

UiO-66基材料在水处理领域的应用进展

辛鹏飞

哈富环境科技(上海)有限公司, 上海

收稿日期: 2026年8月24日; 录用日期: 2026年9月23日; 发布日期: 2026年9月30日

摘要

UiO-66是一类以锆氧团簇和对苯二甲酸构筑的金属有机框架材料, 因其优异的水热稳定性、化学稳定性和结构可调性在水处理领域受到广泛关注。本文系统综述了UiO-66的结构特性、合成方法及其在吸附、光催化降解、荧光传感和膜分离等方面的应用进展。针对原始UiO-66在光响应范围窄、孔径受限和官能团单一等方面的不足, 重点总结了配体功能化修饰、缺陷工程和复合结构构建三种主要改性策略, 并通过典型案例展示了这些策略在提升污染物去除效率、选择性和材料可操作性方面的成效。最后, 文章指出现有研究仍以实验室模拟为主, 未来需在协同机制解析、绿色规模化制备、真实水体长期验证及技术经济性评估等方面持续突破, 以推动UiO-66基材料向实际水处理工程应用转化。

关键词

UiO-66, 金属有机框架, 水处理, 吸附, 光催化, 膜分离, 荧光传感

Progress in the Application of UiO-66-Based Materials in the Field of Water Treatment

Pengfei Xin

Hafu Environmental Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai

Received: August 24, 2026; accepted: September 23, 2026; published: September 30, 2026

Abstract

UiO-66 is a zirconium-based metal-organic framework (MOF) constructed from zirconium-oxo clusters and terephthalic acid ligands. Owing to its excellent hydrothermal stability, chemical stability, and structural tunability, UiO-66 has attracted extensive attention in the field of water treatment. This review systematically summarizes the structural characteristics, synthesis strategies, and recent advances of UiO-66 in various water treatment applications, including adsorption, photocatalytic degradation, fluorescence sensing, and membrane separation. To address the limitations of pristine UiO-

66, such as limited light responsiveness, restricted pore accessibility, and insufficient functional diversity, three major modification strategies, including ligand functionalization, defect engineering, and composite construction, are highlighted. Representative studies are discussed to demonstrate how these strategies enhance pollutant removal efficiency, selectivity, and practical applicability of UiO-66-based materials. Finally, current challenges are discussed, including the predominance of laboratory-scale investigations, and future perspectives are proposed regarding synergistic mechanism elucidation, green and scalable synthesis, long-term validation in real water matrices, and techno-economic assessment, aiming to promote the practical implementation of UiO-66-based materials in water treatment applications.

Keywords

UiO-66, Metal-Organic Frameworks, Water Treatment, Adsorption, Photocatalysis, Membrane Separation, Fluorescence Sensing

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水资源安全是人类社会可持续发展的基础保障。伴随人口增长、工业化与城镇化进程的加快,天然水体中重金属离子、有机染料、药物及个人护理品、农药、酚类化合物等污染物检出愈发频繁。这些污染物即便处于低浓度乃至痕量水平,其高毒性与潜在致癌性仍会对生态系统和人类健康造成长期威胁。吸附、光催化降解、膜分离是目前应用最广的三类处理技术,其去除效能很大程度上取决于所用材料的性能[1]。然而活性炭、沸石、金属氧化物等传统材料普遍存在孔道结构不可控、活性位点有限、难以针对特定污染物精准设计等局限,制约了处理技术的进一步突破,也促使研究者将目光转向结构可设计性更强的新型多孔材料[2]。

金属有机框架材料(MOFs)是由金属离子/团簇与有机配体经配位自组装形成的晶态多孔材料,相较于结构模糊、孔道不规则的传统材料,其有机-无机杂化结构可通过金属节点与配体的选择实现按需设计,孔径、比表面积及表面化学性质均可精细调控,弥补了传统材料结构固定、功能单一的短板,使MOFs在污染物吸附富集、光催化降解及膜分离等方向展现出天然优势[3]-[5]。然而MOFs自身也并非完美,多数体系所依赖的金属-配体配位键并不耐水,酸碱环境或长期水浸泡极易引发配体水解与骨架坍塌,这一稳定性瓶颈制约着MOFs从实验室走向实际水处理工程的进程[6]。在此背景下锆基MOF材料UiO-66凭借其在众多MOF体系中都属罕见的水稳定性与化学稳定性脱颖而出,成为该领域的研究热点。UiO-66逐渐发展为环境催化、吸附分离、膜过滤及荧光传感检测等水处理相关方向应用潜力最突出的MOF材料体系之一。

2. UiO-66 的结构与性质

2.1. 结构特性

UiO-66是由锆氧团簇 $[Zr_6O_4(OH)_4]$ 和对苯二甲酸(H_2BDC)配体组装而成的一种典型锆基MOF,如图1所示,最早由Cavka等于2008年合成[7]。在其结构中每个锆原子周围连接着8个氧原子,其中一部分来自锆氧团簇本身,另一部分来自配体上的羧酸基团;而每个锆氧团簇又可以同时连接12个配体分子,

形成配位数很高的三维网络结构[8]-[10]。从整体形貌来看, UiO-66 的晶体结构呈现规则的面心立方排列, 内部具有大小不同的笼状孔道, 属于典型的微孔材料, 理论比表面积可达 $1160 \text{ m}^2/\text{g}$ 左右, 具有较高的孔隙率[11]。正是这种高配位数的锆氧团簇结构, 赋予了 UiO-66 十分突出的稳定性。相比于大多数依赖低配位金属离子的 MOFs, UiO-66 中 Zr-O 键的键合更加牢固, 水分子等小分子很难破坏其骨架结构。因此 UiO-66 即使长期浸泡在水中或处于强酸、强碱等苛刻环境下, 也能较好地维持结构完整; 同时其热稳定性也较为出色, 在几百摄氏度的高温下依然可以保持骨架不坍塌。这种在同类 MOF 材料中较为少见的综合稳定性, 也是 UiO-66 能够被广泛应用于水处理等实际场景的重要原因。

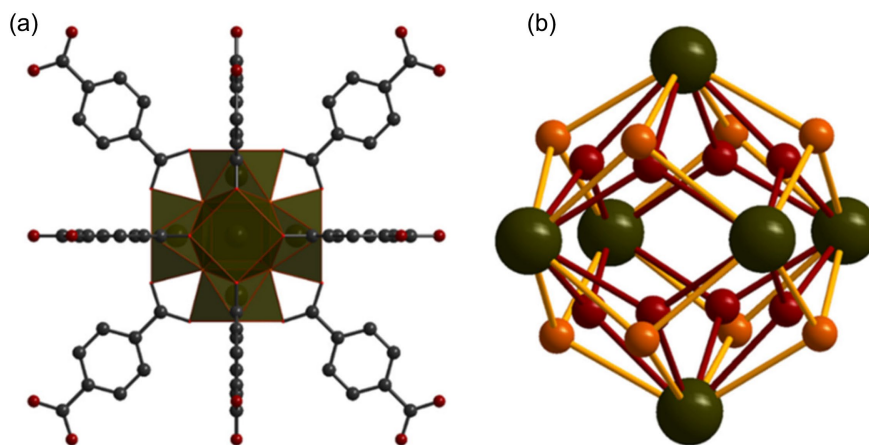


Figure 1. Schematic representation of the UiO-66 structure based on crystallographic data (COD ID: 4512072). (a) Dark green polyhedra represent Zr-O metal-oxygen clusters, gray spheres represent carbon atoms, and dark red spheres represent oxygen atoms; (b) Schematic illustration of the $\text{Zr}_6\text{O}_4(\text{OH})_4$ secondary building unit (SBU), showing the two oxygen coordination forms of $\mu_3\text{-O}$ and $\mu_3\text{-OH}$ species. The structure was generated using Diamond 4.6.5 [12]

图 1. 基于晶体学数据(COD ID: 4512072)的 UiO-66 结构示意图。(a) 深绿色多面体表示 Zr-O 金属氧簇, 灰色球表示碳原子, 深红色球表示氧原子; (b) $\text{Zr}_6\text{O}_4(\text{OH})_4$ 次级结构单元示意图, 其中展示了 $\mu_3\text{-O}$ 和 $\mu_3\text{-OH}$ 两种氧配位形式。结构模型由 Diamond 4.6.5 软件绘制[12]

2.2. 合成方法

UiO-66 制备方法如图 2 所示, 其中最经典当属溶剂热法, 即将锆源(如 ZrCl_4 、 ZrOCl_2 等)与对苯二甲酸配体溶解于 N,N-二甲基甲酰胺(DMF)等有机溶剂中, 在一定温度下通过配位反应形成 UiO-66 晶体[13]。该方法具有设备要求低、操作简单以及产物结晶度高等优点, 是目前实验室合成 UiO-66 最常用的方法[7]。通过引入乙酸、苯甲酸等调节剂, 可以调控金属节点与配体之间的配位过程, 进而影响晶体成核速率、粒径大小以及缺陷结构, 例如 Chen 等[14]首次报道 UiO-66 材料时, 即采用 ZrCl_4 与对苯二甲酸在 DMF 体系中的溶剂热反应成功构筑了具有优异稳定性的锆基 MOF 材料, 并证明其在水、酸和碱环境中均能够保持较好的结构稳定性, 为 UiO-66 后续环境领域应用奠定了基础。然而传统溶剂热法通常需要较长反应时间, 并且大量依赖有机溶剂, 在规模化生产过程中仍存在能耗较高和环境负荷较大的问题。

为提高合成效率并降低能源消耗, 研究者进一步发展了多种快速和绿色合成策略。其中微波辅助合成法利用微波辐射产生快速均匀加热, 可显著促进金属离子与有机配体之间的配位反应, 大幅缩短 UiO-66 晶体形成时间。例如 Taddei 等采用微波辅助方法制备 UiO-66, 通过优化微波功率、反应温度和时间等条件, 实现了 UiO-66 的快速合成与放大制备[15]。研究发现微波辅助制备的 UiO-66 在晶体结构、粒径以及缺陷程度方面与传统加热方法制备样品保持相近水平, 同时显著提高了合成效率, 体现了该方法在规模化制备中的应用潜力。机械化学合成法是一种更加绿色的制备方式, 通常无需大量有机溶剂而是

利用球磨过程中产生的机械力促进金属盐与有机配体之间的配位反应, 具有反应时间短、溶剂消耗低和环境友好等特点。Karadeniz 等[16]利用水辅助机械化学方法制备了 UiO 系列锆基 MOF 材料, 在降低溶剂使用量的同时获得了具有良好结晶性和孔结构的 UiO-66 材料, 证明了机械化学方法在绿色制备 UiO-66 中的可行性。此外, 随着 MOF 材料规模化应用需求的增加, 连续流合成技术也逐渐受到关注。相比传统间歇式反应, 连续流体系统能够更加精准地控制温度、停留时间和反应条件, 有利于提高产品质量稳定性并实现连续化生产, 为 UiO-66 等 MOF 材料的大规模生产提供了新的技术路线[17]-[20]。

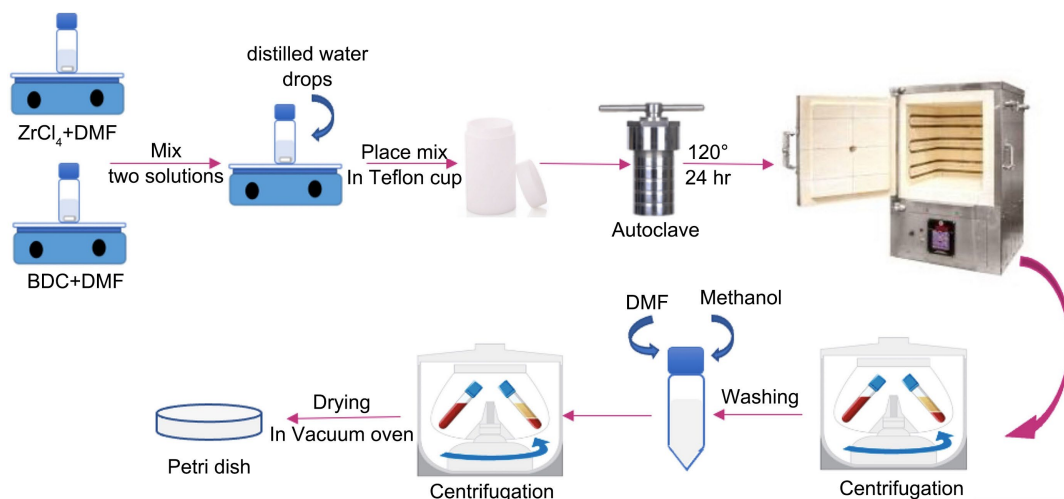


Figure 2. Synthesis methods of UiO-66 [13]

图 2. UiO-66 的合成方法[13]

2.3. 原始 UiO-66 的局限性

尽管 UiO-66 具有优异的稳定性和规整的孔道结构, 但未经修饰的原始 UiO-66 在实际应用中仍存在一些短板。首先是禁带宽度较宽的问题, UiO-66 的带隙接近 4 eV 只能被紫外光激发, 可见光响应能力较弱, 光生电子-空穴对也容易快速复合导致其光催化活性并不理想, 难以满足对可见光利用率要求较高的实际应用场景[21]。其次 UiO-66 固有的孔道属于微孔范畴, 孔径仅有几个埃, 这在一定程度上限制了体积较大的污染物分子进入孔道内部与活性位点接触, 导致传质速率较慢、吸附容量受限[22]。此外, 原始 UiO-66 表面官能团单一, 缺乏针对特定污染物的选择性识别位点, 难以满足复杂水体中对特定污染物精准去除的需求[23]。正是这些局限性的存在推动了研究者围绕 UiO-66 展开一系列结构优化与功能改性工作。

3. UiO-66 的优化改性方法

3.1. 配体功能化修饰

配体功能化修饰是改善 UiO-66 性能最直接的手段之一, 其基本思路是在不改变原有拓扑结构的前提下, 用带有不同官能团的对苯二甲酸衍生物替换原始的 BDC 配体, 比如引入氨基(-NH₂)、羟基(-OH)、硝基(-NO₂)、磺酸基(-SO₃H)等基团。这些官能团的引入方式一种是在合成之前就选用带有目标官能团的配体, 直接参与配位反应; 而另一种则是先合成出原始 UiO-66 再通过后合成修饰的方法, 将功能分子接枝到骨架表面或孔道内部[24] [25]。

以氨基修饰为例, Shen 等[26]通过在 UiO-66 有机配体中引入-NH₂ 基团, 系统研究了不同取代基对

UiO-66 电子结构和光学性质的影响, 如图 3 所示。研究发现, 氨基作为电子给体能够提高配体电子云密度, 使 UiO-66 的吸收边发生明显红移, 并将禁带宽度由约 3.8 eV 降低至约 2.9 eV 从而拓宽材料对可见光的响应范围。相比未修饰 UiO-66 表现出更优的光生载流子产生能力和光催化活性。除调节光学性质外, 其中巯基(-SH)作为典型的软碱可与汞离子等软酸金属离子发生强烈特异性螯合, 常用于构建高选择性重金属吸附材料。研究者通过后合成功能化制备的 UiO-66-A.T. 吸附剂, 对 Hg^{2+} 最大吸附容量达 691 mg/g, 在含 10 种重金属离子的混合溶液中选择性高达 99.4% [27]。研究者还将羧基引入 UiO-66 骨架, 制备了单羧基与双羧基功能化衍生物 UiO-66-COOH 和 UiO-66-2COOH, 发现羧基的引入显著降低了材料表面电荷, 使其在低 pH 条件下仍能保持较高的吸附能力; 在 pH = 3 时, UiO-66-2COOH 对 U(VI) 和 Eu(III) 的吸附容量分别超过 100 mg/g 和 60 mg/g, 而原始 UiO-66 在同等条件下几乎不发生吸附。该结果表明羧基修饰主要通过调控材料表面电荷分布, 改善其在酸性水体中对金属阳离子的静电吸附能力, 这为处理低 pH 放射性废水提供了新的思路[28]。

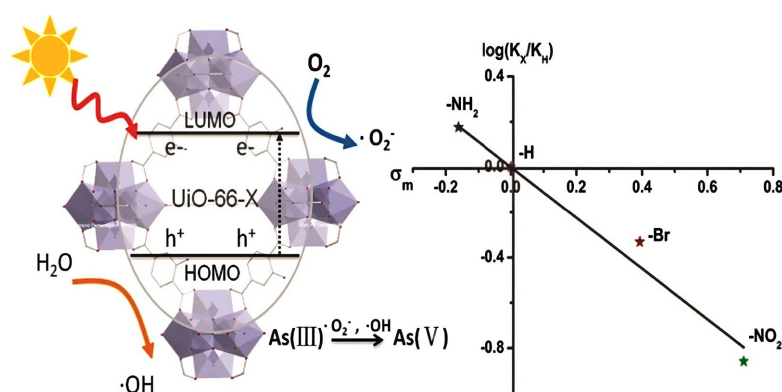


Figure 3. The effect of ligand substituent electronic properties on the photocatalytic activity of UiO-66: the linear relationship between the reaction rate corresponding to different substituents and the Hammett constants [26]

图 3. 配体取代基电子效应对 UiO-66 光催化性能的影响: 不同取代基对应的反应速率与 Hammett 常数之间的线性关系[26]

总体来看, 配体功能化修饰操作简便、官能团选择灵活, 能够在保留 UiO-66 原有拓扑结构的前提下针对性调控其光学性质与表面化学环境, 是目前应用最为成熟的改性手段之一。但该策略也存在局限: 功能化位点通常集中于孔道表面或配体侧链, 对材料本征孔径和比表面积改善有限; 同时功能化配体的引入会不同程度增加合成成本, 部分官能团(如氨基)在强酸、强碱等苛刻环境下的长期稳定性仍有待系统验证。

3.2. 缺陷工程

缺陷工程是指通过人为手段在 UiO-66 骨架中引入配体缺失或金属团簇缺失, 从而破坏原本规整的周期性结构, 形成具有特殊性质的缺陷位点。研究表明, UiO-66 骨架对配体缺失具有较强的耐受性, 即使每个锆氧团簇周围缺失相当比例的配体, 材料仍能维持基本骨架不坍塌, 这为通过缺陷调控孔道结构和活性位点提供了较大的操作空间[29] [30]。制造缺陷的方法大致可分为两类: 一类是在合成过程中直接引入, 比如加入甲酸、乙酸、三氟乙酸等单羧酸调节剂与配体竞争配位; 另一类则是在材料合成完成后进行后处理, 例如通过金属离子部分替换等方式选择性去除部分配体或金属节点。缺陷的产生通常可以在原本致密的微孔骨架中打开更大的介孔甚至大孔, 提高传质效率; 也能暴露出更多不饱和配位位点, 这些位点往往具有更强的化学活性, 可作为吸附或催化反应的活性中心[2]。

在吸附方向, Zheng 等[31]以三氟乙酸(TFA)为调节剂制备了缺陷丰富的 UiO-66-18, 如图 4 所示, 调节剂的引入促使材料形成更多缺失配体位点, 赋予材料分级孔结构与更丰富的吸附活性位点, 使其对 U(VI)的吸附容量达到 622.75 mg/g, 约为未经调制的原始 UiO-66 的 1.43 倍。在气体吸附领域早期研究同样证实了缺陷调控孔隙率的普适性: Wu 等通过改变乙酸调节剂用量及反应时间, 对 UiO-66 中缺失配体的浓度实现了系统性调控, 所得样品孔体积最高可达 $1.0 \text{ cm}^3/\text{g}$ 、比表面积最高达 $1600 \text{ m}^2/\text{g}$, 分别较无缺陷 UiO-66 理论值提升约 150%和 60%, 缺陷的引入对材料的气体吸附行为产生了深远影响[29]。在催化方向缺陷工程与金属掺杂的结合则展现出独特优势: Xie 等通过构建锰掺杂缺陷型 UiO-66 (Mn1D40UiO-66)并耦合过硫酸盐活化, 实现了对 As(III)的高效氧化去除, 1 小时内去除率超过 95%; 相较于原始 UiO-66, 掺杂缺陷结构显著加速了活性氧物种的生成, 使 As(III)去除效率提升约 50%, 且体系在 pH 3~11 的较宽范围内均能保持良好的处理效果[32]。

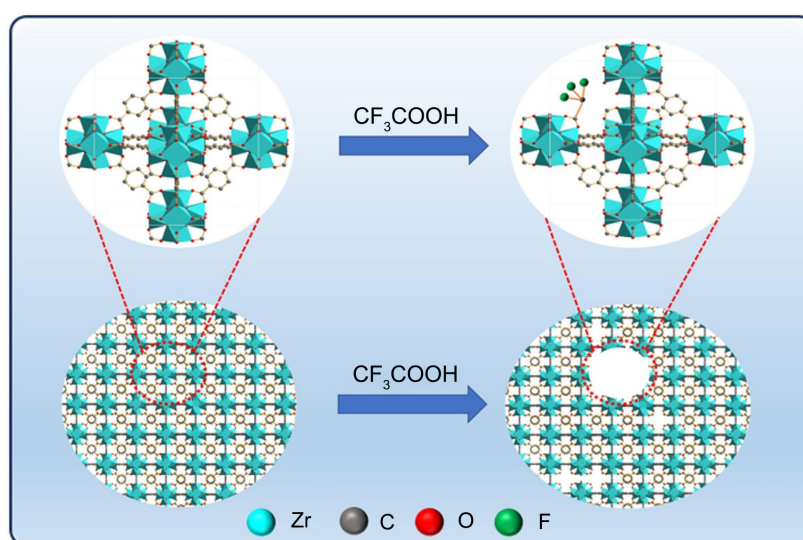


Figure 4. Schematic diagram of UiO-66-18 defects induced by TFA [31]

图 4. TFA 引起的 UiO-66-18 缺陷示意图[31]

相比之下, 缺陷工程通过牺牲部分结构规整性换取更高的孔隙率与更丰富的不饱和活性位点, 在提升吸附容量和催化效率方面效果显著, 且可与官能团修饰、金属掺杂等策略协同使用。然而缺陷浓度与骨架稳定性之间存在此消彼长的关系, 缺陷过多可能削弱 UiO-66 引以为傲的水稳定性和化学稳定性; 此外, 目前对缺陷位点的精确定量与结构表征仍缺乏统一标准, 不同批次材料缺陷程度的可控性与重现性也有待提高。

3.3. 复合结构构建

复合结构构建是指将 UiO-66 与其他功能材料结合, 形成优势互补的复合材料, 从而弥补单一 UiO-66 材料的不足。在复合体系中, UiO-66 可以扮演不同的角色: 可以作为主催化剂, 也可以作为助催化剂、光敏剂或吸附载体, 具体取决于所搭配组分的性质。从制备方式上看, UiO-66 基复合材料的构建大致可以归纳为三种路径: 一是让其他功能组分直接生长在预先制备好的 UiO-66 表面; 二是将预先制备好的 UiO-66 或其前驱体加入到另一组分的合成体系中, 实现原位复合; 三是将两种预先制备好的材料通过机械混合、搅拌或高温煅烧等方式直接结合在一起。

构建异质结是弥补 UiO-66 光生电荷分离效率低这一短板最常用的手段。Lan 等以原位生长法将 UiO-

66 与多孔 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 复合，制得的纳米杂化材料如图 5 所示，在可见光下 70 分钟内即可实现对罗丹明 B 近乎完全的降解，其降解速率分别是纯 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 和纯 UiO-66 的 6.46 倍和 10.56 倍，异质界面处电荷的高效分离与转移是性能提升的关键[33]。在吸附方向磁性复合是解决粉体材料难以固液分离这一工程化瓶颈的典型策略。Zhao 等[34]以 Fe_3O_4 为磁核、 SiO_2 为保护层，外层负载 EDTA 功能化的 UiO-66，构建了核壳结构的 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2\text{-UiO-66-EDTA}$ 复合吸附剂，用于电镀废水中 Cu(II) 和 Cr(VI) 的同步去除，其中 SiO_2 层不仅改善了 Fe_3O_4 的分散稳定性，还为 UiO-66 骨架提供了额外保护，而 EDTA 的引入则通过增加配位位点显著提升了材料对重金属离子的吸附容量。

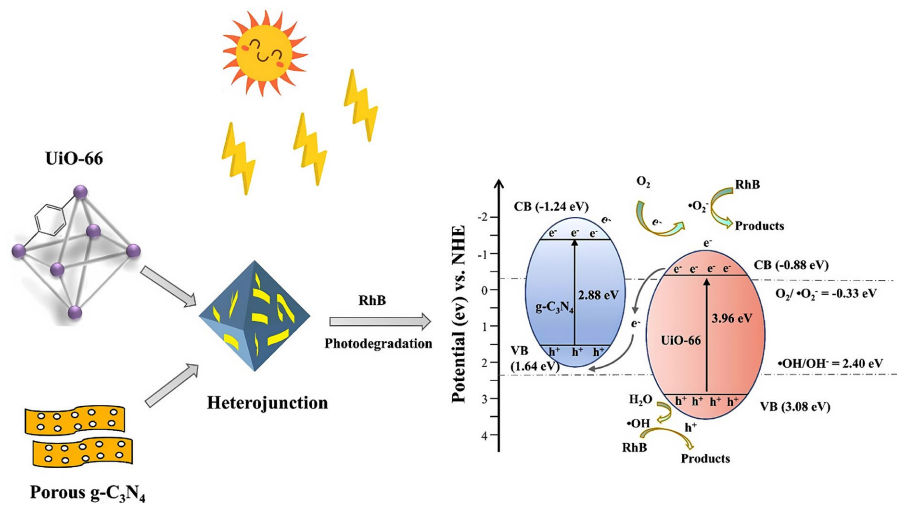


Figure 5. Construction of UiO-66/ $g\text{-C}_3\text{N}_4$ heterojunction and its enhanced photocatalytic dye degradation [33]
图 5. UiO-66/ $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 异质结的构筑及其增强光催化染料降解性能[33]

Table 1. Advances in UiO-66 synthesis and modification
表 1. UiO-66 合成与改性新进展

材料	制备与改性方法	主要性能变化	参考文献
UiO-66	盐酸调制溶剂热合成	加入 HCl 后 2 小时内即可形成 UiO-66，不加 HCl 同等时间内无法成核结晶；调节剂浓度越高，产物比表面积越大	[35]
UiO-66-NH ₂	微波辅助溶剂热合成	结晶时间缩短至 30 分钟左右，缩短倍数达 30~40 倍；调节剂用量可同步调控晶粒尺寸与缺陷度	[36]
UiO-66 (缺陷度可调系列样品)	微波功率直接调控缺陷度的一锅法合成	仅需 90 秒微波辐照即可成相；通过调节微波功率高低即可直接调控产物缺陷浓度和孔隙率，将合成与缺陷工程合二为一	[37]
UiO-66 (Mn)	连续无溶剂机械化学合成	可替代传统溶剂热法实现连续化生产，产物纯度高、产率高且无副产物，绿色化学指标显著优于溶剂热工艺	[38]
缺陷型 UiO-66	热活化诱导末端基团脱除实现缺陷工程	通过热活化脱除封端羧酸基团形成开放 Zr 位点，显著提升催化活性，且缺陷可通过后续配体交换实现选择性修复或再功能化	[39]
PSE-UiO-66-NH ₂ (N-功能化缺陷型 UiO-66)	后合成配体交换(PSE)功能化	利用缺陷位点进行选择性配体交换，在不额外引入新缺陷的前提下提升材料对水分子的吸附性能，实现缺陷位点的二次利用	[40]
EDTMP-UiO-66	膦酸基团后修饰缺陷型骨架	简便易得、可重复使用的膦酸基功能化缺陷 MOF，对 Pb(II)等重金属表现出优异去除性能，兼具功能化与缺陷工程双重优势	[41]
BP@UiO-66-0.9Ni+	金属掺杂 + 缺陷调控	一步溶剂热法同步实现镍掺杂、缺陷调控与异质结构建，对四环素的吸附 - 光催化协同去除率在实际河水样品中协同合成 BP@UiO-66- 达 98%，几乎不受 pH 和共存阴离子影响	[42]

复合结构构建通过引入第二组分实现优势互补,尤其在改善 UiO-66 光生电荷分离效率低、粉体材料难以固液分离等工程化瓶颈方面表现突出,应用场景也更加多元。但复合材料的构建通常步骤更为繁琐,制备重现性和界面结合稳定性容易受到影响,且第二组分的引入可能带来成本上升甚至二次污染风险,其规模化制备工艺与长期结构稳定性仍需进一步验证。三种改性策略各有侧重、互为补充,实际应用中往往需要根据目标污染物及工艺场景对其进行组合优化,为便于横向比较三类改性策略的代表性案例及其性能提升幅度,除前文所述的经典改性策略外,近年来的研究趋势表明,合成工艺本身(调节剂种类与用量、微波功率、机械化学路径等)往往可以直接决定材料的缺陷程度与功能特性,合成与改性两个环节正逐渐趋于一体化。表 1 按照从基础合成条件调控到后合成功能化、再到多策略协同一步合成的逻辑顺序,汇总了近期相关新文献。

4. UiO-66 在水处理中的应用

4.1. 环境催化

UiO-66 基材料因其可调电子结构、丰富孔道结构以及良好的化学稳定性,在环境催化领域受到了广泛关注。其中光催化是 UiO-66 应用最为广泛的催化方向之一。其光催化过程与传统半导体材料类似,在光照条件下,UiO-66 中的有机配体吸收光能后产生光生电子-空穴对,电子由激发态迁移至导带参与还原反应,而空穴则保留于价带参与氧化反应。同时光生载流子可进一步与水分子或溶解氧作用生成羟基自由基($\cdot\text{OH}$)、超氧自由基($\cdot\text{O}_2^-$)等活性物种,从而实现对污染物的氧化降解或重金属离子的还原转化[43]。

例如 Lu 等[44]以缩合反应构建了 UiO-66-NH₂@HDU-25 MOF@COF 异质结,借助 Z 型电荷转移机制实现了对 Cr(VI)的高效光催化还原,最优比例的复合材料对 Cr(VI)的去除率超过 99%,分别是原始 UiO-66-NH₂ 和 HDU-25 的 1.8 倍和 2.6 倍,且经过 5 次循环后仍保持良好的稳定性。Wang 等[45]则通过球磨法将 p 型聚吡咯(PPy)与 n 型 NH₂-UiO-66 复合,构建了具有超高氧化还原电位的直接 Z 型异质结光催化剂,在 100 W LED 光源下 60 分钟内即可实现对 Cr(VI)超过 95%的还原,同时 180 分钟内对四环素的降解率超过 90%;该复合材料还在实际电镀废水处理中展现出良好的抗干扰能力,Cr(VI)去除率达 99%,达到工业废水排放标准。Huong 等[46]构建了 WO₃-UiO-66@还原氧化石墨烯(WO₃-UiO-66@rGO)三元复合光催化材料,通过 WO₃ 与 UiO-66 之间的界面耦合作用以及 rGO 优异的电子传输能力,有效促进光生载流子的分离和迁移。该复合材料被进一步制备为三维打印结构,用于水体中磺胺甲噁唑(SMX)的光催化降解,在 60 min 内实现约 90%的污染物去除,并表现出良好的循环稳定性。

从已有研究来看构建异质结、拓宽可见光响应范围是提升 UiO-66 基材料光催化性能的核心思路,多数体系已能在实验室条件下实现对 Cr(VI)、四环素、磺胺甲噁唑等污染物的高效降解或转化,部分材料还兼顾了循环稳定性。但相关研究大多采用模拟废水、反应体系相对单一,对多污染物共存及复杂水质背景下的光催化性能、光催化剂长期光稳定性以及金属浸出风险等问题的系统评估仍相对不足。

4.2. 吸附

UiO-66 基材料是目前水处理领域研究最广泛的 MOF 吸附材料之一,其优异吸附性能主要来源于高比表面积、多级孔结构以及丰富的表面活性位点。UiO-66 骨架中的 Zr₆O₄(OH)₄ 金属氧簇能够提供开放金属位点和饱和配位位点,通过静电作用、配位作用等方式与污染物发生结合;同时,芳香性有机配体可通过 π - π 相互作用吸附含芳香结构的有机污染物。此外,通过氨基、巯基、羧基等功能基团修饰以及缺陷工程调控,可进一步增加材料表面的特异性结合位点,使 UiO-66 对特定污染物表现出更高的吸附容量和选择性。因此 UiO-66 基吸附材料已广泛应用于重金属离子、染料、抗生素等多种水体污染物的去除。

例如 Li 等通过缺陷工程结合巯基修饰策略构建了 UiO-66-SH 吸附材料,利用巯基与 Hg²⁺之间的强

配位作用实现对汞离子的高选择性捕获。该材料对 Hg^{2+} 表现出快速吸附能力, 最大吸附量达到 $3.91 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$, 并且在多种共存金属离子干扰条件下仍保持良好的选择性, 经过多次循环再生后仍具有较高吸附效率, 证明了功能化 UiO-66 在重金属污染治理中的应用潜力。随后研究者进一步通过多功能基团协同策略优化 UiO-66 吸附性能[47]。Saha Chowdhury 等利用缺陷调控方法将巯基引入 NH_2 -UiO-66 骨架, 构建了 NH_2 -UiO-66-SH 双功能吸附材料, 氨基与巯基之间的协同作用显著增强了 $\text{Hg}(\text{II})$ 捕获能力, 其最大吸附容量达到 $885 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 并表现出良好的循环稳定性, 为 UiO-66 吸附材料的功能化设计提供了新思路[48]。除重金属外 UiO-66 及其衍生材料在有机污染物去除方面同样表现出良好应用前景。Zhao 等系统研究了 UiO-66 官能团调控对药物污染物吸附性能的影响, 发现不同功能基团能够通过改变材料表面化学环境调节污染物吸附行为, 其中氨基功能化能够增强材料与药物分子之间的氢键和静电作用, 从而提升对药物类污染物的去除能力[49]。

吸附方向的研究已较为深入, 功能化与缺陷工程的结合能够显著提升 UiO-66 对特定污染物(尤其是重金属离子)的吸附容量和选择性, 部分材料还展现出优异的循环再生能力。不过现有研究多聚焦于单一污染物体系下的吸附容量与选择性测试, 对真实水体中天然有机质及共存离子的竞争吸附行为、吸附剂固液分离与再生成本等工程化问题的关注相对较少。

4.3. 荧光传感检测

除作为吸附剂和催化剂外, UiO-66 基材料还因其可调孔结构、丰富表面位点以及易功能化特点, 在水环境污染荧光传感检测领域展现出重要应用价值。UiO-66 的荧光传感过程主要依赖污染物与材料之间的特异性相互作用引起荧光信号变化, 从而实现目标污染物的定性识别和定量分析[50]。根据荧光响应方式不同, 主要包括荧光猝灭、荧光增强以及比率荧光传感三种类型。其中荧光猝灭通常源于污染物与荧光中心之间发生电子转移(PET)、能量转移(FRET)或内滤效应(IFE), 导致材料荧光强度降低; 荧光增强则主要是由于污染物抑制了原有猝灭过程, 使荧光信号得到恢复或增强; 而比率荧光传感则通过引入第二荧光发射中心(如 Eu^{3+} 、 Tb^{3+} 等稀土离子), 利用不同发射峰强度比例变化进行信号校准, 相比单一强度检测方式具有更高的准确性和抗干扰能力[51]。基于上述特点 UiO-66 基荧光传感材料已被广泛用于水体污染物的快速检测, 包括重金属离子(Hg^{2+} 、 Fe^{3+} 等)、无机阴离子(PO_4^{3-} 、 F^- 等)以及高毒性污染物 $\text{Cr}(\text{VI})$ 等。由于原始 UiO-66 荧光响应能力有限, 研究者通常通过氨基功能化、稀土离子掺杂、染料分子负载以及碳量子点复合等策略增强荧光信号, 并引入特异性识别位点, 提高检测灵敏度和选择性。

目前部分 UiO-66 基荧光传感体系已实现对污染物的微摩尔甚至纳摩尔级检测, 并进一步发展成便携式检测平台, 为水环境污染的实时监测提供了新的技术路径。近年来 UiO-66 基荧光传感材料逐渐向高灵敏、多功能和实际水样检测方向发展。例如 Liu 等[52]通过氨等离子体处理对 UiO-66- NH_2 进行表面功能化, 增强了材料对 $\text{U}(\text{VI})$ 的识别能力, 构建了一种高选择性的荧光传感平台。由于功能化后材料表面含氮活性位点增加, 能够与 $\text{U}(\text{VI})$ 发生强配位作用, 引起荧光信号变化, 该传感体系对水环境中的 $\text{U}(\text{VI})$ 表现出较高的选择性和灵敏度, 体现了 UiO-66 表面化学调控在放射性污染检测中的应用潜力。针对重金属污染检测 Peng 等[53]利用缺陷工程策略制备了具有增强荧光性能的缺陷型 UiO-66, 并将其用于 $\text{Cr}(\text{VI})$ 快速检测。由于缺陷结构提高了材料荧光响应能力, 同时促进了 $\text{Cr}(\text{VI})$ 与 UiO-66 之间的能量转移过程, 该材料能够在水环境中实现对 $\text{Cr}(\text{VI})$ 的快速识别, 检测限达到 50.5 nM , 并可用于实际水样分析, 展示了缺陷调控提升 UiO-66 传感性能的有效性。此外, 比率荧光策略也被用于提高 UiO-66 传感体系的检测准确性。研究者 Ma 等[54]通过配位补偿策略构建 UiO-66- NH_2 @NDBPA 复合荧光传感材料, 实现了对磷酸根和硫化氢的双目标检测。该材料利用不同荧光信号之间的比例变化进行自校准分析, 对磷酸根检测限可达到 45 nM , 并能够应用于实际水样检测。

荧光传感方向的研究已能实现对多种污染物的高灵敏、高选择性检测,部分体系检测限已达到纳摩尔级别,并逐步向便携化、实际水样检测方向发展。但目前大多数传感体系仍以实验室配制的标准溶液为主要检测对象,对复杂水基质中背景荧光干扰、材料光漂白稳定性以及传感器件小型化和实用化等方面的研究仍相对薄弱。

4.4. 膜分离

UiO-66 基膜材料是近年来拓展其工程应用的重要方向之一。由于粉体 UiO-66 在实际水处理中存在易团聚、难回收以及连续运行困难等问题,将其固定于膜材料中能够有效提升材料的可操作性[55]。UiO-66 基膜主要利用其规则孔道结构和分子筛分效应实现污染物分离,同时结合 Zr 节点及功能化基团提供的配位、静电和氢键作用,进一步增强对目标污染物的选择性截留。相比传统聚合物膜,UiO-66 的引入不仅能够改善膜的亲水性和抗污染性能,还可通过调控 MOF 孔径和界面结构,在提高水通量的同时保持较高的分离效率[56]。根据构筑方式不同,UiO-66 基复合膜主要包括表面负载型膜和混合基质膜两类。其中表面负载型膜通常通过原位生长或二次生长方式,将 UiO-66 均匀构筑于陶瓷、碳材料或聚合物支撑层表面,形成连续 MOF 选择层,实现对污染物的高效筛分;混合基质膜则是将 UiO-66 颗粒均匀分散于聚合物基体中,利用 MOF 孔道与聚合物链段之间的协同作用调节传质过程。研究者进一步发展了不对称结构膜和功能化 UiO-66 复合膜,通过降低传质阻力、增加有效活性位点,实现高通量与高选择性的兼顾。此外将具有光催化或氧化还原功能的 UiO-66 基材料引入膜体系,还可构建“催化-分离”一体化膜,在连续流条件下同步实现污染物截留与降解,为 UiO-66 基材料由实验室研究向实际水处理应用转化提供了新的发展方向[1][2]。

Al-Shaeli 等[55]将 UiO-66 和 UiO-66-NH₂ 分别引入聚醚砜(PES)及磺化聚醚砜(SPES)基体中,制备了 UiO-66 基混合基质超滤膜。研究发现,UiO-66 的引入能够显著提高膜表面亲水性,降低蛋白污染,同时增强膜的水通量和抗污染能力。其中 UiO-66-NH₂/PES 膜表现出较高渗透性能,并在 12 个月长期浸泡测试后仍保持结构稳定,证明了 UiO-66 基混合基质膜在长期水处理过程中的应用潜力。Xu 等[56]进一步构建了 UiO-66-NH₂/有机硅混合基质膜用于水淡化过程。通过将氨基功能化 UiO-66 引入有机硅膜体系,利用 MOF 孔道与聚合物网络之间的协同传质作用,提高了膜材料的水选择透过性能。该研究表明,功能化 UiO-66 不仅能够作为物理填料调节膜结构,还能够通过表面官能团优化水分子传输路径,为 MOF 复合膜在海水淡化和高盐废水处理中提供了新的策略。此外后修饰策略也被用于进一步提升 UiO-66 膜材料的污染物分离能力。研究者 Shen 等[57]通过对 UiO-66-NH₂ 进行后功能化,制备 UiO-66-RSA 材料,并将其引入 PVDF 膜中构建混合基质膜。相比原始 PVDF 膜,该复合膜表现出更好的界面结合能力、更高机械稳定性以及更优异的染料废水处理性能,能有效提升膜材料对复杂污染体系的适应能力。

膜分离方向的研究表明 UiO-66 的引入能够同步改善膜的亲水性、抗污染性与分离选择性,是解决粉体材料难以回收利用问题的有效途径,部分复合膜已通过长期浸泡测试并保持结构稳定。但 UiO-66 颗粒在聚合物基体中的均匀分散性及界面相容性仍是制约膜性能稳定性的关键因素,且现有研究对膜材料通量与选择性之间的权衡关系以及大面积制膜工艺放大问题的探讨仍然有限。

5. UiO-66 基材料的可持续性评价

5.1. UiO-66 基材料的再生与循环利用

材料的可再生性直接决定其工程应用的经济可行性,也是评价 UiO-66 基材料能否从实验室走向实际水处理场景的重要指标之一。目前研究者针对 UiO-66 基材料发展了多种再生策略,主要可归纳为溶剂洗脱法、热处理再生法、化学洗脱法(酸碱/离子交换法)以及依托复合结构的辅助分离再生四类,各自适用

的污染物类型和优缺点存在明显差异。

溶剂洗脱法是最常用、操作最简便的再生方式,其原理是利用有机溶剂(如乙醇、乙腈、甲醇)对吸附在材料表面或孔道内的污染物分子进行溶解洗脱,随后经离心或过滤实现固液分离并重复利用[58]。该方法条件温和,一般不会对 UiO-66 骨架结构造成明显破坏,但洗脱效率高度依赖污染物与材料间作用力的强弱:对于以物理吸附或较弱静电作用结合的有机污染物,溶剂洗脱通常能获得较好的再生效果,但对通过强配位或螯合作用结合的重金属离子,洗脱往往不完全,材料吸附容量会随循环次数增加而逐渐衰减。热处理再生法则通过高温焙烧或真空活化去除孔道内吸附的有机分子,尤其适用于易挥发或可热解的有机污染物体系,同时兼具恢复孔道通畅性的作用[59]。该方法再生效率通常较高,但需要额外的能耗投入,且过高的温度可能引发骨架局部塌陷或结晶度下降,因此再生温度的选择需要在效率与结构稳定性之间权衡。化学洗脱法主要通过调节 pH 或引入竞争离子,破坏污染物(尤其是重金属离子)与 UiO-66 活性位点间的配位/静电作用,实现选择性脱附,但强酸或强碱条件下操作不当也可能诱发配体水解甚至骨架结构破坏,因而实际应用中需要精细控制洗脱液浓度与接触时间[60]。此外,将 UiO-66 与磁性组分(如 Fe_3O_4)复合构建核壳结构,虽然本身不改变污染物的解吸机制,但能够借助外加磁场实现快速固液分离,显著简化再生流程中的材料回收环节[61]。

5.2. UiO-66 基材料的环境健康与安全

尽管 UiO-66 凭借高配位数的 Zr-O 键合被广泛认为具有优异的水稳定性,但其在真实水环境中的长期稳定性、潜在浸出风险及生物安全性仍需审慎评估,这也是其从实验室走向实际工程应用前必须回答的关键问题。

在长期稳定性与浸出风险方面,已有研究通过在不同缓冲体系(如 TRIS、HEPES、PB、NEM)中考察 UiO-66 的组分释放行为发现,材料对苯二甲酸配体在暴露初期(15~30 分钟内)即可观察到快速释放,且释放程度与缓冲液种类及浓度密切相关:在低浓度 TRIS 或 HEPES 体系中锆和配体的浸出较为有限,而在磷酸盐缓冲液(PB)等体系中即使在较低浓度下也会显著加速骨架降解,说明 UiO-66 的高稳定性更多体现在纯水或温和条件下,在真实水体复杂离子背景及特定缓冲组分存在时,其骨架完整性可能被明显削弱,进而带来锆离子和游离配体分子持续释放的风险[62]。

在生物毒性方面,虽然锆本身被认为是低毒金属(大鼠经口半数致死量 LD_{50} 约为 4.1 g/kg),且部分研究显示 UiO-66 纳米颗粒对哺乳动物细胞在低剂量下具有较好的生物相容性,但针对水生生物的研究结果提示不能简单以金属本身的低毒性推断材料整体的生态安全性。例如有研究发现氨基功能化 UiO-66- NH_2 在低至 0.05 mg/L 的剂量下即可诱导铜绿微囊藻释放有害胞外有机物,并对藻类造成生理损伤,且该毒性主要由材料被细胞内化后引发而非单纯的表面接触作用[63]。另有研究表明,UiO-66 颗粒在天然地下水中浸泡 7 天后骨架结构仍保持完整,但被大型溞摄入后却在其肠道内环境中迅速发生结构转化,导致慢性生殖毒性效应的产生,这一发现说明材料的非生物稳定性(如在纯水或天然水体中的结构完整性)并不能直接等同于其在生物体内的生物安全性,二者的评价体系存在本质差异,仅依据水相稳定性数据来推断 UiO-66 的生态安全性可能存在明显局限[64]。此外,斑马鱼胚胎实验也显示纳米级 UiO-66 虽未引起明显急性致死效应,但仍可诱发卵黄囊水肿等亚致死损伤,进一步提示其潜在生物效应不容忽视[5]。

为便于综合评估 UiO-66 基材料从实验室走向实际应用,不仅需要优异的污染物去除性能,还需要具备可重复利用的经济性以及在实际水环境中的长期安全性。表 2 按照应用性能表现到循环再生方法到稳定性与生态毒性的逻辑脉络,汇总了近期涉及新兴污染物(PFAS)去除、多种再生工艺路线,以及水相稳定性与水生生物毒性评估方面的代表性新文献,为 UiO-66 基材料的工程化应用提供了更全面的性能与安全性参照。

Table 2. Progress in performance of UiO-66-based materials
表 2. UiO-66 基材料性能进展

应用与性能	材料体系	再生方法/介质	循环稳定性	生物安全性	参考文献
含油废水膜分离， 分离效率 99.843%~99.952%， 通量 178.9~225.9 L·m ⁻² ·h ⁻¹	CFM-UiO-66-(COOH) ₂	乙醇/水(1:1)超声清洗 +60℃烘干 2 h	6 次循环效率不 降，通量反升至 796.0 L·m ⁻² ·h ⁻¹	斑马鱼 30 天暴露 0 死亡，生物相容 性良好	[65]
Cu ²⁺ /MB 染料双污染物 吸附，Cu ²⁺ 最大容量 343.49 mg/g	UiO-66/GOCOOH@SA	乙醇浸泡(脱 MB)/ 0.1 mol·L ⁻¹ HCl 浸泡 (脱 Cu ²⁺)，搅拌 2 h	5 次循环吸附率 > * 87%		[66]
抗生素吸附 + 抗菌 双功能，利福平最大 容量 542 mg/g，负载后 对 MRSA 抗菌活性 显著增强	UiO-66 MOF 纳米颗粒	乙醇简单活化后重复 使用	5 次循环后容量 保留约 70%	HL-7702 人肝细 胞毒性：低剂量 生物相容性 良好，高剂量 活力明显下降	[67]
抗生素 + 砷同步去除 膜分离，四环素过滤 效率 > 90%，As(III) > 80%	UiO-66/氧化锆纳米 纤维膜	As(III)体系：乙醇与 NaHCO ₃ 溶液交替洗 涤再生；TC 体系： 120℃烘箱热处理 1 h 后，再以 0.1 mol/L NaOH 和乙醇洗涤， 80℃干燥后进入下一 循环	5 次循环，过滤 效率保留约 80%	*	[68]
农药精准控释递送	pH 敏感 UiO-66 纳米 农药递送体系	*		对斑马鱼、蚯蚓 及人 BEAS-2B 细胞均表现低毒 性，多物种交叉 验证	[69]
芳香胺类污染物(MDA, 4-CA)吸附去除，兼具 硝基功能化、铜掺杂、 缺陷调控三重改性	CS@CuUiO-66-NO ₂ 气凝胶	甲醇超声清洗 3 次 +25℃真空干燥 6 h	5 次循环，吸附 容量仅下降约 8%	*	[70]
四环素吸附去除，磁性 活性炭复合，兼具快速 分离能力	PAC/Fe ₃ O ₄ /UiO-66 复合材料	磁性分离回收	5 次连续吸附 - 脱附循环，四环素 去除容量保留 > 80%	*	[71]

注：“*”表示原文献未涉及或未提供可对比数据。

6. 结论与展望

UiO-66 凭借其卓越的水热稳定性、高比表面积及可调的结构特性，已成为水处理领域最具潜力的 MOF 材料之一。针对其光响应范围窄、孔径受限及官能团单一等不足，研究者发展出配体功能化、缺陷工程及复合结构构建等改性策略，成功将其应用从吸附拓展至光催化降解、荧光传感和膜分离等多个方向，形成了较为系统的研究体系。然而当前研究仍主要停留在实验室模拟阶段，距实际工程应用仍有距离。

展望未来，该领域的发展需要在以下几个方向实现实质性突破。在材料设计层面，当前研究对多组分体系中不同功能单元间的协同机制认识仍十分有限，例如异质结界面的电荷转移动力学、缺陷位点的空间分布与催化活性之间的定量关系尚不清晰，未来应借助原位 XPS、瞬态光电压谱等表征手段结合密

度泛函理论计算, 在原子尺度上阐明这些关键科学问题。在规模化制备方面, 尽管微波辅助合成和机械化学法已展现出加速反应的潜力, 但真正能够满足工业级产量(公斤级/批次)且成本可控的连续生产工艺仍未成熟, 开发以水为溶剂、室温条件下即可快速结晶的合成路线将是推动 UiO-66 实际应用的关键一步。在应用验证层面, 目前绝大多数研究采用去离子水配制的单一污染物体系, 而真实水体中天然有机质、共存离子及多种污染物之间的竞争往往导致材料性能显著下降, 亟需开展针对实际工业废水或地表水体的长周期(数月乃至数年)运行评价, 积累可靠的工程数据。在技术经济性方面, 目前尚缺乏对 UiO-66 基材料从合成成本、再生能耗到使用寿命的全生命周期系统评估, 尤其是对氨基、巯基等官能团化及复合结构构建所增加的额外成本是否能为处理效率带来相应的经济回报这一问题, 仍需通过中试规模的对比实验加以回答。只有上述基础科学认知、工艺放大能力和实际验证数据同步推进, UiO-66 基材料才能真正从实验室走向水处理工程的第一线。

参考文献

- [1] Ahmadijokani, F., Molavi, H., Rezakazemi, M., Tajahmadi, S., Bahi, A., Ko, F., *et al.* (2022) UiO-66 Metal-Organic Frameworks in Water Treatment: A Critical Review. *Progress in Materials Science*, **125**, Article 100904. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100904>
- [2] Li, Y.H., Wang, C.C., Yi, X.H., *et al.* (2023) UiO-66(Zr)-Based Functional Materials for Water Purification: An Updated Review. *Environmental Functional Materials*, **2**, 93-132. <https://doi.org/10.1016/j.efmat.2024.02.001>
- [3] Kiteto, M., Vidiya, B., Mecha, C.A., Mrosso, R. and Chollom, M.N. (2024) Advances in Metal-Organic Frameworks as Adsorbents, Photocatalysts and Membranes: A New Frontier in Water Purification. *Discover Water*, **4**, Article No. 54. <https://doi.org/10.1007/s43832-024-00119-4>
- [4] Perera, A.A.P.R., Madhushani, K.A.U., Kumar, A. and Gupta, R.K. (2023) Metal-Organic Frameworks for Wastewater Treatment: Recent Developments, Challenges, and Future Prospects. *Chemosphere*, **339**, Article 139713. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139713>
- [5] Aziz, K.H.H., Mustafa, F.S., Hमारawf, R.F. and Omer, K.M. (2025) Adsorptive Removal of Toxic Heavy Metals from Aquatic Environment by Metal Organic Framework (MOF): A Review. *Journal of Water Process Engineering*, **70**, Article 106867. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106867>
- [6] Iroegbu, A.O.C., Teffo, M.L., Sadiku, E.R., Meijboom, R. and Hlangothi, S.P. (2025) Advancing Wastewater Treatment with Green and Scalable Metal-Organic Frameworks: From Synthetic Strategies to Real-World Deployment. *npj Clean Water*, **8**, Article No. 85. <https://doi.org/10.1038/s41545-025-00514-x>
- [7] Cavka, J.H., Jakobsen, S., Olsbye, U., Guillou, N., Lamberti, C., Bordiga, S., *et al.* (2008) A New Zirconium Inorganic Building Brick Forming Metal Organic Frameworks with Exceptional Stability. *Journal of the American Chemical Society*, **130**, 13850-13851. <https://doi.org/10.1021/ja8057953>
- [8] Cliffe, M.J., Wan, W., Zou, X., Chater, P.A., Kleppe, A.K., Tucker, M.G., *et al.* (2014) Correlated Defect Nanoregions in a Metal-Organic Framework. *Nature Communications*, **5**, Article No. 4176. <https://doi.org/10.1038/ncomms5176>
- [9] Winarta, J., Shan, B., McIntyre, S.M., Ye, L., Wang, C., Liu, J., *et al.* (2020) A Decade of UiO-66 Research: A Historic Review of Dynamic Structure, Synthesis Mechanisms, and Characterization Techniques of an Archetypal Metal-Organic Framework. *Crystal Growth & Design*, **20**, 1347-1362. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.9b00955>
- [10] Chi, H.Y., Song, S., Zhao, K., *et al.* (2025) Non-van-der-Waals Oriented Two-Dimensional UiO-66 Films by Rapid Aqueous Synthesis at Room Temperature. *Journal of the American Chemical Society*, **147**, 7255-7263. <https://doi.org/10.1021/jacs.4c11134>
- [11] Li, B., Wu, W., Zhang, T., Jiang, S., Chen, X., Zhang, G., *et al.* (2017) Ferrocene Particles Incorporated into Zr-Based Metal-Organic Frameworks for Selective Phenol Hydroxylation to Dihydroxybenzenes. *RSC Advances*, **7**, 38691-38698. <https://doi.org/10.1039/c7ra06917k>
- [12] Butova, V.V., Burachevskaya, O.A., Podshibyakin, V.A., Shepelenko, E.N., Tereshchenko, A.A., Shapovalova, S.O., *et al.* (2021) Photoswitchable Zirconium MOF for Light-Driven Hydrogen Storage. *Polymers*, **13**, Article 4052. <https://doi.org/10.3390/polym13224052>
- [13] Koriem, O.A., Showman, M.S., El-Shazly, A.H. and Elkady, M. (2024) Synthesis of High-Performance Biocompatible Polymeric Membranes Incorporated with Zirconium-Based MOF for an Enhanced Brackish Water RO Desalination. *Cellulose*, **31**, 2309-2325. <https://doi.org/10.1007/s10570-023-05723-6>
- [14] Chen, L., Pan, W., Li, K., Chen, M., Li, P., Liu, Y., *et al.* (2025) University of Oslo-66: A Versatile Zr-Based MOF for Water Purification through Adsorption and Photocatalysis. *Processes*, **13**, Article 1133.

- <https://doi.org/10.3390/pr13041133>
- [15] Taddei, M., Dau, P.V., Cohen, S.M., Ranocchiari, M., van Bokhoven, J.A., Costantino, F., *et al.* (2015) Efficient Microwave Assisted Synthesis of Metal-Organic Framework UiO-66: Optimization and Scale Up. *Dalton Transactions*, **44**, 14019-14026. <https://doi.org/10.1039/c5dt01838b>
 - [16] Karadeniz, B., Howarth, A.J., Stolar, T., Islamoglu, T., Dejanović, I., Tireli, M., *et al.* (2018) Benign by Design: Green and Scalable Synthesis of Zirconium UiO-Metal-Organic Frameworks by Water-Assisted Mechanochemistry. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **6**, 15841-15849. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b04458>
 - [17] Julien, P.A., Mottillo, C. and Friščić, T. (2017) Metal-Organic Frameworks Meet Scalable and Sustainable Synthesis. *Green Chemistry*, **19**, 2729-2747. <https://doi.org/10.1039/c7gc01078h>
 - [18] Chakraborty, D., Yurdusen, A., Mouchaham, G., Nouar, F. and Serre, C. (2023) Large-Scale Production of Metal-Organic Frameworks. *Advanced Functional Materials*, **34**, Article 2309089. <https://doi.org/10.1002/adfm.202309089>
 - [19] Teo, W.L., Zhou, W., Qian, C. and Zhao, Y. (2021) Industrializing Metal-Organic Frameworks: Scalable Synthetic Means and Their Transformation into Functional Materials. *Materials Today*, **47**, 170-186. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.01.010>
 - [20] Dunne, P.W., Lester, E. and Walton, R.I. (2016) Towards Scalable and Controlled Synthesis of Metal-Organic Framework Materials Using Continuous Flow Reactors. *Reaction Chemistry & Engineering*, **1**, 352-360. <https://doi.org/10.1039/c6re00107f>
 - [21] Liu, H., Cheng, M., Liu, Y., Zhang, G., Li, L., Du, L., *et al.* (2022) Modified UiO-66 as Photocatalysts for Boosting the Carbon-Neutral Energy Cycle and Solving Environmental Remediation Issues. *Coordination Chemistry Reviews*, **458**, Article 214428. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2022.214428>
 - [22] Lei, Y., Xie, J., Quan, W., Chen, Q., Long, X. and Wang, A. (2023) Advances in the Adsorption of Heavy Metal Ions in Water by UiO-66 Composites. *Frontiers in Chemistry*, **11**, Article 1211989. <https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1211989>
 - [23] Zhang, X., Yang, Y., Lv, X., Wang, Y., Liu, N., Chen, D., *et al.* (2019) Adsorption/Desorption Kinetics and Breakthrough of Gaseous Toluene for Modified Microporous-Mesoporous UiO-66 Metal Organic Framework. *Journal of Hazardous Materials*, **366**, 140-150. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.11.099>
 - [24] Kandiah, M., Nilsen, M.H., Usseglio, S., Jakobsen, S., Olsbye, U., Tilset, M., *et al.* (2010) Synthesis and Stability of Tagged UiO-66 Zr-MOFs. *Chemistry of Materials*, **22**, 6632-6640. <https://doi.org/10.1021/cm102601v>
 - [25] Sun, Q., Qin, L., Lai, C., Liu, S., Chen, W., Xu, F., *et al.* (2023) Constructing Functional Metal-Organic Frameworks by Ligand Design for Environmental Applications. *Journal of Hazardous Materials*, **447**, Article 130848. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130848>
 - [26] Shen, L., Liang, R., Luo, M., Jing, F. and Wu, L. (2015) Electronic Effects of Ligand Substitution on Metal-Organic Framework Photocatalysts: The Case Study of UiO-66. *Physical Chemistry Chemical Physics*, **17**, 117-121. <https://doi.org/10.1039/c4cp04162c>
 - [27] Lam, I.T.Y., Yuan, Y., Bang, K., Choi, S., Shin, D., Lu, D., *et al.* (2023) Towards the Fastest Kinetics and Highest Uptake of Post-Functionalized UiO-66 for Hg²⁺ Removal from Water. *Nanoscale*, **15**, 10558-10566. <https://doi.org/10.1039/d3nr01959d>
 - [28] Yang, Y.Q., Palaniandy, P., Zaman, H.G. and Khan, A.H. (2025) Functionalized Metal-Organic Frameworks for Efficient Uranium Adsorption from Seawater. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **334**, 4457-4484. <https://doi.org/10.1007/s10967-025-10240-w>
 - [29] Wu, H., Chua, Y.S., Krungleviciute, V., Tyagi, M., Chen, P., Yildirim, T., *et al.* (2013) Unusual and Highly Tunable Missing-Linker Defects in Zirconium Metal-Organic Framework UiO-66 and Their Important Effects on Gas Adsorption. *Journal of the American Chemical Society*, **135**, 10525-10532. <https://doi.org/10.1021/ja404514r>
 - [30] Bueken, B., Van Velthoven, N., Krajnc, A., Smolders, S., Taulelle, F., Mellot-Draznieks, C., *et al.* (2017) Tackling the Defect Conundrum in UiO-66: A Mixed-Linker Approach to Engineering Missing Linker Defects. *Chemistry of Materials*, **29**, 10478-10486. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b04128>
 - [31] Zheng, M., Xuan, K., Yan, S., Guo, Y., Huang, Y., Xu, R., *et al.* (2024) Defective UiO-66 for the Highly Efficient Elimination of U(V) from Wastewater: Insights to the Effects of Defects and Pore Structure on the Adsorption Process. *Separation and Purification Technology*, **339**, Article 126550. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.126550>
 - [32] Xie, Z., He, Q., Liu, S., Huang, X., Dai, M., Chen, Q., *et al.* (2024) Enhanced Removal of As(III) by Manganese-Doped Defective UiO-66 Coupled Peroxymonosulfate: Multiple Reactive Oxygen Species and System Stability. *Environmental Science: Nano*, **11**, 3585-3598. <https://doi.org/10.1039/d4en00194j>
 - [33] Lan, D., Zhu, H., Zhang, J., Xie, C., Wang, F., Zheng, Y., *et al.* (2024) Heterojunction of UiO-66 and Porous G-C₃N₄ for Boosted Photocatalytic Removal of Organic Dye. *Applied Surface Science*, **655**, Article 159623. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.159623>

- [34] Zhao, Y., Wen, Y., Xu, X., Fan, M., Guo, S., Chen, Z., *et al.* (2025) Removal of Cu(II) and Cr(VI) from Electroplating Wastewater by Magnetic Fe₃O₄@SiO₂-UiO-66-Edta: Adsorption Behavior and Mechanism. *Environmental Research*, **278**, Article 121647. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121647>
- [35] Schaate, A., Roy, P., Godt, A., Lippke, J., Waltz, F., Wiebcke, M., *et al.* (2011) Modulated Synthesis of Zr-Based Metal-Organic Frameworks: From Nano to Single Crystals. *Chemistry—A European Journal*, **17**, 6643-6651. <https://doi.org/10.1002/chem.201003211>
- [36] Zhang, Z., Tao, C., Zhao, J., Wang, F., Huang, J. and Wang, J. (2020) Microwave-Assisted Solvothermal Synthesis of UiO-66-NH₂ and Its Catalytic Performance toward the Hydrolysis of a Nerve Agent Simulant. *Catalysts*, **10**, Article 1086. <https://doi.org/10.3390/catal10091086>
- [37] Kang, D.A., Mohamed, A.M.O., Murphy, C., Ramos, A., Economou, I.G., Kim, J., *et al.* (2024) Rapid One-Pot Microwave-Assisted Synthesis and Defect Engineering of UiO-66 for Enhanced CO₂ Capture. *Journal of Materials Chemistry A*, **13**, 762-771. <https://doi.org/10.1039/d4ta06814a>
- [38] Zhao, J., Liu, Y., Wang, H., Fu, X.C. and Deng, N.M. (2024) Continuous, Solvent-Free, and Mechanochemical Synthesis of UiO-66 (Mn) by Gas-Solid Two-Phase Flow and Mechanism Research. *Journal of Solid State Chemistry*, **338**, Article 124863. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2024.124863>
- [39] Jrad, A., Al Sabeh, G., Hannouche, K., Al Natour, R., Haidar, O., Sammoury, H., *et al.* (2023) Critical Role of Defects in UiO-66 Nanocrystals for Catalysis and Water Remediation. *ACS Applied Nano Materials*, **6**, 18698-18720. <https://doi.org/10.1021/acsanm.3c03787>
- [40] Fu, G., Wu, P., Zhang, S., Wang, L., Xu, M. and Huai, X. (2023) Improvement of Water Adsorption Performance of UiO-66 by Post-Synthetic Modification. *Dalton Transactions*, **52**, 11671-11678. <https://doi.org/10.1039/d3dt01062g>
- [41] Fu, J., Liu, X., Huang, G. and Wang, Z. (2025) Multi-Strategy Optimized UiO-66 Composite for Simultaneous Efficient Adsorption and Visible-Light Degradation of Tetracycline in Wastewater. *Chemical Engineering Journal*, **505**, Article 159260. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.159260>
- [42] Liu, D., Chen, S., Wang, R., Li, L., Ji, J., Wu, T., *et al.* (2026) Bio-Based TEMPO-CNC Reinforced Fe-Doped UiO-66 with Hierarchical Porosity for Efficient Enrofloxacin Removal. *Environmental Research*, **290**, Article 123475. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.123475>
- [43] Liu, D., Wang, R., Wang, H., Ke, K., Li, L., Ji, J., *et al.* (2026) Engineering Cellulose Nanocrystal-Regulated UiO-66 as a Bifunctional Platform for Enhanced Fluoroquinolone Antibiotic Removal. *Chemical Engineering Journal*, **542**, Article 178262. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2026.178262>
- [44] Lu, W., Wang, C., Song, W., Zhang, Z., Xie, C. and Wang, J. (2024) High-Efficiency Photocatalytic Reduction of Cr(VI) by Z-Scheme Electron Transfer in UiO-66-NH₂ @H2U-25 Heterojunctions. *Journal of Materials Chemistry A*, **12**, 20149-20159. <https://doi.org/10.1039/d4ta03251a>
- [45] Wang, Q., Zheng, S., Ma, W., Qian, J., Huang, L., Deng, H., *et al.* (2024) Facile Synthesis of Direct Z-Scheme PPy/NH₂-UiO-66 Heterojunction for Enhanced Photocatalytic Cr(VI) Reduction, Industrial Electroplating Wastewater Treatment, and Tetracycline Degradation. *Applied Catalysis B: Environment and Energy*, **344**, Article 123669. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2023.123669>
- [46] Huang, V.T., Duc, B.V., An, N.T., Anh, T.T.P., Aminabhavi, T.M., Vasseghian, Y., *et al.* (2024) 3D-Printed WO₃-UiO-66@Reduced Graphene Oxide Nanocomposites for Photocatalytic Degradation of Sulfamethoxazole. *Chemical Engineering Journal*, **483**, Article 149277. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149277>
- [47] Li, J., Liu, Y., Ai, Y., Alsaedi, A., Hayat, T. and Wang, X. (2018) Combined Experimental and Theoretical Investigation on Selective Removal of Mercury Ions by Metal Organic Frameworks Modified with Thiol Groups. *Chemical Engineering Journal*, **354**, 790-801. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.08.041>
- [48] Saha Chowdhury, S., Bera, B. and De, S. (2023) *In-Situ* Synthesis of Dual Functionalized MOF by Engineering Modulator Induced Defect for Efficient Remediation of Aqueous Mercury through Adsorption. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **11**, Article 111332. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111332>
- [49] Zhao, P., Liu, N., Jin, C., Chen, H., Zhang, Z., Zhao, L., *et al.* (2019) UiO-66: An Advanced Platform for Investigating the Influence of Functionalization in the Adsorption Removal of Pharmaceutical Waste. *Inorganic Chemistry*, **58**, 8787-8792. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.9b01172>
- [50] Wu, M., Zhang, Q., Zhang, Q., Wang, H., Wang, F., Liu, J., *et al.* (2022) Research Progress of UiO-66-Based Electrochemical Biosensors. *Frontiers in Chemistry*, **10**, Article 842894. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.842894>
- [51] Cui, Y., Yue, Y., Qian, G. and Chen, B. (2012) Luminescent Functional Metal-Organic Frameworks. *Chemical Reviews*, **112**, 1126-1162. <https://doi.org/10.1021/cr200101d>
- [52] Liu, J., Wang, X., Zhao, Y., Xu, Y., Pan, Y., Feng, S., *et al.* (2022) NH₃ Plasma Functionalization of UiO-66-NH₂ for Highly Enhanced Selective Fluorescence Detection of U(VI) in Water. *Analytical Chemistry*, **94**, 10091-10100. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.2c01138>

- [53] Peng, M., Zeng, D., Lu, Y., Du, E., Zhang, Y. and Fu, J. (2025) A Highly Sensitive Method for Cr(VI) Sensing in Water with a Fluorescence Probe Constructed with the Defective UiO-66. *Inorganica Chimica Acta*, **577**, Article 122492. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2024.122492>
- [54] Ma, Y., Li, M., Gao, G., Luo, S., Cao, Y., Qi, X., *et al.* (2024) Coordination Compensated Metal-Organic Framework Fluorescent Sensor for Highly Selective and Sensitive Dual-Detection of Phosphate and Hydrogen Sulfide. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **409**, Article 135621. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2024.135621>
- [55] Al-Shaeli, M., Smith, S.J.D., Jiang, S., Wang, H., Zhang, K. and Ladewig, B.P. (2021) Long-Term Stable Metal Organic Framework (MOF) Based Mixed Matrix Membranes for Ultrafiltration. *Journal of Membrane Science*, **635**, Article 119339. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119339>
- [56] Xu, R., Liu, X., Zhu, C., Pan, Y., Cheng, S., Ren, X., *et al.* (2023) UiO-66-NH₂ MOF/Organosilica Mixed-Matrix Membrane for Water Desalination. *Journal of Membrane Science*, **685**, Article 121913. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.121913>
- [57] Shen, Y., Sawyerr, F., Xu, L., Shen, S. and Zhou, X. (2024) Mixed Matrix Membranes by Post-Modified UiO-66-NH₂ for Efficient Treatment of Dyeing Wastewater. *Desalination and Water Treatment*, **320**, Article 100886. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100886>
- [58] Kebede Gurmessa, B., Tadesse, A.M. and Teju, E. (2023) UiO-66 (Zr-MOF): Synthesis, Characterization, and Application for the Removal of Malathion and 2, 4-D from Aqueous Solution. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, **35**, Article 2222910. <https://doi.org/10.1080/26395940.2023.2222910>
- [59] Liu, P., Lyu, J. and Bai, P. (2023) One-Step Synthesis of Al-Doped UiO-66 Nanoparticle for Enhanced Removal of Organic Dyes from Wastewater. *Molecules*, **28**, Article 2182. <https://doi.org/10.3390/molecules28052182>
- [60] Ji, S. and Abdel-Fattah, T.M. (2025) Advancing Arsenic Water Treatment Using UiO-66 and Its Functionalized Metal-Organic Framework Analogs. *Nanomaterials*, **15**, Article 1621. <https://doi.org/10.3390/nano15211621>
- [61] Huo, J., Xu, L., Chen, X., Zhang, Y., Yang, J.E., Yuan, B., *et al.* (2019) Direct Epitaxial Synthesis of Magnetic Fe₃O₄@UiO-66 Composite for Efficient Removal of Arsenate from Water. *Microporous and Mesoporous Materials*, **276**, 68-75. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.09.017>
- [62] Bůžek, D., Adamec, S., Lang, K. and Demel, J. (2021) Metal-Organic Frameworks vs. Buffers: Case Study of UiO-66 Stability. *Inorganic Chemistry Frontiers*, **8**, 720-734. <https://doi.org/10.1039/d0qi00973c>
- [63] Li, Y. and Wang, W.X. (2024) Toxic Effects and Action Mechanism of Metal-Organic Framework UiO-66-NH₂ in *Microcystis Aeruginosa*. *Environmental Pollution*, **346**, Article 123595. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123595>
- [64] Chakraborty, S., Dhumal, P., Mikulska, I., Pham, S., Ellis (Bradford), L., Menon, D., *et al.* (2025) Biotic Transformation of Abiotically Stable Nanoscale UiO-66 Metal-Organic Framework by *Daphnia magna* Results in Chronic Reproductive Toxicity. *ACS Nano*, **19**, 41874-41887. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5c16532>
- [65] Yang, G., Wu, Q., Xiao, G. and Ye, X. (2025) UiO-66-(COOH)₂ Decorated Collagen Fiber Membranes for High-Efficiency Separation of Cationic Surfactant-Stabilized Oil/Water Emulsions: Toward Sustainable and Robust Wastewater Treatment. *Polymers*, **17**, Article 2879. <https://doi.org/10.3390/polym17212879>
- [66] Eltaweil, A.S., Mamdouh, I.M., Abd El-Monaem, E.M. and El-Subruti, G.M. (2021) Highly Efficient Removal for Methylene Blue and Cu²⁺ onto UiO-66 Metal-Organic Framework/Carboxylated Graphene Oxide-Incorporated Sodium Alginate Beads. *ACS Omega*, **6**, 23528-23541. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03479>
- [67] Moaty, S.A.A., Kotp, A.A., Salah, A.M., Farghali, A.A. and Eldin, Z.E. (2025) Application of UiO-66 MOF for Rifampicin Removal and Post-Adsorption Antimicrobial Activity against MRSA. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 25768. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10145-4>
- [68] Zhang, X., Dong, Q., Wang, Y., Zhu, Z., Guo, Z., Li, J., *et al.* (2022) Water-Stable Metal-Organic Framework (UiO-66) Supported on Zirconia Nanofibers Membrane for the Dynamic Removal of Tetracycline and Arsenic from Water. *Applied Surface Science*, **596**, Article 153559. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.153559>
- [69] Hou, C., Wei, N., Liang, Q., Tan, Y., Li, X. and Feng, J. (2024) Nano-Pesticide Delivery System Based on UiO-66 with pH Sensitivity for Precise Control of *Spodoptera frugiperda*. *Pest Management Science*, **81**, 798-808. <https://doi.org/10.1002/ps.8483>
- [70] Meng, C., Lu, Z., Huang, G. and Wang, Z. (2026) Chitosan Aerogel Compositd with Cu-Functionalized UiO-66-NO₂ as Recyclable Adsorption of Primary Aromatic Amines in Wastewater. *Water*, **18**, Article 971. <https://doi.org/10.3390/w18080971>
- [71] Cao, M. and Yang, W. (2024) Synthesis of Magnetic UiO-66-NH₂@EDTA-GO and Mechanism Study of Simultaneous Adsorption of Pb(II) and Organic Dyes from Water. *Reaction Chemistry & Engineering*, **9**, 317-338. <https://doi.org/10.1039/d3re00399j>