DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260114001
引用格式: 闫绍鹏, 杨瑞华, 迟宏伟. 鲜食草莓采后保鲜技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(10): 214–222.
YAN SP, YANG RH, CHI HW. Research progress on postharvest preservation techniques of fresh-eating *Fragaria anansissa* Duch [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(10): 214–222. (in Chinese with English abstract).

鲜食草莓采后保鲜技术研究进展

闫绍鹏[1], 杨瑞华[2*], 迟宏伟[3]

(1. 东北林业大学食品与健康学院, 哈尔滨 150040; 2. 黑龙江省农业科学院园艺分院, 哈尔滨 150040; 3. 宁夏瑞信农业开发有限公司, 银川 750010)

摘 要: 草莓果实皮薄, 果肉含水量高, 采后生理代谢旺盛, 储运中易受机械损伤和微生物侵染而腐烂变质, 货架期短。为减少损失, 提升商品价值, 开发安全高效的保鲜技术至关重要。本文系统综述了近年来国内外草莓采后保鲜技术研究, 围绕物理、化学、生物、纳米材料及综合保鲜技术, 深入剖析了各类技术的保鲜机制与应用效果。物理保鲜通过环境控制, 抑制代谢过程来延缓果实衰老; 化学保鲜通过外加化学成分起到抑制微生物、抗氧化作用; 生物保鲜利用生物来源的天然物质或拮抗菌, 控制病原菌与水分流失; 纳米保鲜利用纳米材料的特殊性质如强抑菌、控释能力、增强阻隔等, 提升保鲜剂的效果或包装材料的性能。此外, 多技术联用的协同增效作用也显示出良好的应用前景。基于现有研究, 加强多组学技术解析保鲜机制, 推动新型生物源保鲜剂研发, 探索智能响应型包装材料的应用, 未来保鲜技术将向绿色、高效与智能化融合的方向发展。本文旨在为草莓采后保鲜技术研究提供理论依据, 并为工艺优化与产业应用提供科学指导。

关键词: 草莓; 采后生理; 保鲜技术; 纳米技术

Research progress on postharvest preservation techniques of fresh-eating *Fragaria anansissa* Duch

YAN Shao-Peng[1], YANG Rui-Hua[2*], CHI Hong-Wei[3]

(1. *College of Food and Health*, *Northeast Forestry University*, *Harbin* 150040, *China*; 2. *Horticulture Branch Heilongjiang Academy of Agricultural*, *Harbin* 150040, *China*; 3. *Ningxia Ruixin Agricultural Development Co*., *Ltd*., *Yinchuan* 750010, *China*)

ABSTRACT: *Fragaria anansissa* Duch fruits are characterized by thin skin, high flesh water content, and vigorous postharvest physiological metabolism, rendering them highly susceptible to mechanical damage and microbial infection during storage and transportation, which results in rapid decay and a short shelf life. To reduce losses and enhance commercial value, the development of safe and efficient preservation technologies is essential. This paper systematically reviewed recent domestic and international research on postharvest *Fragaria anansissa* Duch preservation, focused on physical, chemical, biological, nanomaterial-based and integrated preservation technologies, and provided an in-depth analysis of their preservation mechanisms and application effects. Physical preservation

收稿日期: 2026-01-14
基金项目: 黑龙江省农业科技创新跨越工程专项(农业特色产业科技创新支撑项目)(CX23TS14)
第一作者: 闫绍鹏(1975—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为植物资源开发及改良育种。E-mail: ysp_4@126.com
***通信作者:** 杨瑞华(1976—), 女, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为草莓栽培技术及良种选育。E-mail: yrh_ray@126.com

delayed fruit senescence by controlling environmental conditions to suppress metabolic processes. Chemical preservation employed exogenous chemical compounds to inhibit microorganisms and exert antioxidant effects. Biological preservation utilized naturally derived substances or antagonistic microorganisms to control pathogens and water loss. Nanomaterial-based preservation exploited the unique properties of nanomaterials-such as strong antimicrobial activity, controlled-release capability and enhanced barrier properties-to improve the efficacy of preservatives or the performance of packaging materials. Furthermore, the synergistic effects achieved by combining multiple technologies also demonstrate promising application prospects. Based on current research, future efforts should strengthen the use of multi-omics approaches to elucidate preservation mechanisms, promoted the development of novel bio-derived preservatives, and explored the application of smart responsive packaging materials, driving preservation technologies toward the integration of green, efficient and intelligent strategies. This review aims to provide a theoretical basis for research on *Fragaria anansissa* Duch postharvest preservation and offer scientific guidance for process optimization and industrial application.

KEY WORDS: *Fragaria anansissa* Duch; postharvest physiology; preservation techniques; nanotechnology

0　引　言

草莓(*Fragaria anansissa* Duch), 蔷薇科草莓属多年生草本植物, 果实外形美观, 口感独特, 富含维生素、多酚类和花青素等营养成分, 被誉为“水果皇后”, 深受消费者青睐。但草莓果实果肉柔嫩, 果皮较薄, 采后储运和销售过程中极易发生腐烂, 研究表明, 加拿大安大略省每年有近 56%的草莓因腐烂被丢弃[1], 造成极大的经济损失。草莓采后品质下降主要表现为果实失水皱缩、色泽暗淡、质地软化、风味丧失、营养成分损失和微生物导致腐烂等。根据果实损伤原因不同, 可分为生理性损伤, 如冷害、过熟、机械损伤等; 微生物病害损伤, 如由灰葡萄孢菌(*Botrytis cinerea*)引起的灰霉病和根霉属真菌引起的软腐病[2]及白粉病、黑斑病等。

为解决鲜食草莓采后不耐贮的问题, 研究者对草莓保鲜技术进行了大量研究。探索多种草莓采后保鲜技术以抑制病原菌生长, 延长货架期, 是草莓产业发展的关键环节。目前, 草莓采后保鲜主要通过冷藏[3]、气调包装[4]、热处理[5]、辐照[6]、磁场处理[7]、等离子处理[8]、化学保鲜[9]、拮抗微生物[10]、保鲜涂膜[11]、纳米材料包装膜[12]等技术实现。

草莓采后保鲜技术的应用可以延长草莓货架期, 保持草莓质量, 对草莓产业的发展具有重要的意义。本文从作用机制、技术优点和局限性 3 个维度, 对现有草莓保鲜技术进行综述, 以期揭示从单一物理调控向多技术协同、从化学防腐向绿色保鲜的研究发展趋势, 并提出展望, 旨在为该领域的研究提供理论参考。

1　鲜食草莓采后保鲜的主要方法

1.1　物理保鲜方法

草莓采后物理保鲜方法因其绿色、安全、无化学残留等特点, 已成为研究和应用的重要方向。这类方法主要通过控制贮藏环境的物理参数或施加外部物理场, 直接作用于果实及其附着的微生物, 有效延缓衰老、抑制腐烂、保持果实品质。物理保鲜方法正朝着智能化、精准化、复合化的方向发展。物理保鲜方法作为草莓采后绿色保鲜体系的核心组成部分, 持续技术创新与优化, 对于提升草莓产业的经济效益、保障食品安全和减少环境污染具有至关重要的意义。

1.1.1　冷藏保鲜

冷藏是将果实贮藏于较低温度条件下, 通过降低代谢速率来保持果实品质的常用保鲜方法。谢晶等[13]试验表明, 在 20 ℃条件下贮藏的草莓约 3 d 后已经不能为消费者所接受, 但在 0 ℃或 4 ℃条件下的草莓货架期约为 15 d, 且感官评分、质构参数、颜色变化、质量损失率均没有显著差异(P>0.05)。普通家用冰箱有一定的温度波动, 推荐 4 ℃为草莓的适宜贮藏温度; 在贮运过程中, 低温可以延缓草莓腐烂, 但不会完全消除, 且温度应适当控制, 不可过低, 否则草莓会被冻伤。低温冷藏是草莓保鲜的基础手段, 常与其他技术结合使用, 以达到更好的保鲜效果[14–15]。

1.1.2　气调保鲜

气调保藏法是通过调整储存环境气体的组成来抑制果实呼吸作用。并在低温下贮藏, 抑制或延缓微生物生长和营养成分氧化变质, 延长食品货架期的一种保鲜技术[16]。

ALLENDE 等[17]研究发现, 10% CO_2+5% O_2 的气调环境能有效降低草莓的腐烂率和呼吸强度, 保持较好的感官品质; LUIS 等[18]研究表明, 在 80 kPa N_2O+20 kPa O_2 10 ℃条件下贮藏草莓 14 h 后, 品质接近于收获时新鲜水果的品质, 认为草莓在此条件下没有代谢变化; 这两种气调保鲜方法分别代表了草莓采后保鲜从“抑制代谢强度”向“维持生理稳态”的技术转向, 前者依托 CO_2 竞争性抑制呼吸链, 后者则利用 N_2O 抑制。

1.1.3 辐照保鲜

草莓采后辐照保鲜技术，是一种利用电离辐射(如 γ 射线、电子束)处理果实，以灭杀或抑制果实表面微生物、延缓生理代谢，从而达到延长货架期的非热物理保鲜方法[19]。其核心原理是通过辐射能量直接破坏微生物[如导致草莓腐烂的灰霉菌(*Botrytis cinerea*)]的 DNA，或通过水分子辐解产生的活性氧自由基间接损伤细胞结构，实现“冷杀菌”[20]。同时，适宜的辐照剂量可以钝化部分酶活性，减缓果实后熟与衰老进程。

MILTON 等[21]的试验表明，2 kGy 处理的草莓果实，在 12 d 的贮藏试验期间，品质变化很小，在研究的贮藏期间，能够维持感官接受度，获得很好的微生物质量，而 1 kGy 处理达到的效果不足，3 kGy 和 4 kGy 强度处理对果实品质产生负面影响。

1.1.4 热处理保鲜

热处理是草莓采后保鲜领域一项经典且持续发展的物理技术，其核心在于利用高于常温但低于致害温度的短期热胁迫，调控果实的生理代谢与抗病能力，还能够灭杀果实表面真菌、害虫和虫卵，排除不利于贮藏的生物因素，从而达到延缓衰老和抑制病害的双重目的。国内外研究围绕热处理技术的优化、作用机制及与其他技术的协同应用，已形成了完善的技术体系[22]。

热处理介质主要有热水、热空气和热蒸汽 3 种。研究表明，热处理能够降低果实失重率、维持硬度、降低腐烂率和色度的变化，延缓酸度变化，且对总糖含量无显著影响[23]。EUNICE 等[24]采用温和热(46.0±0.5) ℃处理 5 min 将果实真菌感染的发作时间推迟了 6 d，并显著提高了果实的硬度和抗变形能力。此外，热处理能够抑制内切葡聚糖酶(endoglucanase，EGase)、β-木糖苷酶(β-xylosidase，β-Xyl)、多聚半乳糖醛酸酶(polygalacturonase, PG)、β-半乳糖苷酶(β-galactosidase，β-Gal)活性，延缓半纤维素降解，影响果胶的增溶[25]；减少花青素的损失[26]，影响相关基因的表达(*FaCel1*、*FaXyl1*、*FaPG1*、*FaExp2*)[27]，使组织保持较高的完整性。

1.1.5 超声波及静电场处理保鲜

超声波处理的原理是超声波穿透固体物质之后，整个液体介质会震荡产生空化气泡进而产生高温和高压从而破坏食品中细菌的结构进而达到贮藏保鲜的作用[28]。类似的物理保鲜方法还有低、高压静电场处理[29−30]，通过处理延缓草莓的呼吸和微生物繁殖代谢作用，保鲜效果远高于未处理的草莓。

GANI 等[31]采用 33 kHz、60W 的超声波处理了新鲜收获的草莓，并在 4 ℃条件下对草莓进行了长达 15 d 的存储，20~30 min 超声波处理可以显著抑制草莓软化，延长草莓的贮藏时间，但超声波处理时间增加到 60 min，会对草莓果实本身产生损伤，使果实品质下降；ZHANG 等[32]研究发现，超声处理(28 kHz, 0.15 W/cm^2, 3 min)增强草莓活性氧清除能力，激活茉莉酸(jasmonic acid, JA)的生物合成，从而抑制了果胶酯酶(pectinesterase, PE)和 PG 的活性，最终抑制草莓软化。以上两项研究，从宏观保鲜技术应用到微观信号解析，均指向了超声波作为一种物理激发因子对果实成熟软化的非热调控潜力。

1.1.6 物理保鲜技术讨论与评述

各种物理保鲜技术在草莓采后保鲜应用中均有其优点和局限性(表 1)，难以兼具抑菌、延缓衰老与维持品质的多重目标。冷藏为食品保鲜的基础方法，但其保鲜效果有限，需要与其他技术联合使用；气调保鲜效果显著，但对设备依赖性强，运行成本较高，限制分散储存模式下的应用；辐照技术杀菌彻底，剂量控制精度要求高，消费者接受程度有限；热处理环境友好，但具有品种依赖性，温控不当易造成热伤害；超声波与静电场为新兴技术，处理条件温和且无残留，但超声波存在能量衰减快、穿透深度有限的问题，静电场则受限于设备标准化程度不足，单独应用时保鲜效果尚不稳定。

表 1 草莓物理保鲜技术

Table 1 Physical preservation techniques for *Fragaria anansissa* Duch

保鲜方法	作用机制	优点	局限性
冷藏	通过降低果实代谢速率与酶活性，延缓代谢进程	操作简便，成本低廉，是应用最广泛的保鲜基础手段	单独使用效果有限，通常需与其他技术联用以增强保鲜效果
气调	调控贮藏环境中 O_2、CO_2 等气体组成，降低呼吸强度与乙烯生成速率	显著抑制呼吸代谢，延缓软化与色泽变化，有效延长贮藏期	设备投资及运行成本高，气体组分控制精度要求严格
辐照	利用 γ 射线、电子束等电离辐射杀灭表面微生物，抑制生理代谢过程	穿透力强，可对包装后产品进行处理，无化学残留	消费者接受度低，设备投资大且需专业防护
热处理	通过热效应对果实表面病原菌、害虫及虫卵进行杀灭，抑制贮藏期病害发生	无化学药剂残留，环境友好；操作相对简便，成本较低	控温精度不足易造成热伤害，处理效果存在品种差异性，需优化参数
超声波	利用超声波在液体介质中产生的空化效应，破坏微生物细胞结构，促进物质吸收	具有杀菌作用，增强保鲜效果，促进外源物质(如钙离子)吸收	处理均匀性较差，局部能量过高会导致组织损伤，单独应用效果有限，需与其他技术结合

保鲜技术的局限性难以通过单一方法克服, 而低温环境作为基础的代谢调控因子, 与其他物理技术具有良好的协同作用, 如气调、辐照或超声波处理在低温条件下可增强抑菌效果, 延缓衰老进程。因此, 可以构建以低温为核心、多种物理技术协同配合的集成保鲜策略, 充分发挥各技术的优势互补效应, 是突破单一技术局限、实现草莓高效保鲜的重要研究方向。

1.2　化学保鲜方法

草莓采后化学保鲜方法效果直接, 操作简便, 但面临化学残留和抗药性问题。化学保鲜是采用化合物处理草莓达到减少表面微生物、降低腐烂率、延长保质期的方法[33]。化学保鲜分为表面消毒杀菌类, 如利用二氧化氯(chlorine dioxide, ClO_2)、臭氧等, 凭借其强氧化性降解乙烯、杀灭病菌, 但需精确控制浓度以防组织损伤; 气体调节类, 如1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP)、二氧化硫缓释剂等, 创造低 O_2 高 CO_2 环境, 抑制呼吸与微生物生长。化学保鲜方法杀菌、防霉效果较好, 但残留限量严格, 需精确控制。所有化学品均需进行风险评估。非法、过度使用化学杀菌剂, 及化学杀菌剂的毒副作用和残留问题, 会对公众健康构成潜在威胁。

1.2.1　1-甲基环丙烯保鲜

1-MCP 保鲜原理是竞争性阻断乙烯受体, 高效阻断草莓成熟衰老的乙烯信号通路, 延缓草莓的软化进程, 是目前延缓后熟有效的化学手段之一。1-MCP 保鲜不仅表现在外观上延缓软化和变色, 在分子层面还能抑制细胞壁降解酶(如果胶酶、纤维素酶)相关基因的表达。其保鲜效果对果实的成熟度非常敏感。通常对转色期(约 3/4 红)的草莓效果最为显著, 而对于已经全红草莓、乙烯大量生成的果实, 效果会降低很多, 草莓采后尽快处理是关键。

JIANG 等[34]研究发现, 1-MCP 处理结合低温贮藏, 能更好地维持草莓的硬度、可溶性固形物和滴定酸含量; 李志强等[35]研究发现, 1-MCP 处理抑制草莓果实呼吸作用, 维持较高超氧化物歧化酶活性和较低的脂氧合酶活性, 同时降低超氧阴离子产生速率、H_2O_2 积累和丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量, 有利于保持果实品质; 从分子层面上, 1-MCP 通过下调与细胞壁降解相关基因的表达, 从而延缓果胶溶解和细胞壁结构破坏, 抑制果实软化。这两项研究揭示了 1-MCP 保鲜作用的完整过程, 从宏观品质的维持落实到微观氧化还原平衡的调控, 继而通过分子层面下调细胞壁降解相关基因表达, 最终抑制果胶溶解, 达到保鲜的目的。

1.2.2　二氧化氯保鲜

ClO_2 是一种强效、安全的气体杀菌剂, WU 等[36]系统评估了不同浓度气体 ClO_2 处理后草莓的微生物安全、营养品质及残留, 确认在规定剂量下使用安全有效。通过氧化作用灭杀果蔬表面的病原菌。氯基化合物由于其廉价、高效的杀菌性, 在草莓保鲜中得到广泛应用, 常用化合物有 ClO_2 和 $NaClO_2$。

余璐璐等[37]的研究结果显示, 低浓度 ClO_2 处理草莓通过抑菌作用起到较好的果实保鲜效果, 其中 20 mg/L ClO_2 处理效果最好, 处理后的果实在常温下的储藏时间达 6 d 以上。处理组草莓采后储藏期间腐烂率明显降低, 果实硬度、持水量、含糖量等均高于对照组, 表明 ClO_2 在草莓果实保鲜中具有较好的效果; 作为一种安全高效的杀菌剂, ClO_2 在气相和液相状态下均能有效抑制草莓表面的病原菌。缓释型 ClO_2 气体处理能显著降低草莓的腐烂率, 且对品质无不良影响。将固体缓释 ClO_2 置于草莓包装盒内, 能在低温贮藏期间持续释放低浓度气体, 有效抑制霉菌, 保鲜效果优于一次性熏蒸[38]。

1.2.3　钙处理保鲜

钙离子能通过与果胶交联形成果胶酸钙, 增强细胞壁机械强度, 维持细胞壁的稳态和果实硬度。果实衰老过程中钙含量减少, 会导致细胞壁物理屏障功能退化, 使病原菌易侵入细胞, 引起病理性腐烂[39]。采用低浓度 $CaCl_2$ 溶液浸泡草莓, 可有效提高果实硬度和抗病性。

EROUL 等[40]研究发现, 利用 1.5% $CaCl_2$ 浸泡草莓 10 min, 是保持草莓采后品质和延长货架期的有效处理方法。通过处理, 钙离子与细胞壁中果胶的羧基交联, 强化结构形成坚固的网络, 维持果实硬度和完整性。钙离子作为二级信使和膜稳定剂, 降低膜透性, 减少水分和养分流失, 抑制乙烯生物合成。还可以抑制 PG 和果胶甲酯酶(pectin methylesterase, PME)等细胞壁降解酶的活性, 减缓软化。通过钙处理激活果实自身的防御系统, 增强对病原菌的抵抗力。

1.2.4　化学保鲜技术讨论与评述

化学保鲜技术通过外源化学物质的干预, 有效调节草莓采后的生理代谢过程, 灭杀病原微生物, 在延长货架期方面发挥重要作用(表 2)。单一化学保鲜处理难以全面应对草莓因呼吸旺盛、表皮娇嫩及病原菌易感而导致的品质劣变问题。1-MCP 能有效阻断乙烯信号、延缓衰老, 但保鲜效果受果实发育阶段及品种影响; ClO_2 杀菌谱广、作用迅速, 但施用浓度不当易造成漂白或组织损伤; 钙离子处理在维持细胞壁强度、增强果实硬度方面效果独特, 但对病原微生物直接抑制效果较弱。

化学保鲜技术在实际应用中需同其他保鲜方法协同使用。如低温作为基础性调控因子, 协同使用可提升 1-MCP 的抑制效率、降低 ClO_2 的氧化损伤风险、增强钙离子在组织中的稳定性与有效性。化学处理与物理保鲜的联合使用, 可以通过多靶点干预实现协同增效, 以突破单一技术的应用瓶颈, 实现草莓采后保鲜效果的综合提升。

表 2 草莓化学保鲜技术

Table 2 Chemical preservation techniques for *Fragaria anansissa* Duch

保鲜方法	作用机制	优点	局限性
1-MCP	竞争性结合乙烯受体, 阻断乙烯信号传导, 抑制由乙烯诱导的成熟与衰老过程, 延缓果实软化	用量少, 效果显著, 可有效延缓衰老, 保持果实品质	处理效果依赖于浓度、时间及温度, 对部分品种效果不稳定
ClO_2	通过强氧化作用破坏病原菌细胞结构, 有效杀灭果蔬表面微生物	杀菌谱广, 作用快速, 残留低, 成本较低	对处理浓度要求严格, 过高易引起果实表面损伤
钙离子	钙离子与细胞壁中果胶结合形成果胶酸钙, 增强细胞壁结构稳定性, 维持果实硬度	处理方法简单, 能有效提高果实硬度, 增强抗病性	处理效果受钙盐种类、浓度和施用方式影响, 过量会导致生理障碍

1.3 生物保鲜方法

生物保鲜技术是指利用天然来源的生物活性物质或拮抗性微生物, 通过抑制腐败菌与病原菌生长、调控食品表面微环境、形成可食性保护膜或清除氧化自由基等途径, 延缓食品品质劣变, 从而延长货架期的一类绿色保鲜方法。该技术相较于化学保鲜方法, 具有环境友好、安全性高、符合清洁标签趋势等特点, 是现代食品保鲜领域的重要发展方向。

生物保鲜物质有 3 种, 分别为动物源保鲜剂, 如壳聚糖及其衍生物、蜂胶[41]等; 植物源保鲜剂, 如植物精油、香辛料、植物酸等; 微生物源保鲜剂, 产生拮抗作用的微生物菌群可以抑制或杀死果蔬中的有害微生物, 或与有害微生物竞争果蔬表面的糖类等营养素, 抑制有害微生物繁殖, 进而延长果蔬贮藏时间。生物保鲜符合高效、绿色和安全的发展趋势, 是未来食品保鲜技术的研究重点(表 3)。

1.3.1 壳聚糖涂膜保鲜

壳聚糖作为一种天然高分子多糖, 广泛存在于甲壳类动物、昆虫及真菌等生物体内, 具有无毒、可降解、良好的成膜性和抑菌活性等特点, 在果蔬保鲜领域展现出巨大的应用潜力[42]。壳聚糖涂膜是研究最广泛的果蔬保鲜技术, 其在果实表面形成一层保护膜, 能有效降低果实失重率, 抑制霉菌生长, 并诱导果实产生防御反应。保鲜效果更佳的复合涂膜成为了该领域的创新方向与热点[43]。壳聚糖与其他生物保鲜剂复配, 能发挥协同增效作用, 延长草莓的货架期, 在实践中, 低温冷藏与壳聚糖复合涂膜同时作用, 能够大幅度提升果蔬保鲜效果。

吴子龙等[44]的壳聚糖-姜精油涂膜、王中伟等[45]的魔芋葡甘聚糖-壳聚糖复合膜以及闫媛媛等[46]的壳聚糖-柠檬酸复配体系, 分别代表了草莓涂膜保鲜中活性抑菌、物理阻隔与酸度调节 3 种主要方法。3 者的区别在于功能赋予的路径不同: 精油通过挥发性次生代谢物抑菌, 魔芋葡甘聚糖通过高黏度大分子致密网络阻氧, 柠檬酸则通过降低表面 pH 以抑制酶促褐变。

1.3.2 天然植物精油处理保鲜

植物精油是从植物的根、叶、花、果实和种子中通过蒸馏、萃取等方法进行提取, 含有萜类、芳香族、脂肪族等化合物。其中, 萜类和酚类化合物(芳香族化合物)是植物精油的主要抑菌物质[47], 是天然抗菌剂。目前, 已有部分植物精油被批准作为食品添加剂应用于食品加工, 如丁香、肉桂、百里香等。此外, 植物精油还常被当作原料用于活性食品包装的开发。植物精油作为天然防腐剂有望替代化学合成防腐剂在食品中使用。

付振喜[48]研究表明, 丁香和肉桂精油分别处理草莓时, 两者都能够有效保持草莓的硬度, 提高草莓的食用品质, 抑制其贮藏期发生的腐烂现象, 延缓衰老, 从而达到良好的保鲜效果。其中, 用浓度为 0.3%的丁香精油分别在室温和 4 ℃下处理草莓, 可延长货架期 2~3 d 和 8~10 d。而 0.1%的肉桂油在 4 ℃的条件下则可延长 8~12 d 的货架期。

1.3.3 拮抗酵母保鲜

拮抗酵母分布广泛, 环境友好, 在防控草莓采后腐烂方面是化学杀菌剂的有效替代品, 其主要通过拮抗菌与病原菌进行营养和空间的竞争、产生抗菌物质等方式抑制果蔬采后病害, 减缓果实腐烂。拮抗微生物保鲜抗菌抑制率高且不会引入其他成分[49]。

罗伦隐球酵母(*Cryptococcus laurentii*)和膜璞毕赤酵母(*Pichia membranaefaciens*)是研究较多的拮抗酵母, 它们能快速占据伤口位点, 消耗营养物质, 并分泌抗菌物质。毛淑波[50]的研究表明, 罗伦隐球酵母对草莓采后灰霉病的防治效果与化学杀菌剂相当, 且无残留风险; 张璐等[51]探究膜醭毕赤酵母对草莓采后灰霉病抗病性的诱导, 结果发现拮抗酵母浓度越高则抗病性越好, 同时还能够诱导增强果实过氧化物酶、苯丙氨酸解氨酶等抗性相关酶活性, 提高了果实对灰霉病的抵抗能力。两种拮抗酵母的研究代表了拮抗酵母发挥生物防治功效的两条路径, 分别为营养与空间竞争的直接拮抗和激发寄主自身免疫的间接诱导。

1.3.4 生物保鲜技术讨论与评价

生物保鲜技术在草莓采后应用中均以绿色、安全为显著优点, 但各种技术的局限性限制了其应用的普适性。壳聚糖涂膜兼具成膜阻隔与抑菌活性, 但在贮藏中后期若环境湿度偏高, 膜层可能成为霉菌滋生的载体, 反而加速果

实腐败; 天然植物精油抗菌谱广兼具抗氧化功能, 但其强挥发性导致保鲜时效有限, 同时精油特有的气味可能对草莓原有风味产生干扰, 影响感官接受度; 拮抗酵母通过竞争性抑制与诱导抗性发挥防病效果, 环境友好性突出, 但受温度、湿度及果实初始带菌量等因素影响显著, 稳定性不足, 当前商业化制剂开发尚不成熟, 难以实现规模化应用。

单一生物保鲜技术难以独立应对草莓采后复杂的品质劣变问题, 与其他保鲜手段协同应用是提升综合效果的必要路径。低温保存下天然植物精油和壳聚糖联合应用可有效提升保鲜效果, 弥补单独使用的局限性。未来研究应聚焦于生物保鲜技术与低温等基础要素的协同优化, 探索“低温贮藏为核心、生物处理为补充”的集成保鲜策略, 充分发挥生物技术的绿色优势, 推动草莓采后绿色保鲜技术实际应用。

表 3　草莓生物保鲜技术

Table 3　Biological preservation techniques for *Fragaria anansissa* Duch

保鲜方法	作用机制	优点	局限性
壳聚糖涂膜	在果实表面形成选择性半透膜, 调节气体交换, 抑制呼吸作用与蒸腾作用, 具有一定的抑菌活性, 减少微生物侵染	来源广泛, 可降解, 安全无毒, 兼具成膜与抑菌功能	膜层均匀性难以控制, 湿度过高时易滋生霉菌, 单独使用效果有限
天然植物精油	利用植物次生代谢产物(酚类、萜烯类等化合物)破坏病原菌细胞膜结构, 抑制孢子萌发与菌丝生长	抗菌谱广, 安全性高, 兼具抗氧化活性, 符合绿色保鲜需求	挥发性强, 作用时间短, 气味可能影响果实风味
拮抗酵母	通过竞争营养、分泌抗菌物质、诱导寄主抗性等多重机制抑制采后病害发生	抑菌效果显著, 环境友好	防效受环境条件影响较大, 商业化制剂开发尚不成熟

1.4　纳米材料保鲜

近年来, 随着科学技术的快速发展, 纳米杀菌技术已成为果蔬保鲜领域的研究热点[52]。纳米材料优异的抗菌活性为食品保鲜技术的发展提供了新思路。目前, 已发现的可用于抗菌的纳米材料包括贵金属纳米材料、金属氧化物或硫化物纳米材料、碳基纳米材料以及金属有机框架等。与贵金属纳米材料相比, 碳基纳米材料(碳点, 石墨烯, 碳纳米管等)易于合成、对环境友好, 细胞毒性低, 是优异的食品包装材料[53]。

纳米材料在果蔬保鲜中的应用大多是以抗菌膜或抗菌涂层的形式[54], 大量纳米抗菌涂层/薄膜已被开发用于新鲜果蔬的保鲜[55]。除了抑制果蔬表面的微生物增殖, 纳米抗菌薄膜/涂层主要通过减少水分损失、延缓呼吸和氧化反应速率来延长新鲜果蔬的保质期[56](表 4)。

1.4.1　碳量子点保鲜

碳量子点(carbon quantum dots, CQDs)是近年来广受关注的一类新型材料, 通常是指由 sp2/sp3 碳内核和外层含氧/氮官能团组成的直径小于 10 nm 的球状荧光碳纳米材料。研究发现, 在光的激发下, CQDs 可以产生活性氧, 活性氧过度累积引起的氧化应激能使 CQDs 产生抗菌活性; 因此, CQDs 在果蔬保鲜和微生物抑菌杀菌方面展现出较大优势[57−58]。CQDs 凭借其独特的性能, 已成为食品保鲜领域一种创新的“绿色”材料。它主要通过制成活性包装膜或可食用涂层来应用, 能有效延长食品保质期, 并兼顾环境友好。CQDs 的保鲜效果主要基于广谱抗菌作用, 抑制酶促褐变, CQDs 可以清除导致褐变的自由基, 抑制多酚氧化酶的活性, 阻断褐变反应; 将 CQDs 添加到壳聚糖制成的薄膜中, 不仅能赋予其抗菌等功能, 还能通过纳米增强效应, 使薄膜更强韧、更致密, 从而提升其物理阻隔性能。

氮掺杂 CQDs-壳聚糖复合膜对草莓展现出良好的保鲜效果, 能够降低草莓的失重率和腐烂速度, 延缓果实可溶性固形物和抗坏血酸等营养物质的消耗和转化, 当复合膜中掺杂 CQDs 的质量分数为 5%时, 其对草莓的综合保鲜效果最佳。在光照条件下对金黄色葡萄球菌和大肠埃希菌均展现出光敏抑菌性。此外, 它还可以有效维持草莓的贮藏品质, 可溶性固形物、抗坏血酸含量的降低, 且在抑制失重率方面效果较优, 能够有效延长草莓的货架期。该复合膜的原料绿色环保, 制作简单方便, 在草莓保鲜以及超市、市场等场所的果蔬保鲜方面有良好的应用前景[59]。

1.4.2　石墨烯量子点保鲜

石墨烯量子点(graphene quantum dots, GQDs)是由石墨烯或氧化石墨烯衍生而来的碳基纳米材料, 是石墨烯家族的重要成员之一。近年来, GQDs 优异的抗菌活性受到广泛关注, 特别是其横向尺寸小、毒性低、生物相容性好、比表面积大, 易于功能修饰化、稳定性好及水溶性好等优点, 在食品保鲜领域具有广阔的应用前景[60]。石墨烯及其衍生物抗菌纳米材料与传统抗生素的抗菌机制不同, 其抗菌机制主要包括膜损伤、氧化应激、包裹捕获。

基于 GQDs 的广谱抑菌活性, 以海藻酸钠(sodium alginate, SA)为负载基质, 通过化学交联制备了 GQDs@SA 复合涂层, 应用于草莓保鲜[61]。复合涂层对延缓草莓的失重率、维生素 C (vitamin C, VC)、可滴定酸(titratable acid, TA)、总可溶性固形物(total soluble solids, TSS)含量的下降和保持良好的感官品质有积极作用。此外, 复合涂层有效抑制草莓表面微生物菌落的生长, 高通量测序结果表明, GQDs@SA 涂层有效抑制草莓表面腐败菌属包括假单胞

菌属(*Pseudomonas*)、无色杆菌属(*Achromobacter*)、灰葡萄孢属(*Botrytis*)、链格孢属(*Alternaria*)的生长。

1.4.3 纳米保鲜技术讨论与评价

纳米保鲜技术为新兴的交叉学科方向，为草莓采后保鲜提供了新的解决思路。CQDs 与 GQDs 均展现出优异的抗菌活性与酶抑制能力，在抑制褐变和病原菌方面具有独特优势，且环境友好，符合绿色保鲜的发展趋势。但纳米材料在实际应用中仍面临许多挑战。CQDs 虽制备工艺相对简便、抗菌谱较广，但对部分真菌的抑制效果尚不理想，在食品体系中的安全性评估不充分，制约了其商业化推广进程；GQDs 在功能化修饰与复合应用方面潜力突出，但制备工艺复杂、成本较高，成为规模化应用的主要瓶颈。

纳米保鲜技术现阶段难以独立承担草莓采后保鲜的综合需求，与其他保鲜手段协同应用是可行的发展路径。纳米材料可与壳聚糖等成膜基质复合，构建功能性涂膜，实现缓释与靶向递送。未来研究应聚焦于纳米材料的生物安全性评价、制备工艺优化以及多技术协同策略的构建，以推动纳米保鲜技术从实验室研究向实际应用转化。

表 4 草莓纳米保鲜技术

Table 4 Nano-preservation technology for *Fragaria anansissa* Duch

保鲜方法	作用机制	优点	局限性
CQDs	抑制酶促褐变，通过清除自由基、抑制多酚氧化酶活性，阻断褐变反应路径	具有广谱抗菌活性，环境友好，制备工艺相对简单	对某些真菌抑制效果有限，长期稳定性及安全性尚需进一步研究
GQDs	抗菌机制包括破坏细胞膜结构、诱导氧化应激反应以及通过包裹作用捕获微生物	毒性低，生物相容性高，比表面积大，易于功能化修饰，水溶性好	实际应用中成本较高，制备工艺复杂

2 结束语

当前，鲜食草莓采后保鲜技术已从传统的单一低温贮藏，发展为以低温为基础，多种物理、化学、生物及纳米技术协同作用的综合保鲜策略，以壳聚糖涂膜、拮抗酵母、天然植物提取物和纳米技术为代表的绿色保鲜技术展现出巨大的应用前景。其中“复合涂膜+气调包装+低温”综合保鲜技术是目前最接近商业化应用的组合。先进行壳聚糖复合涂膜处理，再置于最适气调环境中低温贮藏，可协同延缓衰老和抑制微生物，将货架期延长至 14 d 以上；“物理诱导+生物保鲜”技术，如紫外线 C 预处理结合拮抗酵母喷洒，可同时激活果实自身防御系统和外部生物防治，实现“内外兼防”的效果；“纳米技术+智能包装”保鲜技术将纳米银、纳米二氧化钛等功能性纳米材料嵌入包装膜中，开发具有抗菌、除乙烯或湿度调节功能的活性包装，是未来的重要研究方向[62–63]。未来，随着多学科技术的交叉融合，更安全、高效、智能的草莓保鲜技术将成为研究和产业化的主流，为草莓产业的提质增效和可持续发展提供有力支撑。

今后，草莓采后保鲜研究将从以下几个方向开展。(1)深入机制研究：从转录组、蛋白质组和代谢组水平进一步揭示各种保鲜技术，特别是生物诱导抗性的分子机制；(2)技术绿色化与智能化：开发生物源、可降解的复合保鲜材料，并融合传感技术，开发能实时监测并反馈果实品质的智能包装系统；(3)全产业链整合：将保鲜技术前置，结合采前田间管理、适时无伤采收和采后冷链物流，构建从田间到餐桌的全产业链保鲜体系。

参考文献

[1] SIU A. An analysis of food waste in Ontario’s domestic fresh strawberry supply chain [D]. Canada Toronto: York University, 2014.

[2] FELIZIANI E, SMILANICK JL, MARGOSAN DA, *et al*. Preharvest fungicide, potassium sorbate, or chitosan use on quality and storage decay of strawberry [J]. Plant Disease, 2013, 97(7): 844–851.

[3] 江英童, 军茂. 草莓冰温贮藏保鲜技术的研究[J]. 食品科技, 2004(10): 85–87.
JIANG YT, JUN M. Study on storage technology of strawberry in ice-temperature conditions [J]. Food Science and Technology, 2004(10): 85–87.

[4] 丁华, 王建清, 王玉峰, 等. 百里香精油与气调技术联用对草莓货架寿命的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2016(37): 71–75, 95.
DING H, WANG JQ, WANG YF, *et al*. Effect of combination of thyme essential oil and controlled atmosphere on the shelf-life of strawberry [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2016(37): 71–75, 95.

[5] 马雪梅, 吴朝峰, 路志芳. 热水处理对草莓贮藏品质与抗氧化能力的影响[J]. 江苏农业科学, 2018(46): 128–132.
MA XM, WU CF, LU ZF. The effect of hot water treatment on the storage quality and antioxidant capacity of strawberries [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018(46): 128–132.

[6] 刘超. 草莓辐照保鲜贮藏及其生理品质变化的研究[J]. 安徽农业科学, 2003, 31(5): 744–745.
LIU C. Study on the irradiation-induced preservation and storage of strawberries and changes in their physiological quality [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2003, 31(5): 744–745.

[7] 高梦祥, 王春萍. 交变磁场对草莓保鲜效果的影响[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(1): 155–158.
GAO MX, WANG CP. Preservation study on fresh strawberries by alternating magnetic field [J]. Food Research and Development, 2010, 31(1): 155–158.

[8] 任翠荣, 刘金光, 王世清, 等. 常压低温等离子体处理对草莓保鲜效果的影响[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2017, 34(3): 228–234.
REN CR, LIU JG, WANG SQ *et al*. Effect of strawberry preservation by atomospheric pressure low temperature plasma [J]. Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science), 2017, 34(3): 228–234.

[9] 赵妍, 杨超, 王若兰, 等. $CaCl_2$ 处理对草莓采后品质及灰霉病害的影

响[J]. 食品工业科技, 2013(34): 313–316.
ZHAO Y, YANG C, WANG RL, *et al*. Influence of $CaCl_2$ on quality and gray mold rot in postharvest strawberry fruit [J]. Science and Technology of Food Industry, 2013(34): 313–316.

[10] 郑晓冬, 张红印, 席玮芳. 罗伦隐球酵母对草莓采后灰霉病害的生物防治[J]. 农业工程学报, 2003(5): 171–175.
ZHENG XD, ZHANG HY, XI YF. Postharvest biological control of gray mold rot of strawberry with *Cryptococcus laurentii* [J]. Transactions of the CSAE, 2003(5): 171–175.

[11] 张安宁, 王鑫, 陈洁. 草莓的涂膜保鲜研究[J]. 食品科学, 2006, 27(3): 231–235.
ZHANG ANN, WANG X, CHEN J. Preservation study on strawberry edible coatings [J]. Food Science, 2006, 27(3): 231–235.

[12] FATHIMA CS, MURALI AM, SUNISH KS, *et al*. Probing the food packaging applications of green carbon quantum dots [J]. Journal of Food Engineering, 2025, 397: 112575.

[13] 谢晶, 张利平, 王金锋, 等. 贮藏温度对草莓理化性质的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(22): 307–310.
XIE J, ZHANG LP, WANG JF, *et al*. Effect of storage temperature on physico-chemical properties of strawberry [J]. Food Science, 2013, 34(22): 307–310.

[14] BAICU AA, POPA ME. Trends in prolonging the post-harvest life of strawberries-a review [J]. Annals of the University Dunarea de Jos of Galati Fascicle VI: Food Technology, 2018, 42(1): 9–16.

[15] KTENIOUDAKI A, COLM P, NUNES M. Modelling the biochemical and sensory changes of strawberries during storage under diverse relative humidity conditions [J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 154: 148–158.

[16] NAKAT A, YI H. Microbiological and quality responses of strawberry fruit to high CO_2 controlled atmosphere and modified atmosphere storage [J] . Hort Science, 2020, 55(3): 386–391.

[17] ALLENDE A, MARÍN A, BUENDÍA B, *et al*. Impact of combined postharvest treatments (UV–C light, gaseous O_3, super atmospheric O_2 and high CO_2) on health promoting compounds and shelf–life of strawberries [J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 46(3): 201–211.

[18] LUIS C, CRISTIANE M, ANGELO P, *et al*. Quality of 'Oso Grande' strawberries is affected by O_2, CO_2 and N_2O concentrations during controlled atmosphere storage [J]. Bragantia, 2019(1): 89–94.

[19] COLLETTI AC, DENOYA GI, POLENTA GA, *et al*. Novel applications of gamma irradiation on fruit processing [J]. Current Food Science and Technology Reports, 2024, 2: 55–64.

[20] SADEGH S, HABIBEH N, FAKHREDIN A, *et al*. Simultaneous effect of the packages designed for the precooling process with gamma irradiation on the shelf life of the strawberry [J]. Food Research Journal, 2025, 34. DOI: 10.22034/fr.2025.58043.1898

[21] MILTON JF, SCOLFORO CZ, SARAIV A, *et al*. Physicochemical, microbiological and sensory acceptance alterations of strawberries caused by gamma radiation and storage time [J]. Scientia Horticulturae, 2018(23): 187–194.

[22] PRIYADARSHI R, JAYAKUMAR A, KREBS C, *et al*. Advances in strawberry postharvest preservation and packaging: A comprehensive review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23: e13417.

[23] CIVELLO PM, MARTINEZ GA. Quality of heat–treated strawberry fruit during refrigerated storage [J]. Postharvest Biology & Technology, 2002, 25(1): 59–71.

[24] EUNICE V, GABRIELA M, MARÍA A, *et al*. Efficacy of mild thermal and pulsed light treatments, individually applied or in combination, for maintaining postharvest quality of strawberry *cv.* Albion [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 45(1): 102–109.

[25] VICENTE AR, MARÍA LC, GUSTAVO AM, *et al*. Effect of heat treatments on cell wall degradation and softening in strawberry fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2005, 38(3): 213–222.

[26] VICENTE A, REPICE B, MARTÍ Z, *et al*. Maintenance of fresh boysenberry fruit quality with UV–C light and heat treatments combined with low storage temperature [J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2004, 79(2): 246–251.

[27] GUSTAVO A. MARTÍNEZ, CIVELLO PM. Effect of heat treatments on gene expression and enzyme activities associated to cell wall degradation in strawberry fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 49(1): 38–45.

[28] 李宇泽, 韩爱云. 草莓保鲜技术的研究进展[J]. 农产品加工. 2021, 524(3): 88–91.
LI ZY, HAN AIY. Research progress in strawberry storage preservation technology [J]. Farm Products Processing, 2021, 524(3): 88–91.

[29] 杜喜玲. 低压静电场对草莓保鲜研究[J]. 食品工业, 2023, 44(9): 11–15.
DU XL. Study on strawberry preservation by low voltage electrostatic field [J]. The Food Industry, 2023, 44(9): 11–15.

[30] 霍英娇, 姜晓晨, 董士远, 等. 高压静电场处理对草莓保鲜品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2023, 23(5): 15–21.
HUO YJ, JIANG XC, DONG SY, *et al*. Effects of high voltage electrostatic field treatment on the preservation quality of strawberry [J]. Storage and Process, 2023, 23(5): 15–21.

[31] GANI A, BABA W, AHMAD M, *et al*. Effect of ultrasound treatment on physicochemical, nutraceutical and microbial quality of strawberry [J]. LWT–Food Science and Technology, 2016, 66: 496–502.

[32] ZHANG J, JIANG H, LI Y, *et al*. Transcriptomic and physiological analysis reveals the possible mechanism of ultrasound inhibiting strawberry (*Fragaria×ananassa* Duch.) postharvest softening [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1066043.

[33] 黄玮婷, 魏倩, 赵梅, 等. 3 种化学保鲜剂对草莓采后保鲜的影响[J]. 南方农业学报, 2016, 47(10): 1755–1760.
HUANG WT, WEI Q, ZHAO M, *et al*. Effect of three preservatives on postharvest storage of strawberry [J]. Journal of Southern Agriculture, 2016, 47(10): 1755–1760.

[34] JIANG T, WANG L, ZHANG Z, *et al*. Effects of 1–MCP on quality and antioxidant capacity of strawberry fruit during cold storage [J]. Scientia Horticulturae, 2022, 295: 110872.

[35] 李志强, 汪良驹, 巩文红, 等. 1–MCP 对草莓果实采后生理及品质的影响[J]. 果树学报, 2006, 23(1): 125–128.
LI ZQ, WANG LJ, GONG WH, *et al*. Effect of 1– MCP on senescence and quality of strawberry fruit [J]. Journal of Fruit Science, 2006, 23(1): 125–128.

[36] WU Y, WANG, Z, ZHANG MM, *et al*. Impact of chlorine dioxide gas concentration on safety and quality of fresh strawberries [J]. LWT–Food Science and Technology, 2022, 165: 113755.

[37] 余璐璐, 曹中权, 朱秋杰, 等. 二氧化氯在草莓采后保鲜中的作用[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(4): 343–346.
YU LL, CAO ZQ, ZHU QJ, *et al*. The role of chlorine dioxide in post–harvest preservation of strawberries [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(4): 343–346.

[38] 菅甜甜, 张钦发, 刘悦悦, 等. 二氧化氯缓释剂的研究及应用进展[J].

食品工业, 2019, 40(2): 241–246.
JIAN TT, ZHANG QF, LIU YY, *et al*. Progress in research and application of chlorine dioxide sustained–release agent [J]. The Food Industry, 2019, 40(2): 241–246.

[39] GAO Q, XIONG T, LI X, *et al*. Calcium and calcium sensors in fruit development and ripening [J]. Scientia Horticulturae, 2019(253): 412–421.

[40] EROUL D, GUNDOGDU M, SEN F, *et al*. Impact of postharvest calcium chloride treatments on decay rate and physicochemical quality properties in strawberry fruit [J]. BMC Plant Biology, 2026, 24(1): 1088.

[41] HAO LT, LUO Y, LUO S, *et al*. The effects of ethanol–dissolved propolis on strawberry preservation [J]. bbbs, 2018, 5: 118–121.

[42] 王凯, 付红军, 彭湘莲. 花青素–壳聚糖基新鲜度指示膜的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(4): 365–371.
WANG K, FU HJ, PENG XL. Research advances in freshness indicator films based on anthocyanins and chitosan [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(4): 365–371.

[43] 钟秋夏, 郑海英, 朱燕丽, 等. 百里香酚微胶囊的制备及其对草莓的保鲜效果[J]. 食品科学, 2023, 44(11): 167–176.
ZHONG QX, ZHENG HY, ZHU YL, *et al*. Preparation of thymol–containing microcapsules and its application in strawberry preservation [J]. Food Science, 2023, 44(11): 167–176.

[44] 吴子龙, 张浩, 王泽熙, 等. 壳聚糖–姜精油涂膜对草莓贮藏品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(22): 169–174.
WU ZL, ZHANG H, WANG ZX, *et al*. The storage quality effects of chitosan and ginger essential oil composited coating on strawberry [J]. Food Research and Development, 2018, 39(22): 169–174

[45] 王中伟, 李云成, 郑淼心, 等. 魔芋葡甘聚糖/壳聚糖复合涂膜对草莓采后贮藏品质的影响[J]. 食品科技, 2019, 44(3): 46–50.
WANG ZW, LI YC, ZHENG MX, *et al*. Effects of konjac glucomannan/chitosan composite coating on the qualities of postharvest strawberry storages [J]. Food Science and Technology, 2019, 44(3): 46–50.

[46] 闫媛媛, 齐海萍, 郜玮, 等. 壳聚糖与柠檬酸复配涂膜液对草莓保鲜效果的研究[J]. 大连民族学院学报, 2015, 17(3): 224–227, 234.
YAN YY, QI HP, GAO W, *et al*. Study on the fresh–keeping effects of chitosan and citric acid complex films on strawberry [J]. Journal of Dalian Nationalities University, 2015, 17(3): 224–227, 234.

[47] REDONDO S, FERNÁNDEZ J, LÓPEZ S, *et al*. Plant phytochemicals in food preservation: antifungal bioactivity: A review [J]. Journal of Food Protection, 2020, 83(1): 163-171.

[48] 付振喜. 丁香等天然物质的抑菌成分在果蔬保鲜中的应用研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2010.
FU ZX. Study of the effects of postharvest treatment with cloves and other kinds of antibacterial ingredients on fruits and vegetables [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2010.

[49] DUKARE AS, PAUL S, NAMBI VE, *et al*. Exploitation of microbial antagonists for the control of postharvest diseases of fruits: A review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(9): 1498–1513.

[50] 毛淑波. 罗伦隐球酵母结合热空气处理对草莓采后病害的防治及其机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
MAO SB. Study on effect and mechanism of antagonistic yeast in combination with hot air treatment on postharvest disease of strawberry [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.

[51] 张璐, 张瑶, 刘丽丹, 等. 膜醭毕赤酵母对草莓采后灰霉病抗病性的诱导[J]. 食品科学, 2013, 34(22): 286 – 291.
ZHANG L, ZHANG Y, LIU LD, *et al*. Induction of disease resistance to gray mold by *Pichia membranaefaciens* in postharvest strawberry fruit [J]. Food Science, 2013, 34(22): 286–291.

[52] ADITHYA S, MUTHAMILSELVI P, SENTHIL KP, *et al*. Food preservation techniques and nanotechnology for increased shelf life of fruits, vegetables, beverages and spices: A review [J]. Environmental Chemistry Letters, 2021, 19(2): 1715–1735.

[53] PRASANTA KR, ANGSHUMAN T, BODHADITYA D, *et al*. Carbon nanostructures as antibacterials and active food–packaging materials: A review [J]. ACS Omega, 2022, 7(14): 11555–11559.

[54] NI Y, SHI S, LI M, *et al*. Visible light responsive, self–activated bionanocomposite films with sustained antimicrobial activity for food packaging [J]. Food Chemistry, 2021, 362: 130201.

[55] LIU Y, WANG S, LAN W, *et al*. Fabrication of polylactic acid/carbon nanotubes/chitosan composite fibers by electrospinning for strawberry preservation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 121: 1329–1336.

[56] BHUSAN BI, AVIK M, VIMAL K, *et al*. Biopolymer–based nanocomposite films and coatings: Recent advances in shelf–life improvement of fruits and vegetables [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(7): 1912–1935.

[57] YANG JJ, ZHANG XD, MA YH, *et al*. Carbon dot–based platform for simultaneous bacterial distinguishment and antibacterial applications [J]. ACS Applied Materials Interfaces, 2016, 8(47): 32170–32181.

[58] 肖丹, 普红梅, 田浩, 等. CQDs/壳聚糖涂膜剂在芒果保鲜中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(22): 130–135.
XIAO D, PU HM, TIAN H, *et al*. Application of carbon dots–chitosan coating in preservation of mango [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(22): 130–135.

[59] 张馨月, 杨禹诚, 段皓月, 等. 氮掺杂 CQDs 壳聚糖复合膜的制备及对草莓的保鲜效果[J]. 浙江农业学报, 2023, 35(12): 2935–2943.
ZHANG XY, YANG YC, DUAN HY, *et al*. Preparation of nitrogen–doped carbon quantum dots–chitosan composite film and its preservation effect of strawberry [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2023, 35(12): 2935–2943.

[60] HENNA TK, PRAMOD K. Graphene quantum dots redefine nanobiomedicine [J]. Materials Science and Engineering, 2020, 110: 110651.

[61] 方晏. GQDs 抑菌性能的评估及其在草莓保鲜中的应用初探[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2023.
FANG Y. Evaluation of antibacterial properties of graphene quantum dots and their preliminary application in strawberry preservation [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2023.

[62] HOSSEINI MS, ZAHEDI SM, ABADÍA J, *et al*. Chitosan–based nanocomposite coatings incorporated with TiO_2 and ZnO nanoparticles for improving postharvest quality of strawberry [J]. Food and Bioprocess Technology, 2021, 14(8): 1522–1533.

[63] CHEN Z, ZHU C, ZHANG Y, *et al*. Effects of chitosan–based coating modified with nano–silicon dioxide on the quality and physiology of strawberry fruit during cold storage [J]. Food and Bioprocess Technology, 2020, 13(6): 929–941.

(责任编辑: 蔡世佳 安香玉)