DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251007002
引用格式: 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 XB, ZHOU GX. 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. (in Chinese with English abstract).

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

李晓波[1], 周广兴[2*]

(1. 内蒙古警察学院生态安全学院, 呼和浩特 010051;
2. 内蒙古农业大学食品科学与工程学院, 呼和浩特 361003)

摘 要: 真菌毒素是一类由真菌代谢产生的有毒次级代谢产物, 广泛存在于谷物、坚果、乳制品等食品中, 具有强烈的肝毒性、肾毒性、免疫毒性及致癌性, 严重威胁人类健康与食品安全。传统检测方法如高效液相色谱-质谱法(high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, HPLC-MS/MS)虽具有高灵敏度和准确性, 但设备昂贵、操作复杂、耗时较长, 难以满足食品安全快速检测与现场检测的需求。近年来, 金属有机框架(metal-organic frameworks, MOFs)作为一类由金属离子/簇与有机配体自组装形成的多孔晶体材料, 因其高比表面积、可调孔径、优异的稳定性与多功能修饰性, 在构建新型生物传感器中展现出巨大潜力。尤其是在真菌毒素检测领域, MOFs 基传感器在灵敏度、选择性及多重检测能力方面均取得了显著突破。本文系统梳理了 2022—2025 年 MOFs 基生物传感器在真菌毒素检测中的应用最新研究进展, 围绕 MOFs 的种类与结构特征, 检测机制与信号转导方式, 具体应用与代表性研究案例 3 个方面展开论述, 并对不同类型 MOFs 在真菌毒素检测中的优势与不足进行了比较。最后, 总结了当前 MOFs 基传感器在实际应用中面临的挑战, 包括复杂基质中的稳定性、规模化制备的可行性与多毒素同时检测的通用策略, 并对未来的发展方向提出展望, 旨在为后续开展 MOFs 材料在食品安全检测中的研究与应用提供参考。

关键词: 金属有机框架; 生物传感器; 真菌毒素

Research progress on the application of biosensors constructed with metal-organic frameworks for mycotoxin detection

LI Xiao-Bo[1], ZHOU Guang-Xing[2*]

(1. *Ecological Security School*, *Inner Mongolia Police College*, *Hohhot* 010051, *China*;
2. *College of Food Science and Engineering*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Hohhot* 361003, *China*)

ABSTRACT: Mycotoxins are toxic secondary metabolites produced by fungal metabolism, widely found in grains,

收稿日期: 2025-10-07
基金项目: 国家自然科学基金项目(32360531)
第一作者: 李晓波(1982—), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: lixiaobo821011@163.com
***通信作者:** 周广兴(1996—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: hainan0923@163.com

nuts, dairy products and other foodstuffs. They exhibit potent hepatotoxicity, nephrotoxicity, immunotoxicity and carcinogenicity, posing serious threats to human health and food safety. Traditional detection methods such as high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (HPLC-MS/MS), while highly sensitive and accurate, are limited by expensive equipment, complex procedures and long processing times, making them unsuitable for rapid and on-site food safety testing. In recent years, metal-organic frameworks (MOFs), a class of porous crystalline materials formed by the self-assembly of metal ions/clusters and organic ligands, have shown great potential in constructing novel biosensors due to their high specific surface area, tunable pore size, excellent stability and multifunctional modifiability. Particularly in the field of mycotoxin detection, MOFs-based sensors have achieved significant breakthroughs in sensitivity, selectivity and multiplex detection capabilities. This review systematically summarized the 2022–2025 research progress in MOF-based biosensors for mycotoxin detection. It elaborated on 3 key aspects: The types and structural characteristics of MOFs, detection mechanisms and signal transduction methods, and specific applications with representative case studies. Additionally, compared the advantages and limitations of different types of MOFs in mycotoxin detection. Finally, the review addressed current challenges in the practical application of MOFs-based sensors, including stability in complex matrices, feasibility of large-scale production, and universal strategies for simultaneous detection of multiple toxins. Future research directions were also proposed. This work aims to provide a reference for subsequent studies and applications of MOFs materials in food safety detection.

KEY WORDS: metal-organic frameworks; biosensors; mycotoxins

0 引 言

食品安全是全球范围内亟待解决的重大公共健康问题。真菌毒素作为重要的化学污染物，常由黄曲霉(*Aspergillus*)、镰刀菌(*Fusarium*)及赭曲霉(*Penicillium*)等真菌在适宜条件下产生[1]。据统计，每年约有 25%以上的农产品受到真菌毒素污染，其中以黄曲霉毒素 B_1 (aflatoxin B_1, AFB_1)、赭曲霉毒素 A (ochratoxin A, OTA)、伏马毒素(fumonisins, FBs)、玉米赤霉烯酮(zearalenon, ZEN)和脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON)最为常见[2]。这些毒素结构稳定，在食品加工链中难以被有效降解，且其慢性暴露即使处于低剂量水平，也可诱发肝癌、肾毒性、免疫抑制及内分泌紊乱等多种健康损害[3]。因此，发展能够适用于现场、快速、高灵敏且低成本的真菌毒素检测技术具有紧迫的现实意义。

目前，真菌毒素的常规检测依赖于色谱-质谱法等仪器方法，虽灵敏准确，但存在前处理复杂、分析周期长、设备昂贵及依赖专业操作人员等局限，难以满足现场、高通量筛查的需求[4–5]。基于特异性生物识别元件(如抗体、适配体)的生物传感技术，为快速检测提供了有前景的替代方案[6–7]。然而，该类技术的检测性能(灵敏度、稳定性及抗干扰性)在很大程度上受限于其信号转导模块的效率。特别是在复杂食品基质中，如何实现痕量毒素的高灵敏、高特异性信号转换与放大，仍是当前生物传感器面临的核心挑战[8]。

针对上述瓶颈，金属有机框架(metal-organic frameworks, MOFs)材料因其可精准调控的物理化学性质，在构建高性能真菌毒素传感器方面展现出独特优势[9]。首先，MOFs 的超高比表面积和有序孔道结构，可作为优异的载体，极大提升识别元件的固定量，并通过对孔径的精细调控，实现对目标毒素分子的尺寸排阻选择性，有效增强其在复杂基质中的抗干扰能力[10]。其次，MOFs 的金属节点(如 Fe、Zr、Cu)本身可具备类过氧化物酶等模拟酶活性，无需额外标记即可直接用于产生或放大电化学/比色信号，为简化传感器设计、实现低成本检测提供了可能[11–12]。此外，MOFs 可作为理想平台与金属纳米颗粒、量子点等功能材料复合，通过协同效应显著增强传感信号强度与稳定性，从而突破现有检测技术的灵敏度极限[13–14]。特别在真菌毒素检测领域，基于 MOFs 的荧光、电化学及比色传感器已被广泛开发，其研究均证实了该类传感器在复杂食品基质中兼具高灵敏度与高选择性的卓越性能[15–17]。

鉴于此，本文聚焦于 MOFs 在真菌毒素生物传感中的应用，旨在从材料设计、传感机制与应用效能 3 个维度，系统梳理 2022—2025 年间的最新研究进展。通过深入剖析 MOFs 传感器在解决实际检测难题中的独特贡献与现存不足，以期为开发下一代真菌毒素快速检测技术提供明确的理论依据与发展方向。

1 MOFs 的定义和特点

MOFs 是由金属离子与有机配体通过配位键自组装形成的晶态多孔材料。其结构可定制性、超高比表面积和可调控的孔道环境，使其在真菌毒素检测领域展现出独特优势[18–20]。MOFs 的多孔结构能够高效富集痕量真菌毒素，并通过精确调控的孔径实现分子尺寸选择性筛分，有效排除食品基质中蛋白质、多糖等大分子干扰，显著提升检测的选择性[21–22]。此外，MOFs 中金属节点(如 Fe、Cu 等)固有的类

酶催化特性，可直接用于催化底物产生增强的显色或荧光信号，为实现高灵敏、无标记检测提供了新途径[23–24]。通过合理设计配体功能基团或进行后合成修饰，还可进一步调控 MOFs 的表面性质，增强其对特定真菌毒素的识别能力。

MOFs 的高度可调孔隙结构与超大比表面积是其核心优势所在。这些特性不仅使其在气体储存与分离领域表现突出，也在重金属离子、农药残留和抗生素等食品外源污染物的检测中展现出广阔应用前景[25]。通过精准调控金属中心与有机配体，可实现 MOFs 孔径与表面性质的灵活定制，从而提升其对多种外源污染物的捕获与识别能力[26]。部分发光型 MOFs(如镧系基或功能配体基材料)具备本征荧光特性，为构建高灵敏度传感器奠定了基础。该类材料在与目标物作用时会发生荧光猝灭或增强等信号响应，从而显著提升痕量检测能力。借助预合成设计或后修饰策略，可在 MOF 骨架中引入氨基、羧基、巯基等官能团，进一步增强其对多种食品污染物的选择性识别性能[27–28]。此外，MOFs 所具有的开放孔道结构有利于污染物分子的快速扩散与传质，而其适度的配位键合强度则在保证结构稳定性的同时，兼顾了材料的可控降解性与重复使用潜力，适用于复杂食品体系。综上所述，MOFs 作为一种性能可定制的前沿多孔材料，在食源性污染物检测与控制方面具有重要应用价值，为发展快速、低成本的食品安全监测技术提供了创新平台。

2　MOFs 的种类

根据结构特征与组成差异，MOFs 可划分为多个系列，不同系列在真菌毒素检测中各有其适用场景(图 1)。以下将结合典型体系，重点介绍其在传感应用中的特点。

2.1　网状金属有机框架系列

在 MOF 材料发展的历程中，O'KEEFFE 等[29]于 1999 年提出的网状化学概念及其代表性等网状金属有机框架(isoreticular metal-organic framework, IRMOF)系列，首次系统性地揭示了如何通过分子层面的理性设计，实现对多孔材料理化性质的精准调控。该系列以 MOF-5 (isoreticular metal-organic framework-1, IRMOF-1)为原型，由 Zn_4O^{6+}金属簇与羧酸配体(如对苯二甲酸)桥联构建，形成具有立方体 pcu 拓扑结构的多孔骨架[30]。IRMOF 的核心突破在于其"网状化学"设计理念：研究人员可如拼搭乐高积木一般，通过选用不同长度的线性二羧酸配体，在不改变基本拓扑结构的前提下，精确调节材料的孔径(约 3.8~28.8 Å，涵盖微孔至介孔范围)与比表面积(最高可达 4500 m^2/g)，从而实现对不同尺寸客体分子的定制化包载与识别。此外，IRMOFs 还具备高度有序的孔道结构和灵活的表面功能化能力。规整的孔道结构为客体分子提供了均匀的传质路径与吸附位点分布[31]，而在配体中引入氨基、羟基等官能团，则可精细调控孔道表面的化学微环境，显著增强其对特定目标分子的亲和性与选择性[32]。其可调控的孔径与表面化学性质，使其能够高效匹配多种真菌毒素(如 AFB_1、OTA 等)的分子尺寸与极性特征，从而作为高选择性吸附剂或传感平台的核心材料(表 1)。

2.2　沸石咪唑酸盐框架系列

沸石咪唑酸盐框架(zeolite imidazolate framework, ZIFs)是一类由二价过渡金属(Zn^{2+}/Co^{2+})和咪唑基配体构成的 MOFs 材料[42]。其金属-咪唑-金属键角(约 145°)与铝硅酸盐沸石中的 Si-O-Si 键角高度相似，使 ZIFs 兼具 MOFs 的结构可调性和沸石的化学稳定性[43]。这类材料最显著的特点是具有类似沸石的拓扑结构，包含 SOD(钠型沸石)和 RHO (ρ 型沸石)等常见沸石结构，从而赋予 ZIFs 优异的化学稳定性和热稳定性[44]。采用 SOD 拓扑结构的 ZIF-8 孔径约为 3.4 Å，可通过尺寸排阻效应实现分子筛分功能[45]。ZIFs 疏水表面特性使其在水溶液中保持结构稳定，这一特性明显优于许多水稳定性较差的 MOFs 材料。此外，ZIFs 可通过室温搅拌、微波辅助等相对简便的方法合成，制备快速且成本低廉，使其在大规模应用中具有显著优势。在真菌毒素检测方面的应用，ZIFs 的上述特性使其在真菌毒素检测领域展现出独特优势[46]。其精确可控的孔径与疏水表面能够实现对毒素分子的高效吸附与选择性识别，尤其适用于水相食品样品(表 2)。

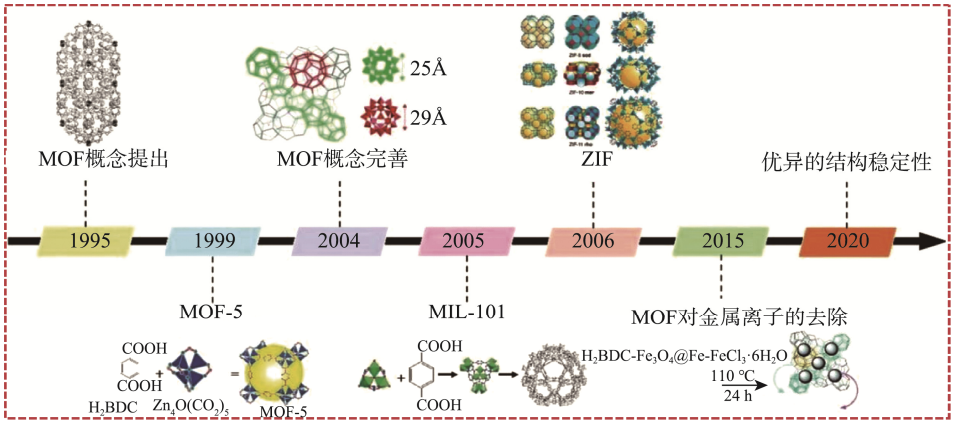


图 1　不同时间的 MOFs 发展阶段

Fig.1　Development stages of MOFs at different times

表 1 IRMOFs 的种类
Table 1 Types of IRMOFs

IRMOF 材料	有机配体	孔径/nm	典型应用	参考文献
IRMOF-1 (MOF-5)	对苯二甲酸	~0.8	氢气/甲烷存储、气体分离	[33]
IRMOF-2	2-溴-对苯二甲酸	~0.7	气体吸附、表面功能化	[34]
IRMOF-3	2-氨基-对苯二甲酸	~0.9	二氧化碳捕集、催化、传感	[35]
IRMOF-6	2,6-萘二甲酸	~1.0	大分子吸附、药物递送	[36]
IRMOF-8	2,6-萘二甲酸	~1.0~1.1	碳氢化合物分离	[37]
IRMOF-9	4,4’-联苯二甲酸	~1.4	大分子存储、催化	[38]
IRMOF-10	4,4’-联苯二甲酸	~1.5	氢气/甲烷存储	[39]
IRMOF-11	四苯基二甲酸	~1.9	大分子吸附	[40]
IRMOF-16	三苯基二甲酸	~3.7	生物分子封装、药物递送	[41]

表 2 ZIFs 的种类
Table 2 Types of ZIFs

ZIF 材料	金属节点	配体	孔径/nm	参考文献
ZIF-4	Zn^{2+}	咪唑酯	~0.35	[47]
ZIF-7	Zn^{2+}	苯并咪唑酯	~0.30	[48]
ZIF-8	Zn^{2+}	2-甲基咪唑酯	~1.16, 0.34	[49]
ZIF-9	Co^{2+}	苯并咪唑酯	~0.30	[50]
ZIF-11	Zn^{2+}	苯并咪唑酯	~1.56	[51]
ZIF-67	Co^{2+}	2-甲基咪唑酯	~1.16	[52]
ZIF-68	Zn^{2+}	混合配体: 苯并咪唑酯+硝基咪唑酯	~1.8	[53]
ZIF-69	Zn^{2+}	混合配体: 咪唑酯+苯并咪唑酯	~1.9	[54]
ZIF-70	Zn^{2+}	混合配体: 咪唑酯+萘并咪唑酯	~1.9	[55]
ZIF-71	Zn^{2+}	4,5-二氯咪唑酯	~1.6	[56]

2.3 拉瓦锡研究所材料系列

拉瓦锡研究所材料(lavoisier institute materials, MILs)系列由法国费雷团队研发，其核心是三价金属(Al^{3+}/Cr^{3+}/Fe^{3+})与多羧酸的配位作用。作为该系列的典型代表, MIL-53 展现出独特的呼吸效应表明其孔径会随外界刺激发生可逆变化[57]。该系列最显著的特征在于结构的动态灵活性。MIL-53(Al)的孔径可在温度和压力变化下于 8.5~13 Å 之间反复伸缩。这种“呼吸效应”源于框架结构中连接键的旋转与畸变，使材料能智能响应环境变化[58]。MILs 材料普遍具有优异的热稳定性和化学稳定性。例如 MIL-101(Cr)在保持水溶液和常见有机溶剂中结构完整的同时，展现出 2280 m^2/g 的超高比表面积，为催化应用奠定了基础[59]。部分 MILs 材料还具备磁性特性，如 MIL-100(Fe)中的铁簇可产生磁响应，使其在磁分离和磁传感领域具有潜在应用价值。在真菌毒素检测方面, MILs 的动态灵活性和磁性特性提供了独特优势。其“呼吸效应”可用于构建智能响应传感器，例如 MIL-53(Fe)的孔径变化在吸附 AFB_1 等小分子毒素时，可触发荧光或电化学信号转变，实现高灵敏度检测；同时，磁性 MIL-100(Fe)能通过外磁场快速分离毒素-MOF 复合物，简化复杂食品基质(如谷物提取液)中的前处理步骤，提升检测通量和准确性[60]。这些特性使 MILs 成为真菌毒素富集与传感的理想平台(表 3)。

表 3 MIL 的种类
Table 3 Types of MIL

MIL 材料	金属节点	配体	参考文献
MIL-53	Al^{3+}, Cr^{3+}, Fe^{3+}	对苯二甲酸	[61]
MIL-88 (A–D)	Fe^{3+}, Cr^{3+}	对苯二甲酸衍生物	[10]
MIL-100	Fe^{3+}, Cr^{3+}	均苯三甲酸	[11]
MIL-101	Cr^{3+}, Fe^{3+}	对苯二甲酸	[12]
MIL-125	Ti^{4+}	对苯二甲酸	[62]
MIL-140	Zr^{4+}, Ce^{4+}	对苯二甲酸	[63]
MIL-160	Al^{3+}	2,5-呋喃二甲酸	[64]
MIL-125-NH_2	Ti^{4+}	2-氨基对苯二甲酸	[65]

2.4 多孔配位网络系列

多孔配位网络(porous coordination network, PCNs)系列的特征在于周洪才团队开发的分层孔结构，其通过立方八面体孔笼的三维互连形成了独特的通道系统[66]。PCN-222(Fe)(又称 MOF-545)是该系列的代表性产物[67]。PCNs 的显著特点在于其分层孔结构，同时包含微孔(<2 nm)和介孔(2~50 nm)，从而实现多尺度协同传质。例如，PCN-222 具有 1D 介孔通道(3.8 nm)和微孔壁(1.1 nm)[68]。这种分层孔系统不仅提供了丰富的活性位点，还确保了快速的质量传输。PCNs 材料展现出高度可调的功能性。通过选择特定金属簇和功能化配体，其性能可被精确调控。例如, PCN-222(Fe)采用 Zr_6 簇与四羧酸盐卟啉配体配位构建类血红素活性中心，实现了类过氧化物酶活性(K_m=0.23 mmol/L)，达到天然辣根过氧化物酶的 83%[69]。此外，PCNs 表现出优异的稳定性。PCN-222 在 pH 范围 2~12 内保持结构完整性，并在超过 20 次催化循环后未出现活性降解，彰显了其实用应用的巨大潜力。在真菌毒素检测方面，PCNs 的分层孔结构和类酶活性提供了独特优势。其介孔通道(如 PCN-222 的 3.8 nm)可容纳大分子真菌毒素(如 AFB_1)或酶标记物，而微孔壁确保高密度吸附位点，实现毒素高效富集; PCN-222(Fe)的类过氧化物酶活性可用于催

化毒素氧化反应, 产生颜色或荧光信号, 实现黄曲霉毒素的高灵敏度比色或荧光检测, 检出限可达纳摩尔级别[70]。此外, PCNs 的宽 pH 稳定性允许在酸性食品基质(如果汁或谷物提取液)中直接应用, 且多次循环后性能不衰减, 显著提升检测的可靠性和经济性(表 4)。

2.5　UiOs 系列

奥斯陆大学材料(materials at the university of oslo, UiOs)系列以 $Zr_6O_4(OH)_4$ 八面体簇为节点, 通过 12 个羧酸盐配体连接形成超稳定框架。UiO-66 作为该系列的典型代表, 展现出高达 12 配位数的卓越稳定性[81]。UiO 系列最显著的特征是其非凡的稳定性。UiO-67 分解温度超过 500 ℃, 在沸水中可保持稳定长达 7 d, 即使在 10 mol/L 盐酸中浸泡 24 h 后仍能保持结晶性[82]。这种稳定性源于 Zr-O 键的高键能(774 kJ/mol)以及具有高配位数(12 连接)的结构设计。UiO 系列具有高度可功能化的表面。通过在对苯二甲酸连接体上引入多种官能团(如-NH_2、-Br、-NO_2), 可获得一系列功能化 UiO-66 材料, 从而调控表面性质和吸附选择性[83]。例如, UiO-66-NH_2 相比未功能化的 UiO-66 展现出显著更高的 CO_2 吸附容量。此外, UiO 材料表现出显著的结构灵活性。虽然不如 MILs 系列中观察到的“呼吸效应”明显, 但像 UiO-67 这样的框架在吸附过程中展现出一定程度的柔性, 有助于容纳不同几何构型的吸附分子(表 5)。在真菌毒素检测方面, UiO 系列的非凡稳定性、可功能化表面和结构灵活性使其成为理想平台。其超强化学稳定性允许在酸性食品基质(如果汁或发酵制品)中直接应用, 避免材料降解导致的检测误差; 例如, 氨基功能化的 UiO-66-NH_2 可通过静电作用选择性吸附带负电的真菌毒素(如展青霉素), 提升富集效率和传感器选择性[81]。同时, UiO-67 的柔性框架能适配多种毒素几何构型(如黄曲霉毒素的平面结构), 实现广谱检测能力。这些特性结合可构建可重复使用的传感器或固相萃取材料, 在复杂样品中实现高灵敏、抗干扰的真菌毒素定量分析。

3　MOFs 传感器

MOFs 基生物传感器在真菌毒素检测中的性能, 主要取决于其信号转导与放大机制。MOFs 本身具有高比表面积、可调控孔道以及丰富的金属活性位点, 这些特性使其能够与适配体、酶、荧光探针、导电材料等进行高效整合, 进而实现多种检测策略的构建。近年来, 研究者们不仅依赖传统的荧光和比色方法, 还积极拓展电化学、光电化学等新兴机制, 以突破灵敏度和选择性的限制(图 2)。

3.1　荧光传感器

荧光法因灵敏度高、检测快速而在真菌毒素检测中被广泛采用。MOFs 的发光特性主要来源于金属簇、配体或嵌入的发光单元, 常见的机制包括荧光淬灭、荧光增强、荧光共振能量转移和内滤效应[89]。

表 4　PCNs 的种类
Table 4　Types of PCNs

PCN 材料	金属节点	配体	结构/特征	参考文献
PCN-6	Cu^{2+}	四(4-羧基苯基)甲烷	三维开放框架, 大孔(~3.4 nm)	[71]
PCN-9	Cu^{2+}	三(4-吡啶基)甲基+吡啶基团	互穿框架	[72]
PCN-14	Cu^{2+}	1,3,5-三(4-羧基苯基)苯	pcu 拓扑结构, 高孔隙率	[73]
PCN-16	Cu^{2+}	1,3,5-三(4-羧基苯基)苯+联吡啶	柱层框架, 孔径可调	[74]
PCN-66	Zr^{4+}	1,3,5-三(4-羧基苯基)苯(三齿配体)	Zr_6 簇, 高稳定性	[75]
PCN-68	Zr^{4+}	四齿连接体(卟啉基)	大三维笼状结构, 含卟啉中心	[76]
PCN-222	Zr^{4+}	四齿连接体(卟啉基)	介孔(~3.7 nm), 高稳定性	[77]
PCN-224	Zr^{4+}	四齿连接体	与 PCN-222 类似, 含卟啉结构	[78]
PCN-333	Al^{3+}	三(4-羧基苯基)苯	介孔(~5.5 nm), 分级笼结构	[79]
PCN-600	Zr^{4+}	卟啉衍生物	功能可定制(金属卟啉节点)	[80]

表 5　UiO 的种类
Table 5　Types of UiO

UiOs 材料	金属节点	配体	结构/特征	参考文献
UiO-66	Zr^{4+}, Hf^{4+}	对苯二甲酸	微孔(~0.6 nm)	[9]
UiO-66-NH_2	Zr^{4+}	2-氨基对苯二甲酸	功能化孔道, 极性增强	[84]
UiO-66-SO_3H	Zr^{4+}	磺化对苯二甲酸	孔道内具有酸性位点	[85]
UiO-67	Zr^{4+}	4,4’-联苯二甲酸	比 UiO-66 具有更大的孔径(~0.8~1.2 nm)	[86]
UiO-68	Zr^{4+}	三联苯-4,4’-二甲酸	扩展框架, 具有介孔结构	[87]
UiO-69	Zr^{4+}	四齿羧酸配体	分级孔隙结构	[88]

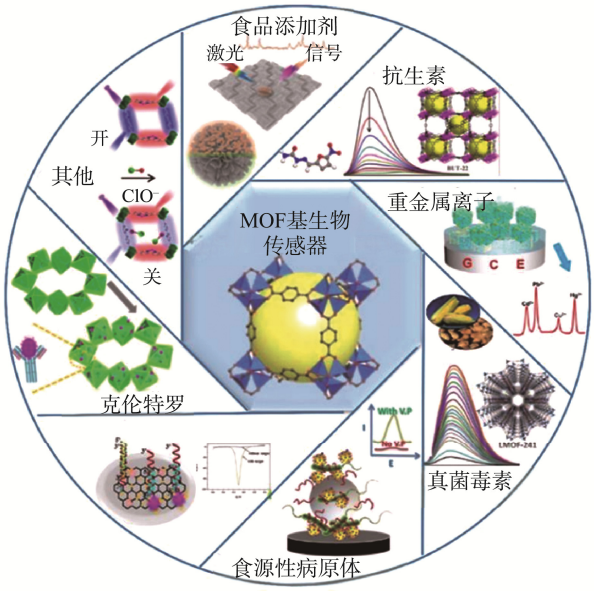


图 2 用于分析食品污染物的 MOFs 基化学传感器/生物传感器
Fig.2 MOFs-based chemosensors/biosensors for analysis of food contaminants

MOFs 材料的多孔结构为封装荧光染料或量子点提供了理想载体，通过调控主客体相互作用，可实现信号放大与自校准检测。如 SUN 等[90]开发了一种基于双发射 MOF@$[Ru(bpy)_3]^{2+}$静电纺丝纳米纤维的比率荧光传感器，用于 AFB_1 的检测。该传感器以 MOFs 的蓝色荧光作为响应信号，$[Ru(bpy)_3]^{2+}$的红色荧光作为内参比信号，当 AFB_1 存在时，通过电子转移过程导致 MOFs 的蓝色荧光增强，而红色荧光保持不变，从而实现从红色到蓝色的可视色度变化。这种比率策略有效克服了环境干扰，检出限达 3.05 ppb。团队还进一步集成了智能手机平台，实现了 AFB_1 的现场快速视觉定量检测。

在荧光能量转移机制方面，如 ZHU 等[91]开发了一种基于 Cu_2O@MOF-碳点纳米复合材料的比色-荧光双模式传感器，用于 DON 的检测(图 3)。该传感器以 Cu_2O@MOF 纳米酶催化 TMB 氧化产生的蓝色显色作为颜色信号，碳点的绿色荧光作为荧光信号，当 DON 存在时，通过竞争性免疫反应导致抗体探针捕获量减少，使颜色信号从深蓝色渐变为浅蓝色，同时荧光强度显著降低，从而实现双模式信号变化。这种双模式策略有效克服了单一检测的假阳性干扰，检出限达 0.0018 ng/mL。

如 LI 等[92]开发了一种基于 Al-MOF@Eu-MOF@MIP 的双中心比率荧光传感器，用于 AFB_1 的检测。该传感器以 Al-MOF 的蓝色荧光(440 nm)作为响应信号，Eu-MOF 的红色荧光(662 nm)作为内参比信号，当 AFB_1 存在时，通过光诱导电子转移和结构呼吸效应导致 Al-MOF 的蓝色荧光增强，而 Eu-MOF 的红色荧光因内滤效应而减弱，从而实现从红色到蓝色的可视色度变化。这种比率策略有效克服了环境干扰，检出限达 1.98 ppb。其还进一步集成了智能手机平台，通过分析荧光强度比值变化，实现了 AFB_1 在饲料样品中的现场快速视觉定量检测。

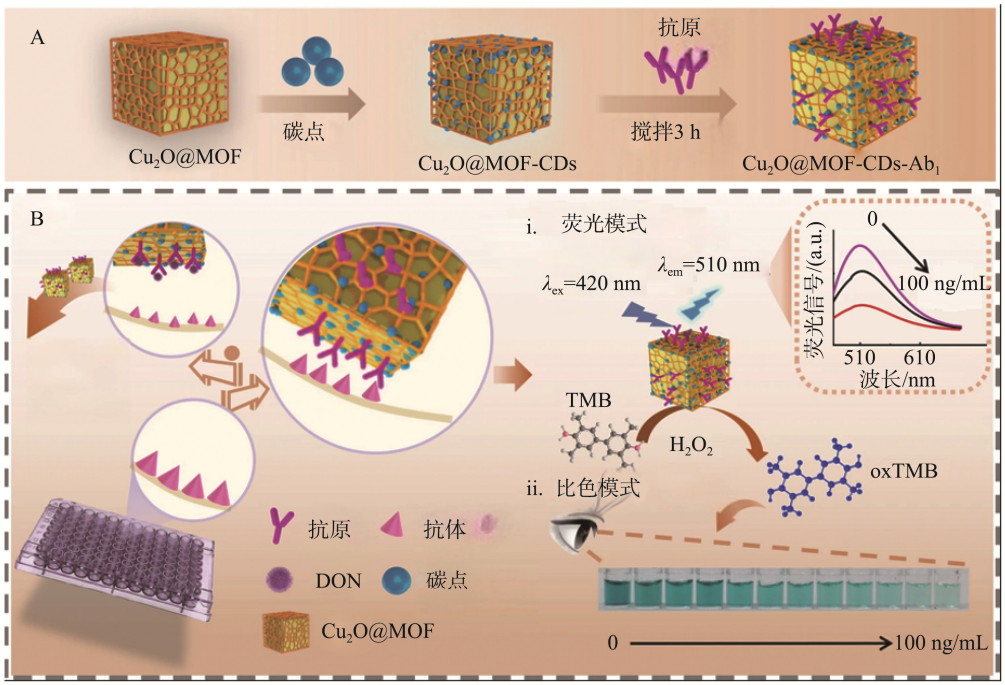
除了单一模式检测，双模和多模传感策略因具有自验证、多场景兼容等优势，正成为食品安全检测的有力工具[93]。同时多种信号的集成可以弥补单个信号的局限性，根据不同的检测需求和环境条件，选择最优的信号组合方式，从而提高检测的可靠性和适应性。

3.2 比色传感器

比色法具有直观、快速和低成本的特点，是实际食品安全监测中应用广泛的手段之一。MOFs 作为类酶材料可催化底物产生显著颜色变化，从而实现信号输出[94]。MOFs 材料能够模拟过氧化物酶、氧化酶和过氧化氢酶等天然酶的活性，催化底物如 3,3’,5,5’-四甲基联苯胺(3,3’,5,5’-tetramethylenediamine, TMB)、二氨基联苯胺(diaminobenzidine, DAB)和邻苯二胺(O-phenylenediamine, OPD)等产生颜色变化，进而实现对目标物的定量分析[95]。MOFs 的类酶催化特性源于其金属节点与有机配体的协同作用。过渡金属(如 Fe、Co、Mn、Cu)的 MOFs 能够通过价态变化催化过氧化氢分解产生羟基自由基，进而氧化底物产生颜色反应。与天然酶相比，MOFs 类酶材料具有更高的稳定性、可调节的催化活性以及更低的制备成本，在复杂食品基质的快速检测中展现出明显优势。如 ZHANG 等[96]开发的基于多功能普鲁士蓝类似物(multifunctional prussian blue analogues, M-NiMnFe-PBA)纳米材料的双模式免疫分析传感器，充分利用了普鲁士蓝类似物的类酶催化特性和光热效应(图 4)。该研究中，通过微波辅助溶剂热法结合酸蚀刻的后处理策略构建的中空立方体结构 M-NiMnFe-PBA，不仅具有优异的过氧化物酶模拟活性，还能在近红外光照射下产生显著光热效应，并通过光芬顿反应高效降解 AFB_1。基于此构建的双模式传感器，在比色模式下检出限达 4.96 fg/mL(线性范围 10^{-5}~10^{2} ng/mL)，光热模式下检出限为 1.5 pg/mL(线性范围 10^{-3}~10^{2} ng/mL)，同时能在 3 h 内实现对 AFB_1 的近完全降解，显著降低了其细胞毒性，实现了检测与降解的双重功能。

同时比色传感器的性能很大程度上取决于 MOFs 的催化活性，因此近年来研究者们提出了多种催化活性增强策略：(1)构建混合价态 MOFs，如基于 Fe^{2+}/Fe^{3+}的 MOFs 通过电子快速传递提升类过氧化物酶活性；(2)将 MOFs 与贵金属纳米粒子复合，如 AuNPs/MOF 复合材料，利用贵金属的表面等离子体共振效应增强催化效率；(3)设计多级孔结构 MOFs，增加活性位点可及性，加速底物扩散。

如 LIN 等[97]开发了一种基于 MOF-on-MOF 双金属纳米酶的比色传感器，用于 AFB_1 的检测。该传感器以 MIL-125@MIL-101-N_2 纳米酶作为催化剂，AFB_1 适配体作为识别元件，当 AFB_1 存在时，通过特异性结合抑制 TMB 氧化反应，导致溶液蓝色褪色，而背景色保持不变，从而



注：A. Cu_2O@MOF-碳点-Ab1 的构建过程，B. 检测原理示意图。

图 3　用于 DON 检测的 CFNLISA 生物传感器的示意图：比色和荧光[91]

Fig.3　Schematic illustration of the CFNLISA biosensor for DON detection: Colorimetric and fluorescence[91]

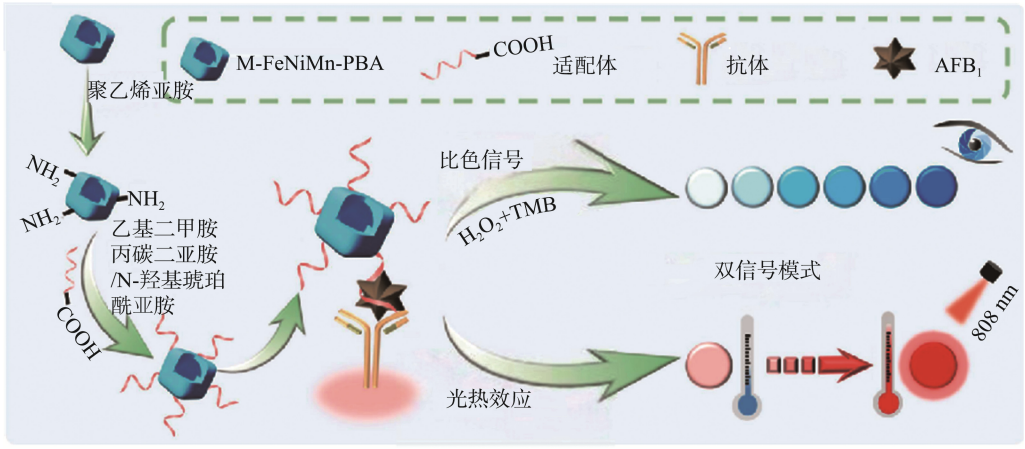


图 4　基于 M-FeNiMn-PBA 改进的 AFB_1 酶联免疫吸附检测方法构建流程[96]

Fig.4　Fabrication of improved enzyme-linked immunosorbent assay for AFB_1 detection based on the M-FeNiMn-PBA[96]

实现从深蓝色到浅蓝色的可视色度变化。这种比色策略有效克服了环境干扰，检出限达 0.32 ng/mL，检测范围为 1~1380 ng/mL。团队还进一步集成了智能手机平台，通过提取和分析反应溶液的 RGB 值，实现了 AFB_1 的现场快速视觉定量检测。

尽管 MOFs 基比色传感器取得了显著进展，但仍面临一些挑战。食品基质的复杂性可能干扰颜色反应，导致假阳性或假阴性结果。未来的研究将致力于提高 MOFs 类酶活性的特异性，通过表面修饰或复合材料设计，降低基质干扰。同时，多通道比色传感器的开发也是一个重要方向，能够同时检测多种真菌毒素，提高检测效率。随着智能手机和便携式设备的普及，MOFs 基比色传感器与这些设备的集成将使现场检测更加便捷、准确。

3.3　电化学传感器

电化学检测技术因其高灵敏度、便携性和低成本等优势，已成为 MOFs 基传感器研究的重要方向。其高比表面积与丰富活性位点赋予多孔结构优异的适配体或电活性分子负载能力，从而显著提升识别性能；对于导电性不足的 MOFs，可通过杂原子掺杂(如氮、硫掺杂)、碳化处理或与石墨烯、MXene 等高导电材料复合等方法有效改善其导电

性；MOFs 与导电材料复合还可实现信号放大，例如 Cu-MOF 与碳材料复合后可促进电子传输，显著降低检出限。电化学阻抗谱作为无标记检测技术，常用于监测适配体与目标物结合所引起的电荷转移阻抗变化，进一步推动了 MOFs 在电化学传感中的应用。

如 ZHANG 等[98]构建了 Au NPs/PC ZIF-8-ZnO 异质结传感平台，结合距离调制策略，开发了电化学/光电化学双模式适配体传感器(图 5)。该传感器通过 Au-S 键固定亚甲蓝标记单链 DNA，利用 AFB_1 激活链置换反应实现信号转换。在电化学模式下，检出限达 36.7 fg/mL，光电化学模式更是低至 9.3 fg/mL。这种双模式交叉验证策略大大提高了检测的可靠性，并在 AFB_1 实际样品(如花生和玉米)分析中展现出优异的回收率和抗干扰能力。

在信号放大策略方面，ZHU 等[99]的研究采用了 PtFe@Co-MOF 联合目标触发多通道 DNAzymes 循环放大策略。当 AFB_1 存在时，其与两条适配体序列特异性结合触发链置换反应，形成 4 个 Mg^{2+}-DNAzymes 结构，循环剪切释放 PtFe@Co-MOF 标记的检测探针，由于 PtFe@Co-MOF 对硫堇的催化作用，使电信号显著增强。该传感器对 AFB_1 的检出限为 2 pg/mL，具有良好的选择性和重现性。

如 GUAN 等[100]报道了基于 Co-MOFs 的比率电化学适配体传感器，结合 DNA walker 技术用于 OTA 检测。该传感器使用 Co-MOFs 和甲苯胺蓝分别作为电化学信号标签和内参比探针，当 OTA 存在时，DNA 标记的 Co-MOFs 远离电极，导致 Co-MOFs 在–1.18 V 的信号降低，而甲苯胺蓝在–0.28 V 的信号增加。这种比率策略克服了环境和仪器因素的影响，实现了对 OTA 的超灵敏检测，检出限达 0.31 fg/mL。

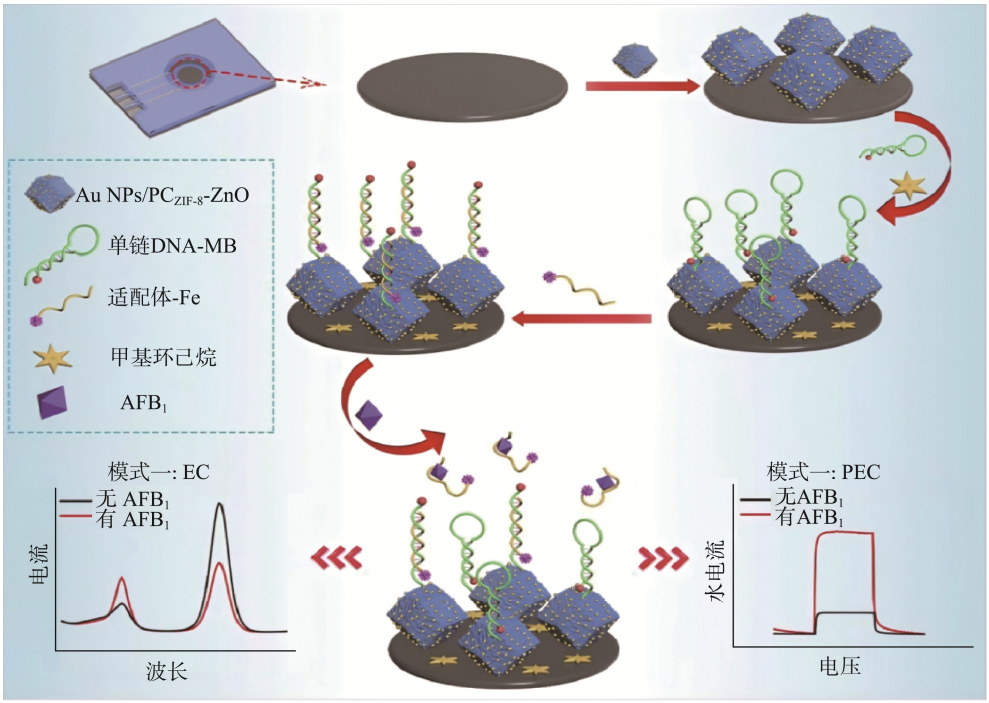


图 5 EC/PEC 双模式适体传感器构建与检测原理示意图[98]

Fig.5 Schematic illustration for the construction and assay of EC/PEC dual-mode aptasesnor[98]

随着技术的发展，MOFs 基电化学传感器正朝着智能化、便携化方向迈进。智能手机控制的便携式电化学检测设备使得现场快速检测成为可能。同时，人工智能算法的引入使得数据处理和分析更加高效、准确。这些前沿技术的深度融合，将极大推动 MOFs 基传感器在食品安全监测等领域的实际应用与推广。

4 结束语

MOFs 材料凭借其高度有序的孔道结构、大比表面积、可调控孔径与表面性质，成为构建高性能真菌毒素传感器的理想平台。研究表明，MOFs 可作为信号探针载体、荧光猝灭剂或催化活性中心，在电化学、荧光和比色等多种传感模式中发挥关键作用。其传感策略灵敏度高、选择性强，检出限不断优化，特异性持续提升。

然而，MOFs 传感器从实验室走向实际应用仍面临挑战。复杂食品基质中的蛋白质、脂质等组分易引起孔道堵塞或非特异性吸附，干扰信号，需提升材料稳定性和抗干扰能力。许多高性能 MOFs 合成条件苛刻、成本高，限制了规模化制备，开发水相合成等绿色低成本路线成为关键。此外，实际样品中多毒素共存，而现有传感器多针对单一对象，构建多元检测系统是未来重点。

展望未来，推动 MOFs 传感器向实用化与智能化融合

是必然路径。材料层面应开发高稳定性、强识别且经济的功能材料；器件层面可结合微流控、纸基或可穿戴技术，实现现场快速检测。进一步融合人工智能与大数据，构建检测、解析与预警一体的智能系统，实现从“被动响应”到“主动防控”的转变，为食品安全提供新一代技术支撑，促进技术实际应用。

参考文献

[1] PITT JI, MILLER JD. A concise history of mycotoxin research [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(33): 7021–7033.

[2] LAGANÀ A. Introduction to the toxins special issue on LC-MS/MS methods for mycotoxin analysis [J]. Toxins, 2017, 9(10): 325.

[3] 白蕾, 陈子悦, 王俊豪, 等. 纳米酶生物传感器在食品中真菌毒素检测的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(15): 73–83.
BAI L, CHEN ZY, WANG JH, *et al.* Research progress on the application of nanozyme biosensors in the detection of mycotoxins in food [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(15): 73–83.

[4] KESKIN E, EYUPOGLU OE. Determination of mycotoxins by HPLC, LC-MS/MS and health risk assessment of the mycotoxins in bee products of Turkey [J]. Food Chemistry, 2023, 400: 134086.

[5] 邢赟, 朱鹏静. 纳米光学生物传感器检测脱氧雪腐镰刀菌烯醇的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(22): 126–134.
XING Y, ZHU PJ. Research progress on nanoplasmonic optical biosensors for deoxynivalenol detection [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(22): 126–134.

[6] XIONG Y, LI W, WEN Q, *et al*. Aptamer-engineered nanomaterials to aid in mycotoxin determination [J]. Food Control, 2022, 135: 108661.

[7] 袁迪, 洪滨, 张珊, 等. 食品中黄曲霉毒素样品前处理及检测技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(24): 124–131.
YUAN D, HONG B, ZHANG S, *et al*. Research progress on sample pretreatment and detection technologies of aflatoxins in food [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(24): 124–131.

[8] FU X, WANG W, LI Y, *et al*. Development of a monoclonal antibody with equal reactivity to ustiloxins A and B for quantification of main cyclopeptide mycotoxins in rice samples [J]. Food Control, 2018, 92: 201–207.

[9] LIU X. Metal-organic framework UiO-66 membranes [J]. Frontiers of Chemical Science and Engineering, 2020, 14(2): 216–232.

[10] HUYNH NTX, CHIHAIA V, SON DN. Hydrogen storage in MIL-88 series [J]. Journal of Materials Science, 2019, 54(5): 3994–4010.

[11] SONG G, SHI G, CHEN L, *et al*. Different degradation mechanisms of low-concentration ozone for MIL-100(Fe) and MIL-100(Mn) over wide humidity fluctuation [J]. Chemosphere, 2022, 308: 136352.

[12] PEDERNEIRA N, AINA PO, ROWNAGHI AA, *et al*. Performance of MIL-101(Cr) and MIL-101(Cr)-pore expanded as drug carriers for ibuprofen and 5-fluorouracil delivery [J]. ACS Applied Bio Materials, 2024, 7(2): 1041–1051.

[13] LI X, LI T, ZHANG J, *et al*. Establishment of a dual-signal enhanced fluorescent aptasensor for highly sensitive detection of ochratoxin A [J]. ACS Omega, 2024, 9(19): 21035–21041.

[14] HE Y, ZHANG D, WU Q, *et al*. Highly sensitive fluorescent aptasensor based on magnetic metal-organic framework for aflatoxin B_1 detection [J]. Talanta, 2025, 287: 127620.

[15] SEREBRENNIKOVA KV, SAMOKHVALOV AV, ZHERDEV AV, *et al*. A fluorescence resonance energy transfer aptasensor for aflatoxin B_1 based on ligand-induced ssDNA displacement [J]. Molecules, 2023, 28(23): 7889.

[16] MENG D, GAN X, TIAN T. An electrochemical sensing method for aflatoxin B_1 detection based on Pt-coordinated titanium-based porphyrin MOF [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2022, 17(2): 220247.

[17] JAHANGIRI-DEHAGHANI F, ZARE HR, SHEKARI Z. A non-label electrochemical aptasensor based on Cu metal–organic framework to measure aflatoxin B_1 in wheat flour [J]. Food Analytical Methods, 2022, 15(1): 192–202.

[18] MA JY, ZHU XK, HU RG, *et al*. A systematic review, meta-analysis and meta-regression of the global prevalence of foodborne *Vibrio* spp. infection in fishes: A persistent public health concern [J]. Marine Pollution Bulletin, 2023, 187: 114521.

[19] WU W, YAN Y, XIE M, *et al*. A critical review on metal organic frameworks (MOFs)-based sensors for foodborne pathogenic bacteria detection [J]. Talanta, 2025, 281: 126918.

[20] CHEN S, PANG H, SUN J, *et al*. Research advances and applications of ZIF-90 metal-organic framework nanoparticles in the biomedical field [J]. Materials Chemistry Frontiers, 2024, 8(5): 1195–1211.

[21] QIN Y, HAN X, LI Y, *et al*. Hollow mesoporous metal-organic frameworks with enhanced diffusion for highly efficient catalysis [J]. ACS Catalysis, 2020, 10(11): 5973–5978.

[22] NATH K, AHMED A, SIEGEL D J, *et al*. Microscale determination of binary gas adsorption isotherms in MOFs [J]. Journal of the American Chemical Society, 2022, 144(45): 20939–20946.

[23] 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.

[24] ZHANG S, ZHANG Y, BAIG F, *et al*. Synthesis and applications of stable iron-based metal–organic framework materials [J]. Crystal Growth & Design, 2021, 21(5): 3100–3122.

[25] HE Q, ZHAN F, WANG H, *et al*. Recent progress of industrial preparation of metal–organic frameworks: Synthesis strategies and outlook [J]. Materials Today Sustainability, 2022, 17: 100104.

[26] JEROZAL RT, PITT TA, MACMILLAN SN, *et al*. High-concentration self-assembly of zirconium- and hafnium-based metal-organic materials [J]. Journal of the American Chemical Society, 2023, 145(24): 13273–13283.

[27] AMOUZESH SP, KHODADADI AA, MORTAZAVI Y, *et al*. MIL-100(Fe)/ZnO nanocomposite sensors: An enhanced ammonia selectivity and low operating temperature [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2024, 399: 134791.

[28] YUSUF VF, MALEK NI, KAILASA SK. Correction to “review on metal–organic framework classification, synthetic approaches, and influencing factors: Applications in energy, drug delivery, and wastewater treatment” [J]. ACS Omega, 2024, 9(27): 29947–29950.

[29] 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.

[30] MAI Z, LIU D. Synthesis and applications of isoreticular metal–organic frameworks IRMOFs-*n* (*n* = 1,3,6,8) [J]. Crystal Growth & Design, 2019, 19(12): 7439–7462.

[31] RAPTOPOULOU CP. Metal-organic frameworks: Synthetic methods and potential applications [J]. Materials, 2021, 14(2): 310.

[32] KALMUTZKI MJ, HANIKEL N, YAGHI OM. Secondary building units as the turning point in the development of the reticular chemistry of MOFs [J]. Science Advances, 2018, 4(10): eaat9180.

[33] ZHENG B, TIAN D, ZHANG L, *et al*. Investigation of methane adsorption in strained IRMOF-1 [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2019, 123(40): 24592–24597.

[34] WINSTON EB, LOWELL PJ, VACEK J, *et al*. Dipolar molecular rotors in the metal-organic framework crystal IRMOF-2 [J]. Physical Chemistry

Chemical Physics, 2008, 10(34): 5188–5191.

[35] ISOBE T, ARAI Y, YANAGIDA S, *et al*. Solvothermal preparation and gas permeability of an IRMOF-3 membrane [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2017, 241: 218–225.

[36] RODRIGUES NM, DIÓGENES TS, MIZUNO ALA, *et al*. IRMOFs in hydrogen gas storage: A theoretical evaluation on the efficiency and influence of water [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 100: 870–881.

[37] ODBADRAKH K, LEWIS JP, NICHOLSON DM. Interaction of the explosive molecules RDX and TATP with IRMOF-8 [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2010, 114(17): 7535–7540.

[38] MENG Z, LU R, RAO D, *et al*. Catenated metal-organic frameworks: Promising hydrogen purification materials and high hydrogen storage medium with further lithium doping [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(23): 9811–9818.

[39] CAREY CA, FOROUGHI LM, MATZGER AJ. Designed additive suppresses interpenetration in IRMOF-10 [J]. Chemical Communications, 2024, 60(70): 9396–9399.

[40] BUTYRSKAYA EV. Single-layer cluster adsorption model and its application for the estimation of the CO_2 structure on metal-organic frameworks [J]. Materials Today Communications, 2022, 33: 104327.

[41] CAI M, NI B, HU X, *et al*. An investigation of IRMOF-16 as a pH-responsive drug delivery carrier of curcumin [J]. Journal of Science: Advanced Materials and Devices, 2022, 7(4): 100507.

[42] PARK KS, NI Z, CÔTÉ AP, *et al*. Exceptional chemical and thermal stability of zeolitic imidazolate frameworks [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2006, 103(27): 10186–10191.

[43] EBRAHIMIPOUR SY, SHAHSAVARI M, SHEIKHSHOAEI M, *et al*. Zeolitic imidazolate frameworks (ZIFs): Versatile materials for sensing and mitigating diverse food contaminants [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 146: 107825.

[44] SHAHSAVARI M, MOHAMMADZADEH-JAHANI P, SHEIKHSHOAIE I, *et al*. Green synthesis of zeolitic imidazolate frameworks: A review of their characterization and industrial and medical applications [J]. Materials, 2022, 15(2): 447.

[45] AMAYUELAS E, SHARMA SK, UTPALLA P, *et al*. Bimetallic zeolitic imidazole frameworks for improved stability and performance of intrusion-extrusion energy applications [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2023, 127(37): 18310–18315.

[46] MOLINA MA, RODRÍGUEZ-CAMPA J, FLORES-BORRELL R, *et al*. Sustainable synthesis of zeolitic imidazolate frameworks at room temperature in water with exact Zn/linker stoichiometry [J]. Nanomaterials, 2024, 14(4): 348.

[47] GANDARA-LOE J, MISSYUL A, FAUTH F, *et al*. New insights into the breathing phenomenon in ZIF-4 [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2019, 7(24): 14552–14558.

[48] ANWAR F, VARGHESE AM, KUPPIREDDY S, *et al*. Functionalized and hybridized ZIF-7 adsorbents for ethane-ethylene separation [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2024, 63(45): 19744–19755.

[49] LEE JH, KIM D, SHIN H, *et al*. Zeolitic imidazolate framework ZIF-8 films by ZnO to ZIF-8 conversion and their usage as seed layers for propylene-selective ZIF-8 membranes [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2019, 72: 374–379.

[50] CHEN W, WANG C, SU S, *et al*. Synthesis of ZIF-9(III)/Co LDH layered composite from ZIF-9(I) based on controllable phase transition for enhanced electrocatalytic oxygen evolution reaction [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 414: 128784.

[51] REIF B, FABISCH F, HOVESTADT M, *et al*. Synthesis of ZIF-11—effect of water residues in the solvent onto the phase transition from ZIF-11 to ZIF-7-III [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2017, 243: 65–68.

[52] GAO G, XIAO C, ZHANG R, *et al*. ZIF-67 derivatives in electrocatalysis [J]. Coordination Chemistry Reviews, 2025, 523: 216296.

[53] LI Q, RUAN M, ZHENG Y, *et al*. Investigation on the selective adsorption and separation properties of coal mine methane in ZIF-68 by molecular simulations [J]. Adsorption, 2017, 23(1): 163–174.

[54] CHEN L, YUAN S, QIAN J F, *et al*. Effective adsorption separation of *n*-hexane/2-methylpentane in facilely synthesized zeolitic imidazolate frameworks ZIF-8 and ZIF-69 [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, 55(40): 10751–10757.

[55] QIN Z, CHEN Y, CHEN T, *et al*. Improved luminous efficiency of AgInS2 quantum dots and zeolitic imidazolate framework-70 composite for white light emitting diode applications [J]. Chemistry-A European Journal, 2023, 29(45): e202301123.

[56] MARTÍNEZ-SALAZAR M, TIEMPOS-FLORES N, OBREGÓN-ZÚÑIGA A, *et al*. Dye removal utilizing ZIF-71 and hydrophobic ZIF-71(ClBr): Kinetic and equilibrium studies [Z]. ACS Omega, 2025.

[57] GARCÍA-BEN J, LÓPEZ-BECEIRO J, ARTIAGA R, *et al*. Discovery of colossal breathing-caloric effect under low applied pressure in the hybrid organic–inorganic MIL-53(Al) material [J]. Chemistry of Materials, 2022, 34(7): 3323–3332.

[58] KHAN S, GUAN Q, JIAO L, *et al*. Synthesis, modifications and applications of MILs metal-organic frameworks for environmental remediation: the cutting-edge review [J]. Science of the Total Environment, 2022, 810: 152279.

[59] ZOU M, DONG M, ZHAO T. Advances in metal-organic frameworks MIL-101(Cr) [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(16): 9396.

[60] MA X, WANG W, SUN C, *et al*. Adsorption performance and kinetic study of hierarchical porous Fe-based MOFs for toluene removal [J]. Science of the Total Environment, 2021, 793: 148622.

[61] ANDONOVA S, IVANOVA E, YANG J, *et al*. Adsorption forms of CO_2 on MIL-53(Al) and MIL-53(Al)–OHx as revealed by FTIR spectroscopy [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2017, 121(34): 18665–18673.

[62] ZHANG Q, CHEN Y, YU X, *et al*. MIL-125(Ti)@ZIF-67-derived MIL-125(Ti)@TiO_2 hollow nanodiscs decorated with Co_3S_4 for remarkable photocatalytic CO_2 reduction [J]. Catalysis Science & Technology, 2023, 13(15): 4525–4533.

[63] SCHULZ M, MARQUARDT N, SCHÄFER M, *et al*. A low-temperature approach for the phase-pure synthesis of MIL-140 structured metal–organic frameworks [J]. Chemistry–A European Journal, 2019, 25(59): 13598–13608.

[64] DAMASCENO-BORGES D, NORMAND P, PERMIAKOVA A, *et al*. Gas adsorption and separation by the Al-based metal–organic framework MIL-160 [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2017, 121(48): 26822–26832.

[65] SHAW EV, CASTILLO-BLAS C, LAMBDEN T, *et al*. Structural insights of mechanochemically amorphised MIL-125-NH_2 [J]. Chemical Communications, 2025, 61(26): 5019–5022.

[66] ENG L, WANG KY, LV XL, *et al*. Hierarchically porous metal-organic frameworks: Synthetic strategies and applications [J]. National Science Review, 2020, 7(11): 1743–1758.

[67] XIA M, LIU T, ZHANG Y. Peroxidase-mimicking activity of PCN-222(Fe) for colorimetric sensing of acetylcholinesterase activity and inhibition [J]. Analytical Sciences, 2021, 37(7): 1023–1027.

[68] LIANG X, CHEN Y, WEN K, *et al*. Urate oxidase loaded in PCN-222(Fe) with peroxidase-like activity for colorimetric detection of uric acid [J]. Journal of Materials Chemistry B, 2021, 9(34): 6811–6817.

[69] ZHANG C, LI H, LI C, *et al*. Fe-loaded MOF-545(Fe): Peroxidase-like activity for dye degradation and high adsorption for the removal of dyes from wastewater [J]. Molecules, 2020, 25(1): 168.

[70] XU X, SUN T, ZHOU X, *et al*. Specific and Enzyme-free monitoring of propiconazole pesticide residues in vegetables with a portable

nanozyme-based paper Sensor [J]. Food Chemistry, 2025, 464: 141686.

[71] MÜHLBAUER E, KLINKEBIEL A, BEYER O, *et al*. Functionalized PCN-6 metal-organic frameworks [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2015, 216: 51–55.

[72] ZHANG R, LIU Y, WANG J, *et al*. Post-synthetic platinum complex modification of a triazine based metal organic frameworks for enhanced photocatalytic H_2 evolution [J]. Journal of Solid State Chemistry, 2019, 271: 260–265.

[73] SUN H, ZHANG J, OUYANG C, *et al*. Computational evaluation of the impact of metal substitution on the $14CH_4$ storage in PCN-14 metal-organic frameworks [J]. Catalysis Today, 2018, 312: 168–173.

[74] KULKARNI AR, SHOLL DS. Screening of copper open metal site MOFs for olefin/paraffin separations using DFT-derived force fields [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2016, 120(40): 23044–23054.

[75] PHAM T, FORREST KA, MCDONALD K, *et al*. Modeling PCN-61 and PCN-66: Isostructural rht-metal–organic frameworks with distinct CO_2 sorption mechanisms [J]. Crystal Growth & Design, 2014, 14(11): 5599–5607.

[76] KWON O, KIM JY, PARK S, *et al*. Computer-aided discovery of connected metal-organic frameworks [J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 3620.

[77] LOZE M, BRANDÈS S, FLEURAT-LESSARD P, *et al*. Cocorrole-functionalized PCN-222 for carbon monoxide selective adsorption [J]. Chemistry–A European Journal, 2024, 30(51): e202402148.

[78] NIE X, WU S, LIAO S, *et al*. Light-driven self-disinfecting textiles functionalized by PCN-224 and Ag nanoparticles [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 416: 125786.

[79] YANG W, LIANG W, O'DELL LA, *et al*. Insights into the interaction between immobilized biocatalysts and metal–organic frameworks: A case study of PCN-333 [J]. JACS Au, 2021, 1(12): 2172–2181.

[80] SUN L, XIE J, CHEN Z, *et al*. Reversible lithium storage in a porphyrin-based MOF (PCN-600) with exceptionally high capacity and stability [J]. Dalton Transactions, 2018, 47(30): 9989–9993.

[81] DALIRAN S, OVEISI AR, KUNG CW, *et al*. Defect-enabling zirconium-based metal-organic frameworks for energy and environmental remediation applications [J]. Chemical Society Reviews, 2024, 53(12): 6244–6294.

[82] YOO DK, JHUNG SH. Selective CO2 adsorption at low pressure with a Zr-based UiO-67 metal-organic framework functionalized with aminosilanes [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2022, 10(16): 8856–8865.

[83] ALMOTIRY S, ALHOGBI BG, ABDEL-SALAM M, *et al*. UiO-67 metal-organic framework as advanced adsorbent for antiviral drugs from water environment [J]. Catalysts, 2024, 14(9): 573.

[84] SHAH M, ABDULLAH U, PERVAIZ E, *et al*. 2D bifunctional tungsten disulfide-embedded UiO-66 (WS_2@UiO-66) as a highly active electrocatalyst for water splitting [J]. Energy Advances, 2024, 3(2): 459–470.

[85] RAVEENDRAN SRD, TEH LP, OTHAMAN R, *et al*. Enhanced carbon dioxide adsorption performance of UiO-66-SO_3H with a mixed ligand strategy [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(5): 113404.

[86] SKORYNINA AA, LAZZARINI A, SANNES DK, *et al*. The structure of Pd-functionalized UiO-67 during CO_2 hydrogenation [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2024, 12(10): 3564–3572.

[87] ZHANG Y, GUO S, LI J, *et al*. Architecting the donor-acceptor units in UiO-68 for high-efficiency photocatalytic pollutant degradation [J]. Inorganic Chemistry, 2025, 64(26): 13507–13514.

[88] AL-OMOUSH MK, POLOZHENTSEV OE, SOLDATOV AV. High drug loading capacity of UiO-69 metal-organic framework with linkers 2,6-naphthalenedicarboxylic acid with carboplatin [J]. Journal of Nanoparticle Research, 2023, 26(1): 5.

[89] KABAK B, SOYUÇOK A. Fe-MOF based turn-on fluorescence sensor for the rapid detection of foodborne pathogens in multiple matrices [J]. Food Bioscience, 2025, 69: 106910.

[90] SUN R, LIU P, MA Y, *et al*. Smartphone-integrated ratiometric sensing platform based on dual-emitting electrospun MOF@$[Ru(bpy)_3]^{2+}$ nanofibers for effective detection and adsorption of aflatoxin B_1 [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 488: 150943.

[91] ZHU X, HE Y, XIE X, *et al*. MOF-engineered Cu_2O nanozymes with boosted peroxidase-like activity for colorimetric-fluorescent dual-mode detection of deoxynivalenol [J]. Microchimica Acta, 2025, 192(5): 320.

[92] LI Z, LI Z, LI Q, *et al*. Dual-centered MOF-on-MOF sensor assisted by molecularly imprinted polymer for rapid and sensitive detection of aflatoxin B_1 with dual selectivity mechanism [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2025, 290: 117933.

[93] ZHOU J, LIU Y, DU X, *et al*. Recent advances in design and application of nanomaterials-based colorimetric biosensors for agri-food safety analysis [J]. ACS Omega, 2023, 8(49): 46346–46361.

[94] SAHARE T, SINGH N, SAHOO BN, *et al*. Smartphone-enhanced nanozyme sensors: Colorimetric and fluorescence sensing techniques [J]. Biosensors and Bioelectronics: X, 2024, 21: 100544.

[95] CHENG X, LIU S, HU Y. Recent advances in nanozyme sensors based on metal-organic frameworks and covalent-organic frameworks [J]. Biosensors, 2024, 14(11): 515.

[96] ZHANG T, LU D, ZENG Y, *et al*. A simple post-processing approach induced interface recombination to construct hollow cubic-shape Prussian blue analogs for biosensing and degradation of aflatoxins B_1 [J]. Food Chemistry, 2025, 479: 143807.

[97] LIN Y, YUAN R, WANG T, *et al*. Sensitive and visual colorimetric detection of AFB_1 based on MOF-on-MOF bimetallic nanozymes [J]. Talanta, 2025, 295: 128404.

[98] ZHANG X, LI Z, SHI Y, *et al*. Electrochemical/photoelectrochemical dual-mode aptasensor for sensitive aflatoxin B_1 assay based on distance-modulation strategy using Au NPs/PCZIF-8-ZnO as sensing substrate [J]. Food Chemistry, 2024, 441: 138382.

[99] ZHU T, LI N, HUANG J, *et al*. An electrochemical aptasensor based on target triggered multiple-channel DNAzymes cycling amplification strategy with PtFe@Co-MOF as signal amplifier [J]. Microchimica Acta, 2022, 189(10): 388.

[100] GUAN Y, SI PB, YANG T, *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.

(责任编辑：蔡世佳　安香玉)