

邻苯二甲酸二丁酯(DBP)检测技术研究进展

吴云洁, 陈安懿*

重庆医科大学公共卫生学院, 重庆

收稿日期: 2026年5月2日; 录用日期: 2026年5月24日; 发布日期: 2026年6月4日

摘要

邻苯二甲酸二丁酯(Dibutyl Phthalate, DBP)是一种典型的内分泌干扰物质, 具有广泛的环境污染和健康风险, 需要开发一种快速、灵敏、可靠的检测技术。本文系统概述了样品前处理技术、针对不同基质的净化策略以及DBP检测应用的方法, 包括GC、HPLC、GC-MS、LC-MS的传统检测方法与光谱法、酶联免疫吸附测定法、电化学传感器等新型检测方法, 并展望了该领域向微型化、智能化、实用化发展的趋势。

关键词

邻苯二甲酸二丁酯, 前处理技术, 检测方法

Research Progress in Detection Technologies for Dibutyl Phthalate (DBP)

Yunjie Wu, Anyi Chen*

College of Public Health, Chongqing Medical University, Chongqing

Received: May 2, 2026; accepted: May 24, 2026; published: June 4, 2026

Abstract

Dibutyl phthalate (DBP) is a typical endocrine-disrupting chemical. Due to its widespread environmental contamination and associated health risks, there is an urgent need to develop rapid, sensitive, and reliable detection techniques. This review systematically sample pretreatment technologies, purification strategies for different matrices, and methods for DBP detection, including traditional techniques such as GC, HPLC, GC-MS, and LC-MS, as well as emerging methods including spectrometry, enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA), and electrochemical sensors. Future trends toward miniaturization, intelligence, and practical application in this field are also discussed.

*通讯作者。

Keywords

Dibutyl Phthalate, Pretreatment Technologies, Detection Methods

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 概述

邻苯二甲酸酯(Phthalic Acid Esters, PAEs)是邻苯二甲酸的酯类物质的总称,是一种环境常见的内分泌干扰物质[1],作为增塑剂常用于聚氯乙烯和塑溶胶的生产中[2],在提高工业聚合物的柔韧性、透明度、稳定性和使用寿命方面具有良好的性能[3]。PAEs占塑料产品中增塑剂的65% [4],其中,DMP、DEP、BBP、DBP、DEHP、DnOP被美国环境保护署、欧盟和我国列为优先污染物[5]。

邻苯二甲酸二丁酯(Dibutyl Phthalate, DBP)是最常见的邻苯二甲酸酯之一。DBP与基质间以物理作用结合,极易从塑料制品中分离出来并进入环境中[6],危害生物健康并造成生态损害[7][8]。人体可以通过饮食、空气吸入和皮肤接触渗透暴露于增塑剂环境中,使人体的摄入量增加而对健康造成影响[9],并通过食物链富集,同时威胁生态系统安全[10],大气、水、土壤和沉积物中均有检出[11]。大量研究证实,DBP具有生殖毒性、胚胎毒性、遗传毒性、肝毒性和神经毒性等人体毒性[12]-[14],对生态环境和公共健康构成严重威胁,已被多国列为优先控制污染物。根据我国国标GB 9685-2016《食品安全国家标准 食品接触材料及制品用添加剂使用标准》[15]中规定DBP作为允许使用的添加剂,其特定迁移限量(Specific Migration Limit, SML)为0.3 mg/kg。GB 5749-2022《生活饮用水卫生标准》[16]中规定,生活饮用水中邻苯二甲酸二乙酯的限值为0.3 mg/L,邻苯二甲酸二丁酯的限值为0.003 mg/L。

需要注意的是,由于PAEs各物质间物理化学性质相似,其样品前处理方法和检测技术具有高度的通用性。因此,本文对PAEs类物质的前处理技术和针对DBP的检测方法也进行了系统梳理,能够为DBP或PAEs类污染物的分析检测提供全面的指导。

2. DBP的样品前处理技术

在色谱、质谱检测过程中,样品前处理至关重要,其决定了检测结果的准确性与灵敏度。由于DBP在食品、环境、生物基质中通常为痕量水平,且各类基质成分复杂,存在基质干扰严重的问题,因此高效简便的前处理技术对于DBP的精准定量分析至关重要。近年来,绿色分析化学理念的推广和新型吸附材料的发展,使得PAEs的样品前处理技术取得了显著进展[17]。

2.1. 固相萃取(SPE)

固相萃取(Solid Phase Extraction, SPE)是目前DBP检测中最常用的前处理方法之一。其原理是利用固体吸附剂特异性地吸附样品中的DBP,再通过适当的溶剂洗脱实现目标物的富集和净化。固相萃取技术操作简便,溶剂用量可控,且易于实现自动化。SPE吸附剂主要包括传统的C18、硅胶和高特异性的分子印迹聚合物(MIPs)的SPE材料。Fang等[18]开发了一种基于硅胶的分散式固相萃取(d-SPE)和带火焰电离检测的气相色谱法(GC-FID),用于实际湖水样本中检测多种PAEs的浓度。

2.2. 固相微萃取(SPME)

固相微萃取(Solid Phase Microextraction, SPME)是一种集采样、萃取、浓缩和进样于一体的无溶剂前

处理技术。其核心是涂覆于熔融石英纤维上的萃取固定相,通过直接浸入或顶空方式富集目标分析物后,直接注入色谱系统进行分析,适用于挥发性和半挥发性 DBP 的痕量分析。近年来的文献综述系统地总结了 SPME 在 PAEs 分析中的应用进展,指出将 MOFs 和 COFs 等新材料用作 SPME 涂层可显著提高萃取效率和选择性[19]。Sun 等[20]设计了一种以 CFs@C-COF 为吸附剂的管内实相微萃取技术(IT-SPME)与高性能液相色谱二极管阵列检测器(HPLC-DAD)结合,用于白酒中 PAEs 的检测,其线性范围为 1.0 $\mu\text{g/L}$ ~10.0 $\mu\text{g/L}$ 、1.5 $\mu\text{g/L}$ ~10.0 $\mu\text{g/L}$,检测限为 0.3 $\mu\text{g/L}$ ~0.5 $\mu\text{g/L}$ 这项研究扩大了碳化 COF 在 SPME 技术中的应用。Zhang 等[21]设计的基于 COF 掺杂 MXene 的新型 SPME 纤维涂层实现了原位衍生化与萃取的一体化,大幅提升了 DBP 及其代谢物的富集效果和检测灵敏度。

2.3. 磁性固相萃取(MSPE)

磁性固相萃取(Magnetic Solid Phase Extraction, MSPE)是 SPE 技术的革新,其利用磁性纳米材料作为吸附剂,通过外部磁场实现快速分离,无需离心或过滤步骤,具有操作简单、溶剂消耗少、易于自动化等优势。Mohiuddin 等[22]系统评述了用于 PAEs 分析的 MSPE 技术进展,重点讨论了 Fe_3O_4 磁性复合材料、MOFs 功能化磁性材料及碳基磁性复合材料在环境水样、食品饮料和生物样品等复杂基质中的应用。

2.4. QuEChERS 技术

QuEChERS (Quick, Easy, Cheap, Effective, Rugged, Safe)是一种快速、简便、廉价、高效、稳定、安全的前处理方法,最初用于农药残留检测,近年来在 PAEs 分析中得到了广泛应用。其基本原理是用乙腈提取样品,经盐析分层后使用 PSA、C18、GCB 等净化材料进行分散固相萃取净化,具有溶剂用量少、操作简单、平行性好等优点。研究表明,在食品和环境基质中,QuEChERS 被广泛用于 DBP 等 PAEs 的前处理,如水产品中采用改良 QuEChERS 结合 GC-MS/MS 技术同时检测 20 种邻苯二甲酸酯类塑化剂[23];食用油中采用 QuEChERS 结合 GC-MS 方法检测食用油中的 16 种 PAEs,检出限低至 1.25 $\mu\text{g/kg}$ ~32.0 $\mu\text{g/kg}$ [24];焙烤食品及塑料包装材料中采用 QuEChERS 结合 GC-MS/MS 可同时测定 25 种 PAEs 类及磷酸三酯类化合物[25]。

2.5. 针对不同复杂基质的净化策略

在针对 DBP 的检测过程中,对于多种复杂基质的水、土壤、食品样本、生物组织等,不同样本的前处理的要求不完全相同。油脂类基质(如食用油、火锅底料)中富含甘油三酯,是 PAEs 的主要污染来源之一,常用净化策略包括凝胶渗透色谱(GPC)去除大分子脂类物质、以及 QuEChERS 结合 C18/PSA 净化。袁荷芳[26]建立了含油食品中 16 种邻苯二甲酸酯含量的凝胶渗透色谱-气相色谱-串联质谱(GPC-GC-MS/MS)测定方法。土壤或污泥中有机成分含量高、基质复杂,常用方法包括加速溶剂萃取(ASE)和超声辅助萃取结合 SPE 净化。郭文建等[27]采用快速溶剂萃取结合 HPLC 测定了土壤中的 6 种 PAEs,陈大村[28]建立了超声波萃取-高效液相色谱(HPLC)同时测定土壤中 4 种常见邻苯二甲酸酯(PAEs)类污染物。水样中 DBP 浓度通常较低,需通过大体积富集(如 SPE 或 MSPE)提升检测灵敏度。Yang 等[29]采用 Fe_3O_4 @GO 复合吸附剂进行 MSPE 结合 GC-MS 分析水中 17 种 PAEs,检出限低至 0.03 $\mu\text{g/L}$ ~0.12 $\mu\text{g/L}$,回收率为 81.5%~109%。生物样品中蛋白质和脂类共存,前处理通常采用蛋白质沉淀后联合 SPE 净化的方案,或采用 QuEChERS 方法同时去除蛋白和脂质干扰,以实现痕量 DBP 的定量分析。不同基质的特点和前处理方法如表 1 所示。

2.6. 发展趋势

现研究表明,DBP 样品前处理技术的发展方向为绿色化、自动化和微型化。绿色化方面,天然低共

熔溶剂和天然生物吸附剂正在替代传统有机溶剂和合成吸附剂; 自动化方面, 在线 SPE 与色谱系统的联用技术日趋成熟, 可实现样品处理到检测的全流程自动化; 微型化方面, 微萃取技术(如 SPME、微固相萃取)大幅降低了样品和溶剂消耗, 为现场快速检测提供了技术基础。未来, 材料科学(如 MOFs、COFs、分子印迹材料)的持续进步将进一步推动 DBP 前处理技术的创新发展。

3. DBP 的检测方法

目前, DBP 的检测方法主要分为两大类: 一类是基于大型仪器的传统实验室分析技术, 以色谱、质谱类方法为核心, 具有高灵敏度、高准确性的优势, 是当前 DBP 检测的“金标准”; 另一类是新兴的快速传感技术, 包括光谱分析法、免疫分析法、电化学传感法等, 具有操作简便、检测快速、成本较低、便于现场检测的特点, 是未来 DBP 检测技术的发展方向。

3.1. 传统检测方法

我国目前对于 DBP 的检测方法比较成熟的有气相色谱法、高效液相色谱法、气相色谱-质谱联用法、液相色谱-三重四级杆质谱法等, 这些传统方法凭借其高灵敏度、高分辨率和可靠性, 在 DBP 的精准检测中仍占据重要地位, 广泛应用于实验室精准分析、标准检测等场景。

3.1.1. 气相色谱法(GC)

气相色谱法(Gas Chromatography, GC)是国内 DBP 检测中常见的传统方法之一。其核心原理是: 将预处理后的样品注入色谱仪, 通过载气将样品中的 DBP 转化为气态, 利用 DBP 与样品中其他组分在色谱柱上的吸附、解吸能力差异实现分离, 最后通过检测器(如氢火焰离子化检测器 FID)测定各组分的含量。

何凤云[30]采用悬浮固化分散液液微萃取气相色谱法测定了塑料保鲜膜浸泡液中的邻苯二甲酸二丁酯(DBP)并优化了萃取剂体积、分散剂体积、萃取时间、涡旋时间等参数, 该方法对 DBP 的线性范围为 1.0 $\mu\text{g/L}$ ~600.0 $\mu\text{g/L}$, 检出限为 0.10 $\mu\text{g/L}$, 可满足塑料中 DBP 迁移量的分析要求。采用气相色谱法与 FID 检测器对六种邻苯二甲酸酯类增塑剂 DBP、BBP、DEHP、DNOP、DINP 和 DIDP 的出峰时间进行定性, 方法对 DBP 的检出限为 0.029 mg/kg [31]。

3.1.2. 高效液相色谱法(HPLC)

高效液相色谱法(High Performance Liquid Chromatography, HPLC)也是传统检测方法中的一种重要手段。以高压下的液体为流动相, 将样品注入色谱柱, 利用 DBP 与其他组分在固定相和流动相之间的分配系数差异实现分离, 通过紫外检测器、荧光检测器等进行检测, 根据保留时间定性、峰面积定量。王艺霖[32]采用 HPLC 法测定食用油中 DBP 等塑化剂的含量, 纪晓娜等[33]采用 HPLC 法检测城市污水中的 DBP 和邻苯二甲酸二辛酯, 优化了流动相(甲醇和水)流速、比例、进样体积和色谱柱温度, 确定了最佳色谱条件, 检出限为 0.1 $\mu\text{g/L}$ 。王敏等[34]改进 HPLC 法的流动相比例并采用梯度洗脱后, 用于工作场所空气中 DBP 的检测并取得了良好的检测效果。

3.1.3. 气相色谱-质谱联用法(GC-MS)、液相色谱-三重四级杆质谱法(LC-MS)

气相色谱-质谱联用法(Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS)和液相色谱-质谱联用法(Liquid Chromatography-Triple Quadrupole Mass Spectrometry, LC-MS)结合了色谱法的分离能力和质谱法的定性、定量能力, 具有灵敏度高、选择性好、定性定量准确的优点, 同时通过优化样品的前处理过程, 技术联用越来越成为 DBP 检测中更为精确和可靠的方法。

GC-MS 结合了 GC 的高效分离优势和 MS 的定性定量优势, 不仅能实现 DBP 的精准分离, 还能

通过质谱图获得 DBP 的分子离子峰和碎片离子峰, 实现精准定性, 有效避免杂质干扰, 检测灵敏度远高于 GC 法和 HPLC 法。该方法是国标 GB 31604.30-2016 规定的 DBP 检测方法, 广泛应用于食品、饮用水、环境样品等各类基质中 DBP 的检测。白金阳[35]采用盐析辅助液液萃取结合 GC-MS 测定饮用水和酒类样本的 PAEs, 骆小方、古明亮、Rezaei 等[36]-[38]优化前处理后结合 GC-MS 测定食品中 DBP 均取得良好的准确度。GC-MS 是检测样品中 DBP 最常用的方法, 在不断地优化过程中越来越成熟。

LC-MS 法在 HPLC 法的基础上进一步提高了检测的灵敏度和选择性, 降低了复杂基质中杂质的干扰, 准确性更高, 适用于痕量 DBP 的检测。潘云山等[39]采用快速溶剂萃取结合 LC-MS 测定污泥中的 6 种邻苯二甲酸酯, 罗璇、李惠华[40][41]也采用 LC-MS 进行多种增塑剂的检测, 谭新等[42]建立了 DHA 甘油酯 DBP 的反相高效液相色谱-质谱联用(RP-HPLC-MS/MS)定性定量分析方法。另外, 李黎明等[43]同时建立测试地表水中的 DBP、DEHP 的 GC-MS 法和 LC-MS 法, 对它们的检出限、线性范围、灵敏度等检测性能进行了对比, GC-MS 具有更低的检出限, 对低浓度样品的检出效果更好。此外, 研究者们还不断探索其他分析技术的联用, 如气相色谱-红外光谱联用(GC-IR)、元素分析-同位素比值质谱仪(EA-IRMS) [44]等以拓展各种技术联合在 DBP 检测中的应用范围。

3.2. 新型检测方法

基于色谱、质谱、光谱技术的 DBP 的传统检测方法均使用大型仪器进行, 其结果准确性高、反应灵敏, 但都需要使用流动相和大量的有机溶剂, 以及必要的萃取、过滤和衍生等前处理操作, 对操作者需要专业要求高, 仪器昂贵, 也无法满足实时现场检测的需求。相对于传统检测方法, 一些新型检测方法, 如光谱分析法、酶联免疫法、电化学传感器等快速检测方法, 因为其简单的前处理、操作简便、快速等特点在实时检测方面有较好的应用前景。

3.2.1. 光谱分析法

光谱分析法是针对待测物质在特定波长下对光的吸收、发射或散射特性进行检测的方法, 主要有近红外光谱法(NIRS)、荧光分光光度法(FSP)、表面增强拉曼散射光谱法(SERS)。赵云等[45]采用近红外快速分析技术建立了定量检测 DBP 的研究, 采集了 175 批次的样本近红外谱图, 经过光谱预处理后建立模型, 新方法的结果具有较好的准确性和精确性。Li [46]的研究是以 Mn/ZnS 量子点作为荧光基团来提高方法的灵敏度, 再结合分子印迹技术实现对 DBP 的高特异性检测。刘渝[47]建立了对 DEHP、DBP、DEP 的表面拉曼散射光谱法(SERS), 利用金纳米棒来增强拉曼信号, 能提供分子“指纹”信息, 具有快速、高灵敏的潜力。

3.2.2. 免疫分析法

酶联免疫吸附法(Enzyme-Linked Immunosorbent Assay, ELISA)是目前最常用的免疫分析法, 其原理是基于抗原(DBP)与抗体的特异性结合反应, 通过酶催化底物显色, 根据显色强度与 DBP 浓度的线性关系, 实现对 DBP 的半定量或定量检测。根据检测模式的不同, 可分为直接竞争 ELISA 法(dc-ELISA)和间接竞争 ELISA 法(ic-ELISA)。

Feng、Zhang 等[48][49]均采用了直接竞争酶联免疫吸附法(dc-ELISA)来检测邻苯二甲酸酯类物质, 向成艳等[50]以单克隆抗体为识别元件, 建立并优化了食用油 DBP 的高灵敏酶联免疫吸附检测方法(ELISA), 其检测结果与国标检测方法相关性达到 99.17%。该方法优势在于操作简便、不适用二抗来减少交互作用, 但检测成本较高。尚淑娜等[51]利用重氮化法合成免疫抗原间接获得 DBP 的抗体建立了间接竞争 ELISA 检测方法(ic-ELISA), 这种方法相较于直接竞争 ELISA 法的优势在于二抗可以加强信号响应

并保持一抗的免疫反应性, 缺点是二抗的交互作用会增强。酶联免疫法具有通量高、操作简便、设备成本相对较低, 且准确度和特异性高的优点, 适用于大规模样本初筛实验, 但其灵敏度有限、抗体制备复杂、存在交叉反应风险, 且生物试剂的稳定性受环境影响较大成本较高、耗时较长、无法达到实时检测的目的。

3.2.3. 电化学传感器

电化学传感器(Electrochemiluminescence, ECL)是利用电化学传感器是对目标检测物进行定量分析的装置, 在电极上修饰对目标分子有特异性识别功能的元件, 通过其与目标物特异性结合引起电信号变化的一种检测方法。Lu 等[52]使用 SELEX 技术筛选出邻苯二甲酸酯的适配体, 构建了电化学阻抗谱适配体传感器, 用于目标物的检测。张英健[53]的研究基于血红素功能化石墨烯(H-Gr)纳米复合材料结合电化学检测的原位探针, 邻苯二甲酸酯为识别元件, 构建了比色及电化学传感器用于邻苯二甲酸酯的检测。Zeng 等[54]构建了一种基于 Au/TiO₂ 纳米复合材料的光电化学分子印迹传感器用于 DBP 检测, 最优条件下表现出较宽的线性范围 50~500 nmol/L 和较低检测限 0.698 nmol/L, 对水样的检测有广阔应用前景。戴高鹏等[55]在二氧化钛纳米管阵列(TiO₂ NTs)上沉积分子印迹聚吡咯(PPy)成功制备 MIP-PPy/TiO₂ NTs 传感器用于高灵敏检测 DBP, 具有良好的稳定性和选择性。Zhou 等[56]将功能性生物炭 F-CC3 浇铸在玻碳电极 GCE 上形成薄膜, 进一步修饰分子印迹聚合物, 利用分子印迹技术和生物质材料的优点实现 DBP 测定的高选择性和灵敏度。李颖等[57]以金修饰磁性石墨烯(Au@Fe₃O₄@RGO)为载体, 结合分子印迹技术构建了分子印迹电化学传感器并进行性能分析, 其表现出良好的检测效能。新型的电化学传感法通过功能材料修饰电极, 将识别元件高效转化为可放大的电信号, 实现更加快速、灵敏、便携检测的研究方法, 在环境监测、食品安全、生物医学等领域具有广泛的应用前景。

3.2.4. 分子印迹技术(MIT)

分子印迹技术(Molecular Imprinting Technology, MIT)分子印迹技术是一种制备对特定分子具有选择性识别能力的聚合物的方法。通过制备与 DBP 分子大小和形状互补的分子印迹聚合物, 可以实现对 DBP 的选择性捕获和检测。该技术具有选择性高、成本低廉、机械性能稳定等优点, 与高灵敏度的传感技术相结合可以在环境监测中发挥较高的实用价值, 主要包括分子印迹荧光传感器和分子印迹电化学传感器。

Zhou 等[58]在 SiO₂ 纳米粒子表面修饰 Mn 掺杂的 ZnS 量子点并包被 DBP-MIP 印迹层, 制备的荧光分子印迹聚合物的荧光强度随 DBP 浓度增加而降低, 表现出良好的线性范围和高灵敏度和特异性。Zhang [59]设计了一种分子印迹电化学传感器, 采用液-液界面聚合法构建了聚 L-赖氨酸/聚(3,4-乙烯二氧噻吩)/多孔石墨烯纳米复合材料(PLL/PEDOT-PG)和聚(o-苯二胺)-印迹材料的(MIP/PLL/PEDOT-PG)传感平台, 该方法的检出限低至 0.88 fmol/L, 表现出优异的稳定性和重复性, 并成功用于塑料包装中 DBP 的定量分析。Wang [60]将多壁碳纳米管(MWCNTs)和金纳米颗粒(AuNPs)与表面分子印迹聚合物(SMIPs)复合, 制备了高灵敏、高选择性测定邻苯二甲酸二丁酯(DBP)的分子印迹传感器。

3.2.5. 其他检测方法

此外, 构建光子晶体传感器、生物传感器、表面增强拉曼光谱法等检测方法也是研究者们关注并发展的新型检测技术, 如 Tu 等[61]以 2-硝基苯甲酸作为拉曼报告分子, 通过二氧化硅包埋, 竞争性结合构建了一种标记型适配体传感器, Zhu 等[62]采用铕(Eu³⁺)和钐(Sm³⁺)作为荧光基团开发了双标记时间分辨荧光免疫分析(TRFIA)用于灵敏检测水生环境中的 DBP。现有检测方法均需要操作者具有专业知识和专业化的操作的支撑, 未来的检测方法会朝着更快更简便、成本低、结果准确且实现现场检测的方向发展。各检测方法的性能参数对比如表 1 所示。

Table 1. Comparison of performance parameters of different DBP detection methods**表 1.** 不同 DBP 检测方法的性能参数对比

检测技术	检出限	线性范围	优点	缺点	适用基质	代表文献
GC	0.10 µg/L	1.0~600.0 µg/L	富集倍数高	前处理复杂	食品包装迁移液	[29]
HPLC	0.012 µg/L	0.0~10.13 µg/ml	操作简便	灵敏度有限	工作场所空气	[33]
GC-MS	0.05 mg/kg	0~1.0 µg/mL	灵敏度极高、定性准确	仪器昂贵, 需专业操作	火锅底料	[35]
LC-MS	0.76 µg/kg	5~500 ng/mL	适用于热不稳定化合物	基质效应明显	污泥	[38]
SERS			提供分子指纹信息	定量能力有限	食品	[46]
FSP	0.27 µmol/L	5.0~50 µmol/L	灵敏度高, 操作简便	易受背景荧光干扰	蒸馏酒	[45]
ELISA	2.44 ng/mL	2.44~606.12 ng/mL	高通量, 操作简便	抗体成本高, 稳定性差	食品油类	[49]
ECL	0.698 nmol/L	50~500 nmol/L	快速, 选择性好	传感器稳定性待验证	河水、饮用水、自来水	[53]
MIT	0.88 fmol/L	1 fmol/L~5 µmol/L	特异性识别, 稳定性高, 成本低	印迹位点不均一	塑料包装材料	[58]

4. 总结与展望

随着人们对 DBP 的人体健康危害和环境污染相关认识的了解, 对于 DBP 的检测方法的研发与应用也受到越来越多的关注, 检测技术也正朝着高灵敏、快速、便携、实用的方向快速发展。从作为“金标准”的色谱-质谱联用法, 到适于大规模样本初筛的酶联免疫分析法, 再到前沿的纳米级电化学传感法, 各类检测方法各有优劣, 分别适用于不同的检测场景。GC-MS 和 LC-MS 因其高灵敏度和高准确性, 是环境监测机构和出入境检验检疫部门执行标准检测的首选方法, 但需要专业操作和大型仪器, 难以实现现场检测。ELISA 因操作简便、通量高, 适合大规模样本的初步筛查, 但检测成本较高、抗体稳定性差。电化学传感器和分子印迹传感器因响应快速、设备便携, 在水体污染事故应急监测、食品安全现场抽检等场景中前景广阔。未来可针对不同应用场景来优化检测参数和方法流程, 构建分级分类的检测体系。

未来, DBP 检测技术的研究应重点聚焦于微型化、智能化、实用化三个方向, 来促进 DBP 检测技术从实验室研究走向规模化实际应用, 更好地满足环境监测、食品安全监管及健康风险评估的多元化需求。在微型化与智能化发展方面, 需重点推动新型检测技术与微流控芯片、物联网、智能手机等前沿技术的深度融合, 打破传统检测设备体积庞大、操作复杂的局限, 实现规模化、常态化监测。在实用化提升方面, 可以针对不同检测场景(如水体、土壤、食品、空气等不同基质)的特点, 调整检测参数、优化前处理流程, 解决复杂基质中杂质干扰、痕量 DBP 检出难度大等实际问题。同时, 加强不同检测技术的联用, 实现全方位、全覆盖的 DBP 检测体系, 既能满足大规模样品快速筛查的高效性需求, 又能实现精准定量的专业性需求, 适配不同场景、不同精度的检测要求, 为环境安全防控、食品安全监管和公共健康保障提供更具实用性的技术支撑。

参考文献

- [1] Chen, M., Niu, Z., Zhang, X. and Zhang, Y. (2024) Pollution Characteristics and Health Risk of Sixty-Five Organics in One Drinking Water System: Paes Should Be Prioritized for Control. *Chemosphere*, **350**, Article ID: 141171. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141171>
- [2] Cheng, Z., Liu, J., Gao, M., Shi, G., Fu, X., Cai, P., et al. (2019) Occurrence and Distribution of Phthalate Esters in Freshwater Aquaculture Fish Ponds in Pearl River Delta, China. *Environmental Pollution*, **245**, 883-888. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.085>

- [3] Guo, H., Song, N., Wang, D., Ma, J. and Jia, Q. (2019) A Modulation Approach for Covalent Organic Frameworks: Application to Solid Phase Microextraction of Phthalate Esters. *Talanta*, **198**, 277-283. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.02.025>
- [4] Zhang, Z., Zhang, H., Zhang, J., Wang, Q. and Yang, G. (2018) Occurrence, Distribution, and Ecological Risks of Phthalate Esters in the Seawater and Sediment of Changjiang River Estuary and Its Adjacent Area. *Science of the Total Environment*, **619**, 93-102. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.070>
- [5] Net, S., Sempéré, R., Delmont, A., Paluselli, A. and Ouddane, B. (2015) Occurrence, Fate, Behavior and Ecotoxicological State of Phthalates in Different Environmental Matrices. *Environmental Science & Technology*, **49**, 4019-4035. <https://doi.org/10.1021/es505233b>
- [6] Vasseghian, Y., Alimohamadi, M., Dragoi, E. and Sonne, C. (2023) A Global Meta-Analysis of Phthalate Esters in Drinking Water Sources and Associated Health Risks. *Science of The Total Environment*, **903**, Article ID: 166846. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166846>
- [7] Lee, D., Kim, M., Lim, Y., Lee, N. and Hong, Y. (2018) Prenatal and Postnatal Exposure to Di-(2-Ethylhexyl) Phthalate and Neurodevelopmental Outcomes: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Environmental Research*, **167**, 558-566. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.08.023>
- [8] Wang, R., Ji, M., Zhai, H. and Liu, Y. (2020) Occurrence of Phthalate Esters and Microplastics in Urban Secondary Effluents, Receiving Water Bodies and Reclaimed Water Treatment Processes. *Science of the Total Environment*, **737**, Article ID: 140219. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140219>
- [9] 聂麦茜. 有机化学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2014: 137.
- [10] Chen, X., Xu, S., Tan, T., Lee, S., Cheng, S., Lee, F., *et al.* (2014) Toxicity and Estrogenic Endocrine Disrupting Activity of Phthalates and Their Mixtures. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **11**, 3156-3168. <https://doi.org/10.3390/ijerph110303156>
- [11] Huang, L., Zhu, X., Zhou, S., Cheng, Z., Shi, K., Zhang, C., *et al.* (2021) Phthalic Acid Esters: Natural Sources and Biological Activities. *Toxins*, **13**, Article 495. <https://doi.org/10.3390/toxins13070495>
- [12] Chang, W., Herianto, S., Lee, C., Hung, H. and Chen, H. (2021) The Effects of Phthalate Ester Exposure on Human Health: A Review. *Science of the Total Environment*, **786**, Article ID: 147371. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147371>
- [13] Wang, X., Xu, M., Shi, M., Tian, Y., Zhi, Y., Han, X., *et al.* (2024) Macrophage Polarization as a Novel Endpoint for Assessing Combined Risk of Phthalate Esters. *Environment International*, **190**, Article ID: 108835. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108835>
- [14] Tsai, T., Hsieh, C., Wu, M., Chen, M., Kuo, P. and Wang, S. (2023) Co-Exposure to Toxic Metals and Phthalates in Pregnant Women and Their Children's Mental Health Problems Aged Four Years—Taiwan Maternal and Infant Cohort Study (TMICS). *Environment International*, **173**, Article ID: 107804. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107804>
- [15] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 9685-2016 食品安全国家标准 食品接触材料及制品用添加剂使用标准[S]. 编辑: 中国标准出版社, 2016.
- [16] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB 5749-2022 生活饮用水卫生标准[S]. 2022. http://c.gb688.cn/bzgk/gb/showGb?type=online&hcno=19A559AF6A1CAF58C90A96471C47FEE9&request_locale=zh, 2023-04-01.
- [17] Ghorbani, M., Saghafi, A., Afshar Lahoori, N., Sarabyar, S., Mohammadi, P. and Ojaghzadeh Khalil Abad, M. (2024) Comprehensive Review of Sample Preparation Strategies for Phthalate Ester Analysis in Various Real Samples. *Microchemical Journal*, **207**, Article ID: 112072. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.112072>
- [18] Fang, Y., Liu, H. and Shi, Z. (2026) Application of a Fluorocarbon Chain Derived Silica as a Dispersive Solid-Phase Extraction Sorbent for Six Pae in Water Samples. *Analytical Methods*, **18**, 4183-4188. <https://doi.org/10.1039/d6ay00365f>
- [19] Yang, Q., Wu, Y., Zhang, S., Xie, H., Han, D. and Yan, H. (2025) Recent Advancements in the Extraction and Analysis of Phthalate Acid Esters in Food Samples. *Food Chemistry*, **463**, Article ID: 141262. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141262>
- [20] Sun, Y., Su, B., Zhang, K., Lin, Y., Wang, B. and Sun, M. (2025) Sensitive Detection of Phthalates in Chinese Baijiu by Online In-Tube SPME-HPLC-DAD Based on Carbonized COF-Coated Carbon Fibers. *Food Chemistry*, **489**, Article ID: 144986. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144986>
- [21] Zhang, M., Yao, H., Zhou, W., Mao, J., Zhang, Q., Fan, W., *et al.* (2025) An *in Situ* Derivatization-Extraction Integrated Strategy for Simultaneous and Ultrasensitive Analysis of Phthalate Esters and Metabolites Using COF-Doped MXENE as SPME Fiber Coating. *Journal of Hazardous Materials*, **500**, Article ID: 140473. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.140473>

- [22] Mohiuddin, I., Bhogal, S. and Gupta, K. (2026) A Review of the Advances in Magnetic Solid Phase Extraction for Phthalate Analysis: Improved Materials and Applications in Complex Matrices. *Talanta*, **296**, Article ID: 128519. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2025.128519>
- [23] 梁秀美, 张维一, 陈官菊, 等. 改良 QuEChERS-气相色谱-串联质谱法测定水产品中 20 种邻苯二甲酸酯类塑化剂含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(18): 50-59.
- [24] 陆慧珍, 陈燕敏, 何靖, 等. QuEChERS-气相色谱-质谱法测定植物油中 16 种邻苯二甲酸酯[J]. 食品安全导刊, 2021(21): 95-98, 101.
- [25] 王莉, 王斌, 董浩, 等. GC-MS/MS 法对焙烤食品及其塑料包装材料中 25 种磷酸三酯类与邻苯二甲酸酯类化合物的同时测定[J]. 分析测试学报, 2017, 36(11): 1287-1295.
- [26] 袁荷芳, 蒋晓勤, 程妍, 等. GPC-GC-MS/MS 同时测定含油食品中 16 种邻苯二甲酸酯[J]. 现代食品, 2018, 3(20): 112-116.
- [27] 郭文建, 张慧, 朱晨, 等. 快速溶剂萃取-凝胶净化-高效液相色谱法测定土壤中 6 种邻苯二甲酸酯[J]. 中国环境监测, 2018, 34(3): 134-140.
- [28] 陈大村, 孙强. 高效液相色谱法测定土壤中酞酸酯类污染物[J]. 山西化工, 2026, 46(3): 99-101.
- [29] Yang, Q., He, Z., Shi, Y., Wang, J., Qiu, Q., Deng, H., *et al.* (2024) Determination of 17 Phthalate Esters in Water Using GC-MS Combined with Magnetic Solid Phase Extraction with Fe₃O₄@GO. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, **52**, Article ID: 100378. <https://doi.org/10.1016/j.cjac.2024.100378>
- [30] 何凤云, 徐锦雅, 石骏杰, 等. 悬浮固化分散液液微萃取气相色谱法测定塑料保鲜膜浸泡液中的 DBP[J]. 南京晓庄学院学报, 2022, 38(6): 44-47.
- [31] https://qikan.cqvip.com/Qikan/Article/Detail?id=7108334706&from=Qikan_Search_Index
- [32] 王艺霖. 高效液相色谱法测定食用油中塑化剂的含量分析[J]. 现代食品, 2017(11): 114-115.
- [33] 纪晓娜, 薛路遥, 任志敏, 等. 高效液相色谱法检测城市污水中的邻苯二甲酸二丁(辛)酯[J]. 化学试剂, 2021, 43(10): 1376-1380.
- [34] 王敏, 宋为丽, 江金凤. 工作场所空气中 DBP 和 DOP 高效液相色谱测定法的改进[J]. 职业与健康, 2015, 31(17): 2349-2351.
- [35] 白金阳. 邻苯二甲酸酯类塑化剂检测及生态和人群健康风险评估[D]: [硕士学位论文]. 海口: 海南医学院, 2023.
- [36] 骆小方, 蒋李, 赵强, 等. 气相色谱-串联质谱法测定火锅底料中邻苯二甲酸酯类塑化剂含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(4): 218-225.
- [37] 古明亮, 江剑, 赵发菊, 等. 水果浆软糖中邻苯二甲酸酯类塑化剂的来源分析[J]. 江苏调味副食品, 2024(2): 38-41.
- [38] Rezaei, H., Moazzen, M., Shariatifar, N., Khaniki, G.J., Dehghani, M.H., Arabameri, M., *et al.* (2021) Measurement of Phthalate Acid Esters in Non-Alcoholic Malt Beverages by MSPE-GC/MS Method in Tehran City: Chemometrics. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 51897-51907. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14290-x>
- [39] 潘云山, 李洁莹, 蓝燕玲, 等. 快速溶剂萃取-LC-MS/MS 法测定污泥中的 6 种邻苯二甲酸酯[J]. 山东化工, 2024, 53(11): 154-157.
- [40] 罗璇, 李宁涛, 冯智劫, 等. 液相色谱-串联质谱法测定食品用塑料包装中邻苯二甲酸酯类增塑剂[J]. 理化检验, 2014, 50(12): 1544-1546.
- [41] 李惠华, 聂贞梅, 孙胜枚. 液相色谱串联质谱(LC-MS/MS)法同时检测食品中 18 种增塑剂[C]//广东省食品学会. 现代食品工程与营养健康学术研讨会暨 2020 年广东省食品学会年会论文集. 江门: 李锦记(新会)食品有限公司, 2020: 139-144.
- [42] 谭新, 陈迪, 彭小雨, 等. DHA 甘油酯中增塑剂 DBP 含量的 HPLC-MS/MS 定性定量分析[J]. 当代化工研究, 2023(18): 31-33.
- [43] 李黎明, 廖焱钢, 邱帮明. LC-MS/GC-MS 法测定饮用水源地中 DBP、DEHP 方法研究[J]. 河南化工, 2024, 41(7): 56-58.
- [44] 张丹. 邻苯二甲酸酯降解过程的碳氢稳定同位素特征研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2019
- [45] 赵云, 董晓燕, 杏若婷, 等. 近红外光谱法快速测定混合含能材料中邻苯二甲酸二丁酯[J]. 分析试验室, 2018, 37(12): 1446-1450.
- [46] Li, T., Gao, Z., Wang, N., Zhou, Z., Xu, W., Zheng, J., *et al.* (2016) Synthesis and Evaluation of a Molecularly Imprinted Polymer with High-Efficiency Recognition for Dibutyl Phthalate Based on Mn-Doped ZnS Quantum Dots. *RSC Advances*, **6**, 54615-54622. <https://doi.org/10.1039/c6ra04663k>

- [47] 刘瑜. 基于拉曼散射光谱的塑化剂检测研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2015
- [48] Feng, X., Lu, S., Liu, D., Li, L., Wu, X., Song, J., *et al.* (2013) Direct Competitive Immunosorbent Assay for Detection of MEHP in Human Urine. *Chemosphere*, **92**, 150-155. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.02.062>
- [49] Zhang, M., Hong, W., Wu, X., Zhang, Y., Li, F. and Zhao, S. (2015) A Highly Sensitive and Direct Competitive Enzyme-Linked Immunosorbent Assay for the Detection of Di-(2-Ethylhexyl) Phthalate (DEHP) in Infant Supplies. *Analytical Methods*, **7**, 5441-5446. <https://doi.org/10.1039/c5ay00207a>
- [50] 向成艳, 刘品品, 唐晓倩, 等. 食用油中邻苯二甲酸二丁酯高灵敏检测技术建立与应用[J]. 中国油料作物学报, 2024, 46(5): 1140-1147.
- [51] 尚淑娜, 生威, 王璐璐, 等. 间接竞争 ELISA 检测食品中的邻苯二甲酸二丁酯[J]. 食品与机械, 2019, 35(5): 67-71.
- [52] Lu, Q., Liu, X., Hou, J., Yuan, Q., Li, Y. and Chen, S. (2020) Selection of Aptamers Specific for DEHP Based on ssDNA Library Immobilized SELEX and Development of Electrochemical Impedance Spectroscopy Aptasensor. *Molecules*, **25**, Article 747. <https://doi.org/10.3390/molecules25030747>
- [53] 张英健. 血红素功能化石墨烯传感器在邻苯二甲酸酯检测中的应用[D]: [硕士学位论文]. 太原: 山西大学, 2023.
- [54] Zeng, Y., Zhang, M., Peng, K., Man, Z., Guo, L., Liu, W., *et al.* (2023) Au/TiO₂-Based Molecularly Imprinted Photoelectrochemical Sensor for Dibutyl Phthalate Detection. *Microchimica Acta*, **190**, Article No. 244. <https://doi.org/10.1007/s00604-023-05824-w>
- [55] 戴高鹏, 隗浚羽, 孙云飞, 等. 分子印迹聚吡咯/二氧化钛纳米管阵列选择性光电化学检测邻苯二甲酸二丁酯[J]. 分析化学, 2023, 51(9): 1463-1472.
- [56] Zhou, Q., Guo, M., Wu, S., Fornara, D., Sarkar, B., Sun, L., *et al.* (2021) Electrochemical Sensor Based on Corncob Biochar Layer Supported Chitosan-MIPs for Determination of Dibutyl Phthalate (DBP). *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **897**, Article ID: 115549. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2021.115549>
- [57] 李颖, 康君君, 赵雪茹, 等. 金修饰磁性石墨烯基分子印迹复合材料的制备及对水中邻苯二甲酸二正丁酯的电化学传感检测[J]. 高等学校化学学报, 2019, 40(3): 448-455.
- [58] Zhou, Z., Li, T., Xu, W., Huang, W., Wang, N. and Yang, W. (2017) Synthesis and Characterization of Fluorescence Molecularly Imprinted Polymers as Sensor for Highly Sensitive Detection of Dibutyl Phthalate from Tap Water Samples. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **240**, 1114-1122. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.09.092>
- [59] Zhang, C., Li, S., Tang, L., Li, S., Hu, C., Zhang, D., *et al.* (2024) Ultrasensitive, Label-Free Voltammetric Detection of Dibutyl Phthalate Based on Poly-L-Lysine/Poly(3,4-Ethylenedioxythiophene)-Porous Graphene Nanocomposite and Molecularly Imprinted Polymers. *Biosensors*, **14**, Article 121. <https://doi.org/10.3390/bios14030121>
- [60] Wang, S., Pan, M., Liu, K., Xie, X., Yang, J., Hong, L., *et al.* (2022) A SiO₂@MIP Electrochemical Sensor Based on MWCNTs and AuNPs for Highly Sensitive and Selective Recognition and Detection of Dibutyl Phthalate. *Food Chemistry*, **381**, Article ID: 132225. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132225>
- [61] Tu, D., Garza, J.T. and Coté, G.L. (2019) A SERS Aptasensor for Sensitive and Selective Detection of Bis(2-Ethylhexyl)Phthalate. *RSC Advances*, **9**, 2618-2625. <https://doi.org/10.1039/c8ra09230c>
- [62] Zhu, F., Zhang, H., Qiu, M., Wu, N., Zeng, K. and Du, D. (2019) Dual-Label Time-Resolved Fluoroimmunoassay as an Advantageous Approach for Investigation of Diethyl Phthalate & Dibutyl Phthalate in Surface Water. *Science of the Total Environment*, **695**, Article ID: 133793. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133793>