

# 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

肖敏, 易建勇, 毕金峰, 吕健, 周林燕, 周沫

(中国农业科学院农产品加工研究所, 农业部农产品加工重点实验室, 北京 100193)

**摘要:** 为明确不同干燥方式对苹果片微观结构及果胶的影响, 探讨干燥苹果片质构与果胶性质的关系, 采用热风干燥 (hot air drying, AD)、压差闪蒸干燥 (instant controlled pressure drop drying, DIC)、真空冷冻干燥 (freeze drying, FD) 等技术处理原料, 分析脱水苹果片硬脆度和微观结构, 以及果胶含量、酯化度和中性糖等性质的变化。结果表明: DIC 苹果片脆度最大, 并有较好的均匀蜂窝状结构; 与未处理鲜样相比, 干燥处理后的苹果片水溶性果胶 (water-soluble pectin, WSP) 含量和分子的线性度下降, 螯合性果胶 (CDTA-soluble pectin, CSP) 含量和分子的线性度上升, 且 WSP 含量和线性度随着热风干燥温度的上升而下降, CSP 具有相反的趋势; AD 90 °C 和 DIC 获得的脱水苹果片的 CSP 酯化度最小, 分别为 24.9±1.2% 和 23.3±0.4%。综合分析, WSP 含量影响脱水苹果片硬度和干燥过程中多孔结构的形成, 而酯化度则是影响脱水苹果片脆度的重要因素之一。

**关键词:** 苹果; 干燥方式; 果胶; 质构; 微观结构

文章编号: 1673-9078(2017)7-157-162

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.7.023

## Influence of Different Dehydration Processes on the Texture and Pectin Characteristics of Apple Chips

XIAO Min, YI Jian-yong, BI Jin-feng, LV Jian, ZHOU Lin-yan, ZHOU Mo

(Institute of Agro-products Processing Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Agro-products Processing, Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China)

**Abstract:** The effects of different drying methods on the microstructure of apple chips and pectin content and characteristics were investigated to explore the relationship between the texture of dried apple chips and pectin properties. Hot-air drying (AD), instant controlled pressure drop (DIC), and vacuum freeze-drying (FD) were used to process the raw materials. The degree of crispness and microstructure of dehydrated apple chips, and the changes in the pectin content, degree of methoxylation, and neutral sugars were investigated, and the relationship between pectin modification and texture properties of the products was analyzed. The results showed that DIC-dried apple chips exhibited the highest crispness and a honeycomb structure with uniform pores. Compared with fresh apple slices, the dehydrated apple chips showed a decrease in the water soluble pectin (WSP) content and linearity of WSP molecules, and an increase in the cyclohexane diamine tetraacetic acid (CDTA)-soluble pectin (CSP) content and linearity of CSP molecules. In addition, with increasing hot-air drying temperature, the WSP content and linearity decreased, and the CSP content and linearity increased. The degrees of methoxylation (DM) of the CSP for AD 90 °C and DIC apple chips were higher than those of the other samples at 24.9±1.2% and 23.3±0.4%, respectively. In summary, the content of WSP affected the hardness of dehydrated apple chips and the formation of a porous structure during the drying process, while DM was an important factor affecting the crispness of dehydrated apple chips.

**Key words:** apple; drying methods; texture; microstructure; pectin

收稿日期: 2016-12-22

基金项目: “十三五”国家重点研发计划课题 (2016YFD0400700、2016YFD0400704)

作者简介: 肖敏 (1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工及贮藏工程

通讯作者: 毕金峰 (1970-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 果蔬加工理论与技术

我国是世界最大的苹果生产和消费国, 苹果产量在 2015 年已超过 4000 万 t, 占世界总产量一半左右。目前, 国内鲜果消费已占苹果总产量的 80% 以上, 进一步提升鲜果消费空间已十分有限, 急需加工提高原料消耗量, 促进产业健康发展。脱水苹果片作为一种通过干燥加工制得的休闲食品, 既能较好地保留苹果原有营养成分, 又具有口感酥脆、酸甜适中的感官特

性,深受消费者喜爱。

质构是衡量脱水苹果片的重要品质之一。对于脱水果蔬,影响其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、孔隙大小和组织排列等。此外,微观水平上,细胞间的粘附、细胞壁厚度、细胞大小以及细胞壁聚合物排列方式决定孔隙大小、组织的形成及排列<sup>[1,2]</sup>。因此,细胞壁的化学成分在微观或者更高水平结构上互相作用会影响脱水果蔬的质构。细胞壁在结构上包括初生壁、次生壁及连接相邻初生壁之间的中间层,果胶是细胞壁中间层的主要多糖物质,控制着细胞壁孔隙及细胞间粘附和组织结合<sup>[3]</sup>。细胞壁中果胶可分为水溶性果胶(water-solute pectin, WSP)、螯合性果胶(CDTA-solute pectin, CSP)和碱溶性果胶( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ -solute pectin, NSP),果胶的含量和性质的变化与脱水果蔬质构形成关系密切。

干燥过程可能会引起果胶降解和结构发生改变,果胶的结构和分子交联方式可能是决定果蔬干制品质构的重要因素之一,导致脱水果蔬质构发生改变。此外,不同干燥过程对果蔬质构形成的影响不同<sup>[4,5]</sup>。针对干燥过程对果胶性质的影响,Monsoor<sup>[6]</sup>研究了喷雾干燥、冷冻干燥和真空干燥对大豆皮果胶性质的影响,发现干燥方式显著影响果胶的色泽、溶解性和流变性等性质。刘佳<sup>[7]</sup>研究了热风干燥、微波干燥和红外干燥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。然而,干燥作为一种常见的果蔬脱水方式,脱水过程中果胶的变化与果蔬质构关系研究仍然较少,两者的关系有待进一步明确。本实验以苹果为研究对象,采用热风干燥、真空冷冻干燥和压差闪蒸干燥等方式进行干燥处理,结合苹果片质构、微观结构和果胶的性质,分析了干燥过程中果胶与脱水苹果片质构的关系。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

苹果(品种:秦冠;产地:陕西静宁)购于北京小营市场,鲜苹果水分含量 $(87.0\pm 0.3)\times 10^{-2}$  g/g (wet basis, w. b.)。

### 1.2 仪器与设备

蔬菜水果切片机(CL50,法国 Robot Coupe 公司);电热恒温鼓风干燥箱(DHG-9203,上海一恒科技有限公司);果蔬膨化设备(QDPH10-1,天津市勤德新材料科技有限公司);真空冷冻干燥设备

(Alpha1-4Lplus,德国 CHRIST 公司);质构仪(TA-XT2i,英国 Stable Micro System 公司);傅里叶红外仪(TENSOR27,德国布鲁克公司);离子色谱仪(DX 600,美国戴安公司);紫外分光光度计(UV 1800,日本岛津公司);扫描电镜(S-570,日本日立公司)。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 苹果片样品制备

苹果经去皮、去核后,切成厚度 10 mm、直径 20 mm 的圆柱状,分别用电热恒温鼓风干燥箱(60 °C、75 °C、90 °C)、真空冷冻干燥设备(-80 °C条件下预冻 12 h,冷阱温度为-55 °C,真空度约为 7 Pa,托盘温度为 35 °C)、果蔬膨化设备(70 °C电热恒温鼓风干燥至含水率至 0.30 g/g (w. b.)),膨化温度 90 °C,停滞时间 10 min,抽真空温度 70 °C,抽真空时间 2 h),进行干燥至含水率低于 10%,装入自封袋,置于干燥器中备用。

#### 1.3.2 硬脆度

硬脆度测定采用质构仪。探头型号采用 HDP/BSW,测试条件为:前期测试速度 2.0 mm/s,检测速度 1.0 mm/s,后期检测速度 2.0 mm/s,触发力度 100 g。每个处理取 8 次平行。以最大力数值来表示样品硬度,单位“N”,力越大,硬度越大;以上支架到样品破碎点所移动的距离来表示脆度,单位“mm”,距离越小,脆度越大。

#### 1.3.3 扫描电镜观察

取适量样品粘贴在样品台上,进行喷金覆盖,然后置于扫描电镜观测台上,调节聚光焦距进行拍照<sup>[8]</sup>。

#### 1.3.4 细胞壁物质的制备

参考 Rose 等人<sup>[9]</sup>方法。取苹果片 10 g,加入 30 mL 95%乙醇,打浆混匀,用 30 mL 的乙醇洗净搅碎机,混合液进行抽滤,不溶物依次用 40 mL、95%的乙醇、40 mL 丙酮冲洗,重复以上步骤 3 次,最后得到均一、白色粉末状固体,于 35 °C烘箱干燥至恒重,即得到细胞壁物质(alcohol-insoluble residue, AIR)。

#### 1.3.5 细胞壁各物质分离

参考 Trinette 等人<sup>[10]</sup>方法,取 AIR 粉末 0.5 g,加入蒸馏水 90 mL,煮沸 5 min,冷却过滤,定容至 100 mL,蒸馏水透析 72 h,冻干得到水溶性果胶;取水不溶性沉淀,加入 90 mL、0.05 mol/L 的 CDTA 溶液(含 0.1 mol/L 醋酸钠溶液, pH=6.5),28 °C条件下搅拌提取 6 h,过滤,定容至 100 mL,透析 72 h(前 36 h 用 0.1 mol/L 的 NaCl 溶液、后 36 h 用蒸馏水),冻干得到螯合性果胶;滤渣再用 90 mL、0.05 mol/L  $\text{NaCO}_3$

(含 0.02 mol/L NaBH<sub>4</sub>), 28 °C 条件下过滤, 定容至 100 mL, 冻干得到碱溶性果胶 (NaCO<sub>3</sub>-soluble pectin, NSP)。

### 1.3.6 果胶含量测定

苹果片中三种果胶含量参考 Blumenkrantz 等人<sup>[11]</sup> 方法, 采用分光光度法, 以半乳糖醛酸 (Galacturonic Acid, GalA) 作为标准物质测定。苹果片中三种果胶的含量以每克细胞壁物质中含半乳糖醛酸毫克数表示 (mg GalA/g AIR)。

### 1.3.7 果胶酯化度

苹果片中果胶酯化度参考 Klavons 等人<sup>[12]</sup> 方法。其中:

$$DM = \frac{M_{OH}}{M_{GalA}} \times 100$$

式中: DM 表示酯化度, %; M<sub>OH</sub> 为甲醇的摩尔量, mol/g; M<sub>GalA</sub> 为半乳糖醛酸的摩尔量, mol/g。

### 1.3.8 果胶单糖的组成和含量

参照 Šimkovic 等人<sup>[13]</sup> 方法略作改动。称取试样 10 mg 于水解管中, 加入 4 mol/L 的三氟乙酸 4 mL,

充氮 1 min, 排出管内空气, 旋紧螺旋盖, 于 120 °C 水解 2 h, 待冷却后, 用氮气吹干水解液, 除去过量的三氟乙酸, 过 0.2 μm 滤膜后进样。分析柱为 CarboPac PA20, 流动相为 0.25 mol/L NaOH 和 1 mol/L NaAC, 流速为 0.5 mL/min, 进样体积为 10 μL, 柱温为 35 °C, 检测器为脉冲安培检测器。

### 1.3.9 果胶红外光谱

取约 1 mg 干燥的苹果果胶和约 200 mg 的溴化钾于玛瑙研钵中, 混匀研磨成细粉后压片, 利用傅里叶红外光谱仪进行红外扫描。扫描分辨率设置为 4 cm<sup>-1</sup>, 累积扫描 64 次。光谱扫描范围 4000~5000 cm<sup>-1</sup>。

### 1.3.10 数据分析

本试验中采用 SPSS 21.0 软件进行数据分析处理; 试验分析图采用 Origin 9.0 软件绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 干燥方式对脱水苹果片硬脆度的影响

表 1 不同干燥方式对苹果片水分和硬脆度的影响

Table 1 Effects of drying methods on the water content, hardness, and crispness of dehydrated apple chips

干燥方式	干燥条件	含水率/(×10 <sup>-2</sup> g/g, w. b.)	硬度/N	脆度/mm
热风干燥	60 °C	7.55±0.08 <sup>d</sup>	86.68±8.10 <sup>e</sup>	10.79±1.24 <sup>d</sup>
	75 °C	5.73±0.10 <sup>e</sup>	43.67±4.66 <sup>b</sup>	5.20±0.13 <sup>b</sup>
	90 °C	5.76±0.11 <sup>c</sup>	43.39±5.64 <sup>b</sup>	4.77±0.45 <sup>b</sup>
真空冷冻干燥		5.30±0.09 <sup>b</sup>	17.41±1.83 <sup>a</sup>	8.60±0.48 <sup>c</sup>
压差闪蒸干燥		4.42±0.06 <sup>a</sup>	44.43±2.26 <sup>b</sup>	2.90±0.15 <sup>a</sup>

从表 1 可以看出, 经过不同干燥处理后, 热风 60 °C 获得的苹果片硬度最大 (86.68 N), 真空冷冻干燥获得的苹果片硬度最小 (17.41 N), 其它干燥方式之间无显著性差异。热风干燥的苹果片脆度随着温度升高而增加, 其中热风 60 °C 的苹果片脆度最小, 压差闪蒸干燥的脆度最大。分析其主要原因可能是原料在热风 60 °C 时, 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, 表现为口感坚硬、脆性小<sup>[4]</sup>。真空冷冻干燥获得的苹果片水分在冰晶状态下直接升华, 可基本保持物料组织细胞原有的微观结构, 形成均匀多孔性的结构。物料整体收缩小, 硬度低, 但是口感较酥软, 表现为脆度小。

### 2.2 干燥方式对脱水苹果片微观结构的影响

通过扫描电镜观察不同干燥方式对苹果片微观结构的影响, 扫描图片见图 1。

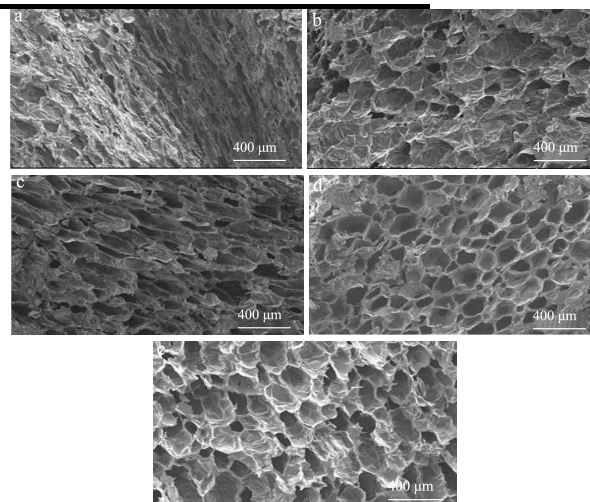


图 1 不同干燥方式脱水苹果片扫描电镜图

Fig.1 SEM images of dehydrated apple chips prepared by different drying methods

注: a 表示 AD 60 °C; b 表示 AD 75 °C; c 表示 AD 90 °C; d 表示 FD; e 表示 DIC。

从图 1 可以看出,不同干燥处理后苹果片组织微观结构明显不同。热风 60 °C 和 75 °C 干燥获得的苹果片内部干缩严重,水分散失后大部分结构比较致密。而苹果片在热风 90 °C 条件下因为水分散失速度提高,产生更多更大的孔隙结构,表现为脆度大,这与前面质构结果(表 1)一致。真空冷冻干燥与压差闪蒸干燥的苹果片组织结构疏松,孔隙较大且均匀,呈现较好的蜂窝状结构。而这些微观结构的不同可能是因为干燥处理影响细胞间起粘结作用的中间层果胶等化合物性质的改变,导致组织结构形态的改变<sup>[14]</sup>,进一步影响脱水苹果片的质构。

### 2.3 干燥方式对脱水苹果片果胶含量的影响

半乳糖醛酸是果胶的主要的组成单元,因此可用其含量来衡量果胶在整个 AIR 中所占的比例。不同干燥方式,总果胶和水溶性果胶(WSP)、螯合性果胶(CSP)和碱溶性果胶(NSP)这三种果胶组分的含量不同。总果胶含量产生差异的原因可能是干燥方式

对苹果片的组织结构产生了不同的影响,从而导致果胶的提取率不同。对于热风干燥,随着温度的升高,WSP 和 NSP 含量下降,CSP 含量上升。WSP 可能在干燥过程中一部分可能随着苹果汁液溶出,另一部分可能转化为 CSP。苹果片在真空冷冻干燥条件下,由于物料前期被快速冷冻,且在冷冻干燥过程中水分保持冻结状态,细胞结构未被破坏,WSP 含量保持较高。WSP 含量高导致细胞之间粘结强度低,机械强度低,导致苹果片硬度低<sup>[15]</sup>。在热风干燥 90 °C 和压差闪蒸干燥过程中,WSP 含量显著降低,表明果胶物质流失或发生降解,这将引起其对组织支撑作用下降,同时导致物料粘弹性和可塑性增加,加上水分散失速度较快时,容易形成较多的多孔结构。而与热风 90 °C 相比,热风 60 °C 和 75 °C 过程中苹果片 WSP 相对较高,组织支撑作用较大,粘弹性和可塑性更低,同时较低温度下水分散失速度较慢时,导致孔状结构形成较少,使得最终苹果片的组织结构致密。

表 2 不同干燥方式对苹果片 WSP、CSP、NSP 半乳糖醛酸含量

Table 2 Effects of drying methods on the galacturonic acid content of WSP, CSP, and NSP in dehydrated apple chips

干燥方式	干燥条件	半乳糖醛酸/(mg/g AIR)			
		WSP	CSP	NSP	Total GalA
热风干燥	60 °C	86.90±2.81 <sup>d</sup>	41.45±0.09 <sup>b</sup>	75.02±5.95 <sup>d</sup>	203.37
	75 °C	74.68±1.84 <sup>c</sup>	40.34±1.69 <sup>b</sup>	65.09±5.21 <sup>c</sup>	180.11
	90 °C	33.84±5.76 <sup>a</sup>	47.34±4.23 <sup>c</sup>	45.78±5.20 <sup>b</sup>	126.96
真空冷冻干燥		102.70±1.80 <sup>e</sup>	38.81±1.13 <sup>b</sup>	33.56±7.27 <sup>a</sup>	175.07
压差闪蒸干燥		64.22±0.86 <sup>b</sup>	56.12±2.88 <sup>d</sup>	51.84±1.92 <sup>b</sup>	172.18
鲜样		112.70±0.87 <sup>f</sup>	32.05±2.75 <sup>a</sup>	73.36±1.43 <sup>d</sup>	218.11

### 2.4 干燥方式对脱水苹果片酯化度的影响

表 3 不同干燥方式对苹果片 WSP、CSP、NSP 酯化度的影响

Table 3 Effects of drying methods on degree of methoxylation of WSP, CSP, and NSP in dehydrated apple chips

干燥方式	干燥条件	酯化度/%		
		WSP	CSP	NSP
热风干燥	60 °C	59.74±3.18 <sup>a</sup>	37.60±3.62 <sup>b</sup>	1.31±0.00 <sup>ab</sup>
	75 °C	60.53±0.70 <sup>a</sup>	34.60±0.06 <sup>b</sup>	1.18±0.31 <sup>a</sup>
	90 °C	71.84±0.73 <sup>b</sup>	24.86±1.24 <sup>a</sup>	0.70±0.02 <sup>a</sup>
真空冷冻干燥		69.18±1.42 <sup>b</sup>	33.81±0.14 <sup>b</sup>	5.05±0.83 <sup>c</sup>
压差闪蒸干燥		67.47±1.98 <sup>b</sup>	23.29±0.44 <sup>a</sup>	2.26±0.18 <sup>b</sup>
鲜样		69.80±0.64 <sup>b</sup>	36.40±5.79 <sup>b</sup>	1.68±0.30 <sup>ab</sup>

酯化度是指果胶主链上聚半乳糖醛酸被甲酯化的程度,是果胶的一个重要功能指标,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。从表 3 可以看出,WSP 酯化度最高,其次是 CSP,NSP 的酯化度最小。NSP 的酯化度较低可能是由于 NSP 提取

过程加入的碱致使其发生皂化反应,酯键断裂所引起。热风干燥随着温度的升高,酯化度升高,可能是温度在 60 °C 时,PME 酶活性高,对 WSP 甲酯基的水解作用大,因此热风 60 °C 条件下苹果片 WSP 酯化度较低。而对于 CSP,酯化度随着温度的升高而降低,可

能是高温使果胶甲酯键水解。CSP 酯化度低，游离的羧基多，更易与组织中金属离子交联<sup>[16]</sup>，有利于增强苹果片多孔强度，这可能是热风 90 °C 和压差闪蒸干燥处理获得的脱水苹果片具有较大脆度的原因。

### 2.5 干燥方式对脱水苹果片果胶单糖的影响

果胶是以半乳糖醛酸为主链，不同类型的单糖以各种方式连接在主链上形成侧链，与侧链相关的中性糖包括岩藻糖 (Fuc)、鼠李糖 (Rha)、阿拉伯糖 (Ara)、半乳糖 (Gal) 和木糖 (Xyl) 等，侧链的数目、连接方式会因不同因素而有很大的变化。果胶分子主要由同型聚半乳糖醛酸 (Homogalacturonan, HG)、鼠李聚半乳糖醛酸 I (Rhamnagalacturonan- I, RG I)、鼠李聚半乳糖醛酸 II (Rhamnagalacturonan- II, RG II) 三个结构区域构成，HG 主要是半乳糖醛酸以 (1,4) 糖苷键连接而成，RG I 骨架由半乳糖醛酸和鼠李糖组成，RG II 的主要结构是 HG<sup>[17]</sup>。单糖组分与其比率能反映果胶的一些结构信息，GalA 与 Fuc+Rha+Ara+

Gal+Xyl 的比值可以反映果胶的线性度；Rha/GalA 能够反映主链的变化，即 RG 类型果胶在整个果胶所占比例；(Ara+Gal)/Rha 反映 RG I 支链与 Rha 的比值<sup>[18]</sup>。

由表 4 可见，与鲜样相比，所有干燥方式获得的苹果片 WSP 分子的线性度 (糖比率 1) 下降，CSP 分子线性度增加，热风干燥获得的苹果片的 WSP 分子线性度随着温度升高而下降，CSP 分子的线性度随着温度的升高而升高，说明干燥过程中 WSP 分子链发生了断裂，生成了线性度较大的 CSP 分子链，这与上面 WSP 和 CSP 含量变化趋势一致；所有苹果片中 RG 类型果胶所占的比例都较小 (糖比率 2)；三种果胶中，WSP 的 RG I 支链最多 (糖比率 3)，这也能证明了 WSP 与细胞壁其它物质粘结作用力最小，最易提取。结合果胶含量变化及糖比率的性质，可以进一步证实水溶性果胶在干燥过程发生了解离，转化成螯合性果胶，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，这可能是热风 90 °C 和压差闪蒸干燥获得苹果片具有较大脆度的原因之一。

表 4 不同干燥方式对苹果片 WSP、CSP、NSP 中性糖比率的影响

Table 4 Effects of drying methods on the neutral sugar ratios of WSP, CSP, and NSP in dehydrated apple chips

糖比率	热风干燥			真空冷冻干燥	压差闪蒸干燥	鲜样	
	60 °C	75 °C	90 °C				
WSP	1	11.92	10.03	6.05	7.19	5.64	13.65
	2	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01
	3	10.47	8.50	9.78	6.87	6.92	7.18
CSP	1	37.05	35.02	43.32	26.70	33.55	26.57
	2	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01
	3	5.61	4.42	5.64	4.21	3.98	5.12
NSP	1	13.01	8.67	6.04	3.79	6.47	5.65
	2	0.01	0.02	0.02	0.04	0.03	0.03
	3	3.84	3.54	4.57	3.74	3.21	4.65

注：表中 1 表示 GalA/(Fuc+Rha+Ara+Gal+Xyl)；2 表示 Rha/GalA；3 表示 (Ara+Gal)/Rha。

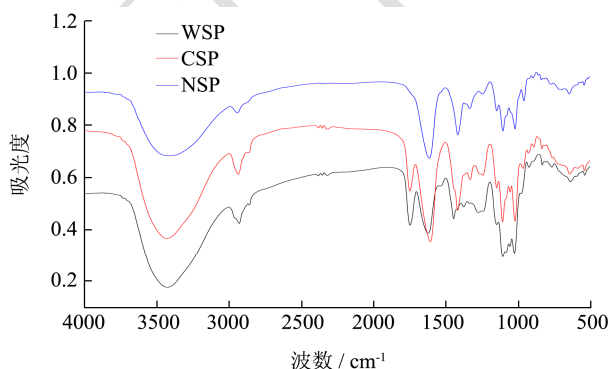


图 2 压差闪蒸处理苹果片 WSP、CSP 和 NSP 的傅里叶红外光谱图

Fig.2 Diffuse reflectance Fourier transform infrared spectra of WSP, CSP, and NSP in DIC-dehydrated apple chips

### 2.6 干燥方式对脱水苹果片果胶傅里叶红外光谱的影响

傅里叶红外光谱法可鉴别不同干燥方式处理后，苹果片果胶变化情况，同时可用来检测酯化度的改变。由于不同干燥方式的果胶傅里叶红外光谱没有明显差异，图 2 仅列出压差闪蒸干燥后苹果片果胶红外光谱。

红外光谱在 3600~2500 cm<sup>-1</sup> 范围内出现的峰主要来自于半乳糖醛酸分子内和分子间的氢键<sup>[19]</sup>。红外光谱在 2000~1000 cm<sup>-1</sup> 范围内的峰表示果胶主要化学官能团，这些区域用来鉴定果胶的不同种类。1800~1600 cm<sup>-1</sup> 提供了比较不同类型果胶的特别信息。果胶在

1760~1740  $\text{cm}^{-1}$  处的强峰为酯化羧基的伸缩振动, 1630~1650  $\text{cm}^{-1}$  处的峰为果胶自由羧基振动引起<sup>[6]</sup>。WSP 和 CSP 这两个波谱范围峰分别是由甲酯化的羧基和未甲酯化的羧基红外吸收引起。由图可以看出, WSP 在 1760~1740  $\text{cm}^{-1}$  处振动强度大于 CSP, 而 CSP 在 1630~1650  $\text{cm}^{-1}$  处振动强度更大, NSP 在 1760~1740  $\text{cm}^{-1}$  范围内有无明显吸收峰, 表明 NSP 酯化度非常低。这些结果与前面三种果胶酯化度测定结果一致, 即 WSP 酯化度最高, 其次是 CSP, NSP 最低。

### 3 结论

综合硬脆度和微观结构等指标, 压差闪蒸干燥获得的苹果片具有较好的质构特征, 即最大的脆度、适中的硬度和均匀的蜂窝状孔隙结构。从细胞物质组分上分析, 果胶在苹果片干燥过程中的变化是引起质构变化的重要因素。一方面, 真空冷冻干燥下, 细胞结构未被破坏, WSP 含量较高导致细胞之间粘结强度低, 机械强度低, 导致苹果片硬度低; 另一方面, 热风干燥和压差闪蒸干燥过程中, 高温导致细胞结构被破坏, WSP 含量低使得组织支撑作用下降, 粘弹性和可塑性增加, 水分出散失速度较快时, 有助于形成稳定的多孔结构。

### 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] 韩涛, 李丽萍, 艾启俊. 漂烫对蔬菜果实质地的影响及低温漂烫作用的机理[J]. *食品工业科技*, 2003, 2: 89-92  
HAN Tao, LI Li-ping, AI-Qi jun. The changes of texture in fruits and vegetables exposed to blanching and the effect of low temperature blanching on texture [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2003, 2: 89-92
- [3] 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
- [4] 蒋小雅, 郑炯. 不同干燥方式对梨干质构特性和微观结构的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(3): 137-141  
JIANG Xiao-ya, ZHENG Jiong. Effects of different drying methods on texture and microstructure characteristics of pears [J]. *Food and Fermentation Industries Editorial Staff*, 2016, 42(3): 137-141
- [5] 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
- [6] Monsoor M A. Effect of drying methods on the functional properties of soy hull pectin [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2005, 61(3): 362-367
- [7] 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  
LIU Jia. Influence of different drying methods of apple pomace on pectin yield and quality [J]. *Journal of Inner Mongolia University for Nationalities*, 2010, 25(4): 398-401
- [8] 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 methods on quality of sweet potato products [J]. *Food Science*, 2011, 32(16): 108-112
- [9] Rose J K, Hadfield K A, Labavitch J M, et al. Temporal sequence of cell wall disassembly in rapidly ripening melon fruit [J]. *Plant Physiology*, 1998, 117(2): 345-361
- [10] Stolle-Smits T, Beekhuizen J G, Recourt K, et al. Changes in pectic and hemicellulosic polymers of green beans (*Phaseolus vulgaris L.*) during industrial processing [J]. *J. Agric. Food Chem.*, 1998, 45(12): 4790-4799
- [11] Blumenkrantz N, Asboehansen G. New method for quantitative determination of uronic acids [J]. *Analytical Biochemistry*, 1973, 54(2): 484-489
- [12] Klavons J A, Bennett R D. Determination of methanol using alcohol oxidase and its application to methyl ester content of pectins [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 1986, 34(4): 597-599
- [13] Ivan S, Alberto N, Garyd S, et al. Fractionation of sugar beet pulp by introducing ion-exchange groups [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2009, 78(4): 806-812
- [14] Marsilio V, Lanza B, Campestre C, et al. Oven-dried table olives: textural properties as related to pectic composition [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2000, 80(8): 1271-1276
- [15] Prestamo G, Fuster C, Risueno M C. Effects of blanching and freezing on the structure of carrots cells and their implications for food processing [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1998, 77(2): 223-229

(下转第 117 页)