

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.11.029

壳聚糖基吸附材料去除微塑料的研究进展

梁姣利, 朱智慧

(伊犁师范大学新疆生物质资源清洁转化与高值利用重点实验室, 新疆伊宁 83500)

摘要: 综述了壳聚糖(CS)基吸附材料在微塑料(MPs)污染治理领域的最新研究进展。首先介绍了CS的化学结构特性及其与MPs的相互作用机制,系统分析了材料多级孔结构、环境因素(温度、pH、离子强度)对吸附过程的调控作用。研究表明,温度通过动力学促进效应与热力学抑制效应之间的动态竞争平衡影响吸附性能;pH通过改变表面电荷调控吸附行为;离子强度则通过静电屏蔽效应影响去除效率。指出目前CS基材料在MPs去除中存在吸附容量有限、复杂水体中稳定性差、再生困难及抗干扰能力弱等问题,尤其在高离子强度或含竞争阴离子的环境中易受抑制等关键问题。未来应重点发展多功能复合改性技术,通过构建协同作用位点和优化孔结构提升材料性能,并借助交联增强和孔结构优化提升材料稳定性和环境适应性。同时,需加强真实水体验证,推动材料从实验室研究向工程应用转化。

关键词: 壳聚糖;微塑料;吸附机理;影响因素;研究进展

中图分类号: TQ424 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)11-0213-06

Research progress on chitosan-based adsorbents for microplastics removal

LIANG Jiaoli, ZHU Zhihui

(Xinjiang Key Laboratory of Clean Conversion and High Value Utilization of Biomass Resources, School of Chemistry and Chemical Engineering, Yili Normal University, Yining 835000, China)

Abstract: This paper reviewed the recent advances in chitosan-based adsorbents for microplastic (MPs) pollution control. The chemical structure of chitosan and its interaction mechanisms with MPs were described, and the effects of the material's hierarchical pore structure and environmental factors (temperature, pH, and ionic strength) on the adsorption process were analyzed. The results indicate that temperature influences adsorption through a dynamic competition between kinetic promotion and thermodynamic inhibition, pH regulates adsorption behavior by altering surface charge, and ionic strength affects removal efficiency primarily via electrostatic shielding. Current challenges include limited adsorption capacity, poor stability in complex water matrices, difficulty in regeneration, and especially weak resistance to interference in high-ionic-strength and competitive-anion-containing environments. In the future, the focus should be on developing multifunctional composite modification technologies. By constructing synergistic interaction sites and optimizing pore structures, the performance of materials can be enhanced. Moreover, through cross-linking reinforcement and pore structure optimization, the stability and environmental adaptability of materials can be improved. Moreover, validation in real aquatic systems is needed to facilitate the transition of these materials from laboratory research to practical engineering applications.

Keywords: chitosan ; microplastics ; adsorption mechanism ; influencing factors ; research

微塑料(MPs)作为一类粒径小于5 mm的塑料颗粒污染物,可以分“有意”添加的MPs和“无意”释放或通过降解形成的MPs^[1],并且来源多样,包括汽车轮胎、饮料容器、婴儿奶瓶、化妆品、纺织品、塑料涂层肥料、农业使用的地膜以及运

动场的填充物等。因MPs具有微观尺度特征,难以通过肉眼直接识别,相较于传统“白色污染”塑料,其对生态系统和人类健康造成的潜在危害更为显著^[2-3]。

MPs污染因广泛存在和潜在危害备受关注,MPs被水生

基金项目: 伊犁师范大学提升学科综合实力专项科研一般项目(22XKZY24)

通信作者: 梁姣利, 讲师, 研究方向为生物质高分子复合材料

收稿日期: 2025-08-15

引用格式: 梁姣利, 朱智慧. 壳聚糖基吸附材料去除微塑料的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(11): 213-218.

LIANG Jiaoli, ZHU Zhihui. Research progress on chitosan-based adsorbents for microplastics removal[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(11): 213-218.

生物摄入,不仅对水生生物造成直接损伤,而且作为污染物载体加剧复合生态风险^[4]。更严重的是,这些污染物可经食物链传递,最终对人类健康构成威胁。啮齿动物实验表明,MPs暴露会引发从细胞应激到器官功能障碍的多重健康效应^[5]。因此,推动高效MPs治理技术的研发与应用具有紧迫的现实意义^[6-8]。

膜过滤、混凝-絮凝-沉淀^[9]、生物累积^[10]及高级氧化工艺^[11]等新型MPs治理技术虽不断涌现,但因环境兼容性差、操作流程复杂、能耗高等固有缺陷,难以实现大规模工程化应用。相较之下,基于吸附原理的传统处理技术凭借操作简便、处理效率高等优势,仍是当前MPs去除的重要手段,其中多孔碳、生物质、离子交换树脂和沸石等^[12-13]吸附剂已被证实对污水中污染物具有良好的去除效果。尤其是生物质吸附材料,因成本低廉、环境友好及吸附性能优异等特性,成为水中MPs去除的理想选择,且具有可持续的优点^[14]。

壳聚糖(CS)是由甲壳素经脱乙酰化制得的天然阳离子多糖,其来源广泛,主要提取于甲壳类动物外壳、真菌细胞壁等生物资源^[15-16]。CS的基本结构单元为2-氨基-2-脱氧- β -D-葡萄糖和2-乙酰氨基-2-脱氧- β -D-葡萄糖,通过 β -(1 \rightarrow 4)糖苷键连接形成线性聚合物。每个结构单元含有C2位氨基、C3位仲羟基和C6位伯羟基,其中氨基在酸性条件下可质子化为 $-\text{NH}_3^+$,赋予材料阳离子特性和pH响应性;羟基则提供亲水性和配位能力^[17]。通过调控脱乙酰度(DD)和分子量(M_w),可调节其结晶度、溶解性和表面电荷等性质,进而影响其在环境修复等领域的应用性能^[18]。

CS的理化性质受DD和 M_w 影响显著:高DD CS因氨基含量高,具有更强的正电性和抗菌活性;高 M_w CS链缠结程度高,溶解性较差,而低 M_w CS溶解性更优^[19]。CS分子中的氨基和羟基为其提供了丰富的化学修饰位点,可通过改性进一步调控其吸附性能、生物相容性和可降解性^[20]。基于这些特性,CS在重金属吸附、染料去除和药物污染物处理等方面展现出良好潜力^[21-22]。如,Li等^[23]制备的CS/细菌纤维素气凝胶对 Pb^{2+} 吸附容量达256.4 mg/g,Zhuang等^[24]制备的气凝胶,30 min内对 Cu^{2+} 去除率超90%,Wang等^[25]开发的大豆蛋白/CS海绵对亚甲基蓝吸附量为120 mg/g,Chen等^[26]合成的Zr-MOF/CS泡沫通过氢键作用有效吸附药物污染物。

在MPs去除方面,CS凭借其质子化氨基与带负电MPs[如聚苯乙烯(PS)、聚氯乙烯(PVC)]间的静电吸引、羟基/氨基与MPs表面极性基团形成的氢键作用,以及分子链形成的三维网络对MPs的物理捕获能力,显示出独特优势^[27-28]。笔者系统阐述了CS基材料吸附MPs的作用机制,分析吸附过程的影响因素,并展望其在实际应用中面临的挑战与发展方向。

1 CS基吸附材料吸附MPs的吸附机理

CS作为一种极具应用前景的生物基吸附剂,因独特的结构特性在MPs污染治理领域展现出显著优势。巨大的比表面积为吸附MPs提供了丰富的活性位点,分子链上高密度

的游离氨基(NH_2)和羟基($-\text{OH}$)赋予其pH响应性、金属配位和多重键合能力,可调控的化学修饰特性等使其能够通过多种相互作用机制高效捕获水中的MPs污染物。CS与MPs的界面相互作用呈现多种协同或竞争的机制,这些机制共同维持了CS与MPs之间的结合,其吸附过程主要涉及四种关键作用力:(1)静电相互作用:质子化 $-\text{NH}_3^+$ 与带负电MPs表面的定向吸引;(2)疏水效应:非极性链段间的范德华力;(3) π - π 堆积:芳香环电子云重叠;(4)氢键网络: $\text{OH}/-\text{NH}_2$ 与MPs表面含氧官能团的键合。这些作用力主导的吸附机制决于材料特性,不同的外在环境也对吸附的主要作用力产生影响。

Ko等^[29]构建了氧化石墨烯(GO)/CS/京尼平(GP)海绵用于吸附水溶液中的PS MPs。在pH=5.7、接触时间2 880 min、投加量0.5 g/L时,该材料对PS MPs的最大吸附量为7.42 mg/g。研究表明,吸附过程以 π - π 堆积和疏水相互作用为主导,GO片层中丰富的 sp^2 杂化碳与PS苯环产生强 π - π 作用,同时CS分子链上的疏水乙酰基团与PS烷基链发生疏水缔合。该研究还提到弱静电排斥对吸附的间接促进作用:材料表面与PS MPs均带负电,形成弱排斥力,有效抑制了MPs团聚,促进其分散,从而间接提升吸附效率。该研究不仅系统解析了 π - π 堆积、疏水作用等核心吸附机制,更创新性地揭示了弱静电排斥在MPs吸附过程中的积极角色,为后续通过调控表面电荷以优化MPs分散性、提高吸附效率提供了新视角。

Zhu等^[30]则通过调控聚苯胺(PANI)含量制备了甲壳素-PANI海绵(ChPANI),发现随着PANI比例增加,材料接触角从153.9°降至32.8°,亲水性显著增强,MPs去除率从84.0%提升至91.7%。吸附行为符合准一级动力学和Freundlich等温模型,表明其为物理主导的多层吸附过程。其中,ChPANI中 $-\text{NH}_3^+$ 与MPs表面负电荷的静电吸引引起主要作用,而PANI相区形成的高电势位点与三维网络中的电荷梯度分布协同强化了吸附效果,表现出0.755 2的强吸附强度。该研究明确了静电吸引的主导地位,揭示了电荷梯度和电势位点的协同增效,为MPs高效去除提供了新思路;若能进一步阐释亲水性增强与去除率提升之间的内在关联,并考察实际水体中共存杂质的影响,将显著提升研究的普适性与应用指导价值。

Zheng等^[31]开发的聚多巴胺修饰磁性CS气凝胶(PDA@MCS)在MPs吸附中展现出优异性能,在pH=6、接触1 440 min后对聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚乙烯(PE)和PS MPs的去除率分别达97.3%、94.3%和92.3%,吸附量高达138 mg/g。其高效吸附源于多重机制协同:静电吸引(质子化 $-\text{NH}_3^+$ 与MPs羧基)、氢键(聚多巴胺酚羟基与MPs含氧基团)、 π - π 堆积(芳香环与MPs苯环)以及阳离子- π 作用($\text{CS}-\text{NH}_3^+$ 与苯环 π 电子云)。这些作用在材料的多级孔道结构中得到强化——大孔(50~200 μm)保障快速吸附,介孔(2~50 nm)调控传质,高孔隙率(>95%)三维网络则为吸附提供稳定支撑。该研究构建了清晰的“结构 \rightarrow 作用 \rightarrow 性能”逻辑链,并

在传统静电吸引、氢键等机制基础上引入阳离子- π 作用,完善了吸附机制网络。未来若能进一步探讨不同MPs之间的竞争吸附行为,并量化孔道参数(孔径、孔隙率)对吸附效率的影响,将有助于建立更普适的吸附模型,为材料结构优化提供更具体的理论依据。

2 CS基吸附材料吸附MPs影响因素

CS基吸附材料对MPs的吸附性能主要受材料结构、环境温度、溶液pH及离子强度等因素共同调控。在材料结构方面,多孔特性与高比表面积可显著增加有效吸附位点,而通过化学修饰引入特定官能团能够优化其与MPs的相互作用机制。温度主要通过影响吸附过程的热力学性质及材料的结构稳定性来调节吸附性能。溶液pH值决定了CS分子中氨基的质子化程度以及MPs表面电荷特性,在pH<6.5的酸性条件下主要表现为静电吸附机制。离子强度会产生双重效应:一方面可能通过静电屏蔽作用减弱吸附性能,另一方面则可能通过盐析效应增强疏水相互作用。盐离子既会屏蔽静电作用,又能通过盐析效应增强疏水作用,表现出双重影响。

2.1 材料结构的影响

CS基吸附材料对MPs的吸附性能,本质上是其多级孔道结构与表面化学性质协同作用的结果。多级孔道(微孔、介孔、大孔)不仅提供了巨大的比表面积和丰富的吸附位点,还能通过尺寸筛分与机械截留效应实现对不同粒径MPs的选择性捕获;而材料表面的官能团(如氨基、羟基)则通过静电作用、氢键等机制决定了吸附的亲合力与选择性^[32]。

Tang等^[33]受软木启发,通过定向冷冻铸造技术制备了具有各向异性径向孔道结构的CS海绵(RCS)。该研究通过巧妙的对比实验,直观揭示了结构对传质效率的决定性影响:具有无序通道的各向同性海绵,因流体渗透性差,暴露300 s后仍保持白色;而RCS凭借其垂直排列的径向通道,借助毛细效应使流体在30 s内快速渗透完成显色。这充分证明,径向有序的通道设计是实现定向快速传质、从而提升MPs吸附动力学的关键。该研究在结构设计上极具启发性,明确指出了“结构优化→传质增强→性能提升”的技术路径。若能进一步量化孔直径、孔隙率等关键结构参数与吸附容量、速率之间的定量关系,并深入阐释这种特殊结构如何与 π - π 堆积、氢键等分子级吸附机制产生空间协同效应,将能构建起从宏观结构到微观机制的完整桥梁,为材料的精准设计与优化提供更坚实的科学依据。

2.2 温度的影响

温度通过影响分子热运动强度和吸附热力学平衡,对吸附过程产生复杂且常呈竞争性的影响。适度升温可增强分子扩散速率,促进MPs向吸附位点的传质;但对于以放热为主的吸附过程,过高的温度会削弱氢键、静电吸引等关键作用力,并驱使吸附平衡向解吸方向移动,导致吸附量下降。

Xu等^[34]开发的双交联壳聚糖基海绵对PS MPs的吸附量在25~45 °C呈现先升后降的趋势(5.7→9.9→6.9 mg/g)。

这一现象可定性解释为:在35 °C以下,动力学扩散增强效应主导过程,掩盖了热力学上的不利影响;超过35 °C后,静电相互作用被高温削弱的热力学效应成为主导,导致吸附量下降。该研究敏锐地捕捉到了这一临界现象,但缺乏热力学参数[如焓变(ΔH),吉布斯自由能变(ΔG)]的支撑,对“竞争平衡”点的解释尚停留于定性推测。

Zhu等^[35]制备的甲壳素-炭黑海绵(ChCB-S)对MPs的吸附量在25~45 °C区间内,随温度升高而持续下降(99.74→61.16 mg/g)。热力学分析证实这是一个自发的放热过程($\Delta H=-19.2 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$),并指出高温会削弱主导该体系的 π - π 相互作用。该研究将宏观吸附行为(Freundlich模型)与微观热力学参数成功关联,形成了更完整的证据链。但未能将 ΔH 等参数的变化与 π - π 作用能、扩散系数的定量变化相关联,未能完全揭示温度影响的内在量化路径。

温度对吸附性能的影响是动力学促进与热力学抑制两种效应动态竞争的结果。BGCS海绵表现出的“窗口效应”和ChCB-S海绵的“单调递减”,根本原因在于其主导吸附机制(如静电作用与 π - π 作用)对温度的敏感度不同。这为实际应用提供了关键启示:必须依据目标吸附剂的主导作用机制来优化操作温度。未来的研究应致力于通过精密的热力学实验和分子模拟,定量建立温度与特定吸附能(如静电势、 π - π 堆叠能)的关联模型,从而实现针对不同材料吸附性能的精准预测与工艺调控。

2.3 pH的影响

pH通过改变CS基吸附材料与MPs的表面电荷,成为调控其吸附性能的关键环境因子。在酸性条件下(pH<6.5),CS分子链上的氨基发生质子化而带正电,与带负电的MPs产生强烈的静电吸引,吸附效果显著;随着pH升至中性乃至碱性,材料表面正电荷减弱甚至转为负电,静电作用减弱,吸附性能通常随之下降。然而,深入分析具体研究可以发现,pH的影响机制远非单一的静电吸引所能概括,其中存在更复杂的协同、竞争甚至辩证关系。

Ko等^[29]揭示了超出常规认知的现象:当pH>5.76时,其GO/CS/GP海绵与PS MPs均带负电,确实存在静电排斥并导致吸附量降低,但在pH在6~8的范围内仍能维持较高吸附效率。这一现象说明,适度的静电排斥力可能通过抑制PS MPs的团聚,该研究的关键洞见在于,它阐明了一种间接辅助吸附的新路径:适度的静电排斥力通过优化PS MPs的分散状态,增加了其与吸附位点的接触机会,这一发现打破了“静电排斥必然不利于吸附”的传统思维定式,揭示了作用力网络中存在的积极辩证关系。

Tang等^[33]研究表明,RCS在pH为6~8时依赖静电吸附达到最佳吸附,当pH>8静电吸引减弱后,材料仍能保有50%的吸附能力,这归功于其独特的径向孔道结构、 π - π 共轭效应和氢键等多重机制的协同支撑。这项研究凸显了通过优化材料结构与引入多种作用机制,可以有效拓宽吸附材料的有效pH窗口,增强其环境适应性。而Wang等^[36]对CS改

磁性生物炭(CMBC)的研究则补充了另一个关键视角:在强碱性条件(pH=10)下,吸附效率的下降不仅源于增强的静电排斥,过量OH⁻与MPs竞争吸附位点也是重要原因。这一发现表明,pH的影响不仅体现在吸附剂与MPs的表面电荷上,溶液中的离子本身也会作为竞争者直接参与吸附过程,这使得实际水体的环境更为复杂。

pH对CS基材料吸附MPs的影响遵循“改变表面电荷→调控主导作用力→影响位点可用性与竞争环境”的传导路径。静电相互作用虽是最核心的机制,但并非唯一决定因素。这些研究共同为开发宽pH适应性吸附材料提供了清晰的梯度化设计策略:首先是以静电调控为基础,其次是构建多重作用力协同的强化机制以应对主导力的失效,最终则需通过活性位点工程来规避或减弱溶液中竞争离子的干扰。这种从单一机制认知到系统化、辩证性理解的演进,为针对不同实际水体pH条件设计和优化高效吸附材料奠定了更坚实的理论基础。

2.4 离子强度的影响

离子强度是影响CS基吸附材料去除MPs性能的关键环境因子之一,主要通过调控静电屏蔽效应、竞争吸附行为及双电层结构,改变固液界面的相互作用,进而影响吸附过程的动力学与热力学特性。

研究表明,溶液中电解质离子的存在可通过多种途径干扰CS基材料与MPs之间的相互作用,阴离子的竞争吸附是抑制吸附性能的重要机制之一。课题组实验发现,在PS MPs的去除过程中,随着Cl⁻,SO₄²⁻,PO₄³⁻等阴离子浓度的增加,PS MPs的去除率呈现明显下降趋势,且抑制效果遵循PO₄³⁻>SO₄²⁻>Cl⁻的顺序。这是由于CS在酸性条件下形成的带正电NH₃⁺位点易与阴离子静电结合,而高价阴离子电荷密度更高,竞争能力强,更易占据吸附位点,从而抑制PS MPs的吸附^[34]。该结果表明,在富含磷酸盐或硫酸盐的实际废水体系中(如农业径流、生活污水),CS材料的吸附效能可能受到显著制约,提示其应用需充分考虑背景电解质组成。

然而,与阴离子的抑制作用相反,阳离子特别是Na⁺的引入反而促进了某些体系中PS MPs的吸附。以GO/CS/GP海绵为例,研究发现PS MPs去除率随NaCl浓度升高而上升,这主要归因于高离子强度下的静电屏蔽效应:过量Na⁺压缩了吸附剂与PS MPs表面的双电层厚度,有效中和二者间的负电排斥力,降低界面能垒,促进物理接触与吸附发生^[29]。盐析效应对PS溶解性无显著影响,说明该促进作用主要源于静电环境的调控,而非物化性质改变。这一发现为CS基材料在高盐环境(如海水、油田采出水)中的适用性提供了有力支撑,表明其在特定条件下具备“转弊为利”的潜力。

进一步对比不同类型MPs及处理工艺可见,离子强度的影响具有显著的机制依赖性和工艺特异性。例如,在PET MPs的混凝去除过程中,CO₃²⁻浓度从0增至300 mg/L仅导致去除率轻微下降(99.93%→99.37%),而Mg²⁺,Ca²⁺等二价阳离子(0增至60 mg/L)的影响更为微弱(降幅<1.3%),说明

该过程主要依赖网捕卷扫和絮体包裹等非静电凝聚机制,而非传统的电中和作用^[37]。这种对离子干扰的高度耐受性凸显了混凝工艺在复杂水质条件下的鲁棒性优势,尤其适用于离子组成波动较大的实际水体。

综上所述,当前研究已初步构建起一个“阴离子抑制—阳离子促进”的静电调控框架,并揭示了不同去除路径下离子响应行为的本质差异。在以静电吸附为主导机制的CS基材料体系中,高价阴离子通过竞争位点显著削弱吸附能力,限制其在多阴离子共存环境中的应用;而在高盐度条件下,Na⁺等阳离子可通过双电层压缩缓解静电排斥,反而提升吸附效率,体现出该类材料在特定场景下的适应潜力;相比之下,混凝工艺凭借网捕卷扫等物理机制主导的过程,表现出更强的抗离子干扰能力,更适合用于离子成分复杂的实际水体处理。

上述差异为实际工程中技术路线的选择提供了科学依据:对于含高浓度PO₄³⁻,SO₄²⁻等竞争性阴离子的废水,宜优先采用混凝法实现高效稳定去除;而对于高盐但低干扰离子的水体(如近岸海水、咸水湖),则可优选经过功能优化的CS基吸附材料,充分发挥其在静电屏蔽条件下的增效潜力。

从材料设计角度出发,单一依赖静电作用的CS吸附剂在复杂环境下面临稳定性差、选择性低等问题。因此,未来应注重通过分子结构修饰与交联增强策略提升其环境耐受性。例如,引入疏水基团(如烷基链、芳香环)可强化疏水相互作用,在碱性或高盐环境中弥补静电作用的减弱;采用环氧氯丙烷、京尼平等交联剂构建三维网络结构,则有助于提高材料机械强度与抗溶胀能力,拓宽其适用pH与离子强度范围。

总体而言,离子强度对MPs去除的影响并非单一方向的作用,而是由材料性质、目标污染物类型、主导机制及共存离子种类共同决定的系统性响应。未来的研究应超越简单的现象描述,转向多因素耦合条件下的机制解析与工艺匹配优化,推动MPs治理技术从实验室研究向实际应用场景的精准适配迈进。唯有实现“机制明晰-材料可调-工艺匹配”的闭环设计,才能真正提升CS基功能材料在复杂水环境中的实用价值与工程可行性。

3 CS基吸附材料去除MPs存在的问题与展望

尽管CS基吸附材料在MPs污染治理方面展现出良好的应用前景,现有研究已系统揭示了其多机制协同的吸附行为及关键影响因素,但在向实际工程应用推进过程中仍面临一系列亟待解决的技术瓶颈及挑战,以下是存在的问题并提出未来的发展方向。

3.1 当前技术存在的主要问题

(1)材料稳定性差:CS在酸性条件下易溶胀甚至溶解,机械强度不足,限制了长期运行的可靠性;同时,再生性能研究薄弱,缺乏高效环保的脱附方法,影响循环使用经济性。

(2)复杂水体中选择性与抗干扰能力有限:在含高价阴离子(如PO₄³⁻,SO₄²⁻)或天然有机物的复杂水体中,竞争吸附

和静电屏蔽效应显著削弱吸附性能。吸附机制依赖性强,环境适应窗口窄。

(3)环境适应性窄:多数材料依赖静电作用,导致环境适应性窄,在碱性或高盐条件下吸附效率大幅下降,难以实现“宽域响应”。

(4)规模化制备与成本控制难题:高性能改性材料(如气凝胶、磁性复合物、多级孔海绵)常涉及复杂合成步骤、昂贵试剂(如GO, PDA, MOFs)或特殊设备(如冷冻干燥),导致制备成本较高,不利于大规模推广。

(5)缺乏标准化评价体系与真实场景验证

现有研究多基于理想化实验室条件,缺乏对真实水体、老化MPs及多污染物共存体系的验证,且评价标准不统一,制约了技术向工程转化。

3.2 展望

针对上述问题,未来CS基吸附材料的研发应聚焦于:“功能强化-结构优化-工艺匹配-工程落地”四位一体的技术路径,推动其从基础研究走向实用化。

(1)发展多功能集成型复合材料:应突破单一静电吸附的局限,构建兼具静电吸引、疏水作用、氢键、 π - π 堆积等多重机制的多功能复合材料,从而提高对不同类型MPs的选择性和捕获效率。

(2)强化材料稳定性与可循环性:采用交联策略构建三维网络结构,提升材料在酸性、高盐或动态水流条件下的结构完整性;开发温和高效的再生方法,延长材料使用寿命,实现高效循环利用。

(3)提升复杂环境适应能力:面向实际水体多样性,设计具有宽pH响应范围和抗离子干扰能力的智能响应型材料。例如,通过两性离子修饰赋予材料抗污性能,或构建电荷梯度结构以缓解静电屏蔽效应,增强在含磷酸盐、腐殖酸等背景物质中的鲁棒性。

(4)推进绿色低碳制备与可规模化工艺:优先选用环境友好型改性剂和溶剂,简化合成流程,探索常温常压成型、喷雾干燥或模板法等适用于工业化生产的加工技术。同时,拓展非传统原料来源,降低原材料成本,提升可持续性。

(5)加强真实场景验证与标准化建设:鼓励开展基于真实污水、海水、雨水径流等复杂基质的中试实验,评估材料在长期运行、多污染物共存条件下的综合性能;建立统一的MPs吸附性能测试规范,促进研究成果的横向比较与工程转化。

(6)推动与其他工艺耦合集成:将CS基吸附材料作为预处理或深度处理单元,与混凝、膜分离、生物降解等主流工艺耦合,形成“协同增效”的集成处理系统。例如,在混凝后端设置吸附模块以捕获残余细小MPs,或用于高级氧化后的产物富集与回收,提升整体处理效能。

CS基吸附材料因其来源丰富、可降解、吸附性能优异,在MPs治理领域具有独特优势。然而,要真正实现从“实验室高效”到“工程可用”的跨越,必须正视当前在稳定性、选择

性、环境适应性及可扩展性等方面的短板。未来研究应在深化作用机制理解的基础上,注重材料设计的功能导向与应用场景的精准匹配,走绿色化、智能化、工程化的创新发展之路。唯有如此,CS基材料才能在应对日益严峻的MPs污染挑战中发挥更大价值,成为可持续水环境治理的重要技术支撑。

参考文献

- [1] THOMPSON R C, et al. *Science*, 2024, 386(6720). DOI: 10.1126/science.adl2746.
- [2] HIDALGO-RUZ V, et al. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(6):3 060–3 075.
- [3] QIN M, et al. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 312. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127816.
- [4] SHEN M C, et al. *Environmental Pollution*, 2019, 252:511–521.
- [5] ZHOU H J, et al. *Small Methods*, 2021, 5. DOI: 10.1002/smt.202100230.
- [6] LU Y, et al. *Science of the Total Environment*, 2023, 868. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.161618.
- [7] 王静,等. *环境科学*, 2025, 08. DOI:10.13227/j.hjcx.202505067. WANG Jing, et al. *Environmental Science*. 2025, 08. DOI:10.13227/j.hjcx.202505067.
- [8] 刘贝贝,等. *中国环境科学*, 2025, 08. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20250804.003. LIU Beibei, et al. *China Environmental Science*, 2025, 08. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20250804.003.
- [9] ESFANDIARI A, et al. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 151:341–354.
- [10] DAWSON A L, et al. *Nature Communications*, 2018, 9. DOI: 10.1038/s41467-018-03465-9.
- [11] DENG Y, et al. *Current Pollution Reports*, 2015, 1(3):167–176.
- [12] QIAO L, et al. *Journal Of Water Process Engineering*, 2021, 43. DOI:10.1016/j.jwpe.2021.102233.
- [13] KIM J, et al. *Polymers*, 2019, 11(2). DOI: 10.3390/polym11020297.
- [14] PRABHAT K P, et al. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 299. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2025.140203.
- [15] NGO D H, et al. *Advances in Food and Nutrition Research*, 2014, 73:15–31.
- [16] FERNANDES C, et al. *Biological Reviews*, 2016, 30:1–14.
- [17] DAS A, et al. *Hybrid Advances*, 2024, 6. DOI: 10.1016/j.hybadv.2024.100265.
- [18] CRINI G, et al. *Progress in Polymer Science*, 2008, 33:399–447.
- [19] KNIDRI H E, et al. *The International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 120:1 181–1 189.
- [20] XU B, et al. *Journal Of Cleaner Production*, 2024, 467. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142924.
- [21] 邢波,等. *安全与环境学报*, 2025, 25 (8):2 928–2 936. XING Bo, et al. *Journal of Safety and Environment*, 2025, 25 (8): 2 928–2 936.

- [22] 邹豪君,等.电镀与精饰,2025,47(8):1-8.
ZOU Haojun, et al. Plating and Finishing, 2025, 47 (8):1-8.
- [23] LI D W, et al. Chemical Engineering Journal, 2020, 383. DOI: 10.1016/j.cej.2019.123127.
- [24] ZHUANG J, et al. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 235. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2023.123884.
- [25] WANG Z G, et al. Chemical Engineering Journal, 2021, 415. DOI: 10.1016/j.cej.2021.129006.
- [26] CHEN J, et al. Chemical Engineering Journal, 2022, 431. DOI: 10.1016/j.cej.2021.134045.
- [27] GUO C Q, et al. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 2008, 70:597-604.
- [28] SKOVSTRUP S, et al. Biomacromolecules, 2010, 11(11):3 196-3 207.
- [29] KO M, et al. Chemosphere, 2024, 356. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.141956.
- [30] ZHU Z P, et al. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2023.127292.
- [31] ZHENG B Y, et al. Journal of Hazardous Materials, 2022, 431. DOI:10.1016/j.jhazmat.2022.128611.
- [32] WU Y, et al. Advanced functional materials, 2024, 34. DOI: 10.1002/adfm.202311075.
- [33] TANG C, et al. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2025, 13. DOI:10.1016/j.jece.2025.116584.
- [34] XU J W, et al. Chemical Engineering Journal, 2023, 475. DOI: 10.1016/j.cej.2023.146130.
- [35] ZHU Z P, et al. Separation and Purification Technology, 2023, 322. DOI:10.1016/j.seppur.2023.124321.
- [36] WANG S, et al. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 307. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2025.141401.
- [37] HE J S, et al. Separation and Purification Technology, 2024, 337. DOI:10.1016/j.seppur.2024.126420.

(上接第212页)

- [38] LIU F, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2023, 140(17). DOI: 10.1002/app.53779.
- [39] ZHOU N, et al. Surfaces and Interfaces, 2023, 37. DOI: 10.1016/j.surfin.2023.102652.
- [40] GUO J, et al. Progress in Organic Coatings, 2024, 192. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2024.108479.
- [41] YAN F, et al. Composites Part B:Engineering, 2024, 272. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111205.
- [42] LI Y, et al. Composites Science and Technology, 2023, 232. DOI: 10.1016/j.compscitech.2022.109851.
- [43] WANG S, et al. Composites Part B:Engineering, 2023, 251. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.110470.
- [44] GUO J, et al. Progress in Organic Coatings, 2025, 200. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2025.109056.
- [45] PEI W, et al. Polymer Composites, 2024, 45(7):6 226-6 238.
- [46] 罗静祺.石油化工技术与经济, 2024, 40(2):24-26.
LUO Jingqi. Technology & Economics in Petrochemicals, 2024, 40(2):24-26.
- [47] GENG Y, et al. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2024, 181. DOI: 10.1016/j.compositesa.2024.108148.
- [48] GENG Y, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2024, 141 (33). DOI: 10.1002/app.55825.
- [49] JIAO W, et al. Applied Surface Science, 2018, 439:88-95.
- [50] ZHOU S, et al. Materials Science and Engineering:B, 2024, 300. DOI: 10.1016/j.mseb.2023.117135.
- [51] HUANG C, et al. Materials, 2024. DOI: 10.3390/ma17112559.
- [52] GAO D, et al. Polymer Composites, 2025, 46(2):1 916-1 930.
- [53] LI S, et al. New Carbon Materials, 2023, 38(2):385-390.
- [54] ZHOU J Q, et al. ACS Applied Nano Materials, 2024, 7(6). DOI: 10.1021/acsanm.3c06254.
- [55] XU P, et al. Composites Science and Technology, 2024, 253. DOI: 10.1016/j.compscitech.2024.110658.