· 卫生理化检验新技术新方法专题 实验技术 ·

固相萃取-气相色谱质谱法检测饮用水11种卤代咔唑

魏源[1]，刁永卿[2]，胡洁兰[2]，李禹昕[2]，郁晞[2]，王霞[1]

1.复旦大学公共卫生学院，上海 200032；2.上海市青浦区疾病预防控制中心，上海 201799

摘要：目的 建立固相萃取-气相色谱质谱法检测饮用水中11种卤代咔唑的方法，为该类污染物的水环境监测提供技术参考。**方法** 优化色谱程序升温条件和固相萃取洗脱剂，提高目标化合物分离效果和降低基质干扰。采集1 L自来水厂出厂水样，经HC-C_{18}固相萃取柱富集浓缩、二氯甲烷洗脱，采用气相色谱质谱联用仪的选择离子监测模式进行定量分析，采用替代标准品校正。建立11种卤代咔唑工作曲线，计算检出限、定量限、平均加标回收率和相对标准偏差（RSD）。**结果** 优化条件后检测11种卤代咔唑及替代标准品结果显示，各目标化合物峰形对称，基质干扰较少，分离度良好，满足定量、定性分析。11种卤代咔唑在0.1~5.0 ng/L范围内线性关系良好，相关系数均≥0.999 4；方法检出限为0.02~0.08 ng/L，定量限为0.04~0.25 ng/L。0.1、0.2和1.0 ng/L浓度下，11种卤代咔唑的平均加标回收率分别为89.1%~107.6%、97.8%~100.5%和92.6%~100.4%，RSD分别为2.9%~9.2%、1.0%~3.4%和0.8%~3.1%。**结论** 基于固相萃取-气相色谱质谱法测定饮用水中11种卤代咔唑的检测方法准确度和精密度良好，可用于饮用水中卤代咔唑的检测。

关键词：固相萃取；气相色谱质谱法；卤代咔唑

中图分类号：R123 **文献标识码：**A **文章编号：**2096-5087（2026）08-0844-05

Determination of eleven polyhalogenated carbazoles in drinking water by solid-phase extraction-gas chromatography-mass spectrometry

WEI Yuan[1], DIAO Yongqing[2], HU Jielan[2], LI Yuxin[2], YU Xi[2], WANG Xia[1]

1.School of Public Health, Fudan University, Shanghai 200032, China; 2.Qingpu District Center for Disease Control and Prevention, Shanghai 201799, China

Abstract: Objective To establish a method for the determination of 11 polyhalogenated carbazoles in drinking water by solid-phase extraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry, so as to provide technical reference for monitoring such pollutants in aquatic environments. **Methods** The temperature programming conditions of chromatography and the eluent for solid-phase extraction were optimized to improve the separation efficiency of target compounds and reduce matrix interference. A total of 1 L finished water sample from a waterworks was collected, enriched and concentrated using a HC-C_{18} solid-phase extraction cartridge, eluted with dichloromethane, quantitatively analyzed under the selected ion monitoring mode of gas chromatography-mass spectrometry, and corrected using surrogate standards. Working curves of 11 polyhalogenated carbazoles were established, and the limits of detection, limits of quantification, average spiked recovery rates and relative standard deviation (RSD) were calculated. **Results** Under the optimized conditions, the analysis results of 11 polyhalogenated carbazoles and surrogate standards showed that all target compounds exhibited symmetrical peak shapes, low matrix interference and good resolution, meeting the requirements of quantitative and qualitative analysis. The 11 polyhalogenated carbazoles showed good linear relationships in the range of 0.1-5.0 ng/L, with all correlation coefficients ≥0.999 4. The limits of detection ranged from 0.02 to 0.08 ng/L, and the limits of quantification ranged from 0.04 to 0.25 ng/L. At spiked concentrations of 0.1, 0.2 and 1.0 ng/L, the average spiked recovery rates were 89.1%-107.6%, 97.8%-100.5% and 92.6%-100.4%, respectively, with RSD of 2.9%-9.2%, 1.0%-3.4% and

DOI：10.19485/j.cnki.issn2096-5087.2026.08.020

基金项目：上海市公共卫生三年行动计划项目（GWVI-11.1-39）

作者简介：魏源，硕士研究生在读，公共卫生专业

通信作者：王霞，E-mail：xwang6@fudan.edu.cn

0.8%-3.1%, respectively. **Conclusion** The method based on solid-phase extraction-gas chromatography-mass spectrometry for the determination of 11 polyhalogenated carbazoles in drinking water demonstrates good accuracy and precision, and can be applied to the detection of polyhalogenated carbazoles in drinking water.

Keywords: solid-phase extraction; gas chromatography-mass spectrometry; polyhalogenated carbazoles

卤代咔唑是由卤素原子（氯、溴和碘）取代咔唑苯环上的氢原子而形成的新型环境有机污染物，具有持久性、生物累积性与生物放大性等特征，已在沉积物、土壤、大气、水体和生物体等多种环境介质中检出。环境中卤代咔唑来源复杂，除卤代靛蓝染料生产、光电材料制造和工业排放等人类活动外，也可通过氯过氧化物酶催化的卤化反应、森林火灾和火山爆发等自然途径生成[1]。研究表明，卤代咔唑可通过芳香烃受体介导产生类二噁英毒性效应[2]，对生态环境构成潜在威胁。卤代咔唑具有较高的辛醇-水分配系数，表现强疏水性、低水溶性[3]，在水环境中通常需要前处理富集浓缩后方可准确测定。目前，水环境中卤代咔唑的检测多采用液液萃取-气相色谱质谱法[4-6]，但该方法操作步骤复杂、有机溶剂消耗大且易产生污染[7]。固相萃取操作简便，兼具富集与净化功能[8]，在大体积水样痕量分析中展现出显著优势。在吸附剂选择方面，C_{18}反相固相萃取柱对水中疏水性有机物表现出较强的保留能力[9]，可用于疏水性有机物的富集。本研究采用 HC-C_{18}固相萃取柱，建立固相萃取-气相色谱质谱法检测饮用水中卤代咔唑的方法，为该类污染物的水环境监测提供技术参考。

1　材料与方法

1.1　仪器与试剂

7890B-5977A 高性能单四级杆气相色谱质谱联用仪和 HP-5MS 毛细管色谱柱（30 m×0.25 mm，0.25 μm）均购自美国 Agilent 公司；Milli-Q 超纯水机购自德国默克公司；CNWBOND HC-C_{18}固相萃取柱（500 mg，6 mL）购自上海安谱实验科技股份有限公司；Visiprep™SPE 真空固相萃取装置购自美国 Supelco 公司。11 种卤代咔唑混合标准储备液（2.5 μg/mL，纯度>98%）购自加拿大 Wellington Laboratories 公司，包括 3-氯咔唑（3-CCZ）、3,6-二氯咔唑（36-CCZ）、1,3,6,8-四氯咔唑（1368-CCZ）、2,3,6,7-四氯咔唑（2367-CCZ）、3-溴咔唑（3-BCZ）、1-溴-3,6-二氯咔唑（1-B-36-CCZ）、2,7-二溴咔唑（27-BCZ）、3,6-二溴咔唑（36-BCZ）、1,8-二溴-3,6二氯咔唑（18-B-36-CCZ）、1,3,6-三溴咔唑（136-BCZ）和 1,3,6,8-四溴咔唑（1368-BCZ）；替代标准品包括 9-苯基咔唑（PCZ，纯度>98%）、N-乙基咔唑（NECZ，纯度≥99%）和 3,6-二叔丁基咔唑（36-BtbCZ，纯度>98%）均购自北京百灵威科技有限公司；丙酮（色谱级）、甲醇（色谱级）和无水硫酸钠（优级纯）均购自德国默克公司；正己烷（HPLC 级）购自国药集团化学试剂有限公司；二氯甲烷（农残级）购自上海安谱实验科技股份有限公司。

1.2　方法

1.2.1　标准溶液配制

取卤代咔唑混合标准储备液（2.5 μg/mL），用甲醇逐级稀释配制成 50 μg/L 卤代咔唑混合标准溶液。分别向 1 L 超纯水中加入适量 50 μg/L 卤代咔唑混合标准溶液，配制成 0.1、0.2、0.5、1.0、2.0 和 5.0 ng/L 卤代咔唑混合标准系列溶液，现配现用。

1.2.2　替代标准品溶液配制

参照 Wang 等[10]研究方法，并根据目标化合物保留时间及结构相似性选择 PCZ、NECZ 和 36-BtbCZ 3 种替代标准品作为定量内标进行校正。替代标准品于样品前处理前加入，评价目标化合物在萃取及仪器分析过程中的损失情况。3-CCZ、3-BCZ 采用 NECZ 校正，36-CCZ、1368-CCZ 和 1-B-36-CCZ 采用 PCZ 校正，27-BCZ、36-BCZ、18-B-36-CCZ、136-BCZ、1368-BCZ 和 2367-CCZ 采用 36-BtbCZ 校正。分别称取上述适量替代标准品，用甲醇溶解，配制成 200 mg/L 的替代标准储备液。分别取上述替代标准储备液，用甲醇稀释配制成 1 mg/L 替代标准品混合中间液；取替代标准品混合中间液，用甲醇稀释配制成 100 μg/L 替代标准品混合工作溶液，于-20 ℃保存，2 周内使用。

1.2.3　样品前处理

采用 HC-C_{18}固相萃取柱对水样进行富集。HC-C_{18}固相萃取柱预先用 6 mL 二氯甲烷进行淋洗，去除小柱表面杂质，后分别用 6 mL 甲醇和超纯水进行活化和平衡。向 1 L 棕色采样瓶的水样（出厂水）中加入 10 μL 替代标准品混合工作溶液，混匀后以 2 mL/min 的流速过柱。上样结束后低真空度抽干 HC-C_{18}固相萃取柱，用 6 mL 二氯甲烷洗脱，洗脱液收集于玻璃试管，加入 1 g 无水硫酸钠去除残留水分并转移至氮吹管中，氮吹浓缩至近干，加入正己烷复溶至 100 μL，待测定。

1.2.4　气相色谱、质谱条件

气相色谱条件：HP-5MS 毛细管色谱柱（30 m×0.25 mm，0.25 μm）；载气为高纯氦气，纯度>99.99%，流速 1.0 mL/min；进样口温度 260 ℃；进样方式为不分流进样；进样体积 2 μL。升温程序：初始温度 60 ℃，保持 1.0 min；以 30.0 ℃/min 升至 160 ℃；以 2.5 ℃/min 升至 250 ℃；再以 25.0 ℃/min 升至 300 ℃，保持 5.0 min。

质谱条件：离子源为电子轰击离子源，碰撞能量 70 eV；离子源温度 230 ℃；四极杆温度 150 ℃；采用选择离子监测（selected ion monitoring，SIM）模式进行定量分析。

1.2.5　试验条件优化

参考文献［10-11］中检测卤代呋喹的气相色谱分析条件，配制 100 μg/L 卤代呋喹混合标准溶液和 100 μg/L 替代标准品混合工作溶液进行全扫描分析，获取各目标化合物的保留时间和特征质谱信息，据此确定 SIM 模式的监测离子和时间窗口。在此基础上，比较不同程序升温条件对目标化合物的分离效果、峰形及基线稳定性，确定分析条件。

取 50 μg/L 卤代呋喹混合标准溶液 100 μL，加至 1 L 超纯水样品中，分别采用丙酮-二氯甲烷混合溶液（1∶3，v∶v）和二氯甲烷对 HC-C_{18} 固相萃取柱进行洗脱，比较不同洗脱剂对目标化合物的洗脱效果，并采用空白样品评价背景干扰。

1.2.6　方法学评价指标

以超纯水为基质，0.1~5.0 ng/L 卤代呋喹混合标准系列溶液分别加入 10 μL 替代标准品混合工作溶液，使替代标准品在水样中加标浓度为 1 ng/L。以目标化合物与替代标准品质量浓度比为横坐标、峰面积比值为纵坐标，绘制工作曲线，计算相关系数（R^2）。以 3 倍信噪比（S/N=3）对应的样品质量浓度作为方法检出限；S/N=10 对应的样品质量浓度作为方法定量限。以超纯水为基质，在 0.1、0.2 和 1.0 ng/L 浓度下进行空白加标回收率试验，每个浓度设置 6 个平行，同时设置空白对照，计算平均加标回收率和相对标准偏差（relative standard deviation，RSD）。

1.2.7　实际样品检测

连续采集长江入海口某城市自来水厂的出厂水样 3 份，每份样品采集 1 L，同时设置实验室空白（超纯水）与运输空白，水样均于 4 ℃条件下避光保存，并在 4 d 内完成前处理，采用优化后方法检测出厂水中 11 种卤代呋喹。

2　结　果

2.1　试验条件优化结果

2.1.1　程序升温优化

程序升温 1 条件虽能实现目标化合物的有效分离，但在 SIM 模式下，在程序升温后期，色谱基线出现系统性漂移；程序升温 2 条件同样在运行后段出现色谱基线抬高。程序升温 3 和程序升温 4 条件均可实现目标化合物的有效分离，其中程序升温 4 条件下获得了更稳定的色谱基线和良好峰形，因此选择程序升温 4 条件用于后续分析。程序升温优化参数见表 1。

表 1　程序升温优化参数

Table 1　Optimization parameters for temperature programming

项目	速率/（℃/min）	温度/℃	保持时间/min	运行时间/min
程序升温1	初始	50	1.0	1.0
	25.0	100	2.0	5.0
	10.0	315	5.0	31.5
程序升温2	初始	120	1.0	1.0
	10.0	160	/	5.0
	2.5	250	/	41.0
	25.0	300	5.0	48.0
程序升温3	初始	120	1.0	1.0
	10.0	160	/	5.0
	2.5	250	/	41.0
	5.0	280	/	47.0
	5.0	300	5.0	56.0
程序升温4	初始	60	1.0	1.0
	30.0	160	/	4.3
	2.5	250	/	40.3
	25.0	300	5.0	47.3

注：/表示未设置该参数。

2.1.2　前处理洗脱剂优化

采用丙酮-二氯甲烷混合溶液洗脱时，空白样品在 3-CCZ 和 3-BCZ 的保留时间处出现杂峰，干扰目标化合物的识别与定量；采用二氯甲烷洗脱时，空白样品色谱无明显杂峰干扰，且目标化合物均有效检出，因此选择二氯甲烷作为前处理洗脱剂，并用于后续方法学验证。

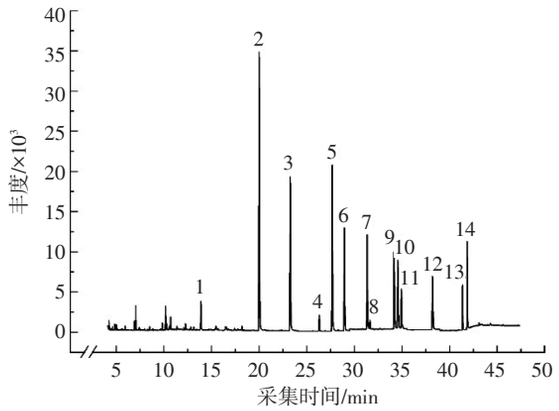
2.2　仪器分析结果

优化后条件分析结果显示，各目标化合物峰形对称，无明显拖尾现象，基质干扰较少，分离度良好，满足定量、定性分析。总离子流色谱图见图 1，保留时间和定量、定性离子见表 2。

2.3　检出限和定量限

在 0.1~5.0 ng/L 范围内，11 种卤代呋喹线性回

归方程 R^2 均≥0.999 4，线性关系良好，检出限为0.02~0.08 ng/L，定量限为0.04~0.25 ng/L。见表3。



注：1表示NECZ，2表示3-CCZ，3表示3-BCZ，4表示PCZ，5表示36-CCZ，6表示1368-CCZ，7表示1-B-36-CCZ，8表示36-BtbCZ，9表示27-BCZ，10表示36-BCZ，11表示18-B-36-CCZ，12表示136-BCZ，13表示1368-BCZ，14表示2367-CCZ。

图1 SIM模式下卤代咔唑及替代标准品总离子流色谱图

Figure 1 Total ion chromatogram of polyhalogenated carbazoles and surrogate standards in SIM mode

2.4 回收率与精密度

PCZ、NECZ和36-BtbCZ 3种替代标准品的平均加标回收率为97.5%~118.6%。空白加标回收率试验结果显示，0.1、0.2和1.0 ng/L浓度下，11种卤代咔唑平均加标回收率分别为89.1%~107.6%、97.8%~100.5%和92.6%~100.4%，RSD分别为2.9%~9.2%、1.0%~3.4%和0.8%~3.1%。见表3。

表2 卤代咔唑及替代标准品的保留时间和定量、定性离子

Table 2 Retention times, quantitative and qualitative ions of polyhalogenated carbazoles and surrogate standards

目标化合物	保留时间/min	定量离子/（m/z）	定性离子/（m/z）
NECZ	13.8	195.1	195.1，180.1
3-CCZ	20.0	201.1	201.1，166.1
3-BCZ	23.3	245.0	245.0，166.1
PCZ	26.3	243.2	243.2，120.6
36-CCZ	27.7	235.0	235.0，200.0
1368-CCZ	29.0	304.9	304.9，268.0
1-B-36-CCZ	31.4	314.9	314.9，198.0
36-BtbCZ	31.6	279.3	279.3，264.1
27-BCZ	34.2	324.9	324.9，164.1
36-BCZ	34.6	324.9	324.9，164.1
18-B-36-CCZ	35.0	392.9	392.9，198.0
136-BCZ	38.2	402.8	402.8，164.1
1368-BCZ	41.4	482.8	482.8，162.0
2367-CCZ	41.8	305.0	305.0，268.0

表3 卤代咔唑线性回归方程、检出限、定量限、平均加标回收率和RSD

Table 3 Linear equations, limits of detection, limits of quantification, average spiked recovery rates and RSD of polyhalogenated carbazoles

目标化合物	线性回归方程	R^2	检出限/（ng/L）	定量限/（ng/L）	平均加标回收率/%			RSD/%		
					0.1 ng/L	0.2 ng/L	1.0 ng/L	0.1 ng/L	0.2 ng/L	1.0 ng/L
3-CCZ	y=0.316 5x-0.010 5	0.999 8	0.02	0.05	95.4	100.5	99.9	3.4	3.4	0.8
3-BCZ	y=0.235 0x-0.010 5	0.999 7	0.02	0.05	98.9	99.2	99.5	3.3	1.6	1.1
36-CCZ	y=0.179 8x-0.003 2	0.999 6	0.02	0.06	100.0	99.2	98.0	5.9	2.3	1.7
1368-CCZ	y=0.178 2x+0.005 4	0.999 4	0.02	0.04	89.1	97.8	95.3	4.9	1.9	2.1
1-B-36-CCZ	y=0.235 1x-0.010 5	0.999 6	0.03	0.09	102.7	98.0	95.1	8.6	1.7	2.1
27-BCZ	y=0.308 4x+0.004 8	0.999 5	0.03	0.10	107.6	99.3	97.4	5.5	1.0	3.1
36-BCZ	y=0.254 5x-0.006 7	0.999 5	0.07	0.22	104.9	99.6	100.4	6.1	3.1	1.9
18-B-36-CCZ	y=0.149 0x+0.002 7	0.999 4	0.08	0.25	93.5	99.6	96.8	5.5	1.9	2.8
136-BCZ	y=0.201 9x+0.000 9	0.999 7	0.04	0.12	92.6	98.4	95.5	2.9	1.4	2.3
1368-BCZ	y=0.094 3x+0.004 6	0.999 5	0.07	0.23	90.2	100.2	96.6	9.2	2.3	0.9
2367-CCZ	y=0.156 2x-0.007 2	0.999 7	0.03	0.09	101.3	98.1	92.6	6.2	2.3	1.4

2.5 实际样品检测结果

实验室空白（超纯水）和运输空白均未检出目标化合物，表明样品采集、运输和分析过程中未引入污染。3份出厂水样均有卤代咔唑检出，共检出4种卤代咔唑，其中3-BCZ、36-CCZ和1-B-36-CCZ的检出率为100%。出厂水样中各同系物的平均质量浓度由低至高依次为3-CCZ（0.11 ng/L）、1-B-36-CCZ（0.26 ng/L）、3-BCZ(0.27 ng/L)和36-CCZ(0.36 ng/L)。

3 讨 论

本研究建立了基于固相萃取-气相色谱质谱法测定饮用水中11种卤代咔唑的检测方法，方法学验证结果表明，该方法具有良好的线性关系（R^2≥0.999 4）、较低的检出限（0.02~0.08 ng/L）、较高的回收率（89.1%~107.6%）和较好的精密度（RSD为0.8%~9.2%），能够满足饮用水中卤代咔唑的定量分

析需求。

本研究通过优化色谱程序升温条件和洗脱剂，保证了色谱基线稳定性和目标化合物的有效分离。本研究优化初始柱温和升温速率后，11种卤代咔唑及替代标准品均获得良好的色谱响应和分离效果，为后续方法学评价提供了基础。在前处理过程中，通过比较不同洗脱剂发现，采用二氯甲烷作为洗脱剂可有效降低空白干扰，保证目标化合物的有效分离。已有研究表明，提取卤代咔唑的常用有机溶剂中，二氯甲烷表现出较高的提取性能[8]；同时，卤代咔唑的强疏水性促使其易于从水相向有机相转移。在富集材料的选择上，本研究采用HC-C_{18}固相萃取柱进行富集，与其他研究中使用Poly-Sery PSD固相萃取柱[10]相比，两者同属反相吸附材料，其中Poly-Sery PSD固相萃取柱填料为聚苯乙烯-二乙烯基苯，常用于反相条件下保留疏水性有机污染物，而HC-C_{18}固相萃取柱则通过其表面的硅醇基经硅烷化反应键合疏水性烷基[12]，对水中卤代咔唑具有良好的富集能力，且成本更具优势。

本研究建立的方法具有良好的准确度和精密度。不同加标浓度下的平均加标回收率为89.1%~107.6%，RSD为0.8%~9.2%，符合GB/T 5750—2023《生活饮用水标准检验方法》[13]中准确度和精密度的要求。与既往研究相比，本研究方法的平均加标回收率与东海海水中液液萃取法（87%~113%）[4]、黄海海水中液液萃取法（80.0%~98.8%）[5]的平均加标回收率相近；也与采用Poly-Sery PSD固相萃取柱检测武汉市饮用水（92.7%~104.9%）[10]和采用C_{18}固相萃取盘检测浙江省自来水（86.6%~112.8%）[11]的平均加标回收率相近。采用本研究建立的方法对某出厂水样进行检测，发现水样均检出卤代咔唑，其中，36-CCZ的平均质量浓度较高，提示卤代咔唑可在饮用水中赋存，需关注其潜在健康风险。

本研究建立了适用于饮用水中11种卤代咔唑的检测方法，在0.1~5.0 ng/L范围内，线性关系良好，具有良好的准确度、精密度和检测能力，为饮用水中卤代咔唑的检测提供方法参考。然而，本研究方法在其他复杂环境水体中的适用范围有待进一步研究，未来可结合更高灵敏度的检测技术和更广泛的环境样品调查，完善卤代咔唑的环境监测体系。

参考文献

[1] 林坤德，陈艳秋，袁东星 . 新型污染物卤代咔唑的环境行为及生态毒理效应［J］. 环境科学，2016，37（4）：1576-1583.

[2] Ji C Y，Shen C，Zhou Y X，et al.AhR agonist activity confirmation of polyhalogenated carbazoles（PHCZs）using an integration of *in vitro*，*in vivo*，and in silico models［J］.Environ Sci Technol，2019，53（24）：14716-14723.

[3] Tu J M，Zeng X Y，Liang Y，et al.Polyhalogenated carbazoles in the environment：analysis，origins，occurrence，and toxicity［J/OL］.Environ Pollut，2025，372［2026-08-02］.https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.125910.

[4] Jin H B，Zhao N，Hu H M，et al.Occurrence and partitioning of polyhalogenated carbazoles in seawater and sediment from East China Sea［J/OL］.Water Res，2021，190［2026-08-02］.https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116717.

[5] Li Z M，Fan X Y，Mu Y D，et al.Distribution characteristics and risk assessment of polyhalogenated carbazoles in sea water of the Yellow Sea［J/OL］.Mar Pollut Bull，2020，161［2026-08-02］.https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111656.

[6] Deng Z C，Hu S T，Tang L M，et al.Carbazole and polyhalogenated carbazoles in the marine environment around the Zhoushan Archipelago：distribution characteristics，environmental behavior，and sources［J/OL］.J Hazard Mater，2023，442［2026-08-02］.https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129999.

[7] 王桂珍，王金花，张飞，等 . 固相萃取-气相色谱-质谱法测定地表水中的氯苯类化合物［J］. 化学分析计量，2024，33（2）：40-45.

[8] Sun Y X，Zheng M H，Yang L L，et al.Progress of congener specific analysis of polyhalogenated carbazoles in the environment［J/OL］.TrAC Trends Anal Chem，2022，157［2026-08-02］.https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116755.

[9] 薛俊发 .C18固相萃取与GC-MS对地表水苯并（a）芘的测定［J］. 河南化工，2022，39（9）：50-52.

[10] Wang G W，Jiang T M，Li S，et al.Occurrence and exposure risk evaluation of polyhalogenated carbazoles（PHCZs）in drinking water［J/OL］.Sci Total Environ，2021，750［2026-08-02］.https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141615.

[11] Hu H M，Zhao M R，Jin H B.Determination of polyhalogenated carbazoles in waters at low nanogram-per-liter concentrations with solid-phase disk extraction［J］.J Sep Sci，2021，44（20）：3840-3848.

[12] 张样盛 . 固相萃取技术及其在环境监测中的应用研究［J］. 绿色科技，2017，19（18）：133-136.

[13] GB/T 5750—2023　生活饮用水标准检验方法［S］.

收稿日期：2026-05-06　**修回日期**：2026-08-02　**本文编辑**：徐亚慧