

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.06.009

# 含氮消毒副产物的生成机理与富集技术研究进展

陈金凤, 姚宁, 汪裕昌, 余海, 裴炎炎, 李妍, 蒋柱武  
(福建理工大学 生态环境与城市建设学院, 福建 福州 350118)

**摘要:** 含氮消毒副产物(N-DBPs)作为饮用水中一类新兴的消毒副产物,因其与含碳消毒副产物(C-DBPs)相比具有更强的“三致”(致畸、致癌、致突变)作用,且由于国内标准法规未对其浓度含量进行限定及监测,因此其危害更加隐蔽,近年来受到广泛关注。对卤乙腈(HANs)、卤乙酰胺(HAcAms)、卤代硝基甲烷(HNMs)、亚硝胺(NMs)等新型N-DBPs的毒理性质、形成机理及控制技术进行了梳理归纳,总结了现有不同N-DBPs的前处理技术及其原理。对新材料在前处理富集过程中的应用前景进行了展望,以期为实现饮用水N-DBPs的痕量检测及有效监测提供参考。

**关键词:** 含氮消毒副产物; 饮用水; 富集技术

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)06-0046-07

## Research Progress on Formation Mechanism and Enrichment Technology of Nitrogenous Disinfection By-products

CHEN Jin-feng, YAO Ning, WANG Yu-chang, YU Hai, PEI Yan-yan, LI Yan,  
JIANG Zhu-wu

(College of Ecological Environment and Urban Construction, Fujian University of Technology,  
Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** Nitrogenous disinfection by-products (N-DBPs), as a kind of emerging disinfection by-products in drinking water, have stronger teratogenic, carcinogenic and mutagenic effects compared with carbonaceous disinfection by-products (C-DBPs), and their concentrations are not limited and monitored by domestic standards and regulations, so their hazards are more hidden, and give rise to be widely concerned in recent years. In this paper, the toxicological properties, formation mechanism and control technology of new N-DBPs such as haloacetonitriles (HANs), haloacetamides (HAcAms), halonitromethanes (HNMs) and nitrosamine (NMs) were summarized, and the pre-treatment technology and principle of different N-DBPs in existing research were summarized. The application of the new materials in the pretreatment enrichment process were prospected, which provided a literature basis for the realization of trace detection and effective monitoring of N-DBPs in drinking water.

**Key words:** nitrogenous disinfection by-products; drinking water; enrichment technology

消毒是水处理过程中必不可少的环节,对预防疾病传播具有不可替代的作用。饮用水消毒常用的消毒剂包括液氯( $\text{Cl}_2$ )、次氯酸钠( $\text{NaClO}$ )、氯胺( $\text{NH}_2\text{Cl}$ )等。根据使用的消毒剂不同,生成的消毒

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52070043); 福建工程学院科研启动基金资助项目(GY-Z20166)

通信作者: 蒋柱武 E-mail: jiangzhuwu@126.com

副产物(DBPs)也不同,使用氯胺主要生成的含氮消毒副产物(N-DBPs)具有“三致”作用,其细胞毒性及遗传毒性也比使用氯消毒剂生成的含碳消毒副产物(C-DBPs)更强。此外,N-DBPs还具有浓度低、难去除等特点。目前,美国环境保护署对其中5种N-DBPs(溴氯乙腈、二溴乙腈、二氯乙腈、三氯乙腈和三氯硝基甲烷)进行了含量限制并进行日常监管。消毒副产物的生成类型与消毒工艺密切相关,已有研究报道了我国各城市的实际水样中消毒副产物的检出情况,其中卤乙腈检出浓度最高,卤乙酰胺其次,卤代硝基甲烷浓度最低<sup>[1-4]</sup>。由于N-DBPs在实际水样中的存在浓度极低,对富集检测方法提出了较大挑战。随着材料革命的到来,新材料在富集

检测领域的应用受到广泛关注。

系统性梳理了N-DBPs的类别,阐述了N-DBPs的形成机理与控制技术,从分子结构层面,识别N-DBPs与富集检测技术的相关性,并对N-DBPs的富集检测技术发展前景及趋势进行了展望。

1 N-DBPs的种类

一般将消毒剂与水中天然有机质(NOM)、化学品等物质反应生成的含有氮元素的消毒副产物称为含氮消毒副产物<sup>[5]</sup>。N-DBPs被人类发现的时间较晚,因此对其危害了解较少,从而导致现有饮用水标准中对N-DBPs的限制较少,其危害范围和程度仍未得到全面研究。表1总结了常见N-DBPs的代表性化合物。

表1 含氮消毒副产物的分类

Tab.1 Classification of nitrogen-containing disinfection by-products

类型	化合物名称
卤乙腈(HANs)	氯乙腈(CAN)、二氯乙腈(DCAN)、三氯乙腈(TCAN)、溴乙腈(BAN)、二溴乙腈(DBAN)、三溴乙腈(TBAN)、碘乙腈(IAN)、溴氯乙腈(BCAN)、一溴二氯乙腈(BDCAN)、二溴一氯乙腈(DBCAN)
卤乙酰胺(HAcAms)	氯乙酰胺(CAcAm)、二氯乙酰胺(DCAcAm)、三氯乙酰胺(TCAcAm)、溴乙酰胺(BAcAm)、二溴乙酰胺(DBAcAm)、三溴乙酰胺(TBAcAm)、碘乙酰胺(IAcAm)、二碘乙酰胺(DIAcAm)、一溴一碘乙酰胺(BIAcAm)、一溴一氯乙酰胺(BCAcAm)、一氯一碘乙酰胺(CIAcAm)、一溴二氯乙酰胺(BDCAcAm)、一氯二溴乙酰胺(CDBAcAm)
卤代硝基甲烷(HNMs)	氯硝基甲烷(CNM)、二氯硝基甲烷(DCNM)、三氯硝基甲烷(TCNM)、溴硝基甲烷(BNM)、二溴硝基甲烷(DBNM)、三溴硝基甲烷(TBCN)、一溴一氯硝基甲烷(BCNM)、一溴二氯硝基甲烷(BDCNM)、一氯二溴硝基甲烷(DBCNM)
亚硝胺(NMs)	亚硝基二甲胺(NDMA)、亚硝基二乙胺(NDEA)、亚硝基二丙胺(NDPA)、亚硝基二丁胺(NDBA)、亚硝基二苯胺(NDPhA)、亚硝基吡咯烷(NPYR)、亚硝基甲乙胺(NMEA)、亚硝基吗啉(NMOR)、亚硝基哌啶(NPIP)
芳香族N-DBPs	2-氯苯乙腈(CPAN)、3-氯苯乙腈(3-CPAN)、4-氯苯乙腈(4-CPAN)、2,3-二氯苯乙腈(2,3-CPAN)、2,4-二氯苯乙腈(2,4-CPAN)、2,5-二氯苯乙腈(2,5-CPAN)、2,6-二氯苯乙腈(2,6-CPAN)、3,4-二氯苯乙腈(3,4-CPAN)

2 N-DBPs的生成机理与控制技术

N-DBPs的氮源既可以是水中的溶解有机氮(DON),也可是NH<sub>2</sub>Cl,它们在水中的浓度直接影响了N-DBPs的生成<sup>[6]</sup>。地表水特征的季节变化是影响DBPs生成的另一个关键因素:春夏季温度升高,微生物代谢速率加快,水中DON含量下降,N-DBPs浓度降低,秋冬季节则反之。此外,高温条件下通常会增大消毒剂的用量,以防止病原体的生长,但消毒剂也会与NOM反应,导致产生大量的DBPs<sup>[7-9]</sup>。

2.1 N-DBPs的生成机理

① 卤乙腈

已有研究表明,卤乙腈是三氯甲烷(THMs)和卤乙酸(HAAs)在一定条件下降解的副产物<sup>[10]</sup>。卤乙腈的生成途径主要有以下3种:a. 游离氨基中的α-胺基与氯或氯胺反应生成腈<sup>[11]</sup>,即脱羧途径;b. 氯胺的孤电子对攻击醛类,形成氯化氮甲醇,脱水反

应消去HCl生成卤乙腈<sup>[12]</sup>,即醛途径;c. 芳香族化合物在氯胺作用下生成卤乙腈<sup>[13-14]</sup>。

② 卤乙酰胺

卤乙酰胺生成路线主要有两种:a. HANs醛途径或水解生成卤乙酰胺<sup>[11]</sup>;b. 卤乙酰胺前体物(如氨基酸)与NH<sub>2</sub>Cl反应生成卤乙酰胺<sup>[15]</sup>。

③ 卤代硝基甲烷

卤代硝基甲烷的生成方式主要有4种:a. DOM与消毒剂生成的硝基甲烷酸化了C—H键,使α碳位发生卤代反应,生成卤代硝基甲烷<sup>[16]</sup>;b. 硝酸盐在UV下光解生成NO<sub>2</sub>·,并将溶解性有机物(DOM)转化为硝基苯酚,进一步与消毒剂反应生成卤代硝基甲烷<sup>[17]</sup>;c. 溴离子在UV/Cl处理过程中被氧化成次溴酸并与有机物发生取代反应,生成Br-HNMs<sup>[18]</sup>;d. 氯离子与芳香族化合物反应生成中间体,再与HClO反应,使苯环裂解,进而生成卤代硝基

甲烷<sup>[19]</sup>。

#### ④ 亚硝胺

根据消毒过程中可能出现的情况,研究者总结了4种亚硝胺生成路径<sup>[20-22]</sup>:a. 氯胺消毒过程中,未配位的伯、叔、季胺对氯二胺进行攻击,形成中间体,再被溶解氧化生成相对应的亚硝胺;b. 次氯酸盐与亚硝酸盐生成 $\text{ClNO}_2$ ,进一步与亚硝酸盐反应生成高活性亚硝化中间体 $\text{N}_2\text{O}_4$ ,再与二甲胺(DMA)反应生成NDMA;c. 臭氧条件下, $\text{NH}_2\text{OH}$ 与DMA反应生成NDMA;d. 活性炭催化仲胺生成亚硝胺。

#### ⑤ 芳香族N-DBPs

目前,对于芳香族N-DBPs前驱物的研究还处于起步阶段,但从结构特点来看,含有苯基或杂环结构的DOM更容易形成芳烃DBPs,如蛋白质和多肽。Liu等<sup>[23]</sup>总结了芳香族N-DBPs通过DOM生成的途径:a. 间接途径。DOM被氯攻击生成非卤代芳香族DBPs(如水杨酸),作为中间体再通过亲电取代进一步转化为卤代芳香DBPs。b. 直接途径。氯先取代DOM中的酚基,随后形成的氯-酚基将DOM裂解生成卤代芳香族DBPs。虽然“直接途径”和“间接途径”都会形成卤代芳香族DBPs,但大部分芳烃DBPs是通过间接途径形成的<sup>[24]</sup>。

芳香族N-DBPs中的氮源可以是DOM也可以是无机氮。如前所述,多肽、吡咯等具有芳香结构和氮原子的有机化合物可与消毒剂反应生成芳香型N-DBPs。同时,氯胺也能作为氮源,在苯环中羟基的邻位或对位与氯胺发生亲电取代反应,生成芳香化合物<sup>[25]</sup>。此外,有研究发现,使用氯消毒生成的2-氯苯乙腈(CPANs)浓度比使用氯胺消毒生成的CPANs浓度更高,可能是因为氯比氯胺的亲电取代能力更强,更容易与潜在的芳香族前驱物反应形成CPANs<sup>[26]</sup>。

## 2.2 N-DBPs的控制技术

### ① 去除前驱物

含氮有机物以及藻类死亡后释放的高浓度有机氮是N-DBPs的主要前驱物<sup>[27]</sup>,目前可采用强化混凝、高级氧化等技术实现前驱物的去除。Li等<sup>[27]</sup>比较了多种材料对DBPs前驱物的混凝性能,结果显示以 $\text{AlCl}_3$ 合成的新型混凝剂(CBC)对低浓度NOM中芳香族化合物和腐殖质的去除效果最优,这与CBC具有较高的电荷中和能力及硅组分反应有

关。Ike等<sup>[28]</sup>研究了 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 、 $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{Cl}\cdot$ 高级氧化降解DOM后水中N-DBPs的浓度变化,结果表明该技术产生的DBPs总体影响取决于DOM化学性质和自由基剂量的大小。

### ② 优化消毒工艺

采用多种消毒工艺可降低出水中的N-DBPs含量,如臭氧预氧化、 $\text{O}_3$ /活性炭联用等。Hu等<sup>[29]</sup>研究比较了4种不同氧化剂在不同工艺下对含Cl的N-DBPs前驱物浓度的影响,结果发现采用预氧化可使N-DBPs的去除率提高7.2%~10.6%。其中臭氧的预处理效果最好,原因推测是臭氧通过增加含氧官能团的浓度或通过桥接反应<sup>[28]</sup>促进了混凝和改变有机物的分子特性,使亲水性有机物更容易降解。但臭氧预氧化也会使含Br的NOM转变为毒性更强的溴化DBPs<sup>[4]</sup>,因此需要根据原水水质进行工艺选择。Gilca等<sup>[8]</sup>使用 $\text{O}_3$ 预处理后联用活性炭,将N-DBPs的去除率提高了53.0%。活性炭的加入解决了N-DBPs前驱物的DOM位点与臭氧氧化的DOM活性位点不同的问题,吸附了无法被臭氧氧化的N-DBPs及前驱物<sup>[30]</sup>。

### ③ 直接去除N-DBPs

使用性能优越的吸附剂可直接去除水中的N-DBPs,Zhang等<sup>[31]</sup>研究表明,将纳米级零价铁(nZVI)负载在银纳米管(MONTs)上,可有效吸附降解水中的NDMA。Yao等<sup>[32]</sup>等研究发现,使用巯基改性的Al基MOF材料,可吸附去除水中低浓度的NDEA,其吸附机制主要为亲核反应。

## 3 N-DBPs的富集检测技术

N-DBPs在饮用水中的浓度较低,一般为 $\text{ng/L}$ 级,需要通过前处理技术将其浓缩、富集,才能实现准确定量分析。目前,常用的前处理技术主要有:液液萃取(LLE)、分散液液微萃取(DLLME)、固相萃取(SPE)、分散固相萃取(DSPE)、固相微萃取(SPME)等。各种前处理技术结合各类分析仪器(如GC/ECD、GC-MS、LC-MS/MS等)<sup>[8]</sup>,可实现对N-DBPs的痕量分析。但目前主要研究对象集中在HANs、HAcAms、HNMs的部分化合物上,并未实现已知N-DBPs的全覆盖测试。

### 3.1 液液萃取

液液萃取是目前应用最广泛的同时处理多种N-DBPs的萃取技术,适用于大多数实验室。由于



目标物与目标物所处溶液的不同,所选择的萃取剂也会发生变化,常用于萃取N-DBPs的有机溶剂有:甲基叔丁基醚、乙酸乙酯、乙腈、二氯甲烷等<sup>[33-34]</sup>。

盐析辅助液液萃取是在液液萃取基础上,在溶液中加入电解质的一种前处理手段。加入的电解质增大了溶质在溶剂中的分布比例,间接破坏了有机溶质与溶剂之间的界面张力,萃取液在外界振荡的帮助下充分分散到水相中,从而增加萃取效率。美国环境保护署公布的USEPA Method 551.1中,加入NaCl或Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>进行盐析辅助液液萃取,富集并检测水中5种N-DBPs(BCAN、DBAN、DCAN、TCAN和TCNM)。

液液萃取具有价廉、简单等优点,但也存在耗时、回收率低、检出限高等缺点。

### 3.2 分散液液微萃取

液液萃取需要使用大量的有机溶剂,而分散液液微萃取只需使用较少的水样和萃取剂。分散液液微萃取是在传统液液萃取基础上,加入不溶于样品溶液和萃取剂的分散剂,形成三相混合的状态,利用目标物在不同相之间的分配系数不同<sup>[35]</sup>,使之转移至萃取剂,最后利用离心分离。萃取N-DBPs常用的分散剂有甲醇、乙腈和异丙酮等<sup>[34]</sup>。

该方法有机溶剂用量少,萃取时间短且具有较高的萃取效率和富集倍数。分散液液微萃取的弊端是需额外添加分散剂,难以实现自动化连续进样,且分析物极性较强时会减少目标物在萃取剂上的分配系数,如高极性的卤乙酰胺就难以使用分散液液微萃取进行富集。

### 3.3 固相萃取

固相萃取是基于液固萃取和液相色谱理论的一种前处理技术,当液体通过固定相时,目标物被吸附到萃取柱上,再用有机溶剂或热解吸的方式解吸目标物,从而达到富集的目的<sup>[36]</sup>。在这种以吸附为基础的技术中,萃取柱材料的选择对萃取效果至关重要。吸附N-DBPs常用的萃取柱有:C18、envi18、Oasis WAX、Bond elutu-ph、MAX和Oasis HLB等。

与液液萃取相比,固相萃取具有较好的富集效果和较高的回收率,但也更耗费时间和精力,且重现性不佳。

### 3.4 分散固相萃取

如果水样中含有的颗粒或微生物浓度较高时,使用传统的固相萃取进行富集,萃取柱表面的孔道

会被堵塞,不仅增加了后续清理的困难,还降低了萃取效果,因此出现了分散固相萃取。分散固相萃取其实是固相萃取的一种变体,吸附材料并不是填充在萃取柱上,而是以粉末或颗粒状与目标溶液直接接触,吸附结束后,通过离心或过滤分离吸附剂,再使用有机溶剂或热解吸方式分离目标物。Zhang等<sup>[37]</sup>使用二氧化钛对水中N-DBPs进行了分散固相萃取,取得了较好的效果。

分散固相萃取具有接触面积大、吸附平衡时间短等优点,但也存在分离过程复杂、回收率低等不足。

### 3.5 固相微萃取

固相微萃取技术是一种基于固相萃取的前处理技术,较之于固相萃取具有操作更简单、快速的特点,且只需要较少的样品,易于自动化。固相微萃取的独到之处在于,它将吸附材料涂覆在纤维头上,再浸没于目标液中,取样和富集于一体,并通过热解吸或溶剂洗脱,将分析物转移至进样瓶即可直接上机分析。常用的萃取N-DBPs的纤维头有CAR-PDMS和DVBCAR-PDMS两种。在这种水样量较少的前处理技术中,使用选择性较高的纤维头往往能起到事半功倍的效果,将新材料用作纤维头进行萃取是未来的重点研究方向之一。

Dominguez-Tello等<sup>[38]</sup>采用3D打印装置,使用聚丙烯中空螺旋纤维材料制作了一个气泡技术辅助分散微固相萃取装置。该装置基于支撑液膜的原理,结合纤维表面孔隙,增加了接触面积,有着重复性强、选择性高、富集效果好的特点。虽然该装置需要专业设备制作且商业化困难,但为探索新型的装置提供了一种新的思路。

### 3.6 N-DBPs常用前处理技术比较

液液萃取对绝大多数有机物具有适用性,且能在大多数场所使用,简单快捷,但水中的目标物浓度较低时无法检出,因此萃取后需使用氮吹浓缩技术,用以提高富集倍数。这种前处理手段对目标物损失较大,回收率较低。固相萃取、固相微萃取具有较高的回收率和富集倍数,作为富集技术时水样体积不宜过大(一般不超过50 mL),且使用的萃取柱/物需有较高的针对性,否则洗脱液中非目标物过多,干扰检测分析。

简单来说,液液萃取简单快速,适用面广;水样体积小,低浓度时使用固相萃取、固相微萃取为宜。

富集效果不仅与前处理手段选择有关,也受水样pH、温度及目标物在水中的稳定性等因素影响。Liew等<sup>[39]</sup>研究了亚硫酸钠、氯化铵和抗坏血酸等常见防腐剂对卤代硝基甲烷和卤乙酰胺的保存作用,实验结果表明氯化铵最适合保存卤代硝基甲烷和卤乙酰胺。卤乙酰胺在中性条件下较为稳定,对于无法立即测定的卤乙酰胺水样,需将水样pH调至5左右保存。然而,并不是的所有N-DBPs都适合采用这种方法保存,部分N-DBPs在低pH下易接受质子,从而发生变化。Tang等<sup>[40]</sup>对模拟水样的pH进行细微调整和优化后,使用UPLC/ESI-tqMS分析,检测和识别到一种新型杂环N-DBPs——卤化吡啶醇,并在实际水样中检出该类新N-DBPs。由于,目前对N-DBPs的了解有限,也就意味着对N-DBPs在饮用水消毒处理和给水分配过程中进行有效监测存在较大困难,而随着新N-DBPs不断被检出和认知,N-DBPs与人体健康之间的关联性尚需进一步探索。

#### 4 结语

因N-DBPs在水中的浓度较低,无法直接由检测设备准确定量,因此对其进行深入研究存在较大困难。目前,主要采用液液萃取、固相萃取等前处理手段对其进行富集,再结合气相色谱、液相色谱质谱联用等仪器进行分析检测。此外,随着对N-DBPs生成机理的深入研究,将不断探索出水样中存在但仍未发现的N-DBPs,而这些研究均是在能够对超痕量N-DBPs实现富集前处理的基础上进行,以确保能够得到较高的回收率,降低检出限,为实际水样中N-DBPs的检测提供保障,并为进一步实现N-DBPs的控制提供研究基础。

随着材料科学的飞速发展,新型功能材料成为研究热点,并广泛应用于水处理、能源、生态环境修复等领域,其中效果好、选择性较高的萃取材料的发展与新型材料的研发息息相关。基于固相微萃取的独特优势,可以根据目标物的不同选择更换萃取头,体现出较高的选择性,以及较强的可操作性。目前,固相微萃取的材料对N-DBPs的富集机制以物理吸附为主,存在萃取效果不理想、经济成本较高的不足。为提高选择性和吸附能力,在固相微萃取材料的选择上,应结合N-DBPs官能团特点,寻找对各类N-DBPs具有选择性较高、吸附能力较强的

材料,这可能是未来该领域的研究发展方向。

含氮消毒副产物是近10年来备受关注的新型消毒副产物,其形成对人体(尤其是神经和生殖系统)具有累积性和破坏性的影响。为消除和控制N-DBPs,对原水水质的分析监测具有重要意义。在水处理中,应结合原水pH、温度、DOM等特性,通过改变消毒剂种类及使用剂量等措施,尽可能减少N-DBPs的产生。为实现对N-DBPs的有效控制,应进一步研究N-DBPs的发生及转化途径,并结合现代分析方法,采用先进的高精度质谱手段,加强N-DBPs的筛查和鉴定技术研究,以期发现更多的未知的N-DBPs。同时,结合其体外和体内毒理学研究结果,形成更加系统和全面的N-DBPs研究体系,并将研究成果转化为水质标准或法规,确保饮用水安全。

#### 参考文献:

- [1] WANG C, LIU S, WANG J, *et al.* Monthly survey of N-nitrosamine yield in a conventional water treatment plant in north China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 38: 142-149.
- [2] HUANG H, ZHU H, GAN W, *et al.* Occurrence of nitrogenous and carbonaceous disinfection byproducts in drinking water distributed in Shenzhen, China [J]. *Chemosphere*, 2017, 188: 257-264.
- [3] 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 Lei, WANG Haiyan, CAI Hongquan, *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 (in Chinese).
- [4] CHEN H, LIN T, CHEN W, *et al.* Removal of disinfection byproduct precursors and reduction in additive toxicity of chlorinated and chloraminated waters by ozonation and up-flow biological activated carbon process[J]. *Chemosphere*, 2019, 216: 624-632.
- [5] 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 Zhuwu, LIU Xinru, WU Jiangnan, *et al.* Research progress on generation and control of typical nitrogenous disinfection by-products in drinking water

- [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(10): 2595–2603 (in Chinese).
- [6] DING S K, CHU W H, BOND T, *et al.* Formation and estimated toxicity of trihalomethanes, haloacetonitriles, and haloacetamides from the chlor(am)ination of acetaminophen [J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 341: 112–119.
- [7] ZHOU X, ZHENG L, CHEN S, *et al.* Factors influencing DBPs occurrence in tap water of Jinhua Region in Zhejiang Province, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 171: 813–822.
- [8] GILCA A F, TEODOSIU C, FIORE S, *et al.* Emerging disinfection byproducts: a review on their occurrence and control in drinking water treatment processes [J]. Chemosphere, 2020, 259: 127476.
- [9] LIU H, ZHANG X, FANG Y, *et al.* Trade-off control of organic matter and disinfection by-products in the drinking water treatment chain: role of pre-ozonation [J]. Science of the Total Environment, 2021, 770: 144767.
- [10] MANASFI T, COULOMB B, BOUDENNE J. Occurrence, origin and toxicity of disinfection byproducts in chlorinated swimming pools: an overview [J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2017, 220(3): 591–603.
- [11] LE ROUX J, NIHEMAITI M, CROUÉ J. The role of aromatic precursors in the formation of haloacetamides by chloramination of dissolved organic matter [J]. Water Research, 2016, 88: 371–379.
- [12] 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, 42(8): 134–141.
- BAO Lu'er, ZHANG Haifeng, YU Jianwei, *et al.* Review on haloacetonitrile precursor and its formation mechanism of disinfection byproduct containing nitrogen [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(8): 134–141 (in Chinese).
- [13] LINGEA K L, KRISTIANA I, LIEW D, *et al.* Halogenated semivolatile acetonitriles as chloramination disinfection by-products in water treatment: a new formation pathway from activated aromatic compounds [J]. Environmental Science: Processes & Impacts, 2020, 22(3): 653–662.
- [14] QIAN Y, HU Y, CHEN Y, *et al.* Haloacetonitriles and haloacetamides precursors in filter backwash and sedimentation sludge water during drinking water treatment [J]. Water Research, 2020, 186: 116346.
- [15] 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: 806–812.
- [16] 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.
- GAO Naiyun, CHU Wenhai, XU Bin. Discussion on the control strategy of new disinfection by-products in drinking water from generation mechanism [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(2): 1–5 (in Chinese).
- [17] GUO Z B, LIN Y L, XU B, *et al.* Factors affecting THM, HAN and HNM formation during UV-chlor(am)ination of drinking water [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 306: 1180–1188.
- [18] DONG H Y, QIANG Z M, HU J, *et al.* Degradation of chloramphenicol by UV/chlorine treatment: kinetics, mechanism and enhanced formation of halonitromethanes [J]. Water Research, 2017, 121: 178–185.
- [19] WANG J J, LI Z G, HU S Y, *et al.* Formation and influence factors of halonitromethanes in chlorination of nitroaromatic compounds [J]. Chemosphere, 2021, 278: 130497.
- [20] SGROI M, VAGLIASINDI F G A, SNYDER S A, *et al.* N-nitrosodimethylamine (NDMA) and its precursors in water and wastewater: a review on formation and removal [J]. Chemosphere, 2018, 191: 685–703.
- [21] LIU X K, LIN Y F, RUAN T, *et al.* Identification of N-nitrosamines and nitrogenous heterocyclic byproducts during chloramination of aromatic secondary amine precursors [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(20): 12949–12958.
- [22] MAZARI S A, ALABA P, SAEED I M. Formation and elimination of nitrosamines and nitramines in freshwaters involved in post-combustion carbon capture process [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2019, 7(3): 103111.
- [23] LIU X Y, CHEN L, YANG M T, *et al.* The occurrence, characteristics, transformation and control of aromatic disinfection by-products: a review [J]. Water Research, 2020, 184: 116076.
- [24] JIANG J Y, HAN J R, ZHANG X R. Nonhalogenated aromatic DBPs in drinking water chlorination: a gap

- between NOM and halogenated aromatic DBPs [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 54 (3): 1646–1656.
- [25] GONG T T, TAO Y X, ZHANG X R, *et al.* Transformation among aromatic iodinated disinfection byproducts in the presence of monochloramine: from monoiodophenol to triiodophenol and diiodonitrophenol [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51 (18): 10562–10571.
- [26] 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.
- [27] LI X, RAO N R H, LINGE K L, *et al.* Formation of algal-derived nitrogenous disinfection by-products during chlorination and chloramination [J]. *Water Research*, 2020, 183: 116047.
- [28] IKE I A, LEE Y, HUR J. Impacts of advanced oxidation processes on disinfection byproducts from dissolved organic matter upon post-chlor(am)ination: a critical review [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 375: 121929.
- [29] 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.
- [30] KOSAKA K, IWATANI A, TAKEICHI Y, *et al.* Removal of haloacetamides and their precursors at water purification plants applying ozone/biological activated carbon treatment [J]. *Chemosphere*, 2018, 198: 68–74.
- [31] ZHANG B B, LIU J S, ZHAO R S, *et al.* NDMA adsorption and degradation by a new-type of Ag-MONT material carrying nanoscale zero-valent iron [J]. *Chemosphere*, 2021, 268: 129271.
- [32] YAO N, CHEN J F, FENG R, *et al.* Mechanistic insight into the adsorption of low concentrations of N-nitrosodiethylamine in water by functional MIL-96: experiments and theoretical calculations [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 451: 138761.
- [33] CARTER R A A, LIEW D S, WEST N, *et al.* Simultaneous analysis of haloacetonitriles, haloacetamides and halonitromethanes in chlorinated waters by gas chromatography–mass spectrometry [J]. *Chemosphere*, 2019, 220: 314–323.
- [34] ON J, PYO H, MYUNG S. Effective and sensitive determination of eleven disinfection byproducts in drinking water by DLLME and GC-MS [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 639: 208–216.
- [35] 李贺贺, 何菲, 段佳文, 等. 液相微萃取技术在食品分析中的应用 [J]. *中国食品学报*, 2021, 21 (8): 400–408.
- LI Hehe, HE Fei, DUAN Jiawen, *et al.* Application of liquid phase microextraction technology in food analysis [J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2021, 21 (8): 400–408 (in Chinese).
- [36] 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.
- [37] ZHANG Y, ZHAO Y G, MUHAMMAD N, *et al.* Ultrasound-assisted synthesis of clover-shaped nanotitania functionalized covalent organic frameworks for the dispersive solid phase extraction of N-nitrosamines in drinking water [J]. *Journal of Chromatography A*, 2020, 1618: 460891.
- [38] DOMINGUEZ-TELLO A, DOMINGUEZ-ALFARO A, GÓMEZ-ARIZA J L, *et al.* Effervescence-assisted spiral hollow-fibre liquid-phase microextraction of trihalomethanes, halonitromethanes, haloacetonitriles, and halo ketones in drinking water [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 397: 122790.
- [39] 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.
- [40] TANG H Y, ZHONG H L, PAN Y, *et al.* A new group of heterocyclic nitrogenous disinfection byproducts (DBPs) in drinking water: role of extraction pH in unknown DBP exploration [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(10): 6764–6772.

作者简介: 陈金凤 (1981– ) 女, 福建漳平人, 博士, 副教授, 主要从事环境污染物的识别与控制等研究工作。

E-mail: jfchen@fjut.edu.cn

收稿日期: 2021-12-26

修回日期: 2022-01-22

(编辑: 丁彩娟)