

西江原水有机物成分解析及其消毒副产物生成特性

宋凌志¹, 施周¹, 徐勇², 陈忠², 曹宇安², 赵旺², 胡天明¹,
周石庆¹

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 中山公用水务有限公司, 广东 中山 528400)

摘要: 以中山市西江水源水体为研究对象, 分析了原水中溶解性有机物(DOM)的分子质量分布特征; 同时, 利用 XAD 型树脂逐级将 DOM 分离成强疏水性(HP)、弱疏水性(TP)和亲水性(HL)3种组分, 考察了原水中有有机物的亲疏水性分布以及各有机组分对应的 SUVA₂₅₄ 和消毒副产物生成潜能(DBPFP)。结果表明, 原水中溶解性有机物的分子质量主要集中在3~5 ku区间, 占比在35%以上、最大达到了73%, 其次是分子质量<3 ku的区间; 原水中的 DOM 主要为亲水性有机物; 疏水性有机物是最主要的氯化消毒副产物前体物; 另外, SUVA₂₅₄ 值与比消毒副产物生成潜能(SDBPFP)呈低度正相关, 不能简单地用 SUVA₂₅₄ 值来反映水体中 DOM 的消毒副产物生成能力。

关键词: 原水; 溶解性有机物; 消毒副产物; 分子质量; 亲疏水性

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)21-0032-07

Analysis of Organic Compounds in Xijiang Raw Water and Characteristics of Disinfection By-products Formation

SONG Ling-zhi¹, SHI Zhou¹, XU Yong², CHEN Zhong², CAO Yu-an², ZHAO Wang²,
HU Tian-ming¹, ZHOU Shi-qing¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Zhongshan Public Utilities Water Co. Ltd., Zhongshan 528400, China)

Abstract: The molecular weight (MW) distribution characteristics of dissolved organic matters (DOM) in Xijiang raw water in Zhongshan were investigated. In addition, XAD resins were used to isolate DOM into strongly hydrophobic, weakly hydrophobic and hydrophilic components. The distribution of hydrophilic and hydrophobic components of organic matters in the raw water was investigated, and disinfection by-products formation potential (DBPFP) and SUVA₂₅₄ of the three corresponding components were evaluated. MW of the DOM in raw water mainly distributed in 3-5 ku which accounted for over 35% and up to a maximum of 73% of the total DOM, followed by the range of MW <3 ku. Moreover, hydrophilic organic matters were the dominant component of DOM in raw water, and hydrophobic organic matters were found to be the main disinfection by-products precursors. In addition, SUVA₂₅₄ had a low positive correlation with the specific disinfection by-products formation potential (SDBPFP), which could not simply be used to reflect the formation capacity of disinfection by-products

of DOM in raw water.

Key words: raw water; dissolved organic matter; disinfection by-products; molecular weight; hydrophilicity/hydrophobicity

近年来,随着珠三角工农业的发展和人口的增多,水污染问题日趋严重,西江作为中山市的重要水源地,其水质也受到了一定程度的污染。根据2017年中山水资源公报报道,每年排入西江的工业废水及生活污水总量分别达到 2.93×10^8 和 1.28×10^8 m³。大量的污水排放必然会增加水中溶解性有机物(DOM)的浓度并改变DOM的特性,有研究表明,DOM是自来水厂消毒副产物(DBPs)的主要前体物^[1],因此较高的DOM会引起饮用水中消毒副产物浓度的升高。除此之外,每年秋冬季节,广东珠江口流域易受到咸潮的影响,咸潮期水中氯化物和溴离子等浓度偏高,也会导致自来水厂出水消毒副产物含量出现超标风险。

目前对饮用水原水中DOM的分子质量分布特性与化学分类表征的研究报道很多^[2-4],XAD大孔树脂已被广泛应用于DOM的分离工艺中^[5]。饮用水原水中DOM的分子质量分布区间极大程度影响着给水处理工艺对DOM的去除效果^[6-7]。然而针对沿海地区易受咸潮影响的高含氯原水中有机物成分解析以及消毒副产物前体物表征的研究仍较少。笔者以中山市西江典型水源水体为研究对象,分析了原水中DOM的分子质量分布特征;同时,采用XAD-8和XAD-4树脂联用技术分离DOM,识别三卤甲烷(THMs)和卤乙酸(HAAs)这两种消毒副产物的主要前体物,研究西江原水中DOM的组分特性对消毒副产物生成的影响,以期水厂实际生产时监控水中消毒副产物前体物的水质安全保障技术提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验材料和水样采集

试验中使用的次氯酸钠(有效氯含量为5%)、抗坏血酸、氢氧化钠、浓盐酸、浓硫酸、甲醇、无水硫酸钠、磷酸二氢钾、碳酸氢钠等试剂为优级纯或分析纯试剂,甲基叔丁基醚(MTBE)为色谱纯。亲疏水性有机组分分离采用XAD-4和XAD-8吸附树脂。试验所需溶液均采用超纯水配制。

试验水样采集时间为2018年的6月21日、8月16日和9月20日。在西江流域设8个采样点,

如图1所示。样品的采集位置为水源地水厂取水口或沿岸水深50%~75%处,样品在采集后24 h内保存在冰箱中,并用0.45 μm的滤膜进行初滤,过滤后的水样储存在4℃的环境中以备分析。



图1 西江流域的采样点分布示意

Fig. 1 Sampling point distribution in Xi Jiang River basin

1.2 消毒试验

三卤甲烷(THMs)和卤乙酸(HAAs)是DBPs中占比最高的组分^[8],本试验选取的消毒剂为次氯酸钠,按照有效氯Cl₂:DOC=5:1(质量比)计算次氯酸钠投加量,调节水样pH值至6.8~7.2,将水样放入(25±2)℃恒温培养箱中避光密封反应24 h;用抗坏血酸终止氯化反应,测定THMs和HAAs的含量。试验结果是在高投氯量和长时间反应条件下水样中能够生成的THMs和HAAs的总量^[9]。

1.3 分析项目与方法

DOC采用总有机碳分析仪测定,用DOC表征各有机组分;UV₂₅₄采用紫外可见分光光度计测定;水样通过TSK-GEL G3000PWXL柱(7.8 mm×300 mm)分离后,使用高效液相色谱和在线DOC检测器分析溶解性有机物的分子质量分布;三维荧光光谱图采用荧光光谱仪测定。根据XAD-4、XAD-8树脂对DOM的吸附特性,将DOM分为3种组分:强疏水性有机物、弱疏水性有机物和亲水性有机物。依据USEPA Method 551方法,利用GC/MS测定样品中的THMs;依据USEPA Method 552方法,用甲醇酯化后,利用GC/MS测定样品中的HAAs。

2 结果与讨论

2.1 西江原水水质基本特征

由于西江流域沿线的排污导致水质受到了较严

重的污染,近 5 年来采取了多项水源保护与水环境治理措施,西江水质状况得到了明显改善,大部分取

水点水质能达到地表水Ⅱ类水质标准,满足饮用水源地的水质要求。采样期间原水水质如表 1 所示。

表 1 原水水质

Tab. 1 Quality of raw water

项 目	$\text{NH}_3 - \text{N}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{TN}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{COD}_{\text{Mn}}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{DOC}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{UV}_{254}/\text{cm}^{-1}$	$\text{SUVA}_{254}/$ ($\text{L} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)
A1	0.12 ~ 0.18	0.2 ~ 2.3	1.9 ~ 6.9	1.27 ~ 2.62	0.085 1 ~ 0.099 2	3.725 ~ 6.682
A2	0.10 ~ 0.14	1.3 ~ 4.6	1.2 ~ 4.1	1.36 ~ 1.63	0.063 6 ~ 0.091 1	3.892 ~ 6.684
A3	0.06 ~ 0.18	0.3 ~ 1.4	0.5 ~ 5.0	1.13 ~ 1.44	0.053 8 ~ 0.094 8	3.726 ~ 7.965
A4	0.07 ~ 0.75	0.5 ~ 2.1	0.8 ~ 1.1	1.34 ~ 1.54	0.078 4 ~ 0.094 8	5.748 ~ 6.168
A5	0.19 ~ 0.39	0.4 ~ 2.1	3.4 ~ 9.5	1.62 ~ 3.33	0.092 1 ~ 0.102 2	3.072 ~ 6.057
A6	0.09 ~ 0.23	0.8 ~ 2.0	0.9 ~ 4.6	1.51 ~ 1.71	0.083 2 ~ 0.098 3	4.854 ~ 6.519
A7	0.08 ~ 0.19	0.1 ~ 1.5	2.7 ~ 5.7	1.18 ~ 2.25	0.078 6 ~ 0.104 5	4.653 ~ 6.650
A8	0.12 ~ 0.18	0.2 ~ 0.4	1.8 ~ 6.3	1.27 ~ 2.78	0.085 1 ~ 0.098 1	3.525 ~ 6.682

西江原水全年水质特征如下:①原水中的 COD_{Mn} 均值为 3.5 mg/L, DOC 均值为 1.74 mg/L, 氨氮均值为 0.176 mg/L, 总氮浓度全年大部分情况下均超过 0.5 mg/L;②秋冬枯水季节氯化物浓度会出现短暂性超标,检测到的最高浓度为 5 500 mg/L。氯化物超标会导致后续原水处理中消毒副产物出现超标风险。

2.2 原水有机物的分子质量分布

西江原水中溶解性有机物的分子质量分布如图 2 所示。

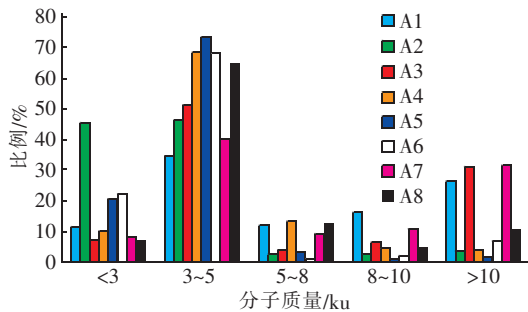


图 2 原水中溶解性有机物的分子质量分布

Fig. 2 Molecular weight distribution of DOM in raw water

用 DOC 表征各有机组分,原水有机物主要分布在较小分子质量区间,分子质量为 3 ~ 5 ku 的有机物占 35% 以上,最高占比达到了 73%;其次是分子质量 < 3 ku 的组分,其占比也较大。其中,取水点 A2、A4、A5、A6 的原水中 DOM 的分子质量分布主要集中在 3 ~ 5 ku 和 < 3 ku 两个区间;取水点 A1、A3、A7 原水中 DOM 的分子质量分布主要集中在 3 ~ 5 ku 和 > 10 ku 两个区间;取水点 A8 原水中 DOM 的分子质量分布主要集中在 3 ~ 5 ku 和 5 ~ 8 ku 两个

区间。相关研究表明:一般天然水源中有机物的分子质量分布为 1.2 ~ 4.1 ku^[10];天津某水源地区原水中天然有机物主要由分子质量 < 2 ku 的有机物组成^[11];巢湖饮用水原水中分子质量 < 5 ku 的有机物组分所占比例超过了 70%^[12]。相比之下,西江原水中溶解性有机物的分子质量有些偏高。有文献研究报道,水厂常规处理工艺主要去除分子质量 > 3 ku 的有机物^[13]。西江原水中分子质量 < 3 ku 的这部分有机物的存在给饮用水水质安全保障带来了一定隐患。

2.3 原水中有机物组分的三维荧光光谱分析

西江 8 个取样点原水中有机物的三维荧光光谱如图 3 所示。可知,取样点 A1、A2、A4、A5、A7、A8 的原水有机物均在 $\text{Ex}/\text{Em} = 220 \sim 250 \text{ nm}/320 \sim 380 \text{ nm}$ 处有强烈的响应,说明它们可能由芳香族蛋白质类物质组成;另外, A1、A5、A7、A8 的原水有机物在 $\text{Ex}/\text{Em} = 250 \sim 280 \text{ nm}/280 \sim 380 \text{ nm}$ 处出现峰值,该区域应该来源于色氨酸和可生物降解有机物,导致这一现象可能的原因是这 4 个取样点上游曾经建过一个养猪场,在土壤中积累的可生物降解有机物渗出至地表径流及浅层地下水中。取样点 A3 的原水有机物在 $\text{Ex}/\text{Em} = 220 \sim 250 \text{ nm}/380 \sim 450 \text{ nm}$ 处出现峰值,根据荧光峰特性,该荧光区属于类富里酸。取样点 A6 的原水中出现了两个三维荧光特征峰值,其一是 $\text{Ex}/\text{Em} = 250 \sim 350 \text{ nm}/350 \sim 450 \text{ nm}$,这一荧光响应区域与类腐殖酸的荧光响应区域相似;其二是 $\text{Ex}/\text{Em} = 220 \sim 250 \text{ nm}/320 \sim 380 \text{ nm}$,表明原水中的溶解性有机物主要由类腐殖酸和类蛋白组成。

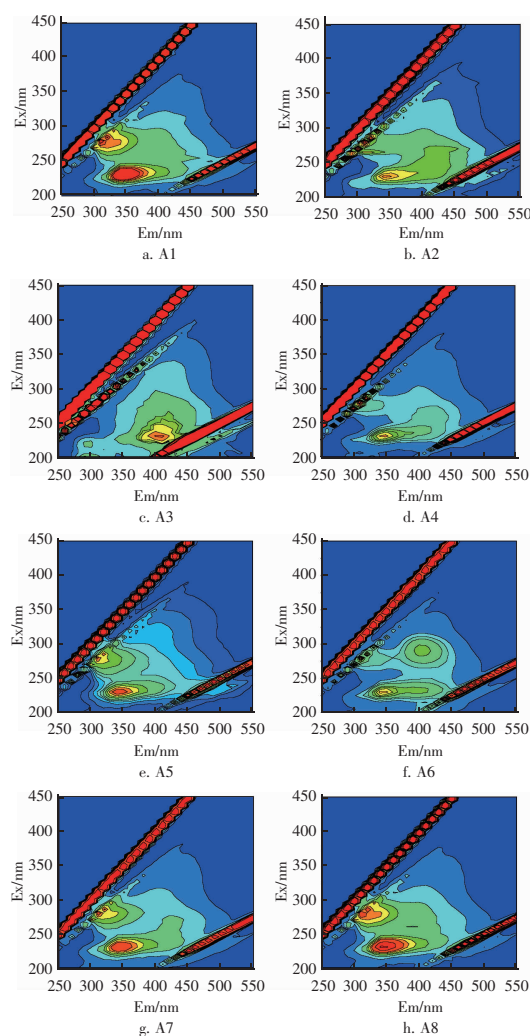


图3 原水中溶解性有机物的三维荧光光谱

Fig.3 EEM of DOM in raw water

2.4 西江原水中有机物各组分分级

根据以上水质情况分析可知,取样点 A5 和 A6 的原水中有机物含量较高,水质较差,因此将其作为典型原水进行有机物各组分分级情况分析。结果表明,取样点 A6 的原水中亲水性有机物组分所占比例最大,为 56.5%;其次是强疏水性有机物组分,为 33.0%;最少的是弱疏水性有机物组分,占 10.5%。取样点 A5 的情况类似,原水中的亲水性有机物组分占比最大,为 53.1%;其次是强疏水性有机物组分,占 38.5%;弱疏水性有机物组分最少,占 8.4%。由此可知,这两个取样点的原水中溶解性有机物主要是亲水性有机物。有学者认为,一般天然水体中疏水性有机组分所占比例会大于 50%^[14],反映水质良好,受污染程度较低。而取样点 A5、A6 的原水中具有低芳香度的亲水性有机物占总溶解性有机物

的 50% 以上,说明原水受到了外界污染,导致原水中的亲水性有机物含量较高,一般来说蛋白质、氨基酸等大分子有机物及含氮有机物是组成亲水性有机物的主要成分^[15],这些有机物其中有一部分可能来自于天然水体中的动植物,其余更多的可能来自受污染土壤渗至地表径流的有机物以及生活污水、工业废水等外源性有机污染物的排入。

2.5 原水 DOM 各组分的消毒副产物生成潜能

取样点 A5 和 A6 的原水中 DOM 各组分的氯化消毒副产物生成潜能如图 4 所示。

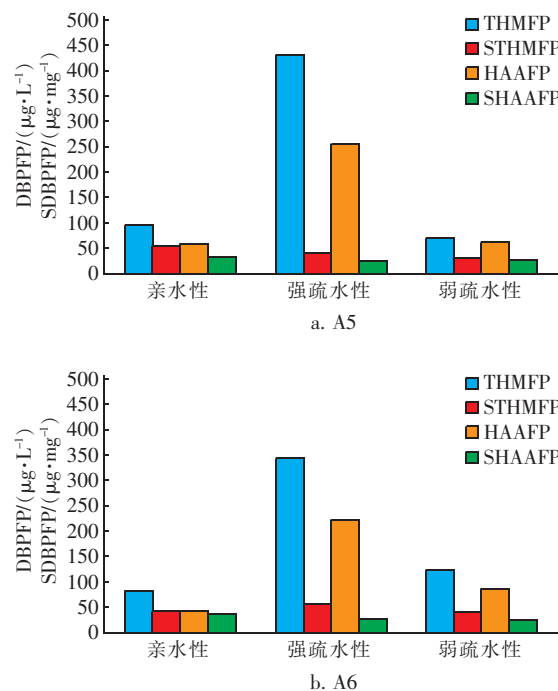


图4 取样点 A5 和 A6 原水中各有机组分的消毒副产物生成潜能

Fig.4 DBPFP of organic matter in raw water at A5 and A6

在取样点 A6,原水中强疏水性有机物生成的三卤甲烷达到了 345.6 $\mu\text{g/L}$,占三卤甲烷生成总量的 62.1%,弱疏水性有机物和亲水性有机物生成的三卤甲烷占比分别为 22.7% 和 15.2%,可知强疏水性有机物对三卤甲烷的生成影响最大;从三卤甲烷生成潜能(STHMFP)来看,强疏水性有机物 > 亲水性有机物 > 弱疏水性有机物,说明该水样中强疏水性有机物组分是生成三卤甲烷的主要前体物。而在取样点 A5,原水中强疏水性有机物生成的三卤甲烷为 433.76 $\mu\text{g/L}$,占三卤甲烷生成总量的 72.4%,亲水性有机物对三卤甲烷生成的贡献占 16.2%,弱疏水性有机物的贡献最低,占 11.4%;从 STHMFP 来

看,亲水性有机物>强疏水性有机物>弱疏水性有机物,综合来看,该水样中强疏水性有机物是生成三卤甲烷的主要前体物,同时亲水性有机物也能生成一定的三卤甲烷。表 2 的数据显示,对两个取样点而言,亲水性有机物均是生成一氯二溴甲烷(DBCM)和二氯一溴甲烷(DCBM)的主要前体物,强疏水性有机物则对生成三氯甲烷(TCM)的贡献最大。

表 2 原水中各有机组分的三卤甲烷生成潜能占比

Tab. 2 THMFP proportion of organic matter in raw water

项 目		TCM	DCBM	DBCM
亲水性有机物	A5	13.70	80.14	100
	A6	14.72	54.02	100
强疏水性有机物	A5	74.55	15.40	0
	A6	62.56	26.42	0
弱疏水性有机物	A5	11.75	4.46	0
	A6	22.72	19.56	0

从图 4 还可知,在取样点 A6,原水中强疏水性有机物生成的卤乙酸占卤乙酸生成总量的 62.0%,其次是弱疏水性有机物,占比为 25.3%;亲水性有机物的占比最低,为 12.7%;从比卤乙酸生成潜能(SHAAFP)看,亲水性有机物>强疏水性有机物>弱疏水性有机物,说明强疏水性与亲水性有机物是生成卤乙酸的主要前体物。而在取样点 A5,原水中强疏水性、弱疏水性和亲水性有机物对卤乙酸生成的贡献分别为 69.6%、16.8%、15.6%;另外,从 SHAAFP 来看,亲水性有机物>弱疏水性有机物>强疏水性有机物,说明亲水性和强疏水性有机物是生成卤乙酸的主要前体物。同时,表 3 的数据显示,亲水性有机物是生成氯溴乙酸(BCAA)和二溴乙酸(DBAA)的主要前体物,强疏水性有机物则对二氯乙酸(DCAA)、三氯乙酸(TCAA)的生成贡献最大。

表 3 原水中各有机组分的卤乙酸生成潜能占比

Tab. 3 HAAFP proportion of organic matter in raw water

项 目		DCAA	TCAA	BCAA	DBAA
亲水性有机物	A5	13.14	12.84	51.34	100
	A6	12.16	9.48	55.02	52.88
强疏水性有机物	A5	72.66	67.38	24.06	0
	A6	66.18	63.45	0	0
弱疏水性有机物	A5	14.02	19.78	24.60	0
	A6	21.57	27.07	44.98	47.12

总体而言,在取样点 A5 和 A6,原水中 DOM 的

三卤甲烷生成潜能均高于卤乙酸生成潜能。强疏水性有机物生成的三卤甲烷和卤乙酸的量均分别超过总生成量的 60% 和 65%,表明疏水性有机物是 3 种有机组分中最主要的消毒副产物前体物,这与黄辉等人^[16]的研究结果类似。其中,亲水性有机物是生成 DBCM、DCBM、BCAA、DBAA 的主要前体物,而强疏水性有机物是生成 TCM、DCAA、TCAA 的主要前体物。

2.6 SUVA₂₅₄对消毒副产物前体物的指示作用

SUVA₂₅₄是 UV₂₅₄和 DOC 的比值,其可反映碳碳不饱和和双键或芳香环有机物的相对含量等有机特性。有研究认为,SUVA₂₅₄值与 DBPs 生成能力显著相关^[6],但此结论是在高 SUVA₂₅₄值原水中得出的。图 5 为取水点 A5、A6 原水中溶解性有机物的 DBPFP 与其不同有机组分 SUVA₂₅₄之间的关系。可知,西江原水的 SUVA₂₅₄值较低,且 SUVA₂₅₄值与比消毒副产物生成潜能(SDBPFP)的正向线性关系并不是很显著,这说明不能简单地用 SUVA₂₅₄值来表征水体中溶解性有机物与氯反应的能力及其生成 DBPs 的量。已有研究表明,水体中有机物组分的 DBPFP 高低不仅与有机物组分中芳香性有机物的含量有关,还受芳香性有机物性质的影响^[17]。

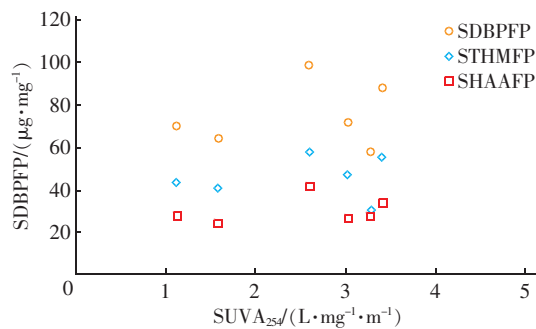


图 5 原水中有机物组分的比消毒副产物生成潜能与 SUVA₂₅₄的关系

Fig. 5 Relationship between specific disinfection by-products formation potential of organic matter and SUVA₂₅₄ in raw water

3 结论

① 西江原水中的溶解性有机物以较小分子质量有机物为主,其中,分子质量为 3~5 ku 的有机物占 35% 以上、最大达到了 73%;其次是分子质量 <3 ku 的有机物。A3、A6 取样点有机物组分主要是类富里酸、类腐殖酸,其余取样点有机物组分则以芳香族蛋白质类为主。

② 取水点 A6 和 A5 的原水中溶解性有机物主要是亲水性有机物,分别占溶解性有机物总量的 56.5%、53.1%,强疏水性有机物组分占溶解性有机物总量的 33.0%、38.5%;弱疏水性有机物组分占溶解性有机物总量的 10.5%、8.4%。

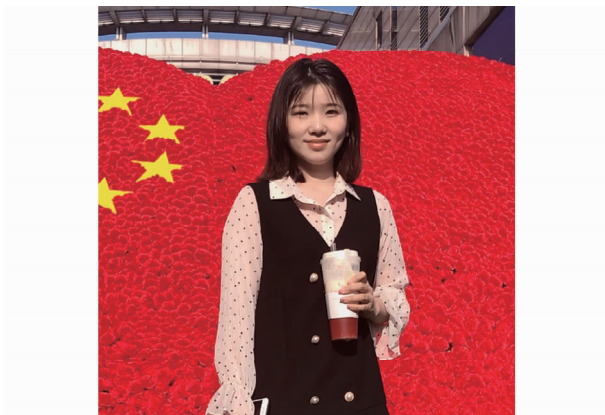
③ 疏水性有机物是最主要的消毒副产物前体物,强疏水性有机物组分对三卤甲烷和卤乙酸生成的贡献率均超过了 60%。强疏水性有机物是生成 TCM、DCAA、TCAA 的主要前体物,而亲水性有机物是生成 DBCM、DCBM、BCAA、DBAA 的主要前体物。

④ 对于西江原水, $SUVA_{254}$ 值与 SDBPFP 呈现低度正相关关系,这说明不能简单地将 $SUVA_{254}$ 与 DBPs 的生成能力等同。

参考文献:

- [1] Malliarou E, Collins C, Graham N, *et al.* Haloacetic acid in drinking water in the United Kingdom [J]. *Water Res*, 2005, 39(12): 2722–2730.
- [2] 尹军, 周璇, 林英姿, 等. 北方水库水中有机物化学分级及 THMFP 特征研究[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(7): 83–86.
Yin Jun, Zhou Xuan, Lin Yingzi, *et al.* Chemical fractionation of organic matters and THMFP characterization in north reservoir water [J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(7): 83–86 (in Chinese).
- [3] 何洪威, 周达诚, 王保强, 等. 珠江水体中有机物分布、组成及与消毒副产物生成的关系[J]. *环境科学*, 2012, 33(9): 3076–3082.
He Hongwei, Zhou Dacheng, Wang Baoqiang, *et al.* Relationship between dissolved organic carbon and DBP in the Pearl River water [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(9): 3076–3082 (in Chinese).
- [4] 程拓, 徐斌, 朱贺振, 等. 南水北调丹江口水库原水有机物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.
Cheng Tuo, Xu Bin, Zhu Hezhen, *et al.* Composition of NOM in raw water of Danjiangkou Reservoir of south-to-north water diversion project and comparison of efficacy of enhanced coagulation [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(3): 898–904 (in Chinese).
- [5] 宋凡浩, 吴丰昌, 郭飞, 等. XAD 树脂吸附技术提取和分级土壤富里酸研究进展[J]. *环境工程*, 2017, 35(11): 173–177.
Song Fanhao, Wu Fengchang, Guo Fei, *et al.* Review on extraction and fractionation of soil fulvic acid by XAD resin adsorption technique [J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35(11): 173–177 (in Chinese).
- [6] 张健, 华伟, 张璐, 等. 水处理工艺过程中有机物分子量分布规律[J]. *水资源保护*, 2012, 28(1): 95–99.
Zhang Jian, Hua Wei, Zhang Lu, *et al.* Molecular weight distribution of organic matter during water treatment process [J]. *Water Resources Protection*, 2012, 28(1): 95–99 (in Chinese).
- [7] 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.
Lü Weiwei, Yao Xin, Zhang Baohua. Fluorescent characteristics and sources of organic matter in Lake Taihu [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2018, 27(8): 1512–1521 (in Chinese).
- [8] Kitis M, Karanfil T, Wigton A, *et al.* Probing reactivity of dissolved organic matter for disinfection by-product formation using XAD-8 resin adsorption and ultra-filtration fractionation [J]. *Water Res*, 2002, 36(15): 3834–3848.
- [9] Summerhayes R J, Morgan G G, Lincoln D, *et al.* Spatio-temporal variation in trihalomethanes in New South Wales [J]. *Water Res*, 2011, 45(17): 5715–5726.
- [10] 万巧玲, 王良超, 贾海舰, 等. 原水中 DOM 的分子量分布及深度处理去除特性[J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(S1): 205–210.
Wan Qiaoling, Wang Liangchao, Jia Haijian, *et al.* Molecular weight distribution and removal of DOM by advanced treatment in drinking water sources [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40(S1): 205–210 (in Chinese).
- [11] 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, 37(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, 37(7): 128–132 (in Chinese).
- [12] 陈铭, 徐斌, 王安琪, 等. 巢湖水中溶解性有机物分子大小分布、亲疏水性及消毒副产物的生成势[J]. *净水技术*, 2018, 37(3): 22–28.
Chen Ming, Xu Bin, Wang Anqi, *et al.* Distribution of molecular size, hydrophilicity and hydrophobicity, and DBP formation potential of DOM in water of Chaohu

- Lake[J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37(3): 22–28 (in Chinese).
- [13] 周云, 李富生, 汤浅晶. 日本柴岛净水厂深度处理工艺[J]. *净水技术*, 2002, 21(3): 25–28.
Zhou Yun, Li Fusheng, Tang Qianjing. Study and test on advanced water treatment at Kunijima Water Purification Plant[J]. *Water Purification Technology*, 2002, 21(3): 25–28 (in Chinese).
- [14] Perdue E M, Ritchie J D. Dissolved organic matter in freshwaters [J]. *Treatise on Geochemistry*, 2003, 5: 273–318.
- [15] Cai Z X, Benjamin M M. NOM fractionation and fouling of low-pressure membranes in microgranular adsorptive filtration[J]. *Environ Sci Technol*, 2011, 45(20): 8935–8940.
- [16] 黄辉, 程志鹏, 林芳, 等. 河流型水源地源水有机物种类分布特性及其与消毒副产物关系[J]. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(12): 1602–1607.
Huang Hui, Cheng Zhipeng, Lin Fang, *et al.* Species distribution characteristic of organic matters in the river-type water source and its relationship with disinfection by-products[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, 22(12): 1602–1607 (in Chinese).
- [17] 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.
Gao Naiyun, Zhu Mingqiu, Zhou Shiqing, *et al.* Characteristics of disinfection by-products formation from algae organic matters in the process of chlorination[J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 2014, 42(5): 48–53 (in Chinese).



作者简介: 宋凌志(1995–), 女, 湖南娄底人, 硕士研究生, 研究方向为水质净化与水污染控制。

E-mail: SongLZ0025@163.com

收稿日期: 2019–04–22

