

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.15.002

常规净水工艺中DBPFP的指示指标筛选及应用

王俊奇^{1,2}, 李伟^{1,2}, 辛慧宇^{1,2}, 徐晓妮³

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院 陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055; 3. 中铁环境研究院<西安>有限公司, 陕西 西安 710055)

摘要: 因消毒副产物种类繁多且检测复杂,致使其在常规饮用水处理过程中无法被快速监测。为获取适宜的有机物指标以表征消毒副产物生成势(DBPFP),选取金盆水库原水作为研究对象,利用混凝剂硫酸铝模拟混凝—沉淀—过滤—氯消毒的常规净水过程,测定并建立了多种有机物指标(UV₂₅₄、DOC、SUVA和EEMs-PARAFAC组分最大荧光强度)与DBPFP之间的关系。结果表明,随着混凝剂投量的增加,溶解性有机物及DBPFP的去除率均呈现出先升高后基本保持不变的趋势;与其他指标相比,UV₂₅₄与目标DBPFP(THMs、HAAs、HANs和1,1,1-TCP)具有更好的相关性($r^2 > 0.93$),且测定简单,适宜作为DBPFP的指示参数。为验证该指标的广适性,将其应用于4种不同水质的原水,均取得了类似结果。以上结果证实UV₂₅₄可较好地指示DBPFP,在常规净水工艺中可依据其变化优化工艺条件来控制DBPs的生成量。

关键词: 混凝; 消毒副产物生成势; 指示指标; 线性关系; 平行因子分析

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)15-0007-07

Screening and Application of Indicators for the Formation Potential of Disinfection Byproducts in Conventional Water Purification Processes

WANG Jun-qi^{1,2}, LI Wei^{1,2}, XIN Hui-yu^{1,2}, XU Xiao-ni³

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environmental Ecology <Ministry of Education>, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. China Railway Environmental Research Institute <Xi'an> Co. Ltd., Xi'an 710055, China)

Abstract: During conventional drinking water treatment process, concentrations of disinfection byproducts (DBPs) cannot be rapidly detected due to their various types and complex detection protocols. In order to obtain suitable organic matter indicators of DBPs formation potential (DBPFP), a surface water collected from Jinpen Reservoir was employed as raw water, and the coagulant aluminum sulfate was used to simulate the conventional water treatment process which consists of coagulation/flocculation,

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2021JM-365); 陕西省教育厅重点实验室项目(20JS083); 西安建筑科技大学陕西省自然科学基金资助项目(ZR20021); 国家留学基金委资助项目(201808610069)

通信作者: 李伟 E-mail: liwei@xauat.edu.cn

sedimentation, filtration and chlorine disinfection. The relationships between DBPFP and various organic indexes (UV_{254} , DOC, SUVA and the maximum fluorescence intensity of EEMs-PARAFAC components) were established. The results showed that, with the increase of coagulant dosage the removal efficiencies of dissolved organic matter and DBPFP were firstly increased and then remained unchanged. Compared to other indicators, UV_{254} and target DBPFP (THMs, HAAs, HANs and 1,1,1-TCP) had a better correlation ($r^2 > 0.93$) and was simple to determine, which was suitable for DBPFP indicator parameter. In order to verify the broad applicability of this indicator, it was applied to four kinds of raw water with different water quality, and similar results were obtained. The results suggest that UV_{254} can indicate DBPFP well, and the production of DBPs can be controlled by optimizing the operational conditions according to its variation in conventional water treatment process.

Key words: coagulation; disinfection byproducts formation potential; indicator; linear relationship; parallel factor analysis

消毒副产物(DBPs)是消毒剂与水中天然有机物(NOM)反应生成的一系列微量有机污染物,对人体具有潜在致癌性。目前,已确定分子结构的DBPs达700余种^[1-2]。鉴于其对人体的危害,已有数十种DBPs被纳入世界卫生组织及各国饮用水水质标准^[3-4]。我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)也对饮用水中二氯一溴甲烷、三氯甲烷、二氯乙酸、三氯乙酸等DBPs指标进行了强制性规定。

然而,DBPs在饮用水中的赋存浓度极低(一般为 $ng/L \sim \mu g/L$)^[2],需要通过富集预处理、气相色谱/液相色谱技术结合质谱等大型分析仪器对其进行定量,难以实现快速测定。因此有学者尝试建立多种常规水质指标与DBPs生成量的关系,选用合适的有机物指标来表征消毒副产物生成势(DBPFP),以实现DBPs的监测。如White等^[5]评估了不同水体中赋存的NOM与DBPFP的关系,发现 UV_{254} 与DBPFP之间存在很强的相关性。徐鹏等^[6]在3个不同水源水中,引入SUVA指标,发现三卤甲烷生成势(THMFP)和二卤乙酸生成势(DHAAF)与该指标之间存在明显线性关系。Hua等^[7]通过三维荧光光谱-平行因子分析(EEMs-PARAFAC)考察了美国密苏里州55个湖泊水体的荧光性有机物质与THMFP的相关性,表明组分1和组分2可能是三卤甲烷(THMs)的前体物,比SUVA更能预测DBPFP。

但是,目前关于有机物指标与DBPFP的相关性研究,主要集中在水源水或处理前后水样,而很少研究在常规水处理工艺中,不同处理条件下处理水中残留的有机物与DBPFP的相关性。已有研究证

实,常规净水工艺(混凝—沉淀—过滤)可有效去除DBPs前体物,是控制DBPs的有效方法^[8]。

因此为了探究常规饮用水处理中,DBPFP与有机物指标之间的相关性,采用常规铝盐混凝剂硫酸铝和西安金盆水库水源水,模拟水厂混凝—沉淀—过滤—消毒的常规处理过程,选用近些年研究中常见的有机物指标(UV_{254} 、DOC、SUVA和EEMs-PARAFAC组分最大荧光强度),研究了在不同混凝剂投加量下DBPFP与有机物指标之间的线性关系,以获得合适的DBPs表征指标来量化DBPFP情况,为饮用水处理工艺中DBPs的监测以及混凝剂投加量的确定提供一个新的方法,进而有助于选择适当的技术控制DBPs生成量并优化水处理过程。

1 材料与方 法

1.1 试剂与材料

硫酸铝(分析纯)、磷酸氢二钠(分析纯)、磷酸二氢钾(分析纯)、硫代硫酸钠(分析纯)、次氯酸钠(5%)均购于国药集团化学试剂有限公司(上海)。甲醇(色谱纯)、甲基叔丁基醚(MTBE,色谱纯)购于德国Merck公司。无水硫酸钠(分析纯)购于天津市科密欧化学试剂有限公司。超纯水($18.2 M\Omega \cdot cm$)由Elga纯水系统制取(Bucks, UK)。储备液均置于4℃冰箱避光保存。

EPA 552.2 卤乙酸(HAAs)混标($2\ 000 \mu g/mL$),其中包括一氯乙酸(MCAA)、一溴乙酸(MBAA)、二氯乙酸(DCAA)、溴氯乙酸(BCAA)、二溴乙酸(DBAA)、三氯乙酸(TCAA)、二氯一溴乙酸(BDCAA)、一氯二溴乙酸(CDBAA)和三溴乙酸

(TBAAs); EPA 501/601 THMs 混标(2 000 $\mu\text{g}/\text{mL}$), 包括氯仿(TCM)、二氯一溴甲烷(BDCM)、一氯二溴甲烷(CDBM)和溴仿(TBM); EPA 551B 卤代挥发物混标(2 000 $\mu\text{g}/\text{mL}$), 包括溴氯乙腈(BCAN)、二溴乙腈(DBAN)、二氯乙腈(DCAN)、三氯乙腈(TCAN)、三氯硝基甲烷(TCNM)、1,1-二氯-2-丙酮(1,1-DCP)、1,1,1-三氯丙酮(1,1,1-TCP)和內标(1,2-二溴丙烷), 以上DBPs标准试剂均购于Sigma-Aldrich公司。HAAs和挥发性DBPs(V-DBPs), 主要包括EPA 501/601 THMs和EPA 551B 卤代挥发

混合物)储备液置于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱避光保存。

1.2 水样和烧杯实验

实验用水取自西安地区金盆水库、渭河、沔河, 以及南澳大利亚两个地表水 Hope Valley 和 Anstey Hill。金盆水库是西安市最大的水源地, 供应两个水厂, 设计处理能力分别为 $50\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 和 $60\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, 因此本研究主要以金盆水库水源水为例进行分析。水样经过 $2.7\text{ }\mu\text{m}$ 玻璃微纤维膜过滤后, 储存在棕色试剂瓶中, 置于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱避光保存。实验所用原水的主要水质参数如表1所示。

表1 原水主要水质指标

Tab.1 Main water quality indicators of raw water

项 目	金盆水库	渭河	沔河	Hope Valley	Anstey Hill
浊度/NTU	3.9 ± 0.4	4.4 ± 0.3	4.9 ± 0.4	3.6 ± 0.5	5.6 ± 1.2
pH	7.6 ± 0.1	8.0 ± 0.1	8.3 ± 0.1	8.0 ± 0.3	7.4 ± 0.4
$\text{UV}_{254}/\text{cm}^{-1}$	0.098 ± 0.003	0.057 ± 0.002	0.052 ± 0.002	0.142 ± 0.003	0.166 ± 0.002
$\text{DOC}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	3.0 ± 0.1	2.8 ± 0.5	2.5 ± 0.2	4.9 ± 0.5	7.3 ± 0.6
$\text{SUVA}/(\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{m}^{-1})$	3.26	2.04	2.08	2.89	2.27
碱度/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	72 ± 2	235 ± 5	209 ± 3	—	—
硬度/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	84 ± 2	303 ± 3	309 ± 4	120 ± 5	99 ± 4

采用JJ-4C六联搅拌装置按照以下程序进行烧杯实验:将混凝剂($0\sim 210\text{ }\mu\text{mol}/\text{L}$)加入装有1 L水样的烧杯中, 然后立即以 $250\text{ r}/\text{min}$ 的速度快速混合1 min, 再以 $30\text{ r}/\text{min}$ 的速度缓慢混合15 min, 最后静置30 min。

沉淀结束后, 取50 mL上清液使用 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 注射器过滤膜过滤, 用于测定 UV_{254} 、DOC和三维荧光光谱。然后另取300 mL上清液过 $1.2\text{ }\mu\text{m}$ 玻璃微纤维膜, 将其转移到玻璃烧杯中, 用2 mmol/L磷酸盐缓冲液进行缓冲, 通过滴加少量1 mol/L硫酸或氢氧化钠溶液调节水样pH为7。然后加入一定量的氯[保证反应24 h后残留氯浓度维持在 $(1.0 \pm 0.5)\text{ mg}/\text{L}$ (以 Cl_2 计)]摇晃10 s后, 立即分别将50 mL和40 mL样品转移到PTFE內衬隔垫的无顶空带盖棕色玻璃瓶中, 在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下避光氯化24 h后, 加入 $10\text{ }\mu\text{L}$ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 溶液($100\text{ g}/\text{L}$)淬灭残留氯, 分别用于后续HAAs和V-DBPs检测。所有实验均重复3次。

1.3 分析方法

1.3.1 常规水质指标测定方法

溶液中氯的浓度通过标准DPD比色法测定; 分别使用哈希2100P浊度计和Sension1便携式pH计测定水样的浊度和pH; 使用总有机碳分析仪(TOC-

LCPN, 日本岛津)测定DOC浓度; 使用带有1 cm石英比色皿的UV/Vis光谱仪测定 UV_{254} 。

1.3.2 三维荧光光谱分析

使用具有四个透光面的1 cm石英比色皿的日立F-7000荧光光谱仪测定三维荧光光谱, 扫描参数: 激发波长为 $200\sim 400\text{ nm}$, 步长为 5 nm ; 发射波长为 $250\sim 550\text{ nm}$, 步长为 1 nm ; 扫描速度为 $12\ 000\text{ nm}/\text{min}$; 激发和发射狭缝宽度均设置为 5 nm 。用FL Solutions软件收集和处埋荧光数据。

1.3.3 平行因子分析(PARAFAC)

PARAFAC从水样EEM中分解出不同的荧光化合物组分, 已被证明是表征溶解性有机物的有效方式之一^[9]。根据Stedmon等^[10]推荐的程序, 在MATLAB软件中使用DOMFluor工具箱构建和处理PARAFAC模型。最后, 通过在线OpenFluor数据库(<https://openfluor.lablicate.com/home>)^[11], 将激发光谱和发射光谱与先前已发表的研究成果进行比较, 确定PARAFAC荧光化合物组分。

1.3.4 消毒副产物检测

① HAAs

吸取10 mL待测水样, 滴加1 mol/L的硫酸至 $\text{pH} = 2.5 \pm 0.1$; 接着使用 $0.22\text{ }\mu\text{m}$ 的滤膜过滤至进

样瓶中待测。

仪器:超高效液相色谱-电喷雾-串联三重四级杆质谱联用仪(UPLC-ESI-MS/MS, Waters, USA)。

色谱柱:ACQUITY™ UPLC HSS T3(2.1 mm × 100 mm × 1.8 μm, Waters, USA)。

液相色谱条件:流动相由甲醇(流动相A)和0.000 5%甲酸溶液(流动相B)组成,进样体积为10 μL。采用梯度洗脱方法,即1% A保持1.5 min,然后A的比例在4 min内增加到40%,保持3 min;再将A的比例增加到90%并保持2 min;最后,将A的比例减少到1%,并在下一次注射前平衡3 min。

质谱条件:电喷雾离子源(ESI),毛细管电压为2.50 kV;离子源温度为110 °C,去溶剂化温度为350 °C;脱溶剂气(氮气)流量为500 L/h;锥孔气(氮气)流量为50 L/h;碰撞气体(氩气)流量为0.12 mL/min。

② V-DBPs

液液萃取:将30 mL水样置于40 mL样品瓶中,加入1.5 mL MTBE(10 μg/L),拧紧瓶盖置于旋涡混合器上混合1~2 min;接着加入10 g无水Na₂SO₄,再次置于旋涡混合器上混合5 min左右;最后,静置5 min,取上层溶液于进样瓶中待测。

仪器:7890A气相色谱仪-串联7000三重四级杆质谱仪(GC-QqQ-MS/MS, Agilent, USA)。

色谱柱:HP-5MS(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm, Agilent, USA)。

气相色谱条件:进样口温度设为180 °C,采用不分流模式,进样体积为1 μL,载气(氮气)和淬灭氮气的流速分别为1.50、2.25 mL/min。采用程序升温方法,即35 °C保持3.6 min,随后以35 °C/min升温至210 °C,保持1.4 min。

质谱条件:离子源为电子轰击源(EI);灯丝发射电流为35 μA;传输线、离子源和四极杆温度分别为280、230、150 °C。

2 结果与讨论

2.1 PARAFAC组分

利用PARAFAC模型,对三维荧光光谱数据进行解析,集中分离出三个不同的组分C1、C2和C3。然后利用在线OpenFluor数据库,与库中各组分的激发-发射光谱进行比较(激发和发射波长Tucker系数均大于0.97),最终确定PARAFAC荧光组分。根据它们的等高线图和对半分析验证结果,组分C1

主峰(次峰)的激发波长/发射波长($\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}$)最大值在245(340) nm/438 nm处。将组分C1的光谱特征与OpenFluor数据库中200多个建模的PARAFAC组分的光谱特征进行比较,C1被确定为类富里酸组分^[12-13]。对于组分C2,其光谱与先前研究中报道的类腐殖酸组分的光谱匹配良好^[14-15]。根据这些文献,主峰在 $\lambda_{Ex}/\lambda_{Em} = 270 \text{ nm}/482 \text{ nm}$ 和次峰在 $\lambda_{Ex}/\lambda_{Em} = 365 \text{ nm}/482 \text{ nm}$ 处是来自陆地微生物降解有机物产生的芳香族大分子物质。类似地,组分C3($\lambda_{Ex}/\lambda_{Em} = 280 \text{ nm}/380 \text{ nm}$)被确定为源自微生物的类腐殖酸组分^[13,15]。

2.2 DOC及DBPFP随混凝剂投加量的变化

三种PARAFAC组分最大荧光强度($F_{max,C1}$ 、 $F_{max,C2}$ 和 $F_{max,C3}$)和UV₂₅₄、DOC、SUVA去除率与硫酸铝投加量的关系如图1所示。

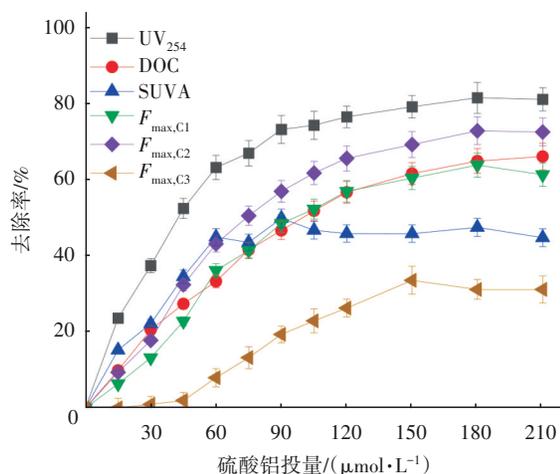


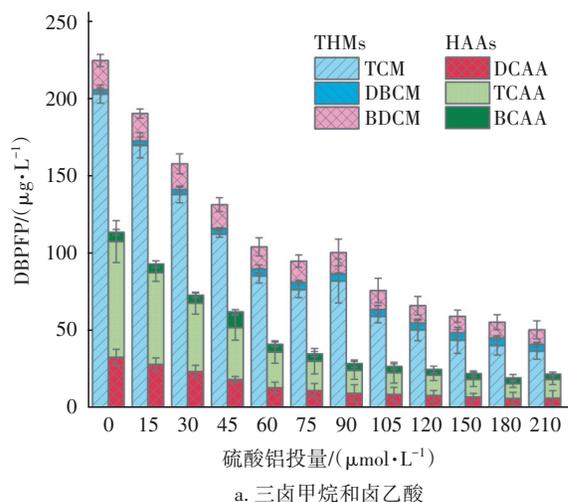
图1 不同Al₂(SO₄)₃投量下对UV₂₅₄、DOC、SUVA和PARAFAC组分最大荧光强度的去除效果

Fig.1 Removal of UV₂₅₄, DOC, SUVA, and the maximum fluorescence intensity of PARAFAC components C1, C2 and C3 at different dosages of Al₂(SO₄)₃

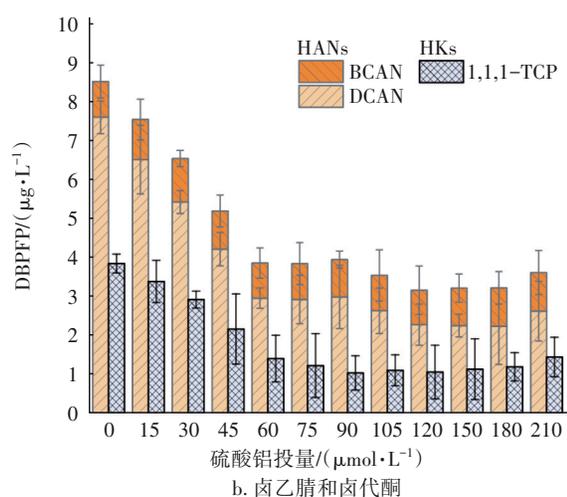
由图1可知,随着混凝剂投量的增加,各指标的去率先逐渐升高,而后逐渐趋于平稳或略有下降。在硫酸铝投加量为180 μmol/L时,UV₂₅₄去除率基本达到最大(81.7%),高于F_{max,C2}(72.9%)、DOC(65.0%)、F_{max,C1}(63.9%),远高于F_{max,C3}(31.2%)。随着混凝剂的投量进一步增加至210 μmol/L,这5个指标的去除率均基本趋于平稳。SUVA的去除呈现出类似的趋势,不同之处是其在硫酸铝投加量为60 μmol/L时基本达到最大去除率。

氯化24 h后,检测到3种THMs(TCM、DBCM、BDCM)、3种HAAs(DCAA、TCAA、BCAA)、2种

HANs (DCAN、BCAN)和1种 HKs (1,1,1-TCP),结果如图2所示。可见,氯化原水中的 DBPFP 最高,其中 THMs、HAAs、HANs 和 HKs 的最大浓度分别为 224.3、113.4、8.5 和 3.9 $\mu\text{g/L}$ 。随着硫酸铝投加量增加至 210 $\mu\text{mol/L}$, THMs 的浓度持续下降至 50.3 $\mu\text{g/L}$; 而 HAAs 的浓度在硫酸铝投加量为 150 $\mu\text{mol/L}$ 时就已经下降至 22.0 $\mu\text{g/L}$ 的最低值,然后几乎保持不变。HANs 的浓度在硫酸铝投加量为 120 $\mu\text{mol/L}$ 时降至最小值 3.2 $\mu\text{g/L}$ 。对于 HKs,其生成势在硫酸铝投加量为 90 $\mu\text{mol/L}$ 时达到最小,进一步增加混凝剂投加量,则浓度略有增加。



a. 三卤甲烷和卤乙酸



b. 卤乙腈和卤代酮

图2 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 投量对消毒副产物生成势的影响Fig.2 Effect of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ dosage on the formation potential of disinfection byproducts

2.3 溶解性有机物指标与 DBPFP 之间的相关性

结合图1和图2可知,随着混凝剂投量的增加,溶解性有机物指标的去除效果与DBPFP的变化趋势基本一致。在不同混凝剂投量下,各水质指标和DBPFP之间的相关系数见表2。其中,PARAFAC组分C1和C2与 UV_{254} 和SUVA呈现显著相关($r^2 \geq 0.80$),而与DOC的相关性更强($r^2 \geq 0.97$)。对于组分C3,与DOC呈现显著相关性($r^2 = 0.844$),但与 UV_{254} 和SUVA呈现相对较弱的相关性。

表2 混凝后 UV_{254} 、DOC、SUVA与PARAFAC组分C1、C2、C3的最大荧光强度(F_{max})和DBPFP的相关系数Tab.2 Correlation coefficients of UV_{254} , DOC, SUVA with the maximum fluorescence intensity (F_{max}) of PARAFAC components C1, C2 and C3 and DBPFP after $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ coagulation

项目	UV_{254}	DOC	SUVA	$F_{\text{max,C1}}$	$F_{\text{max,C2}}$	$F_{\text{max,C3}}$	THMs	HAAs	HANs	1,1,1-TCP
UV_{254}	1.000	0.872	0.958	0.885	0.921	0.632	0.967	0.988	0.966	0.932
DOC		1.000	0.646	0.974	0.979	0.844	0.941	0.877	0.814	0.745
SUVA			1.000	0.799	0.837	0.520	0.882	0.949	0.954	0.959
$F_{\text{max,C1}}$				1.000	0.992	0.864	0.921	0.885	0.850	0.813
$F_{\text{max,C2}}$					1.000	0.823	0.958	0.929	0.896	0.856
$F_{\text{max,C3}}$						1.000	0.393	0.237	0.171	0.138
THMs							1.000	0.970	0.952	0.885
HAAs								1.000	0.976	0.954
HANs									1.000	0.975
1,1,1-TCP										1.000

从表2还可以看出,DBPFP与除了组分C3之外的其他所有指标之间均存在显著的相关性。其中,THMs与 UV_{254} 、DOC、 $F_{\text{max,C1}}$ 和 $F_{\text{max,C2}}$ 的相关系数大于0.92;HAAs与 UV_{254} 、SUVA和 $F_{\text{max,C2}}$ 的相关系数均大于0.92。尽管HANs和1,1,1-TCP的浓度

远低于THMs和HAAs,但与 UV_{254} 和SUVA均呈现出良好的相关性($r^2 \geq 0.93$)。比较各水质指标与各DBPs之间的相关系数可以发现, UV_{254} 与DBPFP的相关性整体更好($r^2 > 0.93$)。这一结果与前人的研究结果一致,即 UV_{254} 和DBPs的形成密切相关^[5-6]。

而且 UV_{254} 指标测定简单, 适宜作为 DBPFP 的指示参数。与此同时, 研究结果亦进一步证明水中存在的天然腐殖质类芳香族化合物为 DBPs 的主要前体物^[7]。

将上述方法应用于具有不同水质的 4 种原水 (见图 3), 均取得了类似结果, 即 UV_{254} 与 DBPFP 整体上具有更好的相关性。

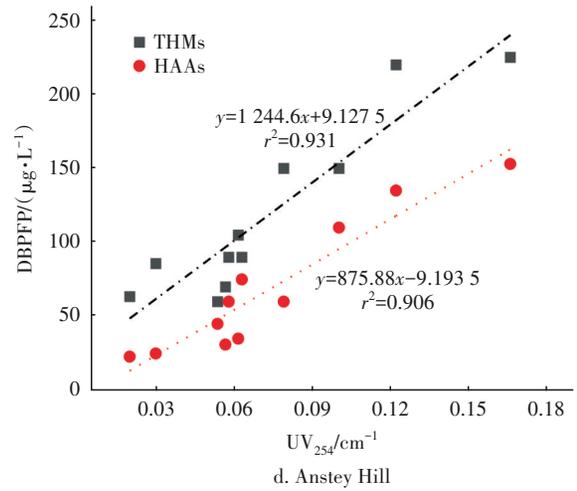
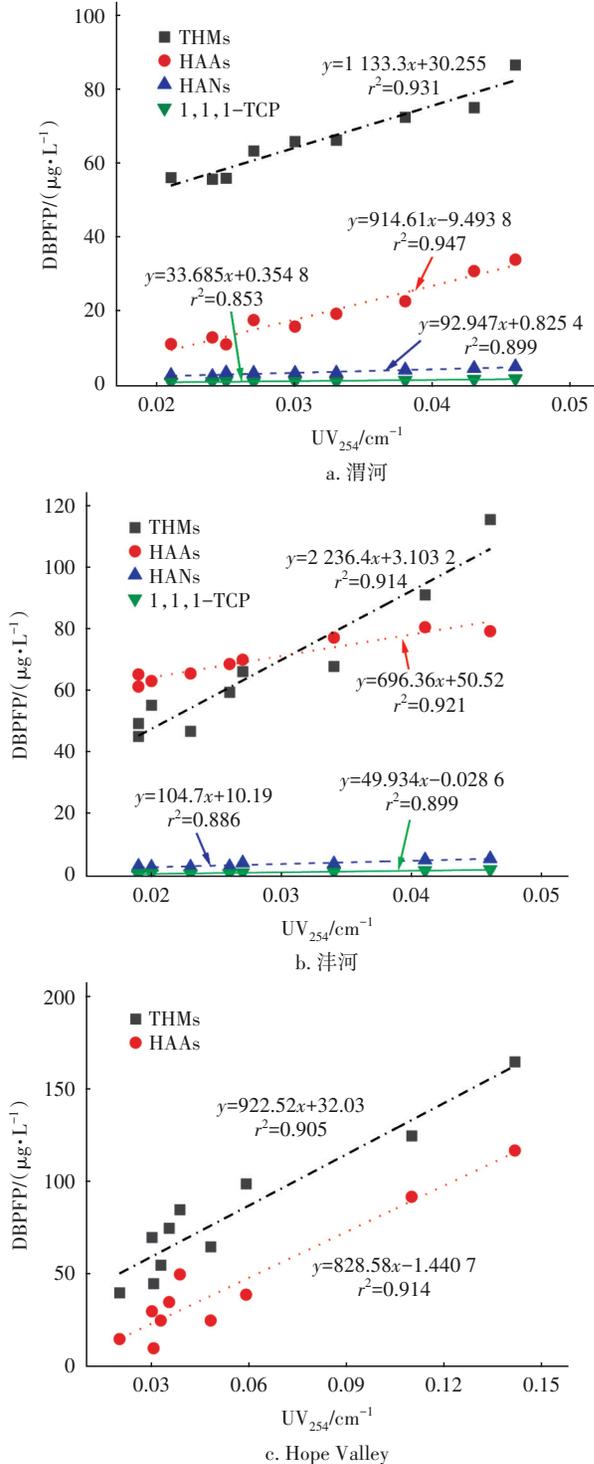


图 3 常规净水工艺处理不同原水时 UV_{254} 与 DBPFP 的线性拟合方程及相关系数

Fig.3 Linear fitting equation and correlation coefficient of UV_{254} and DBPFP for different raw water in conventional water treatment process

如图 3 所示, 根据 UV_{254} 与 DBPFP 的线性拟合方程及相关系数, 可通过监测 UV_{254} 值便可计算得到目标 DBPFP 的近似值。因此, UV_{254} 可以较好地指示 DBPs 的生成, 可以作为消毒副产物生成势的指示指标, 即可依据其变化优化工艺条件进而控制 DBPs 的生成量。

3 结论

① 随着混凝剂投量的增加, 溶解性有机物及 DBPFP 的去除率均呈现先升高后基本保持不变的趋势。

② 与其他指标相比, UV_{254} 与目标 DBPFP (THMs、HAAs、HANs 和 1,1,1-TCP) 具有更好的相关性 ($r^2 > 0.93$), 且测定简单, 适宜作为 DBPFP 的指示参数。在常规净水工艺中可依据其变化优化工艺条件, 进而控制 DBPs 的生成量。

③ PARAFAC 类富里酸组分 C1、类腐殖酸组分 C2 和 UV_{254} 与 DBPFP 的相关性显著, 表明腐殖质类芳香族化合物与 DBPs 的生成密切相关, 进一步证实了水中的天然腐殖质类芳香族化合物为 DBPs 的主要前体物。

参考文献:

[1] DONG H, CUTHBERTSON A A, RICHARDSON S D. Effect-directed analysis (EDA): a promising tool for nontarget identification of unknown disinfection

- byproducts in drinking water[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(3):1290-1292.
- [2] 楚文海,肖融,丁顺克,等. 饮用水中的消毒副产物及其控制策略[J]. *环境科学*, 2021,42(11):5059-5074.
- CHU Wenhai, XIAO Rong, DING Shunke, *et al.* Disinfection by-products in drinking water and their control strategies[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(11):5059-5074 (in Chinese).
- [3] 肖融,楚文海. 全球饮用水标准中消毒副产物管控指标对比与启示[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(6):1328-1337.
- XIAO Rong, CHU Wenhai. Comparison and enlightenment of disinfection by-products control indicators in global drinking water standards [J]. *Environmental Science Research*, 2021, 34(6):1328-1337 (in Chinese).
- [4] 陈宏源,赵奇特,张凯风. 次氯酸钠用于饮用水消毒时副产物风险和控制在[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(20):34-40.
- CHEN Hongyuan, ZHAO Qite, ZHANG Kaifeng. Risk and control of by-products in drinking water disinfection with sodium hypochlorite [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(20):34-40(in Chinese).
- [5] WHITE D M, GARLAND D S, NARR J, *et al.* Natural organic matter and DBP formation potential in Alaskan water supplies [J]. *Water Research*, 2003, 37(4):939-947.
- [6] 徐鹏,李忠群,程战利,等. 水源水消毒副产物生成势与UV₂₅₄/DOC的相关性研究[J]. *环境科学学报*, 2018,38(8):3021-3026.
- XU Peng, LI Zhongqun, CHENG Zhanli, *et al.* Correlation between the generation potential of disinfection by-products in source water and UV₂₅₄/DOC [J]. *Journal of Environmental Science*, 2018, 38(8):3021-3026(in Chinese).
- [7] HUA B, VEUM K, YANG J, *et al.* Parallel factor analysis of fluorescence EEM spectra to identify THM precursors in lake waters[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 161(1):71-81.
- [8] BRATBY J. *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment* [M]. 3rd ed. London: IWA Publishing, 2006.
- [9] MURPHY K R, STEDMON C A, GRAEBER D, *et al.* Fluorescence spectroscopy and multi-way techniques. PARAFAC [J]. *Analytical Methods*, 2013, 5(23):6557.
- [10] STEDMON C A, BRO R. Characterizing dissolved organic matter fluorescence with parallel factor analysis: a tutorial[J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2008,6(11):572-579.
- [11] MURPHY K R, STEDMON C A, WENIG P, *et al.* OpenFluor—an online spectral library of auto-fluorescence by organic compounds in the environment [J]. *Analytical Methods*, 2014,6(3):658-661.
- [12] SHUTOVA Y, BAKER A, BRIDGEMAN J, *et al.* Spectroscopic characterisation of dissolved organic matter changes in drinking water treatment: from PARAFAC analysis to online monitoring wavelengths [J]. *Water Research*, 2014, 54:159-169.
- [13] GROENEVELD M, CATALÁN N, ATTERMEYER K, *et al.* Selective adsorption of terrestrial dissolved organic matter to inorganic surfaces along a boreal inland water continuum [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020,125(3):5236.
- [14] CATALA T S, RECHE I, FUENTES-LEMA A, *et al.* Turnover time of fluorescent dissolved organic matter in the dark global ocean [J]. *Nature Communications*, 2015, 6:5986.
- [15] DAINARD P G, GUÉGUEN C, YAMAMOTO-KAWAI M, *et al.* Interannual variability in the absorption and fluorescence characteristics of dissolved organic matter in the Canada Basin polar mixed waters [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2019,124(7):5258-5269.

作者简介:王俊奇(1995-),男,江苏徐州人,硕士研究生,研究方向为给水处理理论与技术。

E-mail:1824729771@qq.com

收稿日期:2022-03-02

修回日期:2022-05-22

(编辑:李德强)