

# 真空浸渍钙对拉宾斯大樱桃果实浸渍特性及细胞壁多糖影响机制研究

毛佳琦<sup>1</sup>, 陈复生<sup>1</sup>, 张丽芬<sup>1</sup>, 赖少娟<sup>2</sup>

(1. 河南工业大学粮油食品学院, 河南郑州 450001) (2. 河南工业大学生物工程学院, 河南郑州 450001)

**摘要:** 本文研究了钙含量和浸渍时间对拉宾斯大樱桃果实真空浸渍过程中流体动力学机制和变形弛豫现象(HDM-DPR)模型中体积形变系数、浸渍体积分数和有效孔隙度等真空浸渍(VI)特性的影响, 并验证了模型的有效性, 同时研究了真空浸渍钙处理对拉宾斯大樱桃果实细胞壁多糖含量及其纳米结构的影响。结果显示: HDM-DPR 在钙浓度 $\leq 3\%$ 时对真空浸渍处理后拉宾斯大樱桃果实中钙含量具有较好的预测能力; 真空浸渍钙处理对拉宾斯大樱桃果实细胞壁多糖含量没有显著影响( $p > 0.05$ )。分析原子力显微镜(AFM)扫描结果发现拉宾斯大樱桃果实果胶分子的链宽值集中分布在 40~120 nm 范围内; 钙处理组链宽值与对照组相比具有显著性差异( $p < 0.05$ ), 钙处理组的较大链宽值(120~160 nm)出现频率较高; 通过 AFM 定性分析发现, 钙处理组果胶分子存在较多聚集体结构, 且发现了类似“花环”的聚集体, 说明  $\text{Ca}^{2+}$  能够增强果胶分子间的交联。

**关键词:** 拉宾斯大樱桃; 真空浸渍; HDM-DPR; AFM

文章编号: 1673-9078(2017)1-112-118

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.1.018

## Effect of Vacuum Impregnation with Calcium on Impregnation Properties and Cell Wall Polysaccharides of Lapins Cherry

MAO Jia-qi<sup>1</sup>, CHEN Fu-sheng<sup>1</sup>, ZHANG Li-fen<sup>1</sup>, LAI Shao-juan<sup>2</sup>

(1. College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

(2. College of Biological Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The effects of calcium content and impregnation time on the coupling hydrodynamic mechanism and the deformation-relaxation phenomena (HDM-DPR) model of Lapins cherry during vacuum impregnation (VI) were investigated. The properties of VI of the HDM-DPR model examined included the volumetric deformation coefficient, impregnation volume fraction, and effective porosity. The validity of the model was verified, and the effect of VI with calcium treatment on the content and structure of cell wall polysaccharides was investigated. The results suggested that the HDM-DPR model could predict the calcium content of post-treatment Lapins cherries when the calcium concentration in the solution was  $\leq 3\%$ . Additionally, the process of VI with calcium treatment had no significant effect on the content of cell wall polysaccharides ( $p > 0.05$ ). Atomic force microscopy (AFM) showed that the chain widths of the chelate-soluble pectins (CSP) of the cherry were between 40 and 120 nm. VI with calcium treatment significantly affected the chain widths of these pectins ( $p < 0.05$ ); the pectins in the calcium-treated group had more chains with higher width (120~160 nm) than those in the control group. Qualitative analysis of the AFM images showed that there were more polymers and “wreath” structures in the calcium-treated group than in the control group. Thus, calcium ions could enhance crosslinking between pectin molecules.

**Key words:** Lapins cherry; vacuum impregnation; hydrodynamic mechanism and deformation-relaxation phenomena; atomic force microscopy

收稿日期: 2016-01-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(31371851, 31471605); 高层次人才基金(31401523); 校科技创新人才基金项目(2014CXRC01); 河南省成果转化资金项目(132201610014); 高层次人才基金项目(31401523)

作者简介: 毛佳琦(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品资源开发与利用

通讯作者: 陈复生(1963-), 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向: 食品资源开发与利用; 赖少娟(1979-), 女, 博士后, 副教授, 硕士研究生导师, 研究方向: 食品与生物大分子结构与功能

拉宾斯大樱桃 (*Cerasus avium*(L.) Moench. 'Lapins') 色泽鲜艳, 酸甜可口, 营养丰富, 其维生素、蛋白质、糖、铁、磷、钙和等含量均比其它樱桃高<sup>[1]</sup>, 但果实不耐储运, 供应期短, 制约了经济效益, 因而对其贮藏保鲜技术的研究显得尤为重要<sup>[2]</sup>。低温冷藏虽然能有效维持果实合适的质地特性<sup>[3]</sup>, 但在冷藏过程中采后水果的呼吸及果实中酶的作用, 仍能导致果实多糖大分子降解进而硬度等质地特性降低。此外, 涂膜等操作有利于延缓果实质地的降低过程, 但因涂膜材料难以渗入果实内部所以延缓果实质地下降的效果有限<sup>[4]</sup>。因此, 开发新的控制采后果蔬质地变化也是近年来研究者关注的热点。

真空浸渍(VI)技术是与传统浸渍过程结合的一种新技术, 真空浸渍过程主要利用压力的改变引起的水动力学机制使得食品孔隙内部气体和液体与外部溶液进行交换<sup>[5]</sup>。将果实浸渍于含有某种组分的溶液中, 溶液上方通过真空泵形成部分真空, 溶液中的离子或特定溶质分子由于压力差的作用可以渗透入果肉中, 可以利用此技术强化维生素<sup>[6]</sup>, 风味物质如糖类及保藏剂如氯化钙或乳酸钙和护色剂<sup>[3]</sup>等。采后钙浸渍处理能有效延长果实贮藏期, 延缓果实软化变质, 是目前普遍采用的贮藏保鲜前处理手段<sup>[7]</sup>。目前采用真空浸渍进行采后保鲜的水果主要有: 苹果、草莓、芒果、桃和梨等<sup>[8,9]</sup>。而对拉宾斯大樱桃采后真空浸渍钙处理关于 HDM-DPR 模型中相关浸渍特性的变化及对果实细胞壁多糖含量及微观结构的影响未见报道。

本文将真空浸渍处理技术应用于拉宾斯大樱桃的采后保鲜处理, 利用 HDM-DPR 模型, 研究采用不同类型和浓度浸渍溶液及不同浸渍处理时间对拉宾斯大樱桃果实真空浸渍特性和细胞壁多糖含量及微观结构的影响, 同时验证模型的有效性, 以期对真空浸渍技术应用于拉宾斯大樱桃采后贮藏保鲜提供理论支持和技术指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

新鲜拉宾斯大樱桃果实: 于 2015 年 5 月 25 日采自郑州市樱桃沟, 采后立即运回实验室。挑选果实大小均一, 成熟度(约 9 成熟)基本一致(可溶性固形物含量: 11~12%; 成熟度指数: 106.19±2.30), 无病虫害, 无机械损伤的樱桃果实作为试验材料。

蔗糖 (AR): 天津市科密欧化学试剂有限公司; 乳酸钙(食品级): 郑州市瑞普生物工程有限公司; 无水乙醇 (AR): 天津市天力化学试剂有限公司; 咪唑

(AR): 国药集团化学试剂有限公司; 1,2-环己二胺四乙酸 (CDTA) (AR): 国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 仪器与设备

DZF 型真空干燥箱: 北京市永光明医疗仪器有限公司; iCAP 6000 电感耦合等离子体发射光谱仪: 赛默飞科技有限公司; 冷冻干燥机: 北京四环科学仪器厂有限公司; 722s 可见分光光度计: 上海仪电分析仪器有限公司; ZLAFM-II 型原子力显微镜: 上海卓纳微纳设备有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 新鲜拉宾斯大樱桃果实理化指标的测定

水分含量  $X_w(\%)$  的测定采用减压干燥法; 可滴定酸度的测定采用酸碱滴定法; 手持糖度计测定可溶性固形物含量; 成熟度指数为可溶性固形物含量与酸度的比值; 表观密度  $\rho_a(\text{kg}/\text{m}^3)$  采用比重瓶法测定, 样本真实固液密度  $\rho_t(\text{kg}/\text{m}^3)$  可由样本水分含量  $X_w$  代入式(1)计算得出, 样本孔隙度  $\varepsilon$  与样本密度有关<sup>[10,11]</sup>, 如式(2):

$$\rho_t = 1590 \times (1 + 0.590 \times X_w)^{-1} \quad (1)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_t} \quad (2)$$

#### 1.3.2 样品制备

挑选大小均一(单果重约 11 g), 果蒂完整的樱桃果实分为 15 组, 每份 200 g (每组三份) 迅速置于一定压力 and 对应温度的真空浸渍装置内, 复压一段时间后冲洗, 拭干。真空浸渍条件: 温度 25 °C, 真空度 50 mbar, 固液比为 1:3, 浸渍时间为:  $t_1=t_2=10 \text{ min}$ 、 $t_1=t_2=15 \text{ min}$ 、 $t_1=t_2=20 \text{ min}$ 、 $t_1=t_2=25 \text{ min}$ 、 $t_1=t_2=30 \text{ min}$  和  $t_1=t_2=35 \text{ min}$  ( $t_1$  为真空时间,  $t_2$  为复压时间), 蔗糖浸渍液浓度为 11 °Brix, 氯化钙和乳酸钙添加量分别为 1%、2%、3% 和 4%。

#### 1.3.3 样本的浸渍特性

根据 Fito<sup>[12,13]</sup>等人提出的流体动力学机制和变形松弛现象(HDM-DRP)数学模型(式 3~6)计算出水果的相关浸渍参数: 浸渍体积分数, 有效孔隙度, 体积形变, 从而分析水果在不同条件下真空浸渍处理过程中的浸渍特性, 并预测产品中钙含量(式(7)~(8))<sup>[14,15]</sup>。

$$\gamma = \frac{V_t - V_0}{V_0} \times 100\% \quad (3)$$

$$X = \frac{M_f - M_0}{\rho^{15} V_0} \quad (4)$$

$$\varepsilon_c = \frac{(X - \gamma)r + \gamma_1}{r - 1} \quad (5)$$

$$r = \frac{P_2 + P_c}{P_1} \quad (6)$$

$$x_{HDM} = X \frac{\rho^{IS}}{\rho^0} \quad (7)$$

$$x_i^I = \frac{x_i^0 + x_{HDM} y_i}{1 + x_{HDM}} \quad (8)$$

式中,  $\gamma(\text{m}^3/\text{m}^3)$ 为体积形变分数;  $\gamma_1(\text{m}^3/\text{m}^3)$ 为真空阶段未相对体积形变,可忽略;  $V_0(\text{cm}^3)$ 为初始样本体积;  $V_1(\text{cm}^3)$ 为浸渍后样本体积;  $X(\text{m}^3 \text{浸渍溶液}/\text{m}^3 \text{原始样本})$ 为外部溶液浸渍样本体积分数;  $M_0$ 为初始样本质量;  $M_f$ 为浸渍后样本质量;  $r$ 为压缩比;  $P_2(\text{mbar})$ 为大气压;  $P_1(\text{mbar})$ 为真空度;  $P_c(\text{mbar})$ 为毛细压力,可忽略;  $\rho^S$ 为浸渍液密度;  $\epsilon_c$ 为样本有效孔隙度;  $x_{HDM}$ 为浸渍液在产品中质量比;  $x_i^I$ 为产品中Ca含量;  $x_i^0$ 为处理前样本钙含量。

### 1.3.4 钙含量的测定

样品经消化后用电感耦合等离子体发射光谱仪于 315.89 nm 处,分别测定未处理样本和处理后样本中钙含量,并与式(8)中真空浸渍钙处理后的样本中钙含量预测值进行对比。

### 1.3.5 细胞壁多糖的提取及含量的测定

细胞壁多糖的提取参照 Deng 等<sup>[16]</sup>的方法并稍加修改,取 15 g 果肉在冰冻的研钵中快速捣碎,加入到 200 mL、80%的乙醇溶液中煮沸 20 min。冷却至室温,离心 10 min,下层残渣再用乙醇煮沸,冷却离心,重复一次。将最后的残渣加入到 50 mL DMSO(二甲亚砜)与水(9:1)混和液中,4 °C 保温过夜。然后用水冲洗并转移至 200 mL 氯仿-乙醇(2:1)混和液中,10 min 后过滤,用 200 mL 丙酮冲洗至白色。果胶含量的测定采用咔唑比色法。

### 1.3.6 果胶纳米结构测定

将提取的果胶溶液稀释至约 10  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ,在 70 °C 水浴中加热 5 min 后高速震荡 30 s,取约 10  $\mu\text{L}$ 滴在新剥的云母片上,室温下自然干燥,将附有样品的云母片用双面胶固定在直径为 15 mm 的圆形铁片上,将此铁片固定在原子力显微镜样品平台上,利用 ZLAFM-II 型原子力显微镜中的轻敲模式进行测定,探针为 Si3N4 型,扫描频率为 0.5 Hz~2 Hz。每个样品至少扫描得到 20 张图像。

### 1.3.7 数据处理

本试验采用 Origin 8.5 和 SPSS 软件计算、分析和绘图,所有指标的测定均重复三次,计算平均值和标准偏差;采用 ANOVA 进行邓肯式多重差异分析,比较差异显著性 ( $p < 0.05$  表示差异显著,  $p < 0.01$  表示差

异极显著)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 拉宾斯大樱桃果实的理化特性

拉宾斯大樱桃果实的理化性质如表 1 所示。较小的标准偏差反映了样本的均一性,样本成熟度指数与良好的感官品质和质构有关,本试验中拉宾斯大樱桃果实的成熟度指数为 106.19;水果孔隙度反映果实组织内孔隙尺寸大小,说明了样本组织中浸渍溶液能够渗透的最大空间,拉宾斯大樱桃果实的孔隙度约为 1.45%。

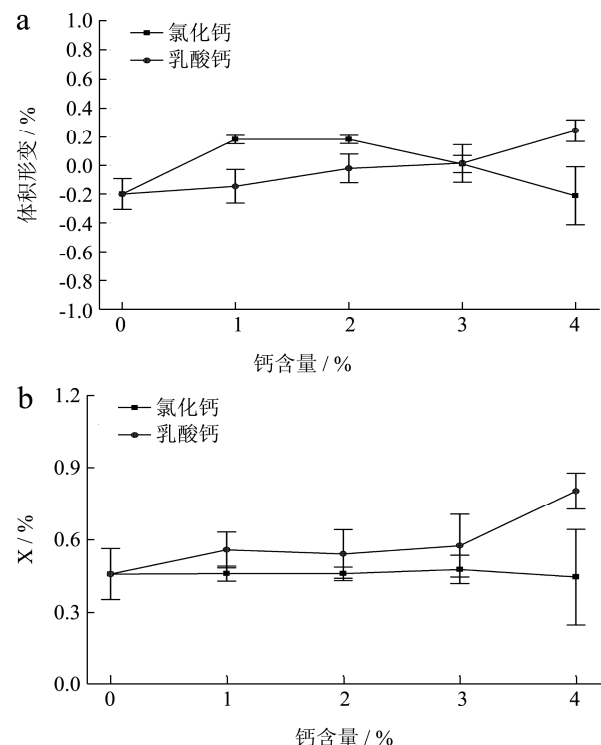
表 1 拉宾斯大樱桃果实的物理化学性质

Table 1 Physicochemical characteristics of Lapins cherries

测定指标	测定结果
水分含量/%	82.29±1.54
可滴定酸度TA/%	0.11±0.07
可溶性固形物含量SSC/%	11.58±0.25
表观密度 $\rho_a(\text{kg}/\text{m}^3)$	1054.43±0.00
固液密度 $\rho_l(\text{kg}/\text{m}^3)$	1070.34±6.55
孔隙度 $\epsilon$	1.45±0.69
成熟度指数	106.19±2.30

### 2.2 拉宾斯大樱桃果实的真空浸渍特性变化

#### 规律研究



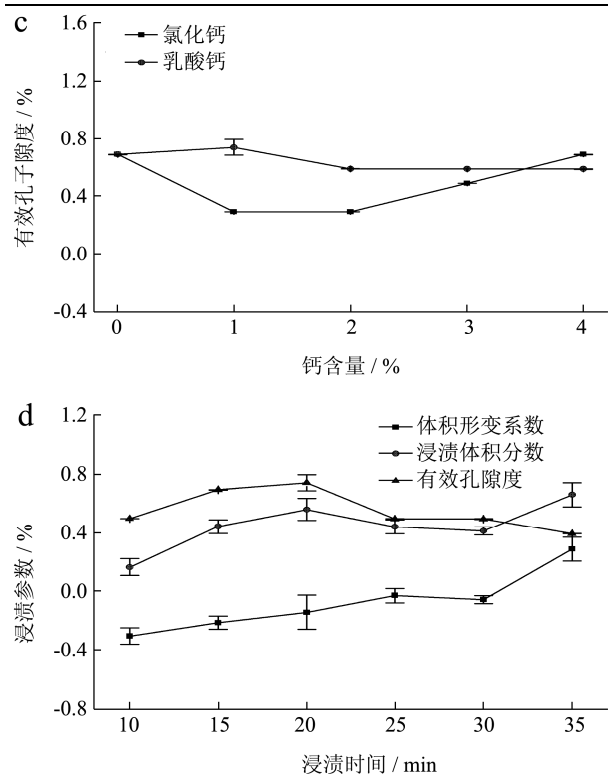


图1 不同真空浸渍处理条件对拉宾斯大樱桃果实浸渍特性的影响

Fig.1 Effect of different VI treatment conditions on VI properties of Lapins cherry

不同真空处理条件对拉宾斯大樱桃果实浸渍特性的影响规律如图1所示。采用体积形变系数 $\gamma$ 将样本真空浸渍后的体积变化进行量化,从而反映了样本组织结构在真空浸渍过程中的变化规律。由图1a可知对照组、4%氯化钙处理组、1%和2%乳酸钙处理组的 $\gamma$ 值均为负值,分别为:-0.20%、-0.21%、-0.15%和-0.02%;真空浸渍钙处理后拉宾斯大樱桃果实的 $\gamma$ 值变化范围为:-0.211~0.243%。4%氯化钙处理组与对照组的 $\gamma$ 值均显著小于其他浓度氯化钙处理组( $p<0.05$ );4%乳酸钙处理组的体积形变系数显著大于其他浓度乳酸钙处理组( $p<0.05$ );1%乳酸钙处理组和1%氯化钙处理组的 $\gamma$ 值具有极显著性差异( $p<0.01$ ),2%乳酸钙处理组与2%氯化钙处理组及4%乳酸钙处理组与4%氯化钙处理组的 $\gamma$ 值均具有显著性差异( $p<0.05$ )。体积形变系数为负值说明在真空浸渍过程中样本孔隙内气体膨胀逸出时伴随有组织内溶液的溢出,拉宾斯大樱桃果实组织产生不可逆形变,不能完全恢复至真空浸渍前的组织结构状态。

最终外部溶液浸渍样本的体积分数(X)反映了试验操作条件下的浸渍水平。真空浸渍氯化钙和乳酸钙处理对比发现(如图1b所示),在本研究所采用的操作条件下,1%和4%乳酸钙处理组的浸渍水平分别显

著高于1%和4%氯化钙处理组( $p<0.05$ ),在添加量为4%时达到最大浸渍水平(0.80%),而4%氯化钙浸渍组浸渍体积分数 $0.45%<0.46%$ (CK组);不同浓度氯化钙处理后样本的X值无显著性差异( $p>0.05$ );4%乳酸钙处理组的浸渍水平值显著高于其他浓度乳酸钙处理组 and 对照组( $p<0.05$ )。

样本有效孔隙度与流体动力学机制有关,真空浸渍过程中,组织内气体膨胀和压缩影响外部溶液进入组织毛细孔。如图1c所示,4%氯化钙处理组和对照组的 $\epsilon_e$ 值显著大于1%、2%和3%氯化钙处理组( $p<0.05$ );1%乳酸钙处理组和对照组的 $\epsilon_e$ 值显著高于2%、3%和4%乳酸钙处理组( $p<0.05$ );1%和2%乳酸钙处理组的 $\epsilon_e$ 值显著大于1%和2%氯化钙处理组( $p<0.05$ )。有效孔隙度 $\epsilon_e$ 均小于总孔隙度 $\epsilon(1.45)$ ,1%和2%氯化钙浸渍组 $\epsilon_e$ 值最小,均为0.29。可能是由于在本研究所采用的操作条件下,樱桃果实组织中保留有部分孔隙未被外部等渗溶液占据,即真空浸渍过程中外部溶液渗入组织内的体积分数小于样本组织中气体体积分数。

图1d中,在真空浸渍温度为25℃,浸渍溶液为含有1%乳酸钙的等渗蔗糖溶液,真空度为50 mbar的条件下,浸渍体积分数和体积形变系数呈上升趋势,在35 min处体积形变系数和浸渍体积分数均达到最大,分别为0.29%和0.66%;有效孔隙度呈下降趋势,猜想这可能是由于随浸渍时间的增长能够被HDM所利用的孔隙量变少,而孔隙利用率增大,且浸渍水平与浸渍时间有关。

### 2.3 模型有效性验证

表2 拉宾斯大樱桃果实产品中钙含量的试验值与预测值

Table 2 Experimental values and predicted values of calcium in the impregnated product

浸渍液钙浓度 / %	试验值 / ( $\times 10^{-2}$ mg/g)	计算值 / ( $\times 10^{-2}$ mg/g)	相对误差 / %
1	23.87±0.94	24.80±0.32	3.76
2	27.83±1.85	30.10±2.01	7.53
3	34.72±1.11	36.60±3.89	5.15
4	37.05±2.69	51.50±2.95	28.06

测定添加不同浓度乳酸钙真空浸渍处理后拉宾斯大樱桃果实(含果皮)中钙含量(重复测定三次),与式(8)中钙含量预测值进行对比:( $x_i^0=19.21 \times 10^{-2}$  mg/g),由表2可知,浸渍液中钙浓度 $\leq 3\%$ 时,试验值与计算值较为吻合,相对误差 $<10\%$ ;当浸渍液中钙浓度 $>3\%$ 时,试验值与计算值相差较大,这可能是由于拉宾斯大樱桃果实或果皮中的钙含量趋近于饱和状态。因此,

式(8)对较低浓度钙真空浸渍处理的拉宾斯大樱桃果实中钙含量有较好的预测能力, 进而说明式(3)~(5)在钙浓度 $\leq 3\%$ 时能够反映样本的浸渍特性。

### 2.4 真空浸渍处理过程对拉宾斯大樱桃果实细胞壁多糖含量的影响规律研究

樱桃果实质地好坏与果实细胞壁的结构变化和细胞壁多糖(果胶、纤维素和半纤维素)的组成、含量及空间结构的变化密切相关, 表2中的数据显示了真空浸渍钙处理对拉宾斯大樱桃果实细胞壁多糖含量的

影响规律, CK组WSP、CSP、SSP、HC和CE含量分别为 $(39.97、68.08、141.65、16.01和460.18) \times 10^{-2} \text{ mg/g}$ , 氯化钙和乳酸钙处理组WSP、CSP、SSP、HC和CE含量分别为: $(37.51\sim 40.41) \times 10^{-2}$ 、 $(68.22\sim 70.39) \times 10^{-2}$ 、 $(137.74\sim 140.78) \times 10^{-2}$ 、 $(16.76\sim 18.06) \times 10^{-2}$ 和 $(467.77\sim 482.26) \times 10^{-2} \text{ mg/g}$ 。采用SPSS进行显著性分析发现不同浓度乳酸钙和氯化钙真空浸渍处理过程中拉宾斯大樱桃果实细胞壁中果胶、纤维素和半纤维素含量无显著性变化( $p > 0.05$ ), 因而真空浸渍钙处理过程对拉宾斯大樱桃果实细胞壁多糖含量无显著性影响。

表3 真空浸渍钙对拉宾斯大樱桃果实细胞壁多糖含量的影响

Table 3 Effect of VI with calcium treatment on the content of cell wall polysaccharides of Lapins cherry

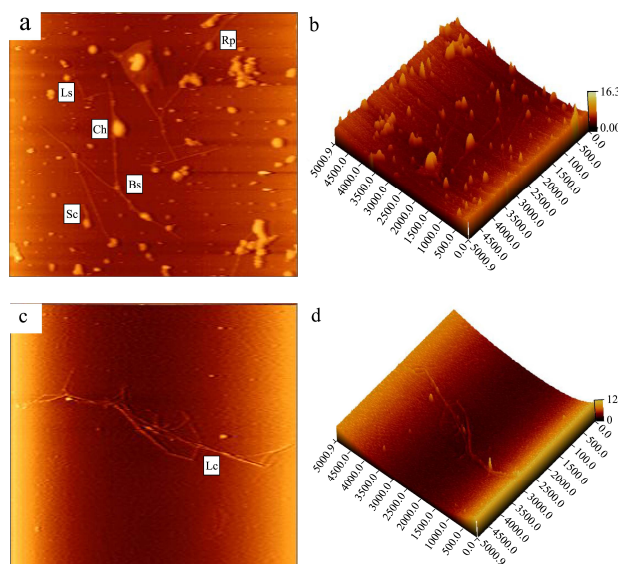
不同钙源	钙含量/%	WSP/( $\times 10^{-2} \text{ mg/g}$ )	CSP/( $\times 10^{-2} \text{ mg/g}$ )	SSP/( $\times 10^{-2} \text{ mg/g}$ )	HC/( $\times 10^{-2} \text{ mg/g}$ )	CE/( $\times 10^{-2} \text{ mg/g}$ )
CK	0	39.97 $\pm$ 6.54	69.08 $\pm$ 6.19	141.65 $\pm$ 9.13	16.01 $\pm$ 9.13	460.18 $\pm$ 16.86
	1	40.99 $\pm$ 3.38	69.74 $\pm$ 5.27	137.74 $\pm$ 9.13	18.06 $\pm$ 1.77	482.26 $\pm$ 10.42
	2	38.67 $\pm$ 2.19	70.39 $\pm$ 3.22	139.04 $\pm$ 7.83	17.07 $\pm$ 0.93	472.60 $\pm$ 20.84
	3	37.51 $\pm$ 2.47	67.35 $\pm$ 5.23	138.17 $\pm$ 12.40	16.88 $\pm$ 1.12	474.67 $\pm$ 11.40
	4	37.94 $\pm$ 2.62	68.22 $\pm$ 2.84	138.61 $\pm$ 6.57	17.25 $\pm$ 1.04	476.74 $\pm$ 9.56
氯化钙	1	39.39 $\pm$ 2.72	68.43 $\pm$ 6.57	140.78 $\pm$ 4.19	17.07 $\pm$ 1.12	481.57 $\pm$ 7.46
	2	40.41 $\pm$ 1.65	68.22 $\pm$ 3.97	139.47 $\pm$ 2.72	16.76 $\pm$ 0.84	467.77 $\pm$ 14.98
	3	38.09 $\pm$ 2.30	69.09 $\pm$ 6.27	140.78 $\pm$ 9.25	17.00 $\pm$ 1.03	476.74 $\pm$ 23.55
	4	38.23 $\pm$ 1.33	68.22 $\pm$ 3.91	140.35 $\pm$ 3.45	17.13 $\pm$ 2.33	471.91 $\pm$ 19.89

### 2.5 拉宾斯大樱桃果胶分子纳米结构的定性和定量分析

果胶主要存在于果实细胞初生壁和中胶层中, 按照溶解特性可分为水溶性果胶(WSP)、螯合性果胶(CSP)和碱溶性果胶(SSP)。其中, CSP与果实细胞间的联结有关, 通过AFM对CSP的微观结构进行观察, 结果其含有较多分支结构(图2a中“Bs”), 较大的CSP聚集体(图2e、g和h中“p”)大多与螯合剂(图2a中“Ch”)CDTA连接, 而线性单分子(图2a中“Ls”)则较少出现。氯化钙处理组和乳酸钙处理组与对照组相比有更多的聚集体结构存在, 且两种钙处理组中均发现了“花环”结构(图g和h)。

CSP是利用螯合剂提取的多为中胶层中与钙离子交联的果胶, 钙与CSP连接形成钙桥, 有助于维持果实的质地, 其微观结构的变化影响果实质地的软化。由图3可以看出CSP链宽的频率分布变化, 真空浸渍2%氯化钙处理组链宽值集中分布在60~80 nm和100~12 nm, 频率和为55%; 真空浸渍2%乳酸钙处理组链宽值集中分布在60~120 nm, 频率和为65%; 对

照组链宽值集中分布在40~80 nm处, 频率和为55%。对照组与2%乳酸钙处理组CSP链宽值存在显著性差异( $p < 0.05$ ), 2%乳酸钙处理组和氯化钙处理组链宽值无显著性差异( $p > 0.05$ ), 表明真空浸渍钙处理能够增强果胶分子链间的交联, 稳定果胶链结构。对照组、2%氯化钙处理组和3%乳酸钙处理组对应链宽值的果胶链高度范围分别为: 0.50~6.80 nm、0.10~3.60 nm和0.10~4.50 nm。



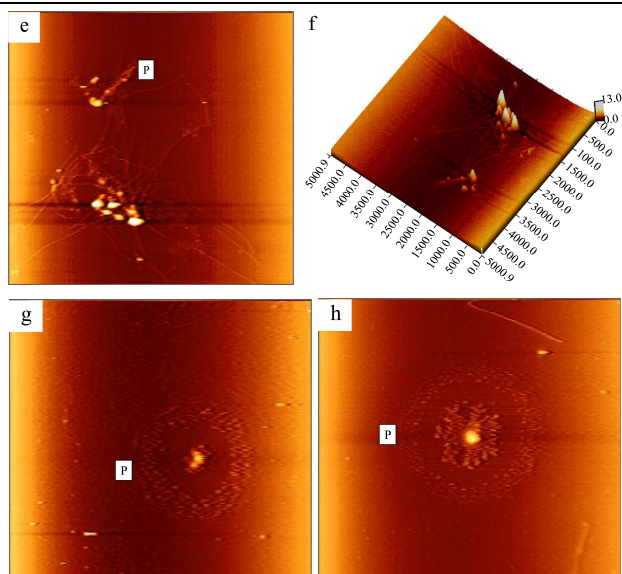


图2 真空浸渍钙处理后拉宾斯大樱桃 CSP 的典型 AFM 图像  
Fig.2 AFM images of CSP from Lapins cherry under VI with calcium treatment

注: a 和 b, CK(对照组); c、d 和 g, C-2%(2%氯化钙处理组); e、f 和 h, R-2%(2%乳酸钙处理组); 扫描范围 5.00×5.00 μm<sup>2</sup>: Bs-分支结构; Ls-线性单分子; Lc-长链; Sc-短链; Ch-螯合剂, CDTA; P-聚集体; Rp-从 CDTA 延伸出的果胶分子。

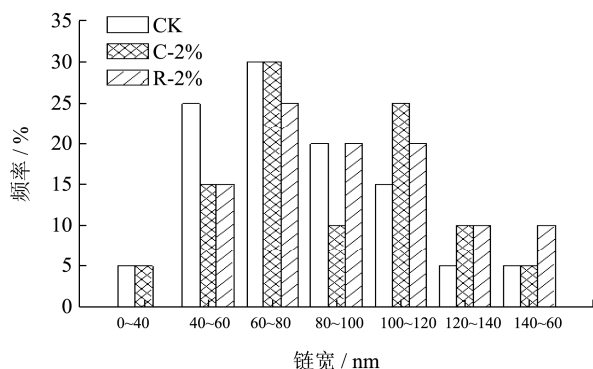


图3 真空浸渍2%钙处理后拉宾斯大樱桃果实 CSP 链宽频率分布  
Fig.3 Frequency of CSP chain widths after vacuum impregnation with 2% calcium-treatment

注: CK 为对照组; C-2%为 2%氯化钙处理组; R-2%为 2%乳酸钙处理组。

### 3 结论

3.1 本试验研究了不同条件真空浸渍钙处理拉宾斯大樱桃果实的过程对 HDM-DPR 模型中相关真空浸渍特性(体积形变系数、浸渍体积分数、有效孔隙度)的影响规律,并验证模型有效性。结果表明,当钙浓度 ≤3%, HDM-DPR 模型对真空浸渍产品中钙含量有较好的预测能力,能够更好的反映样本浸渍特性;在本研究所采用的操作条件下,真空浸渍过程中外部溶液渗入组织内的体积分数小于样本组织中气体体积分

数,即  $\epsilon_e < \epsilon(1.45)$ ;测定处理后的拉宾斯大樱桃果实细胞壁多糖含量发现,真空浸渍过程对拉宾斯大樱桃果实的细胞壁多糖含量无显著性影响( $p > 0.05$ ),浸渍参数的变化与细胞壁多糖含量无关。

3.2 利用 AFM 对果胶纳米结构观察发现,真空浸渍 2%钙处理后的拉宾斯大樱桃果实 CSP 链宽值与对照组相比存在显著性差异,钙处理组较大链宽值(120~160 nm)出现频率较高,通过 AFM 图像分析发现钙处理组存在更多聚集体结构,由于钙处理增加了细胞壁中的  $Ca^{2+}$ ,加强了  $Ca^{2+}$ 交联的果胶定位。因而,  $Ca^{2+}$ 可以通过真空浸渍方式引入拉宾斯大樱桃果实细胞间隙,从而有利于维持拉宾斯大樱桃果实质地特性。

### 参考文献

- [1] 高佳,王宝刚,冯晓元,等.甜樱桃和酸樱桃品种果实性状的综合评价[J].北方园艺,2011,17:17-21  
GAO Jia, WANG Bao-gang, FENG Xiao-yuan, et al. Evaluation of fruit characteristics of sweet cherry and sour cherry cultivars [J]. Northern Horticulture, 2011, 17: 17-21
- [2] 贾晓玲.樱桃储藏保鲜技术[J].农村科学实验,2007,12: 21  
JIA Xiao-ling. Technology of storage and fresh-keeping for cherry [J]. Scientific Experiment Countryside, 2007, 12: 21
- [3] Núñez-Mancilla Y, Vega-Gálvez A, Pérez-Won M, et al. Effect of osmotic dehydration under high hydrostatic pressure on microstructure, functional properties and bioactive compounds of strawberry (*Fragaria Vesca*) [J]. Food & Bioprocess Technology, 2014, 7(2): 516-524
- [4] Chen F S, Liu H, Yang H S, et al. Quality attributes and cell wall properties of strawberry (*Fragaria annanassa* Duch.) under calcium chloride treatment [J]. Food Chemistry, 2011, 126(2): 450-459
- [5] Leunda M A, Guerrero S N, Alzamora S M. Color and chlorophyll content changes of minimally processed kiwifruit [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2000, 24(1): 17-38
- [6] Occhino E, Hernando I, Llorca E, et al. Effect of vacuum impregnation treatments to improve quality and texture of zucchini (*Cucurbita pepo*, L.) [J]. Procedia Food Science, 2011, 1(1): 829-835
- [7] 周先艳,李进学,杨雪,等.钙、硼处理对热带亚热带水果品质的影响研究进展[J].保鲜与加工,2014,6: 56-60  
ZHOU Xian-yan, LI Jin-xue, YANG Xue, et al. Research advance on the effect of calcium and boron treatment on the quality of the tropical and subtropical fruits [J]. Storage and Protect, 2014, 6: 56-60

- [8] Salvatori D, Andres A, Chiralt A, et al. The response of some properties of fruits to vacuum impregnation [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 1998, 21(1): 59-73
- [9] Elzbieta R K, Róža B M, Marcin K. Applicability of vacuum impregnation to modify physico-chemical, sensory and nutritive characteristics of plant origin products: a review [J]. *International Jolecular Sciences*, 2014, 15(9): 16577-16610
- [10] Perez-Cabrera L, Chafer M, Chiralt A, et al. Effectiveness of antibrowning agents applied by vacuum impregnation on minimally processed pear [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2011, 44(10): 2273-2280
- [11] Gras M, Vidal-Brotóns N, Betoret A, et al. The response of some vegetables to vacuum impregnation [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2002, 3(3): 263-269
- [12] Fito P, Pastor R. Non-diffusional mechanisms occurring during vacuum osmotic dehydration [J]. *Journal of Food Engineering*, 1994, 21(4): 513-519
- [13] Fito P, Andrés A, Chiralt A, et al. Coupling of hydrodynamic mechanism and deformation-relaxation phenomena during vacuum treatments in solid porous food-liquid systems [J]. *Journal of Food Engineering*, 1996, 27(3): 229-240
- [14] Chiralt A, Fito P, Barat J M, et al. Use of vacuum impregnation in food salting process [J]. *Journal of Food Engineering*, 2001, 49(2): 141-151
- [15] Fito P, Chiralt A, Betoret N, et al. Vacuum impregnation and osmotic dehydration in matrix engineering: Application in functional fresh food development [J]. *Journal of Food Engineering*, 2001, 49(2): 175-183
- [16] Deng Y, Wu Y, Li Y. Changes in firmness, cell wall composition and cell wall hydrolases of grapes stored in high oxygen atmospheres [J]. *Food Research International*, 2005, 38(7): 769-776

## (上接第 111 页)

- [11] 王艳颖,胡文忠,庞坤,等.机械伤害引起果蔬褐变机理的研究进展[J].*食品工业科技*,2007,28(11):230-233  
WANG Yan-ying, HU Wen-zhong, PANG Kun, et al. Research progress of browning mechanism of fruit and vegetables responding to mechanical stress [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2007, 28(11): 230-233
- [12] Mateos, Cantwell M. Phenolic metabolism and ethanolic fermentation in intact and cut lettuce exposed to CO<sub>2</sub>-enriched atmosphere [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 1993, 3(3): 1225-1233
- [13] 李正国,高雪,樊晶,等.奉节脐橙果实苯丙氨酸解氨酶活性及其基因表达与果皮褐变的关系[J].*植物生理与分子生物学学报*, 2006,32(3):381-386  
LI Zheng-guo, GAO Xue, FAN Jing, et al. The relationship between activity and gene expression of phenylalanine ammonia-lyase and peel pitting in 'Fengjie' navel orange fruits [J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2006, 32(3): 381-386
- [14] 孙蕾,王太明,乔勇进,等.果实褐变机理及研究进展[J].*经济林研究*,2002,20(2):92-94  
SUN Lei, WANG Tai-ming, QIAO Yong-jin, et al. Review of the mechanism of fruit browning with reference to prevention [J]. *Economic Forest Researches*, 2002, 20(2): 92-94
- [15] 郁志芳,夏志华,陆兆新.鲜切甘薯酶促褐变机理的研究[J].*食品科学*,2005,26(5):54-59  
YU Zhi-fang, XIA Zhi-hua, LU Zhao-xin. Enzymatic browning mechanism of fresh-cut sweet potatoes (*Ipomoea batatas*) [J]. *Food Science*, 2005, 26(5): 54-59