

邹放, 郅晓沙, 谢若微, 等. 基于数据挖掘和试验融合的水厂双预氧剂优化投加技术[J]. 净水技术, 2026, 45(9): 190–199.

Zou F, Zhi X S, Xie R W, et al. Optimized dosing technology for dual pre-oxidation in WTP based on data mining and experimental integration[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(9): 190–199.

基于数据挖掘和试验融合的水厂双预氧剂优化投加技术

邹放, 郅晓沙, 谢若微, 陈东奇, 曹贺, 王硕, 韩梅*

(北京市自来水集团有限责任公司, 北京市供水水质工程技术研究中心, 北京 100012)

摘要 【目的】针对预氯化工艺带来的氯化消毒副产物风险问题, 本文旨在探究双预氧化方法的效能、适用条件与优化策略, 以寻求兼顾处理效率与水质安全的可行方案。【方法】本文基于 10 a 水厂实际运行数据, 融合中试试验, 系统分析了预 O_3 及其组合工艺的处理效能并提出投加优化策略。【结果】原水水质呈现显著的季节分异特征, 主要表现为夏季高温高浊型与冬季低温低浊型。采用 O_3 替代次氯酸钠的双预氧化模式, 可在维持有机物去除效果同时, 显著提升高藻期除藻效率, 并使三氯甲烷的生成量降低。此外, 预 O_3 对沉淀效果的影响与池型及回流水比例密切相关。A 厂(无回流、机械加速澄清池)在低温低浊期(0.6~1.4 NTU)开启预 O_3 可提升浑浊度去除率, 但当原水浑浊度低于 0.6 NTU 时宜停止投加以避免抑制效应。与之相比, 采用无回流斜板沉淀池的 B 厂 I 期受预 O_3 干扰较为显著, 低浊(<0.6 NTU)与高浊(>1.5 NTU)条件下均需关闭 O_3 以稳固沉淀效能; 而 B 厂 II 期机械加速澄清池中, 高回流水有助于稳定预 O_3 的混凝沉淀效果, 使其在更宽的进水浑浊度范围内(<2.0 NTU)均能显著提升去浊效能。【结论】因此, 建议依据池型结构与回流水条件实施“一厂一策”的动态投加方式, 以提升工艺效能和供水安全。

关键词 高藻; 臭氧; 次氯酸钠; 沉淀; 数据挖掘; 水厂

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)09-0190-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.09.021

Optimized Dosing Technology for Dual Pre-Oxidation in WTP Based on Data Mining and Experimental Integration

Zou Fang, Zhi Xiaosha, Xie Ruowei, Chen Dongqi, Cao He, Wang Shuo, Han Mei*

(Beijing Waterworks Group Co., Ltd., Beijing Engineering Research Center for Drinking Water Quality, Beijing 100012, China)

Abstract [Objective] To address the risk of chlorinated disinfection byproducts generated by pre-chlorination, this paper aims to evaluate the efficacy, applicable conditions, and optimization of a dual pre-oxidation solutions for achieving balanced treatment performance and water safety. [Methods] Combining 10 years of water treatment plant (WTP) operational data with pilot-scale experiments, this paper analyzes the treatment efficiency of pre-ozonation and its combinations, and proposed dosing optimization solutions. [Results] Data mining showed that raw water quality varied seasonally, with high temperature and turbidity in summer, and low temperature and turbidity in winter. By replacing part of sodium hypochlorite with ozone, the dual pre-oxidation mode significantly enhanced algae removal during high-algae periods, maintained organic matter removal, and reduced chloroform formation. Furthermore, the impact of pre-ozonation on sedimentation performance was closely related to tank type and the proportion of recirculation water. WTP A (non-recirculating mechanical accelerated clarification tank) achieved turbidity removal under low-temperature, low-turbidity conditions (0.6–1.4 NTU). However, dosing should be stopped when raw water turbidity fell below 0.6 NTU to avoid inhibitory effects. In contrast, WTP B Phase I (side-flow inclined plate sedimentation tank without recirculation) was more significantly affected by pre-ozonation interference, requiring ozone to be turned off under both low-turbidity (<0.6 NTU) and high-turbidity (>1.5 NTU) conditions to ensure stable sedimentation performance. In WTP B Phase II (mechanical accelerated

[收稿日期] 2026-02-10

[基金项目] 京津冀环境综合治理国家科技重大专项(2026ZD1213700)

[作者简介] 邹放(1990—), 男, 工程师, 主要从事智慧水务工作, E-mail: 460543838@qq.com。

[通信作者] 韩梅(1985—), 女, 正高级工程师, 主要从事饮用水安全保障技术及智慧水务工作, E-mail: hithanmei@163.com。

clarification tank), a high recirculation ratio helped stabilize the coagulation-sedimentation effect of pre-ozonation, enabling it to effectively enhance turbidity removal across a wider range of influent turbidity (<2.0 NTU). [Conclusion] Therefore, dual pre-oxidation solutions should be optimized on a case-by-case basis for each plant, according to sedimentation tank configuration and recirculation conditions, to enhance process efficiency and safety.

Keywords dense algae; ozone (O_3); sodium hypochlorite ($NaClO$); sedimentation; data mining; water treatment plant(WTP)

随着我国城市化进程的加快和水源污染的日益严峻,城市供水安全面临着前所未有的挑战。预氧化技术作为保障饮用水安全的关键环节,其重要性日益凸显^[1]。早期的预氧化技术主要采用含氯氧化剂,虽然在高藻期能有效改善出水水质,但会产生三卤甲烷、卤乙酸等致癌消毒副产物,带来长期健康风险^[2]。近年来,臭氧(O_3)因其氧化性强、无氯代副产物生成等优点,逐渐成为重要的预氧化替代手段,在改善混凝、去除藻类与有机物等方面展现出良好潜力^[3-6]。然而, O_3 在实际水厂运行中的效能和负面影响也是生产应用中需要确认和直面的问题。一方面,预 O_3 化过程中大分子物质经氧化转为小分子物质导致混凝效果变差,影响浑浊度去除效能^[7];另一方面, O_3 与有机物反应可能改变后续氯消毒过程中的副产物生成特性^[2],其综合效能与调控方式仍需在生产实践中进一步明确。

在实际运行过程中,原水水质差异性大、变化复杂,而不同水厂的工艺流程(如沉淀池类型)也存在较大差别。目前 O_3 投加的时机、剂量以及与其他氧化剂的组合方式尚缺乏系统、定量的指导原则,导致其处理效果不稳定,工艺优势难以稳定保障^[8]。此外, O_3 对水处理工艺的影响是多因子耦合、非线性叠加的过程,其贡献在复杂水质与工艺背景下往往难以直观量化与准确表征^[9]。特别是在沉淀环节, O_3 投加所产生的气泡对沉淀效果的影响成为许多水厂关注与担忧的现实问题^[10]。因此,如何结合具体水厂的工艺特征与水质变化,科学评估并优化预 O_3 的投加策略,是实现其高效、安全应用的关键。

基于此,本文以北方南水北调受水区典型水厂为研究对象,围绕预氯化削减、预 O_3 协同强化及消毒副产物控制之间的平衡问题,采用“生产运行响应解析-中试试验验证-工艺适用性评价”的技术路线,分析双预氧化工艺对混凝沉淀、有机物/藻类控制及消毒副产物生成的影响,进一步探讨不同水质特征、沉淀池型和回流水条件下的适用边界,为双预

氧化工艺分区调控提供参考。

1 材料与方法

本文包括生产运行响应解析、中试试验验证和工艺适用性评价 3 个部分。生产运行数据来源于水厂 2015 年—2024 年实际监测数据,主要用于分析原水水质特征及预 O_3 对混凝沉淀和浑浊度控制的工程响应;中试试验以进厂水为水源,搭建连续流全流程系统,用于补充考察不同双预氧化组合投加条件下总有机碳(TOC)、藻类和三氯甲烷等指标的响应变化;在此基础上,综合生产运行数据和中试试验结果,评估双预氧化工艺在不同水质特征、沉淀池型和回流水条件下的适用性,并提出相应调控策略。具体技术路线如图 1 所示。

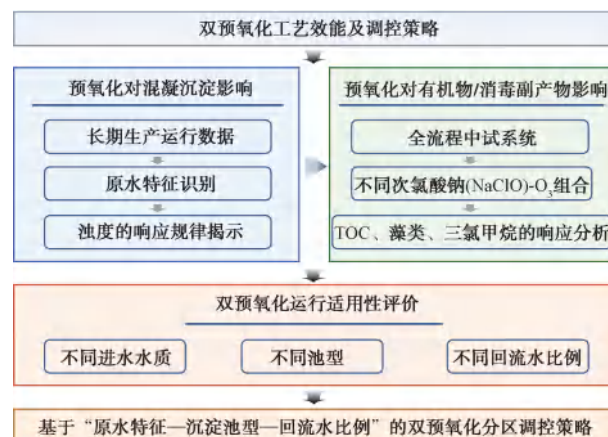


图 1 技术路线

Fig. 1 Technical Workflow

1.1 水厂概况

(1) 水厂工艺

研究选择了北方地区 2 个实际运营的水厂(A 厂和 B 厂)进行了双预氧化工艺效能分析。

A 厂日供水能力为 50 万 m^3/d ,水源为南水北调来水,工艺流程如图 2 所示。水厂主要工艺流程包括前加氯、预 O_3 、机械加速澄清池、主 O_3 及活性炭过滤。原水首先经机械加速澄清池进行混凝沉淀等常规处理,再由 O_3 、石英砂和活性炭过滤吸附,最后经过超滤膜过滤及紫外消毒处理后,输送至市区

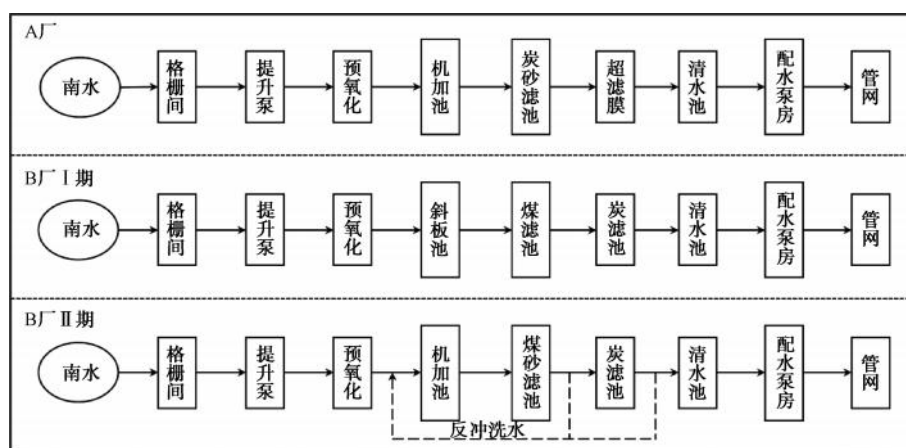


图2 不同水厂处理工艺示意

Fig. 2 Schematic of Treatment Processes in Different WTPs

供水管网,供居民生活饮用。

B厂先后建有2套工艺流程(I期和II期)。其中,I期设计处理能力为25万 m^3/d ,进水为单一水源南水北调来水。生产工艺采用预加氯、预 O_3 、机械搅拌混凝、侧向流波形斜板沉淀池沉淀、无烟煤滤池截留悬浮杂质及活性炭过滤吸附。II期设计处理能力为60万 m^3/d ,进水由南水以及厂区回流水组成。生产工艺采用预加氯、预 O_3 、机械搅拌混凝、机械加速澄清池、无烟煤滤池截留悬浮杂质及活性炭吸附深度处理。与A厂相比,B厂I期采用了侧向流波形斜板沉淀池,II期水源有20%~30%的反冲洗回流水。

(2) 原水特征

为了探究双预氧化工艺在不同池型、不同回流水比例下的处理效能,首先基于历史数据分析了不同水厂的进水水质特征,挖掘生产性规律。数据源自2015年—2024年的水厂实际监测数据。由于各年进水水质有差异,且不同水质参数对工艺运行有交叉影响,采用R处理包psych、cluster对数据做因子分析、聚类分析划分了原水特征。A厂、B厂I期和B厂II期的原水特征如图3所示。A厂水质划分为4个区:一区原水浑浊度、温度的均值分别为5.79 NTU和24 $^{\circ}\text{C}$,均处于最高水平,接近夏季原水水质即高温高浊情况;三区原水浑浊度、温度的均值分别为1.24 NTU和7 $^{\circ}\text{C}$,均处于最低水平,接近冬季原水水质即低温低浊情况^[11]。B厂I期水质同样划分为4个区:二区原水浑浊度、温度的中位数相对较高,分别为2.3 NTU和24 $^{\circ}\text{C}$,接近夏季高温高

浊型;四区浑浊度、温度和耗氧量的中位数相对较低,分别为0.62 NTU、9 $^{\circ}\text{C}$ 和1.3 mg/L,呈现冬季低温低浊特征。B厂II期水质划分为3个区:二区原水浑浊度、温度的中位数相对较高,分别为2.90 NTU和20 $^{\circ}\text{C}$,接近夏季原水水质(高温高浊);一区浑浊度和温度的中位数相对较低,分别为2.20 NTU和4 $^{\circ}\text{C}$,呈现冬季低温期特征。

1.2 中试试验系统

上述生产运行数据能够反映实际水厂中预 O_3 对沉淀效果和浑浊度控制的工程响应,但出于供水安全和水质稳定考虑,实际水厂难以在生产线上开展不同 $\text{NaClO}-\text{O}_3$ 组合投加条件的系统对比试验,无法充分表征不同预氧化组合工况下TOC、藻类和三氯甲烷等指标的综合水质响应。因此,为了验证双预氧化组合工艺效果、衔接小试与工程实际,本文进一步搭建中试全流程系统,考察不同预氧化组合工况对上述指标的影响,为生产运行调控提供剂量响应参考。

研究搭建了典型工况的中试全工艺流程系统开展验证试验(图4),试验水源为B厂II期进厂水,系统设计产水量为1 m^3/h ,包括原水箱、进水泵、预 O_3 接触池、混合池、混凝反应池、斜管沉淀池、砂滤池、 O_3 接触池、碳滤池、清水箱等^[12]。系统按照实际水厂“预氧化-混凝-沉淀-过滤- O_3 -活性炭”处理流程构建,目的是在接近工程运行条件的连续流系统中,考察双预氧化组合工艺对后续常规处理和深度处理单元的协同强化作用。

预 O_3 接触池采用玻璃材质,进水方式为上进

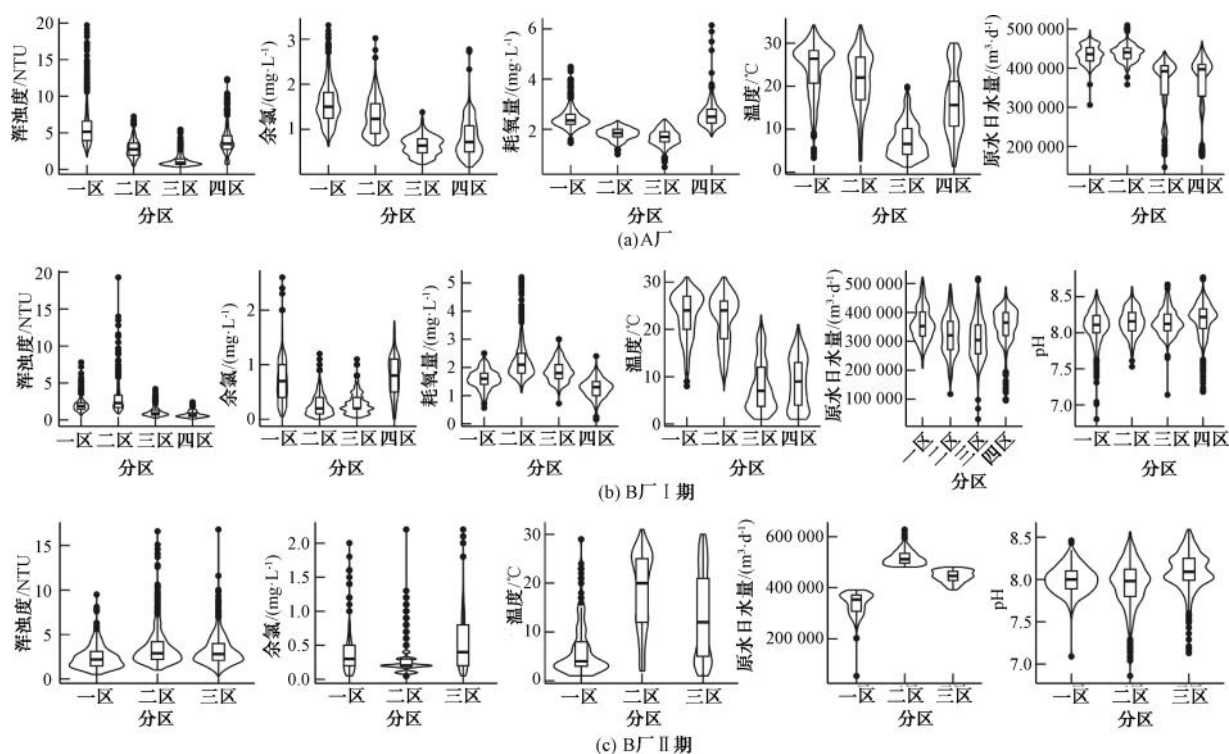


图3 不同水厂原水水质特征划分

Fig. 3 Classification of Raw Water Quality Characteristics for Different WTPs

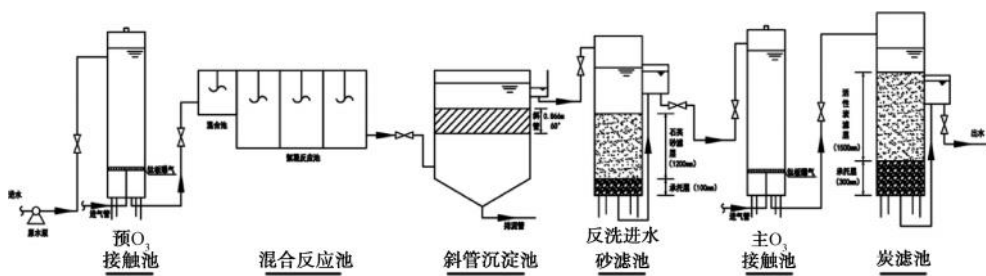


图4 中试系统工艺流程

Fig. 4 Process Flow of the Pilot-Scale System

下出, O_3 通过钛板微孔曝气投加, 曝气盘孔径为 $6 \sim 11 \mu m$, 气泡直径约为 $0.5 mm$, 服务面积为 $0.3 \sim 0.5 m^2$ 。 O_3 由青岛国林 CF 系列空气源 O_3 发生器制备, 供气系统包括上海复盛 VA-80 型空压机和 $0.11 m^3$ 储气罐, 可较真实地反映双预氧化组合工艺在全流程水处理中的工程适用性。试验采用连续流运行方式, 在保持进水流量及后续处理单元运行条件相对稳定的基础上, 按照设定工况调整预氧化组合条件。系统稳定运行后, 分别采集原水、预氧化出水、沉淀出水、砂滤出水及碳滤出水等样品, 通过比较不同工况下各单元出水水质变化, 评价双预氧化组合工艺对污染物去除、混凝沉淀效果、过滤负荷及全流

程出水水质的影响。

2 结果和讨论

2.1 预氧化工艺对藻类和有机物的影响

通过典型工况的中试试验, 对比了 $NaClO$ 、 O_3 及其组合预氧化工艺对藻类和有机物的去除效果 (图 5)。在藻类去除方面, 未投加预氧化剂时原水、沉淀池出水、滤池出水的藻类分别为 4 792 万、618 万、99 万个/L, 原水到混凝沉淀单元藻类数量总去除率为 87.1%。单独投加 $NaClO$ 时, $NaClO$ 投加量为 $3.0 mg/L$ (以有效氯计, 下同) 后, 藻数量分别为 3 908 万、249 万、36 万个/L, 混凝沉淀去除率提升到 93.6%, 表明混凝沉淀单元除藻效果有所提升。

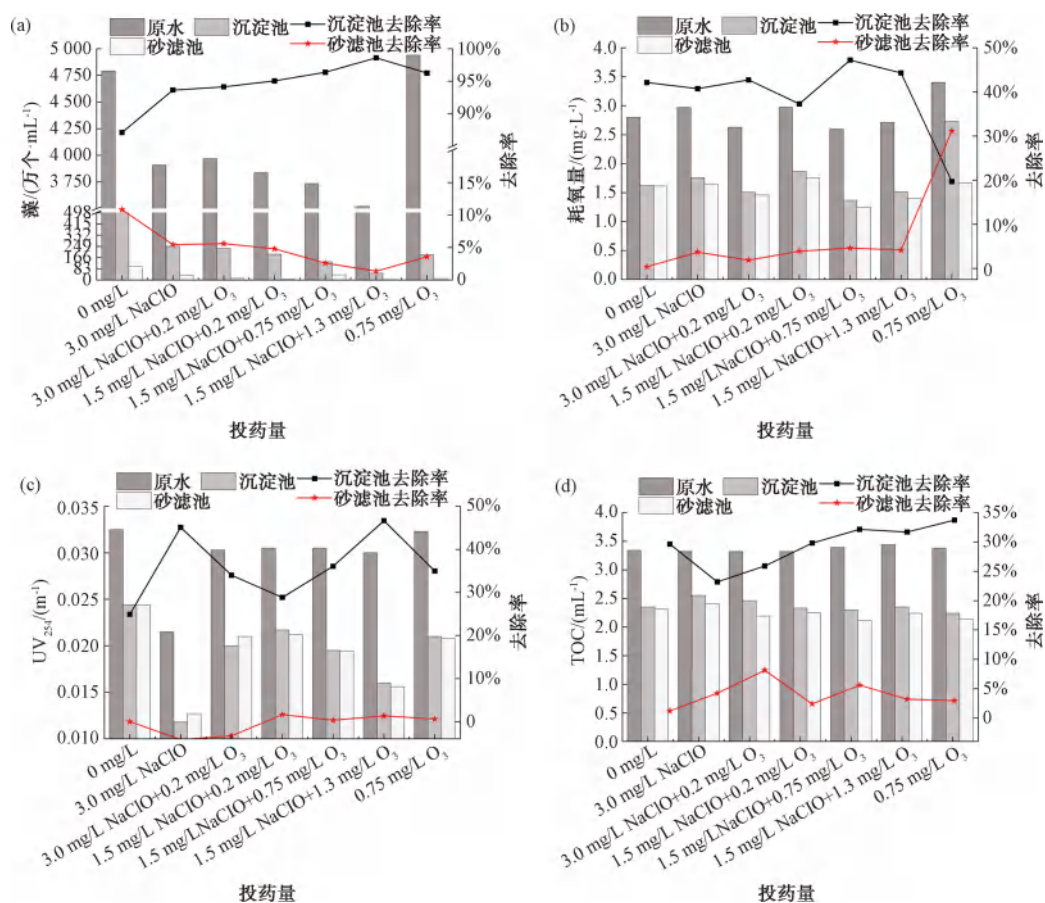


图5 不同预氧化工艺对水质指标的影响

Fig. 5 Impact of Different Pre-Oxidation Processed on Water Quality

单独投加预 O_3 (0.75 mg/L) 时, 各工艺对应藻密度为 4 939 万、185 万、9 万个/L, 混凝沉淀去除率提升到 96.3%。采用 O_3 与 NaClO 的双预氧化组合可进一步强化除藻效果, 除藻效果随着 O_3 投加量提高而增强; 当 NaClO 与 O_3 投加量分别为 1.5 mg/L 和 1.3 mg/L 时, 各工艺段的藻类数量降至 3 520 万、49 万、2 万个/L, 混凝沉淀单元去除率为 98.6%, 这表明双预氧化组合在除藻方面具有协同增效作用。

在有机物的去除方面, 单独投加 NaClO 时, 各工艺段水样在紫外波长为 254 nm 吸光度 (UV_{254}) 的数值均低于预 O_3 及双预氧化工艺, 但其副产物会显著增加后续处理负担。3 种预氧化方式对 TOC 的去除效果无显著差异, 这表明以 O_3 部分替代 NaClO 可在保持 TOC 去除效能的同时提升除藻效率, 这与尹翠琴等^[13] 的结论近似。 O_3 因具有较高的氧化电位, 可溶裂藻细胞并改变有机物分子量、憎水性等, 从而提升其可混凝性^[13-14]。然而, 受制于运行成本及溴酸盐生成风险, 预 O_3 无法完全替代

预氯化。因此, 双预氧化工艺成为水厂预处理阶段的优化选择。

2.2 预氧化工艺对消毒副产物的影响

基于中试试验同时探究了不同预氧化工艺对消毒副产物的影响, 结果如图 6 所示。未投加预氧化剂时, 三氯甲烷质量浓度沿工艺顺序 (原水、沉淀池、砂滤池、炭滤池) 依次为 21.85、10.35、4.02 $\mu\text{g/L}$ 和 3.81 $\mu\text{g/L}$ 。单独投加 NaClO (3.0 mg/L) 后, 各单元出水的三氯甲烷分别升至 21.69、21.67、13.85 $\mu\text{g/L}$ 和 3.49 $\mu\text{g/L}$, 表明较高剂量 NaClO 预氧化可能促进了消毒副产物的生成。相比之下, 单独投加 O_3 (0.75 mg/L) 可大幅降低沉淀、砂滤及炭滤出水的三氯甲烷, 降幅分别为 55.0%、77.1% 和 54.4%, 显示出良好的三氯甲烷控制效果。然而, O_3 在水体中衰减较快, 对藻类去除持续性不足; NaClO 虽持续性好, 但易生成三卤甲烷^[15-16]。因此, 单独预 O_3 虽有利于降低三氯甲烷生成风险, 但仍难以完全替代预氯化作用, 有必要进一步考察 NaClO- O_3 联用条件

下的综合水质响应。在 NaClO-O₃ 联用条件下,不同剂量组合对三氯甲烷生成的影响存在差异。

当在较高 NaClO 投加量 (3.0 mg/L) 基础上额外引入低剂量 O₃ (0.2 mg/L) 时,反而促进了沉淀池及后续工艺中三氯甲烷的生成。分析其原因,O₃ 可将大分子有机物分解为小分子有机物,这些小分子产物若未充分矿化,在后续工艺中与过量余氯接触后,可能加速三氯甲烷的生成^[17]。因此,双预氧化的配比尤为关键。基于此,进一步将 NaClO 投加量降至 1.5 mg/L 并配合 0.2 mg/L 的 O₃ 投加后,可使各工艺段三氯甲烷质量浓度均有所下降;若维持该 NaClO 投加量,并将 O₃ 投加量提高至 0.75 mg/L,三氯甲烷的削减效果进一步强化,各单元质量浓度

均显著降低,炭池出水质量浓度降至 2.95 μg/L,较单独投加 NaClO 时降低约 15.7%,且藻类与总有机物的去除效能未受影响(图 5)。这表明以 O₃ 替代部分 NaClO 的双预氧化模式,可在保证藻类和有机物去除效果的前提下,有效降低三氯甲烷生成量。当 O₃ 投加提升至 1.3 mg/L 时,炭滤池出水三氯甲烷降至 2.67 μg/L,较前者仅降低 0.3 μg/L,进一步削减幅度有限。因此,综合三氯甲烷控制效果、藻类与有机物去除效果以及 O₃ 投加经济性,在典型工艺流程和考察剂量范围内,NaClO (1.5 mg/L) 与 O₃ (0.75 mg/L) 联用可作为双预氧化配比的备选策略,后续可结合原水水质及其工艺特性在此基础上进行特异性配比优化。

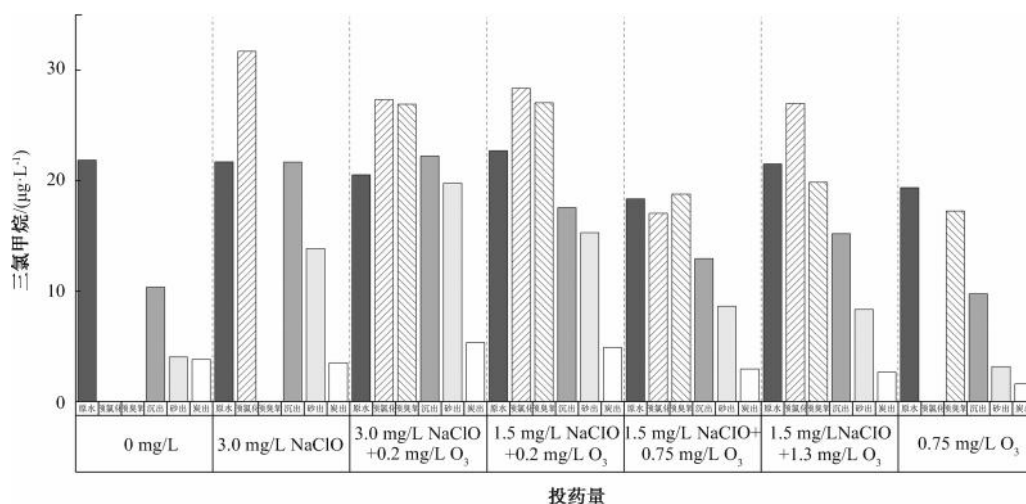


图 6 不同预氧化工艺对 NaClO 的影响

Fig. 6 Impact of Different Pre-Oxidation Processed on NaClO

2.3 预氧化工艺对沉淀的影响

为分析预氧化对沉淀效果的影响,本文选取 3 个典型水厂,覆盖不同水质特征和池型结构。其中, A 厂采用机械加速澄清池, B 厂 I 期采用侧向流波形斜板沉淀池, B 厂 II 期采用机械加速澄清池,且进水中含 20%~30% 的厂区回流水。基于上述差异,本文进一步探讨了不同工程条件下预氧化投加策略对沉淀效果及出水水质的影响规律,以识别其工艺适用性及边界条件。

2.3.1 预氧化对 A 厂沉淀的影响

由于北京市水厂主要采用机械加速澄清池,为研究开启 O₃ 产生的气泡对沉淀效果的影响,首先通过聚类分析探究了 A 厂机械加速澄清池在预 O₃ 启动下对浑浊度去除率的影响,结果如图 7 所示。

预 O₃ 的增效作用存在明确区间。一区(夏季)关闭 O₃ 与开启时,浑浊度去除率在对进应水区间基本相差在 5% 以内[图 7(a)]。二区当进水浑浊度大于 1.0 NTU 时,关闭预 O₃ 时的浑浊度去除率整体较开启时中位数高 2.25%[图 7(b)]。三区(冬季)进水浑浊度低于 0.6 NTU 时,关闭 O₃ 后沉淀效果中位数高 8.5%;但浑浊度位于 0.6~1.4 NTU 时,开启 O₃ 数据中位数高 19%;当浑浊度高于 1.4 NTU 后,预 O₃ 影响未表现出规律差异,仅在浑浊度为 2.0~4.0 NTU 且投加质量浓度较高时,能观察到较好效果[图 7(c)]。四区在低浑浊度(<1.2 NTU)下,去除率本身波动较大;预 O₃ 的开启因伴随更高的进水浑浊度减弱了影响,且调整 O₃ 质量浓度并未改变这一波动趋势[图 7(d)]。

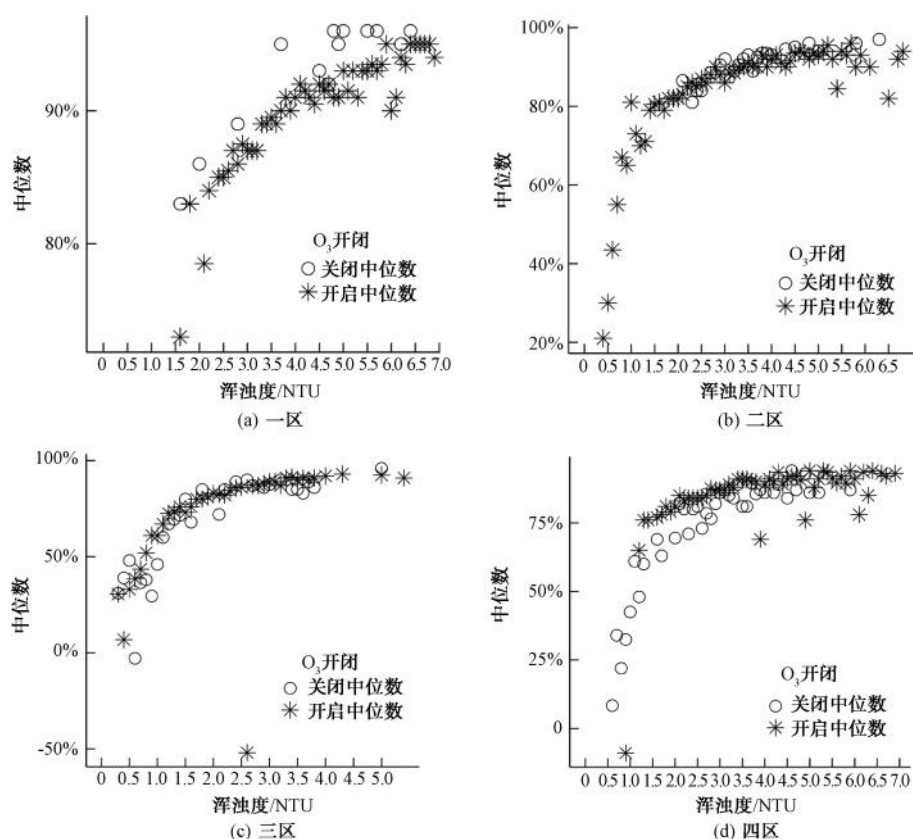


图7 A厂不同进水浑浊度下预臭氧对浑浊度去除率的影响

Fig. 7 Effect of Pre-Ozonation on Removal Rate under Different Turbidity Levels in WTP A

综上,A厂在浑浊度较低(<0.6 NTU)时开启预 O_3 会降低浑浊度去除率,因此低浑浊度下宜关闭 O_3 ;过高浑浊度下开启 O_3 对去浑浊度效果的影响并不显著,且可以减少氯的投加及其副产物的生成^[18]。因此,水厂可根据浑浊度和消毒副产物的控制需求灵活选择工艺。

2.3.2 预氧化工艺对B厂I期沉淀影响

为进一步对比不同沉淀池型对预 O_3 投加影响,选取B厂I期的斜板沉淀池开展预 O_3 效能研究,通过数据挖掘分析结果如图8所示。预 O_3 效果因季节与水质而异。一区(夏季)在进水浑浊度为 $1.0\sim 2.2$ NTU时,开启预 O_3 后浑浊度去除率整体中位数高 20.5% ;而高于 2.2 NTU时则关闭 O_3 效果更优(高 9.5%)[图8(a)]。二区(秋季)在关闭预 O_3 时浑浊度去除率更高(中位数高 21.74%)[图8(b)]。三区(冬季)在低浊(<0.5 NTU)下 O_3 表现出抑制作用,在 $0.5\sim 1.0$ NTU时则提升去除率中位数高 16.75% ,而高于 1.0 NTU后继续增加投量亦无效,反而关闭 O_3 的效果相对更好[图8(c)]。四

区与一区、三区趋势类似,进水浑浊度低于 0.6 NTU时预 O_3 效果并不理想,而在 $0.6\sim 1.4$ NTU(除 0.7 NTU与 1.3 NTU外)区间内开启 O_3 后浑浊度去除率中位数高 18.5% ,当进水高于 1.4 NTU则需要关闭预 O_3 以保障沉淀效果[图8(d)]。值得注意的是,三区与四区同为低温低浊水质,但预 O_3 效果差异显著。分析发现,四区余氯中位数较三区高 0.6 mg/L,主因进水藻密度较高而加大预氯投加量。此时 O_3 产生的微气泡易导致藻类上浮,降低沉降性能,叠加低温低浊本身不易沉降的特性,致使四区开启预 O_3 时浑浊度去除率下降最为明显。B厂I期因回流水比例较低, O_3 投加宜根据实际沉淀效果与消毒副产物风险进行动态调整。

综上,预 O_3 对B厂I期混凝沉淀效果影响显著。在低浊(<0.6 NTU)、低温高浊(>1.5 NTU)及高温高浊(>2.2 NTU)条件下,均建议关闭预 O_3 。相较而言,B厂I期整体浑浊度去除率低于A厂,主要源于两厂工艺本质差异。A厂采用的机械加速澄清池集成混凝、絮凝与沉淀过程,其因污泥回流作

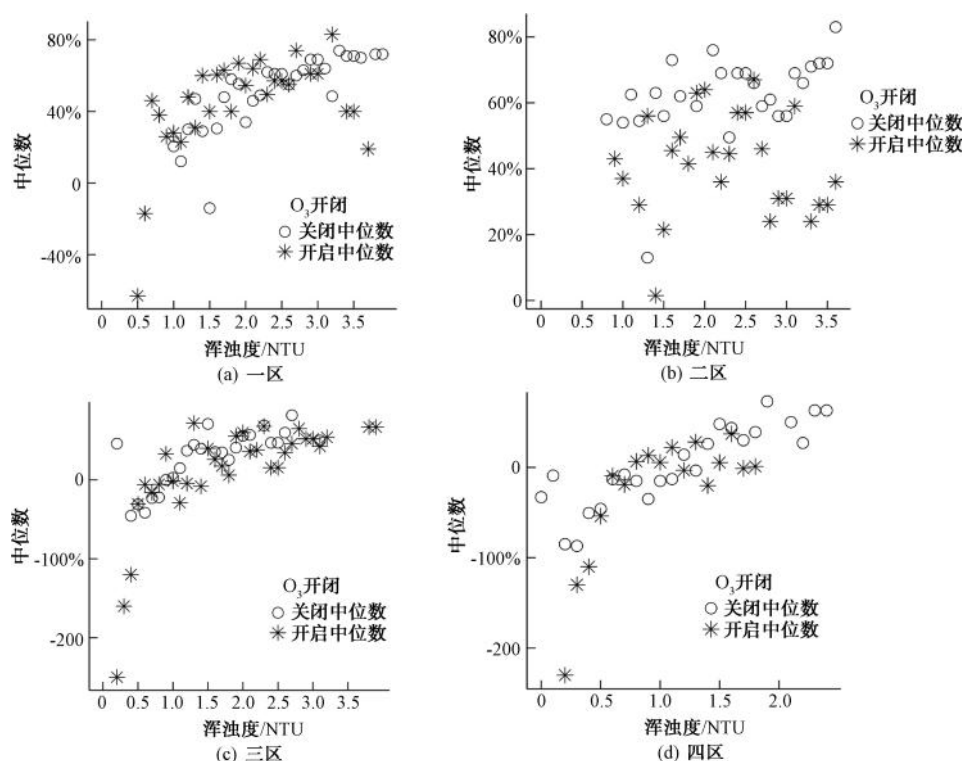


图8 B厂I期不同进水浑浊度下预臭氧对浑浊度去除率的影响

Fig. 8 Effect of Pre-Ozonation on Removal Rates under Different Turbidity Levels in WTP B Phase I

用更易形成密实易沉降的絮体;而B厂I期使用的斜板沉淀池仅依靠扩大面积进行被动分离,依赖前段工艺絮凝效果^[19]。因此,机械加速澄清池对水质变化的适应范围更广,受 O_3 影响相对较弱。

2.3.3 预氧化工艺对B厂II期沉淀影响

为了探究高回流水对混沉效果的影响,进一步选取B厂II期含回流水(20%~30%)的机械加速澄清池开展预 O_3 效能研究,同样基于水厂数据进行分析挖掘,如图9所示。随着进水浑浊度升高,预 O_3 开启和关闭后的去除率在1.6~2.7 NTU内出现

过渡区。一、二、三区的去除率曲线交点分别在1.9、3.6 NTU和2.6 NTU附近,此时对应的水温和水量分别为4℃和35.37万 m^3/d 、20℃和51.18万 m^3/d 以及12℃和44.67万 m^3/d 。由此发现,交点随水温、水量降低(二区>三区>一区)向左移动,表明预 O_3 对浑浊度的效能窗口由高温期到低温期逐渐收窄。在交点前,开启预 O_3 后浑浊度去除率更高,而交点后二者趋势基本一致。

具体来看,一区在浑浊度低于1.6 NTU时去除率随浑浊度上升而升高,超过后开启预 O_3 效果反

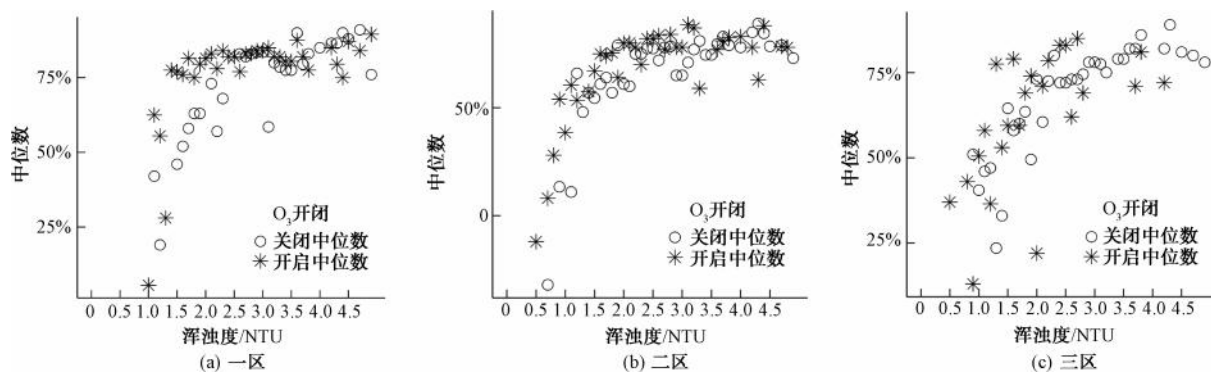


图9 B厂II期预臭氧在不同进水浑浊度下的去除率

Fig. 9 Removal Rates of Pre-Ozonation under Various Inflow Turbidity Levels in Plant B Phase II

而下降,关闭后则持续上升[图 9(a)];二区去除率始终随浑浊度上升而升高,且在 1.6~2.2 NTU 存在过渡(图 9b);三区在浑浊度低于 1.9 NTU 时去除率随浑浊度上升,超过后继续开启 O_3 未有显著改变,而关闭 O_3 后则继续提升[图 9(c)]。整体上,在浑浊度小于 2.0 NTU 时开启预 O_3 可显著提升浑浊度去除效率;超过 2.0 NTU 后, O_3 开启或关闭对混沉效果无显著影响,因此开启与否宜综合考虑其他效益影响。

与 A 厂相比,B 厂 II 期的机械加速澄清池进水含有较高比例的回流水,使进水浑浊度升高,强化了絮体碰撞的几率和密实度,从而抵消了气泡的负面影响。对于无回流或回流比例较低的水厂, O_3 投加需根据沉淀效果与消毒副产物风险动态调整。若沉淀效果不佳、滤程压力增大,建议降低预 O_3 投加量,或将投加方式从气量调节转为电流调节,以减少气泡对沉淀的干扰。

3 结论

(1)中试试验表明适度降低 $NaClO$ 投加量并引入中等剂量 O_3 ,可在强化除藻和 TOC 去除的同时降低消毒副产物风险。其中,1.5 mg/L $NaClO$ + 0.75 mg/L O_3 工况下,三氯甲烷生成量较单独投加 $NaClO$ 降低 15.7%,实现了氧化强化与副产物控制的平衡。实际应用中仍需结合原水水质、有机物组成、藻类特征及工艺流程进一步特异性优化。

(2)预 O_3 对沉淀效果的影响并非单一促进作用,而是受沉淀池型、进水浑浊度和工况等参数共同控制,需“一厂一策”。无回流机械加速澄清池(A 厂)在低温低浊期,即进水浑浊度 0.6~1.4 NTU 时,开启预 O_3 可提升浑浊度去除率;而无回流侧向流波形斜板沉淀池(B 厂 I 期)在低浊(<0.6 NTU)或高浊(>1.5 NTU)条件下,预 O_3 可能影响沉淀稳定性。因此,对于无回流或回流水比例较低的水厂,预 O_3 投加宜结合沉淀效果和副产物风险进行动态调控,不宜采用固定开启策略。

(3)回流水条件可缓解预 O_3 微气泡对絮体沉降的不利影响,从而拓宽预 O_3 的适用范围。高回流比机械加速澄清池(B 厂 II 期)在进水浑浊度 < 2.0 NTU 范围内,预 O_3 均能稳定提升浑浊度去除效果。由此表明,南水北调受水区预氧化投加策略应由单一固定剂量控制转向基于“水质特征-沉淀池

型-回流条件-副产物风险”的分区调控,以提高工艺适用性和出厂水水质稳定性。

参考文献

- [1] Wu Y W, Bu L J, Zhu S M, et al. Molecular transformation of algal organic matter during sequential ozonation-chlorination: Role of pre-ozonation and properties of chlorinated disinfection byproducts[J]. Water Research, 2022, 223: 119008. DOI: 10.1016/j.watres.2022.119008.
- [2] 孙卓然, 蔡宇, 宋倩, 等. 致人体健康危害的饮用水氯化消毒副产物流行病学调查研究进展[J]. 净水技术, 2026, 45(1): 26-34, 62.
Sun Z R, Cai Y, Song Q, et al. Research progress of epidemiological investigation for human health hazards of chlorinated DBPs in drinking water[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(1): 26-34, 62.
- [3] 姚昊, 许航, 温昕, 等. 预臭氧氧化对混凝沉淀过程中有机物去除的影响[J]. 中国给水排水, 2022, 38(7): 33-42.
Yao H, Xu H, Wen X, et al. Effect of pre-ozonation on removal of organic matter during coagulation and sedimentation[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(7): 33-42.
- [4] 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.
- [5] 任腾飞, 陶峰, 任航, 等. 非均相臭氧催化剂活性位点调控及其催化氧化净水机制前沿进展[J]. 水处理技术, 2025, 51(10): 195-202.
Ren T F, Tao F, Ren H, et al. Active site regulation of heterogeneous ozone catalysts and oxidation mechanisms for wastewater purification[J]. Technology of Water Treatment, 2025, 51(10): 195-202.
- [6] 丁强. 给水厂藻类的应急处置措施[J]. 城镇供水, 2025(3): 21-24.
Ding Q. Emergency treatment of algae in water supply plants[J]. Journal of China Urban Water Association, 2025(3): 21-24.
- [7] 李旭枫, 周瑶, 常晶, 等. 预处理及深度处理技术强化天津某水厂净水工艺[J]. 中国给水排水, 2024, 40(3): 46-52.
Li X F, Zhou Y, Chang J, et al. Enhanced purification process of a waterworks in Tianjin by pretreatment and advanced treatment technology[J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(3): 46-52.
- [8] Wu S X, Fu Q L, Fujii M, et al. Qualitatively elucidating the molecular characteristics of precursors for saturated halogenated disinfection byproducts in chlorinated urban eutrophic lake water by ultrahigh-resolution mass spectrometry[J]. Journal of Hazardous Materials, 2025, 489: 137709. DOI: 10.1016/j.

- jhazmat. 2025. 137709.
- [9] Fijolek L, Świetlik J, Frankowski M. Ozonation and catalytic ozonation – Sources of error. What do we need to know? [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 370: 123031. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.123031.
- [10] 李宗强, 束敏, 董立. 低浊水预氯胺、预氯化及预臭氧处理效能分析[J]. 中国给水排水, 2025, 41(21): 83–87.
Li Z Q, Shu M, Dong L. Performances of pre-chloramination, pre-chlorination, and pre-ozonation for treatment of low-turbidity water[J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(21): 83–87.
- [11] 张婉竹, 杨力, 王洋, 等. 超滤膜在北方地区南水北调中线水厂中的应用[J]. 给水排水, 2024, 50(5): 48–52.
Zhang W Z, Yang L, Wang Y, et al. Application of ultrafiltration membranes in water treatment plants for the South-to-North Water Diversion Middle Line in northern China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2024, 50(5): 48–52.
- [12] 邹放, 刘畅, 谢若激, 等. 残余铝在全流程净水工艺中的变化规律研究[J]. 城镇供水, 2024(5): 23–29, 43.
Zou F, Liu C, Xie R W, et al. Study on the change law of residual aluminum in the whole process of water purification[J]. City and Town Water Supply, 2024(5): 23–29, 43.
- [13] 尹翠琴, 方雯萱, 谢宇, 等. 预氯化和预臭氧化在自来水厂的运行效果探究[J]. 城镇供水, 2022(1): 25–28.
Yin C Q, Fang W X, Xie Y, et al. Study on operation effect of pre-chlorination and pre-ozonation in waterworks [J]. City and Town Water Supply, 2022(1): 25–28.
- [14] 冯星灿, 张宇玲, 江晓铭, 等. 高级氧化工艺对饮用水控藻除嗅的研究进展[J]. 净水技术, 2024, 43(5): 53–60.
Feng X C, Zhang Y L, Jiang X M, et al. Research progress of AOPs on algae control and odor removal in drinking water[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(5): 53–60.
- [15] 武钦凯, 夏霆, 陶巍, 等. 臭氧对河道典型藻类的影响研究[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(8): 936–941.
Wu Q K, Xia T, Tao W, et al. Effect of ozone on typical algae in river[J]. Environmental Pollution & Control, 2018, 40(8): 936–941.
- [16] Liao Z C, Ma W Q, He H, et al. Molecular-level insights into oxidant sensitivity of algal extracellular organic matter and disinfection by-product formation during chlorination/ozonation [J]. Water Research, 2026, 296: 125655. DOI: 10.1016/j.watres.2026.125655.
- [17] 朱晓燕, 叶婷, 夏彭斌, 等. 臭氧与氯联合消毒对钱塘江水源水 DBPs 形成及溴取代的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39(4): 1226–1233.
Zhu X Y, Ye T, Xia P B, et al. Formation of disinfection by-products and the bromine incorporation upon ozone-chlorination of Qiantang River water[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(4): 1226–1233.
- [18] 齐天天, 温颖, 胡振江, 等. 不同氧化剂对南水北调中线高藻原水的处理效果及生物安全影响试验 [J]. 净水技术, 2025, 44(10): 55–63, 135.
Qi T T, Wen Y, Hu Z J, et al. Effects of different oxidants on treatment and experiment of biosafety of high algal raw water in middle route of the south-to-north water diversion project [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(10): 55–63, 135.
- [19] 薛广进, 王洋, 刘洋, 等. 加速型机械搅拌澄清池系列化设计研究[J]. 市政技术, 2025, 43(2): 103–109.
Xue G J, Wang Y, Liu Y, et al. Serial design research on accelerated mechanical stirring clarifier [J]. Municipal Engineering Technology, 2025, 43(2): 103–109.