吴梦娇, 胡骁飞, 赵秋艳, 等. 玉米赤霉烯酮电化学检测技术研究进展 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(5): 484−493. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030309

WU Mengjiao, HU Xiaofei, ZHAO Qiuyan, et al. Recent Advances in Electrochemical Detection Techniques for Zearalenone[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(5): 484−493. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030309

· 专题综述 ·

玉米赤霉烯酮电化学检测技术研究进展

吴梦娇[1], 胡骁飞[2], 赵秋艳[1], 赵广山[1], 李　宁[1], 宋莲军[1], 黄现青[1], 胡　梅[1,2,3,*]

（1.河南农业大学食品科学技术学院, 河南郑州 450002;
2.河南省农业科学院动物疫病防控研究所（动物免疫学重点实验室）, 河南郑州 450002;
3.龙湖现代免疫实验室, 河南郑州 450046）

摘　要: 玉米赤霉烯酮（Zearalenone，ZEN）是一种由镰刀菌属真菌产生的有毒代谢物，广泛存在于玉米、小麦等谷物及其制品中，可通过干扰内分泌系统对人和动物的健康造成潜在威胁。近年来，由于全球气候变化、储存和加工管理不当以及食品供应链复杂化，ZEN 的污染问题日益严重，食品安全风险逐步增加。为降低其危害，各国相继制定了其限量标准以控制其风险。电化学传感器检测法因其高灵敏度、响应速度快和适合现场检测的特点，在玉米赤霉烯酮的检测中广泛应用。本文综述了电化学传感器检测玉米赤霉烯酮的研究进展，介绍了用于修饰电极的纳米材料以及电化学生物传感器、电化学发光传感器和分子印迹电化学传感器。同时，分析了电化学传感器在玉米赤霉烯酮检测中的挑战与发展前景，为研制高效、低成本的检测技术提供了参考与思路。

关键词: 玉米赤霉烯酮, 食品安全, 纳米材料, 电化学检测, 灵敏检测

中图分类号: TS207.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)05−0484−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030309

本文网刊:

Recent Advances in Electrochemical Detection Techniques for Zearalenone

WU Mengjiao[1], HU Xiaofei[2], ZHAO Qiuyan[1], ZHAO Guangshan[1], LI Ning[1], SONG Lianjun[1], HUANG Xianqing[1], HU Mei[1,2,3,*]

（1.College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;
2.Institute for Animal Health, Henan Academy of Agricultural Sciences (Key Lab for Animal Immunology, Henan Academy of Agricultural Sciences), Zhengzhou 450002, China;
3.Longhu Laboratory, Zhengzhou 450046, China）

Abstract: Zearalenone (ZEN) is a mycotoxin produced by Fusarium species, commonly found in maize, wheat, and other cereals, as well as their derived products. It presents substantial health risks to human and animal health by disrupting the endocrine system. Many factors have intensified ZEN contamination, which include global climate change, inadequate storage and processing practices, and the increasing complexity of the food supply chain, thus exacerbating food safety concerns. In response, various countries have set regulatory limits for ZEN level in foods. Accordingly, electrochemical sensor-based detection methods have gained widespread application in ZEN detection for their sensitivity, fast, and portability. This review summarizes the up-to-date developments in this field, including the surface modified nanomaterials, electrochemical biosensors, electrochemiluminescence sensors, and molecularly imprinted electrochemical sensors. Additionally, the challenges and future prospects of electrochemical sensors in ZEN detection are analyzed, offering insights to advance the development of efficient and cost-effective detection technologies.

Key words: zearalenone; food safety; nanomaterials; electrochemical detection; ultrasensitive detection

收稿日期: 2025−03−25

基金项目: 河南省重点研发与推广专项（科技攻关）（242102310303, 242102310241）。

作者简介: 吴梦娇（1998−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: wumj826@163.com。

*** 通信作者:** 胡梅（1986−）, 女, 博士, 讲师, 研究方向: 食品安全快速检测, E-mail: humei@henau.edu.cn。

玉米赤霉烯酮(Zearalenone, ZEN)，又称 F-2 毒素，化学式为 $C_{18}H_{22}O_5$，是由禾谷镰刀菌(*Fusarium graminearum*)、尖孢镰刀菌(*F. oxysporum*)、木贼镰刀菌(*F. equiseti*)和雪腐镰刀菌 (*F. sporotrichioides*)等真菌产生的次级代谢产物[1]，主要存在于霉变的粮食作物中。ZEN 结构稳定，耐热性强，难以通过常规加工降解[2]，易在污染谷物中富集，构成食品安全风险。

玉米赤霉烯酮首次从患有赤霉病的玉米中分离得到，其分子结构与天然雌激素相似，能够与雌激素受体结合并表现出雌激素样活性，从而干扰内分泌系统[3]。ZEN 的毒性具有剂量依赖性，其危害程度与暴露水平密切相关。在高剂量暴露下，ZEN 可干扰生殖系统的发育与功能，影响胎盘稳态，并在动物实验中被证实可能增加流产和胎儿异常的风险[4]。低剂量长期接触可能影响神经递质系统，诱发氧化应激和炎症反应，进而可能影响认知功能[5]。此外，ZEN 可通过诱导氧化应激和细胞凋亡，对肝脏和免疫系统造成损伤[6−8]。动物中毒表现因剂量和暴露时间不同而异，急性中毒可导致兴奋不安、步态不稳、全身肌肉震颤，严重时甚至死亡；慢性中毒则可能引发外生殖器肿大、充血、死胎及延期流产，尤其对母畜危害较大[9]。2017 年世界卫生组织国际癌症研究机构(IARC)将 ZEN 归为 3 类致癌物。综上，玉米赤霉烯酮能影响免疫细胞的增殖和分化，破坏机体的免疫力，具有致癌性、致畸性、遗传毒性、免疫毒性和细胞毒性等危害作用[10]。因此，加强 ZEN 的污染监测及食品安全控制至关重要。

目前，玉米赤霉烯酮(ZEN)的检测方法主要包括薄层色谱(Thin Layer Chromatography, TLC)、高效液相色谱(High-Performance Liquid Chromatography, HPLC)、液相色谱-质谱联用(Liquid Chromatography-Mass Spectrometry, LC-MS)、酶联免疫吸附测定(Enzyme-Linked Immunosorbent Assay, ELISA)和胶体金免疫层析(Colloidal Gold Immunochromatographic Assay, GICA)等[11]。这些方法各有优缺点，例如 TLC 操作简便、成本低，但灵敏度和准确性较低[12]；HPLC 具有较高的分离效率和检测灵敏度，但样品前处理复杂，检测周期较长[13]；LC-MS 结合了色谱分离与质谱鉴定，具有极高的灵敏度和特异性，但仪器昂贵、维护成本高；ELISA 操作简便、检测速度快，适用于大规模筛查，但易受干扰，可能出现假阳性或假阴性；GICA 具备快速、便携的优势，适用于现场检测，但灵敏度相对较低，定量能力有限。近年来，电化学检测技术因其高灵敏度、无需衍生化、操作简便、成本低及响应速度快等优势[14]，在 ZEN 检测领域受到广泛关注。此外，借助纳米材料修饰电极，可以显著提高传感器的选择性和稳定性，进一步增强其检测性能。随着电化学技术的不断发展，其在食品安全领域的应用前景广阔，有望成为未来 ZEN 检测的重要发展方向。因此，本文重点综述了电化学传感器在玉米赤霉烯酮检测中的应用研究，介绍了纳米材料在传感器构建中的作用，归纳了不同类型电化学传感器的设计策略与应用，并探讨了其在食品安全检测中的发展趋势。

1　玉米赤霉烯酮的污染现状及限量标准

玉米赤霉烯酮(ZEN)广泛污染全球谷物及其制品。其污染水平受地理位置、气候条件、谷物类型以及储存和加工方式等多种因素影响。研究表明，ZEN 污染在全球范围内存在明显的区域差异。例如，韩国玉米和混合谷物的 ZEN 污染分别达到 4.3 μg/kg 和 6.1 μg/kg，检出率分别为 7% 和 47%[15]；葡萄牙和荷兰小麦粉的平均污染分别为 10.7 μg/kg 和 13.1 μg/kg[16]。意大利小麦和大麦的 ZEN 污染分别为 2.4~27.2 μg/kg 和 7.3~15 μg/kg，检出率分别为 8.8% 和 22%[17]。科特迪瓦在玉米和小麦中的 ZEN 检出率为 100%，平均污染分别为 82.8 μg/kg 和 141.9 μg/kg[18]。我国的东北、华北和华东地区是玉米的主产区，同时也是 ZEN 污染的高发区域。特别是在雨季，湿度较高的环境下有利于霉菌毒素生长。由于我国大部分地区气候温和，降水丰富，谷物在种植、收获、加工、运输、保存等过程中为霉菌提供了良好的生长环境，从而导致 ZEN 的蓄积与扩散[19]。根据 2022 年中国饲料和原料中霉菌毒素污染调查显示，在抽检的五类样品(配合饲料、杂粕、小麦及麸皮、玉米及玉米副产物)中玉米赤霉烯酮的检出率均超过 90%，其中配合饲料、小麦及麸皮和玉米副产物的检出率达 100%[20]。此外，欧洲食品安全局(EFSA)研究发现，ZEN 在玉米、玉米粉和麦麸中的含量最高，而玉米胚芽油和小麦胚芽油中的含量相对较低[21]。因此，为保障食品与饲料安全，应加强对 ZEN 污染的监测与风险评估，特别是在高风险谷物及其加工产品中建立有效的防控措施。

为了降低玉米赤霉烯酮的危害，我国在 GB 2761-2017《食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量》[22] 中规定了谷物及其制品中玉米赤霉烯酮的限

表 1　各国及组织对玉米赤霉烯酮限量标准

Table 1　Standards for limits of zearalenone from different countries and organizations

国家	食品/饲料	限量标准(μg/kg)	参考文献
中国	小麦、小麦粉 玉米、玉米面(渣、片)	60	[23]
	玉米	350	
欧盟	谷物和产品	75	[24]
	饲料	100	
日本	饲料	20	[24]
澳大利亚	谷物	50	[25]
法国	谷物及其制品	50	[25]
意大利	婴幼儿食品	20	[25]
奥地利	小麦/黑麦	60	[25]

量标准，不同的国家和组织对玉米赤霉烯酮的限量也有不同的标准，详见表 1。

同时，国际上针对 ZEN 的安全性设定了不同的膳食摄入限值。欧洲食品安全局（European Food Safety Authority, EFSA）建议人类每日耐受摄入量（Tolerable Daily Intake, TDI）为 0.25 μg/kg 体重[26]。此外，联合国粮农组织/世界卫生组织食品添加剂联合专家委员会（JECFA）在第 26、27 及 32 次会议上评估了 ZEN 的主要代谢物 α-玉米赤霉烯醇，并提出其每日允许摄入量（Acceptable Daily Intake, ADI）为 0~0.5 μg/kg 体重。在实际暴露评估方面，中国的一项研究显示，ZEN 的估算日摄入量（Estimated Daily Intake, EDI）平均为 25.6 ng/kg 体重/d，分别占 EFSA 设定 TDI 的 10.2% 和 JECFA 设定暂定最大可耐受日摄入量（PMTDI）的 5.1%。其中，小麦是主要的暴露来源，且儿童群体的摄入量最高[27]。尽管当前人群的膳食暴露水平低于安全限值，但在谷物种植、加工及储存过程中，ZEN 污染具有广泛性和隐蔽性，且儿童等敏感人群的暴露风险较高。因此，开发高效、灵敏的检测技术对于实现 ZEN 的实时监测和风险评估至关重要。近年来，电化学传感器因其操作简便、响应快速、成本低廉以及检测灵敏度高等优势，在 ZEN 检测领域受到广泛关注。电化学检测技术通过识别 ZEN 分子与电极表面识别元件的特异性结合，引发电流、电位或电导等信号变化，实现对 ZEN 的定量分析。尤其是结合纳米材料修饰电极、免疫传感平台的电化学传感器，可显著提高检测灵敏度和选择性，并实现超低浓度 ZEN 的检测。

2 纳米材料在玉米赤霉烯酮电化学传感器构建中的应用

在玉米赤霉烯酮的检测中，电化学传感器的性能在很大程度上依赖于其敏感元件和电极材料的设计与优化。随着纳米技术的迅速发展，各类纳米材料因其独特的物理、化学和电子特性，被广泛应用于电化学传感器中。这些材料不仅显著提高了传感器的灵敏度和选择性，还为信号放大、抗干扰能力增强以及检测限的进一步降低提供了新的思路。目前，常用的纳米材料有碳纳米管、石墨烯和金属有机骨架材料等。

2.1 碳材料

碳材料是一类以碳元素为主要成分的材料，具有 sp、sp^2 和 sp^3 三种不同的杂化类型，不同的杂化类型赋予了其不同的性质。碳材料主要包括石墨、石墨烯、碳纳米管、活性炭和碳纤维等，它们展现出卓越的导电性、导热性、机械强度和吸附能力[28]。在食品检测中，碳材料广泛用于构建高灵敏度和高选择性的电化学传感器，使其能够快速、准确地检测食品中的农药残留、重金属离子和有害微生物，以提升食品安全检测的效率和可靠性。

2.1.1 碳纳米管 碳纳米管（Carbon Nanotubes, CNTs）是一种具有特殊结构的一维量子材料，由呈六边形排列的碳原子构成的同轴圆管层叠而成，通常包含数层至数十层，层间距约为 0.34 nm，直径一般在 2~20 nm 之间[29]。碳纳米管的骨架由碳原子形成，每个碳原子采取 sp^2 杂化，相互之间以碳-碳 σ 键连接，形成由六边形组成的蜂窝状结构。每个碳原子上未参与杂化的一对 p 电子形成共轭 π 电子云，跨越整个碳纳米管。碳纳米管的发展始于 1991 年，它具有许多独特的性质，例如轻质、小尺寸、高强度和良好的导电性[30]。

在实际应用中，碳纳米管常与导电聚合物、金属纳米颗粒或二维材料复合使用，以进一步增强其电化学性能[31]。首先，在导电增强与界面稳定构建方面，有研究者采用壳聚糖功能化的多壁碳纳米管与乙炔黑复合，构建出电化学稳定性良好的复合界面，实现了对 ZEN 的高灵敏检测，检出限可达 3.64 fg/mL[32]。类似地，将 CNTs 与二硫化钼（MoS_2）、聚乙烯亚胺（PEI）等材料协同构建导电基底，可增强电荷传递与界面亲水性。在复杂基质如啤酒样品中，PEI-MoS_2-MWCNTs 平台实现了对 ZEN 低至 0.17 pg/mL 的检出限，检测范围达 0.5 pg/mL~50 ng/mL[33]，验证了其在实际检测中的良好性能与抗干扰能力。其次，碳纳米管在复合结构中还可起到支撑骨架作用，有效稳定层状材料结构、提升活性组分的电接触效率。如在与硫化镉（CdS）纳米颗粒、二硫化钼（MoS_2）纳米片等半导体材料复合时，可改善活性位点的电接触，提高电流转换效率，其对 ZEN 的检出限为 0.60×10^{-3} μg/L[34]。此外，在进一步提升信号放大能力方面，将碳纳米管与聚乙烯亚胺（PEI）、金纳米颗粒（AuNPs）等协同修饰，不仅增强了抗体固定能力，也提升了传感平台的电荷传递速率和抗干扰能力，从而实现较低的检测限和更宽的线性范围（检出限为 0.15 pg/mL，检测范围为 1×10^{-4}~1×10^{-1} ng/mL）[35]。

总体来看，碳纳米管作为电极修饰材料，既能独立增强传感器性能，又能作为多功能复合载体，协同提升结构稳定性与信号放大能力，是构建高性能电化学检测平台的重要功能材料之一。

2.1.2 石墨烯 石墨烯最初于 1962 年在电子显微镜下被观察到，但直到 2004 年，英国曼彻斯特大学的物理学家安德烈·海姆（Andre Geim）和康斯坦丁·诺沃肖洛夫（Kostya Novoselov）才成功地从石墨中分离出石墨烯，证实其可以单独存在[5]。这一发现为他们赢得了 2010 年的诺贝尔物理学奖。石墨烯是一种由碳原子以 sp^2 杂化连接形成的单原子层二维晶体，碳原子规整地排列于蜂窝状点阵结构单元之中。每个碳原子除了以 σ 键与其他三个碳原子相连之外，剩余的 π 电子与其他碳原子的 π 电子形成离域大 π 键，电子可以在此区域内自由移动，从而使石墨烯具有优异的导电性能。这种稳定的二维蜂窝状晶格结构赋予了石墨烯极为优异的导电性、导热性、

机械强度和柔韧性[36]，自 2004 年由 Geim 与 Novoselov 成功从石墨中分离并证实其可稳定存在以来，石墨烯迅速成为材料科学领域研究的热点，并在能源器件、复合材料、生物医药和传感器等方向展现出广阔应用前景。

石墨烯及其氧化物衍生物在电化学传感器中展现出多重功能。一方面，其高比表面积和 π-π 堆积结构促进电子快速转移；另一方面，其表面羧基、羟基等官能团赋予其良好的官能化能力，能够高效固定抗体、适体等识别分子，同时保持其生物活性[37]。在实际应用中，石墨烯常与磁性材料、金属纳米颗粒或 MOFs 等功能组分复合使用，以增强传感性能。例如，将氧化石墨烯与 Fe_3O_4 磁性纳米颗粒和 Cu 基 MOF 复合，可在扩大工作电极活性面积的同时，实现靶标分子的富集识别，提升检测灵敏度和选择性[38]。此外，通过氧化石墨烯纳米带（O-GNRs）的制备与还原，可构建具高导电性的 rGNRs 结构，再在其表面修饰金纳米颗粒，配合功能单体进行电聚合，可进一步增强传感界面的响应信号，实现对 ZEN 的高灵敏检测[39]。

综合来看，碳纳米管在提升电子传输效率和信号放大方面表现突出，适用于构建响应速度快、灵敏度高的电化学检测平台；而石墨烯则凭借其丰富的表面官能团和良好的生物亲和性，更适合用于识别分子的固定与活性保持，特别适用于高选择性和定量分析需求。针对高通量筛查与痕量污染物定量等不同应用场景，两者各具优势，可根据检测目标灵活选用，或通过复合构建实现导电性与生物识别能力的协同优化。

2.2　金属有机骨架材料（MOFs）

金属有机框架材料（MOF）是一类由有机配体和无机金属离子或团簇通过配位键自组装形成的具有分子内孔隙的有机-无机杂化材料。在 20 世纪 90 年代中期，科学家们合成了第一代 MOF 材料[40]。1999 年，Yaghi 等人成功合成了具有三维开放骨架结构的 MOF-5，即使去除孔道中的客体分子，骨架仍然保持完整。2002 年，Yaghi 研究组通过调控修饰官能团，成功地合成了一系列孔径跨度从 3.8 Å到 28.8 Å 的 IRMOF 类分子筛材料，实现了 MOF 材料从微孔到介孔的成功过渡[41]。MOFs 因其高度有序的多孔结构、超大的比表面积以及良好的化学可调性，成为近年来构建电化学传感器的重要功能材料[42−44]。

通过修饰电极表面，MOFs 可显著提高与目标分子的接触频率与富集能力，从而有效提升传感器的灵敏度[45]。此外，其结构中大量未配位金属位点和有机配体官能团也为识别分子的固定与信号传导提供了有利条件。MOFs 常与碳纳米管、石墨烯、金属纳米颗粒等材料复合，构建复合电极材料，以进一步增强导电性与结构稳定性。例如，将稀土元素 Ce 掺杂 MOF 并与 MWCNTs 复合，有助于提升材料的电子传输速率与负载能力，实现对 ZEN 的高灵敏检测，检出限可达 10^{-5} ng/mL[46]。除此之外，MOF 在电化学发光（ECL）传感中也显示出良好性能，Lai 等[47] 合成了一种基于芘衍生物的金属有机框架材料，有效克服了芘衍生物堆积导致的发光猝灭效应，显著提升了电化学发光效率和强度。基于该材料构建的传感器对 ZEN 的检出限低至 0.21 fg/mL，检测范围为 10 fg/mL~100 ng/mL。多金属中心构成的 MTV polyMOF（Ti）则凭借其多配位点与高电子迁移率，为适体识别与信号放大提供了优异平台，其构建的电化学传感器在 10 fg/mL~10 ng/mL 范围内表现出良好的线性响应[48]。MOFs 在与碳材料或金属纳米粒子复合后，其在识别分子固定、信号放大与复合结构构建等方面的协同增效作用，使其成为食品安全检测领域中具有广泛应用潜力的关键材料之一。

不同类型纳米材料因其在导电性、比表面积、表面官能团密度及复合能力等方面的差异，在电化学传感器构建中承担着不同的功能角色。碳材料类如碳纳米管和石墨烯在提升电子传输效率和反应界面活性方面表现突出，有助于增强传感器的信号响应与稳定性；而 MOFs 等材料则凭借其高度可调的孔隙结构与良好的功能修饰性能，更适用于构建识别位点丰富、响应机制复杂的检测平台。这些材料特性不仅决定了其在电极修饰中的适配方式，也对后续传感器类型的构型设计与性能优化起到关键支撑作用。

3　电化学传感器在玉米赤霉烯酮检测中的应用

电化学传感器的历史可追溯至 20 世纪 50 年代，当时主要用于监测氧气浓度[49]。然而，随着科技的不断发展，至 20 世纪 80 年代中期，该技术实现质的飞跃。小型化、高精度的电化学传感器崭露头角，不仅能检测多种有毒气体在 PEL（允许暴露极限）范围内的浓度，并表现出优异的灵敏度和选择性。电化学传感器利用电化学反应将待测物质转化为电流、电压或电阻等电信号，从而实现对待测目标物质的检测，具有高灵敏度、低检测限和快速响应等特点，在食品检测领域广泛应用[50]。在玉米赤霉烯酮的检测中常用的电化学传感器的类型有电化学生物传感器、电化学发光传感器和分子印迹电化学传感器等，不同类型的传感器在检测过程中有各自的优缺点（见表 2）。

3.1　电化学生物传感器

电化学生物传感器是一种将生物识别元件与电化学信号转换技术相结合的分析装置，能够通过特异性相互作用检测目标分子。其工作原理是目标分子与生物识别元件（如酶、抗体、适配体、核酸或细胞等）发生特异性反应，产生电化学信号（如电流、电位或阻抗变化），这些信号通过电极检测并转化为电信号，经电路处理后用于分析目标物质的浓度或性质[51]。根据所使用的生物识别元件类型，电化学生物

表 2 不同类型电化学传感器的优点和局限性

Table 2 Advantages and limitations of different types of electrochemical sensors

类型	优点	局限性
电化学生物传感器	多功能性: 可检测多种生物分子, 如酶、蛋白质和DNA; 高灵敏度: 对生物分子变化敏感	受环境影响: 环境因素如温度和pH可能影响传感器性能; 生物元件稳定性较差: 生物识别元件可能会降解或失活; 筛选复杂: 适配体筛选过程复杂, 需要特定的筛选技术
电化学发光传感器	高灵敏度: 电化学发光信号强, 背景干扰低; 低检测限: 适用于痕量分析; 检测过程中不需要外部激发光源	仪器要求: 需要特定的电化学发光设备
分子印迹电化学传感器	高选择性: 通过分子印迹技术, 可以实现对特定分子的高选择性识别; 稳定性好: 印迹分子通常具有良好的化学和物理稳定性	制备复杂: 分子印迹聚合物制备过程复杂

传感器可分为免疫传感器和适配体传感器等, 广泛应用于食品安全领域。通过不同元件的合理选择与设计, 电化学生物传感器展现出高灵敏度和特异性, 为目标物质的定量与定性分析提供了高效工具。

3.1.1 电化学免疫传感器 电化学免疫传感器检测玉米赤霉烯酮的原理基于抗原与特异性抗体之间的免疫反应, 通过将抗体或抗原固定在传感器的工作电极表面, 当样品中的 ZEN 与固定化抗体结合时, 会引起电化学信号(如电流、电压或电阻)的变化, 从而实现目标物质的定量检测。近年来, 为提升检测灵敏度与稳定性, 研究者在电极材料、信号转导机制及传感结构方面开展了多项技术创新。最初的策略聚焦于提高导电性与稳定性的电极复合材料构建。Yan 等[52]采用 PEI 功能化石墨烯与 Pt@Au 纳米颗粒复合材料(PEI-rGO/Pt@Au)构建传感界面, 并结合差分脉冲伏安法(DPV)检测 ZEN 免疫反应后引起的电流变化, 实现了 0.02 pg/mL 的检出限和 1~1×10^6 pg/mL 的线性范围, 体现了多金属-碳材料协同导电强化策略的可行性。随后, Kumar 等[53] 设计出一种无标记电化学阻抗免疫传感器, 将单克隆抗体(ZEN-mAb)固定在嵌入功能化碳纳米管-壳聚糖(SPCE/CS-CNT-Pd)的改性电极上(如图 1 所示), 功能化碳纳米管与钯(Pd)纳米颗粒构建的复合材料在增强电极导电性与催化性能的同时, 有效促进了电化学信号的生成与传递, 并为生物识别抗体的稳固固定提供了良好平台, 从而提高了免疫反应的效率。最终, 该传感器实现了 0.25~16 ng/mL 的检测范围和 0.25 ng/mL 的检出限。由于无需标记过程, 操作更为简便, 适用于中等浓度范围内的高效检测。

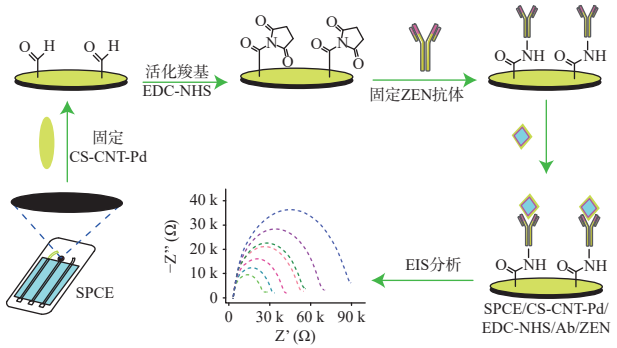


图 1 免疫传感器电极制作示意图[53]。

Fig.1 Schematic representation of the fabrication of the immunosensor electrode[53]

在进一步提高检测灵敏度方面, Jiang 等[54] 构建了一种三明治结构的电化学免疫传感器。其制备过程包括(图 2): 首先在玻碳电极表面修饰 Ti-MOF-KB 纳米复合材料, 作为导电增强与信号放大骨架; 随后在该基底上固定 ZEN 抗体, 并利用 Tb/NG/PDDA/HNTs 负载大量金纳米颗粒(AuNPs)作为信号探针, 与 ZEN 分子发生特异性结合形成三明治结构。该传感器通过高比表面积和快速电子传输结构协同作用, 有效增强了电信号输出, 检出限低至 0.57 fg/mL, 线性范围为 10 fg/mL~100 ng/mL, 展现出优异的灵敏度与亲和识别能力。综上, 电化学免疫传感器在 ZEN 检测中的发展已由早期侧重导电材料修饰, 逐步演进至识别构型与免疫反应机制的协同优化阶段。通过调控抗体固定方式、构建高效信号放大界面, 各类策略显著提升了传感器在复杂基质中对痕量 ZEN 的识别能力, 体现出构型设计与免疫机制精准调控对检测性能的关键作用。

3.1.2 电化学适体传感器 电化学适体传感器(Electrochemical Aptasensors)是一种以适体(Aptamer)为生物识别元件的高性能传感器。适体是一类由指数富集配体系统进化技术(SELEX)筛选获得的特定寡核苷酸序列, 包括 DNA 或 RNA, 因其独特的三维结构具有高特异性和高亲和力, 能够精准识别靶分子的细微结构差异。适体的靶标识别范畴极为广泛, 可与包括蛋白质、核酸、小分子化合物、离子以及复合生物标志物等在内的多种目标分子发生选择性结合。适体凭借其广泛的靶标识别范围、优异的选择性和灵敏度, 在电化学生物传感器中具有独特优势[55]。

在电化学适体传感器的开发中, 提升灵敏度、信号放大效率以及平台适应性是研究重点。不同研究团队基于材料创新与结构设计, 逐步拓展了检测策略和检测性能。首先, 在构建高灵敏适体传感平台方面, Au@Pt 类复合纳米结构联合双信号放大策略已被多项研究证实为有效手段。例如 Suo 等[56] 提出了一种基于亚甲基蓝(MB)与银离子(Ag^+)双信号比值策略的电化学适体传感器(图 3), 通过引入高导电性的 Au@Pt/Fe-N-C 纳米复合材料, 显著增强了电子传输与信号放大效果。该平台实现了对 ZEN 超低

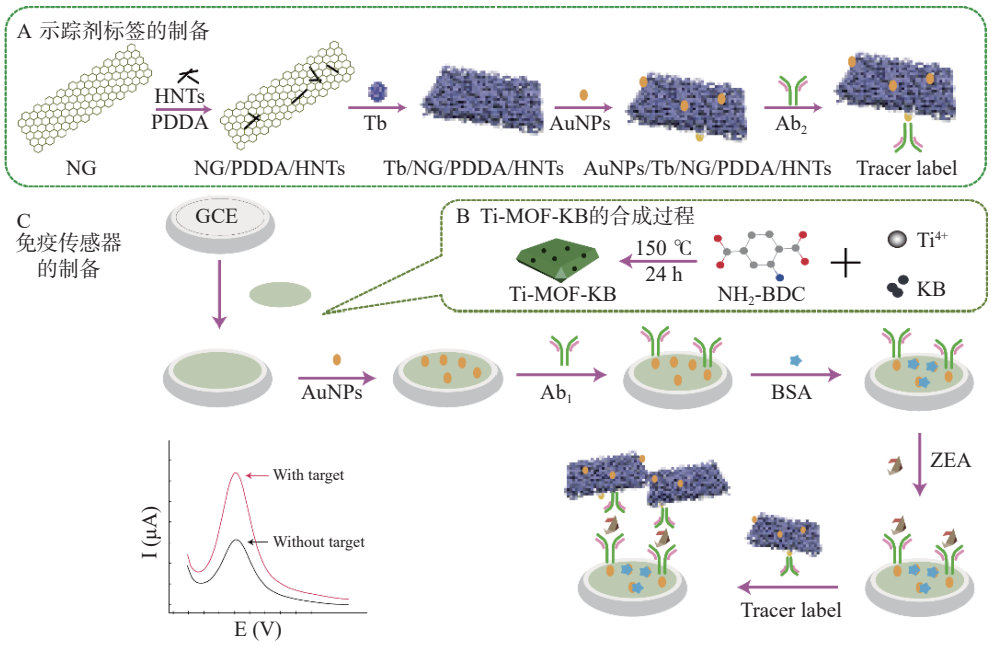


图 2　基于 Ti-MOF-KB 复合材料构建的 ZEN 电化学免疫传感器的制备示意图[54]

Fig.2　Schematic illustration of the fabrication of the electrochemical immunosensor for ZEN detection based on Ti-MOF-KB composites[54]

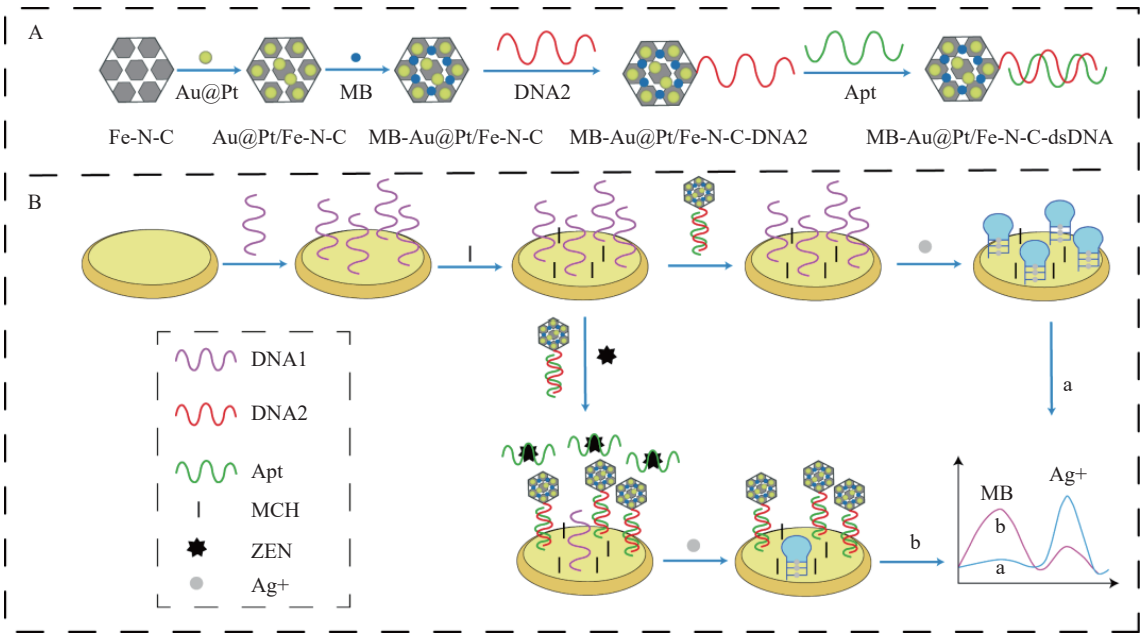


图 3　电化学适体传感器检测原理图[56]

Fig.3　Detection schematic diagram of the ratiometric electrochemical aptasensor[56]

至 5 fg/mL 的检出限。随后，Yan 等[57] 开发出以 Ce_3NbO_7/CeO_2@Au 空心纳米球为电极修饰层，并配合 PdNi@MnO_2/MB 标记物构建信号通道的适体传感器，其检出限进一步优化至 4.57 fg/mL，展现出更强的检测灵敏度与平台稳定性。两项研究表明，Au 基复合材料与多信号放大机制的协同集成可显著增强适体识别平台在超痕量 ZEN 检测中的应用潜力。

除了纳米材料辅助构建的电化学适体传感器外，近年来也有研究尝试融合杂交链式反应（HCR）机制与多功能识别平台，以进一步提升适体传感器的检测通量与适用性。Sun 等[58] 将 HCR 引入比色适体平台，创新性地将 MOFzyme 纳米酶与透明质酸-DNA 水凝胶结合，构建了一种响应性比色适体传感系统。在 ZEN 结合诱导下，水凝胶网络解体释放纳米酶，激发比色反应，检出限低至 0.8 pg/mL。随后，Zhu 等[59] 进一步将 HCR 策略与电化学平台深度融合，构建了一种基于链霉亲和素磁性微球（MMPs）与 HCR 放大机制的多重识别电化学平台，实现了对 T-2 毒素和 ZEN 的同时检测。通过适配体和 HCR 的协同作用，该传感器在 ZEN 检测中的检出限达 1.2 pg/mL，线性范围为 0.01~100 ng/mL，展现出良好的多通道响应能力。两者均表明，HCR 机制与多功能载体的

协同设计为适体传感平台在高通量检测与信号可视化方向提供了有力支撑。

铜纳米簇是一种由几个铜原子组成的纳米级别的粒子集合体。这些纳米簇具有独特的荧光性质，可以在特定波长下发射荧光。Yu 等[60] 开发了一种基于磁性核酸适配体的荧光纳米铜簇生物传感器（图 4），该传感器能够直观且定量地检测 ZEN。通过对接辅助合理裁剪（DART）策略，分析了 ZEN 与适配体的分子作用力和结合位点，并通过优化适配体结构，使其与 ZEN 的结合亲和力增强了 3.4 倍。在此基础上，磁珠修饰的适体在与互补序列竞争结合玉米赤霉烯酮的过程中发生构象变化。释放的互补序列在无模板模式下，在末端脱氧核苷酸转移酶（TdT）的存在下扩增，形成了纳米铜簇的发光核心序列。通过紫外照射可实现荧光的可视化和定量检测。该传感器具有高灵敏度和特异性，检测限（LOD）达到了 0.1 ng/mL。这一创新技术为食品安全检测提供了一个高效且精确的新工具。

综上所述，当前电化学适体传感器在玉米赤霉烯酮检测中的研究呈现出多元化的发展趋势。一方面，适体识别元件的高特异性和合成灵活性，使其在复杂食品基质中具备良好的抗干扰能力；另一方面，信号放大策略日益丰富，如双信号探针设计、纳米材料（Au@Pt/Fe-N-C，Ce_3NbO_7/CeO_2@Au）辅助构建、电化学与光学手段耦合等，大幅提升了检测灵敏度。基于适体的传感器还展现出良好的低检出限与宽线性范围，具备现场快速筛查与痕量毒素检测的潜力。

3.2 电化学发光传感器

电化学发光传感器（Electrochemiluminescence，ECL）是一种结合化学发光与电化学技术的分析方法，通过电极提供能量，驱动电极表面的发光物发生氧化还原反应，从而形成激发态并释放光子，产生可检测的发光信号[61]。ECL 传感器巧妙结合了电化学技术的高精度可控性与化学发光技术的高灵敏度，展现出优异的信号稳定性和低背景噪声，能够对复杂基质中的目标分析物进行快速、灵敏的定性和定量检测[62]。近年来，电化学发光（ECL）传感器在玉米赤霉烯酮检测中展现出卓越的超灵敏检测能力与复杂基质适应性，其性能提升主要依赖于识别机制的拓展与发光体系的放大设计。在识别元件创新方面，Fang 等[63] 采用 mimotope 替代肽作为识别单元，构建了一种竞争型 ECL 传感器。通过从噬菌体展示肽库中筛选高亲和力的 ZEN 模拟肽并固定于传感界面，同时以高比表面积材料负载 $Ru(bpy)_3^{2+}$发光探针，实现了对 ZEN 的超灵敏检测。该平台在 0.1~1.0×10^{-5} ng/mL 范围内具良好线性，检出限低至 3.3 fg/mL，证明了替代识别元件与 ECL 放大机制的高效融合。在发光效率调控方面，Wang 等[64] 进一步发展了基于双信号放大的阴极 ECL 平台。其检测策略融合了 Eu-卟啉配位聚合物（Eu-PCP）与金纳米颗粒协同增强发光强度，同时引入羧基功能化石墨氮化碳（C-g-C_3N_4）作为共反应物促进剂，大幅提升了 ECL 信号效率。该平台具有良好的抗干扰能力，在 ZEN 检测中线性范围达 0.001~200 μg/kg，检出限为 9.75×10^{-5} μg/kg，展现出在复杂食品基质中稳定检测的应用潜力。Feng 等[65] 则采用二氧化锡量子点修饰的尖刺状金银合金构建免疫探针，结合高发光效率与优异电子传输性能，设计了一种结构紧凑、性能优越的 ECL 传感器。该系统实现了 0.16 pg/mL 的检出限，线性范围覆盖 0.0005~500 ng/mL，在实际样品的检测中表现出良好的稳定性。

电化学发光传感器技术在玉米赤霉烯酮检测中的发展已逐步由单一材料优化向识别机制的再设计与多层信号放大系统集成演进。多功能发光探针、高亲和力识别单元与协同增强体系的组合，使其在超痕量检测与复杂样品分析中表现出卓越性能。

3.3 分子印迹电化学传感器

分子印迹电化学传感器（Molecularly Imprinted

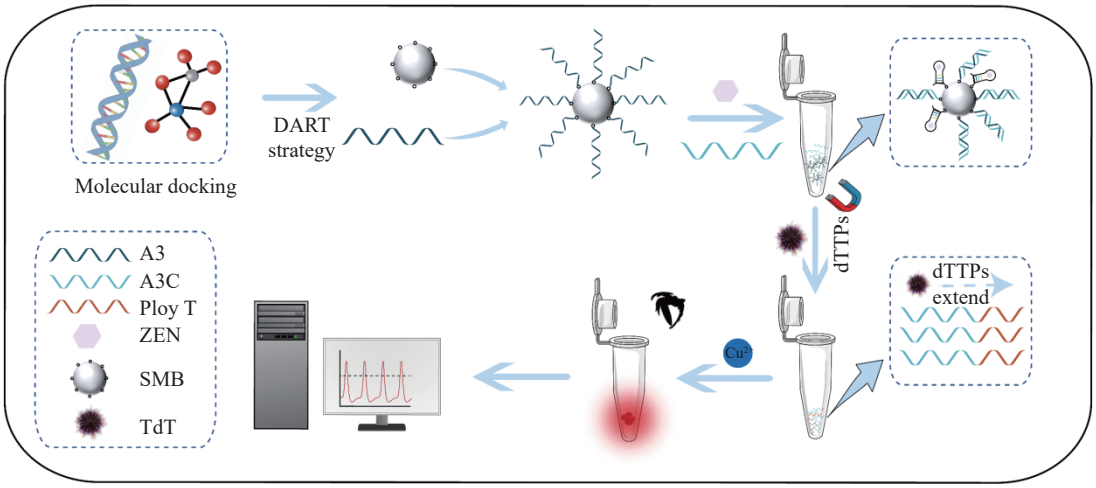


图 4 DART 策略辅助适体剪裁与基于 TdT 酶扩增的荧光铜纳米簇传感器检测 ZEN 流程示意图[60]

Fig.4 Schematic illustration of aptamer tailoring guided by the DART strategy and ZEN detection using a TdT-amplified fluorescent copper nanocluster sensor[60]

Electrochemical Sensors, MIS）是一种利用分子印迹聚合物（MIPs）作为识别元件的传感器，这些传感器通过将 MIPs 固定在电极表面，实现对特定目标分子的选择性识别。当目标分子与印迹聚合物结合时，会引起电信号的变化，实现对目标分子的检测[66]。在 ZEN 检测中，MIS 凭借其良好的稳定性与识别专一性，成为传统抗体识别机制的重要补充。Moya-Cavas 等[67] 构建了一种结合 MIP 固相萃取（MISPE）与高效液相色谱-荧光检测（HPLC-FLD）的检测平台，实现了 ZEN 和交链孢酚（AOH）在复杂基质中的同时分析。该平台利用结构模拟模板制备高选择性的印迹聚合物，应用于玉米、向日葵和橄榄油等样品中。在优化条件下，ZEN 的检测限为 5 μg/kg，线性范围 100~500 μg/kg，加标回收率达 94%~106%，相对标准偏差（RSD）小于 6%，并经 HPLC-MS/MS 验证具良好准确性与可重复性，为复杂油脂类基质中毒素检测提供了可靠方案。相比之下，Zhou 等[68] 开发了电化学自报告型 MIS 平台，更突出电极界面的结构响应性。其构建包括在玻碳电极（GCE）表面修饰还原石墨烯纳米带/氧化石墨烯（rGNR-rGO）底层，电沉积铜纳米颗粒与六氰铁酸铜（CuHCF），再电聚合形成识别 ZEN 的 MIP 薄膜。该传感器无需外加信号标签，即可实现电流响应检测，检出限低至 0.09 ng/mL，线性范围为 0.25~500 ng/mL，展现出优异的灵敏度和结构响应性。

4　总结与展望

电化学传感器凭借高灵敏度、高选择性、快速响应、便携性和低成本的优势，在玉米赤霉烯酮检测中展现出巨大的应用潜力。纳米材料（如金属有机骨架材料、石墨烯、碳纳米管等）的引入显著提升了传感器的检测性能。同时，物联网技术的发展也加速了传感器系统向智能化、远程化方向的演进。在材料方面，碳材料、MOFs、金属纳米颗粒等为传感器构建提供了丰富的界面修饰手段；在识别机制上，抗体、适体及分子印迹等多种方式不断被开发与优化，使检测性能持续提升。尽管如此，当前玉米赤霉烯酮电化学传感技术在实际应用中仍面临诸多挑战。一方面，适体筛选与抗体制备周期长、成本高，且在复杂样品中稳定性不足；另一方面，部分功能材料如 MOFs 导电性差、重复利用性不强，限制了其实际应用。此外，分子印迹膜选择性与可逆性仍有待提升，传感器构建过程仍依赖较多步骤和仪器，制约了其商品化和现场推广能力。

未来，电化学传感器的发展将围绕高选择性、高稳定性及多功能集成展开。首先，应突破复杂基质中的抗干扰能力与良好的稳定性，利用新型纳米复合材料（如 MOF/碳纳米管复合结构）和精准表面修饰策略，提高传感器在粮食检测中的适用性。其次，多毒素联合检测是粮食安全评估的重要趋势，可通过构建多靶点传感平台，并结合人工智能（AI）算法进行信号处理与模式识别，实现玉米赤霉烯酮与其他常见真菌毒素（如黄曲霉 B1、呕吐毒素、伏马菌素等）的同步检测，提高检测效率和精准度。此外，智能化与便携式检测系统的进一步发展将依托物联网（IoT）、5G 和云计算技术，实现远程监测、实时数据分析及食品安全风险的动态预警，同时探索柔性电子在粮仓及供应链监测中的应用。推动电化学传感器的产业化应用仍面临挑战，需优化大规模生产工艺，提高生产一致性与成本效益，同时推动相关标准化与法规适配，使其检测结果具备法律效力。综上所述，随着材料创新、智能化集成及商业化进程的推进，电化学传感器在食品安全检测领域有望发挥更为关键的作用，为粮食安全的高效、精准评估提供有力技术支撑。

© 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] 李晨亮, 孙长坡, 管骁, 等. 玉米赤霉烯酮生物脱毒及降解酶分子改造研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(16): 367−377. [LI Chenliang, SUN Changpo, GUAN Xiao, et al. Research progress on zearalenone biodetoxification and molecular modification of degrading enzymes[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(16): 367−377.]

[2] LI Y, CHEN S, YU Z, et al. A novel *Bacillus velezensis* for efficient degradation of zearalenone[J]. Foods, 2024, 13(4): 530.

[3] YAZAR S, OMURTAG G Z. Fumonisins, trichothecenes and zearalenone in cereals[J]. Int J Mol Sci, 2008, 9(11): 2062−2090.

[4] LONG M, YANG S, WANG Y, et al. The protective effect of selenium on chronic zearalenone-induced reproductive system damage in male mice[J]. Molecules, 2016, 21(12): 1687.

[5] WALIMBE P, CHAUDHARI M. State-of-the-art advancements in studies and applications of graphene: A comprehensive review[J]. Materials Today Sustainability, 2019, 6: 100026.

[6] 邓子锋, 王利娟, 吴希强, 等. 玉米赤霉烯酮在动物体内的代谢与分子毒性研究进展[J]. 中国畜牧兽医, 2023, 50(12): 5194−5203. [DENG Zifeng, WANG Lijuan, WU Xiqiang, et al. Research progress on metabolism and toxicity of zearalenone in animals[J]. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2023, 50(12): 5194−5203.]

[7] 李凯龙, 刘昆仑, 辛颖, 等. 生物法在玉米赤霉烯酮降解中的应用及其脱毒机制研究进展[J/OL]. 食品科学, 1−16[2025-12-22]. https://link.cnki.net/urlid/11.2206.ts.20240219.1003.012 [LI Kailong, LIU Kunlun, XIN Ying, et al. Application of biological methods in the degradation of zearalenone and research progress on its detoxification mechanism [J]. Food Science, 1−16[2025-12-22]. https://link.cnki.net/urlid/11.2206.ts.20240219.1003.012.]

[8] JING S, LIU C, ZHENG J, et al. Toxicity of zearalenone and its nutritional intervention by natural products[J]. Food Funct, 2022, 13(20): 10374−10400.

[9] 李凯龙, 刘昆仑, 辛颖, 等. 玉米赤霉烯酮生物降解及其脱毒机制研究进展[J]. 食品科学, 2025, 46(1): 246−254. [LI Kailong, LIU Kunlun, XIN Ying, et al. Research progress on zearalenone biodegradation and its detoxification mechanism[J]. Food Science, 2025, 46(1): 246−254.]

［10］ 徐文静, 魏文娟, 陈晓光, 等. 玉米赤霉烯酮对猪的危害及防控研究进展[J]. 饲料研究, 2024, 47(5): 166−171. ［XU Wenjing, WEI Wenjuan, CHEN Xiaoguang, et al. Research progress on harm of zearalenone to pigs and its prevention and control[J]. Feed Research, 2024, 47(5): 166−171.］
［11］ 赵飞. 超高效液相色谱-三重四极杆质谱法测定玉米粉中玉米赤霉烯酮[J]. 当代化工, 2022, 51(4): 997−1000. ［ZHAO Fei. Determination of zearalenone in corn flour by ultra-liquid chromatography-mass spectrometry[J]. Contemporary Chemical Industry, 2022, 51(4): 997−1000.］
［12］ 褚洪强, 诸葛宁军, 陈赛赛, 等. 粮油食品中真菌毒素常见检测方法研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(4): 1−9. ［CHU Hongqiang, ZHUGE Ningjun, CHEN Saisai, et al. Research progress on common detection methods of mycotoxins in grain, oil and food[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(4): 1−9.］
［13］ YANG Y, LI G, WU D, et al. Recent advances on toxicity and determination methods of mycotoxins in foodstuffs[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 96: 233−252.
［14］ 尹昌. 基于三种纳米复合材料的电化学传感器构建及其在食品检测中的应用[D]. 南昌: 南昌大学, 2021. ［YIN Chang. Construction of electrochemical sensors based on three nanocomposites and their application in food detection[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021.］
［15］ KIM D H, HONG S Y, KANG J W, et al. Simultaneous determination of multi-mycotoxins in cereal grains collected from South Korea by LC/MS/MS[J]. Toxins, 2017, 9(3): 106.
［16］ ALDANA J R, SILVA L J G, PENA A, et al. Occurrence and risk assessment of zearalenone in flours from Portuguese and Dutch markets[J]. Food Control, 2014, 45: 51−55.
［17］ JUAN C, RITIENI A, MAñES J. Occurrence of Fusarium mycotoxins in Italian cereal and cereal products from organic farming[J]. Food Chemistry, 2013, 141(3): 1747−1755.
［18］ KPAN K K G, MANDA P, OSSEKE S M, et al. Dietary exposure to zearalenone in maize and millet grains and their porridges marketed in Abidjan (Côte d'Ivoire)[J]. Food Addit Contam Part A Chem Anal Control Expo Risk Assess, 2023, 40(9): 1264−1274.
［19］ 薛琳琳, 张朋振, 杨小进, 等. 玉米赤霉烯酮在玉米及其副产物中污染现状及生物脱毒研究进展[J]. 畜牧与兽医, 2024, 56(1): 145−151. ［XUE Linlin, ZHANG Pengzhen, YANG Xiaojin, et al. Review of research on contamination status of zearalenone in maize and its co-products and biological detoxification[J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2024, 56(1): 145−151.］
［20］ 苏青云, 齐莎日娜, 雷元培, 等. 2022 年中国饲料和原料中霉菌毒素污染调查报告[J]. 饲料工业, 2024, 45(9): 121−125. ［SU Qingyun, QI Sharina, LEI Yuanpei, et al. A survey report on the mycotoxin contamination of Chinese raw materials and feed in 2022[J]. Feed Industry, 2024, 45(9): 121−125.］
［21］ ALEXANDER J, BENFORD D, BOOBIS A, et al. Scientific opinion on the risks for animal and public health related to the presence of Alternaria toxins in feed and food[J]. EFSA Journal, 2011, 9(10): 2407.
［22］ GB 2762-2017《食品安全国家标准食品中污染物限量》[J]. 中国食品卫生杂志, 2018, 30(3): 329-340. ［GB 2762-2017 National food safety standard limits of contaminants in food [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2018, 30(3): 329-340.］
［23］ 《食品安全国家标准食品中真菌毒素限量》(GB 2761-2017)及《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762-2017)解读[J]. 中国食品卫生杂志, 2017, 29(2): 154, 229, 237, 250. ［Interpretation of the national food safety standards: Maximum levels of mycotoxins in food (GB 2761-2017) and maximum levels of contaminants in food (GB 2762-2017) [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2017, 29(2): 154, 229, 237, 250.］
［24］ 补彤. 基于多元微生物载体的玉米赤霉烯酮高灵敏免疫层析检测方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022. ［BU Tong. Multi-microorganisms carriers-based high-sensitivity immunochromatographic assay for detection[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2022.］
［25］ ZINEDINE A, SORIANO J M, MOLTÓ J C, et al. Review on the toxicity, occurrence, metabolism, detoxification, regulations and intake of zearalenone: An oestrogenic mycotoxin[J]. Food Chem Toxicol, 2007, 45(1): 1−18.
［26］ ROPEJKO K, TWARUŻEK M. Zearalenone and its metabolites-general overview, occurrence, and toxicity[J]. Toxins (Basel), 2021, 13(1): 35.
［27］ ZHANG S, ZHOU S, GONG Y Y, et al. Human dietary and internal exposure to zearalenone based on a 24-hour duplicate diet and following morning urine study[J]. Environment International, 2020, 142: 105852.
［28］ MISHRA S, MISHRA S, PATEL S S, et al. Carbon nanomaterials for the detection of pesticide residues in food: A review[J]. Environ Pollut, 2022, 310: 119804.
［29］ 吴嘉浩. 基于碳纳米管的电离式微气体传感器的制备与性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008. ［WU Jahao. Research and fabrication of carbon nanotube based ionization micro gas sensor[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.］
［30］ RATHINAVEL S, PRIYADHARSHINI K, PANDA D. A review on carbon nanotube: An overview of synthesis, properties, functionalization, characterization, and the application[J]. Materials Science and Engineering: B, 2021, 268: 115095.
［31］ MESKHER H, RAGDI T, THAKUR A K, et al. A Review on CNTs-based electrochemical sensors and biosensors: Unique properties and potential applications[J]. Crit Rev Anal Chem, 2024, 54(7): 2398−2421.
［32］ MU Z, MA L, WANG J, et al. A target-induced amperometric aptasensor for sensitive zearalenone detection by CS@AB-MWCNTs nanocomposite as enhancers[J]. Food Chem, 2021, 340: 128128.
［33］ MA L, BAI L, ZHAO M, et al. An electrochemical aptasensor for highly sensitive detection of zearalenone based on PEI-MoS(2)-MWCNTs nanocomposite for signal enhancement[J]. Anal Chim Acta, 2019, 1060: 71−78.
［34］ QILENG A, HUANG S, HE L, et al. Composite films of CdS nanoparticles, MoS_2 nanoflakes, reduced graphene oxide, and carbon nanotubes for ratiometric and modular immunosensing-based detection of toxins in cereals[J]. ACS Applied Nano Materials, 2020, 3(3): 2822−2829.
［35］ RIBERI W I, TARDITTO L V, ZON M A, et al. Development of an electrochemical immunosensor to determine zearalenone in maize using carbon screen printed electrodes modified with multiwalled carbon nanotubes/polyethyleneimine dispersions[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 254: 1271−1277.
［36］ PAPAGEORGIOU D G, KINLOCH I A, YOUNG R J. Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites[J]. Progress in Materials Science, 2017, 90: 75−127.
［37］ PENGSOMJIT U, ALABDO F, KARUWAN C, et al. Innovative graphene-based nanocomposites for improvement of electrochemical sensors: Synthesis, characterization, and applications[J].

Crit Rev Anal Chem, 2024: 1−19.
[38] ZENG Y, CAMARADA M B, LU X, et al. Detection and electrocatalytic mechanism of zearalenone using nanohybrid sensor based on copper-based metal-organic framework/magnetic Fe_3O_4-graphene oxide modified electrode[J]. Food Chem, 2022, 370: 131024.
[39] ZHOU B, XIE H, ZHOU S, et al. Construction of AuNPs/reduced graphene nanoribbons co-modified molecularly imprinted electrochemical sensor for the detection of zearalenone[J]. Food Chem, 2023, 423: 136294.
[40] LI H, EDDAOUDI M, O'KEEFFE M, et al. Design and synthesis of an exceptionally stable and highly porous metal-organic framework[J]. Nature, 1999, 402(6759): 276−279.
[41] CARREON M A, VENNA S R. Metal-organic framework membranes for molecular gas separations[M]. Singapore: World Scientific Publishing, 2020.
[42] ALTINTAS C, ERUCAR I, KESKIN S. MOF/COF hybrids as next generation materials for energy and biomedical applications [J]. CrystEngComm, 2022, 24(42): 7360−7371.
[43] DING M, CAI X, JIANG H L. Improving MOF stability: Approaches and applications[J]. Chem Sci, 2019, 10(44): 10209−10230.
[44] GAO J, GENG S, CHEN Y, et al. Theoretical exploration and electronic applications of conductive two-dimensional metal-organic frameworks[J]. Top Curr Chem (Cham), 2020, 378(2): 25.
[45] WANG Q X, LI G. Bi (III) MOFs: Syntheses, structures and applications[J]. Inorganic Chemistry Frontiers, 2021, 8(3): 572−589.
[46] LAI H, MING P, WU M, et al. An electrochemical aptasensor based on P-Ce-MOF@MWCNTs as signal amplification strategy for highly sensitive detection of zearalenone[J]. Food Chem, 2023, 423: 136331.
[47] LAI D, MU Z, ZUO J, et al. Perylene-based electrochemiluminescent metal–organic frameworks for detection of zearalenone [J]. ACS Applied Nano Materials, 2023, 6(23): 22416−22425.
[48] DUAN F, RONG F, GUO C, et al. Electrochemical aptasensing strategy based on a multivariate polymertitanium-metal-organic framework for zearalenone analysis[J]. Food Chem, 2022, 385: 132654.
[49] CRETESCU I, LUTIC D, MANEA L R. Electrochemical sensors for monitoring of indoor and outdoor air pollution[J]. Electrochemical Sensors Technology, 2017, 65.
[50] BARANWAL J, BARSE B, GATTO G, et al. Electrochemical sensors and their applications: A review[J]. Chemosensors, 2022, 10(9): 363.
[51] 谭红霞, 马良, 郭婷, 等. 玉米赤霉烯酮新型生物传感器检测技术研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(2): 240−246. [TAN Hongxia, MA Liang, GUO Ting, et al. Research progress of biosensor technology for detecting zearalenone[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(2): 240−246.]
[52] YAN H, HE B, REN W, et al. A label-free electrochemical immunosensing platform based on PEI-rGO/Pt@Au NRs for rapid and sensitive detection of zearalenone[J]. Bioelectrochemistry, 2022, 143: 107955.
[53] KUMAR V S, KUMMARI S, CATANANTE G, et al. A label-free impedimetric immunosensor for zearalenone based on CS-CNT-Pd nanocomposite modified screen-printed disposable electrodes[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2023, 377: 133077.
[54] JIANG X, MU Z, WANG J, et al. A novel sandwich-type electrochemical immunosensor for sensitive detection of zearalenone using NG/PDDA/HNTs and Ti-MOF-KB composites for signal amplification[J]. Food Chem, 2024, 436: 137704.
[55] 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 Yan, BAO Shilei, SUN Lirui, et al. Recent progress on the application of electrochemical technology in food detection[J]. Food Science, 2024, 45(3): 295−306.]
[56] SUO Z, NIU X, LIU R, et al. A methylene blue and Ag^+ ratiometric electrochemical aptasensor based on Au@Pt/Fe-N-C signal amplification strategy for zearalenone detection[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2022, 362: 131825.
[57] YAN H, HE B, ZHAO R, 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]. J Hazard Mater, 2022, 438: 129491.
[58] SUN Y, QI S, DONG X, et al. Colorimetric aptasensor targeting zearalenone developed based on the hyaluronic acid-DNA hydrogel and bimetallic MOFzyme[J]. Biosens Bioelectron, 2022, 212: 114366.
[59] ZHU W, JI G, CHEN R, et al. A fluorescence aptasensor based on hybridization chain reaction for simultaneous detection of T-2 toxins and zearalenone(1)[J]. Talanta, 2023, 255: 124249.
[60] YU Y, CHEN K, DU Z, et al. Magnetic aptamer copper nanoclusters fluorescent biosensor for the visual detection of zearalenone based on docking-aided rational tailoring[J]. Food Chem, 2024, 448: 139127.
[61] CAO Y, WU R, GAO Y Y, et al. Advances of Electrochemical and electrochemiluminescent sensors based on covalent organic frameworks[J]. Nanomicro Lett, 2023, 16(1): 37.
[62] BABAMIRI B, BAHARI D, SALIMI A. Highly sensitive bioaffinity electrochemiluminescence sensors: Recent advances and future directions[J]. Biosens Bioelectron, 2019, 142: 111530.
[63] FANG D, ZHANG S, DAI H, et al. Electrochemiluminescent competitive immunoassay for zearalenone based on the use of a mimotope peptide, Ru(II)$(bpy)_3$-loaded $NiFe_2O_4$ nanotubes and TiO_2 mesocrystals[J]. Mikrochim Acta, 2019, 186(9): 608.
[64] WANG J, XIA M, WEI J, et al. Dual-signal amplified cathodic electrochemiluminescence aptsensor based on a europium-porphyrin coordination polymer for the ultrasensitive detection of zearalenone in maize[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2023, 382: 133532.
[65] FENG Y, CHENG G, WANG Z, et al. Electrochemiluminescence immunosensor based on tin dioxide quantum dots and palladium-modified graphene oxide for the detection of zearalenone[J]. Talanta, 2024, 271: 125740.
[66] LI Y, LUO L, KONG Y, et al. Recent advances in molecularly imprinted polymer-based electrochemical sensors[J]. Biosens Bioelectron, 2024, 249: 116018.
[67] MOYA-CAVAS T, NAVARRO-VILLOSLADA F, LUCAS URRACA J, et al. Simultaneous determination of zearalenone and alternariol mycotoxins in oil samples using mixed molecularly imprinted polymer beads[J]. Food Chem, 2023, 412: 135538.
[68] ZHOU B, XIE H, LI X, et al. Construction of a self-reporting molecularly-imprinted electrochemical sensor based on CuHCF modified by rGNR-rGO for the detection of zearalenone[J]. Food Chem, 2024, 448: 139154.