

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.09.012

城镇污水处理厂次氯酸钠消毒影响因素及优化研究

杨敏, 尚巍, 李鹏峰, 游佳, 顾森, 孙永利, 张文安
(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

摘要: 以典型城镇污水处理厂滤池出水为研究对象,对次氯酸钠消毒主要影响因素进行了分析,并从有效氯投加量和消毒效果表征指标两方面对工艺优化分别开展了研究。结果表明,有效氯投加量、接触时间、混合条件和粪大肠菌群数对消毒效果影响显著,氨氮浓度对消毒效果影响较小;静置下温度对消毒效果影响显著,搅拌下温度对消毒效果的影响可以忽略;当搅拌接触时间 ≥ 10 min时,有效氯投加量为0.75 mg/L即可确保滤池出水消毒后的粪大肠菌群数稳定达到一级A标准;典型深度处理工艺沿程粪大肠菌群数明显降低,与二沉池出水相比,滤池出水粪大肠菌群数平均降低85%;对于一级A及以上标准的城镇污水处理厂,接触时间 ≥ 10 min时滤池出水消毒的有效氯投加量为1 mg/L,接触时间 < 10 min时滤池出水消毒的有效氯投加量可增至1.25 mg/L;优化的有效氯投加量(1~1.25 mg/L)明显低于调研的全国高排放标准城镇污水处理厂的平均有效氯投加量(3.69 mg/L);当有效氯投加量为1 mg/L时,滤池出水接触30 min的余氯(0.02~0.16 mg/L)明显低于调研的全国高排放标准城镇污水处理厂的平均余氯(1.12 mg/L),尾水生态安全风险明显降低;同时,提出了一种消毒效果快速表征指标,即氧化还原电位(ORP)和运行控制参数氧化还原电位增量(Δ ORP),并给出了有效氯投加量为1 mg/L时滤池出水不同接触时间的 Δ ORP参考值。

关键词: 次氯酸钠; 消毒; 影响因素; 工艺优化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)09-0076-06

Influencing Factors of Sodium Hypochlorite Disinfection and Its Optimization in Municipal Wastewater Treatment Plants

YANG Min, SHANG Wei, LI Peng-feng, YOU Jia, GU Miao, SUN Yong-li,
ZHANG Wen-an

(North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074,
China)

Abstract: The main influencing factors of sodium hypochlorite for disinfecting the effluent from a filter of a typical municipal wastewater treatment plant were systematically analyzed, and the disinfection process was optimized according to the characterization indexes of effective chlorine dosage and disinfection performance. Effective chlorine dosage, contact time, mixing conditions and the number of fecal coliforms had significant effects on disinfection performance, while ammonia nitrogen had little effect on disinfection performance. The influence of temperature on disinfection performance under static condition was significant, while that under agitation could be ignored. When the stirring and contact time was no less than 10 min, effective chlorine dosage of 0.75 mg/L could ensure that the number of fecal

基金项目: 住建部科技计划项目(2020-K-052)

coliforms in the effluent of the filter after disinfection reached the first level A criteria specified in the *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002). The number of fecal coliforms in the effluent from typical advanced treatment processes decreased significantly along the process. Compared with the number of fecal coliforms in the effluent from a secondary sedimentation tank, that in the effluent from the filter was decreased by 85% on average. For municipal wastewater treatment plants that require to meet the first level A standard or more strict standards, the optimized effective chlorine dosage for disinfection of the effluent from filter was 1 mg/L when the contact time was no less than 10 min. When the contact time was less than 10 min, the effective chlorine dosage for the disinfection could be increased to 1.25 mg/L. The optimized effective chlorine dosage (1-1.25 mg/L) was significantly lower than the average effective chlorine dosage (3.69 mg/L) of the surveyed municipal wastewater treatment plants required to meet stricter discharge standards. When the effective chlorine dosage was 1 mg/L, the residual chlorine in the effluent from the filter for 30 minutes contact (0.02-0.16 mg/L) was significantly lower than that (1.12 mg/L) in the effluent from the surveyed municipal wastewater treatment plants required to meet stricter discharge standards in China, and the ecological safety risk of the tail water was significantly reduced. An optimized disinfection rapid characterization index [oxidation reduction potential (ORP)] and an operation control parameter (Δ ORP) were innovatively proposed, and the referential Δ ORP for different contact times of the effluent from the filter under the effective chlorine dosage of 1 mg/L were proposed.

Key words: sodium hypochlorite; disinfection; influencing factor; process optimization

城镇污水处理厂消毒工艺主要包括紫外消毒、次氯酸钠消毒、二氧化氯消毒、臭氧消毒及其组合工艺等,其中次氯酸钠由于具有消毒效果好、不涉及危化品、运行管理简单等优点,是当前城镇污水处理厂应用最广泛的消毒剂。但目前关于次氯酸钠消毒的研究存在诸多问题。①次氯酸钠消毒影响因素方面:a. 以二沉池出水为研究对象开展一级A标准下次氯酸钠消毒影响因素研究^[1-3],而非滤池出水;b. 部分因素对次氯酸钠消毒影响的研究方法不合理^[3];c. 影响因素研究的结论并不一致^[3-4]。②有效氯投加量方面:a. 相同排放标准下城镇污水处理厂单独次氯酸钠消毒系统有效氯投加量差别较大^[5];b. 《室外排水设计标准》(GB 50014-2021)规定,当无试验资料时,污水厂出水加氯量可采用5~15 mg/L,其并未针对不同出水排放标准分类规定加氯量。③次氯酸钠消毒效果表征指标(粪大肠菌群数和余氯浓度)存在一定的应用局限:a. 粪大肠菌群数为生物指标,检测周期一般为48 h,不能实时指导原水水质水量波动下消毒系统的动态调控;b. 余氯为化学指标,一般便携式和在线余氯仪的检测下限分别为0.02和0.035 mg/L,但研究发现低有效氯

投加量或实际接触时间较长时存在出水总余氯低于或接近余氯仪检测下限问题。

基于此,笔者以典型城镇污水处理厂滤池出水为研究对象,对次氯酸钠消毒主要影响因素(有效氯投加量、混合条件、温度、氨氮浓度等)开展了系统研究,并在此基础上从有效氯投加量和消毒效果表征指标两方面分别进行工艺优化,以期“双碳战略”下城镇污水处理厂次氯酸钠消毒系统的精细化设计和运行提供指导,并为我国相关标准规范的制定和修订提供参考。

1 次氯酸钠消毒主要影响因素试验研究

1.1 有效氯投加量的影响

以某典型城镇污水处理厂滤池出水为研究对象,在常温(25.5℃)和静置接触30 min的条件下,开展了有效氯投加量对滤池出水消毒效果的影响。消毒前粪大肠菌群数为47 000个/L,滤池出水氨氮为0.2 mg/L,当有效氯投加量为0.5、0.75、1、1.5、2、2.5 mg/L时,消毒后粪大肠菌群数分别为27 500、13 000、8 850、1 800、100、0个/L。可见,随着有效氯投加量的增加,滤池出水消毒效果增强,消毒后粪大肠菌群数明显降低,当有效氯投加量为2 mg/L

时,滤池出水消毒后的粪大肠菌群数稳定低于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准限值(1 000个/L)。

1.2 混合条件的影响

《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)规定“次氯酸钠消毒后应进行混合和接触”。实际工程中次氯酸钠溶液一般投加在推流式接触池前端,主要通过水力作用实现次氯酸钠与滤池出水的充分混合。在常温(27℃)和接触时间为30 min的条件下,开展了不同混合条件(静置和搅拌)下有效氯投加量对滤池出水消毒效果的影响,其中滤池出水氨氮为0,搅拌转速为100 r/min,结果见表1(消毒前粪大肠菌群数为59 000个/L)。可知,混合条件对滤池出水次氯酸钠消毒效果影响显著,搅拌条件下的消毒效果明显优于静置时的消毒效果。根据实际情况,有效氯投加量为0.75 mg/L可确保滤池出水粪大肠菌群数稳定达到一级A标准。而当静置接触30 min时,确保滤池出水粪大肠菌群数稳定达到一级A标准的有效氯投加量为2 mg/L。

表1 不同混合条件下有效氯投加量对滤池出水消毒效果的影响

Tab.1 Influence of effective chlorine dosage on disinfection effect of filter effluent with different mixing conditions

混合条件	有效氯投加量/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	消毒后粪大肠菌群 数/($\text{个}\cdot\text{L}^{-1}$)
静置	1.5	1 100
	2	50
	2.5	0
搅拌	0.5	900
	0.75	0
	1	10

1.3 温度的影响

分别在静置和搅拌条件下,开展温度对滤池出水消毒效果的影响。静置条件下,消毒前粪大肠菌群数为59 000个/L,接触时间为30 min,滤池出水氨氮为0,当有效氯投加量为1.5、2、2.5 mg/L时,常温(27℃)环境下消毒后粪大肠菌群数分别为1 100、50、0个/L;低温(13℃)环境下该指标分别为4 900、1 750、0个/L。搅拌条件下,消毒前粪大肠菌群数为34 000个/L,接触时间为30 min,滤池出水氨氮为0.3 mg/L,搅拌转速为100 r/min,当有效氯投加量为

0.75、1、1.5 mg/L时,常温(24℃)和低温(13℃)环境下消毒后粪大肠菌群数均为0。可见,静置条件下,温度对滤池出水次氯酸钠消毒效果的影响显著,与常温的消毒效果相比,低温的消毒效果较差。为确保滤池出水消毒后粪大肠菌群数稳定达到一级A标准,静置时间为30 min时,常温 and 低温环境下所需的有效氯投加量分别为2和2.5 mg/L。但在搅拌条件下,温度对滤池出水次氯酸钠消毒效果的影响可以忽略。在低温搅拌30 min条件下,有效氯投加量为0.75 mg/L即可确保滤池出水消毒后粪大肠菌群数稳定达到一级A标准。温度对次氯酸钠消毒效果的影响主要取决于微生物活性和水分子运动综合作用下粪大肠菌群与消毒剂的混合程度,静置条件下微生物活性和水分子运动的综合作用是主导因素,而搅拌条件下以机械混合作用为主。

1.4 接触时间的影响

在常温(24℃)条件下,以搅拌进行混合,接触时间对滤池出水消毒效果的影响见表2,其中滤池出水氨氮为1.2 mg/L,搅拌转速为100 r/min。可知,接触时间对滤池出水次氯酸钠消毒效果的影响显著,随着接触时间的增加,滤池出水消毒后粪大肠菌群数明显降低。为确保滤池出水消毒后粪大肠菌群数稳定达到一级A标准,当有效氯投加量为0.5 mg/L时,需要的接触时间为20 min;而有效氯投加量为0.75 mg/L时,需要的接触时间可降低至10 min,均明显低于《室外排水设计标准》规定的“不应小于30 min”的要求。

表2 接触时间对滤池出水消毒效果的影响

Tab.2 Influence of contact time on disinfection effect of filter effluent

有效氯投加量/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	不同接触时间下的粪大肠菌群数/($\text{个}\cdot\text{L}^{-1}$)			
	0 min	10 min	20 min	30 min
0.5	39 000	1 000	450	400
0.75	39 000	150	10	0

1.5 氨氮浓度的影响

氨氮是次氯酸钠消毒的主要影响因素之一,当污水处理厂出水含有氨氮时,次氯酸钠会与氨氮反应生成活性相对较低的氯胺。在常温(20℃)、搅拌接触30 min、有效氯投加量为0.75 mg/L、消毒前粪大肠菌群数为25 000个/L的条件下,研究氨氮浓度对滤池出水消毒效果的影响,结果见表3。可知,初始氨氮浓度对滤池出水次氯酸钠消毒效果有一定

影响,当初始氨氮 ≥ 1 mg/L时,滤池出水消毒效果有所降低,但并不影响出水粪大肠菌群数稳定达标,这与何敏等^[3]得出的结论“次氯酸钠消毒效果随氨氮浓度的增加而增强”并不一致。经核算,当氨氮浓度为0、1、2和3 mg/L时,滤池出水消毒后的化合氯浓度分别为0、0.05、0.09和0.05 mg/L。分析认为,在较低有效氯投加量下,随着氨氮浓度的增加,部分有效氯转化为消毒能力相对较低的一氯胺等化合氯是导致消毒效果下降的主要原因。

表3 氨氮浓度对滤池出水消毒效果的影响

Tab.3 Influence of $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration on disinfection effect of filter effluent

氨氮浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	粪大肠菌群 数/($\text{个}\cdot\text{L}^{-1}$)	游离氯/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	总氯/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
0	0	0.02	0.02
1	200	0.04	0.09
2	50	0.04	0.13
3	50	0.04	0.09

1.6 粪大肠菌群数的影响

在常温搅拌30 min和有效氯投加量为0.5 mg/L的条件下,分析初始粪大肠菌群数对滤池出水消毒效果的影响。结果表明,当消毒前粪大肠菌群数为25 000、39 000和48 500个/L时,消毒后粪大肠菌群数分别降至150、400和1 480个/L。可见,初始粪大肠菌群数对滤池出水消毒效果的影响显著,消毒效果随初始粪大肠菌群数的增加呈下降趋势。初始粪大肠菌群数为48 500个/L时,消毒后的粪大肠菌群数已超过一级A标准限值。

进一步对典型深度处理工艺(混凝—沉淀—过滤)沿程粪大肠菌群数变化特征进行了研究。以海河流域3座典型污水处理厂深度处理工艺沿程粪大肠菌群数为研究对象,结果表明,这3座污水厂工艺沿程粪大肠菌群数均呈降低趋势,二沉池出水粪大肠菌群数为 $(19.5\sim 39)\times 10^4$ 个/L,经过深度处理后,滤池出水降至 $(2.05\sim 5.4)\times 10^4$ 个/L,平均降幅为 23.04×10^4 个/L,即平均降低率为85%。

2 次氯酸钠消毒工艺优化研究

2.1 基于出水生态安全的有效氯投加量优化

有效氯投加量是次氯酸钠消毒的关键运行参数^[5-7],不但会影响消毒药剂的投加成本,而且会影响污水处理厂尾水余氯浓度和受纳水体的生态安全。海河流域3座典型一级A以上标准城镇污水处

理厂次氯酸钠消毒系统调研结果表明,实际有效氯投加量为2.5~4.5 mg/L,均值为3.67 mg/L。但本研究中,在低温和搅拌接触10 min条件下,有效氯投加量为0.75 mg/L即可确保城镇污水处理厂滤池出水消毒后粪大肠菌群数稳定达到一级A标准,明显低于李激等^[5]调研的全国31座一级A及以上标准城镇污水处理厂单独次氯酸钠消毒系统的平均有效氯投加量(3.69 mg/L),进一步表明当前我国一级A及以上标准城镇污水处理厂普遍存在有效氯投加量过大、出水生态安全风险高等问题。结合城镇污水处理厂水质水量波动、部分时段二沉池跑泥、消毒系统改造受限时消毒剂投加点前移等不利因素,并考虑到工程安全系数,建议一级A及以上标准城镇污水处理厂接触时间不低于10 min下的有效氯投加量为1 mg/L,接触时间低于10 min下的有效氯投加量可适当增加至1.25 mg/L。

为分析上述一级A及以上标准城镇污水处理厂出水次氯酸钠消毒有效氯投加量建议值的可行性,以海河流域某典型城镇污水处理厂滤池出水为研究对象,在常温搅拌接触30 min、有效氯投加量为1 mg/L、初始粪大肠菌群数为25 000个/L的条件下,进一步验证了不同初始氨氮浓度下滤池出水消毒效果。结果表明,当初始氨氮浓度为0、1、2、3 mg/L时,消毒后粪大肠菌群数均为0,游离氯分别为0.02、0.02、0.03、0.03 mg/L,总氯分别为0.02、0.06、0.12、0.16 mg/L。同时,结合当前我国一级A及以上标准城镇污水处理厂次氯酸钠消毒系统平均有效氯投加量的实际情况,分析了较高有效氯投加量(4 mg/L)下消毒接触时间对余氯的影响(滤池出水氨氮为0.2 mg/L),结果如图1所示。

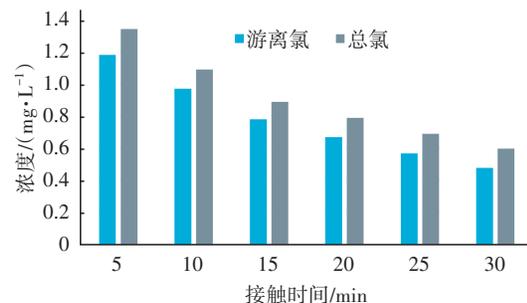


图1 有效氯投加量为4 mg/L时接触时间对余氯浓度的影响

Fig.1 Influence of contact time on residual chlorine concentration with effective chlorine dosage of 4 mg/L

不同初始氨氮浓度下,有效氯投加量为1 mg/L均可确保滤池出水消毒后粪大肠菌群数稳定达到一级A标准,滤池出水消毒后的游离氯和总氯均明显低于较高有效氯投加量(4 mg/L)下滤池出水消毒30 min的游离氯(0.48 mg/L)与总氯(0.6 mg/L),同时也低于李激等^[5]调研的全国56座一级A及以上标准城镇污水处理厂的出水总余氯平均值(1.12 mg/L)。综上所述,有效氯投加量为1 mg/L时,一级A及以上标准城镇污水处理厂尾水生态安全风险可明显降低。

2.2 消毒效果表征指标的优化

次氯酸钠溶液在实际储存过程中受光照等因素的影响会出现有效氯含量衰减问题,进而影响有效氯的精准投加和消毒效果^[1]。针对上述问题和次氯酸钠消毒效果主要表征指标(粪大肠菌群数与余氯浓度)应用的局限,基于氧化还原电位(ORP)在污水生物处理系统运行管理中的应用以及其可作为游泳池水消毒效果的评价指标^[8],创新性地提出了一种优化的污水处理厂次氯酸钠消毒效果快速表征指标。采用氧化还原电位实时指导低有效氯投加量下一级A及以上标准城镇污水处理厂次氯酸钠消毒系统的动态调控。

以某典型城镇污水处理厂滤池出水为研究对象,开展了有效氯投加量为1 mg/L时接触时间对消毒后出水ORP的影响,结果如图2所示。可知,在接触1 min内,消毒后出水ORP由初始的183.3 mV迅速上升至506.7 mV,随后ORP随接触时间的延长呈下降趋势,接触60 min后降至299.2 mV。

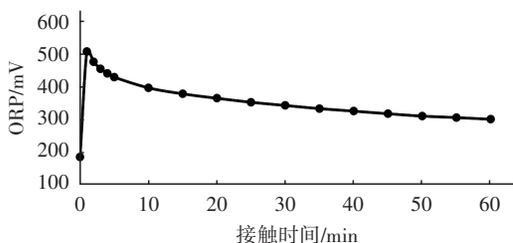


图2 有效氯投加量为1 mg/L时接触时间对消毒出水ORP的影响

Fig.2 Influence of contact time on ORP of disinfection effluent with effective chlorine dosage of 1 mg/L

考虑到滤池出水ORP会受DO浓度和硝酸盐等氧化性物质浓度的影响,不同污水处理厂滤池出水ORP(初始ORP)有所差异,提出将消毒后出水的氧化还原电位增量(Δ ORP)作为系统运行的控制参

数,并给出了优化有效氯投加量为1 mg/L时某典型城镇污水处理厂滤池出水不同接触时间(≥ 10 min)的 Δ ORP参考值,见表4,可为水质水量波动下一级A及以上标准城镇污水处理厂次氯酸钠消毒系统的优化调控提供参考。

表4 有效氯投加量为1 mg/L时滤池出水不同接触时间的 Δ ORP参考值

Tab.4 Referential Δ ORP of filter effluent under different contact time and effective chlorine dosage of 1 mg/L

接触时间 <i>t</i> /min	Δ ORP参考值/mV	接触时间 <i>t</i> /min	Δ ORP参考值/mV
$10 \leq t < 15$	$195 < \Delta \text{ORP} \leq 210$	$30 \leq t < 40$	$140 < \Delta \text{ORP} \leq 160$
$15 \leq t < 20$	$180 < \Delta \text{ORP} \leq 195$	$40 \leq t < 50$	$125 < \Delta \text{ORP} \leq 140$
$20 \leq t < 25$	$170 < \Delta \text{ORP} \leq 180$	$50 \leq t < 60$	$115 < \Delta \text{ORP} \leq 125$
$25 \leq t < 30$	$160 < \Delta \text{ORP} \leq 170$	$t > 60$	115

为确保城镇污水处理厂出水粪大肠菌群数稳定达到一级A及以上标准,并实现节省消毒剂投加成本和降低出水生态安全风险的目标,次氯酸钠消毒工艺在设计和运行过程中应把握如下技术要点:①设置消毒系统出水在线ORP仪和精确加药控制系统;②合理确定滤池出水ORP(初始ORP)和优化有效氯投加量下滤池出水不同接触时间的 Δ ORP;③基于消毒系统进水流量实时核算实际接触时间,并根据核算的实际接触时间确定具体 Δ ORP范围;④参考优化的有效氯投加量,并结合滤池出水ORP和 Δ ORP范围,实时指导次氯酸钠溶液的动态投加,进而合理控制尾水实时ORP。

3 结论与建议

① 有效氯投加量、混合条件、接触时间和粪大肠菌群数对次氯酸钠消毒效果的影响显著,氨氮浓度对次氯酸钠消毒效果的影响较小;静置条件下温度对次氯酸钠消毒效果的影响显著,搅拌条件下产生的影响可忽略;搅拌接触时间 ≥ 10 min时,有效氯投加量为0.75 mg/L即可确保滤池出水消毒后粪大肠菌群数稳定达到一级A标准。

② 对于一级A及以上标准城镇污水处理厂,接触时间 ≥ 10 min时滤池出水消毒的优化有效氯投加量为1 mg/L,接触时间 < 10 min时可增加至1.25 mg/L;优化的有效氯投加量(1~1.25 mg/L)明显低于调研的全国高排放标准城镇污水处理厂的平均有效氯投加量(3.69 mg/L);当优化有效氯投加量为1

mg/L时,滤池出水接触30 min的余氯(0.02~0.16 mg/L)明显低于调研的平均余氯(1.12 mg/L),消毒剂投加成本和尾水生态安全风险均明显降低,经济和环境效益显著。

③ 创新性地提出了一种优化的消毒效果快速表征指标,即ORP和 Δ ORP,并给出了优化有效氯投加量为1 mg/L时滤池出水不同接触时间的 Δ ORP参考值。

④ 对于以清水池作为接触池的情况,建议新建清水池采用推流式池型,采用非推流式池型的清水池可强化混合效果或适当增加有效氯投量;当污水处理厂消毒系统改造受限导致进水为非滤池出水时,建议结合烧杯试验确定有效氯投量。

⑤ 当滤池出水水质波动较大时,注意关注初始ORP的检测和修正,在优化的有效氯投加量下,结合烧杯试验确定污水处理厂滤池出水不同接触时间的 Δ ORP,并且条件允许时在滤池出水管道上设置在线流量计,根据接触池实时进水流量核算接触时间。

参考文献:

- [1] 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 Mu, TAN Zhenjiao, LI Ji, *et al.* Influence factors of sodium hypochlorite disinfection performance in municipal wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(1): 22-27 (in Chinese).
- [2] 张荣海,方淑霞,杨阿香,等. 城市污水处理厂尾水消毒应急提标改造研究[J]. 中国给水排水,2019,35(7):97-100.
ZHANG Ronghai, FANG Shuxia, YANG Axiang, *et al.* Emergency upgrading and reconstruction of tail wastewater disinfection in a municipal wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(7): 97-100 (in Chinese).
- [3] 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).

- [4] 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).
- [5] 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 Ji, WANG Yan, XIONG Hongsong, *et al.* Investigation and optimization strategies on the operation of disinfection facilities in municipal WWTPs [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(8): 7-19 (in Chinese).
- [6] HELZ G R, NWEKE A C. Incompleteness of wastewater dichlorination [J]. Environmental Science & Technology, 1995, 29(4): 1018-1022.
- [7] 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的估算方法研究[J]. 生态毒理学报,2011,6(6):634-642.
BAI Yucui, 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).
- [8] 方道奎,余淑苑,周国宏,等. 深圳市2016—2017年游泳池水质监测情况及氧化还原电位卫生学意义探讨[J]. 中国卫生产业,2018,15(33):1-3.
FANG Daokui, YU Shuyuan, ZHOU Guohong, *et al.* Discussion on the monitoring of swimming pool water quality and the significance of oxidation reduction potential in Shenzhen from 2016 to 2017 [J]. China Health Industry, 2018, 15(33): 1-3 (in Chinese).

作者简介:杨敏(1981-),男,安徽安庆人,硕士,高工,注册环保工程师,主要研究方向为城镇污水处理、工业废水处理、城市水环境综合整治等。

E-mail: 707180297@qq.com

收稿日期:2021-09-11

修回日期:2021-12-07

(编辑:任莹莹)