

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.2025.0732

涂层技术在番茄保鲜中的应用

刘程宏¹, 黄文¹, 张舜¹, 张晓炎¹, 杨海龙¹, 付诗雨¹, 詹丽娟²

(1. 郑州市农业科学研究院 郑州 450015; 2. 河南农业大学食品科学技术学院 郑州 450002)

摘要: 番茄营养丰富、美味多汁, 广受消费者喜爱, 但番茄在采摘后, 由于其果实特点, 加之代谢活动旺盛, 在贮藏和流通过程中极易受到微生物侵染、机械损伤以及环境因素的影响, 导致果实腐烂变质、品质下降, 造成巨大的经济损失。因此, 很有必要开发出一种高效、安全、绿色的番茄贮藏保鲜技术对采后番茄进行及时的保鲜处理。随着近年来对食品安全和环境保护的关注度日益加强, 人们越来越倾向于选用更安全的生物保鲜技术和涂层保鲜技术用于番茄的采后保鲜。涂层保鲜技术作为一种绿色高效的保鲜方法, 通过可食性材料在番茄表面形成薄膜, 调控水分流失、呼吸速率及微生物活动, 有效保持果实品质。本文系统分析影响番茄保鲜的关键因素, 重点综述涂层技术的分类与原理, 包括可食性涂层、复配涂层、复合涂层以及功能性涂层(微生物涂层、植物提取物涂层)的研究进展, 探讨存在问题与未来趋势, 以期对番茄保鲜技术创新提供理论依据。

关键词: 番茄; 涂层保鲜技术; 可食性涂层; 微生物涂层; 植物提取物涂层; 复合涂层与智能材料

中图分类号: S641.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2026)08-008-08

Research and application of coating technologies for tomato preservation

Liu Chenghong¹, Huang Wen¹, Zhang Shun¹, Zhang Xiaoyan¹, Yang Hailong¹, Fu Shiyu¹, Zhan Lijuan²

(1. Zhengzhou Academy of Agricultural Science and Technology, Zhengzhou 450015, Henan, China; 2. College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, Henan, China)

Abstract: Tomato is nutritious, delicious, and widely favored by consumers. However, after being picked, due to its fruit characteristics and vigorous metabolic activities, tomato is highly susceptible to microbial infection, mechanical damage, and environmental factors during storage and circulation, leading to fruit decay, quality deterioration, and substantial economic losses. Therefore, there is urgent need to develop efficient, safe and green preservation technologies for preservation tomato storage. In recent years, with growing public awareness of food safety and environmental protection, green technologies such as biological preservation and coating preservation have attracted increasing attention. Among these, coating preservation technology, which utilizes edible materials to form a protective film on the fruit surface, can effectively regulate moisture loss, respiration rate, and microbial growth, thereby delaying quality deterioration, and presents an environmentally friendly preservation approach. This paper systematically reviews the key factors influencing tomato preservation, with a focus on the classification and mechanisms of coating technologies, including edible coatings, compound coatings, composite coatings, and functional coatings (microbial coating, plant extract coatings). The existing challenges and future trends are also discussed, aiming to provide a theoretical basis for innovation in tomato preservation technologies.

Key words: Tomato; Coating preservation technology; Edible coating; Microbial coating; Plant extract coating; Composite coatings and smart materials

番茄(*Solanum lycopersicum* L.)作为茄科番茄属的一年生或多年生草本植物, 在全球蔬菜生产与消费领域占据着极为重要的地位, 其果实富含维生

素C、维生素E、番茄红素、 β -胡萝卜素、酚类及黄酮类化合物等多种营养成分, 这些营养物质赋予了番茄抗氧化、抗炎、预防心血管疾病等保健功效, 深受

收稿日期: 2025-10-22; 修回日期: 2026-01-16

基金项目: 河南省现代农业产业技术体系(HARS-22-07-G7); 2024年度郑州市科技惠民计划(2024KJHM0042); 郑州市劳模和工匠人才创新工作室项目

作者简介: 刘程宏, 女, 助理研究员, 主要从事植物生理与生物技术研究。E-mail: 421781004@qq.com

通信作者: 黄文, 女, 副研究员, 主要从事番茄育种和栽培研究。E-mail: Diamondfashion@126.com

消费者青睐。近年来,全球番茄产业发展态势迅猛,我国作为番茄种植大国,种植规模长期位居全球首位。根据联合国粮食与农业组织统计数据库数据(FAOSTAT),2023年中国番茄种植面积达115.6万 hm^2 ;2024年产业进入提质增效的结构优化阶段,全国番茄收获面积调整至110.0万 hm^2 。2025年国内综合监测显示全国番茄种植面积回升至118.6万 hm^2 ,鲜食与加工番茄分区布局持续完善,为满足国内市场需求以及参与国际市场竞争奠定了坚实基础。

然而,番茄作为一种呼吸跃变型果实,采后生理代谢旺盛,在贮藏和流通过程中极易受到微生物侵染、机械损伤以及环境因素的影响,导致果实腐烂变质、品质下降,番茄果实损失率高达42%^[2],造成巨大的经济损失。过去通常采用低温、气调和辐照等物理方法或1-MCP、 ClO_2 、防腐剂等化学药剂处理,但随着近年来对食品安全和环境保护的关注度日益提高,人们越来越倾向于选用高效、安全、绿色的保鲜技术用于番茄的采后保鲜。涂层保鲜技术作为一种创新的果蔬防腐保鲜方法,可在番茄果实表面产生物理屏障,控制水分流失、抑制乙烯生成、延缓成熟进程、抑制微生物活动,减少膜内外的气体交换、水分迁移以及降低番茄的呼吸速率等,有效保持新鲜番茄的品质并延长保鲜期。笔者首先分析了影响番茄保鲜效果的因素,随后介绍了涂层保鲜技术的原理和分类,并分别介绍了基础涂层与复配技术、功能性涂层技术、复合涂层及智能材料涂层技术的研究和应用情况,最后提出了存在的问题与未来展望,以期番茄保鲜技术的进一步创新和优化提供理论依据与实践参考。

1 影响番茄保鲜效果的因素

由于成熟的番茄是浆果,容易受到机械损伤,常因形成的创面受到病原菌侵染而导致番茄腐烂变质,这是影响番茄保鲜效果的最重要因素。除此之外,贮藏温度、番茄品种、运输包装等也都会影响番茄的贮藏保鲜效果。

1.1 病原微生物

病原微生物是导致番茄在贮藏保鲜过程中品质下降、腐烂变质的重要因素。病原微生物通常会通过番茄的伤口、气孔或皮孔侵入果实内部,并导致果实腐烂、影响果实外观、加速营养成分流失、促使果实生理失调等,降低番茄的营养价值和食用品

质,并大幅缩短其贮藏期。最常见的病害是灰霉病、黑霉病、果腐病等,不加以重视常造成番茄重大经济损失^[3]。

灰葡萄孢(*Botrytis cinerea*)易侵害番茄等含水量高的果实^[4],具有传播快、传染力强的特点,番茄感染后会发生灰霉病,出现果实变软变色,最终表面附着一层灰褐色霉层,彻底丧失食用价值;番茄的黑霉病通常是由病原菌链格孢(*Alternaria alternata*)引起,对番茄的茎和果实造成危害,最后果实表面会出现灰黑色霉层,在一定条件下还会产生毒素^[5],对人体健康存在较大隐患;最常见的番茄果腐病由扩展青霉菌(*Penicillium expansum*)引发,青霉菌感染番茄果实后出现绒状暗绿色、近球形的菌落并不断扩大^[6]。

1.2 其他因素

贮藏温度对番茄的保鲜效果至关重要,一方面通过促进或抑制细胞呼吸,另一方面通过调控乙烯合成来影响番茄的贮藏效果^[7]。通常认为,适宜低温有助于果蔬的贮藏保鲜^[8]。此外,贮藏期间温度应尽可能保持稳定,研究证实,温度波动最小时能保持番茄的良好品质,可使番茄的保鲜期再延长2~4 d^[9]。

不同品种的番茄生理特性有差异,其贮藏保鲜效果也不相同,如一些品种的番茄呼吸强度较低,在贮藏期间消耗的营养物质少,能更长时间保持果实品质^[10];果皮较厚且韧性强的品种,能更好地抵御机械损伤和微生物侵染,保鲜期相对较长^[11];由于果胶是维持果实硬度的重要物质,因此高果胶含量的品种在贮藏过程中果实硬度下降速度慢,耐贮藏性好^[12]。

另外,选择适当的运输与包装形式,能减少运输中的磕碰导致的机械损伤,进而减少番茄表面破损及降低病原菌感染概率,确保保鲜效果^[13]。

2 涂层技术的原理与分类

涂层保鲜技术作为一种创新的果蔬防腐保鲜方法,可在番茄果实表面产生物理屏障,减少水分流失、抑制乙烯产生、延缓成熟进程、消除微生物活动,降低膜内外的气体交换、水分迁移及呼吸速率等,有效保持新鲜番茄的品质并延长保鲜期。根据材料与功能,涂层可分为基础可食性涂层、复配涂层、复合涂层及功能性涂层(如微生物涂层、植物提取物涂层),随着涂层材料的开发研究,智能响应材料在涂层技术中日益发挥重要作用。

3 基础涂层与复配技术

3.1 可食性涂层保鲜

可食性涂层以天然可食性物质为原料,通过在番茄表面形成阻隔层,抑制呼吸作用、减少水分散失和微生物污染,从而延长番茄保鲜期。可食性涂层材料具有生物安全性、可再生、来源广、成本低等优势,符合大众对食品安全和绿色环保的要求。常见的涂层材料包括多糖类如壳聚糖、纤维素,蛋白质类如大豆蛋白、乳清蛋白,以及脂质类如蜂蜡、植物油等。

多糖分子由化学性质稳定的长链螺旋结构组成,易于成膜,且含有大量亲水基团,可作为番茄的涂层保鲜材料,在番茄表面形成保湿层,减少果实内部水分散失,维持果实的鲜嫩度和饱满度。壳聚糖涂层可显著降低番茄中与成熟相关的酶活性,导致软化速度变慢,保鲜期延长,还有助于保持番茄红素的含量和整体品质^[14]。1.0%海藻酸钠处理可更好地减少番茄营养物质在室温条件下的损失^[15]。蛋白质分子通过氢键、二硫键、疏水相互作用等可在果实表面形成具有一定机械强度和韧性的薄膜,同时,蛋白质分子含有多种功能基团(氨基、羧基、羟基等),可与其他物质发生相互作用,通过与具有抑菌、抗氧化等功能的物质结合,赋予涂层更多的保鲜功能。脂质分子具有长的碳氢链,表现出很强的疏水性,能有效阻止水分从果实内部向外散失,同时,脂质分子间的作用力使其具有一定的柔韧性和延展性,可在果实表面形成连续、均匀且有弹性的薄膜,但蛋白质类和脂质类薄膜均存在机械性能较差的问题,因此较少单独用于番茄的贮藏保鲜,而是与其他材料复合使用。

3.2 可食性涂层材料复配保鲜

单独使用可食性涂层通常在耐水性和机械性能等方面存在一定的局限性,因此,可通过不同可食性涂层材料间的复配实现各组分间的功能互补,协同提升涂层的相关性能。

3.2.1 多糖-多糖复配 单一多糖制备的涂层材料机械性能和阻隔性能较差,而多糖与多糖的复配可使氢键相互作用形成互穿网络结构,有效改善涂层整体的机械性能和阻隔性能,进而提高涂层保鲜效果。如壳聚糖-魔芋葡甘露聚糖复配涂层能使番茄的呼吸高峰推迟,减少营养物质消耗^[16],0.5%壳聚糖+0.8%可溶性淀粉+0.3%羧甲基纤维素钠能有效减少番茄在贮藏期间的水分损失,使保鲜期延长至

15 d 以上^[17]。一些多糖本身具有抑菌性,复配后可增强抑菌效果,如壳聚糖与其他多糖复配形成的涂层能有效抑制番茄表面常见霉菌及细菌等微生物的生长与繁殖,从而显著降低果实腐烂率。Liu 等^[18]在羟乙基纤维素(HEC)中添加具有抗菌性的硫酸化米糠多糖(SRBP),制成的复合涂膜用于樱桃番茄的保鲜,结果证实保鲜效果较好。多糖复配涂层还能有效维持番茄的硬度、色泽、风味等品质指标,如壳聚糖-芦荟凝胶涂层可以更好地保持其外观色泽和口感,有效减缓自然衰老过程,并将保鲜期延长到 42 d^[19]。

3.2.2 多糖-蛋白质复配 蛋白质类大分子对气体的阻隔作用有限,而多糖类对 O₂ 和 CO₂ 阻隔性更好,二者协同作用,复合涂层的阻气性能更加显著。例如,壳聚糖是一种多糖,明胶是蛋白质,壳聚糖-明胶复合膜可在番茄表面形成保护膜,调节番茄周围的气体环境,抑制其呼吸作用,减少水分散失,同时壳聚糖的抗菌性与明胶的成膜性结合,能有效延缓番茄的成熟和衰老,减少微生物侵染,延长番茄的货架期^[20]。虫胶-芦荟凝胶复合涂层相较于单一涂层,具有更强的 O₂、CO₂ 和水蒸气阻隔性能,可有效抑制番茄的呼吸作用和乙烯合成,并维持果实硬度,使番茄的常温保鲜期延长至 12 d^[21]。

3.2.3 多糖-脂类复配 多糖本质上亲水,且伸展性较差,而脂质材料由于其疏水性而导致涂层的水蒸气渗透率较低,二者结合后成膜性和保鲜效果更好。用羟丙基甲基纤维素复合蜂蜡制作樱桃番茄的保鲜涂层,结果樱桃番茄的失重率和呼吸速率均有所降低^[22]。RUZAINA 等^[23]制备了一种新型壳聚糖-棕榈硬脂(棕榈油酸)复合涂层,发现可有效维持樱桃番茄果实的硬度并显著减少质量损失,保持果实品质。

3.2.4 蛋白质-脂质复配 蛋白质可以形成具有一定强度和韧性的薄膜结构,脂质则具有良好的疏水性,二者的复合涂层可在番茄表面形成连续、均匀的保护膜,阻止 O₂ 进入,降低番茄的呼吸速率,减少营养物质消耗,还能阻碍水分散失,保持果实的新鲜度。某些蛋白质如溶菌酶等具有抗菌活性,可破坏微生物的细胞壁等结构,抑制微生物生长,同时一些脂质也具有一定的抗菌性,如中链脂肪酸等,二者结合可协同增强对番茄表面微生物的抑制作用,减少腐烂。大豆分离蛋白-石蜡复合涂层是一种较好的番茄涂层保鲜材料^[24],2%大豆分离蛋白+0.2%蜂蜡复合涂层可有效减少樱桃番茄的质量损

失,更好地维持果实颜色、硬度、可溶性固形物含量及 pH 值等,保鲜效果显著^[25]。添加 0.3%丁香酚的大豆蛋白涂层能有效保持樱桃番茄果实硬度、减少维生素 C 和总酸度损失^[26]。常温贮藏 12 d 后,经过茶多酚-大豆分离蛋白复合涂层处理的樱桃番茄其腐烂率和失重率均比未涂膜对照组更低,且维生素 C 含量和总酸度分别是后者的 1.21 倍和 1.41 倍^[27]。

4 功能性涂层技术

4.1 微生物涂层

微生物涂层保鲜是利用涂覆在番茄表面的有益微生物(拮抗菌)及其代谢产物来抑制病原菌生长、延缓食品变质的技术,主要通过竞争抑制、产生抑菌物质、改善环境条件、诱导宿主抗性等几种途径发挥保鲜作用(图 1)。张晓宇等^[28]利用解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*)Y-3 对番茄进行

防腐保鲜,发现其对采后早疫病和灰霉病的病原菌具有良好的防治效果,可有效降低红熟番茄货架期腐烂率和病果率。Freitas 等^[29]研究发现,哈茨木霉产生的哈茨酸对真菌生长有显著抑制活性,含特定比例成分的配方可显著减少番茄的质量损失和营养物质降解,保持多种品质属性,还能有效控制微生物生长,改善番茄果实的颜色和硬度。壳寡糖与卡利比克毕赤酵母结合使用可有效控制番茄采后黑斑病,降低自然腐烂率,对番茄品质无显著不良影响,还能缓解品质劣变^[30]。张鸿雁等^[6]从番茄健康植株根际土壤筛选出对其有拮抗作用的放线菌 X13,该菌能抑制病原菌生长,提高番茄抗性酶 PPO、POD 和 PAL(苯丙氨酸解氨酶)活性,降低腐烂指数,延缓果实硬度、可溶性固形物含量、总酸含量及维生素 C 含量的降低,对贮藏期番茄有良好的防腐保鲜作用。

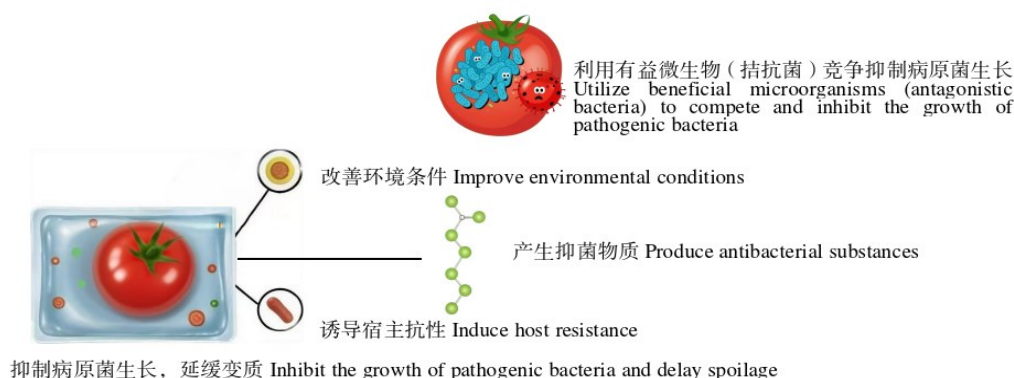


图 1 微生物保鲜作用机制

Fig.1 Mechanism of microbial preservation

4.2 植物提取物涂层

植物提取物涂层保鲜是利用植物中的天然抑菌成分抑制微生物生长,从而达到贮藏保鲜效果(图 2)。该法因具有天然、绿色、安全且具有多种生物活性等特点,逐渐成为番茄贮藏保鲜领域的研究热点。植物提取物中的抗氧化成分,如黄酮类、多酚类物质,能有效清除番茄在贮藏过程中产生的自由基。如丁香提取物中的丁香酚能够破坏微生物细胞膜的完整性,使细胞内的物质泄漏,从而抑制细菌和真菌生长^[31]。迷迭香提取物中的迷迭香酸具有很强的抗氧化能力,可减缓番茄中脂质过氧化反应,保护细胞膜稳定性,还可以提高果实抗氧化系统的能力,诱导 CAT、SOD 等活性增强和对应基因的表达^[32]。研究发现,经抗氧化植物提取物处理后的番茄,在贮藏期间的 SOD 和 CAT 等抗氧化酶活性相对较高,MDA 含量较低,果实的色泽和硬度保

持较好^[33]。部分植物提取物还可以调节番茄的生理代谢过程,进而延长其保鲜期。郭红莲等^[34]研究证实,SA(水杨酸)处理使番茄的蛋白质含量以及与其抗逆性有关的酶(PPO 和 POD)活性显著增强,因此认为 SA 可以诱导番茄产生系统抗性,增强其对病原菌的抵抗力,同时调节果实的成熟进程。

植物精油是从植物中提取制备的脂质类物质,是一类公认安全的天然保鲜剂,具有较强的抗氧化能力和广谱抑菌特性,可有效抑制微生物生长、清除果实体内自由基并诱导果实抗病相关酶系统反应,从而达到较好的保鲜效果。将海藻酸钠和香橙精油制备成纳米乳液涂层用于番茄的贮藏保鲜,可有效抑制病原菌生长,延缓成熟、减少腐烂,显著延长保鲜期^[35]。较低浓度的鼠尾草精油与芦荟凝胶复配成涂层材料,可使番茄的保鲜效果更好(11℃, 90% RH)^[36]。其他几种植物精油的作用见表 1。

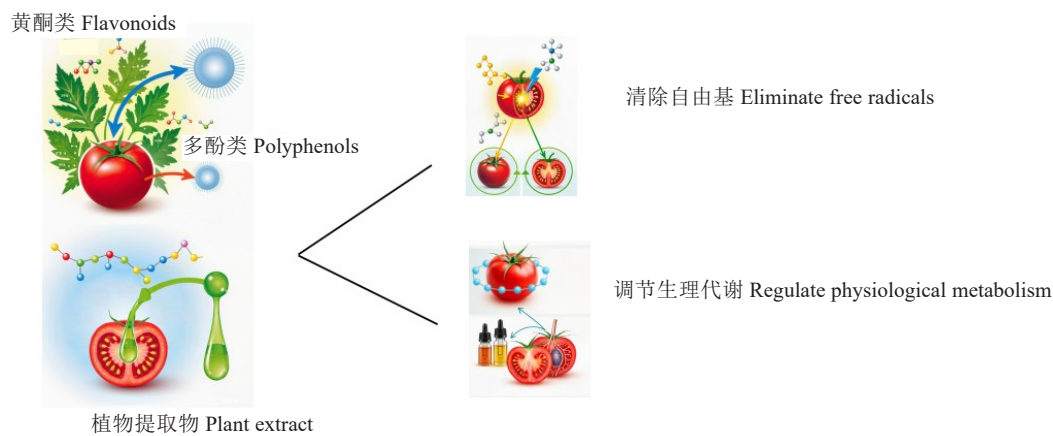


图 2 植物提取物保鲜作用机制
Fig. 2 Mechanism of preservation of plant extracts

表 1 几种植物精油对微生物的抑制效果

Table 1 Inhibitory effects of several plant essential oils on microorganisms

种类 Types	抑菌主要成分 Main antibacterial component	抑制微生物种类 Types of inhibited microorganisms	参考文献 References
香漆柏精油 Cypress essential oil	α -蒎烯、 β -石竹烯、环氧石竹素 α -pinene, β -caryophyllene, epoxy caryophyllene	灰霉病菌 <i>Botrytis cinerea</i>	[37]
肉桂精油 Cinnamon essential oil	反式肉桂醛、丁香酚、芳樟醇 Trans-cinnamaldehyde, eugenol, linalool	粉红单端孢菌、灰葡萄孢菌、链格孢菌、扩展青霉菌 <i>Trichospora tetraphylla</i> , <i>Trichospora glabrata</i> , <i>Trichospora glabrata</i> , <i>Penicillium expansum</i>	[38]
		大肠杆菌、金黄色葡萄球菌 <i>Escherichia coli</i> , <i>Staphylococcus aureus</i>	[39]
		链格孢菌 <i>Streptomyces</i>	[40]
		软腐病菌 Soft rot pathogen	[41]
翅果芋精油 Winged taro essential oil	石竹烯 Caryophyllene	曲霉、尖孢镰刀菌、白地霉 <i>Aspergillus</i> , <i>Fusarium acuminatum</i> , <i>Trichoderma leukoderma</i>	[42]
丁香精油 Clove essential oil	丁香酚 Eugenol	黑曲霉、尖孢镰刀菌 <i>Aspergillus niger</i> , <i>Fusarium acuminatum</i>	[43]
	丁香酚和石竹烯 Eugenol and caryophyllene	灰葡萄孢霉、粉红单端孢霉、串珠镰刀菌 <i>Botrytis cinerea</i> , <i>Trichothecium roseum</i> , <i>Fusarium verticillioides</i>	[44]
当归茎叶精油 Angelica sinensis stem and leaf essential oil	2,4,5-三甲基苯甲醛、 α -蒎烯 2, 4, 5-trimethylbenzaldehyde, α -pinene	粉红单端孢菌、疏色镰刀菌、互隔交链孢菌、扩展青霉菌 <i>Trichothecium roseum</i> , <i>Fusarium sulphureum</i> , <i>Alternaria alternata</i> , <i>Penicillium expansum</i>	[45]
薰衣草精油 Lavender essential oil		金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、单核细胞增生李斯特菌 <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Listeria monocytogenes</i>	[46]
芸香精油 Rutin essential oil	2-十一烷酮、2-壬酮 2-undecanone, 2-nonanone	霉菌、酵母、嗜氧菌、嗜温细菌 Mold, yeast, aerobic bacteria, and mesophilic bacteria	[47]
百里香精油 Thyme essential oil		大肠杆菌 <i>Escherichia coli</i>	[48]

5 复合涂层与智能材料应用

5.1 复合涂层

涂层中添加甘油等增塑剂可增强柔韧性和延展性,避免涂层脆化易损,利于附着在被涂覆物体

表面;使用交联剂能稳定单一涂层的分子结构,提高涂层在不同环境下的稳定性,延长使用寿命;添加具有特定功能的物质,比如抗菌剂,可强化抗菌效果,或者添加一些能提高涂层亲/疏水性的物质以满足实际应用中涂层性能的要求;添加某些物质

能改变涂层在不同溶剂中的溶解情况,使其适配各种使用条件;此外,还可与其他功能性组分如纳米 TiO_2 、MOFs(金属-有机框架)材料等复合使用,有效提升膜的拉伸、阻隔性能,这也是目前果蔬保鲜或包装材料研究和应用的热点之一^[50],但是复合使用的纳米和金属材料对食品安全性的影响应得到充分重视。

复合涂层能综合多种成分的优势,更有效地抑制微生物生长、延缓食品氧化及呼吸作用等,延长保鲜期;可改善涂层的阻隔性能,优化机械性能使其更耐磨损、不易破裂;通过复合不同物质可满足多样化的保鲜及防护需求。张朝涛等^[51]利用菊花提取物绿色合成纳米银,与壳聚糖制备成复合涂层用于樱桃番茄的保鲜,可有效保持樱桃番茄中较高的可溶性固形物、总酸及维生素C含量,并能显著降低樱桃番茄的腐烂率和失重率。

5.2 智能材料

在番茄涂层保鲜领域,智能材料的应用核心是响应型涂层与功能化载体的精准耦合,通过感知番茄采后生理代谢变化或外界环境波动,实现保鲜功能的动态调控与按需释放,从被动防护升级为主动适配的智能化保鲜模式,有效解决了传统涂层保鲜效果单一、无法适配复杂贮藏运输场景的问题。目前研究较为成熟的智能响应涂层包括pH响应型智能涂层、温度响应型智能涂层、氧化响应型智能涂层等,通过结合pH、温度、氧化反应等敏感材料^[52-53],设计可动态调节气体渗透率的“智能膜”,以适配番茄不同成熟阶段的呼吸需求。

此外,还可以将纳米填料(SiO_2 、 TiO_2 、 ZnO 纳米颗粒、纤维素纳米晶等)与上述单一响应型材料复合制备智能涂层体系,通过多组分协同整合实现“响应调控-结构增强-功能叠加”的综合保鲜效果^[54]。其设计核心是纳米填料通过填充涂层内部孔隙、构建致密网络,显著提升涂层的机械强度、水氧阻隔性和抗裂性,同时利用纳米 TiO_2 等材料的光催化抑菌特性,在光照条件下产生羟基自由基破坏微生物细胞膜,与响应型涂层释放的抑菌剂形成协同抗菌效应;根据应用场景不同,可灵活组合pH/温度氧化响应机制,适配番茄长期冷链贮藏运输或常温货架保鲜的差异化需求。

6 存在问题与未来展望

尽管涂层技术在番茄保鲜中展现出显著优势,但其产业化应用仍面临标准化不足、协同机制不

明、成本较高等关键问题。一方面,涂层材料配比、功能性成分使用等缺乏统一标准,影响技术稳定性,限制了技术的应用推广;另一方面,复合涂层中多组分相容性差及纳米材料(如AgNPs)的长期食用安全性需进一步验证。此外,存在成本与规模化瓶颈,如植物精油的提取成本高昂,且抑菌浓度阈值较高,制约产业化应用。

未来应着力于智能响应型涂层的开发,通过pH/温度敏感材料实现保鲜功能的动态调控;加强多组学技术融合,利用代谢组学解析拮抗菌的抑菌代谢通路,联合转录组学筛选番茄抗病关键基因,实现精准保鲜;开展绿色增效技术探索,开发兼具物理阻隔与化学抑菌功能的光催化-精油协同系统,实现废弃生物质原材料的涂层材料再生利用,降低环境负荷。番茄保鲜技术的革新需跨学科协作,推动实验室成果向产业端转化,促进番茄保鲜技术和番茄产业的安全、高效、绿色发展。

参考文献

- [1] FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations[DB/OL]. (2025-06-11)[2025-09-22]. <https://www.fao.org/faostat/zh/#home>.
- [2] Fekadu A, Andarege B. Analysis of the pre-harvest factors that influence on the postharvest quality attributes of Tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mill.): A systematic review[J]. Scientia Horticulturae, 2024, 337: 113460.
- [3] 陈利达, 石延霞, 谢学文, 等. 我国不同地区番茄主要病毒病种类的分子检测与分析[J]. 华北农学报, 2020, 35(1): 185-193.
- [4] 曹继璇. GSNOR 在 GABA 诱导番茄果实抗灰霉病中的作用研究[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2021.
- [5] 张晓云, 岳青蓉, 周游, 等. 拮抗酵母控制樱桃番茄采后病害及其机制研究[J]. 中国食品学报, 2024, 24(4): 304-314.
- [6] 张鸿雁, 林国莉, 李如莲, 等. 番茄果腐病拮抗菌的筛选及对番茄的防腐保鲜作用[J]. 生物技术通报, 2022, 38(3): 69-78.
- [7] Liu H J, Han X W, Fadji T B, et al. Prediction of the cracking susceptibility of tomato pericarp: Three-point bending simulation using an extended finite element method[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 187: 111876.
- [8] 罗云波, 生吉萍. 园艺产品贮藏加工学(贮藏篇)[M]. 3版. 北京: 中国农业大学出版社, 2022.
- [9] 刘佳, 乔丽萍, 李喜宏, 等. 温度波动对樱桃番茄贮藏效果研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(11): 198-202.
- [10] Joung M J, Shin Y J. Physicochemical quality, antioxidant compounds, and activity of 'Beta Tiny' and 'TY Nonari' cherry tomatoes during storage[J]. Korean Journal of Food Science and Technology, 2021, 53: 63-71.
- [11] 孙中峰, 曹霞, 毛秀杰, 等. 不同硬度番茄成熟果实贮藏期间的品质变化[J]. 河北科技师范学院学报, 2011, 25(3): 16-19.
- [12] Ali Q, Kurubas M S, Dogan A, et al. Variations in postharvest attributes of different types of tomatoes stored under shelf-life

- conditions[J]. *Acta Horticulturae*, 2022, 1275:303-310.
- [13] Gautam D M, Tripathi K M, Acedo A L, et al. Effect of maturity stage and packaging method used in transportation on reduction of transportation loss and extension of shelf-life in tomato[J]. *Acta Horticulturae*, 2017, 1179:201-206.
- [14] Shehata S A, Abdelrahman S Z, Megahed M M, et al. Extending shelf life and maintaining quality of tomato fruit by calcium chloride, hydrogen peroxide, chitosan, and ozonated water[J]. *Horticulturae*, 2021, 7(9):309.
- [15] 任邦来, 邱婷婷. 海藻酸钠对番茄保鲜效果的影响[J]. *中国食物与营养*, 2017, 23(10):38-41.
- [16] 李浩祥, 倪学文, 徐玮键, 等. 魔芋葡甘聚糖/乙基纤维素复合膜对水果保鲜效果的影响[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(7):248-252.
- [17] 安承松, 白雪静, 石玉, 等. 可食性液态膜复合保鲜剂对番茄保鲜效果的研究[J]. *保鲜与加工*, 2017, 17(6):27-32.
- [18] Liu G G, Chen B J, Liu H R, et al. Effects of hydroxyethyl cellulose and sulfated rice bran polysaccharide coating on quality maintenance of cherry tomatoes during cold storage[J]. *Foods*, 2023, 12(17):3156.
- [19] Khatri D, Panigrahi J, Prajapati A, et al. Attributes of Aloe vera gel and chitosan treatments on the quality and biochemical traits of post-harvest tomatoes[J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 259:108837.
- [20] Erceg T, Šovljanski O, Stupar A, et al. A comprehensive approach to chitosan-gelatine edible coating with β -cyclodextrin/lemongrass essential oil inclusion complex-characterization and food application[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 228:400-410.
- [21] Chauhan O P, Nanjappa C, Ashok N, et al. Shellac and aloe vera gel based surface coating for shelf life extension of tomatoes[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(2):1200.
- [22] Fagundes C, Palou L, Monteiro A R, et al. Hydroxypropyl methylcellulose - beeswax edible coatings formulated with antifungal food additives to reduce alternaria black spot and maintain post-harvest quality of cold-stored cherry tomatoes[J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 193:249-257.
- [23] Ruzaina I, Fang Z, Norizzah A R, et al. Effect of different degree of deacetylation, molecular weight of chitosan and palm stearin and palm kernel olein concentration on chitosan as edible packaging for cherry tomato[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2017, 41(4):1-12.
- [24] 宋慧, 钟志春, 马利华, 等. 番茄涂膜保鲜效果评价[J]. *徐州工程学院学报(自然科学版)*, 2020, 35(2):11-16.
- [25] 隋思瑶, 马佳佳, 陆皓茜, 等. 不同涂膜处理对樱桃番茄保鲜效果的影响[J]. *保鲜与加工*, 2019, 19(5):40-45.
- [26] 刘永, 颜冬梅, 李志伟. 丁香酚/大豆蛋白膜对圣女果保鲜效果的研究[J]. *中国食品添加剂*, 2017(4):83-87.
- [27] 郭丛珊, 张丽叶. 含茶多酚大豆分离蛋白抗菌膜的制备及其性能和保鲜效果[J]. *北京化工大学学报(自然科学版)*, 2011, 38(4):104-109.
- [28] 张晓宇, 张立新, 高振峰, 等. *Bacillus amyloliquefaciens* Y-3 保鲜剂的制备及对番茄货架期的影响[J]. *西北农业学报*, 2019, 28(12):2043-2052.
- [29] Freitas D L D A, Silva C D J, Vandenbergh P D S L, et al. Bioactive coating containing harzianic acid: Control of *Fusarium oxysporum* and preservation of tomato quality[J]. *Food Control*, 2024, 126:110445.
- [30] 张晓云, 周红瑶, 张红印, 等. 壳寡糖结合卡利比克毕赤酵母防治番茄采后病害及贮藏保鲜的方法: CN 115989828 A[P]. 2023-12-22.
- [31] Xu J G, Liu T, Hu Q P, et al. Chemical composition, antibacterial properties and mechanism of action of essential oil from clove buds against *Staphylococcus aureus*[J]. *Molecules*, 2016, 21(9):1194.
- [32] 周志雯. 迷迭香酸对番茄高温抗性和果实采后品质的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [33] 司宝华, 文炳南, 葛蓓蕾, 等. 枸杞叶多酚对樱桃番茄贮藏的保鲜效果[J]. *安徽农学通报*, 2019, 25(23):52-53.
- [34] 郭红莲, 路玉蓉, 王刚志, 等. 水杨酸对采后番茄抗逆性及病程相关蛋白的影响[J]. *现代食品科技*, 2012, 28(2):131-134.
- [35] Das S, Vishakha K, Banerjee S, et al. Sodium alginate-based edible coating containing nanoemulsion of *Citrus sinensis* essential oil eradicates planktonic and sessile cells of food-borne pathogens and increased quality attributes of tomatoes[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 162:1770-1779.
- [36] Tzortzakakis N, Xylia P, Chrysargyris A. Sage essential oil improves the effectiveness of aloe vera gel on postharvest quality of tomato fruit[J]. *Agronomy*, 2019, 9(10):635.
- [37] Rguez S, Ben S I, Abid G, et al. *Tetraclinis articulata* essential oil reduces *Botrytis cinerea* infections on tomato[J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 266:109291.
- [38] 蔡锦玲, 蓝波妙, 陈品品, 等. 番茄采后病菌鉴定及肉桂精油的抑菌分析[J]. *亚热带植物科学*, 2021, 50(2):140-146.
- [39] He X, Li M, Gong X C, et al. Biodegradable and antimicrobial CSC films containing cinnamon essential oil for preservation applications[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2021, 29:100697.
- [40] Black-Solis J, Ventura-Aguilar R I, Correa-Pacheco Z, et al. Pre-harvest use of biodegradable polyester nets added with cinnamon essential oil and the effect on the storage life of tomatoes and the development of *Alternaria alternata*[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 245:65-73.
- [41] 蒋梦曦, 林福兴, 别小妹, 等. Iturin A 与肉桂精油复配提升樱桃番茄贮藏品质[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(19):206-212.
- [42] Dania V O, Olaleye E A. Chemical characterization of essential oil constituents of three selected botanicals and their antimicrobial activity against postharvest rot pathogens of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) [J]. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 2022, 55(5):564-582.
- [43] Castellanos L M, Olivas N A, Ayala-Soto J, et al. *In vitro* and *in vivo* antifungal activity of clove (*Eugenia caryophyllata*) and pepper (*Piper nigrum* L.) essential oils and functional extracts against *Fusarium oxysporum* and *Aspergillus niger* in tomato

- (*Solanum lycopersicum* L.)[J]. International Journal of Microbiology, 2020, 2020: 1702037.
- [44] 陈梅. 丁香精油对番茄采后腐烂抑制作用及成分分析[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2016, 36(9): 678-684.
- [45] 乔彩红, 李斌山, 张忠, 等. 当归茎叶精油对四种果蔬采后腐败真菌的抑制活性[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(11): 206-212.
- [46] Sun X, Wang J, Zhang H, et al. Development of functional gelatin-based composite films incorporating oil-in-water lavender essential oil nano-emulsions: Effects on physicochemical properties and cherry tomatoes preservation[J]. LWT- Food Science and Technology, 2021, 142: 110987.
- [47] Peralta-Ruiz Y, Tovar C D G, Sinning-mangonez A, et al. Reduction of postharvest quality loss and microbiological decay of tomato 'Chonto' (*Solanum lycopersicum* L.) using chitosan-essential oil-based edible coatings under low-temperature storage[J]. Polymers, 2020, 12(8): 1822.
- [48] He Q, Guo M M, Jin T Z, et al. Ultrasound improves the decontamination effect of thyme essential oil nanoemulsions against *Escherichia coli* O157: H7 on cherry tomatoes[J]. International Journal of Food Microbiology, 2021, 337: 108936.
- [49] 刘玉姣, 鲁丁强, 刘丹阳, 等. 植物提取物应用于番茄贮藏的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(19): 208-217.
- [50] 刘程宏, 张舜, 黄文, 等. 壳聚糖涂层在果蔬贮藏保鲜上的研究与应用[J]. 河南农业科学, 2025, 54(7): 1-11.
- [51] 张朝涛, 王春慧, 高光晔, 等. 用于樱桃番茄保鲜的纳米银复合膜材料研究与应用[J]. 生物技术进展, 2023, 13(6): 925-933.
- [52] Li L L, Guo W X, Wang L, et al. Chitosan derived nano-selenium based coatings for postharvest safety of cherry tomato[J]. LWT - Food Science and Technology, 2025, 217: 117441.
- [53] Wang Y K, Jin Z Y, Zhang Z J, et al. pH-responsive polymer films based on click polymerization for food freshness monitoring: Non-toxic, non-leaking, and antibacterial[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(28): 33998-34007.
- [54] Liu X Y, Auth T, Hazra N, et al. Wrapping anisotropic microgel particles in lipid membranes: Effects of particle shape and membrane rigidity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2023, 120(30): e2217534120.