

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2022.03.017

液液萃取-超高效液相色谱法测定水中16种多环芳烃

杨小莉, 杨梅, 邵鑫, 张春林, 杨小丽

YANG Xiao-Li, YANG Mei, SHAO Xin, ZHANG Chun-Lin, YANG Xiao-Li

中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北武汉 430205

Wuhan Center of China Geological Survey (Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan 430205, Hubei, China

摘要:多环芳烃(PAHs)因其难降解性、潜在毒性及环境中存在的广泛性,近年来受到越来越多的关注。本文通过色谱条件及检测波长的优化,建立了液液萃取-紫外荧光检测器串联超高效液相色谱法同时测定地下水中16种PAHs的分析方法。选用Waters PAH C18色谱柱,以水和乙腈作为流动相,通过调整流动相比比例,实现了在16.5 min内完成16种目标化合物的基线分离与检测,效率比传统高效液相色谱分析提高了一倍。该方法在0.01-5.00 mg/L之间具有良好的线性关系($R^2 > 0.9999$),PAHs各化合物的方法检出限在1.25-7.02 ng/L之间,测定结果相对标准偏差($n=6$)为0.80%-7.98%,加标回收率为65.0%~104%。本方法分析效率高,适用于批量地下水中PAHs同时筛查分析。

关键词:液液萃取;超高效液相色谱;紫外-荧光检测器;多环芳烃

中图分类号:O657.7

文献标识码:A

文章编号:2097-0013(2022)03-0561-07

Yang X L, Yang M, Shao X, Zhang C L and Yang X L. 2022. Liquid-Liquid Extraction Combined with UPLC for the Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Samples. *South China Geology*, 38(3): 561-567.

Abstract: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are widely distributed in the environment. Being hardly degradable and potentially toxic, PAHs are getting more and more attention. In this work, a method has been developed for the simultaneous determination of 16 PAHs by optimizing the UPLC conditions and the detection wavelength. The chromatographic separation was carried out on ACQUITY UPLC Waters PAH C18 column; water and acetonitrile have been used as the mobile phases. By adjusting the proportions of the mobile phase, complete baseline separation and detection of 16 PAHs could be achieved within 16.5 min. The efficiency in this way reaches twice as high as that of traditional high-performance liquid chromatography. The linearity range yielded was from 0.01 to 5.00 mg/L with a good correlation coefficient ($R^2 > 0.9999$), and the MDL ranged from 1.25 to 7.02 ng/L. The relative standard deviation (RSD, $n=6$) of the determination results was 0.80% - 7.98% and the recovery rates of the target compounds were 65.0% - 104%. This method provides high analysis efficiency and is suitable for simultaneous screening and analysis of PAHs in batch groundwater.

Key words: Liquid-Liquid Extraction; UPLC; Fluorescence-Ultraviolet Detector; Polycyclic Aromatic Hydrocarbons

收稿日期:2021-9-27;修回日期:2021-11-23

基金项目:珠海市财政项目(440401-2022-02369 (MZCD-2201-008))

第一作者:杨小莉(1984—),女,硕士,高级工程师,研究方向为岩石矿物及环境水质分析,E-mail:362220738@qq.com

多环芳烃(PAHs)是指分子中含有两个以上苯环的芳香族化合物,具有难降解性、强致癌致畸致突变性及生物累积性,在环境中浓度很低(痕量)但却广泛存在于沉积物、土壤和水体中的持久性有机污染物(Bansal and Kim, 2015;王辉等, 2015;王建宇等, 2018;田芹等, 2022)。PAHs分布广泛,在水体中普遍存在(李贵洪等, 2017),可通过吸入或食物链作用在生物体内累积,对环境和人体健康产生严重影响。美国环保署已将萘、蒽、荧蒽、苯并(a)芘、苯并(a)蒽、茚并(1,2,3-cd)芘等16种PAHs确定为优先控制的环境污染物(US EPA, 2007)。EPA制定的水质标准规定,饮用水中PAHs允许的最大污染物水平为0.2 $\mu\text{g/L}$ (Pasquale et al., 2017)。我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2022)中规定:苯并(a)芘的含量不得超过0.01 $\mu\text{g/L}$,多环芳烃总量不得超过0.002 mg/L (国家市场监督管理总局, 2022);《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中苯并(a)芘的污染限值为0.0028 $\mu\text{g/L}$ (国家环境保护总局和国家质量监督检验检疫总局, 2002);《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)中对萘、蒽、荧蒽、苯并[b]荧蒽、苯并[a]芘也作出明确规定:适用于集中式生活饮用水水源及工农业用水的水质需满足萘不超过100 $\mu\text{g/L}$,蒽不超过1800 $\mu\text{g/L}$,荧蒽不超过240 $\mu\text{g/L}$,苯并[b]荧蒽不超过4.0 $\mu\text{g/L}$,苯并[a]芘不超过0.01 $\mu\text{g/L}$ (国家质量监督检验检疫总局, 2017)。因此,建立起快速、准确测定多环芳烃的方法对于水质污染现状调查评价及生活饮用水水源的寻找定位具有重要意义。

由于水体中PAHs含量很低,在仪器测定之前往往需要对样品进行富集浓缩,富集方法以液液萃取(LLE)(Titato and Lancas, 2006;李贵洪等, 2017;许丹丹, 2019)和固相萃取(SPE)(王钊等, 2016;聂丹丹等, 2016;王金成等, 2018)最为常用。虽溶剂用量较大, LLE提取对非水溶性的物质回收率通常较高,稳定性好,且所需仪器设备更为简单经济;SPE提取可简化前处理过程,难点是需要针对不同极性的目标物选择富集和净化效率高的固相萃取柱(李贵洪等, 2017),且在大体积富集浓缩方面有其局限性。本文选用液液萃取作为前处理方法。

PAHs测定方法主要有气相色谱法(郑海涛等,

2004)、气相色谱-质谱法(Bandowe et al, 2010;陈雯等, 2020;魏丹等, 2020;董希良等, 2021;张晶等, 2022;杨清, 2022)、三重四级杆-气相色谱质谱法(王征等, 2021)、高效液相色谱法(曹效等, 2010;陶鑫等, 2019;袁继委等, 2020;王军淋等, 2020)、高效液相色谱-质谱联用法(刘丹等, 2018)等。由于PAHs大多是分子量大、不易被气化的化合物,而且这类化合物在紫外或荧光检测器上具有相当灵敏的响应,因此液相色谱是目前最常用水质PAHs检测仪器。荧光检测器具有高灵敏度、高分辨率、低检出限及对某些物质高选择性等特点,但不适用于检测不具有荧光基团的物质,如二氢萘等。紫外检测器适用范围广,但灵敏度有限。故本文采用荧光与紫外检测器联用超高效液相色谱法同时测定地下水中16种PAHs。本方法具有分析时间短、灵敏度高、检出限低、精密度高等特点,能满足批量地下水日常检测需求。

1 实验部分

1.1 仪器及试剂

超高效液相色谱仪(Waters Acquity UPLC H-Class):系统配置超高压四元溶剂泵,耐高压进样器,高温低扩散色谱柱温箱,高速低体积紫外检测器和多波长荧光检测器;全自动定量浓缩仪(ATR)和Millipore纯水机。

16种(EPA)PAHs混合标液:200.0 mg/L , 1 mL,美国AccuStandard公司。

十氟联苯标准溶液:美国O₂si公司,2000 mg/L , 1 mL。

乙腈:CNW,液相色谱级,上海安谱科技股份有限公司。

正己烷:CNW,液相色谱级,上海安谱科技股份有限公司。

氯化钠(分析纯)、无水硫酸钠(分析纯):上海安谱科技股份有限公司,450℃烘烤4小时,冷却后储于磨口瓶中密封保存。

1.2 色谱条件

色谱柱:Waters PAH C18色谱柱(50 mm × 4.6 mm, 3 μm);流动相:水(A)和乙腈(B);流动相梯度

条件见表1;进样体积:5 μL ;流速:1.4 mL/min;柱温:30 $^{\circ}\text{C}$;紫外吸收($\lambda=254\text{ nm}$)检测,设置的最佳波长及荧光检测不同化合物对应的最佳激发和发射波长见表2。

1.3 样品保存

样品采集后应避光0-4 $^{\circ}\text{C}$ 冷藏保存,7天内完成萃取,萃取后的样品应避光,4 $^{\circ}\text{C}$ 以下冷藏,并在40天内分析完毕。

表1 梯度洗脱程序

Table 1 Gradient elution procedures

时间(min)	A(%)	B(%)	曲线
起始	50	50	5
5.5	50	50	5
17.0	0	100	5
19.0	50	50	1
22.0	50	50	5

表2 紫外吸收波长、荧光激发和发射波长(nm)

Table 2 UV absorption wavelength and fluorescent excitation wavelength and emission wavelength(nm)

化合物	最佳紫外吸收波长	激发波长	发射波长	检测器
萘	219	280	340	FLD
二氢萘	228	-	-	UVD
萘	210	280	340	FLD
芴	254	280	340	FLD
菲	251	280	340	FLD
蒽	251	254	400	FLD
荧蒽	232	280	430	FLD
芘	238	254	400	FLD
苯并[a]蒽	267	280	430	FLD
蒎	254	254	400	FLD
苯并[b]荧蒽	258	280	430	FLD
苯并[k]荧蒽	240	280	430	FLD
苯并[a]芘	295	280	430	FLD
二苯并[a,h]蒽	295	280	430	FLD
苯并[ghi]芘	210	280	430	FLD
茚并[1,2,3-cd]芘	251	305	500	FLD
十氟联苯	230	-	-	UVD

1.4 样品前处理

量取1000 mL水样,倒入1000 mL分液漏斗中,加入30 g氯化钠;再加入十氟联苯和50 mL正己烷,振摇5 min,静置分层,收集有机相于250 mL接收瓶。重复萃取两遍,合并有机相,加入无水硫酸钠除水。将有机相转移至氮吹管,氮吹浓缩至近干,再加入3 mL乙腈,继续浓缩至1 mL以下。最后用乙腈定容至1.0 mL,待上机测定。

2 结果与讨论

2.1 色谱条件的优化

为了获得合适的洗脱溶剂及流动相比例,本文

分别试验了甲醇-水和乙腈-水流动相体系,结果表明:乙腈-水作为流动相时,目标物分离度和洗脱效果更佳,且流动相中乙腈体积分数增大会缩短化合物保留时间,分离度则随之降低。

为了实现16种PAHs的分离,需根据各组分极性和理化性质不同,对梯度洗脱程序进行优化,使所有目标化合物达到基线分离。通过反复试验流动相比例,选择乙腈初始体积比为50%,流速为1.0 mL/min。但在此条件下,荧蒽与芘、蒎与苯并[a]蒽、二苯并[a,h]蒽与苯并[ghi]芘及茚并[1,2,3-cd]芘基线分离不完全。继续调整流动相比例、梯度洗脱程序,从5.5 min开始匀速增加乙腈比例,到17 min达到乙腈体积比为100%,从而提高目标物分离度;此

外,将流速调整为1.4 mL/min,从而缩短测定时间。最终在16.5 min内实现16种PAHs完全分离(最佳色谱分析条件见1.4节),得到分离度、峰型均良好

的PAHs谱图,如图1所示。检测效率与传统高效液相色谱(约需40 min)(陈静等,2014;王金成等,2018;熊力和王金成,2019)对比,提高了1倍。

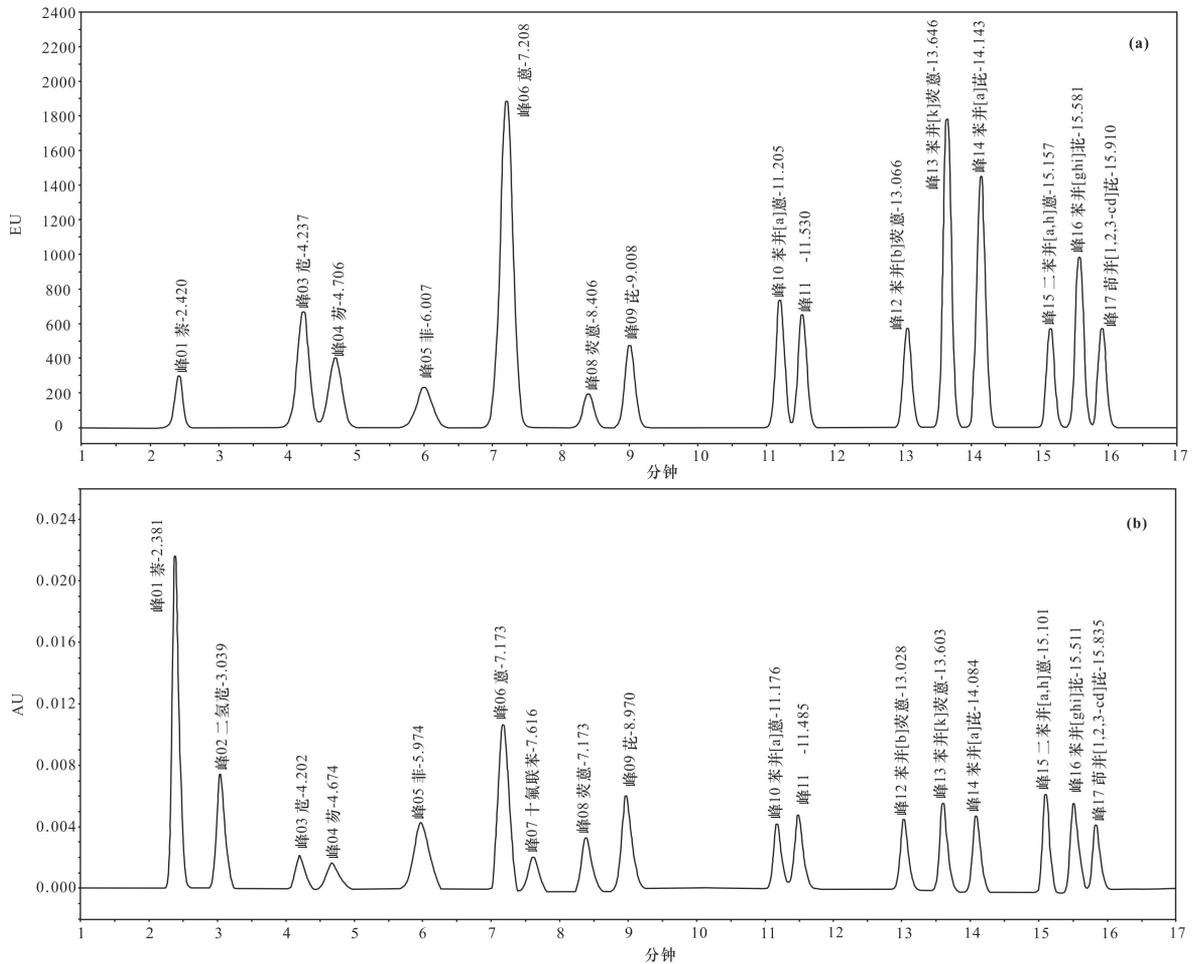


图1 多环芳烃分离色谱图(a荧光检测,b紫外检测)

Fig. 1 Separation chromatogram of PAHs (a-Fluorescence detection, b-Ultraviolet detection)

2.2 检测波长的优化

紫外检测器适用范围较广,16种多环芳烃在紫外检测器上均有响应,但灵敏度却很低,适用于高含量多环芳烃的测定。荧光检测器灵敏度高,适用于低含量多环芳烃的检测。同时,由于二氢芘及替代物十氟联苯(图1b中的色谱峰02和07)无荧光吸收(纪春苗和余群,2017;王军淋等,2020),只能选用紫外检测器检测。因此,将紫外检测器与荧光检测器串联,同时解决了高、中、低浓度多环芳烃的同时检测及二氢芘无荧光吸收的问题。

通过多次条件实验优化,得到了紫外检测器的

最佳吸收波长及荧光检测器的最佳激发与发射波长,得到的色谱峰窄而尖,无杂质峰干扰。优化的最佳检测参数见表2。

2.3 线性范围及检出限

配制0.01、0.02、0.05、0.10、0.20、0.50、1.00、2.00和5.00 mg/L系列标准溶液,以色谱峰面积为纵坐标,对应浓度为横坐标,利用外标法建立标准曲线,得到16种PAHs回归方程和相关系数(表3)。由表3可知,PAHs在0.01-5.00 mg/L范围内其标准曲线线性关系良好,相关系数 R^2 均大于0.9999,可满足日常不同浓度水样分析测试需求。

在空白样品中添加 PAHs 混合标准溶液 0.03 $\mu\text{g/L}$, 制备模拟超低浓度样品 9 份。按照 1.4 节进行前处理, 采用 1.2 节色谱条件上机检测, 计算方法检出限。计算公式为:

$$\text{MDL} = t_{(n-1, 0.99)} \times S$$

其中, MDL 为测定检出限; S 为样品平行测定的标准偏差; t 为自由度 n-1、置信度为 99% 时的 t 分

布; n 为重复分析的样品数。当 n=9 时, 计算得到 PAHs 方法检出限为 1.25-7.02 ng/L (表 3)。取 4 倍方法检出限作为方法测定下限, 列于表 3。结果表明, 本方法 16 种 PAHs 检出限均低于标准方法 HJ 478-2009 (环境保护部, 2009) 规定的检出限, 同时与其他学者研究方法对比, 检出限优于文献检出限 (姜丞等, 2019; 袁继委等, 2020)。

表 3 多环芳烃的线性方程、检出限、检出下限及测量范围

Table 3 The regression equation, limits, lower limits of detection and measuring range

化合物	标准曲线方程	检出限(ng/L)	检出下限(ng/L)	测量范围(mg/L)
萘	$Y=9.72 \times 10^6 X - 3.02 \times 10^4$	4.00	16.00	0.02-5.00
苊	$Y=6.50 \times 10^4 X - 2.96 \times 10^2$	2.17	8.68	0.01-5.00
芴	$Y=3.52 \times 10^7 X - 1.37 \times 10^5$	4.32	17.3	0.01-5.00
二氢苊	$Y=1.34 \times 10^7 X - 5.82 \times 10^4$	1.25	5.00	0.02-5.00
菲	$Y=6.69 \times 10^6 X - 1.02 \times 10^5$	7.02	28.1	0.02-5.00
蒽	$Y=9.33 \times 10^7 X - 7.26 \times 10^5$	2.40	9.60	0.02-5.00
荧蒽	$Y=1.03 \times 10^7 X - 3.04 \times 10^5$	1.86	7.42	0.01-5.00
芘	$Y=9.41 \times 10^6 X - 2.50 \times 10^5$	2.67	10.7	0.02-5.00
苯并[a]蒽	$Y=3.27 \times 10^7 X - 6.94 \times 10^4$	2.56	10.2	0.02-5.00
蒎	$Y=9.68 \times 10^6 X - 1.52 \times 10^5$	2.27	9.08	0.02-5.00
苯并[b]荧蒽	$Y=2.45 \times 10^7 X - 2.05 \times 10^5$	2.48	9.92	0.02-5.00
苯并[k]荧蒽	$Y=7.68 \times 10^7 X - 3.38 \times 10^5$	2.12	8.47	0.02-5.00
苯并[a]芘	$Y=6.57 \times 10^7 X - 3.13 \times 10^5$	2.26	9.03	0.02-5.00
二苯并[a,h]蒽	$Y=1.54 \times 10^7 X - 1.15 \times 10^5$	2.19	8.75	0.02-5.00
苯并[ghi]芘	$Y=1.96 \times 10^7 X - 2.12 \times 10^5$	2.89	11.6	0.02-5.00
茚并[1,2,3-cd]芘	$Y=2.37 \times 10^7 X - 2.01 \times 10^5$	2.70	10.8	0.02-5.00

2.4 精密度及加标回收率

为了确保分析数据的准确性、重复性, 分别在未检出目标物的地下水样品中添加一定量 PAHs 混合标准溶液, 制成浓度分别为 0.05、0.50、5.00 $\mu\text{g/L}$ 的样品各 6 份, 按照 1.4 节的方法进行前处理后分别检测, 计算其精密度及加标回收率 (表 4)。由表 4 可见, 相对标准偏差 (RSD, n=6) 为 0.80%-7.98%, 加标回收率为 65.0%-104%, 除个别低浓度的低环化合物由于受前处理影响较大, 容易挥发, 其 RSD 稍大、回收率略低以外, 其他化合物的 RSD 均小于 5%、加标回收率均大于 75%。

2.5 实际样品的测定

采用本方法分析武汉周边采集的 4 个地下水、

地表水样品, 仅有 1 个地表水样品检出目标物萘、二氢苊和菲, 含量分别为 0.019、0.021、0.049 $\mu\text{g/L}$, 《GB 3838-2002 地表水环境质量标准》(国家环境保护总局和国家质量监督检验检疫总局, 2002) 中关注的苯并[a]芘并未检出, PAHs 检出总量为 0.089 $\mu\text{g/L}$, 远小于《GB 5749-2022 生活饮用水卫生标准》(国家市场监督管理总局, 2022) 规定的标准值 (2 $\mu\text{g/L}$), 低于美国环保署环境水质标准 0.2 $\mu\text{g/L}$ (US EPA, 2007), 表明该水质尚在安全范围之内。样品的加标回收率在 62.2%-84.6% 之间, 满足《水质环境标准 HJ 478-2009》(环境保护部, 2009) 中回收率的要求, 表明该方法适用于水体中 16 种多环芳烃的同时检测。

表4 实际样品的相对标准偏差($n=6$)及加标回收率Table 4 Recoveries and RSD ($n=6$) of the samples

化合物	0.05 $\mu\text{g/L}$		0.5 $\mu\text{g/L}$		5.0 $\mu\text{g/L}$	
	回收率(%)	RSD (%)	回收率 (%)	RSD (%)	回收率(%)	RSD(%)
萘	70.3	6.83	73.7	4.63	68.5	1.82
苊	65.0	7.96	69.8	2.14	72.4	1.92
芴	76.3	4.20	77.8	2.95	74.4	2.73
二氢苊	85.7	2.73	78.0	3.00	76.7	2.96
菲	70.0	6.52	76.8	3.88	79.5	2.95
蒽	83.7	3.52	76.6	2.67	83.4	3.10
荧蒽	89.0	2.36	79.7	1.60	83.2	3.02
芘	87.3	4.95	79.9	1.68	84.2	3.06
苯并[a]蒽	94.7	2.56	96.0	0.80	93.9	2.01
蒾	96.0	2.95	97.8	0.94	95.0	1.79
苯并[b]荧蒽	102	5.34	98.8	1.11	94.1	1.80
苯并[k]荧蒽	104	4.60	98.8	1.04	94.7	1.76
苯并[a]芘	89.0	5.82	93.8	1.16	92.9	1.96
二苯并[a,h]蒽	94.3	7.98	96.1	1.43	94.0	1.72
苯并[ghi]芘	95.3	7.35	95.8	1.49	93.0	1.71
茚并[1,2,3-cd]芘	96.3	7.81	96.0	1.54	93.3	1.73

3 结语

本文建立了采用液液萃取前处理,紫外和荧光检测器串联检测的超高效液相色谱法同时测定水中16种多环芳烃分析方法。结果表明,该方法灵敏度高,检出限低,且速度快,在16.5 min内即可完成16种PAHs的分离与检测,分析效率较EPA8310及HJ478-2009(约40 min)提高一倍。此外,方法准确度高,重现性好,加标回收率符合规范要求,适用于水体中不同含量多环芳烃的同时批量检测。

参考文献:

- 曹 旻, 马 军, 李云木子. 2010. 荧光-紫外检测器高效液相色谱法检测地下水中16种多环芳烃 [J]. 岩矿测试, 29(5): 539-542.
- 陈 静, 戴振宇, 许 群, 张祥民. 2014. 在线固相萃取-高效液相色谱法测定水体中的多环芳烃 [J]. 分析化学, (45): 1785-1790.
- 陈 雯, 余绍文, 张宏鑫, 刘怀庆. 2020. 广西北海市冯家江河水及其沿岸地下水污染特征初探 [J]. 华南地质, 36(2): 186-196.

董希良, 刘玲玲, 赵传明. 2021. 加速溶剂萃取-固相萃取净化-气相色谱/质谱法测定土壤中的多环芳烃 [J]. 分析试验室, 40(2):140-144.

国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 2002. GB3838-2002地表水环境质量标准 [S]. 北京:中国标准出版社. 1-9.

国家质量监督检验检疫总局. 2017. GB/T14848-2017地下水质量标准 [S]. 北京:中国标准出版社, 1-16.

国家市场监督管理总局. 2022. GB5749-2022生活饮用水卫生标准 [S]. 北京:中国标准出版社. 1-9.

环境保护部. 2009. HJ478-2009水质多环芳烃的测定液液萃取和固相萃取高效液相色谱法 [S]. 北京:中国环境科学出版社, 1-12.

纪春苗, 余 群. 2017. 全自动固相萃取-高效液相色谱法测定水源水中的16种多环芳烃 [J]. 分析仪器, (6):70-75.

姜 丞, 贾双琳, 龙纪群, 邓昭祥. 2019. 高效液相色谱法测定贵州铜仁地区优质矿泉水中16种多环芳烃 [J]. 贵州地质, 36(4):382-387.

李贵洪, 郭 峰, 饶 竹, 谭 红, 杨鸿波, 谢 勋, 梁发明. 2017. 超高效液相色谱法同时分析地下水中的16种多环芳烃及4种衍生物 [J]. 环境化学, 36(6):1295-1303.

刘 丹, 赫春香, 那广水, 李瑞婧, 高宇航, 曹胜凯. 2018. C_{18} 膜萃取-超高效液相色谱-串联质谱法测定海水中羟基多

- 环芳烃[J]. 分析试验室, 37(8):884-888.
- 聂丹丹, 徐斌, 代飞飞. 2016. 全自动固相萃取-气相色谱-质谱法测定饮用水源中16种多环芳烃[J]. 现代预防医学, 43(23):4358-4361.
- 陶鑫, 全洗强, 俞建国, 杜文越, 秦榛妮. 2019. 加速溶剂萃取-旋蒸定容-高效液相色谱法检测土壤中16种多环芳烃[J]. 环境化学, 38(12):2797-2807.
- 田芹, 佟玲, 安子怡, 许春雪, 孙慧中, 刁金玲. 2022. 沉积物中多环芳烃、有机氯农药和多氯联苯成分分析标准物质研制[J]. 岩矿测试, 41(3):511-520.
- 王辉, 孙丽娜, 刘哲, 罗庆, 王晓旭, 吴昊, 孙家君. 2015. 大辽河地表水中多环芳烃的污染水平及致癌风险评价[J]. 生态毒理学报, 10(4):187-194.
- 王钊, 张俊, 许维, 孟宪智, 崔文彦, 张世禄, 徐铭霞. 2016. 固相萃取-高效液相色谱法测定河水中的多环芳烃[J]. 环境监测管理与技术, 28(6):41-43+50.
- 王征, 徐清, 詹重清, 刘文菁, 何孟杭, 邱秀玉. 2021. 气相色谱-三重四级杆串联质谱法同时测定茶叶中16种多环芳烃[J]. 食品安全质量检测学报, 12(19):7585-7591.
- 王建宇, 李丽, 王蕴平, 王桂芳, 袁汉成, 洪云鹤, 孙颖. 2018. 在线固相萃取-超高效液相色谱法检测水中15种多环芳烃类污染物[J]. 环境化学, 37(12):2832-2836.
- 王金成, 樊芸, 卢宪波, 张海军, 陈吉平. 2018. 固相萃取-高效液相色谱法同时测定自来水中氯代多环芳烃和多环芳烃[J]. 环境化学, 37(9):1987-1993.
- 王军淋, 张念华, 应英, 田春霞, 冯靓, 吴平谷, 王志园, 韩见龙. 2020. 固相萃取-高效液相色谱-紫外串联荧光检测器同时检测水源水和自来水中的16种多环芳烃[J]. 卫生研究, 49(3):480-485.
- 魏丹, 国明, 吴慧珍, 张菊. 2020. 加速溶剂萃取-磁固相萃取净化-气相色谱-质谱法测定土壤中16种多环芳烃和23种有机氯残留[J]. 色谱, 38(8):945-952.
- 熊力, 王金成. 2019. 凝固漂浮有机液滴-分散液液微萃取结合高效液相色谱法同时测定自来水中氯代多环芳烃与多环芳烃[J]. 分析测试学报, 38(11):1335-1339.
- 许丹丹, 饶竹, 梁汉东. 2019. 气相色谱-质谱法同时测定地下水中的36种多环芳烃及其衍生物[J]. 理化检验(化学分册), 55(1):31-38.
- 杨清. 2022. 过硫酸钠修复土壤中多环芳烃的准确测定[J]. 岩矿测试, 41(3):404-411.
- 袁继委, 王金成, 徐威力, 徐方曦, 卢宪波. 2020. 凝固漂浮有机液滴-分散液液微萃取结合高效液相色谱法同时测定地表水中多环芳烃和酞酸酯[J]. 色谱, 38(11):1308-1315.
- 张晶, 饶竹, 杨志鹏, 郭晓辰, 刘晨, 孟建卫, 王立平. 2022. 地下水中102种酸性、碱性和中性有机污染物的气相色谱-质谱法同时快速测定[J]. 分析测试学报, 41(5):659-667.
- 郑海涛, 刘菲, 刘永刚. 2004. 固相萃取-气相色谱法测定水中多环芳烃[J]. 岩矿测试, 23(2):148-152.
- Bandowe B A M, Shukurov N, Kersten M, Wilcke W. 2010. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their oxygen-containing derivatives (OPAHs) in soils from the Angren Industrial area, Uzbekistan [J]. Environmental Pollution, 158(9): 2888-2899.
- Bansal V, Kim K H. 2015. Review of PAH contamination in food products and their health hazards [J]. Environment International, 84: 26-38.
- Pasquale A, Ivan N, Luisa P, Mario V R. 2017. New protocol based on high-volume sampling followed by DLLME-GC-IT/MS for determining PAHs at ultra-trace levels in surface water samples [J]. Microchemical Journal, 133: 251-257.
- Titato G M, Lancas F M. 2006. Optimization and Validation of HPLC-UV-DAD and HPLC-APCI-MS Methodologies for the Determination of Selected PAHs in Water Samples [J]. Journal of Chromatographic Science, 44(1): 35-40.
- US EPA (U. S. Environmental Protection Agency). 2007. Drinking water standards and health advisories table [R].