

# 果蔬采后纳米复合涂膜保鲜研究进展

王佳欣<sup>1,2#</sup>, 魏雯雯<sup>3#</sup>, 李庆鹏<sup>2</sup>, 王丽霞<sup>1</sup>, 林琼<sup>2\*</sup>

(1. 天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457; 2. 中国农业科学院农产品加工研究所, 北京 100193;  
3. 中华全国供销合作总社济南果品研究所, 济南 250014)

**摘要:** 果蔬采后纳米复合涂膜保鲜技术是一种新型的保鲜方法, 通过在果蔬表面形成一层纳米级别复合涂膜, 降低果蔬呼吸作用和防止微生物侵入污染, 从而延长保质期和维持品质。本文梳理了果蔬涂膜保鲜机制, 阐述了蛋白质、脂质、多糖、生物抗菌剂 4 类基质的纳米涂膜保鲜技术在果蔬保鲜中的应用。综合得出, 纳米复合涂膜具有抑菌、延缓果实衰老, 增强果实硬度、可溶性固形物等优点。目前常用的纳米材料包括纳米 ZnO、纳米 TiO<sub>2</sub> 等金属氧化物、纳米纤维素等, 纳米复合涂膜应用阶段仍处于初级阶段, 纳米材料的功能和毒性还未完全掌握, 可能存在迁移风险。未来研究将重点优化涂膜材料、改进涂膜制备技术、扩大应用范围和安全性评估等方面, 本文为纳米涂膜果蔬保鲜技术开发提供参考。

**关键词:** 纳米复合材料; 涂膜; 保鲜; 采后品质; 果蔬

## Research progress on postharvest nanocomposite coating for preservation of fruits and vegetables

WANG Jia-Xin<sup>1,2#</sup>, WEI Wen-Wen<sup>3#</sup>, LI Qing-Peng<sup>2</sup>, WANG Li-Xia<sup>1</sup>, LIN Qiong<sup>2\*</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;  
2. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China;  
3. Jinan Fruit Research Institute of China National Supply and Marketing Cooperative Society, Jinan 250014, China)

**ABSTRACT:** The nanocomposite coating preservation technology for fruits and vegetables after harvest is a new type of preservation method. By forming a layer of nano level composite coating on the surface of fruits and vegetables, it reduces their respiration and prevents microbial invasion and pollution, thereby extending the shelf life and maintaining quality. This article summarized the mechanism of fruit and vegetable coating preservation, and elaborates on the application of nano coating preservation technology with 4 types of substrates: Protein, lipids, polysaccharides, and biological antibacterial agents in fruit and vegetable preservation. Overall, the nanocomposite coating has advantages such as antibacterial activity, delaying fruit aging, enhancing fruit hardness, and soluble solids. Currently, commonly used nanomaterials include metal oxides such as nano ZnO and nano TiO<sub>2</sub>, as well as nano cellulose. The application stage of nanocomposite coatings is still in its early stages, and the functions and toxicity of

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2022YFD2100105)、中国农业科学院农产品加工研究所创新工程院所重点任务项目(CAAS-ASTIP-G2022-IFST-02)

**Fund:** Supported by the National Key Research and Development Program of China (2022YFD2100105), and the Key Tasks of Institute of Innovation Engineering, Institute of Agricultural Product Processing, Chinese Academy of Agricultural Sciences (CAAS-ASTIP-G2022-IFST-02)

#王佳欣、魏雯雯为共同第一作者

#WANG Jia-Xin and WEI Wen-Wen are Co-first Authors

\*通信作者: 林琼, 博士, 副研究员, 主要研究方向为果蔬采后品质调控与贮运保鲜。E-mail: linqiong1026@126.com

\*Corresponding author: LIN Qiong, Ph.D, Associate Professor, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, No.2 Yuanmingyuan West Road, Beijing 100193, China. E-mail: linqiong1026@126.com

nanomaterials are not fully understood, which may pose migration risks. Future research will focus on optimizing coating materials, improving coating preparation technology, expanding application scope, and evaluating safety. This article will provide reference for the development of nano coated fruit and vegetable preservation technology.

**KEY WORDS:** nanocomposites; coating; preservation; postharvest quality; fruits and vegetables

## 0 引言

随着社会经济飞速发展,人们健康意识日益增强,对果蔬新鲜度要求也日趋严格,因此提高果蔬保鲜技术迫在眉睫。据统计,果蔬损耗率占整个供应链的 45%<sup>[1]</sup>。其中保鲜包装在维持果蔬质量和延长贮藏期方面发挥重要作用,在极易腐烂的果蔬品种中表现尤为明显。而且经过不同材料包装后的果蔬更能抵御外界环境影响,能够有效预防果蔬采后运输以及贮存过程中受到物理、化学和微生物等多方面的损害<sup>[2-3]</sup>。目前,果蔬保鲜技术还是以传统包装和化学保鲜法等为主,而传统的包装材料大多是从石油产品中提取的合成聚合物<sup>[4]</sup>,该类材料具有优异的机械和阻隔性能且易于加工、成本低等优点<sup>[5]</sup>。然而,这些合成聚合物是不可被生物降解的,填埋和焚烧塑料垃圾对环境和公众健康会造成不利影响<sup>[6]</sup>。

近年来,一些替代合成聚合物的生物可降解薄膜应运而生。此类薄膜通常由可再生成分制成,例如壳聚糖(chitosan, CS)、淀粉和蛋白质等,与合成类聚合物材料相比更容易被降解<sup>[7]</sup>。薄膜不仅应用于食品包装,还可以作为营养物质、抗褐变剂、香料和着色剂的载体,以提高果蔬品质和其他活性成分。其因含有抗真菌和抗氧化化合物,具有降低病毒增值率的特性,从而达到延长保质期、减少失误浪费的目的<sup>[8]</sup>。由于消费者对健康和环境问题的关注度增加,保鲜包装材料也由传统包装向生物降解活性包装材料、不同的天然生物活性化合物包装材料转变。因此,用环保的可降解生物纳米包装材料来取代石油基合成聚合物是十分可取的,对该领域发展具有积极的影响<sup>[9]</sup>。现如今,纳米技术广泛应用于农业、畜牧业、生物化学、医学、石油工程等领域<sup>[10]</sup>,是由于纳米粒子具有高敏感性、粒径的微小性、量子效应以及优良延展性,并且可用来改善生物利用度提高营养稳定性。纳米材料的出现为食品的加工、贮存、保鲜等业务结合提供了可行的发展策略<sup>[11]</sup>。本文主要介绍了纳米保鲜涂膜的制备及其保鲜机制,并按照 4 种不同基质分类总结了纳米涂膜材料在果蔬保鲜的应用,简要描述了纳米材料可能存在的安全风险,为果蔬纳米涂膜应用补充理论依据。

## 1 纳米涂膜保鲜

纳米复合涂膜是将纳米颗粒与传统涂膜包装材料结合用于活性包装,其中纳米颗粒是将有机或无机的涂膜原

料研磨到纳米级大小颗粒(50~500 nm),纳米材料(nanometre materials, NMs)的尺寸越小,比表面积越大,化学反应性越高。此外,纳米尺度上的量子效应为纳米结构提供强催化反应性、导电性、光学吸收性和机械性能<sup>[12]</sup>。用纳米材料配制出更有应用前途的食品级纳米涂膜保鲜溶液或乳液后,可采用浸泡法、喷涂法、铺展法等让膜液包裹在果蔬表面,形成一层致密保护膜,提供一个惰性环境用以保护食品免受有害和腐败细菌的侵染,因此,纳米涂膜是具有保持新鲜度、降低氧化、延缓果实衰老等功能的食品保鲜技术之一。该技术可实施性强,是近年来研究保鲜领域的热点。

### 1.1 纳米复合保鲜薄膜的制备

复合涂膜使用的纳米材料,包括纳米金属颗粒、介孔颗粒、纳米凹凸棒土和石墨烯<sup>[13]</sup>等,广泛应用于食品保鲜、食品添加剂和包装。纳米复合薄膜用纳米颗粒与其他可食性包装材料作为基料所制,常用的制备方法包括熔融制备法<sup>[14]</sup>、液相还原法<sup>[15]</sup>、原位聚合法<sup>[16]</sup>等。复合涂膜主要使用共混法,以上制备方法可以减少普通共混法的不稳定性。

冯晓燕等<sup>[17]</sup>采用液相还原法,在 CS 与无水乙酸的反应液中加入硝酸银、硼氢化钠溶液制备出 CS-Ag 纳米颗粒(Ag nanoparticles, AgNPs)复合材料。DHANABALAKRISHNAN 等<sup>[18]</sup>利用铝合金良好的浇注性使用传统的搅拌法制备的 Al 和纳米 TiO<sub>2</sub> 复合膜,掺量为 2 wt%的纳米 TiO<sub>2</sub> 对铝复合材料的抗拉强度较单一材料性能较好。ALAMDARI 等<sup>[19]</sup>在研究可生物降解的抗菌涂层中,采用铸造工艺制备了一种由绿色合成的 ZnO 纳米颗粒(ZnO nanoparticles, ZnONPs)与 CS 基质组成的可降解复合膜,该复合膜具有较强的可见光发射和紫外线阻挡性能,并且 ZnO/CS 薄膜在 23°C 下储存时,将水果的保质期延长至 8 d。NEPOMUCENO 等<sup>[20]</sup>将纤维素纳米晶体(cellulose nanocrystals, CNC)和聚苯胺两种材料结合在一起,通过在 CNC 悬浮液中原位聚合聚苯胺来制备纳米结构材料。综上所述,与传统包装相比较,纳米材料的加入可使膜具有更优质的防潮性、气体阻隔性、延展性、生物降解性以及抗菌性能等优点<sup>[21-22]</sup>。由此可知纳米材料在保鲜涂膜方面有较好的应用前景。

### 1.2 纳米涂膜保鲜机制

#### 1.2.1 隔离保护作用

纳米涂膜在果蔬表面形成一个透明保护薄膜层,纳

米颗粒比表面积大, 具有强吸附性与韧性, 通过测定光学性能、水蒸气透过率(water vapor permeability, WVP)、接触角(contact angle, CA)、扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)等结构性能<sup>[23]</sup>, 可观察到纳米涂膜减少了果蔬的机械损伤, 为果实提供惰性保护; 果蔬采摘后会继续蒸腾和呼吸, 若涂膜中只添加纳米粒子, 水分子通路会更曲折, 扩散时间变长, WVP 值会降低。WVP 过低会增加果蔬包装内的相对湿度, 水蒸气会变成水滴, 导致细菌滋生并缩短果蔬保质期。故需要添加亲水物质, 使其具有良好阻隔性能与防紫外线能力, 以平衡水分<sup>[24]</sup>, 阻止破坏植物组织、叶绿素和维生素 C, 延缓脱水萎缩等。

### 1.2.2 气调作用

果蔬收获后, 由于温度、水分活度、湿度、pH 和空气等因素的变化, 一些跃变期果实的乙烯产量和呼吸速率迅速增加。呼吸作用对新鲜农产品质量的影响是由于淀粉、糖和有机酸氧化分解而导致的体重减轻, 以及额外的生产步骤(剥皮、切割、切片或切碎)最终导致水果和蔬菜的迅速变质和腐败<sup>[25]</sup>。而纳米涂膜的存在则为 O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、微生物等物质的传递设置了保护屏障, 活性包装中纳米成分如纳米 TiO<sub>2</sub> 与纳米 Ag 等具有光催化能力, 能将乙烯吸收并氧化成 H<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub>, 提供了低 O<sub>2</sub> 高 CO<sub>2</sub> 的环境, 最大程度降低了涂膜果蔬与环境之间的相互作用, 抑制好氧型微生物代谢与果实的呼吸作用, 防止内部细胞膜损伤, 减少营养物质的消耗从而保持产品的价值特性。

### 1.2.3 抗菌、抗氧化作用

目前, 涂膜所用的纳米材料, 如纳米 Ag、ZnO 和 TiO<sub>2</sub> 的加入已被证明具有良好的抗菌效果<sup>[26]</sup>, 会破坏细菌内部蛋白质和核酸等物质, 削弱细菌机能, 从而阻挡外界病原菌污染<sup>[27]</sup>; 纳米技术可通过防止营养物质分解与损失, 控制果实营养物质流失氧化, 发挥防腐保鲜作用<sup>[28]</sup>。

## 2 纳米基质涂膜分类

纳米复合涂层所需的特性和功能主要根据每种食品的变质途径来制定, 因此它们取决于果蔬自身特质, 比如呼吸跃变型果实(芒果、香蕉、番茄等)采后蒸腾和呼吸作用会导致失水失重、颜色变化、影响品质等。因此需要低 O<sub>2</sub> 高 CO<sub>2</sub> 延缓乙烯产生, 延缓成熟。大量研究表明纳米复合涂膜可改善以上状况, 按基质成分将纳米复合膜分为以下 4 类。

### 2.1 蛋白质类基底纳米复合膜

蛋白质类薄膜材料主要有乳清蛋白、酪蛋白等天然蛋白质。它们已被应用于制造多种生物活性物质, 如明胶、 $\beta$ -乳球蛋白、大豆蛋白、丝素蛋白和玉米醇溶蛋白等。LI 等<sup>[29]</sup>研究了大豆分离蛋白(soy protein isolate, SPI)、植物源肉桂醛(cinnamaldehyde, CIN)、ZnONPs 的复合涂层对香蕉

在整个贮藏过程中各种理化性质和抗菌性能的影响, 结果表明该复合涂层可抑制果实硬度、可溶性糖、可滴定酸度和感官品质的有害变化, 防止溶质迁移, 加入 ZnONPs 复合膜的抗菌性是 SPI/CIN 复合膜的 1.25 倍。在 JUNG 等<sup>[30]</sup>的研究中, 开发了一种基于聚蛋白和纤维素纳米晶体的可食用且可清洗的纳米复合材料, 该纳米复合材料可以通过不同的方法(如浸渍和喷涂)以微米厚度的涂层保形地涂覆在不同的易腐烂水果上。该涂层成功地减少了水果的微生物生长、呼吸和脱水, 这些都有助于延长保质期, 同时可以食用和清洗。ZIMET 等<sup>[31]</sup>用乳化法制备百里酚纳米乳液, 并将其包覆在藜麦蛋白/CS 涂层上, 研究涂层对冷藏草莓感官品质的影响。结果表明该涂层显著降低了草莓的重量损失, 并且对 pH、可滴定酸度等结果影响较小, 让草莓感官特性保持到 12 d, 故可应用于延长草莓等易腐产品的保质期。由此可知, 蛋白质类涂层具有优良的成膜性、对气体具有良好阻隔性等优点<sup>[32]</sup>。蛋白质通常能制备出具有良好机械性能的薄膜, 对 O<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的阻隔作用最佳<sup>[6]</sup>, 但由于其高亲水性, 在许多应用中受到限制, 因此需要添加其他活性物质进行复合改性使用。

### 2.2 脂类基底纳米复合膜

脂类材料作为基底的有: 蜂蜡、蜂胶、蜡质、脂肪或纳米乳剂等。ZAMBRANO-ZARAGOZA 等<sup>[33]</sup>制备出由蜂蜡固体脂质纳米颗粒 10 g/L、黄原胶 4 g/L 和丙二醇 5 g/L 制备的复合涂膜应用于草莓保鲜, 由于微生物感染、呼吸代谢、脱水或机械损伤<sup>[34-37]</sup>, 导致草莓保质期很短, 增加了消费者的购买成本, 该复合膜的使用在 4°C 下将草莓保鲜时间延长保存至 21 d, 涂膜减少了真菌污染, 减少气体蒸腾, 显著降低了腐烂率。MIRANDA-LINARES 等<sup>[38]</sup>研究得出以 10 g/L 的固体脂质纳米颗粒为载体的新鲜番茄在成熟期的硬度、番茄红素浓度、pH 和可溶性固形物等参数变化最均匀且果实表面光度基本保持不变。DE 等<sup>[39]</sup>探讨番木瓜果实经可食性涂料处理后的保鲜潜力, 该涂料是棕榈蜡纳米乳液(carnauba wax nanoemulsion, CWN)和鲁沙香茅精油(*Cymbopogon martinii* essential oil, CEO)所制, 涂层减少果实重量损失, 维持了果实的硬度, 同时延缓了贮藏期间水果颜色的变化。可知脂类基的加入对果蔬表面涂抹均匀性有较好的效果, 而且脂类阻止水分运输效果显著从而达到保鲜效果, 但脂类透明度较差, 容易破坏果蔬外观以及口感, 故果蔬上应用脂类涂膜较少, 多用于肉类。

### 2.3 多糖类基底纳米复合膜

天然可再生的多糖成分主要有 CS、果胶、淀粉、纤维素、魔芋葡甘露聚糖(konjac glucomannan, KGM)等, 具有良好的成膜性、气体隔绝性、抗菌性、抗氧化性、亲水性<sup>[24]</sup>, 可作为成膜基质, 纳米材料的加入可以提高多糖膜的防水能力, 延缓腐败速度, 提高保鲜能力。其中纳米纤

纤维素由丰富的可再生资源生产,主要来源于棉花、玉米的植物纤维,细菌以及动物也可产生纤维素,是制备纳米复合材料的主要成分之一,可降低涂层的水和气体渗透性,并增强机械性能<sup>[40-41]</sup>。纳米纤维素可分为细菌纤维素(bacterial cellulose, BC)、纤维素纳米纤维(cellulose nanofibers, CNFs)和 CNC 3 个子类。LEE 等<sup>[42]</sup>采用回收的甘蔗渣提取的纤维素纳米晶体(bagasse cellulose nanocrystals, BCNCs)、壳聚糖纳米纤维(chitosan nanofibers, ChNFs)、海藻酸钠(sodium alginate, SA)等多糖材料与牛至精油(oregano oil, OEO)共混制备单多糖和复合多糖食用涂层悬浮液。结果表明,与单一多糖涂料相比,复合多糖涂料对真菌生长的抑制效果更佳。SA/BCNC/ChNF/OEO 处理的草莓贮藏 9 d 后重量仅下降 10.8%,单一多糖涂层草莓的重量下降了 28.6%。此外,SA/BCNC/ChNF/OEO 涂层由于其缠结基体结构所产生的气体阻隔性能,能够保持草莓所需的水分、呼吸速率、硬度等。研究发现 SA 和绿原酸联合处理降低了梨的失重率和腐烂指数,增强了愈合组织的质地,保持了细胞膜系统的完整性<sup>[43]</sup>。研究者利用超声制备了一种新型纳米硅氧化物(nano silicon oxide, SiOx)/CS 复合膜并考察其对青番茄品质保鲜的影响,发现延缓了失重和腐烂度,降低了可滴定酸和可溶性糖的损失,抑制丙二醛含量以及增加总多酚含量,显著延长了青番茄的保质期<sup>[44]</sup>。通过研究 KGM 和纳米 ZnO 的复合型涂膜对香蕉的保鲜效果,8 d 后清水组严重褐变,而复合膜组保鲜效果良好,褐变与好果率下降速度最缓慢<sup>[45]</sup>。总之,多糖基底材料是保鲜涂膜中最常用的,其中 CS 的应用最为广泛。CS 是一种天然抗菌剂,具有无毒、光谱利用和优良成膜性等优点<sup>[46]</sup>,阻隔外界 O<sub>2</sub> 的同时,可以释放 CO<sub>2</sub>,从而达到保鲜效果。其次是 KGM,作为从魔芋块茎中提取的天然多糖,有成膜能力<sup>[27]</sup>,但作为保鲜剂其阻水能力弱<sup>[47]</sup>,无抗菌性,故需要与具有抗菌性等材料复合来提高保鲜效果。

## 2.4 生物抗菌剂基底纳米复合膜

生物抗菌剂[包括细菌素、环状脂肽<sup>[48]</sup>和聚氨基酸等抗菌肽(antimicrobial peptides, AMPs)]等生物基材料由于其可生物降解性和生态友好性,成为目前更有吸引力的选择,可以预防高度易腐的果蔬感染常见的病原菌引发疾病<sup>[49]</sup>。AMPs 是一种具有广谱抑菌性的小分子多肽,已发现部分 AMPs 能有效控制果蔬采后病害,但数量较少且抑制效果不稳定,因此仍需大量挖掘在此领域内的其他 AMPs。然而,由于天然抗菌剂的功效尚无明确结论、溶解度低,特别是稳定性较低<sup>[50]</sup>,其实际应用开发仍然具有挑战性<sup>[51]</sup>。ε-聚赖氨酸(ε-polylysine, ε-PL)是一种天然 AMPs,主要由白色链霉菌发酵葡萄糖所产<sup>[52]</sup>,多用于水产品及肉类保鲜。乳酸链球菌素(nisin from streptococcus lactis, Nisin)是一种无毒、无味、耐低 pH 且热稳定的阳离子 AMPs,由乳酸链球菌亚种产生的一种最常用的细菌素<sup>[53]</sup>。Nisin 通常

对几种革兰氏阳性食源性病原体有效,包括肉毒梭菌、蜡样芽孢杆菌、单核细胞增生李斯特菌和葡萄球菌,同时还抑制一些革兰氏阴性细菌,如沙门氏菌和大肠杆菌。纳米材料本身有较好的抗菌性,加入抗菌剂效果更明显,TAJFIROOZEH 等<sup>[54]</sup>制备出负载没食子酸和 Nisin/静电纺丝 CS/聚环氧乙烷的可生物降解膜,具有抗氧化和抗菌性能。CHEN 等<sup>[55]</sup>用含 Nisin 的明胶(gelatin, GEL)与 CS 和玉米淀粉(corn starch, COS)制备复合抗菌膜,将樱桃番茄贮存于 GEL-CS/N-COS 薄膜包装中,评测对樱桃番茄货架期的影响。结果表明,贮藏期间,复合薄膜可降低失重率和抑制细菌滋生,减缓硬度降低,延缓颜色变化。可知,生物抗菌剂是可以作为涂膜材料使用的,安全且有效。并且抗菌剂与其他物质联合使用,提高抗菌效果,降低成本,仍是未来的发展方向。

## 3 果蔬采后纳米涂膜的安全性

食品标准规定:由纳米材料组成或具有纳米结构的产品,添加纳米材料,或使用纳米技术处理的产品称之为纳米技术产品。尽管纳米技术在食品领域的应用取得了较大的进步,在食品工业中制造了新的产品、开拓了新的方向,但仍有很多问题需要解决。此外,社会对人类消费和使用纳米技术商品的安全性尚有存疑<sup>[56]</sup>。

目前,在纳米材料领域仍然存在许多困惑和相互矛盾的结果。一些研究表明某一特定的纳米颗粒不产生毒性,而另一些研究认为缺少新的数据与方法标准来认证使用纳米技术食品的安全性。所以在纳米食品大面积商业化之前,需要深入研究评估纳米涂膜食品对人类健康的影响。

纳米颗粒在包装材料中的迁移和吸收是主要问题。为了更深入地理解纳米材料的功能和毒性,需提高使用的安全标准。纳米颗粒有 3 种可能的进入人体方式:吸入、皮肤进入和摄入<sup>[57]</sup>。这些纳米颗粒可能聚集在人体的各个器官,目前已被观察到纳米颗粒能够克服生物边界并穿透细胞和器官,包括胃、肾、肝、小肠、肺、脾脏和主要分布器官<sup>[58-59]</sup>,所以从食品包装中纳米颗粒迁移到消费者身体的风险问题可能比其他问题更复杂,例如使用不同纳米颗粒的影响,需要考虑氧化应激反应、蛋白质变性、DNA 损伤等潜在危险和毒理学风险,同时还需考虑与环境等相关问题。纳米颗粒的毒性取决于大小、形状、表面积、净电荷、化学结构和表面功能化等物理和化学特性<sup>[60]</sup>,然而发现许多实验调查并未提供令人信服的数据,来证明纳米颗粒从食品包装材料迁移到食品的概率,可能是缺乏足够的分析技术来识别含量较低、直径较小的纳米颗粒。

针对上述内容,纳米涂膜技术可优先应用于可剥皮类果蔬或涂膜材料遇水溶解性强的产品,以此减少消费者对果蔬保鲜使用 NPs 安全性的担忧。

## 4 结束语

纳米技术的应用可以提升新型包装材料的性能,不同基底的材料具有相应优点,根据不同应用场景与纳米材料进行复合,将为果蔬保鲜提供新思路。纳米复合保鲜材料可以抑菌,延长果蔬保质期,增强果实硬度,降低失重率,延缓维生素 C、可溶性糖及总酸等含量下降的速率。此外,涂膜制备技术已取得较大的进展,但仍存在一些问题,如涂膜厚度不均、涂膜稳定性不高等。因此,改进涂膜制备技术,提高涂膜的质量和稳定性,将是未来研究的重点。全球食品包装纳米技术市场研究报告表明:预估到 2030 年,对全球食品包装领域“纳米技术市场”的投入会增长至 448 亿美元。由此可知,纳米复合涂膜保鲜作为一种新型的果蔬采后保鲜技术,具有很大的发展潜力。未来研究将重点优化涂膜材料、改进涂膜制备技术、扩大应用范围和安全性评估等方面,以实现该技术的实际应用和推广。

## 参考文献

- [1] FACCHINI F, SILVESTRI B, DIGIESI S, *et al.* Agri-food loss and waste management: Win-win strategies for edible discarded fruits and vegetables sustainable reuse [J]. *Innov Food Sci Emerg*, 2023, 83: 103235.
- [2] DONG X, LIANG X, ZHOU Y, *et al.* Preparation of polylactic acid/TiO<sub>2</sub>/GO nano-fibrous films and their preservation effect on green peppers [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 177: 135–148.
- [3] MATSUI T, KAMATA T, KOSEKI S, *et al.* Development of automatic detection model for stem-end rots of ‘Hass’ avocado fruit using X-ray imaging and image processing [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2022, 192: 111996.
- [4] WANG H, XUE T, WANG S, *et al.* Preparation, characterization and food packaging application of nano ZnO@Xylan/quaternized xylan/polyvinyl alcohol composite films [J]. *Int J Biol Macromol*, 2022, 215: 635–645.
- [5] PANDARAM P, LAWRENCE B, PRITHIVIKUMARAN N, *et al.* Influence of mono energetic gamma radiation on structural and electrical properties of TiO<sub>2</sub> thin film coated on p-type porous silicon [J]. *J Mater Sci-Mater*, 2019, 30(7): 7135–7149.
- [6] CAO W, YAN J, LIU C, *et al.* Preparation and characterization of catechol-grafted chitosan/gelatin/modified chitosan-AgNP blend films [J]. *Carbohydr Polym*, 2020, 247: 116643.
- [7] TRAJKOVSKA PA, DANILOSKI D, D’CUNHA NM, *et al.* Edible packaging: Sustainable solutions and novel trends in food packaging [J]. *Food Res Int*, 2021, 140: 109981.
- [8] XAVIER JR. Multifunctional nanocomposite coatings for superior anticorrosive, flame retardant and mechanical properties in aerospace components [J]. *Surf Interf*, 2023, 38: 102832.
- [9] DONG X, LIANG X, ZHOU Y, *et al.* Preparation of polylactic acid/TiO<sub>2</sub>/GO nano-fibrous films and their preservation effect on green peppers [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 177: 135–148.
- [10] ZHANG WL, AHARI H, ZHANG ZK, *et al.* Role of silica (SiO<sub>2</sub>) nano/micro-particles in the functionality of degradable packaging films/coatings and their application in food preservation [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2023, 133: 75–86.
- [11] SHAO RZ, QI YX, JIANG YM, *et al.* Internal friction properties of carboxylated cellulose nanofibers (CNF-C) modified aramid woven fabrics [J]. *J Text*, 2023. DOI: 10.1080/00405000.2022.2035052
- [12] BHASKAR R, ZO SM, NARAYANAN KB, *et al.* Recent development of protein-based biopolymers in food packaging applications: A review [J]. *Polym Test*, 2023, 124: 108097.
- [13] RODRIGUES R, PATIL S, DHAKANE-LAD J, *et al.* Effect of green tea extract, ginger essential oil and nanofibrillated cellulose reinforcements in starch films on the keeping quality of strawberries [J]. *J Food Process Pres*, 2021. DOI: 10.1111/JFPP.16109
- [14] XIAOHUI L, YUNZHONG L, ZHIGUANG Z, *et al.* Enhanced printability and strength of unweldable AA2024-based nanocomposites fabricated by laser powder bed fusion via nano-TiC-induced grain refinement [J]. *Mater Sci Eng*, 2022, 856: 144010.
- [15] DAUD H, AYOUB KS, SALMAN SA, *et al.* Insight into the performance of novel kaolinite-cellulose/cobalt oxide nanocomposite as green adsorbent for liquid phase abatement of heavy metal ions: Modelling and mechanism [J]. *Arab J Chem*, 2022, 15(7): 103925.
- [16] SHARMA B, MALIK P, JAIN P. Biopolymer reinforced nanocomposites: A comprehensive review [J]. *Mater Today Commun*, 2018, 16: 353–363.
- [17] 冯晓燕, 郑坤, 陈莹, 等. 壳聚糖-银纳米微粒表面修饰木纤维的制备及抗菌性能研究[J]. *生物质化学工程*, 2017, 51: 1–7.
- [17] FENG XY, ZHENG K, CHEN Y, *et al.* Preparation and antibacterial activity of wood fiber modified with chitosan-Ag nanoparticles [J]. *Biomass Chem Eng*, 2017, 51: 1–7.
- [18] DHANABALAKRISHNAN KP, MATHAN KN, MOTHILAL T, *et al.* Influence of nano titanium oxide reinforced Al-7075 matrix composites in stir casting method [J]. *Mater Today*, 2022, 69: 1381–1386.
- [19] ALAMDARI S, MIRZAEI O, NASIRI JF, *et al.* Green synthesis of multifunctional ZnO/chitosan nanocomposite film using wild *Mentha pulegium* extract for packaging applications [J]. *Surf Interf*, 2022, 34: 102349.
- [20] NEPOMUCENO NC, SEIXAS AAA, MEDEIROS ES, *et al.* Evaluation of conductivity of nanostructured polyaniline/cellulose nanocrystals (PANI/CNC) obtained via *in situ* polymerization [J]. *J Solid State Chem*, 2021, 302: 122372.
- [21] SARAH L. Antimicrobial nanostructures in food packaging [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2013, 30(1): 56–69.
- [22] LIN G, LI X, ZHAO C. Preparation and application of in-situ loaded silver nanoparticles antibacterial fresh-keeping composite paper [J]. *Polymers (Basel)*, 2022, 14(18): 122372.
- [23] 隋思瑶, 马佳佳, 陆皓茜, 等. 纳米二氧化钛抗菌防雾膜的制备表征及对草莓的保鲜效果[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(5): 302–310.

- SUI SY, MA JJ, LU HQ, *et al.* Characterizations and preservative effect of anti-fogging films prepared with nano-TiO<sub>2</sub> [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2019, 35(5): 302–310.
- [24] 肖移聪, 刘军, 马梦亚, 等. 多糖-纳米材料复合涂层在水果保鲜中的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(5): 337–343.
- XIAO YC, LIU J, MA MY, *et al.* Research progress of polysaccharide-nano material composite coating in fruit preservation [J]. *Food Ferment Ind*, 2023, 49(5): 337–343.
- [25] PERUMAL AB, HUANG L, NAMBIAR RB, *et al.* Application of essential oils in packaging films for the preservation of fruits and vegetables: A review [J]. *Food Chem*, 2022, 375: 131810.
- [26] DUAN N, LI Q, MENG X, *et al.* Preparation and characterization of  $\kappa$ -carrageenan/konjac glucomannan/TiO<sub>2</sub> nanocomposite film with efficient anti-fungal activity and its application in strawberry preservation [J]. *Food Chem*, 2021, 364: 130441.
- [27] 于子越, 陈飞, 董威杰, 等. 纳米银的抑菌机理及其在食品储藏方面的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(19): 305–309.
- YU ZY, CHEN F, DONG WJ, *et al.* Antibacterial mechanism of nano-silver and its research progress in food storage [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 40(19): 305–309.
- [28] 朱露露, 高丰衣, 李大虎. 壳聚糖涂膜技术在水果保鲜中的研究进展[J]. *农产品加工*, 2022, (6): 72–76.
- ZHU LL, GAO FY, LI DH. Research progress of chitosan coating technology in fruit preservation [J]. *Farm Prod Process*, 2022, (6): 72–76.
- [29] LI J, SUN Q, SUN Y, *et al.* Improvement of banana postharvest quality using a novel soybean protein isolate/cinnamaldehyde/zinc oxide bionanocomposite coating strategy [J]. *Sci Hortic Amsterdam*, 2019, 258: 108786.
- [30] JUNG S, CUI Y, BARNES M, *et al.* Multifunctional bio-nanocomposite coatings for perishable fruits [J]. *Adv Mater*, 2020, 32(26): e1908291.
- [31] ZIMET P, LIVNEY YD. Beta-lactoglobulin and its nanocomplexes with pectin as vehicles for  $\omega$ -3 polyunsaturated fatty acids [J]. *Food Hydrocolloid*, 2009, 23(4): 1120–1126.
- [32] ROBLEDO N, LÓPEZ L, BUNGER A, *et al.* Effects of antimicrobial edible coating of thymol nanoemulsion/quinoa protein/chitosan on the safety, sensorial properties, and quality of refrigerated strawberries (*Fragaria×ananassa*) under commercial storage environment [J]. *Food Bioprocess Technol*, 2018, 11(8): 1566–1574.
- [33] ZAMBRANO-ZARAGOZA ML, QUINTANAR-GUERRERO D, DEL RA, *et al.* Effect of nano-edible coating based on beeswax solid lipid nanoparticles on strawberry's preservation [J]. *Coatings*, 2020, 10(3): 253.
- [34] JUNQUEIRA-GONCALVES MP, SALINAS GE, BRUNA JE, *et al.* An assessment of lactobionanopolymer-montmorillonite composites for dip coating applications on fresh strawberries [J]. *J Sci Food Agric*, 2017, 97(6): 1846–1853.
- [35] 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.
- [36] KANG S, XIAO Y, GUO X, *et al.* Development of gum arabic-based nanocomposite films reinforced with cellulose nanocrystals for strawberry preservation [J]. *Food Chem*, 2021, 350(7): 129199.
- [37] SOGVAR OB, SABA MK, EMAMIFAR A. Aloe vera and ascorbic acid coatings maintain postharvest quality and reduce microbial load of strawberry fruit [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2016, 114: 29–35.
- [38] MIRANDA-LINARES V, ESCAMILLA-RENDÓN P, DEL REAL-LÓPEZ A, *et al.* Solid lipid nanoparticles based edible coating for saladette tomato preservation [J]. *Acta Horti*, 2018, (1194): 305–312.
- [39] DE G, CRUZ D, ALENCAR C, *et al.* Edible coating based on carnauba wax nanoemulsion and *Cymbopogon martinii* essential oil on papaya postharvest preservation [J]. *Coatings*, 2022, 12(11): 1700.
- [40] ISOGAI A. Emerging nanocellulose technologies: Recent developments [J]. *Adv Mater*, 2021, 33(28): e2000630.
- [41] YU S, SUN J, SHI Y, *et al.* Nanocellulose from various biomass wastes: Its preparation and potential usages towards the high value-added products [J]. *Environ Sci Ecotechnol*, 2021, 5: 100077.
- [42] LEE D, SHAYAN M, GWON J, *et al.* Effectiveness of cellulose and chitosan nanomaterial coatings with essential oil on postharvest strawberry quality [J]. *Carbohydr Polym*, 2022, 298: 120101.
- [43] ZHANG Y, ZHANG W, WANG H, *et al.* The combination treatment of chlorogenic acid and sodium alginate coating could accelerate the wound healing of pear fruit by promoting the metabolic pathway of phenylpropane [J]. *Food Chem*, 2023, 414: 135689.
- [44] ZHU Y, LI D, BELWAL T, *et al.* Effect of nano-SiO<sub>2</sub>/chitosan complex coating on the physicochemical characteristics and preservation performance of green tomato [J]. *Molecules*, 2019, 24(24): 4552.
- [45] 韦巧艳, 成清岚, 陈碧, 等. 魔芋葡甘露聚糖/纳米 ZnO 复合涂膜对香蕉常温保鲜效果的影响[J]. *包装工程*, 2020, 41(5): 49–55.
- WEI QY, CHENG QL, CHEN B, *et al.* Influence of konjac glucomannan/nano-ZnO composite coating on the preservation effect of bananas at room temperature [J]. *Packag Eng*, 41(5): 49–55.
- [46] 丁艳红, 张婉莹, 何雪, 等. 茶多酚/还原石墨烯纳米复合物增强羧甲基壳聚糖薄膜性能的研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(2): 108–113.
- DING YH, ZHANG WY, HE X, *et al.* Study on properties of carboxymethyl chitosan film enhanced by tea polyphenol/reduced graphene nanocomposite [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(2): 108–113.
- [47] DING J, ZENG S, WANG Y, *et al.* Metal coordinating-induced self-assembly of cyclic lipopeptides into high-performance antimicrobial supramolecules [J]. *Food Chem*, 2023, 422: 136203.
- [48] ZHANG B, LI Y, ZHANG Y, *et al.* High-cell-density culture enhances the antimicrobial and freshness effects of *Bacillus subtilis* S1702 on table grapes (*Vitis vinifera* cv. Kyoho) [J]. *Food Chem*, 2019, 286: 541–549.
- [49] YAN Y, LI Y, ZHANG Z, *et al.* Advances of peptides for antibacterial applications [J]. *Colloids Surf B Bioint*, 2021, 202: 111682.

- [50] LIN N, WANG C, DING J, *et al.* Efficacy of nanoparticle encapsulation on suppressing oxidation and enhancing antifungal activity of cyclic lipopeptides produced by *Bacillus subtilis* [J]. *Colloids Surf B Bioint*, 2020, 193: 111143.
- [51] RAJA KSN, ARUN J, ARVIND SRB, *et al.* Biocompatible formulation of cationic antimicrobial peptide polylysine (PL) through nanotechnology principles and its potential role in food preservation-A review [J]. *Int J Biol Macromol*, 2022, 222(Pt B): 1734–1746.
- [52] LUO X, PENG Y, QIN Z, *et al.* Chitosan-based packaging films with an integrated antimicrobial peptide: Characterization, *in vitro* release and application to fresh pork preservation [J]. *Int J Biol Macromol*, 2023, 231: 123209.
- [53] ROSHANAK S, SHAHIDI F, TABATABAEI YF, *et al.* Evaluation of antimicrobial activity of buforin I and Nisin and synergistic effect of the combination of them as a novel antimicrobial preservative [J]. *J Food Prot*, 2020, 83(11): 2018–2025.
- [54] TAJFIROOZEH F, MORADI A, SHAHIDI F, *et al.* Fabrication and characterization of gallic-acid/nisin loaded electrospun core/shell chitosan/polyethylene oxide nanofibrous membranes with free radical scavenging capacity and antimicrobial activity for food packing applications [J]. *Food Biosci*, 2023. DOI: 10.1016/J.FBIO.2023.102529
- [55] 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 Packaging Shelf*, 2022. DOI: 10.1016/J.FPSL.2022.100980
- [56] SILVESTRE C, DURACCIO D, CIMMINO S. Food packaging based on polymer nanomaterials [J]. *Prog Polym Sci*, 2011, 36(12): 1766–1782.
- [57] ESMAEILLOU M, MOHARAMNEJAD M, HSANKHANI R, *et al.* Toxicity of ZnO nanoparticles in healthy adult mice [J]. *Environ Toxicol Pharmacol*, 2013, 35(1): 67–71.
- [58] MCCLEMENTS DJ, XIAO H. Is nano safe in foods? Establishing the factors impacting the gastrointestinal fate and toxicity of organic and inorganic food-grade nanoparticles [J]. *NPJ Sci Food*, 2017, 1: 6.
- [59] MCCLEMENTS DJ, XIAO H, DEMOKRITOU P. Physicochemical and colloidal aspects of food matrix effects on gastrointestinal fate of ingested inorganic nanoparticles [J]. *Adv Colloid Interface Sci*, 2017, 246: 165–180.
- [60] ZHANG LJ, QIAN L, DING LY, *et al.* Ecological and toxicological assessments of anthropogenic contaminants based on environmental metabolomics [J]. *Environ Sci Ecotechnol*, 2021, 5: 100081.

(责任编辑: 于梦娇 郑 丽)

### 作者简介



王佳欣, 硕士研究生, 主要研究方向为生物与医药。

E-mail: 870686978@qq.com



魏雯雯, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为果蔬采后贮藏保鲜技术研发及标准化。

E-mail: flying200807@163.com



林琼, 博士, 副研究员, 主要研究方向为果蔬采后品质调控与贮运保鲜。

E-mail: linqiong1026@126.com