, 潘章斌⁴

(1. 北京景盛达环保科技有限公司, 北京 101199; 2. 潍坊市市政公用事业服务中心, 山东潍坊 261041; 3. 哈尔滨工业大学<深圳>土木与环境工程学院, 广东深圳 518055; 4. 山东省城市供排水水质监测中心, 山东济南 250021)

摘要 【目的】针对饮用水中嗅味物质问题, 在 A、B 两水厂开展中试试验, 探究紫外/过氧化氢 (UV/H₂O₂) 高级氧化工艺对 2-甲基异莰醇 (2-MIB) 和土臭素 (GSM) 等典型嗅味物质去除效果。【方法】本文开展了 UV/H₂O₂ 高级氧化中试验证, 发现 2-MIB 和 GSM 初始浓度、H₂O₂ 的投加量、UV 剂量、耦合生物活性炭 (BAC) 等均对 2-MIB 和 GSM 的去除率有着重要影响。【结果】在本研究试验条件下, H₂O₂ 投加量为 12 mg/L 时, 2-MIB 的去除率能达到 87.24%, GSM 的去除率能达到 91.36%; 当 UV 剂量升高时, 2-MIB 和 GSM 的去除率增加到 94.79% 和 95.90%, UV/H₂O₂ 高级氧化工艺出水符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022) 中对嗅味物质的要求。【结论】H₂O₂ 的存在能显著提升嗅味物质的去除率, 而嗅味物质的去除过程中羟基自由基 (·OH) 起到了关键作用, 也表明 H₂O₂ 在 UV 的照射下能够生成更多的 ·OH, 后续 BAC 可以有效淬灭残余的 H₂O₂, 还可以进一步去除水中嗅味物质, 优化水质。本文可为去除饮用水中的嗅味物质提供有力的技术支持。

关键词 2-甲基异莰醇 土臭素 紫外/过氧化氢 高级氧化 中试

中图分类号: TU991 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2025)12-0039-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.12.005

Pilot Test of UV/H₂O₂ AOP for Odorous and Taste Substances Removal in Drinking Water

FU Yu¹, CHEN Benyao^{2,*}, XIE Wenyu¹, ZHAO Xuezhi¹, ZHENG Qun¹, ZHENG Chunyuan¹, HAN Jinglong³, PAN Zhangbin⁴

(1. Beijing JENSEND Environmental Technology Co., Ltd., Beijing 101199, China;

2. Weifang Municipal Utility Service Center, Weifang 261041, China;

3. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology <Shenzhen>, Shenzhen 518055, China;

4. Shandong Provincial City Water Supply and Drainage Water Quality Monitoring Center, Jinan 250021, China)

Abstract [Objective] To address the odor and taste problems in drinking water, pilot tests are conducted at water treatment plant A and B to investigate the removal efficiencies of typical odorous and taste substances such as 2-methylisoborneol (2-MIB) and geosmin (GSM) by ultraviolet/hydrogen peroxide (UV/H₂O₂) advanced oxidation process. [Methods] This paper conducted a pilot test verification of UV/H₂O₂ advanced oxidation process, and found that the initial concentrations of 2-MIB and GSM, the dosage of H₂O₂, the dosage of UV radiation, and the coupling of biological activated carbon (BAC) all had significant effects on the removal rates of 2-MIB and GSM. [Results] Under the experimental conditions of this study, the removal rate of 2-MIB was 87.24% when the dosage of hydrogen peroxide was 12 mg/L, and the removal rate of GSM was 91.36%; when the dosage of UV radiation was increased, the removal rates of 2-MIB and GSM increased to 94.79% and 95.90%, respectively. UV/H₂O₂ advanced oxidation process effluent

[收稿日期] 2024-12-05

[基金项目] 国家重点研发计划(2021YFC3200904)

[作者简介] 付雨(1996—), 男, 研究方向为饮用水处理技术等方面研究, E-mail: 1348334786@qq.com。

[通信作者] 陈本耀(1978—), 男, 研究方向为净水工艺处理技术和水质监测, E-mail: wfsz_cby@126.com。

met the water quality requirements of odorous and taste substances in the *Standard for Drinking Water Quality* (GB 5749—2022).

[**Conclusion**] Presence of H₂O₂ can significantly improve the removal rate of odorous and taste substances, and the hydroxyl radical ($\cdot\text{OH}$) plays a key role in the removal process of odorous and taste substances, and H₂O₂ can generate more $\cdot\text{OH}$ under UV irradiation. BAC can effectively quench the residual H₂O₂ and further remove the odorous and taste substances in water, optimizing the water quality. This study can provide powerful technical support for the removal of odorous and taste in drinking water.

Keywords 2-methylisoborneol (2-MIB) geosmin (GSM) UV/H₂O₂ advanced oxidation process (AOP) pilot test

我国部分湖泊、水库等水体面临严重的富营养化问题,导致藻类大量繁殖,有些藻类的代谢产物或死亡后的腐败物质,会使水体产生异嗅异味,对人们的生活造成不利影响,污染了水源,造成了经济与环境损失,影响着饮用水的供水安全^[1-2]。水环境新污染物问题日益凸显,饮用水源中藻类及其代谢产物、抗生素等药物,消毒副产物前体物等痕量毒害有机污染物大量检出^[3-4],尤其新国标《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)^[5]将 2-甲基异莰醇 (2-MIB) 和土臭素 (GSM) 等嗅味物质列入新增感官指标^[6-8],部分水厂的传统工艺难以应对嗅味物质所引发的水质问题,必须采取更加科学有效的深度处理工艺技术进行应对^[9-11]。

紫外/过氧化氢 (UV/H₂O₂) 高级氧化工艺 (AOP) 可将水中大分子有机物降解为小分子有机物,对荧光类、含苯环或双键类物质的有机物去除效果显著, H₂O₂ 在 UV 照射下生成羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$), $\cdot\text{OH}$ 将有机物氧化分解^[12-13]。以 $\cdot\text{OH}$ 的氧化作用为主, $\cdot\text{OH}$ 氧化能力极强,氧化还原电位为 2.8 V,氧化性仅次于氟。 $\cdot\text{OH}$ 具有非选择性,能够快速氧化大部分有机物,整个反应过程时间一般以微秒计^[14]。

Rosenfeldt 等^[15]发现, UV/H₂O₂ 体系中的 $\cdot\text{OH}$ 对 2-MIB 和 GSM 有降解作用,且 $\cdot\text{OH}$ 起到主要的作用,其降解反应符合一级反应动力学模型。王昊^[16]在 UV/H₂O₂ 的中试研究中发现, GSM 和 2-MIB 去除率与进水流量成反比,与 UV 剂量呈正比,且随 H₂O₂ 剂量的增大呈先快后慢的增大趋势。Jo 等^[17]采用 UV/H₂O₂ AOP 在降解消毒副产物和土腥味物质方面,能够取得一定的效果。

近年来,在欧美发达国家已有水厂采用基于 UV 的 AOP,工艺效果明显且运行稳定,嗅味物质、抗生素等难降解有机污染物得到有效控制^[18-19]。针对 UV/H₂O₂ AOP 对 2-MIB、GSM 的去除,国内缺少相关的工程案例及实际运行参数,因此,基于国内

水厂水质情况的中试试验很有必要。

因此,本次中试试验以 A、B 水厂嗅味物质为研究对象,研究 UV/H₂O₂ AOP 是否可以有效去除 2-MIB 和 GSM 等嗅味物质,同时通过后端配备生物活性炭 (BAC) 罐的方式,解决 H₂O₂ 残留问题及嗅味物质去除等问题。本文是针对水厂嗅味物质去除的中试研究,能够对后续水厂处理嗅味物质时提供参考和工程经验^[20]。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设备

试验在 A 厂和 B 厂试验基地分别进行,试验所需药品包括上海安谱实验科技股份有限公司生产的 2-MIB、GSM 标准溶液 (纯度 > 99%), 济南海承化工有限公司生产的质量分数为 35% 的 H₂O₂ 溶液 (食品级), 紫外灯管采用飞利浦生产的设备包括安捷伦生产的顶空固相萃取气相色谱质谱仪 (5977C GC/MS), GSM 和 2-MIB 提取采用长城科工贸有限公司生产的磁力加热搅拌器 (HWCL-3S 型), H₂O₂ 浓度检测采用长春吉大小天鹅仪器有限公司生产的 H₂O₂ 测定仪 (GDYS-102SC), 投加装置采用保定齐力恒流泵有限公司生产的蠕动泵 (BT100-02), A 厂 (原水) 和 B 厂 (滤后水) 水质数据如表 1 所示。

1.2 中试装置

中试装置如图 1 所示,中试装置主要组成部件如表 2 所示。

1.3 UV/H₂O₂ AOP 中试流程

中试试验流程如图 2 所示,水厂供水水源取自当地水库,水厂主体处理工艺采用“预加氯+机械混合+折板絮凝+平流沉淀+V 型滤池”为主的常规处理工艺,并备用投加粉末活性炭和石灰等,以应对水质变化。试验采用 UV/H₂O₂ AOP 中试反应装置, A 厂试验进水端为水厂进厂原水, B 厂试验进水端为滤后水,试验期间进水水质参数如表 1 所示,为验证中试装置和工艺对嗅味物质的去除效果,进水流量

表 1 A、B 水厂水质概况
Tab. 1 Water Quality Overview of WTP A and B

项目	浑浊度/NTU	水温/℃	pH 值	锰/(mg·L ⁻¹)	菌落总数/ (CFU·mL ⁻¹)	总大肠菌群/ [CFU·(100 mL) ⁻¹]
A 厂(原水)	4.25	21.5	6.79	0.09	248	2 419.6
B 厂(滤后水)	3.78	22.7	6.51	0.11	416	2 871.9

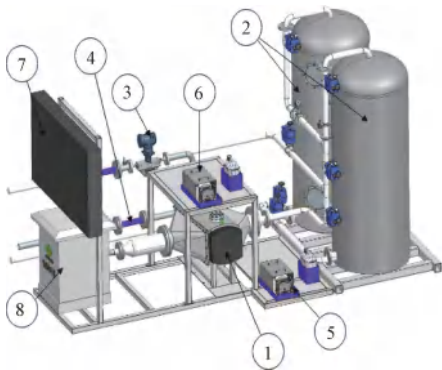


图 1 中试装置
Fig. 1 Pilot Test Device

表 2 中试装置主要组成部件
Tab. 2 Main Components of the Pilot Test Device

编号	部件名称	单位	数量	备注
①	UV/AOP 反应器	套	1	配套灯管、套管
②	BAC 滤罐	套	2	
③	进水电磁流量计	台	1	
④	管道混合器	个	1	
⑤	H ₂ O ₂ 投加泵	台	1	
⑥	标样投加泵	台	1	
⑦	参数、指标显示器	台	1	
⑧	控制柜	套	1	

设置为 5 m³/h 和 10 m³/h,进水后在管道混合器中与投加试剂充分混合,随后进入 AOP 反应器去除

2-MIB 和 GSM,AOP 反应器出水后接入 BAC 罐,以去除反应器中出水中残留的 H₂O₂ 和 2-MIB、GSM 等嗅味物质。

1.4 样品采集

在进行中试试验过程时,将试验条件设定完毕后,稳定运行 2 h 后进行取样,水样采集点如图 2 所示,采集后的水样过滤后储存于棕色玻璃采样瓶中,当天未能检测完毕的水样存放于 4 ℃ 条件下,并于次日全部检测完毕。

1.5 检测方法

GSM 和 2-MIB 的测定参照《生活饮用水标准检测方法 第 8 部分:有机物指标》(GB/T 5750.8—2023)。利用固相微萃取纤维吸附样品中的 GSM 和 2-MIB,顶空富集后用气相色谱质谱联用仪分析测定,内标法定量。前处理采用固相微萃取法,在 40 mL 水样中加入内标使用溶液,水浴加热搅拌,压下萃取纤维至顶部空间进行吸附萃取,取出纤维后,将萃取纤维插入气相色谱进样口,在 250 ℃ 下解吸 5 min。气相色谱仪器条件为 HP-5 色谱柱,高纯氦气,进样口压力为 56.5 kPa,进样口温度为 250 ℃,起始温度为 60 ℃,保持 2.5 min,以 8 ℃/min 速率升至 250 ℃,保持 5 min。质谱仪离子源采用电子电离源(EI),离子源温度为 230 ℃,接口温度为 280 ℃,离子化能量为 70 eV,扫描模式为选择性离子检测(SIM)^[21]。

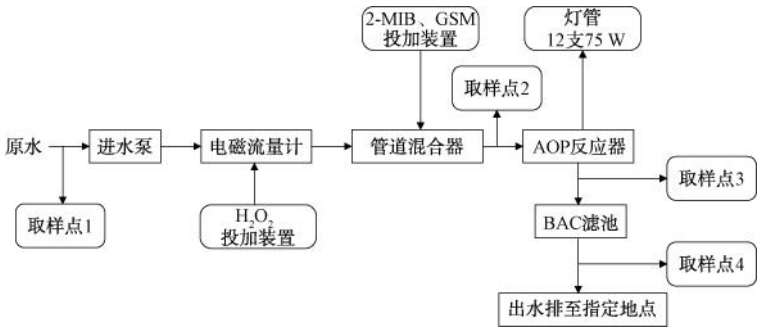


图 2 UV/H₂O₂ AOP 中试流程
Fig. 2 Pilot-Test Process of UV/H₂O₂ AOP

1.6 数据处理

采用 Excel 2007 软件对数据统计与计算, Origin 2021 进行作图。

2 结果与讨论

2.1 UV/H₂O₂

试验选在 A 厂进行验证, 中试验证平台取水点为水厂进水端(混凝工艺前), 该水厂试验过程中 2-MIB 的质量浓度选取 60 ng/L 和 110 ng/L。

图 3 为不同 H₂O₂ 投加量对 2-MIB 浓度的影响, 当进水量相同 (10 m³/h), 吨水 UV 功率相同 (90 W), 进水 2-MIB 的质量浓度为 54.4~69.3 ng/L, H₂O₂ 投加量为变量, 对比 2-MIB 的浓度变化。

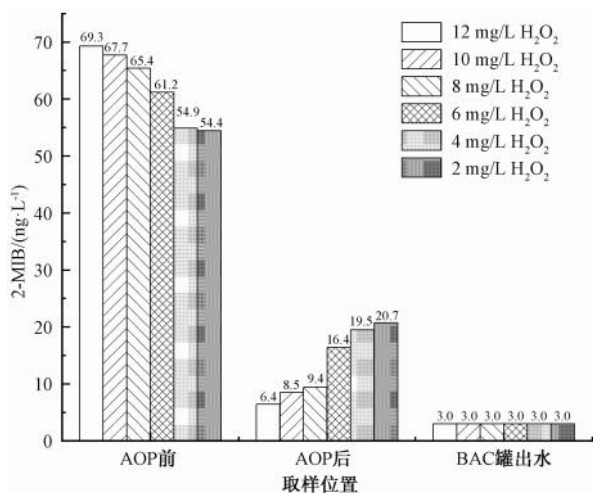


图 3 不同 H₂O₂ 投加量下 2-MIB 的浓度变化

Fig. 3 Concentration Changes of 2-MIB under Different H₂O₂ Dosages

在 H₂O₂ 的投加量为 12 mg/L 时, AOP 设备出水 2-MIB 质量浓度为 6.4 ng/L, 对比 AOP 设备前后, 2-MIB 的去除率为 90.76%; H₂O₂ 的投加量为 10 mg/L 时, AOP 设备出水 2-MIB 质量浓度为 8.5 ng/L, 对比 AOP 设备前后, 2-MIB 的去除率为 87.44%; 在 H₂O₂ 的投加量为 8 mg/L 时, AOP 设备出水 2-MIB 质量浓度为 9.4 ng/L, 对比 AOP 设备前后, 2-MIB 的去除率为 85.63%; 在 H₂O₂ 的投加量为 6 mg/L 时, AOP 设备出水 2-MIB 质量浓度为 16.4 ng/L, 对比 AOP 设备前后, 2-MIB 的去除率为 73.20%; 在 H₂O₂ 的投加量为 4 mg/L 时, AOP 设备出水 2-MIB 质量浓度为 19.5 ng/L, 对比 AOP 设备前后, 2-MIB 的去除率为 64.48%; 在 H₂O₂ 的投加量为 2 mg/L 时, AOP 设备出水 2-MIB 质量浓度为

20.7 ng/L, 对比 AOP 设备前后, 2-MIB 的去除率为 61.95%。AOP 出水后经过 BAC 罐处理, 2-MIB 等于 3 ng/L (最低检测限)。

可以看出, 当 H₂O₂ 质量浓度从 2 mg/L 增加到 12 mg/L 时, 2-MIB 去除率从 61.95% 提高至 90.76%。这表明 H₂O₂ 的存在能显著提升嗅味物质的去除率, 而嗅味物质的去除过程中·OH 起到了关键作用, 也表明 H₂O₂ 在 UV 的照射下生成的·OH 在嗅味物质的去除中起到关键作用^[22-23]。

图 4 为不同 H₂O₂ 投加量对 2-MIB 浓度的影响, 当进水量相同 (10 m³/h), 吨水 UV 功率相同 (90 W), 进水 2-MIB 的质量浓度为 112.9~116.0 ng/L, H₂O₂ 投加量为变量, 对比 2-MIB 的浓度变化。

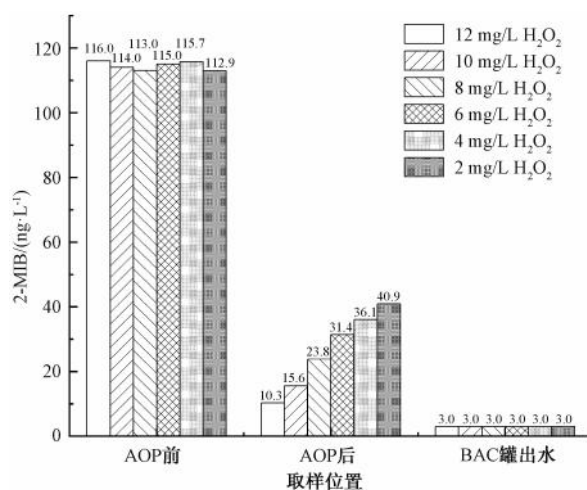


图 4 不同 H₂O₂ 投加量下 2-MIB 的浓度变化

Fig. 4 Concentration Changes of 2-MIB under Different H₂O₂ Dosages

在 H₂O₂ 的投加量为 12 mg/L 时, AOP 设备出水 2-MIB 质量浓度为 10.3 ng/L, 对比 AOP 设备前后, 2-MIB 的去除率为 91.12%; H₂O₂ 的投加量为 10 mg/L 时, AOP 设备出水 2-MIB 质量浓度为 15.6 ng/L, 对比 AOP 设备前后, 2-MIB 的去除率为 86.32%; 在 H₂O₂ 的投加量为 8 mg/L 时, AOP 设备出水 2-MIB 质量浓度为 23.8 ng/L, 对比 AOP 设备前后, 2-MIB 的去除率为 78.94%; 在 H₂O₂ 的投加量为 6 mg/L 时, AOP 设备出水 2-MIB 质量浓度为 31.4 ng/L, 对比 AOP 设备前后, 2-MIB 的去除率为 72.70%; 在 H₂O₂ 的投加量为 4 mg/L 时, AOP 设备出水 2-MIB 质量浓度为 36.1 ng/L, 对比 AOP 设备前后, 2-MIB 的去除率为 68.80%; 在 H₂O₂ 的投加量为

为 2 mg/L 时, AOP 设备出水 2-MIB 质量浓度为 40.9 ng/L, 对比 AOP 设备前后, 2-MIB 的去除率为 63.77%。AOP 出水后经过 BAC 罐处理, 2-MIB 等于 3 ng/L (最低检测限)。

可以看出, 当 H_2O_2 质量浓度从 2 mg/L 增加到 12 mg/L 时, 2-MIB 去除率从 63.77% 提高至 91.12%。这表明 H_2O_2 在 UV 的照射下生成的 $\cdot\text{OH}$ 在嗅味物质的去除中起到关键作用。

2.1.1 UV/ H_2O_2 AOP 中 H_2O_2 残留问题

为验证 UV/ H_2O_2 AOP 残留 H_2O_2 是否对后端原有常规工艺造成影响, 因此, 借助 A 厂内原有常规工艺的中试设备进行连续性验证。具体操作流程

如图 5 所示, AOP 出水不经过 BAC 罐直接连接水厂原有常规工艺中试设备的进水端, AOP 出水进入蓄水桶后通过提升泵进入反应池、斜管沉淀池, 流经砂滤柱后进入清水池。采样点除保留 AOP 反应器前、后以外, 在清水池出水位置增设取样点 3。在取样点 1 (AOP 前) 投加 H_2O_2 , 测得 H_2O_2 质量浓度分别为 12.6 mg/L 和 20.2 mg/L, 在经过 AOP 设备后, 所测得的 H_2O_2 残留量分别为 10.1 mg/L 和 16.0 mg/L, 在取样点 3 (清水池) 处, 未检出 H_2O_2 含量。此试验连续运行 7 d, 在清水池出水端均未检测出 H_2O_2 含量, 因此, 可推断出, 水厂原有常规处理工艺可以对 UV/ H_2O_2 AOP 所残留的 H_2O_2 进行一定程度的淬灭。

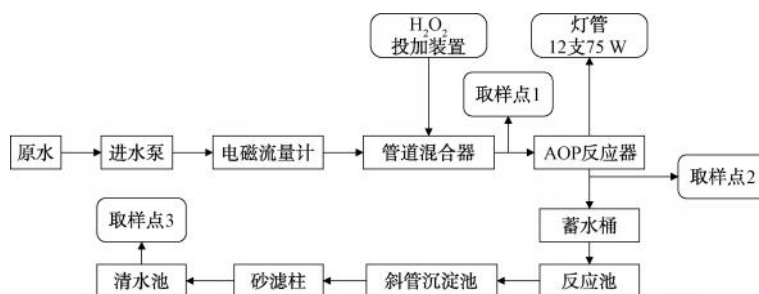


图 5 UV/ H_2O_2 AOP+水厂常规工艺中试流程

Fig. 5 Pilot Test Flow of UV/ H_2O_2 AOP and Conventional Process of WTP

2.1.2 UV/ H_2O_2 AOP 嗅味物质超标问题

为证 UV/ H_2O_2 AOP 出水 2-MIB 质量浓度高于 10 ng/L 在经过常规工艺处理是否能被去除, 借助 A 水厂内原有常规工艺的中试设备进行连续性验证。具体操作流程如图 5 所示, 连续 8 d 在取样点 2 测得 2-MIB 的质量浓度, 检测结果分别为 15.6、16.4、19.5、20.7、23.8、31.4、36.1、40.9 ng/L, 在取样点 3 清水池出水端均为检测出 2-MIB 含量 (低于检出限)。因此可以推断出, UV/ H_2O_2 AOP 出水嗅味物质超出国家标准时, 经过水厂的原有常规工艺处理后能够得到解决, 出水符合国家卫生标准对嗅味物质含量的要求。

2.2 UV/ H_2O_2 +BAC

中试试验选在 B 厂进行验证, 中试验证平台取水点为水厂滤池出水, 该水厂试验过程中 2-MIB 的质量浓度选取 60 ng/L 和 80 ng/L 进行, GSM 的质量浓度选取 40 ng/L 进行, 进水流量分别为 5 m^3/h 和 10 m^3/h 。

2.2.1 UV/ H_2O_2 +BAC 对嗅味物质去除效果

图 6、图 7 为不同 H_2O_2 投加量对嗅味物质浓度的影响, 当进水量相同 (10 m^3/h), 吨水 UV 功率相同 (90 W), 进水 2-MIB 的质量浓度为 53.0~77.3 ng/L, GSM 的质量浓度为 27.7~41.6 ng/L, H_2O_2 投加量为变量, 对比 2-MIB 和 GSM 的浓度变化。

在 H_2O_2 的投加量为 4 mg/L 时, 对比 AOP 设备前后, 2-MIB 的去除率为 70.75%, GSM 的去除率为 77.61%, H_2O_2 的利用率为 11.63%。 H_2O_2 的投加量为 6 mg/L 时, 对比 AOP 设备前后, 2-MIB 的去除率为 71.27%, GSM 的去除率为 79.46%, H_2O_2 的利用率为 9.68%。在 H_2O_2 的投加量为 8 mg/L 时, 对比 AOP 设备前后, 2-MIB 的去除率为 76.82%, GSM 的去除率为 84.36%, H_2O_2 的利用率为 13.41%。在 H_2O_2 的投加量为 10 mg/L 时, 对比 AOP 设备前后, 2-MIB 的去除率为 84.86%, GSM 的去除率为 89.66%, H_2O_2 的利用率为 12.38%。在 H_2O_2 的投加量为 12 mg/L 时, 对比 AOP 设备前后, 2-MIB 的

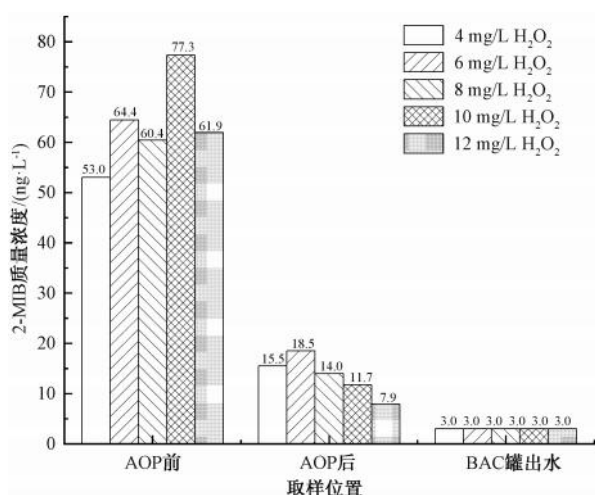


图6 进水量为 10 m³/h 时不同 H₂O₂ 投加量下 2-MIB 的浓度变化

Fig. 6 Concentration Changes of 2-MIB under Different H₂O₂ Dosages for the Influent Rate of 10 m³/h

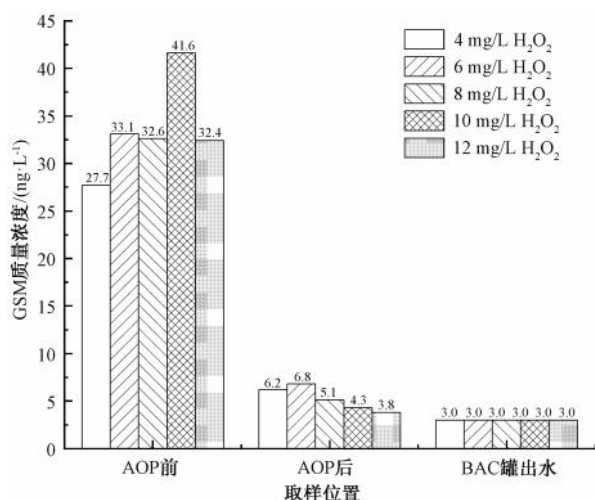


图7 进水量为 10 m³/h 时不同 H₂O₂ 投加量下 GSM 的浓度变化

Fig. 7 Concentration Changes of GSM under Different H₂O₂ Dosages for the Influent Rate of 10 m³/h

去除率为 87.24%, GSM 的去除率为 91.36%, H₂O₂ 的利用率为 9.09%, 经过 BAC 罐后, 2-MIB 等于 3 ng/L (最低检测限), GSM 等于 3 ng/L (最低检测限), 且 H₂O₂ 可完全被分解。

可以看出, 当 H₂O₂ 质量浓度从 4 mg/L 增加到 12 mg/L 时, 2-MIB 去除率从 70.75% 提高至 87.24%, GSM 的去除率从 77.61% 提高至 91.36%。表明 H₂O₂ 在 UV 的照射下生成的·OH 嗅味物质的去除中起到关键作用。

图 8 和图 9 为不同 H₂O₂ 投加量对嗅味物质浓

度的影响, 当进水量相同 (5 m³/h), 吨水 UV 功率相同 (90 W), 进水 2-MIB 的质量浓度为 51.8 ~ 80.9 ng/L, GSM 的质量浓度为 26.8 ~ 41.4 ng/L, H₂O₂ 投加量为变量, 对比 2-MIB 和 GSM 的浓度变化。

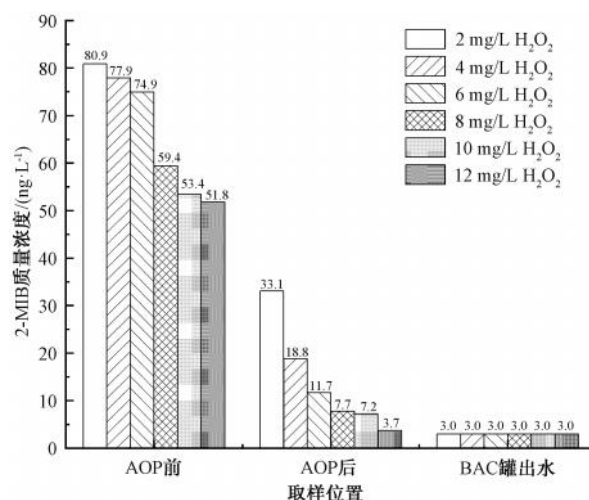


图8 进水量为 5 m³/h 时不同 H₂O₂ 投加量下 2-MIB 的浓度变化

Fig. 8 Concentration Changes of 2-MIB under Different H₂O₂ Dosages for the Influent Rate of 5 m³/h

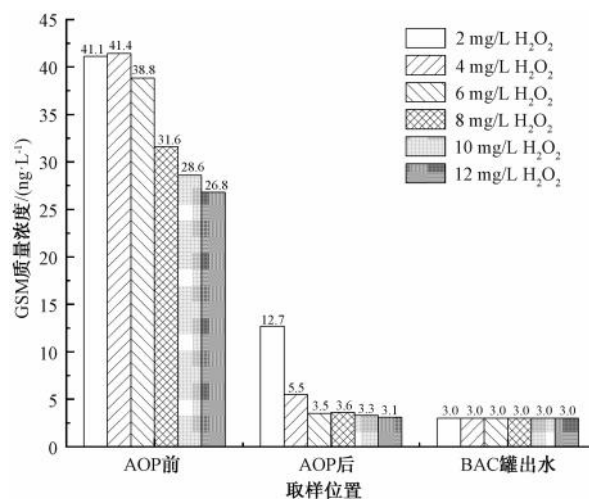


图9 进水量为 5 m³/h 时不同 H₂O₂ 投加量下 GSM 的浓度变化

Fig. 9 Concentration Changes of GSM under Different H₂O₂ Dosages for the Influent Rate of 5 m³/h

结果表明: 在 H₂O₂ 的投加量为 2 mg/L 时, 对比 AOP 设备前后, 2-MIB 的去除率为 59.09%, GSM 的去除率为 69.10%, H₂O₂ 的利用率为 39.13%。在 H₂O₂ 的投加量为 4 mg/L 时, 对比 AOP 设备前后,

2-MIB 的去除率为 75.87%, GSM 的去除率为 84.30%, H_2O_2 的利用率为 11.63%, 经过 BAC 罐后, 2-MIB 等于 3 ng/L, GSM 等于 3 ng/L, H_2O_2 可完全被分解。

在 H_2O_2 的投加量为 6 mg/L 时, 对比 AOP 设备前后, 2-MIB 的去除率为 84.32%, GSM 的去除率为 90.98%, H_2O_2 的利用率为 16.39%。在 H_2O_2 的投加量为 8 mg/L 时, 对比 AOP 设备前后, 2-MIB 的去除率为 87.04%, GSM 的去除率为 91.77%, H_2O_2 的利用率为 17.86%。在 H_2O_2 的投加量为 10 mg/L 时, 对比 AOP 设备前后, 2-MIB 的去除率为 86.52%, GSM 的去除率为 91.96%, H_2O_2 的利用率为 15.15%。在 H_2O_2 的投加量为 12 mg/L 时, 对比 AOP 设备前后, 2-MIB 的去除率为 94.79%, GSM 的去除率为 95.90%, H_2O_2 的利用率为 19.53%。经过 BAC 罐后, 2-MIB 等于 3 ng/L, GSM 等于 3 ng/L, 且残留的 H_2O_2 可完全被分解。

可以看出, 当 H_2O_2 质量浓度从 2 mg/L 增加到 12 mg/L 时, 2-MIB 去除率从 59.09% 提高至 94.79%, GSM 的去除率从 69.10% 提高至 95.90%。这表明 H_2O_2 在 UV 的照射下生成的 $\cdot\text{OH}$ 在臭味物质的去除中起到关键作用。

2.2.2 UV 剂量对臭味物质的影响

在同一套中试设备中, 当 H_2O_2 投加量和臭味物质浓度一致时, 进水量减半即为 UV 剂量加倍, 结果表明: 当 UV 剂量升高时, 2-MIB 和 GSM 的去除率随之增加。当 H_2O_2 投加量为 4 mg/L 时, 2-MIB 的去除率从 70.75% 提高至 75.87%, GSM 的去除率从 77.61% 提高至 84.30%; 当 H_2O_2 投加量为 6 mg/L 时, 2-MIB 的去除率从 71.27% 提高至 84.32%, GSM 的去除率从 79.46% 提高至 90.98%; 当 H_2O_2 投加量为 8 mg/L 时, 2-MIB 的去除率从 76.82% 提高至 87.04%, GSM 的去除率从 84.36% 提高至 91.77%; 当 H_2O_2 投加量为 10 mg/L 时, 2-MIB 的去除率从 84.86% 提高至 86.52%, GSM 的去除率从 89.66% 提高至 91.96%; 当 H_2O_2 投加量为 12 mg/L 时, 2-MIB 的去除率从 87.24% 提高至 94.79%, GSM 的去除率从 91.36% 提高至 95.90%。结果表明: UV 能够激发 H_2O_2 分解产生更多的 $\cdot\text{OH}$, 从而提高臭味物质的去除效果。

2.3 BAC 对臭味物质的影响

UV/ H_2O_2 AOP 在去除臭味物质的过程中存在

H_2O_2 残留问题, 因此, 需通过耦合 BAC 解决存在残留 H_2O_2 问题及臭味物质去除。BAC 去除臭味物质的原理是依靠活性炭的吸附能力和微生物降解作用。通过物理化学吸附作用, BAC 的表面和空隙内附着臭味物质, 以达到去除的目的, 但是 BAC 饱和和后去除效果会逐渐降低, 这与国内外学者的研究^[22-24]一致。UV/ H_2O_2 AOP 在 AOP 反应器后增加 BAC 罐, BAC 能够提高 2-MIB 和 GSM 的去除率, 将 2-MIB 和 GSM 等臭味物质的含量降低至检测限以下。结果表明: BAC 能够进一步地去除臭味物质, 分解残留 H_2O_2 , 在保障饮用水安全方面具有重要意义。

3 结论

(1) 通过中试验证分析得出, UV/ H_2O_2 AOP 在 2-MIB 质量浓度为 50~70 ng/L 时, H_2O_2 投加 8 mg/L, AOP 出水检测出的 2-MIB 含量完全满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022) 中的要求。

(2) 通过中试试验验证分析得出, UV/ H_2O_2 AOP 在 2-MIB 为 110~120 ng/L 时, H_2O_2 投加 12 mg/L, AOP 出水检测出的 2-MIB 含量满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022) 中的要求。

(3) 通过中试试验分析得出: UV/ H_2O_2 AOP + BAC 工艺对 2-MIB、GSM 等臭味物质的去除效果比较显著, 去除率可达 90%~95%。

(4) 通过中试试验分析得出: UV/ H_2O_2 AOP + BAC 工艺, 不仅可以去除水中残余的 H_2O_2 , 还可以进一步去除水中臭味物质, 优化水质。这也为实际应用提供了强有力的技术支持。

(5) 通过中试试验分析得出, 当进水 2-MIB 的质量浓度低于 100 ng/L, GSM 的质量浓度低于 40 ng/L 时, H_2O_2 的投加量为 4~8 mg/L 时, 经过 UV/ H_2O_2 AOP + BAC 工艺, 出水浓度等于臭味物质检测限。

(6) 在中试试验的实际运行状况中能够分析得出: UV/ H_2O_2 AOP 工艺对 GSM 和 2-MIB 均有良好的去除效果, 通过调整 H_2O_2 投加量、UV 剂量及吨水 UV 功率等参数, 产生更多的 $\cdot\text{OH}$ 能够有利于去除水中 2-MIB 和 GSM。

(7) 通过中试试验验证: 当水厂出现季节性臭味物质超标问题时, 可以优先考虑采用 UV/ H_2O_2 AOP 作为应急措施, 并根据水厂实际情况考虑是否

在 UV/H₂O₂ 后端配备 BAC。

参考文献

- [1] 王永磊, 刘杰, 王猛, 等. 紫外高级氧化工艺降解土臭素 (GSM) 和 2-甲基异茨醇 (2-MIB) 的对比[J]. 环境化学, 2022, 41(9): 3083-3093.
WANG Y L, LIU J, WANG M, et al. Comparative study on degradation of GSM and 2-MIB by ultraviolet advanced oxidation processes[J]. Environmental Chemistry, 2022, 41(9): 3083-3093.
- [2] 朱欢欢, 孙韶华, 冯桂学, 等. 紫外联用高级氧化技术处理饮用水应用进展[J]. 水处理技术, 2019, 45(3): 1-7, 13.
ZHU H H, SUN S H, FENG G X, et al. Research progress of ultraviolet combined advanced oxidation technology for drinking water treatment[J]. Water Treatment Technology, 2019, 45(3): 1-7, 13.
- [3] 辛晓东, 王明泉, 赵清华, 等. 饮用水嗅味物质检测与控制技术研究进展[J]. 中国给水排水, 2013, 29(14): 13-15.
XIN X D, WANG M Q, ZHAO Q H, et al. State-of-the-art of detection and control technologies of odorous compounds in drinking water[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(14): 13-15.
- [4] 刘海勇. UV/H₂O₂ 高级氧化降解水中 GSM 和 2-MIB 试验研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2017.
LIU H Y. Experimental study on oxidative degradation of GSM and 2-MIB by UV/H₂O₂ [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2017.
- [5] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 生活饮用水卫生标准: GB 5749—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Standards for drinking water quality: GB 5749—2022 [S]. Beijing: China Standard Press, 2022.
- [6] 水博阳, 宋小三, 范文江, 等. 饮用水嗅味问题及去除技术研究进展[J]. 应用化工, 2022, 51(10): 3075-3081.
SHUI B Y, SONG X S, FAN W J, et al. Research progress on odor of drinking water and removal technology [J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(10): 3075-3081.
- [7] 史嘉璐, 龙超, 李爱民. 饮用水源水中致嗅物质去除技术研究进展[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(3): 122-126.
SHI J L, LONG C, LI A M. Progress in removal technology of taste and odor compounds-geosmin and 2-MIB in drinking water source [J]. Environmental Science and Technology, 2012, 35(3): 122-126.
- [8] 李学艳, 马军, 陈忠林, 等. 若干氧化剂对水中嗅味物质 2-MIB 的氧化去除[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2007, 24(1): 76-80.
LI X Y, MA J, CHEN Z L, et al. Comparison on the removal efficiency of 2-methylisoborneol by several oxidants in drinking water [J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2007, 24(1): 76-80.
- [9] 黄林, 詹健, 王晓玘. 城市饮用水产生嗅味的原因及控制技术研究[J]. 江西化工, 2008(3): 35-39.
HUANG L, ZHAN J, WANG X P. The research on the reason of taste and odor and control technology of urban drinking water [J]. Jiangxi Chemical Industry, 2008(3): 35-39.
- [10] 胡涛. 饮用水嗅味问题及其分析方法研究进展[J]. 净水技术, 2019, 38(s1): 11-14, 82.
HU T. Research advances of odorous compounds and its analysis methods in drinking water [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(s1): 11-14, 82.
- [11] 李勇, 张晓健, 陈超. 我国饮用水中嗅味问题及其研究进展[J]. 环境科学, 2009, 30(2): 583-588.
LI Y, ZHANG X J, CHEN C. Review on the tastes and odors compounds in drinking water of China [J]. Environmental Science, 2009, 30(2): 583-588.
- [12] 刘勇, 贾瑞宝. UV/H₂O₂ 高级氧化技术在饮用水深度处理中的应用研究进展[J]. 工业用水与废水, 2010, 41(2): 1-5.
LIU Y, JIA R B. Research progress of UV/H₂O₂ advanced oxidation process applied in advanced treatment of drinking water [J]. Industrial Water & Wastewater, 2010, 41(2): 1-5.
- [13] 贾瑞宝, 李桂芳, 潘章斌, 等. 基于新有机污染物风险控制的 UV/H₂O₂-BAC 深度处理技术优化与应用[J]. 净水技术, 2023, 42(5): 44-50.
JIA R B, LI G F, PAN Z B, et al. Optimization and application of UV/H₂O₂-BAC advanced treatment technology based on risk control of emerging organic pollutants [J]. Water Purification Technology, 2019, 42(5): 44-50.
- [14] 杜振齐, 王永磊, 田立平, 等. UV/H₂O₂ 工艺降解饮用水中有机微污染物研究进展[J]. 山东建筑大学学报, 2019, 34(4): 50-57.
DU Z Q, WANG Y L, TIAN L P, et al. Research process of degradation of organic micro-pollutants in drinking water by UV/H₂O₂ process [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2019, 34(4): 50-57.
- [15] ROSENFELDT E J, MELCHER B, LINDEN K G. UV and UV/H₂O₂ treatment of methylisoborneol (MIB) and geosmin in water [J]. Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua, 2005, 54(7): 423-434.
- [16] 王昊. UV/H₂O₂ 高级氧化法深度去除水中嗅味物质[J]. 中国给水排水, 2018, 34(19): 48-51.
WANG H. Removal of odorous compounds in water by UV/H₂O₂ advanced oxidation process [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(19): 48-51.
- [17] JO C H, DIETRICH A M, TANKO J M. Simultaneous degradation of disinfection byproducts and earthy-musty odorants by the UV/H₂O₂ advanced oxidation process [J]. Water Research, 2011, 45(8): 2507-2516.

(下转第 66 页)

- [3] 陈栩云. 广州供水调度信息系统综合评价研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
CHEN X Y. A research on the performance evaluation of Guangzhou water supply dispatching information system [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [4] 朱波, 刘业政. 基于 FAHP 的供水信息化建设效果评价[J]. 电子技术与软件工程, 2022(3): 207-210.
ZHU B, LIU Y Z. Evaluation of water supply informatization construction effectiveness based on FAHP [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2022(3): 207-210.
- [5] 张一鸣, 田雨, 蒋云钟. 基于 TOE 框架的智慧水务建设影响因素评价[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(5): 980-984.
ZHANG Y M, TIAN Y, JIANG Y Z. Evaluation of impact factors of smart water construction based on TOE framework[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(5): 980-984.
- [6] 张美玲. 城市智慧水务建设成熟度评价体系研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2017.
ZHANG M L. Research of maturity evaluation system for urban smart water construction [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2017.
- [7] 夏明. YC 水务公司智慧水务平台成熟度评价研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
XIA M. Research on maturity evaluation of smart water platform of YC water company [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [8] 韩心星, 付明, 梁光华, 等. 地下市政设施运行监测指标体系研究[J]. 安全, 2024, 45(7): 7-13.
HAN X X, FU M, LIANG G H, et al. Research on index system for monitoring the operation of underground municipal facilities [J]. Safety & Security, 2024, 45(7): 7-13.
- [9] 丁睿, 徐首珏, 李君. 数字化项目后评估指标体系探索[J]. 上海信息化, 2024(8): 35-38.
DING R, XU S J, LI J. Exploration of the post-implementation evaluation index system for digital projects [J]. Shanghai Informatization, 2024(8): 35-38.
- [10] 郭小红. 信息化应用水平评价内容的思考[J]. 天津经济, 2011(1): 72-73.
GUO X H. Reflections on the evaluation content of informatization application level [J]. Tianjin Economy, 2011(1): 72-73.
- (上接第 46 页)
- [18] ZOSCHKE K, DIETRICH N, BÖRNICK H, et al. UV-based advanced oxidation processes for the treatment of odour compounds: Efficiency and by-product formation [J]. Water Research, 2012, 46(16): 5365-5373.
- [19] YU J W, YANG M, LIN T F, et al. Effects of surface characteristics of activated carbon on the adsorption of 2-methylisobornel (2-MIB) and geosmin from natural water[J]. Separation and Purification Technology, 2007, 56(3): 363-370.
- [20] 尚菲, 石炳瑞, 丁路明. 基于 UV/H₂O₂ 深度处理组合去除饮用水中嗅味物质的工艺研究[J]. 生物化工, 2022, 8(2): 65-70.
SHANG F, SHI B R, DING L M. Study on the process of removing odorous substances from drinking water based on UV/H₂O₂ advanced treatment combination [J]. Biological Chemical Engineering, 2022, 8(2): 65-70.
- [21] 陈钰杭, 李鑫玮, 甘振东, 等. 中试紫外高级氧化耦合生物活性炭工艺去除典型嗅味物质[J]. 环境化学, 2023, 42(12): 4366-4374.
CHEN Y H, LI X W, GAN Z D, et al. Pilot test of removing typical odors by the coupled UV advanced oxidation and biological activated carbon processes [J]. Environmental Chemistry, 2023, 42(12): 4366-4374.
- [22] 甘慧慧, 俞梦飞, 柳成荫, 等. 饮用水中嗅味物质的高级氧化处理及其检测方法的研究进展[J]. 宁波大学学报(理工版), 2025, 38(1): 73-81.
GAN H H, YU M F, LIU C Y, et al. Advanced oxidation treatment and analytical detection for odorous substances in drinking water: A review [J]. Journal of Ningbo University (Natural Science and Engineering Edition), 2025, 38(1): 73-81.
- [23] 张瑞芳, 刘志壮, 刘玉田. 高级氧化技术在饮用水处理中的应用研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(7): 187-189, 255.
ZHANG R F, LIU Z Z, LIU Y T. Research progress on the application of advanced oxidation technology in drinking water treatment [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2024, 42(7): 187-189, 255.
- [24] SCHOLZ M, MARTIN R J. Ecological equilibrium on biological activated carbon [J]. Water Research, 1997, 31(12): 2959-2968.