

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.05.012

溴离子对污水处理工艺消毒副产物生成势的影响

孙晓云¹, 刘建广¹, 钟雪莲¹, 安琦¹, 孙韶华²

(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 250101)

摘要: 利用消毒副产物(DBPs)三卤甲烷生成势(THMsFP)和卤乙酸生成势(HAAsFP),研究了含溴污水在某校园污水处理工艺中沿程DBPs前体物变化及溴离子对DBPs类型的影响规律。结果表明,以A²/O生物工艺为主的二级处理,对污水中DOC、UV₂₅₄的去除效果十分显著,THMsFP在沿程处理中呈逐渐降低的趋势,HAAsFP与SUVA值经二级处理后呈升高趋势,即芳香性与不饱和度高的溶解性小分子有机物是HAAs的重要前体物,含溴消毒副产物(Br-DBPs)占总DBPs的50%~65%;经A²/O工艺处理后,当Br⁻浓度由100 μg/L增加到300 μg/L时,THMs中溴结合因子(BIF)由0.5增加到0.8,HAAs中BIF由0.51增加到0.62,溴代为主的THMsFP和HAAsFP呈逐渐增加的趋势,即溴离子浓度的增加使DBPs的种类由氯代向溴代转化。

关键词: A²/O工艺; 溴离子; 消毒副产物生成势; 三卤甲烷; 卤乙酸; 三维荧光光谱
中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)05-0074-07

Effect of Bromide Ion on Formation Potential of Disinfection By-products in Wastewater Treatment Process

SUN Xiao-yun¹, LIU Jian-guang¹, ZHONG Xue-lian¹, AN Qi¹, SUN Shao-hua²

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. Urban Water Monitoring Center of Shandong Province, Jinan 250101, China)

Abstract: The changes in disinfection by-products (DBPs) precursors and the effect of bromide ion on DBPs types in bromide-containing wastewater from a campus wastewater treatment process were investigated by using the formation potentials of two DBPs: trihalomethane formation potential (THMsFP) and haloacetic acid formation potential (HAAsFP). The secondary treatment based on A²/O process had a good removal performance of DOC and UV₂₅₄ in wastewater. Profile of the concentration of THMsFP was a decreasing trend along the treatment process, whereas the profile of the concentrations of HAAsFP and SUVA was an increasing trend after secondary treatment. Therefore, soluble small molecular organics with high aromaticity and desaturation were important precursors of HAAs, and bromide-containing disinfection by-products (Br-DBPs) accounted for 50%–65% of the total DBPs. After A²/O treatment, with the increasing of bromide ion concentration from 100 μg/L to 300 μg/L, bromide-binding factor (BIF) of THMs increased from 0.5 to 0.8, and the BIF of HAAs increased from 0.51 to 0.62. The concentration of dominated bromide, THMsFP and HAAsFP, showed a trend of gradual increase, that was, the increase of bromide ion concentration transformed DBPs from chlorides to bromides.

Key words: A²/O process; bromide ion; formation potential of disinfection by-products; trihalomethane; haloacetic acid; 3D-EEM

水中卤代DBPs的研究关注较多的是三卤甲烷(THMs)和卤乙酸(HAAs),但对于其中含溴消毒副产物(Br-DBPs)的研究相对较少。有研究表明^[1],氯化消毒过程中的反应产物,如次氯酸(HClO),可以氧化溴化物生成Br-DBPs,Br-DBPs通常比氯代消毒副产物(Cl-DBPs)具有更大的细胞毒性、基因毒性和致癌性。Zhang等^[2]发现,我国13处水源水中,有8处溴离子浓度在50 μg/L以上,且发现当溴化物浓度超过100 μg/L时,生成较多的Br-DBPs。Duong等^[3]研究高含溴地表水时发现,当溴离子为50~140 μg/L时,含溴THMs在THMs中的占比为80%以上。

污水中含有的污染物成分较复杂,主要包括有机物、腐殖酸、脂肪、蛋白质等。研究发现^[4],蛋白质、腐殖酸等物质会与氯反应生成DBPs,其中腐殖酸为主要的乙酸类前体物;Ma等^[5]研究发现,天然有机物(NOM)中的多烃类芳香结构、酯类和酮类可以与氯反应生成卤代中间产物,进而通过水解或脱羧作用生成小分子DBPs。

在含溴污水处理工艺中,加氯消毒后HClO与溴离子迅速发生反应,生成次溴酸(HBrO),其与水中有机物反应可以生成Br-DBPs,该过程改变了水中Br-DBPs的含量。有研究表明^[6],HBrO与有机物的反应速率要快于HClO与有机物的反应,虽然水中溴离子浓度要低于氯,但会优先生成Br-DBPs。尤其是在新冠病毒防疫期间,因为新型冠状病毒具有不耐氯的特性,氯消毒剂对其是有效的,所以要确保水质安全,可适当增加氯投加量^[7],如采用紫外工艺时可结合氯强化消毒。目前关于污水处理工艺中生成Br-DBPs的变化情况以及现有处理工艺能否有效控制Br-DBPs生成等问题尚不明确。因此,关注Br-DBPs在水处理过程中的存在形态和变化规律具有重要意义。

笔者以某校园含溴污水处理站各工艺沿程出水为研究对象,通过常规指标和结合氯消毒条件下的消毒副产物生成势(DBPsFP),分析了有机物的芳香性和三维荧光光谱特征,研究了污水再生过程中DBPs前体物的转化规律,以及溴离子浓度对水处理

过程中THMs、HAAs的产生量和Br-DBPs占总消毒副产物比例的影响,旨在为处理含溴污水过程中控制Br-DBPs的生成提供依据。

1 材料与方法

1.1 水样采集

某校园污水处理站的工艺主要包括格栅、初沉池、A²/O、二沉池、曝气生物滤池(BAF)、砂滤池,其设计处理能力为4 000 m³/d,污水经处理后达到《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2002)中冲厕、绿化标准。所取水样为各单元出水。针对原水、A²/O和砂滤池出水,进行了三维荧光光谱分析,并向水样中投加溴离子,探究溴离子浓度对消毒副产物生成势的影响。原水中溴离子含量为100 μg/L,从各取样点取样后立即用0.45 μm膜过滤去除悬浮物,然后放入4℃冰箱保存。各取样点的水质情况见表1。

表1 水质参数

Tab.1 Parameters of water quality

项 目	色度/ 度	浊度/ NTU	硝酸盐氮/ (mg·L ⁻¹)	亚硝酸盐氮/ (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)
原水	50	31.20	0.194	0.41	27.179
初沉池	45	29.30	1.595	0.46	21.830
A ² /O	35	2.12	6.721	0.34	0.637
二沉池	30	1.73	8.495	0.35	0.602
BAF	25	1.89	10.283	0.43	0.572
砂滤池	25	1.03	12.926	0.40	0.354
中水	20	1.01	13.832	0.42	0.286

1.2 仪器与试剂

仪器:磁力搅拌器、紫外灯、手提式pH检测仪、手提式浊度仪、紫外可见分光光度计、岛津DOC-V_{cpH} GC-2014C气相色谱、COD恒温加热器等。

试验试剂:过硫酸钾、硫代硫酸钠、无水硫酸钠、甲基叔丁基醚(MTBE)、硫酸(优级纯)、次氯酸钠、溴离子标准溶液等。

1.3 分析方法

常规指标测定方法:DOC采用燃烧法测定,COD采用重铬酸钾法测定,浊度采用快速检测法测定,色度采用铂钴标准比色法测定,NO₂⁻-N采用N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法测定,NO₃⁻-N采用紫

外分光光度法测定, NH_4^+-N 采用纳氏试剂分光光度法测定, UV_{254} 采用紫外分光光度法测定。

氯化消毒副产物生成势测定方法: DBPs 的测定按照国标法进行。THMs 和 HAAs 用 MTBE 萃取, 根据 US EPA 551.1 液-液萃取+气相色谱-电子捕获检测法测定。

2 结果与讨论

2.1 沿程 DBPsFP 的变化

图 1 为 DBPsFP 随各工艺单元出水的变化。可知, 原水中 DBPsFP 相对较高, 可能是由于污水中含有易降解的大分子物质, 有较强的反应活性, 更易与氯反应生成 DBPs。由于 A^2/O 对 DOC、 UV_{254} 等有机物的大幅去除, THMs 前体物减少了 19%, 总 THMsFP 呈下降趋势, 但三氯甲烷 (TCM) 含量却增加。经 A^2/O 工艺处理后的 SUVA 值明显升高, 说明水中溶解性有机物的芳香性变强, 生成的小分子疏水溶解性微生物产物 (SMPs) 是主要的含碳消毒副产物的前体物, 更易与消毒剂反应, 导致 TCM 增加。处理过程中, Br-DBPs 占总 DBPs 的 50%~65%。含溴污水中的三卤甲烷前体物主要是二氯一溴甲烷 (CHBrCl_2) 前体物, 经 A^2/O 工艺处理后小分子疏水性物质增多, 加氯量相同时, Cl-DBPs 相对增加。水中的溴离子被 HClO 氧化成 HBrO , 而 HBrO 与有机物的反应比 HClO 与有机物的反应要快, 因此会先生成 Br-DBPs。

污水处理过程中, 各阶段出水 HAAsFP 呈先上升后下降的变化趋势。含溴污水中的 HAAs 前体物主要是二氯乙酸 (DCAA)、溴氯乙酸 (BCAA) 和三氯乙酸 (TCAA) 前体物。由图 1(b) 可以看出, 溴与氯形成竞争关系, HBrO 与有机物的反应速率要快于 HClO 与有机物的反应速率, 因此优先生成溴代乙酸。尤其是 A^2/O 工艺处理后出水 HAAsFP 迅速升高, 主要是由于 TCAA 和 BCAA 的生成。含溴污水经过 A^2/O 处理以后, 氯代 DBPs 明显向溴代 DBPs 转化, 尤其是 BCAA、一溴乙酸 (MBAA) 和三溴乙酸 (TBAA) 生成势有升高趋势, 可能是由于溴离子的存在优先与增加的小分子疏水性 SMPs 发生反应, 使总 DBPsFP 增加。利用微生物作用去除了大部分易降解有机物, 其中接近 50% 的 DOC 被去除, 但由于生成的小分子疏水性 SMPs、芳香性及不饱和度高的溶解性有机物是主要的 HAAs 前体物, 因此 HAAs

由 $170.89 \mu\text{g/L}$ 增加至 $234.33 \mu\text{g/L}$, 这与张雅晶等^[8]的结果类似。

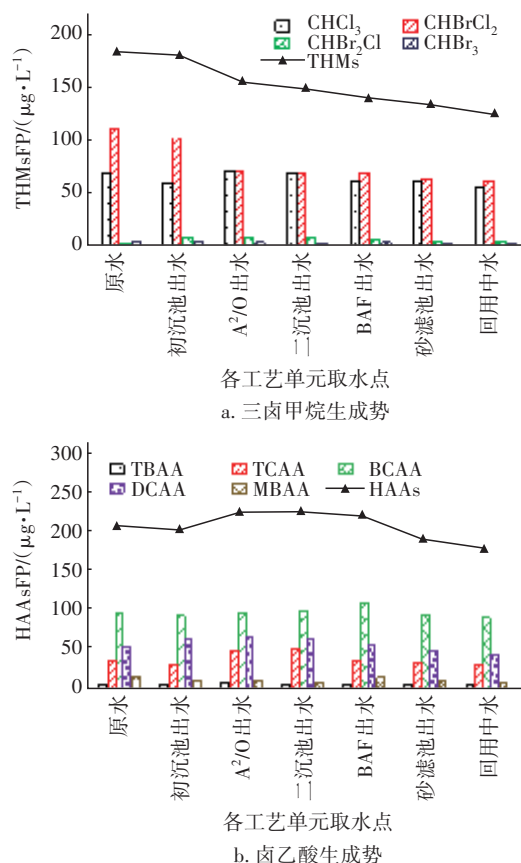


图1 DBPsFP随各工艺单元出水的变化

Fig.1 Change of DBPsFP of effluent from each process unit

2.2 对有机物的去除效能

各工艺单元对有机物的去除效果如图 2 所示。由图 2(a) 可知, 进水中有机物含量丰富, DOC 为 51.39 mg/L , COD 为 910 mg/L 。COD、DOC、 UV_{254} 含量随污水处理各工艺单元呈逐渐降低的趋势。经 A^2/O 工艺处理后, DOC 去除率接近 50%, 表明 A^2/O 去除有机物的效果较好, 其出水有机物含量相对较低, 可能是由于污染物结构发生了变化, 产生了小分子疏水性 SMPs 类物质。经 BAF 处理后, 水中 DOC 含量同样呈降低趋势, 并降至 13.07 mg/L , DOC 去除率达到了 74.66%。 UV_{254} 含量沿工艺流程逐渐下降, 经 A^2/O 工艺处理后去除率达到 47.6%, 说明生物处理可以有效降解腐殖质和芳香类有机物, BAF 对 UV_{254} 也有一定的去除能力。

由图 2(b) 可知, 进水 SUVA 值仅为 $0.78 \text{ L}/(\text{m} \cdot \text{mg})$, 表明芳香性较低^[9]。污水处理过程中, SUVA

值呈上升趋势,特别是经过生物单元处理之后的水样,其SUVA值明显升高,说明单位溶解性有机碳的紫外吸收值升高,可能是由于A²/O利用微生物的作用去除了大部分易降解有机物,其中接近50%的DOC被去除,但由于生成了小分子疏水性SMPs,且芳香性变高,导致SUVA值增大。同时,SUVA值与沿程各工艺单元出水DBPsFP有一定的线性关系,说明紫外吸收能力强的组分DBPs的生成能力也相应较强。

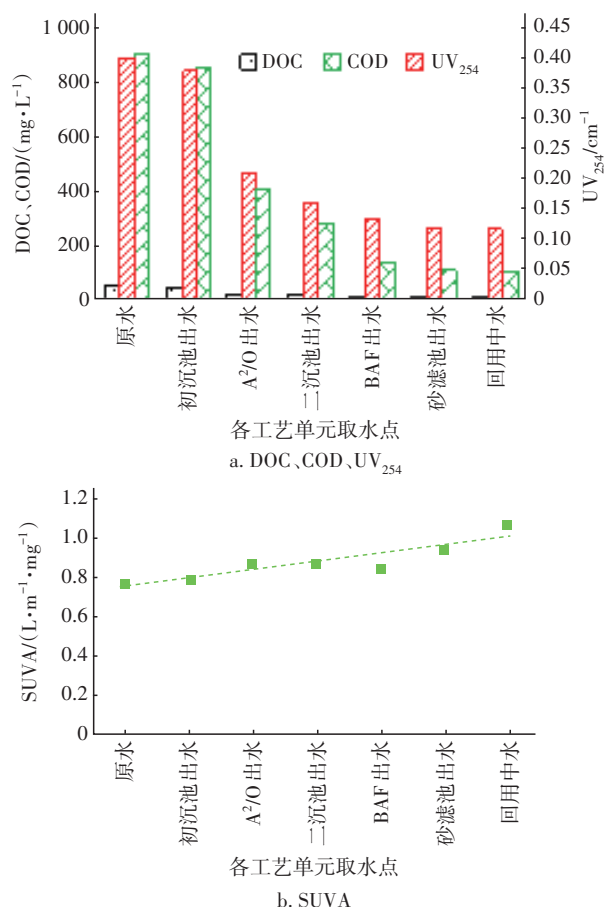


图2 各工艺单元对有机物的去除效果

Fig.2 Removal efficiency of organic matters by different process units

2.3 有机物特性与DBPsFP的关系

图3为各工艺单元出水的消毒副产物生成势(均为1 mg/L DOC的生成势)。由图3(a)可知,THMsFP随各工艺单元中单位DOC浓度呈升高趋势,且THMsFP与DOC浓度呈正相关。对于经生物单元处理之后的水样,其有机物含量相对降低,但生成了具有芳香结构及不饱和结构更易与消毒剂反应的小分子物质,导致THMs含量增加,生成势呈

上升趋势。这样水中有机物与消毒剂反应时,虽然有机物本身被消耗,但也易生成DBPs的前体物质。

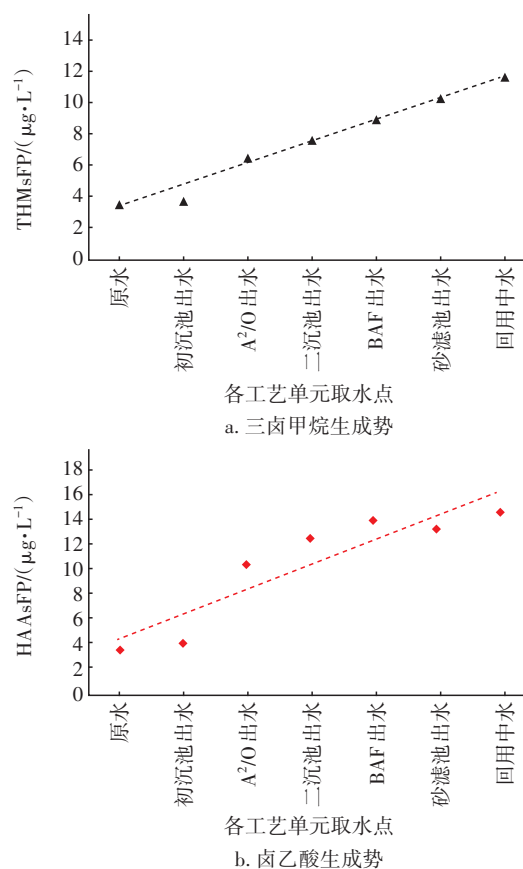


图3 各工艺单元出水的消毒副产物生成势

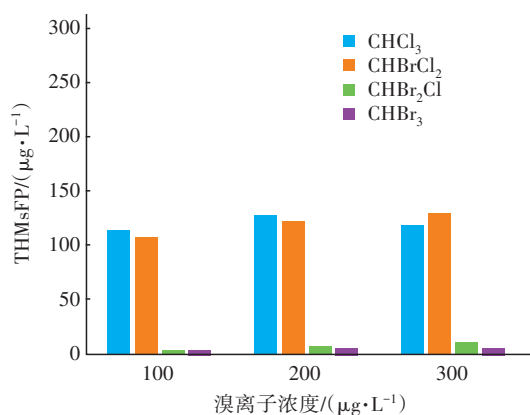
Fig.3 DBPsFP of effluent of each process unit

由图3(b)可知,HAAsFP随各工艺单元中DOC浓度呈逐渐升高的趋势,且HAAsFP和DOC浓度呈一定的线性关系。生物单元去除了大部分易降解有机物,但由于生成的小分子疏水性SMPs是主要的含碳消毒副产物的前体物,生成了更易与消毒剂反应的物质,导致Cl-DBPs含量增加,污水在BAF中生成了更多大分子疏水性SMPs类物质,具有较高的卤代DBPs生成潜力,使BAF单位质量有机物产生的DBPsFP进一步增加。

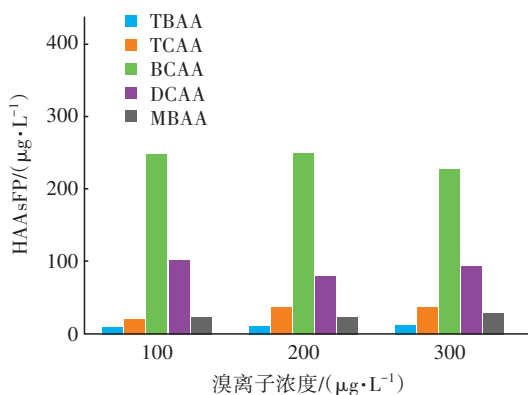
2.4 溴离子浓度对DBPsFP的影响

图4为溴离子对沿程工艺消毒副产物生成势的影响。由图4(a)可知,随着溴离子浓度的增加,原水的Br-DBPs生成势呈增长趋势,其中CHBrCl₂占比最高,而CHCl₃(TCM)呈先升后降的变化趋势。由于HBrO的氧化作用强于HClO,故水中溴离子的存在可促进THMs的生成,使得总THMs含量增加,

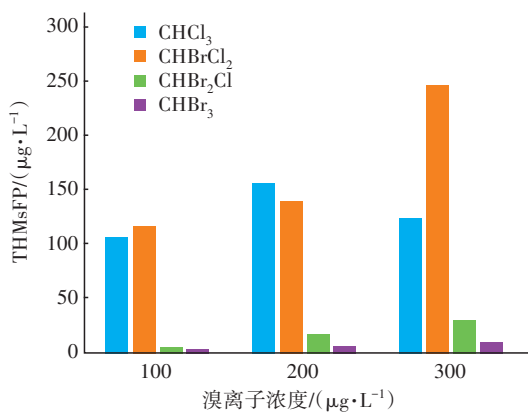
其中Br-DBPs在总THMs中占比增大,使溴结合因子(BIF)增大^[10]。HAAAs中含溴卤乙酸含量呈逐渐增加的趋势,BCAA和MBAA占主要优势,DCAAFP在各工艺中基本呈下降趋势,总体上HAAAs种类的变化趋势是由氯代向溴代转化。当溴离子浓度从100 $\mu\text{g/L}$ 增加到300 $\mu\text{g/L}$ 时,各工艺中THMs和HAAAs的BIF均不断升高,这表明在一定范围内,溴离子的存在及其浓度的增加有利于Br-DBPs的生成,与前人的研究结果相似^[11]。



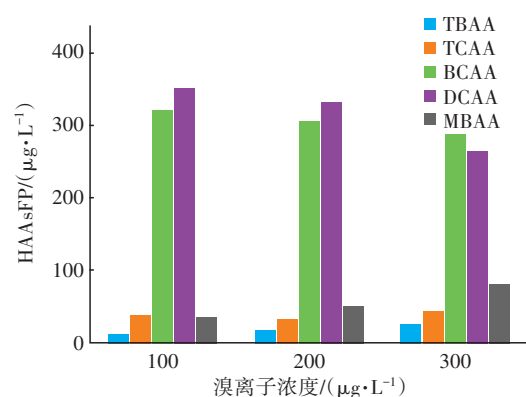
a. 原水 (THMsFP)



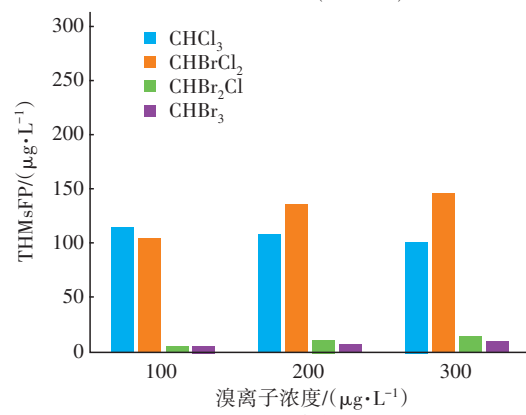
b. 原水 (HAAAsFP)



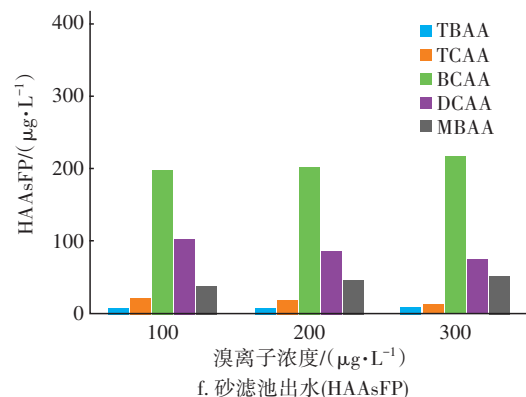
c. A²/O出水 (THMsFP)



d. A²/O出水 (HAAAsFP)



e. 砂滤池出水 (THMsFP)



f. 砂滤池出水 (HAAAsFP)

图4 溴离子对沿程工艺消毒副产物生成势的影响

Fig.4 Effect of bromide ion on the formation potential of disinfection by-products in the process

当溴离子浓度为100~300 $\mu\text{g/L}$ 时,经过A²/O处理以后,THMs含量升高,说明氯离子和溴离子浓度的增加会提高THMs的生成量,其中Br-DBPs含量也有上升,CHBrCl₂含量在加氯之后相较于原水和砂滤池出水增加明显。大量投加NaClO且经生物单元处理后,HAAAsFP相较于原水和砂滤池出水都有一定升高,其中BCAA、DCAA占主要优势,说明由于HClO的强氧化性,前体物的变化有利于DBPs的生成。三维荧光光谱分析结果表明,前体物的主要组

分是SMPs类物质及少量腐殖质类物质,大量HClO与前体物反应使DCAA增加,并且伴随溴氯取代反应的发生,DCAA逐渐降低,MBAA大幅增加。

由图4(e)和(f)可知,DBPs的组成由高氯向高溴低氯方向转变^[12]。随着Br⁻浓度的增加,THMsFP呈增加趋势,主要是由于在氯化反应过程中,NaClO与Br⁻反应,生成HBrO或BrO⁻,由于HBrO先与有机物反应,当氯化消毒过程中同时存在BrO⁻、ClO⁻时,会影响THMsFP的生成量和种类。污水中HAAs的前体物主要是BCAA、DCAA和TCAA的前体物,占总量的90%以上。DCAAFP和TCAAFP呈逐渐减小的趋势,BCAAFP、TBAAFP和MBAAFP则呈增加趋势,溴代HAAs含量呈逐渐增加的趋势,即HAAs种类的变化趋势是由氯代向溴代转化,这和牛志广等^[13]的研究结果相似。

2.5 三维荧光光谱分析

不同水样的三维荧光光谱如图5所示。可以看

出,经过生物单元处理后有机物的类型变化较大。原水中DBPs前体物的有机物荧光峰中心主要集中在275 nm/350 nm、225 nm/350 nm和325 nm/425 nm的位置,其主要成分是腐殖质类物质、蛋白质类物质,主要是色氨酸及其类似物和SMPs,所产生的THMsFP和HAAsFP都较大。经初沉池沉淀后,前体物的主要组分仍与进水类似,但是荧光响应明显减弱,消毒副产物呈降低趋势。经A²/O生物单元处理后,前体物主要组分的荧光峰集中在275 nm/375 nm和325 nm/425 nm位置,主要是SMPs类物质及少量腐殖质类物质。可见,A²/O工艺对腐殖质类及蛋白质类物质有较好的去除效果,但会产生大量具有疏水性的SMPs,这也是经生物单元处理后HAAsFP和部分THMsFP上升的原因。经砂滤池处理后,前体物仍主要为SMPs,但相较于A²/O出水,SMPs的荧光响应略有减弱,腐殖质类物质略有减少,表明过滤作用能截留并去除部分腐殖质类物质及SMPs。

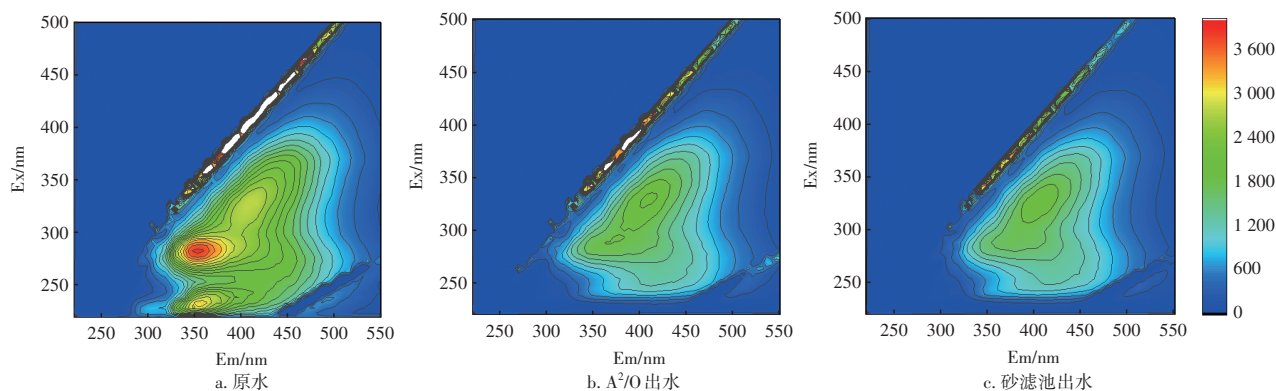


图5 不同水样的三维荧光光谱

Fig.5 3D-EEM spectra of different water samples

3 结论

① 对于含溴污水,以A²/O单元为主的二级处理,对DOC、UV₂₅₄的去除效果十分显著,THMsFP在沿程处理过程中呈逐渐降低的变化趋势,HAAsFP与SUVA呈升高趋势,即芳香性与不饱和度高的溶解性小分子有机物是HAAs的重要前体物,Br-DBPs占总DBPs的50%~65%。经生物单元处理后有机物产生的DBPs都会增加,说明有机物结构与DBPs的生成有极大的关系。

② 经A²/O处理后,当Br⁻浓度由100 μg/L增加到300 μg/L时,THMs中BIF由0.5增加到0.8,HAAs中BIF由0.51增加到0.62。与有机物反应过程中,HClO和HBrO之间出现了竞争,且Br-DBPs

生成速率要快于Cl-DBPs,Cl-DBPs逐渐被前者所取代,DBPs种类的变化趋势是由氯代向溴代转化,溴离子的存在同时促进Cl-DBPs的产生。

③ 三维荧光光谱表明,生活污水中富含腐殖质类物质、色氨酸类蛋白质和SMPs等物质,DOC、UV₂₅₄沿工艺流程逐渐下降。经A²/O处理后,大分子有机物被降解为小分子物质,溴代甲烷生成势呈下降趋势,溴代乙酸呈上升趋势,微生物代谢作用导致了SMPs的生成,致使DBPsFP增加。

参考文献:

- [1] ZHAI H Y, ZHANG X R, ZHU X H, *et al.* Formation of brominated disinfection byproducts during

- chloramination of drinking water: new polar species and overall kinetics [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(5):2579-2588.
- [2] ZHANG J Z, YU J W, AN W, *et al.* Characterization of disinfection byproduct formation potential in 13 source waters in China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(2):183-188.
- [3] DUONG H A, BERG M, HOANG M H, *et al.* Trihalomethane formation by chlorination of ammonium- and bromide-containing groundwater in water supplies of Hanoi, Vietnam [J]. *Water Research*, 2003, 37 (13) : 3242-3252.
- [4] ZHANG B B, XIAN Q M, ZHU J P, *et al.* Characterization, DBPs formation, and mutagenicity of soluble microbial products (SMPs) in wastewater under simulated stressful conditions [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 279:258-263.
- [5] MA D F, XIA C F, GAO B Y, *et al.* C-, N-DBP formation and quantification by differential spectra in MBR treated municipal wastewater exposed to chlorine and chloramine [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 291:55-63.
- [6] ZHA X S, LIU Y, LIU X, *et al.* Effects of bromide and iodide ions on the formation of disinfection by-products during ozonation and subsequent chlorination of water containing biological source matters [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21 (4) : 2714-2723.
- [7] 王连杰, 李金河, 郑兴灿, 等. 城镇污水系统中病毒特性和规律相关研究分析[J]. *中国给水排水*, 2020, 36 (6):14-21.
- WANG Lianjie, LI Jinhe, ZHENG Xingcan, *et al.* Review and analysis on the characteristics and rules of virus in urban wastewater treatment system [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(6):14-21(in Chinese).
- [8] 张雅晶, 缪恒锋, 张晓夏, 等. AAO-MBR工艺污水处理系统中消毒副产物前体物变化规律[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(12):2037-2046.
- ZHANG Yajing, MIAO Hengfeng, ZHANG Xiaoxia, *et al.* Variation of disinfection by-product precursors during anaerobic-anoxic-oxic-membrane-bioreactor (AAO-MBR) process in the sewage treatment plant [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31 (12) : 2037-2046(in Chinese).
- [9] 刘艳芳, 王启山, 岳尚超, 等. 基于疏水性能及相对分子质量分析消毒副产物前体物[J]. *给水排水*, 2011, 47(7):128-132.
- LIU Yanfang, WANG Qishan, YUE Shangchao, *et al.* Analysis of disinfection by-product precursors based on hydrophobicity and molecular weight [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2011, 47 (7) : 128-132 (in Chinese).
- [10] 倪先哲, 王刚, 周彩云, 等. 磺胺甲噁唑氯化消毒副产物生成势及影响因素研究[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(5):48-54.
- NI Xianzhe, WANG Gang, ZHOU Caiyun, *et al.* Formation potential and influence factors of chlorination disinfection by-products of sulfamethoxazole [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(5):48-54(in Chinese).
- [11] 梅红, 丁国际, 黄鑫, 等. 含溴黄浦江水消毒过程中溴代三卤甲烷和卤乙酸的生成特性[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(10):2162-2168.
- MEI Hong, DING Guoji, HUANG Xin, *et al.* Formation of Br-THMs and Br-HAAs in bromide-containing Huangpu River water during disinfection [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31 (10) : 2162-2168 (in Chinese).
- [12] 刘立超, 李征, 李静, 等. 溴离子对三卤甲烷生成及致癌风险的影响[J]. *中国给水排水*, 2018, 34 (23) : 45-49.
- LIU Lichao, LI Zheng, LI Jing, *et al.* Effects of bromine ion on the formation and carcinogenic risk of THMs [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34 (23) : 45-49(in Chinese).
- [13] 牛志广, 张玉彬, 吕志伟, 等. 溴离子对预氯化化和常规水处理工艺中消毒副产物的影响[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 44(1):109-117.
- NIU Zhiguang, ZHANG Yubin, LÜ Zhiwei, *et al.* Effect of bromine ion on disinfection by-products during water treatment processes [J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2019, 44(1):109-117(in Chinese).

作者简介:孙晓云(1994-),女,山东莒县人,硕士研究生,主要研究方向为水处理工程技术。

E-mail:1440981334@qq.com

收稿日期:2020-03-20

修回日期:2020-04-11

(编辑:任莹莹)