综述与专论

DOI：10.11949/0438-1157.

木质素基水凝胶的构建机制及应用研究进展

周思颖，杜健，胡金文，王海松

（大连工业大学轻工与化学工程学院，辽宁大连，116034）

摘要： 在可持续发展对可再生功能材料的需求日益迫切之际，木质素作为自然界储量最丰富的芳香族天然高分子，因其独特的抗紫外线、抗氧化、抗菌活性和双亲性，正从制浆造纸废弃物逐步转向高值化功能材料。本文系统综述了木质素的来源、结构性质及构建水凝胶的机制与应用进展，总结了木质素分子结构特征与反应活性并阐述了化学交联、物理交联及混合交联三种水凝胶构建方式及其形成机制。从环境修复、生物医学、农业与园艺、柔性传感、能源等领域需求出发，梳理了木质素基水凝胶在重金属吸附、药物控释、伤口敷料、土壤改良、可穿戴传感及储能器件等方面的最新研究成果与作用机理。最后，总结了当前木质素构建水凝胶功能材料面临的关键挑战并展望未来发展方向，以期为木质素基水凝胶的高值化利用与功能化设计提供参考。

关键词： 木质素；水凝胶；交联剂；吸附；功能材料

中图分类号： TS79　　**文献标志码：** AA

文章编号： 0438-1157（XXXX）XX-0001-15

Research progress on construction mechanisms and applications of lignin-based hydrogels

ZHOU Siying, DU Jian, HU Jinwen, WANG Haisong

(*School of Light Industry and Chemical Engineering*, *Dalian Polytechnic University*, *Dalian* 116034, *Liaoning*, *China*)

Abstract: As the demand for renewable functional materials in sustainable development grows increasingly urgent, lignin—the most abundant aromatic natural polymer in nature—is gradually shifting from pulp and paper waste to high-value functional materials, thanks to its unique UV-blocking, antioxidant, antibacterial, and amphiphilic properties. This article systematically reviews the sources, structural properties, and mechanisms of hydrogel construction based on lignin, as well as recent progress in their applications. It summarizes the molecular structural characteristics and reactivity of lignin and describes three methods for hydrogel preparation—chemical crosslinking, physical crosslinking, and mixed crosslinking—along with their formation mechanisms. From the perspectives of environmental remediation, biomedicine, agriculture and horticulture, flexible sensing, and energy, the review outlines the latest research achievements and underlying mechanisms of lignin-based hydrogels in areas such as heavy metal adsorption, controlled drug release, wound dressings, soil improvement, wearable sensing, and energy storage devices. Finally, it summarizes the key challenges currently faced in constructing functional hydrogel materials from lignin and discusses future development directions, aiming to provide a reference for the high-value

收稿日期： 2026-05-14　　**修回日期：** 2026-07-21

通信作者： 杜建(1990—)，男，博士，副教授，dujian01@dlpu.edu.cn；胡金文(1990—)，男，博士，讲师，hujinwen@dlpu.edu.cn；王海松(1978—)，男，博士，教授，wanghs@dlpu.edu.cn

第一作者： 周思颖(2003—)，女，博士研究生，13470213410@163.com

基金项目： 国家自然科学基金项目(W2412117)；辽宁省自然科学基金项目(LJBKY2025057和2025-BS-0463)

引用本文： 周思颖, 杜健, 胡金文, 王海松. 木质素基水凝胶的构建机制及应用研究进展[J]. 化工学报, XXXX, XX(XX): 1-15

Citation: ZHOU Siying, DU Jian, HU Jinwen, WANG Haisong. Research progress on construction mechanisms and applications of lignin-based hydrogels[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(XX): 1-15

utilization and functional design of lignin-based hydrogels.

Keywords: lignin; hydrogel; crosslinking agent; adsorption; functional materials

引 言

随着全球对可持续发展与绿色化学的关注日益加深，开发环境友好可再生的功能材料已成为材料科学的重要方向[1]。水凝胶具有可调三维多孔结构、良好柔韧性与物质传输能力，在农业、环境、生物医学及柔性电子等领域应用广泛[2-4]。纤维素、壳聚糖(CS)和丝素蛋白来源丰富、可再生性强，且分别具有亲水性、抗菌活性和细胞相容性等独特功能，是构建绿色水凝胶的理想基材[5-7]。然而，现有天然高分子水凝胶普遍存在力学性能不足、功能单一、成本受限等问题，亟需开发新型水凝胶以突破性能瓶颈[8]。

木质素作为自然界储量最丰富的可再生芳香族高分子，是植物细胞壁的核心组分之一，全球每年制浆和生物炼制行业产生数千万吨工业木质素。与纤维素等线性多糖不同，木质素具有独特的三维网状芳香骨架，富含酚羟基、醇羟基等活性官能团，是兼具抗紫外线、抗氧化、抗菌活性及双亲性的天然高分子[9-10]。然而，受限于结构复杂、空间位阻大且反应活性不足，木质素长期被视作工业废弃物，除不足2%得到高效利用外，其余大多作为低值燃料焚烧，造成严重的资源浪费与环境负担[11]。

近年来，多种选择性化学改性方法的突破性进展，显著提升了木质素的反应活性和加工性能，使其从废弃物逐步转变为高性能材料的关键组分[12]。将改性木质素引入水凝胶体系，不仅可以利用其刚性芳香骨架增强力学性能，还能通过多重活性位点赋予材料紫外屏蔽、抗菌、导电及吸附等新功能[13-14]，同时降低对石油基原料的依赖，践行“变废为宝”的绿色理念。基于此，木质素基水凝胶的研究近年迅速兴起，并在环境修复、生物医学、农业园艺、柔性传感及能源存储等领域取得了一系列重要进展[15-16]，成为天然高分子水凝胶领域的前沿热点。

1 概述

1.1 木质素的来源

木质素，是植物界中储量仅次于纤维素的天然高分子有机物，也是维管植物细胞壁的核心成分[17]。它与纤维素、半纤维素相互交织，共同撑起植物的骨架，广泛存在于木材、秸秆、草本植物等陆生植物的根、茎、叶和果实之中。

在工业上，木质素主要来源于制浆黑液及生物炼制副产物[18-19]。据统计，全球每年产生的工业木质素已达数千万吨，预计到2030年将攀升至2.25亿吨[20]。然而，目前仅有约6%被回收利用，其余大多直接焚烧，既浪费了宝贵资源，又给环境带来了沉重负担。这一产量巨大且亟待利用的工业副产物为木质素基水凝胶的研发提供了丰富原料来源，也生动诠释了绿色化学“变废为宝”的核心理念。

1.2 木质素的结构与性质

木质素的结构极为复杂，过去普遍认为，木质素是由苯基丙烷结构单元通过醚键和碳-碳键连接而成的三维高分子共聚物。现代研究则进一步揭示，木质素的结构单元之间还存在酯键连接，并且与碳水化合物(主要是半纤维素)之间也以多种化学键相连，共同形成木质素-碳水化合物复合体(LCC)[21]。木质素广泛存在于木本植物、草本植物以及所有维管植物中，在自然界中的储量仅次于纤维素和甲壳素，是第三大天然高分子有机物质。

木质素由愈创木基丙烷(G)、紫丁香基丙烷(S)和对羟苯基丙烷(H)三种主要的苯基丙烷单体通过自由基偶联聚合而成[22]。不同植物来源比例各异：针叶木以G为主，阔叶木含G和S，禾本科富含H[23]。在化学连接方式上，β-O-4芳基醚键是最主要的连接形式，其次还有β-β、β-5、β-1、5-5及5-O-4等键型(见图1)。木质素具有醇羟基、酚羟基、醛基、酮基、甲氧基等活性官能团，决定其化学反应特性。当前研究多通过化学改性或复合制备功能化木质素[24]，可通过RAFT聚合、接枝共聚等进行化学改性[25-26]，制备功能化共聚物和动态网络材料。

1.3 木质素基水凝胶

水凝胶网络通过物理(氢键、疏水、离子作用)或化学(共价键)交联构筑[27]。木质素引入可提升抗氧化、抗紫外、抗菌及机械性能：其多酚结构可与聚乙烯醇(PVA)、聚乙二醇(PEG)等聚合物分子形成分子间氢键，聚合物长链之间相互穿插缠绕，形成稳定结构[28]；羟基和羧可参与化学交联[29]。在水凝胶体系中木质素可扮演三种主要角色。(1)作为多

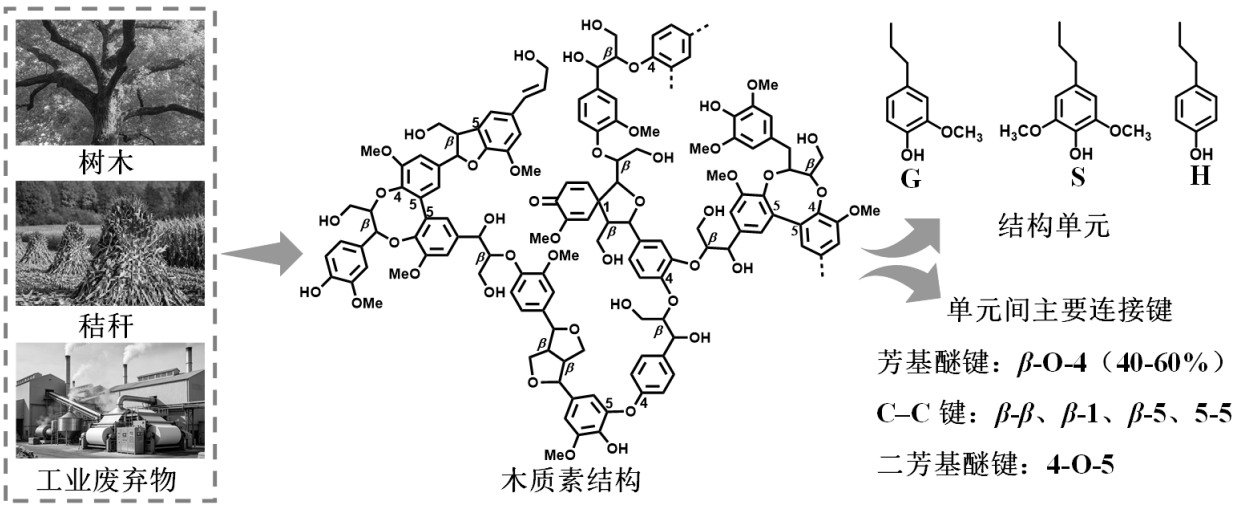


图1 木质素的来源与分子结构特征

Figure 1 Source of raw materials and molecular structural characteristics of lignin

功能交联剂。木质素的多酚结构既可编织动态物理网络，也能构筑稳固的共价网络。例如，其与CS、PVA之间可通过氢键和静电相互作用，直接搭建成物理凝胶的骨架[30]。(2)作为活性接枝骨架。在木质素骨架上接枝丙烯酸(AA)、丙烯酰胺(AM)等合成聚合物链，形成共聚物水凝胶，如海藻酸钠(SA)接枝苯硼酸与脱甲基磺化木质素，通过动态硼酸酯键构建可注射自愈合水凝胶[31]。(3)作为功能纳米填料或增强相。以纳米颗粒分散改善强度并赋予光热、抗菌等功能，如SL@AgNPs增强聚丙烯酸(PAA)水凝胶，断裂伸长率1816%，抑菌率100%[32]。

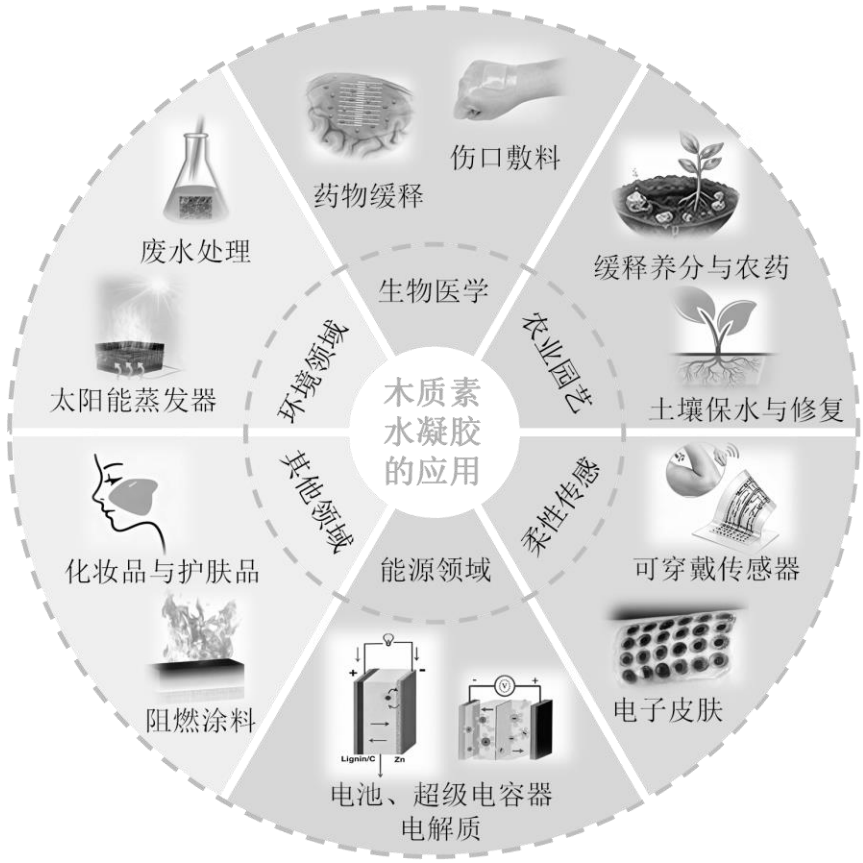


图2 木质素基水凝胶的多领域应用场景[33-41]

Figure 2 Lignin-based hydrogels: Diverse applications across multiple fields[33-41]

木质素基水凝胶具有可调的三维网络结构、良好的生物相容性和木质素赋予的抗氧化、抗菌等附加性能，因此在多个领域展现出良好的应用潜力，其典型应用场景如图2所示。在环境修复方面，木质素的多酚结构与三维多孔网络赋予水凝胶优异的金属配位和污染物吸附能力[33-34]；在生物医学领域，木质素的生物相容性、抗氧化及抗菌活性使其成为伤口敷料和药物缓释载体的理想候选材料[35]；农业与园艺应用中，木质素丰富的亲水基团可改善水凝胶的保水性和缓释能力，有助于改善土壤墒情、提高肥料利用率[36]；在柔性传感方向，木质素基水凝胶凭借可调的力学性能和导电性，可构建高灵敏度应变传感器[37]；能源领域中，其多孔网络结构和丰富官能团则为超级电容器电解质和电池隔膜提供了稳定支撑[38-39]；此外，在化妆品领域，木质素的高抗氧化活性可赋予水凝胶抗衰老和美白功效[40]；而在阻燃材料方面，其成炭特性则为制备绿色阻燃涂层提供了新路径[41]。上述应用将在第3部分中进一步展开讨论。

2 木质素基水凝胶构建机制

木质素水凝胶的制备方法依据交联机制进行分类，即依据高分子链之间形成网络结构的作用力类型，将其分为化学交联法、物理交联法以及结合两者优势的混合交联法。

2.1 化学交联法

化学交联是构建木质素基水凝胶的重要方法之一，该策略充分利用木质素分子中的酚羟基、醇羟基和部分羧基等活性官能团，与多官能团的交联剂形成不可逆的共价键，如碳-碳键、酯键、醚键等。

碳-碳键交联主要通过自由基聚合实现，是最为广泛采用的化学交联策略[42]。该交联方式的基本原理是：在引发剂或催化体系作用下，木质素分子上的酚羟基被氧化脱氢生成酚氧自由基，或烯类单体（如AA、AM等）的双键被打开形成活性自由基，进而引发链式聚合反应，在木质素与聚合物链之间或聚合物链彼此之间形成碳-碳键连接，最终构筑三维网络结构。根据木质素参与方式的不同，该交联方式又可分为两类：一是木质素作为大分子共聚单体，其分子上的酚羟基经氧化后直接参与乙烯基单体的自由基共聚；二是木质素先经化学改性引入可聚合双键，再通过共聚接入聚合物网络。例如，Zerpa等[43]将阔叶木碱木质素（AL）引入N-异丙基丙烯酰胺和N,N′-亚甲基双丙烯酰胺的自由基聚合体系，AL分子上的酚羟基在引发剂作用下氧化为酚氧自由基，直接作为大分子共聚单体与丙烯酰胺单体发生链式共聚，以碳-碳键将木质素骨架共价接入聚丙烯酰胺（PAM）网络，使水凝胶热稳定性显著提升。李帅等[44]先利用烯丙基缩水甘油醚将木质素进行醚化改性引入双键，然后与AA和两性离子单体甲基丙烯酸磺基甜菜碱进行交联共聚，将木质素以碳-碳键牢固嵌入聚合物交联网络中，构筑了兼具抗氧化、抗紫外和抗菌性能的水凝胶。Su等[45]利用木质素-碱金属离子自催化体系，木质素酚羟基在此体系中自发氧化生成酚氧自由基，无需外加引发剂即可引发AA单体聚合，4分钟内即可快速构建以碳-碳键连接木质素与聚丙烯酸链的三维网络水凝胶电解质[图3(a)]。需要指出的是，自由基聚合中的“接枝共聚”根据接枝机理的不同，可分为“从表面接枝”（grafting from）和“接枝到表面”（grafting to）两种方式，前者指在木质素骨架上引入引发基团后原位引发单体聚合，后者则指将预合成聚合物链直接连接到木质素骨架，目前木质素基水凝胶研究以前者为主。

酯键交联主要利用木质素分子中的醇羟基或酚羟基与含羧酸、酸酐或酰氯等官能团的交联剂之间发生酯化反应形成交联网络。该交联方式的优势在于反应条件相对温和（通常在室温至60 ℃之间），且无需外加金属催化剂。此外，酯键在生理环境下具有一定的可降解性，赋予了水凝胶生物可降解功能，在药物控释和组织工程等领域具有独特价值。例如，Zhang等[46]利用多巴胺和SA与木质素组装了木质素多层微球水凝胶，体系中木质素的酚羟基与SA的羧基通过酯化反应形成共价交联点。在农用化学品缓释领域，Zheng等[47]设计了一种将甲基丙烯酸化的植物生长调节剂或除草剂与AA共聚的木质素基水凝胶体系，其中木质素通过酯键与活性分子连接，酯键的水解赋予材料pH响应释放特性，在碱性条件下释放更快。

醚键交联主要通过木质素的醇羟基或酚羟基与含有环氧基团、卤代烃的交联剂之间的亲核取代反应实现。最具代表性的体系是以环氧氯丙烷为交联剂，其分子两端的环氧基团分别与两个羟基发生开环醚化反应，从而将不同聚合物链连接起来。该交联方式的优点是交联效率高、反应可在碱性水

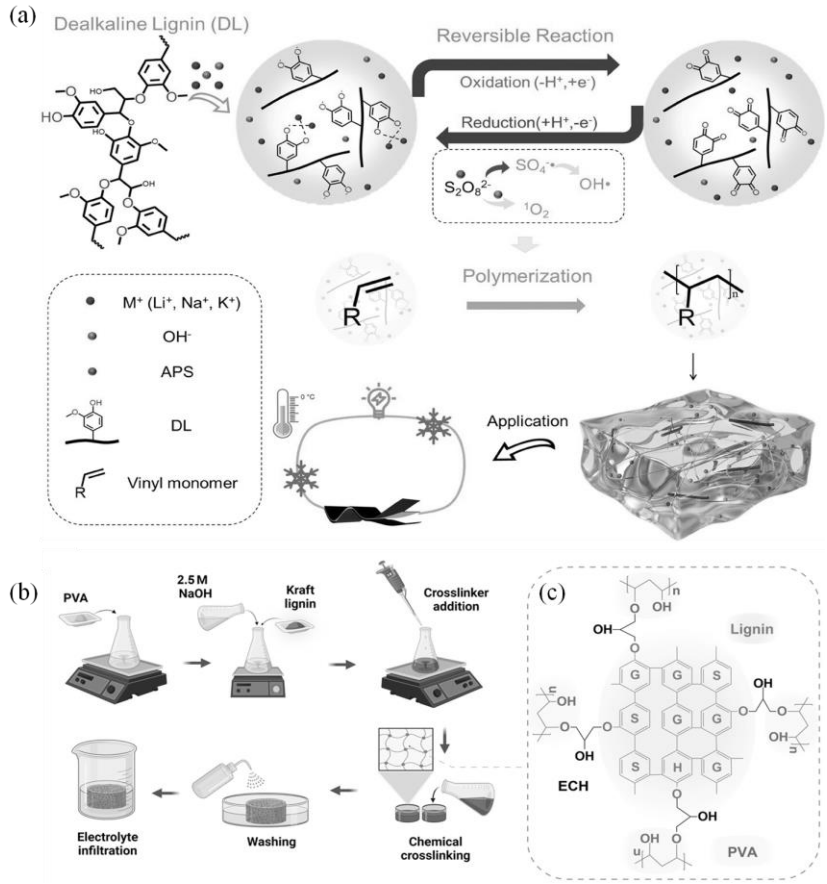


图3 (a) 木质素—碱金属离子自催化体系引发乙烯基单体聚合示意图[45];(b) 木质素基离子型热电水凝胶合成过程示意图;(c) 化学交联机理示意图[49]

Figure 3 (a) Schematic diagram of vinyl monomer polymerization initiated by lignin-alkali metal ion autocatalytic system[45]; (b) Schematic illustration of the synthesis process of lignin-based ionic thermoelectric hydrogels; (c) Chemical cross-linking mechanism[49]

溶液中进行,且环氧氯丙烷来源广泛、成本较低。此外,木质素分子中丰富的酚羟基使其在碱性条件下易于去质子化,形成亲核性更强的酚氧负离子,有利于醚化反应的进行。例如,Raschip等[48]利用环氧氯丙烷交联木质素与黄原胶,制备了可负载亲水性药物的水凝胶体系。Muddasar等[49]以PVA和硫酸盐木质素为原料,采用环氧氯丙烷作为化学交联剂,通过环氧基团与羟基之间的醚化反应形成化学交联网络[图3(b)、(c)]。

碳-碳键、酯键和醚键三类交联方式各有其适用场景。碳-碳键交联(自由基聚合)反应活性高、网络结构可调性强,但能耗较高;酯键交联条件温和且赋予材料生物可降解性,但稳定性不足;醚键交联操作简便、交联效率高,但生物安全性受限。在实际研究中,应根据目标应用选择合适的交联方式,或组合使用以发挥协同效应。

2.2 物理交联法

与化学交联法不同,物理交联法主要依赖氢键、静电相互作用、金属配位和物理缠结等非共价相互作用来构建三维网络。这种方法绿色环保、操作简便、无需外加化学交联剂,因此在生物医学和食品包装等对安全性要求较高备受青睐。

氢键是由氧、氮等电负性原子与氢原子之间形成的非共价相互作用,是木质素基水凝胶中最常见的物理交联方式。这种作用具有方向性、可逆性和动态可调性,能够在赋予水凝胶良好保水性、热稳定性和机械性能的同时,通过分子自组装或诱导结晶构建有序结构。Song等[50]利用SA的羟基和木质素磺酸盐的醚氧原子之间的氢键作用构建了木质素基水凝胶。该水凝胶具有较好的保水性、热稳定性、生物降解性和机械性能,可作为农业土壤改良剂。Gu等[51]利用DMSO/H_2O与乙醇的挥发速率差异,通过溶剂部分交换结合高温退火,诱导PVA形成致密结晶区并促使AL自组装形成大量氢键,一步构建了内密外疏的梯度结构超分子水凝胶[见图4(a)]。Pan等[52]人提出一种仿生木材结构的溶液浸泡

诱导结晶策略。该研究将预拉伸的PVA水凝胶浸泡在纳米木质素磺酸钠(LS)溶液中,通过氢键诱导结晶和物理固定作用,一步法构建了仿木材有序致密结构的高强度水凝胶[见图4(b)]。

与氢键作用类似,静电相互作用也是木质素基水凝胶中常见的物理交联方式。碱性条件下,木质素的酚羟基与羧基电离带负电,可与CS的质子化胺基产生静电吸附并形成离子交联[53],赋予水凝胶多孔结构、剪切变稀特性与优良力学性能,同时可构筑多层自组装结构,提升吸水保水能力。Kartik等[54]通过AL与CS的静电交联制备水凝胶,改变了壳聚糖结晶形态,获得具优异结构与性能的凝胶材料,适用于伤口敷料及组织工程支架。Li等[55]结合网络互穿与层层自组装技术,以SA/AL为核心、CS与木质素磺酸钠静电自组装为壳,构建核壳结构凝胶颗粒,显著提升吸水及耐盐性[见图4(c)]。

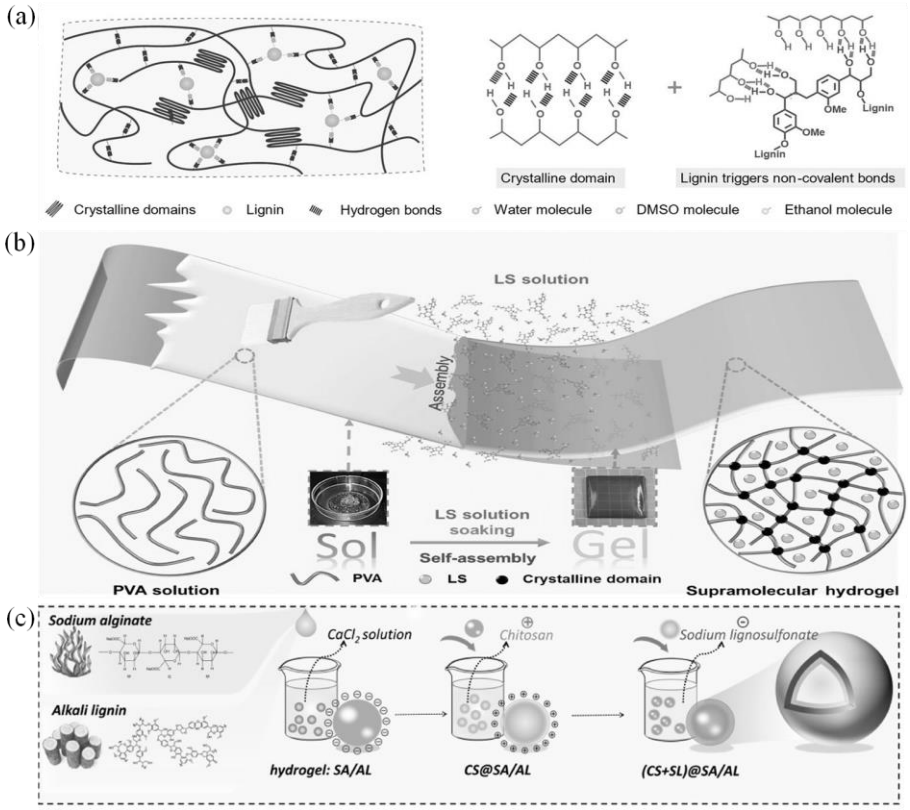


图4　(a) DR-PVA-AL水凝胶中非共价键与晶体结构之间协同增强的作用机理[51];(b) LS溶液诱导PVA溶液自组装形成超分子水凝胶示意图[52];(c) 核壳结构水凝胶构建示意图[55]

Figure 4　(a) Mechanism of synergistic enhancement between non-covalent bonds and crystal structures in DR-PVA-AL hydrogels[51]; (b) Schematic diagram of supramolecular hydrogel formation via self-assembly of polyvinyl alcohol solution induced by LS solution[52]; (c) Schematic diagram of the construction of core-shell structured hydrogels[55]

2.3　混合交联法

混合交联法是指在同一体系中引入化学共价键与物理非共价相互作用的交联策略。化学交联提供稳定骨架,物理交联赋予可逆动态性,协同实现强度与自愈合、形状记忆、抗冻等功能。Ma等[56]人利用双键功能化超支化木质素纳米颗粒(DH-LNPs)作为多功能界面交联剂,通过核层动态硼酸酯交联与壳层自由基聚合的协同,构建了界面强结合的核壳结构水凝胶。DH-LNPs通过共价键增强壳层韧性并作为纳米填料致密化壳层结构,通过界面处的硼酸酯键和氢键与核层形成物理-化学双交联,使水凝胶兼具高韧性(3428.9 kJ·m^{-3})、快速自修复及强界面结合。Yang等[57]以光敏木质素为原料,添加甘油和LiCl建立动态氢键和锂离子键网络,大幅提升了水凝胶的柔韧性和抗冻性。Xu等[58]将部分甲基丙烯酸化的木质素与两性离子单体磺基甜菜碱甲基丙烯酸酯通过自由基聚合形成化学交联网络,同时引入纤维素纳米纤维与聚合物链之间形成氢键和静电相互作用的物理交联,构筑了双网络结构。这种混合交联策略使水凝胶同时具备较高

亲水性、良好的抗蛋白吸附能力和较强的抗菌活性，并保持较好的细胞相容性。

三类交联策略的本质区别在于网络节点间作用力的类型。共价键赋予永久性网络结构，非共价键则提供动态可逆性。化学交联通过共价键确保水凝胶的结构稳定性与强持久性，但部分体系涉及有机溶剂或毒性交联剂；物理交联基于氢键、静电等非共价相互作用驱动自组装，无需外加交联剂，可赋予材料可逆性与剪切变稀特性；混合交联整合两者优势，化学网络提供力学骨架，物理网络赋予动态可逆性，协同实现高强度与自愈合等功能性。三类策略各有适用场景，需依据应用对力学耐久性、生物安全性与动态响应性的具体需求进行权衡选择，理解其机制差异与互补关系是实现木质素基水凝胶功能化设计的逻辑起点。

3 木质素基水凝胶应用领域

3.1 环境修复

在环境修复领域，木质素基水凝胶因具有良好的吸附和分离性能，被广泛应用于重金属离子去除、微塑料捕获、染料脱色以及太阳能驱动水蒸发等方向。研究表明，木质素基水凝胶对Pb^{2+}、Cd^{2+}、Cu^{2+}等重金属离子具有较强吸附能力，木质素中的多酚结构提供了丰富的金属配位位点，三维多孔网络则有利于离子传输和吸附过程的进行[59]。Jiao等[60]通过接枝共聚策略制备磺甲基化木质素（SL）接枝聚丙烯酸（SL-g-PAA）水凝胶[见图5(a)]，该研究以SL作为大分子骨架，通过自由基接枝共聚将PAA链引入SL分子链上，构筑了木质素多酚配位位点与PAA羧基协同增效的三维多孔吸附网络。该水凝胶对Co^{2+}、Cu^{2+}、Ni^{2+}、Cd^{2+}、Pb^{2+}的最大吸附容量分别达145.14、117.64、166.72、277.89和344.85 $mg\cdot g^{-1}$，实现了废水中重金属离子的高效去除[见图5(b)]。值得关注的是，吸附固定在凝胶骨架上的Co^{2+}等过渡金属离子可原位异相催化异鲁米诺-H_2O_2体系发生化学发光反应，使该材料在富集污染物的同时实现信号读出，构建“吸附-检测”一体化平台，为多功能木质素吸附剂的设计提供了新思路。Zhang等[46]使用多巴胺和SA组装了木质素多层微球（LMM）水凝胶，其主要机制为静电引力和表面配合作用吸附重金属离子。由于AL的修饰和组装作用，该水凝胶吸附剂形成了多种活性官能团和球形结构，吸附活性位点明显增加。该木质素基水凝胶制备过程较为简单，同时具有较高吸附性能和多功能特性，进一步提升了木质素的应用价值。

木质素富含芳香环和活性官能团，可通过静电吸引和π-π堆叠等作用吸附有机污染物，因此木质素基水凝胶在微塑料去除和染料废水处理方面具备优势。Jung等[61]以甲壳素纳米纤维（ChNFs）和季铵化木质素（QL）制备多孔水凝胶，其海绵状大孔结构与良好的水稳定性、溶胀性，可快速捕获水中纳米塑料。得益于QL的季铵基团与带负电的聚苯乙烯纳米塑料之间的强静电引力以及芳香骨架的π-π相互作用，该水凝胶在pH=7的条件下对纳米塑料的吸附容量高达1790.8 $mg\cdot g^{-1}$，且该水凝胶可重复利用，三次循环使用后仍保持93.7%的初始吸附效率。Heo等[62]利用聚乙烯亚胺（PEI）对木质素进行胺化改性，并以聚乙二醇二缩水甘油醚（PEGDGE）交联，构建了支化胺化木质素基水凝胶（BALH）[见图5(c)]。该材料具有均匀多孔结构与正电表面，通过强静电作用吸附带负电的甲基橙（MO）染料，吸附机理如图5(d)所示，为阴离子染料废水处理提供了新思路。

木质素光吸收能力强、热导率低，是优质的光热材料，以其为原料制备的水凝胶可高效输水、降低蒸发能耗，适用于太阳能界面蒸发。王先娇等[63]构建的木质素-CS水凝胶，利用木质素的亲水羟基与CS形成三维多孔网络，通过氢键作用增加“中间水”比例、降低水蒸发焓，同时木质素的高光吸收和低热导率协同促进热局域化。该水凝胶热导率较纯水降低52%，蒸发速率达2.06 $kg\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$，且表现出优异的耐盐性和长期运行稳定性。Jiang等[64]设计了一种双层木质素基水凝胶太阳能蒸发器，上层聚吡咯（PPy）高效光热转换并实现热局域化，下层木质素水凝胶通过羟基与水分子的氢键作用降低蒸发焓，三维多孔结构保障快速供水，同时木质素中的羧基、羟基可与重金属离子静电络合。该蒸发器蒸发速率高达2.25 $kg\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$，光热转换效率91.6%，在3.5%盐水中连续运行48 h无盐结晶，并有效去除Co^{2+}、CrO_4^{2-}、Cu^{2+}等重金属离子，兼具低成本、抗盐积累和重金属净化能力。

当前木质素基水凝胶环境修复研究多集中于单一污染物静态吸附，针对实际复杂水体的多污染物竞争吸附及流动水体的处理，关于水凝胶的绿色再生与处置技术仍较为欠缺。明晰多污染物去除

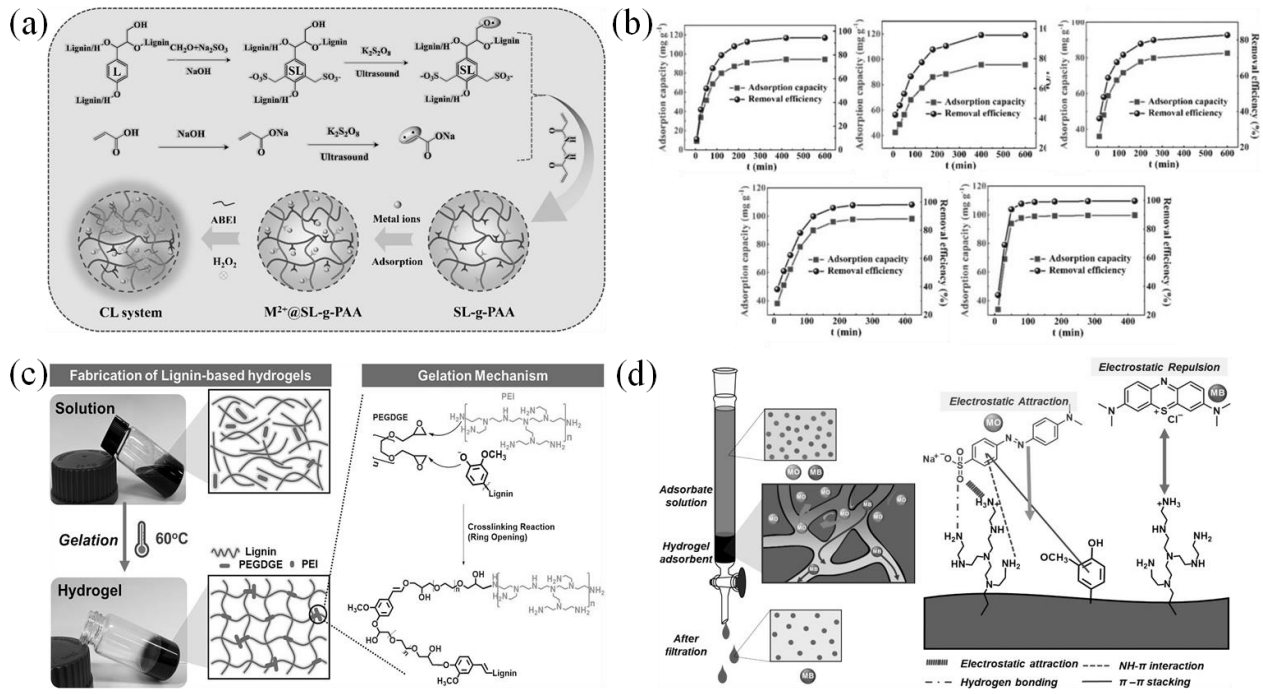


图5　(a) SL-g-PAA水凝胶的合成及其用于重金属离子吸附与化学发光的连续应用原理示意图;(b) 不同取样时间下,SL-g-PAA水凝胶对Co^{2+}、Cu^{2+}、Ni^{2+}、Cd^{2+}、Pb^{2+}的吸附容量与去除率[60];(c) 木质素基水凝胶构建示意图;(d) MB和MO在BALH上选择性吸附机理[62]

Figure 5　(a) Schematic illustration of the synthesis and successive application of SL-g-PAA hydrogel for adsorption of heavy metal ions and chemiluminescence; (b) Adsorption capacity and removal rate of Co^{2+}, Cu^{2+}, Ni^{2+}, Cd^{2+}, Pb^{2+} by SL-g-PAA hydrogel at different sampling times[60]; (c) Schematic diagram of the construction of lignin-based hydrogels; (d) Selective adsorption mechanism of MB and MO on BALH[62]

机理、开发低成本可循环吸附体系,是推动其工程化应用的关键。

3.2　生物医学

木质素兼具生物相容、抗氧化、抗菌特性,木质素基多孔复合水凝胶可用作药物载体实现负载和控释[65]。其释放机制取决于水凝胶的基质组分:例如,环氧氯丙烷交联的木质素-黄原胶水凝胶能够实现亲水性药物的控释;而木质素-甲基乙醚和马来酸共聚物(GAN)/PEG体系则能够负载疏水性药物姜黄素,并持续释放96 h[66]。Li等[67]利用双醛基/羧基修饰的木质纤维素纳米纤维(DCLCNF)与CS通过席夫碱反应构建双交联水凝胶。该水凝胶的动态席夫碱键和氢键赋予其自愈合、可注射性及pH响应性,DCLCNF中保留的木质素和羧基增强了机械强度,并通过氢键和π-π堆积作用实现对抗生素四环素的缓慢、pH响应性释放。同时,兼具自愈合、可注射、抗菌特性,适用于感染创面敷料。Cheng等[68]人开发了一种基于季铵化含木质素纤维素纳米纤丝(QALCNFs)的仿生黏附水凝胶,该水凝胶对左氧氟沙星展现出pH响应性缓释特性,释放过程符合Fickian扩散模型,在药物递送领域具有良好前景。

在伤口敷料领域,木质素中的多酚结构能够赋予水凝胶较强的自由基清除能力,有助于缓解伤口部位的氧化应激。与抗菌剂复配使用还可以起到抗菌消炎的作用,并促进伤口愈合。Dong等[69]将QL与聚(六亚甲基二胍)盐酸盐(PHMB)自组装复合物引入到PAM水凝胶中,作为促进感染伤口修复的多功能敷料。材料依靠QL邻苯二酚基团实现多基底黏附,并可清除自由基缓解氧化损伤;PHMB赋予水凝胶对多种致病菌长期抑制效果。黏附、抗氧化、长效抗菌三功能一体化的设计理念,使该水凝胶在感染性创面修复中展现出超越传统单一功能敷料的综合优势。

在组织工程支架方面,具有良好细胞相容性和适宜孔隙结构的水凝胶可用于骨、软骨和皮肤组织再生[70]。研究表明,木质素含量适中的季铵化LCNF水凝胶孔隙率可达86%,细胞相容性优异。Sun等[71]合成了木质素基碳点(L-CDs),并将其引入水凝胶体系,构建出具有温度和pH双响应特性的水凝胶。

该水凝胶具有较好的机械性能，还可通过调节PVA含量控制内部孔径，为组织工程支架和药物载体设计提供了新的研究思路。Bonifacio等[72]开发了一种用于软骨组织工程的可生物打印水凝胶，该体系以高酰基和低酰基结冷胶共混物为基础，加入0.1%–0.4%w/v木质素，并采用Mg^{2+}进行交联。木质素的引入使水凝胶对DPPH和ABTS自由基的清除能力达到抗坏血酸的80%，且木质素释放量较低（<5%）。该水凝胶具有良好的剪切稀化性能，可实现稳定的3D生物打印，为软骨再生提供了一种兼具抗氧化、抗菌和促分化功能的可持续生物墨水。

现有木质素基水凝胶体外抗氧化、抗菌与细胞相容性能研究较为充分，但体内降解代谢、长期植入免疫反应及组织整合等问题仍缺乏验证，后续研究需侧重体内安全与功效的系统评价。

3.3 农业与园艺

在农业与园艺领域，木质素基水凝胶的应用同样展现出显著优势，水凝胶卓越的保水能力在半干旱和干旱环境中尤为有益。通过改善土壤保水性，这些水凝胶可为植物创造适宜的生长环境，减少灌溉频率，节约水资源[73]。木质素基水凝胶在养分缓释方面也表现出良好应用潜力。将木质素与肥料结合后，使植物在较长时间内持续获得所需养分，同时减少养分流失及环境污染，有助于提高肥料利用率并促进可持续农业发展。Zheng等[47]先将植物生长调节剂（IAC）或除草剂（DCP）进行甲基丙烯酸化改性引入可聚合双键，再以甲基丙烯酸化木质素作为大分子交联剂，与AA和N,N–二甲基氨基丙基丙烯酰胺（DMAPAA）通过自由基共聚，将IAC或DCP以共价键接枝于水凝胶网络骨架中。活性分子通过酯键与聚合物主链相连，酯键水解赋予材料pH响应特性。同时，该水凝胶对Cu^{2+}和Pb^{2+}的吸附容量分别超过380 $mg\cdot g^{-1}$和60 $mg\cdot g^{-1}$，实现了缓释和吸附的协同，为农业提供了多功能集成的绿色新材料。研究表明，水凝胶在防止土壤侵蚀方面也具有一定潜力[74]。Hu等[75]嵌入Fe_2O_3纳米颗粒于木质素磺酸盐/PAM双网络水凝胶（Fe_2O_3@LH），对Pb^{2+}最大吸附容量达143.11 $mg\cdot g^{-1}$，在土壤中90 d后回收率仍超75%，为重金属污染土壤修复提供了新方法。

现有木质素基水凝胶农用研究多限于室内与短期盆栽，田间复杂环境下的长效性能、生态安全性缺乏实地验证；研发低成本环境响应型水凝胶并配套适配农艺施用方案，是实现规模化应用的关键。

3.4 柔性传感

近年来，为满足可穿戴电子设备在复杂环境下对柔性传感器的多重需求，木质素基水凝胶的功能化设计已从单一性能优化，拓展至仿生黏附、抗冻抗挥发、快速凝胶化、自愈合、超宽范围传感及能量采集存储等协同创新策略[76]。例如，Zeng等[77]利用LNPs修饰的MXene–Fe^{3+}双催化系统构建PAA/EG/LM–Fe复合水凝胶，木质素–MXene纳米填料兼具共引发剂（发挥还原剂作用，与Fe^{3+}构成氧化还原引发体系）、交联剂和导电填料三重作用，使溶液室温快速凝胶化。所得水凝胶兼具超高拉伸性（2139%）、良好导电性和宽温耐受性（–70 ℃~50 ℃）。作为可穿戴应变传感器，其应变灵敏系数（GF）为2.8，灵敏度高、响应快（311 ms），可精准捕捉多尺度生理信号，为高低温场景可穿戴传感材料提供新思路[见图6(a)]。Ren等[78]利用明胶、Pyy和木质素磺酸钠之间的动态非共价交联，制得兼具可塑性、可回收性和自黏附的导电水凝胶（LGP）。其应变传感器灵敏度高（GF=6.08）、响应快（107 ms），能稳定监测关节大动作及吞咽、脉搏等微弱生理活动，且600次循环负载后性能稳定，适用于可穿戴人体运动监测。

为满足复杂环境下的适应性和多功能集成需求，木质素基水凝胶传感器通过引入仿生黏附、自催化快速凝胶化、自愈合以及能量采集与存储等结构设计，实现了由单一传感向一体化功能应用的发展。基于贻贝仿生黏附原理(贻贝蛋白上的儿茶酚结构可以与金属离子形成强键合作用)，An等[79]开发的木质素/PVA离子有机水在木质素上构建儿茶酚结构，实现儿茶酚–金属离子配位作用，实现了稳定黏附与抗菌性能，水/乙二醇双溶剂体系使其具有抗冻性（–20 ℃）和抗挥发性能，可用于人机交互。Song等[80]提出氧化–自催化协同机制，通过Fe^{3+}介导的邻苯二酚氧化与AA聚合的耦合反应，构建了兼具高导电性（2.57 $S\cdot m^{-1}$）和超高拉伸性（断裂伸长率1080%）的木质素基互穿网络，其应变传感器灵敏度高（GF=16.4），能精准监测手指弯曲及咽喉振动；组装的自供电摩擦纳米发电机（TENG）可点亮LED，为难溶性碱木质素在可穿戴电子设备中的高值化应用提供了新途径。Mi等[81]人开发了一种基于LS和羧甲基纤维素（CMC）协同增强的全生物质导电

水凝胶(LCPAD),该水凝胶具备超宽范围应变/压力传感(0%–600%应变,GF最高7.48,响应/恢复时间289/304 ms),可实时监测手指弯曲、吞咽、呼吸、表情等人体活动[见图6(b)],并且实现了从人体运动监测、电生理信号采集、机器学习手势识别到能量收集(TENG)与存储(超级电容器)的全链条一体化应用。

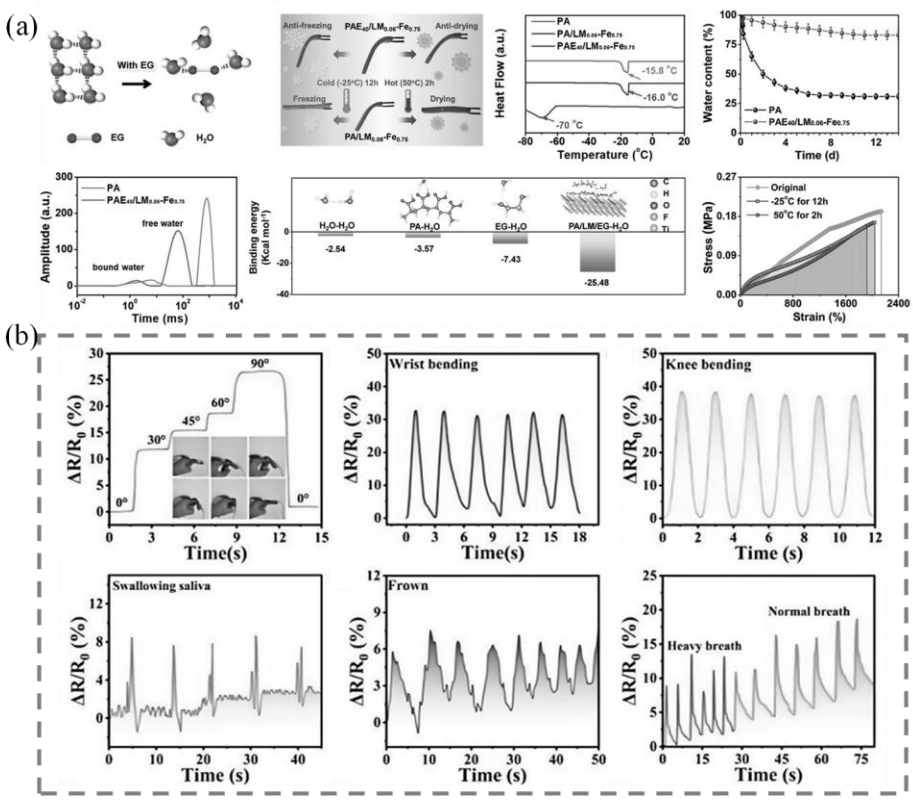


图6 (a) 水凝胶的抗冻与保水性能及环境适应性表征[77];(b) LCPAD水凝胶传感器在手指、手腕、膝盖弯曲动作以及捕捉吞咽、皱眉、正常呼吸、深呼吸等生理信号的电阻变化率随时间响应曲线[81]

Figure 6 (a) Characterization of antifreeze and water-retention properties as well as environmental adaptability of hydrogels[77];(b) The time-varying response curves of relative resistance variation of the LCPAD hydrogel sensor during bending motions of the fingers, wrists and knees, as well as physiological signals including swallowing, frowning, normal breathing and deep breathing[81]

木质素基水凝胶传感器在拉伸性、灵敏度及多重刺激响应方面已展示出显著进步,但在大形变下传感信号稳定性、循环疲劳寿命及系统集成方面仍然存在明显短板。后续研究需侧重全场景稳定使用、自供电自修复一体化系统设计,以满足可穿戴设备长期稳定使用需求。

3.5 能源领域

木质素基水凝胶凭借其可调控的三维网络结构、丰富的活性官能团及动态交联机制,可用作超级电容器电解质,在柔性储能领域展现出超越传统水凝胶的综合性能优势[43]。Li[82]等利用木质素与银离子在深共晶溶剂中的氧化还原反应,构建了兼具高导电性与形状记忆性能的Ag-LNPs凝胶电解质,组装的超级电容器比电容达208 $F\cdot g^{-1}$,可在-80 °C至60 °C宽温域内稳定工作,循环寿命优异。Wan[83]等以天冬氨酸改性木质素和SA为原料构建了双交联水凝胶,得到了良好力学性能的水凝胶电解质[见图7(a)]。基于该水凝胶组装的柔性超级电容器,经过10000次充放电循环后,电容保持率为115%,库仑效率接近100%,且在90°弯曲下比电容保持率仍然高达94%,展现出卓越的机械耐久性。Muddasar等[84]将化学交联的木质素水凝胶(LH-1.0)作为离子热电电解质,其碳化产物(LC-1.5)作为多孔活性炭电极,实现了全木质素基离子热电超级电容器(i-TE SC)的构建,LH-1.0表现出优异的离子热电性能。组装的i-TE SC在8 K温差下输出功率密度达6.24 $mW\cdot m^{-2}$。该研究揭示了木质素酚羟基与氢氧根离子之间的相互作用机制,为可穿戴设备、传感器及低品位热能利用相关的可持续多功能能源器件提供了新的研究方向。

在电池领域，木质素基水凝胶电解质可通过抑制枝晶生长、调控溶剂化结构和降低水活性等机制，缓解锌基电池中的负极腐蚀和正极穿梭等问题。Zhong等[85]利用高浓度$ZnCl_2$和木质素对PAM水凝胶进行改性，制备的水凝胶具有超高离子电导率，在室温下达到440.91 mS·cm^{-1}，在−20 ℃条件下仍可达到380.95 mS·cm^{-1}，可诱导锌均匀沉积、抑制枝晶。其组装柔性锌空气电池高低温性能优异、弯折稳定性好，为低温柔性储能提供了新策略。Yang等[86]针对锌碘电池中锌负极的枝晶生长、析氢反应以及正极多碘化物穿梭问题，设计了一种“网球拍”结构的水凝胶电解质(TR)。该电解质由PAM、SL和SA通过共聚共混制备，SL的刚性苯环和SA的柔性离子交联网络构成类似网球拍的网格结构。TR电解质通过丰富的含氧官能团(−OH、$-COO^-$、$-SO_3^-$)与H_2O分子结合，降低水活性，抑制析氢反应；同时与Zn^{2+}配位，调节溶剂化结构，促进锌均匀沉积，柔性软包电池可弯曲、剪切后仍稳定工作[见图7(b)]。该工作通过单一水凝胶电解质的设计同步解决了锌负极的枝晶生长、析氢反应以及正极多碘化物穿梭问题，而非分别优化电极材料，大大简化了电池系统设计。展示了木质素基水凝胶电解质在柔性储能器件中的实际应用潜力，为锌碘电池的同步正负极调控提供了新策略。

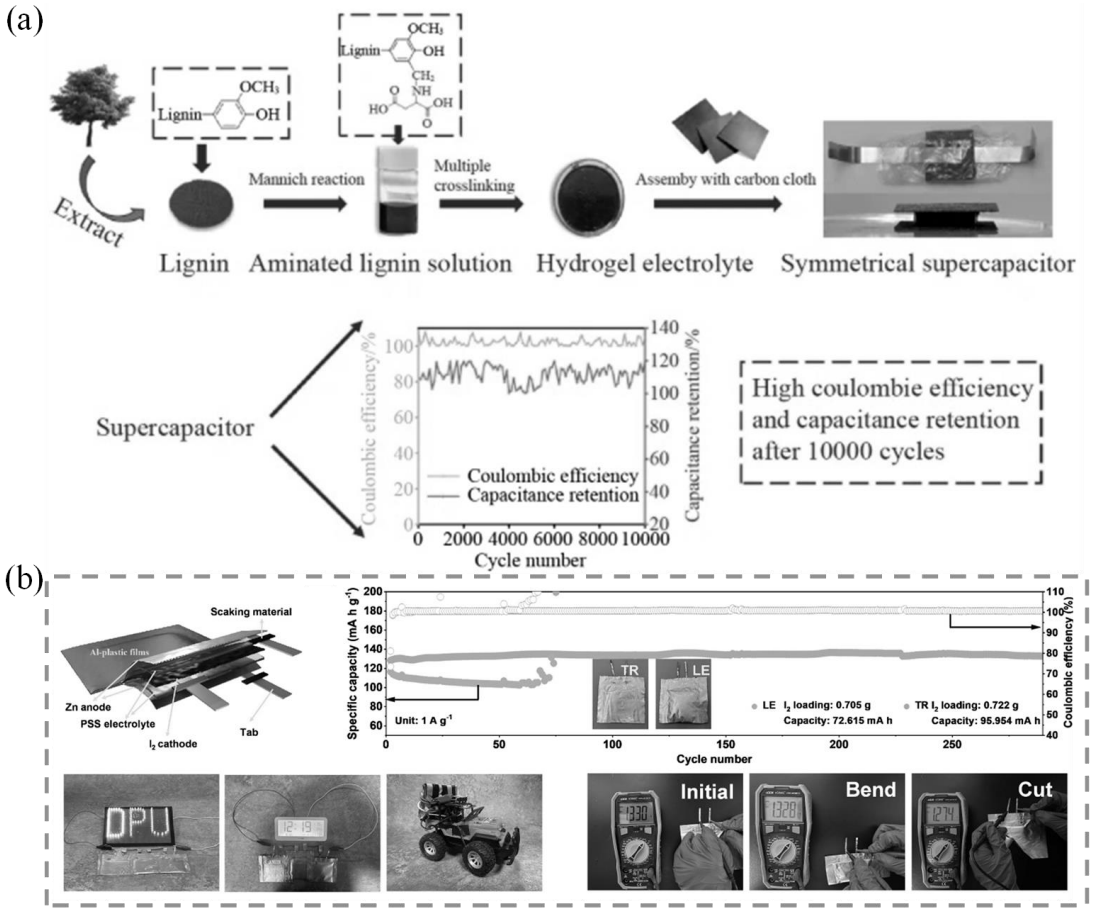


图7 (a)胺化木质素基水凝胶电解质的构建及超级电容器循环性能[83]；(b) Zn−I_2软包电池的循环性能、库仑效率及其为电子设备供电的展示[86]

Figure 7 (a) Construction of aminated lignin-based hydrogel electrolyte and cycling performance of supercapacitors [83]; (b) Cycling performance, Coulombic efficiency of Zn−I_2 pouch cells, and demonstration of powering electronic devices[86]

木质素基水凝胶电解质具备优异的柔性与宽温域适配性，适用于准固态储能器件，但存在离子电导率不足、界面阻抗大及长期循环副反应等问题，限制了电池功率密度与使用寿命。未来可通过调控交联结构、水分比例及离子配位环境，在保留材料柔性的同时提升离子传输性能，拉近与商用液态电解质的性能差距。

3.6 其他领域

除上述主要领域外，木质素基水凝胶在个人护理与安全防护等前沿方向也展现出独特价值。Xu

等[42]通过低共熔溶剂处理结合漆酶氧化，制得高抗氧化木质素纳米颗粒（HA-LNPs），其兼具自由基清除、酪氨酸酶抑制与促胶原生成能力，应用于护肤面膜可实现抗氧化、美白抗皱效果，生物相容性优异。Ingtipi等[43]以PVA、黄原胶和LNP为原料，构建木质素基复合水凝胶阻燃涂层，该材料结构致密、保水性能优异，高温下可形成防护炭层、有效延缓燃烧，适用于绿色消防防护领域。还有一些新兴应用多处于概念验证阶段，需建立专用标准并解决制备放大与成本问题。

4 结论与未来展望

木质素基水凝胶的研究已逐步实现从废弃物资源化利用向高性能功能材料构筑的发展。利用木质素中丰富的酚羟基、芳香骨架及多重活性位点，通过化学交联、物理交联及混合交联等多层次网络设计，可有效提升水凝胶的力学性能、抗紫外、抗菌、导电及吸附性能，使其在环境修复、生物医学、农业园艺、柔性传感及能源存储等领域展现出广阔的应用前景。

然而，木质素基水凝胶高性能材料的研究仍面临若干核心挑战。首先，水凝胶自身易失水的固有缺陷导致体积收缩、力学性能衰减甚至功能失效等问题，严重制约了其长期服役可靠性，木质素能否协同改善保水性能尚待深入探索；其次，木质素在水相中的不溶/难溶特性严重制约了绿色制备工艺的开发，目前多数木质素基水凝胶的构建仍依赖有机溶剂、强碱溶液或复杂的化学改性预处理，背离了可持续发展的初衷，亟需开发水相兼容的木质素衍生物或分散策略；此外，木质素固有的深色特性限制了其在光学透明器件（如可视化传感器、光学监测敷料等）中的应用，如何在保留其功能活性的同时进行有效脱色或光学调控，是一个亟待突破的难题。上述瓶颈的突破，将推动木质素基水凝胶从实验室迈向实际应用。

可以预见，随着基础研究与应用技术的深度交叉融合，木质素基水凝胶将在绿色功能材料体系中占据愈发重要的地位，为构建可持续发展的材料生态贡献力量。

参考文献

[1] Bao Z T, Xian C H, Yuan Q J, et al. Natural polymer-based hydrogels with enhanced mechanical performances: preparation, structure, and property[J]. Advanced Healthcare Materials, 2019, **8**(17): 1900670.

[2] Guo T Y, Wang W X, Song J L, et al. Dual-responsive carboxymethyl cellulose/dopamine/cystamine hydrogels driven by dynamic metal-ligand and redox linkages for controllable release of agrochemical[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, **253**: 117188.

[3] Zhou R, Cai R, Chen Y, et al. Research progress on the application of hydrogel adsorbent materials in wastewater treatment: A review[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2025, **216**: 1-24.

[4] 鲍艺, 卢小鸾, 孙晓霞, 等. 自愈性水凝胶的制备及其在生物医学中的应用研究进展[J]. 化工新型材料, 2020, **48**(2): 1-5.
Bao Y, Lu X L, Sun X X, et al. Progress in preparation of self-healing hydrogel and application in biomedicine[J]. New Chemical Materials, 2020, **48**(2): 1-5.

[5] Zainal S H, Mohd N H, Suhaili N, et al. Preparation of cellulose-based hydrogel: a review[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, **10**: 935-952.

[6] Pan S Y, Zhu C Y, Wu Y W, et al. Chitosan-Based Self-Healing Hydrogel: From Fabrication to Biomedical Application[J]. Polymers, 2023, **15**(18): 3768.

[7] Zheng H Y, Zuo B Q. Functional silk fibroin hydrogels: preparation, properties and applications[J]. Journal of Materials Chemistry B, 2021, **9**(5): 1238-1258.

[8] 徐婷婷, 古训洪, 高欢力, 等. 木质素基水凝胶材料的设计策略及应用进展[J]. 中国造纸学报, 2023, **38**(3): 79-88.
Xu T T, Gu X H, Gao H L, et al. Design strategy and application progress of lignin-based hydrogel materials[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2023, **38**(3): 79-88.

[9] Yi Y B, Wang X H, Liu Z M, et al. A green composite hydrogel based on xylan and lignin with adjustable mechanical properties, high swelling, excellent UV shielding, and antioxidation properties [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, **139**(28): e52520.

[10] 刘慧, 刘国龙, 毕成龙, 等. 木质素基水凝胶的制备及其潜在应用研究进展[J]. 中国造纸, 2024, **43**(11): 26-36.
Liu H, Liu G L, Bi C L, et al. Research progress on the preparation of lignin-based hydrogel and Its potential application [J]. China Pulp & Paper, 2024, **43**(11): 26-36.

[11] 杜晓云, 修慧娟, 梁晏搏, 等. 木质生物质基黏附水凝胶的研究进展[J]. 中国造纸学报, 2023, **38**(3): 113-123.
Du X Y, Xiu H J, Liang Y B, et al. Research progress of woody biomass-based adhesive hydrogels[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2023, **38**(3): 113-123.

[12] Libretti C, Santos Correa L, Meier M A R. From waste to resource: advancements in sustainable lignin modification[J]. Green Chemistry, 2024, **26**(8): 4358-4386.

[13] Gao S S, Cheng Z H, Zhou X, et al. Fabrication of lignin based renewable dynamic networks and its applications as self-healing, antifungal and conductive adhesives[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, **394**: 124896.

[14] Hachimi Alaoui C, Réthoré G, Weiss P, et al. Sustainable biomass lignin-based hydrogels: a review on properties, formulation, and biomedical applications[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, **24**(17): 13493.

[15] Rath S, Pradhan D, Du H S, et al. Transforming lignin into value-added products: Perspectives on lignin chemistry, lignin-based biocomposites, and pathways for augmenting ligninolytic enzyme

production[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2024, **7**(1): 27.

[16] Xiu H J, Zhao H Z, Dai L, et al. Robust and adhesive lignin hybrid hydrogel as an ultrasensitive sensor[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, **213**: 226-233.

[17] Lu F Y, Wang Y, Sun D, et al. Research progress on the preparation of lignin micro/nano-particles and their biomedical applications[J]. Green Chemistry, 2025, **27**(19): 5400-5422.

[18] Lai C H, Yang C D, Jia Y, et al. Lignin fractionation to realize the comprehensive elucidation of structure-inhibition relationship of lignins in enzymatic hydrolysis[J]. Bioresource Technology, 2022, **355**: 27255.

[19] Jia Y L, Wang Y, Wang M Y, et al. Efficient separation of biofuel, lignin and alkali from black liquor by acid precipitation and ethanol extraction for valorization[J]. Industrial Crops and Products, 2024, **209**: 117987.

[20] Bukhari I, Haq F, Kiran M, et al. Lignocellulosic biomass as a renewable resource: Driving second-generation biofuel innovation from agricultural waste[J]. Biomass and Bioenergy, 2025, **201**: 108133.

[21] Nishimura H, Kamiya A, Nagata T, et al. Direct evidence for α ether linkage between lignin and carbohydrates in wood cell walls [J]. Scientific Reports, 2018, **8**: 6538.

[22] Martim D B, Brilhante A J V C, Lima A R, et al. Resolving the metabolism of monolignols and other lignin-related aromatic compounds in Xanthomonas citri[J]. Nature Communications, 2024, **15**: 7994.

[23] Liu R, Smeds A, Willför S, et al. Structural properties of softwood lignin fractions: Revealed by NMR and Py-GC/MS[J]. Industrial Crops and Products, 2024, **209**: 118055.

[24] Zhao J X, Zhu M Y, Jin W, et al. A comprehensive review of unlocking the potential of lignin-derived biomaterials: from lignin structure to biomedical application[J]. Journal of Nanobiotechnology, 2025, **23**(1): 538.

[25] Liu J Y, Shi X Y, Ma L, et al. Facile design of renewable lignin copolymers by photoinitiated RAFT polymerization as Pickering emulsion stabilizers[J]. Green Chemistry, 2023, **25**(14): 5428-5437.

[26] Gao C, Xiao L P, Zhou J H, et al. Immobilization of nanosilver onto glycine modified lignin hydrogel composites for highly efficient p-nitrophenol hydrogenation[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, **403**: 126370.

[27] Huo L M, Lu Y M, Ding W L, et al. Recent advances in the preparation, properties, and applications of lignin-based hydrogels and adhesives[J]. Green Chemistry, 2025, **27**(7): 1895-1908.

[28] Chen X H, Wang Y M, Wang A, et al. Demethylated lignin-reinforced multifunctional polyvinyl alcohol-based composites materials enabled by natural physical intertwining effect[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, **509**: 161192.

[29] Gregorich N, Kanhere S, Stutts J, et al. Enhanced mechanical properties of composite hydrogels containing fractionated and purified lignin[J]. ACSplied Polymer Materials, 2023, **5**(1): 201-213.

[30] Wang B W, Qiu D K, Gu Y H, et al. A lignin-based controlled/sustained release hydrogel by integrating mechanical strengthening and bioactivities of lignin[J]. Journal of Bioresources and Bioproducts, 2025, **10**(1): 62-76.

[31] Shan Z, Jiang B, Wang P, et al. Sustainable lignin-based composite hydrogels for controlled drug release and self-healing in antimicrobial wound dressing[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, **285**: 138327.

[32] Jin Z X, Gong H, Chen B, et al. Novel functional hydrogels based on lignin-silver nanoparticles with adhesion, antimicrobial, antioxidant and anti-freezing properties for wound dressings and pressure strain sensors[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, **291**: 138853.

[33] Liu Y H, Zhang Z W, Wang J G, et al. Janus-structured lignin hydrogel evaporator via laser direct writing for high efficiency seawater desalination and solar power generation[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, **513**: 162853.

[34] Chen J W, Ghosh T, Ayranci C, et al. Bio-cleaned lignin-based carbon fiber and its application in adsorptive water treatment[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, **139**(18): 52054.

[35] Jia Y P, Zhang Y, Zhan W J, et al. Sustained release of neuroprotective drugs curcumin and edaravone from supramolecular hydrogel for ischemic stroke treatment[J]. Advanced Functional Materials, 2023, **33**(49): 230930.

[36] Chen X L, Yang T, Cai X L, et al. Eco-friendly hydrogel based on locust bean gum for water retaining in sandy soil[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, **275**:133490.

[37] Hu O D, Zhu P, Cai M K, et al. Lignin-based surface adhesion engineering enables tough hydrogel for flexible epidermal array sensing[J]. ACS Sensors, 2026, **11**(6): 4775-4785.

[38] 张培元, 余婷, 陈礼辉, 等. 木质素基导电水凝胶及其在超级电容器电解质中的应用[J]. 中国造纸学报, 2024, **39**(4): 61-69.
Zhang P Y, Yu T, Chen L H, et al. Preparation of lignin-based conductive hydrogels and their application in supercapacitor electrolytes[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2024, **39**(4): 61-69.

[39] Ail U, Backe J, Khan Z U, et al. Safe and stable Zn-lignin batteries with a biopolymer based hydrogel electrolyte[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2025, **13**(4): 2974-2986.

[40] Xu E H, Yu H N, Wu W, et al. Preparation of high antioxidant nanolignin and its application in cosmetics[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, **272**: 132635.

[41] Ingtipi K,Choudhury B J, Moholkar V S. Development of NaOH-borax crosslinked PVA-xanthan gum-lignin hydrogel as green fire retardant coating[J]. Progress in Organic Coatings, 2023, **174**: 107268.

[42] Mondal A K, Uddin M T, Sujan S M A, et al. Preparation of lignin-based hydrogels, their properties and applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, **245**: 125580.

[43] Zerpa A, Pakzad L, Fatehi P. Hardwood kraft lignin-based hydrogels: production and performance[J]. ACS Omega, 2018, **3**(7): 8233-8242.

[44] 李帅, 苗亚男, 张敏, 等. 木质素交联共聚的抗紫外抗菌导电水凝胶及其压力传感性能[J]. 林业工程学报, 2022, **7**(6): 114-123.
Li S, Miao Y N, Zhang M, et al. Anti-UV antibacterial conductive lignin-copolymerized hydrogel for pressure sensing[J]. Journal of Forestry Engineering, 2022, **7**(6): 114-123.

[45] Su H W, Guo Q Q, Qiao C D, et al. Lignin-alkali metal ion self-catalytic system initiated rapid polymerization of hydrogel electrolyte with high strength and anti-freezing ability[J].

Advanced Functional Materials, 2024, **34**(25):2316274.

[46] Zhang Z H, Chen Y H, Wu C J. Dual-modified lignin-assembled multilayer microsphere with excellent Pb^{2+} capture[J]. Polymers, 2022, **14**(14): 2824.

[47] Zheng L, Seidi F, Wu W B, et al. Dual-functional lignin-based hydrogels for sustained release of agrochemicals and heavy metal ion complexation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, **235**: 123701.

[48] Raschip I E, Hitruc G E, Vasile C, et al. Effect of the lignin type on the morphology and thermal properties of the xanthan/lignin hydrogels[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, **54**: 230-237.

[49] Muddasar M, Menéndez N, Quero Á, et al. Highly-efficient sustainable ionic thermoelectric materials using lignin-derived hydrogels[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2024, **7**(2):47.

[50] Song B, Liang H X, Sun R R, et al. Hydrogel synthesis based on lignin/sodium alginate and application in agriculture[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, **144**: 219-230.

[51] Gu Y H, Wu W J, Zhang C F, et al. Multi-solvent-induced gradient aggregation rendered superstrong, tough, stretchable, and fatigue-resistant lignin-based supramolecular hydrogels[J]. Advanced Functional Materials, 2025, **35**(11): 2417206.

[52] Pan X F, Pan J W, Li X, et al. Tough supramolecular hydrogels crafted via lignin-induced self-assembly[J]. Advanced Mterials, 2024, **36**(36): e2406671.

[53] Utami R, Tran M H, Lee E Y. Mini-review on lignin-based self-healing polymer[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, **279**: 135295.

[54] Ravishankar K, Venkatesan M, Desingh R P, et al. Biocompatible hydrogels of chitosan-alkali lignin for potential wound healing applications[J]. Materials Science and Engineering: C, 2019, **102**: 447-457.

[55] Li J, Li L T, Zhang Y J, et al. Bio-based hydrogel particles with enhanced water retention properties for alleviating drought stress of saline soil[J]. Journal of Cleaner Production, 2025, **518**:145960.

[56] Ma R T, Duan C, Yan C Y, et al. Core-shell hydrogels: Robust interfacial integration and extreme environmental tolerance enabled by lignin nanoparticles[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, **525**: 170291.

[57] Yang J, Yang K, An X Y, et al. Highly flexible, stretchable, and compressible lignin-based hydrogel sensors with frost resistance for advanced bionic hand control[J]. Advanced Functional Materials, 2025, **35**(11): 2416916.

[58] Xu C, Liu L Y, Renneckar S, et al. Chemically and physically crosslinked lignin hydrogels with antifouling and antimicrobial properties[J]. Industrial Crops and Products, 2021, **170**: 113759.

[59] 耿绍, 张伟风, 罗浪漫, 等. 双醛改性纤维素纳米纤丝增强木质素水凝胶及其耐温耐盐性能研究[J]. 中国造纸学报, 2022, **37**(1): 29-35.
Geng S, Zhang W F, Luo L M, et al. Study on lignin hydrogel reinforced by dialdehyde-modified cellulose nanofibril and its temperature and salt tolerance[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2022, **37**(1): 29-35.

[60] Jiao G J, Ma J L, Li Y C, et al. Removed heavy metal ions from wastewater reuse for chemiluminescence: Successive application of lignin-based composite hydrogels[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, **421**: 126722.

[61] Jung S, Kim J, Park S, et al. Nature-derived hydrogel for microplastic removal[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2025, **8**(5): 346.

[62] Heo J W, Kim M S, Oh D Het al. Innovative construction of amine-functionalized lignin-based hydrogel for ultrafast and selective dye remediation[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, **498**: 155506.

[63] 王先娇,伍思权,林绪亮. 木质素-壳聚糖基水凝胶的制备及其水蒸发性能[J]. 生物质化学工程, 2025, **59**(5): 33-40.
Wang X J, Wu S Q, Lin X L. Preparation and water evaporation performance of lignin-chitosan-based hydrogels[J]. Biomass Chemical Engineering, 2025, **59**(5): 33-40.

[64] Jiang S, Zhang Z Z, Zhou T, et al. Lignin hydrogel-based solar-driven evaporator for cost-effective and highly efficient water purification[J]. Desalination, 2022, **531**: 115706.

[65] Shan Z, Manan S, Jiang B, et al. Emerging role and potential of lignin in antibacterial hydrogel applications for wound healing: A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, **318**: 144976.

[66] Larrañeta E, Imízcoz M, Toh J X, et al. Synthesis and characterization of lignin hydrogels for potential applications as drug eluting antimicrobial coatings for medical materials[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, **6**(7): 9037-9046.

[67] Li W W, Cheng G G, Wang S J, et al. Bifunctional lignocellulose nanofiber hydrogel possessing intriguing pH-responsiveness and self-healing capability towards wound healing applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, **260**: 129398.

[68] Cheng G G, Zeng F J, Liu X Y, et al. Mussel-inspired adhesive and tough hydrogel for drug release based on lignin-containing cellulose nanofiber[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, **306**: 141458.

[69] Dong Y N, Li Y X, Fan B R, et al. Long-term antibacterial, antioxidative, and bioadhesive hydrogel wound dressing for infected wound healing applications[J]. Biomaterials Science, 2023, **11**(6): 2080-2090.

[70] Chandna S, Thakur N S, Kaur R, et al. Lignin-bimetallic nanoconjugate doped pH-responsive hydrogels for laser-assisted antimicrobial photodynamic therapy[J]. Biomacromolecules, 2020, **21**(8): 3216-3230.

[71] Sun L, Mo Z Y, Li Q, et al. Facile synthesis and performance of pH/temperature dual-response hydrogel containing lignin-based carbon dots[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, **175**: 516-525.

[72] Bonifacio M A, Cometa S, Cochis A, et al. A bioprintable gellan gum/lignin hydrogel: a smart and sustainable route for cartilage regeneration[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, **216**: 336-346.

[73] Zhang F, Chen H X, Yang H, et al. Waste feather keratin composited geopolymer hydrogels for improving plant water retention and N nutrients utilization[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024, **682**: 132925.

[74] Di Martino A, Ozaltin K, Hua L S, et al. Lignin-based hydrogels for application in agriculture: A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, **306**: 141744.

[75] Hu T, Zhang M K, Wei X J, et al. Efficient Pb(II) removal from contaminated soils by recyclable, robust lignosulfonate/polyacrylamide double-network hydrogels embedded with Fe_2O_3 via one-pot synthesis[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, **479**: 135712.

[76] 蒋灿, 唐良张, 吴艳光, 等. 木质素基水凝胶柔性传感器制备的综合实验设计[J]. 实验室研究与探索, 2025, **44**(8): 178-183.
Jiang C, Tang L Z, Wu Y G, et al. Comprehensive experimental design for the preparation of lignin-based hydrogel flexible sensors[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2025, **44**(8): 178-183.

[77] Zeng Z F, Yang Y Q, Pang X W, et al. Lignin nanosphere-modified MXene activated-rapid gelation of mechanically robust, environmental adaptive, highly conductive hydrogel for wearable sensors application[J]. Advanced Functional Materials, 2024, **34** (51): 2409855.

[78] Ren K Y, Shi Y D, Wen C Y, et al. Lignin-based conductive hydrogels with plasticity, recyclability, and self-adhesion as flexible strain sensors for human motion monitoring[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2024, **6**(9): 5297-5307.

[79] An H, Yu P, Pan J X, et al. A self-healing, long-lasting adhesive, lignin-based polyvinyl alcohol organo-hydrogel for strain-sensing applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, **279**: 135509.

[80] Song T J, He Z, He H, et al. Alkali lignin-Fe(III) -induced successive redox reaction triggered ultrafast gelation of high quality hydrogel for wearable flexible sensors and self-powered devices[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, **500**: 157220.

[81] Mi Y J, Wu T, Sun Y C, et al. Synergistic, Biomass-enhanced hydrogels for sustainable, all-in-one sensing and energy-autonomous bioelectronics[J]. Advanced Functional Materials, 2026, **36**(42):e74956

[82] Li T Q, Wang S N, Huang Y F, et al. Lignin-induced rapid-synthesis of deep eutectic solvent-based gel with high robustness and conductivity applied for flexible quasi-solid-state supercapacitors[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, **472**: 144864.

[83] Wan H F, Zhao X, Guo Q, et al. Stretchable and conductive lignin hydrogel electrolyte for flexible supercapacitor[J]. Frontiers of Chemical Science and Engineering, 2025, **19**(4): 34.

[84] Muddasar M, Jabeen N, Culebras M, et al. Mechanistic insights and performance of fully lignin-based hydrogels for next-generation ionic thermoelectric supercapacitors[J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2026, **168**:101151.

[85] Zhong D Y, Wang K L, Wei M H, et al. Enhanced Low-Temperature performance of flexible Zinc-Air batteries via High-Concentration $ZnCl_2$ and lignin modified polyacrylamide hydrogels [J]. Chemical Engineering Journal, 2025, **510**: 161596.

[86] Yang T Y, Su T T, Wang H L, et al. "Tennis racket" hydrogel electrolytes to synchronously regulate cathode and anode of zinc-iodine batteries[J]. Journal of Energy Chemistry, 2025, **102**: 454-462.