

严好婷, 俞昊天, 陈玉敏, 等. 预氧化工艺对含溴饮用水消毒副产物生成的影响[J]. 净水技术, 2022, 41(7): 41-46, 153.
YAN H T, YU H T, CHEN Y M. et al. Effect of pre-oxidation process on DBPs formation in bromine-containing drinking water[J].
Water Purification Technology, 2022, 41(7): 41-46, 153.



扫我试试?

预氧化工艺对含溴饮用水消毒副产物生成的影响

严好婷, 俞昊天, 陈玉敏, 留嘉婧, 叶东东, 毛玉琴*

(浙江树人学院生物与环境工程学院, 浙江杭州 310015)

摘要 预氧化工艺在提高对水中有机物去除效率的同时还会改变有机物的性质,有可能会对后续氯消毒过程中消毒副产物(DBPs)的生成产生不利的影响,尤其是当水中含有溴离子时,这种不利影响可能会扩大。目前,关于溴离子和有机物在预氧化-消毒组合工艺中的协同转化规律还未可知。文中考察了臭氧和二氧化氯对含溴水体在后续氯消毒过程中三卤甲烷(THMs)、卤乙酸(HAAs)和二卤乙腈(DHANs)等DBPs生成和分配的影响。研究表明,在臭氧和二氧化氯预氧化后,THMs和HAAs的总生成潜能随氧化剂投加量的增大呈现先增加后降低态势,DHANs总生成势随着氧化剂投加量的增加而逐渐减少。从DBPs总量控制的视角考虑,建议提高氧化剂的投放量,且高投量的臭氧对DBPs总量生成的抑制作用优于二氧化氯预氧化。然而,臭氧和二氧化氯预氧化都会促进后续氯消毒过程中THMs、HAAs和DHANs中溴代组分所占的比重上升,即溴结合因子增加。氧化剂含量越高,溴结合因子也越大。因此,对于某些含溴水体增设预氧化工艺,还需谨慎考虑因毒性更高的溴代DBPs生成比例增大而产生潜在的危险性。

关键词 臭氧 二氧化氯 消毒副产物 溴结合因子 溴分配

中图分类号: TU991 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2022)07-0041-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.07.006

Effect of Pre-Oxidation Process on DBPs Formation in Bromine-Containing Drinking Water

YAN Haoting, YU Haotian, CHEN Yumin, LIU Jiajing, YE Dongdong, MAO Yuqin*

(College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang Shuren University, Hangzhou 310015, China)

Abstract Pre-oxidation process can improve the removal efficiency of organic matter, while it can change the properties of organic matter. It may have adverse effect on the formation of DBPs during subsequent chlorination, especially when the raw water contains bromide ions. At present, the synergistic transformation law of bromide ions and organic matter in the combined process of pre-oxidation and disinfection is unknown. In this study, ozone and chlorine dioxide were selected to investigate the effect of pre-oxidation process on DBPs formation and speciation in bromine-containing water during subsequent chlorination. Trihalomethanes (THMs), haloacetic acids (HAAs) and dihaloacetonitriles (DHANs) were included. The results showed that the total formation potentials of THMs and HAAs were firstly increased and then decreased with the dosages of ozone and chlorine dioxide increased, while the total formation potentials of DHANs kept decreasing. From the perspective of controlling the total DBPs yields, a high oxidant dosage was suggested, and the decreased amount of the total DBPs yields by high dosage ozone was larger than by chlorine dioxide. However, the proportion of bromine-containing DBPs were increased by pre-oxidation with both ozone and chlorine dioxide. The higher the oxidant dosage, the greater the bromine incorporation factor values were. Therefore, adding pre-oxidation process in treating water with high bromide levels should be cautious for the potential danger caused by the increase in the proportion of bromine-containing DBPs with higher toxicity.

[收稿日期] 2021-12-04

[基金项目] 浙江省自然科学基金(LQ20E080015);浙江省大学生科技创新活动计划暨新苗人才计划(2021R421011)

[作者简介] 严好婷(2000—),女,研究方向为饮用水消毒,E-mail:Yanhaoting4587@163.com。

[通信作者] 毛玉琴(1989—),女,博士,主要从事饮用水处理技术和消毒副产物的检测,E-mail:maoyq@zjsru.edu.cn。

Keywords ozone chlorine dioxide disinfection by-products (DBPs) bromine incorporation factor bromine distribution

目前,饮用水水源中存在的有机污染问题仍然比较突出,常规的饮用水处理工艺对可溶性有机物(DOM)的去除能力有限^[1],越来越多的水厂在传统工艺前增设预氧化工艺以加强对DOM的去除^[2]。预氯化是国内外水厂最早且应用最广泛的预氧化工艺,但是预氯化后会产生致畸、致癌的消毒副产物(DBPs)^[3],因此,臭氧、二氧化氯、高锰酸钾等预氧化工艺逐渐被水厂用于替代预氯化工艺。单独使用这些预氧化工艺不会生成DBPs,但是有可能会引进一些其他的问题,如二氧化氯预氧化后生成亚氯酸盐和氯酸盐^[4],同样威胁健康。另外,臭氧和二氧化氯还能够氧化有机物的双键和芳香结构,改变有机物性质^[5],进而影响后续氯消毒过程中DBPs的生成。肖融等^[6]研究表明,臭氧能够将水中的部分有机物氧化成含类甲基酮等结构的化合物,这是形成三卤甲烷(THMs)的一种主要前体物,使得后续氯消毒过程中THMs生成量显著增加。但也有研究表明,臭氧预氧化可以有效消除DBPs的主要前体物,减少后续氯消毒工艺中的氯耗,从而减少卤乙酸(HAAs)、THMs和二卤乙腈(DHANs)等DBPs的生成^[7]。水源水中有机物特性以及氧化剂类型的不同可能会对DBPs的形成产生很大的影响,但目前关于不同预氧化工艺对后续氯消毒过程中DBPs生成影响的定量对比研究还比较缺乏。

此外,溴离子普遍存在于自然界水体中,长江下游和微山湖的溴离子质量浓度一般在200~400 μg/L,黄河下游的溴离子质量浓度一般在100~150 μg/L^[8-9]。溴离子的大量出现会导致预氧化工艺对DBPs生成特性的影响更加复杂。以臭氧预氧化为例:一方面,臭氧预氧化工艺可以通过降解水中有机质除去部分DBPs前体物^[10];另一方面,臭氧的强氧化特性也可能使水中溴离子形成溴酸盐,并且促使由其所形成的DBPs进一步向溴代DBPs转变^[11-12]。相比于同结构的氯代DBPs,溴代DBPs具有更高的细胞毒性和基因毒性^[13],然而目前关于预氧化工艺对含溴水体DBPs生成特性的研究还相当少。因此,本研究以预氧化工艺中的臭氧和二氧化氯预氧化为代表,通过定量研究对比了这两类预氧化工艺对含溴水体中DBPs生成和分配的影响,并将预氧化工艺、溴离子与DBPs联系在一起,以期为

更好地保障饮用水安全提供依据和对策。

1 试验材料和方法

1.1 水样配制

利用腐植酸模拟自然水体中有机物含量[以溶解性有机碳(DOC)浓度表示]进行配水试验,并添加CaCl₂、MgSO₄·7H₂O、NaHCO₃等模拟自然水体中的碱度、硬度和离子强度等。配水组分如下:Ca²⁺质量浓度为30 mg/L, Mg²⁺质量浓度为10 mg/L, Na⁺质量浓度为34.50 mg/L, (CO₃)^{TOT}(总碳酸盐)质量浓度为90 mg/L, Cl⁻质量浓度为53.25 mg/L, SO₄²⁻质量浓度为40 mg/L, 腐植酸(以DOC计)质量浓度为3 mg/L。采用添加了溴离子的标准溶液(1 000 μg/mL, 国家有色金属及电子材料分析测试中心)使得水中溴离子质量浓度为300 μg/L, 然后通过硼酸盐缓冲使所配水样的pH值调整到8.0±0.2, 并采用0.45 μm的水系膜过滤, 去除悬浮颗粒物后用于水质指标测定和预氧化-氯消毒反应。

1.2 试验方法与仪器

臭氧预氧化试验采用臭氧发生器(新大陆, NLO-20)通过高压放电法每天即时制备饱和臭氧水, 试验装置和制备过程参照Yang等^[9]的文献。二氧化氯储备液的制备参照《生活饮用水标准检验方法 消毒剂指标》(GB/T 5750.11—2006), 利用亚氯酸钠和稀硫酸反应制得。臭氧和二氧化氯采用等当量浓度投加的方式, 具体投加量如表1所示, 反应20 min后测定氧化剂余量, 立即加入等化学反应剂量的硫代硫酸钠淬灭。取一定体积的水样进行常规水质指标的测定, 剩余水样进行加氯培养测定THMs、HAAs、DHANs等DBPs的生成势。加氯培养条件为:pH值为8.0±0.2, 恒温培养箱温度为(20±1)℃, 培养时间为24 h, 氯投加量采用过量投加的方式, 保证最大需氯量的水样(一般为原水)培养24 h后的余氯质量浓度大于1 mg/L。培养完成后立即测定各水样的余氯含量, 并随即加入等化学反应剂量的硫代硫酸钠淬灭余氯, 最后进行液液萃取测定DBPs。

臭氧浓度的检测采用靛蓝法测定臭氧在610 nm处的吸光度;二氧化氯浓度采用Hach二氧化氯测定仪(Pocket Colorimeter™ II)并利用DPD分光光度法进行测定, 每次试验前均需先对二氧化氯浓度

表 1 实验室自配水的氧化剂投加量和当量浓度
Tab. 1 Oxidant Dosage and Normal Concentration of Experimental Raw Water

氧化剂当量摩尔浓度/(mmol·L ⁻¹)	0	0.02	0.04	0.08	0.12	0.16
臭氧投加量/(mg·L ⁻¹)	0	0.45	0.90	1.80	2.70	3.60
二氧化氯投加量/(mg·L ⁻¹)	0	0.25	0.50	1.00	1.50	2.00

进行测定后再使用;溴离子和溴酸盐浓度利用瑞士万通 Metrohm 761 型离子色谱仪测定;UV₂₅₄ 的测定仪器为上海美普达 UV-1800 型分光光度计;DOC 采用日本岛津公司的 TOC-VCPH 型总有机碳分析仪进行测定;THMs 和 DHANs 浓度利用 EPA 551.1 标准方法测定,仪器采用安捷伦公司的气相色谱仪 (Agilent 7890A, USA), 配备电子捕获 (ECD) 检测器,使用 DB-1 毛细管柱 (30 m×0.25 mm×0.25 μm);HAAs 色谱分离采用 DB-1701 毛细管柱 (30 m×0.25 mm×0.25 μm), HAAs 浓度的测定利用美国环保署 (EPA) 552.3 标准方法,仪器采用安捷伦公司的气相色谱仪 (Agilent 7890A, USA), 其辅助仪器为电子捕获 (ECD) 检测器。

2 结果与讨论

2.1 预氧化对常规水质指标的影响

SUVA 值是水样的 UV₂₅₄ 与 DOC 的比值,通常被用于表征 DBPs 前体物和水中有有机物所含腐植酸类物质的量^[10]。SUVA 值与化合物中的芳香度和疏水性化合物数量呈正相关关系^[14],即 SUVA 值越高,DBPs 的生成潜能越大。如图 1 所示,SUVA 值随着臭氧投加量的提高而出现了明显的降低态势,SUVA 值为 4.26~8.51 L/(mg·m),下降率约为 49.9%。但二氧化氯投加量的增加对 SUVA 值的降低无显著影响,SUVA 值为 8.18~8.69 L/(mg·m),下降率仅有 5.9%。SUVA 值在不同氧化剂当量浓度条件下,臭氧对 SUVA 的去除效率远高于二氧化氯。然而,臭氧和二氧化氯预氧化后 DOC 基本不变,说明对于腐植酸类物质,这两种氧化工艺均不能将其彻底矿化生成 CO₂ 和 H₂O。水样的 DOC 不变,SUVA 值显著下降,表明预氧化改变了腐植酸类物质结构,将大分子疏水性的有机物转变为小分子亲水性有机物,这与之前文献中的研究结果吻合^[15]。

2.2 DBPs 的生成和分布

在本研究所检测的 DBPs 中,HAAs 中的一氯乙酸 (MCAA)、一溴乙酸 (MBAA) 和三溴乙酸 (TBAA)

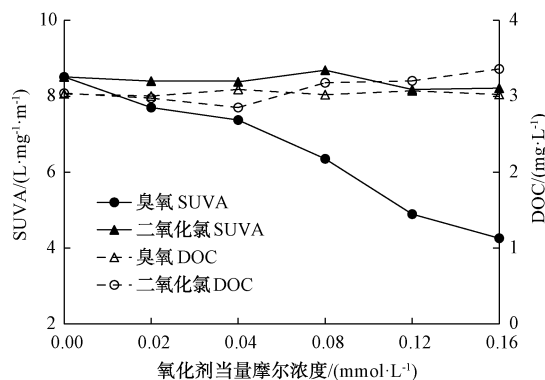


图 1 不同氧化剂当量浓度下 SUVA 和 DOC 的变化
Fig. 1 Variation of SUVA and DOC under Different Oxidant Normal Concentrations

浓度基本低于检出限,因此不予考虑。如图 2 所示,臭氧和二氧化氯对 THMs、HAAs 和 DHANs 总生成潜能的影响规律基本一致。THMs 和 HAAs 总生成潜能随着臭氧和二氧化氯投加量的增加呈现先增加后减少的趋势[图 2(a)~图 2(d)]。这可能是由于臭氧和二氧化氯的强氧化作用使得一些难以和氯直接反应的大分子物质转变为可以和氯反应的小分子物质,增加了 DBPs 的前体物^[16]。然而,随着臭氧和二氧化氯投加量的进一步提高,这些前体物可能继续被臭氧和二氧化氯氧化分解,不能再充当 DBPs 的前体物,从而导致 THMs 和 HAAs 总生成潜能的降低。DHANs 中的 CN 官能团极易被氧化,随着臭氧和二氧化氯投加量的增大,DHANs 的生成量呈下降趋势[图 2(e)~图 2(f)]。

在 THMs 组分构成中,三氯甲烷 (CF) 和一氯二溴甲烷 (DBCM) 始终为优势物质。在臭氧和二氧化氯投加量逐渐增大的情况下,CF 的生成量呈现显著降低趋势,一溴二氯甲烷 (BDCM) 降低趋势则相对稍缓,而对 DBCM 的生成起促进作用,且三溴甲烷 (TBM) 生成量也逐渐升高,溴代 THMs 将逐渐代替氯代 THMs 成为优势物质。DBCM 在臭氧投加量由 0.90 mg/L 升至 1.80 mg/L,其生成量的增长率为 37.5%;DBCM 在二氧化氯投加量从 0.50 mg/L 升

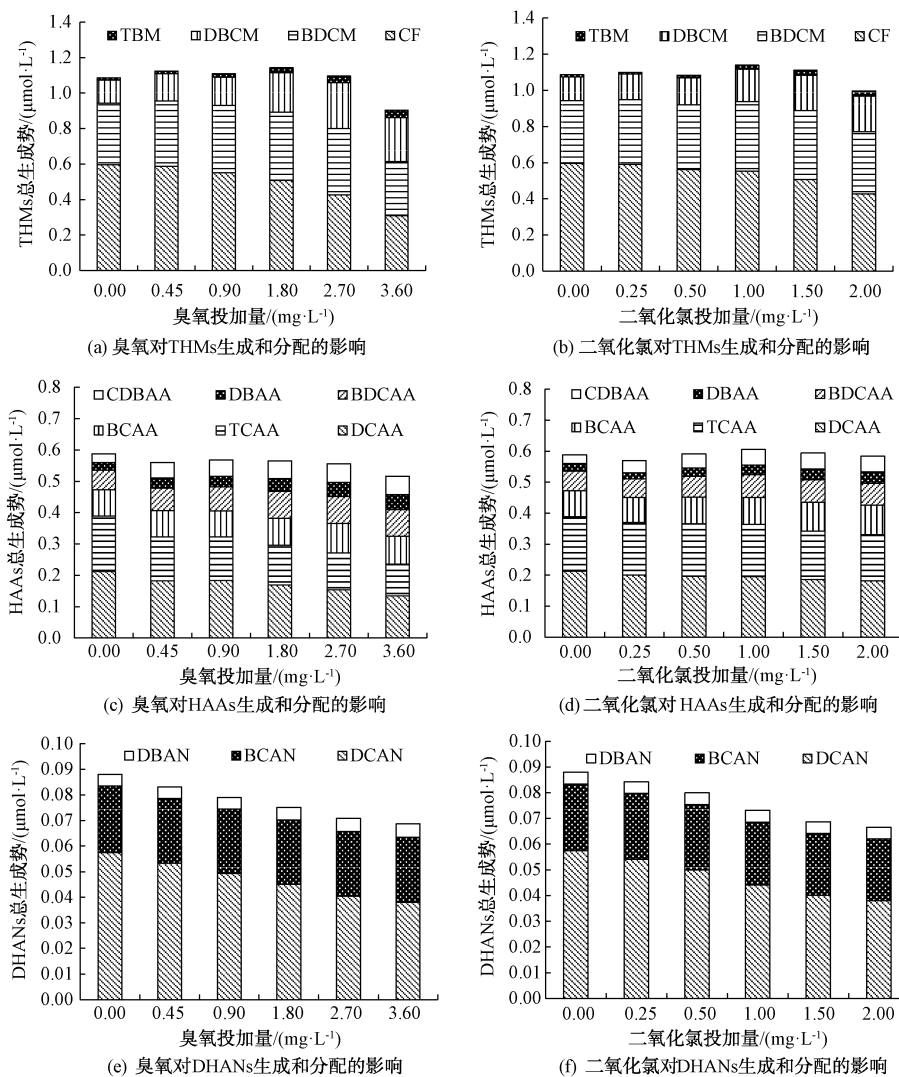


图2 氧化剂投加量对 DBPs 生成和分布的影响

Fig. 2 Effect of Oxidant Dosage on DBPs Formation and Speciation

至 1.00 mg/L 时,增长率约为 20.0%。臭氧和二氧化氯对 THMs 的抑制作用为 $CF > BDCM > DBCM > TBM$ [图 2(a) ~ 图 2(b)]。在 HAAs 组分构成中,二氯乙酸(DCAA)和三氯乙酸(TCAA)始终占据优势地位,随着臭氧和二氧化氯投加量的增大而逐渐减少,而溴氯乙酸(BCAA)、一溴二氯乙酸(BDCAA)、二溴乙酸(DBAA)和一氯二溴乙酸(CDBAA)生成量呈现增加趋势[图 2(c) ~ 图 2(d)],这说明在含溴水体中采用预氧化工艺会增加溴代 HAAs 生成的风险,值得引起注意。

在不同臭氧和二氧化氯投加量下,3 种 DHANs 的生成量均较相近,两种含溴 DHANs [溴氯乙腈(BCAN)和二溴乙腈(DBAN)]的生成量随着臭氧和

二氧化氯投加量的增大基本不变,其中二氯乙腈(DCAN)含量最高,随着臭氧和二氧化氯投加量的增加,DCAN 的生成量与单独氯消毒相比存在较明显的下降趋势,故而 DHANs 总体生成量也逐渐下降。

2.3 溴结合因子

为深入分析臭氧和二氧化氯预氧化对各类 DBPs 中溴代组分所占比例的变化状况,引入溴结合因子(BIF)对 DBPs 中溴代组分所占比例进行评估,THMs、HAAs 和 DHANs 的 BIF 计算如式(1) ~ 式(3)^[17]。BIF 值越大,表明在 DBPs 中溴的结合程度越高,反映出溴代 DBPs 所占比例也越大^[18]。如图 3 所示,随着臭氧和二氧化氯投加量的增大,THMs、HAAs 和 DHANs 的 BIF 均呈现升高趋势。当臭氧

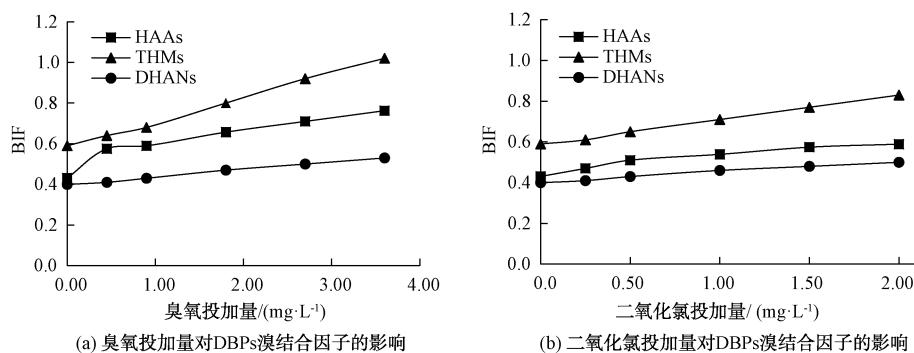


图3 氧化剂投加量对DBPs溴结合因子的影响

Fig.3 Effect of Oxidant Dosage on DBP Bromine Incorporation Factor

投加量增至 3.60 mg/L, THMs、HAAs 和 DHANs 的 BIF 分别增长了 0.43、0.33 和 0.13; 而当二氧化氯投加量增至 2.00 mg/L, THMs、HAAs 和 DHANs 的 BIF 分别增长了 0.24、0.16 和 0.10。BIF 的升高可能因为臭氧和二氧化氯将原水中芳香族类的疏水性基团逐渐被氧化成小分子亲水性基团, 而亲水性基团更有利于溴的取代。HAAs 和 DHANs 的 BIF 始终小于 THMs 的 BIF, HAAs、DHANs 与 THMs 相比各组分分配比例受臭氧和二氧化氯投加量影响更小, 且 THMs、HAAs 和 DHANs 的 BIF 对于臭氧投加量的变化更敏感。

$$BIF(THMs) = \frac{[BDCM] + 2[DBCM] + 3[TBM]}{[CF] + [BDCM] + [DBCM] + [TBM]} \quad (1)$$

$$BIF(HAAs) = \frac{[BCAA] + 2[DBAA] + [BDCAA] + \Rightarrow}{[DCAA] + [BCAA] + [DBAA] + \Rightarrow} \frac{2[DBCAA] + 3[TBAA]}{[TCAA] + [BDCAA] + [CDBAA] + [TBAA]} \quad (2)$$

$$BIF(DHANs) = \frac{[BCAN] + 2[DBAN]}{[DCAN] + [BCAN] + [DBAN]} \quad (3)$$

其中: [BDCM]——一溴二氯甲烷的摩尔浓度, $\mu\text{mol/L}$;
 [DBCM]——一氯二溴甲烷的摩尔浓度, $\mu\text{mol/L}$;
 [TBM]——三溴甲烷的摩尔浓度, $\mu\text{mol/L}$;
 [CF]——三氯甲烷的摩尔浓度, $\mu\text{mol/L}$;
 [BCAA]——溴氯乙酸的摩尔浓度, $\mu\text{mol/L}$;
 [DBAA]——二溴乙酸的摩尔浓度,

$\mu\text{mol/L}$;
 [BDCAA]——一溴二氯乙酸的摩尔浓度, $\mu\text{mol/L}$;
 [CDBAA]——一氯二溴乙酸的摩尔浓度, $\mu\text{mol/L}$;
 [TBAA]——三溴乙酸的摩尔浓度, $\mu\text{mol/L}$;
 [DCAA]——二氯乙酸的摩尔浓度, $\mu\text{mol/L}$;
 [TCAA]——三氯乙酸的摩尔浓度, $\mu\text{mol/L}$;
 [DCAN]——二氯乙腈的摩尔浓度, $\mu\text{mol/L}$;
 [BCAN]——溴氯乙腈的摩尔浓度, $\mu\text{mol/L}$;
 [DBAN]——二溴乙腈的摩尔浓度, $\mu\text{mol/L}$;
 BIF (THMs)、BIF (HAAs)、BIF (DHANs)——THMs、HAAs、DHANs 的溴结合因子。

2.4 预氧化对溴分配的影响

在臭氧-氯消毒后的含溴水体中, 主要含溴 DBPs 是 BrO_3^- 、溴代 THMs、溴代 HAAs 和溴代 DHANs。溴在 BrO_3^- 、溴代 THMs、溴代 HAAs 和溴代 DHANs 中的分配比例随臭氧和二氧化氯投加量的变化情况如图 4 所示。在臭氧-氯消毒后的含溴水体中, 溴在 THMs 中的分配比例最高, 远高于溴在 HAAs 中的分配比例, 这主要是因为 HOBr 与有机物反应生成溴代 THMs 的速率远高于溴代 HAAs 的生成^[19]。当臭氧投加量从 0 增加到 3.60 mg/L, BrO_3^- 、

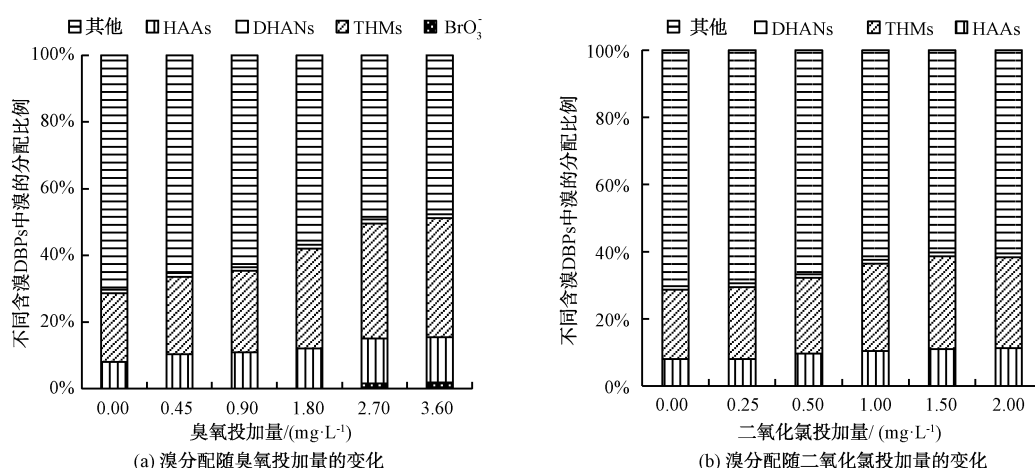


图4 溴分配随氧化剂投加量的变化

Fig. 4 Variation of Bromine Distribution with Different Oxidant Dosage

溴代 HAA_s、溴代 THM_s 和溴代 DHAN_s 的溴比例呈现增长趋势,在臭氧投加量为 3.60 mg/L 时达到最大,分别为 1.9%、13.6%、35.6% 和 1.2%,溴代 DBPs 中溴含量占总溴含量的 29.8%~50.5%。在臭氧投加量较低时,溴离子转化为 BrO₃⁻ 的比例很小,可以忽略。在二氧化氯-氯消毒后的含溴水体中,主要含溴 DBPs 是溴代 HAA_s、溴代 THM_s 和溴代 DHAN_s。其中,溴在 THM_s 中的分配比例最高,最大为 27.6%,出现在二氧化氯投加量为 1.50 mg/L 时。当二氧化氯投加量从 0 增加到 2.00 mg/L,溴代 DBPs 的溴比例呈现先增加而后减少的态势,在二氧化氯投加量为 1.50 mg/L 时达到最大,其生成量分别为单独氯消毒时的 1.33 倍,最大值为 39.7%,溴代 DBPs 中溴含量占总溴含量的 29.8%~39.7%。比较臭氧和二氧化氯预氧化对溴分配的影响,臭氧预氧化后溴代 DBPs 中溴含量增加幅度远高于二氧化氯预氧化,这与预氧化后 SUVA 值下降幅度(图 1)呈现正相关,说明 SUVA 值越低的水体,溴离子对水体消毒过程中存在的潜在风险越大。

3 结论

(1) 臭氧和二氧化氯这两种预氧化工艺处理含溴水体后对后续氯消毒过程中 THM_s、HAA_s 和 DHAN_s 总生成量的变化趋势基本一致, HAA_s 和 THM_s 总生成量均随着臭氧和二氧化氯投加量的增大呈现先增加后减小趋势, DHAN_s 总生成量随着氧化剂投加量的增加而减少。从 DBPs 总量控制的角度出发,建议增大氧化剂的投加量,且高投量的臭氧

对 DBPs 总量生成的抑制作用优于二氧化氯预氧化。

(2) 对臭氧和二氧化氯进行预氧化处理均会促进后续氯消毒过程中 THM_s、HAA_s 和 DHAN_s 中溴代组分所占的比例增大,即溴结合因子增大。氧化剂含量越高,溴结合因子越大。等当量浓度下臭氧预氧化后,其溴结合因子增大幅度高于二氧化氯预氧化。

(3) 在含溴水体臭氧-氯和二氧化氯-氯消毒过程中,溴代 DBPs 的分配比例呈现增加趋势。在臭氧和二氧化氯投加量较低的情况下,氯能够迅速将溴离子氧化,而溴的取代效率比氯高很多,导致溴代 DBPs 大量生成。

参考文献

- [1] 程拓,徐斌,朱贺振,等. 南水北调丹江口水库原水有机分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比[J]. 环境科学, 2015, 36(3): 898-904.
- [2] 吕伟伟,姚昕,张保华. 太湖水体有机质荧光特征及其来源解析[J]. 生态环境学报, 2018, 27(8): 1512-1521.
- [3] 郭巧珍. 饮用水中大环内酯类抗生素氯消毒副产物的产生机制、存在水平及毒性效应研究[D]. 北京:北京化工大学, 2018.
- [4] 王妍彦,张流波. 低浓度二氧化氯消毒研究现状[J]. 中国消毒学杂志, 2019, 36(2): 147-150.
- [5] LI C M, WANG D H, XU X, et al. Formation of known and unknown disinfection by-products from natural organic matter fractions during chlorination, chlorination, and ozonation[J]. Science of the Total Environment, 2017, 587/588: 177-184. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.108.

(下转第 153 页)

- [8] 陈智慧. 城镇污水处理厂不同生化单元功能菌群研究[D]. 保定: 河北大学, 2021.
- [9] 刘天琪. 异养硝化好氧反硝化菌 *Pseudomonas* sp. AND-42 的鉴定与脱氮特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [10] 邹玉兰. 好氧反硝化细菌 *Acinetobacter haemolyticus* ZYL 的脱氮性能及其代谢机理研究[D]. 大连: 太原理工大学, 2020.
- [11] 刘文超, 吴彬彬, 李晓森, 等. 1 株筛自柴油污染土壤的铜绿假单胞菌对萘的降解特性研究[J]. 环境科学, 2015, 36(2): 712-718.
- [12] 史延华. 农药降解菌施氏假单胞菌 YC-YH1 的分离鉴定及降解机理研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- [13] 刘玉华, 王慧, 胡晓珂. 不动杆菌属(*Acinetobacter*)细菌降解石油烃的研究进展[J]. 微生物学通报, 2016, 43(7): 1579-1589.
- [14] 侯洁. 生物炭对潜流人工湿地生物脱氮影响机理研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- [15] XING W, LI J, LI P, et al. Effects of residual organics in municipal wastewater on hydrogenotrophic denitrifying microbial communities[J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, 65: 262-270. DOI: 10.1016/j.jes.2017.03.001.
- [16] MIELCAREK A, RODZIEWICZ J, JANCZUKOWICZ W, et al. Denitrification aided by waste beer in anaerobic sequencing batch biofilm reactor (AnSBBR) [J]. Ecological Engineering, 2016, 95: 384-389. DOI: 10.1016/j.ecoeng.2016.06.083.
- [17] FOESEL B U, DRAKE H L, SCHRAMM A. *Defluviimonas denitrificans* gen. nov., sp. nov., and *Pararhodobacter aggregans* gen. nov., sp. nov., non-phototrophic *Rhodobacteraceae* from the biofilter of a marine aquaculture[J]. Systematic and Applied Microbiology, 2011, 34(7): 498-502.
- [18] SCHOLTEN E, LUKOW T, AULING G, et al. *Thauera rnecher-nichensis* sp. nov., an aerobic denitrifier from a leachate treatment plant[J]. International Journal of Systematic Bacteriology, 1999, 49: 1045-1051. DOI: 10.1099/00207713-49-3-1045.
- [19] YU H, KASHIMA H, REGAN J M, et al. Kinetic study on anaerobic oxidation of methane coupled to denitrification[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2017, 104: 47-55. DOI: 10.1016/j.enzmictec.2017.05.005.
- [20] CHAKRABOTRY A, PICARDAL F. Neutrophilic, nitrate-dependent, Fe(II) oxidation by a *Dechloromonas* species [J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2013, 29(4): 617-623.

(上接第 46 页)

- [6] 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, 56(9): 137-145.
- [7] 闫雨薇, 翟洪艳, 王雪娇. 臭氧/氯消毒中藻类有机物生成消毒副产物的特征[J]. 中国给水排水, 2020, 36(5): 7-13.
- [8] 杨宏伟, 吕森, 杨少霞, 等. 黄河下游含溴水库水臭氧消耗与溴酸盐生成[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50(9): 1400-1403.
- [9] YANG H W, LIU W J, WANG X M, et al. Bromate control by dosing hydrogen peroxide and ammonia during ozonation of the Yellow River water[J]. Ozone Science & Engineering, 2014, 37(2): 127-133.
- [10] 徐振秋, 徐恒省. 太湖饮用水源地主要嗅味物质污染现状及其防治对策研究[J]. 污染防治技术, 2017, 30(2): 80-82.
- [11] ZHANG H F, YANG M. Characterization of brominated disinfection byproducts formed during chlorination of fulvic acid in the presence of bromide [J]. Science of the Total Environment, 2018, 627: 118-124. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.215.
- [12] 曹美苑, 李罴橙, 黄柏文. 国内饮用水中消毒副产物分布水平与健康风险评价[J]. 公共卫生与预防医学, 2020, 31(3): 90-93.
- [13] 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. DOI: 10.1016/j.jes.2017.04.021.
- [14] HUR J, LEE B M, SHIN H S. Microbial degradation of dissolved organic matter (DOM) and its influence on phenanthrene-DOM interactions [J]. Chemosphere, 2011, 85(8): 1360-1367.
- [15] 高乃云, 朱明秋, 周石庆, 等. 藻源型有机物氯化消毒副产物的生成特性[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2014, 42(5): 48-53.
- [16] JIANG Y, GOODWILL J E, TOBIASON 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. DOI: 10.1016/j.watres.2019.02.051.
- [17] OBOLENSKY A, SINGER P C. Halogen substitution patterns among disinfection byproducts in the information collection rule database [J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(8): 2719-2730.
- [18] 王永京, 冯思捷, 季雨晴, 等. 臭氧-生物活性炭工艺对臭味及溴酸盐控制的中试研究[J]. 给水排水, 2016, 42(8): 27-32.
- [19] 孙媛媛. 预氯化对溴代消毒副产物的影响研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.