

苏宇亮, 韩国杭, 马腾冲, 等. 粉末活性炭-氯联用法对水中 Mn(II) 的去除及消毒副产物的控制[J]. 净水技术, 2026, 45(5): 40-44, 62.

Su Y L, Han G H, Ma T C, et al. Combined process of PAC-chlorine for Mn(II) removal and control of DBPs in water[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(5): 40-44, 62.

## 粉末活性炭-氯联用法对水中 Mn(II) 的去除及消毒副产物的控制

苏宇亮<sup>1</sup>, 韩国杭<sup>1</sup>, 马腾冲<sup>2</sup>, 沈会栋<sup>1</sup>, 曹家瑶<sup>1</sup>, 方黎<sup>1</sup>, 李贵伟<sup>2,\*</sup>

(1. 珠海水务环境控股集团有限公司, 广东珠海 519020; 2. 中国科学院生态环境研究中心区域环境安全全国重点实验室环境水质学重点实验室, 北京 100085)

**摘要** 【目的】溶解态二价锰离子[Mn(II)]在水厂中较难有效地去除,一旦进入管网系统会再氧化、沉积,形成管壁沉积物,造成潜在管网“黄水”风险。预氯化是水厂最常用的一种预氧化手段,但是氯在均相体系中氧化除 Mn(II) 速率非常缓慢,无法起到有效除 Mn(II) 的作用。前期研究发现,投加少量粉末活性炭(PAC)能大大催化氯化除 Mn(II) 进程,但是实际原水中存在有机物等各种组分,其如何影响该技术实际除 Mn(II) 效果, PAC 在氯化过程中如何影响消毒副产物生成还有待研究。【方法】本文研究了 PAC 催化氯化法应用于南方某市实际原水的 Mn(II) 去除效果,以及 PAC 的投加对氯化水中消毒副产物的影响。【结果】在药剂投加顺序方面,同时投加 PAC 和氯,或先投加 PAC、后投加氯的除 Mn(II) 效果优于先投加氯、后投加 PAC,这是因为后者会导致氯先被水中有机物快速消耗而减少与 Mn(II) 的反应,但整体差异并不明显。增加 PAC 投量能显著提升 Mn(II) 去除效果,但通过提升氯投加量强化 Mn(II) 去除会造成消毒副产物产量增加。【结论】总体上,在催化氯化 Mn(II) 过程中, PAC 的投加不仅能大大促进 Mn(II) 的氧化,还可同时吸附降低水中消毒副产物,起到 Mn(II) 和消毒副产物协同控制的效果。本文可为水厂预氯化除 Mn(II) 以及应对消毒副产物问题提供借鉴指导。

**关键词** 粉末活性炭 氯 催化氧化 除锰 消毒副产物

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)05-0040-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.05.006

## Combined Process of PAC-Chlorine for Mn(II) Removal and Control of DBPs in Water

Su Yuliang<sup>1</sup>, Han Guohang<sup>1</sup>, Ma Tengchong<sup>2</sup>, Shen Huidong<sup>1</sup>, Cao Jiayao<sup>1</sup>, Fang Li<sup>1</sup>, Li Guiwei<sup>2,\*</sup>

(1. Zhuhai Water Environment Holdings Group Co., Ltd., Zhuhai 519020, China;

2. Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, State Key Laboratory of Regional Environment and Sustainability, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract** [Objective] Dissolved divalent manganese ions [Mn(II)] are difficult to remove efficiently in water treatment plants (WTPs). Once entering the pipe networks system, they may be re-oxidized and deposited on pipe walls, posing a potential risk of “yellow water”. Pre-chlorination is a commonly used pre-oxidation method in WTPs, but the oxidation of Mn(II) by chlorine in a homogeneous system is very slow, making it ineffective for Mn(II) removal. Previous studies have found that adding a small amount of powdered activated carbon (PAC) significantly catalyzes the Mn(II) oxidation process by chlorine. However, the effects of organic matter and other components in raw water on the practical Mn(II) removal efficiency of this technology, as well as the influence of PAC on disinfection by-products formation during chlorination, remain to be investigated. [Methods] This paper evaluated the performance of PAC-catalyzed chlorination for Mn(II) removal in actual raw water from a southern City, and examined the impact of PAC addition on the formation of disinfection by-products during chlorination. [Results] Regarding the order of chemical addition,

[收稿日期] 2025-06-24

[基金项目] 国家自然科学基金(52300123)

[作者简介] 苏宇亮(1975—),男,高级工程师,主要从事水质监测、分析和水处理工艺研究等工作,E-mail: soda@21cn.com。

[通信作者] 李贵伟(1992—),男,副教授,研究方向为饮用水处理与安全输配,E-mail: ligw@sjtu.edu.cn。

simultaneous addition of PAC and chlorine, or adding PAC before chlorine, achieved better Mn(II) removal than adding chlorine before PAC. The latter resulted in rapid consumption of chlorine by organic matter before it could react with Mn(II), though the overall difference was not significant. Increasing the PAC dosage significantly enhanced Mn(II) removal efficiency, but raising the chlorine dosage to improve Mn(II) removal led to increased disinfection by-products formation. [Conclusion] Overall, during the catalytic chlorination of Mn(II), PAC addition not only greatly promotes Mn(II) oxidation but also simultaneously adsorbs and reduces disinfection by-products in water, achieving synergistic control of both Mn(II) and disinfection by-products. This paper provides practical guidance for WTPs using pre-chlorination for Mn(II) removal while managing disinfection by-products issues.

**Keywords** powdered activated carbon (PAC) chlorine (Cl) catalytic oxidation manganese removal disinfection by-products (DBPs)

锰是引起给水管网饮用水变色相关的典型金属。其在管道内壁的积累和释放会诱发黄水或黑水事件<sup>[1-2]</sup>。即使水厂出水中的锰质量浓度低至几十微克每升,进入管网后,仍可能继续被氧化为二氧化锰,进而诱发变色水问题<sup>[3-5]</sup>,因此需将出厂水中锰的浓度降至更低水平,才能更好地预防锰引发的变色水问题。相较于容易通过沉淀、过滤去除的颗粒态锰氧化物,二价锰离子[Mn(II)]的去除主要依靠化学氧化形成锰氧化物后方能去除<sup>[6]</sup>,因此,使用更高效的Mn(II)氧化技术有利于进一步降低出厂水中锰浓度。在水处理中,氯是最常见的预氧化剂,但是在饮用水常见近中性pH条件下,Mn(II)和氯反应缓慢。Li等<sup>[7]</sup>研究表明,投加粉末活性炭(PAC)可使氯氧化去除Mn(II)的速率实现数量级的提升。除与Mn(II)反应外,氯也会与水体中的天然有机物(NOM)反应,并生成有害人体健康的消毒副产物(DBPs)<sup>[8]</sup>。当前,已有一些研究<sup>[9-10]</sup>指出,纯水体系中PAC和较高浓度氯可反应生成少量DBPs。但是关于较低浓度氯条件下,PAC与氯联用去除天然水Mn(II)过程中DBPs的生成情况尚不清楚,还需开展研究明确在常见饮用水水质条件下,PAC与氯联用是会通过PAC吸附机制降低DBPs,还是会由于PAC与氯发生可能的反应而造成DBPs的增加。

本文以南方某城市水厂的的实际原水(地表水)为对象,在典型的饮用水条件下(本文所采用的pH、氯投加浓度、PAC投加浓度均为实际水处理中常见值)探讨了PAC和氯的联合投加策略及投加顺序对催化氧化Mn(II)效果的影响,这对实际工程中应用该技术具有重要指导意义。同时,本文重点研究了PAC在催化氯氧化除Mn(II)过程中DBPs的生成的情况,明确了PAC和氯联合投加对DBPs生成

具有控制作用。本文结果可为水厂提供高效除锰的指导,帮助减少因锰引发的黄水问题,并有助于掌握和控制DBPs的生成。本文对保障供水安全具有现实意义。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料和化学品

使用硫酸锰(MnSO<sub>4</sub>,优级纯)配置锰的储备液,使用盐酸羟胺(NH<sub>2</sub>OH-HCl,优级纯)配置用于将颗粒态锰还原为溶解态锰的消解液。以上药剂均购自阿拉丁(中国)。浓硝酸(HNO<sub>3</sub>,≥65%)由安普(中国)提供。次氯酸钠和抗坏血酸购自麦克林,分别用于配置游离氯储备液和淬灭余氯中试氯氧化反应。试验中使用的水相针式过滤器(安普)由聚醚砜(PES)材料制成,膜孔径为0.22 μm,膜直径为25 mm,用于过滤水样。试验在容量为1 L玻璃烧杯中进行,磁力搅拌器用于反应过程中的溶液混合。用于催化氯氧化反应试验所使用的PAC为水厂常备煤质PAC,该PAC用200目孔筛分(对应粒径<74 μm),碘值大于800 mg/g。用于检测的标准液包括用于电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定的金属标液、甲醇中配置的三卤甲烷(标样),包括三氯甲烷(40.9 μg/mL)、一溴二氯甲烷(40.8 μg/mL)、二溴一氯甲烷(40.5 μg/mL)和三溴甲烷(39.5 μg/mL)等。试验用水为南方某城市水厂的的原水,其平均pH值为7.5,浑浊度为3.7 NTU,含溶解性有机碳质量浓度为1.9 mg/L、总铝质量浓度为48 μg/L、总铁质量浓度为86 μg/L、总锰质量浓度为40 μg/L。使用超纯水(电导率>18.2 MΩ·cm)配置储备液和稀释样品。

### 1.2 药剂投加顺序对Mn(II)氧化及DBPs的影响

试验分为2组,每组设置2个平行试验(1#和

2#为一组, 3#和 4#为一组)。平行试验结果以平均值 $\pm$ 标准偏差形式呈现。所有烧杯置于磁力搅拌器上, 放入 A300 转子, 以 500 r/min 的转速搅拌。向每个烧杯中注入 1 L 试验用水, 并投加质量浓度为 200  $\mu\text{g/L}$  的 Mn(II)。转动 30 s 后, 进行第一次取样, 作为试验的起始点。然后, 在 1#和 2# 烧杯中, 先投加 5 mg/L PAC(参考水厂常用投加剂量), 5 min 后进行第 2 次取样。取样后再投加质量浓度为 3 mg/L 的氯, 并在反应进行到第 15、30、45、60 min 时分别取样。在 3#和 4# 烧杯中, 先投加 3 mg/L 氯, 5 min 后进行第 2 次取样, 取样后继续投加 5 mg/L PAC, 并同样在第 15、30、45、60 min 时取样。每次取样 10 mL, 水样用 0.22  $\mu\text{m}$  滤膜过滤, 置于 15 mL 离心管用于随后的溶解 Mn(II) 浓度的分析。试验结束时(60 min), 从每个烧杯中取 100 mL 水样, 通过 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤后, 存入含 0.3 g 抗坏血酸的棕色磨口玻璃瓶中(防止样品光解), 用作三卤甲烷等 DBPs 的测试。

### 1.3 药剂投加量对 Mn(II) 氧化及 DBPs 的影响

试验分为 2 组, 每组设置 2 个平行试验(1#和 2#为一组, 3#和 4#为一组)。所有烧杯置于磁力搅拌器上, 放入 A300 转子, 转速为 500 r/min, 注入 1 L 水厂原水。向 4 个烧杯中分别投加质量浓度为 200  $\mu\text{g/L}$  的 Mn(II), 搅拌 30 s 后, 进行第一次取样, 作为试验的起始点。然后在 1#和 2# 烧杯中同时投加质量浓度为 2 mg/L 的氯和 5 mg/L 的 PAC, 向 3#和 4# 烧杯中同时投加质量浓度为 4 mg/L 的氯和 10 mg/L 的 PAC, 间隔 5、15、30、45、60 min 时分别进行过滤取样用于锰浓度测定。试验结束时(60 min), 从每个烧杯中取 100 mL 水样, 使用 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤, 存入含有 0.3 g 抗坏血酸的棕色磨口玻璃瓶中, 用作三卤甲烷等 DBPs 测试。

### 1.4 PAC 对氯催化氧化 Mn(II) 过程中 DBPs 的影响

试验分为 2 组, 每组设置 2 个平行试验(1#和 2#为对照组, 3#和 4#为试验组)。所有烧杯置于磁力搅拌器上, 放入 A300 转子, 提供 500 r/min 转速, 注入 1 L 试验用水。向每个烧杯中投加 200  $\mu\text{g/L}$  Mn(II), 搅拌 30 s 后, 进行第一次取样, 作为试验的起始点。然后在 1#和 2# 烧杯中仅投加 2 mg/L 氯, 向 3#和 4# 烧杯中同时加入质量浓度为 2 mg/L 的氯和 5 mg/L 的 PAC, 两体系分别在间隔 5、15、

30、45、60 min 时分别进行取样测定 Mn(II) 含量。试验结束时(60 min), 从每个烧杯中取 100 mL 水样, 使用 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜, 存入含 0.3 g 抗坏血酸的棕色磨口玻璃瓶中, 用作三卤甲烷等 DBPs 测试。

### 1.5 水质分析

采用电感耦合等离子质谱(ICP-MS)(Thermo iCAP Q)法测量水样中锰浓度。在取样后, 在离心管中使用质量分数为 1% 的  $\text{HNO}_3$  和浓度为 0.25 mmol/L  $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$  对锰进行消解至少 24 h, 随后使用 ICP-MS 测试分析。DBPs 根据《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 4.3 顶空毛细管柱气相色谱法使用气相色谱仪(安捷伦 7890B)进行测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 药剂投加顺序对 Mn(II) 氧化及 DBPs 的影响

PAC 和氯投加顺序对 Mn(II) 氧化速率的影响结果如图 1 所示。研究发现, 2 种方式都能较为快速地除 Mn(II), 但先投加 PAC 更有助于去除水相中的 Mn(II)。试验开始投加 5 mg/L PAC 至投加氯前 5 min 内, 水相中的 Mn(II) 质量浓度由 214.8  $\mu\text{g/L}$  降至 164.9  $\mu\text{g/L}$ , 该阶段水相中 Mn(II) 的减少归因于 PAC 的吸附作用, 而非氧化作用。5 min 后投加氯, 催化氧化过程启动。继续反应大约 40 min 后, 水相中的 Mn(II) 质量浓度降至 43  $\mu\text{g/L}$  左右, 去除率约为 80.0%, 伪一级反应速率常数( $k$  值)为 0.028  $\text{min}^{-1}$ 。随着反应时间的延长, Mn(II) 浓度不再进一步下降。相比之下, 若先投加 3 mg/L 氯, 再间隔 5 min 后投加 PAC, 水相中的 Mn(II) 质量浓度在前 5 min 内仅由 214.8  $\mu\text{g/L}$  降至 180.1  $\mu\text{g/L}$ , 继续投加 PAC 反应约 40 min 后, 水相中的 Mn(II) 质量浓度降至 64  $\mu\text{g/L}$  左右, 去除率约为 70.0%,  $k$  值约为 0.020  $\text{min}^{-1}$ 。两体系中 45~60 min 反应几乎不再进行, 这是氯快速消耗所致(水体浑浊度较大, 且夏季水中藻、有机物等含量较高), 60 min 时水中自由氯质量浓度仅剩约 0.1 mg/L。

综上所述, 使用相同药剂的投加量, 先投加 PAC 比先投加氯的除 Mn(II) 效果更显著, 去除率高约 10.0%。再对比后文中同时投加 3 mg/L 氯和 5 mg/L PAC 的除锰效果(约 75%)可知, 同时投加

氯和 PAC 相较于先投加氯后投加 PAC 又具有更好的除 Mn(II) 效果, 因此在实际中条件允许情况下, 同时投氯和 PAC 最优, 其次是先投 PAC 后投氯, 再次选择是先投氯后投 PAC。在 PAC-氯催化氧化除 Mn(II) 中, Mn(II) 和氯同时被 PAC 微孔吸附, 继而二者发生接触、氧化是 Mn(II) 快速氧化的关键。先投加 PAC 的优点是能够确保 Mn(II) 被 PAC 吸附, 随后即可被 PAC 吸附的氯在微孔中氧化<sup>[7,11]</sup>。先投加氯则会导致在 Mn(II) 被 PAC 吸附前, 氯就被 PAC 吸附, 并被 PAC 还原和快速消耗, 从而使得能与 Mn(II) 反应的局部氯浓度降低, Mn(II) 氧化反应变慢、Mn(II) 去除率降低<sup>[7,11]</sup>。

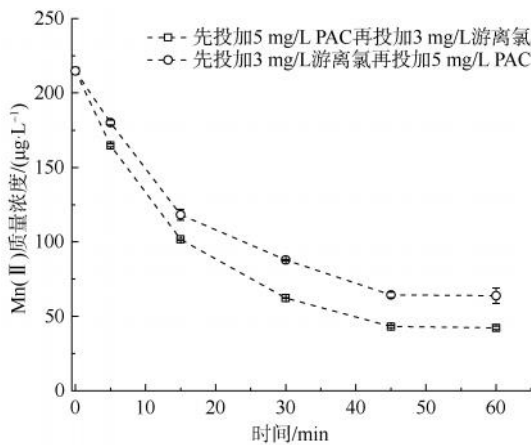


图1 PAC和氯投加顺序对Mn(II)氧化速率的影响  
Fig. 1 Effect of PAC and Chlorine Dosing Sequence on Mn(II) Oxidation Rates

去除 Mn(II) 过程中 PAC 和氯投加顺序对 DBPs 的影响结果如图 2 所示。结果表明, 先投加 PAC 有助于略微减少 DBPs 的产生, 三氯甲烷、二氯一溴甲烷和一氯二溴甲烷的产量分别比先投加氯时低约 3.0%、4.0% 和 3.0%。这可能是因为 PAC 对于 DBPs 具有一定吸附作用, 从而降低了其在水中的浓度, 但总体上该差别不大。先投加 PAC 不仅有助于催化氧化 Mn(II), 还有助于控制有害 DBPs 的生成。

## 2.2 药剂投加量对 Mn(II) 氧化及 DBPs 的影响

PAC 和氯投加量对 Mn(II) 氧化速率的影响结果如图 3 所示。较少的药剂投加量使得 Mn(II) 氧化反应更快达到平衡, 30 min 后 Mn(II) 质量浓度几乎就不再明显继续降低(降至 86 µg/L)。而增加 PAC 和氯投加量的情况下, Mn(II) 的催化氧化过

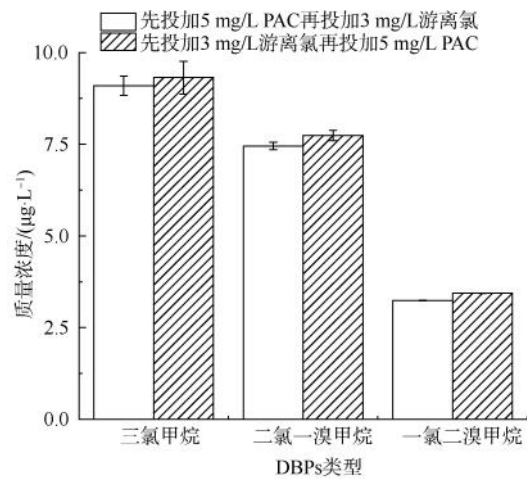


图2 PAC和氯投加顺序对DBPs的影响

Fig. 2 Effect of PAC and Chlorine Dosing Sequence on DBPs

程持续时间更长, Mn(II) 能被更好地氧化去除(降至 30 µg/L)。增加 1 倍药剂投加量, 水相中 Mn(II) 的去除率增加 18.4%。这是因为投加 2 mg/L 氯时, 30 min 后氯即能衰减至 0.05 mg/L 以下, 而投加 4 mg/L 氯时, 60 min 后残余氯质量浓度还有 0.5 mg/L。

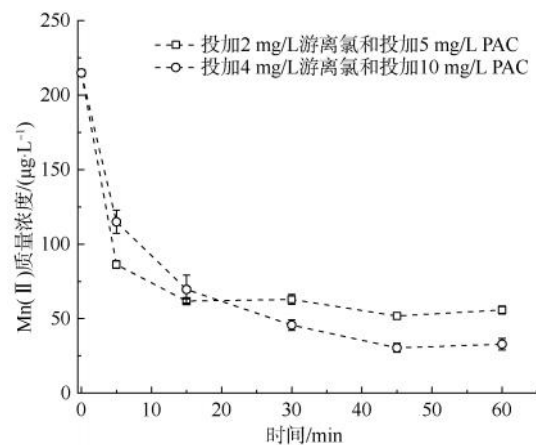


图3 PAC和氯同时投加时药剂投加量对Mn(II)氧化速率的影响

Fig. 3 Effect of Chemical Dosage on Mn(II) Oxidation Rate with Co-Dosing of PAC and Chlorine

去除 Mn(II) 过程中 PAC 和氯投加量对 DBPs 的影响结果如图 4 所示。在催化氧化 Mn(II) 的过程中提高氯投加量会大幅增加 DBPs 的产生, 但是对不同类型 DBPs 的影响不同。增加氯投量对 DBPs 产量影响显著。当提高 1 倍氯药剂投加量时, 三氯甲烷的产量增加了 93.3%、二氯一溴甲烷增加

了 304.3%、一氯二溴甲烷增加了 1 260.0%。

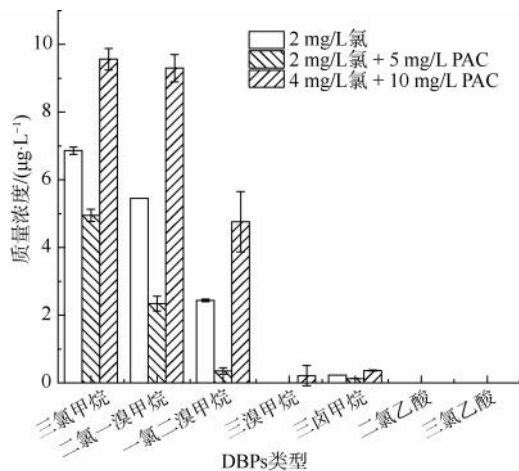


图 4 仅投加氯、同时投加氯和 PAC、药剂投加量对 DBPs 的影响

Fig. 4 Effect of Chlorine alone, both Chlorine and PAC, and Chemical Dosage on DBPs

由于提高药剂投量并不总能大幅提升 Mn(II) 氧化速率及去除率, 而且增加氯投量会大幅增加 DBPs 产量, 建议在不同原水除 Mn(II) 的实际应用中, 应进行锰氧化小试试验获得最优的氯和 PAC 投加浓度, 达到降低药剂投量成本、强化除 Mn(II) 效果和控制在 DBPs 多重目标。此外, 不同类型 PAC 对氯化 Mn(II) 反应催化能力有很大差异<sup>[12]</sup>, 因此, 亦可通过优选、储备和使用具有较强催化能力的 PAC 用于催化氧化除 Mn(II)。

### 2.3 投加 PAC 对氯催化氧化 Mn(II) 过程中 DBPs 的影响

未投加 PAC 或者氯情况下, 即原水中三氯甲烷、二氯一溴甲烷和一氯二溴甲烷的浓度均在检出限以下。如图 4 所示, 单独投加 2 mg/L 氯时, 三氯甲烷、二氯一溴甲烷和一氯二溴甲烷的质量浓度分别为 6.86、5.45 µg/L 和 2.44 µg/L, 而在氯投加同时投加 5 mg/L 的 PAC, 三氯甲烷、二氯一溴甲烷和一氯二溴甲烷的质量浓度分别降低至 4.95、2.34、0.35 µg/L。尽管有研究<sup>[9-10]</sup>表明, 在纯水体系中 PAC 或者颗粒活性炭(GAC)和较高浓度氯可反应生成少量 DBPs, 但以上结果证实, 在含有 NOM 的天然水中, 即使 PAC 可能与氯发生反应, 投加少量 PAC 并未增加 DBPs 生成量。相反, 由于 PAC 会吸附水中形成的 DBPs, 在同时投氯和 PAC 用于氧化除锰时, PAC 的投加能显著降低水中 DBPs 的浓度,

表现出氧化除 Mn(II) 和 DBPs 控制的双重效果。这个结果与贺渝<sup>[10]</sup>的研究一致, 即在实际原水炭滤前氯化再经炭滤情况下, 存在活性炭对 DBPs 的吸附作用。

### 3 结论

本文利用实际水厂原水进行试验, 明确了 PAC 和氯投加剂量和顺序对 Mn(II) 催化氧化去除的重要影响, 对实际工程中应用该技术具有指导意义; 明确了 PAC 和氯联合投加对 DBPs 生成具有控制(降低)作用, 而非增加 DBPs 生成, 这对联合使用 PAC-氯催化除锰同时控制 DBPs 具有重要的现实意义。

本文主要结论如下。

(1) 在应用 PAC 催化氯化法除 Mn(II) 中, 氯和 PAC 投加量相同时, 先投加 PAC、后投加氯的除 Mn(II) 效果优于先投加氯、后投加 PAC, 且前者一定程度上减少了水中 DBPs 的浓度, 但整体差异并不十分明显。建议实际中先投加 PAC、随后投加氯, 或二者同时投加以保障氧化除 Mn(II) 效果。

(2) 将氯投加量增加 1 倍仅使得水中 Mn(II) 的去除率增加 18.4%, 但是三氯甲烷、二氯一溴甲烷和一氯二溴甲烷等 DBPs 产量大幅增加(分别增加 93.3%、304.3% 和 1 260.0%)。在实际运用中, 氯的投加应综合考虑除 Mn(II) 效果和 DBPs 控制, 若水中 DBPs 浓度较高, 可优先通过提升 PAC 投加浓度提升除 Mn(II) 效果同时控制 DBPs 生成。

(3) 在催化氯化 Mn(II) 过程中, 投加 PAC 不仅能促进氧化, 还可同时发挥吸附作用降低水中 DBPs 的量。当 2 mg/L 氯和 5 mg/L PAC 同时投加后, 三氯甲烷、二氯一溴甲烷和一氯二溴甲烷的产量较仅投加氯都有显著降低。

### 参考文献

- [1] Li G W, Ding Y X, Xu H F, et al. Characterization and release profile of (Mn, Al)-bearing deposits in drinking water distribution systems [J]. Chemosphere, 2018, 197: 73-80. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.01.027.
- [2] Ma X, Li G W, Yu Y, et al. Spatial variation of loose deposit characteristics in a 40 km long operational drinking water distribution system [J]. Environmental Science: Water Research & Technology, 2019, 5(10):1689-1698.
- [3] 李秀娟. 一起由锰引起的市政管网自来水污染事故的调查 [J]. 环境与健康杂志, 2013, 30(6): 564.

(下转第 62 页)

- contaminants in surface water ecosystem; Sources, monitoring, and its impact on human health[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, 31(45): 56428-56462.
- [21] Zhang C, Zhang W N, Huang Y X, et al. Analysing the correlations of long-term seasonal water quality parameters, suspended solids and total dissolved solids in a shallow reservoir with meteorological factors [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(7): 6746-6756.
- [22] 张雪, 蒋福春, 林涛. 南方某水厂活性炭滤池滤料更换评价及管理应用[J]. *净水技术*, 2019, 38(7): 89-95, 120.  
Zhang X, Jiang F C, Lin T. Evaluation and management application of filter material replacement for activated carbon filter of a water treatment plant in South China[J]. *Water Purification Technology*, 2019, 38(7): 89-95, 120.
- [23] Krasner S W, Weinberg H S, Richardson S D, et al. Occurrence of a new generation of disinfection byproducts[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(23): 7175-7185.
- [24] Woo Y T, Lai D, McLain J L, et al. Use of mechanism-based structure-activity relationships analysis in carcinogenic potential ranking for drinking water disinfection by-products [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2002, 110(s1): 75-87.
- [25] Villanueva C M, Cordier S, Font-Ribera L, et al. Overview of disinfection by-products and associated health effects [J]. *Current Environmental Health Reports*, 2015, 2(1): 107-115.
- [26] Li X F, Mitch W A. Drinking water disinfection byproducts (DBPs) and human health effects; Multidisciplinary challenges and opportunities [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(4): 1681-1689.
- [27] Wagner E D, Plewa M J. CHO cell cytotoxicity and genotoxicity analyses of disinfection by-products: An updated review [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 58: 64-76. DOI: 10.1016/j.jes.2017.04.021.
- [28] 张振秀, 杨凯, 于建伟, 等. 臭氧活性炭-后置砂滤工艺对水中农药的控制效能[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(5): 2315-2320.  
Zhang Z X, Yang K, Yu J W, et al. Pesticides removal evaluation for O<sub>3</sub>/BAC with post filtration process in drinking water[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(5): 2315-2320.
- [29] 李思佳, 沈晓芳, 张占恩, 等. 氨基化金属有机骨架对废水中新型烟碱类农药的去除机制[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(10): 2654-2667.  
Li S J, Shen X F, Zhang Z E, et al. Removal mechanism of neonicotinoid insecticides in wastewater by aminated metal-organic framework [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14(10): 2654-2667.
- [30] 赵建伟, 袁庆江, 秦丞志, 等. 氟苯尼考降低生物除磷性能的影响行为及机制解析[J]. *环境科学学报*, 2023, 43(5): 116-124.  
Zhao J W, Yuan Q J, Qin C Z, et al. Behavior and mechanism analysis of florfenicol Influence on biological phosphorus removal performance[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, 43(5): 116-124.

(上接第44页)

- Li X J. Investigation on a tap water pollution accident caused by manganese in municipal pipe network [J]. *Journal of Environment and Health*, 2013, 30(6): 564.
- [4] 石宝友, 李涛, 顾军农, 等. 北方某市水源更换过程中管网黄水产生机制的探讨[J]. *供水技术*, 2010, 4(4): 12-15.  
Shi B Y, Li T, Gu J N, et al. Mechanism of distribution system red water occurred during the source water switch in a city of North China[J]. *Water Technology*, 2010, 4(4): 12-15.
- [5] 江迎春. 自来水厂去除水中微量铁锰防治“黄水”技术研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2011.  
Jiang Y C. Study on prevention of "red water" by removal of trace iron and manganese in waterworks [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2011.
- [6] Farnsworth C E, Voegelin A, Hering J G. Manganese oxidation induced by water table fluctuations in a sand column [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(1): 277-284.
- [7] Li G W, Hao H T, Zhuang Y, et al. Powdered activated carbon enhanced Manganese (II) removal by chlorine oxidation [J]. *Water Research*, 2019, 156: 287-296. DOI: 10.1016/j.watres.2019.03.027.
- [8] Watts C, Sun J X, Jones P D, et al. Monthly variations of unregulated brominated disinfection by-products in chlorinated water are correlated with total bromine [J]. *Eco-Environment & Health*, 2022, 1(3): 147-155.
- [9] Huang X, Yu Y, Chen H, et al. Disinfection by-product formation and toxicity evaluation for chlorination with powdered activated carbon [J]. *Water Research*, 2021, 205: 117660. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117660.
- [10] 贺渝. 活性炭与次氯酸钠反应生成消毒副产物的规律研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.  
He Y. Formation of the halogenated dbps by reaction of chlorine and activated carbon [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [11] Yin S X, Wang H R, Zhang Y, et al. Enhanced pore structure of powdered activated carbon can boost its performance in catalyzing Mn(II) oxidation by chlorine [J]. *Environmental Science & Technology*, 2025, 59(21): 10578-10587.
- [12] 郑昕怡, 武心怡, 李伟, 等. 氯耦合粉末活性炭去除水中锰的效能及机理[J]. *中国给水排水*, 2024, 40(23): 1-6.  
Zheng X Y, Wu X Y, Li W, et al. Efficiency and mechanism of manganese removal from water using chlorine coupled with powdered activated carbon [J]. *China Water & Wastewater*, 2024, 40(23): 1-6.