

彭俊翔, 郑丹苗, 姜博铭, 等. 在线 SPE-UPLC-MS/MS 法同时测定水中 5 种内分泌干扰物[J]. 净水技术, 2025, 44(5): 216-221.

PENG J X, ZHENG D M, JIANG B M, et al. Simultaneous determination of five EDCs in water by online SPE-UPLC-MS/MS Method [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(5): 216-221.

在线 SPE-UPLC-MS/MS 法同时测定水中 5 种内分泌干扰物

彭俊翔¹, 郑丹苗¹, 姜博铭², 杨创涛^{1,*}

(1. 广东粤海水务检测技术有限公司, 广东深圳 518021; 2. 广东粤港供水有限公司, 广东深圳 518021)

摘要 【目的】 该研究采用在线固相萃取系统(Online SPE)与超高效液相色谱-串联质谱(UPLC-MS/MS)连接,建立了1种能同时测定饮用水和地表水中5种内分泌干扰物(双酚A、双酚B、双酚F、4-辛基酚和4-壬基酚)的快速检测方法。【方法】 水样经过简单离心或过滤处理后,只需取5 mL样品即可上机检测。采用BE Online PLRP-S(15~20 μm , 2.1 mm $\times$ 12.5 mm)作为Online SPE柱对样品进行富集和净化,采用GOWON Polar-MS液相色谱柱(2.7 μm , 2.1 mm $\times$ 100 mm)进行分离,以10%甲醇和1:1:1的甲醇/乙腈/异丙醇作为Online SPE洗脱溶剂,0.01%氨水和甲醇作为液相色谱流动相进行梯度洗脱。使用电喷雾离子源电离,负离子多反应监测模式(MRM)对样品进行检测。【结果】 结果表明:5种内分泌干扰物分离效果和线性关系良好,其中相关系数(r) ≥ 0.998 ,方法检出限为0.23~0.71 ng/L,检测下限为0.92~2.84 ng/L,满足我国生活饮用水标准检验方法中最低检测质量浓度的要求。对饮用水和地表水在不同浓度下的加标回收率分别为84.3%~111.0%和73.4%~112.0%,相对标准偏差分别为1.0%~7.7%和1.1%~7.0%。【结论】 该方法灵敏度、准确度和精密度较高,预处理和仪器分析总时长不超过15 min,适用于饮用水和地表水中5种内分泌干扰物的快速检测。

关键词 水质 内分泌干扰物(EDCs) 在线固相萃取(SPE) 超高效液相色谱-串联质谱(UPLC-MS/MS) 饮用水 地表水
中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)05-0216-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.05.024

Simultaneous Determination of Five EDCs in Water by Online SPE-UPLC-MS/MS Method

PENG Junxiang¹, ZHENG Danmiao¹, JIANG Boming², YANG Chuangtao^{1,*}

(1. Guangdong Yuehai Water Testing Technology Co., Ltd., Shenzhen 518021, China;

2. Guangdong Yue Gang Water Supply Co., Ltd., Shenzhen 518021, China)

Abstract [Objective] In this study, a fast approach for the simultaneous determination of five endocrine disrupting chemicals (bisphenol A, bisphenol B, bisphenol F, 4-octylphenol, and 4-nonylphenol) in drinking water and surface water is developed by using an Online solid phase extraction (Online SPE) system connected with ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS). [Methods] After simple centrifugation or filtration of the water samples, only 5 mL of the samples were taken for detection. The samples were concentrated and purified using BE Online PLRP-S (15~20 μm , 2.1 mm $\times$ 12.5 mm) as the Online SPE extraction column, and separated on a GOWON Polar-MS column (2.7 μm , 2.1 mm $\times$ 100 mm), with 10% methanol and 1:1:1 mixture of methanol/acetonitrile/isopropanol as the elution solvents for the Online SPE, and 0.01% ammonia and methanol as the liquid phase chromatography mobile phase for gradient elution. The samples detection was operated under negative electrospray ionization in multiple reaction monitoring mode (MRM). [Results] The result showed that the separation effects, and linearity of the five endocrine disrupting chemicals were good, in which the correlation coefficients (r) were no less than 0.998, the method detection limits were in the range from 0.23 ng/L to 0.71 ng/L, and the lower limits of determination were in the range from 0.92 ng/L to 2.84 ng/L, which met the requirements of the minimum detection quality concentration in standard examination method for drinking water in China. The spiked recovery rate for drinking water and surface water at different concentrations were in the range

[收稿日期] 2024-08-21

[基金项目] 中国博士后科学基金项目(2023M740785)

[作者简介] 彭俊翔(1995—),男,硕士研究生,主要从事水质分析检测的工作,E-mail:jxpeng1995@163.com。

[通信作者] 杨创涛,男,高级工程师,主要从事水质分析检测的工作,E-mail:328120767@qq.com。

of 84.3% to 111.0% and 73.4% to 112.0%, respectively. And the relative standard deviations were in the range of 1.0% to 7.7% and from 1.1% to 7.0%, respectively. [**Conclusion**] This method has high sensitivity, accuracy and precision, and the total time for pretreatment and instrumental analysis is no more than 15 minutes, which is suitable for the fast determination of the five endocrine disrupting chemicals in drinking water and surface water.

Keywords water quality endocrine disrupting chemicals (EDCs) online solid phase extraction (SPE) ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS) drinking water surface water

双酚类化合物(BPs)和烷基酚类化合物(APs)是典型的内分泌干扰物(EDCs)。其中,双酚类化合物中的双酚 A(BPA)是全球产量最高的物质之一,主要用于环氧树脂和聚碳酸酯的生产。研究表明,BPs 在生物体中表现出遗传毒性、生殖毒性、内分泌干扰效应、细胞毒性和神经毒性等。近年来,我国和其他欧美国家相继颁布法律法规,限制或禁止使用 BPA。为了迎合市场需求,双酚 B(BPB),双酚 F(BPF)等双酚 A 类似物迅速发展起来,它们主要被用作环氧树脂、婴儿奶瓶、热敏纸、杀虫剂、皮革鞣剂等工业产品的一种原材料^[1-3]。这些物质的毒性也随着其使用量的不断增大和环境污染水平的增加而逐渐成为关注点,已有研究^[4-6]表明,这些 BPA 类似物具有与 BPA 相近的生物毒性。同样地,烷基酚类化合物的代表—4-壬基酚(4-NP)和 4-辛基酚(4-OP),也于 2023 年被列入我国《重点管控新污染物清单(2023 年版)》。这类化合物在水体中普遍存在,具有难降解、持久性、生物积累等特性,并且已经被证明与生物体的内分泌系统及其他病理息息相关^[7-9]。这些在水环境中的积累将会对水生态和人类产生不容忽视的威胁。

目前,水中内分泌干扰物主要用高效液相色谱法(HPLC)^[10]、液相色谱串联质谱法(LC-MS/MS)^[11-13]和气相色谱质谱法(GC-MS)^[14-15]这 3 种方法进行测定。采用 HPLC 法的成本较低,但在同时对多种内分泌干扰物进行检测时,其定性能力较弱,检测耗时较长。GC-MS 法检测带有羟基的内分泌干扰物时容易出现峰型拖尾现象,因此,在上机分析前通常需要进行衍生化处理,该过程较为繁琐且容易影响样品结果的准确性。LC-MS/MS 法是目前内分泌干扰物检测用的最多的方法,其定性和定量能力都比其他 2 种方法更好。但水体中内分泌干扰物的浓度通常较低,因此,在使用 LC-MS/MS 法检测前通常需要对水样进行富集浓缩,这个前处理过程需要消耗水样且所需有机试剂的体积较大,步骤

较多且耗时长^[13,16]。本研究将在线固相萃取系统与高效液相色谱串联质谱(UPLC-MS/MS)连接,通过优化流动相、色谱柱和洗脱程序等条件,建立了 1 种在线固相萃取与超高效液相色谱-串联质谱联用的检测方法(Online SPE-UPLC-MS/MS),用于同时测定地表水和饮用水中 5 种内分泌干扰物。该方法只需要对水样进行简单的离心或者过滤处理便可直接上机检测,在线固相萃取系统仅需 6 min 即可完成对水样的净化和富集,整个检测流程的时长不超过 15 min,5 种内分泌干扰物的测定下限为 0.91~2.83 ng/L,满足我国生活饮用水标准检验方法中的测定要求,方法需要的水样量少,响应性好,分析时间短,适用于实际水样中 5 种内分泌干扰物的快速测定。

1 试验部分

1.1 仪器与试剂

AB Sciex Triple Quad™ 3500 三重四级杆液质联用仪(美国 AB Sciex 公司);CTC PAL RSI 在线固相萃取仪(广州智达实验室科技有限公司);Milli-Q Reference 超纯水仪(法国 Millipore 公司);GOWON Polar-MS 液相色谱柱(2.7 μm , 2.1 mm $\times$ 100 mm)(广州太玮生物科技有限公司);BE Online PLRP-S 在线固相萃取柱(15~20 μm , 2.1 mm $\times$ 12.5 mm)(美国 Agilent 公司);HLB Direct Connect HP 在线固相萃取柱(20 μm , 2.1 mm $\times$ 30 mm)、XBridge C8 HP 在线固相萃取柱(10 μm , 2.1 mm $\times$ 30 mm)(美国 Waters 公司);聚四氟乙烯过滤膜(47 mm $\times$ 0.22 μm)(安谱实验科技公司)。

氨水、甲醇、乙腈、氟化铵、甲酸(色谱纯)(安谱实验科技公司);乙腈中 5 种有机酚混标溶液(100 mg/L)、乙腈中双酚 A-D₁₆ 内标溶液(100 mg/L)(天津阿尔塔科技有限公司)。

1.2 试验条件

1.2.1 在线固相萃取条件

使用 BE Online PLRP-S 在线固相萃取柱。流

动相为 10% 甲醇(A 相), 1 : 1 : 1 的甲醇/乙腈/异丙醇(B 相); 进样量为 5 mL。表 1 为在线固相萃取梯度洗脱程序。

表 1 在线固相萃取流动相梯度
Tab. 1 Mobile Phase Gradient of Online SPE

时间/min	流速/ (mL·min ⁻¹)	A 相 (10% 甲醇)	B 相(1 : 1 : 1 的 甲醇/乙腈/异丙醇)
0	2.50	100%	0
2.0	2.50	100%	0
2.1	0.01	100%	0
5.0	1.00	0	100%
5.1	1.00	100%	0
6.0	1.00	100%	0

1.2.2 液相色谱条件

使用 GOWON Polar-MS C18 色谱柱(2.7 μm, 2.1 mm×100 mm); 柱温为 40 ℃; 流速为 0.4 mL/min; 流动相为 0.01% 氨水(A 相), 甲醇(B 相)。表 2 为液相色谱梯度洗脱程序。

表 2 液相色谱流动相梯度
Tab. 2 Mobile Phase Gradient of Liquid Chromatography

时间/min	流速/ (mL·min ⁻¹)	A 相 (0.01% 氨水)	B 相 (甲醇)
0		30%	70%
1.5		0	100%
3.5	0.4	0	100%
3.6		30%	70%
4.5		30%	70%

1.2.3 质谱条件

使用多离子同时扫描模式(MRM)。电喷雾离子源(ESI⁻); 离子喷射电压(IS)为-450 0 V; 气帘气(CUR)为 0.207 MPa; 碰撞气(CAD)为 0.062 MPa; 离子源温度(TEM)为 500 ℃; 喷雾气(GS1)为 0.345 MPa; 干燥气(GS2)为 0.345 MPa。内分泌干扰物的质谱参数如表 3 所示。

1.2.4 水样处理

水样经过亲水性聚四氟乙烯滤膜过滤处理后, 移至 20 mL 进样瓶, 按照上述条件参数进行上机检测。若水样浑浊, 则先用离心机以 5 000 r/min 离心 3 min, 取上清液过滤后再进行检测。

2 结果讨论

2.1 在线固相萃取柱的选择

试验选取了 HLB Direct Connect HP、XBridge C8

表 3 内分泌干扰物的 MRM 扫描参数
Tab. 3 MRM Scan Parameters of EDCs

序号	目标化合物	定量离子对	去簇 电压/V	碰撞 能量/V
1	BPA	227.0>133.0	-90	-31
2	BPB	241.0>212.0	-83	-24
3	BPF	199.0>105.0	-90	-28
4	4-OP	205.0>106.0	-70	-24
5	4-NP	219.2>106.1	-90	-24
6	BPA-D ₁₆	241.0>142.0	-80	-35

HP 和 BE Online PLRP-S3 种在线固相萃取柱, 对比它们对 5 种内分泌干扰物的保留效果, 如图 1 所示。结果表明, BPA、BPB 和 BPF 经过 HLB Direct Connect HP 固相萃取柱富集和净化后峰型较好, 但 4-OP 和 4-NP 的峰展宽严重。XBridge C8 HP 固相萃取柱对 4-OP 和 4-NP 的保留效果较好, 但其他几个物质的峰型较差。相比于其他 2 种固相萃取柱, BE Online PLRP-S 固相萃取柱可以获得较高的响应值, 且分离效果更优, 峰型更加对称。因此, 最后选取 BE Online PLRP-S 固相萃取柱对 5 种内分泌干扰物进行分析检测。

2.2 在线固相萃取流动相的选择

选择 1 : 1 : 1 的甲醇/乙腈/异丙醇作为在线固相萃取 B 相, 用于对固相萃取柱的活化再生。试验研究了在不同的在线固相萃取系统 A 相作用下目标物的上样效果, 分别测试了 0.01% 氨水、0.01% 甲酸、2 mmol/L 氟化铵和 10% 甲醇 4 种条件下, 5 种内分泌干扰物的质谱响应值, 如图 2 所示。结果表明, 10% 甲醇作为在线固相萃取系统的 A 相能更有利于目标化合物的上样和检测, 其色谱峰分离程度更好, 质谱获得的响应值更高, 其他 3 种条件下的目标化合物存在峰展宽以及峰分叉的情况。因此, 选择 10% 甲醇作为在线固相萃取系统的 A 相对 5 种内分泌干扰物的样品进行上样。

2.3 质谱设置参数优化

液相色谱串联质谱的条件参数参考《生活饮用水标准检验方法 第 8 部分: 有机物指标》(GB/T 5750.8—2023) 中的 75.1 标准, 选用 0.01% 氨水(A 相)、甲醇(B 相)作为流动相, GOWON Polar-MS C18 作为液相色谱柱, 对 5 种内分泌干扰物进行质谱条件优化。在明确各个目标化合物的前体离子后, 用产物离子扫描模式(MS2)确定合适的产物离

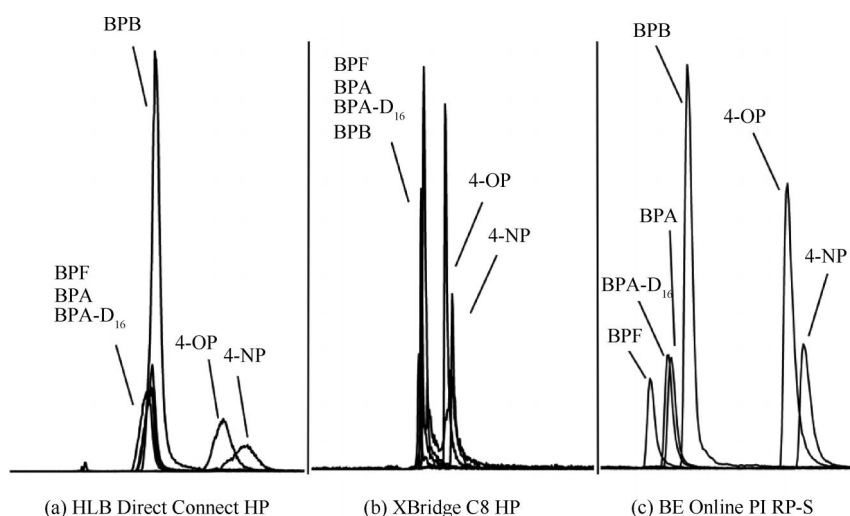


图 1 在线固相萃取柱对内分泌干扰物的影响

Fig. 1 Effect of Online SPE Columns on EDCs

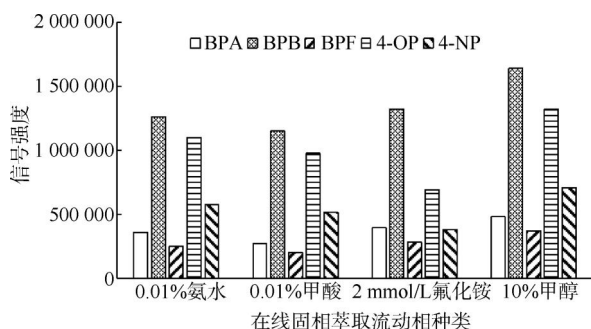


图 2 在线固相萃取流动相对内分泌干扰物的影响

Fig. 2 Effect of Online SPE Phases on EDCs

子,得出各个化合物的定量离子对。再通过调谐模式对离子对的去簇电压、碰撞能量等质谱参数进行优化,确定目标化合物获得最佳质谱响应值下的条件参数,经过优化后 5 种内分泌干扰物的多反应监测扫描模式(MRM)条件如表 3 所示。

2.4 内分泌干扰物总离子流图(TIC)

经过上述条件选择和参数优化后,5 种内分泌干扰物分离效果和响应值良好,如图 3 所示。

2.5 方法性能验证

2.5.1 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 5 种内分泌干扰物的混合标准溶液,以纯水为介质,配置质量浓度为 0.50、1.00、5.00、10.00、20.00、50.00、100.00 ng/L 的标准系列混合溶液,内标加入质量浓度为 50.00 ng/L,以目标化合物与内标物的浓度比值为横坐标 x ,目标化合物与内标物响应值的比值为纵坐标 y 拟合线性回归方程。结果表明,5 种

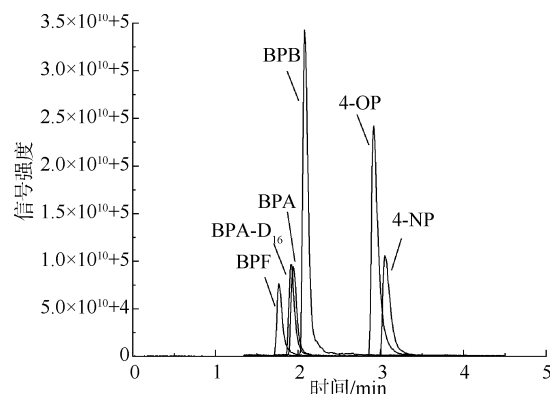


图 3 内分泌干扰物的 TIC 图

Fig. 3 TIC Chromatogram of EDCs

目标化合物相关系数(r) ≥ 0.998 ,线性值均为 0.5~100.0 ng/L。根据《环境监测分析方法标准制订技术导则》(HJ 168—2020)标准中的规定,配制 7 份低质量浓度加标水样(1.00 ng/L)进行检测,通过检测结果计算本方法的检出限和测定下限,结果如表 4 所示。

2.5.2 方法的精密度和准确度

使用上述检测方法对实际的饮用水和地表水水样中 5 种内分泌干扰物的浓度进行了测定,水样均未检出目标化合物。为了验证方法的精密度和准确度,在水样中分别加入了低、中、高浓度水平的混标溶液,计算相对标准偏差和加标回收率,如表 5 所示。结果显示,饮用水和地表水在不同浓度下的加标回收率分别为 84.3%~111.0% 和 73.4%~112.0%,相对标准偏差分别为 1.0%~7.7% 和

表 4 内分泌干扰物的线性关系和检出限

Tab. 4 Linear Relation and Detection Limits of EDCs

目标化合物	线性回归方程	线性值/(ng·L ⁻¹)	<i>r</i>	检出限/(ng·L ⁻¹)	测定下限/(ng·L ⁻¹)
BPA	$y=0.080x+0.091$	0.5~100.0	0.998	0.23	0.92
BPB	$y=0.298x+0.164$	0.5~100.0	0.999	0.24	0.96
BPF	$y=0.066x+0.044$	0.5~100.0	0.998	0.43	1.72
4-OP	$y=0.258x+0.114$	0.5~100.0	0.999	0.24	0.96
4-NP	$y=0.134x+0.060$	0.5~100.0	0.999	0.71	2.84

表 5 不同水样的回收率和相对标准偏差

Tab. 5 Recovery Rates and Relative Standard Deviation of Different Water Samples

水样类型	加标质量浓度/(ng·L ⁻¹)	相对标准偏差	平均回收率
饮用水	5	1.0%~4.0%	88.5%~111.0%
	20	1.8%~7.7%	84.3%~105.0%
	50	1.1%~5.2%	90.4%~106.0%
地表水	5	1.1%~5.4%	89.3%~112.0%
	20	2.5%~6.1%	73.4%~105.0%
	50	1.8%~7.0%	91.6%~103.0%

1.1%~7.0%,表明检测方法的精密度和准确度均满足实际水样的检测要求。

3 结论

(1)填料不同的在线固相萃取柱和在线固相萃取流动相的选择会对内分泌干扰物的检测有明显的影响,选用 BE Online PLRP-S 柱作为在线固相萃取柱,10%甲醇和 1:1:1 的甲醇/乙腈/异丙醇为固相萃取流动相,质谱的响应值最佳。

(2)此方法对 5 种内分泌干扰物的响应值好,抗干扰性强,准确度高,测定下限为 0.92~2.84 ng/L,饮用水和地表水的加标回收率分别为 84.3%~111.0%和 73.4%~112.0%,相对标准偏差分别为 1.0%~7.7%和 1.1%~7.0%。

(3)此方法自动化程度高,便捷高效,前处理和仪器分析全流程时长不超过 15 min,能同时对 5 种内分泌干扰物进行快速检测。

(4)此方法适用于生活饮用水和地表水中内分泌干扰物的快速检测,减少繁冗的前处理操作流程,提高水样检测效率,对水体中内分泌干扰物的监测具有参考意义。

参考文献

[1] CHEN D, KANNAN K, TAN H, et al. Bisphenol analogues

other than BPA: Environmental occurrence, human exposure, and toxicity: A review [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(11): 5438–5453.

[2] CHEN Y, SHU L, QIU Z, et al. Exposure to the BPA-substitute bisphenol S causes unique alterations of germline function[J]. PLoS Genetics, 2016, 12(7): e1006223. DOI: 10.1371/journal.pgen.1006223.

[3] LIU J, ZHANG L, LU G, et al. Occurrence, toxicity and ecological risk of bisphenol A analogues in aquatic environment—A review [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 208: 111481. DOI:10.1016/j.ecoenv.2020.111481.

[4] 丁峰, 沈玥. 双酚类化合物与慢性肾脏病:挑战与启示[J]. 肾脏病与透析肾移植杂志, 2023, 32(1): 41–42.

DING F, SHEN Y. Bisphenolic compounds and chronic kidney disease: Challenges and implications [J]. Journal of Kidney Disease and Dialysis Renal Transplantation, 2023, 32(1): 41–42.

[5] 魏锦博, 何正宇, 王昌泽, 等. 双酚 A 类似物的生殖毒性及人体生殖健康风险研究进展[J]. 生态毒理学报, 2022, 17(6): 85–107.

WEI J B, HE Z Y, WANG C Z, et al. Progress in the study of reproductive toxicity and human reproductive health risk of bisphenol A analogs [J]. Journal of Ecotoxicology, 2022, 17(6): 85–107.

[6] 于晖, 周鸿, 谢慧英, 等. 固相萃取-超高效液相色谱串联三重四级杆质谱法同时测定禽蛋中双酚 A、双酚 F 和双酚 S [J]. 实验与检验医学, 2023, 41(6): 687–690+697.

YU H, ZHOU H, XIE H Y, et al. Simultaneous determination of bisphenol A, bisphenol F and bisphenol S in poultry eggs by solid-phase extraction coupled with ultra performance liquid chromatography tandem triple quadrupole mass spectrometry [J]. Experimental and Laboratory Medicine, 2023, 41(6): 687–690, 697.

[7] LIU L, GUO F, CUI H, et al. Alkylphenols disrupt estrogen homeostasis via diradical cross-coupling reactions: A novel pathway of endocrine disruption [J]. Environment International, 2024, 183: 108428. DOI:10.1016/j.envint.2024.108428.

[8] BHANDARI G, BAGHERI A R, BHATT P, et al. Occurrence, potential ecological risks, and degradation of endocrine disrupter, nonylphenol, from the aqueous environment [J]. Chemosphere, 2024, 371: 133111. DOI:10.1016/j.chemosphere.2024.133111.

- 2021, 275: 130013. DOI: 10. 1016/j. chemosphere. 2021. 130013.
- [9] 王文娜, 吴刚, 何席伟, 等. 酚类环境内分泌干扰物微生物降解研究进展[J]. 环境监控与预警, 2024, 16(4): 9-21.
- WANG W N, WU G, HE X W, et al. Progress of microbial degradation of phenolic environmental endocrine disruptors[J]. Environmental Monitoring and Early Warning, 2024, 16(4): 9-21.
- [10] WANG D, XU Z, LIU Y, et al. Molecularly imprinted polymer-based fiber array extraction of eight estrogens from environmental water samples prior to high-performance liquid chromatography analysis[J]. Microchemical Journal, 2020, 159: 105376. DOI: 10. 1016/j. microc. 2020. 105376.
- [11] 慕妮, 何薛纯, 樊青青, 等. 液相色谱-质谱联用仪测定桶装饮用水中双酚 A 含量[J]. 福建分析测试, 2021, 30(5): 13-16.
- MU N, HE X C, FAN Q Q, et al. Determination of bisphenol A in barrel-filled drinking water by liquid chromatography-mass spectrometry[J]. Fujian Analytical Testing, 2021, 30(5): 13-16.
- [12] HAO P P. Determination of bisphenol A in barreled drinking water by a SPE-LC-MS method[J]. Journal of Environmental Science and Health, 2020, 55(6): 697-703.
- [13] 王园媛, 李璐璐, 张岚. 超高效液相色谱-串联质谱法测定饮用水中双酚类化合物[J]. 净水技术, 2023, 42(5): 172-177.
- WANG Y Y, LI L L, ZHANG L. Determination of bisphenols in drinking water by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(5): 172-177.
- [14] 彭诗琪, 赵嘉辉, 胡洪伟, 等. 液液萃取-烷基化衍生-气相色谱-质谱法测定海水中 4 种烷基酚类化合物的含量[J]. 理化检验-化学分册, 2024, 60(3): 324-327.
- PENG S Q, ZHAO J H, HU H W, et al. Determination of four alkylphenols in seawater by liquid-liquid extraction-alkylation derivatization-gas chromatography-mass spectrometry [J]. Physical and Chemical Inspection-Chemistry Division, 2024, 60(3): 324-327.
- [15] BOJKE A, LITWIN M, SZPIECH A, et al. Determination of bisphenol A (BPA) in the port of gdynia waters using gas chromatography coupled with mass spectrometry (GC-MS)[J]. Water, 2023, 15(16): 2958. DOI:10. 3390/w15162958.
- [16] 李宝珠, 陈海玲, 王翠玲, 等. 酚类内分泌干扰物分析方法研究进展[J]. 环境卫生学杂志, 2022, 12(9): 680-689.
- LI B Z, CHEN H L, WANG C L, et al. Advances in analytical methods for phenolic endocrine disruptors [J]. Journal of Environmental Hygiene, 2022, 12(9): 680-689.