

刘爽,王铮,武珉辉,等. 采用金泽原水的水厂工艺集成优化关键技术研究[J]. 净水技术,2021,40(4):12-17.

LIU S, WANG Z, WU M H, et al. Research achievement of key technologies of integrated and optimized process for WTPs with Jinze raw water[J]. Water Purification Technology, 2021,40(4):12-17.



扫我试试?

采用金泽原水的水厂工艺集成优化关键技术研究成果

刘爽¹,王铮^{1,*},武珉辉¹,沈雪¹,于建伟²,陈洪斌³

(1. 上海城市水资源开发利用国家工程中心有限公司,上海 200082;2. 中国科学院生态研究中心,北京 100085;3. 同济大学环境科学与工程学院,上海 200092)

摘要 围绕金泽水库水源特点,在“十一五”和“十二五”成果基础上,针对金泽水源运行水厂存在的耗氧量、三卤甲烷总量超上海地标风险,浑浊度、嗅味物质等偏高,出厂水有抗生素检出的问题,进行金泽原水水厂工艺集成优化关键技术研究。结果表明,通过水厂前后臭氧投加优化、活性炭滤池运行优化以及水厂消毒方式优化,出厂水浑浊度不高于 0.15 NTU,2-MIB、土臭素不高于 5 ng/L,三卤甲烷总量不高于 0.5,磺胺类抗生素去除率不低于 60%,出厂水水质稳定达到国家标准和地方标准。

关键词 金泽水库 工艺优化 臭氧 活性炭 消毒

中图分类号: TU991.2 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2021)04-0012-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2021.04.003

Research Achievement of Key Technologies of Integrated and Optimized Process for WTPs with Jinze Raw Water

LIU Shuang¹, WANG Zheng^{1,*}, WU Minhui¹, SHEN Xue¹, YU Jianwei², CHEN Hongbin³

(1. Shanghai National Engineering Research Center of Urban Water Resources Co., Ltd., Shanghai 200082, China;

2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China;

3. College of Environmental Science and Engineering of Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract Focusing on characteristics of Jinze Reservoir, and on the basis of research results of “Eleventh Five-Year” and “Twelfth Five-Year”, research on key technologies for process integration and optimization of Jinze Water Treatment Plants (WTPs), to solve the problems that COD_{Mn} and THM have the risk of exceeding Shanghai local standard, turbidity and odor substances are occasionally detected high, and antibiotics are detected. Results show that through the optimization of ozone dosing, activated carbon filter operation and disinfection method, effluent turbidity is not higher than 0.15 NTU, 2-MIB, geosmin is not higher than 5 ng/L, THM is not more than 0.5, removal rate of sulfonamide antibiotics is not less than 60%, and water quality of WTPs is stable and reaches national standard and local standard.

Keywords Jinze Reservoir process optimization ozone activated carbon disinfection

在金泽水库通水之前,上海市西南五区各水厂各自就近在黄浦江干、支流水域取水,原水常年处于

中污染状况,切换金泽水库后,原水水质有较为明显的改善,但仍存在耗氧量偏高、季节性藻类暴发,以及复合嗅味、抗生素、农药等微量污染物均有检出等风险。西南五区 12 座水厂原有工艺运行出水尽管能满足国标 106 项要求,但耗氧量、三卤甲烷总量存在超上海地标风险,部分水厂出厂水浑浊度、嗅味物质等偏高。因此,亟需根据新水源的水质特征对水厂工艺进行优化,形成水厂工艺适应性技术方案,保

[收稿日期] 2021-03-18

[基金项目] “水体污染控制与治理”科技重大专项,金泽水库原水水处理工艺优化与安全输配技术研究与應用(2017ZX07207004)

[作者简介] 刘爽(1991—),女,研究方向为饮用水深度处理工艺,E-mail:lsyx_726@163.com。

[通信作者] 王铮,女,E-mail:wangzhenjoan@126.com。

障出厂水水质稳定达标,为上海市金泽水源供水系统水质安全提供有效技术支持。

1 研究目标与背景

金泽原水水厂工艺集成优化关键技术研究属于国家科技重大专项“太浦河金泽水源地水质安全保障综合示范”(2017ZX07207)课题“金泽水库原水水处理工艺优化与安全输配技术研究与应用”(2017ZX07207004)的重要研究任务之一,由上海城市水资源开发利用国家工程中心有限公司、中国科学院生态研究中心、同济大学共同承担完成。

金泽水源主要服务闵行、松江、青浦、奉贤和金山五区共计 12 座水厂,合计制水能力为 292 万 m^3/d ,均采用臭氧-生物活性炭深度处理工艺。上海市实行地标《生活饮用水标准》(DB31/T 1091—2018)后,对水厂运行管理提出了新的挑战。为更严格地执行地标要求,提升饮用水水质,针对金泽水源运行水厂存在的耗氧量、三卤甲烷总量存在超上海地标风险,浑浊度、嗅味物质等偏高^[1],出厂水有抗生素检出的问题,以臭氧-生物活性炭为关键工艺进行优化研究,解决水质问题,保障供水安全。

2 研究成果

2.1 耗氧量强化去除工艺

2.1.1 臭氧优化效果分析

根据水厂臭氧投加实际情况,以金泽水库原水为试验对象,设定预臭氧投加量为 0.5、1.0、1.4 mg/L,后臭氧投加量为 0.8、1.5、2.0 mg/L。预臭氧单元对 COD_{Mn} 的平均去除率随着预臭氧投加量的增加呈现先升高后降低的趋势,在投加量为 1 mg/L 时, COD_{Mn} 的去除率最高。后臭氧单元对 COD_{Mn} 的去除率随着臭氧投加量的上升呈现先增加后减少的趋势,当后臭氧投加量为 1.5 mg/L 时, COD_{Mn} 的去除率达到最大,为 12.7%;而 BAC 单元对 COD_{Mn} 的去除效果优于臭氧单元,对 COD_{Mn} 的去除变化规律类似于臭氧单元,随着臭氧投加量的上升呈现先增加后减少的趋势,当后臭氧投加量为 1.5 mg/L 时,去除率达到最大,为 25.7%。将上述结果进行响应面分析,模型预测出适用于金泽水库原水耗氧量强化去除的臭氧投加最优组合:预臭氧投加量为 1.02 mg/L,后臭氧投加量为 1.36 mg/L,至活性炭滤池出水, COD_{Mn} 可达最优去除率(65.4%)。以此投加量在金泽水源供水某水厂进行生产投加,固定后臭氧

投加量为 1.0 mg/L,改变预臭氧投加量,结果如图 1 所示。对预臭氧+混凝沉淀整体的 COD_{Mn} 的去除率而言,随着预臭氧投加量的增加,整体 COD_{Mn} 的去除率呈现先增加后减少趋势,在预臭氧投加量为 0.8~1.0 mg/L 时,整体 COD_{Mn} 的去除率最大,为 43.5%,与试验及模拟结果吻合。

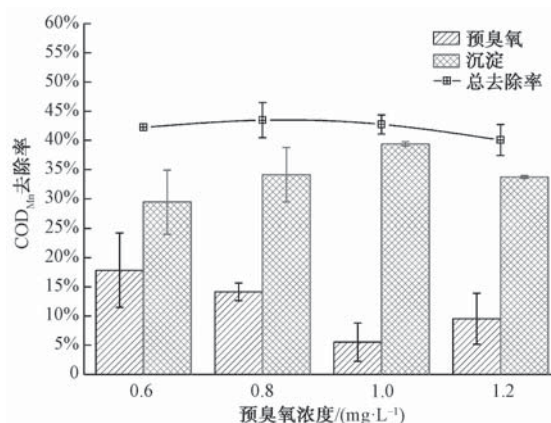


图 1 预臭氧投加量对 COD_{Mn} 去除的影响

Fig. 1 Effect of Pre-Ozone Dosage on COD_{Mn} Removal

2.1.2 活性炭滤池优化效果分析

活性炭的比表面积和孔容随着运行时间的延长而不断衰减,在运行 4~5 个月时,下降约 50%~60%;运行至 7 年时,微孔孔容基本耗竭,比表面积大大减小。而中孔和大孔仍保留了较多的孔容,意味着活性炭的解吸附与置换吸附是可能发生的。分析活性炭的生物活性可以部分反映活性炭滤池中生物降解作用的强度。结果显示,柱状炭生物活性总体在破碎炭水平的 50% 左右,破碎炭生物作用显著高于柱状炭滤池,新炭池运行 2~5 个月,随着运行时间的增长,生物活性不断增强。老炭池的生物活性整体低于稳定运行的新炭池。活性炭微孔孔容、比表面积等性能明显降低时,同样伴随着活性炭滤池对水中 COD_{Mn} 去除率降低的现象,此时水厂应及时更换活性炭滤池滤料。金泽水源某水厂经评估可知:活性炭性能明显下降,臭氧活性炭单元对 COD_{Mn} 的去除率呈现逐月下降趋势,平均从 27.2% 降低至 11.5%,出厂水总 COD_{Mn} 的去除率平均从 56% 降低至 48% 左右;换炭结束,臭氧活性炭单元对 COD_{Mn} 的去除率升高 25% 左右,最高达 29%,出厂水总 COD_{Mn} 去除率上升至 53% (图 2)。

2.2 嗅味风险控制工艺优化

金泽原水具有复合性嗅味风险,其中,2-MIB 为

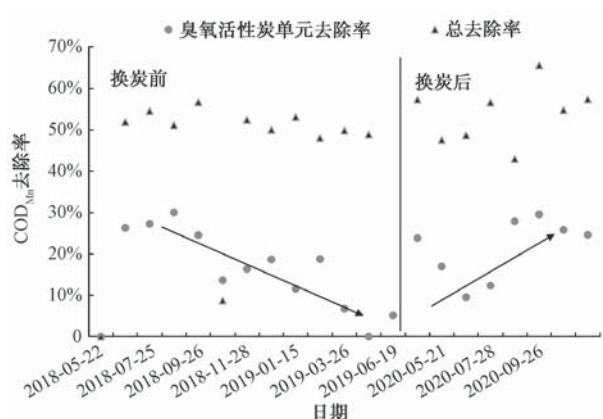


图2 金泽水源某水厂活性炭工艺优化前后
COD_{Mn} 去除率变化

Fig. 2 Removal Variation of COD_{Mn} before and after
Optimization of Activated Carbon Process in a WTP
with Jinze Raw Water

主要风险致嗅物质,其在7月—8月达到峰值,最高为476.6 ng/L,明显超出嗅阈值。通过对水厂的致嗅物质去除效能评估可知,水厂的工艺对2-MIB及土臭素均能有效去除,且臭氧-活性炭工艺为主要去除工艺段^[2]。通过中试及生产试验进行臭氧-活性炭工艺的优化研究,试验过程中其他工艺参数不变,只调整臭氧投加量。

试验期间,原水土臭素检出浓度为7 ng/L,经沉淀即可完全去除。因此,试验分析以2-MIB的去除效果为主,试验期间2-MIB浓度最高为15 ng/L,结果如图3、图4所示。随着预臭氧投加量的增加,在1 mg/L左右对2-MIB的去除效率有明显增加,继续增加预臭氧投加量对2-MIB的去除率提升不明显。综合实际生产运行中臭氧投加能力和范围,以及前后臭氧对嗅味的去除,建议:针对嗅味的去除,前臭氧投加量为0.65~1 mg/L,后臭氧为0.5~1 mg/L。

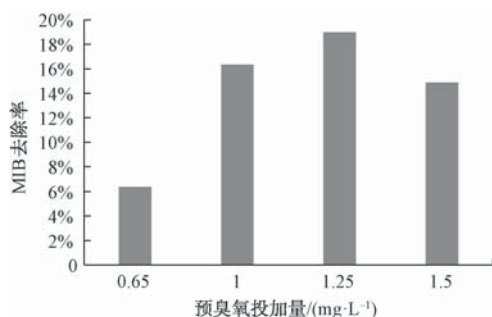


图3 预臭氧投加量对2-MIB去除效率影响

Fig. 3 Effect of Dosage of Pre-Ozonation on Removal
Rate of 2-MIB

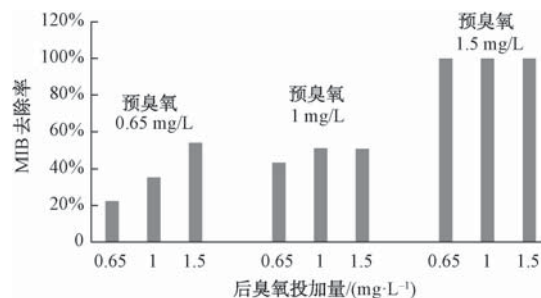


图4 后臭氧投加量对2-MIB去除效率影响

Fig. 4 Effect of Dosage of Post-Ozonation on Removal
Rate of 2-MIB

当前臭氧投加量为0.65 mg/L时,后臭氧需达到1 mg/L以上才能有明显的2-MIB去除率提升;当前臭氧投加量为1 mg/L时,后臭氧为0.5 mg/L左右即可达到较高的去除率。

2.3 抗生素去除工艺优化

臭氧生物活性炭工艺的优化,基于原水中磺胺类抗生素的浓度水平,调整不同前后臭氧投加比例,跟踪磺胺类抗生素在不同工艺参数下的去除效率。金泽水源水厂检出频率及浓度较高的磺胺类抗生素为磺胺甲恶唑。由图5可知,当预臭氧投加量为0.65 mg/L时,后臭氧投加量需达到1.5 mg/L,磺胺甲恶唑的去除率才能高于60%,达到88.59%。若预臭氧采用1 mg/L,后臭氧投加量需达到1 mg/L以上,磺胺甲恶唑的去除率才能达到60%以上,去除效率分别为74.58% (后臭氧投加量为1 mg/L)和75.67% (后臭氧投加量为1.5 mg/L)。当预臭氧的投加量增加至1.5 mg/L时,后臭氧无论采用0.5 mg/L还是1 mg/L,磺胺甲恶唑的去除率均高于

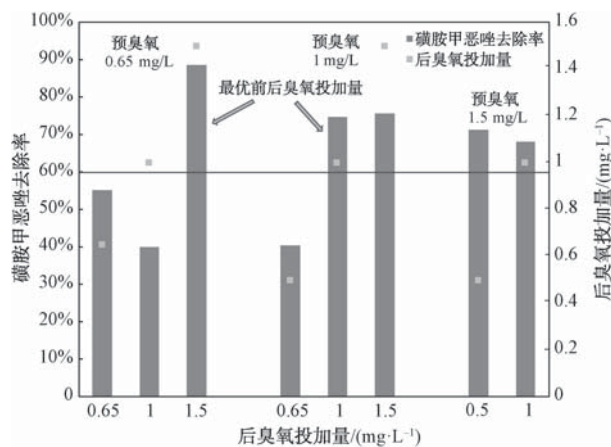


图5 磺胺甲恶唑在不同前后臭氧投加量的去除率

Fig. 5 Removal Rate of Sulfamethoxazole in Different Dosages
of Pre-Ozonation and Post-Ozonation

60%, 分别达到 71.32% 和 68.04%。由生产性试验结果可知, 综合抗生素去除率、投加量经济性, 最优的前后臭氧投加量为: 预臭氧投加量取 0.65 mg/L 时, 后臭氧取 1.5 mg/L; 或者, 预臭氧投加量取 1 mg/L 时, 后臭氧取 1 mg/L。

将生产性试验结果推广到 2 座水厂, 同时考虑前后臭氧单元进水中抗生素浓度对去除率的影

响, 计算采用最优前后臭氧投加量时, 单位抗生素总量所需臭氧量 (每 ng 抗生素所需 mg 臭氧量), 即: 就预臭氧单元而言, 计算最佳预臭氧投加量与相应原水中磺胺类抗生素总量的比值; 就后臭氧单元而言, 计算最佳后臭氧投加量与相应主臭氧单元进水中磺胺类抗生素总量的比值, 结果如表 1 所示。

表 1 前后臭氧单位抗生素总量所消耗的臭氧量

Tab. 1 Amount of Unit Ozone Consumed of Total Antibiotics in Pre-Ozonation and Post-Ozonation

工艺单元	最优单位抗生素总量所需臭氧量 /[mg O ₃ ·(ng 抗生素) ⁻¹]	抗生素浓度/(ng·L ⁻¹)	推荐臭氧投加量/(mg·L ⁻¹)
前臭氧单元	0.028~0.038	原水: 15~30 (均值为 23.5)	0.65~0.90
后臭氧单元	0.05~0.08	后臭氧进水: 0~23 (均值为 12)	0.60~0.95

水厂原水中的抗生素浓度为 15~30 ng/L, 均值为 23.5 ng/L, 前臭氧处理单元中, 采用的最优单位抗生素总量所需臭氧量为 0.028~0.038 mg O₃/(ng 抗生素), 推荐的最优预臭氧投加量为 0.65~0.9 mg/L。后臭氧处理工艺进水中的抗生素浓度为 0~23 ng/L, 均值为 12 ng/L; 后臭氧处理单元中, 采用的最优单位抗生素总量所需臭氧量为 0.05~0.08 mg O₃/(ng 抗生素), 根据后臭氧进水抗生素均值, 推荐的最优后臭氧投加量为 0.60~0.95 mg/L。

2.4 三卤甲烷控制优化

2.4.1 臭氧氧化 DBPs 前体物效果分析

在饮用水处理过程中, 受水质条件和操作参数的影响, 臭氧及其相关高级氧化工艺对 DBPs 生成的影响不尽相同。NOM 作为 DBPs 的前驱物, 臭氧氧化可改变其组分, 从而影响 DBPs 的生成。比较不同投加量情况下对前驱物的去除率, 结果如图 6 所示。随着臭氧投加量的增加, 消毒副产物前体物的去除率在后臭氧及臭氧-生物活性炭出水呈现先增加后减少的趋势。当预臭氧增加到 1 mg/L 以上、后臭氧浓度为 0.8 mg/L 时, 前驱物的去除率出现负增长的趋势, 证明上述研究中臭氧投加量对消毒副产物前驱物的控制并不是通过去除 NOM 来控制 DBPs 的生成, 而是通过改变 NOM 的组分来影响 DBPs 的生成, 且有最佳臭氧投加点。结果显示, 当预臭氧浓度为 0.5~1 mg/L、后臭氧浓度为 0.8~1.5 mg/L 时, 均能较好地去除前驱物。进一步开展了主臭氧投加变化的消毒副产物生产势生产性试验, 改变后臭氧投

加量为 1.2 mg/L 及 1.5 mg/L, 分析使用 5 mg/L 氯 24 h 的消毒副产物生成势。结果表明, 臭氧投加量为 1.2 mg/L 时, 出厂水中消毒副产物总量相比原水降低 33%; 而当臭氧投加量为 1.5 mg/L 时, 出厂水中消毒副产物总量相比原水只降低 3.3%, 说明随着臭氧投加量的升高, 不能一味地通过去除消毒副产物前驱物来控制消毒副产物。

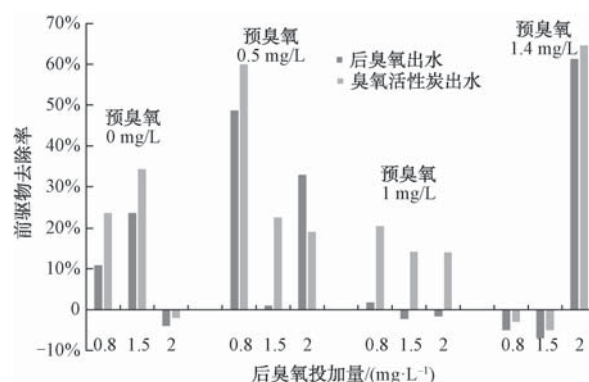


图 6 不同后臭氧投加量对前驱物去除的影响

Fig. 6 Effect of Different Dosages in Post-Ozonation on Precursors Removal

2.4.2 消毒方式和消毒剂剂量对 DBPs 生成的影响

上海目前对于已经采用臭氧-生物活性炭深度处理工艺的金泽水源水厂, 推荐使用游离氯消毒化合氯出厂的消毒副产物控制方式, 即在深度处理活性炭池后设消毒接触池, 有 30 min 的接触时间, 采用游离氯消毒, 浓度为 0.5 mg/L, 满足 CT 值 ≥ 15, 然后再加氨 0.2~0.3 mg/L, 氯氨重量比在 4:1 左右, 达到 1 mg/L 左右化合氯出厂, 可使出厂消毒副

产物得到控制,且后续管网中亚硝酸盐产生的可能性较小^[3]。

针对采用自由氯消毒的水厂,通过采用分段投加自由氯的方法控制出厂水中三卤甲烷的总量不高于0.5。就三卤甲烷而言,在不同次氯酸钠投加总量、采用分段加氯时,其产生量较稳定,而未采用分段加氯、三卤甲烷总量最高时,是采用分段

加氯时的3倍有余。如采用分段加氯,三氯甲烷浓度在0.36~0.48 $\mu\text{g/L}$;不采用分段加氯,则在0.36~0.66 $\mu\text{g/L}$ 。可以看出,分段加氯是一种很有效的控制三卤甲烷的消毒方法。研究表明,在次氯酸钠总投加量为1.5 mg/L 时,可以减少67%的三卤甲烷产生量和30%的三氯甲烷产生量,如图7所示。

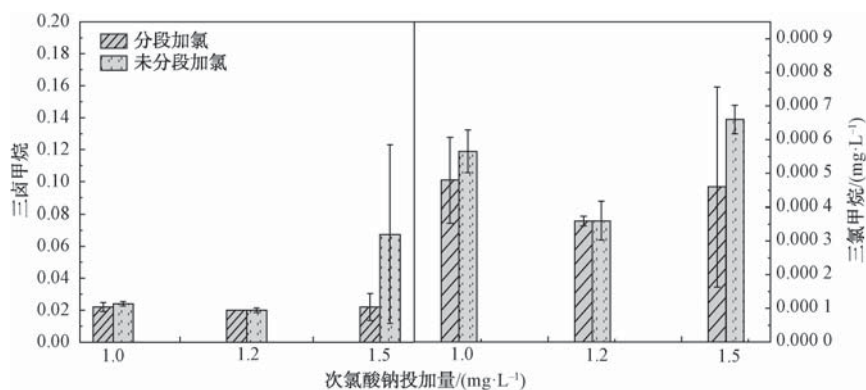


图7 分段加氯和非分段加氯所产生的三卤甲烷和三氯甲烷浓度

Fig. 7 Concentrations of Trihalomethane and Trichloromethane Produced by Staged and Non-Staged Chlorination

(1) 分段加氯比例

为优化分段加氯时的前后段次氯酸钠投加比例,在不同前加氯投加量下(即:0.4、0.5 mg/L 和0.6 mg/L),比较采用不同前后加氯比所产生的三卤甲烷总量和三氯甲烷浓度。加氯比包括1:1、1:2、1:2.5和1:3。由图8可知:当前段加氯投加量在0.4 mg/L 时,前后段次氯酸钠投加比例采用1:1、1:2和1:2.5所产生的三卤甲烷和三氯甲烷量差异不大,三卤甲烷总量为0.020~0.023,三氯甲

烷生成量为0.37~0.44 $\mu\text{g/L}$;当采用1:3的前后加氯比时,三卤甲烷和三氯甲烷生成量明显升高,分别为0.031 $\mu\text{g/L}$ 和0.63 $\mu\text{g/L}$,比其他前后加氯比时增加了29%和37%。因此,最优投加比例为1:1、1:2和1:2.5。

(2) 次氯酸钠总投加量

在确定了最优前后段加氯比之后,进一步优化次氯酸钠总投加量范围,因为即使采用最佳前后段加氯比,如果次氯酸钠总投加量过高也难以达到控

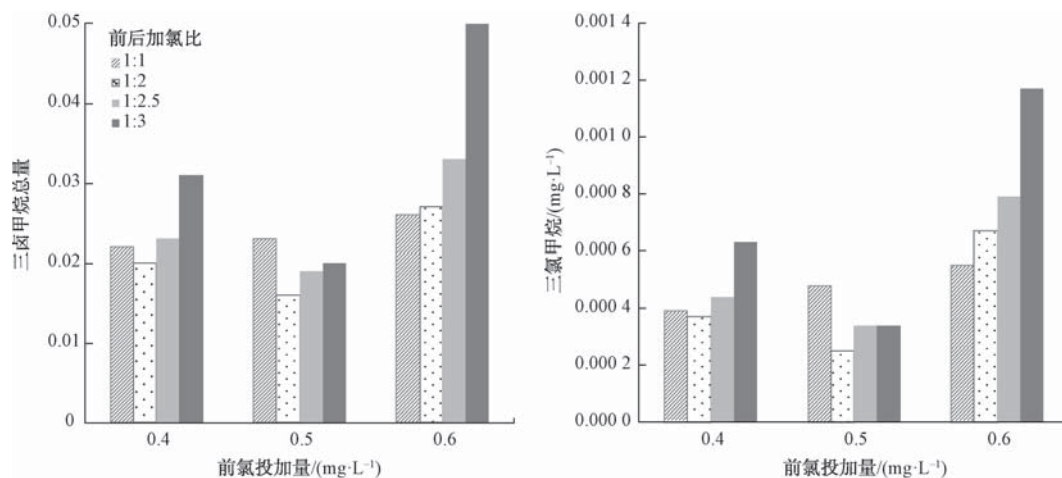


图8 不同前后段加氯比下的三卤甲烷总量和三氯甲烷生成量比较

Fig. 8 Comparison of Trihalomethane and Trichloromethane Production under Different Chlorination Ratios

制消毒副产物生成的目的。为了优化次氯酸钠总投加量,试验在不同投加总量下,检测三卤甲烷总量和三氯甲烷的生成量,结果如图9所示。由图9可知:生成三卤甲烷最低的次氯酸钠总投加量在1.2~

1.75 mg/L;三氯甲烷生成量的趋势与三卤甲烷相同,生成量最少时的总投加量为1.2~1.75 mg/L。因此,采用前后分段加氯消毒时,推荐次氯酸钠投加总量应保持在1.2~1.75 mg/L。

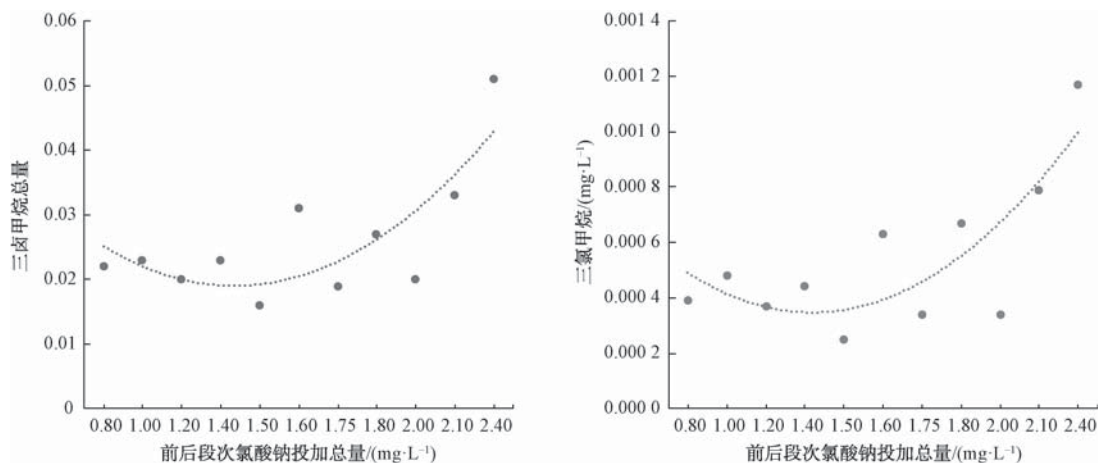


图9 不同次氯酸钠投加总量下生成的三卤甲烷总量和三氯甲烷的浓度

Fig. 9 Total Amount of Trihalomethane and Concentration of Trichloromethane Produced under Different Total Dosages of Sodium Hypochlorite

总而言之,分段加氯更能有效控制消毒过程中消毒副产物的产生。在采用分段加氯时,前后段次氯酸钠投加比例应控制在1:2~1:2.5,次氯酸钠总投加量应控制在1.2~1.75 mg/L。

2.5 超滤膜对微生物安全控制效果

砂滤池/活性炭滤池出水有微生物泄露风险,为研究膜过滤对无脊椎动物的拦截规律,开展了管式超滤膜和纳滤膜对生物活性炭滤池出水的无脊椎动物虫体及可孵化体的拦截生产性试验。超滤膜对无脊椎动物的拦截效率为98.52%±1.17%,出水生物种类主要为轮虫和线虫,未发现体积较大的虫体,对虫卵及可繁殖体的拦截效率为89.44%±17.97%,主要为轮虫卵,偶尔出现线虫卵。随着跨膜压差的增大,超滤对虫体、虫卵及可繁殖体的拦截效率降低。当跨膜压差大于0.04 MPa时,出水开始出现少量轮虫,随着跨膜压差的进一步增大(至0.08 MPa),处理效率出现大幅度下降。

2.6 浊度控制优化效果

混凝沉淀是目前水厂处理中对浊度去除效率最高的工艺环节,因此,以混凝剂投加量的优化研究,确定金泽水库供水水厂适宜的最佳混凝剂投加量,为实现出厂水浊度小于0.15 NTU,至少需将沉后水浊度控制在1 NTU。研究显示:在不同混

凝剂中,聚合氯化铝在投加量为6~10 mg/L(按Al₂O₃计)时,可将沉后水浊度降至1 NTU以下;硫酸铝在投加量为2~4 mg/L(按Al₂O₃计)时,即可将原水20 NTU左右的浊度降到1 NTU以下,去除率达到90%以上。

3 应用前景

本研究以上海西南五区水厂现行的“臭氧-生物活性炭”工艺为主要优化工艺,进行臭氧投加量优化、活性炭滤池运行优化、消毒方式及投加量优化研究,提出以有机物和浊度达标、嗅味去除、消毒副产物控制、新型污染物去除为目标的对应工艺参数,为上海市金泽水源供水系统水质安全提供有效技术支撑。

参考文献

- [1] 陈国光. 上海市《生活饮用水水质标准》制定及实施步骤与措施[J]. 给水排水, 2019, 55(5): 26-31.
- [2] XIA P, ZHANG S, YU J, 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(1). DOI: 10.1186/s12302-020-00313-w.
- [3] 陈国光. 精准加氯降低消毒副产物改善自来水口感[J]. 给水排水, 2019, 55(9): 10-13.