

技术总结

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.23.006

# 二氧化氯预氧化生成无机消毒副产物的研究

王晓云<sup>1</sup>, 付爱民<sup>2</sup>

(1. 福建工程学院 生态环境与城市建设学院, 福建 福州 350008; 2. 福建宁德核电有限公司, 福建 宁德 355200)

**摘要:** 为了研究二氧化氯对不同人工合成水样预氧化的反应情形以及对无机消毒副产物 (IDBPs) 生成的影响,以腐殖酸(HA)模拟水中有有机物,在不同酸碱环境下,考察了各项反应参数对二氧化氯氧化有机物以及 IDBPs 生成量的影响;并分析了不同溴离子浓度与 HA 浓度对二氧化氯氧化的竞争作用,考察了溴离子对 IDBPs 各物质变化趋势的影响。结果表明,二氧化氯在水中的降解反应受到不同酸碱水质条件的影响,酸性水质条件有利于氯离子的生成,碱性条件有利于亚氯酸根离子的生成。有机物的存在会催化 IDBPs 的生成,纯水中因发生降解反应仅有不超过 38% 的二氧化氯反应生成 IDBPs,而经有机物催化后,有 80% ~ 95% 的二氧化氯反应生成 IDBPs。在添加溴离子后,由溴离子的减少可知,二氧化氯或其水解中间产物将氧化溴离子,但不会生成溴酸根离子,而且溴离子对余氯的消耗将减缓二氧化氯在纯水中的降解反应。在 HA 环境下,单位二氧化氯消耗量对应的亚氯酸根生成量将随溴离子浓度的增加而减少,尤其在碱性环境下更明显。

**关键词:** 二氧化氯; 预氧化; 无机消毒副产物; 溴离子; 腐殖酸; 氯酸根离子; 亚氯酸根离子

中图分类号: TU991 文献标识码: A 文章编号: 1000-4602(2021)23-0034-06

## Formation of Inorganic Disinfection By-products during Chlorine Dioxide Pre-oxidation

WANG Xiao-yun<sup>1</sup>, FU Ai-min<sup>2</sup>

(1. College of Ecological Environment and Urban Construction, Fujian University of Technology, Fuzhou 350008, China; 2. Fujian Ningde Nuclear Power Company Limited, Ningde 355200, China)

**Abstract:** To explore the pre-oxidation of different synthetic water samples by chlorine dioxide and the effect of chlorine dioxide on formation of inorganic disinfection by-products (IDBPs), effects of various reaction parameters on oxidation of humic acid (HA) in simulated water by chlorine dioxide and formation of IDBPs were investigated under different acid-base conditions. In addition, the competitive effect of different bromine concentration and HA concentration on chlorine dioxide oxidation was analyzed, and the influence of bromine ion on variation trend of IDBPs species was investigated. The results showed that the degradation of chlorine dioxide in water was affected by acidic and alkaline water conditions. The acidic water condition was favorable to the formation of chlorine ion, whereas the alkaline condition was favorable to the formation of chlorite ion. The presence of organic matter catalyzed the

formation of IDBPs. In pure water, only no more than 38% of chlorine dioxide reacted to generate IDBPs because of degradation reaction of chlorine dioxide, while about 80% - 95% of chlorine dioxide reacted to generate IDBPs after catalyzed by organic matter. After the addition of bromine ions, the reduction of bromine ions indicated that the chlorine dioxide or its hydrolysis intermediate would oxidize bromine ions. However, no bromate ions were formed, and the consumption of residual chlorine by bromine ions slowed the degradation rate of the chlorine dioxide in pure water. When HA was present, chlorite production per unit chlorine dioxide consumption decreased with the increase of bromine ion concentration, and the phenomena was more obvious specially at alkaline condition.

**Key words:** chlorine dioxide; pre-oxidation; inorganic disinfection by-product; bromine ion; humic acid; chlorate; chlorite

二氧化氯是一种强氧化剂,能有效杀灭水中的细菌、病毒和浮游生物,同时能够有效减少具有“三致”作用的三卤甲烷 (THMs)、卤乙酸 (HAAs) 等有机氯化消毒副产物的生成。研究表明<sup>[1]</sup>,二氧化氯在消毒过程中会产生无机消毒副产物 (IDBPs),包括亚氯酸根离子、氯酸根离子和氯化物。其中亚氯酸根离子和氯酸根离子会影响红血球的解毒功能及血红素的输氧能力,也会造成甲状腺机能退化及 DNA 合成能力减弱。研究表明<sup>[2]</sup>,沿海地区部分水厂,由于海水入侵含水层,原水中会出现溴离子,直接影响消毒副产物 (DBPs) 的生成。

有关二氧化氯控制有机消毒副产物 (ODBPs) 的研究较多<sup>[3]</sup>,但涉及 IDBPs 的文献较少。鉴于此,笔者以腐殖酸 (HA) 模拟水中有机物,探讨二氧化氯自然降解反应在不同酸碱环境下对 IDBPs 生成的影响,以及二氧化氯在不同酸碱环境下氧化 HA 后 IDBPs 的分布及反应机制。另外,在相同的实验条件下,加入溴离子,讨论不同溴离子与 HA 浓度对二氧化氯氧化的竞争作用,进一步了解溴离子对 IDBPs 含氯物质变化趋势的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 水样的配制

**HA 溶液:** 纯水加入 NaOH 调整 pH 值至 12,再将 500 mg 的 HA 溶液溶解于 1 L 上述溶液中,充分搅拌,并经 0.45  $\mu\text{m}$  微孔滤膜过滤后储存于棕色试剂瓶中,使用前再以 TOC 分析仪标定其有机物浓度,以缓冲溶液稀释后使用。

**溴离子溶液:** 将 1.489 2 g 的 KBr 溶解于 1 L 纯水中,得到 1 000 mg/L 的溴离子溶液。

**缓冲溶液:** 经过预实验稀释 100 倍条件下,采用硫酸溶于 1 L 纯水使溶液 pH 值 = 4,采用 13.61 g

的  $\text{KH}_2\text{PO}_4 + 2.48 \text{ g}$  的 NaOH 溶于 1 L 纯水使溶液 pH 值 = 7,采用 38.13 g 的  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O} + 3.44 \text{ g}$  的 NaOH 溶于 1 L 纯水使 pH 值 = 10。实验用二氧化氯采用亚氯酸钠与稀硫酸反应制备,经饱和亚氯酸钠溶液去氯后,由纯水吸收并保存于无光照、4  $^\circ\text{C}$  环境下备用。

**水样:** 取 10 mL 缓冲溶液加入到 1 L 反应器中,加入适当的 HA 溶液及  $\text{Br}^-$  溶液后,以纯水进行稀释定量,待加入适量的二氧化氯氧化剂以后,再加入纯水至反应器口,在确保瓶口无任何气泡的情况下密封。

### 1.2 实验设计

实验分 3 部分:第 1 部分进行二氧化氯在水中的降解实验以及二氧化氯与溴离子的氧化还原实验,由此观察溴离子的存在对二氧化氯降解反应的影响;第 2 部分进行二氧化氯氧化 HA 的实验,分析二氧化氯氧化 HA 对 IDBPs 生成的影响;第 3 部分进行二氧化氯氧化合成水样的反应实验,分析溴离子的存在对二氧化氯氧化 HA 的影响。

**操作参数:** HA 浓度分别为 0、2、10 mg/L, pH 值分别为 4、7、10,溴离子浓度分别为 0、0.5、1 mg/L,二氧化氯投加量分别为 1、5 mg/L;控制参数:反应时间为 2 h,反应温度为 25  $^\circ\text{C}$ 。

### 1.3 分析项目及方法

**二氧化氯:** 采用 DPD 法分析二氧化氯及余氯的生成量,在每次实验时皆以碘滴定法标定二氧化氯浓度,并测定二氧化氯残留量。

$\text{Cl}^-$ 、 $\text{Br}^-$ : 采用离子层析仪 (DX100),配有保护管柱 (AS4A - SH)、分离管柱 (AG4A - SC)、电导率侦测器,提取液采用碳酸系统提取液 (2.0 mmol/L 的  $\text{Na}_2\text{CO}_3 + 0.75 \text{ mmol/L}$  的  $\text{NaHCO}_3$ ),辅助气体为

氮气(N<sub>2</sub>),气体的压力为 48 265 Pa,样品回路容积为 25 μL。

ClO<sub>2</sub><sup>-</sup>、ClO<sub>3</sub><sup>-</sup> 及 BrO<sub>3</sub><sup>-</sup>: 采用离子层析仪 (DX120), 配有保护管柱 (AS9HC)、分离管柱 (AG9HCC)、硫酸抑制器、电导率侦测器, 提取液采用碳酸系统提取液 (9.0 mmol/L 的 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), 辅助气体为氮气, 气体压力为 48 265 Pa, 样品回路容积为 500 μL。分析发现, 不同缓冲溶液使 ClO<sub>2</sub><sup>-</sup>、ClO<sub>3</sub><sup>-</sup> 及 BrO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的停留时间略有偏差, 但对积分面积无明显干扰。

## 2 结果与讨论

### 2.1 二氧化氯在水中的降解反应

本实验主要探讨在不同二氧化氯投加量以及不同酸碱水质环境下, ClO<sub>2</sub><sup>-</sup>、ClO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup> 等 IDBPs 的变化趋势, 结果如图 1 所示。

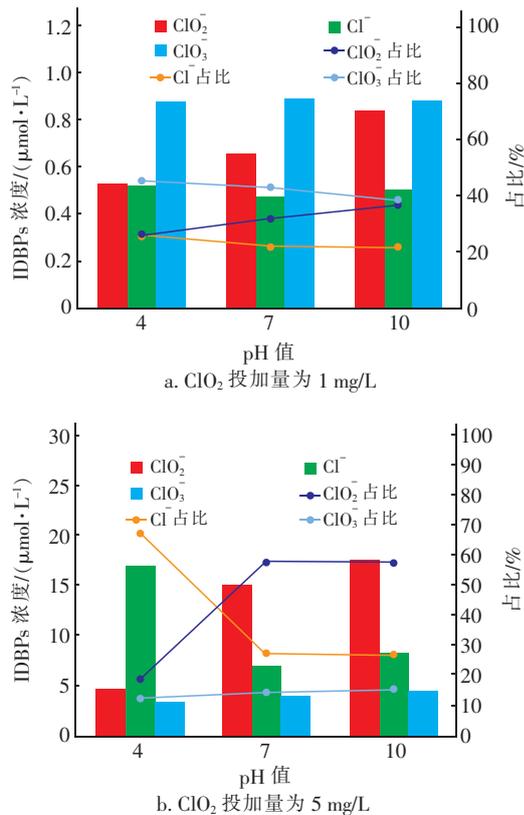


图 1 不同投加量下 ClO<sub>2</sub> 的水解中间产物

Fig. 1 Hydrolysis products of ClO<sub>2</sub> with different dosage

由图 1 可以看出, 在较低二氧化氯投加量时, IDBPs 各物质的变化趋势基本不会受到 pH 值的影响, 可能是因为二氧化氯投加量较低, 其水解反应或含氯化物之间的反应并不明显, 因此各物质变化趋势不明显。相比之下, 在较高二氧化氯投加量下,

IDBPs 各物质生成浓度明显受到 pH 值的影响, 呈现不同的生成趋势。

从消耗单位二氧化氯所生成的亚氯酸根离子、氯离子、氯酸根离子的比例, 可分析不同酸碱条件对二氧化氯降解反应的影响。在 pH 值 = 10 时, 亚氯酸根离子的生成量可达最大, 且随着 pH 值的降低而减少。研究表明<sup>[4]</sup>, 二氧化氯在碱性环境下易进行降解反应, 降解反应可分为反应缓慢的初期及受次氯酸根催化而加快反应的催化期两个阶段, 消耗二氧化氯生成氯酸根离子及亚氯酸根离子。研究结果显示<sup>[5]</sup>, 二氧化氯会与氢氧根离子反应生成·OH 与亚氯酸根离子; 而反应后期会进行一系列的反应生成氯酸根离子与次氯酸, 次氯酸在水中可生成次氯酸根离子, 次氯酸根离子将加速二氧化氯的分解。综上可知, 在碱性环境下确实能促进二氧化氯的自行分解反应, 使得亚氯酸根离子增加, 并产生中间产物 ClO<sup>-</sup>/HClO。

对于氯离子而言, 在 pH 值 = 4 的酸性条件下, 氯离子的生成量最大, 因为二氧化氯在水中的氧化还原反应易受到酸碱条件的影响, 除了在碱性环境中交换 1 个电子而生成亚氯酸根离子外, 二氧化氯在酸性环境中倾向交换 5 个电子而生成氯离子。

氯酸根离子的生成量受 pH 值的影响并不大, 而且氯酸根离子的生成量会随着二氧化氯投加量的增加而提高, 且与投加量呈现大致相同的倍数关系, 这与 Lasagna 等<sup>[6]</sup>的研究结果一致。

由二氧化氯降解反应所生成的 IDBPs 来看, 高投加量二氧化氯的降解率 (31% ~ 38%) 高于低投加量二氧化氯的降解率 (16% ~ 19%)。研究表明<sup>[7]</sup>, 二氧化氯的降解速率受二氧化氯以及次氯酸根离子浓度影响, 降解初期为一级反应, 经过一系列复杂的反应产生次氯酸根离子后, 受其影响而变为二级反应。反应速率计算公式为:

$$r = -\frac{dc(\text{ClO}_2)}{dt} = k_1c(\text{ClO}_2) + k_2c(\text{ClO}_2)c(\text{ClO}^-) \quad (1)$$

其中,  $k_1$  为  $3.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,  $k_2$  为  $36 \text{ L}/(\text{mol} \cdot \text{s})$ 。由此可知, 在较高投加量下二氧化氯的降解速率较快。

### 2.2 溴离子对二氧化氯降解反应的影响

考察了溶液中添加不同浓度的溴离子后, 二氧化氯降解反应生成 IDBPs 的变化趋势。结果表明,

投加 1 mg/L 二氧化氯时, IDBPs 各物质的生成均不会受到影响; 而在投加 5 mg/L 二氧化氯的情况下, IDBPs 各物质则呈现出不同的变化趋势, 具体如图 2 所示。

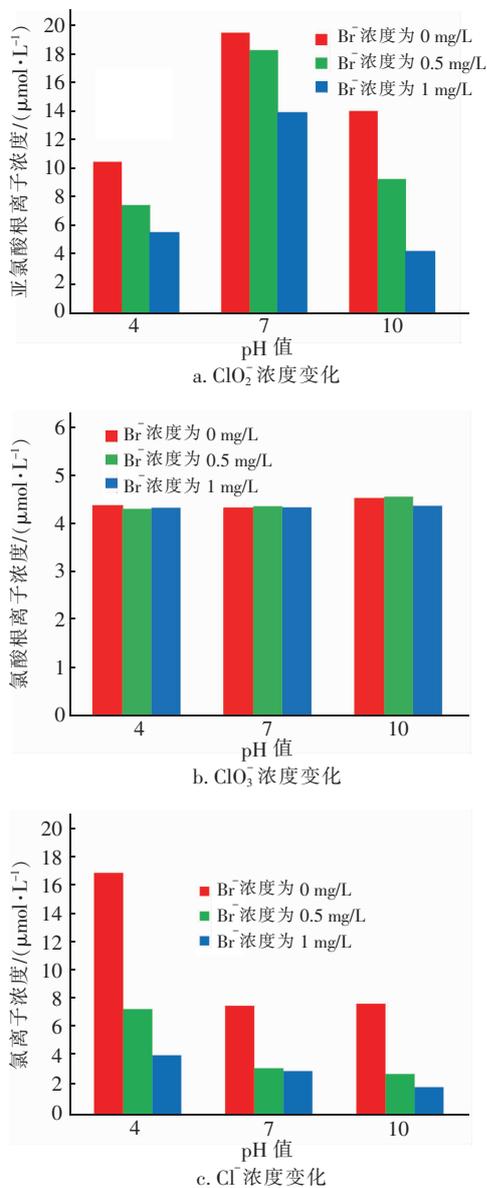


图 2  $\text{Br}^-$  浓度对  $\text{ClO}_2$  (投加量为 5 mg/L) 降解的影响

Fig. 2 Effect of  $\text{Br}^-$  concentration on degradation of  $\text{ClO}_2$  with dosage of 5 mg/L

图 2(a) 显示, pH 值 = 7 时亚氯酸根离子的生成量最大, 相同 pH 值条件下随着溴离子浓度的增加, 亚氯酸根离子的生成量反而减少, 当  $\text{Br}^-$  浓度为 1 mg/L、pH 值 = 10 时生成量最低。主要原因在于, 溴离子会被二氧化氯降解反应的中间产物  $\text{HClO}$  氧化生成  $\text{HBrO}$  和氯离子, 因此当溴离子浓度增加时,

$\text{HClO}$  会被消耗而减少, 使得二氧化氯的分解速率减慢; 相应地, 在高碱性环境下, 亚氯酸根离子的生成量也随之降低<sup>[8]</sup>。

由图 2(b) 可知, 氯酸根离子的生成量受溴离子的影响不大, 低投加量时亦是如此。

由图 2(c) 可知, 在高二氧化氯投加量下, 由于溴离子加入后会被余氯氧化而减缓二氧化氯的水解反应, 因此随着溴离子的添加, 氯离子的生成量反而减少。

添加溴离子后, 理论上溴离子被二氧化氯或其水解中间产物氧化生成次溴酸, 同时也会继续被氧化生成亚溴酸根离子和溴酸根离子<sup>[9]</sup>。而在较高的二氧化氯投加量下, 二氧化氯在水中产生  $\cdot\text{OH}$  较多,  $\cdot\text{OH}$  易与溴离子作用产生  $\text{BrO}\cdot$ , 然后与亚溴酸根离子及次溴酸根离子反应生成溴酸根离子, 所以溴离子浓度随着二氧化氯投加量的增加而有减少的趋势。实验结果还显示, pH 值对二氧化氯氧化溴离子的影响并不大。本实验没有检测出溴酸根离子, 表示溴离子可能被氧化生成次溴酸根离子和亚溴酸根离子, 但却没有被进一步氧化成溴酸根离子。

### 2.3 腐殖酸环境下无机消毒副产物的生成

采用不同投加量 (1、5 mg/L) 的二氧化氯氧化不同浓度 (2、10 mg/L) 腐殖酸, 无机消毒副产物会伴随着氧化还原反应出现。因此, 探讨了不同酸碱环境下腐殖酸存在对无机消毒副产物生成的影响。

当采用 1 mg/L 二氧化氯氧化水样时, 无论 pH 值如何, 低 HA 浓度与高 HA 浓度下, 二氧化氯消耗率达 95% 以上; 采用 5 mg/L 二氧化氯时, 二氧化氯消耗率在 80% 以上, 表明在有机物环境下, 二氧化氯反应完全。当水中有机物浓度增加时, 单位二氧化氯氧化反应生成的亚氯酸根离子明显下降, 而氯酸根离子及氯离子生成量上升。这是因为, 亚氯酸根离子具有氧化能力, 只要水中有机物浓度足够高, 亚氯酸根离子易与这些有机物发生歧化反应而生成氯酸根离子和氯离子<sup>[10]</sup>。所以在需要二氧化氯量提高的情况下, 亚氯酸根离子生成后自然还会继续与有机物发生反应, 导致在高 HA 浓度下单位二氧化氯氧化反应生成的亚氯酸根离子少于低 HA 浓度时的。由不同酸碱环境来看, 使用低二氧化氯投加量氧化低 HA 浓度时, 单位二氧化氯消耗量对应的亚氯酸根离子生成量显然不受 pH 值影响。在高 HA 浓度下, 单位二氧化氯消耗量对应的氯离子生

成量将会高于低 HA 浓度,其主要原因在于亚氯酸根离子会继续受到有机物的影响而加速降解。此外,在酸性环境及高 HA 浓度下,将更有利于亚氯酸根离子的分解,所以单位二氧化氯氧化反应生成的氯离子量也是最显著的。对于单位二氧化氯氧化反应生成的氯离子量,HA 浓度以及 pH 值的影响不大。

以相同投加比分析初始 HA 浓度对二氧化氯降

解生成 IDBPs 的影响,结果见表 1。由  $c(\text{ClO}_2)/c(\text{HA})$  为 1/2 的两组结果可知,在相同的投加比下,低 HA 浓度时单位二氧化氯氧化生成的亚氯酸根离子较高 HA 浓度时大,而氯离子生成量则相反,说明在高 HA 浓度下亚氯酸根离子被催化分解为氯离子的速率明显提高。在相同投加比下,唯有氯酸根离子的生成量几乎不受 HA 浓度的影响。

表 1 不同 HA 浓度下二氧化氯投加量对 IDBPs 物质种类的影响

Tab. 1 Effects of chlorine dioxide dosage on IDBPs species under different HA concentrations

ClO <sub>2</sub> 投加量/ (mg · L <sup>-1</sup> )	HA 浓度/ (mg · L <sup>-1</sup> )	pH 值	ClO <sub>2</sub> 消耗量/ (μmol · L <sup>-1</sup> )	IDBPs 组分/(μmol · L <sup>-1</sup> )			IDBPs 组分: ClO <sub>2</sub> 消耗量/%		
				ClO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	ClO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	ClO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	ClO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
1	2	4	14.40	12.07	0.25	1.09	83.82	1.74	7.57
		7	14.40	11.04	1.29	1.08	76.67	8.96	7.50
		10	14.81	11.48	0.70	1.64	77.52	4.73	11.07
	10	4	14.47	6.64	3.57	3.93	45.89	24.67	27.16
		7	14.81	6.70	3.95	3.43	45.24	26.67	23.16
		10	14.81	6.97	3.98	3.71	47.06	26.87	25.05
5	2	4	39.81	31.32	3.45	1.40	78.67	8.67	3.52
		7	54.09	42.61	1.44	1.68	78.78	2.66	3.11
		10	68.22	55.93	2.34	1.51	81.98	3.43	2.21
	10	4	73.24	44.25	23.39	5.61	60.42	31.94	7.66
		7	72.44	43.29	24.36	4.79	59.76	33.63	6.61
		10	70.52	45.55	20.90	4.07	64.59	29.64	5.77

#### 2.4 溴离子对无机消毒副产物生成的影响

由前述分析可以看出,溴离子的添加会消耗二氧化氯及其水解产物,导致二氧化氯的降解速率变慢,所以氯离子的生成量也随之减少;亚氯酸根离子则随二氧化氯氧化溴离子而生成。进一步研究了当有机物参与氧化还原反应时,溴离子对单位二氧化氯消耗量下 IDBPs 生成的影响。结果表明,亚氯酸根离子的单位生成量受 HA 影响而明显增加,但是随着溴离子浓度的提高,亚氯酸根离子单位生成量反而减少,这主要是因为亚氯酸根离子的氧化能力比溴离子高,所以当亚氯酸根离子达到临界浓度后,将可以氧化溴离子而导致其单位生成量下降。此外,溴离子在水中被氧化为次溴酸根离子时会释放出氢离子<sup>[11]</sup>,所以在碱性环境中,将更有利于反应的进行,从而使得单位亚氯酸根离子的生成量降幅变大。

针对单位二氧化氯消耗量下氯离子生成量而言,氯离子生成量随单位亚氯酸根离子氧化溴离子的消耗而有增加的趋势。此外,随着 pH 值的增大,氯离子生成量也明显增加,亚氯酸根离子生成量则减少,氯酸根离子生成量变化不大。

#### 3 结论

① 二氧化氯在纯水中的降解反应将受到酸碱条件的影响。在酸性条件下有利于氯离子的生成,而在碱性条件下则更有利于亚氯酸根离子的生成。此外,低浓度的二氧化氯在纯水中的降解率为 16% ~ 19%,而高浓度二氧化氯的降解率为 31% ~ 38%。

② 溴离子将会影响二氧化氯在纯水中的降解反应。由溴离子的减少可知,二氧化氯或其水解中间产物将会氧化溴离子,但不会生成溴酸根离子,仅生成次溴酸根离子;而且溴离子对中间产物的消耗也将减缓二氧化氯在纯水中的降解反应。

③ 有机物的存在将会催化 IDBPs 的生成。纯水中因降解反应仅有不超过 38% 的二氧化氯反应生成 IDBPs,而经 HA 催化后有 80% ~ 95% 的二氧化氯反应生成 IDBPs。当水中有机物浓度增加时,单位二氧化氯氧化生成的亚氯酸根离子明显下降,而氯酸根离子及氯离子的生成量上升。

④ 在存在 HA 的环境中,由于溴离子还原能力强,可与亚氯酸根离子进行氧化还原反应,造成单位二氧化氯氧化生成的亚氯酸根离子将随溴离子浓

度的增加而减少,尤其在碱性环境下更有利于该反应的进行。针对单位二氧化氯氧化生成的氯离子而言,氯离子生成量随单位亚氯酸根离子氧化溴离子的消耗量而有增加的趋势;此外,随着 pH 值的增大氯离子生成量明显增加,亚氯酸根离子则减少,而氯酸根离子生成量变化不大。

#### 参考文献:

- [ 1 ] KATZ A, NARKIS N. Removal of chlorine dioxide disinfection by-products by ferrous salts [J]. *Water Research*, 2001, 35(1): 101 - 108.
- [ 2 ] 孟欣,魏彬,李学艳,等. 溴离子对三卤甲烷生成量的影响因素研究[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(19): 66 - 71.  
MENG Xin, WEI Bin, LI Xuayan, *et al.* Factors affecting the formation of trihalomethanes by bromide ions [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(19): 66 - 71 (in Chinese).
- [ 3 ] 辛会博,崔晓宇,史正晨,等. 二氧化氯预氧化控制藻源有机物 DBPsFP 的研究[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(23): 40 - 44.  
XIN Huibo, CUI Xiaoyu, SHI Zhengchen, *et al.* Control of DBPsFP in algae organic matters by chlorine dioxide pre-oxidation [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(23): 40 - 44 (in Chinese).
- [ 4 ] HOIGNÉ J, BADER H. Kinetics of reactions of chlorine dioxide (OClO) in water—I. Rate constants for inorganic and organic compounds [J]. *Water Research*, 1994, 28(1): 45 - 55.
- [ 5 ] SVENSON D R, KADIA J, CHANG H M, *et al.* Effect of pH on the inorganic species involved in a chlorine dioxide reaction system [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2002, 41(24): 5927 - 5933.
- [ 6 ] LASAGNA C, RAFFO E, BIANCHI M, *et al.* Chlorine dioxide DBPs (disinfection by-products) in drinking water [J]. *Journal of Biological Research*, 2013, 86(1): 22 - 24.
- [ 7 ] HEIJNE G V, TEDER A. Kinetics of the decomposition of aqueous chlorine dioxide solutions [J]. *Acta Chemica Scandinavica*, 1973, 27(10): 4018 - 4019.
- [ 8 ] TRATNYEK P G, HOIGNÉ J. Kinetics of reactions of chlorine dioxide (OClO) in water—II. Quantitative structure-activity relationships for phenolic compounds [J]. *Water Research*, 1994, 28(1): 57 - 66.
- [ 9 ] KORN C, ANDREW R C, ESCOBAR M D. Development of chlorine dioxide-related by-product models for drinking water treatment [J]. *Water Research*, 2002, 36(1): 330 - 342.
- [ 10 ] GORDON G, BERNARD B. Ozone and chlorine dioxide: similar chemistry and measurement issues [J]. *Ozone: Science and Engineering*, 1999, 21(5): 447 - 464.
- [ 11 ] CHEN L, ZHANG J J, ZHENG X L. Coupling technique for deep removal of manganese and iron from potable water [J]. *Environmental Engineering Science*, 2016, 33(4): 261 - 269.

作者简介:王晓云(1978 - ),女,河北保定人,硕士,副教授,主要从事水质净化及安全研究工作。

E-mail: 541981557@qq.com

收稿日期:2020-01-09

修回日期:2020-02-04

(编辑:任莹莹)

完善水利基础设施网络  
增强水安全保障能力