

疫情防控期间含氯消毒剂大量使用对水生生物的影响综述*

叶利兰¹ 甘春娟² 陈 焱^{1#} 袁绍春¹

(1.重庆交通大学河海学院,重庆 400074;2.重庆市市政设计研究院,重庆 400012)

摘要 家庭和公共场所消毒是有效防控新型冠状病毒(2019-nCoV)的重要手段。合理使用含氯消毒剂可以杀灭或抑制病毒的生长和繁殖,但大剂量、高浓度的含氯消毒剂会对生态环境造成潜在毒性危害。综述了含氯消毒剂对冠状病毒的灭活特性,总结了含氯消毒剂进入水环境的主要途径,及其对水中浮游植物、水生动物的毒理作用和对水生群落结构的影响,并提出了规范化使用含氯消毒剂的相关建议。

关键词 含氯消毒剂 冠状病毒 浮游植物 水生动物 生态毒性

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2021.05.021

Effect of chlorinated disinfectants usage on aquatic organism during the epidemic control: a review YE Lilan¹, GAN Chunjuan², CHEN Yao¹, YUAN Shaochun¹. (1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074; 2. Chongqing Municipal Research Institute of Design, Chongqing 400012)

Abstract: During the epidemic control, disinfection in homes and public places is an important means to effectively prevent the existence and spread of novel coronavirus (2019-nCoV). The rational use of chlorinated disinfectants can kill or inhibit the growth and reproduction of viruses, but large doses and high concentrations of chlorinated disinfectants will cause potential toxicity damage to the ecological environment. In this paper, the inactivation characteristics of chlorinated disinfectants to coronavirus were reviewed. Meanwhile the main pathways of chlorinated disinfectants entering water environment, and then the toxicological effects on phytoplankton, aquatic animals and community structure in water were summarized and analyzed. Some suggestions on the standardized usage of chlorinated disinfectants were ultimately put forward.

Keywords: chlorinated disinfectants; coronavirus; phytoplankton; aquatic animals; ecological toxicity

新型冠状病毒(2019-nCoV)肺炎疫情发生以来,经过全国上下齐心协力、顽强奋战,国内形势积极向好,但境外疫情形势依然严峻。家庭和公共场所的消毒是有效防控 2019-nCoV 的重要手段。2020 年 2 月 18 日,国家卫生健康委员会印发了《消毒剂使用指南》^[1],明确要求在疫情防控期间严格遵循“五加强七不宜”,正确合理地使用消毒剂,真正做到切断传播途径,控制传染病流行。在这场病毒防疫战中,正确合理的消毒剂使用可以杀灭大量的病原微生物,抑制病毒的生长,阻断病毒的传播,从而保证人们的身体健康。然而,若消毒剂使用不当,残留于环境中的大量消毒剂可扩散到大气中、流入地表水或渗入地下水,进而威胁到当地水生态系统和人类身体健康^[2]。在此背景下,本研究综述了含氯消毒剂对冠状病毒(CoV)的灭活特性,总结分析了含氯消毒剂进入水环境的主要途径,对水体中浮游

植物和水生动物的毒理作用,对生物群落结构的影响,并对含氯消毒剂的规范化使用提出了相关建议。

1 含氯消毒剂对 CoV 的灭活特性

据文献报道^{[3]-[4]59},引发此次肺炎的 2019-nCoV 属于 β 属 CoV,而这类病毒因存在包膜已被证实对消毒剂抗力低,同时对紫外线和热也敏感,一般情况下,56℃下水浴 30 min,或采用含氯消毒剂、过氧乙酸和 75%(体积分数)乙醇、乙醚、氯仿等脂溶剂均可有效灭活病毒,但氯已定无法破坏病毒包膜。含氯消毒剂主要通过与水发生反应,产生 HClO,并释放出具有极强氯化作用的活性氯原子和氧化能力的初生态氧,进而有效杀灭 CoV 病毒(见表 1)。因此,疫情防控期间世界卫生组织(WHO)建议每天应使用有效氯为 500 mg/L 的常规家用消毒剂对床头柜、沙发和其他经常接触的物体表面进

第一作者:叶利兰,女,1997 年生,硕士研究生,主要从事水污染防控研究。* 通讯作者。

* 重庆市“留创计划”项目(No.cx2017065);重庆市教育委员会科学技术研究项目(No.KJ170540)。

行至少 1 次的预防性清洁消毒^[8],以对 2019-nCoV 病毒的传播途径进行灭活阻断。国内学者则建议采用有效氯为 500~1 000 mg/L 的含氯消毒剂对物体进行浸泡、表面擦拭或喷洒,并且消毒结束后需用清水擦拭或冲洗^[4,60]。金伟等^[9,3]通过对上海市定点隔离酒店、定点收治医院的排水管及末端污水处理厂中 2019-nCoV 病毒的检测,证实正常的污水消毒方式和消毒剂量可有效灭活 2019-nCoV,并建议居家隔离人员在抽水马桶放置消毒氯片,集中收治区域实行正常消毒,没有必要过量使用消毒剂。

由表 1 还可看出,正确合理使用含氯消毒剂可有效灭活多种 CoV。但疫情防控期间,存在含氯消毒剂大规模和大剂量使用。据报道,自 2020 年 1 月 29 日至 2 月 18 日,武汉市各区、各单位累计投放消毒药剂 1 963.58 t,其中,26 座污水处理厂尾水强化消毒用量 1 777.36 t,污泥消毒用量 33.69 t^[10],再现了“非典”时期过度消毒的现象^[11]。长时间大量使用含氯消毒剂会造成大量消毒剂残留在环境中。有证据表明,多种消毒剂残留物会在土壤、地下水、植物等环境中长期存在,对动植物产生急性和慢性毒性作用,并进入食物链,通过生物富集作用,对人体健康造成危害^[12]。同时,消毒剂在杀灭 CoV 的同时,也灭活了大量有益微生物。

2 含氯消毒剂对水生生物及群落结构的影响

使用含氯消毒剂产生的含氯废水进入水体后可能会造成水环境污染。自然水体通过各类微生物、水生植物和水生动物的食物链关系进行水体、底泥和大气之间的能量交换与物质循环,从而形成水体自净过程。若水中残留的活性氯含量过高,可能会导致生物多样性降低,造成生态系统异源演替,甚至出现关键物种的丧失,导致生态系统发生退化^[13,27,21]。消毒剂的过量使用对河湖生态系统的水化学过程、群落结构和生态演替都可能造成深远影

响,应予以足够的重视。早在 20 世纪初期,国内因在水产养殖中使用含氯消毒剂进行消毒,逐渐开始重视水中残余活性氯对水生生物的影响^[14]。可以预见,疫情防控期间大规模、大剂量使用含氯消毒剂,残留的活性氯很可能会通过地表径流、排水管网和污水含氯尾水排放进入自然水体,进而对水体中的水生生物产生不可逆的毒理作用,从而影响水生生物群落结构。

2.1 含氯消毒剂进入水环境的主要途径

在疫情防控期间,不仅对室内环境进行消毒,也会对室外公共场所进行大面积的喷洒消毒。消毒期间造成大量含氯消毒剂残留,这些含氯消毒剂会随降雨径流作用进入地表水中,或通过渗透作用进入到地下水中,从而对微生物群落和水生态系统产生影响。而家庭和公共场所用水器具使用高浓度、高剂量的含氯消毒剂还会通过排水设施进入城镇污水处理厂,导致污水处理厂进水余氯含量较高,进而对生物池中的活性污泥产生抑制作用,甚至对生物处理系统产生破坏性影响。高剂量 NaClO 会严重损伤污水处理系统中的聚磷菌,影响吸磷和释磷速率^[15]。目前,已证实 2019-nCoV 可以通过粪便污水进入排水设施^[9,2]。为进一步防控 2019-nCoV 的卫生学风险,各地污水处理厂往往在消毒设施中增加了含氯消毒剂的投加剂量,但过量的余氯可能产生致癌性含氯有机物(三卤甲烷)和持久性高毒性有机物(卤乙酸、卤代硝基甲烷)等消毒副产物,排入水体后引发持久性累积效应,进一步增加生态风险。为避免疫情防控期间污水处理厂因大剂量投加含氯消毒剂产生的消毒副产物对水环境的影响,住房和城乡建设部出台了《关于疫情期间城镇污水处理厂加氯消毒设施运行建议》,指出需要加强对尾水中余氯含量的检测,严格控制出水余氯含量,以避免余氯含量过高对后续接纳水体造成影响。但该建议并未给出尾水余氯含量控制阈值。同时,对于乡镇污水处

表 1 含氯消毒剂对 CoV 的灭活效果
Table 1 Inactivation effect of chlorinated disinfectants on CoV

含氯消毒剂有效成分	针对 CoV 属类	针对 CoV 种类	灭活效果	参考文献
NaClO	β	严重急性呼吸综合征冠状病毒(SARS-CoV)	0.05%(质量分数)NaClO 作用 2 min 可抑制 SARS-CoV 的复制,但需作用 30 min 才能完全破坏病毒核酸;而 0.1% NaClO 作用 1 min 即可完全破坏病毒基因组	[5]
NaClO、ClO ₂	β	SARS-CoV	使用 NaClO、ClO ₂ 消毒,当污水中游离余氯量分别保持 0.5、2.19 mg/L 以上时可完全灭活污水中的 SARS-CoV	[6]
NaClO	β	鼠肝炎病毒(MHV)	0.06%(质量分数)NaClO 作用 1 min 能使 MHV 与 TGEV 滴度分别下降 0.4、0.6 对数值(以半数组织细胞感染剂量计)	[7]
	α	猪传染性胃肠炎病毒(TGEV)		

理厂而言,往往由于技术和设备原因,难以严格控制出水余氯含量,导致尾水余氯含量过高。相关研究表明,对于含活性氯尾水连续排入的自然水体,活性氯应控制在 0.01 mg/L (以 Cl_2 计)以下,才能防止其对水生生物的影响,若水体中存有敏感生物,活性氯则不能超过 0.002 mg/L ^[16]。

2.2 含氯消毒剂对浮游植物的毒理作用

含氯消毒剂进入水体后,残留的余氯会对水生植物,尤其是浮游植物产生影响,但其影响程度取决于水体水质条件,如水中较高浓度的总颗粒物(TSS)和溶解性有机碳(DOC)会大量消耗水体中的余氯,进而降低其对浮游植物的影响^{[13]2719}。相关研究证实,水体中余氯可通过抑制铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)^[17]、三角褐指藻(*Phaeodactylum tricornutum*)^[18]、小球藻(*Chlorella* sp.)^{[19]5429}等藻类的光合作用和呼吸作用,继而对其生长产生明显抑制作用。同时,水中微量活性氯的残留和氯胺的存在均会破坏浮游植物的细胞酶活性,使其对氮的吸收功能受阻,从而影响浮游植物的繁殖能力^[20]。此外,余氯对浮游植物的毒害作用受余氯浓度和作用时间影响^[21]。如低水平余氯(0.02 mg/L)反而可促进小球藻的生长^{[19]5432},而当余氯超过 0.25 mg/L 时,则会对藻类生长产生抑制作用^[22],并随余氯浓度的增加和作用时间的延长,抑制作用逐渐增强^[23]。虽然浮游植物具有较强的恢复潜能,对余氯的胁迫损伤作用可作出较快的响应恢复,但其恢复后会导致群落结构会发生显著变化^[24]。余氯浓度过高引起浮游植物生产力中断,可能导致直接或间接依赖光合作用提供能量的较高营养级生物的食物短缺,严重者可能会影响生产力低下区域内各种生物的生长、繁殖潜力或最终生存^[25]。

2.3 含氯消毒剂对水生动物的毒理作用

水体中残留余氯对水生动物的毒理作用与余氯浓度、应激时间和敏感性等因素有关。由于浮游动物生命周期较短,因此,毒理效应主要基于急性毒性实验结果^[26]。由于浮游动物对氯较敏感,即使余氯含量较低,也可对浮游动物产生显著影响,但相较于间歇接触,连续接触时浮游动物对氯的敏感阈值更低^{[13]2719}。基于水中余氯对鱼类和无脊椎动物物种的显著毒理效应,美国环境保护署(USEPA)建议,天然淡水中总余氯(游离氯和化合氯)阈值(时均值)宜为 0.019 mg/L ^[27]。而国内污水处理厂出水水质所执行的现行标准中,并未规定污水处理厂尾水的余氯阈值,难以消除含氯尾水排放对水环境产生的

生态毒理作用。对于含氯消毒剂的生态毒性,EM-MANUEL等^[28]研究发现即使水体中余氯低于 1 mg/L ,也可对水生生物产生急性毒理作用。同时,研究发现含氯尾水排放还会导致青鳉鱼(*Oreochromis mossambicus*)的繁殖率和水蚤(*Daphnia similis*)的存活率明显下降^[29]。余氯对浮游动物的毒理作用还会与温度产生协同效应,呈现出随温度的升高而浮游动物对余氯更敏感的规律^[30]。江志兵等^[31]研究发现余氯对中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)的毒性随水体温度的升高而增强。同样,研究证实余氯对鱼类的毒理作用也随温度升高而增强^{[32]88}。

余氯对不同水生动物存在不同的毒性效应机制。对于鱼类而言,余氯会通过氧化损伤致毒途径导致鱼鳃组织产生病变,阻止氧气的进入和交换,降低血液运输氧的能力,进而对鱼类产生毒性作用^{[32]89, [33]};对于浮游动物而言,则主要通过蛋白质外泄致毒途径产生灭活^[34]。而余氯对底栖动物的灭活途径受底栖动物种类影响。余氯会通过减少涡虫(*Dugesia tigrina*)摄食和运动能力,导致其生殖能力受损,表现出明显的亚致死毒性^[35]。受余氯影响后,摇蚊(*Chironomidae*)幼虫和水蚯蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)会随时间推移和水温上升表现出不同的恢复特性,其中,摇蚊幼虫可较快恢复,而未被杀死的水蚯蚓因处于应激状态而恢复进程较慢^{[36]29}。

2.4 含氯消毒剂对生物群落结构的影响

微生物是水生态物质循环和能量流动等生态过程的重要参与者,但其群落结构易受环境因素干扰而发生演替。微生物群落结构属于生物群落结构的一部分,含氯消毒剂可杀灭大多数病原微生物,也会对微生物群落结构产生影响。水体中残留的消毒剂可能会破坏微生物的细胞壁,或者对其蛋白质造成氧化损伤^[37]。如活性氯从 0.057 mg/L 增加至 0.070 mg/L 时,菌群多样性明显降低,并显著改变了优势菌种^[38]。同时,当含氯消毒剂超量排放至受纳水体时,残留的余氯首先以游离氯形式存在。但在水动力条件下,游离氯不断稀释、光分解和挥发,并与水中还原物质和有机物质发生反应形成性质比较稳定的氯胺^{[39]2}。相对于游离氯,氯胺超过 1 mg/L 时即可对水体中的硝化细菌产生明显抑制作用^[40],进而影响水体中氮的循环过程。最新研究指出,含氯尾水排放会显著影响水环境中的微生物群落,降低生物多样性,甚至导致水体中具有硝化功能的微生

物发生缺失,进而破坏水体中氮还原体系,影响自然水体中氮循环过程^[39-43]。可见,过量含氯消毒剂排放至自然水体,会破坏环境功能微生物的菌群结构,改变微生物生态功能,进而影响生物群落结构。

含氯消毒剂不仅会对微生物群落结构产生影响,也会对水生植物和动物种群演替产生影响。研究表明,低水平氯(0.05~0.15 mg/L)会导致海洋浮游植物群落的物种组成发生重大变化^[41]。此外,含氯尾水中余氯和消毒副产物的联合作用还可对受纳水体的生物群落产生不利影响^[42]。水生生物群落中的微生物、植物和动物种群之间是相互影响、相互作用的。水中溶解氧的主要来源是浮游生物的光合作用,当水中余氯浓度过高时会导致浮游植物死亡,光合作用减弱,水中溶解氧浓度降低^[36~38]。然而,底栖无脊椎动物种类的多样性指数与水中溶解氧呈显著正相关关系^[43]。当水中溶解氧浓度降低时,底栖动物也会受到相应的影响。同时,在池塘中施用 ClO_2 会在短期内增加水体氨氮毒性,并导致浮游动物的种类、密度和生物量显著增加,进而导致浮游植物生物量显著下降、小型化藻类增多、优势种显著变化^[44]。含氯消毒剂大量使用不仅会对单一水生物种造成影响,对水生态系统的群落结构和生态演替都可能造成深远的影响,进而影响水生态系统中的物质循环,最终破坏水生态系统的平衡。

3 含氯消毒剂的规范化使用

3.1 源头削减

在疫情防控期间,社区、公共场所和家庭均应严格按照产品使用说明书上标明的使用浓度进行消毒剂配制,以避免过量使用消毒剂,尤其是不宜使用有效氯大于1000 mg/L的消毒剂进行预防性消毒。在进行家庭室内消毒时,若家人身体无明显异常,可适当减少消毒次数或放弃大面积消毒,以降低HClO对身体的伤害。同时,应尽量减少一些室外公共场所的过度消毒,如避免在小区入口处设置全身喷淋式的消毒通道。此外,若小区无感染者或密切接触者时,公共场所的消毒应以清洁卫生为主,预防性消毒为辅,重点对高频接触的门把手、电梯按钮、门禁按钮等物体表面进行消毒。对于空气流通性较好的室外公共场所,尤其是人体很少直接接触的区域,不建议进行大面积消毒,尤其是不应在池塘、水库、湖泊等水环境中投加含氯消毒剂。

3.2 过程控制

针对含氯消毒剂产生的废水,可通过在进入水

事前设置调蓄、拦截和净化设施进行净化处理,以阻断降雨径流携带含氯消毒剂废水进入水体。当含氯消毒剂的生活污水或医疗废水进入污水处理厂后,应通过处理工艺流程的强化措施,并根据进水余氯指标的变化情况,及时采取有针对性的应急措施。当对医疗废水进行消毒时,若含氯消毒剂投加量不足,则易与污水中的氨氮生成氯胺。同样地,家用消毒剂进入污水中也通常以氯胺形态存在^[45,38]。虽然氯胺氧化能力较弱,但低浓度便可对硝化功能微生物产生显著的抑制作用,进而影响污水处理系统的生物脱氮作用。因此,在疫情防控期间特别要保证城市污水处理厂的稳定运行。王洪臣^[45]³⁹建议疫情防控期间,污水处理厂运行时应密切关注余氯的瞬时波动特性,并严密监控和及时预警活性污泥的活性,可通过增加污泥回流比或投加营养物质促进活性污泥中微生物的生长,以减少余氯对处理系统的冲击效应。为防止含氯尾水排放对水生态系统的影响,可将污水处理厂尾水中余氯阈值控制在 0.5 mg/L 以下。

3.3 末端治理

当污水处理厂含氯尾水排放进入水环境后,也可以通过水力调控、曝气复氧提高水中溶解氧浓度,并结合水生植物生态系统构建,强化消毒剂在水体中降解和脱毒,降低其对人体生物健康的影响。例如,采取超微净化水处理技术,可以把水质中的残留消毒产物、氮磷、藻类、胶体等污染物进行清除。水体曝气复氧技术经常用于湖泊、河道污染治理,通过增强水体自净能力,改善水环境质量。

4 结 论

在疫情防控期间,家庭和公共场所消毒是有效防范 2019-nCoV 传播的重要手段,但应正确合理使用含氯消毒剂。若大规模、大剂量使用含氯消毒剂,残留的含氯废水易通过地表径流、市政污水管网以及污水处理厂含氯尾水的排放进入水环境中,改变微生物群落结构,影响物质循环,进而对水生生物产生毒性危害,甚至造成物种的丧失,破坏水生态功能。因此,各场所均应正确地使用含氯消毒剂,从源头上削减使用量,并采用过程控制措施以阻断残留余氯进入水体中。

参考文献:

- [1] 国家卫生健康委办公厅.国家卫生健康委办公厅关于印发消毒剂使用指南的通知[EB/OL].[2020-02-20].<http://www.nhc.>

- gov. cn/zhjcj/s9141/202002/b9891e8c86d141a08ec45c6a18e21dc2.shtml? from = groupmessage&isappinstalled = 0&wYNO rhjjiR4y = 1582160443166.
- [2] 王红梅,刘征涛,刘晓宇,等.完善 2019-nCoV 民用防疫废物收集管理消除病原微生物环境暴露次生污染风险[J].环境工程技术学报,2020,10(2):228.
- [3] 李六亿,吴安华.新型冠状病毒医院感染防控常见困惑探讨[J].中国感染控制杂志,2020,19(2):105-108.
- [4] 魏秋华,任哲.2019 新型冠状病毒感染的肺炎疫源地消毒措施[J].中国消毒学杂志,2020,37(1).
- [5] ANSALDI F, BANFI F, MORELLI P, et al. SARS-CoV, influenza A and syncytial respiratory virus resistance against common disinfectants and ultraviolet irradiation[J]. Journal of Preventive Medicine and Hygiene, 2004, 45(1): 5-8.
- [6] 王新为,李劲松,金敏,等.SARS 冠状病毒的抵抗力研究[J].环境与健康杂志,2004,21(2):67-71.
- [7] HULKOWER R L, CASANOVA L M, RUTALA W A, et al. Inactivation of surrogate coronaviruses on hard surfaces by health care germicides[J]. American Journal of Infection Control, 2011, 39(5): 401-407.
- [8] 世界卫生组织.症状轻微的疑似新型冠状病毒(COVID-19)感染者的家庭护理及其接触者管理[EB/OL]. [2020-04-27]. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/331133/WHO-nCov-IPC-HomeCare-2020.2-chi.pdf>.
- [9] 金伟,董滨,谭学军,等.全流程实测揭露新冠病毒从病区到城市污水处理系统的传播[J].给水排水,2020,56(4).
- [10] 汤炜玮.实施城市下水道消毒,武汉投放消毒药剂 1 963.58 吨[N].湖北日报,2020-02-19(3).
- [11] 马萍,刘晓平,马虹.非典期间滥用消毒剂的危害及正确使用[J].中国公共卫生,2003,19(9):1145.
- [12] 杨华明.对 SARS 病毒污染消毒措施的建议[J].中国消毒学杂志,2003,20(2):36-38.
- [13] 曾江宁,陈全震,郑平,等.余氯对水生生物的影响[J].生态学报,2005,25(10).
- [14] 赵明军,张洪玉,夏磊,等.常用消毒剂对水产动物的毒性(连载一)[J].中国水产,2011(5):46-47.
- [15] 赵俏迪.次氯酸钠控制城市污水厂污泥膨胀的研究[D].西安:西安建筑科技大学,2018.
- [16] BRUNGS W. Effects of residual chlorine on aquatic life[J]. Water Pollution Control Federation Journal, 1973, 45(10): 2180-2193.
- [17] 赵德骏,李绍秀,夏文琴,等.二氧化氯杀灭水中铜绿微囊藻的影响因素[J].净水技术,2013,32(1):6-9.
- [18] MA Z, GAO K, LI W, et al. Impacts of chlorination and heat shocks on growth, pigments and photosynthesis of *Phaeodactylum tricornutum* (Bacillariophyceae)[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2011, 397(2): 214-219.
- [19] 金施,孙岳,徐兆礼,等.余氯对小球藻的影响以及损失评估[J].生态学报,2014,34(19).
- [20] NAOJI F. 用氯处理废水对水生生物的影响[J].世界环境,1989(2):33-37.
- [21] EPPLEY R W, RINGER E H, WILLIAMS P M. Chlorine reaction with seawater constituents and inhibition of photosynthesis of natural marine phytoplankton[J]. Estuarine and Coastal Marine Science, 1976, 4(2): 147-261.
- [22] ZARGAR S, GHOSH T K. Thermal and biocidal (chlorine) effects on select freshwater plankton[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2007, 53(2): 191-197.
- [23] 江志兵,曾江宁,陈全震,等.热冲击和加氯后亚热带海区浮游植物细胞数量的动态变化[J].植物生态学报,2008,32(6): 1386-1396.
- [24] SARAVANANE N, SATPATHY K K, NAIR K V K, et al. Preliminary observations on the recovery of tropical phytoplankton after entrainment[J]. Journal of Thermal Biology, 1998, 23(2): 91-97.
- [25] HALL L W, BURTON D T, LIDEN L H. Power plant chlorination effects on estuarine and marine organisms[J]. Critical Reviews in Toxicology, 1982, 10(1): 27-47.
- [26] 毕亚梅.余氯对浮游生物毒理效应及损失量初步评估[D].上海:上海海洋大学,2011.
- [27] EPA 440-9-76-023, Quality criteria for water[S].
- [28] EMMANUEL E, KECK G, BLANCHARD J M, et al. Toxicological effects of disinfections using sodium hypochlorite on aquatic organisms and its contribution to AOX formation in hospital wastewater[J]. Environment International, 2004, 30(7): 891-900.
- [29] CHEN C M, SHIH M L, LEE S Z, et al. Increased toxicity of textile effluents by a chlorination process using sodium hypochlorite[J]. Water Science & Technology, 2001, 43(2): 1-8.
- [30] LANGFORD T E L. Electricity generation and the ecology of natural waters[M]. Liverpool: Liverpool University Press, 1983.
- [31] 江志兵,曾江宁,陈全震,等.滨海电厂冷却水余热和余氯对中华哲水蚤的影响[J].应用生态学报,2008,19(6):1401-1406.
- [32] 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).
- [33] 朱英.典型家用消毒剂对稀有鲍毒性及酶活性影响[J].环境科学与技术,2019,42(7):51-56.
- [34] 张璐,华伟,陈卫,等.氯和氯胺对桡足类浮游动物灭活效能及机理研究[J].城镇供水,2015(1):36-40,52.
- [35] MACEDO L P R, DORNELAS A S P, VIEIRA M M, et al. Comparative ecotoxicological evaluation of peracetic acid and the active chlorine of calcium hypochlorite: use of *Dugesia ti-grina* as a bioindicator of environmental pollution[J]. Chemosphere, 2019, 233: 273-281.
- [36] 黄辨非,张敏,夏良鹏,等.施用漂白粉对池塘理化性质及底栖动物的影响[J].湖北农学院学报,2002,22(1).
- [37] BRADBEER S J, COUGHLAN N E, CUTHBERT R N, et al. The effectiveness of disinfectant and steam exposure treatments to prevent the spread of the highly invasive killer shrimp, *Dikerogammarus villosus* [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 1919.
- [38] 万东锦,牛振华,刘永德,等.膜电解氢自养 MBBR 反应器深度转化水中高氯酸盐[J].中国环境科学,2018,38(7):2477-2482.
- [39] 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,2020,56(6).
- [40] 陆品品.南方某市氯胺消毒管网生物稳定特性及控制技术研究[D].北京:清华大学,2013.
- [41] Office of Pollution Prevention and Toxics. Chemical summary for chlorine[R]. Washington, D.C.: USEPA, 1994.
- [42] WATSON K, SHAW G, LEUSCH F D L, et al. Chlorine disinfection by-products in wastewater effluent: bioassay-based assessment of toxicological impact[J]. Water Research, 2012, 46(18): 6069-6083.
- [43] 任海庆,袁兴中,刘红,等.环境因子对河流底栖无脊椎动物群落结构的影响[J].生态学报,2015,35(10):3148-3156.
- [44] 董加沙.三种常用渔药对池塘水质和浮游生物群落结构短期影响[D].武汉:华中农业大学,2015.
- [45] 王洪臣.关于疫情防控期间医疗污水和城镇污水处理若干问题的建议[J].给水排水,2020,46(3).

编辑:陈锡超 (收稿日期:2020-04-27)