

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

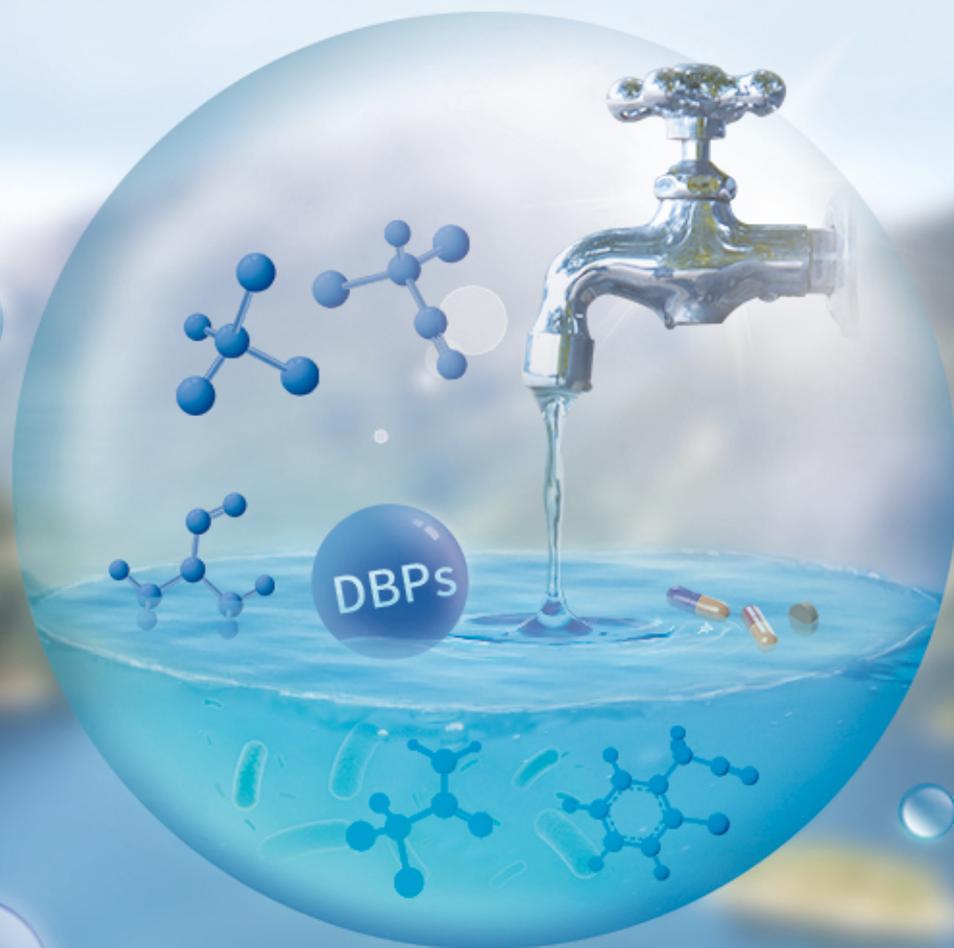
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

饮用水中的消毒副产物及其控制策略

楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年11月

第42卷 第11期
Vol.42 No.11

目次

综述与专论

饮用水中的消毒副产物及其控制策略 楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华(5059)
生物炭吸附硫化氢机制与影响因素研究进展 徐期勇, 梁铭坤, 许文君, 黄丹丹(5086)

研究报告

1998~2016 中国八大经济区植被覆盖对 PM_{2.5} 浓度时空分布的影响 杨玉莲, 杨昆, 罗毅, 喻臻钰, 孟超, 李岑(5100)
COVID-19 疫情期间北京市两次重霾污染过程大气污染物演变特征及潜在源区分析 赵德龙, 田平, 周崑, 肖伟, 盛久江, 王飞, 杜远谋, 黄梦宇, 何晖, 丁德平(5109)

汾渭平原临汾市 2019 年春节期间大气污染特征与来源解析 刘威杰, 胡天鹏, 毛瑶, 许安, 苏业旺, 李星谕, 程铖, 石明明, 梁莉莉, 邢新丽, 张家泉, 祁士华(5122)

石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 刘大喜, 陈静, 田亮, 贺博文, 沈梦宇(5131)

天津市冬季空气湿度对 PM_{2.5} 和能见度的影响 丁净, 唐颖潇, 郝天依, 姚青, 蔡子颖, 张裕芬, 韩素芹(5143)

承德市 PM_{2.5} 中碳质组分的季节分布特征及来源解析 贺博文, 聂赛赛, 王帅, 冯亚平, 姚波, 崔建升(5152)

中国生活源挥发性有机物排放清单 梁小明, 陈来国, 沈国锋, 卢清, 刘明, 陆海涛, 任璐, 孙西勃, 林奎, 梁明易, 叶代启, 陶澍(5162)

2011~2019 年中国工业源挥发性有机物排放特征 刘锐源, 钟美芳, 赵晓雅, 卢诗文, 田俊泰, 李银松, 侯墨, 梁小明, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启(5169)

基于 LHS-MC 青岛市工业源 VOCs 排放清单及不确定性 徐琬莹, 付飞, 吕建华, 李瑞凡, 邵蕊, 和慧, 李淑芬, 左华(5180)

典型橡胶制品业 VOCs 排放特征及对周边环境的影响 王海林, 辛国兴, 朱立敏, 薛松, 聂磊, 郝润(5193)

沈阳市不同功能区挥发性有机物分布特征及臭氧生成潜势 库盈盈, 任万辉, 苏枫棋, 于兴娜(5201)

天津城区夏冬季典型污染过程中 BTEX 变化特征及其健康风险评估 韩婷婷, 李颖若, 蒲维维, 姚青, 刘敬乐, 吴进, 张楠楠, 李梓铭, 马志强(5210)

郑州市大气氨排放清单及驱动力分析 计尧, 王琛, 卢轩, 张欢, 尹沙沙(5220)

基于 GAMs 模型分析成都市气象因子交互作用对 O₃ 浓度变化的影响 张莹, 倪长健, 冯鑫媛, 王式功, 张小玲, 张家熙, 李运超(5228)

长江干流表层水体悬浮物的空间变化特征及遥感反演 李建鸿, 黄昌春, 查勇, 王川, 尚娜娜, 郝维月(5239)

河北省夏季降雨溶解性有机物光谱特征的空间分布、来源解析及氮素响应 张紫薇, 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 董宛佳, 甄瑞哈, 张馨童, 姚波, 崔建升(5250)

城镇与城郊污染河道中 DOM 成分分布与影响因素 朱奔, 陈浩, 丁国平, 孙晓楠, 刘辉, 叶建锋(5264)

北京城市河流水和沉积物中微塑料的组成与分布 胡嘉敏, 左剑恶, 李頔, 谢珍雯, 陈磊(5275)

太湖西岸地表水中中性有机污染物非靶向筛查与生态风险评估 卢昕妍, 王菲, 张丽敏, 任晓鸣, 于南洋, 韦斯(5284)

河水-地下水交互带沉积物中抗生素和代谢产物提取方法优化及其分布特征 李玉琼, 童蕾, 严涵, 尤悦, 卢钰茜, 刘慧(5294)

白洋淀清淤示范区沉积物中抗生素和多环芳烃的分布特征与风险评估 王同飞, 张伟军, 李立青, 张美一, 廖桂英, 王东升(5303)

雄安新区唐河污水库残留污染物对地下水水化学动态的作用机制 张志雄, 王仕琴, 张依章, 冯文钊(5312)

基于时间序列模型的饮用水源地重金属健康风险分析与预测 姬超, 侯大伟, 谢丽, 孙华, 李发志, 周宇, 邓爱萍, 沈红军, 包广静, 王逸南(5322)

千河下游水体-沉积物重金属空间分布、风险及影响因素 高煜, 王国兰, 金梓函, 张军, 耿雅妮(5333)

巢湖流域丰水期可溶态重金属空间分布及污染评价 何苗, 刘桂建, 吴蕾, 齐翠翠(5346)

洪泽湖围网养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评估 瞿鑫源, 张鸣, 谷孝鸿, 阚可聪, 毛志刚, 陈辉辉, 曾庆飞(5355)

成都市地表水天然水化学变化特征及影响因素 许秋瑾, 赖承钺, 丁瑶, 王照丽, 程中华, 于涛(5364)

雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 黄长生, 师环环, 皮鹏程, 潘羽杰(5375)

粤港澳大湾区陆源氮污染源结构与空间分布 董斯齐, 黄翀(5384)

红壤丘陵区小流域典型土地利用的面源氮磷输出特征 房志达, 苏静君, 赵洪涛, 胡炼, 李叙勇(5394)

减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响 姜海斌, 张克强, 邹洪涛, 马璞骏, 渠清博, 谷艳茹, 沈仕洲(5405)

互花米草入侵对胶州湾湿地土壤磷赋存形态的影响 沙梦乔, 柴娜, 赵洪涛, 刘春井, 丁文超, 谢文霞(5414)

基于 16S rRNA 高通量测序的北运河水体及沉积物微生物群落组成对比分析 彭柯, 董志, 邸琰蓉, 郭道宇(5424)

硅改性花生壳生物炭对水中磷的吸附特性 赵敏, 张小平, 王梁嵘(5433)

高锰酸钾改性桉木生物炭对 Pb(II) 的吸附特性 莫贞林, 曾鸿鹤, 林华, Asfandiyar Shahab, 石清亮, 张华(5440)

混合金属氧化物/碳复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能 卢予沈, 宗莉, 于惠, 牟斌, 王爱勤(5450)

负载型钛凝胶的制备及其吸附去除三价砷的性能 孙晔洋, 周畅, 甘永海, 吴兵党, 张淑娟(5460)

一体式短程硝化-厌氧氨氧化工艺启动过程的亚硝酸盐调控 左富民, 郑蕊, 隋倩雯, 钟慧, 陈彦霖, 魏源送(5472)

生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响 邓华, 高明, 龙翼, 赖佳鑫, 王莹燕, 王子芳(5481)

紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组含量对施肥管理的响应 徐曼, 余添, 王富华, 王丹, 王莹燕, 杨文娜, 高明, 王子芳(5491)

南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评估 赖书雅, 董秋瑶, 宋超, 杨振京(5500)

城郊农田土壤多环芳烃污染特征及风险评估 张秀秀, 卢晓丽, 魏宇宸, 朱昌达, 潘剑君(5510)

我国东部沿海地区蔬菜中重金属累积分布特征及居民膳食暴露评估 孙帅, 耿柠波, 郭崔崔, 张保琴, 卢宪波, 张海军, 陈吉平(5519)

典型矿区周边农业用地农产品安全风险及影响因素 霍彦慧, 王美娥, 谢天, 姜蓉, 陈卫平(5526)

稻田土壤 Cd 污染与安全种植分区, 以重庆市某区为例 曹淑珍, 母悦, 崔敬鑫, 刘安迪, 程先, 符远航, 魏世强, 张进忠(5535)

镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 陈小红, 耿杰, 李佳欣, 陈文清(5545)

纳米膜覆盖对畜禽粪便好氧堆肥进程及恶臭气体排放的影响 李永双, 孙波, 陈菊红, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮(5554)

《环境科学》征订启事(5108) 《环境科学》征稿简则(5151) 信息(5249, 5263, 5283)

饮用水中的消毒副产物及其控制策略

楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 消毒副产物(disinfection by-products, DBPs)是在饮用水消毒时由消毒剂与有机或无机前体物反应生成的一类次生污染物,其由于具有致癌、致畸和致突变的三致特性在全球范围内广受关注. 聚焦于饮用水中的DBPs,介绍了DBPs的主要分类和研究历程,汇总了多地饮用水中常见DBPs的浓度水平以及全球饮用水水质标准对DBP指标的管控要求. 随后系统介绍了饮用水中DBPs的控制策略,包括源头控制、过程控制、末端控制以及协同控制这4大类,并对各类控制方法的优缺点进行了分析. 评述了中国的DBPs研究的现有水平和未来趋势,并展望了未来有关DBPs控制方法的研究方向. 一方面,在评价某种工艺或技术对DBPs的控制效果时需要考虑DBPs浓度和水质综合毒性的变化,另一方面,建议关注耦合源头、过程和末端控制技术的协同控制方法,兼顾从源头到龙头每个节点,实现对饮用水中各类DBPs的高效控制.

关键词: 消毒副产物; 饮用水; 控制策略; 研究历程; 浓度水平

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)11-5059-16 DOI: 10.13227/j.hjkk.202103034

Disinfection By-products in Drinking Water and Their Control Strategies: A Review

CHU Wen-hai, XIAO Rong, DING Shun-ke, ZHANG Rui-hua

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

Abstract: Disinfection by-products (DBPs) are secondary pollutants generated by the reaction of disinfectants with organic or inorganic precursors during drinking water disinfection. DBPs have received considerable global attention due to their carcinogenic, teratogenic, and mutagenic characteristics. Focusing on drinking water, this paper introduces the main classification and research history of DBPs, and then summarizes the concentration levels of common DBPs in drinking water, and DBPs regulatory compliance in global drinking water standards. Further, the control strategies for DBPs in drinking water, including source control, process control, DBPs removal and integrated control are introduced together with the advantages and disadvantages. Finally, a summary and review of the current level and future trends of DBPs research in China are presented with the proposed control strategies. On the one hand, when evaluating the control effect of a process or technology, the DBPs concentration and comprehensive toxicity should be considered; on the other hand, in order to realize the efficient control of DBPs in drinking water, the focus should be on the integrated methods coupling different DBPs control methods.

Key words: disinfection by-products; drinking water; control strategy; research history; occurrence level

19世纪中叶,随着微生物领域的快速发展,饮用水中的细菌和病毒等微生物被证实是与霍乱和伤寒等介水疾病相关的致病物种,需要在饮用水处理过程中被去除^[1]. 尽管包括混凝、沉淀和过滤在内的传统水处理工艺对致病菌有一定去除作用,但消毒工艺不仅可灭活水源水中的致病微生物,还可通过出厂水中的剩余消毒剂抑制供水管网微生物滋生,有效保障了生活饮用水的微生物安全^[2].

消毒副产物(disinfection by-products, DBPs)是在消毒过程中由消毒剂与水中存在的天然有机物(NOM)、人为污染物及卤素离子等前体物质反应生成的一类次生污染物,其浓度水平一般在 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ~ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 级别^[3]. 毒理学研究显示,大部分已被识别的DBPs具有细胞毒性、神经毒性和遗传毒性,且含氮消毒副产物(nitrogenous DBPs, N-DBPs)的毒性高于含碳消毒副产物(carbonaceous DBPs, C-DBPs),此外DBPs的毒性按卤素种类大致可如下排序:碘代DBPs>溴代DBPs>>氯代DBPs^[4]. 流行病学研究表明,氯消毒饮用水的长期饮用和罹患膀胱

癌、结肠癌和孕妇流产之间存在一定联系^[5]. 自21世纪初以来,饮用水中被识别的DBPs从500余种增至700余种^[6,7],其中约百余种DBPs的细胞毒性和遗传毒性得到了毒理学试验研究^[4],数十种DBPs被纳入各国饮用水水质标准中^[8,9].

目前有关饮用水中DBPs的研究主要集中在以下方面:①开发及优化DBPs的定量检测方法,甄别饮用水中新型高毒性DBPs并对其进行定性定量分析^[10];②调研饮用水中DBPs的浓度水平和分布特征,基于水质及工艺参数建立和优化DBPs浓度预测模型^[11];③识别DBPs前体物质并揭示相应的DBPs生成机制^[12,13];④探究DBPs的毒性特征和健康风险^[4,5],研究方法包括毒理学试验及流行病学调查;⑤研发DBPs的控制技术,包括源头控制、过程控制和末端控制等方式^[12-14]. 本文聚焦于饮用

收稿日期: 2021-03-04; 修订日期: 2021-04-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51822808); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07201005)

作者简介: 楚文海(1983~),男,教授,主要研究方向为饮用水消毒及消毒副产物, E-mail: 1world1water@tongji.edu.cn

水中的 DBPs,介绍了饮用水中 DBPs 的主要分类及研究历程,汇总了全球多地饮用水中 DBPs 的浓度水平和多国水质标准对 DBPs 类指标管控要求,系统梳理了 DBPs 的各类控制方法,并展望了未来有关 DBPs 控制方法的研究方向。

1 DBPs 的主要分类和研究历程

自 1974 年三卤甲烷 (trihalomethanes, THMs) 在加氯消毒的水中被发现以来^[15,16],饮用水中的 DBPs

逐渐开始被人们重视,相关领域也得到快速发展.总的看来,常见 DBPs 可分为有机 DBPs 和无机 DBPs,目前受关注较多有机 DBPs 的分类及代表物质结构式如图 1 所示,其中一些已被纳入饮用水水质标准的 DBPs (如 THMs) 和一些未被纳入标准但已知具有较高毒性的 DBPs (如卤乙酰胺) 皆包含 CX_3R 的分子结构,即在 α 碳位上有一个取代基和 1~3 个卤素原子, CX_3R 型 DBPs 由于具有毒性大、浓度高以及检出频繁的特点,成为了一类具有代表性的 DBPs^[17~19].

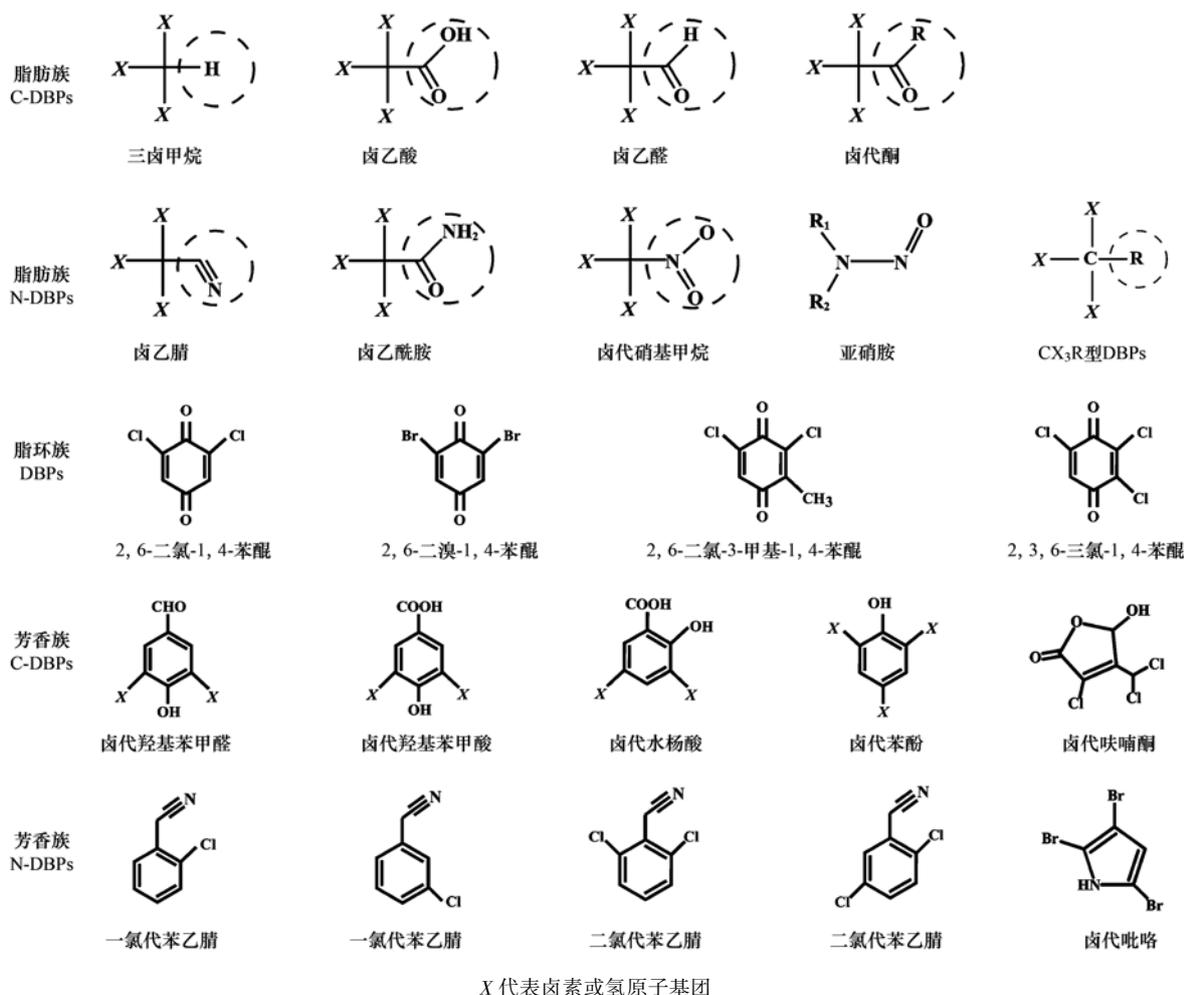


图 1 有机 DBPs 的分类及代表物质结构式

Fig. 1 Classification of organic DBPs and the structural formula of representative chemicals

图 2 展示了多类 DBPs 在饮用水中被发现的时间节点. 1974 年,荷兰化学家 Rook^[15] 的研究发现氯消毒饮用水中的 THMs 浓度高于原水,并猜测其是水中 NOM 与氯的反应产物;同年, Bellar 等^[16] 的研究提出,消毒时增加氯的投量会导致饮用水中的 THMs 浓度升高. 1976 年,有研究者在检测饮用水厂出水中的挥发性有机物时发现卤代硝基甲烷 (halonitromethanes, HNMs) 类 DBPs^[20]; 同年,卤代酮 (haloketones, HKs) 作为一类卤仿前体物在饮用水中被识别和分离^[21]. 进入 20 世纪 80 年代后,卤

乙酸 (haloacetic acids, HAAs)、卤乙腈 (haloacetonitriles, HANs) 和卤乙醛 (haloacetaldehydes, HALs) 先后在前体物消毒实验及饮用水中被检测发现^[22~24]; 1984 年 Holmbom 等^[25] 在氯化的造纸废水中识别出了高致诱变物质 3-氯-4-二氯甲基-5-羟基-2(5 氢)-呋喃酮 (MX), 该团队随后于 1986 年在饮用水中检测到 MX 的存在^[26]. 1986 年,加拿大开展的水质调研首次发现饮用水中也存在 *N*-二甲基亚硝胺 (*N*-nitrosodimethylamine, NDMA)^[27]. 随后,一些由替代

消毒剂产生的无机 DBPs 相继被发现,包括亚氯酸盐、氯酸盐和溴酸盐等^[3,28,29]。

进入 21 世纪,美国环保署(U. S. EPA)于 2002 年选取了全美 12 个典型饮用水厂展开 DBPs 浓度调研,其发现了存在于饮用水中的卤乙酰胺(haloacetamides, HAMs)类 DBPs 和碘代酸类 DBPs^[30]。2003 年 Richardson 等^[31]在以高溴水为原水的饮用水中发现卤代吡咯类 DBPs。2009 年, Zhao 等^[32]在加拿大饮用水中首次检出一类脂环

型 DBPs 卤苯醌,随后对其生成机制、浓度分布及毒理效应展开了系统地研究。2013 年, Pan 等^[33]在氯消毒饮用水中检出了四大类芳香型 DBPs,分别是卤代苯酚、卤代水杨酸、卤代羟基苯甲酸和卤代羟基苯乙醛。时间推进至 2018 年,中国饮用水中首次检出了一类芳香型 N-DBPs 氯苯乙腈,其由于具有高毒性和高稳定性受到了广泛关注^[34],脂环族和芳香族类高毒性 DBPs 相关领域快速发展^[35]。

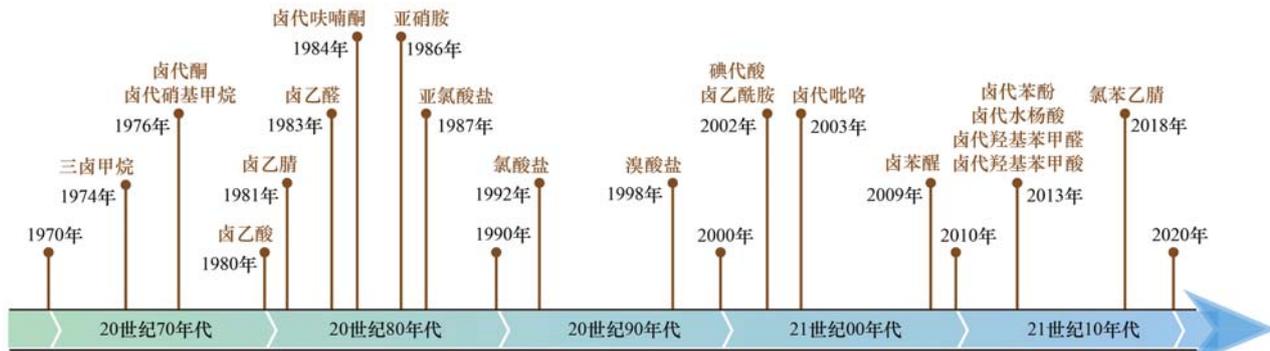


图 2 饮用水中 DBPs 的识别历程

Fig. 2 Discovery process of DBPs in drinking water

2 DBPs 的浓度分布和限值要求

表 1 汇总了全球多地饮用水中常见 DBPs 的浓度水平,总体来说,饮用水中 DBPs 的浓度水平一般在 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1} \sim \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 级别,其中 THMs 和 HAAs 两大类脂肪族 C-DBPs 的质量浓度在不同消毒条件下均占主导地位,HALs 的质量浓度水平占据第三位,以三氯乙醛(TCAL)的浓度最高^[30]。对于 HANs、HAMs 和 HNMIs 等脂肪族 N-DBPs 而言,这几类 DBPs 中相

较而言浓度较高且检出频率较高的物质包括:二氯乙腈(DCAN)、二溴乙腈(DBAN)、二氯乙酰胺(DCAM)、二溴乙酰胺(DBAM)和三氯硝基甲烷(TCNM)^[36]。饮用水中同类脂肪族卤代 DBPs 的生成潜能可大致排序为:氯代 > 溴氯代 > 溴代 DBPs;三卤代 > 二卤代 > 一卤代 DBPs^[37]。此外,已有的研究表明,2,6-二氯苯醌是卤苯醌类 DBPs 中检出率和浓度水平最高的一类物质^[38],另外氯苯乙腈类 DBPs 中检出浓度最高的物质为 2-氯苯乙腈^[34]。

表 1 饮用水中常见 DBPs 的浓度水平

Table 1 Concentration levels of commonly occurring DBPs identified in drinking water

地点	$\rho(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$								2,6-二氯苯醌 / $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	2-氯苯乙腈 / $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	文献
	THMs	HAAs	TCAL	DCAN	DBAN	DCAM	DBAM	TCNM			
中国	0.8~107.0	0.45~59.6	—	ND~6.7	ND~4.1	0.1~2.1	ND~0.8	ND~0.3	—	170.0~530.0	[34,39,40]
北京	ND~44.3	ND~30.4	ND~10.4	ND~3.4	ND~4.7	—	—	ND~2.1	—	—	[41]
中国台湾	ND~133.2	0.2~46.7	—	—	—	—	—	—	—	—	[42]
日本	—	—	—	—	—	0.1~1.3	ND~1.1	—	8.0~51.0	—	[43,44]
日本兵库县	21.7~61.6	17.11~83.9	ND~5.4	1.13~8.2	ND~0.2	—	—	—	—	—	[45]
韩国首尔	ND~77.7	ND~75.3	ND~33.2	ND~18.8	ND~8.0	—	—	ND~4.2	—	—	[46]
英国	16.5~47.3	11.1~41.0	—	—	—	—	—	—	—	—	[47]
英格兰	—	—	—	ND~4.4	ND~8.1	ND~4.5	ND~5.1	ND~0.5	—	—	[48]
欧洲 苏格兰	12.0~419.0	11.0~134.0	—	0.05~2.1	—	—	—	ND~0.4	—	—	[49]
西班牙	41.6~127.5	18.9~53.1	ND~12.1	ND	ND~5.5	—	—	ND	—	—	[50]
希腊	—	—	—	0.4~2.1	—	0.35~2.8	—	—	—	—	[51]
美洲 美国	4.0~164.0	5.0~130.0	ND~16.0	ND~12.0	ND~2.0	ND~5.6	ND~1.1	ND~2.0	4.5~274.5	—	[30,38]
加拿大	0.5~343.0	0.4~244.0	—	—	—	—	—	—	4.5~274.5	—	[38,52]
澳洲 澳大利亚阿德莱德	109.0~191.0	—	2.0~7.0	—	—	—	—	ND~0.1	—	—	[53]
澳大利亚珀斯	57.0~112.0	—	0.2~19.0	—	—	—	—	ND~0.3	—	—	[53]
非洲 突尼斯比塞大	—	47.3~105.7	—	—	—	—	—	—	—	—	[54]

1) ND 表示未检出(not detected),“—”表示文中没有相关数据

图 3 展示了全球多个国家、地区及组织饮用水水质标准对 DBPs 指标的限值要求^[9]。总的看来,全球多部饮用水水质标准对 THMs 和 HAAs 类 C-

DBPs 以及溴酸盐、亚氯酸盐和氯酸盐等无机 DBPs 进行了限值规定,另我国、埃及和澳大利亚将 TCAL 纳入了饮用水标准。除此之外,包括 NDMA 和 HANs

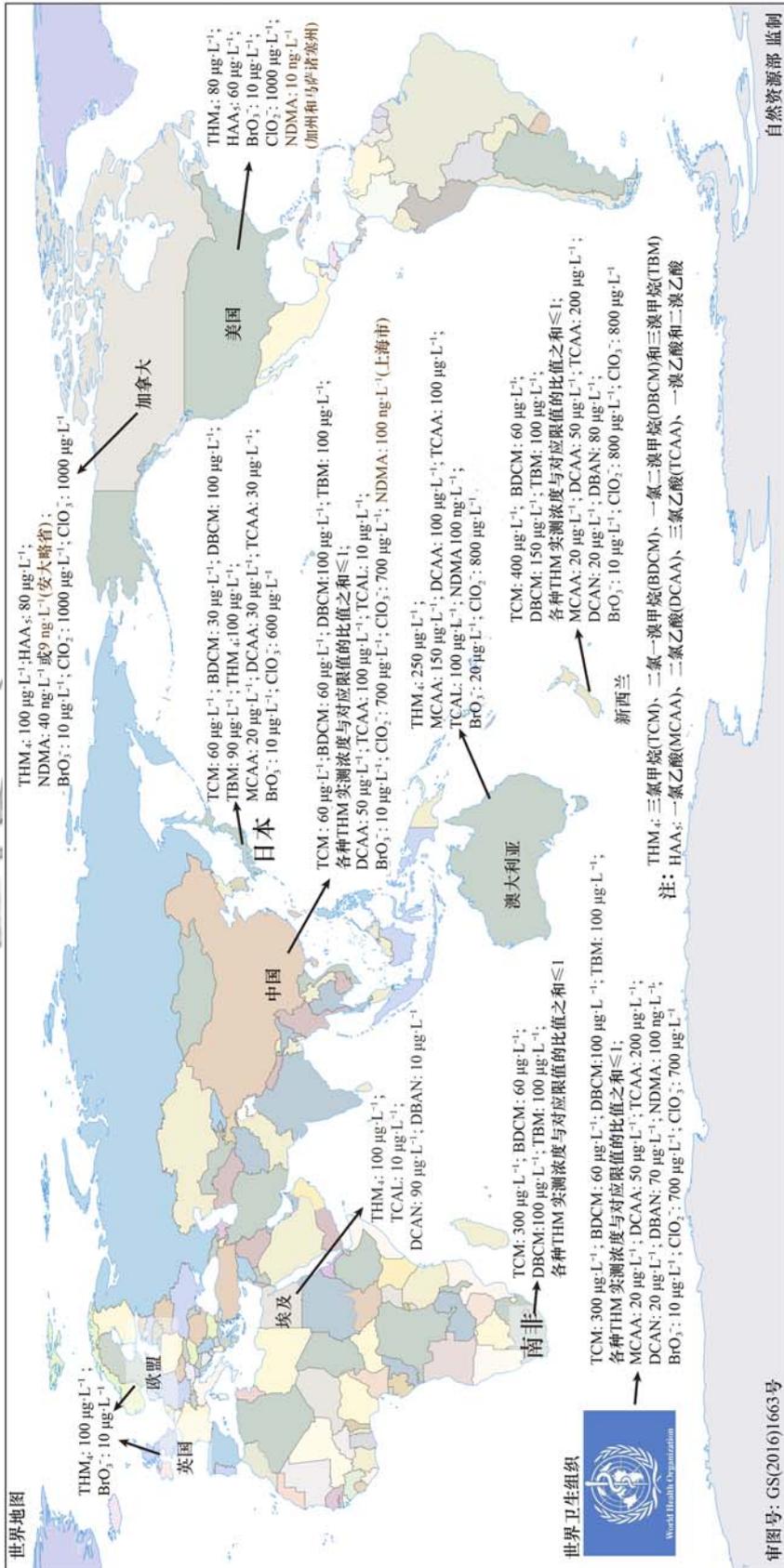


图 3 全球多个国家、地区和组织饮用水水质标准中 DBPs 指标的限值要求

Fig. 3 DBPs regulatory limits in drinking water quality standard set by various countries, regions and organizations

在内的高风险 N-DBPs 日益引起关注,我国上海市地方标准、美国加州及马萨诸塞州地方标准、加拿大国家标准、加拿大安大略省地方标准、澳大利亚国家标准和世界卫生组织(WHO)水质准则均有考虑 NDMA 指标,另外埃及、新西兰和 WHO 为 DCAN 和 DBAN 两种 HANs 设置了浓度限值。

3 DBPs 的控制方法

饮用水中 DBPs 的控制方法大致可分为源头控制、过程控制、末端控制和协同控制这 4 大类。其中源头控制是指在消毒剂投加之前通过水源保护或饮用水厂处理工艺削减水中 DBPs 前体物的浓度;过程控制即为通过改变消毒方式及优化消毒工艺等方式来减少 DBPs 的生成或改变 DBPs 的生成种类;末端控制则是利用物理或化学方法去除一系列已生成的 DBPs;协同控制即是通过耦合源头、过程和末端控制方式以实现多类 DBPs 的高效控制^[14]。

3.1 源头控制

3.1.1 水源保护

水源保护是通过降低水源水中 DBPs 前体物(包括 NOM 和卤素离子等)浓度以控制饮用水中 DBPs 含量。就控制 NOM 而言,一方面可通过控制水源水的营养化程度以及营养物质的循环过程限制藻类的生长,从而达到控制原水中藻源有机物的目的,另一方面可利用河岸渗滤以及含水层储存和回采(ASR)等方式净化原水^[14,55]。河岸渗滤是地表水体在进入两岸地下水系统或抽水井期间,河床及周边含水层通过物理拦截渗透和化学生物转化等作用消减水中污染物并提升水源水质的过程。Krasner 等^[55]的研究发现,河岸渗滤对总有机碳去除率约为 30%,而其对 NDMA 前体物的去除率可达 64%。另 ASR 是在丰水季利用注水井将已处理的饮用水储存至合适的地下含水层中,后续在需要时将水抽取出来并在重新消毒后输配至用户端。Singer 等^[56]的研究表明,ASR 不仅可以去除饮用水中已生成的 THMs 和 HAAs,还可去除水中剩余的 THMs 和 HAAs 前体物。另就控制卤素离子而言,首先需要防止海水或苦咸水入侵至饮用水水源,其次需要关注水源地相关产业发展,尤其是海产养殖业等易导致外加卤素进入水源的产业^[57]。

3.1.2 常规工艺和强化常规工艺

DBPs 的前体物特性各异,如 C-DBPs 的前体物一般为疏水性、具有芳香结构的大分子物质^[58],而 N-DBPs 的前体物则更多是一些亲水性、富含氮元素的小分子物质^[59]。总的看来,常规工艺(混凝-沉淀-砂滤)对溶解性有机碳(DOC)的去除率通常高

于溶解性有机氮(DON),期间 C-DBPs 前体物的控制效果优于 N-DBPs。如 Chu 等^[60]的研究显示,混凝-沉淀-过滤对 DOC 和 DON 的平均去除率分别为 47% 和 31%。另 Zhang 等^[11]调研了我国太湖流域饮用水厂处理工艺对 DBPs 前体物的控制效果,其中常规工艺对 THMs、HAAs 和 HALs 类 C-DBPs 前体物的去除率分别为 30%、49% 和 20%,对 HANs、HNMs 和 HAMs 类 N-DBPs 前体物的去除率分别为 20%、33% 和 25%。

常规工艺主要是为了去除水中的悬浮颗粒,而强化常规工艺可进一步改善常规工艺对溶解性有机物(DOM)的处理效果,较显著地提高 DOC 和 DON 的去除率以及对 DBPs 前体物的控制效果。以聚合氯化铝作为混凝剂,Tongchang 等^[61]考察了粉末活性炭强化混凝对 DOC 和 DON 去除率的影响,结果表明,粉末活性炭强化混凝过程对 DOC 和 DON 的去除率分别可达 85% 和 71%,其中 DOC 去除率相较于非强化混凝工艺平均提升了 30%。Zhao 等^[62]的研究发现,以氯化铁为混凝剂进行强化混凝时 DOC 的去除率为 57%,而当混凝剂为聚合氯化铝时,强化混凝工艺对 THMs 和 HAAs 前体物的去除率分别可达 51% 和 59%。

3.1.3 预处理及深度处理工艺

(1) 化学预氧化 化学预氧化是一类广泛用于饮用水厂的处理工艺,可用于解决水中的色度及嗅味问题、去除 NOM 和无机离子、提高混凝工艺的效率以及处理原水中存在的藻类,并在一定程度上控制后续消毒产生的 DBPs,常见的预氧化剂包括有氯、二氧化氯、臭氧、高锰酸钾以及高铁酸盐等^[63,64]。在氯胺消毒前应用预氧化工艺可在一定程度上控制后续消毒时生成的 NDMA 浓度,这是因为预氧化工艺可将 NDMA 前体物(如季铵盐类高分子助凝剂)转变为与氯胺反应活性较低的物质^[65]。Jiang 等^[66]考察了臭氧和高铁酸盐处理对后续氯/氯胺消毒生成 DBPs 的影响,结果表明,在该实验条件下两种预氧化处理均可控制 THMs、HAAs 以及 HANs 的生成,但预臭氧会导致 HKs 和 HNMs 的浓度增加,而高铁酸盐预氧化则可能会导致碘代 DBPs 的浓度升高。

但由于水中 DBPs 前体物种类繁多,且不同前体物与各类氧化剂的反应活性、反应路径及反应产物迥异,而预氧化剂的种类、预处理条件(预氧化剂投加量和反应 pH 条件等)以及对象水体的水质特征(如高藻水或高溴水)均会影响预氧化对 DBPs 前体物的影响,则有关预氧化工艺对 DBPs 的控制效果很难得到定论。也有研究发现,在特定前体物条件

下预氧化处理也可能促进后续消毒时特定 DBPs 的产生^[17,64]。

(2)高级氧化 传统的高级氧化工艺(AOPs)指的是利用在环境温度和压力下原位生成的高活性羟基自由基($\text{HO}\cdot$)降解水中污染物的过程;但随着硫酸根自由基($\text{SO}_4\cdot^-$)和氯自由基($\text{Cl}\cdot$)等多种自由基的相关研究不断发展,现今的 AOPs 定义得到了拓展,其它一些高活性化学自由基也被纳入范畴^[67]。利用 AOPs 控制 DBPs 前体物受到了广泛关注。

Ike 等^[68]详细综述了在氯/氯胺消毒前使用 AOPs 时对后续 DBPs 生成的影响,提出水中 DOM 的特性以及 AOPs 产生自由基的浓度和种类均会影响实验结果。AOPs 会改变 DBPs 前体物的性质,当水中原有的 DOM 与消毒剂的反应活性较低时,高级氧化工艺可能会导致后续消毒过程中生成的 DBPs 增多;而当水中原有的 DOM 与消毒剂的反应活性较高时,其与自由基的反应产物可能在消毒时生成更少 DBPs。而当自由基的投加量足够致使体系发生矿化反应时,此时原有 DOM 的性质不会影响实验结果, AOPs 工艺可实现对有机 DBPs 的控制效果,但会导致产生更多无机 DBPs。而就自由基的种类而言, $\text{SO}_4\cdot^-$ 相较于 $\text{HO}\cdot$ 和 $\text{Cl}\cdot$ 而言具有更高的选择性,其对 DOM 中的芳香组分具有更好的降解效果,可在整体上提高 DOM 的矿化率进而降低后续消毒时 DBPs 的生成量^[68]。但利用 AOPs 控制消毒副产物前体物时可能会致使生成更多溴酸盐、醛类物质以及卤代有机物等氧化副产物^[67,69]。

(3)离子交换 离子交换法是借助固态离子交换树脂中的离子与溶液中的离子进行可逆交换,从而提取或去除溶液中的某些离子,其在用于饮用水处理时可去除硝酸盐和氟离子等无机离子以及一些带电荷的有机物。根据离子交换树脂所带活性基团的性质可将其分为阳离子型、阴离子型和螯合型树脂几大类,不同种类离子交换树脂的组成成分以及处理对象均存在差异。磁性离子交换(MIEX)树脂是一种具有磁性的以聚丙烯为骨架的大孔型强碱性阴离子交换树脂,其功能基团为季铵基团,可交换离子为氯离子^[70]。MIEX 工艺被公认为是一种可高效去除原水中 NOM 的预处理工艺,其具有运行灵活、占地面积小以及处理效能高等优势,在全球多家水厂投入使用。

Bazri 等^[71]的研究表明,Purolite A860 型强碱性阴离子交换树脂处理对腐殖质类 NOM 的去除率为 40%~67%。而其对亲水性和非离子型 NOM 的去除率的去除率仅有 12%~33%,该过程中,C-DBPs 前

体物和 N-DBPs 前体物的去除率分别为 13%~20% 和 3%~50%。此外,Gan 等^[72]考察了 MIEX 工艺对地表水中有机物以及多种 DBPs 前体物的控制效果,结果显示,MIEX 工艺对 THMs 前体物和 HAAs 前体物的去除率分别为 39%~86% 和 42%~87%,另 HNMs 前体物的去除率在 9%~33% 范围内。位于我国江苏省淮安市的北京路水厂是国内首座应用 MIEX 作为预处理工艺的自来水厂,该水厂在运行过程中发现,MIEX 工艺对原水中 THMs 前体物和 HAAs 前体物的去除率分别为 34.4% 和 45.5%,另 MIEX 工艺的使用还可降低后续消毒剂的投加量,由此可知,MIEX 工艺在一定程度上可实现对 DBPs 的控制^[73,74]。但值得关注的是,离子交换树脂已被证明是一种重要的 NDMA 前体物,采用离子交换法可能导致后续消毒出水中 NDMA 浓度升高^[72,75]。

(4)活性炭吸附 活性炭吸附是一种有效的有机物分离工艺,按照活性炭的形态可分为粉末活性炭(PAC)和颗粒活性炭(GAC),其中 PAC 一般在应急时投加,而以 GAC 作为滤料的滤池则是常见的水处理构筑物。20 世纪 90 年代 Summers 等^[76]考察了 GAC 对于 THMs 前体物的去除效果,实验结果表明,GAC 具有很好的 DOC 去除效果以及 THMs 控制效果,但 GAC 出水在加氯消毒时生成的 THM_4 的溴取代系数明显高于进水;另外 Jacangelo 等^[77]的研究发现 HAA_5 也有相同规律,这是因为 GAC 并不能有效去除溴离子,这一方面导致 Br^- 与 DOC 的比值升高,另一方面 DOC 的降低会致使消毒剂投量减小,则此时 Br^- 与 Cl_2 的比值也相应升高。此外,Chili 等^[78]探究了 GAC 对于 N-DBPs 的控制效果,结果发现 GAC 并不能有效去除 N-DBPs 前体物以及 DON。考虑到 DBPs 的健康风险应结合浓度和毒性两个因素进行评价,有学者对 GAC 处理后出水进行了毒性计算,随后提出 GAC 对 THMs 及 HAAs 的控制效果并不适用于其它 DBPs,在应用 GAC 工艺时需重点关注溴代 HNMs 和溴代 HANs 这些高毒性 DBPs^[79,80]。

(5)生物处理 现如今,包括生物接触氧化以及生物活性炭滤池在内的生物处理工艺在饮用水厂受到了越来越多的应用,一方面,生物处理工艺生成的溶解性微生物产物和脱落的生物膜可在后续消毒工艺时充当 DBPs 的前体物^[75];另一方面,生物作用可降解或矿化 DBPs 前体物,从而实现对 DBPs 的控制。Zhang 等^[81]考察了在微生物作用对 20 种氨基酸生成 CX_3R 型 DBPs 的影响,结果显示,甘氨酸、精氨酸和天冬氨酸等数类氨基酸易被生物降解,对应多类 CX_3R 型 DBPs 生成潜在在生物处理后显著

降低. 而 Bei 等^[82]的研究发现水中含氮有机质(如氨基酸)的微生物代谢过程会贡献重要的 NDMA 前体物. Liu 等^[83]详尽介绍了生物滤池对 DBPs 前体物的控制效果, 提出生物滤池可有效去除一系列卤代有机 DBPs 的前体物质, 但其对 NDMA 前体物的作用并不确定. 此外, 预氧化处理、滤料种类、空床接触时间、反冲洗频率和时间、温度以及营养物质等处理方式或工艺参数均会影响生物滤池对 DBPs 的控制效果, 对其进行优化可实现对高浓度 C-DBPs 以及高毒性 N-DBPs 的协同控制^[83].

(6) 膜滤法 膜滤法也是一种有效的有机物分离工艺, 其对于 DOC 和 DBPs 前体物的去除效果优于强化混凝工艺和 GAC 工艺^[77]. 与 GAC 类似的是, 膜滤工艺出水在加氯消毒后产生的 THM₄ 的溴取代系数明显高于进水, 且该现象在进水 DOC 较低时尤为明显^[76]. 早期的研究表明, 纳滤(NF)对 THMs 及 HAAs 前体物的去除率高达 90% 以上, 即使是在处理高溴水时, NF 也可使 DBPs 生成总浓度降低^[77]. 另外 Ates 等^[84]同时研究了 NF 和超滤(UF)工艺对 DBPs 的控制效果, 结果显示, 在处理 DOC 较低的水样时, 孔径不超过 1000 的 NF 和 UF 可有效去除水中相对分子质量高的物质, 但对相对分子质量较小的物质(<2 000)的去除效果较差, 且 NF 和 UF 处理均会导致 Br⁻与 DOC 的比值升高, 致使生成更多溴代 THMs 和溴代 HAAs. 而在不同原水水质条件下考察 NF 对 NDMA、THMs 以及 HNMs 前体物去除效果的研究表明, 该过程一方面受到膜参数的影响, 另一方面还与原水水质参数有关^[85].

3.1.4 组合工艺

考虑到仅探究单种工艺对 DBPs 前体物的去除效果缺乏实际参考价值, 多位研究者通过中试实验考察了常用或新型组合工艺对饮用水中 DBPs 的去除效果. Hu 等^[86]的研究利用中试平台比较了 13 种常用工艺组合(包括 4 种预氧化方式和 3 种深度处理工艺)对多种 DBPs 及其综合毒性的控制效果, 结果显示, 针对该类原水, O₃ 预氧化-常规工艺-O₃-生物活性炭(BAC)工艺组合的出水具有最低的计算细胞毒性, 而 ClO₂ 预氧化-常规工艺-GAC(或 O₃-BAC)工艺组合的出水具有最低的计算遗传毒性. Andersson 等^[87]的研究对比了离子交换-陶瓷膜微滤-在线混凝-O₃-GAC 新型组合工艺与混凝-沉淀-快滤池-慢滤池常规组合工艺对 DBPs 前体物的去除效果, 结果表明, 新型组合工艺对 THMs 和总有机卤素(TOX)的控制效果优于常规组合工艺, 但新型组合工艺出水在氯化或氯胺化后生成的溴代 DBPs 更多.

3.2 过程控制

3.2.1 改变消毒方式

常用的液氯/次钠消毒会生成较多 THMs 和 HAAs 等标准内 DBPs, 为满足水质标准, 越来越多水厂开始使用其它消毒方式, 包括使用氯胺、紫外光(UV)、O₃ 或 ClO₂ 等替代消毒剂, 或采用组合消毒方式, 如 O₃/氯、O₃/氯胺、UV/氯和 UV/氯胺等.

然而, 每种常见消毒剂的使用都会导致生成一些特定的 DBPs. 尽管氯胺及二氧化氯在消毒时生成的 THMs、HAAs 和 TOX 相较于氯消毒更少, 但这两种消毒剂生成的未知 TOX 比例更高, 且当原水中存在高浓度碘离子时, 仅利用氯胺或二氧化氯消毒可能生成较高浓度碘代 DBPs, 增加饮用水的毒性风险^[3,88]. 此外, 氯胺的使用会造成 NDMA 及卤代氰生成, 而二氧化氯的使用通常会致氯酸盐以及亚氯酸盐的产生^[89]. 而用 O₃ 消毒时需要关注醛类物质及致癌物溴酸盐的生成^[14]. 就组合消毒而言, 当 O₃ 与氯或氯胺联合使用时, 尽管预臭氧可去除一些 DBPs 的前体物(如 NDMA 前体物及碘离子等), 但会导致后续氯/氯胺消毒时生成更高浓度的 HALs 及 HNMs^[90]; 而当 UV 与氯或氯胺联用时, 由于 UV 会导致水中硝酸盐及亚硝酸盐的光解, 进而产生一系列活性氮物质并导致后续消毒过程中生成更多 HNMs^[89]. 需要强调的是, 在通过改变消毒方式以控制 DBPs 时, 消毒剂的消毒效果也是应纳入考虑的关键因素. 在各类替代消毒剂中, 氯胺的氧化消毒能力较弱, 而 UV 和 O₃ 不能在管网中产生持续消毒效果.

3.2.2 优化消毒工艺

Shah 等^[89]的研究提出, 相较于寻求一种不生成 DBPs 的消毒剂, 优化消毒方式可更高效地降低消毒后饮用水的健康风险. 消毒条件(如 pH 和温度)及消毒剂的投加位置和投加方式等均会影响 DBPs 的生成种类和生成浓度. 如 Liang 等^[91]的研究发现 pH 值的增加会促进氯化过程中 THMs 的生成, 但三卤代 HAAs 浓度会随 pH 值的增加而降低; 另外碱性条件有利于 HALs、HANs 和 HAMs 等 DBPs 进行水解反应^[92-94]. 与 pH 值类似, 水温一方面可能改变 DBPs 前体物与消毒剂的反应速率, 另一方面还会影响已生成 DBPs 的生物降解或化学去除(水解或脱羧)过程^[95,96]. 在通过优化消毒条件以控制 DBPs 的同时需关注人为调控 pH 值或水温带来的能耗问题, 此外出厂水的 pH 值及水温还会影响管网中的管材腐蚀及微生物生长情况. 值得说明的是, 尽管消毒剂的投加剂量和消毒反应接触时间也会影响 DBPs 的生成情况^[95], 但切记不可为控制 DBPs 忽略消毒工艺对致病微生物的灭活效果^[97].

就消毒剂的投加位置而言,考虑到 GAC 对芳香型卤代有机物的吸附效果优于其对 NOM 的吸附效果, Jiang 等^[98,99]提出了一种新型的 DBPs 控制方法,通过置换 GAC 工艺与消毒工艺的位置,利用 GAC 的吸附作用去除一些氯化产生的芳香型卤代 DBPs,从而控制出水中 DBPs 浓度. 考虑到该新型方法里 GAC 可将余氯耗尽,研究者在 GAC 出水加入了消毒剂以保证余氯浓度,结果显示此时出水中卤代 DBPs 浓度和出水的发育毒性均低于传统方法^[100].

而在消毒剂的投加方式上,陈超等^[101]提出了一种新型氯化消毒工艺——顺序氯化消毒工艺,即先加入氯进行游离氯消毒,随后在一个较短的接触时间(<15 min)后加入氨将游离氯转化为氯胺,后续进行氯胺消毒. 相较于传统氯消毒,该种顺序氯化工艺被证明可有效控制 DBPs 的生成,其中 THMs 和 HAAs 的生成浓度可降低 50% 以上^[101]. 天然水体中存在多类耗氯物质,为保障自由氯的消毒效果,折点加氯工艺由此应运而生^[102],多位研究者提出折点加氯对 DBPs 的影响不可忽视,尤其是具有较高健康风险的 NDMA 以及碘代 DBPs^[103-106]. 此外,氯胺消毒时氯胺的投加方式(原位生成或投加预制氯胺)以及 Cl_2 和 NH_3 的投加顺序和比例也会影响 DBPs 的生成. Hayes-Larson 等^[107]的研究发现,相较于预制氯胺,相同条件下原位氯胺处理生成的 HANs 更多;此外原位生成氯胺或采用预制氯胺还会影响高毒性碘代 DBPs 的生成^[108,109]. 考虑到二氯胺(NHCl_2)是氯胺消毒时生成 NDMA 的主要反应物, Schreiber 等^[110]提出先投加 Cl_2 再投加 NH_3 可以防止加氯点处出现较高的氯氨比,从而控制氯胺消毒过程中生成的 NDMA. 此外有研究表明,在使用氯胺消毒时需要严格控制氯和氨的比值(4:1 或 4.5:1 较宜),这是因为当氨浓度过高时会导致给水管网中硝化细菌发生硝化反应从而引发亚硝酸盐问题,另有研究指出当管网中发生硝化反应时,此时的管壁生物膜会产生一些特定的 DBPs 前体物,致使生成更多高毒性 N-DBPs^[14,111]. Charrois 等^[104]的研究发现相较于直接氯胺消毒,先加入自由氯,随后在一定接触时间后(2 h)再进行氯胺消毒可实现对 NDMA 的有效控制.

3.3 末端控制

3.3.1 物理法

(1) 吸附法 就吸附法而言,活性炭已被证明可通过吸附作用去除多种 DBPs,且其对某些 DBPs 的去除率可高达 100%,但很难吸附 NDMA 类强亲水性的 DBPs^[55,80]. Levesque 等^[112]考察了活性炭家

用净水装置对龙头水中 THMs 及 HAAs 的去除效果,结果显示 THMs (约 90%) 的去除率高于 HAAs (约 70%). 此外,常用滤料石英砂(QS)也展示了一系列 DBPs 的吸附效果,实验结果表明,单独使用 QS 对三氯乙腈的去除率可达 80%^[113]. 甘轶群^[114]探究了家用净水器中常用的三级滤芯(PP 棉、GAC 和压缩活性炭)对 7 种卤代甲烷的去除效果,结果表明,3 种吸附材料中 GAC 对卤代甲烷的去除率最高,当三级滤芯串联使用时水中卤代甲烷的去除率可达 81%~100%. 王立伟^[115]的研究发现,不同流速条件下 GAC 对 HAAs 的去除效果均优于 PP 棉和压缩活性炭,经过三级串联滤芯后,水中 7 种目标 HAAs 类物质的去除率在 16%~44% 范围内. 值得说明的是,在利用吸附法去除 DBPs 时不能仅关注去除率,还需考虑吸附材料的吸附容量以及 DBPs 的吸附动力学等参数. 另外 DBPs 的吸附效果也会受到 DBPs 物化性质的影响,如活性炭对 THMs 的去除率高于 HAAs,这是因为 THMs 的水溶性和极性更小,更易通过吸附作用去除.

(2) 膜滤法 膜滤也是家庭净水处理中常见的一类工艺,其可通过尺寸筛分原理去除饮用水中的微生物. 现如今,市面上家用净水器的处理工艺通常为前置三级滤芯作为预处理,随后连接膜滤装置进行深度处理^[114]. 由于大多数已被识别的 DBPs 相对分子质量较小($<0.5 \times 10^3$),UF、NF 以及反渗透(RO)可通过尺寸筛分及电荷排斥等机制去除一系列 DBPs^[116,117]. Fujioka 等^[118]的研究利用 RO 实现了对 NDMA 的有效去除,去除率达 71%. 考虑到膜滤法的能耗较高且会产生浓水, Wang 等^[119]的研究尝试采用多级 RO 去除水中的 HAAs,结果表明 5 级 RO 对 HAAs 有较高的去除率($>75\%$),该处理过程中水的回收率达 87%. Weinberg 等^[120]的研究利用 RO/去离子水系统去除实际龙头水中的 DBPs,结果显示,该处理系统对 THMs 的去除率为 48%,对 HAAs 的去除率高达 100%. 顾昕等^[121]调查了天津市两个供水区域内家用净水器(三级滤芯与滤膜联用)的使用情况和进出水水质变化,结果表明,该地区家用净水器中 UF 净水器和 RO 净水器分别占比 70% 和 30%,其中 80% 家用净水器对饮用水中 THMs 的去除率达 75% 以上,另相较于 UF 净水器而言,RO 净水器对 THMs 的去除率均值更高. 值得说明的是,未定期清理或更换滤芯及其它配件可能会导致家用净水膜滤装置出现微生物污染现象^[122],另有关 RO 会去除水中营养物质(如微量元素等)这一现象也受到广泛关注^[122].

(3) 加热法 烧水是一种常用的家庭水处理技

术,对于无直饮水供应的国家及地区而言,其是保障饮用水微生物安全最末端也是最重要的一道屏障。在水的加热过程中,挥发性 DBPs 的浓度会因挥发作用而降低,而其它部分难挥发的 DBPs 也可通过水解或脱羧等反应被去除^[123,124]。相关研究结果表明,在水的加热过程中,THMs 的挥发作用占主导地位,而 HALs 和 HANs 主要经历水解反应,不同 DBPs 在加热过程中的去除率将受到 DBPs 性质(挥发性及稳定性)、水温、水中剩余消毒剂的种类和浓度以及烧水设备类型等因素影响^[124]。总的看来,烧水可有效控制饮用水中 DBPs,期间 THMs、HALs、HANs、HNMs 和 TOX 浓度明显降低,但加热过程中氯消毒饮用水中会持续生成 MCAA 和 DCAA,可能导致 HAAs 总浓度升高^[125]。

(4)曝气吹脱法 U. S. EPA 发布的有关控制饮用水中 THMs 的技术报告指出^[126],曝气法可实现 THMs 类 DBPs 的末端去除,该过程中 THM 的去除效率随着物质相对分子质量的升高而降低,即三氯甲烷(TCM)最易通过曝气法去除,而期间三溴甲烷的去除率最低。Brooke 等^[127]的研究对比了扩散曝气和喷淋曝气两种方式对 THMs 的控制作用,结果显示,喷淋曝气对 THMs 的去除效果更好,THMs 去除率受到液滴直径、液滴行进距离、水温和 THM 种类的影响。但值得说明的是,曝气吹脱法只能用于去除挥发性 DBPs,而难以控制挥发性较差的 DBPs^[14],另外在实际使用时采取曝气法去除 DBPs 也需要考虑相应的能耗问题。

(5)UV 法 UV 法既是一种常见的消毒工艺,也可用于在末端去除已生成的 DBPs。在利用 UV 法去除 DBPs 过程中,一方面会发生 DBPs 的直接光解,另一方面还可通过生成的 HO·实现 DBPs 的间接光解^[128]。考虑到单独 UV 光解过程中生成的 HO·有限,则在利用 UV 法实现 DBPs 的末端控制时,直接光解是降解 DBPs 的主要反应过程。除 NDMA 外,一系列卤代 DBPs 也被发现可通过 UV 工艺去除,且为基于紫外光用量的表观准一级反应速率常数呈一定规律:三卤代 DBPs > 二卤代 DBPs > 一卤代 DBPs;碘代 DBPs > 溴代 DBPs ≫ 氯代 DBPs^[129,130]。如今,家用净水器中常利用 UV 工艺在用户端去除饮用水中的致病菌,其操作简单且不会影响饮用水的口感,但需要考虑成本问题。

3.3.2 化学法

从反应机制角度对化学法末端控制 DBPs 进行分类主要可以分为氧化法和还原法两类,前者即指在氧化剂作用下去除 DBPs,常用的氧化法主要包括利用超声(US)、UV/H₂O₂、UV/过硫酸盐(PS)和

UV/O₃ 等 AOPs,该过程中发生的反应主要包括有氧化脱卤、脱羧及矿化;而后者则是通过还原性物质实现 DBPs 的还原脱卤,常用的还原法主要有零价铁(ZVI)及其衍生材料和工艺、亚硫酸盐处理、高级还原工艺(ARPs)和电化学法等。

3.3.2.1 氧化法

(1)US 工艺 US 工艺在水处理中的应用受到了广泛关注,该工艺的原理是利用空化气泡在破裂时产生的高温高压使水离解,随即产生的具有强氧化性的 HO·可用于降解污染物^[131]。初期有关 US 降解 DBPs 的研究主要关注 THMs 类物质,Guo 等^[132]的研究发现 US 对 THMs 有一定去除效果,且该过程主要受到物质的自身性质(包括分子极性、蒸汽压和键离解能等)以及超声辐射声强的影响。随后相关研究得到进一步拓展,Yang 等^[113]的研究发现正辛醇/水分配系数对数值($\lg K_{ow}$) ≤ 1.2 的 DBPs 不可被超声去除,而 $\lg K_{ow} \geq 1.97$ 的 DBPs 受到超声处理时的去除率达 20% 以上。需要关注的是,使用 US 工艺时需要考虑噪声以及能耗方面的问题,则其在用于实际生产时可行性较低。

(2)AOPs 工艺 包括 UV/H₂O₂、UV/PS 和 UV/O₃ 在内的基于 UV 的 AOPs 对 DBPs 具有较好的去除效果,NAAs 和 HANs 等多种 DBPs 在 AOPs 中的去除效果及反应机制以及动力学受到了广泛研究^[130,133-135]。值得说明的是,在利用这些基于 UV 的 AOPs 处理 DBPs 时,一方面 UV 可直接光解某些 DBPs,另一方面会发生 HO·或 SO₄·主导的氧化反应(如使 C—Cl 或 C—C 键断裂)以及过氧离子的亲核攻击(如使腈基转变为酰胺基团)等过程^[135,136]。但在考虑利用 AOPs 进行 DBPs 的末端去除时需要关注反应体系中加入的催化剂(如 PS)可能造成的二次污染问题。

3.3.2.2 还原法

(1)ZVI ZVI 材料由于具有较强的还原性首先在地下水(受氯代有机物污染)的原位修复领域备受关注,随后有研究者为提高 ZVI 效能进行了新材料制备以及反应条件优化,由此衍生出一系列其它工艺^[137]。有研究发现,单独的 ZVI 对 HAMs、HAAs 及溴酸盐等一系列 DBPs 具有去除效果,而在该过程中加入金属铜则可进一步提高去除率^[137-139];此外,纳米零价铁材料及一系列改性或复合材料和铁系双金属材料(包括 Cu/Fe 和 Pd/Fe)在用于处理 DBPs 时均展示出一定优势,另外弱磁场条件也可改善 ZVI 对 DBPs 的去除效果^[140-143]。然而 ZVI 降解 DBPs 的反应速率较慢,且该还原反应可能只是将高卤代 DBPs 转化成为低卤代 DBPs,则处理后饮用水

的水质毒性并非一定会降低,此外在末端控制时投加药剂材料可能引发饮用水二次污染问题,可行性较低。

(2)投加亚硫酸盐 亚硫酸盐是一种常用的淬灭剂,用以淬灭水样中剩余的消毒剂从而防止 DBPs 在样品采集后继续生成。但亚硫酸盐具有较强的还原能力,可使水中的 DBPs 发生还原脱卤反应。已有研究证明, HANs、HNMs 和 HAMs 等 DBPs 均会被亚硫酸盐还原,其中 10 种 HAMs 的降解反应动力学以及相关机制得到了深入的探究^[144,145]。但该反应可能只是将高卤代 DBPs 转化成为低卤代 DBPs,仍需关注过程中水质毒性的变化。需要强调的是,由于亚硫酸盐在该过程中会被氧化为硫酸盐,而当存在较高浓度硫酸盐时可能会导致饮用水产生明显的味道,另外还可能会腐蚀配水系统^[146],则在实际生活中利用该方法控制 DBPs 的可行性较低。

(3)ARPs 工艺 ARPs 是近几年兴起的一种水处理技术,其是利用 UV 活化还原性物质(亚硫酸盐和连二亚硫酸盐等),进而生成一系列还原性自由基用以降解污染物,常见的还原性自由基包括有水

合电子(e_{aq}^-)、氢原子($H\cdot$)和亚硫酸根自由基($SO_3^{\cdot-}$)等。利用 ARPs 可以有效地处理饮用水中的卤代 DBPs,包括有机 DBPs(如 HAMs)和无机 DBPs(如溴酸盐)^[147,148]。但应考虑的是饮用水厂的出厂水中需保证剩余消毒剂浓度以抑制微生物在供水管网中滋生,则 ARPs 很难在水厂内应用,而在用户端使用 ARPs 一方面需关注能耗和经济性问题,另一方面还需考虑投加的化学试剂可能会造成饮用水的水质污染。

(4)电化学工艺 电化学工艺由于具有高效低耗以及可在温和条件下进行等优势受到广泛关注,在利用电化学法处理卤代有机物时,相较于可能生成高毒性产物的氧化脱卤法,电化学还原脱卤的产物通常是一些无机卤素离子和无毒有机物^[149]。按照主导还原物质的不同,电化学还原脱卤反应可分为直接还原过程以及间接还原过程,前者是通过阴极上产生的电子(e^-)进行脱卤反应,而后者则是利用一些还原性中间产物(如吸附氢 H_{ads})^[150]。Li 等^[151]的研究利用 Pd/Fe 改性的碳纸电极作为阴极实现了氯代 HAA 的高效去除,发现在该过程中同

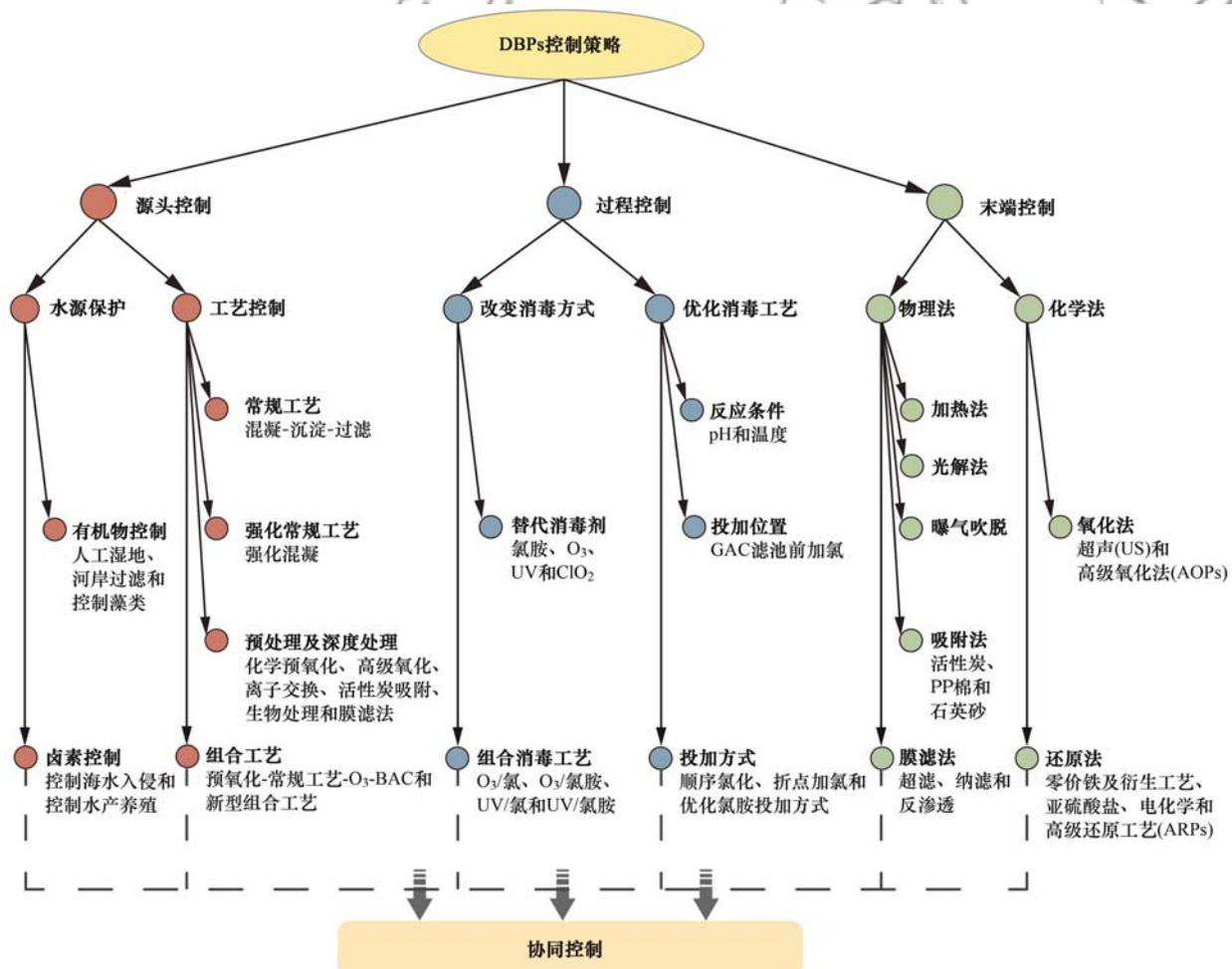


图 4 饮用水中 DBPs 的控制策略

Fig. 4 Strategies for DBPs control in drinking water

时发生着两种还原过程. 另外 Li 等^[152]考察了活性炭电极材料对 22 种 DBPs 的去除效果, 在吸附和电化学的原理下, 该电极材料实现了对其中 13 种 DBPs 的高效去除, 去除率达 90% 以上. 现如今, 电化学还原脱卤工艺在实际生产中应用的成熟度相对不够, 其中改性电极价格昂贵是制约其实现工业化应用的重要要素, 另相关反应机制和反应器设计也需进一步研究, 则现阶段较难实现实际生活中利用电化学还原脱卤法去除饮用水中的 DBPs.

3.4 协同控制

饮用水中 DBPs 的控制方法如图 4 所示, 其中源头控制、过程控制和末端控制这 3 种方法各有优劣. 虽然源头控制不仅可降低水中 DBPs 前体物浓度还可降低水体的需氯量, 进而在后续消毒工艺中减少消毒剂的投加量和 DBPs 生成量, 但源头控制很难完全去除水中的 DBPs 前体物, 尤其是仅使用常规工艺的水厂对 DBPs 前体物的处理效果有限. 就过程控制而言, 每种替代消毒剂的使用都会导致生成一些特定的 DBPs, 在关注常规 DBPs 浓度的同时需要考虑一些更易由替代消毒剂生成的高毒性 DBPs (如碘代 DBPs 和 N-DBPs) 及其对水质毒性的影响, 另通过优化消毒工艺进行 DBPs 的过程控制需在确保消毒效果及满足其它饮用水水质参数的前提下操作. 而末端控制通常在用户端进行, 例如家用净水技术是保障饮用水安全的最后一道屏障, 由于饮用水中同时存在着剩余消毒剂和 DBPs 前体物, 则末端处理过程中通常也伴随着 DBPs 的生成与转化, 另相关能耗问题和二次污染带来的风险不容忽视. 仅通过单种控制方法很难实现对各类 DBPs 的有效控制, 联用源头控制、过程控制和末端控制中的 2~3 种方法协同控制饮用水中的 DBPs 日益引起关注.

Ding 等^[153]的研究比较了 UV/H₂O₂ 预处理联合 3 种消毒方式 (氯消毒、原位生成氯胺和先氯后氨) 综合控制饮用水中 DBPs 浓度及毒性潜力的效果, 结果显示, 由于 UV/H₂O₂ 能够破坏 NOM 的芳香性组分和 DON 成分, 该预处理工艺可致使后续消毒过程中 C-DBPs 生成浓度增加, 但期间 N-DBPs 生成浓度降低. 另相较于单独氯消毒, 不论是原位生成氯胺抑或是先加氯后加氨均可降低 CX₃R 型 DBPs 的总体生成浓度, 整体看来, UV/H₂O₂ 预处理协同原位氯胺处理可以使 DBPs 浓度和 DBPs 毒性潜力降至最低^[153]. Chu 等^[154]的研究提出了一种耦合 UV/PS 预处理 (源头控制)、消毒条件优化 (过程控制) 和物理曝气吹脱 (末端控制) 协同控制水中氯代 N-DBPs 的专利方法, 其中 UV/PS 工艺产生的强氧化

性 SO₄⁻· 可高效去除 N-DBPs 的前体物, 而针对 SO₄⁻· 氧化后可能造成后续 THMs 类 C-DBPs 浓度增高的问题, 研究者调节水样 pH 以优化消毒条件并利用快速曝气措施去除已生成的 TCM.

4 总结及展望

DBPs 是饮用水消毒过程中生成的一类具有潜在健康风险的次生污染物, 其浓度水平一般在 ng·L⁻¹ ~ μg·L⁻¹ 级别, 相关研究自 20 世纪 70 年代开始, 迄今已逾近 50 年. 现如今饮用水中已被识别的 DBPs 超过 700 种, 按照化学结构对有机 DBPs 进行分类主要可分为脂肪族 DBPs、脂环族 DBPs 及芳香族 DBPs, 其中包含 CX₃R 结构的一系列脂肪族 DBPs 由于具有毒性风险较大、浓度水平较高和检出频率较大的特点受到广泛关注. 随着相关部门对 DBPs 的重视程度日益提高, 包括 THMs、HAAs、HALs、HANs 和 NDMA 在内的有机 DBPs 以及溴酸盐、亚氯酸盐和氯酸盐等无机 DBPs 已被纳入多个国家及组织的饮用水水质标准中. 控制饮用水中的 DBPs 是全球饮用水安全保障领域的研究热点和难点之一, 其中常见的 DBPs 控制策略包括在水源或水厂削减 DBPs 前体物 (源头控制), 改变消毒方式或优化消毒工况 (过程控制), 以及通过物理法或化学法去除已生成 DBPs (末端控制). 但 3 种常见控制策略各有优劣, 如源头控制很难完全去除水中的 DBPs 前体物, 另每种替代消毒剂的使用都会导致生成一些特定 DBPs, 而优化消毒工艺需在确保消毒效果及满足其它饮用水水质参数的前提下操作, 此外, 末端处理过程中通常也伴随着 DBPs 的转化与生成, 相关能耗问题和二次污染风险不容忽视.

饮用水 DBPs 研究发展至今, 无论是在分析识别、生成机制抑或是控制技术的研究领域中, 中国都是处于与国际接轨甚至领先的水平. 但我国研究人员并不能止步于此, 未来还需要依据我国国情, 识别与我国水源水质特征和水处理工艺特点相符的、具有我国特性的高风险 DBPs, 将分析检测技术、浓度调研结果、生成转化机制以及健康风险效应几部分相耦合, 提出一系列需优先控制的 DBPs 以纳入到我国国家以及地方饮用水水质标准之中, 对其进行有效的监管和控制. 为有效降低饮用水中 DBPs 导致的环境和健康风险, 在此对 DBPs 控制方法的未来研究方向提出如下展望: ①在评价某种工艺或技术对 DBPs 的控制效果时, 以往研究主要考虑 DBPs 浓度的变化, 包括多种 DBPs 以及综合性指标 TOX. 但由于不同种类 DBPs 的毒性值大小各异, 可能出现 DBPs 总浓度明显降低但综合毒性未显著降

低的情况. 由此, 评估某种方法对 DBPs 的控制效果需要综合考虑 DBPs 浓度和综合毒性的变化. ②考虑到常见的 3 类控制方法各有利弊, 未来相关研究建议关注 DBPs 的协同控制方法, 即耦合源头、过程及末端控制方法, 兼顾水源、水厂、管网及用户端家庭处理, 以实现饮用水中各类 DBPs 的高效控制.

参考文献:

- [1] Ellis K V. Water disinfection; a review with some consideration of the requirements of the third world[J]. *Critical Reviews in Environmental Control*, 1991, **20**(5-6): 341-407.
- [2] 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.
- [3] 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**(1-3): 178-242.
- [4] Wagner E D, Plewa M J. CHO cell cytotoxicity and genotoxicity analyses of disinfection by-products: an updated review [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, **58**: 64-76.
- [5] Hrudey S E. Chlorination disinfection by-products, public health risk tradeoffs and me [J]. *Water Research*, 2009, **43**(8): 2057-2092.
- [6] Richardson S D. Disinfection by-products and other emerging contaminants in drinking water[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2003, **22**(10): 666-684.
- [7] Richardson S D, Kimura S Y. Water analysis: emerging contaminants and current issues [J]. *Analytical Chemistry*, 2020, **92**(1): 473-505.
- [8] Wang X M, Mao Y Q, Tang S, *et al.* Disinfection byproducts in drinking water and regulatory compliance: a critical review[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2015, **9**(1): 3-15.
- [9] 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 R, Chu W H. Disinfection by-products regulatory compliance in global drinking water standards: comparison and enlightenment[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(6): 1328-1337.
- [10] 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.
- [11] Zhang R H, Wang F F, Fang C, *et al.* Occurrence of CX₃R-Type disinfection byproducts in drinking water treatment plants using DON-rich source water[J]. *ACS ES&T Water*, 2021, **1**(3): 553-561.
- [12] 肖融, 楚文海. 从“源头到龙头”的前体物全过程来源分析消毒副产物的源头控制[J]. *给水排水*, 2020, **46**(9): 137-145.
Xiao R, Chu W H. Source control of disinfection by-products in drinking water; a review from a precursor source perspective[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, **46**(9): 137-145.
- [13] 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, **43**(2): 1-5.
- [14] Singer P C. Control of disinfection by-products in drinking water [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1994, **120**(4): 727-744.
- [15] Rook J J. Formation of haloforms during chlorination of natural waters[J]. *Water Treatment Examination*, 1974, **23**(2): 234-243.
- [16] Bellar T A, Lichtenberg J J, Kroner R C. The occurrence of organohalides in chlorinated drinking waters [J]. *Journal-American Water Works Association*, 1974, **66**(12): 703-706.
- [17] Yao D C, Chu W H, Bond T, *et al.* Impact of ClO₂ pre-oxidation on the formation of CX₃R-type DBPs from tyrosine-based amino acid precursors during chlorination and chloramination[J]. *Chemosphere*, 2018, **196**: 25-34.
- [18] Fang C, Hu J L, Chu W H, *et al.* Formation of CX₃R-type disinfection by-products during the chlorination of protein; the effect of enzymolysis[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, **363**: 309-317.
- [19] 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.
- [20] Hu J, Song H, Addison J W, *et al.* Halonitromethane formation potentials in drinking waters [J]. *Water Research*, 2010, **44**(1): 105-114.
- [21] Suffet I H, Brenner L, Silver B. Identification of 1, 1, 1-trichloroacetone (1, 1, 1-trichloropropanone) in two drinking waters: a known precursor in haloform reaction [J]. *Environmental Science & Technology*, 1976, **10**(13): 1273-1275.
- [22] Norwood D L, Johnson J D, Christman R F, *et al.* Reactions of chlorine with selected aromatic models of aquatic humic material [J]. *Environmental Science & Technology*, 1980, **14**(2): 187-190.
- [23] Miller J W, Uden P C. Characterization of nonvolatile aqueous chlorination products of humic substances [J]. *Environmental Science & Technology*, 1983, **17**(3): 150-157.
- [24] Trehy M L, Bieber T I. *Advances in the identification & analysis of organic pollutants in water* [M]. Ann Arbor: Ann Arbor Science Publishers, 1981.
- [25] Holmbom B, Voss R H, Mortimer R D, *et al.* Fractionation, isolation and characterization of Ames-mutagenic compounds in kraft chlorination effluents [J]. *Environmental Science & Technology*, 1984, **18**(5): 333-337.
- [26] Hemming J, Holmbom B, Reunanan M, *et al.* Determination of the strong mutagen 3-chloro-4-(dichloromethyl)-5-hydroxy-2(5H)-furanone in chlorinated drinking and humic waters [J]. *Chemosphere*, 1986, **15**(5): 549-556.
- [27] Bond T, Huang J, Templeton M R, *et al.* Occurrence and control of nitrogenous disinfection by-products in drinking water-A review[J]. *Water Research*, 2011, **45**(15): 4341-4354.
- [28] Werdehoff K S, Singer P C. Chlorine dioxide effects on THMFP, TOXFP, and the formation of inorganic by-products[J]. *Journal-American Water Works Association*, 1987, **79**(9): 107-113.
- [29] Bolyard M, Fair P S, Hautman D P. Occurrence of chlorate in hypochlorite solutions used for drinking water disinfection [J]. *Environmental Science & Technology*, 1992, **26**(8): 1663-1665.
- [30] Krasner S W, Weinberg H S, Richardson S D, *et al.* Occurrence of a new generation of disinfection byproducts[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(23): 7175-7185.
- [31] Richardson S D, Thruston A D, Rav-Acha C, *et al.* Tribromopyrrole, brominated acids, and other disinfection

- byproducts produced by disinfection of drinking water rich in bromide[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37** (17): 3782-3793.
- [32] Zhao Y L, Qin F, Boyd J M, *et al.* Characterization and determination of chloro-and bromo-benzoquinones as new chlorination disinfection byproducts in drinking water [J]. *Analytical Chemistry*, 2010, **82**(11): 4599-4605.
- [33] 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.
- [34] Zhang D, Chu W H, Yu Y, *et al.* Occurrence and stability of chlorophenylacetonitriles: a new class of nitrogenous aromatic dbps in chlorinated and chloraminated drinking waters [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2018, **5**(6): 394-399.
- [35] 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**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116076.
- [36] Mian H R, Hu G J, 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.
- [37] 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.
- [38] Zhao Y L, Anichina J, Lu X F, *et al.* Occurrence and formation of chloro-and bromo-benzoquinones during drinking water disinfection [J]. *Water Research*, 2012, **46**(14): 4351-4360.
- [39] Ding H H, Meng L P, Zhang H F, *et al.* Occurrence, profiling and prioritization of halogenated disinfection by-products in drinking water of China [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2013, **15**(7): 1424-1429.
- [40] Chu W H, Gao N Y, Yin D Q, *et al.* Trace determination of 13 haloacetamides in drinking water using liquid chromatography triple quadrupole mass spectrometry with atmospheric pressure chemical ionization [J]. *Journal of Chromatography A*, 2012, **1235**: 178-181.
- [41] Wei J R, Ye B X, Wang W Y, *et al.* Spatial and temporal evaluations of disinfection by-products in drinking water distribution systems in Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(20): 4600-4606.
- [42] Chang H H, Tung H H, Chao C C, *et al.* Occurrence of haloacetic acids (HAAs) and trihalomethanes (THMs) in drinking water of Taiwan [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, **162**(1): 237-250.
- [43] Kosaka K, Ohkubo K, Akiba M. Occurrence and formation of haloacetamides from chlorination at water purification plants across Japan [J]. *Water Research*, 2016, **106**: 470-476.
- [44] Nakai T, Kosaka K, Asami M, *et al.* Analysis and occurrence of 2, 6-dichloro-1, 4-benzoquinone in drinking water by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Journal of Japan Society on Water Environment*, 2015, **38**(3): 67-73.
- [45] Kawamoto T, Makihata N. Distribution of bromine/chlorine-containing disinfection by-products in tap water from different water sources in the hyogo prefecture [J]. *Journal of Health Science*, 2004, **50**(3): 235-247.
- [46] Lee K J, Kim B H, Hong J E, *et al.* A study on the distribution of chlorination by-products (CBPs) in treated water in Korea [J]. *Water Research*, 2001, **35**(12): 2861-2872.
- [47] Zhang Y P, Martinez D, Collins C, *et al.* Modelling of haloacetic acid concentrations in a United Kingdom drinking water system [J]. *Journal of Water Supply Research and Technology-AQUA*, 2011, **60**(5): 275-285.
- [48] Bond T, Templeton M R, Kamal N H M, *et al.* Nitrogenous disinfection byproducts in English drinking water supply systems: occurrence, bromine substitution and correlation analysis [J]. *Water Research*, 2015, **85**: 85-94.
- [49] Goslan E H, Krasner S W, Bower M, *et al.* A comparison of disinfection by-products found in chlorinated and chloraminated drinking waters in Scotland [J]. *Water Research*, 2009, **43** (18): 4698-4706.
- [50] Villanueva C M, Castaño-Vinyals G, Moreno V, *et al.* Concentrations and correlations of disinfection by-products in municipal drinking water from an exposure assessment perspective [J]. *Environmental Research*, 2012, **114**: 1-11.
- [51] Samios S A, Golfinopoulos S K. Haloacetamides in the drinking water of Athens, Greece: Determination and degradation [J]. *Analytical Letters*, 2016, **49**(7): 1091-1101.
- [52] Chowdhury S, Rodríguez M J, Sadiq R. Disinfection byproducts in Canadian provinces: associated cancer risks and medical expenses [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **187**(1-3): 574-584.
- [53] Simpson K L, Hayes K P. Drinking water disinfection by-products: an Australian perspective [J]. *Water Research*, 1998, **32**(5): 1522-1528.
- [54] Hammami B, Ben Hessin S, Bahri M, *et al.* Assessment of haloacetic acids in drinking water in Bizerte, Tunisia [J]. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2014, **42**(8): 1052-1059.
- [55] Krasner S W, Mitch W A, McCurry D L, *et al.* Formation, precursors, control, and occurrence of nitrosamines in drinking water: a review [J]. *Water Research*, 2013, **47** (13): 4433-4450.
- [56] Singer P C, Pyne R D G, Ays M, *et al.* Examining the impact of aquifer storage and recovery on DBRs [J]. *Journal-American Water Works Association*, 1993, **85**(11): 85-94.
- [57] Watson K, Farré M J, Knight N. Strategies for the removal of halides from drinking water sources, and their applicability in disinfection by-product minimisation: a critical review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, **110**: 276-298.
- [58] Hua G H, Reckhow D A. Characterization of disinfection byproduct precursors based on hydrophobicity and molecular size [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41** (9): 3309-3315.
- [59] Dotson A, Westerhoff P, Krasner S W. Nitrogen enriched dissolved organic matter (DOM) isolates and their affinity to form emerging disinfection by-products [J]. *Water Science & Technology*, 2009, **60**(1): 135-143.
- [60] Chu W H, Gao N Y, Templeton M R, *et al.* Comparison of inclined plate sedimentation and dissolved air flotation for the minimisation of subsequent nitrogenous disinfection by-product formation [J]. *Chemosphere*, 2011, **83**(5): 647-651.
- [61] Tongchang P, Kumsuvan J, Phatthalung W N, *et al.* Reduction by enhanced coagulation of dissolved organic nitrogen as a precursor of *N*-nitrosodimethylamine [J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2018, **53**(6): 583-593.
- [62] Zhao Y M, Xiao F, Wang D S, *et al.* Disinfection byproduct

- precursor removal by enhanced coagulation and their distribution in chemical fractions [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(11): 2207-2213.
- [63] Camel V, Bermond A. The use of ozone and associated oxidation processes in drinking water treatment [J]. *Water Research*, 1998, **32**(11): 3208-3222.
- [64] Xie P C, Ma J, Fang J Y, *et al.* Comparison of permanganate preoxidation and preozonation on algae containing water: cell integrity, characteristics, and chlorinated disinfection byproduct formation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(24): 14051-14061.
- [65] 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.
- [66] Jiang Y J, Goodwill J E, Tobiasson J E, *et al.* Comparison of ferrate and ozone pre-oxidation on disinfection byproduct formation from chlorination and chloramination [J]. *Water Research*, 2019, **156**: 110-124.
- [67] Miklos D B, Remy C, Jekel M, *et al.* Evaluation of advanced oxidation processes for water and wastewater treatment-A critical review [J]. *Water Research*, 2018, **139**: 118-131.
- [68] Ike I A, Lee Y, Hur J. Impacts of advanced oxidation processes on disinfection byproducts from dissolved organic matter upon post-chlorination: a critical review [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, **375**, doi: 10.1016/j.cej.2019.121929.
- [69] Lamsal R, Walsh M E, Gagnon G A. Comparison of advanced oxidation processes for the removal of natural organic matter [J]. *Water Research*, 2011, **45**(10): 3263-3269.
- [70] Levchuk I, Rueda Márquez J J, Sillanpää M. Removal of natural organic matter (NOM) from water by ion exchange - A review [J]. *Chemosphere*, 2018, **192**: 90-104.
- [71] Bazri M M, Martijn B, Kroesbergen J, *et al.* Impact of anionic ion exchange resins on NOM fractions: Effect on N-DBPs and C-DBPs precursors [J]. *Chemosphere*, 2016, **144**: 1988-1995.
- [72] Gan X J, Karanfil T, Kaplan Bekaroglu S S, *et al.* The control of N-DBP and C-DBP precursors with MIEX® [J]. *Water Research*, 2013, **47**(3): 1344-1352.
- [73] 沈兆欢, 刘文君, 梁伟, 等. 淮安北京路净水厂 MIEX 树脂处理系统应用研究 [J]. *给水排水*, 2014, **50**(4): 38-42.
- Shen Z H, Liu W J, Liang W, *et al.* Study on the application of magnetic ion exchange resin system in Beijing road water treatment plant, Huaian City [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2014, **50**(4): 38-42.
- [74] 姜春杰. 磁性离子交换技术在淮安北京路水厂的应用 [J]. *中国给水排水*, 2014, **30**(16): 62-64, 67.
- Jiang C J. Application of magnetic ion exchange technique at Beijing road waterworks in Huaian City [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, **30**(16): 62-64, 67.
- [75] Ding S K, Deng Y, Bond T, *et al.* Disinfection byproduct formation during drinking water treatment and distribution: a review of unintended effects of engineering agents and materials [J]. *Water Research*, 2019, **160**: 313-329.
- [76] Summers R S, Benz M A, Shukairy H M, *et al.* Effect of separation processes on the formation of brominated THMs [J]. *Journal-American Water Works Association*, 1993, **85**(1): 88-95.
- [77] Jacangelo J G, Demarco J, Owen D M, *et al.* Selected processes for removing NOM: an overview [J]. *Journal-American Water Works Association*, 1995, **87**(1): 64-77.
- [78] Chili C A, Westerhoff P, Ghosh A. GAC removal of organic nitrogen and other DBP precursors [J]. *Journal-American Water Works Association*, 2012, **104**(7): E406-E415.
- [79] Krasner S W, Lee T C F, Westerhoff P, *et al.* Granular activated carbon treatment may result in higher predicted genotoxicity in the presence of bromide [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(17): 9583-9591.
- [80] Cuthbertson A A, Kimura S Y, Liberatore H K, *et al.* Does granular activated carbon with chlorination produce safer drinking water? From disinfection byproducts and total organic halogen to calculated toxicity [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(10): 5987-5999.
- [81] Zhang R H, Wang F F, Chu W H, *et al.* Microbial degradation of typical amino acids and its impact on the formation of trihalomethanes, haloacetonitriles and haloacetamides during chlor(am)ination [J]. *Water Research*, 2019, **159**: 55-64.
- [82] Bei E, Li X, Wu F H, *et al.* Formation of *N*-nitrosodimethylamine precursors through the microbiological metabolism of nitrogenous substrates in water [J]. *Water Research*, 2020, **183**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116055.
- [83] Liu C, Olivares C I, Pinto A J, *et al.* The control of disinfection byproducts and their precursors in biologically active filtration processes [J]. *Water Research*, 2017, **124**: 630-653.
- [84] Ates N, Yilmaz L, Kitis M, *et al.* Removal of disinfection byproduct precursors by UF and NF membranes in low-SUVA waters [J]. *Journal of Membrane Science*, 2009, **328**(1-2): 104-112.
- [85] Ersan M S, Ladner D A, Karanfil T. The control of *N*-nitrosodimethylamine, Halonitromethane, and Trihalomethane precursors by Nanofiltration [J]. *Water Research*, 2016, **105**: 274-281.
- [86] Hu J L, Chu W H, Sui M H, *et al.* Comparison of drinking water treatment processes combinations for the minimization of subsequent disinfection by-products formation during chlorination and chloramination [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, **335**: 352-361.
- [87] Andersson A, Lavonen E, Harir M, *et al.* Selective removal of natural organic matter during drinking water production changes the composition of disinfection by-products [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2020, **6**(3): 779-794.
- [88] Ye T, Xu B, Lin Y L, *et al.* Formation of iodinated disinfection by-products during oxidation of iodide-containing waters with chlorine dioxide [J]. *Water Research*, 2013, **47**(9): 3006-3014.
- [89] Shah A D, Mitch W A. Halonitroalkanes, halonitriles, haloamides, and *N*-nitrosamines: a critical review of nitrogenous disinfection byproduct formation pathways [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(1): 119-131.
- [90] Krasner S W, Mitch W A, Westerhoff P, *et al.* Formation and control of emerging C- and N-DBPs in drinking water [J]. *Journal-American Water Works Association*, 2012, **104**(11): E582-E595.
- [91] Liang L, Singer P C. Factors influencing the formation and relative distribution of haloacetic acids and trihalomethanes in drinking water [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(13): 2920-2928.
- [92] Ding S K, Chu W H, Krasner S W, *et al.* The stability of chlorinated, brominated, and iodinated haloacetamides in drinking water [J]. *Water Research*, 2018, **142**: 490-500.
- [93] Yu Y, Reckhow D A. Kinetic analysis of haloacetonitrile stability

- in drinking waters [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(18): 11028-11036.
- [94] Ma S C, Guo X Q, Chen B Y. Toward better understanding of chloral hydrate stability in water: Kinetics, pathways, and influencing factors [J]. *Chemosphere*, 2016, **157**: 18-24.
- [95] Hua G H, Reckhow D A. DBP formation during chlorination and chloramination; effect of reaction time, pH, dosage, and temperature [J]. *Journal-American Water Works Association*, 2008, **100**(8): 82-95.
- [96] Hong H C, Xiong Y J, Ruan M Y, *et al.* Factors affecting THMs, HAAs and HNMs formation of Jin Lan Reservoir water exposed to chlorine and monochloramine [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **444**: 196-204.
- [97] Health Canada. Guidelines for Canadian drinking water quality—Summary Table [M]. Ottawa: Water and Air Quality Bureau, Healthy Environments and Consumer Safety Branch, 2019.
- [98] 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.
- [99] Jiang J Y, Zhang X R. A smart strategy for controlling disinfection byproducts by reversing the sequence of activated carbon adsorption and chlorine disinfection [J]. *Science Bulletin*, 2018, **63**(18): 1167-1169.
- [100] Jiang J Y, Li W X, Zhang X R, *et al.* A new approach to controlling halogenated DBPs by GAC adsorption of aromatic intermediates from chlorine disinfection; effects of bromide and contact time [J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, **203**: 260-267.
- [101] 陈超, 张晓健, 朱玲侠, 等. 控制消毒副产物及前体物的优化工艺组合 [J]. *环境科学*, 2005, **26**(4): 87-94.
Chen C, Zhang X J, Zhu L X, *et al.* Optimal process combination for control of disinfection by-products and precursors [J]. *Environmental Science*, 2005, **26**(4): 87-94.
- [102] Rossum J R. A proposed mechanism for breakpoint chlorination [J]. *Journal-American Water Works Association*, 1943, **35**(11): 1446-1449.
- [103] Amy G L, Chadik P A, King P H, *et al.* Chlorine utilization during trihalomethane formation in the presence of ammonia and bromide [J]. *Environmental Science & Technology*, 1984, **18**(10): 781-786.
- [104] Charrois J W A, Hrudey S E. Breakpoint chlorination and free-chlorine contact time; Implications for drinking water *N*-nitrosodimethylamine concentrations [J]. *Water Research*, 2007, **41**(3): 674-682.
- [105] Park S H, Padhye L P, Wang P, *et al.* *N*-nitrosodimethylamine (NDMA) formation potential of amine-based water treatment polymers; effects of in situ chloramination, breakpoint chlorination, and pre-oxidation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, **282**: 133-140.
- [106] Liu Z, Lin Y Y, Xu B, *et al.* Formation of iodinated trihalomethanes during breakpoint chlorination of iodide-containing water [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, **353**: 505-513.
- [107] Hayes-Larson E L, Mitch W A. Influence of the method of reagent addition on dichloroacetonitrile formation during chloramination [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(2): 700-706.
- [108] Jones D B, Saglam A, Triger A, *et al.* I-THM formation and speciation; preformed monochloramine versus prechlorination followed by ammonia addition [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(24): 10429-10437.
- [109] Fang C, Krasner S W, Chu W, *et al.* Formation and speciation of chlorinated, brominated, and iodinated haloacetamides in chloraminated iodide-containing waters [J]. *Water Research*, 2018, **145**: 103-112.
- [110] Schreiber I M, Mitch W A. Influence of the order of reagent addition on NDMA formation during chloramination [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(10): 3811-3818.
- [111] Zeng T, Mitch W A. Impact of nitrification on the formation of *N*-nitrosamines and halogenated disinfection byproducts within distribution system storage facilities [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(6): 2964-2973.
- [112] Levesque S, Rodriguez M J, Serodes J, *et al.* Effects of indoor drinking water handling on trihalomethanes and haloacetic acids [J]. *Water Research*, 2006, **40**(15): 2921-2930.
- [113] Yang W, Dong L L, Luo Z, *et al.* Application of ultrasound and quartz sand for the removal of disinfection byproducts from drinking water [J]. *Chemosphere*, 2014, **101**: 34-40.
- [114] 甘轶群. 家庭常用设备对饮用水中卤代甲烷的去除研究 [D]. 深圳: 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 2015.
Gan Y Q. A research of household methods for halomethane treatment in drinking water [D]. Shenzhen: Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, 2015.
- [115] 王立伟. 家庭常用设备对水中卤代乙酸的去除研究 [D]. 深圳: 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 2015.
Wang L W. An evaluation of household methods for haloacetic acids treatment in water [D]. Shenzhen: Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, 2015.
- [116] Hua G H, Reckhow D A. Hydrophobicity and molecular size distribution of unknown TOX in drinking water [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2008, **134**(3): 152-160.
- [117] Zazouli M A, Kalankesh L R. Removal of precursors and disinfection by-products (DBPs) by membrane filtration from water; a review [J]. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 2017, **15**, doi: 10.1186/s40201-017-0285-z.
- [118] Fujioka T, Khan S J, McDonald J A, *et al.* *N*-nitrosamine rejection by nanofiltration and reverse osmosis membranes; the importance of membrane characteristics [J]. *Desalination*, 2013, **316**: 67-75.
- [119] Wang L, Sun Y N, Chen B Y. Rejection of haloacetic acids in water by multi-stage reverse osmosis; Efficiency, mechanisms, and influencing factors [J]. *Water Research*, 2018, **144**: 383-392.
- [120] Weinberg H S, Pereira V R P J, Singer P C, *et al.* Considerations for improving the accuracy of exposure to disinfection by-products by ingestion in epidemiologic studies [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **354**(1): 35-42.
- [121] 顾昕, 翟洪艳, 柏慧. 饮用水中三卤甲烷健康风险和净水器净化能力评价 [J]. *中国给水排水*, 2020, **36**(13): 31-37.
Gu X, Zhai H Y, Bai H. Health risk assessment of trihalomethanes in drinking water and purification efficiency of water purifiers [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, **36**(13): 31-37.
- [122] Sedlak D L. The unintended consequences of the reverse osmosis revolution [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(8): 3999-4000.

- [123] Wu W W, Benjamin M M, Korshin G V. Effects of thermal treatment on halogenated disinfection by-products in drinking water[J]. *Water Research*, 2001, **35**(15): 3545-3550.
- [124] Krasner S W, Wright J M. The effect of boiling water on disinfection by-product exposure[J]. *Water Research*, 2005, **39**(5): 855-864.
- [125] Xiao R, Duan Y L, Chu W H. The effectiveness of household water treatment and safe storage in improving drinking water quality: a disinfection by-product (DBP) perspective [J]. *Journal of Water Supply Research and Technology-AQUA*, 2020, **69**(8): 785-806.
- [126] US EPA. Treatment techniques for controlling trihalomethanes in drinking water[M]. Washington, DC: Office of Research and Development, 1981.
- [127] Brooke E, Collins M R. Posttreatment aeration to reduce THMs [J]. *Journal-American Water Works Association*, 2011, **103**(10): 84-96.
- [128] Wang L, Niu R L, Chen B Y, *et al.* A comparison of photodegradation kinetics, mechanisms, and products between chlorinated and brominated/iodinated haloacetic acids in water [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, **330**: 1326-1333.
- [129] Zhang Y Q, Xiao Y J, Zhang Y C, *et al.* UV direct photolysis of halogenated disinfection byproducts: experimental study and QSAR modeling[J]. *Chemosphere*, 2019, **235**: 719-725.
- [130] Chuang Y H, Parker K M, Mitch W A. Development of predictive models for the degradation of halogenated disinfection byproducts during the UV/H₂O₂ advanced oxidation process [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(20): 11209-11217.
- [131] Chowdhury P, Viraraghavan T. Sonochemical degradation of chlorinated organic compounds, phenolic compounds and organic dyes-a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(8): 2474-2492.
- [132] Guo Z B, Gu C H, Zheng Z, *et al.* Sonodegradation of halomethane mixtures in chlorinated drinking water [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2006, **13**(6): 487-492.
- [133] Zhou C, Gao N Y, Deng Y, *et al.* Factors affecting ultraviolet irradiation/hydrogen peroxide(UV/H₂O₂) degradation of mixed N-nitrosamines in water[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **231-232**: 43-48.
- [134] Chen Z, Fang J Y, Fan C, *et al.* Oxidative degradation of N-Nitrosopyrrolidine by the ozone/UV process: Kinetics and pathways[J]. *Chemosphere*, 2016, **150**: 731-739.
- [135] Hou S D, Ling L, Shang C, *et al.* Degradation kinetics and pathways of haloacetonitriles by the UV/persulfate process[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, **320**: 478-484.
- [136] Ling L, Sun J L, Fang J Y, *et al.* Kinetics and mechanisms of degradation of chloroacetonitriles by the UV/H₂O₂ process[J]. *Water Research*, 2016, **99**: 209-215.
- [137] Gillham R W, O'Hannesin S F. Enhanced degradation of halogenated aliphatics by zero-valent iron [J]. *Groundwater*, 1994, **32**(6): 958-967.
- [138] Xie L, Shang C. Effects of copper and palladium on the reduction of bromate by Fe(0)[J]. *Chemosphere*, 2006, **64**(6): 919-930.
- [139] Chu W H, Li X, Bond T, *et al.* Copper increases reductive dehalogenation of haloacetamides by zero-valent iron in drinking water; reduction efficiency and integrated toxicity risk [J]. *Water Research*, 2016, **107**: 141-150.
- [140] Chen H F, Cao Y, Wei E Z, *et al.* Facile synthesis of graphene nano zero-valent iron composites and their efficient removal of trichloronitromethane from drinking water [J]. *Chemosphere*, 2016, **146**: 32-39.
- [141] Zha X S, Ma L M, Liu Y. Reductive dehalogenation of brominated disinfection byproducts by iron based bimetallic systems[J]. *RSC Advances*, 2016, **6**(20): 16323-16330.
- [142] Chen S H, Chu W H, Wei H B, *et al.* Reductive dechlorination of haloacetamides in drinking water by Cu/Fe bimetal [J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, **203**: 226-232.
- [143] Chen S H, Wang F F, Chu W H, *et al.* Weak magnetic field accelerates chloroacetamide removal by zero-valent iron in drinking water[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, **358**: 40-47.
- [144] Ding S K, Wang F F, Chu W H, *et al.* Rapid degradation of brominated and iodinated haloacetamides with sulfite in drinking water; Degradation kinetics and mechanisms [J]. *Water Research*, 2018, **143**: 325-333.
- [145] Croue J P, Reckhow D A. Destruction of chlorination byproducts with sulfite [J]. *Environmental Science & Technology*, 1989, **23**(11): 1412-1419.
- [146] WHO. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum[M]. Geneva: WHO, 2017.
- [147] 伏芝萱, 郭迎庆, 楚文海. 紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2271-2277.
- Fu Z X, Guo Y Q, Chu W H. Removal efficiency of trichloroacetamide by UV/sodium sulfite [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2271-2277.
- [148] Xiao Q, Yu S L, Li L, *et al.* An overview of advanced reduction processes for bromate removal from drinking water: reducing agents, activation methods, applications and mechanisms[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, **324**: 230-240.
- [149] Radjenovic J, Sedlak D L. Challenges and opportunities for electrochemical processes as next-generation technologies for the treatment of contaminated water[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(19): 11292-11302.
- [150] Zhang M, Shi Q, Song X Z, *et al.* Recent electrochemical methods in electrochemical degradation of halogenated organics: a review[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(11): 10457-10486.
- [151] Li A Z, Zhao X, Hou Y N, *et al.* The electrocatalytic dechlorination of chloroacetic acids at electrodeposited Pd/Fe-modified carbon paper electrode [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2012, **111-112**: 628-635.
- [152] Li Y Q, Kemper J M, Datuin G, *et al.* Reductive dehalogenation of disinfection byproducts by an activated carbon-based electrode system[J]. *Water Research*, 2016, **98**: 354-362.
- [153] Ding S K, Wang F F, Chu W H, *et al.* Using UV/H₂O₂ pre-oxidation combined with an optimised disinfection scenario to control CX₃R-type disinfection by-product formation[J]. *Water Research*, 2019, **167**, doi: 10.1016/j.watres.2019.115096.
- [154] Chu W H, Li D M, Gao N Y, *et al.* Method for controlling chlorinated nitrogen-containing disinfection by-product in water [P]. United States: US 10723644B2, 2020-07-28.

CONTENTS

Disinfection By-products in Drinking Water and Their Control Strategies; A Review	CHU Wen-hai, XIAO Rong, DING Shun-ke, <i>et al.</i>	(5059)
Advances in Mechanism and Influencing Factors Affecting Hydrogen Sulfide Adsorption by Biochar	XU Qi-yong, LIANG Ming-shen, XU Wen-jun, <i>et al.</i>	(5086)
Effect of Vegetation Coverage on the Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentration in China's Eight Major Economic Regions from 1998 to 2016	YANG Yu-lian, YANG Kun, LUO Yi, <i>et al.</i>	(5100)
Evolution and Potential Source Apportionment of Atmospheric Pollutants of Two Heavy Haze Episodes During the COVID-19 Lockdown in Beijing, China	ZHAO De-long, TIAN Ping, ZHOU Wei, <i>et al.</i>	(5109)
Characteristics and Origin Analysis of Air Pollution During the Spring Festival in Linfen, Fenwei Plain	LIU Wei-jie, HU Tian-peng, MAO Yao, <i>et al.</i>	(5122)
Spatio-Temporal Characteristics and Potential Source Areas of Seasonal Atmospheric Pollution in Shijiazhuang	NIE Sai-sai, WANG Shuai, CUI Jian-sheng, <i>et al.</i>	(5131)
Impact of Air Humidity on PM _{2.5} Mass Concentration and Visibility During Winter in Tianjin	DING Jing, TANG Ying-xiao, HAO Tian-yi, <i>et al.</i>	(5143)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, WANG Shuai, <i>et al.</i>	(5152)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory from Domestic Sources in China	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SHEN Guo-feng, <i>et al.</i>	(5162)
Characteristics of Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China from 2011 to 2019	LIU Rui-yuan, ZHONG Mei-fang, ZHAO Xiao-ya, <i>et al.</i>	(5169)
VOCs Emission Inventory and Uncertainty Analysis of Industry in Qingdao Based on Latin Hypercube Sampling and Monte Carlo Method	XU Wan-ying, FU Fei, LÜ Jian-hua, <i>et al.</i>	(5180)
Emission Characteristics and Environment Impacts of VOCs from Typical Rubber Manufacture	WANG Hai-lin, XIN Guo-xing, ZHU Li-min, <i>et al.</i>	(5193)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Different Functional Zones of Shenyang, China	KU Ying-ying, REN Wan-hui, SU Cong-cong, <i>et al.</i>	(5201)
Characteristics of BTEX and Health Risk Assessment During Typical Pollution Episodes in Summer and Winter in Tianjin Urban Area	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, PU Wei-wei, <i>et al.</i>	(5210)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Analysis of the Driving Force in Zhengzhou City	JI Yao, WANG Chen, LU Xuan, <i>et al.</i>	(5220)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of O ₃ Concentrations Based on GAMs Model in Chengdu	ZHANG Ying, NI Chang-jian, FENG Xin-yuan, <i>et al.</i>	(5228)
Spatial Variation Characteristics and Remote Sensing Retrieval of Total Suspended Matter in Surface Water of the Yangtze River	LI Jian-hong, HUANG Chang-chun, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(5239)
Spatial Distribution Characteristics of the Spectrum, Source Analysis, and Nitrogen Response of Dissolved Organic Matter in Summer Rainfall in the Hebei Province	ZHANG Zi-wei, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i>	(5250)
Distribution and Influencing Factors of DOM Components in Urban and Suburban Polluted Rivers	ZHU Yi, CHEN Hao, DING Guo-ping, <i>et al.</i>	(5264)
Composition and Distribution of Microplastics in the Water and Sediments of Urban Rivers in Beijing	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Di, <i>et al.</i>	(5275)
Nontarget Screening and Ecological Risk Assessment of Polar Organic Pollutants in Surface Water on the West Bank of Taihu Lake	LU Xin-yan, WANG Fei, ZHANG Li-min, <i>et al.</i>	(5284)
Optimization of Extraction Methods and Distribution Characteristics of Antibiotics and Metabolites in Sediments of a River Water-Groundwater Interaction Zone	LI Yu-qiong, TONG Lei, YAN Han, <i>et al.</i>	(5294)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Desilting Demonstration Area in Baiyangdian Lake	WANG Tong-fei, ZHANG Wei-jun, LI Li-qing, <i>et al.</i>	(5303)
Dynamic Mechanisms of Groundwater Quality by Residual Contaminants of the Tanghe Wastewater Reservoir in Xiong'an New Area	ZHANG Zhi-xiong, WANG Shi-qin, ZHANG Yi-zhang, <i>et al.</i>	(5312)
Analysis and Prediction of Health Risk from Heavy Metals in Drinking Water Sources Based on Time Series Model	JI Chao, HOU Da-wei, XIE Li, <i>et al.</i>	(5322)
Spatial Distribution, Risk, and Influencing Factors of River Water-Sediment Heavy Metals in the Lower Reaches of the Qianhe River	GAO Yu, WANG Guo-lan, JIN Zi-han, <i>et al.</i>	(5333)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake Basin During the Wet Season	HE Miao, LIU Gui-jian, WU Lei, <i>et al.</i>	(5346)
Impact of Enclosure Culture on Heavy Metal Content in Surface Sediments of Hongze Lake and Ecological Risk Assessment	ZI Xin-yuan, ZHANG Ming, GU Xiao-hong, <i>et al.</i>	(5355)
Natural Water Chemistry Change in the Surface Water of Chengdu and Impact Factors	XU Qiu-jin, LAI Cheng-yue, DING Yao, <i>et al.</i>	(5364)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Groundwater in the Leizhou Peninsula	PENG Hong-xia, HOU Qing-qin, ZENG Min, <i>et al.</i>	(5375)
Land-based Nitrogen Pollution Source Structure and Spatial Distribution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DONG Si-qi, HUANG Chong, <i>et al.</i>	(5384)
Output Characteristics of Nitrogen and Phosphorus from Non-Point Source Pollution of Typical Land Use in a Micro-Watershed in Hilly Red Soil Region	FANG Zhi-da, SU Jing-jun, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i>	(5394)
Effects of Different Fertilization Patterns on Nitrogen Leaching Loss from Paddy Fields Under Reduced Nitrogen	JIANG Hai-bin, ZHANG Ke-qiang, ZOU Hong-tao, <i>et al.</i>	(5405)
Effects of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil Phosphorus Forms in the Jiaozhou Bay Wetland	SHA Meng-qiao, CHAI Na, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i>	(5414)
Contrasting Analysis of Microbial Community Composition in the Water and Sediments of the North Canal Based on 16S rRNA High-Throughput Sequencing	PENG Ke, DONG Zhi, DI Yan-ming, <i>et al.</i>	(5424)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution by Si-modified Peanut Shell Biochar	ZHAO Min, ZHANG Xiao-ping, WANG Liang-rong, <i>et al.</i>	(5433)
Adsorption Characteristics of Pb(II) on Eucalyptus Biochar Modified by Potassium Permanganate	MO Zhen-lin, ZENG Hong-hu, LIN Hua, <i>et al.</i>	(5440)
Preparation of Mixed Metal Oxide/Carbon Composites and Its Adsorption Performance for Pb(II)	LU Yu-shen, ZONG Li, YU Hui, <i>et al.</i>	(5450)
Fabrication of Supported Titanium Xerogel Adsorbent and Performance Evaluation for Arsenite Removal	SUN Ye-yang, ZHOU Chang, GAN Yong-hai, <i>et al.</i>	(5460)
Nitrite Regulation During Start-up of Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	ZUO Fu-min, ZHENG Rui, SUI Qian-wen, <i>et al.</i>	(5472)
Effects of Biochar and Straw Return on Soil Aggregate and Organic Carbon on Purple Soil Dry Slope Land	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i>	(5481)
Response of Soil Organic Carbon Content in Different Slope Positions to Fertilization Management in Purple Soil Sloping Fields	XU Man, YU Luo, WANG Fu-hua, <i>et al.</i>	(5491)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	LAI Shu-ya, DONG Qiu-yao, SONG Chao, <i>et al.</i>	(5500)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Suburban Farmland Soil	ZHANG Xiu-xiu, LU Xiao-li, WEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(5510)
Accumulation Characteristics and Dietary Exposure Estimation of Heavy Metals in Vegetables from the Eastern Coastal Region of China	SUN Shuai, GENG Ning-bo, GUO Cui-cui, <i>et al.</i>	(5519)
Security Risk and Influencing Factors of Agro-Products in Farmland Soil Around a Typical Mining Smelter	HUO Yan-hui, WANG Mei-e, XIE Tian, <i>et al.</i>	(5526)
Cd Pollution and Safe Planting Zoning in Paddy Soils: A Case Study in a District of Chongqing	CAO Shu-zhen, MU Yue, CUI Jing-xin, <i>et al.</i>	(5535)
Characteristics and Influencing Factors of Cadmium Accumulation in Different Rice Varieties Under Cadmium Contaminated Field Conditions	WANG Yu-hao, YANG Li, KANG Yu-chen, <i>et al.</i>	(5545)
Effects of Nano-membrane on Aerobic Composting Process and Odor Emission of Livestock Manure	LI Yong-shuang, SUN Bo, CHEN Ju-hong, <i>et al.</i>	(5554)