

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.17.011

UV/H₂O₂工艺对常规砂滤出水中有机物的去除特性

王永强^{1,2,3}, 李桂芳², 宋武昌², 孙韶华², 张素珍², 李梅¹,
贾瑞宝²

(1. 山东建筑大学 市政与环境工程学院, 山东 济南 250100; 2. 山东省城市供排水水质监测中心, 山东 济南 250101; 3. 基准方中建筑设计股份有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要: 针对UV/H₂O₂水处理过程中有机物特性变化尚不明确等问题,以某水厂(以引黄水库水为原水,采用常规处理工艺)的砂滤出水为处理对象,构建了规模为5 m³/h的UV/H₂O₂中试系统,长期稳定运行结果显示,H₂O₂利用率为46%左右,COD_{Mn}和UV₂₅₄的平均去除率分别为5.7%和50.3%,当2-甲基异莰醇(2-MIB)加标浓度为110 ng/L时去除率几乎可达100%。对工艺进出水中有机物的分子质量分布、三维荧光光谱、溶解性有机物(DOM)组分、三卤甲烷生成势(THMFPS)进行分析发现,该工艺可将水中的大分子有机物降解为小分子有机物,出水中荧光物质减少、芳香性降低,DOM各组分含量减少、占比改变,THMFPS略有增加。

关键词: UV/H₂O₂工艺; 有机物; 2-甲基异莰醇(2-MIB); 三卤甲烷生成势

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)17-0060-07

Removal Characteristics of Organic Matter in Effluent from Conventional Sand Filtration by UV/H₂O₂ Process

WANG Yong-qiang^{1,2,3}, LI Gui-fang², SONG Wu-chang², SUN Shao-hua²,
ZHANG Su-zhen², LI Mei¹, JIA Rui-bao²

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250100, China; 2. Urban Water Monitoring Centre of Shandong Province, Jinan 250101, China; 3. JZFA Architectural Design Co. Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: The change of organic matter properties in UV/H₂O₂ treatment process is still not clear. The UV/H₂O₂ pilot-scale system with scale of 5 m³/h was constructed to treat the effluent from sand filtration of a water treatment plant (Yellow River diversion reservoir raw water, conventional treatment process). The long-term operational results showed that the H₂O₂ utilization rate was approximately 46%, and the average removal efficiencies of COD_{Mn} and UV₂₅₄ were 5.7% and 50.3% respectively. When the spiked concentration of 2-methylisoborneol was 110 ng/L, its removal efficiency was almost 100%. The molecular weight distribution, three-dimensional fluorescence spectrum, component of dissolved organic matter (DOM) and trihalomethane formation potentials (THMFPS) in influent and effluent of the process were analyzed. The process could degrade the macromolecular organic matter in water into small molecule

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07501002、2017ZX07501003); 2020年度山东省重大科技创新工程项目(2020CXGC011406)

通信作者: 贾瑞宝 E-mail: jiaruibao68@126.com

organic matter, reduce fluorescence substance concentrations and aromatic, decrease DOM components content and change their proportions, and slightly increase THMFPS.

Key words: UV/H₂O₂ process; organic matter; 2-methylisoborneol (2-MIB); trihalomethane formation potentials

饮用水源水中经常会检测到痕量有机污染物,例如2-甲基异莰醇(2-MIB),常规水处理工艺无法有效去除这些有机物,通常需增加高级氧化、吸附或膜过滤等深度处理工艺^[1]。三卤甲烷(THMs)、卤乙酸(HAAs)等消毒副产物(DBPs)是由水中溶解性有机物(DOM)和氯反应产生,这些痕量的消毒副产物很多具有“三致”作用,因此受到广泛关注。但是大部分DBPs前体物不能在常规水处理过程中被有效去除。相比臭氧氧化工艺,UV/H₂O₂高级氧化工艺的处理效率高、氧化性强、操作简单,在国外已被广泛用于去除臭味物质、药物、DBPs前体物等^[2-3],但目前国内大多处于试验研究阶段,中试运行数据较少,UV/H₂O₂处理过程中水中有机物特性的变化尚不明确。鉴于此,笔者选取THMs作为典型DBPs,采用UV/H₂O₂工艺中试重点考察高级氧化过程中THMs前体物特性变化;同时,考察了UV/H₂O₂工艺中试在长期运行条件下对臭味物质的去除效果及常规指标的变化。为深入探讨UV/H₂O₂工艺对滤后水中有机物的去除特性,重点分析了UV/H₂O₂工艺处理前后水中有机物分子质量(MW)、荧光物质、DOM组分及三卤甲烷生成势(THMFPS)的变化,以期为实际生产应用提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置及方法

本研究在济南鹊华水厂国家水专项中试科研基地进行,中试装置主要由紫外高级氧化反应器、加药泵、静态混合器、吸水泵、流量计、管路系统等组成。其中,紫外高级氧化反应器的处理规模为5 m³/h,内含8根紫外灯(低压汞灯),呈螺旋状排列,波长为254 nm,总功率为2 kW;系统管路包含加药点,用以向系统投加H₂O₂溶液等;静态混合器安装在紫外反应腔体之前一段距离,以保证溶液充分混合。中试工艺流程见图1。

采用加标试验研究UV/H₂O₂工艺对2-MIB的去除效果。配制一定浓度的H₂O₂和2-MIB溶液分别置于两个加药桶中,通过计量泵控制H₂O₂和2-MIB

的投加量。UV平均光强为9.05 mW/cm²,接触时间为63 s,平均剂量为570 mJ/cm²。H₂O₂浓度为5~10 mg/L,进水流量为5 m³/h。装置稳定运行一年,多次取样检测2-MIB、pH、TOC、UV₂₅₄、浊度、COD_{Mn}、有机物分子质量分布、荧光物质、DOM组分及THMFPS。

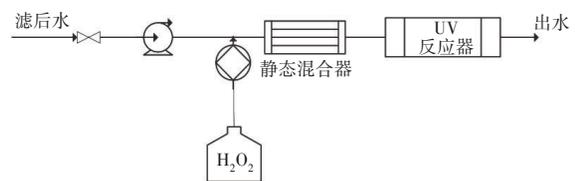


图1 UV/H₂O₂工艺中试流程

Fig.1 Flow chart of pilot UV/H₂O₂ process

1.2 进水水质

UV/H₂O₂工艺中试进水为混凝/气浮沉淀/砂滤工艺出水(原水为引黄水库水),中试期间进水水质如下:pH为8.11±0.12,浊度为(0.634±0.116) NTU,DOC为(3.45±0.46) mg/L,UV₂₅₄为(0.038±0.005) cm⁻¹,COD_{Mn}为(2.152±0.237) mg/L,紫外线透过率(UVT)为(91±3)%。

1.3 检测指标及方法

常规指标的检测方法:2-MIB采用SPE-GC/MS法测定;pH采用pH测试仪测定;浊度采用HACH 2100N型浊度仪测定;TOC采用VCPH型总有机碳分析仪测定;UV₂₅₄采用紫外可见光光度计测定;有机物分子质量采用超滤膜法测定。

荧光有机物的测定方法:三维荧光光谱(EEM)分析可根据荧光强度在不同发射波长(Ex)及激发波长(Em)下的变化,并结合不同物质特有的光谱信息,对荧光有机物进行定性和定量。EEM采用荧光光度计检测,以纯水为空白,去除背景噪音及拉曼散射影响。波长扫描范围Ex/Em为220~500 nm/220~550 nm,扫描间隔为5 nm,扫描速度为12 000 nm/min。不同荧光物质对应不同的波长范围,酪氨酸、色氨酸、富里酸、溶解性微生物代谢产物和腐殖酸的Ex/Em范围分别为200~250 nm/280~320 nm、200~250 nm/320~380 nm、200~250 nm/380~540 nm、

250~340 nm/280~380 nm、250~400 nm/380~540 nm。

DOM的测定方法:DOM采用液相色谱-有机碳检测分析仪(LC-OCD)测定,LC-OCD根据分子质量大小和化学性质将未被尺寸排阻色谱柱吸附流出的DOM分为生物聚合物(50 ku<MW<2 000 ku)、腐殖质(0.1 ku<MW<100 ku)、有机物结构单元(MW=0.35~0.5 ku)、低分子质量(LMW)中性物质和LMW酸性物质(MW<0.35 ku),其中腐殖质和有机物结构单元为难生物降解有机物,生物聚合物、LMW中性物质和酸性物质为易生物降解有机物。

三卤甲烷生成势的测定方法:采用HCl或NaOH溶液调节水样pH至7.0±0.2,向水样中投加一定浓度的NaClO溶液,使水样中的有效氯浓度达到20 mg/L;将水样转移到顶空瓶并放入25℃的恒温培养箱中,在避光条件下放置72 h,保证至反应终点时水样余氯值在3~5 mg/L;用Na₂S₂O₃溶液终止反应,采用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)测定三卤甲烷浓度。GC-MS采用HP-5毛细管色谱柱,其长度为30 m,内径为0.32 mm,膜厚为0.25 μm;GC-MS进样口温度为220℃,ECD检测器温度为300℃,分流进样。采用程序升温方法,即初始温度设置为35℃并保持5 min,然后以1℃/min的速度升温至50℃,保持5 min,总时间为25 min。

2 结果与讨论

2.1 H₂O₂利用率

本研究采用2018年4月—8月的试验数据分析H₂O₂浓度的变化,结果见图2。

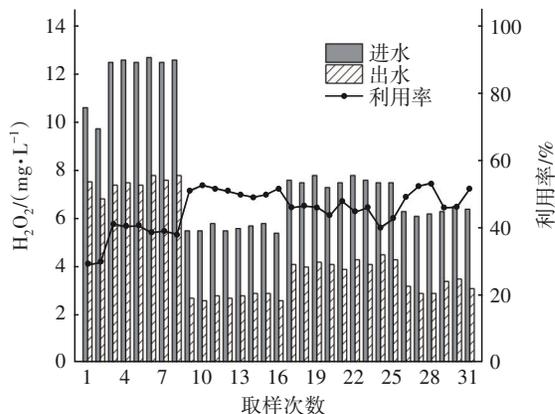


图2 H₂O₂浓度的变化

Fig.2 Change of H₂O₂ concentration

由图2可知,当进水H₂O₂浓度在5.4~7.8 mg/L之间时,出水浓度在2.6~4.5 mg/L之间,H₂O₂利用

率在40%~53%之间。H₂O₂消耗与水质和UV灯管功率有关,随着电能剂量的增加,H₂O₂的光解作用增大,H₂O₂利用率提高^[4]。消耗的H₂O₂一部分被紫外光激发分解生成·OH从而进一步进行氧化还原反应,一部分直接进行氧化还原反应。残留的H₂O₂可能会引起潜在的环境和健康隐患,因此建议在UV/H₂O₂工艺后增加活性炭工艺^[4]。

2.2 关键水质指标的变化

根据2018年4月—8月的试验数据,进水pH在8.11左右,出水pH在8.07左右,出水pH较进水pH略有下降。这可能是由于进水中的部分天然有机物被·OH氧化降解为CO₂、HCO₃⁻、小分子羧酸等弱酸性产物,从而导致出水pH略微下降。另外,经UV/H₂O₂工艺处理后,浊度略微降低,浊度表征光线穿透水体时悬浮物质对光线的阻碍程度,浊度的变化在一定程度上可以反映水体中有机物被降解从而导致的结构变化,浊度降低从某种程度上表明了滤后水中有机物分子质量减小等性质的变化^[5]。

如图3(a)所示,UV/H₂O₂对UV₂₅₄的去除率较稳定。进水UV₂₅₄平均值为0.037 cm⁻¹,出水UV₂₅₄平均值为0.018 cm⁻¹,UV₂₅₄平均去除率为50.3%。UV₂₅₄表征某些有机物在254 nm下的紫外吸光度,比如NOM中芳香结构和共轭碳双键可以强烈吸收253.7 nm处的辐射,因此UV₂₅₄的变化表明水中大量的大分子有机物被降解,或有机物结构发生了较大变化,芳香性降低^[5],这与Sarathy等人^[6]通过高性能尺寸排阻色谱法检测发现高级氧化出水芳香性显著降低的结果相似。另外,进水COD_{Mn}平均浓度为2.152 mg/L,出水COD_{Mn}平均浓度为2.028 mg/L,COD_{Mn}平均去除率为5.7%。COD_{Mn}浓度表征水中被还原性物质污染的程度,COD_{Mn}浓度降低表明经过UV/H₂O₂工艺处理后,水中还原性物质减少。

为避免2-MIB自身挥发对UV/H₂O₂工艺处理结果的影响,进行了空白对照试验。从图3(b)可以看出,当2-MIB进水加标浓度为110 ng/L左右时,经UV/H₂O₂工艺处理后,出水2-MIB浓度均在5 ng/L以下,去除率几乎达到了100%,表明该工艺对臭味物质的去除效果良好,这与Bang等人^[2]的研究结果相似。·OH氧化反应速率是单独UV辐射反应速率的35倍,可将2-MIB矿化成水、二氧化碳和无机盐^[7]。与臭氧/活性炭工艺相比,UV/H₂O₂工艺反应条件较温和、无副产物、设备简单、占地面积小,对解决嗅

味问题具有优越性。

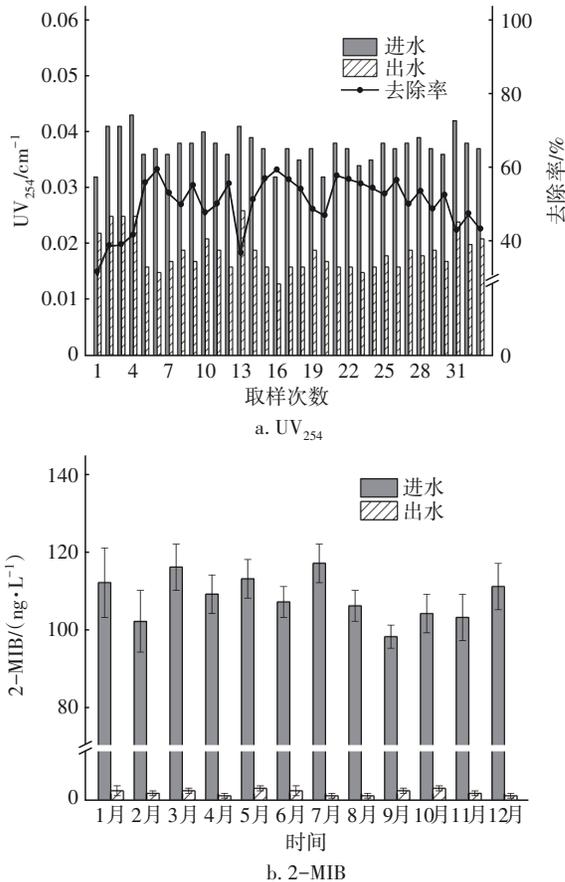


图3 UV₂₅₄和2-MIB的变化

Fig.3 Change of UV₂₅₄ and 2-MIB

2.3 有机物去除特性分析

2.3.1 分子质量分布的变化

UV/H₂O₂工艺进出水不同分子质量区间UV₂₅₄的变化如图4所示。

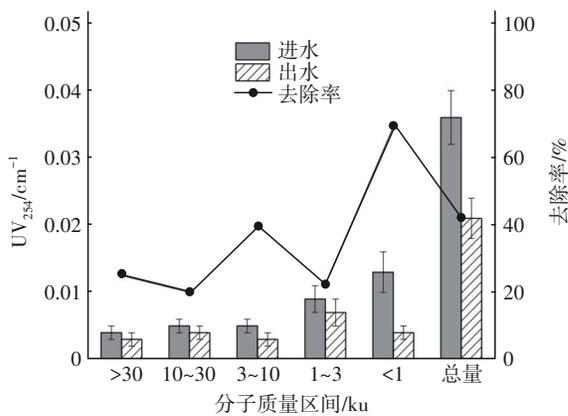


图4 进、出水不同分子质量区间UV₂₅₄的变化

Fig.4 Change of UV₂₅₄ at different molecular weights in influent and effluent

从图4可以看出,在MW<1 ku区间内的进水

UV₂₅₄为0.013 cm⁻¹,这部分小分子有机物的占比(35.1%)和去除率(69.2%)最大,说明进水中该区间具有芳香性的物质较多,这类有机物更易被·OH降解。UV/H₂O₂工艺对不同分子质量区间内的有机物都有不同程度的降解,这与其他研究结果类似^[8-9]。另有研究证明,UV₂₅₄的减少与可生化有机碳(AOC)的增加有很大相关性^[10],说明经过UV/H₂O₂工艺处理后,水中有机物的可生化性增强。

UV/H₂O₂工艺进、出水不同分子质量区间TOC的变化如图5所示。可以看出,进水中大分子有机物含量较多,可能是水源水中含有较多的植物或藻类的腐殖质^[11]。在MW>30 ku区间,进、出水TOC的占比分别为18.1%、10.4%,TOC去除率为53.4%,高于其他分子质量区间,说明UV/H₂O₂工艺优先将较高分子质量的有机物降解成较小分子质量的有机物^[6]。另外,本试验中MW<1 ku区间内的TOC降解率为20.5%,处理效果优于常规工艺^[12],表明UV/H₂O₂工艺对小分子有机物的去除有重要作用。

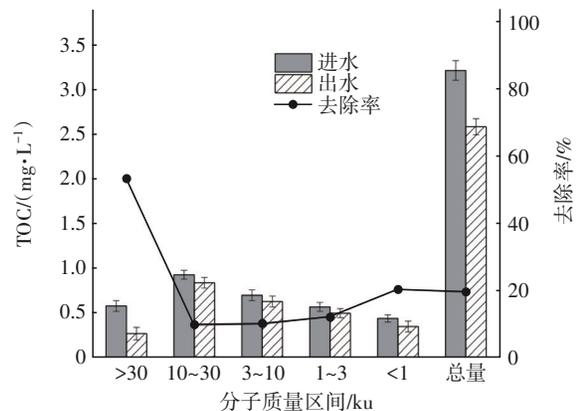


图5 进、出水不同分子质量区间TOC的变化

Fig.5 Change of TOC at different molecular weights in influent and effluent

2.3.2 三维荧光特性的变化

三维荧光光谱可以用来分析溶解性荧光物质的组成及含量,对UV/H₂O₂工艺进、出水分别进行三维荧光光谱分析,结果见图6。可以看出,进水中有色氨酸类蛋白质、少量酪氨酸类蛋白质、酚类物质或芳香族类蛋白质、溶解性微生物产物、富里酸类及腐殖酸类有机物等。经过UV/H₂O₂工艺处理后,三维荧光强度明显减弱,酪氨酸类蛋白质以及溶解性微生物产物被全部降解,可能是由于这两类物质不稳定且含量较少。

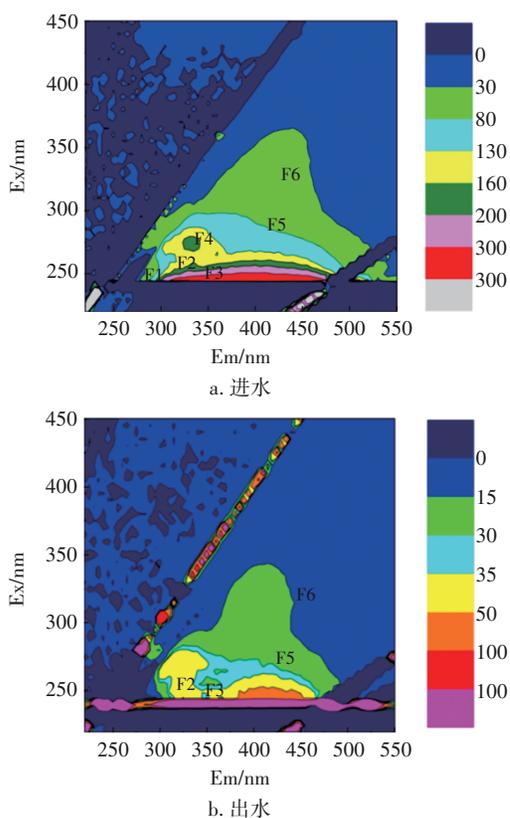


图 6 UV/H₂O₂ 工艺进、出水的三维荧光光谱

Fig.6 EEM spectra of influent and effluent of UV/H₂O₂ process

对比图 6(a) 和 (b) 可知, 荧光峰存在一定程度的蓝移, 反映了水中芳香族化合物的变化与分解以及大分子有机物的降解, 链结构中 共轭键数量的减

少、线性环结构向非线性结构的转化以及特定官能团(羰基、羟基和胺基)的去除等^[13-14]。已有一些学者^[15-16]采用尺寸排阻色谱法证实了荧光强度的降低是由于具有高分子质量、高 UV₂₅₄ 和荧光吸收的有机物优先分解生成较低分子质量、较弱 UV₂₅₄ 和荧光吸收的有机物。因此可以推测, 经过 UV/H₂O₂ 工艺处理后, 相对分子质量较大的富里酸类及腐殖酸类有机物可能被转化成小分子有机物, 水中有机物的芳香性降低。

2.3.3 DOM 组分的变化

试验采用 LC-OCD 技术对 UV/H₂O₂ 工艺处理前后的水质变化进行了分析, 结果见表 1。可以看出, 虽然 UV/H₂O₂ 工艺对 DOC 的去除效果不显著(仅 24.3% 的 DOC 被矿化), 但对水中 DOM 各组分均有一定的去除效果, 改变了 DOM 各组分占比。经 UV/H₂O₂ 工艺处理后, 生物聚合物、腐殖质、有机物结构单元、LMW 酸性物质和 LMW 中性物质的去除率分别为 30.1%、23.7%、25.9%、100%、17.4%; 腐殖质和 LMW 中性物质占比分别从进水的 51% 和 19% 增加到出水的 52% 和 21%, 生物聚合物、有机物结构单元占比分别从进水的 16% 和 14% 减少到出水的 15% 和 13%。这与 Ahn 等人^[17]的研究结果相似。腐殖质占比增加可能是因为其他组分物质更容易被 UV/H₂O₂ 工艺去除; LMW 中性物质占比增加, 可能是由大分子质量有机物转化而成。

表 1 UV/H₂O₂ 工艺处理前后 DOM 组分变化

Tab.1 DOM component changes before and after UV/H₂O₂ process

项目	DOC/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	生物聚合物/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	腐殖质/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	有机物结构单 元/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	LMW 酸性物 质/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	LMW 中性物 质/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	光谱吸收系数 (SAC)/ m^{-1}	比紫外吸光度(SUVA)/ ($\text{L}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{mg}^{-1}$)
进水	3 421±342	546±48	1 753±89	463±32	14±2	644±54	0.55±0.03	2.02±0.11
出水	2 591±237	378±52	1 338±72	343±21	—	532±47	0.24±0.02	1.41±0.12

SUVA 可以表征在 254 nm 处具有强吸光度的含有不饱和碳键和芳香族基团的有机物, 反映水中的腐殖质含量^[18]。从表 1 可以看出, 经过 UV/H₂O₂ 工艺处理后, SUVA 值由 2.02 L/($\text{m}\cdot\text{mg}$) 减少到 1.41 L/($\text{m}\cdot\text{mg}$), 去除率为 30.2%, 但腐殖质去除率仅为 23.7%。可见 SUVA 指标并不能准确代表水中的腐殖质含量。这是因为腐殖质分子中存在富电子位点(双键、芳香环), 芳香环会与 $\cdot\text{OH}$ 迅速反应, 降低芳香性^[18], 但是腐殖质的螺旋结构空间阻止 $\cdot\text{OH}$ 裂解分子核心键, 使腐殖质主体结构保持完整^[19]。因此 SUVA 值低并不能代表腐殖质含量就低。

2.3.4 THMFPS 的变化

UV/H₂O₂ 工艺可以将大分子有机物降解为小分子有机物, 但小分子有机物是 THMs 的主要前体物。在本研究中, UV/H₂O₂ 工艺处理后 THMFPS 的变化见图 7。可以看出, 经 UV/H₂O₂ 工艺处理后, 三氯甲烷生成势由 0.004 9 mg/L 增至 0.006 5 mg/L, 增加了 32.6%; 二氯一溴甲烷生成势由 0.018 5 mg/L 增至 0.023 5 mg/L, 增加了 27.0%; 一氯二溴甲烷生成势由 0.015 mg/L 增至 0.022 mg/L, 增加了 46.7%; 三溴甲烷生成势则由 0.004 2 mg/L 增至 0.006 5 mg/L, 增加了 54.8%, 出水的 THMFPS 总量增加。《生活饮用

水卫生标准》(GB 5749—2006)规定,三氯甲烷、二氯一溴甲烷、一氯二溴甲烷、三溴甲烷在饮用水中的最大限值分别为0.06、0.06、0.1、0.1 mg/L。可见虽然UV/H₂O₂工艺出水中的THMFPS略有增加,但没有造成超标风险。

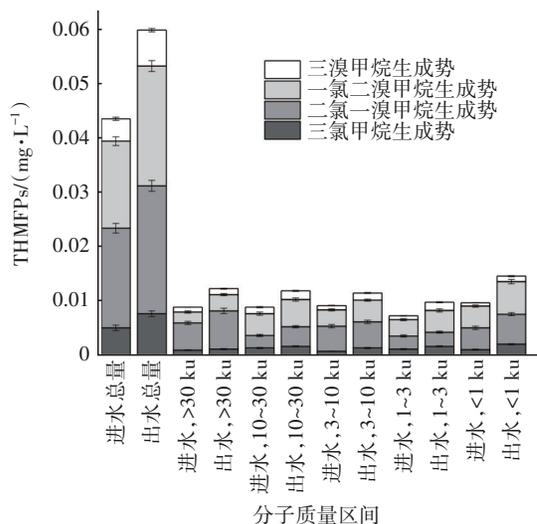


图7 UV/H₂O₂工艺进、出水THMFPS的变化

Fig.7 Changes of THMFPS in influent and effluent of UV/H₂O₂ process

从各分子质量区间来看,在分子质量为3~10 ku和<1 ku两个区间内三氯甲烷生成势的增加量最多,增长率分别为57.1%和50.0%;二氯一溴甲烷生成势在分子质量<1 ku区间内增加了0.0013 mg/L;一氯二溴甲烷生成势在所有分子质量区间内平均增加了0.0014 mg/L;三溴甲烷生成势在不同分子质量区间均略微增加。

结合水中有机物分子质量分布、荧光物质、DOM组分及THMFPS的变化可知,水中大分子有机物被·OH降解为小分子有机物,小分子有机物可能是THMs的前体物^[20],从而导致经UV/H₂O₂处理后THMFPS增加。另外,THMFPS增加的原因还可能是:①由于·OH可以将水中的亲水性有机物氧化成疏水性有机物,而疏水性有机物经氯化反应之后更易生成THMs^[21];②消毒副产物前体物一般是富里酸、腐殖酸及其他天然有机物,但·OH对这类物质的去除效果不理想^[22]。综上,经UV/H₂O₂工艺处理后THMFPS有一定增加,故应加强对THMFPS的检测分析,必要时采取措施防止消毒副产物超标。

3 结论与建议

① 采用UV/H₂O₂工艺处理常规砂滤出水时,

对臭味物质的去除效果较好,H₂O₂平均利用率为46%,对UV₂₅₄、COD_{Mn}的平均去除率分别为50.3%和5.7%,pH和浊度略有降低。

② 经UV/H₂O₂工艺处理后,水中的大分子有机物被降解为小分子有机物,荧光强度减弱,DOM组分和结构均发生变化,THMFPS略微增加。

针对微污染湖库水源臭味问题,可考虑采用UV/H₂O₂工艺进行控制,该工艺比臭氧氧化工艺更高效和经济便捷,更具应用前景;同时,针对UV/H₂O₂工艺可能存在残留H₂O₂、THMFPS略微升高的问题,建议与生物活性炭工艺联合使用。

参考文献:

- [1] ANTONOPOULOU M, EVGENIDOU E, LAMBROPOULOU D, *et al.* A review on advanced oxidation processes for the removal of taste and odor compounds from aqueous media [J]. *Water Research*, 2014, 53: 215-234.
- [2] BANG H, SLOKAR Y M, FERRERO G, *et al.* Removal of taste and odor causing compounds by UV/H₂O₂ treatment: effect of the organic and inorganic water matrix [J]. *Desalination & Water Treatment*, 2016, 57: 27485-27494.
- [3] WANG C J, MOORE N, BIRCHER K, *et al.* Full-scale comparison of UV/H₂O₂ and UV/Cl₂ advanced oxidation: the degradation of micropollutant surrogates and the formation of disinfection byproducts [J]. *Water Research*, 2019, 161: 448-458.
- [4] SARATHY S R, STEFAN M I, ROYCE A, *et al.* Pilot-scale UV/H₂O₂ advanced oxidation process for surface water treatment and downstream biological treatment: effects on natural organic matter characteristics and DBP formation potential [J]. *Environmental Technology*, 2011, 32 (15): 1709-1718.
- [5] GARCÍA-MORALES M A, ROA-MORALES G, BARRERA-DÍAZ C E, *et al.* Integrated advanced oxidation process (ozonation) and electrocoagulation treatments for dye removal in denim effluents [J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2013, 8(6): 8752-8763.
- [6] SARATHY S R, MOHSENI M. The impact of UV/H₂O₂ advanced oxidation on molecular size distribution of chromophoric natural organic matter [J]. *Environmental*

- Science & Technology, 2007, 41(24): 8315-8320.
- [7] TAN F X, CHEN H H, WU D J, *et al.* Optimization of removal of 2-methylisoborneol from drinking water using UV/H₂O₂ [J]. Journal of Advanced Oxidation Technologies, 2016, 19(1):98-104.
- [8] AUDENAERT W T M, VANDIERENDONCK D, VAN HULLE S W H, *et al.* Comparison of ozone and HO induced conversion of effluent organic matter (EfOM) using ozonation and UV/H₂O₂ treatment [J]. Water Research, 2013, 47(7): 2387-2398.
- [9] ZHAO X, HU H Y, YU T, *et al.* Effect of different molecular weight organic components on the increase of microbial growth potential of secondary effluent by ozonation [J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(11): 2190-2197.
- [10] 于德森. 臭氧高级氧化与BAF联合污水深度处理工艺比较与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- YU Demiao. Study on Comparison on the Treatment and Reuse of Municipal Wastewater by Means of AOPs+BAF Technology [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006 (in Chinese).
- [11] WANG D S, ZHAO Y M, YAN M Q, *et al.* Removal of DBP precursors in micro-polluted source waters: a comparative study on the enhanced coagulation behavior [J]. Separation & Purification Technology, 2013, 118: 271-278.
- [12] XU B, GAO N Y, SUN X F, *et al.* Characteristics of organic material in Huangpu River and treatability with the O₃-BAC process [J]. Separation & Purification Technology, 2007, 57(2): 348-355.
- [13] VALENCIA S, MARÍN J M, RESTREPO G, *et al.* Evaluation of natural organic matter changes from Lake Hohloh by three-dimensional excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy during TiO₂/UV process [J]. Water Research, 2014, 51: 124-133.
- [14] SWIETLIK J, SIKORSKA E. Application of fluorescence spectroscopy in the studies of natural organic matter fractions reactivity with chlorine dioxide and ozone [J]. Water Research, 2004, 38(17): 3791-3799.
- [15] ESPINOZALA T, TER HASEBORGE, WEBER M, *et al.* Investigation of the photocatalytic degradation of brown water natural organic matter by size exclusion chromatography [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2009, 87(1/2): 56-62.
- [16] VALENCIA S, MARÍN J, VELÁSQUEZ J, *et al.* Study of pH effects on the evolution of properties of brown-water natural organic matter as revealed by size-exclusion chromatography during photocatalytic degradation[J]. Water Research, 2012, 46(4): 1198-1206.
- [17] AHN Y, LEE D, KWON M, *et al.* Characteristics and fate of natural organic matter during UV oxidation processes [J]. Chemosphere, 2017, 184: 960-968.
- [18] GONZÁLEZ O, JUSTO A, BACARDIT J, *et al.* Characterization and fate of effluent organic matter treated with UV/H₂O₂ and ozonation [J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 226: 402-408.
- [19] JANSEN R H S, ZWIJNENBURG A, WESSLING M. Response to comment on “outside-in trimming of humic substances during ozonation in a membrane contactor” [J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(14): 5162-5164.
- [20] ZHAO Z Y, GU J D, FAN X J, *et al.* Molecular size distribution of dissolved organic matter in water of the Pearl River and trihalomethane formation characteristics with chlorine and chlorine dioxide treatments [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 134(1/3): 60-66.
- [21] AWAD J, VAN LEEUWEN J, CHOW C, *et al.* Characterization of dissolved organic matter for prediction of trihalomethane formation potential in surface and sub-surface waters [J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 308: 430-439.
- [22] 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 Haiyong. Experimental Study on Oxidative Degradation of GSM and 2-MIB by UV/H₂O₂ [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2017 (in Chinese).

作者简介:王永强(1994-),男,山西临汾人,硕士研究生,研究方向为水处理理论与技术。

E-mail: 1131411599@qq.com

收稿日期:2020-05-20

修回日期:2020-07-31

(编辑:刘贵春)