



MOFs材料在新兴污染物分析检测和去除应用中的研究进展

贾舒宏, 潘自宇*, 李石娟, 刘智敏, 许志刚*

(昆明理工大学 理学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 新兴污染物因种类繁多、痕量存在、结构复杂、具有生物累积性和生物毒性而存在生态环境与健康风险, 因此, 研发具备高灵敏检测与高效去除能力的功能材料, 对实现污染物精准检测与深度治理具有重要意义。目前, 操作简便、响应灵敏、成本低廉且环境友好的检测技术和去除材料已被开发, 并有效解决了常规检测技术需依赖大型精密仪器, 存在前处理复杂、成本高昂、需专业操作以及去除效率不满足工业使用标准等问题。金属有机框架(MOFs)材料凭借高比表面积、孔隙结构可调及表面易于功能化等特性, 在复杂基质中对污染物展现出优异的选择性富集能力、高灵敏传感性能以及高效催化降解潜力。基于此, 该文系统梳理了新兴污染物的类别及管控现状, 阐述了MOFs材料的合成方法与分类体系, 重点综述了功能化MOFs材料在抗生素、持久性有机污染物及内分泌干扰物等典型新兴污染物中高灵敏检测与高效去除领域的最新研究进展。

关键词: 新兴污染物; 金属有机框架材料; 检测; 去除

中图分类号: O615.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4957(2026)09-2077-15

Progress of Research on Metal-Organic Frameworks in Analysis, Detection and Removal of Emerging Contaminants

JIA Shu-hong, PAN Zi-yu*, LI Shi-juan, LIU Zhi-min, XU Zhi-gang*

(Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Emerging contaminants (ECs) pose significant risks to the ecological environment and biological health due to their diverse types, trace-level presence, complex structures, inherent bioaccumulation, and biotoxicity. Therefore, the development of functional materials that can afford highly sensitive detection and efficient removal is crucial for achieving accurate detection and in-depth remediation of these contaminants. Currently available detection technologies and removal materials are characterized by facile operation, sensitive response, low cost, and environment-friendliness. These techniques and materials effectively address the problems of conventional detection techniques—including reliance on large-scale precision instruments, cumbersome sample pretreatment processes, high costs, requirement for professional operation, and insufficient removal efficiency to meet industrial application standards. Metal-organic framework (MOF) materials, by virtue of their high specific surface areas, tunable pore structures, and facile surface functionalization, exhibit excellent selective enrichment capacities, high-sensitivity detection performance, and efficient catalytic degradation potential for contaminants in complex matrices. Based on these observations, in this study, we systematically collate the categories and regulatory status of emerging contaminants, elaborate on the synthesis methods and classification systems of MOF materials, and focus on reviewing the latest progress of research on functionalized MOF materials in the high-sensitivity detection and efficient removal of typical emerging contaminants, such as antibiotics, persistent organic pollutants, and endocrine-disrupting chemicals.

Key words: emerging contaminants; metal-organic framework materials; detection; removal

收稿日期: 2026-04-30; 修回日期: 2026-06-08

基金项目: 云南省基础研究计划项目(202501CF070112)

* 通讯作者: 潘自宇, 博士, 研究方向: 分析化学, E-mail: pzysz2022@163.com

许志刚, 博士, 教授, 研究方向: 样品前处理技术、色谱分析研究, E-mail: chemxuzg@kust.edu.cn

网络首发日期: 2026-08-07

随着经济的快速发展与人民生活水平的不断提高,工业、农业及医疗领域技术持续进步,同时也引发了日益严峻的环境问题。各类污染物通过多途径被持续排放,并在环境中不断累积,对生态系统与公众健康构成潜在威胁^[1-2]。其中,新兴污染物指近年来发现的、未受监管或近期才被纳入监管范围的化合物,有天然和合成两个来源,虽不在常规环境监测之列,但其对生态系统和人体健康依然存在潜在风险^[3]。“新兴污染物(Emerging contaminants, ECs)”在环境污染相关文献中被频繁使用(图 1A),种类繁多:涵盖个人护理用品(PPCPs)、全氟和多氟烷基物质(PFAS)、药物、纳米材料等^[4];来源广泛:主要来自农业活动、工业生产、城市废物等途径,污染空气、水、土壤和食物,进而危害环境和生物^[5-6];其典型特征为:健康危害性、风险隐蔽性、环境持久性、来源广泛性和治理复杂性等,且以痕量形式存在于环境中^[7-9]。鉴于上述风险与治理难点,实现新兴污染物的高选择、高灵敏检测和高效去除具有重要意义。

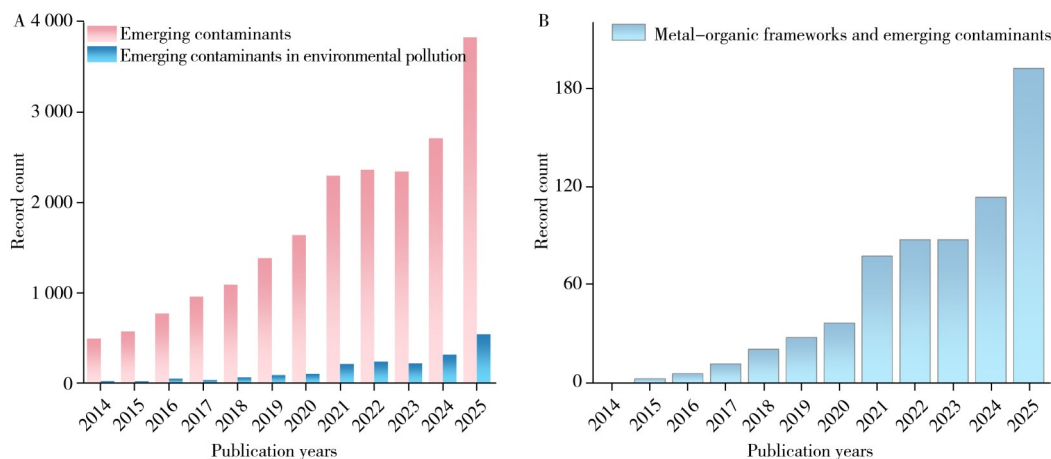


图 1 以“新兴污染物”和“环境污染中新兴污染物”为主题的论文发表数量(2014~2025年)(A);以“金属有机框架及新兴污染物”为主题的论文发表数量(2014~2025年)(B)

Fig. 1 Number of articles published during 2014–2025 on the topics of “emerging contaminants” and “emerging contaminants in environmental pollution” (A) and “metal–organic frameworks and emerging contaminants” (B)

all the data was from Web of Science on March 26, 2026(所有数据均来自 2026 年 3 月 26 日 Web of Science 的检索)

传统新兴污染物检测常采用液相色谱(LC)、气相色谱(GC)、质谱(MS)、分光光度计、液质联用(LC–MS/MS)及气质联用(GC–MS/MS)等方法^[10-12],这些方法虽具有高灵敏度、稳定性和准确性,但依赖于精密仪器,检测成本高昂、样品前处理复杂并需专业人员操作,且多为离线分析,数据滞后,难以实时原位监测。相比之下,传感技术具备操作简便、响应灵敏、成本经济且环境友好等优势,特别适合现场快速分析与实时监测^[12-14]。在新兴污染物去除方面,物理吸附、生物降解、电化学氧化、臭氧氧化等传统工艺虽可实现一定去除效果,但普遍存在去除效率低、能耗与成本偏高、反应条件苛刻、前处理复杂等问题,且易生成有毒中间产物、造成二次污染^[15-16]。相比之下,基于 MOFs 材料构建的体系能够高效、经济、绿色地深度去除复杂基质中高毒性、难去除的新兴污染物。

近年来,随着新型功能材料合成技术的飞速发展,一系列具有卓越理化性质、特定拓扑结构与可修饰表面的先进材料被成功构筑,例如:共价有机框架(COFs)材料^[17-18]、MOFs 材料^[19-20]、多孔有机聚合物(POPs)^[21-22]、分子印迹聚合物(MIPs)^[23-24]以及各类碳纳米材料^[25-26]等。这些新型材料及其复合材料的成功开发,极大地推动了分析科学、环境修复和催化等领域的进步^[27-28]。MOFs 材料规整的孔道结构、可功能化的表面及不饱和金属位点的存在,使其在复杂环境介质中对痕量新兴污染物表现出优异的选择性富集能力、高灵敏传感识别性能及高效催化活性^[29-30],这精准契合了新兴污染物分析检测和环境修复中对材料高选择性、高灵敏度及高效去除能力的关键需求。然而,部分 MOFs 材料在实际应用中仍面临水稳定性或化学稳定性不足、合成成本较高及在复杂基质中分离回收困难等挑战。针对这些问题,研究者通过合理的金属-配体组合选择、后合成修饰、复合材料构建及形貌调控等策略,有效改善了稳定性、增强了吸附选择性、提升了催化效率并降低了应用成本。基于此,设计合成新型功能化 MOFs 材料并系统探索其在环境分析与污染控制中的应用,已成为当前环境功能材料领域的研究

前沿和热点(图 1B)^[31-33]。本文系统综述了近一年不同类型功能化 MOFs 材料作为灵敏传感平台、高效吸附和先进催化材料,在新兴污染物分析检测与去除方面的最新研究进展、作用机制与应用前景。

1 新兴污染物的种类

新兴污染物涵盖 20 余个大类,每类包含数十至上百种化学物质,已在多种环境介质及生物体内被检出。常见类别包括全氟和多氟烷基物质、抗生素、微塑料及内分泌干扰物(EDCs)等。尽管其在环境中痕量存在,但长期暴露可能带来严重的健康危害,而其对人类和生态系统的潜在影响亦尚不明确^[7, 34-35]。

目前,研究者已对种类多样、结构复杂的新兴污染物进行了系统分类,为分析检测与有效治理提供了基础框架。Jiang 等^[36]指出,环境有机污染物可按使用类别(如农药、医药、个人护理品等)或化学结构(如苯系物、杂环化合物等)划分,为大规模暴露建模与溯源分析提供了依据,并明确其核心判据在于持久性与毒性。不同类别的新兴污染物在极性、分子尺寸、官能团等方面具有显著差异,对检测方法的选择性与灵敏度、去除技术的适配性提出了差异化需求,这正是功能材料设计中需针对性考量的关键。因此,需发展结构可调、功能可控的新型材料,而非依赖“一刀切”的传统技术。2022 年 12 月 29 日,我国发布《重点管控新污染物清单(2023 年版)》^[37],自 2023 年 3 月 1 日起施行,标志着我国新污染物治理工作进入了实质性阶段。在此背景下,ECs 的种类多样性与结构复杂性为新型功能材料的设计与应用提供了明确的应用场景与现实需求。表 1 以典型新兴污染物为例,梳理其结构特征与在不同基质中的典型浓度范围,直观体现了不同类别污染物的结构差异,为后续针对性检测与去除技术的设计提供了现实依据。

表 1 常见 ECs 的结构特征、不同基质中的典型浓度范围以及与 MOFs 的主要作用机制
Table 1 Structural characteristics of common ECs, typical concentration ranges in different matrices, and main interaction mechanisms with MOF materials

Contaminant category	Representative compound	Structural characteristic	Matrix	Typical concentration range	Typical concentration range	Reference
抗生素	四环素	氢化并四苯,含酚羟基、醇羟基、二	废水	ng/L~μg/L	氢键作用	[38-39]
	诺氟沙星	甲氨基、酰胺基及酮基;喹啉环、羧	猪/禽肉	ng/g	π-π 堆积作用	
	磺胺甲噁唑	基、酮基、氟原子、哌嗪环;磺酰胺基、苯环、异噁唑环	血浆	ng/mL	配位作用	
PFAS	全氟辛酸	全氟化碳链,末端羧酸基	废水	ng/L~μg/L	静电作用	[40-41]
	全氟辛磺酸	全氟化碳链,末端磺酸基	鱼类/鸡蛋	ng/g	疏水作用	
			血清	ng/mL	F-F 相互作用	
微塑料	聚苯乙烯	苯环侧链,疏水链段	海水	颗粒/L	π-π 堆积作用(聚苯乙烯)	[42-43]
	聚乙烯	长碳链,无极性基团	贝类	颗粒/g	疏水作用	
			人体粪便	颗粒/g		
内分泌干扰物	双酚 A	双酚骨架,含两个酚羟基	废水	ng/L~μg/L	氢键作用	[44-45]
			鱼类/海鲜	ng/g	π-π 堆积作用	
			尿液	ng/mL	疏水作用	

2 MOFs 材料的合成及分类

1999 年,Yaghi 课题组^[46]首次合成的 MOF-5 是 MOFs 材料发展历程中具有标志性意义的里程碑工作。此后,这类结晶性多孔材料迅速引发广泛关注,逐步发展成为集材料设计、可控合成与功能应用于一体的跨学科研究领域。

MOFs 材料的结构多样性与可调性主要取决于合成方法,常用方法(图 2)包括水热/溶剂热法、扩散法、电化学合成法、机械合成法、超声波法和微波辅助合成法等^[47],各方法在反应条件、产物结晶度、产率及可规模化程度等方面各有优劣。其中,水热/溶剂热法发展最早、应用最广,凭借合成简便、条件可控、结晶度高、适用范围广、重现性好等优势成为研究人员的首选,但存在反应周期长、能耗高、规模化受限等问题^[48];扩散法可制备低缺陷高质量 MOFs 单晶,但生长速率慢、对原料溶解性要求严苛^[49];电化学合成法可在室温温和条件下快速批量制备高完整性大尺寸晶体,还能规避杂质阴离子引入^[50];机械合成法为无溶剂绿色工艺,该技术可提高产率、缩短反应时间,降低成本^[51];超声波法依靠超声微泡效应加速配位成核,结晶周期短、产物粒径小,环境友好^[52];微波辅助合成法利用电磁波

与极性分子作用产生局部加热及介电加热效应缩短反应时间,提升晶体质量与均匀性,优化 MOFs 性能^[53]。不同合成方法的独特作用机制,赋予了 MOFs 材料差异化的微观结构与功能特性,使之适配不同的应用场景。例如,超声波合成法制备的 MOFs 材料比表面积更大、活性位点暴露更充分、孔隙结构更丰富,可显著加快目标检测分子的吸附与扩散速率。此外,超声作用可适度调控材料表面缺陷,增加传感活性中心,有效提升响应灵敏度、降低检出限,大幅优化 MOFs 材料的传感检测性能^[54]。电化学合成法可在导电基底上原位生长 MOFs 材料,实现材料与基底的紧密结合,有效降低界面电阻、加快电子传输效率,避免活性位点被覆盖,最大化暴露催化反应界面,对提升 MOFs 催化活性具有独特优势^[55]。因此,针对不同的应用需求,可选用与之相适应的合成方法,充分发挥各方法在结构调控与功能优化上的独特优势。

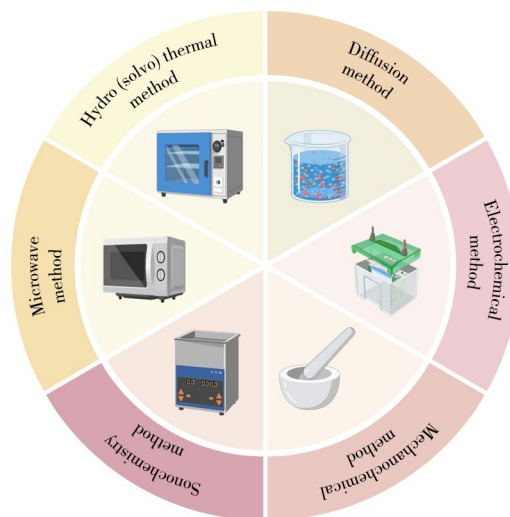
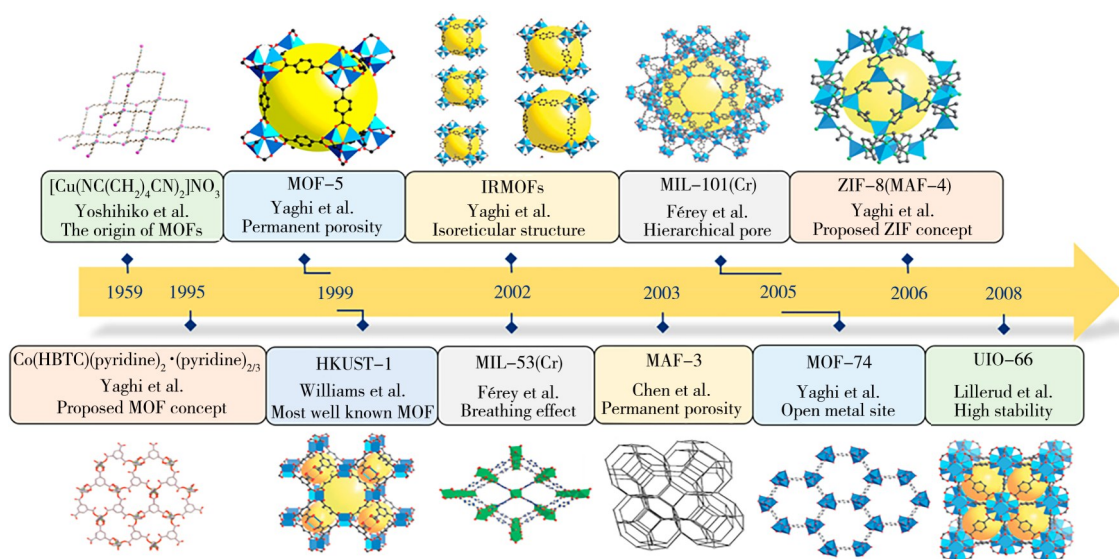


图2 MOFs材料的合成方法

Fig. 2 Synthesis of MOF materials

按代表性系列分类, MOFs 材料主要包括网状金属-有机骨架^[56] (IRMOFs)、类沸石咪唑骨架^[57-58] (ZIFs)、莱瓦希尔骨架^[59] (MILs)、多孔配位网络骨架 (PCNs)^[60] 及奥斯陆大学系列骨架 (UiO)^[61] 等, 这些均为 MOFs 材料发展史上的经典材料 (图 3)。根据金属节点, MOFs 材料可分为过渡金属 (如 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 等) 和高价金属 (如 Zr^{4+} 、 Hf^{4+} 等)^[62-63]; 根据有机配体可分为含氮杂环、羧酸及磺酸, 以及含氮杂环与羧酸混合类等。有机配体的长度 (如二齿、三齿、四齿) 是决定框架孔径大小的关键。因此, 通过组合相同的有机配体与不同的金属簇, 可设计并制备出具有不同孔径与结构的 MOFs 材料, 为其在新兴污染物选择性富集、传感识别与去除等应用中的性能优化奠定重要基础。例如, ZIF-8 的疏水孔道适合富集疏水性新兴污染物 (如部分抗生素和 PFAS), 但该材料对酸性环境敏感, 在 pH (1.5~6.0) 弱酸性至酸性条件下易发生 Zn-N 配位键断裂、 Zn^{2+} 浸出, 晶体结构易坍塌; UiO-66 的高稳定性使其适合在水相中长期运行, 在 pH (1.0~9.0) 区间几乎无 Zr^{4+} 浸出; MIL-101 的大孔径适合大分子污染物 (如微塑料降解中间体) 的吸附, 其中 Cr 基 MIL-101 酸稳定性优异、金属浸出极低^[64-67]。不同 MOFs 的孔结构、酸碱稳定性与金属浸出行为差异显著, 实际水体处理中需根据水体 pH 值、运行周期及目标污染物特性合理筛选。

图3 MOFs系列材料发展史及经典材料^[68]Fig. 3 History and classic representative MOF materials^[68]

3 MOFs材料在新兴污染物分析检测中的应用

实现复杂基质(如环境、食品、生物样品)中新兴污染物的高选择性、高灵敏检测是环境分析领域的重要课题。MOFs材料作为高效吸附剂、传感识别元件及信号放大载体,在新兴污染物的分析检测中展现显著优势。本节综述近一年功能化MOFs材料在典型新兴污染物分析检测中的最新研究进展。

3.1 在环境中的应用

抗生素、全氟烷基化合物、酚类内分泌干扰物等新兴污染物痕量存在水环境中且基质复杂,传统方法难以快速现场检测。基于MOFs材料的样品前处理与传感技术可有效提升选择性与灵敏度。下文按污染物类别梳理近一年的代表性研究。

3.1.1 抗生素分析检测 Kabak^[69]制备了耐水型Tb-MOF荧光探针,将其用于水环境中四环素(TC)的检测,传感机理为TC与MOF发生电子转移导致荧光猝灭。该探针对TC的选择性优异,在0~60 $\mu\text{mol/L}$ 范围内线性良好,检出限(LOD)低至0.024 5 $\mu\text{mol/L}$ 。Xia等^[70]将两种铜系MOF发光团复合,构建比率型荧光探针,实现了对喹诺酮类抗生素的高选择性可视化检测。该探针对环丙沙星(CPF_X)和诺氟沙星(NFX)的LOD分别为 4.863×10^{-8} mol/L和 9.259×10^{-7} mol/L,可通过荧光颜色变化实现裸眼识别。Aham等^[71]以构建的UiO-66(Fe/Zr)-NH₂双金属MOF作为过氧化物酶模拟物,结合智能手机建立比色传感平台,实现了卡那霉素(KAN)和土霉素(OTC)的同步检测,LOD分别为0.44 nmol/L和6.86 nmol/L,实际水样回收率良好,适于现场快速分析。

3.1.2 PFAS分析检测 PFAS具有高持久性与生物累积性,需要快速灵敏的方法进行检测。Yuan等^[72]构建了碳点-MOF富集耦合微流控芯片体系(图4),实现了全氟辛酸(PFOA)、全氟辛烷磺酸盐(PFOS)、全氟丙基乙烯基醚(PPVE)的高选择、高灵敏检测,检出限分别为0.33、0.35、0.40 $\mu\text{mol/L}$,在实际水体中识别准确率超过90%。Roh等^[73]采用基于铜六羟基三苯(Cu-HHTP)的二维导电MOF薄膜构建化学电阻传感装置,对饮用水中PFAS的检出限低至0.002 ng/L。Han等^[74]采用配体植入的模块化策略,在不破坏MOFs在水体中结构完整性的前提下,实现了孔隙环境的精准调控。该研究构建了包含13种PCN-700衍生物的材料库,证实增大孔隙可及性可有效提升传感性能。其中,氨基官能团通过增强主客体相互作用,将猝灭效率提升3倍,从而显著提高了对PFAS的检测灵敏度。

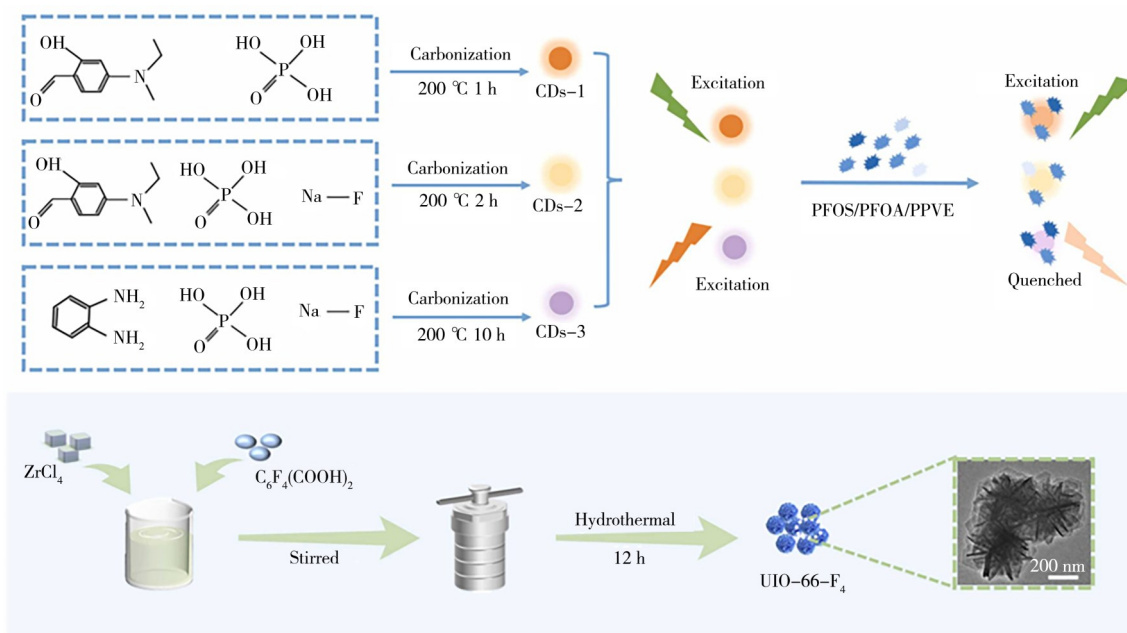


图4 碳点材料制备流程图和UiO-66-F₄制备流程图^[72]

Fig. 4 Preparation flowcharts for carbon dot material and UiO-66-F₄^[72]

3.1.3 内分泌干扰物分析检测 Zhang等^[75]将制备的50.0% 4F-BDC@UiO-67疏水MOF,用于环境样品中双酚类污染物(BPs)的高效富集。其富集倍数为原始UiO-67的1.5~6.3倍,疏水性与稳定性显著提升,可提供更多亲和位点,实现BPs快速传质与低检出限检测,适用于复杂环境基质。Gao等^[76]以层

状 Ni-MOF 为前驱体热解制备 $\text{Ni}_2\text{P@C}$ 电化学传感界面, 用于环境中双酚 A 的检测。该传感器在 1~100 $\mu\text{mol/L}$ 范围内线性良好, 灵敏度为 $0.951 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{mol}^{-1} \cdot \text{L}$, 检出限低至 56.8 nmol/L, 电催化活性与稳定性优异。此外, Liu 等^[77]构建了以 $\text{WS}_2\text{-MIL100(Fe)}$ 为阳极、 Au@N , S-Cu-MOF 分子印迹材料为阴极的光电芬顿自供电电化学传感器, 实现了水中邻苯二甲酸二丁酯(DBP)的高灵敏特异性检测, 线性范围为 31.25 pmol/L~20 nmol/L, 检出限($S/N=3$)低至 0.28 pmol/L, 实际水样回收率为 92.44%~109.32%, 相对标准偏差(RSD)为 0.33%~5.15%, 适用于痕量内分泌干扰物的现场监测。

尽管基于 MOFs 材料的环境污染物传感已实现高选择性与高灵敏检测, 但其作用机理仍存在共性规律与明显不足。上述研究中, 荧光传感多将响应归因于静态/动态荧光猝灭、内滤效应(IFE)、光诱导电子转移(PET)或荧光共振能量转移(FRET), 污染物吸附识别主要依靠氢键、 π - π 堆积作用、F-F 特异性相互作用、静电作用与金属配位作用协同完成, 电化学与光电传感则依托异质结界面电荷分离、类芬顿电子转移、活性氧生成及分子印迹特异性位点实现信号放大与高选择性检测。然而, 当前机理解释高度趋同、多为间接推测, 缺乏原位表征与定量验证; 多数研究仅强调“多作用力协同”, 却未区分各种作用的贡献权重; 同时对复杂环境基质(如离子、pH 值、天然有机质)下的机理漂移关注不足, 且孔结构、官能化程度与传质效率间的构效关系讨论较浅。在目前研究中, 已出现定量解析多作用力贡献的探索, 尽管研究体系并非完全针对 MOFs 材料, 但其方法学可为 MOFs 的多作用力权重区分提供借鉴。例如, Hong 等^[78]在羧酸团簇研究中借助微波光谱与对称匹配微扰理论(SAPT)能量分解定量解析了氢键与 π - π 堆积的各自贡献, 为多作用力协同的权重区分提供了示范性方法。Altangerel 等^[79]采用热稳定拉曼相互作用分析技术(TRIP), 在复杂蛋白质环境中实现了对芳香族 π - π 相互作用的直接、免标记检测与定量。因此, 发展原位动态机理表征、定量区分主作用力、结合 DFT 与实际环境条件, 才能真正实现 MOFs 传感材料的理性设计与性能精准调控。

3.2 在食品中的应用

食品安全备受关注, 其中新兴污染物风险尤为突出。抗生素在疾病防治中的滥用与残留已造成环境污染与食物链风险。值得注意的是, 食品中的新兴污染物远不止抗生素, 还涵盖持久性有机污染物、新型兽药代谢产物、农药、重金属等, 这类污染物隐蔽性强、易累积, 环境与健康风险更需重点防控。因此, Huang 等^[80]制备了 PCN-222@脂质体, 并基于该材料构建了微流控芯片侧流免疫分析方法, 通过比色和荧光双信号, 实现了鸡肉、虾和牛奶中磺胺甲噁唑、磺胺甲噁唑、磺胺甲氧嘧啶和磺胺噻唑 4 种磺胺类药物的同时检测。

基于荧光探针的传感器可以实现新兴污染物的快速、选择性和灵敏检测。例如, Yu 等^[81]制备了 UiO-66-F_4 比率型荧光探针, 基于内滤效应(IFE)以及 UiO-66-F_4 与左氧氟沙星之间的化学相互作用实现了左氧氟沙星高灵敏检测, 检出限低至 0.1 $\mu\text{mol/L}$ 。该探针稳定性与选择性优异, 已成功用于自来水、蜂蜜、牛奶、橙汁、番茄、鸡蛋等多种样品检测, 回收率可靠。An 等^[82]开发了首例 MOF 基荧光开启型探针 Zn-TBLeuBa , 实现了对阿莫西林、阿莫西林钠、氨苄西林等 β -内酰胺类抗生素的高选择性、高灵敏度定量检测, 突破了传统 MOF 探针仅限单一抗生素检测的局限。该探针检出限极低, 并具备优异的稳定性、重现性与快速响应能力, 已成功用于牛奶、蜂蜜、猪肉等复杂食品基质中目标抗生素的定量分析。Zhao 等^[83]构建了 $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@RhB@ZIF-90@AChE}$ 磁荧光纳米探针, 用于有机磷(OPs)和氨基甲酸酯(CMs)类农药检测。该传感器线性范围为 0.01~2 mg/L, 对多种农药的检出限低至 0.015~0.021 mg/L, RSD<3.74%, 果蔬样品加标回收率为 97.7%~104.5%, 重现性与准确性优异。

MOF-on-MOF 材料由两种或多种单一 MOFs 复合而成, 相较于单一组分 MOFs, 其因结构与性能更优而在吸附分离、多相催化及传感检测等领域展现出广阔应用前景。如: Guo 等^[84]通过外延生长法合成了 $\text{NH}_2\text{-MIL-101(Eu)@Fe-MOF}$ 异质结构, 构建了新型 MOF-on-MOF 比率荧光传感器, 用于黄霉素(Fla)的高灵敏可视化检测(图 5), 检出限低至 4.8 nm; 该双金属有机框架智能手机传感平台在家禽肉和猪肉样品中回收率良好。Deng 等^[85]创新构建了基于“双引擎”协同作用的电化学适配体传感器, 用于高灵敏检测妥布霉素(TOB)。该传感器采用夹心式设计: 以聚乙烯亚胺(PEI)修饰的乙炔黑(AB)负载金纳米颗粒(AuNPs)为传感基底, 利用其高导电性和大比表面积固定更多适配体; 以负载金纳米线(AuNWs)和信号分子甲苯胺蓝(Tb)的双金属 MOF-on-MOF 异质结构(Sn-MOF-on-Ce-MOF)作为示踪

标记,通过界面调控与一维纳米结构实现协同信号放大。“双引擎”共同作用使得传感器具备卓越性能,线性检测范围达 $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^2$ ng/mL,检出限低至 0.19 fg/mL。在鸡肉、鸭肉、鱼肉、牛奶和蜂蜜等实际样品的检测中表现出良好的适用性与回收率。为了增强金属有机框架衍生碳材料的吸附能力, Song 等^[86]合成了 MOF-on-MOF 核壳结构的 2D ZIF-L@ZIF-67 杂化框架,并将其转化为具有多级孔隙率的氮掺杂碳-石墨烯/碳纳米管异质结构(NC@GC/CNT),用作固相微萃取(SPME)纤维涂层材料,富集茉莉花茶、桶装饮用水和绿茶饮料中的痕量多氯联苯(PCB),结合顶空 SPME(HS-SPME)与气相色谱-火焰电离检测器(GC-FID),得到该方法线性范围为 $0.005 \sim 30$ ng·mL⁻¹,检出限为 0.001~0.003 ng·mL⁻¹,富集因子达 11 077~14 447,实际样品中多氯联苯的回收率为 83.2%~119.6%。

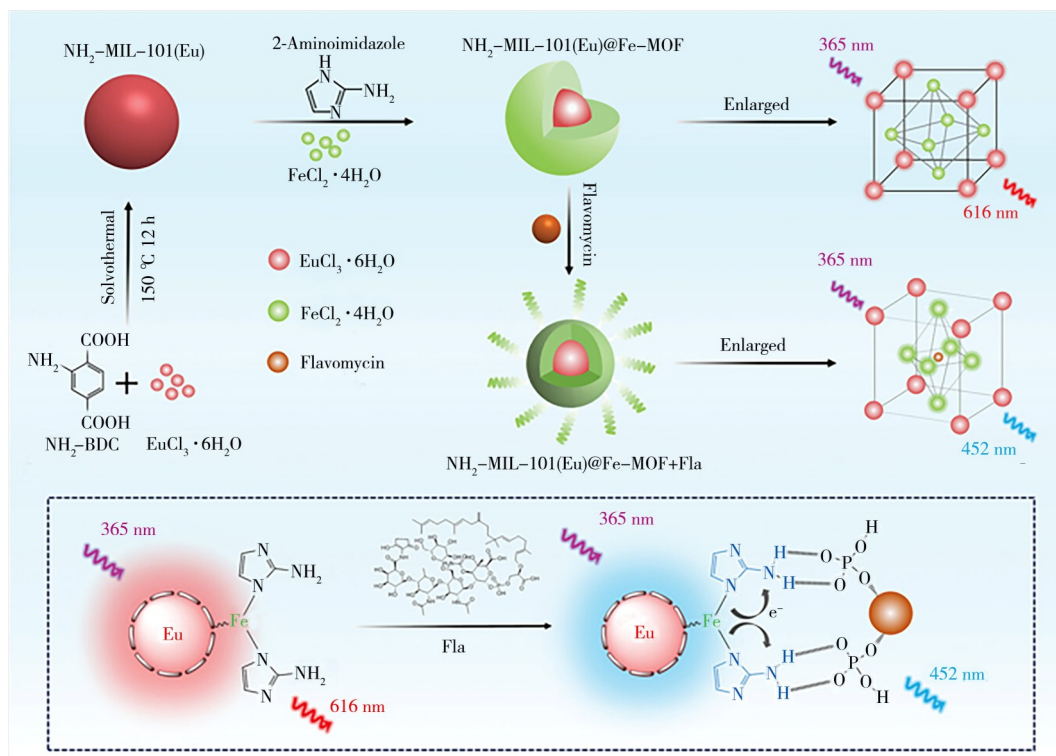


图5 基于 $\text{NH}_2\text{-MIL-101(Eu)@Fe-MOF}$ 的比例荧光传感器可视化检测黄霉素^[84]

Fig. 5 Illustration of $\text{NH}_2\text{-MIL-101(Eu)@Fe-MOF}$ -based ratiometric fluorescent sensor for visual detection of Fla^[84]

双金属 MOFs 凭借双金属协同与活性位点可调,不仅对目标物具有更高的吸附容量与识别选择性,还可通过双金属间的电子结构调控实现更快的传感响应与更低的检出限,同时,结构稳定性的提升也有效延长了传感器的使用寿命。基于此, Liu 等^[87]开发了具有多发射特性的双金属有机框架(Fe/Eu-MOF),作为比率荧光传感器用于合成雌激素二乙基苯丙醇(DES)的灵敏可视化检测。该材料在 615 nm 处呈现稳定红色荧光发射,在 410 nm 处呈现对 DES 响应的蓝色荧光发射,可实现自参比定量检测;线性范围分别为 $0.005 \sim 2$ $\mu\text{g/mL}$ 和 $2 \sim 30$ $\mu\text{g/mL}$,检出限为 1.78 ng/mL,选择性优异,在牛奶和虾样品中回收率与重现性良好;结合纸基传感器与智能手机 RGB 分析,可实现现场无仪器快速检测。为高选择性、高灵敏度检测 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} , Ma 等^[88]采用溶剂热与氧化聚合法合成了 CeBi-MOF 负载聚苯胺(PANI)复合材料(CeBi-MOF/PANI)修饰玻碳电极构建电化学传感器,对 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 的检出限分别为 0.31 $\mu\text{g/L}$ 和 0.05 $\mu\text{g/L}$,在湖水、自来水、牛奶、蜂蜜及茶叶等实际样品中回收率为 90.6%~112.0%,具备良好的准确性与应用潜力。黄曲霉毒素 B1(AFB1)毒性高、稳定性强,严重威胁食品安全与公共健康。Wang 等^[89]构建了适用于中性 pH 值条件的比色快速检测传感器,其核心为具有仿生超氧化物歧化酶(SOD)活性的双金属 Mn/Cu-MOF 纳米酶。该传感器由固定于磁性纳米颗粒的 AFB1 特异性适配体($\text{Apt@Fe}_3\text{O}_4$)及结合 cDNA 的 Mn/Cu-MOF(cDNA@Mn/Cu-MOF)组成;目标物结合后置换出 cDNA@Mn/Cu-MOF ,在中性 pH 值下催化还原硝基蓝四唑铵(NBT),并于 560 nm 处产生吸光度响应。该方法在 0.1~3 000 ng/mL 范围内线性良好,检出限低至 0.07 ng/mL,加标花生样品回收率为 91.80%~109.08%,

为 AFB1 灵敏检测及中性 pH 值生物传感器设计提供了新思路。

目前,多数 MOFs 基食品传感器研究对作用机理的解析仍缺乏系统性与深入探讨。在磺胺类、 β -内酰胺类抗生素等小分子污染物检测中,现有研究多仅定性阐释氢键、 π - π 堆积、疏水作用等非共价相互作用,以及内滤效应、能级跃迁、荧光共振能量转移等光物理过程,但未量化多种机制间的协同贡献与内在关联,致使机理解释停留在表现现象层面。在有机磷/氨基甲酸酯农药、黄霉素、重金属及黄曲霉毒素等检测体系中,虽已初步揭示酶抑制效应、MOF-on-MOF 异质结协同、双金属位点电子调控及纳米酶催化等作用规律,但仍无法明确活性位点、金属价态、界面电子转移在传感过程中的贡献占比,难以从机理层面指导传感器结构与性能定向优化。更为关键的是,现有研究均未考虑实际食品基质中蛋白质、脂质、有机酸、天然色素等对识别机理的干扰。食品基质组分可与 MOFs 材料发生竞争性吸附、占据表面活性位点、破坏 MOFs 骨架结构、改变表面电子环境,显著干扰目标物识别与信号响应,与机理研究的理想化假设存在明显偏差。未来研究需结合分子模拟、原位光谱表征技术,定量解析各作用机制的贡献权重,理清双金属位点、异质结界面、主客体作用的调控规律;同时系统探究不同食品基质的干扰机制与屏蔽策略,完善 MOFs 传感理论体系,从根本上提升其在复杂食品体系检测中的实用性、稳定性与可靠性。

3.3 在生物样品中的应用

生物样品中的新兴污染物代谢产物可直接反映人体暴露水平,是健康风险评估的重要依据。生物基质存在干扰强、目标物浓度极低的问题,MOFs 材料作为高效吸附与传感材料,可为生物样品中痕量 ECs 及其代谢物分析检测提供新方案。例如,Yu 等^[90]以 MOF-808 为分散固相萃取(DSPE)吸附剂,结合超高效液相色谱串联质谱(UPLC-MS/MS),建立了尿液中 di-OPEs 的高通量检测方法(图 6),线性范围为 0.05~50.0 ng/mL,检出限为 0.02~0.45 ng/mL,回收率为 75.6%~121.8%,基质效应可控,已成功用于人体尿液样品检测。Dey 等^[91]将锆基金属有机框架(Zr-MOF)原位复合于石墨烯薄膜,构建出 Zr-MOF@GR 柔性自支撑电化学传感器,用于萘普生(NP)的高选择性、高灵敏检测。优化条件下,该传感器线性检测区间为 0.05~350 μ mol/L,检出限低至 3.81 nmol/L,灵敏度达 21.76 μ A $\cdot\mu$ mol⁻¹ $\cdot$ L $\cdot$ cm⁻²,在池塘水与人体尿液等实际样本中回收率优异。Chen 等^[92]采用投影微立体光刻(P μ SL)3D 打印技术制备硫醇官能化 MOF-808(MOF-808-SH)后修饰的单片阵列,并集成于 3D 打印提取装置中构建微萃取系统,结合电感耦合等离子体质谱(ICP-MS),实现了人体尿液中微量镉、铅的在线分析。

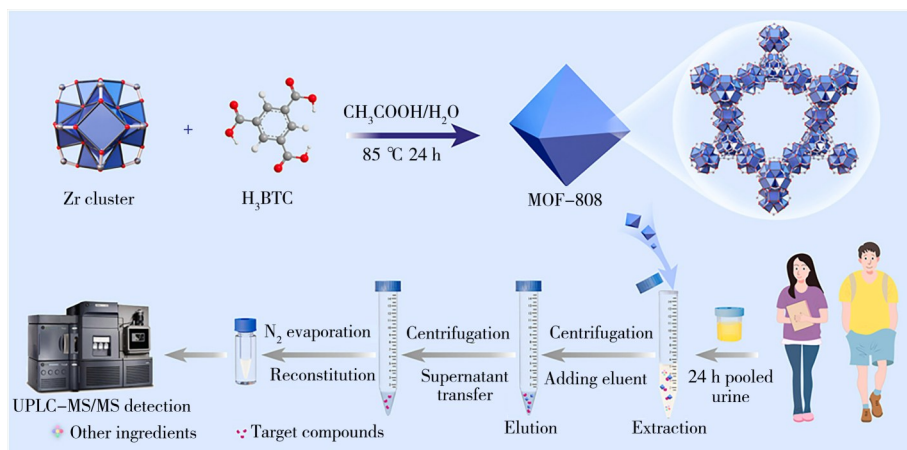


图 6 Zr 基 MOF-808 的制备及其在 DSPE-UPLC-MS/MS 高通量多靶点检测人尿中 di-OPEs 的应用示意图^[90]

Fig. 6 Schematic of the preparation of Zr-based MOF-808 and its application in high-throughput multi-target detection of di-OPEs in human urine by DSPE-UPLC-MS/MS^[90]

尽管 MOFs 在生物样品新兴污染物检测中展现出良好应用潜力,但仍存在亟待解决的短板。现有研究多聚焦单一目标物检测,而生物样品中的污染物常以复合形式存在,且 MOFs 对复杂基质中多组分污染物的抗干扰能力缺乏系统探究。从 MOF-808 吸附机理来看,其主要依靠 Zr 簇羟基位点、有机配体芳香环提供的氢键、 π - π 堆积及范德华力实现特异性吸附,但生物样品中的蛋白质、内源性代谢物等组分易与其竞争活性位点,干扰主客体相互作用,进而降低有机污染物的检测准确度。同时,基于

MOFs的电化学检测机理在生物基质中的稳定性数据不足,如Zr-MOF@GR电极,其峰电位-pH响应规律在实际生物样品中的适配性尚未得到有效验证;且生物基质易吸附于电极表面,弱化材料电催化性能、阻碍界面电荷转移动力学,影响检测可靠性。此外,生物样品前处理步骤繁琐耗时,且MOFs及其3D整体柱材料在生物检测体系中的再生性能与重复利用性缺乏系统探究,生物有机质易堵塞多孔孔道,进一步制约了该类材料在实际生物样本分析中的规模化推广应用。

针对上述食品和生物基质干扰问题,当前研究采用的先进屏蔽策略主要包括表面亲水化修饰、孔径尺寸排阻、防污涂层等技术,从而提升检测准确性。例如,以甲基丙烯酸酯透明质酸-羧甜菜碱甲基丙烯酰胺(HA-CB)水凝胶为核心防污基材,高效阻断蛋白质、微生物、有机大分子等复杂基质污染物的非特异性吸附,有效抑制基质干扰^[93]。AF@MOF-801探针依托MOF-801超小孔径的尺寸选择效应,可快速、高灵敏、高特异性检测细胞内次氯酸盐,且不受生物体系中大尺寸干扰物的影响^[94]。两性离子防污涂层可显著降低生物样品蛋白吸附、提升信号稳定性,无需样品预处理即可实现复杂生物体系中电化学生物传感的高灵敏、高重现检测^[95]。后续研究中针对新兴污染物的实际检测,可在上述屏蔽策略基础上进行工艺优化与复合改性,探索不同防污与尺寸筛分技术的联用,从而构建适用于复杂食品与生物基质的高效检测方案。

4 MOFs材料在新兴污染物去除中的应用

新兴污染物在水体、土壤、食品及生物样本中频繁检出,而传统工艺对痕量难降解污染物去除能力有限,因此,高效、绿色、温和的深度降解技术成为研究热点。MOFs凭借丰富的活性位点与可调控的催化性能,在吸附与催化降解方面潜力显著^[96-97]。下文重点综述近一年MOFs及其衍生材料在新兴污染物去除领域的研究进展。

4.1 吸附-富集

MOFs作为高效吸附材料,可通过静电作用、 π - π 堆积、氢键及疏水作用快速富集新兴污染物。Jin等以Zr基MOF-808为吸附剂,探究其与含羧基、磺酸基、羟基、氨基等官能团污染物的吸附构效关系,结果表明该材料的吸附选择性受污染物官能团影响显著,吸附能力依次为 $-\text{COOH} > -\text{SO}_3\text{H} > -\text{OH} \approx -\text{NH}_2$;线性溶剂化能关系分析证实,其吸附驱动力以静电作用为主, π - π 堆积次之,氢键作用较弱^[98]。Hoa等^[99]将氨基、吡啶官能团与传统对苯二甲酸(BDC)配体引入UiO-66拓扑结构,构建了具有特异性结合位点的ML-MOF。密度泛函理论(DFT)计算表明,氨基与吡啶配体可通过 π - π 堆积、氢键及静电作用强化污染物结合,吸附能显著高于母体UiO-66。优化后的材料对BPA和TC的吸附容量分别达385、428 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,优于商用活性炭。Coin等^[100]制备的PE-Ca-5%MOF生物基复合薄膜对百草枯与TC吸附良好,材料绿色可重复使用,适用于水体污染物净化。Feng等^[101]制备的 Fe_3O_4 @CMC-MOFs磁性复合材料对微/纳米塑料表现出优异吸附性能,其中 Fe_3O_4 @CMC-MIL-101- NH_2 对聚苯乙烯微塑料的吸附率可达98.0%,最大吸附量为1 923 mg/g ,循环使用5次后去除效率仍高于89.0%,可有效去除饮料中微/纳米塑料。Liang等^[102]制备了铜掺杂的Cu-ZIF-8/MWCNTs/CC复合阳极,实现了废水中2,4-二氯酚、三氯生、氯霉素3类典型有机氯污染物的吸附-电催化协同去除。

尽管上述MOFs基吸附材料在污染物富集方面展现出良好潜力,但从现有研究的深度与实用性角度分析,仍存在若干共性问题亟待解决。首先,吸附机理多停留于定性阐释,缺乏定量分析支撑,不管是基于PE-Ca-5%MOF复合薄膜提出的配位与 π - π 作用协同作用,还是基于 Fe_3O_4 @CMC-MIL-101- NH_2 报道的共价与非共价作用协同效应,均未对相互作用的贡献比例进行定量解析,难以形成系统、深入的机理体系。其次,材料长期稳定性表征存在明显欠缺,PE-Ca-5%MOF仅以“可重复使用”简单描述循环性能,未验证循环过程中MOF颗粒是否从基底脱落, Fe_3O_4 @CMC-MIL-101- NH_2 虽给出循环效率数据,却未关注MOF晶体结构在多次使用后的完整性,无法排除晶体坍塌、官能团流失对吸附性能的影响,难以支撑材料的长期实际应用需求。最后,实际环境适配性不足,与真实水体治理场景存在差异, Fe_3O_4 @CMC-MIL-101- NH_2 采用酸性条件实现微塑料脱附,但未提及酸性废液的后处理方式,易造成二次污染;包括Zr基MOF-808在内的研究,均以单一污染物为目标,未涉及复杂水体中多组分共存的竞争吸附行为,与真实应用场景存在明显差距。

4.2 光催化降解

光催化技术可直接利用太阳能实现污染物深度矿化, 具有绿色、节能、高效等优势, 在新兴污染物治理中应用广泛。例如, Hazarika 等^[103]构建的 $g\text{-C}_3\text{N}_5/\text{Co}_3\text{O}_4/\text{ZIF-67}$ 三元纳米复合材料, 在可见光下 90 min 内对替硝唑(TNZ)降解效率达 98.35%, 循环 5 次后仍保持 76.47% 的活性, 具有良好稳定性与生物安全性。Wang 等^[104]合成了 13 种铁基 MOFs 材料, 其中氨基胍功能化 Fe-MOF-NH_2 的可见光催化性能最优, 依靠氨基与铁中心的协同作用, 可实现高效光生电荷分离与抗生素吸附活化, 可见光下 100 min 内抗生素降解效率达 97%。Zhu 等^[105]制备的 MOF 衍生 Fe-ZnO/CdS Z 型异质结光催化剂, 有效提升了载流子分离效率, 120 min 内对环丙沙星(CIP)的降解效率达 90.0%, 在复杂水体中稳定性良好。Dixit 等^[106]将 $\text{TiO}_2/\text{HKUST-1}$ 固定于玻璃珠表面, 构建可回收复合光催化剂, 基于电荷-载流子分离增强和界面协同效应, 紫外光下 45 min 内对环丙沙星的降解率达 98%, 循环使用 5 次后活性无明显下降, 金属离子浸出量低、环境安全性高。Chen 等^[107]制备的 GdCo-MOF/BiOBr-55 复合材料, 可见光下 60 min 内对诺氟沙星的降解效率达 94.72%。Zhu 等^[108]采用水热法合成锌基 MOF 光催化剂, 可见光下对 TC 的去除率可达 87.5%。Sun 等^[109]构建的 $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{MIL-101}$ 复合体系实现了对四环素类抗生素的灵敏检测与高效降解一体化。Wan 等^[110]制备的 $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Ni-MOF-74}$ Z 型异质结材料, 可见光下 120 min 对 TC 的降解效率达 85.1%, 循环使用后仍保持 75% 以上活性。Subhadarshini 等^[111]构建的 $\text{Bi}_2\text{S}_3/\text{ZIF-8}$ 复合材料, 可见光下 90 min 内对多西环素的降解效率达 81.43%。Khan 等^[112]制备的 FeCuMn 三金属改性 PCN-250, 可利用多金属协同效应实现聚苯乙烯、聚丙烯微塑料的高效光催化降解, 8 h 内的降解效率分别达 91.2% 与 97.0%, 循环 5 次后仍保持 78.6% 的催化活性。Febrian 等^[113]以 ZIF-8 为前驱体制备 ZnO/C 与 $\text{ZnO/TiO}_2/\text{C}$ 光催化剂, 紫外光照下 $\text{ZnO/TiO}_2/\text{C}$ 性能最优, 60 min 可完全降解 BPA, 优于 ZnO/C (85%~90%)。

从应用转化与机理深化的双重维度来看, 上述光催化降解相关研究虽取得显著进展, 但仍需进一步系统完善。在机理解析层面, 目前相关研究的机理阐释多依赖常规表征手段, 例如 GdCo-MOF/BiOBr-55 的 Z 型异质结判定、 $\text{Bi}_2\text{S}_3/\text{ZIF-8}$ 活性氧反应路径的描述, 缺乏直接证据支撑; 若能引入原位表征技术结合 DFT 计算, 深入揭示电荷转移路径、活性位点作用机制及活性氧生成本质, 可大幅提升机理解析的说服力。在实际水体适应性方面, MOF 衍生 Fe-ZnO/CdS 材料注重复杂水体稳定性、 $\text{TiO}_2/\text{HKUST-1}/\text{玻璃珠}$ 复合材料关注金属离子浸出问题, 但 $g\text{-C}_3\text{N}_5/\text{Co}_3\text{O}_4/\text{ZIF-67}$ 、氨基胍功能化 Fe-MOF-NH_2 等多数研究仍以去离子水为反应体系, 对天然水体中常见的无机离子干扰缺乏系统考察, 也未深入探究实际水体中腐殖酸等天然有机物的影响。在活性氧物种研究层面, FeCuMn 三金属改性 PCN-250 仅通过表征定性证实多种活性氧物种的存在, 未对各活性氧物种的降解贡献进行定量分析, 难以明确主导活性物种及各物种间的协同作用关系, 不利于材料构-效关系的建立与催化性能的精准优化。上述问题的系统解决, 不仅能深化光催化降解的科学理论认知, 更能推动光催化材料从实验室研究走向实际水体治理应用, 显著提升光催化体系的实际应用价值与科学研究深度。

4.3 类芬顿催化降解

芬顿及类芬顿反应可产生高氧化还原电位的活性氧物种, 实现难降解污染物的深度矿化。传统均相芬顿技术面临 pH 值适用范围窄、铁泥产量大、过氧化氢(H_2O_2)利用率低等瓶颈。MOFs 因其结构可调、金属节点可设计、孔道限域效应等特性, 可为构建高效非均相类芬顿催化剂提供新思路。近年来, 研究者围绕反应速率、催化剂稳定性及氧化剂利用效率 3 个核心问题取得了重要进展。例如, Chen 等^[114]构建的 $\text{KNbO}_3/\text{ZIF-67}(\text{Co})$ 异质结, 通过压电极化工程强化界面 Co-O-Nb 键, 实现了过一硫酸盐(PMS)高效活化, 可在 1 min 内完全降解 TC, 具有高选择性、高稳定性与低生态毒性。Bose 等^[115]制备了镍修饰的 $\text{ZIF-67}(\text{Co})$ MOF 衍生双金属催化剂 NiCo/C , 在微波辅助过硫酸盐活化体系中, 优化条件下 2 min 内 TC 的降解效率可达约 97.59%。Tang 等^[116]以不同 Co/Cu 比例的双金属 MOF 为前驱体, 经一步热解制备出 Co-Cu -碳复合纳米催化剂 $\text{Co}_x\text{Cu}_{10-x}\text{-cnp}$, 其中 Co/Cu 比为 6/4 的催化剂性能最优, 60 min 内可去除 98% 的氯霉素(CAP), 速率常数达 0.13 min^{-1} , 矿化率为 62.5%。Chen 等^[117]通过调控 MOF 前驱体制备单原子 Fe@C-700 催化剂, 可高效活化 PMS, 实现左氧氟沙星、磺胺甲噁唑、TC、BPA 和布洛芬(IBP)等多种污染物快速降解, 广谱性与实用性突出。Yang 等^[118]基于 ZIF-67 制备蛋黄壳型 Cu-Co/

C@mSiO₂催化剂,对4种喹诺酮类抗生素实现了100%降解,实际水体中去除率高于95%。Zhang等^[119]制备的Zn/Co双金属MOF可高效活化PMS,90 min内乙酰氨基(ACE)降解率达96.93%,且在实际水体中仍保持95%以上去除效率。Wei等^[120]通过界面生长-重组策略合成了蛋黄-壳型MOF-on-MOF杂化材料(O-YSNs),使用单宁酸对该催化剂进行改性以提升分散性,并通过聚乙烯醇和戊二醛的界面交联将其固定在聚偏氟乙烯膜上,制备出一种新型TA@O-YSNs/聚偏氟乙烯催化膜,用于高效降解抗生素(图7)。在O-YSNs/PMS/可见光系统中,最优膜对盐酸四环素、环丙沙星、土霉素和头孢曲松钠的去除率分别为98.45%、87.60%、98.65%和94.30%,经6次循环实验后,盐酸四环素的降解效率仍保持在90%以上,表现出优异的稳定性。自由基清除实验和电子顺磁共振(EPR)分析揭示了降解过程中多种活性物种(O₂⁻、·OH、SO₄⁻和¹O₂)和空穴(h⁺)的协同作用机制。Li等^[121]针对高效、环境友好型非均相催化剂的设计挑战,成功开发了一种新型磁性三金属氧化物异质结构催化剂(FeMnO@Sn),该物质由Fe₂O₃/Fe₃O₄/Mn₃O₄/SnO₂构成,其独特的异质结构不仅产生了丰富的Fe²⁺和Mn²⁺活性位点,且SnO₂的引入促进了吸附态PMS中O—O键的断裂。多种金属氧化物间的协同作用显著提升了PMS的活化效率,从而实现了BPA等持久性有机污染物的快速高效降解。尽管类芬顿反应已成为一种极具前景的水净化技术,但在传统H₂O₂型类芬顿体系中,H₂O₂在生成羟基自由基(·OH)过程中存在的电子短缺和不稳定性仍是核心挑战。基于此,Duan等^[122]成功在MOF-253中构建了联吡啶铁单原子(BPY-Fe),即MOF-253-Fe。该单原子在类芬顿反应中通过分子内电子转移生成具有π缺电子特性的联吡啶有机自由基(·BPY⁺),·BPY⁺与Fe位点协同作用,使MOF-253-Fe能够从污染物获取电子并持续供给过氧化氢生成·OH。这种单向电子传输避免了过氧化氢的电子损失,大幅提升了其利用效率:降解BPA、对氯苯酚、苯酚和TC时,H₂O₂与污染物的摩尔比分别低至34.20、19.28、14.11和33.33,远低于传统类芬顿反应的100~500。此外,MOF-253-Fe在10次循环中,对BPA的降解效率仍保持在90%以上。

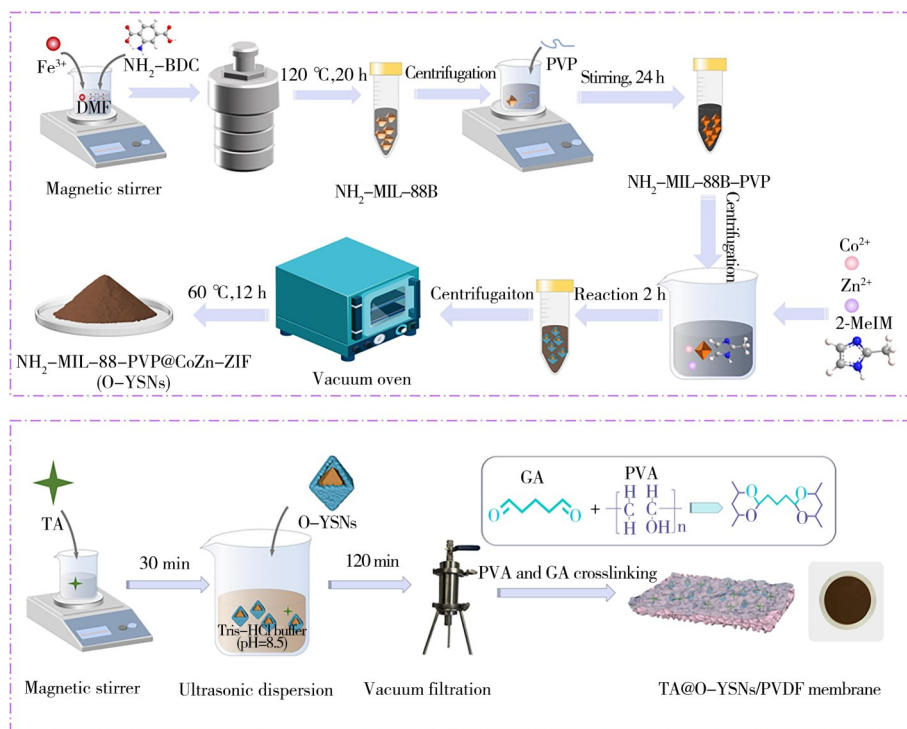


图7 O-YSNs催化剂的合成和TA@O-YSNs/PVDF催化膜的制备流程图^[120]

Fig. 7 Synthesis of O-YSN catalyst and preparation flow chart of TA@O-YSNs/PVDF catalytic membrane^[120]

尽管上述MOFs基催化剂在活化PMS降解新兴污染物过程中,表现出优异的降解效率、宽pH值适用范围及良好的循环稳定性,但现有研究仍存在不足。首先,部分研究仅依靠自由基猝灭实验判定¹O₂为主导活性物种,并未明确O₂⁻经氧化复合、歧化反应生成¹O₂的具体转化路径;在电子转移主导的非自由基体系中,催化剂表面活化络合物与有机污染物之间的界面电子传递机制不清晰。其次,多金属共掺杂、异质结协同活化的内在本质阐释较为模糊:例如Zn/Co基MOF中Zn对局域电子结构的调控机

制、Fe-Mn-Sn 三金属异质结中 Sn^{4+} 充当电子传导介质的跃迁路径, 现有研究多仅依靠 XPS 价态偏移推测金属氧化还原循环, 缺乏直接实验证据和原位表征对反应中间态、界面作用过程的实时动态追踪。此外, 实际水体基质对 PMS 活化路径的影响被忽视, 实际水体中的离子对活性物种具有猝灭作用, 但已有研究未分析这些离子如何改变活性物种分布及降解路径, 导致机理结论的实际参考价值受限。

5 结论与展望

本文系统综述了 MOFs 材料在新兴污染物分析检测与去除领域的最新研究进展。梳理了新兴污染物的定义、分类、环境风险及管控现状, 阐述了 MOFs 的典型合成方法与分类体系, 重点总结了功能化 MOFs 在新兴污染物高灵敏检测与高效去除方面的应用进展、作用机理与性能优势。

在分析检测方面: MOFs 凭借高比表面积、可调孔结构、丰富活性位点及易功能化等特点, 可作为高效吸附萃取材料与高灵敏传感单元, 有效提升复杂基质中痕量污染物的富集效率与选择性检测, 与荧光、电化学、比色、适体传感及微流控分析等多种检测技术联用, 实现环境、食品及生物样品中新兴污染物的快速、灵敏、精准检测。在去除方面: MOFs 及其衍生材料可作为吸附剂、光催化剂及高级氧化反应催化剂, 通过吸附富集、光催化降解、过硫酸盐活化、类芬顿反应等途径, 实现对难降解新兴污染物的高效去除与深度矿化。总体而言, MOFs 材料为新兴污染物的高效检测与绿色治理提供了新型功能材料与可靠技术路径。

未来研究可重点聚焦以下方向: (1) 提升材料的环境稳定性与实用性。针对部分 MOFs 在水体、宽 pH 值范围或存在竞争性离子条件下稳定性不足的问题, 需进一步通过配体设计、后修饰、构建复合材料等策略, 增强其稳定性和机械强度, 以满足复杂条件应用的需求。(2) 增强复杂基质的抗干扰能力。加强 MOFs 材料在实际环境水样、复杂食品基质及生物样品中的性能验证, 开发亲水化修饰、尺寸排阻、防污涂层等有效屏蔽策略, 增强复杂介质中的识别选择性、信号可靠性及结构稳定性。(3) 深化机理研究与定量解析。结合原位光谱和 DFT 计算动态追踪主客体相互作用、电荷转移路径及活性物种的生成与转化过程, 定量区分不同作用力或活性物种的贡献权重。(4) 发展多功能集成与智能化材料或器件。探索设计 MOFs 基复合材料或器件(如便携式传感滤膜), 实现污染物检测-捕获-降解联动。

综上, 随着材料设计、合成方法、功能改性及机理研究技术的不断发展, 高性能、高稳定、适应复杂体系的新型功能化 MOFs 材料将在新兴污染物分析检测与污染控制领域展现更广阔的应用前景, 为生态环境安全与人体健康保障提供有力支撑。

参考文献:

- [1] Bayabil H K, Teshome F T, Li Y C. *Front. Environ. Sci.*, **2022**, 10(2022): 873499.
- [2] Cui H L, Gao S H, Wang H C, Zhang L Y, Luo Y, Ying G G, Sun W L, Yu Y J, Liang B, Wang A J. *Nat. Sustain.*, **2026**, 9(2): 196-206.
- [3] Xuan X Y, Chen H, Li H D, Wei C Z, Jiang Y B, Zeng S, Zhang C F, Zhang W J, Jin Y. *Desalin. Water Treat.*, **2024**, 320: 100773.
- [4] Das R, Raj D. *J. Hazard. Mater. Adv.*, **2025**, 17: 100602.
- [5] Liu L, Liu C R, Fu R Z, Nie F D, Zuo W, Tian Y, Zhang J. *Chemosphere*, **2024**, 363: 142854.
- [6] Pan Y Y, Zhu C C, Chen Y F, Ouyang C Z, Yang R Q, Zhang Q H, Jiang G B. *Environ. Sci. Technol.*, **2025**, 59(45): 24197-24211.
- [7] Jiang R. *Environment*(江谿·环境), **2023**, (8): 19-21.
- [8] Soares S F, Brenheiro J, Fateixa S, Daniel da Silva A L, Trindade T. *J. Colloid Interface Sci.*, **2025**, 700: 138587.
- [9] Chai T T, Jin Y Y, Cui F, Li Z J, Li M X, Meng S L, Yuan L L, Qiu J, Mu J D, Xiao G H, Mu X Y, Qian Y Z. *J. Hazard. Mater. Adv.*, **2024**, 474: 134813.
- [10] Ding Q Q, Zhang W M, Guo Y H, Wang J, Chen H, Zhang L. *Anal. Chem.*, **2023**, 95(14): 6098-6106.
- [11] Park S Y, Kim Y R, Lim S J, Kim J Y, Choi J D, Moon G I. *Food Sci. Biotechnol.*, **2024**, 33(6): 1467-1486.
- [12] Chen P, Wang J Q, Xue Y, Wang C M, Sun W J, Yu J W, Guo H G. *Water Res.*, **2024**, 265: 122297.
- [13] Nanda R R, Sharma J, Chand S, Addagada L, Rout P R. *Curr. Opin. Environ. Sci. Health*, **2025**, 47: 100649.
- [14] Gao X K, Wang L S, Elumalai P, Lakshminarayanan S, Zhu X Z, Wang L, Govindan R, Theerthagiri J, Parthipan P, Zhao Q, Cui J J, Choi M Y, Luo J Y. *Coord. Chem. Rev.*, **2025**, 542: 216849.
- [15] Rizzo L, Malato S, Antakyali D, Beretsou V G, Đolić M B, Gernjak W, Heath E, Ivancev Tumbas I, Karaolia P, Lado Ribeiro A R, Mascolo G, McArdell C S, Schaar H, Silva A M T, Fatta Kassinos D. *Sci. Total Environ.*, **2019**, 655: 986-1008.

- [16] Morin Crini N, Lichtfouse E, Fourmentin M, Ribeiro A R L, Noutsopoulos C, Mapelli F, Fenyvesi É, Vieira M G A, Picos Corrales L A, Moreno Pirajón J C, Giraldo L, Sohajda T, Huq M M, Soltan J, Torri G, Magureanu M, Bradu C, Crini G. *Environ. Chem. Lett.*, **2022**, 20(2): 1333–1375.
- [17] Huang P, Hou L H, Yang M Y, Xiao C, Wu Y L, Cai S J, Guo W J, Zhang M, Lu M, Lan Y Q. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2025**, 64(29): e202507002.
- [18] Li H, Ren X R, Wang Y, Zhang D, Wang Z, Wei L, Wang X L, Wang D. *J. Am. Chem. Soc.*, **2025**, 147(13): 10840–10845.
- [19] Wang W, Chen Y C, Bu X H, Feng P Y. *J. Am. Chem. Soc.*, **2025**, 147(18): 15146–15156.
- [20] Zheng D S, Xu M, Tang W Q, Gu Z Y. *Coord. Chem. Rev.*, **2026**, 549: 217380.
- [21] Gao Z, Li S Z, Tang J T, Yuan J Y, Yu G P. *Acc. Mater. Res.*, **2025**, 6(11): 1354–1367.
- [22] Malaval J, Granier M, Gerbier P, Richeter S, Clément S. *Polym. Int.*, **2025**. <https://doi.org/10.1002/pi.70042>.
- [23] Kapase S A, Jadhav S A, Peralta M E, Carlos L. *ACS Appl. Polym. Mater.*, **2025**, 7(16): 10358–10394.
- [24] Abdel Hamied M, Rajpal S, Mishra P, Kranz C, Mizaikoff B. *TrAC, Trends Anal. Chem.*, **2026**, 194: 118487.
- [25] Cheng G, Li H J, Fang J H, Wang X Q, Li J Q, Chang J F, Teng N, Wang J T. *Carbon Lett.*, **2025**, 35(2): 441–467.
- [26] Pithaksinsakul K, Chaipornchalerm P, Bureekaew S, Wattanakit C. *Small Struct.*, **2026**, 7(3): e202500596.
- [27] Yang M L, Ai S Y, Ji R R, Wu T T, Cui Z W, Huang Q, Kang L X, Li B Y, Tian D. *Sci. China: Chem.*, **2025**, 68(12): 6171–6199.
- [28] Bhadane P, Chakraborty S. *Coord. Chem. Rev.*, **2025**, 535: 216669.
- [29] Liu Y M, Pan W X, Zhang H, Geng N X, Jiang L X, Bao J A, Wu H W, Qi L. *J. Environ. Manage.*, **2026**, 397: 128363.
- [30] Xu A Y, He Y, Su B H, Gu Z F, Dai M Z, Xia Y Y, Wang S X, Yang X J, Bai H P. *Chem. Eng. J.*, **2026**, 527: 172010.
- [31] Nguyen V T, Nguyen T B, Chen C W, Bui X T, Chen W H, Doong R A, Dong C D. *Chem. Eng. J.*, **2025**, 526: 171207.
- [32] Lv C Y, Fu K X, Liu X, Xia Y J, Fang Z Y, Zhang J F, Luo J M. *Chem. Eng. J.*, **2026**, 527: 171918.
- [33] Gao Y, Jia S H, Han N N, Yan M, Zhao J S. *J. Environ. Chem. Eng.*, **2026**, 14(2): 121550.
- [34] Yue S, Zhao Z Y, Yang M X, Liu Y X, Wang P F, Xie C X, Zhan S H. *Chin. Chem. Lett.*, **2026**, 37(6): 112108.
- [35] Cao S H, Sun K M, Tang Z L, Sun Y T, Lee J M. *Chem. Rec.*, **2025**, 25(9): e202500091.
- [36] Ruan T, Li P Y, Wang H T, Li T Y, Jiang G B. *Chem. Rev.*, **2023**, 123(17): 10584–10640.
- [37] Pan Z Y, Liu Z M, Xu Z G. *J. Instrum. Anal.* (潘自宇, 刘智敏, 许志刚. 分析测试学报), **2025**, 44(1): 12–24.
- [38] Maghsodian Z, Sanati A M, Mashifana T, Sillanpää M, Feng S, Nhat T, Ramavandi B. *Antibiotics*, **2022**, 11(11): 1461.
- [39] Du C Y, Zhang Z, Yu G L, Wu H P, Chen H, Zhou L, Zhang Y, Su Y H, Tan S Y, Yang L, Song J H, Wang S T. *Chemosphere*, **2021**, 272: 129501.
- [40] Ackerman Grunfeld D, Gilbert D, Hou J, Jones A M, Lee M J, Kibbey T C G, O' Carroll D M. *Nat. Geosci.*, **2024**, 17(4): 340–346.
- [41] Li R, Adarsh N N, Lu H, Wriedt M. *Matter*, **2022**, 5(10): 3161–3193.
- [42] Koelmans A A, Mohamed Nor N H, Hermesen E, Kooi M, Mintenig S M, De France J. *Water Res.*, **2019**, 155: 410–422.
- [43] Honarmandrad Z, Kaykhani M, Gebicki J. *BMC Chem.*, **2023**, 17(1): 122.
- [44] Pironti C, Ricciardi M, Proto A, Bianco P M, Montano L, Motta O. *Water*, **2021**, 13(10): 1347.
- [45] Zahmatkesh Anbarani M, Bonyadi Z. *Chem. Eng. J. Adv.*, **2025**, 24: 100920.
- [46] Li H, Eddaoudi M, O'Keeffe M, Yaghi O M. *Nature*, **1999**, 402(6759): 276–279.
- [47] Lin J, Liu Z M, Guo Y J, Wang S L, Tao Z, Xue X D, Li R S, Feng S H, Wang L M, Liu J T, Gao H Y, Wang G, Su Y J. *Nano Today*, **2023**, 49: 101802.
- [48] Li H C, Ren S, Guo Y Y, An D Y, Nan R, Chai S N, Zheng C L, Bai B F. *Int. J. Hydrogen Energy*, **2025**, 181: 151746.
- [49] Akeremale O K, Ore O T, Bayode A A, Badamasi H, Adedeji Olusola J, Durodola S S. *Results Chem.*, **2023**, 5: 100866.
- [50] Varsha M V, Nageswaran G. *J. Electrochem. Soc.*, **2020**, 167(15): 155527.
- [51] Głowniak S, Szczęśniak B, Choma J, Jaroniec M. *Mater. Today*, **2021**, 46: 109–124.
- [52] Chen Z, Xing F, Yu P Y, Zhou Y X, Luo R, Liu M, Ritz U. *Acta Biomater.*, **2024**, 175: 27–54.
- [53] Yahia M, Lozano L A, Zamaro J M, Téllez C, Coronas J. *Sep. Purif. Technol.*, **2024**, 330: 125558.
- [54] Yan X W, Gharib M, Esrafil L, Wang S J, Liu K G, Morsali A. *Front. Chem.*, **2022**, 10(2022): 855886.
- [55] Chai C, Gao J, Zhao G, Li L, Tang Y, Wu C, Wan C. *Anal. Chim. Acta*, **2021**, 1152: 338242.
- [56] Jiang L, Lin L, Wang Z H, Ai H Y, Jia J T, Zhu G S. *J. Am. Chem. Soc.*, **2024**, 146(33): 22930–22936.
- [57] Wang Y H, Tang Y X, Guo L, Yang X, Wu S L, Yue Y, Xu C N. *Asian J. Pharm. Sci.*, **2025**, 20(1): 101017.

- [58] Gao Y, Jia S H, Zhou H Y, Chen Z Y, Yan M, Zhao J S. *Fuel Process. Technol.*, **2024**, 254: 108033.
- [59] Yang S Z, Li X, Zeng G M, Cheng M, Huang D L, Liu Y, Zhou C Y, Xiong W P, Yang Y, Wang W J, Zhang G X. *Coord. Chem. Rev.*, **2021**, 438: 213874.
- [60] Yu K, Won D, Lee W I, Ahn W S. *Korean J. Chem. Eng.*, **2021**, 38(4): 653–673.
- [61] Yan X, Lin W H. *Coord. Chem. Rev.*, **2025**, 545: 217034.
- [62] Hsueh C H, Kung C W. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2026**, 18(1): 4–18.
- [63] Kaushal S, Kaur G, Kaur J, Singh P P. *Mater. Adv.*, **2021**, 2(22): 7308–7335.
- [64] Ilango A K, Mekkat R, Jeyalakshmi V, Pervez M N, Jiang T, Chand P, Kumaran Y, Efstathiadis H, Sukalingum D, Soos M, Liang Y. *Chem. Eng. J.*, **2025**, 507: 160192.
- [65] Molavi H, Hakimian A, Shojaei A, Raeiszadeh M. *Appl. Surf. Sci.*, **2018**, 445: 424–436.
- [66] Wu P, Guo M, Zhang R W, Huang Q, Wang G, Lan Y Q. *Chem. Sci.*, **2024**, 15(43): 17781–17798.
- [67] Safy M E A, Amin M, Haikal R R, Elshazly B, Wang J, Wang Y, Wöll C, Alkordi M H. *Chem. Eur. J.*, **2020**, 26(31): 7109–7117.
- [68] Liu Y T, Chen L Y, Yang L F, Lan T H, Wang H, Hu C H, Han X, Liu Q X, Chen J F, Feng Z M, Cui X L, Fang Q R, Wang H L, Li L B, Li Y W, Xing H B, Yang S H, Zhao D, Li J P. *Green Energy Environ.*, **2024**, 9(2): 217–310.
- [69] Kabak B. *J. Mol. Struct.*, **2025**, 1322: 140348.
- [70] Xia M, Ma W C, Zhao L, Liu H B. *Luminescence*, **2025**, 40(6): e70227.
- [71] Aham E C, Ravikumar A, Zeng K, Arunjegan A, Tamilselvan G, Hu Z, Zhang Z, Zhao H. *Microchim. Acta*, **2025**, 192(3): 201.
- [72] Yuan Y, Jia H, Liu J B, Gao F, Zhu X, An Z H, Wang J. *J. Hazard. Mater.*, **2026**, 504: 141245.
- [73] Roh H, Quill T J, Chen G, Gong H X, Cho Y, Kulik H J, Bao Z, Salles A, Gumyusenge A. *ACS Nano*, **2025**, 19(6): 6332–6341.
- [74] Han Z S, Wang K Y, Huo J T, Cui W Y, Liu Z Y, Yang Y H, Liang R R, Shi W, Zhou H C. *J. Am. Chem. Soc.*, **2026**, 148(3): 3697–3702.
- [75] Zhang N, Li Y Y, Liu M Y, Hu M J, Wang H F, Ma W D, Lu M H. *J. Hazard. Mater.*, **2025**, 493: 138382.
- [76] Gao P, Hussain M Z, Gryc D, Mukherjee S, Zhou Z, Li W, Jentys A, Elsner M, Fischer R A. *Biosens. Bioelectron.*, **2025**, 286: 117598.
- [77] Liu Z Q, Gao L L, Cheng Z L, Zhang L P, Yang C L, Qiu F C, Wang L Q, Zhou Z Y. *Microchem. J.*, **2025**, 219: 116130.
- [78] Hong J, Schnell M, Zhou M, Li W. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2026**, 65(13): e23854.
- [79] Altangerel N, Ocola E J, Neuman B W, Yakovlev V V, Kuo S T, Vulupala V R, Khatua K, Zhang H, Yan X, Russell D H, Xu S, Fierke C A, Liu W R, Sokolov A V, Hemmer P R, Scully M O. *Sci. Adv.*, **2026**, 12(15): eab3917.
- [80] Huang H Z, Wang H F, Du K Y, Yu X P, Shentu X P. *Biosens. Bioelectron.*, **2025**, 279: 117393.
- [81] Yu Y Q, Hong D L, Zhu Z Y, Jiang Y L. *Food Chem.*, **2025**, 465: 142110.
- [82] An R, Li R X, Shang X, Fu C Q, Gao E Q, Yue Q. *Food Chem.*, **2025**, 490: 145080.
- [83] Zhao Y H, Li R N, Tang J Z, Liu M G, Zhang B N, Chen J, Ren S J, Ma Q, Sun Z W, Weng H B. *Food Chem.*, **2025**, 493: 145935.
- [84] Guo Y J, Li L F, Zhang M F, Xu S H, Jiang C L. *Small*, **2025**, 21(11): 2410911.
- [85] Deng M L, Mu Z D, Wu Y J, Pan Y P, Bai L J. *J. Environ. Chem. Eng.*, **2025**, 13(5): 118021.
- [86] Song Z, Zhou H N, Liu Z Z, Xia M Y, Lv Q Q, Yuan Y, Lu M H. *Microchem. J.*, **2025**, 216: 114818.
- [87] Liu D M, Jiang X H, Li X M, Zou H C, He L, Zhang Z W, Li S Q, Bian X T. *Biosens. Bioelectron.*, **2026**, 291: 118017.
- [88] Ma H M, Yang R H, Xu Z X, Yang Q, Hu X X, Zhang Y Y, Zeng T, Yang J, Li C L, Yang N J. *Food Chem.*, **2025**, 496: 146764.
- [89] Wang T S, Ding L J, Zhang M, Wang D P, Zhu W R, Wang K. *Food Chem.*, **2026**, 498: 147255.
- [90] Yu M, Xie C, Chen D, Xu Q T, Li J, Wang H W, Mei S R. *Talanta*, **2026**, 298: 128950.
- [91] Dey B, Niaz A, Khan H, Hossain S K S, Yang D J, Choudhury A. *Inorg. Chem. Commun.*, **2026**, 187: 116388.
- [92] Chen T Y, He M, Chen B B, Hu B. *Talanta*, **2025**, 281: 126859.
- [93] Li H, Huang Z, Song X, Zhao L, Ding C. *Anal. Chem.*, **2025**, 97(41): 22995–23002.
- [94] Briš A, Jašák J, Turel I, Roithová J. *Dalton Trans.*, **2019**, 48(8): 2626–2634.
- [95] Saxena S, Lu Y, Zhang Z, Li Y, Soleymani L, Hoare T. *Chem. Eng. J.*, **2024**, 495: 153522.
- [96] Chen Y X, Jiang Y S, Li W P, Su W, Xing Y, Yu S Y, Li W X, Guo Y, Zhang D, Wang S Q, Qian Z S, Hong C, Jiang B. *Inorganics*, **2025**, 13(10): 324.
- [97] Das P, Chatterjee A, Bose S, Mondal S, Gautam M K, Das R. *Environ. Funct. Mater.*, **2026**. <https://doi.org/10.1016/j.efmat.2026.01.001>.

- [98] Jin P N, Zhu W J, Zheng Y, Wang C, Li F, Lin Y Q, Zhang X, Wang J J, Fan J. *Langmuir*, **2025**, 41(48): 32612–32621.
- [99] Hoa V T. *RSC Sustainability*, **2026**, 4(3): 1421–1435.
- [100] Coin F, Iacovone C, Cerveny S. *Polymers*, **2026**, 18(2): 171.
- [101] Feng J, Dong Y Z, Li H, Tu J, Chen Y P. *J. Hazard. Mater.*, **2025**, 495: 139040.
- [102] Liang X Y, Zhang W H, Yao X L, Feng Z Y, Bu Q W, Gong W W, Wang W, Wang C, Sun Y X. *J. Environ. Chem. Eng.*, **2025**, 13(6): 119774.
- [103] Hazarika B, Ghosh B N, Ahmaruzzaman M. *J. Environ. Chem. Eng.*, **2026**, 14(2): 121911.
- [104] Wang H L, Cui H S, Lan Y, Yang L P, Zhao J H, Ye Y T, Zhang W J, Deng R J, Liu H J, Lv Y, Yang H. *J. Colloid Interface Sci.*, **2025**, 695: 137797.
- [105] Zhu X, Li Z K, Liang B L, Xing S J, He H B, Li X L, Liang S X. *Appl. Surf. Sci.*, **2026**, 730: 166377.
- [106] Dixit D, Sarkar S, Boving T. *Water*, **2026**, 18(5): 545.
- [107] Chen J, Xue Y Z, Wang H, Chen K Y, Wei J M, Fu L S, Ferreira R A S, Yang T H. *J. Rare Earths*, **2026**. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2026.02.021>.
- [108] Zhu Z X, Qu J Y, Lin J H, Xu X L, Chen Y B, Xie K L, Zheng H. *Mater. Res. Bull.*, **2026**, 194: 113719.
- [109] Sun C Y, Yu Y, Lu Y Q, Wang F C, Liu J F, Zhai W Y, Gao X. *ACS Appl. Nano Mater.*, **2026**, 9(8): 3740–3751.
- [110] Wan H H, Jin M X, Liu C L, Zhou D L, Wei G Q, Yuan Z W, Shao M, Wan Y S. *ChemistrySelect*, **2026**, 11(8): e06685.
- [111] Subhadarshini A, Behera S A, Parwin N, Subudhi E, Achary P G R, Nanda B. *BMC Chem.*, **2026**, 20(1): 63.
- [112] Khan M H, Zuhra Z, Hussain W, Zhaowei Z, Ali S. *Sep. Purif. Technol.*, **2026**, 389: 136842.
- [113] Febrian R, Meirinawati H, Septiani N L W, Wulan D R, Rosmalina R T, Nugraha W C, Yudasari N, Yulianto B, Qadafi M. *Chem. Eng. Res. Des.*, **2026**, 227: 894–907.
- [114] Chen Z Y, Zhao C, Ma R X, Yao Z N, Guo Z H, Zhao Z X, Zheng Y F, Fu H F. *Adv. Funct. Mater.*, **2026**, 36(12): e16474.
- [115] Bose S, Kumar M. *Sep. Purif. Technol.*, **2025**, 364: 132371.
- [116] Tang H, Gu A T, Xu X Q, Liu P, Chen K H, Zhou Y M, Gong C H, Wang P, Yang Y. *J. Solid State Chem.*, **2026**, 358: 125892.
- [117] Chen X D, Dai W T, Luo C L, Guo R Q, Peng G L, Wei S Q, Jiang Z M. *Sep. Purif. Technol.*, **2026**, 382: 136052.
- [118] Yang H Q, Liu J, Zhang B T, Zhao J J, Yan Z H, Chen Z. *Appl. Catal. B*, **2025**, 377: 125483.
- [119] Zhang M, Li J C, Wu L J, Liang T, Liu J, Wang L. *Sep. Purif. Technol.*, **2026**, 392: 137127.
- [120] Wei F F, Xin M X, Kang Z Q, Chen X, He H M, Ren K, Song R T, Wang H Y, Zeng G Y. *Sep. Purif. Technol.*, **2025**, 378: 134743.
- [121] Li A Q, Yang Y, Bai X N, Bao H B, He M, Zeng X Z, Wang Y J, Li F, Qin S J, Yang W J, Li X M. *J. Colloid Interface Sci.*, **2025**, 679: 232–244.
- [122] Duan L M, Jiang H H, Cai B R, Wang J L, Wu W H, Lin D H, Yang K. *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, 35(52): e09337.

(责任编辑: 盛文彦)