

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.04.007

卤代苯醌检出及前体物研究进展

林珂¹, 王永磊¹, 陈淑华², 张孟雨¹, 亓华³, 赵银河¹

(1. 山东建筑大学 市政与环境工程学院, 山东 济南 250101; 2. 济南水务集团有限公司, 山东 济南 250000; 3. 新泰市自来水有限公司, 山东 新泰 271299)

摘要: 卤代苯醌(HBQs)是一类近年来新检出的且未受控的消毒副产物,虽然在水中的浓度很低且只有ng/L级别,但是其细胞毒性和遗传毒性均强于常见的消毒副产物三卤甲烷、卤乙酸等,其高毒性和膀胱癌风险对人类的健康无疑是一项重大威胁。水处理厂的常规处理工艺目的在于去除消毒副产物前体物,但是目前对HBQs的前体物及检测情况研究较少。从HBQs的种类、HBQs的检出情况、已证实的HBQs前体物及其生成HBQs途径和可能的HBQs前体物等四个方面,综述了HBQs的前体物研究进展及检测情况,并对HBQs目前研究方面存在的局限进行了总结,进一步提出未来HBQs的研究新方向和思路,以期从前体物方面为更好地处理HBQs和分析HBQs的生成途径提供依据。

关键词: 消毒副产物; 卤代苯醌; 前体物

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)04-0038-06

Progress on the Detection of Halogenated Benzoquinones and Their Precursors

LIN Ke¹, WANG Yong-lei¹, CHEN Shu-hua², ZHANG Meng-yu¹, QI Hua³,
ZHAO Yin-he¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. Jinan Water Group Co. Ltd., Jinan 250000, China; 3. Xintai City Water Supply Co. Ltd., Xintai 271299, China)

Abstract: Halogenated benzoquinones(HBQs) are a class of uncontrolled disinfection by-products that have been newly detected in recent years. Although the concentration of HBQs in water is very low with the level of ng/L, their cytotoxicity and genetic toxicity are both stronger than that of common disinfection by-products, e.g. trihalomethane, haloacetic acid, respectively. The high toxicity of HBQs and their risk on bladder cancer are undoubtedly a major threat to human health. The conventional treatment process of water treatment plants aims to remove the precursors of disinfection by-products, but there are few studies on the detection of HBQs and their precursors. The article summarizes the research progress of HBQs precursors from four aspects: the types of HBQs, the detection status of HBQs around the world, the proven precursors of HBQs and the pathways to generate HBQs, and the potential precursors of HBQs. It also summarizes the limitations of the current research on HBQs, and proposes new directions and ideas for HBQs research in future, hoping to provide a basis for a better HBQs processing, as well as analyzing

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2020ME221); 潍坊市科学技术发展计划项目(2020ZJ1320)

通信作者: 王永磊 E-mail: wyl1016@sdjzu.edu.cn

the generation pathways of HBQs from the perspective of precursors.

Key words: disinfection by-products; halogenated benzoquinones; precursor

卤代苯醌(halogenated benzoquinones, HBQs)是一类新型且并未受到控制和限制的饮用水消毒副产物,虽然在饮用水中只是ng/L水平^[1],但其毒性比常见消毒副产物三卤甲烷(THMs)和卤乙酸(HAAs)等高1 000倍以上^[2]。现有的水厂处理工艺如混凝、砂滤、紫外和臭氧等对HBQs及其前体物的去除效果较差,且对HBQs的前体物研究较少,所以有必要研究饮用水处理过程中HBQs的生成及其前体物。

1 HBQs种类及检出

1.1 HBQs种类

目前,已知的卤代苯醌有12种^[3],在水中浓度较高而易被检出的有4种,包括2,6-二氯-1,4-苯醌(2,6-DCBQ)、2,6-二溴-1,4-苯醌(2,6-DBBQ)、2,6-二氯-3-甲基-1,4-苯醌(2,6-DC-3-MBQ或DCMBQ)、2,3,6-三氯-1,4-苯醌(TriCBQ),其他8种浓度相对较低且难以检出的分别为2,3-二溴-5,6-二甲基-1,4-苯醌(DBDMBQ)、2,3,5,6-四氯-1,4-苯醌(TetraC-1,4-BQ)、3,4,5,6-四氯-1,2-苯

醌(TetraC-1,2-BQ)、2,5-二氯-1,4-苯醌(2,5-DCBQ)、2,5-二溴-1,4-苯醌(2,5-DBBQ)、2,3,5,6-四溴-1,4-苯醌(TetraB-1,4-BQ或TBBQ)、3,4,5,6-四溴-1,2-苯醌(TetraB-1,2-BQ)、2,3-二碘-1,4-苯醌(2,3-DIBQ)。

1.2 HBQs检出情况

卤代苯醌是水中某些物质氯化后产生的一组消毒副产物。然而,到目前为止,卤代苯醌前体物的身份仍然未知。HBQs在国内与国外的水厂及游泳池中均有不同程度的检出,在被检出的四种常见卤代苯醌中,2,6-DCBQ被检出频率且检出浓度最高^[4]。表1为不同地区卤代苯醌的检出情况^[1,4-8]。可以看出,HBQs在水厂出水中普遍存在,且在泳池水和地表水中也有不低的含量。HBQs在水处理过程中形成的种类和生成的浓度与原水水质、消毒剂类型、消毒剂投加剂量和处理条件(pH值、温度等)等多种因素相关,所以不同地区的检出情况略有差异。

表1 不同地区HBQs检出情况

Tab.1 Detection of HBQs in different regions

国家或城市	水源类型	HBQs浓度/(ng·L ⁻¹)	检测方法
加拿大 ^[5]	水厂出厂水	2,6-DCBQ:165±9.1;DCMBQ:1.3±0.2;TriCBQ:9.1±0.6;2,6-DBBQ:0.5±0.1	固相萃取-液相色谱串联质谱法
加拿大、美国 ^[1]	水厂出厂水	2,6-DCBQ:1.0;2,6-DBBQ:0.5;2,6-DC-3-MBQ:0.9;TriCBQ:1.5	固相萃取-液相色谱-质谱法
美国 ^[4]	泳池水	2,6-DCBQ:0.19;DCMBQ:0.06;TriCBQ:0.10;2,6-DBBQ:0.05;2,5-DBBQ:0.12;DBDMBQ:0.05;TB-1,4-BQ:1.12;TB-1,2-BQ:0.03	固相萃取-高效液相色谱串联质谱法
美国 ^[6]	地表水	2,6-DCBQ:1.2;2,5-DCBQ:1.2;DCMBQ:0.9;TriCBQ:1.0;2,6-DBBQ:0.2;2,5-DBBQ:0.2;TetraB-1,2-BQ:0.5	固相萃取-超高压液相色谱-负电喷雾电离质谱法
美国圣地亚哥 ^[7]	水厂出厂水	2,6-DCBQ:5.3~14.4;2,6-DBBQ:14.3~54.6	固相萃取-液相色谱-串联质谱法
中国南宁 ^[8]	泳池水	2,6-DCBQ:4.56~45.3;2,6-DBBQ:0.38~14.2;TetraC-1,2-BQ:0.54~2.6	高效液相色谱-串联质谱法

在国外,美国和加拿大对卤代苯醌的调查和研究较多,但大多为水厂出水和游泳池水,对输配水管网中卤代苯醌的调查较少。在国内,对卤代苯醌的研究还没有受到足够的重视,检测和调查较少,但是Wu等^[8]对南宁市的7个公共室内外游泳池水检测发现,2,6-DCBQ的浓度最高,最高可达45.3 ng/L,且室内游泳池水中卤代苯醌的浓度明显高于

室外游泳池水。原因可能是室内游泳池水中低氮、高氯化物、腐殖酸、化学需氧量和UV₂₅₄会增加HBQs的形成。

现有水厂对溶解性有机物的去除能力有限,一些大分子有机物不完全降解,在氯化消毒过程中形成了卤代苯醌^[9]。游泳池水中卤代苯醌出现的原因与饮用水消毒相似,消毒剂可以与水中的有机或无

机物发生反应生成消毒副产物(DBPs)。所以对卤代苯醌的前体物进行研究至关重要,对卤代苯醌的控制和限制有重要意义。

2 HBQs 前体物

饮用水中的天然有机物(NOM)在消毒过程中可与消毒剂反应生成多种消毒副产物,饮用水中卤代苯醌出现的原因可能是水厂的常规处理工艺对卤代苯醌的前体物处理效能较低^[10],并且NOM种类复杂且含量较高,为大部分消毒副产物的前体物。

2.1 芳香族化合物

2.1.1 苯酚

苯酚已经被证实为HBQs的前体物^[11]。Zhao等^[5]研究并提出了2,6-DCBQ的生成途径,其中2,6-DCBQ是通过2,4,6-三氯苯酚(TCP)作为中间体形成的。生成途径包括两个反应:首先苯酚被HClO取代生成TCP($C_6H_5OH + 3HClO = C_6H_2Cl_3OH + 3H_2O$);然后TCP被HClO氧化生成2,6-DCBQ($C_6H_2Cl_3OH + HClO = C_6H_2Cl_2O_2 + 2HCl$)。

Kosaka等^[11]研究了5种氯苯酚氯化60 min后生成2,6-DCBQ的情况,二氯酚(2-CP)为0.12%,四氯酚(4-CP)为0.03%,2,4-二氯苯酚(2,4-DCP)为0.07%,2,6-二氯苯酚(2,6-DCP)为0.12%,TCP为0.2%。同时也研究了苯酚(PHE)氯化60 min后生成DCBQ的情况,生成产率为0.1%(以物质的量计,下同)。可以看出,不同结构的苯酚、氯苯酚的2,6-DCBQ生成率不同,原因是不同苯酚、氯苯酚生成TCP的能力不同,而TCP作为中间产物转化为2,6-DCBQ,所以2,6-DCBQ的生成率不同,这也与上述推测生成2,6-DCBQ的反应过程相符合。

2.1.2 对位取代酚类化合物和芳香胺类化合物

当水中没有酚类时,对位取代酚类化合物和对位取代芳香胺类化合物也被证明是2,6-DCBQ的前体物。对位取代酚以双酚A(BPA)为代表,BPA作为苯酚的重要衍生物,它可以在氯化过程中产生TCP,从而进一步产生2,6-DCBQ。此外,对位取代芳胺(如苯胺和N-甲基苯胺)在氯化后也可以生成2,6-DCBQ,且生成量高于对位取代酚。其中N-甲基苯胺的生成途径由Kosaka等^[11]研究提出,N-甲基苯胺(NMA)氯化后先生成2,4,6-三氯-N-甲基苯胺(2,4,6-TCMA),然后生成3,5-二氯醌-4-氯酰亚胺(3,5-DCQC),并推测2,6-DCBQ由3,5-DCQC通

过N-氯酰亚胺官能团转变为醌官能团而形成。

这些结果表明,2,6-DCBQ是由与其具有相似官能团的NOM化合物氯化后形成的,如酚类。而酚基是对位取代酚类的主要官能团之一,因此对位取代酚类化合物可作为更常见的2,6-DCBQ前体物。

2.1.3 腐殖酸

NOM可以分为腐殖质和非腐殖质两部分,通常认为腐殖质氯化后生成消毒副产物较多,而腐殖质主要由富里酸和腐殖酸组成^[7]。

张英芹^[12]以腐殖酸为前体物研究了不同情况下HBQs的生成情况,并以DOC浓度表示腐殖酸浓度,结果表明,2,6-DCBQ、2,6-DBBQ、TBBQ和DBDMBQ等4种HBQs生成量随DOC浓度的增加而增加,在DOC为7 mg/L时,4种HBQs生成浓度分别为8.3、8.23、43.94和330.17 $\mu\text{g/L}$ 。对某泳池水的研究表明^[5],HBQs的形成和DOC有着明显的相关性($R^2=0.65$),Diemert等^[13]对北美洲奥托纳比河、格兰德河和安大略湖水进行了研究和调查,发现2,6-DCBQ的形成和DOC呈线性关系,三个地区的 R^2 分别为0.79、0.53和0.43。因此以DOC表示腐殖酸浓度具有合理性。

腐殖酸一般以芳香结构为核心,并且由许多烷烃、脂肪酸、碳水化合物和含氮化合物通过醚键、酯键以及其他键与核心结合在一起。有研究通过三维荧光光谱分析和FTIR光谱分析等技术对氯化过程中腐殖酸的形态和结构研究发现,氯化会破坏腐殖酸的芳香结构,此时会发生取代反应,生成C—Cl键,羧基、羰基和甲氧基等含氮官能团进而可以与C—Cl键上的Cl发生反应转化为其他结构^[14]。由此推测腐殖酸氯化后生成多种小分子芳香结构,如苯酚、4-羟基邻苯二甲酸、氯苯酚等物质,然后经过含氮官能团的取代、氧化反应,最终生成HBQs^[15]。

2.2 藻源有机物

藻类常存在于饮用水水源中,且会暴发季节性水华,使水体产生异味、堵塞水处理厂管道甚至产生一些毒素。此外,水源中藻类产生的藻源有机物(AOM)会增加消毒副产物的形成^[16]。水源水中的AOM一般来源于藻类的代谢活动,一般分为细胞外有机物(EOM)、活细胞释放的产物、细胞内有机物(IOM)和细胞溶解产物^[17]。

而绿藻IOM中的蛋白质组分也被证明为HBQs的前体物,Ge等^[18]选取湖泊和河流中常见的绿藻进

行氯化实验研究其HBQs的生成情况,将绿藻分为胞内有机物蛋白质组分和胞外有机物多糖组分,IOM和EOM的氯化反应分别生成 $1.4\text{ }\mu\text{g/mgC}$ 和 $0.7\text{ }\mu\text{g/mgC}$ 的2,6-DCBQ。可以看出,IOM的2,6-DCBQ形成潜力是EOM的两倍,这表明IOM组分中的蛋白质是2,6-DCBQ前体物之一。同时,Ge等从普通念珠菌中提取蛋白质并进行氯化处理实验,结果证实2,6-DCBQ的产生量与藻总蛋白浓度线性关系良好, R^2 可达到0.98。这些结果表明,藻类中的蛋白质是2,6-DCBQ的主要前体物,与肖瑶^[19]的研究结果相似。

AOM富含以蛋白质、氨基酸和胺形式存在的有机氮^[20],HClO可以与这些有机氮反应生成有机氯胺^[21],而有机氯胺是DBPs形成的重要中间体^[22],可以后续产生DBPs。王忱^[23]选取酪氨酸、苯丙氨酸作为HBQs的前体物,以NaClO为消毒剂进行氯化实验研究HBQs的生成情况。结果表明,酪氨酸在投加量为 10 mg/L 时,生成了7种HBQs,分别为:2,6-DCBQ、2,6-DBBQ、TetraC-1,2-BQ、TetraC-1,4-BQ、TetraB-1,2-BQ、TetraB-1,4-BQ、TriCBQ。苯丙氨酸在投加量为 15 mg/L 时,同样也可以产生这7种HBQs。其中TetraC-1,2-BQ生成量最高,2,6-DBBQ生成量最低。通过对比所提取的离子流图,分析其原因是酪氨酸、苯丙氨酸主要生成邻位苯醌,对位苯醌很少,这是由酪氨酸、苯丙氨酸本身的结构和官能团所决定的。

2.3 人为污染物

游泳池水中DBPs的形成十分复杂,这是因为自来水中含有各种类型的有机物,而且大量游泳者也可能带入额外的污染物,如生物液体(尿液和汗液)和个人护理产品(化妆品、乳液和防晒霜)。

Wang等^[4]选择了4种身体乳液和4种超市常见的防晒霜,为了比较游泳池水氯化过程中不同个人护理品(PPCPs)形成HBQs的可能性,制备了含有相同DOC含量(5 mg/L)的样品,并将游离余氯保持在相同的浓度($3.0\pm 0.1\text{ mg/L}$)。研究发现,身体乳液和防晒霜的所有氯化样品均会产生2,6-DCBQ。其中一种防晒霜产生的2,6-DCBQ浓度最高,为(5420 ± 373) ng/L 。其他乳液和防晒霜产生的2,6-DCBQ浓度也处于类似水平,为(18 ± 6)~(194 ± 6) ng/L 。除2,6-DCBQ外,部分氯化PPCPs样品还含有其他HBQs物质。在所有4份身体乳液样本和2

份防晒霜样本中均检测到DCMBQ,其浓度为(0.1 ± 0.6)~(4.0 ± 0.6) ng/L ;4份防晒霜样本中均检测到TetraB-1,4-BQ,其浓度为(0.9 ± 1.0)~(1.6 ± 1.4) ng/L ,但这些物质在任何乳液样本中均未被检测到。此外,在2份防晒霜样品中还发现了TriCBQ,其浓度分别为(3.5 ± 0.5)、(30.7 ± 7.6) ng/L 。这些结果可以证明PPCPs不仅是2,6-DCBQ的前体物,而且也是TriCBQ等HBQs的前体物。

已有研究证明,酚类和醌类是HBQs的前体物,乳液中的一些常见成分,如苯甲醇、卵磷脂、对羟基苯甲酸酯,以及一些含有维生素、氨基酸、肽和蛋白质的植物提取物可以作为HBQs的前体物;防晒霜中对紫外线有遮挡、吸收作用的化学物质(如阿伏苯宗、奥克立林和对苯二亚甲基二樟脑磺酸),也可能是HBQs的前体物。

3 HBQs可能的前体物

3.1 人工甜味剂

人工甜味剂是一种人工合成或半人工合成的有机化合物,广泛应用于食品、护理品和饮料,并且在人体内很难或几乎不会被转化。人工甜味剂因其对废水的高度特异性、高水溶性、对固体的低吸附性,使其成为常用的人为废水标记物^[24]。Wu等^[25]研究了氯化去除乙酰磺胺(ACE)的效果,结果发现氯化过程中产生了多种溴代消毒副产物,并且毒性高于氯代消毒副产物。王忱^[23]以人工甜味剂为卤代苯醌的前体物,对多地区水源进行检测,并对水中HBQs和人工甜味剂之间的相关性进行分析,得出结果显示溴代HBQs与ACE、总有机碳(TOC)相关性较低。但是该研究并未进行关于HBQs与人工甜味剂的生成实验,也没有对人工甜味剂进行成分、官能团的分析,所以应该进一步进行验证,以确定人工甜味剂是否为HBQs的前体物。

3.2 抗生素

抗生素是由细菌、霉菌或者其他微生物产生的一类次级代谢产物,且具有抗病原体活性。抗生素的滥用使环境中的抗生素残留水平不断升高,且抗生素本身就有一定的毒理效应^[26]。水中残留的抗生素已被发现是消毒副产物的前体物。Zhou等^[27]对四环素类抗生素氯化后产生的消毒副产物进行了研究,结果表明三氯甲烷、四氯化碳、二氯乙腈和二氯丙酮均有产生,同时还发现反应条件对不同消

毒副产物生成的影响较大。Ye等^[28]研究发现,四环素在氯化化和氯胺化过程中产生的二氯乙酰氨(DCAcAm)最多,平均产率为0.43%~54.26%。四环素等多种抗生素本身由多个苯环及其他羟基、氨基组成,部分结构与苯酚和苯醌类似,但是目前还没有关于抗生素是否为HBQs前体物的研究,可进行进一步研究,验证抗生素氯化后是否可以生成HBQs,为抗生素是否为HBQs的前体物提供依据。

4 结论

卤代苯醌是一种新型的消毒副产物,且并未受到控制,浓度虽然是ng/L级别,但是细胞毒性和遗传毒性却远远高于常见的卤代消毒副产物。由于现有水厂对HBQs的去除能力较差,而且HBQs难以去除,所以处理工艺重点都放在消毒副产物前体物的去除方面,这就对HBQs的前体物研究提出了新的挑战。目前,HBQs的前体物研究尚少且不完善,需要对HBQs的前体物进行进一步研究,为HBQs前体物的去除提供可靠依据。今后需要针对以下几方面进行重点研究:

① 深入研究已确定前体物生成HBQs的途径,研究出更加精确的HBQs检测技术,对多处水源地进行HBQs的检测、调查与分析。

② 对其他可能的污染物进行验证分析,如药物污染物(抗生素)或者化学污染物(化妆品、人工甜味剂),以确定其是否为卤代苯醌的前体物。

参考文献:

- [1] ZHAO Y L, ANKHINA 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.
- [2] WANG W, QIAN Y C, JMAIFF L K, *et al.* Precursors of halobenzoquinones and their removal during drinking water treatment processes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(16): 9898-9904.
- [3] WANG W, MOE B, LI J H, *et al.* Analytical characterization, occurrence, transformation, and removal of the emerging disinfection byproducts halobenzoquinones in water [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2016, 85: 97-110.
- [4] WANG W, QIAN Y C, BOYD J M, *et al.* Halobenzoquinones in swimming pool waters and their formation from personal care products [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(7): 3275-3282.
- [5] 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.
- [6] HUANG R F, WANG W, QIAN Y C, *et al.* Ultra pressure liquid chromatography-negative electrospray ionization mass spectrometry determination of twelve halobenzoquinones at ng/l levels in drinking water [J]. *Analytical Chemistry*, 2013, 85(9): 4520-4529.
- [7] QIN F, ZHAO Y Y, ZHAO Y L, *et al.* A toxic disinfection by-product, 2, 6-dichloro-1, 4-benzoquinone, identified in drinking water [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2010, 49(4): 790-792.
- [8] WU H, LONG K L, LU D, *et al.* Occurrence and formation of halobenzoquinones in indoor and outdoor swimming pool waters of Nanning City, Southwest China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26: 31537-31545.
- [9] 王永京, 曹康玲, 吕峥, 等. 饮用水中卤代苯醌类新型消毒副产物研究进展[J]. *给水排水*, 2020, 46(2): 133-137, 144.
WANG Yongjing, CAO Kangling, LÜ Zheng, *et al.* Research progress on new disinfection by-products of halogenated benzoquinones in drinking water [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 46(2): 133-137, 144 (in Chinese).
- [10] 李乃军. 饮用水中消毒副产物四氯对苯醌的控制技术研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2017: 8-11.
LI Naijun. Research on Control Strategies of Tetrachloro-*p*-benzoquinone Disinfection By-product in Drinking Water [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017: 8-11 (in Chinese).
- [11] KOSAKA K, NAKAI T, HISHIDA Y, *et al.* Formation of 2, 6-dichloro-1, 4-benzoquinone from aromatic compounds after chlorination [J]. *Water Research*, 2016, 110: 48-55.
- [12] 张英芹. 微污染水源水卤代苯醌前体物的生成及混凝控制技术研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2020: 27-28.
ZHANG Yingqin. Study on the Formation and Coagulation Control of Halobenzoquinone Precursors in Micro-polluted Water [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2020: 27-28 (in Chinese).

- [13] DIEMERT S, WANG W, ANDREWS R G, *et al.* Removal of halo-benzoquinone (emerging disinfection by-product) precursor material from three surface waters using coagulation [J]. *Water Research*, 2013, 47 (5): 1773–1782.
- [14] KANOKKANTAPONG V, MARHABA T F, PANYAPINYOPHOL B, *et al.* FTIR evaluation of functional groups involved in the formation of haloacetic acids during the chlorination of raw water [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 36(2): 188–196.
- [15] KOSAKA K, KEIKO O, MICHIIHIRO A. Occurrence and formation of haloacetamides from chlorination at water purification plants across Japan [J]. *Water Research*, 2016, 106: 470–476.
- [16] FANG J Y, YANG X, MA J, *et al.* Characterization of algal organic matter and formation of DBPs from chlor(am)ination [J]. *Water Research*, 2010, 44(20): 5897–5906.
- [17] WERT E C, ROSARIO-ORTIZ F L. Intracellular organic matter from cyanobacteria as a precursor for carbonaceous and nitrogenous disinfection byproducts [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47 (12): 6332–6340.
- [18] GE F, XIAO Y, YANG Y X, *et al.* Formation of water disinfection byproduct 2, 6-dichloro-1, 4-benzoquinone from chlorination of green algae [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, 63(1): 1–8.
- [19] 肖瑶. 小球藻及其藻类有机物氯化生成2,6-二氯苯醌的过程与特性 [D]. 湘潭:湘潭大学, 2016: 37–42.
XIAO Yao. Formation of 2, 6-dichloro-1, 4-benzoquinone from Chlorination of *Chlorella vulgaris* and Its Algal Organic Matter [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2016: 37–42 (in Chinese).
- [20] LI L, GAO N Y, DENG Y, *et al.* Characterization of intracellular & extracellular algae organic matters (AOM) of *Microcystis aeruginosa* and formation of AOM-associated disinfection byproducts and odor & taste compounds [J]. *Water Research*, 2012, 46 (4): 1233–1240.
- [21] HOW Z T, LINGE K L, Busetti F, *et al.* Organic chloramines in drinking water: an assessment of formation, stability, reactivity and risk [J]. *Water Research*, 2016, 93: 65–73.
- [22] YOON J, JENSEN J N. Distribution of aqueous chlorine with nitrogenous compounds: chlorine transfer from organic chloramines to ammonia [J]. *Environmental Science & Technology*, 1993, 27(2): 403–409.
- [23] 王忱. 饮用水中新型卤代醌类消毒副产物的检测及生成势研究 [D]. 武汉: 江汉大学, 2019: 36–39.
WANG Chen. Detection and Formation Potential of New Type Haloquinone Disinfection By-products in Drinking Water [D]. Wuhan: Jiangnan University, 2019: 36–39 (in Chinese).
- [24] LANGE F T, SCHEURER M, BRAUCH H J, *et al.* Artificial sweeteners—a recently recognized class of emerging environmental contaminants: a review [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2012, 403: 2503–2518.
- [25] WU P, LAW C F, CHOW C H, *et al.* Transformation of acesulfame in chlorination: kinetics study, identification of byproducts, and toxicity assessment [J]. *Water Research*, 2017, 117(15): 157–166.
- [26] 鲁金凤, 王斌, 廖洋, 等. 水环境中残留抗生素的消毒副产物问题最新研究进展 [J]. *中国给水排水*, 2020, 37(4): 6–7.
LU Jinfeng, WANG Bin, LIAO Yang, *et al.* Latest research progress on the disinfection by-products of residual antibiotics in water environment [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 37(4): 6–7 (in Chinese).
- [27] ZHOU S, SHAO Y, GAO N, *et al.* Chlorination and chloramination of tetracycline antibiotics: disinfection by-products formation and influential factors [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 107: 30–35.
- [28] YE Z X, SHAO K L, HUANG H, *et al.* Tetracycline antibiotics as precursors of dichloroacetamide and other disinfection byproducts during chlorination and chloramination [J]. *Chemosphere*, 2021, 270: 128628.

作者简介: 林珂(1997–), 男, 山东济宁人, 在读硕士,
主要从事水处理理论与技术等方面的研究。

E-mail: 1014662924@qq.com

收稿日期: 2020-12-03

修回日期: 2020-12-20

(编辑: 丁彩娟)