

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.15.008

串并联复合清水池中试模型构建与消毒方案优化

陶 阳¹, 范功端¹, 魏忠庆², 陈永福¹, 郑 奋², 徐开钦¹

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 福州市自来水有限公司, 福建 福州 350001)

摘 要: 消毒剂的储存条件、运行工况和投加方案对消毒效果的影响极大,如控制不当则出厂水可能出现病原微生物及消毒副产物浓度偏高等问题,给饮用水安全造成威胁。针对串并联复合清水池在消毒过程中出现的此类问题,通过构建1:50全幅清水池中试模型,开展不同条件下的消毒试验。结果表明,当次氯酸钠消毒剂有效氯含量为5%时,采用前端和中间同时投加的两点投加方案,保持消毒剂水力停留时间(HRT)在45 min以上且原水腐殖酸(HA)浓度低于5 mg/L的条件下,既能保障不同工况出口处的出水水质,还能保持较低的氯耗量,因此可将其确定为该清水池的最佳消毒方案。

关键词: 串并联复合清水池; 消毒效果; 次氯酸钠; 两点投加; 氯耗量

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)15-0055-06

Construction of Pilot Model for Series-Parallel Composite Clear Water Reservoir and Optimization of Disinfection Scheme

TAO Yang¹, FAN Gong-duan¹, WEI Zhong-qing², CHEN Yong-fu¹, ZHENG Fen², XU Kai-qin¹

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Fuzhou Municipal Water Supply Co. Ltd., Fuzhou 350001, China)

Abstract: Disinfectants exert a significant influence on disinfection efficacy under varying storage conditions, operational conditions, and dosing strategies. Consequently, the treated water of the waterworks may exhibit elevated levels of pathogenic microorganisms and disinfection by-products, which pose potential risks to drinking water safety. In response to the challenges encountered during the disinfection process of serial-parallel composite clear water reservoir, a full-scale clear water reservoir with 1:50 scale was developed to carry out disinfection experiments under various conditions. When the effective chlorine content of sodium hypochlorite disinfectant was 5%, a two-stage dosing strategy involving simultaneous addition at both the inlet and mid-section of the system was implemented. Provided that the hydraulic retention time (HRT) of the disinfectant remained above 45 minutes and the humic acid (HA) concentration in the raw water was below 5 mg/L, this method not only ensured treated water quality across various operational conditions but also maintained relatively low chlorine consumption. Therefore, it can be considered the optimal disinfection strategy for the clear water tank.

基金项目: 福建省住房和城乡建设系统科学技术项目(2022-K-2); 国家自然科学基金资助项目(51778146)

通信作者: 范功端 E-mail: fgdfz@fzu.edu.cn

Key words: series-parallel composite clear water reservoir; disinfection effect; sodium hypochlorite; two point dosing; chlorine consumption

清水池作为给水厂水处理工艺的核心构筑物,兼具消毒与贮水双重功能,是调节水厂均匀供水与满足用户波动用水需求的关键设施^[1]。随着国家对饮用水水质标准的持续提升,在给水厂新建、扩建及改造工程中,叠合式清水池因具备显著的节地优势而被广泛采用^[2]。根据设计规范要求,清水池需在优先保障居民用水需求的基础上,确保至少30 min的水力停留时间(HRT),以保障消毒剂与水体充分接触,提升对病原微生物的灭活效率,强化消毒效果^[3]。

为满足功能需求与用地限制,叠合式清水池常见串联、并联及串并联复合三种布置形式^[4]。串联布置能进一步提升土地利用率,但运行时最高与最低水位相对独立清水池有所抬升;并联布置通过延长水力流程优化消毒效果,不过需要提高进水压力以维持与独立清水池相同的水位;串并联复合式清水池则整合前两者优势,凭借良好的消毒性能在实际工程中得到广泛应用^[5]。然而,受进、出口结构及导流板形态的影响,串并联复合式清水池内部水流的流态复杂,导致病原微生物灭活效率与消毒副产物生成速率难以精准调控,给饮用水安全保障带来严峻挑战^[6]。

笔者以南方某水厂串并联复合式清水池消毒工艺为研究对象,通过搭建1:50全幅中试模型,系统开展不同存储条件、运行工况及投加方案下的消毒试验。通过分析试验数据,深入探讨各因素对消毒效果的影响机制,旨在确定最优消毒方案,同时为串并联复合式清水池的安全稳定运行提供理论支撑与数据依据,并为同类型水厂的生产实践提供参考。

1 材料与方法

1.1 水厂清水池概况

南方某水厂总占地面积为3.87 hm²,以水量充足、水质优良的敖江作为主水源,以闽江作为应急水源,实现双水源互补供水,处理水量为15×10⁴ m³/d。为了节约用地,并满足最低水力停留时间的设计要求,该水厂在双阀滤池和高密度澄清池下分别下叠1个一级清水池,将2个一级清水池并联后与

2个并联的二级清水池进行串联,构成了“下叠式串并联复合式”清水池。该清水池进水流量为5 400 m³/h,总有效容积约为18 750 m³,水力停留时间为3.34 h。该水厂分别在臭氧-生物活性炭滤池出水处和中间串联管道上各安装1个次氯酸钠消毒剂自动投加设备,可实施前端投加、中间投加和两点投加三种投加方案,以此保障出厂水的各项水质指标均符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)要求。

1.2 串并联复合清水池中试模型构建

根据Froude相似准则^[7],以该清水池的实际尺寸及运行条件作为参照,利用3D打印技术,构建比例为1:50的全幅清水池中试模型。4个分池的连接情况、水流方向、投药点位置等如图1所示。

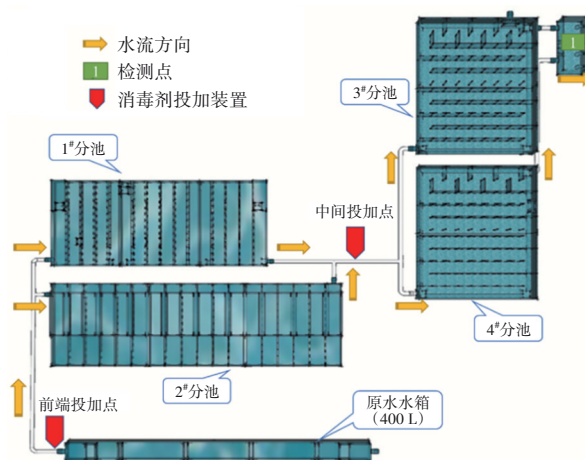


图1 串并联复合清水池中试模型布置方式示意

Fig.1 Schematic diagram of layout of series-parallel composite clear water reservoir pilot model

为模拟水厂清水池的实际运行工况,在中试模型入口处装配蠕动泵与数显流量计,通过二者协同运作精确控制入口流量;于出口位置安装阀门及数显流量计,实现对出口流量的精准调控。同时,采用数显计量泵替换次氯酸钠消毒剂自动投加装置,在既定投加点进行自动化投药操作。原水水箱容积为400 L,其水源直接取自水厂臭氧-生物活性炭滤池的滤后水。串并联复合清水池1#~4#分池的长×宽×深分别为49.0 m×25.2 m×5.0 m、74.4 m×24.6 m×5.0 m、40.0 m×30.4 m×5.0 m、40.0 m×30.4 m×

5.0 m,中试模型相应尺寸分别为0.98 m×0.50 m×0.10 m、1.49 m×0.49 m×0.10 m、0.80 m×0.61 m×0.10 m、0.80 m×0.61 m×0.10 m,其他运行参数见表1。

表1 串并联复合清水池与中试模型的运行参数

Tab.1 Operational conditions of series-parallel clean water reservoir and pilot model

项 目	实体清水池	中试模型
总容积/m ³	18 750	0.15
进口流量/(m ³ ·h ⁻¹)	5 400	0.30
进口速度/(m·s ⁻¹)	1.42	0.20
HRT/h	3.34	0.50

1.3 试验设备及药剂

试验设备主要包括余氯检测仪、离子色谱仪、气相色谱仪、荧光光谱分析仪等。试验药剂有三氯甲烷(CHCl₃,标准溶液)、四氯化碳(CCl₄,标准溶液)、腐殖酸(HA,标准溶液)、次氯酸钠(NaClO,10.74%)。各类水质指标均严格参照《生活饮用水标准检验方法 第4部分:感官性状和物理指标》(GB/T 5750.4—2023)中的方法进行检测。其中,三氯甲烷和四氯化碳采用气相色谱-电子捕获检测器(GC-ECD)法测定,腐殖酸浓度采用荧光光谱分析法检测,余氯浓度采用N,N-二乙基对苯二胺(DPD)光度法测定,氯酸盐采用离子色谱法测定。

2 结果与讨论

2.1 储存方式对消毒效果的影响

次氯酸钠作为强碱弱酸盐,化学性质极不稳定,在运输、存储、使用过程中受光照等因素影响,易发生化学分解反应,导致有效氯含量降低,进而影响消毒效果^[8]。为探究储存条件对消毒效果的影响,将成品次氯酸钠消毒剂(有效氯初始含量均为10.74%)分别置于高温(32℃)、常温(20℃)与低温(4℃)环境下保存100 d,其间按既定采样周期不定期取样检测,分析有效氯衰减规律及氯酸盐生成趋势,共测量9次,结果如图2所示。可以看出,有效氯含量随时间延长持续降低,且与温度显著相关,即温度越高,衰减速率越快。其中,32℃条件下有效氯含量降至约4%、20℃条件下降至约6%、4℃条件下降至约7%后,衰减趋势均趋于平缓。具体数据显示,储存第8天时,在高温、常温和低温条件下,有效氯含量分别降至10.14%、10.58%、10.58%,均满足使用要求;到第20天时,三种温度条件下的有效氯含量分别为8.59%、9.88%、10.58%,此时高温

环境的已不再符合标准,仅常温和低温保存达标;第34天时,有效氯含量进一步下降至7.75%、9.58%、10.27%,唯有低温储存满足要求。

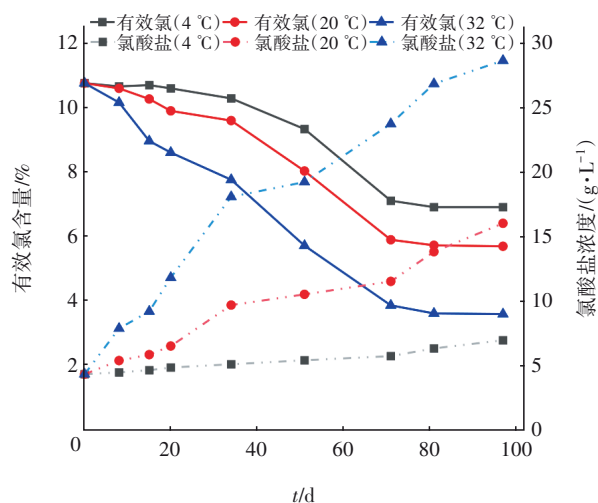


图2 次氯酸钠有效氯衰减及氯酸盐生成趋势

Fig.2 Effective chlorine decay of sodium hypochlorite and formation trend of chlorate

在氯酸盐生成方面,其浓度变化同样受时间和温度的双重影响。随着储存时间的增加,氯酸盐浓度持续上升,且温度越高,浓度增长速度越快。综合有效氯衰减与氯酸盐生成情况来看,为确保次氯酸钠维持良好的化学特性,成品次氯酸钠在高温环境下最长保存时间为8 d,常温环境下可延长至20 d,低温环境下保存期限最长,可达34 d。

2.2 运行条件对消毒效果的影响

水厂实际生产性试验数据显示,消毒过程产生的副产物以三氯甲烷为主,四氯化碳、二氯一溴甲烷及一氯二溴甲烷等物质均未被检测出。基于此,研究将出口处三氯甲烷浓度确定为主要监测指标。另外,已有研究^[9]表明,原水中有有机物含量对消毒副产物三氯甲烷浓度有着显著影响。为深入探究二者关系,结合水厂原水水质的历史数据,选取0、5、10、15 mg/L这四个典型腐殖酸浓度作为试验条件。在实际操作中,需在中试模型400 L的原水水箱内,分别投加0、2、4、6 g腐殖酸,以此模拟不同原水水质情况,为后续研究提供可靠的数据基础。

2.2.1 出口处余氯浓度的变化

基于清水池实际运行参数与中试模型尺寸参数,为确保中试模型出口处余氯浓度符合不低于0.30 mg/L的标准要求^[10],经计算确定次氯酸钠消毒

剂最小投加浓度为 1.2 mg/L;为实现中试模型的最大水力效率,其水位深度设定为 0.08 m;为满足 HRT 不小于 30 min 的运行条件,将最大进水流量调整为 0.30 m³/h。

一个消毒周期后,测定模型出口处余氯浓度的变化,结果如图 3 所示。可知,随着 HRT 的增加,余氯浓度整体呈下降趋势。这是由于延长消毒接触时间虽能提升消毒效果,但也会导致氯耗量显著增加。在相同 HRT 条件下,余氯浓度会随 HA 浓度的增加而降低,且 HA 浓度每增加 5 mg/L,氯耗量约增加 0.16 mg/L,表明 HA 浓度越高,氯耗量越大;而在相同 HA 浓度下,HRT 每延长 15 min,余氯浓度平均降低 0.10 mg/L,氯耗量平均增加 0.10 mg/L。经综合分析,当 HRT 为 45 min 且 HA 浓度为 5 mg/L 时,余氯浓度达 0.74 mg/L,氯耗量为 0.46 mg/L,此时既能保证良好的消毒效果,又可以有效控制成本,达到较优平衡状态。

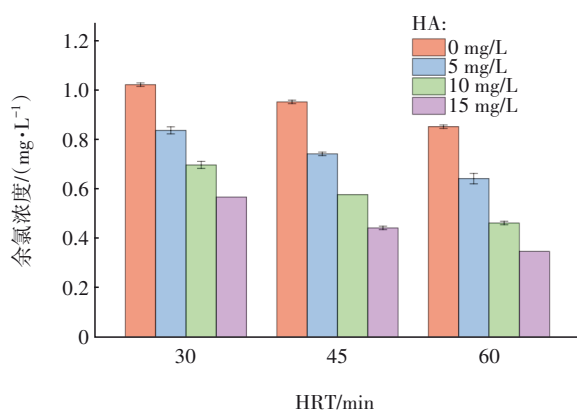


图3 不同水力停留时间下余氯浓度的变化

Fig.3 Change in residual chlorine concentration under different hydraulic retention times

2.2.2 出口处三氯甲烷浓度的变化

不同 HA 浓度条件下,中试模型出口处三氯甲烷浓度的变化如图 4 所示。当不添加 HA 时,延长 HRT 对三氯甲烷生成量几乎无影响,这是由于水体中有机物及消毒副产物已基本去除,即便持续增加 HRT,三氯甲烷浓度也不会产生显著波动;当 HA 浓度升高时,三氯甲烷浓度整体呈上升趋势。在相同 HRT 条件下,三氯甲烷浓度随 HA 浓度增加而升高,HA 浓度每增加 5 mg/L,三氯甲烷浓度平均增大 0.67 μg/L,且 HA 浓度越高,三氯甲烷生成速率越快;在相同 HA 浓度下,三氯甲烷浓度随 HRT 延长而升高,HRT 每增加 15 min,三氯甲烷浓度平均增大

0.41 μg/L,且 HRT 越长,三氯甲烷生成速率越快。综合分析表明,当 HA 浓度≤5 mg/L 且 HRT 为 45 min 时,出口处三氯甲烷浓度为 1.06 μg/L,此时消毒效果达到最佳平衡状态。

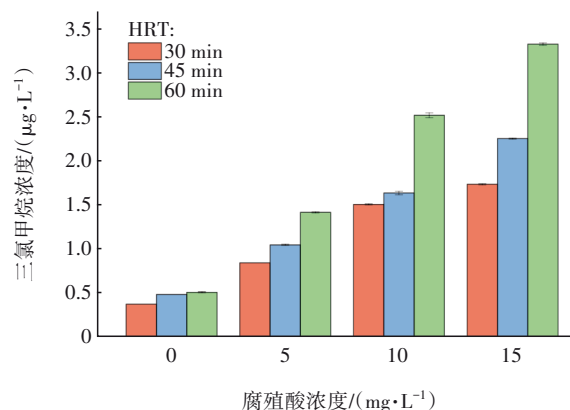


图4 不同腐殖酸浓度下三氯甲烷浓度的变化

Fig.4 Change in trichloromethane concentration under different humic acid concentrations

2.3 投加方案对消毒效果的影响

为精准分析不同投加方案对消毒效果的影响,在原文水箱中投加 6 g 腐殖酸以模拟清水池进水口水质(腐殖酸浓度为 15 mg/L)。为确保出口处余氯浓度维持在规定范围,同时降低消毒接触时间对消毒副产物生成及氯耗量的影响,经理论计算与预试验验证,需将前端投加和中间投加方案的次氯酸钠消毒剂投加浓度统一设定为 1.2 mg/L,两点投加方案中各投加点的次氯酸钠消毒剂投加浓度均设定为 0.6 mg/L。

2.3.1 对余氯浓度的影响

当次氯酸钠消毒剂采用不同投加方案时,中试模型出口处余氯浓度的变化如图 5 所示。当 HRT 相同时,前端投加、两点投加和中间投加三种方案对应的余氯浓度依次增加,氯耗量则依次减少。采用中间投加方案时,1#分池和 2#分池未进行消毒,仅在 3#分池和 4#分池有消毒接触,其水力流程和实际消毒接触时间均不符合设计要求,导致病原微生物灭活水平下降,水质不达标。采用前端投加方案时,全部次氯酸钠消毒剂先从 1#分池和 2#分池流过,水力流程增大,且 HRT 越大,余氯浓度越小。当 HRT 为 60 min 时,余氯浓度仅为 0.35 mg/L,氯耗量达 0.85 mg/L,且 1#分池和 2#分池余氯浓度偏高,3#分池和 4#分池余氯浓度偏低。为保证水质,需增大消毒剂投加浓度,消毒成本较高。采用两点投加方案

时,各 HRT 对应的余氯浓度均大于前端投加方案,且余氯浓度平均增大 0.12 mg/L。因此,两点投加方案可在不同工况下保障出口处余氯浓度符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)要求,同时保持较低的氯耗量。

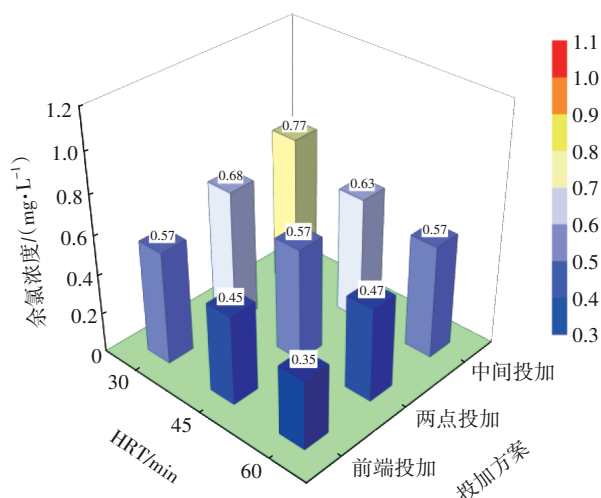


图 5 不同投加方案下余氯浓度的变化

Fig.5 Change in residual chlorine concentration under different dosing strategies

2.3.2 对消毒副产物生成的影响

因中试模型规模较小,其产生的消毒副产物主要为三氯甲烷。不同投加方案下三氯甲烷浓度的变化趋势如图 6 所示。

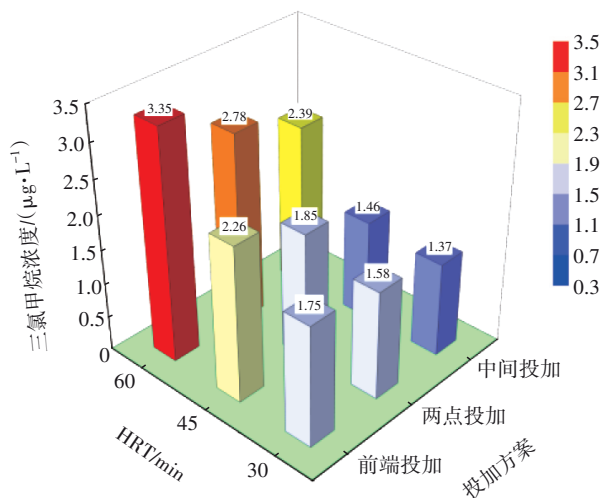


图 6 不同投加方案下三氯甲烷浓度的变化

Fig.6 Change in trichloromethane concentration under different dosing strategies

深入分析发现,前端投加方案呈现出独特的变化规律,其对应的三氯甲烷浓度显著高于中间投加

和两点投加方案,并且随着 HRT 的不断延长,三氯甲烷浓度呈现持续上升的趋势;中间投加方案的效果则存在一定局限性,可能是由于消毒剂在中试模型中的水力流程相对较短,三氯甲烷对余氯的消耗偏少,消毒效果不稳定,三氯甲烷生成浓度偏低;两点投加方案有着自身的特点与优势,其 1#分池与 2#分池的次氯酸钠消毒剂投加浓度仅为前端投加方案的一半,但水力流程却显著增加。经计算表明,采用两点投加方案时,中试模型出口处水中的三氯甲烷浓度与前端投加方案相比,平均减少了 0.38 μg/L,有效降低了成本。

在分析次氯酸钠消毒剂不同投加方案对病原微生物灭活效果时发现,仅中间投加方案且 HRT 为 30 min 时,检测出总大肠菌群为 0.15 MPN/100 mL (标准规定不得检出),不满足标准要求,而其他投加方案的各项指标均符合要求。这一结果进一步证实了中间投加方案存在消毒效果不达标的问题,不宜采用。综合来看,消毒剂两点投加方案在满足余氯浓度要求的基础上,既能保持良好的消毒效果,又能减少氯耗量、降低成本,是最优的投加方案。

3 结论

① 在相同 HRT 条件下,余氯浓度随着腐殖酸浓度的增加而减小,腐殖酸浓度每增加 5 mg/L,余氯浓度平均降低 0.16 mg/L,氯耗量平均增加 0.16 mg/L。三氯甲烷浓度随腐殖酸浓度的增加而增大,且腐殖酸浓度每增加 5 mg/L,三氯甲烷浓度平均增大 0.67 μg/L,当腐殖酸浓度小于 5 mg/L 时,消毒效果最佳。

② 当腐殖酸浓度相同时,余氯浓度随着 HRT 的增加而减小,HRT 每增加 15 min,余氯浓度平均降低 0.10 mg/L,氯耗量平均增大 0.10 mg/L。三氯甲烷浓度也随着 HRT 的增加而增大,且 HRT 每增加 15 min,三氯甲烷浓度平均增大 0.41 μg/L,HRT 越长三氯甲烷生成浓度越高,相比之下,消毒剂的 HRT 为 45 min 较合理。

③ 在采用不同投加方案时,中间投加方案由于消毒接触时间和实际水力停留时间都不符合设计要求,消毒效果大大降低,甚至会出现水质不达标等现象;前端投加因水力流程较大,消毒反应时间变长,对应的余氯浓度偏低,氯耗量增大,同时对

应的三氯甲烷浓度较高;而两点投加方案的氯耗量相比前端投加方案平均降低0.12 mg/L,产生的三氯甲烷浓度平均减少0.38 $\mu\text{g/L}$,既能保障各种工况出口处的水质符合标准要求,还能保持较低的氯耗量,是消毒剂最佳投加方案。

参考文献:

- [1] 方若凡,朱静萍,张天阳,等. 水厂清水池的水力特性模拟与结构优化[J]. 净水技术, 2021, 40(1): 28-36.
FANG Ruofan, ZHU Jingping, ZHANG Tianyang, *et al.* Hydraulic characteristics simulation and structural optimization of clean water reservoirs of WTP[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(1): 28-36 (in Chinese).
- [2] 汪健,王雷钧,张少国,等. 给水厂叠合式反应沉淀清水池工艺设计[J]. 中国给水排水, 2017, 33(12): 56-58.
WANG Jian, WANG Leijun, ZHANG Shaoguo, *et al.* Design of superposition reaction-sedimentation and clean-water tank in waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(12): 56-58(in Chinese).
- [3] 张君君. 自来水厂中次氯酸钠消毒的应用分析[J]. 黑龙江水利科技, 2022, 50(10): 140-142.
ZHANG Junjun. Application analysis of sodium hypochlorite disinfection in waterworks[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2022, 50(10): 140-142(in Chinese).
- [4] 张艳辉,李晓,王洪刚,等. 广东省某给水厂叠合构筑物设计[J]. 净水技术, 2021, 40(7): 154-159.
ZHANG Yanhui, LI Xiao, WANG Honggang, *et al.* Design of superimposed structures for a WTP in Guangdong Province[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(7): 154-159(in Chinese).
- [5] 张晏晏,吴少衡. 水处理构筑物下叠清水池的设计要点[J]. 净水技术, 2017, 36(12): 104-108.
ZHANG Yanyan, WU Shaoheng. Key points of design for clear water reservoir overlapped under water treatment constructions[J]. Water Purification Technology, 2017, 36(12): 104-108(in Chinese).
- [6] 刘文军. 示踪实验确定消毒剂在清水池内有效接触时间[J]. 城镇供水, 2021(5): 48-51.
LIU Wenjun. Measuring effective contact time of disinfectant in reservoir by tracer experiment [J]. City and Town Water Supply, 2021(5): 48-51(in Chinese).
- [7] 于洋,张玉,罗文斌,等. 液氯/二氧化氯联合消毒的消毒剂余量检测研究[J]. 中国给水排水, 2018, 34(13): 58-61.
YU Yang, ZHANG Yu, LUO Wenbin, *et al.* Detection of disinfectant residual in liquid chlorine/chlorine dioxide combined disinfection process [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(13): 58-61(in Chinese).
- [8] 方榕华,龚晓晔,陈辉,等. 次氯酸钠消毒在清泰水厂的运行研究分析[J]. 净水技术, 2021, 40(S1): 40-43.
FANG Ronghua, GONG Xiaoye, CHEN Hui, *et al.* Study on the operation of sodium hypochlorite disinfection in Qingtai Water Plant [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(S1): 40-43 (in Chinese).
- [9] ZEKANOVIĆ M S, BEGIĆ G, MEŽNARIĆ S, *et al.* Effect of UV light and sodium hypochlorite on formation and destruction of *Pseudomonas fluorescens* biofilm in vitro[J]. Processes, 2022, 10(10): 1901.
- [10] 王庆松,宋淑芬,柯丞东. 次氯酸钠消毒在大型水厂的优化与创新[J]. 净水技术, 2019, 38(8): 130-134, 138.
WANG Qingsong, SONG Shufen, KE Chengdong. Application and optimization of sodium hypochlorite disinfection in large water treatment plant [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(8): 130-134, 138 (in Chinese).

作者简介:陶阳(1983-),男,湖北黄冈人,博士研究生,主要研究方向为供水管网漏损监测及水质保障。

E-mail:taoyangfzu@126.com

收稿日期:2024-08-22

修回日期:2024-09-12

(编辑:任莹莹)