

闭凤丽, 张凌云, 刘波, 等. 在线固相萃取-超高效液相色谱-紫外法同时测定水中的 3 种氯酚类化合物[J]. 净水技术, 2026, 45(1): 188-193.
BI F L, ZHANG L Y, LIU B, et al. Simultaneous determination of 3 kinds of chlorophenols in water by online solid phase extraction-ultra performance liquid chromatography-ultraviolet methods [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(1): 188-193.

在线固相萃取-超高效液相色谱-紫外法同时测定水中的 3 种氯酚类化合物

闭凤丽, 张凌云*, 刘波, 徐荣, 邹启贤

(深圳水务<集团>有限公司水质监测中心, 广东深圳 518000)

摘要 【目的】 文章采用在线固相萃取 (online SPE) 装置与超高效液相色谱-紫外检测器 (UPLC-TUV) 连接, 建立了一种能同时测定原水和饮用水中 3 种氯酚类化合物 (2, 4-二氯酚、2, 4, 6-三氯酚和五氯酚) 的快速检测方法。【方法】 样品经过滤膜简单过滤处理后, 只需取 5 mL 样品即可直接上机检测。通过 online SPE 自动切换六通阀的方式, 实现 2 根在线固相萃取柱 Oasis HLB Direct Connect HP (20 μm , 2.1 mm \times 30 mm) 依次对样品进行富集和净化, 采用 ACQUITY UPLC HSS T3 色谱柱 (1.7 μm , 2.1 mm \times 50 mm) 进行分离, 以 0.05% 乙酸水和 9:1 的乙腈/甲醇溶液作为 online SPE 和液相梯度洗脱溶剂, 采用紫外检测器进行定量分析。【结果】 3 种氯酚类分离效果良好, 同时在 0.50~10.00 $\mu\text{g/L}$ 质量浓度内具有良好的线性关系, 相关系数 (r) 大于 0.998, 方法测定下限为 0.40~0.56 $\mu\text{g/L}$, 满足我国水源水和生活饮用水相关标准限值要求。将目标分析物在不同浓度水平下加标, 超纯水、原水和饮用水 (出厂水、管网水) 的加标回收率为 80.4%~117% ($n=6$), 相对标准偏差为 0.6%~9.9% ($n=6$)。【结论】 该检测方法灵敏度、准确度和精密度较高, 符合国家标准要求。此外, 相对于传统的固相萃取方法而言, 该方法预处理和仪器分析时长在 15 min 以内, 且固相萃取柱可重复使用, 具有检测用时短、成本低以及环境更友好等特点, 适用于原水和饮用水中 3 种氯酚类化合物的快速检测。

关键词 氯酚类 在线固相萃取 (online SPE) 原水 饮用水 水质

中图分类号: X832 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)01-0188-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.01.023

Simultaneous Determination of 3 Kinds of Chlorophenols in Water by Online Solid Phase Extraction-Ultra Performance Liquid Chromatography-Ultraviolet Methods

BI Fengli, ZHANG Lingyun*, LIU Bo, XU Rong, ZOU Qixian

(The Monitoring Centre of Water, Shenzhen Water <Group> Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract [Objective] In this paper, a fast approach for the simultaneous determination of three chlorophenol chemicals (2,4-dichlorophenol, 2,4,6-trichlorophenol and pentachlorophenol) in drinking water and source water is developed by using an online solid phase extraction (online SPE) system connected with ultra performance liquid chromatography-tandem ultraviolet detector (UPLC-TUV). [Methods] After simple filtration of the water samples, only 5 mL of the samples were taken for directly detection. The samples were concentrated and purified in turn by switching the six-way valve of the online solid phase extraction device and using Oasis HLB Direct Connect HP (20 μm , 2.1 mm \times 30 mm) as online SPE extraction column, and separated on an ACQUITY UPLC HSS T3 column (1.7 μm , 2.1 mm \times 50 mm), with 0.05% acetic acid and 9:1 mixture of acetonitrile/methanol as the elution solvents for the online SPE and the liquid phase chromatography mobile phase for gradient elution. The samples were detected by TUV. [Results] The separation effects and linearity in 0.50–10.00 $\mu\text{g/L}$ of three chlorophenol chemicals were good, in which the correlation coefficients (r) were no less than 0.998, the lower limits of determination were in the range from 0.40 $\mu\text{g/L}$ to 0.56 $\mu\text{g/L}$, which met the relevant standard limits for raw water and drinking water in China. The spiked recovery rate for source water and drinking

[收稿日期] 2025-08-19

[作者简介] 闭凤丽 (1992—), 工程师, 主要从事水质分析和新污染物研究等工作, Email: 1197295006@qq.com。

[通信作者] 张凌云, 高级工程师, 主要从事水质技术管理和污染研究等工作, Email: 270983692@qq.com。

water at different concentrations were in the range of 80.4%–117% ($n=6$). And the relative standard deviations were in the range of 0.6%–9.9% ($n=6$). [**Conclusion**] This method has high sensitivity, accuracy and precision, and meets the requirements of national standards. In addition, the total time for pretreatment and instrumental analysis is within 15 minutes comparing with the traditional solid-phase extraction method. The SPE column can be reused. The method has the characteristics of short detection time, low cost and more environmental friendliness, which is suitable for the fast determination of three chlorophenol chemicals in source water and drinking water.

Keywords chlorophenols online solid phase extraction (online SPE) raw water drinking water water quality

氯酚类化合物对生物具有致毒性、致畸性、致癌性,对生态系统和人类健康具有显著危害^[1-2]。目前氯酚类化合物在我国地表水中广泛检出,其主要来源于腐植酸的氯化、含氯杀虫剂的使用以及木材和皮革的浸渍剂,被认为是环境水中主要污染物之一^[3-4]。在饮用水管控方面,水源水经加氯处理后易形成毒性更大的氯酚类污染物^[2,5],严重威胁人类健康。因此,氯酚类化合物是我国水体中重点关注的污染物之一。

早在 1989 年,氯酚类化合物就被列入我国水中优先控制污染物黑名单^[6]。近年来,我国对新污染的管控不断加强,五氯苯酚及其盐类和酯类由于其致癌性被列入我国《重点管控新污染物清单》(2023 年版)。此外,我国《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)^[7]和《生活饮用水水质标准》(GB 5749—2022)^[8]分别对地表水和饮用水中氯酚类污染物的限值做出了明确的规定。与此同时,有关部门颁布了一系列检测标准方法,归纳起来分别有气相色谱法^[9]、气相色谱质谱联用法^[10]、液相色谱^[11]以及液相色谱质谱联用法^[12]。由于水体中氯酚类化合物浓度处于痕量级别,因此大部分的标准方法都需要通过液液萃取或固相萃取等方式富集后才能上机测定。以上方法多为人工处理,不仅操作繁琐、耗时、给检测带来诸多不便,而且使用大量的有机试剂和固相萃取柱,不利于环境保护。综上,建立一种灵敏度、准确度和精密度符合标准要求,且操作简单、环保高效的水中氯酚类检测方法具有重要意义。不少研究者^[13]合成了具有良好富集效果的新型材料,并搭建在线富集进样检测装置,取得了不错的成效,但此类方法多未市场化,不便推广使用。另外,张秀蓝等^[14]建立了在线固相萃取-液相色谱法测定水中的 10 种苯酚类污染物,取得了较满意的结果。然而在实际水样中,仍存在复杂基质干扰,需要通过标准加入法才能部分去除基体干扰,给检测带来

不便。

本文采用已经市场化的在线固相萃取-超高效液相色谱-紫外检测器(Online-SPE-UPLC-TUV)设备,建立了一种能同时测定水源水和饮用水中 3 种氯酚类化合物检测方法。水样仅通过滤膜过滤即可上机测试,简化了前处理步骤,缩短了分析时间。同时,由于固相萃取柱可以循环使用,有效降低了分析成本,且环境友好。

1 试验部分

1.1 仪器与试剂

超高效液相色谱仪为 Waters Acquity UPLC,美国;全自动在线固相萃取前处理仪为 2777C Sample Manager,美国;超纯水系统为 Thermo MicroPure UV,德国;分析色谱柱为 Waters ACQUITY UPLC HSS T3 (1.7 μm , 2.1 mm \times 50 mm),沃特世科技有限公司,美国;在线固相萃取(online SPE)柱为 Oasis HLB Direct Connect HP (20 μm , 2.1 mm \times 30 mm),沃特世科技有限公司,美国。

试剂和溶剂:标准品 2,4-二氯酚、2,4,6-三氯酚和五氯酚皆购于中国计量科学研究院,质量浓度为 1 000 $\mu\text{g/mL}$;甲醇、乙腈、丙酮、正己烷、乙酸皆为色谱纯,默克,美国;实验室用水为高纯水,电导率为 18.2 M Ω 。

1.2 色谱条件

全自动在线固相萃取仪的设备装置如图 1 所示,整个系统由 2 根在线固相萃取柱、二元泵(ACQUITY BSM)、四元泵(ACQUITY QSM)和六通阀及管路组成。样品在进样口 A 处进样,由四元泵溶剂带动样品进入固相萃取柱 A 或 B 上富集,样品富集后由二元泵带动流动相进入固相萃取柱洗脱,并带入色谱柱分离,进入检测器检测。六通阀 B 的主要作用是切换固相萃取柱流路,确保其中 1 根萃取柱在富集样品的同时,清洗另一个萃取柱,2 根萃取柱轮流工作,样品从过滤到进样分析仅需要

15 min,缩短了分析时间。

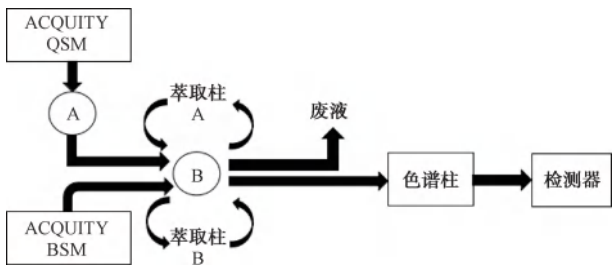


图 1 全自动在线固相萃取仪装置
Fig. 1 Automatic Online SPE Instrument Device

二元泵和四元泵的淋洗液及淋洗梯度分别如表 1 和表 2 所示。色谱柱温度为 30 ℃。2,4-二氯酚和 2,4,6-三氯酚的检测波长为 295 nm,7.15 min 时转为 305 nm,检测五氯酚,不同物质的检测波长及保留时间如表 3 所示。上机溶液体积为 5 mL。

表 1 液相色谱分离条件(二元溶剂泵)
Tab. 1 LC Separate Conditions (Binary Solvent Pump)

时间/ min	流速/ (mL·min ⁻¹)	A	B	梯度变化 曲线
Initial	0.400	95.0%	5.0%	Initial
3.80	0.010	95.0%	5.0%	11
4.10	0.400	95.0%	5.0%	11
7.00	0.400	5.0%	95.0%	6
9.00	0.400	5.0%	95.0%	6
9.50	0.400	95.0%	5.0%	6
11.00	0.400	95.0%	5.0%	6
60.00	0.000	95.0%	5.0%	11

注:A 相为 0.05%乙酸水;B 相为 90%乙腈+10%甲醇溶液;运行时间为 11.00 min;6 为梯度变化;11 为终止时间即时变化。

表 2 液相色谱分离条件(四元溶剂泵)
Tab. 2 LC Separate Conditions (Quadruple Solvent Pump)

时间/ min	流速/ (mL·min ⁻¹)	A	B	C	D	梯度变化 曲线
Initial	2.000	100.0%	0.0	0.0	0.0	Initial
0.50	2.000	0.0	95.0%	5.0%	0.0	11
3.80	0.010	0.0	95.0%	5.0%	0.0	11
4.10	2.000	0.0	0.0	0.0	100.0%	11
7.00	2.000	100.0%	0.0	0.0	0.0	11
60.00	0.000	100.0%	0.0	0.0	0.0	11

注:A 相为超纯水;B 相为 0.05%乙酸水;C 相为 90%乙腈+10%甲醇溶液;D 相为 1:1:1 的甲醇、丙酮、正己烷溶液。

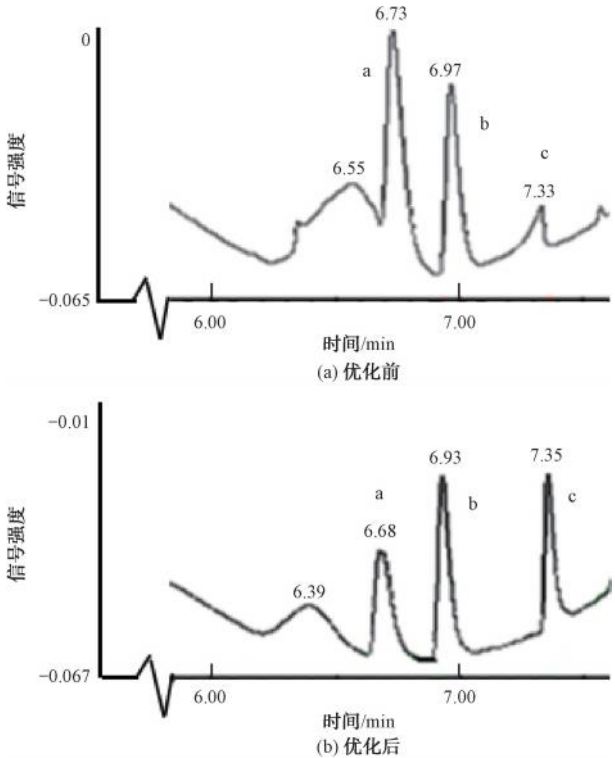
表 3 不同物质的检测波长及保留时间
Tab. 3 Detection Wavelengths and Retention Times of
Different Substances

类别	2,4-二氯酚	2,4,6-三氯酚	五氯酚
检测波长/nm	295	295	305
保留时间/min	6.68	6.93	7.35

2 结果与讨论

2.1 在线萃取条件优化

本文研究了酸度对氯酚类富集和分离效果的影响。在本试验中,不同溶液功能有所差异,其中四元泵 B 相为将样品带入到在线 SPE 进行富集的溶液,而二元泵 A 相为在线 SPE 的洗脱溶液。试验研究了不同上样溶液和洗脱溶液作用下目标物的分离和响应效果,如图 2 所示。优化前,二元泵 A 相和四元泵 B 相均为超纯水,2,4-二氯酚色谱峰与前面的杂峰无法有效分离,此外,五氯酚的响应灵敏度不高。本研究根据酚类化合物在酸性条件下呈分子状态的特性,在二元泵 A 相和四元泵 B 相中添加 0.05%的乙酸,改变氯酚类物质与在线 SPE 固定相之间相互作用,更有利于物质富集和分离。结果显



注:a 为 2,4-二氯酚;b 为 2,4,6-三氯酚;c 为五氯酚。

图 2 萃取条件优化前后色谱对比

Fig. 2 Comparison of Chromatography before and after Optimized Extraction Conditions

示:优化后 2,4-二氯酚色谱峰与前杂峰基本分离,五氯酚的信号峰明显加强,更有利于 3 种氯酚类物质的定性定量分析。

2.2 标准曲线、检出限和测定下限

根据上述优化后的条件,移取适量浓度的 3 种氯酚类化合物的混合标准溶液,以纯水为介质,配制质量浓度为 0.50、1.00、2.00、5.00、10.00 $\mu\text{g/L}$ 的工作溶液,以目标化合物的峰面积对浓度进行线性拟合。结果显示:在该浓度范围内,3 种氯酚类化合物均具有良好的线性关系,相关系数(r) ≥ 0.998 。根据《环境监测分析方法标准制订技术导则》(HJ 168—2020)^[15]中的规定,准确量取一定体积的混合标准溶液,以纯水为介质,按照逐级稀释的方式配制

质量浓度为 0.50 $\mu\text{g/L}$ 的加标水样,连续 7 次测定,结果如表 4 所示,按照式(1)计算检出限(MDL),并以 4 倍的检出限为测定下限。以上结果如表 5 所示。由表 5 可知,本方法中各物质的测定下限远低于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)和《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)中氯酚类化合物的限值,满足水源水和饮用水中氯酚类物质的检测要求。

$$M_{DL} = t_{(0.95, n=6)} \times S \tag{1}$$

其中: M_{DL} ——检出限, $\mu\text{g/L}$;
 t ——置信度为 0.95,自由度(n)为 6 时的 t 分布值;
 S ——7 次平行测定的标准偏差。

表 4 目标物质检出限测定结果
Tab. 4 Detection Limit Results of the Target Substances

目标物质	检测结果/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)						
	1	2	3	4	5	6	7
2,4-二氯酚	0.588	0.594	0.549	0.534	0.485	0.600	0.526
2,4,6-三氯酚	0.530	0.580	0.577	0.596	0.569	0.587	0.488
五氯酚	0.599	0.593	0.599	0.566	0.514	0.598	0.584

表 5 目标物质的标准曲线和检出限等信息
Tab. 5 Standard Curve and Detection Limits of the Target Substances

目标物质	标准曲线	r	检出限/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	测定下限/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
2,4-二氯酚	$y = 262.544x - 16.3607$	0.9991	0.14	0.56
2,4,6-三氯酚	$y = 313.711x + 9.11133$	0.998	0.13	0.52
五氯酚	$y = 146.431x - 12.9489$	0.9995	0.098	0.40

2.3 方法的精密度和准确度

为了验证方法的精密度和准确度,本研究使用上述检测方法分别对超纯水、水源水和饮用水(出厂水和管网水)等实际水样进行了测定,并采用混合标准溶液分别配制加标质量浓度为 1.0 $\mu\text{g/L}$ 和 8.0 $\mu\text{g/L}$ 的不同样品溶液,计算相对标准偏差和加标回收率,如表 6 所示。结果显示:超纯水在不同浓度下的加标回收率为 91.0%~114%,相对标准偏差(RSD)为 2.1%~5.9%,实际水样在不同浓度下的加标回收率为 80.4%~117%,RSD 为 0.6%~9.9%,表明该方法的精密度和准确度均满足实际水样的检测要求。值得注意的是,当采集含有余氯等氧化剂的水样时,水样中应加入适量的抗坏血酸或硫代硫酸钠脱氯,以消除干扰,确保检测结果真实可靠^[11,16]。

表 6 实际水样加标精密度和回收率
Tab. 6 Standard Precision and Recovery Rate of Actual Water Samples

目标物质	水样类别	本底质量浓度/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	RSD	回收率
2,4-二氯酚	超纯水	N. D.	2.4%~5.9%	91.0%~111%
	水源水	N. D.	3.4%~8.2%	88.9%~111%
	出厂水	0.17	5.1%~7.2%	83.6%~105%
	管网水	N. D.	4.2%~4.4%	90.5%~106%
2,4,6-三氯酚	超纯水	N. D.	3.0%~3.4%	104%~114%
	水源水	0.23	2.2%~7.9%	93.4%~116%
	出厂水	N. D.	7.3%~8.3%	84.2%~106%
	管网水	0.22	0.6%~8.3%	97.8%~111%
五氯酚	超纯水	N. D.	2.1%~3.8%	102%~112%
	水源水	0.42	2.0%~8.7%	89.2%~117%
	出厂水	0.29	6.1%~9.9%	85.8%~111%
	管网水	0.42	2.8%~3.6%	80.4%~87.8%

注:N. D. 表示未检出。

2.4 不同方法的比较分析与讨论

本研究从方法性能(检出限或测定下限、精密度和准确度)以及方法使用设备、试剂耗材情况等不同角度比较了本方法与不同标准方法之间的差异,如表 7 所示。结果表明:本研究中检测方法不仅

满足相关产品标准要求,而且在方法性能方面也与现行检测标准相当。此外,本方法还具有样品用量少、操作简便、耗时短以及经济实惠等特性,对于水源水和饮用水中氯酚类的快速检测具有一定的使用参考价值。

表 7 不同方法的比较分析
Tab. 7 Comparative Analysis of Different Methods

项目	本试验方法	《水质 酚类化合物的测定 液液萃取/气相色谱法》 (HJ 676—2013)	《水质 酚类化合物的测定 气相色谱-质谱法》 (HJ 744—2015)	《城镇供水水质 标准检验方法》 (CJ/T 141—2018)	《水中 2,4-二氯酚、2,4,6-三氯酚和五氯酚的测定 高效液相色谱-串联质谱法》 (T/GAIA 005—2020)
适用范围	水源水、饮用水	地表水、地下水、生活污水、工业废水	地表水、地下水、生活污水、工业废水	城镇供水及其水源水	饮用水、地表水、地下水
检出限/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.098~0.14	1.1~1.2	0.1~0.2		0.21~0.97
测定下限/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.40~0.56	4.4~4.8	0.4~0.8	0.27~0.54	0.84~3.88
精密度	0.6%~9.9%	1.3%~14.5%*	2.3%~9.2%*	4.8%~11%	0.5%~10.9%*
准确度	80.4%~117%	65.9%~113.3%*	85.4%~105%	93.9%~100%	80.0%~118%
仪器设备情况	在线 SPE-液相色谱仪,价格中等	气相色谱-氢火焰检测器,价格较低	气相色谱串联质谱,价格中等	液相色谱仪,价格中等	液相色谱串联质谱仪,价格高昂
试剂耗材情况	试剂用量少, SPE 柱可重复使用	萃取试剂消耗较多,不利于环境	萃取试剂消耗较多, SPE 柱不可重复使用	萃取试剂消耗较多, SPE 柱不可重复使用	试剂用量较少
前处理情况	滤膜过滤,全自动在线 SPE 上机测试	液液萃取,操作繁琐	液液萃取或固相萃取后再衍生化处理上机检测,操作繁琐	固相萃取后上机测试,操作繁琐	滤膜过滤,直接上机测试
样品用量	5 mL	500 mL	250 mL	1 000 mL	10 μL
单个样品耗时	15 min	数小时以上	数小时以上	数小时以上	5 min

注:* 为实验室内 RSD。

3 结论

(1) 本文采用已经市场化的在线 SPE-UPLC-TUV 设备建立了水体中 3 种氯酚类化合物的检测方法,该方法测定下限为 0.40~0.56 $\mu\text{g}/\text{L}$,回收率为 80.4%~117%,RSD 为 0.6%~9.9%,满足我国标准要求。

(2) 该方法自动化程度高,样品过滤即可上机,无需进行复杂的人为处理,符合我国检测技术向自动化、智能化的发展方向。

(3) 该方法设备成本较低且经济环保,目前仅有液相色谱质谱联用仪(LC-MS/MS)能满足氯酚类化合物直接上机检测的灵敏度要求,但 LC-MS/MS 设备昂贵,不利于边远地区的推广和使用,而本研究仅用紫外检测器配以在线 SPE 装置即可满足氯酚类化合物直接上机检测的灵敏度要求,降低了快速高效检测

的设备门槛。此外,该方法在线 SPE 柱可以重复使用,检测过程中有机试剂用量也远小于传统 SPE 和液液萃取试剂使用量,具有经济环保的特性。

(4) 该方法检测效率高,前处理与仪器分析全流程时长不超过 15 min,适用于水源水和饮用水中 3 种氯酚类化合物的快速检测,对我国水源水中新污染物及饮用水中消毒副产物的监测具有重要意义。

参考文献

[1] 刘泽洋,徐春,孙述海. 氯酚类化合物的水生生物毒性效应与生态风险评估[J]. 岩矿测试, 2025, 44(4): 794-780.
LIU Z Y, XU C, SUN S H. Aquatic toxicity and ecological risk assessment of chlorophenol insecticides[J]. Rock and Mineral Analysis, 2025, 44(4): 794-780.
[2] 曹便利,李春灵,王婉至,等. 氯酚类化合物的研究进展[J]. 化工设计通讯. 2022, 48(12): 1-3.
CAO B L, LI C L, WANG W Z, et al. Research progress of

- chlorophenols[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2022, 48(12): 1-3.
- [3] 王旭升, 王晓南, 刘征涛, 等. 酚类化合物的环境影响及其在水环境中的分布和转化分析[J/OL]. 环境化学, 1-12 [2025-12-08]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1844.X.20250707.1642.028>.
- WANG X S, WANG X N, LIU Z Y, et al. Environmental impact of phenolic compounds and their distribution and transformation in aquatic environments[J]. Environmental Chemistry, 1-12 [2025-12-08]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1844.X.20250707.1642.028>.
- [4] 刘田, 王伟华, 宋洲, 等. 超声辅助衍生—气相色谱—质谱法测定水体中13种酚类化合物[J/OL]. 分析实验室, 1-11 [2025-12-08]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2017.TF.20250718.0908.006>.
- LIU T, WANG W H, SONG Z, et al. Determination of 13 phenolic compounds in water by ultrasonic-assisted derivatization-gas chromatography-mass spectrometry[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 1-11 [2025-12-08]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2017.TF.20250718.0908.006>.
- [5] 李惠惠, 韩香, 司玉昌. 水中酚类有机污染物的检测方法研究进展[J]. 广东化工, 2018, 45(1): 108-110.
- LI H H, HAN X, SI Y C. Recent advances of the determination of the phenolic pollutants in water[J]. Guangdong Chemical Industry, 2018, 45(1): 108-110.
- [6] 周文敏, 傅德黔, 孙宗光. 中国水中优先控制污染物黑名单的确定[J]. 环境科学研究, 1991, 4(6): 9-12.
- ZHOU W M, FU D Q, SUN Z G. Determination of black list of China's priority pollutants in water[J]. Research of Environmental Sciences, 1991, 4(6): 9-12.
- [7] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Environmental quality standards for surface water: GB 3838—2002[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [8] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 生活饮用水卫生标准: GB 5749—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration of China. Standards for drinking water quality: GB 5749—2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [9] 环境保护部. 水质 酚类化合物的测定 液液萃取/气相色谱法: HJ 676—2013[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- Ministry of Ecology and Environment. Water quality-Determination of phenolic compounds Liquid extraction gas chromatography: HJ 676—2013[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013.
- [10] 环境保护部. 水质 酚类化合物的测定 气相色谱—质谱法: HJ 744—2015[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2015.
- Ministry of Ecology and Environment. Water quality-determination of phenols compounds-Gas chromatography mass spectrometry: HJ 744—2015[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2015.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城镇供水水质标准检验方法: CJ/T 141—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard of water quality examination methods for urban water supply: CJ/T 141—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [12] 广东省分析测试协会. 水中2,4-二氯酚、2,4,6-三氯酚和五氯酚的测定 高效液相色谱—串联质谱法: T/GAIA 005—2020[S/OL]. (2020-02-25) [2025-12-08]. <https://www.ttbz.org.cn/upload/file/20191107/6370872414486458958695499.pdf>.
- Guangdong Association for Instrumental Analysis. Determination of 2,4-dichlorophenol, 2,4,6-trichlorophenol and pentachlorophenol in water—High performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry method: T/GAIA 005—2020[S/OL]. (2020-02-25) [2025-12-08]. <https://www.ttbz.org.cn/upload/file/20191107/6370872414486458958695499.pdf>.
- [13] 杨成雄, 杨雪清, 严秀平. 金属-有机骨架 MIL-101(Cr) 掺杂聚合物整体膜的制备及其用于酚类化合物的在线固相萃取[J]. 色谱, 2019, 37(8): 824-830.
- YANG C X, YANG X Q, YAN X P. Preparation of metal-organic framework MIL-101(Cr) incorporated polymer monolithic column for on-line solid-phase extraction of phenols[J]. Chinese Journal of Chromatography, 2019, 37(8): 824-830.
- [14] 张秀蓝, 郭婧, 杨文龙, 等. 在线固相萃取—液相色谱法测定水中苯酚类污染物[J]. 环境化学, 2017, 36(1): 201-203.
- ZHANG X L, GUO J, YANG W L, et al. Determination of phenols in water by online SPE coupled with high performance liquid chromatography[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(1): 201-203.
- [15] 中华人民共和国生态环境部. 环境监测分析方法标准制订技术导则: HJ168—2020[S]. 北京: 中国环境出版社, 2020.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical guideline for the development of environmental monitoring analytical method standards: HJ168—2020[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2020.
- [16] 张志英, 田大勇, 王建安. 水中余氯对检测挥发酚类化合物的影响[J]. 城镇供水, 2002(2): 20-21.
- ZHANG Z Y, TIAN D Y, WANG J A. The effect of residual chlorine in water on the detection of volatile phenolic compounds[J]. City and Town Water Supply, 2002(2): 20-21.