

城镇水系统全流程水质监测技术专栏

王杰, 甘晓娟, 贾海舰. 吹扫捕集-三重四级杆气质联用测定生活饮用水中 9 种含氮消毒副产物[J]. 净水技术, 2024, 43(5):198-203.

WANG J, GAN X J, JIA H J. Determination of 9 nitrogen-containing DBPs in drinking water by purge and trap-gas chromatography-triple quadrupole mass spectrometry[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(5):198-203.

吹扫捕集-三重四级杆气质联用测定生活饮用水中 9 种含氮消毒副产物

王 杰*, 甘晓娟, 贾海舰

(重庆水务集团水质检测有限公司, 重庆 400060)

摘 要 建立吹扫捕集-三重四级杆气质联用测定饮用水中 6 种卤乙腈、3 种卤代硝基甲烷消毒副产物(DBPs)的方法,并了解本市饮用水中目标 DBPs 的浓度水平。优化吹扫捕集条件,气质联用条件建立检测方法,并对日常饮用水、原水样品进行检测,选用 10#捕集阱(2, 6-二苯基对苯醚/硅胶/碳分子筛),选用 DB-VRX 色谱柱,对比 25 mL 吹扫管与 5 mL 吹扫管前处理灵敏度,确定吹脱时间为 11 min,捕集阱温度为 40 ℃,捕集阱热脱附温度为 190 ℃,传输线温度为 115 ℃,烘烤时间为 10 min,吹扫流量为 40 mL/min。在多反应监测(SRM)模式下检测,外标法定量。结果表明,各个物质线性范围良好, $r>0.996$,方法检出限(LODs)为 0.051~0.14 $\mu\text{g/L}$,定量限为 0.25~0.56 $\mu\text{g/L}$,两种不同浓度加标回收率为 70.2%~117.0%,相对标准偏差为 2.45%~10.50%。该方法高效、灵敏、操作简单,对卤乙腈、卤代硝基甲烷等 DBPs 能进行有效检测。对出厂水、管网水进行检测,不同消毒工艺次氯酸钠、液氯和二氧化氯消毒时,卤乙腈检出质量浓度不同,为 ND~3.20 $\mu\text{g/L}$,卤代硝基甲烷未检出。

关键词 卤代硝基甲烷 卤乙腈 吹扫捕集-三重四级杆气质联用 饮用水 含氮消毒副产物

中图分类号: TU991 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)05-0198-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.05.023

Determination of 9 Nitrogen-Containing DBPs in Drinking Water by Purge and Trap-Gas Chromatography-Triple Quadrupole Mass Spectrometry

WANG Jie*, GAN Xiaojuan, JIA Haijian

(Chongqing Water Group Water Quality Testing Co., Ltd., Chongqing 400060, China)

Abstract To establish a method for the determination of six haloacetonitriles and three halogenated nitromethane disinfection by-products (DBPs) in drinking water by purge and trap triple four stage GC/MS, and to understand the concentration level of target DBPs in drinking water in this city. Optimize the purge and capture conditions, establish a detection method using gas chromatography-mass spectrometry, and detect daily drinking water and raw water samples. Select a 10# trap (2, 6-diphenyl phenyl ether/silica gel/carbon molecular sieve) and a DB-VRX chromatographic column. Compare the pre-treatment sensitivity of a 25 mL purge tube with a 5 mL purge tube. Determine a purge time of 11 minutes, a trap temperature of 40 ℃, a trap thermal desorption temperature of 190 ℃, and a transfer line temperature of 115 ℃, The baking time is 10 minutes, and the blowing flow rate is 40 mL/min. Detected in SRM mode. Quantitative analysis using external standard method. The results showed that the linear range of each substance was good, with $r>0.996$. The detection limit of the method (LODs) was 0.051~0.14 $\mu\text{g/L}$, and the quantitative limit was 0.25~0.56 $\mu\text{g/L}$. The recovery rates of the two different concentrations were 70.2%~117.0%, and the relative standard deviation was 2.45%~10.50%. This method is efficient, sensitive and simple to operate, and can effectively detect DBPs such as halogen acetonitrile and halonitromethane. The factory water and pipe network water are tested. In different disinfection processes of sodium hypochlorite,

[收稿日期] 2023-07-17

[通信作者] 王杰(1995—),男,主要从事化学分析检测工作, E-mail:1034256084@qq.com。

liquid chlorine and chlorine dioxide, the mass concentration of halogen acetonitrile is different, ND ~ 3.20 $\mu\text{g/L}$, and haloated nitromethane is not detected.

Keywords halogenic nitromethane halo acetonitriles chromatography-triple quadrupole mass spectrometry drinking water nitrogen-containing disinfection by-products (DBPs)

含氮消毒副产物一直是消毒副产物研究中一个比较热门的话题。含氮消毒副产物的毒性比含氯消毒副产物的毒性强,对人体的危害性更大。自来水中卤乙腈在含氮消毒副产物中是检出水平最高的一类物质,其神经毒性、遗传毒性、细胞毒性已有相关资料进行报道,二氯乙腈可引发皮肤癌,而三氯乙腈和溴氯乙腈可引发肺癌。国际癌研究机构分别将二溴乙腈列入Ⅱ B类,二氯乙腈和三氯乙腈列入Ⅲ类致癌清单^[1]。现在自来水厂使用的几乎所有消毒方式均会产生卤乙腈,其中包括液氯、氯胺、二氧化氯、臭氧,且因为其亲水性结构让它在工艺中难以被去除。世界卫生组织(WHO)《饮用水水质准则》(第四版)^[2]中规定了二氯乙腈 20 $\mu\text{g/L}$ 和二溴乙腈 70 $\mu\text{g/L}$ 的限值要求。日本则在 1993 年开始就将卤乙腈纳入监管指标,经过 7 次修订^[3],将二氯乙腈的限值定为 10 $\mu\text{g/L}$,二溴乙腈限值定为 60 $\mu\text{g/L}$ 。但是目前卤乙腈类消毒副产物在国内还缺少相关标准规范,只有上海市在 2020 年发布的团体标准对饮用水中二氯乙腈和二溴乙腈有限值要求,分别是二氯乙腈 35 $\mu\text{g/L}$ 和二溴乙腈 10 $\mu\text{g/L}$ 。卤代硝基甲烷在饮用水中也常有检出,一般都在 1 $\mu\text{g/L}$ 以下,但我国尚未对其限值作出要求,世界上大多数国家也是如此,卤代硝基甲烷也有较强的细胞毒性和遗传毒性,其在饮用水中存在一定风险性。

卤乙腈的前驱体主要是腐殖质中微生物活动代谢产物,相关研究^[4]发现卤乙腈的两种生成机理:由氯或者氯胺和 α -胺基发生卤代反应,这是脱羧的途径,还有一种由氯胺孤电子和醛类发生亲核反应生成甲醇和氯化铵然后脱水反应生成卤乙腈,这是醛反应途径。针对水中卤乙腈的检测主要有液液萃取气相色谱法、液液萃取气质联用法、顶空气相色谱法、顶空气质联用法、固相微萃取气质联用法^[5-6]。以上方法的前处理均有相应的缺点,比如液液萃取使用大量有机试剂,损害试验人员的身体健康,而且萃取过程容易造成损失,影响检测准确性。顶空法灵敏度较低,固相微萃取成本过高,精密度较差,准确性不高。

卤代硝基甲烷前驱体种类繁多,主要是水源藻类代谢物、大部分氨基酸、胺类物质。卤代硝基甲烷主要是由消毒剂氯(胺)与水中前体物质发生化学反应。在湖泊中,若湖泊受到污染而富营养化,这个时候氨基酸浓度会大幅度提高。在水厂进行消毒的过程时,色氨酸、甘氨酸和赖氨酸对卤代硝基甲烷的生成具有较大的贡献,而藻类的大量繁殖会贡献大量的有机物,这种有机物也是主要的前驱体之一^[7-10]。当前在饮用水中的卤代硝基甲烷研究比较零碎,缺乏系统性研究,相关毒理学研究不完善,对其在饮用水中对人们的健康影响缺乏真实评价。目前报道^[11-12]的卤代硝基甲烷浓度水平并不高,现在对其检测方法有液液萃取气相色谱法、液液萃取气质联用法、固相微萃取气质联用法,以上方法均有不足之处,或者重现性低方法不稳定,检测灵敏度太低无法准确定量,又或者检测成本过高,不适用于日常检测。

本研究采用吹扫捕集-三重四级气质联用法同时检测自来水中氯硝基甲烷、二氯硝基甲烷、三氯硝基甲烷、氯乙腈、溴乙腈、溴氯乙腈、二溴乙腈、二氯乙腈、三氯乙腈。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

仪器:三重四级气质联用仪(Thermo Trace1300-TSQ8000evo);吹扫捕集仪(OI4760/4551-A);纯水机 Milli-Q。试剂:甲醇(色谱纯)、抗坏血酸(川东化工分析纯)。标准物质:混合标准溶液(溴氯乙腈、三氯硝基甲烷、二溴乙腈、二氯乙腈、三氯乙腈)质量浓度均为 100 $\mu\text{g/mL}$,购自 AccuStandard;氯乙腈(纯度为 99.9%)购自 Tmstandard;氯硝基甲烷(纯度为 95%)购自 Toronto Research Chemicals;氯乙腈(纯度为 99.0%)购自 Tmstandard;二氯硝基甲烷(纯度为 99.0%)购自 Cansyn Chem。

1.2 水样采集

在 250 mL 样品瓶中先加入 0.2~0.5 g 抗坏血酸,样品瓶充满水样不留气泡,密封样品瓶后迅速送回实验室检测。

1.3 吹扫捕集条件

选用 10#捕集阱,进样量为 5 mL,吹扫气体使用高纯氮气,捕集阱温度为 40 ℃,吹脱时间为 11 min,捕集阱热脱附温度为 190 ℃,解析时间为 1.5 min,传输线温度为 115 ℃,烘烤时间为 10 min,吹扫流量 40 mL/min。

1.4 气相色谱-质谱条件

色谱柱规格为 DB-VRX 60 m×0.25 mm×0.25 μm;进样口温度为 170 ℃,分流进样,分流比为 10:1,色谱柱流速为 1.2 mL/min;柱温箱程序升温(起始温度为 35 ℃保持 5 min,以 8 ℃/min 升至 100 ℃保持 4 min,再以 20 ℃/min 升至 200 ℃保持 9 min)质谱端离子源(EI 源,离子源温度为 280 ℃,能量为 70 eV,传输线温度为 250 ℃);扫描模式[多反应监测(SRM)模式],9 种含氮消毒副产物的定性和定量离子对如表 1 所示。

表 1 目标化合物的保留时间、定量离子对和定性离子对

Tab. 1 Retention Time and MS Parameters of Target Compounds

物质名称	保留时间/ min	定量离子对 (<i>m/z</i>)	定性离子对 (<i>m/z</i>)	碰撞能/ eV
氯乙腈	13.66	75>40.1	75>48	15, 8
三氯乙腈	14.32	108>47	108>73	20, 25
二氯乙腈	15.09	74>47	82>47	15, 25
一氯硝基甲烷	15.68	49>49	51>51	0, 0
二氯硝基甲烷	16.75	82.9>48	82.9>47	52, 55
溴乙腈	17.37	119>40.1	121>40.1	10, 10
溴氯乙腈	18.97	74>47	154.9>74	15, 8
三氯硝基甲烷	18.62	118.9>84	116.9>82	28, 30
二溴乙腈	21.58	120>92.9	199>117.9	25, 8

2 试验条件与方法数据

2.1 试验条件优化

吹扫捕集条件:本次研究选用 10#捕集阱,为了使得吹扫捕集能够更高效地捕集到卤乙腈和卤代硝基甲烷,对比了 9#捕集阱和 10#捕集阱的捕集效率,根据目标物响应值发现 10#捕集阱对以上物质的捕集效率更高。根据比较解析时间,对比了解析时间为 1.0、1.5、2.0、2.5 min 的目标物响应值,解析时间为 1.0 min 时响应最低,而超过 2.0 min 后峰出现拖尾现象,所以择优得出解析时间为 1.5 min 更合适。对比了 25 mL 吹扫管和 5 mL 吹扫管各个物质的响应值,25 mL 吹扫管确实能够提高仪器的灵敏

度,但是相应的吹扫捕集泡沫过滤器会更加容易被水中其他挥发性有机物堵塞,最终影响试验准确度,故放弃使用 25 mL 吹扫管。

气相色谱进样口条件:根据比较进样口温度为 150、170、200、220 ℃,考虑到温度过低目标物汽化不完全,温度过高卤代硝基甲烷会分解,最终综合考虑设置进样口温度为 170 ℃。

2.2 标准曲线绘制

分别取氯乙腈(500 mg/L)50 μL、溴乙腈(5 000 mg/L)5 μL 加入装有少量甲醇的 5 mL 容量瓶,取一氯硝基甲烷(2 500 mg/L)10 μL 加入装有少量甲醇的 5 mL 容量瓶,二氯硝基甲烷(100 000 mg/L)先取 100 μL 加入 10 mL 装有适量甲醇溶剂的容量瓶定容摇匀,再从中取 25 μL 加入装有少量甲醇的 5 mL 容量瓶中,取卤乙腈混标(溴氯乙腈、三氯乙腈、二氯乙腈、二溴乙腈、三氯硝基甲烷)40 μL 加入装有适量甲醇的 5 mL 容量瓶中最后定容摇匀作为储备液,冷藏使用。储备液为氯乙腈、溴乙腈,质量浓度均为 5 mg/L,卤乙腈混标(溴氯乙腈、三氯乙腈、三氯硝基甲烷、二氯乙腈、二溴乙腈)质量浓度均为 10 mg/L,一氯硝基甲烷、二氯硝基甲烷质量浓度均为 5 mg/L,临用前用纯水稀释成浓度系列:氯乙腈、溴乙腈(0.25、0.50、1.00、2.00、4.00、8.00、10.00 μg/L)。溴氯乙腈、三氯乙腈、二氯乙腈、二溴乙腈、三氯硝基甲烷(0.5、1.0、2.0、4.0、8.0、16.0、20.0 μg/L)。一氯硝基甲烷、二氯硝基甲烷(0.25、0.50、1.00、2.00、4.00、8.00、10.00 μg/L)。9 种含氮消毒副产物的 SRM 模式色谱如图 1 所示。

出峰顺序依次是:氯乙腈、三氯乙腈、二氯乙腈、一氯硝基甲烷、二氯硝基甲烷、溴乙腈、三氯硝基甲烷、溴氯乙腈、二溴乙腈。

2.3 LODs 与测定下限

选取合适浓度配制 7 个平行样品上机测定,完成后对数据进行整理计算出 LODs,并对 LODs 进行合理性判断。根据《环境监测分析方法标准制定技术导则》(HJ 168—2020)^[13]一般要求至少有 50% 的被分析样品浓度在 3~5 倍计算出的 LODs,同时,至少 90% 的被分析物样品浓度在 1~10 倍计算出的 LODs,其余不多于 10% 的被分析物样品浓度不应超过 20 倍计算的 LODs。若满足以上情况则表示用于测定 LODs 的浓度比较合适,否则应该改变浓度,重新分析,最终做出 LODs 和测定下限如表 2 所示。

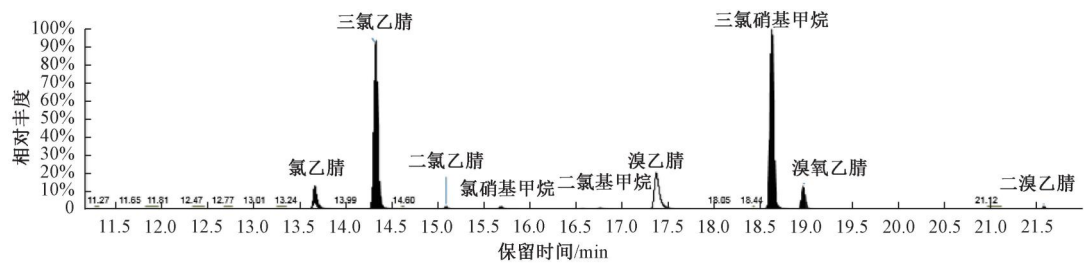


图 1 9 种含氮消毒副产物的 SRM 模式色谱

Fig. 1 SRM Mode Chromatograms of Nine N-DBPs

表 2 LODs 和测定下限测试数据

Tab. 2 Determination Test Data of LODs and Lower Limits

项目	氯乙腈/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	三氯乙腈/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	二氯乙腈/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	溴乙腈/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	溴氯乙腈/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	二溴乙腈/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	一氯硝基 甲烷/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	二氯硝基 甲烷/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	三氯硝基 甲烷/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
	0.25	0.50	0.50	0.25	0.50	0.50	0.20	0.20	0.20
1	0.304	0.464	0.521	0.283	0.393	0.376	0.217	0.184	0.174
2	0.274	0.466	0.489	0.276	0.36	0.311	0.175	0.251	0.220
3	0.336	0.413	0.563	0.335	0.414	0.395	0.217	0.221	0.185
4	0.26	0.343	0.456	0.261	0.337	0.334	0.215	0.218	0.179
5	0.323	0.425	0.559	0.297	0.416	0.421	0.181	0.247	0.175
6	0.259	0.378	0.455	0.255	0.326	0.318	0.21	0.215	0.177
7	0.309	0.425	0.52	0.29	0.385	0.368	0.234	0.203	0.189
平均值	0.295	0.416	0.509	0.285	0.376	0.360	0.207	0.220	0.186
标准偏差	0.031	0.044	0.044	0.027	0.036	0.041	0.021	0.023	0.016
LODs	0.10	0.14	0.14	0.08	0.11	0.13	0.067	0.072	0.051
测定下限	0.39	0.56	0.56	0.33	0.45	0.52	0.30	0.30	0.25

注: T 值为 3.143。

2.4 准确度与精密度

分别取 6 个出厂水,加入不同浓度的卤乙腈、卤代硝基甲烷进行回收率、精密度测试($n=6$),6 种卤

乙腈、3 种卤代硝基甲烷回收率为 70.2%~117.0%,精密度为 2.45%~10.50%(表 3)。

表 3 方法线性范围、工作曲线、相关系数(r)、回收率与精密度

Tab. 3 Linear Ranges, Linear Equations, Correlation Coefficients(r), Average Recoveries and RSDs

化合物	线性范围/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	工作曲线	相关系数 r	加标 0.5 $\mu\text{g}/\text{L}$		加标 1 $\mu\text{g}/\text{L}$	
				回收率	精密度	回收率	精密度
氯乙腈	0.25~10	$y=432\ 400x$	0.998 0	100.0%~114.0%	4.66%	94.0%~108%	4.52%
三氯乙腈	0.5~20	$y=1783\ 000x$	0.999 6	84.1%~91.9%	4.20%	77.7%~90.9%	5.75%
二氯乙腈	0.5~20	$y=468\ 100x$	0.999 7	91.9%~97.3%	2.45%	82.9%~100.0%	5.72%
溴乙腈	0.25~10	$y=143\ 100x$	0.997 0	89.2%~96.4%	2.45%	94.9%~113.0%	6.61%
溴氯乙腈	0.5~20	$y=145\ 700x$	0.997 0	77.6%~88.8%	5.95%	70.7%~78.4%	7.07%
二溴乙腈	0.5~20	$y=28\ 360x$	0.996 0	93.0%~110%	9.78%	70.2%~77.6%	9.54%
一氯硝基甲烷	0.25~8	$y=32\ 270x$	0.990 0	87.5%~117%	10.30%	79.0%~107.0%	10.50%
二氯硝基甲烷	0.25~8	$y=26\ 470x+21\ 930$	0.994 0	92.0%~108%	8.91%	100.0%~117.0%	5.61%
三氯硝基甲烷	0.5~16	$y=633\ 500x$	0.995 0	87.0%~110%	8.69%	94.0%~105.0%	5.04%

2.5 水样检测

采用该方法对市区内 45 个出厂、管网水和 10 个原水进行检测,样品分多次采样检测,其中在出厂水和管网水中均检测出二氯乙腈、溴氯乙腈,管网水的 SRM 模式色谱如图 2 所示。结合检测数据和各个水厂的消毒方式发现,水厂采用次氯酸钠消毒和液氯消毒比采用二氧化氯消毒更容易检出二氯乙腈和溴氯乙腈,具体检测数据如表 4 所示。出厂水和管网水的二氯乙腈检出率为 65.0%,溴氯乙腈在出

厂水与管网水中检出率为 43.2%,其余另外几种含氮消毒副产物均低于检出限。在原水中均未检出以上消毒副产物,证明原水中并不存在以上物质,由后期工艺引入。管网水和出厂水中二氯乙腈质量浓度为 ND~3.20 $\mu\text{g/L}$,溴氯乙腈质量浓度为 ND~1.62 $\mu\text{g/L}$ 。二氯乙腈与二溴乙腈的浓度低于世界卫生组织的限值;二氯乙腈质量浓度为 20 $\mu\text{g/L}$ 、二溴乙腈质量浓度为 70 $\mu\text{g/L}$,其他物质限值缺少评价标准,具体样品结果如表 5 所示。

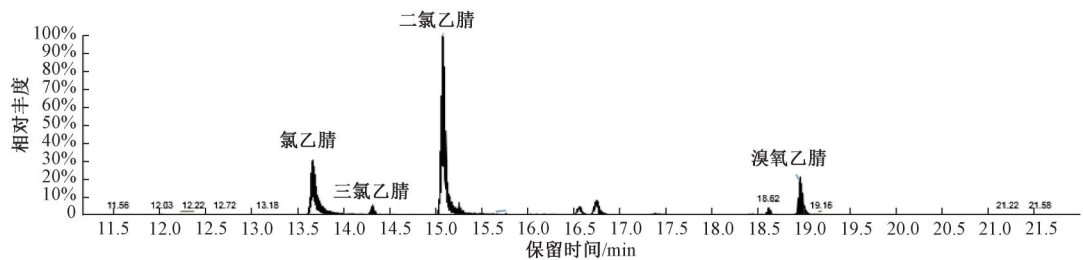


图 2 管网水中 9 种含氮消毒副产物的 SRM 模式色谱

Fig. 2 SRM Mode Chromatograms of Nine N-DBPs in Pipeline Water

表 4 不同消毒方式水厂的出厂水、管网水中二氯乙腈和溴氯乙腈含量

Tab. 4 Content of Dichloroacetonitrile and Bromochloroacetonitrile in Finished Water and Pipeline Water of Different Disinfection Method in WTPs

消毒方式	二氯乙腈/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	溴氯乙腈/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
余氯	ND~3.20	ND~1.62
二氧化氯	ND~0.80	ND

表 5 出厂水、管网水和原水中 9 种含氮消毒副产物的检测结果

Tab. 5 Test Results of Nine N-DBPs in Factory Water, Pipeline Water and Raw Water

组分	出厂水、管网水/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	原水/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
氯乙腈	ND	ND
三氯乙腈	ND	ND
二氯乙腈	ND~3.20	ND
溴乙腈	ND	ND
溴氯乙腈	ND~1.62	ND
二溴乙腈	ND	ND
一氯硝基甲烷	ND	ND
二氯硝基甲烷	ND	ND
三氯硝基甲烷	ND	ND

3 结论

本文建立了吹扫捕集-三重四级杆气质联用对水中 6 种卤乙腈和 3 种卤代硝基甲烷的检测方法,

各个物质线性范围良好, $r>0.990$,LODs 为 0.051~0.14 $\mu\text{g/L}$,定量限为 0.25~0.56 $\mu\text{g/L}$,6 种卤乙腈、3 种卤代硝基甲烷回收率为 70.2%~117.0%,精密密度为 2.45%~10.50%。该方法不使用大量有机溶剂,且二级质谱抗干扰能力强,吹扫捕集具有操作简单、没有复杂前处理等优点。该方法灵敏度高,准确性高,精密密度好,操作简单,无需复杂操作,而且该方法有望实现消毒副产物的大通量检测,后期将引入更多消毒副产物,方便对水中消毒副产物进行大筛查工作,全面监控饮用水中消毒副产物的含量,保证水质安全,指导水厂消毒工艺。

通过对市区多家水厂出厂水、管网水和原水中卤乙腈和卤代硝基甲烷检测发现,原水中无消毒副产物。不同水厂采用不同消毒工艺,含氮消毒副产物二氯乙腈和溴氯乙腈的检出浓度不同,其余 7 种消毒副产物基本没检出。水厂采用次氯酸钠消毒和液氯消毒时,比采用二氧化氯消毒更容易检出二氯乙腈和溴氯乙腈,说明次氯酸钠消毒和液氯消毒时更易产生二氯乙腈和溴氯乙腈。本检测方法可以有效监控生活饮用水中 6 种卤乙腈和 3 种卤代硝基甲烷等消毒副产物含量,为提高饮用水品质,指导优化饮用水净水工艺提供些参考。

参考文献

- [1] 詹未, 韩志宇, 李勇, 等. 吹扫捕集-气相色谱-三重四极杆质谱法同时测定饮用出厂水中 6 种卤乙腈[J]. 色谱, 2021, 39(7): 758-763.
- ZHAN W, HAN Z Y, LI Y, et al. Simultaneous determination of six haloacetonitriles in drinking water by purge trap gas chromatography triple quadrupole mass spectrometry [J]. Chromatography, 2021, 39 (7) : 758-763.
- [2] World Health Organization. Guidelines for drinking water quality [M]. 4th ed. Geneva: Word Health Organization, 2017.
- [3] 于洋, 韦霄, 张志勇. 饮用水中卤乙腈的形成和毒性研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2014, 31(8): 741-745.
- YU Y, WEI X, ZHANG Z Y. Research progress on the formation and toxicity of haloacetonitrile in drinking water [J]. Journal of Environment and Health, 2014, 31(8): 741-745.
- [4] 蔣柱武, 刘欣汝, 武江南, 等. 饮用水中典型含氮消毒副产物的生成与控制研究进展 [J]. 环境工程学报, 2020, 14 (10) : 2595-2603.
- JIANG Z W, LIU X R, WU J N, et al. Research progress on generation and control of typical nitrogen containing disinfection by-products in drinking water [J]. Journal of Environmental engineering, 2020, 14(10) : 2595-2603.
- [5] KERMANI F R, TUGULEA A M, HNATIW J, et al. Application of automated solid-phase microextraction to determine haloacetonitriles, haloketones, and chloropicrin in canadian drinking water [J]. Water Quality Research Journal of Canada, 2013, 48(1): 85.
- [6] CARTER R A A, LIEW D S, WEST N, et al. Simultaneous analysis of haloacetonitriles, haloacetamides and halonitromethanes in chlorinated water by gas chromatography-mass soectrometry [J]. Chemosphere, 2019, 220(4): 314-323.
- [7] 刘晗. 饮用水中卤代硝基甲烷的分布特点、来源及毒性研究进展 [J]. 环境化学, 2022, 41(4): 1182-1192.
- LIU H. Research progress on distribution characteristics, sources and toxicity of halogenated nitromethane in drinking water [J]. Environmental Chemistry, 2022, 41(4): 1182-1192.
- [8] SUN X, CHEN M, WEI D, et al. Research progress of disinfection and disinfection by-products in China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2019, 81: 52-67. DOI: 10.1016/j.jes.2019.02.003.
- [9] DING H H, MENG L P, ZHANG H F, et al. Occurrence, profiling and prioritization of halogenated disinfection by-products in drinking water of China [J]. Environmental Science Processes & Impacts, 2013, 15(7): 1424-1429.
- [10] YE Z X, SHAO K L, HUANG H, et al. Tetracycline antibiotics as precursors of dichloroacetamide and other disinfection byproducts during chlorination and chloramination [J]. Chemosphere, 2020, 270: 128628. DOI: 10.1016/J.chemosphere, 2020.128628.
- [11] 李悦宁, 贺凯, 王婷, 等. 日本消毒副产物及其前体物的现状及研究进展 [J]. 环境化学, 2018, 37(8): 1820-1830.
- LI Y N, HE K, WANG T, et al. Current status and research progress on disinfection by-products and their precursors in Japan [J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(8): 1820-1830.
- [12] CUTHBERTSON A A, LIBERATORE H K, KIMURA S Y, et al. Trace analysis of 61 emerging Br⁻, Cl⁻, and I-DBPs: New methods to achieve part-per-trillion quantification in drinking water [J]. Analytical Chemistry, 2020, 92(4): 3058-3068.
- [13] 中华人民共和国生态环境部. 环境监测分析方法标准制订技术导则: HJ 168—2020 [S]. 北京: 中国环境出版社, 2021.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical guidelines for formulating environmental monitoring and analysis method standards: HJ 168—2020 [S]. Beijing: China Environment Press, 2021.

(上接第 187 页)

- [2] 何纯提. 净水厂排泥水处理 [M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- HE C T. Sludge water treatment in water treatment plant [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [3] 黄鹤俊, 刘万里, 熊宇明, 等. 气浮-臭氧活性炭工艺在珠海唐家水厂升级改造中的应用 [J]. 中国给水排水, 2022, 48 (10) : 12-17.
- HUANG H J, LIU W L, XIONG Y M, et al. Application of air flotation and ozone-activated carbon combined process in the upgrading and reconstruction project of Tangjia water plant in Zhuhai [J]. China Water & Wastewater, 2022, 48 (10) : 12-17.
- [4] 罗丁, 田萌, 董红, 等. 某净水厂排泥水处理工程系统设计 [J]. 给水排水, 2020, 46(3): 103-107.
- LUO D, TIAN M, DONG H, et al. System design of sludge water treatment in a water treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(3): 103-107.
- [5] 魏秉华. 城镇给水 [M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- WEI B H. Urban water supply [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.