



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20180161

数字出版日期: 2019-01-15; 数字出版网址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1355.N.20190115.1430.006.html>

柠檬片真空远红外干燥特性及对品质的影响

杜腾飞, 赵丽娟, 王丹丹, 李建国

(天津市轻工与食品工程机械装备集成设计与在线监控重点实验室, 天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

摘要: 针对新鲜柠檬片在真空远红外干燥过程中的品质变化问题, 采用真空远红外干燥箱对柠檬片进行干燥, 研究操作温度、操作压力对干燥特性和物料色泽的影响, 比较了真空远红外干燥、热风干燥、真空冷冻干燥制备柠檬片的干燥时间、干制品的 RGB 强度、维生素 C 保留率和复水比。结果表明: 真空远红外干燥柠檬片的最佳干燥工艺参数为: 干燥温度 60 °C, 操作压力 2 kPa, 干燥时间 6 h。在干燥过程中, 操作温度越高, 操作压力对干燥速率的影响越不明显 ($P > 0.05$); RGB 强度均值总体呈下降趋势, 当柠檬片含水率低于 10% 时, 柠檬片色泽发生显著变化; 真空远红外干燥所得产品的复水比、RGB 强度与维生素 C 保留率均优于热风干燥所得产品, 略低于真空冷冻干燥产品。

关键词: 柠檬片; 真空; 远红外; 干燥; RGB; 维生素 C

中图分类号: S375 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2019)03-0022-05

Drying Characteristics and Product Quality of Lemon Slice under Vacuum Far-infrared Drying

DU Tengfei, ZHAO Lijuan, WANG Dandan, LI Jianguo

(Tianjin Key Laboratory of Integrated Design and On-line Monitoring for Light Industry & Food Machinery and Equipment, College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: A series of drying experiments were carried out, in a pilot-scale vacuum far-infrared drying oven to study the characteristic changes of lemon slices during the drying process. The effects of temperature and pressure on drying characteristics and material color were studied. The total drying time, RGB intensity, vitamin C retention rate and rehydration ratio of the dried products with different drying methods (hot air drying, vacuum far-infrared drying and vacuum freeze drying) were compared. Results showed that the optimum drying parameters for lemon slices were as follows: drying temperature at 60 °C, operating pressure of 2 kPa and drying for 6 h. During the drying process, the higher the temperature was, the less the influence of pressure on the drying rate ($P > 0.05$). The mean value of RGB strength was generally on the decline. When the moisture content in the lemon slices was lower than 10%, the color of the lemon slices changed significantly. The rehydration ratio, the mean RGB strength, and vitamin C retention of the vacuum far-infrared drying products were higher than those of hot-air drying products and slightly lower than those of vacuum freeze drying products.

Key words: lemon slice; vacuum; far-infrared; drying; RGB; vitamin C

柠檬是世界上最具有药用价值的水果之一, 富含维生素 C、柠檬酸等有效成分, 具有抗菌消炎、延缓衰老、抑制色素沉积、抵抗坏血病等作用^[1-5]。新鲜柠檬常温下保质期 30 d, 切片干制后保存期可延长至 300 d。目前, 国内市场柠檬片干制品多采用真空冷冻干燥与热风干燥两种方式生产, 其产品的色泽、维生

素 C 的含量对价格影响较大^[6-8]。常婷婷等^[8]通过对柠檬片进行大量的热风干燥实验, 得到最佳干燥条件: 干燥温度 70 ~ 90 °C, 片厚 3 ~ 5 mm, 风速 0.4 ~ 0.6 m/s。黄艳斌等^[9-10]经对热风干燥柠檬片的干燥特性进行研究, 得到能良好描述其干燥过程的数学模型式, 以指导生产。谢振文等^[6]对柠檬片真空冷冻干燥

收稿日期: 2018-05-25; 修回日期: 2018-12-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31471618)

作者简介: 杜腾飞(1994—), 男, 河南周口人, 硕士研究生; 通信作者: 赵丽娟, 副教授, zhaolj@tust.edu.cn

生产工艺进行了研究,得到冻干处理加工的最佳工艺:片厚 4 mm,预冻温度低于 -40°C ,冻结时间 8 h,升华干燥搁板温度 40°C ,冷阱温度 -50°C ,干燥时间 9 h. 范兰娣^[11]发现经真空冷冻干燥后的柠檬片,其形态、香气保持良好,2 min 即能在常温水中完全复水,与鲜柠檬片泡水饮品味道基本无异. 高炜等^[12]用色度分析仪分析了冷冻干燥、热风干燥、红外干燥、真空干燥方式得到的柠檬片干制品的色泽并进行了比较,认为真空干燥是干制柠檬片的最佳方式;王海鸥等^[13]研究了真空冻结冷冻干燥、传统冷冻干燥、热风干燥 3 种方式下干燥的柠檬片干制品色泽、维生素 C 保留率,并进行了对比,得到真空冻结冷冻干燥干制柠檬片最佳方法. 上述研究只对最终干制品的色泽进行了测定,并没有测定整个干燥过程中柠檬片的色泽变化. 真空冷冻干燥技术生产的柠檬片干制品虽质量优异,但存在设备成本和能耗较高、干燥时间长、产量低等缺点.

真空远红外干燥采用远红外辐射对物料供热,物料放置在真空环境下进行干燥. 具有传热传质效率高、产品质量好、无污染、易控制等优点^[14-16]. 刘云宏等^[17-18]研究了金银花、地黄等中药材的真空远红外干燥动力学模型,但没有研究干燥参数对于干制品品质的影响. 张秦权等^[19]设计了工业远红外联合低温真空干燥设备用来干燥果蔬,在保证产品质量的同时,缩短了干燥时间,并显著降低操作能耗.

本研究采用真空远红外干燥箱对具有热敏及氧敏感性的柠檬片进行干燥,在研究干燥特性的同时,利用高清相机拍摄干燥过程中柠檬片的图像,运用数字图像处理方法中常用的 RGB(红、绿、蓝)模型分离并测定出干制品红(R)、绿(G)、蓝(B)三个颜色通道的大小,R、G、B 强度值越大,干制品色泽与新鲜产品越接近. 研究干燥过程中柠檬片的 RGB 强度变化及不同干燥工艺对柠檬片成品质量的影响,对工业生产具有重要的应用意义.

1 材料与方 法

1.1 物料与试剂

表皮光滑、大小均匀的新鲜柠檬,购于天津市某超市.

维生素 C 标准品,中国医药上海化学试剂公司. 草酸,分析纯,天津市化学试剂一厂.

1.2 设备与仪器

天津摩纳科技有限公司生产的 MNZF-100 型真

空远红外辐射干燥箱,额定功率 4 kW,温度范围 $50 \sim 200^{\circ}\text{C}$,温度波动度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$,真空度范围 $1 \sim 100\text{ kPa}$ (可调),压力恢复速度 $\leq 10\text{ kPa/min}$ (可调),辐射距离范围 $50 \sim 250\text{ mm}$ (可调). 干燥箱结构见图 1.

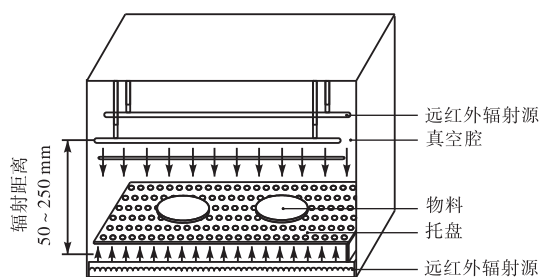


图 1 真空远红外辐射干燥箱

Fig. 1 Vacuum far-infrared dryer

CJS-0.5 型真空冷冻干燥机,上海浦东冷冻干燥设备有限公司;SY-5 型果蔬实验烤箱,额定功率 3 kW,干燥装置的温湿度参数采用自动控制,温度范围为常温至 200°C ,控制精度为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$,北京华珍烘烤系统设备工程有限公司;RP10002k 型电子天平,量程 $(120 \pm 0.01)\text{ g}$,常州锐品精密仪器有限公司;Agilent-1200 高效液相色谱仪,安捷伦科技(中国)有限公司;EOS 5D 相机,日本佳能株式会社;自制暗箱;可调节光源.

1.3 实验方法

预处理:选取新鲜柠檬的中间部分,均匀切片并去籽,切片厚度为 4 mm,每个柠檬切 5 或 6 片,需 16 片备用. 将柠檬片分成两组,第一组柠檬片 4 片,用于测定物料湿含量(湿基含水率);另一组包含柠檬片 12 片,用于后续测定干燥特性.

将预处理后的柠檬片单层均匀地平铺在两层塑料纱布制成的托网中,在真空远红外干燥箱内进行不同温度、压力下的干燥实验,干燥箱输出功率为 2 kW,辐射距离为 140 mm. 为了模拟连续生产中物料湿含量和色泽变化情况,同一温度和压力下多次实验(温度分别为 50 、 55 、 60°C ,压力分别为 2、4、6 kPa). 为减少实验误差,应使真空箱内的压力在物料称重后尽快恢复(实验中每次恢复时间为 30 s);若压力恢复过慢,真空箱内达不到实验要求压力,实验数据对工业化连续生产就无指导意义. 在绝对压力较低时,干燥时间间隔为 1 h;压力较高时,干燥时间间隔为 0.5 h ^[9,12]. 每一干燥阶段结束时快速测定物料的质量,用相机在暗箱内同一光源条件下拍摄物料图像,直至柠檬片干燥至安全含水率(湿基含水率为 10%). 同一工艺下重复 3 次,所测数据取平均值.

1.4 品质测定

1.4.1 RGB 强度

通过对柠檬片干燥过程中的图像进行 RGB 分离,单独测量每个颜色分量的强度变化.对图像的 RGB 分离与强度计算采用国际通用的开源数字图像处理开发库(OpenCV)并结合 NOKIA 公司的 Qt GUI 设计平台,设计了一套算法.实现了柠檬片的快速自适应阈值定位,并进行 RGB 分离与 R、G、B 三通道的平均强度计算.

1.4.2 维生素 C 保留率

采用高效液相色谱法,按照 GB 5009.86—2016 《食品中抗坏血酸的测定》方法测定新鲜柠檬片和不同干燥品中维生素 C 的含量.维生素 C 标准工作曲线为 $y=11.800x-41.725$,其中 x 为标准液质量浓度, $\mu\text{g/mL}$; y 为对应的峰面积值.

由于新鲜柠檬原料和干燥样品的湿基含水率存在差异,柠檬片干燥样品的维生素 C 保留率计算公式^[13]为

$$R_c = \frac{v_d(1-x_0)}{v_0(1-x_d)} \times 100\%$$

式中: R_c 为干燥样品的维生素 C 保留率,%; v_0 为新鲜柠檬的维生素 C 含量, mg/g ; v_d 为干燥样品的维生素 C 含量, mg/g ; x_0 为新鲜柠檬湿含量,为 87.39%; x_d 为干制品湿含量,为 10%.

1.4.3 复水比

将干燥后的柠檬片和对照组的柠檬片分别放入 60 °C 的恒温水浴锅中复水,0~1 h 每 10 min 测量一次柠檬片质量,1~2 h 每 30 min 测量一次,2 h 后每 60 min 测一次;测量前应用滤纸吸干表面水分.复水比 = m_2/m_1 ^[20-21],其中 m_1 为复水前柠檬片质量, g ; m_2 为复水过程中柠檬片质量, g . 每组样品重复 3 次,取其结果的平均值.

1.5 不同干燥方式的比较

柠檬片热风干燥实验条件:干燥温度 60 °C,箱内湿度 40%,物料切片厚度 4 mm,每次干燥新鲜柠檬片 16 片,所得干制品湿含量为 9.75%.

柠檬片真空冷冻干燥实验条件:物料切片厚度 4 mm,每次干燥新鲜柠檬片 16 片;预冻阶段,预冻温度 -35 °C,预冻时间 15 h;升华阶段,冷阱温度 -50 °C,绝对压力 0.4 Pa,干燥时间 48 h,所得干制品湿含量为 10.11%.

1.6 数据处理

采用统计分析软件 SPSS24.0 对实验数据进行方

差分析,采用 Duncan's 法进行多重比较,显著性水平 $P < 0.05$. 图中同一类指标标注不同字母表示有显著性差异 ($P < 0.05$); 表中含义相同.

2 结果与分析

2.1 干燥温度和操作压力对干燥特性的影响

图 2 为不同温度和操作压力条件下柠檬片的干燥曲线.

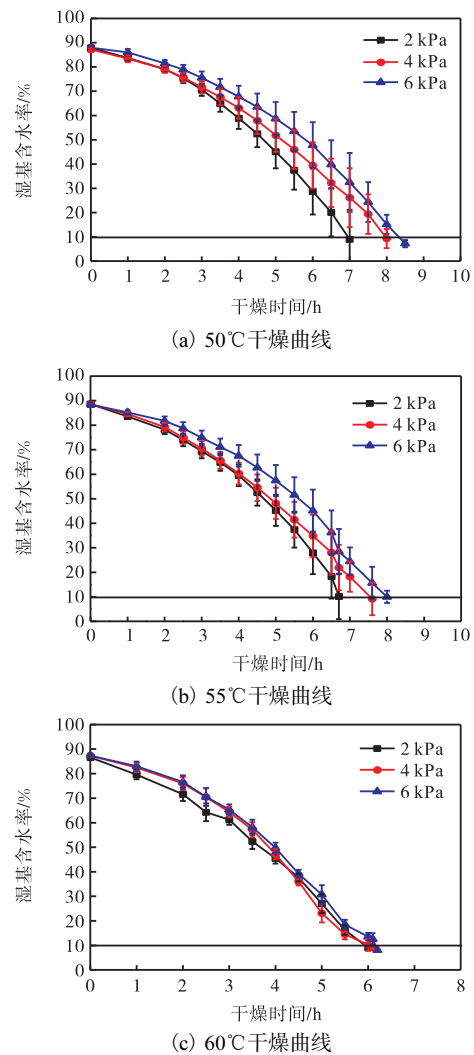


图 2 不同干燥温度和压力下的干燥曲线

Fig. 2 Drying curves under different operating temperature and pressure

由图 2 可知:柠檬片干燥时的失水速率受温度的影响较大,温度越高,干燥到安全含水率所需时间越短.这是由于干燥温度越高,物料与外部环境之间以及物料内部的传热传质速率越大,表现为干燥速率越大,干燥时间越短^[9].温度越低时,操作压力对干燥过程的影响越大;温度越高时,操作压力对干燥过程

的影响越小. 温度对干燥时间的缩短具有显著性差异($P < 0.05$). 如操作温度为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 在 2、4、6 kPa 的操作压力下, 柠檬片干燥至安全含水率的时间分别为 7.0、8.0、8.5 h; 操作温度为 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 在相同操作压力下, 柠檬干燥至安全含水率的时间分别为 6.7、7.6、8.0 h; 而在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 相应的压力下, 干燥至安全含水率的时间分别为 6.0、6.1、6.2 h, 不同操作压力下的干燥时间差越来越小, 可见高温操作时压力对干燥过程的影响较小.

2.2 RGB强度分析

图 3 为在温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、压力为 2 kPa 条件下干燥过程中柠檬片的 RGB 强度变化曲线, 图 4 为干燥过程中 RGB 强度与湿基含水率的关系.

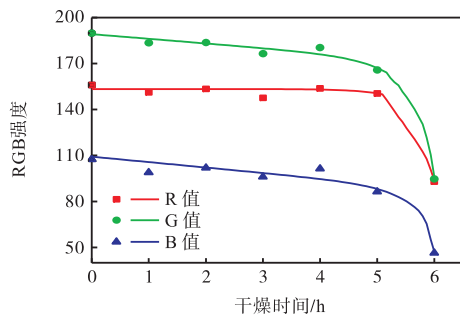


图 3 真空远红外干燥过程中 RGB 强度变化

Fig. 3 Changes of RGB intensity during vacuum far-infrared drying process

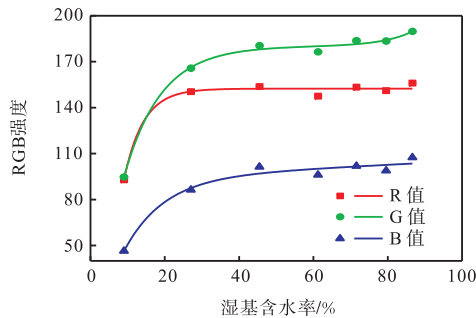


图 4 真空远红外干燥过程中 RGB 强度与湿基含水率的关系

Fig. 4 Relationship between RGB intensity and moisture content during vacuum far-infrared drying process

由图 3 和图 4 可知: 在干燥过程中, RGB 强度保持 $G \text{ 值} > R \text{ 值} > B \text{ 值}$, RGB 强度发生明显改变是在 6 h 左右, 即柠檬片达到湿含量为 10% 左右的要求之前. 在干燥前中期, R 值在干燥过程没有明显变化, G 值与 B 值逐渐下降. 在此干燥过程中, 柠檬片的颜色逐渐稍有加深, 但变化不大, 未出现明显的褐变现象, 因此在干燥过程中 G 值与 B 值是影响色泽变化

的关键因子. 在干燥终末点左右, R 值、G 值、B 值均大幅下降, 柠檬片的颜色迅速加深, 出现了不同程度的褐变现象, 但在感官上本干燥产品的色泽仍优于市售柠檬片色泽. 由此可知, 柠檬片发生褐变的临界含水率为 10% 左右, RGB 强度越大, 柠檬片产品成色越好, 与新鲜柠檬片色泽差距越小.

2.3 不同工艺参数条件下的 RGB 强度

表 1 为不同操作条件下得到的柠檬片干制品的 RGB 强度比较.

表 1 不同工艺参数条件下真空远红外干燥柠檬片的 RGB 强度数据表

Tab. 1 RGB intensity of lemon slices dried with vacuum infrared drying technology under different process parameters

干燥工艺参数	R 平均值	G 平均值	B 平均值
$50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2 kPa, 7.0 h	88.62 ^b	91.00 ^a	48.29 ^a
$50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 kPa, 8.0 h	90.31 ^a	83.14 ^b	46.82 ^a
$50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 6 kPa, 8.5 h	86.34 ^b	81.44 ^b	41.32 ^b
$55\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2 kPa, 6.7 h	99.13 ^a	77.64 ^c	45.34 ^a
$55\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 kPa, 7.6 h	85.69 ^b	74.92 ^c	44.19 ^a
$55\text{ }^{\circ}\text{C}$, 6 kPa, 8.0 h	87.53 ^b	70.67 ^c	32.26 ^c
$60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2 kPa, 6.0 h	93.00 ^a	94.73 ^a	46.41 ^a
$60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 kPa, 6.1 h	77.20 ^c	77.01 ^c	40.62 ^b
$60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 6 kPa, 6.2 h	73.25 ^c	66.11 ^d	35.68 ^c

从表 1 中可以看出: 同一干燥温度下, 操作压力越低, G 值和 B 值越大, 产品色泽越好; 说明柠檬片干燥过程中氧气对产品变色有一定影响, 而温度对产品色泽的影响不大 ($P > 0.05$). 与其他条件相比, 温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、压力为 2 kPa 时所得干制品的 G 值 (94.73) 最大, 且 B 值 (46.41) 仅比温度为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、压力为 2 kPa 时产品的 B 值 (48.29) 小 1.88; 但 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、2 kPa 条件下的最终干燥时间 (6 h) 比 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、2 kPa 条件下的最终干燥时间 (7 h) 缩短了 1 h.

2.4 不同干燥方式的比较

2.4.1 干燥时长对比

表 2 为热风干燥、真空远红外干燥、真空冷冻干燥最终干燥时间的对比. 真空远红外干燥方式的干燥时间 (6 h) 较热风干燥的干燥时间 (7 h) 有微弱优势, 比真空冷冻干燥的干燥时间 (48 h) 有明显优势 ($P < 0.05$).

表 2 不同干燥方式干燥时间的对比

Tab. 2 Comparison of drying time of different drying technologies

干燥方式	干燥时长/h
热风干燥	7
真空远红外干燥	6
真空冷冻干燥	48

2.4.2 柠檬片 RGB 强度对比

热风干燥、真空远红外干燥、真空冷冻干燥所得终产品的 RGB 强度如图 5 所示. 比较影响柠檬片色泽变化的关键因子, 真空冷冻干燥产品 G 值 > 真空远红外干燥产品 G 值 > 热风干燥产品 G 值; 真空冷冻干燥产品 B 值 > 真空远红外干燥产品 B 值 > 热风干燥产品 B 值. 不同干燥方式的 RGB 强度差异明显 ($P < 0.05$). 由于 G 值、B 值越大, 干燥产品的色泽与新鲜柠檬越接近, 故真空冷冻干燥产品的色泽最佳, 其次为真空远红外辐射干燥, 热风干燥产品的色泽最差.

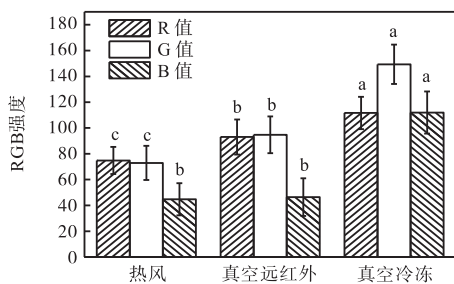


图 5 不同干燥方式下柠檬片的 RGB 强度对比

Fig. 5 Comparison of RGB intensity of different drying technologies

2.4.3 柠檬片维生素 C 保留率和复水比对比

图 6 为 60 °C、2 kPa 条件下的真空远红外干燥产品、真空冷冻干燥产品、热风干燥产品的维生素 C 保留率和复水比的比较.

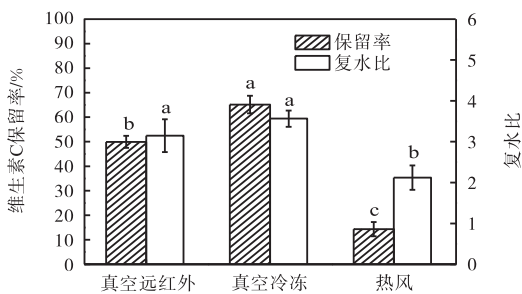


图 6 不同干燥方式下的维生素 C 保留率和复水比

Fig. 6 Vitamin C retention and rehydration ratio with different drying technologies

新鲜柠檬的维生素 C 含量是 56.12 mg/100 g, 真空远红外干燥产品的维生素 C 保留率为 49.92%, 真空冷冻产品的维生素 C 保留率为 65.14%, 均远远高于热风干燥产品的维生素 C 保留率(14.33%). 这可能是因为热风干燥中的氧气浓度较高导致了维生素 C 损失较大; 真空远红外干燥时氧气浓度较低, 故产品中维生素 C 保留率较高; 真空冷冻干燥时真空腔

内压力只有 0.4 Pa, 接近于无氧环境, 故维生素 C 的保留率最高.

真空冷冻干燥产品的复水效果最好, 其次为真空远红外干燥产品, 而热风干燥产品的复水效果最差; 对应柠檬片的最终复水比分别为 3.56、3.15、2.12. 这主要因为热风干燥是在高温常压下进行, 产品干缩变形严重, 表面氧化形成致密保护层, 阻碍水分进出, 影响复水性能^[22]. 真空冷冻干燥的物料内水分去除以升华干燥为主, 可以形成良好的多孔结构, 复水过程中与水的接触面积大, 复水程度比热风干燥制品要高得多^[6]; 真空远红外干燥是在真空环境下采用热辐射对物料加热, 也有利于物料内部空隙的形成, 故而其复水比也远高于热风干燥产品, 但由于操作压力还是要高于冷冻干燥, 故而空隙的数量及大小要低于冷冻干燥产品, 复水比也会相应降低.

3 结论

(1) 柠檬片色泽发生迅速变化的临界水分含量为 10%. 当干燥过程中柠檬片水分含量低于 10% 时, 柠檬片迅速发生褐变, RGB 强度迅速下降.

(2) 综合考虑, 真空远红外最佳的干燥工艺为操作温度 60 °C, 操作压力 2 kPa, 干燥时间 6 h, 辐射距离 140 mm, 柠檬片厚度 4 mm, 所得干制品的 RGB 强度为 R 值 93.00、G 值 94.73、B 值 46.41, 维生素 C 保留率为 49.92%, 复水比为 3.15.

(3) 通过比较不同干燥方式得到的柠檬片干制品的干燥时间、RGB 强度、复水比和维生素 C 保留率可知, 真空远红外干燥产品品质远高于热风干燥产品, 稍逊于真空冷冻干燥产品.

参考文献:

[1] 程劲. 柠檬加工利用研究[J]. 四川食品与发酵, 2005, 41(1): 11-15.

[2] Dhanavade M J, Jalkute C B, Ghosh J S, et al. Study antimicrobial activity of lemon (*Citrus lemon L.*) peel extract[J]. British Journal of Pharmacology & Toxicology, 2011, 2(3): 119-122.

[3] Mohanapriya M, Ramaswamy L, Rajendran R. Health and medicinal properties of lemon (*Citrus limonum*) [J]. International Journal of Ayurvedic and Herbal Medicine, 2013, 3(1): 1095-1100.

(下转第 33 页)

- 263.
- [20] Newman R H. Evidence for assignment of ^{13}C NMR signals to cellulose crystallite surfaces in wood, pulp and isolated celluloses[J]. *Holzforschung*, 1998, 52(2): 157–159.
- [21] Wickholm K, Larsson P T, Iversen T. Assignment of non-crystalline forms in cellulose I by CP/MAS ^{13}C NMR spectroscopy[J]. *Carbohydrate Research*, 1998, 312(3): 123–129.
- [22] Larsson P T, Wickholm K, Iversen T. A CP/MAS ^{13}C NMR investigation of molecular ordering in celluloses[J]. *Carbohydrate Research*, 1997, 302(2): 19–25.
- [23] Larsson P T. Interaction between cellulose I and hemicelluloses studied by spectral fitting of CP/MAS ^{13}C -NMR spectra[J]. *ACS Symposium*, 2003, 864: 254–268.
- [24] Nilsson H, Galland S, Larsson P T, et al. Compression molded wood pulp biocomposites: A study of hemicellulose influence on cellulose supramolecular structure and material properties[J]. *Cellulose*, 2012, 19(3): 751–760.
- [25] Hubbe M A, Venditti R A, Rojas O J. What happens to cellulosic fibers during papermaking and recycling? A review[J]. *BioResources*, 2007, 2(4): 739–788.
- [26] Duchesne I, Hult E, Molin U, et al. The influence of hemicellulose on fibril aggregation of kraft pulp fibres as revealed by FE-SEM and CP/MAS ^{13}C -NMR[J]. *Cellulose*, 2001, 8(2): 103–111.
- [27] 万金泉,肖青,王艳. 固体核磁共振和原子力显微镜分析不同半纤维素含量植物纤维的微观结构[J]. *分析化学*, 2010, 38(3): 347–351.

责任编辑:周建军

(上接第26页)

- [4] Miyake Y, Mochizuki M, Okada M, et al. Isolation of antioxidative phenolic glucosides from lemon juice and their suppressive effect on the expression of blood adhesion molecules[J]. *Journal of the Agricultural Chemical Society of Japan*, 2007, 71(8): 1911–1919.
- [5] Adibelli Z, Dilek M, Akpolat T. Lemon juice as an alternative therapy in hypertension in Turkey[J]. *International Journal of Cardiology*, 2009, 135(2): e58–e59.
- [6] 谢振文,张帮奎,涂雪令,等. 真空冷冻干燥柠檬片工艺参数优化研究[J]. *食品与发酵科技*, 2010, 46(3): 51–54.
- [7] 王玉玲,李海滨. 柠檬片真空冷冻干燥工艺初探[J]. *保鲜与加工*, 2011, 11(4): 23–26.
- [8] 常婷婷,张欣,熊伟成,等. 柠檬片热风干燥工艺参数优化[J]. *农产品加工(学刊)*, 2013(16): 34–37.
- [9] 黄艳斌,郑优,陈海桥,等. 柠檬热风干燥特性及数学模型[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(14): 169–172.
- [10] 黄艳斌. 微波真空干燥对柠檬片干燥特性及品质的影响研究[D]. 重庆:西南大学, 2017.
- [11] 范兰娣. 冻干柠檬片生产工艺的研究[J]. *食品科技*, 2009, 34(5): 54–56.
- [12] 高炜,丁胜华,王蓉蓉,等. 不同干燥方式对柠檬片品质的影响[J]. *食品科技*, 2017(2): 114–119.
- [13] 王海鸥,谢焕雄,陈守江,等. 不同干燥方式对柠檬片干燥特性及品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(14): 292–299.
- [14] 车刚,李成华,汪春. 蕨菜真空干燥的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(5): 165–168.
- [15] 徐成海. 真空干燥技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2012.
- [16] Mongpraneet S, Abe T, Tsurusaki T. Accelerated drying of welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 55(2): 147–156.
- [17] 刘云宏,朱文学,刘建学. 地黄真空红外辐射干燥质热传递分析[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(10): 135–140.
- [18] 刘云宏,朱文学,马海乐. 金银花真空远红外辐射干燥动力学模型[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(5): 105–109.
- [19] 张秦权,文怀兴,袁越锦. 远红外联合低温真空干燥设备研究与设计[J]. *食品与机械*, 2013, 29(1): 157–160.
- [20] 龚丽,刘清化,刘军,等. 柠檬热泵干燥工艺参数优化[J]. *食品研究与开发*, 2017, 38(7): 79–83.
- [21] 颜建春,胡志超,吴朋来,等. 热板-微波联合真空冷冻干燥茭白工艺优化[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(1): 262–270.
- [22] 王蓉蓉,丁胜华,李高阳,等. 柠檬片热风干燥特性及品质研究[J]. *食品科技*, 2016(5): 48–53.

责任编辑:常涛