

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.23.007

# $O_3$ /PMS 工艺处理不同含溴水时溴酸盐的生成规律

杨淑淇<sup>1</sup>, 刘建广<sup>1</sup>, 钟雪莲<sup>1</sup>, 孙韶华<sup>2</sup>

(1. 山东建筑大学 市政与环境工程学院, 山东 济南 250101; 2. 山东省城市供排水水质监测中心, 山东 济南 250100)

**摘 要:** 研究了臭氧/单过硫酸氢钾( $O_3$ /PMS)氧化工艺处理 Q 水厂水源水时溴酸盐的生成规律,同时对比分析了  $O_3$ /PMS 工艺处理纯水、S 学校自来水、H 泉水、Q 水厂水源水、J 水库水等不同水质配制的含溴水时溴酸盐的生成情况。结果表明,在  $O_3$ /PMS 处理含溴 Q 水厂水源水时,当  $n(\text{PMS})/n(\text{O}_3)$  (物质的量之比)在 0~1.5 范围内增大时,PMS 对溴酸盐生成的抑制作用呈增强趋势,且当  $n(\text{PMS})/n(\text{O}_3)=1.5$  时抑制作用达到最大,继续增大  $n(\text{PMS})/n(\text{O}_3)$ ,PMS 对溴酸盐生成的抑制作用减弱。当  $O_3$ /PMS 处理不同水质的含溴配水时,投加 PMS 对溴酸盐生成的影响效果不同。 $O_3$ /PMS 处理含溴纯水、H 泉水和 J 水库水配水时, $O_3$  和 PMS 联用会促进溴酸盐的生成; $O_3$ /PMS 处理含溴 S 学校自来水和 Q 水厂水源水配水时, $O_3$  和 PMS 联用会抑制溴酸盐的生成,这主要是因为水中有机物与  $O_3$  和 PMS 发生了一系列反应从而影响了溴酸盐的生成。

**关键词:** 臭氧; 单过硫酸氢钾; 溴酸盐; 水质条件; 中间产物

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)23-0040-06

## Formation of Bromate in Different Water Containing Bromide Treated by $O_3$ /PMS Process

YANG Shu-qi<sup>1</sup>, LIU Jian-guang<sup>1</sup>, ZHONG Xue-lian<sup>1</sup>, SUN Shao-hua<sup>2</sup>

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. Shandong Province City Water Supply and Drainage Water Quality Monitoring Center, Jinan 250100, China)

**Abstract:** Formation of bromate in source water of Q waterworks treated by ozone/potassium monopersulfate ( $O_3$ /PMS) oxidation process was investigated, and the formation of bromate in different water containing bromide prepared by pure water, S school tap water, H spring water, source water of Q waterworks, and J reservoir water was compared and analyzed when treated by  $O_3$ /PMS process. When source water of Q waterworks containing bromide was treated by  $O_3$ /PMS, the inhibition of PMS on bromate formation showed an increasing trend with the  $n(\text{PMS})/n(\text{O}_3)$  (molar ratio) increasing in the range of 0-1.5, and the inhibition was the largest when  $n(\text{PMS})/n(\text{O}_3)$  was 1.5. When  $n(\text{PMS})/n(\text{O}_3)$  continued to increase, the inhibition of PMS on bromate formation was weakened. The effect of PMS on bromate formation was different when the different water quality containing bromide was treated by  $O_3$ /PMS. When the pure water, H spring water and J reservoir water containing bromide were treated

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07404-003); 国家自然科学基金资助项目(51278285)  
通信作者: 刘建广 E-mail:liujlg@163.com

by O<sub>3</sub>/PMS, the combination of ozone and PMS promoted the formation of bromate. When O<sub>3</sub>/PMS was employed to treat S school tap water and source water of Q waterworks containing bromide, the combination of O<sub>3</sub> and PMS inhibited the formation of bromate. The reason was mainly because of a series of reactions between organic matter in water and O<sub>3</sub>/PMS affected the formation of bromate.

**Key words:** ozone; potassium monopersulfate; bromate; water quality condition; intermediate product

近年来,由于 SO<sub>4</sub><sup>·-</sup> 具有比 ·OH 更高的氧化还原电位(前者为 2.5 ~ 3.1 V,后者为 2.3 ~ 2.7 V)而引起了广泛关注。此外,在降解有机污染物方面,SO<sub>4</sub><sup>·-</sup> 比 ·OH 具有更高的选择性而且受水基质的影响较小<sup>[1]</sup>。由于臭氧/单过硫酸氢钾(O<sub>3</sub>/PMS)可以同时产生 ·OH 和 SO<sub>4</sub><sup>·-</sup>,能显著提高有机物的去除率<sup>[2]</sup>,因此,O<sub>3</sub>/PMS 工艺近年来已成为高级氧化技术和饮用水消毒技术的研究热点。Yuan 等人<sup>[3]</sup>的研究验证了 O<sub>3</sub>/PMS 体系可同步生成 ·OH 和 SO<sub>4</sub><sup>·-</sup>,同时,O<sub>3</sub>/PMS 对布洛芬的降解有明显的协同作用;刘伟利<sup>[4]</sup>研究发现,单独 O<sub>3</sub> 和单独 PMS 对泛影酸钠几乎无降解作用,而在 O<sub>3</sub>/PMS 体系中,PMS 可以显著提高 O<sub>3</sub> 的分解速率,从而提高泛影酸钠的降解效率。

基于 ·OH 和 SO<sub>4</sub><sup>·-</sup> 的高级氧化工艺在处理含有 Br<sup>-</sup> 的原水时都会生成有溴酸盐<sup>[5-6]</sup>,而溴酸盐是一种潜在的致癌物质,我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)中规定 BrO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的限值为 10 μg/L。目前,关于臭氧氧化过程中 BrO<sub>3</sub><sup>-</sup> 生成的动力学和机理已有全面的研究,Lutze 等<sup>[7]</sup>指出,SO<sub>4</sub><sup>·-</sup> 驱动的 BrO<sub>3</sub><sup>-</sup> 生成机理与 ·OH 诱导的 BrO<sub>3</sub><sup>-</sup> 生成机理相似,但 SO<sub>4</sub><sup>·-</sup> 存在的条件下 Br<sup>-</sup> 生成 BrO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的机理和途径非常复杂,需要进一步研究。前人在采用 O<sub>3</sub>/PMS 处理含溴纯水配水和某地表水时对 BrO<sub>3</sub><sup>-</sup> 生成的促进作用有所研究<sup>[8]</sup>,但对于不同水质条件下 O<sub>3</sub>/PMS 处理过程中 BrO<sub>3</sub><sup>-</sup> 生成的研究较少,笔者在实验中发现,采用 O<sub>3</sub>/PMS 工艺处理某水源水时出现了抑制溴酸盐产生的情况。为此,笔者研究了不同水质条件对 O<sub>3</sub>/PMS 工艺处理含溴水过程中溴酸盐生成的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验水样

实验用纯水为超纯水,pH 值为 6.5;S 学校自来水取自实验室自来水,pH 值为 8.2 ~ 8.3,氨氮未检

出,Br<sup>-</sup> 浓度为 80 μg/L;实际水样 Q 水厂水源水(简称:Q 水源水)、H 泉水、J 水库水的水质见表 1。实际水样均经过 0.45 μm 滤膜过滤。

表 1 实际水体水质

Tab. 1 Actual water quality

项目	pH 值	氨氮/ (mg · L <sup>-1</sup> )	TOC/ (mg · L <sup>-1</sup> )	UV <sub>254</sub> / cm <sup>-1</sup>	Br <sup>-</sup> / (μg · L <sup>-1</sup> )
Q 水源水	8.30	未检出	2.519	0.033	110
H 泉水	8.33	未检出	0.826	0.010	90
J 水库水	8.26	0.11	7.238	0.073	25

### 1.2 实验方法

将配制好的含溴水加入到 250 mL 的锥形瓶中,采用恒温振荡器来维持恒定的反应温度。采用臭氧发生器制备饱和臭氧水(臭氧浓度为 20 mg/L)。实验结束时用硫代硫酸钠淬灭剩余臭氧以终止反应。实验用药品均为优级纯。根据实验需要向水样中投加溴离子使用液,溴离子使用液由溴离子标准溶液配制而成。

### 1.3 分析项目与方法

Br<sup>-</sup> 和 BrO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度采用离子色谱法测定;DOC 采用岛津总有机碳分析仪测定,样品在测定前需经 0.45 μm 醋酸纤维素滤膜过滤;饱和臭氧水浓度采用紫外分光光度法测定,反应体系中的臭氧浓度采用靛蓝二磺酸钠分光光度法测定;NH<sub>3</sub> - N 浓度采用纳氏试剂分光光度法测定;HOBr/OBr<sup>-</sup> 浓度采用 DPD 分光光度法测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PMS 对 O<sub>3</sub> 氧化 Q 水源水生成 BrO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的影响

向 Q 水源水中投加溴离子使用液,控制 Br<sup>-</sup> 浓度为 0.25 mg/L、pH 值为 8.3、反应温度为 20 ℃,在臭氧投加量(初始臭氧浓度)为 2、3、4 mg/L 的条件下分别向溶液中投加不同量的 PMS[以 PMS 与 O<sub>3</sub> 的物质的量之比 n(PMS)/n(O<sub>3</sub>) 计,共进行 3 组实验],考察 n(PMS)/n(O<sub>3</sub>) 对 BrO<sub>3</sub><sup>-</sup> 生成的影响,结果见图 1。

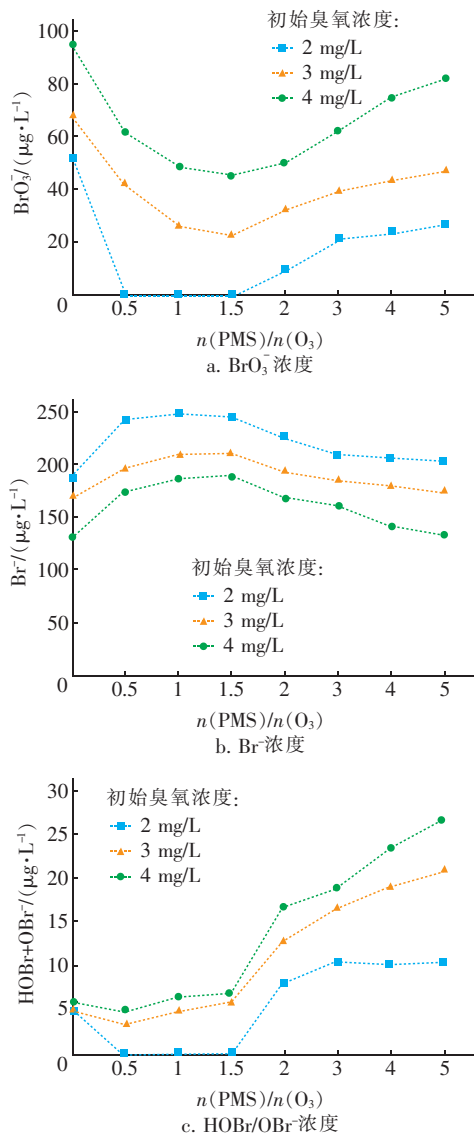


图1  $n(\text{PMS})/n(\text{O}_3)$  对  $\text{BrO}_3^-$ 、 $\text{Br}^-$  和  $\text{HOBr}/\text{OBr}^-$  浓度的影响

Fig. 1 Effect of molar ratio of PMS to  $\text{O}_3$  on  $\text{BrO}_3^-$ ,  $\text{Br}^-$  and  $\text{HOBr}/\text{OBr}^-$  concentrations

由图1(a)和(b)可知,在不同初始臭氧浓度下, $n(\text{PMS})/n(\text{O}_3)$ 对溴酸盐的生成都有较大影响。与未加PMS(单独臭氧氧化)相比,当 $n(\text{PMS})/n(\text{O}_3) < 5$ 时PMS对溴酸盐的生成都有抑制作用。当 $n(\text{PMS})/n(\text{O}_3) < 1.5$ 时,溴酸盐的生成量随 $n(\text{PMS})/n(\text{O}_3)$ 的增大而减少,抑制作用呈增强趋势;当 $n(\text{PMS})/n(\text{O}_3) = 1.5$ 时,溴酸盐的生成量达到最低;当 $n(\text{PMS})/n(\text{O}_3)$ 在1.5~5之间时,溴酸盐的生成量随 $n(\text{PMS})/n(\text{O}_3)$ 的增大而增加,抑制作用呈下降趋势。各组实验中,随初始臭氧浓度的

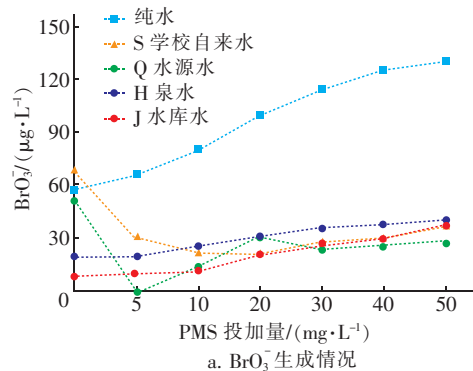
增加,溴酸盐的生成量均增大,在初始臭氧浓度为2 mg/L条件下,当 $n(\text{PMS})/n(\text{O}_3)$ 为0.5~1.5时未检测到溴酸盐的生成。因此减少臭氧初始浓度能有效控制溴酸盐的生成。

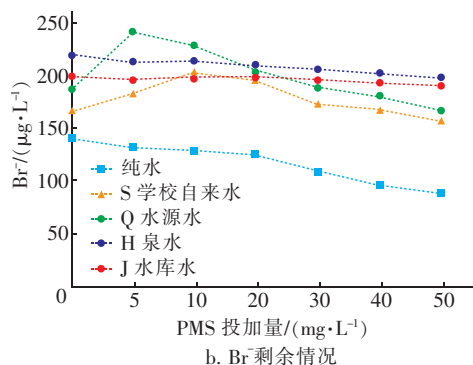
从图1(c)可知, $n(\text{PMS})/n(\text{O}_3)$ 对中间产物 $\text{HOBr}/\text{OBr}^-$ 的影响较大,当 $n(\text{PMS})/n(\text{O}_3) < 1.5$ 时,中间产物的积累量较低;当 $n(\text{PMS})/n(\text{O}_3) > 1.5$ 时,中间产物的积累量随 $n(\text{PMS})/n(\text{O}_3)$ 的增大而迅速增加。由图1(b)可知,当 $n(\text{PMS})/n(\text{O}_3) < 1.5$ 时,反应体系中的 $\text{Br}^-$ 浓度比未加PMS时要高,由于处理的水样为Q水源水,反应中除了加入 $\text{Br}^-$ 之外未加入其他物质,而且当 $n(\text{PMS})/n(\text{O}_3) > 1.5$ 时中间产物的积累量又有升高,因此可以推测,当 $n(\text{PMS})/n(\text{O}_3)$ 介于0.5~1.5时PMS在Q水源水中发生反应生成的某种物质可以将 $\text{HOBr}/\text{OBr}^-$ 还原为 $\text{Br}^-$ 。

综合上述实验结果可知,当 $n(\text{PMS})/n(\text{O}_3) < 1.5$ 时,PMS在Q水源水中生成的某种物质对溴酸盐生成的抑制作用要大于PMS对溴酸盐生成的促进作用,整体上表现为抑制溴酸盐的生成,而且当 $n(\text{PMS})/n(\text{O}_3) = 1.5$ 时表现最明显;当 $n(\text{PMS})/n(\text{O}_3) > 1.5$ 时,PMS对溴酸盐生成的促进作用变强,因此表现为对溴酸盐生成的抑制作用减弱。根据这种现象和推测,选取了几种不同来源的水样进行 $\text{O}_3/\text{PMS}$ 氧化实验。

## 2.2 不同水质对 $\text{O}_3/\text{PMS}$ 体系中 $\text{BrO}_3^-$ 生成的影响

实验水样选取纯水、S学校自来水、H泉水、Q水源水和J水库水,向实验水样中投加溴离子使用液使 $\text{Br}^-$ 浓度为0.25 mg/L,在pH值为8.2~8.3、反应温度为20℃、初始臭氧浓度为2 mg/L的条件下分别向反应体系中投加不同量的PMS,研究不同水质对 $\text{O}_3/\text{PMS}$ 体系中 $\text{BrO}_3^-$ 生成的影响,结果如图2所示。



图 2 不同水质对 O<sub>3</sub>/PMS 体系中 BrO<sub>3</sub><sup>-</sup> 生成的影响Fig. 2 Effect of different water quality on BrO<sub>3</sub><sup>-</sup> formation in O<sub>3</sub>/PMS system

从图 2 可以看出,采用 O<sub>3</sub>/PMS 处理含溴水配水时,PMS 的加入对溴酸盐生成的影响效果与水质密切相关。当 O<sub>3</sub>/PMS 处理含溴纯水配水时,PMS 的加入会促进溴酸盐的生成,并且随着 PMS 投加量的增加溴酸盐的生成量亦增加。分析实验结果可知,在处理含溴纯水配水时,PMS 的加入会催化自由基的生成从而促进溴酸盐的生成。O<sub>3</sub>/PMS 处理含溴 H 泉水配水和 J 水库水配水时,PMS 的加入对溴酸盐的生成也会起到促进作用,并且溴酸盐生成量和溴离子剩余量的变化趋势与纯水体系基本相同。但是,两种实际水样体系中溴酸盐的生成量均低于纯水体系,即 PMS 对溴酸盐生成的促进作用明显低于纯水体系。

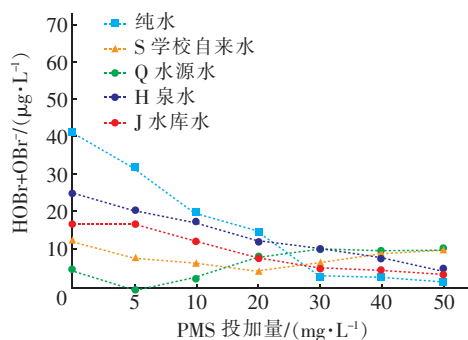
O<sub>3</sub>/PMS 氧化含溴 S 学校自来水配水和 Q 水源水配水时,PMS 的加入会抑制溴酸盐的生成。从图 2(a)可以看出,单独臭氧氧化含溴 S 学校自来水配水和 Q 水源水配水时,溴酸盐的生成量明显高于单独臭氧氧化含溴 H 泉水配水和 J 水库水配水。但加入 PMS 后,O<sub>3</sub>/PMS 氧化含溴 S 学校自来水配水和 Q 水源水配水时溴酸盐的生成量会随着 PMS 投加量的增加而减少。O<sub>3</sub>/PMS 处理 S 学校自来水配水时,在 PMS 投加量达到 20 mg/L 时,溴酸盐生成量最少,对溴酸盐生成的抑制率可以达到 69.14%;而当 PMS 投加量 >20 mg/L 时,抑制作用呈下降趋势。当 O<sub>3</sub>/PMS 氧化含溴 Q 水源水配水时,PMS 的加入对溴酸盐生成的抑制作用最为明显,在 PMS 投加量为 5 mg/L 时,未检测到溴酸盐的生成;而当 PMS 投加量 >5 mg/L 时,对溴酸盐生成的抑制作用减弱。

对剩余臭氧的检测结果表明,含溴 H 泉水、Q

水源水和 J 水库水配水经 O<sub>3</sub>/PMS 氧化后均无臭氧剩余;含溴纯水、S 学校自来水配水经 O<sub>3</sub>/PMS 氧化后有一定的臭氧剩余量,且臭氧剩余量随着 PMS 投加量的增加而减少。

### 2.3 PMS 对 BrO<sub>3</sub><sup>-</sup> 生成的影响机制

O<sub>3</sub>/PMS 氧化不同含溴水时中间产物 HOBr/OBr<sup>-</sup> 的积累情况见图 3。可以看出,O<sub>3</sub>/PMS 氧化含溴纯水、J 水库水、H 泉水配水时,HOBr/OBr<sup>-</sup> 的生成量会随着 PMS 投加量的增加而减少。结合图 2 可知,在这 3 种水质体系中,PMS 的加入会促进中间产物氧化生成溴酸盐,其原因主要是,在 O<sub>3</sub>/PMS 工艺中,SO<sub>4</sub><sup>·-</sup> 和 ·OH 以相同的产率同时生成,但在较高的 PMS 浓度下,PMS 的分解速率会提高,因此 ·OH/SO<sub>4</sub><sup>·-</sup> 的生成速度更快,同时,较高的 PMS 投加量导致臭氧利用效率提高,SO<sub>4</sub><sup>·-</sup> 和 ·OH 的生成量增加。

图 3 O<sub>3</sub>/PMS 处理不同含溴水时中间产物 HOBr/OBr<sup>-</sup> 的积累情况Fig. 3 HOBr/OBr<sup>-</sup> accumulation during treatment of different water containing bromide by O<sub>3</sub>/PMS

从图 3 还可知,O<sub>3</sub>/PMS 氧化含溴 S 学校自来水配水、Q 水源水配水时,中间产物的生成量会随着 PMS 投加量的增加而先减少后增加,中间产物的生成趋势与溴酸盐的变化趋势基本相同。O<sub>3</sub>/PMS 氧化含溴 Q 水源水配水时,在未检出溴酸盐的实验中,也未检测到中间产物。从实验结果可以推测出,O<sub>3</sub>/PMS 处理含溴自来水、Q 水源水配水时,PMS 通过控制中间产物的生成或转化来控制溴酸盐的生成。推测原因主要是:①O<sub>3</sub>/PMS 处理 Q 水源水配水时生成了某种物质可以将 HOBr/OBr<sup>-</sup> 还原成 Br<sup>-</sup>。②在 O<sub>3</sub>/PMS 处理含溴 S 学校自来水和 Q 水源水配水时,PMS 的加入会促进臭氧生成 ·OH,但生成的 ·OH 可能与水中特定物质反应,导致溶液

中 $\cdot\text{OH}$ 的量减少,同时促进了臭氧的氧化分解,水中臭氧分子含量减少,导致中间产物和溴酸盐的生成量减少;而当PMS过量时,PMS会与溴离子反应生成溴酸盐,导致中间产物和溴酸盐的生成量增加。

#### 2.4 自由基抑制剂对 $\text{BrO}_3^-$ 生成的影响

选取纯水和Q水源水为实验水样,投加溴离子使用液使 $\text{Br}^-$ 浓度为 $0.25\text{ mg/L}$ ,在 $\text{pH}$ 值为 $8.2\sim 8.3$ 、反应温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 、初始臭氧浓度为 $2\text{ mg/L}$ 、初始PMS浓度为 $10\text{ mg/L}$ 的条件下分别向溶液中投加不同量的叔丁醇( $\cdot\text{OH}$ 抑制剂)和乙醇( $\cdot\text{OH}$ 和 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 抑制剂),研究自由基抑制剂对 $\text{O}_3/\text{PMS}$ 生成 $\text{BrO}_3^-$ 的影响,结果见图4。

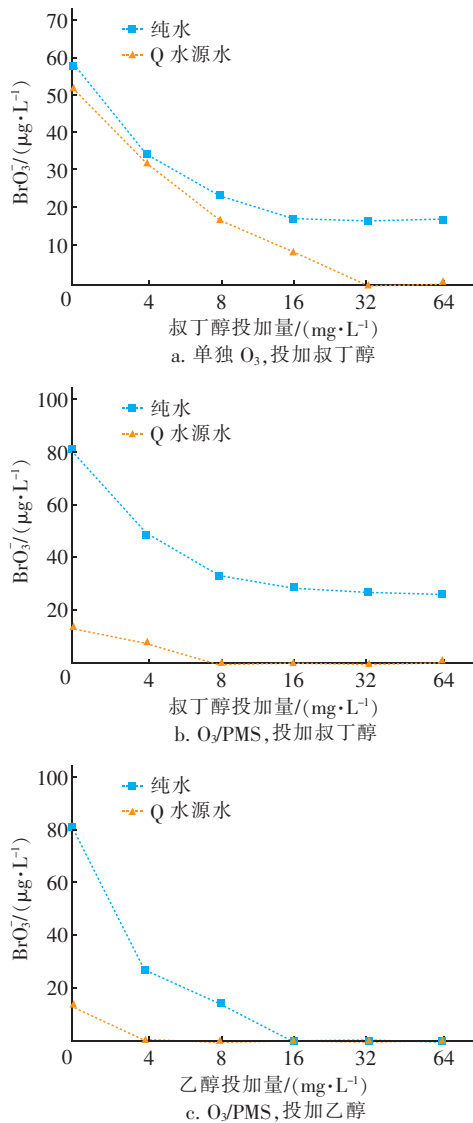


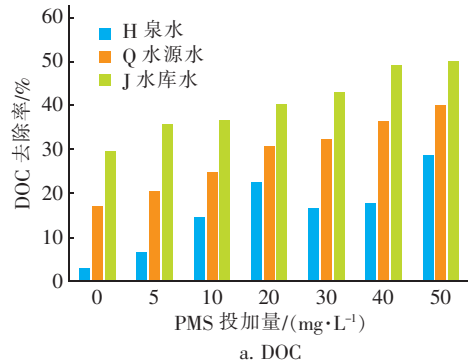
图4 自由基抑制剂对 $\text{O}_3/\text{PMS}$ 生成 $\text{BrO}_3^-$ 的影响

Fig.4 Effect of free radical inhibitors on formation of  $\text{BrO}_3^-$  in  $\text{O}_3/\text{PMS}$  process

由图4(a)可知,单独 $\text{O}_3$ 工艺处理含溴纯水配水时,水中臭氧分子氧化溴离子生成溴酸盐的量为 $17\text{ }\mu\text{g/L}$ ;但单独 $\text{O}_3$ 工艺处理Q水源水配水时,臭氧分子未氧化生成溴酸盐,说明在臭氧氧化Q水源水时臭氧分子被完全分解利用。结合图4(b)和(c)可知, $\text{O}_3/\text{PMS}$ 工艺处理含溴纯水配水时,由臭氧分子和 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 氧化溴离子生成的溴酸盐可达到 $26\text{ }\mu\text{g/L}$ ,但 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 可以催化臭氧分解成 $\cdot\text{OH}$ ,在完全抑制了 $\cdot\text{OH}$ 和 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 后,单独臭氧分子氧化时未检测到溴酸盐的生成,说明 $\text{O}_3/\text{PMS}$ 处理含溴纯水配水时仅由 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 氧化生成的溴酸盐量为 $26\text{ }\mu\text{g/L}$ ,由 $\text{O}_3$ 、 $\cdot\text{OH}$ 氧化生成的溴酸盐量为 $54\text{ }\mu\text{g/L}$ ;  $\text{O}_3/\text{PMS}$ 处理Q水源水配水时未检出由臭氧分子和 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 氧化生成的溴酸盐,在完全抑制了 $\cdot\text{OH}$ 和 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 后,单独臭氧分子氧化时也未检测到溴酸盐的生成,说明 $\text{O}_3/\text{PMS}$ 处理Q水源水配水时生成的溴酸盐全部由 $\text{O}_3$ 、 $\cdot\text{OH}$ 和 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 共同氧化产生。综合上述实验结果可以推测,Q水源水中可能存在某种有机物比溴离子更容易与 $\text{O}_3$ 、 $\cdot\text{OH}$ 和 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 发生反应,导致水中的 $\text{O}_3$ 、 $\cdot\text{OH}$ 和 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 含量减少从而抑制了溴酸盐的生成。

#### 2.5 $\text{O}_3/\text{PMS}$ 对不同水源水的处理效果

选取H泉水、Q水源水和J水库水为实验水样,在 $\text{pH}$ 值为 $8.2\sim 8.3$ 、反应温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 、初始臭氧浓度为 $2\text{ mg/L}$ 的条件下分别向溶液中投加不同浓度的PMS,研究 $\text{O}_3/\text{PMS}$ 工艺对不同水源水中DOC和 $\text{UV}_{254}$ 的去除效果,结果见图5。可以看出,PMS的加入对DOC的去除起到了促进作用,当PMS投加量为 $50\text{ mg/L}$ 时,三种水源水中的DOC去除率都比单独臭氧处理时提高了约20%。另外,PMS的加入对 $\text{UV}_{254}$ 的去除也起到了一定的效果,但只有在PMS投加量较大时, $\text{UV}_{254}$ 才比原水和单独臭氧氧化出水中的要低。



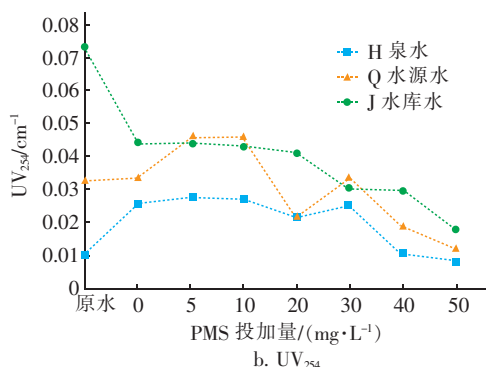


图 5 O<sub>3</sub>/PMS 对不同水源水中 DOC 和 UV<sub>254</sub> 的去除效果

Fig.5 Removal of DOC and UV<sub>254</sub> in different source water by O<sub>3</sub>/PMS process

### 3 结论

① O<sub>3</sub>/PMS 处理含溴 Q 水源水时, PMS 的投加对溴酸盐的生成起到了抑制作用。当  $n(\text{PMS})/n(\text{O}_3)$  在 0 ~ 1.5 范围内增大时, PMS 的抑制作用呈增强趋势, 而且当  $n(\text{PMS})/n(\text{O}_3) = 1.5$  时抑制作用最明显; 继续增大  $n(\text{PMS})/n(\text{O}_3)$ , PMS 对溴酸盐生成的抑制作用减弱。

② O<sub>3</sub>/PMS 处理含溴水配水时, 投加 PMS 对溴酸盐生成的影响效果与水质密切相关。O<sub>3</sub>/PMS 处理含溴纯水、H 泉水和 J 水库水配水时, PMS 的加入会促进溴酸盐的生成; O<sub>3</sub>/PMS 处理含溴 S 学校自来水和 Q 水源水配水时, PMS 的加入会抑制溴酸盐的生成。

③ 从中间产物的生成情况和投加自由基抑制剂后的实验数据分析推测: a. O<sub>3</sub>/PMS 处理 Q 水源水时生成了某种物质可以将 HOBr/OBr<sup>-</sup> 还原成 Br<sup>-</sup>。b. PMS 的加入会促进臭氧生成 ·OH, 但生成的 ·OH 可能会与水中特定物质反应, 导致溶液中 ·OH 的量减少, 同时促进了臭氧的氧化分解, 水中臭氧分子含量减少, 从而导致中间产物和溴酸盐的生成量减少; 而当 PMS 过量时, PMS 会与溴离子反应生成溴酸盐, 导致中间产物和溴酸盐的生成量增加。c. Q 水源水中可能存在某种物质比溴离子更容易被氧化, 从而抑制了溴酸盐的生成。

④ O<sub>3</sub>/PMS 可以达到比单独臭氧更好的氧化效果。对于 H 泉水、Q 水源水和 J 水库水三种水源水, 投加 PMS 后对 DOC 的去除率比单独臭氧时都有所提高; 但 UV<sub>254</sub> 只有在 PMS 投加量较大时才有降低。

### 参考文献:

- [1] CONG J, WEN G, HUANG T L, *et al.* Study on enhanced ozonation degradation of *para*-chlorobenzoic acid by peroxymonosulfate in aqueous solution [J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 264: 399 – 403.
- [2] GOVINDAN K, RAJA M, NOEL M, *et al.* Degradation of pentachlorophenol by hydroxyl radicals and sulfate radicals using electrochemical activation of peroxomonosulfate, peroxodisulfate and hydrogen peroxide [J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 272: 42 – 51.
- [3] YUAN Z, SUI M, YUAN B, *et al.* Degradation of ibuprofen using ozone combined with peroxymonosulfate [J]. Environmental Science: Water Research & Technology, 2017, 3(5): 960 – 969.
- [4] 刘伟利. 臭氧/过一硫酸盐降解泛影酸钠效能及机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
LIU Weili. Study on the Degradation Efficacy and Mechanism of Diatrizoate Sodium by Ozone with Peroxymonosulfate [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016 (in Chinese).
- [5] 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 Xueyan, *et al.* Factors affecting the formation of trihalomethanes by bromide ions [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(19): 66 – 71 (in Chinese).
- [6] FANG J Y, SHANG C. Bromate formation from bromide oxidation by the UV/persulfate process [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(16): 8976 – 8983.
- [7] LUTZE H V, BAKKOUR R, KERLIN N, *et al.* Formation of bromate in sulfate radical based oxidation: mechanistic aspects and suppression by dissolved organic matter [J]. Water Research, 2014, 53: 370 – 377.
- [8] WEN G, QIANG C, FENG Y, *et al.* Bromate formation during the oxidation of bromide-containing water by ozone/peroxymonosulfate process: influencing factors and mechanisms [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 352: 316 – 324.

作者简介: 杨淑淇 (1995 – ), 女, 山东烟台人, 硕士研究生, 研究方向为水处理技术。

E-mail: 391032455@qq.com

收稿日期: 2020-01-17

修回日期: 2020-04-22

(编辑: 刘贵春)