DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260516001
引用格式: 郭巧珍, 张晶, 王泽林, 等. 离子色谱-串联四极杆质谱法测定水中 8 种痕量消毒副产物[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(17): 63–74.
Guo Qiaozhen, Zhang Jing, Wang Zelin, et al. Determination of 8 kinds of trace disinfection byproducts in water by ion chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(17): 63–74. (in Chinese with English abstract).

离子色谱-串联四极杆质谱法测定水中 8 种痕量消毒副产物

郭巧珍[1,2], 张 晶[1,2], 王泽林[1], 陈绍占[1], 刘丽萍[1,2*]
(1. 北京市疾病预防控制中心, 北京 100013; 2. 首都医科大学公共卫生学院, 北京 100089)

摘 要: 目的 建立离子色谱-串联四极杆质谱法测定水中 8 种痕量消毒副产物的方法。**方法** 水样过 0.22 μm 亲水滤膜后, 经烷醇基季胺型离子色谱柱分离和抑制器后进入串联四极杆质谱, 采用电喷雾负离子电离、多反应监测模式检测, 内标法定量。**结果** 8 种痕量消毒副产物在各自线性范围内线性关系良好, 相关系数均大于等于 0.9980, 检出限为 0.003~0.100 ng/mL, 定量限为 0.01~0.50 ng/mL。在最优条件下, 不同基质水样(纯水、末梢水、出厂水、水源水)中, 不同浓度水平消毒副产物的平均加标回收率为 85%~120%(二碘乙酸: 60.8%~90.6%), 相对标准偏差为 0.39%~18.80%(二碘乙酸: 1.82%~20.20%)。实验发现使用不同内标定量时, 8 种消毒副产物在纯水中添加回收率能够满足 80%~120%, 但在其他水基质中的添加回收率有偏差, 因此在质谱检测时最佳的内标选择是该化合物的氢、碳同位素内标。利用该方法对北京市部分水样进行了检测, 有 6 种消毒副产物检出, 质量浓度范围 0.10~46.00 ng/mL。**结论** 该方法操作简单, 灵敏度和准确度高, 适用于生活饮用水及水源水中消毒副产物的检测, 为实际监测水样中消毒副产物提供快速简单准确的方法。

关键词: 离子色谱-串联四极杆质谱法; 水; 消毒副产物
中图分类号: TS254.7 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)17–0063–12

Determination of 8 kinds of trace disinfection byproducts in water by ion chromatography-tandem mass spectrometry

GUO Qiao-Zhen[1,2], ZHANG Jing[1,2], WANG Ze-Lin[1], CHEN Shao-Zhan[1], LIU Li-Ping[1,2*]
(1. *Beijing Center for Disease Prevention and Control*, *Beijing* 100013, *China*; 2. *School of Public Health*, *Capital Medical University*, *Beijing* 100089, *China*)

ABSTRACT: Objective To establish a method for the determination of 8 kinds of trace disinfection byproducts in water by ion chromatography-tandem mass spectrometry. **Methods** After passing through a 0.22 μm hydrophilic filter, water samples were separated on an alkanol quaternary ammonium-type ion chromatography column, passed through a suppressor, and then detected by tandem quadrupole mass spectrometer, using electrospray negative ionization in

收稿日期: 2026-05-16
基金项目: 高层次公共卫生技术人才建设项目(学科骨干-03-28)
第一作者: 郭巧珍(1984—), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: qiao037@126.com
***通信作者:** 刘丽萍(1965—), 女, 教授, 主要研究方向为与健康相关的有害物质和营养成份分析。E-mail: llp9312@163.com

multiple reaction monitoring mode, and quantifed by the internal standard method. **Results** The 8 kinds of trace disinfection byproducts showed good linearity within their respective ranges, with correlation coefficients all great than or equal to 0.9980. The limits of detection were 0.003–0.100 ng/mL, and the limits of quantitation were 0.01–0.50 ng/mL. Under the optimized conditions, the average spiked recoveries of disinfection byproducts at different concentration levels in various matrix water samples (pure water, finished/tap water, source water and distributed/end-point water) ranged from 85% to 120% (diiodoacetic acid: 60.8%–90.6%), with relative standard deviations of 0.39%–18.80% (iodoacetic acid: 1.82%–20.20%). It was found that when different internal standards were used for quantification, the spiked recoveries of 8 kinds of disinfection byproducts in pure water met the criterion of 80%–120%, but deviations were observed in other water matrices. Therefore, the optimal internal standard for accurate detection was the homologous isotope-labeled internal standard of the compound. The method was applied to analysis real samples in Beijing, and 6 kinds of disinfection byproducts were detected, with the mass concentrations ranging from 0.10 to 46.00 ng/mL. **Conclusion** The method is simple, sensitive and accurate, and is suitable for the determination of disinfection byproducts in drinking water and source water, providing a rapid, simple and accurate approach for practical monitoring of disinfection byproducts in water samples.

KEY WORDS: ion chromatography-tandem mass spectrometry; water; disinfection byproducts

0 引 言

饮用水消毒是给水工艺的最后环节，是保障饮用水安全的重要途径。目前饮用水常用的消毒方法有氯消毒(氯、氯胺)、二氧化氯消毒、臭氧消毒、紫外线消毒以及多种方法的联合使用。由于水体中含有不同的天然有机物(natural organic matter, NOM)，溴离子(Br^-)，碘离子(I^-)等，使得消毒过程中产生不同的消毒副产物(disinfection byproducts, DBPs)[1]。迄今为止饮用水中 DBPs 的报道有 800 余种。很多 DBPs 已被证实具有“三致”毒性和生殖毒性[2–4]。鉴于此，DBPs 一直是供水安全中关注的热点问题之一[5]。世界卫生组织(World Health Organization, WHO)已对相关危害 DBPs 作出了详尽的分类。不同国家均对饮用水中 DBPs 的种类和限量进行规定，关注的重点为三卤甲烷类、卤乙酸类、溴酸盐等物质，其限量标准见表 1。我国饮用水中 DBPs 的监测均按照 GB 5749—2022 进行。文献[6]表明某市政出厂水中卤乙酸的检出率大于 45%，K 市卤乙酸的监测评估结果表明应重视长期暴露于饮用水中 DBPs 物卤乙酸引起的潜在健康风险[7]。上海市水源水和出厂水中 DBPs 评估结果显示卤乙酸和卤乙腈类 DBPs 的水平总致癌风险值超过美国环保署(Environmental Protection Agency, EPA)定义的低风险水平，应引起重视[8]。做好常规监测的同时关注新 DBPs[9]并扩充其检测方法，评价其安全性是研究饮用水安全的必要环节。

研究表明碘代 DBPs 的毒性比相应的氯化 DBPs 毒性更大[10]。碘乙酸是饮用水消毒过程中产生的一类 DBPs，包含一碘乙酸(monoiodoacetic acid, MIAA)、二碘乙酸(diiodoacetic acid, DIAA)、三碘乙酸(triiodoacetic acid, TIAA)等多种化合物，TIAA 不稳定。碘乙酸可诱导 NIH/3T3 细胞发生恶性转化，形成肿瘤，体外细胞试验表明碘乙酸具有潜在致癌性[11]。文献[12]表明，某地区出厂水中检测到碘乙酸质量浓度为几十纳克每升，而新颁布的 GB 5750—2023《生活饮用水标准检验方法》中并没有碘乙酸的测定方法，据文献调查和实际应用需求，有必要建立含碘乙酸等多种卤乙酸同时测定的方法，为监测碘乙酸提供方法依据。

表 1 国内外检测水中部分 DBPs 的标准方法

Table 1 Standard method for detection of some DBPs in water at home and abroad

国内外标准	卤乙酸类/(mg/L)	溴酸盐/(mg/L)
GB 5749—2022《生活饮用水卫生标准》	二氯乙酸(dichloroacetic acid, DCAA) 0.05 三氯乙酸(trichloroacetic acid, TCAA) 0.1	0.01 使用臭氧时测定
CJ 94—2005《建设部行业标准—饮用净水水质标准》和 CJ/T 206—2005《城市供水水质标准》	0.06 (DCAA 和 TCAA 之和)	0.01 使用臭氧消毒时测定
世界卫生组织准则第三版 2005	一氯乙酸(monochloroacetic acid, MCAA) 0.02 DCAA 0.05, TCAA 0.2	0.01
美国环境保护署关于饮用水标准和健康建议	0.06 [MCAA、一溴乙酸(monobromoacetic acid, MBAA)、DCAA、二溴乙酸(dibromoacetic acid, DBAA)和 TCAA 之和]	0.01
欧盟饮用水水质指令(98/83/EC)	/	0.01
加拿大饮水水质指南—2019	0.08 (MCAA、MBAA、DCAA、DBAA 和 TCAA 之和)	0.01
日本饮用水水质标	DCAA 0.03, TCAA 0.03	0.01

注: /表示没有规定限量值。

饮用水中卤乙酸和含氧酸等 DBPs 的检测方法主要有气相色谱法(gas chromatography, GC)[13–15]、毛细管电泳法(capillary electrophoresis, CE)[16]、液相色谱法(liquid chromatography, LC)[17–19]、离子色谱法(ion chromatography, IC)[20–22]。测定卤乙酸最早被国内外标准方法所采纳的是液液萃取衍生气相色谱法, 它的优点是灵敏度高, 仪器检测成本低, 普及率高, 缺点是样品前处理烦琐, 液液萃取-衍生法需要使用大量有机溶剂, 对人和环境均不友好。美国 EPA 检测卤乙酸和溴酸盐的方法有气相色谱-质谱法(GC-mass spectrometry, GC-MS)和离子色谱-质谱法(ion chromatography-mass spectrometry, IC-MS), 我国建设部行业标准 CJ/T141《城镇供水水质标准检验方法》针对卤乙酸类化合物也建立了液相色谱-质谱法(liquid chromatography-mass spectrometry, LC-MS), 虽不需要前处理但其分离的色谱峰不对称。有文献表明 LC 测定时需要结合固相前处理富集, 操作烦琐[23]。IC 在检测阴离子方面具有较强的优势, 但对于低浓度的 DBPs, 如溴酸盐, IC 方法定量限仅为 5 μg/L, 而我国国家标准卫生限值为 10 μg/L, 方法灵敏度无法达到限值 1/10 的要求。离子色谱-串联质谱法(IC-tandem mass spectrometry, IC-MS/MS)具有灵敏度高、准确性好的特点, 已广泛的应用于食品、环境等领域的痕量物质测定中。本研究采用 IC-MS/MS 测定 DBPs, 不仅能快速进行 DPBs 的准确识别, 同时可提高方法灵敏度。

本研究建立了 IC-MS/MS 测定 8 种痕量 DBPs 的方法。水样直接过膜, 采用 IC-MS/MS 进行定性定量检测分析, 通过优化色谱分离条件、质谱参数, 保障目标物的分离效果和检测精度。实验方法可为环境监测、饮用水水质安全评估、供水企业日常质检等大批量样本检测提供方法依据。

1　材料与方法

1.1　仪器与试剂

IC-16 8060 离子色谱-串联四极杆质谱仪(日本 Shimadzu 公司); Dionex IonPac AS19、AS20 阴离子交换色谱柱(250 mm×4 mm, 10 μm)、Dionex IonPac AG19、AG20 保护柱(50 mm×4 mm, 10 μm)(美国赛默飞世尔科技公司); AL204DU-IC 分析天平(精度 0.0001 g, 美国 Mettler Toledo 公司); Vortex gene 漩涡混合仪(美国 Scientific Industries 公司)。

标准物质: MCAA、DCAA、TCAA、DIAA、MBAA(纯度≥99%)、DBAA(纯度≥98%)、MIAA(纯度≥97%)、甲基叔丁基醚中 MCAA-D_3、MIAA-2-^{13}C、TCAA-$^{13}C_2$(质量浓度 100 μg/mL)(天津阿尔塔公司); DCAA-2-^{13}C、MBAA-1-^{13}C(纯度≥99%)、DBAA-1-^{13}C(纯度≥97%)(美国 Sigma-Aldrich 公司); 溴酸盐(以 BrO_3^-计, 纯度≥99%, 中国计量科学研究院); 溴酸盐内标溶液(以 $Br^{18}O_3^-$, 质量浓度 100 μg/mL, 英国 Cambridge isotope laboratories 公司); 乙腈、甲醇(色谱级, 美国 Honeywell 公司); 氢氧化钾(KOH)(分析纯, 美国 Thermo Fisher Scientific 公司); Milli-Q® IQ Element 痕量元素分析专用超纯水仪(德国 Merck KGaA 公司); 0.22 μm 针式过滤器[聚四氟乙烯(亲水性), 赛默飞世尔科技(中国)有限公司]; 水样采自北京各地方的出厂水、水源水、末梢水。

1.2　实验方法

1.2.1　标准溶液及内标配制

取适量固体标准物质, 用甲醇溶解稀释, 分别制备成质量浓度为 1000 μg/mL 的标准储备溶液。取适量单标储备液, 用甲醇配成混合标准中间液(其中 MCAA 质量浓度 100 μg/mL, MBAA 和 TCAA 质量浓度为 20 μg/mL, 其余物质质量浓度为 10 μg/mL), 然后用甲醇稀释混合标准中间液 10、100、1000、10000 倍得到混合标准使用液。取适量的内标储备液, 用甲醇配成混合内标使用液(其中 MCAA-D_3 质量浓度为 5 μg/mL, MBAA-1-^{13}C 和 TCAA-$^{13}C_2$ 质量浓度为 1 μg/mL, 其余物质质量浓度为 0.5 μg/mL)。

1.2.2　样品采集、保存及处理

样品采集应采用螺口密封盖子的棕色玻璃瓶(推荐 250 mL), 样品瓶(含盖)使用超纯水进行冲洗, 玻璃瓶进行烘干, 水样采集后密封置 4 ℃条件下避光保存。一周内完成分析。

取 100 μL 同位素内标使用液加入至 10 mL 水样中, 混匀, 经过 0.22 μm 的水相滤膜过滤后再注入 IC-MS/MS 进行检测。

1.3　仪器工作条件

1.3.1　色谱条件

色谱柱: Dionex IonPac AS19 (250 mm×4 mm, 10 μm)及其保护柱 Dionex IonPac AG19 (50 mm×4 mm, 10 μm); 流速: 0.25 mL/min; 进样量: 100 μL; 柱温: 25 ℃; 流动相: 100 mmol/L KOH (A)。梯度洗脱条件为: 0~5 min, 5% A; 5~15 min, 10% A; 15~17 min, 17% A, 保持至 18 min, 然后回到初始流动相。抑制器电流: 65 mA。抑制器后进质谱前接三通, 加入 0.25 mL/min 乙腈。

1.3.2　质谱条件

离子源为电喷雾电离源(electronspray ionization negative, ESI), 电离模式为负离子模式, 雾化气流量为 3 L/min, 加热气流量为 10 L/min, 接口温度 100 ℃, 脱溶剂温度 160 ℃, 脱溶剂管温度 100 ℃, 加热块温度 100 ℃, 干燥气流量 10 L/min。在多反应监测模式(multiple reaction monitoring, MRM)下进行测定, 每个目标物监测 1~2 个离子通道。各目标

化合物的定性和定量离子参数如表 2 所示。

1.4 线性范围、检出限和定量限

在最优化内标使用的条件下进行回收率及定量分析，MCAA 和 TCAA 的响应低于其他卤乙酸，因此在标准配制中这两种化合物浓度高于其他卤乙酸，对 8 种 DBPs 的系列标准工作溶液进行测定，以化合物定量离子的色谱峰面积与内标峰面积比值为纵坐标(*Y*)，以各组分的质量浓度为横坐标(*X*，ng/mL)绘制标准曲线，计算线性方程和相关系数。以空白样品的 3 倍信噪比确定检出限(limit of detection，LOD)，10 倍信噪比确定定量限(limit of quantitation，LOQ)。

1.5 加标回收率

分别选择纯水、源水、出厂水和末梢水进行加标回收实验，实验各取 10 mL 样品，分别添加 4 个水平的混合标准溶液于基质中，每个浓度水平做 6 次平行。内标选择对应的氘代或 ^{13}C 内标，DIAA 选取 DCAA-1-^{13}C 作为内标计算回收率。

1.6 数据处理

实验数据采集和处理通过岛津 Lab Solutions LCMS 软件完成。制表、绘图采用 Word 2016 和 Excel 2016 软件。

2 结果与分析

2.1 质谱条件优化

8 种痕量 DBPs 的化学性质决定它们在负离子扫描模式下更易离子化。在 ESI⁻模式下，分别对质量浓度为 100 ng/mL 的 8 种痕量 DBPs 标准溶液进行母离子扫描，获得响应最好的[M-H]⁻准分子离子峰。采用自动优化方式对母离子进行子离子扫描、偏差电压和碰撞能量进行优化，选择响应较强的子离子作为定量离子，优化后的质谱条件见表 2。

2.2 色谱条件优化

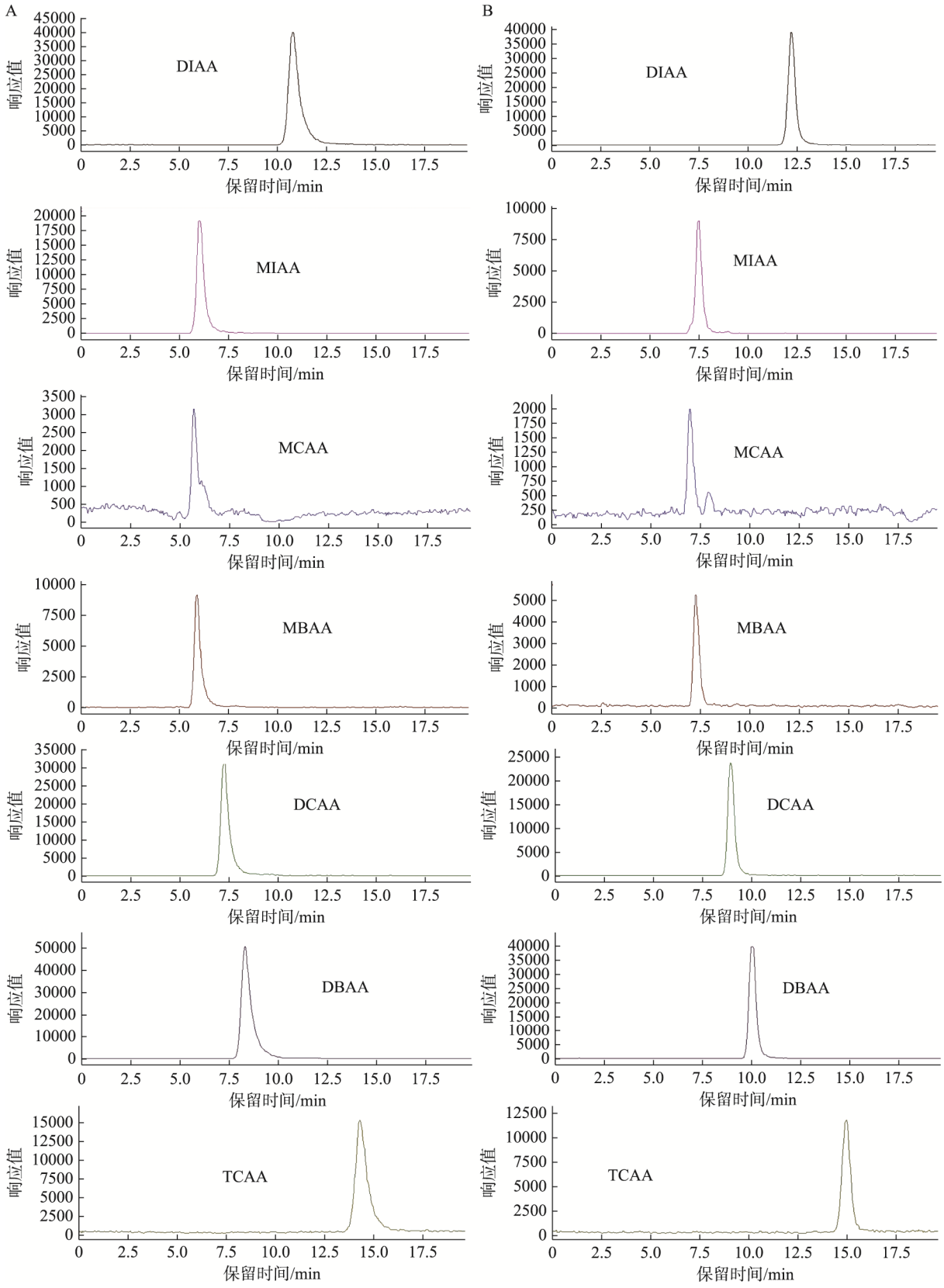
目前已报道的 IC-MS 测定卤乙酸常用的色谱柱有阴离子交换色谱柱 Dionex IonPac AS19、AS20，实验对比了这两款色谱柱，发现这 8 种 DBPs 在 AS19 色谱柱上不仅分离效果好而且响应较高(图 1)，本研究在满足 GB 5749—2022 中卤乙酸含量限值的基础上，选择使用 AS19 离子色谱柱。同时优化了流动相 100 mmol/L KOH (A)的梯度洗脱条件。实验优化了补偿液及其流速对分离效果的影响，发现补偿液乙腈的响应高于甲醇，且流速和色谱分离流速 1:1 的情况下效果最佳，因此补偿液采用 0.25 mL/min 的乙腈。同时优化了抑制器电流，实验结果发现(图 2)，在抑制器电流为 65 mA 时，大多数物质的响应最高，因此确定了 8 种 DBPs 的分离条件，见 1.3.1。

表 2 8 种 DBPs 的质谱参数

Table 2 Mass spectrometry parameters of 8 kinds of DBPs

化合物	母离子(*m*/*z*)	子离子(*m*/*z*)	Q_1 电压/V	碰撞能量/eV	Q_3 电压/V	内标
DIAA	310.6	266.7*	12	13	24	DBAA-1-^{13}C
	310.6	126.8	12	42	17	
MIAA	184.8	126.8*	13	15	10	MIAA-2-^{13}C
MCAA	92.9	35.0*	16	14	29	MCAA-D_3
	95.0	37.0	16	14	29	
DCAA	126.8	82.8*	14	13	10	DCAA-2-^{13}C
	128.8	85.0	14	13	10	
TCAA	162.8	118.8*	19	11	24	TCAA-$^{13}C_2$
	116.8	34.9	20	21	29	
MBAA	136.8	78.9*	10	18	20	MBAA-1-^{13}C
	138.8	80.9	10	18	20	
DBAA	216.7	172.8*	11	13	15	DBAA-1-^{13}C
	214.8	170.9	11	13	15	
BrO_3^-	126.8	110.8*	14	26	15	$Br^{18}O_3^-$
	126.8	112.7	16	23	15	
MIAA-2-^{13}C	185.8	126.8	14	14	10	
MCAA-D_3	94.5	35.0	18	16	30	
DCAA-2-^{13}C	127.8	83.8	13	13	22	
TCAA-$^{13}C_2$	164.8	119.8	19	11	25	
MBAA-1-^{13}C	139.8	80.8	15	16	23	
DBAA-1-^{13}C	217.7	172.8	11	12	15	
$Br^{18}O_3^-$	132.8	114.8	14	26	16	

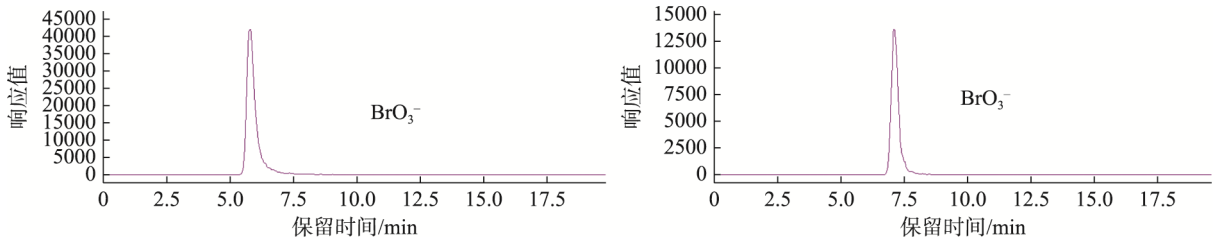
注：*为定量离子标记。



注: A、B 分别为 AS19、AS20 色谱柱分离色谱图。

图 1　两种色谱柱分离 8 种 DBPs 色谱图

Fig.1　Chromatograms of 8 kinds of DBPs separated by 2 kinds of chromatographic columns



注: A、B 分别为 AS19、AS20 色谱柱分离色谱图。

图 1(续) 两种色谱柱分离 8 种 DBPs 色谱图

Fig.1 Chromatograms of 8 kinds ofDBPs separated by 2 kinds of chromatographic columns

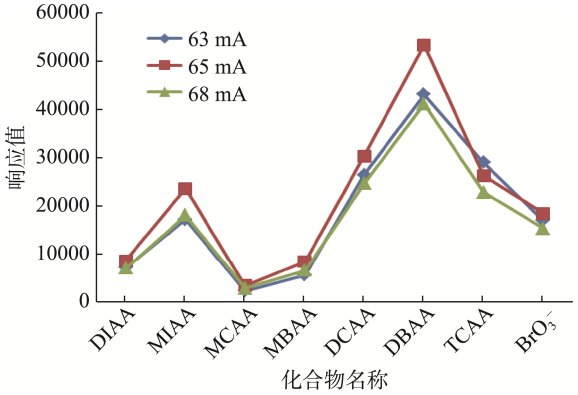


图 2 8 种 DBPs 在不同抑制器电流下的响应

Fig.2 Response of 8 kinds of DBPs under different inhibitor currents

2.3 内标的优化

2.3.1 同族元素内标考察

同族元素内标分为两类: (1)与目标物完全同结构的自身同位素标记内标(C、H 同位素); (2)与目标物母核结构一致、仅卤族取代元素为VIIA 族同族元素的卤族同族替代内标。自身同位素标记内标是所有目标物的最优选择, 其与目标物的理化性质、萃取行为、质谱响应几乎完全一致, 可精准校正复杂水基质的干扰。结果如表 3 所示, MIAA 采用 MIAA-1-^{13}C 为内标时, 0.2~50.0 ng/mL 全质量浓度区间全基质回收率为 86.5%~120%; MBAA 以 MBAA-1-^{13}C 为内标, 0.4~100.0 ng/mL 各水基质回收率为 85.1%~119%; MCAA、DCAA、DBAA、TCAA 采用自身氘代/^{13}C 标记内标时, 全浓度、多水体回收率均稳定在 80%~120%的痕量分析合格范围内, 无显著基质效应影响。

卤族同族替代内标的校正能力随卤族元素原子序数差异增大而显著下降。MIAA 采用同母核、Br 替代 I 的 MBAA-1-^{13}C 为内标时, 纯水回收率 93.0%~101.0%符合要求, 但复杂水体末梢水、出厂水、源水回收率严重偏离; MBAA 采用 I 替代 Br 的 MIAA-1-^{13}C 为内标, 出厂水 0.40 ng/mL 回收率仅 62.5%, 仅高浓度段勉强符合要求; DIAA 无自身同位素内标, 采用 Br 替代 I 的 DBAA-1-^{13}C 为内标时, 仅纯水回收率 93.9%~101.0%合格, 末梢水、出厂水回收率普遍低于 80%, 虽无法完全抵消基质干扰, 但仍优于 DCAA-2-^{13}C 作为内标的回收率, 因此 DIAA 选择 DBAA-1-^{13}C 作为其内标进行定量分析。

2.3.2 同系物替代内标考察

同系物替代内标指与目标物均为卤代乙酸同系物、仅卤代数目存在差异的同位素标记内标, 其校正能力整体劣于同族元素替代内标, 且随结构差异增大内标可替代性越差。卤代乙酸采用同系物替代内标时, 纯水中回收率范围在 80%~120%范围内符合要求, 然而复杂水体回收率严重偏离。MIAA 采用同系物 MCAA-D_3 为内标, 其回收率范围为 35.5%~68.0%; MBAA 采用同系物 MCAA-D_3 为内标, 其回收率范围为 62.2%~89.8%; MCAA 采用同系物 MBAA-1-^{13}C 为内标, 回收率为 98.4%~176%; DCAA 采用同系物 MCAA-D_3 为内标, 复杂水体基质回收率 41.0%~132%; DBAA 采用同系物 DCAA-2-^{13}C 为内标, 回收率为 109%~243%。无一定的规律性。

总之, 自身同位素标记的同族元素内标是卤代乙酸 DBPs 检测的可靠内标选择, 可在全浓度范围、多类型水基质中实现稳定的回收率, 精准校正基质效应; 卤族同族元素替代内标仅能在纯水中实现合格回收率, 复杂水体中低浓度段回收率严重偏离, 仅可作为无自身同位素内标时的次优选择; 同系物替代内标受卤代数目、卤代元素极性差异影响, 复杂水体中回收率偏差较大, 不具备定量分析的可行性。

2.4 线性范围、检出限和定量限

由表4可知, 8种DBPs在各自质量浓度范围内线性良好, 决定系数(r^2)均大于等于 0.9980, LODs 为 0.003~0.100 ng/mL, LOQs 为 0.01~0.50 ng/mL, 满足我国和国际上对水中卤乙酸的限量要求。

2.5 加标回收率

由表 3 可知, 在 4 个加标水平下, 除 DIAA 外, 其余 7 种 DBPs 在这 4 种水基质中的平均回收率为 85.1%~120%之间, 相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)为 0.55%~18.8%; DIAA 在纯水中添加回收率为 93.9%~101%, RSDs 为 2.88%~10.30%, 而在末梢水、出厂水和源水中添加回收率为 60.8%~92.0%, RSDs 为 1.82%~20.2%。实验结

果整体表明本方法准确度和精密度良好, 适用于分析末梢水、出厂水、水源水中 DBPs 类化合物。

2.6　实际样品分析

应用本研究方法对北京市不同区域的不同基质水样进行测定, 有 6 种 DBPs 检出。具体为 MIAA 和 DIAA 未检出, MCAA、MBAA、DCAA、DBAA、TCAA 和 BrO_3^-均有检测到, 但其浓度未超过 GB 5749—2022 生活饮用水限量标准。测定结果见表 5, 阳性样品谱图见图 3。

表 3　DBPs 在使用不同内标、不同水基质中的添加回收率结果

Table 3　Recoveries results of DBPs in different water matrices using different inter standards

化合物	所用内标	添加质量浓度/(ng/mL)	纯水		末梢水		出厂水		源水	
			平均实测质量浓度/(ng/mL)	回收率/%	平均实测质量浓度/(ng/mL)	回收率/%	平均实测质量浓度/(ng/mL)	回收率/%	平均实测质量浓度/(ng/mL)	回收率/%
MIAA	MIAA-1-^{13}C	0.2	0.239	120.0	0.224	112.0	0.230	115.0	0.228	114.0
		2.0	2.010	100.0	2.050	102.0	2.000	100.0	2.170	108.0
		10.0	9.770	97.7	10.800	108.0	10.800	108.0	10.700	107.0
		50.0	43.200	86.5	46.500	93.0	45.300	90.7	45.700	91.5
	MBAA-1-^{13}C	0.2	0.186	93.0	0.099	45.0	0.080	40.0	0.138	68.9
		2.0	2.020	101.0	0.890	44.5	0.928	46.5	0.848	42.4
		10.0	9.690	96.9	4.790	47.9	4.310	43.2	4.430	44.3
		50.0	49.300	98.6	28.900	57.8	26.400	52.6	22.500	44.9
	MCAA-D_3	0.2	0.191	95.5	0.100	50.0	0.091	45.5	0.099	49.9
		2.0	2.060	103.0	0.931	46.5	0.872	43.5	0.989	49.0
		10.0	9.890	98.9	4.900	49.0	3.550	35.5	5.810	58.1
		50.0	65.100	120.0	29.500	58.6	19.100	38.2	34.000	68.0
MBAA	MBAA-1-^{13}C	0.4	0.340	85.1	0.379	94.8	1.240	119.0	0.432	108.0
		4.0	4.300	107.0	4.020	100.0	4.970	105.0	4.170	104.0
		20.0	20.100	100.0	20.500	102.0	22.200	107.0	20.600	102.0
		100.0	92.200	92.2	89.300	89.3	93.300	92.6	93.900	93.9
	MIAA-1-^{13}C	0.4	0.375	93.8	0.367	91.9	1.050	62.5	0.375	93.8
		4.0	3.920	97.9	3.850	96.3	3.870	76.8	3.210	80.1
		20.0	18.600	93.2	17.400	87.0	18.400	87.9	17.400	86.9
		100.0	102.000	102.0	86.300	86.3	92.900	92.1	93.700	93.7
	MCAA-D_3	0.4	0.358	89.4	0.261	65.2	0.656	64.9	0.311	77.7
		4.0	3.790	94.8	2.490	62.2	2.790	59.7	2.980	74.5
		20.0	18.500	92.3	12.500	62.4	13.300	64.6	15.900	79.7
		100.0	109.00	109.0	66.000	66.0	67.400	67.0	89.800	89.8
	DBAA-1-^{13}C	0.4	0.324	80.9	0.224	56.1	0.539	67.2	0.202	50.6
		4.0	3.770	94.1	3.340	83.4	2.470	55.0	3.090	77.3
		20.0	17.200	86.1	14.400	71.9	10.000	48.6	14.900	74.5
		100.0	82.800	82.8	47.300	47.3	33.300	33.3	60.600	60.6
MCAA	MCAA-D_3	2.0	1.960	98.2	1.610	80.5	1.770	88.5	1.730	86.5
		20.0	20.700	103.0	22.200	111.0	21.400	107.0	20.200	101.0
		100.0	97.200	97.2	108.000	108.0	114.000	114.0	103.000	103.0
		500.0	484.000	96.8	526.000	105.0	554.000	110.0	521.000	104.0
	MIAA-1-^{13}C	2.0	1.890	94.5	2.180	109.0	2.110	106.0	1.890	94.5
		20.0	18.200	91.1	30.100	151.0	22.100	111.0	18.400	91.8
		100.0	86.300	86.3	118.000	118.0	119.000	119.0	79.700	79.7
		500.0	459.000	91.9	512.000	102.0	508.000	102.0	404.000	80.7
	MBAA-1-^{13}C	2.0	2.140	107.0	2.020	101.0	2.880	143.0	2.150	107.0
		20.0	20.900	105.0	31.400	157.0	35.400	176.0	26.400	132.0
		100.0	96.400	96.4	131.000	131.0	173.000	173.0	122.000	122.0
		500.0	410.000	82.0	642.000	128.0	827.000	165.0	492.000	98.4

表 3(续)

化合物	所用内标	添加质量浓度/(ng/mL)	纯水		末梢水		出厂水		源水	
			平均实测质量浓度/(ng/mL)	回收率/%	平均实测质量浓度/(ng/mL)	回收率/%	平均实测质量浓度/(ng/mL)	回收率/%	平均实测质量浓度/(ng/mL)	回收率/%
	DCAA-2-^{13}C	2.0	2.130	106.0	2.120	105.0	2.210	110.0	1.750	87.7
		20.0	18.900	94.6	34.100	170.0	27.900	139.0	21.400	106.0
		100.0	84.200	84.2	134.000	134.0	115.000	115.0	99.700	99.7
		500.0	360.000	82.0	460.000	92.0	409.000	81.9	373.000	74.7
	TCAA-$^{13}C_2$	2.0	2.020	101.0	1.890	94.5	2.120	106.0	1.750	87.7
		20.0	16.800	84.0	24.700	124.0	25.400	127.0	21.300	107.0
		100.0	80.600	80.6	101.000	101.0	112.000	112.0	108.000	108.0
		500.0	431.000	86.2	397.000	79.4	389.000	77.8	405.000	81.0
DCAA	DCAA-2-^{13}C	0.2	0.196	98.2	0.976	106.0	6.630	103.0	0.469	98.7
		2.0	2.060	102.0	2.740	98.7	8.250	91.2	2.380	105.0
		10.0	9.680	96.8	11.700	109.0	17.000	105.0	10.800	104.0
		50.0	47.100	94.3	48.500	95.5	51.200	89.6	48.400	96.4
	DBAA-1-^{13}C	0.2	0.170	85.0	0.661	56.0	4.640	30.8	0.310	88.8
		2.0	2.130	106.0	2.290	86.8	5.550	48.7	2.190	103.0
		10.0	9.830	98.3	10.200	96.5	12.000	73.7	9.820	96.9
		50.0	41.300	82.6	37.300	73.5	36.300	63.5	42.700	85.2
	MCAA-D_3	0.2	0.183	91.3	0.555	41.0	4.570	64.9	0.335	77.8
		2.0	2.150	107.0	1.720	62.1	6.030	66.9	2.110	96.4
		10.0	10.600	106.0	8.930	84.6	15.900	112.0	10.600	104.0
		50.0	62.800	116.0	52.500	104.0	71.000	132.0	63.700	127.0
	TCAA-$^{13}C_2$	0.2	0.171	85.5	0.462	61.0	3.420	49.5	0.274	75.0
		2.0	2.140	107.0	1.930	79.4	5.030	85.6	2.010	94.5
		10.0	9.760	97.6	9.330	89.9	14.700	114.0	9.750	96.3
		50.0	49.900	99.7	50.800	101.0	61.200	116.0	54.600	109.0
DBAA	DBAA-1-^{13}C	0.2	0.183	91.7	0.206	103.0	3.210	112.0	0.208	104.0
		2.0	1.990	99.4	2.050	102.0	4.990	100.0	2.160	107.0
		10.0	9.740	97.4	10.500	104.0	13.500	104.0	10.400	104.0
		50.0	45.100	90.3	45.800	91.7	47.800	89.5	48.200	96.4
	DCAA-2-^{13}C	0.2	0.181	90.3	0.260	130.0	4.480	243.0	0.242	121.0
		2.0	1.920	96.0	2.470	123.0	7.370	168.0	2.340	116.0
		10.0	9.680	96.8	12.000	120.0	19.200	151.0	11.400	114.0
		50.0	52.000	104.0	59.800	119.0	67.700	127.0	54.700	109.0
	MBAA-1-^{13}C	0.2	0.176	87.8	0.236	118.0	5.380	101.0	0.280	140.0
		2.0	2.070	104.0	2.490	124.0	9.090	195.0	2.810	140.0
		10.0	10.800	108.0	14.200	142.0	28.100	229.0	13.700	136.0
		50.0	59.200	118.0	81.500	163.0	129.000	249.0	70.500	141.0
DIAA	DBAA-1-^{13}C	0.2	0.201	100.0	0.152	75.9	0.130	64.8	0.181	90.6
		2.0	2.040	101.0	1.610	80.3	1.280	64.3	1.220	60.8
		10.0	9.980	99.7	7.080	70.8	7.090	70.8	7.710	77.1
		50.0	46.900	93.9	40.200	80.4	34.800	69.6	38.800	77.6
	DCAA-2-^{13}C	0.2	0.173	86.5	0.174	87.2	0.110	54.9	0.167	83.5
		2.0	1.780	88.8	1.660	83.2	0.922	46.1	1.110	55.3
		10.0	9.090	90.9	7.680	76.8	5.480	54.8	5.870	58.7
		50.0	51.410	103.0	37.400	74.8	29.800	59.6	29.500	59.0
	MIAA-1-^{13}C	0.2	0.258	129.0	0.151	75.3	0.120	59.8	0.160	79.9
		2.0	2.080	104.0	1.840	92.0	1.090	54.5	1.190	59.5
		10.0	10.600	106.0	8.920	89.2	6.760	67.6	6.820	68.2

表 3(续)

化合物	所用内标	添加质量浓度/(ng/mL)	纯水		末梢水		出厂水		源水	
			平均实测质量浓度/(ng/mL)	回收率/%	平均实测质量浓度/(ng/mL)	回收率/%	平均实测质量浓度/(ng/mL)	回收率/%	平均实测质量浓度/(ng/mL)	回收率/%
		50.0	56.100	112.0	46.700	93.4	30.800	61.6	32.400	64.8
TCAA	TCAA-$^{13}C_2$	0.4	0.356	89.1	0.979	91.9	6.770	116.0	0.448	112.0
		4.0	3.810	95.1	5.150	113.0	10.700	111.0	4.130	103.0
		20.0	20.100	100.0	23.500	114.0	28.300	109.0	21.100	105.0
		100.0	101.000	101.0	108.000	107.0	106.000	100.0	105.000	105.0
	MCAA-D_3	0.4	0.310	77.5	0.722	64.9	5.470	65.1	0.310	77.6
		4.0	3.740	93.5	4.320	96.5	8.420	80.3	3.720	93.0
		20.0	17.800	89.0	20.300	99.2	22.300	85.5	16.200	81.0
		100.0	89.800	89.8	98.500	98.5	96.600	91.4	88.300	88.3
	DCAA-2-^{13}C	0.4	0.350	87.5	0.827	77.5	5.970	77.5	0.380	95.1
		4.0	3.660	91.5	5.040	113.0	9.170	87.8	3.920	98.0
		20.0	20.400	102.0	21.500	105.0	24.300	93.2	17.300	86.5
		100.0	99.600	99.6	102.000	101.0	101.000	95.3	100.000	100.0

注: 末梢水中 MBAA-1-^{13}C、MIAA-1-^{13}C、MCAA-D_3、DBAA-1-^{13}C 本底值分别为 0.762、0.798、0.396、0.271 ng/mL; 纯水中 DCAA-2-^{13}C、DBAA-1-^{13}C、MCAA-D_3、TCAA-$^{13}C_2$ 本底值分别为 0.764、0.549、0.473、0.340 ng/mL; 末梢水中 DCAA-2-^{13}C、DBAA-1-^{13}C、MCAA-D_3、TCAA-$^{13}C_2$ 本底值分别为 6.43、4.78、4.69、3.32 ng/mL; 出厂水中 DCAA-2-^{13}C、DBAA-1-^{13}C、MCAA-D_3、TCAA-$^{13}C_2$ 本底值分别为 0.272、0.132、0.179、0.124 ng/mL; 纯水中 TCAA-$^{13}C_2$、MCAA-D_3、DCAA-2-^{13}C 本底值分别为 0.611、0.462、0.517 ng/mL; 末梢水中 TCAA-$^{13}C_2$、MCAA-D_3、DCAA-2-^{13}C 本底值分别为 6.30、5.21、5.66 ng/mL; 其他物质在本底中未检出。

表 4　8 种 DBPs 的线性范围及 LOQs 和 LODs

Table 4　Linear range, LOQs and LODs of 8 kinds of DBPs

化合物	线性范围/(ng/mL)	标准曲线	r^2	LOQs/(ng/mL)	LODs/(ng/mL)
MCAA	0.50~500.00	Y=1.2380X+0.0025	0.9998	0.50	0.100
MBAA	0.04~100.00	Y=0.7817X+0.0100	0.9993	0.04	0.010
MIAA	0.01~50.00	Y=1.024X+0.0080	0.9980	0.01	0.003
DCAA	0.02~50.00	Y=0.8840X+0.0050	0.9987	0.02	0.005
DBAA	0.01~50.00	Y=1.0900X+0.0087	0.9990	0.01	0.003
DIAA	0.01~50.00	Y=2.2750X–0.0010	0.9987	0.01	0.003
TCAA	0.40~100.00	Y=1.2080X+0.0057	0.9985	0.40	0.100
BrO_3^-	0.01~50.00	Y=1.3640X+0.0120	0.9996	0.01	0.003

表 5　实际水样的测定结果(ng/mL)

Table 5　Test results of the real water samples (ng/mL)

样品	DIAA	MIAA	MCAA	MBAA	DCAA	DBAA	TCAA	BrO_3^-
水源水-1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.05	ND
水源水-2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.08	ND
水源水-3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.03	ND
管网水-1	ND	ND	ND	ND	9.77	0.22	11.60	0.70
管网水-2	ND	ND	ND	ND	1.91	0.71	3.05	0.28
管网水-3	ND	ND	ND	ND	1.49	0.58	3.03	0.29
出厂水-1	ND	ND	ND	ND	13.40	0.34	12.10	0.48
出厂水-2	ND	ND	ND	ND	5.84	3.05	6.56	0.12
出厂水-3	ND	ND	ND	ND	6.24	ND	6.15	0.74
S 区-末梢水 Y1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
S 区-末梢水 Y2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
S 区-末梢水 Y3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
P 区-末梢水 Y1	ND	ND	2.55	0.16	12.40	0.13	6.38	0.34
P 区-末梢水 Y2	ND	ND	11.30	0.21	46.00	ND	20.80	2.08
P 区-末梢水 Y3	ND	ND	1.99	0.10	11.60	1.54	5.20	0.22
T 区-末梢水 Y1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
T 区-末梢水 Y2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
T 区-末梢水 Y3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

注: ND 代表未检出。

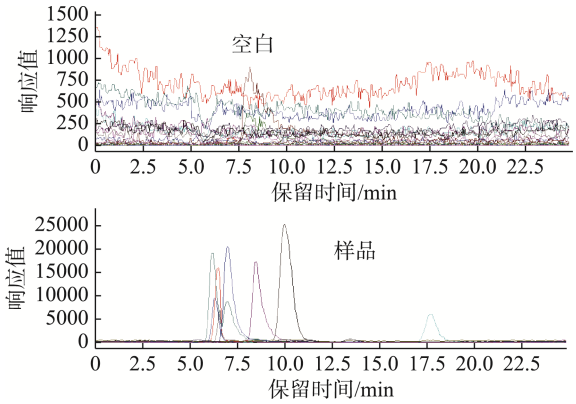


图 3 过程空白和实际样品谱图

Fig.3 Chromatography of process blank and the real sample

3 与其他方法对比

本研究在优化 TCAA 质谱信息时发现, TCAA 容易源内裂解, 形成脱羧基的母离子[M-COOH]⁻: 116.8, 因此, 实验采用 162.8 和 116.8 作为 TCAA 的两对母离子。在实验过程中可根据具体情况优化最佳的母离子、子离子及碰撞能量。在卤乙酸的内标选择上, 若选择两个氘代氢或两个 $^{13}C_2$, 很容易与卤离子的同位素峰形成干扰, 且同族元素内标和同系物内标选择均会带来一定的误差, 实验过程中内标的选择对样品的定量结果有很大的影响, 正如本次实验结果所对比, 因此在选择内标的过程中需要充分考虑干扰。实验中发现DIAA在纯水中添加回收率能达到80%~120%, 但是在出厂水中添加回收率较末梢水中低, 可能是基质中含有其他离子干扰 DIAA 测定而使得回收率降低, 因此, DIAA 在末梢水和出厂水中的准确定量有待于进一步研究。

将本方法和已发表的分析生活饮用水的相关文献方法进行比对, 结果见表 6。本方法一方面增加了碘乙酸的测定, 同时扩大了检测基质, 可应用于出厂水、末梢水和水源水中卤乙酸和卤氧酸的测定。相比表中文献, 该方法灵敏度提高了 2~30 倍, 能够满足 GB 5749—2022 对相关项目的监测要求。

表 6 DBPs 不同测定方法的比较

Table 6 Comparison of different determination methods of DBPs

基质	目标物	检测方法	LOQs/(ng/mL)	相对回收率/%	RSD/%	参考文献
生活饮用水	DCAA、TCAA、高氯酸盐、氯酸盐、BrO_3^-、	0.22 μm 微孔滤膜过滤-液相色谱-串联四极杆质谱法(liquid chromatography-tandem mass spectrometry, HPLC-MS/MS)	3.00~12.00	89.4~105	1.0~5.4	[18]
生活饮用水	12 种氯乙酸和 4 种卤氧酸盐	HPLC-MS/MS	0.20~3.00	89.4~110	1.2~8.9	[19]
生活饮用水	5 种 DBPs	IC-MS		84.7~103	0.2~5.8	[24]
生活污水、工业废水、地下水、地表水	氯酸盐、亚氯酸盐、BrO_3^-、DCAA 和 TCAA	针式微孔滤膜过滤; Ba/Ag/H 固相萃取柱-离子色谱电导检测器	2.00~9.00	70.0~126	0.8~1.1	[25]
生活饮用水	高氯酸盐、亚氯酸盐、氯酸盐、BrO_3^-、DCAA 和 TCAA	微孔滤膜过滤-离子色谱电导检测器	1.10~6.00	94.0~101	0.37~2.01	[26]
生活饮用水	9 种卤乙酸和 2 种卤氧化物	IC-MS/MS	0.02~0.12	85.9~110	0.4~6.6	[27]
生活饮用水	5 种 DBPs	IC-MS/MS	0.05~1.00	71.1~115	1.1~6.5	[28]
生活饮用水	5 种 DBPs	碳酸盐体系 IC	10~400	85.0~108	0~11.1	[29]
生活饮用水	9 种 DBPs	IC	0.10~2.00	80.8~111	0.13~7.2	[30]
纯水、自来水、出厂水、水源水	7 种卤乙酸和 1 种溴酸盐	0.22 μm 微孔滤膜过滤-IC-MS/MS	0.01~0.50	85.0~120	0.39~18.8	本研究

4 结 论

本研究建立的 IC-MS/MS 同时测定生活饮用水及水源水、纯水、末梢水中 8 种痕量 DBPs (MCAA, DCAA, TCAA, MBAA, DBAA, MIAA, DIAA 和 BrO_3^-)的方法简单便捷, 灵敏度高, 采用同位素内标法定量目标化合物减少基质干扰, 且方法学可靠, 快速便捷, 易于操作, 满足国家标准检测要求, 为水中准确监测痕量 DBPs 提供技术支持。研究显示 DIAA 在水源水、出厂水和末梢水中回收率为 60.8%~90.6%, 虽没有达到 80%~100%, 但稳定性可靠, 仍可进行定量检测。后期可进一步采用 LC-MS/MS 检测这 8 种 DBPs, 考察与 IC-MS/MS 的一致性, 另一方面该方法可扩展更多的卤代酸和阴离子的同时检测方法以提高实验室工作效率。

参考文献

[1] Sharma N, Zeng Chao, Eaton A, et al. Co-occurrence of bromine and iodine species in US drinking water sources that can impact disinfection byproduct formation [J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(47): 18563–18574.

[2] Dong Feilong, Zhu Jiani, Li Jinzhe, et al. The occurrence, formation and transformation of disinfection byproducts in the water distribution system: a review [J]. Science of the Total Environment, 2023, 867: 161497.

[3] Qadafi M, Rosmalina R T, Pitoi M M, et al. Chlorination disinfection by-products in Southeast Asia: a review on potential precursor, formation, toxicity assessment, and removal technologies [J]. Chemosphere, 2023, 316: 137817.

[4] Ye Jing, Ni Jiawei, Tian Fuxiang, et al. Toxicity effects of disinfection byproduct chloroacetic acid to *Microcystis aeruginosa*: cytotoxicity and mechanisms [J]. Journal of Environmental Sciences, 2023, 129: 229–239.

[5] Chowdhury S. Comparing risk of disinfection byproducts in drinking water under variable scenarios of seawater intrusion [J]. Science of the Total Environment, 2023, 870: 161772.

[6] 王冰, 张永, 韩志宇, 等. 2018—2020 年某市饮用水中消毒副产物监测结果及风险评估[J]. 实用预防医学, 2022, 29(2): 169–173.
Wang Bing, Zhang Yong, Han Zhiyu, et al. Surveillance results and risk assessment of disinfection by-products in drinking water in a city, 2018—2020 [J]. Practical Preventive Medicine, 2022, 29(2): 169–173.

[7] 栗旸, 李建云, 张旭辉, 等. 云南省 K 市水厂出厂水中卤乙酸的健康风险评估[J]. 实用预防医学, 2021, 28(5): 577–580.
Li Yang, Li Jianyun, Zhang Xuhui, et al. Health risk assessment of haloacetic acids in water from water treatment plants in City K, Yunnan Province [J]. Practical Preventive Medicine, 2021, 28(5): 577–580.

[8] 李永珍, 何更生, 詹铭, 等. 上海市水源水及出厂水中卤甲烷、卤乙酸、卤乙腈类消毒副产物含量及健康风险评估[J]. 环境与职业医学, 2021, 38(5): 460–466.
Li Yongzhen, He Gengsheng, Zhan Ming, et al. Levels and health risk assessments of halomethanes, haloacetic acids, and haloacetonitriles disinfection by-products in source and finished water in Shanghai [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2021, 38(5): 460–466.

[9] Allen J M, Plewa M J, Wagner E D, et al. Drivers of disinfection byproduct cytotoxicity in U. S. drinking water: should other DBPs be considered for regulation? [J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(1): 392–402.

[10] 杨启泽. 珠三角某市饮用水碘代消毒副产物的生成机制探究[D]. 深圳: 深圳大学, 2020: 29.
Yang Qize. Study on the formation mechanism of iodine disinfection by-products in drinking water in a city in the Pearl River Delta [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2020: 29.

[11] Richardson S D, Fasano F, Ellington J J, et al. Occurrence and mammalian cell toxicity of iodinated disinfection byproducts in drinking water [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(22): 8330–8338.

[12] 赵好, 查河霞, 嵇童童. 生活饮用水中碘乙酸等 7 种消毒副产物的离子色谱测定法[J]. 环境与健康杂志, 2024, 41(9): 816–819.
Zhao Hao, Zha Hexia, Ji Tongtong. Determination of 7 kinds of disinfection by-products, iodoacetic acid, etc. , in drinking water by ion chromatography [J]. Journal of Environment and Health, 2024, 41(9): 816–819.

[13] 王红, 沈伟健, 张峰, 等. 正化学源-气相色谱-质谱法测定生活饮用水中卤乙酸化合物[J]. 中国食品卫生杂志, 2023, 35(3): 333–338.
Wang Hong, Shen Weijian, Zhang Feng, et al. Determination of haloacetic acids in drinking water with positive chemical ionization-gas chromatography-mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2023, 35(3): 333–338.

[14] Chaves R S, Rodrigues J E, Santos M M, et al. Development of multi-residue gas chromatography coupled with mass spectrometry methodologies for the measurement of 15 chemically different disinfection by-products (DBPs) of emerging concern in drinking water from two different Portuguese water treatment plants [J]. Analytical Methods, 2022, 14(47): 4967–4976.

[15] 杨静, 刘超, 郑宏玲. 顶空-气相色谱法测定 5 种挥发性消毒副产物在饮用水加热前后的含量变化[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(1): 256–260.
Yang Jing, Liu Chao, Zheng Hongling. Determination of 5 kinds of volatile disinfection byproducts in drinking water before and after boiling by headspace-gas chromatography [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(1): 256–260.

[16] 王菀,邱军,赵国华.饮用水中溴酸盐检测方法研究进展[J].食品科学, 2009, 30(23): 460-464.
Wang Yu, Qiu Jun, Zhao Guohua. Review on determination of bromate in drinking water [J]. Food Science, 2009, 30(23): 460-464.

[17] Chen Yining, Zhu Zhou, Qiu Hongmei, et al. Occurrence of perchlorate, *Chlorate* and bromate in drinking water in Shenzhen and related human exposure risks [J]. Environmental Advances, 2022, 8: 100205.

[18] 钱秀荣, 黎俊宏, 陈志永, 等. 生活饮用水 5 种消毒副产物高效液相色谱串联质谱检测法的优化及与离子色谱法的比较[J]. 中国消毒学杂志, 2025, 42(8): 573–576, 581.
Qian Xiurong, Li Junhong, Chen Zhiyong, et al. Optimising of HPLC-MS/MS method for five disinfection by-products detection in domestic drinking water and comparation with ion chromatography [J]. Chinese Journal of Disinfection, 2025, 42(8): 573–576, 581.

[19] 李伟, 李凤, 苏芳, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法测定生活饮用水中 12 种卤乙酸和 4 种卤氧酸盐[J]. 现代疾病预防控制, 2025, 36(12): 916–921, 931.
Li Wei, Li Feng, Su Fang, et al. Determination of 12 haloacetic acids and 4 halogenated acid salts in drinking water by ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Modern Disease Control and Prevention, 2025, 36(12): 916–921, 931.

[20] Yang Yang, Ma Wei, Chen Baiyang, et al. Determining haloacetic acids in drinking water by one-pump column-switching ion chromatography: an online and cost-effective tool for matrix removal and sample enrichment [J]. Microchemical Journal, 2022, 183: 107997.

[21] 许珉. 离子色谱法同时测定生活饮用水中五种常见消毒副产物和草甘膦[J]. 环境卫生学杂志, 2022, 12(4): 298–303.
Xu Min. Simultaneous determination five common disinfection by-products and glyphosate in drinking water using ion chromatography [J]. Journal of Environmental Hygiene, 2022, 12(4): 298–303.

[22] 赵莹, 尹丹阳. 离子色谱法同时测定饮用水中 5 种消毒副产物的不确定度评定[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(9): 3021–3028.

Zhao Ying, Yin Danyang. Uncertainty evaluation for the simultaneous determination of 5 kinds of disinfection by-products in drinking water by ion chromatography [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(9): 3021–3028.

[23] 刘艳, 饶竹, 路国慧, 等. 饮用水中 9 种卤乙酸的超高效液相色谱法测定[J]. 分析测试学报, 2011, 30(3): 248–253.
Liu Yan, Rao Zhu, Lu Guohui, et al. Determination of haloacetic acids in drinking water using ultra performance liquid chromatography coupled with solid-phase extraction [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2011, 30(3): 248–253.

[24] 孙晓娜, 李洁, 陈雪, 等. 离子色谱法同时检测生活饮用水中 5 种消毒副产物[J]. 安徽化工, 2025, 51(2): 163–166.
Sun Xiaona, Li Jie, Chen Xue, et al. Simultaneous detection of five disinfection byproducts in drinking water by ion chromatography [J]. Anhui Chemical Industry, 2025, 51(2): 163–166.

[25] 马月, 姚兰, 严源, 等. 离子色谱法同时测定 4 种水质类型样品中 5 种常见消毒副产物[J]. 分析仪器, 2025(3): 62–66.
Ma Yue, Yao Lan, Yan Yuan, et al. Simultaneous determination of five common disinfection by-products in four water types by ion chromatography [J]. Analytical Instrumentation, 2025(3): 62–66.

[26] 魏静, 董德泉. 离子色谱法同时测定饮用水中高氯酸盐和 5 种消毒副产物[J]. 化学分析计量, 2025, 34(1): 106–111.
Wei Jing, Dong Dequan. Simultaneous determination of perchlorate and five disinfection by-products in drinking water by ion chromatography [J]. Chemical Analysis and Meterage, 2025, 34(1): 106–111.

[27] 吴艳, 黄丹瑜, 杨昕蕊, 等. 离子色谱-串联质谱法同时测定生活饮用水中 11 种消毒副产物的含量[J]. 理化检验-化学分册, 2026, 62(2): 221–227.
Wu Yan, Huang Danyu, Yang Xinrui, et al. Simultaneous determination of 11 disinfection by-products in drinking water by ion chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part B (Chemical Analysis), 2026, 62(2): 221–227.

[28] 徐广洲, 韩进, 张美, 等. 离子色谱-串联质谱法测定生活饮用水中草甘膦、氨甲基膦酸、高氯酸盐和 5 种消毒副产物的含量[J]. 理化检验-化学分册, 2025, 61(8): 980–986.
Xu Guangzhou, Han Jin, Zhang Mei, et al. Determination of glyphosate, aminomethylphosphonic acid, perchlorate and 5 disinfection by-products in drinking water by ion chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part B (Chemical Analysis)), 2025, 61(8): 980–986.

[29] 林娴, 陈凤松, 朱吉东, 等. 碳酸盐体系离子色谱法测定水中消毒副产物与高氯酸盐[J]. 云南化工, 2026, 53(5): 70–73.
Lin Xian, Chen Fengsong, Zhu Jidong, et al. Determination of disinfection by-products and perchlorate in water by ion chromatography with a carbonate system [J]. Yunnan Chemical Technology, 2026, 53(5): 70–73.

[30] 雷凯, 王建国, 王芳, 等. 离子色谱法同时测定生活饮用水中丙烯酸、草甘膦和 9 种消毒副产物[J]. 化学分析计量, 2026, 35(5): 88–96.
Lei Kai, Wang Jianguo, Wang Fang, et al. Simultaneous determination of acrylic acid, glyphosate and nine disinfection by-products in drinking water by ion chromatography [J]. Chemical Analysis and Meterage, 2026, 35(5): 88–96.

(责任编辑: 蔡世佳 安香玉)