

## · 论 著 ·

## 气相色谱质谱法快速测定生活饮用水中多种挥发性有机物研究\*

周 亮, 朱韩武, 钟艳琴, 贺春霞, 雷 颢  
(郴州市疾病预防控制中心, 湖南 郴州 423001)

**[摘要]** 目的 建立生活饮用水中 58 种挥发性有机物(VOCs)快速测定的方法, 以满足饮用水污染事件中 VOCs 测定需求。**方法** 取 5 mL 水样经吹扫捕集装置处理, VOCs 被富集并进样至气相色谱-质谱联用仪进行定性、定量分析。**结果** 在 0~10.0  $\mu\text{g/L}$  线性范围内, 各组分的标准曲线相关系数均大于或等于 0.99, 用 0.5、2.0、10.0  $\mu\text{g/L}$  3 种质量浓度水平加标, 回收率为 81.3%~113.5%, 6 次测定的相对标准偏差为 1.9%~11.1%, 检出限为 0.001~0.045  $\mu\text{g/L}$ 。在 30 个实际水样中, 除 1,1-二氯乙烷和氯溴甲烷未检出外, 其余有机物均有痕量快速检出, 且 94.7% 的组分质量浓度在 2  $\mu\text{g/L}$  以下。**结论** 该方法前处理简单, 测定灵敏、准确且迅速, 能满足饮用水污染事件中 VOCs 的定性和定量测定需求。

**[关键词]** 气相色谱质谱法; 挥发性有机物; 生活饮用水; 快速检测; 水质检测

**DOI:** 10.3969/j.issn.1009-5519.2023.03.002 **中图法分类号:** R115

**文章编号:** 1009-5519(2023)03-0368-05

**文献标识码:** A

**Rapid determination of volatile organic compounds in drinking water  
by gas chromatography-mass spectrometry\***

ZHOU Liang, ZHU Hanwu, ZHONG Yanqin, HE Chunxia, LEI Yang

(Chenzhou Municipal Center for Disease Control and Prevention, Chenzhou, Hunan 423001, China)

**[Abstract]** **Objective** To establish a method for rapid determination of 58 volatile organic compounds (VOCs) in drinking water, so as to meet the needs of VOCs determination in drinking water pollution events. **Methods** 5 mL water sample was treated by the purge and trap device, VOCs were enriched and injected into gas chromatography-mass spectrometry for qualitative and quantitative analysis. **Results** The correlation coefficients of standard curve of all components were greater than or equal to 0.99 in the linear range of 0–10.0  $\mu\text{g/L}$ . The recovery rates of three mass concentration levels of 0.5, 2.0, 10.0  $\mu\text{g/L}$  were in the range of 81.3%–113.5%, the relative standard deviation (RSD) was 1.9%–11.1%, and the detection limits were 0.001–0.045  $\mu\text{g/L}$ . In 30 actual water samples, except for 1,1-dichloroethane and chlorobromomethane, trace were detected rapidly in the remaining organic compounds and 94.7% of the components were less than 2  $\mu\text{g/L}$ . **Conclusion** The method has the advantages of simple pretreatment, sensitive, accurate and rapid determination, and can meet the qualitative and quantitative determination needs of VOCs in drinking water pollution events.

**[Key words]** Gas chromatography-mass spectrometry; Volatile organic compounds; Drinking water; Rapid detection; Water quality detection

随着工业的发展,挥发性有机物(VOCs)产生量急剧增加,而它们易迁移的特点极易造成饮用水的污染<sup>[1-5]</sup>。2014年兰州自来水中苯污染事件造成60万市民陷入水危机<sup>[6]</sup>。新型冠状病毒感染疫情防控期间,含氯消毒剂的大量使用,在水中会反应生成含氯VOCs,将有可能对生活饮用水源造成污染<sup>[7-8]</sup>。为保障饮用水安全,应对VOCs水污染事件,有必要建立快速测定生活饮用水中多种VOCs的方法。而

VOCs质量浓度低、易挥发、直接定量分析困难,所以高效的前处理和灵敏的检测仪器是解决VOCs测定的关键。传统的液液萃取和固相萃取前处理方法和普通气相色谱仪灵敏度太低<sup>[9-10]</sup>,而吹扫捕集-气相色谱质谱联用操作简单,富集效率高,定性准确,能满足要求<sup>[11-13]</sup>。现有的吹扫捕集-气相色谱质谱联用检测生活饮用水中VOCs的方法为GB/T 5750.8-2006附录A方法<sup>[14]</sup>,本研究在此方法基础上新加入了重要

\* 基金项目:湖南省卫健委科研项目(20201731);湖南省郴州市科技局重点科技计划项目(ZDYF2020195)。

作者简介:周亮(1983—),硕士研究生,副主任技师,主要从事检验工作。

的消毒副产物 VOCs 指标——氯二溴甲烷,通过改进色谱、质谱和吹扫捕集条件,色谱分析时间由 36 min 缩短至 18 min,检出限范围由 0.02~0.32  $\mu\text{g}/\text{L}$  降至 0.001~0.045  $\mu\text{g}/\text{L}$ ,建立了更快速、更灵敏的 58 种常见 VOCs 的吹扫捕集-气相色谱质谱法,能满足饮用水痕量监测或水污染事件中快速测定需求。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

**1.1.1 仪器** 气相色谱-质谱联用仪(Agilent 公司, 7890B-5977A),吹扫捕集装置(Tekmar 公司, AQUATEK 100),40 mL 带盖进样管。

**1.1.2 试剂** 58 种 VOCs 混合标准溶液(Restek Corporation 公司,批号:A011504430603,200  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ),内标(Internal Standard):氟代苯标准溶液(Accu Standard 公司,批号:M-524-IS-2,100  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ),替代物(Surrogate Analyte):氘代-1,2-二氯苯标准溶液(Accu Standard 公司,批号:2017071149,2 000  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ),4-溴氟苯标准溶液(o2si smart solutions 公司,批号:303234,100  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ),甲醇(色谱纯,美国 TIDE 公司),超纯水(电阻率大于或等于 18.2  $\text{M}\Omega$ ),研究样品(由郴州市疾病预防控制中心监测采样提供)。

### 1.2 方法

**1.2.1 色谱-质谱条件** 色谱柱:DB-VRX(20  $\text{m}\times$  180  $\mu\text{m}\times$  1.0  $\mu\text{m}$ )。载气:氮气(纯度大于 99.99%),恒流 1.0  $\text{mL}/\text{min}$ ,进样口温度 250  $^{\circ}\text{C}$ 。升温程序:初始温度 40  $^{\circ}\text{C}$ ,保持 5 min,以 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  升至 100  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,再以 30  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  升至 250  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,保持 2 min;分流比:10:1。质谱条件:四极杆温度 150  $^{\circ}\text{C}$ ,离子源温度 230  $^{\circ}\text{C}$ ,传输线温度 250  $^{\circ}\text{C}$ 。

**1.2.2 吹扫捕集条件** 吹扫气体:高纯氮气,吹扫温度:室温,吹扫流速:45  $\text{mL}/\text{min}$ ,吹扫时间:10 min,解吸温度:250  $^{\circ}\text{C}$ ,解吸时间:2 min,烘烤温度:280  $^{\circ}\text{C}$ ,烘烤时间:2 min。

**1.2.3 标准溶液配制** (1)氘代-1,2-二氯苯标准储备液(200  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ):取氘代-1,2-二氯苯 1.0 mL 于 10 mL 容量瓶中,用甲醇定容至刻度线。(2)混合标准使用液(5.0  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ):分别取 250、250、500  $\mu\text{L}$  58 种 VOCs 混合标准溶液、氘代-1,2-二氯苯标准储备液和 4-溴氟苯溶液于 10 mL 容量瓶中,用甲醇定容至刻度线。(3)内标使用液(5  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ):取氟代苯标准溶液 500  $\mu\text{L}$  于 10 mL 容量瓶中,用甲醇定容至刻度线;取 5 个 100 mL 容量瓶,均加入约 80 mL 纯水,再分别加入 0、20、40、100、200  $\mu\text{L}$  混合标准使用液,再加入 40  $\mu\text{L}$  内标使用液,混匀后,分别加入 200、180、160、100、0  $\mu\text{L}$  甲醇,再用纯水定容至刻度线,得到 0、1.0、2.0、5.0、10.0  $\mu\text{g}/\text{L}$  标准系列质量浓度。

**1.2.4 供试品溶液制备** 取一定量水样于 100 mL 容

量瓶中,加入内标使用液 40  $\mu\text{L}$ ,用水样定容至刻度线,充分混匀,倒入自动进样管中,充满,盖上瓶盖,待进样。

### 1.2.5 方法学考察

**1.2.5.1 组分分离、定性及定量离子考察** 取 10  $\mu\text{g}/\text{L}$  VOCs 混合标准溶液,采用“1.2.1”项色谱-质谱条件,利用质谱全扫描模式(SCAN),得到各组分的色谱图,依据峰度大、质量数大、特异性好的原则选择各组分的定性、定量离子。同时记录各组分保留时间,观察各色谱峰分离情况。

**1.2.5.2 线性关系、检出限考察** 将按“1.2.3”项配制的系列标准溶液进样后,采用选择离子监测模式(SIM)扫描模式,以待测组分与内标的定量离子峰面积比值为纵坐标、以各待测组分与内标的质量浓度比值为横坐标绘制曲线;在空白水样中加入低质量浓度标准溶液,当组分的色谱信号值与附近基线噪声的比值(S/N)为 3 时,加入的质量浓度为该组分的方法检出限。

**1.2.5.3 样品加标回收率考察** 在空白水样中分别加入 0.5、2.0、10.0  $\mu\text{g}/\text{L}$  3 个质量浓度水平的标准混合溶液,按照“1.2.4”项下方法制备供试水样,采用 SIM 定量分析。每个质量浓度水平重复 6 次,根据测定结果分别计算 3 种质量浓度水平的平均回收率。

**1.2.5.4 精密度考察** 在空白水样中分别加入 0.5、2.0、10.0  $\mu\text{g}/\text{L}$  3 个质量浓度水平的标准混合溶液,按照“1.2.4”项下方法制备供试水样,采用 SIM 定量分析。每个质量浓度水平重复 6 次,分别计算 3 种质量浓度水平 6 次测定结果的相对标准差(RSD)。

**1.2.5.5 实验样品测定** 对本市 10 个水厂 30 个末梢水进行 58 种 VOCs 检测。按照“1.2.4”项下方法制备供试水样,以保留时间利用 SCAN 和 SIM 进行定性、定量分析。

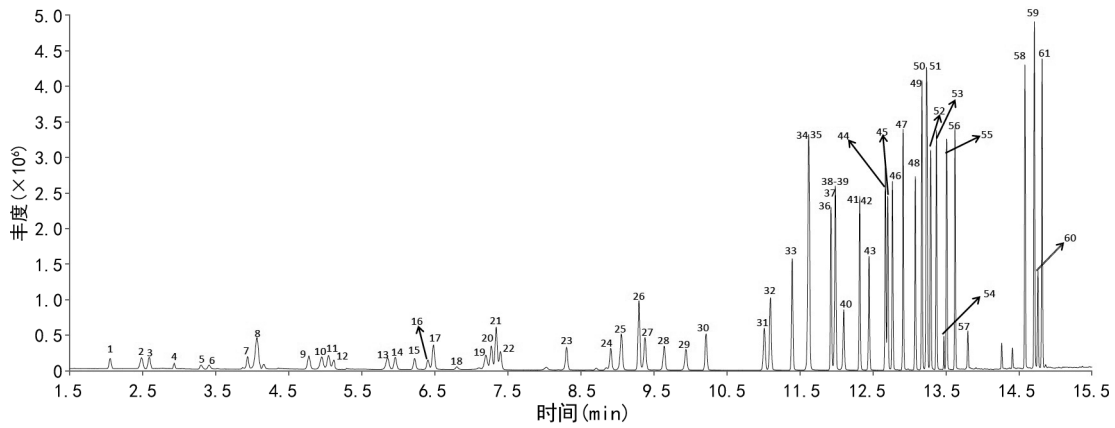
## 2 结果

**2.1 组分分离、定性及定量离子** 除三溴甲烷与邻二甲苯、1,1,2,2-四氯乙烷与对(间)二甲苯、异丙苯与 4-溴氟苯、仲丁苯与 1,3-二氯苯无法根据保留时间分开外,其余组分均可分离,见图 1。61 个组分(含 2 个替代物和 1 个内标物)的定性、定量离子见表 1。

**2.2 线性关系、检出限** 各组分在 0~10.0  $\mu\text{g}/\text{L}$  质量浓度内的线性方程、相关系数及方法检出限见表 1。相关系数均大于或等于 0.99,检出限为 0.001~0.045  $\mu\text{g}/\text{L}$ 。

**2.3 样品加标回收率** 各组分高、中、低 3 种质量浓度水平加标的平均回收率范围见表 1。总体回收率为 81.3%~113.5%。

**2.4 精密度** 各组分高、中、低 3 种质量浓度水平加标的平均 RSD 见表 1。总体 RSD 范围为 1.9%~11.1%。



注:各数字代表组分,具体见表 1。

图 1 58 种 VOCs、内标及替代物的总离子流色谱图

表 1 各组分保留时间、特征离子、线性关系、检出限、RSD 及回收率

序号	组分名称	保留时间 (min)	定量(*),定性离子	回归方程	相关系数	检出限 (μg/L)	回收率(%)	RSD(%)
1	氯乙烯	2.20	62 * ,64	$Y=0.022X-0.001$	0.996	0.020	90.5~97.7	5.5~8.7
2	溴甲烷	2.47	94 * ,96	$Y=0.327X-0.023$	0.997	0.025	92.5~96.2	5.5~8.7
3	氯乙烷	2.57	66 * ,64	$Y=0.507X-0.001$	0.998	0.025	91.2~95.4	4.3~5.8
4	三氯一氟甲烷	2.93	101 * ,103	$Y=0.027X-0.036$	0.997	0.010	98.6~101.3	3.5~4.3
5	1,1-二氯乙烯	3.29	96 * ,61	$Y=0.025X+0.009$	0.997	0.025	89.1~96.2	5.5~6.7
6	二氯甲烷	3.41	84 * ,86	$Y=0.039X-0.013$	0.994	0.025	99.3~113.5	9.8~11.1
7	反-1,2-二氯乙烯	3.94	96 * ,61	$Y=0.025X+0.004$	0.999	0.035	90.8~98.7	4.4~5.3
8	1,1-二氯乙烷	4.16	63 * ,65	$Y=0.602X-0.061$	0.998	0.015	96.1~102.5	3.8~4.5
9	顺-1,2-二氯乙烯	4.77	96 * ,61	$Y=0.233X-0.008$	0.999	0.008	92.4~99.7	4.7~6.5
10	氯溴甲烷	4.95	130 * ,128	$Y=0.383X-0.051$	0.998	0.030	93.5~98.3	4.9~6.3
11	三氯甲烷	5.04	83 * ,85	$Y=0.372X-0.001$	0.999	0.035	97.3~105.8	6.4~7.8
12	2,2-二氯丙烷	5.11	77 * ,79	$Y=0.127X-0.012$	0.996	0.045	81.3~90.2	5.8~6.2
13	1,2-二氯乙烷	5.85	62 * ,64	$Y=0.287X-0.007$	0.998	0.006	91.5~99.6	3.1~4.4
14	1,1,1-三氯乙烷	5.96	97 * ,99	$Y=0.293X-0.017$	0.999	0.004	95.4~100.2	3.7~5.1
15	1,1-二氯丙烯	6.22	75 * ,110	$Y=0.307X-0.003$	0.998	0.002	95.1~93.3	2.8~3.8
16	四氯化碳	6.41	117 * ,119	$Y=0.290X-0.020$	0.999	0.001	94.5~97.4	3.2~4.2
17	苯	6.48	78 * ,77	$Y=0.935X+0.001$	0.999	0.002	95.2~101.1	4.1~5.7
18	氟代苯(内标)	6.80	96 * ,70	—	—	—	—	—
19	二溴甲烷	7.20	174 * ,93	$Y=0.079X-0.023$	0.996	0.015	90.5~96.2	2.5~3.7
20	1,2-二氯丙烷	7.27	63 * ,76	$Y=0.107X-0.001$	0.997	0.012	89.2~94.7	3.9~4.8
21	三氯乙烯	7.34	95 * ,130	$Y=0.125X-0.013$	0.998	0.010	91.5~97.9	2.8~4.6
22	二氯一溴甲烷	7.40	83 * ,85	$Y=0.324X-0.011$	0.998	0.008	89.8~94.4	3.2~4.1
23	顺-1,3-二氯丙烯	8.30	75 * ,77	$Y=0.567X-0.002$	0.998	0.001	95.6~104.1	2.7~3.5
24	反-1,3-二氯丙烯	8.91	75 * ,77	$Y=0.526X-0.013$	0.997	0.004	87.9~94.1	3.3~4.1
25	1,1,2-三氯乙烷	9.05	97 * ,83	$Y=0.598X-0.019$	0.998	0.002	93.1~97.5	5.5~6.2
26	甲苯	9.30	92 * ,91	$Y=0.640X-0.008$	0.998	0.003	99.4~112.9	7.5~8.8
27	1,3-二氯丙烷	9.38	76 * ,78	$Y=0.512X-0.003$	0.996	0.002	90.8~98.8	3.5~4.3
28	一氯二溴甲烷	9.64	129 * ,127	$Y=0.305X-0.001$	0.992	0.008	94.5~99.1	2.6~4.4
29	1,2-二溴乙烷	9.94	107 * ,109	$Y=0.342X-0.043$	0.997	0.002	96.5~98.7	3.3~5.4
30	四氯乙烯	10.22	166 * ,168	$Y=0.336X-0.012$	0.992	0.007	96.9~102.2	2.1~3.2

续表 1 各组分保留时间、特征离子、线性关系、检出限、RSD 及回收率

序号	组分名称	保留时间 (min)	定量(*),定性离子	回归方程	相关系数	检出限 (μg/L)	回收率(%)	RSD(%)
31	1,1,1,2-四氯乙烷	11.01	131*,133	$Y=0.577X-0.012$	0.995	0.008	96.4~99.1	2.9~3.9
32	氯苯	11.10	112*,77	$Y=0.864X-0.022$	0.994	0.004	98.1~100.7	4.2~5.5
33	乙苯	11.39	91*,106	$Y=1.230X-0.004$	0.997	0.002	99.5~104.1	4.7~6.0
34	三溴甲烷	11.61	173*,175	$Y=0.208X-0.001$	0.997	0.012	90.6~97.7	5.0~6.4
35	邻二甲苯	11.62	106*,91	$Y=0.994X-0.029$	0.997	0.002	91.5~96.3	4.2~5.1
36	苯乙烯	11.93	104*,78	$Y=0.754X-0.048$	0.996	0.004	90.7~95.9	4.4~5.6
37	1,1,2,2-四氯乙烷	11.98	83*,85	$Y=0.887X-0.037$	0.999	0.002	88.4~94.6	4.3~5.2
38	对二甲苯	11.99	106*,91	$Y=0.507X-0.001$	0.992	0.001	91.2~97.4	5.1~6.7
39	间二甲苯	11.99	106*,91	$Y=0.507X-0.001$	0.992	0.001	91.2~97.4	5.1~6.7
40	1,2,3-三氯丙烷	12.10	75*,110	$Y=0.392X-0.013$	0.998	0.006	90.8~98.5	4.5~5.4
41	异丙苯	12.32	105*,120	$Y=0.869X-0.061$	0.998	0.015	89.5~93.2	4.2~5.5
42	4-溴氟苯(替代物)	12.32	174*,95	$Y=0.547X-0.005$	0.999	0.015	95.5~101.2	2.1~3.9
43	溴苯	12.45	156*,77	$Y=0.877X-0.016$	0.999	0.002	95.5~104.0	3.2~4.6
44	正丙苯	12.67	120*,91	$Y=0.703X-0.001$	0.998	0.001	93.1~96.6	4.8~5.7
45	2-氯甲苯	12.70	126*,91	$Y=0.581X-0.002$	0.998	0.002	94.2~101.2	3.7~4.1
46	4-氯甲苯	12.77	91*,126	$Y=0.601X-0.033$	0.999	0.003	96.1~100.6	3.3~4.9
47	1,3,5-三甲苯	12.91	105*,120	$Y=0.981X-0.021$	0.997	0.001	92.8~99.8	2.1~3.4
48	异丁基苯	13.08	119*,134	$Y=0.787X-0.053$	0.999	0.001	98.5~104.4	4.5~5.1
49	1,2,4-三甲苯	13.17	105*,120	$Y=0.911X-0.032$	0.998	0.020	91.7~102.5	5.5~6.1
50	仲丁苯	13.23	105*,134	$Y=0.521X-0.022$	0.996	0.015	93.1~97.7	4.2~5.0
51	1,3-二氯苯	13.24	146*,111	$Y=0.497X-0.037$	0.998	0.001	90.3~103.2	1.9~3.5
52	1,4-二氯苯	13.29	146*,111	$Y=0.638X-0.001$	0.999	0.004	92.8~104.6	2.2~3.0
53	对甲基异丙苯	13.37	119*,134	$Y=0.708X-0.035$	0.999	0.001	94.4~102.8	3.4~4.1
54	1,2-二氯苯-d4(替代物)	13.49	150*,152	$Y=0.112X-0.003$	0.999	0.008	95.1~98.9	3.8~4.9
55	1,2-二氯苯	13.51	146*,111	$Y=0.559X-0.016$	0.994	0.003	91.1~95.9	4.2~5.8
56	正丁苯	13.62	91*,92	$Y=0.527X-0.028$	0.997	0.001	94.7~103.8	5.1~6.6
57	1,2-二溴-3-氯丙烷	13.80	157*,75	$Y=0.107X-0.001$	0.998	0.006	94.5~101.3	4.5~5.3
58	1,2,4-三氯苯	14.58	180*,182	$Y=0.327X-0.025$	0.998	0.003	93.1~98.3	3.2~4.3
59	萘	14.71	128*,127	$Y=0.337X-0.048$	0.999	0.001	94.2~99.8	4.7~5.2
60	六氯丁二烯	14.76	225*,260	$Y=0.118X-0.016$	0.993	0.006	93.6~98.1	3.1~4.6
61	1,2,3-三氯苯	14.82	180*,182	$Y=0.315X-0.045$	0.999	0.003	96.5~102.7	4.2~4.8

注：-表示无此项。

2.5 实际样品检测 除 1,1-二氯乙烷、氯溴甲烷未检出(ND)外,其余有机物组分均有痕量检出,且 94.7%的组分质量浓度在 2 μg/L 以下。见表 2。

表 2 实际样品检测结果(μg/L)

组分名称	质量浓度	组分名称	质量浓度	组分名称	质量浓度
氯乙烯	0.140~0.338	三氯乙烯	ND~1.091	异丙苯	ND~0.541
溴甲烷	0.120~1.081	二氯一溴甲烷	0.193~3.380	溴苯	ND~0.480
氯乙烷	0.267~0.611	顺-1,3-二氯丙烯	ND~0.781	正丙苯	ND~0.433
三氯一氟甲烷	ND~0.182	反-1,3-二氯丙烯	ND~0.895	2-氯甲苯	0.384~0.519

续表 2 实际样品检测结果(μg/L)

组分名称	质量浓度	组分名称	质量浓度	组分名称	质量浓度
1,1-二氯乙烯	ND~0.730	1,1,2-三氯乙烷	ND~0.639	4-氯甲苯	0.382~0.394
二氯甲烷	0.019~19.200	甲苯	0.229~0.779	1,3,5-三甲苯	0.422~0.469
反-1,2-二氯乙烯	0.130~0.729	1,3-二氯丙烷	ND~0.526	异丁基苯	0.458~0.469
1,1-二氯乙烷	ND	一氯二溴甲烷	ND~0.911	1,2,4-三甲苯	0.376~0.385
顺-1,2-二氯乙烯	ND~0.316	1,2-二溴乙烷	ND~0.602	仲丁苯	0.307~0.630
氯溴甲烷	ND	四氯乙烯	ND~0.687	1,3-二氯苯	0.295~0.677
三氯甲烷	0.140~8.742	1,1,1,2-四氯乙烷	ND~0.690	1,4-二氯苯	0.333~1.863
2,2-二氯丙烷	ND~0.408	氯苯	0.307~0.523	对甲基异丙苯	ND~0.541
1,2-二氯乙烷	0.200~3.480	乙苯	0.343~0.390	1,2-二氯苯	0.202~0.595
1,1,1-三氯乙烷	ND~0.262	三溴甲烷	ND~0.713	正丁苯	0.374~1.810
1,1-二氯丙烷	0.330~0.394	邻二甲苯	0.350~0.375	1,2-二溴-3-氯丙烷	ND~0.373
四氯化碳	ND~0.274	苯乙烯	0.330~0.740	1,2,4-三氯苯	0.318~0.669
苯	0.120~0.228	1,1,2,2-四氯乙烷	ND~0.281	萘	0.247~1.970
二溴甲烷	ND~0.044	对/间二甲苯(总量)	0.340~0.463	六氯丁二烯	ND~0.689
1,2-二氯丙烷	0.122~0.541	1,2,3-三氯丙烷	0.443~0.950	1,2,3-三氯苯	0.234~0.630

### 3 讨 论

**3.1 色谱柱的选择** 本研究比较了 HP-VOC (60 m×0.2 mm×1.12 μm)、DB-624(30 m×0.32 mm×1.8 μm)和 DB-VRX(20 m×180 μm×1.0 μm)3 种色谱柱对组分的分离情况,发现均无法将对(间)二甲苯分离,且它们的特征离子均相同,只能合并计算。HP-VOC 色谱柱对各组分的分离度总体比其他 2 种色谱柱要大,但耗时很长,需 45 min 色谱分析时间。而 DB-VRX 所需时间最短,仅需 18 min。虽然使用 DB-VRX 色谱柱导致三溴甲烷与邻二甲苯、1,1,2,2-四氯乙烷与对(间)二甲苯、异丙苯与 4-溴氟苯、仲丁苯,以及 1,3-二氯苯无法根据保留时间分开,但由于它们的定性、定量离子不同,可通过质谱的提取离子方法避免相互干扰,从而实现定性、定量分析。为了应对突发水污染事件的快速测定需求,所以选择 DB-VRX 色谱柱。

**3.2 吹扫捕集条件选择** 吹扫捕集条件的选择需要考察全部组分的回收率水平。由于组分种类有 58 种,实验过程较复杂。本研究尝试采用氙代-1,2-二氯苯和 4-溴氟苯 2 种替代物的回收率来评价吹扫捕集条件。固定吹扫流速、吹扫时间、解吸温度、解吸时间 4 个影响因素中的 3 个,让 1 个因素变化,得到氙代-1,2-二氯苯和 4-溴氟苯的回收率。当其回收率达到最高时取各影响因素的最小值。得到吹扫捕集条件:吹扫流速 45 mL/min,吹扫时间 10 min,解吸温度 50 °C,解吸时间 2 min。在此吹扫捕集条件下,按照“1.2.5.3”项实验,得到各组分的实际回收率水平为

81.3%~113.5%,可以看出,替代物回收率可以用来评价 58 种 VOCs 的吹扫捕集效果。

本研究建立了 58 种 VOCs 同时测定的方法,且具有较好的准确度、精密度和检出限。一个样品的整体分析流程能在 30 min(色谱分析 18 min,吹扫时间为 10 min)内完成,能满足饮用水污染事件中 VOCs 快速测定需求,具有较大的现实意义和应用价值。

### 参考文献

- [1] 韩小亮,姚庆兵,邹莉,等.生活饮用水污染事件的流行病学调查报告[J].现代医药卫生,2017,33(18):2886-2887.
- [2] 陈芳,徐建芬,曹芸燕,等.钱塘江流域污水处理厂出水中挥发性有机物健康风险评估[J].科技通报,2019,35(9):184-189.
- [3] PELTO-HUIKKO A, AHONEN M, RUISM-ÄKI M, et al. Migration of volatile organic compounds (VOCs) from PEX-a pipes into the drinking water during the first five years of use [J]. Materials (Basel), 2021, 4(14):746-748.
- [4] 陈光强,詹以森,黄展,等.2016—2018 年江门市市区生活饮用水中挥发性有机物的调查[J].现代预防医学,2020,47(11):2075-2079.
- [5] 潘恩春,张芹,杨芳影,等.江苏省淮安市农村饮用水挥发性有机物污染现状及与人群健康关系的研究[J].中华流行病学杂志,2014,35(10):1105-1108. (下转第 377 页)

- 在七氟烷诱导的术后认知功能障碍老年大鼠中的作用[J]. 中国老年学杂志, 2021, 41(13): 2782-2785.
- [2] 吴振宇, 杨洋, 林夏妃, 等. 七氟烷对衰老模型大鼠认知功能及海马  $\alpha 7nAChR$  的影响[J]. 医学研究生学报, 2020, 33(4): 341-347.
- [3] DENNY W A, FLANAGAN J U. Inhibitors of discoidin domain receptor (DDR) kinases for cancer and inflammation [J]. *Biomolecules*, 2021, 11(11): 1671.
- [4] 王立侠, 韩金芬, 马明明. miR-150-5p 通过调控 DDR1 表达对缺氧缺糖诱导的大鼠皮质神经细胞损伤的影响[J]. 中国免疫学杂志, 2021, 37(12): 1428-1433.
- [5] ZHAO Z, MA L, LI Y, et al. MiR-124 protects against cognitive dysfunction induced by sevoflurane anesthesia in vivo and in vitro through targeting calpain small subunit 1 via NF- $\kappa$ B signaling pathway [J]. *Adv Clin Exp Med*, 2021, 30(7): 701-709.
- [6] 崔松勤, 黄红芳, 黄雪莲, 等. 七氟烷预处理和右美托咪定对老年食管癌患者术后认知功能的影响[J]. 天津医药, 2021, 49(10): 1089-1093.
- [7] 肖秀英, 吴华兵, 詹玮玮. 丙泊酚对七氟烷引起的大鼠海马神经细胞凋亡及认知障碍的影响及相关机制探究[J]. 解放军医药杂志, 2021, 33(2): 10-13.
- [8] HUANG X, YING J, YANG D, et al. The mechanisms of sevoflurane-induced neuroinflammation [J]. *Front Aging Neurosci*, 2021, 13: 717745.
- [9] 谢瑞霞, 王小英, 张建刚, 等. 盘状结构域受体 1 的研究进展[J]. 基础医学与临床, 2014, 34(4): 555-558.
- [10] MOLL S, DESMOULIÈRE A, MOELLER M J, et al. DDR1 role in fibrosis and its pharmacological targeting [J]. *Biochim Biophys Acta Mol Cell Res*, 2019, 1866(11): 118474.
- [11] ZHU M, XING D, LU Z, et al. DDR1 may play a key role in destruction of the blood-brain barrier after cerebral ischemia-reperfusion [J]. *Neurosci Res*, 2015, 96: 14-19.
- [12] 邢东, 董辉, 朱明霞. 体外培养大鼠皮层神经元和星形胶质细胞氧糖剥夺后 DDR1 的表达情况[J]. 陕西医学杂志, 2014, 43(2): 133-136.
- [13] 王立侠, 韩金芬, 马明明. miR-150-5p 通过调控 DDR1 表达对缺氧缺糖诱导的大鼠皮质神经细胞损伤的影响[J]. 中国免疫学杂志, 2021, 37(12): 1428-1433.

(收稿日期: 2022-05-12 修回日期: 2022-12-08)

(上接第 372 页)

- [6] 左锐, 尹芝华, 孟利, 等. 保障饮用水安全的水质监测分析[J]. 科技导报, 2017, 35(5): 54-58.
- [7] 朱红霞, 薛荔栋, 刘进斌, 等. 含氯消毒副产物的种类、危害与地表水污染现状[J]. 环境科学研究, 2020, 33(7): 1640-1647.
- [8] 张坤锋, 昌盛, 涂响, 等. 新冠疫情下武汉典型饮用水水源中 DBPs 污染特征与风险评估[J]. 环境科学, 2022, 43(2): 878-886.
- [9] 闫磊, 黄银芝, 高松, 等. 杭州湾北岸 36 种挥发性有机物污染特征及来源解析[J]. 环境科学研究, 2020, 33(3): 536-546.
- [10] 姜洋, 房丽萍, 杨刚, 等. 水体中挥发性有机物分析方法研究进展[J]. 环境化学, 2015, 34(9): 1611-1618.
- [11] 魏麟欢, 王宏伟, 郭维静. 生活饮用水中多种挥发性有机物的检测方法与应用[J]. 预防医学论坛, 2020, 26(1): 76-78.
- [12] 刘波, 黄为红, 朱铭洪, 等. 吹扫捕集气相色谱-质谱联用法同时测定饮用水中 16 种硫醇类致嗅物[J]. 江苏预防医学, 2017, 28(6): 626-628.
- [13] 依力哈木·扎依尔, 杨艳伟, 朱英, 等. 自动固相萃取-气相色谱-质谱法测定生活饮用水中 60 种半挥发性有机物[J]. 环境卫生学杂志, 2020, 10(1): 81-88.
- [14] 中华人民共和国卫健委, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 5750. 8-2006 生活饮用水标准检验方法有机物指标[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.

(收稿日期: 2022-05-08 修回日期: 2022-12-05)