

余琴芳, 王怡帆, 杨淑娴, 等. 生态补水下污水处理消毒现状与优化建议[J]. 净水技术, 2025, 44(8): 30-37, 68.

YU Q F, WANG Y F, YANG S X, et al. Existing status and optimization suggestions for disinfection in wastewater treatment under ecological water compensation[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(8): 30-37, 68.

生态补水下污水处理消毒现状与优化建议

余琴芳^{1,*}, 王怡帆¹, 杨淑娴², 李杨煜²

(1. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北武汉 430014; 2. 武汉市城市排水发展有限公司, 湖北武汉 430070)

摘 要 【目的】随着污水资源化利用加快推进, 各地再生水利用率逐步增加, 再生水用于生态补水量也相应增加, 该背景下污水消毒工艺需同时考虑卫生学安全和生态安全。【方法】文章系统梳理了污水处理领域主流消毒工艺的应用现状, 详细对比分析了常用工艺(如次氯酸钠、紫外线等)的关键消毒参数、消毒效能及其存在的局限性。针对应用最广泛的次氯酸钠消毒工艺, 重点剖析了消毒副产物(DPBs)的生成机制和余氯残留规律, 并评估了其潜在的生态风险。在此基础上, 从风险防控的视角出发, 探讨了次氯酸钠消毒工艺的优化策略。【结果】文章对不同消毒工艺进行了综合比较与评估, 提出采用次氯酸钠消毒时, 应掌握加氯量与相关因素的关系, 及时调整加氯量; 采用紫外线消毒时, 消毒前应设有过滤工艺, 紫外线剂量应充足。解决生态补水下次氯酸钠消毒的DPBs和余氯残留风险, 加氯量精准控制是核心。研究进一步指出, 传统依赖余氯作为加氯量控制参数存在不足, 建议探索采用氧化还原电位(ORP)监测作为更优的控制手段。【结论】在“水资源、水环境、水生态”三水统筹背景下, 污水处理厂尾水进行生态补水具有重要意义, 文章旨在为生态补水场景下污水消毒工艺选择与优化提供科学依据与技术指导, 从而推动三水协同共治目标实现。

关键词 消毒工艺 余氯 氧化还原电位(ORP) 消毒副产物(DPBs) 加氯量精准控制

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)08-0030-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.08.004

Existing Status and Optimization Suggestions for Disinfection in Wastewater Treatment under Ecological Water Compensation

YU Qinfang^{1,*}, WANG Yifang¹, YANG Shuxian², LI Yangyu²

(1. Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430014, China;

2. Wuhan Urban Drainage Development Co., Ltd., Wuhan 430070, China)

Abstract [Objective] With accelerated advancement in wastewater resource recovery, the utilization rate of reclaimed water has gradually increased nationwide, leading to a corresponding rise in its application for ecological water replenishment. In this context, sanitary safety and ecological safety are simultaneously essential in the wastewater disinfection process. [Methods] This study systematically reviews the application status of mainstream disinfection processes in wastewater treatment. Detailed comparative analysis of key disinfection parameters, disinfection efficacy, and limitations of common processes (e.g., sodium hypochlorite disinfection, ultraviolet disinfection) are conducted. Focusing on the most widely used sodium hypochlorite disinfection, the research specifically analyzes the formation mechanisms of disinfection by-products (DBPs) and the patterns of residual chlorine. Based on this analysis, the potential ecological risks are assessed. From a risk mitigation perspective, optimization strategies for sodium hypochlorite disinfection are explored. [Results] A comprehensive comparison and evaluation of various disinfection processes is conducted, proposing that for sodium hypochlorite disinfection the relationship between chlorine dosage and influencing factors must be understood to enable timely dosage adjustments, while for ultraviolet disinfection, a filtration process is required prior to disinfection and sufficient ultraviolet dose must be ensured. Addressing DBPs formation and residual chlorine risks during ecological replenishment using sodium hypochlorite requires precise chlorine dosage control as the core solution. The study further indicates that the traditional reliance on

[收稿日期] 2024-07-22

[基金项目] 2023年度湖北省建设科技计划项目(2023-21569-149)

[通信作者] 余琴芳(1992—), 女, 研究方向为水处理技术研究及应用, E-mail: 602306910@qq.com。

residual chlorine as the control parameter for chlorine dosing is inadequate and suggests exploring oxidation-reduction potential (ORP) monitoring as a superior alternative control method. [**Conclusion**] Under the framework of Three Waters Coordination (integrated management of 'water resources, water environment, and water ecology'), the utilization of wastewater treatment plant effluent for ecological replenishment holds significant importance. This paper aims to provide a scientific basis and technical guidance for the selection and optimization of wastewater disinfection processes in ecological replenishment scenarios, thereby advancing the goals of synergistic governance of the Three Waters.

Keywords disinfection process residual chlorine oxidation-reduction potential (ORP) disinfection by-products (DPBs) precise control of chlorine dosage

近年来,我国治水思路发生重大变化,由以污染防治为主的水环境治理,向水资源、水环境、水生态“三水统筹”协同治理转变。我国污水处理厂出水水质逐步提升,为污水资源化利用奠定了良好基础,不仅能缓解我国水资源短缺局面,也能改善生态环境。2022年,我国城市再生水利用量为179.55亿 m^3 ,再生利用率为29%^[1],其中部分城市生态补水占比高达90%以上^[2]。污水处理厂尾水用于河道、湖泊、湿地等生态系统的补水,可以恢复和维持其生态功能和环境容量,提升城市生态环境品质。

消毒作为污水处理与再生利用的最终处理单元,是保障卫生学安全的重要手段。尽管消毒工艺发挥重要作用,但其应用也面临着诸多挑战。污水中成分复杂、水质波动较大、有机物浓度高,消毒效果受水质影响大,常用的氯消毒易生成有毒、有害的消毒副产物等问题,可能对水环境和水生态造成长期累积的影响。生态安全性是生态补水中重点关注的问题,处理好卫生学安全和生态安全的关系,是消毒工艺应用中亟待解决的问题。

本文旨在综述我国当前污水处理厂(再生水厂)消毒工艺应用现状与效能,结合氯衰减和消毒副产物生成机理指出生态补水下常用次氯酸钠消毒工艺存在的生态风险,并提出工艺优化的思考,为进一步提升污水处理与生态补水的安全性提供指导。

1 消毒工艺应用现状

1.1 消毒工艺调研

根据《2022年城镇水务统计年鉴(排水)》^[3],统计的我国797个城镇污水处理厂中,采用不同消毒工艺污水处理厂数量占比从高到低排序为次氯酸钠消毒(68.9%)、紫外消毒(11.8%)、二氧化氯消毒(9.0%)、液氯和消毒粉等其他含氯消毒剂(2.8%)、二氧化氯/液氯/臭氧+次氯酸钠组合消毒(5.4%)、紫外+次氯酸钠组合消毒(1.0%)、臭氧消

毒(0.6%)。根据李激等^[4]2020年对上海、江苏、浙江、福建等地59座城镇污水厂消毒设施调研,次氯酸钠消毒占55.9%、紫外+次氯酸钠组合消毒占23.7%、二氧化氯消毒占8.5%、紫外消毒占6.8%;其中采用单独次氯酸钠消毒的污水厂消毒接触时间不足15 min的占19%,不足30 min的占33%。综上可知,我国污水处理厂最常用的消毒工艺为次氯酸钠消毒,其他占比较高的消毒工艺为二氧化氯消毒、紫外消毒、紫外+次氯酸钠组合消毒。

根据美国各州污水处理设施设计标准,美国最常用的污水消毒工艺也为氯消毒。氯消毒剂最常用液氯和次氯酸钠/钙,标准规定氯消毒剂应尽可能快速混合(3 s内完成混合),在最大时流量下消毒接触时间不小于15 min。为保证氯消毒的生态安全,规定采用氯消毒的污水处理厂必须有脱氯措施。除氯消毒外,紫外线消毒在美国也有较多的应用。

1.2 次氯酸钠消毒调研

污水排放和生态补水一般都执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准(以下简称“一级A标准”)的粪大肠菌群数 $\leq 1\,000$ 个/L,处理工艺常采用“预处理+二级生化处理+深度处理”工艺。我国污水处理厂采用次氯酸钠消毒工艺的设计接触时间一般为30 min。次氯酸钠消毒效果与消毒剂量、接触时间、混合程度以及水温、pH、氨氮等有关。下面列举不同研究中次氯酸钠消毒接触时间为30 min、pH值为7.7~7.9下的达到一级A标准的消毒参数,如表1所示。

研究^[5-11]表明:粪大肠菌群去除率与有效氯投加量、接触时间、水温成正比;搅拌混合条件下的消毒效果优于静置的;不同研究中氨氮对消毒效果的影响有所不同;随着消毒前水中粪大肠菌群数增加,同样消毒参数下对细菌的去除率会降低。一般二沉池出水粪大肠菌群数为 $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$ 个/L,经过

表 1 满足一级 A 标准的次氯酸钠消毒参数及效果
Tab. 1 Parameters and Effect of Sodium Hypochlorite Disinfection to Meet First Grade A Standard

参考文献	消毒原水	原水粪大肠菌群数/(个·L ⁻¹)	水温/℃	氨氮/(mg·L ⁻¹)	混合条件	加氯量/(mg·L ⁻¹)	对数去除率
[5]	二沉池出水	2.2×10 ⁵	20~30	8~12	搅拌混合后静置	4	2.93log
[6]	二沉池出水	2.6×10 ⁵	17	0.05	摇匀混合后静置	3	2.5log
[7]	二沉池出水	6.3×10 ⁵	20~25	1.1	搅拌混合后静置	3	3log
[8]	滤池出水	2.6×10 ⁵	/	2.3~5.8	搅拌	4	2.5log
[9]	滤池出水	2.0×10 ⁵	/	2.3~3.4	搅拌	4	2.4log
[10]	滤池出水	6.9×10 ⁴	/	1.5~3.8	混合池混合	2	2.4log
[11]	滤池出水	3.4×10 ⁴	27	0.3	搅拌	0.75	4.5log
			13			0.75	4.5log
		5.9×10 ⁴	27		静置	2	3.1log
			13			2	1.5log

滤池深度处理后粪大肠菌群数进一步降低为 $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$ 个/L。当滤池出水粪大肠菌群 1×10^4 个/L 时,消毒工艺需实现去除率为 2log,在非低温季节一般加氯量为 2 mg/L 可实现达标;当滤池出水粪大肠菌群为 1×10^5 个/L 时,消毒工艺需实现去除率为 3log,在非低温季节一般加氯量为 3~4 mg/L,可实现达标;在低温季节,加氯量需适当增加。《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)规定:污水处理厂加氯量应根据试验确定,无试验资料时,可采用 5~15 mg/L,再生水的加氯量应按卫生学指标和余氯量确定。标准中推荐的加氯量数值相较于实际需求偏高。李激等^[4]调研 32 座采用次氯酸钠消毒、消毒接触时间为 30 min 的污水处理厂,加氯量为 1.5~6.0 mg/L。本文调研某中部城市 3 座污水处理厂,2022 年日均加氯量 95% 置信区间分别为 1.5~7.0、

2.5~5.5、5.4~9.0 mg/L,加氯量高,未进行精准加氯控制。可见,采用次氯酸钠消毒的污水处理厂加氯量优化仍有较大空间。

1.3 其他消毒工艺调研

其他常用的消毒工艺还包括二氧化氯消毒、紫外线消毒、紫外+次氯酸钠组合消毒。

二氧化氯消毒效果好且稳定,不易受水中有机物和 pH 的影响,但是其成本较高、生产过程较复杂、现场安全管控要求较高,限制了其广泛使用。

紫外线消毒快速、节省占地且不会产生消毒副产物,近些年也已经在污水处理厂中被广泛应用。紫外消毒的效果取决于紫外剂量(紫外强度×停留时间)以及污水紫外穿透率。本文列举不同研究中采用紫外消毒达到一级 A 标准的消毒参数,如表 2 所示。

表 2 满足一级 A 标准的紫外线消毒参数及效果
Tab. 2 Parameters and Effect of Ultraviolet Disinfection to Meet First Grade A Standard

参考文献	消毒原水	原水粪大肠菌群数/(个·L ⁻¹)	浑浊度或悬浮物	消毒条件	紫外剂量/(mJ·cm ⁻²)	对数去除率
[3]	二沉池出水	2.2×10 ⁵	浑浊度<2 NTU 悬浮物质量浓度为 4~10 mg/L	中试(水渠内)	60	3log
[12]	二沉池出水	/	浑浊度为 1.9 NTU	小试,搅拌	33	1.4log
[5]	厂 1 二沉池出水	6.6×10 ⁵	浑浊度<5 NTU	消毒渠	51	2.9log
	厂 2 滤池出水	(1.0~2.5)×10 ⁵	浑浊度为 0.6~1.1 NTU	消毒渠	21.6	3.0log~3.6log
	厂 3 滤池出水	(6.3~10.0)×10 ⁵	浑浊度为 0.8~1.2 NTU	消毒渠	29	3.3log~4.4log
[7]	滤池出水	2.6×10 ⁵	浑浊度为 1.4~4.3 NTU	小试,搅拌	12	2.8log
[9]	滤池出水	2.0×10 ⁵	浑浊度为 1.7~2.9 NTU	小试,搅拌	12	2.8log
[13]	膜生物反应器(MBR)出水	2.2×10 ⁵	浑浊度为 0.2~0.4 NTU	中试(封闭腔体内)	25	2.7log

上述研究表明,粪大肠菌群去除率与紫外剂量成正比。对于执行一级 A 标准的污水处理厂,消毒前设有过滤工艺,达到 3log 的去除率需要的紫外线剂量为 12~29 mJ/cm²,对于二沉池出水直接紫外线消毒,达到 3log 的去除率需要紫外线剂量较高为 51~69 mJ/cm²。《城镇给排水紫外线消毒设备》(GB/T 19837—2019)规定:为达到一级 A 标准峰值流量时,紫外线有效剂量不应低于 20 mJ/cm²。《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)规定:二级处理的出水紫外线消毒有效剂量宜为 15~25 mJ/cm²,再生水宜为 24~30 mJ/cm²。文献^[14]调研发现,执行一级 A 标准的污水处理厂,紫外消毒的设计剂量一般为 20~30 mJ/cm²。实际工程运行中,紫外灯管使用时间延长导致的灯管老化以及石英套管结垢,均会降低辐射剂量,水中悬浮物、色度物质、有机物会降低紫外穿透率。我国污水处理厂的紫外消毒系统存在粪大肠菌群不达标的隐患。

另外,污水厂紫外线消毒不能提供持久的消毒能力,如果出现紫外消毒剂量不足或受到水中悬浮物等因素影响时,粪大肠菌群会处于亚致死状态。该部分粪大肠菌群在脱离紫外线照射并在可见光下,可快速修复由紫外线造成的脱氧核糖核酸损伤而复活,紫外消毒剂量越低复活率越高,

复活率随着光照强度的增加以及光照时间的延长而增加^[9]。

为了保证出水粪大肠菌群数达标,很多采用紫外消毒的污水处理厂增设次氯酸钠投加设施,构成紫外-次氯酸钠组合消毒工艺。研究^[7,9,15-16]表明,在紫外线剂量为 24 mJ/cm² 消毒后,投加 1 mg/L 次氯酸钠反应 1 min,可将粪大肠菌群降低到 480 个/L,且显著抑制粪大肠菌群的光复活;紫外剂量为 12 mJ/cm² 消毒后,投加 2 mg/L 的次氯酸钠反应 30 min,可将粪大肠菌群降低到 200 个/L 以下(去除率为 3.2log);紫外剂量为 9 mJ/cm² 消毒后投加 3 mg/L 的次氯酸钠反应 30 min,可将粪大肠菌群降低到 900 个/L;紫外剂量为 40 mJ/cm² 后,投加 1 mg/L 的二氧化氯反应 10 min,48 h 内未出现光复活导致粪大肠菌群数增加。紫外-次氯酸钠组合消毒工艺设计和运行中,如何平衡紫外线强度和次氯酸钠投加量,以确保整体消毒效果、副产物控制以及经济性,仍有待探讨。

1.4 不同消毒工艺比较

不同消毒工艺各有优缺点,常用消毒工艺比较如表 3 所示,根据污水厂规模、运行管理水平、污水处理目标等选择。生态补水场景下,建议采用紫外线主消毒,并配备次氯酸钠投加装置。

表 3 常用消毒工艺特点

Tab. 3 Characteristics of Commonly Used Disinfection Processes

消毒工艺	建设成本	运行成本	运营管理难度	总体评价	备注
次氯酸钠	消毒池土建、药剂储罐和加药设备投资,土建投资较大	按有效氯投加量为 4 mg/L 计,运行成本约为 0.042 元/m ³	操作简便,需控制次氯酸钠储存时间	消毒效果较好,投资成本低,运行成本适中	采购 10% 次氯酸钠产品
二氧化氯	消毒池土建、药剂储罐、二氧化氯发生器、加药设备投资,土建投资和 设备投资均较大	按有效氯投加量约为 2.5 mg/L 计,运行成本约为 0.021 元/m ³	原料采购、储存、使用手续繁琐,有安全风险	消毒效果好,投资成本高,运行成本低	用盐酸和次氯酸钠现场制备
紫外线	土建投资省,设备投资较大	按紫外剂量为 25 mJ/cm ² 计,运行成本(电费)为 0.014 元/t	紫外灯管需经常清洗与定期更换	消毒效果受水质影响较大,无需投加化学药剂,不产生消毒副产物	
紫外线+次氯酸钠	投资大	按紫外剂量为 25 mJ/cm ² ,有效氯投加量为 1 mg/L 计,运行成本约为 0.024 元/m ³	需平衡好紫外剂量与氯投加量	消毒效果能保障,消毒副产物生成量少	

2 次氯酸钠消毒反应机理与生态风险

2.1 余氯消耗与消毒副产物形成

次氯酸钠消毒是目前应用最广泛的污水消毒方式,氯在灭活微生物的同时会与水中有机物、无机物

生成有毒、有害的消毒副产物。氯消毒剂对微生物的灭活效果主要取决于消毒完成时的余氯浓度和消毒剂与水的接触时间。余氯是指水加氯消毒接触反应一段时间后水中所余留的有效氯。氯衰减一般符

合一级动力学模型^[17],如式(1)。

$$C_A = C_{A,0} \times \exp(-k_A t) \quad (1)$$

其中: C_A —— t 时刻余氯质量浓度, mg/L;

$C_{A,0}$ ——初始氯质量浓度, mg/L;

k_A ——余氯衰减系数, min^{-1} ;

t ——消毒接触时间, min。

由式(1)可知,经过一段时间反应后余氯浓度与初始氯浓度和余氯衰减系数有关,尾水余氯一般都随氯投加量增加而增加。余氯衰减系数与温度及水中耗氯物质(有机物、氨氮等)浓度有关,水温和耗氯物质浓度越高,氯与水中耗氯物质反应速率越高,余氯衰减系数越高,残留余氯越低。根据 Chick-Watson 定律,微生物灭活动力学如式(2)。

$$N_t/N_0 = \exp(-k' C_A n t) \quad (2)$$

其中: N_t —— t 时刻微生物浓度, CFU/mL 或 MPN/(100 mL);

N_0 ——初始微生物浓度, CFU/mL 或 MPN/(100 mL);

k' ——灭活速率常数, $\text{L}^n/(\text{mg}^n \cdot \text{min})$;

n ——动力学系数。

由式(2)可知,经过一段时间反应后出水粪大肠菌群数与初始粪大肠菌群数、灭活速率常数、余氯浓度有关,而水温和耗氯物质浓度会影响余氯浓度,从而影响一定加氯量下的灭菌效果。

建立消毒副产物生成模型对于消毒副产物的控制具有积极作用,消毒副产物生成模型建立方法主要包括2类:一是基于对于不同水质试验积累的大量数据进行统计和回归得到经验模型,经验模型研究表明,消毒副产物生成量与加氯量、前体物浓度、反应时间等因素相关;二是基于消毒剂与前体物反应过程的动力学模型,一般符合一级动力学模型^[18],如式(3)。

$$C_B = C_{B,0} + k_B C_{E,0} C_{A,0} \times [1 - \exp(-k_A t)] \quad (3)$$

其中: C_B —— t 时刻消毒副产物质量浓度, mg/L;

$C_{B,0}$ ——消毒前消毒副产物质量浓度, mg/L;

k_B ——消毒副产物生成系数, L/mg ;

$C_{E,0}$ ——消毒副产物前体物质量浓度, mg/L。

由式(3)可知,消毒副产物生成量随着氯投加量、反应时间、消毒副产物前体物浓度增加而增加。华东地区5个城市的12个典型氯消毒城市污水处理厂中,浓度较高的主要消毒副产物:卤乙酸为 $6.6 \sim 120.0 \mu\text{g/L}$ (平均质量浓度为 $47.0 \mu\text{g/L}$)、三卤甲烷为 $2.3 \sim 61.0 \mu\text{g/L}$ (平均质量浓度为 $28.0 \mu\text{g/L}$)^[19]。刘超超^[20]研究发现,在砂滤出水可溶性有机碳(DOC)为 $3.4 \sim 7.1 \text{ mg/L}$ (COD平均值为 14 mg/L)、消毒时间为30 min、加氯量为 $5.4 \sim 12.0 \text{ mg/L}$ 时,三卤甲烷质量浓度随温度变化为 $36 \sim 144 \mu\text{g/L}$,其中三氯甲烷占 $64\% \sim 89\%$;王俭龙^[10]研究发现,在砂滤出水 DOC 质量浓度为 $5.8 \sim 7.5 \text{ mg/L}$ 、消毒时间为30 min、加氯量从 1 mg/L 增加到 5 mg/L 时,三卤甲烷质量浓度从 $7 \mu\text{g/L}$ 增加至 $49 \mu\text{g/L}$,其中三氯甲烷占 83% ;权维^[5]发现,在改良序批式活性污泥工艺出水 COD 为 25 mg/L 、消毒时间为30 min、加氯量从 1 mg/L 增加到 14 mg/L 时,三卤甲烷质量浓度仅从 $2.2 \mu\text{g/L}$ 增加至 $4.6 \mu\text{g/L}$,生成量很低。

2.2 生态补水下消毒副产物与余氯生态风险

在我国,污水消毒后排放进入地表水体或者作为河湖等水体的生态补水等,甚至间接补给饮用水水源。消毒副产物难自然降解,进入水环境后会在环境中积累,造成持久影响,地表水中已检测到不同浓度的各类消毒副产物^[21-22]。Larry 等^[23]发现,氯消毒改造为紫外线消毒可以大幅度降低消毒副产物的种类及浓度,受纳水体卤代烃由13种可以降低到1种,平均质量浓度由 $1.4 \mu\text{g/L}$ 降低到 $0.1 \mu\text{g/L}$ 。消毒副产物在饮用水领域已有很多研究积累,并对其风险与控制有足够的重视^[24],而污水处理领域尚未得到充分重视和关注。随着对环境健康和生态安全意识的加深,新污染物治理行动的开展,预计污水处理消毒副产物将逐步得到重视。

次氯酸钠消毒后水中往往残留一定量的余氯,具有强氧化性的余氯进入水体可能危害水生生态系统^[25]。首先,余氯超过一定浓度可破坏细胞壁或蛋白质,从而对水生生物产生组织损伤、致死等急性毒性作用^[26],毒性效应受余氯浓度、暴露时间、水体温度等因素的影响,随余氯浓度升高,余氯对水生生物的毒性增强。对部分鱼类的幼鱼,余氯在较低浓度下即能产生急性毒性效应,如其对银鲑幼鱼 96 h 下半致死质量浓度为 0.07 mg/L (总余氯),对黑头呆

鱼幼鱼 96 h 下半致死质量浓度为 0.08 mg/L(总余氯)^[26]。其次,地表水体中溶解性有机物含量较多,而余氯具有高反应活性,余氯进入水体会与水体中有机物继续反应生成三卤甲烷、卤乙酸等消毒副产物^[27-28]。因此,余氯排入水体可能引起二次生态风险。美国加利福尼亚州规定污水处理厂出水余氯应控制在 0.1 mg/L 以下,而我国污水处理厂普遍执行的《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中未规定余氯排放限值。据调研,我国污水处理厂出水余氯普遍高于 0.1 mg/L。

3 次氯酸钠消毒优化策略

3.1 加氯量传统控制参数

鉴于次氯酸钠消毒存在消毒副产物和余氯残留的生态风险,而加氯量是直接影响因素,污水处理厂普遍存在加氯过量的情况,增加了消毒成本,同时会增加消毒副产物和余氯浓度。通过精准控制加氯量来减少余氯残留和消毒副产物生成量,是生态补水需求下采用次氯酸钠消毒的污水处理厂应关注的重要方向。

目前,污水处理厂次氯酸钠消毒投加量通常根据粪大肠菌群数、消毒后出水余氯浓度、水质参数等调整加氯量,加氯量精准控制的研究和应用较少。粪大肠菌群数是评判消毒效果直接指标,但是其检测时间需 24 h,无法作为及时调整加氯量的依据,水厂常用出水余氯作为次氯酸钠消毒的控制参数。

污水消毒前水质复杂且波动较大,依据出水游离余氯调整加氯量存在局限。例如,当水中氨氮浓度升高时,投加的次氯酸钠会迅速与氨氮反应生成氯胺,消毒能力降低,根据折点加氯原理,次氯酸钠投加量小于折点前,出水中游离余氯很低,总余氯基本等于加氯量,若以游离余氯控制加氯量会导致加氯量很大;另外,游离余氯包含 HOCl 和 OCl⁻,pH 增加时,氧化性较差的 OCl⁻增加,氧化灭菌能力减弱,仅检测游离余氯浓度不能准确反映其消毒能力。另外,部分污水处理厂接触消毒时间较长如 60 min,消毒后出水游离余氯质量浓度为 0.05 mg/L 以下,亦能满足粪大肠菌群数<1 000 个/L 的标准^[5],受余氯监测仪器精度限制,这种情况下通过余氯准确控制加氯量很难实现。

3.2 加氯量控制新参数

鉴于出水游离余氯作为消毒控制参数的局限

性,采用氧化还原电位(ORP)控制也是一种可行的方法。ORP 取决于水中氧化态/还原态物质的种类、浓度与活性,测试的是有效氧化/还原能力,考虑了水中 pH、余氯种类、有机物和氮浓度等能影响杀菌效果的多种化学要素,ORP 高表明水中氧化活性较高。污水氯消毒系统中发挥消毒灭菌作用的成分主要包括 HOCl、OCl⁻和 NH₂Cl。这 3 种物质的标准 ORP 和灭活性能如图 1 所示^[29],影响消毒效果的因素很多,图 1 中灭活性的数值为近似值。由图 1 可知,不同形态氯的灭活能力有数量级差异,比灭活系数与 ORP 存在近似线性关系。这表明相比于氯浓度,ORP 与消毒能力相关性更强,污水厂出水微生物水平与 ORP 关系的报道^[30-32]也支撑了该结论。

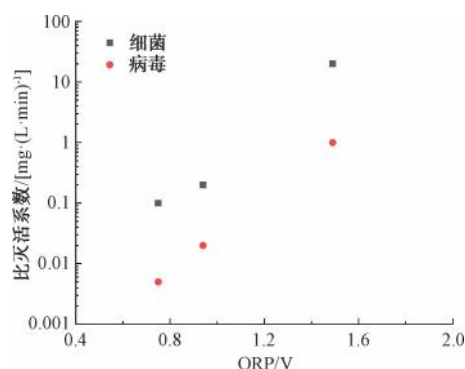


图 1 含氯消毒剂的比灭活系数和标准 ORP

Fig. 1 Specific Inactivation Coefficient of Chlorine Disinfectants and Standard ORP

美国某污水厂消毒目标为出水大肠埃希氏菌≤2.2 MPN/(100 mL),氯消毒和脱氯系统由余氯控制改为 ORP 控制,ORP 设定值为 520 mV,实现氯用量减少了 47%^[29];另一污水厂消毒目标为出水粪大肠菌群≤200 CFU/(100 mL),采用 ORP 控制氯消毒系统后,在 ORP 设定值 530 mV 和 550 mV 下,分别降低氯用量 62% 和 47%,ORP 设定点可为 500~530 mV^[33]。上述研究表明,污水处理厂可根据具体的水质情况和消毒目标合理设定 ORP 目标值,实现加氯量自动控制。我国江苏常州多年污水消毒运行经验和相关研究^[4]也表明,执行一级 A 排放标准的污水处理厂消毒后出水 ORP>600 mV 时,出水粪大肠菌群数<1 000 个/L。

3.3 其他优化措施

我国污水处理厂次氯酸钠多投加在接触消毒池前端或者消毒池进水管,药剂混合效果较差。研

究^[11]表明,好的混合条件可提高消毒效率,通过充分利用游离氯的强杀菌率和有效促进氯向细菌体的传质作用,从而实现高效的消毒作用。可采用管道动态混合器或设置机械搅拌混合池等混合措施,确保次氯酸钠在污水中快速、均匀地分散,从而减少消毒剂投加量。另外,消毒池内一般存在短流、死区等现象,会降低消毒剂与水的有效接触时间,可在消毒池内设置隔板墙、在入口处设置花墙、在拐弯处设置导流墙等提升有效接触时间。

另外,优化消毒前污水处理工艺的运行,提高其对有机物、氨氮、浑浊度等物质的去除率,减少其对消毒工艺的干扰,从而减少加氯量。同时,消毒前有机物去除率的增加,也可减少消毒副产物前体物的量,从而减少消毒副产物生成量^[34-35]。

4 结论与展望

次氯酸钠、二氧化氯、紫外线及组合消毒等不同消毒工艺各有优缺点,污水处理厂在进行消毒工艺选择、设计与运行时,应充分考虑其特点,保证消毒的安全性及经济性。如采用次氯酸钠消毒时,应避免加氯量偏高,应掌握加氯量与相关因素的关系,及时调整加氯量;另外,氯消毒剂与水的快速混合和有效接触也是提升消毒效率的良好措施。采用紫外线消毒时,消毒前应设有过滤工艺,紫外线剂量选择还应考虑粪大肠菌群的光复活,保证消毒剂量充足,如无法满足稳定达标要求应设置次氯酸钠等消毒作为补充。

“三水统筹”背景下,污水处理厂尾水进行生态补水具有重要意义,但是其长期生态风险评估也需要进一步研究。对于最常用的次氯酸钠消毒,生态补水下存在消毒副产物和余氯残留风险,该场景下加氯量精准控制应重点关注,常用的余氯反馈控制加氯量具有局限性,建议可采用 ORP 作为控制参数,各厂可根据自身情况探索合理的 ORP 设定值。紫外-次氯酸钠组合消毒在同时保障卫生安全和生态安全方面具有优势,但是如何平衡紫外消毒和氯消毒剂量以兼顾安全性和经济性,仍有待探讨。另外,更安全高效的消毒技术也需要进一步研究与应用。

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城乡建设统计年鉴 2022[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Urban and rural construction statistics yearbook 2022 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.

[2] 北京市水务局. 2022 北京市水务统计年鉴[R/OL]. (2023-08-30) [2024-07-22]. <https://nj.tjj.beijing.gov.cn/nj/main/2022-tjnj/zk/e/zk/indexce.htm>.
Beijing Water Authority. Beijing water statistics yearbook 2022 [R/OL]. (2023-08-30) [2024-07-22]. <https://nj.tjj.beijing.gov.cn/nj/main/2022-tjnj/zk/e/zk/indexce.htm>.

[3] 中国城镇供水排水协会. 2022 年城镇水务统计年鉴(排水)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
China Urban Water Association. Urban water statistics yearbook 2022 (wastewater) [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2022.

[4] 李激, 王燕, 熊红松, 等. 城镇污水处理厂消毒设施运行调研与优化策略[J]. 中国给水排水, 2020, 36(8): 7-19.
LI J, WANG Y, XIONG H S, et al. Investigation and optimization strategies on the operation of disinfection facilities in municipal WWTPs[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(8): 7-19.

[5] 权维. 污水回用处理中消毒技术的试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
QUAN W. Experimental research for disinfected methods in the course of wastewater reuse [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.

[6] 王慕, 谈振娇, 李激, 等. 城镇污水处理厂次氯酸钠消毒效果的影响因素研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(1): 22-27.
WANG M, TAN Z J, LI J, et al. Influence factors of sodium hypochlorite disinfection performance in municipal wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(1): 22-27.

[7] 濮晨熹. 城市污水处理厂消毒技术应用研究[D]. 广州: 广州大学, 2012.
PU C X. Study on application of disinfection in urban sewage treatment plants [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2012.

[8] 李腾. UV-NaClO 联合消毒对污水中病原微生物灭活及 ARGs 去除效果研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.
LI T. The inactivation effect of UV-NaClO combined disinfection on pathogenic microorganisms and ARGs removal in sewage [D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2021.

[9] 周琳, 李子浩, 李沛卓, 等. UV-NaClO 顺序消毒对污水中大肠菌群的去活效果[J]. 环境工程学报, 2022, 16(10): 3213-3220.
ZHOU L, LI Z H, LI P Z, et al. Inactivation of coliforms in wastewater by UV-NaClO disinfection [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(10): 3213-3220.

- [10] 王俭龙. 城市污水再生处理过程消毒技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.
WANG J L. Research on disinfection technology in municipal wastewater reusing treatment process [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014.
- [11] 杨敏, 尚巍, 李鹏峰, 等. 城镇污水处理厂次氯酸钠消毒影响因素及优化研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(9): 76-81.
YANG M, SHANG W, LI P F, et al. Influencing factors of sodium hypochlorite disinfection and its optimization in municipal wastewater treatment plants [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(9): 76-81.
- [12] 张崇森, 苗艳辉, 张庆珮, 等. 氯消毒和紫外消毒对城市污水处理厂二沉池出水中粪大肠菌群耐药性的影响[J]. 环境科学研究, 2014, 27(4): 422-426.
ZHANG C M, MIAO Y H, ZHANG Q P, et al. Effects of chlorination and ultraviolet disinfection on antibiotic resistance of *Fecal coliforms* in secondary settling tank effluent of municipal wastewater treatment plant [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(4): 422-426.
- [13] 李鑫玮, 李魁晓, 郑晓英, 等. MBR出水氯、紫外、臭氧单独与组合消毒[J]. 环境工程学报, 2014, 8(11): 4681-4686.
LI X W, LI K X, ZHENG X Y, et al. Disinfection of MBR effluents by chlorination, ultraviolet irradiation, ozonation and combination technologies [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(11): 4681-4686.
- [14] 刘文君. 紫外线消毒原理、设计和应用[J]. 中国建设信息, 2009(4): 18-18.
LIU W J. Principle, design and application of ultraviolet disinfection [J]. China Construction Information, 2009(4): 18-18.
- [15] LU H, WANG X Y, LI X Q, et al. Study on the disinfection efficiency of the combined process of ultraviolet and sodium hypochlorite on the secondary effluent of the sewage treatment plant [J]. Processes, 2022, 10(8): 1622.
- [16] 刘喜坤, 王晓, 陈红娟, 等. 再生水紫外线/二氧化氯联合消毒效果试验研究[J]. 环境工程, 2017, 35(5): 40-43.
LIU X K, WANG X, CHEN H J, et al. Study of the combined infection effect of ultraviolet and chlorine dioxide on recycled water [J]. Environmental Engineering, 2017, 35(5): 40-43.
- [17] 侍路梦, 吴慧芳, 王玉敏, 等. 供水管网余氯衰减变化规律及模型研究[J]. 中国给水排水, 2020, 36(1): 52-57, 62.
SHI L M, WU H F, WANG Y M, et al. Decay pattern and model of residual chlorine in water supply network [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(1): 52-57, 62.
- [18] ZHAO Y Y, YANG Y J, SHAO Y, et al. The dependence of chlorine decay and DBP formation kinetics on pipe flow properties in drinking water distribution [J]. Water Research, 2018, 141: 32-45. DOI: 10.1016/j.watres.2018.04.048.
- [19] LI Z G, LIU X Y, HUANG Z J, et al. Occurrence and ecological risk assessment of disinfection byproducts from chlorination of wastewater effluents in East China [J]. Water Research, 2019, 157: 247-257. DOI: 10.1016/j.watres.2019.03.072.
- [20] 刘超超. 污水再生消毒副产物预测模型及其前体物特性分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
LIU C C. Disinfection by-products prediction model and its precursor characteristic analysis in wastewater reclamation process [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.
- [21] 张亚凤. 污水厂尾水中氯消毒副产物对浮游生物的影响研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022.
ZHANG Y F. Effects of chlorine disinfection by-products in sewage treatment plant effluent on the plankton [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.
- [22] 罗莹, 刘娜, 孙善伟, 等. 我国地表水中典型DBPs的暴露水平及生态风险[J]. 中国环境科学, 2021, 41(4): 1806-1814.
LUO Y, LIU N, SUN S W, et al. The exposure level and ecological risk of typical DBPs in surface water in China [J]. Chinese Environmental Science, 2021, 41(4): 1806-1814.
- [23] LARRY B B, MICHELLE L H, ALAN M V, et al. Impact of wastewater infrastructure upgrades on the urban water cycle: Reduction in halogenated reaction byproducts following conversion from chlorine gas to ultraviolet light disinfection [J]. Science of the Total Environment, 2015, 529: 264-274. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.04.112.
- [24] 楚文海, 肖融, 丁顺克, 等. 饮用水中的消毒副产物及其控制策略[J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5059-5074.
CHU W H, XIAO R, DING S K, et al. Disinfection by-products in drinking water and their control strategies: A review [J]. Environmental Science, 2021, 42(11): 5059-5074.
- [25] ZHANG H, TANG W Z, CHEN Y S, et al. Disinfection threatens aquatic ecosystems [J]. Science, 2020, 368(6487): 146-147.
- [26] 马瑜, 杨超, 陈玲. 地表水中余氯的潜在生态风险及监测必要性初探[J]. 中国给水排水, 2021, 37(14): 8-12.
MA Y, YANG C, CHEN L. Preliminary study on the potential ecological risk of residual chlorine in surface water and its monitoring necessity [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(14): 8-12.
- [27] 楚文海, 沈杰, 栾鑫森, 等. 疫情防控期间污水处理厂强化消毒下的水环境次生风险实证研究[J]. 给水排水, 2020, 46(6): 1-5.
CHU W H, SHEN J, LUAN X M, et al. Study on secondary risk of water environment under enhanced disinfection of wastewater treatment plant during epidemic prevention and control [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(6): 1-5.

(下转第68页)

1,1,1), 水压可靠性为(1,1,1,1,1,1,1,1), 余氯可靠性为(0.00, 0.02, 1.00, 0.04, 0.98, 0.04, 0.99, 0.15), 水龄可靠性为(1.00, 0.98, 0.99, 1.00, 0.98, 0.04, 0.99, 0.15), 供水系统的综合可靠性为0.38。

3 结论

(1)供水管网可靠性应综合考虑节点水力指标和水质指标, 不仅应包括水力可靠性, 如水压可靠性、水量可靠性等, 还应包括水质可靠性, 如余氯可靠性、水龄可靠性等。

(2)针对供水管网对水压、水量、余氯和水龄的要求, 本文提出基于节点可靠性的管网系统可靠性, 可以分析供水管网在动态变化下的系统可靠性。

(3)供水管网可靠性应考虑节点在供水管网中的重要性, 节点重要性与节点在供水管网的拓扑位置关系密切。今后研究应结合节点拓扑结构, 如节点介数、节点度数、接近中心性等赋予不同的权重, 而不是仅仅根据节点需水量赋权。

(4)针对参数的不确定性, 本文仅考虑了管道粗糙度系数、余氯主体水衰减系数、余氯管壁衰减系数、节点需水量的随机分布, 今后还应考虑参数的多重不确定性和多维参数的不确定性对供水管网可靠性的影响。

参考文献

[1] 曾文, 汪鼎雄, 陈金娅. 利用带流向阀门拓扑模型评价供水

管网可靠性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(2): 222-227.

ZENG W, WANG D X, CHEN J Y. Reliability evaluation of water distribution networks using a valve topology model [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(2): 222-227.

[2] TODINI E. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach [J]. Urban Water, 2000, 2(2): 115-122.

[3] PRASAD T D, HONG S H, PARK N. Reliability based design of water distribution networks using multi-objective genetic algorithms [J]. Journal of Civil Engineering, 2003, 7(3): 351-361.

[4] 徐祖信, 刘遂庆, R Guercio. 熵在水分配系统优化设计中的应用[J]. 同济大学学报, 1997, 25(1): 71-76.

XU Z X, LIU S Q, GUERCIO R. Application of entropy in the optimal design of water distribution system [J]. Journal of Tongji University, 1997, 25(1): 71-76.

[5] CIMORELLI L, MORLANDO F, COZZOLINO L, et al. Comparison among resilience and entropy index in the optimal rehabilitation of water distribution networks under limited-budgets [J]. Water Resources Management, 2018(32): 3997-4011.

[6] WAGNER J M, SHAMIR U, MARKS D H. Water distribution reliability: Simulation methods [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1988, 114(3): 276-294.

[7] GUPTAL R, BHAVEZ P R. Comparison of methods for predicting deficient-network performance [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1996, 122(3): 214-217.

(上接第 37 页)

[28] 宋凌志, 施周, 徐勇, 等. 西江原水有机物成分解析及其消毒副产物生成特性[J]. 中国给水排水, 2019, 35(21): 32-38.

SONG L Z, SHI Z, XU Y, et al. Analysis of organic compounds in Xijiang raw water and characteristics of disinfection by-products formation [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(21): 32-38.

[29] KIM Y H, HENSLEY R. Effective control of chlorination and dechlorination at wastewater treatment plants using redox potential [J]. Water Environment Research, 1997, 69(5): 1008-1014.

[30] REYNAERT E, NAGAPPA D, SIGRIST J A, et al. Ensuring microbial water quality for on-site water reuse: Importance of online sensors for reliable operation [J]. Water Research X, 2024, 22: 100215. DOI: 10.1016/j.wroa.2024.100215.

[31] REYNAERT E, STEINER P, YU Q X, et al. Predicting microbial water quality in on-site water reuse systems with online sensors [J]. Water Research, 2023, 240: 120075. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120075.

[32] REYNAERT E, GRETENER F, JULIAN T R, et al. Sensor setpoints that ensure compliance with microbial water quality targets for membrane bioreactor and chlorination treatment in on-site water reuse systems [J]. Water Research X, 2023, 18: 100164. DOI: 10.1016/j.wroa.2022.100164.

[33] RICHARD D, ZIMMERMAN R A, PADMANABHAN G. Evaluation of ORP-based chlorination for wastewater treatment plant effluent disinfection [C]. RiO: 20th Congresso Brasil De Engenharia Sanitaria e Ambiental, 2015.

[34] REN X L, WANG F, ZHANG Y J, et al. Characterization and disinfection by product formation of dissolved organic matter in anaerobic-anoxic-oxic membrane bioreactor (AAO-MBR) process [J]. Water, 2023, 15(6): 1076.

[35] SONG Q Y, GRAHAM N, TANG Y N, et al. The role of medium molecular weight organics on reducing disinfection by-products and fouling prevention in nanofiltration [J]. Water Research, 2022, 215: 118263. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118263.