

水源与饮用水保障

宋佳临, 顾松, 王明远, 等. 饮用水常规处理工艺的强化与提升: 地表水预处理与深度处理案例[J]. 净水技术, 2025, 44(9): 50-56.

SONG J L, GU S, WANG M Y, et al. Enhancement and upgrading of conventional drinking water treatment process: Case of pretreatment and advanced treatment for surface water [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(9): 50-56.

饮用水常规处理工艺的强化与提升: 地表水预处理与深度处理案例

宋佳临¹, 顾松², 王明远¹, 吕忠强², 张逸¹, 梁恒^{1,*}

(1. 哈尔滨工业大学环境学院, 黑龙江哈尔滨 150090; 2. 济宁中山公用水务有限公司, 山东济宁 272100)

摘要 【目的】 城市化进程的加速导致了城镇供水需求的增加, 而地表水作为重要的供水水源, 其水质及净化效果对于饮用水安全保障至关重要。为了探究山东省济宁市某地表水厂的混凝-沉淀-臭氧-生物活性炭组合工艺处理当地微污染水源水的效果, 此文开展了以常规处理工艺为核心工艺的组合工艺处理微污染地表水的试验研究。【方法】 文章探索了混凝沉淀、预氧化以及臭氧-生物活性炭等各段工艺单元的运行参数, 对比探究了不同预氧化剂强化混凝的效果。【结果】 聚合氯化铝(PAC)的最适投加量宜为 10~15 mg/L, 聚丙烯酰胺(PAM)强化混凝的效果有限; 次氯酸钠和臭氧这 2 种预氧化剂对出水浑浊度并没有进一步降低的作用, 但可强化对有机污染物的去除; 臭氧-生物活性炭工艺展现出了对有机物更好的去除效果, 臭氧投加量为 1.00~2.00 mg/L 时, 可实现 30% 以上的高锰酸盐指数去除和 60% 以上的 UV_{254} 去除。【结论】 文章为“混凝-沉淀-臭氧-生物活性炭”组合工艺处理山东济宁微污染地表水源水的运行与优化, 提供了参考与技术支撑, 验证了其良好的工程适应性和可操作性。该工艺作为常规处理工艺的有效强化手段, 对于山东济宁及类似水质条件地区的水厂运行具有重要的指导意义和良好的推广应用前景。

关键词 地表水 预处理 混凝 沉淀 臭氧-生物活性炭(O_3 -BAC)

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)09-0050-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.09.006

Enhancement and Upgrading of Conventional Drinking Water Treatment Process: Case of Pretreatment and Advanced Treatment for Surface Water

SONG Jialin¹, GU Song², WANG Mingyuan¹, LÜ Zhongqiang², ZHANG Yi¹, LIANG Heng^{1,*}

(1. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. Jining Zhongshan Public Utilities Water Co., Ltd., Jining 272100, China)

Abstract [Objective] The acceleration of urbanization has led to an increase in urban water supply demand. As an important water supply source, surface water quality and purification effect are crucial to ensuring drinking water safety. In order to investigate the effectiveness of the coagulation-precipitation- O_3 -BAC combination process for treating local micropolluted water at a water treatment plant (WTP) in Jining City, Shandong Province, this paper carries out an experimental study on the treatment of micropolluted surface water by the combination process with the conventional treatment process as the core process. [Methods] This paper introduces the operating parameters of the coagulation and precipitation, pre-oxidation and O_3 -BAC processes, and explored the effect of different pre-oxidants to strengthen coagulation. [Results] The optimum dosage of polyaluminum chloride (PAC) was 10-15 mg/L, and the

[收稿日期] 2024-03-06

[基金项目] 国家重点研发计划(2022YFC3203701)

[作者简介] 宋佳临(1997—), 男, 博士研究生, 研究方向为膜法水处理技术与原理, E-mail: hitsongjialin@126.com。

[通信作者] 梁恒(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为膜法水处理技术与原理, E-mail: hitliangheng@163.com。

enhanced coagulation effect of polyacrylamide (PAM) was limited. Two pre-oxidizers of sodium hypochlorite and ozone did not have further reduction of turbidity in the effluent, while they enhanced the removal of organic matter. The O_3 -BAC process demonstrated a better removal of organics, and more than 30% of permanganate removal and more than 60% of UV_{254} removal could be realized with an ozone dosage of 1.00–2.00 mg/L. [Conclusion] This paper provides reference and technical support for the operation and optimization of a combined “coagulation-sedimentation- O_3 -BAC” process for the treatment of micropolluted surface water in Jinan, Shandong Province, verifying its excellent engineering adaptability and operability. And it is of great significance and promising prospects for widespread application as a guide for the operation of local WTP with similar processes.

Keywords surface water pretreatment coagulation sedimentation ozone-biological activated carbon (O_3 -BAC)

水是人类最重要的资源之一,随着社会的发展和城镇化的推进,居民对清洁安全的饮用水需求不断增加^[1-2]。济宁市位于山东省中部,是一个人口众多的地级市。南四湖是济宁市内重要的淡水湖泊之一,位于市区南部。该湖是济宁市的重要饮用水源之一^[3],也是当地居民休闲娱乐的重要场所。然而,随着城市化和工业化的快速发展,南四湖的水质逐渐受到了严重的污染和破坏^[4-8]。传统的常规饮用水处理工艺主要包括混凝和沉淀,然而,常规水处理工艺对于复杂水体的有机物去除效果较为有限^[9]。随着技术的发展,人们越来越关注使用先进的预处理和深度处理技术来提高饮用水的质量^[10]。

此研究旨在探究不同预处理和深度处理技术对传统混凝沉淀工艺处理微污染地表水过程中的能效的提升。这些技术的有效性将通过比较它们在去除饮用水中常见的污染物指标(如浊度、有机物等)方面的效果来评估。首先,探究了混凝剂的适宜投量和助凝剂强化混凝的效果;其次,对比了投加不同剂量的3种预氧化剂[次氯酸钠($NaClO$)、高锰酸钾

($KMnO_4$)、臭氧]对混凝沉淀工艺的影响;最后,在中试规模下,通过比较梯度臭氧投量下的深度处理工艺对进水中的有机物去除,确定了较为合适的臭氧投量。此研究结果将为先进的预处理和深度处理技术在提高饮用水处理质量方面的应用提供有价值的见解,并有助于开发更有效和高效的饮用水处理技术。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置运行概况

试验原水来自山东省济宁市某水厂的进水。混凝剂[聚合氯化铝(PAC),有效成分>10.3%,以 Al_2O_3 计]、助凝剂[聚丙烯酰胺(PAM)]和预氧化剂均取自水厂加药间。中试部分工艺流程参考所在水厂的工艺流程设计,如图1所示。原水首先经静态混合器混合后进入折板絮凝池,后经上向流斜管沉淀池进入臭氧接触池和上向流生物活性炭滤池。中试的混凝沉淀部分运行参数参考小试试验结果。臭氧-生物活性炭(O_3 -BAC)深度处理单元前端进水为原水经混凝沉淀处理后的产水,进水经臭氧接触后进入活性炭滤池,进水流量为 $3\text{ m}^3/\text{h}$ 。

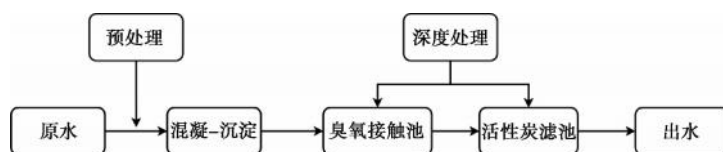


图1 济宁市某水厂中试工艺流程概况

Fig. 1 Overview of Pilot-Test Process of a WTP in Jinan City

1.2 分析项目与方法

2.1、2.2 小节数据内容来自小试规模试验,2.3 小节数据内容来自中试规模试验。

小试部分的混凝试验采用六连搅拌器在室温下开展,分别将1 L 原水以及不同剂量的药剂加入烧杯,为模拟实际水处理混凝过程,首先快速搅拌1 min(200 r/min),随后中速搅拌5 min

(120 r/min),最后慢速搅拌12 min(100 r/min),结束后静置20 min,取上清液检测相关指标^[11]。中试部分试验在上述济宁某水厂的中试车间内进行。试验中浊度指标使用浊度仪(HACH-2100N)检测, UV_{254} 采用紫外分光光度法进行测量,高锰酸盐指数使用酸性高锰酸钾滴定法进行测定^[11]。

2 结果与讨论

2.1 常规处理工艺对污染物的去除效能

2.1.1 混凝工艺处理效能

图 2(a) 展示了不同 PAC 投加量对混凝沉淀工艺去除浑浊度效果的影响。单独沉淀(投加量为 0)时, 浑浊度的去除率仅为 4.7%; 在 5 mg/L 的 PAC 投量下, 浑浊度降低到 1.0 NTU, 去除率达到 80.32%; PAC 投量为 10 mg/L 时, 浑浊度去除率达到 88.3%; 在此基础上继续加大 PAC 投加量, 浑浊度去除率达到 90% 后趋于稳定。混凝剂可有效降低原水浑浊度, 在低剂量下浑浊度去除率随混凝剂投加量的增加而显著提升, 但在高剂量下去除率趋于稳定。这主要是混凝剂的水解过程产生的正电荷产物导致水中颗粒物的再稳现象^[12]。

图 2(b) 展示了不同 PAC 投加量对混凝沉淀工艺去除高锰酸盐指数效果的影响。原水高锰酸盐指数均值为 4.14 mg/L, 单独沉淀(投加量为 0)时高锰酸盐指数相比原水仅有微弱降低。在 5 mg/L 的

PAC 投加量下, 上清液的高锰酸盐指数均值降低至 3.20 mg/L, 去除率达到 22.82%; 在 10 mg/L 的 PAC 投量下高锰酸盐指数均值降低至 2.85 mg/L, 去除率增加至 31.09%; 在此基础上继续增加 PAC 投量时, 高锰酸盐指数去除率未有显著提升。

图 2(c) 展示了不同 PAC 投加量对混凝沉淀工艺去除 UV_{254} 效果的影响。试验期间原水 UV_{254} 均值为 0.099 cm^{-1} , 单独沉淀(投加量为 0)时 UV_{254} 均值为 0.098 cm^{-1} , 与原水相比几乎无变化; 在 5 mg/L 的 PAC 投量下, UV_{254} 均值显著降低至 0.068 cm^{-1} , 去除率为 31.23%; 在此基础上, 随着 PAC 投加量的继续增加, 去除率先缓慢增加后趋于稳定, 当 PAC 投量增至 30 mg/L 时, 去除率增加至 50%, UV_{254} 降低至 0.052 cm^{-1} 。

由于在 5 mg/L 的 PAC 投加量下即可以实现较为明显的浑浊度和有机物的去除, 后续小试部分试验中如无特别说明, 均采用 5 mg/L 的 PAC 投加量。

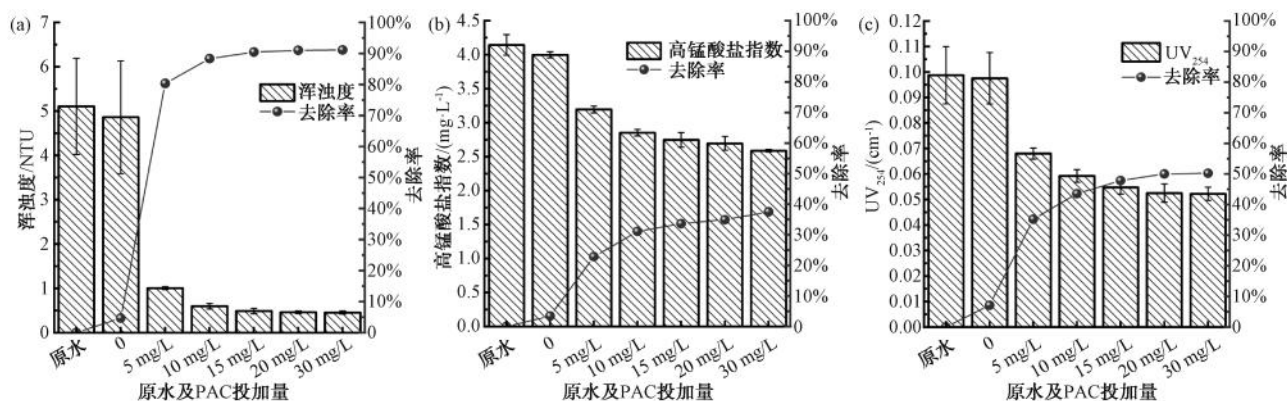


图 2 梯度 PAC 投加量下混凝沉淀工艺对 (a) 浑浊度; (b) 高锰酸盐指数; (c) UV_{254} 的去除效果

Fig. 2 Removal Efficiency of Coagulation-Sedimentation Process at Different PAC Dosages for (a) Turbidity; (b) Permanganate Index; (c) UV_{254}

2.1.2 PAM 助凝对混凝工艺处理效能的影响

为了考察 PAM 对混凝过程的协助效果, 选择在 5 mg/L 的 PAC 投加量下开展研究。

图 3(a) 展示了不同 PAM 投加量下混凝沉淀过程对浑浊度的去除效果。原水浑浊度均值为 5.52 NTU, 单独混凝沉淀后浑浊度均值已显著降低至 1.22 NTU, 去除率达到 77.90%; PAM 投加量为 0.2~1.0 mg/L 时, 出水浑浊度和单独混凝沉淀工况相比均无明显变化。这表明 PAM 的加入未能有效提升混凝沉淀的去除浑浊度效果。这种现象可主

要归因于原水浑浊度并不算高, 加入 5 mg/L PAC 后水中颗粒物已较好地形成絮体, 在此基础上加入 PAM 虽增大了絮体体积, 加快了沉降速度, 但对浑浊度去除效果的提升有限。

图 3(b) 展示了不同 PAM 投量下混凝沉淀过程对高锰酸盐指数的去除。原水高锰酸盐指数均值为 3.78 mg/L, 单独混凝沉淀后均值降低至 3.04 mg/L, 去除率达到 19.58%; 在 0.2~1.0 mg/L 的 PAM 投加量, 出水高锰酸盐指数和单独混凝沉淀工况相比均无明显变化。这表明 PAM 的加入未能强化混凝沉

淀过程对高锰酸盐指数的去除。

图 3(c) 展示了不同 PAM 投加量下混凝沉淀过程对 UV_{254} 的去除效果。原水 UV_{254} 均值为 0.105 cm^{-1} , 单独混凝沉淀后出水上清液 UV_{254} 均值降低

至 0.075 cm^{-1} , 去除率达到 28.57%; PAM 投加量为 $0.2 \sim 1.0 \text{ mg/L}$ 时, 出水 UV_{254} 和单独混凝沉淀工况相比均无明显变化。这表明 PAM 的加入未能有效提升混凝沉淀过程对 UV_{254} 指标的去除效果。

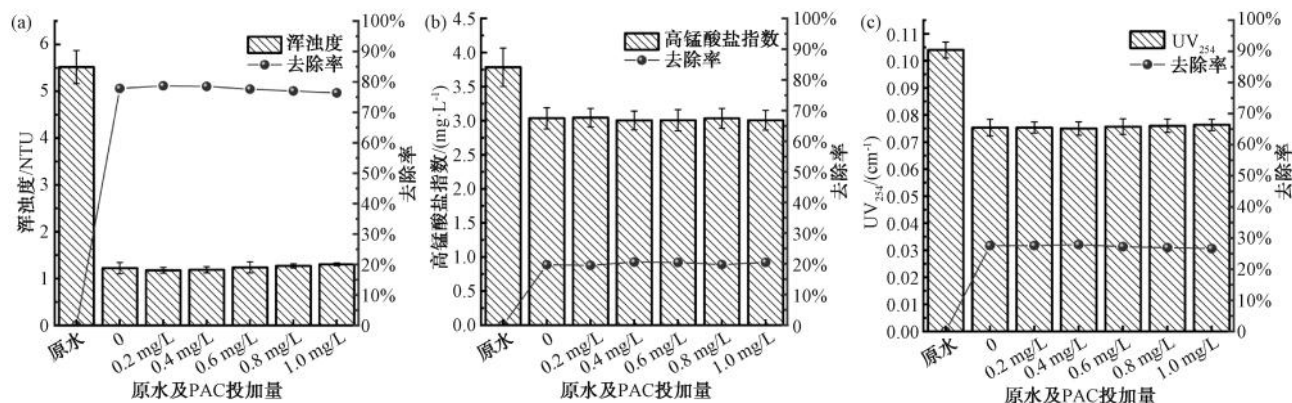


图 3 不同 PAM 投加量下混凝沉淀工艺对 (a) 浊度; (b) 高锰酸盐指数; (c) UV_{254} 的去除效果

Fig. 3 Removal Efficiency of Coagulation-Sedimentation Process at Different PAM Dosages for (a) Turbidity;

(b) Permanganate Index; (c) UV_{254}

2.2 预氧化对常规处理工艺的影响

考察了不同预氧化剂的加入对混凝过程的强化效果, 选择在 5 mg/L 的固定 PAC 投加量下开展研究。

2.2.1 次氯酸钠预氧化

图 4(a) 展示了不同 NaClO 投加量下的混凝沉淀过程去除浊度的效果。原水平均浊度为 5.36 NTU , 在单独混凝沉淀时, 出水浊度均值为 1.42 NTU , 去除率已达到 73.51%; 随着 NaClO 投加量从 0.25 mg/L 增加至 1.50 mg/L , 出水浊度均值降至 1.24 mg/L , 去除率仅增加 3.35%。这表明

NaClO 在强化去除浊度方面作用有限。

图 4(b) 展示了不同 NaClO 投加量下的混凝沉淀过程对高锰酸盐指数的去除效果。原水高锰酸盐指数均值为 3.69 mg/L , 在单独混凝沉淀时, 出水平均高锰酸盐指数为 3.11 mg/L , 去除率仅为 15.72%。随着 NaClO 投加量从 0.25 mg/L 增加至 1.50 mg/L , 出水高锰酸盐指数逐渐下降至 2.82 mg/L , 去除率提升至 23.58%。

图 4(c) 展示了梯度 NaClO 投加量下的混凝沉淀出水的 UV_{254} 值。原水 UV_{254} 均值为 0.101 cm^{-1} , 在单独混凝沉淀时, 出水 UV_{254} 均值降低至

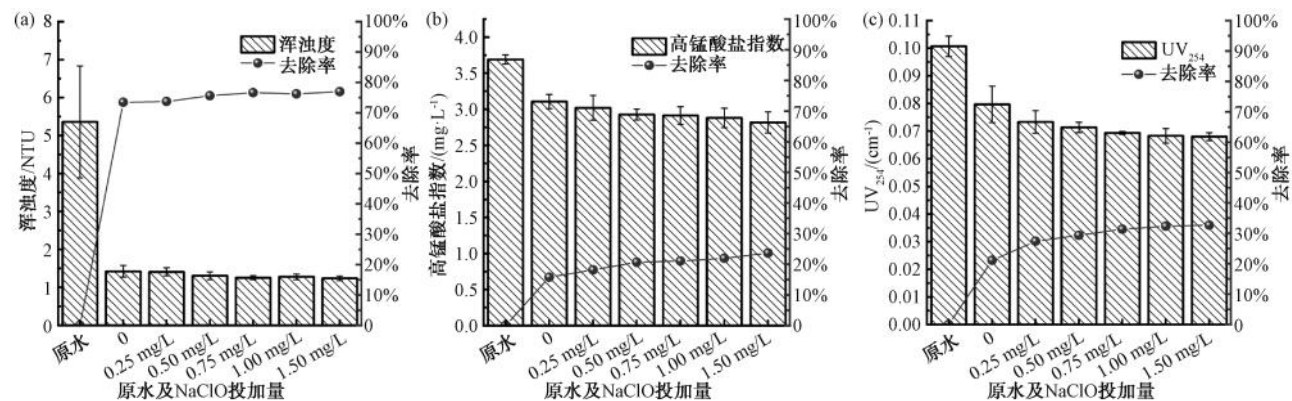


图 4 不同 NaClO 投加量下混凝沉淀工艺对 (a) 浊度; (b) 高锰酸盐指数; (c) UV_{254} 的去除效果

Fig. 4 Removal Efficiency of Coagulation-Sedimentation Process at Different NaClO Dosages for (a) Turbidity;

(b) Permanganate Index; (c) UV_{254}

0.08 cm^{-1} ,去除率仅为 20.79%;随着 NaClO 投加量从 0.25 mg/L 增加至 1.50 mg/L ,出水 UV_{254} 含量缓慢下降, NaClO 投加量超过 0.75 mg/L 后去除率提升有限。以上结果表明, NaClO 预氧化过程在强化有机物去除方面相比强化除浊有更明显的效果。

2.2.2 臭氧预氧化

图 5(a)展示了不同预臭氧投加量下混凝沉淀过程去除浑浊度的效果。在单独混凝沉淀时,出水浑浊度均值为 1.32 NTU ;经过不同预臭氧浓度的强化的混凝沉淀后,出水浑浊度均值分别降低至 1.17 、 1.00 、 1.03 、 0.89 NTU 。在低投加量下随着臭氧浓度的增加对浑浊度的去除率有较为明显的提升,而当臭氧投加量大于 0.5 mg/L 时对浑浊度的去除率趋于稳定,此时混凝沉淀出水浑浊度可稳定低于 1.0 NTU 。

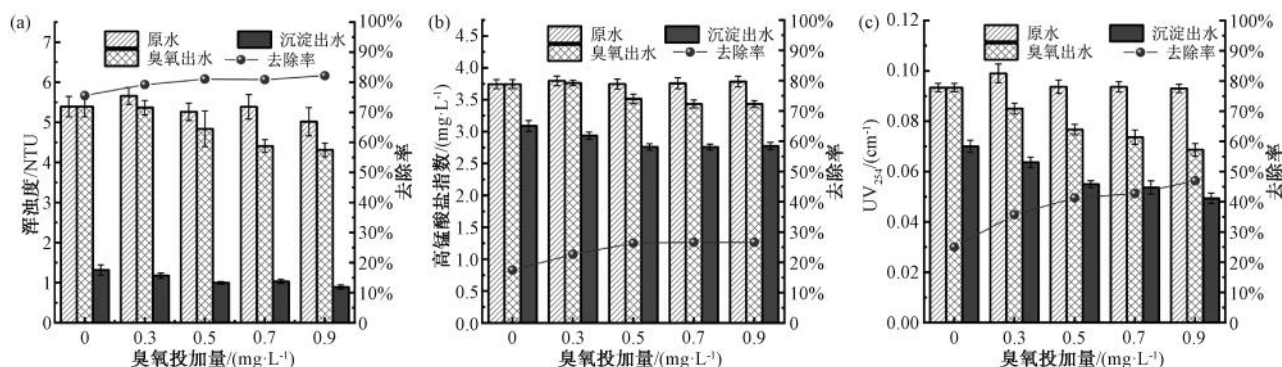


图 5 不同剂量预臭氧强化混凝沉淀工艺对 (a) 浑浊度; (b) 高锰酸盐指数; (c) UV_{254} 的去除效果

Fig. 5 Removal Efficiency of Pre-Ozone-Enhanced Coagulation-Sedimentation Process at Different O_3

Dosages for (a) Turbidity; (b) Permanganate Index; (c) UV_{254}

2.3 O_3 -BAC 深度处理工艺对常规处理工艺的效能提升

虽然经混凝沉淀常规处理工艺处理后出水浑浊度基本可以满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)要求,但常规处理工艺对有机物的去除显得较为有限,当原水水质恶化时,出水水质恐难以保障。为进一步探究提升常规工艺处理效能的可能性,进行了中试规模的 O_3 -BAC 深度处理工艺的研究。

图 6(a)展示了不同梯度的臭氧投加量 (1.00 、 1.25 、 1.50 mg/L 和 2.00 mg/L) 下 O_3 -BAC 深度处理单元对进水中高锰酸盐指数的去除效果。在 1.00 mg/L 臭氧投加量下,进水的高锰酸盐指数为

图 5(b)展示了梯度投加预臭氧的混凝沉淀过程对高锰酸盐指数的去除。原水高锰酸盐指数为 $3.70 \sim 3.80 \text{ mg/L}$,单独预臭氧处理模式下,高锰酸盐指数随臭氧投加量的提升出现微弱下降。单独混凝沉淀对高锰酸盐指数的去除率为 17.38%;随着预臭氧投加量从 0.3 mg/L 提升至 0.9 mg/L ,预臭氧强化混凝沉淀对高锰酸盐指数的去除率分别提升至 22.63%、26.40%、26.59%和 26.46%。

图 5(c)展示了不同预臭氧投加量下混凝沉淀过程对 UV_{254} 的去除效果。随臭氧投加量的增加,单独预臭氧对 UV_{254} 的去除提升较明显。单独混凝沉淀出水 UV_{254} 相比原水降低了 24.73%;随着预臭氧投加量从 0.3 mg/L 提升至 0.9 mg/L ,预臭氧强化混凝沉淀出水的 UV_{254} 较原水分别降低了 35.35%、41.49%、42.55%和 47.31%。结果表明,预臭氧强化了混凝沉淀工艺对有机物的去除。

2.84 mg/L ,臭氧出水以及活性炭滤池出水的高锰酸盐指数均值分别为 2.48 mg/L 和 1.94 mg/L ,去除率各达到 12.68%和 31.69%;在 1.25 mg/L 臭氧投加量下,臭氧出水以及活性炭滤池出水的高锰酸盐指数均值分别为 2.35 mg/L 和 1.77 mg/L ,相比进水 2.72 mg/L 的去除率分别达到 13.60%和 34.93%;在 1.50 mg/L 臭氧投加量下,进水高锰酸盐指数为 2.77 mg/L ,臭氧出水以及活性炭滤池出水的高锰酸盐指数均值分别为 2.33 mg/L 和 1.74 mg/L ,去除率分别达到 15.88%和 37.18%;在 2.00 mg/L 臭氧投加量下,进水高锰酸盐指数为 2.75 mg/L ,臭氧出水以及活性炭滤池出水的高锰酸盐指数均值分别为 2.27 mg/L 和 1.72 mg/L ,去除率分

别达到 17.45% 和 37.45%。结果显示,臭氧投加量为 1.00~2.00 mg/L 时, O₃-BAC 工艺展现出可观的高锰酸盐指数去除效果。

图 6(b) 展示了不同梯度的臭氧投加量下, O₃-BAC 深度处理单元出水 UV₂₅₄ 变化趋势。在 1.00 mg/L 的臭氧投加量下, 进水 UV₂₅₄ 值为 0.058 cm⁻¹, 臭氧出水以及活性炭滤池出水的 UV₂₅₄ 值为 0.033 cm⁻¹ 和 0.022 cm⁻¹, 去除率分别为 43.10% 和 62.07%; 在 1.25 mg/L 的臭氧投加量下, 进水 UV₂₅₄ 值为 0.056 cm⁻¹, 臭氧出水以及活性炭滤池出水的

UV₂₅₄ 分别为 0.029 cm⁻¹ 和 0.020 cm⁻¹, 去除率分别为 48.21% 和 64.28%; 在 1.50 mg/L 的臭氧投加量下, 进水 UV₂₅₄ 值为 0.055 cm⁻¹, 臭氧出水以及活性炭滤池出水的 UV₂₅₄ 值分别为 0.026 cm⁻¹ 和 0.018 cm⁻¹, 去除率分别达到 52.73% 和 67.27%; 在 2.00 mg/L 的臭氧投加量下, 进水 UV₂₅₄ 值为 0.056 cm⁻¹, 臭氧出水以及活性炭滤池出水的 UV₂₅₄ 分别降低至 0.026 cm⁻¹ 和 0.016 cm⁻¹, 相比于进水的去除率分别达到 53.57% 和 71.43%。结果显示, O₃-BAC 深度处理工艺在对 UV₂₅₄ 的去除方面展现出了优异效果。

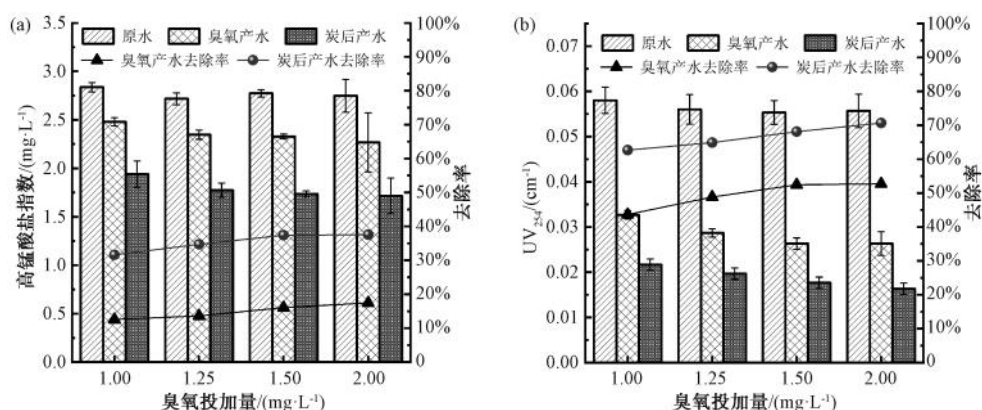


图 6 不同臭氧投加量下的 O₃-BAC 深度处理单元对 (a) 高锰酸盐指数; (b) UV₂₅₄ 的去除效果

Fig. 6 Removal Efficiency of O₃-BAC Advanced Treatment Unit at Different O₃ Dosages for (a) Permanganate Index; (b) UV₂₅₄

3 结论

本文通过不同预处理工艺以及 O₃-BAC 深度处理对常规混凝-沉淀工艺处理微污染水效能的影响进行了对比研究,探索了各工艺的最佳运行参数,为山东省济宁市某水厂的混凝-沉淀-O₃-BAC 工艺运行提供了参考依据。

(1) 通过小试规模的试验探究了不同 PAC 投加量下混凝沉淀工艺对原水中浊度和有机物指标的去除效果,确定了最佳 PAC 投加量宜设置为 10~15 mg/L,而 PAM 的加入对出水水质指标的提升相对有限。

(2) 对加入 NaClO 和臭氧这 2 种预氧化剂的常规处理工艺进行了对比研究。预氧化剂对浊度的去除无明显作用,但预臭氧明显强化了对有机物的去除。

(3) O₃-BAC 深度处理工艺表现出优异的有机物去除效果。臭氧投加量为 1.00~2.00 mg/L 时可稳定实现 30% 以上的高锰酸盐指数去除率和 60% 以上的 UV₂₅₄ 去除率。在低投加量下,随着臭氧量

的增加, O₃-BAC 深度处理工艺对有机物的去除率逐渐提升,但在高投加量下提升不明显。

(4) 本研究结果对水厂实际生产有一定的指导作用,预处理部分试验因受限于实验室规模,采用小试规模的研究。未来可在此基础上开展中试规模的试验对处理效果进行验证,以进一步优化工艺参数并探索可能存在的新的预处理方法。

参考文献

- [1] TAN J. Water quality monitoring and standardization in China: A review[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. England: IOP Publishing, 2020.
 - [2] 邓坤, 张璇, 万小庆, 等. 我国饮用水水源地安全内涵、现状及影响因素分析[C]//中国水利学会 2020 学术年会论文集第五分册: 北京: 中国水利协会, 2020.
- DENG K, ZHANG X, WAN X Q, et al. Analysis of the connotation, current situation and influencing factors of the safety of drinking water sources in China[C]//Proceedings of the 2020 academic annual conference of the Chinese hydraulic engineering society, fifth sub volume: Beijing: Chinese Hydraulic Engineering Society, 2020.

- [3] ZHANG X H, SANG G Q. Research on water body information extraction and land use status of Nansi Lake based on high-resolution images [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. England: IOP Publishing, 2019.
- [4] 马景,武周虎. 南四湖水质评价及改善效果分析[J]. 青岛理工大学学报, 2021, 42(6): 101-105.
MA J, WU Z H. Evaluation of water quality of Nansihu Lake and analysis of improvement effect[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2021, 42(6): 101-105.
- [5] 张志斌, 闫大江, 鞠颂, 等. 平水期/枯水期南四湖溶解性有机物差异特征[J]. 中国给水排水, 2021, 37(21): 48-55.
ZHANG Z B, YAN D J, JU S, et al. Differences in characteristics of dissolved organic matter in Nansi Lake during normal and dry seasons [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(21): 48-55.
- [6] 王滨勇, 刘楠, 童力. 南四湖流域硫酸盐来源及管控措施分析[J]. 曲阜师范大学学报(自然科学版), 2021, 47(2): 119-123.
WANG B Y, LIU N, TONG L. Study on the source and control measures of sulfate in Nansi Lake Basin [J]. Journal of Qufu Normal University (Natural Science Edition), 2021, 47(2): 119-123.
- [7] 李双双, 杜强, 杜霞, 等. 湖库型饮用水水源地安全评价新方法探索[J]. 中国农村水利水电, 2022(7): 151-157.
LI S S, DU Q, DU X, et al. Exploration of new methods for security assessment of lake-reservoir-type drinking water resources [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(7): 151-157.
- [8] 朱学武, 成小翔, 谢柏明, 等. 超滤/纳滤组合工艺的运行与优化研究[J]. 中国给水排水, 2017, 33(5): 10-15.
ZHU X W, CHENG X X, XIE B M, et al. Operation and optimization of ultrafiltration/nanofiltration hybrid membrane process [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(5): 10-15.
- [9] 李圭白, 梁恒, 白朗明, 等. 绿色工艺——第三代饮用水净化工艺的发展方向[J]. 给水排水, 2021, 47(9): 1-5.
LI G B, LIANG H, BAI L M, et al. Green process: Development direction of the third generation drinking water purification process [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(9): 1-5.
- [10] 李圭白, 田家宇, 齐鲁. 第三代城市饮用水净化工艺及超滤的零污染通量[J]. 给水排水, 2010, 36(8): 11-15.
LI G B, TIAN J Y, QI L, et al. The third generation of urban drinking water treatment process and zero-membrane fouling flux of ultrafiltration [J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(8): 11-15.
- [11] 王明远. 超滤-纳滤组合工艺处理南水北调微污染源水效能及调控[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
WANG M Y. Ultrafiltration-nanofiltration combined process to treat the water efficiency and regulation of micro-polluted water sources in the south-to-north water diversion [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [12] LIU H J, HU C Z, ZHAO H, et al. Coagulation of humic acid by PAC with high content of Al_{13} : The role of aluminum speciation[J]. Separation and Purification Technology, 2009, 70(2): 225-230.

(上接第 32 页)

- Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(2): 126-134.
- [68] LIN X H, LI S Y, SUN D, et al. Assessment and comprehensive evaluation of large-scale reclaimed water reuse for urban river restoration and water resource management: A case study in China[J]. Water, 2023, 15(22): 3909.
- [69] ZHANG X Q, DUAN B S, HE S Y, et al. Simulation study on the impact of ecological water replenishment on reservoir water environment based on MIKE 21——Taking Baiguishan Reservoir as an example[J]. Ecological Indicators, 2022, 138: 108802. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108802.
- [70] 吴雪, 何佳. EFDC 模型在城市景观水体生态补水工程设计中的应用——以昆明市翠湖为例[J]. 环境保护科学, 2019, 45(1): 73-78.
WU X, HE J. The application of EFDC model in the design of ecological water supplement project for urban landscape water-case study of the Green Lake in Kunming [J]. Environmental Protection Science, 2019, 45(1): 73-78.
- [71] 王奕博, 郭甜甜, 刘攀, 等. 城市湖泊随季节变化的生态补水数值模拟研究[J]. 人民长江, 2024, 55(7): 44-52, 72.
WANG Y B, GUO T T, LIU P, et al. Numerical simulation on seasonal ecological water supplement for urban lakes [J]. Yangtze River, 2024, 55(7): 44-52, 72.