

净水技术前沿与热点综述

袁焯玥, 肖玉冰, 欧子旋, 等. 我国典型水源地 N-DBPs 生成势及生态风险评价[J]. 净水技术, 2024, 43(2): 7-16, 125.

YUAN X Y, XIAO Y B, OU Z X, et al. Formation potential of N-DBPs and assessment of ecological risks in typical water sources at home[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(2): 7-16, 125.

我国典型水源地 N-DBPs 生成势及生态风险评价

袁焯玥^{1,2}, 肖玉冰³, 欧子旋², 冯 骞^{1,2,*}

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 河海大学环境学院, 江苏南京 210098; 3. 第一工程代建管理办公室, 江苏南京 210003)

摘要 随着含氮消毒副产物(N-DBPs)的基因毒性和细胞毒性受到重视, 饮用水中的 N-DBPs 产生和生态风险的研究成为近年的关注热点。文章基于前人研究分析, 研究了我国典型水源地中 N-DBPs 生成势的空间分布特征, 采用风险熵值法, 对我国典型水源地 N-DBPs 的潜在生成生态风险进行了评估, 还关注了有机物指标与 N-DBPs 生成势之间的关系。结果表明: DON 与 N-DBPs 生成势的分布特点均存在地域差异, 总体表现为在东部沿海城市呈现南北高、中部低、东部地区高于其他地区、经济发达地区高于其他地区、珠三角地区高于其他地区的特点。结合生态风险的评价方法, 利用现有数据进行初步估计, 发现部分城市水源地生态风险呈现低风险, 水库水源 N-DBPs 的生态风险一般高于河流水源。UV₂₅₄ 与 N-DBPs 生成势相关性较好, 可以作为 N-DBPs 生成势的替代性指标。研究结果将为做好我国水源地的修复与保护、保障居民饮水安全提供重要的支撑。

关键词 含氮消毒副产物(N-DBPs) 水源地 含氮有机物 空间分布 UV₂₅₄

中图分类号: X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2024)02-0007-11

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.02.002

Formation Potential of N-DBPs and Assessment of Ecological Risks in Typical Water Sources at Home

YUAN Xinyue^{1,2}, XIAO Yubing³, OU Zixuan², FENG Qian^{1,2,*}

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. The First Construction Management Agency, Nanjing 210003, China)

Abstract With paying more attention to the genotoxicity and cytotoxicity of nitrogen-containing disinfection by-products (N-DBPs), the research on the ecological risk of the generation and control of N-DBPs in drinking water has become a hot spot of concern in recent years. Based on the analysis of previous research, the spatial distribution characteristics of N-DBPs in typical water sources is studied at home, and evaluate the potential ecological risk of N-DBPs in typical water sources at home by using the method of risk quotient, and also focus on the relationship between organic index and N-DBPs. The results show that there were regional differences in the distribution characteristics of DON and N-DBPs, which are generally characterized by high in the north and south, low central, higher in the eastern region, higher in the economically developed region and higher in the Pearl River Delta region in the eastern coastal cities. Combined with the evaluation method of ecological risk, using the existing data to make a preliminary estimation, it is found that

[收稿日期] 2022-12-20

[基金项目] 国家自然科学基金(51978238)

[作者简介] 袁焯玥(2000—), 女, 研究方向为水源地保护及污水资源化利用, E-mail: 1798907745@qq.com。

[通信作者] 冯骞, 研究方向为水动力及污水资源化利用, E-mail: xiaofq@hhu.edu.cn。

the ecological risk of some urban water sources presents low risk, and the ecological risk of reservoir water source N-DBPs is generally higher than that of river water source. UV_{254} had a good correlation with the potential of N-DBPs, and can be used as an alternative index of the potential of N-DBPs. The research results can provide important support for the good restoration and protection of water sources at home and ensure the safety of drinking water.

Keywords nitrogenous disinfection by-products (N-DBPs) water source nitrogenous organic matter spatial distribution UV_{254}

消毒副产物(disinfection byproducts, DBPs)是生活饮用水消毒过程中消毒剂与原水中某些有机物发生化学反应所产生的有毒、有害物质。自 1974 年,荷兰科学家 Rook 首次发现氯消毒会产生对人体有害的三卤甲烷(trihalomethanes, THMs)以来,各类 DBPs 的生成和控制因其对饮水安全和生态风险的重要意义,在饮用水处理中得到了越来越多的重视^[1-2]。根据 DBPs 结构中是否含 N, DBPs 可分为含氮消毒副产物(N-DBPs)和含碳消毒副产物(C-DBPs, 只含 C 而不含 N)。与发现较早、研究较多的 THMs、卤乙酸(haloacetic acids, HAAs)等 C-DBPs 相比,以二氯乙腈(dichloroacetonitrile, DCAN)和二氯乙酰胺(dichloroacetamide, DCAcAm)等为代表的 N-DBPs, 由于毒性更强、致癌性更高、基因诱变性更大^[3-11], 近年来在饮用水领域得到了更多的关注。目前,国内外对饮用水中 N-DBPs 的研究正处于快速发展阶段^[2], 已有研究多围绕各类 N-DBPs 的形成、危害和控制, 考察 N-DBPs 生成势在饮用水处理中不同单元的演变与归趋, 但在水源地中 N-DBPs 的生成潜力、生态风险方面, 相关成果十分有限^[1]。

尽管各级政府投入了大量的资金, 建设了一系列水源地保护工程, 也取得了一定的成效。但这些水源地保护项目, 多数仍以常规的有机物、N、P 等水质指标为依据, 考察评价水源地水质改善状况。对于我国不同水源地中 N-DBPs 前体物 DON 的分布、N-DBPs 的潜在生成能力、基于 N-DBPs 潜在生成能力的生态风险以及围绕 N-DBPs 生态风险控制该如何开展水源地保护工作等关键问题, 仍然缺乏较为清晰的理解和认识。

考虑到 N-DBPs 在饮用水安全保障中的重要作用, 本文从保障饮水工程水源地安全, 控制水源地生态风险的角度出发, 综述了饮用水中典型 N-DBPs 的类型和生成途径, 分析了全国典型水源地中 N-DBPs 生成势的分布, 在此基础上探讨并总结了水源地中 N-DBPs 生成势与常规之间的相关性, 为水

源地的保护和建设提供重要的支撑。

1 N-DBPs 的类型、来源与生成途径

1.1 分类及其危害

目前, 饮用水中研究的 N-DBPs 主要涉及卤乙腈(haloacetonitriles, HANs)、卤代乙酰胺(HAcAms)、卤代硝基甲烷(halonitromethanes, HNMs)和亚硝胺(nitrosamines, NAs)4类^[8, 12-13]。4类典型 N-DBPs 的性质及毒性如表 1 所示^[6, 9-10, 14-28]。

翟家欣等^[29]、Muellner 等^[30]发现, HAcAms 和 HNMs 等 N-DBPs 比常规的 THMs 和 HAAs 更具细胞毒性和基因毒性; DBAN 对人类终生致癌风险是 THMs 的 3~10 倍; 而 DCAN 及其代谢物能穿过胎盘并在小鼠胎儿脑组织中积累, 诱导氧化应激和神经凋亡。有关 NAs 的细胞毒性和基因毒性近年来也逐渐被关注。

1.2 来源与生成途径

普遍认同的观点^[31-34]表明, 动植物躯体的分解和水中藻类、微生物的代谢产生的腐植酸等有机物是 N-DBPs 的主要前体物。调查^[35-38]发现, 长三角地区的水资源中大多数样本中微囊藻毒素浓度过高, 同时它也是氯化消毒过程中 N-DBPs 的重要来源。部分研究^[39-41]也表明, 污水处理厂排放的废水也是水系统中 DBPs 的重要来源。长江原水的调查^[42]发现, 分子量小于 1 kDa 和大于 10 kDa 且具有疏水性、极性和非正电的有机物是饮用水中生成 N-DBPs 主要的前体物。

4类典型 N-DBPs 的生成途径各不相同。翟家欣等^[29]、蒋柱武等^[43]提出 N-DBPs 中 HANs 的生成主要有脱羧途径和醛途径两种。脱羧途径的产物中的 N 来源于含 N 有机物。醛途径的前体物可以是脱羧反应的产物, 也可以是含 N 有机物或不含 N 的有机物, 还可以是醛类。醛途径中的 N 来源于氯胺, 产物中会有二氧化碳。因此, 用氯胺消毒会促进醛途径的进行, 可能产生更多的 HANs。含 N 有机物是 HNMs 的主要前体物。通常情况下, 氯化消毒的 HNMs 生成量高于氯胺消毒。HAcAms 的前体物

表 1 N-DBPs 分类及性质
Tab. 1 Classification and Properties of N-DBPs

N-DBPs	特性	毒性	参考文献
HANs	以一碳、二碳 HANs 为主,一碳主要为 HANs,二碳主要为 DCAN,分子量小,化学性质稳定,去除困难	致畸、致突变性极强,最低中毒质量浓度可以低至 1.00×10^{-6} $\mu\text{g/L}$,可以诱导沙门氏菌基因突变、诱发哺乳动物染色体变异,致癌能力强于三氯甲烷近万倍,其中,DCAN 在水体中生成量最大,二溴乙腈 (DBAN) 的细胞毒性和遗传毒性最大	[6, 9-10, 14-16]
HAcAms	分子较小,易溶于水,具有很强的极性和亲水性,氢与酰胺基的结合非常牢固,较为稳定,且难以挥发,且在酸性或碱性条件下易发生水解	在所有已知的 DBPs 中,细胞毒性最高,是常规 DBPs 中 HAAs 的 99 倍,遗传毒性居第二,仅次于 HANs,是 HAAs 遗传毒性的 19 倍,同时溴代乙酰胺通常比氯代乙酰胺具有更高的细胞毒性和基因毒性	[17-19]
HNMs	有 9 种物质,分别是一氯硝基甲烷、二氯硝基甲烷、三氯硝基甲烷、一溴硝基甲烷、二溴硝基甲烷、三溴硝基甲烷、一溴一氯硝基甲烷、一溴二氯硝基甲烷和二溴一氯硝基甲烷;容易受热分解;在常温常压下具有较好的稳定性和弱亲核性	9 种 HNMs 物质都会对中国仓鼠卵巢细胞中的 DNA 造成严重的破坏;因其具有强烈的致突变性,已被美国环境保护署列入优先控制 DBPs 的最高等级	[20-23]
NAs	是一类复杂的物质,通常在水中 NAs 含量很低;国际癌症研究机构 (IARC) 将 NAs 归类为具有强致癌性的物质	环境中已检测到近 300 种 NAs,证实其中 80%~90% 具有致癌、致畸和致突变毒性,且毒性与化学结构密切相关,即脂肪链越短,致癌风险越大	[24-28]

是 HANs、HANs 生成的中间产物,以及 HANs 生成的醛类和丙烯酰胺等。作为生成 DCAcAm 的主要途径,水中溶解性有机氮 (dissolved organic nitrogen, DON) 含量越高,HAcAms 生成量越大。NAs 的前体物主要为氯胺和有机胺前体物。研究^[26]表明,NAs 的亚硝基主要来源于氯胺。可以猜测,氯胺的存在有利于 HANs 和 HAcAms 的产生,氯消毒将有利于 HNMs 的产生,这一猜测与 Zhang 等^[44]、Xie 等^[45] 的结果一致。

2 N-DBPs 生成势在典型水源地的分布

2.1 DON 分布

DON 被认为是水源中最为广泛的 N-DBPs 前体物^[46],与饮用水中 N-DBPs 的产生关系密切。笔者通过相关文献^[40-52] 调研,整理了我国部分城市水源水中 DON 的浓度 (表 2)。全国水源水中 DON 质量浓度总体在 0~0.848 mg/L, DON 的浓度分布总体上呈现西部低、东部高的特点,与人口分布的特点有较高的相似性。西部地区如西藏、云南等地,由于人口相对东部较少、工业企业分布相对较稀疏等,水源水中 DON 浓度较低,大部分水域 DON 质量浓度在 0.5 mg/L 以下。东部沿海地区如江苏、上海、福建、广东等省份人口分布相对集中,生活污水排放量较大,工业企业沿江河湖分布较密集,水源水中 DON 浓度普遍较高。

珠三角和长三角的 DON 明显高于其他城市,且珠三角的水源水 (主要指珠江) 中 DON 浓度比长三角地区约高出一倍。进一步的研究^[46] 表明,长江口原水中含 N 物质以无机氮为主,溶解性有机物主要以亲水性小分子有机物为主,腐植酸、芳香类有机物比例较低, SUVA₂₅₄ 为 1.1~2.8 L/(mg·m), 黄浦江中 SUVA₂₅₄ 为 1.5~4.2 L/(mg·m)。珠三角原水 (如西江) 中溶解性有机物的组分则主要为类富里酸、类腐植酸、芳香族蛋白质等^[53], 亲水性有机物占 53.1%~56.5%, SUVA₂₅₄ 为 1~3.5 L/(mg·m)。

2.2 N-DBPs 生成势分布

目前,各国出厂水中检测出 N-DBPs 大致包含 4 类: NAs、HNMs、HAcAms 和 HANs, 检出质量浓度只有纳克每升到毫克每升,远低于常规 C-DBPs 的 THMs 和 HAAs^[3-10, 17, 19-21]。与出厂水相比,水源水未经过消毒,因此,多利用消毒剂投加条件下测定的 N-DBPs 生成势表达原水中 N-DBPs 生成的潜在可能性。Wang 等^[54] 在 54 个原水和成品水样中检测出存在 N-亚硝基二甲胺 (NDMA) 等 9 种 NAs 生成势,9 种 NAs 生成势在水源水样中的中位数和最大值分别为 17.5 ng/L 和 142.9 ng/L。表 3 表明了全国部分城市水源水的 N-DBPs 生成势。全国水源水中 N-DBPs 生成势总体为东部沿海城市中总体上呈

表 2 我国部分城市水源水中 DON 浓度分布
Tab. 2 Distribution of DON Concentration in Water Sources in Some Cities at Home

调查省市	调查地区	调查时间	水样类型	质量浓度/(mg·L ⁻¹)		参考文献
				最高值	中位值	
江西、湖南	鄱阳湖、洞庭湖等 6 个湖泊	2012 年	湖泊	0.017~0.292	0.134	[44]
上海	长江河口	2012 年—2013 年	河口	0.07~0.46	-	[47]
上海	黄浦江	2012 年	湖泊	0.21	-	[47]
广东	松山湖水库、雁田水库	2014 年—2015 年	湖库	0.538~0.848	-	[48]
江苏	太湖	2015 年	湖泊	0.039~0.076 6	-	[52]
安徽	巢湖	2018 年	湖库	0.22~0.78	0.5	[11]
云南	洱海、澄海、泸沽湖	2018 年	洱海	0.148~0.544	0.346	[44]
			澄海	0.421~0.631	0.526	
			泸沽湖	0.095~0.044	0.095	
江苏	洪泽湖	2019 年	湖泊	0.250~0.368	-	[40]
西藏	青藏高原	2020 年	河湖	0.007~0.015	-	[45]
湖北	武汉	2021 年	河流	0~4.0	-	[46]

表 3 我国部分地区水源水体中 N-DBPs 生成潜能
Tab. 3 N-DBPs Formation Potential in Water Sources in Selected Regions at Home

调查省市	调查地区	调查年份	DBPs 生成 潜能(DBPFP)	水样类型	质量浓度/(μg·L ⁻¹)		参考文献
					最高值	中位值	
-	珠三角	2009 年—2010 年	HANFP	西江	10.0	—	[13]
				北江	19	—	
				东江	33	—	
				广州处	81	—	
北京	-	2010 年	TCANFP	湖库	5.14	—	[49]
			BCANFP		3.8	—	
			DBANFP		4.7	—	
			DCANFP		3.43	—	
			THANFP		—	2.44	
广州	珠三角	2012 年	HANFP	西江	15.19	7.79	[55]
				北江	29.63	14.60	
				东江	55.45	27.92	
				广州处	79.76	68.37	
丹江口	丹江口水库	2015 年	DCANFP	原水	4.8	—	[50]
深圳	珠三角	2016 年	NAmFP	原水	16.64	12.10	[51]
			HANFP		0	0	
哈尔滨	东北	2016 年	NAmFP	原水	17.10	0	[51]
			HANFP		0	0	
苏州	太湖	2018 年	DCANFP	原水	9.05	9.05	[52]

注: HANFP 为 HANs 生成势; TCANFP 为三氯乙腈生成势; BCANFP 为溴氯乙腈生成势; DBANFP 为二溴乙腈生成势; DCANFP 为二氯乙腈生成势; THANFP 为三卤乙腈生成势; NAmFP 为亚硝酸胺生成势。

现南北高、中部低的特征,其地域分布与 DON 的分布特点相似,也表现出东部地区高于其他地区、经济发达地区高于其他地区、珠三角地区高于其他地区的特点。

珠三角流域的 NAs 和 HANs 生成势总体很高,从 2009 年—2010 年和 2012 年珠三角的调查结果对比来看,在时间上各流域的 N-DBPs 生成势是不断增加的。由表 2 中广东数据可知, DON 浓度也很

高,同时广东的人口较多,每日排出大量的生活污水和工业废水。结合表 3 可知,东江、北江 N-DBPs 生成势与 DON 相关性较高,靠近交汇处广州人口更加密集,生活污水含量升高,使得 N-DBPs 生成势与 DON 相关性降低,因此,推测珠江三角洲流域水源水中的 DBPs 生成势总体偏高的原因主要是 DON 过高。研究者们^[48-49,55]的研究也发现,珠江中东江、西江、北江中 TN、 PO_4^{3-} 、 NH_4^+ 浓度均是沿径流方向逐渐增大,且交汇处水质指标的浓度普遍高于 3 条干流,平均浓度约为前 3 者的 6 倍,与 HANs 生成势变化趋势相同。

长三角的 DBPs 生成势总体比其他城市偏低,但 DON 浓度却比其他城市偏高。其中,长江流经湖南、江西两省 DON 浓度较低,流经安徽、江苏两省时

DON 浓度普遍较高,在上海处有所降低。高乃云等^[42]研究表明,黄浦江中 DCANFP 与 DON 浓度之间存在一定的线性关系,但是 BCANFP、DBANFP 与 DON 浓度之间线性关系较弱。

综上,珠三角流域的 N-DBPs 生成势在沿流向方向和时间上是不断增加的,同时 N-DBPs 生成势的分布特点与 DON、总氮、总磷、氨氮分布相似;长三角的 N-DBPs 生成势与 DON 分布没有显著相关性,结合相关研究,推测长三角流域 DON 中的部分物质是造成 N-DBPs 生成势升高的主要原因。同时,由表 4 和图 1 可知,DON 与 N-DBPs 或部分 N-DBPs 生成势存在一定的相关性,可以通过图中已知的 DON 的点预测未知的 N-DBPs 生成势。

表 4 水源水体中 N-DBPs 生成势与 DON 的相关性

Tab. 4 Correlation between N-DBPs Formation Potential and DON in Water Body of Water Sources

调查地区	相关性结果	分析	参考文献
珠江流域	HANFP 与 DON 相关性系数关系: $R^2_{东江段}(0.631) \approx R^2_{北江段}(0.630) > R^2_{珠江整体}(0.440) > R^2_{西江段}(0.388) > R^2_{广州处}(0.108)$	东江、北江相关性较高,靠近交汇处(广州)HANFP 与 DON 相关性更不明显	[47]
长三角流域	黄浦江处 DCANFP 与 DON 存在明显的线性关系($R^2 = 0.892 \sim 0.893$),BCANFP、DBANFP 与 DON 之间的线性关系较弱	DCANFP 与 DON 存在明显的相关性,其他 DBPF 相关性较弱	[42]

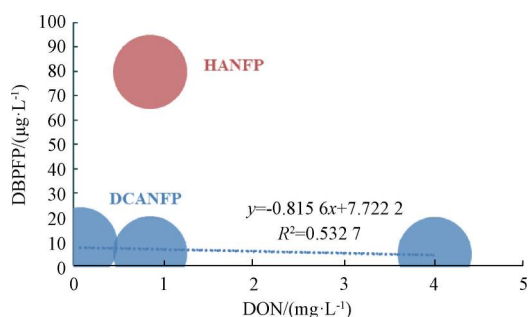


图 1 不同城市水源水 N-DBPs 生成势与 DON 的相关性

Fig. 1 Correlation of N-DBPs Formation Potential with DON in Different Urban Water Sources

2.3 生态风险评估

水源水的水质对 N-DBPs 生成势的形成至关重要,因此,有必要对水源水的生态风险开展评估和长期监测,特别是前体物负荷较高的水源水。为从 N-DBPs 前体物源头控制的角度进一步评估水源地的生态风险,根据文献中获得的相关数据,采用风险熵值法,对我国典型水源地 N-DBPs 的潜在生成生态风险进行评估和测算。

风险熵值法是利用现有科学认知水平下,对水体和沉积物中检测到的污染物的潜在环境风险进行

评估^[56],确认化合物不会对水生生物造成不利影响的最大效应浓度值[即生态风险阈值(PNEC)]来表征生态风险大小的方法。根据欧盟风险评价指南推荐的评价因子法,计算如式(1)~式(2)。

$$P = \frac{L_{50}}{A} \times 10^6 \quad (1)$$

$$R_Q = \frac{M}{P} \quad (2)$$

其中: L_{50} ——半数致死质量浓度,mg/L,可从毒理学数据库和相关文献中获得;

M ——目标污染物在水中检测质量浓度,ng/L;

A ——评价因子,推荐值为 1 000;

P ——预测无效应质量浓度,ng/L;

R_Q ——PNEC 值,根据 R_Q 的大小,将生态风险划分成 4 个等级:无风险或最低风险($R_Q < 0.01$),低风险($0.01 \leq R_Q < 0.10$),中等风险($0.1 \leq R_Q < 1.00$)和高风险($R_Q \geq 1.00$)^[56]。

Chen 等^[57]通过 ECOSAR 软件模拟计算获得了

CX₃R 型 N-DBPs, 即 HANs、HAcAms 和 HNMs 的半数致死浓度。本文通过相关计算, 根据国内 Chen 等^[57] 针对 CX₃R 型 N-DBPs 基于鱼类、大型藻和绿藻的慢性细胞毒性和急性基因毒性的研究, 取 HANs、HAcAms 和 HNMs 基于鱼类 96 h 的半数致死浓度, 根据已知 N-DBPs 生成势数值的 PNEC 如表 5 所示。

表 5 我国部分城市原水 PNEC

Tab. 5 PNEC for Raw Water in Selected Cities at Home

城市	地区	调查年份	水样类型	PNEC
北京	-	2010 年	湖库	0.005 91
广州	珠三角	2012 年	西江	0.003 26
			北江	0.006 36
			东江	0.011 90
			广州	0.017 11
丹江口	丹江口水库	2015 年	原水	0.005 11
深圳	珠三角	2016 年	原水	0
哈尔滨	东北	2016 年	原水	0
苏州	太湖	2018 年	原水	0.009 63
太湖贡湖湾	太湖	2018 年	原水	0.009 63

通过分析测算, 经济发达太湖地区中水源地 N-DBPs 的生态风险明显高于其他地区 (R_0 值为 0.009 63)。珠三角地区的三江汇集处, 因为生活污水和工业废水大量汇入, 也呈现出低的 N-DBPs 生态风险 (R_0 值为 0.017 11)。以丹江口、密云水库等为代表的水库水源, 总体上 N-DBPs 的生态风险一般高于河流水源。因此, 在城市水源地的建设中, 随着 N-DBPs 等新污染物的控制获得越来越多的重视, 更应高度关注经济快速发展城镇的湖库水源地水质安全和潜在生态风险。

3 水中有机物评价指标与 N-DBPs 关系

目前, 我国水源地建设和运行维护管理中, 仍然多以常规污染物作为监测重点。考虑到溶解性有机物与 N-DBPs 生成势之间的潜在关联, 为更好地开展水源地保护管理, 本文进一步分析了水中典型的有机物评价指标与 N-DBPs 生成势之间的关系, 以期水源地建设和保护提供支撑。

3.1 常规有机物评价指标与 N-DBPs 关系

3.1.1 可溶性有机碳(DOC)

DOC 可以代表水体中有机碳的含量。DOC 含量越高并不意味着 DBPsFP 越高。学者们^[58-59] 研

究表明, 选用 FeCl_3 、 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 为混凝剂在氯化剂和氯胺消毒条件下, 水中 THMs、HAAs、HANs 和 1, 1, 1-TCP 这 4 类物质生成势与 DOC 线性相关性均较低。高乃云等^[42] 调查了沉淀和过滤出水以及出厂水中 DCAN 质量浓度与原水 DOC 之间的线性关系, DCAN 质量浓度与 DOC 之间的线性关系并不明显。因此, 可以认为 N-DBPs 生成势与 DOC 相关性较低。

3.1.2 DON

DON 可以反映水中的有机氮含量。在许多研究中 DON 被视为是 N-DBPs 主要的前体物^[60-64]。但是在进行 N-DBPs 与 DON 的相关性研究时, 结果往往出现矛盾。在氯化消毒的条件下, N-DBPs 前体物的减少会导致 DON 的减少, 用 DON 可以表征 N-DBPs 前体物。高乃云等^[42] 的研究表明, 沉淀和过滤出水中 DCAN 质量浓度与 DON 存在明显的线性关系 (沉淀水的 $R^2 = 0.893$; 过滤水的 $R^2 = 0.892$)。但辛慧宇^[58] 发现 BCAN、DBAN 生成势与 DON 存在较弱的线性关系, Liao 等^[27]、Chen 等^[65] 也发现 NDMA 生成势与 DON 没有直接关系。

3.1.3 DON/DOC

DON 是水中溶解性有机物的重要组成部分。该比值能反映含 N 有机物在总有机物中的占比。据报道^[27], 水源水体中 DON/DOC 在 0.5%~10%。

Liao 等^[27] 的试验研究表明, NDMA 生成势与 DON/DOC 及 DON 的变化趋势相同, 湖水中的 DON/DOC 及 DON 高于其他水样, NDMA 生成势也高于其他样品, 这一观点也得到了 Krasner 等^[66] 认可。因此, DON/DOC 可能与部分 N-DBPs 生成势存在一定的相关性。

3.1.4 UV₂₅₄

UV₂₅₄ 代表水中腐植酸和黄腐酸的芳香族特质。代表水体中不饱和键中芳烃碳类物质在 254 nm 处的吸光度值, 被证实是 DOC 一种良好的替代参数^[67]。水源中芳香族及酚类结构化合物是氧化消毒过程中易于反应形成 DBPs 的部分, 且会吸收与其浓度成正比关系的 254 nm 处的 UV 辐射, UV₂₅₄ 通常作为 N-DBPs 生成势的指代性指标^[58]。

研究^[58] 表明, 水中 THMs、HAAs、HANs 和 1, 1, 1-TCP 这 4 类物质生成势与 UV₂₅₄、UV₂₆₅、UV₂₈₀ 均存在明显的线性相关性, 差异较小, 且这 3 种指标间相

关性系数 R^2 均大于 0.99, 认为可以互相替代。同时, 氯消毒时与 UV_{254} 的相关性最高, R^2 均在 0.8 以上。这是因为 DBPs 的来源主要为腐植酸等, 可认为 UV_{254} 与 N-DBPs 生成势存在较强的相关性。

3.1.5 SUVA

SUVA 可以表示水中腐殖质含量相对指标。SUVA 是 UV_{254} 和 DOC 的比值, 其可反映碳碳不飽和双键或芳香环有机物的相对含量等有机特性。

研究引入 UV_{254}/DOC 指标, 发现 THMFP、DHAAFP 与该指标之间存在明显线性关系^[66]。有报道^[65]将 UV_{254} 作为 TOC 和 DOC 的代替参数, 并且 THMFP 与其值存在密切关系, 且 SUVA 越大表示水中物质的亲水性和可生化性越好^[67-71]。Liao 等^[27]试验研究表明, SUVA 与 NDMA 相关性较差; Chuang 等^[26]也列举了很多研究结果, 均证明 SUVA 不能作为 NDMA 的形成指标; 但是辛慧宇^[58]的研究显示, 在氯胺消毒的过程中 SUVA 与 HANs、HAAs 和 THMs 生成势均有较强的相关性。因此, 可以认为只在氯胺消毒条件下 $SUVA_{254}$ 与部分 N-DBPs 生成势有较强相关性。

3.2 对已有研究的评估

以徐鹏等^[72]研究的江苏省宜兴 3 个水源地为例, 其中横山水库和油车水库作为宜兴市饮用水水源地, 环境保护较好, 水质优良; 西沭湖作为宜兴市航运通道的一部分, 受污染情况较严重, 水质一般。水质指标如表 6 所示。

表 6 宜兴市水源原水常规水质指标检测结果^[72]

Tab. 6 Test Results of Routine Water Quality Indices of Water Sources in Yixing City^[72]

水源类型	UV_{254}
横山水库	0.04~0.12
油车水库	0.02~0.06
西沭湖	0.14~0.37

根据前人^[58]研究中氯化消毒下混凝剂 $FeCl_3$ 投加下 UV_{254} 的数值以及氯化消毒下 DBPs 生成势与 UV_{254} 线性拟合关系, 可以初步得出 DCAN 生成势与 UV_{254} 的线性关系为 $y=56.129x-0.2264$, $R^2=0.94$ 。由 3 个水源地 UV_{254} 数值, 可以粗略估计横山水库、油车水库、西沭湖的 DCANFP 为 2.0~6.5、0.9~3.1、7.6~20.5 $\mu g/L$ 。由表 4 可知, 预测的数值在苏州与贡湖湾水源地的 DCANFP 数值之间, 说

明这种用 UV_{254} 方法可以大致预测其他城市水源地的 N-DBPs 范围。

综上, 在对 N-DBPs 进行监测和控制时, 应对水中有机物评价指标与 N-DBPs 的关系给予更多关注, 为构建更为完整的水质评价体系提供参考。由于现存的部分有机物指标无法反映出对 N-DBPs 的去除, 可以考虑用更为方便快捷的 UV_{254} 方法对部分 N-DBPs 进行粗略预测。

4 结论

本文总结了在水源水体中 N-DBPs 分类、形成机制, 重点总结了 DON、N-DBPs 在全国范围内的空间分布情况, 分析了其空间分布的特点及形成的原因, 同时根据 N-DBPs 对生物产生的毒理性, 也延伸出生态风险这一评价指标用于评价现有 N-DBPs 城市的 PNEC, 为城市水源水生态安全评估提供参考。

为有效降低饮用水中 N-DBPs 导致的健康风险, 减轻水厂消毒过程的运行压力, 在此对 N-DBPs 的未来研究方向提出如下展望: ①加强监测, 围绕水源地 N-DBPs 生成势时间变化和生成势波动, 进行科学研究, 找出影响 N-DBPs 生成势的关键要素; ②优化生态风险评估指标体系, 把 N-DBPs 生成势纳入生态风险评估系统, 提出更加精确的评价体系。

参考文献

- [1] 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.
- [2] TANG Y L, LONG X, WU M Y, et al. Bibliometric review of research trends on disinfection by-products in drinking water during 1975-2018[J]. Separation and Purification Technology, 2020, 241: 116741. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.116741.
- [3] 唐志儒. 溶解性有机氮的迁移转化规律及其测定方法[J]. 山西建筑, 2021, 47(9): 151-154.
TANG Z R. DON's transformation and conversion and its determination method[J]. Shanxi Architecture, 2021, 47(9): 151-154.
- [4] 李伟, 徐斌, 夏圣骥, 等. 饮用水中溶解性有机氮类化合物的控制研究进展[J]. 中国给水排水, 2009, 25(8): 22-26.
LI W, XU B, XIA S J, et al. Review on characteristics and control of dissolved organic nitrogen in drinking water[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(8): 22-26.
- [5] 朱文倩, 徐斌, 林琳, 等. 微污染源中溶解性有机氮组成

- 规律及其水处理特性[J]. 中国环境科学, 2014, 34(1): 130-135.
- ZHU W Q, XU B, LIN L, et al. Studies on dissolved organic nitrogen compositions and water-treatment behavior in micro-polluted water [J]. China Environmental Science, 2014, 34(1): 130-135.
- [6] 李伟, 徐斌, 夏圣骥, 等. DON 的水处理特性及生成 NDMA 潜能的分析[J]. 中国给水排水, 2009, 25(17): 35-38.
- LI W, XU B, XIA S J, et al. Characteristics of DON and NDMA formation potential in water treatment [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(17): 35-38.
- [7] 刘冰, 余国忠, 古励, 等. 混凝和活性炭吸附去除微污染水源地水中 DON 的研究[J]. 环境科学, 2013, 34(4): 1392-1401.
- LIU B, YU G Z, GU L, et al. Removal of DON in micro-polluted raw water by coagulation and adsorption using activated carbon[J]. Environmental Science, 2013, 34(4): 1392-1401.
- [8] 崔晓宇, 王少坡, 于静洁, 等. 水中有机氮去除方法研究进展[J]. 水处理技术, 2013, 39(2): 11-15, 21.
- CUI X Y, WANG S P, YU J J, et al. Review of technologies for organic nitrogen removal from water and wastewater [J]. Technology of Water Treatment, 2013, 39(2): 11-15, 21.
- [9] 沈开源, 徐斌, 夏圣骥, 等. 饮用水中含氮消毒副产物卤代腈(氰)的生成特性与控制研究进展[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(10): 72-77.
- SHEN K Y, XU B, XIA S J, et al. Progress on the formation and control of disinfection byproduct halogenated nitriles in drinking water chlorination [J]. Environmental Pollution & Control, 2010, 32(10): 72-77.
- [10] 刘思宏, 林英姿, 吕尊敬, 等. 饮用水消毒副产物卤乙腈的研究[J]. 水科学与工程, 2018(5): 26-30.
- LIU S H, LIN Y Z, LÜ Z J, et al. Study on haloacetone as a byproduct of drinking water disinfection[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2018(5): 26-30.
- [11] 朱倩倩. 巢湖水体溶解性有机氮分布特征研究[D]. 安徽: 安徽师范大学, 2018.
- ZHU Q Q. Characterization of the distribution of dissolved organic nitrogen in the water body of Chaohu Lake[D]. Anhui: Anhui Normal University, 2018.
- [12] ZHANG H Y, GAO P, LIU Y Z, et al. Effects of different types of nitrogen sources in water on the formation potentials of nitrogenous disinfection by-products in chloramine disinfection process based on isotope labeling [J]. Science of the Total Environment, 2022, 842: 156692. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156692.
- [13] 梁艳红. 珠江广东段水质的变化趋势和消毒副产物的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- LIANG Y H. Research on disinfection by-products and the change trend of the Pearl River, Guangdong[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [14] 唐凤霞, 李婉婷, 朱延平, 等. 饮用水中卤乙腈和亚硝胺类含氮消毒副产物的管控及在我国典型城市的检测水平研究进展[J]. 给水排水, 2022, 58(5): 151-158.
- TANG F X, LI W T, ZHU Y P, et al. Research progress on the control of halogenated acetonitrile and nitrosamines disinfection byproducts in drinking water and their detection in typical cities in China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 58(5): 151-158.
- [15] LIN T, ZHOU D J, DONG J, et al. Acute toxicity of dichloroacetonitrile (DCAN), a typical nitrogenous disinfection by-product (N-DBP), on zebrafish (*Danio rerio*) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, 133: 97-104. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2016.06.047.
- [16] 员建, 徐彬, 王淳谕, 等. UV 氧化去除含氮消毒副产物二氯乙腈和二溴乙腈的效能[J]. 环境工程, 2019, 37(6): 68-72.
- YUAN J, XU B, WANG B Y, et al. Removal of nitrogenous disinfection by-products of dichloroacetonitrile and dibromoacetonitrile by ultraviolet irradiation [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(6): 68-72.
- [17] 丁昌龙. 逆境下高藻水中含氮消毒副产物前体物释放规律研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- DING C L. Study on the release of nitrogenous disinfection by-products precursors of algal water under environment stress conditions[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [18] 张星, 王珊, 李小龙, 等. 饮用水中卤代乙酰胺的研究进展[J]. 化学与生物工程, 2019, 36(9): 7-10.
- ZHANG X, WANG S, LI X L, et al. Progress in research of haloacetamides in drinking water [J]. Chemistry & Bioengineering, 2019, 36(9): 7-10.
- [19] CHU W H, GAO N Y, YIN D Q, et al. Formation and speciation of nine haloacetamides, an emerging class of nitrogenous DBPs, during chlorination or chloramination [J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 260: 860-812. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.06.044.
- [20] 鲁金凤, 王琼, 冯瑛, 等. 典型含氮消毒副产物 HNMs 的最新研究进展[J]. 中国给水排水, 2015, 31(4): 28-33.
- LU J F, WANG Q, FENG Y, et al. Latest research progress of typical nitrogenous disinfection by-products halonitromethanes in drinking water[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(4): 28-33.
- [21] WALVOORD R R, KOZLOWSKI M C. Minimizing the amount of nitromethane in palladium-catalyzed cross-coupling with aryl halides [J]. Journal of Organic Chemistry, 2013, 78(17): 8859-8864.
- [22] 刘晗, 邓琳. 饮用水中卤代硝基甲烷的分布特点、来源及毒性研究进展[J]. 环境化学, 2022, 41(4): 1182-1192.
- LIU H, DENG L. Research progress on distribution

- characteristics, source and toxicity of halonitromethanes in drinking water[J]. *Environmental Chemistry*, 2022, 41(4): 1182-1192.
- [23] LIEW D, LINGE K L, JOLL C A, et al. Determination of halonitromethanes and haloacetamides: An evaluation of sample preservation and analyte stability in drinking water[J]. *Journal of Chromatography A*, 2012, 1241: 117-122. DOI: 10.1016/j.chroma.2012.04.037.
- [24] 周超, 高乃云. 测定和去除含氮消毒副产物亚硝胺的研究进展[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(6): 13-16.
ZHOU C, GAO N Y. Research progress in detection and removal of nitrogenous disinfection by-products-nitrosamines in water[J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(6): 13-16.
- [25] 李晓, 贝尔, 汪隽, 等. 食品和饮用水中的亚硝胺研究进展[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(22): 13-18.
LI X, BEI E, WANG J, et al. Research progress of N-nitrosamine in food and drinking water[J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(22): 13-18.
- [26] CHUANG Y H, LIN A Y C, WANG X H, et al. The contribution of dissolved organic nitrogen and chloramines to nitrogenous disinfection byproduct formation from natural organic matter [J]. *Water Research*, 2013, 47(3): 1308-1316.
- [27] LIAO X B, ZHAO L, SHEN L L, et al. Effect of pre-ozonation on N-nitrosodimethylamine (NDMA) formation from four drinking-water sources during subsequent chloramination [J]. *Water Supply*, 2019, 19(6): 1816-1822.
- [28] CHEN W H, HUANG T H, WANG C Y. Impact of pre-oxidation on nitrosamine formation from a source to drinking water: A perspective on cancer risk assessment [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, 113: 424-434.
- [29] 翟家欣, 张欣然, 杨欣. 新型含氮消毒副产物的生成机制及毒性研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2020, 15(1): 17-33.
ZHAI J X, ZHANG X R, YANG X. Research overview on formation mechanism and toxicity for emerging nitrogenous disinfection byproducts [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2020, 15(1): 17-33.
- [30] MUELLNER M G, WAGNER E D, MCCALLA K, et al. Haloacetamides vs. regulated haloacetic acids: Are nitrogen-containing DBPs more toxic? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(2): 645-651.
- [31] 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.
- [32] 郭显强. 高藻水含氮消毒副产物前体物识别与预氧化控制规律研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
GUO X Q. Study on the recognition of nitrogenous disinfection by-products precursors and the control mechanism by pre-oxidation in high algae-containing water [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [33] 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.
- [34] WU Y W, DA S, WU Y T, et al. Molecular insights into formation of nitrogenous disinfection byproducts from algal organic matter in UV-LEDs/chlorine process based on FT-ICR analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 812: 152457. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152457.
- [35] ZHANG Y S, SHAO Y S, GAO N Y, et al. Removal of microcystin-LR by free chlorine: Identify of transformation products and disinfection by-products formation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 287: 189-195. DOI: 10.1016/j.cej.2015.10.111.
- [36] 蔡安蓉, 郭显强, 丁昌龙, 等. 不同剂量氯氧化对含藻源水有机物及消毒副产物的影响[J]. *三峡生态环境监测*, 2021, 6(4): 64-72.
CAI A R, GUO X Q, DING C L, et al. Effects of different doses of chlorine oxidation on organic matter and disinfection by-product in algal source water[J]. *Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges*, 2021, 6(4): 64-72.
- [37] BOND T, TEMPLETON M R, GRAHAM N. Precursors of nitrogenous disinfection by-products in drinking water--A critical review and analysis[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 235/236: 1-16. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.07.017.
- [38] DONG F L, LIN Q F, LI C, et al. Impacts of pre-oxidation on the formation of disinfection byproducts from algal organic matter in subsequent chlor(am)ination: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 754: 141955. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141955.
- [39] PENG L Q, WANG F F, ZHANG D, et al. Effect of oxidation ditch and anaerobic-anoxic-oxic processes on CX3R-type disinfection by-product formation during wastewater treatment [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 770: 145344. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145344.
- [40] YANG X F, WEI X Y, XU X P, et al. Characteristics of dissolved organic nitrogen in the sediments of six water sources in Taihu Lake, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(6): 929. DOI: 10.3390/ijerph16060929.
- [41] SHEN Y C. Formation of nitrogenous disinfection by-products (N-DBPs) in drinking water: Emerging concerns and current issue[J]. *Earth and Environmental Science*, 2021, 801(1): 012015. DOI 10.1088/1755-1315/801/1/012015.
- [42] 高乃云, 赵璐, 楚文海. 饮用水中典型含氮消毒副产物卤乙腈的质量浓度分布[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(2): 251-255.
GAO N Y, ZHAO L, CHU W H. Concentration distribution of typical nitrogenous disinfection by-products HANs in drinking

- water[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2012, 40(2): 251-255.
- [43] 蒋柱武,刘欣汝,武江南,等. 饮用水中典型含氮消毒副产物的生成与控制研究进展[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(10): 2595-2603.
JIANG Z W, LIU X R, WU J N, et al. Research progress on the formation and control of typical nitrogenous disinfection by-products in drinking water[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14(10): 2595-2603.
- [44] ZHANG L, XU K, WANG S, et al. Characteristics of dissolved organic nitrogen in overlying water of typical lakes of Yunnan Plateau, China[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 84: 727-737. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.09.038.
- [45] XIE M Z, ZHAO L, WU X D, et al. Seasonal variations of nitrogen in permafrost-affected soils of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Catena*, 2020, 195: 104793. DOI: 10.1016/j.catena.2020.104793.
- [46] WANG L Y, ZHANG X, CHEN S S, et al. Spatial variation of dissolved organic nitrogen in Wuhan surface waters: Correlation with the occurrence of disinfection byproducts during the COVID-19 pandemic[J]. *Water Research*, 2021, 198: 117138. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117138.
- [47] 卢宁,刘茵. 长江口原水中溶解性有机氮类化合物分析[J]. *人民长江*, 2013(21): 104-107.
LU N, LIU Y. Analysis on dissolved organic nitrogen (DON) in the raw water of Yangtze River Estuary[J]. *Yangtze River*, 2013(21): 104-107.
- [48] 张一凡. 湖库水源地中氮形态特征实例分析及 DON 去除特性[D]. 广州:暨南大学,2016.
ZHANG Y F. A case study of form characteristics of nitrogen in lakes and reservoirs and DON removal specialities [D]. Guangzhou: Jinan University, 2016.
- [49] 宝露尔,张海峰,于建伟,等. 含氮消毒副产物卤乙腈前驱体及生成机制综述[J]. *给水排水*, 2016, 52(8):134-141.
BAO L E, ZHANG H F, YU J W, et al. Precursors of haloacetonitrile, a byproduct of disinfection containing nitrogen, and their formation mechanisms were reviewed [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2016, 52(8):134-141.
- [50] 张民盛,徐斌,张天阳,等. 南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比[J]. *环境科学*, 2015, 36(9): 3278-3284.
ZHANG M S, XU B, ZHANG T Y, et al. Formation of disinfection by-products during chlor(am) ination of Danjiangkou Reservoir water and comparison of disinfection processes [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(9): 3278-3284.
- [51] 董蕾,王海燕,蔡宏铨,等. 我国六城市饮用水中含氮消毒副产物的现状调查[J]. *环境与健康杂志*, 2016, 33(3): 232-235.
DONG L, WANG H Y, CAI H Q, et al. Investigation on nitrogenous disinfection by-products in drinking water in six cities, China[J]. *Journal of Environment and Health*, 2016, 33(3): 232-235.
- [52] 董坚,蒋福春,周东菊,等. 太湖水源中二氯乙腈前体物特性及其去除[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(4):296-300.
DONG J, JIANG F C, ZHOU D J, et al. Study on the dichloroacetonitrile precursors and its removal in the source water of Taihu Lake [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2018, 46(4): 296-300.
- [53] 宋凌志,施周,徐勇,等. 西江原水有机物成分解析及其消毒副产物生成特性[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(21):32-38.
SONG L Z, SHI Z, XU Y, et al. Analysis of organic compounds in Xijiang raw water and characteristics of disinfection by-products formation[J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(21): 32-38.
- [54] WANG W F, YU J W, AN W, et al. Occurrence and profiling of multiple nitrosamines in source water and drinking water of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 551/552: 489-495. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.175.
- [55] 梁艳红,何洪威,周达诚. 珠江水质和含氮消毒副产物的时空变化[J]. *环境化学*, 2012, 31(9): 1308-1314.
LIANG Y H, HE H W, ZHOU D C. Temporal and spatial variations of water quality and N-DBP formation in Pearl River, Guangdong [J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(9): 1308-1314.
- [56] HERNANDO M D, MEZCUA M, FERNÁNDEZ-ALBA A R, et al. Environmental risk assessment of pharmaceutical residues in wastewater effluents, surface waters and sediments[J]. *Talanta*, 2005, 69(2): 334-342.
- [57] 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.
- [58] 辛慧宇. 三维荧光光谱多变量分析与消毒副产物生成势相关性研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2021.
XIN H Y. Correlation between multivariate analysis of 3D fluorescence spectra and disinfection by-product generation potential[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021.
- [59] 陈铭,徐斌,王安琪,等. 巢湖水中溶解性有机物分子大小分布、亲疏水性及消毒副产物的生成势[J]. *净水技术*, 2018, 37(3): 22-28.
CHEN M, XU B, WANG A Q, et al. Distribution of molecular size, hydrophilicity and hydrophobicity, and DBP formation potential of DOM in water of Chaohu Lake [J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37(3): 22-28.

(下转第 125 页)

- phosphate from semiconductor wastewater using chemical precipitation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 307: 696–706. DOI: 10.1016/j.cej.2016.08.134.
- [8] HE Y J, HUANG L, SONG B C, et al. Defluorination by ion exchange of SO_4^{2-} on alumina surface: Adsorption mechanism and kinetics[J]. *Chemosphere*, 2021, 273: 129678. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.129678.
- [9] AOUDJ S, DROUICHE N, HECINI M, et al. Coagulation as a post-treatment method for the defluoridation of photovoltaic cell manufacturing wastewater [C]. Algiers: First International Seminar on Water, Energy and Environment (ISWEE), 2011: 111–120.
- [10] 卢建杭, 刘维屏, 郑巍. 铝盐混凝去除氟离子的作用机理探讨[J]. *环境科学学报*, 2000(6): 709–713.
- LU J H, LIU W P, ZHENG W. The removal mechanisms of fluoride ion by aluminum salt coagulant [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000(6): 709–713.

(上接第 16 页)

- [60] ZHENG F, WANG J, XIAO R, et al. Dissolved organic nitrogen in wastewater treatment processes: Transformation, biosynthesis and ecological impacts [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 273: 116436. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116436.
- [61] LUO Y Y, LIU C, ZHAO M Q, et al. Removal performance and mechanism of typical amino acids in water by the peroxymonosulfate/ Fe_3O_4 nanoparticles [J]. *Water Supply*, 2022, 22(2): 2257–2268.
- [62] WANG Y L, WANG X L, TIAN L P, et al. Removal effect and mechanism of amphiphilic chitosan modified microbubbles on microcystis aeruginosa [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, 46: 102585. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.102585.
- [63] LEE W, WESTERHOFF P, CROUÉ J. Dissolved organic nitrogen as a precursor for chloroform, dichloroacetonitrile, N-nitrosodimethylamine, and trichloronitromethane [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(15): 5485–5490.
- [64] RUAN X X, ZHANG X R, LEI Y, et al. UV_{254} irradiation of N-chloro- α -amino acids: Kinetics, mechanisms, and N-DBP formation potentials[J]. *Water Research*, 2021, 199: 117204. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117204.
- [65] CHEN B Y, WESTERHOFF P. Predicting disinfection by-product formation potential in water[J]. *Water Research*, 2010, 44(13): 3755–3762.
- [66] 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.
- [67] LIU X, PARK M, BEITEL S C, et al. Formation of nitrogenous disinfection byproducts in MP UV-based water treatments of natural organic matters: The role of nitrate [J]. *Water Research*, 2021, 204: 117583. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117583.
- [68] KALI S, KHAN M, GHAFFAR 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.
- [69] ZHANG S S, LIN T, CHEN H, et al. Precursors of typical nitrogenous disinfection byproducts: Characteristics, removal, and toxicity formation potential [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 742(5): 140566. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140566.
- [70] ERSAN G, ERSAN M S, KANAN A, et al. Predictive modeling of haloacetonitriles under uniform formation conditions [J]. *Water Research*, 2021, 201: 117322. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117322.
- [71] 蒋绍阶, 刘宗源. UV_{254} 作为水处理中有机物控制指标的意义 [J]. *重庆建筑大学学报*, 2002(2): 61–65.
- JIANG S J, LIU Z Y. The meaning of UV_{254} as an organic matter monitoring parameter in water supply & wastewater treatment [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2002(2): 61–65.
- [72] 徐鹏, 李忠群, 程战利, 等. 水源水消毒副产物生成势与 $\text{UV}_{254}/\text{DOC}$ 的相关性研究 [J]. *环境科学学报*, 2018, 38(8): 3021–3026.
- XU P, LI Z Q, CHENG Z L, et al. Correlation study between the generation potential of disinfection by-products and $\text{UV}_{254}/\text{DOC}$ in water source water [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(8): 3021–3026.