胡维, 张筠, 蒋栋磊, 等. 基于电化学粮油安全检测技术进展 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(4): 502−513. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040139

HU Wei, ZHANG Yun, JIANG Donglei, et al. Developments in Electrochemical Sensing Technologies for Grain and Oil Safety Detection[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(4): 502−513. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040139

· 专题综述 ·

基于电化学粮油安全检测技术进展

胡　维[1,2,3], 张　筠[1], 蒋栋磊[2], 周玉蓉[2,3], 张　娜[3], 王立峰[2,*]

（1.黑龙江东方学院食品工程学院, 黑龙江哈尔滨 150066;
2.南京财经大学食品科学与工程学院, 江苏南京 210023;
3.哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江哈尔滨 150028）

摘　要: 粮油中存在的霉菌毒素、重金属离子及农药残留等污染物对公共健康构成潜在威胁，迫切需要构建高效、灵敏的检测体系以保障粮油安全。本文系统综述了电化学传感技术在粮油污染物分析中的研究进展，讨论了其在霉菌毒素、重金属离子和农药残留检测中的应用路径，重点介绍了离子印迹聚合物、生物识别分子与纳米材料修饰电极在传感界面构建中的集成策略。针对复杂粮油基质中的检测难题，分析了构型优化、信号放大机制与识别选择性等关键技术突破，展示了电化学传感技术在实际应用中的潜力。本文还探讨了当前面临的挑战，包括复杂样品基质带来的干扰、传感器的长期稳定性和重复使用能力不足，以及成本限制问题。未来研究可聚焦于提升抗干扰能力、增强稳定性与可靠性，并在保证性能的前提下推动传感器的低成本设计，以促进电化学传感技术在粮油安全领域的实用化应用。

关键词: 粮油安全, 电化学检测, 纳米材料, 分子印迹, 生物传感器

中图分类号: TS207.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)04−0502−12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040139　　本文网刊:

Developments in Electrochemical Sensing Technologies for Grain and Oil Safety Detection

HU Wei[1,2,3], ZHANG Yun[1], JIANG Donglei[2], ZHOU Yurong[2,3], ZHANG Na[3], WANG Lifeng[2,*]

（1.College of Food Engineering, East University of Heilongjiang, Harbin 150066, China;
2.College of Food Science and Engineering, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023, China;
3.College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China）

Abstract: Mycotoxins, heavy metal ions, and pesticide residues present in grain and oil products pose potential threats to public health, highlighting the urgent need for the development of efficient and sensitive detection systems to ensure food safety. In this review, recent advances in electrochemical detection techniques for analyzing such contaminants in grain and oil matrices are systematically summarized. The application pathways for electrochemical sensing of mycotoxins, heavy metals, and pesticide residues are discussed, with particular emphasis placed on the integrated strategies involving ion-imprinted polymers, biomolecular recognition elements, and nanomaterial-modified electrodes for constructing functional sensing interfaces. Key technical breakthroughs in sensor configuration optimization, signal amplification mechanisms, and selective recognition are analyzed in the context of overcoming challenges posed by complex grain and oil matrices. Furthermore, current limitations—including sample matrix interferences, insufficient long-term stability, limited reusability, and high cost —are also discussed. Future research directions may focus on enhancing anti-interference capability, improving stability and reliability, and developing cost-effective sensor designs, to promote the practical application of electrochemical sensing technologies in grain and oil safety monitoring.

Key words: grain and oil safety; electrochemical detection; nanomaterials; molecular imprinting; biosensor

收稿日期: 2025−04−14

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目（LH2024C072）; 国家自然科学基金面上项目（32172297）; 江苏高校优势学科建设工程资助项目（PAPD）; 江苏省现代农业重点项目（BE2022317, BE2023358）; 黑龙江东方学院食品工程学院科研创新平台项目（HDFSP250201C）。

作者简介: 胡维（1982−）（ORCID: 0009−0000−4514−5295）, 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 食品安全检测, E-mail: awei1234@163.com。

*** 通信作者:** 王立峰（1977−）（ORCID: 0000−0002−0443−9649）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品安全与食品化学, E-mail: wanglifeng_8@163.com。

粮油作为人们日常饮食中不可或缺的基础食品，其安全性直接关系到公众的身心健康和国家的稳定[1−2]。目前，重金属、霉菌毒素和农药残留已成为威胁粮油安全的主要污染物。工业排放、农业灌溉等人为活动导致的重金属污染，易引起铅、镉、汞、砷等元素在作物中的富集，增加致癌与神经毒性风险[3]。霉菌毒素由真菌在粮油作物生长、收储过程中产生，具有较强的毒性和致癌性，污染问题在玉米、水稻、小麦、花生等作物中日益突出[4]。此外，草甘膦等农药的广泛使用亦带来残留隐患，其致癌潜力已被广泛关注[5]。

霉菌毒素、重金属离子和农药残留广泛存在于粮油中，且具有显著危害性，因此构建高效的检测技术对保障食品安全和公众健康具有重要意义。霉菌毒素的检测主要依赖于高效液相色谱-质谱联用技术（Liquid Chromatography–Mass Spectrometry，LC-MS）和酶联免疫吸附法（Enzyme-Linked Immunosorbent Assay，ELISA）；重金属离子检测多采用原子吸收光谱法（Atomic Absorption Spectrometry，AAS）和电感耦合等离子体质谱法（Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry，ICP-MS）；农药残留则通常通过气相色谱-质谱联用技术（Gas Chromatography–Mass Spectrometry，GC-MS）和 LC-MS 进行分析[6−9]。尽管上述方法具有灵敏度高、准确性强等优势，但大多依赖昂贵仪器、繁琐的样品前处理流程以及专业人员操作，难以满足现场快速检测和应急响应的实际需求。因此，开发操作简便、响应迅速、成本可控的检测手段成为当前研究热点。其中，电化学检测方法因具备高灵敏度、快速响应、易集成及便携性等优势，显示出在粮油污染物现场快速筛查中的巨大应用潜力。

电化学检测技术泛指基于电化学反应实现物质分析的手段，包括但不限于电极分析、离子选择电极、电化学光谱分析、电分析化学等；而电化学传感技术则是其重要分支，通常指利用传感元件（如修饰电极）对特定物质进行识别并将其转化为可测电信号的技术体系。电化学传感器可以通过直接检测污染物的电化学行为，快速提供检测结果，尤其适用于重金属污染、霉菌毒素、农药残留及其他污染物的现场检测[10]。电化学传感技术的高度灵活性与可定制性使其能够根据不同污染物类型进行功能化修饰，如生物材料[11−12]、无机纳米材料[13−14]、分子印迹[15−16] 以及材料的多重组合应用[17−19]，以实现更具针对性和更高效率的检测[20]（图 1）。电化学传感技术在粮油安全保障中有着独特的优势，特别是对于需要实时、高效监控的生产、储存和运输环节，有助于提升粮油安全管理的整体水平。综上，本文围绕电化学传感技术在粮油污染物检测中的多种策略展开综述，涵盖无修饰电极、分子印迹材料、生物识别元件（抗体、核酸、细胞）及无机纳米材料（纳米粒子与纳米通道）的最新应用，结合多功能材料的协同构建，总结了其在复杂食品基质下的适应性与发展潜力，旨在为相关技术的实用化推广与工程应用提供理论基础与技术参考。



图 1　电化学传感器检测污染物的示意图

Fig.1　Schematic of electrochemical sensor for pollutant detection

1　电化学传感技术的基础原理

电化学传感技术通常依赖于电解池中的三电极系统，包括工作电极（Working Electrode，WE）、参比电极（Reference Electrode，RE）和对电极（Counter Electrode，CE）。在电化学工作站的控制下，通过电位器调节施加在工作电极上的电势，产生特定的电化学反应，用于分析目标污染物。工作电极与样品溶液直接接触，是反应发生的主要位置，而参比电极用于提供稳定的参考电位，确保测量的准确性，对电极用于提供和接收电流以保持体系的电荷平衡[21]。

在电化学反应过程中，目标物质与工作电极上的识别单元发生特定的氧化还原反应，产生电流或电压信号。这些信号由电极差分电流/电压放大器放大，然后由计算机进行数据分析和曲线拟合，最后得出目标物质的浓度信息[22]。为了提高电化学检测的灵敏

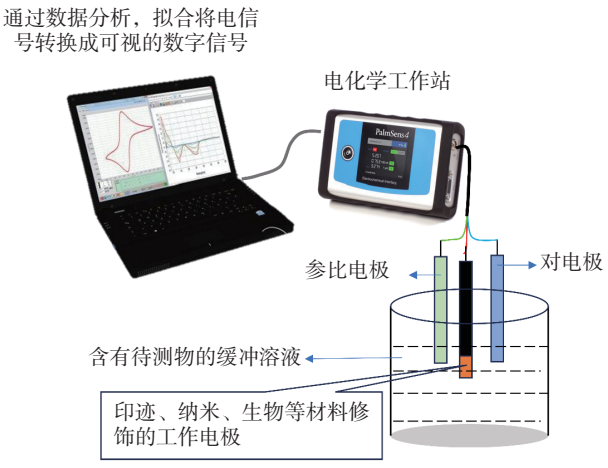


图 2　电化学检测的一般设置

Fig.2　General setup for electrochemical detection

度、选择性和稳定性，通常在工作电极表面修饰识别单元，包括分子印迹材料、无机纳米材料、生物材料等[23−25]（图 2）。这些识别单元能够选择性地与目标污染物相互作用，从而提高检测的准确性和效果。

2 基于电化学的粮油安全检测技术

2.1 无修饰工作电极检测应用

原始工作电极未进行任何表面修饰时，可以利用检测物本身的电化学活性特性进行直接检测。一些具有电活性基团的分子，如酚类化合物[26]、醇类化合物[27]、醛类化合物[28] 以及某些金属离子[29]，在特定电位条件下能够通过电子转移过程发生氧化还原反应，从而生成显著的电化学信号。这种检测方法依赖目标物的分子结构与氧化还原特性的固有关联，通过精确选择电位窗口实现高灵敏度的检测。无修饰工作电极传感器在粮油检测中的应用情况如表 1 所示。

尽管未修饰电极具有操作简便和成本低廉的优势，但其在复杂基质中检测微量目标物时存在显著局限性，主要表现为灵敏度和选择性不足。这是由于未修饰电极表面反应位点稀缺，导致电化学信号较弱且容易受到干扰。此外，目标物的电化学响应通常伴随表面吸附或污染，进而影响信号的稳定性与检测精度。因此，为提升电化学传感器的性能，采用特殊材料修饰电极成为常见且有效的手段。通过选择合适的修饰材料，不仅可以增加反应位点，促进电子转移，还能显著提高传感器的灵敏度与选择性，尤其在粮油安全检测中，修饰电极的应用能够有效应对复杂样本中的干扰。

2.2 分子印迹材料应用

分子印迹聚合物（Molecularly Imprinted Polymer, MIP）通过将待测物质作为模板，与交联剂和功能单体共同聚合，去除模板后形成与目标物质在形状、大小及官能团上高度匹配的孔穴结构，从而赋予其极高的特异性识别能力[34]（图 3a）。基于这一原理，分子印迹传感器能够通过 MIP 与目标物的特异性结合反应，转化为电化学信号，进而实现对食品中污染物的精确检测。由于 MIP 的卓越选择性，分子印迹传感器在小分子物质检测中表现出色，已广泛应用于食品中的色素[35]、农药残留[36]、抗生素[37] 及其他食源性有害物质[38−39] 的痕量检测。然而，尽管其在食品检测中得到广泛应用，分子印迹传感器在粮油检测领域的实际应用仍较为有限，这一领域有待进一步研究和探索。表 2 展示了分子印迹传感器在粮油检测中的应用情况。

分子印迹电化学传感器在粮油检测的研究中展现了显著的优势。以邻苯二甲酸二异壬酯

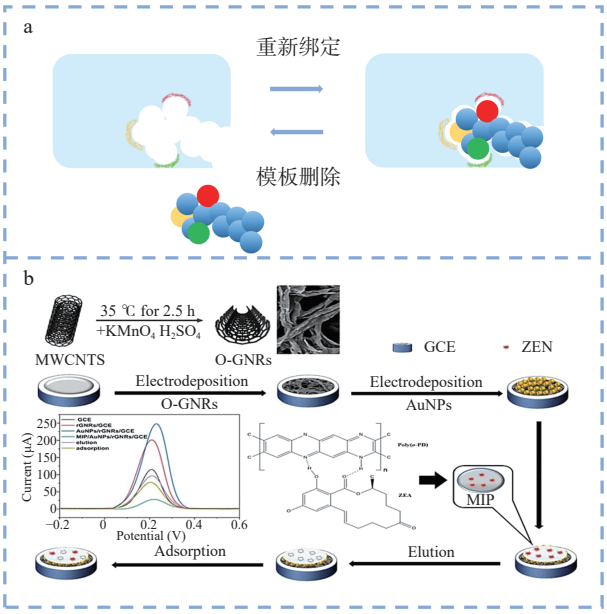


图 3 分子印迹材料工作原理示意图(a)和用于检测 ZEN 的分子印迹电化学传感器(b)[41]

Fig.3 Schematic of the working principle of molecular imprinting materials (a) and molecularly imprinted electrochemical sensor for the detection of zearalenone (b)[41]

表 1 无修饰工作电极传感器在粮油检测中的应用

Table 1 Application of unmodified working electrode sensors in grain and oil detection

电极	来源	分析物	线性范围	检测线	参考文献
玻碳电极	玉米胚芽油	植物甾醇	160~800 μg/mL	8.8 μg/mL	[30]
玻碳电极	紫小麦	烷基间苯二酚	2.5~50 μmol/L	5.78×10^{-7} mol/L	[31]
汞电极	食用油	铜、锌、铅	–	–	[32]
汞电极	糙米粉、全麦粉	镉、铅	–	镉0.005 mg/kg 铅0.002 mg/kg	[33]

注：“–”表示无数据；表3同。

表 2 分子印迹传感器在粮油检测中的应用

Table 2 Applications of molecular imprinting sensors in grain and oil detection

印迹材料	来源	分析物	线性范围	检测线	参考文献
DINP-MIP	食用油	PAEs	0.05×10^{-6}~0.7×10^{-6} mol/L	0.117 mg/kg	[40]
MIP/Mn-CeO2	小麦、大麦	DON	0.01~50 ng/mL	0.003 ng/mL	[15]
MIP/AuNPs/rGNRs	玉米粉	ZEN	1~500 ng/mL	0.34 ng/mL	[41]
MIP/PPy	大米饮料	Gly	2.5~350 ng/mL	1.94 ng/mL	[42]

（Diisononyl Phthalate, DINP）为目标物，通过 MIP 的自由基聚合制备，构建的传感器吸附容量高达 8.61 mg/g，是非印迹聚合物（Non-Imprinted Polymer, NIP）的两倍以上，检出限低至 0.117 mg/kg，在食用油样品中的加标回收率为 104.9%~106.6%，验证了其对塑化剂检测的可靠性[40]。研究者针对隐蔽毒素脱氧雪腐镰刀菌烯醇-3-葡萄糖苷（Deoxynivalenol-3-glucoside, D3G），开发了一种基于表面功能单体导向策略的 MIP 传感器，结合 Mn-CeO_2 的催化特性，实现了 0.003 ng/mL 的超低检出限，能够有效区分复杂样品中的前体毒素脱氧雪腐镰刀菌烯醇（Deoxynivalenol, DON）[15]。在玉米赤霉烯酮（Zearalenone, ZEN）的检测中（图 3b），利用还原石墨烯纳米带（Reduced Graphene Nanoribbons, rGNRs）和金纳米粒子（Gold Nanoparticles, AuNPs）的协同放大效应，开发的传感器在 1~500 ng/mL 范围内表现出优异的线性响应，检出限达 0.34 ng/mL，适用于粮油样品的精确分析[41]。此外，通过在聚吡咯纳米管（Polypyrrole Nanotubes, PPy）表面印迹草甘膦（Glyphosate, Gly）位点制备的 MIP 传感器，在 2.5~350 ng/mL 范围内实现了稳定检测，检出限为 1.94 ng/mL，并成功应用于橙汁和大米饮料样品[42]。这些研究展示了分子印迹电化学传感器在粮油中塑化剂、真菌毒素和农药残留检测中的潜力，为复杂样品中痕量目标物质的精准分析提供了可靠工具。

分子印迹电化学传感器在粮油中痕量污染物检测方面展现出较高的选择性和灵敏度，尤其在应对复杂基质干扰方面具有独特优势。尽管已有多种构型实现了对塑化剂、真菌毒素和农药残留的高效检测，但当前研究多集中于实验室验证，尚缺乏通用性强、可规模化的应用体系。未来应加强对印迹位点结构优化、传感界面协同功能设计及多组分识别能力的研究，推动其向标准化、实用化方向发展。

2.3　生物传感材料应用

电化学生物传感器通过将生物识别信号转换为数字电信号，实现对目标物质的检测并触发化学反应，从而实现样品的定量或半定量分析[43]。在这一过程中，生物识别元件和电极材料是关键组成部分（如图 4a 所示）。电化学生物传感器为粮油中真菌毒素和重金属等有害物质的检测提供了潜在的替代方案。根据固定在电极表面的识别分子类型，电化学生物传感器主要分为抗体型、核酸型和细胞型传感器[45]。表 3 总结了电化学生物传感器在粮油检测中的最新应用。

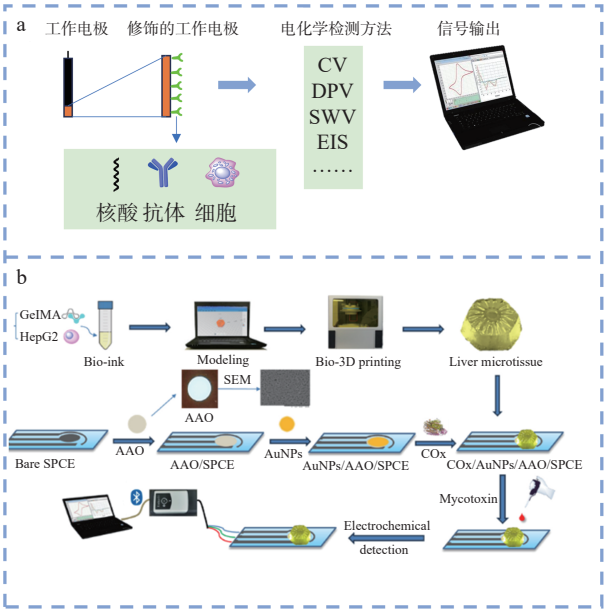


图 4　电化学生物传感器工作原理（a）和用于检测 DON 的细胞电化学生物传感器（b）示意图[44]

Fig.4　Schematic of the working principle of electrochemical biosensors (a) and cell-based electrochemical biosensor sensor for DON detection (b)[44]

2.3.1　电化学免疫生物传感器　电化学免疫生物传感器结合了抗体分子与电化学技术，已成为分析技术中的重要组成部分[46]。目前，许多针对真菌毒素检测的生物传感器均基于免疫生物传感器技术[47]。随着免疫学理论的不断发展，各种新技术的出现极大地改善了抗原、抗体及大分子结构与功能的特性，进一步验证了免疫生物传感器作为成熟技术的可靠性。免疫学方法通常依赖于靶分子与免疫球蛋白的特异性

表 3　电化学生物传感器在粮油检测中的最新应用

Table 3　Recent applications of electrochemical biosensors in grain and oil detection

生物传感器	来源	分析物	线性范围	检测线	参考文献
抗体	花生油、菜籽油	苯并（a）芘（BaP）	0.1~100 ng/mL	0.03 ng/mL	[67]
核酸	玉米	AFB1	1.0 pg/mL~1.0 μg/mL	0.33 pg/mL	[59]
抗体	花生油、玉米油、橄榄油	AFB1	0~20 ng/mL	0.015 ng/mL	[50]
抗体	小麦	DON	0.002~80 ng/mL	0.5 pg/mL	[51]
核酸	花生油、玉米粉	ZEN	100 fg/mL~50 ng/mL	89 fg/mL	[60]
抗体	玉米、小麦、面粉、大米	DON	10~107 pg/mL	4.5 pg/mL	[52]
抗体	小麦粉、米粉	DON	0.5~5000 pg/mL	0.0166 pg/mL	[53]
核酸	玉米粉	ZEN	10^{-4}~10^{3} ng/mL	4.57×10^{-6} ng/mL	[61]
细胞	水稻	Cd^{2+}, Hg^{2+}, Pb^{2+}	Cd^{2+} 5~160 μmol/L Hg^{2+} 5~160 μmol/L Pb^{2+} 10~3000 μmol/L	–	[66]
细胞	谷物	DON	2~40 μg/mL	1.229 μg/mL	[44]

结合[48]。其检测原理基于抗原-抗体相互作用，当反应达到平衡时，生物信号转化为可测量的电信号。在一定浓度范围内，信号的大小与目标分析物呈线性关系，能够在电化学测量中实现对目标物质的精准分析[49]。免疫反应的高选择性使得免疫传感器具有极强的特异性识别能力，这是其主要优势。

电化学免疫生物传感器在 AFB_1 和 DON 等农产品毒素检测中进展显著。研究者开发了一种基于电化学修饰碳布（Electrochemically Modified Carbon Cloth, EMCC）电极的免疫生物传感器，结合交联邻氨基硫酚功能化金纳米颗粒（o-ATP@AuNPs）和普鲁士蓝（Prussian Blue, PB）复合层，显著提高了传感器的灵敏度和稳定性，能够检测 0~20 ng/mL 范围内的 AFB_1，检测限达到 0.015 ng/mL[50]。另有研究基于金纳米粒子与 BPMWCNTs-COOH 纳米复合材料，构建了一种用于小麦粉中 DON 的电化学免疫生物传感器，利用 AuNPs-BP-MWCNTs-COOH 复合材料的良好电子传递能力和蛋白结合能力，实现了 0.002~80 ng/mL 范围内的高灵敏度检测，检测限为 0.5 pg/mL[51]。针对 DON 的检测，还开发了一种基于镍铁双金属普鲁士蓝类似物（Nickel-Iron Prussian Blue Analogue, Ni-Fe-PBA）的免疫生物传感器，利用 Ni-Fe-PBA 纳米酶的过氧化物酶样活性，在过氧化氢存在下实现了高灵敏度的 DON 检测，其检测限为 4.5 pg/mL[52]。此外，为进一步提升灵敏度，有研究者设计了一种比率分析法，结合铁基金属有机框架（Metal–Organic Framework, MOF）材料与金纳米粒子，利用免疫反应引起的指示信号变化和内部参考信号的比率，实现了 DON 的可重复和灵敏检测，检测限为 0.0166 pg/mL[53]。上述研究表明，电化学免疫生物传感器在食品安全检测中具备重要价值，尤其适用于农产品中有害物质的快速、灵敏和可靠识别。

2.3.2 电化学核酸传感器 核酸（Nucleic Acid, NA）是大多数生物体内的关键生物分子[54]。随着基因组研究的进展和纳米生物技术的发展，核酸作为一种优异的生物识别材料，其应用逐渐扩展到元素特异性识别领域[55]。与抗体相比，核酸分子在与电化学传感技术集成时具有明显优势，主要体现在其小尺寸和良好的化学稳定性，且能够超越传统核酸的固有作用[56]。基于核酸的电化学生物传感器通常通过将核酸探针固定在换能器表面，检测其与分析物之间的相互作用，并通过这些相互作用引起化合物结构的变化，从而改变电化学性能。目前，设计和合成了多种功能核酸探针，典型的包括 DNA 探针和适体。电化生物学传感器在研究核酸与各类生物分子相互作用时提供了丰富的应用前景，并在检测灵敏度和便捷性方面表现出显著优势[57]。由于其小型化及与微加工技术和简易仪器的兼容性，基于核酸的电化学生物传感器在粮油真菌毒素检测中越来越受到关注[58]。然而，DNA 探针和适体的低电化学活性限制了其应用效果，因此在电化学生物传感器的设计中，通常通过结合纳米材料来增强电化学活性。

研究者提出了一种基于二茂铁标记适配体的电化学生物传感器用于灵敏检测 AFB_1。该传感器通过在金电极上组装巯基化互补 DNA（cDNA）、巯基己醇（6-Mercapto-1-hexanol, MCH）和二茂铁修饰的 AFB_1 适配体（Fc-Apt），利用目标物 AFB_1 与适配体的特异性结合引起信号变化，从而实现对 AFB_1 的灵敏检测，检测范围从 1.0 pg/mL 到 1.0 μg/mL[59]。对于 ZEN 的检测，研究者开发了基于适体的电化学生物传感器，并结合核酸外切酶 III 辅助的靶标回收和 DNA 酶催化的底物切割策略，成功实现了 100 fg/mL~50 ng/mL 范围内的高灵敏度检测，最低检测限为 89 fg/mL，并在谷物样品分析中表现出与液相色谱法相当的结果[60]。此外，另一项研究构建了一种基于 Nb.BbvCl 触发的双足 DNA 步行策略的电化学适体生物传感器，用于超灵敏检测 ZEN。该传感器采用 Ce_3NbO_7/Au 空心纳米球作为电极修饰材料，PdNi@MnO_2/MB 作为信号标记，结合高比表面积和优异导电性能的材料，有效提升了检测性能，展现了优越的灵敏度和选择性[61]。通过这些创新设计，电化学适体生物传感器不仅提高了对真菌毒素的检测灵敏度和选择性，还扩展了其在食品安全领域的应用潜力。

2.3.3 细胞生物传感器 细胞是生物体的基本组成和功能单位。随着细胞培养技术和半导体微处理技术的进步，基于活细胞的生物传感器已经成为分析科学的新兴领域[62]。传统的生物分子如酶、抗体和 DNA，因其对靶分子的高度特异性，常用于生物传感器的识别受体[63]。然而，活细胞作为生物受体提供了一个有前途的替代方案，能够释放特异性的信号以应对不同的毒素[64]。不同类型的细胞可用于检测多种生物标志物，如细胞凋亡、生长因子分泌和蛋白质合成等，因此，基于细胞的生物传感器不仅能实时、快速、准确地监测细胞的生理活动，还能够检测目标物质的含量和生物毒性[65]。

基于细胞生物传感器的创新研究在重金属离子和霉菌毒素毒性检测中取得了显著进展。有研究开发了一种基于智能手机的电化学细胞生物传感器，通过还原氧化石墨烯（RGO）/硫化钼（MoS_2）复合材料提高了生物适应性和信号放大能力，利用微分脉冲伏安法（Differential Pulse Voltammetry, DPV）测定了 Cd^{2+}、Pb^{2+}、Hg^{2+}等对 HepG2 细胞的毒性，获得的 IC_{50} 值分别为 49.83、36.94 和 733.90 μmol/L，并揭示了不同重金属离子间的协同或拮抗作用[66]。其团队进一步开发了便携式微纳米通道 3D 打印肝脏微组织传感器（图 4b），采用纳米多孔阳极氧化铝（Anodic Aluminum Oxide, AAO）、AuNPs 和细胞色素 C 氧化酶修饰丝网印刷碳电极（Screen-Printed Carbon Electrode, SPCE），结合明胶甲基丙烯酸酯水

凝胶与肝细胞癌细胞，制备了高性能的 3D 打印生物墨水。该传感器实现了 DON 的灵敏检测，检测范围为 2~40 μg/mL，最低检测限为 1.229 μg/mL，展现了出色的线性响应和稳定性[44]。

从目前的研究进展来看，免疫生物传感器以其良好的特异性在复杂粮油基质中具有较高的应用价值，但抗体稳定性差、制备成本高的问题仍需克服；核酸生物传感器在灵敏度和可编程性方面表现突出，适用于多重污染物检测，但在实用化中仍受限于核酸探针的降解与非特异吸附等影响；而细胞生物传感器虽能真实反映毒性作用，但生物活性维护和响应时效尚待优化。未来研究应聚焦于识别元件的稳定性提升、生物传感平台的集成化和智能化设计，以及与样品预处理技术的协同优化，以推动电化学生物传感器在粮油安全检测领域从实验室研究走向规模化应用。

2.4　无机纳米材料应用

纳米尺度的粒子和通道表现出与宏观结构截然不同的理化性质。纳米粒子修饰工作电极不仅能够增加电极表面积，还能显著提高其导电性，已成为食品电化学检测研究中的重要方向[68]（图 5）。然而，纳米通道在电化学传感器中的应用，尤其是在食品安全检测领域，仍为新兴领域。表 4 总结了纳米材料传感器在粮油检测中的最新应用。

2.4.1　纳米粒子　各种纳米粒子（如金属、氧化物和半导体纳米粒子）在电化学分析仪器中得到了广泛应用，其功能主要体现在以下几个方面：a.生物分子的固定化，凭借其大比表面积，纳米粒子能够将生物受体牢固吸附在电极表面，同时保持其生物活性；b.电催化，利用其优异的催化性能促进化学反应；c.增强电子转移，通过作为氧化还原介体，加速电化学反应的进行；d.标记分子，凭借其小尺寸和可修饰性，在生物传感器中用作标记工具；e.作为反应物，利用其化学活性参与反应。这些特性使纳米粒子成为提升电

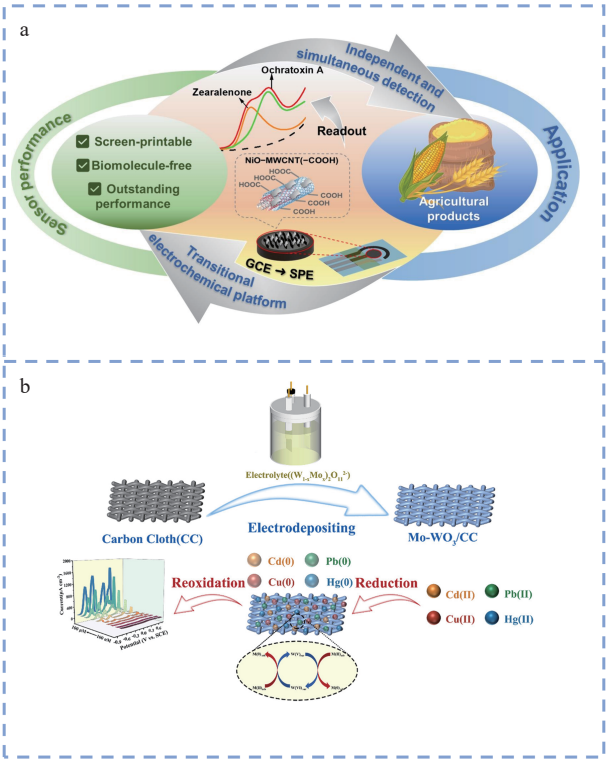


图 5　无机纳米材料示意图[69−70]

Fig.5　Schematic of inorganic nanomaterials[69−70]

化学分析性能的重要工具[71−73]。

ZEN 的污染对人类和动物健康构成严重威胁，快速检测技术的发展为其监测提供了新思路。一项研究利用离子注入技术将 AuNPs（5~10 nm）均匀修饰在丝网印刷电极表面，制备了高灵敏电化学传感器。该传感器展现了广泛的线性范围 10 ng/kg~10 mg/kg 和优异的检测限 1.1 ng/kg，成功用于玉米和燕麦样品中 ZEN 的检测[74]。另一项研究则开发了一种无生物分子电化学传感器（图 5a），通过氧化镍（NiO）和羧基化碳纳米管（MWCNT-COOH）的协同作用，实现了 ZEN 和赭曲霉毒素 A（Ochratoxin

表 4　纳米材料传感器在粮油检测中的最新应用

Table 4　Recent applications of nanomaterial sensors in grain and oil detection

纳米材料	来源	分析物	线性范围	检测线	参考文献
N-Cs—[BSMIM]HSO	油脂	BHT	1.5~25.0 μg/mL	0.34 μg/mL	[89]
Fe_3O_4 @Pt	油脂	BHT	0.5~35 μg/mL	0.214 μg/mL	[90]
Mo-WO_3	水稻、小米、玉米、小豆、绿豆、大豆	Cd^{2+}, Pb^{2+}, Cu^{2+}, Hg^{2+}	0.1~100.0 μmol/L	Cd^{2+} 14.7 nmol/L, Pb^{2+} 17.1 nmol/L, Cu^{2+} 11.2 nmol/L, Hg^{2+} 13.1 nmol/L	[70]
CeMOF@MWCNTs	水稻、玉米、小麦、高粱	Cd^{2+}, Pb^{2}	Cd^{2+} 10~1500 ppb; Pb^{2+} 4~1200 ppb	Cd^{2+} 2.2 ppb, Pb^{2+} 0.64 ppb	[91]
CFP/CoMOF/AuNPs/GSH	水稻、玉米、大豆	Cd^{2+}	1~20 μmol/L 1 nmol/L~1 μmol/L	1 nmol/L	[92]
ZIF-67@AMNFs	大米、高粱	Pb^{2+}, Cu^{2+}, Hg^{2+}	0.1~200 pmol/L	Pb^{2+} 0.01 pmol/L, Cu^{2+} 0.042 pmol/L, Hg^{2+} 0.031 pmol/L	[77]
NiO-MWCNT(-COOH)		ZEN OTA	ZEN 0.01~10.24 μg/mL OTA 0.04~10.24 μg/mL	ZEN 6 ng/mL OTA 15 ng/mL	[69]
AuNPs	玉米、燕麦	ZEN	10 ng/kg~10 mg/kg	1.1 ng/kg	[74]
VMSF/ITO	玉米、板栗	ZEN	1 pg/mL~1 μg/mL	1.2 fg/mL	[87]

注：BHT：2,6-二叔丁基对甲酚；N-Cs—[BSMIM]HSO：氮掺杂碳球—1-甲基-3-丁磺酸基咪唑硫酸氢盐；CFP碳纤维纸。

A, OTA)的同时电位分辨检测。传感器在 ZEN 和 OTA 的线性范围分别为 0.01~10.24 μg/mL 和 0.04~10.24 μg/mL, 检测限分别达到 6 ng/mL 和 15 ng/mL, 展现了良好的选择性、重现性和稳定性[69]。

此外, 电化学检测方法通过集成预富集步骤来提高重金属离子的检测性能, 尽管这也带来了一定的复杂性和能耗问题。为简化检测过程, 有研究者采用一步电沉积法在碳布上原位生长了 Mo 掺杂的 WO_3 电极(图 5b)。这种电极不仅能够直接同时检测 0.1~100.0 μmol/L 范围内的多种重金属离子, 还在 LOD 范围内表现出 11.2~17.1 nmol/L 的卓越灵敏度。凭借钼掺杂所引入的氧空位和 WO_3 的价态特性, 该电极能够精确检测多种食品样品中的重金属离子, 具有制备简单、响应快速、性能卓越的优势, 为便携式重金属离子检测装置的开发提供了新的可能[70]。

利用纳米复合材料提升检测性能的研究也不断推进。例如, 使用铜基金属有机框架材料与含羰基杂环的介孔氮化碳合成的纳米复合材料修饰电极, 构建了一种用于检测水环境中草甘膦的电化学传感器。该传感器采用 DPV 进行检测, 其工作原理为 Cu^{2+}与草甘膦发生络合反应, 引起电流响应降低。通过扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)、透射电子显微镜(Transmission Electron Microscope, TEM)等手段对材料进行系统表征, 证实了其良好的结构与性能。结果显示, 该传感器具有极高的灵敏度, 检出限低至 0.1576 pg/L, 线性范围为 10^{-6}~10^{-12} g/L, 对草甘膦具有优异的选择性。在实际水样分析中, 其回收率达 94%~107%, 体现了出色的准确性与实用性[75]。

纳米材料的引入提升了电化学传感器在食品安全检测中的性能, 体现在信号放大、靶向识别与多重检测能力的显著增强。通过构建功能化界面和优化电子传输路径, 实现了对多类污染物的高灵敏、快速检测, 为传感器的实用化与便携化奠定了基础。未来研究应聚焦纳米结构调控与界面反应机制, 推动其在复杂样品中的广泛应用与产业转化。

2.4.2 纳米通道 纳米通道结合电化学检测平台, 并结合先进的纳米加工技术, 显著提升了检测的灵敏度和特异性, 为提高食品安全检测的准确性和高效性开辟了新途径[76]。最新研究成果表明, 纳米通道与先进电化学技术的结合, 充分利用了纳米通道的封闭空间、卓越的机械性能、可调节的几何结构和表面特性[77]。此外, 纳米通道特有的空间限制效应[78] 显著提升了电化学反应的效率和速率。纳米通道与电化学分析技术创新性的融合, 已推动其在食品安全[79−81]、环境检测[82]、生物医学[83−84] 等关键领域成为研究重点, 展现出广泛的应用潜力与科研价值。尤其在食品安全检测方面, 纳米通道电化学传感技术凭借其能够快速且精准地识别食品中的微量有害物质的能力[85−86], 发挥着至关重要的公共健康保护作用。

有研究制作出一种基于纳米通道的电化学适体传感器, 用于 ZEN 的检测, 突出纳米通道在信号富集和放大中的关键作用。通过在氧化铟锡(Indium Tin Oxide, ITO)电极表面生长垂直有序介孔氧化硅薄膜(Vertically Ordered Mesoporous Silica Film, VMSF), 该传感器利用其规则的纳米通道结构对 $Ru(NH_3)_6^{3+}$ 实现选择性富集, 同时结合氧化石墨烯(Graphene Oxide, GO)形成的纳米复合探针, 显著增强了检测信号。当 ZEN 与适体结合后, 复合探针释放出自由的 $Ru(NH_3)_6^{3+}$, 在修饰电极处产生强氧化还原信号, 从而实现了 ZEN 的精确定量检测[87]。这一策略结合了纳米通道的信号富集优势和 GO 的高效吸附能力, 成功应用于玉米和板栗样品的 ZEN 分析。

此外, 另一项研究通过在 PPy@玉米芯多孔碳修饰的玻碳电极上沉积 ZrO_2 纳米粒子, 开发出一种灵敏检测食品中草甘膦残留的电化学传感器电极材料。玉米芯多孔碳的平均孔径为 4.07 nm, PPy@玉米芯多孔碳复合材料的高比表面积显著提高了 ZrO_2 的负载量, 从而增强了传感器的检测性能。该修饰电极用于草甘膦检测时, 展现出良好的线性范围(10~1000 μg/kg)与极低的检出限(24.4 ng/kg), 在实际稻谷样品中的回收率为 95.5%~99.1%[88]。

尽管纳米通道因其独特的结构在电化学检测中具有显著优势, 但其导电性较差等局限性限制了单一纳米通道材料的应用范围。因此, 纳米通道技术常与其他材料和方法相结合, 通过功能性复合材料的设计提升传感器的导电性、灵敏度和选择性。接下来, 将进一步探讨多种识别单元结合的典型应用案例, 为复杂食品污染物检测提供更多技术支持。

2.5 综合材料应用

在电化学检测中, 采用多种材料修饰工作电极已经成为常见的方法。这种方法通过综合利用每种材料的独特性质, 优化电极的性能, 以提高检测的灵敏度和选择性[93−95]。例如, 尽管纳米通道具有显著的尺寸效应, 但人工纳米通道通常存在导电性差的问题, 因此需要通过导电性优异且稳定的纳米材料进行修饰, 才能充分发挥其作用。同时, 免疫检测中使用的免疫物质也依赖于与高导电材料的结合, 以确保信号的有效传递和增强。不同材料的协同作用在粮油安全检测中展现出巨大的潜力, 使得电化学传感技术能够应对更为复杂和多样的分析任务, 提供更为可靠的检测平台。表 5 总结了综合材料传感器在粮油检测中的最新应用。

2.5.1 纳米通道与功能化材料的协同设计 基于纳米通道的电化学生物传感器在食品安全检测中展现出卓越的性能。有研究者利用 GO 和催化发夹组装(Catalytic Hairpin Assembly, CHA)策略, 开发了一种超灵敏的纳米通道生物传感器用于无标记 OTA 的检测。该传感器包括 GO 与 DNA 探针的协同作用, 通过 OTA 触发 CHA 回路生成大量双链 DNA

表 5　综合材料传感器在粮油检测中的应用

Table 5　Applications of composite material sensors in grain and oil detection

传感器	来源	分析物	线性范围	检测线	参考文献
SnO_2/SiC NCs HRP-GNPs-Ab	花生油、玉米油	AFB1	3.81 pg/mL~1 μg/mL	1.13 pg/mL	[102]
Au@Zr-MOF 核酸	玉米	AFB1	10^{-4}~10^{1} ng/mL	0.19 pg/mL	[103]
NF/wPLaE-CS/AuNPs/MWNT	大米	敌敌畏	10~100 μg/L	4 μg/L	[104]
AuPd NPs/UiO-66 核酸	饲料	TET	0.01~500 ng/mL	0.789 pg/mL	[100]
NH_2-MnO_2/Pd@Au NBs 核酸	玉米粉	ZEN	10^{-5}~10 ng·mL^{-1}	6.27×10^{-6} ng·mL^{-1}	[101]
GNUs-Apt-TAMRA	杂豆	ZEN	0.01~60 ng/mL	0.01 ng/mL	[99]
AuNPs/Co-MOF 核酸	大豆、花生、燕麦	AFB1	0.001~500 ng/mL	1.2×10^{-2} pg/mL	[98]
纳米通道 核酸	酒	OTA	10 pmol/L~1 μmol/L	6.2 pmol/L	[96]
适配体功能化VMSF纳米通道	花生、玉米	AFB1	3 pg/mL~3 μg/mL	2.3 pg/mL	[97]
Co_3O_4/MoS_2/Au 核酸	玉米粉	ZEN	1.0×10^{-10}~1.0×10^{-8} mol/L	1.95×10^{-9} mol/L	[105]

注：SnO_2/SiC NCs：二氧化锡 / 碳化硅空心球纳米链；HRP-GNPs-Ab：辣根过氧化物酶-金纳米颗粒-抗体；来源于植物的小麦酯酶（plant-esterase from wheat flour, wPLaE）；Tetracycline（TET）：四环素；Sea urchin gold nanoparticles（GNUs）：海胆金纳米颗粒。

（dsDNA），并利用仿生纳米通道中的聚乙烯亚胺（Polyethylenimine, PEI）和 Zr_4O_2 涂层检测 dsDNA 浓度，实现了低至 6.2 pmol/L 的检测限，在红葡萄酒样品分析中表现优异[96]。此外，基于 VMSF 纳米通道的特异性适配体功能化和氧化还原探针$Ru(NH_3)_6^{3+}$的扩散行为，开发了一种用于 AFB1 检测的高灵敏电化学适配体生物传感器。VMSF 的阳离子选择透过性可静电预富集 $Ru(NH_3)_6^{3+}$并放大电化学信号，而 AFB1 的加入通过适配体结合产生空间位阻效应，导致信号降低，从而实现 AFB1 的定量检测，检测限低至 2.3 pg/mL，成功应用于花生和玉米样品的实际分析[97]。以上方法展现了纳米通道与功能化纳米材料结合的强大潜力，为食品安全检测提供了创新路径。

2.5.2　纳米材料与核酸技术的组合策略　近年来，纳米材料与核酸技术的结合在电化学生物传感器的开发中展现了巨大潜力，特别是在食品安全检测领域。AFB1 作为一种强致癌性污染物，其检测具有重要意义。通过金纳米粒子/钴基金属有机框架（AuNPs/Co-MOF）修饰材料，结合无酶信号放大策略，开发的电化学适配体生物传感器能够显著增强信号响应，并在优化条件下实现 0.001~500 ng/mL 的检测范围和低至 1.2×10^{-2} pg/mL 的检测限，展示了出色的灵敏性和选择性[98]。另一项基于海胆金纳米粒子与 ZEN 适配体的拉曼传感器，采用了核酸适体的构象变化原理，实现在 0.01~60 ng/mL 范围内的线性响应，并达到了 0.01 ng/mL 的检测限，证明了其在食品中的应用潜力[99]。此外，利用 MXene-Au 纳米复合材料和信号探针 MB/AuPd 纳米复合材料/UiO-66，开发了用于四环素检测的电化学生物传感器。通过双重信号放大策略，该传感器不仅提高了信号响应，而且具有 0.01~500 ng/mL 的检测范围和低至 0.789 pg/mL 的检测限，进一步提升了其在食品安全检测中的应用价值[100]。另有研究结合 CRISPR/Cas 12a 系统与 DNAzyme 扩增的级联双酶转化策略，构建了一种用于 ZEN 检测的超灵敏电化学适体生物传感器。通过优化电极修饰材料，如 NH_2-MnO_2/Pd@Au NBs 纳米复合材料，成功实现了 1×10^{-5}~10 ng·mL^{-1} 的广泛线性范围，检测限为 6.27×10^{-6} ng·mL^{-1}，展现出良好的稳定性和选择性[101]。这些研究表明，纳米材料与核酸技术的综合应用能够有效提升电化学生物传感器的灵敏度和选择性，为食品安全检测提供创新解决方案。

2.5.3　抗体与多功能纳米材料的协同放大　通过结合抗体探针和二氧化锡/碳化硅空心球纳米链、聚苯胺纳米线以及金纳米颗粒等高性能纳米材料，研究者构建了一种具有高灵敏度的 AFB1 直接竞争电化学生物传感器。纳米材料的优异特性为抗体提供了稳定的修饰平台，并显著放大了电化学信号，从而提高了传感器的检测性能。实验结果表明，该传感器对 AFB1 的检测线性范围为 3.81 pg/mL~1.00 μg/mL，检出限低至 1.13 pg/mL，展现出极高的灵敏度和可靠性[102]。在食用油的检测中，生物传感器表现出良好的稳定性和特异性，添加回收率为 84.6%~107.6%，变异系数为 5.42%~10.49%。这种结合抗体与纳米材料的策略，为快速筛查食用油中的黄曲霉毒素 B1 提供了高效可靠的解决方案，突显了电化学传感技术在食品安全检测中的应用潜力。

3　结论与展望

本文综述了电化学传感技术在粮油安全领域中的最新应用进展，重点讨论了霉菌毒素、重金属离子和农药残留等常见污染物的电化学检测方法。通过采用分子印迹材料、无机纳米材料和生物材料等创新设计，电化学传感器在提高检测灵敏度、选择性及

响应速度方面取得了显著成效。分子印迹材料通过特异性识别增强了对目标污染物的选择性，而无机纳米材料凭借其较大的比表面积及独特的物理化学性质，显著提升了传感器的信号放大效应和灵敏度。同时，生物材料的引入不仅提升了传感器的生物兼容性，也优化了其在复杂食品基质中的检测性能。这些创新材料的应用，推动了电化学传感器在粮油安全监测中的广泛应用，展示了较高的灵敏度、快速响应和较强的选择性。

尽管电化学传感器在粮油安全监测中展示了优越性能，但仍面临一些需要解决的问题。首先，样品基质干扰是影响传感器准确性和可靠性的重要因素之一，尤其是在复杂食品基质中，如何减少干扰并提高传感器的抗干扰能力，仍是当前技术面临的主要挑战。其次，尽管许多研究展示了高灵敏度和选择性的传感器，但其在长期使用中的稳定性和再现性尚需进一步验证。尤其是在不同环境条件下，传感器的可靠性和持久性仍有待改进。此外，传感器的成本问题也限制了其大规模应用，如何在保证性能的前提下降低生产成本，仍是未来发展的关键。

随着电化学传感器设计的不断优化和材料性能的持续提升，电化学传感技术有望在粮油安全领域发挥更加重要的作用，特别是在现场实时监测和大规模粮油质量控制方面。通过进一步的技术创新和材料研发，电化学传感器将在提高检测精度、灵敏度和抗干扰能力方面取得突破，为粮油安全提供更加高效、精确和可靠的检测手段。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] HU X, ZHU B, ZHANG B K, et al. Do internal and external risk spillovers of the food system matter for national food security?[J]. Economic Modelling, 2024, 136: 106747.

[2] JANDAGHIAN-BIDGOLI M, KAZEMIAN E, SHATERIAN N, et al. Focusing attention on the important association between food insecurity and psychological distress: A systematic review and meta-analysis[J]. BMC Nutrition, 2024, 10(1): 118.

[3] ZAMORA-LEDEZMA C, NEGRETE-BOLAGAY D, FIGUEROA F, et al. Heavy metal water pollution: A fresh look about hazards, novel and conventional remediation methods[J]. Environmental Technology & Innovation, 2021, 22: 101504.

[4] ZHANG Chenchen, QU Zheng, HOU Jie, et al. Contamination and control of mycotoxins in grain and oil crops[J]. Microorganisms, 2024, 12(3): 567.

[5] CENTNER T J, RUSSELL L, MAYS M. Viewing evidence of harm accompanying uses of glyphosate-based herbicides under US legal requirements[J]. Science of the Total Environment, 2019, 648: 609−617.

[6] LI K J, YANG H Y, YUAN X, et al. Recent developments of heavy metals detection in traditional Chinese medicine by atomic spectrometry[J]. Microchemical Journal, 2021, 160: 105726.

[7] ABDUL R S, AHMAD N I, MOHD S R J, et al. A scoping review on fungus and mycotoxin studies in the building's environment: Mycotoxin analysis by mass spectrometry[J]. International Journal of Analytical Chemistry, 2024, 2024(1): 8581029.

[8] CHARUSALAIPONG P, GORDON M J, CANTLAY L, et al. Frequent dietary multi-mycotoxin exposure in UK children and its association with dietary intake[J]. Toxins, 2024, 16(6): 251.

[9] GOTT P N, ZHENG L, CORRAY S, et al. PSV-20 Mycotoxin contamination trends in United States corn grain: 2019-2023[J]. Journal of Animal Science, 2024, 102(Supplement_2): 315−316.

[10] WANG K, LIN X G, ZHANG M X, et al. Review of electrochemical biosensors for food safety detection[J]. Biosensors, 2022, 12(11): 959.

[11] PAN Y, WANG L, CHEN S H, et al. A target-triggered ultrasensitive aptasensor for simultaneous detection of Cd^{2+} and Hg^{2+} using MWCNTs-Au NPs modified electrode[J]. Food Chemistry, 2024, 440: 138185.

[12] YANG Yongjie, LI Weixuan, LIU Juewen. Review of recent progress on DNA-based biosensors for Pb^{2+} detection[J]. Analytica Chimica Acta, 2021, 1147: 124−143.

[13] ALBALAWI I, HOGAN A, ALATAWI H, et al. A novel comparative study for simultaneous determination of Cd (II) and Pb (II) based on ruthenium complex-nanoparticles-nafion modified screen-printed gold electrode[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2023, 380: 133273.

[14] LI B, XIE X M, MENG T H, et al. Recent advance of nanomaterials modified electrochemical sensors in the detection of heavy metal ions in food and water[J]. Food Chemistry, 2024, 440: 138213.

[15] NIE D X, ZHU X T, LIU M H, et al. Molecularly imprinted polymer-based electrochemical sensor for rapid detection of masked deoxynivalenol with Mn-doped CeO_2 nanozyme as signal amplifier[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 477: 135366.

[16] YANG Y, REN M Y, XU X G, et al. Recent advances in simultaneous detection strategies for multi-mycotoxins in foods[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(12): 3932−3960.

[17] WU Y F, SHI Z X, LIU J J, et al. Simple fabrication of electrochemical sensor based on integration of dual signal amplification by the supporting electrode and modified nanochannel array for direct and sensitive detection of vitamin B_2[J]. Frontiers in Nutrition, 2024, 11: 1352938.

[18] YANG W Q, XU J J, YAO Q D, et al. Electrophoretic deposition of Ru $(bpy)_3^{2+}$ in vertically-ordered silica nanochannels: A solid-state electrochemiluminescence sensor for prolidase assay[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2024, 247: 115967.

[19] JIANG D L, FENG Z, JIANG H, et al. Biomimetic gastric microtissue electrochemical biosensors for ovalbumin detection[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2024: 117103.

[20] MCCONNELL E M, COZMA I, MOU Q, et al. Biosensing with dnazymes[J]. Chemical Society Reviews, 2021, 50(16): 8954−94.

[21] BANSOD B, KUMAR T, THAKUR R, et al. A review on various electrochemical techniques for heavy metal ions detection with different sensing platforms[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2017, 94: 443−55.

[22] 王艳, 包士雷, 孙立瑞, 等. 电化学技术在食品检测中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(3): 295−306. [WANG Y, BAO S L, SUN L R, et al. Recent advances in the application of electrochemical techniques in food detection[J]. Food Science, 2024,

45(3)：295−306.］
［23］ TANG L W, ALIAS Y, JIWANTI P K, et al. Recent advances in amino acid-based electrode fabrication strategies for enhanced electrochemical detection of metal ions[J]. Trends in Environmental Analytical Chemistry, 2024, 41: e00225.
［24］ MCCLEMENTS J, SEUMO T P M, VILELA STRAPAZON A L, et al. Immobilization of molecularly imprinted polymer nanoparticles onto surfaces using different strategies: Evaluating the influence of the functionalized interface on the performance of a thermal assay for the detection of the cardiac biomarker troponin I[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(24): 27868−27879.
［25］ ZHOU Y L, YIN H S, ZHAO W W, et al. Electrochemical, electrochemiluminescent and photoelectrochemical bioanalysis of epigenetic modifiers: A comprehensive review[J]. Coordination Chemistry Reviews, 2020, 424: 213519.
［26］ HANSSEN B L, SIRAJ S, WONG D K. Recent strategies to minimise fouling in electrochemical detection systems[J]. Reviews in Analytical Chemistry, 2016, 35(1): 1−28.
［27］ YAN Wenyan, HUANG Qinle, ZHOU Lin, et al. Direct photoelectrochemical detection of ethanol in complex biological sample[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2025, 268: 116915.
［28］ ZHAO Xiaoqian, LI Meng, SUN Kunhui, et al. Electrochemical deoxygenative Homo-couplings of aromatic aldehydes[J]. Chemical Communications, 2023, 59(87): 13062−13065.
［29］ MOLINERO-ABAD B, IZQUIERDO D, PÉREZ L, et al. Comparison of backing materials of screen printed electrochemical sensors for direct determination of the sub-nanomolar concentration of lead in seawater[J]. Talanta, 2018, 182: 549−557.
［30］ 张媛媛, 吕双双, 李书国. 电化学分析法快速测定粮油食品中的总植物甾醇含量[J]. 现代食品科技, 2015, 31(5): 297−302.［ZHANG Y Y, LÜ S S, LI S G. Rapid determination of total plant sterol content in grains and oils by electrochemical analysis[J]. Modern Food Science & Technology, 2015, 31(5): 297−302.］
［31］ 杨新童, 闫苍, 李书国. 电化学分析法快速测定紫小麦中的烷基间苯二酚[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(3): 148-53.［YANG X T, YAN C, LI S G. Rapid determination of alkylresorcinols in purple wheat by electrochemical analysis[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(3): 148–153.］
［32］ 殷勇, 薄娟娟, 于慧春, 等. 基于信号降噪与支持向量机的食用油中铜锌铅电化学检测[J]. 核农学报, 2013, 27(5): 641−646.［YIN Y, BO J J, YU H C, et al. Electrochemical detection of copper, zinc, and lead in edible oil based on signal denoising and support vector machine[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2013, 27(5): 641−646.］
［33］ 田巍, 袁华山, 白福军, 等. 粮食中重金属铅镉电化学快速检测方法研究[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(8): 244−249.［TIAN W, YUAN H S, BAI F J, et al. Rapid electrochemical detection method for heavy metals lead and cadmium in grain[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(8): 244−249.］
［34］ YOSHIKAWA M, THARPA K, DIMA S O. Molecularly imprinted membranes: past, present, and future[J]. Chemical Reviews, 2016, 116(19): 11500−11528.
［35］ WU L, WU T, ZENG W, et al. A new ratiometric molecularly imprinted electrochemical sensor for the detection of Sunset Yellow based on gold nanoparticles[J]. Food Chemistry, 2023, 413: 135600.
［36］ FAROOQ S, CHEN B C, GAO F K, et al. Development of molecularly imprinted polymers for fenthion detection in food and soil samples[J]. Nanomaterials, 2022, 12(13): 2129.
［37］ FU R Y, HAI X Q, LU Q X, et al. Molecularly imprinted polymer gel with superior recognition and adsorption capacity for amphenicol antibiotics in food matrices[J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141255.
［38］ KUMAR V, KUTNER W. Advancements and potentials of molecularly imprinted polymer-based sensors for lysozyme determination in food and clinical samples[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 499: 155828.
［39］ WANG Y, WEI D Z, WANG Y, et al. Recent progress of molecularly imprinted technique for the detection of mycotoxins in food[J]. Foods, 2024, 13(24): 4125.
［40］ 黄世慧, 潘相玉, 张榴萍, 等. 分子印迹电化学传感器对食用油中塑化剂邻苯二甲酸二异壬酯的快速检测[J]. 化工进展, 2023, 42(12): 6469−6477.［HUANG S H, PAN X Y, ZHANG L P, et al. Molecularly imprinted electrochemical sensor for rapid detection of phthalate plasticizer diisononyl phthalate in edible oil[J]. Chemical Industry Progress, 2023, 42(12): 6469−6477.］
［41］ ZHOU B B, XIE H, ZHOU S S, et al. Construction of AuNPs/reduced graphene nanoribbons co-modified molecularly imprinted electrochemical sensor for the detection of zearalenone[J]. Food Chemistry, 2023, 423: 136294.
［42］ DING S C, LYU Z, LI S Q, et al. Molecularly imprinted polypyrrole nanotubes based electrochemical sensor for glyphosate detection[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2021, 191: 113434.
［43］ TROTTER M, BORST N, THEWES R, et al. Electrochemical DNA sensing-Principles, commercial systems, and applications[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2020, 154: 112069.
［44］ WANG N W, HU W, JIANG H, et al. A portable micro-nanochannel bio-3D printed liver microtissue biosensor for DON detection[J]. Biosensors and Bioelectronics 2025, 267: 116810.
［45］ WANG Chenfeng, SUN Xinyue, SU Ming, et al. Electrochemical biosensors based on antibody, nucleic acid and enzyme functionalized graphene for the detection of disease-related biomolecules[J]. Analyst, 2020, 145(5): 1550−1562.
［46］ KONDZIOR M, GRABOWSKA I. Antibody-electroactive probe conjugates based electrochemical immunosensors[J]. Sensors, 2020, 20(7): 2014.
［47］ CHEN M, QILENG A, LIANG H, et al. Advances in immunoassay-based strategies for mycotoxin detection in food: From single-mode immunosensors to dual-mode immunosensors[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2023, 22(2): 1285−1311.
［48］ FANG L, LIAO X F, JIA B Y, et al. Recent progress in immunosensors for pesticides[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2020, 164: 112255.
［49］ WANG Yang, XU Huiren, LUO Jinping, et al. A novel label-free microfluidic paper-based immunosensor for highly sensitive electrochemical detection of carcinoembryonic antigen[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2016, 83: 319−326.
［50］ CHI H, WEN X F, LI H, et al. An electrochemical immunosensing of electrochemically modified carbon cloth electrode based on functionalized gold nanoparticle-Prussian blue for the detection of aflatoxin B1 in vegetable oil industry[J]. Food Chemistry, 2025, 471: 142765.
［51］ LI Weiqiang, LIU Xiaoxue, HE Pianpian, et al. AuNPs-BP-MWCNTs-COOH-based electrochemical immunosensor for the determination of deoxynivalenol in wheat flour[J]. Analytical Methods, 2024, 16(30): 5231−5238.

[52] XU S H, ZHOU T H, WANG J, et al. Determination of deoxynivalenol (DON) by a label-free electrochemical immunosensor based on NiFe PBA nanozymes[J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141436.
[53] SHU Zaixi, HU Huilin, YUAN Zhenhong, et al. Fe-MOF/AuNP-based ratiometric electrochemical immunosensor for the detection of deoxynivalenol in grain products[J]. Microchimica Acta, 2024, 191(4): 210.
[54] BAGHERI E, ABNOUS K, ALIBOLANDI M, et al. Triple-helix molecular switch-based aptasensors and DNA sensors[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2018, 111: 1−9.
[55] VILLALONGA A, PÉREZ-CALABUIG A M, VILLALONGA R. Electrochemical biosensors based on nucleic acid aptamers [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2020, 412(1): 55−72.
[56] WU Y, ARROYO-CURRÁS N. Advances in nucleic acid architectures for electrochemical sensing[J]. Current Opinion in Electrochemistry, 2021, 27: 100695.
[57] BEIRANVAND S, AZADBAKHT A. Electrochemical switching with a DNA aptamer-based electrochemical sensor[J]. Materials Science and Engineering: C, 2017, 76: 925−933.
[58] JIANG Y W, SIMA Y, LIU L, et al. Research progress on portable electrochemical sensors for detection of mycotoxins in food and environmental samples[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 485: 149860.
[59] 朱冠宇, 朱成喜, 李玉叶, 等. 基于二茂铁标记适配体的电化学传感器检测玉米中黄曲霉毒素 B1[J]. 江苏理工学院学报, 2022, 28(6): 38−46. [ZHU G Y, ZHU C X, LI Y Y, et al. Electrochemical sensor based on ferrocene-labeled aptamer for detection of aflatoxin B1 in maize[J]. Journal of Jiangsu University of Technology, 2022, 28(6): 38−46.]
[60] WANG J T, ZHANG Y Z, QI C Y, et al. Detection of zearalenone by electrochemical aptasensor based on enzyme-assisted target recycling and DNAzyme release strategy[J]. Talanta, 2025, 286: 127533.
[61] YAN Han, HE Baoshan, ZHAO Renyong, et al. Electrochemical aptasensor based on Ce_3NbO_7/CeO_2@Au hollow nanospheres by using Nb. BbvCI-triggered and bipedal DNA walker amplification strategy for Zearalenone detection[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 438: 129491.
[62] GUPTA N, RENUGOPALAKRISHNAN V, LIEPMANN D, et al. Cell-based biosensors: Recent trends, challenges and future perspectives[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2019, 141: 111435.
[63] SANDE M G, RODRIGUES J L, FERREIRA D, et al. Novel biorecognition elements against pathogens in the design of state-of-the-art diagnostics[J]. Biosensors, 2021, 11(11): 418.
[64] LU X, YE Y L, ZHANG Y Z, et al. Current research progress of mammalian cell-based biosensors on the detection of foodborne pathogens and toxins[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 61(22): 3819−3835.
[65] WANG L F, CAO H W, JIANG H, et al. A novel 3D bioprinting "liver lobule" microtissue biosensor for the detection of AFB1[J]. Food Research International, 2023, 168: 112778.
[66] JIANG Donglei, SHENG Kaikai, GUI Guoyue, et al. A novel smartphone-based electrochemical cell sensor for evaluating the toxicity of heavy metal ions Cd^{2+}, Hg^{2+}, and Pb^{2+} in rice[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2021, 413(16): 4277−4287.
[67] 王瑞鑫, 冯亚净, 李秀缺, 等. 电化学免疫传感器法快速测定粮油食品中的苯并(a)芘[J]. 现代食品科技, 2016, 32(9): 295−301. [WANG R X, FENG Y J, LI X Q, et al. Rapid determination of benzo(a)pyrene in grain and oil food by electrochemical immunosensor method[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(9): 295−301.]
[68] LU L, ZHU Z W, HU X Q. Multivariate nanocomposites for electrochemical sensing in the application of food[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2019, 118: 759−769.
[69] VEENUTTRANON K, LU X B, CHEN J P. Ultrasensitive electrochemical sensing for simultaneous rapid detection of zearalenone and ochratoxin A in feedstuffs and foodstuffs[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 497: 154807.
[70] GAO J, YIN J, WANG G D, et al. A novel electrode for simultaneous detection of multiple heavy metal ions without pre-enrichment in food samples[J]. Food Chemistry, 2024, 448: 138994.
[71] WANG Mengli, MA Lele, KANG Le, et al. Highly sensitive electrochemical detection of ERα based on AuNPs-SWCNT composites and Hemin@HKUST-1[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2023, 170(4): 047509.
[72] KARNWAL A, KUMAR S R S, DEVGON I, et al. Gold nanoparticles in nanobiotechnology: From synthesis to biosensing applications[J]. ACS Omega, 2024, 9(28): 29966−29982.
[73] UDDIN I, VENKATACHALAM S, MUKHOPADHYAY A, et al. Nanomaterials in the pharmaceuticals: Occurrence, behaviour and applications[J]. Current Pharmaceutical Design, 2016, 22(11): 1472−1484.
[74] ZHAO L Y, ZHOU L Z, DANSOU D M, et al. Ultrasensitive analyses of zearalenone in grain samples with a catalytic oxidation platform involving gold nanomaterials[J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101666.
[75] 王琪, 刘瑶, 舒傲澜, 等. 改性氮化碳/铜基 MOF 纳米复合材料修饰电极对草甘膦的电化学检测研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2024, 37(3): 22−33. [WANG Q, LIU Y, SHU A L, et al. Electrochemical detection of glyphosate using electrodes modified with modified g-C_3N_4/Cu-based MOF nanocomposites[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2024, 37(3): 22−33.]
[76] RAHMAN M, SAMPAD M J N, HAWKINS A, et al. Recent advances in integrated solid-state nanopore sensors[J]. Lab on a Chip, 2021, 21(16): 3030−3052.
[77] ZHANG Ya, XU Ying, LI Ning, et al. An ultrasensitive electrochemical sensor based on antimonene simultaneously detect multiple heavy metal ions in food samples[J]. Food Chemistry, 2023, 421: 136131.
[78] GROMMET A B, FELLER M, KLAJN R. Chemical reactivity under nanoconfinement[J]. Nature Nanotechnology, 2020, 15(4): 256−271.
[79] DOS SANTOS CAETANO K, LIEBERKNECHT G, BENVENUTTI E V, et al. Sol-gel immobilization of lipase enzyme on FTO modified with silica-zirconia and gold nanoparticles films for design of triglyceride impedimetric biosensor[J]. Electrochimica Acta, 2024, 483: 143997.
[80] HORMSOMBUT T, MEKJINDA N, KALASIN S, et al. Mesoporous silica nanoparticles-enhanced microarray technology for highly sensitive simultaneous detection of multiplex foodborne pathogens[J]. ACS Applied Bio Materials, 2024, 7(4): 2367−2377.
[81] LI Yue, MA Xinyue, ZHU Wenyue, et al. Enzymatic catalysis in size and volume dual-confined space of integrated nanochannel-electrodes chip for enhanced impedance detection of *Salmonella*[J]. Small, 2023, 19(35): 2300900.
[82] LÜ Haiming, ZHANG Guiyun, YANG Weiqiang, et al.

Portable anti-fouling electrochemical sensor for soil heavy metal ions detection based on the screen-printed carbon electrode modified with silica isoporous membrane[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2023, 930: 117141.

[83] HU Ze, WANG Hao, CHEN Huimin, et al. Target-triggered cascade signal amplification in nanochannels: An ingenious strategy for ultrasensitive photoelectrochemical DNA bioanalysis[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2023, 242: 115724.

[84] WANG Yahui, ZHANG Hongfang. Gold nanoparticles engineered nanoporous membrane with sandwich structure for sensitive electrochemical quantification of exosome[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2023, 393: 134294.

[85] MA Xinyue, LI Yue, ZHANG Jie, et al. Metal–organic framework-decorated nanochannel electrode: Integration of internal nanoconfined space and outer surface for small-molecule sensing [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(22): 27034−27045.

[86] ZOU Yi, LIU Liqi, XIA Tiantian, et al. A reusable electrochemiluminescence biosensor controlled by a nanochannel gating system for T-2 toxin detection[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2023, 393: 134113.

[87] HUANG Zhongnan, LUO Xuan, YAN Fei, et al. Homogeneous electrochemical aptasensor for sensitive detection of Zearalenone using nanocomposite probe and silica nanochannel film[J]. Molecules, 2023, 28(21): 7241.

[88] 王惠, 何利, 潘无双, 等. ZrO2/PPy@玉米芯多孔碳材料的制备及用于检测稻谷中草甘膦残留[J]. 分析试验室, 2023, 42(12): 1563−1570. [WANG H, HE L, PAN W S, et al. Preparation of ZrO_2/PPy@corncob porous carbon material and its application in detecting glyphosate residues in rice[J]. Analytical Laboratory, 2023, 42(12): 1563−1570.]

[89] 王勇. 油脂中抗氧化剂 2, 6-二叔丁基对甲酚(BHT)的电化学检测方法研究[J]. 现代食品, 2020(16): 151−155. [WANG Y. Electrochemical detection method for antioxidant 2, 6-di-tert-butyl-p-cresol (BHT) in oils and fats[J]. Modern Food, 2020(16): 151−155.]

[90] 李晓倩. 油脂中抗氧化剂 BHT 的电化学检测[J]. 食品科技, 2021, 46(3): 297−301. [LI X Q. Electrochemical detection of antioxidant BHT in oils and fats[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(3): 297−301.]

[91] DONG Jiangbo, WEN Li, ZHAO Dong, et al. Flexible carbon fiber cloth supports decorated with cerium metal- organic frameworks and multi-walled carbon nanotubes for simultaneous on-site detection of Cd^{2+} and Pb^{2+} in food and water samples[J]. Food Chemistry, 2023, 418: 135869.

[92] QI Y L, CHEN X L, LIU S S, et al. Electrochemical sensor for Cd^{2+} detection based on carbon fiber paper sequentially modified with CoMOF, AuNPs, and glutathione[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2021, 168(6): 067526.

[93] ÇELIK M, KUCUK I, SADAK S, et al. Combination of miniature electrode systems *via* nanomaterials: Pesticide analysis [J]. Trends in Environmental Analytical Chemistry, 2025, 45: e00251.

[94] YADAV A K, VERMA D, SOLANKI P R. Electrophoretically deposited L-cysteine functionalized MoS_2@MWCNT nanocomposite platform: A smart approach toward highly sensitive and label-free detection of gentamicin[J]. Materials Today Chemistry, 2021, 22: 100567.

[95] SAEED M, MARWANI H M, SHALAUDDIN M, et al. Sensitive detection of unsafe nitrite chemical based on GO@Fe_2O_3/Y_2O_3 nanocomposite by electrochemical approach for environmental assessment[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2025, 144: 552−564.

[96] ZHANG Siqi, LI Kaibin, PAN Yuanjiang, et al. Ultrasensitive detection of ochratoxin A based on biomimetic nanochannel and catalytic hairpin assembly signal amplification[J]. Talanta, 2020, 220: 121420.

[97] ZHANG Tongtong, XU Shuai, LIN Xingyu, et al. Label-free electrochemical aptasensor based on the vertically-aligned mesoporous silica films for determination of aflatoxin B1[J]. Biosensors, 2023, 13(6): 661.

[98] YU T F, SUO Z G, ZHANG X Y, et al. Highly conductive AuNPs/Co-MOF nanocomposites synergistic hybridization chain reaction enzyme-free electrochemical aptasensor for ultrasensitive detection of Aflatoxin B1[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 495: 153596.

[99] GAO Ruoqi, ZHANG Liyuan, YU Runzhong. Detection of Zearalenone in miscellaneous beans by functionalized SERS sensor based on sea urchin aptamer[J]. Food Chemistry, 2024, 460: 140394.

[100] ZHANG Jinmin, JIN Huali, SUO Zhiguang, et al. Highly conductive MXene-Au NPs and high current AuPd NPs/UiO-66 electrochemical sensor combining multiple signal amplification strategies for tetracycline detection[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 504: 158980.

[101] YAN Han, HE Baoshan, ZHAO Renyong, et al. Electrochemical aptasensor based on CRISPR/Cas12a-mediated and DNAzyme-assisted cascade dual-enzyme transformation strategy for Zearalenone detection[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 493: 152431.

[102] 吴民富, 李莎, 徐振林, 等. 基于二氧化锡/碳化硅空心球纳米链的电化学传感器检测食用油中黄曲霉毒素 B1[J]. 食品与机械, 2020, 36(6): 86−92. [WU M F, LI S, XU Z L, et al. Electrochemical sensor based on SnO_2/SiC hollow sphere nanowires for detection of aflatoxin B1 in edible oil[J]. Food and Machinery, 2020, 36(6): 86−92.]

[103] 李宗达, 陆康, 裴强, 等. 基于金掺杂的锆基金属有机框架电化学适配体传感器检测玉米中黄曲霉毒素 B1[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(21): 132-40. [LI Z D, LU K, PEI Q, et al. Electrochemical aptamer sensor based on gold-doped zirconium metal–organic framework for detection of aflatoxin B1 in maize[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2023, 14(21): 132–140.]

[104] 刘丰, 田运霞, 吴远根, 等. 小麦酯酶电化学生物传感器构建及其对敌敌畏的检测[J]. 食品科学, 2022, 43(2): 2355−2360. [LIU F, TIAN Y X, WU Y G, et al. Construction of a wheat esterase-based electrochemical biosensor and its application in detecting dichlorvos[J]. Food Science, 2022, 43(2): 2355−2360.]

[105] GUO Wentao, HU Yuda, ZHANG Xuxin, et al. An electrochemical aptasensor for Zearalenone detection based on the Co_3O_4/MoS_2/Au nanocomposites and hybrid chain reaction[J]. Microchimica Acta, 2024, 191(7): 367.