北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

多重交联诱导木质素基液态地膜及其土壤固持与作物促生效应

王杰 胡立红 陈泽秋 朱燕云 陈玲 戴燕 周永红 靳红梅 张会岩 孙恩惠

Multiple cross-linking induced lignin-based liquid mulch film for soil stabilization and crop growth promotion

Wang Jie, Hu Lihong, Chen Zeqiu, Zhu Yanyun, Chen Ling, Dai Yan, Zhou Yonghong, Jin Hongmei, Zhang Huiyan, Sun Enhui

引用本文:
王杰, 胡立红, 陈泽秋, 朱燕云, 陈玲, 戴燕, 周永红, 靳红梅, 张会岩, 孙恩惠. 多重交联诱导木质素基液态地膜及其土壤固持与作物促生效应[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(4):174–182. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250453
Wang Jie, Hu Lihong, Chen Zeqiu, Zhu Yanyun, Chen Ling, Dai Yan, Zhou Yonghong, Jin Hongmei, Zhang Huiyan, Sun Enhui. Multiple cross–linking induced lignin–based liquid mulch film for soil stabilization and crop growth promotion[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(4):174–182. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250453

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250453

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

木质素磺酸钠@单宁酸水凝胶的制备及其性能

Preparation and its properties of sodium lignosulfonate@tannic acid hydrogel

北京林业大学学报, 2022, 44(5): 142–149. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210411

Janus氧化纤维素壳聚糖功能膜的制备及其性能

Preparation and performance of Janus oxidized cellulose–chitosan functional films

北京林业大学学报, 2025, 47(8): 173–181. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250169

壳聚糖/明胶/植酸复合阻燃涂料的制备及性能

Preparation and properties of chitosan/gelatin/phytic acid composite flame retardant coatings

北京林业大学学报, 2024, 46(7): 112–122. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240151

低共熔溶剂预处理麦草制备含木质素纳米纤维素和薄膜

Fabrication of lignin containing nanocellulose and films from wheat straw pretreated by deep eutectic solvent

北京林业大学学报, 2024, 46(11): 141–147. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240260

低共熔溶剂木质素的分离及结构性质研究进展

Research progress on the fractionation and structural properties of lignin based on deep eutectic solvents

北京林业大学学报, 2021, 43(4): 158–168. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200410

干旱半干旱区灌木生物量多尺度建模与碳库特征解析

Multiscale modeling of shrub biomass and analysis of carbon pool characteristics in arid and semi–arid regions: a case study of the Hubq Desert, Inner Mongolia of northern China

北京林业大学学报, 2025, 47(4): 50–60. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250017

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250453

多重交联诱导木质素基液态地膜及其土壤固持与作物促生效应

王 杰[1,2,3] 胡立红[1,3] 陈泽秋[2] 朱燕云[2] 陈 玲[2] 戴 燕[1]
周永红[1,3] 靳红梅[2] 张会岩[4] 孙恩惠[2]

（1. 中国林业科学研究院林产化学与工业研究所，江苏 南京 210042；2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所，农业农村部盐碱土改良与利用（滨海盐碱地）重点实验室，国家农业环境六合观测实验站，江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心，江苏 南京 210014；3. 江苏省林业资源高效加工利用协同创新中心，江苏 南京 210042；4. 东南大学能源与环境学院，江苏 南京 210096）

摘要:【目的】针对我国干旱半干旱地区广泛使用的 PE 地膜引发的白色污染及微塑料风险问题，本研究以提升生物质资源利用价值为导向，提出一种基于非共价键合自组装的液态地膜制备新策略，旨在开发绿色生物基覆盖材料，为干旱半干旱区耕地保育提供 PE 地膜替代方案。**【方法】**以木质素磺酸钠、壳聚糖与聚乙烯醇为原料，通过调控壳聚糖与聚乙烯醇的质量比，制备三元复合可喷涂的多重交联诱导木质素基液态地膜（LCP）。利用傅里叶变换红外光谱、等温滴定量热及旋转流变表征 LCP 的物化结构；采用万能试验机测试其力学性能，并通过水蒸气透过率、作物生长特性及土壤固持能力评估，确定 LCP 的最佳配比与喷施量。**【结果】**LCP 的合成主要由氢键结合与静电作用协同驱动，具有显著的剪切变稀特性。当木质素磺酸钠、壳聚糖和聚乙烯醇质量比为 10∶4∶4 时，所制备的 LCP 性能最优，其力学强度达 24.05 MPa，水蒸气透过率降至 352.10 g/(m^2·d)，种子发芽率提升至 95%，平均根长达 19.44 mm。与未喷涂处理相比，干物质喷涂量为 8.0 g/m^2 时，作物出苗率、株高和总生物量分别提高了 54.55%、26.90% 和 54.99%，土壤固持效果亦显著增强。**【结论】**本研究合成的液态地膜可有效促进作物生长发育并提升土壤固持能力，为 PE 地膜减量替代及农林废弃物高值化利用提供了重要参考，具有广阔的应用前景。

关键词：木质素磺酸钠；壳聚糖；聚乙烯醇；液态地膜；水蒸气阻隔性；土壤固持；作物促生；生物基材料；PE 地膜替代；干旱半干旱区

中图分类号：TQ351.37；TQ317；S157 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)04−0174−09

引文格式：王杰，胡立红，陈泽秋，等. 多重交联诱导木质素基液态地膜及其土壤固持与作物促生效应［J］. 北京林业大学学报，2026，48(4)：174−182. Wang Jie, Hu Lihong, Chen Zeqiu, et al. Multiple cross-linking induced lignin-based liquid mulch film for soil stabilization and crop growth promotion［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(4): 174−182.

Multiple cross-linking induced lignin-based liquid mulch film for soil stabilization and crop growth promotion

Wang Jie[1,2,3] Hu Lihong[1,3] Chen Zeqiu[2] Zhu Yanyun[2] Chen Ling[2] Dai Yan[1]
Zhou Yonghong[1,3] Jin Hongmei[2] Zhang Huiyan[4] Sun Enhui[2]

(1. Institute of Chemical Industry of Forest Products, Chinese Academy of Forestry, Nanjing 210042, Jiangsu, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences; Key Laboratory of Saline-Alkali Soil Improvement and Utilization (Coastal Saline-Alkali Lands), Ministry of Agriculture and Rural Affairs; National Luhe Agricultural Environmental Observation and Experiment Station; Jiangsu Collaborative Innovation Center for Organic Solid Waste Resource Utilization, Nanjing 210014, Jiangsu, China;

收稿日期：2025−11−14 **修回日期：**2026−02−08

基金项目：国家重点研发计划（2023YFD2201903-3），江苏省农业科技自主创新资金项目（CX(24)1008），农业部长江下游平原农业环境重点实验室（2025F03）。

第一作者：王杰。主要研究方向：木质素基液态地膜及其在农业覆盖领域上的应用。Email：2254007797@qq.com 地址：210014 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所。

责任作者：孙恩惠，副研究员。主要研究方向：秸秆定向解离技术及绿色增值农用可降解材料创制与应用。Email：enhsun@126.com 地址：同上。

本刊网址：https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

3. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Efficient Processing and Utilization of Forest Resources, Nanjing 210042, Jiangsu, China;
4. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract:［**Objective**］In response to white pollution and microplastic risks associated with the widespread use of polyethylene (PE) film in arid and semi-arid regions of China, this study proposes a novel strategy for preparing liquid films through non-covalent bonding self-assembly, guided by the goal of enhancing the utilization value of biomass resources. The aim is to develop green, biobased soil-covering materials and provide a sustainable alternative to PE film for cultivated land conservation in arid and semi-arid areas.［**Method**］A ternary composite sprayable, multi-crosslinked lignin-based liquid film (LCP) was prepared using sodium lignosulfonate, chitosan, and polyvinyl alcohol as raw materials, with the mass ratio of chitosan to polyvinyl alcohol systematically adjusted. The physicochemical structure of the LCP was characterized using Fourier transform infrared spectroscopy, isothermal titration calorimetry, and rotational rheology. Mechanical properties were evaluated using a universal testing machine. The optimal formulation ratio and application rate of LCP were determined based on assessments of water vapor permeability, crop growth characteristics, and soil water retention capacity.［**Result**］The synthesis of LCP is primarily driven by hydrogen bonding and electrostatic interactions, and the material exhibits pronounced shear-thinning behavior. When the mass ratio of sodium lignosulfonate, chitosan, and polyvinyl alcohol is 10∶4∶4, the resulting LCP demonstrates optimal performance, achieving a mechanical strength of 24.05 MPa, a water vapor permeability of 352.10 g/(m^2·d), a seed germination rate of 95%, and an average root length of 19.44 mm. Compared with the untreated control, application at a dry matter dosage of 8.0 g/m^2 increases crop emergence rate, plant height, and total biomass by 54.55%, 26.90%, and 54.99%, respectively, while also significantly enhancing soil retention.［**Conclusion**］The liquid mulch film developed in this study effectively promotes crop growth and enhances soil water retention capacity, offering a valuable strategy for reducing polyethylene (PE) film usage and enabling high-value utilization of agricultural and forestry wastes, with broad application prospects.

Key words: sodium lignosulfonate; chitosan; polyvinyl alcohol; liquid mulch film; water vapor barrier; soil fixation; crop growth promotion; bio-based materials; PE mulch film alternative; arid and semi-arid regions

干旱/半干旱区占我国陆地面积的 45% 以上，涵盖西北、华北等重要农业产区[1]，是保障国家粮食安全与生态安全的关键区域。然而，受全球气候变化与人类活动加剧的双重影响，该区域面临降水减少、蒸发加剧、土壤退化（如沙化、盐碱化）等严峻挑战，导致农业水资源利用效率低下，作物产量波动大，生态脆弱性进一步凸显[2]。农业地膜覆盖技术可减少土壤水分蒸发，保持土壤湿度，增加地温，抑制杂草和病虫害，改善作物生长环境，促进作物生长和产量提升，是保障农业可持续发展的关键措施[3−4]。而传统聚乙烯地膜的长期使用已造成严重的“白色污染”及微塑料风险，土壤结构破坏、微生物活性下降等问题日益突出[5]，成为制约干旱区农业可持续发展的核心瓶颈，因此开发可替代的环保型地膜已迫在眉睫。生物基液态地膜具有喷施方便、减少劳动力、适应复杂地形等优点，喷施后形成的覆膜不仅具备常规的保墒、增温与抑草功能，从根本上杜绝了残留污染。推广应用液态地膜，是构建绿色低碳农业体系、实现农业高质量发展的关键路径,也是落实国家“双碳”目标与生态保护修复的关键举措。

木质素磺酸钠（lignosulfonate sodium，LS）作为一种制浆造纸中的副产物，富含羟基、甲氧基和磺酸基等多种活性官能团，是推动绿色能源和循环经济的重要资源，在农业增效和食品包装等可持续产业领域发挥重要作用[6−7]。Xu 等[8]成功制备了均质的聚乙烯醇/木质素磺酸钠复合地膜。结果表明，木质素磺酸钠的引入显著提升了薄膜的力学强度，且降低了其水蒸气透过率。Wang 等[9]使用木质素磺酸钠/羧甲基纤维素钠/聚乙烯醇制备了一种具有良好的土壤保水、保温效果和生物降解性好的地膜。尽管 LS 在农业地膜等领域展现出资源化利用潜力，但其极端环境适应性（如高温干旱）、生物相容性及优异力学性能提升仍具有挑战性[10]。壳聚糖（chitosan，CS）作为另一种天然生物聚合物，凭借其卓越的抗菌性、成膜性及可降解性，与 LS 结合可实现性能互补。CS 主要由甲壳素脱乙酰合成的一种可生物降解的生物

聚合物多糖，具有优良的可再生性、生物相容性、抗菌活性和无毒性，在薄膜涂层阻隔应用领域受到广泛的关注[11]。Sun 等[12]将戊二醛交联壳聚糖与腐殖酸/尿素配合物涂在纤维素/腐殖酸膜上，构建的多糖基可降解地膜具有很高的疏水性、热稳定性、抗紫外线性、耐老化性和生物降解性，且保温效果与 PE 地膜相当，但该膜脆性较大，存在力学性能不足和功能单一等问题，限制了该功能膜在农业特定环境下的应用。聚乙烯醇（polyvinyl alcohol，PVA）可有效改善壳聚糖的脆性，同时保留其生物相容性和抗菌性，由于其具备优异的生物安全性和可降解性以及出色的成膜性和力学性能，由其制备的薄膜已成为工农业和食品领域的研究热点[13]。Ma 等[14]利用过氧化氢氧化的柠檬酸发酵废物和 PVA 制备新型可生物降解地膜，该膜拉伸强度和断裂伸长率可分别达到 16.43 MPa 和 446.96%，不仅可有效改善土壤结构，且提高了地膜抗断裂性。也有研究表明，使用流延法制备的聚乙烯醇/再生壳聚糖共混膜，无论是物理化学和功能特性还是阻隔（氧气和水）性能均有所改善[15]。这一特性为构建兼具柔韧性与高强度的功能地膜材料奠定了理论基础，并在干旱半干旱极端气候条件下土壤生态保护领域展现巨大潜力。

鉴于此，本研究选用木质素磺酸钠为原料，以壳聚糖为功能化修饰剂，以聚乙烯醇为网络交联成膜促进剂，利用多重交联诱导策略制备具有优异力学和水汽阻隔性能的木质素基液态地膜（LCP）。采用物化结构表征，系统探讨木质素磺酸钠/壳聚糖/聚乙烯醇三元复合液态地膜合成的分子间相互作用机制，研究其流变特性、力学强度及水蒸气阻隔性能与作物生长及土壤固持特性间的响应性。以期为木质素磺酸盐高值化利用及干旱半干旱区农业绿色转型提供理论依据和技术支撑，对推动地膜减量替代和可持续发展具有重要实践意义。

1 材料与方法

1.1 材 料

工业木质素磺酸钠，黑褐色固体粉末，购自山东泉林纸业有限公司；聚乙烯醇（PVA1788），聚合度为 1 650 ~ 1 850，醇解度 86% ~ 90%，分子量 72 600 ~ 81 400，麦克林试剂；壳聚糖，黏度 200 mPa·s，脱乙酰度 90%，分子量 800 ~ 1 000，麦克林试剂；供试青菜品种为苏州青（*Brassica chinensis*）。

1.2 木质素基液态地膜的制备

将一定量的 PVA 加到盛有 82 g 去离子水的三口烧瓶中，80 ℃ 恒温水浴条件下采用磁力搅拌器进行搅拌至完全溶解。待溶液静置 15 min 后，依次加入 LS 和 CS，持续磁力搅拌 2 h，制得 LS/CS/PVA（三组分的质量分数之和固定为 18%）系列均质木质素基液态地膜 LCP_x，x 表示 CS 质量分数，如 LCP_1 对应的 LS、CS 和 PVA 三组分质量比为 10∶1∶7，LCP_0 为对照组。试验样品各组分配比参数详见表 1。采用流延法将配制好的均质成膜前驱液 3 g 室温下倾入内径为 7.0 cm 的圆形模具中，60 ℃ 鼓风烘箱中干燥 2 h，制得薄膜样品，其工艺流程如图 1 所示。

1.3 木质素基液态地膜性能表征

1.3.1 化学官能团与分子间相互作用

采用傅里叶红外光谱仪（Nicolet Is50，赛默飞，美国）分别测定 LS、LS/PVA 和 LS/CS/PVA 样品的 FTIR 光谱，频率范围 500 ~ 4 000 cm^{-1}，分辨率为 4 cm^{-1}；采用等温滴定量热分析仪（isothermal titration calorimetry，ITC；VP-ITC，马尔文，英国）在 25 ℃ 下，将 1 mmol/L 的 LS 溶液滴定到 0.1 mmol/L 的 CS/PVA 溶液中。背景实验为 1 mmol/L 的 LS 溶液滴定纯水，选取单点模型将样品数据减去背景数据，并对 ITC 测得的热量峰曲线进行基线调整和模型拟合。

1.3.2 流变性能

使用旋转流变仪（MAS60，赛默飞，美国）在 25 ℃ 旋转模式下测试 LCP 液态凝胶的稳态流变性能，剪切速率采用对数模式，范围为 1 ~ 1 000 s^{-1}。

1.3.3 力学性能

采用电子万能试验机（UTM6503，三思，中国）检测，对样品膜进行拉伸性能测定[16]。将液态地膜裁切成哑铃状试样，测试区域宽度为 4 mm。试样在相对湿度 50% 的环境试验箱中预处理 48 h 后取出，以 50 mm/min 的拉伸速率进行拉伸强度和断裂伸长率测试。每组处理 3 个平行实验。

1.3.4 水蒸气透过率

参照文献 [17] 进行，将样品膜密封于盛装定量去离子水的称量瓶瓶口处，精确称量并记录各组称量瓶与样品膜的初始总质量（记为 m_0）。随后将样品置于温度 23 ℃、相对湿度 50% 的恒温恒湿箱中，每

表 1 试验样品各组分质量分数

Tab. 1 Mass fraction of each component in the test sample %

样品	木质素磺酸钠（LS）	壳聚糖（CS）	聚乙烯醇（PVA）	水
LCP_0	10	0	8	82
LCP_1	10	1	7	82
LCP_2	10	2	6	82
LCP_3	10	3	5	82
LCP_4	10	4	4	82
LCP_5	10	5	3	82

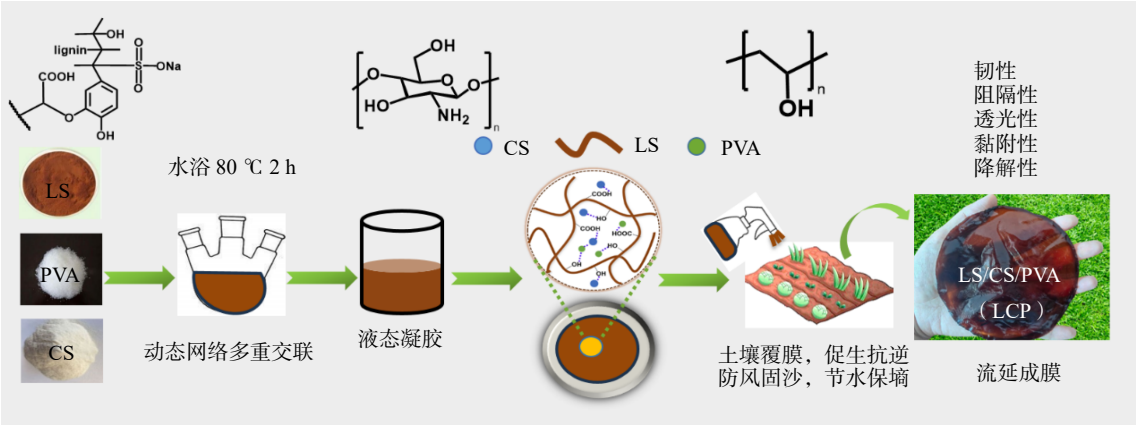


图 1　LCP 液态地膜合成及制备工艺图

Fig. 1　Synthesis and preparation process diagram of LCP liquid film mulch

隔 24 h 测定并记录质量(记为 m_n)，连续监测 6 d。根据样品膜前后质量变化测定其水蒸气透过率，其计算公式为

$$W = (m_n - m_0)/(S \times n) \quad (1)$$

式中：W 为水蒸气透过率，g/(m²·d)；n 为天数，d；S 为杯口横截面积，m²。

1.3.5　作物生长特性

为了测定木质素基液态地膜对种子安全性影响，将双层滤纸平铺于培养皿中，分别注入 10 mL 质量分数 1% 的 LCP，均匀播种 10 粒青菜种子，加盖密封后置于温度为 28 ℃ 的恒温培养箱中进行发芽试验。以胚根突破种皮且外露长度≥1 mm 作为萌发标准，处理 72 h 后取出培养皿，统计发芽率并测量主根长度。每个处理设置 3 个平行试验，同时以等体积去离子水处理的培养皿作为空白对照组。

进一步评估液态地膜对小青菜生长影响规律。试验前将供试土壤经风干处理后过 5 mm 筛，装填至直径为 12 cm 的花盆中以确保土壤质地均匀一致，初始土壤质量含水量调节至 20%。每盆定量播 10 粒青菜种子，采用优化筛选的 LCP_x(稀释浓度至 1%(*w*/*v*)，即 1 g/100 mL)经充分搅拌混匀后进行不同梯度喷施处理，喷施有效成分干物质分别为 2.5、5.0、8.0、10.5 和 13.0 g/m²。生育期内每日定时定量浇水，持续育苗 60 d(2024 年 12 月 29 日—2025 年 2 月 28 日，江苏省农业科学院温室，温度 25 ℃)后收获青菜幼苗。测定指标包括出苗率、株高和鲜重等相关参数。

1.3.6　土壤固持特性

为评估 LCP_4 对土壤的固持性能，采用立式恒温振荡器(HZQ-F160，太仓市华美生化仪器厂)开展固持试验。沙土样品经 80 ℃ 电恒温干燥箱处理 12 h 至质量恒定，经 80～100 目过筛，将其均匀填装至直径 90 mm 的玻璃培养皿中构建测试沙锥。采用精密喷雾装置将 LCP_4 按不同的干物质喷施量(4.5、9.0 和 13.5 g/m²)施加于沙锥表面，烘干至质量不变。通过调节振动频率模拟特定强度的荷载作用，在 160 r/min 持续振动 5 min 后，测量沙锥倒角角度及几何尺寸变化。每组处理设置 3 个平行试验以确保数据可靠性。

2　结果与讨论

2.1　木质素基液态地膜结构

2.1.1　化学结构

从图 2 可以看出，当在 LS 中引入 PVA 后，3 362 cm⁻¹ 附近的特征峰右移至 3 297 cm⁻¹，主要归因于 PVA 中大量羟基与 LS 中的羟基之间形成了氢键。此外，2 920 cm⁻¹ 处的特征峰强度增加，是由于 PVA 的 C—H 伸缩振动[18]叠加在 LS 的 C—H 振动上所致。在该体系中加入 CS 后，可以观察到位于 3 297 cm⁻¹ 附近的宽峰强度进一步增强。这是由于 CS 中含有大量氨基和羟基，能够与 PVA 和 LS 中的羟基形成更多氢键[19–20]。同时，在 1 100 cm⁻¹ 附近磺

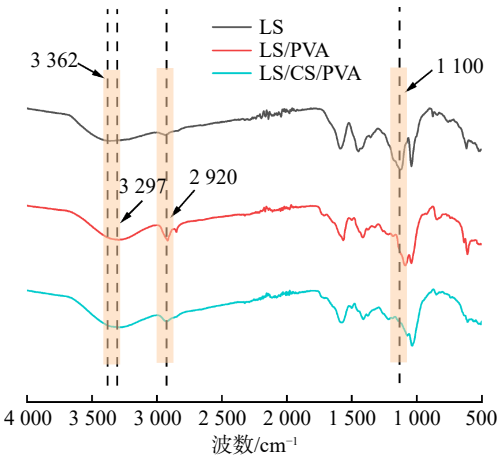


图 2　LS、LS/PVA 和 LS/CS/PVA 红外光谱图

Fig. 2　FTIR spectra of LS, LS/PVA and LS/CS/PVA

酸基的特征峰[21]强度减弱，源于 CS 中阳离子氨基与 LS 中阴离子磺酸基之间的静电相互作用。

2.1.2 分子间相互作用

图 3 所示的 ITC 拟合曲线与实验数据高度吻合，表明所选用的模型能够准确描述多组分分子之间的相互作用机制，实验数据可靠，计算出的热力学参数能够真实反映结合过程的本质。从图中可知，结合常数(K)为 1.07×10^4 L/mol，焓变(ΔH)为-2.06×10^3 kJ/mol，熵变(ΔS)为-6.69×10^3 J/(mol·K)，说明这是一个放热且熵减的过程，反应降低了体系中分子的无序性。由吉布斯自由能方程 $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ 可得出，ΔG 是负值，说明反应是自发进行的焓驱动反应，三组分通过静电和氢键相互作用形成相对稳定的分子间网络结构。该热力学数据与红外光谱分析中观察的特征峰相互印证。

2.1.3 流变性

图 4 中 LCP 的黏度均随着剪切速率的增高而降低，展现出剪切变稀的特性。与 LCP_0 相比，LCP_1、LCP_2、LCP_3 与 LCP_4 的初始黏度由 5 324 mPa·s 分别增加至 8 263、6 183、8 360 和 6 804 mPa·s，表明 CS 的加入提高了 LCP 的黏度。这是因为 CS 的氨基与 LS 的磺酸基产生静电作用形成动态网络结构，且与 PVA 的羟基之间形成氢键使体系结构密集，增强分子间作用力而致，相关结果在 FTIR 分析中也得到验证。此外，样品黏度在 30 ~ 53 s^{-1} 范围内出现临界剪切速率[22]，在 1 ~ 30 s^{-1} 时以较低的速率下降；在 53 ~ 1 000 s^{-1} 下降速率增大。低于该临界值时，分子链相互作用形成缠结与网格占主导，黏度下降较慢；高于该临界值时，分子链形成的缠结与网络被破坏，逐渐沿流动方向取向，分子间的阻力减小，因此黏度下降加快。而 LCP_5 的黏度远低于其他样品，可能是由于体系中 PVA 占比低，无法提供足够的氢键与 LS 和 CS 组成复杂的交联网络。

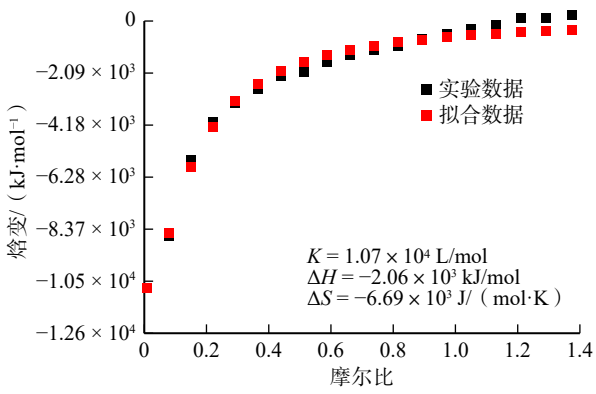


图 3 LCP 液态地膜中滴定摩尔比与反应焓变的关系

Fig. 3 Relationship between titration molar ratio and reaction enthalpy change in LCP liquid mulch film

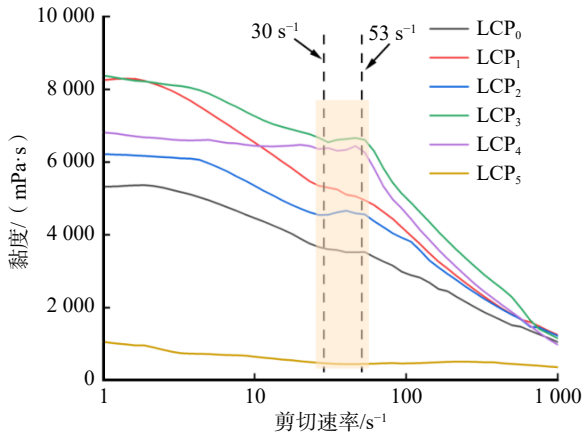


图 4 LCP 液态地膜的流变性能

Fig. 4 Rheological properties of LCP liquid mulch film

2.2 木质素基液态地膜的力学性能

图 5 中 LCP_0 样品表现出最高的拉伸应力与最大的拉伸应变，在 PVA 与 CS 含量比降低的过程中，液态地膜的拉伸应力与应变逐渐下降(见表 2)。与 LCP_0 相比，LCP_1 ~ LCP_5 的应力分别下降至 29.93、28.51、25.35、24.05 和 11.75 MPa，且样品在测试过程中脆性表现出变大的趋势。主要因为 PVA 中含有大量的羟基，可以与 LS、CS 之间形成强烈的分子内和分子间的氢键，从而提升材料的强度和韧性[23]。但是随着 CS 含量的增加，其分子链间氢键作用增强，在一定程度上削弱了 CS 与 PVA 及 LS 之间的分子间相互作用。此外，考虑到 CS 与其他高分子之间相容性有限，即使存在氢键等作用，体系在成膜过程中仍可能发生相分离，进而削弱界面结合并引入应力集中，从而导致材料整体力学性能下降[24]。综合来看，CS 含量在 1% ~ 4% 时，应力降幅在 18.00% ~ 34.11%，应变降幅在 28.13% ~ 50.00%，当含量超过 4% 后会使地膜力学性能大幅降低。

2.3 木质素基液态地膜的水蒸气透过率

水蒸气透过率(W)是评价液态地膜保水性能的

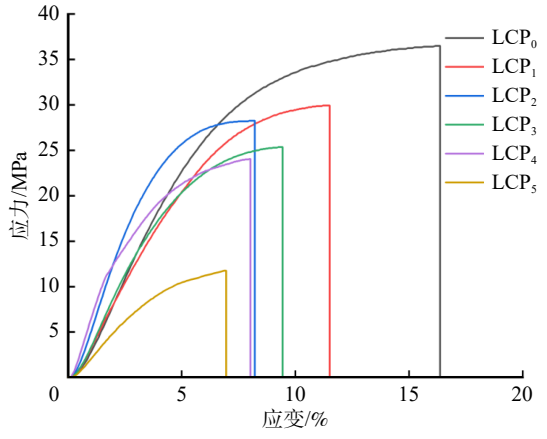


图 5 LCP 液态地膜的应力−应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of LCP liquid mulch film

表 2　LCP 液态地膜的最大应力和最大应变

Tab. 2　Maximum stress and maximum strain of LCP liquid mulch film

样品	最大应力/MPa	最大应变/%
LCP_0	36.55	16.00
LCP_1	29.93	11.51
LCP_2	28.51	8.24
LCP_3	25.35	9.41
LCP_4	24.05	8.00
LCP_5	11.75	6.91

核心指标，直接关联土壤水肥蒸发速率及作物微环境调控能力。在室温 23 ℃、相对湿度为 50% 条件下，未添加 CS 的对照组 W 高达 366.84 g/(m^2·d)，而随着 CS 含量的增加与 PVA 含量的减少，W 呈现逐渐下降趋势，LCP_4 的 W 为 352.10 g/(m^2·d)，降幅为 4.02%(图 6)。这是因为 CS 分子中含有大量羟基和氨基，可通过氢键等分子间相互作用在一定程度上增强局部结构的致密性，从而对水蒸气的传输产生阻碍作用。且随着 CS 含量的增加，其在体系中可能形成相对连续的阻隔相结构，使水蒸气在膜内的扩散路径更加曲折，从传质角度延长了水分子的有效扩散距离，从而有利于材料阻隔性能的提升[25]。此外，降低 PVA 用量亦有助于减少水分子的吸附与传输。两者协同作用提升了复合液态地膜水蒸气阻隔性能。这在实际应用中，有利于保持作物生长环境的温湿度，对促进农业节水保墒具有重要意义。尽管 LCP_5 的 W 最低，但其最大应力与应变仅为 11.75 MPa 和 6.91%，为保障田间应用的综合性能，优选 LCP_4 木质素液态地膜，既可保持一定的力学强度又兼具良好的阻隔性。

2.4　木质素基液态地膜对作物生长特性的影响

2.4.1　种子发芽率与根长发育

种子发芽率是评估液态地膜对种子萌发能力强弱的重要指标。LCP 对青菜种子的发芽率和根长产生了一定的影响，CK 组种子发芽率为 90%，平均根长为 20.79 mm。与 CK 相比，LCP_0、LCP_1、LCP_2、LCP_3 的种子发芽率分别降低 10、7、7、4 个百分点，平均根长分别减少 5.22、3.90、3.15、1.82 mm。而 LCP_4 的种子发芽率达到 95%，对比 CK 增加了 5 个百分点; 根长为 19.94 mm，相较于 CK 减少了 0.85 mm (降幅为 4%)。总体而言，随 CS/PVA 质量配比的增加，LCP 对种子发芽率及根长的促进作用越来越强，LCP_4 效果达到最佳(图 7)。这是因为适量的 CS 既能通过软化种皮、增强透水性来加速种子吸胀与萌发启动，并可作为功能性物质为胚芽生长提供能量和底物以促进萌发(浓度过高则抑制)[26−27]，又能在与 PVA 形成适宜比例时，使 LCP 膜具备良好的亲水性和适度的透气性，从而维持种子微环境湿度平衡，避免水分胁迫，并保障氧气交换以促进胚根呼吸[28]。

2.4.2　土壤表面覆盖对作物生长的影响

不同喷涂量处理下，第 8 天小青菜种子的出苗率呈现先升后降的趋势(图 8a)，表明 LCP_4 液态地膜覆盖对种子萌发具有促进作用。与未喷涂 LCP_4 地膜对照组相比，不同 LCP_4 喷涂量的小青菜出苗率增高，从 48.89% 增长至 55.56%、71.11%、75.56%、60.00% 与 55.56%。喷涂量 8.0 g/m^2 时达到最高的 75.56%，随后逐渐下降。至幼苗生长第 55 天时，相较于未喷涂 LCP_4 的小青菜，不同 LCP_4 喷涂量的小青菜株高均有所增高，分别从 17.62 cm 增长至 19.32、20.15、22.36、19.19 和 17.95 cm，每盆总生物量也从 109.72 g 增至 126.81、156.14、170.06、143.26 和 132.54 g(图 8b)。其中，与对照组相比，喷涂 8.0 g/m^2 处理的株高和总生物量分别增加了 26.90% 和 54.99%。分析原因为种植小青菜期间温度过高，盆栽土壤水分散失速率快，而 LCP 地膜通过三元复合体系构筑的致密网络结构，具有良好的水蒸气阻隔

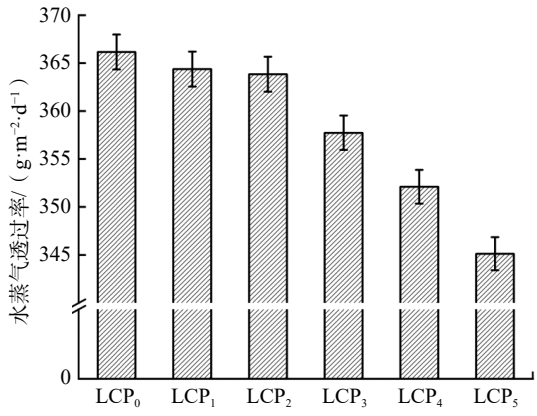


图 6　LCP 液态地膜的水蒸气透过率

Fig. 6　Water vapor transmission rate of LCP liquid mulch film

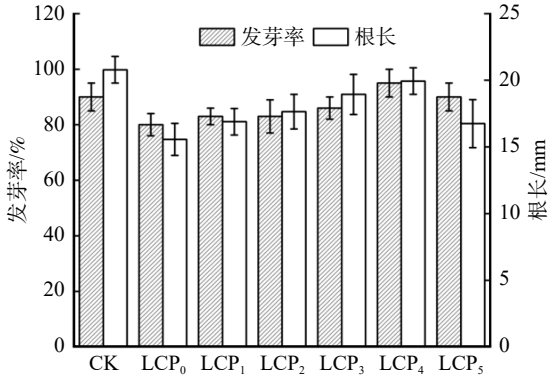


图 7　LCP 液态地膜对种子发芽率与平均根长的影响

Fig. 7　Influence of LCP liquid mulch film on seed germination rate and average root length

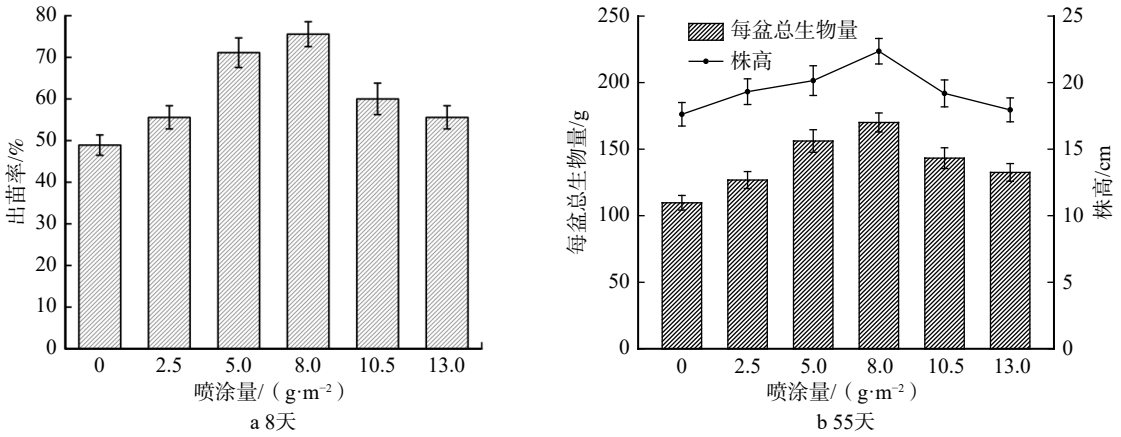


图 8 不同喷涂量 LCP_4 液态地膜对小青菜的出苗率、株高及总生物量的影响

Fig. 8 Effects of LCP_4 liquid mulch film on the germination rate, plant height and total biomass of Chinese cabbage under different spraying amounts

性，有效减少土壤水分蒸发，维持根系层湿度稳定，且 LCP 中 LS 的多酚结构可清除自由基，缓解高温引发的氧化损伤[29]，缓解了高温胁迫，形成益于小青菜生长发育的微环境，进而促进作物生长（图 9）。综合可知，喷涂量为 8.0 g/m² 时，小青菜出苗率、株高及每盆总生物量均达到最优平衡。

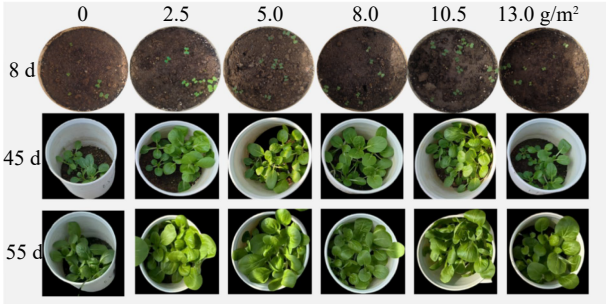


图 9 不同喷涂量 LCP_4 液态地膜对小青菜生长情况的影响

Fig. 9 Influence of different spraying amounts of LCP_4 liquid mulch film on the growth of Chinese cabbage

2.5 木质素基液态地膜对沙土结构稳定性和防风固土效能的影响

经 LCP_4 表面处理后，砂锥模型锥角增幅呈现施用量依赖性特征。其中低、中、高喷施量的锥角增幅分别为 16.51%、19.05% 和 18.35%（图 10b ~ d），而未喷涂 LCP_4 由 123°增至 180°（图 10a），增幅高达 46.34%，表明 LCP_4 膜可通过增强砂粒间胶结作用实现沙土固结效能的提升。其表面形貌观测显示，当 LCP_4 喷施量为 4.5 g/m² 时，砂锥表层即可形成致密防护膜层，有效阻隔振动能量向内部松散土体的传递，维持模型几何构型的完整性。随着 LCP_4 施用量的梯度增加，砂粒间黏结强度呈现先增强后趋缓的变化规律，中、低喷施量处理主要借助 LCP 多元协同，能够在沙土表层形成一种薄而坚韧的“黏合膜”，从而实现固持作用[30]，显著提升风沙抗侵蚀性能；而高喷施量溶液在土壤表面的流动性显著增强，因局部堆积或渗流而无法形成均匀的胶结层，实际应用中 LCP_4 的施用量可根据需要调整。研究证实，LCP_4 表面喷涂技术可构建物理屏障与化学固结的协同作用机制[30]，其防风蚀效能较未喷施提升 58.90% ~ 64.37%（锥角变化幅度的差值百分比），为半干旱干旱区耕地保育和作物生存提供良好环境。

2.6 木质素基液态地膜生产成本及应用前景

为应对干旱半干旱地区农业生产的微塑料风险挑战，本研究创新性地开发了一种木质素基多重交联诱导液态地膜。通过批量成本核算，该 LCP 生产成本约为 5.70 元/kg，结合 4 ~ 5 kg/亩的施用量及 20 元/亩的机械喷施成本，其综合应用成本约 42.8 ~ 48.5 元/亩。田间试验表明：LCP 地膜不仅能有效维

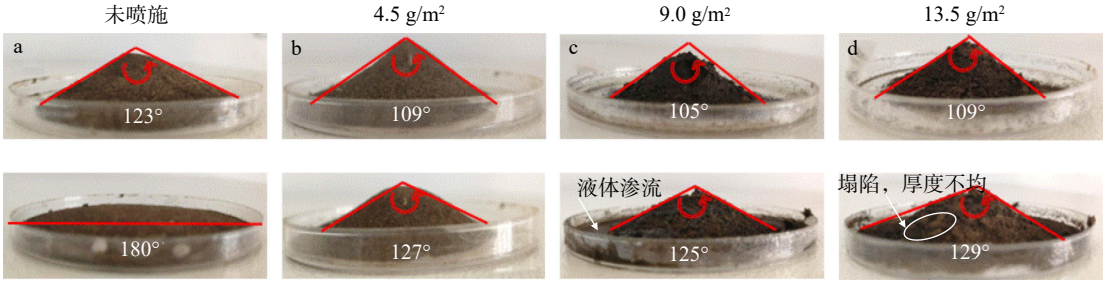


图 10 LCP_4 液态地膜对土壤的固持作用

Fig. 10 The soil retention effect of LCP_4 liquid mulch film

持土壤结构，抑制风蚀，改善土壤水热条件和理化性质，还能促进微生物群落多样性，提升作物产量和品质，且具备全生物降解特性，对推动绿色低碳农业可持续发展具有重要的工程应用价值与研究意义。

3 结　　论

本研究提出基于木质素磺酸钠、壳聚糖与聚乙烯醇多重交联诱导的木质素基液态地膜（LCP）合成策略，既实现生物质资源高值化利用，又有效规避传统地膜微塑料污染风险，为干旱半干旱地区作物覆盖提供绿色可持续新途径。研究主要结论如下。

（1）木质素磺酸钠/壳聚糖/聚乙烯醇通过氢键与静电协同交联，构建了 PVA 动态氢键骨架支撑、LS/CS 静电网络锚定、LS/PVA/CS 氢键−疏水增韧的强化分子结构，此多重非共价协同机制是提升 LCP 界面融合性与力学性能的关键。

（2）LCP 呈现明显的剪切变稀特性，利于土壤表面喷雾施用，显著提升农业生产适用性。其对种子萌发、根系发育及作物生长均具有积极促进作用，喷涂量达 8.0 g/m^2 时，作物出苗率、株高及总生物量提升显著，展现出良好生物刺激效应且经济成本合理。是干旱半干旱区域有效的农艺覆盖材料保护举措。

（3）LCP 液态地膜施于土壤表面可快速形成稳定防护膜层，能阻隔振动能量向内部松散土壤传递，减少土壤颗粒位移，增强砂粒间胶结作用，提升干旱半干旱地区土壤固持能力。

本研究为 PE 地膜减量替代及农林废弃物高值化利用提供新思路。但研究仅评价了 LCP 的力学性能、作物生长及土壤固持特性。未来需深入聚焦于 LCP 在干旱半干旱地区微环境响应、降解特性，以及其促生机制与土壤结构改良作用的全面评估。后续研究可进一步结合材料学、土壤学、生态学等多学科知识，深入探究 LCP 与不同土壤类型、气候条件的相互作用机制，开发出更具针对性和适应性的液态地膜，对推动新型地膜在可持续场景中的应用具有广泛价值。

参　考　文　献

[1] Mao D, Wang Z, Wu B, et al. Land degradation and restoration in the arid and semiarid zones of China: quantified evidence and implications from satellites [J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(11): 3841−3851.

[2] Zhang W, Zhou T, Wu P. Anthropogenic amplification of precipitation variability over the past century [J]. Science, 2024, 385: 427−432.

[3] Liao G, Sun E, Kana E B G, et al. Renewable hemicellulose-based materials for value-added applications [J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 341: 122351.

[4] Sun E, Zhang Y, Yong C, et al. Biological fermentation pretreatment accelerated the depolymerization of straw fiber and its mechanical properties as raw material for mulch film [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 284: 124688.

[5] Reay M K, Graf M, Murphy M, et al. Higher potential leaching of inorganic and organic additives from biodegradable compared to conventional agricultural plastic mulch film [J]. Journal of Hazardous Materials, 2025, 488: 137147.

[6] Jiang C, Wang Q, Wang H, et al. Structurally robust, hydrophobicity and multifunctional black cellulose/lignin-based mulch film for green agriculture [J]. Industrial Crops and Products, 2024, 219: 118911.

[7] Zhang X, Li G, Chen C, et al. Chitosan/PVA composite film enhanced by ZnO/lignin with high-strength and antibacterial properties for food packaging [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 306: 141658.

[8] Xu J, Ren L, Song W, et al. Homogeneous PVA/sodium lignosulfonate mulch films with improved mechanical and UV/water vapor barrier properties [J]. Industrial Crops and Products, 2024, 209: 117975.

[9] Wang Q, Wang L, Li C, et al. Biodegradable and multifunctional black mulch film decorated with darkened lignin induced by iron ions for “green” agriculture [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 265: 130981.

[10] Zhang B, Wang G, Huang X, et al. Formulation and application assessment of lignin-based biodegradable composite mulching film with emphasis on lignin enhancement [J]. Industrial Crops and Products, 2024, 215: 118634.

[11] Jogaiah S, Mujtaba A G, Mujtaba M, et al. Chitosan-metal and metal oxide nanocomposites for active and intelligent food packaging; a comprehensive review of emerging trends and associated challenges [J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 357: 123459.

[12] Sun Z, Ning R, Qin M, et al. Sustainable and hydrophobic polysaccharide-based mulch film with thermally stable and ultraviolet resistance performance [J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 295: 119865.

[13] Aslam M, Kalyar M A, Raza Z A. Polyvinyl alcohol: a review of research status and use of polyvinyl alcohol based nanocomposites [J]. Polymer Engineering and Science, 2018, 58(12): 2119−2132.

[14] Ma Z, Ma Y, Qin L, et al. Preparation and characteristics of biodegradable mulching films based on fermentation industry wastes [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2016, 111: 54−61.

[15] Panda P K, Park K, Seo J. Development of poly (vinyl alcohol)/regenerated chitosan blend film with superior barrier, antioxidant, and antibacterial properties[J]. Progress in Organic Coatings, 2023, 183: 107749.

[16] Wang Q, Duan Y, Huang Y, et al. Multifunctional soybean protein isolate-graft-carboxymethyl cellulose composite as all-biodegradable and mechanically robust mulch film for “green”

agriculture [J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 323: 121410.

[17] Yu J, Ruengkajorn K, Crivoi D, et al. High gas barrier coating using non-toxic nanosheet dispersions for flexible food packaging film [J]. Nature Communications, 2019, 10: 2398.

[18] Ren L, Yang S, Wu N, et al. Preparation and characterization of polyvinyl alcohol/sodium lignosulfonate/black rice anthocyanin extract agricultural film for monitoring soil pH [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 126800.

[19] Liu X, Chen C, Cao Y, et al. Effect and enhancement mechanism of sodium lignosulfonate on the chitosan-based composite film [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2023, 678: 132505.

[20] Ye D Z, Jiang L, Hu X Q, et al. Lignosulfonate as reinforcement in polyvinyl alcohol film: mechanical properties and interaction analysis [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 83: 209−215.

[21] Rasool K, Pandey R P, Rasheed P A, et al. Screening the growth inhibition mechanism of sulfate reducing bacteria by chitosan/lignosulfonate nanocomposite (CS@LS) in seawater media [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(6): 106624.

[22] 张田伟, 梁嘉欣, 岳双双, 等. 可生物降解的半芳香聚酯聚碳酸丙烯酯共聚物/聚己二酸−对苯二甲酸丁二酯共混物的制备及性能表征 [J]. 高分子学报, 2023, 54(8): 1144−1154.
Zhang T W, Liang J X, Yue S S, et al. Preparation and characterization of biodegradable poly (propylene carbonate-co-phthalate)/poly (butylene adipate-co-terephthalate) blends [J]. Acta Polymerica Sinica, 2023, 54(8): 1144−1154.

[23] Ngasotter S, Xavier K A M, Sagarnaik C, et al. Evaluating the reinforcing potential of steam-exploded chitin nanocrystals in chitosan-based biodegradable nanocomposite films for food packaging applications [J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 348: 122841.

[24] Ren L, Yan X, Zhou J, et al. Influence of chitosan concentration on mechanical and barrier properties of corn starch/chitosan films [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 105(3): 1636−1643.

[25] Fernandez-Saiz P, Ocio M J, Lagaron J M. Antibacterial chitosan-based blends with ethylene-vinyl alcohol copolymer [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 80(3): 874−884.

[26] Nakasato D Y, Pereira A E S, Oliveira J L, et al. Evaluation of the effects of polymeric chitosan/tripolyphosphate and solid lipid nanoparticles on germination of *Zea mays*, *Brassica rapa* and *Pisum sativum* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 142: 369−374.

[27] Manjunatha G, Roopa K S, Prashanth G N, et al. Chitosan enhances disease resistance in pearl millet against downy mildew caused by *Sclerospora graminicola* and defence-related enzyme activation [J]. Pest Management Science, 2008, 64(12): 1250−1257.

[28] Li R, He J, Xie H, et al. Effects of chitosan nanoparticles on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 126: 91−100.

[29] Li K, Xu H, Liu Y, et al. Exploring the relationship between lignin structure and antioxidant property using lignin model compounds [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 282: 136786.

[30] Su W, Yang Z, Wang H, et al. Synergistic effect of sodium alginate and lignin on the properties of biodegradable poly(vinyl alcohol) mulch films [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2022, 10(36): 11800−11814.

（责任编辑 吴 娟
责任编委 许 凤）