

分析与监测

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.12.021

静态顶空-捕集阱联用多次萃取GC法同时测定水中6种卤代化合物

陈 东

(徐州市铜山区自来水有限公司 水质检测中心, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 饮用水中消毒副产物对人类健康的影响日益严重,目前卤代烷、卤乙酸类常规消毒副产物的检测方法已较为成熟,但关于卤代苯甲醚类新型消毒副产物检测的研究还较少。建立了静态顶空-捕集阱联用多次萃取气相色谱(GC)测定水中三氯甲烷、四氯化碳、二氯一溴甲烷、一氯二溴甲烷、三溴甲烷、2,4-二氯苯甲醚等6种卤代化合物的分析方法。分别对该方法的顶空平衡时间、顶空进样时间、顶空平衡温度、循环萃取次数、NaCl投加量等条件进行了优化研究,结果表明,在最佳条件下,方法的线性相关系数为0.997 3~0.999 2,检出限为0.002~0.212 $\mu\text{g/L}$,定量限为0.007~0.707 $\mu\text{g/L}$,相对标准偏差(RSD)为1.7%~7.1%,回收率为89.3%~107.0%。该方法进样快速、准确、无溶剂污染、灵敏度高,可对水中6种卤代化合物同时进行痕量分析。

关键词: 静态顶空; 捕集阱; 气相色谱; 卤代化合物

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)12-0130-07

Static Headspace-Trap Multi-extraction-Gas Chromatography for Simultaneous Determination of 6 Halogenated Compounds in Water

CHEN Dong

(Water Quality Testing Center, Xuzhou Tongshan Water Limited Company, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The impact of disinfection by-products in drinking water on human health is becoming increasingly significant. Currently, the detection methods for conventional disinfection by-products, such as haloalkanes and haloacetic acids, are relatively well-established. However, research on the detection of emerging disinfection by-products, such as halogenated anisoles, remains limited. An analytical method for the determination of six halogenated compounds in water, including trichloromethane, carbon tetrachloride, dichlorobromomethane, chlorodibromomethane, tribromomethane, and 2,4-dichloroanisole, was developed using static headspace-trap multi-extraction-gas chromatography (GC). The optimization was conducted on several key conditions of this method, including headspace equilibrium time, headspace sampling time, headspace equilibrium temperature, cycle extraction times, and NaCl dosage. Under the optimal conditions, the method exhibited a linear correlation coefficient ranging from 0.997 3 to 0.999 2, a detection limit between 0.002 $\mu\text{g/L}$ and 0.212 $\mu\text{g/L}$, a quantification limit from 0.007 $\mu\text{g/L}$ to 0.707 $\mu\text{g/L}$, relative standard deviation (RSD) within 1.7% to 7.1%, and recoveries in the range of 89.3% to 107.0%. This method is characterized by rapid sampling, accuracy, the absence of solvent

contamination, high sensitivity, and the ability to simultaneously perform trace analysis of six halogenated compounds in water.

Key words: static headspace; trap; gas chromatography (GC); halogenated compounds

卤代化合物是地表水中普遍存在的有机污染物^[1],地下水中的卤代化合物浓度一般较低,属于痕量有机污染物^[2]。但无论是地下水还是地表水,出厂前都需进行消毒处理,我国饮用水多采用氯消毒^[3],保证出厂水水质符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)。加氯消毒后水中最常检出的是含卤消毒副产物^[4],主要包括三氯甲烷、二氯一溴甲烷、一氯二溴甲烷、三溴甲烷等,它们均属于挥发性卤代化合物^[5-6],一般不溶或微溶于水,沸点低于200℃,具有特别的气味和毒性,可以通过皮肤接触、呼吸或饮水进入人体,GB 5749—2022将其列为常规检测指标。但近些年已有研究^[7]发现,除了这些常规的挥发性卤代烃消毒副产物,饮用水在加氯消毒过程中经微生物的甲基化还会产生其他卤代消毒副产物,即当氯与水中的苯甲醚接触时会取代苯甲醚苯环上的氢原子,生成新的卤代化合物——氯代苯甲醚,其通常在管网末端含量最高,在水中超过嗅阈值会产生明显的嗅味。除了加氯消毒过程,藻类代谢过程也会产生氯代苯甲醚,夏季是地表水中藻类的暴发期,氯代苯甲醚存在于水中的现象更为明显。有研究^[8]表明,当水中土臭素和二甲基异茨醇的检测浓度低于国标限值时,仍会产生土腥味,主要原因就是水中含有氯代苯甲醚。此类物质容易在人体中富集,潜在危害较大,近年来学者们已经在氯代苯甲醚的生成机理研究上取得了一定进展,但其检测方法仍没有得到足够的关注。GB 5749—2022的检测指标中还未将氯代苯甲醚列入,目前国内和国际均未给出其在水中的限值,也尚未出台相关的标准检测方法。氯代苯甲醚在水中的含量大都较低,往往是ng/L级别,采用现有仪器直接进样通常达不到检测要求,只有先经过高效的前处理进行分离与富集,才能满足进样仪器的痕量分析要求。因此,建立一种在检测水中常规消毒副产物的同时也能对痕量氯代苯甲醚消毒副产物进行准确测定的分析方法就显得尤为重要。

目前对水中卤代化合物的前处理方法主要有吸附管采样热脱附法^[9]、溶剂萃取法、顶空固相微萃

取法、静态顶空法、动态顶空法^[10]等,吸附管采样热脱附法只适用于空气检测;溶剂萃取法需使用其他有机溶剂,对人体健康不利而且溶剂可能会污染仪器;顶空固相微萃取法操作复杂且耗时较长;动态顶空法一般指吹扫捕集法,虽然灵敏度比静态顶空法高,对样品的前处理无需使用有机溶剂,对环境不造成二次污染,但易形成泡沫,使仪器超载,还会将水样中的水蒸气吹出,从而对检测结果造成干扰,而且吹扫捕集装置价格也比较昂贵^[11],并非所有实验室都具备;静态顶空法即常见的顶空直接进样法,虽然无溶剂污染,但因其没有与捕集阱相连,只能进行一次平衡状态下的提取,故灵敏度偏低,进行痕量分析的性能远不如静态顶空-捕集阱联用多次萃取进样法出色。静态顶空-捕集阱联用法具有多次萃取富集目标物的作用,即样品可以被反复加压循环,从而尽可能多地提取样品蒸气,当提取完成后,样品经干吹并脱附,使分析物进入气相色谱(GC)。因此,其检出限明显低于顶空直接进样法。静态顶空-捕集阱联用多次萃取GC法在国内的研究还比较少,将静态顶空-捕集阱联用同时测定水中挥发性卤代烃和2,4-二氯苯甲醚的研究还未有报道。对该法各项参数进行优化,可以实现将水中挥发性卤代烃和2,4-二氯苯甲醚成分同时高效顶空富集及检测的目标,证明其是一种分离度好、灵敏度高、快速、简单、准确的定量分析方法,旨在为水中卤代化合物的同时测定提供参考。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

美国PE气相色谱仪(PerkinElmer Clarus580-GC)配有顶空自动进样器(TurboMatrix 40),石英捕集阱(内置石墨化碳黑、碳分子筛吸附剂),电子捕获检测器(ECD),20 mL顶空瓶,20 mL钳口顶空瓶盖。

三氯甲烷标准溶液10 mg/L,四氯化碳标准溶液1 mg/L,二氯一溴甲烷标准溶液10 mg/L,一氯二溴甲烷标准溶液100 mg/L,三溴甲烷标准溶液100 mg/L,2,4-二氯苯甲醚1 000 mg/L,氯化钠(优级纯)。

1.2 溶液配制

将1 000 mg/L的2,4-二氯苯甲醚标准溶液以纯水稀释为100 $\mu\text{g/L}$ 的2,4-二氯苯甲醚标准中间液。取5个顶空瓶,先分别加入10 mL纯水,然后分别加入三氯甲烷、四氯化碳、二氯一溴甲烷标准溶液10、20、30、40、50 μL ,一氯二溴甲烷、三溴甲烷标准溶液2、4、6、8、10 μL ,2,4-二氯苯甲醚标准中间液1、2、5、8、10 μL ,配制成混合标准系列溶液。按照实验方法取10 mL水样置于20 mL顶空瓶中配制出样品溶液。

1.3 测定条件

HP-5毛细管色谱柱(30 m $\times$ 0.25 mm, 0.25 μm),柱流量1.2 mL/min;ECD检测器温度300 $^{\circ}\text{C}$;尾吹流量30 mL/min;进样口温度250 $^{\circ}\text{C}$;程序升温:初始温度50 $^{\circ}\text{C}$,保持2 min,以10 $^{\circ}\text{C/min}$ 升温至120 $^{\circ}\text{C}$,再以20 $^{\circ}\text{C/min}$ 升温至180 $^{\circ}\text{C}$,保持1.5 min;分流比5:1。

顶空平衡温度80 $^{\circ}\text{C}$,进样针温度90 $^{\circ}\text{C}$,传输线温度110 $^{\circ}\text{C}$,顶空平衡加热时间20 min,顶空进样时间0.1 min,加压时间0.5 min,拔针时间0.3 min,捕集阱温度40~260 $^{\circ}\text{C}$,脱附时间1 min,干吹扫时间5 min,捕集阱持续时间5 min,循环萃取次数3次。

1.4 测定方法

移取10 mL混合标准溶液或样品溶液置于20 mL顶空瓶中,压盖密封,然后放入捕集阱顶空装置中开始加热萃取进样。

2 结果与讨论

2.1 静态顶空-捕集阱条件的选择

静态顶空-捕集阱联用多次萃取进样法,即当样品被加热至平衡后,开始对瓶内样品加压,然后减压通过冷的带吸附剂的捕集阱,最多可以重复这种加压/减压循环4次,最大程度提取顶空蒸气,从而提高卤代分析物的进样浓度。样品蒸气提取完成后,干吹气流通过捕集阱以去除样品中的水分,同时也干燥了捕集阱,从而减少后续捕集阱烘烤步骤的耗时,样品分析时间得以缩短。捕集阱可以被迅速加热,使被吸附的分析物快速气化脱附并随着一定分流流量的载气进入气相色谱柱,实现瞬时进样分离和定量。影响该进样方法灵敏度的因素主要包括顶空平衡时间、顶空进样时间、顶空平衡温度、循环萃取次数、NaCl加入量等。

2.2 顶空平衡时间的优化

卤代化合物的气液两相平衡时间对其在样品中含量分析的影响较大,卤代化合物从液相到气相的扩散速度越快,即分子扩散系数越大,所需平衡时间就越短。选择平衡保温时间为5、10、15、20、25 min,分别进样测定,结果表明,当平衡保温时间为5 min时,6种卤代化合物的峰面积均较小,这可能是由于样品被加热的时间太短,卤代化合物尚未达到气液两相平衡;随着平衡保温时间的增大,各待测组分的峰面积逐渐增大,当平衡保温时间为20 min时,卤代化合物的峰面积达到最大,气液也已达到平衡;当平衡保温时间增至25 min时,各分析组分峰面积增加已不再明显。平衡保温时间过长可能会造成顶空瓶的气密性变差,导致定量准确性降低,而且平衡保温时间越长,检测时间就越长。因此,该方法选择顶空平衡时间为20 min。

2.3 顶空进样时间的优化

在顶空平衡时间为20 min的条件下,分别在进样3、6、12、30 s后进行测定,结果表明,当顶空进样时间为3 s时,各卤代化合物组分的峰面积都较小,这是因为进样时间过短,进样量较少不利于卤代化合物含量的测定;当进样时间为6 s时,各卤代化合物的响应值达到最高;当进样时间继续增至12 s时,各组分的响应值增加已不再明显;而当进样时间为30 s时,挥发性卤代烃出现过载现象,表现为峰形粗大,分离度差,这是因为进样时间太长,样品蒸气超过衬管的容积,造成样品在色谱柱中过载,从而产生峰形重叠和拖尾的现象,不利于6种卤代化合物组分的分离定量,影响检测结果。因此,该方法选择顶空进样时间为6 s。

2.4 顶空平衡温度的优化

在顶空平衡时间20 min,顶空进样时间6 s的条件下,顶空平衡温度越高,6种卤代化合物的挥发蒸气量越多,灵敏度越高,但平衡温度过高会使顶空进样的压力变大,损害仪器的耐压能力,而且会产生大量的水蒸气,降低待测组分的相对浓度,影响色谱柱的寿命和富集效果。分别设定60、70、80、90 $^{\circ}\text{C}$ 的平衡温度进行实验,结果表明,当平衡温度为60 $^{\circ}\text{C}$ 时,由于温度低于各卤代化合物组分的沸点,顶空气体富集量少,峰面积较小;随着温度升高,6种卤代化合物的峰面积响应值也随之增大;当平衡温度为80 $^{\circ}\text{C}$ 时,响应值已基本达到最大。考虑

到仪器压力和水蒸气量等因素的影响,该方法选择顶空平衡温度为 80 ℃。

2.5 循环萃取次数的优化

在顶空平衡时间 20 min、顶空进样时间 6 s、顶空平衡温度 80 ℃ 的条件下,循环萃取次数与 6 种卤代化合物的峰面积呈正相关,这是由于顶空每加压/减压循环一次,捕集阱均会吸附样品蒸气进行一次萃取并装载至捕集阱中,在每次提取后,样品瓶中的气液二相之间会重新平衡,再进行下一次萃取装载,因此,捕集阱中分析物富集量会随着循环次数逐渐得到累积。若从同一样品瓶的顶部空间连续提取 2 份等分样品,虽然分配系数 K 保持不变,但所得到的第二等分样品的峰面积要比第一次分析获得的峰面积小;若继续从样品瓶的顶部空间连续提取等分样品,余下的被分析物的总量将会进一步减少,最终被全部取尽,各单次循环提取中所移取被分析物量的总和与存在于原先样品中的被分析物总量相等。静态顶空-捕集阱联用多次萃取流程图见图 1。

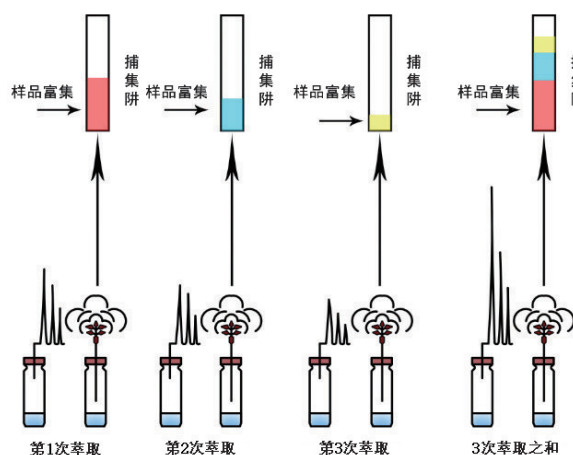


图1 静态顶空-捕集阱联用多次萃取流程

Fig.1 Flow chart of static headspace-trap multi-extraction

设定循环萃取次数分别为 1、2、3、4 次进行实验,循环次数对峰面积的影响见图 2。结果表明,当循环次数为 1 次时,6 种卤代化合物的峰面积均最小,这与常见的顶空气体直接进样法一致,没有多次富集的过程,灵敏度较低。随着循环次数的增加,样品在捕集阱中的富集量增加,各待测组分进入色谱柱的相对浓度增加,灵敏度也随之不断提高,而循环次数为 3 次和 4 次时的峰面积差别较小,

说明被分析物已最大程度地被提取并富集至捕集阱中。考虑到分析时间和经济成本,该方法选择循环萃取次数为 3 次。

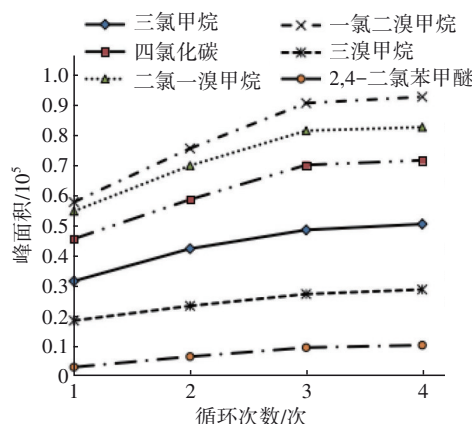


图2 循环萃取次数对峰面积的影响

Fig.2 Influence of cycle extraction number on peak area

2.6 盐析效应的影响

在静态顶空-捕集阱联用多次萃取进样法中利用盐析效应,即在水溶液中加入适量 NaCl 改变挥发性组分的分配系数,降低卤代化合物在溶液中的溶解度,提高它们的挥发蒸气量,从而达到提高灵敏度、降低检出限的目的。在 10 mL 混合标准溶液中分别加入 0、1、2、3 g 的 NaCl,在实验最佳条件下采用静态顶空-捕集阱联用多次萃取进样法对 6 种卤代化合物的萃取效率进行研究,结果见图 3。

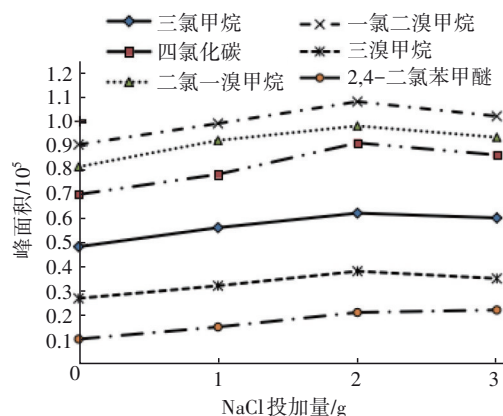


图3 NaCl投加量对峰面积的影响

Fig.3 Influence of NaCl dosage on peak area

由图 3 可知,各分析物的峰面积随 NaCl 投加量的增加而增大,当投加量为 2 g 时,峰面积达到最大,继续增至 3 g 时峰面积反而减小,原因可能是 NaCl 投加量过大,样品中的目标分析物会和未溶解的盐产生凝结,从而阻碍卤代化合物的气体逸出。

2.7 方法的线性关系、检出限及定量限

按照1.2节方法配制5个点的标准系列溶液,在最佳条件,即顶空平衡时间20 min、顶空进样时间6 s、顶空平衡温度80 ℃、循环萃取次数3次、NaCl投加量2 g的条件下进样,以峰面积为纵坐标,浓度为横坐标进行线性回归分析,得到6种卤代化合物的线性相关系数、检出限和定量限(见表1)。可知,6种卤代化合物各组分的线性关系较好。

表1 6种卤代化合物的线性相关系数、检出限和定量限
($n=7$)

Tab.1 Linear correlation coefficients, detection limits and quantitation limits for 6 kinds of halogenated compounds ($n=7$)

分析物	线性范围/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	线性相关 系数(r)	检出限/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	定量限/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
三氯甲烷	10 ~ 50	0.998 6	0.005	0.015
四氯化碳	1 ~ 5	0.998 3	0.002	0.007
二氯一溴甲烷	10 ~ 50	0.999 2	0.016	0.055
一氯二溴甲烷	20 ~ 100	0.997 3	0.031	0.103
三溴甲烷	20 ~ 100	0.998 7	0.212	0.707
2,4-二氯苯甲醚	0.010 ~ 0.1	0.998 1	0.003	0.010

加入适量的6种卤代化合物标准溶液,得到三氯甲烷、四氯化碳、二氯一溴甲烷、一氯二溴甲烷、三溴甲烷、2,4-二氯苯甲醚质量浓度分别为0.6、0.1、1、10、10、0.02 $\mu\text{g/L}$ 的样品溶液,按1.4节方法进行7次平行样测定。以3倍信噪比(S/N)计算6种卤代化合物的平均检出限为0.002~0.212 $\mu\text{g/L}$,以10倍 S/N 计算其平均定量限为0.007~0.707 $\mu\text{g/L}$ 。

2.8 与吹扫捕集方法对比分析

针对常见的卤代消毒副产物,除了常规检测方法外,《生活饮用水标准检验方法 第10部分:消毒副产物指标》(GB/T 5750.10—2023)和《水质 挥发性有机物的测定 吹扫捕集/气相色谱-质谱法》(HJ 639—2012)均给出了吹扫捕集气质联用法。由于静态顶空-捕集阱联用进样以及吹扫捕集进样均具备分离并富集挥发性有机物的功能,为了更深入地探讨静态顶空-捕集阱联用多次萃取进样法测定卤代化合物的优越性,将采用该方法测定的卤代化合物的检出限与吹扫捕集气质联用法进行对比,结果见表2。可知,采用静态顶空-捕集阱联用进样时,5种挥发性卤代烃的检出限均低于采用GB/T 5750.10—2023、HJ 639—2012中的吹扫捕集检出

限。虽然2,4-二氯苯甲醚没有相应的标准检测方法,但有研究^[12]表明,采用吹扫捕集测定水中嗅味物质时灵敏度偏低,往往达不到检测要求。两种前处理进样方法在检出限上的差异可能由以下原因造成:①吹扫捕集采用动态顶空进样方式,使用惰性气体鼓泡带出VOCs;静态顶空-捕集阱属于静态顶空,在气液两相中VOCs浓度达到平衡后进样,从而导致提取VOCs的量不同。②吹扫捕集是一种非平衡状态下的连续萃取技术,虽然可以完全萃取目标物,但脱附解吸时目标物会有一定量的损失;静态顶空-捕集阱进样则是在平衡状态下进行多次萃取,目标物不产生脱附解吸损失。③吹扫捕集的捕集阱较静态顶空联用的阱更大,吸附剂更多,且吸附剂种类不同。

表2 5种挥发性卤代烃的检出限对比

Tab.2 Comparison of detection limits for 5 kinds of volatile halogenated hydrocarbons

分析物	静态顶空-捕集 阱联用检出限/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	吹扫捕集检出限/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	
		GB/T 5750.10 —2023	HJ 639—2012
三氯甲烷	0.005	0.120	0.400
四氯化碳	0.002	0.130	0.400
二氯一溴甲烷	0.016	0.290	0.400
一氯二溴甲烷	0.031	0.251	0.400
三溴甲烷	0.212	0.251	0.500

2.9 样品测定

按照1.2节的方法配制样品溶液,以1.4节的方法进行测定。分析测试3份地表水和3份地下水中6种卤代化合物的含量,其中1份样品溶液的色谱见图4。

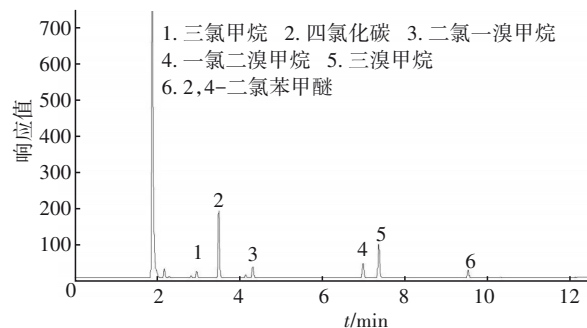


图4 水样中6种卤代化合物色谱

Fig.4 Chromatogram of 6 kinds of halogenated compounds in water samples

结果表明,6份样品中6种卤代化合物的质量浓度范围为0~8.5 $\mu\text{g/L}$ 。对1份地下水样品和1份地

表水样品分别进行低、中、高3个浓度水平的水样加标,每个浓度水平平行测定5次,结果见表3。

表3 水样中6种卤代化合物加标回收率、精密度($n=5$)

Tab.3 Recoveries and precisions of 6 kinds of halogenated compounds in water samples ($n=5$)

项目	地下水					地表水				
	浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	加标浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	平均测定浓 度/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	平均回收 率/%	相对标准 偏差 (RSD)/%	浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	加标浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	平均测定 浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	平均回收 率/%	相对标准 偏差 (RSD)/%
三氯甲烷	0.1	10	10.2	101.0	4.5	7.1	10	18.3	107.0	3.2
		20	21.2	105.5	4.8		20	27.7	102.2	2.1
		40	41.9	104.5	3.9		40	48.5	103.0	4.3
四氯化碳	0.2	0.5	0.73	104.3	4.7	0.1	0.5	0.58	96.7	3.1
		2.5	2.87	106.3	5.0		2.5	2.75	105.8	1.9
		3.5	3.89	105.1	5.2		3.5	3.85	106.9	3.7
二氯一溴 甲烷	0.5	10	11.0	104.8	2.9	3.5	10	13.3	98.5	1.7
		20	21.6	105.4	4.6		20	22.7	96.6	3.3
		40	41.2	101.7	4.0		40	43.9	100.9	2.5
一氯二溴 甲烷	1.2	20	22.1	104.2	5.1	6.3	20	26.9	102.3	4.3
		40	42.0	101.9	4.6		40	45.2	97.6	4.8
		60	62.7	102.5	4.4		60	65.4	98.6	4.1
三溴甲烷	8.4	20	26.8	94.4	5.7	7.7	20	27.1	97.8	3.8
		40	47.9	99.0	3.6		40	46.5	97.5	4.4
		60	72.2	105.6	5.0		60	69.3	102.4	5.7
2,4-二氯 苯甲醚	0	0.03	0.026 8	89.3	7.1	0.003 2	0.03	0.031 0	93.4	6.5
		0.05	0.047 3	94.6	6.9		0.05	0.051 2	96.2	6.0
		0.07	0.065 0	92.9	6.3		0.07	0.069 8	95.4	5.8

由表3可知,6种卤代化合物的平均加标回收率为89.3%~107.0%,相对标准偏差(RSD)为1.7%~7.1%。由此可知,6种卤代化合物在水中的含量均较低,采用高灵敏度的静态顶空-捕集阱联用多次萃取进样法可以准确地对其进行痕量分析。

3 结语

建立了一种静态顶空-捕集阱联用多次萃取进样GC定量同时测定水中三氯甲烷、四氯化碳、二氯一溴甲烷、一氯二溴甲烷、三溴甲烷、2,4-二氯苯甲醚等6种卤代化合物的分析方法,通过对顶空平衡时间、顶空进样时间、顶空平衡温度、循环萃取次数、NaCl投加量等条件进行优化,确立了最佳分析条件,得到了理想的检测结果。

静态顶空-捕集阱联用多次萃取进样法是一种较为少见的样品前处理方法,该方法与传统萃取法相比,没有繁琐的操作步骤,不会造成待测成分损失,避免了有机溶剂对仪器设备、环境的污染以及对实验操作人员健康带来的危害,是一种绿色的分析方法。与常见的不关联捕集阱的顶空直接进样法相比,捕集阱多次萃取富集提高了样品检测方法

的灵敏度,降低了检出限,对一些需要进行痕量分析的待测物的检测效果会更加出色。与吹扫捕集气质联用法相比,该方法仪器价格低,检测样品的经济成本低,对仪器污染小,操作简单,在痕量分析上更胜一筹。因此,静态顶空-捕集阱联用多次萃取进样法不仅具有较高的实用价值,还具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] 黄韵竹,隋倩,王佳琦,等.太湖流域城镇地表水中挥发性卤代烃污染特征[J].中国环境科学,2020,40(5):2174-2179.
HUANG Yunzhu, SUI Qian, WANG Jiaqi, et al. Pollution characteristics of volatile halogenated hydrocarbons in the surface water of a typical town in Taihu basin[J]. China Environmental Science, 2020, 40(5):2174-2179(in Chinese).
- [2] 李秋莹,刘玲花,王学东,等.地下水中挥发性有机物的样品预处理与分析检测综述[J].首都师范大学学报(自然科学版),2022,43(1):91-96.
LI Qiuxuan, LIU Linghua, WANG Xuedong, et al.

- Sample pretreatment and analysis detection of volatile organic compounds in groundwater[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2022, 43(1):91-96(in Chinese).
- [3] 张玉先. 供水工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2015:249-251.
ZHANG Yuxian. Water Supply [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015: 249-251 (in Chinese).
- [4] 王栋,贾瑞宝,孙韶华,等. 饮用水消毒副产物检测技术应用进展[J]. 中国环境监测, 2020, 36(3):1-9.
WANG Dong, JIA Ruibao, SUN Shaohua, *et al.* Application progress of detection technology for drinking water disinfection byproducts [J]. Environmental Monitoring in China, 2020, 36(3):1-9(in Chinese).
- [5] 张付刚,许红睿,浦阳,等. 长江流域苏州段水中5种挥发性卤代烃水平含量检测分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2022, 32(13):1618-1622.
ZHANG Fugang, XU Hongrui, PU Yang, *et al.* Detection and analysis of five volatile halogenated hydrocarbons in the Suzhou section of the Yangtze River basin [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2022, 32(13):1618-1622(in Chinese).
- [6] 杜小弟,蔡宏伟,郭丽萍,等. 联苯-联苯醚混合萃取剂分散液微萃取测定饮用水中挥发性卤代烃[J]. 分析化学, 2018, 46(9):1493-1500.
DU Xiaodi, CAI Hongwei, GUO Liping, *et al.* Determination of volatile halogenated hydrocarbon in drinking water using dispersive liquid-liquid microextraction with biphenyl-biphenyl ether mixture as extractants[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2018, 46(9):1493-1500(in Chinese).
- [7] 熊茂富,任敏,杜伊,等. 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用法同时测定湖库水中12种氯苯甲醚的条件优化[J]. 岩矿测试, 2019, 38(6):724-733.
XIONG Maofu, REN Min, DU Yi, *et al.* Simultaneous determination of 12 chloroanisoles in lake reservoir waters by headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry [J]. Rock and Mineral Analysis, 2019, 38(6):724-733(in Chinese).
- [8] 张可佳,毛敏敏,张土乔,等. 氯代苯甲醚类致嗅物的生成机理及影响因素[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(1):108-112.
ZHANG Kejia, MAO Minmin, ZHANG Tuqiao, *et al.* Formation mechanism and influence factors of taste and odour compounds-chloroanisoles [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(1):108-112(in Chinese).
- [9] 曹方方,王文雷,李玉华,等. 山东省环境空气中挥发性卤代烃污染状况研究[J]. 中国测试, 2023, 49(4):60-67.
CAO Fangfang, WANG Wenlei, LI Yuhua, *et al.* Pollution characteristics of ambient halocarbons in Shandong Province [J]. China Measurement & Test, 2023, 49(4):60-67(in Chinese).
- [10] 周华,汪允刚,吴香伦,等. 顶空气相色谱法测定饮用水中7种卤代烃[J]. 中国卫生检验杂志, 2009, 19(2):300-302.
ZHOU Hua, WANG Yougang, WU Xianglun, *et al.* Determination of seven halohydrocarbons in drinking water with headspace gas chromatography [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2009, 19(2):300-302(in Chinese).
- [11] 展学旺,李彭辉,徐琳,等. 顶空固相微萃取/气相色谱-质谱联用测定尿液中8种苯系物和17种挥发性卤代烃[J]. 分析化学, 2023, 51(6):1033-1041.
ZHAN Xuewang, LI Penghui, XU Lin, *et al.* Determination of 8 kinds of benzenes and 17 kinds of volatile halogenated hydrocarbons in urine by headspace-solid phase microextraction/gas chromatography-mass spectrometry[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2023, 51(6):1033-1041(in Chinese).
- [12] 张振伟. 饮用水中致嗅物质 GSM、MIB 和 DMTS 的 SPME-GC/MS 测定方法研究[D]. 北京:中国疾病预防控制中心, 2010.
ZHANG Zhenwei. Study on the Determination Method of Odor-causing Substances GSM, MIB, and DMTS in Drinking Water by SPME-GC/MS [D]. Beijing: Chinese Center for Disease Control and Prevention, 2010 (in Chinese).

作者简介:陈东(1985-),男,江苏徐州人,硕士,高级工程师,主要研究方向为仪器分析。

E-mail:cdaxf@126.com

收稿日期:2024-08-04

修回日期:2024-09-17

(编辑:沈靖怡)