

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241008001

引用格式: 张光, 杨烨, 马春敏, 等. 壳聚糖在淀粉基可食用膜中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(2): 254–262.

ZHANG G, YANG Y, MA CM, *et al.* Research progress on the application of chitosan in starch-based edible films [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(2): 254–262. (in Chinese with English abstract).

壳聚糖在淀粉基可食用膜中的应用研究进展

张 光¹, 杨 烨¹, 马春敏¹, 艾连中², 李云辉³, 吴 双⁴,
王玉鑫⁵, 张慧敏⁶, 林枫翔⁷, 张 娜^{1*}

(1. 哈尔滨商业大学食品工程学院, 哈尔滨 150028; 2. 上海理工大学健康科学与工程学院, 上海 200093;
3. 黑龙江省五常金禾米业有限责任公司, 五常 150200; 4. 黑龙江双盛米业有限公司, 佳木斯 154002;
5. 哈尔滨市太阳岛调味食品股份有限公司, 哈尔滨 150001; 6. 黑龙江省克东腐乳有限公司,
齐齐哈尔 164800; 7. 哈尔滨美华生物技术股份有限公司, 哈尔滨 150010)

摘 要: 淀粉基可食膜作为可食膜中的重要组成部分, 具有安全、可降解、成本低和来源广等诸多优点。壳聚糖因其具有生物可降解、抗氧化、抗菌、成膜性好等诸多优点被广泛应用于食品包装膜中。将壳聚糖应用于淀粉基可食膜中, 开发具有良好生物降解性和安全性的壳聚糖淀粉基食品包装材料, 是食品包装行业的研究热点。本文综述了壳聚糖的结构、成膜性及生物活性, 阐明了壳聚糖淀粉基可食膜成膜机理及壳聚糖在不同种类淀粉基质中的成膜性质。讨论了壳聚糖淀粉基复合可食膜, 在肉类、水果蔬菜、以及其他食品中的应用。随着研究深入, 壳聚糖淀粉基可食包装膜在未来具有广阔的发展前景, 本文为壳聚糖在淀粉基可食膜中的应用提供了依据和方向, 为其在新型食品包装中的应用提供了良好理论基础。

关键词: 壳聚糖; 淀粉; 可食膜

Research progress on the application of chitosan in starch-based edible films

ZHANG Guang¹, YANG Ye¹, MA Chun-Min¹, AI Lian-Zhong², LI Yun-Hui³, WU Shuang⁴,
WANG Yu-Xin⁵, ZHANG Hui-Min⁶, LIN Feng-Xiang⁷, ZHANG Na^{1*}

(1. School of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China; 2. School of Health Sciences and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 3. Heilongjiang Wuchang Jinhe Rice Industry Limited Liability Company, Wuchang 150200, China; 4. Heilongjiang Shuangsheng Rice Industry Company Limited, Jiamusi 154002, China; 5. Harbin Sun Island Condiment Food corporation, Harbin 150001, China;
6. Heilongjiang Kedong Sufu Company Limited Company Limited, Qiqihar 164800, China;
7. Harbin Meihua Biotechnology Corporation, Harbin 150010, China)

ABSTRACT: Starch as an important component of edible films, has many advantages such as safety, degradability, low cost, and wide availability. Chitosan is widely used in food packaging films due to its good biodegradability,

收稿日期: 2024-10-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2100803); 国家自然科学基金项目(32372387); 黑龙江省杰出青年基金项目(JQ2024C003); 黑龙江省“双一流”学科协同创新成果项目(LJGXCG202083); 黑龙江省重点研发计划揭榜挂帅项目(2023ZXJ08B03); 黑龙江省青年科技人才托举工程项目(2023QNTJ001); 2022 年哈尔滨商业大学博士科研启动支持计划项目(22BQ65)

第一作者: 张光(1982—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为谷物加工技术。E-mail: rczkzg@163.com

*通信作者: 张娜(1979—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为谷物化学与粮食副产物高值化利用。E-mail: foodzhangna@163.com

antioxidant, antibacterial, and good film-forming properties. The application of chitosan in starch based edible films and the development of packaging materials with good biodegradability and safety is a research hotspot in the food packaging industry. This paper reviewed the structure, film-forming properties, and biological activity of chitosan, and elucidated the film-forming mechanism of chitosan starch based edible films and the film-forming properties of chitosan in different types of starch matrices, discussed the application of chitosan-starch composite edible film in meat, fruits, vegetables, and other foods. With the deepening of research, chitosan starch based edible packaging film has broad development prospects in the future. This paper provides a basis and direction for the application of chitosan in starch based edible film, and provides a good theoretical basis for its application in new food packaging.

KEY WORDS: chitosan; starch; edible membrane

0 引言

鉴于日益升级的环境问题及人类对食品安全意识的不断提高,可降解且安全性能优异的可食用包装膜受到了研究人员和工业界极大的关注^[1-2]。可食用膜是以大分子物质为基质,通过添加可食用性交联剂和增塑剂而形成的一种薄膜^[3]。按照基质不同可以分为多糖类、蛋白类、脂类以及复合类可食用膜^[4],如图1所示。以多糖为基质的可食用膜主要有淀粉膜、壳聚糖膜、果胶膜、海藻酸钠膜、动植物胶膜和纤维素衍生物膜等^[5]。淀粉是世界上仅次于纤维素的第二大最丰富的生物聚合物,是一种广泛使用的天然多糖^[6]。淀粉膜无毒、无味、无色^[7]。由于其丰富、高效和特殊的生物降解性,正在作为一种很有发展前景的环保替代品^[8]。壳聚糖作为天然多糖中唯一的碱性高分子多糖^[9],具有抗菌、抗氧化、生物可降解、可再生和无毒特性等诸多优点^[10],在可食用薄膜中被广泛开发和应用。因此,淀粉和壳聚糖由于其相对较低的成本、丰富的来源、良好的生物相容性、生物降解性以及抗菌、抗氧化和成膜特性,可作为制备可食膜或可食涂层的可持续来源。将壳聚糖应用于淀粉基膜中能够扩大降解性包装材料的研究范围,减缓生化能源如石油类的紧张供应问题^[11]。目前,壳聚糖基可食膜的制备及其生物活性的研究较广,但针对淀粉基可食膜研究中壳聚糖的应用研究综述较少。因此,本文对壳聚糖及其在淀粉基可食用膜中的应用研究进行了综述,对未来淀粉基绿色可持续包装膜的发展提供了参考意义。

1 壳聚糖结构、成膜性及生物活性

1.1 壳聚糖的结构

壳聚糖是一种天然的多糖,普遍存在于昆虫、真菌细胞壁、节肢动物和海洋甲壳类动物的外骨骼中^[12]。除此之外,也有其他来源,如灵芝,乌干达的食用蘑菇和尼罗河鲈鱼鳞,也可以用于分离这种生物聚合物,因为这些生物的细胞壁中含有大量的甲壳素,可脱酰获得壳聚糖。壳聚糖由酰化和脱酰化的葡萄糖胺亚基组成,并作为线性聚合

物存在。壳聚糖是由几丁质去乙酰化获得的^[13]。去乙酰化的过程产生壳聚糖的脱酰基葡萄糖胺亚基主要负责壳聚糖的大部分活性。壳聚糖中最重要的官能团有3个,即C-2有一个氨基,而羟基和次要官能团分别位于C-6和C-3。氨基的分布则是随机的,这使得分子间和分子内的氢键可以顺利形成^[14]。市场上的壳聚糖主要是来自蟹壳、龙虾的海洋甲壳素的部分也是通过去乙酰化产生的。甲丁质中乙酰含量高,无游离胺基,在水中溶解度较差。而壳聚糖因其亲水性和游离胺基的存在,具有良好的溶解性和反应性^[15]。

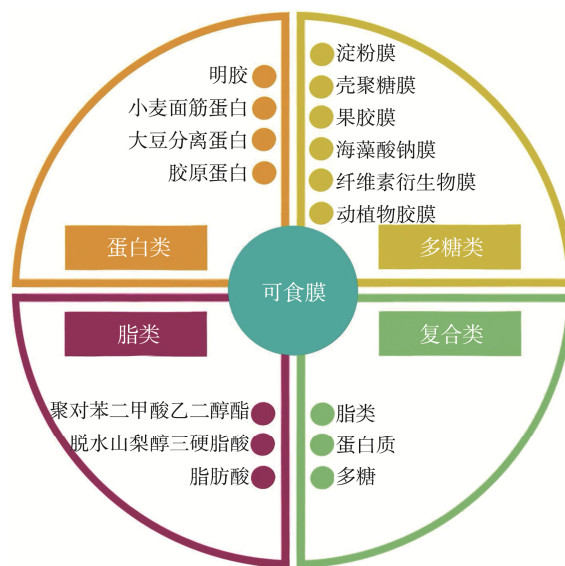


图1 可食用膜的分类^[5]

Fig.1 Classification of edible films^[5]

1.2 壳聚糖的成膜性

壳聚糖具有较好的成膜性,且与壳聚糖结合的淀粉膜的抗菌、成膜和力学性能都有所增加。有研究表明,壳聚糖与淀粉可以通过氢键相互作用形成复合抗菌膜,具有优异的力学性能并能改善膜的微观结构特征,如图2所示^[16]。陈敬鑫等^[17]将巴西棕榈蜡和壳聚糖配制成不同质量浓度的复合膜溶液,结果表明,随着巴西棕榈蜡含量的增加,复合膜的力学

性能、光学阻隔性能、疏水性能和热稳定性均得到显著改善,这可能与巴西棕榈蜡的疏水性及其与壳聚糖分子间的氢键和静电相互作用有关。当巴西棕榈蜡添加量为 0.3 g/100 mL 时,复合膜具有良好的物理性能,其拉伸强度增加,可能是与巴西棕榈蜡中羧酸基团的存在有关,如中等链长的羧酸。羧酸中的羧基可以通过氢键和离子键的方式与壳聚糖链上的氨基相互作用。此外,将巴西棕榈蜡-壳聚糖复合膜在葡萄上进行涂膜处理,可降低贮藏期间‘巨峰’葡萄果实的腐烂率和失重率,较好地维持其贮藏品质,延长其贮藏时间。由此,巴西棕榈蜡的加入有利于提高壳聚糖膜作为可食用膜的适用性。方娟丽等^[18]将黄皮多糖同壳聚糖制备复合可食膜,结果表明,与单一壳聚糖膜相比,复合膜的厚度、水溶解性、溶胀率增加,水分含量降低。是由于黄皮多糖(WSP-W)与壳聚糖之间存在相互作用力,增强了壳聚糖分子链的网络结构,随着 WSP-W 的添加量的增大, WSP-W 与壳聚糖膜的相容程度增大,与此同时膜的延展性和柔韧性、可塑性增强,对提高活性膜的机械能有重要的影响。在光学透过率方面,波长小于 500 nm 时,复合膜的紫外阻隔能力较强。机械性能的研究结果显示,在 WSP-W 添加量为 12% 时,拉伸强度和断裂伸长率均达到最大值,分别为 30.13 MPa 和 29.93%。水蒸气透过率在 WSP-W 12% 时达 24.54 g·mm/(m²·d·kPa),在 WSP-W 6% 时,阻油性能达 96.24 g·mm/(m²·d)。差示扫描量热结果表明,复合膜的热稳定性更佳。1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)清除率和羟基自由基清除率(最大达 99.85%)结果表明 WSP-W 可以提高复合膜的抗氧化活性。综上所述, WSP-W 的加入能够改善单一壳聚糖膜的光学性能、力学性能、阻隔性和抗氧化性。宣伟等^[19]将植酸溶液溶解于食用壳聚糖并涂膜冷鲜黄牛肉表面,能够有效地延缓冷鲜黄牛肉在贮藏过程中的品质下降并延长其货架期。其中,2% 食用壳聚糖涂膜的品质控制及保鲜效果最好,相比于对照组,货架期延长了 8 d。

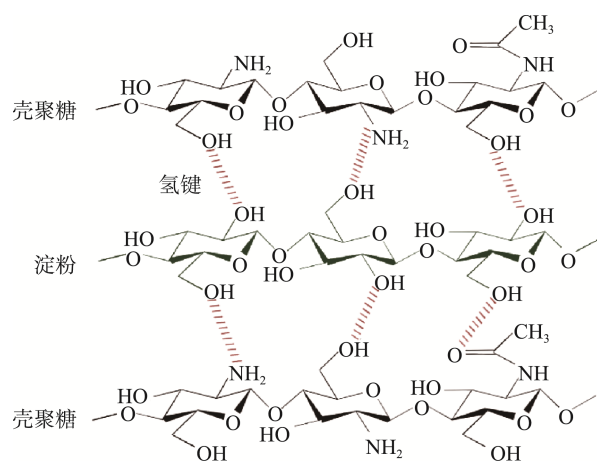


图2 壳聚糖与淀粉的氢键相互作用示意图^[16]

Fig. 2 Diagram of hydrogen bond interaction between chitosan and starch^[16]

1.3 壳聚糖的生物活性

1.3.1 抗菌活性

由于壳聚糖氨基的存在,壳聚糖表现出多阳离子性质^[20]。这使得它能够与微生物细胞膜中带负电荷的成分相互作用,包括革兰氏阴性菌中的脂多糖和革兰氏阳性菌中的磷壁酸。这些相互作用破坏了细胞膜的完整性和通透性,导致细胞内容物的泄漏,最终导致细胞死亡^[21]。此外,壳聚糖可以穿透细胞质膜,干扰主要的细胞过程,抑制微生物生长^[22]。影响壳聚糖抗菌活性的因素有很多,如 pH、温度、盐度、二价阳离子、壳聚糖溶剂和悬浮介质等^[23]。周围环境的 pH 可以显著影响壳聚糖的抗菌效果,在酸性条件下往往会提高其活性。由于多阳离子结构的存在,使壳聚糖能够与电荷相反的细菌细胞壁结合,从而改变细胞的通透性。随后,它与细胞内的 DNA 结合,导致其复制停止,从而导致细胞死亡。多阳离子结构是在酸性条件下形成的,当培养基的 pH 低于壳聚糖的 pKa 时,以多阳离子结构为主,增加了壳聚糖与微生物细胞表面蛋白的相互作用,从而抑制了微生物的生长^[23]。温度也影响壳聚糖的抗菌性能,因为较高的温度促进了壳聚糖和微生物细胞之间更强的相互作用^[24]。孙静等^[25]研究发现杆菌霉素和壳聚糖复合使用可以有效抑制霉菌的生长,从而更有效地控制砂糖橘的霉变率。陈顺心等^[26]研究发现壳聚糖和海藻酸钠以及茶末复合物制备的复合膜具有较好的抑菌特性,抑菌圈直径为 18.6 mm,在一定程度上对葡萄具有保鲜效果。

1.3.2 抗氧化活性

大量文献表明,壳聚糖具有显著的抗氧化活性。其抗氧化活性与壳聚糖聚合物中的活性基团和壳聚糖的分子量有关。壳聚糖结构中存在的反应基团能与自由基进行反应。这些基团中的氨基和羟基,能有效清除自由基,即产生抗氧化活性^[27]。产生抗氧化活性的原因可能是低分子量结构中存在短链,降低了分子内羟基键与其结合的机会,因此有大量的活化氨基和羟基可以清除自由基。另外,其抗氧化活性也随壳聚糖中分子量的降低而增强^[28]。同时,不同的研究发现壳聚糖衍生物的抗氧化潜力比纯壳聚糖更大。郑家辉等^[29]发现天然可食用壳聚糖及其衍生物羧甲基壳聚糖为原料,通过层层自组装的方法对干禧果进行涂膜保鲜处理,有效延长干禧果的保质期,对果实的腐败起到了很好的抗氧化作用。项昭保等^[30]研究发现将芦丁和壳聚糖制备的薄膜具有良好抗氧化活性,能有效地清除 DPPH 和 2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ammonium salt, ABTS]阳离子自由基,并能有效延缓植物油的氧化酸败。此外,还发现加入没食子酸能使壳聚糖结晶形态发生变化,并能有效地清除 DPPH 和 ABTS 阳离子自由基,延缓芝麻油的氧化酸败^[31]。

有研究发现不同浓度的天然壳聚糖分子间的氢键,影响了其清除自由基的能力,从而降低了 DPPH 的还原

能力^[32]。然而,当用没食子儿茶素修饰壳聚糖时,其抗氧化潜能大大提高。在另一项研究中,将天然壳聚糖与没食子酸和壳聚糖的共轭结构进行了比较,其中共轭结构在1200 $\mu\text{mol/L}$ 浓度下的活性为87.3%,而天然聚合物在相同的水平下没有潜在活性。此外,比较了天然壳聚糖与壳聚糖衍生物酚酸接枝羧甲基壳聚糖的抗氧化潜力,表明其共轭结构对过氧化氢、DPPH、羟基和超氧自由基的清除活性显著提高。因此,可以一致认为,当壳聚糖被修饰为一种衍生物时,其抗氧化潜力会显著提高。

2 壳聚糖淀粉基可食膜的成膜机理

壳聚糖/淀粉粘性溶液体系的形成机制主要包括淀粉的糊化和凝沉两个过程^[33]。淀粉基仿壳聚糖复合物的形成涉及淀粉与脂肪胺等配体分子的超分子包合作用,通过这种作用,淀粉的氨基化修饰得以实现。具体过程包括原淀粉在水热条件下润胀、糊化,直链淀粉与支链淀粉溶出,配体的疏水尾链与淀粉螺旋空腔通过疏水相互作用包合,形成含有氨基的复合结构。糊化过程是淀粉基仿壳聚糖复合物形成的关键步骤之一。糊化过程可分为3个阶段:可逆吸水阶段、不可逆吸水阶段和淀粉粒最后解体阶段。在可逆吸水阶段,水分进入淀粉粒的非晶质部分,体积略有膨胀,此时冷却干燥后颗粒可以恢复;在不可逆吸水阶段,水分进入淀粉粒的微晶间隙,导致淀粉粒膨胀;最后阶段,淀粉分子全部进入溶液,形成糊状物^[34]。凝沉过程是淀粉基仿壳聚糖复合物形成的另一个重要步骤。凝沉是指淀粉糊在储存过程中逐渐变稠的现象。直链淀粉含量越高,交联聚合越多,凝胶的硬度和弹性增大。凝沉过程中,支链淀粉的重结晶随时间延长而逐步增大,导致淀粉糊的黏度和稠度增加^[35]。张枝健^[36]利用流变学技术发现,与单一壳聚糖溶液相比,壳聚糖/淀粉共混溶液的黏度、储存模量、损耗模量均升高,表明壳聚糖与淀粉反应形成了新的大分子,并增强了凝胶网络。

改性淀粉,如淀粉醛-儿茶素,可以与壳聚糖薄膜结合,在食品包装中有广阔的潜力,因为这种薄膜能提供更好的抗氧化活性,水蒸汽屏障,减少病原体黏附,这是包装材料未来的发展前景。此外,由于壳聚糖和多糖的电荷相反,而海藻酸盐和果胶也通过静电沉积形成了壳聚糖基多糖膜。这促进了相反电荷之间的强分子间相互作用,从而有助于发展稳定和均匀的薄膜^[37]。壳聚糖/多糖基薄膜可以有效提供理想的性能,并可以作为传统食品包装的有效替代品。

3 淀粉基-壳聚糖复合膜的成膜性

淀粉是由1,4-连接的葡萄糖单位组成的聚合碳水化合物。淀粉聚合物可进一步细分为两种主要形式:直链淀粉和支链淀粉(共占淀粉干质量的98%~99%),排列在同心环

中,形成半晶和非晶层^[38]。直链淀粉(25%~30%)本质上是一种线性的 α -1,4连接聚合物,含有保留的 α -1,6个分支点,主要参与淀粉颗粒的非晶相^[39]。相比之下,支链淀粉是一个高度分支的结构,每20~30个葡萄糖单位有6个分支点。支链淀粉主要参与淀粉颗粒的周围结晶组织。直链淀粉和支链淀粉内部结构中的单位链长分布规律影响了淀粉的热性能和退化曲线^[40]。在这方面,这些成分的组成会影响淀粉基薄膜的性能。具有较多直链淀粉的薄膜通常具有更好的成膜特性,包括机械强度、伸长率和气体屏障性能。

淀粉基薄膜在持水能性、气体渗透率等多方面都表现出很好的优异性,且经过改性的淀粉在膜性能的改善上展现了巨大的潜力。SIGDEL等^[41]以玉米淀粉和马铃薯淀粉以及矿物离子和海藻酸钠为基料,加入甘油作为增塑剂共同制成薄膜,且通过傅里叶变换红外光谱和X射线粉末衍射分析证实了淀粉-离子配合物的形成。形成的淀粉矿物薄膜具有较高的透明性且薄、均匀,虽然加入矿物离子,如 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 离子会使其呈褐色至黄色,但 Mn^{2+} 和 Zn^{2+} 离子的存在增加了薄膜的持水能力,降低了水蒸气的渗透性。研究结果表明,马铃薯淀粉膜的抗拉强度高于玉米淀粉膜,矿物离子的存在进一步增强了其抗拉强度。同时,由于矿物离子的存在,人体对薄膜的淀粉消化能力增加,此研究为开发淀粉-矿物复合物可食用薄膜提供了新的途径。BAIIESTEROS-MARTINEZ等^[42]以甘薯淀粉为基料,加入甘油和山梨醇作为增塑剂制备淀粉薄膜,研究发现膜的水溶性、断裂伸长率和水蒸气渗透性随着膜悬浮液中增塑剂浓度的增加而增大。但增塑剂浓度超过一定限度时,膜的色差和抗拉伸强度均有所减小。甘油和山梨醇增塑剂的添加都能使膜的力学性能增加,但甘油的增塑效果更好。而山梨醇则使膜具有较低的水蒸汽渗透性,故山梨糖醇可用于开发可食用糖包装纸的薄膜及可食用涂层。REN等^[43]以改性玉米淀粉为基料,加入果胶、棕榈酸和香叶醇共混制成复合膜,研究表明,经过改性的淀粉有效地增强了淀粉膜与棕榈酸涂层之间的界面。通过实验分析,证实了改性剂、棕榈酸、果胶和淀粉之间存在氢键和化学交联反应使水接触角增大,水蒸汽渗透性和氧渗透性降低,此外,该复合膜在保持高可见光透过率的同时,表现出较高的紫外线阻挡能力和抗菌性能。

淀粉和壳聚糖分别单独成膜时,均具有绿色环保、可生物降解和延长食品货架期等优点。单一淀粉膜阻水、阻气性能和延展性较差,而单一壳聚糖膜具有好的成膜性、韧性、持久性和抗菌性好等特点,两者相容性较好,按比例共混后加入增塑剂或交联剂结合成膜时,能形成均一稳定、成膜性好、营养价值高且抗菌性能好的复合膜^[44-45]。淀粉和壳聚糖与其他物质共同制备的薄膜具有更好的抗菌性、阻隔性和机械性能(表1)。程龙等^[46]以玉米淀粉和壳聚糖为原料制备的薄膜相比于纯淀粉有更好的阻油性、水蒸汽阻隔性、抗菌性和力学性能。姚沛琳等^[49]以马铃薯淀

表 1 壳聚糖对淀粉膜的性质改善
Table 1 Improvement of starch film properties by chitosan

淀粉原料	主要组成	涂膜方法	性质改善	文献
玉米淀粉	壳聚糖、甘油	溶液浇铸法	适量的壳聚糖可以较明显地改善薄膜的力学性能, 提高其隔水和阻油性能; 壳聚糖与淀粉质量比为 1/3 时制得的薄膜结构均匀, 拉伸强度增大, 水蒸气透过率降低且能抑制大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的生长	[46]
	壳聚糖、明胶和甘油	流延法	最佳制备条件为壳聚糖添加量 2.00%, 明胶添加量 1.13%, 甘油添加量 2.25%时, 膜的性能最好	[47]
	甘油	流延法	超声波处理的玉米淀粉溶液所成膜的机械性能、阻隔性以及表面微观结构都有所改善, 其中 1200 W 处理 15 s 时效果最佳	[48]
马铃薯淀粉	乳酸菌、壳聚糖、甘油	流延法	马铃薯淀粉添加量为 15%、甘油添加量为 4%、壳聚糖添加量为 1%制备的膜的拉伸强度、断裂伸长率最佳, 其中含菌株为 7-1 的马铃薯淀粉壳聚糖膜所获膜的拉伸强度、断裂伸长率最佳, 分别为 2.80 MPa、34.7%, 并在防止鸡蛋被大肠杆菌污染应用中效果良好	[49]
木薯淀粉	甘油、壳聚糖、纤维素纳米晶	流延法	随纤维素纳米晶含量增加, 淀粉基膜的吸水率、透光率及透油率均呈下降趋势, 膜的生物降解性提高。纤维素纳米晶添加质量分数为 2.5%、降解 7 d 时, 降解率达 18.28%。结果证明纤维素纳米晶改善了木薯淀粉基膜的性能, 增强了膜的生物降解性。可用作绿色生物包装材料、减少环境污染提供参考	[50]
	壳聚糖、甘油	溶液共混法	结果表明该共混膜各组分之间由于存在氢键等的相互作用而表现出良好的相容性。壳聚糖的加入改善了其力学性能、阻湿性能及阻氧性能, 提高了其抗菌性	[51]

粉和壳聚糖为原料制备的薄膜具有更好的机械性能且对大肠杆菌的抑制作用显著。田春美等^[51]以木薯淀粉和壳聚糖共混制备的薄膜综合性能最佳且对鲜切菠萝中酶的抑制作用增强, 有效延缓果实的衰老。

4 壳聚糖淀粉可食膜在食品包装中的应用

4.1 壳聚糖淀粉可食膜在肉制品中的应用

涂膜保鲜技术迅猛发展, 壳聚糖淀粉膜在肉类等保鲜、抑菌方面有较好的应用效果。冀晓瑶^[52]以改性山药淀粉与壳聚糖制备淀粉膜应用于新鲜猪肉, 结果表明当壳聚糖浓度为 1.0%时, 膜的阻氧效果最好, 从而使得新鲜猪肉中的肌红蛋白与氧气结合能力较差, 高铁肌红蛋白值降低, 故可延长猪肉的保质期。裴诺^[53]以超声及没食子酸改性后的壳聚糖/淀粉复合膜应用于保鲜南美白对虾, 结果表明, 虾肉 pH、挥发性盐基氮和菌落总数都显著降低且感官评分显著升高, 南美白对虾的货架期延长 4 d。SREEKANTH 等^[54]以玉米淀粉、肉桂精油和纤维素纳米纤维制备复合膜应用于生牛肉保鲜, 发现该膜有效抑制了牛肉中有害微生物的生长。FAN 等^[55]以小麦淀粉、豌豆淀粉和马齿苋提取物制备复合膜应用于冷冻肉, 发现该膜具有良好的隔水性能和机械强度以及显著的抗氧化能力, 显著降低了冷冻肉的脂质氧化, 从而延长食品的保质期。

4.2 壳聚糖淀粉可食膜在果蔬制品中的应用

壳聚糖淀粉可食膜除了对肉制品有良好的保鲜效果之外, 还能延长果蔬的保质期。李新明等^[56]以壳聚糖、淀粉、苹果多酚为原料, 制成壳聚糖/淀粉/苹果多酚复合膜涂剂, 试验证明壳聚糖/淀粉/苹果多酚复合膜涂剂对维持双孢蘑菇的新鲜度是有效的。不但显著降低了双孢蘑菇贮藏

期间的乙烯释放量、失重率、褐变度、呼吸强度、丙二醛含量和多酚氧化酶活性, 还提高了双孢蘑菇中的维生素 C、总酚、可溶性糖、可溶性蛋白质含量、超氧化物歧化酶活性。李雪^[57]以马铃薯淀粉、壳聚糖和纳米 TiO₂ 制成复合膜涂膜果蔬, 结果表明, 果蔬涂膜组的失重率、丙二醛含量和氧化物酶活性显著降低, 维生素、可溶性糖和可滴定酸含量显著升高, 具有一定的保鲜性能; 杜易阳^[58]以壳聚糖、可溶性淀粉、乳酸链球菌素对巨峰葡萄进行涂膜保鲜, 结果表明该膜对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌及葡萄中所含的常见致病菌均有抑制作用。田春美^[59]以木薯淀粉和壳聚糖制备复合膜对鲜切菠萝蜜进行涂膜保鲜, 结果表明, 涂膜处理可延缓鲜切菠萝蜜的感官品质变化, 可延长保鲜期 6~9 d 左右。该膜可抑制还原糖、淀粉、总酸的下降速率和可溶性固形物以及总糖的上升速率, 防止了维生素 C 的损失; 同时不仅抑制了细菌、霉菌和酵母菌的生长, 还对维持过氧化氢酶的活性有一定的积极作用。

4.3 壳聚糖淀粉可食膜在其他食品中的应用

壳聚糖淀粉可食膜除了肉类和果蔬制品中应用外, 在其他的食品当中也扮演着重要角色, 壳聚糖-淀粉可食膜在其他食品中的应用如表 2 所示。LUO 等^[60]以岩豆蛋白、柠檬烯颗粒和玉米淀粉为原料制备的可食膜应用于糯米饼, 结果表明可使糯米饼的保质期延长 2~4 d。SRIVASTAVA 等^[61]以薄荷精油、稻壳纤维和玉米淀粉为原料制备的可食膜应用于面包, 发现复合膜的抗拉伸强度、热稳定性显著提高, 对革兰氏阴性菌和革兰氏阳性菌均有抑制作用, 有效延长面包的保质期。ZHENG 等^[62]以玉米淀粉、壳聚糖和玫瑰花青素封装的马铃薯支链淀粉纳米颗粒作为 pH 指示剂制备 pH 响应膜, 结果表明, 该膜促

表 2 壳聚糖淀粉可食膜在食品中的应用
Table 2 Application of chitosan-starch edible membranes in food products

涂膜方法	主要组成	应用	保鲜效果	参考文献
-	岩豆蛋白、柠檬烯颗粒和玉米淀粉	糯米饼	保质期延长 2~4 d	[60]
-	薄荷精油、稻壳纤维和玉米淀粉	面包	有效抑制革兰氏阴性菌和革兰氏阳性菌	[61]
-	玉米淀粉、壳聚糖和玫瑰花青素封装的马铃薯支链淀粉纳米颗粒	智能包装	良好的 pH 响应性, 实时监测食品新鲜度	[62]
溶液浇铸法	玉米淀粉; 壳聚糖; 端羧基超支化聚酯	-	有效改善复合膜的机械性能和蒸汽阻隔性能	[63]
	超支化聚酯	猪肉	延缓猪肉腐败, 为智能食品包装材料的进一步研究提供依据	[64]
浇铸成膜法	黄皮、壳聚糖	-	有效改善复合膜的性能	[65]
浸没法	壳聚糖、刺玫果提取物	半风干型牛肉	对半风干型牛肉的保鲜效果有一定的积极作用	[66]
	壳聚糖、大米淀粉	-	有效改善大米淀粉的老化	[67]
	壳聚糖、单宁酸	百香果	在 25 °C 条件下货架期可延长至 12 d	[68]
	碧根果精油、壳聚糖、乳清分离蛋白	碧根果	可有效抑制碧根果仁贮藏过程中的霉菌、酵母菌的生长以及脂质氧化, 具有良好的保鲜效果	[69]
-	茶多酚; 壳聚糖	蕨菜	延缓了蕨菜在贮藏期间的衰老, 提高其贮藏品质和营养价值	[70]
-	乳酸链球菌素、壳聚糖、茶多酚	鲜湿面	可有效抑制鲜湿面腐败变质, 货架期从 12 h 延长到 48 h	[71]
-	苦杏仁抑菌肽、壳聚糖、明胶	奶酪	有效抑制微生物生长, 延长奶酪的保质期, 保持其原有的色泽、风味和品质	[72]

注: -表示文献中未提及。

进了淀粉和壳聚糖的相容性, 显著提高了基质的均匀性、阻水能力、疏水性、耐光性和力学性能并具有更高的颜色稳定性和良好的 pH 响应性, 对食品的智能包装具有巨大的应用潜力。壳聚糖淀粉膜主要应用于果蔬和肉制品, 在米面制品中的应用甚少, 未来应加大壳聚糖淀粉膜在这方面的研究。

5 结束语

随着人们环保意识的增强, 绿色包装材料受到广泛关注, 壳聚糖与淀粉基可食性包装的结合具有广阔是市场前景。利用淀粉制成的无毒无害、可生物降解的可食性薄膜, 添加壳聚糖制成复合膜, 能够改善淀粉膜的性能, 形成均一稳定且性能较好的壳聚糖淀粉复合膜, 这类安全、可降解的可食膜在肉制品、果蔬制品和其他多种食品中已经受到广泛应用。壳聚糖可食薄膜和涂层因其生物降解性、生物相容性和生物活性在水果、蔬菜、肉制品等食品包装方面得到了广泛的研究, 但在加热食品中研究甚少。除此之外, 对这些薄膜的毒性应进行全面的研究, 特别是在与食物接触时, 是否会对人体产生毒害。许多食品包装应用需要改进壳聚糖基薄膜的机械性能, 大量生产工业用途的壳聚糖薄膜也面临一些挑战, 现有技术的优化或与新的技术结合, 能更好地解决工业生产的难题。因此, 壳聚糖的

实际应用确实面临着一些挑战, 但随着国家政策的不断完善和科研工作者的深入研究, 壳聚糖可食薄膜在食品包装领域的应用中有着广阔的发展前景。

参考文献

[1] LIU W, CHEN L, MCCLEMENTS DJ, *et al.* Development of starch film to realize the value-added utilization of starch in food and biomedicine [J]. Food Bioscience, 2024, 57: 103521.

[2] ABDILLAH AA, CHARLES AL. Characterization of a natural biodegradable edible film obtained from arrowroot starch and iota-carrageenan and application in food packaging [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 191: 618–626.

[3] 林伟鸿, 夏明. 可食用膜的分类和应用研究进展[J]. 农产品加工, 2016, 23: 62–65, 68.

LIN WH, XIA M. Progress in the classification and application of edible membranes [J]. Processing of Agricultural Products, 2016, 23: 62–65, 68.

[4] 李帅, 孙帆. 可食膜的制备及其在食品工业中的研究进展[J]. 农业科技与信息, 2023, 8: 145–148.

LI S, SUN F. Preparation of edible membranes and their research progress in the food industry [J]. Agricultural Science and Information, 2023, 8: 145–148.

[5] 李昱杰. 多糖基可食性复合膜在食品保鲜中的应用[J]. 现代食品, 2022, 28(5): 24–27.

LI YJ. Application of polysaccharide-based edible composite film in food preservation [J]. Modern Foods, 2022, 28(5): 24–27.

- [6] OLIVEIRA JP, DASILVA IB, COSTA JSS, *et al.* Bibliometric study and potential applications in the development of starch films with nanocellulose: A perspective from 2019 to 2023 [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 277(1): 133828.
- [7] LUCHESE CL, BENELLI P, SPADA JC, *et al.* Impact of the starch source on the physicochemical properties and biodegradability of different starch-based films [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2018, 135(33): 46564.
- [8] BANGAR SP, WHITESIDE WS, OZOGUL F, *et al.* Development of starch-based films reinforced with cellulosic nanocrystals and essential oil to extend the shelf life of red grapes [J]. *Food Bioscience*, 2022, 47: 101621.
- [9] 裴诺, 杜宇凡, 孙洁, 等. 超声改性对壳聚糖/淀粉复合膜特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(18): 88–94.
- PE N, DU YF, SUN J, *et al.* Effect of ultrasound modification on the membrane properties of chitosan/starch complex [J]. *Food and Fermentation Industry*, 2022, 48(18): 88–94.
- [10] PAVATKOVA L, SDLANKOVA J, PLEVA P, *et al.* Bioactive zein/chitosan systems loaded with essential oils for food-packaging applications [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 103(3): 1097–1104.
- [11] 刘星凯, 任菲, 王书军. 淀粉基抗菌食品包装膜的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(1): 1–9.
- LIU XK, REN F, WANG SJ. Advances in starch-based antibacterial food packaging films [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(1): 1–9.
- [12] QU B, LUO Y. Chitosan-based hydrogel beads: Preparations, modifications and applications in food and agriculture sectors—A review [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 152: 437–448.
- [13] PRIYADARSHI R, RHIM JW. Chitosan-based biodegradable functional films for food packaging applications [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 62: 102346.
- [14] QU B, LUO Y. Chitosan-based hydrogel beads: Preparations, modifications and applications in food and agriculture sectors—A review [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 152: 437–448.
- [15] NEGM NA, HEFNI HHH, ABD-ELAAL AAA, *et al.* Advancement on modification of chitosan biopolymer and its potential applications [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 152: 681–702.
- [16] OYEKUNLE DT, NIA MH, WILSON LD. Recent progress on the application of chitosan, starch and chitosan–starch composites for meat preservation—a mini review [J]. *Journal of Composites Science*, 2024, 8(8): 302.
- [17] 陈敬鑫, 赵毕文, 钟燕琴, 等. 棕榈蜡-壳聚糖膜的表征及对葡萄的保鲜应用[J]. *渤海大学学报(自然科学版)*, 2024, 45(2): 81–89.
- CHEN JX, ZHAO BW, ZHONG YQ, *et al.* Characterization of palm wax-chitosan film and its application for grape preservation [J]. *Journal of Bohai University (Natural Science Edition)*, 2024, 45(2): 81–89.
- [18] 方娟丽, 熊群燕, 龚锐枝, 等. 黄皮多糖/壳聚糖复合可食膜的制备、结构表征及理化性质[J]. *现代食品科技*, 2024, 40(8): 263–273.
- FANG JL, XIONG QY, GONG RZ, *et al.* Preparation, structural characterization, and physicochemical properties of yellow skin polysaccharide/chitosan composite edible membranes [J]. *Modern Food Technology*, 2024, 40(8): 263–273.
- [19] 宣伟, 李铁, 伊芳, 等. 食用壳聚糖涂膜冷鲜黄牛肉的品质控制研究[J]. *食品科技*, 2023, 48(7): 92–98.
- XUAN W, LI T, YI F, *et al.* Quality control of edible chitosan-coated chilled fresh yellow beef [J]. *Food Technology*, 2023, 48(7): 92–98.
- [20] PAL P, PAL A, NAKASHIMA K, *et al.* Applications of chitosan in environmental remediation: A review [J]. *Chemosphere*, 2021, 266: 128934.
- [21] AIBANI N, RAI R, PATEL P, *et al.* Chitosan nanoparticles at the biological interface: Implications for drug delivery [J]. *Pharmaceutics*, 2021, 13(10): 1686.
- [22] CHO MH, KIM KS, AHN HH, *et al.* Chitosan gel as an in situ-forming scaffold for rat bone marrow mesenchymal stem cells *in vivo* [J]. *Tissue Engineering Part A*, 2008, 14(6): 1099–1108.
- [23] CAMPOS EVR, OLIVEIRA JL, FRACETO LF. Poly (ethylene glycol) and cyclodextrin-grafted chitosan: From methodologies to preparation and potential biotechnological applications [J]. *Frontiers in Chemistry*, 2017, 5: 93.
- [24] CHEHELGERDI M, DOOSTI A. Effect of the cagW-based gene vaccine on the immunologic properties of BALB/c mouse: An efficient candidate for *Helicobacter pylori* DNA vaccine [J]. *Journal of Nanobiotechnology*, 2020, 18: 1–16.
- [25] 孙静, 刘玉娟, 罗晓娇, 等. 杆菌霉素D和壳聚糖复合抑菌作用及其对砂糖橘保鲜效果[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(17): 372–379.
- SUN J, LIU YJ, LUO XJ, *et al.* Compound antibacterial effect of bacilomycin D and chitosan and its preservation effect on sugar orange [J]. *Food Industry Technology*, 2024, 45(17): 372–379.
- [26] 陈顺心, 刘海波, 朱静, 等. 海藻酸钠-壳聚糖-茶末复合膜的制备及其对葡萄的保鲜效果[J]. *食品研究与开发*, 2024, 45(2): 145–153.
- CHEN SX, LIU HB, ZHU J, *et al.* Preparation of sodium alginate-chitosan-tea end composite film and its effect on grape preservation [J]. *Food Research and Development*, 2024, 45(2): 145–153.
- [27] CHEHELGERDI M, DOOSTI A. Effect of the cagW-based gene vaccine on the immunologic properties of BALB/c mouse: An efficient candidate for *Helicobacter pylori* DNA vaccine [J]. *Journal of Nanobiotechnology*, 2020, 18: 1–16.
- [28] MARIN AC, CULCASI M, CASSIEN M, *et al.* Chitosan as an antioxidant alternative to sulphites in oenology: EPR investigation of inhibitory mechanisms [J]. *Food Chemistry*, 2019, 285: 67–76.
- [29] 郑家辉, 杨梅, 祖煦, 等. 羧甲基壳聚糖/壳聚糖涂膜保鲜干禧果[J]. *包装工程*, 2022, 43(11): 107–114.
- ZHENG JH, YANG M, ZU X, *et al.* Carboxymethyl chitosan/chitosan coating to keep fresh millennium fruit [J]. *Packaging Engineering*, 2022, 43(11): 107–114.
- [30] 项昭保, 刘岩, 张琳婧. 芦丁-壳聚糖抗氧化食品保鲜膜的制备与表征[J/OL]. *重庆工商大学学报(自然科学版)*, 1–13. [2024-11-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1155.N.20240109.1018.002.html>
- XIANG ZB, LIU Y, ZHANG LJ. Preparation and characterization of rutin-chitosan antioxidant food cling wrap [J/OL]. *Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition)*, 1–13. [2024-11-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1155.N.20240109.1018.002.html>
- [31] 项昭保, 张琳婧, 刘岩. 没食子酸-壳聚糖抗氧化食品保鲜膜的制备与表征[J/OL]. *重庆工商大学学报(自然科学版)*, 1–13. [2024-11-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1155.N.20240417.1749.008.html>
- XIANG ZB, ZHANG LJ, LIU Y. Preparation and characterization of gallic

- acid-chitosan antioxidant food cling wrap [J/OL]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 1–13. [2024-11-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1155.n.20240417.1749.008.html>
- [32] SUN T, ZHOU D, MAO F, *et al.* Preparation of low-molecular-weight carboxymethyl chitosan and their superoxide anion scavenging activity [J]. European Polymer Journal, 2007, 43(2): 652–656.
- [33] 李莹, 杨欣悦, 王雪羽, 等. 壳聚糖基复合膜的成膜机理和特性研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(7): 430–438.
- LI Y, YANG XY, WANG XY, *et al.* Progress on membrane formation mechanism and characteristics of chitosan-based composite membranes [J]. Food Industry Science and Technology, 2022, 43(7): 430–438.
- [34] 张利铭, 刘战丽, 孙阳, 等. CS/马铃薯淀粉复合膜体系流变学与微观结构分析[J]. 食品工业, 2019, 40(6): 235–238.
- ZHANG LM, LIU ZL, SUN Y, *et al.* Rheology and microstructure analysis of chitosan/potato starch composite membrane system [J]. Food Industry, 2019, 40(6): 235–238.
- [35] RUEDA DR, SECALL T, BAYER RK. Differences in the interaction of water with starch and chitosan films as revealed by infrared spectroscopy and differential scanning calorimetry [J]. Carbohydrate Polymers, 1999, 40(1): 49–56.
- [36] 张枝健. 淀粉 CS 基复合材料的制备及机械性能研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2019.
- ZHANG ZJ. Preparation and mechanical properties of starch-chitosan-based composites [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2019.
- [37] KONG P, ROSNAN SM, ENOMAE T. Carboxymethyl cellulose–chitosan edible films for food packaging: A review of recent advances [J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 346: 122612.
- [38] BENBETTAIEB N, DEBEAUFORT F, KARBOWIAK T. Bioactive edible films for food applications: Mechanisms of antimicrobial and antioxidant activity [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(21): 3431–3455.
- [39] LAUER MK, SMITH RC. Recent advances in starch-based films toward food packaging applications: Physicochemical, mechanical, and functional properties [J]. Comprehensive Reviews In Food Science And Food Safety, 2020, 19(6): 3031–3083.
- [40] LI X, DENG S, LIN T, *et al.* Cassava starch ternary graft copolymer as a corrosion inhibitor for steel in HCl solution [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(2): 2196–2207.
- [41] SIGDEL A, JANASWAMY S. Effect of mineral ions on the functional properties of starch films: Towards developing novel edible films [J]. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 2024, 42: 101790.
- [42] BAIESTEROS-MARTINEZ L, PEREZ-CERVERA C, ANDRADE-PIZARRO R. Effect of glycerol and sorbitol concentrations on mechanical, optical, and barrier properties of sweet potato starch film [J]. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 2020, 20: 1–9.
- [43] REN J, CAO Y, ZHANG Y, *et al.* Dual cross-linked network of the active starch film by incorporating palmitic acid and geraniol: A comprehensive evaluation of the hydrophobic mechanism and antimicrobial activity [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 280: 135830.
- [44] LI Y, WANG F, XU J, *et al.* Improvement in the optical properties of starch coatings via chemical-physical combination strategy for fruits preservation [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 137: 108405.
- [45] 陈晓梅, 刘巧瑜, 陈海光, 等. 葛根淀粉-壳聚糖复合膜的研究进展[J]. 广州化工, 2018, 46(18): 31–33.
- CHEN XM, LIU QY, CHEN HG, *et al.* Progress of Pueraria starch-chitosan composite membrane [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2018, 46(18): 31–33.
- [46] 程龙, 郝艳玲, 宋小双. 壳聚糖对玉米淀粉可食膜性能的影响[J]. 中国塑料, 2021, 35(4): 35–41.
- CHENG L, HAO YL, SONG XS. Effect of chitosan on the edible membrane properties of cornstarch [J]. China Plastics, 2021, 35(4): 35–41.
- [47] 高妮娜, 张业崎, 李帅. 响应面法优化玉米淀粉基可食膜的制备[J]. 饲料与畜牧, 2017, 11: 32–38.
- GAO NN, ZHANG YQ, LI S. Preparation of maize starch-based edible film optimized by response surface method [J]. Feed and Animal Husbandry, 2017, 11: 32–38.
- [48] 陈光, 王香琪, 孙旸, 等. 超声波对玉米淀粉成膜性能影响的研究[J]. 现代食品科技, 2010, 26(12): 1314–1318.
- CHEN G, WANG XQ, SUN Y, *et al.* Study on the effect of ultrasound on the film-forming properties of corn starch [J]. Modern Food Science and Technology, 2010, 26(12): 1314–1318.
- [49] 姚沛琳, 马庆兰, 黄悦, 等. 含乳酸菌马铃薯淀粉膜的制备及抑菌性研究[J]. 廊坊师范学院学报(自然科学版), 2019, 19(2): 73–76, 80.
- YAO PL, MA QL, HUANG Y, *et al.* Preparation and inhibition of potato starch membrane [J]. Journal of Langfang Normal University (Natural Science edition), 2019, 19(2): 73–76, 80.
- [50] 贯东艳, 崔少宁, 谢玮, 等. 纤维素纳米晶对木薯淀粉基复合膜性能的影响[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2019, 35(6): 59–63.
- GUAN DY, CUI SN, XIE W, *et al.* Effect of cellulose nanocrystalline on the properties of cassava starch-based composite membrane [J]. Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 35(6): 59–63.
- [51] 田春美, 钟秋平. 木薯淀粉/壳聚糖可食复合膜的制备及性能研究[J]. 食品研究与开发, 2006, 7: 25–29.
- TIAN CM, ZHONG QP. Preparation and properties of cassava starch/chitosan edible composite membrane [J]. Food Research and Development, 2006, 7: 25–29.
- [52] 冀晓瑶. 基于壳聚糖-没食子酸改性山药淀粉膜的制备和表征及其在猪肉保鲜中的应用[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
- JI XY. Preparation and characterization of yam starch membrane based on chitosan-gallic acid-modified yam and its application in pork preservation [D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.
- [53] 裴诺. 壳聚糖/淀粉功能性复合膜的制备及其在南美白对虾保鲜中的应用[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
- PEI N. Preparation of chitosan/starch functional composite membrane and its application in preservation of South America [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022.
- [54] SREEKANTH K, SHARATH KP, CD MD, *et al.* Microbial load reduction in stored raw beef meat using chitosan/starch-based active packaging films incorporated with cellulose nanofibers and cinnamon essential oil [J]. Meat Science, 2024, 216: 109552.
- [55] FAN X, ZHANG B, ZHANG X, *et al.* Incorporating portulaca oleracea extract endows the chitosan-starch film with antioxidant capacity for chilled meat preservation [J]. Food Chemistry-X, 2023, 18: 100662.

- [56] 李新明, 郭霄飞, 郭尚. 壳聚糖/淀粉/苹果多酚复合膜对双孢蘑菇保鲜效果的影响[J]. 北方园艺, 2022, 15: 98–105.
LI XM, GUO XF, GUO S. Effect of chitosan starch apple polyphenols complex film on the preservation effect of mushroom *Bisporus* [J]. Northern Horticulture, 2022, 15: 98–105.
- [57] 李雪. 壳聚糖与纳米 TiO₂ 对淀粉复合膜力学强度和阻隔性能的影响及复合膜在果蔬中的涂膜保鲜应用[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021.
LI X. Influence of chitosan and nano-TiO₂ on the mechanical strength and barrier properties of starch composite film and the application of coating film preservation of composite film in fruits and vegetables [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021.
- [58] 杜易阳. 壳聚糖—淀粉广谱抗菌膜的研制及功能性评价[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2012.
DU YY. Development and functional evaluation of chitosan-starch [D]. Harbin: Heilongjiang University, 2012.
- [59] 田春美. 木薯淀粉/壳聚糖可食复合膜性能及在鲜切菠萝蜜中的应用研究[D]. 海口: 华南热带农业大学, 2007.
TIAN CM. Research on cassava starch/chitosan edible composite membrane and application in freshly cut jackfruit [D]. Haikou: South China Tropical Agricultural University, 2007.
- [60] LUO S, CHEN J, HE J, *et al.* Preparation of corn starch/rock bean protein edible film loaded with d-limonene particles and their application in glutinous rice cake preservation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 206: 313–324.
- [61] SRIVASTAVA V, SINGH S, DAS D. Development and characterization of peppermint essential oil/rice husk fibre/corn starch active biocomposite film and its performance on bread preservation [J]. Industrial Crops and Products, 2024, 208: 117765.
- [62] ZHENG L, LIU L, YU J, *et al.* Intelligent starch/chitosan-based film incorporated by anthocyanin-encapsulated amylopectin nanoparticles with high stability for food freshness monitoring [J]. Food Control, 2023, 151: 109798.
- [63] 刘文宇, 王皓昱, 郝嘉辉, 等. 端羧基超支化聚酯增强淀粉/壳聚糖复合膜[J]. 精细化工, 2024, 41(8): 1718–1725.
LIU WY, WANG HY, HAO JH, *et al.* Terminal carboxyl hyperbranched polyester enhances the starch chitosan composite membrane [J]. Fine Chemical Industry, 2024, 41(8): 1718–1725.
- [64] 李丰羽, 孙雨晴, 高丹, 等. 负载桑葚花青素的葛根淀粉/壳聚糖复合膜的制备与表征[J]. 包装工程, 2023, 44(23): 52–61.
LI FY, SUN YQ, GAO D, *et al.* Preparation and characterization of *Pueraria* starch chitosan composite membrane loaded with mulberry anthocyanin [J]. Packaging Works, 2023, 44(23): 52–61.
- [65] 方娟丽, 熊群燕, 龚锐枝, 等. 黄皮多糖/壳聚糖复合可食膜的制备、结构表征及理化性质[J]. 现代食品科技, 2024, 40(8): 263–273.
FANG JL, XIONG QY, GONG RZ, *et al.* Preparation, structural characterization, and physicochemical properties of yellow skin polysaccharide/chitosan composite edible membranes [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(8): 263–273.
- [66] 曾睿, 汤艳凝, 斯琴其木格, 等. 壳聚糖-刺玫果提取物复配涂膜对半干型风干牛肉贮藏品质的影响[J]. 中国调味品, 2024, 49(5): 24–30.
ZENG R, TANG YL, SIQIN QMG, *et al.* Effect of chitosan-spinosa extract on storage quality of semi-dried beef [J]. Chinese Condiments, 2024, 49(5): 24–30.
- [67] 王昊翊, 张昆明, 唐湘毅, 等. 壳聚糖添加量对大米淀粉老化的影响[J]. 广西科技大学学报, 2024, 35(3): 132–137.
WANG HY, ZHANG KM, TANG XY, *et al.* Effect of the amount of chitosan added on rice starch aging [J]. Journal of Guangxi University of Science and Technology, 2024, 35(3): 132–137.
- [68] 刘婧, 陈昆平, 李华锋. 百香果保鲜技术研究进展[J]. 农产品加工, 2023, 22: 90–92, 97.
LIU J, CHEN KP, LI HF. Progress in passion fruit preservation technology [J]. Agricultural Products Processing, 2023, 22: 90–92, 97.
- [69] 李贺兴, 孙烨, 齐路路, 等. 碧根果精油-壳聚糖-乳清分离蛋白可食膜的制备及其在碧根果仁保鲜中的研究[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(5): 215–223.
LI HX, SUN Y, QI LL, *et al.* Preparation of edible membrane of pecan fruit essential oil-chitosan-whey separated protein and its study in the preservation of pecan nuts [J]. China Food Additives, 2024, 35(5): 215–223.
- [70] 刘金玉, 刘晓强, 盛学文. 茶多酚-壳聚糖复合涂膜结合微冻对蕨菜保鲜效果的研究[J]. 食品科技, 2023, 48(12): 41–47.
LIU JY, LIU XQ, SHENG XW. Study on the effect of tea polyphenols-chitosan composite coating combined with micro-freezing on fern preservation [J]. Food Technology, 2023, 48(12): 41–47.
- [71] 马赫, 李雅, 吴杰, 等. 复合生物保鲜剂对鲜湿面保鲜效果及其品质变化的影响[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(3): 125–131.
MA H, LI Y, WU J, *et al.* The influence of compound biological preservative on fresh and wet noodles [J]. Grain, Oil and Food Science and Technology, 2024, 32(3): 125–131.
- [72] 张涛, 周芷夷, 邓文奇, 等. 苦杏仁多肽/壳聚糖复合膜的制备及对奶酪保鲜效果的研究[J/OL]. 食品与发酵工业, 1–9. [2024-11-29]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.039148>
ZHANG T, ZHOU ZY, DENG WQ, *et al.* Preparation of bitter almond polypeptide/chitosan composite film and research on the effect of cheese preservation [J/OL]. Food and Fermentation Industry, 1–9. [2024-11-29]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.039148>

(责任编辑: 韩晓红 安香玉)