

冯琦, 杨夯, 吴振斌, 等. 氯消毒副产物研究综述: 挑战、进展与未来方向[J]. 净水技术, 2025, 44(10): 21-39.

FENG Q, YANG H, WU Z B, et al. Review on chlorination DBPs: Challenges, progress and future directions[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(10): 21-39.

氯消毒副产物研究综述: 挑战、进展与未来方向

冯琦^{1,2}, 杨夯¹, 吴振斌¹, 张义^{1,2,*}

(1. 中国科学院水生生物研究所, 水产品种创制与高效养殖全国重点实验室, 湖北武汉 430072; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 【目的】为系统综述饮用水中氯消毒副产物(DBPs)的研究现状、挑战与未来方向, 全面评估其对公共健康的潜在风险, 为水处理工艺优化和安全标准制定提供科学参考。【方法】采用文献计量学与系统综述法, 基于 Web of Science 核心数据库分析该领域的研究态势与热点, 并系统归纳评述了 DBPs 的前体来源、生成机制、种类特征、健康风险、检测技术及各类处理方法的研究进展。【结果】计量分析表明, DBPs 研究热度持续攀升, 中美为主要研究力量, 聚焦为三卤甲烷(THMs)和卤乙酸(HAAs)。天然有机物(NOMs)是生成含碳 DBPs 的主要前体, 而含氮有机物则生成毒性更高的氮杂 DBPs。高级氧化(AOPs)和臭氧氧化能有效去除前体, 但存在成本高与二次污染风险。质谱联用是主流检测技术, 但在识别新型、低浓度 DBPs 方面仍具挑战。总有机碳(TOC)与紫外吸光度(UV₂₅₄)可作前体替代监测指标, 机器学习模型在预测 DBPs 生成方面潜力巨大。【结论】当前, DBPs 的控制在新物种识别、全过程风险评估与高效低成本处理技术方面仍存挑战。未来研究应聚焦于发展高通量、高精度的检测新技术, 评估新型 DBPs 的毒性, 开发经济环保的组合处理工艺, 并加强从源头到龙头的全过程风险管控策略, 以保障饮用水安全。

关键词 消毒副产物(DBPs) 水处理 健康风险评估 分析技术 环境影响

中图分类号: TU991 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2025)10-0021-19

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.10.003

Review on Chlorination DBPs: Challenges, Progress and Future Directions

FENG Qi^{1,2}, YANG Hang¹, WU Zhenbin¹, ZHANG Yi^{1,2,*}

(1. State Key Laboratory of Breeding Biotechnology and Sustainable Aquaculture, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract [Objective] To systematically review the research status, challenges, and future directions of chlorination disinfection by-products (DBPs) in drinking water, comprehensively assess their potential public health risks, and provide a scientific reference for optimizing water treatment processes and setting safety standards. [Methods] Using bibliometrics and systematic review, this paper analyzes research trends and hotspots in this field based on the Web of Science core collection database. It also systematically summarizes and reviews research progress on DBP precursor sources, formation mechanisms, species characteristics, health risks, detection techniques, and various treatment method. [Results] Bibliometric analysis shows that DBP research interest is continuously growing, with China and the US as the primary research forces, focusing on trihalomethanes (THMs) and haloacetic acids (HAAs). Natural organic matter (NOM) is the main precursor for carbonaceous DBPs, while nitrogenous organic matter forms more toxic nitrogenous DBPs. Advanced oxidation processes (AOPs) and ozonation can effectively remove precursors but face challenges of high cost and secondary pollution risks. Mass spectrometry is the mainstream detection technique but still faces challenges in identifying novel, low-concentration DBPs. Total organic carbon (TOC) and ultraviolet absorbance (UV₂₅₄) can serve as surrogate monitoring

[收稿日期] 2024-09-30

[基金项目] 水产品种创制与高效养殖全国重点实验室创新交叉团队(2024BBSA09); 湖北省重点研发项目(2022BCA066)

[作者简介] 冯琦(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水产养殖尾水处理、生态修复, E-mail: 1322446051@qq.com。

[通信作者] 张义(1985—), 男, 研究员, E-mail: zhangyi@ihb.ac.cn。

indices for precursors, and machine learning models show great potential in predicting DBP formation. [**Conclusion**] The control of DBPs currently faces challenges in novel species identification, whole-process risk assessment, and efficient, low-cost treatment technologies. Future research should focus on developing high-throughput, high-precision new detection techniques, assessing the toxicity of novel DBPs, developing economical and eco-friendly combined treatment processes, and strengthening source-to-tap whole-process risk control strategies to ensure drinking water safety.

Keywords disinfection by-product(DBPs) water treatment health risk assessment analytical technology environmental impact

随着工业化和城市化的快速发展,饮用水安全逐渐成为全球性的公共健康问题^[1]。消毒副产物(DBPs)作为水处理过程中不可避免的副产物,其对人体健康的潜在影响引起了科学界和公众的广泛关注^[2-5]。过去几十年中,科学家们对DBPs的种类、生成机制及其健康影响进行了深入研究。研究^[6-9]表明,大部分DBPs有潜在的致癌、致畸、致突变的“三致”毒性,如三卤甲烷(THMs)和卤乙酸(HAAs)具有致癌和遗传毒性的风险,卤代乙腈(HANs)、卤化硝基甲烷(HNMs)和卤化氰有较强的致畸和致突变性风险。此外,流行病学研究^[10-13]表明,DBPs的暴露可能会增加健康风险,例如,引起结肠直肠癌、膀胱癌和造成不良生育。随着分析技术的进步,越来越多种类的DBPs被识别出来,其环境行为和健康管理影响逐渐清晰^[14]。然而,当前的水处理技术和水质监测手段仍面临着许多具体的挑战,这些挑战主要表现在以下几个方面:水处理效率低下、处理成本较高、检测技术灵敏度不足以及新型DBPs的识别困难等。特别是传统的氯消毒方法,在确保水质安全的同时,依然存在较高的DBPs生成风险^[15-16],且新型DBPs的毒性和长期影响尚未完全明了,这使得现有的水处理方法和监测技术无法全面应对这些新兴挑战。

此外,随着DBPs种类的不断增多,尤其是非卤代DBPs的出现,现有的水处理工艺和检测方法亟需进一步改进。例如,传统的水处理技术虽然在防控水传播疾病方面取得显著成绩,但其对一些高风险DBPs的去除效果有限。因此,探索更高效、环保且可持续的水处理技术,尤其是新型水处理方法和高级氧化技术(AOPs)的应用以及更为精确的DBPs检测方法,已成为亟待解决的问题。同时,全面评估DBPs的健康影响,特别是对人体长期暴露的风险评估也需要进一步加强,这对于制定科学合理的饮用水安全标准和管理政策至关重要。

本文旨在综合评述DBPs研究的现状、存在的

主要问题及未来发展趋势。首先,系统总结了DBPs的种类、生成机制及其对人体健康的潜在影响,重点分析了目前在DBPs控制和检测方面的先进技术和方法。其次,本文深入探讨了现有研究的不足之处,尤其是在新型DBPs的识别、健康影响评估以及有效去除技术方面的空白。最后,本文展望了未来DBPs研究的方向,包括发展更为精确的检测技术、全面的健康风险评估模型以及环保高效的水处理策略。本文的研究不仅对DBPs领域的科学研究具有重要意义,也为政策制定者和水处理行业提供了宝贵的参考,以期更好地保障公共饮用水的安全和人类健康。

1 文献计量分析

图1(a)和图1(b)展示了1990年—2024年(截至9月份)关于DBPs研究的发表文章数量的变化趋势。显著的增长趋势在2000年后开始显现,特别是在2010年后,文章数量持续攀升,反映了该领域的研究关注度逐年上升。2020年和2021年分别达到494篇和500篇,成为研究的高峰期。这一趋势可能与全球饮用水安全问题的日益严峻、DBPs对公共健康潜在威胁的关注增加以及相关技术与分析方法的进步密切相关。此外,近年来,科学研究的全球化及跨学科合作的加强也推动了该领域文献数量的快速增长。

图1(c)展示了基于Web of Science核心数据库的各国在DBPs研究领域的文献发表量。由图1(c)可知,我国以2 241篇遥遥领先,显示出我国在此研究领域的主导地位,这可能与我国在水处理和水质安全管理领域的政策推动以及国内相关研究机构的大力支持密切相关。美国紧随其后,发表了1 647篇相关文献,反映了美国在公共健康、环境保护及水质监控方面的强大科研能力。其他国家如加拿大、西班牙、澳大利亚和英国也在DBPs的研究中占据重要位置,显示出该问题得到全球范围内的关注。

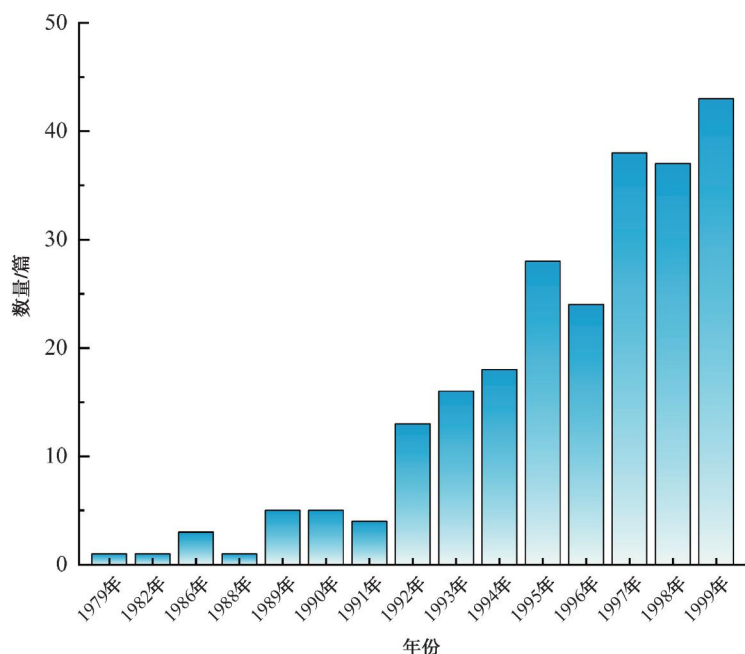
图 1(d) 则通过网络可视化图展示了 DBPs 研究领域的主要关键词之间的相互关系。由图 1(d) 可知, THMs 和 HAAs 作为与 DBPs 相关的核心关键词, 位于图中显著位置, 并且与“risk”“exposure”“cancer”等健康相关的术语紧密相连。该网络图清晰地呈现了 DBPs 对健康的潜在威胁, 尤其是在暴露评估和风险分析方面的重要性。此外, 图 1(d) 还显示了其他影响因素, 如“oxidation”和

“degradation”, 揭示了 DBPs 形成机制的复杂性及其在水处理过程中的重要性。

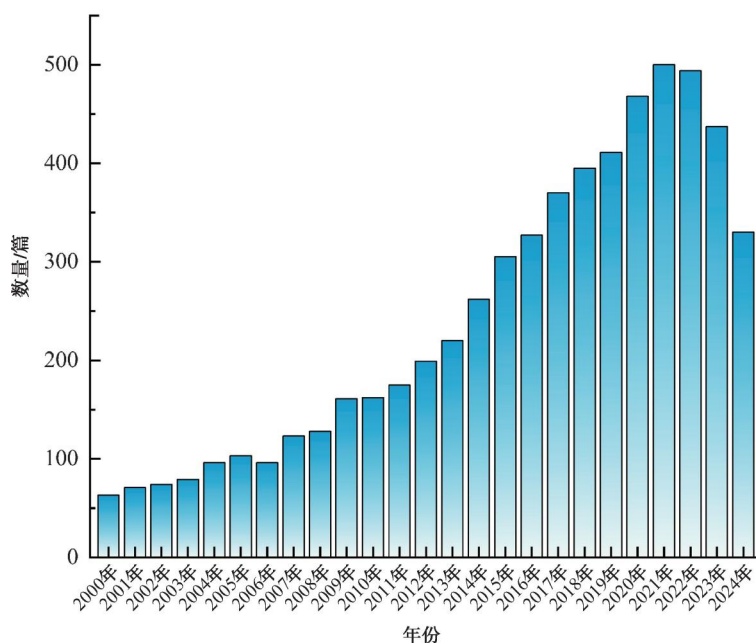
2 DBPs 的来源、特征、类型和检测

2.1 DBPs 前体及来源

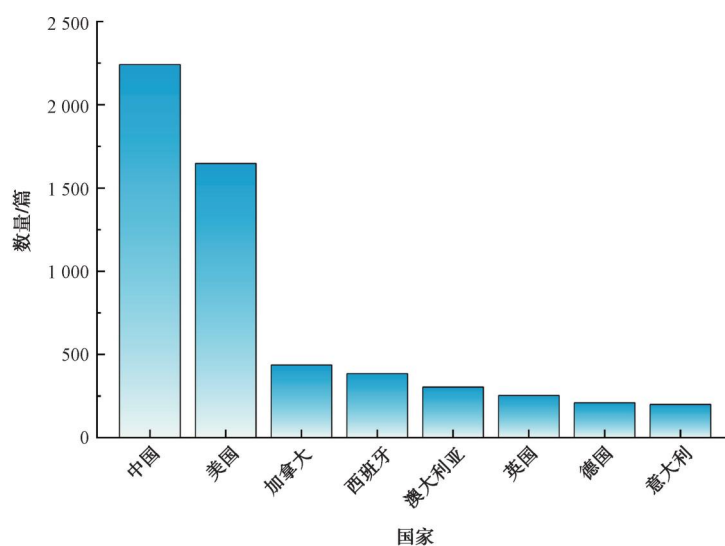
DBPs 前体物是指在水消毒过程中, 能够与消毒剂反应生成 DBPs 的母体有机物。国内外大量研究发现腐殖质和藻类有机物等天然有机物主要是 THMs、HAAs 等含碳 DBPs (C-DBPs) 的前体物。因



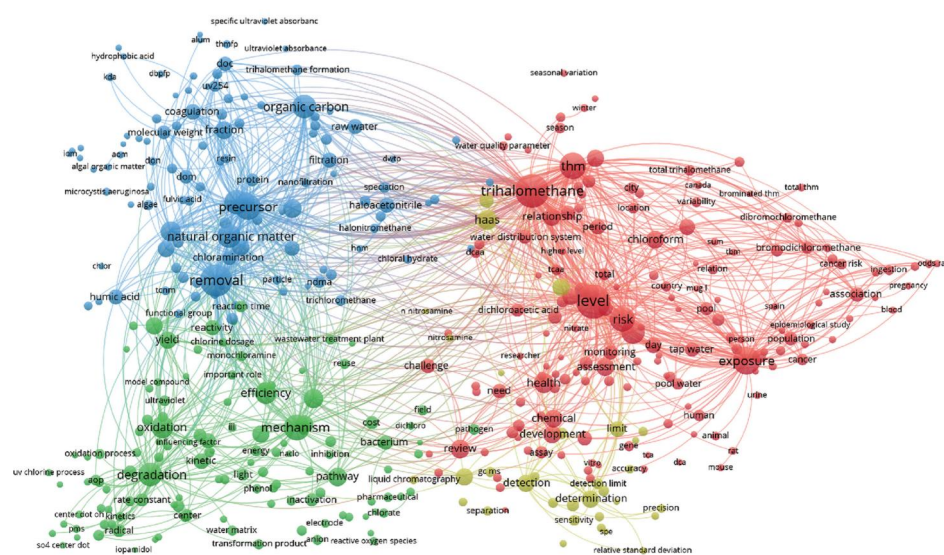
(a) 1979年—1999年发表的文章数量



(b) 2000年—2024年发表的文章数量



(c) 不同国家发表的文章数量(前8)



(d) 网络可视化图

图1 基于 Web of Science 核心数据库搜索关键词“disinfection by-products”生成的统计图

Fig. 1 Statistical Chart Generated from the Web of Science Core Collection Database by Using of the Keyword "Disinfection by-Products"

此,有机物含量较高的水体在消毒过程中往往伴随着较高 THMs 和 HAAs 的生成。含胺基化合物、天然有机物、生活污水和工业废水等出水有机物是亚硝胺的前体物,这些前体物与氯胺、臭氧、游离氯等消毒剂反应生成亚硝胺。富含藻类和腐殖质的水体在进行氯胺消毒时也会生成一定浓度的亚硝胺。与此同时,大量研究表明,疏水性腐殖质类物质是 C-DBPs 的主要前体物,如 HAAs 和 THMs 等。氨基酸类物质主要是含氮 DBPs (N-DBPs) 的典型前体物,且氨基酸上不同的 R 基结构能够显著影响 DBPs 的

生成潜能。含有羰基或醇羟基的有机物是卤代醛/酮类 DBPs 的主要前体物^[17-18]。

在水处理过程中,有机物的结构特征、元素组成和官能团会显著影响其与氯反应生成 DBPs 种类。表 1 和表 2 分别介绍了 DBPs 前体及其生成的 DBPs 特征与危害程度和官能团对 DBPs 生成的影响。如腐植酸和富里酸等含有苯环、酚类、羧酸类等芳香结构的物质,易与氯反应生成 THMs 和 HAAs,含有高共轭体系(如腐殖质)的有机物能增强 DBPs 的生成潜力^[19-20]。结构中存在的羟基、羧基等富电子基团

能够加速卤化反应,例如苯酚类化合物在氯化过程中会形成较高产量的 THMs。直链或支链的烷烃、醇类、脂肪酸等,如脂肪族羧酸和酮类等化合物在氯消毒过程中能够产生 THMs 和 HAAs,但生成 DBPs 的能力低于芳香族。支链结构会促进氯化反应,进而生成更多的 DBPs,脂肪族羰基化合物(如醛、酮等)可通过卤代反应生成卤代酮(HKs)和卤代醛(HALs)^[21]。含氮结构,比如胺($-\text{NH}_2$)、酰胺($-\text{CONH}_2$)、含氮杂环等化合物在氯消毒过程中会形

成 N-DBPs,如 N-亚硝基二甲胺(NDMA)和卤代腈(HANs)^[22]。含氮有机物与氯或氯胺作用时,能生成更高毒性的 DBPs,其毒性远高于 THMs 和 HAAs。含卤素结构的化合物,溴代/碘代化合物在消毒过程中会生成溴代 DBPs(如溴仿、溴乙酸)和碘代 DBPs(如碘仿)的生成,且碘代 DBPs 的毒性高于氯代 DBPs 和溴代 DBPs。例如在海水淡化的过程中,高溴水体容易生成致癌风险较高的溴酸盐^[23-24]。

表 1 DBPs 前体及其生成的 DBPs 特征与危害评估

Tab. 1 Characteristics and Hazard Assessment of DBPs Precursors and DBPs Generated

类别	物质	生成的 DBPs	危害程度	参考文献
DBPs 前体	腐植酸、富里酸	THMs、HAAs	THMs 具有潜在致癌性(膀胱癌、结直肠癌),肝肾毒性,影响生殖健康;HAAs 具有遗传毒性、遗传物质脱氧核糖核酸(DNA)损伤和肝脏毒性	[22]
	含氮有机物	NDMA、卤代胺	NDMA 是强致癌物,可能导致肝癌和胃癌;卤代胺可影响神经系统,损害 DNA,具有生殖毒性	[25-27]
	藻类	THMs、HAAs、HANs、N-DBPs	藻类产生的有机物可促进 DBPs 形成,部分 DBPs 具有基因毒性和生殖毒性,影响胎儿发育	[28]
	卤素离子(Br^- 、 I^- 等)	溴代 DBPs、碘代 DBPs、无机 DBPs(如溴酸盐)	溴代/碘代 DBPs 毒性远高于氯代 DBPs,可导致 DNA 损伤、肝损伤、免疫系统损害;溴酸盐已被列为 2B 类潜在致癌物	[27, 29]
	人为污染物	各类 DBPs(NDMA、HKs、HANs 等)	工业污染物可增强 DBPs 生成,部分具有神经毒性、肝毒性、致癌性,增加慢性病风险	[29-30]
消毒剂	氯	亚氯酸盐、THMs、HAAs	THMs 可能致癌(膀胱癌、结直肠癌)、影响神经系统,HAAs 具有基因毒性和肝脏毒性	[31-32]
	氯胺	亚氯酸盐、THMs、NDMA	NDMA 是强致癌物,可导致肝癌、胃癌;氯胺消毒可降低 THMs,但增加 N-DBPs(如 NDMA)的风险	[32]
	二氧化氯	氯酸盐、亚氯酸盐	氯酸盐和亚氯酸盐可能影响甲状腺功能,导致代谢紊乱和神经发育问题	[31]
	臭氧(在含有溴化物和有机溴类的水体中)	溴酸盐	溴酸盐被列为 2B 类潜在致癌物,长期暴露可能导致肾脏损害和 DNA 破坏	[33-35]

表 2 官能团对 DBPs 生成的影响

Tab. 2 Impact of Functional Groups on DBPs Formation

官能团	化学特性	主要生成的 DBPs	影响因素	参考文献
羟基($-\text{OH}$)	易被氯化,促进芳香环卤代	THMs、HAAs	高 THMs 生成潜力,特别是在富里酸、腐植酸等天然有机物丰富的水体中	[36-37]
羧基($-\text{COOH}$)	参与卤化,生成 DBPs	HAAs	生成高毒性 HAAs,其形成受水体 pH 和反应时间影响较大	[20, 35]
醛基($-\text{CHO}$)	易氧化形成 DBPs	HALs、HKs	促进 HALs(如三氯乙醛)和 HKs(如三氯丙酮)生成,受氧化剂浓度和水温影响显著	[38]
酮基($-\text{CO}-$)	促进卤化	HALs、HKs	生成高毒性 HKs,特别是在含氮环境下可与氯胺作用形成更复杂的 DBPs	[38]
胺基($-\text{NH}_2$)	形成 N-DBPs	NDMA、HANs	受氯胺投加量影响较大,特别是在污水处理厂出水或含氮有机物较高的水体中,易生成高毒性 NDMA	[37]
卤素($-\text{Br}$ 、 $-\text{I}$)	促进溴代 DBPs/碘代 DBPs 生成	溴仿、碘仿	在高 Br^- 、 I^- 水体中,溴代和碘代 DBPs 生成潜力大,且其毒性远高于氯代 DBPs	[18]

有机质的组成和性质决定了 DBPs 的形成。水体中有机物按来源又可以分为外源有机物(如高等植物腐解产生的腐植酸类物质)、内源有机物(如藻类和微生物代谢物)及人为产生的有机物(如工业废水、生活污水中的有机物)。外源有机物通常主要来源于流域输入,包括土壤冲刷、植物腐解和农业活动等,这类有机物常以腐植酸和富里酸的形式存在。这些有机质的结构和反应性差异显著,导致不同水体在相同消毒条件下可能产生不同的 DBPs^[39-40]。内源有机物主要由水体中藻类、细菌、浮游生物等的代谢活动和细胞裂解产生,包含多糖、蛋白质、脂类及腐殖质等。其中藻类有机物主要由藻类在生长和衰亡过程中释放的胞外有机物和细胞内溶解有机物组成,藻类有机物因其较高的生物活性和溶解性,易参与消毒反应并生成 DBPs^[41]。例

如,藻类有机物在氯消毒条件下形成较多的 THMs^[42],三氯乙酸与藻类有机物中的羧基化合物在消毒过程中反应生成 HAAs 等^[43]。此外,水中微生物的代谢产物也可能参与 DBPs 的形成,如细菌释放的细胞外聚合物,可能含有高反应性的官能团,在消毒过程中与消毒剂反应生成特定的 DBPs^[44-45]。DBPs 的前体主要来源天然水体、污水处理厂排放和农业径流三大类,其中天然水体如河流湖泊和地下水等,含有丰富的天然有机物腐植酸和富里酸等;污水处理厂排放是指由人类活动产生的污染物,尤其是药物、化妆品和其他工业化学品;农业径流主要指施用农药和肥料后流入水体中的化学物质。表 3 归纳了不同水体中 DBPs 前体物的浓度与特征。

表 3 不同水体 DBPs 前体物的浓度与特征

Tab. 3 Concentrations and Characteristics of DBPs Precursors in Different Water Bodies

水体类型	前体物的种类	前体物的质量浓度/(mg·L ⁻¹)	主要 DBPs 类型	特征	参考文献
河流	腐植酸、富里酸	5~20	THMs, HAAs	天然有机物浓度高,易生成 DBPs	[30]
湖泊	腐殖质	10~30	THMs, HAAs	水温和 pH 影响 DBPs 生成	[30, 46]
污水处理厂出水	有机污染物	20~50	THMs, N-DBPs	人为污染浓度高, DBPs 多样性强	[46]
农业径流	农药、肥料残留	1~15	THMs, HAAs	受季节性影响,浓度波动大	[47]

2.2 DBPs 的特征

在深入探讨 DBPs 的特征时,重点应放在其化学稳定性、生物活性(毒性)以及环境行为这 3 个关键方面。DBPs 的这些特征决定了它们在水处理系统中的行为、对环境的长期影响以及对人体健康的潜在威胁。深入理解这些特性对于评估水处理过程的效率、预测环境中 DBPs 的行为以及制定有效的风险管理策略至关重要。

DBPs 的化学稳定性是评估其环境影响的关键因素。这一特性不仅影响 DBPs 在水体中的寿命,还决定了它们在环境中的迁移和转化^[48]。例如, THMs 类 DBPs 通常在水体中显示出较高的化学稳定性,这意味着它们可以在水处理系统中长距离传输,甚至可能通过水气交换进入大气^[49]。相比之下, HAAs 类 DBPs 在一定条件下可能更容易在水体中发生水解或生物降解,从而减少其环境影响^[50]。此外, HKs 和 HANs 等 DBPs 由于其较高的反应性,可能在水处理系统中快速转化,形成新的化学物质。

DBPs 的生物活性是评估其对人体健康影响的

重要指标。自 1976 年美国国家癌症协会发现三氯甲烷(TCM)对动物有致癌作用以来, DBPs 的毒性研究备受关关注^[51]。已有流行病学和毒理学研究^[52]表明,长期饮用含 DBPs 的水可能导致直肠癌、膀胱癌、结肠癌等健康问题。例如, N-DBPs,尤其是卤代亚硝胺类化合物,因其高毒性和致癌潜力而受到广泛关注。Plewa 等^[3]和 Richardson 等^[24,53]研究发现,碘代 DBPs 的细胞毒性和遗传毒性通常是溴代 DBPs 和氯代 DBPs 的几倍至几百倍。这类 DBPs 在水处理过程中的生成与氯胺消毒剂的使用密切相关,其毒性显著高于传统的卤代 DBPs^[28,54]。Tuthill 等^[55]研究表明, THMs 与消化系统疾病,如直肠癌和结肠癌等有直接关系。因此,深入了解这些化合物的生物活性对于评估和控制饮用水中 DBPs 的健康风险至关重要。

饮用水中的 DBPs 主要由水中有机物与消毒剂反应生成,腐植酸和富里酸是天然有机物的主要成分,广泛存在于自然水体中,这些物质在氯化消毒过程中主要生成 THMs 和 HAAs,占氯化 DBPs 的

80%^[30,56]。含氮有机物如蛋白质、氨基酸等会生成 HANs、HKs 和 NDMA 等,这些含氮类副产物的毒性通常高于 THMs 和 HAAs,对人体健康影响更大^[30,57-58]。当水中存在 Br⁻或 I⁻时,可能生成溴代或碘代 DBPs,如溴乙酸、碘代甲烷等,这些副产物具有更高的致癌风险^[57,59]。

2.3 DBPs 的类型

消毒是饮用水处理的关键步骤,主要目的是灭活水中的病原微生物,确保饮用水安全。DBPs 的生成主要由消毒剂与水中有机质及其他前体物的反应引发^[60-61]。常用的消毒剂如氯、氯胺、臭氧等,与水体中的有机物、无机物质及微生物代谢产物相互作用,导致复杂的化学反应^[62-63]。这些反应不仅取决于消毒剂的种类和浓度,还与水体中的有机质数量和性质[如溶解性有机碳(DOC)的含量和组成]、pH、温度、接触时间等因素密切相关^[64-65]。例如,氯消毒过程中,氯与水中的有机物如腐植酸和富里酸反应,会生成多种类型的 DBPs,包括 THMs、HAAs 等^[66-67]。在 DBPs 的研究领域中,对 DBPs 的类型进行精确分类是理解其环境和健康影响的基础^[68]。有研究^[69]指出,1974 年荷兰学家 Rook 首次在消毒后的饮用水中检测出三氯甲烷,越来越多的 DBPs 被识别。DBPs 的种类繁多,目前已发现超过 800 多种 DBPs,受到人们的广泛关注^[70-71]。根据其化学结构和形成途径,主要可以分为以下几大类:THMs、HAAs、HKs、HANs、HALs、N-DBPs 和其他类

别^[14,31,72-73]。每一类 DBPs 都有其独特的化学特征和形成机制,这对于理解它们在水处理系统中的行为和潜在的健康风险至关重要。表 4 详细归纳了不同类型的 DBPs。

THMs 是最为人所知的 DBPs 类别,包括氯仿、溴仿、溴氯甲烷和二溴氯甲烷。这些化合物主要通过消毒剂(尤其是氯)与水中的有机质(如腐殖质)反应生成^[74-75]。THMs 的生成受到多种因素的影响,包括原水中有机质的性质、消毒剂的种类和剂量、水体的 pH 和温度等^[76]。由于 THMs 在饮用水中的普遍存在及其潜在的健康影响,它们成为了水处理行业和环境健康研究中的重点^[31,77]。HAAs 类 DBPs 包括多种卤代乙酸,如单卤乙酸和二卤乙酸,它们通常在消毒过程中的自由基取代反应中形成^[78]。HKs 和 HANs 是另外两类重要的 DBPs^[79]。这些化合物的形成与消毒剂中的氯或溴含量以及水中有机质的类型密切相关^[68,80]。此外,N-DBPs,尤其是卤代亚硝胺类(如 NDMA),在近年来引起了广泛关注^[27,81]。这类 DBPs 通常在氯胺消毒过程中形成,与传统的卤基 DBPs 相比,N-DBPs 具有更高的致癌风险^[64,82-83]。Zhang 等^[84]研究表明,氯代消毒剂氯胺可以降低 C-DBPs 的形成,但促进 N-DBPs 的形成,且后者具有更强的细胞毒性和遗传毒性。因此,对 N-DBPs 的形成机制、分布以及其对环境 and 人体健康的影响进行研究,对于提升饮用水安全至关重要^[85]。

表 4 不同类型 DBPs 的详细介绍
Tab. 4 Detailed Introduction of Different Types of DBPs

类型	化学名称	主要来源	健康影响	检测方法	参考文献
THMs	氯仿、溴仿、二溴氯甲烷、溴氯甲烷	氯或溴与水中有机物的反应	可能致癌,影响肝脏、肾脏和中枢神经系统	气相色谱-质谱联用(GC-MS)	[31,72,74]
HAAs	氯乙酸、二氯乙酸、三氯乙酸等	氯与水中有机物的反应	潜在致癌性,对肝脏和生殖系统的影响	液相色谱-串联质谱(LC-MS/MS)	[78,86]
HKs	1,1-二氯-2-丙酮等	氯与水中有机酮类化合物反应	对肝脏和肾脏的潜在毒性	GC-MS	[68,79-80]
HANs	二氯乙腈等	含氮有机物与消毒剂反应	潜在的致癌性和毒性	GC-MS	[87]
HALs	三氯乙醛等	氯与水中醛类化合物反应	刺激皮肤和呼吸道,潜在毒性	GC-MS	[73,88]
N-DBPs	NDMA 等	氯胺消毒剂与含氮有机物反应	高致癌风险	LC-MS/MS	[27,82,89-90]

2.4 DBPs 的检测

在 DBPs 的检测过程中,采用了多种技术手段,以确保能够全面、精准地分析这些物质的种类和浓度。现有的检测方法涵盖了气相色谱、液相色谱(LC)以及高分辨质谱(HRMS)等技术,每种方法在

特定条件下均表现出独特的优势。为了帮助更好地理解这些检测技术的特点,表 5 展示了 DBPs 的常见检测方法及其应用。通过这些方法的综合运用,研究人员能够更有效地监测和识别水中的 DBPs,为水质管理和健康风险进一步的评估提供数据支持。

表 5 DBPs 的检测方法
Tab. 5 Determination Methods of DBPs

检测方法	特点	应用范围	参考文献
GC-MS	高灵敏度和高选择性,适用于气体相中 DBPs,如 THMs	主要用于常见的气态 DBPs 分析	[91-93]
LC-MS/MS	适用于极性和低浓度的 DBPs,处理复杂样品中的干扰问题	适合于复杂水样中极性和低浓度 DBPs 的检测	[94-95]
HRMS	提供极高的分辨能力,能识别新型 DBPs 和未知的污染物	广泛应用于发现新型 DBPs,尤其在高分辨分析中	[96]
紫外-可见分光光度法 (UV-Vis)	通过吸光度测量反应生成的 DBPs,对部分 DBPs 有较好的检测能力	适用于水质监测和一些常规分析	[30]
高效液相色谱 (HPLC)	常用于分析具有特殊化学结构的 DBPs	可用于分析特定化合物的 DBPs	[94]
质谱	能提供化学物质的详细质量信息,适用于多种 DBPs	广泛应用于各类污染物分析,尤其是 DBPs	[94]
LC-HRMS	结合高分辨质谱技术,精准分析复杂样品中的 DBPs 前体	更准确地分析 DBPs 前体的来源和结构特征	[95]
离子色谱	有着较高的灵敏度、准确性和较好的选择性,能够同时对多种 DBPs 进行定性定量分析,还能够有效消除基体干扰对试验结果的影响	可用于生活饮用水中 HAAs、溴酸盐、氯酸盐和亚氯酸盐的日常检测	[97-98]

3 DBPs 的处理方法

随着水处理技术的不断发展,对 DBPs 的处理方法也日益多样化。有效的 DBPs 处理不仅是保障饮用水安全的关键环节,也是实现环境友好和可持续发展的重要措施。本节将详细介绍物理、化学和生物三大类处理方法的原理、技术应用及其优缺点,通过对比和分析,探讨各类处理方法在实际应用中的效果和前景,为研究人员和水处理从业者提供全面的技术参考。

3.1 物理方法

在 DBPs 的处理领域,吸附法是处理 DBPs 前体物的常用方法,通过吸附剂的表面和孔隙结构捕获 DBPs 前体分子^[99]。活性炭因其大比表面积和强吸附能力,成为最常用的吸附剂之一,常用于去除 DBPs 前体,如某些 HAAs 前体物和 HKs 前体物等^[100]。然而,其效率可能受到水中其他有机物和无机物的竞争吸附影响,且需定期更换或再生,限制了其在大规模水处理中的应用^[101]。活性炭吸附工艺对 DBPs 前体物也有着不同的去除效率,活性炭吸附对 THMs 前体物(芳香族类化合物)的去除效率可达 60%~90%,对 HAAs 前体(腐植酸、蛋白质类化合物)的去除效率为 50%~80%。粉末活性炭比颗粒活性炭的去除效率更高^[102]。Jiang 等^[103]通过利用颗粒活性炭吸附饮用水在氯化过程中的中间体芳香族卤代 DBPs,发现可以更加有效地控制卤代

DBPs 的生成。膜分离技术是一种有效的物理处理方法,包括反渗透、纳滤和超滤等^[104]。纳滤处理技术对 THMs 前体(腐植酸、富里酸类化合物)的去除效率可达 50%~90% 及以上,反渗透技术可高达 90% 以上。纳滤处理技术对 HAAs 前体(蛋白质、氨基酸类化合物)的去除效率为 50%~80%,反渗透技术同样可高达 90% 以上。膜的选择透过性使得它可以使用尺寸排阻和扩散机制等功能,进而有效去除水中的 DBPs 及其前体物质^[105-106]。然而,膜分离技术的运行成本较高,且易受膜污染和水质硬度影响,需要定期清洗和维护。物理方法在 DBPs 的处理中提供了一种无需化学添加剂的替代方案。

3.2 化学方法

在 DBPs 的处理中,化学方法是实施广泛的策略之一,通过氧化还原反应、水解和其他化学转化过程,改变 DBPs 的化学结构,从而降低其对环境 and 人体健康的潜在风险。典型的化学处理方法包括臭氧氧化、氯消毒法等,每种方法都有其独特的作用机制和适用条件^[107-108]。臭氧氧化是一种有效的 DBPs 前体物处理方法,它通过强氧化剂臭氧对 DBPs 前体物进行氧化分解。臭氧具有高反应活性,能够与 DBPs 中的多种有机结构,如不饱和键、芳香环和某些官能团发生反应,从而导致 DBPs 前体物的分解,去除效率可达 70%~90%^[109-110]。此外,臭氧氧化还能够破坏 DBPs 前体物,防止其在消毒过程中形

成新的 DBPs。然而,臭氧氧化处理可能产生次生氧化产物,如臭氧酸和羟基自由基,这要求对处理过程进行精细控制以避免可能的次生污染^[33]。杨宁等^[111]以水厂砂滤水为水源,研究了 3 种短链全氟化合物[全氟丁酸(PFBA)、全氟戊酸(PFPeA)、全氟己酸(PFHxA)]和溶解性有机物(DOM)在连续运行 90 d 的臭氧-生物活性炭中试装置中的去除效果,发现臭氧的投加能够氧化 DOM 从而改善短链 PFCs 在炭滤中的吸附去除,过高的臭氧投加量又会使更具竞争性的低分子量有机物增多,从而削弱炭滤对短链 PFCs 的去除能力。钱勇等^[34]以太湖水源的 3 座水厂为目标,探究臭氧-生物活性炭工艺在不同运行情况下的长期运行效能发现,活性炭的吸附能力随臭氧-生物活性炭工艺运行时间的增加而逐渐下降。AOPs 是一种包括光化学(UV 技术)和非光化学(臭氧氧化、过硫酸盐活化、Fenton 等)工艺技术,用于提高 DBPs 去除效率^[26]。AOPs 主要通过产生高反应性的羟基自由基氧化和矿化 DBPs 前体。这些自由基能够与 DBPs 中的大多数有机结构发生反应,导致其分解成小分子物质。AOPs 包括多种技术,如 UV/H₂O₂、UV/臭氧和光催化氧化等,每种技术都有其特定的应用场景和优化参数^[112-114]。Chu 等^[115]利用高锰酸盐氧化-活性炭粉末吸附联合预处理 DBPs,发现能够更加强效地去除 DBPs 中的 C-DBPs 和 N-DBPs。高锰酸钾预氧化法对大分子有机物的去除率可达 60%~85%,并且能有效减少后续处理中的 DBPs 生成氯。氯消毒法作为一种传统的消毒方法,常用于 DBPs 的处理。通过控制氯的加入量和接触时间,可以降解某些类型的 DBPs。与此同时,Liang 等^[116]通过研究对比氯剂量在氯化过程中对再生水中 DBPs 的形成影响发

现随着 Cl₂/DOC 值的增加,氯代 DBPs 丰度和总有机氯(TOCl)也随之增加,微不饱和脂肪族化合物和多环芳香族化合物的总丰度随着 Cl₂/DOC 值的增加而增加,增加氯剂量有利于形成高度不饱和的多环芳香族化合物。然而,过量的氯化处理可能导致新的 DBPs 的生成,因此需要精确控制氯化过程以平衡 DBPs 的去除和新 DBPs 的生成风险^[114,117-118]。AOPs 法对 THMs 前体物(腐植酸、芳香族类化合物)的去除效率为 50%~90%,对 HAAs 前体物(蛋白质、氨基酸类化合物)的去除效率为 60%~90%。与此同时,对于 THMs(主要前体物为腐植酸、富里酸、芳香族化合物等)去除的不同工艺中,主要是通过加入 Cl₂ 或次氯酸钠等条件进行污染物的去除,对于 HAAs(主要前体物为蛋白质、腐植酸和氨基酸类化合物等)去除的不同工艺中,主要是添加氯或氯胺等^[30,102]。

3.3 生物方法

生物方法是指利用微生物的代谢能力,通过生物降解或生物转化机制,实现对 DBPs 的有效处理。活性污泥法是一种常见的生物处理方法,在此过程中它通过混合液悬浮生物的代谢活动来降解有机物,污泥中的微生物群落可以通过吸附和生物代谢作用分解 DBPs,将其转化为较小的无害或低毒性的分子^[119]。生物滤池是另一种有效的生物处理技术,它利用固定生物膜上微生物的代谢能力来去除水中的 DBPs^[120]。构造湿地是一种模拟自然湿地生态系统的生物处理方法,适用于 DBPs 的去除。在植物和微生物共同作用下,通过吸附、植物吸收和微生物降解等机制去除 DBPs^[121]。但其效率可能受季节、温度和水体负荷的影响^[122]。表 6 与表 7 分别展示了不同处理方法与不同处理工艺的比较。

表 6 不同处理方法的优缺点比较

Tab. 6 Comparison of Advantages and Disadvantages of Different Treatment Methods

处理方法	常见技术	优点	缺点	适用性	参考文献
物理方法	吸附、膜分离	高效、适用范围广、二次污染小	成本高、操作复杂、对某些 DBPs 处理效果有限	高水质要求的工业或饮用水处理	[14,104]
化学方法	AOPs、氯消毒、臭氧或高锰酸钾等预氧化	高效快捷、适用难降解污染物、工艺灵活多样	成本高、潜在二次污染风险、某些方法对处理条件要求高	难降解 DBPs 的深度处理或应急处理	[110,114,118,123]
生物方法	生物滤池、活性污泥法、湿地处理、厌氧处理	成本低、环境友好、适合长期运行	对难降解 DBPs 效果差、速率慢、需要稳定的运行条件	长期低浓度处理或与其他工艺联合使用、环境保护要求较高的区域	[122,124]

表 7 不同工艺比较

Tab. 7 Comparison of Different Processes

处理工艺	去除效率	经济性	参考文献
臭氧氧化	臭氧能够有效氧化水中的有机物,尤其是大分子有机物,去除效率可达 70%~90%	高初始成本,但高效益	[109-111]
活性炭吸附	活性炭对有机物的去除率通常为 50%~80%,具体取决于水中有机物的性质和浓度	初期投资低,但长期成本高	[34,104]
高锰酸钾预氧化	该方法对大分子有机物的去除率可达 60%~85%,并且能有效减少后续处理中的 DBPs 生成	成本低,可与其他工艺联用	[125]
混凝沉淀	传统混凝沉淀法对小分子有机物的去除率一般为 30%~50%,效果有限	投资少,但效果有限	[111]
反渗透	反渗透技术对水中绝大多数有机物和无机盐的去除率可达 90%以上	高投资和运行成本	[104]

4 健康风险评估

4.1 DBPs 致癌风险评估

健康风险评估模型是用于量化环境暴露对人体健康潜在风险的一种方法学工具,描述人类暴露于环境危害因素之后,出现不良健康效应的特征,在饮用水 DBPs 研究中被广泛应用^[126-127]。DBPs 是水消毒过程中与有机物反应生成的副产物,其中部分物质对人体具有潜在健康危害,例如致癌性、基因毒性或内分泌干扰效应。

针对 DBPs 的致癌风险可以采用美国国家环境保护局(EPA)推荐的致癌和非致癌健康风险评估模型进行风险评价。癌症风险评估计算如式(1)~式(3)^[126-127]。

$$R = C_{DI} S_F (R < 0.01)$$
 (1)

$$R = 1 - \exp(-C_{DI} S_F) (R \geq 0.01)$$
 (2)

其中: R ——致癌风险,表示人体终生超额患癌的概率;

C_{DI} ——饮水途径的日摄入量,mg/(kg·d);

S_F ——化学致癌物的致癌斜率因子,mg/(kg·d)。

$$C_{DI} = (C_W I_R E_F E_D) / (B_W A_T)$$
 (3)

其中: C_W ——饮用水中 DBPs 质量浓度,mg/L;

I_R ——饮用水摄入量,L/d;

E_F ——暴露频率,d/a;

E_D ——持续暴露时间,a;

B_W ——体重,kg;

A_T ——平均暴露时间,d/a。

相关参数可以查阅《中国人群暴露参考手

册》^[22,128-129]。

当存在多种致癌物时,通常将各种致癌物质的健康风险计算后求和得到最终的致癌风险。

判断标准如表 8^[127]。

表 8 致癌风险判断标准

Tab. 8 Criteria for Carcinogenic Risk Assessment

R	结论
$<1 \times 10^{-6}$	DBPs 致癌风险可以忽略
$1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$	DBPs 致癌风险在人类可接受范围内
$\geq 1 \times 10^{-4}$	DBPs 致癌风险较高

4.2 DBPs 非致癌风险评估

DBPs 对人体的非致癌风险一般用危害指数(H_I)表示^[126-127],计算如式(4)。

$$H_I = \frac{C_{DI}}{R_{ID}}$$
 (4)

其中, R_{ID} ——化学物质非致癌参考量,mg/(kg·d)。

判断标准如表 9^[127]所示。

表 9 非致癌风险判断标准^[127]

Tab. 9 Criteria for Non-Carcinogenic Risk Assessment^[127]

H_I	结论
<1	DBPs 非致癌风险在可接受范围内
≥ 1	DBPs 非致癌风险较高

5 DBPs 前体预测

DBPs 是饮用水消毒过程中由消毒剂与水中存在的有机物反应生成的有害物质。为了有效控制 DBPs 的生成,准确预测其前体物的浓度至关重要。近年来,研究者们提出了多种预测方法,以提高对

DBPs 前体的识别和控制能力。

5.1 基于水质参数的统计模型

DBPs 的生成主要与水中有机物(如天然有机物、藻类代谢产物)和无机物(如 Br^- 、 I^-)反应相关,因此精确预测水体中 DBPs 前体物的浓度与生成潜力是优化消毒工艺的关键。早期研究^[30]主要利用简单的水质指标(如 TOC、 UV_{254} 、 Br^- 浓度)与 DBPs 生成潜力之间的经验关联。TOC 反映有机物的总量, UV_{254} 则与芳香性有机物的含量相关,两者与 DBPs 生成量具有显著正相关性^[57]。但此类方法忽视了有机物的分子结构差异和消毒反应路径,仅提供粗略的量化结果,无法精确评估复杂水质条件下的 DBPs 前体物^[18]。

5.2 回归模型

基于多元回归法的 DBPs 预测模型基本原理是将 DBPs 浓度作为因变量,一系列影响 DBPs 生成的因素作为自变量,通过建立线性回归模型,输入水龄和水质数据等,讨论两者之间的线性或非线性关系,并建立相应的含参数方程,进而有效预测饮用水中的 DBPs。这种方法简单易行,适用于多种水质条件^[130]。

当因变量与自变量的关系呈线性关系时,可以用式(5)表示。

$$Y = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_m x_m \quad (5)$$

其中: Y ——DBPs 浓度;

$x_1, x_2, \cdots, x_m$ ——影响 DBPs 生成因素;

m ——自变量的个数;

α ——截距;

$\beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_m$ ——回归系数。

当因变量与自变量的关系呈非线性关系时,可用式(6)表示。

$$Y = t_1(x_1)^{l_1}(x_2)^{l_2}\cdots(x_m)^{l_{m+1}} \quad (6)$$

其中: $t_1, t_2, \cdots, t_{m+1}$ ——模型参数。

5.3 机器学习模拟

机器学习模型具有良好的扩展性,较强的自适应性以及较好的泛化能力等,采用随机森林(RF)、支持向量机(SVM)等机器学习算法,可以处理复杂的非线性关系,提高对 DBPs 生成的预测精度,这些算法模拟能够综合考虑多种影响因素^[30,126]。与此同时,通常对水质数据进行标准化和归一化等处理,

剔除异常值,从而提高数据质量,并利用相关性分析、主成分分析(PCA)等方法筛选与 DBPs 生成潜力高度相关的水质指标,如溴离子浓度、有机物浓度、TOC 等,而后采用交叉验证方法评估模型性能,)选取均方误差(MSE)、决定系数(R^2)等指标衡量预测精度,最后可以通过网格搜索等方法优化模型的关键参数,如学习率、树的深度等从而优化整个预测模型^[18,130]。该方法具有能适应复杂水质特征,能够捕捉非线性关系、自动化程度高,可与在线监测设备集成,实现实时预测,通过模型更新,适应不同水源和工艺条件等优势,但依赖高质量的训练数据,数据不足或偏差可能导致预测不准确,且模型解释性较弱,往往需要与机理研究结合提高可信度。几种常用机器学习方法如表 10 所示。

表 10 常用机器学习方法
Tab. 10 Common Machine Learning Methods

常用算法	内容
多元线性回归 (MLR)	适用于简单线性关系的 DBPs 生成预测
SVM	能够处理非线性数据关系,在水质参数预测中表现出色
RF	通过决策树组合实现对高维数据的特征筛选与预测优化,能够处理复杂非线性关系
梯度提升树 (GBT)	通过多次迭代优化模型性能,在小样本数据条件下表现出较高的预测精度
深度学习 (DL)	如卷积神经网络 (CNN) 和长短期记忆网络 (LSTM),结合高光谱数据或时间序列数据,能够实现 DBPs 前体分布的精准预测

6 DBPs 相关的法律法规、政策

6.1 国际法规与政策

世界卫生组织 (WHO) 在其《饮用水质量准则》中对 DBPs 设定了指导性标准。欧盟 (EU) 为保障饮用水的安全和质量,于 1998 年颁布了《饮用水水质指令》,明确规定了针对 THMs 等特定 DBPs 的最大允许浓度(总 THMs 的最大限度为 $100 \mu\text{g/L}$),并要求成员国定期监测并报告水质数据。EPA 通过《安全饮用水法》对 DBPs 进行了严格规制,该法于 1974 年颁布,多次修订,旨在确保美国公众获得安全的饮用水。在印度,鉴于 DBPs 问题与水源保护和水处理技术紧密相关,国家环境保护政策和指南强调了整个水供应链的管理。印度标准局 (BIS) 制定的《饮用水规范》中包含了对 DBPs 的限值,这些限值反映了对 DBPs 健康风险的认识和对水处理技术的可行性考虑。

总之,国际法规与政策在控制和管理饮用水中的 DBPs 方面发挥着至关重要的作用。通过 WHO、EU 和 EPA 等机构的指导性标准和规定,全球范围内的水质监测和管理得以标准化,同时促进了在降低 DBPs 暴露风险方面的国际合作。这些法规和政策不仅确保了公共饮用水的安全,也推动了水处理技术的发展和改进。

6.2 国内法规与政策

中华人民共和国国家卫生健康委员会颁布的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)中,对多种 DBPs 设定了明确的最大允许浓度(MAC)。这些标准基于对 DBPs 潜在健康风险的科学评估,旨在减少长期暴露对人体健康的影响。除了直接限制 DBPs 浓度外,我国的相关法规还强调了提高水处理工艺的重要性,以及采用先进的水质监测技术以确保水质符合标准。

总的来说,国内法规与政策在管理 DBPs 方面起着至关重要的作用,它们不仅确保了饮用水的安全,还指导了水处理实践的改进和技术发展。各国的法规和政策反映了它们对 DBPs 健康风险的认识以及对水处理技术的可行性考虑,同时也展示了不同国家在环境保护和公共健康方面的重视程度。

7 结论与展望

本研究系统地分析了 DBPs 的种类、来源、形成机制及其常见的处理方法,并评估了这些物质对人体健康和环境的潜在影响。研究表明,DBPs 种类繁多,其中 THMs 和 HAAs 尤为突出,具有显著的致癌、致畸和致突变等毒性,长期暴露可能导致肝脏、肾脏以及生殖系统的损害。N-DBPs 作为新型 DBPs,因其高致癌性和遗传毒性,已成为研究的热点,特别是在氯胺消毒过程中,氯代亚硝胺类化合物的生成具有较高的健康风险。研究还表明,DBPs 的形成受到水体中有机物质种类、消毒剂类型及其浓度等因素的影响,且不同水处理方法对 DBPs 前体的去除效果差异显著。因此,进一步优化水处理工艺,提升其去除效率和成本效益,是降低 DBPs 生成的重要研究方向。未来,研究应聚焦于新型 DBPs 的识别与毒性评估、DBPs 前体的控制及替代指标的应用,以更好地保障饮用水的安全和人类健康。

在 DBPs 的检测和分析方面,目前常用的技术包括 GC-MS、LC-MS/MS 和高分辨质谱等。GC-MS

具有高灵敏度和高选择性,能够有效地分析气体相中的 DBPs,如 THMs。然而,对于一些极性较大的 DBPs,如 HAAs 和某些新型的 N-DBPs,GC-MS 的应用受到限制。LC-MS/MS 在处理极性和低浓度 DBPs 方面表现出较强的分离能力,并能较好地分析溶液中的复杂物质,但其在复杂样品中的干扰问题依然突出,可能影响分析结果的准确性和精度。HRMS 则能提供极高的分辨能力,有助于发现和识别新的、未知的 DBPs,尤其在探索新污染物时具有重要应用。然而,其高成本和对操作人员的专业要求,限制了其普及和广泛应用。因此,未来的研究应向高通量、快速、低成本的检测方法发展,尤其是在提升低浓度和复杂样品中 DBPs 检测能力方面,优化仪器技术和提高检测灵敏度。

同时,如何有效控制和减少 DBPs 的生成仍是水处理领域的重要研究方向。现有的水处理技术,特别是传统的氯消毒方法,虽然能有效消灭病原微生物,但也不可避免地产生 DBPs。近年来,基于先进 AOPs、臭氧氧化等新型水处理技术已被提出,能够在一定程度上减少 DBPs 的生成,尤其在去除有机物和前体物方面表现出较好的效果。然而,这些技术在实际应用中仍面临高成本、操作复杂和二次污染等挑战,限制了其在大规模水处理中的普及。因此,未来的研究应侧重于优化水处理工艺,平衡成本效益、能源效率和环境影响。例如,生物方法在某些水质条件下表现出较低的能耗和较好的 DBPs 前体物去除效果,适用于低浓度 DBPs 的处理,而对于高浓度或难降解的 DBPs,化学方法(如 AOPs 和臭氧氧化)则需进一步优化操作条件,降低处理成本,并尽量减少对环境的负面影响。此外,为了应对复杂水质或难降解 DBPs 的挑战,未来还需探索多种水处理方法的联用技术,如结合生物处理与化学处理的混合处理模式,以达到更高效、更经济且环保的 DBPs 降解效果。

参考文献

- [1] SHARMA V K, YANG X, CIZMAS L, et al. Impact of metal ions, metal oxides, and nanoparticles on the formation of disinfection byproducts during chlorination [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 317: 777–792. DOI: 10.1016/j.cej.2017.02.071.
- [2] JEONG C H, WAGNER E D, SIEBERT V R, et al. Occurrence and toxicity of disinfection byproducts in european drinking waters

- in relation with the HIWATE epidemiology study [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(21): 12120–12128.
- [3] PLEWA M J, MUELLNER M G, RICHARDSON S D, et al. Occurrence, synthesis, and mammalian cell cytotoxicity and genotoxicity of haloacetamides; An emerging class of nitrogenous drinking water disinfection byproducts [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(3): 955–961.
- [4] PAN Y, ZHANG X, LI Y. Identification, toxicity and control of iodinated disinfection byproducts in cooking with simulated chlor(am)inated tap water and iodized table salt [J]. *Water Research*, 2016, 88: 60–68. DOI: 10.1016/j.watres.2015.10.002.
- [5] DAIBER E J, DEMARINI D M, RAVURI S A, et al. Progressive increase in disinfection byproducts and mutagenicity from source to tap to swimming pool and spa water; Impact of human inputs[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(13): 6652–6662.
- [6] CHEN H, XIE J, HUANG C, et al. Database and review of disinfection by-products since 1974: Constituent elements, molecular weights, and structures [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 462: 132792. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.132792.
- [7] ZHOU N, SUI S, LIU H, et al. Determining high priority disinfection byproducts based on experimental aquatic toxicity data and predictive models: Virtual screening and in vivo study [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 951: 175489. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.175489.
- [8] WANG Y, LIU H, YANG X, et al. Aquatic toxicity and aquatic ecological risk assessment of wastewater-derived halogenated phenolic disinfection byproducts [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 809: 151089. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151089.
- [9] LAU S S, FORSTER A L, RICHARDSON S D, et al. Disinfection byproduct recovery during extraction and concentration in preparation for chemical analyses or toxicity assays[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(20): 14136–14145.
- [10] LEVALLOIS P, GIGUÈRE Y, NGUILE-MAKAO M, et al. Disinfection by-products exposure and intra-uterine growth restriction: Do genetic polymorphisms of CYP2E1 or deletion of GSTM1 or GSTT1 modify the association? [J]. *Environment International*, 2016, 92/93: 220–231. DOI: 10.1016/j.envint.2016.03.033.
- [11] DIANA M, FELIPE-SOTELO M, BOND T. Disinfection byproducts potentially responsible for the association between chlorinated drinking water and bladder cancer: A review [J]. *Water Research*, 2019, 162: 492–504. DOI: 10.1016/j.watres.2019.07.014.
- [12] LU Y, SONG Z M, WANG C, et al. Combination of high resolution mass spectrometry and a halogen extraction code to identify chlorinated disinfection byproducts formed from aromatic amino acids[J]. *Water Research*, 2021, 190: 116710. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116710.
- [13] KRASNER S W, JIA A, LEE C T, et al. Relationships between regulated DBPs and emerging DBPs of health concern in U. S. drinking water[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, 117: 161–172. DOI: 10.1016/j.jes.2022.04.016.
- [14] CHEN B Y, JIANG J Y, YANG X, et al. Roles and knowledge gaps of point-of-use technologies for mitigating health risks from disinfection byproducts in tap water: A critical review[J]. *Water Research*, 2021, 200: 117265. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117265.
- [15] DONG F L, CHEN J N, LI C, et al. Evidence-based analysis on the toxicity of disinfection byproducts in vivo and in vitro for disinfection selection[J]. *Water Research*, 2019, 165: 114976. DOI: 10.1016/j.watres.2019.114976.
- [16] JIANG J Y, HAN J R, ZHANG X R. Nonhalogenated aromatic DBPs in drinking water chlorination: A gap between NOM and halogenated aromatic DBPs [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(3): 1646–1656.
- [17] 陈超, 王玉, 谢宇煊, 等. 饮用水水质标准升级带来的消毒副产物挑战与对策[J]. *给水排水*, 2024, 50(9): 7–14.
- CHEN C, WANG Y, XIE Y X, et al. The challenges of disinfection by-products brought by the upgrading of drinking water quality standards and the countermeasures [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2024, 50(9): 7–14.
- [18] 廖雨枫, 王正, 潘昶, 等. 再生水消毒副产物的检测、生成与控制[J]. *环境科学*, 2024, 45(3): 1561–1576.
- LIAO Y F, WANG Z, PAN Y, et al. Detection, generation, and control of disinfection by-products of reclaimed water [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(3): 1561–1576.
- [19] YANG X, GUO W H, LEE W. Formation of disinfection byproducts upon chlorine dioxide preoxidation followed by chlorination or chloramination of natural organic matter [J]. *Chemosphere*, 2013, 91(11): 1477–1485.
- [20] 王小文, 张晓健, 陈超, 等. 芳香类有机物生成氯化消毒副产物特性及其与化学结构的关系[J]. *环境科学*, 2006, 27(8): 1603–1607.
- WANG X W, ZHANG X J, CHEN C, et al. DBPs formation characteristics in chlorinating and relationship with chemical structure of some aromatic organic matter [J]. *Environmental Science*, 2006, 27(8): 1603–1607.
- [21] 郭改梅, 林逢凯, 田光明. 芳香类有机物氯化生成消毒副产物的特性研究[J]. *环境污染与防治*, 2009, 31(2): 9–13.
- GUO G M, LIN F K, TIAN G M, A study of disinfection by-products formation characteristics in the chlorination reactions of aromatic organic compounds [J]. *Environmental Pollution &*

- Control, 2009, 31(2): 9–13.
- [22] 庞雪菲, 赵敏娟, 刘强, 等. 区域性饮用水中三卤甲烷的残留及健康风险[J]. 上海预防医学, 2023, 35(12): 1212–1217, 1222.
- PANG X F, ZHAO M X, LIU Q, et al. Distribution and health risk of residual trihalomethane in regional drinking water[J]. Shanghai Journal of Preventive Medicine, 2023, 35(12): 1212–1217, 1222.
- [23] SRIVASTAV A L, PATEL N, CHAUDHARY V K. Disinfection by-products in drinking water: Occurrence, toxicity and abatement[J]. Environmental Pollution, 2020, 267: 115474. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115474.
- [24] RICHARDSON S D, PLEWA M J, WAGNER E D, et al. Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: A review and roadmap for research[J]. Mutation Research/Reviews in Mutation Research, 2007, 636(1): 178–242.
- [25] HONG H C, LU Y C, ZHU X Y, et al. Cytotoxicity of nitrogenous disinfection byproducts: A combined experimental and computational study[J]. Science of the Total Environment, 2023, 856: 159273. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159273.
- [26] LIU Z, XU B, ZHANG T Y, et al. Formation of disinfection by-products in a UV-activated mixed chlorine/chloramine system[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 407: 124373. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124373.
- [27] DING S K, WANG F F, CHU W H, et al. Effect of reduced sulfur group on the formation of CX₃R-type disinfection by-products during chlor(am)ination of reduced sulfur compounds[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 361: 227–234. DOI: 10.1016/j.cej.2018.12.069.
- [28] WU Y, WEI W Z, LUO J Y, et al. Comparative toxicity analyses from different endpoints: Are new cyclic disinfection byproducts (DBPs) more toxic than common aliphatic DBPs? [J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(1): 194–207.
- [29] KALI S, KHAN M, GHAFAR M S, et al. Occurrence, influencing factors, toxicity, regulations, and abatement approaches for disinfection by-products in chlorinated drinking water: A comprehensive review[J]. Environmental Pollution, 2021, 281: 116950. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116950.
- [30] 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.
- [31] DONG H, QIANG Z, RICHARDSON S D. Formation of iodinated disinfection byproducts (I-DBPs) in drinking water: Emerging concerns and current issues[J]. Accounts of Chemical Research, 2019, 52(4): 896–905.
- [32] NIHEMATI M, ICKER M, SEIWERT B, et al. Revisiting disinfection byproducts with supercritical fluid chromatography-high resolution-mass spectrometry: Identification of novel halogenated sulfonic acids in disinfected drinking water[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(9): 3527–3537.
- [33] LI C, WANG Z B, LIU Y T, et al. Effective control of DBPs formation and membrane fouling in catalytic ozonation membrane reactor for municipal wastewater reclamation[J]. Separation and Purification Technology, 2024, 330: 125492. DOI: 10.1016/j.seppur.2023.125492.
- [34] 钱勇, 张雪, 蒋福春, 等. 太湖水源水厂臭氧-生物活性炭工艺长期运行净化效能变化研究[J]. 给水排水, 2022, 48(11): 9–16.
- QIAN Y, ZHANG X, JIANG F C, et al. Evaluation of long-term operation efficiency of ozone-biological activated carbon process in drinking water treatment plants with Taihu Lake as water source[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(11): 9–16.
- [35] 张锁娜, 王海波, 李肖肖, 等. 臭氧对饮用水中氯化消毒副产物生成的影响[J]. 环境工程学报, 2014, 8(10): 4091–4096.
- ZHANG S N, WANG H B, LI X X, et al. Influence of ozonation on formation of chlorination disinfection by-products in drinking water[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(10): 4091–4096.
- [36] ZHANG M, WANG X A, DU T T, et al. Effects of carbon materials on the formation of disinfection byproducts during chlorination: Pore structure and functional groups[J]. Water Research, 2019, 162: 1–10. DOI: 10.1016/j.watres.2019.06.059.
- [37] 陈娇, 甘国娟, 伍欢, 等. 不同种类氨基酸在氯化后形成三卤甲烷和卤乙酸潜能特性[J]. 环境化学, 2018, 37(2): 216–222.
- CHEN J, GAN G J, WU H, et al. Trihalomethanes and haloacetic acids formation upon chlorination of typical amino acids[J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(2): 216–222.
- [38] 余晓敏, 赵少远, 袁守军, 等. 卤代醛/酮消毒副产物的生成潜能及其前驱物的结构特征[J]. 环境化学, 2020, 39(1): 28–38.
- YU X M, ZHAO S Y, YUAN S J, et al. Formation potential of halogenated aldehydes and ketones disinfection by-products and structural characteristics of their precursors[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(1): 28–38.
- [39] LIU X Y, CHEN L, YANG M T, et al. The occurrence, characteristics, transformation and control of aromatic disinfection by-products: A review[J]. Water Research, 2020, 184: 116076. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116076.
- [40] YANG M T, ZHANG X R, LIANG Q H, et al. Application of (LC/MS/MS precursor ion scan for evaluating the occurrence,

- formation and control of polar halogenated DBPs in disinfected waters: A review[J]. *Water Research*, 2019, 158: 322–337. DOI: 10.1016/j.watres.2019.04.033.
- [41] ZHANG T Y, LIN Y L, XU B, et al. Formation of organic chloramines during chlor(am)ination and UV/chlor(am)ination of algae organic matter in drinking water[J]. *Water Research*, 2016, 103: 189–196. DOI: 10.1016/j.watres.2016.07.036.
- [42] WANG Z, XU B, LIN Y L, et al. A comparison of iodinated trihalomethane formation from iodide and iopamidol in the presence of organic precursors during monochloramination[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 257: 292–298. DOI: 10.1016/j.cej.2014.07.084.
- [43] MA W, LI X, LI D, et al. Algal-rich drinking source water: Effects of chlorine pre-oxidation on algal growth, algal organic matter, and the potential of disinfection by-products[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2024, 235(4): 239–239.
- [44] FU L X, WU X F, ZHU Y B, et al. Iodinated disinfection byproduct formation in a $\text{MnO}_2/\text{I}^-/\text{EPS}$ system [J]. *Chemosphere*, 2021, 280: 130643. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130643.
- [45] HU J, WANG C, SHAO B J, et al. Enhanced formation of carbonaceous and nitrogenous disinfection byproducts from biofilm extracellular polymeric substances undercatalysis of copper corrosion products[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 723: 138160. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138160.
- [46] WU H Z, ZHANG L, GUO P R, et al. Occurrence and ecological risk of disinfection byproducts in urban water body during the pandemic in the Pearl River Delta[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 482: 136550. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.136550.
- [47] 张瑞华, 纪桂霞, 楚文海. 微生物对饮用水典型消毒副产物前体物的降解效能及其群落特征[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(4): 700–708.
- ZHANG R H, JI G X, CHU W H, et al. Degradation of precursors of typical disinfection byproducts in drinking water by microorganisms and its microbial communities[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(4): 700–708.
- [48] PENG F T, PENG J J, LI H P, et al. Health risks and predictive modeling of disinfection byproducts in swimming pools [J]. *Environment International*, 2020, 139: 105726. DOI: 10.1016/j.envint.2020.105726.
- [49] PRESSMAN J G, RICHARDSON S D, SPETH T F, et al. Concentration, chlorination, and chemical analysis of drinking water for disinfection byproduct mixtures health effects research: U. S. EPA's four lab study [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(19): 7184–7192.
- [50] LI J, AZIZ M T, GRANGER C O, et al. Halocyclopentadienes: An emerging class of toxic DBPs in chlor(am)inated drinking water[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(16): 11387–11397.
- [51] 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.
- [52] RICHARDSON S D, TERNES T A. Water analysis: Emerging contaminants and current issues [J]. *Analytical Chemistry*, 2018, 90(1): 398–428.
- [53] RICHARDSON S D, FASANO F, ELLINGTON J J, et al. Occurrence and mammalian cell toxicity of iodinated disinfection byproducts in drinking water [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(22): 8330–8338.
- [54] WENDEL F M, TERNES T A, RICHARDSON S D, et al. Comparative toxicity of high-molecular weight iopamidol disinfection byproducts[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2016, 3(3): 81–84.
- [55] TUTHILL R W, MOORE G S. Drinking water chlorination: A practice unrelated to cancer mortality [J]. *Journal AWWA*, 1980, 72(10): 570–573.
- [56] 叶璟, 王照洋, 田富箱, 等. 新型污染物氯代消毒副产物的生态环境及人体健康毒性效应研究进展[J]. *环境化学*, 2024, 43(10): 3234–3246.
- YE J, WANG Z Y, TIAN F X, et al. Research progress of the toxic effects of emerging contaminants chlorinated disinfection byproducts on ecological environment and human health [J]. *Environmental Chemistry*, 2024, 43(10): 3234–3246.
- [57] 高乃云, 楚文海, 徐斌. 从生成机制谈饮用水中新型消毒副产物的控制策略[J]. *给水排水*, 2017, 53(2): 1–5.
- GAO N Y, CHU W H, XU B, et al. The control strategy of new disinfection by-products in drinking water is discussed from the generation mechanism [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 53(2): 1–5.
- [58] 李忠禹, 彭健伟, 文怡心, 等. 饮用水含氮与含碳消毒副产物的生成潜能及其毒性[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(9): 3401–3407.
- LI Z Y, PENG J W, WEN Y X, et al. Formation potential and estimated toxicity of nitrogenous and carbonaceous disinfection byproducts in drinking water[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(9): 3401–3407.
- [59] 韩慧慧, 缪恒锋, 张雅晶, 等. 污水再生过程中消毒副产物前体物转化规律[J]. *环境科学*, 2017, 38(7): 2883–2892.
- HAN H H, MIAO H F, ZHANG Y J, et al. Transformation of disinfection byproduct precursors during the wastewater regeneration processes [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(7): 2883–2892.
- [60] SHAH A D, KRASNER S W, LEE C F T, et al. Trade-offs in disinfection byproduct formation associated with precursor preoxidation for control of N-nitrosodimethylamine formation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(9): 4809–

- 4818.
- [61] CRIQUET J, ALLARD S, SALHI E, et al. Iodate and iodo-trihalomethane formation during chlorination of iodide-containing waters: Role of bromide [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(13): 7350–7357.
- [62] CHOWDHURY S, ALHOOSHANI K, KARANFIL T. Disinfection byproducts in swimming pool: Occurrences, implications and future needs[J]. *Water Research*, 2014, 53: 68–109. DOI: 10.1016/j.watres.2014.01.017.
- [63] DONG H Y, QIANG Z M, HU J, et al. Accelerated degradation of iopamidol in iron activated persulfate systems: Roles of complexing agents[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 316: 288–295. DOI: 10.1016/j.cej.2017.01.099.
- [64] ZHANG B B, XIAN Q M, ZHU J P, et al. Characterization, DBPs formation, and mutagenicity of soluble microbial products (SMPs) in wastewater under simulated stressful conditions[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 279: 258–263. DOI: 10.1016/j.cej.2015.05.039.
- [65] KRISTIANA I, LETHORN A, JOLL C, et al. To add or not to add: The use of quenching agents for the analysis of disinfection by-products in water samples[J]. *Water Research*, 2014, 59: 90–98. DOI: 10.1016/j.watres.2014.04.006.
- [66] ALLARD S, TAN J, JOLL C A, et al. Mechanistic Study on the Formation of Cl-/Br-/I-Trihalomethanes during chlorination/chloramination combined with a theoretical cytotoxicity evaluation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(18): 11105–11114.
- [67] LI J, AZIZ M T, GRANGER C O, et al. Are disinfection byproducts (DBPs) formed in my cup of tea? Regulated, priority, and unknown DBPs [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(19): 12994–13004.
- [68] MIAN H R, HU G, HEWAGE K, et al. Prioritization of unregulated disinfection by-products in drinking water distribution systems for human health risk mitigation: A critical review[J]. *Water Research*, 2018, 147: 112–131. DOI: 10.1016/j.watres.2018.09.054.
- [69] SHAO B B, SHEN L Y, LIU Z F, et al. Disinfection byproducts formation from emerging organic micropollutants during chlorine-based disinfection processes[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 455: 140476. DOI: 10.1016/j.cej.2022.140476.
- [70] YANG M, ZHANG X. Current trends in the analysis and identification of emerging disinfection byproducts[J]. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 2016, 10: 24–34. DOI: 10.1016/j.teac.2016.03.002.
- [71] CHEN Y R, LIANG Q H, LIANG W J, et al. Identification of toxicity forcing agents from individual aliphatic and aromatic disinfection byproducts formed in drinking water: Implications and limitations[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57: 1366–1377. DOI: 10.1021/acs.est.2c07629.
- [72] PAN Y, WANG Y, LI A M, et al. Detection, formation and occurrence of 13 new polar phenolic chlorinated and brominated disinfection byproducts in drinking water[J]. *Water Research*, 2017, 112: 129–136. DOI: 10.1016/j.watres.2017.01.037.
- [73] LI Q, ZHOU L, SHEN X D, et al. Stereoselective construction of halogenated quaternary carbon centers by brønsted base catalyzed [4+2] cycloaddition of α -haloaldehydes [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2018, 57(7): 1913–1917.
- [74] PAN Y, ZHANG X R. Four groups of new aromatic halogenated disinfection byproducts: Effect of bromide concentration on their formation and speciation in chlorinated drinking water [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(3): 1265–1273.
- [75] LI X F, MITCH W A. Drinking water disinfection byproducts (DBPs) and human health effects: Multidisciplinary challenges and opportunities [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(4): 1681–1689.
- [76] ADIN A, KATZENDLER J, ALKASLASSY D, et al. Trihalomethane formation in chlorinated drinking water: A kinetic model[J]. *Water Research*, 1991, 25(7): 797–805.
- [77] RICHARDSON S D, DEMARINI D M, KOGEVINAS M, et al. What's in the pool? A comprehensive identification of disinfection by-products and assessment of mutagenicity of chlorinated and brominated swimming pool water [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2010, 118(11): 1523–1530.
- [78] YANG Z, SUN Y X, YE T, et al. Characterization of trihalomethane, haloacetic acid, and haloacetonitrile precursors in a seawater reverse osmosis system [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 576: 391–397. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.10.139.
- [79] WEI X, YANG M T, ZHU Q Y, et al. Comparative quantitative toxicology and qsar modeling of the haloacetonitriles: Forcing agents of water disinfection byproduct toxicity[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(14): 8909–8918.
- [80] DING S K, CHU W H. Recent advances in the analysis of nitrogenous disinfection by-products [J]. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 2017, 14: 19–27. DOI: 10.1016/j.teac.2017.04.001.
- [81] TANG H Y, ZHONG H L, PAN Y, et al. A new group of heterocyclic nitrogenous disinfection byproducts (DBPs) in drinking water: Role of extraction pH in unknown DBP exploration[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(10): 6764–6772.
- [82] FAN Z H, GONG S, XU X, et al. Characterization, DBPs formation, and mutagenicity of different organic matter fractions in two source waters [J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2014, 217(2): 300–306.

- [83] PENG F Y, YANG F, LU Y, et al. Formation of disinfection byproducts during chlorination of mixed nitrogenous compounds in swimming pools[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 754: 142100. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142100.
- [84] ZHANG A H, WANG F F, CHU W H, et al. Integrated control of CX₃R-type DBP formation by coupling thermally activated persulfate pre-oxidation and chloramination[J]. *Water Research*, 2019, 160: 304–312. DOI: 10.1016/j.watres.2019.05.047.
- [85] ZHANG H, LIU H J, ZHAO X, et al. Formation of disinfection by-products in the chlorination of ammonia-containing effluents: Significance of Cl₂/N ratios and the DOM fractions[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 190(1): 645–651.
- [86] HU S Y, GONG T T, XIAN Q M, et al. Formation of iodinated trihalomethanes and haloacetic acids from aromatic iodinated disinfection byproducts during chloramination [J]. *Water Research*, 2018, 147: 254–263. DOI: 10.1016/j.watres.2018.09.058.
- [87] ZHANG D, CHU W, YU Y, et al. Occurrence and Stability of Chlorophenylacetoneitriles: A new class of nitrogenous aromatic DBPs in chlorinated and chloraminated drinking waters [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2018, 5(6): 394–399.
- [88] MA M, WANG M, CAO X K, et al. Yield of trihalomethane, haloacetic acid and chloral upon chlorinating algae after coagulation-filtration: Is pre-oxidation necessarily negative for disinfection by-product control? [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 364: 762–769. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.09.056.
- [89] MUELLNER M G, WAGNER E D, MCCALLA K, et al. Haloacetoneitriles vs. regulated haloacetic acids: Are nitrogen-containing DBPs more toxic? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(2): 645–651.
- [90] ZHOU S Q, ZHU S M, SHAO Y S, et al. Characteristics of C-, N-DBPs formation from algal organic matter: Role of molecular weight fractions and impacts of pre-ozonation [J]. *Water Research*, 2015, 72: 381–390. DOI: 10.1016/j.watres.2014.11.023.
- [91] 王栋, 贾瑞宝, 孙韶华, 等. 在线液液萃取-气相色谱-质谱法测定生活饮用水中卤代乙腈[J]. *中国环境监测*, 2022, 38(5): 175–181.
- WANG D, JIA R B, SUN S H, et al. Determination of haloacetoneitriles in drinking water using automated liquid-liquid extraction-gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2022, 38(5): 175–181.
- [92] 陈雄, 陈同强, 方宣启, 等. 气相色谱法测定饮用水中 6 种含氮类消毒副产物的含量[J]. *理化检验-化学分册*, 2024, 60(3): 336–338.
- CHEN X, CHEN T Q, FANG X Q, et al. Determination of six nitrogen-containing disinfection by-products in drinking water by gas chromatography[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis)*, 2024, 60(3): 336–338.
- [93] 王杰, 甘晓娟, 贾海舰. 吹扫捕集-三重四级杆气质联用测定生活饮用水中 9 种含氮消毒副产物[J]. *净水技术*, 2024, 43(5): 198–203.
- WANG J, GAN X J, JIA H J. Determination of 9 nitrogen-containing DBPs in drinking water by purge and trap-gas chromatography-triple quadrupole mass spectrometry [J]. *Water Purification Technology*, 2024, 43(5): 198–203.
- [94] 雷颖, 八十岛诚, 王凌云, 等. 液相色谱-串联质谱法同时检测自来水中 9 种卤乙酸[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(20): 124–129.
- LEI Y, YASOJIMA M, WANG L Y, et al. Determination of nine haloacetic acids in tap water by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(20): 124–129.
- [95] 张雪杰, 王楠, 宋彩瑞, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法检测高基质生活饮用水中 5 种常见消毒副产物的方法改进[J]. *现代疾病预防控制*, 2024, 35(11): 810–815.
- ZHANG X J, WANG N, SONG C R, et al. An improvement of the method for determining five common disinfection by-products in drinking water with high substrate using ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Modern Disease Control and Prevention*, 2024, 35(11): 810–815.
- [96] 宋艳, 孙小玲, 王明泉, 等. 色谱高分辨质谱法在水质检测中的应用研究进展[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(5): 131–138.
- SONG Y, SUN X L, WANG M Q, et al. Advances in application of chromatogram/high resolution mass spectrometry in water quality detection [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(5): 131–138.
- [97] 白丝雨, 王硕, 孙灵利. 生活饮用水中卤乙酸和卤氧化物离子色谱-串联质谱的同时测定法[J]. *职业与健康*, 2021, 37(20): 2757–2760.
- BAI S Y, WANG S, SUN L L, et al. Simultaneous determination of haloacetic acid and oxyhalide in drinking water by ion chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Occupation and Health*, 2021, 37(20): 2757–2760.
- [98] 许珉. 离子色谱法同时测定生活饮用水中五种常见消毒副产物和草甘膦[J]. *环境卫生学杂志*, 2022, 12(4): 298–303.
- XU M. Simultaneous determination five common disinfection by-products and glyphosate in drinking water using ion chromatography [J]. *Journal of Environmental Hygiene*, 2022, 12(4): 298–303.
- [99] CHEN H, LIN T, ZHANG S S, et al. Covalent organic frameworks as an efficient adsorbent for controlling the formation of disinfection by-products (DBPs) in chlorinated drinking water [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 746: 141138. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141138.

- [100] WANG Y, LI L, DONG H, et al. Removal of carbonaceous and nitrogenous disinfection by-product precursors in biological activated carbon process of drinking water: Is service life a pivotal factor? [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 465: 142875. DOI: 10.1016/j.cej.2023.142875.
- [101] LAU S S, FENG Y, GU A Z, et al. Cytotoxicity comparison between drinking water treated by chlorination with postchloramination versus granular activated carbon (GAC) with postchlorination [J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(36): 13699–13709.
- [102] 孙绪敏, 刘建广. 紫外高级氧化工艺控制消毒副产物生成研究进展[J]. *净水技术*, 2022, 41(11): 7–15.
SUN X M, LIU J G. Research progress of UV-AOPs for DBPs formation control[J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(11): 7–15.
- [103] JIANG J Y, ZHANG X R, ZHU X H, et al. Removal of intermediate aromatic halogenated DBPs by activated carbon adsorption: A new approach to controlling halogenated DBPs in chlorinated drinking water [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(6): 3435–3444.
- [104] CHEN B Y, ZHANG C, WANG L, et al. Removal of disinfection byproducts in drinking water by flexible reverse osmosis: Efficiency comparison, fates, influencing factors, and mechanisms[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 401: 123408. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123408.
- [105] MATILAINEN A, VEPSÄLÄINEN M, SILLANPÄÄ M. Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2010, 159(2): 189–197.
- [106] CHAUKURA N, MARAIS S S, MOYO W, et al. Contemporary issues on the occurrence and removal of disinfection byproducts in drinking water—A review [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, 8(2): 103659.
- [107] GUAN Y H, MA J, REN Y M, et al. Efficient degradation of atrazine by magnetic porous copper ferrite catalyzed peroxymonosulfate oxidation via the formation of hydroxyl and sulfate radicals[J]. *Water Research*, 2013, 47(14): 5431–5438.
- [108] ZIMMERMANN S G, SCHMUKAT A, SCHULZ M, et al. Kinetic and mechanistic investigations of the oxidation of tramadol by ferrate and ozone[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(2): 876–884.
- [109] HE Z X, CHENG Y S, LIAO X B, et al. Which pre-oxidation methods to choose? From perspective of DBPs formation and toxicities reduction [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 161: 118–125. DOI: 10.1016/j.psep.2022.02.072.
- [110] WU Y W, BU L J, ZHU S M, et al. Molecular transformation of algal organic matter during sequential ozonation-chlorination: Role of pre-ozonation and properties of chlorinated disinfection byproducts[J]. *Water Research*, 2022, 223: 119008. DOI: 10.1016/j.watres.2022.119008.
- [111] 杨宁, 许咏穗, 侯英娜, 等. 水厂臭氧-生物活性炭工艺对短链 PFCs 及 DOM 去除特性的中试[J]. *净水技术*, 2024, 43(5): 80–91, 142.
YANG N, XU Y S, HOU Y N, et al. Pilot test of O₃-BAC process for characteristics of short-chain PFCs and DOM removal in WTP[J]. *Water Purification Technology*, 2024, 43(5): 80–91, 142.
- [112] CHEEMA W A, ANDERSEN H R, KAARSHOLM K M S. Improved DBP elimination from swimming pool water by continuous combined UV and ozone treatment [J]. *Water Research*, 2018, 147: 214–222. DOI: 10.1016/j.watres.2018.09.030.
- [113] HU Q, WANG R G, GAN Y S, et al. Chlorinated disinfection by-product formation during DOM removal by discharge plasma: Insights into DOC structure alterations [J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 294: 121183. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.121183.
- [114] LEI X, LEI Y, ZHANG X R, et al. Treating disinfection byproducts with UV or solar irradiation and in UV advanced oxidation processes: A review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 408: 124435. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124435.
- [115] CHU W H, YAO D C, GAO N Y, et al. The enhanced removal of carbonaceous and nitrogenous disinfection by-product precursors using integrated permanganate oxidation and powdered activated carbon adsorption pretreatment [J]. *Chemosphere*, 2015, 141: 1–6. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.05.087.
- [116] LIANG J K, LU Y, SONG Z M, et al. Effects of chlorine dose on the composition and characteristics of chlorinated disinfection byproducts in reclaimed water [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 824: 153739. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153739.
- [117] LIU Z, LIN Y L, XU B, et al. Degradation of diiodoacetamide in water by UV/chlorination: Kinetics, efficiency, influence factors and toxicity evaluation[J]. *Chemosphere*, 2020, 240: 124761. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.124761.
- [118] WANG Z, LI M X, LIAO Y F, et al. Formation of disinfection byproducts from chlorinated soluble microbial products: Effect of carbon sources in wastewater denitrification processes [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 432: 134237. DOI: 10.1016/j.cej.2021.134237.
- [119] MODIN O, PERSSON F, WILÉN B M, et al. Nonoxidative removal of organics in the activated sludge process[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2016, 46(7): 635–672.

- [120] WANG L, SONG S A, XU L, et al. Beneficial role of pre- and post-ozonation in a low rate biofiltration-ultrafiltration process treating reclaimed water [J]. *Water Research*, 2022, 226: 119284. DOI: 10.1016/j.watres.2022.119284.
- [121] CUI L, YIN C, CHEN T, et al. Remediation of organic halogen-contaminated wetland soils using biochar [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 696: 134087. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134087.
- [122] LIU X D, SUN Y R, TANG Y T, et al. Woody and herbaceous wastes for the remediation of polluted waters of wetlands [J]. *Chemosphere*, 2023, 335: 139132. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.139132.
- [123] MA Y H, LI M X, HUO Y R, et al. New insights into the reaction mechanisms and kinetics of aromatic compounds degraded by $\text{ClO}\cdot$ and $\text{BrO}\cdot$ to produce disinfection by-products [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12 (5): 113770.
- [124] WANG X O, LI J Y, ZHANG C P, et al. Degradation products and transformation pathways of sulfamethoxazole chlorination disinfection by-products in constructed wetlands [J]. *Environmental Research*, 2024, 249: 118343. DOI: 10.1016/j.envres.2024.118343.
- [125] 张雅晶, 缪恒锋, 张晓夏, 等. AAO-MBR 工艺污水处理系统中消毒副产物前体物变化规律 [J]. *环境科学研究*, 2018, 31(12): 2037-2046.
- ZHANG Y J, MIAO H F, ZHANG X X, et al. Variation of disinfection by-product precursors during anaerobic-anoxic-oxic-membrane-bioreactor (AAO-MBR) process in the sewage treatment plant [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(12): 2037-2046.
- [126] 刘俊萍, 陈镜吉, 宋亚丽, 等. 供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型 [J]. *环境科学*, 2020, 41(7): 3307-3314.
- LIU J P, CHEN J J, SONG Y L, et al. Occurrence and prediction model of disinfection by-products in tap water [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(7): 3307-3314.
- [127] 费娟, 于洋, 郑浩, 等. 次氯酸钠消毒饮用水中消毒副产物健康风险评估 [J]. *环境卫生学杂志*, 2023, 13(9): 686-691.
- FEI J, YU Y, ZHENG H, et al. Health risk assessment of disinfection by-products in drinking water disinfected by sodium hypochlorite [J]. *Journal of Environmental Hygiene*, 2023, 13(9): 686-691.
- [128] 中华人民共和国生态环境部. 中国人群暴露参数手册 (成人卷) [M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Exposure factors handbook of Chinese population (adults) [M]. Beijing: China Environmental Publishing House, 2013.
- [129] 中华人民共和国生态环境部. 中国人群暴露参数手册儿童卷 6~17 岁 [M]. 北京: 中国环境出版社, 2016.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Exposure factors handbook of Chinese population (children 6 ~ 17 years) [M]. Beijing: China Environmental Publishing House, 2016.
- [130] 褚洋洋, 李卉, 朱延平, 等. 消毒副产物预测模型的研究进展: 经验模型 [J]. *环境工程*, 2024, 42(7): 38-48.
- CHU Y Y, LI H, ZHU Y P, et al. A review of research progress of prediction models for disinfection by-products: Empirical models [J]. *Environmental Engineering*, 2024, 42 (7): 38-48.