



移动扫码阅读

曾韵乔, 张天阳, 曾超, 等. 饮用水消毒研究进展: 从氯消毒到新型技术的应用 [J]. 能源环境保护, 2025, 39(1): 48-59.

ZENG Yunqiao, ZHANG Tianyang, ZENG Chao, et al. Research Updates on Drinking Water Disinfection: From Conventional Chlorine-Based Disinfection to Novel Technologies [J]. Energy Environmental Protection, 2025, 39(1): 48-59.

饮用水消毒研究进展: 从氯消毒到新型技术的应用

曾韵乔, 张天阳, 曾超, 徐斌, 何欢*

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 饮用水消毒是保障水质安全和公众健康的重要手段, 自氯、臭氧等化学消毒剂首次应用于饮用水消毒后, 在应对介水疾病传播和识别消毒衍生风险的过程中, 消毒技术也在不断更新与进步。综述了主流消毒技术的发展与应用概况, 包括氯、臭氧、紫外消毒技术的发展历程、应用比例与利弊分析; 并详细讨论了当下消毒技术的最新研究进展, 包括对传统消毒过程的再认识与创新利用和基于传统氧化剂、新型紫外光源、新型(纳米)材料、生物自身或代谢产物及其组合形式的多种新型消毒技术, 如折点氯消毒技术、臭氧微纳米气泡消毒技术、基于新型(复合)波长或发光方式的紫外消毒技术、纳米线改性电极消毒技术、抗菌水凝胶消毒技术、基于噬菌体的消毒技术等。这些技术通过自由基氧化、光化学破坏、物理作用及生物机制等多种反应机制耦合互补, 实现微生物高效灭活与消毒副产物等衍生风险的有效控制。为满足日益严格的水质安全标准, 未来将聚焦于“理想”消毒技术的开发、新型材料/装备的创新利用、因地制宜的消毒方法选择, 推动饮用水消毒技术向高效、环保、低成本的方向发展, 进一步提升饮用水的质量和安

关键词: 饮用水消毒; 消毒副产物; 微生物风险; 氯; 紫外光

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 2097-4183(2025)01-0048-12

Research Updates on Drinking Water Disinfection: From Conventional Chlorine-Based Disinfection to Novel Technologies

ZENG Yunqiao, ZHANG Tianyang, ZENG Chao, XU Bin, HE Huan*

(School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Drinking water disinfection is a critical measure to ensure water quality and protect public health. Since the initial application of chemical disinfectants such as chlorine and ozone, disinfection technologies have continuously evolved to address the dual challenges of controlling waterborne disease transmission and managing the risks associated with disinfection by-products (DBPs). Ultraviolet (UV) disinfection technology is a notable example of this evolution. These advancements have been driven by increasing demands for safer, more effective, and environmentally sustainable water treatment methods, in response to evolving health standards, urbanization, and public concerns over emerging contaminants. This paper reviews the development and application of mainstream disinfection technologies, providing insights into their historical evolution, application proportions, and the

收稿日期: 2024-12-18

修回日期: 2025-01-12

接受日期: 2025-01-14

DOI: 10.20078/j.eep.20250109

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52400253)

第一作者: 曾韵乔(2001—), 女, 四川乐山人, 博士研究生, 主要研究方向为给水处理理论与技术。E-mail: zengyunqiao@tongji.edu.cn

通讯作者: 何欢(1989—), 女, 重庆人, 同济大学长聘副教授, 特聘研究员, 主要研究方向为城市水循环系统新兴微生物风险识别与控制。

E-mail: huanhe@tongji.edu.cn

advantages and limitations. We examine widely used disinfection methods employing free and combined chlorine, ozone, and ultraviolet (UV) light. In addition to reviewing traditional approaches, we explore the latest research advances and innovative applications of disinfection technologies. Emerging methods include breakpoint chlorination, the use of secondary disinfectants, ozone-chlorine combined disinfection technology, and ozone micro-nanobubble disinfection. Novel UV-based technologies are also gaining traction, such as UV disinfection with various or combined wavelengths, solar water disinfection systems (SODIS), UV side-emitting optical fibers (SEOFs), and UV laser systems. Furthermore, advanced oxidation processes (AOPs) employing UV light, nanotechnology-enhanced systems (e.g., nanowire-modified electrodes), and nanospike hydrodynamic disinfection show significant promise. Additional innovative solutions include antibacterial hydrogel disinfection, atmospheric plasma disinfection, and phage-based disinfection technologies, each offering unique mechanisms to inactivate pathogens while minimizing the risks of DBPs. These approaches leverage diverse and often complementary reaction mechanisms, including free radical oxidation, photochemical deactivation, physical disruption, and biological interactions, to achieve efficient microbial inactivation. Through the combination of such mechanisms, these approaches improve disinfection efficiency and mitigate risks such as the formation of harmful DBPs, which are a growing concern with conventional methods. By integrating these technologies, the ability to simultaneously inactivate pathogens and mitigate harmful by-products can be significantly enhanced. To meet the increasingly stringent water quality standards, future research is recommended to prioritize the development of "ideal" disinfection technologies featured by high efficacy, environmental sustainability, and cost-effectiveness. This includes innovating new materials and equipment and tailoring disinfection methods to local conditions and water characteristics. Interdisciplinary collaboration will be crucial in advancing both theoretical and practical aspects of disinfection. Collectively, these advancements will push drinking water disinfection technologies toward safer and more sustainable practices, significantly enhancing the overall quality and safety of drinking water worldwide.

Keywords: Drinking water disinfection; Disinfection by-products (DBPs); Microbial risks; Chlorine; Ultraviolet (UV) light

0 引 言

为防止介水疾病传播,消毒是生活饮用水处理工艺中不可或缺的重要环节,也是确保公共健康与用水安全的关键措施之一。在当前全球水资源短缺和环境污染问题日益加剧的背景下,饮用水质量安全已成为公众广泛关注的焦点问题。随着我国工业化和城市化进程的加快,地表水和地下水中的污染物种类与数量不断增加,不仅检出农药、内分泌干扰物、药物及个人护理品(PPCPs)残留,耐药细菌及抗性基因等新兴微生物污染物的传播也成为令人担忧的问题。为应对日益复杂的水质污染、保障人群饮水安全,我国自来水处理工艺逐渐趋向标准化和严格化,逐步实现传统工艺向深度处理工艺的改造升级。有关部门亦不断地优化调整饮用水卫生标准。2022年3月15日

新版《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)发布,其中与消毒相关的水质指标共19项,检出率较高的一氯二溴甲烷等6项消毒副产物(DBPs)从非常规指标调整到了常规指标以加强管控,出厂水及末梢余氯上限由4 mg/L调整为2 mg/L^[1]。我国饮用水标准与发达国家或地区基本持平,美国现行国家饮用水水质标准EPA 816-F-09-004中包含的DBPs指标有三卤甲烷(TTHMs)和5种卤乙酸(HAA₅)、溴酸盐和亚氯酸盐^[2];欧盟饮用水指令EU2020/2184与美国类似,但对氯酸盐、亚氯酸盐的限值更低,并且对军团菌做出了规定^[3]。近年来,上海、深圳等地也相继发布了地方标准,对国标内原有DBPs提出更严格的要求,并更加关注新兴或地区性高风险消毒副产物,如N-亚硝基二甲胺(NDMA)、碘乙酸(IAA)和二氯一碘甲烷(DCIM)等高毒性碘代DBPs^[4]。

主流消毒方法包括氯及氯化物消毒、臭氧消毒、紫外线消毒等,也是如今我国及世界范围大部分自来水厂采用的消毒工艺。传统单一消毒方法在面对复杂水质处理场景时,往往难以同时满足微生物有效灭活、DBPs 生成控制、消毒剂余量保证的多重要求。国内外都在不断探索更加高效、环保且可持续的新型消毒技术或组合方式以应对现有消毒工艺的局限性。本综述调研了传统和新型消毒技术在饮用水处理中的最新研究进展,重点关注这些技术对微生物的灭活效率及 DBPs 生成方面的衍生风险,以及部分技术对生物膜的控制效果,探讨它们在饮用水处理及供水输配系统中的应用前景及潜在改进方向。

1 饮用水主流消毒技术的发展与应用概况

1.1 消毒技术发展历程

在应对介水疾病传播和识别消毒衍生风险的过程中,消毒技术也在不断更新与进步(图 1)。

19 世纪末至 20 世纪初,法国开始尝试使用臭氧(O₃)进行饮用水消毒,随后美国进行了自由氯(FAC,包括 HOCl, OCl⁻, Cl_{2(aq)})消毒的首次大规模应用。随着集中式水处理规模的扩大,化学消毒剂的应用逐渐普及并日趋成熟,除了自由氯,二氧化氯(ClO₂)和氯胺(NH₂Cl)亦相继被投入应用。然而,化学消毒剂的广泛使用也带来了新的环境与健康问题。20 世纪 70 年代,三卤甲烷和卤乙酸等首批 DBPs 的发现引起了科学界和公共卫生部门的关注,这些化合物的潜在致癌性和毒性带来了新的挑战,促使研究者探索如何优化消毒剂的剂量、接触时间等参数以平衡微生物控制与 DBPs 风险^[5]。20 世纪末期,隐孢子虫、贾第鞭毛虫等高耐氯性病原微生物受到重视,促进紫外(UV)消毒技术在水处理领域的应用得到大幅提升。这一技术通过紫外辐照破坏病原体结构从而实现灭活,具有不产生化学副产物的显著优势,其推广标志着水处理工艺向低风险、高效能的方向发展。

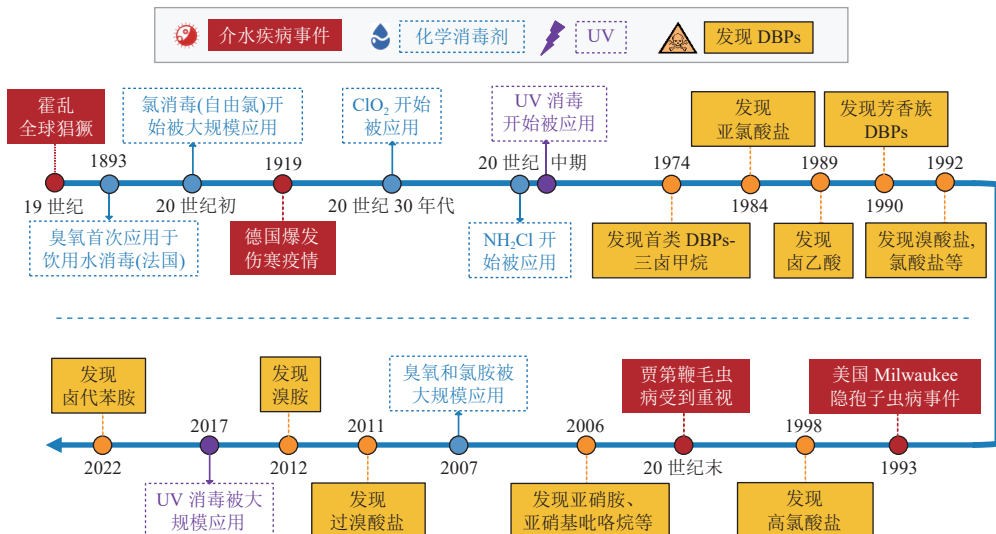


图 1 饮用水消毒技术发展历程

Fig. 1 Development history of drinking water disinfection technologies

1.2 主流消毒方式使用比例

不同国家或地区在消毒工艺的选择应用上存在一定差异,分布比例如图 2 所示。总体而言,氯消毒仍然是目前应用最为广泛的消毒方式,具体工艺应用与国情、原水情况相关联,同时紫外消毒具有较大的应用增长潜力和需求。

根据 2019 年一项对长江、黄河、珠江等 7 个流域 298 个自来水管厂的给水处理工艺调研,氯基消毒在我国占据主导地位(>99%),具体采用的消毒剂包括次氯酸钠、液氯、二氧化氯,部分地区采

用接触池自由氯消毒加氯胺化出厂的方式;近年来我国各地也逐步引入紫外消毒工艺以减少 DBPs 的生成,但比例仍较低(仅 0.3%)^[6]。在美国,主流的消毒工艺以自由氯消毒为主且占比相对稳定(AWWA 在 1983—2018 年间的 5 次调研显示,自由氯使用占比维持在 63%~80%),其余工艺(氯胺、臭氧、二氧化氯等)占比较低,紫外消毒的比例逐年增加^[7]。在欧洲,自由氯的应用占据了较大比例,紫外消毒的应用也较为显著,部分国家在原水水质较好的条件下也采用慢速过滤等水处

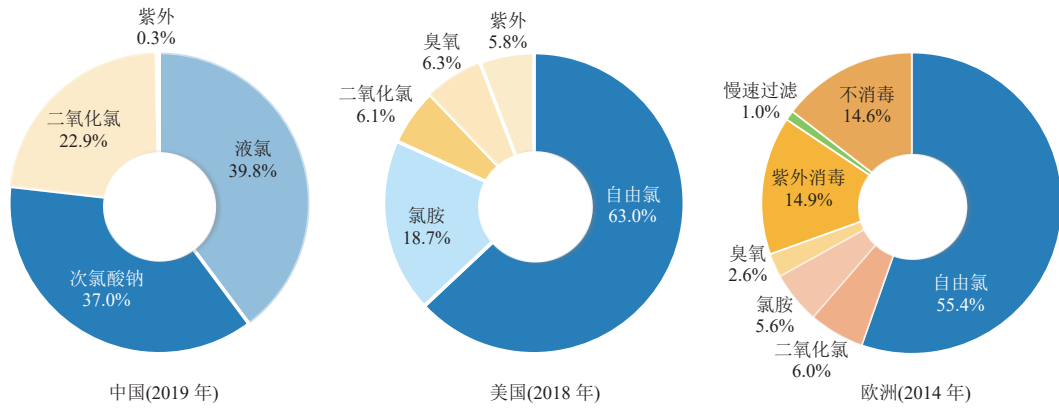


图 2 不同地区饮用水处理采用的主流消毒方式^[6-8]

Fig. 2 Main disinfection methods used in drinking water treatment across different regions^[6-8]

理过程代替消毒^[8]。

1.3 主流消毒方式的利弊分析

消毒工艺的选择需要综合考虑消毒效果、成本及操作便捷性,同时需权衡可能产生的衍生水质风险。氯消毒成本较低、经济有效、使用方便,应用历史最久且最为广泛,但是对耐氯微生物(如隐孢子虫、贾第鞭毛虫、真菌孢子等)消毒效果较差,且容易与天然有机物或无机物发生反应产生 THMs、HAAs、氯酸盐等 DBPs。与传统氯消毒相比,臭氧氧化能力强,能够在较短的接触时间内有

效灭活微生物,且不会产生有害的卤代副产物;然而臭氧在水中停留时间较短,且易与水中溴离子产生溴酸盐等致癌性副产物。UV 消毒工艺具有广谱灭菌、效率高、运行可靠的特性,且无 DBPs 生成风险(如 1.1 所述);然而,UV 不具有持续消毒性能,无法保证出厂水及后续管网水消毒剂余量,且存在微生物光复活等问题,通常需要与自由氯或氯胺联合使用;此外,传统紫外光源如低压或中压汞灯也存在环保问题^[9]。表 1 总结了当前主流饮用水消毒工艺的优缺点及面临的挑战。

表 1 主流消毒工艺优缺点对比^[7]

Table 1 Advantages and disadvantages of main disinfection processes^[7]

指标	自由氯	氯胺	二氧化氯	臭氧	紫外
产品可用性	√	√	√	—	—
消毒可靠性(反应速率)	√(快)	√(慢)	√(较快)	√(最快)	√(快)
隐孢子虫灭活	—	—	—	—	√
消毒剂余量保障	√	√	—	—	—
易用性	√	√	√	—	—
DBPs生成量低	THM、HAA、 卤代芳香酸等	THM、HAA、 卤代醛等	卤代酮、溴酸盐、 脂肪醛等	溴酸盐、羧酸、 亚硝胺等	无
异臭味/色度控制	—	—	—	√	—
占地面积小	—	—	—	—	√
未来法规的不确定性	×	×	—	—	—
储存与风险管理	×	—	—	—	—
管网硝化作用	—	×	—	—	—
运维成本高	—	—	×	—	×
操作员安全	—	—	×	—	—
设备可靠性	—	—	—	×	—
培训操作人员	—	—	—	×	×

注:√表示优势;×表示挑战/劣势。

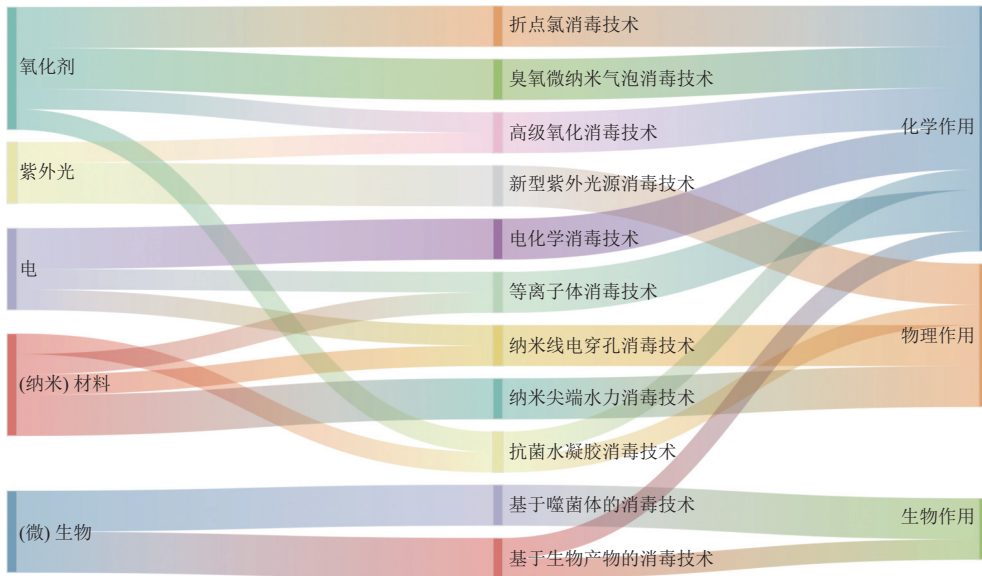


图 3 消毒技术耦合作用机制

Fig. 3 Coupling mechanisms of disinfection technologies

2 新型消毒技术研究进展

近年来,许多研究对传统消毒过程的作用机理有了更深入的认识,并积极探索创新利用方式。同时为了解决传统消毒技术的弊端和局限,一系列基于传统氧化剂、新型紫外光、新型材料及其组合形式的消毒技术也得到了广泛研究和关注,通过不同反应机制耦合互补,实现对病原微生物的有效灭活与衍生风险控制。其中,强氧化性的活性物种(如活性氧、活性氯等)可以快速氧化和破坏病原体的细胞膜和遗传物质,是许多新型消毒技术实现灭活微生物作用的重要因素。多种新型消毒技术的耦合作用机制如图 3 所示。

2.1 对传统消毒过程的再认识与创新利用

2.1.1 折点氯消毒技术

水中存在氨氮时,加氯过程中加氯量-余氯的关系曲线为一条折线,氯的种类也随着氯与氨的摩尔比(CI/N)变化而变化,这种现象被称为折点氯化,常用于在消毒的同时去除水中氨氮^[10]。在中性条件下且 CI/N ≤ 1.0 时,主要产生 NH₂Cl,总余氯约等于氯胺浓度;在 CI/N 为 1.5~1.7 即折点时,氨被氧化为氮气或硝酸盐,总余氯达到最小值;进一步增大 CI/N 摩尔比将形成自由氯(图 4)^[11-12]。因此,折点氯化技术适用于含氨量较高、需实现氨氮去除及消毒双重目标的水处理场景。

研究发现,折点氯化的过程中会产生一系列

活性中间产物,例如羟基自由基(HO·)、活性氯物种(RCS,即 Cl·、ClO·和 Cl₂·)以及活性氮物种(RNS,包括过氧亚硝酸/过氧亚硝酸根(HOONO/OONO⁻)、氧化二氮(N₂O)和二氧化氮自由基(·NO₂)等)^[13]。这些活性物种对多种传统消毒难降解的污染物表现出较高的反应活性,显著提升了去除效率^[14-15]。类似地,折点氯化在病原体灭活方面同样表现出了优越的效果。WANG 等^[16]首次将折点氯化应用于阿米巴包囊及其内生细菌的灭活,发现其在模拟和实际饮用水中对二者的灭活效率均显著高于单独自由氯或氯胺处理:在 CI/N 为 2 : 1 时,折点氯化 30 min 内对阿米巴包囊及其内生细菌的灭活率均高于 5.5-log₁₀;多种活性物种在灭活过程中起到了关键作用,其中折点氯化产生的 RNS 有效促进阿米巴包囊外壳破坏,而包囊内生细菌的灭活可能涉及内源性活性氧物种(ROS)增加导致细胞膜完整性受损。

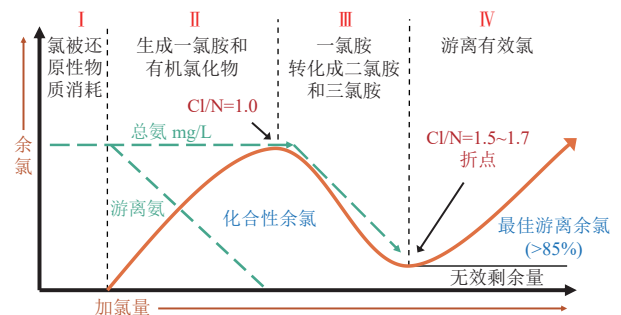


图 4 折点加氯过程中氯形态分布特征^[12]

Fig. 4 Distribution of chlorine species during breakpoint chlorination^[12]

值得关注的是,折点氯化不同阶段生成 DBPs 的种类和浓度存在一定的差别。例如氯化氰(CNCl)和 NDMA 等含氮 DBPs 的生成量在折点处显著增加,随着氯胺进一步分解后生成量下降^[15]。含碘水折点加氯过程中,新兴碘代 DBPs (如 I-THM)的生成量在折点之前随着加氯量增加而升高,在折点之后随加氯量继续增加呈现递减趋势^[12]。为控制 DBPs 的生成,需结合水质条件和消毒目标合理选择加氯量,将 Cl/N 摩尔比控制在适当范围内。

2.1.2 次级消毒剂

近年来,针对传统消毒过程中生成的次级消毒剂的研究也取得了显著进展。广义上,几乎所有化学消毒剂在处理过程中均会与水中氨氮、天然有机物(NOM)等反应生成次级消毒剂。例如,自由氯消毒过程中可产生氯胺、自由溴(FAB),ClO₂ 消毒过程中可产生自由氯、氯酸盐等^[17]。研究发现,某些卤代酚类 DBPs(如 2,6-二氯苯醌)具备优异的抗菌活性,对灭活细菌、真菌和病毒的灭活率比传统消毒剂对氯间二甲苯酚(PCMX)高出 9~22 倍,并且可在海水等弱碱性环境中通过光降解和水解等途径迅速降解和脱毒^[18],减少了对下游生态环境的影响。合理筛选具备高效杀菌性能和快速降解特性的次级消毒剂,为开发兼具公共卫生与环境友好性能的消毒技术提供了新思路。

2.1.3 臭氧-氯组合消毒技术

单一消毒工艺存在局限性,臭氧和氯的组合工艺能够结合 2 种化学消毒剂的优势,发挥一定的协同效应,提升消毒效能。臭氧-氯组合工艺可利用 O₃ 的强氧化性破坏微生物细胞壁/膜(包括坚固的细菌芽孢外层),再与氯进一步渗透入细胞内部,损坏胞内物质以达到灭活作用。同时由于臭氧无法持续消毒,而氯消毒具有持续消毒能力,采用臭氧消毒后投加氯消毒剂保障了管网余氯水平,是有效灭活耐氯病原微生物、保障饮用水微生物安全性的可行途径^[19-21]。此外,臭氧-氯消毒还能有效控制输配水系统出水和生物膜中的条件致病菌,并通过改变腐蚀相关细菌的含量有效抑制管壁腐蚀和铁的释放^[22]。在氯消毒之前增设预臭氧工艺,能够氧化水中消毒副产物前体物,有效降低出水含碳 DBPs 的生成风险,同时还能够提升消毒效果^[23]。臭氧-氯组合消毒将增加 DBPs 的溴取代程度并且改变溴在不同 DBPs 之间的分配比例,即减少了 THMs、二卤乙酸(DHAAs)、三卤乙

酸(THAAs)、二卤乙腈(DHANs)等对溴的利用率,但大幅增加了卤代硝基甲烷(HNMs)的溴利用率,而溴代 HNMs 具有高毒性^[24]。综上,臭氧-氯消毒组合工艺可有效提升消毒效率和控制含碳 DBPs 生成,但在处理溴离子浓度较高的水体时,需谨慎评估应用该组合工艺的健康风险。

2.1.4 臭氧微纳米气泡消毒技术

臭氧因氧化性强、反应速率快和二次污染低等优点,广泛应用于水处理领域,但传统臭氧气泡存在半衰期短、传质效率较低等局限。微纳米气泡(MNBs)通常指直径小于 50 μm 的微小气泡,具有稳定性高、气液传质效率高以及可产生活性自由基等特征。将臭氧和微纳米气泡技术结合,能够产生协同效应,显著强化氧化消毒能力^[25]。

相比于传统大气泡臭氧系统,臭氧微纳米气泡对大肠杆菌、枯草芽孢杆菌、铜绿假单胞菌等微生物的灭活效率显著增强,甚至在低浓度下也能实现较高的消毒效率,可减小应用时的臭氧剂量和反应器尺寸^[26-28],特别适用于需要高效杀菌且条件复杂(如存在顽固生物膜或抗性病原体)的环境。其灭活效能的强化主要源自:(1)增大气液界面传质,促进臭氧分解生成大量 HO·,破坏细胞膜并扩散到胞内,破坏胞内成分;(2)气泡表面的电双层效应能够吸附微生物,提高臭氧接触效率和反应效率;(3)气泡崩塌过程中诱导周围液体形成微射流、冲击波和剪切应力并释放大量能量破坏细胞膜,产生局部高温促进微生物热失活^[29-30]。此外,臭氧微纳米气泡在控制生物膜方面表现优异,除了上述对生物膜中微生物的灭活机制,气泡崩解时释放的能量还可推动微生物附着部位移动导致其脱落,同时原位产生的 HO·可降解水中有机物减少微生物食源,抑制生物膜生长^[30]。

值得注意的是,由于微纳米气泡具有更高的气体利用率,可能会增加臭氧与溴离子的接触面积,导致更多的溴酸盐生成。有研究发现通过加入氨等调节剂,可以有效抑制溴酸盐形成^[31]。

2.2 基于紫外光的新型消毒技术

紫外线消毒是一种控制耐氯菌的有效手段。紫外光根据波长特性可分为 UVA(长波,320~400 nm)、UVB(中波,280~320 nm)以及 UVC(短波,100~280 nm)^[32]。紫外消毒主要利用 UVC 波段,这一波段范围内的紫外线可穿透细胞膜,破坏微生物的 DNA 或 RNA,导致微生物灭活,并且不会产生 DBPs^[33-35]。现阶段水处理领域广泛采用的

低压与中压紫外汞灯虽然价格低廉,但存在不环保(含汞)、能耗高等问题^[36]。近年来,新型紫外光源不断被开发利用,如 222 nm 的 KrCl*准分子灯和 210~400 nm 紫外线发光二极管(UV-LED)。其中 UV-LED 可通过改变材料配比,释放不同波段的紫外线与可见光,以满足各种应用需求。

2.2.1 基于新型(复合)波长或发光方式的紫外消毒技术

研究表明,不同波长的紫外线对微生物灭活效果与机制存在显著差异。研究发现,265 nm UV-LED 展现出最高的灭活效率,在损伤细菌 DNA 方面表现突出^[37]。然而通过 KrCl*准分子灯产生的 222 nm 紫外线通过诱导大量 ROS,破坏细胞膜结构和蛋白质并导致腺嘌呤核苷三磷酸(ATP)直接下降和轻微 DNA 损伤。254 nm 低压汞灯的灭活机制集中在 DNA 损伤方面^[38]。UV 消毒效能与微生物在特定波段的光谱吸收特性密切相关^[39]。图 5 系统比较了 222~305 nm 紫外线对大肠杆菌、枯草芽孢杆菌、噬菌体等微生物的灭活速率常数(k),发现其变化趋势与该波段 DNA 的相对吸光度高度一致^[40],因为紫外线引起微生物灭活的主要机制是核酸(DNA 或 RNA)上嘧啶二聚化或生成 6-4 光产物;也有研究报道 k 在 285nm 处波动显示出较弱的第二峰值,接近 280 nm 处的微生物蛋白质吸收率谱峰值,表明光化学破坏细胞蛋白质和酶是相对不太显著但很重要的灭活机制^[41]。

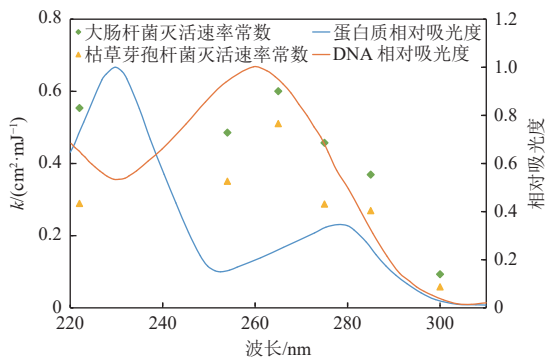


图 5 微生物灭活一级动力学速率常数(k)和 DNA、蛋白质的相对吸光度与紫外波长的关系^[40-41]

Fig. 5 Inactivation rate constants (k) of microorganisms and the relative absorbance of DNA and proteins at different UV wavelengths^[40-41]

组合波长消毒技术通过对不同波长紫外光进行串并联组合,在适宜的组合方式和反应条件下,可显著提升微生物灭活效率,并有效控制微生物

下游复活风险。有研究发现,UV C/UV B 叠加波长组合可实现微生物的强化灭活,而 UVA 与 UV C 或 UV B 相叠加反而由于 UVA 的光复活效应降低大肠杆菌的灭活效果^[42]。相反,在 UV C 灭活之前进行 UVA 照射可实现显著的协同效应^[43],这是由于 UVA 预处理影响 tRNA 中巯基尿苷,抑制蛋白质合成,使得细菌对后续 UV C 诱导损伤更敏感^[39]。多光谱中压紫外线(MPUV)涵盖了 200~400 nm 的波长范围,事实上也可认为是一种多波长叠加的紫外消毒技术,结合了 DNA 损伤、细胞膜损伤和氧化损伤多种机制。

太阳光消毒系统(SODIS)通过创新反应器设计,使用来自太阳的紫外线辐射(UVA 和 UVB)进行消毒,可以减少能耗和二次污染风险。通过特殊的几何形状设计,在反应器中集成光热和光催化材料(如复合抛物线或抛物线槽聚能器),或集成光伏驱动的人工紫外线辐射消毒技术,有效地捕集和集中太阳能辐射,实现饮用水消毒^[44]。该系统适用于太阳辐射强、水资源匮乏且缺乏能源基础设施的地区,例如偏远乡村或自然灾害后的紧急供水。

紫外光纤利用光纤技术传输紫外光,具有高效消毒、灵活安全、小型化与集成化等特点^[45],适合长期运行;具有极好的弯曲性能,可灵活布置在复杂空间中,也易于集成到小型或移动式消毒装置中。由于紫外光纤能将光线安全地引导到特定位置,因此其还可以减少紫外辐射对操作人员和环境的直接暴露,适用于需要高精度、高安全性且空间受限的场景(如器械内部管道、航天器内部的消毒)。

紫外激光能够集中能量并在特定方向上传播,具有高能量密度和精确定向能力,短时间内即可达到消毒所需的辐射剂量,实现病原体的高效灭活。266 nm 的脉冲紫外激光在 1 s 内就能实现 SARS-CoV-2 病毒约 99% 的灭活^[46],还可能通过光热效应(即光能转化为热能)增强消毒效果,具有环境友好性,适用于快速消毒需求高的场景。

2.2.2 基于紫外光的高级氧化消毒技术

基于 UV 的高级氧化技术(AOPs)利用特定波长范围的 UV 光来激发氧化剂光解,直接或间接生成一系列高活性物种,强化化学污染物降解和微生物灭活^[47],在应对含有复杂有机污染物或耐氯病原体的水体时表现尤为优异。目前,不同波长的 UV 与过硫酸盐(PMS/PDS)、 H_2O_2 、过氧乙

酸(PAA)、 ClO_2 、氯(胺)等多种氧化剂的组合工艺得到了广泛研究^[48]。相较于单独紫外,UV/PMS和UV/ H_2O_2 工艺均显著提高了抗氯性芽孢杆菌孢子的灭活效果,然而基于 HO^\cdot 的AOPs对pH较为敏感,较高的pH条件下, HO^\cdot 的生成效率会下降,因此应用范围受到一定限制^[49]。VUV(真空紫外)激发PAA也展示出高效的大肠杆菌灭活性能,研究表明VUV比传统UVC更有效地激活PAA,生成更多的 HO^\cdot ,进而破坏微生物细胞,且在处理难降解污染物时效果显著,尤其在酸性和中性条件下表现优异^[50]。

UV/氯工艺利用中低压UV光(254 nm)激发自由氯,产生 HO^\cdot 、 Cl^\cdot 、 Cl_2^\cdot 、 ClO^\cdot 等一系列高反应活性物种,可有效去除水中臭味物质、藻毒素等污染物,被认为可替代UV/ H_2O_2 工艺^[51]。紫外光和氯消毒的协同作用也能够显著提高对病毒和微生物的灭活效率。研究发现,UV₂₂₂/氯联合工艺可产生高浓度的RCS等活性物种加强对耐氯真菌孢子的灭活,还可通过UV光解损害膜的完整性,有利于氯和自由基渗透到细胞内进行灭活。此外,UV₂₂₂/氯工艺对光复活表现出更强的抑制作用,克服了紫外线和氯消毒的局限性。在DBPs的控制方面,与单独氯化 and 传统的UV₂₅₄/氯工艺相比,UV₂₂₂/氯工艺在达到相同灭活目标的基础上产生的氯化DBPs更少^[47]。

2.3 基于新型(纳米)材料或装置的消毒技术

2.3.1 纳米线改性电极消毒技术

电化学消毒技术利用电化学装置高效灭活多种水中细菌、病毒和真菌等病原体,具有减少化学药品剂量、操作简单和自动化程度高等优势,且能够有效减少或避免DBPs生成^[52]。根据作用原理可分为电絮凝消毒与电氧化消毒^[53],其中电物理场直接消毒是通过电场直接作用于微生物细胞膜、核酸或蛋白质使其灭活,电化学间接消毒则是借助电极界面产生的 HO^\cdot 、 O_3 、 H_2O_2 以及RCS等活性物质灭活微生物。

新型电极材料(如纳米结构电极等)的开发和优化是电化学消毒技术降低能耗、提高消毒效果的关键方向。例如铜氧化物纳米线(CuONWs)因其独特的一维结构和高比表面积,能够增强局部电场强度,通过在纳米线尖端产生的强大电场使细菌细胞膜的通透性急剧增加,导致不可逆的电穿孔。有研究利用纳米线修饰的三维电极在极低的电压(1 V)实现有效灭活细菌,并且不会引起细

菌的再生或活化^[52]。电场处理还能够促进铜离子穿透细胞膜与细胞内的功能性分子反应,进一步产生协同灭活效果^[54]。此外,将纳米线电穿孔技术与传统氯消毒相结合,可通过协同效应显著提高对耐氯微生物的灭活效率^[55]。

为提升电极稳定性和使用寿命,研究者正在探索更坚固的纳米线结构,并尝试使用交流电(AC)代替直流电(DC)以减少电极上的电化学反应和铜释放^[56]。随着纳米材料制备成本降低和效率提高,纳米线电穿孔技术在点对点使用和复杂末端系统中的应用前景广阔。

2.3.2 纳米尖端水力消毒技术

有研究团队报道了一种基于纳米尖端的水力学杀菌新机制^[57],即平缓水流可以通过碳包覆纳米尖端与细菌的色散作用有效地撕裂细菌。研究开发了一种由碳包覆、尖锐的 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 纳米线构成、生长在铜泡沫基底上的材料,碳包覆纳米尖端的瞬时黏附-流场撕扯效应可以突破细菌的临界应力,能够在水流中通过高分散力高效撕裂细菌,无需化学试剂或额外的能量供应。该系统在不同流速下均显示出良好的杀菌效果,并且在30 d连续运行中保持了高效的杀菌能力。这种基于纳米材料的消毒技术具有环境友好和可持续性的特点,为分散式水处理以及偏远地区的饮用水安全管理提供了新的策略,但同时也需要对其潜在的长期环境影响(如纳米材料释放等问题)进行深入研究 and 监测。

2.3.3 抗菌水凝胶消毒技术

有研究通过分子工程集成了儿茶酚功能化的壳聚糖(CCS)网络和醌锚定的活性炭颗粒(QAC),开发了一种具有抗菌和抗生物污染特性的水凝胶(ABH)^[58]。儿茶酚基团在空气和水中与氧气反应,自发氧化产生 H_2O_2 和ROS,能够有效灭活细菌。同时QAC颗粒通过与细菌蛋白和代谢物中的硫醇基团反应,进一步增强了抗菌效果。ABHs能够直接作为片剂使用,在60 min内实现超过99%的水消毒效率,并且无需能源输入。利用其优异的光热性能和抗生物污染特性,ABHs还可作为太阳能蒸发器使用,在处理过程中不产生有害副产品,易于移除,不留残留物,在家庭或社区规模的饮用水处理中潜力巨大。

2.3.4 等离子体消毒技术

等离子体是一种被电离的气体,包含等量的正电和负电粒子,由离子、电子和中性粒子、活性

自由基和紫外线等组成。等离子体水处理技术是一种集活性自由基氧化、臭氧氧化、紫外线辐射等效应于一体的新型高级氧化技术,具有处理简单快速、低能耗易操作等优势^[59]。

在微生物灭活方面,等离子体通过产生 RCS、RNS 快速破坏微生物细胞膜、蛋白质和 DNA,导致其结构性损伤和代谢失调;同时通过氧化应激反应破坏细胞膜脂质层,并进一步破坏细胞内的功能性生物分子。等离子体消毒技术对多重耐药菌、真菌和病毒具有显著的灭活效果,且不易产生抗药性^[60]。在生物膜控制方面,有研究发现等离子体中的活性物质可有效穿透胞外聚合物(EPS),直接破坏生物膜结构及其内部的微生物^[61]。此外,等离子体处理可显著提高细胞内氧化应激水平,激活大肠杆菌携带的噬菌体 λ ,裂解细菌并释放噬菌体,进一步破坏生物膜中的细菌,实现对生物膜的控制^[62]。

等离子体技术适用于需要快速、高效灭活微生物的场景,但在实际应用中面临活性物质生成不稳定、对温度和水质等环境条件敏感^[61]以及在复杂环境中穿透能力有限等问题^[62]。如何优化等离子体发生装置、提高活性物质生成的稳定性和效率、降低设备成本和能耗等是推动其大规模应用的关键。

2.4 基于生物自身或其代谢产物的消毒技术

自然界中的某些生物能选择性地抑制或杀灭有害微生物,受此启发,发展出了基于生物体或其代谢产物的生物消毒技术^[63]。近年来,噬菌体、抗菌肽等被发现可有效抑制水中的病原体,控制生物膜的形成和增长,尤其适用于需要选择性灭活或抑制特定病原体、避免广谱消毒剂/抗菌剂使用的场景。

噬菌体是专门感染并裂解细菌的病毒,具有高度特异性,不会破坏其他微生物和生态系统。有研究利用壳聚糖包封噬菌体,开发出一种 pH 响应型噬菌体包封系统,可在生物膜局部酸性环境中自动释放噬菌体,有效减少储水系统中生物膜的生物量^[64]。此外,有研究通过改造 M13 噬菌体的主要外壳蛋白和尾纤蛋白,提升其对假单胞菌生物膜的亲和力和递送能力,在模拟输配水系统中更有效地递送噬菌体到生物膜内,显著降低生物膜表面积和活细菌生物量。高浓度噬菌体还通过下调细菌群体感应和胞外多聚物分泌相关基因,进一步抑制生物膜再生^[65];然而,低浓度的裂

解型噬菌体可能会刺激细菌的群体感应基因和多糖生产基因的上调,导致生物膜结构更致密,对消毒剂产生更强的抵抗力^[66]。

抗菌肽(AMPs)是动植物和微生物中天然存在的小分子肽,通过破坏细菌细胞膜或抑制其代谢过程杀死病原体。与化学消毒剂不同,抗菌肽的杀菌过程不会产生有毒副产物,且较难诱导细菌产生耐药性。有研究通过合成生物学手段将抗菌肽 HHC10 固定在聚羟基烷酸酯(PHA)生物珠上,这种功能化的抗菌材料可显著灭活大肠杆菌和枯草芽孢杆菌,并且在储存 35 d 后仍保留了 88% 的抗菌活性,具有良好的稳定性和耐久性^[67]。

生物制剂在复杂水环境中易受环境条件影响,导致活性下降。提高生物制剂稳定性和持久性,并深入研究其与生物膜和微生物群落的相互作用机制,将有助于提升生物消毒技术的效率与应用前景。

3 研究展望

未来消毒技术的发展应聚焦于应对复杂水质条件下的多重挑战,并满足日益严格的水质安全标准。

(1)不断追求更“理想”的消毒剂/消毒技术。未来的饮用水消毒研究将致力于开发满足安全性、绿色环保和高效能的消毒剂与技术,确保微生物高效广谱灭活,并最大限度地减少 DBPs 的生成,同时尽可能实现低能耗、低成本,提升饮用水终端水质安全。

(2)新型材料/装置的开发推动消毒技术迭代。UV-LED 作为一种高效的紫外光源,因其能耗低、寿命长、无汞污染等优势,推动了消毒技术更高效绿色的发展。新型纳米材料的开发(如纳米线改性电极等)同样为消毒技术带来了突破性进展。开发具有高反应活性、环境友好的材料与装置,将实现消毒技术的高效灵活应用。

(3)应用更适配当地水源与供水系统的消毒方法。针对不同水质特征(如地下水/地表水),采用因地制宜的消毒方法,以应对特定污染物和微生物风险。此外,需选择适当的消毒剂,确保供水管网中消毒剂的残留浓度有效控制微生物。在二次供水系统中,应考虑水质的动态变化,结合紫外消毒等补充消毒措施,保障末端水质的安全与稳定。

总体而言,未来饮用水消毒技术将聚焦提高消毒效率、降低能耗成本、避免副产物生成,并通

过技术创新和耦合应用,更有效地平衡微生物风险和 DBPs 风险,进一步提升饮用水的质量和安

参考文献 (References):

- [1] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 生活饮用水卫生标准: GB 5749—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Standards for Drinking Water Quality: 5749—2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [2] US EPA. National primary drinking water regulations[S]. Washington DC: Office of Ground Water and Drinking Water, 2009.
- [3] European Union. Directive (EU) 2020/2184 of the European parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption [S]. Brussels: Official Journal of the European Union, 2020.
- [4] 肖融, 楚文海. 全球饮用水标准中消毒副产物管控指标对比与启示 [J]. 环境科学研究, 2021, 34(6): 1328-1337.
XIAO Rong, CHU Wenhai. Disinfection by-product regulatory compliance in global drinking water standards: Comparison and enlightenment[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(6): 1328-1337.
- [5] XIAO Rong, DENG Yang, XU Zuxin, et al. Disinfection byproducts and their precursors in drinking water sources: Origins, influencing factors, and environmental insights[J]. *Engineering*, 2024, 36: 36-50.
- [6] 中国城镇供水排水协会. 中国城镇水务行业发展报告-2019[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
China Urban Water Association. Annual report of Chinese urban water utilities[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020.
- [7] COMMITTEE A D. Emerging trends in disinfection: Lessons from AWWA's disinfection survey[J]. *Journal - American Water Works Association*, 2021, 113(1): 20-28.
- [8] VAN DER HOEK J P, BERTELKAMP C, VERLIEFDE A R D, et al. Drinking water treatment technologies in Europe: State of the art—challenges—research needs[J]. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 2014, 63(2): 124-130.
- [9] XIA Ying, LIN Yili, XU Bin, et al. Effect of UV irradiation on iodinated trihalomethane formation during post-chloramination[J]. *Water Research*, 2018, 147: 101-111.
- [10] 李佳, 朱百泉, 祝明, 等. 折点加氯反应在次氯酸钠消毒中水中的应用 [J]. 环境工程学报, 2012, 6(11): 4069-4073.
LI Jia, ZHU Baiquan, ZHU Ming, et al. Application of break point chlorination in sodium hypochlorite disinfection of reclaimed water[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(11): 4069-4073.
- [11] HUANG Huang, ZHENG Hangcong, JIAO Jijia, et al. Trichloramine and hydroxyl radical contributions to dichloroacetonitrile formation following breakpoint chlorination[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(17): 12592-12601.
- [12] 刘志. 水厂混合态余氯对消毒副产物的生成影响机制与控制方法 [D]. 上海: 同济大学, 2022: 9-10.
LIU Zhi. Formation mechanisms and control of disinfection by-products during mixed residual chlorine process in water treatment plant [D]. Shanghai: Tongji University, 2022: 9-10.
- [13] LU Senhao, SHANG C, SUN Bo, et al. Dominant dissolved oxygen-independent pathway to form hydroxyl radicals and the generation of reactive chlorine and nitrogen species in breakpoint chlorination[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(1): 150-159.
- [14] WANG Wenlong, WU Qianyuan, DU Ye, et al. Elimination of chlorine-refractory carbamazepine by breakpoint chlorination: Reactive species and oxidation byproducts[J]. *Water Research*, 2018, 129: 115-122.
- [15] SCHREIBER I M, MITCH W A. Enhanced nitrogenous disinfection byproduct formation near the breakpoint: implications for nitrification control[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(20): 7039-7046.
- [16] WANG Liping, MAI Yingwen, LI Shenzhou, et al. Breakpoint chlorination enhances the disinfection of amoeba spores and their intraspore bacteria[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2023, 10(3): 267-273.
- [17] JÜTTE M, ABDIGHAHOUDI M S, WALDMINGHAUS T, et al. Bacterial inactivation processes in water disinfection—mechanistic aspects of primary and secondary oxidants—A critical review[J]. *Water Research*, 2023, 231: 119626.
- [18] HAN Jiarui, LI Wanxin, ZHANG Xiangru. An effective and rapidly degradable disinfectant from disinfection byproducts[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 4888.
- [19] 吴悦, 杨炯彬, 吴作栩, 等. 不同消毒技术在饮用水处理中的研究进展 [J]. 城镇供水, 2023(5): 87-92+96.
WU Yue, YANG Jiongbin, WU Zuoxu, et al. Research progress of different disinfection technologies in drinking water treatment[J]. *City and Town Water Supply*, 2023(5): 87-92+96.
- [20] CHO M, KIM J H, YOON J. Investigating synergism during sequential inactivation of *Bacillus subtilis* spores with several disinfectants[J]. *Water Research*, 2006, 40(15): 2911-2920.
- [21] 黄廷林, 赵建超, 文刚, 等. 臭氧-氯顺序灭活地下水源水中真菌的效能 [J]. 环境工程学报, 2016, 10(9): 4691-4697.
HUANG Tinglin, ZHAO Jianchao, WEN Gang, et al. Sequential inactivation of fungi in drinking groundwater by ozone and chlorine[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(9): 4691-4697.
- [22] WANG Haibo, HU Chun, ZHANG Suona, et al. Effects of O₃/Cl₂ disinfection on corrosion and opportunistic pathogens growth in drinking water distribution systems[J].

- Journal of Environmental Sciences*, 2018, 73: 38-46.
- [23] 吴悦, 赖永忠, 张彤, 等. 不同消毒工艺对韩江滤后水消毒效果的影响 [J]. 中国给水排水, 2020, 36(11): 39-45.
WU Yue, LAI Yongzhong, ZHANG Tong, et al. Disinfection efficiency of filtered water from Hanjiang River by different disinfection processes[J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(11): 39-45.
- [24] 朱晓燕, 叶婷, 夏彭斌, 等. 臭氧与氯联合消毒对钱塘江水源水 DBPs 形成及溴取代的影响 [J]. 环境科学学报, 2019, 39(4): 1226-1233.
ZHU Xiaoyan, YE Ting, XIA Pengbin, et al. Formation of disinfection by-products and the bromine incorporation upon ozone-chlorination of Qiantang River water[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(4): 1226-1233.
- [25] 王兴林. 臭氧微纳米气泡降解饮用水中典型嗅味物质的效能与机理研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2023: 5-8.
WANG Xinglin. Study on the efficiency and mechanism of ozone micro-nanobubbles in degrading typical odor compounds in drinking water[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2023: 5-8.
- [26] ZHANG Feng, XI Jinying, HUANG Jingjing, et al. Effect of inlet ozone concentration on the performance of a microbubble ozonation system for inactivation of *Bacillus subtilis* spores[J]. *Separation and Purification Technology*, 2013, 114: 126-133.
- [27] NILOOFAR G, BEHNAZ D, MEHDI M, et al. Effect of ozone micronano bubbles on the removal of infectious pathogens in contaminated water: *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, and *Enterococcus faecalis*[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2024, 150(3): 04024001.
- [28] NAIR S S, PINEDO CUENCA R, STUBBS T, et al. Contemporary application of microbubble technology in water treatment[J]. *Water Science and Technology*, 2022, 86(9): 2138-2156.
- [29] NING Rongsheng, YU Shuili, LI Lei, et al. Micro and nanobubbles-assisted advanced oxidation processes for water decontamination: The importance of interface reactions[J]. *Water Research*, 2024, 265: 122295.
- [30] WANG Tianzhi, YANG Ci, SUN Peizhe, et al. Generation mechanism of hydroxyl free radicals in micro-nanobubbles water and its prospect in drinking water[J]. *Processes*, 2024, 12(4): 683.
- [31] LI Pan, WU Chao, YANG Yunxiu, et al. Effects of microbubble ozonation on the formation of disinfection by-products in bromide-containing water from Tai Lake[J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 193: 408-414.
- [32] CHEN Jian, LOEB S, KIM J H. LED revolution: Fundamentals and prospects for UV disinfection applications[J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2017, 3(2): 188-202.
- [33] OGUMA K, KITA R, SAKAI H, et al. Application of UV light emitting diodes to batch and flow-through water disinfection systems[J]. *Desalination*, 2013, 328: 24-30.
- [34] SONG Kai, MOHSENI M, TAGHIPOUR F. Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: A review[J]. *Water Research*, 2016, 94: 341-349.
- [35] ZOU Xiangyun, LIN Yili, XU Bin, et al. Enhanced inactivation of *E. coli* by pulsed UV-LED irradiation during water disinfection[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 210-215.
- [36] LI Boqiang, PAN Huimei, CHEN Baiyang. A review of factors affecting the formation and roles of primary and secondary reactive species in UV254-based advanced treatment processes[J]. *Water Research*, 2023, 244: 120537.
- [37] RATTANAKUL S, OGUMA K. Inactivation kinetics and efficiencies of UV-LEDs against *Pseudomonas aeruginosa*, *Legionella pneumophila*, and surrogate microorganisms[J]. *Water Research*, 2018, 130: 31-37.
- [38] JING Zibo, LU Zedong, SANTORO D, et al. Which UV wavelength is the most effective for chlorine-resistant bacteria in terms of the impact of activity, cell membrane and DNA?[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 447: 137584.
- [39] PROBST RÜD S, NYANGARESI P O, ADEYEYE A A, et al. Synergistic effect of UV-A and UV-C light is traced to UV-induced damage of the transfer RNA[J]. *Water Research*, 2024, 252: 121189.
- [40] SUN Wenjun, JING Zibo, ZHAO Zhinan, et al. Dose-response behavior of pathogens and surrogate microorganisms across the ultraviolet-C spectrum: Inactivation efficiencies, action spectra, and mechanisms[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(29): 10891-10900.
- [41] ITANI N, EL FADEL M. Microbial inactivation kinetics of UV LEDs and effect of operating conditions: A methodological critical analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 885: 163727.
- [42] SONG Kai, TAGHIPOUR F, MOHSENI M. Microorganisms inactivation by wavelength combinations of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 665: 1103-1110.
- [43] CHEVREMONT A C, FARNET A M, SERGENT M, et al. Multivariate optimization of fecal bioindicator inactivation by coupling UV-A and UV-C LEDs[J]. *Desalination*, 2012, 285: 219-225.
- [44] CHAÚQUE B J M, BRANDÃO F G, ROTT M B. Development of solar water disinfection systems for large-scale public supply, state of the art, improvements and paths to the future—A systematic review[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(3): 107887.
- [45] MOHSIN M S, AVDIC M, FITZPATRICK K, et al. UV-C side-emitting optical fiber-based disinfection: A promising approach for infection control in tight channels[J]. *Microbiology Spectrum*, 2024, 12(6): e00040-24.
- [46] SUN Kexiong, NIU Gang, ZHANG Yanfang, et al. Ultra-

- fast inactivation of SARS-CoV-2 with 266 nm lasers[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 18640.
- [47] WANG Yongyi, MA Ben, ZHAO Jing, et al. Rapid inactivation of fungal spores in drinking water by far-UVC photolysis of free chlorine[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(51): 21876-21887.
- [48] XU Mengyuan, ZENG Chao, LIN Yili, et al. Wavelength dependency and photosensitizer effects in UV-LED photodegradation of iohexol[J]. *Water Research*, 2024, 255: 121477.
- [49] ZENG Fanzhe, CAO Song, JIN Wenbiao, et al. Inactivation of chlorine-resistant bacterial spores in drinking water using UV irradiation, UV/Hydrogen peroxide and UV/Peroxymonosulfate: Efficiency and mechanism[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 243: 118666.
- [50] MOUSSAVI G, BAKHTIARYNASAB M, SHEKOOHI YAN S, et al. High potential of the vacuum UV-activated peracetic acid (VUV/PAA) process in eliminating recalcitrant contaminants and waterborne pathogens: Assessing the efficacy of annular and helical reactor configurations[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 60: 105143.
- [51] FENG Yangang, SMITH D W, BOLTON J R. Photolysis of aqueous free chlorine species (HOCl and OCl⁻) with 254 nm ultraviolet light[J]. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2007, 6(3): 277-284.
- [52] HUO Zhengyang, XIE Xing, YU Tong, et al. Nanowire-modified three-dimensional electrode enabling low-voltage electroporation for water disinfection[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(14): 7641-7649.
- [53] 张珈瑜, 杨诗林, 崔崇威, 等. 电化学消毒技术研究进展[J]. *武汉工程大学学报*, 2021, 43(5): 473-480+495.
- ZHANG Jiayu, YANG Shilin, CUI Chongwei, et al. Research progress in electrochemical disinfection process[J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2021, 43(5): 473-480+495.
- [54] JARIN M, WANG Ting, XIE Xing. Operando investigation of the synergistic effect of electric field treatment and copper for bacteria inactivation[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 1345.
- [55] LU Yingwen, LIANG Xiangxing, WANG Chenyang, et al. Synergistic nanowire-assisted electroporation and chlorination for inactivation of chlorine-resistant bacteria in drinking water systems *via* inducing cell pores for chlorine permeation[J]. *Water Research*, 2023, 229: 119399.
- [56] ZHOU Jianfeng, WANG Ting, CHEN Wensi, et al. Emerging investigator series: Locally enhanced electric field treatment (LEEFT) with nanowire-modified electrodes for water disinfection in pipes[J]. *Environmental Science: Nano*, 2020, 7(2): 397-403.
- [57] PENG Lu, ZHU Haojie, WANG Haobin, et al. Hydrodynamic tearing of bacteria on nanotips for sustainable water disinfection[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 5734.
- [58] GUO Youhong, DUNDAS C M, ZHOU Xingyi, et al. Molecular engineering of hydrogels for rapid water disinfection and sustainable solar vapor generation[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(35): 2102994.
- [59] 郝悦, 许桂敏, 石兴民, 等. 低温等离子体消毒灭菌技术的应用研究进展[J]. *中国消毒学杂志*, 2024, 41(1): 51-56.
- HAO Yue, XU Guimin, SHI Xingmin, et al. Research progress on the application of low-temperature plasma disinfection and sterilization technology[J]. *Chinese Journal of Disinfection*, 2024, 41(1): 51-56.
- [60] DAS S, GAJULA V P, MOHAPATRA S, et al. Role of cold atmospheric plasma in microbial inactivation and the factors affecting its efficacy[J]. *Health Sciences Review*, 2022, 4: 100037.
- [61] MAI PROCHNOW A, ZHOU Renwu, ZHANG Tianqi, et al. Interactions of plasma-activated water with biofilms: Inactivation, dispersal effects and mechanisms of action[J]. *NPJ Biofilms and Microbiomes*, 2021, 7: 11.
- [62] GU Xia, HUANG Dan, CHEN Juhong, et al. Bacterial inactivation and biofilm disruption through indigenous prophage activation using low-intensity cold atmospheric plasma[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(12): 8920-8931.
- [63] 吴敏, 杨健, 马小杰, 等. 水处理生物消毒技术研究现状及展望[J]. *中国给水排水*, 2004, 20(8): 34-35.
- WU Min, YANG Jian, MA Xiaojie, et al. Current status and prospect for research of biological disinfection technology in water treatment[J]. *China Water & Wastewater*, 2004, 20(8): 34-35.
- [64] ZUO Pengxiao, METZ J, YU Pingfeng, et al. Biofilm-responsive encapsulated-phage coating for autonomous biofouling mitigation in water storage systems[J]. *Water Research*, 2022, 224: 119070.
- [65] SUN Ruonan, YU Pingfeng, ZUO Pengxiao, et al. Biofilm control in flow-through systems using polyvalent phages delivered by peptide-modified M13 coliphages with enhanced polysaccharide affinity[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(23): 17177-17187.
- [66] ZHANG Bo, YU Pingfeng, WANG Zijian, et al. Hormetic promotion of biofilm growth by polyvalent bacteriophages at low concentrations[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(19): 12358-12365.
- [67] WU Ying, ZHU Baotong, WEI Na. Antimicrobial peptide-functionalized polyhydroxyalkanoate bio-beads as a bactericidal material for water disinfection[J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2023, 9(11): 2880-2890.