



doi: 10.12452/j.fxcxb.250519369

环境中全氟和多氟烷基化合物的检测方法研究进展

罗宇震, 宗博洋, 李秋菊, 毛舜*

(同济大学 环境科学与工程学院, 水污染控制与资源绿色循环全国重点实验室, 上海 200092)

摘要: 全氟和多氟烷基化合物(PFAS)作为新污染物, 其环境与健康风险已成为全球关注焦点。环境中PFAS的检测方法对其风险评估与管控具有重要的技术支撑作用。该文从采样方法、预处理过程及检测技术等方面系统评述各类环境样品中PFAS检测方法的研究进展。当前, 色谱-质谱联用技术因高准确度和高灵敏度优势被用作标准检测技术, 但其设备成本高、操作要求高不适于现场原位检测; 以光学与电学方法为核心的快速检测技术通过传感体系设计与数据分析方法构建, 充分发挥操作便利与便携性的优势, 并突破 $\mu\text{g/L}$ 浓度水平的特异性检测能力, 为快速原位检测提供了突破性解决方案, 但仍需克服多目标检测的可靠性与产业化应用能力等关键挑战。未来, PFAS快速筛查技术与实验室确证方法(LC-MS/MS)协同演进, 将推动自动化、智能化、数据互联的智能监测网络建设, 为PFAS污染防控提供更坚实的技术支撑。

关键词: 全氟和多氟烷基化合物; 光学传感; 电学传感; 快速检测; 原位检测

中图分类号: O657.3; O613.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4957(2026)01-0197-12

Research Progress on Detection Methods of Perfluorinated and Polyfluoroalkyl Substances in the Environment

LUO Yu-zhen, ZONG Bo-yang, LI Qiu-ju, MAO Shun*

(State Key Laboratory of Water Pollution Control and Green Resource Recycling, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Perfluorinated and polyfluoroalkyl substances (PFAS) are emerging contaminants. Their environmental and health risks cause global concern. Accurate detection methods for PFAS in environmental samples are critical for risk assessment and regulatory control. Therefore, this paper systematically reviews the research progress of PFAS detection methods. This paper covers sampling, pretreatment, and detection techniques. At present, liquid chromatography-tandem mass spectrometry (LC-MS/MS) is the gold standard. It provides high accuracy and sensitivity. It is widely standardized for diverse environmental samples. However, it requires expensive equipment and complex operations. Thus, it is unsuitable for field deployment. To address this gap, researchers developed rapid detection techniques. These techniques primarily use optical and electrochemical methods. Optical/electrochemical rapid detection methods show key advantages: They achieve $\mu\text{g/L}$ level sensitivity; exhibit exceptional selectivity; and feature field portability. These techniques are engineered through sensing architecture optimization and data analytics integration. These advancements establish a breakthrough approach for rapid in-situ detection. But challenges remain in multi-analyte reliability and industrial scalability. Further efforts are essential to overcome these limitations. In the future, PFAS rapid screening technology and laboratory confirmatory method (LC-MS/MS) will co-evolve. This synergy promotes the construction of intelligent monitoring network with automation, intelligence and data interconnection. They provide robust technical support for PFAS control.

Key words: perfluorinated and polyfluoroalkyl substances; optical sensing; electrochemical sensing; rapid detection; in situ detection

全氟和多氟烷基化合物(PFAS)是至少含有一个全氟化甲基或亚甲基碳原子(不含任何H/Cl/Br/I原子)的氟化物, 因其优异的物化稳定性在工业及消费品领域得到广泛应用^[1]。目前已知的PFAS种类繁多

收稿日期: 2025-05-19; 修回日期: 2025-06-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(22376159)

* 通讯作者: 毛舜, 博士, 教授, 研究方向: 环境污染物快速检测技术, E-mail: shunmao@tongji.edu.cn

网络首发日期: 2025-08-14

吸附剂浸渍聚氨酯泡沫盘(SIP)^[31-34]和聚乙烯片材(PE)^[35]等,价格低且操作简便,但采样速率和平衡时间受风速/温度影响^[36],需优化速率模型^[37]。其不需要电力,适用于偏远地区^[33],广泛用于大范围的长期监测,如全球大气被动采样网络(GAPS)2009~2017年通过SIP覆盖全球41个监测点^[38]。而硅胶腕带小巧、轻便和可穿戴的特性利于评估个体吸入/皮肤暴露水平^[39]。

固体样品(室内灰尘、泥土、底泥沉积物、消费品和生物样品等)的采样因样品类型而异。灰尘通过真空吸尘器^[25, 40-43]或鬃毛刷与聚丙烯管^[25]收集;土壤按网格法5点(中心及四角)合成均质样存于聚乙烯/聚丙烯容器^[44-45]。底泥沉积物的表层采用抓斗采样器^[46-47],深层(30~50 cm)用柱状采样管结合机械驱动装置,多管同层样本均质化以降低异质性误差^[47-49]。PFAS因热稳定性在焚烧产物(如飞灰、底灰)中大量存在,采样时一般使用聚丙烯袋^[50]。消费品来源于商业店铺^[51-52]、网购平台^[53]、研究人员个人物品^[52]和制造商^[52, 54]等。食品包装需清除表面残留物并限制接触时间 ≤ 2 min以抑制PFAS迁移^[51];对比分析PFAS管控法规颁布前后的样品可以评估管控法规的影响^[52];工业制造样本涵盖多生产阶段原料以溯源PFAS的潜在引入节点^[54]。生物样品中,人体组织样品经伦理审批后通过志愿者招募获取^[55-57];动植物样品野外采集或商业采购^[58]。

1.2 预处理

液体样品的常规固相萃取方法存在样品浓度极低(pg/L、ng/L)及大样本量(500 mL)等导致的操作成本高^[59]等缺点。为此,研究者结合固相微萃取等技术开发了多种新型吸附材料,包括:金属有机框架(MOF)^[60-65]、共价有机骨架材料(COF)^[66]、分子印迹聚合物(MIP)^[67-69]、葫芦环大环聚合物^[70]及磁性碳纳米材料^[71-72]。这些材料凭借高比表面积和多孔结构特性显著提升了吸附性能。此外,针对分散固相萃取离心分离困难的问题,可通过引入过滤^[67, 73]、磁性^[61, 65, 70]分离技术提高分离效率。

生物样品中脂类、蛋白质等干扰物易导致目标物回收率降低及检出限升高。为此,研究者通过新型功能材料开发和操作流程优化提升提取效率与检测灵敏度。以全鱼样本为例,传统EPA标准方法的回收率仅(26 $\pm$ 18)%,而采用增强基质去除柱(安捷伦 Captiva EMR-Lipid; 5190-1004)通过尺寸排阻与疏水作用选择性去除磷脂并保留PFAS,可将回收率提升至(96 $\pm$ 9)%^[74]。Taylor等^[75]对QuEChERS进行改进,开发的扩展方法QuEChERSER(Efficient and Robust)通过优化乙腈/水提取与盐析步骤,在牛肉、鲶鱼、鸡肉等食品基质中去除脂类与蛋白质干扰,对33种PFAS的回收率达70%~120%(RSD $\leq$ 20%),检出限低至0.1 ng/g。此外,超声波振动辅助提取可有效增强PFAS释放效率^[76];双固相萃取策略通过多重净化机制亦可显著降低干扰物影响^[77]。

减少有机溶剂的使用实现预处理过程绿色化,是当前的研究方向之一。Skaggs等^[78]基于PFAS凝固点低的特点,应用冷冻浓缩(FC)方法结合搅拌棒吸附萃取(SBSE),仅需50 μ L有机溶剂即可实现PFAS富集,同时自制搅拌棒可重复使用50次以上且萃取性能未出现显著下降。同样以减少有机溶剂消耗为目标,Liang等^[79]将由十二烷醇和四氢呋喃通过自组装和凝聚形成的超分子溶剂用于微萃取,仅需2 mL的有机溶剂即可在1 min内提取21种PFAS,但检出限较高(10~80 ng/L)。研究者还采用ComplexMoGAPI等综合性指标工具量化评估预处理方法的环境友好性^[64]。

未来,PFAS样品前处理技术的研发应聚焦于开发高效低耗的新型方法,持续优化具有大比表面积和多样分子识别能力的功能材料,提升富集萃取效果,并针对水体、生物类样品、环境土壤等不同基质,研发高度适配的特异性萃取方法与提取柱。

2 PFAS检测技术

色谱-质谱联用技术作为检测PFAS的金标准,已广泛应用于各类环境样品PFAS的检测^[80],其检测精度高、选择性好,已初步开发出标准检测方法(表1)。然而,该技术对设备成本与操作专业性要求高,且需依赖实验室环境,限制了其在现场原位检测中的应用。相较之下,以光学和电学方法为核心的快速检测技术聚焦传感体系创新设计,通过纳米材料的浓缩作用协同识别传感,从原理上利于小型化和便携化,并具有成本低和检测快等优点,被广泛用于各类新污染物的检测^[81-83]。近十年,这类技术被广泛用于PFAS检测中,在灵敏度(ng/L~pg/L级)、选择性及现场部署方面取得突破性进展。

2.1 色谱-质谱联用技术

作为基准方法,用于PFAS的色谱-质谱联用技术包括液相色谱-质谱联用(LC-MS)、气相色谱-质

谱联用(GC-MS)、液相色谱-串联质谱法(LC-MS/MS)、离子色谱法(IC)等。离子型PFAS适用液相色谱^[84],挥发性PFAS适用气相色谱^[85],目前LC的应用更广。此外,对于缺乏有效的可电离基团和发色团而难以直接检测的PFAS(如全氟辛烷磺酰氟、PFASF),需衍生化为亚磺酸间接检测^[86]。目前,色谱-质谱联用技术已发展出一些成熟的标准检测方法(表1),研究重点集中于针对该技术开发的前处理技术(如“1.2”章节所述),以拓展检测种类/基质并提升灵敏度/精度。

表1 PFAS的检测标准
Table 1 Detection standards of PFAS

Organization	Standard	Sample	Analyte	Detection method	Detection limit of PFOA and PFOS/(ng/L or ng/kg)
Standardization Administration of China (SAC)	GB/T 5750.8-2023	Drinking water	11 perfluoroalkyl acids (PFAAs)	SPE+LC-MS/MS	5.00, 3.00
Ministry of Ecology and Environment, China (MEE)	HJ 1333-2023	Surface water, groundwater, domestic wastewater, industrial wastewater, seawater	Perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctanesulfonic acid (PFOS)	SPE+LC-MS/MS	0.50, 0.60
U. S. Environmental Protection Agency (US EPA)	METHOD 537.1	Drinking water	18 analytes including perfluoroalkyl acids, perfluoroalkyl ether acids, perfluorooctane sulfonamides	SPE+LC-MS/MS	0.530, 1.10
U. S. Environmental Protection Agency (US EPA)	METHOD 1633	Water, soil, biosolids, sediment, biological tissue	40 analytes including perfluoroalkyl acids, fluorotelomer sulfonates, perfluorooctane sulfonamides, per-/polyfluoroalkyl ether carboxylic acids	SPE+LC-MS/MS	-
ASTM International	ASTM 7979-20	Surface water, groundwater, sludge, wastewater	21 perfluoroalkyl acids (PFAAs)	LC-MS/MS	1.70, 2.20
ASTM International	ASTM 7968-23	Soil	21 perfluoroalkyl acids (PFAAs)	LLE+LC-MS/MS	6.24, 18.8

基于高分辨质谱(HRMS)的非靶向分析(NTA)因环境未知PFAS风险凸显而成为热点^[87-89]。HRMS会产生大量潜在PFAS信号,通常使用质量缺陷过滤(范围通常设定为 $-0.25 \sim +0.1$ Da)^[90-93]、同源序列检测(如 CF_2)^[90,93-94]及碎片离子标记^[90,94-95]等方法对信号进行初步筛选。在此基础上,目前开发了多种搜索算法来提高识别效率。这些算法通过捕捉PFAS的特征内源中和损失、特定的碳硫同位素分布等特征,并通过机器学习技术构建算法模型^[96-98]。例如,Jiao等^[97]使用双层同系物网络和批量质谱搜索工具(MASST)显著减少94%的假阳性候选物,并在防水产品和工业污泥样品中成功检测到94种PFAS(含36种新型PFAS)。GC-MS在NTA中展现出潜力,尤其在挥发性和半挥发性PFAS检测中与LC-MS表现互补^[99],EPA试验证实GC可识别809种化合物(47%为LC方法未检出)^[100]。Hu等^[101]的随机森林回归模型通过预测响应因子,为缺乏标准品的非目标PFAS提供了定量方案,但其预测结果与真实响应因子仍存在2.7倍的偏差,需要进一步研究改进。

2.2 光学检测法

光学检测技术(荧光法、比色法、电化学发光法等)通过探针功能化设计提升检测性能和拓展实际应用(表2)。

光学检测法通过多类型探针的功能化设计实现性能提升,荧光探针涵盖有机小分子/高分子材料、生物材料及其他纳米材料。例如,Lei等^[102]基于四苯乙烯大环衍生物(BC)的聚集诱导发光(AIE)效应(图2A),通过阳离子大环与PFOS间的静电和疏水作用实现特异性检测,操作简便(检出限 $23.7 \mu\text{g/L}$)。为增强检测灵敏度,Concellón等^[103]通过合成放大荧光聚合物(AFP)增强荧光信号(图2B),该AFP中具有选择性的吡啶结构及高度氟化的聚对苯乙炔-聚苄复合骨架,其链式结构可以高效传递激子,使聚合物链上浓度很低的检测物捕获传递中的激子,以达到良好的灵敏度,PFOA的检出限为 80 ng/L 。为实现低浓度环境样品的筛查,Sunantha等^[104]利用基因工程开发了检测PFOS和PFOA的细菌生物探针传感器,检出限 10 ng/L ,但由于细菌生物内蛋白转录等复杂过程,需要24 h检测时间方可达到最佳检测效果。相对而言,纳米材料凭借较大比表面积及孔隙结构促进检测物快速富集于传感界面,显著提升了灵敏度及检测速度。例如,Li等^[105]使用在上转换颗粒外生长COF形成的纳米核壳结构超痕量检测

PFOS, 检出限低至0.3 ng/L, 荧光信号在10 min内达到峰值。

光学检测法可同时实现多功能应用场景突破。除PFAS检测外, 多孔材料基于高比表面积亦可同步实现其高效去除。例如, Jard等^[106]使用阳离子COF通过羧基脱质子化促进的静电与疏水作用特异性捕获PFOA(图2C), 兼具荧光检测与去除功能, 其荧光开启效应源于PFOA诱导的AIE, 检出限低至1.8 $\mu\text{g/L}$, 并表现出2 600 mg/g的显著平衡吸附容量, 柱吸附实验证实环境浓度下PFOA可完全去除。为扩展光学检测方法的使用场景, 近期Song等^[107]首次将荧光传感应用于PFAS光催化实时监控, 以通过溶剂热法合成的铜系MOF作为比率荧光探针, 基于光致电子转移与能量转移原理, 实现了PFOA光降解过程及转化率的肉眼实时监控, 但检出限较高(5.258 mg/L), 仅适用于高浓度场景。

光学检测法的检测操作简便, 在现场实时分析方面取得明显进展。光学响应信号在灵敏度要求不高的情况下可实现肉眼直接判读, 或借助简易光学传感器(如智能手机)进行定量分析^[108]。针对空气样本现场检测技术空白, Nie等^[109]开发了集成气体采样和光学检测的便携式数字监测设备(图2D): 以水凝胶试剂盒为采样核心, 通过琼脂糖水凝胶对气体分子的自发吸附特性捕获大气中的PFOA, 并基于PtCoNPs@g-C₃N₄纳米酶与邻苯二胺显色体系, 12 min内完成了PFOA富集与荧光/比色双信号响应, 在氟化工厂周边大气监测中, 检测结果与GC-MS高度一致。为了现场即时调整污水处理工艺, 近期Marino等^[110]首次将荧光技术用于臭氧工艺中PFAS降解的现场实时监控, 在线色氨酸荧光传感器通过280/340 nm激发/发射对实时追踪荧光强度衰减, 其信号变化与羟基自由基($\cdot\text{OH}$)活性强相关, 结合PFAS与 $\cdot\text{OH}$ 及色氨酸的作用机制, 间接推算PFAS的降解速率($R^2 \geq 0.93$), 为参数优化提供了即时反馈。

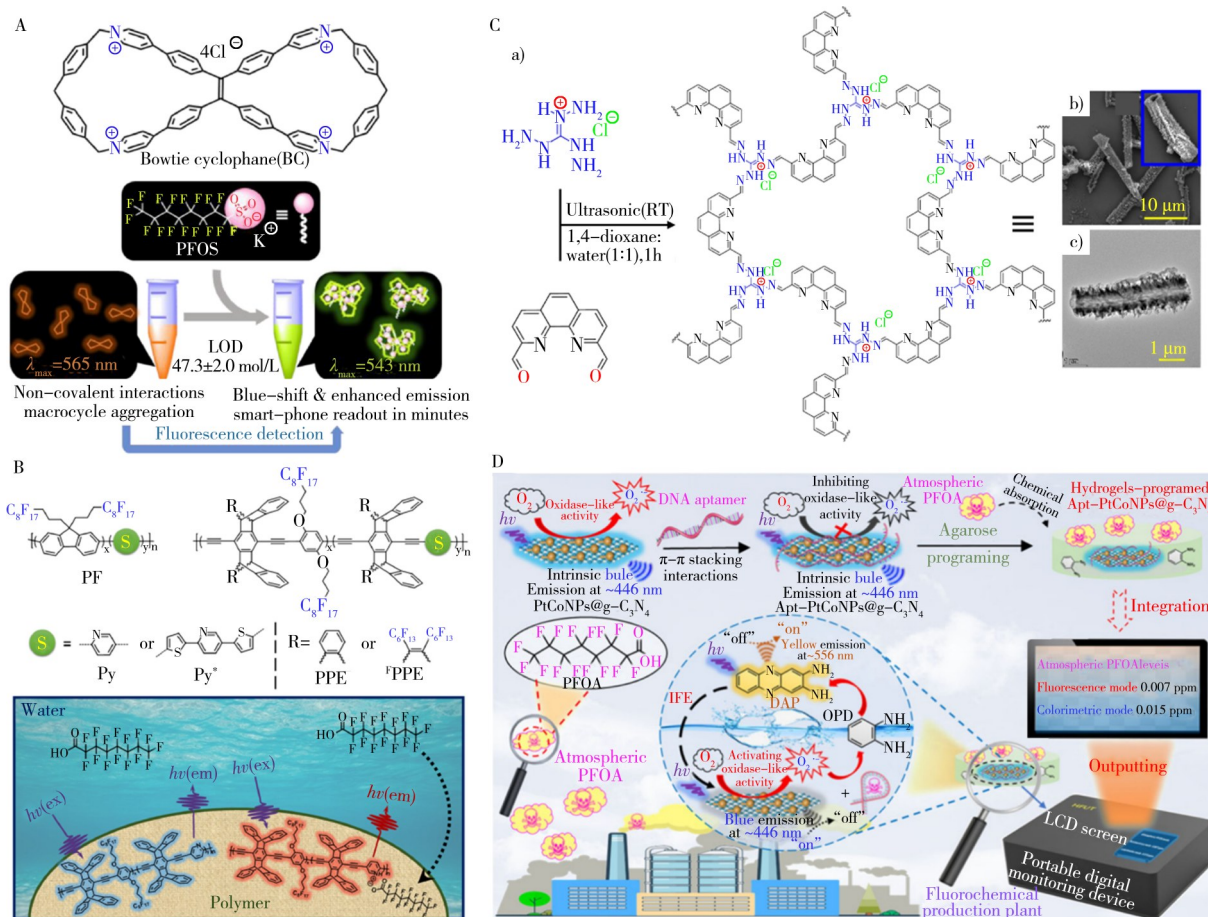


图2 基于四苯乙烯大环衍生物(BC)的聚集诱导发光效应(AIE)的PFOS荧光检测原理示意图^[102](A), 基于放大荧光聚合物(AFP)的PFOA荧光检测原理示意图^[103](B), 兼具PFOA荧光检测与去除功能的阳离子共价有机框架(COF)的合成方法和形貌结构图^[106](C), 基于纳米酶的大气PFOA便携式采样和光学检测一体化设备示意图^[109](D)

Fig. 2 Schematic diagram of PFOS fluorescence detection principle based on aggregation-induced emission (AIE) effect of tetraphenylethylene macrocyclic derivative (BC)^[102](A), schematic diagram of PFOA fluorescence detection principle based on amplified fluorescent polymer (AFP)^[103](B), synthesis method and morphology structure diagram of cationic covalent organic framework (COF) with PFOA fluorescence detection and removal function^[106](C), schematic diagram of atmospheric PFOA portable sampling and optical detection integrated equipment based on nanozyme^[109](D)

表 2 PFAS 光学检测方法的检测性能
Table 2 Detection performances of optical detection methods for PFAS

Principle	Material	Analyte	Detection limit/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	Application context	Sample	Ref.
Colorimetric	Ethyl violet dye	PFOA, PFOS	0.500	Low-cost detection (smartphone compatible)	Tap water, groundwater	[111]
Electrochemiluminescence	Carbon nitride nanosheets/MIP	PFOA	8.28×10^{-3}	Trace analysis (ng level)	Tap water, Yangtze River, East Lake	[112]
Fluorescence	Guanidinocalix[5]arene	PFOA, PFOS	PFOS: 10.7 PFOA: 10.9	Simultaneous detection & removal	Tap water, lake water	[113]
Fluorescence	Genetically engineered bacteria	PFOA, PFOS	10.0×10^{-3}	Trace analysis (ng/L level)	Drinking water, river water, wastewater	[104]
Fluorescence	Zirconium-porphyrin MOF	PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFOS	$36.0\times 10^{-3}\sim 47.0\times 10^{-3}$	Ultrafast detection (10 s)	Taihu Lake, groundwater	[114]
Fluorescence	Diimine derivative	PFOS	14.0	Naked-eye readout	Tap water, soil extracts	[115]
Fluorescence	Oil-in-water biphasic droplets	PFOA, PFOS	PFOA: 4.50, PFOS: 2.50	Anti-hydrocarbon surfactant interference	Tap water, synthetic groundwater	[116]
Fluorescence	Amplified fluorescent polymer	PFOA, PFOS	PFOA: Flim: 1.00, Nanoparticle: 0.080 0	Trace analysis (ng/L level)	Well water	[103]
Fluorescence	Fluorinated PPE/fluorinated squaraine dye	PFOA, PFOS	PFOA: 0.059 0 PFOS: 0.068 0	Trace analysis (ng/L level)	Well water	[117]
Fluorescence	Cyclometalated iridium (III) complex	PFOA	6.21	Anti-metal cation/acid interference	Tap water, bottled water (mineral, soda, flavored)	[118]
Fluorescence	Lanthanide MOF/MIP	PFOA	0.406	Smartphone-based detection	Tap water, river/lake water	[108]
Fluorescence	Lanthanide MOF	PFOA	5.26×10^3	Real-time photocatalytic monitoring	Drinking water, seawater	[107]
Fluorescence	Cationic COF	PFOA	1.80	Simultaneous detection & removal	—	[106]
Fluorescence/Colorimetric	Carbon nitride nanozyme	PFOA	Fluor: 0.129, Color: 0.277	Portable air monitoring	Ambient air	[109]

2.3 电化学检测法

目前已经发展的电学检测方法通过电极界面设计与信号解析策略创新,在灵敏度与特异性上展现出优势(表3)。这些电学检测方法的检出限普遍处于 ng/L~ $\mu\text{g/L}$ 级别,部分阻抗检测方法的检出限甚至达到 pg/L 级别,低于质谱联用技术。这些检测方法大多用于水体样品的检测,电位检测方法可用于如沙土的固态样品^[119]。

伏安检测法作为 PFAS 电学检测方法的核心技术,通过氧化还原探针创新可显著提升现场检测适用性。因 PFAS 本身电化学活性较弱,多数方法需添加氧化还原探针以实现间接检测,常见的氧化还原探针为二茂铁甲酸(FcCOOH)。此外,为便于河流实地检测,河水中天然存在的溶解氧也可作为氧化还原探针^[120]。近期的研究通过在电极上电聚合四甲基哌啶氮氧化物(TEMPO)、麦尔多拉蓝(MB)、亚甲基蓝(MB)等氧化还原活性物质,避免检测过程额外添加氧化还原探针以简化流程^[121-123]。例如,Rehman 等^[122]在检测电极上电聚合梅尔多拉蓝(epMB)形成导电薄膜(图 3A),通过氨基静电作用捕获 PFAS,并诱导 F—F 疏水簇聚集,阻碍 epMB/epMB⁺氧化还原过程,方法对 PFOS 和 PFOA 的检出限分别达 0.4 ng/L 和 1.65 ng/L,在腐植酸、氯化钠、金属离子(Cu、Hg、As)等常见干扰化合物浓度高出 4 万倍时也表现出良好的选择性,对工业废水样品的回收率为 95.45%。近期还出现了摆脱氧化还原探针而基于 PFAS 部分氧化还原产生电流的伏安检测方法^[124-126]。例如,基于石墨烯材料与 PFOA 氧原子的静电吸附作用,Shanbhag 等^[124]将具有高表面活性和优越导电性的石墨烯纳米片用于 PFOA 的直接伏安检测,检出限为 4.3 $\mu\text{g/L}$,检测范围覆盖 21 $\mu\text{g/L}\sim 0.207\text{ g/L}$ 。另一项研究中,Wang 等^[127]开发了利用强氧化能力的电芬顿技术直接氧化 PFAS 的伏安检测方法,利用 MOF 和碳纳米纤维电极通过电芬顿反应氧化 PFAS 并产生伏安信号,可在检测的同时完成对 PFAS 的降解。这些无氧化还原探针的检测方法在使用

上具有便利性，但由于 PFOA 的电化学活性较低导致灵敏度受限，与基于氧化还原探针的间接检测方法相比，检出限高出 2~3 个数量级，通常在 $\mu\text{g/L}$ 以上。

表 3 PFAS 电学检测方法的检测性能
Table 3 Detection performances of electrical detection methods for PFAS

Principle	Material	Analyte	Detection limit/ $(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	Application context	Sample	Ref.
Potentiometry	Fluorinated anion-exchange membrane/carbon contact electrode	PFOS	0. 430	In-situ solid analysis	Sand, Carnegie Lake water	[119]
Impedance	Cr-MOF/interdigitated microelectrode	PFOS	$0. 500\times 10^{-3}$	Trace water analysis(ng/L)	Groundwater	[136]
Impedance	MIP/glassy carbon electrode	PFOS	$1. 70\times 10^{-3}$	Deployable aquatic sensing (DO redox probe)	Huo River water	[120]
Impedance	MXene-AgNPs/glassy carbon electrode	PFOS	$33. 0\times 10^{-6}$	Ultra-trace analysis(pg/L)	Industrial wastewater	[135]
Impedance	SWCNT/gold electrode	PFOS, PFOA, GenX, PFBS	PFOS: 8. 00 PFOA: 20. 0	PFAS congener differentiation	—	[133]
Current Blockade(Nanopore)	γ -Cyclodextrin	PFOA, PFOS	0. 400	PFAS congener differentiation	—	[134]
SWV	Hf-doped WO_3 NPs/carbon paste electrode	PFOA	7. 58	Multi-matrix compatibility	Tap water, soil, dam water, lake water, spoiled produce	[125]
LSV	Fluorinated MOF/glassy carbon electrode	PFOA	$20. 0\times 10^{-3}$	Trace water analysis(ng/L)	Wei River, Tap water, Campus lake water	[137]
DPV	Gold nanostar/glassy carbon electrode	PFOS	$7. 50\times 10^{-3}$	Trace water analysis(ng/L)	Tap water	[138]
DPV	MIP/Co-FeMOF/CNT	PFOA	0. 444	Simultaneous detection & degradation	—	[127]
DPV	B, N-co-doped diamond-carbon wall	PFOS	Tap: 1. 20 WW: 1. 50	Wastewater anti-interference detection	Tap water, treated wastewater	[131]
DPV	PANI-Chitosan/screen-printed carbon electrode	PFOA	1. 08	Wastewater anti-interference detection	Industrial wastewater, residential wastewater, rural wastewater	[126]
DPV	MB-embedded β -CD MIP/glassy carbon electrode	PFOA	$1. 57\times 10^{-3}$	Trace water analysis(ng/L)	Groundwater	[121]
DPV	MIP/ $\text{Cu}_2\text{O}-\text{C}-\text{NiCo}_2\text{O}_4$ /gold electrode	PFOA	$19. 5\times 10^{-3}$	Seawater trace analysis	Seawater	[139]
DPV	Meldola's Blue(MB)-MIP/glassy carbon electrode	PFOS	PFOS: $0. 400\times 10^{-3}$ PFOA: $0. 389\times 10^{-3}$	User-friendly trace detection (integrated redox mediator)	Industrial wastewater	[122]
CV	PEDOT-TEMPO-MIP/glassy carbon electrode	PFOA	$0. 280\times 10^{-3}$	User-friendly trace detection (integrated redox mediator)	Lake water	[123]
Photoelectrochemical	MIP/AgI-BiOI nanostructure/FTO electrode	PFOA	$10. 0\times 10^{-3}$	Trace water analysis(ng/L)	Yangtze River, tap water	[140]

分子印迹聚合物(MIP)基底工程化设计与复合结构创新，提高了 PFAS 电学检测的特异性和稳定性。作为人工合成的特异性识别材料，MIP 兼具抗干扰、低成本和高稳定性优势^[125-126]，其识别机制依赖于空腔对氧化还原探针电子交换路径的调控，其性能则受基底材料调控，需兼具均一性、绝缘性与可再生性^[130]。基于此，Pierpaoli 等^[131]首次在微/纳米尺度上研究了定制基底形貌对 MIP 性能的影响(图 3B)，利用化学气相沉积硼和氮共掺杂富含金刚石的纳米结构作为基底材料，显著降低 MIP 异质性，并诱导选择性空腔的定向分布，从而增强了检测的选择性和灵敏度，在纯水中可实现 $0. 1\sim 100 \mu\text{g/L}$ 范围的 PFAS 检测，并在经处理的废水样品中达到了 $1. 5 \mu\text{g/L}$ 检出限的抗干扰检测。此外，MOF 复合 MIP 材料也表现出良好的应用潜力，Razaei 等^[132]通过复合磁性 MIP 与双金属 MOF(Zn/Ti-MOF)实现同步预浓缩与检测，对 PFOS 的检出限达 $0. 35 \mu\text{g/L}$ ，实际水样回收率为 $96. 0\%\sim 104. 1\%$ ，且 21 天重复使用性能稳定。

阻抗检测法充分发挥 PFAS 分子对电荷传递的阻碍效应，在超痕量(pg 级)检测与复杂基质多目标分析领域实现了突破性进展。例如，为实现复杂基质中多目标 PFAS 的同步检测，Han 等^[133]开发了氟

化表面修饰的单壁碳纳米管(SWCNT)阻抗检测方法(图 3C): 通过传输线模型(TLM)解析阻抗谱并提取多个等效电路参数, 随后通过主成分分析(PCA)对多维度信息降维处理, 最终实现了 PFOS、PFOA、GenX 及 PFBS 的区分检测, 为多 PFAS 识别提供了新策略。基于相似的 PCA 策略, Wei 等^[134]使用生物纳米孔单分子检测技术, 通过 α -溶血素(α -HL)纳米孔内 γ -环糊精与 PFAS 之间主客体的相互作用, 捕获 PFAS 引起多级电流阻断信号, 通过电流阻断幅度比值与碳链长度的强相关性, 成功区分了 PFAA 类的 PFCA(C4~C9)和 PFSA(C4~C8)系列中不同碳链长度的 PFAS 分子, 经预浓缩处理后, PFOA 和 PFOS 的检出限可达 0.4 $\mu\text{g/L}$ 。Khan 等^[135]开发的基于银纳米颗粒与 MXenes 复合材料的阻抗检测方法(图 3D), 通过静电作用与 F—F 协同效应诱导电荷转移电阻随 PFAS 浓度梯度变化, 检出限低至 33 pg/L , 为迄今报道的 PFAS 检测方法的最低值。

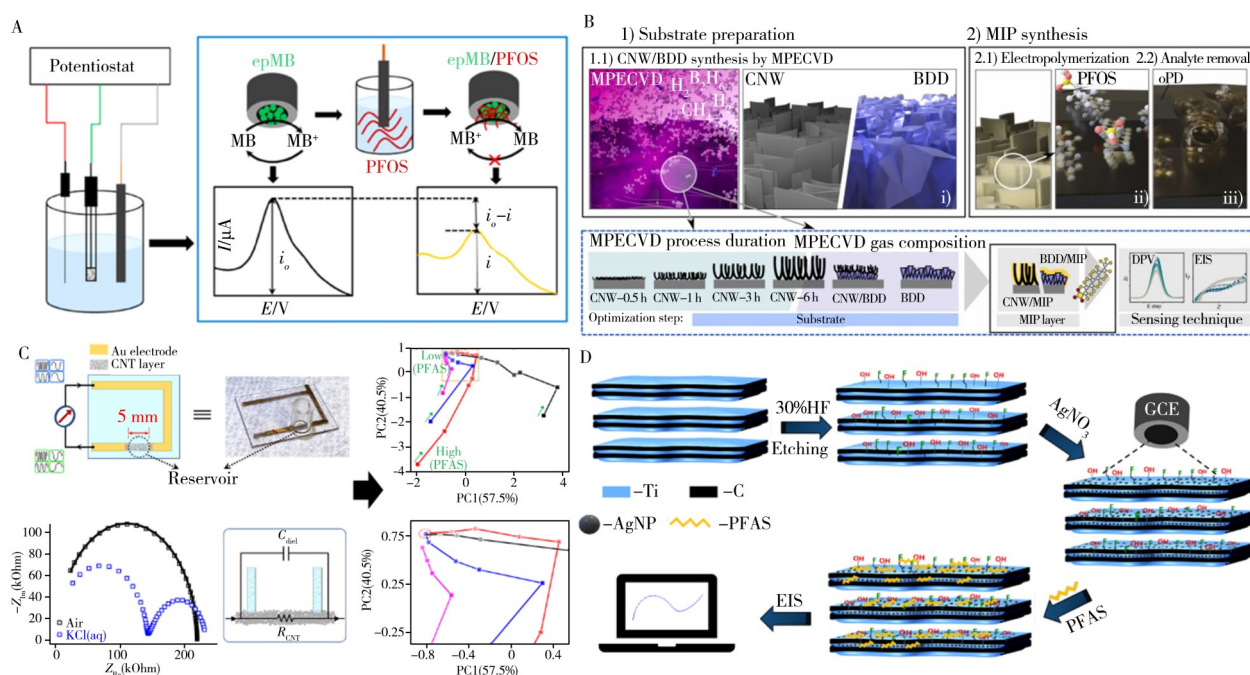


图 3 基于电聚合氧化还原物质(梅尔多拉蓝)的无氧化还原探针的 PFOS 伏安检测示意图^[122](A), 基于硼-氮共掺杂富含金刚石定制 MIP 基底的伏安检测示意图^[131](B), 基于单壁碳纳米管(SWCNT)与主成分分析(PCA)技术的 PFAS 差异化阻抗检测原理示意图^[133](C), 基于银纳米颗粒与 MXenes 复合材料的极高灵敏度阻抗检测原理示意图^[135](D)

Fig. 3 Schematic diagram of PFOS voltammetric detection without redox probe based on electropolymerized redox substance (Mel-dola blue)^[122](A), schematic diagram of voltammetric detection based on boron-nitrogen co-doped diamond-rich custom MIP substrate^[131](B), schematic diagram of PFAS differential impedance detection principle based on single-walled carbon nanotubes (SWCNT) and principal component analysis (PCA)^[133](C), schematic diagram of extremely high sensitivity impedance detection principle based on silver nanoparticles and MXenes composites^[135](D)

3 结论与展望

如表 4, 目前 SPE+LC-MS/MS 作为常规 PFAS 检测方法, 已在痕量分析(ng/L 级)中实现标准化应用, 并通过前处理技术创新持续提升检测效率与经济性, 但其高成本限制了在快速筛查与原位监测中的应用。基于功能纳米材料的光学/电学快速检测方法则在灵敏度、选择性及现场适用性方面取得显著进展, 展现出显著的成本优势与便携性, 但仍面临以下挑战:

(1) 检测目标范围窄: 现有方法主要针对 PFOA 和 PFOS, 对新型替代物(如 PFBS、GenX)及前驱体转化产物的识别能力不足。研究证实, 环境中多数 PFAS 前驱体会转化为包括 PFOA 和 PFOS 在内的终端产物^[141], 这一过程导致实际暴露风险被严重低估, 因此检测目标范围还需进一步拓展至这些物质。

(2) 特异性与多目标检测能力弱: 快速检测方法虽能实现大批量样品中 PFAS 污染的低成本初筛, 但由于其主要依赖氟-氟作用和疏水作用等机制, 对 PFAS 同系物及结构类似物的区分能力有限。阻抗谱-PCA 法虽可识别碳链长度, 但复杂基质抗干扰与多目标同步检测的可靠性亟待验证。值得注意的是, 快速检测技术与非靶标 HRMS 的联用仍属研究空白, 通过整合非靶向 HRMS 中特征性结构片段(如

磺酸基团)和精确分子量等数据,有望在维持高效低成本优势的同时提升特异性与多目标检测能力。

(3)规模化应用瓶颈:当前快速检测技术的研发主要集中于性能指标,而对产业化应用的关键要素关注不足。为充分发挥快速检测方法的成本优势,需重点突破功能材料批量化制备、器件稳定性控制及生产工艺标准化等瓶颈,推动技术从实验室验证向规模化应用跨越。

未来PFAS检测方法将向自动化、智能化与信息化方向发展,通过整合快速筛查检测技术与实验室确证方法(LC-MS/MS),构建覆盖现场即时筛查到实验室精准分析的监测网络。

表4 PFAS的检测方法

Table 4 Detection methods for PFAS

Principle	Advantage	Limitation
LC-MS/MS	Standardized methods for multiple matrices, high sensitivity, multi-component simultaneous detection	Expensive and bulky instrumentation, complex operational procedures
Optical methods	High portability (smartphone-compatible), rapid response, simultaneous detection & removal, low cost	Limited selectivity, restricted range of detectable PFAS congeners
Electrochemical methods	High sensitivity, congener-specific differentiation (PCA algorithm), low operational cost	Limited application scale, restricted range of detectable PFAS congeners

参考文献:

- [1] Glüge J, Scheringer M, Cousins I T, DeWitt J C, Goldenman G, Herzke D, Lohmann R, Ng C A, Trier X, Wang Z. *Environ. Sci. Processes Impacts*, **2020**, 22(12): 2345-2373.
- [2] US EPA. Comptox PFAS-defined Structure-ORD_CompTox Per- and PolyFluoroAlkyl Substances-defined Structure. [2025-06-27]. <https://cdxapps.epa.gov/oms-substance-registry-services/substance-list-details/467>.
- [3] Chen Y, Wei L J, Luo W, Jiang N, Shi Y, Zhao P, Ga B, Pei Z G, Li Y M, Yang R Q, Zhang Q H. *J. Hazard. Mater.*, **2023**, 443: 130170.
- [4] Brusseau M L, Anderson R H, Guo B. *Sci. Total Environ.*, **2020**, 740: 140017.
- [5] Shao M H, Ding G H, Zhang J, Wei L, Xue H H, Zhang N N, Li Y, Chen G Q, Sun Y Q. *Environ. Pollut.*, **2016**, 216: 675-681.
- [6] Zhu Y L, Tang J X, Li M X, Wang H F, Yang H. *Asian J. Ecotoxicol.* (朱永乐, 汤家喜, 李梦雪, 王鹤飞, 杨欢. 生态毒理学报), **2021**, 16(2): 86-99.
- [7] Han M, Li Z K, Xu L, Li Z Y, Wen X Y, Shi Q, Hu X J, Qin C, Gao Y Z. *China Environ. Sci.* (韩淼, 李泽楷, 许淋, 李昭燕, 文欣雨, 侍卿, 胡小婕, 秦超, 高彦征. 中国环境科学), **2024**, 44(3): 1638-1647.
- [8] Convention Stockholm. Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs). [2025-07-22]. <https://chm.pops.int/Convention/ConferenceofthePartiesCOP/COPDecisions/tabid/208/Default.aspx>
- [9] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. List of Emerging Pollutant for Priority Control (2023 Edition) (中国生态环境部. 重点管控新污染物清单(2023年版)). [2025-07-22]. https://www.mee.gov.cn/gzk/gz/202212/t20221230_1009192.shtml.
- [10] Wang J Y, Chen J W, Tang W H, Cui Y H, Wang Z Y, Song G B, Chen W Q. *Environ. Sci.* (王佳钰, 陈景文, 唐伟豪, 崔蕴晗, 王中钰, 宋国宝, 陈伟强. 环境科学), **2021**, 42(9): 4566-4574.
- [11] Xu L, Lin Q F, Li C, Wei G Z J, Ji J. *China Water Wastewater* (许罗, 林秋风, 李聪, 魏郭子建, 计杰. 中国给水排水), **2022**, 38(10): 56-62.
- [12] Zhu Q H, Qian J H, Yang J. *Environ. Pollut. Control* (朱清禾, 钱佳浩, 杨洁. 环境污染与防治), **2024**, 46(6): 908-916.
- [13] GB 5749-2022. Standards for Drinking Water Quality. National Standards of the People's Republic of China (生活饮用水卫生标准. 中华人民共和国国家标准).
- [14] US EPA. Final PFAS National Primary Drinking Water Regulation. [2025-06-27]. <https://www.epa.gov/sdwa/and-polyfluoroalkyl-substances-pfas#Webinars>.
- [15] State Council of the People's Republic of China. Action Plan for the Governance of Emerging Pollutnat (中国国务院. 新污染物治理行动方案). [2025-06-27]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-05/24/content_5692059.htm.
- [16] Gorji S G, Ramos M J G, Dewapriya P, Schulze B, Mackie R, Nguyen T M H, Higgins C P, Bowles K, Mueller J F, Thomas K V, Kaserzon S L. *Environ. Sci. Technol.*, **2024**, 58(3): 1690-1699.
- [17] Fang Z, Li Y, Li Y Y, Yang D X, Zhang H, Jones K C, Gu C, Luo J. *Environ. Sci. Technol.*, **2021**, 55(14): 9548-9556.
- [18] Becanova J, Saleeba Z S S L, Stone A, Robuck A R, Hurt R H, Lohmann R. *Environ. Sci.: Nano*, **2021**, 8(10): 2894-2907.
- [19] Gardiner C, Robuck A, Becanova J, Cantwell M, Kaserzon S, Katz D, Mueller J, Lohmann R. *Environ. Toxicol. Chem.*, **2022**, 41(10): 2375-2385.

- [20] Guan D X, Li Y Q, Yu N Y, Yu G H, Wei S, Zhang H, Davison W, Cui X Y, Ma L Q, Luo J. *Water Res.*, **2018**, 144: 162–171.
- [21] Wallace M A G, Smeltz M G, Mattila J M, Liberatore H K, Jackson S R, Shields E P, Xhani X, Li E Y, Johansson J H. *Chemosphere*, **2024**, 358(2024): 142129.
- [22] Fang X G, Wang Q, Zhao Z, Tang J H, Tian C G, Yao Y M, Yu J C, Sun H W. *Atmos. Environ.*, **2018**, 192: 128–135.
- [23] Barber J L, Berger U, Chaemfa C, Huber S, Jahnke A, Temme C, Jones K C. *J. Environ. Monit.*, **2007**, 9(6): 530–541.
- [24] Xie Z Y, Wang Z, Mi W Y, Möller A, Wolschke H, Ebinghaus R. *Sci. Rep.*, **2015**, 5(1): 8912.
- [25] Yao Y M, Zhao Y Y, Sun H W, Chang S, Zhu L Y, Alder A C, Kannan K. *Environ. Sci. Technol.*, **2018**, 52(5): 3156–3166.
- [26] Padilla-Sánchez J A, Papadopoulou E, Poothong S, Haug L S. *Environ. Sci. Technol.*, **2017**, 51(21): 12836–12843.
- [27] Johansson J H, Berger U, Cousins I T. *Environ. Pollut.*, **2017**, 224: 779–786.
- [28] Ahrens L, Harner T, Shoeib M, Lane D A, Murphy J G. *Environ. Sci. Technol.*, **2012**, 46(13): 7199–7206.
- [29] Wallace M A G, Smeltz M G, Mattila J M, Liberatore H K, Jackson S R, Shields E P, Xhani X, Li E Y, Johansson J H. *Chemosphere*, **2024**, 358: 142129.
- [30] Titaley I A, Cruz F B D I, Barlaz M A, Field J A. *Environ. Sci. Technol. Lett.*, **2023**, 10(3): 214–221.
- [31] Ahrens L, Harner T, Shoeib M, Koblikova M, Reiner E J. *Environ. Sci. Technol.*, **2013**, 47(24): 14024–14033.
- [32] Rauert C, Shoeib M, Schuster J K, Eng A, Harner T. *Environ. Pollut.*, **2018**, 238: 94–102.
- [33] Wang X P, Schuster J, Jones K C, Gong P. *Atmos. Chem. Phys.*, **2018**, 18(12): 8745–8755.
- [34] Xia C, Capozzi S L, Romanak K A, Lehman D C, Dove A, Richardson V, Greenberg T, McGoldrick D, Venier M. *Environ. Sci. Technol.*, **2024**, 58(21): 9303–9313.
- [35] Morales-McDevitt M E, Becanova J, Blum A, Bruton T A, Vojta S, Woodward M, Lohmann R. *Environ. Sci. Technol. Lett.*, **2021**, 8(10): 897–902.
- [36] González P C, Sadia M, Baabish A, Sobhane S, Fiedler H. *Chemosphere*, **2021**, 282: 131069.
- [37] Lai F Y, Rauert C, Gobelius L, Ahrens L. *TrAC-Trends Anal. Chem.*, **2019**, 121: 115311.
- [38] Saini A, Chinnadurai S, Schuster J K, Eng A, Harner T. *Environ. Pollut.*, **2023**, 323: 121291.
- [39] Hoxie T, Zhang S, Herkert N J, Bauer R A, Guo Y, Bhattacharya A, Carignan C C, Hoffman K, Higgins C P, Stapleton H M. *Environ. Sci. Technol.*, **2024**, 58(37): 16316–16326.
- [40] Padilla-Sánchez J A, Haug L S. *J. Chromatogr. A*, **2016**, 1445: 36–45.
- [41] Hall S M, Patton S, Petreas M, Zhang S, Phillips A L, Hoffman K, Stapleton H M. *Environ. Sci. Technol.*, **2020**, 54(22): 14558–14567.
- [42] Gustafsson Å, Bergman Å, Weiss J M. *Chemosphere*, **2022**, 303: 135061.
- [43] Winkens K, Giovanoulis G, Koponen J, Vestergren R, Berger U, Karvonen A M, Pekkanen J, Kiviranta H, Cousins I T. *Environ. Int.*, **2018**, 119: 493–502.
- [44] Tang L, Liu X R, Yang G J, Xia J F, Zhang N, Wang D B, Deng H W, Mao M, Li X M, Ni B J. *Catena*, **2021**, 198: 105059.
- [45] Ahmadireskety A, Silva B F D, Townsend T G, Yost R A, Solo-Gabriele H M, Bowden J A. *Sci. Total Environ.*, **2021**, 760: 143944.
- [46] Chen H T, Reinhard M, Yin T, Nguyen T V, Tran N H, Gin K Y-H. *Water Res.*, **2019**, 154: 227–237.
- [47] Codling G, Hosseini S, Corcoran M B, Bonina S, Lin T, Li A, Sturchio N C, Rockne K J, Ji K, Peng H, Giesy J P. *Environ. Pollut.*, **2018**, 236: 373–381.
- [48] Tran H L, Van D-A, Vu D T, Huynh T H. *Environ. Monit. Assess.*, **2022**, 194(5): 380.
- [49] Mussabek D, Ahrens L, Persson K M, Berndtsson R. *Chemosphere*, **2019**, 227: 624–629.
- [50] Liu S S, Zhao S Y, Liang Z H, Wang F, Sun F Y, Chen D. *Sci. Total Environ.*, **2021**, 795: 148468.
- [51] Dueñas-Mas M J, Ballesteros-Gómez A, Boer J D. *Chemosphere*, **2023**, 339: 139734.
- [52] Kotthoff M, Müller J, Jüriling H, Schlummer M, Fiedler D. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **2015**, 22(19): 14546–14559.
- [53] Herkert N J, Kassotis C D, Zhang S, Han Y, Pulikkal V F, Sun M, Ferguson P L, Stapleton H M. *Environ. Sci. Technol.*, **2022**, 56(2): 1162–1173.
- [54] Jovanović M, Müller V, Feldmann J, Leitner E. *Food Addit. Contam. A*, **2024**, 41(5): 525–536.
- [55] Zheng G M, Schreder E, Dempsey J C, Uding N, Chu V, Andres G, Sathyanarayana S, Salamova A. *Environ. Sci. Technol.*, **2021**, 55(11): 7510–7520.
- [56] Suzuki M, Nilsson S, Shepherd C E, Zammit I, Suryana E, Mueller N, Halliday G, Wang X Y, Symeonides C, Dunlop S, Mueller J F. *Environ. Sci. Technol.*, **2025**, 59(7): 3366–3375.
- [57] Itoh H, Harada K H, Kasuga Y, Yokoyama S, Onuma H, Nishimura H, Kusama R, Yokoyama K, Zhu J, Sassa M H, Tsugane S, Iwasaki M. *Sci. Total Environ.*, **2021**, 800(2021): 149316.
- [58] Ruffle B, Vedagiri U, Bogdan D, Maier M, Schwach C, Murphy-Hagan C. *Environ. Res.*, **2020**, 190: 109932.

- [59] Domingo J L, Ericson-Jogsten I, Perelló G, Nadal M, Bavel B V, Kärrman A. *J. Agric. Food Chem.*, **2012**, 60(17): 4408–4415.
- [60] Petromelidou S, Zoi T, Alampanos V, Bikiaris D N, Lambropoulou D A. *Microchem. J.*, **2024**, 207: 111795.
- [61] Jiang H L, Xue F, Sun J, Lin J M, Zhang C, Wang X, Zhao R S. *Microchim. Acta*, **2021**, 188(2): 47.
- [62] Gong X Y, Xu L Y, Kou X X, Zheng J, Kuang Y X, Zhou S X, Huang S M, Zheng Y, Ke W, Chen G S, Ouyang G F. *Microchem. J.*, **2022**, 179: 107661.
- [63] Lin Y M, Sun J N, Yang X W, Qin R Y, Zhang Z Q. *Talanta*, **2023**, 252: 123860.
- [64] Petromelidou S, Alampanos V, Haj-Yahya A, Lazarides T, Lambropoulou D A. *Green Anal. Chem.*, **2025**, 12: 100235.
- [65] Selahle S K, Mpupa A, Nomngongo P N. *Arabian J. Chem.*, **2022**, 15(8): 103960.
- [66] Pan Z Y, Liu Z M, Xu Z G. *J. Instrum. Anal.* (潘自宇, 刘智敏, 许志刚. 分析测试学报), **2025**, 44(1): 12–24.
- [67] Ren J, Lu Y K, Han Y H, Qiao F X, Yan H Y. *Food Chem.*, **2023**, 400: 134062.
- [68] Lu Y K, Yan H Y, Li P F, Han Y H, Shen S G. *Food Chem.*, **2024**, 453: 139677.
- [69] Zou D S, Li P F, Yang C L, Han D D, Yan H Y. *Anal. Chim. Acta*, **2022**, 1226: 340271.
- [70] Huang Z Z, Liu P, Lin X, Xing Y D, Zhou Y, Luo Y H, Lee H K. *J. Chromatogr. A*, **2022**, 1674: 463151.
- [71] Song X L, Lv H, Liao K C, Wang D D, Li G M, Wu Y Y, Chen Q Y, Chen Y. *Talanta*, **2023**, 253: 123930.
- [72] Xing Y D, Zhou Y, Liu P, Lee H K, Huang Z Z. *Microchem. J.*, **2025**, 211: 113058.
- [73] Lu Y K, Li P F, Yan H Y, Shen S G. *J. Agric. Food Chem.*, **2022**, 70(4): 1327–1334.
- [74] Balgooyen S, Scott M, Blackwell B R, Pulster E L, Mahon M B, Lepak R F, Backe W J. *Environ. Sci. Technol.*, **2025**, 59(7): 3759–3770.
- [75] Taylor R B, Sapozhnikova Y. *Anal. Chim. Acta*, **2022**, 1230: 340400.
- [76] Koloka O, Boti V, Hela D, Albanis T, Konstantinou I. *Emerging Contam.*, **2025**, 11(2): 100467.
- [77] Koenig P, Brand B, Hamscher G, Stahl T. *Chemosphere*, **2025**, 372: 144123.
- [78] Skaggs C S, Logue B A. *J. Chromatogr. A*, **2021**, 1659: 462493.
- [79] Liang M, Xian Y P, Wang B, Hou X C, Wang L, Guo X D, Wu Y L, Dong H. *Environ. Pollut.*, **2020**, 263: 114389.
- [80] Wang Z J, Luo X, Liang S K, Tang Z X, Ye X W, Ma Q, Niu Z Y. *J. Instrum. Anal.* (王振聚, 罗忻, 梁生康, 汤志旭, 叶曦雯, 马强, 牛增元. 分析测试学报), **2022**, 41(6): 931–940.
- [81] Chen X Y, Liu C B, Mao S. *Nano-Micro Lett.*, **2020**, 12(1): 95.
- [82] Ye Z W, Qin H H, Wei X J, Tao T, Li Q J, Mao S. *J. Hazard. Mater.*, **2025**, 485: 136897.
- [83] Li Q J, Wang X Y, Huang Q S, Li Z, Tang B Z, Mao S. *Nat. Commun.*, **2023**, 14(1): 409.
- [84] Shafique U, Schulze S, Slawik C, Kunz S, Paschke A, Schüttümann G. *Anal. Chim. Acta*, **2017**, 949: 8–22.
- [85] Bach C, Boiteux V, Hemard J, Colin A, Rosin C, Munoz J F, Dauchy X. *J. Chromatogr. A*, **2016**, 1448: 98–106.
- [86] Bao M, Feng H R, Zheng Y Y, Luo H W, Sun C R, Pan Y J. *Environ. Sci. Technol.*, **2023**, 57(10): 4180–4186.
- [87] Jia S L, Marques Dos Santos M, Li C, Snyder S A. *Anal. Bioanal. Chem.*, **2022**, 414(9): 2795–2807.
- [88] Chi Z H, Liu L, Zheng J Y, Tian L, Chevrier J, Bornman R, Obida M, Goodyer C G, Hales B F, Bayen S. *Chemosphere*, **2025**, 373: 144154.
- [89] Joerss H, Menger F. *Curr. Opin. Green Sustainable Chem.*, **2023**, 40: 100775.
- [90] Feng C, Lin Y J, Le S Y, Ji J Y, Chen Y H, Wang G Q, Xiao P, Zhao Y F, Lu D S. *Environ. Sci. Technol.*, **2024**, 58(10): 4737–4750.
- [91] Yu N Y, Wen H Z, Wang X B, Yamazaki E, Taniyasu S, Yamashita N, Yu H X, Wei S. *Environ. Sci. Technol.*, **2020**, 54(6): 3103–3113.
- [92] McCord J, Strynar M. *Environ. Sci. Technol.*, **2019**, 53(9): 4717–4727.
- [93] Bugsel B, Zweigle J, Zwiener C. *Trends Environ. Anal. Chem.*, **2023**, 40: e00216.
- [94] Yu N Y, Guo H W, Yang J P, Jin L, Wang X B, Shi W, Zhang X W, Yu H X, Wei S. *Environ. Sci. Technol.*, **2018**, 52(15): 8205–8214.
- [95] Hensema T J, Berendsen B J A, Leeuwen S P J V. *Chemosphere*, **2021**, 265: 128599.
- [96] Tang C M, Liang Y T, Wang K, Liao J B, Zeng Y H, Luo X J, Peng X Z, Mai B X, Huang Q G, Lin H. *NPJ Clean Water*, **2023**, 6(1): 1–10.
- [97] Jiao Z Y, Taniyasu S, Yu N Y, Wang X B, Yamashita N, Wei S. *Nat. Commun.*, **2025**, 16(1): 688.
- [98] Wang X B, Yu N Y, Jiao Z Y, Li L H, Yu H X, Wei S. *Sci. Adv.*, **2024**, 10(21): eadn1039.
- [99] Newton S R, Bowden J A, Charest N, Jackson S R, Koelmel J P, Liberatore H K, Lin A M, Lowe C N, Nieto S, Pollitt K J G, Robuck A R, Rostkowski P, Townsend T G, Wallace M A G, Williams A J. *Environ. Sci. Technol. Lett.*, **2025**, 12(2): 104–112.
- [100] Ulrich E M, Sobus J R, Grulke C M, Richard A M, Newton S R, Strynar M J, Mansouri K, Williams A J. *Anal. Bioanal. Chem.*, **2018**, 411(4): 853–866.
- [101] Hu J R, Lyu Y T, Chen H, Cai L L, Li J, Cao X Q, Sun W L. *Water Res.*, **2023**, 233: 119735.
- [102] Lei S N, Cong H. *Chin. Chem. Lett.*, **2022**, 33(3): 1493–1496.

- [103] Concellón A, Castro-Esteban J, Swager T M. *J. Am. Chem. Soc.*, **2023**, 145(20): 11420–11430.
- [104] Sunantha G, Vasudevan N. *Sci. Total Environ.*, **2020**, 759: 143544.
- [105] Li J, Zhang C Y, Yin M Y, Zhang Z, Chen Y J, Deng Q L, Wang S. *ACS Omega*, **2019**, 4(14): 15947–15955.
- [106] Jrad A, Das G, Alkhatib N, Prakasam T, Benyettou F, Varghese S, Gándara F, Olson M, Kirmizialtin S, Trabolsi A. *Nat. Commun.*, **2024**, 15(1): 10490.
- [107] Song M Z, Yu R Y, Shang Y X, Tashpulatov K, Sun H M, Zeng J B. *Chemosphere*, **2024**, 363: 142946.
- [108] Yang Y Y, Liu X H, Mu B F, Meng S, Mao S, Tao W Q, Li Z. *Biosens. Bioelectron.*, **2024**, 257: 116330.
- [109] Nie C, Shui J X, Huang L, Wang J L, Shen Y Z, Wu Y N. *Anal. Chem.*, **2024**, 96(33): 13512–13521.
- [110] Marino L, Gagliano E, Santoro D, Rocco P. *Water Res.*, **2025**, 268: 122616.
- [111] Fang C, Zhang X, Dong Z M, Wang L, Megharaj M, Naidu R. *Chemosphere*, **2018**, 191: 381–388.
- [112] Chen S H, Li A M, Zhang L Z, Gong J M. *Anal. Chim. Acta*, **2015**, 896: 68–77.
- [113] Zheng Z, Yu H J, Geng W C, Hu X Y, Wang Y Y, Li Z H, Wang Y F, Guo D S. *Nat. Commun.*, **2019**, 10(1): 5762.
- [114] Chen B N, Yang Z S, Qu X L, Zheng S R, Yin D Q, Fu H Y. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2021**, 13(40): 47706–47716.
- [115] Zhang Q J, Liao M Y, Xiao K R, Zhuang K Y, Zheng W L, Yao Z Y. *Sens. Actuators B*, **2022**, 350: 130851.
- [116] Trinh V, Malloy C S, Durkin T J, Gadh A, Savagatrup S. *ACS Sens.*, **2022**, 7(5): 1514–1523.
- [117] Concellón A, Swager T M. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2023**, 62(47): e202309928.
- [118] Zhang K, Carrod A J, Giorgio E D, Hughes J, Rurack K, Bennet F, Hodoroba V-D, Harrad S, Pikramenou Z. *Anal. Chem.*, **2024**, 96(4): 1565–1575.
- [119] Chen L D, Lai C Z, Granda L P, Fierke M A, Mandal D, Stein A, Gladysz J A, Bühlmann P. *Anal. Chem.*, **2013**, 85(15): 7471–7477.
- [120] Clark R B, Dick J E. *ACS Sens.*, **2020**, 5(11): 3591–3598.
- [121] Zhu X Y, Cheng C, Qin X G, Wang Y. *J. Hazard. Mater.*, **2025**, 485: 136870.
- [122] Rehman A U, Andreescu D, Tiwari S, Andreescu S. *Anal. Chem.*, **2024**, 96(44): 17506–17516.
- [123] Hafeez S, Khanam A, Cao H, Chaplin B P, Xu W. *Environ. Sci. Technol. Lett.*, **2024**, 11(8): 871–877.
- [124] Shanbhag M M, Shetti N P, Daouli A, Nadagouda M N, Badawi M, Aminabhavi T M. *Langmuir*, **2024**, 40(7): 3831–3847.
- [125] Shanbhag M M, Shetti N P, Kalanur S S, Pollet B G, Nadagouda M N, Aminabhavi T M. *Chem. Eng. J.*, **2022**, 434: 134700.
- [126] Suhaimi N F, Baharin S N A, Jamion N A, Mohd Z Z, Sambasevam K P. *Microchem. J.*, **2023**, 188: 108502.
- [127] Wang Y, Ren R, Chen F, Jing L, Tian Z, Li Z, Wang J, Hou C. *Sep. Purif. Technol.*, **2023**, 310: 123257.
- [128] Tao T, Wei X J, Ye Z W, Zong B Y, Li Q J, Mao S. *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, 35(3): 2413485.
- [129] Chen X Y, Li Q J, Yuan T Y, Ma M T, Ye Z W, Wei X J, Fang X, Mao S. *ACS Sens.*, **2023**, 8(2): 858–866.
- [130] Moro G, Cristofori D, Bottari F, Cattaruzza E, De Wael K, Moretto L M. *Sensors*, **2019**, 19(20): 4433.
- [131] Pierpaoli M, Szopińska M, Olejnik A, Ryl J, Fudala-Ksiażek S, Łuczkiewicz A, Bogdanowicz R. *J. Hazard. Mater.*, **2023**, 458: 131873.
- [132] Rezaei M, Ghanavati M, Mohammadi N, Khani S, Nasirimoghadam S, Smiley E, Basiryanmahabadi A. *Talanta*, **2024**, 276: 126229.
- [133] Han S H, Pioch T N, Swager T M. *J. Am. Chem. Soc.*, **2024**, 146(46): 31486–31496.
- [134] Wei X J, Choudhary A, Wang L Y, Yang L X, Uline M J, Tagliazucchi M, Wang Q, Bedrov D, Liu C. *Sci. Adv.*, **2024**, 10(45): eadp8134.
- [135] Khan R, Uygün Z O, Andreescu D, Andreescu S. *ACS Sens.*, **2024**, 9(6): 3403–3412.
- [136] Cheng Y H, Barpaga D, Soltis J A, Shutthanandan V, Kargupta R, Han K S, McGrail B P, Motkuri R K, Basuray S, Chatterjee S. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2020**, 12(9): 10503–10514.
- [137] Tian Q Y, Chen S A, Shi M L, Gao T, Zhang M, Liao C L, Li X M, Dong Q B, Wang C Y. *Sens. Actuators B*, **2024**, 404: 135309.
- [138] Lu D N, Zhu D Z, Gan H H, Yao Z Y, Luo J Y, Yu S R, Kurup P. *Sens. Actuators B*, **2022**, 352: 131055.
- [139] Wei Y M, Liu H J, Wang S P, Yu K F, Wang L W. *Analyst*, **2023**, 148(16): 3851–3859.
- [140] Gong J M, Fang T, Peng D H, Li A M, Zhang L Z. *Biosens. Bioelectron.*, **2015**, 73: 256–263.
- [141] Sun H W, Fang B, Chen H, Zhao M S, Zhang Y Z, Qiao B T, Yu H. *Environ. Sci.* (孙红文, 方博, 陈浩, 赵茂森, 张耀之, 乔碧汀, 喻豪. 环境科学), **2023**, 44(3): 1214–1227.

(责任编辑: 盛文彦)