

双酚 A 的检测现状及其发展趋势

王静怡¹, 郭启悦², 梁俊¹

(1.天津科技大学, 天津 300222; 2.上海师范大学, 上海 200234)

摘要:目的 对国内外双酚 A 的检测现状进行综述分析, 总结双酚 A 检测技术的发展趋势, 为双酚 A 的检测提供更多参考。方法 对现有的双酚 A 检测方法, 即大型仪器联用、电化学法、比色法、拉曼散射法及其主要检测机理进行阐述; 分析和总结国内外对双酚 A 检测的最新研究成果; 从高效安全的双酚 A 检测方法的建立及其应用性、准确性等方面指出今后的发展趋势。结果 对于双酚 A 检测方法的建立已呈现多样化、精准化趋势, 检测方法的简便性、快捷性有待进一步提高。结论 总结现有检测方法的特点, 对未来检测趋势作出合理预估。

关键词: 双酚 A; 检测; 研究进展; 趋势

中图分类号: TS206; TB484.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)03-0054-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.03.008

Detection Status and Development Trend of Bisphenol A

WANG Jing-yi¹, GUO Qi-yue², LIANG Jun¹

(1.Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China;
2.Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

ABSTRACT: The work aims to review and analyze the present situation of bisphenol A detection at home and abroad, and summarize the development trend of bisphenol A detection technology to provide more references for bisphenol A detection. The existing bisphenol A detection methods, i.e. large-scale instrument coupling, electrochemical method, colorimetric method, Raman scattering method and their main detection mechanisms were described. The latest research results of bisphenol A detection at home and abroad were analyzed and summarized. The development trend in the future was pointed out from the aspects of the establishment of efficient and safe bisphenol A detection method, its applicability and accuracy. The establishment of bisphenol A detection methods had shown a trend of diversification and precision. The simplicity and rapidity of detection methods needed to be further improved. The characteristics of the existing detection methods are summarized to make a reasonable prediction of the future detection trend.

KEY WORDS: bisphenol A; detection; research progress; trend

天然和异生环境内分泌干扰物 (EDCs) 对环境和人类健康状态具有不利影响, 引起了广泛的关注^[1-5]。目前关于 EDCs 有害影响的大部分研究均针对动物。近年来, 针对 EDCs 暴露对代谢、肥胖、甲状腺功能、生育力以及激素分泌功能等的不良影响^[6], 已进行大

量的研究。双酚 A (BPA) 作为 EDCs 中的一种, 已有大量研究证明其与人类健康的有着密切的关系。有研究表明, 接触双酚 A 的幼儿患哮喘风险提高, 表明支气管哮喘患者可能存在 BPA 暴露风险^[7]。双酚 A 常见于包装材料中, 如聚氯乙烯 (PVC) 塑料中常添

收稿日期: 2018-11-01

作者简介: 王静怡 (1994—), 女, 天津科技大学硕士生, 主攻食品包装材料的安全控制与评价。

通信作者: 梁俊 (1978—), 男, 博士, 天津科技大学教授, 主要研究方向为储运质量的安全评价与控制。

加双酚 A 及其类似物作为增塑剂, BPA 可能会被 PVC 微塑料释放和吸附, 从而对生态系统造成相应的污染^[8]。双酚 A 通常用作生产聚碳酸酯(PC)和环氧树脂的原料, 广泛存在于众多塑料制品中, 如食品工业中使用的保护性聚合物薄膜的内侧、牛奶包装、饮料罐等^[9-10]。BPA 具有通过模仿激素的阻断和触发作用来干扰内分泌系统的能力^[11]。为防止因双酚 A 超标而造成的一系列安全问题, 提出一种有效的检测食品包装中双酚 A 含量的方法变得尤为重要。

目前, 许多分析技术已被用于 BPA 检测, 包括高效液相色谱(HPLC)、气相色谱联用质谱(GC-MS)和液相色谱联用质谱(LC-MS)、酶联免疫法(ELISA)等, 这些高灵敏度和高选择性的方法是 BPA 常规分析最常用的方法。然而, 这些方法需要昂贵的仪器、繁琐的预处理和熟练的操作人员, 限制了它们潜在的应用领域^[12]。为了解决这些问题, 通过使用适配体作为识别元件, 运用比色法、电化学和表面增强拉曼散射(SERS)等各种信号转导策略来进行 BPA 检测。

1 现有双酚 A 检测方法

1.1 大型仪器联用检测双酚 A

大型仪器联用多基于高效液相色谱法, 该方法以液体为流动相, 采用高压输液系统, 将具有不同极性的单一溶剂或不同比例的混合溶剂、缓冲液等流动相泵入装有固定相的色谱柱, 在柱内各成分被分离后, 进入检测器进行检测, 从而实现对试样的分析。

Zhou^[13]等开发了一种新型空气辅助液-液微萃取(AALLME)方法用于 HPLC, 测定从一次性塑料饭盒迁移到接触水中的双酚 A, 在最佳条件下, LOD(检测限)为 0.2~0.7 $\mu\text{g/L}$; Wang^[14]等开发了以二氧化碳为介导的可转换亲水性溶剂, 结合 HPLC-UV 测定食品和饮料中的双酚类物质, 其中双酚 A 的 LOD 为 0.17~0.30 g/L ; Yin^[15]等采用新型多孔芳香骨架(PAF-6)作为固相萃取吸附剂, 建立了快速有效的固相萃取高效液相色谱荧光检测(SPE-HPLC-FLD)方法, 以富集和测定在牛奶及其包装样品中的双酚 A, 其 LOD 为 0.1 ng/mL ; Caceres^[16]等采用分子印迹萃取的方法联用 HPLC 检测双酚 A; Plutzer^[17]等采用 HPLC/MS 联用的方法检测不同季节水样中双酚 A 的含量, 测得 LOD 为 0.1 ng/mL ; Deng^[18]等提出了一种基于液-液萃取结合固相萃取和同位素稀释-超高效液相色谱-串联质谱(UPLC-MS/MS)的分析方法, 用于同时测定黄曲霉毒素 B1(AFB1)、双酚 A 和花生油中的 4-壬基酚(4-NP); Hao^[19]等利用 Carb/PSA

固相萃取-高效液相色谱-串联质谱法同时测定富含脂肪的食品中的双酚 A、双酚 F、4-壬基酚、4-正壬基酚和辛基酚, 检测限为 1.0~2.0 g/kg 。

近年来, 大型仪器联用检测各种不同条件下的双酚 A 研究多集中在改变萃取方式, 分子印迹法和新型吸附材料的出现使得该方法更加简便、快捷。大型仪器具有方法较为成熟、检测环境稳定的优点, 同时也具有操作相对烦琐、费时等不可避免的缺点。

1.2 电化学分析法检测双酚 A

电化学分析法是建立在溶液中物质的电化学性质基础上的一类仪器分析方法, 通常将试液作为化学电池的一个组成部分, 根据该电池的某种电参数(如电阻、电导、电位、电流、电量或电流-电压曲线等)与被测物质的浓度之间存在一定的关系而进行测定的方法。

Abnous^[20]等开发了一种基于非靶向诱导桥组装, 通过末端脱氧核苷酸转移酶触发的适配体延伸反应来检测双酚 A, LOD 为 15 pmol/L ; Messaoud^[21]等提出了一种超声波辅助磁性分子印迹聚合物(US-MagMIP)与用炭黑纳米粒子复合材料(CBNPs)修饰的电化学传感器和金纳米粒子(AuNPs)相结合, 特异性检测双酚 A, LOD 为 8.8 nmol/L ; Fan^[10]等成功制备了一种基于锌酞菁(ZnPc)敏化 TiO_2 纳米棒(NGA)的轻便灵敏的光电化学(PEC)传感平台, 用于双酚 A 的检测, 测得 LOD 为 8.6 nmol/L ; He^[22]等在目前的工作中, 开发了一种直接“接触”方法, 用于石墨烯-离子液体修饰的玻碳电极上附着可清洁表面的纳米金, LOD 为 4.8 nmol/L ; Kashefi-Kheyraadi^[23]等在流体室中剧烈产生的微涡流提供了 BPA 和 BPA 适配体之间的高碰撞机会, 因此可以在适体传感器表面上捕获更多的 BPA 分子, 这最终实现适体传感器的高灵敏度, LOD 为 2 nmol/L ; Ekomo^[24]等首次引用丝网印刷碳电极作为传感原件来检测双酚 A, LOD 为 0.06 nmol/L ; Jiang^[25]等开发了一种新型可见光驱动的 PEC 平台, 使用基于纳米 TiO_2 及碳纳米管形成的纳米片(TiO_2/BCN)复合材料, 实现双酚 A 的超灵敏检测, LOD 为 0.03 fmol/L ; Zhang^[26]等构建了一个超灵敏的电化学双酚 A 传感器, 采用分层的 Ce-金属有机骨架(Ce-MOF), 用十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)作为传感平台, 检测最低浓度为 2.0 nmol/L 的双酚 A; Shi^[27]等在自支撑纳米多孔金(np-Au)微电极上构建新颖且通用的电化学适体传感器, 与核酸外切酶 III(Exo III)诱导的信号放大策略整合, BPA 具有超低检出限为 10 pg/mL ; Wang^[28]等研究开发了一种基于多壁碳纳米管(MWCNTs)和聚晶紫(PCV)改性玻碳电极

的新型灵敏电化学传感器,测得 LOD 为 0.1 nmol/L; Lawrywianiec^[29]等建立了用碳黑纳米粒子(CB)修饰的玻碳电极测定双酚 A 的伏安法,测得 LOD 为 3.4 nmol/L; Messaoud^[30]等开发了基于多壁碳纳米管和金纳米颗粒复合改性的玻碳电极,用于检测双酚 A 的新型电化学传感器,测得的 LOD 为 4 nmol/L; Vilian^[31]等开发了一种 spick-and- span 方法在 Au 纳米球固定辣根过氧化物酶,使其与蛋氨酸/石墨烯生物基质结合用于测定双酚 A,测得的 LOD 为 2.6 pmol/L; Deiminiat^[32]等基于功能化多壁碳纳米管/金纳米粒子(f-MWCNTs/AuNPs)复合膜修饰金电极,构建了一种新的无标记电化学适体传感器,测得的 LOD 为 0.05 nmol/L; Mirzajani^[33]等通过使用 BPA 特异性适体作为探针分子和电极来实现高灵敏度检测,以增强电热效应,从而将 BPA 分子向电极表面的长程传输。电容传感技术通过测量传感器的样品/电极界面的电容来确定有界 BPA 水平,具有 1 fmol/L 至 10 pmol/L 的大线性范围,LOD 为 152.93 amol/L; Qiao^[34]等开发了一种使用 Au 纳米颗粒活化的 ZnO 纳米模板,产生表面等离子体共振,构成光电化学(PEC)适体传感器,LOD 为 0.5 nmol/L; Pogacean^[35]等首次通过催化化学气相沉积法合成石墨烯-双金属纳米粒子复合材料,增强电催化检测双酚 A 的灵敏度,LOD 为 30 μ mol/L。

近年来,电化学法检测双酚 A 的研究多集中在电极的改变,该方法成本较低,仪器的调试和操作都较简单,容易实现自动化。适配体等识别器件的加入也克服了电化学分析法灵敏度低的缺点,同时光电化学法的发展也为双酚 A 的电化学分析法检测提供了新的思路。

1.3 光谱法检测双酚 A

光谱分析法是根据物质的光谱来鉴别物质及确定其化学组成和相对含量的方法,是以分子和原子的光谱学为基础建立起的分析方法,包含 3 个主要过程:能源提供能量;能量与被测物质相互作用;产生被检测讯号。光谱法之一的紫外-可见分光光度法对于双酚 A 的检测,主要以荧光共振能量转移(FRET)理论为主,是指在 2 个不同的荧光基团中,如果 1 个荧光基团(供体)的发射光谱与另一个基团(受体)的吸收光谱有一定的重叠,当这 2 个荧光基团间的距离合适时(一般小于 10 nm),就可观察到荧光能量由供体向受体转移的现象,即以前一种基团的激发波长激发时,可观察到后一个基团发射的荧光。

Lim^[12]等采用的 NanoAptamer 分析是双酚 A 定量方法,使用磁珠、量子点纳米粒子和 BPA 适配体,通过 NanoAptamer 测定的 BPA 定量范围为

0.005~1000 ng/mL; Li^[5]等提出基于 AHN 标记的适配体和磁性颗粒的次分体荧光纳米传感器,对于 BPA 和 aptasensor 的线性范围为 0.20~8.00 ng/mL,检出限为 0.047 ng/mL; Liu^[36]等首次采用 TriPlex (TM) 技术在熔融石英基板上制造波导芯片,构成利用激光诱导荧光检测的光学传感器,LOD 为 0.6 μ g/mL; Lee^[37]等使用改良的适体/AuNP 传感器与荧光单链 DNA 适体一起用于敏感检测双酚 A,LOD 低至 9 pg/mL; Liu^[38]等通过阵列荧光生物传感器平台,高通量探测生物分子间的相互作用; Xiong^[39]等建立了一种具有荧光检测器(FLD)的特异、精确以及 HPLC 特点的分析方法,用于测定牛奶样品中的 9 种双酚(BP); Guan^[40]等采用荧光偏振法测定土壤中双酚 A 及其卤代类似物,该测定法对 BPA, BPAF, TBBPA 和 TCBPA 的检出限分别为 0.35, 0.21, 0.27 和 1.03 μ g/g; Sheng^[41]等开发了一种基于侧向流量量子点的免疫色谱分析和荧光淬灭免疫色谱分析方法,量子点作为荧光供体,可视化检测食品和水样中的双酚 A,检出限分别为 10 μ g/kg 和 4 μ g/L; Guo^[42]等将阳离子共轭聚合物作为信号报告物,基于靶介导的二酰亚胺淬灭剂聚集,无标记测定双酚 A,LOD 为 0.05 ng/mL; Lim^[43]等设计用于在单个比色杯样品上进行的反应和荧光测量,将改良的 NanoGene 测定法作为传感机制,使用 BPA 浓度范围为 0.0005~1.0 ng/mL 的样品,证明了 NanoAptamer 分析仪检测 BPA 的能力; Lu^[44]等报道了一种简便的策略来制备基于双发射纳米颗粒的比率荧光分子印迹传感器,其由碳点和金纳米团簇组成,用于检测双酚 A,LOD 为 29 nmol/L; Hu^[45]等根据荧光素标记的 BPA 适体和磁性氧化石墨烯之间的荧光共振能量转移,提出了用于检测 BPA 的磁性分离“开启”荧光方法,检测限为 0.071 ng/mL,线性范围为 0.2~10 ng/mL; McCracken^[46]等评估了一种独立的基于智能手机的荧光传感方法,用于从水样中识别 BPA,未经处理的样品检测限为 4.4 μ mol/L。

光谱法基于荧光共振能量转移理论,现阶段多应用于不同荧光及淬灭物质的开发,如量子点、光子晶体等。将荧光物质与适配体结合形成荧光纳米探针是目前常见的检测策略。色谱法具有操作简便、快速、精度高等优点,但由于目前对于适配体的相关研究尚不明确,受适配体的影响,色谱法具有实际应用不稳定的缺陷。基于光谱法的检测呈多通道检测的趋势,且与智能手机结合实现了检测仪器的简化、检测条件的普适性。

1.4 表面增强拉曼光谱技术检测双酚 A

“拉曼散射”是指一定频率的激光照射到样品表面时,物质中的分子吸收了部分能量,发生不同方式

和程度的振动,然后散射出较低频率的光。频率的变化决定于散射物质的特性,不同种类的原子团振动的方式是唯一的,因此可以产生特定频率的散射光,其光谱就称为“指纹光谱”,可以照此原理鉴别组成物质的分子种类。

表面增强拉曼光谱技术是在普通拉曼光谱法的基础上,结合表面增强技术研发出来的一种新技术。Lin^[47]等提出了使用表面增强拉曼散射侧流(SERS-LFA)测定二元系统中双酚A的检测方法,应用在BPA SERS-LFA试剂盒中后获得视觉和拉曼信号。SERS信号的检测限为0.073 μg/L,分别比视觉强度和颜色强度定量的灵敏度高205和20倍;Wang^[48]等通过在分子印迹聚合物(MIPs)基质内原位制备银纳米粒子(AgNPs)用于双酚A检测,构建了分子印迹聚合物与银纳米粒子形成的复合材料,构建表面增强拉曼散射传感器,BPA的检出限为50 nmol/L;Zhang^[49]等将金属MoO₂用作SERS底物,以实现痕量检测高风险化学品,包括双酚A、二氯酚、五氯苯酚等,最小的可检测浓度为0.1 μmol/L,最大增强因子高达3.75×10⁶;De Bleye^[50]等首次开发基于金纳米颗粒-纳米棒异质组件,用于增强拉曼散射编码的适配体传感器以检测BPA,LOD低至3.9 pg/mL。

SERS具有稳定性强、受水与荧光干扰小、方便快捷等特点,有望成为无损检测、设备便携的快速检测手段之一。

2 发展趋势

采用高效液相色谱、质谱等大型仪器联用的方法实现双酚A检测,具有检测方法成熟、检测环境稳定的优势,但检测方法仍具有操作比较烦琐、费时等缺点。基于大型仪器联用的现状,检测方法向色谱法、电化学法、表面增强拉曼散射等快速检测方向发展。快速检测方法多与适配体结合组成传感器,这一策略虽然操作简便、成本低,但仍具有一定的缺陷。比如由于适配体的不稳定,造成检测范围较窄、检测信号较弱,导致检出限偏高以及适配体自身不稳定,使其在实际检测中具有不稳定的缺陷。为解决以上存在的一些问题,已有研究尝试将信号放大,如有杂交链式反应(HCR)^[51]、催化发夹自组装(CHA)、滚环扩增(RCA)^[52]等,运用这些方法来实现检测信号的放大。

3 结语

大型仪器联用检测双酚A具有灵敏度高、选择性好的优点,但其操作复杂,耗费时间较长;拉曼光

谱法具有不破坏检测样品的优势;电化学法、比色法等具有成本低、灵敏、快速的优点,将其与信号放大方式结合运用能够有效改进其检测信号弱、检测范围较窄等缺点。

食品包装材料中的双酚A具有潜在的毒性危害,建立一种高效、快速、灵敏的针对双酚A的检测方法,为食品包装材料的安全提供相应保障,以满足现代食品包装安全的需要。

参考文献:

- [1] ALIABADI M, SHAGHOLANI H, LEHI A Y. Synthesis of a Novel Biocompatible Nanocomposite of Graphene Oxide and Magnetic Nanoparticles for Drug Delivery[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 98: 287—291.
- [2] LI C S, LU Q Y, YE J S, et al. Metabolic and Proteomic Mechanism of Bisphenol A Degradation by *Bacillus Thuringiensis*[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 640: 714—725.
- [3] SALGUEIRO-GONZALEZ N, CASTIGLIONI S, ZUCCATO E, et al. Recent Advances in Analytical Methods for the Determination of 4-Alkylphenols and Bisphenol A in Solid Environmental Matrices: A Critical Review[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2018, 1024: 39—51.
- [4] STREET M E, ANGELINI S. Current Knowledge on Endocrine Disrupting Chemicals (Edcs) from Animal Biology to Humans, from Pregnancy to Adulthood: Highlights from a National Italian Meeting[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, 19(6): 1647.
- [5] LI M K, HU L Y, NIU C G, et al. A Magnetic Separation Fluorescent Aptasensor for Highly Sensitive Detection of Bisphenol A[J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2018, 266: 805—811.
- [6] GARCÍA-ESPIEIRA M, TEJEDA-BENÍTEZ L, JESUS O V. Toxic Effects of Bisphenol A, Propyl Paraben, and Triclosan on *Caenorhabditis Elegans*[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(4): 684.
- [7] YOUSSEF M M, EL-DIN E, ABUSHADY M M, et al. Urinary Bisphenol A Concentrations in Relation to Asthma in a Sample of Egyptian Children[J]. *Human & Experimental Toxicology*, 2018, 37: 1180—1186.
- [8] WU P, CAI Z, JIN H, et al. Adsorption Mechanisms of Five Bisphenol Analogues on PVC Microplastics[J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 650:

- 671—678.
- [9] VANDENBERG L N, LUTHI D, QUINERLY D A. Plastic Bodies in a Plastic World: Multi-disciplinary Approaches to Study Endocrine Disrupting Chemicals[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 140: 373—385.
- [10] FAN Z, FAN L, SHUANG S, et al. Highly Sensitive Photoelectrochemical Sensing of Bisphenol A Based on Zinc Phthalocyanine/TiO₂ Nanorod Arrays[J]. *Talanta*, 2018, 189: 16—23.
- [11] MERCOGLIANO R, SANTONICOLA S. Investigation on Bisphenol A Levels in Human Milk and Dairy Supply Chain: A Review[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2018, 114: 98—107.
- [12] LIM H J, LEE E H, LEE S D, et al. Quantitative Screening for Endocrine-disrupting Bisphenol A in Consumer and Household Products Using Nanoapptamer Assay[J]. *Chemosphere*, 2018, 211: 72—80.
- [13] ZHOU Q, JIN Z, LI J, et al. A Novel Air-assisted Liquid-liquid Microextraction Based on In-situ Phase Separation for the Hplc Determination of Bisphenols Migration from Disposable Lunch Boxes to Contacting Water[J]. *Talanta*, 2018, 189: 116—121.
- [14] WANG X, GAO M, ZHANG Z, et al. Development of CO₂-mediated Switchable Hydrophilicity Solvent-based Microextraction Combined with HPLC-UV for the Determination of Bisphenols in Foods and Drinks [J]. *Food Analytical Methods*, 2018, 11: 2093—2104.
- [15] YIN D, CHEN Y, ZHANG Y, et al. 2D Porous Aromatic Framework as a Novel Solid-phase Extraction Adsorbent for the Determination of Trace Bpa in Milk[J]. *Chromatographia*, 2018, 81: 749—758.
- [16] CÉSAR C, CATALINA B, BERNABÉ R, et al. Molecularly Imprinted Polymers for the Selective Extraction of Bisphenol A and Progesterone from Aqueous Media[J]. *Polymers*, 2018, 10(6): 679.
- [17] PLUTZER J, AVAR P, KERESZTES D, et al. Investigation of Estrogen Activity in the Raw and Treated Waters of Riverbank Infiltration Using a Yeast Estrogen Screen and Chemical Analysis[J]. *Journal of Water and Health*, 2018, 16: 635—645.
- [18] DENG H, SU X, WANG H. Simultaneous Determination of Aflatoxin B1, Bisphenol A, and 4-Nonylphenol in Peanut Oils by Liquid-liquid Extraction Combined with Solid-phase Extraction and Ultra-high Performance Liquid Chromatography-tandem Mass Spectrometry[J]. *Food Analytical Methods*, 2018, 11: 1303—1311.
- [19] HAO Z, XIAO Y, JIANG L, et al. Simultaneous Determination of Bisphenol A, Bisphenol F, 4-Nonylphenol, 4-N-Nonylphenol, and Octylphenol in Grease-rich Food by Carb/Psa Solid-phase Extraction Combined with High-performance Liquid Chromatography Tandem Mass Spectrometry[J]. *Food Analytical Methods*, 2018, 11: 589—597.
- [20] ABNOUS K, DANESH N M, RAMEZANI M, et al. A Novel Electrochemical Sensor for Bisphenol A Detection Based on Nontarget-induced Extension of Aptamer Length and Formation of a Physical Barrier[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2018, 119: 204—208.
- [21] MESSAOUD N, LAHCEN A A, DRIDI C, et al. Ultrasound Assisted Magnetic Imprinted Polymer Combined Sensor Based on Carbon Black and Gold Nanoparticles for Selective and Sensitive Electrochemical Detection of Bisphenol A[J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2018, 276: 304—312.
- [22] HE S, MA Y, ZHOU J, et al. A Direct "Touch" Approach for Gold Nanoflowers Decoration on Graphene/Ionic Liquid Composite Modified Electrode with Good Properties for Sensing Bisphenol A[J]. *Talanta*, 2019, 191: 400—408.
- [23] KASHEFI-KHEYRABADI L, KIM J, GWAK H, et al. A Microfluidic Electrochemical Aptasensor for Enrichment and Detection of Bisphenol A[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2018, 117: 457—463.
- [24] EKOMO V M, BRANGER C, BIKANGA R, et al. Detection of Bisphenol A in Aqueous Medium by Screen Printed Carbon Electrodes Incorporating Electrochemical Molecularly Imprinted Polymers[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2018, 112: 156—161.
- [25] JIANG D, DU X, ZHOU L, et al. TiO₂ Nanoparticles Embedded in Borocarbonitrides Nanosheets for Sensitive and Selective Photoelectrochemical Aptasensing of Bisphenol A[J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2018, 818: 191—197.
- [26] ZHANG J, XU X, CHEN L. An Ultrasensitive Electrochemical Bisphenol a Sensor Based on Hierarchical Ce-metal-organic Framework Modified with Cetyltrimethylammonium Bromide[J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2018, 261: 425—433.
- [27] SHI L, RONG X, WANG Y, et al. High-performance and Versatile Electrochemical Aptasensor Based on Self-supported Nanoporous Gold Microelectrode and Enzyme-induced Signal Amplification[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2018, 102: 41—48.
- [28] WANG W, TANG J, ZHENG S, et al. Electrochemical

- Determination of Bisphenol A at Multi-walled Carbon Nanotubes/Poly (Crystal Violet) Modified Glassy Carbon Electrode[J]. *Food Analytical Methods*, 2017, 10: 3815—3824.
- [29] LAWRYWIANIEC M, SMAJDOR J, PACZOSABATOR B, et al. High Sensitive Method for Determination of the Toxic Bisphenol A in Food/Beverage Packaging and Thermal Paper Using Glassy Carbon Electrode Modified with Carbon Black Nanoparticles[J]. *Food Analytical Methods*, 2017, 10: 3825—3835.
- [30] MESSAOUD N, GHICA M E, DRIDI C, et al. Electrochemical Sensor Based on Multiwalled Carbon Nanotube and Gold Nanoparticle Modified Electrode for the Sensitive Detection of Bisphenol A[J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2017, 253: 513—522.
- [31] VILIAN A T E, GIRIBABU K, CHOE S R, et al. A Spick-and-span Approach to the Immobilization of Horseradish Peroxidase on Au Nanospheres Incorporated with a Methionine/Graphene Biomatrix for the Determination of Endocrine Disruptor Bisphenol A[J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2017, 251: 804—812.
- [32] DEIMINIAT B, ROUNAGHI G H, ARBAB-ZAVAR M H, et al. A Novel Electrochemical Aptasensor Based on F-Mwcnts/Aunps Nanocomposite for Label-free Detection of Bisphenol A[J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2017, 242: 158—166.
- [33] MIRZAJANI H, CHENG C, WU J, et al. A Highly Sensitive and Specific Capacitive Aptasensor for Rapid and Label-free Trace Analysis of Bisphenol A (BPA) in Canned Foods[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2017, 89: 1059—1067.
- [34] QIAO Y, LI J, LI H, et al. A Label-free Photoelectrochemical Aptasensor for Bisphenol A Based on Surface Plasmon Resonance of Gold Nanoparticle-sensitized ZnO Nanopencils[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2016, 86: 315—320.
- [35] POGACEAN F, BIRIS A R, SOCACI C, et al. Graphene-bimetallic Nanoparticle Composites with Enhanced Electro-catalytic Detection of Bisphenol A[J]. *Nanotechnology*, 2016, 27(48): 484001.
- [36] LIU L, SHAN D, ZHOU X, et al. Triplex (Tm) Waveguide-based Fluorescence Biosensor for Multichannel Environmental Contaminants Detection[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2018, 106: 117—121.
- [37] LEE E S, KIM G B, RYU SH, et al. Fluorescing Aptamer-gold Nanosensors for Enhanced Sensitivity to Bisphenol A[J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2018, 260: 371—379.
- [38] LIU L, ZHOU X, MA R, et al. High-throughput Biomolecular Interaction Analysis Probing by an Array Fluorescent Biosensor Platform[J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2018, 259: 888—893.
- [39] XIONG L, YAN P, CHU M, et al. A Rapid and Simple HPLC-FLD Screening Method with Quechers as the Sample Treatment for the Simultaneous Monitoring of Nine Bisphenols in Milk[J]. *Food Chemistry*, 2018, 244: 371—377.
- [40] GUAN T, SUN Y, ZHANG T, et al. Simultaneous Determination of Bisphenol A and Its Halogenated Analogues in Soil by Fluorescence Polarization Assay[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18: 845—851.
- [41] SHENG W, LIU Y, LI S, et al. Lateral Flow Quantum-dot-based Immunochromatographic Assay and Fluorescence Quenching Immunochromatographic Assay with Quantum Dots as Fluorescence Donors to Visually Detect Bisphenol A in Food and Water Samples[J]. *Food Analytical Methods*, 2018, 11: 675—685.
- [42] GUO L, ZHANG Z, TANG Y. Cationic Conjugated Polymers as Signal Reporter for Label-free Assay Based on Targets-mediated Aggregation of Perylene Diimide Quencher[J]. *Chinese Chemical Letters*, 2018, 29: 305—308.
- [43] LIM H J, CHUA B, SON A. Detection of Bisphenol A Using Palm-size Nanoaptamer Analyzer[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2017, 94: 10—18.
- [44] LU H, XU S. Visualizing BPA by Molecularly Imprinted Ratiometric Fluorescence Sensor Based on Dual Emission Nanoparticles[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2017, 92: 147—153.
- [45] HU L Y, NIU C G, WANG X Y, et al. Magnetic Separate "Turn-on" Fluorescent Biosensor for Bisphenol A Based on Magnetic Oxidation Graphene[J]. *Talanta*, 2017, 168: 196—202.
- [46] MCCracken K E, TAT T, PAZ V, et al. Smartphone-based Fluorescence Detection of Bisphenol A from Water Samples[J]. *Rsc Advances*, 2017, 7: 9237—9243.
- [47] LIN L K, STANCIU L A. Bisphenol A Detection Using Gold Nanostars in a Sers Improved Lateral Flow Immunochromatographic Assay[J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2018, 276: 222—229.
- [48] WANG Z, YAN R, LIAO S, et al. In Situ Reduced Silver Nanoparticles Embedded Molecularly Imprinted Reusable Sensor for Selective and Sensitive Sers De-

- tection of Bisphenol A[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 457: 323—331.
- [49] ZHANG Q, LI X, MA Q, et al. A Metallic Molybdenum Dioxide with High Stability for Surface Enhanced Raman Spectroscopy[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 14903.
- [50] DE BLEYE C, DUMONT E, HUBERT C, et al. A Simple Approach for Ultrasensitive Detection of Bisphenols by Multiplexed Surface-enhanced Raman Scattering[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2015, 888: 118—125.
- [51] YUN W, WU H, CHEN L, et al. Dual Enzyme-free Amplification Strategy for Ultra-sensitive Fluorescent Detection of Bisphenol A in Water[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2018, 1020: 104—109.
- [52] LI X, SONG J, XUE Q W, et al. A Label-free and Sensitive Fluorescent Qualitative Assay for Bisphenol A Based on Rolling Circle Amplification/Exonuclease Iii-Combined Cascade Amplification[J]. *Nanomaterials*, 2016, 6(10): 190.