

# 真空微波干燥过程中 南瓜果胶性质变化与质构的关系

张钟元, 聂梅梅, 肖亚冬, 李大婧, 宋江峰, 刘春泉, 王晓燕, 刘春菊, 徐亚元, 牛丽影, 江宁  
(江苏省农业科学院农产品加工研究所, 江苏南京 210014)

**摘要:** 为了明确真空微波干燥过程中脱水果蔬果胶性质变化对质构的影响, 实验以南瓜为原料, 采用不同微波强度进行处理, 分析脱水南瓜硬脆度和微观结构, 以及果胶含量、酯化度和单糖组成等性质的变化之间的关系。结果表明: 微波强度为 9 W/g 时, 南瓜获得较大的脆度和适中的硬度, 孔状结构均匀。随着微波强度的升高, 南瓜水溶性果胶 (WSP) 含量先减少后增加, 螯合性果胶 (CSP) 含量先增加后减少。微波处理后南瓜果胶分子链断裂, 分子量减小。随微波强度的升高, 南瓜中不饱和半乳糖醛酸 (UG) 含量、果胶酯化度呈现先升高后降低的趋势, 微波强度为 9 W/g 时, UG 含量较高, 达到 10.54 mg/g。综合分析, 真空微波干燥过程中 UG 含量是影响南瓜硬度的主要因素之一, 酯化度和 WSP 含量影响其脆度和多孔结构的形成。

**关键词:** 真空微波干燥; 南瓜; 果胶; 质构

文章编号: 1673-9078(2021)01-134-141

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.01.0730

## Relationship between Pectin Properties and Texture of Pumpkin during Vacuum Microwave Drying

ZHANG Zhong-yuan, NIE Mei-mei, XIAO Ya-dong, LI Da-jing, SONG Jiang-feng, LIU Chun-quan,  
WANG Xiao-yan, LIU Chun-ju, XU Ya-yuan, NIU Li-ying, JIANG Ning

(Institute of Farm Product Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** In order to find out the effect of pectin property change on texture during microwave vacuum drying (MVD), pumpkin were used as raw materials and treated with different microwave power. The hardness, crispness, microstructure, pectin content, esterification degree and monosaccharide composition of dehydrated pumpkin were analyzed. The results showed that when the microwave power was 9 W/g, pumpkins obtained higher crispness, moderate hardness and uniform pore structure. With the increase of microwave power, the content of water-soluble pectin (WSP) of pumpkin decreased first and then increased, and the content of chelating pectin (CSP) increased first and then decreased. After microwave treatment, the molecular chains of pumpkin pectin were broken and the molecular weight decreased. With the increase of microwave power, the content of unsaturated galacturonic acid (UG) and pectin ester degree in pumpkin increased first and then decreased, when the microwave power was 9 W/g, the content of UG was higher, reaching 10.54 mg/g. In summary, UG content is one of the main factors affecting the hardness of pumpkin during MVD, and the degree of esterification and WSP content affect the formation of its crispness and porous structure.

**Key words:** microwave vacuum drying; pumpkin; pectin; texture

引文格式:

张钟元, 聂梅梅, 肖亚冬, 等. 真空微波干燥过程中南瓜果胶性质变化与质构的关系[J]. 现代食品科技, 2021, 37(1): 134-141

ZHANG Zhong-yuan, NIE Mei-mei, XIAO Ya-dong, et al. Relationship between pectin properties and texture of pumpkin during vacuum microwave drying [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(1): 134-141

收稿日期: 2020-08-03

基金项目: 江苏省现代农业-重点及面上项目 (BE2018382)

作者简介: 张钟元 (1983-) 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 果蔬加工与营养健康; 共同第一作者: 聂梅梅 (1993-), 女, 硕士, 研究方向: 农产品加工与贮藏

通讯作者: 李大婧 (1976-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品加工与综合利用

脱水果蔬的质构是重要的品质属性,对消费者的可接受性有较大影响。影响脱水果蔬质构特性的外在因素包括原料成熟度、脱水条件等,内在因素包括其水分含量、孔隙大小等,而在微观结构上,研究表明细胞壁的化学成分相互作用会影响脱水果蔬的质构<sup>[1]</sup>。果胶是构成细胞壁的主要多糖物质,控制着细胞壁孔隙及细胞间粘结和组织结合<sup>[2]</sup>。果胶在加工过程变化显著,可有效调控细胞结构特性。研究发现果胶的含量和性质的变化与脱水果蔬质构关系密切<sup>[3]</sup>。

干燥方式诱导细胞壁果胶降解和组分改变,果胶的结构和分子交联方式可能是影响脱水果蔬质构的重要因素,进而导致脱水果蔬质构发生改变。大量研究表明不同干燥方式对果胶性质影响不同<sup>[4-6]</sup>, Monsoor 等<sup>[7]</sup>研究比较了喷雾干燥、冷冻干燥和真空干燥对大豆皮果胶性质的影响,表明真空干燥制备的果胶的色泽较差,而不同干燥方法对果胶的溶解度和流动性没有显著影响。刘佳<sup>[8]</sup>研究发现微波干燥相比热风干燥所获得的苹果皮渣中果胶酯化度和半乳糖醛酸含量较高。刘江等<sup>[9]</sup>研究表明热风干燥、真空干燥、冷冻干燥及喷雾干燥对柠檬果胶结构没有显著影响,但不同干燥后的果胶各指标均存在显著性差异,其中真空干燥得到果胶酯化度较高、色差值较小。然而对于干燥过程中果胶性质的变化对质构影响的研究较少,肖敏等<sup>[3]</sup>研究表明压差闪蒸处理过程中果胶发生解离、转化,进而使组织产生多孔状结构,因此获得脱水苹果片脆度大,而热风干燥过程中水溶性果胶含量较高,导致产品组织结构致密。探究不同干燥过程中果胶性质变化对调控脱水果蔬的质构具有重要意义。

真空微波干燥由于降低了干燥温度又加快干燥速率被广泛应用<sup>[10]</sup>。微波辐射产生热效应使细胞壁多糖尤其是果胶的物化性质改变,使果胶发生 $\beta$ -消除反应、去甲酯化等,破坏原有果胶结构<sup>[11]</sup>。然而真空微波干燥过程中果胶特性的变化对脱水果蔬质构的影响并不明确。因此,本实验以南瓜为研究对象,采用真空微波干燥方式进行处理,基于果胶特性的变化,结合南瓜微观结构,分析真空微波干燥对南瓜质构的影响,为获得高质量的果蔬干制品提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

供试南瓜品种为‘蜜本南瓜’,购于南京市孝陵卫集贸市场。

1-苯基-3-甲基-5-吡唑啉酮(PMP)、单糖(鼠李糖、岩藻糖、阿拉伯糖、木糖、甘露糖、果糖、葡萄

糖、半乳糖)标准品购于Sigma公司;甲醇标准品购于Aladdin公司;1,2-环己二胺四乙酸(CDTA)购于麦克林公司;美国光谱医学即用型透析袋购于上海桥星贸易有限公司;乙醇氧化酶(OA)购于上海源叶生物科技有限公司。

### 1.2 仪器与设备

VDM-1型真空微波干燥设备,南京孝马机电设备有限公司;CT3质构仪美国Brookfield公司;1200高效液相色谱仪,美国安捷伦科技有限公司;BS224S电子分析天平,北京赛多利斯科学仪器有限公司;SHZ-D(III)循环水式真空泵,上海东玺制冷仪器设备有限公司;RE52CS旋转蒸发仪、B-226恒温水浴锅,上海亚荣生化仪器厂;D10氮气吹扫仪,杭州奥盛仪器有限公司;FW100高速万能粉碎机,天津市泰斯特仪器有限公司;DW-86L828型超低温保存箱,青岛海尔股份有限公司;Quanta-200环境扫描电子显微镜,美国FEI公司。

### 1.3 样品处理

严格挑选新鲜、大小形状均一、无机械损伤、无生理病害的南瓜,清洗、去皮,南瓜需去除瓜籽及瓜瓢,后切成厚度约为 $7\pm 2$  mm的薄片。

分别称取南瓜各200 g,采用微波间歇比为1的间歇加热方式,真空度为-90 kPa,选取6、9、12、15 W/g等4个不同微波强度,将南瓜干燥至干燥终点(水分含量 $<5\%$ ),装入自封袋,置于干燥器中备用。

### 1.4 硬度脆度测定

硬脆度测定采用CT3质构仪:选用TA-TPB夹具、TA7刀具探头;目标类型:距离;目标值:10.00 mm;测试速度:0.50 mm/s;触发点负荷:10 g;在此条件下测定干燥后南瓜脆片的硬度和脆度。硬度是在压缩过程中坐标图中出现的最大压力峰值,力越大,硬度越大,单位为g;在第一次压缩过程中若是产生破裂现象,曲线中出现一个明显的峰,此峰值就定义为脆度,力越小,脆度越大,单位为g。

### 1.5 扫描电镜观察

用双面胶将干燥后的南瓜分别粘附于循环样品板上,对断面喷金,利用扫描电子显微镜观察南瓜的微观结构<sup>[12]</sup>。所有样品的观察均在低真空状态下进行。

### 1.6 果胶的提取与测定

本实验乙醇不溶物(alcohol-insoluble residue,

AIR) 的提取方法以 McFeeters 与 Armstrong<sup>[13]</sup> 的文献报道中的方法为基础, 并稍作修改而成; 三种果胶的提取参考 Willemsen<sup>[14]</sup> 与 Jianyong Yi<sup>[15]</sup> 的方法, 并稍作修改。称取真空微波干燥后样品各 20 g, 剪碎后置于研钵中研磨, 随后置于 200 mL 锥形瓶中, 加入 60 mL 95%乙醇, 均质 10 min, 过滤, 收集滤渣, 加入 40 mL 95%乙醇, 均质 10 min, 过滤, 收集滤渣, 加入 40 mL 丙酮, 置于震荡培养箱中震荡(37 °C) 5 min, 过滤, 收集滤渣, 置于干燥箱(40 °C) 中干燥 16 h, 获得干燥的 AIR。准确称取 0.5 g AIR 置于 250 mL 烧杯中, 加入 100 mL 沸水, 于 100 °C 的恒温水浴锅中煮沸 10 min, 冷却至室温, 过滤, 收集滤液, 透析(72 h)、冻干(48 h) 后获得干燥的水溶性果胶(water-solute pectin, WSP); 收集滤渣。取全部滤渣于 250 mL 烧杯中, 加入 100 mL 0.05 mol/L 的 CDTA (pH=6.5), 28 °C 下震荡反应 6 h, 过滤, 收集滤液, 透析(72 h)、冻干(48 h) 后获得干燥的螯合性果胶(CDTA-solute pectin, CSP); 收集滤渣。取全部滤渣于 250 mL 烧杯中, 加入 100 mL 0.05 mol/L 的碳酸钠溶液(含有 0.02 mol/L 硼氢化钠), 在 4 °C 下培养 16 h 后在 28 °C 下培养 6 h, 过滤, 收集滤液, 透析(72 h)、冻干(48 h) 后获得干燥的碱溶性果胶(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-solute pectin, NSP)。总果胶(total solute pectin, TSP) 为三种果胶的总量。

三种果胶含量测定参考 Blumenkrantz 等<sup>[16]</sup> 的方法, 采用分光光度法测定 525 nm 处的吸光度, 绘制半乳糖醛酸(Galacturonic Acid, GalA) 标准曲线。果胶含量的测定: 吸取 1.5 mL 滤液置于 25 mL 具塞玻璃试管中, 依次加入 1.5 mL 蒸馏水、0.75 mL 吡啶乙醇溶液, 连续摇动试管, 迅速加入 15 mL 硫酸, 盖好磨口玻璃塞, 摇匀。将试管置于 85 °C 的恒温水浴锅内水浴 20 min, 冰浴, 冷却至室温后于分光光度计 525 nm 处测定吸光度。根据上述标准曲线计算果胶含量。

### 1.7 单糖组成的分析

利用 PMP 柱前衍生化法测定中性糖(岩藻糖、鼠李糖、阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖、木糖、甘露糖) 的含量, 参考武忠伟<sup>[17]</sup> 的方法进行试验, 具体步骤如下: 多糖样品酸水解: 称取 5 mg 冻干样品, 用蒸馏水配成 5 mg/mL, 取 100 μL 加入到 2 mL 具塞玻璃管中, 加入 100 μL 4 mol/L 三氟乙酸(TFA) 并充氮封管, 在 100 °C 条件下水解 2 h, 冷却至室温, 加入 200 μL 甲醇于 50 °C 减压蒸干, 重复 3 次, 加 100 μL 蒸馏水溶解后备用。

PMP 衍生化: 向上述水解后的样品加入 0.6 mol/L

NaOH 溶液 100 μL, 混合均匀后取该溶液 100 μL 与 5 mol/L 的 100 μL PMP 甲醇溶液旋涡混匀, 置于 70 °C 下反应 100 min, 冷却至室温, 加入 50 μL 0.3 mol/L HCl 溶液中和反应液, 于 50 °C 下减压蒸干, 加入 1 mL 蒸馏水溶解, 用氯仿反复萃取以除去其中过量的 PMP, 经 0.45 μm 滤膜过滤后, 置于超低温冰箱, 待液相分析使用。

HPLC 检测条件: Agilent 1100 高效液相色谱仪; RP-C18 柱(4.6×250 mm, 5 μm Venusil, USA); 柱温 30 °C; 流动相为比例为 83:17 (V/V) 的 0.1 mol/L PBS (pH=6.7) 和乙腈; 流速 1.0 mL/min; 检测波长 245 nm。

### 1.8 果胶分子量分布的测定

样品的分子量分布及分子量测定采用高效液相凝胶渗透色谱法, 具体方法根据 Wang 等<sup>[18]</sup> 稍作修改, 具体操作如下: 色谱条件: Agilent 1100 高效液相色谱仪, TSL-Gel G3000 SWXL 色谱柱; 示差折光检测器(RID); 流动相为含 0.1 mol/L Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 的 0.01 mol/L PBS (pH=6.8); 流速 0.8 mL/min; 柱温 25 °C; 进样体积 20 μL。

### 1.9 β-消除反应程度的测定

取 0.05 g AIR 样品与 30 mL 的去离子水混合置于 100 °C 水浴锅中, 5 min 后取出, 冷却至室温。调节 pH 到 6.5, 过滤, 收集滤液, 于分光光度计 235 nm 处测定吸光度值。吸光系数为 5412 M<sup>-1</sup>cm<sup>-1</sup>, 无水半乳糖醛酸的分子量为 176<sup>[19]</sup>。

### 1.10 果胶酯化度的测定

果胶酯化度为皂化过程中甲醇生成量与细胞壁果胶半乳糖醛酸含量的比值。根据 Yi 等<sup>[20]</sup> 方法做稍微调整, 吸取 90 μL 果胶溶液置于具塞玻璃试管中, 加入 75 μL 1 mol/L NaOH 进行皂化反应, 25 °C 条件下反应 30 min 后用 0.75 mol/L 的硫酸调节 pH 值至 7.5。分别向试管中依次加入 270 μL 0.2 mol/L 磷酸缓冲液(pH 7.5)、30 μL 乙醇氧化酶(1 unit/mL), 置于摇床中(25 °C) 培养 15 min, 然后向混合液中加入 6 mL 乙酰丙酮溶液(0.02 mol/L 2,4-乙酰丙酮溶于 2.0 mol/L 乙酸铵和 0.05 mol/L 乙酸溶液中), 于 58 °C 恒温水浴锅中反应 15 min。冷却至室温后于 412 nm 处测定吸光度。以甲醇为标准物, 配制标准曲线。

### 1.11 数据统计与分析

各实验结果均以“平均值(means)±标准差(SD)”表示。应用 SAS 软件进行单因素方差分析及组间差异

的 Duncan's 多重比较。利用 Origin Pro V8.5 软件绘制曲线。

## 2 结果与分析

### 2.1 真空微波干燥对南瓜硬度脆度的影响

本实验选用硬度和脆度两个指标来描述真空微波干燥后南瓜的质构。从表 1 可见, 经过不同微波强度处理后, 南瓜的脆度和硬度存在显著差异。微波强度为 9 W/g 时, 南瓜的脆度值较小, 为 723.00 g, 产品酥脆性较好。南瓜的硬度值随微波强度增加而上升, 分析原因可能是随微波强度升高, 表面温度比内部高, 内部在水分转移到表面之前, 细胞收缩, 在表面迅速形成一层硬膜, 因此硬度升高。不同微波强度对不同物料影响不同, 如微波强度为 12 W/g 时, 获得的苹果片感官品质较好<sup>[21]</sup>, 这可能与物料性质差异有关。

表 1 不同微波强度条件下南瓜的硬度和脆度

Table 1 Hardness and crispness of pumpkin under different microwave power density

microwave power density		
微波强度/(W/g)	脆度/g	硬度/g
6	1028.00 ± 50.00 <sup>b</sup>	2000.00 ± 35.00 <sup>c</sup>
9	723.00 ± 24.00 <sup>c</sup>	1893.00 ± 41.00 <sup>c</sup>
12	736.00 ± 31.00 <sup>c</sup>	2375.00 ± 52.00 <sup>b</sup>
15	1835.00 ± 61.00 <sup>a</sup>	2798.00 ± 36.00 <sup>a</sup>

注: 不同处理间同列小写英文字母不同表示差异显著 ( $p < 0.05$ ), 表 2、4 同。

### 2.2 真空微波干燥对南瓜微观结构的影响

图 1 为不同微波强度条件下南瓜的扫描电镜图 ( $\times 100$  倍)。真空微波干燥后的南瓜形成大小不均的多孔状结构, 出现断裂, 微波强度为 12 W/g 时, 细胞壁破坏较明显, 形成大小不均的多孔状结构, 排列密集。经真空微波干燥处理后, 南瓜能够形成多孔状结

构。这是因为微波能够穿透南瓜细胞, 导致水分子的震动剧烈, 使南瓜内部的水分直接汽化, 细胞组织在压力的作用下膨胀破裂产生孔状结构。

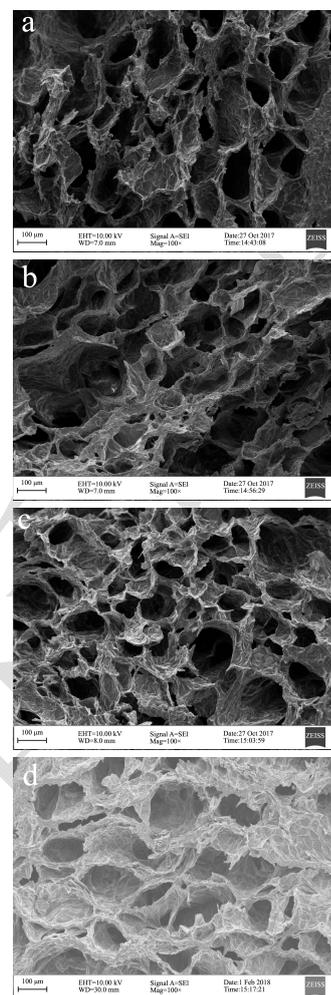


图 1 不同微波强度条件下南瓜的扫描电镜图

Fig.1 Scanning electron micrograph of pumpkin under different microwave power density

注: a、b、c、d 分别代表微波强度为 6、9、12、15 W/g。

### 2.3 真空微波干燥对南瓜果胶含量的影响

表 2 不同微波强度条件下南瓜中果胶的含量

Table 2 Pectin extraction yields of pumpkin under different microwave power density

微波强度/(W/g)	果胶含量/(mg/g AIR)			
	WSP	CSP	NSP	TSP
CK	148.80 ± 0.81 <sup>a</sup>	24.84 ± 0.06 <sup>c</sup>	87.26 ± 1.14 <sup>a</sup>	263.90 ± 2.13 <sup>a</sup>
6	140.11 ± 2.01 <sup>b</sup>	27.43 ± 1.06 <sup>b</sup>	39.25 ± 3.00 <sup>b</sup>	206.79 ± 2.56 <sup>b</sup>
9	65.13 ± 3.77 <sup>d</sup>	34.28 ± 0.66 <sup>a</sup>	44.49 ± 1.26 <sup>b</sup>	143.90 ± 5.01 <sup>d</sup>
12	100.99 ± 3.74 <sup>c</sup>	24.76 ± 0.13 <sup>c</sup>	30.89 ± 0.07 <sup>c</sup>	156.64 ± 3.58 <sup>c</sup>
15	98.01 ± 1.76 <sup>c</sup>	23.01 ± 0.13 <sup>d</sup>	39.01 ± 0.04 <sup>b</sup>	150.03 ± 1.03 <sup>c</sup>

经真空微波干燥后的南瓜中三种果胶含量下降显著。由表 2 可以看出, 南瓜中三种果胶的含量变化情况存在一定的差异性: 三种果胶含量随微波强度的升

高变化趋势不同, 随着微波强度的升高, WSP 含量先减少后增加, CSP 含量先增加后减少, NSP 含量显著下降 ( $p < 0.05$ )。其中, 微波强度为 9 W/g 时, 干燥后的

南瓜中 WSP 含量显著降低( $p<0.05$ ), 达到 65.13 mg/g AIR, 与对照组显著降低 56.23%, 而 CSP 含量显著升高( $p<0.05$ )。这表明真空微波干燥使果胶物质流失或发生降解, 这将引起果胶对物料组织支撑作用下降, 导致物料粘弹性和可塑性增加<sup>[3]</sup>, 同时微波处理水分散失速度较快, 容易形成较多的孔状结构, 这与江宁等对甘薯片研究结果相似<sup>[22]</sup>。

## 2.4 真空微波干燥对南瓜果胶单糖的影响

表 3 不同微波强度条件下南瓜果胶的糖比率

Table 3 The sugar ratios of pectin in pumpkin under different

果胶	糖比率	微波强度/(W/g)				
		CK	6	9	12	15
WSP	1	30.74	30.18	32.88	46.38	31.35
	2	0.33	0.39	0.50	0.31	0.40
	3	0.03	0.01	0.03	0.00	0.01
CSP	1	14.28	15.29	17.43	6.24	10.23
	2	0.37	0.40	0.38	0.43	0.44
	3	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01
NSP	1	7.56	27.08	10.14	21.65	6.37
	2	0.74	0.43	0.49	0.34	0.48
	3	0.01	0.02	0.02	0.01	0.05

注: 糖比率 1 表示 (Ara+Gal)/Rha; 糖比率 2 表示 Gal A/(Fuc+Rha+Ara+Gal+Xyl); 糖比率 3 表示 Rha/Gal A。Ara: 阿拉伯糖; Gal: 半乳糖; Rha: 鼠李糖; Gal A: 半乳糖醛酸; Fuc: 岩藻糖; Xyl: 木糖。

果胶分子主要以半乳糖醛酸为主链, 其他单糖主要参与构成果胶侧链, 因此可以用不同单糖之间的比值关系来表达果胶的相关结构信息, 如糖比率 1 可以反映鼠李聚半乳糖醛酸 I 支链与鼠李糖的比值; 糖比率 2 可以反映果胶的线性度; 糖比率 3 能够反映主链的变化, 即鼠李聚半乳糖醛酸类型果胶在全部果胶中所占的比例<sup>[23,24]</sup>。由表 3 可知, 真空微波干燥后的南瓜的糖比率变化情况明显, 说明真空微波干燥对其细胞壁果胶的组分变化有显著影响 ( $p<0.05$ )。真空微波干燥后的南瓜的 NSP 的糖比率 1 变化显著, 说明真空微波干燥对果胶结构产生较大的影响, 改变了 NSP 的结构, 减小了其与细胞壁其他物质之间的粘结作用力。根据糖比率 2 可知, 与鲜样相比, CSP 的线性度均有不同程度的增加, 说明在真空微波干燥过程中, 发生了果胶间的转化, 有线性度较大的 CSP 的生成; 南瓜 NSP 的糖比率 2 均低于南瓜鲜样, 说明 NSP 分子的线

性度下降; 而糖比率 3 均较低, 其中 CSP 与 NSP 的糖比率 3 小于 0.05, 说明在南瓜的果胶中 RG 的含量较低。在三种果胶中, 糖比率 1 最高的为 WSP, 说明在三种果胶中, WSP 的鼠李聚半乳糖醛酸 I 最多, 同时也说明了 WSP 更易提取, 这与肖敏等<sup>[3]</sup>的试验结果类似。结合果胶含量变化(表 2)及糖比率的性质, 微波辐射使 WSP 发生解离, 转化成 CSP 果胶, 这有利于在高温、水分散失速度大的条件时形成稳定的孔状结构<sup>[25]</sup>。

## 2.5 真空微波干燥对南瓜果胶分子量的影响

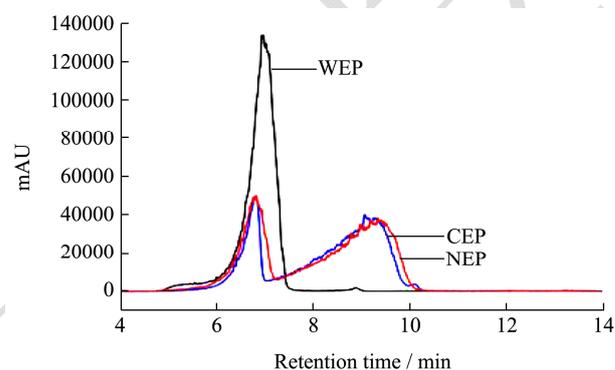


图 2 南瓜鲜样中果胶的分子量分布

Fig.2 Pectin molecular distribution of pumpkin

分子量是描述果胶性质的重要指标之一, 出峰时间越早说明分子量越大, 出峰时间越晚则说明分子量越小。从图 2 可看出, 鲜样南瓜中 WEP 出峰时间较早, 且仅含有一个峰值, NEP 与 CEP 各含有两个峰值且 NEP 与 CEP 的分子量相差较小。本实验研究了不同微波强度对果胶分子量分布的影响, 南瓜三种果胶经不同微波强度处理后表现出不同的分子量分布。图 3a 可以发现液相图中出现小分子峰, 对比鲜样可知, 真空微波干燥促进了南瓜 WSP 的降解, 导致分子量降低。由图 3b 可知, 南瓜 CSP 随微波强度的增加, 分子量减小的速度放缓, 在 6 W/g 时, 分子量减小明显, 高强度情况下尽管也发生分子量的改变, 但不如低强度变化明显。图 3c 表明, 高强度组 NSP 分子量变化比低强度组明显, 6 W/g 时分子量变化不明显。

不同强度对果胶结构影响差异明显, 高强度组的 NSP 分子量变化较大, 低强度组的 CSP 变化明显, 这可能与 NSP、CSP 的结合方式及性质有关。NSP 为共价结合果胶, CSP 为离子结合型果胶, 高强度组在干燥的过程中产生的瞬时热量高, 利于打断果胶共价键, 使 NSP 降解成小分子, 低强度组则是一个持续加热的过程, 缓慢破坏果胶离子结合, 使 CSP 更易降解。

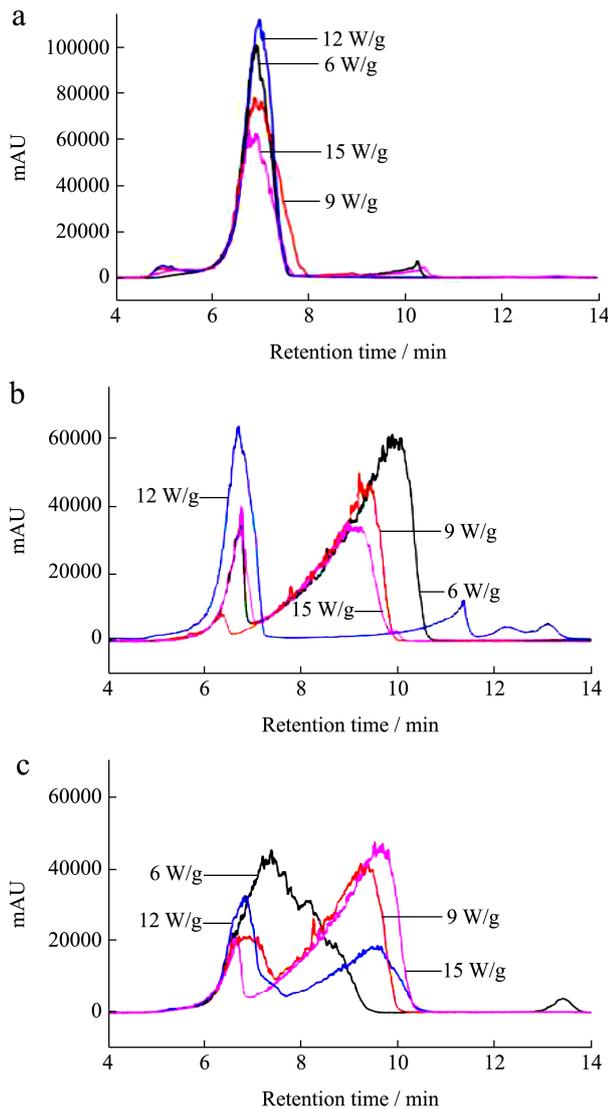


图3 不同微波强度条件下南瓜果胶的分子量分布

Fig.3 Pectinmolecular distribution of pumpkin under different microwave power density

注: a、b、c 分别代表 WSP、CSP、NSP。

### 2.6 真空微波干燥对南瓜 $\beta$ -消除反应程度的影响

果胶在加工过程中发生  $\beta$ -消除反应, 使高分子果胶解聚, 导致果胶的溶解和相邻细胞的分离, 最终降低蔬菜组织完整性和硬度<sup>[26]</sup>。采用不饱和和半乳糖醛酸 (UG) 含量的高低来反应  $\beta$ -消除反应的程度, 含量越高, 说明  $\beta$ -消除反应发生的越彻底<sup>[22]</sup>。由图 4 可知, 与南瓜鲜样组 (CK) 相比, 真空微波干燥后的南瓜 UG 含量显著升高 ( $p < 0.05$ ), 升高幅度为 79%~176%, UG 含量随微波强度的升高呈现先上升后下降的趋势。微波强度为 9 W/g 时, 南瓜 UG 含量达到较高水平, 为 10.54 mg/g, 表明此强度下  $\beta$ -消除反应发生彻

底, 果胶溶解, 因此降低组织硬度, 这可能是得到适中硬度的原因。这与表 1 中硬度值变化趋势相符。

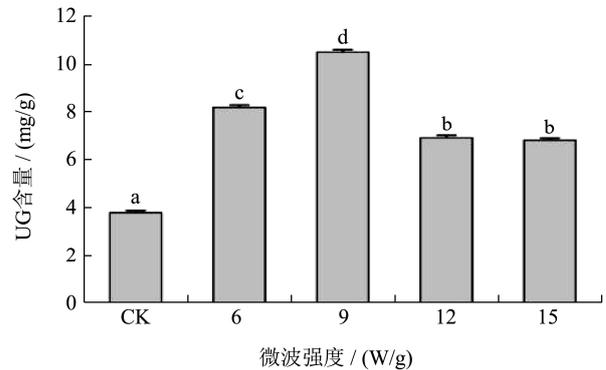


图4 不同微波强度条件下南瓜的果胶 UG 含量

Fig.4 The content of UG in pectin of pumpkin under different microwave power density

注: 小写英文字母不同表示差异显著 ( $p < 0.05$ )。

热加工过程中, 在高温和中性的理化环境下发生的  $\beta$ -消除反应会导致果胶链的断裂, 使细胞壁结构松散, 具体表现为半乳糖醛酸含量升高, 果胶的负电荷含量增加, 分子内作用力降低, 果胶链发生团聚、交联性减弱, 果胶呈链状结构<sup>[27]</sup>。本研究发现 UG 含量随微波强度的升高呈先升高后下降的趋势, 这与 Zhang 等研究结果一致<sup>[28]</sup>, 这是因为在一定温度条件下, 相同时间内产生的热量越高,  $\beta$ -消除反应越易发生; 而较高的强度条件下, 瞬时产生的热量过高, 水分蒸发较快, 缩短了干燥过程, 使果胶解聚不明显。

### 2.7 真空微波干燥对南瓜果胶酯化度的影响

甲酯化和  $\beta$ -消除反应是果胶在热加工过程中发生的两类主要反应。酯化度影响果胶分子间的氢键作用, 从而影响果蔬组织的质构<sup>[3]</sup>。表 4 显示不同微波强度条件下南瓜细胞壁果胶酯化度的变化趋势。研究发现, 微波热效应会引起果胶的去甲酯化反应, 随着微波强度的升高, 南瓜 WSP 的酯化度呈现先升高后降低的趋势, NSP 的酯化度持续降低, CSP 的酯化度则是先降低后升高。这表明真空微波干燥对每一种果胶酯化度的影响不同。酯化度基本呈现先上升后下降的趋势, 这与 UG 含量的变化一致。当微波强度为 9 W/g 时, 南瓜 CSP 酯化度较低, 仅为 28.92%, 游离的羧基多, 更易与组织中金属离子交联<sup>[29]</sup>, 因此有利于增强南瓜片多孔强度, 这可能是微波强度为 9 W/g 得到较大脆度的原因。

微波辐射会产生热效应与非热效应, 一方面热效应会使细胞壁多糖尤其是果胶的物化性质改变; 另一方面, 微波的非热效应产生湍流剪切细胞壁多糖大分子, 导致果蔬细胞壁结构瓦解。刘佳<sup>[8]</sup>研究了 3 种干

干燥方式对苹果皮渣果胶理化性质的影响,发现微波干燥所获得的果胶酯化度和半乳糖醛酸含量较高,这与本实验研究结果一致,这是因为微波的热效应使腔体内温度升高,增加了 $\beta$ -消除反应的速率,导致pH增加,从而使果胶酯化度上升<sup>[30]</sup>。此外,Latorre等通过对红甜菜进行不同强度的微波处理的研究,发现微波

处理本质上是通过增加细胞壁多糖的亲水性的方式来改变细胞壁结构<sup>[31]</sup>。肖敏等<sup>[3]</sup>研究发现压差闪蒸干燥获得的苹果片具有较好的质构特征,然而对比本研究中真空微波干燥,压差闪蒸干燥时间长,能耗高,因此,采用真空微波干燥通过选择适当的微波强度可调控果蔬的果胶性质变化,最终获得较佳的质构特征。

表4 不同微波强度条件下南瓜果胶的酯化度

微波强度/(W/g)	果胶甲基酯化度/%			
	WSP	CSP	NSP	TSP
CK	10.25±0.54 <sup>b</sup>	39.09±5.28 <sup>a</sup>	10.18±0.65 <sup>b</sup>	13.54±0.63 <sup>b</sup>
6	10.73±0.22 <sup>b</sup>	30.88±0.14 <sup>b</sup>	18.29±3.28 <sup>a</sup>	14.84±0.72 <sup>b</sup>
9	14.88±2.53 <sup>a</sup>	28.92±2.67 <sup>b</sup>	16.46±1.66 <sup>a</sup>	19.66±2.45 <sup>a</sup>
12	10.38±0.13 <sup>b</sup>	50.68±8.27 <sup>a</sup>	15.73±1.89 <sup>a</sup>	17.68±1.71 <sup>ab</sup>
15	10.34±0.65 <sup>b</sup>	43.49±1.71 <sup>a</sup>	15.25±0.82 <sup>a</sup>	17.40±0.52 <sup>ab</sup>

### 3 结论

真空微波干燥使果胶物质流失、降解,WSP转化为CSP,果胶分子链断裂,分子量降低,导致在高温、水分散失速度大的条件时形成稳定的孔状结构。随微波强度的升高,南瓜中UG含量、果胶酯化度呈现先升高后降低的趋势。其中微波强度为9 W/g时,南瓜中UG含量较高,表明 $\beta$ -消除反应发生彻底,从而降低组织硬度,此时获得产品硬度适中,南瓜CSP酯化度较低,有利于增强其多孔强度,从而获得较大脆度。

### 参考文献

- [1] Fuentes A, Vázquez-Gutiérrez J L, Pérez-Gago M B, et al. Application of nondestructive impedance spectroscopy to determination of the effect of temperature on potato microstructure and texture [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 133(2): 16-22
- [2] Sila D N, Buggenhout S V, Duvetter T, et al. Pectins in processed fruits and vegetables: Part II-structure-function relationships [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2009, 8(2): 86-104
- [3] 肖敏,易建勇,毕金峰,等.不同干燥方式对苹果片质构的影响及其与果胶性质的关系[J].现代食品科技,2017,33(7): 157-162
- [4] XIAO Min, YI Jian-yong, BI Jin-feng, et al. Influence of different dehydration processes on the texture and pectin characteristics of apple chips [J]. Modern Food Technology, 2017, 33(7): 157-162
- [4] Yi J, Zhou L, Bi J, et al. Influences of microwave pre-drying and explosion puffing drying induced cell wall

polysaccharide modification on physicochemical properties, texture, microstructure and rehydration of pitaya fruit chips [J]. LWT - Food Science & Technology, 2016, 70: 271-279

- [5] Xiao M, Bi J F, Yi J Y, et al. Osmotic pretreatment for instant controlled pressure drop dried apple chips: Impact of the type of saccharides and treatment conditions [J]. Drying Technology, 2019, 37(7):896-905
- [6] Huang L L, Zhang M, Wang L P, et al. Influence of combination drying methods on composition, texture, aroma and microstructure of apple slices [J]. LWT - Food Science and Technology, 2012, 47(1): 183-188
- [7] Monsoor M A. Effect of drying methods on the functional properties of soy hull pectin [J]. Carbohydrate Polymers, 2005, 61(3): 362-367
- [8] 刘佳.干燥方式对苹果皮渣果胶理化性质的影响[J].内蒙古民族大学学报(自然汉文版),2010,25(4):398-401
- [8] LIU Jia. Effect of drying method on the physicochemical properties of apple peel residue [J]. Journal of Inner Mongolia University for Nationalities (Natural Chinese Version), 2010, 25(4): 398-401
- [9] 刘江,雷激,苏菲烟,等.干燥方法对柠檬果胶理化性质影响[J].食品工业科技,2020,41(3):79-85
- [9] LIU Jiang, LEI Ji, SU Fei-yan, et al. Effect of drying method on the physicochemical properties of lemon pectin [J]. Food Industry Technology, 2020, 41(3): 79-85
- [10] Quan X, Zhang M, Fang Z, et al. Low oil French fries produced by combined pre-frying and pulsed-spouted micro-wave vacuum drying method [J]. Food and Bioproducts Processing, 2016, 99: 109-115
- [11] 梁瑞红,王淑洁,贺小红,等.微波降解果胶对其流变性质的

- 影响及动力学[J].食品科学,2017,38(5):1-6
- LIANG Jie-hong, WANG Shu-jie, HE Xiao-hong, et al. Effect of microwave degradation on rheological properties of pectin and its dynamics [J]. Food Science, 2017, 38(5): 1-6
- [12] 丁媛媛,毕金峰,木泰华,等.不同干燥方式对甘薯产品品质的影响[J].食品科学,2011,32(16):108-112
- DING Yuan-yuan, BI Jin-feng, MU Tai-hua, et al. Effects of different drying methods on quality of sweet potato products [J]. Food Science, 2011, 32(16): 108-112
- [13] Mcfeeters R F, Armstrong S A. Measurement of pectin methylation in plant cell walls [J]. Analytical Biochemistry, 1984, 139(1): 212-217
- [14] Willemsen K L D D, Panozzo A, Moelants K, et al. Physico-chemical and viscoelastic properties of high pressure homogenized lemon peel fiber fraction suspensions obtained after sequential pectin extraction [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 72: 358-371
- [15] Yi J, Zhou L, Bi J, et al. Influences of microwave pre-drying and explosion puffing drying induced cell wall polysaccharide modification on physicochemical properties, texture, microstructure and rehydration of pitaya fruit chips [J]. LWT - Food Science and Technology, 2016, 70: 271-279
- [16] 彭健.压差闪蒸干燥胡萝卜脆条质构品质形成机制研究[D].北京:中国农业科学院,2019
- PENG Jian. Study on the formation mechanism of crispy structure quality of carrot dried by pressure differential flash [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019
- [17] 武忠伟.蝙蝠蛾拟青霉胞外多糖的发酵优化、结构鉴定及生物活性研究[D].南京:南京农业大学,2014
- WU Zhong-wei. Study on fermentation optimization, structure identification and biological activity of exopolysaccharide from *Penicillium batta* [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014
- [18] Wang M, Jiang C, Ma L, et al. Preparation, preliminary characterization and immunostimulatory activity of polysaccharide fractions from the peduncles of *Hovenia dulcis* [J]. Food Chemistry, 2013, 138(1): 41
- [19] Fraeye I, Roeck A D, Duvetter T, et al. Influence of pectin properties and processing conditions on thermal pectin degradation [J]. Food Chemistry, 2007, 105(2): 555-563
- [20] Yi J Y, Njoroge D M, Sila D N, et al. Detailed analysis of seed coat and cotyledon reveals molecular understanding of the hard-to-cook defect of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) [J]. Food Chemistry, 2016, 210: 481-490
- [21] Zhang Y, Zheng B, Tian Y, et al. Optimization of drying technique of *Lentinus edodes* (Berk.) sing with microwave vacuum equipment via response surface analysis [J]. Advance Journal of Food Science & Technology, 2012, 4(6): 366-371
- [22] 江宁,刘春泉,李大婧,等.甘薯片真空微波干燥工艺的优化[J].中国食品学报,2011,11(7):81-88
- JIANG Ning, LIU Chun-quan, LI Da-jing, et al. Optimization of vacuum microwave drying process for sweet potato chips [J]. Chinese Food Journal, 2011, 11(7): 81-88
- [23] Castaño J L, Villamiel M, Fandiño L R. Glycosylation of individual whey proteins by Maillard reaction using dextran of different molecular mass [J]. Food Hydrocolloids, 2007, 21(3): 433-443
- [24] Houben K, Jolie R P, Fraeye I, et al. Comparative study of the cell wall composition of broccoli, carrot, and tomato: Structural characterization of the extractable pectins and hemicelluloses [J]. Carbohydrate Research, 2011, 346(9): 1105-1111
- [25] Isaacs N S, Coulson M. Effect of pressure on processed modeling the Maillard reaction [J]. Journal of Physical Organic Chemistry, 1996, 9: 639-644
- [26] Tola Y B, Ramaswamy H S. Effect of novel processing techniques on texture softening and  $\beta$ -carotene content of thermally processed carrots [J]. Food & Bioprocess Technology, 2014, 7(10): 2986-2999
- [27] 李雄彪.植物细胞壁[M].北京大学出版社,1993
- LI Xiong-biao. Plant Cell Wall [M]. Peking University Press, 1993
- [28] Zhang Z, Wang X, Li Y, et al., Evaluation of the impact of food matrix change on the *in vitro* bioaccessibility of carotenoids in pumpkin (*Cucurbita moschata*) slices during two drying processes [J]. Food & Function, 2017, 8: 4693-4702
- [29] Wooster T J, Augustin M A.  $\beta$ -Lactoglobulin-dextran Maillard conjugates: their effect on interfacial thickness and emulsion stability [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2006, 303(2): 564-572
- [30] Krall S M, Mcfeeters R F. Pectin hydrolysis: effect of temperature, degree of methylation, pH, and calcium on hydrolysis rates [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 1998, 46(4): 1311-1315
- [31] Latorre M E, Plá M F D E, Rojas A M, et al. Blanching of red beet (*Beta vulgaris* L. var. *conditiva*) root. Effect of hot water or microwave radiation on cell wall characteristics [J]. LWT - Food Science and Technology, 2013, 50(1): 193-203