

干燥条件对橘皮颜色与结构性能的影响

徐明月^{1,2}, 钟耀广², 毕金峰¹, 周沫¹, 韩丹丹¹, 郑金铠¹

(1. 中国农业科学院农产品加工研究所, 农业部农产品加工综合性重点实验室, 北京 100193)

(2. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306)

摘要: 柑橘皮富含经济和药用价值, 为寻求更优的干燥方式以实现资源全利用, 本文对比研究了真空冷冻、热风、中短波红外干燥橘皮的颜色和结构性能。结果表明: 不同干燥条件对橘皮色泽和结构性能影响显著 ($p < 0.05$)。褐变引起橘皮总色差值变化, 而类胡萝卜素降解导致 b 值降低; 在干燥温度 $60\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, 干燥橘皮 L 值, a 值, b 值和类胡萝卜素含量随干燥温度升高而降低, ΔE 值和褐变度随干燥温度升高而升高。微观结构的改变则为干燥橘皮粗纤维含量、质构参数和干燥效率、复水性等性质研究提供了参考方法, 微观结构疏松且未受损伤, 孔隙大, 分布均匀, 则粗纤维含量较高, 硬脆度适中, 复水性好, 反之结构性能较差; 较真空冷冻和热风干燥, 中短波红外低温干燥 ($60\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$) 对橘皮的颜色和结构保持最好。本文为橘皮的干燥产业化生产提供了重要理论依据。

关键词: 橘皮; 干燥; 色泽; 质构; 微观结构

文章编号: 1673-9078(2016)8-197-203

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.8.030

Effect of Different Drying Conditions on Color and Texture of Citrus Peels

XU Ming-yue^{1,2}, ZHONG Yao-guang², BI Jin-feng¹, ZHOU Mo¹, HAN Dan-dan¹, ZHENG Jin-kai¹

(1. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of

Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China) (2. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Citrus peels have significant economic and medicinal values. To realize the full utilization of citrus fruits, a comparative study was carried out to illustrate the color and textural property of citrus peels dried by freeze drying, hot-air drying, and mid- and short-wave infrared radiation drying. Different drying conditions significantly affected the color and textural property of citrus peels ($p < 0.05$). The browning reaction caused ΔE changes in citrus peels, and the degradation of carotenoid led to a decrease in b value. When the drying temperature was in the range of $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, L value, a value, b value, and total carotenoid content of dried citrus peels decreased with increasing temperatures, and ΔE value and browning index were elevated. The variation of microstructure provided a theoretical basis to further study the crude fiber, textural parameters, drying efficiency, and rehydration of citrus peels. If the microstructure was loose, undamaged, and regular, the dried citrus peels had high crude fiber content, suitable hardness and crispness, and good rehydration. The mid- and short-wave infrared radiation drying at relatively low drying temperatures ($60\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$) gave better color and structural quality compared to that by freeze-drying and hot-air drying. This study provides an important theoretical basis for the industrial production of dried citrus peels.

Key words: citrus peels; drying; color; texture; microstructure

柑橘是世界第一大水果, 中国是世界上最大的柑橘生产国。目前, 我国柑橘除用于鲜食外, 主要用于加工罐头和果汁。随着柑橘加工业的飞速发展, 每年长其储藏期具有重要意义; 与此同时, 柑橘皮富含香精油、膳食纤维、黄酮等多种风味和健康功效成分,

收稿日期: 2015-09-15

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (31401581); 国家自然科学基金海外合作项目 (31428017)

作者简介: 徐明月 (1991-), 女, 硕士研究生

通讯作者: 郑金铠 (1982-), 男, 博士, 研究员, 果蔬加工与营养研究; 毕金峰 (1970-), 男, 博士, 研究员, 果蔬加工营养研究

其干燥产品 (部分品种可制作陈皮入药) 已广泛销售产生大量柑橘皮副产物。其中, 除少量用于陈皮和动物饲料外, 大部分作为垃圾直接填埋, 不仅污染环境, 而且浪费资源, 给企业造成了巨大损失^[1-2]。为了提高柑橘副产物利用率, 国内外研究柑橘皮的各种精深加工途径: 一是开发新型柑橘皮制品, 如果皮酱、果皮干等; 二是将柑橘皮作为生物活性物质来源, 从中提取精油、果胶、膳食纤维、色素等物质; 三是通过生物转化, 制备生物燃料、酶制剂、食品添加剂等^[3]。

由于柑橘皮含水量高, 不易储藏, 干燥处理对延

于国内外各大市场。已有多种可产业化的干燥方式：热风干燥因其操作简单、成本低等优点被广泛使用，但过长的加热时间、高温则易对产品品质造成不良影响，同时造成产品营养成分的严重损失^[4]；真空冷冻虽然能最大限度的保持产品原有物理形态及营养品质，但其能耗高，投资大，不易大规模生产^[5]。因此，寻求柑橘皮干燥新技术至关重要。而中短波红外干燥作为一种新型农副产品加工技术，具有加热迅速且均匀，穿透性强、节能等优点，目前已成功运用于多种果蔬干燥，如番木瓜、苹果片、香菇等^[6]，不仅能大大缩短果蔬干燥时间，而且能够改善产品感官及营养品质。

颜色和结构性能是干燥类产品的两个重要指标，而干燥过程（条件）对柑橘皮的颜色和结构性能的影响并不明晰。本文对比研究了真空冷冻干燥、热风干燥、中短波红外干燥橘皮的颜色（色泽、褐变度和类胡萝卜素含量）和结构性能（微观结构、粗纤维、质构、干燥速率和复水性），并探究其变化规律。本研究为干燥橘皮产品的品质评价（颜色和质构）及其产业化生产提供了重要的科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜柑橘（浙江黄岩柑桔）购于北京市海淀区清河小营农副产品批发市场；新鲜柑橘平均重量为 151.83 ± 4.65 g，橘皮厚度为 2.68 ± 0.11 mm，初始含水率为 2.50 ± 0.10 (g/g d.w.)；贮存条件为 $4\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷库中；正己烷，浓硫酸与氢氧化钠均购自国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

真空冻干机，Alphal-4Lplus，德国 Christ 公司；电热鼓风干燥箱，DHG-9023A，上海精宏实验设备有限公司；中短波红外干燥箱，Senttech，江苏泰州圣泰科红外科技有限公司；电子天平，AUW 220，日本 Shimadzu 公司；色彩色差仪，D25L，美国 Huterlab 公司；高速冷冻离心机，3K 15，德国 Sigma 公司；紫外可见分光光度计，UV 1800，日本 Shimadzu 公司；物性分析仪，Ta. xT 2i/50，英国 Stable Micro System 公司；粗纤维测定仪，Fibertec 2010，丹麦 FOSS 公司；水浴恒温振荡器，HZS-HA，中国哈尔滨市东联电子技术开发有限公司；扫描电子显微镜，JSM-6700F，日本电子（JEOL）公司。

1.3 橘皮干燥

1.3.1 样品前处理

选取颜色、大小基本一致的柑橘为试验原料，清洗，擦干表面水分，八分切，手工去皮；将橘皮贮存于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下不超过 2 h（均湿），以备干燥。

1.3.2 真空冷冻干燥

称取 30.00 g 橘皮于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下预冻 24 h，均匀平铺于真空冷冻干燥机的托盘上，温度为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，真空度为 10^{-3} MPa；每隔 2 h 快速取出称重（精确至 0.01 g）并做记录；当橘皮水分含量达到 0.05 (g/g d.w.) 停止干燥，干制品密封避光保存，以备指标测定；每组试验重复三次。

1.3.3 热风干燥

称取 30.00 g 橘皮均匀平铺于热风干燥箱的加热板上，分别控制干燥温度在 60、70、80、90 $^{\circ}\text{C}$ ；每隔 10 min 快速取出称重（精确至 0.01 g）并做记录；当橘皮水分含量达到 0.05 (g/g d.w.) 停止干燥，干制品密封避光保存，以备指标测定；每组试验重复三次。

1.3.4 中短波红外干燥

称取 30.00 g 橘皮均匀平铺于中短波红外干燥箱的加热板上，固定红外功率为 1350 W，分别控制干燥温度在 60、70、80、90 $^{\circ}\text{C}$ ；每隔 5 min 快速取出称重（精确至 0.01 g）并做记录；当橘皮水分含量达到 0.05 (g/g d.w.) 停止干燥，干制品密封避光保存，以备指标测定；每组试验重复三次。

1.4 橘皮色泽相关指标测定

1.4.1 色泽

采用 Hunterlab-D25L 色彩色差仪进行色泽测量，分别用 L 值、 a 值和 b 值和 ΔE 值表示。其中 L 值为亮度值， a 值为红绿值， b 值为黄蓝值， ΔE 值为总色差值， ΔE 值越大说明干燥过程中橘皮色泽变化越大，计算公式为^[7]：

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2} \quad (1)$$

式中： L_0 、 a_0 、 b_0 指新鲜橘皮的色泽值； L 、 a 、 b 指干燥橘皮的色泽值。

1.4.2 褐变度

精确称取干燥橘皮粉末 1.00 g，加入 100 mL 蒸馏水，混匀后静置 24 h；然后将混合物在 10000 r/min 条件下离心 10 min，得到上清液；以蒸馏水作空白对照，将上清液在 420 nm 处比色，吸光值即为干燥橘皮的褐变度^[8]。每组试验重复三次，取平均值。

1.4.3 类胡萝卜素

精确称取一定量的干燥橘皮粉末,用 15 mL 正己烷提取 3 次,直至提取液无色。提取时混合物先在室温下超声 10 min,然后在 4 °C 条件下 10000 r/min 离心 10 min,收集并合并三次上清液并用提取剂定容至 50 mL。以正己烷作空白对照,在 450 nm 处检测上清液吸光度。每组试验重复三次,取平均值。类胡萝卜素含量通过 β -胡萝卜素的消光系数 $E^{1\%}$ 计算,计算公式为^[9]:

$$M_{\text{类胡萝卜素}} = \frac{A_{450} \times V \times 10^4}{E^{1\%} \times m} \quad (2)$$

式中: $M_{\text{类胡萝卜素}}$ 为总类胡萝卜素含量 ($\mu\text{g/g}$); V 为提取液总体积 (mL); $E^{1\%}$ 为 β -胡萝卜素在正己烷中的消光系数,为 2505; m 为样品质量 (g)。

1.5 橘皮质构相关指标测定

1.5.1 微观结构

对橘皮的横断面进行扫描,从而测定其微观结构。分别取真空冷冻干燥、热风干燥、中短波红外干燥橘皮及新鲜的橘皮贴到扫描样品台上,先镀膜,再通过 JSM-6700F 扫描电子显微镜进行扫描观察、拍照(放大倍数为 200)。

1.5.2 粗纤维含量

采用重量法通过粗纤维测定仪对橘皮粗纤维含量进行测定。精确称取 1.00 g 干燥橘皮粉末放在预干燥的坩埚里,先加入 150 mL 煮沸的 1.25% 硫酸,加热煮沸,保持体积恒定,维持 30 min,过滤;沸水洗涤 1 次,过滤;再加入 150 mL 煮沸的 1.25% 氢氧化钠溶液,加热煮沸,保持体积恒定,维持 30 min,过滤;沸水水洗 3 次,过滤;然后将坩埚放置在 130 °C \pm 2 °C 烘箱中烘干 2 h。冷却坩埚到室温,称重精确到 0.10 mg;最后将坩埚放置在 525 °C \pm 10 °C 马弗炉中烘干 3 h 以灰化含碳物质,冷却坩埚到室温(在干燥器中),称重精确到 0.10 mg。每组试验重复三次,取平均值。粗纤维含量计算公式为^[10]:

$$X = \frac{m_1 - m_2}{m} \times 100 \quad (3)$$

式中: X 为粗纤维含量 (%); m_1 为 130 °C \pm 2 °C 烘箱中 2 h 后坩埚和样品的重量 (g); m_2 为 525 °C \pm 10 °C 马弗炉中 3 h 后坩埚和样品的重量 (g); m 为样品重量 (g)。

1.5.3 质构

采用质构仪进行脆度与硬度的测定。探头: CFS; 测定模式: 下压过程测量力; 测试条件: 测试前速度为 1 mm/s, 测试速度为 0.5 mm/s, 测试后速度为 1 mm/s, 测试距离为 5 mm。以测试中产生的距离为脆

度(单位为 mm), 距离越小, 脆度越大, 反之脆度越小; 样品断裂所需最大力为硬度(单位为 N), 力越大, 硬度越大, 反之硬度越小。每个样品重复 10 次, 取平均值^[1]。

1.5.4 干燥效率(干燥时间)

水分含量 (moisture content, M) 计算公式为:

$$M_t = \frac{m_t - m_0}{m_0} \quad (4)$$

式中, M_t 为任意时刻干基含水率, (g/g d.w.); m 为任意时刻物料重量, g; m_0 为物料干基重量, g。干燥时间为橘皮水分含量达到 0.05 (g/g d.w.) 时所需的总时间。

1.5.5 复水性

精确称取一定量的干燥橘皮于烧杯中, 按 1:100 比例加入蒸馏水, 在 30 °C 恒温条件下进行复水试验。前 1 h 每隔 15 min 称重样品一次, 后 1 h 每隔 30 min 称重样品一次, 称重前需用滤纸轻轻吸去表面水分, 复水 2 h 后停止试验。每组试验重复三次, 取平均值。复水比计算公式为^[11]:

$$RR = \frac{m_r}{m_d} \quad (5)$$

式中: m_r 为干燥橘皮复水后的质量 (g); m_d 为干燥橘皮质量 (g)。

1.6 统计学分析

利用 Excel 2007 和 Origin 8.0 软件进行数据处理及图形绘制; 利用 SPSS 19.0 软件进行数据分析。所有试验均采用 3 个重复, 数据均以平均值 \pm 标准差 (mean \pm S.D.) 表示。多组数据间差异采用单因素方差分析 (ANOVA), 当 ($p < 0.05$) 时认为差异显著。

2 结果与讨论

2.1 不同干燥条件对橘皮色泽与褐变度的影响

不同干燥条件下柑橘皮的图片, 如图 1 所示。一方面, 与鲜橘皮相比, 真空冷冻干燥橘皮收缩和形变最小, 其次是中短波红外干燥橘皮, 而热风干燥橘皮收缩和形变最严重; 且中短波红外干燥和热风干燥过程中, 随着温度的升高 (60 °C~90 °C), 干燥橘皮收缩和形变加剧, 低温干燥 (60 °C~70 °C) 对于橘皮形状的保持优于高温干燥 (80 °C~90 °C)。另一方面, 真空冷冻干燥橘皮色泽最接近鲜样, 其次是中短波红外干燥橘皮, 而热风干燥橘皮色泽变化最大, 且随着温度的升高, 色泽变化越大。因此, 从感官性质判断,

真空冷冻干燥橘皮效果最佳,其次是中短波红外干燥,而热风干燥橘皮效果相对较差,且低温干燥(60℃~70℃)优于高温干燥橘皮(80℃~90℃)。

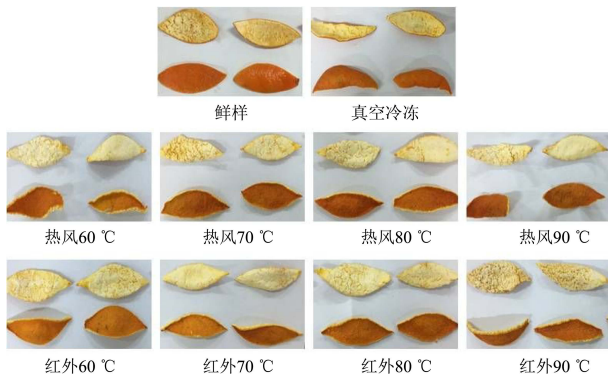


图1 不同干燥条件下橘皮图片

Fig.1 Appearance of citrus peels in different drying conditions

不同干燥条件下橘皮的色泽如图2所示。由结果可知,真空冷冻干燥橘皮L、a、b值最大,ΔE值最小。相同干燥温度下,中短波红外干燥橘皮L、a、b值均大于热风干燥橘皮,而ΔE值小于热风干燥。在干燥温度60℃~90℃之间,干燥橘皮L、a、b值随着干燥温度的升高呈现下降趋势,ΔE值随着温度的升高呈现升高趋势。在热风干燥中,L、b、ΔE值在60℃~90℃各处理组之间均呈现显著性差异(p<0.05),a值在60℃和70℃处理组、80℃和90℃处理组之间均未呈现显著差异(p>0.05)。在中短波红外干燥过程中,L、b、ΔE值在60℃~90℃各处理组之间均呈现显著性差异(p<0.05),a值在70℃和80℃处理组之间未呈现显著差异(p>0.05)。

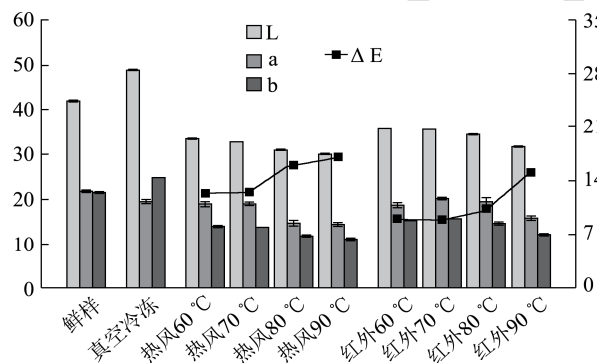


图2 不同干燥条件对橘皮色泽的影响

Fig.2 Effect of different drying conditions on the color of citrus peels

不同干燥条件下橘皮褐变度如图3所示。由图可知,真空冷冻干燥橘皮褐变度值最小,热风干燥90℃处理组褐变度值最高。相同干燥温度下,热风干燥橘皮褐变度值高于中短波红外干燥橘皮。在干燥温度60℃~90℃之间,干燥橘皮褐变度随温度升高而升高。在热风干燥中,60℃处理组和70℃处理组之间

未呈现显著差异(p>0.05),而与80℃处理组和90℃处理组均呈现显著性差异(p<0.05)。在中短波红外干燥过程中,各处理组之间均呈现显著性差异(p<0.05)。由此可知,橘皮褐变度结果与色泽测定结果基本一致:高温和过长的加热时间使得橘皮褐变加剧,从而总色差值ΔE值增加。

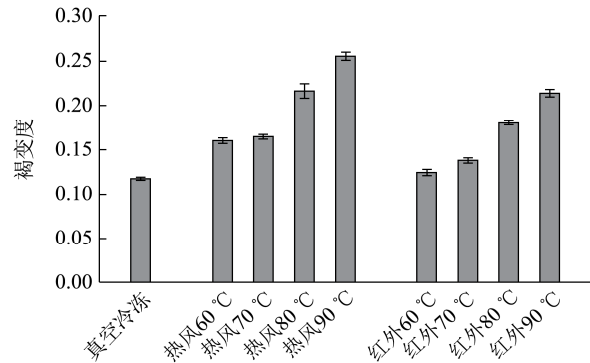


图3 不同干燥条件对橘皮褐变度的影响

Fig.3 Effect of different drying conditions on the browning index of citrus peels

2.2 不同干燥条件下类胡萝卜素的含量变化及橘皮颜色变化机制分析

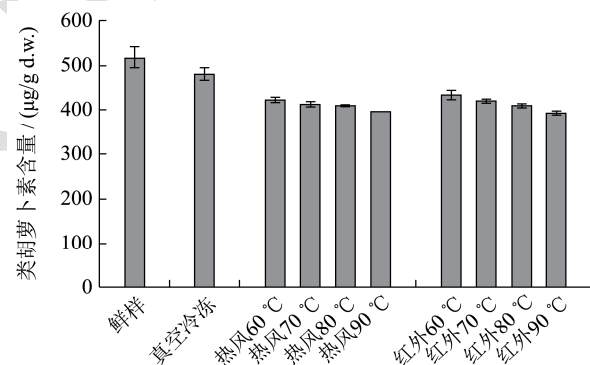


图4 不同干燥条件对橘皮类胡萝卜素含量的影响

Fig.4 Effect of different drying conditions on the total carotenoids content of citrus peels

类胡萝卜素是橘皮中的主要呈色物质,图4为不同干燥条件下橘皮的类胡萝卜素含量。结果显示,不同干燥橘皮类胡萝卜素含量均低于鲜橘皮类胡萝卜素含量,真空冷冻干燥橘皮类胡萝卜素含量保持最高。相同干燥温度下,中短波红外干燥橘皮类胡萝卜素含量略高于热风干燥。在干燥温度60℃~90℃之间,干燥橘皮类胡萝卜素含量随温度升高而略有降低。类胡萝卜素对光、热和氧气很敏感,这些因素可能促使类胡萝卜素发生氧化和降解,从而降低其含量。而红外干燥由于其加热速度快,相较于热风干燥,能更好的保持橘皮类胡萝卜素含量,这与橘皮在干燥过程中

b 值的变化相对应。

色泽对于干制品来说是一个重要的感官品质，它的变化直接影响其潜在应用。而在橘皮干燥过程中，其颜色加深并非由类胡萝卜素的含量及结构变化引起；干燥温度和持续的干燥时间使得橘皮产生美拉德等非酶褐变、酚类物质酶促褐变等一系列反应，从而导致其色泽变化。高温和长时间干燥会加速橘皮褐变，褐变度增加，同时总色泽差异值增加。*L* 值随温度降低可能是因为美拉德反应所致，而黄色和橙色相关的类胡萝卜素等物质的降解可能是 *b* 值降低的主要因素，类似的研究也出现在橘皮的微波干燥中^[7]。由于真空冷冻干燥中橘皮处于低温和真空环境中，隔绝了热和氧气，因此色泽保持最好；热风干燥中橘皮大面积接触氧气，且加热时间较长，因此色泽变化最大；红外干燥加热速率快于热风干燥，可能是色泽保持较优的主要原因。

2.3 不同干燥条件对橘皮显微结构、粗纤维和硬脆度的影响

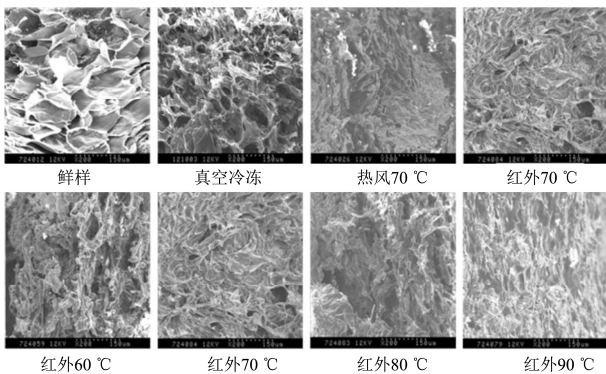


图5 不同干燥条件对橘皮微观结构的影响

Fig.5 Effect of different drying conditions on the microstructure of citrus peels

图 5 显示了不同干燥方式下橘皮断面微观结构图。由图可以看出，真空冷冻干燥橘皮微观结构图孔隙大且分布均匀，几乎不受损伤。热风干燥橘皮微观结构图孔隙较小，分布较密，密度较大，局部细胞受损，这可能是由于干燥过程中产生的收缩应力等所致；而中短波红外干燥橘皮微观结构图孔隙较热风干燥橘皮大，略不规则。橘皮的显微结构不仅验证了不同干燥橘皮的宏观形态结构、收缩性等特点，还为下述粗纤维含量、质构参数和干燥速率、复水性等性质提供了重要的理论依据。

表 1 为不同干燥条件下橘皮的粗纤维含量值、硬度和脆度。由粗纤维结果可知，干燥橘皮粗纤维含量均低于鲜样，且均与其存在显著性差异 ($p < 0.05$)。在

干燥温度 60 °C~90 °C 之间，干燥橘皮粗纤维含量随温度上升总体呈略有下降趋势，各干燥处理组之间均未呈现显著性差异 ($p > 0.05$)。粗纤维是植物细胞壁的主要成分，包括纤维素、半纤维素、木质素及角质等成分。粗纤维的变化能反映橘皮在干燥过程中细胞壁受破坏的程度。干燥加工过程随着橘皮水分含量的减少，细胞逐渐收缩，细胞壁被破坏。同时随着温度的升高，水分扩散速率增加，细胞壁受损越严重，粗纤维含量越少。

由硬度结果可知，热风干燥 60 °C 橘皮硬度最大，红外干燥 90 °C 橘皮硬度最小。在干燥温度 60 °C~90 °C 之间，干燥橘皮硬度随温度升高而降低。在热风干燥中，70 °C 和 80 °C、80 °C 和 90 °C 处理组之间均未呈现显著差异 ($p > 0.05$)。在中短波红外干燥过程中，60 °C 和 70 °C、80 °C 和 90 °C 处理组之间均未呈现显著差异 ($p > 0.05$)。研究表明，产品组织结构是产品质量性能的一个重要而复杂的因素，结构的变化往往会影响产品的水分吸附能力，而干燥加工往往会引起产品变形和内部张力增加，从而破坏和损伤其内部组织结构^[12]。真空冷冻干燥通过冷冻和升华去除橘皮内部水分，最大程度的保持了橘皮形状，组织结构破坏最小，且产生的孔隙较大，因此硬度适中。而热风干燥橘皮形变最严重，内部组织结构破坏最严重，产生的孔隙小，密度大，硬度大。中短波红外干燥的热扩散和水分扩散一致，因此形状保持优于热风干燥，孔隙大于热风干燥，硬度也小于热风干燥。同时，随着干燥温度的上升，干燥橘皮水分蒸发越快，可溶性物质迁移越快，孔隙越大，硬度越小。

表 1 不同干燥条件对橘皮粗纤维含量和质构的影响

Table 1 Effect of different drying conditions on the crude fibre content and texture of citrus peels

干燥条件/°C	粗纤维/%	硬度/g	脆度/mm
F	1.28±0.06 ^a	-	-
FD	1.11±0.01 ^b	961.90±109.13 ^{bcd}	0.91±0.14 ^{def}
HAD60	1.09±0.01 ^b	1250.19±176.48 ^a	1.57±0.15 ^a
HAD70	1.09±0.02 ^b	1018.92±127.25 ^b	1.17±0.29 ^{cd}
HAD80	1.10±0.00 ^b	938.78±180.60 ^{bcd}	0.99±0.16 ^{de}
HAD90	1.09±0.00 ^b	826.14±82.56 ^{cde}	0.79±0.17 ^{ef}
IRD60	1.15±0.02 ^b	1021.79±77.75 ^b	1.41±0.39 ^{bc}
IRD70	1.14±0.09 ^b	998.36±110.73 ^{bc}	1.05±0.17 ^{de}
IRD80	1.10±0.01 ^b	788.71±120.24 ^{de}	0.86±0.13 ^{ef}
IRD90	1.11±0.05 ^b	698.21±114.36 ^e	0.67±0.15 ^f

注：同列数据中不同字母代表同一干燥条件下差异显著 ($p < 0.05$)。

由脆度结果可知，红外干燥 90 °C 橘皮脆度最大，

热风干燥 60 °C 橘皮脆度最小。在干燥温度 60 °C ~90 °C 之间,干燥橘皮脆度随温度升高而升高。在热风干燥中,70 °C 和 80 °C、80 °C 和 90 °C 处理组之间均未呈现显著差异 ($p>0.05$)。在中短波红外干燥过程中,70 °C 和 80 °C、80 °C 和 90 °C 处理组之间均未呈现显著差异 ($p>0.05$)。有研究显示,干燥能改变物料的组织结构,干燥速率越快,物料组织结构破坏越严重,产品脆度越高^[12]。基于各干燥方式的干燥机理,红外干燥橘皮脆度最大,且温度越高,橘皮脆度越大。而产品的脆度直接影响产品的运输情况,脆度过大会使得产品在运输途中易破碎,因此,真空冷冻、80 °C 热风干燥和 70 °C 中短波红外干燥橘皮脆度适中。

2.4 不同干燥条件下橘皮的干燥效率和复水性

不同干燥条件下橘皮的不同结构特征,意味其干燥效率和复水比等产品性质或有不同。表 2 为不同干燥条件下橘皮的水分含量和干燥时间。如表所示,不同干燥方式下干燥橘皮水分含量均在 0.05 (g/g d.w.) 左右,均未呈现显著性差异 ($p>0.05$)。真空冷冻干燥橘皮所需干燥时间最长,热风干燥橘皮所需干燥时间次之,中短波红外干燥橘皮效率最高。在干燥温度 60 °C~90 °C 之间,干燥时间随着干燥温度的升高而降低,在对应的温度下,热风干燥橘皮所需时间分别为 250、180、150 和 140 min,而中短波红外干燥时间较热风干燥分别缩短了 56%、47%、53%和 46%。

表 2 不同干燥条件对橘皮干燥效率的影响

Table 2 Effect of different drying conditions on the drying efficiency of citrus peels

干燥条件/°C	干基含水率/(g/g d.w.)	干燥时间/min
F	2.73±0.13 ^a	-
FD	0.05±0.02 ^b	1320
HAD60	0.05±0.00 ^b	250
HAD70	0.05±0.00 ^b	180
HAD80	0.05±0.02 ^b	150
HAD90	0.05±0.00 ^b	140
IRD60	0.05±0.00 ^b	110
IRD70	0.05±0.01 ^b	95
IRD80	0.05±0.01 ^b	85
IRD90	0.05±0.01 ^b	75

注: 同列数据中不同字母代表同一干燥条件下差异显著 ($p<0.05$)。

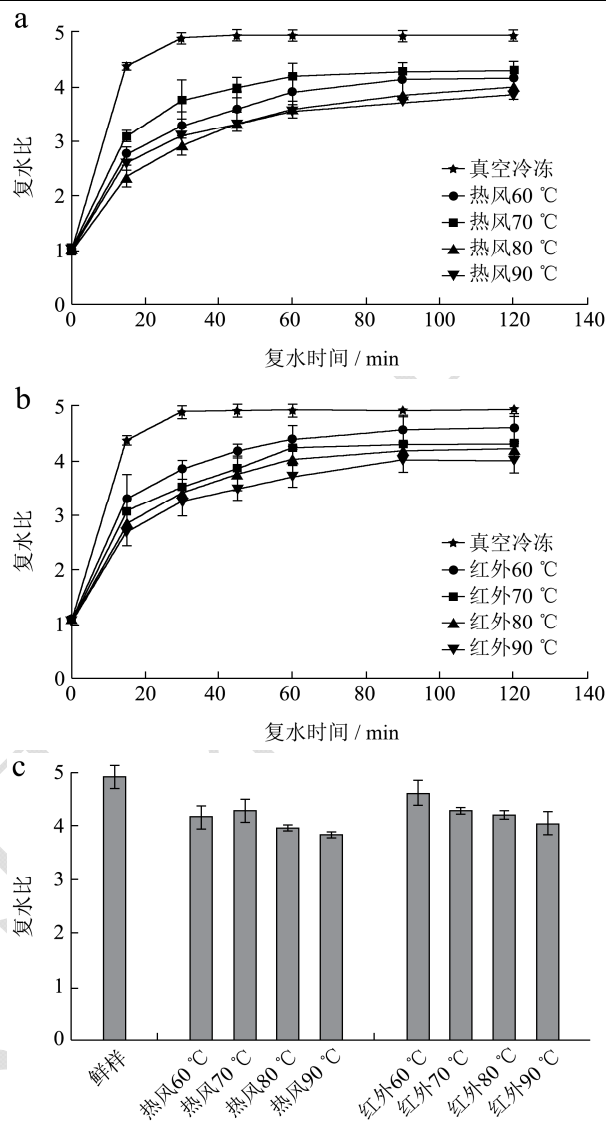


图 6 不同干燥条件对橘皮复水性的影响

Fig.6 Effect of different drying conditions on the rehydration of citrus peels

注: (a) 真空冷冻,热风 60 °C,热风 70 °C,热风 80 °C 和热风 90 °C; (b) 真空冷冻,中短波红外 60 °C,中短波红外 70 °C,中短波红外 80 °C 和中短波红外 90 °C; (c) 不同干燥条件对 2 h 时橘皮复水性的影响)。

不同干燥方式干燥橘皮效率由高到低依次为: 中短波红外>热风>真空冷冻,这与各干燥方式的干燥机制密切相关。中短波红外干燥过程中,热量直接在物料内部生成,因此,物料内部蒸汽压高于物料外部,水分扩散和热扩散方向均由内到外,水分被迅速除去,大大降低了干燥时间。热风干燥是一个相对缓慢的干燥过程,因为它主要依赖于由外向内的热传导,且物料表面热量高于内部,物料表面水分迅速蒸发,溶质迁移至表面从而硬化,阻碍物料内部水分的蒸发,最

终延长了干燥时间,形变最严重^[13]。真空冷冻干燥是先将物料在低温下冻结成固态,然后在真空下使物料中的水分直接升华,从而达到脱水状态,因此真空冷冻最耗时,但是形态保持最佳。

产品的复水性与产品结构同样密切相关。图6为不同干燥条件下橘皮的复水性,其中图6a和6b是不同干燥条件下橘皮复水比随复水时间变化的曲线图,图6c是不同干燥条件下橘皮在2h时的复水比。由图可知,真空冷冻干燥橘皮复水比最大,复水速率最快,在40min时就基本复水完全;在相同干燥温度下,中短波红外橘皮复水比高于热风干燥橘皮;在干燥温度60℃~90℃之间,复水比随干燥温度升高呈现下降趋势。结合显微结构等给出的相关信息,在真空冷冻干燥中,橘皮形状保持最好,孔隙均匀且大,整体结构疏松,因此复水速率最快,复水比最高(4.92);在热风干燥中,70℃干燥橘皮复水比最高(4.28),其次是60℃干燥橘皮(4.15)、80℃干燥橘皮(3.97)和90℃干燥橘皮(3.83),这可能是因为60℃时干燥时间较长,会使橘皮细胞和毛细管萎缩变形,影响其复水,而80℃和90℃时复水性下降,这可能是因为橘皮蛋白质和果胶等亲水性成分在强热力作用下发生变化而失去吸水能力,导致亲水性下降,也可能是因为高温产生的收缩应力使得橘皮组织结构受损伤,影响了橘皮的复水^[14];在中短波红外干燥过程中,随着温度升高,橘皮复水比下降,在60℃~90℃干燥范围内,复水比依次为4.60、4.29、4.21和4.00,原因可能干燥速率随着干燥温度升高而加快,水分蒸发加速,可溶性物质迁移至表面,阻碍孔隙,影响复水效果。因此,真空冷冻和中短波红外低温干燥(60℃~70℃)橘皮具有较好的复水性。

3 结论

本文对比研究了真空冷冻干燥、热风干燥和中短波红外干燥橘皮与鲜样在颜色和结构性能间的差异,结果发现,不同干燥条件对橘皮颜色和结构各相关指标影响显著($p < 0.05$)。橘皮色泽变化是由干燥温度和持续的干燥时间产生的美拉德等非酶褐变、酚类物质酶促褐变等一系列反应引起的,而类胡萝卜素的降解可能是**b**值降低的主要因素;在热风和中短波红外干燥温度60℃~90℃范围内,橘皮**L**值,**a**值和**b**值和类胡萝卜素含量随干燥温度升高而降低, ΔE 值和褐变度随干燥温度升高而升高;干燥橘皮**b**值随类胡萝卜素降低而降低, ΔE 值随褐变度增加而增加。微观结构的改变则为干燥橘皮粗纤维含量、质构参数和干燥速率、复水性等性质研究提供了参考方法;干燥橘皮

的微观结构疏松且未受损伤,孔隙大,分布均匀,则粗纤维含量较高,硬度脆度适中,复水性好,反之结构性能较差;较真空冷冻干燥和热风干燥,中短波红外低温干燥(60℃~70℃)对橘皮的颜色和结构保持最好。以上研究为干燥橘皮产品的品质评价(颜色和质构)和工业化生产提供了重要的科学理论依据。

参考文献

- [1] 毕金峰.柑橘变温压差膨化干燥工艺优化研究[J].中国农业大学学报,2008,13(5):40-47
BI Jin-feng. Optimization of explosion puff drying process for citrus at variable temperature and pressure difference [J]. Journal of China Agricultural University, 2008, 13(5): 40-47
- [2] Garau M C, Simal S, Rossello C, et al. Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties of dietary fibre and antioxidant capacity of orange (*Citrus aurantium* v. *canoneta*) by-products [J]. Food Chemistry, 2007, 104(3): 1014-1024
- [3] 孙金辉,陈海桂,卢沿钢,等.柑橘皮渣生物转化利用研究进展[J].食品科学,2011,32(19):312-315
SUN Jin-hui, CHEN Hai-gui, LU Yan-gang, et al. Research advance in biotransformation and utilization of citrus peels [J]. Food Science, 2011, 32(19): 312-315
- [4] Nijhuis H H, Torringa H M, Muresan S, et al. Approaches to improving the quality of dried fruit and vegetables [J]. Trends in Food Science & Technology, 1998, 9(1): 13-20
- [5] Pei F, Yang W, Shi Y, et al. Comparison of Freeze-drying with three different combinations of drying methods and their influence on colour, texture, microstructure and nutrient retention of button mushroom (*Agaricus bisporus*) slices [J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(3): 702-710
- [6] 高鹤,易建勇,毕金峰,等.中短波红外和热风干燥对番木瓜干燥特性及品质的比较[J].现代食品科技,2015,2:32
GAO He, YI Jian-yong, BI Jin-feng, et al. Drying characteristics and quality of carica papaya linn under med- and short-wave infrared radiation and hot air drying [J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 2: 32
- [7] Ghanem N, Mihoubi D, Kechaou N, et al. Microwave Dehydration of three citrus peel cultivars: effect on water and oil retention capacities, color, shrinkage and total phenols content [J]. Industrial Crops and Products, 2012, 40: 167-177
- [8] Lee C W, Oh H J, Han S H, et al. Effects of hot air and freeze drying methods on physicochemical properties of citrus "Hallabong" powders [J]. Food Science and Biotechnology,

- 2012, 21(6): 1633-1639
- [9] Lee H S. Characterization of carotenoids in juice of red navel orange (cara cara) [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, 49(5): 2563-2568
- [10] 聂继云. 果品质量安全分析技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009
- NIE Ji-yun. Analysis technology of fruit quality safety [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009
- [11] Megías-Pérez R, Gamboa-Santos J, Soria A C, et al. Survey of quality indicators in commercial dehydrated fruits [J]. *Food Chemistry*, 2014, 150: 41-48
- [12] Raksakantong P, Siriamornpun S, Meeso N. Effect of drying methods on volatile compounds, fatty acids and antioxidant property of thai kaffir lime (citrus hystrix dc) [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2012, 47(3): 603-612
- [13] 冯寅洁, 石芳荣, 应铁进. 加工工艺和复水条件对脱水胡萝卜复水性的影响[J]. *中国食品学报*, 2009, 9(4): 149-154
- FENG Yin-jie, SHI Fang-rong, YING Tie-jin. Influence of processing technology and rehydration conditions on rehydration performance of dehydrated carrots [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2009, 9(4): 149-154
- [14] Witrowa-Rajchert D, Rząca M. Effect of drying method on the microstructure and physical properties of dried apples [J]. *Drying Technology*, 2009, 27: 903-909