DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251003001
引用格式: 陶鑫, 叶彤, 张磊, 等. 化学、生物与物理方法在果蔬非热保鲜中的效能对比及其作用机制研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(3): 3–13.
TAO X, YE T, ZHANG L, *et al*. Research progress on comparative efficacy and mechanisms of chemical, biological and physical methods in non-thermal preservation of fruits and vegetables [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(3): 3–13. (in Chinese with English abstract).

化学、生物与物理方法在果蔬非热保鲜中的效能对比及其作用机制研究进展

陶 鑫[1#], 叶 彤[2#], 张 磊[3], 刘慧燕[1*], 方海田[1,2*]

(1. 宁夏大学食品科学与工程学院, 银川 750021; 2. 宁夏大学生命科学学院, 银川 750021;
3. 宁夏虹桥食品有限公司, 中卫 755000)

摘 要: 果蔬在采后贮运过程中, 因其本身的生理代谢活动及外源微生物侵染等因素, 易发生品质劣变, 造成大量资源浪费并带来显著的环境压力。传统热处理保鲜技术虽应用广泛, 但其能源消耗较高, 且可能对果蔬感官和营养品质产生不良影响。因此, 多种环境友好、能耗较低的非热保鲜技术逐渐在果蔬贮运保鲜中得到应用。本文旨在系统梳理并对比分析当前主流非热保鲜技术化学处理、生物制剂及物理方法在果蔬保鲜中的应用现状与研究进展。详细阐述各类技术的作用原理、具体应用场景及其相较于传统方法的优势, 如化学保鲜剂成本低、生物保鲜剂基于天然成分、物理处理保鲜无残留等, 同时客观指出了其在产业化应用中面临的关键瓶颈, 如化学残留风险、生物制剂稳定性不足、物理设备成本较高等。在此基础上, 本文进一步探讨了这些非热技术共通的生物学作用机制, 包括如何通过调控果蔬采后生理代谢、诱导抗病性、抑制酶活及微生物生长等途径, 从而有效维持营养成分、延缓成熟衰老进程、显著延长货架期。以期为未来非热保鲜技术的优化创新与多技术协同应用建立提供坚实的理论依据与前瞻性思路。

关键词: 果蔬贮运; 非热保鲜; 物理保鲜; 生物机制; 货架期

Research progress on comparative efficacy and mechanisms of chemical, biological and physical methods in non-thermal preservation of fruits and vegetables

TAO Xin[1#], YE Tong[2#], ZHANG Lei[3], LIU Hui-Yan[1*], FANG Hai-Tian[1,2*]

(1. *College of Food Science and Engineering*, *Ningxia University*, *Yinchuan* 750021, *China*; 2. *College of Life Sciences*, *Ningxia University*, *Yinchuan* 750021, *China*; 3. *Ningxia Hongqiao Food Company*, *Ltd.*, *Zhongwei* 755000, *China*)

收稿日期: 2025-10-03
基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2024BBF02026, 2024BBF02015); 中卫市沙坡头区科技计划项目; 宁夏回族自治区科技创新领军人才培养项目(宁科合作字[2025]9 号); 银川市科技计划项目(2024NYHZC002); 宁夏回族自治区自然科学基金项目(2022AAC03020)
#陶鑫和叶彤为共同第一作者
第一作者: 陶鑫(2003—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为健康食品生物制造。E-mail: Tx120212439@outlook.com
叶彤(1998—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为微生物资源开发与利用。E-mail: yt21131959@outlook.com
***通信作者:** 刘慧燕(1977—), 女, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为健康食品生物制造, 果蔬贮运保鲜。E-mail: liuhy@nxu.edu.cn
方海田(1978—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为健康食品生物制造。E-mail: fanght@nxu.edu.cn

ABSTRACT: Fruits and vegetables are susceptible to quality deterioration during postharvest handling due to their ongoing respiration and physiological metabolism, as well as exogenous microbial contamination, resulting in considerable resource loss and environmental burden. While conventional heat-based preservation methods are widely used, they typically require high energy inputs and can compromise the sensory and nutritional attributes of the produce. As a result, a range of low-energy, environmentally benign non-thermal preservation technologies are increasingly being implemented for fruit and vegetable storage and transport. This review systematically summarized and compared the current applications and research progress of mainstream non-thermal preservation techniques encompassing chemical, biological and physical methods-for postharvest produce. It detailed the operational principles, specific use cases and relative merits of each approach, such as the cost-effectiveness of chemical preservatives, the natural origin of biological agents and the absence of residues in physical treatments. The discussion also objectively addressed the key limitations hindering industrial adoption, including potential chemical residues, the variable stability of biological formulations and the substantial capital investment for physical equipment. Furthermore, the review examined the shared biological mechanisms through which these technologies acted, such as modulating postharvest physiology, inducing host resistance, and suppressing enzymatic activity and microbial growth to better retain nutrients, delay ripening and senescence, and extend shelf life. This analysis aims to provide a theoretical foundation and prospective direction for future optimization, innovation and the development of integrated multi-technology strategies in non-thermal preservation.

KEY WORDS: fruit and vegetable storage and transportation; non-thermal preservation; physical preservation; biological mechanism; shelf life

0 引 言

果蔬采后仍是具有生命的有机体, 在贮运过程中, 会进行呼吸作用、水分蒸腾以及氧化还原反应等新陈代谢活动。与此同时, 外源机械损伤与微生物侵染等问题也难以避免。这些内外因素共同作用, 极易导致果蔬出现失水、衰老、腐烂等一系列品质劣变现象, 因此, 在果蔬采后贮运过程中采用安全、高效的保鲜技术至关重要[1]。适宜的保鲜技术不仅能有效延缓品质劣变进程、延长商品货架期, 更能最大限度地维持其固有的营养成分, 并保障良好的感官品质与商业价值, 对于实现果蔬产业减损、增效与可持续发展具有重要意义[2]。

果蔬保鲜技术依据其是否对物料进行加热, 主要可分为热保鲜与非热保鲜。其中, 热保鲜技术体系发展较早, 应用成熟, 针对新鲜果蔬的保鲜, 热处理的应用主要体现为“热激处理”, 该技术通过短暂、适度的升温来诱导果蔬自身的抗逆性, 从而延缓衰老并提高抗病性[3], 然而, 其存在作用效果不稳定可能影响产品风味等局限[4]。由此可见, 传统的热保鲜技术已难以完全满足现代消费者对果蔬新鲜、营养与健康的更高追求。在此背景下, 一系列高效、低耗的非热保鲜技术应运而生, 并逐渐成为采后保鲜研究与应用的新焦点。已有研究表明, 气调包装能有效调节双孢蘑菇的呼吸代谢, 从而显著改善其储藏性能[5]; 脉冲电场处理可有效延缓凤梨释迦的酶促褐变, 提升其保藏品质[6]; 静磁场处理则被证实能够维持黄瓜的细胞膜完整性, 提升其综合保鲜效果[7], 这些技术普遍具有能耗低、对产品原始品质影响小等优势, 为果蔬产业的绿色可持续发展提供了新路径。

现有研究多聚焦于单一技术的效果报道, 尚缺乏对不同非热保鲜技术(化学、生物、物理)的系统性梳理与比较分析, 尤其对于这些技术背后共通的及特有的生物学作用机制, 如其对果蔬采后生理、抗氧化系统、细胞结构及基因表达的影响, 仍缺乏深层次的解析与整合。因此, 如图 1 所示, 本文系统综述各类非热保鲜技术的研究进展, 并探讨其内在的生物机制, 以期为该领域的深入研究和产业化应用提供坚实的理论依据。

1 化学保鲜法

化学保鲜法的本质在于通过添加化学合成或天然提取的抗菌物质, 直接作用于腐败微生物, 抑制或杀灭其生长, 从而延长果蔬保质期[9]。该方法以其操作简便、成本较低和设备投资小的特点, 在产业中应用广泛[10]。根据作用形式的不同, 化学保鲜剂主要可分为吸附型、溶液浸泡型和熏蒸型 3 大类[11]。吸附型保鲜剂主要通过清除乙烯、降低氧气(O_2)浓度或脱除过量二氧化碳(CO_2)来延缓果蔬后熟, 例如常见的乙烯吸收剂; 溶液浸泡型则通过浸泡或喷施等方式, 达到防腐保鲜目的, 其作用或是直接杀灭果蔬表面及内部的病原微生物, 或是调节采后代谢, 苯并咪唑类衍生物是其中典型代表; 熏蒸型保鲜剂则在常温下可挥发成气体, 通过抑制或杀死果蔬表面微生物而发挥保鲜作用, 且对果蔬自身伤害较小, 二氧化硫制剂是此类中已广泛应用的代表, 其作用机制涵盖抑制微生物、调节生理代谢与延缓氧化过程[12], 但若使用浓度过高易导致二氧化硫残留, 存在安全隐患[13]。

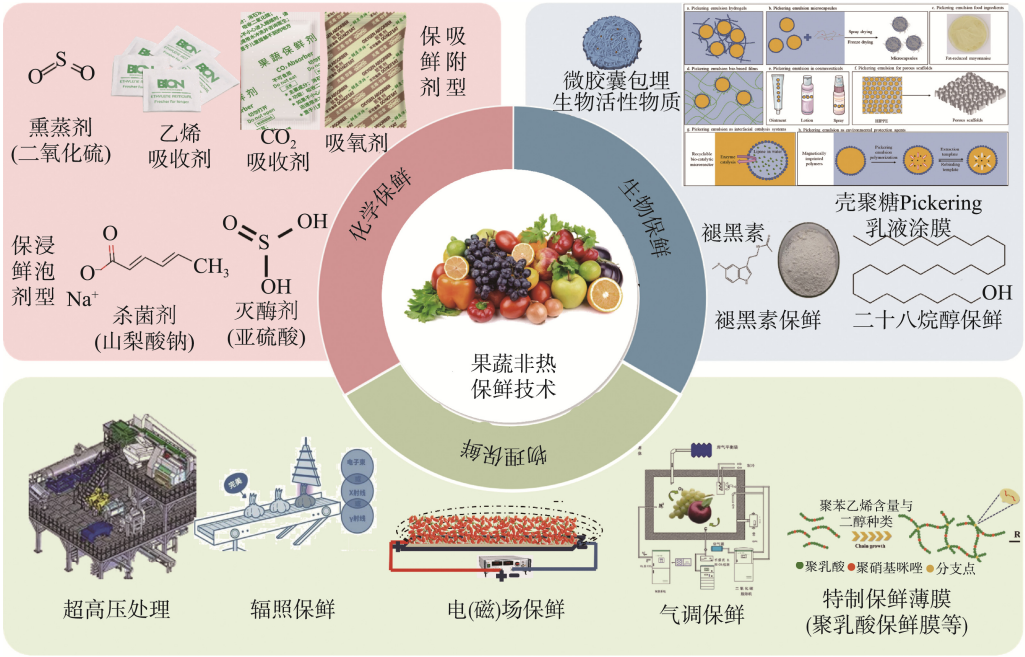


图 1　果蔬非热保鲜技术分类[8]

Fig.1　Classification of non-thermal preservation technologies for fruits and vegetables[8]

如在葡萄的贮藏保鲜中，利用 2%氯化钙浸泡处理可以硬化细胞壁结构，增强果实硬度、抑制采后生理成熟速率，减少产品腐烂损耗[14]。乙烯抑制剂 1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene，1-MCP)可有效延缓枣果实成熟和衰老，而不会影响硬度、维生素 C 含量或抗氧化特性[15]。游霉素(抗真菌剂)和没食子酸丙酯(抗氧化剂)等表面消毒剂可通过减少微生物污染和氧化应激延长枣果实贮藏期[16]。此外，郭衍银[17]系统阐述了化学保鲜剂在鲜切果蔬领域的应用，详细分析了过氧化氢(H_2O_2)和次氯酸水的消毒清洗作用、1-MCP 对乙烯作用的生理调控机制，以及钙盐在维持细胞壁结构和果实质地方面的功效。这些研究均有力地说明了化学保鲜剂可有效地维持果蔬品质，延长其货架期。

尽管如此，化学保鲜法仍面临不可忽视的挑战。其潜在的食品安全性风险，部分化学药剂的残留可能对消费者健康构成威胁；经化学药剂(特别是浸泡处理后)处理的果蔬，常引发消费者对其安全性和天然性的担忧，导致市场接受度相对较低[18]。未来研究的重点在于积极开发新型、安全、高效、无毒或低毒且可食用的化学保鲜剂，以期在保障食品安全与满足消费者需求的前提下，延续其成本与效率优势。

2　生物保鲜法

生物保鲜技术是一种基于生物体内天然物质或微生物代谢产物，通过拮抗、竞争、成膜及诱导抗性等作用调控果蔬生理代谢、抑制微生物生长等多种机制，实现安全、绿色且高效的保鲜效果，逐步替代或减少化学合成防腐剂的使用[17]，是现代食品保鲜科学中迅速发展的重要方向。

2.1　拮抗与竞争作用

拮抗与竞争作用是生物保鲜技术中抑制有害微生物、维持果蔬采后品质的核心机制。这一过程主要依赖于有益微生物、其代谢产物或特定天然活性物质[19]，通过占据生态位、争夺营养资源以及分泌抗菌物质等多种方式，直接或间接地抑制病原菌的生长与活性，从而延缓果蔬腐败[20]。

在微生物层面，以乳酸菌为代表的有益菌群通过竞争性拮抗发挥关键作用。乳酸菌能在果蔬表面快速定殖，优先利用可溶性糖、有机酸等营养物质，并通过物理占位削弱病原菌的附着与繁殖空间，形成营养与生态位的双重竞争[21]。此外其代谢过程中产生的有机酸(如乳酸与乙酸)能持续降低局部 pH，改变为不利于多数病原菌生长的微环境；同时，乳酸菌分泌的细菌素、H_2O_2 等抗菌物质可破坏病原菌细胞膜结构，干扰生理代谢，在竞争基础上强化的抑菌效果[22]。如 AMENU 等[23]对乳酸菌对水果和蔬菜的抑菌效果展开了全面地综述，表明乳酸菌主要通过生产乳酸，乳酸降低 pH 延长水果和蔬菜的保质期并抑制腐败病原体和病原体的生长；RANJITH 等[24]使用乳酸菌对芒果进行采后处理，使芒果的保鲜期提升至 16 d；并且 DE-SIMONE 等[25]研究了将植物乳杆菌结合海藻酸盐涂层，使鲜食葡萄的抗病率显著提升。拮抗作用与竞争效应在生物保鲜实践中相互交织、协同作用，共同构成一个动态的微生物调控体系。

2.2　成膜作用

成膜作用是通过在果蔬表面构建一层由壳聚糖、果胶、海藻酸钠等天然生物分子组成的连续的致密半透性薄膜，

延缓腐败并维持采后品质的物理—生物复合保鲜方式[26]。该技术通过利用可食性大分子(如壳聚糖、蛋白质、纤维素衍生物)或在其中复配天然抗菌成分(如植物精油), 在果蔬表面构建一层微米级薄膜[27]。这层薄膜可发挥物理屏障功能, 有效调节 O_2 与 CO_2 的透过率, 抑制果蔬采后呼吸作用; 减少水分蒸腾, 维持组织饱满度, 从而在宏观上延缓衰老与萎蔫[28]。

可食性涂层作为生物涂膜的重要分支, 由蛋白质、多糖和脂质等可生物降解的食品级材料构成(图 2), 不仅提供物理保护, 还可搭载天然抗氧化与抗菌成分, 从而主动抑制变质, 提高产品质量并延长货架期[29]。WANG 等[30]利用废弃蚕茧与丝绸副产物开发出一种新型可食性包装膜, 将其应用于果蔬保鲜, 可有效减缓水分流失并缓解氧化应激, 从而延长货架期。FENG 等[31]构建了一种基于类淀粉样蛋白的环保型可食涂层, 通过相转化溶菌酶形成黏附层并结合多糖复合膜, 实现了优异的抑菌、抗氧化与水氧阻隔性能。IQBAL 等[32]研制了由壳聚糖、芦荟凝胶与氧化锌纳米颗粒构成的纳米乳液涂层, 该体系粒径均匀(约 178 nm)、成膜稳定, 应用于番茄后可显著抑制腐败、保持感官品质并延长货架期。

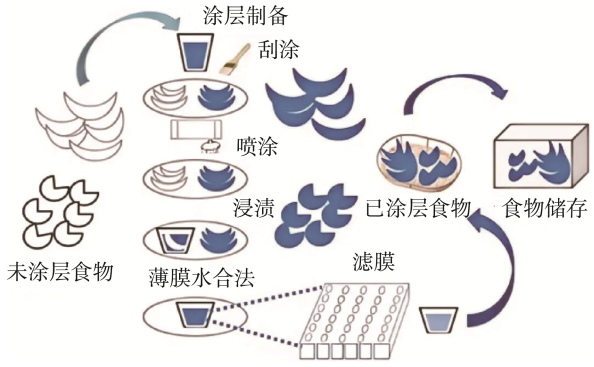
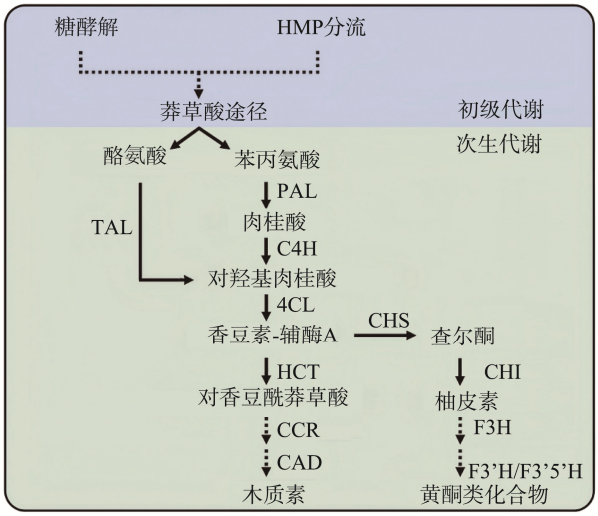


图 2 可食用涂层的生产方法及其在食品中的应用过程
Fig.2 Production method of edible coatings and their application process in food

许多成膜基质本身或其所负载的功能性成分, 具直接的生物抗性。如, 壳聚糖膜在形成物理屏障的同时, 其本身带有的正电荷能与微生物细胞壁的负电荷成分相互作用, 扰乱细胞膜功能[33]; 而当膜中复配百里香酚、肉桂醛等植物精油时, 这些活性成分可在薄膜中缓慢释放, 在界面处形成抗菌微环境, 通过破坏病原菌膜结构、抑制酶活等方式, 直接干预其生长与定殖[34]。这种“物理隔绝”与“界面化学拮抗”的结合, 不仅有效阻碍了病原菌的侵染, 也为果蔬表面固有的或人工接种的有益菌群提供了竞争优势, 从而更全面地维持采后品质。如 ZHU 等[35]利用酸催化预处理从甘蔗渣中提取含木质素的纤维素纳米原纤维(lignin-containing cellulose nanofibrils, LCNF), 并以其稳定 Pickering 乳液, 在鲜切香蕉表面形成致密纳米级薄膜。该涂层有效延缓了香蕉在 12 h 内的黑化与软化进程。总体而言, 成膜保鲜通过将材料的结构可设计性与功能可编程性相结合, 为精准、长效地维持果蔬采后品质提供了兼具理论基础与应用潜力的重要方案。

2.3 诱导抗性作用

诱导抗性作用是一种依托褪黑素、植物精油、益生菌代谢产物等外源信号分子, 通过间接调控果蔬内源防御机制与衰老相关生理代谢, 如调控病程相关蛋白的表达、活性氧迸发、植保素合成及细胞壁木质化增强等从而强化其病原菌抗性及抗衰潜能, 从而达到采后保鲜效果[19]。褪黑素保鲜的核心机制在于利用该内源信号分子激活果蔬的防御系统, 增强其抗病性与抗氧化能力, 从而间接延缓品质劣变。ZHENG 等[36]研究了褪黑素对鲜切马铃薯的保鲜效果, 发现其处理可显著提高块茎内源褪黑素水平, 激活苯丙烷代谢途径(图 3)[37], 促进总酚与黄酮等抗氧化物质的合成与积累, 并有效抑制多酚氧化酶活性, 在延缓酶促褐变的同时增强了组织的整体抗氧化能力。WEI 等[37]研究发现, 外源二十八烷醇处理可有效延缓苹果采后衰老进程。其作用机制涉及增强表皮蜡质屏障、激活抗氧化防御系统、维持糖代谢平衡及提升细胞壁结构稳定性等多路径协同。



注: 磷酸戊糖途径(hexose monophosphate pathway, HMP); 苯丙氨酸解氨酶(phenylalanine ammonia-lyase, PAL); 酪氨酸解氨酶(tyrosine ammonia-lyase, TAL); 肉桂酸-4-羟化酶(cinnamate 4-hydroxylase, C4H); 4-香豆酸:辅酶 A 连接酶(4-coumarate:coenzyme A ligase, 4CL); 羟基肉桂酰辅酶 A 连接酶(hydroxycinnamoyl-coenzyme A transferase, HCT); 肉桂酰辅酶 A 还原酶(cinnamoyl-coenzyme A reductase, CCR); 肉桂醇脱氢酶(cinnamyl alcohol dehydrogenase, CAD); 查尔酮合酶(chalcone synthase, CHS); 查尔酮异构酶(chalcone isomerase, CHI); 黄烷酮 3-羟化酶(flavanone 3-hydroxylase, F3H); 黄酮 3'-羟化酶(flavonoid 3'-hydroxylase, F3'H); 黄酮 3',5'-羟化酶(flavonoid 3',5'-hydroxylase, F3'5'H)。

图 3 植物苯丙烷代谢通路
Fig.3 Plant phenylpropanoid metabolic pathway

结果表明, 0.5 mg/L 为最优处理质量浓度, 可显著延长苹果保鲜期。此外, 李金歌等[38]基于多组学技术, 系统梳理多组学技术在果蔬保鲜中的分子机制, 填补传统保鲜技术机制研究的不足。由此可见, 诱导抗性保鲜的本质在于通过外源信号的精准输入, 调动并整合果蔬固有的防御与抗衰潜能, 使其在采后阶段仍能维持较高的生理活性与抗逆水平。该策略不仅避免了直接抗菌可能带来的生态干扰, 更通过强化果蔬自身韧性, 为绿色、可持续的保鲜技术提供了重要的生理学基础与系统化思路。

生物保鲜技术作为一类环境友好型保鲜策略, 近年来受到广泛关注。生物保鲜剂技术具有诸多优势, 首先生物保鲜剂多来源于天然动植物提取物或微生物代谢产物, 具有良好的生物相容性与可降解性, 在正确使用条件下不易产生有害残留, 符合现代消费者对食品安全与健康属性的要求; 部分生物保鲜手段(如褪黑素处理、某些益生菌或激发子)不仅不干扰果蔬的正常生理, 反而能够激活其自身的抗逆机制, 从而在保鲜的同时提升产品的功能品质; 此外, 许多生物保鲜材料如果胶、壳聚糖、淀粉等来源广泛, 部分甚至可以依托农业副产物进行开发, 具备循环经济的潜力。

然而, 该技术在实际推广中仍存在若干瓶颈。生物活性成分的提取与纯化成本普遍偏高, 导致终端产品价格难以与合成防腐剂竞争, 天然成分的稳定性易受环境因素影响, 不同批次间可能存在效能差异, 对工艺标准化和质量控制提出了较高要求。在安全性层面, 尽管多数生物材料被认为是安全的, 但其与复杂食品体系之间的相互作用、长期摄食的生物效应以及在高浓度下的潜在致敏性仍需更系统的评估。此外, 生物保鲜的效果往往依赖于特定的环境条件和对象种类, 尚未形成如化学保鲜那样普适性强、操作统一的技术规程。

3　物理保鲜法

物理保鲜技术作为一类重要的果蔬采后处理手段, 主要借助压力、电场、磁场、光照、特定包装环境及辐射等物理场作用, 对果蔬进行非侵入式或微环境影响处理, 从而实现对其生理代谢、微生物活动及品质变化的有效调控。与化学及生物保鲜方法相比, 物理保鲜普遍具备无化学残留、作用过程可控、环境兼容性好等技术优势, 正逐渐成为果蔬绿色保鲜体系的重要组成部分[39]。目前研究与应用较为广泛的物理保鲜技术主要包括超高压处理、电磁场保鲜、膜保鲜、冷等离子体(cold plasma, CP)保鲜、气调保鲜及辐照保鲜等。

3.1　超高压处理保鲜技术

超高压处理技术作为当前非热加工领域的研究热点, 在保持果蔬品质方面展现出显著潜力。该技术利用静水压原理, 以水或水基溶液为压力介质, 在常温或较低温度条件下向果蔬施加 100~800 MPa 的静态压力, 通过压力的等向性传递实现全食材均匀处理, 由于其压力仅作用于非共价键而不会破坏共价键结构, 因此能在有效灭活微生物、钝化酶活性的同时, 最大程度地保留果蔬的天然风味、色泽与营养成分[40]。其保鲜优势源于物理作用与微化学效应的协同, 然而, 超高压处理亦可能引起部分果蔬质构特性的改变, 需结合具体对象优化工艺参数。

黄欢[41]研究了超高压处理对鲜切马铃薯品质的影响, 发现该技术虽能有效维持色泽, 但会引起硬度下降; 当压力提升至 500 MPa 时, 硬度指标出现一定回升, 显示出压力强度与质构响应间的非线性关系。边昊等[42]以鲜切芋头为对象, 系统探究了超高压处理对其冷藏品质的影响, 结果表明, 200 MPa 处理能显著抑制多酚氧化酶和过氧化物酶活性, 降低褐变程度与菌落总数, 维生素 C 保留率最高, 感官品质最佳。

3.2　电磁场保鲜技术

电磁场保鲜技术作为物理保鲜领域的重要分支, 依托电场与磁场的协同或独立作用, 通过非热力机制调控果蔬采后生理代谢与微生物活动。该技术体系涵盖静电场、脉冲电场、交变磁场及复合电磁场等多种形式, 能够有效影响细胞膜电位、离子分布、酶活性以及基因表达等关键生理过程[7]。其作用过程不产生明显热效应, 在延缓果蔬衰老、抑制微生物增殖及维持营养品质方面展现出独特优势, 已成为当前果蔬绿色保鲜研究中极具潜力的方向之一。相较于超高压技术, 其核心优势在于对果蔬结构造成的破坏性更低, 且更适合于完整鲜果的长期贮藏。

3.2.1　高压脉冲电场保鲜技术

高压脉冲电场技术(pulsed electric fields, PEF)处理具有低能耗、节省时间以及作为最小加工方法的优势[43]。PEF 的核心机制是利用高强度、短时长的电脉冲形成电穿孔效应, 破坏微生物细胞膜磷脂双分子层结构, 导致膜电位失衡、通透性急剧增加, 使得细胞内溶物大量外泄, 同时胞外水分与有害物质内渗, 最终引发微生物细胞裂解死亡[44]; 在此基础上, 对于芽孢或孢子类抗性微生物, PEF 可通过破坏其芽孢壁与细胞膜的协同稳定性, 降低其萌发率与繁殖能力。另外, PEF 还可通过影响微生物细胞内酶系统的活性, 阻断能量代谢与物质合成通路, 进一步抑制微生物的定植与扩散[43]。该技术作为一种电物理处理方法, 在果蔬采后病害防控中显示出良好应用前景。如张元元等[45]针对娃娃菜采后软腐病问题, 系统研究了 PEF 对致病菌胡萝卜软腐果胶杆菌的抑制效果。研究表明, 随着电场强度和脉冲占空比的增加, 对病原菌的杀灭效果显著增强, 其作用机制主要表现为破坏细胞膜完整性, 导致胞内物质泄漏。进一步研究发现, PEF 处理能有效钝化病原菌的果胶酶和纤维

素酶活性, 显著抑制接种抱子芥病斑的扩展。在 28 kV/cm 电场强度和 49.2%脉冲占空比的最优条件下, 可完全阻止病原菌在 24 h 内的侵染发病[46]。BARBA 等[47]研究表明, 对菠萝与红甜菜进行适度 PEF 处理, 虽未明显缩短干燥时间, 但能改善最终产品的复水性、质地与结构多孔性, 使其呈现更清晰的颗粒感。但是过高的能量输入可能导致植物材料宏观形状变形, 处理参数的优化是实现该技术潜在效益的关键。综上, PEF 通过电物理机制直接作用于微生物细胞及植物组织, 在杀菌保鲜与质构改良方面具有独特优势; 其技术效果高度依赖于处理参数的精准调控, 在实现高效保鲜的同时, 也需避免过度处理可能带来的物理结构变化。这为开发低能耗、高效率的果蔬采后非热保鲜技术提供了切实可行的物理途径。

3.2.2 低压静电场保鲜技术

低压静电场技术(low voltage electro-static field, LVEF)作为一类新兴的非热物理保鲜手段, 最初主要用于肉类保存[48], 近年来, 它在果蔬保鲜方面展现出显著潜力。其核心原理在于利用弱电场环境(通常为直流或低频交流电场)作用于果蔬组织, 通过调控细胞膜电位、影响离子跨膜运输及调节活性氧代谢[49]等生理过程, 延缓采后衰老与品质劣变。该技术不仅能够有效抑制呼吸强度、降低酶促褐变相关酶活性, 还可在一定程度上维持细胞壁完整性, 减轻电解质渗漏与脂质过氧化程度[50–51]。由于其设备简单、能耗低且不产生明显热效应, LVEF 在多种果品、蔬菜及食用菌的贮藏保鲜中展现出良好的适用性[50]。研究表明, 该技术可降低双孢蘑菇的呼吸速率、控制酶活性并减轻微生物侵染[52]; 在鲜切菠萝中可通过降低活性氧代谢水平调节保鲜效果[51]。对于荔枝, LVEF 能够调节丙二醛含量、相对电解质渗漏率以及多酚氧化酶和过氧化物酶的活性[53]。此外, 该技术还可通过调控白玉菇的基因表达, 抑制酶促褐变并延长货架期。在草莓中的研究亦证实, LVEF 能抑制丙二醛积累, 从而延长保鲜时间[54]。在此基础上, 300 mV LVEF 能有效维持枸杞和长枣品质并延长其贮藏期[49,55]。这些案例共同表明, LVEF 通过电生理干预而非热效应或化学作用, 实现了对多种果蔬采后代谢的精准调节。未来研究可进一步聚焦于电场参数与不同果蔬生理特性的匹配优化, 以推动其从实验室向规模化贮藏应用的稳健过渡。

3.2.3 磁场保鲜技术

磁场保鲜技术则是利用静态磁场、交变磁场、脉冲磁场等不同形态的磁场对果蔬采后生理进行干预的物理方法。其作用机制涉及磁场对生物体内水分子簇结构、离子行为以及自由基反应的调节, 进而影响细胞的代谢活性和微生物的生长状态。静态磁场是由恒定直流电流或静止永磁体激发形成的磁场类型, 其磁感应强度的大小与方向在时空维度上均保持恒定, 因此亦被称作恒定磁场, 其可以通过影响果蔬细胞内部带电粒子的运动, 改变生物酶活性, 从而影响其代谢活动[56]; 交变磁场是指强度和方向规律变化的磁场, 交变磁场可促使细胞膜极性磷脂双分子层紧密排列, 影响膜表面水分子结构; 并通过调控膜内 K^+、Ca^{2+}、等极性带电离子的运动改变膜电压, 降低细胞膜通透性与电导率, 减缓呼吸作用, 减少电解质外渗[57]; 脉冲磁场的强度和方向可以根据不同需求进行调节, 呈间歇式出现, 强脉冲磁场通过引发微生物细胞的跨膜电位、感应电流、带电粒子运动、洛伦兹力及离子能量等一系列变化, 破坏细胞结构、干扰生理活动, 从而实现对微生物的灭杀作用[58]。

在低温贮藏条件下, 磁场处理还被证实能够改善组织的过冷状态、抑制冰晶生长, 从而减轻冷冻损伤[58]。与电场及其他物理场技术相似, 磁场保鲜具有作用均匀、无残留、环境兼容性好等优势[59]。例如, 静态磁场可延缓草莓软化、减少蓝莓重量损失、维持辣椒质地和颜色等, 但对土豆等部分果蔬无显著影响[56]; 交变磁场能改善葡萄感官特性、减少青椒重量损失、维持樱桃番茄色泽[60]; 脉冲磁场通过杀菌作用保持芒果、番茄等的品质, 增强草莓香气[61]; 振荡磁场可减少樱桃重量损失、延长鲜切芒果货架期, 其效果与果蔬类型、冷冻条件等相关[62]。此外, 果蔬的冷冻保藏也是保鲜的一种常见方法, YOU 等[63]系统研究了磁场在果蔬低温贮藏中的应用。其优势在于能通过非热力机制如影响离子运输、改变水结构来增强超冷度、抑制冰晶生长并调控生理代谢, 从而有效保持果蔬品质。结果表明, 该技术能缩短冻结时间、减小冰晶损伤, 并与电场产生协同效应。总体而言, 磁场保鲜以其作用均匀、无化学残留、能耗较低的特点, 为果蔬采后贮藏提供了一种环境友好的物理调控途径。未来研究可根据果蔬种类与贮藏需求, 进一步优化磁场类型、强度及处理时间等参数, 推动其从机制研究走向规模化、标准化应用。

3.3 冷等离子体保鲜技术

CP 保鲜技术具有安全、环境可持续性以及无有害残留等优势[64], 其核心在于通过特定能量场使气体电离, 形成由离子、电子、活性自由基等组成的非平衡低温等离子体从而破坏细胞壁, 提高杀菌效果[65]。如王照琪等[66]以鲜切猕猴桃为研究对象, 探讨了介质阻挡放电与滑放电两种形式产生的 CP, 在气相色谱或液相色谱条件下对果实的保鲜效能。研究结果显示, CP 处理能够延缓果实自身的呼吸速率, 可有效维持鲜切猕猴桃在 72 h 内的良好外观, 抑制了腐败迹象的出现, 从而为延长其保鲜期提供了可能。ZHANG 等[67]发现 80 s 的 CP 处理可使新鲜苹果的可滴定酸度增加 4.35%、可溶固体含量增加 13.79%以及总酚含量增加 22.12%, 说明其适度处理可在不明显影响外观与硬度的同时, 提升部分果蔬的可滴定酸、可溶性固形物及总酚等品质指标; 然而过度处理则可能导致表面微损伤、水分迁移加快, 甚至引起组织裂纹等负面效应。因此, CP 技术在应用中需依据果蔬种类、组织特性及贮藏目标进行参数

优化, 以实现杀菌效果与品质维持的最佳协同。该技术为果蔬采后保鲜提供了一条高效、清洁且可控的物理路径, 未来有望通过设备集成与工艺标准化进一步拓展其产业应用前景。

3.4　气调保鲜与膜保鲜技术

气调保鲜技术是基于果蔬采后仍作为生命体持续进行呼吸作用的特性, 通过主动调节贮藏环境中的气体成分(如 O_2、CO_2 比例)与温湿度条件, 有效抑制其呼吸强度与新陈代谢速率, 从而延缓成熟衰老、维持品质并延长货架期。该技术通过控制贮藏环境实现保鲜目的, 具有绿色安全的显著优势(图 4)[68]。气调保鲜尤其适用于呼吸跃变型果实, 但在实际应用中需严格控制气体组成, 过高 CO_2 或过低 O_2 浓度均可能引起代谢紊乱, 导致组织褐变、异味产生或腐烂加剧。

近年来, 将可生物降解包装材料与气调技术相结合, 已成为提升果蔬采后品质的重要研究方向。此类复合材料在发挥气调功能的同时, 兼顾环境友好特性, 展现出广阔的应用前景。PEANO 等[69]比较了不同包装材料结合气调保鲜包装对杏果实贮藏品质的影响, 通过系统监测膜内气体组成、果实失重率、果肉硬度、可溶性固形物含量及色泽变化等指标, 评估其保鲜效果。研究发现, 可生物降解薄膜能够有效平衡果实呼吸与薄膜透气性, 维持包装内适宜的 O_2 与 CO_2 动态平衡。相较于其他处理, 传统聚乙烯膜膜与可降解膜包装的杏果失重率更低, 果肉硬度保持更好, 成功将货架期延长至 21 d。

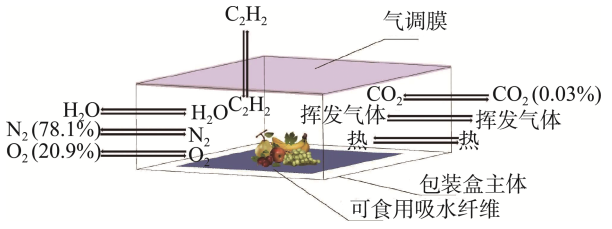


图 4　果蔬气调包装系统示意图

Fig.4　Schematic diagram of modified atmosphere packaging system for fruits and vegetables

膜保鲜技术通过构建适宜的包装微环境, 实现对果蔬采后生理活动的精细调控。该技术不仅能物理隔绝外部污染, 还能通过调节内部气体组成、抑制微生物活动及诱导抗性反应等多重机制, 为果蔬创造最佳的保存条件[70]。

3.4.1　塑料薄膜

塑料薄膜作为传统物理保鲜材料, 在现代果蔬供应链中仍发挥着重要作用。低密度聚乙烯等材料制成的包装膜具有成本低、易加工、机械性能好等优点, 但其环境持续性差的问题促使科研人员积极寻求可生物降解的替代方案。如 WANG 等[71]开发出由羧甲基纤维素和改性淀粉制成的高性能生物塑料薄膜, 该薄膜在机械强度、透明度及水氧阻隔性上均优于商用塑料, 并兼具阻燃、抗菌特性。YAN 等[72]创新性地将双向拉伸聚乙烯薄膜(biaxially oriented polyethylene film, BOPE)包装与硫化氢(H_2S)熏蒸处理相结合, 用于番茄采后保鲜。研究表明, BOPE 相比普通聚乙烯膜膜具有更优异的气体阻隔性和表面光滑度, 且其性能不受 H_2S 影响。这种“包装+处理”的协同策略系统性地延缓了番茄的变色、软化与衰老过程, 显著提升了果实的抗氧化酶活性, 并更好地保留了总酚、总黄酮等营养成分。

3.4.2　功能性复合膜

功能性复合膜其本质上就是通过添加纳米材料和无机物等其他成分或通过提升基础膜的性能。如 LI 等[73]成功制备的壳聚糖/明胶生物基薄膜, 展现出优秀的综合性能, 该膜通过单宁酸功能化几丁质纳米晶体与明胶基质间的强氢键作用, 实现机械性能的显著提升, 并且用于草莓保鲜时, 能有效降低 14 d 失重率至 18.9%, 维持果实硬度与色泽。在此基础上, 针对壳聚糖膜抗菌性能不足的问题, 王英沣等[74]采用流延法制备了一种壳聚糖基薄膜, 并通过添加 1,3-二氯-5,5-二甲基海因和姜黄素实现了薄膜对 pH 响应及高效的抗菌性能。庄良等[75]开发了一种由壳聚糖和聚乙烯醇增强的 CuZnAl 复合金属氧化物纳米薄膜用于樱桃保鲜, 能有效调节包装内气体微环境、抑制微生物生长并减少水分流失, 从而显著延长保鲜期并维持果实品质。WANG 等[76]通过将蒙脱土负载丁香油与纳米纤维素固定铜纳米颗粒协同引入壳聚糖基质, 成功构建了羧甲基纤维素-铜离子复合气凝胶包装。该材料巧妙的多孔结构设计不仅显著提升了其机械韧性, 解决了纯壳聚糖气凝胶易损的问题, 更能通过缓释活性成分实现持久的抗氧化与抗菌效能, 为减缓果蔬储运过程中的物理损伤和氧化变质提供了创新性解决方案。

此外, WANG 等[77]以廉价大豆蛋白为原料制备纳米纤维, 复合壳聚糖和氧化锌纳米颗粒构建多功能薄膜, 实现了高机械性能、抗菌、抗氧化、抗紫外和生物安全的多功能集成, 有效延长番茄货架期。ZHAO 等[78]针对荔枝采后易腐烂难题, 成功开发了一种基于羧甲基纤维素、铁沸石咪唑金属有机框架(Fe/zeolitic imidazolate framework, Fe/ZIF-8)和表没食子儿茶素没食子酸酯(epigallocatechin gallate, EGCG)的多功能活性薄膜 FZ@CEF。该薄膜具备优异抗氧化与光热抗菌能力, 在近红外光照射下可实现高效杀菌, 该材料能显著延长荔枝保鲜期至 9 d, 有效保持品质, 同时具有可生物降解、安全无残留的优势。LIANG 等[79]成功开发了一种蓖麻油衍生的水性聚氨酯(waterborne polyurethane, WPU)纳米涂层, 该 WPU 涂层通过破坏细菌细胞膜完整性、引发内容物泄漏和氧化应激, 对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌表现出强效抗菌活性, 将其涂覆于多种水果表面, 能有效延缓失重、稳定品质并显著延长货架期。

TI 等[80]成功制备了碳量子点(carbon quantum dots, CDs)铁沸石咪唑金属有机框架(@ZIF-8)/聚己内酯(polycaprolactone, PCL)/碳酸乙烯酯(ethylene carbonate, EC), 纳米纤维膜用于水果保鲜。其优势在于 CDs 与 ZIF-8 的协同作用产生了良好的光动力抗菌效果, 该材料能将草莓的保质期从 6 d 显著延长至 12 d。DENG 等[81]通过调控木质素含量与复合比例, 开发出一系列具有优化阻隔性、机械强度和紫外线屏蔽功能的木质纳米纤维素复合食品包装膜, 并开展水果保鲜实验, 发现优化后的LCNF-2-4膜在 7 d 储藏期内使葡萄失重率降低至 11.9%、硬度损失控制在 2%、维生素 C 降解率限制在 31%。DING 等[82]开发了一种基于丹皮酚@ZIF-8 和 Ag_2CO_3/Ag_2O 异质结(AgH)的多糖基纳米复合保鲜膜。该膜的优势在于具备 pH 响应释放特性、优异的力学性能、抗氧化及抗紫外线能力, 并能有效抑制大肠杆菌和金黄色葡萄球菌。应用结果表明, 该膜可使树莓和鲜切黄瓜在 5 d 内无明显腐败, 且生物安全性高。

MAO 等[83]综述了将多酚引入淀粉基质中可显著增强其对水汽、气体与光的阻隔性能, 提升抗氧化与抗菌活性, 这些功能是延长果蔬货架期的关键因素。随着纳米技术的发展, 一种集成了纳米结构拉曼散射传感器的可拉伸和抗菌包装材料被提出, 这种包装不仅可以实时、无损地检测食品中的营养成分、新鲜度和有毒物质, 还可以防止微生物生长并增强食品的保鲜效果[84]。此外, 基于真菌多糖的 pH/NH_3 敏感智能薄膜也得到了研究, 这种薄膜具有出色的热稳定性和抗氧化活性, 可以有效地用于多功能智能包装[85], 通过不同的酸性、中性和碱性氨基酸功能化的 CDs 在食品中的谷胱甘肽检测方面也表现出了很好的应用前景[86]。总体而言, 气调与膜保鲜技术正从单一的气体调控向材料、功能与智能化集成发展, 通过多机制协同不仅有效延缓了果蔬品质劣变, 也回应了绿色包装与可持续发展的行业需求。未来该领域的突破, 将取决于如何在材料性能、成本控制、环境友好性与产业化可行性之间取得更优平衡。

3.5 辐照保鲜技术

辐照保鲜技术主要利用电离或非电离辐射处理果蔬, 达到杀灭表面微生物、抑制发芽及延缓生理老化的目的。该技术可在基本保持果蔬外观形态与内在营养成分的基础上实现保鲜, 但仍存在高能辐射可能引起的维生素损失与矿物质降解[87]。发光二极管(light-emitting diode, LED)光辐照作为非电离辐射保鲜的一种形式, 其作用机制与果蔬体内的光受体系统密切相关。采后果蔬组织中存在的光敏色素、隐花色素等光受体, 在接收特定波长 LED 光(如蓝光、红光)信号后, 可激活下游信号转导通路, 进而调控相关基因表达与生理代谢。BAI 等[88]以“川知红”杏为试材, 研究了白色 LED 光照对其采后品质的调控效应。结果显示, LED 处理通过延缓成熟进程、抑制细胞壁降解酶活性、调节糖酸代谢及乙烯合成, 较好地保持了果实质地与营养品质; 同时该处理提升了关键香气合成酶活性, 促进有益香气组分积累并抑制不良风味物质生成, 表明LED光照处理在保持杏果采后风味与延长贮藏期方面具有积极效果。辐照保鲜技术正从传统的“抑菌防腐”向基于光信号调控的“生理干预”方向拓展, LED 光辐照等新兴手段通过精准调控采后果蔬的生理代谢网络, 为实现高品质、低损耗的绿色保鲜提供了新的技术路径。

3.6 脉冲光保鲜技术

脉冲光(pulsed light, PL)技术是另一类非热物理保鲜方法, 其采用短时、高强的脉冲式广菌原理通过光化学效应,主要是紫外线 C 对细菌 DNA 的破坏或通过光热或光物理效应, 破坏细菌的细胞膜、蛋白质和其他成分[89]。TAO 等[90]阐明 PL 处理作为一种非热物理保鲜技术, 在维持采后番茄品质和抗性方面的作用机制与优势。JIANG 等[91]发现 PL 通过调控光信号与生物钟相关基因、激活苯丙素代谢及植物防御通路, 不仅能有效保持果实色泽、硬度, 减少失重, 更能通过调节糖酸代谢与关键挥发性有机物如 2-苯乙醇的合成, 显著延缓风味劣变并抑制不良风味产生。PL 技术通过“表面对菌、内部调控”的双重作用, 为果蔬采后保鲜提供了一种快速、高效且无残留的物理解决途径, 尤其在保持果实外观、质地与风味完整性方面展现出独特优势。

物理保鲜技术作为果蔬采后保鲜的重要方式, 近年来因其环境友好、无化学残留的特点而备受关注。与化学方法相比, 物理保鲜不依赖外源添加剂, 而是通过压力、电场、磁场、光照或特定包装环境等物理手段, 直接作用于果蔬本身或其微环境, 实现对其生理代谢和微生物活动的调控。这类技术的优势主要体现在不引入化学物质, 物理保鲜更好地保持了果蔬的“天然”属性, 符合当下消费者对食品安全与健康的需求;物理保鲜技术作用可控, 处理参数(如压力强度、电场频率、光照波长等)可精确调整, 便于实现标准化应用; 部分技术如低温等离子体、LED 光照等, 在节能方面展现出潜力, 为降低保鲜环节的碳足迹提供了可能。

然而, 物理保鲜技术同样存在一定的局限性。一方面, 许多技术尚处于实验室或中试阶段, 设备投入成本高, 工艺参数尚未形成统一标准, 制约了其产业化推广。另一方面, 物理保鲜的作用效果存在明显的果蔬种类特异性。例如, 某些果蔬对特定波长的光响应良好, 而另一些则不明显; 静电场处理对叶菜类效果显著, 但对根茎类作物可能收效甚微。这种差异性要求在实际应用中必须具有针对性, 增加了技术推广的复杂性。更为深层的挑战在于, 部分物理保鲜技术的作用机制尚未被完全阐明。例如, 磁场保鲜的生物学效应途径、PL 对果蔬内在代谢网络的精确调控等, 仍需要从分子和基因层面进行更系统的解析。

4　结束语

当前, 非热保鲜技术已从单一方法探索发展为化学、生物与物理多体系并存的格局, 在果蔬绿色保鲜中展现出替代传统热处理的潜力。化学法应用广泛但面临安全性问题; 生物法依托天然成分与诱导抗性机制, 虽绿色安全却受制于稳定性与成本; 物理法则通过电场、磁场、光照、压力等非热力场精准调控生理代谢或抑制微生物, 在无化学残留方面优势显著, 但设备投入高、参数优化复杂。各类技术虽机制不同, 但均以延缓衰老、保持品质为核心目标。然而, 其实际应用仍普遍存在效果物种依赖性显著、产业化成本偏高、部分作用机制尚未完全阐明等共性挑战。未来研究需着力构建基于多技术协同的精准保鲜体系, 通过整合物理场处理、生物保鲜剂与功能膜材料等优势, 突破单一技术的局限性。

参考文献

[1] FAISAL M, ARSHAD N, WANG H, *et al*. Recent advances in technologies for preserving fresh-cut fruits and vegetables [J]. Foods, 2025, 14(16): 2769.

[2] PACE B, CEFOLA M. Innovative preservation technology for the fresh fruit and vegetables [J]. Foods, 2021, 10(4): 719.

[3] PENG J, DUAN X, LIANG H, *et al*. Hot water treatment enhances mandarin fruit resistance to *Penicillium italicum* via histone H3K9 and H3K36 methylation modification [J]. Postharvest Biology and Technology, 2025, 226: 113569.

[4] XU S, HE W, YAN J, *et al*. Volatomics-assisted characterization of aroma and off-flavor contributors in fresh and thermally treated kiwifruit juice [J]. Food Research International, 2023, 167: 112656.

[5] JIANG X, FENG L, HAN J, *et al*. Preparation of hydroxypropyl methylcellulose/pueraria-based modified atmosphere film and its influence on delaying the senescent process of postharvest *agaricus bisporus* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 261: 129611.

[6] CHANG CK, YANG YT, GAVAHIAN M, *et al*. Prolonging the shelf-life of atemoya (*Annona cherimola*×*Annona squamosa*) using pulsed electric field treatments [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 88: 103458.

[7] ZHAO S, YANG Z, ZHANG L, *et al*. Effect of combined static magnetic field and cold water shock treatment on the physicochemical properties of cucumbers [J]. Journal of Food Engineering, 2018, 217: 24–33.

[8] MENG W, SUN H, MU T, *et al*. Chitosan-based pickering emulsion: A comprehensive review on their stabilizers, bioavailability, applications and regulations [J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 304: 120491.

[9] 乌馀冰, 张志祥, 崔燕, 等. 蔬菜采后保鲜技术的应用与发展[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(10): 107–110.
WU XB, ZHANG ZX, CUI Y, *et al*. Application and development of post-harvest preservation technology for vegetables [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(10): 107–110.

[10] MA L, ZHANG M, BHANDARI B, *et al*. Recent developments in novel shelf life extension technologies of fresh-cut fruits and vegetables [J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 64: 23–38.

[11] 邹东云, 马丽艳, 杨丽丽, 等. 化学保鲜剂在果蔬保鲜中的应用[J]. 农产品加工(学刊), 2006(3): 38–40, 45.
ZOU DY, MA LY, YANG LL, *et al.* Application of chemical preservatives in the preservation of fruits and vegetables [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2006(3): 38–40, 45.

[12] 郑怡格, 邢世均, 施文健, 等. 二氧化硫熏蒸激活硫代谢维持‘木纳格’葡萄采后品质[J]. 食品科学, 2025, 46(9): 285–294.
ZHENG YG, XING SJ, SHI WJ, *et al*. Sulphur dioxide fumigation activates sulphur metabolism to maintain post-harvest quality of ‘Muscat’ grapes [J]. Food Science, 2025, 46(9): 285–294.

[13] LOU T, HUANG W, WU X, *et al*. Monitoring, exposure and risk assessment of sulfur dioxide residues in fresh or dried fruits and vegetables in China [J]. Food Additives & Contaminants, Part A, 2017, 34(6): 918–927.

[14] 孙思胜, 王玉敏, 田林垚, 等. 采后氯化钙处理对‘阳光玫瑰’葡萄贮藏品质的影响[J]. 许昌学院学报, 2022, 41(5): 75–79.
SUN SS, WANG YM, TIAN LY, *et al*. Effects of postharvest calcium chloride treatment on the storage quality of ‘Sunshine Rose’ grapes [J]. Journal of Xuchang University, 2022, 41(5): 75–79.

[15] OZTURK B, YILDIZ M, YILDIZ K, *et al*. Maintaining the postharvest quality and bioactive compounds of jujube (*Ziziphus jujuba* mill. Cv. ‘Li’) fruit by applying 1-methylcyclopropene [J]. Scientia Horticulturae, 2021, 275: 109671.

[16] ZHAO L, LI H, LIU Z, *et al*. Quality changes and fungal microbiota dynamics in stored jujube fruits: insights from high-throughput sequencing for food preservation [J]. Foods, 2024, 13(10): 1473.

[17] 郭衍银. 化学保鲜在国外鲜切果蔬上的应用进展[J]. 食品工业科技, 2012(6): 403–408.
GUO YY. Progress in the application of chemical preservation in foreign fresh-cut fruits and vegetables [J]. Science and Technology for the Food Industry, 2012(6): 403–408.

[18] NNAJI ND, ONYEAKA H, UGHAMBA KT, *et al*. Chemical toxicants used for food preservation in Africa. Is it a case of ignorance or food fraud? A review [J]. HEALTH Science Reports, 2025, 8(4): e70333.

[19] OBAFEMI YD, OBIUKWU AC, ORANUSI SU. Revisiting the application, current trends, and prospect of bacteriocins in food preservation [J]. Discover Food, 2025, 5(1): 165.

[20] WANG X, YUAN Z, SHI Y, *et al*. *Bacillus amyloliquefaciens* HG01 induces resistance in loquats against anthracnose rot caused by *colletotrichum acutatum* [J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 160: 111034.

[21] CIRAT R, CAPOZZI V, BENMECHERNENE Z, *et al*. LAB antagonistic activities and their significance in food biotechnology: Molecular mechanisms, food targets, and other related traits of interest [J]. Fermentation, 2024, 10(4): 222.

[22] SARAGOÇA A, CANHA H, VARANDA CMR, *et al*. Lactic acid bacteria: A sustainable solution against phytopathogenic agents [J]. Environmental Microbiology Reports, 2024, 16(6): e70021.

[23] AMENU D, NUGUSA A, TAFESSE T. Preservative effectiveness of lactic acid bacteria on fruits and vegetables [J]. International Journal of Cell Biology, 2025, 2025(1): 5833236.

[24] RANJITH FH, ARIFFIN SH, MUHIALDIN BJ, *et al*. Influence of natural antifungal coatings produced by lacto-fermented antifungal substances on respiration, quality, antioxidant attributes, and shelf life of mango (*Mangifera indica* L.) [J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 189: 111904.

[25] DE-SIMONE N, SCAURO A, FATCHURRAHMAN D, *et al*. Inclusion of antifungal and probiotic *Lactiplantibacillus plantarum* strains in edible alginate coating as a promising strategy to produce probiotic table grapes and exploit biocontrol activity [J]. Horticulturae, 2024, 10(4): 419.

[26] ALI M, ALI A, ALI S, *et al*. Global insights and advances in edible coatings or films toward quality maintenance and reduced postharvest losses of fruit and vegetables: An updated review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2025, 24(1): e70103.

[27] GURJAR PS, KILLADI B, LENKA J, *et al*. Effect of gum arabic coatings

on physico-chemical and sensory qualities of guava (*Psidium guajava* L) cv. Shweta [J]. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 2018, 7(4): 3769–3775.

[28] PAN J, LI C, LIU J, *et al*. Polysaccharide-based packaging coatings and films with phenolic compounds in preservation of fruits and vegetables—a review [J]. Foods, 2024, 13(23): 3896.

[29] MBONAMBI NP, ADEYEMI JO, SEKE F, *et al*. Fabrication and application of bio-based natural polymer coating/film for food preservation: A review [J]. Processes, 2025, 13(8): 2436.

[30] WANG X, WANG Y, ZHU H, *et al*. Emerging strategies for food preservation: Recent advances and challenges in nanotechnology for edible coatings [J]. Agricultural Products Processing and Storage, 2025, 1(1): 13.

[31] FENG N, ZHANG J, TIAN J, *et al*. Preserving fruit freshness with amyloid-like protein coatings [J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 5060.

[32] IQBAL SZ, WASEEM M, ZIA KM, *et al*. Application of chitosan, zinc oxide nanoparticles, and aloe vera gel edible coating for the extension in shelf life of tomatoes [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2025, 50: 101570.

[33] PIZATO S, VEGA-HERRERA SS, CHEVALIER RC, *et al*. Impact of chitosan coatings enriched with clove essential oil on quality of minimally processed strawberries [J]. Brazilian Archives of Biology and Technology, 2022, 65: e22210278.

[34] YILDIZ E, HANCI F, YAMAN M, *et al*. Edible micro-sized composite coating applications on post-harvest quality of sweet cherry fruits [J]. Horticulturae, 2025, 11(3): 303.

[35] ZHU X, FANG Y, HASSANPOUR M, *et al*. Lignin-containing cellulose nanofibrils as pickering emulsion stabilizers for essential oil microcapsules in preservation of fresh-cut banana slices [J]. Food Hydrocolloids, 2026, 172: 111869.

[36] ZHENG X, ZHANG X, JIANG H, *et al*. Melatonin treatment extended shelf life and improved antioxidant capacity of fresh-cut potato tubers [J]. Agricultural Products Processing and Storage, 2025, 1(1): 10.

[37] WEI M, SUN Q, WANG A, *et al*. Octacosanol preserves postharvest apple quality by delaying senescence through coordinated regulation of cuticular wax biosynthesis and antioxidant defense mechanisms [J]. Food Quality and Safety, 2025, 9: fyaf015.

[38] 李金歌, 黄桂丽. 多组学技术在果蔬保鲜领域的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(18): 145–151.
LI JG, HUANG GL. Research progress on multi-omics technology in fruit and vegetable preservation [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(18): 145–151.

[39] CHEN D, ZHANG Y, ZHAO J, *et al*. Research progress on physical preservation technology of fresh-cut fruits and vegetables [J]. Horticulturae, 2024, 10(10): 1098.

[40] ARSLAN M, ZAREEF M, AFZAL M, *et al*. Innovative non-thermal processing technologies for shelf life extension and retention of bioactive compounds in liquid foods: Current status and future prospects [J]. Foods, 2025, 14(17): 2953.

[41] 黄欢. 超高压处理对鲜切马铃薯质地及风味品质的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
HUANG H. Effect of ultra-high pressure treatment on texture and flavor quality of fresh-cut potatoes [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.

[42] 边昊, 雷镇欧. 超高压处理对鲜切芋头品质影响研究[J]. 四川旅游学院学报, 2020(1): 16–19.
BIAN H, LEI ZOU. Research on the impact of ultra-high pressure treatment on the quality of fresh-cut taro [J]. Journal of Sichuan Tourism Institute, 2020(1): 16–19.

[43] LI L, YANG R, ZHAO W. The effect of pulsed electric fields (PEF) combined with temperature and natural preservatives on the quality and microbiological shelf-life of cantaloupe juice [J]. Foods, 2021, 10(11): 2606.

[44] YOGESH K. Pulsed electric field processing of egg products: A review [J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(2): 934–945.

[45] 张元元, 赵欢欢, 李国锋, 等. 高压脉冲电场对果胶杆菌的杀菌效果及其致死动力学研究[J]. 食品工业科技, 2023, 44(1): 162–171.
ZHANG YY, ZHAO HH, LI GF, *et al*. Study on bactericidal effect and lethal dynamics of high pulsed electric field on *Pectobacterium carotovorum* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(1): 162–171.

[46] LIU C, GRIMI N, LEBOVKA N, *et al*. Effects of pulsed electric fields treatment on vacuum drying of potato tissue [J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 95: 289–294.

[47] BARBA FJ, PARNIAKOV O, PEREIRA SA, *et al*. Current applications and new opportunities for the use of pulsed electric fields in food science and industry [J]. Food Research International, 2015, 77: 773–798.

[48] XIE Y, CHEN B, GUO J, *et al*. Effects of low voltage electrostatic field on the microstructural damage and protein structural changes in prepared beef steak during the freezing process [J]. Meat Science, 2021, 179: 108527.

[49] LIU H, YE T, WEI X, *et al*. Low-voltage electrostatic field prolongs *Ziziphus jujuba* mill.cv. Lingwuchangzao fresh keeping via mitochondrial electron transfer regulation and NAD(*P*)H redox balance remodeling [J]. Food Chemistry, 2025: 147210. DOI: 10.1016/j.foodchem.2025.147210

[50] LIU F, ZHANG Y, ZENG M, *et al*. Quantified low voltage electrostatic field: The effects of intensity on cherry tomato preservation and mechanism [J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141100.

[51] CHENG R, LI W, WANG Y, *et al*. Low voltage electrostatic field treatment of fresh-cut pineapples with slightly acidic electrolytic water: Influence on physicochemical changes and membrane stability [J]. Scientia Horticulturae, 2023, 308: 111602.

[52] LIU F, XU Y, ZENG M, *et al*. A novel physical hurdle technology by combining low voltage electrostatic field and modified atmosphere packaging for long-term stored button mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 90: 103514.

[53] ZHOU J, WU J, LIU H, *et al*. Low voltage electrostatic field combined with ice-temperature to improve the quality of litchi during storage [J]. Food Research International, 2024, 196: 115068.

[54] XU C, ZHANG X, LIANG J, *et al*. Cell wall and reactive oxygen metabolism responses of strawberry fruit during storage to low voltage electrostatic field treatment [J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 192: 112017.

[55] YANG C, ZHOU Z, NIU P, *et al*. Transcriptomic and physiological analysis reveal the effects and potential mechanisms of low-voltage electrostatic field treatment on the quality retention of goji berries during storage [J]. LWT-Food Science and Technology, 2025, 223: 117762.

[56] TAO J, YANG Q, JI S, *et al*. Static magnetic field treatment regulates reactive oxygen species metabolism and cell wall metabolism to delay postharvest softening of blueberries [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2025, 229: 110398.

[57] ZHANG L, ZHANG M, MUJUMDAR AS, *et al*. Intermittent high voltage electrostatic field and static magnetic field assisted modified atmosphere packaging alleviate mildew of postharvest strawberries after simulated transportation by activating the phenylpropanoid pathway [J]. Food Chemistry, 2024, 434: 137444.

[58] QIAN J, ZHANG M, DAI C, *et al*. Transcriptomic analysis of *Listeria monocytogenes* under pulsed magnetic field treatment [J]. Food Research International, 2020, 133: 109195.

[59] YANG Z, TIAN J, PU A, *et al*. Magnetic field (MF) assisted freezing in

food preservation: Principles, applications, and technological progress: An overview [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2025, 24(4): e70207

[60] EŞITKEN A, TURAN M. Alternating magnetic field effects on yield and plant nutrient element composition of strawberry (*Fragaria x ananassa cv. camarosa*) [J]. Taylor & Francis, 2004, 54: 135–139.

[61] ZHANG L, YANG Z, DENG Q. Effects of pulsed magnetic field on freezing kinetics and physical properties of water and cucumber tissue fluid [J]. Journal of Food Engineering, 2021, 288: 110149.

[62] KANG T, YOU Y, HOPTOWIT R, *et al*. Effect of an oscillating magnetic field on the inhibition of ice nucleation and its application for supercooling preservation of fresh-cut mango slices [J]. Journal of Food Engineering, 2021, 300: 110541.

[63] YOU K, CAO X, LI Q, *et al*. Application of magnetic fields in low-temperatures storage of fruits and vegetables [J]. Comprehensive Reviews in food Science and food Safety, 2025, 24(5): e70252.

[64] LI Y, HUANG X, YANG Y, *et al*. The effects of cold-plasma technology on the quality properties of fresh-cut produce: A review [J]. Foods, 2025, 14(2): 149.

[65] MISRA NN, PANKAJ SK, SEGAT A, *et al*. Cold plasma interactions with enzymes in foods and model systems [J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 55: 39–47.

[66] 王照琪, 冯蕊, 仲崇山, 等. 不同冷等离子处理对鲜切猕猴桃保鲜效果的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(22): 211–214.
WANG ZQ, FENG R, ZHONG CS, *et al*. Effect of different cold plasma treatments on the preservation effect of fresh-cut kiwi fruit [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(22): 211–214.

[67] ZHANG M, LIU J, JIANG H. Effect of different cold plasma pretreatment periods on quality, phenolic compounds, and browning control of apple slices during vacuum microwave drying [J]. Drying Technology, 2025, 43(11-12): 1657–1672.

[68] FAN Z. Recent advances in biological and technological research of fresh fruit and vegetable: 2nd edition [J]. Foods, 2025, 14(17): 3029.

[69] PEANO C, GIUGGIOLI NR, GIRGENTI V. Effects of innovative packaging materials on apricot fruits (cvTom Cot®) [J]. Fruits, 2014, 69(3): 247–258.

[70] APPENDINI P, HOTCHKISS JH. Review of antimicrobial food packaging [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2002, 3(2): 113–126.

[71] WANG C, HE Y, WEI Y, *et al*. Sustainable and versatile bioplastics toward large-scale industrialization [J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 521: 167070.

[72] YAN LY, GARCIA-CAPARROS P, WANG JX, *et al*. Biaxially oriented polyethylene film packing and hydrogen sulfide fumigation maintain postharvest quality of tomato fruits by reducing malondialdehyde levels and water loss [J]. Postharvest Biology and Technology, 2026, 231: 113845.

[73] LI R, YANG T, DING M, *et al*. Multifunctional nanocomposite packaging films enabled by tannic acid-modified chitin nanocrystals for fruit preservation [J]. Food Hydrocolloids, 2026, 171: 111863.

[74] 王英洋, 洪大卫, 董硕, 等. pH 响应壳聚糖薄膜的制备及抗菌性能[J]. 精细化工, 2025, 42(5): 1037–1044.
WANG YF, HONG DW, DONG S, *et al*. Preparation and antibacterial properties of pH-responsive chitosan films [J]. Fine Chemicals, 2025, 42(5): 1037–1044.

[75] 庄良, 王平飞, 陈立石, 等. CuZnAl- MMO 复合纳米抗菌薄膜对樱桃保鲜效果的影响[J]. 食品科学技术学报, 2025, 43(1): 126–136.
ZHUANG L, WANG PF, CHEN LS, *et al*. Effect of CuZnAl-MMO composite nano antibacterial film on cherry preservation effect [J]. Journal of Food Science and Technology, 2025, 43(1): 126–136.

[76] WANG XT, GUO J, ZHOU H, *et al*. Chitosan-based aerogel food active packaging with integrated preservation and buffering functions [J/OL]. Journal of Advanced Research, 1–17. [2025-08-07]. DOI: 202510.1016/j.jare.2025.08.054

[77] WANG YL, LI R, YANG X, *et al*. Multifunctional film of soy protein nanofiber/chitosan/zinc oxide for tomato postharvest freshness preservation [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 168: 111504.

[78] ZHAO W, LIANG Y, ZHANG Y, *et al*. Active cellulose-based film with synergistic enhanced photothermal antibacterial effects by Fe-doped ZIF-8 and EGCG for efficient litchi preservation [J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 521: 166462.

[79] LIANG CP, LIU FF, REN HY, *et al*. Antibacterial and fruit preservation properties of castor oil-based waterborne polyurethane [J]. Food Control, 2026, 180: 111661.

[80] TI Y, QIN Z, GUO X, *et al*. Fabrication of dual photodynamic enhanced antimicrobial CDs@ZIF-8/polycaprolactone/ethyl cellulose nanofibrous films for fruit preservation [J]. Advanced Science, 2025: e03567. DOI: 10.1002/advs.202503567

[81] DENG N, MA Y, LI P, *et al*. Mechanically robust lignin-cellulose films with triple barrier functions for antagonistic food preservation [J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 521: 166561.

[82] DING X, ZHAO Y, CHEN X, *et al*. Chitosan/kudzu-based packaging films synergistically reinforced by paeonol@ZIF-8 and Ag_2CO_3/Ag_2O nano-heterojunctions for raspberry preservation [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2025, 51: 101584.

[83] MAO S, ZHANG J, WU Q, *et al*. Roles of polyphenols incorporated in starch-based films and coatings for fruits and vegetables preservation: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2025, 163: 105170.

[84] LIU L, DAI T, SUN T. *et al*. Durable, recyclable, and stretchable plasmonic film for grapefruit decay detection [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2025, 417: 5839–5846.

[85] KHAN S, BAO Z, ABDULLAH, *et al*. Smart funoran film incorporated with blueberry anthocyanins as a dual pH/NH_3 sensor for real-time monitoring of shrimp freshness [J]. Food Hydrocolloids, 2026, 171: 111788.

[86] SONG X, WEN X, HUANG Y, *et al*. Bioinspired amino acid-functionalized carbon dots nanozymes with enhanced peroxidase-like activity for sensitive detection of GSH in food [J]. Food Chemistry, 2025, 491: 145224.

[87] COLLETTI AC, SOTERAS T, PIERONI V, *et al*. Physicochemical and sensory parameters correlation as a tool to establish the varietal aptitude of minimally processed peaches treated with gamma irradiation [J]. Postharvest Biology and Technology, 2025, 230: 113804.

[88] BAI C, ZUO J, WATKINS CB, *et al*. White LED light affects flavor and nutritional quality of harvested apricot fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2025, 230: 113797.

[89] 胡晓敏, 黄彭, 刘雯欣, 等. 非热物理技术在鲜切果蔬保鲜中的应用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(10): 278–284.
HU XM, HUANG P, LIU WX, *et al*. Application of non-thermal physical technologies in fresh-cut fruits and vegetables preservation [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(10): 278–284.

[90] TAO J, ZUO J, WANG Y, *et al*. The effect of pulsed light treatment on the postharvest resistance and flavor quality of fresh tomato [J/OL]. Horticultural Plant Journal, 1–39. [2025-08-05]. DOI: 10.1016/j.hpj.2025.05.009

[91] JIANG Y, REN Y, ZHENG X, *et al*. Pulsed light treatment mediated ethylene and abscisic acid synthesis effectively inhibited bell pepper turning red and softening [J]. Food Chemistry, 2026, 499: 147303.

(责任编辑: 安香玉　蔡世佳)