杨娅, 马孝林, 周泽江, 等. 变频冷藏对货架期胡萝卜脆度、弹性、粘着性和果胶纳米结构的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(4): 392−403. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030218

YANG Ya, MA Xiaolin, ZHOU Zejiang, et al. Effects of Refrigeration of Variable Frequency on Fracturability, Springiness, Adhesiveness and Pectin Nanostructure of Carrot during Shelf life[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(4): 392−403. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030218

· 贮运保鲜 ·

变频冷藏对货架期胡萝卜脆度、弹性、粘着性和果胶纳米结构的影响

杨　娅[1], 马孝林[2], 周泽江[3], 赵鲁迺克[1], 王馨怡[1], 杨成贵[1], 向　辉[1], 王军节[1,*]

（1.北方民族大学生物科学与工程学院, 植物性农产品贮藏与加工重点实验室, 宁夏银川 750021;
2.宁夏回族自治区农业勘查设计院, 宁夏银川 750002;
3.宁夏回族自治区乡镇企业经济发展服务中心, 宁夏银川 750002）

摘　要: 为探究变频冷藏对货架期胡萝卜质地特性和果胶纳米结构的影响，本文以经变频和定频冷库冷藏的胡萝卜为研究对象，采用质构仪分析测定货架期室温贮藏期间胡萝卜的脆度、弹性、凝聚性和粘着性等质地指标。通过分光光度法研究货架期胡萝卜的细胞壁物质含量和细胞壁降解酶活性，并用原子力显微镜（Atomic Force Microscope，AFM）分析货架期胡萝卜果胶物质的纳米结构。结果表明，变频冷藏维持了货架期胡萝卜的脆度和弹性，以及碳酸钠可溶性果胶（Sodium Carbonate Soluble Pectin，SSP）、螯合可溶性果胶（CDTA-Soluble Pectin，CSP）、纤维素和半纤维素等细胞壁多糖物质含量，延缓了水溶性果胶（Water-Soluble Pectin，WSP）含量的增加，同时，变频库冷藏可降低货架期前中期胡萝卜多聚半乳糖醛酸酶（Polygalacturonase，PG）的活性，以及整个货架期胡萝卜果胶甲酯酶（Pectinesterase，PME）、纤维素酶（Cellulase，Cx）和 β-半乳糖苷酶（β-Galactosidase，β-Gal）的活性，增加 CSP 和 SSP 果胶聚集体数量；相关性分析进一步发现，货架期胡萝卜的脆度与 PME 活性、粘着性与 PME 活性以及弹性与 β-Gal 活性之间存在显著的负相关（$P<0.05$）。由此得出，采用变频冷藏能够有效维持货架期胡萝卜果胶纳米结构，维持优良的脆度、弹性和粘着性等质地品质，从而为胡萝卜在货架期内的贮藏保鲜提供了科学的理论支持。

关键词: 变频, 货架期, 质地, 胡萝卜, 果胶, 纳米结构

中图分类号: TS255.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)04−0392−12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030218

本文网刊:

Effects of Refrigeration of Variable Frequency on Fracturability, Springiness, Adhesiveness and Pectin Nanostructure of Carrot during Shelf life

YANG Ya[1], MA Xiaolin[2], ZHOU Zejiang[3], ZHAO Lunaike[1], WANG Xinyi[1], YANG Chenggui[1], XIANG Hui[1], WANG Junjie[1,*]

（1.Key Laboratory of Storage and Processing of Plant Agro-products, School of Biological Science and Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750021, China;
2.Ningxia Hui Autonomous Region Agricultural Exploration and Design Institute, Yinchuan 750002, China;
3.Ningxia Hui Autonomous Region Township Enterprises Economic Development Service Center, Yinchuan 750002, China）

Abstract: To investigate the effects of frequency conversion refrigeration on the textural properties and pectin

收稿日期: 2025−03−17

基金项目: 中央高校基本科研业务费（YCX24142）; 宁夏农业农村厅农产品冷链物流标准化示范项目（2021-187）。

作者简介: 杨娅（1999−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬采后科学与安全, E-mail: yangya1128@163.com。

*** 通信作者:** 王军节（1977−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 果蔬采后科学与安全, E-mail: smkxwjj@163.com。

nanostructure over the shelf life, the carrots were analyzed for textural indices such as fracturability, springiness, and adhesiveness using a texture analyzer. Additionally, the content of cell wall materials and the activity of cell wall-degrading enzymes over its shelf life were evaluated using spectrophotometric methods, and the nanostructure of pectin substances was examined with an atomic force microscope (AFM). The results showed that frequency conversion refrigeration maintained the fracturability and springiness of carrots during shelf life, as well as the content of cell wall polysaccharides, including sodium carbonate soluble pectin (SSP), chelated soluble pectin (CSP), cellulose, and hemicellulose. The increase of water-soluble pectin (WSP) content was also delayed in carrots over the shelf life. Furthermore, frequency conversion refrigeration reduced the activity of carrot polygalacturonase (PG) during the middle of the pre-shelf life period, along with the activities of carrot pectinesterase (PME), cellulase (Cx), and β-galactosidase (β-Gal) throughout the entire shelf life. The increase in the number of CSP and SSP pectin aggregates was linked to the changes in Cx and β-Gal activities. Correlation analyses further indicated significant negative correlations between fracturability and PME activity, adhesiveness and PME activity, and springiness and β-Gal activity of the carrots during shelf life. It is concluded that frequency conversion refrigeration can preserve excellent textural qualities, such as fracturability, springiness, and adhesiveness, by delaying the depolymerization of pectin in carrots throughout its shelf life, thereby providing a theoretical basis and technical support for carrot cold storage aimed at preserving freshness.

Key words: frequency conversion; shelf life; texture; carrot; pectin; nanostructure

胡萝卜(*Daucus carota* L.)是世界各地广泛种植的块根类蔬菜作物之一[1]，其果实口感清脆，味道鲜美，因富含类胡萝卜素、维生素、膳食纤维和矿物质等多种营养成分而具有预防心血管疾病、视网膜疾病和癌症等功能[2]，深受消费者喜爱。然而，新采收的胡萝卜由于水分含量较高，呼吸强度大，常温贮藏条件不当，极易造成其清脆口感变差，营养成分损失，商业品质下降，严重影响消费者的体验和市场效益[3−4]。研究发现，低温贮藏结合采后处理能够有效抑制胡萝卜在贮藏期间的呼吸作用，从而有助于维持其良好的感官特性和食用品质[3,5]。随着国家农产品产地仓储保鲜冷链政策的落实，胡萝卜采后冷链物流设施也趋于完善，然而由于“双碳”目标的加快推进，农产品冷链物流已逐渐追求绿色化和智能化。因此，研究与推广节能和冷藏双重效应的冷库已成为新的风向标[6]。本团队前期研究发现，压缩机变频技术能够降低冷藏期间的总体能耗，且变频冷藏能有效维持货架期胡萝卜的色泽、味觉和营养等品质，进而延缓其衰老进程[7]。变频库冷藏可维持货架期胡萝卜的硬度和咀嚼性，但有关脆度、弹性和粘着性等其它重要质地品质还有待进一步研究。

质地是果蔬采后重要品质，在采后贮藏期间，果蔬质地品质改变与细胞壁多糖含量和结构的变化有关，尤其与果胶组分的纳米结构动态变化密切相关[8]，果蔬细胞壁多糖的解聚及细胞壁结构完整性的破坏是引发其品质衰老的关键因素[9]。原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)是分析大分子微观结构的有用工具，可用于表征果胶的纳米结构水平以及多糖在自然状态下的形态。因此，AFM 技术能够实现对果胶分子及其聚合物的成像，进而表征多糖的纳米结构特征[10]。这种高分辨率的纳米结构表征手段，为阐明果蔬质地变化的潜在机制提供了理论依据。Zhang 等[11] 研究表明，通过氯化钙和果胶甲酯酶并结合真空浸渍处理，延缓了 WSP、CSP 和 SSP 的降解，从而有效维持了红枣的品质。Imaizumi 等[12] 研究发现，胡萝卜进行高温焯水处理后，CSP 的果胶链逐渐发生降解，链的长度从 44.76 nm 缩短到 12.57 nm。本团队前期针对胡萝卜货架期品质和活性氧积累的研究结果表明，变频库冷藏处理能够抑制活性氧的积累，从而延缓胡萝卜衰老维持品质[7]，然而果胶含量及果胶纳米结构在变频冷藏货架期胡萝卜中的变化规律尚不明确。

本研究以新鲜胡萝卜为试材，采用变频压缩机冷库(变频库)和定频压缩机冷库(定频库)对其进行短期冷藏，分析测定货架期胡萝卜的质地品质、细胞壁多糖物质含量及其降解酶活性，并利用 AFM 对货架期胡萝卜果胶纳米结构进行表征，揭示变频冷藏对货架期胡萝卜的脆度、弹性、粘着性及果胶纳米结构的影响规律，为胡萝卜的贮藏保鲜提供理论依据和技术支撑。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

广红品种胡萝卜(*Daucus carota* L. cv. Guanghong)　陕西榆林靖边县东坑海权农业发展有限公司；无水乙醇　分析纯，上海厂诺化学科技有限公司；丙酮、硫酸　分析纯，成都市科隆化学品有限公司；环已二胺四乙酸和蒽酮　分析纯，北京酷来搏科技有限公司。

TMS-Pro 质构仪　美国 TFC 公司；VarioskanLUX 酶标仪　美国 Thermo Fisher Science 公司；UV-9000S 紫外分光光度计　上海元析仪器有限公司；DW-86L500 超低温冰箱　上海博讯实业有限公司；TT-2 AFM 原子力显微镜　美国 AFM Worshop 公司；SAVC070D44ULK 变频压缩机　广东美芝精密制造有限公司；YW550C1G-V100 定频压缩机　苏州英华特涡旋技术股份有限公司；冷库 [主要设备 SAVC070D44ULK 变频压缩机，定频压缩机冷库(简称定频库)和变频压缩机冷库(简称变频库)的建筑结

构一致, 库体长×宽×高均为 14.0 m×10.0 m×4.2 m]

由宁夏塞上阳光新能源科技有限公司组装; 10 P 蒸发器冷凝器　广州彩雅节能电器配件有限公司; DPF(S03)6.5C-02 节流阀　浙江三花智能控制股份有限公司; YWF330 定频蒸发器冷风机　杭州微光电子股份有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　材料来源与处理　胡萝卜的来源与处理、变频库和定频库设计均与赵鲁迺克等[7] 方法一致。经筛选的 180 t 胡萝卜装入编织袋中, 每袋 75 公斤, 将编织袋先敞口放入 0~2 ℃ 冷库中预冷, 24 h 后扎口, 然后分批次放入变频和定频库中进行冷藏, 冷藏条件: 温度保持在 0~5 ℃(温度恒定后为 1±0.5 ℃)、相对湿度为 90%~95%, 冷藏 32 d 后从冷库中取出回温, 采用 5 点取样法分别挑选无机械伤、无病虫害, 且大小和成熟度一致的胡萝卜样品 100 根转移至常温 25 ℃ 左右、55%~65% RH 条件下模拟货架期贮藏(贮藏时间为货架期第 0、3、6、9 和 12 d)。

将不同贮藏时间内的胡萝卜中间部位的切片进行粉碎处理, 用锡箔纸包裹, 2.0 g/包, 液氮速冻后于 -80 ℃ 保存用于后续指标测定与分析。

1.2.2　质地品质测定　取 1.2.1 中处理的胡萝卜清洗干净后, 从中间部位横向切取约 1 cm 厚的圆片, 采用质构仪和直径为 3 mm 的柱形探头对其质地品质进行穿刺测试。样品测定参数为: 检测速度 30 mm/min; 形变量 50%; 起始力 0.1 N[13], 质构特性以弹性、脆度、凝聚性和粘着性指标表示。每个处理 10 根胡萝卜, 实验重复 3 次。

1.2.3　细胞壁多糖物质含量测定

1.2.3.1　细胞壁多糖的提取与分离　参考 Liu 等[14] 的方法, 将胡萝卜样品(5 g)与 5 mL 的 80%(v/v)乙醇研磨, 再用 95 mL 的 80%(v/v)乙醇清洗研钵, 将混合物转移至锥形瓶中, 4 ℃ 超声 10 min, 再回流煮沸 20 min。密封冷却至室温后, 8500 r/min, 离心 10 min, 收集沉淀, 向沉淀中加入 100 mL 无水乙醇超声处理 10 min, 离心, 再用无水乙醇和丙酮分别洗涤 2 次, 洗涤后的沉淀用 50 mL 二甲基亚砜浸泡过夜, 3500 r/min 离心 10 min, 去掉上清液, 沉淀于 45 ℃ 干燥箱中烘干, 得到细胞壁物质(CWM)。

将细胞壁物质悬浮在 10 mL 去离子水中, 振荡 4 h, 4 ℃, 13500×g 离心 15 min 收集上清液, 此过程重复 2 次, 收集的上清液即为水溶性果胶(WSP)。然后, 用 50 mmol/L 环己烷二胺四乙酸(CDTA)和 50 mmol/L 含 2 mmol/L CDTA 的碳酸钠溶液代替去离子水, 分别得到螯合可溶性果胶(CSP)和碳酸钠可溶性果胶(SSP)[15]。向剩余沉淀中加入含有 100 mmol/L $NaBH_4$ 的 4 mmol/L NaOH 溶液, 摇匀, 4 ℃, 13500×g 离心 15 min, 上清液收集为半纤维素组分, 最后将沉淀用蒸馏水多次洗涤至中性, 其溶液即为纤维素组分[16]。

1.2.3.2　果胶含量测定　使用咔唑比色法, 以半乳糖醛酸为标准, 测定胡萝卜的果胶含量[17]。将果胶溶液(2 mL)与 12 mL 硫酸(98%, w/w)混合, 煮沸 10 min, 然后将混合物使用自来水冷却, 并在与 0.5 mL 咔唑-乙醇溶液混合后在室温下孵育 30 min。接着使用 UV-9000s 紫外分光光度计测定 530 nm 出的吸光度, 结果表示为 mg/g。所有实验重复三次。

1.2.3.3　纤维素和半纤维素含量测定　采用蒽酮法测定纤维素和半纤维素含量[18], 分别吸取 1.2.3.1 处理的纤维素和半纤维素水解液 1 mL 于试管中, 加入 4 mL 蒸馏水, 沿壁加入 0.2% 的蒽酮硫酸试剂 10 mL, 振荡摇匀后, 沸水浴 6 min, 待冷却后 630 nm 处测定吸光值, 重复 3 次, 参照葡萄糖标准曲线计算得出各自的含量(%)。

1.2.3.4　木质素含量的测定　参考 Hao 等[19] 的方法, 将 10 g 胡萝卜样品与 12 mL 70% 的 H_2SO_4 混合后, 在 40 ℃ 下水解 1 h, 下一步将混合液稀释至 4% H_2SO_4 并回流煮沸 1 h, 然后将材料清洗并转移到烧瓶中, 在反应结束时, 用滤纸保留固体(烘箱保持在 60 ℃ 直到样品称重, m_0), 使用保持在 60 ℃ 的烘箱清洗和干燥样品, 直到称重(m_1)。木质素含量计算公式:

$$\text{木质素含量}(\%) = \frac{m_1 - m_0}{m} \times 100$$

1.2.4　细胞壁降解酶的提取与测定

1.2.4.1　细胞壁降解酶的提取　参考宁密密等[20] 和潘越等[21] 的方法, 将 1 g 胡萝卜样品置于研钵中, 加入 4 mL 40 mmol/L 乙酸钠缓冲液(50 g/L 聚乙烯吡咯烷酮、2% β-巯基乙醇和 0.1 mol/L NaCl, pH5.2), 进行研磨。匀浆液于 4 ℃, 12000 r/min 离心 20 min 后, 上层清液即为粗酶提取液, 用以分析测定 PME、PG、Cx 和 β-Gal 的活性。

1.2.4.2　PME 活性测定　向具塞刻度试管中加入 1 mL 醋酸缓冲液、0.5 mL 果胶和 0.5 mL 胡萝卜酶提取液, 振荡, 37 ℃ 保温 1 h, 之后加入 1.5 mL 3,5-二硝基水杨酸, 煮沸 5 min, 冷却至室温, 定容至 25 mL, 在 540 nm 波长处测定吸光度值, 以葡萄糖质量为横坐标, 吸光度值为纵坐标, 绘制标准曲线。一个单位的 PME 催化活性(U)定义为每分钟使反应体系在 540 nm 波长处吸光度值改变 1 所需的酶量, 每个处理平行测定 3 次。

1.2.4.3　PG 活性测定　向具塞刻度试管中加入 1 mL 多聚半乳糖醛酸溶液和 1 mL 乙酸-乙酸钠缓冲液, 再分别加入 0.5 mL 酶提取液和煮沸 5 min 的酶提取液, 振荡, 37 ℃ 保温 1 h, 迅速加入 1.5 mL DNS, 煮沸 5 min, 冷却至室温, 定容至 25 mL, 在 540 nm 波长下测定其吸光度值, 以葡萄糖质量为横坐标, 吸光度值为纵坐标, 绘制标准曲线。以 1 mL

酶液于每小时内催化果胶分解产生 1 mg 半乳糖醛酸定义为一个单位 PG 催化活力(U), 每个处理平行测定 3 次。

1.2.4.4 Cx 活性测定　与 PG 活力测定相同, 在 540 nm 波长下测定其吸光度值, 以葡萄糖质量为横坐标, 吸光度值为纵坐标, 绘制标准曲线。一个单位的 Cx 催化活性定义为每小时内催化羧甲基纤维素水解形成 1 mg 还原糖, 单位为 U, 每个处理平行测定 3 次。

1.2.4.5 β-Gal 活力测定　将 0.2 mL 酶提取物和 2 mL 10 g/L 的对硝基苯基-β-D-半乳糖苷混合并在 37 ℃ 反应 30 min, 然后加入 2 mL 0.2 mol/L 的 Na_2CO_3 溶液终止反应, 在 400 nm 波长处测定吸光度值。一个单位的 β-Gal 催化活性定义为以 1 mL 酶液每小时产生 1 μmol/L 对硝基苯酚, 单位为 U。

1.2.4.6 蛋白质含量的测定　采用考马斯亮蓝法[22]测定上述粗酶液的蛋白质含量, 以牛血清白蛋白作标准曲线, 最终酶活性以比活性表示, U/mg protein, 每个处理平行测定 3 次。

1.2.5 AFM 观察果胶纳米结构　将果胶溶液用涡旋混合器混匀, 稀释至 10~30 μg/mL。扫描前将 10 μL 样品溶液快速吸至新鲜剥离的云母片表面, 自然晾干。原子力显微镜采用轻敲模式。探针的共振频率和扫描频率分别为 164.5 kHz 和 0.5 Hz, 用于检测果胶结构。利用 Gwyddion 软件对 AFM 图像进行分析, 通过剖面分析得到定性信息(宽度和高度)。频率(frequency, Fq)定义为具有特定宽度的果胶链在所有观察到的果胶链中的百分比[23]。每个样品重复 10 次。

1.3 数据处理

所有实验均重复三次, 所有结果以平均值±标准偏差表示, 利用 SPSS 23.0 软件对数据进行统计与显著性分析(WSP 链宽>500 nm, CSP 链宽>500 nm, SSP 链宽>1200 nm, WSP 链高>170 nm, CSP 链高>70 nm, SSP 链高>350 nm), 当 P<0.05 时表示差异显著, 使用 Graphpad Prsim 5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 变频和定频冷藏对胡萝卜货架期弹性、脆度、凝聚性和粘着性的影响

弹性和脆度是评价果蔬贮藏期间品质变化的关键指标[24]。两种库冷藏后货架期胡萝卜的弹性值变化趋势如图 1A 所示, 定频库冷藏后货架期胡萝卜的弹性呈先升高后下降的单峰型变化趋势, 而变频库冷藏延缓了该峰型变化; 除货架期第 3 d, 变频库冷藏均显著提高其它货架期胡萝卜的弹性值(P<0.05); 货架期第 6 和第 12 d, 经变频库冷藏胡萝卜的弹性值分别是同期定频库的 1.11 倍和 1.12 倍。由图 1B 可知, 定频库冷藏后的胡萝卜货架期脆度均呈现先降低后升高再降低的 S 型变化; 变频库冷藏能显著提高货架期 0、3、6 和 12 d 胡萝卜的脆度(P<0.05); 变频库冷藏后货架期第 6 和 12 d 胡萝卜的脆度分别比经定频库冷藏后货架期同期的胡萝卜脆度高 3.40% 和 13.10%。凝聚性和粘着性是反映果蔬内部细胞间结合力的大小, 使其保持完整的性质[25]。经定频库冷藏后货架期胡萝卜的凝聚性变化趋势和脆度

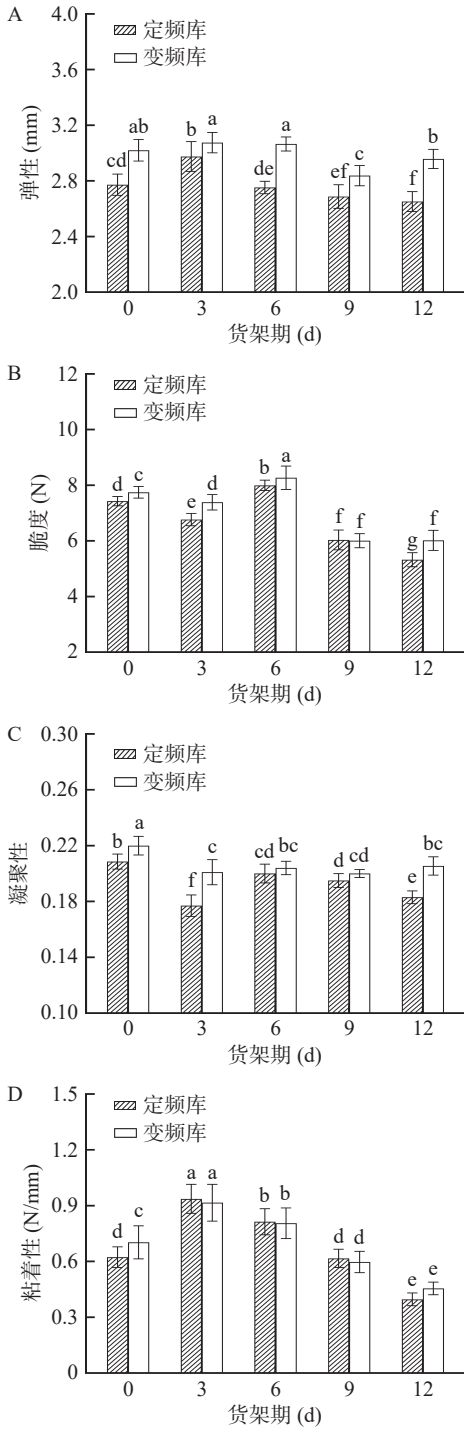


图 1　变频和定频库冷藏后货架期胡萝卜的弹性、脆度、凝聚性和粘着性

Fig.1　Elasticity, brittleness, cohesiveness and adhesion of carrots during shelf life after refrigerated storage in variable frequency and fixed frequency warehouses

注: A: 弹性; B: 脆度; C: 凝聚性; D: 粘着性; 图中不同小写字母表示不同时间点两种处理间该指标差异显著(P<0.05), 图 2~图 3 同。

相似, 呈现 S 型变化, 而变频库冷藏能显著提高货架期第 0、3 和 12 d 的胡萝卜凝聚性(P<0.05), 其中货架期第 12 d, 经变频库冷藏胡萝卜的凝聚性是同期定频库冷藏的 1.12 倍(图 1C)。冷藏后货架期胡萝卜的粘着性均呈单峰型变化, 变频库冷藏能显著提高货架期当天的粘着性(P<0.05), 货架期第 12 d, 变频库冷藏比定频库冷藏的胡萝卜粘着性高 14.80%(图 1D)。综上可知, 变频库冷藏对货架期胡萝卜的弹性、脆度、凝聚性和粘着性等质地品质具有一定的维持和调节作用。

2.2 变频和定频库冷藏对货架期胡萝卜细胞壁物质含量的影响

SSP 和 CSP 是果蔬细胞壁多糖的重要组成部分, 其含量的波动与果蔬贮藏期间质地的变化密切相关[26]。两种库冷藏后货架期胡萝卜的 SSP 含量总体呈上升趋势, 变频库冷藏可显著提高货架期胡萝卜的 SSP 含量, 货架期第 0 和第 6 d, 经变频库冷藏的胡萝卜 SSP 含量分别是定频库冷藏后货架同期的 3.35 倍和 1.99 倍(图 2A)。变频库冷藏对货架期胡萝卜 CSP 含量的影响与对 SSP 含量影响不同, 变频库冷藏能显著提高货架期初期和中期胡萝卜的 CSP 含量(P<0.05), 但降低货架期末期的 CSP 含量。货架期当天和第 6 d 经变频库冷藏胡萝卜的 CSP 含量分别是同期定频库的 43.85 和 20.29 倍, 而货架期第 12 d 经定频库冷藏胡萝卜的 CSP 含量是同期经变频库冷藏胡萝卜的 71.35 倍(图 2B)。在果蔬贮藏期间, WSP 含量的增加通常与果蔬软化程度的加剧有关[26]。变频库冷藏对货架期胡萝卜 WSP 影响与对 CSP 影响模式正好相反, 变频库冷藏能显著抑制货架期当天和第 6 d WSP 含量的升高(P<0.05), 而提升了货架期第 12 d 胡萝卜的 WSP 含量(图 2C)。由此可知, 变频库冷藏抑制了货架期中前期胡萝卜 WSP 含量升高、提高其 CSP 含量, 保持整个货架期具有较高的 SSP 含量。

纤维素和半纤维素是构成果蔬细胞壁骨架的关键物质, 起着维持细胞壁结构稳定和完整的作用[27]。由图 2D 可知, 胡萝卜经两种库冷藏后, 货架期间纤维素含量整体呈先升高后降低趋势。经变频库冷藏后货架期第 0 和第 6 d 胡萝卜的纤维素含量分别是定频库冷藏后同货架期胡萝卜的 1.47 倍和 1.68 倍, 而货架期第 12 d 两种库冷藏胡萝卜的纤维素含量无显著差异。两种库冷藏后胡萝卜货架期半纤维素含量均呈先降低后升高趋势。变频库冷藏胡萝卜在货架期当天和第 6 d 时半纤维素含量均显著高于定频库(P<0.05), 但变频库冷藏后货架期第 12 d 胡萝卜半纤维素含量却显著低于定频库(图 2E)。由图 2F 可知, 胡萝卜货架期木质素含量在两种库冷藏过程中呈逐渐升高趋势; 变频库冷藏显著提高了货架期当天胡萝卜木质素含量而抑制了货架期第 6 和 12 d 木质素含量(P<0.05)。由此表明, 变频库冷藏提高货架期当天和第 6 d 纤维素和半纤维素含量, 抑制了货架期后期半纤维素和木质素的过度积累。

2.3 变频和定频库冷藏对货架期胡萝卜细胞壁降解酶活性的影响

多聚半乳糖醛酸酶和果胶甲酯酶是参与果胶水解的主要酶, 过多积累会加速果蔬细胞壁的降解, 从

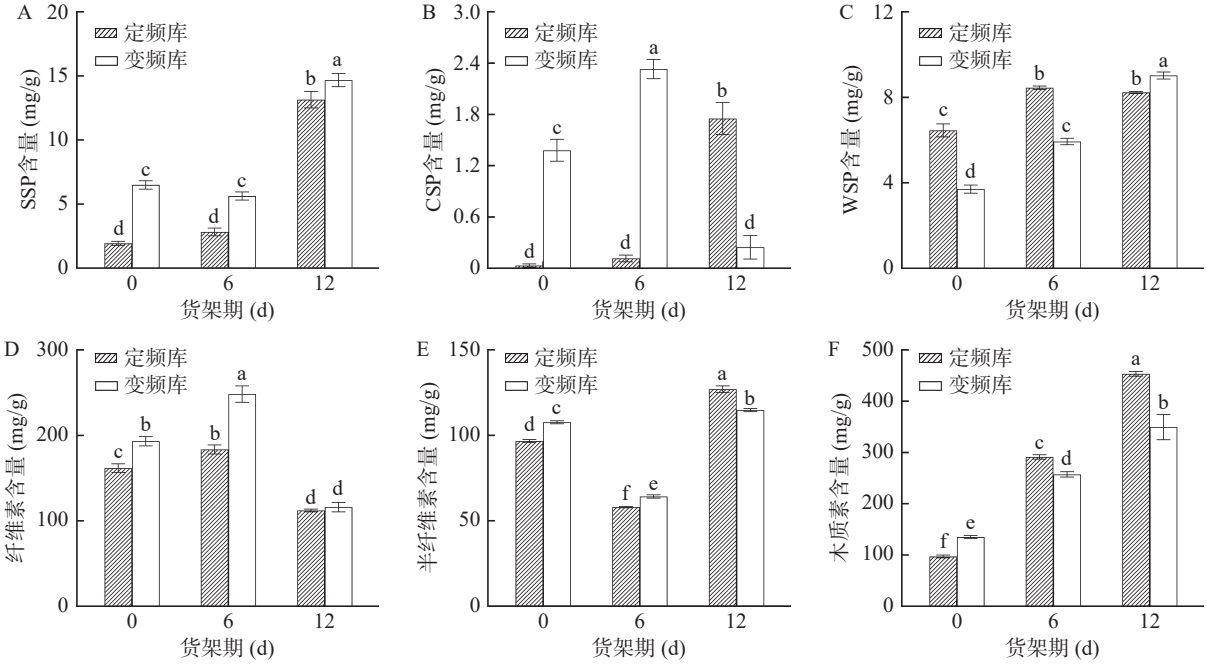


图 2 变频和定频库冷藏后货架期胡萝卜的 SSP、CSP、WSP、纤维素、半纤维素和木质素含量

Fig.2 Contents of SSP, CSP, WSP, cellulose, hemicellulose and lignin of carrot during shelf life after cold storage in frequency conversion and fixed frequency storage were determined

注: A: SSP 含量; B: CSP 含量; C: WSP 含量; D: 纤维素含量; E: 半纤维素含量; F: 木质素含量。

而影响果蔬的品质[28–29]。由图 3A 可知, 变频库冷藏可显著抑制货架期第 0 和第 6 d 胡萝卜的 PG 活性(P<0.05), 但显著提高了货架期第 12 d 胡萝卜的 PG 活性(P<0.05)。货架期第 0 和 6 d, 经变频库冷藏的胡萝卜的 PG 活性分别比同期的定频库冷藏胡萝卜低 16.29% 和 6.11%, 而变频库冷藏后货架期第 12 d 胡萝卜的 PG 活性是同期定频库冷藏胡萝卜的 1.19 倍。两个库冷藏后货架期胡萝卜的 PME 活性变化如图 3B 所示, 定频库冷藏后货架期胡萝卜 PME 活性则表现为先下降后升高趋势, 而变频库冷藏后货架期胡萝卜的 PME 活性呈逐渐降低趋势, 且在整个货架期, 变频库冷藏后胡萝卜的 PME 活性均显著低于定频库(P<0.05); 在货架期第 12 d, 经定频库冷藏是同期变频库冷藏胡萝卜 PME 活性的 3.14 倍。由此可知, 变频库冷藏可有效抑制胡萝卜货架期的 PME 活性和货架中前期的 PG 活性。

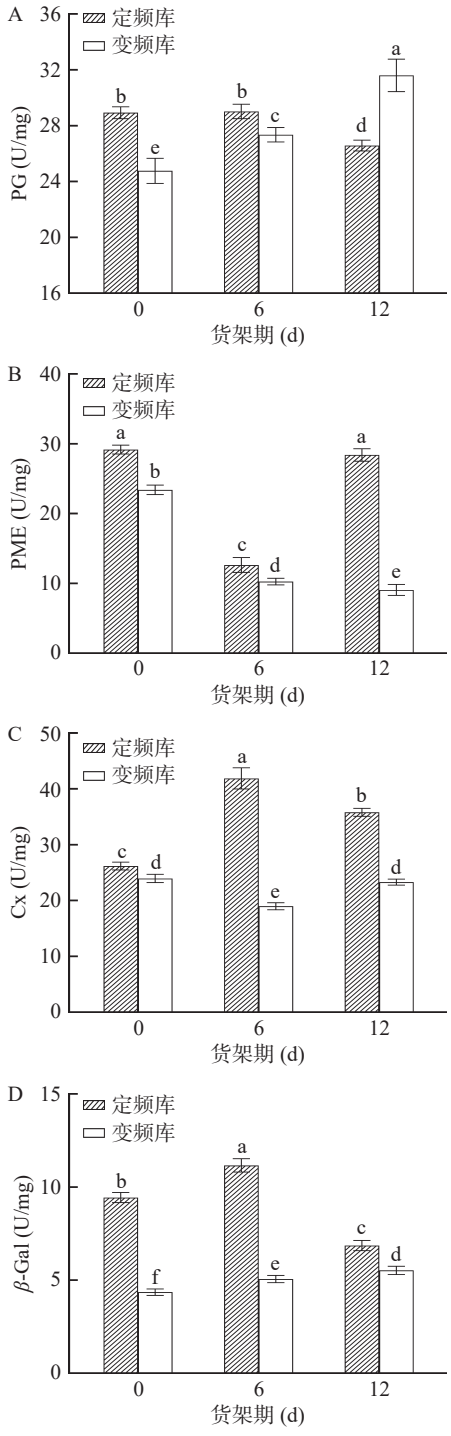


图 3　变频和定频库贮藏后货架期胡萝卜的 PG、PME、Cx 和 β-Gal 活性

Fig.3　Activities of PG, PME, Cx and β-Gal in carrots during shelf life after storage in variable frequency and fixed frequency libraries were studied

注: A: 多聚半乳糖醛酸酶活性; B: 果胶甲酯酶活性; C: 纤维素酶活性; D: β-半乳糖苷酶活性。

纤维素酶与 β-半乳糖苷酶协调作用, 与果蔬细胞生长发育过程中细胞壁的松弛或加固有关[30–31]。由图 3C 可知, 定频库冷藏后胡萝卜货架期的 Cx 活性呈先升高后降低的单峰型变化趋势, 而变频库冷藏可显著抑制整个货架期胡萝卜的 Cx 活性(P<0.05), 经变频库冷藏后胡萝卜在货架期的第 0、6 和 12 d 的 Cx 活性分别比同期经定频库冷藏的胡萝卜低 9.30%、120.66% 和 53.64%。由图 3D 可知, 定频库冷藏后货架期胡萝卜的 β-Gal 活性也呈先上升后下降的单峰型变化趋势, 而变频库冷藏可显著抑制整个货架期胡萝卜的 β-Gal 活性(P<0.05); 在货架期第 12 d, 经变频库冷藏的胡萝卜的 β-Gal 活性分别比同期经定频库冷藏胡萝卜低 24.14%。因此, 变频库冷藏可显著降低货架期胡萝卜的 Cx 和 β-Gal 活性。

2.4　变频和定频库冷藏对货架期胡萝卜 WSP 纳米结构的影响

变频和定频冷藏后货架期胡萝卜 WSP 的 AFM 图像如图 4A 所示, 云母上的 WSP 聚合物呈现小的椭圆形, 与初始时期新采收的胡萝卜相比, 两种库冷藏后货架期胡萝卜 WSP 的颗粒尺寸变大, 且定频库冷藏后货架期胡萝卜的 WSP 颗粒尺寸增大更明显。通过定量分析 WSP 果胶的链长和链宽, 以进一步阐明果胶分子在贮藏过程中的结构变化。图 4B 和图 4C 分别表示冷藏后货架期胡萝卜果胶链的宽度和高度变化。由图 4B 可知, 初始新鲜胡萝卜 WSP 的链宽值主要集中在 400~500 nm, 出现频率为 54.44%, 且出现了频率为 5.56% 的 600 nm 以上的高链宽; 在货架期第 0 d 时两种库冷藏结束后 600 nm 以上高链宽频率均有增加, 且定频库增加更明显, 此时定频库冷藏胡萝卜 WSP 的 600 nm 以上高链宽为 26.67%, 是同期变频库胡萝卜同范围高链宽值的 2.29 倍; 随着货架期延长到第 6 d, 定频库冷藏后胡萝卜 WSP的 600 nm 以上高链宽值降至 12.38%, 而此时经变频库冷藏胡萝卜未出现 600 nm 以上的 WSP 链宽。整个货架期胡萝卜 WSP 链高的变化趋势与链宽类似(图 4C), 即初始时胡萝卜 WSP 链高均低于210 nm; 之后随着货架期的延长, 210 nm 以上的胡萝卜高链高先增加后降低, 且经定频库冷藏胡萝卜的变化趋势更明显; 货架期第 6 d, 定频库冷藏后胡萝卜 WSP 的 210 nm 以上高链高

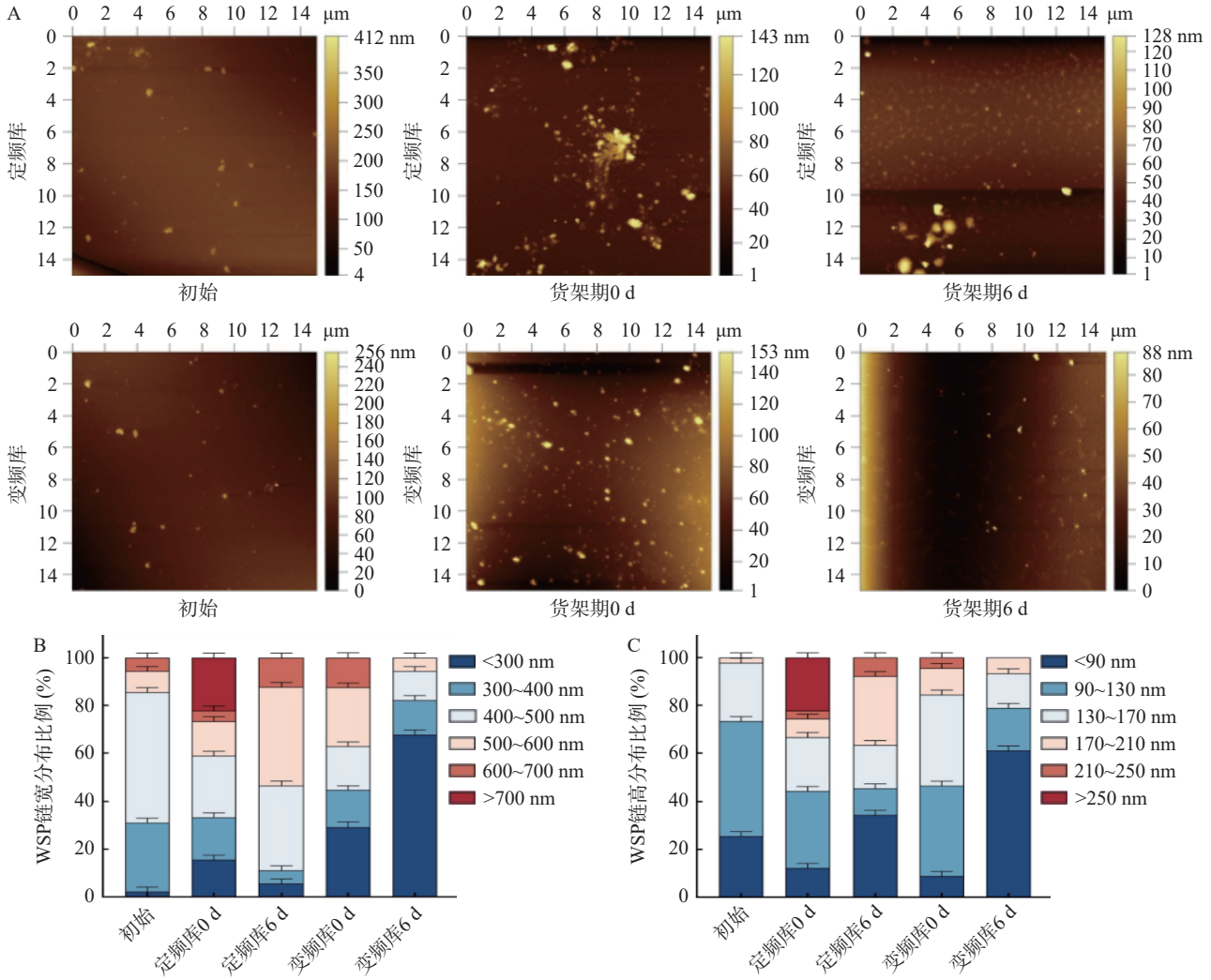


图 4 变频和定频库冷藏后货架期胡萝卜 WSP 的纳米结构

Fig.4 Nanostructure of carrot WSP during shelf life after cold storage in frequency conversion and fixed frequency storage

注: A: AFM 图片; B: WSP 链宽分布; C: WSP 链高分布。

值为 7.78%, 而此时经变频库冷藏胡萝卜未出现 210 nm 以上的高链高。由此可知, 两种库冷藏均会促使 WSP 发生聚集, 但这种聚集趋势随货架期延长而减弱, 这表明两种库冷藏处理均可延缓 WSP 的降解, 可能是因为 WSP 分子间的氢键、疏水相互作用等非共价键作用可能增强, 促进了胡萝卜细胞分子间的聚集, 从而更好地维持了货架期胡萝卜的品质。

2.5 变频和定频库冷藏对货架期胡萝卜 CSP 纳米结构的影响

两种冷藏后货架期胡萝卜 CSP 的 AFM 图像如图 5A 所示。CSP 聚集体呈现小的椭圆形, 随着货架期的延长, 两种库冷藏后货架期胡萝卜 CSP 聚集体粒径逐渐缩小, 且定频库冷藏后货架期胡萝卜的 CSP 聚集体粒径缩小更为明显。图 5B 和图 5C 分别表示冷藏后货架期胡萝卜 CSP 果胶链的宽度和高度变化。由图 5B 可知, 初始新鲜胡萝卜 700 nm 以上高链宽的 CSP 出现频率较高, 为 31.11%; 定频冷藏后货架期当天胡萝卜 700 nm 以上高链宽 CSP 的频率明显降低, 而变频库有延缓下降趋势, 此时变频冷藏是定频冷藏后胡萝卜同范围 CSP 高链宽值的 2.4 倍; 随着货架期延长至第 6 d, 变频和定频冷藏后胡萝卜 700 nm 以上高链宽 CSP 的出现频率分别为 5.56% 和 8.89%。两种冷藏后货架期胡萝卜 CSP 链高的变化趋势与链宽类似(图 5C), 新鲜胡萝卜 110 nm以上的 CSP 高链高出现频率为 10.00%, 随着货架期的延长, 该范围的高链高呈现先升高后降低趋势, 在货架期第 0 d, 变频和定频冷藏后 110 nm 以上高链高的胡萝卜 CSP 出现频率分别升为 18.89% 和 17.78%, 而货架期延长至第 6 d, 两种库冷藏后均未出现 110 nm 以上高链高的胡萝卜 CSP, 但变频库冷藏胡萝卜出现了 5.56% 的 90~110 nm 链高的 CSP, 而定频库冷藏胡萝卜未出现该范围链高的 CSP。由此可知, 冷藏均具有延缓 CSP 链的解聚趋势, 且变频冷藏的抑制趋势更显著。

2.6 变频和定频库冷藏对货架期胡萝卜 SSP 纳米结构的影响

两种库冷藏胡萝卜货架期 SSP 的 AFM 图像如图 6A 所示。云母上的 SSP 聚合物呈树枝状结构, 主

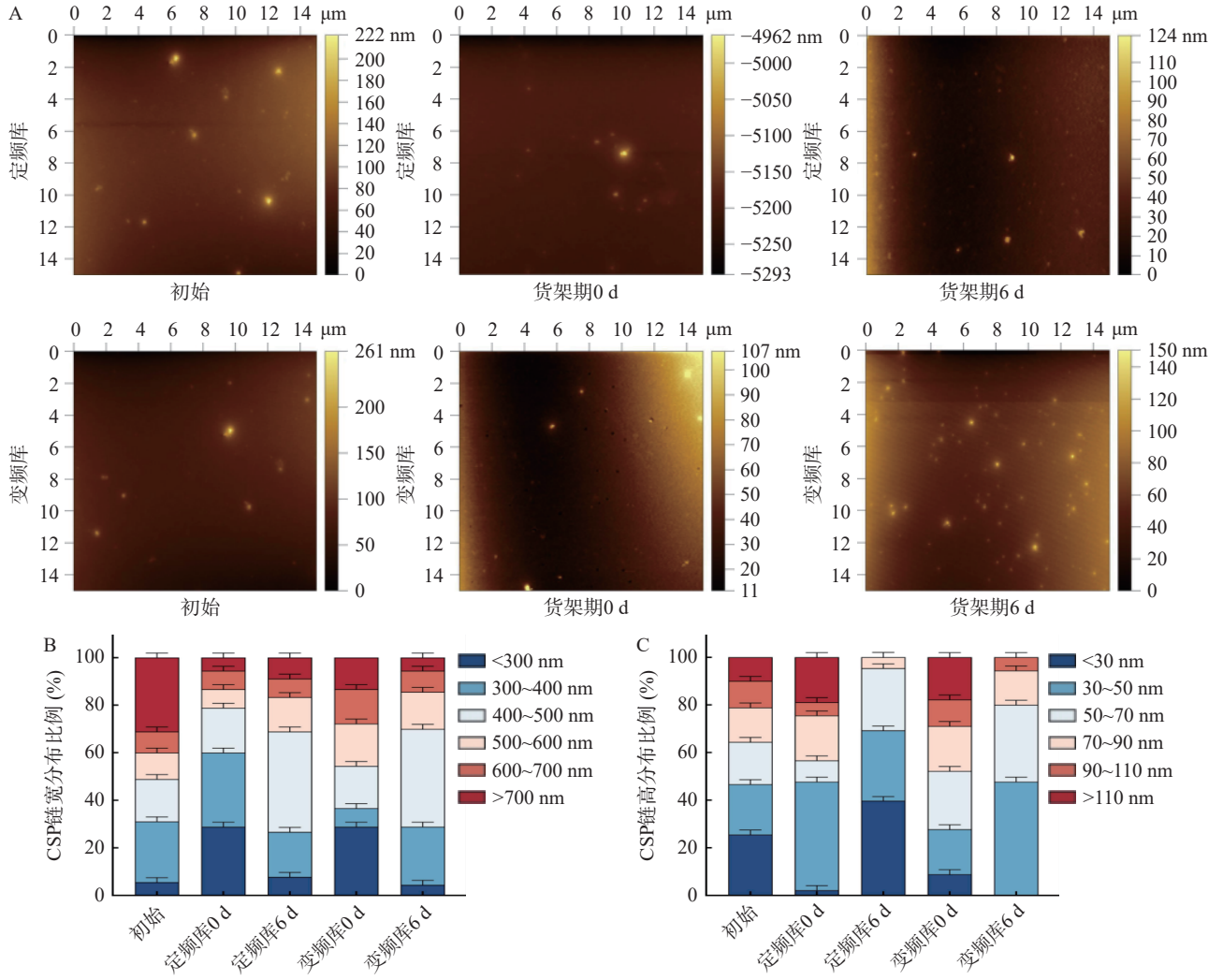


图 5　变频和定频库冷藏后货架期胡萝卜 CSP 的纳米结构

Fig.5　Nanostructure of carrot CSP during shelf life after refrigerated storage in frequency conversion and fixed frequency warehouses

注：A：AFM 图片；B：CSP 链宽分布；C：CSP 链高分布。

链周围还存在较多支链侧链，与初始胡萝卜相比，在整个货架期，两种库冷藏后胡萝卜 SSP 的主链和侧链开始解聚，出现更短和更细的链，且定频库冷藏后货架期胡萝卜的 SSP 解聚程度更严重。图 6B 和图 6C 分别表示冷藏后货架期胡萝卜果胶链的宽度和高度变化。由图 6B 可知，在初始时，胡萝卜 SSP 的链宽值主要集中在 1400~1600 nm，出现频率为 31.11%，且出现了频率为 6.67% 的 1600 nm 以上的高链宽，变频库冷藏结束后 1600 nm 以上高链宽频率显著增加（P<0.05），此时，变频库冷藏胡萝卜 SSP 的1600 nm 以上高链宽为 47.78%，是同期定频库胡萝卜同范围高链宽值的 8.60 倍；货架期延长至第 6 d 时，变频库冷藏后胡萝卜 SSP 的 1600 nm 以上高链宽值降至 10.33%，是同期定频库胡萝卜同范围高链宽值的 4.65 倍。由图 6C 可知，初始新鲜胡萝卜 SSP 的链高值主要集中在 150~350 nm，出现频率为 47.78%，且出现了频率为 4.44% 的 450 nm 以上链高，随着货架期的延长，两种库冷藏结束后 550 nm 以上高链高频率均有增加，且变频库增加更明显，此时变频库冷藏胡萝卜 SSP 的 550 nm 以上高链高为 6.67%，是同期定频库胡萝卜同范围高链高值的 3 倍；货架期延长至第 6 d，定频库冷藏后胡萝卜 SSP 的 450~550 nm 链高值为 21.11%，而此时经变频库冷藏胡萝卜未出现 450 nm 以上的链高。结果表明，变频库冷藏能够抑制货架期胡萝卜 SSP 主链的降解，从而维持了货架期胡萝卜较好的质地品质。

2.7　弹性、脆度、凝聚性、粘着性、细胞壁物质含量、降解酶活性与果胶纳米结构间相关性分析

根据 Pearson 相关系数，货架期胡萝卜的弹性、脆度、凝聚性和粘着性与细胞壁组分、细胞壁降解酶以及果胶纳米结构之间的相关性分析结果如图 7 所示。由图可知，弹性与 CSP 含量呈显著正相关，与 β-Gal 活性和 WSP 链高呈显著负相关（P<0.05）；脆度与 PME 活性呈显著负相关（P<0.05）；粘着性与木质素含量呈显著正相关，与 PME 活性呈显著负相关（P<0.05）；CSP 含量与 WSP 链高呈显著负相关（P<0.05）；半纤维素含量与 CSP 链高呈显著正相关（P<0.05）；木质素含量与 PME 活性和 CSP 链高呈显著负相关（P<0.05）。综上可知，两种库冷藏后货架期

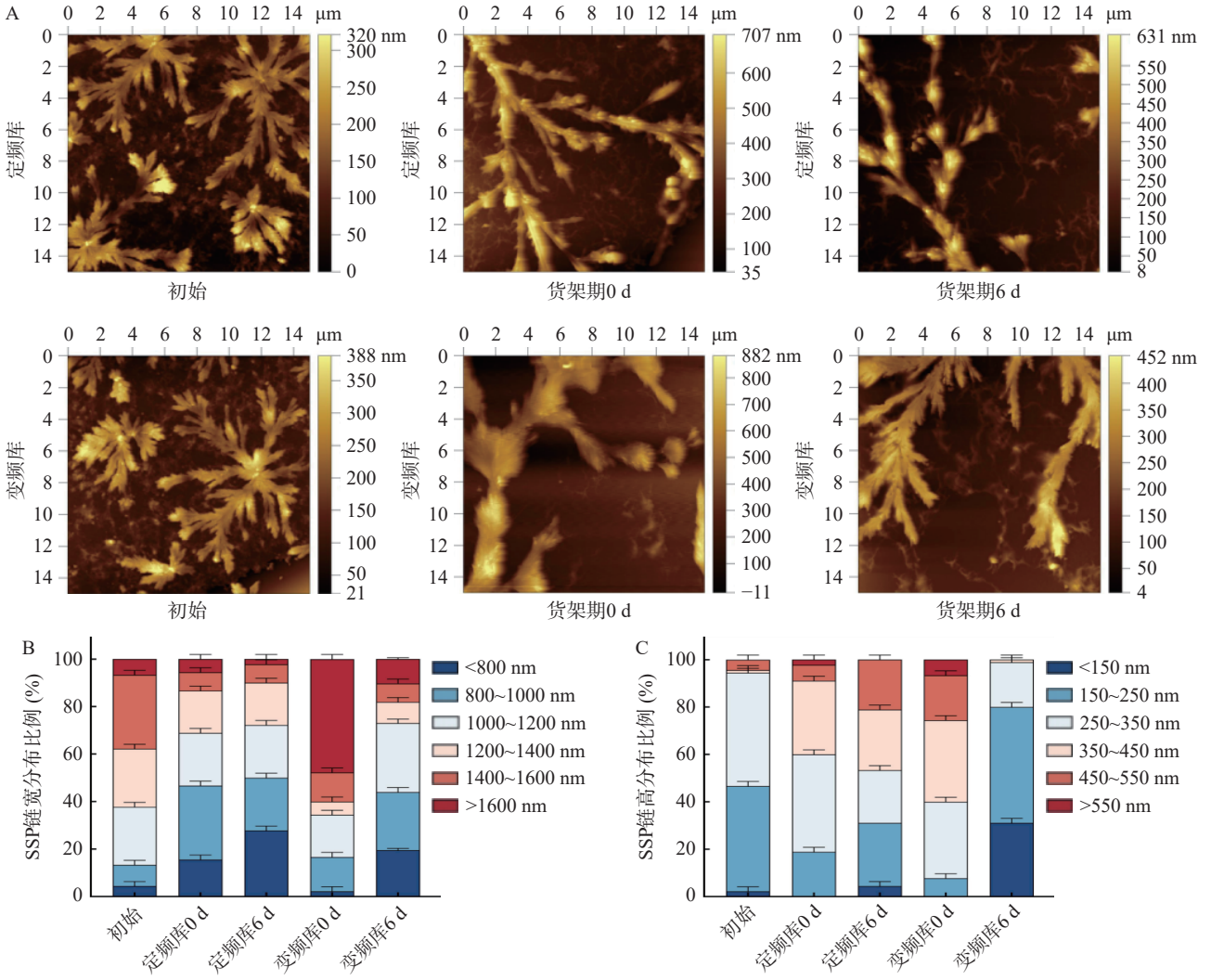


图 6　变频和定频库冷藏后货架期胡萝卜 SSP 的纳米结构

Fig.6　Nanostructure of carrot SSP during shelf life after refrigerated storage in frequency conversion and fixed frequency storage

注: A: AFM 图片; B: SSP 链宽分布; C: SSP 链高分布。

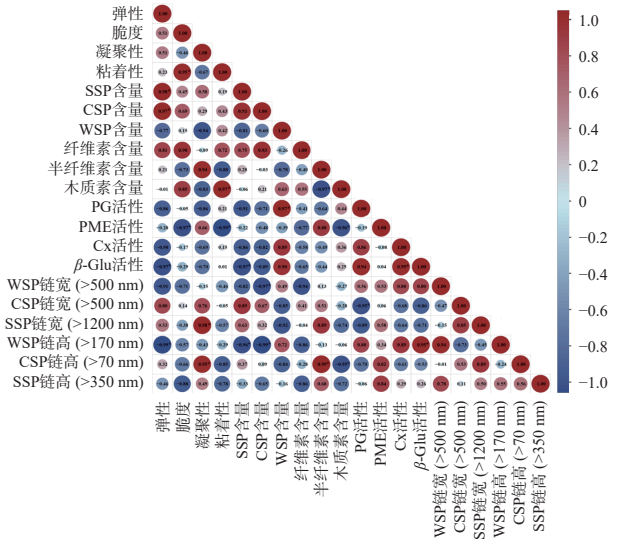


图 7　胡萝卜弹性、脆度、凝聚性、粘着性、细胞壁组分、降解酶活性与果胶纳米结构的相关性

Fig.7　Correlation between elasticity, crispness, cohesiveness, adhesiveness, cell wall components, degradation enzyme activity and pectin nanostructures in carrots

注: *表示显著相关性, $P<0.05$。

胡萝卜的弹性、脆度、粘着性和木质素含量的下降与细胞壁降解酶活性存在显著相关性($P<0.05$), 细胞壁降解酶通过降解货架期胡萝卜果胶从而影响果胶的含量和果胶的纳米结构。

3　讨论与结论

果蔬的质地品质是评价其市场价值的重要物理特征, 尤其是胡萝卜的脆度和弹性是影响消费者可接受度的关键质地属性。本研究发现变频库冷藏能够延缓货架期胡萝卜的弹性、脆度和凝聚性的下降速率, 这可能是由于在变频冷藏条件下, 胡萝卜组织细胞壁的分解受到抑制, 从而增强了细胞结构的机械性能, 该结果与 1-MCP 和 GA_3 处理能延缓芒果果实的质构变化[32] 和低温冷藏延缓货架期花生芽苗菜脆度下降[33] 的报道结果相似。果蔬的初级细胞壁和细胞间隙中富含果胶, 其中 SSP 和 CSP 是果胶的主要成分, 它们通过钙离子交联形成果胶酸钙网络结构, 对于增强细胞壁刚性和维持结构完整性至关重要[34]; 而 WSP 是果胶降解的产物, 其含量增加通常与细胞壁松解和质地衰老密切相关[35]。在本研究中观察到

经变频库冷藏胡萝卜后 SSP 含量随着货架期时间的延长而逐渐增加，CSP 含量在货架期前 6 d 时显著高于定频库，而 WSP 含量则显著低于定频库冷藏，由此可见变频库冷藏能够更好的维持货架期胡萝卜细胞壁的完整性和细胞间的紧密连接，从而延缓胡萝卜的质地衰老，这与 He 等[36] 研究中提出戊酸处理能够减缓李子中果胶 SSP 和 CSP 含量的下降，延缓 WSP 含量的增加的结果一致。纤维素和半纤维素是果蔬细胞壁的骨架物质，对细胞壁起到支撑的作用。与定频库相比，变频库冷藏后货架期胡萝卜具有较高的纤维素和半纤维素含量，这可能是因为变频库更精确的温度控制，减少了温度波动对细胞壁代谢和相关酶活性的影响，从而促进了纤维素和半纤维含量的增加，这与 He 等[36] 提出戊酸处理能够减缓李子中纤维素和半纤维素含量的下降的结果一致。

PG 和 PME 是参与果胶降解的关键酶，它们的活性降低可以减缓果胶的解聚，从而维持细胞壁结构的完整性；β-Gal 通过水解 SSP 侧链上的阿拉伯糖基和半乳糖残基，减少果胶网络的交联[37]。本研究发现变频库冷藏后整个货架期胡萝卜的 PME、Cx 和 β-Gal 活性均显著低于定频库，而 PG 活性在货架期前 6 d 时显著低于定频库冷藏，表明变频库冷藏能够显著抑制 PG、PME、Cx 和 β-Gal 的活性，进一步增强了胡萝卜果胶网络结构的稳定性，从而延缓质地的劣变，这与 Wang 等[37] 研究表明外源硅抑制番茄果实细胞壁中 PG、PME、Cx 和 β-Gal 的活性的结果一致。WSP 通过范德华力和氢键松散地结合到细胞壁上[38]。本研究利用 AFM 技术研究定频和变频压缩机冷藏后货架期胡萝卜的果胶纳米结构发现，随着货架期的延长，两种库冷藏后胡萝卜的 WSP 聚合物粒径尺寸均有所增加，这可能是由于 WSP 的溶解性增加所致。Imaizumi 等[12] 通过 AFM 评估发现低温焯水处理后胡萝卜中 WSP 产生类似现象。CSP 通过离子键与细胞壁结合。在整个货架期，经过两种库冷藏处理的胡萝卜 CSP 聚集体粒径逐渐减小，这可能是由于 CSP 的降解或解聚所致。值得注意的是，定频库冷藏胡萝卜 CSP 聚集体的粒径减小趋势更为明显，这进一步证实了变频库冷藏在维持胡萝卜细胞壁结构完整性方面的优势。此外，利用 AFM 定量分析发现两种库冷藏后货架期胡萝卜 CSP 均观察到 700 nm 以上的高链宽，这表明胡萝卜的 CSP 在细胞壁结构中保持了较高的完整性；而 90 nm 以上的链高仅在变频库冷藏后货架期胡萝卜中出现，这一现象可能与变频库冷藏条件能更有效的维持了胡萝卜 CSP 的结构完整性有关，这一发现与用 1% Ca 处理后在 5 ℃ 下冷藏处理能够减少 CSP 的降解的结果一致[39]。在本研究发现，随着货架期延长至第 6 d，两种库冷藏后胡萝卜 SSP 主链逐渐发生解聚，果胶链被缩短并显著降解，同时短链数量增加，并伴有裂解的现象，这表明 SSP 的结构受到了明显的破坏。这种现象在定频库冷藏的胡萝卜中更为显著。在初始时，货架期胡萝卜 SSP 在 1600 nm 以上高链宽出现的频率为 6.67%。变频库冷藏结束后，1600 nm 以上高链宽值显著增加，出现频率为 47.78%，是同期定频库冷藏胡萝卜同范围高链宽出现频率的 8.60 倍。这表明变频库冷藏有效延缓了 SSP 的降解，维持了其结构的完整性。这一结果与超声波协同钙浸渍处理抑制了草莓 SSP 以及壳聚糖涂膜处理能够抑制樱桃 SSP 果胶链的降解的结果一致，这些研究均表明通过变频库冷藏胡萝卜均可有效维持果胶的结构完整性[40−41]。

压缩机变频冷藏能维持货架期胡萝卜较好的品质，主要体现在能减缓胡萝卜弹性和脆度下降，保持较高的 SSP、CSP、纤维素和半纤维素含量，延缓 WSP 含量的增加。这主要归因于变频库冷藏抑制了货架期胡萝卜 PG、PME、Cx 和 β-Gal 等细胞壁多糖降解酶活性，从而延缓了 WSP、CSP 和 SSP 的降解，进一步维持了胡萝卜良好的质地品质。综上所述，压缩机变频冷藏是一种有效的胡萝卜低温冷藏保鲜技术，其通过调控细胞壁降解酶活性和维持细胞壁结构的完整性，有效延缓了胡萝卜质地品质的劣变。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 齐晓雨, 孔小平, 周红伟, 等. 基于广靶代谢组学分析胡萝卜萜类代谢产物差异[J]. 中国农业科学, 2024, 57(16): 3250−3263. [QI Xiaoyu, KONG Xiaoping, ZHOU Hongwei, et al. Crucial factors impacting carrot flavor analysis based on broad target metabolomics[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(16): 3250−3263.]

[2] SUN Miao, YANG Tao, QIAO Xuanhuan, et al. Nitric oxide regulates the lignification and carotenoid biosynthesis of postharvest carrot (*Daucus carota* L.)[J]. Postharvest Biology and Technology, 2024, 207: 112593.

[3] 董文丽, 巩雪, 侯理达, 等. 壳聚糖/柠檬酸复合涂膜对胡萝卜的保鲜效果[J]. 包装工程, 2021, 42(9): 72−78. [DONG Wenli, GONG Xue, HOU Lida, et al. Effects of chitosan and citric acid composite film on preservation of carrot[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(9): 72−78.]

[4] 汤尧, 李朝哲, 刘春雨, 等. 1-MCP 协同活性炭处理抑制鲜切胡萝卜木质化形成研究[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2024, 43(4): 44−52. [TANG Yao, LI Chaozhe, LIU Chunyu, et al. Study of inhibition of lignification formation of fresh-cut carrots by 1-MCP combined with activated carbon treatment[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2024, 43(4): 44−52.]

[5] 王清, 杨娜, 郭李维, 等. 1-甲基环丙烯处理对胡萝卜贮藏期间品质的影响[J]. 食品科学, 2011, 32(S1): 6−10. [WANG Qing, YANG Na, GUO Liwei, et al. Effects of 1-methylcylcopropene on quality of carrot during storage[J]. Food Science, 2011, 32(S1): 6−10.]

[6] 张睿智, 刘倩媛, 刘冰, 等. 农产品(果蔬)产地仓储保鲜冷链设施建设模式研究[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(12): 127−132.

［ZHANG Ruizhi, LIU Qianyuan, LIU Bing, et al. Research on the construction mode of storage and preservation of cold-chain facilities for agricultural products (fruits and vegetables)[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(12): 127−132.］
［7］ 赵鲁迺克, 马孝林, 周泽江, 等. 压缩机变频冷藏对胡萝卜货架期品质和活性氧积累的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(23): 7798−7806. ［ZHAO Lunaike, MA Xiaolin, ZHOU Zejiang, et al. Effects of refrigeration of variable frequency compressor on quality of shelf life and accumulation of reactive oxygen species of carrots[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(23): 7798−7806.］
［8］ CHONG Jiaxin, LAI Shaojuan, YANG Hongshun. Chitosan combined with calcium chloride impacts fresh-cut honeydew melon by stabilising nanostructures of sodium-carbonate-soluble pectin[J]. Food Control, 2015, 53: 195−205.
［9］ WANG Hongjuan, CHEN Fusheng, YANG Hongshun, et al. Effects of ripening stage and cultivar on physicochemical properties and pectin nanostructures of jujubes[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 89(4): 1180−1188.
［10］ KOZIOŁ A, CYBULSKA J, PIECZYWEK P M, et al. Changes of pectin nanostructure and cell wall stiffness induced *in vitro* by pectinase[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 161: 197−207.
［11］ ZHANG Lifen, WANG Pei, CHEN Fusheng, et al. Effects of calcium and pectin methylesterase on quality attributes and pectin morphology of jujube fruit under vacuum impregnation during storage[J]. Food Chemistry, 2019, 289: 40−48.
［12］ IMAIZUMI T, SZYMAŃSKA-CHARGOT M, PIECZYWEK P M, et al. Evaluation of pectin nanostructure by atomic force microscopy in blanched carrot[J]. LWT, 2017, 84: 658−667.
［13］ 王军节, 毕阳, 范存斐, 等. 采后水杨酸处理对早酥梨果实色泽和质地的影响[J]. 现代食品科技, 2010, 26(10): 1047−1051. ［WANG Junjie, BI Yang, FAN Cunfei, et al. Effect of postharvest salicylic acid treatment on color and texture of pear fruit (*Pyrus bretchneideri* cv. Zaosu)[J]. Modern Food Science and Technology, 2010, 26(10): 1047−1051.］
［14］ LIU Jun, ZHAO Yuhui, XU Hao, et al. Fruit softening correlates with enzymatic activities and compositional changes in fruit cell wall during growing in *Lycium barbarum* L[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(6): 3044−3054.
［15］ DENG Lizhen, PAN Zhongli, ZHANG Qian, et al. Effects of ripening stage on physicochemical properties, drying kinetics, pectin polysaccharides contents and nanostructure of apricots[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 222: 114980.
［16］ LIU Binghua, WANG Kaifang, SHU Xiuge, et al. Changes in fruit firmness, quality traits and cell wall constituents of two highbush blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.) during postharvest cold storage[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 246: 557−562.
［17］ GE Yonghong, ZHANG Junhu, LI Canying, et al. Trisodium phosphate delays softening of jujube fruit by inhibiting cell wall-degrading enzyme activities during ambient storage[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 262: 109059.
［18］ WANG Hanbo, CHENG Xin, WU Caie, et al. Retardation of postharvest softening of blueberry fruit by methyl jasmonate is correlated with altered cell wall modification and energy metabolism [J]. Scientia Horticulturae, 2021, 276: 109752.
［19］ HAO Yuqi, CHEN Fahe, WU Guangbin, et al. Impact of postharvest nitric oxide treatment on lignin biosynthesis-related genes in wax apple (*Syzygium samarangense*) fruit[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(45): 8483−8490.
［20］ 宁密密, 张群, 舒楠, 等. 不同形式 SO_2 保鲜剂处理对‘阳光玫瑰’葡萄贮藏期间果实硬度和细胞壁代谢的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(19): 169−177. ［NING Mimi, ZHANG Qun, SHU Nan, et al. Effects of different forms of SO_2 preservative on fruit firmness and cell wall metabolism of‘Shine Muscat’grape during storage[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(19): 169−177.］
［21］ 潘越, 李婷婷, 吴彩娥. 低温等离子体处理对小白杏细胞壁代谢及软化特性的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(8): 168−175. ［PAN Yue, LI Tingting, WU Caie. Effect of low-temperature plasma on cell wall metabolism and softening characteristics of xiaobai apricot[J]. Food Science, 2024, 45(8): 168−175.］
［22］ 姜惠萍, 刘万顺, 宋福来, 等. 改良考马斯亮蓝试剂法测定壳聚糖及其衍生物中蛋白质含量[J]. 现代食品, 2022, 28(17): 173−178. ［JIANG Huiping, LIU Wanshun, SONG Fulai, et al. Determination of protein content in chitosan and its derivatives by modified coomassie brilliant blue reagent method[J]. Modern Food, 2022, 28(17): 173−178.］
［23］ 郑碧霞, 黄进, 李慧, 等. 不同 1-MCP 浓度对桃果实采后质地品质的影响[J]. 天津农业科学, 2024, 30(11): 86−90. ［ZHENG Bixia, HUANG Jin, LI Hui, et al. Effects of different 1-MCP concentrations on postharvest texture quality of peach[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2024, 30(11): 86−90.］
［24］ 宾宇淇, 谢佳妮, 王铭宇, 等. 精准控温对鲜切胡萝卜贮藏品质和抗氧化性的影响[J]. 包装工程, 2024, 45(5): 46−55. ［BIN Yuqi, XIE Jiani, WANG Mingyu, et al. Effect of precise temperature control on storage quality and antioxidant activity of fresh-cut carrots[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(5): 46−55.］
［25］ 陈青, 励建荣. 杨梅果实在储存过程中质地变化规律的研究[J]. 中国食品学报, 2009, 9(1): 66−71. ［CHEN Qing, LI Jianrong. Research on texture change regularity of the Chinese bayberry during storage[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2009, 9(1): 66−71.］
［26］ 鲁梦情, 王云香, 王宝刚, 等. 低压静电场对草莓果实质地和细胞壁代谢的影响[J]. 食品科技, 2025, 50(4): 74−82. ［LU Mengqing, WANG Yunxiang, WANG Baogang, et al. Effect of low-voltage electrostatic field treatment on the texture and cell wall metabolism of strawberry fruit[J]. Food Science and Technology, 2025, 50(4): 74−82.］
［27］ 代琳, 张伦德, 周志扬, 等. 外源赤霉素、氨基酸钙处理对‘明日见’柑橘裂果的影响[J]. 中国农学通报, 2024, 40(7): 49−55. ［DAI Lin, ZHANG Lunde, ZHOU Zhiyang, et al. Effects of exogenous gibberellin and calcium amino acid on fruit cracking of ‘asumi’ *Citrus*[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40(7): 49−55.］
［28］ DE LOS SANTOS M B, JACOBI S S, DELA CRUZ ARCAS MIÑARRO M, et al. Kinetic characterization, thermal and pH inactivation study of peroxidase and pectin methylesterase from tomato (*Solanum betaceum*)[J]. Food Science and Technology, 2020, 40(suppl 1): 273−279.
［29］ 张哲, 张志强, 张治权, 等. 贮藏温度对葡萄果胶含量及相关酶活性的影响[J]. 制冷学报, 2019, 40(3): 140−150. ［ZHANG Zhe, ZHANG Zhiqiang, ZHANG Zhiquan, et al. Effect of storage temperature on grape pectin and related enzymes activities[J]. Journal of Refrigeration, 2019, 40(3): 140−150.］
［30］ CHEN Y H, HUNG Y C, CHEN M Y, et al. Effects of acidic electrolyzed oxidizing water on retarding cell wall degradation and delaying softening of blueberries during postharvest storage[J]. LWT, 2017, 84: 650−657.

［31］ 毛惠娟, 王月, 吕云皓, 等. 乙烯利和 1-MCP 处理对库尔勒香梨表皮蜡质的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(6): 216−230. ［MAO Huijuan, WANG Yue, LÜ Yunhao, et al. Effects of ethephon and 1-MCP treatments on the cuticular wax of Korla pear[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(6): 216−230.］

［32］ 马冀恒, 李雯, 陈明敏, 等. 不同处理对采后芒果质构的影响[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(12): 10−15. ［MA Jiheng, LI Wen, CHEN Mingmin, et al. Effects of different treatments on texture of postharvest mango fruits[J]. Storage and Process, 2021, 21(12): 10−15.］

［33］ 尚佳硕, 周倩, 赵泽军, 等. 花生芽苗菜贮藏品质变化及货架期预测模型[J]. 包装工程, 2024, 45(23): 197−206. ［SHANG Jiashuo, ZHOU Qian, ZHAO Zejun, et al. Storage quality change and shelf life prediction model of peanut sprouts[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(23): 197−206.］

［34］ BRUMMELL D A, HARPSTER M H. Cell wall metabolism in fruit softening and quality and its manipulation in transgenic plants[J]. Plant Molecular Biology, 2001, 47(1): 311−339.

［35］ CHEN Cong, QI Sumin, ZHANG Susu, et al. Study on the quality change and regulation mechanism of ‘shannongsu’ pear under low-temperature storage[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2025, 26(7): 2900.

［36］ HE Mingyang, WU Yanfei, WANG Yong, et al. Valeric acid suppresses cell wall polysaccharides disassembly to maintain fruit firmness of harvested ‘Waizuili’ plum (*Prunus salicina* Lindl)[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 291: 110608.

［37］ WANG Jiaying, ZHU Wen, JIN Li, et al. Effect of exogenous silicon treatments on cell wall metabolism and textural properties of tomato fruits[J]. Scientia Horticulturae, 2024, 336: 113407.

［38］ LI Xueou, HUANG Huofeng, ZHANG Lida, et al. Effect of postharvest storage temperature and duration on tomato fruit quality[J]. Foods, 2025, 14(6): 1002.

［39］ LIU Hui, CHEN Fusheng, LAI Shaojuan, et al. Effects of calcium treatment and low temperature storage on cell wall polysaccharide nanostructures and quality of postharvest apricot (*Prunus armeniaca*)[J]. Food Chemistry, 2017, 225: 87−97.

［40］ 潘润森, 张丽芬, 陈复生. 超声波协同钙浸渍处理对草莓果胶结构特性的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2019, 40(2): 9−14. ［PAN Runsen, ZHANG Lifen, CHEN Fusheng. Effect of ultrasound combined with calcium impregnation treatment on structural properties of strawberry pectin[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 40(2): 9−14.］

［41］ XIN Ying, CHEN Fusheng, LAI Shaojuan, et al. Influence of chitosan-based coatings on the physicochemical properties and pectin nanostructure of Chinese cherry[J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 133: 64−71.