

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240313003

# 壳聚糖对果蔬的抗菌保鲜效果及其应用研究进展

曹梦园<sup>1</sup>, 乔成奎<sup>2</sup>, 韩丽君<sup>1\*</sup>, 谢汉忠<sup>2</sup>, 陈如霞<sup>2</sup>, 李晓光<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学理学院, 北京 100193; 2. 中国农业科学院郑州果树研究所, 郑州 450009)

**摘 要:** 由于采后旺盛的生理代谢, 新鲜水果和蔬菜会出现品质劣变, 采取有效的抗菌保鲜策略是果蔬采后贮藏过程亟待解决的问题。天然大分子壳聚糖作为果蔬的活性包装材料具有来源广泛、安全和可生物降解等优点。本文综述了近年来壳聚糖基涂层/膜用于果蔬保鲜包装的抗菌保鲜效果及其对果蔬品质的影响, 首先介绍了壳聚糖的来源及应用特点以及制备壳聚糖薄膜材料的常用方法, 然后综述了壳聚糖及其与其他生物活性材料复合使用在果蔬保鲜中的应用, 并总结了使用壳聚糖基涂层/膜保鲜对果蔬外观品质、营养品质、挥发性香气物质等方面的影响; 最后, 对壳聚糖在果蔬抑菌保鲜机制方面的研究进行归纳介绍, 以期为其未来发展和应用提供新的思路。

**关键词:** 壳聚糖; 保鲜; 抗菌; 果蔬

## Research progress on the preservation and antibacterial effect of chitosan on fruits and vegetables and its application

CAO Meng-Yuan<sup>1</sup>, QIAO Cheng-Kui<sup>2</sup>, HAN Li-Jun<sup>1\*</sup>, XIE Han-Zhong<sup>2</sup>,  
CHEN Ru-Xia<sup>2</sup>, LI Xiao-Guang<sup>2</sup>

(1. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Zhengzhou Fruit Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450009, China)

**ABSTRACT:** Due to the vigorous physiological metabolism after harvest, fresh fruits and vegetables may experience quality deterioration. Adopting effective antibacterial and preservation strategies is an urgent problem to be solved in the post harvest storage process of fruits and vegetables. Natural macromolecular chitosan, as an active packaging material for fruits and vegetables, has advantages such as wide sources, safety, and biodegradability. This paper reviewed the recent effect of chitosan-based coatings and films on the antibacterial and preservation packing and its impact on the quality of fruits and vegetables. Firstly, introduced the source and application characteristics of chitosan, as well as the preparation methods of chitosan film materials, reviewed the application and its composite use of chitosan with other biologically active materials in preserving fruits and vegetables. Then summarized the impacts of using chitosan-based coatings/films on the appearance, quality, nutritional value, and volatile aroma substances of fruits and vegetables. Additionally, summarized an overview of the research on the preservation and antibacterial mechanism of chitosan in fruit and vegetable and presented to provide new ideas and insights for their future development and application.

**基金项目:** 北京自然科学基金项目(J210019)、国家重点研发计划项目(2023YFD1400902)

**Fund:** Supported by the Beijing Natural Science Foundation (J210019), and the National Key Research and Development Program of China (2023YFD1400902)

**\*通信作者:** 韩丽君, 博士, 教授, 主要研究方向为农药分析与残留分析。E-mail: hanlijun2000@163.com

**\*Corresponding author:** HAN Li-Jun, Ph.D Professor, College of Science, China Agricultural University, No.2, Yuanmingyuan West Road, Haidian District, Beijing 100193, China. E-mail: hanlijun2000@163.com

**KEY WORDS:** chitosan; preservation; antibacterial; fruits and vegetables

## 0 引言

水果和蔬菜是平衡膳食的重要组成部分, 包含人体生命活动所必需的维生素、糖类、矿物质、膳食纤维等<sup>[1]</sup>。根据中国居民膳食结构金字塔, 蔬菜每日推荐摄入量为 300~500 g, 水果为 200~350 g, 占总膳食推荐量的 30%~40%。然而, 大部分水果和蔬菜具有较高含水量, 采后呼吸代谢旺盛, 易腐烂变质, 从而导致品质劣变、商品价值降低<sup>[2]</sup>。我国是世界上最大的水果和蔬菜生产和消费国, 每年由于不当的保鲜和贮藏技术造成的损耗率高达 20%~30%, 而发达国家的损耗率不到 5%<sup>[3]</sup>。近年来, 随着人们健康意识的提升以及对即食和鲜切食品需求的不断增加, 对果蔬采后保鲜技术提出了更高的要求。传统化学保鲜剂如防腐剂、杀菌剂的使用不可避免会造成一定的化学残留或者环境污染, 因此需要探索一种更加安全、环保的保鲜技术, 以满足消费者新的消费需求和环境可持续发展的要求。

壳聚糖(chitosan)又称为几丁聚糖或脱乙酰甲壳素, 具有良好的抑菌性、生物相容性和生物可降解性, 在农业、食品、医药、化工等领域均有应用。壳聚糖用于食品中被认为是安全、无毒的, 其生物安全性已经通过相关动物饲喂实验得到证实<sup>[4]</sup>。壳聚糖具有很好成膜特性, 其通透性和阻水性可以对各种气体分子增加穿透阻力, 使膜内外形成一种微气调环境, 降低果蔬的呼吸作用。此外, 壳聚糖作为自然界中唯一的碱性氨基多糖, 在酸性条件下溶解后特殊的阳离子特性使其成为天然的抗菌材料, 基于壳聚糖的保鲜材料在制备可食用涂层/薄膜以及防水防油食品包装纸中有广泛的应用<sup>[5]</sup>。由壳聚糖制成的可食用涂层或薄膜是用于水果、蔬菜等农产品防腐保鲜的有效手段<sup>[6]</sup>。

目前, 壳聚糖的食品防腐保鲜功能和安全性已经得到多个国家的认可, 加拿大政府批准使用来自白蘑菇(*Agaricus bisporus*)的壳聚糖作为食品防腐剂<sup>[7]</sup>; 美国食品药品监督管理局(Food and Drug Administration, FDA)认证壳聚糖是一般认为安全(generally recognized as safe, GRAS)的抗菌剂, 美国环境保护署(Environmental Protection Agency, EPA)将其列入最低风险农药活性成分清单中<sup>[8]</sup>; 我国在 GB 2763—2021《食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量》标准中也将壳聚糖(几丁聚糖)列入最低风险农药豁免清单。近年来, 关于壳聚糖涂层/膜用于保鲜中的研究不断增加, 卢嘉敏<sup>[9]</sup>对包括壳聚糖在内的多种绿色可降解食品保鲜

材料研究进展进行了综述。王安杏等<sup>[10]</sup>总结了壳聚糖分别与多糖、蛋白质、脂质等生物聚合物用于果蔬的特点。果蔬的品质是采后保鲜研究的重点, 目前关于壳聚糖保鲜对果蔬品质的影响尤其是风味品质缺少全面的综述, 本文主要总结了壳聚糖及其复合膜对果蔬品质影响的研究进展, 从外观品质、营养品质及风味角度讨论壳聚糖对果蔬保鲜的影响, 同时讨论了壳聚糖基涂层/膜的制备方法以及对应的优缺点, 并对壳聚糖的抗菌活性和抗氧化作用机制研究进行了详细论述, 以期为其未来发展和应用提供新的思路和见解。

## 1 壳聚糖基涂层/膜的制备方法、组成及特点

### 1.1 壳聚糖的起源、结构和性质

壳聚糖是由甲壳素通过水解或特定的方式脱乙酰化 70%以上形成的产物, 来源丰富, 是自然界中含量仅次于纤维素的第二大多糖, 甲壳类动物(如螃蟹、龙虾和虾)的外骨骼是壳聚糖工业生产原料的主要来源<sup>[11]</sup>。壳聚糖分子中含有大量游离的羟基和氨基(图 1), 只能溶于大多数稀酸如盐酸、醋酸等溶液(pH<6.5)在酸性条件下, 壳聚糖中的氨基质子化后带正电荷, 从而使其具有阳离子性质, 能够与带负电荷的细菌等微生物或其他聚合物材料相互作用<sup>[12]</sup>。

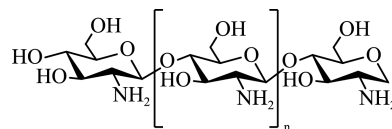


图1 壳聚糖的分子结构

Fig.1 Molecular structural of chitosan

### 1.2 壳聚糖基涂层/膜的制备

壳聚糖作为一种优良的成膜材料, 基于壳聚糖的可食性包装材料的制备主要包括两种类型: (1)涂膜保鲜, 将壳聚糖溶液通过喷涂、浸泡的方式直接在果蔬表面形成壳聚糖涂层; (2)预先将壳聚糖在成膜基底上制备成薄膜后, 再用于果蔬包装保鲜。制备壳聚糖可食用涂层和薄膜的主要方法有: 直接涂布法、溶液浇铸法、熔融挤出法和逐层自组合法, 这几种不同制备方法的优缺点列于表 1。

#### 1.2.1 直接涂布法

直接涂布法是将壳聚糖溶液通过浸渍、喷涂、涂刷、淘洗和干燥等工序直接涂覆或喷洒在食品表面上形成薄膜的过程。具体包括以下步骤: (1)制备壳聚糖溶液, 以达到预设浓度; (2)按照预先设计的时间将样品浸入或浸泡在溶液中, 根据食品表面与壳聚糖的黏附性以及溶液的浓度浸泡

表 1 壳聚糖基涂层/膜主要制备方法的优缺点比较  
Table 1 Comparison the advantages and disadvantages of major preparation methods for chitosan based coatings/films

| 制备方法   | 优点                        | 缺点                        | 文献   |
|--------|---------------------------|---------------------------|------|
| 直接涂布法  | 操作简单、便捷, 生产成本低            | 易受薄膜附着力影响, 成膜的结构、质量不稳定    | [13] |
| 溶液浇铸法  | 无需复杂的设备, 工艺简单经济, 制备的膜厚度可控 | 无法控制溶剂蒸发过程, 残留溶剂可能会存在安全问题 | [14] |
| 熔融挤出法  | 生产效率高, 速度快, 膜的性能、厚度均匀性良好  | 需要专业的设备和技术人员, 生产成本较高      | [15] |
| 逐层自组装法 | 制备工艺相对简单, 对设备和空间的要求较低     | 多层组装过程耗时久, 膜的物理稳定性较差      | [16] |

适当时间, 通常为 30 s~30 min; (3)取出食品, 将附着在食品表面的多余溶液排干, 在特定的气流环境下进行干燥, 然后进行包装储存。经过涂膜和干燥步骤后, 食品表面会形成一层薄薄的薄膜起到保护作用。与其他涂层方法相比, 直接涂布法具有操作简单、便捷等优点, 在食品保鲜中得到了广泛的应用<sup>[13]</sup>。涂布法也可以与其他技术结合, 以改善其成膜性能, 例如, GUO 等<sup>[17]</sup>通过高压均质处理将壳聚糖与其他成膜成分混合, 使得成膜液中各组分具有更小的粒径和更均匀的分布, 生产出更薄的壳聚糖薄膜。

1.2.2 溶液浇铸法

溶液浇铸法常用于将两种或多种聚合物混合在一起以获得更好的交联效果<sup>[18]</sup>。在溶液浇铸法中, 需要先使用适当的溶剂(如乙酸)来溶解壳聚糖, 然后加入其他聚合物和增塑剂, 如甘油和山梨醇, 以提高膜的机械性能, 经过不断搅拌以形成均匀稳定的分散体系, 最后将溶液倒在干净的平面上使溶剂蒸发、干燥, 在特定温湿度的干燥器中储存。该方法由于操作简便和经济而受到欢迎, 其主要缺点是无法控制溶剂蒸发过程, 最终用于食品包装薄膜中的残留溶剂可能会引起食品安全问题<sup>[14]</sup>。

1.2.3 熔融挤出法

熔融挤出法是制备生物活性食品包装材料的常用方法之一。熔融挤出法的基本过程是将壳聚糖、增塑剂等原料在挤出机内被混合加热到熔点以上, 不断搅拌变成均匀的熔融状态, 然后通过机头挤出成膜。相比于溶液浇铸法, 熔融挤出法的工艺快速简单且不使用潜在的有害溶剂, 可以很容易地扩大规模, 常用于在实际工业生产中<sup>[15]</sup>。熔融挤出法的生产过程主要在挤出器内进行, 挤出器分为单螺旋挤出器和双螺旋挤出器, 在实际生产中可以根据聚合物性质对进样方式和挤出工艺调整优化, 是高性价比的工业生产方法。例如, MATET 等<sup>[19]</sup>通过将双螺杆挤出机连接到单螺杆挤出机并联进样, 改良了挤出工艺中各材料的进样和混合方法, 减少了混合时间和壳聚糖的热降解, 制备的壳聚糖/茂金属聚乙烯共混膜具有更好的机械性能和光学性能。

1.2.4 逐层自组装法

逐层自组装 (layer-by-layer, LbL) 技术是由 DECHER<sup>[20]</sup>1997 年提出的用在固体载体上制造多组分薄

膜的方法。LBL 技术是通过将基材交替置于带有相反电荷的溶液中, 通过静电作用使溶液中的阴离子和阳离子吸附、沉积在基材表面, 根据需要重复该过程。由于壳聚糖是一种阳离子生物聚合物, LBL 技术可以用于制备壳聚糖和带负电荷的聚合物的复合膜。这种方法对设备和空间的要求较低, 通过 LBL 技术生产的膜, 其每一层可以由具有不同功能的聚合物制备而成, 为最终的薄膜提供了各组分的优点, 还能提高复合薄膜的化学稳定性<sup>[16]</sup>。

1.3 壳聚糖基涂层/膜的组成及特点

基于壳聚糖的保鲜涂层/膜已经在多种水果和蔬菜的保鲜中有了广泛的研究和应用。单独使用壳聚糖制成的薄膜耐水性和机械性能较差, 通过在壳聚糖中掺入适量其他生物活性物质, 可用于改善膜的各种性能<sup>[21]</sup>。表 2 列出了近年来壳聚糖涂层/膜在水果和蔬菜保鲜方面的应用研究报道。研究表明, 壳聚糖和多糖、蛋白质等聚合物(如海藻酸盐、明胶等)结合使用, 可以通过氢键和静电作用形成复合材料, 这些生物聚合物具有可生物降解、使用安全的优点, 分子中含有较多的活性基团, 可以提升复合膜各组分间的相互作用以及相容性, 但是对膜的力学性能提升不大<sup>[49]</sup>。壳聚糖与脂质类物质复合成膜可用于增强薄膜的功能特性, 扩大其潜在应用可行性。植物来源的脂质如肉桂精油、百里香精油、柠檬精油等, 这些精油大多数都具有抗氧化和抗菌的性能, 且精油具有疏水性, 在壳聚糖中掺入适当比例的精油有助于提高薄膜的耐水性、稳定性和抗菌抗氧化能力<sup>[49-51]</sup>。此外, 壳聚糖和其他功能性组分如纳米 TiO<sub>2</sub>、MOFs 材料等复合使用, 可以有效提升膜的拉伸、阻隔性能, 也是目前壳聚糖果蔬保鲜或包装材料研究和应用的热点之一<sup>[43-44]</sup>, 但是与壳聚糖复合使用的纳米和金属材料对食品的安全性影响应得到重视。

2 壳聚糖基涂层/膜对果蔬外观品质的影响

果蔬的外观品质是判断果蔬新鲜与否的重要标准, 决定着消费者的购买意愿。果蔬贮藏与保鲜过程中由于旺盛的呼吸作用以及其他生理活动, 导致其品质劣变和商品价值降低。目前文献表明, 壳聚糖保鲜涂膜对果蔬外观品质

表 2 基于壳聚糖涂层/膜在果蔬保鲜中的应用  
Table 2 Application of chitosan-based coatings/films on fruits and vegetables preservation.

| 涂膜材料     | 涂膜形式 | 主要组成                         | 应用   | 保鲜效果                                                                    | 参考文献 |
|----------|------|------------------------------|------|-------------------------------------------------------------------------|------|
| 壳聚糖      | 涂层   | 壳聚糖                          | 葡萄   | 提高抗氧化能力, 保持了更高的类黄酮和总酚含量, 维持果实硬度                                         | [22] |
|          | 涂层   | 壳聚糖                          | 番荔枝  | 推迟果实出现呼吸跃变时间, 保持水分和降低腐烂率                                                | [23] |
|          | 涂层   | 壳聚糖                          | 李子   | 降低呼吸和乙烯释放速率, 阻碍花青素合成, 推迟转色                                              | [24] |
| 壳聚糖-多糖   | 涂层   | 海藻酸盐                         | 蓝莓   | 显著抑制细菌和酵母菌/霉菌的生长, 腐烂率降低 50%以上, 增强抗氧化性能, 保持果实硬度, 延缓异味发生                  | [25] |
|          | 涂层   | 海藻酸盐                         | 甜樱桃  | 贮藏 8 d 后, 抗氧化活性保留了 75%以上                                                | [26] |
|          | 涂层   | 普鲁兰                          | 木瓜   | 降低了失重、软化、颜色和 pH 变化, 延缓了可滴定酸和维生素 C 的下降, 维持了呼吸速率和可溶性固形物含量, 保留了木瓜的风味和整体接受度 | [27] |
| 壳聚糖-蛋白质  | 涂层   | 辣木叶提取物、羧甲基纤维素                | 鳄梨   | 更低的质量损失、电导率、呼吸速率、多酚氧化酶活性, 减少脂质过氧化                                       | [28] |
|          | 涂层   | 大豆蛋白                         | 苹果   | 减少体重损失、维生素 C 含量下降                                                       | [29] |
|          | 涂层   | 明胶                           | 南国梨  | 保鲜期可延长至 20 d 左右                                                         | [30] |
|          |      | 鱼胶                           | 鲜切苹果 | 抑制微生物生长, 减少颜色褐变, 维持硬度                                                   | [31] |
|          | 涂层   | 干酪素                          | 香蕉   | 抑制革兰氏阴性菌生长                                                              | [32] |
|          | 涂层   | 田刺芹精油、肉桂精油                   | 甜樱桃  | 果实表面的微生物数量显著减少                                                          | [33] |
|          | 涂层   | 百里香精油                        | 甜椒   | 抑制真菌和酵母菌数量                                                              | [34] |
|          | 涂层   | 大蒜精油                         | 辣椒   | 提高感官品质, 抑制细菌生长, 延长贮藏期                                                   | [35] |
| 壳聚糖-脂质   | 涂层   | 巴西棕榈精油、牛至精油                  | 黄瓜   | 减少水分损失和微生物腐烂                                                            | [36] |
|          | 薄膜   | 紫苏精油                         | 雪莲果  | 维持果实感官品质, 延长货架期                                                         | [37] |
|          | 涂层   | 藜麦蛋白、柑橘精油                    | 圣女果  | 有效降低圣女果在贮藏期间的腐烂率, 延长保鲜期                                                 | [38] |
|          | 涂层   | 肉桂精油                         | 芒果   | 抑制芒果炭疽菌生长, 提高果实抗氧化能力                                                    | [39] |
|          | 涂层   | 柠檬精油                         | 生菜   | 更好保留叶绿素、类胡萝卜素和酚类化合物的含量                                                  | [40] |
|          | 涂层   | 漆蜡                           | 猕猴桃  | 体重减轻、成熟缓慢、呼吸频率降低、硬度、有机酸和抗氧化活性下降速度变慢                                     | [41] |
|          | 薄膜   | 连翘精油                         | 草莓   | 延缓可滴定酸、可溶性固形物、维生素 C 含量降低, 降低腐烂率、失重率                                     | [42] |
|          | 涂层   | 纳米 TiO <sub>2</sub>          | 黄瓜   | 增加了黄瓜中的果胶含量, 保持硬度                                                       | [43] |
| 壳聚糖-其他材料 | 薄膜   | MOFs 材料 ZIF-8、姜黄素、CS 和玉米醇溶蛋白 | 荔枝   | 对引起果实腐烂的大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和霉菌有优异的抗菌活性, 显著延长了荔枝果实的保质期                          | [44] |
|          | 涂层   | 水杨酸                          | 豆芽   | 保留了总酚物质和维生素 C 含量, 提高了抗氧化活性和抗氧化酶活性                                       | [45] |
|          | 涂层   | 肉桂精油、纤维素纳米晶                  | 山楂   | 减少水分和可滴定酸、维生素 C 等的损失                                                    | [46] |
|          | 薄膜   | 明胶、乳链球菌、玉米淀粉                 | 樱桃番茄 | 量减轻和细菌总数减少, 硬度更高, 颜色更好                                                  | [47] |
|          | 薄膜   | 肉桂醛、单宁酸纳米乳液                  | 蘑菇   | 相比聚乙烯膜, 保质期延长了 4 d 以上                                                   | [48] |

的影响主要包括重量损失、硬度、腐烂率3个方面。

### 2.1 重量损失

果蔬采后由于营养消耗和水分蒸腾作用会导致重量损失,其中蒸腾作用占采后总重量损失的65%~95%<sup>[52]</sup>。蒸腾作用还会导致果蔬表皮失水皱缩,影响其感官品质,从而缩短果蔬保鲜期。尤其是在草莓<sup>[42]</sup>、苹果<sup>[29]</sup>等果皮较薄的水果上,壳聚糖保鲜涂层已被证明可以降低气孔的蒸腾速率,从而降低果实采后的失重率<sup>[44]</sup>。壳聚糖减少果蔬重量损失的作用机制是壳聚糖涂层在水果表面形成阻隔层充当气体和水蒸气的屏障,限制膜内外物质交换,减慢了呼吸速率造成的营养物质和水分消耗<sup>[53]</sup>。单独使用壳聚糖制备的涂层其水蒸气阻隔性能较差,在壳聚糖涂层中掺入其他的活性物质,是改善其保水透气性能的有效方法。例如,将疏水性精油掺入壳聚糖涂层中可显著提高水蒸气阻隔性能,在减少葡萄和橙子贮藏过程中的重量损失方面表现出良好的保鲜效果<sup>[23-24]</sup>。与之类似,含有肉桂精油的壳聚糖涂层处理降低了黄瓜的呼吸速率,并将黄瓜的失重率降低了29%<sup>[54]</sup>。

### 2.2 硬度

水果和蔬菜的硬度对其采后寿命有重大影响,目前许多研究都表明,壳聚糖涂膜能有效维持果蔬的硬度<sup>[22,26,41]</sup>,从而延长其货架期。果蔬软化主要是由细胞壁中的多糖组分降解和结构变化造成的,影响果蔬硬度的主要因素是细胞壁和生物膜结构<sup>[52]</sup>。例如,SUN等<sup>[55]</sup>研究了壳聚糖/百里香精油涂膜对蓝莓果实软化的影响,结果发现,与对照组相比,涂膜处理组降低了聚半乳糖醛酸酶(polygalacturonase, PG)、果胶甲酯酶(pectin methylesterase, PME)等的活性,抑制了细胞壁中多糖的降解,从而延缓了蓝莓的软化过程。CARVALHO等<sup>[56]</sup>在显微镜下观察了壳聚糖涂膜处理后的甜瓜细胞壁,发现涂膜后甜瓜细胞壁的结构更完整,且由于细胞脱水导致的褶皱更少,说明壳聚糖涂层可以通过减少细胞失水和维持细胞壁结构的完整性来保持甜瓜硬度。

### 2.3 腐烂率

细菌、酵母菌和霉菌引起的微生物污染是导致果蔬腐烂的主要原因。壳聚糖对多种微生物有广泛的抗菌活性,许多研究都表明壳聚糖能有效抑制果蔬贮藏过程中的微生物生长<sup>[23,32]</sup>,从而有效延长果蔬的保质期。例如,SHYU等<sup>[31]</sup>使用1.5%的壳聚糖处理鲜切苹果并在22℃下储存5d,苹果片中总需氧菌、酵母菌、霉菌和大肠杆菌的数量均比对照组少,有壳聚糖涂膜的苹果片的保质期可从4d延长到12d。另有研究表明,在草莓收获前对植株喷施壳聚糖,也能明显降低采后草莓果实中灰霉病菌的感染率,在抑制草莓灰霉病方面表现出良好的效果<sup>[57]</sup>。此外,壳聚糖和一些抗菌材料如精油、氧化锌、氧化银和氧化镁等制备的复合材料被认为可以提高膜的抗菌性能,已被应用于甜樱桃<sup>[33]</sup>、黄瓜<sup>[36]</sup>、

圣女果<sup>[38]</sup>、鲜食葡萄<sup>[58]</sup>、木瓜<sup>[59]</sup>和青椒<sup>[34]</sup>等多种果蔬的防腐保鲜中。

## 3 壳聚糖基涂层/膜对果蔬中营养物质的影响

果蔬中含有丰富的营养成分,在采后代谢过程中营养物质会不断损失,对品质造成影响。根据文献研究,壳聚糖覆膜保鲜对果蔬中可溶性固形物含量(total soluble solid, TSS)、维生素C、酚类等营养物质以及一些有益次级代谢产物的含量均有一定的影响。

TSS是指食品中所有可以溶于水的固体物质,如糖、酸、维生素和矿物质等。TSS含量是判断水果和蔬菜成熟度和采收期的重要标准。在果蔬成熟过程中,淀粉和有机酸会随着代谢过程不断转化为糖,TSS含量随之逐渐增加并达到最大值,若继续贮藏,糖类等有机物由于呼吸作用被分解消耗,TSS含量不断下降。目前壳聚糖被证明可以有效延缓木瓜<sup>[32]</sup>、草莓<sup>[42]</sup>等采后贮藏过程中TSS含量的下降速率。对于呼吸跃变型水果,通常在没有完全成熟的时候采收,因此在采后贮藏中果实会有后熟的过程,TSS含量会先增加再减少,例如,YIN等<sup>[60]</sup>制备由壳聚糖、海藻酸盐涂层和肉桂精油微胶囊的多层涂层用于芒果的采后保鲜,与未涂膜的果实相比,涂膜推迟了果实的呼吸峰值和后熟过程,从而导致TSS含量的增加较慢,在后续贮藏过程中延缓了TSS的消耗,维持了果实中的TSS含量。其机制是壳聚糖涂层限制了CO<sub>2</sub>和O<sub>2</sub>的交换,从而降低了呼吸速率和代谢活动,使得果实中有机物转化为TSS和后期TSS的消耗速度较慢,延缓了芒果的采后成熟与衰老。

维生素C是果蔬中的重要营养物质,其含量在果蔬贮藏过程中由于被氧化会不断降低,壳聚糖涂层的抗氧化能力可以有效维持果蔬采后维生素C的含量<sup>[32,61-62]</sup>。例如,ZHANG等<sup>[27]</sup>研究发现,壳聚糖和普鲁兰多层涂膜延缓了维生素C的氧化过程,贮藏14d后,四层涂膜处理的木瓜果实中维生素C的含量明显高于对照组,其含量分别为26.17 mg/kg和15.06 mg/kg。

酚类化合物是一类具有丰富生物活性的营养物质,不仅影响果蔬的色泽发育、风味品质,酚类物质所具有的抗氧化能力,还具有促进人体健康的功能。总酚含量是指植物中所有酚类物质的总和,通常以没食子酸当量(gallic acid equivalents, GAE)表示。例如,ALVAREZ等<sup>[25]</sup>用壳聚糖和海藻酸钠对蓝莓果实涂膜保鲜,处理过的蓝莓中总酚含量下降速度明显低于清水处理组;同样的,KHALIFA等<sup>[63]</sup>使用2%壳聚糖-橄榄叶提取物处理的苹果在35d贮藏后总酚含量为1.24 mg GAE/g,而未包衣的果实中总酚含量仅为0.28 mg GAE/g。

类黄酮类物质是果蔬中广泛存在的多酚类化合物。AL-QURASHI等<sup>[22]</sup>研究了不同浓度壳聚糖(1%、1.5%和2%)对鲜食葡萄贮藏30d后品质的影响,与对照组相比,

壳聚糖处理后的葡萄中有更高含量的总酚和总类黄酮,尤其是低浓度(1%)的壳聚糖对总酚和总类黄酮含量的保持效果最好。花青素是一种天然植物色素,属于类黄酮类化合物,是浆果类水果中的主要营养成分。花青素在植物中起着多种功能,包括吸引昆虫传粉、清除自由基以及抵抗病原体。OLIVEIRA 等<sup>[64]</sup>使用壳聚糖和海藻糖复合的可食用涂层,发现复合涂层可以作为保护性化合物,维持了草莓和蓝莓中的花青素类物质(矢车菊素 3-*O*-葡萄糖苷和锦葵素-3-*O*-葡萄糖苷)的稳定。AL-QURASHI 等<sup>[22]</sup>在测定了壳聚糖处理后李子中花青素含量的变化,李子中花青素含量随着贮藏期的增加而增加,这是由于成熟度增加导致颜色转变,但是与对照组相比,涂膜后的李子中花青素增加速率较慢,说明壳聚糖涂膜延缓了李子转色和采后成熟过程。

除了营养物质外,果蔬果实中的次级代谢物种类繁多,在采后生理代谢过程中,次级代谢物直接参与植物的生长发育以及抗病防御过程。目前关于壳聚糖覆膜后果蔬中次级代谢物的影响,也有少量研究报道。采用的研究方法主要是利用靶向或非靶向代谢组学,结合高分辨色谱-质谱技术和多元统计分析,分析壳聚糖覆膜处理后果蔬中小分子代谢物的含量变化。例如,RAKPENTHAI 等<sup>[65]</sup>为了探究不同浓度寡壳聚糖 O-80 对白萝卜芽中代谢物的影响,使用液相色谱-四极杆飞行时间串联质谱法(liquid chromatography- quadrupole- time of flight- tandem mass spectrometry, LC-Q-TOF-MS/MS)和液相色谱-串联质谱法(liquid chromatography- tandem mass spectrometry, LC-MS/MS)结合代谢组的研究方法对白萝卜芽的代谢谱进行分析,结果表明,高浓度的 O-80 (20 ppm 和 40 ppm)显著提高了白萝卜芽中硫代葡萄糖苷和酚类物质的含量,也促进了白萝卜芽中其他有益于人体健康的次级代谢物的积累。

#### 4 壳聚糖基涂层/膜对果蔬中挥发性风味物质的影响

植物中的挥发性风味物质包括自由态风味物质和结合态风味物质。结合态风味物质是自由态挥发性风味物质的前体,其本身不具有挥发性,可以通过酶解等特定的条件释放而被感知到。自由态风味物质是人们可以直接感知到的挥发性物质,主要包括酯类、醛类、酮类和醇类物质。不同组成和浓度的自由态风味物质决定了果蔬中成熟时的特征风味。植物中的挥发性风味物质种类很多,一般可采用顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱联用技术,或者气相色谱-高分辨质谱技术,结合多元统计分析方法进行研究。

目前,壳聚糖保鲜对果蔬中挥发性风味物质的影响方面的文献较少。有研究表明,使用壳聚糖保鲜可以有效抑制果蔬贮藏过程中异味的产生,保持风味的新鲜度。CHOO 等<sup>[66]</sup>采用顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱联用技术,研究了壳聚糖-纳他霉素涂层对松露在 0、7、14、21

和 28 d 5 个贮存间隔下的香气特征的影响,发现涂层处理后能有效抑制或延缓松露香气的劣变,减缓样品中贡献“松露”特征气味的物质癸二酸二甲酯的下降,并延缓具有发酵和腐烂气味的 2-戊酮的增加,有效延缓了松露风味的变质。GUTIÉRREZ-GAMBOA 等<sup>[67]</sup>对葡萄植株进行叶面喷施壳聚糖、茉莉酸甲酯和酵母提取物,采用主成分分析法对成熟葡萄加工后的葡萄酒中挥发性物质进行了分析,与对照组相比,壳聚糖处理降低了酯类、苯类化合物和 C<sub>13</sub>-降异戊二烯类物质,增加了 C<sub>6</sub> 类化合物,与茉莉酸甲酯和酵母提取物处理组相比,壳聚糖处理不会降低萜类化合物的总量。

#### 5 壳聚糖的保鲜机制研究

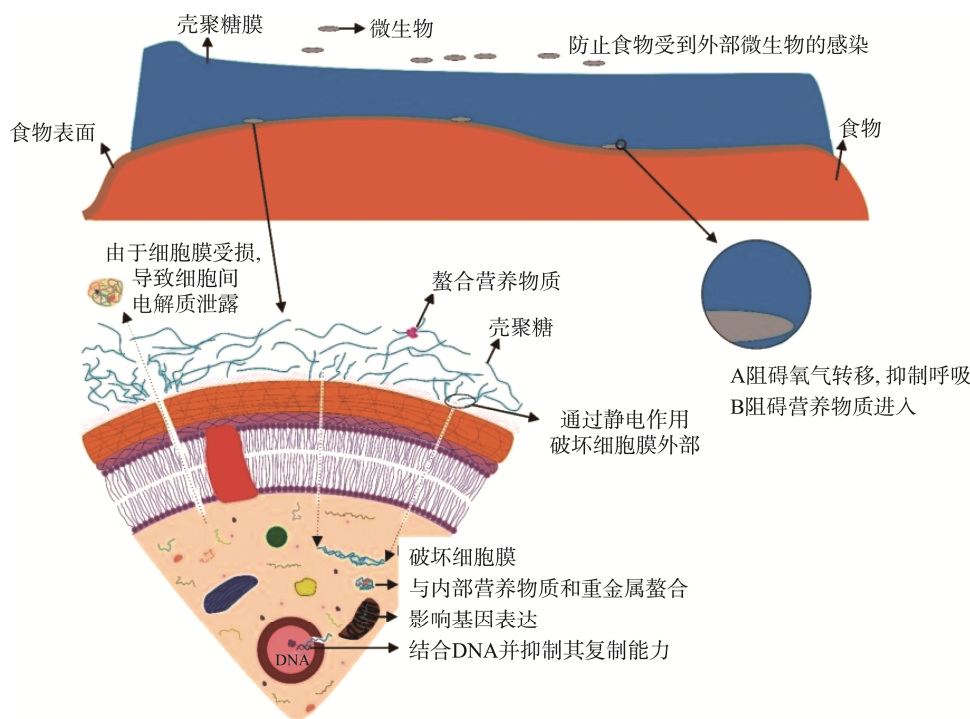
壳聚糖发挥保鲜作用除了通过在果蔬表面形成选择性半透膜,减缓果蔬采后呼吸代谢速率和衰老过程,最主要归功于壳聚糖的抗菌活性和抗氧化能力。目前关于壳聚糖保鲜机制的研究主要有两方面,一方面是抗菌作用机制,另一方面是抗氧化作用机制。

##### 5.1 抗菌作用机制

壳聚糖的抗菌活性主要是由于其含有带正电荷的 NH<sub>3</sub><sup>+</sup>,关于壳聚糖的抗菌作用机制方面,目前有几种不同的观点。一种是以带负电荷的细胞膜为作用靶点的抗菌机制,认为带有 NH<sub>3</sub><sup>+</sup>的壳聚糖可以吸附在微生物表面,与带负电荷的大分子残基相互作用,形成一层高分子膜,阻碍了微生物细胞正常代谢所需营养物质的供应,或者改变了细胞膜的选择通透性,导致细胞质流失,从而起到抗菌作用<sup>[68-70]</sup>;另一种观点是以微生物细胞内 DNA 为作用靶点的抗菌机制,认为壳聚糖进入微生物细胞后,可与带负电荷的细胞质产生絮凝作用,并与 DNA 反应形成稳定的复合物,扰乱了 DNA 聚合酶或 RNA 的合成,从而起到抗菌作用<sup>[71]</sup>;也有人认为两种抗菌机制同时存在(图 2),即壳聚糖在食品表面形成薄膜充当保护层,阻止微生物侵染食品,同时还能作用于细胞膜,阻隔氧气以及营养物质进入细胞内,具体哪种机制优先,则取决于壳聚糖的分子量<sup>[12,68]</sup>,高分子量的壳聚糖难以穿过细胞膜,只能在细胞外发挥抗菌活性,而低分子量的壳聚糖可以进入细胞内,直接作用于微生物的细胞膜、细胞壁或者 DNA,从而抑制微生物生长。

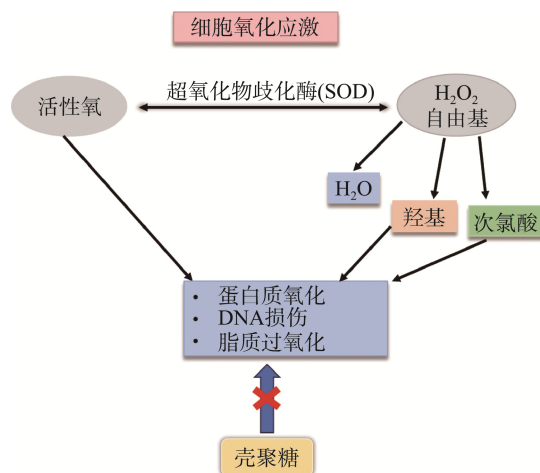
##### 5.2 抗氧化作用机制

目前,多项研究表明,壳聚糖涂膜可以提高果蔬的抗氧化能力,对于防止食品和生物系统中的脂质氧化,发挥其保鲜效果有重要作用<sup>[64]</sup>。关于壳聚糖涂膜提高果蔬抗氧化能力的机制方面,有一些不同的观点。有研究认为,壳聚糖提高果蔬抗氧化活性主要是基于其 C2 上连接的羟基和氨基,这些官能团中的氢或孤对电子可以清除自由基,

图2 壳聚糖的抗菌作用机制(修改自WANG等<sup>[68]</sup>)Fig.2 Schematic representation of antibacterial mechanism of chitosan<sup>[68]</sup>

氧和氮中的孤对电子可以充当配体, 螯合金属离子, 形成壳聚糖-金属离子络合物<sup>[72]</sup>。还有研究认为壳聚糖可以诱导分子与膜受体相互作用, 触发宿主的防御体系, 增加自身的抗氧化活性, 并抑制一系列病原真菌的生长<sup>[73]</sup>。壳聚糖的脱乙酰度(degree of deacetylation, DDA)和分子量(molecularweight, MW)被认为是影响壳聚糖抗氧化活性的关键因素<sup>[12]</sup>。壳聚糖的抗氧化作用机制如图3。目前文献中的研究表明, 壳聚糖的脱乙酰度越高, 壳聚糖氨基质子化后的正电荷越多, 其氧化活性越强, 但是关于分子量对壳聚糖抗菌性能的影响尚无统一的说法<sup>[74-76]</sup>。MAHDY 等<sup>[74]</sup>对具有不同 DDA 和 MW 的壳聚糖样品进行了抗氧化活性实验, 结果表明高 DDA 和低 MW 的壳聚糖具有较高抗氧化活性。BAKAR 等<sup>[75]</sup>采用 DPPH 自由基清除测定法测试了低分子量(50~190 kDa, 75%~85% DDA)、中分子量(190~310 kDa, 75%~85% DDA)和高分子量(190~310 kDa, 75%~85% DDA)壳聚糖薄膜的抗氧化能力, 发现 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基清除活性没有受壳聚糖分子量的影响( $P>0.05$ ); HAJJI 等<sup>[76]</sup>研究了从不同来源提取得到的壳聚糖, 包括虾废弃物(DDA 为 88%)、螃蟹壳(DDA 为 83%)和墨鱼骨头(DDA 为 95%), 在抗氧化活性测试中, DDA 含量为 95%的墨鱼壳聚糖对 DPPH 自由基的清除作用最高。此外, 壳聚糖的晶体结构和浓度也会对抗氧化能力产生影响。JUNG 等<sup>[77]</sup>研究了壳聚糖的不同结构( $\alpha$ -、 $\beta$ -)、分子量(4~5、22~30、61~79 和 280~300 kDa)

和质量浓度(2、4、6、8、10 mg/mL)对 4 种抗氧化能力(自由基清除活性、金属螯合能力、还原能力和羟基自由基清除活性)的影响, 结果表明, 4 组不同分子量的壳聚糖相比, 22~30 kDa 的  $\alpha$ -壳聚糖和  $\beta$ -壳聚糖的 DPPH 自由基清除活性、还原能力和羟基自由基清除活性均最高, 4~5 kDa 的壳聚糖只有金属螯合能力最高, 此外, 相同的分子量和结构, 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基清除活性随着壳聚糖浓度的增加而增加, 这说明壳聚糖的浓度也会对抗氧化能力有一定影响。

图3 壳聚糖的抗氧化作用机制(修改自RAJOKA等<sup>[12]</sup>)Fig.3 Schematic representation of antioxidant mechanism of chitosan<sup>[12]</sup>

## 6 结束语

壳聚糖作为一种可再生的天然多糖,具有良好的成膜性和抗菌抗氧化能力,已有的大量研究证明基于壳聚糖的抗菌保鲜涂层/膜可以通过抑制微生物的滋生、减少采后腐烂和衰老、减少异味产生和增强抗氧化能力来延长果蔬货架期。此外,使用壳聚糖生物膜保鲜技术在减少化学保鲜剂和塑料包装的使用、减少环境污染方面也发挥了积极的作用。近年来随着壳聚糖保鲜技术的不断深入研究,以壳聚糖为成膜基质,掺入蛋白质、多糖、精油和纳米材料等制成复合涂膜,不仅可以提高壳聚糖膜的溶解性、抗菌能力和机械性能,还能满足不同食品的特定保鲜需求。可见壳聚糖及其复合抗菌保鲜膜在食品保鲜领域将会有大的发展潜力和应用前景。

在壳聚糖抗菌保鲜从实验室阶段向工业化生产过渡的过程中,依旧面临着许多问题和挑战:(1)壳聚糖与其它生物活性物质复合使用时,对于复合材料尤其是金属材料的安全性需要引起重视;(2)壳聚糖涂层/膜技术规模化生产的流程和技术仍面临生产成本高、通用性不足等问题;(3)壳聚糖只能溶于一些稀酸溶液中,限制了其应用。此外,目前关于壳聚糖涂膜保鲜技术主要集中在涂膜组分和保鲜效果的研究,而对涂膜后果蔬的生理生化特征、营养物质及挥发性物质等方面的影响及其作用机制方面,还有待进一步研究和探索。针对以上问题,未来应增强对壳聚糖涂膜各组分用量和安全性的监管,同时不断探索通过掺入其他材料增强壳聚糖成膜性能的可行性,实现壳聚糖基绿色保鲜技术的高效、安全使用。相信随着未来人们不断深入研究,壳聚糖及其复合抗菌保鲜涂膜在果蔬保鲜包装中会有更广阔的应用前景。

## 参考文献

- [1] SEPTEMBRE-MALATERRE A, REMIZE F, POUCHERET P. Fruits and vegetables, as a source of nutritional compounds and phytochemicals: Changes in bioactive compounds during lactic fermentation [J]. *Food Res Int*, 2018, 104: 86–99.
- [2] 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*, 2023, 63(33): 12441–12452.
- [3] 汪旭晖, 张其林. 基于物联网的生鲜农产品冷链物流体系构建: 框架、机理与路径[J]. *南京农业大学学报(社会科学版)*, 2016, 16(1): 31–41, 163.  
WANG XD, ZHANG QL. Construction of cold-chain logistics system for fresh agricultural products based on the internet of things: Framework, mechanism and path [J]. *J Nanjing Agric Univ (Social Sci Ed)*, 2016, 16(1): 31–41, 163.
- [4] XING YG, XU QL, LI XC, *et al.* Chitosan-based coating with antimicrobial agents: Preparation, property, mechanism, and application effectiveness on fruits and vegetables [J]. *Int J Polym Sci*, 2016, 2016: 1–24.
- [5] 朱瑞丰, 龙柱, 覃程荣, 等. 多糖-植物蜡-纳米二氧化硅防水防油包装纸制备与性能[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(4): 2107–2118.  
ZHU RF, LONG Z, QIN CR, *et al.* Preparation and performance of water and oil-resistant packaging paper based on polysaccharide-vegetable wax-nano-SiO<sub>2</sub> [J]. *Acta Mater Compos Sin*, 2023, 40(4): 2107–2118.
- [6] MANZOOR A, DAR AH, PANDEY VK, *et al.* Recent insights into polysaccharide-based hydrogels and their potential applications in food sector: A review [J]. *Int J Biol Macromol*, 2022, 213: 987–1006.
- [7] Health Canada's proposal to enable the use of chitosan from white button mushrooms (*Agaricus bisporus*) as a preservative in various foods [DB/OL]. [2023-11-20]. <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/food-nutrition/public-involvement-partnerships/proposal-enable-use-chitosan-from-white-button-mushrooms.html> [2024-03-13].
- [8] U.S. Environmental Protection Agency. Adds chitosan to the list of active ingredients eligible for minimum risk pesticide exemption [DB/OL]. [2022-11-08]. <https://www.epa.gov/pesticides/epa-adds-chitosan-list-active-ingredients-eligible-minimum-risk-pesticide-exemption> [2024-03-13].
- [9] 卢嘉敏. 绿色可降解食品保鲜材料的研究进展[J]. *包装工程*, 2023, 44(S2): 77–81.  
LU JM. Research progress on green and biodegradable food preservation materials[J]. *Packag Eng*, 2023, 44(S2): 77–81.
- [10] 王安杏, 曹川, 张庆, 等. 壳聚糖复合膜在果蔬保鲜中的应用[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(5): 164–172  
WANG ANX, CAO C, ZHANG Q, *et al.* Application of chitosan composite film in fruits and vegetables preservation [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(5): 164–172
- [11] RAHMAN L, GOSWAMI J. Recent development on physical and biological properties of chitosan-based composite films with natural extracts: A review [J]. *J Bioact Compat Pol*, 2021, 36(3): 225–236.
- [12] RAJOKA MSR, MEHWISH HM, WU YG, *et al.* Chitin/chitosan derivatives and their interactions with microorganisms: A comprehensive review and future perspectives [J]. *Crit Rev Biotechnol*, 2020, 40(3): 365–379.
- [13] MORENO MA, ORQUEDA ME, GÓMEZ-MASCARAQUE LG, *et al.* Crosslinked electrospunzein-based food packaging coatings containing bioactive chilo fruit extracts [J]. *Food Hydrocolloid*, 2019, 95: 496–505.
- [14] WANG BY, YANG C, WANG JM, *et al.* Effects of combined pullulan polysaccharide, glycerol, and trehalose on the mechanical properties and the solubility of casted gelatin-soluble edible membranes [J]. *J Food Process Pres*, 2019, 43(1): e13858.
- [15] LLANOS JHR, TADINI CC, GASTALDI E. New strategies to fabricate starch/chitosan-based composites by extrusion [J]. *J Food Eng*, 2020, 290: 110224.
- [16] HU B, CHEN L, LAN S, *et al.* Layer-by-layer assembly of polysaccharide films with self-healing and antifogging properties for food packaging applications [J]. *ACS Appl Nano Mater*, 2018, 1(7): 3733–3740.
- [17] GUO M, JIN TZ, YADAV MP, *et al.* Antimicrobial property and microstructure of micro-emulsion edible composite films against *Listeria* [J]. *Int J Food Microbiol*, 2015, 208: 58–64.
- [18] LIU Y, WANG S, LAN W. Fabrication of antibacterial chitosan-PVA blended film using electrospray technique for food packaging applications [J]. *Int J Biol Macromol*, 2018, 107: 848–854.
- [19] MATET M, HEUZEY MC, AJJI A, *et al.* Plasticized chitosan/polyolefin films produced by extrusion [J]. *Carbohydr Polym*, 2015, 117: 177–184.
- [20] DECHER G. Fuzzy nanoassemblies: Toward layered polymeric multicomposites [J]. *Science*, 1997, 277(5330): 1232–1237.
- [21] HAGHIGHI H, LICCIARDELLO F, FAVA P, *et al.* Recent advances on

- chitosan-based films for sustainable food packaging applications [J]. Food Packag Shelf, 2020, 26: 100551–100567.
- [22] AL-QURASHI AD, AWAD MA. Postharvest chitosan treatment affects quality, antioxidant capacity, antioxidant compounds and enzymes activities of ‘El-Bayadi’ table grapes after storage [J]. Sci Hort, 2015, 197: 392–398.
- [23] 林晓玲, 黄永平, 黄乙生, 等. 三种涂膜材料对番荔枝采后生理和贮藏品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2023, 23(8): 21–28.  
LIN XL, HUANG YP, HUANG YS, *et al.* Effects of three different coating materials on post-harvest physiology and storage quality of custard apples [J]. Storage Process, 2023, 23(8): 21–28.
- [24] KUMAR P, SETHI S, SHARMA RR, *et al.* Effect of chitosan coating on postharvest life and quality of plum during storage at low temperature [J]. Sci Hort, 2017, 226: 104–109.
- [25] ALVAREZ MV, PONCE AG, MOREIRA MR. Influence of polysaccharide-based edible coatings as carriers of prebiotic fibers on quality attributes of ready-to-eat fresh blueberries [J]. J Sci Food Agric, 2018, 98(7): 2587–2597.
- [26] ZAM W. Effect of alginate and chitosan edible coating enriched with olive leaves extract on the shelf life of sweet cherries (*Prunus avium* L.) [J]. J Food Qual, 2019, 2019: 8192964.
- [27] ZHANG L, HUANG C, ZHAO H. Application of pullulan and chitosan multilayer coatings in fresh papayas [J]. Coatings, 2019, 9(11): 745.
- [28] TESFAY SZ, MAGWAZA LS, MBILI N, *et al.* Carboxyl methylcellulose (CMC) containing moringa plant extracts as new postharvest organic edible coating for avocado (*Persea americana* Mill.) fruit [J]. Sci Hort, 2017, 226: 201–207.
- [29] WU T, DAI S, CONG X, *et al.* Succinylated soy protein film coating extended the shelf life of apple fruit [J]. J Food Process Pres, 2017, 41(4): e13024.
- [30] 孟令伟, 王洪江, 刘伟, 等. 壳聚糖-明胶复合涂膜处理对南果梨保鲜效果的研究[J]. 农产品加工, 2018, (17): 1–3, 9.  
MENG LW, WANG HJ, LIU W, *et al.* Study on the effect of chitosan-gelatin composite coating on the preservation of nanguo pear [J]. Farm Prod Process, 2018, (17): 1–3, 9.
- [31] SHYU YS, CHEN GW, CHIANG SC, *et al.* Effect of chitosan and fish gelatin coatings on preventing the deterioration and preserving the quality of fresh-cut apples [J]. Molecules, 2019, 24(10): 2008.
- [32] NGUYEN TT, THI UTD, BUI QTP, *et al.* Enhanced antimicrobial activities and physiochemical properties of edible film based on chitosan incorporated with *Sonneratiacaseolaris* (L.) Engl. leaf extract [J]. Prog Org Coat, 2020, 140: 105487.
- [33] ARABPOOR B, YOUSEFI S, WEISANY W, *et al.* Multifunctional coating composed of *Eryngium campestre* L. essential oil encapsulated in nano-chitosan to prolong the shelf-life of fresh cherry fruits [J]. Food Hydrocolloid, 2021, 111: 106394.
- [34] CORREA-PACHECO ZN, BAUTISTA-BANOS S, CORONA-RANGEL ML, *et al.* Effect of chitosan-based natural products nanocoatings on green bell peppers during storage [J]. Food Bioprocess Technol, 2023, 16(8): 1703–1715.
- [35] KUSUMANINGSIH T, ISTIQOMAH A, FIRDAUS M, *et al.* A green metrics approach toward antibacterial chitosan/starch-based films reinforced with garlic oil for extending the shelf-life of *Capsicum annum* [J]. Int J Food Sci Technol, 2023, 58(10): 5311–5318.
- [36] 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.
- [37] 唐森, 李孟玲, 陈显玲, 等. 紫苏精油壳聚糖复合膜的制备及其对鲜切雪莲果的保鲜效果研究[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(9): 61–65, 83.  
TANG S, LI ML, CHEN XL, *et al.* Preparation of perilla essential oil chitosan composite film and its preservation effect on fresh-cut yacon [J]. Cereals Oils, 2023, 36(9): 61–65, 83.
- [38] 刘敏, 张岚, 王丹, 等. 壳聚糖/藜麦蛋白/柑橘精油复合膜对圣女果保鲜效果的影响[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(8): 230–237.  
LIU M, ZHANG L, WANG D, *et al.* Effects of chitosan/quinoa protein/citrus essential oil composite film on the preservation of cherry tomatoes [J]. China Food Addit, 2023, 34(8): 230–237.
- [39] 方静, 谷会, 李蕊, 等. 肉桂精油复合壳聚糖处理对采后杧果的保鲜效果[J]. 中国南方果树, 2023, 52(6): 97–103.  
FANG J, GU H, LI R, *et al.* Effect of chitosan treatment with cinnamon essential oil on the preservation of postharvest freshness of volunteers’ fruits [J]. South China Fruits, 2023, 52(6): 97–103.
- [40] COFELICE M, IFTIKHAR A, LOPEZ F, *et al.* Effect of edible coatings on quality parameters and phenol composition of ready-to-eat *Salanova* lettuce [J]. Eur Food Res Technol, 2023, 250: 691–700.
- [41] HU HL, ZHOU HS, LI PX. Lacquer wax coating improves the sensory and quality attributes of kiwifruit during ambient storage [J]. Sci Hort, 2019, 244: 31–41.
- [42] 唐森, 付美杨, 韦巧艳, 等. 壳聚糖-连翘精油复合可食膜的制备及其在草莓中保鲜应用[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(21): 98–105.  
TANG S, FU MY, WEI QY, *et al.* Preparation of chitosan-forsythia suspensa essential oil composite edible film and the application in strawberry preservation [J]. Food Res Dev, 2023, 44(21): 98–105.
- [43] SAMI R, KHOJAH E, HELAL M, *et al.* Effects of coating by chitosan, TiO<sub>2</sub> nanoparticles, and sodium tripolyphosphate as crosslinker on stored cucumber fruits [J]. J Biobased Mater Bio, 2021, 15(5): 598–605.
- [44] GENG C, LIU X, MA J, *et al.* High strength, controlled release of curcumin-loaded ZIF-8/chitosan/zein film with excellence gas barrier and antibacterial activity for litchi preservation [J]. Carbohydr Polym, 2023, 306: 120612.
- [45] SUPAPVANICH S, ANAN W, CHIMSONTHORN V. Efficiency of combinative salicylic acid and chitosan preharvest-treatment on antioxidant and phytochemicals of ready to eat daikon sprouts during storage [J]. Food Chem, 2019, 284: 8–15.
- [46] 李娜, 张海锋, 曹金锋, 等. 纤维素纳米晶-肉桂精油-壳聚糖复合涂膜制备及其对黄山楂金如意的保鲜效果[J]. 果树学报, 2023, 40(3): 556–565.  
LI N, ZHANG HF, CAO JF, *et al.* Preparation of cellulose nanocrystal cinnamon essential oil chitosan composite coating and its effect on fruit preservation of *Crataegus pinnatifida* Bge. var. major N. E. Br [J]. J Fruit Sci, 2023, 40(3): 556–565.
- [47] CHEN J, ZHANG J, LIU D, *et al.* Preparation, characterization, and application of edible antibacterial three-layer films based on gelatin–chitosan–corn starch–incorporated nisin [J]. Food Packag Shelf, 2022, 34: 100980.
- [48] FU H, HUANG RP, LI JF, *et al.* Multifunctional cinnamaldehyde-tannic acid nano-emulsion/chitosan composite film for mushroom preservation [J]. Food Hydrocoll, 2023, 145: 109111.
- [49] CAZÓN P, VÁZQUEZ M. Mechanical and barrier properties of chitosan combined with other components as food packaging film [J]. Environ Chem Lett, 2020, 18: 257–267.

- [50] CHEN XN, LAN WQ, XIE J. Characterization of active films based on chitosan/polyvinyl alcohol integrated with ginger essential oil-loaded bacterial cellulose and application in sea bass (*Lateolabrax japonicus*) packaging [J]. Food Chem, 2024, 441: 138343.
- [51] KARAMI-ESHKAFTAKI Z, SAEI-DEHKORDI S, ALBADI J, *et al.* Coated composite paper with nano-chitosan/cinnamon essential oil-nanoemulsion containing grafted CNC@ZnO nanohybrid; synthesis, characterization and inhibitory activity on *Escherichia coli* biofilm developed on grey zucchini [J]. Int J Biol Macromol, 2024, 258: 128981.
- [52] CHAVAN P, LATA K, KAUR T, *et al.* Recent advances in the preservation of postharvest fruits using edible films and coatings: A comprehensive review [J]. Food Chem, 2023, 418: 135916.
- [53] KHODAEI D, HAMIDI-ESFAHANI Z, RAHMATI E. Effect of edible coatings on the shelf-life of fresh strawberries: A comparative study using TOPSIS-Shannon entropy method [J]. NFS J, 2021, 23: 17–23.
- [54] MOHAMMADI A, HASHEMI M, HOSSEINI SM. Chitosan nanoparticles loaded with cinnamomum zeylanicum essential oil enhance the shelf life of cucumber during cold storage [J]. Postharvest Biol Technol, 2015, 110: 203–213.
- [55] SUN HY, HAO DQ, TIAN Y, *et al.* Effect of chitosan/thyme oil coating and UV-C on the softening and ripening of postharvest blueberry fruits [J]. Foods, 2022, 11(18): 2795.
- [56] CARVALHO RL, CABRAL MF, GERMANO TA, *et al.* Chitosan coating with *trans*-cinnamaldehyde improves structural integrity and antioxidant metabolism of fresh-cut melon [J]. Postharvest Biol Technol, 2016, 113: 29–39.
- [57] RAJESTARY R, XYLIA P, CHRYSARGYRIS A, *et al.* Preharvest application of commercial products based on chitosan, phosphoric acid plus micronutrients, and orange essential oil on postharvest quality and gray mold infections of strawberry [J]. Int J Mol Sci, 2022, 23(24): 15472.
- [58] 杨桂兰, 陈迎春, 管林生, 等. 壳聚糖对葡萄病害和果实品质影响的研究进展[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2021, 6: 77–83.  
YANG GL, CHEN YC, ZAN LS, *et al.* Research progress on effects of chitosan on grape diseases and fruit quality [J]. Sino-Overseas Grapev Wine, 2021, 6: 77–83.
- [59] DOTTO GL, VIEIRA MLG, PINTO LAA. Use of chitosan solutions for the microbiological shelf life extension of papaya fruits during storage at room temperature [J]. LWT-Food Sci Technol, 2015, 64(1): 126–130.
- [60] YIN C, HUANG C, WANG J, *et al.* Effect of chitosan-and alginate-based coatings enriched with cinnamon essential oil microcapsules to improve the postharvest quality of mangoes [J]. Materials, 2019, 12(13): 2039.
- [61] GUO Q, WU B, PENG X, *et al.* Effects of chlorine dioxide treatment on respiration rate and ethylene synthesis of postharvest tomato fruit [J]. Postharvest Biol Tec, 2014, 93: 9–14.
- [62] LIU Q, LI Y, XING S, *et al.* Genipin-crosslinked amphiphilic chitosan films for the preservation of strawberry [J]. Int J Biol Macromol, 2022, 213: 804–813.
- [63] KHALIFA I, BARAKAT H, EL-MANSY HA, *et al.* Preserving apple (*Malus domestica* var. *Anna*) fruit bioactive substances using olive wastes extract-chitosan film coating [J]. Inf Process Agric, 2017, 4(1): 90–99.
- [64] OLIVEIRA G, TYLEWICZ U, DALLA-ROSA M, *et al.* Effects of pulsed electric field-assisted osmotic dehydration and edible coating on the recovery of anthocyanins from in vitro digested berries [J]. Foods, 2019, 8(10): 505.
- [65] RAKPENTHAI A, KHAKSAR G, BUROW M, *et al.* Metabolic changes and increased levels of bioactive compounds in white radish (*Raphanus sativus* L. cv. 01) sprouts elicited by oligochitosan [J]. Agron J, 2019, 9(8): 467.
- [66] CHOO KSO, BOLLEN M, RAVENSDALE JT, *et al.* Effect of chitosan and gum arabic with natamycin on the aroma profile and bacterial community of Australian grown black perigord truffles (*Tuber melanosporum*) during storage [J]. Food Microbiol, 2021, 97: 103743.
- [67] GUTIÉRREZ-GAMBOA G, PÉREZ-ÁLVAREZ EP, RUBIO-BRETÓN P, *et al.* Changes on grape volatile composition through elicitation with methyl jasmonate, chitosan, and a yeast extract in tempranillo (*Vitis vinifera* L.) grapevines [J]. Sci Hortic, 2019, 244: 257–262.
- [68] WANG H, QIAN J, DING F. Emerging chitosan-based films for food packaging applications [J]. J Agric Food Chem, 2018, 66(2): 395–413.
- [69] LI S, HAN D, ZHANG Y, *et al.* Activation of AMPK prevents monocrotaline induced extracellular matrix remodeling of pulmonary artery [J]. Med Sci Monit Basic Res, 2016, 22: 27–33.
- [70] LI JH, ZHUANG SL. Antibacterial activity of chitosan and its derivatives and their interaction mechanism with bacteria: Current state and perspectives [J]. 2020.
- [71] MÁRQUEZ GI, AKUAKU J, CRUZ I, *et al.* Disruption of protein synthesis as antifungal mode of action by chitosan [J]. Int J Food Microbiol, 2013, 164(1): 108–112.
- [72] ARANAZ I, ALCÁNTARA AR, CIVERA MC, *et al.* Chitosan: An overview of its properties and applications [J]. Polym, 2021, 13(19): 3256.
- [73] LÓPEZ-ZAZUETA BA, AYÓN-REYNA LE, GUTIÉRREZ-DORADO R, *et al.* Effect of chitosan with different molecular weights on the antifungal activity against colletotrichum gloeosporioides and activation of the non-enzymatic antioxidant system on infected papaya [J]. J Food Sci, 2023, 88(5): 1979–1993.
- [74] MAHDY S, EL-KALYUBI MH, KHALAF, *et al.* Physicochemical, functional, antioxidant and antibacterial properties of chitosan extracted from shrimp wastes by microwave technique [J]. Ann Agric Sci, 2013, 58(1): 33–41.
- [75] BAKAR B, PEKDEMIR SS, BIRHANLI E, *et al.* Unveiling the effect of molecular weight of vanillic acid grafted chitosan hydrogel films on physical, antioxidant, and antimicrobial properties for application in food packaging [J]. Int J Biol Macromol, 2024, 256(1): 128397.
- [76] HAJJI S, YOUNES I, RINAUDO M, *et al.* Characterization and *in vitro* evaluation of cytotoxicity, antimicrobial and antioxidant activities of chitosans extracted from three different marine sources [J]. Appl Biochem Biotech, 2015, 177(1): 18–35.
- [77] JUNG J, ZHAO Y. Comparison in antioxidant action between  $\alpha$ -chitosan and  $\beta$ -chitosan at a wide range of molecular weight and chitosan concentration [J]. Bioorg Med Chem, 2012, 20(9): 2905–2911.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)

## 作者简介



曹梦园, 硕士研究生, 主要研究方向为农药分析与环境安全。  
E-mail: S20213101998@cau.edu.cn



韩丽君, 博士, 教授, 主要研究方向为农药分析与残留分析。  
E-mail: hanlijun2000@163.com