DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251201005
引用格式: 何思睿, 钟雪珍, 杨文昊, 等. 果蔬加工原料防褐变技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(11): 11–20.
HE SR, ZHONG XZ, YANG WH, *et al*. Research progress on anti-browning technologies for fruits and vegetables processing raw materials [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(11): 11–20. (in Chinese with English abstract).

果蔬加工原料防褐变技术研究进展

何思睿[1,2], 钟雪珍[3], 杨文昊[3], 毛菁菁[3], 宣晓婷[1], 朱 麟[1*]

(1. 宁波市农业科学研究院农产品加工研究所, 宁波 315100; 2. 浙江万里学院生物与环境学院, 宁波 315100; 3. 宁波市圆蓝食品科技有限公司, 宁波 315502)

摘 要: 果蔬加工原料品质是决定产品质量的基础, 优质原料可保障产品的风味与色泽, 是果蔬加工产业实现优质化的关键所在。但果蔬原料在加工及贮运过程中, 其内部组织极易因内在属性和环境胁迫而诱发褐变, 严重影响加工制品的色泽品质与货架期, 制约了果蔬加工产业的高质量发展。目前, 防褐变技术已从传统化学方法向物理、生物等绿色、多元化方向发展。阐释并总结防褐变技术的研究进展, 能为新型高效的原料源头控制技术研发提供理论依据。本文系统综述了果蔬加工原料褐变类型、防褐变技术以及场景化应用研究进展, 旨在为从源头上控制果蔬加工品质提供理论依据。

关键词: 果蔬; 加工原料; 防褐变; 品质控制

Research progress on anti-browning technologies for fruits and vegetables processing raw materials

HE Si-Rui[1,2], ZHONG Xue-Zhen[3], YANG Wen-Hao[3], MAO Jing-Jing[3], XUAN Xiao-Ting[1], ZHU Lin[1*]

(1. *Institute of Agricultural Products Processing*, *Ningbo Academy of Agricultural Sciences*, *Ningbo* 315100, *China*; 2. *College of Biology and Environment*, *Zhejiang Wanli University*, *Ningbo* 315100, *China*; 3. *Ningbo Yuanlan Food Technology Co*., *Ltd*., *Ningbo* 315502, *China*)

ABSTRACT: The quality of processing raw materials for fruit and vegetable is the foundation determining product quality. High-quality raw materials can guarantee the flavor and color of finished products, serving as the key to achieving high-quality development in the fruit and vegetable processing industry. However, during processing, storage and transportation, the internal tissues of fruit and vegetable raw materials are highly prone to browning induced by inherent properties and environmental stresses. This seriously impairs the color quality and shelf life of processed products, restricting the high-quality development of the fruit and vegetable processing industry. At present, anti-browning technologies have evolved from traditional chemical methods toward green and diversified

收稿日期: 2025-12-01
基金项目: 浙江省果品产业技术推广服务团队项目(区域试验站)(2026QYSYGP01); 宁波市团队科技特派员项目(2024S212); 宁波市公益性科技项目(2025S009)
第一作者: 何思睿(2001—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为食品营养与加工工程。E-mail: 17366652846@163.com
***通信作者:** 朱麟(1984—), 男, 研究员, 主要研究方向为农产品保鲜与高值化利用研究。E-mail: zhulin0822@163.com

approaches including physical and biological techniques. Elaborating and summarizing the research progress of anti-browning technologies can provide a theoretical basis for the research and development of novel and efficient source control technologies for raw materials. This paper systematically reviewed the types of browning, anti-browning technologies and scenario-based application research progress of fruit and vegetable processing raw materials, aiming to offer theoretical references for controlling the processing quality of fruits and vegetables from the source.

KEY WORDS: fruits and vegetables; processing raw materials; anti-browning; quality control

0 引 言

果蔬是人类膳食中不可或缺的食物来源, 富含维生素、矿物质和膳食纤维等多种营养成分, 对维持人体健康具有重要意义[1]。然而, 果蔬采后在加工与流通环节中的品质劣变问题突出, 总体损失率高 20%以上[2], 严重制约了产业效益与发展。在各类品质劣变中, 褐变现象尤为普遍, 已成为实现果蔬加工业高品质化所面临的关键技术瓶颈。

褐变主要源于原料自身的酶促与非酶促反应体系, 有效防控褐变必须从理解原料特性出发, 并针对加工环节进行精准干预。近年来, 随着食品保鲜技术与绿色加工理念的深入, 防褐变技术研究已从依赖传统化学抑制剂, 逐步转向物理、化学及生物技术多元融合的绿色发展方向。本文立足于加工原料的防褐变控制, 系统综述果蔬褐变的内在机制、关键影响因素以及近年来的主要防控技术, 并阐述其在不同加工场景下的应用策略, 以期为果蔬加工原料的防褐变技术创新与产业应用提供系统的理论参考。

1 果蔬加工原料褐变类型

果蔬加工原料褐变主要包括酶促褐变与非酶促褐变。酶促褐变时果蔬采后发生的最主要的褐变类型, 其必须有酶类、酚类物质以及氧气的参与[3]。非酶促褐变则不需要酶的参与, 主要包括美拉德反应、焦糖化反应、抗坏血酸氧化反应)。在果蔬加工过程中, 褐变受原料内在特性(品种)与外在环境因素(加工方式、贮藏条件)共同影响。有文献表明, 如同属桃类, 白桃、突围桃等在加工中不易发生褐变, 而南方软质型水蜜桃则极易褐变, 限制了其产业链的拓展与延伸[4]。切割方式也是影响褐变产生的重要因素, 切割方式所诱导的创伤程度与褐变呈正相关, 吕静祎等[5]比较了萝卜不同的切分方式, 发现整片处理因切割创伤最小, 能有效延缓白度、膜脂过氧化及酶促褐变, 并较好地维持营养成分, 而块状处理因创伤强度最大, 品质裂变最严重。类似的结论在土豆[6]、黄瓜[7]、莴苣[8]中发现。温度与氧气也是关键因素。PARK 等[9]发现不足和过度的热烫温度都会导致果蔬发生褐变, 其中 40 ℃是其多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)最适温度[10]。而隋继学等[11]研究结合真空包装、气调包装等技术发现, 能有效延缓褐变进程。因此, 控制褐变的关键途径即是对这些影响因素进行系统性调控。褐变类型总结如表 1。

2 果蔬加工原料防褐变技术

2.1 化学防褐变技术

化学防褐变技术依赖于化学物质的添加, 抑制相关酶活。传统化学护色剂虽具有成本低、效果显著的优势, 但其潜在的安全性问题, 推动研究者开发更安全天然代替方案。因此, 近年来越来越多的研究聚焦于天然提取物及可食性涂膜在防褐变领域的应用。主要通过抑制褐变关键酶活性、激活抗氧化系统、调控膜脂与能量代谢以及物理阻隔与缓释等途径发挥作用。在植物源提取物中, TIGHILET 等[15]研究发现, 苦薄荷甲醇提取物可显著抑制红甘蓝的 PPO 和

表 1 褐变类型

Table 1 Types of browning

褐变类型	是否需要酶	反应底物	触发条件	产物特性	参考文献
酶促褐变	是	酚类物质	温度、酸性或中性、有氧、机械损伤	生成醌类物质, 并进一步聚合形成黑色或褐色物质	[4]
美拉德反应	否	蛋白类氨基化合物与糖类羰基化合物	高温高湿、加热、中性或碱性	反应末期生成褐色的类黑精以及风味物质, 丙烯酰胺、5-羟甲基糠醛(5-hydroxymethylfurfural, 5-HMF)和晚期糖基化末端产物等有害物质	[12]
抗坏血酸反应	否	抗坏血酸	有氧或无氧、酸性、存在氨基酸	有氧或无氧条件下生成脱氢抗坏血酸或糖醛, 其降解产物(糖醛、3-羟基-2-吡喃酮)可与氨基酸结合, 进一步生成褐色色素	[13]
焦糖化反应	否	糖类	高温、高糖、酸性	糖醛和 5-HMF 与氨基化合物反应, 参与美拉德后期聚合, 产生褐变色素	[14]

过氧化物酶(peroxidase, POD)活性, 分别抑制率达 42.68%和51.40%。而香芹酚能通过激活抗坏血酸-谷胱甘肽循环, 增强抗氧化系统并抑制 PPO 反应, 维持桃果实活性氧代谢平衡[16]。作为天然产物的褪黑素也有同样效果, 刘士琦等[17]用 0.125 mmol/L 褪黑素成功延缓红毛丹的褐变。而 WANG 等[18]不仅证实了褪黑素对褐变的抑制作用, 还与调节膜脂代谢、能量代谢、维持细胞膜完整性密切相关。在动物源提取物中, HUANG 等[19]发现硫酸软骨素能降低荔枝果皮的活性氧含量, 提高抗氧化酶活性并调控酚类代谢基因表达。此外, 天然提取物不仅具备成膜性和抗氧化功能, 可作为可食性涂层延缓酶促褐变, 还具有安全, 可降解等特性。有研究发现, 壳聚糖在草莓和樱桃中作为涂膜, 通过物理阻隔减少氧气的接触, 减缓酶促褐变[20]。在单一涂层的基础上, 更多研究者进一步探索了复合涂层的协同效应。RATHER 等[21]对比单一涂层与复合涂层研究发现, 壳聚糖和沙棘叶提取物复合涂层显著减少桃果实表面的褐斑, 褐变率降低至 65.4%, 其抑制褐变的效果优于任一单一涂层, 表明复合涂层可增加协同效应。此外, 蜂胶与蜂蜡复合涂膜可清除自由基、螯合金属离子, 并形成疏水膜以降低呼吸强度, 协同延缓双孢菇褐变[22]。BARBOSA 等[23]进一步研究发现含干酪乳杆菌和低聚果糖的海藻酸钠合生元涂层, 不仅具备传统涂层的物理阻隔和抗氧化能力, 在抑制 PPO、POD 的同时, 维持色泽与酸度稳定性, 使涂层兼具保鲜与益生功能。

2.2　物理防褐变技术

2.2.1　热处理技术

热处理技术是果蔬加工中应用广泛的防褐变方法, 其核心机制是通过热能使 PPO、POD 等关键酶变性失活。传统热处理(热水漂烫、蒸汽漂烫)因设备简单, 操作便捷且成本低而被广泛使用, 但其导致的营养流失与受热不均等问题, 也促使研究者不断探索和发展新的热处理技术。微波、射频、欧姆、高温高湿气体射流冲击烫漂逐(high humidity air impingement blanching, HHAIB)逐渐受到关注。有研究表明, HHAIB 在与传统烫漂方法相比, 显示出明显的性能优势, 特别是在加热速率、保水性和质量保持方面。WANG 等[24]研究发现, 辣椒在 110 ℃下进行 120 s 的 HHAIB 处理后, 不仅使 PPO 活性降至 7%, 还可保持其红色素浓度。DENG 等[25]进一步发现用 HHAIB 预处理杏 120 s 可完全灭活 PPO 和 POD, 缩短后续干燥时间。同时, 时间参数对细胞结构产生的影响, 但较长的处理时间会破坏细胞结构, 必须针对不同果蔬的原料特性, 对处理时间进行调控, 以避免热损伤对果蔬品质造成负面影响。WANG 等[26]比较 4 种不同漂烫技术对红甜椒的影响, 发现 HHAIB 不仅使 PPO 和 POD 灭活, 同时在抗氧化能力、色素与维生素 C 保留、干燥速率等方面表现最优, 尤其在总抗氧化活性方面显著高于其他方法。HHAIB 是一种不仅可高效灭酶, 还能保持优良品质的新型烫漂技术。微波通过分子摩擦实现体积加热, 能够极快的使酶失活。有研究表明, 微波加热也会存在不均匀, 可能导致营养降解[27]。SU 等[28]研究发现进行适度微波处理可钝化 PPO, 但过度处理会破坏细胞膜结构, 反而促进褐变。微波处理在苹果汁加工中不仅能抑制酶促褐变, 还可通过降低氨基态氮减缓美拉德反应[29]。同样, 射频技术能有效抑制桃和莴苣的 PPO 和 POD 活性, 并减少细胞损伤[30], 更适用于大规模操作。欧姆加热由于其温度分布均匀和处理时间短, 该方法在酶失活和营养保留方面最佳。GUIDA 等[31]分别采用欧姆加热漂烫与热水漂烫洋蓟头, 发现欧姆漂烫使 PPO 和 POD 更快失活, 并保持更高的多酚含量。同时, BARRÓN-GARCÍA 等[32]研究对比发现, 两者均能有效降低菇体中 PPO 的活性, 但欧姆漂烫加热速度更快、温度分布更均匀, 表现出更高的失活效率。在选择烫漂技术时, 需综合考虑物料特性、工艺参数与生产规模, 新型技术虽各具优势, 但其适用性与经济性在实际生产中进一步验证与优化。

2.2.2　辐照技术

辐照技术可分为电离辐射(如电子束、γ 射线)和非电离(紫外线)。研究发现, 辐照处理效果与剂量密切相关。COLLETTI 等[33]探讨不同剂量的 γ 射线处理桃子, 研究发现低剂量可适度改善质地, 而高剂量则会因其果实过度软化, 不利于保持性状。同样的在电子束处理猕猴桃[34]、生姜[35]、冬枣[36]研究中均得到验证。同时, 5 kGy 的^{60}Coγ 辐照不仅能显著抑制枣的真菌污染, 还能维持其总酚含量与抗氧化酶活性, 保障长期贮藏的感官品质[37]。此外, 短波紫外线(ultraviolet C, UV-C)照射(1.5 kJ/m^2)也可通过调节脂质代谢与增强抗氧化能力, 有效抑制桃果褐变并保持硬度与维生素 C 含量[38]。

2.2.3　脉冲电场技术

有研究表明, 脉冲电场(pulsed electric field, PEF)技术作为冷冻的前处理可以影响植物组织的组织, 最大限度地减少冰晶的分散形成, 并减少解冻过程中的滴水损失。RONDINELI 等[39]采用 PEF 预处理巴西莓, 研究表明 0.75 kV/cm 的 PEF 预处理可显著缩短相变时间, 提升冻融效率, 同时降低解冻后的滴水损失。此外, JIANG 等[40]发现 PEF 可以降低草莓中的 PPO 活性。脉冲电场对 PPO 的钝化效果受电场强度、物种差异、酶分子特性等多种因素影响, 因此酶活性变化与具体处理条件密切相关。PEF 在复杂食品加工中尤需精细调控, DOROTA 等[41]在苹果冻干加工过程中研究发现, 低能量 PEF 处理结合慢速冻结可协同加速冻干过程, 过高能量的 PEF 处理反而会因过度破坏细胞结构而延长干燥时间, 并显著加剧产品的酶促褐变。此技术在调节冷冻食品组织结构、抑制酶促反应及优化加工能耗等方面展现出显著潜力。其效能最大化发挥,

要与电场参数、物料特性及工艺条件精准适配。

2.2.4 等离子体技术

等离子体技术利用放电产生的部分电离气体，在低温条件下实现果蔬品质调控。SREELAKSHMI 等[42]研究发现，冷等离子体(cold plasma, CP)处理不仅能抑制苹果中 PPO 和 POD 等褐变相关酶活性，提高总酚含量，还能延缓颜色变化、维持硬度，使其在常温和低温下的货架期分别延长至 7 d 和 11 d。GU 等[43]采用 CP 处理香蕉，研究表明，其抑制 PPO 和 POD 的活性，减少酚类物质氧化为醌类。CP 诱导的活性氧(reactive oxygen species, ROS)可能进一步促进酶蛋白结构的改变，增强钝酶效果。同时，对受到机械损伤的苹果进行 CP 处理，还可增强超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)和过氧化氢酶(catalase, CAT)等抗氧化酶活性，减少 ROS 和丙二醛(malondialdehyde, MDA)积累，促进酚类与木质素沉积，加速伤口愈合，从而提升果实抗逆性与品质保持能力[44]。此外，GAO 等[45]探究等离子体活化水对苹果品质的影响，研究发现等离子体活化水不仅可以抑制 PPO 活性，还可诱导抗氧化酶活性上升，等离子体活化水更均匀地覆盖果实表面，适用于表面不平整的果蔬。这为低温等离子体在果蔬贮运加工防褐变中的应用提供契机，但其处理效率受电离程度、功率、时间及物料特性等多种因素影响，其设备需高压电源与特殊材料，相关研究还有待深入。

2.2.5 气调与包装技术

气调贮藏主要是通过调节贮藏环境中气体成分、温度与湿度等条件，降低褐变相关酶活性及果蔬的生理代谢水平，从而实现减缓褐变。FERNÁNDEZ-TRUJILLO 等[46]通过采用不同透气性的聚丙烯薄膜来调节桃果实贮藏环境的气体组成，在低温条件下形成高 CO_2、低 O_2 的气调贮藏，从而控制桃果实的冷害与褐变。贾晓辉等[47]采用 1% O_2 和 3% CO_2 气调贮藏并结合 1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP)可以减轻梨在贮藏过程中发生的氧化损伤，维持细胞结构与代谢平衡。安容慧等[48]探讨草莓在不同的包装和不同的温度下贮藏，研究发现采用具有特定气体透过率的抑菌薄膜，结合低温贮藏，可显著维持袋内较高的 O_2 浓度，抑制 CO_2 积累，并增强抗氧化能力以延缓品质劣变。此外，程杨等[49]对葡萄采用 1-MCP 结合 EPP 控温箱的智能包装处理，发现其显著降低 PPO 活性和 MDA 含量，延缓膜脂过氧化，从而延缓褐变产生。气调包装技术是一种能有效延缓褐变和保持品质的物理技术，但其气体环境是否能长期稳定，后续还需要进一步研究发展。

2.2.6 新型保鲜与冻藏技术

果蔬加工原料在贮藏过程极易发生褐变，如“湖景蜜露”等南方软质型水蜜桃在 8 ℃以下冷藏或–18 ℃冻藏均易发生褐变等冷害现象[50–51]，研究表明，采用冰温技术、气调技术协同 1-MCP 等保鲜技术可有效延缓冷藏加工原料的褐变问题。但加工原料的长期贮藏仍主要依赖冻藏或打浆冻藏。传统冷冻易因冰晶形成破坏细胞结构，解冻后加剧褐变。为此，新型冻藏技术致力于优化冷冻过程，快速冷冻、超低温冷冻等应用，可减少冰晶对细胞膜的破坏，从而在更大程度上保留原料原有色泽与质地。李珊珊等[52]在研究龙眼种子的超低温保存中发现，与传统的直接冷冻相比，“玻璃化冷冻”技术能有效避免冰晶，显著降低膜脂过氧化水平，并更好地保持了细胞超微结构的完整。其中杨梅、桑葚等深色水果冻藏褐变不显著，基本不影响其加工品质，但水蜜桃、苹果等易褐变果蔬及其果浆等冻藏过程中仍会发生显著褐变，一般需要协同其他预处理(如糖渍、渗透脱水、热钝酶)或新型物理场(如超声波、高压)相结合，也被证明能更好地维持细胞完整性，减轻解冻后的酶促褐变现象[51]。

2.3 生物防褐变技术

生物防褐变技术是利用生物来源的方法来抑制或延缓果蔬褐变。针对果蔬防褐变，常用的技术途径有 3 种，分别是微生物抑制法、酶工程法、基因工程法。有学者研究发现，微生物或其代谢产物的抑酶效果与特异性密切相关，基因工程法相较于其他两者，能从根源上彻底抑制褐变相关酶的表达，实现性状的稳定遗传。然而，该技术因成本昂贵且面临消费者接受度较低，制约商品化应用进程。该项技术在果蔬保鲜领域的研究日益深入，其关键控制点在于筛选出高效、安全的生物制剂或技术方法。例如，从豌豆发酵液中筛选的乳酸菌的代谢产物对莲藕 PPO 抑制效果优于传统抗坏血酸[53]，而特定菌株 G3 则通过分泌特异性蛋白酶直接降解 PPO，从而有效抑制褐变[54]。LI 等[55]研究发现植物乳杆菌通过直接分解莲藕中的主要酚类底物，显著延缓酶促褐变。目前利用生物技术，已在杏、荔枝、马铃薯等果蔬中进行研究。DERARDIA 等[56]研究发现，添加外源蛋白酶(如木瓜蛋白酶)直接靶向降解 PPO，其降解效率依赖于作用时间、浓度及 pH 环境，与抗坏血酸联用可产生协同效应，实现 24 h 内对酶活的完全抑制。WANG 等[57]利用编辑荔枝愈伤组织的 *PPO* 基因可显著延缓褐变。NICOLÁS 等[58]敲除马铃薯 *StPPO2* 基因更可使 PPO 活性与褐变程度分别降低 69%和 73%。在进行生物防褐变技术前，根据果蔬的相关特性，来选择合适的微生物菌株、酶制剂等。近年来，随着消费者对绿色、安全保鲜的需求不断增长，市场对高效、精准的褐变控制技术的要求正逐渐提高。生物防褐变技术因其作用温和，能从根本上解决问题等优势，将成为未来果蔬采后保鲜与品质调控的重要方向。

2.4 新型保鲜技术

近年来已有学者对腺苷三磷酸(adenosine triphosphate, ATP)处理在果蔬保鲜方面展开了研究，并已在能量代谢调控、品质保持及抗氧化能力提升等方面取得一定的研究成果。ZHANG 等[59]利用 ATP 处理梨，显著提升其能量水平

和抑制膜脂降解关键酶的活性, 延长褐变发生时间, 使褐变指数最大降低至 72%。LI 等[60]在龙眼中研究发现, 外源 ATP 处理能显著抑制能量耗散系统相关基因的表达, 减少能量消耗, 以维持较高的 ATP 含量和能量电荷水平。LIN 等[61]在龙眼中添加 2,4-二硝基苯酚(2,4-dinitrophenol, DNP)和 ATP 进行对比, 进一步揭示了 ATP 可以调控能量依赖的膜脂代谢途径, 延缓褐变发生。此外, 优化处理参数也成为研究热点。AGHDAM 等[62]研究不同浓度 ATP 处理对双孢蘑菇品质的影响, 发现在 750 μmol/L 褐变抑制率达 51%。上述研究表明, 通过采后技术调节能量代谢以维持能量平衡, 逐渐成为延缓果实品质的新研究方向。外源 ATP 处理作为此方向的能量调控手段, 已初步展现在延缓酶促褐变、维持采后品质等方面, 后续可以与其他保鲜技术进行协同处理, 以推动其在果蔬的实际应用。

3　果蔬加工原料防褐变技术场景化应用

3.1　鲜切果蔬的防褐变技术

鲜切果蔬是以新鲜果蔬为原料, 经去皮、切割等物理处理后形成的即食产品。在加工过程中受到的机械损伤会破坏细胞结构, 导致酚类物质和 PPO 接触, 引发酶促褐变, 严重影响产品外观与商品价值。目前主要通过以物理技术为主、安全化学和生物处理为辅的协同方式实现护色保鲜。尹琳琳等[63]研究 UV-C 协同壳聚糖对鲜切甘蔗的协同作用, 研究发现协同处理使其褐变速率降低 70%, 显著抑制 PPO 和 POD 活性。二者结合既能抑制酶活性, 又能阻隔氧气, 协同延缓褐变进程。LIN 等[64]研究表明, 弱酸性电解水与乳链球菌肽联用可降低生菜褐变程度与 MDA 含量。刘欢等[65]研究表明, 1-MCP、短波紫外线照射与真空包装协同处理可显著抑制鲜切莴笋的褐变, 该组合处理通过抑制 PPO 与 POD 活性、降低总酚消耗及减少氧气接触等多途径协同延缓酶促褐变进程。此外, 超声协同半胱氨酸处理、中波紫外线(ultraviolet B, UV-B)联合 1-MCP 处理、冷等离子体协同蜂蜜涂膜等协同保鲜手段, 均被证实能显著抑制鲜切果蔬褐变, 延长货架期(表 2)。未来, 随着保鲜材料的绿色化、智能化发展, 协同保鲜技术将在提升鲜切果蔬商品价值、降低损耗方面发挥更大作用, 推动产业向高效、安全、可持续方向发展。

3.2　果汁加工的防褐变技术

果汁加工需经过原料处理、压榨、杀菌等工序, 在其加工和贮藏过程中易发生色泽劣变, 在前处理阶段因细胞结构被破坏和氧气接触引发酶促褐变, 影响初始色泽, 而热杀菌及贮藏期间则以非酶褐变为主, 决定货架期颜色稳定性。为此, 需同时抑制酶促与非酶褐变以保障果汁品质。目前已有多种防褐变技术被应用在果汁加工防褐变过程中, AUGILAR 等[71]利用多波长紫外-可见光处理桃汁, 研究发现在桃汁加工过程中, 45 ℃的辐照效果更佳, 抑制 PPO 和 POD 活性, 降解色素, 从而在加工过程中控制褐变。BAGHER 等[72]利用乳酸菌发酵处理桃汁, 研究发现发酵桃汁对美拉德反应的抑制率显著提高, 主要是因为乳酸菌消耗还原糖(葡萄糖、果糖), 减少了美拉德反应底物, 从而延缓非酶褐变。有研究表明, 热超声处理能有效抑制加工过程中的褐变, 但在 4 ℃贮藏 90 d 后, PPO 活性恢复至 58.4%, 说明长期贮藏中褐变仍会产生[73]。CHEN 等[74]通过建立浓缩橙汁模拟体系的研究发现, 其即使加工时已灭活酶类, 贮藏中由抗坏血酸降解和美拉德反应驱动的非酶褐变将成为主要矛盾。TIAN 等[75]探讨高静水压处理与表儿茶素没食子酸酯(epigallocatechin gallate, EGCG)、阿魏酸复合抑制剂相结合处理苹果汁, 表明其不仅在加工时能协同灭活苹果汁中 95%以上的 PPO 活性, 且在后续的贮藏期间, 其酶活性能被持续抑制, 色泽稳定。因此, 要实现对果汁色泽的全程稳定保护, 必须在优化加工工艺的同时, 辅以有效的贮藏期防褐变策略(表 3)。

表 2　鲜切果蔬防褐变技术

Table 2　Anti-browning technologies for fresh-cut fruits and vegetables

鲜切果蔬	协同处理	处理结果	参考文献
莲藕	超声、半胱氨酸	超声(40 kHz、200 W、2 min)与 0.01%半胱氨酸协同处理鲜切莲藕, 无明显褐变, 白度指数最高、褐变指数及色差最低	[66]
桃	UV-B、1-MCP	UV-B (1.46 kJ m^{-2})+1-MCP (1 μL/L)联合处理使鲜切桃在冷藏 8 d 内褐变度降低约 40%, 延长货架期	[67]
苹果	热水、钙抗坏血酸	热水处理(48 ℃×2 min)联合 6%钙抗坏血酸能显著提高抗氧化水平和维生素 C 含量, 并延长货架期至 21 d	[68]
苹果	CP、蜂蜜涂膜	先 CP 处理(51.5 W, 9.9 min)再 10%枣花蜜涂膜, 协同处理对 PPO 抑制率达 60%, 贮藏第 10 d 微生物总数仍低于食品安全标准, 延长货架期	[69]
香芋	抗坏血酸、壳聚糖	抗坏血酸(5 g/L)与壳聚糖(15 g/L)协同处理使得 PPO 活性降至 15.9 U/g, 延长货架期至 9 d	[70]
生菜	弱酸性电解水、乳链球菌肽	协同处理使褐变程度降低 29.9%, MDA 含量降低 43.1%, PPO、POD 活性均下降, 货架期延长至 8 d	[64]

表 3 果汁加工防褐变技术

Table 3 Anti browning technologies in juice processing

果汁品种	处理方法	应用阶段	处理结果	参考文献
苹果	微波	前处理	对苹果进行微波前处理(720~900 W, 75~125 s), 果汁色值较高, PPO 活性持续下降, 经微波预处理后, 再经热处理步骤, 可完全钝化 PPO 活性	[29]
蓝莓	热水漂烫、酶解	前处理	对蓝莓进行前处理, 80 ℃热烫 2 min 能有效钝化 PPO 和 POD 酶活性, 同时花色苷损失较少, 色泽较好, 出汁率得以提高	[76]
菠萝	欧姆加热	加工	对菠萝汁进行欧姆处理, PPO 活性被有效钝化, 5-HMF 含量保持最低	[77]
蓝靛果	热处理、葡萄糖氧化酶	加工	热处理钝化 PPO 酶活性, 葡萄糖氧化酶处理消耗果汁中的溶解氧与葡萄糖, 减少美拉德反应与抗坏血酸反应的发生	[78]
橙	EGCG、*L*-半胱氨酸	贮藏	橙汁在贮藏过程中褐变指数和 5-HMF 生成量与对照组相比分别降低 26%和 70%	[79]
苹果	超高压均质、无菌包装	贮藏	羟甲基糠醛含量随贮藏时间和温度升高而增加, 经过高压均质处理产生的苹果汁, 产生 5-HMF 的含量积累最少, 在 4 ℃下可贮藏至 60 d	[80]

3.3 果蔬干制防褐变技术

果蔬干制是通过脱水降低水分活度, 从而抑制微生物和内源酶活性, 实现长期保藏的技术。在加工过程中产生的褐变现象严重影响产品感官品质与商业价值。褐变主要包括酶促褐变与非酶褐变: 在干制初期或预处理不当时, 酶促褐变较为显著; 随着干燥进行, 随时间和温度升高与水分下降会加剧以美拉德反应和焦糖化为代表的非酶褐变, 成为决定最终色泽的关键。因此, 护色策略需针对性阻断这两类反应路径。YU 等[81]采用超声波渗透脱水(55 ℃, 30 min)预处理莲藕, 使 PPO 和 POD 活性分别降至 34.7%和 62.9%, 并结合微波热空气干燥, 进一步抑制酚类物质流失, 保护抗氧化能力。ZHU 等[82]采用水烫漂和空气声波超声辅助干燥处理苹果, 水漂烫预处理显著降低 PPO 活性, 超声可通过缩短干燥时间, 间接减少非酶促褐变的发生。CHAO 等[83]对杏鲍菇进行干制处理时, 采用植酸与谷胱甘肽协同处理结合热风干燥的方式, 使用 0.08%植酸与 0.1%谷胱甘肽复合处理, 在干燥过程中褐变抑制率达 78.09%, 贮藏期间仍保持 69.93%的抑制效果, 该协同处理能同时抑制酶促与非酶促褐变, 显著提升杏鲍菇干制品的色泽与贮藏稳定性(表 4)。

表 4 果蔬干制防褐变技术

Table 4 Anti-browning technologies for dried fruits and vegetables

干制品种	处理方法	应用阶段	处理结果	参考文献
杨梅	冻融循环、脉冲光	加工	在干燥前进行冻融循环和脉冲光协同处理, 使得干制杨梅 PPO 和 POD 活性分别降低 47.4%和 31.31%, 有效抑制酶促褐变	[84]
山药	CP、热风干燥	加工	对鲜切山药进行 CP (17 kV, 120 s)处理, 钝化 PPO 酶活性, 但对抑制 60 ℃热风干燥所引起非酶促褐变有限	[85]
杏鲍菇	穿透式微波漂烫、热风干燥	加工	对杏鲍菇进行微波漂烫(2.5 W, 8 min)预处理后, 再进行热风干燥, 其中 PPO 和 POD 完全灭活, 其褐变程度最轻	[86]
杏鲍菇	植酸、谷胱甘肽、热风干燥	加工、贮藏	0.08%植酸和 0.1%谷胱甘肽协同处理杏鲍菇片在干燥过程中褐变抑制率达 78.09%, 贮藏期间褐变抑制率达 69.93%, 同时抑制酶促和非酶促褐变	[83]

4 结束语

果蔬加工原料的褐变是贯穿于加工、贮运全过程的核心品质劣变问题, 其发生是原料自身特性与外部环境及加工条件相互作用的结果。在机制层面, 褐变主要由 PPO、POD 介导的酶促反应以及美拉德反应、抗坏血酸氧化等非酶促反应共同驱动, 其进程深受原料品种、成熟度、酚类物质组成等内在属性的决定性影响。在防控技术层面, 当前已形成物理、化学与生物三大技术体系。物理技术(如新型热加工、辐照、隔氧包装等)以其绿色安全的特性, 在钝酶和调控微环境方面展现出优势; 化学技术正从传统合成护色剂向天然提取物等安全、高效的方向发展; 生物技术(如微生物发酵、酶工程、基因编辑)则凭借其精准靶向的特点, 代表了未来防褐变技术的根本性解决方案。在应用层面, 针对鲜切、果汁、干制等不同加工方式, 单一技术的局限性日益凸显, 而基于褐变机制的多种技术协同控制

策略, 已成为实现高效、优质加工的重要途径。

面向未来, 果蔬加工原料的防褐变研究与应用将呈现以下趋势: (1)技术融合系统化。未来的防褐变策略将不再是单一技术的应用, 而是物理、化学、生物技术的深度交叉与协同。例如, 将天然提取物与隔氧打浆结合, 或将基因编辑原料与温和的物理场处理相结合, 构建从原料到成品的全程品质控制体系; (2)控制过程智能化。随着智能材料与信息技术的发展, 开发集成氧气清除、湿度/pH 调控、褐变指示等多功能一体的智能加工系统, 实现对原料初加工过程中品质变化的动态监测与反馈式精准调控, 是未来发展的重要方向; (3)解决方案绿色化。消费者对“清洁标签”的需求将持续推动天然防褐变剂的挖掘与作用机理研究, 同时, 基因编辑等生物技术虽然在法规和消费者接受度上面临挑战, 但其从源头上解决问题的潜力巨大, 需加强科学传播与法规建设, 推动其负责任的应用。总之, 从被动防止到主动调控, 从终端处理到全程管理, 通过多技术融合与系统化解决方案, 是实现果蔬加工产业高品质与可持续发展的必然路径。

参考文献

[1] LIU RH. Health-promoting components of fruits and vegetables in the diet [J]. Advances in Nutrition (Bethesda, Md.), 2013, 4(3): 384S–392S.

[2] 胡小松, 廖小军, 陈芳, 等. 中国果蔬加工产业现状与发展态势[J]. 食品与机械, 2005(3): 4–9.
HU XS, LIAO XJ, CHEN F, *et al*. The present status and developing trend of fruit & vegetable industry in China [J]. Food and Machinery, 2005(3): 4–9.

[3] LIU R, YU ZL, SUN YL, *et al*. The enzymatic browning reaction inhibition effect of strong acidic electrolyzed water on different parts of sweet potato slices [J]. Food Bioscience, 2021, 43(101252): 1–6.

[4] 陈维宁, 李旋, 王文月, 等. 桃酶促褐变机理与调控技术研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(7): 290–298.
CHEN WN, LI X, WANG WY, *et al*. Research progress on the mechanism and regulation of enzymatic browning in peach fruit [J]. Food Science, 2024, 45(7): 290–298.

[5] 吕静祎, 王雅萱, 葛永红, 等. 不同切分方式对冷藏鲜切‘心里美’萝卜保鲜的影响[J]. 渤海大学学报(自然科学版), 2024, 45(3): 161–172.
LV JY, WANG YX, GE YH, *et al*. Effects of different cutting types on preservation of fresh-cut ‘Xinlimei’ radish during cold storage [J]. Journal of Bohai University (Natural Science Edition), 2024, 45(3): 161–172.

[6] HU WZ, GUAN YG, JI YR, *et al*. Effect of cutting styles on quality, antioxidant activity, membrane lipid peroxidation, and browning in fresh-cut potatoes [J]. Food Bioscience, 2021, 44(PB): 101435.

[7] 陈逸婷. 切分方式及 ATP 处理对鲜切黄瓜品质和活性成分积累的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2023.
CHEN YT. Effects of cutting styles and atp treatment on quality and accumulation of bioactive compounds of fresh-cut cucumber [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2023.

[8] 祝竞芳. 切分方式及钙处理对鲜切莴苣品质和 γ-氨基丁酸积累的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2022.
ZHU JF. Effect of cutting styles and calcium treatment on quality and γ-aminobutyric acid accumulation of fresh-cut stem lettuce [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022.

[9] PARK JJ, KIM SS, PARK KS, *et al*. Assessment of enzymatic browning in blanched potato slices using combined hyperspectral imaging and hyperspectral microscopy imaging [J]. Food Chemistry: X, 2025, 32: 103356.

[10] 王磊, 阮征, 骆成尧, 等. 马铃薯多酚氧化酶酶学特性及热稳定性模型的研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(19): 92–96.
WANG L, RUAN Z, LUO CY, *et al*. Enzymatic characteristics and thermal stability model of polyphenol oxidase from potato [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(19): 92–96.

[11] 隋继学, 陈亚南, 王婷婷, 等. 鲜切苹果防褐变保鲜实验研究[J]. 冷藏技术, 2020, 43(4): 15–18.
SUI JX, CHEN YN, WANG TT, *et al*. Experimental study on browning prevention of fresh-cut apples [J]. Journal of Refrigeration Technology, 2020, 43(4): 15–18.

[12] 张琳, 高琳, 张仁堂. 基于 Maillard 反应的发酵黑化技术在果蔬加工中的研究进展[J]. 中国调味品, 2021, 46(1): 170–176.
ZHANG L, GAO L, ZHANG RT. Research progress of fermentation melanization technology based on Maillard reaction in fruit and vegetable processing [J]. China Condiment, 2021, 46(1): 170–176.

[13] 郑雯. 真空油炸杏鲍菇脆片的生产工艺及其褐变机理的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
ZHENG W. Study on the processing technology and browning mechanism of vacuum fried crispy *Pleurotus eryngii* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015

[14] 李申, 马亚琴, 韩智, 等. 氨基酸在柑橘汁非酶褐变过程中的影响和作用[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(11): 249–255.
LI S, MA YQ, HAN Z, *et al*. Role and effect of amino acids in the non-enzymatic browning of citrus juice [J]. Food and Fermentation Industries, 2015, 41(11): 249–255.

[15] TIGHILET K, ADJEBLI A, MESSIS A. Inhibition of enzymatic browning and antioxidant activities of *Marrubium vulgare* L extracts: A promising natural solution [J]. Pharmacological Research-Modern Chinese Medicine, 2025, 16: 100658.

[16] CAO S, ZHANG Y, WANG X, *et al*. Carvacrol treatment enhances the quality of peach fruit by regulating the metabolism of reactive oxygen species and the phenylpropanoid pathway [J]. LWT-Food Science and Technology, 2025, 231: 118329.

[17] 刘士琦, 韦东伶, 刘家粮, 等. 褪黑素对采后红毛丹果实褐变及膜脂代谢和能量代谢的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(18): 207–215.
LIU SQ, WEI DL, LIU JL, *et al*. Effect of melatonin on browning, membrane lipid and energy metabolisms in postharvest rambutan fruit [J]. Food Science, 2024, 45(18): 207–215.

[18] WANG T, HU MJ, YUAN DB, *et al*. Melatonin alleviates pericarp browning in litchi fruit by regulating membrane lipid and energy metabolisms [J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 160: 111066.

[19] HUANG H, LIU H, YU J. Delay of pericarp browning by chondroitin sulfate attributes of enhancing antioxidant activity and membrane integrity in litchi fruit after harvest [J]. Postharvest Biology and Technology, 2025, 227: 113612.

[20] PASQUARIELLO SM, PATRE DD, MASTROBUONI F, *et al*. Influence

of postharvest chitosan treatment on enzymatic browning and antioxidant enzyme activity in sweet cherry fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 109: 45–56.

[21] RATHER AS, HUSSAIN RP, SURADKAR P. Evaluating the effects of chitosan incorporated with seabuckthorn leaf extract composite edible coatings on the shelf life of peach (*Prunus persica* L.) fruits [J]. Food and Humanity, 2024, 2: 100280.

[22] 刘小霞, 安学明, 贠建民, 等. 蜂胶、蜂蜡复合涂膜剂对双孢蘑菇的保鲜作用[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(16): 187–194.
LIU XX, AN XM, YUN JM, *et al*. Preservative effects of propolis and beeswax composite coating on *Agaricus bisporus* [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(16): 187–194.

[23] BARBOSA VJD, ALMEIDAL KWC, SOUSA DDM, *et al*. Probiotic and synbiotic edible coatings: Effects on *Lacticaseibacillus casei* viability and general quality of minimally processed fruit during storage [J]. Food Bioscience, 2023, 56: 103144.

[24] WANG J, FANG X, MUJUMDAR A, *et al*. Effect of high-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) on drying and quality of red pepper (*Capsicum annuum* L.) [J]. Food Chemistry, 2017, 220: 145–152.

[25] DENG L, PAN Z, MUJUMDAR A, *et al*. High-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) enhances drying quality of apricots by inactivating the enzymes, reducing drying time and altering cellular structure [J]. Food Control, 2019, 96: 104–111.

[26] WANG J, YANG X, MUJUMDAR A, *et al*. Effects of various blanching methods on weight loss, enzymes inactivation, phytochemical contents, antioxidant capacity, ultrastructure and drying kinetics of red bell pepper (*Capsicum annuum* L.) [J]. LWT, 2017, 77: 337–347.

[27] XIAO H, PAN Z, DENG L, *et al*. Recent developments and trends in thermal blanching-A comprehensive review [J]. Information Processing in Agriculture, 2017, 4(2): 101–127.

[28] SU D, LV W, WANG Y, *et al*. Influence of microwave hot-air flow rolling dry-blanching on microstructure, water migration and quality of pleurotuseryngii during hot-air drying [J]. Food Control, 2020, 114: 107228.

[29] 张少颖, 王向东, 于有伟, 等. 微波预处理原料对苹果汁褐变的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 347–351.
ZHANG SY, WANG XD, YU YW, *et al*. Effects of microwave treatment of raw apple on browning of apple juice [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(5): 347–351.

[30] GRACE L, CHIEKO T, MIKU N, *et al*. Improving the shelf life stability of vacuum-packed fresh-cut peaches (*Prunus persica* L.) by radio frequency heating in water [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 57(6): 3251–3262.

[31] GUIDA V, FERRARI G, PATARO G, *et al*. The effects of ohmic and conventional blanching on the nutritional, bioactive compounds and quality parameters of artichoke heads [J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 53(2): 569–579.

[32] BARRÓN-GARCÍA OY, NAVA-ÁLVAREZ B, NAVA-ÁLVAREZ B, *et al*. Ohmic heating blanching of Agaricus bisporus mushroom: Effects on polyphenoloxidase inactivation kinetics, color, and texture [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2022, 80: 103105.

[33] COLLETTI AC, COLLETTI AC, BUDDE CO, *et al*. Induction of stress defense response and quality retention in minimally processed peaches through the application of gamma irradiation treatments [J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 194: 112084.

[34] YE L, NIU Y, YU J, *et al*. Application of electron beam irradiation in kiwifruit preservation and construction of a predictive model for its effectiveness [J]. Journal of Stored Products Research, 2025, 114: 102723.

[35] 刁源, 曾顺德, 程杨, 等. 电子束辐照对生鲜仔姜采后贮藏品质的影响[J]. 南方农业, 2023, 17(5): 190–193.
DIAO Y, ZENG SD, CHENG Y, *et al*. Effect of electron beam irradiation on postharvest storage quality of fresh young ginger [J]. South China Agriculture, 2023, 17(5): 190–193.

[36] HOU D, WANG C, YU J, *et al*. Effects of electron beam irradiation on the postharvest quality characteristics of winter jujube (*Zizyphus jujuba* mill. cv. Dalidongzao) [J]. Journal of Future Foods, 2025, 5(2): 153–161.

[37] ZARBAKHSH S, RASTEGAR S. Influence of postharvest gamma irradiation on the antioxidant system, microbial and shelf life quality of three cultivars of date fruits (*Phoenix dactylifera* L) [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 247: 275–286.

[38] ZHOU DD, LIU Q, ZHU T, *et al*. Effects of ultraviolet C on the quality and aroma volatile in peach fruit during postharvest storage [J]. Food Chemistry, 2024, 456: 139906.

[39] RONDIINELI A, SILVA KE. Pulsed electric field as a pre-treatment in food freezing processes: Fundamentals, mechanisms, applications and impacts on frozen food quality [J]. Food Bioscience, 2024, 60: 104275.

[40] JIANG HQ, LI D, SHAO DC, *et al*. Effect of pulsed electric field pre-treatment combined with static magnetic field freezing on strawberry quality [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2025, 105: 104237.

[41] DOROTA N, EWA J. Effect of pulsed electric field pre-treatment and the freezing methods on the kinetics of the freeze-drying process of apple and its selected physical properties [J]. Foods, 2022, 11(16): 2407.

[42] SREELAKSHMI VP, VENDAN SE, NEGI PS. The effect of cold plasma treatment on quality attributes and shelf life of apples [J]. Postharvest Biology and Technology, 2024, 214: 112975.

[43] GU YX, SHI WQ, LIU R, *et al*. Cold plasma enzyme inactivation on dielectric properties and freshness quality in bananas [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 69(prepublish): 102649.

[44] 陈秋怡, 刘晓媛, 刘畅, 等. 低温等离子体对静压损伤金冠苹果的贮藏品质和愈伤的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(12): 267–277.
CHEN QY, LIU XY, LIU C, *et al*. Effect of cold plasma on storage quality and wound healing of static pressure damaged golden delicious apple [J]. Food Science, 2025, 46(12): 267–277.

[45] GAO YM, SHA RC, WEI GH, *et al*. Postharvest application of plasma-activated water delays anthracnose symptom development in apples [J]. Postharvest Biology and Technology, 2025, 230: 113760.

[46] FERNÁNDEZ-TRUJILLO JP, MARTÍNEZ JA, ARTÉS F. Modified atmosphere packaging affects the incidence of cold storage disorders and keeps ‘flat’ peach quality [J]. Food Research International, 1998, 31(8): 571–579.

[47] 贾晓辉, 张鑫楠, 刘佰霖, 等. 低 O_2/高 CO_2 气调结合 1-MCP 对‘玉露香’梨贮藏品质的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(23): 4717–4727.
JIA XH, ZHANG XN, LIU BL, *et al*. Effects of low oxygen/high carbon dioxide controlled atmosphere combined with 1-methylcyclopropene on quality of Yuluxiang pear during cold storage [J]. Scientia Agricultura

Sinica, 2022, 55(23): 4717–4727.

[48] 安容慧, 姚莉, 邓秀丽, 等. 自发气调包装对草莓货架期品质的影响[J]. 中国果菜, 2025, 45(11): 10–19.
AN RH, YAO L, DENG XL, *et al*. Effect of modified atmosphere packaging on the shelf-life quality of strawberries [J]. China Fruit & Vegetable, 2025, 45(11): 10–19.

[49] 程杨, 唐谦, 刁源, 等. 智能包装模式对电商配送“夏黑”葡萄贮运保鲜效果的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(10): 88–95.
CHENG Y, TANG Q, DIAO Y, *et al*. Effect of intelligent packaging mode on storage and storage of “Xiahei” grape [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2020, 42(10): 88–95.

[50] 朱麟, 凌建刚, 尚海涛, 等. 因子分析法综合评价冰温结合 1-MCP 处理对‘玉露’水蜜桃贮藏品质的影响[J]. 果树学报, 2016, 33(9): 1164–1172.
ZHU L, LING JG, SHANG HT, *et al*. Factor analysis of the effects of controlled freezing-point storage in combination with 1-MCP treatment on quality of ‘YuLu’ juicy peaches during cold storage [J]. Journal of Fruit Science, 2016, 33(9): 1164–1172.

[51] 宣晓婷, 钟雪珍, 尚海涛, 等. 射频和热激处理对水蜜桃冻藏褐变及品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(1): 234–242.
XUAN XT, ZHONG XZ, SHANG HT, *et al*. Effects of radio frequency and heat shock treatment on the browning and quality of honey peaches during frozen storage [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(1): 234–242.

[52] 李珊珊, 孙政, 曾琳. 超低温冷冻对龙眼种子生理生化特性的影响[J]. 热带作物学报, 2024, 45(12): 2599–2606.
LI SS, SUN Z, ZENG L. Effect of cryopreservation on the physiological and biochemical characteristics of Longan seeds [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2024, 45(12): 2599–2606.

[53] 谷云, 汤少华, 周丽, 等. 防褐变作用乳酸菌的筛选及其发酵条件研究[J]. 中国食品学报, 2014, 14(3): 72–77.
GU Y, TANG SH, ZHOU L, *et al*. Study on screening and fermentation conditions of lactic acid bacteria for anti-browning [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(3): 72–77.

[54] 公立群, 高心雨, 王金杰, 等. 产蛋白酶微生物菌株的筛选及其对马铃薯酶促褐变的抑制作用[J/OL]. 食品工业科技, 1-17. [2025-05-21]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024120253
GONG LQ, GAO XY, WANG JJ, *et al*. Screening of protease-producing microbial strain and it sinhibitory effect on enzymatic browning of potato [J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1-17. [2025-05-21]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024120253

[55] LI J, BAI J, LI S, *et al*. Effect of lactic acid bacteria on the postharvest properties of fresh lotus root [J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 160: 110983.

[56] DERARDIA AE, PRETZLER M, KAMPATSIKAS L, *et al*. Inhibition of apricot polyphenol oxidase by combinations of plant proteases and ascorbic acid [J]. Food Chemistry: X, 2019, 4(C): 100053.

[57] WANG S, LI F, WANG G, *et al*. Polyphenol oxidase gene editing changed the flavonoid composition and browning process of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) callus [J]. Gene, 2025, 936: 149130.

[58] NICOLÁS MG, ALEJANDRA GM, MARIETTE A, *et al*. Reduced enzymatic browning in potato tubers by specific editing of a polyphenol oxidase gene via ribonucleoprotein complexes delivery of the CRISPR/CAS9 system [J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 1649.

[59] ZHANG L, WANG J, ZHOU X, *et al*. Effect of ATP treatment on enzymes involved in energy and lipid metabolisms accompany peel browning of ‘Nanguo’ pears during shelf life after low temperature storage [J]. Scientia Horticulturae, 2018, 240: 446–452.

[60] LI ML, ZHENG QP, LIN HT, *et al*. The influence of ATP treatment on energy dissipation system in postharvest Longan fruit during senescence [J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 164: 111154.

[61] LIN YF, CHEN MY, LIN HT, *et al*. Phomopsis longanae-induced pericarp browning and disease development of Longan fruit can be alleviated or aggravated by regulation of ATP-mediated membrane lipid metabolism [J]. Food Chemistry, 2018, 269: 644–651.

[62] AGHDAM SM, LUO Z, JANNATIZADEH A, *et al*. Exogenous adenosine triphosphate application retards cap browning in *Agaricus bisporus* during low temperature storage [J]. Food Chemistry, 2019, 293: 285–290.

[63] 尹琳琳, 张雪, 卢世凤, 等. 短波紫外照射协同壳聚糖涂膜处理对鲜切甘蔗的保鲜效果[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(6): 218–224.
YIN LL, ZHANG X, LU SF, *et al*. The preservative effect of UV-C combined with chitosan coating on fresh-cut sugarcane [J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(6): 218–224.

[64] LIN LJ, LIN YQ, CHEN BY, *et al*. A combination treatment of slightly acidic electrolyzed water (SAEW) and nisin to alleviate browning development of fresh-cut lettuce [J]. Postharvest Biology and Technology, 2025, 222: 113402.

[65] 刘欢, 赵焓羽, 周飘飘, 等. 1-MCP 和短波紫外线照射处理结合真空包装对鲜切莴笋保鲜效果的影响[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(15): 78–86.
LIU H, ZHAO HY, ZHOU PP, *et al*. Combination treatment of fresh-cut asparagus lettuce by 1-methylcyclopropene, short-wave ultraviolet radiation and vacuum packaging [J]. Food Research and Development, 2022, 43(15): 78–86.

[66] WEN B, LI D, TANG D, *et al*. Effects of simultaneous ultrasonic and cysteine treatment on antibrowning and physicochemical quality of fresh-cut lotus roots during cold storage [J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 168: 111294.

[67] LI YL, LIU S, CHEN SQ, *et al.* Physicochemical changes in fresh-cut peaches with the combined treatment of UV-B irradiation and 1-MCP [J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 184: 111755.

[68] AGUAYO E, REQUEJO-JACKMAN C, STANLEY R, *et al*. Hot water treatment in combination with calcium ascorbate dips increases bioactive compounds and helps to maintain fresh-cut apple quality [J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 110: 158–165.

[69] DU Y, HUANG X, YUAN S, *et al*. Cold plasma and honey synergistically inhibit polyphenol oxidase to enhance fresh-cut apple preservation [J]. Food Chemistry, 2025, 468: 142490.

[70] 胡位荣, 刘顺枝, 黄惠娟, 等. 抗坏血酸与壳聚糖处理对鲜切香芋贮藏效果的研究[J]. 食品科学, 2010, 31(24): 436–439.
HU WR, LIU SZ, HUANG HJ, *et al*. Effects of ascorbic acid and chitosan treatments on physiological changes of fresh-cut taro during storage [J]. Food Science, 2010, 31(24): 436–439.

[71] AGUILAR K, GARVÍN A, IBARZ A. Effect of UV–Vis processing on enzymatic activity and the physicochemical properties of peach juices from different varieties [J]. Innovative Food Science and Emerging

Technologies, 2018, 48: 83–89.

[72] BAGHER MSH, DORNOUSH J, MOHAMMAD J. Improving bioactive properties of peach juice using *Lactobacillus* strains fermentation: Antagonistic and anti-adhesion effects, anti-inflammatory and antioxidant properties, and Maillard reaction inhibition [J]. Food Chemistry, 2021, 365: 130501.

[73] PARFAIT EGMD, DUNDAR BK, ERDAL A, *et al*. Changes in cashew apple juice treated with optimum thermosonication during storage [J]. Food Chemistry Advances, 2022,1: 100120.

[74] CHEN Y, ZHANG M, MUJUMDAR SA, *et al*. A simulation system to study the types and causes of browning in concentrated orange juice during storage [J]. Food and Bioproducts Processing, 2024, 146: 160–169.

[75] TIAN X, LI Y, MA T, *et al*. A strategy to significantly improve the efficacy of high hydrostatic pressure in inactivating polyphenol oxidase using epigallocatechin gallate and ferulic acid for the inhibition of enzymatic browning: From a model system to cloudy apple juice [J]. Food Chemistry, 2025, 491: 145246.

[76] 刘伟, 许弯, 胡小琴, 等. 预处理对蓝莓 NFC 果汁品质和风味的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(3): 193–202.
LIU W, XU W, HU XQ, *et al*. Effect of pretreatment on quality and flavor of blueberry NFC juice [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(3): 193–202.

[77] MAKROO HA, SRIVASTAVA B, JABEEN A. Influence of mild electric field (MEF) on polyphenol oxidase and quality attributes of pineapple juice during ohmic heating [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 156: 113021.

[78] 马永强, 李丹, 杨晨曦, 等. 蓝靛果汁加工过程中褐变机理及防控技术[J]. 食品与机械, 2023, 39(11): 152–160.
MA YQ, LI D, YANG CX, *et al*. Browning mechanism of indigo juice during processing prevention and control technology [J]. Food & Machinery, 2023, 39(11): 152–160.

[79] CHEN YY, ZHANG M, MUJUMDAR AS, *et al*. Combination of epigallocatechin gallate with l-cysteine in inhibiting Maillard browning of concentrated orange juice during storage [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112604.

[80] MARCELLO S. Aseptically packaged UHPH-treated apple juice: Safety and quality parameters during storage [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 109(2): 291–300.

[81] YU Y, CHEN Y, WANG Y, *et al*. Unlocking new drying potential for Lotus root: Ultrasonic osmotic dehydration and microwave hot air drying based on phenolic retention and microstructure [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2024, 97: 103824.

[82] ZHU R, JIANG SR, LI DD, *et al*. Dehydration of apple slices by sequential drying pretreatments and airborne ultrasound-assisted air drying: Study on mass transfer, profiles of phenolics and organic acids and PPO activity [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2022, 75: 102871.

[83] CHAO G, WENJUAN G, SHENGJUN W. Inhibitive effects of phytic acid combined with glutathione on the browning and oxidation of King Oyster mushroom (*Pleurotus eryngii*) slices during drying and storage [J]. Food Chemistry: X, 2023, 19: 100874.

[84] SUO K, PAN Z, PAN L, *et al*. Freeze-thaw cycle synergistic pulsed light pretreatment improves vacuum freeze drying of Chinese bayberry [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2025, 105: 104228.

[85] YUAN S, CHEN T, DU Y, *et al*. The effect of cold plasma treatment on the color and drying efficiency of fresh cut yam (*Dioscorea opposita* Thunb. cv. Tiegun) [J]. Food chemistry, 2025, 492(Pt2): 145456.

[86] WANG D, CHEN X, PANDISELVAM R, *et al*. Effects of microwave power control on enzyme activity, drying kinetics, and typical nutrients of *Pleurotus eryngii*: Exploring the blanching mechanism by microstructural and ultrastructural evaluation [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 128: 106037.

(责任编辑: 韩晓红 安香玉)