

磁性纳米材料修复有机污染物研究进展

卢楠^{1,2,3,4*}, 孙婴婴^{1,2,3,4}, 孟婷婷^{2,3,4}, 罗玉虎^{2,3,4}, 李燕^{2,3,4}

(1. 陕西地建-西安交大土地工程与人居环境技术创新中心, 陕西 西安 710075;

2. 自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安 710075;

3. 陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安 710075; 4. 陕西农业发展集团有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要:通过系统综述近年来磁性纳米材料主流制备方法与改性策略, 重点解析其对典型有机污染物的修复机理与应用场景, 分析其在实际应用中存在的问题与未来发展方向, 以期磁性纳米材料在环境修复领域的高效应用提供理论参考与技术支持。

关键词:磁性纳米材料; 有机污染物; 改性策略; 修复机理; 环境治理

中图分类号: X505

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)08-0060-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.08.012

Research progress on remediation of organic pollutants by magnetic nanomaterials

LU Nan^{1,2,3,4*}, SUN Ying-ying^{1,2,3,4}, MENG Ting-ting^{2,3,4}, LUO Yu-hu^{2,3,4}, LI Yan^{2,3,4}

(1. Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Jiaotong University, Technology Innovation Center for Land Engineering and Human Settlements, Xi'an 710075, China; 2. Key Laboratory of

Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710075, China;

3. Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an 710075, China; 4. Shaanxi Agricultural Development Group Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: This paper systematically reviews the mainstream preparation methods and modification strategies of magnetic nanomaterials in recent years, with an emphasis on their remediation mechanisms and application scenarios for typical organic pollutants. The existing problems in practical applications and future development directions are also analyzed, aiming to provide theoretical reference and technical support for the efficient application of magnetic nanomaterials in environmental remediation.

Key words: magnetic nanomaterials; organic pollutants; modification strategies; remediation mechanisms; environmental remediation

随着工业化进程加速发展与人口持续增长, 通过工业废水排放、农业面源污染及垃圾渗滤液渗漏等途径进入水体与土壤的染料、抗生素、多环芳烃等有机污染物日益积累^[1]。此类污染物通常具有化学稳定性强、生物毒性高、环境持久性及生物累积性显著等特征, 对生态安全与人体健康产生严重威胁。已有研究表明, 饮用水源水中磺胺类、大环内酯类等 8 种抗生素的检出浓度为 13.9~188.1 ng/L^[2]; 自来水中磺胺类抗生素的最高检出率达 59.1%^[3]。此外, 黄河三角洲滨海滩涂潮沟水中多环芳烃 (PAHs) 的浓度范围为 0.113~1.533 $\mu\text{g/L}$, 整体处于中等污染水平, 其中苯并[a]芘是生态风险的主要贡献者^[4]。另有研究指出, 陈年原油污染的砂质

土壤中, 总石油烃 (TPH) 的含量范围可达 24 900~47 800 mg/kg^[5]。

传统有机污染物处理技术 (如物理吸附、化学氧化、生物降解等) 存在处理效率低、选择性差、二次污染风险高、处理成本昂贵等局限, 难以满足复杂环境中有机污染物的深度净化需求^[6]。功能纳米材料因独特的物理化学性质成为环境修复领域的研究热点。其中磁性纳米材料 (MNMs), 尤其是铁基氧化物, 如 Fe_3O_4 、 CoFe_2O_4 、 NiFe_2O_4 及其复合材料, 凭借磁响应性强、分散性好、活性位点丰富等优势, 可通过吸附、催化降解、高级氧化等多重机制实现有机污染物的高效去除, 且能在外加磁场作用下快速分离回收, 有效解决了传统纳米材料难回收、易造成

收稿日期: 2026-04-14; 修回日期: 2026-05-29

基金项目: 陕西地建-西安交大土地工程与人居环境技术创新中心开放基金项目 (2024WHZ0235); 陕西农业发展集团内部科研项目 (NFJS2025-05)

作者简介: 卢楠 (1987-), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为污损土地修复, 通讯联系人, lunan8836@126.com。

二次污染的瓶颈问题^[7]。

自 20 世纪 90 年代首次应用于环境污染物处理以来,磁性纳米材料的制备工艺、改性策略与修复效能不断优化,在染料废水处理、抗生素降解、土壤有机污染修复等领域取得显著进展。但在实际应用中仍存在易团聚、吸附/催化活性不足、光催化依赖光照条件、复合污染协同去除机制不明确等问题^[8]。本文中结合近年来国内外研究成果,系统阐述磁性纳米材料的制备方法、修复机理、改性技术及其在环

境中的应用效果,重点分析关键问题,并对未来发展方向进行展望,为材料的规模化应用提供参考。

1 磁性纳米材料制备方法

磁性纳米材料的制备是实现有机污染物高效修复的基础。常见方法包括化学共沉淀法、溶剂热/水热法、溶胶-凝胶法、微乳液法、超声/微波辅助法及绿色合成法等。各方法在反应条件、产物性能及规模化潜力方面差异显著,详见表 1。

表 1 磁性纳米材料的制备方法及特点

制备方法	基本原理	典型工艺参数	优点	缺点	适用性	规模化潜力
共沉淀法	惰性气氛下,Fe ²⁺ /Fe ³⁺ 按计量比混合,碱液(如NH ₄ OH)使其在常温或低温下成核沉淀	pH = 8 ~ 10, 25 ~ 80℃, 搅拌 300 ~ 800 r/min	工艺简单、成本低,反应条件温和,产率高,适用于水相体系	粒径控制差、产物易团聚、对 pH 和反应温度敏感	亲水性纳米粒子,生物医学成像	高,易于放大,但需要解决批次间稳定性问题;工业上常用于大规模生物分离介质的制备
水热/溶剂热法	密闭高压釜,水或有机溶剂为介质,在高温高压(通常>100℃)下使难溶物质溶解并重结晶	反应温度 100 ~ 200℃, 压力 1 ~ 5 MPa, 反应时间 6 ~ 24 h	结晶度高、形貌可控、磁响应强;产物均一性好、稳定性强	需高压设备、反应周期长、能耗高、产量受高压釜体积限制,批次产量小	各向异性结构、掺杂型铁氧体等	中,单批次产量低,通过大型企业高压釜可实现中等规模生产,常用于高性能磁性粉体制备
溶胶-凝胶法	金属醇盐或无机盐在液相中水解、缩合形成溶胶,经老化、干燥形成凝胶,最后热处理得到纳米颗粒	钛酸四丁酯/正硅酸乙酯等前驱体, pH = 3 ~ 5, 凝胶温度 25 ~ 60℃, 焙烧温度 300 ~ 600℃	组分均匀、掺杂容易、易改性,可实现分子级混合	前驱体成本高,易收缩、开裂,制备周期长,有机溶剂可能带来环境问题	复合氧化物、核壳结构、高催化活性材料	较高,工艺相对成熟,可用于制备薄膜和涂层材料;在电子陶瓷和催化剂载体领域已有工业化应用案例
微乳液法	利用表面活性剂在油水界面形成纳米尺寸的液滴(反相胶束)作为“微反应器”,调控颗粒成核生长	表面活性剂 5% ~ 20%, pH = 9 ~ 12, 室温至 80℃	粒径可控、分散性好、可制备核壳结构	表面活性剂用量大、纯化难,残留表面活性剂影响生物相容性,成本高	复合纳米粒子、表面包覆、需精准控制尺寸材料	较低,由于产率低和表面活性剂残留问题,大规模生产难度大,多用于实验室研究特殊结构材料
超声/微波辅助法	空化效应/介电加热效应,在溶液中产生局部高温高压热点,加速成核反应	—	反应快、能耗低、易于均匀成核、环境友好	设备要求较高(专用微波/超声反应器)、规模化放大场分布不均	快速合成、二维纳米片、实验室筛选	中等。微波辅助合成在连续流反应器中具有放大潜力,正向工业化过渡
绿色合成法	利用植物提取物、细菌、真菌或生物大分子(如蛋白质、多肽)的还原性和稳定化作用,将金属盐还原为纳米粒子	植物提取物, Fe ³⁺ 0.01 ~ 0.1 mol/L, 25 ~ 50℃	环境友好、无需有毒化学试剂、生物相容性好	合成机理复杂、粒径、形貌调控难、批次间重复性差、产物纯度低、磁性较弱	生物医学、环境修复、纳米农业	较高,符合绿色化学,有望在医药和食品接触材料领域实现工业化突破

1.1 化学共沉淀法

化学共沉淀法是制备磁性纳米材料最常用的传统方法。该法在碱性条件下,将亚铁盐与铁盐(或其他过渡金属盐)按一定摩尔比混合,通过氧化还

原反应生成磁性氧化物纳米颗粒。通过调控盐溶液浓度、pH、反应温度等条件,可实现产物粒径与分散性的初步调控。Javanbakht 等^[9]以 FeCl₂·4H₂O 和 FeCl₃·6H₂O 为原料,采用共沉淀法制备的 Fe₃O₄ 磁

性纳米颗粒粒径均一,平均直径18~23 nm,饱和磁化强度达74.29 emu/g。但传统共沉淀法制备的磁性纳米颗粒易团聚,表面活性基团单一,晶体结构不够规整,限制了在复杂环境中的应用效能。

1.2 溶剂热/水热法

溶剂热/水热法是在密闭高压反应釜中,以水或有机溶剂为反应介质,通过高温高压环境促进金属盐前驱体的溶解、结晶与生长的方法。水热法以水为溶剂,环境友好、产物纯度高;溶剂热法则可通过选择不同有机溶剂调控产物的形貌与分散性,产物结晶度高、磁学性能优异、粒径可控性强。Tong等^[10]以 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 为前驱体,乙二醇为溶剂,采用溶剂热法制备了 CoFe_2O_4 磁性纳米球,产物纯度高、粒径小、比表面积大、饱和磁化强度高。该方法操作简单、环境友好、无需引入沉淀剂和表面活性剂,但反应周期长、设备要求高、成本高,不利于工业化生产。

1.3 溶胶-凝胶法

溶胶-凝胶法是将金属醇盐或无机盐前驱体在溶液中水解生成溶胶,再经凝胶化、干燥与焙烧得到产物。通过调控前驱体浓度、水解温度、pH等参数,可精确控制产物的组成与结构,且能实现磁性组分与其他功能组分的均匀复合。Shobegar等^[11]以正硅酸乙酯(TEOS)为硅源, Fe_3O_4 纳米颗粒为磁性内核,通过溶胶-凝胶法制备了 $\text{CaFe}_2\text{O}_4 @ \text{SiO}_2$ 核壳结构磁性纳米材料,平均粒径33~51 nm,有效提升了材料的化学稳定性、耐热性和表面修饰能力。

1.4 新型制备方法

除上述方法外,微乳法、超声制备、微波辅助合成法、绿色合成法等新型技术也逐渐应用^[12]。其中,微波辅助合成法通过微波辐射促进反应体系的快速升温与均匀加热,可显著缩短反应时间(数分钟至数十分钟),产物粒径均一、分散性好,是一种高效绿色的制备方法。从性能看,热分解法和溶剂热法在结晶度和磁响应强度上表现最优;微乳液法和超声法在粒径均一性上表现突出。从工业化潜力看,共沉淀法和溶胶-凝胶法最为成熟;绿色合成法和微波辅助法因符合环保和高效理念,被认为是未来最具潜力的规模化技术^[13];而微乳液法和高温还原法因工艺复杂、成本高,目前多处于实验室阶段^[12]。

2 磁性纳米材料修复有机污染物的机理

明晰吸附与催化降解机制是定向设计改性策略的前提。目前,磁性纳米材料主要通过物理吸附、化

学氧化还原以及吸附-催化协同作用修复有机污染物。不同机理的主导作用取决于材料结构、表面性质及反应环境。

2.1 吸附去除机理

物理吸附是磁性纳米材料通过范德华力、静电相互作用、氢键结合、 $\pi-\pi$ 堆积、疏水作用等非化学作用将有机污染物富集于材料表面或孔隙中的过程。该过程快速且可逆,受材料比表面积、表面电荷、孔隙结构及污染物性质影响显著^[14]。材料表面的官能团(如氨基、羧基、羟基)是产生静电相互作用与氢键结合的关键。氨基化磁性纳米材料表面带正电荷,可通过静电吸引吸附带负电的有机污染物(如酸性染料、全氟羧酸);含有羟基与羧基的磁性材料则可与有机污染物分子中的羟基、氨基形成氢键,增强吸附作用。对于芳香族有机污染物(如多环芳烃、芳香族染料),磁性纳米材料表面修饰的芳香环结构可通过 $\pi-\pi$ 堆积作用实现高效吸附^[14]。

2.2 催化降解机理

催化降解是指磁性纳米材料作为催化剂或载体,激活氧化剂(如 H_2O_2 、 O_2 、过硫酸盐)产生高活性自由基(如 $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 、 $\cdot\text{O}_2^-$),或通过光、电催化等方式直接断裂有机污染物分子中化学键,将其降解为 CO_2 、 H_2O 等无毒或低毒的小分子化合物的过程^[15]。

类芬顿催化是最常用的降解机制,磁性铁氧化物(如 Fe_3O_4 、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)表面的 Fe^{2+} 可激活 H_2O_2 ,或活化过氧单硫酸盐(PMS),产生羟基自由基($\cdot\text{OH}$)和硫酸根自由基($\text{SO}_4^{\cdot-}$)等高活性物种(ROS)。反应式为: $\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2 \longrightarrow \text{Fe}^{3+} + \cdot\text{OH} + \text{OH}^-$, $\cdot\text{OH}$ 具有极强的氧化能力(氧化还原电位2.8 V),可快速降解绝大多数有机污染物。 MnFe_2O_4 磁性纳米材料可高效激活 H_2O_2 产生 $\cdot\text{OH}$,反应时间120 min后,对四环素的降解效率达92.3%^[16]。光催化降解机制则是通过磁性纳米材料与半导体复合,在光照条件下产生电子-空穴对,分别与 O_2 、 H_2O 反应生成 $\cdot\text{O}_2^-$ 、 $\cdot\text{OH}$ 等活性物种^[17]。材料的高导电性可加速电子-空穴对的分离,提升光催化效率。

2.3 吸附-催化协同修复机理

在实际修复过程中,吸附-催化协同作用是实现高效去除的关键。首先,物理吸附将污染物分子富集于材料表面,提高污染物在活性位点周围的局部浓度;随后,催化降解将吸附的污染物转化为无害物质,同时空出吸附位点,实现材料的原位再生与循

环使用^[18]。这种协同机制既解决了吸附法仅能转移污染物、易造成二次污染的问题,又克服了催化降解法在低浓度污染物处理中效率低下的局限性,显著提升了修复效能。如 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{UiO}-66$ 对黄曲霉毒素 B1 (AFB1) 的降解效率高达 90%, 且循环使用 3 次后仍保持 80% 以上的活性, 该材料对农药和染料等多种有机污染物均有降解效果, 表现出通用性^[19]。

由玉米芯与赤泥共热解制备的多功能磁性生物炭 (MMBC-400), 不仅能高效吸附孔雀绿 (MG) (吸附量高达 793.51 mg/g), 还能活化过二硫酸盐 (PDS) 产生 ROS, 通过自由基 ($\cdot\text{OH}$, $\text{SO}_4\cdot^-$) 与非自由基 ($^1\text{O}_2$, 电子转移) 双重途径实现超过 85% 的降解率^[20]。这种协同功能使磁性纳米材料成为处理复杂有机污染物的多功能平台。

3 磁性纳米材料的改性策略

磁性纳米材料的表面性质、微观结构、分散状态及活性位点密度是决定修复效果的核心因素。纯磁性纳米材料存在表面活性位点不足、选择性差、易氧化团聚、在复杂环境中稳定性不佳等问题。研究者通过物理或化学改性方法定向调控材料结构与表面特性, 以提升吸附容量、催化活性与环境稳定性。常见的改性策略包括表面功能化修饰、复合改性及形貌结构调控。

3.1 表面功能化修饰

表面功能化修饰是通过物理吸附或化学接枝等方式在磁性纳米材料表面引入特定官能团 (如氨基、羧基、羟基、巯基、芳香环等), 增强材料与有机污染物之间的相互作用 (如静电吸引、氢键结合、 $\pi-\pi$ 堆积等), 从而提升吸附选择性与催化活性^[21]。物理吸附法操作简单、不破坏材料结构的优势。如, 将 β -环糊精通过氢键吸附于 Fe_3O_4 表面, 利用其疏水空腔与有机污染物形成包合物, 可显著提升对疏水性有机污染物的吸附选择性。化学接枝法是最常用的功能化修饰方法, 通过在磁性纳米材料表面引入活性基团 (如羟基、氨基), 再与含有目标官能团的有机分子 (如聚乙烯亚胺、柠檬酸、巯基乙酸等) 发生共价反应, 实现功能基团的稳定接枝。Sabouri 等^[22] 通过硅烷偶联剂 APTES (3-氨丙基三乙氧基硅烷) 对 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ 纳米颗粒进行表面氨基化修饰, 产物 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2-\text{NH}_2$ 通过静电吸引与氢键作用, 对亚甲基蓝的降解效率达 90%。

3.2 复合改性

复合改性是将磁性纳米材料与其他功能材料 [如碳材料、半导体材料、金属有机框架 (MOFs)、生物材料等] 通过物理混合、化学交联或原位生长等方式复合, 构建兼具多重功能的复合材料, 实现吸附-催化协同修复效果。碳材料 (石墨烯、碳纳米管、活性炭) 具有高比表面积、优异的导电性与化学稳定性。Vinothkannan 等^[23] 合成了还原型 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{氧化石墨烯 (rGO)}$ 复合材料, rGO 的片层结构有效抑制了 Fe_3O_4 颗粒团聚, 二者协同构建的导电网络加速了电子转移, 通过 $\pi-\pi$ 堆积, 氢键和静电作用, 在 12 min 内完全降解了亚甲基蓝染料。

半导体材料 (TiO_2 、 ZnO 、 $\text{g-C}_3\text{N}_4$) 与磁性纳米材料复合可构建磁性光催化复合材料。Tan 等^[24] 采用磁场诱导构建核壳 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{TiO}_2-\text{Co}$ 纳米复合材料, 在可见光下对四环素的最优降解效率达 92.4%, 循环 5 次后光催化活性几乎无损失, 且在外加磁场作用下可完全分离, 解决了光催化剂回收难题。

MOFs 材料孔径可调、比表面积超大、活性位点丰富, 与磁性纳米材料复合后可协同提升材料的吸附容量与催化活性。Qu 等^[25] 通过原位生长法制备 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZIF}-8$ 复合材料, ZIF-8 的多孔结构提供了丰富吸附位点, Fe_3O_4 的磁性实现了高效回收, 该材料在 20 min 内对苯酚的吸附容量达 129.8 mg/g。

3.3 形貌结构调控

通过优化制备工艺参数, 构建纳米球、纳米棒、纳米片、核壳结构、多孔结构等特定形貌, 可调控材料的比表面积、孔径分布与活性位点暴露程度。核壳结构是最常见的形貌调控方式。如 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{MIPs}$ (磁性分子印迹聚合物) 核壳结构材料, 通过分子印迹技术在壳层形成与目标污染物结构匹配的特异性识别位点, 对四溴双酚 A 的最大吸附容量为 118.48 mg/g, 吸附选择性系数大于 4, 远高于非印迹复合材料^[26]。多孔结构调控通过引入致孔剂或采用模板法, 显著提升材料的比表面积与孔隙率, 增加活性位点。Wang 等^[27] 以 SBA-15 为硬模板, 通过水热法合成了多孔磁性 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}$ 纳米材料, 比表面积达 522.7 m^2/g , 对甲基橙、亚甲基蓝、罗丹明 B 的总吸附量分别高达 400、600、150 mg/g, 且合成材料表现出优异的再利用性。

4 典型应用场景

4.1 水体有机污染修复

磁性纳米材料在水体有机污染修复中应用最为

广泛,可针对染料、抗生素、多环芳烃等不同类型有机污染物实现高效净化。对高浓度染料废水,通过快速吸附降低染料浓度,再通过催化降解实现彻底矿化;对低浓度抗生素废水,吸附-催化协同机制可实现抗生素的深度去除。Wang等^[28]制备的 Sn-MOF@Fe₃O₄ 复合材料用于处理含罗丹明 B 的模拟废水,在 H₂O₂ 存在及紫外-可见光照射 20 min 后,罗丹明 B 的降解效率达 100%,出水浓度达到国家排放标准。

4.2 土壤有机污染修复

土壤中的多环芳烃、农药残留、石油烃等污染物具有隐蔽性强、迁移性差、降解难度大等特点。传统修复技术存在修复周期长、成本高、易破坏土壤结构。磁性纳米材料可通过原位注射或异位处理等方式应用于土壤有机污染修复,凭借高分散性与磁响应性,在土壤中形成活性修复体系。如,通过非均相类 Fenton 催化,活化 H₂O₂ 生成·OH,对 PAHs 的降解效率达 80%~90%,且材料可通过外磁场快速回收,避免二次污染^[29]。此外,磁性纳米材料还可与生物修复技术结合,通过磁响应性靶向递送微生物或酶制剂,提升修复效率。

5 结论

磁性纳米材料凭借独特的磁响应性、高比表面积与优异的吸附-催化性能,在有机污染物修复领域展现出巨大应用潜力。本文中系统综述了磁性纳米材料的制备方法、改性策略、修复机理与典型应用。目前,该材料在实际应用中仍面临规模化制备技术不成熟、环境稳定性不足、复合污染协同去除机制不明确、长期生态安全风险未知等挑战。

未来研究应聚焦以下 4 方面。一是绿色规模化制备,发展低能耗、低成本的连续生产工艺,如微波辅助连续流合成,解决批次稳定性问题。二是高性能复合改性,设计多功能协同的复合材料(如磁性 MOFs、磁性生物炭),增强对复杂污染物(如重金属-有机物复合污染)的同步去除能力。三是环境安全与长期稳定性评估,系统研究材料在真实环境中的老化、转化过程及其对生态系统的长期影响。四是实际应用技术集成,开发与现有水处理和土壤修复工艺兼容的反应器或工艺,推动从实验室向工程应用的转化。通过上述方向的优化,有望推动磁性纳米材料在环境修复领域的规模化、安全化应用,为解决日益严峻的有机污染问题提供高效可行的技术方案。

参考文献

- [1] Upadhyay S K, Rani N, Kumar V, *et al.* A review on simultaneous heavy metal removal and organo-contaminants degradation by potential microbes: Current findings and future outlook[J]. *Microbiological Research*, 2023, 273: 127419.
- [2] Feng L, Cheng Y, Zhang Y, *et al.* Distribution and human health risk assessment of antibiotic residues in large-scale drinking water sources in Chongqing area of the Yangtze River[J]. *Environmental Research*, 2020, 185: 109386.
- [3] Tang J, Han Y, Zha Y, *et al.* Distribution, seasonal characteristics, ecological risks and human health risks of 9 antibiotics in the main water environment of Anhui province, China[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2024, 12: 1408363.
- [4] Zhao Y, Li J, Qi Y, *et al.* Distribution, sources, and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the tidal creek water of coastal tidal flats in the Yellow River Delta, China[J]. *Water Research*, 2020, 173: 115517.
- [5] Mostagab H, Baghdady A, Al-Rashid A, *et al.* Evaluating indigenous and commercial microbial consortia for remediation of aged crude oil-contaminated sandy soil[J]. *Environments*, 2026, 13(4): 225.
- [6] Osman A, El-Monaem E, Elgarahy A, *et al.* Methods to prepare biosorbents and magnetic sorbents for water treatment: A review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2023, 21: 2337-2398.
- [7] Shi L, Hu Y, He Y. Magneto-responsive thermal switch for remote-controlled locomotion and heat transfer based on magnetic nanofluid[J]. *Nano Energy*, 2020, 71: 104582.
- [8] Sanchez J, Oliva J, Gomez-Solis C, *et al.* High removal of PS and PET microplastics from tap water by using Fe₂O₃ porous microparticles and photothermal irradiation with NIR light[J]. *Chemosphere*, 2024, 367: 143538.
- [9] Javanbakht V, Ghoreishi S, Habibi N, *et al.* Synthesis of zeolite/magnetite nanocomposite and a fast experimental determination of its specific surface area[J]. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2017, 53: 693-702.
- [10] Tong Y, Feng M, Wei J, *et al.* One-Step synthesis of CoFe₂O₄ nanomaterials by solvothermal method[J]. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 2022, 95(7): 1086-1090.
- [11] Shobegar E, Ghahfarokhi S, Motamedi H. Fabrication of structural, and magnetic properties of CaFe₂O₄@SiO₂-sodium alginate nanocomposite and the effect of heat treatment on its stability[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2025, 333: 130301.
- [12] Suljagic M, Vulic P, Jeremic D, *et al.* The influence of the starch coating on the magnetic properties of nanosized cobalt ferrites obtained by different synthetic methods[J]. *Materials Research Bulletin*, 2021, 134: 111117.
- [13] Azizi A. Green synthesis of Fe₃O₄ nanoparticles and its application in preparation of Fe₃O₄/Cellulose magnetic nanocomposite: A suitable proposal for drug delivery systems[J]. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 2020, 30: 3552-3561.
- [14] Jiang D, Yang J, Wang D. Green carbon material for organic contaminants adsorption[J]. *Langmuir*, 2020, 36(12): 3141-3148.

- [15] Liu C, Yu L, Zhao Y, *et al.* Recent advances in metal-organic frameworks for adsorption of common aromatic pollutants [J]. *Microchimica Acta*, 2018, 185: 342.
- [16] Abuzeyad O, El-Khawaga A, Tantawy H, *et al.* Merits photocatalytic activity of rGO/zinc copper ferrite magnetic nanocatalyst for photodegradation of methylene blue (MB) dye [J]. *Nanoscale Research Letters*, 2025, 20: 2.
- [17] Zhao W, Yang B. Fabrication of magnetic MnFe_2O_4 @HL composites with an in situ Fenton-like reaction for enhancing tetracycline degradation [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2024, 658: 997–1008.
- [18] Roostaei S, Ahmadi-Kashani M, Turki H, *et al.* Carbohydrate-assisted eco-friendly synthesis of $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{CoCo}_2\text{O}_4/\text{CeO}_2$ magnetic photocatalyst for efficient dye degradation [J]. *Solar Energy*, 2026, 304: 114216.
- [19] Song C, Liu Y, Ding G, *et al.* Synergistic adsorption-photocatalysis based on magnetic metal-organic framework nanoplateforms for organic pollutant removal [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2022, 12 (5): 18930–18939.
- [20] Rushdi, Hardian R, Rusidi R, *et al.* Microplastic and organic pollutant removal using imine-functionalized mesoporous magnetic silica nanoparticles enhanced by machine learning [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2025, 510: 161595.
- [21] Sun Y, Dai Y, Zhu X, *et al.* A nanocomposite prepared from bifunctionalized ionic liquid, chitosan, graphene oxide and magnetic nanoparticles for aptamer-based assay of tetracycline by chemiluminescence [J]. *Microchimica Acta*, 2020, 187: 63.
- [22] Sabouri Z, Sabouri M, Moghaddas S, *et al.* Design and preparation of amino-functionalized core-shell magnetic nanoparticles for photocatalytic application and investigation of cytotoxicity effects [J]. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 2023, 21: 93–105.
- [23] Vinothkannan M, Karthikeyan C, Gnana Kumar G, *et al.* One-Pot green synthesis of reduced graphene oxide (RGO)/ Fe_3O_4 nanocomposites and its catalytic activity toward methylene blue dye degradation [J]. *Spectrochim. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2015, 136: 256–264.
- [24] Tan Q, Zhang W, Liu T, *et al.* Magnetically induced construction of core-shell architecture Fe_3O_4 @ TiO_2 -Co nanocomposites for effective photocatalytic degradation of tetracycline [J]. *New Journal of Chemistry (RSC)*, 2023, 47: 15951–15962.
- [25] Qu Y, Qin L, Liu X, *et al.* Magnetic Fe_3O_4 /ZIF-8 composite as an effective and recyclable adsorbent for phenol adsorption from wastewater [J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 294: 121169.
- [26] Ciarlantini C, Romano S, Amici G, *et al.* Synthesis and characterization of magnetic molecularly imprinted polymer sorbents (Fe_3O_4 @MIPs) for removal of tetrabromobisphenol A [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2025, 26 (16): 7686.
- [27] Wang J, Zhang Q, Liu J, *et al.* Preparation and excellent adsorption of water pollution dyes over magnetic Fe_3O_4 /C nanoparticles with hollow grape cluster morphology [J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2020, 22: 196.
- [28] Wang X, Li H, Song Y, *et al.* Sn-MOF and Sn-MOF@ Fe_3O_4 composites for highly efficient photocatalytic degradation of rhodamine B [J]. *Polyhedron*, 2024, 255: 117130.
- [29] Mazarji M, Minkina T, Sushkova S, *et al.* Effect of nanomaterials on remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons-contaminated soils: A review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 284: 112023. ■

(上接第 54 页)

- [23] Zhang Y, Qin J, Chen Z, *et al.* Efficient removal and recovery of phosphorus from industrial wastewater in the form of vivianite [J]. *Environmental Research*, 2023, 228: 115848.
- [24] 石佳田. 侧流强化生物除磷与磷回收耦合工艺性能优化研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2024.
- [25] Wu Z, Zheng Q, Zhang Y, *et al.* Phosphorus recovery from waste-activated sludge through vivianite crystallization enhanced by magnetic biochar [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 392: 136294.
- [26] 李想. 诱导羟基磷酸钙结晶磷回收过程及产物质量控制研究 [D]. 南京: 东南大学, 2023.
- [27] 佟颖, 蒋绍坚, 康冰艳, 等. 废水中鸟粪石回收的机器学习预测和优化 [J]. *能源环境保护*, 2023, 37 (6): 79–88.
- [28] Li X, Hu X, Shen S, *et al.* Unravelling key factors controlling homogeneous crystallization during phosphorus recovery: From the perspective of crystallization kinetics [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2025, 490: 144782.
- [29] 王向阳. 剩余污泥焚烧灰分与盐卤协同资源化研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2024.
- [30] Liu Y, Qu H. Design and optimization of a reactive crystallization process for high purity phosphorus recovery from sewage sludge ash [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2016, 4 (2): 2155–2162. ■

(上接第 59 页)

- [29] Abasaeed A E, Ibrahim A A, Fakeeha A H, *et al.* Ni-Co bimetallic catalysts supported on mixed oxides (Sc-Ce-Zr) for enhanced methane dry reforming [J]. *ChemistryOpen*, 2024, 13 (12): e202400086.
- [30] Küchen G, Olszok V, Kreitz B, *et al.* Spray-dried Ni-Co bimetallic catalysts for dry reforming of methane [J]. *ChemCatChem*, 2024, 16 (17): e202400371.
- [31] Duan X X, Pan J H, Yang X R, *et al.* Nickel-cobalt bimetallic catalysts prepared from hydrotalcite-like compounds for dry reforming of methane [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47 (58): 24358–24373.
- [32] Phan T S, Sane A R, de Vasconcelos B R, *et al.* Hydroxyapatite supported bimetallic cobalt and nickel catalysts for syngas production from dry reforming of methane [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2018, 224: 310–321.
- [33] Gao X, Tan Z, Hidajat K, *et al.* Highly reactive Ni-Co/ SiO_2 bimetallic catalyst via complexation with oleylamine/oleic acid organic pair for dry reforming of methane [J]. *Catalysis Today*, 2017, 281: 250–258.
- [34] 邹宗鹏. 高效稳定甲烷干重整 Ni 基催化剂的制备及其构效关系研究 [D]. 成都: 四川大学, 2023.
- [35] Ou Z L, Ran J Y, Qiu H Y, *et al.* Understanding the role of Co segregation on the carbon deposition over Ni-Co bimetal catalyst in dry reforming of methane [J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 333: 125868. ■