

气相色谱法和离子色谱法测定生活饮用水中二氯乙酸、三氯乙酸的方法比对

张媛媛, 韩晓鸥, 陈曦, 李延升, 曹忠波*

(辽宁省疾病预防控制中心, 沈阳 110005)

摘要: 目的 优化并比较气相色谱法(gas chromatography)和离子色谱法(ion chromatography)测定生活饮用水中二氯乙酸、三氯乙酸。**方法** 对气相色谱法和离子色谱法测定二氯乙酸、三氯乙酸的方法进行优化和改进, 对灵敏度、精密度、回收率等指标作比对, 并对中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所研制的标准物质进行定值, 对测定结果进行统计学分析。**结果** 2种方法均能较好地对生活饮用水中二氯乙酸、三氯乙酸进行定性和定量分析, 气相色谱法的检出限分别为1、0.5 $\mu\text{g/L}$, 平均回收率范围为96.0%~99.1%, 相对标准偏差为0.66%~2.42%。离子色谱法的检出限分别为10、20 $\mu\text{g/L}$, 平均回收率范围为97.2%~99.8%, 相对标准偏差为0.59%~1.90%。对标准物质定值结果无显著性差异。**结论** 气相色谱法检出限低, 离子色谱法前处理简单, 2种方法各有优缺点, 可根据实际情况选择适宜的分析方法。

关键词: 二氯乙酸; 三氯乙酸; 气相色谱法; 离子色谱法; 生活饮用水; 方法比对

Comparison on determination of dichloroacetic acid and trichloroacetic acid in drinking water by gas chromatography and ion chromatography

ZHANG Yuan-Yuan, HAN Xiao-Ou, CHEN Xi, LI Yan-Sheng, CAO Zhong-Bo*

(Liaoning Provincial Center for Disease Control and Prevention, Shenyang 110005, China)

ABSTRACT: Objective To optimize and compare the determination of dichloroacetic acid and trichloroacetic acid in drinking water by gas chromatography (GC) and ion chromatography (IC). **Methods** The methods of determination of dichloroacetic acid and trichloroacetic acid by gas chromatography and ion chromatography were optimized and improved. The sensitivity, precision, recovery and other indicators were compared. The standard substance developed by the Chinese center for disease control and prevention of environmental and health related product safety institute was determined and the results were analyzed statistically. **Results** Both methods could be used for qualitative and quantitative analysis of dichloroacetic acid and trichloroacetic acid in drinking water. The limits of detection of dichloroacetic acid and trichloroacetic acid were 1 $\mu\text{g/L}$ and 0.5 $\mu\text{g/L}$, respectively, the average recoveries were 96.0%~99.1%, and the relative standard deviations were 0.66%~2.42% by GC. The limits of detection of dichloroacetic acid and trichloroacetic acid were 10 $\mu\text{g/L}$ and 20 $\mu\text{g/L}$, respectively, the average recoveries were 97.2%~99.8%, and the relative standard deviations were 0.59%~1.90% by IC. There was no significant difference in the determination results of standard substance. **Conclusion** The limit of detection of gas chromatography is lower and the pretreatment methods of ion

*通讯作者: 曹忠波, 副主任技师, 主要研究方向为生活饮用水水质分析。E-mail: yuanyuande_1984@163.com

*Corresponding author: CAO Zhong-Bo, Associate Chief Technician, Center for Disease Control and Prevention of Liaoning Province, Shenyang 110005, China. E-mail: yuanyuande_1984@163.com

chromatography is simpler. Because the 2 methods have their own advantages and disadvantages, the appropriate analysis method can be selected according to the actual situation.

KEY WORDS: dichloroacetic acid; trichloroacetic acid; gas chromatography; ion chromatography; drinking water; method comparison

1 引言

二氯乙酸(dichloroacetic acid, DCAA)、三氯乙酸(trichloroacetic acid, TCAA)是生活饮用水非常规项目毒理指标,是饮用水在氯化消毒过程中,水中有机物与氯作用产生的消毒副产物^[1,2],因其具有潜在的致癌、致畸、致突变风险,引起人们广泛关注^[3,4]。我国《生活饮用水卫生标准》规定水中二氯乙酸、三氯乙酸的最高允许浓度分别为0.05 mg/L和0.1 mg/L^[5]。GB/T 5750.10-2006《生活饮用水标准检验方法》^[6]中规定了二氯乙酸、三氯乙酸的检测方法为液液萃取衍生气相色谱法^[7,8],即水中待测物用甲基叔丁基醚萃取,在50℃硫酸-甲醇衍生120 min,衍生产物采用DB-5毛细管色谱柱程序升温分离,电子捕获检测器检测,内标法定量。由于二氯乙酸、三氯乙酸是有机酸,极性较强,近年来用离子色谱法检测饮用水中二氯乙酸、三氯乙酸的研究较多^[9,10],该方法前处理简单,准确度高,已有很多实验室将其作为非标方法使用^[11,12]。本研究通过参加中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所于2018年组织开展的标准物质定值工作,分别采用气相色谱法和离子色谱法检测二氯乙酸、三氯乙酸,对2种方法进行优化和改进,对灵敏度、精密性、回收率等指标作比对,对标准物质定值结果进行统计学分析。以期为今后开展生活饮用水106项水质全分析提供了技术支持,同时建议将离子色谱法纳入二氯乙酸、三氯乙酸《生活饮用水标准检验方法》。

2 材料与方 法

2.1 气相色谱法(gas chromatography, GC)

2.1.1 仪器与试剂

Trace 1300 气相色谱仪(配 ECD 检测器,美国 Thermo 公司);HWS26 型电子恒温水浴锅(上海一恒科技有限公司);Lab dancer S25 涡旋器(德国 IKA 公司)。

二氯乙酸(1000 μg/mL, SB05-238-2008, 农业部环境保护科研监测所);三氯乙酸(1000 μg/mL, SB05-239-2008, 农业部环境保护科研监测所);1, 2-二溴丙烷(97%, 美国 ALDRICH 公司);甲基叔丁基醚、甲醇(色谱纯, 美国 Fisher 公司);浓硫酸(优级纯, 北京化工厂);碳酸氢钠(优级纯, 天津科密欧化学试剂有限公司);无水硫酸钠、无水硫酸铜(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)。

2.1.2 标准溶液的配制

分别准确吸取 DCAA、TCAA 标准物质各 0.50 mL 于预先装有 5 mL 甲基叔丁基醚的 10 mL 容量瓶中,用甲基叔丁基醚定容,摇匀,配成浓度为 50 μg/mL 标准中间液。再分别准确吸取 2.0 mL DCAA、1.0 mL TCAA 标准中间液于预先装有 5 mL 甲基叔丁基醚的 10 mL 容量瓶中,用甲基叔丁基醚定容,摇匀,配成 DCAA 浓度为 10 μg/mL, TCAA 浓度为 5 μg/mL 的混合标准使用液。分别取混合标准使用液 10、25、50、100、200、400 μL 至装有 25 mL 纯水的 50 mL 离心管中,配制成浓度为 DCAA: 4、10、20、40、80、160 μg/L, TCAA 为 2、5、10、20、40、80 μg/L 的标准系列。按样品处理方法进行萃取、衍生、分析。以标准物质峰面积与内标物质峰面积比值为纵坐标, DCAA、TCAA 浓度为横坐标,绘制工作曲线。

2.1.3 内标萃取液的配制

取 1, 2-二溴丙烷(1,2-DBP)7.8 μL, 相对密度 1.9323 g/mL, 滴入预先盛有约 20 mL 甲基叔丁基醚的 50 mL 容量瓶中,振摇,用甲基叔丁基醚定容,配成浓度为 300 mg/L 内标储备液。再取内标储备液 50 μL, 滴入预先盛有约 20 mL 甲基叔丁基醚的 50 mL 容量瓶中,振摇,用甲基叔丁基醚定容,配成浓度为 300 μg/L 内标萃取液。

2.1.4 色谱条件

色谱柱:安捷伦 DB-5 毛细管色谱柱(30 m×0.32 mm, 0.25 μm);载气:氮气;流速 1.0 mL/min;进样口温度 200℃;柱温:35℃保持 7 min, 5℃/min 升温至 80℃, 30℃/min 升温至 250℃, 保持 1 min;进样方式:分流 10:1;检测器温度:300℃, 进样体积:1 μL。

2.1.5 样品前处理

用单标移液管移取 1.00 mL 标准物质定值样品溶液,于 50 mL 容量瓶中用水定容,此溶液为稀释 50 倍。再取该稀释溶液 1.00 mL 于 25 mL 容量瓶中用水定容,此溶液为定值原液稀释 1250 倍。将该溶液倒入 25 mL 离心管中,加入 2 mL 浓硫酸,摇匀,加入 4 g 无水硫酸钠,1.0 g 无水硫酸铜,摇匀。加入 5.0 mL 内标萃取液,涡旋萃取 3 min,静止 5 min。取上层清液 3.0 mL 至 10 mL 比色管中,加新配 10%硫酸-甲醇溶液 1.0 mL,在 50℃恒温衍生 90 min。取出冷却后加入 4.00 mL 饱和碳酸氢钠溶液,振摇,注意放气,静止 5 min 后,取上层清液供 GC 分析用。

2.2 离子色谱法(ion chromatography, IC)

2.2.1 仪器与试剂

DX-120 型, 离子色谱仪(配 Chromleon6.8 色谱工作站和电导检测器, 美国 Thermo 公司); MILLI-Q 超纯水系统(美国 Millipore 公司)。

标准物质: 二氯乙酸(99.0%, 百灵威科技有限公司); 三氯乙酸(99.0%, 日本 TCI 公司); 碳酸氢钠、碳酸钠(优级纯, 天津科密欧化学试剂有限公司)。

2.2.2 标准溶液的配制

分别称取 0.1 g(精确至 0.1 mg)DCAA、TCAA 标准物质溶解于纯水中并稀释至 100 mL, 配制成 1000 mg/L 的标准储备溶液。分别准确移取 0.5 mL DCAA、0.3 mL TCAA 标准储备液, 用纯水定容至 10.0 mL, 配成 DCAA 浓度为 50 mg/L, TCAA 浓度为 30 mg/L 的混合标准中间液。再取 2.5 mL 混合标准中间液于 25.0 mL 容量瓶中定容, 配成 DCAA 浓度为 5 mg/L, TCAA 浓度为 3 mg/L 的混合标准使用液。再分别吸取 0.5、1.0、2.0、4.0、5.0 mL 混合标准使用液于 10 mL 容量瓶中定容, 此工作曲线的浓度为 DCAA: 0.25、0.5、1.0、2.0、2.5、5 mg/L, TCAA 为 0.15、0.3、0.6、1.2、1.5、3 mg/L。

2.2.3 色谱条件

阴离子分离柱: Dionex Ionpac AS23(4 mm×250 mm); 阴离子保护柱 AG23(4 mm×50 mm); 抑制器 ASRSII-Ultra 300, 4 mm; 淋洗液: Na₂CO₃/NaHCO₃ 3.5 mmol/L/1.0 mmol/L。流速 1.0 mL/min; 进样体积 500 μL; 柱温 26 °C; 电导检测; 峰面积定量。

2.2.4 样品前处理

准确移取 1.00 mL 标准物质定值样品于 100 mL 容量瓶中水定容, 此溶液为 100 倍稀释。直接上机测定。

3 结果与分析

3.1 方法的改进和优化

3.1.1 气相色谱法的改进和优化

(1) 衍生温度的影响

本实验考察了衍生温度和时间对酯化衍生反应的影响, 结果见图 1。由于萃取剂甲基叔丁基醚沸点为 55.2 °C, 当水浴温度过高时, 甲基叔丁基醚损失严重, 因此, 衍生温度选择 30、40、50 °C, 衍生时间选择 30、60、90、120 min。结果表明, DCAA 衍生温度在 30 °C、衍生时间 30 min 时衍生效率能够达到 80%以上, 随着温度 and 时间的增加, 衍生效率略有增加, 在 50 °C、90 min 时达到 95%以上。TCAA 衍生温度在 30 °C、衍生时间 30 min 时衍生效率只为 30%左右, 随着温度和时间的增加, 衍生效率大幅提升, 在 50 °C、90 min 时达到 95%以上。这是由于三氯乙酸分子含 3 个氯原子, 空间位阻大, 导致甲醇分子上的氧进攻羧基碳原子受阻, 较难取代羧基上的羟基, 酯化速率慢, 需要提高温度和增加时间使三氯乙酸酯化反应完成。因此本实验选择衍生温度为 50 °C, 衍生时间为 90 min。在不影响衍生效率的前提下, 缩短衍生时间, 提高工作效率。

(2) 气相色谱条件优化

本研究设定初始柱温分别为 35、40、50、60 °C, 分别以升温速率 5 °C/min 和 10 °C/min 考察待测组分的分离效果, 结果表明, 内标 1,2-DBP 的后面有干扰峰, 初始温度越高, 升温速率越快, 待测组分出峰越快, 峰与峰间的间距越小, 内标 1,2-DBP 和干扰峰不能完全分开, 甚至重合, 导致内标 1,2-DBP 积分不正确, 定值结果的偏离。因此, 本实验选择初始温度 35 °C, 以 5 °C/min 的升温速率, 从而保证 DCAA、TCAA、内标 1,2-DBP 和干扰峰能够达到基线分离, 完全分开。色谱图见图 2。

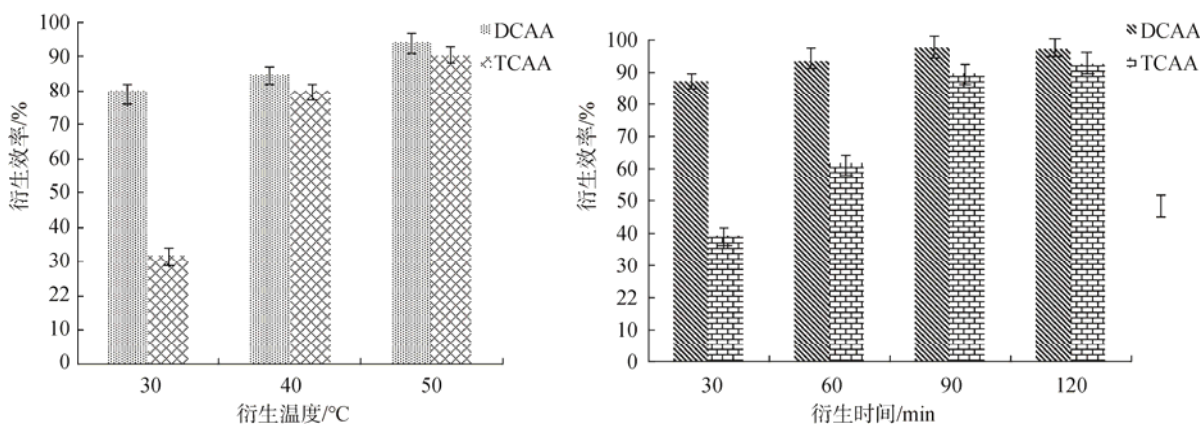
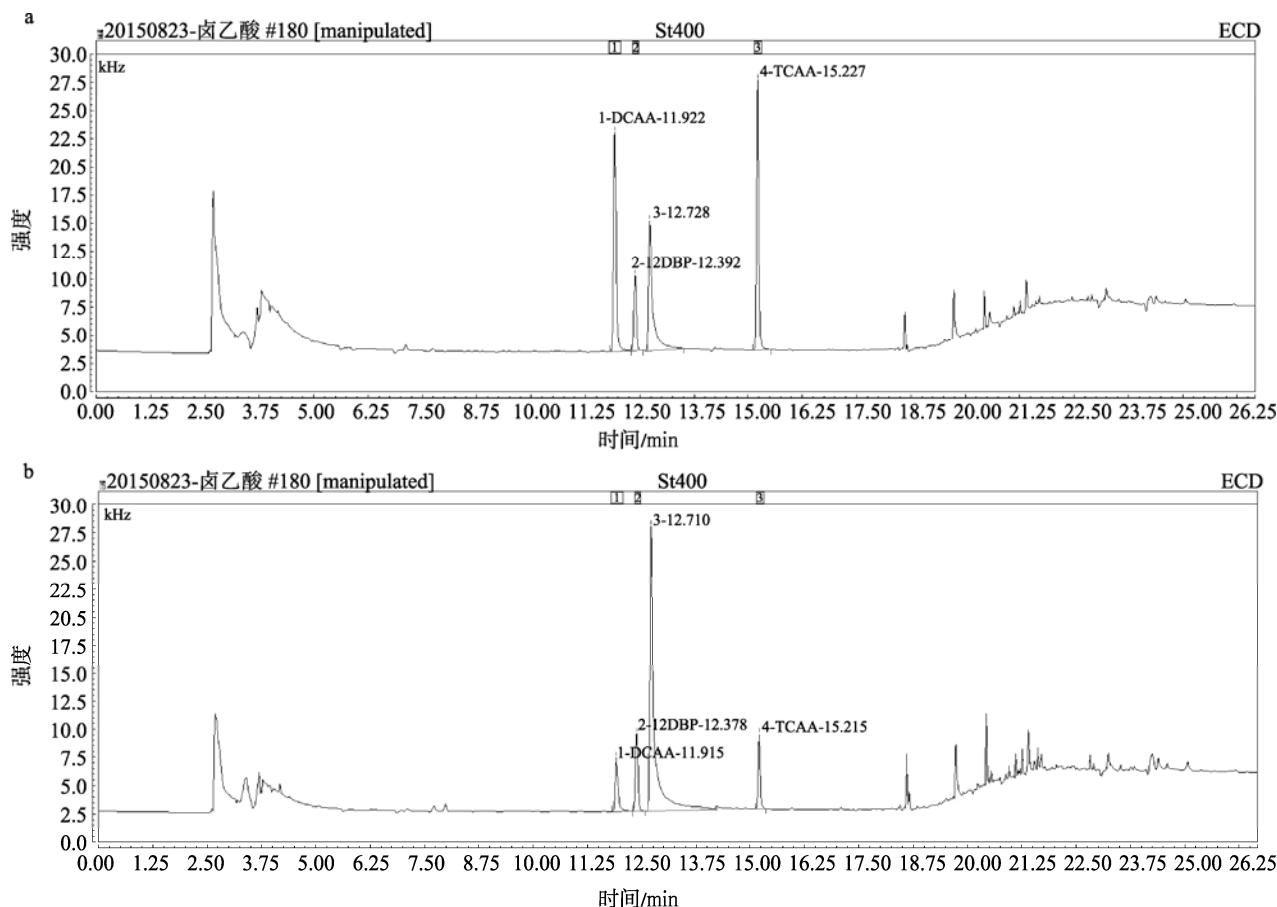


图1 衍生温度和衍生时间对 DCAA、TCAA 衍生效率的影响(n=6)

Fig.1 Influence of derivative temperature and time on derivative efficiency of DCAA and TCAA(n=6)



注: a: 标准溶液气相色谱图; b: 定值样品的气相色谱图。

图2 DCAA、TCAA 标准溶液和定值样品的气相色谱图

Fig.2 Gas chromatogram of DCAA, TCAA standard solution and fixed value sample

3.1.2 离子色谱法条件的优化

本研究选用了 $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{NaHCO}_3$ 溶液作为淋洗液,通过对不同浓度的 $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{NaHCO}_3$ 溶液考察,发现较低浓度的 $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{NaHCO}_3$,对 DCAA 和 TCAA 保留时间延长,峰形拖尾;较高浓度的 $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{NaHCO}_3$,对 DCAA 和 TCAA 保留时间缩短,但 DCAA、TCAA 与水中阴离子干扰物不能完全分离。因此,本实验选择淋洗液为 3.5 mmol/L/ 1.0 mmol/L $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{NaHCO}_3$,该浓度 DCAA、TCAA 及水中阴离子干扰物分离效果好,分离度 >1.5 ,且样品的保留时间缩短,使整个分析过程在 20 min 内完成。同时,本实验选择在 40、26、15 °C 柱温条件下,考察柱温对 DCAA 和 TCAA 分离效果的影响。结果表明,在 26 °C 时,可以得到较好的峰型,较高的分离度和较短的保留时间。按照该色谱条件进行实验,DCAA、TCAA 标准色谱图和定值样品色谱图见图 3。

3.2 线性范围与检出限

由表 1 可知,2 种方法在线性范围内均具有良好的线性关系,相关系数均大于 0.9995,满足样品的分析要求。以 3 倍信噪比计算检出限,气相色谱法的检出限分别为 1、0.5 $\mu\text{g/L}$,离子色谱法的检出限分别为 10、20 $\mu\text{g/L}$ 气相色

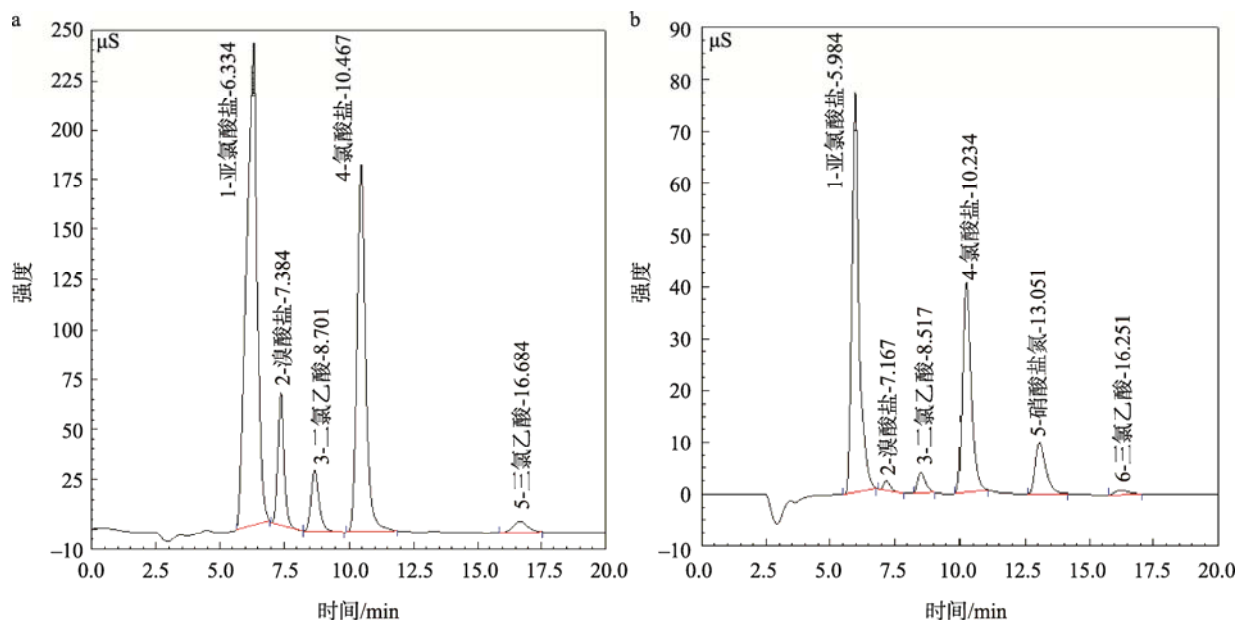
谱法比离子色谱法检出限低,离子色谱法比气相色谱法线性范围宽。

3.3 回收率及精密度

向空白水样中标,进行 3 个浓度水平的空白加标实验,每个浓度水平进行 6 次平行测试。取平均浓度为测定浓度,计算精密度、回收率。结果由表 2 可知,气相色谱法的平均回收率范围为 96.0%~99.1%,相对标准偏差为 0.66%~2.42%。离子色谱法的平均回收率范围为 97.2%~99.8%,相对标准偏差为 0.59%~1.90%。

3.4 标准物质定值的测定

采用优化的气相色谱法、离子色谱法对中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所研制的标准物质进行定值测定,测定 6 次,用 t 检验统计学分析,对 2 种方法的测定结果进行计算,结果见表 3。选择 $\alpha=5\%$ 显著性水平,总自由度 $f=n_1+n_2-2$ 时,查 t 分布双侧临界值表, $t(0.05, 10)=2.23$,因为 $t_{\text{DCAA}}=0.69$, $t_{\text{TCAA}}=0.56$,均小于 2.23,说明采用 2 种方法测定水样中的 DCAA、TCAA 不存在显著性差异,具有良好的一致性。标准物质定值测定结果平均值与 5 家共同定值实验室相比相对标准偏差小于 5%。



注: a: 标准溶液离子色谱图; b: 定值样品的离子色谱图。

图3 DCAA、TCAA 标准溶液和定值样品的离子色谱图

Fig. 3 Ion chromatogram of DCAA, TCAA standard solution and fixed value sample

表1 气相色谱法和离子色谱法测定 DCAA、TCAA 的工作曲线和检出限

Table 1 Linearity parameters and detection limits of DCAA, TCAA

	目标化合物	线性范围/($\mu\text{g/L}$)	线性方程	相关系数(r)	检出限/($\mu\text{g/L}$)
GC	DCAA	4~160	$Y=1.9881X$	0.9998	1
	TCAA	2~80	$Y=4.3714X$	0.9999	0.5
IC	DCAA	250~5000	$Y=3.871X-0.687$	0.9999	10
	TCAA	150~3000	$Y=2.191X-0.067$	0.9998	20

表2 气相色谱法和离子色谱法测定 DCAA、TCAA 的回收率和精密度($n=6$)

Table 2 Recoveries and relative standard deviations of DCAA and TCAA ($n=6$)

化合物	气相色谱法				离子色谱法			
	加标浓度/($\mu\text{g/L}$)	测定值/($\mu\text{g/L}$)	回收率(%), $n=6$	精密度 RSD(%), $n=6$	加标浓度/(mg/L)	测定值/(mg/L)	回收率(%), $n=6$	精密度 RSD(%), $n=6$
DCAA	10	9.72	97.2	2.42	0.5	0.486	97.2	1.72
	40	38.93	97.3	0.98	2.0	1.964	98.2	0.98
	100	99.05	99.1	0.66	5.0	4.970	99.4	0.59
TCAA	5	4.80	96.0	1.90	0.3	0.292	97.3	1.90
	20	19.39	96.9	1.69	1.2	1.182	98.5	1.69
	50	49.54	99.1	0.97	3.0	2.994	99.8	0.97

表3 标准物质定值样品的测定结果

Table 3 determination results of standard substance fixed value samples

序号	DCAA 含量/(mg/L)		TCAA 含量/(mg/L)	
	GC 法(X_1)	IC 法(X_2)	GC 法(X_1)	IC 法(X_2)
1	51.6	51.7	24.7	24.9
2	51.2	51.3	24.8	24.2
3	51.3	51.4	24.8	24.2
4	51.4	51.8	24.5	25.0
5	51.5	51.8	25.0	24.9
6	52.0	51.7	24.6	24.2
平均值	51.5	51.6	24.7	24.6

$$\text{合并标准偏差 } S = \sqrt{\frac{\sum(X_{1i} - \bar{X}_1)^2 + \sum(X_{2i} - \bar{X}_2)^2}{(n_1 - 1) + (n_2 - 1)}} \quad S_{\text{DCAA}}=0.25$$

$$S_{\text{TCAA}}=0.31$$

$$t: t = \frac{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|}{S} \sqrt{\frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2}} \quad t_{\text{DCAA}}=0.69 \quad t_{\text{TCAA}}=0.56$$

4 结论

本文对气相色谱法、离子色谱法测定生活饮用水中的DCAA、TCAA进行改进和优化,并做方法比对。实验表明两种方法均能较好地定性定量分析。气相色谱法检出限较低,适合低含量水样的测定,且干扰少,更适合较脏复杂水样的检测。离子色谱法前处理简单,不需要衍生,避免了衍生化试剂对人体带来的潜在危害,并且比气相色谱法线性范围宽,精密度高,当水样干净且DCAA浓度大于10 μg/L, TCAA大于20 μg/L时离子色谱法更具优势。综上所述,2种方法各有优缺点,在实际工作中可选择适宜的分析方法。

参考文献

- [1] 区良益, 王晓, 钟宁, 等. 饮用水氯和氯胺消毒过程中卤乙酸生成势的比较[J]. 中国给水排水, 2018, 34(5): 15-20.
Ou LY, Wang X, Zhong N, et al. Comparison of haloacetic acids formation potential between chlorine and chloramine disinfection process in drinking water treatment [J]. China Water Wastewater, 2018, 34(5): 15-20.
- [2] 董淑江, 高蓉. 饮用水消毒副产物研究进展[J]. 职业与健康, 2014, 30(24): 3628-3631.
Dong SJ, Gao R. Research progress on drinking water disinfection by-products [J]. Occup Health, 2014, 30(24): 3628-3631.
- [3] 范丽莎, 李玄, 于衍真. 水库水氯化消毒副产物毒性研究[J]. 环境保护科学, 2014, 40(5): 24-27.
Fan LS, Li X, Yu YZ. Genotoxicity study of the by-products generated from reservoir water chlorination [J]. Environ Protect Sci, 2014, 40(5): 24-27.
- [4] 向红, 吕锡武. 饮用水中卤乙酸致癌性的研究进展[J]. 安全与环境工

程, 2008, 15(1): 17-21.

Xiang H, Lv XW. Study advance on carcinogenicity of haloacetic acids in drinking water [J]. Saf Environ Eng, 2008, 15(1): 17-21.

- [5] GB 5749-2006 生活饮用水卫生标准[S].
GB 5749-2006 Standard for drinking water quality [S].
- [6] GB/T 5750.10-2006 生活饮用水标准检验方法 消毒副产物指标[S].
GB/T 5750.10-2006 Standard examination methods for drinking water-Disinfection by-products parameters [S].
- [7] 刘天洁, 黄伟, 李谦. 生活饮用水中二氯乙酸三氯乙酸检测方法的改进[J]. 中国卫生产业, 2014, (10): 25-26.
Liu TJ, Huang W, Li Q. The improvement of detection method for dichloroacetic acid and trichloroacetic acid in drinking water [J]. China Health Ind, 2014, (10): 25-26.
- [8] 肖洋, 王新娟, 韩伟. 气相色谱法测定不同水质中的二氯乙酸和三氯乙酸[J]. 理化检验-化学分册, 2014, 50(8): 979-982.
Xiao Y, Wang XJ, Han W. GC determination of dichloroacetic acid and trichloroacetic acid in different water [J]. Test Chem Anal B, 2014, 50(8): 979-982.
- [9] 王红伟, 闫惠珍, 林少彬. 离子色谱法同时测定水中5种消毒副产物[J]. 中国卫生检验杂志, 2009, 19(3): 558-559.
Wang HW, Yan HZ, Lin SB. Simultaneous determination of five DBPs in water by ion chromatography [J]. Chin J Health Lab Technol, 2009, 19(3): 558-559.
- [10] 齐剑英, 吴颖娟, 张平, 等. 离子色谱法测定饮用水中二氯乙酸和三氯乙酸[J]. 理化检验-化学分册, 2007, 43(11): 947-949.
Qi JY, Wu YJ, Zhang P, et al. Determination of dichloroacetic acid and trichloroacetic acid in drinking water by ion chromatography [J]. Test Chem Anal B, 2007, 43(11): 947-949.
- [11] 杨姣兰, 曹宁涛, 董梦萌. 全国实验室生活饮用水中二氯乙酸检测的能力验证结果分析[J]. 环境与健康杂志, 2017, 34(11): 1004-1007.
Yang JL, Cao NT, Dong MM. Proficiency test for determination of dichloroacetic acid in drinking water among laboratories in China [J]. J Environ Health, 2017, 34(11): 1004-1007.
- [12] 罗嵩, 王红伟, 林强, 等. 气相色谱法与离子色谱法测定饮用水消毒副产物中二氯乙酸的方法比对[J]. 环境卫生学杂志, 2017, 7(4): 301-305.
Luo S, Wang HW, Lin Q, et al. Comparison on dichloroacetic acid determination in disinfection by-products for drinking water with gas chromatographic and ion chromatographic methods [J]. J Environ Hyg, 2017, 7(4): 301-305.

(责任编辑: 武英华)

作者简介



张媛媛, 硕士, 主管技师, 主要研究方向为食品安全风险监测。

E-mail: yuanyuande_1984@163.com



曹忠波, 硕士, 副主任技师, 主要研究方向为生活饮用水水质分析。

E-mail: yuanyuande_1984@163.com