

引用:王保平,王月,程萍,等.魔芋葡甘露聚糖基食品保鲜材料研究进展及产业化挑战与对策[J].聊城大学学报(自然科学版),2026,39(4):622-632.

Citation:WANG Baoping, WANG Yue, CHENG Ping, ZHANG Xue, FAN Zhiping, HAN Jun. Research progress and industrialization challenges and strategies for konjac glucomannan-based food preservation materials[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2026, 39(4):622-632.

文章编号 1672-6634(2026)04-0622-11

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2025110003

魔芋葡甘露聚糖基食品保鲜材料研究进展及产业化挑战与对策

王保平¹,王月¹,程萍²,张雪¹,范治平¹,韩军^{1,2}

(1. 聊城大学 生物制药研究院,山东 聊城 252059;2. 聊城高新生物技术有限公司,山东 聊城 252059)

摘要 随着健康消费理念的日益普及和环境友好型生物材料需求的持续增长,兼具低成本经济性与天然保鲜特性的材料研究近年来受到广泛关注。魔芋葡甘露聚糖(Konjac glucomannan, KGM)作为天然植物多糖的代表,凭借其卓越的生物安全性、可降解性及广泛的生物来源性,结合独特的流变特性,已成为食品保鲜材料的理想基材。基于我们前期的系列研究,本综述按功能系统归纳了四类 KGM 基材料体系:阻隔及稳定型材料、智能响应型材料、抗菌功能型材料、力学强化型材料,重点阐述了其在冷藏品保鲜、果蔬食品保鲜、肉制品保鲜等主流领域的最新应用。并展望了通过优化组份配比、推动连续化生产以及集成光动力抗菌等功能模块的有效途径,实现 KGM 基材料规模化替代石油基包装材料的转换。

关键词 魔芋葡甘露聚糖;食品保鲜;功能材料;智能包装;生物降解

中图分类号 Q936

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Research progress and industrialization challenges and strategies for konjac glucomannan-based food preservation materials

WANG Baoping¹, WANG Yue¹, CHENG Ping², ZHANG Xue¹,
FAN Zhiping¹, HAN Jun^{1,2}

(1. Institute of Biopharmaceutical Research, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China;

2. Liaocheng High-tech Biotechnology Co., Ltd, Liaocheng 252059, China)

Abstract With the increasing prevalence of health-conscious consumption and growing demand for eco-friendly biomaterials, research on materials balancing cost-effectiveness with natural preservation properties has garnered significant attention in recent years. Konjac glucomannan (KGM), as a representative natural plant polysaccharide, has emerged as an ideal substrate for food preservation materials owing to its

收稿日期:2025-11-07

基金项目:国家“重大新药创制”科技重大专项(2017ZX09201003-013);山东省自然科学基金项目(ZR2021ME127);聊城大学博士基金项目(318051609)资助

通信作者:范治平,男,汉族,博士,副教授,研究方向:医/药天然高分子材料及流变学,E-mail:fanzhiping@lcu.edu.cn.

exceptional biosafety, biodegradability, abundant biological sources, and unique rheological properties. Building upon our prior research series, this review systematically categorizes four functional KGM-based material systems: barrier/stabilizing materials, stimuli-responsive materials, antibacterial functional materials, and mechanically reinforced materials. It highlights their latest applications in key preservation domains including refrigerated products, fruits/vegetables, and meat products. Furthermore, we prospect effective pathways to achieve large-scale replacement of petroleum-based packaging through optimized component ratios, continuous production advancement, and integration of functional modules such as photodynamic antibacterial systems.

Keywords konjac glucomannan; food preservation; functional materials; smart packaging; biodegradation

0 引言

新鲜蔬果作为人类膳食结构中不可或缺的组成部分,其营养价值和保鲜技术研究在当前食品安全与可持续发展背景下具有重要意义^[1]。现代研究表明,新鲜蔬果中花青素、多酚类物质及维生素C等活性成分的含量与其采后保鲜工艺密切相关^[2]。然而,在蔬果的储存与运输过程中,极易因操作不当或环境因素导致蔬果损伤及污染,进而造成食物资源的严重浪费^[3]。目前,市面上出现的保鲜材料绝大部分以石油基为原料,这些材料在生物毒性、降解性等方面面临诸多挑战^[4]。因此,研究可降解、无毒性的保鲜材料,对于水果或冷藏食品的储藏与运输具有重要的现实意义。近年来,研究者以壳聚糖^[5]、纤维素^[6]、淀粉^[7]、魔芋葡甘露聚糖^[8]等天然多糖为基质开发保鲜材料,在实验研究中展现出显著的应用潜力。这类生物基材料凭借其独特的理化特性,有望在食品保鲜领域形成新的技术突破,并逐步替代传统石油基保鲜材料。

魔芋葡甘露聚糖(Konjac Glucomannan, KGM)是从魔芋块茎中提取的天然多糖,其分子主链由 β -1,4糖苷键连接的D-甘露糖和D-葡萄糖单元构成,支链则通过 β -1,3糖苷键连接^[9](图1)。KGM的分子结构中,其甘露糖单元的C-3位存在特定的分支结构,且大约每19个糖残基会连接一个乙酰基团^[10]。这种独特的结构使得KGM能够抵抗人体上消化道内各类消化酶的作用,因而无法被水解,被明确定义为一种不可消化的膳食纤维。尽管如此,KGM可以被特定的酶类,如 β -甘露糖苷酶,有效水解以生成甘露寡糖;此外,它也能作为底物被其他 β -糖苷酶利用,应用于功能性寡糖的制备^[11]。该物质不仅具有优异的成胶性能和粘附特性,还表现出卓越的保水能力与类淀粉增稠特性^[12-13]。作为理想的保鲜基质材料,KGM兼具以下优势:出色的成膜性、显著的水合作用、可食用安全性、完全生物降解性以及一定的抗氧化活性,这些特性使其在食品保鲜领域具有广阔的应用潜力^[14-15]。特别值得关注的是,KGM基保鲜材料还具有原料来源广泛、环境友好、性能稳定等突出优点^[16-17]。

众多研究团队在生物基保鲜材料开发方面已取得系列重要进展^[18-21]。为促进KGM基保鲜材料的深入研发与推广应用,本研究通过系统梳理现有文献,全面总结了KGM基保鲜材料的制备工艺、性能特征及实际应用效果。经文献调研发现,目前尚未见针对KGM保鲜材料“制备-性能-应用”全链条的系统性综述,本研究可为该领域的后续研究提供理论参考。

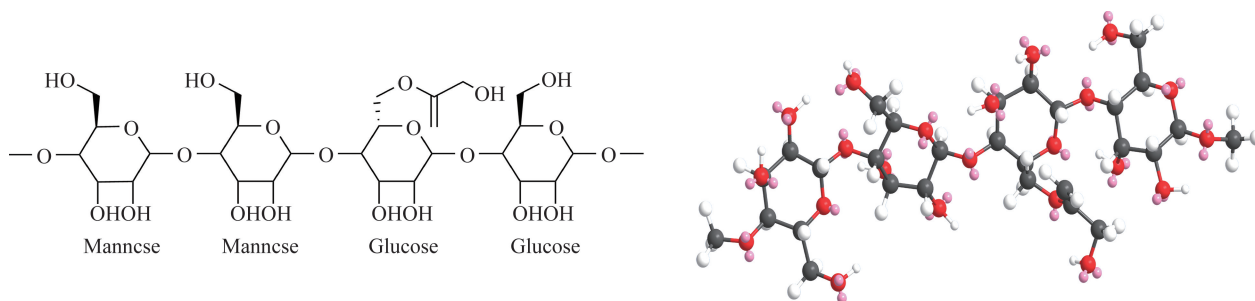


图1 魔芋葡甘露聚糖化学结构式及球棍模型

Fig. 1 Chemical structural formula and ball-and-stick model of konjac glucomannan

1 制备方法策略及性能

1.1 KGM 基阻隔及稳定型材料

水凝胶材料通过可调控交联密度的聚合物网络结构,实现了智能气体阻隔与动态稳定性的协同优化。其具备的 90% 以上水蒸气阻隔率和优异的抗冻融循环特性,为替代传统塑料保鲜膜提供了新的技术路径。早在 2002 年,Cheng 等就率先探讨了碱处理与羧甲基纤维素钠对魔芋葡甘露聚糖基薄膜性质的调控作用。研究发现,经碱性条件处理的凝胶薄膜表现出较低的吸水率和更为优异的拉伸性能;相比之下,经羧甲基纤维素钠修饰后的薄膜,则显示出更强的吸水能力与更高吸水率^[22]。在后续的研究中,Ye 课题组进一步展开了对 KGM 与黄原胶复合薄膜的系统研究。该团队将二者溶液在醋酸盐环境中混合,并于室温条件下干燥 24 h 成功制备复合膜。实验结果表明,当 KGM 与黄原胶配比为 8:2 时,所得凝胶薄膜的性能达到最优,且在细胞培养应用中展现出显著潜力^[23]。近几年来,Xiao 等学者创新性地采用 KGM 与高酰基明胶(HAGG)构建水梯度薄膜,应用于冷冻鱼片保鲜^[24]。通过精确调控 KGM/HAGG 的重量比,该薄膜的力学性能与阻隔性能均可实现定向调节。这种通过单侧加水形成的水梯度薄膜,经冷冻后同时具备薄膜特性和冰涂层功能,能有效抑制水分流失与迁移,并显著延缓蛋白质及脂质氧化过程。进一步研究中,Deng 团队开发了基于脱乙酰魔芋葡甘露聚糖(DKGM)与谷蛋白的新型耐水生物物质薄膜,如图 2(a)^[8]。该技术通过氢氧化钠溶液同步实现谷蛋白溶解和 KGM 脱乙酰化,形成的半互穿网络结构复合材料展现出卓越性能:表面疏水性显著提升,机械强度高达 92.5 MPa,同时具有突出的阻隔性能和低透氧率。Peng 等人则聚焦于 DKGM 与 HAGG 组成的水梯度薄膜(WGFs),系统研究了其在增强冷冻鱼片保鲜方面的效果^[25]。研究发现,KGM 脱乙酰化程度(DDA)对薄膜性能具有决定性影响,其中 DDA 为 25.2% 的 DKGM/HAGG 薄膜表现出最优异的水蒸气和氧气阻隔性能。在功能性拓展方面,Ni 团队成功研制出含有纤维素纳米晶体/单宁酸(CNC/TA)稳定化山苍子精油(LCEO)Pickering 乳液的 KGM/卡拉胶复合薄膜(KCNTO),如图 2(b)^[26]。通过 Pickering 乳液技术将 LCEO 均匀分散于 KGM/KC 基体中,形成的松散网络结构使材料性能获得全面提升:断裂伸长率显著增加,水接触角增大表明疏水性增强,同时水蒸气阻隔性、紫外线屏蔽性能和不透明度均得到明显改善。Wu 等研究者则采用溶液浇注法制备了 KGM 和黄原胶(XG)基复合薄膜(KXS),通过引入大豆分离蛋白(SPI)-单宁酸-铁(STFe)复合物实现了材料性能的多维度提升^[27]。STFe 复合物通过共价相互作用和多酚-金属离子配位作用增强稳定性,赋予薄膜优异的阻隔性、机械强度和紫外线屏蔽能力。值得注意的是,该材料还展现出快速土壤生物降解性、强抗氧化活性和广谱抗菌效果,体现了环境友好型材料的综合优势。同时,Chen 等人研究了基于 KGM/凝乳(KC)复合体系的山茶油(CO)乳液保鲜涂层系统(KC-CO)^[28]。Zhang 课题组通过希夫碱反应和硫醇-醛加成反应开发了一种基于羧甲基壳聚糖(CCS)-L-半胱氨酸(CYS)-氧化魔芋葡甘露聚糖(OKGM)的复合抗菌薄膜^[29]。

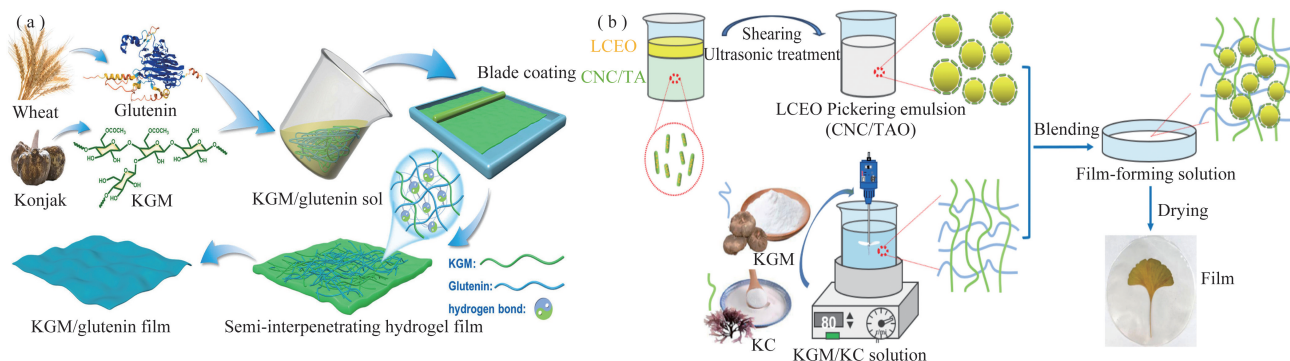


图 2 (a) KGM/谷蛋白薄膜合成机制^[8]; (b) KGM/KC 混合膜的制备示意图^[26]

Fig. 2 (a) Synthesis mechanism of KGM/gluten film; (b) Schematic diagram illustrating the preparation method of the KGM/KC blend film

1.2 KGM 基智能响应型材料

水凝胶材料的智能响应特性源于其环境敏感型聚合物网络的独特设计。该种材料通过温度/pH 双响

应机制实现动态调控,不仅能够精准匹配冷链温区的保鲜需求,还能在食品腐败产生的酸性环境中主动阻隔有害物质渗透,为构建自适应保鲜系统提供了创新性材料解决方案。在早期研究中,Zhou 等人开发了一种基于 KGM 的双层指示薄膜,用于监测鸡肉的新鲜度。研究显示,由 KGM 构成的乳化层显著提升了薄膜的热稳定性、阻水性与抗紫外线性能^[30]。在具体应用研究中,Li 等学者创新性地开发了基于 KGM/壳聚糖(CS)复合基质的 Pickering 乳液活性包装薄膜^[31]。该研究通过精确调控 KGM 与阿拉伯胶(GT)以 1:5 的质量比协同稳定丁香油乳液,并利用静电相互作用将活性成分锁定在薄膜基质中,从而构建出具有三维网络结构的复合材料。这种设计使薄膜在保持优异柔韧性的同时,其阻隔性能得到显著提升-水蒸气透过率(WVP)和氧气渗透率(OP)均优于纯 KGM/CS 膜,同时还兼具紫外线屏蔽功能和良好的土壤降解性。在功能性拓展领域,Wang 团队创新性的开发了负载茶多酚(TP)和黑果枸杞花青素(LRA)的海藻酸钠-KGM(SA-KGM)可食用复合膜^[32]。该复合膜展现出多层次智能响应性:LRA 组分赋予薄膜显著的 pH 响应显色能力,其颜色变化与溶液 pH 值呈线性关联;而 TP 组分则通过分子间氢键作用有效稳定花青素结构,防止其在复杂环境中的降解。值得注意的是,在冷藏 8 天的实际应用中,尽管薄膜因吸湿导致微观结构松散,使拉伸强度下降约 20%且水蒸气透过率有所上升,但其核心功能特性-紫外线屏障性、抗氧化活性以及 pH 响应特性仍能保持稳定。这一系列实验结果充分证明了该复合膜在实际应用环境中的结构可靠性和功能耐久性,为其在智能食品包装领域的应用提供了有力支撑。

在智能包装系统创新方面,Li 等人研究开发一种新型双层智能包装系统,通过将 pH/NH₃ 响应指示层(海藻酸盐/茜素)与抗菌阻隔层(KGM/肉桂精油皮克林乳液)结合,实现了海鲜新鲜度的实时监测与保鲜双重功能^[33]。该薄膜具有优异的力学性能、光阻隔性、疏水性及抗菌抗氧化特性,能灵敏响应 pH/NH₃ 变化并显示可逆变色。Liang 等人研究成功开发了一种基于 γ -聚谷氨酸修饰脂质体(负载高良姜精油)与酯化 KGM-聚乙烯醇(PVA)的三元复合智能材料,如图 3(a)^[34]。该材料通过氢键作用形成光滑微观结构,兼具优异力学性能、热透光率和阻隔性,其降解性通过降低 PVA 比例显著提升。特性表现为 pH 响应控释(能感知柑橘包装环境 pH 变化释放活性成分);保鲜功能(延缓果实品质劣变,延长保质期);稳定性(长期储存后仍保持性能)。研究为绿色智能包装设计提供新思路,未来可扩展天然色标以实现食品质量可视化监测。

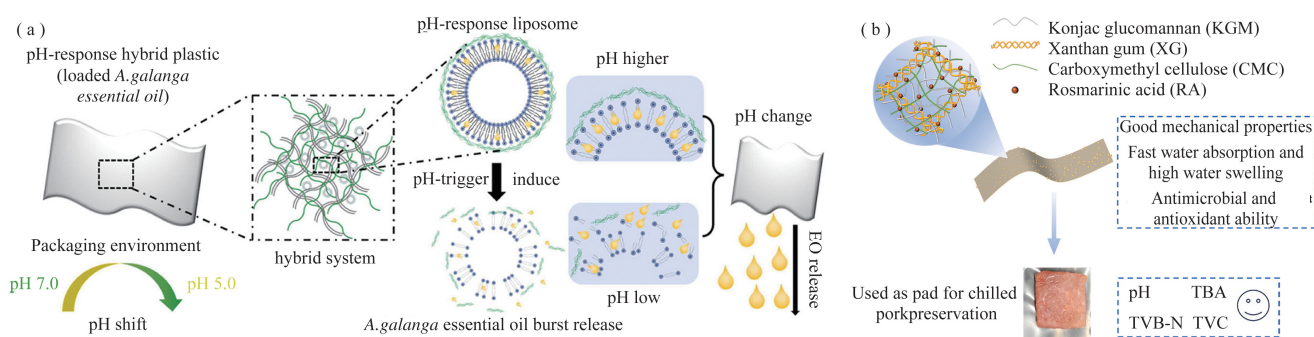


图3 (a) pH 响应脂质体释放机制^[34]; (b) KXC 三元复合薄膜保鲜机制^[35]

Fig. 3 (a) Release mechanism of the pH-responsive liposomes; (b) Preservation mechanism of the KXC ternary composite film

1.3 KGM 基抗菌功能型材料

作为新一代智能保鲜材料,水凝胶的抗菌功能主要通过物理阻隔、缓释型抗菌和接触杀菌三种协同机制实现。2008 年,Lu 团队开发了一种基于 KGM 与聚二烯丙基二甲基氯化铵(PDADMAC)共混的新型薄膜材料。研究表明,该凝胶薄膜的性能随 PDADMAC 浓度变化呈现规律性改变。当 PDADMAC 含量达到 20%时,薄膜的热稳定性显著高于纯 KGM 薄膜,同时其水蒸气渗透率明显降低^[36]。Liu 等学者创新性地开发了负载柑橘油(MO)的 KGM/果胶复合薄膜^[37]。通过精确调控 MO 浓度,该薄膜实现了性能的显著提升:不仅获得最高抗拉强度和最大水接触角,其水蒸气渗透率和透氧率也同步降低,展现出优异的综合性能。Xiang 团队则构建了由 KGM、XG 和羧甲基纤维素(CMC)组成的三元复合薄膜(KXC),创新性地引入迷迭

香酸(RA)以增强功能特性,如图 3(b)^[35]。该薄膜展现出理想的力学性能:干态下拉伸强度达 60.1~78.0 MPa,断裂伸长率为 26.5%~33.4%;湿态下仍保持 0.20~1.02 MPa 的强度和 76.0%~168.4% 的延展性。特别值得注意的是,RA 的加入使薄膜对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑制率分别高达 98.3% 和 96.2%,展现出强大的抗菌活性。在抗菌涂层应用方面,Lou 等研究者成功开发了基于 KGM 的香叶天竺葵精油纳米乳液(LNE)抗菌涂层,专门用于柑橘类水果保鲜^[38]。该涂层溶液表现出独特的剪切稀化行为和良好的物理稳定性,但研究也发现,LNE 含量的增加会干扰 KGM 分子间相互作用,导致材料结构松散。Xiao 团队则创造性地将壳聚糖季铵盐(CQAS)、KGM 和十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)进行组合,开发出新型复合抗菌薄膜(CQAS/KGM/CTAB)^[39]。数据表明,当 CTAB 浓度达到 0.15% (w/v) 时,薄膜性能实现显著提升:不仅拉伸强度增加,其抗菌活性(尤其对金黄色葡萄球菌的抑制作用)和抗氧化性能也得到明显改善。在绿色环保型抗菌薄膜方面,Gasti 等人开发了 CS/PVA/银纳米颗粒(AgNPs)复合薄膜(CPAG)^[40]。通过紫外可见光谱、X 射线衍射和 SEM-EDS 分析,证实了 CS/PVA 基质中成功生成了 AgNPs。该纳米复合材料较纯 CS/PVA 薄膜机械强度提升 19.55%。CPAG 薄膜展现出优异的抗紫外线性能(透过率显著降低)、表面疏水性增强以及水蒸气阻隔性改善,并在未处理土壤中实现了快速生物降解。

1.4 KGM 基力学强化型材料

面向生鲜物流环境开发的仿生水凝胶材料,通过纳米纤维素骨架构建、离子配位双网络设计以及梯度孔隙结构调控的多尺度结构耦合,实现了运输过程中损伤率的显著降低。在具体应用研究中,Chen 等学者创新性地开发了基于 KGM/凝乳复合体系的山茶油乳液(KCM-CO)保鲜涂层系统^[41]。该研究通过添加绿豆蛋白(MBP)作为乳化剂,成功构建了具有稳定三维网络结构的乳液体系,其中 K54C40M6-CO 配方表现出最优性能:形成最光滑的表面形貌(原子力显微镜证实),断裂伸长率达 37.6%,水接触角提升至 97.8°,并具有优异的水蒸气阻隔性和透氧性。Tian 团队则开发了基于 KGM/可得然胶与玉米醇溶蛋白复合的新型疏水包装材料(KCZ),如图 4(a)^[42]。通过将疏水性玉米醇溶蛋白添加到多糖基质中,形成了 KGM 与凝乳胶束通过氢键相互缠绕的网络结构,其中玉米醇溶蛋白颗粒均匀分布。结果表明,最佳配比的复合材料具有优异的性能:机械性能显著提升,水接触角增加,同时具备良好的水蒸气阻隔性。在多功能复合薄膜开发方面,Deng 等研究者成功制备了基于季铵化壳聚糖/单宁酸纳米颗粒(QCs/TA NPs)和 KGM 的多功能复合薄膜(K-NPs)^[43]。该薄膜通过将 TA 作为抗氧化剂和交联剂,利用 KGM 溶液作为纳米颗粒分散稳定剂制备而成。性能测试表明:机械性能优异-最大拉伸强度达 67.1 MPa,断裂伸长率 12.2%;阻隔性能突出,氧气透过率低;功能特性卓越,兼具抗菌、抗氧化和紫外线屏蔽功能。Tang 等人通过静电自组装技术成功开发基于 KGM 的新型生物纳米复合薄膜(KGM/TP-FCNPs)如图 4(b)^[44]。该薄膜通过将包裹茶多酚的岩藻糖聚糖-壳聚糖纳米颗粒(TP-FCNPs)作为填料引入 KGM 基质制成,为智能包装材料的发展提供新的技术路径。

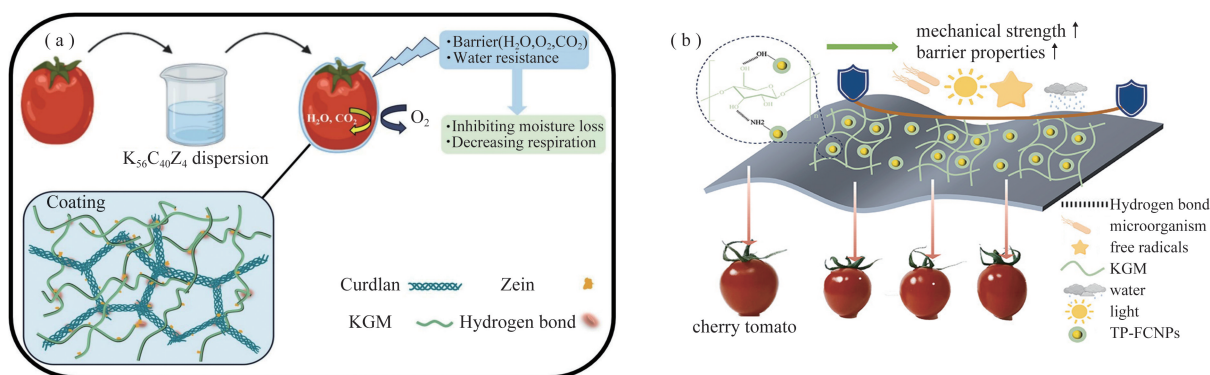


图 4 (a) K₅₆C₄₀Z₄ 涂层的分子组装结构示意图及其对樱桃番茄呼吸的抑制^[42];

(b) 生物纳米复合膜功能增强机制的示意图^[44]

Fig. 4 (a) Molecular assembly structure of the K56C40Z4 coating and its inhibition of cherry tomato respiration;
(b) Schematic diagram of the functional enhancement mechanism of the bionanocomposite film

2 应用场景

2.1 冷藏品保鲜

在冷冻食品运输保鲜领域,传统石油基材料与水锁鲜技术因保鲜效果有限而面临挑战。水凝胶材料凭借其独特的性能优势,为冷藏食品保鲜提供了创新解决方案。早期研究中,Wei 等人开发的 DKGM 涂层显著增强了虫胶/硬脂酸复合薄膜的阻湿性与机械性能,为食品保鲜应用提供了关键基础^[45]。Xiao 等研究者开发的 KGM/HAGG 凝胶薄膜展现出显著优势,与传统未包装和聚乙烯包装相比,能更好地维持鱼片品质。该薄膜目前含 30% 甘油可能影响食用性,未来可通过优化配方减少甘油含量,并采用 DKGM 提升阻隔性能,或添加水溶性抗氧化剂以增强功能性^[24]。Peng 团队开发的水梯度薄膜通过增强 DKGM 与 HAGG 的相互作用,形成了结构更致密的基质。这种设计不仅促进细小冰晶生成以减少氧扩散路径,还在 90 天冷冻期内有效抑制鱼片水分流失和脂质/蛋白质氧化,其保鲜效果显著优于传统 KGM/HAGG 薄膜、冰釉及聚乙烯包装。该成果不仅揭示了脱乙酰化改善阻隔性能的机理,还为工业级无甘油水梯度膜的连续生产工艺提供了重要理论支撑^[25]。在冷藏鱼片保鲜方面,Yin 等人创新性地利用 KGM 与牛蛭精油(OEO)制备了皮克林乳液材料。该材料在应用中展现出多重优势:有效抑制微生物繁殖、减缓脂质/蛋白质氧化、减少水分流失并维持肌肉组织结构,成功将鱼片保质期从 8 天延长至 12 天。研究证实,该材料可作为水产品活性包装的理想选择,如图 5(a)^[46]。

Li 等开发的双层包装薄膜在虾类保鲜中表现出卓越性能。实际应用表明,即使在 72 h 后,虾样品仍保持较低的 TVB-N 值和微小色差,有效延长了食品保质期,为减少食品浪费提供了创新解决方案^[33]。Jiang 团队则开创性地利用小龙虾壳衍生的掺氮碳量子点(N-CQD)与 KGM/SA 复合,开发出可生物降解的光动力抗菌薄膜。该材料在蓝光激发下能有效延长小龙虾肉保鲜期至 8 天,维持理想的 pH 和 TVB-N 水平,并在 14 天内实现近完全土壤降解。这项研究不仅提供了兼具高强度、抗菌性和环境友好性的食品包装解决方案,更开创了废弃生物质可持续利用的新途径。未来研究可进一步优化光动力效应对肉组织的影响机制,并验证其可食用安全性^[47]。

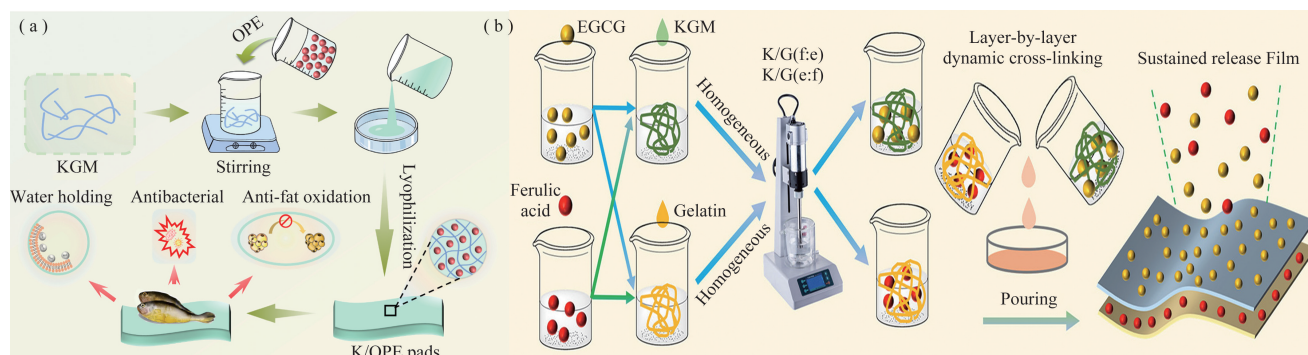


图5 (a) K/OPE 薄膜的制备示意图^[46]; (b) KGM/Gel 复合膜制备示意图^[48]

Fig. 5 (a) Schematic diagram of K/OPE film preparation; (b) Schematic diagram of KGM/Gel composite film preparation

2.2 果蔬食品保鲜

鲜切水果保鲜领域长期受限于传统保鲜膜的微生物污染和安全风险双重挑战。针对这一行业痛点,研究者们基于 KGM 开发了一系列创新性保鲜解决方案。在枇杷保鲜研究中,Wang 等发现 KGM 薄膜的应用效果优于其他对比材料。该薄膜有效延长了枇杷的贮藏期,并使其总可溶性固形物、可滴定酸与抗坏血酸含量得到更好维持^[49]。Chen 团队开发的 KGM/凝乳复合体系山茶油乳液(KCM-CO)保鲜涂层在樱桃番茄保鲜应用中表现出色,能显著延缓果实软化腐烂,使失重率降低 41.2%、硬度下降减少 54.5%,同时将呼吸强度抑制 44.2%。该研究通过 MBP 的氢键作用实现油滴均匀分散,不仅改善了薄膜的机械与阻隔性能,更为生物基果蔬保鲜材料的开发提供了新思路^[41]。Tian 等研究者则创新性地采用卡拉胶、玉米蛋白与 KGM 制备复合薄膜。该材料在樱桃番茄保鲜中展现出多重优势:有效抑制呼吸作用、减少水分流失并保持外观品

质。数据表明,玉米醇溶蛋白含量需控制在 6% 以下,以避免聚集现象对材料性能的负面影响,这一发现为疏水包装解决方案的优化提供了重要参考^[42]。在功能性保鲜材料开发方面,Li 团队开创性地将没食子酸和阿魏酸引入 KGM/Gel 体系。该薄膜通过一级动力学模型实现活性物质缓释,成功将蓝莓货架期延长至 9 天,并在 15 天内完全生物降解。值得注意的是,研究者建议未来可优化为疏水材料外包层,以解决高湿度环境下亲水性明胶外层的防湿性能问题,如图 5(b)^[48]。Ning 等的研究则聚焦于 KGM/SA 复合体系,创新性地加入蜂胶乙醇提取物(PEE)和茶树精油(TTO)。在草莓保鲜应用中,该材料较普通 PE 膜可延长保质期 3~4 天,维持不小于 91% 的果实硬度保留率,减少 14.2% 的质量损失,且 21 天内土壤降解率达 60%,充分展现了其在活性食品包装领域的环保价值^[50]。

Liu 团队的研究另辟蹊径,利用果胶乳化橘子油分散于 KGM 基质中。该薄膜在草莓保鲜中展现出显著优势:降低蒸腾与呼吸作用,延长货架期 8 天,同时减少供应链重量损失。结构分析证实,果胶能有效乳化封装 MO,与 KGM 形成致密结构,为高性能可生物降解食品包装材料的开发提供了新方向^[37]。相比之下,Li 等⁶采用 KGM 和树胶(GT)稳定丁香油,通过静电作用引入 KGM/CS 薄膜。在蓝莓保鲜应用中,该材料通过持续释放抗菌/抗氧化成分,使保质期较聚乙烯薄膜延长 10 天,有效控制腐烂率、重量损失及硬度下降。这一技术为纯天然、高性能活性食品包装的开发开辟了新路径,未来可通过优化环境湿度适应性进一步提升材料性能^[31]。其他研究者在蓝莓保鲜中,还利用海藻酸钠(SA)和羧甲基纤维素钠(CMC)为基材,甘油为增塑剂制备复合薄膜^[51]。Bai 等开发了一种基于香叶醇(GR)负载 β -环糊精 MOF 的非接触式固体防腐剂用于香蕉保鲜^[52]。Lou 等设计出一种基于 KGM 的香叶天竺葵精油纳米乳液(LNE)抗菌涂层,用于柑橘类水果保鲜^[38]。

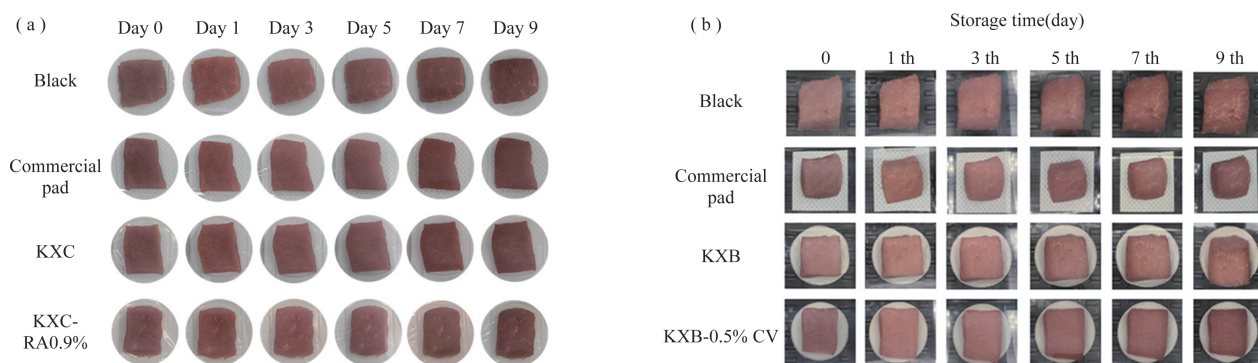


图 6 (a) 不同薄膜在第 0、1、3、5、7 和 9 天拍摄的猪肉样本照片^[35];

(b) 不同薄膜在第 0、1、3、5、7 和 9 天拍摄的猪肉样本照片^[53]

Fig. 6 (a) Photographs of pork samples taken on days 0, 1, 3, 5, 7, and 9 using different films;

(b) Photographs of pork samples taken on days 0, 1, 3, 5, 7, and 9 using different films

2.3 肉制品保鲜

肉制品保鲜技术长期面临微生物污染与脂质氧化的双重品质瓶颈。针对这一挑战,研究者们基于 KGM 开发了系列创新性保鲜方案。Xiang 团队开发的 KGM/XG/CMC 复合薄膜(KXC)在冰鲜猪肉保鲜中表现出色,通过添加迷迭香酸(RA)赋予其多重功能特性。该材料不仅能有效吸收肉品渗出液,更可显著抑制 pH 值、TVB-N、TBA 和 TVC 等新鲜度指标的上升,在 4 °C 条件下将保质期延长至 7 天。研究同时指出,当前配方中 30% 的甘油含量可能影响生物降解性能,建议未来通过优化增塑剂配比及扩大抗菌评估范围来提升工业适用性,如图 6(a)^[35]。Ni 等研究者则创新性地将其纤维素纳米晶体/单宁酸(CNC/TA)稳定的山苍子精油(LCEO)Pickering 乳液引入 KGM/卡拉胶复合体系,开发出 KCNTO 活性薄膜。该材料在 25 °C 条件下可实现 LCEO 的缓释释放,对 4 °C 储存猪肉展现出卓越的保鲜效果:有效抑制微生物繁殖和脂质氧化,延缓 pH 值上升和品质劣变。其中 KCNTO-8 配方表现尤为突出,为可生物降解活性包装材料的开发提供了重要参考^[26]。Li 团队的研究另辟蹊径,设计出基于 KGM、XG、竹纤维(BF)和香芹醇(CV)的可生物降解气凝胶。数据证实,该材料能将 4 °C 冷藏猪肉保质期延长至 9 天。值得注意的是,研究发现真空冷冻干燥工艺会导致 48% 的香芹酚损失,为此建议采用制备后喷洒工艺以提高活性成分保留率。这一环保型解决

方案在保持优异保鲜性能的同时,还具备良好的土壤生物降解特性,如图 6(b)^[53]。Wang 等研究者开发的含花青素(LRA)和茶多酚(TP)的 SA-KGM 复合膜展现出双重功能优势。在 4 ℃条件下,该膜不仅能延长牛肉和草鱼保鲜期 2~4 天,还可以通过 pH 响应特性实现新鲜度的实时监测。研究表明,薄膜的颜色变化与肉类腐败指数具有显著相关性,这一特性主要源于 TP 和 LRA 的协同抗菌抗氧化作用,以及花青素独特的 pH 敏感特性。尽管储存 8 天后薄膜会出现微观结构变化,但其光学阻隔和抗氧化性能仍保持优异,这得益于 TP 和 LRA 通过减少亲水羟基可及性而削弱水分影响的特殊机制^[32]。

表 1 多组分复合凝胶在食品保鲜中的功能特性及应用优势

Tab. 1 Functional properties and application advantages of multicomponent composite gels in food preservation

材料基底	复合材料	保存物质	性能特点	参考文献
魔芋葡 甘露聚糖	柠檬酸、抗坏血酸	石斛	具备卓越的成膜性、高粘附力与高效扩散能力,能有效锁水保湿、阻隔氧气并抑制微生物侵蚀,从而显著提升产品的感官品质与叶绿素保留率	[54]
	壳聚糖季铵盐、十六 烷基三甲基溴化铵	蓝莓	显著提升了抗拉强度、抗菌活性及抗氧化特性,并有效减少了总可溶固形物、花青素、总酚与总黄酮的损失,同时抑制了丙二醛(MDA)的生成	[39]
	乙基纤维素、 玉米蛋白	黄瓜	较高的拉伸强度与适中的断裂伸长率,能有效减少重量损失、保持硬度,并减缓糖度、酸度及抗坏血酸含量的下降	[55]
壳聚糖	生姜精油	玉米种子	显著增强了种子的综合抗逆性,具体表现为:提升抗真菌能力、激活抗氧化防御系统并促进发芽潜力的释放	[56]
	NADES、阿魏酸、 咖啡酸	核桃	显著改善了光与水蒸气阻隔性能,同时展现出高清除活性及 106% 的抗菌效率提升	[57]
	氮掺杂碳点 (N-CDs)	草莓	卓越的综合性能,兼具高强度机械特性、优异的环境屏障功能(阻水、紫外)、高效的生物活性(抗菌、抗氧化)以及灵敏的智能湿度监测能力	[58]
	β -葡聚糖	鸡蛋	显著降低了蛋品的重量损耗,有效抑制了微生物污染,并延缓了整体品质劣化进程	[59]
纤维素(CNF)	二醛 CNF、乙基纤 维素、姜黄素	虾	卓越的屏障特性,在将水蒸气透过率显著降低 44% 的同时,更实现了对氧气高达 99% 的抑制率	[60]
	三嗪-吡啶	樱桃	显著提升机械强度与抗菌性能的同时,有效延长了产品的保质期	[61]
	纳米木质素	猪肉	优异的抗氧化活性,其自由基清除率超过 91%,有效延长了生物活性功能的持续时间	[62]
淀粉(玉米淀 粉、豌豆淀粉)	乳草杆菌	猪肉	增强结构紧凑性与热稳定性的同时,展现出优异的保存效果和显著的抑菌能力	[63]
	氯原酸、 Tween-80	鳕鱼	显著延长了有效成分的保留时间,并展现出强烈的抗氧化活性,使腐烂菌的存活率降至 0.61%	[64]
	铜单宁酸 纳米颗粒	草莓	集优异的抗紫外线与抗氧化性能、针对性抗菌效果、高生物相容性及环保特性于一体	[65]
	壳聚糖、 木质亚硫酸钠	葡萄	卓越的紫外线阻断能力,同步增强了对大肠杆菌的抗菌活性,并能有效维持果实的硬度、色泽及酸度等关键品质指标	[66]

3 总结与展望

KGM 作为天然植物多糖,通过复合改性可构建兼具阻隔性、抗菌性、抗氧化性及智能响应特性的多功能材料体系。其独特的流变特性与生物可降解性,使其在食品保鲜领域展现出显著优势:在冷藏鱼片保鲜中,KGM 基材料可减少水分流失 41.2%^[41],对常见食源性微生物的抑制率超过 98.3%^[35];在樱桃番茄、蓝莓等果蔬保鲜中,其可延长货架期 10 天以上,同时保持果实硬度与色泽^[31];通过 pH 响应变色机制,还能实现食品新鲜度的实时监测^[32]。这些成果表明,KGM 基材料已具备替代石油基包装材料的潜力,尤其在冷藏品、果蔬及肉制品保鲜等主流领域具有广阔应用前景。

然而,KGM 基材料的规模化应用仍面临增塑剂调控、生产工艺优化及功能拓展等挑战。未来需通过优化甘油等增塑剂含量以平衡材料柔韧性 with 机械强度,开发工业级挤出、涂布等连续化生产工艺以降低成本,

并结合光动力抗菌技术(如叶绿素衍生物负载)实现无化学残留的保鲜效果。此外,政策支持与产业链协同将是推动其规模化应用的关键,例如将生物基材料纳入绿色包装标准,联合食品企业、包装制造商与科研机构构建完整产业链。随着纳米技术、生物工程与人工智能的深度融合,KGM 基材料有望向自修复、自清洁等智能功能升级,最终实现全生命周期环境效益最大化,为食品包装行业的可持续发展提供创新解决方案。

参 考 文 献

- [1] LI Z C, YANG L N, WANG B Z, et al. A multifunctional nanozyme hydrogel film with antibacterial and antioxidant activity for fruit packaging and freshness preservation[J]. Food Research International, 2025, 218: 116943-116955.
- [2] LI Y J, HUANG N, SUN Y, et al. Development of multifunctional quaternary ammonium cellulose coating for fruit preservation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 305: 141126-141138.
- [3] GONG W, HE W Y, HOU Y Y, et al. Polyvinyl alcohol-based multifunctional hydrogel film: a novel strategy for food preservation packaging[J]. Food Bioscience, 2024, 59: 104125-104138.
- [4] LIU R, CHEN Z P, LI Y H, et al. Recycling of *Pouteria campechiana* pericarp waste for production of edible fresh-keeping film and its preservation effect on tilapia meat[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 452: 142146-142158.
- [5] HU T, SUN T, XUE B, et al. A near-infrared-responsive bismuth sulfide/polymeric carbon nitride/chitosan/polyacrylamide composite hydrogel and contactless food preservation application[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2025, 727: 138376-138386.
- [6] WANG S Z, MCCLEMENTS D J, LAN Q Q, et al. Fabrication of composite hydrogels by sonication-assisted assembly of okara cellulose nanofibers and guar gum: unraveling structure, properties, and tofu quality enhancement[J]. Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie, 2025, 229: 118222-118233.
- [7] ZHAO M, YANG H H, RAN C C, et al. Chitosan-dialdehyde starch/polyvinyl alcohol double-crosslinked network hydrogel film for degradable food packaging: addressing mono-crosslinking limitations[J]. Progress in Organic Coatings, 2025, 208: 109487-109498.
- [8] DENG P P, WANG Z H, LI Y W, et al. High strength, gas barrier and hydrophobic konjac glucomannan/glutenin films with semi-interpenetrating network for cherry tomato preservation[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 160: 110861-110869.
- [9] DUAN B D, GUO J Y, LI P Y, et al. Moisture, rheology and structure of deacetylated konjac glucomannan-treated dough and the performance of steamed bread under frozen storage[J]. Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie, 2024, 197: 115941-115954.
- [10] MAEKAJI K. Determination of acidic component of konjac mannan[J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1978, 42(1): 177-178.
- [11] HE Z M, ZHANG J, HUANG D P. A kinetic correlation for konjac powder hydrolysis by β -mannanase from *Bacillus licheniformis*[J]. Biotechnology Letters, 2001, 23(5): 389-393.
- [12] HALIM Y, ANGELINA B, HARDOKO H, et al. Characteristics of dried noodle analogue made from sorghum flour and rice flour added with konjac glucomannan[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2023, 1200(1): 012032-012043.
- [13] VERNI E, SABATINI F, LEE C, et al. Development and characterization of novel tannin-modified konjac glucomannan hydrogels with optimized crosslinking features[J]. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, 2025, 11: 100875-100887.
- [14] FATHI M, MARTÍN Á, MCCLEMENTS D J. Nanoencapsulation of food ingredients using carbohydrate based delivery systems[J]. Trends in Food Science & Technology, 2014, 39(1): 18-39.
- [15] WANG B P, WANG Y, CHENG P, et al. Next-generation konjac glucomannan hydrogels: rational design, convergent applications, and industrial challenges[J]. Langmuir, 2025, 41(36): 24078-24096.
- [16] YUAN Y, HONG X, MU R J, et al. Structure and properties of konjac glucomannan/galactoglucomannan nanofiber membrane[J]. Macromolecular Research, 2017, 25(10): 963-970.
- [17] CHEN Y, WANG S Y, YANG C J, et al. Chitosan/konjac glucomannan bilayer films: physical, structural, and thermal properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 257: 128660-128670.
- [18] ZHENG S W, SUN D W, ZHU Z W. Intelligent hydrogels: food detection, preservation and delivery driven by material-derived intelligence[J]. Trends in Food Science & Technology, 2025, 165: 105247-105266.
- [19] LI Q Q, WU Z Y, QIN L D, et al. NIR-triggered spatiotemporal control of cinnamaldehyde release in antibacterial Pickering emulsion hydrogel for prolonged preservation of table grapes[J]. Food Hydrocolloids, 2026, 172: 111938-111949.
- [20] ZENG R Q, LIU Y Y, JIANG Z L, et al. Development of a synergistic antimicrobial hydrogel coating by lysozyme amyloid fibrils and silver-glutathione bio-coordination nanofibrils for long-term preservation of perishable fruits[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2025, 51: 101588-101601.
- [21] LU Y L, NING Y Y, WANG X, et al. Rapidsynthesis of an antifreeze and photocatalytic antibacterial multifunctional hydrogel for low-temperature preservation of marine fish[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 519: 165558-165568.

- [22] CHENG L H, KARIM A A, NORZIAH M H, et al. Modification of the microstructural and physical properties of konjac glucomannan-based films by alkali and sodium carboxymethylcellulose[J]. Food Research International, 2002, 35(9): 829-836.
- [23] YE X, KENNEDY J F, LI B, et al. Condensed state structure and biocompatibility of the konjac glucomannan/chitosan blend films[J]. Carbohydrate Polymers, 2006, 64(4): 532-538.
- [24] XIAO M, PENG C, QIN J M, et al. Development of a water gradient film through film and ice-glazing approach utilizing konjac glucomannan and high acyl gellan gum for enhanced preservation of frozen snakehead (*Channa argus*) fillets[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 152: 109904-109915.
- [25] PENG C, QIN J M, LI Y B, et al. Enhanced water and oxygen barrier properties of deacetylated konjac glucomannan/high acyl gellan gum water gradient film for improved frozen fish fillet preservation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 279: 135203-135213.
- [26] NI X W, XIAO W L, LIU X H, et al. Enhancement of konjac glucomannan/carrageenan blend films by incorporating cellulose nanocrystals/tannic acid stabilized Litsea cubeba essential oil Pickering emulsion and their application to pork preservation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 307: 142198-142211.
- [27] WU Z Z, WANG L, MA C, et al. Konjac glucomannan/xanthan gum film embedding soy protein isolate-tannic acid-iron complexes for blueberry preservation[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 163: 111040-111050.
- [28] CHEN K, JIANG J, TIAN R M, et al. Properties of konjac glucomannan/curdlan-based emulsion films incorporating *Camellia* oil and the preservation effect as coatings on 'Kyoho' grapes[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 258: 128836-128845.
- [29] ZHANG Z H, MU L, LI J L, et al. A double cross-linked film based on carboxymethyl chitosan binding with L-cysteine/oxidized konjac glucomannan with slow-release of nisin for food preservation[J]. Food Chemistry, 2025, 472: 142876-142890.
- [30] ZHOU X, YU X Z, XIE F, et al. pH-responsive double-layer indicator films based on konjac glucomannan/*Camellia* oil and carrageenan/anthocyanin/curcumin for monitoring meat freshness[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 118: 106695-106705.
- [31] LI M N, WEI H Y, WANG X, et al. Performance of konjac glucomannan/tragacanth gum-stabilized eugenol particles in konjac glucomannan/chitosan films and their application in blueberry preservation[J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 368: 124117-124130.
- [32] WANG S C, ZHUANG D, LI R, et al. Study on preservation and monitoring effect of sodium alginate-konjac glucomannan films loaded with tea polyphenols and Lycium ruthenicum anthocyanins[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 264: 130483-130497.
- [33] LI S Q, HU X R, ZHANG S, et al. A versatile bilayer smart packaging based on konjac glucomannan/alginate for maintaining and monitoring seafood freshness[J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 340: 122244-122258.
- [34] LIANG W, GE X Z, LIN Q, et al. pH-responsive PVA/konjac glucomannan/functional liposome terpolymer composites: spotlight on its structure-performance, functionality, barrier properties, controlled-release behavior, biodegradability, and its intelligent preservation role for food[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2024, 42: 101250-101263.
- [35] XIANG P F, WANG S, WANG F X, et al. Fast water absorption and antibacterial konjac glucomannan/xanthan gum/carboxymethyl cellulose film incorporated with rosmarinic acid for extending shelf life of chilled pork[J]. Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie, 2025, 229: 118102-118114.
- [36] LU J, WANG X D, XIAO C B. Preparation and characterization of konjac glucomannan/poly(diallyldimethylammonium chloride) antibacterial blend films[J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 73(3): 427-437.
- [37] LIU Y, CHENG Y H, YU X, et al. Konjac glucomannan films incorporated pectin-stabilized Mandarin oil emulsions: structure, properties, and application in fruit preservation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 267: 131292-131302.
- [38] LOU S R, NI X W, XIAO W L, et al. Physical stability, microstructure and antimicrobial properties of konjac glucomannan coatings enriched with Litsea cubeba essential oil nanoemulsion and its effect on citrus preservation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 256: 128306-128318.
- [39] XIAO L Q, CUI L, WU X, et al. Preparation and characterization of chitosan quaternary ammonium salt/konjac glucomannan film incorporated with CTAB for blueberry preservation[J]. Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie, 2025, 231: 118324-118335.
- [40] GASTI T, DIXIT S, SHASTRI L A, et al. One-pot fabrication of chitosan/poly(vinyl alcohol) films with *Spondias Pinnata* fruit extract-mediated silver nanoparticles for meat preservation[J]. ACS Food Science & Technology, 2025, 5(6): 2430-2443.
- [41] CHEN K, JIANG J, TIAN Y L, et al. Improved konjac glucomannan/curdlan-based emulsion coating by mung bean protein addition for cherry tomato preservation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 291: 139080-139092.
- [42] TIAN R M, YUAN S, JIANG J, et al. Improvement of mechanical, barrier properties, and water resistance of konjac glucomannan/curdlan film by zein addition and the coating for cherry tomato preservation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 276: 134132-134143.
- [43] DENG P P, WANG Z H, BU J J, et al. Konjac glucomannan-based nanocomposite spray coating with antimicrobial, gas barrier, UV

- blocking, and antioxidation for bananas preservation[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 265: 130895-130905.
- [44] TANG J J, HUANG C, LIU W J, et al. Preparation and characterization of a konjac glucomannan-based bio-nanocomposite film and its application in cherry tomato preservation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2025, 159: 110689-110701.
- [45] WEI X Q, PANG J, ZHANG C F, et al. Structure and properties of moisture-resistant konjac glucomannan films coated with shellac/stearic acid coating[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 118: 119-125.
- [46] YIN J, LI Y L, ZHONG W Q, et al. Effect of konjac glucomannan-based preservation pads on quality changes in refrigerated large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 276: 133752-133761.
- [47] JIANG Z W, FENG J D, DAI Y D, et al. Preparation of a biodegradable packaging film by konjac glucomannan/sodium alginate reinforced with nitrogen-doped carbon quantum dots from crayfish shell for crayfish meat preservation[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 297: 139596-139609.
- [48] LI H C, YANG M R, JIA Y M, et al. Synergistic enhancement of functional properties in EGCG and ferulic acid incorporated konjac glucomannan/gelatin bilayer films for blueberry preservation[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 320: 145914-145928.
- [49] WANG Y P, SHAN Y X, CHEN J W, et al. Comparison of practical methods for postharvest preservation of loquat fruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 120: 121-126.
- [50] NING Q, TANG J J, CHEN H Q, et al. Development and characterization of alginate/konjac glucomannan composite film reinforced with *Propolis* extract and tea tree essential oil co-loaded Pickering emulsions for strawberry preservation[J]. *Industrial Crops and Products*, 2025, 235: 121669-121681.
- [51] LI Y, BIAN B Y, TANG R R, et al. Characterization of a clove essential oil slow-release microencapsulated composite film and its preservation effects on blueberry[J]. *ACS Omega*, 2024, 9(11): 12643-12656.
- [52] BAI H R, YANG L Y, LI Z, et al. Contactless and biosafe freshness protection package consists of geraniol@ β -cyclodextrin MOF complex for emperor banana storage[J]. *ACS Food Science & Technology*, 2024, 4(11): 2762-2773.
- [53] LI C, WANG F X, XIANG P F, et al. High-absorbent antibacterial konjac glucomannan/xanthan gum/bamboo fiber aerogel with carvacrol for chilled pork preservation[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 306: 141624-141637.
- [54] CHENG Z, NONG X M, MO Q B, et al. Konjac glucomannan-based edible coatings for preservation of *Dendrobium officinale* [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2026, 337: 149680-149693.
- [55] XU J, WANG F X, WANG S, et al. Thin and biodegradable konjac glucomannan-ethyl cellulose/zein bilayer films with directional moisture regulation for cucumber preservation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2026, 174: 112358-112371.
- [56] QIAN H Y, PAN S K, WU S J. Combined effects of chitosan-ginger essential oil coating on maize seed preservation: enhancing insect resistance, fungal protection, antioxidant defense, and germination[J]. *Journal of Stored Products Research*, 2026, 115: 102885-102890.
- [57] ZHANG Y Q, LIN Q W, VENKATACHALAM K, et al. Step-by-step assembly of functionalized chitosan films via NADES and caffeic acid/ferulic acid grafting for walnuts preservation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2026, 172: 112129-112142.
- [58] REN Y, CHEN D, LIN S Y, et al. Sustainable multifunctional packaging films based on chitosan and food waste-derived carbon nanodots for fruit preservation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2026, 410: 112930-112940.
- [59] AO J Q, ZHANG Z, WANG C L, et al. Development of an antimicrobial β -glucan/chitosan composite film and its application in chicken egg preservation[J]. *Food Bioscience*, 2026, 75: 108106-108116.
- [60] YAO R T, WANG C, XU Y L, et al. High-barrier cellulose-based packaging material for enhanced food preservation with visual freshness monitoring[J]. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 2026, 11(1): 100227.
- [61] FU Q B, HOU S, WEI G Q, et al. Triazine-pyridine covalent organic frameworks integrated cellulose films for sweet cherry photodynamic antibacterial preservation[J]. *Food Chemistry*, 2026, 500: 147471-147482.
- [62] SUN F F, ZHAO W H, ZHAO J, et al. A sustainable gelatin-based film reinforced with nanolignin-stabilized Pickering emulsion and cellulose nanocrystals from coffee leaves for food preservation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2026, 172: 112156-112170.
- [63] ZANG J W, HU Y, LIN T, et al. Fabrication and characterization of starch-based edible films loaded with *Lactiplantibacillus plantarum* STB9b for pork preservation[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2025, 52: 101662-101677.
- [64] REN J H, FAN Y T, XIAO X L, et al. Construction of a gelatinized starch-based chlorogenic acid emulsion: Transcriptomic insights into antibacterial mechanism and application in cod preservation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2026, 172: 112134-112147.
- [65] HU Y N, YANG W J, BAI X Y, et al. A dual-pH-responsive smart starch film with antibacterial and controlled-release functions constructed from tannic acid-copper nanoparticles for strawberry preservation[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2026, 373: 124588-124600.
- [66] BIAN X J, CUI J Q, TANG J W, et al. Silane-modified starch reinforced chitosan/lignosulfonate composite film for grape preservation[J]. *Food Research International*, 2025, 222: 117700-117709.

(责任编辑:刘庆松)