

论述与研究

加氯对不同工艺出水消毒副产物生成的研究

邹琳, 周圣东, 顾新春, 冯婷婷, 乔茜
(无锡市自来水有限公司, 江苏 无锡 214073)

摘要: 分析了W市太湖水净化过程中多点加氯后生成的三卤甲烷消毒副产物含量和其中各组分的比例分配情况,发现对于含有较高浓度溴离子的原水而言,消毒不仅会造成溴代消毒副产物绝对值的增加,还会提高其在三卤甲烷中的分配比例,因此溴代消毒副产物浓度的增加是引起三卤甲烷浓度增高的主要原因。同时,通过开展小试比较液氯和次氯酸钠对以太湖水为原水的水处理消毒效果,得到液氯较次氯酸钠的氧化性更强,投加液氯会促进三氯甲烷的生成,而投加次氯酸钠会造成三溴甲烷、二氯一溴甲烷和一氯二溴甲烷浓度的升高。总体而言,投加次氯酸钠生成的三卤甲烷消毒副产物浓度更高。

关键词: 多点加氯; 液氯; 次氯酸钠; 溴代消毒副产物; 三卤甲烷; 深度处理; 常规处理

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)05-0001-07

Formation of Chlorinated Disinfection By-products in Different Water Treatment Processes

ZOU Lin, ZHOU Sheng-dong, GU Xin-chun, FENG Ting-ting, QIAO Qian
(Wuxi Water Supply General Company, Wuxi 214073, China)

Abstract: The concentration and proportion of each component of trihalomethanes (THMs) in the water from Tai Lake after the multi-point chlorination procedure of water purification were analyzed. It was found that both the concentration and distribution proportion of the raw water containing bromide with high concentration increased, which meant the increase in the concentration of Br-DBPs caused the high concentration of THMs in the water. Sample experiment was carried out to compare the water treatment effect upon the raw water from Tai Lake using liquid chlorine or sodium hypochlorite. The results showed that liquid chlorine was more oxidative than sodium hypochlorite, and adding liquid chlorine would promote the formation of chloroform while the addition of sodium hypochlorite caused an increase in the concentration of bromomethane, dichlorobromomethane and chlorodibromomethane. In general, the concentration of THMs formed by the addition of sodium hypochlorite was higher.

Key words: multi-point chlorination; liquid chlorine; sodium hypochlorite; Br-DBPs; trihalomethanes (THMs); advanced water treatment; conventional water treatment

加氯是水厂净水处理过程中的一个重要环节,具有助凝、除藻、去臭、消毒等作用。为提高净水效

果,“多点加氯”的手段已被广泛采用。目前,国内多数水厂的消毒剂采用液氯或次氯酸钠,而传统液

氯消毒因存在运输、存储、管理等安全隐患,逐步被次氯酸钠消毒取代。如今虽然使用次氯酸钠的水厂越来越多,但关于次氯酸钠消毒效果的试验研究仍较少,已有的文献大多认为次氯酸钠替代液氯消毒,有利于降低出厂水中的消毒副产物含量^[1-3]。

为此,笔者跟踪分析了W市太湖水净化过程中多点加氯后生成的三卤甲烷消毒副产物含量以及各组分比例分配情况,同时通过小试比较了液氯和次氯酸钠两种不同消毒剂对以太湖水为原水的水处理净化效果,以期对其他水厂消毒系统建设或改造提供借鉴。

1 水源水质与水厂工艺

1.1 太湖原水水质特征

太湖为W市几大水厂的主要水源地,多年来随着社会各界对水源地保护力度的加大,太湖原水水质逐年好转,但因受气候环境和周边的影响,水质特征期明显,主要面临高藻、微污染、溴离子季节性水质波动等几大问题,因此近年来以太湖水为水源地的水厂已基本完成臭氧/生物活性炭深度处理改造并投入运行。太湖原水水质见表1。

表1 2015年度W市水源地主要污染物及其含量

Tab.1 Main pollutants and their contents of the major water source in W city

项 目	最大值	最小值	平均值
TOC/(mg·L ⁻¹)	5.19	3.18	4.03
氨氮/(mg·L ⁻¹)	0.36	0.05	0.13
COD _{Mn} /(mg·L ⁻¹)	5.61	3.59	4.7
藻/(10 ⁴ 个·L ⁻¹)	4 900	800	1 400
Br ⁻ /(mg·L ⁻¹)	0.325	0.095	0.206

太湖原水水质具有如下特征:①藻类数量多,活性强,品种杂,夏季尤为明显。藻数量平均值为(1 000~2 000)×10⁴个/L,夏季最高可达1×10⁸个/L以上,多以蓝藻、绿藻、硅藻为主。②原水出现嗅味问题的频次增多,主要出现在夏季高藻期和冬季枯水期,具体表现为水体二甲基异苈醇(2-MIB)和土臭素短期内迅速升高,如2015年8月太湖水源地2-MIB最高曾达到658 ng/L,年平均值为14 ng/L。③太湖原水中的COD_{Mn}为4~6 mg/L,氨氮为0.1~1.0 mg/L,TOC为3~6 mg/L,分子质量<3 ku的有机物占60%~70%,需采用深度处理工艺做进一步净化。④溴离子浓度为0.10~0.30 mg/L,经臭氧强氧化后存在溴酸盐超标的风险,同时臭氧会改变水中有机物的结构,使其在后续的消毒工艺

中更易与溴离子发生卤代反应而生成毒性更高的溴代消毒副产物^[4-7]。

1.2 水厂工艺

W市内多家以太湖水为水源的水厂均采用“预处理+常规处理+深度处理”工艺,因处理工艺大致相同,原水条件也相似,故以Z水厂为代表开展研究。Z水厂设计能力为60×10⁴ m³/d,处理工艺见图1。因太湖原水常年藻类较多,故采用多点加氯(液氯)的方式加以控制(图中实线为常规加注点,虚线为弹性加注点,氯投加与否和投加量均根据藻类数量进行调节):原水预处理后加氯0.5 mg/L,在长距离输水管道中预加氯可与水充分混合而灭活部分藻类,待原水至净水厂后,在沉淀前加氯0.3~0.5 mg/L用于助凝和杀藻(低藻时可不加),于砂滤前加氯0.3 mg/L用于保护滤池免受污染(低藻时可不加),在水厂清水库加氯1.5~1.8 mg/L消毒后出厂。

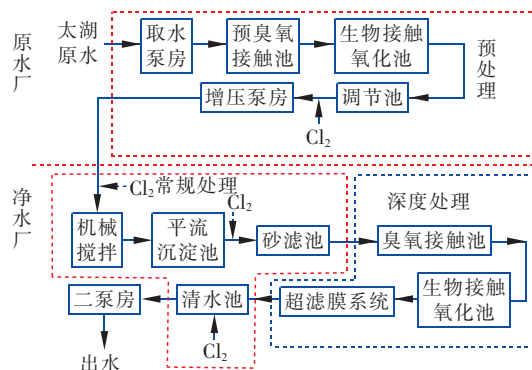


图1 Z水厂处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of Z water treatment plant

2 材料与方法

2.1 研究对象

采集Z水厂各主要处理工艺段加氯后的出水,分析三卤甲烷及其各组分含量(经检测,卤乙酸生成含量较低,因此重点分析三卤甲烷)。

模拟实际生产中水库加氯,对常规处理出水(砂滤后)和深度处理出水(炭滤后)进行小试,方法如下:准备若干个棕色具塞瓶,分别取500 mL水样倒入瓶中;按试验需求加注有效氯浓度为1.7 mg/L的氯水或次氯酸钠;加塞并振动使之均匀混合,放置避光处反应15、30、120和240 min后测定COD_{Mn}、游离氯、pH值和三卤甲烷消毒副产物含量。

2.2 分析方法

COD_{Mn}采用酸性高锰酸钾法测定;游离氯采用

DPD 分光光度法测定;pH 值采用标准缓冲溶液比色法测定。消毒副产物三卤甲烷采用毛细管柱气相色谱法(GB/T 5750.10—2006)测定,主要仪器包括:Varian 450 气相色谱仪,ECD 电子捕获检测器,Varian Genesis 顶空自动进样器,色谱柱 HP-5 (30 m×0.53 mm×2.65 μm)。气相条件:进样口温度为 150℃;检测器温度为 300℃;分流比为 10;初始柱温为 40℃保持 1 min,然后以 20℃/min 升至 150℃;载气为高纯氮气,压力为 10 psi(1 psi 约等于 6.895 kPa)。顶空条件:水样体积为 10 mL,样品瓶容积为 20 mL,平衡温度为 40℃,平衡时间为 40 min。进样量为 200 μL。

3 结果与讨论

3.1 多点加氯后消毒副产物的生成趋势

图 2 为经原水预加氯和净水厂多点加氯(液氯)后各主要工艺环节消毒副产物的变化趋势,由此计算出原水、预处理出水、常规处理出水、臭氧出水、生物活性炭出水、出厂水的三卤甲烷含量分别为 0、0.22、0.26、0.30、0.23 和 0.30。各级加氯后以及臭氧接触后均会造成三卤甲烷的增加,但都在国标限值之内,而生物活性炭过滤环节对三卤甲烷有去除作用。

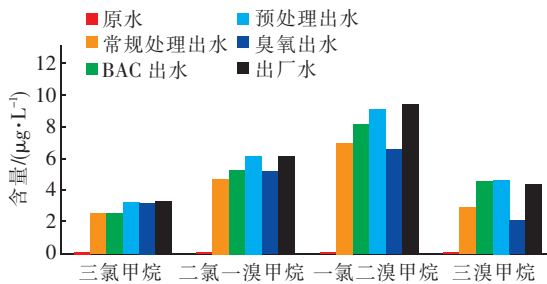


图 2 Z 水厂多点加氯对不同工艺出水中消毒副产物生成的影响

Fig. 2 Influence of multi-point chlorination on THMs formation from different treatment processes in Z water treatment plant

各主要环节三卤甲烷变化原因分析如下^[8-9]:
①原水的三卤甲烷较低,但因含有天然有机物(NOM),其在预加氯过程中会生成氯化消毒副产物,造成 THMs 的初次升高。②在常规处理工艺中部分消毒副产物的前致物以及部分已生成的三卤甲烷会伴随絮体的沉淀和石英砂的过滤截留而被去除,但因水中仍含一定量的溶解性有机物,故在沉淀前和滤前加氯后仍会生成消毒副产物,造成 THMs 的再次升高。③经深度处理后三卤甲烷总体下降,

其中三氯甲烷浓度略有增加,而二氯一溴甲烷、一氯二溴甲烷和三溴甲烷的浓度均有不同程度的降低。深度处理中臭氧接触主要将水中大分子有机物分解成小分子有机物,使得前端工艺出水中残余的游离氯与小分子有机物进一步生成消毒副产物变为可能,故经臭氧氧化后三卤甲烷升高;而经生物活性炭过滤后三卤甲烷降低,与臭氧接触池出水相比,对三氯甲烷、二氯一溴甲烷、一氯二溴甲烷、三溴甲烷、三卤甲烷的去除率分别为 0.6%、15%、29%、56% 和 23%。④水库水经加氯消毒后三卤甲烷再次升高,是由于水在水库中停留时间较长,部分经深度处理无法去除的分子质量<500 u 的小分子有机物被氯化生成三卤甲烷,致使其增幅高达 30%。

3.2 各工艺环节三卤甲烷组成比例分析

就 W 市的太湖原水而言,未经加氯前,原水中的三卤甲烷含量低,年平均值为 0.001 4,且以三氯甲烷的含量(61%)居首,其次是二氯一溴甲烷,最后是一氯二溴甲烷和三溴甲烷,如表 2 所示。因水体中溴离子浓度为 100~300 μg/L(年平均值约为 200 μg/L),经消毒后,溴氯混合型的三卤甲烷比例从未经消毒时的 31.5% 上升至消毒后的 66%~68%,三溴甲烷从 7.5% 上升至 9%~18%,三氯甲烷比例则下降。

表 2 各工艺出水三卤甲烷不同组分比例

Tab. 2 Proportion of THMs in different processes %

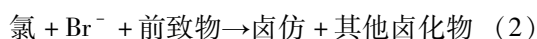
项 目	太湖原水	预处理后	常规处理后	深度处理后	出厂水
三氯甲烷	61	20	16	23	19
二氯一溴甲烷	24	35	34	40	34
一氯二溴甲烷	7.5	32	32	28	32
三溴甲烷	7.5	13	18	9	15

从表 2 可见,原水经预加氯后,三卤甲烷的 4 项指标的分配比例发生了变化,并逐渐固定,在后续的多点加氯过程中,分配比例基本未变,但绝对值均有增加,因溴氯混合型消毒副产物在三卤甲烷中比重大,故其绝对浓度的增加是造成三卤甲烷消毒副产物增加的主导因素。有研究表明^[4],当原水中的溴离子含量小于 10 μg/L 时,氯化后生成的三卤甲烷中溴代副产物的比例不足 5%,但当溴离子含量达到 90 μg/L 时,氯化消毒处理后生成的 THMs 中有 54% 为溴氯混合型。相比于相似结构的氯代消毒副产物,溴代消毒副产物具有更强的细胞遗传毒性。笔者的研究结果与上述文献的报道较为一致。

为更清楚地表示溴代消毒副产物在 THMs 中的分配情况,引入溴结合因子(N_{Br}),其计算见式(1)。 N_{Br} 的范围为0~3,其值越大,说明溴代消毒副产物所占的比例越高^[6]。其中, $[CHCl_3]$ 、 $[CHBrCl_2]$ 、 $[CHBr_2Cl]$ 、 $[CHBr_3]$ 分别表示三氯甲烷、二氯一溴甲烷、一氯二溴甲烷和三溴甲烷的物质的量浓度。

$$N_{Br} = \frac{[CHBrCl_2] + 2[CHBr_2Cl] + 3[CHBr_3]}{[CHCl_3] + [CHBrCl_2] + [CHBr_2Cl] + [CHBr_3]} \quad (1)$$

经计算,原水、预处理出水、常规处理出水、臭氧氧化出水、深度处理出水、出厂水的 N_{Br} 分别为0.54、1.37、1.49、1.42、1.21、1.41,表明当原水中溴离子浓度较高时,经加氯消毒后,溴结合因子会逐渐升高,溴代与溴氯消毒副产物的比例增加,尤其表现在原水预加氯和深度处理后消毒两个环节,溴结合因子分别增长了153%和17%。此现象可解释为:氯与水中的有机物反应生成氯代烃、氯代乙酸等氯代消毒副产物,若水中还含有一定浓度的溴化物,氯会将溴化物氧化成溴酸,溴酸可与有机物反应生成溴代消毒副产物,反应如式(2)所示^[10]。



而深度处理后加氯,溴结合因子增加,除上述原因外,还因臭氧氧化会改变水中有机物的结构使其在后续的消毒工艺中更易与溴离子发生卤代反应,而在生物活性炭滤池中,氯代消毒副产物的前致物比溴代消毒副产物更容易被生物活性炭吸附和去除。

3.3 消毒剂对不同工艺出水水质的影响

为探讨液氯和次氯酸钠(简称次钠)两种消毒剂的消毒效果,模拟水库加氯,采集常规处理出水(砂滤后)和深度处理出水(炭滤后),在上述水样中分别投加1.7 mg/L的消毒剂,反应一定时间后分析相关指标的变化趋势。

3.3.1 对常规指标的影响

pH值:未加消毒剂前,深度处理出水因受到水中二氧化碳、生物硝化作用和水体中残余有机物的影响,酸度增加,pH值较砂滤池出水的低^[11-12]。就两种消毒剂而言,液氯呈酸性,次氯酸钠呈碱性,将它们分别投加于水样后发现,液氯和次氯酸钠的消毒作用主要发生于前30 min内,pH值也在该时段内变化较明显。用液氯消毒的水样,其水体pH值略有降低;而用次氯酸钠消毒的水样,其水体的pH值

比未加氯前升高(见图3)。

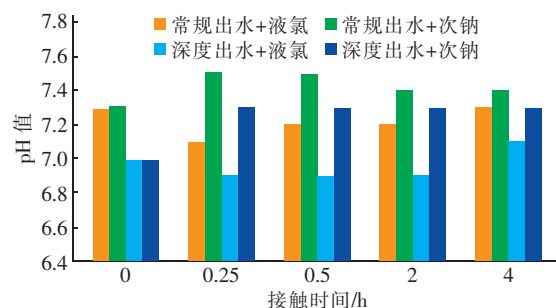


图3 常规及深度处理出水加消毒剂后 pH 值随时间变化

Fig. 3 Change of pH in conventional and advanced water treatment

余氯:当水中 pH 值 < 7.5 时,其消毒效果均较好。因加液氯后,水体 pH 值降低,生成次氯酸较多,氧化性更强,其可氧化的物质更多,因此需氯量高,余氯量少;而投加次氯酸钠后,pH 值升高,其次氯酸根多,氧化性相对较弱,这也解释了投加次氯酸钠反应数小时后其余氯高于同等投加量的液氯的原因(见表3)。

表3 常规及深度处理出水加消毒剂后余氯和 COD_{Mn} 浓度随时间的变化

Tab. 3 Change of residual chlorine and COD_{Mn} with time in conventional and advanced water treatment

$mg \cdot L^{-1}$

项 目		接触时间/h				
		0	0.25	0.5	2	4
常规 + 液氯	余氯	0.05	0.80	0.70	0.60	0.30
	COD_{Mn}	1.96	1.80	1.80	1.84	1.56
常规 + 次钠	余氯	0.05	0.90	0.70	0.70	0.15
	COD_{Mn}	1.96	1.80	1.76	1.76	1.72
深度 + 液氯	余氯	0	0.80	0.70	0.60	0.60
	COD_{Mn}	1.28	1.36	1.28	1.24	1.04
深度 + 次钠	余氯	0	0.90	0.80	0.80	0.70
	COD_{Mn}	1.28	1.24	1.20	1.24	1.24

COD_{Mn} :对同一工艺段出水,从理论上分析应为投加液氯后 COD_{Mn} 去除率更高,而试验数据显示两种消毒剂对 COD_{Mn} 的去除率较接近,笔者分析,水体中仍存在一些物质会与用 COD_{Mn} 表征的有机物进行竞争氯化作用。同时发现,常规处理出水加消毒剂后 COD_{Mn} 去除率更明显,以2 h的数据为参考, COD_{Mn} 去除率为6.1%~10.2%,而深度处理出水加消毒剂后 COD_{Mn} 去除率仅为3.1%,这说明常规处理出水中耗氯性的有机物质含量高于深度处理后出水的,这与生产数据相吻合。

3.3.2 不同消毒剂对消毒副产物生成的影响

无论是常规处理出水还是深度处理出水,与消毒剂接触反应时间越长,生成的消毒副产物浓度越高,见表4。常规处理出水消毒后的三氯甲烷、二氯一溴甲烷、一氯二溴甲烷的增长率均高于深度处理后的,说明未经深度处理的水中仍含有较多的中小分子质量有机物,通过深度处理能去除部分消毒副产物的前致物,保障出水的化学稳定性。而三溴甲烷的增长比例为深度处理后更高,分析原因可能是臭氧氧化一定程度上增加了溴代副产物的分配比例,同时相对于溴代副产物,氯代副产物的前体物更易被生物炭滤池去除。

表4 不同工艺出水消毒后的副产物浓度

Tab.4 Concentration of disinfection by-products of different process effluent

项 目		常规处理出水		深度处理出水	
		液氯	次钠	液氯	次钠
三氯甲烷浓度/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	0	1.08	1.08	1.26	1.26
	0.25 h	1.85	1.88	1.37	1.19
	0.5 h	1.92	2.12	1.47	1.19
	2 h	2.35	2.15	2.01	1.28
	4 h	2.65	2.23	2.38	1.35
二氯一溴甲烷 浓度/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	0	2.87	2.87	3.27	3.27
	0.25 h	3.01	3.21	2.99	3.33
	0.5 h	3.28	4.02	2.80	3.43
	2 h	4.64	5.36	3.10	4.02
	4 h	5.81	6.67	3.72	4.42
一氯二溴甲烷 浓度/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	0	3.63	3.63	3.91	3.91
	0.25 h	3.98	4.55	3.94	5.04
	0.5 h	4.72	5.98	3.60	5.32
	2 h	7.12	8.33	4.53	6.73
	4 h	9.14	10.09	6.91	7.78
三溴甲烷浓度/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	0	2.18	2.18	1.34	1.34
	0.25 h	2.23	2.70	2.01	2.32
	0.5 h	2.95	3.47	1.76	2.55
	2 h	4.21	4.25	2.69	3.57
	4 h	4.98	4.75	5.25	4.22
三卤甲烷比值	0	0.12	0.12	0.13	0.13
	0.25 h	0.14	0.15	0.14	0.15
	0.5 h	0.16	0.19	0.13	0.16
	2 h	0.23	0.25	0.15	0.19
	4 h	0.28	0.30	0.21	0.22

以接触反应2 h为例,深度处理后加氯比常规处理后加氯的三卤甲烷比值下降了35%,而深度处理后加次氯酸钠比常规处理后加次氯酸钠的三卤甲烷比值下降了24%。说明使用相同的消毒剂,在同

样的接触时间下经深度处理后再消毒,水中的三卤甲烷消毒副产物及其前致物均有去除。同时对于同一工艺环节出水,投加液氯后在不同的接触时间下,其三卤甲烷比值均低于投加次氯酸钠的水样,即用次氯酸钠进行消毒会造成三卤甲烷消毒副产物的含量升高。

3.3.3 不同消毒剂对三卤甲烷各组分的影响

对于三氯甲烷,无论何工艺出水,投加液氯均可增加其在三卤甲烷中的分配比例,而投加次氯酸钠可降低其在三卤甲烷中的比例,见图4。对于之前文献报道的,关于投加次氯酸钠可降低消毒副产物的产生量,笔者认为主要是指三氯甲烷在THMs中所占比重较大的水体,因此进行出厂水中消毒副产物的研究,不可仅局限于三氯甲烷这一项指标上,而应全面分析三卤甲烷的各项指标,并根据原水中特征污染物的含量与危害进行综合比选与分析。

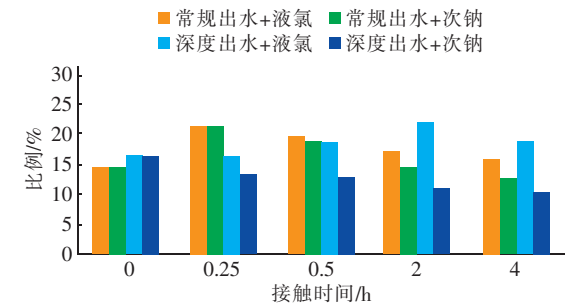


图4 三氯甲烷在THMs中的分配比例

Fig.4 Distribution of chloroform in THMs

对于二氯一溴甲烷,无论投加液氯还是次氯酸钠,其在三卤甲烷中比例均有所下降,而对应的是一氯二溴甲烷的比例上升,且投加次氯酸钠的上升幅度更大,见图5、6。当反应时间为0、0.25、0.5、2、4 h时,常规出水经液氯消毒后,三溴甲烷的比例为18%、16%、18%、18%、18%,经次氯酸钠消毒后为18%、19%、19%、17%、16%;深度处理出水经液氯消毒后,三溴甲烷的比例为10%、14%、14%、18%、19%,经次氯酸钠消毒后为10%、15%、16%、19%、20%。可见,三溴甲烷在深度处理后再消毒时发生变化最大,其比例随时间延长上升明显。除三氯甲烷外,三卤甲烷其他3项指标的生成均为投加次钠的增加比例高于投加液氯的,说明液氯主要能促进三氯甲烷的生成,而投加次氯酸钠对一氯二溴甲烷、二氯一溴甲烷和三溴甲烷均有较强的增长促进作用,笔者认为这除了与原水性质有关外,还因为液氯

与次氯酸钠这两种物质的化学活性差别较大,且溶于水后化学成分和反应机理不尽相同,其详细原因仍有待进一步研究。

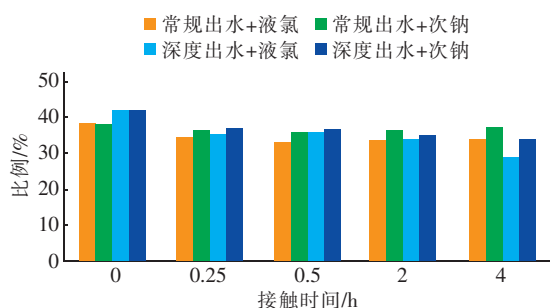


图5 二氯一溴甲烷在THMs中的分配比例

Fig. 5 Distribution of BDCM in THMs

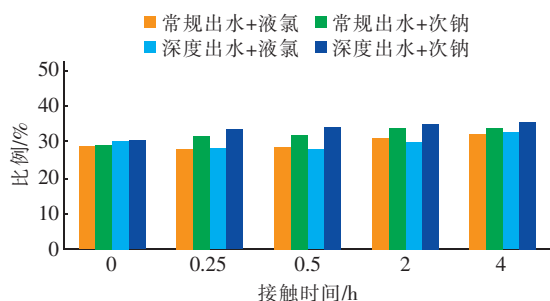


图6 一氯二溴甲烷在THMs中的分配比例

Fig. 6 Distribution of DBCM in THMs

综上,投加次氯酸钠对三卤甲烷的生成有促进作用,无论是三卤甲烷的生成量还是相对增长率均要高于液氯。基于以上现象,对于采用次氯酸钠消毒的水厂,建议跟踪监测出厂水中三卤甲烷各项指标,并严格控制次氯酸钠的投加量。

4 结论

① 对于藻类含量较高的原水,在净化处理过程中可采用多点精确加氯方式进行控制,同时需要关注加氯后出水三卤甲烷消毒副产物的变化情况。

② 对溴离子浓度高的水体进行氯消毒时,溴氯混合型和三溴甲烷消毒副产物浓度增加是造成三卤甲烷增加的主导因素,经加氯后生成的溴氯混合型消毒副产物在三卤甲烷中的占比升高。建议对出水消毒副产物的检测应包含三卤甲烷各项指标而不仅是三氯甲烷。

③ 用液氯消毒时水样pH值会进一步降低,但其优势是氧化能力更强;而用次氯酸钠消毒的水样,其pH值会升高,氧化性能相对较弱。对同一工艺出水投加液氯或次氯酸钠,对 COD_{Mn} 都有一定的

去除作用,且去除率较为接近。

④ 无论投加液氯还是次氯酸钠,随着接触时间的延长,三卤甲烷浓度均呈上升趋势,其中三氯甲烷、二氯一溴甲烷和一氯二溴甲烷增长率为常规处理后高于深度处理后,而三溴甲烷的增长率为深度处理后高于常规处理后,这与臭氧改变了水中有机物的结构使其在消毒过程中更容易与溴离子发生卤代反应有关。

⑤ 对于采用次氯酸钠消毒的水厂,建议跟踪监测出厂水中三卤甲烷各项指标,并需严格控制次氯酸钠的投加量。

参考文献:

- [1] 白晓慧,支兴华,朱斌,等. 次氯酸钠代替液氯消毒对自来水厂供水水质的影响[J]. 中国给水排水,2012,28(11):47-49.
Bai Xiaohui, Zhi Xinghua, Zhu Bin, et al. Effect of sodium hypochlorite instead of liquid chlorine disinfection on water quality in waterworks[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(11): 47-49 (in Chinese).
- [2] 李述茂,吴德礼. 液氯和次氯酸钠对饮用水消毒效果的生产性试验研究[J]. 工业用水与废水,2011,42(2):14-17.
Li Shumao, Wu Deli. Full-scale test on drinking water disinfection by liquid chlorine and sodium hypochlorite[J]. Industrial Water & Wastewater, 2011, 42(2): 14-17 (in Chinese).
- [3] 朱海涛,张富标,徐飏,等. 嘉兴市贯泾港水厂次氯酸钠消毒技术工程应用研究[J]. 中国给水排水,2017,33(6):39-42.
Zhu Haitao, Zhang Fubiao, Xu Biao, et al. Engineering application of sodium hypochlorite disinfection technology in Guanjinggang Water Treatment Plant[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(6): 39-42 (in Chinese).
- [4] Luong T V, Peters C J, Perry R. Influence of bromide and ammonia upon the formation of trihalomethanes under water treatment condition[J]. Environ Sci Technol, 1982, 16(8): 473-479.
- [5] 黄廷林,张晋珠,邸尚志,等. 水厂水处理过程中消毒副产物变化的研究[J]. 水处理技术,2007,33(8):26-29.
Huang Tinglin, Zhang Jinzhu, Di Shangzhi, et al. Variation of disinfection byproducts (DBPs) in water

- treatment plant [J]. *Technology of Water Treatment*, 2007, 33(8): 26–29 (in Chinese).
- [6] 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.
- Wang Yongjing, Feng Sijie, Ji Yuqing, *et al.* Pilot-scale study of odor and bromate control by ozone-biological activated carbon processes [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2016, 42(8): 27–32 (in Chinese).
- [7] 张锁娜,王海波,李肖肖. 臭氧对饮用水中氯化消毒副产物生成的影响[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(10): 4091–4096.
- Zhang Suona, Wang Haibo, Li Xiaoxiao. Influence of ozonation on formation of chlorination disinfection by-products in drinking water [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(10): 4091–4096 (in Chinese).
- [8] 牛志广,孙媛媛,张颖. 预氯化及常规工艺对消毒副产物的影响[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(11): 5142–5148.
- Niu Zhiguang, Sun Yuanyuan, Zhang Ying. Effects of pre-chlorination and conventional process on disinfection by-products [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(11): 5142–5148 (in Chinese).
- [9] 杨宏伟,王昊宇,刘云霞,等. O_3 -BAC 工艺对含溴水体消毒副产物生成势的影响[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2014, 54(5): 607–612.
- Yang Hongwei, Wang Haoyu, Liu Yunxia, *et al.* Ozone-biological activated carbon treatment of DBP in high-bromide water [J]. *Journal of Tsinghua University: Science & Technology*, 2014, 54(5): 607–612 (in Chinese).
- [10] 陈颖敏,左俊利. 饮用水中氯消毒副产物的污染与控制[J]. *工业安全与环保*, 2007, 33(3): 17–18.
- Chen Yingmin, Zuo Junli. Pollution and control of chlorinated disinfection by-products in drinking water [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2007, 33(3): 17–18 (in Chinese).
- [11] 王长平,乔铁军,周瑾,等. 臭氧-生物活性炭工艺出水 pH 的变化及机理[J]. *给水排水*, 2010, 36(7): 21–24.
- Wang Changping, Qiao Tiejun, Zhou Jin, *et al.* Regularity and mechanism of the pH changing in effluent from ozone-biological activated carbon process [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2010, 36(7): 21–24 (in Chinese).
- [12] 张金松,乔铁军. 臭氧-生物活性炭技术水质安全性及控制措施[J]. *给水排水*, 2009, 35(3): 9–13.
- Zhang Jinsong, Qiao Tiejun. Water quality safety and safeguard measures of ozone-biological activated carbon process [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2009, 35(3): 9–13 (in Chinese).



作者简介:邹琳(1981–),女,江苏无锡人,硕士,高工,主要从事饮用水处理技术研究。

E-mail: 370084800@qq.com

收稿日期:2018-08-22

借自然之力,护绿水青山