

纤维素纳米纤维(CNF)及其衍生物在重金属废水处理中的研究进展

蒋雯雯

哈富环境科技(上海)有限公司, 上海

收稿日期: 2026年8月26日; 录用日期: 2026年9月28日; 发布日期: 2026年10月13日

摘 要

重金属水污染具有毒性强、生物累积性、难自然降解等特征, 是水体污染治理的重点难题。传统重金属废水处理技术存在成本高、二次污染明显、固废产量大等短板。纤维素纳米纤维(Cellulose Nanofibril, CNF)来源于农林生物质资源, 具备比表面积大、表面羟基丰富、可生物降解、易于表面功能化等突出优势, 是一类极具发展潜力的绿色生物基吸附材料。但原始CNF仅依靠羟基实现重金属吸附, 吸附容量有限、湿态结构稳定性差, 限制实际工程应用。本文综述CNF及其衍生物的结构特性、主要改性策略, 归纳羧基化、氨基接枝、无机杂化、交联复合等改性手段; 阐述CNF基材料去除重金属离子的吸附机理, 分析pH、离子强度、温度、竞争离子对吸附行为的影响; 总结2D膜材料、3D气凝胶/水凝胶材料在重金属废水领域应用现状; 讨论当前材料存在湿态力学不足、选择性差、规模化制备困难等瓶颈, 展望CNF基吸附材料未来发展方向, 为生物基水处理吸附剂开发提供理论参考。

关键词

纤维素纳米纤维, 重金属废水, 表面改性, 吸附机理, 气凝胶, 生物基吸附剂

Research Progress on Cellulose Nanofiber (CNF) and Its Derivatives in Heavy Metal Wastewater Treatment

Wenwen Jiang

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

Received: August 26, 2026; accepted: September 28, 2026; published: October 13, 2026

文章引用: 蒋雯雯. 纤维素纳米纤维(CNF)及其衍生物在重金属废水处理中的研究进展[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(10): 1592-1601. DOI: 10.12677/aep.2026.1610159

Abstract

Heavy metal water pollution is characterized by high toxicity, bioaccumulation, and difficulty in natural degradation, making it a key challenge in water pollution control. Traditional heavy metal wastewater treatment technologies suffer from drawbacks such as high cost, significant secondary pollution, and large solid waste generation. Cellulose nanofiber (CNF), derived from agricultural and forestry biomass resources, possesses outstanding advantages such as large specific surface area, abundant surface hydroxyl groups, biodegradability, and ease of surface functionalization, making them a promising class of green bio-based adsorbent materials. However, primitive CNF rely solely on hydroxyl groups for heavy metal adsorption, resulting in limited adsorption capacity and poor wet structural stability, which restricts practical engineering applications. This paper reviews the structural characteristics and main modification strategies of CNF and its derivatives, summarizing modification methods such as carboxylation, amino grafting, inorganic hybridization, and cross-linking and composite formation. It elucidates the adsorption mechanism of CNF-based materials for removing heavy metal ions, analyzing the effects of pH, ionic strength, temperature, and competing ions on adsorption behavior. The paper summarizes the current application status of 2D membrane materials and 3D aerogel/hydrogel materials in the field of heavy metal wastewater treatment. It discusses the current limitations of these materials, including insufficient wet mechanical properties, poor selectivity, and difficulties in large-scale preparation. Finally, it looks forward to the future development direction of CNF-based adsorbent materials, providing theoretical reference for the development of biomass-based water treatment adsorbents.

Keywords

Cellulose Nanofibers, Heavy Metal Wastewater, Surface Modification, Adsorption Mechanism, Aerogel, Bio-Based Adsorbent

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

随着采矿、电镀、冶金、电池制造等工业快速发展,大量含铅、镉、铜、铬、镍等重金属废水排入水环境体系。重金属离子不能够被微生物降解,会沿食物链不断富集,损害人体神经系统、肝肾器官,具有极高生态健康风险。目前重金属废水主流处理技术包含化学沉淀法、膜分离法、电化学法、离子交换法、吸附法等。其中吸附法工艺简单、操作灵活,适合低浓度重金属废水深度处理,是水污染治理领域研究热点[1]-[3]。

活性炭、沸石、树脂是传统商用吸附材料,但活性炭吸附选择性较差、再生成本高;合成树脂制备依赖石化原料,环境友好性不足;天然矿物吸附容量偏低。开发来源广泛、低成本、可生物降解的生物质吸附剂成为重要研究方向。纤维素是地球上储量最丰富的天然高分子,纤维素纳米纤维(CNF)通过机械研磨、高压均质结合化学预处理从木材、秸秆、竹材等生物质分离得到,纤维直径几十到几百纳米,比表面积高,表面有大量活性羟基,便于化学修饰,可加工成薄膜、水凝胶、气凝胶等多种形态,在水污染治理领域前景广阔[4]-[6]。

原生 CNF 表面活性位点只有羟基,与重金属离子相互作用较弱,吸附容量较低;同时纯 CNF 三维

多孔材料遇水容易溶胀、骨架坍塌，力学性能衰减，在复杂含盐、酸碱废水环境中结构容易破坏，因此必须通过改性得到 CNF 衍生物，引入羧基、氨基、磷酸基、巯基等活性官能团，提升吸附容量、结构稳定性与抗干扰能力[7]-[10]。

本文系统梳理 CNF 及其衍生物改性手段、吸附重金属作用机制，归纳不同形态 CNF 基材料应用现状，剖析制约工程化应用关键问题，对未来研究方向进行展望(图 1)。

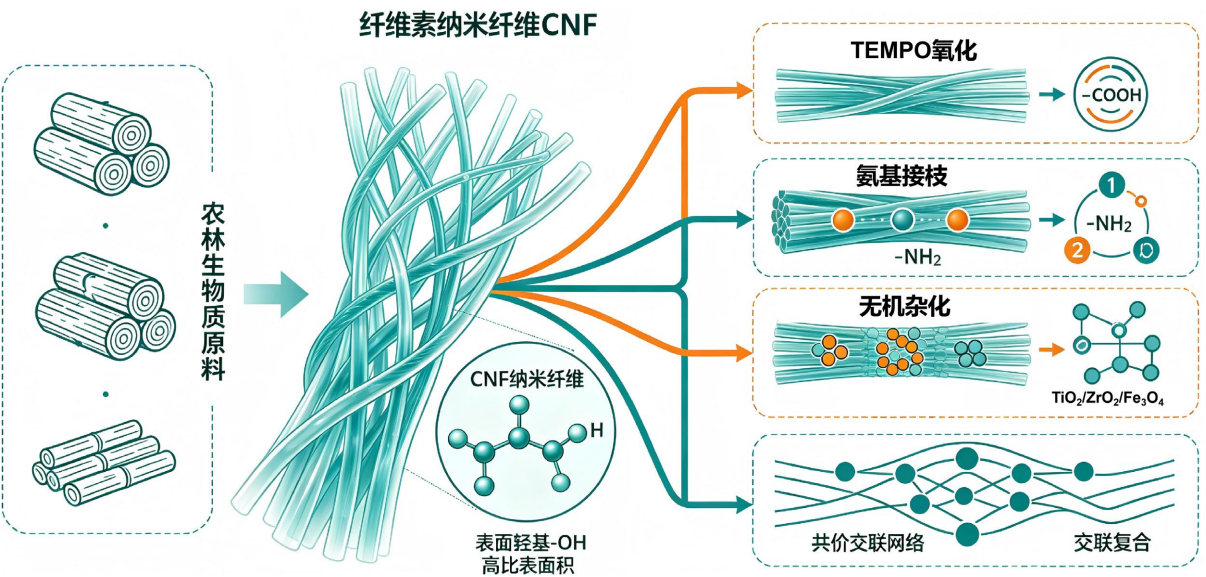


Figure 1. Sources, structures, and main modification strategies of cellulose nanofibers
图 1. 纤维素纳米纤维来源、结构及主要改性策略

2. CNF 的基本结构与理化特性

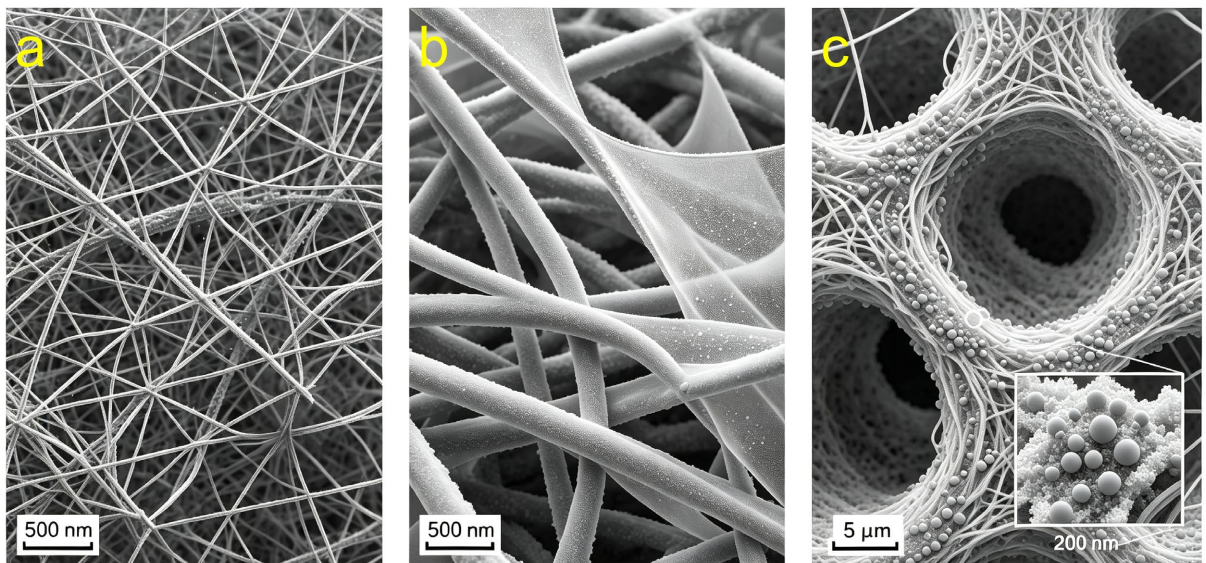


Figure 2. Original CNF fiber network (a), carboxyl-modified CNF (b) and CNF-metal oxide hybrid composite aerogel porous structure (c) [10]
图 2. 原始 CNF 纤维网络(a)，羧基改性 CNF(b)以及 CNF-金属氧化物杂化复合气凝胶多孔结构(c) [10]

纤维素大分子由 β -D-葡萄糖单元通过 β -1,4-糖苷键连接而成, 分子链内、分子间存在大量氢键。CNF 是纳米尺度的纤维素纤维, 同时包含结晶区与无定形区, 纤维纵横比高, 直径 20~500 nm, 长度可达微米级别。因其原料来源广泛, 各类农林废弃物均可用于制备, 属于绿色可生物降解材料。同时, 比表面积大, 表面可暴露大量羟基(-OH), 能够为表面化学改性提供充足的反应位点。以此带来成型加工性能优异等特点, 可制备得到二维薄膜、三维水凝胶、气凝胶等不同结构的材料。另外, 由于其亲水性优异, 能够在水相中充分分散, 有利于重金属离子与吸附位点充分接触。但是, 原生 CNF 也存在一些短板, 比如羟基对重金属离子络合能力有限, 原始 CNF 吸附容量普遍较低[11]。氢键主导的网络遇水极易解离, 三维气凝胶、水凝胶发生严重溶胀, 湿态力学性能差。在对重金属离子的选择性上, 废水中共存的钙、镁、钠等阳离子会产生显著竞争吸附, 耐酸碱、耐盐性能有限, 极端工况下糖苷键易水解断裂, 材料结构溃散。

因此, 原始 CNF 几乎无法直接用于实际重金属废水处理, 需要通过化学改性、复合改性制备 CNF 衍生物, 在保留生物质优势前提下引入高活性吸附位点, 同时改善湿态稳定性(图 2)。

3. CNF 及其衍生物主要改性方法

目前, 针对 CNF 改性的总体思路分为两类, 第一类是表面化学官能化改性, 在 CNF 纤维表面引入羧基、氨基、磷酸基、巯基等螯合基团, 增加重金属吸附位点密度。另一类是复合增强改性, 通过交联、无机填料、高分子共混, 改善湿态力学、抗溶胀、耐酸碱盐性能, 构建稳定 2D/3D 宏观吸附材料。

3.1. 羧基化改性

羧基化是 CNF 最常用改性手段, 羧基电离生成 -COO^- , 依靠静电吸引、离子交换作用捕获阳离子重金属 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Ni^{2+} 。主流为 TEMPO 氧化改性, TEMPO/NaBr/NaClO 体系选择性将纤维素葡萄糖单元 C6 位伯羟基氧化为羧基, 反应条件温和, 能够高效提升表面羧基含量。有研究表明, TEMPO 氧化后的 CNF 对 Cu(II) 、 Ni(II) 、 Zn(II) 吸附性能较原始 CNF 数倍提升。除 TEMPO 氧化外, 酸酐接枝(丁二酸酐、马来酸酐)也可以在 CNF 表面引入羧基。丁二酸酐与 CNF 表面羟基发生酯化反应, 引入大量羧基官能团, 工艺设备简单。但单纯羧基改性材料依然存在湿态溶胀问题, 在高盐废水条件下离子交换作用会被显著削弱, 一般需要搭配交联或者无机复合进一步优化性能[6]。

3.2. 氨基化接枝改性

氨基(-NH_2 、 -NH-)含孤对电子, 可与重金属离子形成稳定螯合物, 对阳离子、部分阴离子重金属(Cr(VI))都具备良好吸附能力。氨基改性通常使用聚乙烯亚胺 PEI、壳聚糖、赖氨酸等氨基试剂接枝到 CNF 表面。其利用硅烷偶联剂 GPTMS 作为桥梁, 将支化聚乙烯亚胺 b-PEI 交联在 TOCNF 表面, 制备复合海绵吸附材料 TOCGP。该材料表面同时具备羧基与氨基双重活性位点, 对 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 最大吸附容量分别可达 89.61 mg/g、72.80 mg/g、205.59 mg/g, 5 次吸附-解吸循环后吸附容量保持初始 80% 以上, 表现出良好再生性能[7]。

3.3. 无机杂化复合改性

将 CNF 与无机纳米材料复合制备 CNF 衍生物, 兼顾有机纤维高比表面积与无机材料化学稳定性优势。常用无机相包含金属氧化物(TiO_2 、 ZrO_2 、 Fe_3O_4)、黏土、MOF 材料等。引入 Fe_3O_4 磁性纳米颗粒可以制备磁性 CNF 复合吸附剂, 吸附完成后在外磁场作用下快速分离回收, 解决纳米吸附剂固液分离难题。Zhou 等制备羧基 CNF 填充壳聚糖磁性水凝胶, 对 Pb(II) 最大吸附容量 171.0 mg/g, 可采用稀酸完成解吸再生。 ZrO_2 、 TiO_2 化学稳定性优异, 可以提升材料耐酸碱耐盐性能; 部分 TiO_2 同时具备光催化功能, 可以将高毒 Cr(VI) 还原为低毒 Cr(III) , 实现吸附-还原协同处理重金属污染[9]。无机杂化分为物理共混和

原位生长两种方式。物理共混操作简便，但纳米颗粒容易发生团聚；原位水解沉淀生成无机颗粒，颗粒在纤维表面分布更加均匀，结合力更强，但工艺控制相对复杂。无机填料添加量需要控制，过高会造成材料变脆，孔隙率下降，降低吸附动力学速率。

3.4. 交联与高分子共混改性

纯 CNF 水凝胶、气凝胶遇水溶胀坍塌，交联改性可以在纤维之间构建共价键、配位键，替代不稳定氢键网络，抑制吸水溶胀，提升湿态力学性能。交联体系分为柠檬酸等多元羧酸酯化交联、环氧类交联剂醚键交联、金属离子配位交联。柠檬酸交联绿色廉价，但是生成酯键不耐强碱；EGDE 环氧交联形成醚键，耐水解性能更优异。金属离子配位交联操作条件温和，但强碱性条件配位键解离失效。亲水高分子 PVA、海藻酸钠、壳聚糖与 CNF 共混形成互穿高分子网络，一方面可以改善材料成型性与湿强度；另一方面高分子本身携带羟基、氨基等官能团，额外增加重金属吸附位点。但高分子添加量过高会包覆 CNF，堵塞孔道，阻碍重金属离子向内部位点扩散(图 3)。

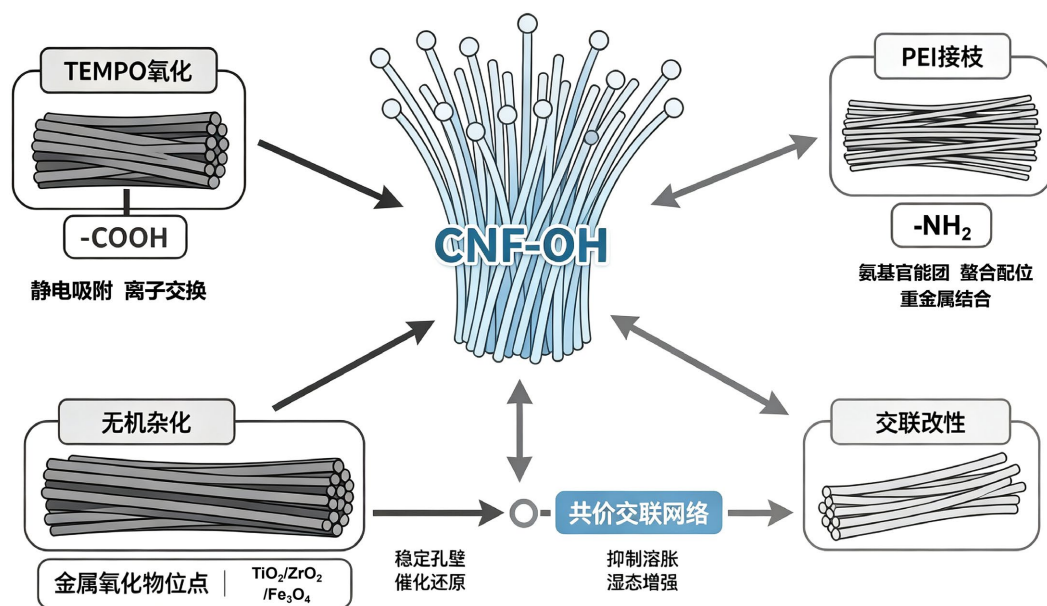


Figure 3. Schematic diagram of main CNF modification methods and corresponding introduced functional groups

图 3. CNF 主要改性方法与对应引入官能团示意图

4. CNF 衍生物对重金属离子吸附机理

4.1. 静电吸附

羧基改性 CNF 在中性水环境下羧基电离为 -COO^- ，材料表面带负电，依靠静电引力捕获水溶液中 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 等阳离子重金属。溶液 pH 直接决定表面电荷：低 pH 条件下 H^+ 浓度高， -COO^- 质子化为 -COOH ，负电荷密度下降，静电吸附作用显著减弱；pH 升高羧基电离程度增大，静电吸附增强，但 pH 过高重金属离子会生成氢氧化物沉淀，干扰吸附实验。静电吸附属于物理作用，容易受到水溶液中共存盐离子干扰，高浓度 Na^+ 、 Ca^{2+} 会和重金属离子竞争表面负电荷位点，降低吸附容量[3]。

4.2. 离子交换

羧基化 CNF 表面 -COONa 中 Na^+ 可以与水溶液中二价重金属离子发生交换： $2\text{Cell-COO-Na}^+ + \text{M}^{2+} \rightleftharpoons$

$(\text{Cell-COO})_2\text{M} + 2\text{Na}^+$ 。重金属离子结合到吸附材料表面, 钠离子释放进入水体。离子交换是羧基改性 CNF 吸附重金属非常重要的机制, 吸附完成后检测溶液钠离子浓度上升可以佐证该机理。离子交换同样受离子强度影响显著, 高盐环境会抑制离子交换过程[2]。

4.3. 螯合配位作用

氨基、巯基、磷酸化改性 CNF 主要依靠螯合配位实现重金属去除。N、S、P 原子含有孤对电子, 可以作为配位供体, 与重金属离子的空轨道形成配位键, 生成稳定螯合物。螯合作用相比于静电吸附, 选择性更强, 受溶液盐度干扰更小。PEI 接枝 CNF 大量氨基与 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 形成螯合物, 是氨基改性材料高吸附容量的核心来源。XPS 表征可以观察到 N 元素结合能发生偏移, 证实配位键生成[2]。

4.4. 物理吸附

CNF 气凝胶、水凝胶具有三维贯通多孔结构, 重金属离子扩散进入材料内部孔隙, 依靠范德华力发生物理吸附。物理吸附贡献整体吸附容量占比一般较低; 但多孔结构可以提供离子扩散通道, 使内部大量吸附位点得以利用, 因此多孔结构对吸附动力学影响巨大。孔隙率高、孔径合适的 3D CNF 衍生物, 吸附可以更快达到平衡[6]。

4.5. 氧化-还原协同作用

部分复合改性 CNF 衍生物引入光催化活性组分(TiO_2 、聚吡咯), 在吸附同时实现价态转化。例如毒性极高 Cr(VI) 阴离子, 材料先通过质子化氨基吸附 Cr(VI), 再通过光催化将 Cr(VI) 还原为低毒 Cr(III), Cr(III) 进一步被材料表面位点固定, 实现吸附-还原协同处理重金属污染, 拓展材料处理阴离子重金属能力[9] (图 4)。

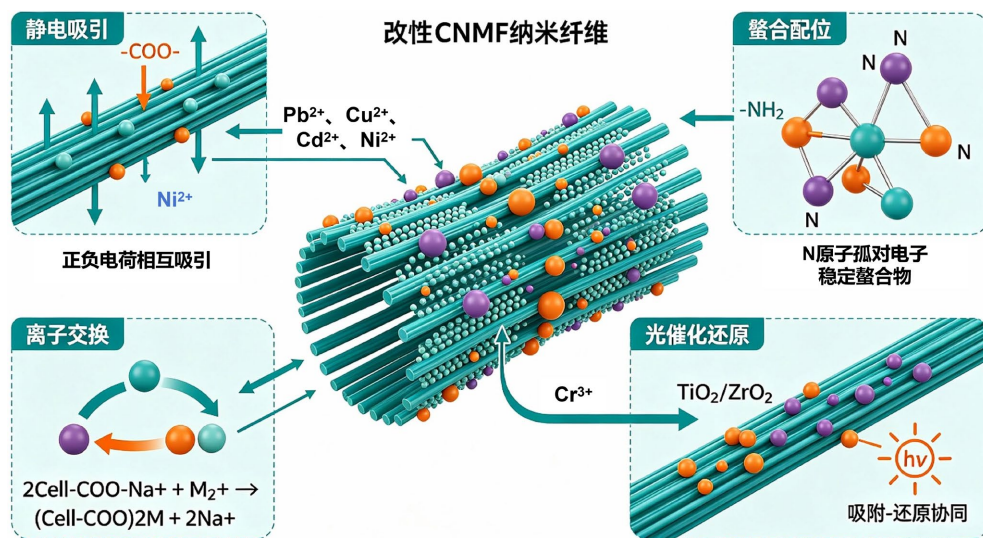


Figure 4. Multiple mechanisms of CNF derivative adsorption of heavy metals

图 4. CNF 衍生物吸附重金属多重作用机理

5. 影响 CNF 衍生物吸附重金属性能关键因素

5.1. 溶液 pH 值

pH 是影响吸附行为最重要因素。一方面 pH 改变吸附剂表面官能团电离状态; 另一方面改变重金属

离子在水中存在形态。对于 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 阳离子重金属, pH 过低, H^+ 竞争吸附位点, 吸附容量低; pH > 6~7, 重金属离子生成氢氧化物沉淀, 无法区分沉淀与吸附去除效果。大多数 CNF 基吸附剂处理二价重金属最优 pH 区间为 5~6。处理 Cr(VI) 阴离子重金属则相反, 酸性条件氨基质子化带正电, 利于吸附 Cr(VI) 阴离子, pH 升高吸附性能下降[7]。

5.2. 初始重金属离子浓度

初始重金属浓度决定吸附传质驱动力。初始浓度较低时, 吸附位点充足, 重金属去除率高, 但单位吸附容量低; 随着初始浓度增大, 单位吸附容量上升, 去除率逐步下降。吸附等温线常采用 Langmuir 与 Freundlich 模型拟合。大量研究表明改性 CNF 衍生物吸附重金属更符合 Langmuir 模型, 代表单分子层化学吸附为主, 吸附剂表面吸附位点均匀分布。

5.3. 吸附温度

温度影响吸附动力学与热力学。多数 CNF 衍生物吸附重金属属于吸热过程, 升高温度吸附容量略有提升, 同时加快离子扩散速率, 缩短吸附平衡时间。但温度过高会造成高分子接枝材料、纤维素骨架老化降解, 实际废水处理一般在室温条件下即可开展。动力学普遍符合准二级动力学模型, 说明吸附速率主要由化学吸附过程控制, 而不是物理扩散。

5.4. 离子强度与共存竞争离子

实际工业废水含有大量 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 。阳离子会与目标重金属竞争静电吸附、离子交换位点, 造成吸附容量下降。对于依靠静电、离子交换机制为主的羧基改性 CNF, 高盐条件性能衰减明显; 以螯合配位作为主要机制的氨基、巯基改性 CNF 受离子强度影响相对更小。多种重金属共存条件下存在竞争吸附, 对 Pb^{2+} 吸附选择性普遍高于 Cd^{2+} 、 Ni^{2+} , 和离子半径、水解常数、配位亲和性相关。

5.5. 材料本身结构因素

官能团接枝密度决定最大吸附位点数量; 多孔结构孔径、孔隙率影响重金属离子扩散速率; 交联程度决定湿态溶胀行为。交联不足材料溶胀严重; 交联过度孔隙被封闭, 离子难以进入材料内部, 吸附容量下降。

6. 不同形态 CNF 衍生物在重金属废水处理应用

6.1. 二维 CNF 基薄膜材料

CNF 薄膜制备工艺简单, 可用于过滤式吸附。薄膜材料优点是厚度可控, 固液分离方便; 缺点是薄膜内部孔道有限, 重金属离子扩散阻力大, 吸附容量往往低于三维多孔材料。薄膜适合低浓度重金属废水深度过滤处理。TEMPO-PEI 改性 CNF 膜, 动态过滤条件下连续去除水中 Cu^{2+} , 使用稀盐酸淋洗可以实现再生。但薄膜抗污染能力有限, 废水中悬浮物容易造成膜孔堵塞[10]。

6.2. CNF 基水凝胶吸附材料

CNF 水凝胶具有三维亲水网络, 含水量高, 重金属离子可以快速扩散进入凝胶内部。水凝胶可以做成颗粒、球状, 用于固定床吸附柱。磁性 CNF 复合水凝胶兼具吸附与磁分离优势, 处理完成后快速回收, 避免纳米材料二次释放风险[8]。水凝胶主要短板: 机械强度有限, 循环多次后凝胶网络容易破碎流失, 需要交联增强改性提升循环使用寿命。

6.3. CNF 基气凝胶吸附材料

CNF 气凝胶通过冷冻干燥制备, 孔隙率可达 90 % 以上, 密度低, 贯通三维孔道, 重金属离子传质阻力小, 是目前 CNF 水处理研究热点。气凝胶可以直接投入废水搅拌吸附, 也可以填充吸附柱实现连续动态处理。但是纯 CNF 气凝胶湿态极易坍塌, 必须经过交联、无机杂化改性才能用于水相体系。

CNF-PEI 复合气凝胶对 Pb^{2+} 表现出优异吸附能力; CNF/ ZrO_2 杂化气凝胶同时具备耐酸碱盐, 适合复杂工业废水; 磁性 CNF 气凝胶兼顾高吸附容量与磁分离回收优势。气凝胶材料短板: 冷冻干燥制备成本偏高, 制约大规模生产应用(图 5)。

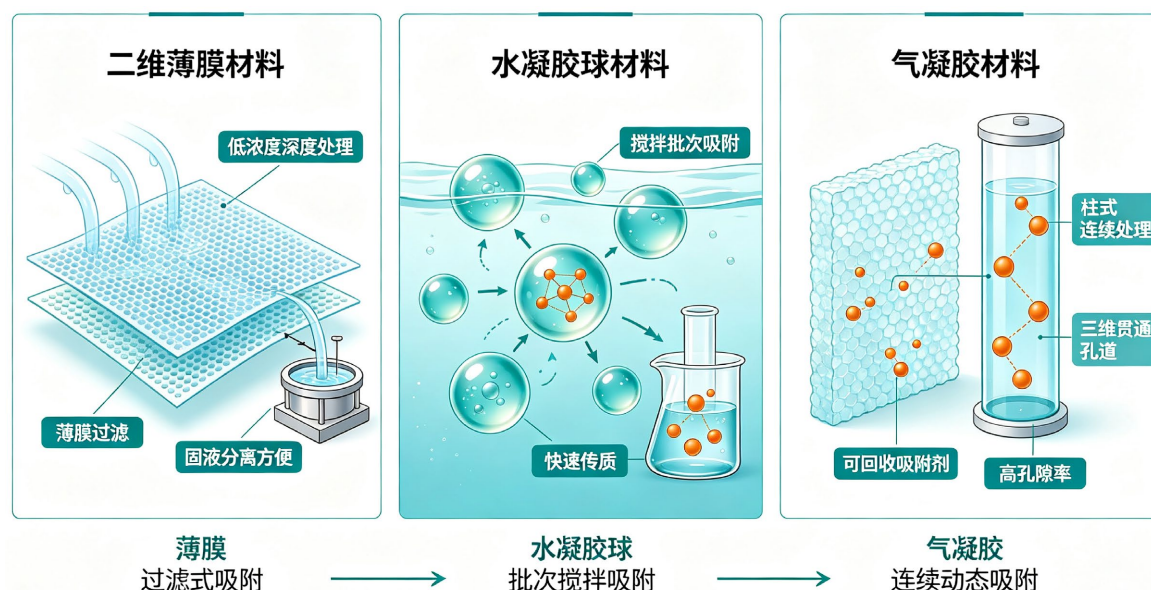


Figure 5. Different macroscopic morphologies of CNF derivatives (films, hydrogel spheres, aerogels) and their applications in wastewater treatment

图 5. CNF 衍生物不同宏观形态(薄膜、水凝胶球、气凝胶)及其废水处理应用

7. 当前存在问题与挑战

尽管实验室条件下 CNF 及其衍生物对重金属离子展现良好吸附性能, 但距离大规模工程应用仍然存在诸多瓶颈, 主要表现在以下几个方面: (1) 湿态结构稳定性有待进一步提升。即使经过交联改性, 在高盐、强酸碱长期工况下, 纤维素糖苷键水解、交联键断裂, 材料会逐渐溶胀破碎, 循环使用寿命不足, 是限制实际应用最大障碍。(2) 重金属离子选择性较差。大部分 CNF 衍生物对多种重金属均有吸附效果, 废水中大量共存阳离子会显著降低目标重金属吸附容量, 选择性吸附材料开发仍然是难点。(3) 规模化制备成本压力。TEMPO 氧化、硅烷偶联剂、聚乙烯亚胺等改性试剂成本较高; 气凝胶依赖冷冻干燥工艺, 能耗大, 放大生产难度高。需要开发低成本绿色改性、常压干燥制备工艺。(4) 吸附后固废处置问题。吸附饱和 CNF 衍生物属于含重金属危险固废。虽然材料本身可生物降解, 但吸附重金属之后不能直接降解, 需要开发高效解吸再生工艺, 提升循环次数, 减少危废产量。(5) 现有研究大多局限于实验室模拟废水。

绝大多数论文采用单一重金属模拟溶液开展实验; 真实工业废水成分复杂, 含有悬浮物、有机物、多种阴阳离子, 实际废水条件下吸附性能衰减规律研究不足。综合现有研究可知, 改性 CNF 基吸附材料凭借丰富的表面官能团、优异的多孔结构与可设计的界面特性, 能够通过静电吸附、离子交换、螯合配位及协同催化还原等多重机制高效去除水体中的重金属离子, 在水环境治理领域具备突出的应用潜力。

然而, 当前研究体系多基于组分单一的模拟废水开展, 材料的实际工程适用性仍存在显著短板。在真实复杂废水体系中, 大量共存碱金属与重金属离子会产生强烈的竞争吸附效应, 大幅削弱 CNF 吸附剂对目标污染物的吸附容量与选择性; 同时水体中的天然有机质可通过位点抢占、络合竞争与孔道堵塞等方式造成材料表面污染, 加速吸附性能衰减。此外, 真实工业废水存在重金属络合形态复杂、水质波动大、悬浮杂质多等特征, 使得 CNF 材料在实际水体中的吸附效率、吸附容量与循环稳定性均显著低于模拟体系表现。综上, 选择性不足、抗污染能力有限以及真实工况适应性差是目前制约 CNF 吸附材料工业化应用的关键瓶颈。未来需通过精准官能团改性、抗污染结构设计以及复合功能构筑等策略优化材料性能, 并加强真实废水、动态连续工艺条件下的中试研究, 进一步推动纳米纤维素绿色吸附材料在重金属废水治理中的实际落地。

8. 研究展望

面向重金属废水治理实际需求, CNF 及其衍生物未来研究可以聚焦下面方向: (1) 开发高稳定复合改性体系。结合共价交联与无机杂化协同改性, 进一步提升 CNF 衍生物在高盐、酸碱复杂废水体系湿态力学与长期稳定性; 开发低成本绿色交联剂, 降低试剂成本。(2) 开发高选择性 CNF 基吸附剂。引入离子印迹技术, 在 CNF 表面构建针对特定重金属离子识别位点, 提升复杂废水体系目标离子选择性吸附能力。(3) 优化制备工艺, 降低生产成本。探索常压干燥替代冷冻干燥制备 CNF 气凝胶; 利用秸秆、农业废弃物为原料制备 CNF, 实现农林废弃物资源化利用。(4) 加强动态吸附、真实废水实验研究。目前大量研究以批次静态吸附为主, 加强固定床动态吸附实验, 探究材料在真实工业废水条件下处理效果、衰减规律, 推进小试、中试试验。(5) 耦合多种水处理功能。将吸附、催化还原、膜过滤功能集成一体, 开发多功能 CNF 基材料, 同步去除重金属、有机污染物, 拓展应用场景。

9. 结论

纤维素纳米纤维 CNF 是一类来源广泛、环境友好的生物质纳米材料。原始 CNF 吸附重金属性能不足, 通过羧基化、氨基接枝、无机杂化、交联共混改性得到 CNF 衍生物, 可以引入大量螯合、离子交换活性位点, 同时改善湿态结构稳定性。CNF 衍生物依靠静电吸附、离子交换、螯合配位、物理吸附、氧化还原协同等多重机制实现重金属去除, 可以加工成薄膜、水凝胶、气凝胶等多种形态, 适配批次搅拌吸附、柱式连续过滤多种处理模式, 在重金属废水处理领域具备巨大潜力。

现阶段 CNF 基吸附材料仍面临湿态稳定性不足、选择性有限、制备成本高、真实废水数据匮乏等问题。未来需要重点开发低成本、高稳定性、高选择性改性 CNF 衍生物, 加强动态与实际废水试验, 推动生物质基吸附材料从实验室走向工程化应用。

参考文献

- [1] 侣荣荣, 吴朝军, 于冬梅, 等. 纳米纤维素基 2D/3D 重金属吸附材料的研究进展[J]. 中国造纸, 2021, 40(2): 63-71.
- [2] 陈舜胜, 戴振庭, 李若男, 等. 纤维素纳米纤维基复合吸附剂的制备及吸附水中重金属离子[J]. 环境化学, 2022(A).
- [3] Carpenter, A.W., de Lannoy, C. and Wiesner, M.R. (2015) Cellulose Nanomaterials in Water Treatment Technologies. *Environmental Science & Technology*, **49**, 5277-5287. <https://doi.org/10.1021/es506351r>
- [4] Zhang, L., Guo, L. and Wei, G. (2021) Recent Advances in the Fabrication and Environmental Science Applications of Cellulose Nanofibril-Based Functional Materials. *Materials*, **14**, Article 5390. <https://doi.org/10.3390/ma14185390>
- [5] Boccia, A.C., Neagu, M. and Pulvirenti, A. (2023) Bio-Based Aerogels for the Removal of Heavy Metal Ions and Oils from Water: Novel Solutions for Environmental Remediation. *Gels*, **10**, Article 32. <https://doi.org/10.3390/gels10010032>

-
- [6] Voisin, H., Bergström, L., Liu, P. and Mathew, A. (2017) Nanocellulose-Based Materials for Water Purification. *Nanomaterials*, **7**, Article 57. <https://doi.org/10.3390/nano7030057>
 - [7] 霍丹, 张希鹏, 孙悦凯, 等. 纳米纤维素吸附材料的制备及在工业废水处理中的应用[J]. 中国造纸, 2021, 40(11): 90-97.
 - [8] Chai, F., Wang, R., Yan, L., Li, G., Cai, Y. and Xi, C. (2020) Facile Fabrication of Ph-Sensitive Nanoparticles Based on Nanocellulose for Fast and Efficient As(v) Removal. *Carbohydrate Polymers*, **245**, Article 116511. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116511>
 - [9] Li, L., Wang, R., Ji, J., Wu, T., Liu, D., Hu, X., *et al.* (2024) Valorization of Water Hyacinth: Efficient Extraction of Nanofibrillated Crystals Using Ultrasound-Assisted TEMPO Oxidation and Their Application in Flexible Piezoelectric Films. *Industrial Crops and Products*, **222**, Article 119787. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119787>
 - [10] 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>
 - [11] Xi, C., Wang, R., Rao, P., Zhang, W., Yan, L., Li, G., *et al.* (2020) The Fabrication and Arsenic Removal Performance of Cellulose Nanocrystal-Containing Absorbents Based on the “Bridge Joint” Effect of Iron Ions. *Carbohydrate Polymers*, **237**, Article 116129. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116129>