

李振邦, 陈婷, 彭锦玉, 等. O_3/H_2O_2 工艺用于水厂臭氧预氧化改造的工程运行分析[J]. 净水技术, 2026, 45(4): 60-68.

Li Z B, Chen T, Peng J Y, et al. Analysis of engineering operation for O_3/H_2O_2 process applied in ozone pre-oxidation reconstruction of WTP[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(4): 60-68.

O_3/H_2O_2 工艺用于水厂臭氧预氧化改造的工程运行分析

李振邦¹, 陈婷², 彭锦玉¹, 祝海波², 卞君伟¹, 王全勇^{1,*}

(1. 山东华城工程技术有限公司, 山东济南 250101; 2. 湛江市粤海水务投资集团有限公司, 广东湛江 524000)

摘要 【目的】针对南方地区高藻高嗅水源在常规处理工艺下普遍存在藻类与臭味物质去除效率低的问题, 本文以一座规模为 $2.5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ 的南方某水厂为研究对象, 对工艺进行升级改造后的运行效能和成本进行了评估, 旨在实现出水水质的提升与运行成本的优化。【方法】将水厂原有的预臭氧单元升级为臭氧/过氧化氢(O_3/H_2O_2)高级氧化预处理工艺, 基于改造前后的长期运行数据对比, 系统探讨了该工艺对藻类、典型臭味物质及其他常规水质指标的去除效能, 并分析了其经济可行性。【结果】 O_3/H_2O_2 工艺对藻类与臭味物质的去除效果显著提升, 在原生藻类密度为 $2.1 \times 10^7 \sim 2.5 \times 10^7$ 个/L, 2-甲基异苊醇(2-MIB)和土臭素(GSM)质量浓度分别为 $35 \sim 70 \text{ ng/L}$ 和 $10 \sim 12 \text{ ng/L}$ 时, 沉淀池出水藻类密度由预臭氧系统下的 $1.0 \times 10^5 \sim 7.9 \times 10^5$ 个/L 降低至 $9.3 \times 10^2 \sim 3.6 \times 10^3$ 个/L; 对 2-MIB 和 GSM 的去除率分别由原来的 51.6%~67.8% 和 26%~58% 提升至 75.0%~80.6% 和 73%~78%。此外, 在聚合氯化铝(PAC)投加量降低 31.6%~40.9% 的条件下, 砂滤池出水浑浊度由 $0.27 \sim 0.33 \text{ NTU}$ 进一步降低至 $0.19 \sim 0.23 \text{ NTU}$, 高锰酸盐指数由 $1.70 \sim 2.20 \text{ mg/L}$ 降至 $1.30 \sim 1.57 \text{ mg/L}$, 锰质量浓度由 $0.02 \sim 0.06 \text{ mg/L}$ 降至 0.005 mg/L 以下。【结论】 O_3/H_2O_2 高级氧化技术可作为一项高效的前置处理工艺, 有效应对高藻高嗅水源, 在显著改善饮用水感官指标与化学安全性的同时, 降低药剂消耗成本, 对同类水厂的升级改造具有重要的工程借鉴与参考价值。

关键词 O_3/H_2O_2 高级氧化工艺 藻类 臭味物质 浑浊度 除锰

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)04-0060-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.04.007

Analysis of Engineering Operation for O_3/H_2O_2 Process Applied in Ozone Pre-Oxidation Reconstruction of WTP

Li Zhenbang¹, Chen Ting², Peng Jinyu¹, Zhu Haibo², Bian Junwei¹, Wang Quanyong^{1,*}

(1. Shandong Huacheng Engineering Technology Co., Ltd., Jinan 250101, China;

2. Zhanjiang Yuehai Water Supply Investment Group Co., Ltd., Zhanjiang 524000, China)

Abstract [Objective] Addressing the widespread issue of low removal efficiency for algae and odor-causing substances in high-algal, high-odor water sources during conventional treatment processes in southern regions, this paper evaluates the operational performance and costs of process after upgrading and reconstruction at a southern water treatment plant(WTP) with a capacity of $2.5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$. The objective is to enhance effluent water quality while optimizing operational costs. [Methods] The pre-ozonation unit at the WTP was upgraded to an ozone/hydrogen peroxide(O_3/H_2O_2) AOP pretreatment. By comparing long-term operational data before and after the reconstruction, the removal efficiency of this process on algae, typical odor substances, and other conventional water quality indices was systematically evaluated and its economic feasibility was analyzed. [Results] The O_3/H_2O_2 process significantly enhanced the removal of algae and odor substances. When algal density in raw water ranged from 2.1×10^7 cells/L to 2.5×10^7 cells/L, and the mass concentrations of 2-methylisoborneol (2-MIB) and geosmin (GSM) were $35 \sim 70 \text{ ng/L}$ and $10 \sim 12 \text{ ng/L}$, respectively, the algal density in the sedimentation tank effluent decreased from $1.0 \times 10^5 \sim 7.9 \times 10^5$ cells/L under the pre-ozonation process to

[收稿日期] 2025-12-05

[基金项目] 海右计划产业领军人才创新团队项目(NO1362022088); 山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2022TSGC2119)

[作者简介] 李振邦(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为给排水工程, E-mail: lizb1218@163.com。

[通信作者] 王全勇(1969—), 男, 正高级工程师, 主要从事给排水工程等工作, E-mail: hkyys@vip.sina.com。

$9.3 \times 10^2 - 3.6 \times 10^3$ cells/L, the removal rates of 2-MIB and GSM increased from 51.6%–67.8% and 26%–58% in the pre-ozonation effluent to 75.0%–80.6% and 73%–78%, respectively. Furthermore, with a 31.6%–40.9% reduction in the polyaluminum chloride (PAC) dosage, the turbidity of the sand filter effluent decreased from 0.27–0.33 NTU to 0.19–0.23 NTU, the permanganate index dropped from 1.70–2.20 mg/L to 1.30–1.57 mg/L, and the manganese mass concentration was reduced from 0.02–0.06 mg/L to below 0.005 mg/L. [Conclusion] The O_3/H_2O_2 AOP can serve as an efficient pretreatment process, effectively addressing water sources with high algae and odor levels. While significantly improving the sensory indices and chemical safety of drinking water, it also lowers chemical consumption costs, offering valuable engineering insights and reference significance for the upgrading and reconstruction of similar WTPs.

Keywords O_3/H_2O_2 AOP algae taste and odor compound turbidity manganese removal

我国南方地区水系发达,气候温暖,水体富营养化问题日益突出。由此引发的藻类大量繁殖及其释放典型臭味物质,如 2-甲基异茨醇(2-MIB)和土臭素(GSM),已成为困扰许多水厂稳定供水的一大难题^[1-2]。藻类本身不仅会堵塞滤池、缩短过滤周期,部分藻种更是消毒副产物前体物的重要来源,严重威胁饮用水安全性。而 2-MIB 和 GSM 等臭味物质因其阈值极低、性质稳定、难以通过常规的“混凝-沉淀-过滤”工艺有效去除、极易穿透处理流程,导致水厂出水含有令人不悦的土霉异味,构成严重的感官性水质问题^[3]。

为应对这一挑战,臭氧(O_3)氧化预处理技术因其具有较强除藻和强化混凝功能,在给水处理领域得到了广泛应用,然而,该技术的处理效果受 O_3 投加量的影响较大,存在不稳定性问题^[4]。此外,在面对高浓度、高稳定性的臭味物质时,常规 O_3 氧化常因氧化性不足而导致去除效率有限,并可能伴随生成溴酸盐(BrO_3^-)等副产物风险^[5]。相比之下,臭氧/双氧水(O_3/H_2O_2)高级氧化工艺可利用 H_2O_2 与 O_3 经过链式反应产生活性更强的羟基自由基($\cdot OH$)。 $\cdot OH$ 的非选择性氧化能力能更高效地降解 2-MIB、GSM 等微量有机污染物,并有效破坏藻细胞结构,从而提升后续工艺的除藻效率,并在一定程度上抑制 BrO_3^- 的生成^[6-7]。

因此,本文以广东省某规模为 2.5×10^5 m^3/d 的水厂为对象,将水厂现有的预 O_3 单元升级改造为 O_3/H_2O_2 高级氧化预处理工艺。通过系统对比工艺改造前后的运行数据,重点探讨该技术对藻类数量、典型臭味物质(2-MIB、GSM)的强化去除效率以及对 BrO_3^- 生成的控制能力,同时分析其对浊度、高锰酸盐指数和锰去除效果的协同改善作用,并进一步探讨其经济可行性。本文旨在为具有类似预 O_3

设施且面临藻类及臭味问题的水厂工艺升级提供可靠的技术支撑与工程示范。

1 水厂概况

1.1 供水规模与工艺

广东省 X 水厂建设规模为 25 万 m^3/d ,原水取自 H 水库。主体水处理工艺为“预臭氧接触池+机械混合池+网格絮凝池+平流沉淀池+V 型砂滤池+消毒”,工艺流程如图 1 所示。其中,预臭氧接触池尺寸为 25.4 m×11.8 m×7.1 m,有效水深为 6.0 m,分为 2 池,单池有效容积为 467 m^3 ,每池进口设置控制闸门,每池各设 1 个投加点,通过立式射流器投加 O_3 ,然后通过喷嘴扩散与原水混合, O_3 投加量为 0.5~1.5 mg/L。为应对季节性原水臭味物质、藻类和锰浓度骤增,在预臭氧接触池前投加次氯酸钠($NaClO$),投加量为 0.5~1.0 mg/L。

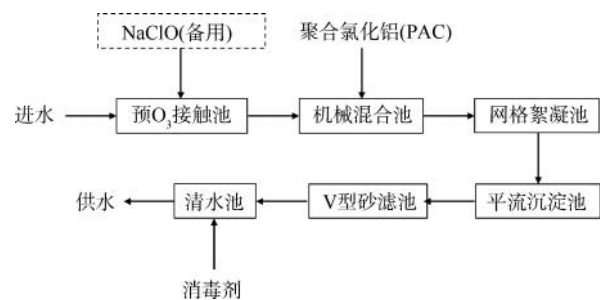


图 1 水处理工艺流程

Fig. 1 Process Flow of Water Treatment

1.2 原水水质及现存问题分析

由表 1 可知,X 水厂原水水质具有典型的高藻、高有机物的复合污染特征,高藻类浓度一方面降低混凝效率,导致 PAC 投加量高达 4.0~6.0 mg/L,另一方面加速滤池堵塞,导致滤池反洗周期仅为 8~10 h。预臭氧工段 O_3 氧化能力不足等因素,难以有效去除水中臭味物质及锰离子,导致出厂水面临嗅

味问题以及锰超标的风险。为控制藻类,保障出厂水 2-MIB 和 GSM 质量浓度控制在 10 ng/L 以下,水厂采用在预 O₃ 接触池前投加 NaClO 的前加氯工艺,但在原水有机物浓度较高(高锰酸盐指数≥5.0 mg/L)的情况下,这一措施又会增加消毒副产物超标的风险。

表 1 原水水质
Tab. 1 Raw Water Quality

水质指标	数值
浊度度/NTU	3~5
色度/度	30~35
2-MIB/(ng·L ⁻¹)	35~70
GSM/(ng·L ⁻¹)	10~12
藻类密度/(个·L ⁻¹)	2.1×10 ⁷ ~2.5×10 ⁷
高锰酸盐指数/(mg·L ⁻¹)	3.87~5.80
锰/(mg·L ⁻¹)	0.1~0.2

2 主要工艺设计

结合 X 水厂现状运行情况,本次升级改造工程主要针对预 O₃ 工段进行升级改造,改造后的主体水处理工艺为“O₃/H₂O₂ 高级氧化池+机械混合池+网格絮凝池+平流沉淀池+V 型砂滤池+消毒”,工艺流程如图 2 所示,主要工艺设计如下。

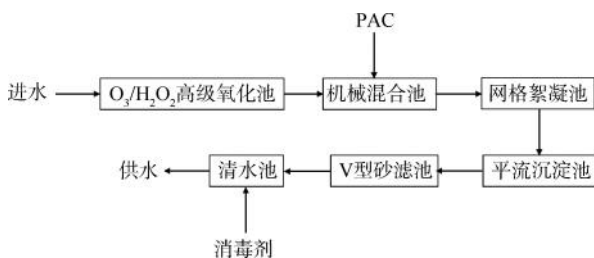


图 2 改造后工艺流程

Fig. 2 Process Flow after Reconstruction

(1) O₃/H₂O₂ 高级氧化池:在原有的 2 座 O₃ 接触池内新增射流布水管道与 O₃ 投加管道,为显著提高 O₃ 的溶解与反应效率,优化 O₃ 投加方式,由单点投加 O₃ 改造为 3 点投加,并采用多喷嘴自激脉冲空化射流曝气装置代替原有单只射流曝气装置,提升 O₃ 在水体中的传质效率^[8-9], O₃ 投加量为 0.5~1.5 mg/L,氧化反应时间为 5 min。

(2) H₂O₂ 投加系统:包含容积均为 2 m³ 的 H₂O₂ 储罐 2 台及配套计量泵 2 台,为达到高级氧化效果,按 O₃ 和 H₂O₂ 质量比为 10 : 1~5 : 1 投加

H₂O₂, H₂O₂ 有效质量分数为 7.5%,投加点位为氧化池进水端,并可根据出水效果调节投加位置。

(3) 实现新旧系统独立切换运行:在新、旧系统连接处增设三通、阀门,方便进行新旧系统切换,确保系统运行的灵活性与可靠性。

(4) 次氯酸钠投加系统:在切换至 O₃/H₂O₂ 高级氧化工艺后,前端停止投加 NaClO。

3 分析指标及检测方法

藻类数量通过显微镜直接计数法测定;2-MIB、GSM、三卤甲烷、三氯甲烷浓度采用固相微萃取-气相色谱质谱联用仪测定,其中 2-MIB、GSM 检测参照《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),三卤甲烷、三氯甲烷检测参照《生活饮用水标准检验方法 第 10 部分:消毒副产物指标》(GB/T 5750.10—2023);BrO₃⁻ 浓度通过离子色谱-质谱联用法测定;浊度采用浊度仪(哈希 TL2300)检测;高锰酸盐指数的测定参照《水质 高锰酸盐指数的测定》(GB 11892—1989);氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定;砂滤池滤料的形貌结构及元素组成采用扫描电子显微镜(JSM-6700F,日本 JEOL 公司)测定。

4 运行效果分析

为对比改造前后工艺运行效果,在 2024 年 11 月—2025 年 7 月,将 1#臭氧接触池维持原有预 O₃ 单元(1#O₃),将 2#O₃ 接触池切换为 O₃/H₂O₂ 高级氧化预处理工艺(2#O₃/H₂O₂)。运行期间,1#O₃ 和 2#O₃/H₂O₂ 的 O₃ 投加量相同,均为 0.5~1.5 mg/L(图 3),1#O₃ 不投加 H₂O₂,2#O₃/H₂O₂ 按 O₃ 和 H₂O₂ 质量比为 10 : 1 投加 H₂O₂。每隔 14 d 取样检测藻类、2-MIB、GSM、浊度、高锰酸盐指数和锰数据,以下系统对比分析了 2 种预处理工艺对上述关键水质指标的去除效能。

4.1 对藻类的去除效果

由图 4 可知,1#O₃ 沉淀池出水藻类密度为 1.0×10⁵~7.9×10⁵ 个/L,2#O₃/H₂O₂ 沉淀池出水藻类密度可降至 9.3×10²~3.6×10³ 个/L,藻类去除量增加了 2~3 个数量级,证明将预 O₃ 单元改造为 O₃/H₂O₂ 高级氧化预处理工艺后,藻类去除效率得到明显提升。经检测发现,原水中藻类群落组成复杂且呈动态变化,其中蓝藻占比为 51.09%~56.25%,为绝对优势门类,蓝藻又以具有鞘膜的拟柱孢藻为优

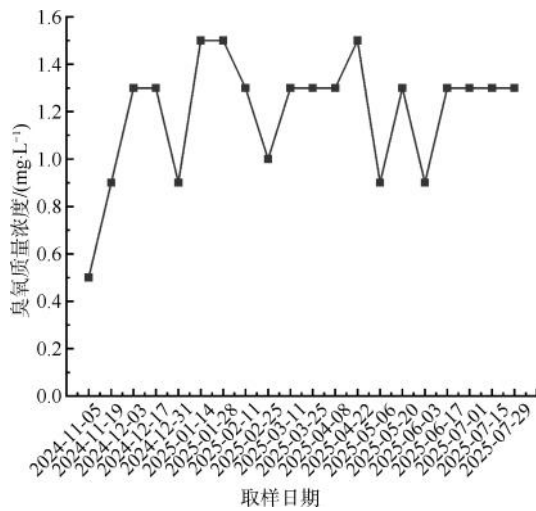


图3 不同取样日期对应的臭氧投加量

Fig. 3 Ozone Dosages Corresponding to Different Sampling Dates
势种;硅藻占比为 32.14%~35.77%,绿藻占比为 8.06%~12.66%,裸藻占比为 0.87%~2.85%。不同预处理工艺对不同藻类的去除效果如表 2 所示,其中,2#O₃/H₂O₂ 沉淀池出水蓝藻数量明显低于 1#O₃ 沉淀池出水,这是因为预 O₃ 主要依靠 O₃ 分子的直接氧化,而 O₃ 分子对结构坚固的藻细胞(如拟柱孢藻)穿透和破坏能力有限,且反应速度相对较慢,导致大量藻细胞未被彻底破坏^[10]。而 H₂O₂ 的加入

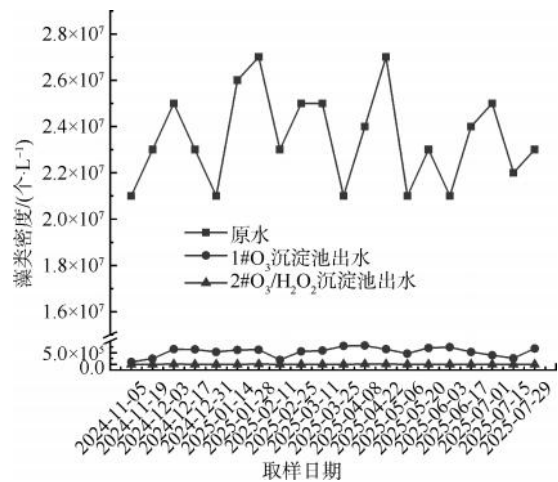


图4 工艺对藻类的去除效果

Fig. 4 Removal Efficiency of Algae by the Process

诱导 O₃ 分解产生氧化性更强的·OH,其氧化电位(2.80 V)显著高于 O₃(2.08 V),具有非选择攻击特性,可快速与藻细胞中有机组分反应,迅速破坏细胞壁和细胞膜,破裂的细胞碎片更易被混凝形成的絮体“网捕”和“共沉”,从而达到更高的藻类去除效率^[11]。因此,O₃/H₂O₂ 高级氧化预处理工艺尤其适用于藻类群落复杂的季节性高藻水体,在应对以蓝藻为主的藻华暴发时具有更优的处理稳定性与普适性。

表 2 不同预处理工艺沉淀池出水藻类(单位:个/L)

Tab. 2 Algal Density in Sedimentation Tank Outflow by Different Pre-Treatment Processes(Unit: cells/L)

预处理工艺	蓝藻	硅藻	绿藻	裸藻
1#O ₃	6.4×10 ⁴ ~7.6×10 ⁵	1.2×10 ³ ~2.6×10 ⁴	4.0×10 ² ~5.9×10 ³	2.3×10 ² ~5.3×10 ²
2#O ₃ /H ₂ O ₂	3.2×10 ² ~1.9×10 ³	2.8×10 ² ~1.6×10 ³	1.4×10 ² ~7.5×10 ²	1.5×10 ² ~4.6×10 ²

4.2 对 2-MIB 和 GSM 的去除效果

由图 5 可知,1#O₃ 沉淀池出水 2-MIB 和 GSM 质量浓度分别为 12~18 ng/L 和 4.2~7.4 ng/L,2#O₃/H₂O₂ 沉淀池出水 2-MIB 和 GSM 质量浓度分别为 7.2~9.2 ng/L 和 2.2~2.8 ng/L,将预 O₃ 单元改造为 O₃/H₂O₂ 高级氧化预处理工艺后,2-MIB 去除率由 51.6%~67.8% 提升至 75.0%~80.6%,GSM 去除率由 26%~58% 提升至 73%~78%。这是因为 O₃ 对 2-MIB 和 GSM 分子结构中的特定部位(如烷基环上的羟基)反应活性有限^[12],需要很长的接触时间或很高的投加量才能达到理想结果,且去除效果易受水基质(如有机物浓度)干扰,导致 1#O₃ 沉淀池出水对 2-MIB 和 GSM 的去除率不高且

波动较大。而 O₃/H₂O₂ 高级氧化预处理工艺中产生的·OH 几乎可以与任何有机物以接近扩散控制的极限速率发生反应,它对 2-MIB 和 GSM 的氧化速率常数分别为 1×10⁹~6×10⁹ mol/(L·s) 和 1×10⁹~4×10⁹ mol/(L·s),远高于 O₃ 与 2-MIB 和 GSM 的氧化速率常数 [4~9 mol/(L·s) 和 5~11 mol/(L·s)],·OH 通过抽氢反应、加成反应等,能迅速将 2-MIB 和 GSM 分子结构破坏、开环,将其初始降解为一系列中间产物(如酮、醛、羧酸等),最终矿化成 CO₂ 和 H₂O,或降解为无嗅无味的小分子有机物^[13]。此外,系统中存在的 O₃ 分子可以与·OH 协同作用^[14],确保氧化过程的彻底性和工艺的鲁棒性。

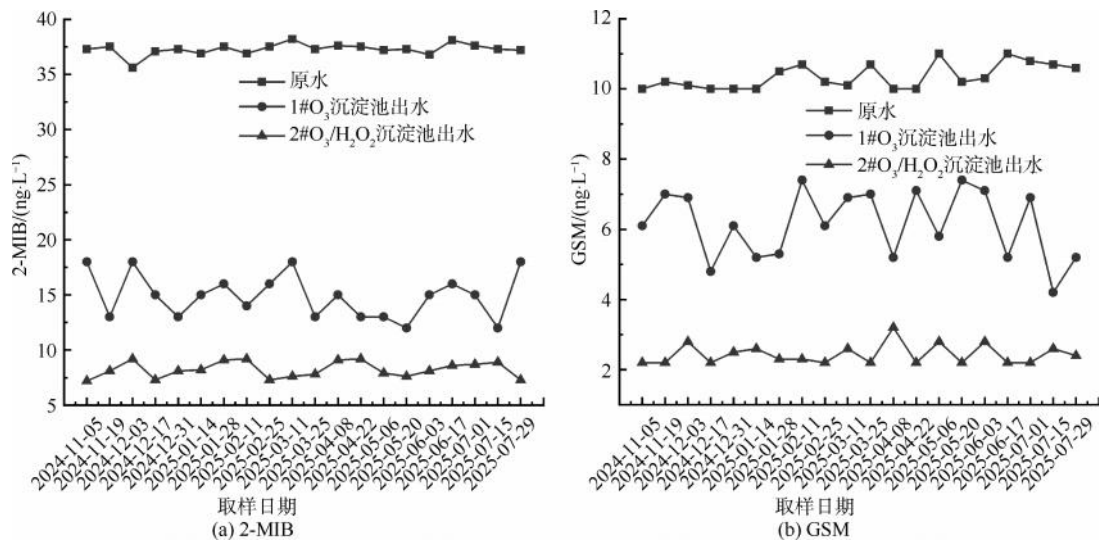


图 5 工艺对2-MIB、GSM 的去除效果

Fig. 5 Removal Efficiency of 2-MIB and GSM by the Process

4.3 对浊度的去除效果

根据运行调控,在1#O₃对应的混合池PAC投加量为1.9~2.2 mg/L,2#O₃/H₂O₂对应的混合池PAC投加量为1.3 mg/L时,二者均可取得最优的浊度去除效果。如图6所示,1#O₃沉淀池出水浊度为0.76~1.42 NTU,砂滤池出水浊度为0.27~0.33 NTU,而2#O₃/H₂O₂沉淀池出水浊度降为0.47~0.59 NTU,砂滤池出水浊度降为0.19~0.23 NTU。因此,在PAC投加量降低31.6%~40.9%的情况下,2#O₃/H₂O₂沉淀池出水和砂滤池出水浊度分别降低了38.2%~59.8%和

29.4%~30.1%。初步分析,胶体颗粒表面的有机涂层是影响混凝效率的重要因素^[15],在现有O₃投加量和较短的氧化时间条件下,预O₃单元对原水中胶体颗粒表面的有机物分解破坏能力有限;而O₃/H₂O₂高级氧化工艺可加快O₃分解速度^[16],通过产生具有强氧化性的·OH,迅速氧化胶体颗粒表面的有机涂层,增加其电负性和疏水性,电负性更强的颗粒更易与带正电混凝剂发生电中和和吸附架桥作用,疏水性更强的颗粒更容易相互靠近、吸附和聚集,二者协同形成更大、更密实的絮体,这种絮体沉降速度更快,导致沉淀池出水浊度显著降低,进而

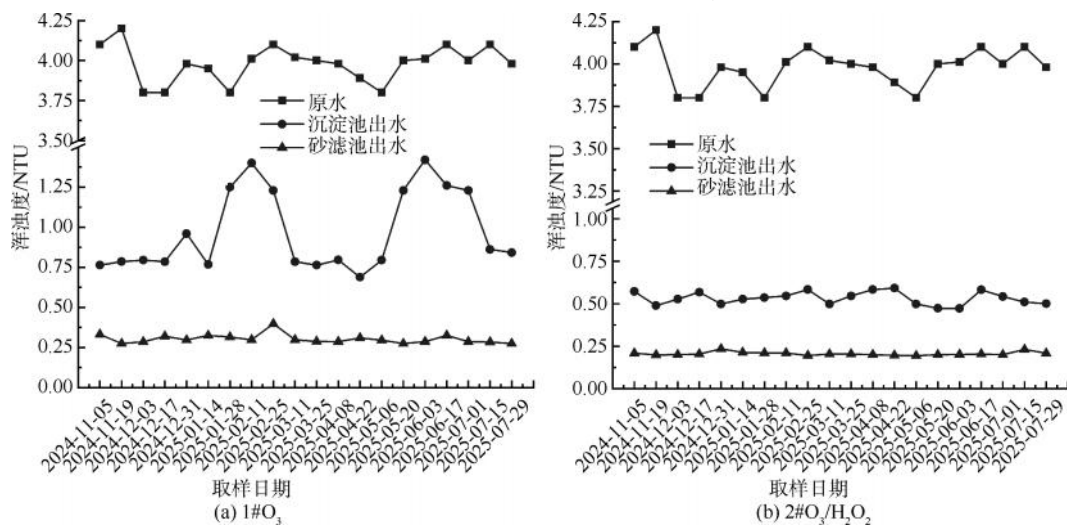


图 6 工艺对浊度的去除效果

Fig. 6 Removal Efficiency of Turbidity by the Process

降低过滤负荷,实现更低的滤后水浑浊度^[9,17]。

4.4 对高锰酸盐指数的去除效果

由图 7 可知,2#O₃/H₂O₂ 砂滤池出水高锰酸盐指数为 1.30~1.57 mg/L,明显低于 1#O₃ 砂滤池出水(1.70~2.20 mg/L),而且受原水波动影响较小,高锰酸盐指数平均去除率由 59.76% 提升至 69.47%。因此,将预 O₃ 单元改造为 O₃/H₂O₂ 高级氧化预处理工艺,在高锰酸盐指数去除效率和稳定性方面具有一定改善效果。这是因为预 O₃ 单元中的 O₃ 更容易与含不饱和键、芳香环或特定官能团(如氨基、巯基)的化合物反应,而对某些饱和和有机物的直接氧化速率较慢^[18-19]。而 O₃/H₂O₂ 高级氧化预处理工艺通过产生强氧化性·OH 拓宽了对原水中有有机物的氧化种类范围,能够有效降解 O₃ 难以直接氧化的有机物,并将其从难混凝、难降解的大分子形态转化为易混凝、易生物降解的小分子形态^[20],改善了后续混凝沉淀和砂滤中微生物对原水中有有机物的整体去除效率。

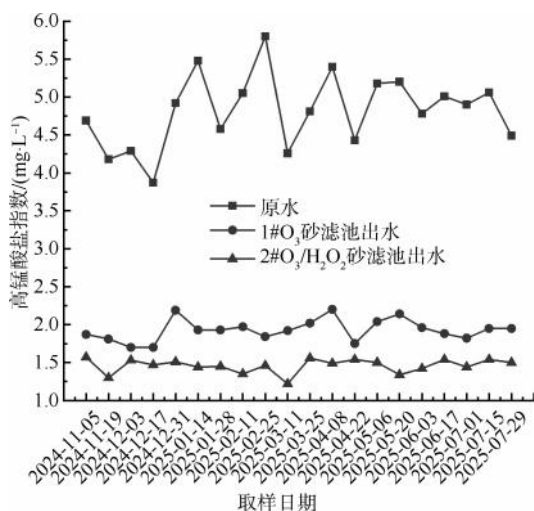


图 7 工艺对高锰酸盐指数的去除效果

Fig. 7 Removal Efficiency of Permanganate Index by the Process

4.5 对锰的去除效果

由图 8 可知,1#O₃ 沉淀池出水和砂滤池出水锰质量浓度分别为 0.03~0.08 mg/L 和 0.02~0.06 mg/L,表明该系统具备一定的锰去除能力,但出水浓度波动较大。而 2#O₃/H₂O₂ 沉淀池出水锰质量浓度降至 0.02~0.05 mg/L,砂滤池出水锰浓度随着运行时间的延长逐渐下降,自 2025 年 3 月下旬起,稳定在 0.005 mg/L 以下,且不随原水波动而变化,这一结

果充分证明,O₃/H₂O₂ 高级氧化预处理工艺相较于预 O₃ 单元,对锰的去除能力和稳定性均有大幅提升。此外,观察 2#O₃/H₂O₂ 对应的砂滤池滤料颜色发现,随着运行时间的延长,滤料逐渐由淡黄色变为黑褐色,表面均匀沉积了大量呈三维立体纳米片结构的锰氧化物(图 9),证实砂滤池滤料由石英砂转变为稳定的功能性锰砂^[21-22],说明 O₃/H₂O₂ 高级氧化预处理工艺可促进锰砂的形成,提高砂滤池对锰的去除效果,从而使系统表现出较强的除锰能力,但锰砂形成原因有待研究。

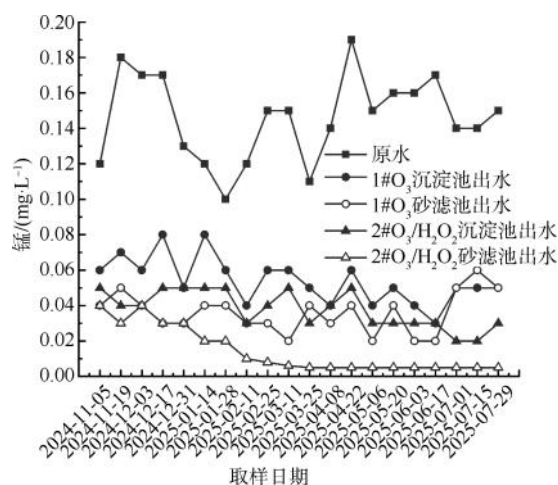


图 8 工艺对锰的去除效果

Fig. 8 Removal Efficiency of Manganese by the Process

4.6 对消毒副产物的控制效果

分别取 1#O₃ 和 2#O₃/H₂O₂ 砂滤池出水进行消毒试验,消毒剂采用 NaClO,投加量为 1.5 mg/L,与水厂采用的剂量一致。试验发现,相比于 1#O₃ 消毒出水,2#O₃/H₂O₂ 消毒出水的三氯甲烷质量浓度由 0.016~0.029 mg/L 降至 0.006~0.012 mg/L,三卤甲烷中各种化合物的实测浓度与其各自限值的比值之和由 0.322~0.563 降至 0.122~0.163,消毒出水的三氯甲烷和三卤甲烷浓度水平远低于标准限值(三氯甲烷≤0.06 mg/L,三卤甲烷中各种化合物的实测浓度与其各自限值的比值之和≤1),说明将预 O₃ 单元改造为 O₃/H₂O₂ 高级氧化预处理工艺后,通过改变氧化路径,降低三卤甲烷前体物浓度,有效抑制了三卤甲烷生成。此外,1#O₃ 出水 BrO₃⁻ 质量浓度为 0.002 7~0.006 7 mg/L,而 2#O₃/H₂O₂ 出水 BrO₃⁻ 浓度稳定在检出限以下(<0.000 5 mg/L)。这一方面是因为 O₃ 将溴离子(Br⁻)氧化成 BrO₃⁻ 的过

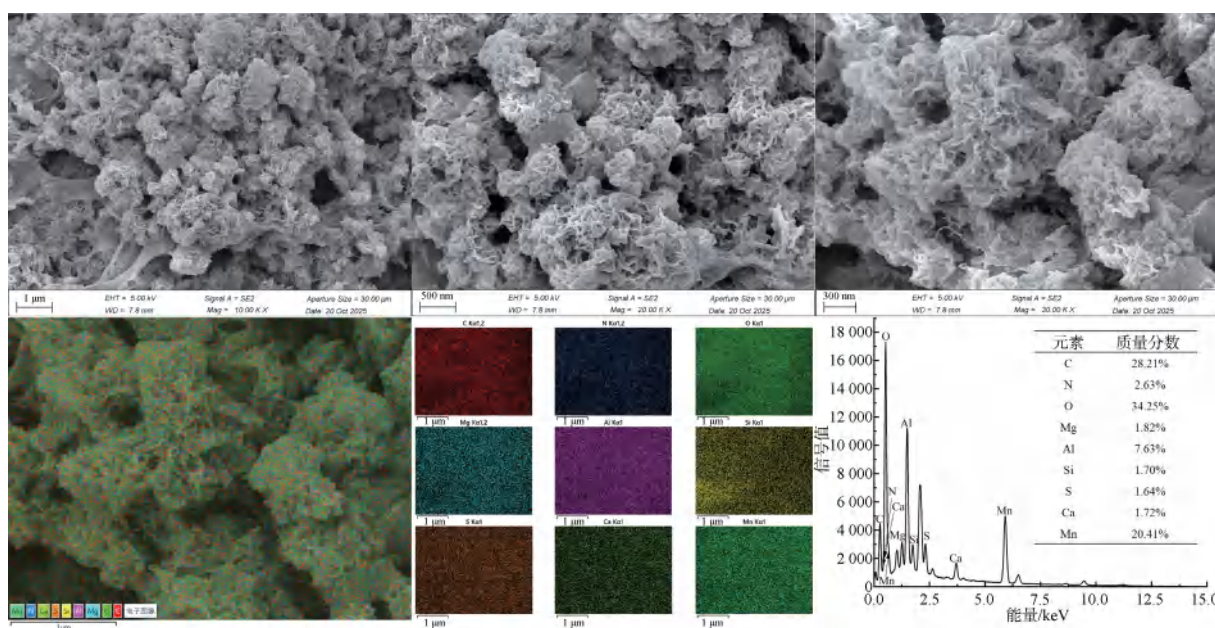


图9 砂滤池滤料的形貌及元素分布图

Fig. 9 Morphology and Elements Distribution of Sand Filter Media

程涉及先将 Br⁻ 氧化为 HOBr/OBr⁻, 再将 HOBr/OBr⁻ 氧化为 BrO₃⁻ 2 个过程, 而 H₂O₂ 作为还原剂能将中间产物 HOBr/OBr⁻ 还原为 Br⁻, 从而切断 BrO₃⁻ 生成链^[23]。另一方面, 氨氮可将 HOBr/OBr⁻ 转化为相对惰性的溴胺(NH₂Br), 从而抑制 BrO₃⁻ 生成^[24]。经检测分析发现, 原水经 2#O₃/H₂O₂ 处理后, 氨氮质量浓度由 0.03 ~ 0.10 mg/L 升至 0.20 ~ 0.27 mg/L, 略高于 1#O₃ 出水(0.12 ~ 0.18 mg/L), 说明 O₃/H₂O₂ 高级氧化预处理工艺可将原水中的有机氮更多地氧化为氨氮^[17]。此外, 2 个系统出水中的溶解氧均有大幅度提升, 为后续砂滤池中的硝化微生物的生长创造了有利条件^[9, 25]。这些微生物能将氨氮最终转化为硝酸盐, 从而实现氨氮的高效去除(出水 < 0.02 mg/L), 提升了最终出水的生物稳

定性。

4.7 经济性分析

由表 3 可知, 相比于 1#O₃, 2#O₃/H₂O₂ 新增了 H₂O₂ 药剂, 其投加量为 0.05 ~ 0.15 mg/L, 成本增加 0.001 9 ~ 0.005 6 元/t, 而 2#O₃/H₂O₂ 无需投加 NaClO, NaClO 成本降低 0.004 5 ~ 0.009 0 元/t。此外, 采用 2#O₃/H₂O₂ 时, 混凝工段药剂 PAC 的投加量减少 0.6 ~ 0.9 mg/L, 成本降低 0.005 1 ~ 0.007 7 元/t。综合来看, 2#O₃/H₂O₂ 虽然新增了 H₂O₂ 的药剂成本, 但 NaClO 和 PAC 药剂成本的降低幅度更大, 整体上实现了净水处理成本的有效控制。经测算, 将预 O₃ 单元升级为 O₃/H₂O₂ 高级氧化预处理工艺后吨水药剂成本降低了 0.007 7 ~ 0.011 1 元。因此, 本次改造提升了水厂的运行经济效益。

表 3 不同预处理工艺对应的药剂投加量(单位: mg/L)

Tab. 3 Chemicals Dosages Corresponding to Different Pretreatment Processes(Unit: mg/L)

预处理工艺	预处理工段 H ₂ O ₂ 投加量	预处理工段 NaClO 投加量	混凝工段 PAC 投加量	消毒工段 NaClO 投加量
1#O ₃	0	0.5~1.0	1.9~2.2	1.5
2#O ₃ /H ₂ O ₂	0.05~0.15	0	1.3	1.5

5 结论

(1) 将预臭氧单元升级为 O₃/H₂O₂ 高级氧化预处理工艺后, 沉淀池出水藻类密度降至 9.3 × 10² ~ 3.6 × 10³ 个/L, 2-MIB 和 GSM 分别降至 7.2 ~

9.2 ng/L 和 2.2 ~ 2.8 ng/L, 同时 O₃/H₂O₂ 出水 BrO₃⁻ 浓度稳定在检出限以下。

(2) O₃/H₂O₂ 高级氧化预处理工艺可通过杀灭藻类等途径强化混凝, 实现深度降低浊度, 沉淀池

出水和砂滤池出水浑浊度较未改造时分别降低 38.2%~59.8%和 29.4%~30.1%。

(3) O_3/H_2O_2 高级氧化预处理工艺投运后发现,砂滤池滤料逐步形成黑色稳定的功能性锰砂,从而能通过吸附、化学氧化及微生物氧化作用协同除锰,提高净水全流程除锰效率。

(4) O_3/H_2O_2 高级氧化预处理工艺需根据水质变化控制 O_3/H_2O_2 投加比例,鉴于臭味具有季节性变化的因素,建议当臭味浓度较低时,同步降低 O_3 与 H_2O_2 投加量,发挥其强化混凝作用,减少 PAC 投加量。

(5) 将水厂现有预臭氧设施升级改造为 O_3/H_2O_2 高级氧化预处理工艺,不仅可以改善臭味和除锰效果,还可以降低出厂水的高锰酸盐指数和浑浊度,拓展了现有设施的处理功能,为同类型水厂提质增效提供了经济可行的技术路径。

参考文献

- [1] Wang L, Pearce J, Zhang W Y. Detection of 2-methylisoborneol and Geosmin in drinking water: History and the current state-of-the-art [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2025, 13(3): 116834. DOI: 10.1016/j.jece.2025.116834.
- [2] Berlt M M G, De Cassia de Souza Schneider R, Machado Ê L, et al. Comparative assessment of the degradation of 2-methylisoborneol and geosmin in freshwater using advanced oxidation processes [J]. *Environmental Technology*, 2021, 42(24): 3832-3839.
- [3] Zhang X Y, Jiang H T, Ma Z X, et al. Zirconium-embedded ceramic membrane catalyzed moderate ozonation: Dual-function synergy for simultaneous control of algal odorants and membrane fouling in water treatment [J]. *Water Research*, 2025, 282: 123742. DOI: 10.1016/j.watres.2025.123742.
- [4] Luo B F, Yu J, Huang W W, et al. Experimental research of combined ozone/hydrogen peroxide oxidative degradation of chemical oxygen demand in sauce-flavored liquor wastewater [J]. *Water Resources and Industry*, 2025, 34: 100312. DOI: 10.1016/j.wri.2025.100312.
- [5] Peng J Y, Wang Q Y, Li Z B, et al. Pilot testing and engineering application of O_3/H_2O_2 process for 2-methylisoborneol and geosmin removal in drinking water treatment [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 60: 105140. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105140.
- [6] Peng J Y, Wang Y, Li Z B, et al. Development of a novel advanced treatment process for high-algae-laden reservoir water: Performance and mechanism [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2025, 158: 281-295. DOI: 10.1016/j.jes.2025.03.014.
- [7] Kämmler J, Zoumpouli G A, Sellmann J, et al. Decolorization and control of bromate formation in membrane ozonation of humic-rich groundwater [J]. *Water Research*, 2022, 221: 118739. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118739.
- [8] 王赫, 彭锦玉, 王全勇, 等. 臭氧/生物活性炭流化床预处理对净水效率的影响 [J]. *中国给水排水*, 2023, 39(5): 46-52.
- Wang H, Peng J Y, Wang Q Y, et al. Effect of ozone/biological activated carbon fluidized bed pretreatment on water purification efficiency [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(5): 46-52.
- [9] 彭锦玉, 王小(彳毛), 丁纯健, 等. 前置 O_3/H_2O_2 高级氧化工艺在净水厂提质改造中的应用及效果分析 [J]. *给水排水*, 2023, 49(12): 1-7.
- Peng J Y, Wang X M, Ding C J, et al. Application and effect analysis of pre-ozonation-based advanced oxidation in improving drinking water quality [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 49(12): 1-7.
- [10] 张璟. 臭氧适度预氧化耦合臭氧/过氧化氢深度处理去除丝状蓝藻及臭味物质 [D]. 济南: 山东大学, 2021.
- Zhang J. Removal of filamentous cyanobacteria and odorants by ozone moderate pre-oxidation coupled with ozone/hydrogen advanced treatment [D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [11] 危有达. O_3 及 O_3/H_2O_2 氧化处理含蓝藻水过程中 AOC 的形成规律及机理分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- Wei Y D. Formation of assimilable organic carbon (AOC) during oxidation of algal suspension with ozone and ozone/hydrogen peroxide [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [12] Xia P, Zhang S Y, Yu J W, et al. Complex odor control based on ozonation/GAC advanced treatment: Optimization and application in one full-scale water treatment plant [J]. *Environmental Sciences Europe*, 2020, 32: 50. DOI: 10.1186/s12302-020-00313-w.
- [13] Westerhoff P, Nalinakumari B, Pei P. Kinetics of MIB and geosmin oxidation during ozonation [J]. *Ozone: Science & Engineering*, 2006, 28(5): 277-286.
- [14] 郝立栋, 贾怀红, 范文江, 等. 氧化技术去除水中臭味物质的研究进展 [J]. *广东化工*, 2022, 49(15): 150-151, 136.
- Hao L D, Jia H H, Fan W J, et al. Research progress on removal of odor substances in water by oxidation technology [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2022, 49(15): 150-151, 136.
- [15] Shi W X, Zhang Y, Xue Y N, et al. Synchronous pre-oxidation-coagulation for the efficient treatment of organic compounds by UV/sodium percarbonate [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2026, 160: 283-291. DOI: 10.1016/j.jes.2025.02.044.
- [16] Ren Y H, Wang Y L, Xue J, et al. Degradation performance and conversion mechanisms of MNZ by advanced oxidation

- systems with O₃: Comparison of O₃, O₃/UV, O₃/H₂O₂ and UV-H₂O₂/O₃ systems [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 68: 106536. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.106536.
- [17] 彭锦玉, 李振邦, 张坤乾, 等. 前置臭氧-生物流化床工艺用于水厂提质改造[J]. *中国给水排水*, 2024, 40(12): 94-100.
Peng J Y, Li Z B, Zhang K Q, et al. Application of pre-ozone and biological fluidized bed in updating and transformation of waterworks[J]. *China Water & Wastewater*, 2024, 40(12): 94-100.
- [18] Zhu T Y, Dai S, Cheng H M, et al. Dual analysis of degradation mechanisms: Unified models integrate the oxidation-reduction potentials of oxidants with the molecular structures of volatile organic compounds to improve predictive performance [J]. *Chemical Engineering Science*, 2025, 318: 122209. DOI: 10.1016/j.ces.2025.122209.
- [19] Tufail A, Price W E, Hai F I. A critical review on advanced oxidation processes for the removal of trace organic contaminants: A voyage from individual to integrated processes [J]. *Chemosphere*, 2020, 260: 127460. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127460.
- [20] 陈占, 杨旅, 汪印, 等. 臭氧及臭氧-双氧水处理高盐高有机物水热液对比[J]. *枣庄学院学报*, 2023, 40(2): 1-9.
Chen Z, Yang L, Wang Y, et al. Comparative study on the effect of ozone and ozone-hydrogen peroxide on treatment of high salt and organic matter hydrothermal solution [J]. *Journal of Zaozhuang University*, 2023, 40(2): 1-9.
- [21] Cheng Q F, Liu Z Y, Huang Y, et al. Influence of temperature on COD_{Mn} and Mn²⁺ removal and microbial community structure in pilot-scale biofilter[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 316: 123968. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123968.
- [22] Wang P P, Wang H, Zhang Y F, et al. Accelerated catalytic oxidation of dissolved manganese(II) by chlorine in the presence of in situ-growing 3D manganese(III)/(IV) oxide nanosheet assembly in zeolite filter [J]. *Water Research*, 2021, 201: 117223. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117223.
- [23] 李磊, 王波, 张苗, 等. O₃/H₂O₂ 高级氧化技术抑制溴酸盐生成中试[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(13): 60-64.
Li L, Wang B, Zhang M, et al. Pilot test on bromate formation inhibition by O₃/H₂O₂ advanced oxidation technology[J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(13): 60-64.
- [24] 朱琦. 饮用水处理过程中溴酸盐的生成特性及优化控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
Zhu Q. Bromate formation characteristics and optimal control in drinking water treatment process[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [25] 邵磊, 杨媛媛, 周煜溪. 净水工艺中不同臭氧投加量对污染物去除效果研究[J]. *供水技术*, 2025, 19(1): 18-22.
Shao L, Yang Y Y, Zhou Y X. Research on the effect of different ozone dosages on pollutant removal in water purification processes[J]. *Water Technology*, 2025, 19(1): 18-22.

(上接第 59 页)

- [16] Li C L, Teng F M, Wu F M, et al. Enhanced cavitation dose and reactive oxygen species production in microbubble-mediated sonodynamic therapy for inhibition of *Escherichia coli* and biofilm [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2024, 105: 106853. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2024.106853.
- [17] 秦雅萍, 任会学, 方睿, 等. 微纳米气泡强化臭氧高级催化氧化处理硝基苯废水的效果[J]. *环境工程技术学报*, 2025, 15(2): 584-593.
Qin Y P, Ren H X, Fang R, et al. Effects of advanced catalytic ozone oxidation enhanced by micro-nano bubbles on the treatment of nitrobenzene wastewater [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2025, 15(2): 584-593.
- [18] Khuntia S, Majumder S K, Ghosh P. Microbubble-aided water and wastewater purification: A review[J]. *Reviews in Chemical Engineering*, 2012, 28(4/5/6): 191-121. DOI: 10.1515/revce-2012-0007.
- [19] Li X H, Liu C C, Liu F M, et al. Substantial removal of four pesticide residues in three fruits with ozone microbubbles [J]. *Food Chemistry*, 2024, 441: 138293. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.138293.