

述评与讨论

城镇污水处理厂消毒设施运行调研与优化策略

李 激^{1,2,3}, 王 燕¹, 熊红松⁴, 谈振娇⁵, 吕 贞⁶, 郑凯凯¹, 邹吕熙¹,
罗国兵⁷, 叶 亮⁸, 张正豪¹, 王 慕⁵

(1. 江南大学 环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏省厌氧生物技术重点实验室, 江苏 无锡 214122; 3. 江苏高校水处理技术与材料协同创新中心, 江苏 苏州 215009; 4. 武汉市城市排水发展有限公司, 湖北 武汉 430073; 5. 无锡市市政公用环境检测研究院有限公司, 江苏 无锡 214000; 6. 常州市排水管理处, 江苏 常州 213017; 7. 无锡市城市供排水监测站, 江苏 无锡 214011; 8. 无锡市水务集团有限公司, 江苏 无锡 214000)

摘 要: 我国《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)将粪大肠菌群数列为出水基本控制指标之一,要求污水处理过程中必须进行消毒,以降低病原微生物对人畜产生的健康风险。为了解污水处理消毒设施运行的效果,对全国56座城镇污水处理厂进行了调研,分析了消毒单元存在的问题并提出应对措施。调研结果表明,采用次氯酸钠和二氧化氯作为消毒剂的污水处理厂数量占调研总量的91.6%。次氯酸钠和二氧化氯消毒的优势在于持久性效果较好以及运行管理相对简单。但调研数据显示,72%的污水处理厂有效氯投加量为1~4 mg/L,14%的污水处理厂有效氯投加量过高,超过了6 mg/L;消毒接触时间 ≥ 30 min的污水处理厂仅占43%,消毒接触时间 ≤ 10 min和 ≤ 2 min的污水处理厂分别占28%和17%;此外,50%的污水处理厂未对消毒后的总余氯含量进行测试,在已检测该指标的污水处理厂中,总余氯浓度 ≥ 0.20 mg/L的占70%。针对调研中发现的问题,结合文献报道以及试验数据,提出了污水处理厂消毒设施优化运行建议,并展望了未来的主要研究方向,以期城镇污水处理厂更合理地设计、运行消毒设施提供理论依据和技术指导。

关键词: 城镇污水处理厂; 消毒; 次氯酸钠; 余氯; 粪大肠菌群

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)08-0007-13

Investigation and Optimization Strategies on the Operation of Disinfection Facilities in Municipal WWTPs

LI Ji^{1,2,3}, WANG Yan¹, XIONG Hong-song⁴, TAN Zhen-jiao⁵, LÜ Zhen⁶,
ZHENG Kai-kai¹, ZOU Lü-xi¹, LUO Guo-bing⁷, YE Liang⁸, ZHANG Zheng-hao¹,
WANG Mu⁵

(1. School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Anaerobic Biotechnology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07202001-004); 江苏省重点研发计划(社会发展)科技示范工程项目(BE2015622)

3. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Water Treatment Technology & Material, Suzhou 215009, China; 4. Wuhan Urban Drainage Development Co. Ltd., Wuhan 430073, China; 5. Wuxi Municipal Public Environmental Testing Research Institute Co. Ltd., Wuxi 214000, China; 6. Changzhou Drainage Management Office, Changzhou 213017, China; 7. Wuxi Supply and Drainage Monitoring Station, Wuxi 214011, China; 8. Wuxi Water Group Co. Ltd., Wuxi 214000, China)

Abstract: Since fecal coliform is one of the basic effluent control indexes in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918 – 2002), disinfection is required as part of the wastewater treatment process to reduce the risk of pathogenic microorganism on human and animal health. A total of 56 municipal wastewater treatment plants (WWTPs) were investigated in this study to analyze the operation effect of disinfection facilities. Disinfection unit problems are summarized and countermeasures are proposed. The results of this study show that 91.6% of municipal WWTPs use sodium hypochlorite and chlorine dioxide as disinfectants which have the advantages of enhanced durability, relatively simple operation, and management. Results also show that effective chlorine dosage was between 1 mg/L and 4 mg/L in 72% of WWTPs, rising to over 6 mg/L in 14% of plants. Data show that 43% of WWTPs had more than 30 minutes disinfection contact time while 28% and 17% had contact times less than ten minutes and two minutes, respectively. In addition, 50% of WWTPs did not test total residual chlorine after disinfection; and this concentration was higher than 0.20 mg/L in 70% of tested plants. In view of the issues revealed by this study, a number of suggestions for the optimal operation of WWTP disinfection facilities are proposed based on the literature and new experiment data. Future research directions are also proposed in order to provide a theoretical basis and guidance for the design and operation of municipal WWTP disinfection facilities.

Key words: municipal WWTPs; disinfection; sodium hypochlorite; residual chlorine; fecal coliform

1 研究背景

未经消毒灭菌的城镇污水处理厂出水中含有大量的病原微生物,这些病原微生物随出水排入自然水体后,在适宜的环境条件下可存活很长时间,存活的病原体可通过直接接触、飞沫或气溶胶等途径传播给人畜而产生健康风险^[1]。因此,我国在2000年4月由原建设部、国家环保总局和科技部联合发布的《城市污水处理及污染防治技术政策》(建城[2000]124号)文件中明确规定“为保证公共卫生安全,防止传染性疾病的传播,城市污水处理设施应设置消毒设施”。2002年12月发布的《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)首次将粪大肠菌群数列为出水基本控制指标之一,要求污水处理过程中必须进行消毒处理^[2]。

目前我国城镇污水处理厂采用的消毒方式主要有紫外、次氯酸钠、二氧化氯和臭氧等,经常单一应用或组合联用。紫外消毒利用紫外线对微生物的核酸产生光化学危害,从而产生消毒作用^[3],但紫外

线没有持续消毒作用,存在光复活现象^[4];次氯酸钠为中性小分子,极易扩散到带着负电的细菌表面,穿透细胞壁,氧化并破坏细菌的酶系统达到消毒目的^[5]。次氯酸钠消毒过程中会产生余氯,余氯依然具有持续消毒能力,能有效抑制残余细菌的复活和繁殖,但余氯对水生生物也会造成一定的毒性影响,不同鱼类对氯的敏感性也不一样,一般为0.001~0.1 mg/L^[6];二氧化氯消毒是利用其强氧化性来破坏微生物的酶系统,从而导致反应产物的分解破坏,使细菌死亡^[5]。相对于次氯酸钠消毒,二氧化氯消毒在抑制消毒副产物三卤甲烷形成以及降低总有机卤化物的生成等方面具有一定的优越性^[7],但二氧化氯制备成本较高;臭氧消毒利用其强氧化性来破坏微生物的细胞膜结构,进而达到灭菌的效果。臭氧在水中半衰期约30 min^[5],由于其消毒持久性相对较差,一般需和氯消毒配合使用。

上述每种消毒方式均各有优缺点,并且消毒效果易受消毒药剂投加量(或紫外剂量)、接触时间、

进水水质水量等因素影响。目前国内对污水消毒的研究主要集中在这些消毒方式在不同条件下的消毒效果评价上,如郑晓英等^[8]对次氯酸钠、臭氧及其组合技术进行再生水消毒研究,结果表明:在次氯酸钠消毒过程中,有效氯投加量为 5 mg/L 时,总大肠菌群和粪大肠菌群数去除率分别为 99.91% 和 99.99%;在次氯酸钠和臭氧的组合工艺中,当臭氧剂量为 2 mg/L、有效氯投加量为 0.5 mg/L 时,出水总大肠菌群和粪大肠菌群数去除率分别为 99.94% 和 99.87%。何敏等^[9]研究了次氯酸钠对污水处理厂二级出水消毒效果的影响因素如氨氮浓度、pH 值、水温和接触时间等,结果表明:当氨氮浓度 ≤ 0.2 mg/L 时,次氯酸钠最佳投加量为 15 mg/L;氨氮浓度为 0.2~0.4 mg/L 时,次氯酸钠最佳投加量为 8 mg/L;氨氮浓度约 0.6 mg/L 时,次氯酸钠最佳投加量为 6 mg/L;氨氮浓度为 0.8~1.2 mg/L 时,次氯酸钠最佳投加量为 5 mg/L。一般消毒接触时间为 15~30 min 时消毒效果最佳。从上述不同研究结果的比较可以看出,不同文献研究条件下,不同次氯酸钠的适宜投加量相差较大。赵琳^[5]对次氯酸钠消毒的研究结果表明,在氨氮含量 < 15 mg/L、次氯酸钠投量 < 6 mg/L 时,随着氨氮浓度升高,次氯酸钠消毒效果降低。该研究结论与何敏等人的研究结果也不一致。

另外,在对组合消毒工艺的研究中,郭美婷等^[10]研究发现先次氯酸钠消毒后紫外消毒协同效果优于先紫外消毒后次氯酸钠消毒,濮晨熹^[2]、张永吉等^[11]、葛洁桦^[12]研究认为先紫外消毒后次氯酸钠消毒协同效果优于先次氯酸钠消毒后紫外消毒。由此可见不同的应用条件研究结果相差较大。

2020 年 1 月,传染性很强的新型冠状病毒肺炎

在武汉暴发蔓延,为了严防新型冠状病毒通过污水传播扩散,2 月 1 日生态环境部印发了《关于做好新型冠状病毒感染的肺炎疫情医疗污水和城镇污水监管工作的通知》(环办水体函〔2020〕52 号),其中特别指出“地方生态环境部门要督促城镇污水处理厂切实加强消毒工作,结合实际,采取投加消毒剂或臭氧、紫外线消毒等措施,确保出水粪大肠菌群数指标达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)要求”。目前各地城镇污水处理厂均在积极落实该通知要求,为了确保出水粪大肠菌群数指标稳定达标,一些原设计为紫外消毒的污水处理厂临时增设次氯酸钠投加设施,将两种消毒方式串联使用;部分污水处理厂由于缺少接触消毒池,采取加药消毒后直接通过管道混合处理出水;部分主要以次氯酸钠作为消毒剂的污水处理厂则将原来的有效氯投加量从 1.5 mg/L 增大至 4~5 mg/L。这些消毒方式的可行性和必要性尚缺乏实际数据支撑。

由于目前我国尚缺乏对城镇污水处理厂消毒的工艺参数和运行效果的统一认识,因此有必要开展污水消毒运行效果调研和研究工作,掌握目前国内城镇污水处理厂消毒设施运行现状,分析存在的主要问题,提出针对性优化策略,为城镇污水处理厂的消毒设施运行提供技术指导。

2 消毒设施运行调研与优化策略

2.1 消毒设施调研概况及分析

2020 年 2 月对江苏、浙江、上海和福建等省市的 56 座城镇污水处理厂的消毒设施的运行情况进行调研,统计结果见表 1。其中 W6、W19 和 W12 三座污水厂因厂内为多期工程,同时采用两种消毒方式,后续统计按 6 座计。

表 1 56 座城镇污水处理厂消毒设施调研汇总

Tab. 1 Survey summary of disinfection facilities operation in 56 urban WWTPs

厂名	出水标准	设计规模/($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	运行规模/($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	消毒方式	10% 次氯酸钠或其他消毒剂加药量(有效氯投加量)/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	接触时间/min	粪大肠菌群数/($\text{MPN} \cdot \text{L}^{-1}$)		出水总余氯/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
							消毒前	消毒后	
W1	一级 A	6	3.5	臭氧	—	—	—	< 20	—
W2	一级 A	3	1.75	次氯酸钠	30(3)	90	—	—	—
W3	DB 32/1072—2018	3	2	次氯酸钠	70(7)	15	—	< 20	0.1
W4	一级 A	2	1.2	次氯酸钠	60(6)	—	—	20	0.35
W5	一级 A	22	22	次氯酸钠	17.5(1.75)	20	—	< 10	0.21

续表1 (Continued)

厂名	出水标准	设计规模/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	运行规模/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	消毒方式	10%次氯酸钠或其他 消毒剂加药量(有效氯 投加量)/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	接触时间/ min	粪大肠菌群数/ ($\text{MPN} \cdot \text{L}^{-1}$)		出水总余 氯/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
							消毒前	消毒后	
W6	一级 A	15	15	次氯酸钠	12.5(1.25)	1	—	—	—
				紫外+次氯酸钠	12.5(1.25)	1	—	—	—
W7	一级 A	0.5	0.5	次氯酸钠	60(6)	60	10^6	100	—
W8	一级 A	16	12.5	次氯酸钠	20(2)	30	>24 196	—	1.5
W9	一级 A	5	6	紫外+次氯酸钠	83(8.3)	—	—	<1 000	—
W10	一级 A	10	10	二氧化氯	—	30	5×10^7	<200	—
W11	一级 A	3	3	次氯酸钠	50(5.0)	5	—	—	—
W12	一级 A	7.5	6.5	次氯酸钠	15(1.5)	60	—	100	—
W13	DB 32/ 1072— 2018	0.5	0.5	芬顿高级氧化 +次氯酸钠	7.5(0.75)	2	—	—	5
W14	一级 A	1.5	1.7	次氯酸钠	11(1.1)	5	—	<20	1.5
W15	一级 A	1	0.4	次氯酸钠	22(2.2)	10	—	<100	—
W16	一级 A	9	7.85	次氯酸钠	113(11.3)	—	5.33×10^7	27	—
W17	一级 A	1.75	1.2	次氯酸钠	40(4)	60	—	—	0.28
W18	一级 A	9.5	7.2	次氯酸钠	14(1.4)	20	—	<20	0.45
W19	一级 A	11	8.5	次氯酸钠	27(2.7)	20	—	<20	0.35
				紫外	—	20	—	<20	—
W20	一级 A	10	8.2	次氯酸钠	30(3)	30	—	80	0.3
W21	一级 A	1	0.7	芬顿高级氧化 +次氯酸钠	10(1)	5	—	—	8.5
W22	DB 32/ 1072— 2018	3	1.6	次氯酸钠	40(4)	4	—	—	1
W23	一级 A	2	2	次氯酸钠	35(3.5)	30	—	157	—
W24	一级 A	0.5	0.5	次氯酸钠	60(6)	60	10^6	100	—
W25	一级 A	3	3	次氯酸钠	22.5(2.25)	30	—	<200	0.15
W26	一级 A	8	6	次氯酸钠	35(3.5)	45	—	<1 000	0.2
W27	一级 A	20	20	紫外+次氯酸钠	28(2.8)	20	—	—	0.18
W28	一级 A	18	18	次氯酸钠	25(2.5)	30	—	—	0.28
W29	一级 A	0.5	0.4	二氧化氯	—	—	—	—	—
W30	一级 A	5	3	次氯酸钠	44(4.4)	25	—	≤ 300	—
W31	一级 A	1	0.73	次氯酸钠	—	35	—	≤ 20	1.9
W32	一级 A	3	2.6	紫外+次氯酸钠	100(10)	1	—	605	0.09
W33	一级 A	10	10	次氯酸钠	44(4.4)	30	—	≤ 20	—
W34	一级 A	1	1	紫外+次氯酸钠	50(5)	—	—	60	—
W35	一级 A	2	2	紫外+次氯酸钠	34.5(3.45)	20	—	≤ 20	—
W36	一级 A	1	1	次氯酸钠	50(5)	—	—	≤ 20	—
W37	一级 A	0.5	0.5	次氯酸钠	51(5.1)	60	—	270	—
W38	一级 A	1	1	紫外+次氯酸钠	20(2)	—	—	≤ 20	—
W39	一级 A	1	1	紫外+次氯酸钠	40(4)	15	—	≤ 20	—
W40	DB 32/ 1072— 2018	3	3	次氯酸钠	36(3.6)	—	—	≤ 20	—
W41	一级 A	1	1	紫外+次氯酸钠	50(5)	—	—	40	—

续表 1 (Continued)

厂名	出水标准	设计规模/ (10 ⁴ m ³ · d ⁻¹)	运行规模/ (10 ⁴ m ³ · d ⁻¹)	消毒方式	10% 次氯酸钠或其他 消毒剂加药量(有效氯 投加量)/(mg · L ⁻¹)	接触时间/min	粪大肠菌群数/ (MPN · L ⁻¹)		出水总余 氯/(mg · L ⁻¹)
							消毒前	消毒后	
W42	一级 A	30	26	二氧化氯 + 次氯酸钠	35(3.5)	1.5	—	≤10	0.7
				紫外 + 次氯酸钠	35(3.5)	1.5			
W43	一级 A	9.5	9.5	二氧化氯	6(2.4 *)	42	—	≤20	2.8
W44	一级 A	20	20	二氧化氯	10(4.2 *)	30	—	≤200	—
W45	一级 A	15	15	二氧化氯	6(2.4 *)	30	—	≤200	—
W46	一级 A	10	10.6	紫外 + 次氯酸钠	27(2.7)	1	—	≤10	—
W47	一级 A	32	31.7	紫外 + 次氯酸钠	20(2)	20	—	≤10	0.37
W48	类地表水 IV 类	16	17.8	紫外 + 次氯酸钠	31(3.1)	20	—	≤10	—
W49	一级 A	20	19.8	二氧化氯 + 次氯酸钠	22(2.2)	30	—	≤10	—
W50	一级 A	8	7.3	次氯酸钠	46(4.6)	60	—	≤10	—
W51	一级 A	5.1	4.8	次氯酸钠	21(2.1)	60	—	≤20	0.3
W52	类地表水 IV 类	10	10	次氯酸钠	5(0.5)	30	—	<1 000	0.2
W53	一级 A	10	9	紫外	—	—	—	—	—
W54	一级 A	9	8	紫外	—	—	—	—	—
W55	一级 A	5	4	紫外	—	—	—	—	—
W56	一级 A	90	83	紫外 + 次氯酸钠	20(2)	1	—	<100	0.2

注: ①“—”表示数据缺失;②带“*”的数据为二氧化氯实际在污水处理厂可发挥消毒效果的有效氯含量。

由表 1 可知:

① 消毒方式多种多样,各种消毒方式均能有效杀菌。56 座城镇污水处理厂中有 41 座采用单独消毒方式,主要为次氯酸钠、二氧化氯、紫外和臭氧,数量分别为 31、5、4 和 1 座;有 18 座采用组合消毒方式,其中 14 座采用紫外 + 次氯酸钠的组合工艺,2 座采用二氧化氯 + 次氯酸钠,2 座采用芬顿氧化 + 次氯酸钠的组合工艺。从调研出水的粪大肠菌群数值来看,各种消毒方式均能有效杀菌(其中仅 1 座紫外消毒的污水处理厂提供了粪大肠菌群数据,结果可能稍有偏差)。

② 目前多数污水处理厂存在消毒接触时间不足现象。调研的污水处理厂消毒接触时间为 1~90 min,我国《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)明确规定“为了提高和保证消毒效果,二氧化氯或氯消毒的接触时间不应小于 30 min”,但调研数据显示消毒接触时间 ≥ 30 min 的污水处理厂仅占 43%,消毒接触时间 ≤ 10 min 和 ≤ 2 min 的污水处理厂分别占 28% 和 17%。

③ 实际运行中消毒药剂投加量和消毒接触时间存在一定的相关性。消毒接触时间 ≥ 30 min 的污水处理厂次氯酸钠平均有效氯投加量为 3.25 mg/L,

消毒接触时间 < 30 min 的污水处理厂平均有效氯投加量为 3.86 mg/L,消毒接触时间 ≤ 5 min 的污水处理厂平均有效氯投加量为 4.27 mg/L,说明实际的污水处理厂加药量和消毒接触时间存在一定的相关性,停留时间越长,加药量越低。

④ 次氯酸钠和其他消毒方式的组合消毒加药量低于单纯次氯酸钠消毒,其中深度处理末端采用芬顿等高级氧化的消毒剂投加量更低。单独次氯酸钠消毒的平均有效氯投加量为 3.69 mg/L,采用组合工艺的次氯酸钠消毒的平均有效氯投加量为 2.93 mg/L,其中采用芬顿高级氧化 + 次氯酸钠工艺平均有效氯投加量为 0.88 mg/L,采用二氧化氯 + 次氯酸钠工艺平均有效氯投加量为 2.50 mg/L,采用紫外 + 次氯酸钠工艺的平均有效氯投加量为 3.34 mg/L,说明次氯酸钠和其他消毒方式的组合消毒加药量低于单纯次氯酸钠消毒。

⑤ 污水处理厂均存在余氯过高现象。56 座污水处理厂中有 24 座有出水余氯的测试数据,出水总余氯为 0.09~8.5 mg/L,平均值为 1.12 mg/L,总余氯浓度 ≥ 0.20 mg/L 的占 70%。

另外,实际调研中有数据的 43 座污水处理厂的出水粪大肠菌群数均低于 1 000 MPN/L,满足一级

A标准,低于方法检出限(20 MPN/L)[《水质 粪大肠菌群的测定 多管发酵法》(HJ 347.2—2018)15管法]的有17座,虽然均无超标,但表中数据均为各厂2019年平均瞬时样数据,在实际采样中仍存在个别厂出现粪大肠菌群数偶然超标的现象。

为了验证调研数据结果,特在消毒接触时间分别为12 min和30 min的两座城镇污水处理厂开展不同次氯酸钠加药量的生产性验证试验,具体试验数据如表2、3和图1所示。对表2数据进行分析,

表2 城镇污水处理厂不同次氯酸钠投加量消毒后水质数据(接触时间12 min)

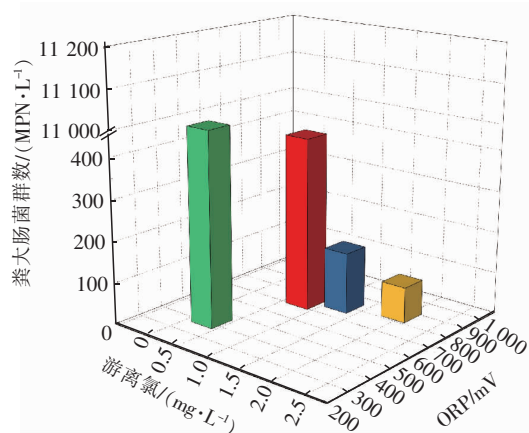
Tab.2 Data after disinfection with different dosage of sodium hypochlorite at contact time 12 min in urban WWTPs

次氯酸钠有效氯投加量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	粪大肠菌群数/($\text{MPN} \cdot \text{L}^{-1}$)	游离氯/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总氯/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ORP/mV	COD/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	氨氮/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总氮/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	浊度/NTU	pH值
0	>24 196	—	—	225	—	0.75	13.7	0.67	7.23
1	>24 196	0.04	0.09	283	24	0.51	12.9	1.90	7.08
2	>24 196	0.10	0.17	338	22	0.65	13.1	1.42	7.11
3	>24 196	0.13	0.43	380	26	0.89	13.5	1.28	7.09
4	11 010	0.28	0.46	418	21	0.33	12.7	1.25	7.12
5	421	0.76	1.07	742	28	<0.02	11.9	2.50	7.15
6	149	1.22	2.47	799	23	<0.02	11.6	1.12	7.11
7	87	1.96	2.85	857	29	未检出	11.7	1.85	7.11

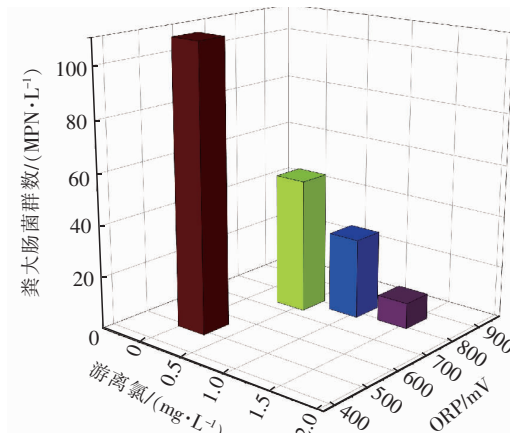
表3 城镇污水处理厂不同次氯酸钠投加量消毒后水质数据(接触时间30 min)

Tab.3 Data after disinfection with different dosage of sodium hypochlorite at contact time 30 min in urban WWTPs

次氯酸钠有效氯投加量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	粪大肠菌群数/($\text{MPN} \cdot \text{L}^{-1}$)	游离氯/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总氯/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ORP/mV	COD/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	氨氮/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总氮/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	pH值
0	2.6×10^5	—	—	190	36	0.05	9.8	7.25
2	>24 196	0.09	0.35	501	32	未检出	10.2	7.23
4	110	0.15	0.68	522	34	未检出	9.6	7.29
6	52	0.44	0.79	768	30	未检出	10.1	7.32
8	31	0.92	1.29	813	32	未检出	9.9	7.52
10	10	1.42	1.90	832	35	未检出	9.8	7.53



a. 接触时间 12 min



b. 接触时间 30 min

图1 粪大肠菌群数与游离氯和 ORP 的关系

Fig.1 Relationship between fecal coliforms, free chlorine and ORP

此外,氧化还原电位(ORP)可反映水溶液中所有物质表现出来的宏观氧化还原性,氧化还原电位越高,氧化性越强,故可考虑根据 ORP 数值判断消毒出水氧化性,从而间接预估消毒情况。由图 1 可知,出水 ORP 和出水粪大肠菌群数存在较好的相关性,污水处理厂可考虑根据出水 ORP 判断消毒效果。由表 2 和表 3 试验数据及常州排水管理处运行经验可知,执行一级 A 标准的城镇污水处理厂加氯消毒后出水 ORP > 600 mV 时,出水粪大肠菌群数 < 1 000 MPN/L。因此,可考虑在加氯消毒后出水口检测 ORP 数值,辅助判断消毒效果。

2.2 消毒方式分析

紫外消毒具有光强易衰减、易光复活等特点,且当尾水悬浮物浓度较高时,会显著影响紫外消毒效果^[13]。因此,随着我国执行一级 A 标准的城镇污水处理厂逐步增多,以及对粪大肠菌群数指标的逐渐重视,应用紫外消毒工艺的城镇污水处理厂逐渐减少^[14]。消毒方式分布见图 2。

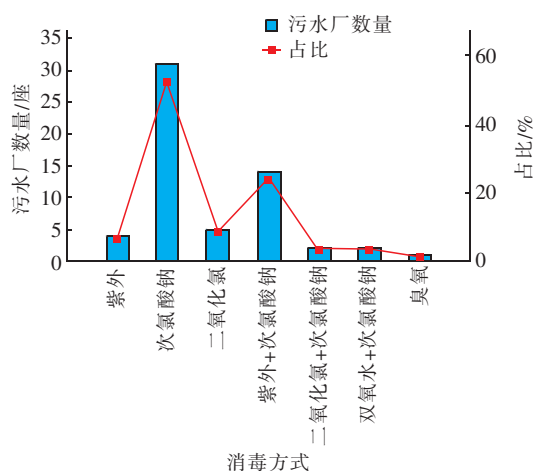


图2 消毒方式分布

Fig. 2 Distribution of disinfection methods

次氯酸钠作为消毒剂具有投加成本相对较低、运行管理方便、持久性好等特点,因此应用较为广泛。由图 2 可知,本次调研中 56 座城镇污水处理厂中的 31 座单独采用次氯酸钠作为消毒剂,有 4 座污水处理厂仍采用单独紫外作为消毒工艺,另有 14 座在紫外消毒的基础上增设了次氯酸钠消毒方式,还有少部分污水处理厂采用二氧化氯 + 次氯酸钠或芬顿氧化 + 次氯酸钠的组合工艺,采用次氯酸钠消毒的污水处理厂数量占调研总量的 83.1%。

二氧化氯作为一种强氧化剂,具有易爆的特性,因此需采取现场制取的方式以确保安全。常用的制

备方法为盐酸还原法^[15],由于原料为盐酸和氯酸钠,这两种原料分别为易制毒、易制爆化学品,运输、保存、使用等要求较高,因此在城镇污水处理厂较少使用。在本次调研中,仅有 5 座污水处理厂采用单独二氧化氯进行消毒,占调研总量的 8.5%。二氧化氯发生器的产物中有消毒作用的主要为二氧化氯和氯,产物产量常以有效氯计,目前常用测定方法为《二氧化氯消毒剂发生器安全与卫生标准》(GB 28931—2012)中的五步碘量法^[16],即 Cl_2 、 ClO_2 、 ClO_2^- 、 ClO_3^- 在不同 pH 值时与碘离子反应生成 I_2 ,再用硫代硫酸钠溶液滴定游离 I_2 ,测得各物质含量后确定有效氯含量。但城镇污水处理厂出水 pH 值一般为 6.5 ~ 8,二氧化氯仅转化为亚氯酸盐^[17],按照产物中二氧化氯和氯的比值为 1 估算,实际能发挥作用的有效氯量仅为发生器产生有效氯量的 42%,因此,在实际运行中建议以实际能发挥作用的有效氯量来调控加氯和衡量其效果。

臭氧具有接触时间短、无消毒副产物产生等优点,但也同样存在运行成本高的缺点^[18],因此应用较少。在本次调研中仅 1 座污水处理厂采用该方式,且该厂使用臭氧工艺的主要目的是去除难降解 COD,兼顾消毒功能。

由于受进水水质、污水处理工艺等多种因素的影响,我国城镇污水处理厂消毒处理单元情况较为复杂,针对以下 4 种常见情况分别给出建议:

① 对目前仍在单独使用紫外消毒的城镇污水处理厂,建议进行不同时间的粪大肠菌群光复活率试验,也可结合当地环境监督部门取样检测方法,判断能否满足实际要求;并充分考虑已有紫外消毒设施的紫外线剂量范围,确保在水量出现波动等最不利条件下出水粪大肠菌群数达标。如无法满足上述要求,需考虑增设其他消毒方式。

② 对目前使用次氯酸钠消毒的城镇污水处理厂,建议关注药剂投加量,定期检测粪大肠菌群数等指标,掌握其与相关因素的关系,在确保出水粪大肠菌群数达标的情况下,尽量降低次氯酸钠的投加量,减少余氯对受纳水体的影响;重视次氯酸钠药剂的存储、使用等管理,并关注次氯酸钠药剂中有效氯含量变化,以及时调整药剂投加比例,确保消毒效果。

③ 对目前使用二氧化氯消毒的城镇污水处理厂,建议对比设备厂家给出的有效氯数据和实际在污水消毒中可发挥作用的有效氯数据的差别(设备

效率、检测时不同 pH 值的影响等),加强二氧化氯发生设备的维护保养,并确保有可正常运行的备件;此外,需加强盐酸、氯酸钠等原料运输、保存、使用的管理,确保产品合格、使用合规,在确保出水粪大肠菌群数达标的情况下,尽量降低药剂的投加量,减少余氯对受纳水体的影响。

④ 对新建及扩建的城镇污水处理厂,在深度处理末端已设置了芬顿、臭氧等高级氧化工艺,且出水粪大肠菌群数稳定达标的情况下,可不另外单独设置消毒处理单元。

2.3 加氯消毒药剂投加量分析

由调研的污水处理厂消毒方式分布情况可知,目前大部分城镇污水处理厂采用加氯消毒。为确保加氯消毒效果,消毒工艺环节应当保证一定的消毒药剂投加量和接触时间,一般采用 CT 值[即接触时间 $T(\text{min}) \times$ 接触时间结束时消毒剂残留浓度 $C(\text{mg/L})$]确定各污水处理厂相应的氯消毒参数,指导生产运行。鉴于目前我国尚缺乏针对粪大肠菌群数达标的普适性 CT 值数据,建议各地污水处理厂根据实际工艺运行摸索和总结适宜的 CT 值,以优化消毒工艺运行。当前可根据有效氯投加量、接触时间和出水余氯含量等参数调控消毒效果,同时加强出水悬浮物浓度的控制,确保出水的粪大肠菌群数稳定达标。

首先,含氯消毒药剂的投加量会直接影响尾水的消毒效果与经济成本,因此有必要对调研污水处理厂的有效氯投加量分布进行分析,掌握目前污水处理厂药剂投加量现状(见图3)。

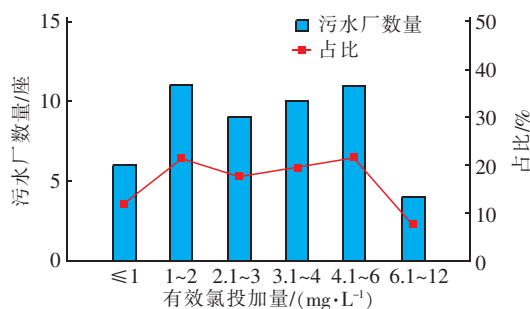


图3 有效氯投加量分布

Fig.3 Distribution of effective chlorine dosage

由图3可知,在调研的城镇污水处理厂中,72%的污水处理厂有效氯投加量为1~4 mg/L,14%的污水处理厂的有效氯投加量过高,超过了6 mg/L,其中有效氯投加量最高的污水处理厂达到11.3

mg/L。这可能是因为部分小型污水处理厂存在进水水量波动较大,对药剂投加量计量不准确等问题,使得有效氯的投加量偏高。王雨等^[19]针对次氯酸钠消毒过程中的消毒副产物进行了研究,发现随着次氯酸钠投加量的增加,消毒副产物三卤甲烷和二氯乙腈的生成量均随之增加。由此可见,过高的药剂投加量容易造成出水消毒副产物的增加,易对受纳水体的生态环境造成损害^[20]。

国内有很多学者研究了不同有效氯投加量对粪大肠菌群数的影响。李璐瑶^[21]探究了不同浓度次氯酸钠投加量对二级出水消毒效果的影响,当次氯酸钠与二级出水的接触时间为30 min,有效氯的投加量为3 mg/L,二级出水中的粪大肠菌群数能够低于1 000 MPN/L,当提高有效氯的投加量为4 mg/L时,粪大肠菌群数可以控制在200 MPN/L以内。赵琳^[5]研究了30 min内有效氯投加量对灭活率的影响,结果表明,当有效氯投量<2.5 mg/L时,灭活率随着有效氯投量的增加而升高,在有效氯投加量为2.5 mg/L时,已经实现了100%的灭活,并建议污水处理厂在处理尾水时控制有效氯的投加量为2.5~3.0 mg/L。濮晨熹^[2]探究了接触反应时间为10 min时不同有效氯投量对MSBR工艺出水的消毒效果,发现当有效氯的投量>3.3 mg/L时,出水的粪大肠菌群数可以达到一级A标准。由上述文献中有效氯投加量与粪大肠菌群数的关系可知,对尾水中投加有效氯的量在2~4 mg/L比较合理,能够保证粪大肠菌群数达到一级A标准。

本研究团队对两座一级A排放标准的城镇污水处理厂出水进行次氯酸钠消毒试验研究,1#厂接触时间为30 min,有效氯投加量为4 mg/L,试验期间水温为17℃,出水粪大肠菌群数<1 000 MPN/L;2#厂现场无消毒接触池,次氯酸钠投加后经管道混合,消毒接触时间约12 min,试验期间水温为14℃,次氯酸钠有效氯投加量需5 mg/L,出水粪大肠菌群数<1 000 MPN/L。

出水中的氨氮等指标的浓度差异对污水消毒中次氯酸钠投加量产生的影响较大。祝明等^[22]研究了氨氮浓度对次氯酸钠消毒的影响,结果表明:水中总余氯的浓度随次氯酸钠投加量的增加呈先升高后降低再逐渐升高的趋势,整个反应过程符合折点加氯消毒理论;当次氯酸钠投加量与氨氮的比值为25:1时,氨氮消耗的次氯酸钠量最多,生成的总余

氯量最少。何敏等^[9]进一步研究了氨氮变化对次氯酸钠消毒效果的影响,发现随着氨氮浓度的升高,最佳次氯酸钠的投加量呈降低的趋势。而赵琳^[5]的研究结果却表明,在氨氮含量 $< 15 \text{ mg/L}$ 、有效氯含量 $< 0.6 \text{ mg/L}$ 时,随着氨氮浓度升高,次氯酸钠消毒效果降低。由此可看出:①目前国内学者对于城镇污水处理厂次氯酸钠消毒的工艺参数和运行效果尚缺乏统一的认识;②出水中氨氮等存在不一定会增加次氯酸钠的用量;③在不同的氨氮浓度和有效氯的组合下,次氯酸钠的消毒效果也存在一定的差异。因此有必要在规范条件下对次氯酸钠投加量与氨氮、总余氯及粪大肠菌群数的关系进行系统的研究。鉴于当前大部分执行一级 A 标准的污水处理厂出水氨氮含量较低,表 1 调研数据中污水处理厂出水氨氮年平均值为 0.41 mg/L ,92% 的污水处理厂出水氨氮年平均值为 $< 1 \text{ mg/L}$,因此氨氮浓度对次氯酸钠的投加量影响相对较小,一般情况下不需考虑此指标的影响,只有当污水处理厂进水受有毒有害物质冲击影响,导致生化系统硝化性能大规模丧失的情况下,氨氮对次氯酸钠的投加量才会产生较大影响。

由于受进水水质、水量、消毒前粪大肠菌群数、接触时间和水温等因素影响,消毒药剂投加量会有所差异,各污水处理厂应关注药剂投加量,定期检测粪大肠菌群数等指标,掌握药剂投加量与相关因素的关系,及时调整加药量。我国《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)规定“无试验资料时,二级处理出水有效氯投加量可采用 $6 \sim 15 \text{ mg/L}$ ”,该数据是依据 2003 年 6 座污水处理厂的加氯消毒数据确定的,与当时的条件相比,当前的污水处理厂在运行工艺和出水水质(氨氮、SS、COD 和粪大肠菌群数等)要求上有较大区别,所需加药量也会有较大差别。对当前污水处理厂加氯消毒设施运行调研、相关文献总结、大量实验室和现场验证的结果表明,执行一级 A 标准的污水处理厂消毒接触时间 $\geq 30 \text{ min}$ 时,有效氯投加量控制在 $2.0 \sim 4.0 \text{ mg/L}$,粪大肠菌群数可达排放标准;消毒接触时间 $< 30 \text{ min}$ 时,需适当增大有效氯投加量。

2.4 加氯消毒接触时间分析

消毒接触时间对污水消毒效果会产生一定的影响。消毒工艺的接触时间分布见图 4。由图 4 可知,调研的污水处理厂消毒工艺的接触时间主要集

中分布在 $11 \sim 30 \text{ min}$,所占的比例达到 47.7%;同时也存在 2% 的污水处理厂消毒接触时间在 60 min 以上。但消毒接触时间少于 10 min 的污水处理厂仍占有 27% 的比例,17% 的污水厂甚至不足 2 min 。这可能是由于部分污水处理厂内并未设置专门的消毒接触池,因此仅依靠管道混合接触消毒;或设计的消毒接触池容量偏小,而进水水量超过了设计容量,使得接触时间较短。何敏等^[9]探究了反应时间对次氯酸钠消毒效果的影响,结果表明,在反应时间低于 2 min 时,次氯酸钠消毒的效果较差,当反应时间在 $15 \sim 30 \text{ min}$ 时,次氯酸钠的消毒作用才可完全发挥,而超过 30 min 后,粪大肠菌群数则基本不出现下降。由此可见,消毒接触时间过短可能会造成消毒效果的降低,还会使出水总余氯的浓度大大升高,增加产生出水消毒副产物的风险(调研中发现个别污水处理厂,消毒药剂投加量低且消毒接触时间低,但出水粪大肠菌群数仍合格,是因为取样时氯药剂未反应完全,在采样瓶中仍在继续反应,所以存在采样的偶然性,不能代表实际消毒效果)。

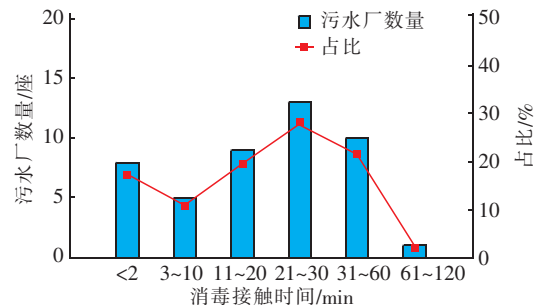


图 4 消毒工艺接触时间分布

Fig. 4 Contact time distribution of disinfection process

朱彩琴^[23]研究了次氯酸钠接触时间与消毒效果的影响,当接触时间为 5 min 、有效氯投加量为 3.51 mg/L 时取得较好的消毒效果,粪大肠菌群数未检出;而当接触时间为 30 min 时,达到较好的消毒效果只需 1.76 mg/L 的有效氯投加量。该研究讨论了采用 A/A/O—SBR 工艺中的情况,不过,不同的处理工艺如 MBR 等次氯酸钠接触时间与消毒效果也不尽相同。由表 1 可以看出,一些按照规范控制有效氯投加量与接触时间的污水处理厂,其出水的总余氯和粪大肠菌群数均能够保持较低的数值,在确保充足的接触时间条件下这些污水处理厂的有效氯投加量并不高;而一些污水处理厂的有效氯投加量虽然偏高,但出水粪大肠菌群数却高于按照规

范投加有效氯量的污水处理厂,这可能是由于该厂的加氯消毒接触时间较短,仅为1 min,使得次氯酸钠与尾水还未充分接触就排出;另外,还有一些污水处理厂在相同的接触时间下,有效氯投加量虽然较低,但出水粪大肠菌群数仍能保持较低的水平,通过调研分析发现这些污水处理厂在消毒工艺前段增加了如芬顿等高级氧化工艺,能够预先杀灭一些粪大肠菌群。我国《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)规定二氧化氯或氯消毒的接触时间不应小于30 min。粪大肠菌群数与接触时间和有效氯投加量的关系见图5。

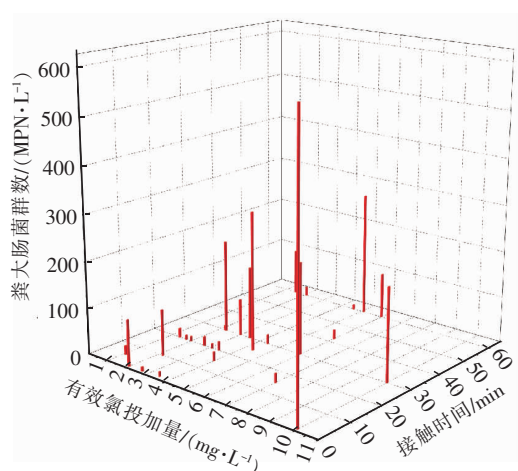


图5 粪大肠菌群数与接触时间和有效氯投加量的关系

Fig.5 Relationship between the number of fecal coliforms, contact time and effective chlorine dosage

由图5可知,结合文献中有效氯投加量与消毒接触时间之间存在的相关性:在一定的接触时间范围内,停留时间越长,所需加药量越低。

因此,建议执行一级A标准的污水处理厂:①应控制加氯消毒接触时间 ≥ 30 min,条件受限的污水处理厂应尽量控制接触时间 ≥ 15 min(15 min内消毒剂对粪大肠菌群的杀灭效率最快,时间延长后杀灭效率放缓),在冬季气温较低时可适时延长接触时间;②对于一些消毒前端采用高级氧化或MBR等工艺的污水处理厂,可在充足接触时间的条件下,根据实际情况适当减少次氯酸钠的投加量;③对于无法改变接触时间或通过管道混合的污水处理厂,则需根据实际情况,通过试验来确定具体的投加量,同时关注出水端余氯量。

2.5 加氯消毒后出水余氯的控制分析

城镇污水处理厂如采用加氯消毒,消毒后的出水中携带的余氯会一并排入自然水体,如排入自然

水体余氯量过高,会对受纳水体中鱼类等水生生物造成毒性影响,因此有必要关注消毒后出水余氯量。

加氯消毒出水若直接排入水体,会对鱼类或其他水生生物产生毒害作用,因此必须对排入水体的尾水余氯量进行严格控制^[24]。美国国家环保局规定尾水中总余氯应小于0.011 mg/L^[25],而我国暂无相关标准。柏育材等^[26]研究发现,当余氯浓度为0.2 mg/L时,大黄鱼仔鱼的死亡率为20%左右;江志兵等^[27]研究发现,0.1~0.2 mg/L的余氯浓度已接近甚至超过海水鱼类的30 min半致死浓度。由此次调研的56座污水处理厂中的24座的出水余氯的测试数据可知,总余氯浓度在0.20 mg/L以上达到70%。

因此,建议各污水处理厂:①优先确保出水粪大肠菌群数达标,在此基础上,尽量降低消毒药剂投加量,从而降低出水余氯浓度,减少对受纳水体生态环境的影响;②对于接触时间充足的,根据自身消毒接触时间进行投加次氯酸钠后水中总余氯量衰减的试验,确定在不同的接触时间下需控制尾水中总余氯量为多少能够保证出水粪大肠菌群数达标;③对于接触消毒时间较短或采用管道加氯消毒的污水处理厂,则需要按短时间内或管道模型实验管道中余氯含量的衰减情况,确定最佳的余氯含量。

3 结论

① 紫外消毒具有持久性差的缺点,结合已有设施的紫外线剂量范围,应进行不同时间、不同水量条件下的粪大肠菌群光复活率实验,确保实现出水的稳定达标排放,如无法满足实际需求,应考虑设置其他消毒方式作为补充;目前使用二氧化氯消毒的城镇污水处理厂,建议对比设备厂家给出的有效氯数据和实际在污水消毒中可发挥作用的有效氯数据的差别(设备效率、检测时不同pH的影响等),加强二氧化氯发生设备的维护保养,并确保有可正常运行的备件,在确保出水粪大肠菌群数达标的情况下,尽量降低药剂的投加量,减少余氯对受纳水体的影响;新建及扩建的城镇污水处理厂,在深度处理末端已设置了芬顿、臭氧等高级氧化工艺,且出水粪大肠菌群数稳定达标的情况下,可不另外单独设置消毒处理单元;消毒前端采用膜处理工艺的污水处理厂,因膜对病原微生物具有截留作用,可根据试验结果相应减少消毒药剂投加量。

② 调研结果表明,加氯消毒(次氯酸钠和二

氧化氯)应用最为广泛,当前我国部分城镇污水处理厂无接触消毒池,消毒剂与污水的接触时间较短,无法充分发挥消毒作用,是导致药剂投加量偏高的原因之一。研究表明,对出水执行一级A排放标准的污水处理厂,当消毒接触时间 ≥ 30 min、有效氯投加量控制在 $2 \sim 4$ mg/L时,粪大肠菌群数可达到排放标准要求;当消毒接触时间 < 30 min时,有效氯投加量需适当增大。由于受进水水质、水量、粪大肠菌群数、接触时间和水温等因素影响,消毒药剂投加量会有所差异,各厂应关注药剂投加量,定期检测粪大肠菌群数等指标,掌握药剂投加量与相关因素的关系,及时调整加药量。

③ 建议执行一级A标准的污水处理厂,应控制加氯消毒接触时间 ≥ 30 min,条件受限的污水处理厂应尽量控制接触时间 ≥ 15 min(15 min内消毒剂对粪大肠菌群的杀灭效率最快,时间延长后杀灭效率放缓),在冬季气温较低时可适当延长接触时间;对于一些消毒前端采用高级氧化或MBR等工艺的污水处理厂,可在充足接触时间的条件下,根据实际情况适当减少次氯酸钠的投加量;对于无法改变接触时间或通过管道混合的污水处理厂,则需根据实际情况,通过试验来确定具体的投加量,同时关注出水端余氯浓度。

④ 城镇污水处理厂如采用加氯消毒,消毒后出水中携带的余氯会一并排入自然水体,如排入自然水体余氯量过高,会对受纳水体中鱼类和水生生物造成毒性影响。建议我国城镇污水处理厂优先确保出水粪大肠菌群数达标,在此基础上,再尽量减少消毒药剂投加量,从而降低出水余氯浓度,避免对受纳水体生态环境产生影响。

⑤ 城镇污水处理厂应加强游离氯、总余氯及粪大肠菌群数等指标的现场检测。针对游离氯和总余氯的检测,如现场未安装在线余氯监测仪,可采用便携式余氯仪快速测定余氯指标指导生产运行。针对粪大肠菌群数指标的检测,如现场检测到水样中含有余氯时,应及时加入适量硫代硫酸钠试剂脱氯以消除对粪大肠菌群数指标检测中的干扰,确保粪大肠菌群指标检测准确可靠。

⑥ 因ORP可反映水溶液中所有物质表现出来的宏观氧化还原性,氧化还原电位越高,氧化性越强,故可根据ORP数值判断消毒出水氧化性,从而间接预估消毒情况。根据常州排水管理处多年运行

经验和无锡市政公用环境检测研究院的研究结果,出水执行一级A排放标准的污水处理厂加氯消毒后出水口ORP数值 > 600 mV时,出水粪大肠菌群数能够小于1 000 MPN/L。因此,可考虑在加氯消毒后出水口检测ORP数值,辅助判断消毒效果。

4 展望

结合已有的研究结果和目前城镇污水处理厂实际面临的问题,在以下几个方面尚需深入的研究:

① 城镇污水处理厂MBR工艺与常规工艺对消毒药剂投加量的影响;

② 进水粪大肠菌群数、pH值、氨氮、还原性干扰物等因素对于不同消毒工艺运行效果的影响,重点研究我国城镇污水处理厂加氯消毒适宜的CT值,即出水余氯和消毒接触时间与粪大肠菌群数的相关关系;

③ 城镇污水处理厂进水余氯衰减规律及对活性污泥的影响机理,为城镇污水处理厂应对含消毒剂来水时的运行调控提供技术指导;

④ 城镇污水处理厂出水不同余氯及消毒副产物浓度对受纳水体生态环境的影响。

参考文献:

- [1] 赵海静. 城市污水中新型病原细菌的生物学特征及杀灭效果研究[D]. 镇江:江苏大学,2010.
Zhao Haijing. Research on Biological Characteristics and the Killing Effect of Emerging Pathogenic Bacteria in Municipal Sewage[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010(in Chinese).
- [2] 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 Chenxi. Study on Application of Disinfection in Urban Sewage Treatment Plants[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2012(in Chinese).
- [3] Brahma M, Belhadi N H, Hamdi H, et al. Modeling of secondary treated wastewater disinfection by UV irradiation: Effects of suspended solids content[J]. J Environ Sci, 2010, 22(8): 1218 - 1224.
- [4] 张永吉, 刘文君. 紫外线消毒对光复活时粪大肠菌群活性的影响[J]. 中国给水排水, 2006, 22(17): 46 - 49.
Zhang Yongji, Liu Wenjun. Influences of UV disinfection on *E. coli* activity during photoreactivation[J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(17): 46 - 49 (in Chinese).

- [5] 赵琳. 紫外与次氯酸钠消毒效果及影响因素研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2014.
Zhao Lin. Study on Disinfection Effect and Influencing Factors of UV Disinfection and Sodium Hypochlorite Disinfection[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014 (in Chinese).
- [6] Platikanov S, Puig X, Martín J, *et al.* Chemometric modeling and prediction of trihalomethane formation in Barcelona's water works plant[J]. *Water Res*, 2007, 41(15): 3394–3406.
- [7] 黄君礼, 曹亚风, 王学风. 二氧化氯对氯仿形成的影响[J]. *环境化学*, 1994, 13(5): 466–473.
Huang Junli, Cao Yafeng, Wang Xuefeng. Influence of chlorine dioxide on chloroform formation [J]. *Environmental Chemistry*, 1994, 13(5): 466–473 (in Chinese).
- [8] 郑晓英, 王靖宇, 李魁晓, 等. 次氯酸钠、臭氧及其组合再生水消毒技术研究[J]. *环境工程*, 2017, 35(11): 23–27.
Zheng Xiaoying, Wang Jingyu, Li Kuixiao, *et al.* Studies on reclaimed water disinfection using sodium hypochlorite, ozone and their combination techniques [J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35(11): 23–27 (in Chinese).
- [9] 何敏, 许小燕, 牛璐瑶, 等. 次氯酸钠对污水处理厂二级出水消毒效果的影响因素探讨[J]. *净水技术*, 2019, 38(1): 7–11.
He Min, Xu Xiaoyan, Niu Luyao, *et al.* Investigation on influencing factors of disinfection effect of sodium hypochlorite on secondary effluent of wastewater treatment plant [J]. *Water Purification Technology*, 2019, 38(1): 7–11 (in Chinese).
- [10] 郭美婷, 胡洪营. 紫外线和氯组合方式对粪大肠菌群灭活效果的影响研究[J]. *中国给水排水*, 2007, 23(17): 80–83.
Guo Meiting, Hu Hongying. Influence of different combination modes of UV and chlorine on inactivation effect of *Escherichia coli* [J]. *China Water & Wastewater*, 2007, 23(17): 80–83 (in Chinese).
- [11] 张永吉, 刘文君, 张琳. 氯对紫外线灭活枯草芽孢杆菌的协同作用[J]. *环境科学*, 2006, 27(2): 329–332.
Zhang Yongji, Liu Wenjun, Zhang Lin. Synergistic disinfection of bacillus subtilis spores by UV irradiation and chlorine [J]. *Environmental Science*, 2006, 27(2): 329–332 (in Chinese).
- [12] 葛洁桦. 紫外光—氯联用强化回用水消毒效果的试验研究[D]. 广州: 中山大学, 2009.
Ge Jieju. Experimental Study on Disinfection Effect of UV Chlorine Combined with Enhanced Reuse Water [D]. Guangzhou: Zhongshan University, 2009 (in Chinese).
- [13] 陈健, 王长生, 张国占, 等. 紫外线消毒技术在给排水中的应用[J]. *中国给水排水*, 2002, 18(7): 29–31.
Chen Jian, Wang Changsheng, Zhang Guozhan, *et al.* Application of ultraviolet disinfection technology in water and wastewater treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2002, 18(7): 29–31 (in Chinese).
- [14] 刘淑琳, 唐玉霖. 城市污水处理厂紫外线消毒常见问题控制及发展趋势[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(22): 24–28.
Liu Shulin, Tang Yulin. Solutions of common problems and development trends of ultraviolet disinfection in wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(22): 24–28 (in Chinese).
- [15] 王璐璐. 饮用水中二氧化氯与氯气消毒效果对比与研究[J]. *内蒙古石油化工*, 2018, 44(6): 32–33.
Wang Lulu. Comparison and study on disinfection effect of chlorine dioxide and chlorine gas in drinking water [J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2018, 44(6): 32–33 (in Chinese).
- [16] 刘怡, 吴明松, 周秀艳, 等. 磷酸改进五步碘量法对二氧化氯发生器产物测定[J]. *中国消毒学杂志*, 2018, 35(12): 890–892, 897.
Liu Yi, Wu Mingsong, Zhou Xiuyan, *et al.* Phosphoric acid improved five-step iodometry for determining products of chlorine dioxide generator [J]. *Chinese Journal of Disinfection*, 2018, 35(12): 890–892, 897 (in Chinese).
- [17] 陈飒, 李志梅, 苏子行, 等. 复合二氧化氯消毒剂有效含量的定义[J]. *净水技术*, 2012, 31(1): 12–15.
Chen Sa, Li Zhimei, Su Zixing, *et al.* Definition of available concentration of composite chlorine dioxide [J]. *Water Purification Technology*, 2012, 31(1): 12–15 (in Chinese).
- [18] Zhao Q L, Kugel G. Thermophilic/mesophilic digestion of sewage sludge and organic wastes [J]. *J Environ Sci Health*, 1996, 31(9): 2211–2231.
- [19] 王雨, 程丽华, 毕学军, 等. 污水深度处理次氯酸钠消毒副产物二氯乙腈的生成影响研究[J]. *水处理技术*, 2014, 40(6): 50–53.
Wang Yu, Cheng Lihua, Bi Xuejun, *et al.* Generation of

- disinfection by-product dichloroacetonitrile by sodium hypochlorite disinfection in the wastewater tertiary treatment[J]. *Technology of Water Treatment*, 2014, 40(6): 50 – 53 (in Chinese).
- [20] Zhou X Q, Zhao J Y, Li Z F, *et al.* Enhancement effects of ultrasound on secondary wastewater effluent disinfection by sodium hypochlorite and disinfection by-products analysis [J]. *Ultrason Sonochem*, 2016, 29: 60 – 66.
- [21] 李璐瑶. 次氯酸钠深度处理城市污水厂二级出水的试验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2012.
Li Luyao. Experimental Study on Advanced Treatment of Secondary Effluent from Municipal Sewage Plant with Sodium Hypochlorite[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2012 (in Chinese).
- [22] 祝明, 杨雅雯, 赵燕, 等. 氨氮浓度对次氯酸钠消毒中水的影响[J]. *环境工程学报*, 2011, 5(12): 2793 – 2796.
Zhu Ming, Yang Yawen, Zhao Yan, *et al.* Effect of ammonia nitrogen concentration on sodium hypochlorite disinfection of reclaimed water[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, 5(12): 2793 – 2796 (in Chinese).
- [23] 朱彩琴. 城镇污水处理厂次氯酸钠消毒实验与分析[J]. *资源节约与环保*, 2015(3): 109.
Zhu Caiqin. Experiment and analysis of sodium hypochlorite disinfection in urban sewage treatment plant [J]. *Resources Economization & Environment Protection*, 2015(3): 109 (in Chinese).
- [24] 王荣生, 黄翔峰, 谢浩, 等. 城市污水厂尾水氯消毒及余氯控制技术进展[J]. *贵州环保科技*, 2003, 9(4): 16 – 20.
Wang Rongsheng, Huang Xiangfeng, Xie Hao, *et al.* Chlorine disinfection and residual chlorine control technology of tail water of urban sewage plant [J]. *Guizhou Environmental Protection Science and Technology*, 2003, 9(4): 16 – 20 (in Chinese).
- [25] Helz G R, Nweke A C. Incompleteness of wastewater dechlorination[J]. *Environ Sci Technol*, 1995, 29(4): 1018 – 1022.
- [26] 柏育材, 李鸣, 徐兆礼, 等. 冷排水中余氯对鱼类毒理效应和资源损失量估算方法的研究[J]. *生态毒理学报*, 2011, 6(6): 634 – 642.
Bai Yucai, Li Ming, Xu Zhaoli, *et al.* Toxic effects of residual chlorine from cooling water on fish and evaluation method of fishery resources loss [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2011, 6(6): 634 – 642 (in Chinese).
- [27] 江志兵, 廖一波, 高爱根, 等. 余氯对鱼类毒性影响的研究进展[J]. *海洋学研究*, 2009, 27(4): 86 – 94.
Jiang Zhibing, Liao Yibo, Gao Aigen, *et al.* Advance in the toxic effects of residual chlorine on fish[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2009, 27(4): 86 – 94 (in Chinese).



作者简介:李激(1970 –),女,江苏无锡人,博士,教授,博导,业内知名专家,长期从事污水处理厂建设、运行管理、提标改造、科技攻关等工作,现就职于江南大学,主要从事教学和科研工作。承担和参与“十二五”“十三五”等国家及省部级科研课题14项;获国家环保部科学技术奖和华夏建设科学技术奖等8项;参与近10部行业技术规程和导则编制;国内外期刊累计发表专业论文80余篇。

E-mail: liji@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2020-02-26