

生物质基水凝胶吸附水中污染物的研究进展

董慧彬¹, 卢刚¹, 张全^{2*}

(1. 国家能源集团雁宝能源敏东一矿, 内蒙古 呼伦贝尔 021100;
2. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 水资源是人类生存不可或缺的元素, 水质净化处理已成为亟待解决的问题。文章综述近年来生物质基水凝胶吸附水中污染物(如重金属离子、染料等)的研究进展, 详细阐述了纤维素质基、壳聚糖基、海藻酸钠基、半纤维素基及其他生物质基水凝胶对水环境中染料及重金属(Cr、Pb、Ni、Cu)的吸附机理。最后, 针对聚合物凝胶净化水环境研究中存在的问题提出建议, 并对未来发展方向进行探讨。

关键词: 生物质吸附剂; 水凝胶; 重金属离子; 废水处理; 吸附

中图分类号: TQ424.3; X703

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)01-0210-05

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.01.038

Research Progress of Adsorption of Water Pollutants by Biomass-based Hydrogels

DONG Huibin¹, LU Gang¹, ZHANG Quan^{2*}

(1. Yanbao Energy Mindong No. 1 Mine, China Energy Investment Group, Hulunbuir 021100, China;
2. CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: Water resources are an essential element for human survival, and water purification has become an urgent issue to address. The article reviewed the research progress of biomass-based hydrogels in adsorbing water pollutants (such as heavy metal ions and dyes) in recent years. It elaborated on the adsorption mechanisms of cellulose-based, chitosan-based, sodium alginate-based, hemicellulose-based, and other biomass-based hydrogels for dyes and heavy metals (Cr, Pb, Ni, Cu) in the aquatic environment. Finally, it put forward suggestions for the existing problems in the research of polymer gels in purifying the water environment and discussed the future development directions.

Keywords: Biomass adsorbent; Hydrogel; Heavy metal ions; Wastewater treatment; Adsorption

我国工业的迅猛发展, 由矿山开采^[1]、工农业生产^[2-3]以及生活污水等^[4]人为活动引发的水污染问题日益严峻, 对生态平衡及公众健康构成重大威胁。据统计, 重金属是废水中最严重的环境污染物之一^[5], 其中包括汞(Hg)^[6]、铬(Cr)^[7]、铅(Pb)^[8]、镉(Cd)^[9]、铜(Cu)^[10]和砷(As)^[11]等元素。这些元素易于在水体中转化为高迁移性、高毒性的离子形态, 严重威胁生物及人体健康。此外, 广泛应用于纺织、皮革、造纸等行业的亚甲基蓝(MB)具有致癌性, 因其稳定的杂环芳香结构而不易降解, 也是不容忽视的污染物之一。

生物质基水凝胶是一种源于自然的绿色材料, 具有来源广泛、成本低廉、生物相容性良好、可降解性等优点^[12-13]。

其表面富含羟基、羧基、氨基等官能团^[14], 能够与金属离子发生螯合或络合作用^[15], 从而实现对污染物的吸附, 是处理污水的有效途径之一。然而, 未改性的生物质基水凝胶的吸附性能难以满足当前废水处理的需求, 因此需要对其进行物理或化学改性, 以提高其吸附性能。

本文综述近年来生物质基水凝胶吸附水中污染物的研究进展, 详细描述了纤维素质水凝胶、壳聚糖基水凝胶、海藻酸钠基水凝胶、半纤维素基水凝胶及其他生物质基水凝胶对水环境中染料和Cr、钴(Co)、镍(Ni)等重金属离子的吸附应用。

收稿日期 Submitted date 2025-03-31; 修回日期 Revised date 2025-04-29; 录用日期 Accepted date 2025-05-28

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目(2023-JC-ZD-27); 天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项重点项目(2022-TD-ZD005)

*联系人, 1182628355@qq.com

引用本文: 董慧彬, 卢刚, 张全. 生物质基水凝胶吸附水中污染物的研究进展[J]. 塑料科技, 2026, 54(1): 210-214.

Citation: DONG H B, LU G, ZHANG Q. Research progress of adsorption of water pollutants by biomass-based hydrogels[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(1): 210-214.

1 生物质基水凝胶吸附剂的吸附机理

生物质基材料属于天然高分子,其高分子链上含有许多亲水性基团(如羟基、羧基、氨基等),是一类绿色可持续发展的材料^[16]。然而,未改性的生物质基材料对污水中污染物的吸附效果尚不能满足实际要求^[17],因此需要进行改性以制备吸附性能更优异的生物质基水凝胶。

对生物质基水凝胶的改性方法分为物理改性和化学改性^[18]。物理改性方法通常包括物理交联、研磨等;化学改性方法则包括醚化、酯化、接枝共聚、表面活性剂改性等^[19]。

生物质基水凝胶的主要吸附机理如下^[20-22]:第一,静电作用。通过加入醚化剂(如环氧氯丙烷、卤代羧酸、季铵型阳离子醚化剂等),将胺基、羧基、季铵基团等引入高分子骨架,改变表面电位,从而增强与污染物的静电作用。第二,离子交换作用。重金属离子与溶液中含氧官能团上的氢离子发生交换,从而实现吸附。第三,络合作用。高分子链上的亲水基团中的氮原子与其他高分子链上的电负性原子形成氢键,这种氢键作用使水凝胶具有更稳定的三维网状结构,提高了吸附性能。

此外,通过加入酰卤、有机酸等试剂进行酯化改性或通过自由基聚合反应制备接枝共聚物水凝胶,可使其具有更优异的疏水性和亲油性。改性后的水凝胶增加了活性位点,促进了其功能基团与重金属离子之间形成共价键和配位键,从而提高污染物的去除率。

2 生物质基水凝胶吸附剂的分类

2.1 纤维素基水凝胶

纤维素来源于农林废弃物,具有良好的生物相容性和生物可降解性,是一种绿色可持续发展的材料。纤维素主要由 β -吡喃葡萄糖单元通过 β -(1,4)糖苷键连接而成,其表面富含大量羟基,因而具有较高的反应活性,可作为吸附材料用于吸附污染物。

SHI等^[23]在纤维素水凝胶中引入磺酸基团进行改性,利用酰胺基团与MB和铅离子的配位作用实现化学吸附,且该吸附过程符合伪二阶动力学模型和Langmuir等温模型。李箫宁^[24]以木屑为原料,采用液相还原法制备负载零价铁的纤维素凝胶。实验结果表明,该材料可用于吸附水中的 Fe^{3+} 、 As^{6+} 和 Cr^{3+} 等重金属离子。其吸附机理主要为化学吸附:一方面, Fe^{3+} 与羟基络合形成羟基氧化铁,同时生成新的吸附位点,增强吸附能力;另一方面, As^{3+} 、 As^{6+} 和 Cr^{3+} 通过螯合作用或静电作用吸附在水凝胶的活性位点上。同时,具有还原性的Fe被砷离子氧化为 Fe^{3+} ,在纤维素中形成 Fe^{3+} 与木屑纤维素的络合物结构,从而提供更多的活性位点。鉴于 Cr^{6+} 的毒性远高于 Cr^{3+} ,LI等^[25]利用酒糟中产生的细菌纤维素制备水凝胶,通过凝胶释放到溶液中的多酚将 Cr^{6+} 还原为 Cr^{3+} ,以降低环境中铬的毒性。MAJAMO等^[26]以玉米芯为原料制备用于吸附MB的水凝胶。实验结果表明,30℃时,对水凝胶对MB的吸附率可

达98.25%。DANG等^[27]从椰子壳中提取纤维素制备气凝胶,对结晶紫染料(CV)的吸附容量为46.9 mg/g。

纤维素基水凝胶的原材料来源广泛,包括木材、农作物及其副产品,主要用于吸附染料污染物(如MB和CV)和重金属离子(如 Fe^{3+} 、 As^{3+} 、 As^{6+} 、 Cr^{6+} 和 Cr^{3+})。

2.2 壳聚糖基水凝胶

壳聚糖的主要来源之一是可再生材料几丁质。几丁质主要存在于真菌的细胞壁、昆虫或甲壳类动物的外层以及节肢动物的骨骼中。通常通过脱矿、脱蛋白和去乙酰化等步骤从几丁质中提取壳聚糖^[28]。壳聚糖结构中含有丰富的活性羟基和氨基,这使其能够进行多种物理和化学修饰。作为一种生物质材料,壳聚糖基水凝胶在净化水质的研究中发挥重要作用。

壳聚糖基水凝胶可用于吸附水中的染料污染物^[29]。SRIVASTAV等^[2]研究以乙二醛交联的天然多糖壳聚糖和瓜尔胶基水凝胶对阳离子染料孔雀石绿(MG)和染料金胺O(AO)的吸附能力,并采用Langmuir模型验证吸附效果。结果表明,水凝胶对MG的最大吸附量为40.69 mg/g,对AO的吸附量为30.51 mg/g。壳聚糖基水凝胶也常用于处理水中的磷酸盐。DUAN等^[30]研究聚丙烯酰胺、铜增强壳聚糖基水凝胶对磷的吸附能力,从而去除水中的磷酸盐。结果表明,在实验室中,吸附效率可达90%以上;在实际应用中,水凝胶处理废水后,可使水质达到一级标准。其主要吸附机理为:(1)静电作用,带正电荷的羟基、氨基与带负电荷的磷酸根离子通过静电相互作用;(2) La^{3+} 以氢氧化镧的形式存在,磷酸盐可与之发生配体交换吸附。WUJICKI等^[31]利用化学沉淀法制备铈改性壳聚糖基水凝胶,该水凝胶对磷酸盐的吸附率可达98%以上,是未改性壳聚糖基水凝胶吸附效果的4倍。

此外,研究人员还发现可以通过纳米材料改性壳聚糖来制备磁性壳聚糖基水凝胶,用于吸附水中的重金属离子^[32]。CHEN等^[33]以戊二醛为交联剂,采用化学沉淀法制备的聚乙烯亚胺改性壳聚糖磁性水凝胶对重金属具有良好的吸附性能,且对 Pb^{2+} 、 Ni^{2+} 和 Cu^{2+} 有明显的竞争性吸附能力,吸附量依次为128.96、105.98、100.32 mg/g,其中吸附能力顺序为 $\text{Cu}^{2+}>\text{Ni}^{2+}>\text{Pb}^{2+}$ 。经过4次循环后,3种金属离子的去除率仍在85%以上。WAN等^[34]研究一种新型聚乙烯亚胺改性磁性水凝胶纳米复合材料。这种具有多孔结构的材料对重金属离子 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 等具有较高的吸附能力,吸附量分别为371.4、236.7、150.0 mg/g。研究还发现,通过提高原溶液的pH值和重金属离子的初始浓度,可以提高磁性水凝胶的吸附能力。

综上所述,壳聚糖基水凝胶主要用于吸附水中的染料污染物(如MG和AO)、磷酸盐以及重金属离子(如 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 和 Cd^{2+})等。

2.3 海藻酸钠基水凝胶

海藻酸钠是通过海带或马尾藻提取碘和甘露醇得

到的副产物,分子是由 β -D-甘露糖醛酸和 α -L-古洛糖醛酸通过(1,4)键连接而成,分子式为 $C_6H_7NaO_6$,属于天然多糖,具有很好的溶解性、黏性和安全性。海藻酸钠具有与各种重金属络合的能力,其中含有的羧基和羟基可作为配位和反应位点,因此常用来吸附水环境中的重金属离子。

ZHAO等^[35]研发一种纤维素-海藻酸钠-聚乙烯亚胺-L-半胱氨酸复合水凝胶微球,该微球能够有效吸附重金属离子 Co^{2+} 和 Ni^{2+} 。研究发现,海藻酸钠结构中的钠离子与水溶液中的钙离子发生离子交换反应后,形成的致密网络结构使复合水凝胶对污染物的吸附通过内外扩散共同作用。其中,含氮、氧、硫的官能团与 Co^{2+} 和 Ni^{2+} 之间的静电作用和络合反应起关键作用。吸附过程符合Langmuir等温吸附模型和准二级动力学模型,对 Co^{2+} 和 Ni^{2+} 的吸附量分别为358 mg/g和373 mg/g,且该材料具有良好的稳定性和可回收性。WANG等^[36]研究海藻酸钠-聚丙烯酰胺水凝胶对铜离子的吸附作用。结果表明,吸附机理主要为非均匀多层吸附,当溶液pH值为5时,最大吸附量为134.65 mg/g。通过伪二阶动力学模型确定吸附过程以化学吸附为主,而Thomas模型表明内外扩散并非限制水凝胶吸附强度的主要因素。ZHANG等^[37]采用化学接枝与原位生长技术相结合,制备一种成本低廉、环境友好的海藻酸钠-三聚氰胺-咪唑酸盐(SA-ME@ZIF-67)吸附剂。研究表明,在308.15 K时,该吸附剂对 Pb^{2+} 的去除能力高达634.99 mg/g。其主要吸附机理为通过络合和静电吸引与 Pb^{2+} 相互作用,其中羧基、羟基和氨基等官能团是主要的吸附位点,但吸附能力会随pH值的减小而降低。此外,吸附-解吸实验还证明SA-ME@ZIF-67吸附剂具有优异的吸附和再生性能。ALNASERY等^[38]研究一种纳米颗粒尺寸为78.48 nm的不均匀球形氧化石墨烯改性海藻酸钠基纳米水凝胶对 Cr^{6+} 和 Pb^{2+} 的吸附过程,发现该过程是非自发的、放热的,且对 Pb^{2+} 的吸附能力大于 Cr^{6+} 。ZHANG等^[39]研究了环保型复合水凝胶对稀土元素La(III)的吸附。根据Langmuir模型,在298.15 K时,吸附剂对 La^{3+} 的最大吸附量为217.39 mg/g。

此外,除重金属离子外,海藻酸钠基水凝胶还可用于吸附有机化合物,如萘(NA)和MB。CHAKRABORTY等^[40]将马铃薯果皮合成的生物炭加入海藻酸钠和高岭土中,制备一种用于吸附水环境中萘的生物基水凝胶。研究表明,在搅拌速度为160 r/min的条件下,90 min内萘的去除率可达99.523%,此时吸附剂剂量为10 g/L。LI等^[41]采用冷冻法制备一种具有小于200 nm孔隙的水凝胶,其对染料污染物MB的吸附能力可达2 986 mg/g,且该吸附过程是自发的、吸热的,且无二次污染。

综上所述,海藻酸钠基水凝胶主要用于吸附重金属离子(如 Ni^{2+} 、 Co^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cr^{6+} 和 La^{3+})以及有机物染料(如NA和MB)。

2.4 半纤维素基水凝胶

半纤维素具有多种结构,由多种单糖组成,主要包括

D-木糖、D-葡萄糖、L-阿拉伯糖、D-半乳糖、D-甘露糖、D-葡萄糖醛酸和D-半乳糖醛酸,其主要类型包括葡聚糖、葡萄糖醛聚糖、阿拉伯聚糖和异多糖等。

LIAN等^[42]研究了通过接枝共聚制备的半纤维素水凝胶在不同浓度、温度条件下对铅离子的吸附性能。研究结果表明,半纤维素对铅离子的吸附为单层吸附,吸附过程是自发进行的吸热反应。梁志^[43]以玉米芯半纤维素为原料,以丙烯酸为功能单体,制备一种生物质基水凝胶,其对 Pb^{2+} 的最大吸附容量为1 095 mg/g,吸附达到平衡的时间为300 min。此外,通过接枝共聚制备的半纤维素水凝胶在pH值为5时,对 Cu^{2+} 的去除率可达92%^[44]。

黄丽丽等^[45]以半纤维素为原材料制备了生物质基水凝胶吸附剂。当温度为25 °C时,该吸附剂在20 min内对MB的去除率可达85.00%,最高去除率约达93.09%。经过5次循环后,对MB的去除率仍可达70.38%。吸附剂中丰富的羟基和特有的环状结构使其能够与MB之间产生氢键和静电作用,从而完成吸附。ZHAO等^[46]将从玉米芯中提取的半纤维素经自由基聚合和原位共沉淀法制备磁性半纤维素基水凝胶。该水凝胶具有超顺磁性,其更加致密的内部结构使其具有更优异的吸附性能。当用量为0.015 g时,该水凝胶对MB的吸附去除率可达97%。吸附过程分为3个阶段:初期(前60 min),吸附速率迅速增长,水凝胶表面的吸附位点与MB迅速反应;中期(60~180 min),吸附速率缓慢增长,随着表面吸附位点被占据,MB逐渐进入水凝胶内部寻找吸附位点;后期(180 min后),吸附速率趋于平稳,此时水凝胶的吸附位点均被占据,反应趋于平衡。

综上所述,半纤维素水凝胶的制备多采用接枝共聚方法,主要用于去除染料污染物MB和重金属离子(如 Pb^{2+} 和 Cu^{2+}),因其制备方法简易,具有较好的应用前景。

2.5 其他生物质基水凝胶

用于水环境处理的生物质基水凝胶还包括木质素基水凝胶、甲壳素基水凝胶和海藻酸盐衍生物等。

OMER等^[47]将从杏仁壳中提取的木质素进行酯化处理,结果显示,酯化后的木质素在室温条件下对铅离子的吸附能力可达113.64 mg/g。MA等^[48]研究的木质素双网络水凝胶表现出优异的吸附性能,能够在10 min内达到吸附平衡,对 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的理论最大吸附量分别为196.68、268.98、374.32 mg/g。该水凝胶的吸附过程主要以含氧、含氮官能团的化学吸附为主,物理吸附为辅。LIU等^[49]采用冻融法制备氧化石墨烯改性的几丁质基水凝胶,其力学性能提高218%,对刚果红(CR)的吸附量可达230.5 mg/g。ZHANG等^[50]研究的海藻酸盐基复合水凝胶对 Pb^{2+} 和 Cu^{2+} 的最大吸附能力分别为369.6 mg/g和124.1 mg/g。WANG等^[51]指出,海藻酸盐基水凝胶的吸附机制主要是 Na^+ 与金属离子之间的交换,其中二价阳离子还可附着在羟基和羧基上,水凝胶的吸附能力主要取决于

羧基的数量。

综上所述,天然高分子衍生物基水凝胶主要用于吸附染料污染物(如CR)和重金属离子(如 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Pb^{2+})。

3 结论

生物质基水凝胶经过一系列改性后,对污水中的重金属离子和染料污染物的吸附量显著提升,在净化水资源领域展现出良好的应用前景。然而,目前相关研究多停留在实验室阶段,关于生物质基水凝胶的实际应用还需深入研究。生物质基水凝胶的制备工艺相对复杂,时间和经济成本较高,不利于工业应用。未来需要在提升性能的同时优化工艺,开发经济、便捷且可持续发展的吸附材料。当前研究多聚焦于单一污染物或离子,而工业废水常含多种污染物。因此,应开发具有多功能吸附特性的高效材料,以更好地应用于实际废水处理。此外,吸附-解吸过程的研究需要进一步深化。一方面,该过程可实现重金属的回收利用;另一方面,该过程可提高吸附剂的循环再生利用率,开发环境友好型吸附剂。

参考文献

- [1] YANG J, CHANG X, GAO Y B, et al. Stress field comparison in deep coal mines: Roof cutting versus traditional methods[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2024, 42(8): 6809-6831.
- [2] SRIVASTAV A L, PATEL N, RANI L, et al. Sustainable options for fertilizer management in agriculture to prevent water contamination: A review[J]. *Environment, Development & Sustainability*, 2024, 26(4): 8303-8327.
- [3] 潘晶, 姜晓业, 黄琳丽, 等. 进水有机负荷和曝气方式对污水地下渗滤系统脱氮和 N_2O 释放的影响[J]. *沈阳师范大学学报(自然科学版)*, 2025, 43(3): 256-261.
- [4] AWONAIKE B, PARAJULEE A, LEI Y D, et al. Traffic-related sources may dominate urban water contamination for many organic contaminants[J]. *Environmental Research Letters*, 2022, 17(4): 044030.
- [5] NURIĆ A, NURIĆ S, VARCAKOVIĆ A. Heavy metal pollution of water sources" šićki brod" and" studenac" due to the exploitation of coal [J]. *SAR Journal-Science and Research*, 2024: 12-18.
- [6] CÓRDOBA-TOVAR L, MARRUGO-MADRID S, CASTRO L P, et al. Exploring the phytoremediation potential of plant species in soils impacted by gold mining in Northern Colombia[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2025, 32(7): 3795-3808.
- [7] XU X H, CHEN K G, DAI Y, et al. Synthesis of zeolite A-X from coal fly ash via ultrasonic-alkali fusion hydrothermal method for the efficient removal of Cr (VI) from wastewater[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2025, 236(2): 1-17.
- [8] ZAMAN HGUL, BALOO L, PENDYALA R. Application in the optimization of Pb (II) adsorption by chitosan from produced water by using response surface methodology[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2023, 20(1): 197-208.
- [9] RIPANDA A, HOSSEIN M, RWIZA M J, et al. Combatting toxic chemical elements pollution for Sub-Saharan Africa's ecological health [J]. *Environmental Pollution and Management*, 2025, 2: 42-62.
- [10] ZHAO Y Y, LUAN H W, YANG B H, et al. Adsorption of Pb, Cu and Cd from water on coal fly ash-red mud modified composite material: Characterization and mechanism[J]. *Water*, 2023, 15(4): 767.
- [11] SRIVIDHYA S, ROJA A, ARUNACHALAM M. Rapid adsorption of iodine from water and reversible capture of iodine vapor using stilbene-crosslinked porous organic polymers[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 68: 106386.
- [12] LIN C Y, KE Z J, SHEN Y P, et al. Bio-based Ca^{2+} -selective supramolecular metallohydrogels with ultra-mechanical responsiveness, selective dye adsorption, and recycling[J]. *Langmuir*, 2023, 39(26): 9200-9210.
- [13] LIU J Y, SUN W, SUN G R, et al. Portable electroanalytical platform based on eco-friendly biomass-based hydrogels with bimetallic MOF composites for trace acetaminophen determination[J]. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 2024, 11(1): 649-660.
- [14] MUBARK A E, HAKEM H A, ZAKI E G, et al. Sequestration of Cd (II) and Cu (II) ions using bio-based hydrogel: A study on the adsorption isotherms and kinetics[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2022, 19(11): 10877-10892.
- [15] BORA A, KARAK N. Biobased hydrogel reinforced with wastepaper-derived modified cellulose nanofiber as an efficient dye remover from wastewater[J]. *Journal of Polymer Research*, 2023, 30(12): 452.
- [16] THAVKAR S, THUBE S, PANCHBHAI P, et al. Evaluation of bio-efficacy of metarhizium anisopliae against the pink bollworm *Pectinophora gossypiella* (Saunders), with insights into its colonization potential and insecticide compatibility[J]. *Journal of Cotton Research*, 2025, 8(1): 8.
- [17] GÜN A, ALBAYRAK A, PARIN F N, et al. Influence of essential oil on the properties of UV-crosslinked polyacrylamide/sodium caseinate (PAAM/SC) hydrogels[J]. *Journal of Innovative Engineering and Natural Science*, 2025, 5(1): 262-272.
- [18] YAO X, ZHANG S F, WEI N, et al. Cellulose-based conductive hydrogels for emerging intelligent sensors[J]. *Advanced Fiber Materials*, 2024, 6(5): 1256-1305.
- [19] 刘琳, 刘紫旭, 费守华, 等. 甲壳素和壳聚糖在污水处理中的应用进展[J]. *环境科学与技术*, 2023, 46(增刊1): 125-130.
- [20] CHEN M Q, LONG A L, ZHANG W, et al. Recent advances in alginate-based hydrogels for the adsorption-desorption of heavy metal ions from water: A review[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 353: 128265.
- [21] 胡鑫鑫, 梁志, 王丹菊. 木聚糖水凝胶对亚甲基蓝吸附性能研究[J]. *塑料科技*, 2024, 52(7): 52-57.
- [22] NJUGUNA D G, SCHÖNHERR H. Green chemistry route to chitosan hydrogels and investigation of the materials as efficient dye adsorbents [J]. *Pure and Applied Chemistry*, 2024, 96(2): 241-258.
- [23] SHI X H, JI H R, JI X X, et al. Cellulose modification using sulfamic acid for adsorption of methylene blue and lead ions[J]. *Cellulose*, 2024, 31(7): 4381-4393.
- [24] 李箫宁. 纤维素基材料制备及对水相污染物吸附和荧光检测研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- [25] LI Z Y, DONG J J, AZI F, et al. Mechanism of Cr(VI) removal by polyphenols-rich bacterial cellulose gel produced from fermented wine pomace[J]. *NPJ Clean Water*, 2024, 7(1): 1-11.
- [26] MAJAMO S L, AMIBO T A, MEKONNEN D T. Experimental investigation on adsorption of methylene blue dye from waste water using corncob cellulose-based hydrogel[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14

- (1): 4540.
- [27] DANG Y T, DO N H N, NGUYEN P T X, et al. Green fabrication of bio-based aerogels from coconut fibers for wastewater treatment[J]. *Journal of Porous Materials*, 2022, 29(4): 1265-1278.
- [28] SZADKOWSKI B, ŚLIWKA-KASZYŃSKA M, MARZEC A. Bioactive and biodegradable cotton fabrics produced via synergic effect of plant extracts and essential oils in chitosan coating system[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 8530.
- [29] VAID V, KHUSHBU, KAUR K, et al. Removal of organic dyes from aqueous solutions by adsorption of chitosan-guar gum-based glyoxal crosslinked hydrogel[J]. *Fibers and Polymers*, 2023, 24(2): 383-401.
- [30] DUAN J X, ZHANG X, WEI Y. Lanthanum-doped chitosan-based polyacrylamide double network hydrogels for adsorption of phosphorus from wastewater[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, 31: 47365-47377.
- [31] WUJICKI Ł, MAŃDOK T, BUDZIŃSKA-LIPKA W, et al. Cerium (IV) chitosan-based hydrogel composite for efficient adsorptive removal of phosphates (V) from aqueous solutions[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 13049.
- [32] HARMAJI A, SAPUTRI N D, SUNENDAR B. Chitosan-modified alumina-zirconia-carbonate apatite nanoparticles-filled dental restorative composite materials: Characterization and mechanical properties[J]. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, 2023, 21(4): 817-828.
- [33] CHEN Z, WANG Y F, ZENG J, et al. Chitosan/polyethyleneimine magnetic hydrogels for adsorption of heavy metal ions[J]. *Iranian Polymer Journal*, 2022, 31(10): 1273-1282.
- [34] WAN T, TANG Q, WANG T R, et al. Adsorption behaviours of copper (II), lead (II), and cadmium (II) ions from aqueous solution by polyethylenimine-modified magnetic hydrogel nanocomposites[J]. *Journal of Polymer Research*, 2022, 29(12): 520.
- [35] ZHAO J R, WEI Z F, SUN L N, et al. A novel cellulose-based composite hydrogel microsphere material: For efficient adsorption of Co (II) and Ni (II) ions in water[J]. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 2025, 35(2): 898-918.
- [36] WANG H Y, HUANG M Y, LI L, et al. Highly efficient copper ions removal by sodium alginate/sodium humate@Polyacrylamide: Adsorption behavior and removal mechanism[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2024, 235(4): 1-13.
- [37] ZHANG X, LI Z Y, ZHANG T Y, et al. Fabrication of sodium alginate-melamine@ZIF-67 composite hydrogel and its adsorption application for Pb(II) in wastewater[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(7): 18364-18379.
- [38] ALNASERY H, NASERI A, JASIM L S, et al. Synthesis, characterization, and adsorption capacity of sodium alginate poly grafted (fumaric acid-co-polyacrylic acid)/graphene oxide hydrogel as adsorbent for Cr (VI) and Pb (II) removal[J]. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 2024, 21(7): 1915-1927.
- [39] ZHANG X, LUO S W, DUAN J X, et al. Fabrication of sodium alginate-doped carbon dot composite hydrogel and its application for La (III) adsorption and enhanced the removal of phosphorus[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(49): 108230-108246.
- [40] CHAKRABORTY P, SARKAR S, DAS P, et al. Synthesis and application of biochar-incorporated sodium alginate-kaolin hydrogel beads to remove naphthalene from waste water[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2025, 15(2): 2867-2879.
- [41] LI J G, ZHANG J J, WANG Q H, et al. Preparation, characterization, and adsorption kinetics of methylene blue dye in sodium alginate hydrogel with improved stability[J]. *Colloid and Polymer Science*, 2023, 301(4): 347-355.
- [42] LIAN Y X, ZHANG J, LI N, et al. Preparation of hemicellulose-based hydrogel and its application as an adsorbent towards heavy metal ions [J]. *Bioresources*, 2018, 13(2): 3208-3218.
- [43] 梁志. 玉米芯半纤维素基水凝胶对Pb²⁺吸附性能和机理[J]. *化工新型材料*. 2023, 51(2): 202-206.
- [44] 梁志, 胡鑫鑫. 木聚糖基水凝胶对Cu²⁺吸附性能的研究[J]. *塑料科技*, 2024, 52(1): 54-58.
- [45] 黄丽丽, 谢祥成, 赵俭波, 等. 半纤维素基水凝胶的制备及其对亚甲基蓝的吸附研究[J]. *化工新型材料*, 2024, 52(10): 192-199.
- [46] ZHAO L T, ZHANG J, LI N, et al. Preparation of hemicellulose-based magnetic hydrogel and its adsorption properties for dye[J]. *Cailiao Gongcheng/Journal Mater Eng*, 2020, 48(11): 85-91.
- [47] OMER S K, FAKHRE N A. Effective removal of aqueous lead (II) ions using partially esterified lignin as a new adsorbent[J]. *Iranian Journal of Science*, 2023, 47(5): 1497-1516.
- [48] MA J H, LI T, LIU Y T, et al. Rice husk derived double network hydrogel as efficient adsorbent for Pb(II), Cu(II) and Cd(II) removal in individual and multicomponent systems[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 290: 121793.
- [49] LIU C Y, LIU H Y, TANG K Y, et al. High-strength chitin based hydrogels reinforced by tannic acid functionalized graphene for congo red adsorption[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2020, 28 (3): 984-994.
- [50] ZHANG H, HAN X, LIU J Y, et al. Fabrication of modified alginate-based biocomposite hydrogel microspheres for efficient removal of heavy metal ions from water[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 651: 129736.
- [51] WANG Y T, SHEN Z P, WANG H L, et al. Progress in research on metal ion crosslinking alginate-based gels[J]. *Gels*, 2025, 11(1): 16.