

壳聚糖复合膜在果蔬保鲜中的应用

王安杏, 曹 川*, 张 庆, 张 瑜, 张晓晴

(安徽职业技术学院环境与生命健康学院, 合肥 230011)

摘 要: 果蔬由于富含营养物质是人类生活的必需品。然而采后的果蔬由于呼吸作用、蒸腾作用、活性氧的伤害及微生物污染易引起腐烂变质。果蔬保鲜是控制果蔬腐烂变质的主要手段。延长果蔬贮藏期, 保持采后果蔬感官品质和营养价值是果蔬保鲜需要解决的主要问题。壳聚糖由于具有良好的生物相容性、可生物降解性、安全性、成膜性、抗菌性, 可延长果蔬贮藏期, 因此壳聚糖膜保鲜技术在果蔬保鲜中应用广泛。但单一壳聚糖膜的机械性能和生物活性不足, 为了增强其理化性能和生物活性, 常添加生物聚合物、抗菌剂、抗氧化剂等功能成分以提高膜综合性能。本文论述了壳聚糖膜在果蔬保鲜中的应用, 从壳聚糖的诱导活性、成膜特性和抗菌活性 3 方面总结了壳聚糖膜的保鲜机制, 综述了壳聚糖/多糖、壳聚糖/蛋白质、壳聚糖/脂质、壳聚糖/抗菌剂和壳聚糖/抗氧化剂等壳聚糖基复合膜在果蔬保鲜中的应用进展, 最后对壳聚糖基复合膜未来发展方向进行了展望, 以期开发安全、高效、绿色、经济的壳聚糖基可食果蔬保鲜膜提供理论参考。

关键词: 壳聚糖; 生物聚合物; 抗菌活性; 抗氧化活性; 果蔬; 保鲜

Application of chitosan composite film in fruits and vegetables preservation

WANG An-Xing, CAO Chuan*, ZHANG Qing, ZHANG Yu, ZHANG Xiao-Qing

(School of Environment and Life Health, Anhui Vocational and Technical College, Hefei 230011, China)

ABSTRACT: Fruits and vegetables are essential for human life because they are rich in nutrients. However, post-harvested fruits and vegetables are perishable due to respiration, transpiration, damage of reactive oxygen species and microbial contamination. Fruits and vegetables preservation is the main means to control the decay and deterioration of fruits and vegetables. Extending the storage period of fruits and vegetables and maintaining the sensory quality and nutritional value of post-harvested fruits and vegetables are the main problems that need to be solved for fruits and vegetables preservation. Chitosan can extend the storage period of fruits and vegetables due to its good biocompatibility, biodegradability, safety, film formation and antibacterial properties, so chitosan film preservation technology is widely used in fruits and vegetables preservation. However, the mechanical properties and biological activity of a single chitosan film are insufficient. In order to enhance its physicochemical properties and

基金项目: 安徽省高等学校自然科学研究项目重点项目(2022AH052061)、安徽职业技术学院校级科技工程项目(2022xjzr006)、安徽省职业与成人教育学会教育教学研究规划课题项目(Azcj2022154)、全国食品产业职业教育教学指导委员会教育教学改革与研究课题项目(SHK2022001)、安徽省质量工程项目(2021jyxm0784)、安徽职业技术学院质量工程提质培优行动计划专项项目(2021xjtz074)

Fund: Supported by Key Projects of Natural Science Research Projects of Anhui Colleges and Universities (2022AH052061), the Anhui Vocational and Technical College School-level Science and Technology Projects (2022xjzr006), the Anhui Vocational and Adult Education Society (Azcj2022154), the National Food Industry Vocational Education Teaching Steering Committee Educational Teaching Reform and Research Topics (SHK2022001), the Anhui Quality Engineering Project (2021jyxm0784), and the Anhui Vocational and Technical College Quality Engineering Quality Improvement and Excellence Action Plan Special Project (2021xjtz074)

*通信作者: 曹川, 博士, 副教授, 主要研究方向为农产品检测。E-mail: 877542357@qq.com

*Corresponding author: CAO Chuan, Ph.D, Associate Professor, School of Environment and Life Health, Anhui Vocational and Technical College, No.2600, Wenzhong Road, Yaohai District, Hefei 230011, China. E-mail: 877542357@qq.com

biological activity, functional components such as biopolymers, antibacterial agents, antioxidants are often added to improve the comprehensive properties of the film. This paper discussed the application of chitosan films in fruits and vegetables preservation, and summarized the preservation mechanism of chitosan films from 3 aspects: Chitosan induction activity, film-forming properties and antibacterial activity. This paper reviewed the progress of the application of chitosan-based composite films such as chitosan/polysaccharide, chitosan/protein, chitosan/lipid, chitosan/antibacterial agent and chitosan/antioxidant in the preservation of fruits and vegetables. Finally, the future development direction of chitosan-based composite films is prospected in order to provide theoretical references for the development of safe, efficient, green and economic chitosan-based edible fruits and vegetables preservation films.

KEY WORDS: chitosan; biopolymer; antibacterial activity; antioxidant activity; fruits and vegetables; preservation

0 引言

我国是果蔬生产大国, 每年因为果蔬腐烂变质造成的损失十分严重。采摘后的果蔬因为呼吸作用、蒸腾作用、活性氧的伤害及微生物污染^[1], 导致感官品质和营养价值下降, 保质期缩短。目前果蔬保鲜技术主要有物理保鲜、化学保鲜和生物保鲜等^[2]。但以上保鲜技术存在成本和技术要求高, 容易造成化学残留和辐射残留等问题, 限制了其在果蔬保鲜中的应用。近年来, 壳聚糖(chitosan, CS)保鲜技术成为果蔬保鲜应用中的研究热点。

CS 是甲壳素脱乙酰基得到的一种多功能天然生物聚合物, 结构式如图 1 所示, 具有良好的生物相容性、可生物降解性、安全性、成膜性、抗菌性等。我国 GB 2760—2014《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》中将 CS 作为食品添加剂。CS 膜保鲜技术是一种安全、高效、环保、经济的保鲜技术, 在果蔬保鲜领域应用广泛。但 CS 膜吸湿性强, 对水蒸气的阻隔性较差, 导致其涂覆于果蔬表面后稳定性差, 保鲜效果不够持久。此外 CS 膜的机械性能、抗氧化性能、抗菌性能也有待提高, 因此, 越来越多研究转向 CS 复合膜。CS 复合膜通常采用两种及以上的材料, 以 CS 为成膜基质, 添加多糖、蛋白质、脂质等生物聚合物及抗菌剂、抗氧化剂等功能成分制备, 以增强 CS 膜的阻隔性能、机械性能、抗菌性能和抗氧化性能, 拓展 CS 膜在果蔬保鲜中的应用。本文综述了壳聚糖膜在果蔬保鲜中的应用, 从壳聚糖的诱导活性、成膜特性和抗菌活性 3 方面总结了壳聚糖膜的保鲜机制, 以期壳聚糖基可食果蔬保鲜膜的推广应用提供依据。

1 CS 膜在果蔬保鲜中的应用

CS 作为一种天然的碱性多糖, 因其无毒、抗菌活性、抗氧化活性、生物相容性、可生物降解性和成膜性, 在果蔬保鲜中应用广泛。一般将 CS 溶解在稀酸溶液中, 形成 CS 溶液, 通过浸渍、喷涂或刷涂等涂层技术在果蔬表面形成薄层, 或将 CS 溶液通过流延法、挤出法和静电纺丝法^[4]制成薄膜包裹果蔬以进行保鲜研究。果蔬保鲜实验中, 主要

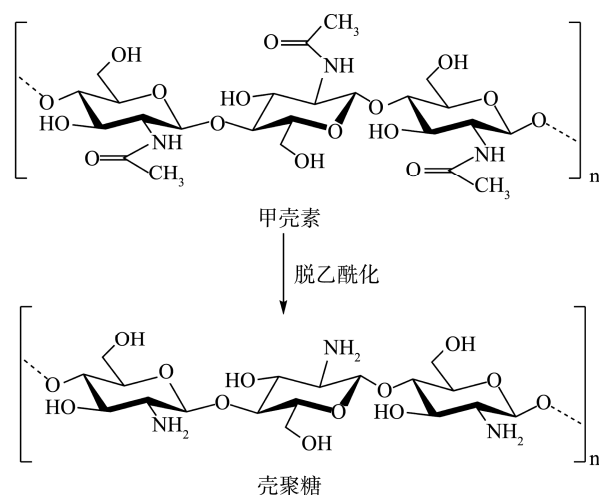


图 1 CS 结构^[3]
Fig.1 CS structure^[3]

通过测定果蔬生理、生化指标评价果蔬在贮藏期间品质变化, 确定 CS 对果蔬的保鲜效果。CS 涂膜处理可以较好地延缓果蔬感官品质的下降, 减少失重率和腐败率, 减缓可溶性固形物(soluble solids content, SSC)、维生素 C (vitamin C, VC)、可滴定酸度(titrable acid, TA)含量的下降, 减少乙烯的产生, 抑制呼吸作用和蒸腾作用、丙二醛(malondialdehyde, MDA)的增加和微生物生长, 保持果蔬中营养物质含量, 从而延长果蔬货架期。目前 CS 主要应用在豌豆、葡萄、芒果、草莓等果蔬的采后贮藏保鲜中, 如表 1 所示。CS 的分子量、脱乙酰度和膜的制备工艺对 CS 膜的保鲜性能影响较大。一般分子量较高的 CS 膜, 透光性和水蒸气透性较好, 透气性和成膜性较差^[10]。JIANG 等^[11]将不同分子量的 CS 涂层静电喷涂在草莓上, 研究 CS 对草莓品质的影响, 结果发现 61 kDa 的 CS 涂层对草莓保鲜性能最好, 在延缓 pH 和 MDA 含量增加方面更有效, 可以更好地保持黄酮类化合物含量。此外 JIANG 等^[12]将不同脱乙酰度(deacetylation degree, DD)的 CS 涂层通过静电喷涂技术用于草莓保鲜, 结果发现, 与传统喷涂相比, 静电喷涂的 CS 涂层形成了更连续和均匀的保护层。88.1% DD 的 CS 涂层保鲜效果最好, 能够显著减少失重, 更好地保持 SSC 含量。

表 1 CS 膜在果蔬保鲜中的应用
Table 1 Application of CS film in preservation of fruits and vegetables

膜中 CS 含量	膜制备溶剂	果蔬种类	果蔬	保鲜效果	参考文献
CS (1%)	冰醋酸	果菜类蔬菜	豌豆	显著降低豆荚腐烂、失重和冷害, 保持豆荚甜味和脆度, 延长了保质期	[5]
CS (1%)	抗坏血酸	水果	巨峰葡萄	4 种不同分子量 CS 等比例混剂涂膜的保鲜效果最佳, 保存 9 d 后, 处理组的 SSC 含量、呼吸强度和 VC 含量下降与对照组存在显著差异, 延缓葡萄衰老和品质的下降	[6]
CS (1%、2%、3%)	冰醋酸	水果	芒果	抑制呼吸速率, 保持果实硬度, SSC、TA、果肉的 pH、糖和淀粉含量变化很小	[7]
CS (2%)	无菌蒸馏水	水果	草莓	保持果实硬度, 抑制腐败, 延长保质期, 保持外观和营养价值及果实中抗氧化酶的高活性	[8]
CS (0.05%)	乙酸	水果	猕猴桃	CS 采前处理增加了果实重量, 降低了呼吸速率和乙烯产量, 保持较高的硬度, 延迟 SSC、TA、总糖、总酸、总酚和总木质素的变化	[9]

2 CS 膜保鲜机制

当 CS 应用于果蔬保鲜时, 表现出诱导活性、抗菌活性和成膜性 3 种活性。在控制果蔬腐烂时, CS 的诱导活性占 30%~40%, 抗菌活性占 35%~45%, 成膜特性占 20%~30%^[13]。CS 用于果蔬保鲜通常是将采摘后的果蔬用 CS 溶液浸渍、涂膜或将 CS 溶液制成薄膜包裹。当 CS 用于采摘前果蔬时, 可作为植物防御机制的诱导剂, 诱导果蔬中与防御机制相关的酶的活性, 从而引发果蔬对病毒、细菌、真菌等的防御, 防止果实采前和采后的微生物污染和腐败。MARTÍNEZ-CAMACHO 等^[14]通过在黑莓植物上叶面喷洒 CS 溶液, 研究采前处理对果蔬保存的影响, 结果发现 CS 采前处理改变了细胞壁降解酶多聚半乳糖醛酸的活性, 该酶有助于提高黑莓果实对腐烂因子的抵抗力, 从而延长黑莓的保质期。

CS 对果蔬的保鲜效果与其成膜性密切相关。CS 溶液可在果蔬表面形成一层保护膜, 该膜对气体具有较好的选择透过性, 在膜内形成一个低 O₂、高 CO₂ 的微环境, 减缓果蔬呼吸强度, 减少营养物质的损失, 从而有效抑制褐变的发生。CS 薄膜具有一定的阻水性, 可以抑制水分损失, 减小蒸腾作用, 保持果蔬新鲜。此外 CS 的抗菌活性是 CS 在果蔬保鲜中应用广泛的主要原因。CS 是一种具有广谱抗菌的天然聚合物, 抗菌活性取决于其分子量、脱乙酰度、浓度、微生物和环境因素(pH、温度)等^[15]。目前 CS 抗菌机制并不清楚, 主要有以下观点^[16-17]: (1)果蔬经 CS 涂层或薄膜处理后, 表面形成的保护层可有效防止食品受到外界细菌的侵袭; (2) CS 中-NH₃⁺与微生物表面带负电荷的基团之间的静电作用, 破坏微生物膜结构和功能, 导致细胞内物质泄漏, 从而杀死微生物; (3) CS 具有螯合特性, 可以选择性地与对微生物生长繁殖有利的金属离子进行螯合, 阻断微生物代谢和增殖; (4) CS 靶向细胞内成分, 低分子

量的 CS 能够有效地穿透微生物细胞膜, 进入细胞质并阻碍 DNA 和 RNA 的合成, 导致微生物细胞死亡。高分子量 CS 通过包裹细胞表面并抑制营养物质渗透到微生物细胞中, 使细胞饥饿并导致其死亡。

3 CS 复合膜在果蔬保鲜中的应用

基于 CS 膜阻隔性能、机械性能、抗菌性能、抗氧化性能不足, 通常以 CS 为载体, 添加多糖、蛋白质、脂质等生物聚合物及抗菌剂、抗氧化剂等功能成分制备复合膜, 以增强 CS 膜的性能。通过在 CS 中添加不同类型功能成分, 制备得到的复合膜表现出优异的性能。如在 CS 中添加多酚类化合物制备得到的共混膜的抗氧化和抗菌活性相比 CS 膜明显提升, 同时由于 CS 和多酚类物质共价键合减少了 CS 分子间和分子内氢键作用, 所以共混膜较 CS 膜表现出更佳的机械性能^[18]。曹前荣等^[19]综述了壳聚糖分别与植物精油、多糖、酸性成分等制备得到的壳聚糖基复合涂膜在草莓保鲜中的应用, 通过添加不同特性的功能成分, 充分发挥不同成分间的协同效应, 可以显著改善壳聚糖的理化性能、机械性能和生物活性。

3.1 CS/生物聚合物复合膜

在 CS 中添加多糖、蛋白质、脂质等生物聚合物主要用于提高 CS 膜的阻隔性能、物理性能和机械性能。

3.1.1 CS/多糖复合膜

多糖具有良好的成膜性, 结构中含有较多的亲水基团, 主要通过氢键与 CS 交联, 使膜结构更加紧密, 复合膜能够有效阻止水蒸气和氧气透过, 拉伸强度(tensile strength, TS)增加, 但由于氢键的作用, 膜会变得更脆, 断裂伸长率(elongation at break, EAB)降低。当多糖添加量达到一定量时, 复合膜的水蒸气透过率和氧气透过率会增加^[20]。

常与 CS 共混制备复合膜的多糖主要有海藻酸钠、纤

纤维素、淀粉、果胶等。CS 与多糖制备的复合膜在果蔬保鲜中的应用如表 2 所示。海藻酸钠和 CS 都是水生多糖, 聚阴离子海藻酸钠的 $-COO^-$ 与聚阳离子 CS 的 $-NH_3^+$ 之间的静电相互作用使它们具有高度的生物相容性, 可制备稳定的复合膜。CS/海藻酸盐复合膜对脂质和气体具有良好的阻隔性能, 对水蒸气的阻隔相对较差。LI 等^[27]通过逐层组装制备得到致密、光滑、均匀的 CS-海藻酸盐薄膜, 复合膜的 TS、遮光能力、热稳定性和疏水性显著提高。薄膜组分具有良好的相容性, 组分之间以非共价键结合, 薄膜具有较低的水蒸气透过率、溶胀度和水溶性, 有望用于包装果蔬以延长果蔬保质期。

纤维素是地球上最丰富的生物聚合物。常用于与 CS 共混制备复合膜的是纤维素衍生物。LIU 等^[28]通过逐层静电沉积方法由羧甲基纤维素钠(carboxy methylcellulose sodium, CMC)和 CS 制备了聚电解质多层(polyelectrolyte multilayer, PEM)薄膜, 并研究了薄膜的抗氧化、抗菌和自愈能力。红外光谱表征表明 CS 中的 $-NH_3^+$ 和 CMC 中 $-COO^-$ 之间形成了氢键和离子键。PEM 膜表现出良好的抗氧化活性和抗菌能力, 对沙门氏菌和大肠杆菌的抑菌率分别达到 100%和 95.48%。PEM 膜受到水刺激后, 可以迅速发生自愈(10 min), 无论层数多少, PEM 膜都可以治愈机械裂纹。PEM 膜在鲜切苹果保鲜中的应用表明膜具有良好的抑制褐变、失重和代谢活性的能力。

淀粉因其良好的生物相容性、成膜性和低成本而成为食品包装中最有前途的天然聚合物, 淀粉主要包括直链淀粉和支链淀粉。不同来源的淀粉含有不同比例的直链淀粉和支链淀粉^[29]。CS-淀粉复合薄膜中, 具有较高直链淀粉含量的淀粉可与 CS 形成稳定的氢键, 因此二者能够很好地共混形成复合膜。增加共混膜中 CS 含量可以提高复合膜的 TS, 而增加淀粉含量可以提高复合膜的 EAB^[17]。淀粉中直链淀粉和支链淀粉的比例对 CS-淀粉复合膜的阻隔性能和机械性能等功能特性影响较大, 主要是因为直链淀粉

和支链淀粉的比例改变了薄膜中分子结构的取向。JHA^[30]通过将含有不同比例直链淀粉和支链淀粉的不同来源淀粉: 玉米淀粉(高直链淀粉玉米淀粉 70:30 和玉米淀粉 28:72)、小麦淀粉(25:75)和马铃薯淀粉(20:80)分别与 CS 及纳米黏土结合制备出含有不同比例直链淀粉和支链淀粉的薄膜, 并研究了直链淀粉与支链淀粉比例对薄膜结晶度、水阻隔、机械等功能特性的影响。结果表明, 制备的玉米淀粉/CS/纳米粘土生物复合薄膜表现出较高的结晶度、分子混溶性、最低的水蒸气渗透性和最高的 TS, 玉米淀粉和 CS 之间的存在较强的氢键作用。

3.1.2 CS/蛋白质复合膜

蛋白质类保鲜膜具有较高的阻气性, 但阻湿性差, 且阻氧性受环境湿度影响大。将蛋白质添加到 CS 中制备得到的薄膜显示出机械性能改变, TS 降低, EAB 增加。常与 CS 共混制备复合膜的蛋白质主要有胶原蛋白、明胶、大豆蛋白、乳清蛋白、酪蛋白、玉米醇溶蛋白等。CS/蛋白质复合膜在果蔬保鲜中的应用如表 3 所示。酪蛋白酸盐是一种热塑性蛋白质, 具有优异的成膜性, 可与 CS 形成聚电解质络合物, 制备得到的共混膜具有优异的热成型性、成膜性和改善的水蒸气阻隔性能^[37]。

明胶具有良好的成膜性, 能够很好地阻隔氧气、二氧化碳和脂质, 是制备可食性包装膜或涂膜剂理想的材料。CS 的铵基和明胶的羧酸盐基之间形成静电作用, 因此二者具有良好的相容性。CS-明胶复合膜显示出对水蒸气渗透性良好的阻隔性能、机械性能和抗紫外线性^[38]。鱼皮明胶是鱼皮胶原的水解产物, 常与 CS 共混提高 CS 膜的机械性能和保水性, 用于果蔬的保鲜。胶原蛋白具有形成高 TS 和稳定性的不溶性纤维的独特能力, 可通过氢键与 CS 作用, 二者能够很好地混合, 但与单一胶原蛋白膜相比, 复合膜显示出较低的机械性能。SIONKOWSKA 等^[39]研究了胶原蛋白/CS 共混膜在紫外线照射前后的热性能和机械性能, 并与胶原蛋白膜和 CS 膜性能进行了比较。研究发现

表 2 CS/多糖复合膜在果蔬保鲜中的应用					
Table 2 Application of CS/polysaccharide composite film in preservation of fruits and vegetables					
添加的多糖	复合膜组成	果蔬种类	果蔬	保鲜效果	参考文献
木薯淀粉	CS、木薯淀粉、甘油	水果	黑桑葚	减轻果实失重和微生物腐败, 保持果实硬度、颜色、花青素和总酚类化合物含量	[21]
支链淀粉	CS、支链淀粉	水果	木瓜	降低果实失重率、软化率、色泽变化率和 pH, 延缓 TA 和 VC 含量下降, 保持呼吸速率和 SSC 含量	[22]
纳米纤维素	CS、纳米纤维素	水果	砂糖橘	有效保持营养物质含量, MDA 含量最低, 维持较高抗氧化酶活力	[23]
果胶	果胶、CS、甘油	水果	蓝莓	降低腐烂率和失重率, 延缓蓝莓有机酸消耗, 较好保持花青素含量	[24]
海藻酸钠	CS、聚乙烯醇、海藻酸钠	水果	百香果	保持较低的失重率, 延缓果实硬度、SSC 和 VC 含量的降低	[25]
马铃薯淀粉、海藻酸钠	CS、海藻酸钠、马铃薯淀粉、甘油(增塑剂)、牛至油、吐温 20(乳化剂)	根茎类蔬菜	马铃薯	6 个月后仍能保持花青素水平, 改善感官评价, 增强颜色、光泽	[26]

表 3 CS/蛋白质复合膜在果蔬保鲜中的应用
Table 3 Application of CS/protein composite film in preservation of fruits and vegetables

添加的蛋白质	复合膜组成	果蔬种类	果蔬	保鲜效果	参考文献
鱼皮明胶	CS、鱼皮明胶	水果	西番莲	降低果实的呼吸速率、乙烯释放速率和失重率, 延缓 MDA 上升, 果实保持较高的商品率和果皮色调角, 维持较高的营养物质含量	[31]
大豆分离蛋白	CS、大豆分离蛋白	水果	杏子	显著降低果实的重量损失, 保持硬度、TA 和 SSC, 抑制果胶降解	[32]
玉米醇溶蛋白	CS、玉米醇溶蛋白、纳米纤维素、肉桂醛、甘油	水果	芒果	有效延缓芒果黄化, 显著抑制呼吸速率、失重率, VC 的减少及 MDA 的积累	[33]
乳清蛋白	CS、乳清蛋白、木姜子精油	水果	枇杷	有效抑制枇杷水分损失, 提升出汁率, 降低 MDA 积累, 抑制多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)、过氧化物酶(peroxidase, POD)和苯丙氨酸解氨酶活性	[34]
乳铁蛋白	乳铁蛋白、CS、结冷胶、羧甲基纤维素	水果	草莓	抑制草莓中嗜温细菌的生长, 延长保质期	[35]
酪蛋白	CS、酪蛋白、牛至精油、甘油、吐温-80	水果	樱桃番茄	延缓 TA、收缩百分比和重量损失的变化, 樱桃番茄在低温下的保质期延长至 32 d	[36]

胶原蛋白/CS 混合膜的热性质取决于混合物的组成, 不会因紫外线照射而显著改变。但紫外线照射时间对共混膜的机械性能有很大影响。紫外线照射后, 共混膜的极限 TS 和极限 EAB 下降, 显著低于胶原蛋白膜。因此胶原蛋白/CS 共混膜在果蔬保鲜中应用有限。

玉米醇溶蛋白是一种安全、环保的材料, 具有光滑的外观、高热稳定性、渗透性、高疏水性、低水溶性、良好的成膜特性和相对较好的阻隔性能, 但玉米醇溶蛋白薄膜的脆性和低柔韧性限制了其单独作为保鲜膜的应用。当与 CS 混合时, 复合薄膜具有更好的水蒸气阻隔性和机械性能。ZHANG 等^[40]制备了 CS/玉米醇溶蛋白复合膜。研究发现, 与单一 CS 膜相比, 共混膜对水蒸气、氧气和二氧化碳的阻隔作用有所改善。玉米醇溶蛋白和 CS 分子之间存在氢键作用, 二者具有良好的相容性, 玉米醇溶蛋白的添加提高了薄膜的热稳定性。玉米醇溶蛋白/CS (1:1, V:V)共混膜包装的蘑菇表现出最低的失重率、呼吸速率, 抑制了 PPO 活性。但 CS/玉米醇溶蛋白复合膜的机械性能和抗菌性能仍然不能满足其在果蔬保鲜中的应用需求, 常需添加功能成分提高复合膜综合性能。

3.1.3 CS/脂质复合膜

脂质由于具有较低的极性, 显示出很强的疏水性, 能有效地阻止果蔬中水分的损失, 常作为助剂添加到 CS 中改善复合膜的阻水性, 降低薄膜的水蒸气渗透性。但脂质单独成膜时, 机械性能较差、不透明, 并且有不良蜡味口感, 加入较高比例会导致薄膜的 TS 降低, EAB 变化取决于添加的脂质和 CS 膜的特性。

常见的脂质有蜂蜡、巴西棕榈蜡等。蜂蜡富含黄酮类、有机酸等物质, 具有抑菌特性。AMIN 等^[41]使用蜂蜡乳化的 CS-芦荟涂层, 并研究了涂层对芒果采后品质的影响, 发现随着蜂蜡浓度增加到 2%, 涂层的水蒸气渗透性降低了 43.7%。涂层的抗菌性能随着蜂蜡浓度的增加而提高, 2%蜂蜡乳化 CS-芦荟涂层保鲜效果最好, 显著降低了芒果的发病率, 有效

延长了芒果的保质期。巴西棕榈蜡主要由脂肪族酯和肉桂酸组成, 常用于可食用涂料配方。GUTIÉRREZ-PACHECO 等^[42]研究发现添加巴西棕榈蜡有助于降低配制的 CS 薄膜的水蒸气透过率, CS-蜡处理可以有效降低新鲜黄瓜上的微生物量。

3.2 CS/抗菌剂复合膜

为了增强 CS 的抗菌活性, 常在 CS 中加入抗菌剂。常见的抗菌剂有有机抗菌剂包括纳米 ZnO、纳米 Ag 和纳米 TiO₂^[43]等; 有机抗菌剂主要有醛类^[44]、有机酸^[45]等有机物质; 天然抗菌剂包括植物源、动物源和微生物源天然抗菌剂^[46]。CS/抗菌剂复合膜在果蔬保鲜中的应用如表 4 所示。在 CS 中添加纳米材料可以显著改善 CS 膜的机械性能、阻隔性能和抗菌活性, CS 纳米材料复合涂膜能够很好地保持果蔬采后品质。纳米 ZnO 由于具有良好的抗菌活性和较高的稳定性成为增强 CS 膜功能特性的主要物质。

精油是天然、安全、有效的抗菌剂和抗氧化剂, 常作为添加剂加入到 CS 中, 以改善 CS 膜的理化性能、机械性能和生物活性。由于精油的疏水性, 提高了复合膜的疏水性。此外 CS 通过氢基团和共价键与精油作用, 限制了氢基团与水形成亲水键, 导致 CS 膜对水的亲和力降低, 降低了膜的吸湿能力。精油对 CS 薄膜性能的影响主要取决于所用 CS 的性质、薄膜制备条件以及精油类型, 掺入精油的 CS 薄膜表现出更有效的抗菌和抗氧化活性。BASUMATARY 等^[51]以丁香酚(丁香精油)和芦荟凝胶为抗氧化剂、抗菌剂和抗真菌剂, 制备了 CS 基纳米乳液, 并将涂层液通过喷雾技术应用于新鲜菠萝果实, 结果表明, 芦荟凝胶和丁香酚与 CS 具有强相互作用, 通过与 CS 中的羟基交联增强了涂层的疏水性, 涂层能够保持菠萝新鲜和质量不变, 使菠萝的采后保质期延长了 3 周。精油作为功能成分直接使用会对果蔬的风味产生影响, 因为精油中含有易挥发和易氧化的不稳定组分, 因此目前研究主要集中在精油的封装, 通过封装缓释来提高精油在应用中的有效性。

表 4 CS/抗菌剂复合膜在果蔬保鲜中的应用

Table 4 Application of CS/antibacterial agent composite film in preservation of fruits and vegetables

添加的抗菌剂	复合膜组成	果蔬种类	果蔬	保鲜效果	参考文献
纳米 ZnO	CS、纳米 ZnO、甘油、吐温 80	果菜类蔬菜	樱桃番茄	保持果实色泽和 SSC 含量, 减缓呼吸强度, 抑制果实表面微生物的生长, 有效延长果实货架期	[47]
乳源抗菌肽	CS、乳源抗菌肽	水果	水果黄瓜	21 d 后失水率上升 4.97%, 腐烂率为 16.67%, 减少 VC、可滴定酸、叶绿素等损失, 较好保持硬度	[48]
柠檬酸	CS、柠檬酸	根茎类蔬菜	胡萝卜	减少 VC、可溶性糖和胡萝卜素的损失, 延缓 POD 和苯丙氨酸解氨酶活性降低	[45]
柠檬精油	CS、柠檬精油、氯化钙、纳他霉素	水果	柑橘	处理组的果实 VC 和 TA 含量最高, 腐烂率和失重率最低, 显著延缓果皮相对电导率的升高和果肉 MDA 积累的, 有效维持抗氧化酶(过氧化氢酶(catalase, CAT)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)和 POD 活性	[49]
纳米 TiO ₂ 和 纳米 Ag	CS、月桂酸钠改性的 纳米 Ag-TiO ₂ 、甘油	根茎类蔬菜、水果	马铃薯、草莓	复合膜表现出增强的物理性能, 纳米 TiO ₂ 和纳米 Ag 的添加增强了复合膜的抗菌能力, 降低果蔬的呼吸作用和代谢	[43]
肉桂醛	CS、肉桂醛、吐温-80、氯化钠	水果	脐橙	降低腐烂率和失重率, 延缓 SSC、TA 和 VC 含量下降, 减缓果实中糖和有机酸的降解, 增强抗氧化和防御相关酶的活性	[44]
纳米 SiO _x	CS、纳米 SiO _x	水果	绿色番茄	延缓番茄失重、软化、TA 和 SSC 含量的损失, 抑制 MDA 和总多酚含量的增加, 涂有复合薄膜的番茄抗菌活性更高, 显著延长了番茄的保质期	[50]

3.3 CS/抗氧化剂复合膜

单一 CS 膜由于抗氧化能力不足, 其应用受到限制。添加植物提取物、精油、酚类物质等抗氧化剂可以增强 CS 膜的抗氧化活性, 拓宽 CS 在果蔬保鲜中的应用, CS/抗氧化剂复合膜在果蔬保鲜中的应用如表 5 所示。植物提取物(plant extract, PE)主要包括叶子、种子和果实提取物, 因含有大量的黄酮类、酚类等活性成分^[58], 常作为抗氧化剂添加到 CS 中, 改善 CS 膜的机械性能、物理性能及抗氧化活性^[59], 复合膜涂层能使果蔬保持优异的采后品质。苹果皮

含有大量的生物活性物质, 可作为功能成分添加到 CS 中, 提高 CS 膜的保鲜性能。相比 CS 膜, 复合膜的保鲜效果显著提升。RIAZ 等^[60]制备含不同浓度苹果皮多酚(apple peel polyphenols, APP) (0%、0.25%、0.50%、0.75%和 1.0%)的 CS 基复合涂膜(CS-APP), 并研究其对草莓贮藏品质的影响。研究发现 CS-APP3 (0.75%)处理组在贮藏第 6 d SSC 含量达到最高值 6.8%。CS-APP4 (1.0%)涂层的草莓显示出最大的 TA 含量(0.78 g/100 g), 而仅具有 CS 涂层的草莓显示出的 TA 含量为 0.68 g/100 g。贮藏结束时, CS-APP2 (0.50%)

表 5 CS/抗氧化剂复合膜在果蔬保鲜中的应用

Table 5 Application of CS/antioxidant composite film in preservation of fruits and vegetables

添加的抗氧化剂	复合膜组成	果蔬种类	果蔬	保鲜效果	参考文献
石榴皮提取物	CS、普鲁兰多糖、石榴皮提取物、甘油	水果	芒果	降低芒果的重量损失, 维持总可溶性固形物含量、酸度和 pH, 保持芒果的新鲜度、色泽、口感和质地等感官品质, 延长芒果采后保质期	[52]
水杨酸	CS、水杨酸、聚乙烯吡咯烷	水果	番石榴	保持酚类化合物含量, 提高抗氧化活性, 降低细胞壁降解酶的活性, 表现出较少的脂质过氧化, 减少水分流失和褐变发生率	[53]
香蕉皮提取物	CS、香蕉皮提取物甘油	水果	苹果	处理的苹果具有较低的呼吸速率、失重率和 SSC 含量, 具有较高的硬度、TA 和 VC 含量	[54]
茶多酚	CS、茶多酚、柠檬酸	水果	牛油果	处理 19 d 后, 果实硬度、SSC、可溶性蛋白质和 VC 含量仍较高, 显著延长了牛油果的贮藏期限, 控制了牛油果的品质恶化	[55]
植酸	CS、植酸	水果	哈密瓜	有效降低失重率和褐变速度, 保持硬度、色度和 VC 含量, 抑制 POD、CAT 活性和 TA 含量增加, 阻止霉菌和酵母的侵染	[56]
马郁兰精油、抗坏血酸	CS、马郁兰精油、抗坏血酸	叶菜	鲜切生菜	马郁兰精油保持了生菜的视觉品质, 改善了香气; 马郁兰精油和 VC 复合使用提高了鲜切生菜中酚类、VC 和类胡萝卜素含量, 提高了鲜切生菜的营养价值, 降低了与植物组织褐变相关的酶活性	[57]

处理组中总酚含量最高(1.3 mg/g)。CS-APP 复合涂膜可有效抑制果实总黄酮和总花色苷含量的下降,延缓果实衰老,保持果实品质。茶多酚(tea polyphenol, TP)由于酚类物质含量高,不仅赋予薄膜增强的抗氧化能力,也可作为交联剂以增强薄膜的机械和物理性能,已成为结合 CS 膜的优良材料。ZHANG 等^[61]制备了 CS/TP-银纳米颗粒(silver nanoparticles, AgNPs)复合膜(CS/TP-AgNPs),随着 TP-AgNPs 掺入量的增加,复合膜的不透明度和厚度增加,含水量和水蒸气渗透率的降低,表现出增强的机械性能,复合膜比 CS 膜表现出更优异的抗氧化和抗菌活性,TP 不仅作为 AgNPs 绿色合成的还原剂,而且在复合膜合成中作为交联剂和抗氧化剂。

4 结束语

基于 CS 优良性能,CS 在果蔬保鲜领域具有良好的发展和应用前景。但 CS 膜的物理性能、机械性能和生物活性有待提高。通过添加多糖、蛋白质、脂质等生物聚合物、抗菌剂、抗氧化剂等功能成分可增强 CS 膜的理化性能和生物活性。未来研究的重点是开发安全、高效、绿色、低成本的功能添加剂,通过将其与 CS 进行共混,制备出绿色、健康、经济的 CS 基可食果蔬保鲜膜。此外,添加到复合膜中功能成分的释放特征也是未来研究重点。

在果蔬保鲜应用中,应根据果蔬的种类、生理差异等,精准研制适合不同果蔬品种性能优越的 CS 基复合膜。CS 膜的生产工艺及生产成本也是未来需重点研究的问题之一。CS 复合膜的保鲜机制主要是基于各组分的协同保鲜机制,但目前复合膜中各组分的协同保鲜作用机制仍不清楚,有待进一步研究。此外,多种保鲜技术联合已发展成为延长食品保质期的有效策略,未来可将 CS 复合膜保鲜与物理保鲜等其他保鲜技术联合使用,充分发挥保鲜技术的协同作用。

参考文献

- [1] 卜红宇. PBAT 基气调呼吸膜对沙葱的保鲜效果及保鲜机理研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- [2] BU HY. Study on preservation effect and mechanism of PBAT respiratory film on sand onions [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [3] YOU Y, ZHOU Y, DUAN X, *et al.* Research progress on the application of different preservation methods for controlling fungi and toxins in fruit and vegetable [J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2022, 62(1): 1–12.
- [4] RAHMAN L, GOSWAMI J. Recent development on physical and biological properties of chitosan-based composite films with natural extracts: A review [J]. J Bioact Comp Polym, 2021, 36(3): 225–236.
- [5] ZHANG X, ISMAIL BB, CHENG H, *et al.* Emerging chitosan-essential oil films and coatings for food preservation—A review of advances and applications [J]. Carbohydr Polym, 2021, 273: 118616–118675.
- [6] EL-HAMAHMY MAM, ELSAYED AI, ODERO DC. Physiological effects of hot water dipping, chitosan coating and gibberellic acid on shelf-life and quality assurance of sugar snap peas (*Pisum sativum* L. var. macrocarpon) [J]. Food Packag Shelf Life, 2017, 11: 58–66.
- [7] 高凤菊. 高分子量壳聚糖及其混剂对货架期葡萄的保鲜效果[J]. 保鲜与加工, 2022, 22(1): 9–15.
- [8] GAO FJ. Preservation effect of high molecular weight chitosan and its mixture on shelf life grapes [J]. Storage Process, 2022, 22(1): 9–15.
- [9] SILVA GMC, SILVA WB, MEDEIROS DB, *et al.* The chitosan affects severely the carbon metabolism in mango (*Mangifera indica* L. cv. Palmer) fruit during storage [J]. Food Chem, 2017, 237: 372–378.
- [10] LI L, SUN J, GAO H, *et al.* Effects of polysaccharide-based edible coatings on quality and antioxidant enzyme system of strawberry during cold storage [J]. Int J Polym Sci, 2017, 2017: 1–8.
- [11] KUMARIHAMI HMPC, KIM JG, KIM YH, *et al.* Preharvest application of chitosan improves the postharvest life of 'Garmrok' kiwifruit through the modulation of genes related to ethylene biosynthesis, cell wall modification and lignin metabolism [J]. Foods, 2021, 10(2): 373–389.
- [12] 陈西广. 甲壳素/壳聚糖结构形态与生物材料功效学研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(9): 126–140.
- [13] CHEN XG. Study on structure morphology and biomaterial efficacy of chitin/chitosan [J]. J Ocean Univ Chin (Nat Sci Ed), 2020, 50(9): 126–140.
- [14] JIANG Y, YU L, HU Y, *et al.* Electrostatic spraying of chitosan coating with different deacetylation degree for strawberry preservation [J]. Int J Biol Macromol, 2019, 139: 1232–1238.
- [15] JIANG Y, YU L, HU Y, *et al.* The preservation performance of chitosan coating with different molecular weight on strawberry using electrostatic spraying technique [J]. Int J Biol Macromol, 2020, 151: 278–285.
- [16] ROMANAZZI G, FELIZIANI E, SIVAKUMAR D. Chitosan, a biopolymer with triple action on postharvest decay of fruit and vegetables: Eliciting, antimicrobial and film-forming properties [J]. Front Microbiol, 2018, 9: 2745–2753.
- [17] MARTÍNEZ-CAMACHO JE, GUEVARA-GONZÁLEZ RG, RICO-GARCÍA AE, *et al.* Delayed senescence and marketability index preservation of blackberry fruit by preharvest application of chitosan and salicylic acid [J]. Front Plant Sci, 2022, 13: 796393.
- [18] CONFEDERAT LG, TUCHILUS CG, DRAGAN M, *et al.* Preparation and antimicrobial activity of chitosan and its derivatives: A concise review [J]. Molecules, 2021, 26(12): 3694–3710.
- [19] YU D, YU Z, ZHAO W, *et al.* Advances in the application of chitosan as a sustainable bioactive material in food preservation [J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2022, 62(14): 3782–3797.
- [20] KUMAR S, MUKHERJEE A, DUTTA J. Chitosan based nanocomposite films and coatings: Emerging antimicrobial food packaging alternatives [J]. Trends Food Sci Technol, 2020, 97: 196–209.
- [21] 胡飞, 孙涛, 谢晶, 等. 壳聚糖多酚复合膜研究进展[J]. 食品与机械, 2019, 35(6): 227–231.
- [22] HU F, SUN T, XIE J, *et al.* Research progress of chitosan phenolic complex film [J]. Food Mach, 2019, 35(6): 227–231.
- [23] 曹前荣, 孙建明, 李林林, 等. 壳聚糖基涂膜技术在草莓贮藏保鲜中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(2): 75–82.
- [24] CAO QR, SUN JM, LI LL, *et al.* Application of chitosan-based coating

- technology in strawberry storage and preservation [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(2): 75–82.
- [20] 孙哈, 傅俊曦, 谢春阳, 等. 秋葵多糖-壳聚糖复合可食膜制备及其结构表征[J/OL]. 吉林农业大学学报: 1-11 [2023-02-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1100.s.20211129.1712.005.html>
- SUN H, FU JX, XIE CY, *et al.* Preparation of edible film of okra polysaccharide-chitosan compound and its structure characterization [J/OL]. *J Jilin Agric Univ*: 1-11 [2023-02-25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1100.s.20211129.1712.005.html>
- [21] OJEDA GA, ARIAS G, SGROPPO SC, *et al.* Application of composite cassava starch/chitosan edible coating to extend the shelf life of black mulberries [J]. *J Food Proc Pres*, 2021, 45(1): e15073.
- [22] ZHANG L, HUANG C, ZHAO H. Application of pullulan and chitosan multilayer coatings in fresh papayas [J]. *Coatings*, 2019, 9(11): 745–754.
- [23] 李保祥, 余易琳, 何悦, 等. 壳聚糖-纳米纤维素复合涂膜对砂糖橘贮藏保鲜效果的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(13): 185–192.
- LI BX, YU YL, HE Y, *et al.* Effect of chitosan-nanocellulose composite coating on preservation effect of sugar tangerine storage [J]. *Food Sci*, 2021, 42(13): 185–192.
- [24] ZHOU X, LIU L, LI J, *et al.* Extraction and characterization of pectin from *Jerusalem artichoke* residue and its application in blueberry preservation [J]. *Coatings*, 2022, 12(3): 385–399.
- [25] 余森艳, 卢珍兰, 邓雅诗, 等. 复合涂膜对百香果常温贮藏品质的影响[J]. 食品科技, 2021, 46(2): 33–38.
- YU SY, LU ZL, DENG YS, *et al.* Effect of composite coating on room temperature storage quality of passion fruit [J]. *Food Technol*, 2021, 46(2): 33–38.
- [26] EMRAGI E, JAYANTY SS. Skin color retention in red potatoes during long-term storage with edible coatings [J]. *Foods*, 2021, 10(7): 1531–1543.
- [27] LI K, ZHU J, GUAN G, *et al.* Preparation of chitosan-sodium alginate films through layer-by-layer assembly and ferulic acid crosslinking: Film properties, characterization, and formation mechanism [J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 122: 485–492.
- [28] LIU X, HAN W, ZHU Y, *et al.* Anti-oxidative and antibacterial self-healing edible polyelectrolyte multilayer film in fresh-cut fruits [J]. *J Nanosci Nanotechnol*, 2018, 18(4): 2592–2600.
- [29] BASIAK E, LENART A, DEBEAUFORT F. Effect of starch type on the physico-chemical properties of edible films [J]. *Int J Biol Macromol*, 2017, 98: 348–356.
- [30] JHA P. Functional properties of starch-chitosan blend bionanocomposite films for food packaging: The influence of amylose-amylopectin ratios [J]. *J Food Sci Technol*, 2021, 58(9): 3368–3378.
- [31] 陈洪彬, 李书亮, 蒋璇, 等. 鱼皮明胶-壳聚糖复合涂膜对“黄金”西番莲的保鲜效果[J]. 食品与发酵工业, 2022. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.032093
- CHEN HB, LI SL, JIANG XL, *et al.* Preservation effect of fish skin gelatin-chitosan composite coating on ‘golden’ passionflower [J]. *Food Ferment Ind*, 2022. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.032093
- [32] ZHANG L, CHEN F, LAI S, *et al.* Impact of soybean protein isolate-chitosan edible coating on the softening of apricot fruit during storage [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2018, 96: 604–611.
- [33] XIAO J, GU C, ZHU D, *et al.* Development and characterization of an edible chitosan/zein-cinnamaldehyde nano-cellulose composite film and its effects on mango quality during storage [J]. *LWT*, 2021, 140: 110809–110819.
- [34] 孟金明, 樊爱萍, 吴依婕, 等. 木姜子精油/壳聚糖/乳清蛋白复合膜对枇杷品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(15): 19–24.
- MENG JM, FAN AIP, WU YJ, *et al.* Effects of composite membrane of *Litsea cubeba* oil/chitosan/whey protein on the storage quality of loquat fruits [J]. *Food Res Dev*, 2019, 40(15): 19–24.
- [35] DUARTE LGR, PICONE CSF. Antimicrobial activity of lactoferrin-chitosan-gellan nanoparticles and their influence on strawberry preservation [J]. *Food Res Int*, 2022, 159: 111586.
- [36] ROSHANDEL-HESARI N, MOKABER-ESFAHANI M, TALEGHANI A, *et al.* Investigation of physicochemical properties, antimicrobial and antioxidant activity of edible films based on chitosan/casein containing *Origanum vulgare* L. essential oil and its effect on quality maintenance of cherry tomato [J]. *Food Chem*, 2022, 396: 133650.
- [37] AKHTAR M, BUTT MS, MAAN AA, *et al.* Development and characterization of emulsion-based films incorporated with chitosan and sodium caseinate [J]. *J Food Meas Charact*, 2022, 16(4): 3278–3288.
- [38] FU B, MEI S, SU X, *et al.* Integrating waste fish scale-derived gelatin and chitosan into edible nanocomposite film for perishable fruits [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 191: 1164–1174.
- [39] SIONKOWSKA A, WISNIEWSKI M, SKOPINSKA J, *et al.* Thermal and mechanical properties of UV irradiated collagen/chitosan thin films [J]. *Polym Degrad Stabilit*, 2006, 91(12): 3026–3032.
- [40] ZHANG L, LIU Z, WANG X, *et al.* The properties of chitosan/zein blend film and effect of film on quality of mushroom (*Agaricus bisporus*) [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2019, 155: 47–56.
- [41] AMIN U, KHAN MKI, KHAN MU, *et al.* Improvement of the performance of chitosan—*Aloe vera* coatings by adding beeswax on postharvest quality of mango fruit [J]. *Foods*, 2021, 10(10): 2240–2251.
- [42] GUTIÉRREZ-PACHECO MM, ORTEGA-RAMÍREZ LA, SILVA-ESPINOZA BA, *et al.* Individual and combined coatings of chitosan and carnauba wax with oregano essential oil to avoid water loss and microbial decay of fresh cucumber [J]. *Coatings*, 2020, 10(7): 614–629.
- [43] DONG Z, LI R, GONG Y. Antibacterial and freshness-preserving mechanisms of chitosan-nano-TiO₂-nano-Ag composite materials [J]. *Coatings*, 2021, 11(8): 914–927.
- [44] GAO Y, KAN C, WAN C, *et al.* Quality and biochemical changes of navel orange fruits during storage as affected by cinnamaldehyde-chitosan coating [J]. *Sci Hortic*, 2018, 239: 80–86.
- [45] 董文丽, 巩雪, 侯理达, 等. 壳聚糖/柠檬酸复合涂膜对胡萝卜的保鲜效果[J]. 包装工程, 2021, 42(9): 72–78.
- DONG WL, GONG X, HOU LD, *et al.* Preservation effect of chitosan/citric acid coating on carrots [J]. *Packag Eng*, 2021, 42(9): 72–78.
- [46] 郭娟, 张进, 王佳敏, 等. 天然抗菌剂在食品包装中的研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(9): 336–346.
- GUO J, ZHANG J, WANG JM, *et al.* Advances in the study of natural antimicrobial agents in food packaging [J]. *Food Sci*, 2021, 42(9):

- 336–346.
- [47] LI Y, ZHOU Y, WANG Z, *et al.* Preparation and characterization of chitosan–Nano–ZnO composite films for preservation of cherry tomatoes [J]. *Foods*, 2021, 10(12): 3135–3150.
- [48] 罗雪云, 吴晓彤, 谢颖思, 等. 抗菌肽壳聚糖复合膜对水果黄瓜的保鲜作用[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(7): 142–149, 330.
- LUO XY, WU XT, XIE YS, *et al.* Effect of antimicrobial peptide chitosan composite film on preservation of fruit cucumber [J]. *Mod Food Technol*, 2020, 36(7): 142–149, 330.
- [49] 张伟清, 林媚, 王天玉, 等. 柠檬精油复合涂膜对柑桔采后品质的影响[J]. *核农学报*, 2020, 34(12): 2725–2733.
- ZHANG WQ, LIN M, WANG TY, *et al.* Effect of lemon essential oil coating on quality of pangang after extraction [J]. *Nucl Agron*, 2020, 34(12): 2725–2733.
- [50] ZHU Y, LI D, BELWAL T, *et al.* Effect of nano-SiO₂/chitosan complex coating on the physicochemical characteristics and preservation performance of green tomato [J]. *Molecules*, 2019, 24(24): 4552–4567.
- [51] BASUMATARY IB, MUKHERJEE A, KATIYAR V, *et al.* Chitosan-based active coating for pineapple preservation: Evaluation of antimicrobial efficacy and shelf-life extension [J]. *LWT*, 2022, 168: 113940.
- [52] KUMAR N, PETKOSKA AT, AL-HILIFI SA, *et al.* Effect of chitosan–pullulan composite edible coating functionalized with pomegranate peel extract on the shelf life of mango (*Mangifera indica*) [J]. *Coatings*, 2021, 11(7): 764–783.
- [53] LO'AY AA, TAHER MA. Influence of edible coatings chitosan/PVP blending with salicylic acid on biochemical fruit skin browning incidence and shelf life of guava fruits cv. 'Banati' [J]. *Sci Hort*, 2018, 235: 424–436.
- [54] ZHANG W, LI X, JIANG W. Development of antioxidant chitosan film with banana peels extract and its application as coating in maintaining the storage quality of apple [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 154: 1205–1214.
- [55] LUO L, LU J, HE E, *et al.* Optimisation of the ratio of chitosan, tea polyphenols, and citric acid for avocado preservation and validation of the changes in quality [Z].
- [56] 王艳, 汤卫东, 张亮. 壳聚糖+植酸复合涂膜对鲜切哈密瓜保鲜效果的影响[J]. *食品科技*, 2022, 47(4): 48–53.
- WANG Y, TANG WD, ZHANG L. Effect of chitosan+phytic acid coating on preservation effect of fresh cut cantaloupe [J]. *Food Technol*, 2022, 47(4): 48–53.
- [57] XYLIA P, CHRYSARGYRIS A, TZORTZAKIS N. The combined and single effect of marjoram essential oil, ascorbic acid, and chitosan on fresh-cut lettuce preservation [J]. *Foods*, 2021, 10(3): 575–595.
- [58] 王阳, 佟伟, 张文江, 等. 植物提取物在葡萄保鲜中的应用研究进展[J]. *保鲜与加工*, 2022, 22(4): 116–120.
- WANG Y, TONG W, ZHANG WJ, *et al.* Research progress on the application of plant extracts in grape preservation [J]. *Storage Process*, 2022, 22(4): 116–120.
- [59] RAMBABU K, BHARATH G, BANAT F, *et al.* Mango leaf extract incorporated chitosan antioxidant film for active food packaging [J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 126: 1234–1243.
- [60] RIAZ A, AADIL RM, AMOUSSA AMO, *et al.* Application of chitosan-based apple peel polyphenols edible coating on the preservation of strawberry (*Fragaria ananassa* cv Hongyan) fruit [J]. *J Food Process Pres*, 2021, 45(1): e15018.
- [61] ZHANG W, JIANG W. Antioxidant and antibacterial chitosan film with tea polyphenols-mediated green synthesis silver nanoparticle via a novel one-pot method [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 155: 1252–1261.

(责任编辑: 于梦娇 郑 丽)

作者简介

王安杏, 硕士, 讲师, 主要研究方向为食品分析检测。

E-mail: wanganxingg@126.com

曹 川, 博士, 副教授, 主要研究方向为农产品检测。

E-mail: 877542357@qq.com