

改性壳聚糖对工业废水重金属离子的吸附处理和修复

韩文晖, 高子良, 陶 哲, 郭振军, 鲍丙银

滁州学院土木与建筑工程学院, 安徽 滁州

收稿日期: 2026年7月15日; 录用日期: 2026年8月14日; 发布日期: 2026年9月10日

摘 要

随着化工、矿冶、电子等工业的快速发展, 含重金属离子废水的排放问题日益严峻。重金属离子难以生物降解, 易通过食物链富集, 对生态环境和人体健康构成严重威胁。传统物理和化学处理法在成本、效率及二次污染等方面存在诸多局限, 开发新型绿色生物吸附材料成为研究热点。壳聚糖作为一种来源丰富、环境友好的天然高分子, 其分子链上富含氨基(-NH₂)和羟基(-OH)等活性官能团, 可通过静电结合、配位络合等作用高效吸附重金属离子。但天然壳聚糖存在酸稳定性差、机械强度低、官能团种类有限等缺陷, 限制了其实际应用。针对上述问题, 本文系统综述了壳聚糖的交联改性、接枝改性和复合改性三大策略: 交联改性通过戊二醛、乙二醇二缩水甘油醚等交联剂构建三维网状结构, 提升材料稳定性和比表面积; 接枝改性通过引入硫脲、聚乙烯亚胺等官能团, 拓宽适用pH范围并增强吸附容量; 复合改性通过与磁性Fe₃O₄纳米粒子、聚丙烯腈、生物炭等功能载体协同组装, 实现易分离回收和多功能集成。在此基础上, 详细探讨了改性壳聚糖对铜、铬、锌三种典型工业重金属离子的吸附机理与处理优势。综合分析表明, 改性壳聚糖凭借吸附容量大、响应速度快、选择性强、可循环再生且无二次污染的综合优势, 在工业重金属废水深度处理领域展现出广阔的应用前景, 契合循环经济与可持续发展的核心理念。

关键词

壳聚糖, 改性, 重金属离子, 吸附, 废水处理

Adsorption Treatment and Remediation of Heavy Metal Ions in Industrial Wastewater Using Modified Chitosan

Wenhui Han, Ziliang Gao, Zhe Tao, Zhenjun Guo, Bingyin Bao

School of Civil and Architectural Engineering, Chuzhou University, Chuzhou Anhui

Received: July 15, 2026; accepted: August 14, 2026; published: September 10, 2026

文章引用: 韩文晖, 高子良, 陶哲, 郭振军, 鲍丙银. 改性壳聚糖对工业废水重金属离子的吸附处理和修复[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(9): 1458-1465. DOI: 10.12677/aep.2026.169147

Abstract

With the rapid development of industries such as chemical engineering, mining and metallurgy, and electronics, the discharge of wastewater containing heavy metal ions has become an increasingly severe problem. Heavy metal ions are difficult to biodegrade and tend to accumulate through the food chain, posing serious threats to the ecological environment and human health. Traditional physical and chemical treatment methods have many limitations regarding cost, efficiency, and secondary pollution; thus, developing novel green biosorbent materials has become a research hotspot. Chitosan, a natural polymer characterized by abundant sources and environmental friendliness, possesses active functional groups such as amino (-NH₂) and hydroxyl (-OH) groups on its molecular chains. It can efficiently adsorb heavy metal ions via electrostatic interactions and coordination complexation. However, natural chitosan suffers from poor acid stability, low mechanical strength, and limited types of functional groups, which restrict its practical application. To address these issues, this paper systematically reviews three major modification strategies for chitosan: cross-linking modification, grafting modification, and composite modification. Cross-linking modification utilizes cross-linkers such as glutaraldehyde and ethylene glycol diglycidyl ether to construct a three-dimensional network structure, thereby enhancing material stability and specific surface area. Grafting modification introduces functional groups like thiourea and polyethyleneimine to broaden the applicable pH range and increase adsorption capacity. Composite modification involves the synergistic assembly with functional carriers such as magnetic Fe₃O₄ nanoparticles, polyacrylonitrile, and biochar to achieve easy separation and multifunctional integration. Furthermore, the paper elaborates on the adsorption mechanisms and treatment advantages of modified chitosan for three typical industrial heavy metal ions: copper, chromium, and zinc. Comprehensive analysis indicates that modified chitosan exhibits broad application prospects in the advanced treatment of industrial heavy metal wastewater due to its comprehensive advantages, including high adsorption capacity, fast response speed, strong selectivity, recyclability, and the absence of secondary pollution. This aligns with the core concepts of a circular economy and sustainable development.

Keywords

Chitosan, Modification, Heavy Metal Ions, Adsorption, Wastewater Treatment

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

伴随着重工业的飞速发展，环境污染的问题也日渐加剧。化工、机械制造、矿冶、电子等企业在工业生产的过程会产生大量含重金属离子的废水[1]。这些重金属离子是难以被生物降解的，其会进一步通过食物链发生富集现象，从而对动植物、人体造成无法逆转的伤害[2]。传统的物理、化学处理手段都有着一定的局限性，生物处理方法相较其有着一定的自身优势，表 1 呈现了目前处理含重金属离子废水的一些传统方法以及它们各自优缺点。且我国近年来高度重视重金属污染防控，先后出台《水污染防治行动计划》¹《关于进一步加强重金属污染防控的意见》²《中华人民共和国水污染防治法》³等多项环保管控文件与法律法规，持续收严工业废水重金属排放限值，明确要求各行业推进废水深度治理，严控重金

¹https://www.mee.gov.cn/ywgz/zcghjtdd/sthjghjh/201811/t20181129_676575.shtml

²https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk03/202203/t20220315_971552.html

³https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/fl/200802/t20080229_118802.shtml

属污染物排放总量，迫使行业升级水处理技术，实现绿色生产，因此研究吸附容量大、操作简便、处理效果好、无二次污染、选择性强及性能稳定的新型生物处理重金属废水吸附材料显得尤其重要。天然高分子吸附剂作为安全无毒、吸附性良好的绿色吸附剂，已经逐渐得到人们的广泛重视，其中以壳聚糖吸附剂最为突出，其本身较活泼的化学特性可以通过对其进行改性化处理进而赋予其不同的特性，比如螯合、电中和、架桥吸附作用等，从而使其对工业废水中重金属离子具有很强的修复与处理能力，近些年来壳聚糖对重金属离子废水修复已经取得较大的发展，有相当大的一部分已经进入使用的程度，在市场和生活中有很大的潜力和发展前景。

Table 1. Traditional methods for treating wastewater containing heavy metals and their advantages and disadvantages
表 1. 处理含重金属废水的传统方法以及其优缺点

分类	方法	优点	缺点
物理法	萃取法	可连续操作，操作比较简单，能耗小，分离效果较好	条件较为苛刻
	离子交换法	操作简单，具有可持续性，所消耗的水量较大，处理效果好，节约成本[3]	适用范围比较有限且容易造成二次污染
	膜分离技术	需要空间小，处理效果较好，污泥产量少，能耗较低[4]	膜易污染、膜易堵塞
	物理吸附法	需要空间较小，处理效果好，成本低廉，可多层吸附[5]	只能特定吸附某一种，具有特异性
化学法	化学沉淀法	成本低廉，药剂来源广泛[6]	管道容易造成结垢堵塞与腐蚀；沉淀体积大，难以分离水和沉积体
	电解法	化学药剂用量少，操作简单，管理方便，所用空间小[7]	耗电，耗电电极金属量大，分离的沉淀物不易处理
	化学吸附法	所用空间小，处理效果好，成本低廉，具有多样性处理能力[8]	只能单层吸附，效果较差
生物法	生物絮凝法	无毒无害，处理效率高，分离操作简单[9]	处理时间长，污泥量大，脱水处理困难
	植物修复法	原位实施，无二次污染	修复工艺周期长，效果差
	生物吸附法	成本低廉，环境友好	受当时环境影响较大

2. 壳聚糖作为天然高分子的优势与缺陷

壳聚糖(Chitosan，简称为 CS)又称脱乙酰甲壳素，是经甲壳素脱 N-乙酰基后得到，是一种广泛存在于海洋甲壳动物的外壳及藻类植物的细胞壁中的线性多糖，自然界中的含量仅次于纤维素，位居第二，也是自然界中能被生物降解的阳离子高分子材料。图 1 所示为壳聚糖的化学结构。因为天然高分子壳聚糖具有生物相容性、血液相容性、可微生物降解等特性，所以引起了各行各业的广泛关注，例如在食品、药品、化妆品、金属提取及生物医学等诸多领域。现在，壳聚糖已经成为继蛋白质、糖类、维生素、矿物质、脂肪之后人体所需的第六大生命要素。2015 年，Baran 等[10]描述这一类多糖至今，人们对天然高分子壳聚糖的研究和认识取得了很大的进展。研究发现，其内部富含氨基(-NH₂)和羟基(-OH)等活性官能团，其官能团能够发生水解后变为 -NH₃⁺ 和 -OH₂⁺ 等携带正电荷的官能团，从而与金属阴离子静电结合进行吸附[11]，壳聚糖不易溶于水、碱和有机溶剂，在酸性溶液中会质子化，因此可在酸性环境下作为吸附剂使用。用于吸附重金属的壳聚糖常被制备成球状或凝胶状，多孔或网状的结构使其具有比表面积大的优势，这种结构可以增大壳聚糖本身与金属阴离子的接触面积，使得吸附剂表面的官能团可以与其充分结合，对重金属离子呈现出显著的吸附效果，但天然壳聚糖在用作吸附剂时受到自身酸稳定性差、热稳定性低、

机械性能差、官能团种类有限等因素的限制, 仅能在较窄的 pH、合适的温度下使用[12]。则需在改性壳聚糖上进行了大量的工作, 目的在于提升壳聚糖的稳定性、耐酸性和吸附能力, 而壳聚糖本身易于改性的优势刚好弥补了这一点, 将通过交联改性、接枝改性、结合改性、磁性改性以及复合载体改性来给壳聚糖提供更稳定的结构, 对 pH 的适应能力, 以及对环境的适应能力。

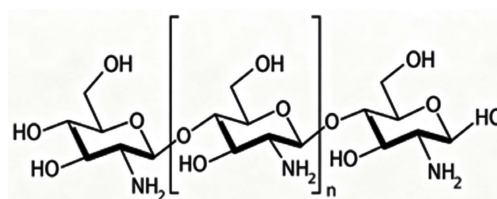


Figure 1. Structure formula of chitosan

图 1. 壳聚糖的化学结构

3. 壳聚糖的改性方式与功能

3.1. 交联改性

交联改性是通过添加交联剂使壳聚糖形成稳定的多孔的网状结构, 通过增加比表面积, 提升吸附效果, 表 2 中举出了常见的 4 种交联改性壳聚糖结构[13]。常见的交联剂有戊二醛、乙二醇二缩水甘油醚、环氧氯丙烷、N-N'乙二胺[14]等。使用交联剂改性是壳聚糖改性的常用方法。随着交联剂的添加能够有助于壳聚糖自身形成更稳定的网状多孔结构, 从而使壳聚糖本身的比表面积显著增大, 吸附容量增加, 去除重金属离子效果显著提升。近几年来研究内容更偏向于新型改性材料的研发和工艺参数的持续优化, 在交联剂改性壳聚糖吸附重金属离子的机理分析上有着进一步的研究并且同时在研发无毒无害、经济效应良好且兼具高吸附能力的改性壳聚糖吸附剂上还有很大的应用潜力。Torres-Badajoz 等[15]通过戊二醛交联制得壳聚糖微球, 该材料能在较短时间内达到较高的 Cr(VI)去除率, 表现出良好的吸附速率。Gomase 等[16]选用草酸作为交联剂, 不仅使吸附容量大幅提升, 还确定了最佳吸附 pH 为 3.0。Kong 等[17]则利用 KH-560 为交联剂、石墨烯为增强体, 构筑了具有三维网络结构的氧化石墨烯/壳聚糖复合气凝胶, 这种结构有效增加了吸附位点, 从而强化了对 Cr(VI)的捕获能力。Zhang 等[18]采用锆离子交联制备了 Zr-CTS 吸附剂, 在适宜 pH 下吸附容量远高于常规材料, 吸附过程以化学吸附为主导。Shi 等[19]合成了 UIO-66 交联剂并与壳聚糖复配成膜, 在各自最优 pH 条件下均可实现 Cr(VI)的高效去除。这些研究表明, 通过调控交联剂的种类和复合方式, 可以显著影响壳聚糖基吸附材料的形貌、吸附容量及吸附机理。

3.2. 接枝改性

接枝改性壳聚糖是通过人工干涉来给壳聚糖增加官能团种类和数量来改善天然壳聚糖酸稳定性差、吸附容量小的问题。硫脲、聚间苯二胺、聚乙烯亚胺这些材料常用于接枝壳聚糖上使其结合, 从而使壳聚糖对重金属的吸附效果得到提升。并且通过相关文献得出了壳聚糖接枝大部分情况是发生在壳聚糖的-NH₂上, 而壳聚糖-NH₂的不断消耗会间接影响与重金属的结合效果, 所以选择合适的接枝率是影响壳聚糖吸附重金属离子能力提升的关键, 通过实验我们可以得出接枝改性壳聚糖普遍具有吸附容量较大、稳定性比普通壳聚糖有显著的提升、重复利用率高的优势, 这是因为接枝改性后给壳聚糖引入了新的官能团, 这些官能团不仅可以强化壳聚糖的吸附效果, 还可以使壳聚糖在酸性条件下具有稳定性的特点, 从而让其应用于更宽的 pH 范围之中, 增强了其对不同环境下的 pH 适应能力。Xu 等[20]制备了 Zr⁴⁺交联硫

脲接枝改性的耐酸碱性能良好的吸附材料(CTS-T-Zr)，通过实验证实了 CTS-T-Zr 去除 Cr(VI)是通过静电作用、离子交换、还原作用和络合作用来协同完成。其中-OH 可以使 80.6%的 Cr(VI)还原为 Cr(III)，极大地降低了吸附溶液的毒性。新引入的-COO 和 C=S 可以提高吸附剂的吸附能力，在 298 K 且 pH = 2 时吸附容量达到了 246.72 mg/g。Guo 等[21]使用 N-2,4-二硝基苯 - 氯化吡啶与壳附温度下 Cr(VI)的吸附容量达到了 200.46 mg/g，并且 PCS 在循环吸附 5 次后的去除率仍可维持在 95%，是稳定性高、吸附容量大、可多次循环使用的经济型吸附剂。

3.3. 复合改性壳聚糖

3.3.1. 有机材料复合改性壳聚糖的作用途径与优势

复合改性技术旨在将壳聚糖与具备特定吸附性能或功能特性的载体材料进行有机结合，从而构建出性能更优越的新型复合材料。这类材料不仅完整保留了壳聚糖自身的优势，更在固液分离便捷性、循环回收利用率以及整体经济效益方面展现出显著优势，应用前景十分广阔。近年来，研究者们广泛采用纤维素纳米纤维、纤维素纳米晶、聚乙烯亚胺、明胶以及海藻酸钠等有机材料与壳聚糖进行复合改性[22][23]。这些有机组分能够协助壳聚糖构建稳固的三维网络结构，这不仅大幅增强了吸附剂在酸性环境下的稳定性，也为其循环再生提供了便利，具有极高的经济价值。

3.3.2. 有机材料复合改性壳聚糖吸附 Cr(VI)的研究进展

在具体研究方面，Zeng 等[24]成功制备了一种接枝碳点的纤维素纳米晶/壳聚糖复合水凝胶。该研究利用纤维素纳米晶作为天然骨架搭建起三维多孔结构，显著强化了吸附性能，其对 Cr(VI)的吸附容量达到 217.8 mg/g。此外，引入的碳点赋予了材料荧光探针特性，使其能够对浓度高于 0.04 μg/L 的 Cr(VI)进行灵敏的定量检测，是一种集低成本、高吸附率与检测功能于一体的智能吸附剂。Chen 等[25]则采用环保的低温水热法，优化并制备了纤维素纳米纤维/壳聚糖互穿网络水凝胶，并将其应用于 Cr(VI)和 Cu(II)的吸附处理。实验数据显示，该材料对 Cr(VI)的吸附容量高达 294.46 mg/g。研究指出，这种绿色无毒的制备工艺所得的水凝胶不仅适用于污水治理和医药领域，最新研究还发现其具有潜在的抗肿瘤活性。Wang 等[26]研发了一种三维超弹性聚亚胺功能化壳聚糖气凝胶。改性后的吸附剂表现出优异的可逆压缩性能，对 Cr(VI)的吸附容量高达 445.29 mg/g。固定床柱实验进一步证实，该材料对初始浓度分别为 2 mg/L 和 52.88 mg/L 的模拟及真实含铬废水，处理量分别达到 36367 mL 和 7453 mL，证明了其在大规模实际应用中的潜力。此外，该吸附剂还能有效抑制小麦对金属离子的富集，在农业灌溉水处理方面前景广阔。Lin 等[27]制备了 Aliquat-336 离子液体填充的壳聚糖胶囊。该复合材料在酸性条件下表现出良好的稳定性，在 20℃时对 Cr(VI)的最大吸附容量为(110.94±5.07)mg/g。机理研究表明，在吸附过程中，Cr(VI)通过 C-C、C-H 及 -NH₂⁺、-NH₃⁺等基团的作用被还原为毒性较低的 Cr(III)，实现了吸附与解毒的同步进行。通过有机材料复合改性极大地拓展了壳聚糖吸附剂的应用边界。其应用场景已不局限于含铬废水的处理与回收，还延伸至农田灌溉、生物医药及 Cr(VI)离子检测等多个领域。大量研究表明，此类吸附剂兼具优异性能与经济效益，有望替代传统工业吸附剂，因此对其深入开发与研究具有重要的科学价值与现实意义，详见表 2。

Table 2. Comparison of three types of modification: cross-linking, grafting, and composite
表 2. 交联、接枝、复合三种改性对比

对比维度	交联改性	接枝改性	复合改性
核心机理	分子间共价桥接， 构建三维网状多孔骨架	支链分子化学键合， 定向引入特异性官能团	异质材料物理/化学组装， 实现多组分功能协同

续表

制备成本	较低(交联剂廉价, 工艺成熟)	较高(需消耗引发剂及高纯度接枝单体)	中等至较高(视载体材料而定, 如磁性纳米粒子)
操作难度	低(常规水溶液反应, 条件温和)	较高(需严格控制接枝率、温度及除氧环境)	中等(需解决异质材料分散性及界面结合问题)
稳定性提升	极佳(显著提升耐酸性、热稳定性及机械强度)	良好(主要提升化学稳定性及pH 适用范围)	优异(载体提供物理支撑, 整体结构稳固)
吸附容量	中等(依赖比表面积增加, 位点数量未变)	极高(引入高密度特异性配位基团)	高(壳聚糖与载体协同吸附, 部分具催化还原作用)
对比维度	交联改性	接枝改性	复合改性
选择性	一般(主要依靠静电和弱配位, 易受共存离子干扰)	极高(可根据目标离子“量身定制”配位基团)	较高(可通过载体功能化增强特异性识别)
再生性能	良好(结构稳定, 耐酸碱洗脱)	优异(强化学键合使官能团不易脱落)	极佳(如磁性材料可无损磁分离, 循环寿命长)
工业化潜力	高(工艺简单, 易于放大生产)	中等(成本及工艺控制限制了大规模应用)	极高(易分离回收, 契合连续化工程应用需求)

4. 改性壳聚糖对铜、铬、锌离子的吸附途径与综合优势

4.1. 改性壳聚糖对金属离子的吸附途径

改性壳聚糖凭借其分子链上丰富的氨基与羟基, 能够通过配位络合、静电吸引以及原位还原等多种机制, 实现对重金属离子的高效去除。针对不同的目标污染物, 其作用途径各有侧重: 对于阳离子如 Cu(II) 和 Zn(II), 材料主要依靠官能团提供孤对电子发生化学螯合, 遵循拟二级动力学模型; 而对于阴离子 Cr(VI), 则是在酸性条件下先通过质子化氨基的静电引力将其富集, 再原位还原为低毒性的 Cr(III) 并加以固定。这种多样化的吸附途径赋予了改性壳聚糖在重金属废水处理中显著的综合应用优势。首先, 在吸附效能与抗干扰能力方面, 各类改性壳聚糖均展现出卓越的容量与选择性。例如, EDTA 改性壳聚糖在强酸性 (pH=3) 环境下仅需 2 分钟即可达到平衡吸附量的 95%, 对 Cu(II) 的最大饱和吸附量达 84.6 mg/g [28]; 柠檬酸改性树脂对 Zn(II) 的吸附容量高达 243.90 mg/g; 而壳聚糖/聚甲基丙烯酸甲酯/聚乙烯亚胺纳米纤维膜对 Cr(VI) 的初始吸附容量更是突破至 226.5 mg/g。

4.2. 改性壳聚糖对金属离子的综合优势

这些材料在实际复杂水体中表现出极强的耐受性, 即便在 Na⁺、Ca²⁺ 等常见共存离子的干扰下, 其对目标金属的去除效率依然稳定, 且对制革废水等成分复杂的工业废水同样适用[29]。其次, 在工程操作与循环再生方面, 改性壳聚糖克服了传统粉末状吸附剂难以分离的工程瓶颈[30]。磁性复合微球的引入使得固液分离变得极为便捷, 且材料具备优异的再生性能——无论是处理含铜还是含铬废水, 经过多次吸附-解吸循环后, 其吸附容量或去除率仍能保持在较高水平。此外, 部分材料无需复杂的预处理即可直接用于低浓度电镀废水的深度净化[31], 大幅简化了操作流程。最后, 改性壳聚糖的应用高度契合循环经济与可持续发展的理念。其不仅制备工艺成熟、成本可控, 更打通了“废水处理-资源回收”的一体化闭环。以锌离子的处理为例, 吸附饱和后的废弃材料可进一步转化为皮革复鞣剂等功能性助剂, 实现高附加值利用; 同时, 在处理 Cr(VI) 时同步完成的减毒过程, 也彻底消除了二次污染隐患。这些特性共同确立了改性壳聚糖在工业废水深度净化与资源化利用领域的广阔前景。

5. 总结

面对化工、矿冶、电子等工业快速发展带来的重金属废水污染问题,许多环保法规对排放限值的持续严肃对待,通过科研开发吸附容量大、操作较简便、无二次污染的新型生物吸附材料已成为行业绿色升级的基本需求。壳聚糖作为自然界中唯一大量存在的碱性多糖,其分子链上富含氨基(-NH₂)和羟基(-OH)等活性官能团,可通过质子化后与金属离子发生静电结合或配位络合,并且其易于制成多孔球状或凝胶状的材料而获得较高的比表面积优点,在重金属废水处理领域展现出天然的优势。但是它的缺点也很明显,因为天然的壳聚糖受酸稳定性差、热稳定性低、机械性能弱并且还有官能团种类有限等因素制约,只能在较窄的 pH 和温度范围内进行使用和操作。为了解决壳聚糖的这种劣势,研究者们围绕交联改性、接枝改性和复合改性三大策略开展了大量工作与实验:交联改性通过戊二醛、乙二醇二缩水甘油醚等交联剂构建稳定的三维网状结构,有效提升了材料的耐酸性和比表面积;接枝改性通过引入硫脲、聚乙烯亚胺等功能基团,增加了吸附位点的种类与数量,拓宽了材料的适用 pH 范围;复合改性则是将壳聚糖与磁性 Fe₃O₄ 纳米粒子、聚丙烯腈、水热炭等功能性载体复合[32],从而赋予材料易分离、易回收和工业化应用能力。通过以铜、铬、锌三种典型工业重金属离子为例,改性壳聚糖能够通过配位络合、静电吸引-还原协同以及离子交换等多元机制方法实现对重金属离子的高效去除:EDTA 改性壳聚糖对 Cu(II)在 2 分钟内即可达到 95%的平衡吸附量;壳聚糖复合纳米纤维膜对 Cr(VI)的吸附容量高达 226.5 mg/g;柠檬酸改性壳聚糖树脂对 Zn(II)的吸附容量达 243.90 mg/g,且吸附后的材料可回收用作皮革复鞣剂,实现了“废水处理-资源回收”的完美闭环。综合来看,实验过后的改性壳聚糖凭借吸附容量大、选择性强、响应速度快、可循环再生且无二次污染的杰出优势,已经逐步从实验室研究走向实际工程应用的星辰大海,深深契合循环经济与可持续发展的核心理念,是当前极具开发潜力的绿色重金属废水处理材料之一。

基金项目

2025 年度滁州学院大学生创新创业训练计划项目(2025cxxl147); 2026 年度滁州学院大学生创新创业训练计划项目(2026cxxl146)。

参考文献

- [1] 贺斐,程爽,高贺敏,等.含锌镉铝的铁废水中金属的资源化分离回收工艺[J].工业水处理,2021,41(11):120-124.
- [2] 李晓晖,艾仙斌,吴永明,等. Mextral V10-Mextral 973H 体系脱除酸性矿山废水中重金属的研究[J].过程工程学报,2021,21(4):488-494.
- [3] 杨海,黄新,林子增,等.离子交换法处理重金属废水的研究进展[J].应用化工,2019,48(7):1675-1680.
- [4] 周荣忠,谢锦文,李攀荣,等.有机硅生产行业重金属废水膜分离技术研究[J].中国给水排水,2022,38(13):90-96.
- [5] 赵阳,张永明,贺泽民,等. β -环糊精磁性复合微球的制备及其对 Cr⁶⁺的吸附[J].化工新型材料,2022,50(4):303-306.
- [6] Kim, J., Yoon, S., Choi, M., Min, K.J., Park, K.Y., Chon, K., *et al.* (2022) Metal Ion Recovery from Electrodialysis-Concentrated Plating Wastewater via Pilot-Scale Sequential Electrowinning/Chemical Precipitation. *Journal of Cleaner Production*, **330**, Article ID: 129879. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129879>
- [7] 魏喆,魏立安,张秋根.铁碳微电解法处理有机硅单体合成中 Cu²⁺、Zn²⁺废水的研究[J].材料保护,2020,53(2):144-147,166.
- [8] 张凤智,王敦球,曹星沣,等.高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II)和 Ni(II)的去除性能及机制[J].环境科学,2023,44(6):3278-3287.
- [9] 李政伟,张金良,蔡明,等.微生物絮凝剂在生活污水处理中的应用进展[J].水处理技术,2023,49(2):25-29,34.
- [10] Baran, T., Menteş, A. and Arslan, H. (2015) Synthesis and Characterization of Water Soluble O-Carboxymethyl Chitosan Schiff Bases and Cu(II) Complexes. *International Journal of Biological Macromolecules*, **72**, 94-103.

- <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.07.029>
- [11] 刘雪梅, 吴凡, 章海亮, 等. 农林废弃物生物吸附剂处理重金属废水的研究进展[J]. 应用化工, 2019, 48(11): 2703-2707.
 - [12] Mohammed, M.H., Williams, P.A. and Tverezovskaya, O. (2013) Extraction of Chitin from Prawn Shells and Conversion to Low Molecular Mass Chitosan. *Food Hydrocolloids*, **31**, 166-171. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.10.021>
 - [13] Kim, I., Seo, S., Moon, H., Yoo, M., Park, I., Kim, B., *et al.* (2008) Chitosan and Its Derivatives for Tissue Engineering Applications. *Biotechnology Advances*, **26**, 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.07.009>
 - [14] 李鑫, 李冬娜, 徐传鑫, 等. 壳聚糖生物降解薄膜在食品保鲜包装中的应用进展[J]. 天津造纸, 2024, 46(2): 21-26, 43.
 - [15] Torres-Badajoz, S.G., Rodríguez-Núñez, J.R., López-Ramírez, E., Peña-Caballero, V., Villa-Lerma, A.G., Madera-Santana, T.J., *et al.* (2022) Kinetic and Equilibrium Studies of Cr(VI) Adsorption Using Glutaraldehyde-Crosslinked Chitosan Beads. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*, **46**, 147-160. <https://doi.org/10.1007/s40995-021-01255-5>
 - [16] Gomase, V., Jugade, R., Doondani, P., Saravanan, D. and Pandey, S. (2022) Sequential Modifications of Chitosan Biopolymer for Enhanced Confiscation of Cr(VI). *Inorganic Chemistry Communications*, **145**, Article ID: 110009. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.110009>
 - [17] Kong, D., He, L., Li, H., Zhang, F. and Song, Z. (2021) Preparation and Characterization of Graphene Oxide/Chitosan Composite Aerogel with High Adsorption Performance for Cr(VI) by a New Crosslinking Route. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **625**, Article ID: 126832. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126832>
 - [18] Zhang, Y., Lan, G., Liu, Y., Zhang, T., Qiu, H., Li, F., *et al.* (2020) Enhanced Adsorption of Cr(VI) from Aqueous Solution by Zirconium Impregnated Chitosan Microspheres: Mechanism and Equilibrium. *Separation Science and Technology*, **56**, 2532-2545. <https://doi.org/10.1080/01496395.2020.1842451>
 - [19] Shi, P., Hu, X. and Duan, M. (2021) A Uio-66/Tannic Acid/Chitosan/Polyethersulfone Hybrid Membrane-Like Adsorbent for the Dynamic Removal of Dye and Cr(VI) from Water. *Journal of Cleaner Production*, **290**, Article ID: 125794. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125794>
 - [20] 徐春梓. Zr⁴⁺交联氨基功能化壳聚糖复合材料材的制备及其对 Cr(VI)的吸附性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆理工大学, 2023.
 - [21] Guo, C., Huang, G., Zhang, X. and Guo, D. (2003) Catalysis of Chitosan-Supported Iron Tetraphenylporphyrin for Aerobic Oxidation of Cyclohexane in Absence of Reductants and Solvents. *Applied Catalysis A: General*, **247**, 261-267. [https://doi.org/10.1016/s0926-860x\(03\)00108-x](https://doi.org/10.1016/s0926-860x(03)00108-x)
 - [22] 李鸣明, 詹世平, 宫蕾. 壳聚糖/明胶复合微球的制备及对铬离子的吸附性能[J]. 材料导报, 2020, 34(S1): 535-538.
 - [23] 贺宝元, 薛海燕. 壳聚糖/明胶复合微球对六价铬的吸附性能[J]. 中国皮革, 2014, 43(19): 7-10.
 - [24] Zeng, H., Hu, Z., Peng, C., Deng, L. and Liu, S. (2021) Effective Adsorption and Sensitive Detection of Cr(VI) by Chitosan/Cellulose Nanocrystals Grafted with Carbon Dots Composite Hydrogel. *Polymers*, **13**, Article 3788. <https://doi.org/10.3390/polym13213788>
 - [25] Chen, X., Song, Z., Yuan, B., Li, X., Li, S., Thang Nguyen, T., *et al.* (2022) Fluorescent Carbon Dots Crosslinked Cellulose Nanofibril/Chitosan Interpenetrating Hydrogel System for Sensitive Detection and Efficient Adsorption of Cu(II) and Cr(VI). *Chemical Engineering Journal*, **430**, Article ID: 133154. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133154>
 - [26] Wang, Q., Tian, Y., Kong, L., Zhang, J., Zuo, W., Li, Y., *et al.* (2021) A Novel 3D Superelastic Polyethyleneimine Functionalized Chitosan Aerogels for Selective Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution: Performance and Mechanisms. *Chemical Engineering Journal*, **425**, Article ID: 131722. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131722>
 - [27] Lin, X., He, X., Lei, L., Zhao, Y., Cui, L. and Wu, G. (2022) Development of Ionic Liquid Filled Chitosan Capsules to Remove Cr(VI) from Acidic Solution: Adsorption Properties and Mechanism. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **10**, Article ID: 108081. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108081>
 - [28] Repo, E., Warchol, J.K., Kurniawan, T.A. and Sillanpää, M.E.T. (2010) Adsorption of Co(II) and Ni(II) by EDTA- and/or DTPA-Modified Chitosan: Kinetic and Equilibrium Modeling. *Chemical Engineering Journal*, **161**, 73-82. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.04.030>
 - [29] 吴海玲. DTPA-壳聚糖/GO 复合材料对重金属铜和阳离子染料的吸附去除[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
 - [30] 税永红, 李前华, 唐欢. 吸附法处理重金属废水的研究现状及进展[J]. 成都纺织高等专科学校学报, 2016, 33(2): 207-213.
 - [31] 石泰山. 用含铬电镀污泥处理焦磷酸盐镀铜废水[J]. 电镀与涂饰, 2016, 35(20): 1087-1090.
 - [32] 王雪峰, 杨龙寿, 陈天. 壳聚糖为载体金属亲和吸附剂的制备及性质[J]. 功能高分子学报, 2003, 10(3): 327-331.