中国科学: 化学 2026 年 第 56 卷 第 5 期: 1407 ~ 1431
SCIENTIA SINICA Chimica chemcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

评 述

基于金属有机骨架复合材料利用荧光技术检测食品污染物的研究进展

单葆坤, 张月*, 王鹏, 赵鹏程*, 傅叔传, 陈学国, 张振宇*

中国刑事警察学院刑事科学技术学院, 沈阳 110035
*通讯作者, E-mail: zhangyue1022_cipuc@163.com; zhaopengcheng@cipuc.edu.cn; ccpczzy@163.com

收稿日期: 2026-01-22; 接受日期: 2026-03-24; 网络版发表日期: 2026-04-28
公安部科技强警基础工作专项(编号: 2022JC03, 2023JC05)、辽宁省教育厅项目(编号: C2024007)、中国刑事警察学院预研项目(编号: Y2024061)、中国刑事警察学院科研重点攻关项目(编号: D2025011)、辽宁省科学技术计划项目(编号: 2025080101-JH2/1013)和公安部科技计划项目(编号: 2025JSM11)资助

摘要 金属有机框架(MOFs)凭借结构均匀、表面积大、孔隙率高及表面易功能化等优势, 近年来在食品污染物检测领域备受关注. 本文阐述了光致电子转移、荧光共振能量转移等八种MOFs材料发光检测机理, 重点系统综述了其在抗生素、农药、真菌毒素及食源性病原体四类主要食品污染物荧光检测中的应用进展, 涵盖各类别下代表性物质的检测实例、性能参数及实际应用场景. 本文还讨论了当前MOFs材料的研发重点, 在此基础上分析了其存在的不足与局限性, 进而对该材料在食品污染物传感领域未来的发展提出建议, 强调了其广阔的应用前景.

关键词 金属有机框架材料, 食品污染物, 荧光, 传感检测

1 引言

食品安全一直以来是公众关注的焦点, 其中食品污染是威胁食品安全的核心问题. 目前食品中的有害残留主要来自: 畜牧业中兽药使用导致的抗生素残留[1]、农业生产中农药的残留[2]、微生物代谢产生的真菌毒素污染[3]还有细菌、病毒等外源污染物对食品的污染, 这些污染物不仅会破坏生态环境, 还可能通过食物链累积, 最终对人体健康造成危害[4]. 因此, 开发保障食品安全的技术手段非常重要, 其中研制食品污染物的传感器[5]是一种有效的方法, 对于及时检测污染物残留并推动后续预防工作具有重要意义.

在分析领域中, 气相色谱法[6]、气相色谱-质谱联用法[7]、高效液相色谱法[8]及毛细管电泳法[9]等方法应用广泛. 这类传统检测方法虽兼具高精度、高灵敏度与高选择性等优势, 但存在依赖贵重仪器、样品前处理繁琐、对操作人员专业素养要求严苛等局限性, 难以满足现场快速检测的实际需求.

为此, 科研人员致力于开发新型检测技术, 荧光传感技术凭借其高灵敏度、快速响应及可视化潜力, 在食品安全快速检测领域展现出巨大前景. 在荧光传感器的材料选择中, 金属有机框架(metal organic frame-

引用格式: Shan B, Zhang Y, Wang P, Zhao P, Fu S, Chen X, Zhang Z. Research progress in detection of food contaminants via fluorescence technology based on metal-organic framework composites. *Sci Sin Chim*, 2026, 56: 1407–1431, doi: 10.1360/SSC-2026-0013

© 2026 《中国科学》杂志社

works, MOFs)材料凭借独特的结构优势, 已成为该领域的热门研究方向.

MOFs由金属节点与有机配体自组装形成, 兼具多孔、高比表面积、孔道可调控的结构特征, 可通过定向设计实现对目标物的特异性识别[10]. 同时还具有多吸附位点、稳定性好及表面易功能化等优点, 不仅在环境检测[11]、光电催化[12]与能量存储[13]等领域应用广泛, 在荧光传感方向更是展现出显著的应用潜力. 以MOFs为荧光传感探针, 可巧妙融合多孔材料的富集能力、晶体的可设计性以及可调谐的荧光响应机制, 为解决食品安全荧光检测中选择性不足、抗干扰能力较弱等关键问题, 提供高效的解决方案.

在先前的报道中, Zhang等[14]对基于MOFs的不同食品有害污染物传感器进行了综述, Hao等[15]对基于MOFs的电化学传感器的进展进行了综述总结, Wu等[16]对基于MOFs的食源性病原菌检测传感器进行了批判性综述. 然而, 在过去的几年中, 对于专门利用MOFs材料构建荧光传感器在食品污染物中的应用缺乏全面的总结. 基于这个出发点, 本文首先剖析了MOFs的传感机制, 随后重点讨论了基于MOFs荧光传感器在抗生素残留, 农药残留, 真菌毒素, 食源性病原体四大类食品污染物中的应用进展(图1), 最后系统地讨论了该种方法目前的局限性与未来发展趋势.

2 MOFs材料的发光检测机理

2.1 光致电子转移

光致电子转移(photoinduced electron transfer, PET)是一种在光激发下发生的氧化还原过程. 受激发的荧光分子会将激发态电子转移至处于基态的分析物, 该电子转移过程导致荧光分子激发态淬灭, 从而使荧光信号减弱并引起光谱特征变化[17].

MOF基荧光传感的PET机理为分子间供体-受体型电子转移过程. MOFs以富含的π-共轭有机连接体为电子供体, 其刚性配位骨架可固定连接体构型与减少非辐射衰减, 保障光激发后电子从第一激发单重态(S_1态)高效转移至电子缺陷型分析物分子轨道, 使MOFs辐射失活并荧光猝灭. 同时其孔道限域效应可富集分析物, 主客体间非共价相互作用还能强化轨道重叠, 进一步促进PET过程, 实现对目标分析物的高灵敏传感[18].

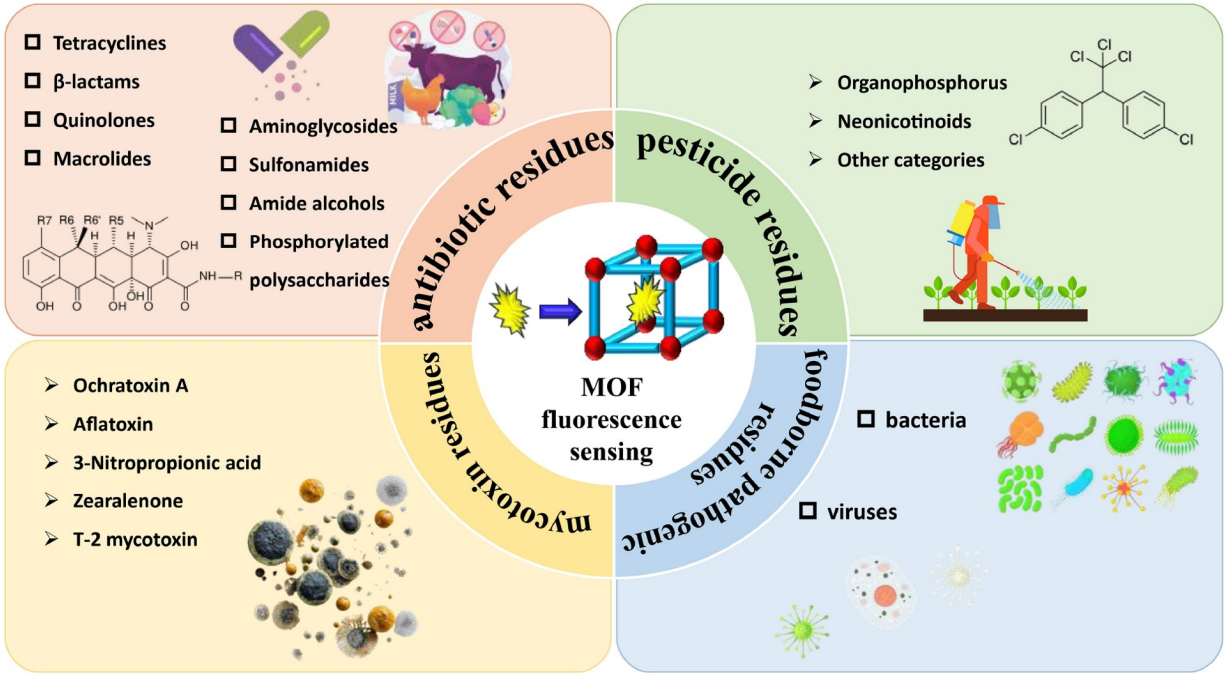


图 1 (网络版彩图)基于MOFs材料荧光检测方法在食品污染物分析中的应用

Figure 1 (Color online) Application of fluorescence detection methods based on MOFs in food contaminant analysis.

2.2　荧光共振能量转移

荧光共振能量转移(fluorescence resonance energy transfer, FRET)的发生需满足两个关键条件: (1) 目标客体分子的紫外-可见吸收光谱与MOFs主体材料的发射光谱之间存在有效重叠; (2) MOFs材料自身的激发或发射能量能够被客体分子吸收. 在该过程中, 处于激发态的MOFs作为供体将能量转移至客体受体, 从而引发供体荧光猝灭[19].

MOF基荧光传感的FRET机制, 依托MOF独特结构优势实现高效检测. MOFs具有多孔刚性骨架, 既可通过发光配体或负载荧光客体作为FRET受体, 其规整孔道又能为供受体提供稳定微环境, 确保二者间距处于FRET有效作用范围, 且发射-吸收光谱天然匹配, 为高效能量转移奠定基础. 目标分析物可调控供-受体间的相互作用与结合状态, 改变FRET效率, 进而引起供体荧光猝灭[20].

2.3　荧光内滤效应

荧光内滤效应(internal filtering effect, IFE)是一种由物理性光吸收竞争所导致的荧光信号变化现象, 而非源自荧光团与分析物之间的直接相互作用. 内滤效应导致荧光淬灭通常由两种机制触发: (1) 分析物竞争性吸收激发光, 使得荧光团实际接收的激发能减少; (2) 分析物吸收荧光团已发射的荧光, 造成检测器接收到的信号强度降低[21].

MOF基荧光传感的IFE机理依托其独特结构与功能优势实现高效检测. MOFs凭借有机配体赋予的固有荧光成为荧光团, 其金属节点可赋予催化活性, 能在辅助物质作用下将分析物氧化为特定产物, 且多孔结构可实现分析物及产物的富集. 当分析物或其氧化产物的吸收光谱与MOFs的激发光谱或发射光谱产生有效重叠时, 会通过竞争性吸收激发光或MOFs发射的荧光, 减少MOFs实际获得的激发能或直接损耗其发射荧光, 最终引发MOFs荧光淬灭[22].

2.4　竞争吸收

若分析物的吸收光谱与MOFs的激发光谱发生重叠, 则可能引发激发光的竞争吸收(competitive absorption, CA)现象. 其本质是分析物与MOFs之间对激发光能量的竞争: 分析物吸收了部分特定波长的入射光, 减少了MOFs所能接收到的有效激发光强, 最终导致MOFs的发光强度发生猝灭[23].

MOF基荧光传感的CA机理为分析物与MOFs间的激发光能量竞争过程, MOFs依靠自身的光吸收特性实现对特定波长激发光的捕获并产生荧光发射, 当具有光吸收能力的目标分析物存在时, 其吸收光谱会与MOF的激发光谱产生重叠, 进而与MOFs竞争吸收相同波长的激发光能量, 使得MOFs所能获取的有效激发光强显著降低, 激发态MOFs的形成数量随之减少, 最终造成MOFs的荧光发射强度发生猝灭[24].

2.5　动态淬灭效应与静态淬灭效应

静态猝灭效应(static quenching effect, SQE)来源于已经受激发的MOFs与猝灭剂预先形成了非发光的基态复合物. 动态猝灭效应(dynamic quenching effect, DQE)是因为受激发的MOFs通过与猝灭剂分子发生碰撞, 以能量或电荷转移的方式损失了激发能而返回基态. 区分这两种效应的核心标准通常是从荧光寿命方面进行分辨, 在静态猝灭过程中, 发光寿命是基本保持不变的, 而在动态猝灭过程中, 发光寿命是缩短的[25].

MOF基荧光传感的SQE与DQE为荧光猝灭的两类核心作用过程, 二者可单独或协同实现对目标分析物的传感检测. 其中静态猝灭效应是电子富集的MOFs基态与电子缺陷型猝灭剂分析物预先结合, 形成无荧光发射能力的基态非发光复合物, 该复合物受光激发后, 能量仅以非辐射形式耗散并直接返回基态, 不会产生荧光, 且此过程中MOFs的荧光寿命基本保持不变; 动态猝灭效应则是受光激发处于激发态的MOFs与体系中猝灭剂分析物发生动态碰撞, 通过能量转移或电荷转移的方式丧失激发能, 进而从激发态快速返回基态, 使荧光发射过程受阻, 该过程会直接造成MOFs的荧光寿命显著缩短[26].

2.6　分子内电子转移

分子内电子转移(intramolecular charge transfer, ICT)通常由同时连接电子给体(D)和电子受体(A)的荧光团构成, 通过π共轭通道形成推拉电子体系, 其中D/A基团本身常作为识别基团. 当识别基团与分析物结合后, 其供/吸电子能力发生改变, 引起π结构重排, 进而导致吸收或发射光谱发生红移或蓝移[27].

MOF基荧光传感的ICT机理为光诱导的分子内电

子定向转移过程，MOFs以金属-氧簇为电子供体、吸电子有机配体为受体，依托刚性配位骨架构建稳定π共轭推拉电子体系. 光激发下体系产生未成对电子，驱动电子从金属-氧簇向吸电子配体转移，且MOFs孔道可富集分析物，主客体相互作用会改变供吸电子能力，引发π电子结构重排，使ICT电子转移效率改变，最终表现为光谱红移或蓝移，实现对目标分析物的灵敏传感[28].

2.7 激发态分子内质子转移

激发态分子内质子转移(excited state intramolecular proton transfer, ESIPT)是一种重要的光物理过程，ESIPT的核心是当识别系统受到特定波长激发光照射时，激发态的质子会在质子供体与质子受体之间发生转移. 像这样的质子供受体基团会发生烯醇式与酮式的互变异构，从而驱动激发态下的质子转移，并且这个过程是完全可逆的[29].

MOF基荧光传感的ESIPT机理，是通过配体功能基团与目标分析物相互作用调控质子转移的传感模式. MOFs在有机连接体中引入–OH等质子供体与–C=O等质子受体，形成稳定分子内氢键，刚性配位骨架固定其空间构型. 基态MOFs为烯醇式，光激发后质子快速转移形成酮式异构体并产生特征荧光；目标分析物通过配位等作用破坏氢键，抑制ESIPT过程，使荧光出现猝灭或增强以及蓝移/红移的变化[30].

2.8 聚集诱导发光效应

聚集诱导发光效应(aggregation-induced luminescence, AIE)指某些分子在溶液中分散时发光微弱或不发光，而聚集形成聚集体后，因分子运动受限、非辐射跃迁减弱，发光显著增强的现象. 其核心是聚集态抑制了分子内有害光物理过程，使激发态能量更多以荧光等形式释放[31].

MOF基荧光传感的AIE机理以分子内运动受限为核心，MOFs将聚集诱导发光分子作为配体或客体包封于骨架，其刚性晶态配位骨架可限制该分子的内旋转与振动，抑制激发态非辐射衰减，让激发态能量更多以荧光形式释放. 同时，MOFs多孔结构可富集分析物，主客体弱相互作用会进一步锁定分子运动或改变其聚集状态，使体系荧光发生变化，实现对目标分析物的高灵敏传感[32].

3 MOFs材料在荧光检测食品污染物中的应用

3.1 检测抗生素的残留

抗生素常广泛用于畜牧和水产养殖中，用以防治疾病并促进生长. 其残留物在环境中难以降解，会通过食物链在人体内蓄积，可能导致细菌耐药性增强、引发过敏反应、肠道菌群失调等问题，严重者甚至会增加致癌风险[33]. 表1是本文所总结的近年来用MOFs材料荧光检测抗生素的应用实例.

目前常用于兽药且易导致残留的抗生素有四环素类、β-内酰胺类、喹诺酮类、大环内酯类、氨基糖苷类、磺胺类、酰胺醇类以及磷酸化多糖类等，下文将以此分类进行介绍.

3.1.1 四环素类

四环素类抗生素(TCs)，如四环素、土霉素、多西环素和金霉素等，因其成本低廉、抗菌谱广且效果显著的优异性质，在畜牧与水产养殖等领域中使用广泛，这类抗生素的残留，会导致细菌产生耐药性，还会对生态环境造成污染[34]. 该类抗生素因分子结构中含多羟基、氨基等特异性结合位点，PET成为其检测的核心机理，同时结合MOFs材料设计的升级，实现了检测灵敏度与抗干扰能力的双重提升.

四环素(TC)曾用于治疗畜禽呼吸道、肠道等多种细菌感染，也常作为饲料添加剂用于促动物生长. Li等[35]在2023年构建了一种基于NH_2-MIL-53(Al)与TpTt-COF复合的双发射荧光探针(NMT)，在365 nm激发下，于455和575 nm处产生双发射荧光. 利用四环素与复合材料的氢键作用触发PET效应，NMT通过PET效应，实现对四环素的特异性识别，最终导致双发射同步猝灭(图2a). 研究进一步开发了结合NMT与智能手机的可视化传感平台，实现了TC的快速、便捷现场检测. 该设计体现了纯MOFs→MOF@COF复合材料的核心趋势，通过共价有机框架(COF)的引入提升MOFs的比表面积与富集能力，强化PET效应的特异性.

土霉素(OTC)常以饲料添加剂或注射剂形式用于防治畜禽的呼吸道、肠道等细菌性感染. Liu等[36]在2024年将分子印迹聚合物PAVE（两亲性嵌段共聚物)与UIO-66-NH_2结合合成新型传感器PAVE-MOFs-MIP(MIP为分子印迹聚合物)，用于检测牛奶中的OTC. 该

表 1　MOFs材料在抗生素荧光检测的机制、性能与应用

Table 1　Mechanism, properties and applications of MOFs materials in antibiotic fluorescence detection

类别	目标检测物	MOFs检测器	检测机理	检出限	线性范围	回收率(%)	实际样品	参考文献
四环素类	四环素	TpTt-COF@ NH_2-MIL-53(Al)	PET	0.014 μmol/L	0–74 μmol/L	94.39–105.67	牛奶, 猪肉, 鸡肉	[35]
四环素类	土霉素	PAVE-MOFs-MIP	PET, MIP	86 nmol/L	10–100 μmol/L	96.1–99.2	牛奶	[36]
四环素类	金霉素	UiO-66-Eu@MOFs (Fe-Cu)	PET	0.71 μM	0.5–200 nM	97.0–108.0	牛奶, 环境水样	[37]
四环素类	多西环素	$Eu_{0.5}/Zr_{0.5}$-MOFs	IFE	2.07 ng/mL	0.05–80 μg/mL	98.87–101.36	鸡蛋	[38]
β-内酰胺类	阿莫西林, 氨苄西林	Zn-TBLeuBa	AIE	0.57, 1.7 μmol/L	5–50 μmol/L	93.2–106.0	牛奶, 蜂蜜, 猪肉	[39]
β-内酰胺类	头孢克肟	Tb-MOFs	IFE, PET	31.55 nM	0.1–150 μM	98.4–104.8	自来水, 嘉陵江水	[40]
喹诺酮类	诺氟沙星	Ag-MOF-74/ NH_2-MIL-53(Al)	DQE	6 nM	10 nM–55 μM	98–102	土壤, 自来水, 牛奶	[41]
喹诺酮类	恩诺沙星	Tb/Eu-MOFs	FRET	0.004 μM	0.005–25 μM	90.8–107.5	鸡蛋, 猪肉	[42]
喹诺酮类	氧氟沙星	Zn/Eu-MOFs	IFE, 阳离子-π作用	0.025 μM	0.1–80 μM	93.4–112.1	猪肉, 牛肉, 鱼肉	[43]
大环内酯类	红霉素	NH2-MIL-88B	ICT	8 nM	0.015–9.5 μM	93.3–103.7	湖水	[44]
氨基糖苷类	链霉素	MOFs-74-Co	“Turn-on”	0.065 nM	50–5×10^6 nM	91.38–100.2	茶叶, 鸡蛋, 蜂蜜	[45]
磺胺类	磺胺甲基嘧啶	$Tb_{0.6}Eu_{0.4}$-MOFs	IFE	0.1 μM	2–140 μM	92.87–107.90	鱼肉	[46]
酰胺醇类	氯霉素	CDs@ZIF-8@SMIP	ICT	0.08 μg/L	0.323–8075.0 μg/L	95.5–101.0	牛奶, 蜂蜜, 猪肉	[47]
磷酸化多糖类	黄霉素	Fe-MOFs@ NH_2-MIL-101(Eu)	PET	4.8 nM	6–8 μM	91.00–103.14	猪肉, 鸡肉	[48]

材料通过π-π共轭作用在MOFs表面构建亲水性分子印迹层, 基于PET导致荧光猝灭效应进行检测(图2b). 其检测结果在与传统的高效液相色谱法(HPLC)的对比中具有良好一致性, 该方法将分子印迹技术与PET机理结合, 解决了纯MOFs检测四环素类抗生素时的基质干扰问题.

金霉素(CTC)常作为饲料添加剂用于畜禽, 主要用于防治细菌性肠炎和呼吸道疾病. Meng等[37]在2025年报道了基于MOF-on-MOF双功能凝胶架构(FCZE)的可视化传感平台, 发挥了双金属协同强化催化活性, 用于CTC的超灵敏检测(图2c). 基于PET效应导致荧光猝灭, 构建的荧光比色检测体系对CTC检测灵敏度高、特异性强, 且结合智能手机辅助平台实现了现场快速检测. 他们还运用密度泛函理论和福井函数明确了目标物的检测机制, 为该类传感体系设计提供理论支撑.

多西环素(DOX)在畜牧业中主要用于治疗畜禽的复杂呼吸道感染、混合感染及特定原虫病. He[38]在2024年开发了一种$Eu_{0.5}/Zr_{0.5}$-MOFs的智能手机辅助荧光传感器, 实现了传感材料的创新, 该材料具有双发射荧光特性(430和615 nm), 基于IFE效应猝灭MOFs荧光, 构建了开关型比率荧光检测体系. 在最优条件下, $Eu_{0.5}/Zr_{0.5}$-MOFs传感器对多西环素表现出高灵敏荧光响应, 在0.05~80 μg/mL范围内, 检出限达2.07 ng/mL, 在鸡蛋样品检测中回收率达98.87%~101.36%, 结合智能手机RGB (红绿蓝色彩模式)分析平台, 实现了快速可视化检测.

综上, 四环素类抗生素的检测呈现“PET机理为主, 复合机理为辅, 材料向双金属/分子印迹复合升级”的趋势, 核心设计目标为解决复杂食品基质中的干扰问题, 同时实现检测信号的可视化, 适配现场快速检测的实际需求.

3.1.2　β-内酰胺类抗生素

β-内酰胺类抗生素的典型类别包括青霉素类、头孢菌素类等, 过度使用会诱导细菌产生β-内酰胺酶, 导致细菌对β-内酰胺类抗生素产生耐药性. 目前该类抗生素的MOFs荧光检测呈现猝灭型机理与增强型机理为主导, 针对不同类别物质特异性设计的特征.

青霉素类抗生素如阿莫西林、氨苄西林等, 会对

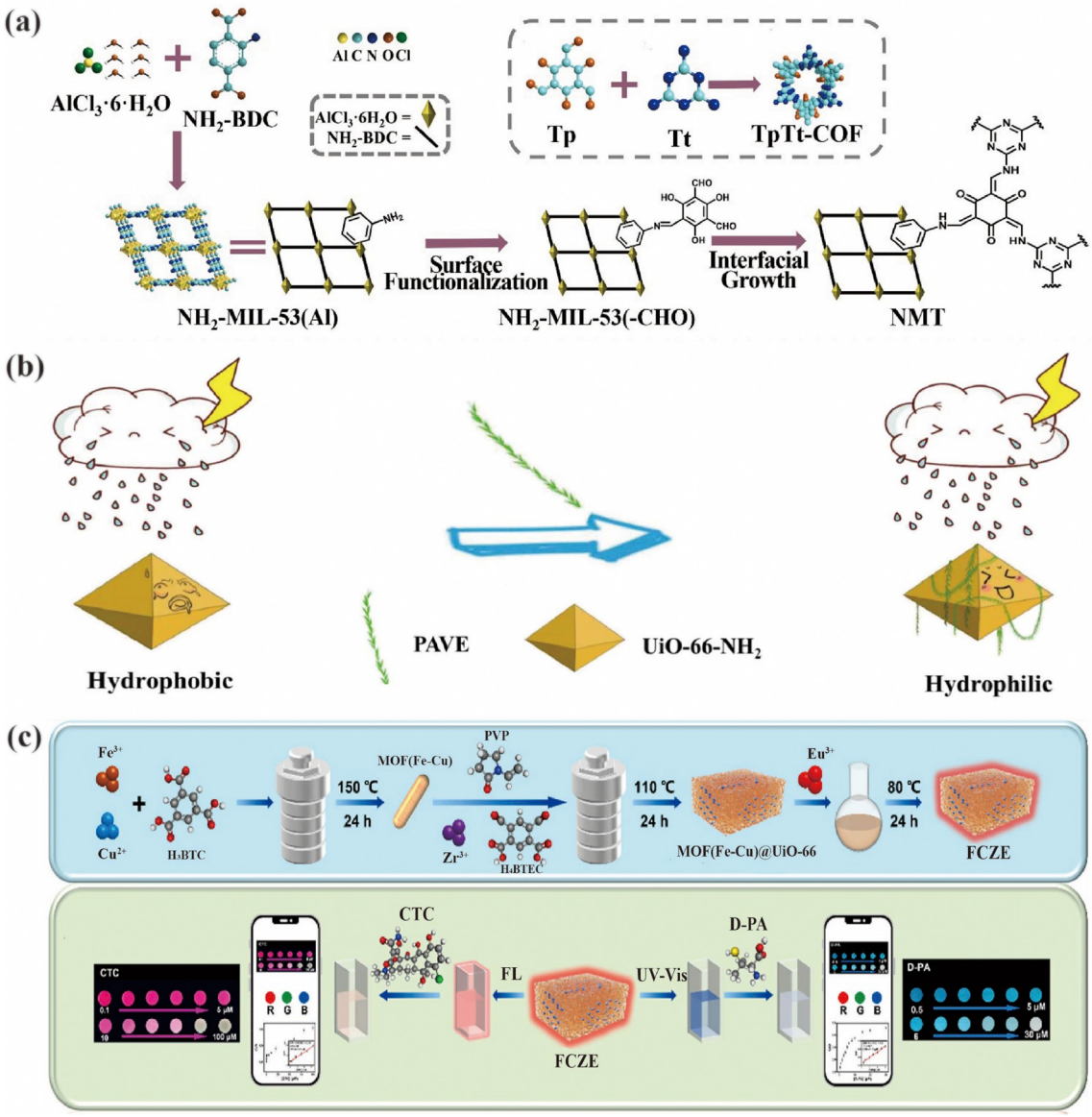


图 2 (网络版彩图) (a) NMT试纸的合成[35]. (b) PAVE-MOFs-MIP的反应检测机制[36]. (c) FCZE的合成、智能手机可视化传感和反应机制[37]

Figure 2 (Color online) (a) Synthesis of NMT test strips. Reproduced with permission from Ref. [35]. Copyright 2023, Elsevier. (b) Reaction detection mechanism of PAVE-MOFs-MIP. Reproduced with permission from Ref. [36]. Copyright 2024, Royal Society of Chemistry. (c) The synthesis of FCZE, smartphone-visualized sensing and reaction mechanism. Reproduced with permission from Ref. [37]. Copyright 2025, Elsevier.

多数革兰氏阳性菌产生强杀菌作用. Yue等[39]在2025年开创了一种荧光开启型Zn-TBLeuBa探针, 实现了对阿莫西林和氨苄西林的高选择性、高灵敏度检测. 该探针通过AIE效应产生荧光增强, 他们提出"通过定制MOFs表面官能团构建专属微环境, 实现特异性抗生素检测"策略, 通过调控MOFs表面微环境实现对青霉素类抗生素的特异性识别, 为增强型机理在抗生素检测中的应用提供了理论与实验基础.

头孢菌素类作为广谱β-内酰胺抗生素, 因抗菌活性强、相对安全性高, 是治疗多系统严重细菌感染的常用药物. 当前MOFs在头孢菌素检测中的应用研究有限, 且多聚焦于头孢克肟(CFX)等低残留风险的种类. Zheng等[40]在2025年构建了一种新型具有水稳定的Tb-MOFs荧光传感器. 该传感器基于IFE以及PET复

合的效应，对CFX产生荧光淬灭(图3)，在自来水、嘉陵江水及头孢克肟片剂等实际样品中该传感器的检测回收率理想且结果与HPLC一致, 其可作为环境水体和药品中CFX快速定量检测的潜在平台，为解决抗生素滥用导致的水体污染检测问题提供了新方法.

3.1.3　喹诺酮类

喹诺酮类抗生素是一类高效廉价的广谱抗菌药, 广泛用于畜禽、水产养殖. 通过抑制细菌DNA旋转酶和拓扑异构酶IV, 阻断DNA复制与转录而发挥杀菌作用，该类别抗生素使用不当易在禽肉、鸡蛋及水产品等食品中残留，构成食品安全风险. 由于其分子结构中含苯环等共轭基团，紫外吸收特性显著，FRET与IFE成为其检测的核心机理，同时材料设计向异质结构比率荧光探针与可视化传感平台升级，实现检测灵敏度与现场应用性的提升.

诺氟沙星(norfloxacin, NFX)、恩诺沙星(enrofloxacin, ENR)和氧氟沙星(ofloxacin, OFL)是典型氟喹诺酮类抗菌药, 在畜牧业和水产养殖中被广泛应用. Li等[41]在2025年构建了一种Ag-MOF-74@NH_2-MIL-53(Al)的异质结构比率荧光探针. NFX在443 nm处通过静电作用与氢键特异性结合，引起信号增强. 通过DQE效应导致540 nm信号减弱，在牛奶、土壤和自来水三类复杂实际样品中实现了NFX的高灵敏检测(图4)，并成功集成了智能手机检测平台，利用自动RGB比值分析实现了定量检测，为现场快速可视化决策提供了技术支持.

Cui等[42]在2025年开发了一种基于Tb/Eu-MOFs的探针, 用于ENR的可视化检测. 选取Tb/Eu-MOFs (3:1)作为传感单元, 在识别ENR后, 基于FRET效应, 荧光颜色由橙红变至浅黄色, 检测限达0.004 μM, 线性范围为0.005~25 μM. 通过将材料固载于琼脂切片中，并结合智能手机RGB分析, 构建了便携式视觉检测平台(图5), 该检测平台可在5~150 μM范围内实现现场快速检测, 检测限为4.7 μM,, 并在鸡蛋和猪肉样品中表现出90.8%~107.5%的回收率和良好重复性.

Zhang等[43]在2023年研究开发了一种基于Zn/Eu-MOFs的荧光探针，用于检测肉制品中的OFL. 探针通过IFE效应及阳离子-π作用高选择性地识别OFL，导致荧光颜色发生橙红至浅绿的显著变化(图6). 该方法具有极低检出限和宽线性范围, 响应时间仅30 s, 并且对常见干扰物质荧光响应稳定，仅对OFL表现出显著荧光淬灭效果. 实验借助智能手机与便携式紫外灯，可实现OFL的可视化检测, 满足快速筛查需求.

喹诺酮类抗生素的检测充分利用其分子共轭结构特征, 实现机理与污染物结构的精准适配, 同时材料设

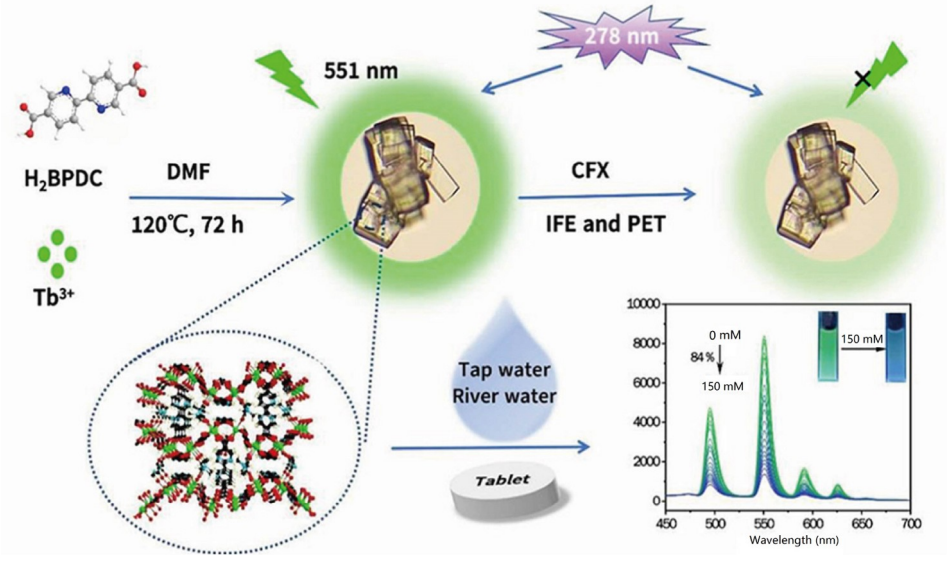


图 3　(网络版彩图)Tb-MOFs荧光传感器的合成与在真实样品中的检测[40]

Figure 3　(Color online) Fabrication process of Tb-MOFs fluorescent sensor and detection in real samples. Reproduced with permission from Ref. [40]. Copyright 2025, Elsevier.

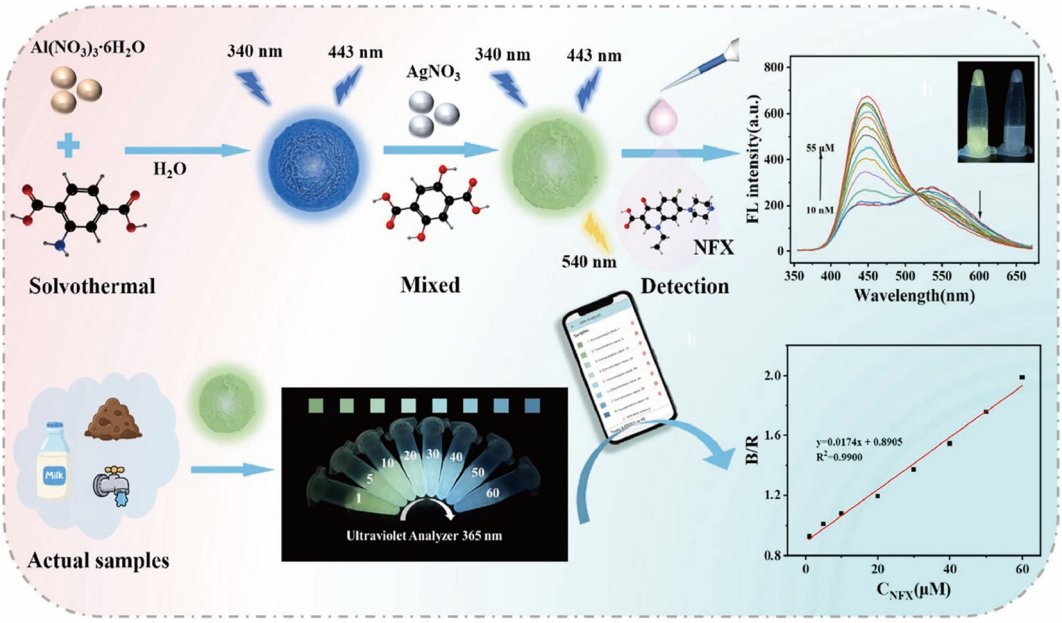


图 4 (网络版彩图) Ag-MOF-74/NH_2-MIL-53(Al)的合成、检测以及实际样品结合智能手机可视化处理过程[41]

Figure 4 (Color online) Synthesis, detection workflow, and smartphone-based visualization process of Ag-MOF-74/NH_2-MIL-53(Al) samples. Reproduced with permission from Ref. [41]. Copyright 2025, Elsevier.

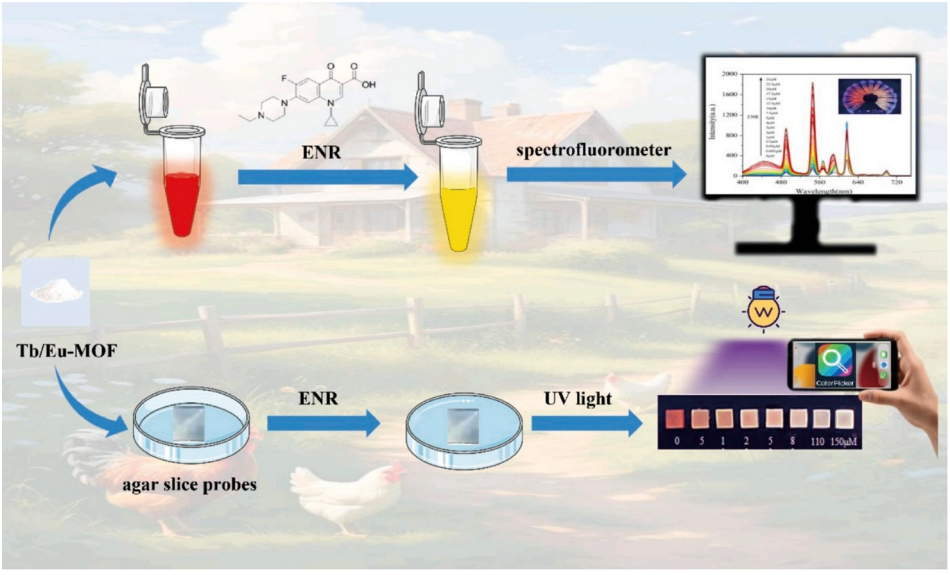


图 5 (网络版彩图)基于Tb/Eu-MOF的双模(荧光/视觉)平台用于快速ENR检测的原理[42]

Figure 5 (Color online) Principle of a dual-mode (fluorescence/visual) platform based on Tb/Eu-MOF for rapid ENR detection. Reproduced with permission from Ref. [42]. Copyright 2025, Elsevier.

计向异质结构、琼脂/试纸条固载发展，按照核心为“提升灵敏度与可视化检测结合”的目标发展，既保证实验室检测的高精度，又满足现场快速检测的实际需求.

3.1.4 大环内酯类

大环内酯类抗生素以大环内酯环为核心结构，通过抑制细菌蛋白质合成发挥药效，是畜禽呼吸道疾病防治的重要药物，其检测因分子结构特征适配ICT机

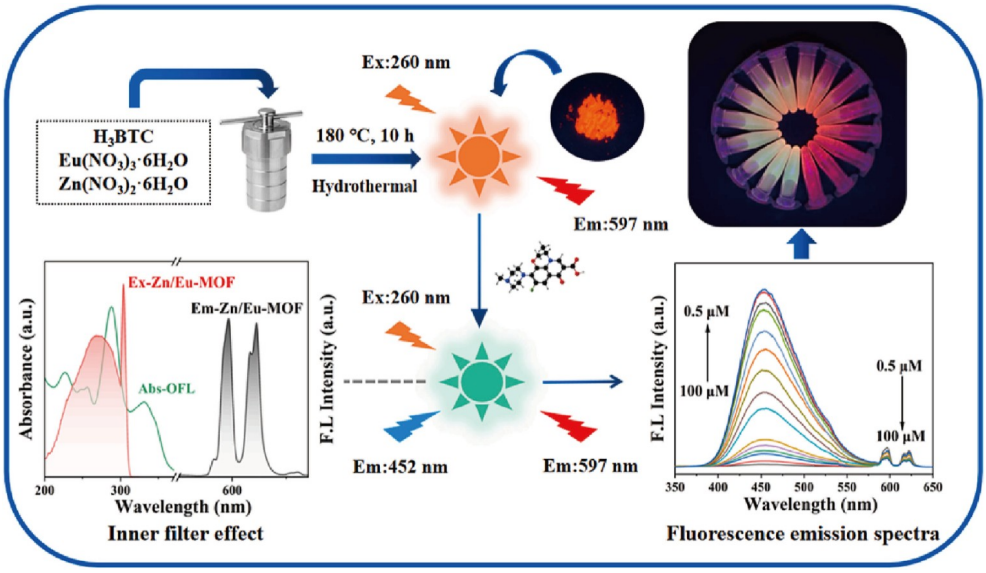


图 6　(网络版彩图) Zn/Eu-MOF对OFL荧光检测的示意图[43]

Figure 6　(Color online) Schematic diagram of fluorescence detection of OFL by Zn/Eu-MOF. Reproduced with permission from Ref. [43]. Copyright 2023, Elsevier.

理, 且目前研究正向双模传感发展, 实现荧光与电化学检测的互补, 提升检测结果的可靠性.

红霉素(erythromycin, ERY)主要用于治疗畜禽的支原体感染、革兰氏阳性菌引起的呼吸道疾病以及作为青霉素过敏时的替代药物. Azeez等[44]在2025年开发了一种NH_2-MIL-88B的双模免疫传感器检测ERY. 在检测中, ERYAb/Fe-MOF复合物在ERY存在时, 源于其ICT效应导致荧光信号增强, 同时使电化学探针$[Fe(CN)_6]^{3-/4-}$的电流信号发生猝灭, 据此构建了荧光与电化学双模检测平台(图7). 该传感器对红霉素的检测线性范围宽, 检测限低至5.2 nM (电化学)与8 nM (荧光), 选择性强, 同时通过水凝胶膜的应用提升传感器稳定性, 结合智能手机实现液体态与水凝胶膜态双体系的快速便携检测. 该研究将ICT机理应用于大环内酯类抗生素检测, 同时通过双模传感实现信号交叉验证, 解决了单一荧光检测易受环境干扰的问题, 为该类抗生素检测提供了新的技术思路.

3.1.5　氨基糖苷类

氨基糖苷类抗生素通过不可逆结合细菌核糖体30S亚基以抑制蛋白质合成, 对需氧革兰氏阴性杆菌作用显著. 因其化学性质稳定、易在动物肾脏等内脏蓄积, 以及其在肌肉、牛奶及蜂蜜中残留风险高, 因此检测要求超灵敏性与宽线性范围, 目前研究以“Turn-on”型荧光机理为核心, 通过适配体与MOFs的结合, 实现对痕量残留的精准检测.

链霉素(streptomycin, STR)被广泛用于防治畜禽的结核病、细菌性肠炎等革兰氏阴性菌感染疾病. Zhong等[45]在2024年研究开发了一种基于MOFs-74-Co的高灵敏度的“Turn-on”型荧光适配体传感器(图8). 当靶标存在时, 适配体脱落并释放出被封装于MOFs-74-Co孔道内的鲁米诺. MOFs-74-Co的催化活性可显著放大鲁米诺的化学发光信号, 于427 nm处检测荧光, 实现了对STR的超灵敏检测, 在50~5×10^6 nM浓度范围内, 检测限为0.065 nM, 在茶叶、鸡蛋和蜂蜜样品中, 回收率为91.38%~100.2%, 研究既实现了痕量链霉素的超灵敏检测, 又适配复杂食品基质, 解决了氨基糖苷类抗生素因残留浓度低、基质干扰大导致的检测难题.

3.1.6　磺胺类

磺胺类药物是一类通过抑制细菌叶酸合成发挥抑菌作用的广谱抗生素, 具有成本低、应用广的特点, 广泛用于畜牧及水产养殖中的细菌感染防治. 其不规范使用易导致在动物肌肉、肝肾及奶蛋产品中残留. 因为其分子结构无强特异性结合位点的特点, IFE成为

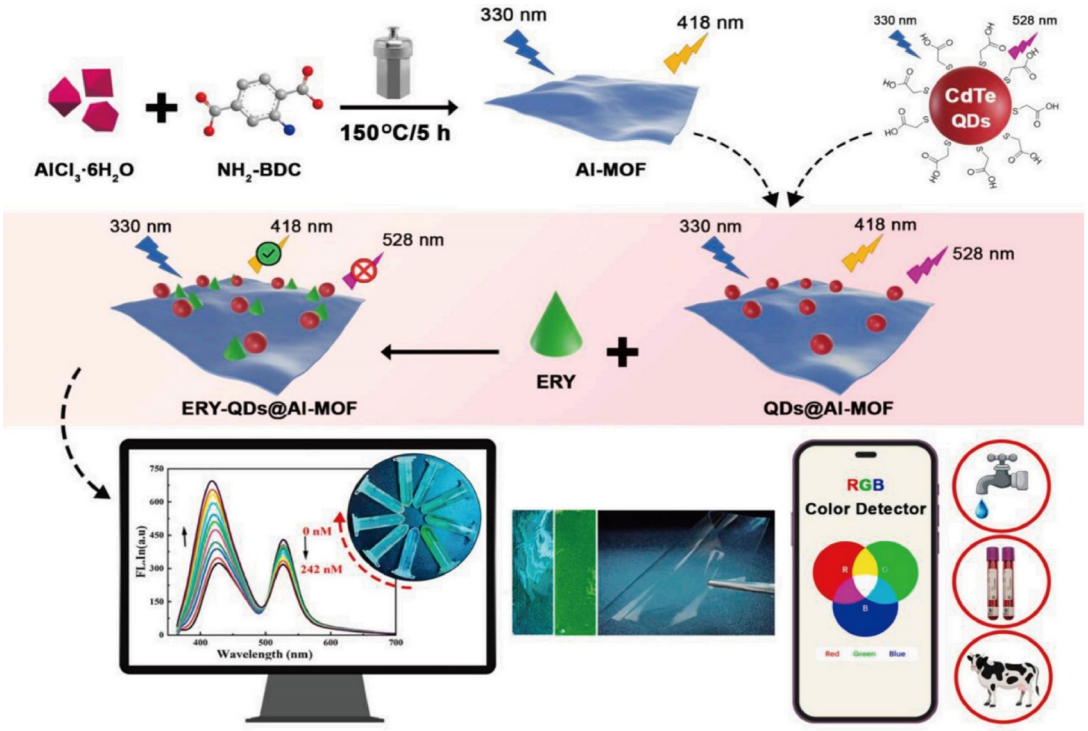


图 7 (网络版彩图) Fe-MOF的作用机制及智能手机辅助可视化检测过程[44]

Figure 7 (Color online) Mechanism of Fe-MOF and smartphone-assisted visual detection process. Reproduced with permission from Ref. [44]. Copyright 2025, Elsevier.

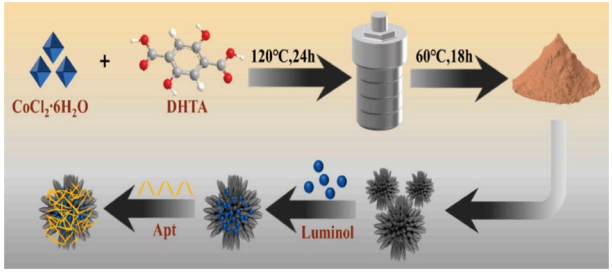


图 8 (网络版彩图) MOFs-74-Co荧光传感器的制备图[45]

Figure 8 (Color online) Preparation process of MOFs-74-Co fluorescent sensor. Reproduced with permission from Ref. [45]. Copyright 2024, Elsevier.

其检测的主流机理, 同时通过双金属比率荧光设计提升检测的抗干扰能力, 实现复杂基质中准确定量.

磺胺甲基嘧啶(sulfamerazine, SMZ)主要用于防治畜禽的链球菌、肺炎球菌及弓形虫等感染, 常与甲氧苄啶联用以增强抗菌效果. Yue等[46]在2023年开发了一种基于$Tb_{0.6}Eu_{0.4}$-MOFs的比率型荧光传感器检测SMZ. 该传感器利用单一MOFs中Tb^{3+}与Eu^{3+}的双发射特性, 通过IFE实现特异性响应. 在线性范围2~140 μM内, 检测限达0.1 μM, 具备优异的选择性与抗干扰能力(图9). 其应用于鱼肉样品中SMZ快速现场分析回收率可达到92.87%~107.90%. 研究还结合智能手机平台, 开发了可自动读取RGB值并计算浓度的应用程序, 实现了检测可视化与数字化. 双金属比率荧光的设计通过两个信号的比值定量, 抵消了食品基质中蛋白质、糖类等成分的干扰, 解决了IFE效应检测特异性与抗干扰能力弱的问题, 成为磺胺类抗生素检测的有效设计方案.

3.1.7 酰胺醇类

酰胺醇类抗生素是一类通过不可逆结合细菌核糖体50S亚基, 从而抑制蛋白质合成的广谱抗生素, 其中氯霉素因具有再生障碍性贫血等严重人体副作用, 已被严格禁止用于所有食品动物, 因此其检测要求超高灵敏度与强特异性, 目前研究以ICT机理为核心, 结合荧光纳米材料与分子印迹的融合思路, 实现对痕量氯霉素的精准检测.

氯霉素(chloramphenicol, CAP)因对人体存在引起

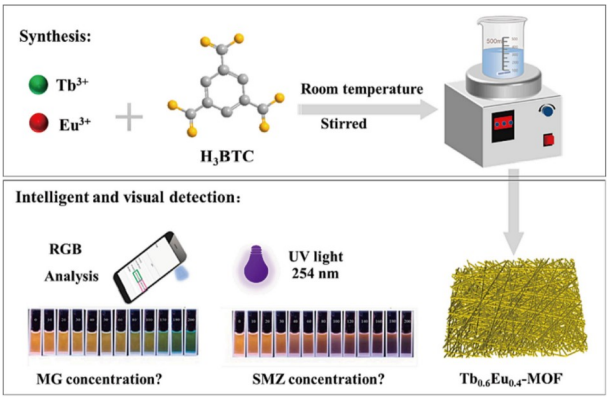


图 9　(网络版彩图) $Tb_{0.6}Eu_{0.4}$-MOF制备过程及对SMZ的检测[46]

Figure 9　(Color online) Reparation of $Tb_{0.6}Eu_{0.4}$-MOF and its detection performance for SMZ . Reproduced with permission from Ref. [46]. Copyright 2023, Elsevier.

再生障碍性贫血等严重副作用的风险，现已严格禁止用于所有食品动物. Pan等[47]在2024年成功构建了一种基于CDs@ZIF-8@SMIP的荧光探针. 该传感器基于ICT实现“Turn-off”型荧光响应(图10), 对CAP表现出卓越的灵敏度, 其线性检测范围宽, 检测限低, 并具备优异的选择性、稳定性和重现性. 在实际样品(牛奶、蜂蜜、猪肉)检测中，该传感器回收率达到95.5%~101.0%. 该传感器提供了“荧光纳米材料+MIP”的融合思路, 通过SMIP的特异性识别位点实现对氯霉素的精准捕获, CDs的引入强化荧光信号强度, 解决了该种痕量禁用抗生素检测灵敏度与特异性的需求.

3.1.8　磷酸化多糖类抗生素

磷酸化多糖类抗生素是畜禽专用的抗菌药物，广泛用于治疗牛、猪及家禽呼吸道疾病，易在动物肝肾等代谢器官中残留. 黄霉素(flavomycin，FLA)是其典型药物, 目前研究以PET机理为核心, 结合比率荧光与气凝胶传感平台，实现检测的可视化与现场化. Guo等[48]在2025年构建了一种基于Fe-MOFs@NH_2-MIL-101(Eu)的比率荧光传感器检测FLA. FLA通过氢键与Fe-MOFs作用，基于PET效应使452 nm处蓝光增强而616 nm处红光保持不变，荧光颜色在FLA的3~7 μM由红渐变至蓝(图11). 该传感器构建了气凝胶可视化传感平台，搭配智能手机RGB分析功能，实现FLA的现场定量检测.

3.2　检测农药残留

农药在农业生产中被广泛使用，虽能有效防治病虫害，但其残留可通过多种途径进入环境，威胁生态安全与人体健康. 本文将依据有机磷类和新烟碱类等主要农药类别，对其在环境与农产品中的残留检测进行综述. 表2是本文所总结的近年来利用MOFs荧光检测农药残留的应用实例.

3.2.1　有机磷类

有机磷农药因其广谱高效、成本低廉而被广泛使用. 然而, 其长期使用导致的食品残留问题已严重威胁食品安全. 该类农药特征性膦酸基团能与金属离子形成稳定配合物, 成为MOFs材料的天然识别位点, 因此CA、IFE、FRET成为其检测的核心机理, 且材料设计向磁荧光复合、酶-MOF偶联发展, 既解决了复杂基质干扰问题, 又强化了检测特异性.

草甘膦(glyphosate，GLY)作为一种广泛使用的广谱除草剂，其残留对农产品安全构成潜在风险. Hui等[49]在2025年开发了一种基于CDs@Cu-MOFs/2,4,6-三甲基-1,3,5-三嗪基共价有机框架(TMTA-COF)的比率荧光传感器, 基于GLY与Cu^{2+}的特异性配位作用, 触发Cu-MOF解体. Cu-MOF与TMTA-COF的紫外-可见吸收光谱重叠，两者通过竞争吸收，导致TMTA-COF荧光淬灭(图12a). 在0.2~40 μM范围内，检测限达0.07 μM. 在土壤、水体、大豆样品检测中的回收率为95.6%~105.0%. 该研究开创性地结合了误差反向传播神经网络的方法分析色度数据，实现了对GLY浓度的智能识别.

甲基对硫磷(methyl parathion，MP)是一种曾广泛使用的速效有机磷杀虫剂. Mehta[50]在2019年构建了一种基于有机磷水解酶(OPH^{6His})偶联 UiO-66-NH_2的生物传感器，利用酶催化产物对硝基苯酚(*p*-nitrophenol, PNP)通过FRET效应淬灭香豆素1荧光, 实现对MP的间接检测(图12b). 该传感器在10~106 ng/mL范围内呈线性响应，检测限为10 ng/mL，MP回收率稳定在95.3%~104.5%，并在橙子和番茄样品的加标检测中与HPLC结果一致, 为农药残留检测提供了快速、灵敏的检测方案.

敌敌畏(dichlorvos，DDV)、氧乐果(omethoate，OMT)和敌百虫(trichlorfon，TCF)，可通过食物链进入

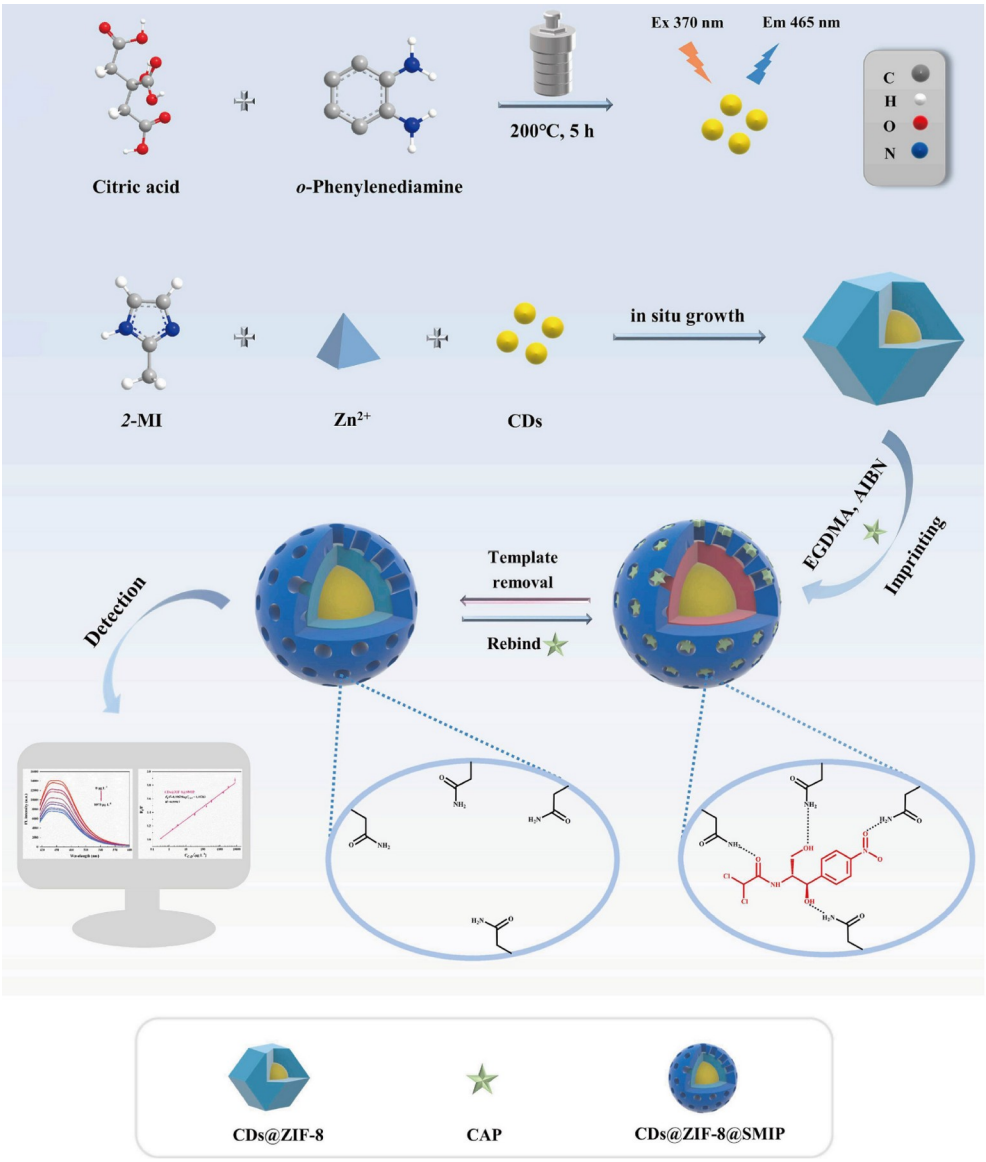


图 10 (网络版彩图) CDs@ZIF-8@SMIP的合成与工作机制[47]

Figure 10 (Color online) Synthesis and mechanism of CDs@ZIF-8@SMIP. Reproduced with permission from Ref. [47]. Copyright 2024, Elsevier.

人体, 抑制胆碱酯酶活性, 引发急性或慢性神经毒性, 因此均需严格监测残留问题. 针对上述农药的检测, Zhao等[51]在2025年开发了一种基于Fe_3O_4@RhB@ZIF-90@AChE的磁荧光纳米传感器. 该探针通过乙酰胆碱酯酶(AChE)催化反应引发ZIF-90框架的空间限域作用和PET效应释放荧光信号, 而有机磷农药通过抑制AChE活性实现荧光信号的负相关检测. 该传感器在线性范围0.01~2 mg/L下, 对OMT、DDV和TCF的检出限分别为0.015、0.019和0.021 mg/L, 加标回收率97.7%~104.5%, 与液相色谱仪-质谱仪(liquid chromatograph-mass spectrometer, LC-MS)结果一致, 操作简单, 无需复杂仪器, 适用于资源有限的现场环境. Fe_3O_4的引入实现了目标物的磁分离富集, 大幅降低食品基质中干扰成分的影响, 同时实现多种有机磷农药的同步检测, 提升了检测效率, 适配农产品批量筛查的需求.

毒死蜱(chlorpyrifos, CPF)是一种过去曾广泛使用的有机磷杀虫剂. Yang等[52]在2024年构建了基于

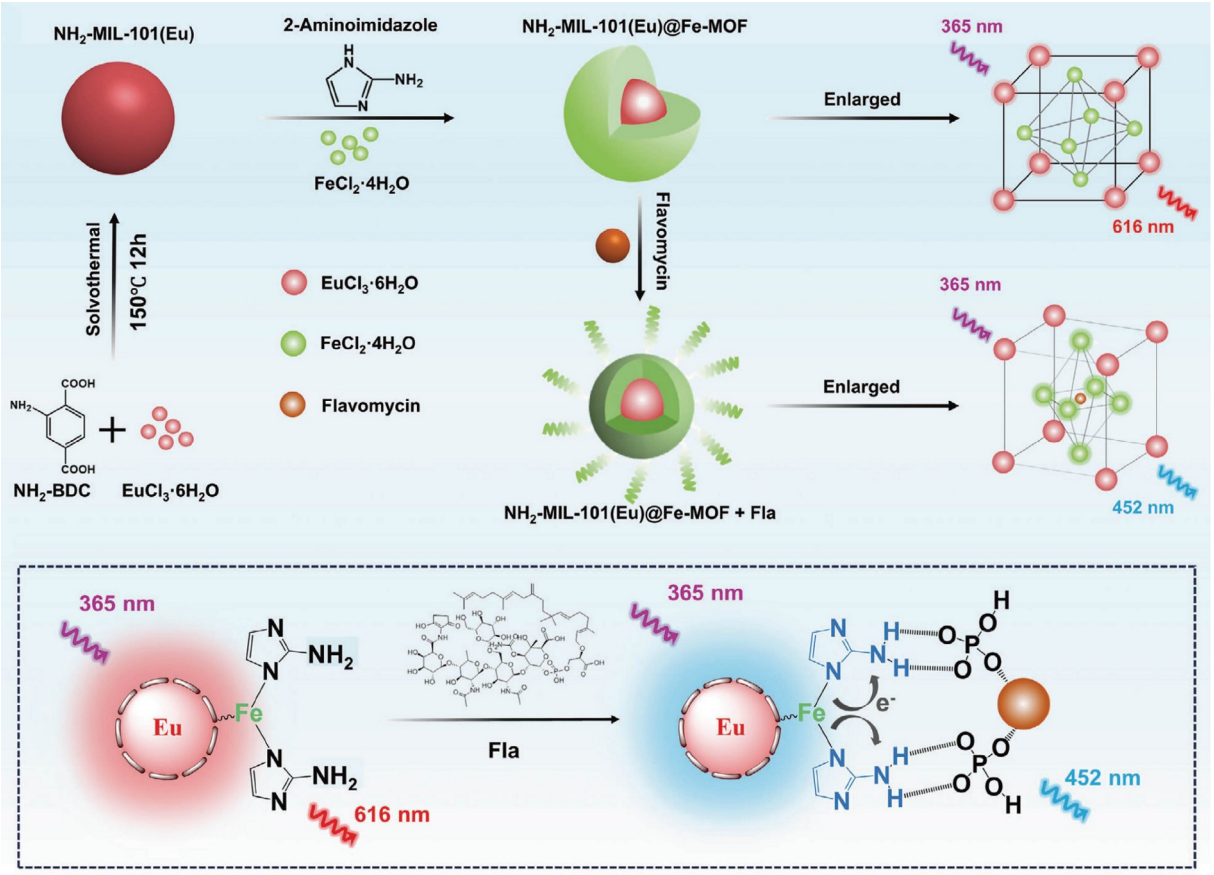


图 11　(网络版彩图) NH_2-MIL-101(Eu)@Fe-MOFs的合成及与FLA的反应机制[48]

Figure 11　(Color online) Synthesis of NH_2-MIL-101(Eu)@Fe-MOFs and its reaction mechanism with FLA. Reproduced with permission from Ref. [48]. Copyright 2025, Wiley-VCH.

aZIF-8@CuNCs检测CPF的传感器(图12c). 该材料利用aZIF-8的限域效应使CuNCs荧光强度提升并显著增强稳定性, 基于IFE效应, 导致荧光猝灭. 在0~50 μg/mL范围内实现检测, 检测限为0.43 μg/mL. 白萝卜、樱桃番茄、土壤样品回收率达90.6%~112.9%, 并成功结合智能手机实现便携式可视化检测.

二嗪磷(diazinon, DZN)是一种中等毒性有机磷农药. 针对其检测, Tang等[53]在2025年开发了一种谷胱甘肽过氧化物酶(GPx)抑制效应的Cu-TCPE传感器, 通过DZN抑制GPx活性, 触发MOFs结构坍塌并释放AIE分子, 而AIE分子在水中聚集后产生荧光增强信号(图12d). 该法在0.001~0.2 mg/L线性范围内, 检出限达0.14 ng/mL, 实际样品回收率为96.28%~105.84%, 并成功应用于水稻根-茎系统中DZN累积的荧光监测, 结果与HPLC方法一致.

马拉硫磷(malathion, Mal)是一种广谱有机磷杀虫剂. Yang等[54]在2024年研制了一种基于N-CDs@Eu-MOF@MIP的比例荧光印迹传感器. 该传感器通过分子印迹特异性捕获Mal后, 选择性恢复氮掺杂碳点(N-CDs)的蓝色荧光, 而Eu-MOF的红色荧光保持稳定, 形成比率型双通道信号(图13). 方法在1~10 μM范围内线性良好, 检测限达0.05 μM, 实际生菜、自来水、土壤样品回收率为93.0%~99.3%, 并结合智能手机实现了(检测限为1.45 μM)的现场可视化分析, 为Mal残留监测提供了快速可靠的手段.

综上, 有机磷类农药的检测呈现“机理适配官能团、材料融合磁分离、检测向多靶标升级”的核心趋势, 膦酸基团与金属离子的配位作用成为机理选择的核心依据, 与其他材料的复合则是解决复杂基质干扰的关键设计思路.

表 2 MOFs材料对农药荧光检测的机制、性能与应用

Table 2 Mechanism, properties and applications of MOFs materials in pesticide fluorescence detection

类别	目标检测物	MOFs检测器	检测机理	检出限	线性范围	回收率(%)	实际样品	参考文献
有机磷类	草甘膦	CDs@Cu-MOFs/TMTA-COF	CA	0.07 μM	0.2–40 μML	95.6–105.0	农田土壤, 黄河上游水, 大豆	[49]
有机磷类	甲基对硫磷	OPH^{6His}/UiO-66-NH_2	FRET	10 ng/mL	10–106 ng/mL	95.3–104.5	橙子, 番茄	[50]
有机磷类	敌敌畏, 氧乐果和敌百虫	Fe_3O_4@RhB@ZIF-90@AChE	空间限域作用, ICT	0.015, 0.019, 0.021 mg/L	0.01–2 mg/L	97.7–104.5	韭菜, 黄瓜, 苹果, 橙子	[51]
有机磷类	毒死蜱	aZIF-8@CuNCs	IFE	0.43 μg/mL	0–50 μg/mL	90.6–112.9	白萝卜, 樱桃番茄, 果园土壤	[52]
有机磷类	二嗪磷	Cu-TCPE	ICT	0.14 ng/mL	0.001–0.2 mg/L	96.28–105.84	水稻根-茎	[53]
有机磷类	马拉硫磷	N-CDs@ Eu-MOF@MIP	比例荧光, MIP	0.05 μM	1–10 μM	93.0–99.3	生菜, 自来水, 农田土壤	[54]
新烟碱类	噻虫嗪	Tb/Ce-MOFs@MIP	IFE, MIP	0.8 μM	1–50 μM	91.11–105.46	苹果, 茶叶, 果园土壤	[55]
新烟碱类	噻虫胺	Eu(BTC)-MPS@MIP	IFE, MIP	4 μg/L	0.01–10 mg/L	78.9–102.0	蔬菜	[56]
苯基吡唑类	氟虫腈	Eu-TFPA-MOFs	SQE, CA	4.4 nM	0–0.15 mM	98.33–106.17	茶叶	[57]
苯并咪唑类	多菌灵	Tb-MOF	IFE, DQE	17.95 ng/mL	0.06–4 μg/mL, 4–40 μg/mL	95.29–100.37	苹果, 茶叶	[58]
含氟氨基膦酸酯类	毒氟磷	UC@CuMOFs	PET	8.86 pg/L	0–5mg/L	91.25–107.22	水稻组织, 稻田水, 黄瓜, 苹果汁	[59]
酰胺类	萘丙酰胺	Tb-MOFs	IFE	4.7 nmol/L	0.06–4 μmol/L	93.3–106.3	湖水, 牛奶	[60]

3.2.2 新烟碱类

新烟碱类杀虫剂通过作用于昆虫烟碱型乙酰胆碱受体发挥高效杀虫作用, 虽对哺乳动物毒性较低, 但其水溶性强, 易造成水体污染. 其分子结构无特征性配位基团, 检测特异性差, IFE机理成为主流选择, 同时结合MIP技术强化特异性, 材料设计聚焦快速响应、便携化, 适配水体与农产品的现场检测需求.

噻虫嗪(thiamethoxam, TMX)是一种高水溶性的新烟碱类杀虫剂. Wei等[55]在2026年构建了一种Tb/Ce MOF@MIP复合荧光传感器. 该传感器结合MOFs强荧光与分子印迹高选择性, 基于IFE效应对TMX实现灵敏检测(图14a), 在1~50 μM范围内呈现良好线性, 检测限为0.8 μM, 响应时间为35 min. 在实际苹果、茶叶、土壤样品中回收率可达91.11%~105.46%, 相对标准偏差(RSD)为2.10%~8.33%, 能有效克服复杂基质干扰, 准确实现TMX定量, 适用于实际样品检测场景.

噻虫胺(clothianidin, CLO)是一种吸性强、持效期长的新烟碱类杀虫剂. Cao等[56]在2024年构建了一种Eu(BTC)-MPS@MIP荧光传感器, 实现了对噻虫胺的高选择性检测. 该传感器利用IFE效应引起荧光猝灭(图14b), 线性范围为0.01~10 mg/L, 检测限达4 μg/L, 5 min内完成检测. 在实际蔬菜样品中回收率为78.9%~102.0%, 结合智能手机成像, 为农产品中农药残留提供了快速便携的现场检测手段.

新烟碱类农药的检测形成“IFE机理为基础, 分子印迹为辅助, 快速响应与便携化为目标”的研究逻辑, 针对其水溶性强、特异性差的检测难点, 分子印迹技术成为目前最有效的解决方案.

3.2.3 其他

除前文所叙述过的几种农药以外的农药也取得了重要进展, 该类农药分子结构多样, 检测难点各有差异, 因此机理选择呈现个性化特征, 材料设计聚焦“靶向解决检测难点”, 同时部分研究突破了传统检测思路, 实现了“智能检测”与“抗干扰检测”的突破.

氟虫腈(fipronil, FP)是一种通过阻断γ-氨基丁酸A型(GABA)受体起效的苯基吡唑类广谱杀虫剂. Liu等[57]在2023年开发了基于Eu-TFPA-MOFs的荧光传感

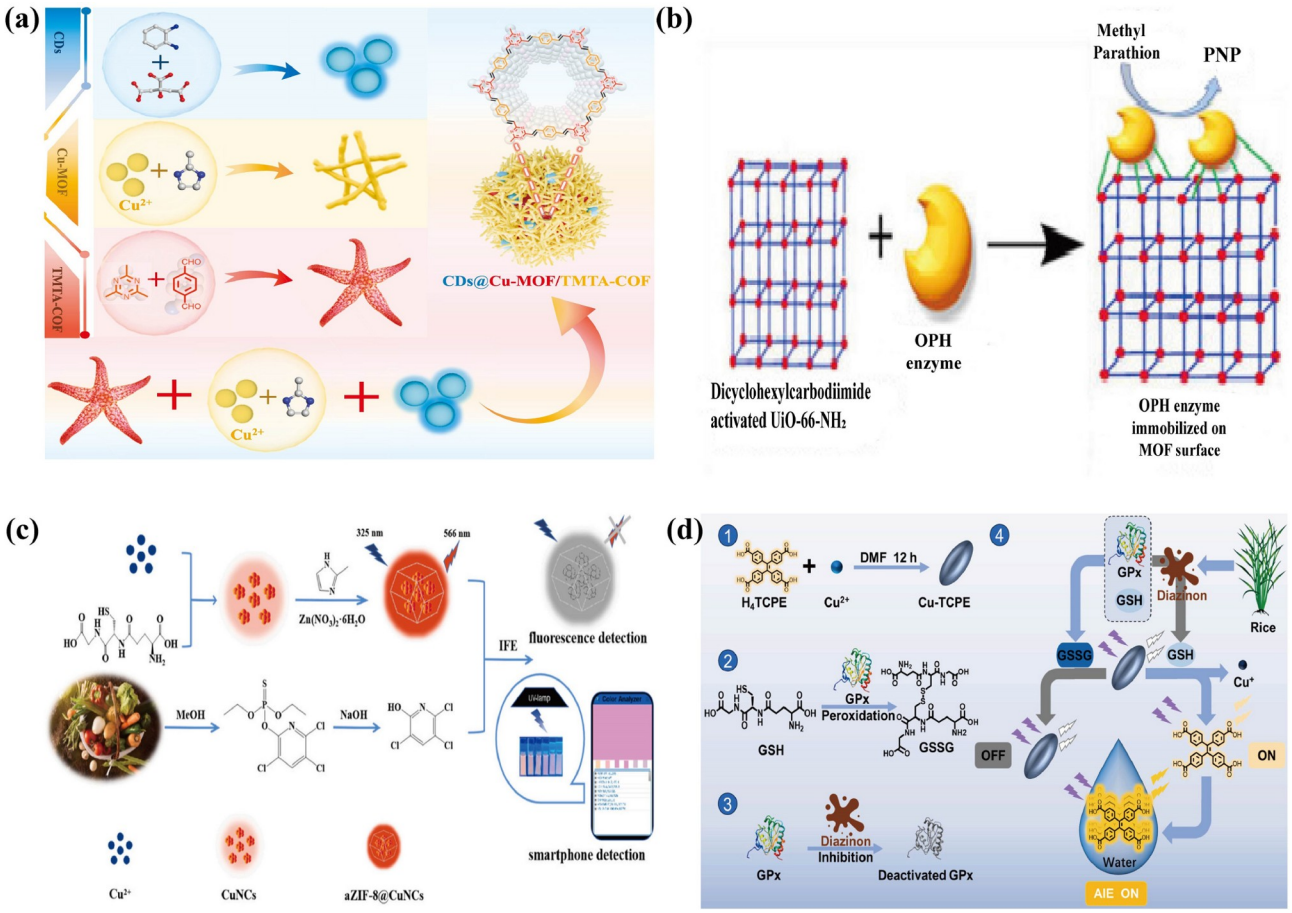


图 12　(网络版彩图) (a) CDs@Cu-MOFs/TMTA-COF的合成示意图[49]. (b) OPH^{6His}/UiO-66-NH$_2$的合成及荧光作用机制示意图[50]. (c) aZIF-8@CuNCs的合成、检测机制与智能手机检测示意图[52]. (d) Cu-TCPE的合成、作用机制以及在水中的聚集发光效应示意图[53]

Figure 12　(Color online) (a) Schematic diagram of the synthesis of CDs@Cu-MOFs/TMTA-COF. Reproduced with permission from Ref. [49]. Copyright 2025, Elsevier. (b) Schematic diagram of the synthesis and fluorescence mechanism of OPH^{6His}/UiO-66-NH$_2$. Reproduced with permission from Ref. [50]. Copyright 2019, Elsevier. (c) Synthesis, detection mechanism, and smartphone-based detection of aZIF-8@CuNCs. Reproduced with permission from Ref. [52]. Copyright 2024, Elsevier. (d) Schematic diagram of the synthesis, mechanism, and water-based aggregation luminescence effect of Cu-TCPE. Reproduced with permission from Ref. [53].Copyright 2025, Elsevier.

器, 用于茶叶中FP的高灵敏检测. 该传感器通过SQE与CA效应共同作用, 在2 min内实现荧光“Turn-off”型响应(图15a), 检测限低至4.4 nM, 线性范围为0~0.15 mM. 在实际茶叶样品中回收率达98.33%~106.17%. 研究还集成智能手机与试纸条平台, 通过RGB分析实现现场快速可视化检测.

多菌灵(carbendazim, CBZ)可以通过干扰细胞分裂对人体产生潜在内分泌干扰与致癌风险. Wang等[58]在2023年开发了一种基于Tb-MOF纳米片的新型荧光传感器, 通过IFE与DQE机制检测CBZ (图15b). 检测具备双线性范围(0.06~4 μg/mL与4~40 μg/mL)和低检测限(17.95 ng/mL), 并成功应用于苹果和茶叶实际样品的检测, 回收率可达95.29%~100.37%, 证明该传感器准确性与精密度良好, 无明显基质效应, 可有效应用于食品中CBZ残留的定量检测.

毒氟磷(dufulin, DUFL)是一种含氟氨基膦酸酯类广谱抗植物病毒剂, 它通过激活植物水杨酸信号通路来发挥作用. Zhou等[59]在2025年开发了一种基于UC@CuMOFs的新型荧光传感器, 利用AChE活性调控镧系掺杂上转换纳米颗粒(UC NPs, lanthanide-doped upconversion nanoparticles)的上转换发光与Cu-MOFs的PET淬灭效应, 对DUFL产生特异性响应(图

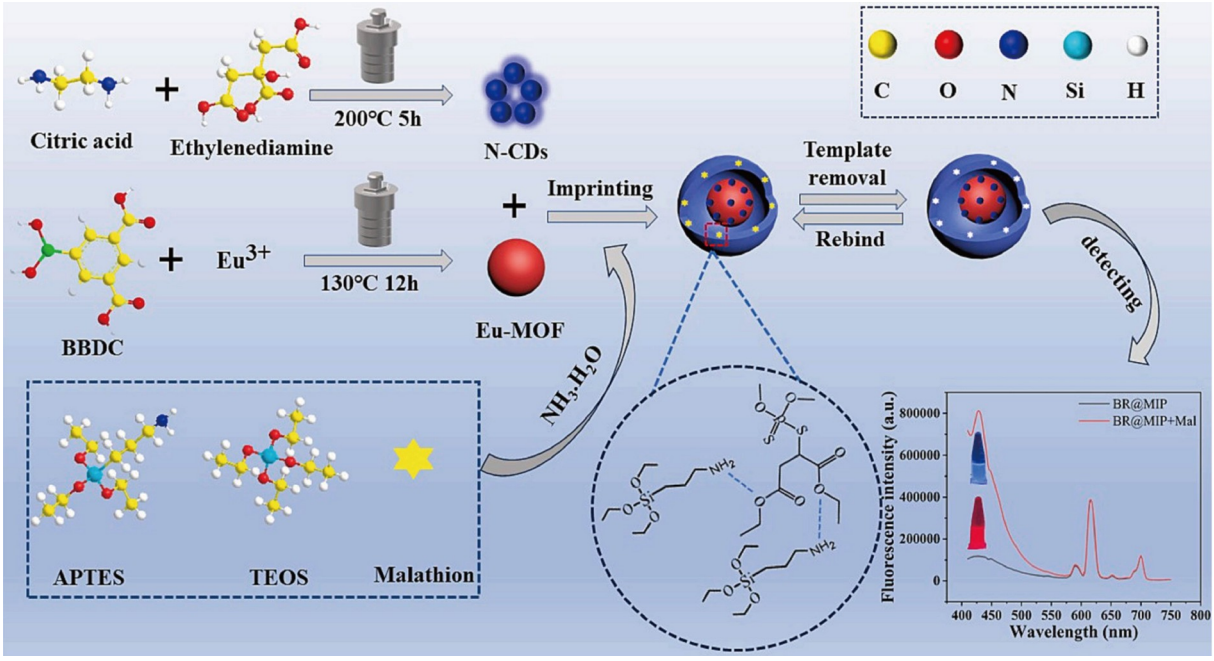


图 13 (网络版彩图) N-CDs@Eu-MOF@MIP的合成及荧光检测示意图[54]

Figure 13 (Color online) Schematic of the synthesis of N-CDs@Eu-MOF@MIP. Reproduced with permission from Ref. [54]. Copyright 2024, Elsevier.

15c), 在0~5 mg/L线性范围内, 检测限低至8.86 pg/mL, 在实际水稻组织、稻田水、黄瓜、苹果汁等样品中回收率达91.25%~107.22%, 传感器还具备近红外激发特性, 可以有效避免植物色素自发荧光的干扰.

萘丙酰胺(napropamide, NAP)是一类通过发挥抑制呼吸作用与细胞膜合成的作用, 来防治作物病害的酰胺类杀菌剂. Yi等[60]在2025年设计并构建了一种Tb-MOFs的新型荧光探针(图15d), 利用NAP与Tb-MOFs之间的IFE效应, 导致Tb-MOFs的特征绿色荧光发生显著猝灭, 实现了对水体和牛奶样品中NAP的灵敏检测. 本传感器构建了集成AND (全部条件成立的结果)、OR (满足一个条件的结果)、NOT (除这个条件以外的结果)功能的二元分子逻辑门, 拓展了Tb-MOF在“智能检测”领域的应用.

3.3 真菌毒素

真菌毒素是由真菌产生的高毒性次生代谢产物, 对多器官系统具有严重毒害作用, 且具有致癌、致畸、致突变风险. 相较于抗生素、农药, 真菌毒素的食品残留浓度更低, 多为pg/ng级, 检测基质更复杂, 因此对检测技术的灵敏度、特异性、抗干扰能力要求更高. 基于MOFs材料的荧光传感技术通过机理精准选择与材料靶向设计, 实现了对赭曲霉毒素A、黄曲霉毒素B1等典型真菌毒素的超灵敏检测, 且研究呈现增强型/复合猝灭型机理为主, 适配体功能化为核心材料设计思路, 可视化检测为发展方向的内在逻辑与趋势, 表3是本文所总结的MOFs荧光检测真菌毒素目前的进展.

3.3.1 赭曲霉毒素A

赭曲霉毒素A (Ochratoxin A, OTA)是赭曲霉毒素中毒性最强的组分, 具有显著的肝肾毒性与致癌性, 主要污染玉米、大米、小米等谷物, 其检测核心需求为超灵敏性与复杂谷物基质的抗干扰能力, 目前研究以FRET为核心机理, 结合比率荧光设计, 摒弃传统生物识别元件, 实现无标记快速检测.

Zhao等[61]在2025年构建了一种Zr-MOFs/SiNPs无标记比率荧光传感器, 利用Zr-MOFs对OTA的特异性富集与FRET效应, 基于荧光比率(I_{450}/I_{650})在1 min内响应(图16a), 该平台摒弃传统生物识别元件, 同时结合智能手机可视化检测技术, 实现比率荧光检测, 兼顾高灵敏度与现场实用性.

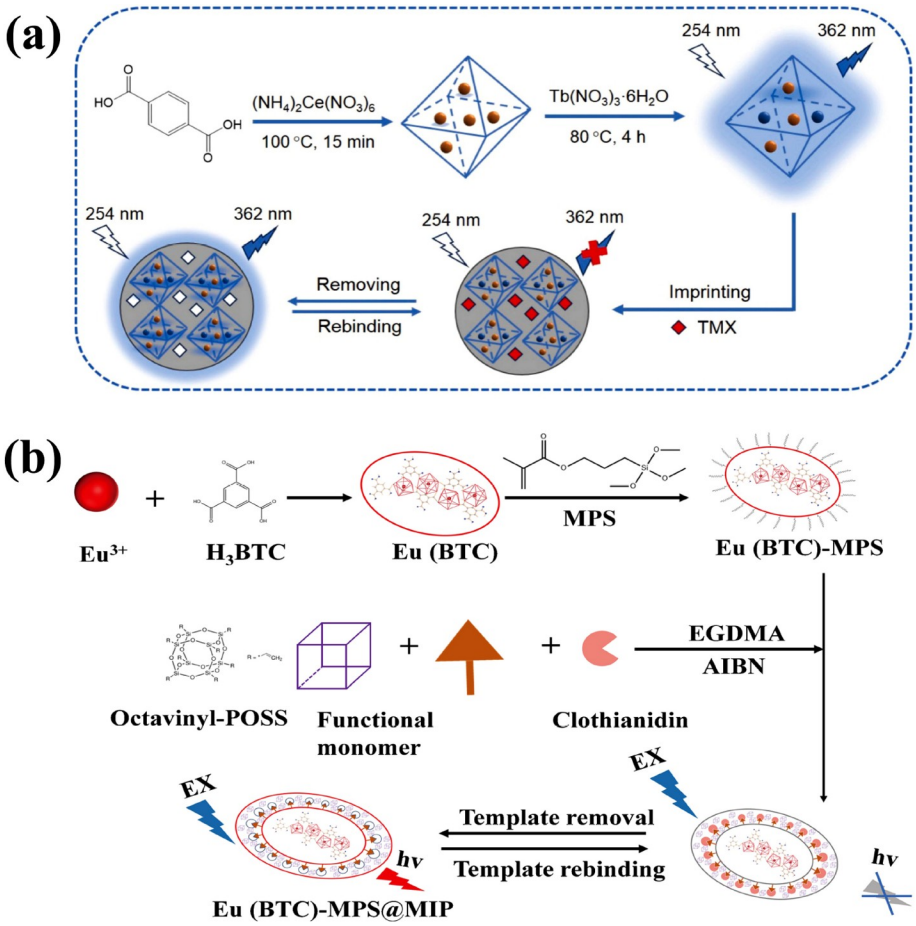


图 14　(网络版彩图) (a) Tb/Ce MOF@MIP的合成示意图[55]. (b) Eu(BTC)-MPS@MIP的合成路径[56]

Figure 14　(Color online) (a) Schematic illustration of Tb/Ce MOF@MIP synthesis. Reproduced with permission from Ref. [55]. Copyright 2026, Elsevier. (b) Synthesis pathway for Eu(BTC)-MPS@MIP. Reproduced with permission from Ref. [56]. Copyright 2024, Springer.

3.3.2　黄曲霉毒素B1

黄曲霉毒素是毒性极强的真菌毒素，其中黄曲霉毒素B1 (Aflatoxin B1, AFB1)毒性最强，其污染严重且被列为I类人类致癌物主要污染玉米、小麦、大米等粮油作物，其检测难点在于痕量残留与基质干扰强，目前研究以CA为核心机理，结合双模式传感设计，实现荧光定量与视觉定性的互补，大幅提升检测结果的可靠性.

Liao等[62]在2024年开发了一种基于Au/MOF纳米复合材料的双模式适配体传感器3,3',5,5'-四甲基联苯胺(TMB)/Au/MOF，该传感器通过AFB1竞争吸收cDNA引发探针释放，实现荧光减弱与视觉信号增强，用于快速灵敏与高选择性检测AFB1 (图16b). 荧光模式保证灵敏度与准确性, 可视化模式便于现场检测, 双检测模式独立且关联, 提升了结果准确性与可靠性. 该方案为开发更精准高效的多模式生物传感器提供了思路.

3.3.3　3-硝基丙酸

3-硝基丙酸(3-nitropropionic acid, 3-NPA)主要由霉变甘蔗中的曲霉、青霉产生，摄入后会引发严重的中枢神经系统损伤，甚至导致死亡. 其检测核心需求为酸性基质适配性与可逆响应，目前研究以PET为核心机理，结合pH敏感型分子修饰，实现酸性基质中对3-NPA的比率荧光响应.

Guo等[63]在2020年开发了一种基于纳米级锆基金属有机框架MPDB-PCN的单激发比率发光传感器，以PCN-224为骨架，通过后合成修饰引入对酸性pH敏感

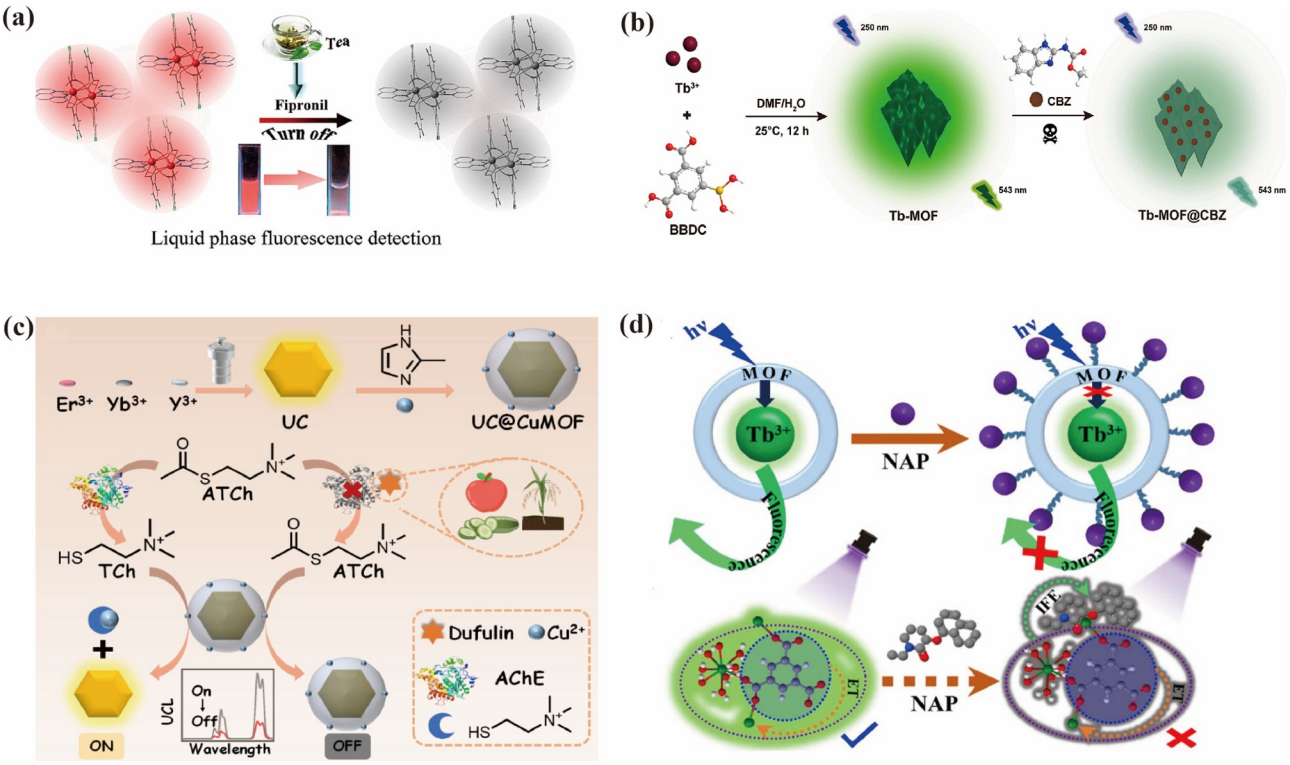


图 15 (网络版彩图) (a) Eu-TFPA-MOFs检测茶叶样品中氟虫腈的示意图[57]. (b) Tb-MOF@CBZ二维纳米片的合成流程与荧光反应机制[58]. (c) UC@CuMOFs组装示意图及其在作物与水果中应用示意图[59]. (d) Tb-MOF检测NAP机制的示意图[60]

Figure 15 (Color online) (a) Schematic of Eu-TFPA-MOFs detecting flufenoxuron in tea samples. Reproduced with permission from Ref. [57]. Copyright 2023, Elsevier. (b) Synthesis process and fluorescence mechanism of Tb-MOF@CBZ 2D nanosheets. Reproduced with permission from Ref. [58]. Copyright 2023, Elsevier. (c) Schematic diagram of UC@CuMOFs assembly and its application in crops and fruits. Reproduced with permission from Ref. [59]. Copyright 2025, American Chemical Society. (d) Schematic illustration of the mechanism for NAP detection by Tb-MOF. Reproduced with permission from Ref. [60]. Copyright 2025, Royal Society of Chemistry.

表 3 MOFs材料在真菌毒素荧光检测的机制、性能与应用

Table 3 Mechanism, properties and applications of MOFs in detection of mycotoxins by fluorescence

目标检测物	MOFs检测器	检测机理	检出限	线性范围	回收率(%)	实际样品	参考文献
赭曲霉毒素A	Zr-MOFs/SiNPs	FRET	0.016 ng/mL	0.05–1000 ng/mL	85.7–102.7	玉米, 大米, 小米	[61]
黄曲霉毒素B1	Au/MOFs	CA	0.07 ng/mL	0.1–30 ng/mL	100.7–111.5	大米, 玉米, 小麦	[62]
3-硝基丙酸	MPDB-PCN	PET	15 μM	10–800 μM	90.6–112.9	甘蔗汁	[63]
玉米赤霉烯酮	UIO-66-NH_2	SQE	5 pg/mL	0.01–100 ng/mL	85–114	小麦, 玉米面粉	[64]
T-2真菌毒素	NH_2-UiO-66	SQE	0.239 ng/mL	0.5–100 ng/mL	89.86–111.51	牛奶, 啤酒	[65]

的MPDB分子, 利用PET机制实现pH调控对3-NPA进行比率荧光响应. MPDB-PCN的核心突破在于首次实现非稀土基纳米级MOFs在宽pH范围内的精准、可逆比率传感. 传统稀土基MOFs虽荧光性能优异, 但成本高、合成复杂, 而MPDB-PCN采用非稀土锆基骨架, 大幅降低合成成本; 同时pH敏感型MPDB分子的修饰, 使传感器可在霉变甘蔗的酸性基质中稳定工作, 可逆响应特性则实现了传感器的循环利用, 为食品中真菌毒素的低成本、可循环检测提供了新策略.

3.3.4 玉米赤霉烯酮

玉米赤霉烯酮(zearalenone, ZEN)是由镰刀菌产生的2,4-二羟基苯甲酸内酯类真菌毒素, 具有强类雌激素效应, 可引发生殖、免疫及肝肾毒性. 其检测难点

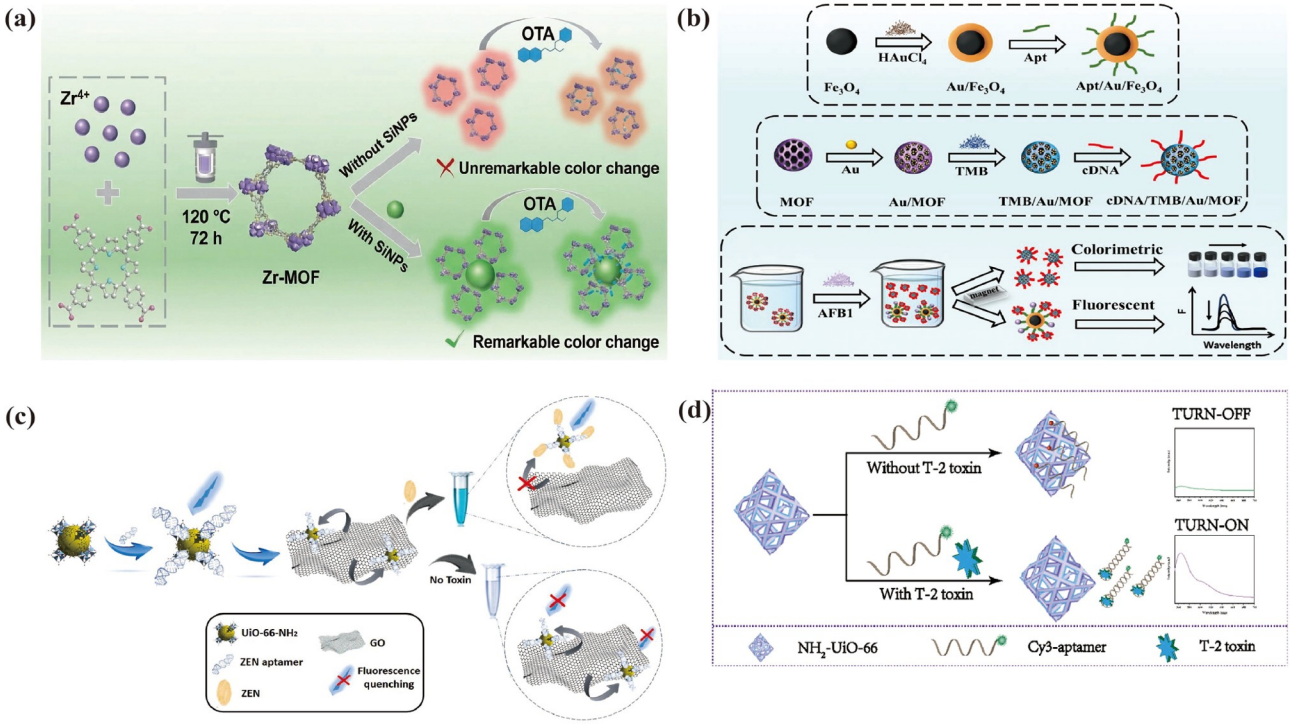


图 16　(网络版彩图) (a) ZrMOF/SiNPs用于OTA检测的示意图[61]. (b) TMB/Au/MOF和cDNA/TMB/Au/MOF的制备及双模式适配体传感器的检测原理[62]. (c) ZEN的适配体传感器的工作原理[64]. (d) Cy3-aptamer/NH_2-UiO-66荧光适配体传感器原理[65]

Figure 16　(Color online) (a) Schematic illustration of the ZrMOF/SiNPs for OTA detection. Reproduced with permission from Ref. [61]. Copyright 2025, Elsevier. (b) Preparation of TMB/Au/MOF and cDNA/TMB/Au/MOF, along with the detection mechanism of the proposed dual-mode aptamer sensor. Reproduced with permission from Ref. [62]. Copyright 2024, Springer. (c) Working principle of ZEN aptamer sensor. Reproduced with permission from Ref. [64]. Copyright 2024, Elsevier. (d) Fluorescence aptamer sensor principle of Cy3-aptamer/NH_2-UiO-66. Reproduced with permission from Ref. [65]. Copyright 2021, Elsevier.

在于与谷物基质结合紧密、特异性识别难度大，目前研究基于其结构将SQE设计为核心检测机理，结合适配体功能化+氧化石墨烯(GO)协同，实现“Turn-on”型超灵敏检测. Singh等[64]在2024年开发了一种基于适配体功能化UIO-66-NH_2与GO的荧光传感器，通过ZEN适配体与GO间的吸附-解离机制，借助SQE效应，实现对ZEN的“Turn-on”型检测(图16c). 其在0.01~100 ng/mL范围内线性良好，检出限达5 pg/mL，在实际小麦和玉米样品中加标回收率为85%~114%，为谷物中ZEN污染提供了一种快速可靠的检测方法.

3.3.5　T-2真菌毒素

T-2真菌毒素是镰刀菌产生的强效霉菌毒素，具有强细胞毒性, 可抑制蛋白质合成、诱导细胞凋亡, 主要污染小麦、玉米、牛奶、啤酒等食品，其检测难点在于检测基质多样，如存在固体谷物和液体乳饮的干扰、跨基质抗干扰能力要求高，目前研究以SQE为核心机理，结合适配体功能化，实现多基质中T-2毒素的超灵敏检测.

Zhao等[65]在2021年开发了一种基于NH_2-UiO-66的荧光适配体传感器，通过MOFs高效猝灭Cy3标记适配体荧光，当T-2毒素与适配体结合后，基于π-π堆积、氢键、配位作用及SQE效应实现荧光信号响应检测T-2毒素(图16d). 其在0.5~100 ng/mL范围内线性良好，检出限0.239 ng/mL. 在实际牛奶和啤酒样品中回收率为89.86%~111.51%且选择性好，证明了其在复杂食品基质中检测T-2毒素的可靠性.

3.4　食源性病原体

食源性病原体是指一类通过污染食品而引发人类疾病的细菌、病毒等生物体, 在自然界中分布广泛. 在食品生产、加工、储存及销售等环节均有污染的风险, 是导致食源性疾病的主因. 与抗生素、农药、真菌毒素等小分子污染物不同，食源性病原体为大分子活

体微生物, 无法进入MOFs孔道实现内部作用, 且检测有着快速筛查、活体识别与超灵敏定量的要求. 基于MOFs材料的荧光传感技术针对其特征实现了靶向设计, 机理选择聚焦表面作用型, 材料设计向生物识别元件功能化、双模态传感升级, 检测技术适配现场快速、多靶标同步需求, 形成了清晰的研究逻辑与发展趋势.

3.4.1 细菌

食源性致病菌以大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌、炭疽芽孢杆菌为代表, 这类细菌易在肉、蛋、奶等高蛋白食品中繁殖, 检测核心难点为复杂基质中活体识别、低菌量超灵敏检测、多菌种同步筛查, 目前研究以PET、SQE为核心机理, 结合噬菌体/抗体功能化、双金属协同设计, 实现对细菌的特异性捕获与荧光信号的高效响应.

在细菌中, 大肠杆菌可产生志贺毒素, 导致出血性肠炎; 金黄色葡萄球菌分泌耐热肠毒素, 引发急性呕吐腹泻; 沙门氏菌则具有强侵袭性, 可在肠道内增殖并引起发热性肠胃炎. Kabak等[66]在2025年开发了一种基于Fe-MOFs的开启型荧光传感器, 通过细菌触发的PET效应实现荧光增强检测(图17a). 该传感器对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的检测限分别达0.464和0.584 log CFU/mL, 在1 h内完成多种基质中病原体的检测, 回收率达95%~104%, 展现出良好的应用潜力.

Qu等[67]在2025年开发了一种理论计算指导的镧系金属-有机框架生物传感器Ln-MOFs, 通过构建噬菌体功能化的“三明治”检测体系(图17b), 实现了大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和沙门氏菌的同步检测. 该传感器在15 min内完成检测, 灵敏度达1 CFU/mL, 并集智能手机平台实现现场可视化分析. 在牛奶样品中回收率达93.68%~104.60%, 为食源性病原体的现场快速筛查提供了可靠方案.

炭疽芽孢杆菌的芽孢可在受污染的动物制品中长期残留, 若未经彻底烹煮而被摄入会引发致死率极高的肠炭疽. Gou等[68]在2024年构建了一种AC@CDs-Eu-MOFs智能复合材料, 兼具连续传感与多维防伪功能. 该材料通过Cu^{2+}诱导荧光猝灭与吡啶二羧酸(dipicolinic acid, DPA)触发Eu^{3+}重敏化, 实现“红-绿-红”荧光转换(图18), 对Cu^{2+}检测限达10.67 nM, 并成功用于水样中Cu^{2+}与炭疽标志物DPA的检测. 他们基于其刺激响应特性, 开发了五维防伪条码与可循环加密荧光墨水, 为智能材料在分析检测与信息安全领域的融合应用提供了新途径.

3.4.2 病毒

食源性病毒以诺如病毒为代表, 相较于细菌这类微生物病原体, 这类病毒无细胞结构且颗粒尺寸小, 检测难点为病毒颗粒易失活、复杂基质中痕量检测、快速现场筛查, 且病毒与MOFs的相互作用更弱, 因此目前研究以MOFs复合纳米材料为核心, 结合CRISPR-Cas系统、双模态传感, 实现病毒的超灵敏检测与信号交叉验证.

诺如病毒, 是一种会导致急性胃肠炎等症状的病毒. Mao等[69]在2025年开发了一种基于Pt@MOFs的CRISPR-Cas12a双模态传感平台, 通过Pt@MOFs的类过氧化物酶活性和碱诱导荧光恢复特性, 实现颜色与荧光双信号输出检测诺如病毒(图19), 二者可交叉验证, 显著提升检测可靠性. 在实际样本检测中, 该方法与先前的标准方法RT-qPCR结果一致, 仅需36 min即可完成, 为现场病毒检测提供了高效新工具.

基于MOFs材料的荧光传感技术针对食源性病原体大分子等特征, 突破传统孔道作用局限, 形成了三点研究逻辑: (1) 机理选择聚焦PET、SQE等表面作用型, 实现活体快速检测; (2) 材料设计以生物识别元件功能化为核心, 结合双金属以及复合纳米MOFs提升特异性与灵敏度, 兼顾生物相容性; (3) 检测技术向跨技术融合、双模态、现场化发展, 适配基层检测需求.

4 总结与展望

本文从MOFs材料的发光检测机理入手, 全面介绍了PET、FRET、IFE等八种发光检测机理, 它们共同构成了MOFs荧光传感的理论基础. 随后, 本文系统综述了近年来基于MOFs的荧光传感技术在食品中的抗生素、农药、真菌毒素及食源性病原体等污染物检测领域的研究进展, 在论述中还涵盖各大类中的代表性小类物质, 通过由点至面的方式, 提供了一个全面的介绍.

研究表明, 通过合理设计MOFs的金属中心、有机配体及复合结构, 能够构建出准确高效的荧光传感器, 实现对食品中污染物的高灵敏、高选择性的检测[70].

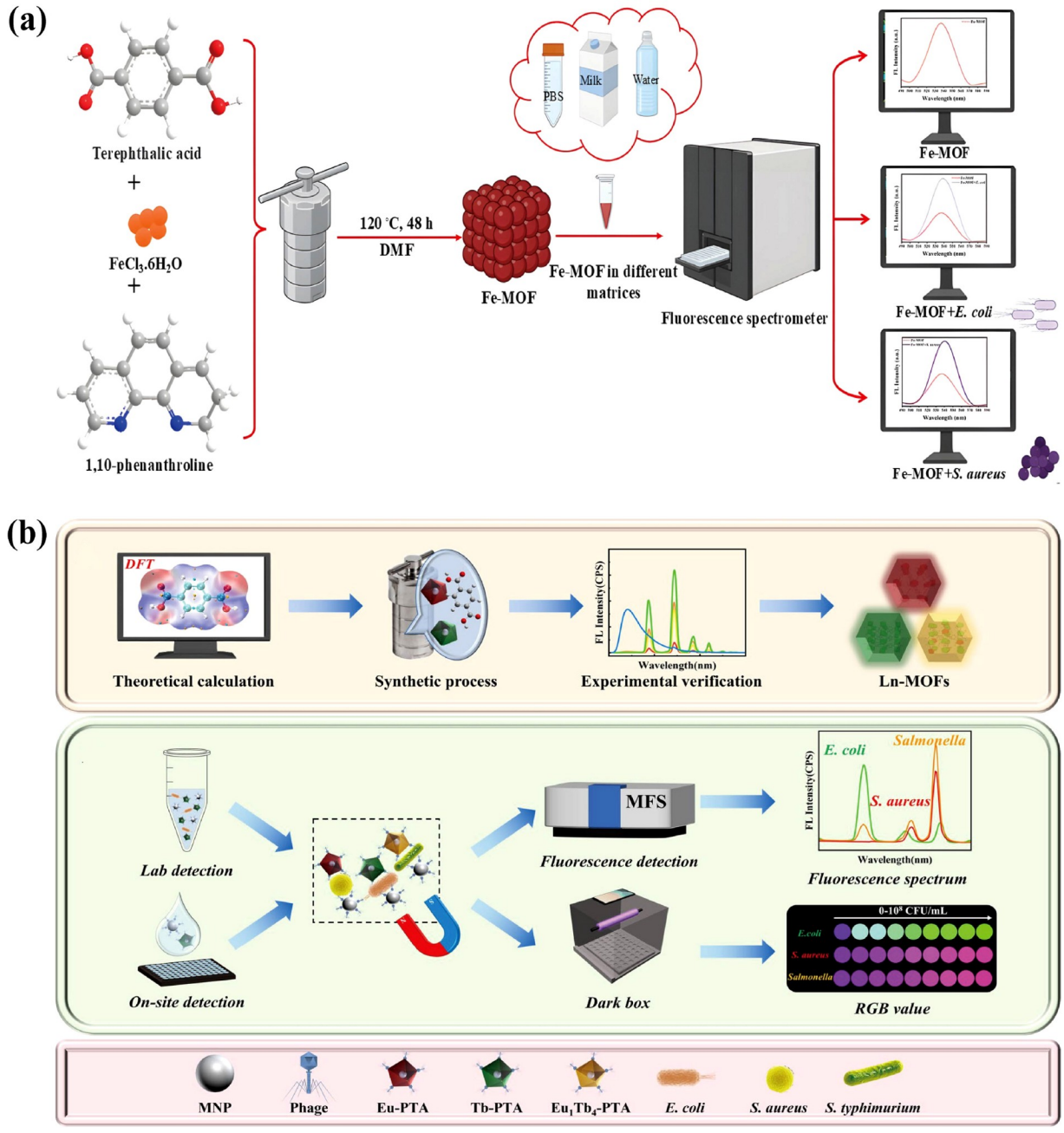


图 17　(网络版彩图) (a) Fe-MOF的合成与检测过程[66]. (b) Ln-MOFs的检测机理与可视化应用[67]

Figure 17　(Color online) (a) Synthesis and detection process of Fe-MOFs. Reproduced with permission from Ref. [66]. Copyright 2025, Elsevier. (b) Detection mechanism and visualization applications of LnMOFs. Reproduced with permission from Ref. [67]. Copyright 2025, Springer

尽管基于MOFs材料荧光传感技术成果显著，但其从实验室研究走向实际应用的转变目前仍面临诸多挑战与局限性[71]，主要是以下4个方面: (1) 部分MOFs材料在复杂食品基质中的化学稳定性不足，且易受共存成分干扰，可能导致无法检测甚至误测; (2) 目前材料的合成工艺尚不稳定，重现性不佳，常出现实验结果难以复现的问题，且难以满足大规模生产对均一性的要求，这是实际应用前必须解决的关键瓶颈; (3) MOFs有材料的孔径规格方面的限制，尤其影响其对大分子分析物的识别能力; (4) 传感器在长期稳定性与使用寿命

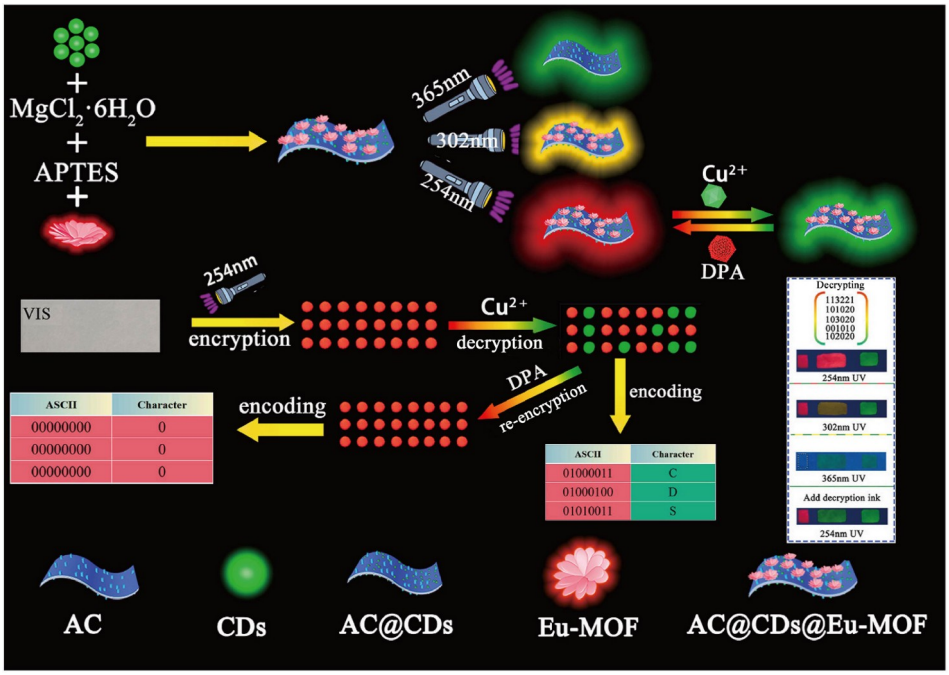


图 18 (网络版彩图) AC@CDs-Eu-MOFs的制备示意图、三模发光特性、铜离子刺激响应以及安全条形码[68]

Figure 18 (Color online) Schematic diagram of the preparation of AC@CDs-Eu-MOFs, triple-mode luminescence properties, copper ion-stimulated response, and security barcodes. Reproduced with permission from Ref. [68]. Copyright 2024, Elsevier.

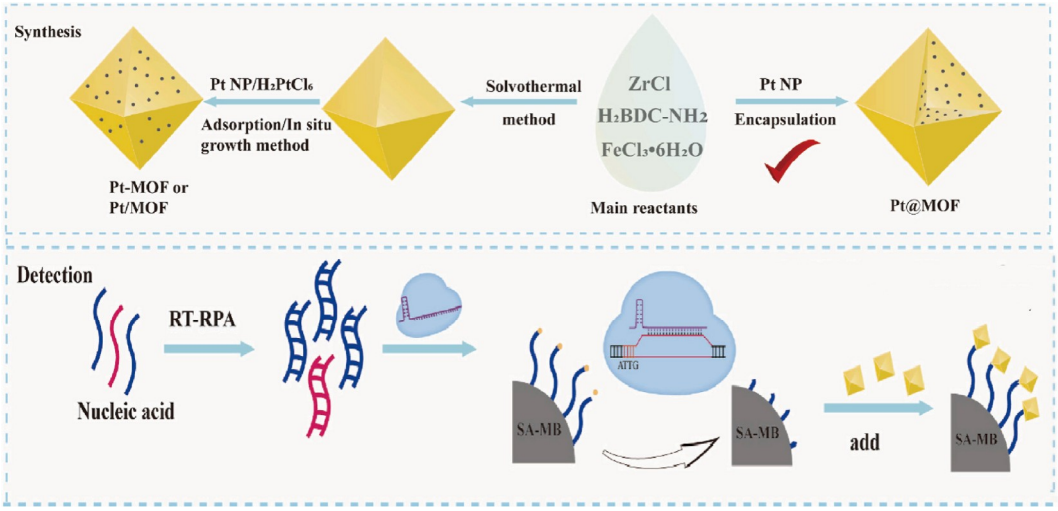


图 19 (网络版彩图)基于Pt@MOF的CRISPR介导双模式分析机制合成与检测[69]

Figure 19 (Color online) Synthesis and detection of CRISPR-mediated dual-mode analysis mechanism based on Pt@MOF. Reproduced with permission from Ref. [69]. Copyright 2025, Elsevier.

方面缺乏充分研究, 尚无法证明其优于现有方法, 这是制约其大规模应用的关键指标. 科技是在不停进步的, 结合现有研究进展, 基于MOFs的荧光传感技术可从以下几个方向寻求突破. 在合成方面: (1) 开发新型合成策略以替代传统方法, 实现MOFs结构的精准调控与绿色制备, 结合分子模拟计算, 可进一步设计兼具优异稳定性与特定功能的新型MOFs材料; (2) 通过将MOFs与聚合物复合, 同步提升材料的机械强度、柔

韧性及可加工性, 拓展MOFs材料的适用场景.

在检测方面, 为提升检测准确性与检测范围, 可以(1) 设计具有多结合位点的MOFs复合材料, 以构建双通道或多功能检测体系, 通过信号交叉验证确保结果可靠; (2) 致力于开发可以同时识别多种靶标分子的MOFs阵列, 提高检测范围.

MOFs荧光传感器与智能手机融合的可视化检测, 是食品安全现场快速监测的核心方向, 当前需突破3大关键瓶颈: (1) 设备接口缺乏标准化适配, 环境光与复杂食品基质易干扰信号; (2) MOFs材料微型化后荧光稳定性不足; (3) 信号强度难以满足低浓度污染物精准识别. 优化路径可聚焦两点: (1) 材料层面, 通过MOFs与量子点、碳纳米管复合提升荧光量子产率, 构建“MOFs-适配体-信号分子”结构实现级联放大; (2) 设备层面, 开发微型激发模块与专用APP, 优化RGB算法以消除干扰, 实现检测数据实时校准与云端存储, 同时需适配多元场景, 开发低成本试纸条、多通道检测仪等产品, 推动该技术从实验室原型稳步走向商业化、实用化.

同时, 必须优先考虑生物相容性与环境友好性. 可参考国际标准化组织发布的ISO 10993等相关标准, 构建以细胞毒性、生物降解性及环境残留毒性为核心指标的综合评估体系, 为后续筛选低毒无毒的合成前体与推进绿色制备工艺提供量化依据, 进而对MOFs传感器的生物安全风险与环境影响进行评估, 推动MOFs传感器实现可持续、规模化的实际应用.

综上, 基于MOFs的荧光传感器技术是极具潜力的传感技术, 其应用领域正在不断拓展. 我们相信, 随着研究的深入, 该类传感器有望在性能上取得重要突破, 为食品安全领域的高灵敏、快速检测技术发展提供关键推动力, 最终切实保障大众的食品安全.

参考文献

1 Auger L, Saucier L, Gaucher ML, Vandenberg GW, Vincent AT, Thibodeau A, Deschamps MH. *Antibiotics*, 2025, 14: 665

2 Zhang Y, Li LW, Wang YF, Zhao PC, Lv XS, Zhang ZY. *Acta Mater Compos Sin*, 2026, 43: 2917–2931 (in Chinese) [张月, 李林威, 王逸飞, 赵鹏程, 吕晓森, 张振宇. 复合材料学报, 2026, 43: 2917–2931]

3 Zhu C, Huo B, Li G. *Sci Sin Chim*, 2024, 54: 1607–1616 (in Chinese) [朱晨灵, 霍冰洋, 李攻科. 中国科学: 化学, 2024, 54: 1607–1616]

4 Zou K, Zhang S, Chen Q, Chen X. *Trends Food Sci Tech*, 2025, 157: 104903

5 Nolvachai Y, Amaral MSS, Marriott PJ. *Anal Chem*, 2023, 95: 238–263

6 Mondello L, Zoccali M, Purcaro G, Franchina FA, Sciarrone D, Moret S, Conte L, Tranchida PQ. *J Chromatogr A*, 2012, 1259: 221–226

7 Zhang YC, Chen XG, Zhao D, Yao WX, Song H. *J Instrum Anal*, 2021, 40: 560–564 (in Chinese) [张一辰, 陈学国, 赵丹, 姚伟宣, 宋辉. 分析测试学报, 2021, 40: 560–564]

8 Li YD, Zhao PC, Wang ZX, Wang YF, Lv YN, Zhang ZE, Wang QY , Yu YP, He YH. *J Instrum Anal*, 2024, 43:1398–1408 (in Chinese) [李扬动, 赵鹏程, 王宗兴, 王逸飞, 吕荫妮, 张泽恩, 王千羽, 于郁沛, 何宇桓. 分析测试学报, 2024, 43: 1398–1408]

9 Wu T, Gao X, Ge F, Zheng H. *CrystEngComm*, 2022, 24: 7881–7901

10 Vodyashkin AA, Sergorodceva AV, Kezimana P, Stanishevskiy YM. *Int J Mol Sci*, 2023, 24: 7819

11 Zhang Y, Wang Y, Zhao P, Li H, Wang Z, Nan C, Zhang Z. *Sci Sin Chim*, 2024, 54: 1012–1026 (in Chinese) [张月, 王逸飞, 赵鹏程, 李宏达, 王宗兴, 南策, 张祉悦. 中国科学: 化学, 2024, 54: 1012–1026]

12 Xiao JD, Li D, Jiang HL. *Sci Sin Chim*, 2018, 48: 1058–1075 (in Chinese) [肖娟定, 李丹丹, 江海龙. 中国科学: 化学, 2018, 48: 1058–1075]

13 Pal TK. *Mater Chem Front*, 2023, 7: 405–441

14 Zhang Z, Zhang Y, Jayan H, Gao S, Zhou R, Yosri N, Zou X, Guo Z. *Food Chem*, 2024, 448: 139051

15 Hao X, Song W, Wang Y, Qin J, Jiang Z. *Small*, 2025, 21: 2408624

16 Wu W, Yan Y, Xie M, Liu Y, Deng L, Wang H. *Talanta*, 2025, 281: 126918

17 Ling Q, Cheng T, Tan S, Huang J, Xu L. *Chin Chem Lett*, 2020, 31: 2884–2890

18 Hidalgo-Rosa Y, Mena-Ulecia K, Treto-Suárez MA, Schott E, Páez-Hernández D, Zarate X. *J Mater Sci*, 2021, 56: 13684–13704

19 Kumar Panigrahi S, Kumar Mishra A. *J PhotoChem PhotoBiol C-PhotoChem Rev*, 2019, 41: 100318

20 Wang N, Xie M, Wang M, Li Z, Su X. *Talanta*, 2020, 220: 121352

21 Xie JY, Tan J, Tang SH, Wang Y. *Food Chem*, 2022, 375: 131887

22 Xia Y, Sun K, Zuo YN, Zhu S, Zhao XE. *Chin Chem Lett*, 2022, 33: 2081–2085

23 Ahmad M, Bushra R, Ritzoulis C. *Int J Biol Macromol*, 2024, 277: 134564
24 Hu X, Zhang Y, Liu H, Zhan M, Chen J, Liu Z, Chen H. *J Agric Food Chem*, 2023, 71: 20575–20584
25 Zhang S, Li H, Yao Q, Ghazali S, Fan J, Du J, Wang J, Gao F, Li M, Wang H, Dong C, Peng X. *Chin Chem Lett*, 2020, 31: 2913–2916
26 Song X, Zhao Q, Hou X, Liu S, Luo L, Ren Y. *J Mol Structure*, 2025, 1324: 140813
27 Lu C, Xu J, Song Z, Dai Z. *Dyes Pigments*, 2024, 224: 111994
28 Yang L, Huang H, Luo X, He H, Gao F, Zhou Y. *J Phys Chem A*, 2020, 124: 5314–5322
29 Yang S, Yuan Y, Wang X, Hu Z, Guo D. *J Lumin*, 2022, 242: 118560
30 Li YP, Zhu XH, Li SN, Jiang YC, Hu MC, Zhai QG. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2019, 11: 11338–11348
31 Li X, Zhao SS, Zhao J, Zhao Z. *Sci Sin Chim*, 2025, 55: 3002–3029 (in Chinese) [李晓琪, 赵思思, 赵经纬, 赵震. 中国科学: 化学, 2025, 55: 3002–3029]
32 Xu H, Cheng P. *Aggregate*, 2024, 5: e518
33 Li C, Awasthi MK, Liu J, Yao T. *Environ Res*, 2025, 266: 120417
34 Xiao S, Digiacomo L, Marchini C, Miceli C, Papi M, Caracciolo G, Rossetta A, Pozzi D. *J Hazard Mater Adv*, 2025, 19: 100851
35 Li C, Xu X, Ji Y, Wang F, Shi Y, Zhao X, Liu J, Yang Y, Zhao Z. *Food Chem*, 2023, 425: 136476
36 Liu W, Wu Z, Peng J, Xu Z, Liang Y. *Anal Methods*, 2024, 16: 196–204
37 Meng Z, Zhang T, Zhang Z, Qu X, Wang B, Qiu Y, Wu P, Ding P. *Biosens Bioelectron*, 2025, 271: 117012
38 He Y, Zou H, Zhou S, Liu D, Jiang X, Zhang Z, Li S. *Food Chem*, 2024, 459: 140365
39 An R, Li RX, Shang X, Fu CQ, Gao EQ, Yue Q. *Food Chem*, 2025, 490: 145080
40 Zheng Y, Yang H, Yang Q, Li Y, Karmaker PG, Yang X. *Dyes Pigments*, 2024, 230: 112340
41 Li X, Wang G, Wang H, Wang A, Guo H. *Microchim Acta*, 2025, 192: 760
42 Cui L, Zhang Y, Chen W, Liu J, Zhang H, Zhu H, Zou J, Chang W. *Food Chem*, 2025, 493: 145733
43 Wu Y, Zhou Y, Long H, Chen X, Jiang Y, Zhang L, Le T. *Food Chem*, 2023, 422: 136250
44 Azeez KF, Salimi A, Hallaj R. *Food Chem*, 2025, 482: 143972
45 Zhong J, Zhang X, Xu J, Zhou L, Zhou Q, Zhai H. *Food Chem*, 2024, 458: 140306
46 Yue X, Fu L, Li Y, Xu S, Lin X, Bai Y. *Food Chem*, 2023, 410: 135390
47 Pan M, Sun J, Wang Y, Yang J, Wang Z, Li L, Wang S. *Food Chem*, 2024, 442: 138461
48 Guo Y, Li L, Zhang M, Xu S, Jiang C. *Small*, 2025, 21: 2410911
49 Hui Y, Wei Y, Guo H, Wang M, Peng L, Ren B, Ma Y, Yang W. *Food Chem*, 2025, 492: 145361
50 Mehta J, Dhaka S, Paul AK, Dayananda S, Deep A. *Environ Res*, 2019, 174: 46–53
51 Zhao Y, Li R, Tang J, Liu M, Zhang B, Chen J, Ren S, Ma Q, Sun Z, Weng H. *Food Chem*, 2025, 493: 145935
52 Yang F, Li S, Ma J, Jia Q. *J Food Composition Anal*, 2024, 135: 106685
53 Tang J, Cai T, Chen Z, Li N, Liu J, Yang H. *Food Chem*, 2025, 493: 145702
54 Yang L, Hu W, Pei F, Liu Z, Wang J, Tong Z, Mu X, Du B, Xia M, Wang F, Liu B. *Food Chem*, 2024, 438: 138068
55 Wei X, Zhao Y, Zhang H, Jia Q. *SpectroChim Acta Part A-Mol Biomol Spectr*, 2025, 347: 127005
56 Cao H, Han Y, Chen Z, Ding X, Ye T, Yuan M, Yu J, Wu X, Hao L, Yin F, Xu F. *Microchim Acta*, 2024, 191: 172
57 Liu X, Song J, Zhang X, Huang S, Zhao B, Feng X. *Food Chem*, 2023, 413: 135639
58 Wang T, Zhang L, Zhang J, Guo G, Jiang X, Zhang Z, Li S. *Food Chem*, 2023, 416: 135853
59 Zhou L, Tang J, Chen G, Cai T, Liu J, Yang H. *J Agric Food Chem*, 2025, 73: 23263–23271
60 Yi K, Zhao Q. *Anal Methods*, 2025, 17: 4976–4986
61 Zhao Y, Li J, Shi Y, Hu J, Liu M, Shen Y, Hou X, Wang Q, Wang Q, Yao Z. *Chin Chem Lett*, 2025, 36: 110132
62 Liao S, Gui L, Yang Y, Liu Y, Hu X. *Microchim Acta*, 2024, 191: 497
63 Guo X, Zhu N, Lou Y, Ren S, Pang S, He Y, Chen XB, Shi Z, Feng S. *Chem Commun*, 2020, 56: 5389–5392
64 Singh H, Deep A, Puri S, Khatri M, Bhardwaj N. *Food Control*, 2024, 163: 110497
65 Zhao X, Wang Y, Li J, Huo B, Qin Y, Zhang J, Chen M, Peng Y, Bai J, Li S, Gao Z. *SpectroChim Acta Part A-Mol Biomol Spectr*, 2021, 259: 119893
66 Kabak B, Soyuçok A. *Food Biosci*, 2025, 69: 106910

67 Qu X, Meng Z, Zhang T, Dai H, Wu P, Ding P. *Microchim Acta*, 2025, 192: 255
68 Gou J, Hu Y, Xing L, Xu J, Yue F, Zhang L, Jia L. *Mater Today Chem*, 2024, 41: 102270
69 Mao Z, Chen R, Huang L, Ren S, Liu B, Gao Z. *Biosens Bioelectron*, 2025, 273: 117153
70 Zhang X, Huang T, Gao Y, Cai Y, Liu J, Ramachandraiah K, Mao J, Ke F. *Coord Chem Rev*, 2024, 516: 215990
71 Jagirani MS, Zhou W, Nazir A, Akram MY, Huo P, Yan Y. *Crit Rev Anal Chem*, 2025, 55: 581–602

Research progress in detection of food contaminants via fluorescence technology based on metal-organic framework composites

Baokun Shan, Yue Zhang*, Peng Wang, Pengcheng Zhao*, Shuchuan Fu, Xueguo Chen, Zhenyu Zhang*

College of Criminal Science and Technology, Criminal Investigation Police University of China, Shenyang 110035, China
**Corresponding authors (email: zhangyue1022_cipuc@163.com; zhaopengcheng@cipuc.edu.cn; ccpczzy@163.com)*

Abstract: Metal-organic frameworks (MOFs) have garnered significant attention in recent years for their application in food contaminant detection, owing to their well-defined structures, exceptionally high surface areas, tunable porosity, and facile surface functionalization. This review presents a comprehensive overview of eight luminescence-based detection mechanisms employed by MOFs, including photoinduced electron transfer and fluorescence resonance energy transfer. Special emphasis is placed on the systematic analysis of MOFs' performance in detecting four major classes of food contaminants—antibiotics, pesticides, mycotoxins, and foodborne pathogens—highlighting representative detection cases, key analytical performance metrics, and real-world application scenarios. Furthermore, current research trends in MOF development are discussed, followed by a critical assessment of existing challenges and inherent limitations. Based on this evaluation, strategic perspectives are proposed to guide future advancements in MOF-based sensing technologies for food safety monitoring, underscoring their considerable potential and promising outlook.

Keywords: metal-organic framework materials, food contaminants, fluorescence, sensing and detection

doi: 10.1360/SSC-2026-0013