DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260316002
引用格式: 徐兰, 孔芳, 刘小红, 等. 金属有机框架材料在食品安全传感检测中的应用进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(18): 132–142.
Xu Lan, Kong Fang, Liu Xiaohong, et al. Application progress on metal-organic framework materials in food safety sensing and detection [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(18): 132–142. (in Chinese with English abstract).

金属有机框架材料在食品安全传感检测中的应用进展

徐　兰, 孔　芳, 刘小红, 杨荣娇, 聂晓明, 罗　苹, 熊　碧, 杨清清, 闻　胜*
(湖北省疾病预防控制中心, 国家卫生健康委员会食品安全风险评估与标准研制特色实验室, 武汉　430079)

摘　要: 食品安全是全球关注的重大公共卫生问题, 食品中有害污染物对人体健康构成潜在威胁, 因此开发高效、灵敏、可靠的污染物检测技术具有重要的现实意义。金属有机框架(metal-organic frameworks, MOFs)材料因其结构可调、比表面积大、功能多样等特性, 在构建高灵敏、高选择性传感检测平台方面展现出显著优势, 已成为推动食品安全检测技术创新的重要材料基础。本文综述了近年来基于 MOFs 材料构建的各类传感器及其在食品污染物检测中的应用进展, 重点阐述其在重金属离子、食品添加剂、农药残留及兽药残留等关键风险因子检测方面的传感机制与性能特点。近期研究表明, MOFs 基传感器正向多元化、快速化、可视化和智能化方向发展。最后, 本文围绕 MOFs 基传感器在食品污染物检测应用中的灵敏度、选择性、材料稳定性、多靶标同步检测及即时检测与智能化等共性问题进行了总结, 并展望其未来发展趋势, 以期为推动食品安全检测技术的智能化、精准化与实用化提供理论参考与技术路径。

关键词: 食品安全; 金属有机框架材料; 食品污染物检测; 传感器
中图分类号: TS207.5; TP212　　**文献识别码:** A　　**文章编号:** 2095–0381(2026)18–0132–11

Application progress on metal-organic framework materials in food safety sensing and detection

XU Lan, KONG Fang, LIU Xiao-Hong, YANG Rong-Jiao, NIE Xiao-Ming, LUO Ping, XIONG Bi, YANG Qing-Qing, WEN Sheng*
(*Hubei Provincial Center for Disease Control and Prevention*, *National Health Commission Specialty Laboratory of Food Safety Risk Assessment and Standard Development*, *Wuhan* 430079, *China*)

ABSTRACT: Food safety is a major public health concern worldwide. Harmful contaminants in food pose potential risks to human health. Therefore, the development of efficient, sensitive and reliable pollutant detection technologies have significant practical significance. Metal–organic frameworks (MOFs) materials, with their tunable structures, large

收稿日期: 2026-03-16
基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF1104800); 武汉市预防医学科研专项重点项目(WY22A02)
第一作者: 徐兰(1995—), 女, 硕士, 检验技师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: 2639020707@qq.com
***通信作者:** 闻胜(1977—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为食品安全。E-mail: 30723280@qq.com

specific surface areas and versatile functionalities, possess unique advantages in constructing highly sensitive and selective sensing platforms, and have become an important material foundation for innovative progress in food safety detection. This review summarized the recent advances of MOFs-based sensors and their applications progress in the detection of food contaminants, focusing on sensing mechanisms and performance characteristics for major hazardous factors such as heavy metal ions, food additives, pesticide residues and veterinary drug residues. Recent studies showed that MOFs-based sensors were evolving toward rapid, visual and intelligent detection. Finally, this review summarized the common issues facing MOFs-based sensors in food contaminant detection, including sensitivity, selectivity, material stability, simultaneous multi-target detection and instant detection and intelligentization, and prospected the future development trends, which aims to provide theoretical references and technical guidance for the development of intelligent, accurate and practical food safety detection technologies in the field.

KEY WORDS: food safety; metal-organic frameworks; detection of food contaminants; sensors

0　引　言

近年来, 乳粉、血铅、油罐车等食品安全事件频发, 食品安全逐渐成为社会关注的焦点。当前, 食品安全问题的紧迫性日益凸显, 需采取有效的措施予以应对。食品污染物的检验检测作为确保食品质量安全的核心环节, 是预防与控制食品安全风险的关键手段。重金属超标、农药与兽药残留、食品添加剂滥用、真菌毒素污染及致病性微生物侵袭等典型问题, 已构成对公众健康的持续性威胁, 是日常食品安全风险监测的重点对象, 需通过更科学、系统的策略加以防控。因此, 研发准确、高效的检测技术对保障食品安全具有重要意义。液相色谱法、气相色谱法、原子吸收光谱法等传统分析方法虽灵敏度高、准确性好, 在食品安全检测中发挥了重要作用, 但主要依赖大型仪器, 存在设备昂贵、操作复杂、专业要求高等局限, 难以满足日常、现场及高通量的监测需求。因此, 开发实用、高效且便捷的新型检测方法已成为食品分析领域的迫切任务。

随着碳纳米管、量子点、石墨烯、金属有机框架(metal-organic frameworks, MOFs)材料等新型功能纳米材料的发展, 传感检测系统不断丰富, 检测方法持续更新。MOFs 作为一类性能优异的多孔晶体材料, 具有易修饰、孔隙率高、活性位点多、可发光、类酶活性等特性, 是构建先进传感系统的理想选择, 在传感检测平台的构建与应用中具有独特优势。通过将 MOFs 材料与光学、电化学等检测技术巧妙结合, 已成功开发了检测重金属、农药残留等关键污染物的多种 MOFs 传感平台。这类平台在实际检测中, 表现出较高的灵敏度、选择性与准确性, 同时具备操作简便、响应快速及成本相对较低的特点, 在食品安全分析领域具有广阔的应用前景与显著的技术优势[1–3]。本文综述了近年来基于 MOFs 材料构建的各类传感器(比色、荧光、电化学等)及其在食品污染物检测中的应用进展, 概述了其主要类型、传感策略与性能特征, 总结了当前面临的共性问题, 并展望了未来的发展方向与设计策略。以期为高性能 MOFs 传感平台的构建与食品安全检测技术的智能化、高效化发展提供参考, 推动其从实验室研究走向实际应用。

1　MOFs 的分类及其传感类型

1.1　MOFs 的结构特点

MOFs 由金属节点和有机配体自组装而成, 兼具无机材料的高稳定性与有机材料的结构可调性。在食品污染物检测应用中, 常见的金属节点包括锆、锌、铁、铕、铽等, 由其构建的 MOFs 主要结构类型有: 沸石咪唑酯骨架(zeolitic imidazolate frameworks, ZIFs)等网状金属有机框架(isoreticular metal-organic frameworks, IRMOFs)、拉瓦锡研究所系列(Matériaux de l'Institut Lavoisier, MILs)、奥斯陆大学锆基系列(University of Oslo, UiOs)、多孔配位网络(porous coordination networks, PCNs)等[4–6]。不同系列的 MOFs 在结构与检测性能上存在明显差异, 表 1 选取了部分代表性 MOFs 材料在不同食品基质中的应用实例及关键参数。从检测性能来看, 各方法的 LOD 差异较大, 部分可达 fg/mL 级; 加标回收率在 81.5%~114.5%之间, RSDs 多低于 5%, 部分低于 1%, 表明 MOFs 基传感器在食品污染物检测中已具备良好的灵敏度、准确度与精密度, 且能实现同时检测多种污染物。不同研究之间的性能差异主要源于目标物类型、传感策略、MOFs 结构及样品基质的复杂性。因此, 在开发新方法时, 需结合实际检测需求研制, 而非单纯追求 LOD 更低。

1.2　MOFs 基传感器的主要类型及构建原理

基于 MOFs 的多孔结构和易修饰等优异性能, 将其与光学、电化学等检测技术结合, 目前已研发出比色、荧光、电化学及表面增强拉曼散射(surface-enhanced Raman scattering, SERS)等多种类型的 MOFs 基传感器[12–14]。

表 1 常见 MOFs 结构类型及其检测应用实例

Table 1 Common MOFs structure types and their application examples in detection

结构类别	MOFs 名称	污染物类别	食品基质类别	线性范围	LODs	回收率/%	RSDs/%	参考文献
ZIFs	ZIF-67	日落黄(食品添加剂)	饮料、零食	0.9~5.2 μmol/L	0.103 μmol/L	95~105	<1	[7]
IRMOFs	Co@IRMOF-9	Hg^{2+}、Pb^{2+}(重金属)、NO_2^-	水、牛奶	Hg^{2+}: 0.04~10.00 mol/L Pb^{2+}: 0.05~100.00 mol/L NO_2^-: 0.05~100.00 mol/L	Hg^{2+}: 1.33 nmol/L Pb^{2+}: 1.66 nmol/L NO_2^-: 1.27 nmol/L	Hg^{2+}: 95~105 Pb^{2+}: 96.8~106.0 NO_2^-: 95~106	Hg^{2+}≤5 Pb^{2+}≤4 NO_2^-≤1.5	[8]
MILs	NH_2-MIL-101(Cr)	氧氟沙星(兽药)	蜂蜜	25~600 μg/kg	7.36 μg/kg	81.5~105.3	<2.6	[9]
UiOs	UiO-66	敌瘟磷(农药)	大米	0.1~50.0 g/kg	0.03 mg/kg	96.56~114.50	<10.5	[10]
PCNs	PCN-224	黄曲霉毒素 B_1(真菌毒素)	玉米	1 fg/mL~100 ng/mL	0.91 fg/mL	95.97~108.67	<6.98	[11]

注: 检出限(limits of detection, LODs); 相对标准偏差(relative standard deviations, RSDs)。

MOFs 基传感器的主要设计策略有: (1)利用 MOFs 本身的发光或催化性质作为信号源, 实现免标记检测; (2)利用 MOFs 作为载体负载荧光染料、金属纳米颗粒、量子点或生物识别元件等(适配体、抗体、酶等), 借助高负载能力和保护作用设计传感策略; (3)利用 MOFs 的类酶催化活性(纳米酶特性)催化底物显色或产生电化学信号, 实现信号放大。

比色传感器可以借助 MOFs 的过氧化物酶催化特性, 催化底物发生显色反应, 可有效避免天然酶在使用中稳定性差、成本高等局限。该类传感器操作简便、无须复杂设备, 可目视化, 是开发现场检测和智能化传感平台的重要方法基础, 但其灵敏度相对较低[15]。

荧光传感器主要基于 MOFs 自身的本体发光或通过封装/键合外源性荧光分子, 产生荧光信号变化(荧光淬灭、荧光增强、荧光共振能量转移和内滤效应等), 具有灵敏度高、响应快等优点, 适用于痕量目标物检测及多污染物同时分析, 但食品基质的自体荧光易产生背景干扰, 是该类传感器在实际应用中需重点克服的瓶颈[16]。

SERS 传感器借助 MOFs 的高比表面积和有序孔道结构, 有效负载并稳定贵金属纳米粒子, 通过目标物的高效富集与贵金属电磁场增强的协同效应, 显著提升拉曼信号强度与检测重现性, 适用于复杂基质中痕量污染物的精准分析[17]。

电化学及电化学发光传感分析中常将 MOFs 材料与碳纳米管、属离子可与 MOFs 的骨架或修饰基, 利用 MOFs 高比表面积提供反应界面和催化活性位点, 提高电子转移效率, 实现对目标物的高灵敏、快速检测或利用 MOFs 负载电活性物质构建刺激响应系统[18–19]。该传感方法信号不受样品浊度和颜色干扰, 可用于微型化便携式检测设备的开发和多靶标同步检测。

值得注意的是, 各类型 MOFs 传感器在检测性能(灵敏度、选择性及抗干扰能力等)上各有局限。将两种及以上传感机制相结合构建双模/多模态传感器, 可通过信号交叉验证及优势互补等有效规避传统单一信号潜在的假阳性/假阴性, 显著提升可靠性与准确度。如 Qi 等[20]集比例荧光、比色及智能手机分析 3 种模式于一体用于检测 Hg^{2+}, 3 种模式灵敏度均达 nmol/L 级别, 其中荧光传感模式最灵敏, 而比色与智能手机模式更利于现场操作。Chai 等[21]基于双纳米酶体系(MOF-818@PMOF)和适配体, 构建比色-化学发光双模毒死蜱传感器, 化学发光模式较比色模式灵敏约 20 倍, 分别适配痕量定量(化学发光)与现场初筛(比色)。Li 等[22]利用 Fe-MIL-88 双功能信号探针实现赭曲霉毒素 A 的比色-电化学-智能手机 3 种模式检测, LOD 达 fg/mL 级, 通过三通道交叉验证显著降低了单一模式的假阳性风险。所得检测结果与商用酶联免疫试剂盒检测结果高度吻合。此外, 多模传感器在兽药残留(孔雀石绿[23]、四环素[24]等方面也已广泛应用。由此可见, 多模态集成并非简单堆叠多种检测技术, 而是通过将功能材料与多检测技术复合, 实现不同的通道信号服务于不同的检测场景(高灵敏的定量分析或现场快速筛查等), 并通过不同信号响应满足交叉确证需求。这种设计思路的优势在于以单一材料体系提供多元信息, 而非单纯追求更低的检出限。

2 MOFs 传感平台在食品安全检测中的应用

MOFs 基传感器在食品安全检测中已得到广泛应用。图 1 展示了各类 MOFs 传感器及其主要检测对象, 下文将以此为基础, 分别论述其在重金属离子、农药残留、兽药残留、食品添加剂及真菌毒素等典型污染物检测中的研究进展。

2.1　重金属离子

食品在生产、加工、运输及储存环节中易受 Pb、Cd、Hg、Se 等重金属离子污染，这些污染物具有高毒性，且在体内富集，对健康构成严重威胁。研究表明，长期摄入超标重金属离子可引发神经损伤、肾功能障碍及癌症等多种疾病。因此，开发并应用高效、准确的重金属检测技术是食品安全风险监测体系中的关键环节。MOFs 传感器在重金属离子检测中应用广泛，其中电化学传感器和荧光传感器是主要的研究方向(表 2)。

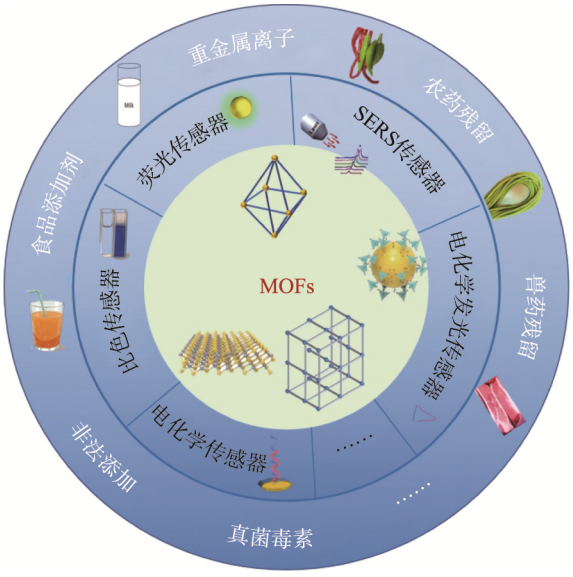


图 1　基于 MOFs 的传感器用于食品污染物分析的示意图

Fig.1　Schematic diagram of MOFs-based sensors for the analysis of food contaminants

在荧光传感方面，MOFs 既可充当传感平台又可作为信号源，金属离子可与 MOFs 的骨架或修饰基团直接发生化学作用，改变发光信号。如 Yan 等[25]制备了硫掺杂碳点复合发光 MOF[UiO-66-NH_2(Eu)-CD(s)]，基于硫与 Hg^{2+}、Pb^{2+}的强亲和络合作用，构建了荧光开启型传感平台，可在宽温度(15~35 ℃)和 pH (4~7)区间内实现水中痕量 Hg^{2+}、Pb^{2+}的荧光检测。而 Li 等[26]基于靶标 Hg^{2+}存在时，双发射荧光 Eu-MOF 在 615 nm 处的荧光强度下降，338 nm 处的荧光强度基本保持不变，构建比率荧光传感策略，LOD 低至 0.0890 nmol/L。Sada 等[27]利用 Pb^{2+}对 MOF 的荧光淬灭作用，基于 NH_2-MIL-125 设计了一种荧光可逆传感策略，通过 EDTA 竞争络合实现荧光“OFF-ON”切换，LOD 低至 7.7 pmol/L。该灵敏度远低于世界卫生组织及各国监管机构制定的饮用水铅限量标准，表明该方法在实际水样检测中具有良好的应用潜力。此外，通过对 MOFs 表面进行功能化修饰，引入特定的功能单元(如化学显色剂、纳米酶或生物识别分子等)，可借助目标离子与修饰物之间的特异性反应，实现对特定重金属离子的间接灵敏检测。如 Rouhi 等[28]将适配体固定于 ZIF-8@AuNPs 表面，利用适配体对铅离子的特异性识别引发荧光恢复，LOD 低至 0.24 pmol/L，已成功应用于鱼肉、鲜虾、自来水、牛奶等多种基质样品中 Pb 的定量分析。而 Jain 等[29]基于 T-Hg^{2+}-T 配位作用，在 MOFs 表面修饰核酸探针，构建了汞离子的荧光/比色双模式传感器。

在电化学传感方面，MOFs 可富集浓缩目标金属离子或表面修饰特异性识别基团，同时可利用复合材料增强电化学放大信号实现高灵敏检测。如 Shi 等[30]基于纳米复合材料(MXene-NH_2@CeFe-MOF)对 Cd^{2+}、Pb^{2+}、Hg^{2+}特异性配位吸附，结合 MXene 的高导电通路与 Ce、Fe 双金属的协同电催化作用，显著提升了电极的富集能力和电化学信号。在鱼肉、牛奶及谷物样品中实现了 3 种重金属的同步检测，结果与电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)吻合，表明此设计方法具有良好的可靠性。此外，基于 MOFs 自身电化学活性的直接传感[31]及结合生物识别单元的纸基传感器[32]亦被用于食品基质中 Pb^{2+}和 Cd^{2+}的检测，进一步表明 MOFs 传感体系在复杂基质中重金属离子定量分析中具有良好的普适性。

值得注意的是，DNAzyme 功能核酸是一类性能优异的生物识别元件，DNAzyme 可在 Pb^{2+}、Hg^{2+}等特定金属离子辅助下催化底物发生反应，兼具信号放大与特异性识别等性能，将 MOFs 材料与 DNAzyme 相结合是构建间接检测重金属离子的重要研究方向之一。目前，基于 DNAzyme 的 MOFs 传感策略已在多种重金属离子的检测中取得进展(表 2)，其中荧光传感模式是目前应用最广泛的，同时比色法和电化学法亦展现出良好的发展潜力。如 Gao 等[33]以 Zr-MOF 为荧光淬灭基底，结合 DNAzyme 对 Pb^{2+}的特异性识别与切割特性，构建了荧光开启型传感器，实现了茶叶样品中 Pb^{2+}的灵敏检测，LOD 为 1.70 nmol/L，同时对多种共存金属离子表现出优异的选择性。而 Liang 等[34]基于靶标 Pb^{2+}激活 DNAzyme 切割活性，构建的 DNA 步行器循环放大电化学检测策略进一步提升了灵敏度，LOD 低至 4.65 pmol/L，灵敏度差距约为 3 个数量级。此外，Ravikumar 等[35]构建的 Y 型 DNAzyme 双模式传感器(荧光-比色)，可实现 Pb^{2+}、Hg^{2+}和 Cu^{2+} 3 种金属离子同时检测。上述研究表明，将 MOFs 的信号转导与 DNAzyme 的高特异性识别能力相结合，可在荧光、电化学、比色等多种传感模式下实现信号的有效输出，有望为食品中痕量重金属的现场快速筛查提供兼具灵敏度和操作便捷性的新方案。

表 2 汇总了上述 MOFs 传感器在代表性重金属离子检测中的关键性能参数。由表 2 可知，基于不同信号模式的传感器均能实现痕量水平的灵敏检测，部分电化学传感器的 LOD 可达 pmol 至 nmol 水平(如 Cd^{2+}低至

0.020 pmol/L、0.076 pmol/L)。值得注意的是, 不同 MOFs 材料对同一目标离子的 LOD 差异可达 2~3 个数量级, 这既与 MOFs 自身的比表面积、孔径和活性位点有关, 也与信号放大策略(如 DNA 步行器循环放大、DNAzyme 催化切割)密切相关。目前, 多数传感器的 LOD 已低于国标限量 1~2 个数量级, 灵敏度已可满足实际检测需求, 但同步检测多种金属离子的能力仍远不及 ICP-MS、原子吸收法等仪器方法, 多目标物的同时区分仍是该领域面临的主要挑战。

表 2 代表性 MOF 传感器在重金属离子检测中的性能对比

Table 2 Performance comparison of representative MOF-based sensors for heavy metal ion detection

MOFs 材料	靶标离子	基质类别	传感器类别	传感策略	LODs	文献
UiO-66-NH_2(Eu)-CD(s)	Hg^{2+}、Pb^{2+}	水样	荧光	MOF 直接传感	76.67 nmol/L, 5.12 nmol/L	[25]
Eu-MOF	Hg^{2+}	水样	荧光	MOF 直接传感	0.0890 nmol/L	[26]
NH_2-MIL-125	Pb^{2+}	水样	荧光	MOF 直接传感	7.7 pmol/L	[27]
ZIF-8@AuNPs	Pb^{2+}	鱼肉、鲜虾、自来水、牛奶	荧光	间接-适配体	0.24 pmol/L	[28]
CuNCs@Zr-MOF	Hg^{2+}	水及水产品	荧光/比色	T-Hg^{2+}-T	0.59 nmol/L(荧光), 36.3 nmol/L(比色)	[29]
MXene-NH_2@CeFe-MOF-NH_2	Cd^{2+}、Pb^{2+}、Hg^{2+}	鱼类、牛奶、大米等	电化学	MOF 直接传感	0.69 nmol/L , 0.95 nmol/L, 0.33 nmol/L	[30]
ZMTE-MOF	Pb^{2+}	水和食品	电化学	MOF 直接传感	0.03 nmol/L	[31]
ZIF-8	Cd^{2+}	牛奶和咖啡	荧光	适配体	0.076 pmol/L	[32]
Zr-MOFs	Pb^{2+}	茶叶	荧光	脱氧核酶(deoxyribozyme, DNAzyme)	1.7 nmol/L	[33]
AuNPs@Zr-MOF	Pb^{2+}	米粉、茶叶和蜂蜜	电化学	DNAzyme	4.65 pmol/L	[34]
MIL-101(Fe)	Pb^{2+}、Hg^{2+}和 Cu^{2+}	水样	荧光	DNAzyme	≤1 nmol/L	[35]
NH_2-UiO-66	Cd^{2+}、Pb^{2+}	海鲜	电化学	MOF 直接传感	0.16 μg/L, 0.07 μg/L	[36]
Bi_2CuO_4@Al-MOF@UiO-67	Cd^{2+}、Cu^{2+} 、Pb^{2+}、Hg^{2+}	大米、蜂蜜、玉米、茶叶等	电化学	MOF 直接传感	0.02 pmol/L, 0.032 mol/L, 0.018 pmol/L, 0.041 pmol/L	[37]

2.2 农药残留

农药广泛应用于果蔬等作物生产中, 多为有机有毒小分子。若使用不当易在农产品及环境中残留, 长期摄入可能增加消费者患白血病、脑癌、乳腺癌等疾病的风险。农药种类繁多(有机磷、有机氯、拟除虫菊酯、新烟碱类等), 且理化性质差异显著。GB 2763—2026《食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量》对各类农药在不同食品基质中的最大残留限量作出了严格规定, 部分农药限量低至 μg/kg、ng/kg, 这对检测方法的灵敏度、选择性和通量均提出较高的要求, 给传感器的通用性设计也带来挑战。MOFs 传感平台已在农药残留检测领域得到广泛应用, 研究者围绕实验室精准定量、现场快速筛查及多靶标同步检测等方向进行了系统探索, 并取得了进展[38–39]。

在实验室精准定量方面, 研究者基于 MOFs 已发展出多种传感策略, 在灵敏度和回收率等方面取得了良好效果, 如利用氯硝胺对 Eu^{3+}@Zn-MOF 荧光的淬灭作用, 在新鲜蔬菜等样品检测中得到了可靠的结果(回收率为 97.50%~101.69%, RSD<9.77%)[40]; 借助锆基发光金属框架(Zr-LMOF)与有机磷农药的配位响应, 对甲基对硫磷和对硫磷的 LOD 低至 0.115 μg/mL[41]; 将分子印迹技术引入 Cu 掺杂 MIL-88 纳米酶中, 实现了对高效氯氟氰菊酯的特异性检测, LOD 为 15.0 ng/L[42]; 以及通过 MOF 孔径调节使之与 2,6-二氯-4-硝基苯胺完全匹配, 并结合计算机视觉在水果表面实现裸眼半定量输出, 突破了传统溶液测试的局限[43]。上述基于识别机制差异的策略在灵敏度、回收率和选择性方面各有突破, 然而, 对于复杂基质中共存物引起的内滤效应和基线漂移等问题仍难以有效应对。为此, 研究者进一步引入信号自校正策略, 通过引入内标物{如罗丹明 B、三(2,2'-联吡啶)钌(II)$[Ru(bpy)_3]^{2+}$等}构建比率型探针, 借助双信号比值抵消基质效应影响。如以亚甲基蓝为内参构建的比率型草甘膦传感器, 有效抵消环境波动误差, LOD 低至 14 pmol/L[44]。

在农业实践中, 多种农药混合施用是提高防治效果的常用方法。为实现此类混合农药的快速灵敏检测, 阵列式传感器因具备多靶标同步响应与模式识别能力而受到广泛关注。Gong 等[45]基于分级限域纳米酶(ZrMOF@Pt@ZrMOF), 构建了一种三通道比色传感器阵

列, 对甲胺磷、水胺硫磷等 5 种有机磷农药实现高通量鉴别与定量检测分析。Huang 等[46]利用不同农药对 3 种 Fe-MOFs 纳米酶过氧化物酶活性的差异化响应, 构建了三通道比色传感阵列, 实现了 5 种农药的同时区分检测, 最低可区分浓度低至 1 μg/mL。与单一农药检测相比, 多残留检测在通量和效率上优势明显, 但灵敏度和选择性往往有所折中。此外, 当前多数 MOFs 多残留传感策略仍以实现广谱筛查为主, 尚难以同步区分具体种类。如多功能磁-荧光纳米探针(Fe_3O_4@RhB@ZIF90@AChE)[47]和 MOFs 适配体传感平台[48], 均可实现对 4 种农药的同时响应, LOD 达 ng/mL 级, 但在种类区分方面仍需结合识别模式或阵列化设计进一步突破。因此, 多残留检测需在通量、灵敏度和选择性之间寻求平衡, 实际应用中应根据检测场景选择合适的技术路线。如何在高通量检测的同时降低交叉干扰、提升灵敏度和区分能力, 是未来研究需突破的核心方向。

2.3　兽药残留

兽药在畜牧养殖中广泛使用, 对预防动物疾病、保障生产效益具有重要意义。然而, 滥用或过量使用可导致药物在动物源性食品中残留, 损伤肝脏、肾脏等器官。抗生素类、磺胺类、激素等兽药是动物性食品中常见的超标物, 也是动物性食品安全监测的重要指标。兽药残留检测的难点在于基质复杂(肉、蛋、奶中蛋白质和脂肪含量高)且代谢物多样, 对样品前处理和传感器的抗干扰能力提出了较高要求。MOFs 基传感器在此类复杂基质中展现出多功能分析特性, 在兽药残留检测领域受到广泛关注[49–50]。

复杂食品基质易导致信号漂移和非特异性吸附, 因此兽药残留检测中 MOFs 材料的稳定性、传感器的抗干扰性能及长期储存的可靠性等均需重点关注。在稳定性方面, Mn-MOF 电化学传感器在室温存放 7 d 后, 响应信号保留率大于 94.6%, 性能变化幅度为 2.4%[51]; 二维 Cd-MOF 在水中可稳定 90 d、耐 pH 3~12[52]; Cu-MOF 传感器在储存 15 d 内对潮霉素 B 检测的相对标准偏差仅为 1.3%[53]。研究表明, MOFs 传感器在实验检测中不仅具备优异的储存稳定性, 还表现出高度一致的重现性, 部分研究甚至展现了良好的长期可用性, 为其实际现场应用奠定了可靠基础。在选择性方面, 发光 MOF 探针实现在 36 种常用兽药筛查中能对土霉素、金四环素等 6 种兽药实现快速、灵敏、高特异性检测[54]; Eu-MOFs@水凝胶复合材料, 对 11 种常见兽药表现出优异的选择性和抗干扰能力, 基于此成功开发了用于检测环丙沙星的智能手机可视化试剂盒[55]。荧光 MOFs 杂化膜传感器阵列不仅对 19 种常规抗生素和 10 种非抗生素类化合物表现出差异化荧光响应, 且在 25 ℃下储存 30 d 后光信号几乎无衰减, 显示出良好的储存稳定性[56]。上述工作表明, 通过 MOFs 结构设计和功能化修饰, MOFs 传感器可在复杂食品基质中实现对特定兽药的选择性识别和抗干扰检测, 然而多数验证仍以理想条件下的选择性测试为主, 在实际复杂食品基质中的长期检测性能有待进一步考察, 且对真实动物源性食品阳性结果测定较少。

动物源性样品中目标物浓度低、干扰物众多, 样品前处理往往不可或缺。MOFs 对复杂基质中的目标物具有富集和分离优势。相较于单独开发 MOFs 基前处理材料或传感检测平台, 将 MOFs 的前处理功能与检测模块系统整合, 构建“前处理-检测”一体化分析平台, 在简化操作、缩短时间和提升现场适用性方面更具潜力。然而, 目前多数研究仅将 MOFs 定位为固相萃取剂[57]或传感元件, 针对一体化策略的系统性研究尚不充分。现有研究多通过孔道吸附、静电吸附、π-π 堆积和氢键等相互作用实现目标物的富集前处理。如利用 ZIF-67 的孔道吸附目标物, 将其富集至 10 nm 以内的拉曼热点区域, 经磁分离后原位 SERS 检测[58]; 通过 Zr-MOF 的 π-π 堆积富集磺胺类抗生素并结合内标进行 SERS 校正[59], 以及借助高熵 MOF 的氢键吸附四环素并增强催化比色响应[60], 均展示了一体化策略的可行性。此外, 现有研究多聚焦于富集环节, 对基质干扰的去除关注不足。如何将 MOFs 的富集、除杂与检测功能整合, 是推动该策略走向实用的关键。

2.4　食品添加剂

食品添加剂在保障食品供应链安全、延长保质期等方面发挥着关键作用, 适量使用合规食品添加剂可有效提升食品的色泽、风味与质地。但长期摄入超标或劣质产品可能对人体健康产生潜在危害[61–62]。因此建立精准高效的检测体系, 对保障食品安全具有重要意义。

与兽药和真菌毒素相比, 多数食品添加剂的允许使用量较高(g/kg 级别)。因此, 在实际监测中对灵敏度的要求相对略低, 对快速、现场检测策略的设计更有利。针对此特性, 研究者结合不同技术路径研发了多种便携化、智能化检测策略, 在光学传感方面, 如 Zhang 等[63]在保证实验室高灵敏荧光定量检测的同时, 将铽掺杂金属框架(Tb^{3+}@Zn-MOF)掺杂于聚乙烯醇基底中, 构建性能稳定、便于携带的荧光薄膜, 实现了对叔丁基对羟基茴香醚和安赛蜜的现场可视化半定量检测, LOD 分别为 0.42 μmol/L 和 78 nmol/L, 完全满足日常监测需求。Pan 等[64]以智能手机为信号读取终端, 将比率型双发射 Eu-MOF 探针与颜色识别应用程序结合, 通过红绿蓝(red-green-blue, RGB)值, 将颜色变化转化为数字信号, 避免了肉眼辨色的主观误差, 在茶叶和果汁样品中实现了没食子酸的现场快速定量检测。在电化学传感方面, Wang 等[65]将复合材料(MOF-545@PANI-800)修饰于丝网印刷电极, 构建了便携式叔丁基对苯二酚电化学传感器, LOD 低至 2.6 nmol/L, 且在薯片、芝麻油和湖水样品中回收率优异, 结果与高效液相色谱法高度一致。上述策略均以操作简便、结果直观为导向, 体现了食品添加剂检测从实验室精密定量向现场快速筛查发展的趋势。

不同于食品添加剂，三聚氰胺、苏丹红等非法添加剂对人体有毒有害，是食品安全法禁止使用的，因此对灵敏度有更高要求，需达到痕量甚至超痕量检测水平。基于UiO-66-NH_2@Ru[66]和 Tb@NH_2-MIL-253(Al)[67]的比率型荧光探针，已成功用于婴幼儿乳粉中三聚氰胺的快速灵敏检测，LOD 达 nmol/L 级别，显著低于婴幼儿配方奶粉中三聚氰胺的最大残留限量(1 mg/kg，约 7.9 μmol/L)。此外，Sun 等[68]利用复合纳米材料(AuNPs/Zr-MOF-石墨烯)制备的电化学传感器，在宽浓度范围(0.1~800.0 μmol/L)内实现了苏丹红 I 的灵敏检测，LOD 为 0.1 μmol/L。上述研究表明，MOFs 传感器在非法添加剂的痕量检测方面已展现出良好的应用潜力。

目前，食品添加剂检测面临种类繁多、非法添加与合法使用并存等问题。合法添加剂可以利用比色和荧光等传感器建立快速筛查方法；非法添加物可利用荧光、电化学和 SERS 等传感器构建痕量检测平台。然而，实际检测场景更为复杂，合法添加剂的允许使用浓度通常跨度较大(g/kg、mg/kg 级)，而非法添加物以痕量水平存在(mg/kg、μg/kg 甚至 ng/kg 级)，且两者在实际样品中可能共存，浓度差异可达数个数量级，对传感器的线性范围和检测限提出了双重挑战。现有 MOFs 基传感器在两方向均有涉及且性能较好，但多数工作仅针对添加剂或非法添加物，因此在实际检测中要注意合法添加剂的高灵敏和非法添加剂的衡量检测。如何在同一传感平台上实现合法添加剂与非法添加物区分检测，是食品添加剂检测的长期目标。

2.5 真菌毒素

真菌毒素是真菌产生的有毒次生代谢产物，常见于玉米、小麦、花生等粮食作物中。黄曲霉毒素、赭曲霉毒素 A、伏马菌素、展青霉素等是毒素食品安全监督的重点检测对象，具有种类多、毒性极强、限量极低等典型特点。以黄曲霉毒素 B_1 (aflatoxin B_1, AFB_1)为例，其被国际癌症研究机构列为一级致癌物[69−71]，在食品中的限量标准仅为 μg/kg 甚至 ng/kg。这一特点对检测方法的灵敏度提出了远高于重金属、农药等污染物的要求。

为实现超高灵敏度检测，信号放大是实验室的常用策略。信号放大技术通过将靶标识别与级联反应、核酸扩增或酶催化等手段结合，使单个靶标识别事件转化为大量可读信号，从而显著降低 LOD。在 MOFs 传感器中，研究者已研发了多种信号放大方式。表 3 汇总了采用不同信号放大策略的代表性 MOFs 真菌毒素传感器，并同时列出了部分未采用放大策略的传感器作为性能参照。从表 3 中可以看出，MOFs 传感器在真菌毒素检测中具有较高信号响应基础，部分未采用额外放大策略的传感器的 LOD 可达 ng/mL 甚至 pg/mL 级别，然而借助级联反应[72]、DNA 步行器扩增[73]、催化发夹自组装循环放大[74]和滚环扩增[22]及酶切循环[75]等放大策略能将检测灵敏度提升至 pg/mL、fg/mL 甚至更高水平，表明 MOFs 基传感器中信号放大方式可以满足痕量真菌毒素的超灵敏检测需求，为满足不同场景下的痕量真菌毒素检测需求提供了灵活的技术选择。

信号放大策略主要解决了检测灵敏度的问题，而传感器的选择性则依赖于识别元件的性能。适配体作为一类化学合成的单链 DNA 或 RNA，对靶标分子表现出高亲和力与特异性识别能力，且可与多种信号读出方式结合，是重要的识别元件，为传感器设计赋予了可拓展性。将适配体与 MOFs 相结合，MOFs 不仅能为适配体的固定提供理想界面、富集靶标分子、保护适配体免受核酸酶降解，还能利用自身的发光或电化学活性，将适配体的特异性识别转化为定量信号，最终实现识别与传感的协同检测。基于上述协同机制，适配体-MOFs 协同策略在真菌毒素检测中已有广泛研究，检测模式涵盖 SERS、荧光、电化学发光等不同类型。如 Chen 等[76]通过磁性金属框架(Fe_3O_4@UiO-66-NH_2)提供丰富结合位点，核壳纳米粒子增强拉曼信号，设计了一种检测 AFB_1 的 SERS 适配体传感器，在实际玉米样品检测中具有良好的选择性和准确性(回收率 94.3%~103.3%)。同样，该策略也被用于玉米赤霉烯酮[77]、展青霉素(回收率 90.10%~104.57%)[78]和脱氧雪腐镰刀菌烯醇(与高效液相色谱法结果无显著差异)[79]等检测中，表明其可根据目标物特性和检测需求灵活选择信号读出方式，在不同真菌毒素检测中均具有良好的适用性。更重要的是，适配体的序列可针对不同靶标进行筛选与设计，将多种适配体有序组装于同一 MOFs 界面，既可开展阵列式检测，也能实现同一体系中的多靶标同时检测。例如，借助适配体与靶标结合后引发的构象改变或竞争置换效应，利用 MOFs 封装氯化血红素/二茂铁或负载 Cu^{2+}和 Pb^{2+}构建的电活性探针，可在同一支电极上实现 AFB_1 和赭曲霉毒素 A 的无干扰同步测定[80−81]。而将多组 MOFs 基传感单元集成于微流控芯片构建的阵列式平台，能实现 3 种及以上真菌毒素同时筛查[84]。这些研究均表明，适配体的可调节、易修饰及特异性正推动 MOFs 基传感器从单一靶标向多靶标、高通量筛查的发展。

2.6 共性问题探讨

本文综述了近年来基于 MOFs 构建的各类传感平台及其在食品污染物检测中的应用进展。目前，MOFs 传感器在多靶标同步检测、现场快速筛查、灵敏度、稳定性、智能化及复杂基质适应性等方面取得了显著进展，但仍面临若干共性挑战。

在灵敏度方面，目前多数 MOFs 传感器已能够满足实际检测需求，LOD 普遍可达 ng/mL 甚至 pg/mL 级别；部分研究借助信号放大策略(如核酸扩增、纳米酶催化等)或比率型检测策略，将 LOD 进一步降至 fg/mL 甚至更高量级，这表明该类传感器在灵敏性能上已具备显著优势。

在准确度方面，现有研究虽普遍获得了较好的加标回收率，但验证手段仍以加标回收实验为主，且所采用的

食品基质相对单一(如仅涉及某一种谷物或牛奶), 缺乏对复杂实际样品(如多种基质比对、阳性样品)的系统考察。因此, 尽管该类传感器在实验室条件下的分析性能较为理想, 但其在实际复杂食品体系中的适用性和可靠性仍有待进一步验证。

在稳定性方面, 多数研究对 MOFs 在传感体系中的稳定性进行了探讨, 普遍报告了较好的短期稳定性, 但考察周期多集中在 7~15 d, 部分研究仅考察 3 或 5 d[68,85], 甚至部分未对稳定性进行考察; 亦有少数文献报告了 3 个月或 4 个月的长期稳定性[52,86], 但总体而言, 相关探讨仍显不足, 缺乏在复杂基质中的系统评估。综上, 尽管该类传感器在实验室条件下表现出较为优异的分析性能, 但在实际复杂食品体系中的可靠性和长期稳定性仍有待进一步验证。

表 3　典型 MOF 基真菌毒素传感器的检测策略与检测性能

Table 3　Detection strategies and analytical performance of typical MOF-based sensors for mycotoxin detection

MOFs 材料	目标物	传感器类别	信号放大策略	基质类别	LODs	文献
GOx@HKUST-1	AFB_1	比色	级联放大	玉米样品	0.004 ng/mL	[72]
Co-MOF	赭曲霉毒素	电化学	DNA 步行器扩增	红酒样品	0.31 fg/mL	[73]
Fe-Co MOF	AFB_1	比色	催化发夹自组装	花生、玉米及植物基肉制品	6.44 pg/mL	[74]
Fe-MIL-88	赭曲霉毒素 A	比色/电化学/智能手机	滚环扩增	玉米、小麦和红酒样品	0.22 fg/mL	[22]
Ni-Co$(HITP)_2$MOF	T-2 毒素	电化学	Exo III循环双重放大	啤酒	0.167 fg/mL	[75]
Fe_3O_4@UiO-66-NH_2	AFB_1	SERS 适配体	无	玉米样品	0.147 fg/mL	[76]
Ce-Zr MOFzyme	玉米赤霉烯酮	比色检测	杂交链式反应	玉米、大豆	0.8 pg /mL	[77]
Zr-MOF	展青霉素	荧光适配体	无	苹果汁	0.871 pg/mL	[78]
Ru-MOFs	脱氧雪腐镰刀菌烯醇	电化学发光适配体	无	小麦和玉米	9 ng/kg	[79]
HKUST-1 MOF	赭曲霉毒素 A 和 AFB_1	电化学适配体	无	玉米粉样品	4.3 ng/mL 5.2 ng/mL	[80]
UiO-66-NH_2	AFB_1、赭曲霉毒素	电化学适配体	无	谷物	6.2 ng/L, 3.7 ng/L	[81]
Ce-MOF@MIP	AFB_1	比色传感器	无	花生、鸡饲料和玉米	0.25 ng/mL	[82]
PVP-UiO-66	展青霉素	荧光	无	果汁	0.29 ng/mL	[83]

在多靶标同步检测方面。本文梳理的 MOFs 传感器已涵盖重金属、农药残留、兽药残留及真菌毒素等多种污染物, 从检测策略来看, 多靶标同步检测以电化学法和荧光法为主, 主要通过空间分辨或信号分辨实现同时响应。目前已有大量研究验证多靶标同时检测的可行性, 但是实际可检测的靶标种类仍远少于国标及食品风险监测手册方法, 且后者经大量实验室验证, 结果权威可靠。并且现有多数研究仍处于实验室阶段, 在靶标覆盖广度和实际样品适用性上尚不及标准化方法, 距离实际推广仍有较大距离。

在即时检测与智能化检测方面, 即时检测是 MOFs 传感器走向实际应用的关键方向。目前, 结合比色、荧光、电化学等方法, 已初步构建了薄膜/试纸条、丝网印刷电极、微型电化学工作站等便携式传感平台。智能手机的进一步整合, 通过软件提取 RGB 值或利用机器学习辅助数据分析, 实现了初步的智能化检测。然而, 当前智能化程度仍较为有限, 多停留在数据采集和简单处理层面, 尚未形成完整的智能体系。随着人工智能、物联网等技术的深度赋能, 有望发展出更具自主分析能力和远程传输功能的现场智能即时传感检测系统。

3　结束语

综上所述, 本文系统综述了 MOF 传感器在食品污染物检测中的研究进展, 涵盖传感器设计策略、灵敏度提升、现场检测及多靶标检测等方面的探索与总结。该领域已在实验室条件下实现了对农药、兽药、真菌毒素及添加剂等典型污染物的灵敏检测, 部分传感器的 LOD 已低至 pg/mL 甚至 fg/mL 级别。然而, 从实际应用的角度看, 仍存在灵敏度、选择性与稳定性之间的权衡, 以及实验室性能与现场适用性之间的差距。如何解决这一问题, 是 MOFs 传感器从实验室概念验证走向实际现场可用的关键。未来研究应针对当前所面临的共性问题, 在发挥 MOFs 传感器优势的基础上, 在材料集成设计、信号转换及复杂基质适配性等方面持续探索, 开发适用性和实用性更强的检测策略, 推动 MOFs 传感器真正满足食品安全现场、快速、精准检测的需求。

参考文献

[1] Zhang Zhepeng, Zhang Yang, Jayan H, et al. Recent and emerging trends of metal-organic frameworks (MOFs)-based sensors for detecting food contaminants: a critical and comprehensive review [J]. Food Chemistry, 2024, 448: 139051.

[2] Zhang Zhihong, Lou Yafei, Guo Chuanpan, et al. Metal–organic frameworks (MOFs) based chemosensors/biosensors for analysis of food contaminants [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 118: 569–588.

[3] Mohan B, Ručman S, Singjai P, et al. Advanced electrochemiluminescent approaches for contaminant detection in food matrices using metal-organic framework composites [J]. Food Chemistry, 2025, 470: 142625.

[4] Xue Yan, Peng Yao, Geng Zhao, et al. Metal: organic frameworks (MOFs) based analytical techniques for food safety evaluation [J]. eFood, 2021, 2(1): 1–12.

[5] 李晓波, 周广兴. 金属有机框架构建的生物传感器在真菌毒素检测中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(1): 3–13.
Li Xiaobo, Zhou Guangxing. Research progress on the application of biosensors constructed with metal-organic frameworks for mycotoxin detection [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(1): 3–13.

[6] Zhang Mao, He Yufang, Tang Zili, et al. Bibliometric analysis of MOF-based fluorescence detection in food safety: development, multi-strategy optimization, and future AI integration [J]. Food Chemistry: X, 2025, 32: 103331.

[7] Ebube Uwaya G, Bisetty K. A sensitive ZIF-67/MWCNTs composite-based sensor for the detection of sunset yellow in food and beverages [J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2023, 951: 117899.

[8] Ding Zhu, Yang Die, Tian Siyu, et al. Co@IRMOF-9/GCE sensor for rapid electrochemical identification of trace Hg^{2+}, Pb^{2+} and NO_2^- in solutions [J]. Journal of Solid State Chemistry, 2024, 338: 124879.

[9] Xia Qinghai, Li Xiao, Xiao Xia, et al. Peroxidase-like NH_2-MIL-101(Cr)-enabled fluorescence sensing of ofloxacin in honey through charge transfer modulation [J]. Food Chemistry, 2026, 510: 148692.

[10] Lv Mingchun, Pu Hongbin, Sun Dawen. Defect-engineered MOF-based magnetic SERS substrate with “berries-on-hedgehog” morphology for sensitive detection of organophosphorus pesticide residues in rice samples [J]. Food Chemistry, 2025, 489: 145172.

[11] Song Wenxu, Cao Xinrui, Yue Wendi, et al. Signal-enhanced ultrasensitive photoelectrochemical immunosensor for detecting aflatoxin B1 based on phage-anti-immuno complex peptide and PCN-224@MXene [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2026, 304: 118641.

[12] Sun Weicheng, Huo Yapeng, Feng Xueying, et al. Recent advances in metal-organic frameworks (MOFs)-based colorimetric sensors for visual detection of food freshness [J]. Coordination Chemistry Reviews, 2025, 535: 216638.

[13] Gu Ying, Pu Xujun, Chen Jinxin, et al. Recent advances of MOF-based SERS substrates in quantitative analysis of food contaminants: a review [J]. The Analyst, 2024, 149(20): 4997–5013.

[14] Mohan B, Priyanka, Singh G, et al. Metal-organic frameworks (MOFs) based luminescent and electrochemical sensors for food contaminant detection [J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 453: 131324.

[15] Gao Shipeng, Sun Qing, Katona J, et al. Recent advances in metal-organic framework nanozyme (MOFzyme)-based biosensors for detecting food contaminants [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2025, 73(37): 23045–23077.

[16] Wang Peilong, Xie Linhua, Joseph E A, et al. Metal–organic frameworks for food safety [J]. Chemical Reviews, 2019, 119(18): 10638–10690.

[17] dos Santos G F S, Paganoto G T, Cosme L C, et al. Surface-enhanced Raman spectroscopy as a tool for food and environmental monitoring of pesticides: recent trends and perspectives [J]. Nanoscale Advances, 2025, 7(22): 7061–7085.

[18] Hu Jinliang, Yuan Guoqiang, He Bin, et al. Recent applications of metal–organic frameworks in the field of electrochemical sensing [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2026, 14(13): 7303–7339.

[19] Zhang Jiuyi, Zhou Xianshu, Zhu Yawen. Zirconium-based metal-organic frameworks for dual-signal electrochemiluminescence sensing: recent advances and analytical applications [J]. Microchemical Journal, 2025, 219: 116065.

[20] Qi Xin, Liu Qian, Zhang Wanting, et al. A ratiometric multimode optical sensor for highly selective and sensitive detection of harmful heavy metal Hg^{2+} in freshwater and seawater [J]. Analytical Chemistry, 2025, 97(50): 27894–27902.

[21] Chai Huining, Yu Kun, Zhao Yiming, et al. MOF-on-MOF dual enzyme-mimic nanozyme with enhanced cascade catalysis for colorimetric/chemiluminescent dual-mode aptasensing [J]. Analytical Chemistry, 2023, 95(28): 10785–10794.

[22] Li Yulong, Chen Yanyue, Xie Fating, et al. Smartphone-based dual-mode aptasensor with bifunctional metal-organic frameworks as signal probes for ochratoxin a detection [J]. Food Chemistry, 2025, 464: 141540.

[23] Ma Zhongrui, Luo Xiao, Liu Yang, et al. Strategically engineered magnetic FeMICuMOFs for smartphone-assisted colorimetric and electrochemical surveillance of malachite green residues [J]. Food Chemistry, 2025, 489: 144982.

[24] Zhang Lu, Shen Mingping, Li Zongda, et al. A dual-mode sensor based on surface molecularly imprinted metal-organic framework for the highly accurate and selective detection of tetracycline [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2025, 432: 137445.

[25] Yan Dingfan, Yuan Fang, Chen Zheng, et al. Eu-doped carbon dots-MOF based turn-on fluorescent probe for trace Hg^{2+} and Pb^{2+} and construction of the simultaneous detection model [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 499: 156102.

[26] Li Yanli, Si Yanmei, Yang Genmei, et al. Rational design of a functionalized metal-organic framework for ratiometric fluorimetric sensing of Hg^{2+} in environmental water [J]. Analytical Methods, 2023, 15(21): 2599–2605.

[27] Sada V, Anikireddy S R, Panda A, et al. Reversible fluorescence switching of metal-organic framework nanoparticles for use as security ink and detection of Pb^{2+} ions in aqueous media [J]. ACS Applied Nano Materials, 2020, 3(4): 3684–3692.

[28] Rouhi N, Khoshbin Z, Rezaei M, et al. A sensitive aptasensor mediated by gold nanoparticles/metal organic framework lattice for detection of Pb^{2+} ion in marine products [J]. Analytica Chimica Acta, 2024, 1317: 342893.

[29] Jain S, Nehra M, Dilbaghi N, et al. Detection of Hg^{2+} using a dual-mode

biosensing probe constructed using ratiometric fluorescent copper Nanoclusters@Zirconia metal-organic framework/*N*-methyl mesoporphyrin IX and colorimetry G-quadruplex/hemin peroxidase-mimicking G-quadruplex DNAzyme [J]. BME Frontiers, 2024, 5: 0078.

[30] Shi Yingkun, Dong Fujia, Rodas-Gonzalez A, et al. Simultaneous detection of heavy metal ions in food samples using a hypersensitive electrochemical sensor based on APTES-incubated MXene-NH_2@CeFe-MOF-NH_2 [J]. Food Chemistry, 2025, 475: 143362.

[31] Vessally E, Imanov H, Soleimani-Amiri S, et al. Development of a highly sensitive electrochemical sensor based on a recently synthesized MOF for the determination of Pb^{2+} in food samples at ultra-trace levels using box-Behnken design [J]. Microchemical Journal, 2025, 219: 115961.

[32] Khoshbin Z, Moeenfard M, Zahraee H, et al. A fluorescence imaging-supported aptasensor for sensitive monitoring of cadmium pollutant in diverse samples: a critical role of metal organic frameworks [J]. Talanta, 2022, 246: 123514.

[33] Gao Li, Deng Yixi, Liu Haolu, et al. Detection of Pb^{2+} in tea using aptamer labeled with AIEgen nanospheres based on MOFs sensors [J]. Biosensors, 2022, 12(9): 745.

[34] Liang Ruirui, Dong Jie, Li Jiayi, et al. DNAzyme-driven bipedal DNA walker and catalytic hairpin assembly multistage signal amplified electrochemical biosensor based on porous AuNPs@Zr-MOF for detection of Pb^{2+} [J]. Food Chemistry, 2024, 435: 137503.

[35] Ravikumar A, Aham E C, Meng Hui, et al. Dual-mode sensing platform for the detection of multiple metal ions based on amine-functionalized MIL-101 (Fe) Y-shaped DNAzyme-assisted fluorescence and colorimetric analysis [J]. Analytical Methods, 2025, 17(15): 2987–2996.

[36] Zhang Hongyuan, Wang Jieqiong, Wu Wei, et al. Graphene oxide supported MOFs-nanofiber carbon aerogel/SPCE for simultaneous detection of Cd^{2+} and Pb^{2+} in seafood [J]. Food Chemistry, 2025, 470: 142643.

[37] Zhang Ya, Xu Ying, Ma Yi, et al. Ultra-sensitive electrochemical sensors through self-assembled MOF composites for the simultaneous detection of multiple heavy metal ions in food samples [J]. Analytica Chimica Acta, 2024, 1289: 342155.

[38] Yang Liu, Liu Sitong, Wang Yuanzhen, et al. Metal-organic frameworks (MOFs) and their derivatives as electrochemical sensors for the detection of pesticide residues in environmental and food samples: a review [J]. Polyhedron, 2025, 280: 117704.

[39] Zheng Kaiyi, Shang Xianwen, Qin Zhou, et al. Recent advances in SERS-based detection of organophosphorus pesticides in food: a critical and comprehensive review [J]. Foods, 2025, 14(21): 3683.

[40] Qin Guoxu, Kong Yaqiong, Gan Tianjue, et al. Ultrathin 2D Eu^{3+}@Zn-MOF nanosheets: a functional nanoplatform for highly selective, sensitive, and visualized detection of organochlorine pesticides in a water environment [J]. Inorganic Chemistry, 2022, 61(23): 8966–8975.

[41] He Kaiyu, Li Zhishang, Wang Liu, et al. A water-stable luminescent metal-organic framework for rapid and visible sensing of organophosphorus pesticides [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(29): 26250–26260.

[42] Su Yu, Wei Liwen, Yin Xinjie, et al. Integrated substrate-nanozyme-adsorbent tri-functional sensor: sensitive detection of lambda-cyhalothrin residues in agricultural products [J]. Food Chemistry, 2026, 500: 147457.

[43] Jiang Yansong, Chang Wenxin, Li Zhihao, et al. Synergistic aggregation-induced emissive linkers in metal-organic frameworks for ultrasensitive and quantitative visual sensing [J]. JACS Au, 2025, 5(4): 1875–1883.

[44] Zhao Fan, Guo Dongqing, Lan Jingyue, et al. One-step electrodeposition of MWCNTs-Cu MOF films for the ratiometric electrochemical analysis of glyphosate [J]. Analytical Methods, 2024, 16(26): 4395–4401.

[45] Gong Chonghai, Wang Qi, Mao Qiu, et al. Hierarchically confined noble metal MOF-on-MOF nanozymes with tunable microenvironments for high-throughput pesticide discrimination [J]. Chemical Engineering Journal, 2026, 531: 173790.

[46] Huang Ying, Liu Tiantian, Xiong Ying, et al. A three-channel colorimetric sensor array utilizing various Fe-MOFs for simultaneous discrimination of multiple pesticides [J]. Food Chemistry, 2025, 496: 146895.

[47] Zhao Yihang, Li Ruonan, Tang Jiaze, et al. MOF-enabled magnetic-fluorescent sensors for on-site organophosphorus/carbamate pesticide detection in fruits and vegetables [J]. Food Chemistry, 2025, 493: 145935.

[48] Shen Zheng, Xu Deyan, Wang Guangxian, et al. Novel colorimetric aptasensor based on MOF-derived materials and its applications for organophosphorus pesticides determination [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 440: 129707.

[49] Mohan B, Kumari R, Virender, et al. Covalent organic frameworks (COFs) and metal–organic frameworks (MOFs) as electrochemical sensors for the efficient detection of pharmaceutical residues [J]. Environment International, 2023, 175: 107928.

[50] Yu Haiyan, Lin Pengxu, Zhou Liyi. Applications and advances of MOFs-based sensors for pesticide and veterinary drug residue detection: from design to application and challenge [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 148: 108147.

[51] Li Sumei, Yan Bo, Liu Lulu, et al. Triple-synergistic Mn-MOF electrochemical sensor for multiplex antibiotic detection: a robust and stable platform for food safety monitoring [J]. Sensing and Bio-Sensing Research, 2025, 49: 100854.

[52] Wang Haiyang, Cai Lin, Wang Yuwei, et al. Covalent molecularly imprinted electrochemical sensor modulated by borate ester bonds for hygromycin B detection based on the synergistic signal amplification of Cu-MOF and MXene [J]. Food Chemistry, 2022, 383: 132382.

[53] Mondal S, Sahoo R, Das M C. Highly water-stable 2D MOF as dual sensor for the ultra-sensitive aqueous phase detection of nitrofuran antibiotics and organochlorine pesticides [J]. Small, 2025, 21(3): e2409095.

[54] He Jiaxin, Yuan Houqun, Zhong Yufei, et al. A luminescent Eu^{3+}-functionalized MOF for sensitive and rapid detection of tetracycline antibiotics in swine wastewater and pig kidney [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2022, 277: 121252.

[55] Gao Yingchun, Chen Yanmei, Li Zhiyuan, et al. Sensitive detection of ciprofloxacin in the livestock manure by a portable smartphone platform based on Eu-MOFs@hydrogel composites [J]. Microchemical Journal, 2025, 211: 113086.

[56] Ma Tongtong, Huang Qiao, Yuan Lei, et al. Tailored fluorescent metal–organic frameworks hybrid membrane sensor arrays: simultaneous and selective quantification of multiple antibiotics [J]. Advanced Science, 2025, 12(27): 2502452.

[57] Li Feng, Lv Huijie, Zhu Feng, et al. High throughput detection of

veterinary drug residues in chicken and eggs [J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141267.

[58] Chen Guotong, Guan Ming, Yang Zhong, et al. High adsorption separation capacity magnetic MOF-based substrate Fe_3O_4@ZIF-67@Ag for sensitive and recyclable SERS detection of malachite green in aquaculture [J]. Microchemical Journal, 2024, 207: 112098.

[59] Sun Yuebo, Dong Yifan, Wang Peilong, et al. Zr-MOF-based substrate with inherent internal standards facilitates reliable SERS analysis of sulfonamide antibiotics [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2025, 423: 136816.

[60] [60] Dou Lupeng, Huang Sitong, Huang Zhimei, et al. High entropy metal organic framework nanozyme with cocktail effect for efficient extraction and colorimetric detection of tetracycline in food and water environment [J]. Food Chemistry, 2025, 494: 146148.

[61] Niu Ying, Fan Yongxiang, Zhang Jiyue. Progress and challenge in the risk management of food additives [J]. Journal of Food Protection, 2025, 88(10): 100607.

[62] Li Yueyue, Dai Weiqi, Li Jingjing, et al. Network toxicology and molecular docking elucidate the hepatotoxic and carcinogenic mechanisms of potassium sorbate validated by *in vitro* assays [J]. Scientific Reports, 2025, 15: 31225.

[63] Zhang Qinyi, Zhang Junyi, Liang Jiaqi, et al. A “turn-off” fluorescent probe based on terbium doped Zn-MOF for sensitive detection of the food additives [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2026, 351: 127478.

[64] Pan Lei, Li Xingzhen, Zhang Qipeng, et al. A boric acid functional multi-emission metal organic frameworks-based fluorescence sensing platform for visualization of gallic acid [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 450: 138283.

[65] Wang Yilin, Liu Zhifang, Li Jiejun, et al. Polyaniline-on-MOF protects the MOF structure during carbonization for the construction of a portable sensor to detect tert-butylhydroquinone [J]. Nano Energy, 2025, 135: 110655.

[66] Lin Chunhua, Zhong Caijun, Song Yonghai, et al. Ratiometric fluorescence detection of melamine in milk by a zirconium-based metal-organic frameworks composite [J]. Microchemical Journal, 2021, 162: 105837.

[67] Alizadeh Sani M, Jahed-Khaniki G, Ehsani A, et al. Metal-organic framework fluorescence sensors for rapid and accurate detection of melamine in milk powder [J]. Biosensors, 2023, 13(1): 94.

[68] Sun Ruimeng, Lv Ruijuan, Li Yuhan, et al. Simple and sensitive electrochemical detection of sunset yellow and Sudan I in food based on AuNPs/Zr-MOF-Graphene [J]. Food Control, 2023, 145: 109491.

[69] Urugo M M, Teka T A, Berihune R A, et al. Novel non-thermal food processing techniques and their mechanism of action in mycotoxins decontamination of foods [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 85: 103312.

[70] Zhai Wenlei, Wei Dizhe, Cao Mingshuo, et al. Biosensors based on core–shell nanoparticles for detecting mycotoxins in food: a review [J]. Food Chemistry, 2023, 429: 136944.

[71] Javed M, Shah A, Nasir S, et al. Emerging nano sensing technologies for the detection of biological and chemical food toxins [J]. RSC Advances, 2025, 15(50): 42771–42842.

[72] Zhang Chi, Wang Yongqi, Sun Yi, et al. A novel immunocolorimetric probe for aflatoxin B_1 based on multifunctional metal−organic frameworks [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2022, 369: 132362.

[73] Guan Yan, Si Pengbin, Yang Tong, et al. A novel method for detection of ochratoxin A in foods: co-MOFs based dual signal ratiometric electrochemical aptamer sensor coupled with DNA walker [J]. Food Chemistry, 2023, 403: 134316.

[74] Lin Xianfeng, Li Jin, Wu Jiajun, et al. Fe-co-based metal-organic frameworks as peroxidase mimics for sensitive colorimetric detection and efficient degradation of aflatoxin B_1 [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16(9): 11809–11820.

[75] Yu Hua, Xu Guangyao, Liu Ying, et al. A conductive MOF with bimetallic spontaneously recycled systems as a signal enhancer for the ultrasensitive detection of T-2 toxin using an electrochemical aptasensor [J]. Microchemical Journal, 2025, 216: 114806.

[76] Chen Yumin, Cheng Weiwei, Yang Yuling, et al. Development of an ultrasensitive SERS aptasensor for determination of aflatoxin B_1 by modifying magnetic beads with UiO-66-NH_2 for enhanced signal probe capturing [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2023, 393: 134329.

[77] Sun Yuhan, Qi Shuo, Dong Xiaoze, et al. Colorimetric aptasensor targeting Zearalenone developed based on the hyaluronic Acid-DNA hydrogel and bimetallic MOFzyme [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2022, 212: 114366.

[78] Yan Xiaohai, Du Gengan, Chen Hong, et al. Label-free fluorescence aptasensor for the detection of patulin using target-induced DNA gates and TCPP/BDC-NH_2 mixed ligands functionalized Zr-MOF systems [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2022, 217: 114723.

[79] Xia Mengke, Wang Jinjin, Li Silun, et al. A sensitive electrochemiluminescence resonance energy transfer system between Ru-MOFs and Bi_2S_3 for deoxynivalenol detection [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2023, 393: 134192.

[80] Jahangiri–Dehaghani F, Zare H R, Shekari Z. Simultaneous measurement of ochratoxin A and aflatoxin B1 using a duplexed-electrochemical aptasensor based on carbon nanodots decorated with gold nanoparticles and two redox probes hemin@HKUST-1 and ferrocene@HKUST-1 [J]. Talanta, 2024, 266: 124947.

[81] Xu Yiwei, Jia Xupeng, Yang Sennan, et al. Simultaneous determination of aflatoxin B_1 and ochratoxin a in cereals by a novel electrochemical aptasensor using metal-organic framework as signal carrier [J]. Foods, 2024, 13(14): 2177.

[82] Damphathik C, Prakobkij A, Jarujamrus P, et al. Colorimetric sensor comprising metal-organic frameworks and molecularly imprinted polymers for aflatoxin B_1 detection in agricultural commodities [J]. Food Chemistry, 2025, 474: 143105.

[83] Daneshimaskoni M, Ali Taher M. Preparation of a fluorescent sensor for fast and highly sensitive detection of patulin using a polyvinylpyrrolidone-modified UiO-66 metal-organic framework [J]. Talanta, 2026, 298: 128981.

[84] Liu Tiantong, Zhang Jing, Liu Xing, et al. Three-channel microfluidic PEC aptasensor driven by S-scheme heterojunction BiOBr@CdIn2S4 for integrated detection of three mycotoxins [J]. Talanta, 2026, 302: 129413.

[85] Massah R T, Zambou Jiokeng S L, Liang Jun, et al. Sensitive electrochemical sensor based on an aminated MIL-101(Cr) MOF for the detection of tartrazine [J]. ACS Omega, 2022, 7(23): 19420–19427.

[86] Ulaganambi M, Tetala K K R. Fabrication of gold nanoparticle incorporated bimetallic metal organic framework electrode for direct, sensitive and selective detection of ochratoxin a from food samples [J]. Food Analytical Methods, 2025, 18(9): 2120–2134.

(责任编辑：范彩旭 安香玉)