

# 荧光检测法检测双酚A的研究进展

刘宇轩, 刘泽馨, 柳俊屹, 闵瑾雯, 李梦珂, 倪芯蕊, 钱 昆, 王司淇, 方 芳\*

锦州医科大学, 辽宁 锦州

收稿日期: 2022年11月7日; 录用日期: 2022年12月9日; 发布日期: 2022年12月22日

## 摘 要

双酚A (BPA)在工业上有广泛应用,但同时也是众所周知的内分泌干扰物,可对生物体造成不可逆的损害,并导致严重疾病。因此,BPA的测定方法,尤其是对于低含量的BPA的灵敏检测方法,引起越来越多的关注。目前,传统的BPA检测方法主要有高效液相色谱法、气相色谱法、气相色谱-质谱法、电化学检测等,但是由于这些方法仪器设备昂贵、操作复杂,在实际应用中受到了一定限制。荧光检测法具有成本低廉、高选择性、高灵敏性的特点,成为检测BPA的一种优良方法。本文主要介绍了荧光检测法检测BPA的最新研究进展。

## 关键词

双酚A, 荧光检测法, 痕量检测, 高灵敏度

# Research Progress of the Detection of Bisphenol A by Fluorescence Detection Method

Yuxuan Liu, Zexin Liu, Junyi Liu, Jinwen Min, Mengke Li, Xinrui Ni, Kun Qian, Siqi Wang, Fang Fang\*

Jinzhou Medical University, Jinzhou Liaoning

Received: Nov. 7<sup>th</sup>, 2022; accepted: Dec. 9<sup>th</sup>, 2022; published: Dec. 22<sup>nd</sup>, 2022

## Abstract

Bisphenol A (BPA) is widely used in industry. At the same time, it is also a well-known endocrine disruptor that can cause irreversible damage to organisms and lead to severe diseases. Therefore, the determination method of BPA, especially for the sensitive detection method of BPA with low con-

\*通讯作者。

文章引用: 刘宇轩, 刘泽馨, 柳俊屹, 闵瑾雯, 李梦珂, 倪芯蕊, 钱昆, 王司淇, 方芳. 荧光检测法检测双酚 A 的研究进展[J]. 材料科学, 2022, 12(12): 1294-1301. DOI: 10.12677/ms.2022.1212144

tent, attracts more and more attention. At present, traditional methods for BPA detection mainly include HPLC, GC, GC-MS, electrochemical detection, and so on, but they have been limited in practical applications because of the expensive instrument and complicated operation. The fluorescence detection method has the characteristics of low cost, high selectivity, and high sensitivity, making it an excellent method for the detection of BPA. In this paper, we mainly describe the recent development of the fluorescence detection method for the detection of BPA.

## Keywords

Bisphenol A, Fluorescence Detection Method, Trace Detection, High Sensitivity

Copyright © 2022 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. 引言

双酚 A (Bisphenol A), 学名 2,2-二(4-羟基苯基)丙烷, 简称二酚基丙烷(BPA), 相对分子质量 228, 熔点 155°C~158°C, 沸点 250°C~252°C, 常温下为白色固体。由于 BPA 具有良好的耐热性、抗破碎性和透明度, 主要用于生产聚碳酸酯(PC)和环氧树脂等多种高分子材料。由 BPA 和光气(COCl<sub>2</sub>)聚合形成的 PC, 具有无色透明、轻巧耐用和不易碎裂等特性[1], 含有 BPA 的环氧树脂主要用于食品及饮料容器的内部涂层, 与食物直接接触[2]。

由于 BPA 在许多行业中的广泛应用, BPA 已受到了越来越多的关注。BPA 作为一种异种雌激素, 对于内分泌系统、生殖系统和免疫系统等均有一定影响, 可对生物体造成不可逆的损害, 并导致严重疾病[3]。长期接触 BPA 可减少精子数量, 并损害男性生育能力, BPA 浓度为 10 mol/L 时, 可直接导致男性支持细胞和精子细胞的急性死亡[4]。并且还可导致其他不良影响, 如子宫内膜异位、性功能障碍、哮喘、心血管等疾病等; 严重情况下, BPA 甚至可刺激乳腺癌[5] [6]。在监测中发现, 由于在合成过程中不完全的聚合反应, 以及使用过程中的分解等, 都可能导致 BPA 单体残留, 且当处于高温、酸性或碱性条件下时, BPA 会从包装材料、垃圾或者是废水中转移并存在于室内粉尘、地表水、沉积物和废水等环境中[7]。因此, 包括欧盟在内的多个国家对于低含量 BPA 的检测格外重视, 设计灵敏安全的 BPA 的检测方法得到了广泛关注。

目前, 传统的 BPA 检测方法主要为各种色谱技术, 如高效液相色谱(HPLC) [8] [9]、气相色谱(GC) [10]、气相色谱-质谱(GC-MS) [11]、超高效液相色谱-质谱(UPLC-MS/MS) [12]、凝胶吸附法[13]、电化学检测[14] [15] [16]等已用于 BPA 的常规检测。但是这些技术普遍昂贵、耗时且操作复杂, 在实际应用中受到了很大的限制, 如表 1 列举了 BPA 的传统检测方法。为了减少 BPA 对于人体机能的不利影响, 使用的检测方法应具有较低的检出限和相对广泛的线性范围。与传统的检测方法相比, 荧光检测法具有高选择性、高灵敏性的特点, 使其成为检测 BPA 的一种优良方法。本文主要介绍了荧光检测法检测 BPA 的最新研究进展。

## 2. 荧光检测法进展

### 2.1. 荧光探针

Sheng 等人在 2018 年将抗双酚 A 抗体偶联羧基功能化的上转换发光纳米颗粒作为信号探针, 包被抗

**Table 1.** Traditional detection methods of Bisphenol A  
**表 1.** BPA 的传统检测方法

检测方法	特点
高效液相色谱	无损检测、易回收、分析速度快；灵敏度较低，柱外效应会降低效率
气相色谱	分析速度快、分离效率高、应用范围广、选择性好；定性分析时，常需校正
气相色谱 - 质谱	分析速度快、分离效率高、灵敏度得到改善；成本较高、操作不便
微凝胶吸附法	回收率高、检测限相对较低
电化学检测	操作简单、灵敏度高、即时性强；一般情况下选择性较差
荧光检测法	简单高效、成本低廉、特异性高、准确稳定

原共轭羧基功能化的磁性聚苯乙烯微球作为捕获探针，建立了一种以荧光免疫分析法为基础的荧光探针技术，在检测水中 BPA 时的检出限为 0.02  $\mu\text{g/L}$  [17]。

Zhang 等人在 2019 年将羧基功能化的磁性纳米颗粒与巯基乙胺包封的  $\text{Mn}^{2+}$  掺杂的 ZnS 量子点偶联，合成磁性核 - 壳型荧光探针( $\text{FeOx}/\text{ZnS}@\text{MIPs}$ )，检出限为 0.362 6  $\mu\text{g/L}$  [18]。Kadam 等人在 2019 年利用环糊精功能化 ZnO QDs 用于 BPA 的荧光检测，BPA 浓度在 2~10  $\mu\text{M}$  范围内呈线性关系，检出限为 0.19  $\mu\text{g/L}$  [19]。

Liu 等人在 2020 年开发了一种利用荧光各向异性分析，基于适配体的 BPA 检测方法。该方法结合了荧光各向异性分析(FA)重现性好、对荧光波动不敏感的优点和核酸适配体的优点，使用单个 TMR 标记的针对 BPA 的 35 聚体适配体进行 BPA 检测；筛选了适配体上的不同标记位点后，选择 FA 响应最强的 BP35-22T-TMR 探针，并在优化条件下实现了 BPA 的 FA 检测，检测限为 0.5  $\mu\text{mol/L}$ 。该方法在水样分析中具有显著作用[20]。

汪海洋在 2020 年以 MCOFs 为载体，碳点(CDs)作为外源荧光信号物质，制备了一种磁性 COFs 基碳点分子印迹复合荧光探针(MCOFs@CDs@MIP)，实验过程中发现 MCOFs@CDs@MIP 在 360 nm 光的激发下，在 450 nm 处有荧光发射的现象，具有对 BPA 的高度选择性。该方法线性范围在 25  $\mu\text{g/L}$ ~3000  $\mu\text{g/L}$  之间，检测限为 12  $\mu\text{g/L}$  ( $S/N = 3$ )，回收率在 86.9%~102.0%之间[21]。

Saraji 和 Alijani 在 2021 年通过在  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  NPs 上形成分子印迹聚合物(MIP)壳，建立了一种用于检测 BPA 的荧光探针，同时兼具了高选择性和强荧光特性。通过使用一锅沉淀聚合的方法将 MIP 层锚定在  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  NPs 表面上并对该纳米颗粒进行表征，发现其在 360 nm 处显示出强烈的荧光发射，在 300 nm 处激发，BPA 存在时荧光猝灭——原因是 3-MPAccapped  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  NPs 表面的羧酸基团与 BPA 的羟基之间形成氢键， $\text{Cr}_2\text{O}_3$  NPs 的光诱导能量转移到复合物，导致荧光猝灭的现象。光学传感器的动态范围为 0.04~4.41 mol/L，检测限 0.015 mol/L [22]。

Wei 等人在 2021 年开发了一种以 BPA-适配子为识别单元，黄连素为荧光探针的一种无标记适配子传感系统。通过研究不同的 pH、金属离子和平衡时间对荧光淬灭反应的影响，最终在以 pH = 7.4 的 PbS 作为缓冲溶液、150 nm 的钠离子和 20 nm 的镁离子作为传感系统，平衡时间 5 min 的条件下进行实验。在最佳实验条件下，小檗碱/BPA-适配体传感系统的荧光强度在 0~1300 mM 范围内与 BPA 浓度呈现良好的线性关系，回收率在 92.4%~102.3%之间，检测限为 32 nm [23]。

Li 等人在 2022 年基于碳点开发了一种用于检测 BPA 的探针(CDs@Eu-AMP)，该探针由  $\text{Eu}^{3+}$  和 50-腺苷一磷酸在含有大量羟基和羰基的碳点表面配位聚合而成。检测结果表明，荧光强度比与 BPA 浓度在 0.1~100 mM 的宽范围内具有良好的线性关系，线性方程为  $F_{439}/F_{623} = -0.01064c + 1.4590$ 。在 0.1~100.0 mM 的宽范围内对 BPA 表现出灵敏的响应，检测限低至 20 nM。此外，该研究还利用固定在试纸上的

CDs@Eu-AMP 开发了一种便携式纸基视觉比例探针, 用于 BPA 检测。该项目成功研制了一种用于 BPA 测定的高选择性、高灵敏度比的荧光探针, 可视化纸基比色探头方便快捷、价格低廉[15]。

## 2.2. 荧光传感器

许宙等人在 2018 年制备了一种在金纳米粒子表面上修饰 BPA 适配体作为能量受体探针, 在水溶性的 UCNP 表面修饰适配体互补链形成功能化 UCNP 作为能量供体的 BPA 生物传感检测法。检测其功能化, UCNP 呈现出良好的分散性, 颗粒大小相对均匀; 由在 543 nm 处的特征峰处荧光强度逐渐提高可知, 与 BPA 浓度之间存在线性关系  $y = 18.967 \ln(x) + 539.36$  ( $R^2 = 0.9923$ ), 即在  $1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-3}$  mol/L 时存在线性关系, 检出限低至  $1 \times 10^{-10}$  mol/L [24]。

何珊等人在 2019 年利用 SYBR Green I 对 ssDNA 具有较弱结合能力的特性, 能够使荧光信号强度迅速减弱以应用于检测过程中, 构建了一种在 10 nM~105 nM 的 BPA 浓度范围内, 呈良好的线性关系且检测限(LOD)为 3.261 nM 的核酸适配体传感器[25]。梁丽娜同样在 2021 年构造了一种以核酸适配体和生物炭(BC)为荧光淬灭原件(BC-cDNA)的传感器(MB-Apt-BC); 实验验证了 BC 对 FAM 荧光具有很高的淬灭能力, 结果表明, BPA 浓度在 0~50 ng/mL 范围之间时, 呈现出线性关系, 检测限为 1.12 ng/mL (4.9 nM) [26]。

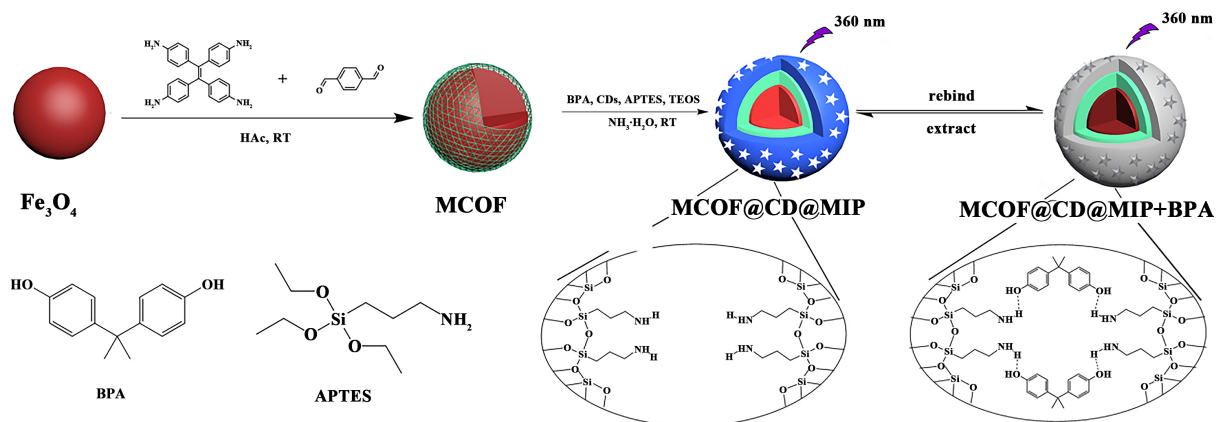
梁红璇等人于 2020 年建立了一种基于多色上转换纳米材料的适配体荧光传感器用于检测 BPA 的检测方法。由于适配体纳米颗粒与 AuNP-cDNA 结合后发生猝灭, 应选择荧光值最低的条件进行优化, 因此选择 pH = 7.3 的 0.1 mol/L Tris-HCl + 0.03 mol/L MgCl<sub>2</sub> 作为缓冲液; 结果表明, 该方法的回收率为 92.65%~105.65%, 线性范围为 5~120 ng/mL, 检出限为 4.78 ng/mL, 且具有良好的特异性[27]。

Zhang 等人于 2021 年利用半共价印迹法制备了一种用于测量 BPA 的新型介孔荧光分子印迹传感器。实验中将分子印迹层涂覆在 CDs 二氧化硅层上, 为 BPA 提供特定的识别位点。讨论中对于 CDs@MIP 的合成条件进行了优化, 使用 1:3:7 的模板分子、交联剂和功能单体的比率作为最佳合成条件, 此时 F<sub>0</sub>/F 为最大值; 最佳的 CDs 添加量为 100 mL。该传感器的线性范围为 0.025 mg/L~2 mg/L, 检出限为 0.016 mg/L, 回收率在 92.5% 至 101.1% 之间[28]。

Pan 等人于 2021 年构建了一种用于检测 BPA 的新型的荧光生物传感器, 通过将放大 DNA 电路与 Mg<sup>2+</sup>依赖性 DNAzyme 集成到传感系统中设计 BPA 生物传感器, 采用抗 BPA 适体作为分子识别探针。在实验中将不同浓度的 BPA 添加到 DNA(1)/(2)双链体进行孵化并记录荧光响应信号, 并利用 DNA 电路生物传感器检测牛奶样品中不同浓度的 BPA, 采用液相色谱-质谱法对生物传感器结果进行了验证。检测限为 50 fM, 检测线性范围为 100 fM 至 1 μM [29]。

Wang 等人于 2022 年将基于磁性共价有机框架支持的碳点嵌入分子印迹复合材料, 形成了检测 BPA 的一种荧光传感器(MCOF@CD@MIP) (见图 1)。实验中使用 4PE 和 TPA 作为有机配体, 通过 COF 晶体合成 MCOF, 并制备有机硅烷官能化 CD 作为荧光信号材料, 后将 MCOF@CD@MIP 在如图 1 的条件下进行优化处理, 在相同条件下进行 FL 强度测量。在一系列的表征检测中发现, 该实验所构建的带有信号转换单元的 MCOF@CD@MIP 传感器可直接检测 BPA 的存在或浓度。进行定量检测实际样品中的 BPA, 验证了该具有信号转导和信号放大功能的 MCOF@CD@MIP 传感器可有效应用于 BPA 选择性捕获和检测[30]。

Pang 等人在 2022 年设计了一种锌基卟啉金属有机骨架(Zn-TCPP-MOF), 用于超灵敏和定量检测 BPA 的一种新型荧光传感器。将 Zn-TCPP-MOF 在 150 °C 下热制备 1 小时, 利用能量色散 X 射线光谱(EDS)和元素映射判断成功合成了二维片状的 Zn-TCPP-MOF。Zn-TCPP-MOF 溶液荧光猝灭的 SV 方程为  $(F_0/F) = 1 + K_{sv} [M]$ , 检测限为 0.906 nM [31]。



**Figure 1.** Schematic diagram of manufacture of MCOF@CD@MIP sensor for BPA [30]

**图 1.** 用于 BPA 的 MCOF@CD@MIP 传感器的制造示意图[30]

为了更有效地提高检测实际应用能力,王胜等人在 2022 年在构造了一种以多巴胺为亲水性功能单体,疏水性丹磺酰多巴胺为荧光功能单体的荧光 MIP 纳米膜;达成了可以在实地进行快速筛测的结果[32]。

### 2.3. 其他研究进展

张慧等人在 2018 年利用核酸适配体可以和双酚 A 特异性结合的特性,制备了一种试纸条。含有羧基的荧光微球与含有氨基的核酸适配体的偶联物检测线为 T 线,控制线为一段可以与适配体当中连接臂互补的序列, C 线。试纸条的颜色深浅与待测物质含量成反比,而当样品中不含待测物质时, C 线、T 线均有明亮的荧光条带出现。该方法实现了 BPA 的快速检测[33]。

Carabajal 等人在 2019 年利用激发发射荧光矩阵动力学三阶数据,量化 BPA 进行检测。通过对系统进行 Fenton 反应,将额外的动力学模式结合到激发-发射荧光矩阵二阶数据中, BPA 所具有的特征衰减率,增加了组分分辨率的选择性。在进行实际样品的检测过程中,该方法除需要大量的有机溶剂外,检测时间仅为 30 分钟左右,与传统采用的色谱技术相比,该方法易于实施、环保且速度极快[34]。

Li 等人在 2020 年设计合成了一种新型复合材料金属有机骨架/壳聚糖/聚氧乙烯复合材料(MOFs/CS/PEO)并以 MIL-53(Al)/CS/PEO 泡沫作为吸附剂,开发了涡流辅助固相萃取流程,同时结合高效液相色谱-荧光检测方法,实现了 BPA 及其他四种结构类似物的检测。该方法的线性范围为 0.1 mg/L~20 mg/L,对 BPA 的检出限为 0.019  $\mu\text{g/L}$  [35]。

薛晨晨等人于 2021 年建立了截短适配体-荧光法用于测定水中 BPA,选择包含 38 个碱基的 BPA 截短适配体为识别元件,检测体系进行了关于特异性与回收率的实验。在 10~75 pmol/LBPA 浓度范围内,线性回归方程为  $y = 2230.7x + 110,825$ ,相关系数为 0.926,检出限 3.3 pmol/L;与其他 4 种干扰物相比较, BPA 的荧光强度差值区别明显,具有良好的特异性,且回收率大于 97.8%,相对标准偏差小于 4.4% [36]。

随着高科技智能设备的发展,将荧光光谱与手机端相结合进行水样中双酚 A 的检测也取得了进展。张祯等人在 2022 年申请了一种集成智能手机平台的 BPA 的双信号免疫分析方法专利:通过将金纳米(GSH-Au NCs)的荧光凝胶传感器和 TMB 的比色凝胶传感器组装获得 Lab-in-a-tube 装置,检测时同时获得比色与荧光双信号,使用手机 APP 平台转化为 RGB 值以定量分析 BPA [37]。

### 2.4. 研究进展总结

由上述研究进展可知:近年来,荧光检测法检测 BPA 的线性范围多为  $\mu\text{M}$  级别,检出限多为 nM 级

别,建立的检测方法常具有良好的稳定性、回收率和优异的抗干扰性能,且能够在生物样品中进行检测。

在近几年的研究中,基于半导体量子点(Quantum Dots, QDs)的荧光检测方法得到了广泛应用,量子点所具有的宽吸收光谱、窄而对称的发射光谱等使其经常应用于功能化修饰,探针的选择性和灵敏度都得到了明显改善[18] [19]。同时,应用适配体进行检测的研究也逐渐推广[20] [25] [26] [27] [33] [36];以核酸适配体的广泛使用更加突出,核酸适配体(Aptamer)是一段短单链脱氧核糖核酸(DNA),核糖核酸(RNA)序列或肽链,具有可以高特异性、高选择性识别结合多种目标物的特点,且成本低廉,热稳定性较好[38]。Carbon Dots (CDs)作为一种具有量子点特性的球状颗粒,具有独特的光学特性、良好的生物相容性、低毒性、发射光谱大小可调等优点[39]。研究中可以改善无机配位聚合物响应强度低、反应时间长的情况,因此,CD常用于敏化荧光探针,使更具备高选择性和高灵敏度[15] [21] [30]。金属氧化物纳米粒子往往因高热稳定性、无毒、以及固定生物分子的高生物活性等性质而应用于研究过程中,使用此种方法制备的探针或荧光传感器常具有较低检测限,常用于高灵敏度以及定量测量的过程中[22] [24] [28] [31] [35]。

不可忽视的是,关于BPA的荧光检测时的便携性与实效性也得到了充分的重视,对于双酚A污染的快速检测和实时监测均具有重要意义。使用智能设备相结合可以有效地缩短检测时间[37],在实际样品的检测过程中,通过制备试纸条的方法使检测结果可视化,更有利于实地检测[15] [33]。

### 3. 结论

随着对于BPA的研究不断深入,人们对于检测方法的探究也会更进一步,与传统的检测方法相比,通过荧光探针、荧光传感器等多种荧光检测方法,可以起到灵敏度高、特异性强、操作简单、成本低廉、方便环保等优点。基于以上的多个优异性能以及研究潜力,荧光检测法检测BPA具有极大的研究应用前景。

### 致 谢

感谢锦州医科大学化学实验平台、辽宁省药物作用与质量评价专业技术创新中心与辽宁省海洋生物活性物质重点实验室提供的支持。

### 基金项目

本文由大学生创新创业项目:基于微孔材料的实时监测与荧光寿命成像在免疫学的应用研究、基于氧化碳纳米管材料的电致化学发光药物传感器研究、限域合成的量子点MOF主客体功能材料在ROS方面的应用研究、国家自然科学基金(批准号21701069)和辽宁省自然科学基金(批准号2022020314-JH2/1013)资助。

### 参考文献

- [1] 李璐. 化妆品中抗氧化剂及化妆品塑料包装中双酚A的测定[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [2] Bakirhan, N.K. and Ozkan, S.A. (2020) The Recent Electrochemical Studies on Bisphenol A Detection in Beverages. In: Mihai, A. and Holban, A.M., Eds., *Safety Issues in Beverage Production*, Academic Press, Cambridge, 309-333. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816679-6.00009-7>
- [3] Zhou, J., et al. (2019) Contamination Status of Bisphenola and Its Analogues (Bisphenol S, F and B) in Foodstuffs and the Implications for Dietary Exposure on Adult Residents in Zhejiang Province. *Food Chemistry*, **294**, 160-170. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.022>
- [4] Kabir, E.R., Rahman, M.S. and Rahman, I. (2015) A Review on Endocrine Disruptors and Their Possible Impacts on Human Health. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, **40**, 241-258. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2015.06.009>
- [5] Youssef, M., El Din, E., Abushady, M., et al. (2018) Urinary Bisphenol A Concentrations in Relation to Asthma in a

- Sample of Egyptian Children. *Human & Experimental Toxicology*, **37**, 1180-1186.  
<https://doi.org/10.1177/0960327118758150>
- [6] 田华, 单立鑫, 崔凯洁, 汝少国. 双酚类化合物污染现状及对生命早期的不良影响[EB/OL]. 生态毒理学报: 1-21. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5470.X.20220908.1511.002.html>, 2022-10-31.
- [7] 国德军. 食品罐头内壁涂料中残留环境激素类物质迁移机制、水解动力学和快速检测技术研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2014.
- [8] 杨永超, 杜宇, 张媛媛, 何成, 于艳军, 韩伟, 李宁涛, 王利兵. 高效液相色谱法测定热敏纸中双酚A和双酚S含量[J]. 中国口岸科学技术, 2021, 3(9): 27-32.
- [9] 杨永超, 杜宇, 何成, 于艳军, 韩伟, 李宁涛, 熊中强, 张颖, 王利兵. 低共熔液相微萃取-高效液相色谱法测定食用油中双酚A [J]. 分析实验室, 2022, 41(1): 33-37.
- [10] 张清智, 吕延强, 刘雪姣, 吴爱芹, 尹硕. 气相色谱-三重四极杆串联质谱法测定硫化胶中双酚A含量[J]. 橡胶工业, 2022, 69(5): 389-393.
- [11] 周圣翔, 张彩虹, 冯广智. GC-MS法测定皮革中的双酚A [J]. 中国纤检, 2022(4): 81-84.
- [12] Kubiak, A., Maćkiewicz, M., Karbarz, M. and Biesaga, M. (2022) Application of Microgel as a Sorbent for Bisphenol Analysis in Liquid Food Samples. *Applied Sciences*, **12**, Article No. 441. <https://doi.org/10.3390/app12010441>
- [13] 钱镭, 李秀军, 曲双双, 等. GPC-UPLC-MS/MS法测定食用油中壬基酚和双酚A [J]. 食品研究与开发, 2016, 37(24): 144-147. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-6521.2016.24.034>
- [14] Bas, S.Z, Yuncu, N., Atacan, K. and Ozmen, M. (2021) A Comparison Study of MFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (M: Ni, Cu, Zn)-Reduced Graphene Oxide Nanocomposite for Electrochemical Detection of Bisphenol A. *Electrochimica Acta*, **386**, Article ID: 138519. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.138519>
- [15] Li, Y., et al. (2022) A Portable Visual Coffee Ring Based on Carbon Dot Sensitized Lanthanide Complex Coordination to Detect Bisphenola in Water. *RSC Advances*, **12**, 7306-7312. <https://doi.org/10.1039/D2RA00039C>
- [16] Huang, Y.-Y., Pang, Y.-H., Shen, X.-F., Jiang, R. and Wang, Y.-Y. (2022) Covalent Organic Framework DQTP Modified Pencil Graphite Electrode for Simultaneous Determination of Bisphenola and Bisphenol S. *Talanta*, **236**, Article ID: 122859. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2021.122859>
- [17] Sheng, W., Duan, W., Shi, Y., et al. (2018) Sensitive Detection of bisphenol A in Drinking Water and River Water Using an Upconversion Nanoparticles-Based Fluorescence Immunoassay in Combination with Magnetic Separation. *Analytical Methods*, **10**, 5313-5320. <https://doi.org/10.1039/C8AY01260A>
- [18] Zhang, X., Yang, S., Chen, W.J., et al. (2019) Magnetic Fluorescence Molecularly Imprinted Polymer Based on FeO<sub>x</sub>/ZnS Nanocomposites for Highly Selective Sensing of Bisphenol A. *Polymers*, **11**, Article No. 1210. <https://doi.org/10.3390/polym11071210>
- [19] Kadam, V.V., Balakrishnan, R.M. and Ettiyanpan, J.P. (2021) Fluorometric Detection of Bisphenol A Using  $\beta$ -Cyclodextrin-Functionalized ZnO QDs. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 11882-11892. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07797-2>
- [20] Liu, L. and Zhao, Q. (2020) A Simple Fluorescence Anisotropy Assay for Detection of Bisphenol a Using Fluorescently Labeled Aptamer. *Journal of Environmental Sciences*, **97**, 19-24. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.04.016>
- [21] 汪海洋. 磁性有机框架表面双酚A分子印迹复合材料的制备及应用[D]: [硕士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2020. <https://doi.org/10.27277/d.cnki.gsdnu.2020.001182>
- [22] Saraji, M. and Alijani, S. (2021) A Molecularly Imprinted Polymer on Chromium (III) Oxide Nanoparticles for Spectrofluorometric Detection of Bisphenol A. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **255**, Article ID: 119711. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.119711>
- [23] Wei, Y., Zhou, Y., Wei, Y., Dong, C. and Wang, L. (2021) A Fluorescent Aptasensor Based on Berberine for Ultrasensitive Detection of Bisphenol A in Tap Water. *Analytical Methods*, **13**, 1816-1822. <https://doi.org/10.1039/D1AY00180A>
- [24] 许宙, 鲁士珍, 陈茂龙, 等. 基于上转换纳米粒子与金纳米粒子构建荧光共振能量转移体系检测双酚A方法研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(9): 83-87. <https://doi.org/10.13652/j.issn.1003-5788.2018.09.017>
- [25] 何珊, 陈卓亨, 赵静怡, 等. 基于核酸适配体的荧光传感器用于检测双酚A [J]. 赣南师范大学学报, 2019, 40(3): 65-68. <https://doi.org/10.13698/j.cnki.cn36-1346/c.2019.03.015>
- [26] 梁丽娜. 利用生物炭诱导荧光猝灭的DNA杂交技术对双酚A进行高灵敏度检测[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2021. <https://doi.org/10.27162/d.cnki.gjlin.2021.005380>
- [27] 梁红璇, 刘欣欣, 白家磊, 等. 基于多色上转换纳米材料的适配体荧光传感器检测三种激素类污染物[J]. 解放军

- 预防医学杂志, 2020, 38(2): 1-6.
- [28] Zhang, J., Wang, H., Xu, L. and Xu, Z. (2021) A Semi-Covalent Molecularly Imprinted Fluorescent Sensor for Highly Specific Recognition and Optosensing of Bisphenol A. *Analytical Methods*, **13**, 133-140. <https://doi.org/10.1039/D0AY01822H>
- [29] Pan, J., Liu, C. and Chen, J. (2021) An Amplifying DNA Circuit Coupled with Mg<sup>2+</sup>-Dependent DNAzyme for Bisphenol A Detection in Milk Samples. *Food Chemistry*, **346**, Article ID: 128975. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128975>
- [30] Wang, H., Jiang, S., Xu, Z., Zhou, S. and Xu, L. (2022) A Novel Fluorescent Sensor Based on a Magnetic Covalent Organic Framework-Supported, Carbon Dot-Embedded Molecularly Imprinted Composite for the Specific Optosensing of Bisphenol A in Foods. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **361**, Article ID: 131729. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.131729>
- [31] Pang, Y., et al. (2022) A Novel Fluorescence Sensor Based on Zn Porphyrin MOFs for the Detection of Bisphenol A with Highly Selectivity and Sensitivity. *Food Control*, **132**, Article ID: 108551. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108551>
- [32] 王胜, 黄常刚, 肖永华, 伍雅婷. 荧光分子印迹传感器同时测定水中 BPA 和 2,4-D [J]. 环境科学与技术, 2022, 45(2): 25-29. <https://doi.org/10.19672/j.cnki.1003-6504.2229.21.338>
- [33] 张慧, 姜侃, 厉永纲, 胡小芳. 基于适配体的双酚 A 荧光检测试纸条制备条件的优化[J]. 浙江化工, 2018, 49(2): 29-33.
- [34] Carabajal, M.D., Arancibia, J.A. and Escandar, G.M. (2019) Excitation-Emission Fluorescence-Kinetic Third-Order/Four-Way Data: Determination of Bisphenol A and Nonylphenol in Food-Contact Plastics. *Talanta*, **197**, 348-355. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.01.045>
- [35] Li, S., Si, H.Z., Li, J.S., Jia, M. and Hou, X. (2020) Metal Organic Framework/Chitosan Foams Functionalized with Polyethylene Oxide as a Sorbent for Enrichment and Analysis of Bisphenols in Beverages and Water. *New Journal of Chemistry*, **44**, 1485-1492. <https://doi.org/10.1039/C9NJ05196A>
- [36] 薛晨晨, 朱光平, 白洁, 吴南翔, 范宏亮. 截短适配体-荧光法检测水中双酚 A 研究[J]. 预防医学, 2021, 33(11): 1086-1090. <https://doi.org/10.19485/j.cnki.issn2096-5087.2021.11.002>
- [37] 江苏大学. 一种集成智能手机平台的双酚 A 的双信号免疫分析方法[P]. 中国专利, CN202210581500.3. 2022-08-16.
- [38] 王紫璇, 孙洁芳, 邵兵. 核酸适配体生物传感器用于内分泌干扰物快速检测研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(18): 5939-5945. <https://doi.org/10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2022.18.016>
- [39] 唐红霞, 王昌文, 杨倩, 白曦龙. 多色发光碳量子点的制备、表征及应用研究[J]. 绥化学院学报, 2022, 42(8): 144-148.