

付雨,姚恒军,赵学志,等. UV/H₂O₂ 高级氧化工艺对去除饮用水中 2-MIB 和 GSM 效果的分析[J]. 净水技术, 2025, 44(6): 54-61.

FU Y, YAO H J, ZHAO X Z, et al. Analysis of effect of UV/H₂O₂ AOP on 2-MIB and GSM removal in drinking water [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(6): 54-61.

UV/H₂O₂ 高级氧化工艺对去除饮用水中 2-MIB 和 GSM 效果的分析

付雨¹,姚恒军^{2,*},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 261000;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 2-甲基异莰醇(2-MIB)和土臭素(GSM)等典型嗅味物质难以有效控制的问题,【方法】文章开展了紫外/过氧化氢(H₂O₂)高级氧化中试试验验证。【结果】发现 2-MIB 和 GSM 初始浓度、H₂O₂ 的投加量、进水水量等均对 2-MIB 和 GSM 的去除率有着重要影响,在该试验条件下,当 H₂O₂ 投加量从 0 提高到 12 mg/L 时,2-MIB 的去除率从 7.54% 提高至 87.24%,GSM 的去除率从 22.77% 提高至 89.66%;当进水量减半(紫外剂量加倍),H₂O₂ 投加量从 0 提高到 12 mg/L 时,2-MIB 的去除率从 7.49% 提高至 92.86%,GSM 的去除率从 17.13% 提高至 90.98%。【结论】研究表明,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羟基自由基起到了关键作用,也表明 H₂O₂ 在紫外灯的照射下能够生成更多的羟基自由基。该研究可为饮用水中的嗅味物质去除提供有力的技术支持。

关键词 2-甲基异莰醇(2-MIB) 土臭素(GSM) 紫外/过氧化氢 高级氧化工艺 中试

中图分类号: TU991 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2025)06-0054-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.06.007

Analysis of Effect of UV/H₂O₂ AOP on 2-MIB and GSM Removal in Drinking Water

FU Yu¹, YAO Hengjun^{2,*}, ZHAO Xuezhi¹, ZHENG Qun¹, ZHENG Chunyuan¹, HAN Jinglong³, PAN Zhangbin⁴

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

2. Weifang Municipal Public Service Center, Weifang 261000, 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] Aiming at the problem that typical odor and taste substances such as 2-methylisoborneol (2-MIB) and geosmin(GSM) in drinking water are difficult to effectively control, [Methods] the pilot test of ultraviolet/hydrogen peroxide (H₂O₂) advanced oxidation was carried out in this paper. [Results] It was found that the initial concentration of 2-MIB and GSM, the dosage of H₂O₂ and the water intake had important effects on the removal rate of 2-MIB and GSM. Under the experimental conditions of this study, when the dosage of H₂O₂ increased from 0 to 12 mg/L, the removal rate of 2-MIB increased from 7.54% to 87.24%, the removal rate of GSM increased from 22.77% to 89.66%. When the water intake was halved (ultraviolet dosage doubled) and the H₂O₂ dosage increased from 0 to 12 mg/L, the removal rate of 2-MIB increased from 7.49% to 92.86% and the removal rate of GSM increased from 17.13% to 90.98%. [Conclusion] The study shows that the presence of H₂O₂ can significantly improve the removal rate of odor and taste substances, and hydroxyl radical plays a key role in removal process of odor and taste substances, and H₂O₂ can generate more hydroxyl radicals under ultraviolet irradiation. This study can provide powerful technical support for removal of

[收稿日期] 2024-11-23

[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, E-mail:1348334786@qq.com。

[通信作者] 姚恒军(1970—),男,研究方向为净水新工艺开发及水质监测, E-mail:wfsgycjzk@wf.shandong.cn。

odor and taste substances in drinking water.

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

随着水域富营养化现象频发,藻类暴发性生长,其产生的臭味物质等污染了水源水,造成了经济与环境的损失,影响着供水安全^[1-2]。水环境新污染物问题日益凸显,饮用水源水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)从原标准中参考指标纳入常规指标^[6-8],部分水厂的传统工艺难以应对臭味物质所引发的水质问题,需要采取更加科学有效的深度处理工艺进行应对^[9-11]。为了解决饮用水中 2-MIB 和 GSM 等引起的臭味物质问题,国内外学者开展了大量针对臭味物质去除技术的研究。

目前,在欧美西方发达国家已有水厂采用基于紫外(UV)的高级氧化处理技术,工艺效果明显且运行稳定,臭味物质、抗生素等难降解有机污染物得到有效控制^[12-13]。UV/过氧化氢(H₂O₂)高级氧化工艺去除 2-MIB 和 GSM 主要原理是 UV 辐射下激发产生氧化能力较强的羟基自由基,羟基自由基具有极高的氧化能力,能够无选择性地与水中有机物进行反应,从而去除水中的 2-MIB 和 GSM 等臭味物质^[14-15]。单线态氧、超氧自由基等其他自由基在降解过程中也可起到一定作用^[16-17]。

曾宁^[18]采用 UV/H₂O₂ 高级氧化工艺(AOP)技术对 2-MIB 和 GSM 进行去除,在短时间内有较好的去除效果,其降解反应符合一级反应动力学模型。王昊^[19]在 UV/H₂O₂ 的中试研究中发现 2-MIB 和 GSM 去除率与进水流量成反比,与 UV 剂量成正比,且随 H₂O₂ 剂量的增大呈先快后慢的增大趋势。Jo 等^[20]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。

因此,文章通过搭建 UV/H₂O₂ 中试装置,投加一定浓度水厂常见臭味物质 2-MIB 和 GSM,考察 2-MIB 和 GSM 的初始浓度, H₂O₂ 投加量,进水水量等对臭味物质降解效果的影响,同时在 AOP 反应器后配备生物活性炭罐,解决 H₂O₂ 残留问题及臭味物质去除等作用^[21]。本中试研究结果可为后续水厂处理臭味物质时提供工艺技术参考^[22]。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设备

试验在浙江省绍兴市某水厂试验基地进行,试验所需化学试剂包括 2-MIB、GSM 标准溶液(纯度>99%),质量分数为 35%的 H₂O₂ 溶液。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), 2-MIB 和 GSM 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 含量采用长春吉大小天鹅仪器有限公司生产的 H₂O₂ 测定仪(GDYS-102SC)进行测定,投加装置为保定齐力恒流泵有限公司生产的蠕动泵(BT100-02)。

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信息如表 1 所示。

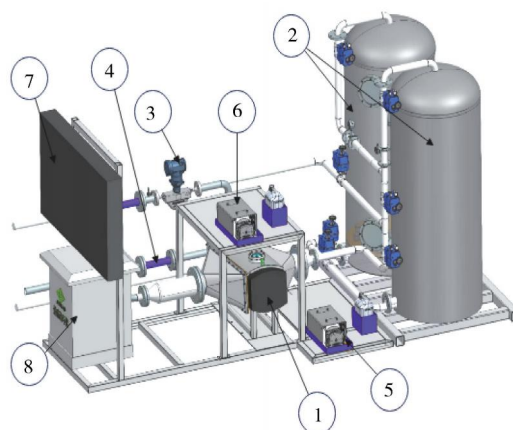


图 1 中试装置

Fig. 1 Pilot Test Device

表 1 中试装置主要组成部件表

Tab. 1 Main Components of the Pilot Plant

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

1.3 UV/H₂O₂ 中试工艺

中试试验流程如图 2 所示,该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,进水端为水厂原水,为验证中试装置和工艺对嗅味物质的去除效果,进水流量分别设置为 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 反应器出水后接入活性炭罐,以去除反应器中出水中残留的 H₂O₂、2-MIB 和 GSM 等嗅味物质。

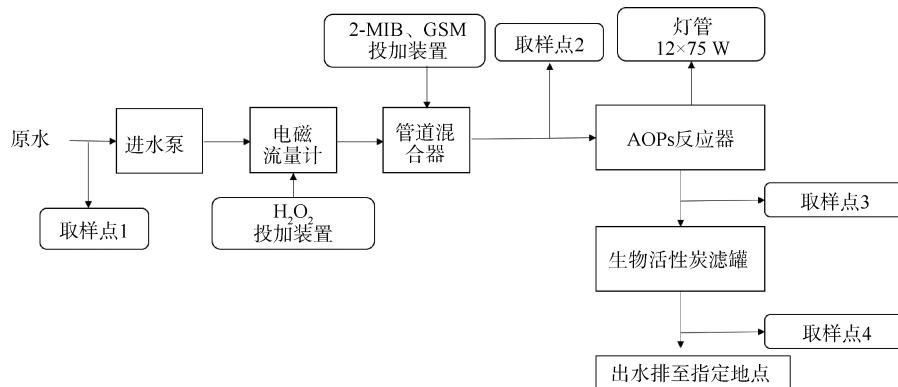


图 2 UV/H₂O₂ AOP 中试流程

Fig. 2 Process Flow of UV/H₂O₂ AOP

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《生活饮用水标准检验方法 第 8 部分:有机物指标》(GB/T 5750.8—2023)中 76、77 小节。利用固相微萃取纤维吸附样品中的 2-MIB 和 GSM,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,高纯氮气,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,扫描模式为选择离子检测(SIM)^[23]。

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 对嗅味物质去除效果

图 3 和图 4 为不同 H₂O₂ 投加量对嗅味物质浓度影响,进水流量相同(10 m³/h),2-MIB 投加量相同(80 ng/L),GSM 投加量相同(40 ng/L),吨水 UV 功率相同(90 W),H₂O₂ 投加量为变量,对比 2-MIB 和 GSM 的浓度变化。

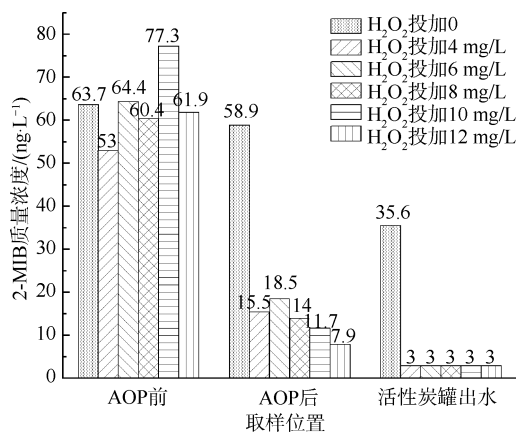


图 3 进水量为 10 m³/h 时不同 H₂O₂ 投加量下 2-MIB 的浓度变化

Fig. 3 Concentration Variation of 2-MIB under Different H₂O₂ Dosages as Inflow of 10 m³/h

如表 2 所示,H₂O₂ 的投加量为 0 时,对比 AOP

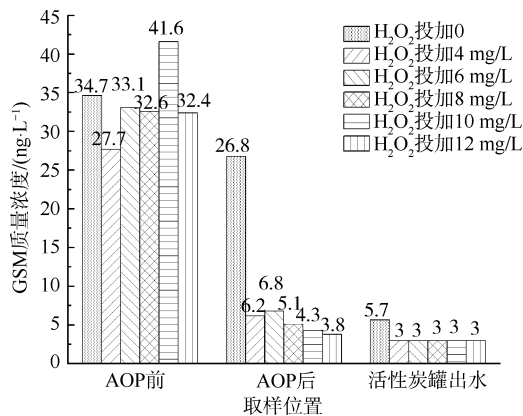


图4 进水量为10 m³/h时不同H₂O₂投加量下GSM的浓度变化

Fig.4 Concentration Variation of GSM under Different H₂O₂ Dosages as Inflow of 10 m³/h

表2 不同H₂O₂投加量下2-MIB、GSM去除率

Tab.2 Removal Rates of 2-MIB and GSM under Different H₂O₂ Dosages

水量/ (m ³ ·h ⁻¹)	H ₂ O ₂ 投加量/ (mg·L ⁻¹)	2-MIB 理论投加量/ (ng·L ⁻¹)	GSM 理论投加量/ (ng·L ⁻¹)	取样位置	2-MIB 去除率	GSM 去除率
10	0	80	40	AOP 前	—	—
				AOP 后	7.54%	22.77%
				活性炭罐出水	39.56%	78.73%
10	4	80	40	AOP 前	—	—
				AOP 后	70.75%	77.62%
				活性炭罐出水	80.65%	51.61%
10	6	80	40	AOP 前	—	—
				AOP 后	71.27%	79.46%
				活性炭罐出水	83.78%	55.88%
10	8	80	40	AOP 前	—	—
				AOP 后	76.82%	84.36%
				活性炭罐出水	78.57%	41.18%
10	10	80	40	AOP 前	—	—
				AOP 后	84.86%	89.66%
				活性炭罐出水	74.36%	30.23%
10	12	80	40	AOP 前	—	—
				AOP 后	87.24%	88.27%
				活性炭罐出水	62.03%	21.05%

H₂O₂ 的利用率为 9.09%, 经过生物活性炭罐后, 除 H₂O₂ 投加量为 0 时, 2-MIB 超出国家标准 (10 ng/L) 外, 其余各组 2-MIB 的质量浓度均低于 3 ng/L (最低检测限), GSM 均低于国家标准, 且 H₂O₂ 可完全被分解。

前后, 2-MIB 的去除率为 7.54%, GSM 的去除率为 22.77%。H₂O₂ 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 77.62%, H₂O₂ 的利用率为 11.63%。H₂O₂ 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%, H₂O₂ 的利用率为 9.68%。H₂O₂ 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%, H₂O₂ 的利用率为 13.41%。H₂O₂ 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%, H₂O₂ 的利用率为 12.38%。H₂O₂ 的投加量为 12 mg/L 时, 对比 AOP 设备前后, 2-MIB 的去除率为 87.24%, GSM 的去除率为 88.27%,

如表 2 所示, 当 H₂O₂ 质量浓度从 0 增加到 12 mg/L 时, 2-MIB 去除率从 7.54% 提高至 87.24%, GSM 的去除率从 22.77% 提高至 88.27%。表明, H₂O₂ 的存在能显著提升 2-MIB 和 GSM 的去除率, 而 2-MIB 和 GSM 的去除过程中羟基自由基起到了

关键作用,也表明 H₂O₂ 在 UV 灯的照射下生成的羟基自由基在 2-MIB 和 GSM 的去除中起到关键作用^[24-25]。

图 5 和图 6 为不同 H₂O₂ 投加量对臭味物质浓度影响,进水量相同(5 m³/h),2-MIB 投加量相同(80 ng/L),GSM 投加量相同(40 ng/L),吨水 UV 功率相同(180 W)、H₂O₂ 投加量为变量,对比 2-MIB、GSM 的浓度变化。

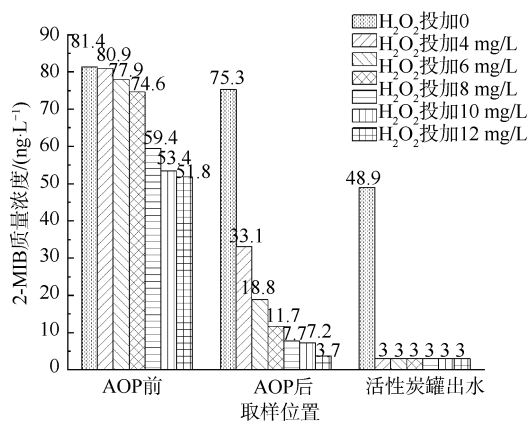


图 5 进水量为 5 m³/h 时不同 H₂O₂ 投加量下 2-MIB 的浓度变化

Fig. 5 Concentration Variation of 2-MIB under Different H₂O₂ Dosages as Inflow of 5 m³/h

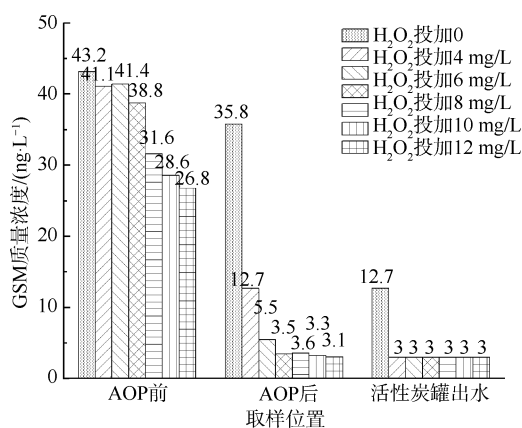


图 6 进水量为 5 m³/h 时不同 H₂O₂ 投加量下 GSM 的浓度变化

Fig. 6 Concentration Variation of GSM under Different H₂O₂ Dosages as Inflow of 5 m³/h

如表 3 所示,H₂O₂ 投加量为 0 时,对比 AOP 设备前后,2-MIB 的去除率为 7.49%,GSM 的去除率为 17.13%。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%。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 86.71%,H₂O₂ 的利用率为 11.63%。H₂O₂ 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%,H₂O₂ 的利用率为 16.39%。H₂O₂ 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 88.61%,H₂O₂ 的利用率为 17.86%。在 H₂O₂ 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 88.46%,H₂O₂ 的利用率为 15.15%。H₂O₂ 的投加量为 12 mg/L 时,对比 AOP 设备前后,2-MIB 的去除率为 92.86%,GSM 的去除率为 88.43%,H₂O₂ 的利用率为 19.53%。

经过生物活性炭罐后,除 H₂O₂ 投加量为 0 时,2-MIB 和 GSM 超出国家标准(10 ng/L)外,其余各组 2-MIB 均低于 3 ng/L(最低检测限),GSM 均低于 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 0 增加到 12 mg/L 时,2-MIB 去除率从 7.49% 提高至 92.86%,GSM 的去除率从 17.13% 提高至 88.43%,其中最高去除率为 90.98%。表明,H₂O₂ 的存在能显著提升 2-MIB 和 GSM 的去除率,而 2-MIB 和 GSM 的去除过程中羟基自由基起到了关键作用,也表明 H₂O₂ 在 UV 灯的照射下生成的羟基自由基在 2-MIB 和 GSM 的去除中起到关键作用^[24-25]。

2.2 UV 剂量对 2-MIB 和 GSM 的影响

在同一套中试设备中,当 H₂O₂ 投加量和臭味物质投加量一致时,进水量减半即为 UV 剂量加倍。如图 7 和图 8 所示,当进水量从 10 m³/h 减半至 5 m³/h 时,UV 剂量升高 1 倍,2-MIB 和 GSM 的去除率随之增加。当 H₂O₂ 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 77.62% 提高至 86.71%;当 H₂O₂ 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 H₂O₂ 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 88.61%;当 H₂O₂ 投加量为 10 mg/L 时,2-MIB 的去除率从 84.86% 提高至 86.52%,GSM 的

表 3 不同 H₂O₂ 投加量下 2-MIB、GSM 的去除率
Tab. 3 Removal Rates of 2-MIB and GSM under Different Dosages of H₂O₂

水量/ (m ³ ·h ⁻¹)	H ₂ O ₂ 投加量/ (mg·L ⁻¹)	2-MIB 理论投加量/ (ng·L ⁻¹)	GSM 理论投加量/ (ng·L ⁻¹)	取样位置	2-MIB 去除率	GSM 去除率
5	0	80	40	AOP 前	—	—
				AOP 后	7.49%	17.13%
				活性炭罐出水	35.06%	64.53%
5	2	80	40	AOP 前	—	—
				AOP 后	59.09%	69.10%
				活性炭罐出水	90.94%	76.38%
5	4	80	40	AOP 前	—	—
				AOP 后	75.87%	86.71%
				活性炭罐出水	84.04%	45.45%
5	6	80	40	AOP 前	—	—
				AOP 后	84.32%	90.98%
				活性炭罐出水	74.36%	14.29%
5	8	80	40	AOP 前	—	—
				AOP 后	87.04%	88.61%
				活性炭罐出水	61.04%	16.67%
5	10	80	40	AOP 前	—	—
				AOP 后	86.52%	88.46%
				活性炭罐出水	58.33%	9.09%
5	12	80	40	AOP 前	—	—
				AOP 后	92.86%	88.43%
				活性炭罐出水	18.92%	3.23%

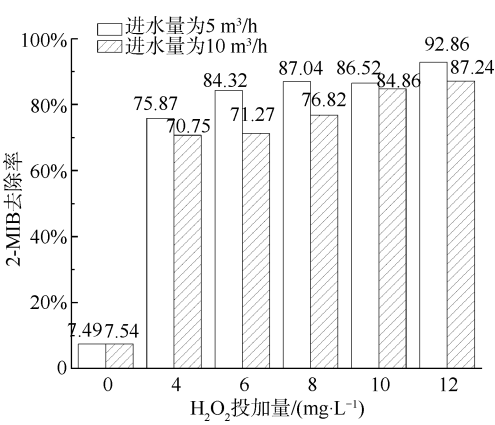


图 7 不同 H₂O₂ 投加量对 2-MIB 的去除效果影响
Fig. 7 Influence of Different Dosages of H₂O₂ on 2-MIB Removal

去除率从 89.66%降低至 88.46%;当 H₂O₂ 投加量为 12 mg/L 时,2-MIB 的去除率从 87.24%提高至 92.86%,GSM 的去除率从 88.27%提高至 88.43%。

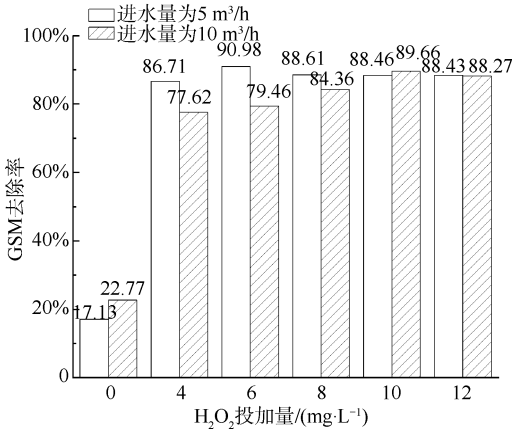


图 8 不同 H₂O₂ 投加量对 GSM 的去除效果影响
Fig. 8 Influence of Different Dosages of H₂O₂ on GSM Removal

结果表明,UV 剂量的升高能提高 2-MIB 和 GSM 的去除效果,而臭味物质的去除是依靠羟基自由基。这说明当 H₂O₂ 投加量一定时,UV 剂量越大,产生的

羟基自由基越多, 嗅味物质去除率也就提高, 这是由于 UV 的激发, 这与甘慧慧等^[24]的研究结果一致。

2.3 生物活性炭对 2-MIB 和 GSM 的影响

UV/H₂O₂ AOP 在去除 2-MIB 和 GSM 的过程中存在 H₂O₂ 残留问题, 影响后续消毒等过程, 因此需通过耦合生物活性炭解决存在残留 H₂O₂ 问题及 2-MIB 和 GSM^[21]。生物活性炭去除嗅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, 生物活性炭的表面和空隙内附着嗅味物质, 以达到去除的目的, 但是生物活性炭饱和后去除效果会逐渐降低, 这与 Scholz 等^[26]的研究一致。UV/H₂O₂ AOP 在 AOP 反应器后增加生物活性炭罐, 生物活性炭能够提高 2-MIB 和 GSM 的去除率, 将 2-MIB 和 GSM 含量降低至检测限以下。结果表明, 生物活性炭能够进一步地去除嗅味物质, 分解残留 H₂O₂, 在保障饮用水安全方面具有重要意义。

3 结论

通过中试试验研究发现, “UV/H₂O₂ AOP+生物活性炭”工艺对 2-MIB、GSM 等嗅味物质的去除效果比较显著, 出水满足新国标《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022) 中对嗅味物质的要求。

(1) 通过中试试验研究发现, “UV/H₂O₂ AOP+生物活性炭”工艺对 2-MIB、GSM 等嗅味物质的去除效果比较显著, 去除率可达 90%~95%。

(2) 通过中试试验研究分析得出, “UV/H₂O₂ AOP+生物活性炭”工艺, 不仅可以去除水中残余的 H₂O₂, 还可以进一步去除水中微量有机物, 优化水质。这也为实际应用提供了强有力的技术支持。

(3) 通过中试试验研究分析得出, 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, H₂O₂ 的投加量为 4~8 mg/L 时, 经过“UV/H₂O₂ AOP+生物活性炭”工艺, 出水浓度低于检测限。

(4) 通过调整 H₂O₂ 投加量、UV 剂量及吨水 UV 功率等参数, 产生更多的羟基自由基能够有利于去除水中 2-MIB 和 GSM。

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-甲基异莰醇 (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]. Technology of Water Treatment, 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] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中华人民共和国国家标准化委员会. 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 of People's Republic of China, National Standardization Administration of People's Republic of China. 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 & 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. 饮用水臭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. 我国饮用水中臭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] 夏萍, 张东, 周新宇, 等. 紫外/过氧化氢(UV/H₂O₂)高级氧化工艺在饮用水处理中的应用[J]. 净水技术, 2012, 31(4): 17-19, 101.
- XIA P, ZHANG D, ZHOU X Y, et al. Application of UV/hydrogen peroxide (UV/H₂O₂) advanced oxidation process in the advanced treatment of drinking water [J]. Water Purification Technology, 2012, 31(4): 17-19, 101.
- [13] YU J W, YANG M, LIN T F, et al. Effects of surface characteristics of activated carbon on the adsorption of 2-methylisobornel (MIB) and geosmin from natural water [J]. Separation and Purification Technology, 2007, 56(3): 363-370.
- [14] 苏晓, 贾霞珍, 胡建坤, 等. 饮用水中 Geosmin 和 2-MIB 去除技术研究现状及展望[J]. 给水排水, 2021, 57(s1): 517-523.
- SU X, JIA X Z, HU J K, et al. Research status and prospect of geosmin and 2-MIB removal technology in drinking water [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(s1): 517-523.
- [15] 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.
- [16] 宋喆. 紫外及紫外/过硫酸盐降解水中苯妥英钠的对比研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- SONG Z. Comparative degradation of phenytoin sodium in aqueous solution by ultraviolet and ultraviolet/persulfate [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [17] 刘梦娇. 光活化过硫酸盐降解水中 PhACs 特性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023.
- LIU M J. Degradation of PhACs in water by photoactivated persulfate [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2023.
- [18] 曾宁. 紫外光—双氧水高级氧化技术对饮用水中典型致嗅物质去除的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
- ZENG N. Study on removing typical odorants in drinking water by advanced oxidation technology of ultraviolet combined with hydrogen peroxide [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.
- [19] 王昊. UV/H₂O₂ 高级氧化法深度去除水中臭味物质[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.
- [20] 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.
- [21] 王禹翰. UV/H₂O₂/O₃-BAC 组合工艺去除典型磺胺类抗生素的效能研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2024.
- WANG Y H. Study on the efficiency of UV/H₂O₂/O₃-BAC combined process to remove typical sulfonamides antibiotics [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2024.
- [22] 尚菲, 石炳瑞, 丁路明. 基于 UV/H₂O₂ 深度处理组合去除饮用水中臭味物质的工艺研究[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]. Bioprocess, 2022, 8(2): 65-70.
- [23] 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臭味物质[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.
- [24] 甘慧慧, 俞梦飞, 柳成荫, 等. 饮用水中臭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.
- [25] 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.
- [26] SCHOLZ M, MARTIN R J. Ecological equilibrium on biological activated carbon [J]. Water Research, 1997, 31(12): 2959-2968.