

不同干燥方式对柠檬片干燥特性及品质的影响

王海鸥^{1,2}, 谢焕雄^{1,3}, 陈守江², 扶庆权²,

王蓉蓉², 张伟², 胡志超^{1,3*}

(1. 农业部现代农业装备重点实验室, 南京 210014; 2. 南京晓庄学院食品科学学院, 南京 211171;
3. 农业部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

摘要:为探索不同干燥方式对柠檬片干燥特性及品质的影响, 该研究采用真空冻结冷冻干燥、传统冷冻干燥、热风干燥3种方式进行对比干燥试验。结果表明, 真空冻结冷冻干燥柠檬片工艺耗时比传统冷冻干燥节省5 h, 但是热风干燥2倍以上; 耗电量比传统冷冻干燥节省14.27%, 但是热风干燥5倍以上; 真空冻结冷冻干燥、传统冷冻干燥、热风干燥柠檬片维生素C保存率分别为66.03%、45.45%、19.14%, 复水比分别为4.60、3.97、2.24, 差异显著($P<0.05$); 热风干燥柠檬片色差值显著($P<0.05$)高于两组冷冻干燥柠檬片, 而两组冷冻干燥柠檬片色差值未见显著差异($P>0.05$); 真空冻结冷冻干燥柠檬片中5种主要挥发性风味化合物保存率显著($P<0.05$)高于传统冷冻干燥柠檬片, 热风干燥柠檬片保存率最低($P<0.05$)。3组干燥柠檬片残留水均呈现自由水、不易流动水、结合水3个横向弛豫时间峰位, 干燥样品残留水分中结合水占比例最高, 不易流动水和自由水占比例较小, 热风干燥柠檬片横向弛豫时间峰位相对其他两组呈现小幅度的右移趋势; 两组冷冻干燥柠檬片感官特征总评分差异不显著($P>0.05$), 热风干燥柠檬片在色泽、质地、柠檬味上远不及两组冷冻干燥柠檬片感官特征丰富。真空冻结冷冻干燥是高附加值柠檬片的首选干燥方法。该研究结果为柠檬片干燥加工技术提升提供参考。

关键词:干燥; 品质控制; 水分; 柠檬片; 冷冻干燥; 真空冻结

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.14.039

中图分类号: TS255.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-14-0292-08

王海鸥, 谢焕雄, 陈守江, 扶庆权, 王蓉蓉, 张伟, 胡志超. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.14.039 http://www.tcsae.org

Wang Haiou, Xie Huanxiong, Chen Shoujiang, Fu Qingquan, Wang Rongrong, Zhang Wei, Hu Zhichao. Effect of different drying methods on drying characteristics and qualities of lemon slices[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(14): 292-299. (in Chinese with English abstract)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.14.039 http://www.tcsae.org

0 引言

柠檬(*Citrus limon*)果实含有丰富的维生素、挥发性精油、有机酸、黄酮类、矿物质等, 具有极高的营养价值和药用价值, 是继柑、橙之后的第三大柑橘类水果, 为中国柑橘品种调优的重点发展方向, 目前种植面积和产量分别约为 $50 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 、 $800 \times 10^3 \text{ t}$, 并呈逐年增加趋势^[1-2]。目前柠檬以商品鲜果销售为主, 不易保存、流通损失大, 且柠檬味极酸, 其新鲜果肉多不被直接食用, 而将柠檬干燥加工成片或粉再进行热水冲泡饮用, 是柠檬加工增

值和食用的重要途径之一。近年来, 干制柠檬片(茶)已发展成为市场上不可缺少的休闲保健饮品, 受到众多消费者的追捧。

国内外学者在柠檬干燥方面已有一些相关报道, 为其生产加工提供技术支持。巩桂芬^[3]、王蓉蓉^[4]、熊伟成^[5]、黄艳斌^[6]、常婷婷^[7]等进行了柠檬片热风干燥工艺参数优化、干燥特性及数值模拟等相关研究; 章斌^[8]、谢振文^[9]、范兰娣^[10]等开展了柠檬片真空冷冻干燥工艺试验研究; Kesbi^[11]、Chen^[12]、García-Pérez^[13]等应用微波对流干燥、太阳能干燥、声能干燥等方法开展柠檬片(皮)干燥特性研究。热风干燥和真空冷冻干燥是目前柠檬片常用加工方式。尽管真空冷冻干燥技术可最大限度地保持原料的色、香、味、形和营养成分, 但由于存在干燥时间长、能耗高、加工成本大等缺陷, 其在食品工业中的广泛应用仍受到较大限制^[14-19]。目前, 柠檬片冷冻干燥产品商品市场份额还相对较少, 主要以热风干燥柠檬片为主。王海鸥^[20]、农业部南京农业机械化研究所^[21]、南京晓庄学院^[22]等提出一种新型的“真空冻结冷冻干燥”工艺方法, 以快速真空冻结方式替代传统的常压速冻方法, 即将切分后的新鲜物料置于真空环境下, 物料中水分快速蒸发并带走大量热量, 使物料快速降温和冻结,

收稿日期: 2017-01-12 修订日期: 2017-02-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31301592); 农业部现代农业装备重点实验室开放课题(201604002); 中国农业科学院科技创新工程(农产品分级与贮藏装备创新团队); 常州市科技支撑计划(农业)项目(CE20152017)

作者简介: 王海鸥, 男(汉), 安徽桐城人, 副教授, 博士, 主要从事食品冷冻与干燥技术研究。南京 南京晓庄学院食品科学学院, 211171。

Email: who1978@163.com。

※通信作者: 胡志超, 男(汉), 陕西蓝田人, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事农业机械化工程及农产品加工技术装备研究。南京 农业部南京农业机械化研究所, 210014。Email: who1978@163.com。

中国农业工程学会高级会员: 胡志超(E041200498S)、王海鸥(E041200664S)

冻结物料在原位继续进行冷冻干燥过程，利用单套冷冻干燥设备实现一体化作业，整个工艺过程高度集成，达到简化冷冻干燥工序、缩短冷冻干燥时间的效果。

本研究以柠檬片为对象，采用真空冻结冷冻干燥、传统冷冻干燥、热风干燥 3 种方式，进行柠檬片干燥对比试验，开展干燥耗时、产品复水比、色泽、芳香成分、水分形态低场核磁共振、品质感官评定等测试分析，探索不同干燥方式对柠檬片干燥特性及品质的影响，以期对柠檬片节能高品质加工提供一定的理论和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜柠檬（尤力克）购于南京苏果超市；乙二酸、淀粉、碘化钾、抗坏血酸、2,6-二氯靛酚、正己烷均为分析纯，购于国药集团。

SCIENTZ-50F 冷冻干燥机，宁波新芝生物科技股份有限公司；DHG-9070B 电热恒温鼓风干燥箱，上海申贤恒温设备厂；3nh 高品质电脑色差仪，深圳市三恩时科技有限公司；HHS 型电热恒温水浴锅，上海博讯实业有限公司医疗设备；HB-04B 200 g 摇摆式粉碎机，广州市旭朗机械设备有限公司；低场核磁共振成像分析系统 MesoMR23-060V-I，上海纽迈电子科技有限公司；二乙基苯/碳分子筛/聚二甲基硅氧烷固相微萃取头，美国 Supelco 公司；7890A/5977A 气相色谱-质谱联用仪、HP-INNOWAX 毛细管色谱柱(30 m×0.32 mm, 0.25 μm)，美国 Agilent 公司。

1.2 试验方法

1.2.1 柠檬的前处理

同一批购买的生鲜柠檬初始湿基含水率为 88.05%，从中挑选形状大小均匀、无损伤、颜色一致的果实，清洗干净后沿轴向切成厚度为 3 mm 的柠檬片，并去除每片中的柠檬籽，每次干燥试验所用柠檬片鲜质量约为 1 kg。

1.2.2 干燥方法

1) 真空冻结冷冻干燥法

冷冻干燥试验所采用 SCIENTZ-50F 冷冻干燥机结构示意图如图 1 所示，主要包括干燥仓、隔板、制冷器、加热器、冷阱仓、制冷盘管、真空泵及测控系统等。其中制冷器可向干燥仓内的隔板供给冷量，使物料降温冻结，实现物料预冻，也可向冷阱仓制冷盘管提供冷量，捕集从物料中蒸发、升华出来的大量水蒸汽。加热器在冷冻干燥期间通过隔板为物料的升华和解析干燥提供热量。冻结和干燥过程中物料温度可通过温度传感器进行实时监测。

真空冻结冷冻干燥工艺参数条件是结合生产实际情况、并经过前期多次试验摸索优化后确定的。提前开启制冷器仅对冷阱仓制冷盘管供给冷量，将冷阱中制冷盘管温度降至-50℃以下，降温过程所需时间为 0.5 h；然后将备好的柠檬片一层平铺至物料盘上，将料盘置于干燥仓隔板上，密闭干燥仓后开启真空泵，使干燥仓压强常压状态持续下降达到水分闪点(800~1 000 Pa)，柠檬片中水分在真空状态下迅速蒸发并使物料快速降温冻结，真空冻结过程维持 0.5 h，在水分蒸发高峰期间干燥仓压强下降趋缓，随着水分真空蒸发作用的减弱，干燥

仓压强最终维持在 20~30 Pa；然后开启加热器进入冷冻干燥过程，隔板采用渐进式温升程序，“温度-时间”控制程序设定为：-30℃-1 h，-20℃-1 h，-10℃-1 h，0℃-1 h，10℃-1 h，20℃-2 h，30℃-2 h，40℃-2 h，50℃-2 h，干燥仓压力控制在 50 Pa 以下。通过前期试验摸索，当物料温度达到(45±0.5)℃时，物料实测湿基含水率在 5%以下，此时判定为冷冻干燥终点，获得真空冻结冷冻干燥柠檬片样品。

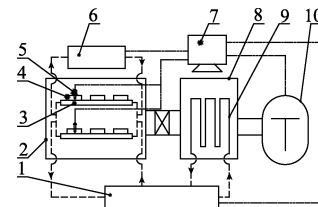


图 1 真空冷冻干燥试验装置示意图
Fig.1 Schematic of experimental device of vacuum freeze-drying
1. Refrigeration machine 2. Drying chamber 3. Shelf plate 4. Samples 5. Temperature sensors 6. Heating machine 7. Control system 8. Cold trap 9. Refrigeration coils 10. Vacuum pump

图 1 真空冷冻干燥试验装置示意图

Fig.1 Schematic of experimental device of vacuum freeze-drying

2) 传统冷冻干燥法

传统冷冻干燥工艺参数条件也是结合生产实际情况、并经过前期多次实验摸索优化后来确定。将平铺一层柠檬片的料盘置于干燥仓隔板上，密闭干燥仓后开启制冷器对隔板供给冷量，隔板温度设定为-30℃，在常压下进行平板冷冻 3 h^[8-10]；然后再转入冷冻干燥过程，冷阱降温、隔板“温度-时间”程序、真空条件及干燥终点确定等条件均同真空冻结冷冻干燥方法一致，获得传统冷冻干燥柠檬片样品。

3) 热风干燥法

参照常婷婷等优化的柠檬片热风干燥工艺参数^[7]，将备好的柠檬片一层平铺于网状料盘中，放入鼓风干燥箱中在 80℃下恒温干燥，直至柠檬片湿基含水率在 5%以下，获得热风干燥柠檬片样品。

1.2.3 测定指标

1) 物料冷冻失水率与冻结温度

在两种冷冻干燥方法中的预冻阶段，随机选取 4 片柠檬为温度监测对象，用温度传感器分别测定预冻结束后的柠檬片中心温度，取平均值为物料冻结温度。随机选取 5 片柠檬，分别记录物料冻结前、后质量，按下式计算冷冻失水率，取平均值为计算结果

$$M_L = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中 M_L 为冷冻失水率，%； m_0 为柠檬片入仓前初始质量，g； m_1 为柠檬片冷冻结束后质量，g。

2) 干燥工艺耗时及耗电量分析

3 种干燥方式中，由于柠檬入仓干燥之前的处理工艺和条件均一致，真空冻结冷冻干燥和传统冷冻干燥 2 种方法干燥工艺耗时均记录为冷阱预降温时间、预冻时间和干燥时间 3 部分，热风干燥工艺耗时记录物料从入仓到出仓所用的时间。用电功率表记录 3 种干燥方式下干燥设备总耗电量。

3) 维生素 C 含量及保存率测定

采用 2,6-二氯酚酚滴定法,按照“GB/T 6195-1986 水果、蔬菜维生素 C 含量测定”方法测定新鲜柠檬原料和干燥样品中的维生素 C 含量^[23]。由于新鲜柠檬原料和干燥样品湿基含水率的差异存在,柠檬片干燥样品的维生素 C 保存率按下式计算:

$$R_c = \frac{v_d(1-x_0)}{v_0(1-x_d)} \times 100\% \quad (2)$$

式中 R_c 为干燥样品维生素 C 保存率, %; v_0 为新鲜柠檬维生素 C 质量分数, mg/g; v_d 为干燥样品维生素 C 质量分数, mg/g; x_0 为新鲜柠檬初始湿基含水率, 为 88.05%; x_d 为干燥终点的样品湿基含水率, 为 5%。

4) 复水比

将干燥后的柠檬片 (m_1 ,g) 放入 30 °C 左右的蒸馏水中充分吸水 30 min, 捞出后用滤纸吸干样品表面的水分, 准确称量 (m_2 ,g), 复水比 = m_2/m_1 ^[24-25]。每组样品平行测定 3 次, 取其平均值。

5) 色泽

将 3 种干燥样品用粉碎机粉碎, 再过 80 目筛制成粉, 用 3nh 高品质电脑色差仪分别进行色泽测定, 根据 CIELAB 表色系统, 读取 L^* 、 a^* 、 b^* , 并按公式计算色差值 ΔE ^[26-27], 每组样品平行测定 5 次, 取其平均值。

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (3)$$

式中 L^* 为干制样品明暗度指数, a^* 为干制样品红绿度指数, b^* 为干制样品黄蓝度指数, L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* 为鲜切柠檬片色差值。

6) 挥发性风味成分测定

挥发性风味物质 SPME 萃取^[28]: 取 2 g 柠檬片样品进行粉碎后装入 15 mL 顶空瓶中, 用聚四氟乙烯隔垫密封, 加入 8 mL 饱和氯化钠, 40 °C 水浴平衡 15 min, 插入已老化处理的 CAR/PDMS/DVB 固相微萃取头, 使之与液面保持 1.5 cm 的距离, 加入搅拌子置于磁力搅拌器上, 搅拌速率 200 r/min, 在 40 °C 条件下萃取 15 min。

色谱条件色谱柱: HP-INNOWAX 色谱柱 (30 m × 0.32 mm, 0.25 μm); 升温程序: 起初温度 40 °C 保持 2 min, 然后 5 °C/min 升温至 220 °C; 进样口温度 250 °C, 解吸 2 min, 采用不分流进样; 载气 He。

质谱条件离子源: 离子源温度 230 °C; MS 四极杆温度 150 °C; 电子电离源; 电子能量 70 eV; 质量扫描范围 m/z 30~450; 扫描速率 5.27 amu/s; 溶剂延迟 1 min。

定性方法^[28]: 采用 NIST 11 质量分析数据库进行检索, 确认挥发性风味成分的各化学组成, 只有当正反匹配度均大于 80 (最大值 100) 的鉴定结果才予以确认。

定量方法^[2]: 采用各成分峰面积与内标物峰面积对比进行半定量分析, 内标物为 1 μL/mL 环己烷, 加入质量 0.1 μg。由于新鲜柠檬和干制柠檬含水率不同, 为了便于比较, 挥发性风味成分测定结果以每克干基柠檬中所含挥发性风味成分微克数来表示, 每个样品重复 3 次。计算公式为

$$C_i = \frac{A_i \cdot w_0}{A_{ii} \cdot w_1} \quad (4)$$

式中 C_i 为各挥发性成分质量分数, μg/g; A_i 为各成分峰面积; w_0 为内标物质量, μg; A_{ii} 为内标物峰面积; w_1 为

柠檬样品干基质量, g。

7) 低场核磁 (low field nuclear magnetic resonance, LF-NMR) 自旋-自旋横向弛豫时间 (T_2) 测定

称取 10 g 干燥后的柠檬片为待测样品, 放置于 MesoMR23-060V-I 低场核磁共振成像分析系统磁场中心位置的射频线圈中心, 利用 FID 信号调节共振中心频率, 然后进行 CPMG 脉冲序列扫描, 测量样品的自旋-自旋横向弛豫时间(T_2)。试验参数: 采样点数 TD=200 000, 重复扫描个数 NS=8, 采样间隔时间 TW=5 000 ms, 回波个数 NECH=8 000, 回波时间 TE=0.25 ms。扫描试验结束后, 利用 T_2 反演拟合软件拟合出 T_2 值, 获得 T_2 图谱。

8) 感官评价

3 种干燥样品各取 10 片柠檬片放于审评盘中, 每种干燥样品各另外取 2 片柠檬片加入 80 °C 的温开水 500mL 浸渍 5 min 后, 将溶液倒尽置于审评碗中, 评审盘和评审碗中的所备样品用于感官评价。

采用定量描述分析方法对柠檬片进行感官评价。邀请食品专业且对试验样品感官性质差别具有识别能力的 10 位学生作为感官评价的品评人员, 经过感官分析基本培训, 熟悉评价的描述词, 并进行标度评价。样品随机提供给感官评价员, 每位评价员单独进行品评, 相互不交流, 样品评定之前用清水漱口。柠檬片感官评价主要包括色泽、柠檬气味、酸味、苦味、涩味、质地 6 个方面, 采用 9 点强度标度, 由低到高依次表示相应感官特征由弱到强的变化。具体感官评价内容及评分见表 1 所示。

表 1 感官评价内容及评分标准

Table 1 Sensory evaluation content and grading criteria

项目 Item	感官特征描述 Sensory description	评价标准 Grading criteria
色泽 Color	干品果肉呈白色, 果皮呈亮黄色	
柠檬气味 Lemon flavor	干品闻到的柠檬气味	
酸味 Sour taste	柠檬浸泡液在口腔中感受到的酸味	采用 9 点强度标度。1 分: 极弱; 2 分: 很弱; 3 分: 较弱; 4 分: 稍弱; 5 分: 中等; 6 分: 稍强; 7 分: 较强; 8 分: 很强; 9 分: 极强。
苦味 Bitterness	柠檬浸泡液在口腔中感受到的苦味	
涩味 Astringency	柠檬浸泡液在口腔中感受到的涩味	
质地 Texture	干品表面平整、质地疏松	

1.2.4 数据处理

采用统计分析软件 SPSS11.5 对试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 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

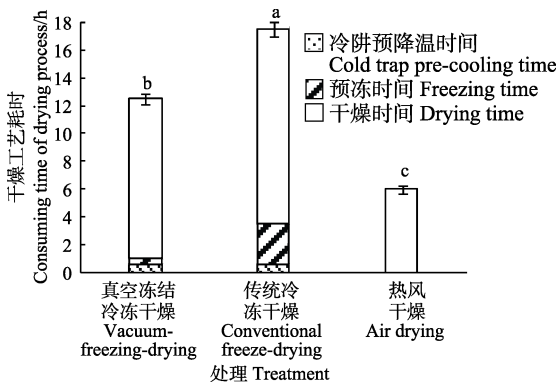
2.1 物料冷冻失水率与冻结温度

本试验在两种冷冻干燥工艺中采用了完全不同的预冻方式, 即真空冻结和常压平板冻结, 过程中物料均无法避免水分损失, 但两者产生原因不同^[29]。真空冻结期间, 从干燥仓压强下降到柠檬片中水分的闪点开始, 大量水分会快速蒸发并从物料带走大量热量, 使柠檬片快速降温冻结。而柠檬片在常压平板冻结时的水分损失通常又称为冷冻干耗, 主要是由于表层部分冰晶饱和蒸汽压高于环境压强而发生升华所致。冷冻干燥加工整个工

艺耗时主要体现在升华和解析干燥段，柠檬物料在预冻期间失去部分水分将更有利于减轻后续冷冻干燥负荷，起到预干燥效果。真空冻结和常压平板冻结过程的失水率分别为 25.62%、4.55%，两者差异显著 ($P<0.05$)，柠檬片冻结温度分别为 $-28.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-29.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，未见显著差异 ($P>0.05$)。通常冷冻干燥需要将物料冻结温度降低到低于其共晶点 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上，而柠檬的共晶点温度约为 $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，两种冷冻干燥工艺中物料冻结温度都能满足此要求。两种工艺中冷冻失水率的显著差异主要是由于冷冻失水的发生原理和条件不同所致，理想情况是真空冻结失水越多、物料降温冻结越彻底，对后续冷冻干燥更有利。

2.2 干燥工艺耗时及耗电量分析

3 种干燥方法中的干燥工艺耗时测试结果如图 2 所示，可见两种冷冻干燥方法干燥工艺耗时均是热风干燥 2 倍以上。真空冻结冷冻干燥和传统冷冻干燥两种方法中冷阱预降温时间均为 0.5 h，预冻时间分别为 0.5 h、3 h，干燥时间分别为 11.5 h、14 h，总干燥工艺耗时为 12.5 h、17.5 h，呈现出显著差异 ($P<0.05$)。真空冻结冷冻干燥加工方法由于采用真空快速冷冻的预冻方式，并预先脱除了近 1/3 的初始水分，减少后期冷冻干燥的负荷，最终比传统冷冻干燥方式节省干燥工艺时间 5 h，其中预冻和干燥环节各节省 2.5 h。



注：图中同一指标字母不同者表示有显著性差异 ($P<0.05$)，下列图中含义相同。
Note: Different letters in the same indicators indicate significant differences ($P<0.05$), the same as below.

图 2 不同干燥工艺耗时

Fig.2 Consuming time of different drying processes

柠檬片干燥耗电量与干燥设备配置及工艺参数密切相关。本试验中，真空冻结冷冻干燥、传统冷冻干燥两种冷冻干燥方法中由于工艺过程中各器件开启和运行时间均不相同，两者耗电量差异显著，分别为 29.62、34.55 kW·h ($P<0.05$)；热风干燥耗电量为 5.40 kW·h，真空冻结冷冻干燥耗电量约为热风干燥耗电量 5 倍以上。可见，冷冻干燥加工柠檬片的能耗成本远高出热风干燥柠檬片，而真空冻结冷冻干燥柠檬片耗电量比传统冷冻干燥柠檬片低 14.27%，而且工艺耗时缩短 5 h，降低加工成本，表现出良好的冷冻干燥加工经济性优势。

2.3 干燥方式对柠檬片维生素 C 含量和复水比的影响

新鲜柠檬维生素 C 质量分数达 0.22 mg/g，3 种干燥方法获得的柠檬片维生素 C 含量如图 3 所示。其中，真空冻结冷冻干燥柠檬片维生素 C 含量比传统冷冻干燥高出 45.30%，比热风干燥高出 245.00%，呈现出显著差异 ($P<0.05$)。在热风干燥中，由于高温、空气对柠檬片的

持续作用，导致其中的维生素 C 极大损失，相对于等量新鲜柠檬片而言，热风干燥柠檬片维生素 C 保存率仅为 19.14%。而真空冻结冷冻干燥和传统冷冻干燥对柠檬片维生素 C 保存率分别为 66.03%、45.45%，分析认为两种冷冻干燥方法中维生素 C 含量与保存率差异显著的原因可能是由于采用不同的预冻方式而引起，相对于常压平板冻结而言，真空冻结过程近似是无氧环境，而且冷冻速度非常迅速，形成冰晶细小，因冷冻而引起细胞组织损伤小，这些都有利于柠檬片冷冻过程中维生素 C 的保存，而在真空冷冻干燥阶段，真空冻结冷冻干燥所需时间也比传统冷冻干燥减少 2.5 h，也有利于降低干燥的温时效应对维生素 C 的破坏作用，尤其在温度较高的解析干燥阶段^[8-10,30]。

由图 3 可以看出，真空冻结冷冻干燥、传统冷冻干燥、热风干燥柠檬片复水比分别为 4.60、3.97、2.24，两种冷冻干燥柠檬片复水比显著高于热风干燥柠檬片 ($P<0.05$)，主要因为热风干燥柠檬片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^[4]。冷冻干燥柠檬片则能够较好地保持产品原有形态，物料内水分的去除以升华干燥为主，可以形成良好的多孔结构，复水程度比热风干燥制品要高得多^[9]。而真空冻结冷冻干燥柠檬片的复水性也显著高于传统冷冻干燥柠檬片 ($P<0.05$)，可能由于真空快速冻结条件对细胞组织引起的冻结损伤相对较小，而冻结速度较为缓慢的常压平板冻结由于细胞内外会形成较大冰晶体，组织破坏程度相对高，干制品组织复水性相对较差^[8,31-32]。

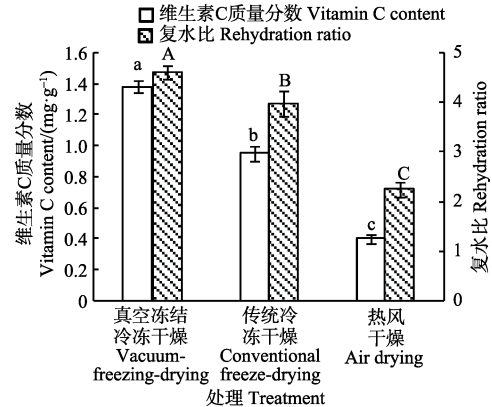


图 3 不同干燥方式柠檬片的维生素 C 质量分数和复水比
Fig.3 Vitamin C content and rehydration ratio of lemon slices by different drying methods

2.4 干燥方式对柠檬片色泽的影响

柠檬片色泽测定结果如表 2 所示。两种冷冻干燥柠檬片亮度指数 L^* 值与新鲜柠檬片无显著差异，接近鲜柠檬切片亮白色，均显著高于热风干燥柠檬片 ($P<0.05$)；热风干燥柠檬片红绿度 a^* 值和蓝黄度 b^* 值明显高于冷冻干燥和新鲜柠檬片 ($P<0.05$)，在彩度上更接近红、黄色；从综合色差指标 ΔE 值来看，热风干燥柠檬片显著高于两种冷冻干燥柠檬片，而两种冷冻干燥柠檬片 ΔE 值未见显著差异 ($P<0.05$)。色泽测试数据表明，相对于新鲜柠檬片而言，柠檬片经热风干燥后颜色变化最大，在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热风干燥 6 h 期间会因酶促褐变、非酶褐变及色素本身氧化等一系列作用引起色泽改变，表现呈现明显的暗褐色；而两种冷冻干燥方法对鲜柠檬片原始色泽改变相对较

小, 冷冻干燥对柠檬呈色物质破坏较少, 保持了柠檬原有的鲜黄色^[7-8]。

表2 不同干燥方式柠檬片的色泽指标

Table 2 Color indices of lemon slices by different drying methods

干燥方式 Drying mode	亮度 Lightness L^*	红绿度 Red-green a^*	蓝黄度 Blue-yellow b^*	色差 Color difference ΔE
新鲜柠檬 Fresh lemon	83.12±0.38 ^a	0.12±0.49 ^c	15.28±0.39 ^f	
真空冻结冷冻干燥 Vacuum-freezing-drying	85.24±0.16 ^a	1.50±0.21 ^b	18.01±0.28 ^b	4.80±0.22 ^b
传统冷冻干燥 Conventional freeze-drying	84.83±0.16 ^a	1.20±0.23 ^b	20.01±0.26 ^b	5.78±0.29 ^b
热风干燥 Air drying	72.14±0.31 ^b	9.12±0.28 ^a	27.47±0.16 ^a	22.20±0.34 ^a

注: 表中同一指标字母不同者表示有显著性差异 ($P<0.05$), 下列表中含义相同。

Note: Different letters in the same indicators indicate significant differences ($P<0.05$), the same as below.

2.5 干燥方式对柠檬片主要挥发性风味成分保存效果的影响

通过 SPME 萃取和 GC-MS 分离鉴定, 新鲜柠檬挥发性风味化合物含量最多的 5 种分别是 D-柠檬烯 (23 320.39 $\mu\text{g/g}$)、萜品烯 (4 509.64 $\mu\text{g/g}$)、左旋- β -蒎烯 (2 279.08 $\mu\text{g/g}$)、 β -蒎烯 (879.92 $\mu\text{g/g}$)、蒎烯 (480.73 $\mu\text{g/g}$) 等化合物, 该 5 种风味化合物经 3 种方法干燥成品后, 含量变化如图 4 所示。以新鲜柠檬为对照, 计算挥发性化合物成分保存率, 结果见表 3 所示。对于每种风味化合物而言, 在 4 种不同状态柠檬片中的含量呈现出显著的差异, 而且具有相同的规律, 含量由高到低分别是新鲜柠檬片、真空冻结冷冻干燥柠檬片、传统冷冻干燥柠檬片、热风干燥柠檬片, 真空冻结冷冻干燥方法对柠檬片中 5 种风味化合物的保存率最高, 其次是传统冷冻干燥方式, 热风干燥方法保存率最低 ($P<0.05$)。

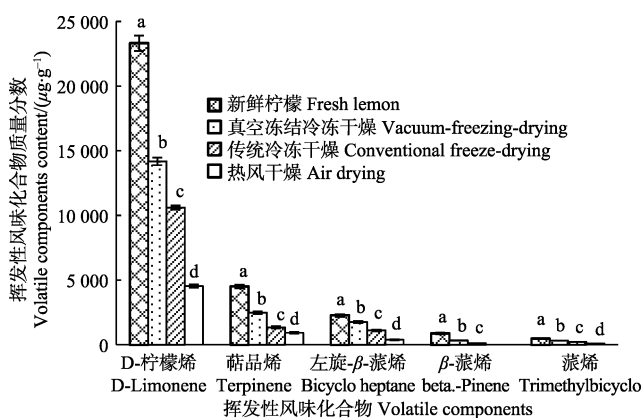


图4 不同干燥方式柠檬片主要挥发性风味化合物含量

Fig.4 Main volatile components content of lemon slices by different drying methods

相对真空低温过程的冷冻干燥而言, 热风干燥整个过程是在常压、有氧、高温环境下进行, 挥发性风味成分破坏程度更大、且更易挥发损失, 所以新鲜柠檬中的 5 种主要挥发性化合物远低于两种冷冻干燥方式所获得柠檬片, 甚至 β -蒎烯在热风干燥柠檬片中未检测出。而柠

檬片在冷冻干燥过程中也无法避免该问题, 挥发性风味化合物会随着水分升华而被带出, 另外在真空状态下挥发性风味化合物也会在压差作用下从细胞组织中逸出, 造成芳香成分的损失^[33]。

表3 不同干燥方式柠檬片挥发性化合物成分保存率

Table 3 Retention ratio of main volatile components

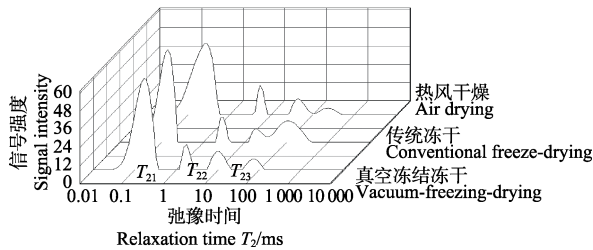
干燥方式 Drying mode	D-柠檬烯 D-Limonene	萜品烯 Terpinene	左旋- β -蒎烯 Bicyclo heptane	β -蒎烯 β -Pinene	蒎烯 Trimethylbicyclo	%
真空冻结 冷冻干燥 Vacuum-freezing-drying	60.82±1.24 ^a	55.20±2.35 ^a	77.46±2.33 ^a	38.25±2.59 ^a	67.58±2.72 ^a	
传统冷冻干燥 Convention- al freeze-drying	45.52±0.65 ^b	29.86±1.66 ^b	49.08±2.58 ^b	14.49±1.48 ^b	47.63±2.19 ^b	
热风干燥 Air drying	19.46±0.58 ^c	20.62±1.29 ^c	17.19±1.54 ^c	0.00 ^c	18.15±1.04 ^c	

而新型的真空冻结冷冻干燥工艺比传统冷冻干燥工艺更有益于保存柠檬片中挥发性风味化合物, 减少冷冻干燥过程中的风味损失, 分析认为两种冷冻干燥方法对柠檬片挥发性风味化合物保存效果产生的差异可以归因于: 1) 真空冻结冷冻干燥工艺中采用真空速冻方式, 细胞组织中的水分被极快速冻结, 形成细小冰晶体, 对细胞组织破坏程度低, 升华干燥形成致密的网络孔道^[31-32]; 而传统冷冻干燥工艺中采用冻结速度较慢的平板冻结, 细胞组织内生成冰晶体相对较大, 对柠檬片细胞破坏程度高, 而且升华干燥形成网络孔道也相对较大^[31-32]; 而柠檬片细胞破坏程度越高、升华形成网络孔道越大, 在真空冷冻干燥过程中则更有利于挥发性风味化合物从柠檬片组织内向外扩散逸出, 造成更多的芳香物损失。2) 相对于传统冷冻干燥工艺而言, 真空冻结冷冻干燥工艺缩短了柠檬片在真空状态下进行冷冻干燥的时间, 因此挥发性风味化合物在真空状态下的挥发迁移损失也相应减少。

2.6 干燥方式对柠檬片中水分形态的影响

LF-NMR 测定横向弛豫时间 T_2 反映了样品内部氢质子所处的化学环境, 氢质子受束缚越大或自由度越小, 弛豫时间 T_2 越短, 在 T_2 谱上峰位置较靠左; 反之弛豫时间 T_2 越长, 在 T_2 谱上峰位置较靠右^[33]。柠檬干燥结束后, 样品中湿基含水率在 5% 左右。物料中水分一般以游离在细胞组织之间流动性较大的自由水 T_{23} 、受一定束缚力约束的不易流动水 T_{22} 、与细胞内部物质结合紧密的结合水 T_{21} 3 种形式存在^[34-35]。由图 5 可知, 3 种干燥方式的柠檬片均呈现 3 个 T_2 峰段, 其中自由水 T_{23} 出现在 100 ms 附近区域, 不易流动水 T_{22} 出现在 10 ms 附近区域, 结合水 T_{21} 出现在 0.1 ms 附近区域。3 组柠檬片各峰段面积所占比例呈现类似的规律, 干燥样品的残留水分中结合水占比最高, 不易流动水和自由水占比较小, 说明不论是热风干燥还是冷冻干燥, 最后干燥残留下来的以不易去除结合水为主, 符合干燥脱水的进程, 占比大的结合水在干燥制品中相对稳定, 有益于维持食品保藏性。热风干燥柠檬片的 T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} 峰位相对其他两组呈现小幅度的右移趋势, 与两种冷冻干燥柠檬片相比, 热风干燥柠

檬片中残留水自由度相对增加和束缚作用相对减小，其原因可能是由于在 80 °C 的热风环境热力持续作用下，柠檬片组织内残留水分与其他组分的结合力和亲水性均有所下降^[34-35]。残留水分在食品物料内的结合形式和分布也是物料干燥的基础特性，可为干燥物料基础参数研究提供参考。



注：湿基含水率为 5%， T_{21} 为结合水， T_{22} 为不易流动水， T_{23} 为自由水。
Note: Moisture content of wet basis is 5%, T_{21} means bond water, T_{22} means un-easily flowing water, T_{23} means free water.

图 5 不同干燥方式柠檬片 LF-NMR 横向弛豫时间 T_2 图谱

Fig.5 Plots of LF-NMR transverse relaxation time T_2 of lemon slices by different drying methods

2.7 干燥方式对柠檬片感官品质的影响

3 种干燥方式柠檬片感官特征评分结果如表 4 所示。总体而言，热风干燥柠檬片的各种感官特征属性强度值与其他两组冷冻干燥柠檬片差异显著 ($P < 0.05$)，总评分表明热风干燥柠檬片感官特征总体较为单薄，不及冷冻干燥柠檬片感官特征丰富，而真空冻结冷冻干燥柠檬片和传统冷冻干燥柠檬片的感官特征总评分未见显著差异 ($P > 0.05$)。在色泽方面，两组冷冻干燥样品呈鲜亮特征，接近新鲜柠檬片色泽，获得较高的感官评分，而热风干燥样品果肉呈褐色、果皮为橙黄色，品相较差。两组冷冻干燥样品均具有浓郁的柠檬气味，真空冻结柠檬片的柠檬气味强于传统冷冻干燥柠檬片，而热风干燥柠檬片则相差甚远，柠檬气味很淡，近闻才有些许味道，柠檬气味感官评定结果与柠檬中主要挥发性化合物成分实际检测结果相符。在质地方面，两组冷冻干燥样品表面平整、疏松，形态接近新鲜柠檬片，而热风干燥样品表面较为致密、质地硬脆，皱缩卷曲严重。在口感方面（涩味、苦味、酸味），3 组样品强度特征值较小，感官差异也不及色泽、质地和气味明显，热风干燥柠檬片的涩味和苦味均稍高于两组冷冻干燥样品，口感较差。

表 4 不同干燥方式柠檬片感官评分表

Table 4 Evaluation of sensory quality of lemon slices by different drying methods

项目 Item	真空冻结冷冻干燥 Vacuum-freezing-drying	传统冷冻干燥 Conventional freeze-drying	热风干燥 Air drying
色泽 Color	8.50±0.35 ^a	8.30±0.42 ^a	3.40±0.20 ^b
柠檬气味 Lemon flavor	8.40±0.28 ^a	7.20±0.34 ^b	4.80±0.25 ^c
酸味 Sour taste	4.90±0.18 ^a	5.10±0.25 ^a	4.20±0.22 ^b
苦味 Bitterness	3.20±0.25 ^b	3.60±0.24 ^b	5.30±0.32 ^a
涩味 Astringency	3.20±0.26 ^b	3.40±0.20 ^b	4.20±0.31 ^a
质地 Texture	8.70±0.37 ^a	8.30±0.33 ^a	3.50±0.17 ^b
总分 Total scores	36.90±1.25 ^a	35.90±1.04 ^a	25.40±0.96 ^b

综合比较前述柠檬片干燥品质指标可以发现，真空冻结冷冻干燥和传统冷冻干燥 2 种柠檬片的各方面品质均明显高于热风干燥柠檬片，冷冻干燥方法适用于高品质、高附加值柠檬片干燥制品加工，而真空冻结冷冻干燥方法可缩短冷冻干燥工艺时间、降低能耗，并获得优于或者相近于传统冷冻干燥柠檬片品质，是高附加值柠檬片的首选干燥方法。

3 结论

1) 柠檬片真空冻结冷冻干燥加工方法采用真空快速冷冻的预冻方式，物料蒸发失水和冻结同步进行，缩短预冻时间、并减少后期冷冻干燥负荷，最终比传统冷冻干燥方式节省干燥工艺耗时 5 h，降低耗电量 14.27%，体现出冷冻干燥的节能降耗优势。但是柠檬片真空冻结冷冻干燥的干燥工艺耗时是热风干燥 2 倍以上，耗电量是热风干燥 5 倍以上。

2) 在维生素 C 保存率、复水比品质指标上，真空冻结冷冻干燥柠檬片均显著高于传统冷冻干燥柠檬片 ($P < 0.05$)，热风干燥柠檬片最低；两组冷冻干燥柠檬片色差 ΔE 值未见显著差异 ($P > 0.05$)，且显著低于热风干燥柠檬片色差 ($P < 0.05$)；真空冻结冷冻干燥柠檬片中 5 种最主要挥发性风味化合物保存率最高，传统冷冻干燥柠檬片次之，热风干燥柠檬片保存率最低 ($P < 0.05$)；在横向弛豫时间 T_2 图谱中，干燥样品残留水分中结合水占比例最高，不易流动水和自由水占比例较小，热风干燥柠檬片 T_2 峰位相对其他两组呈现小幅度的右移趋势；热风干燥柠檬片感官特征总体较为单薄，尤其是在色泽、质地、柠檬味上远不及两组冷冻干燥柠檬片感官特征丰富，而真空冻结冷冻干燥柠檬片和传统冷冻干燥柠檬片感官特征总评分差异不显著 ($P > 0.05$)。

3) 冷冻干燥加工方法适用于高品质、高附加值柠檬片干燥制品加工，而真空冻结冷冻干燥干燥方法可缩短工艺时间、降低能耗，并获得优于或者相近于传统冷冻干燥柠檬片品质，值得进一步推广应用。

[参 考 文 献]

- [1] 洪林, 谢永红. 11 个柠檬品种的生物学特性及果实品质评价[J]. 南方农业学报, 2012, 43(7): 1000-1004.
Hong Lin, Xie Yonghong. Evaluation on biological characteristics and fruit quality of eleven introduced lemon varieties[J]. Journal of Southern Agriculture, 2012, 43(7): 1000-1004. (in Chinese with English abstract)
- [2] 何朝飞, 冉玥, 曾林芳, 等. 柠檬果皮香气成分的 GC-MS 分析[J]. 食品科学, 2013, 34(6): 175-179.
He Chaofei, Ran Yue, Zeng Linfang, et al. Analysis of aroma components from peels of different lemon varieties by GC-MS[J]. Food Science, 2013, 34(6): 175-179. (in Chinese with English abstract)
- [3] 巩桂芬, 李阳. 柠檬片热风微波真空联合干燥工艺参数的优化[J]. 食品科技, 2016(9): 120-123.
Gong Guifen, Li Yang. Optimization of process parameters for lemon slice dried by hot air and vacuum microwave[J]. Food Science and Technology, 2016(9): 120-123. (in Chinese with English abstract)
- [4] 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.
Wang Rongrong, Ding Shenghua, Li Gaoyang, et al. Hot-air

- drying characteristics and quality attributes of lemon slices[J]. Food Science and Technology, 2016(5): 48–53. (in Chinese with English abstract)
- [5] 熊伟成, 常婷婷, 张欣, 等. 柠檬片洞道薄层干燥特性的数值模拟[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(8): 40–45. Xiong Weicheng, Chang Tingting, Zhang Xin, et al. Drying characteristics and numerical simulation of lemon slices dried by tunnel hot air [J]. Food and Fermentation Industries, 2014, 40(8): 40–45. (in Chinese with English abstract)
- [6] 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. Huang Yanbin, Zheng You, Chen Haiqiao, et al. Hot-air drying characteristics and mathematical model of lemon [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(14): 169–172. (in Chinese with English abstract)
- [7] 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: 下, 2013(8): 34–37. Chang Tingting, Zhang Xin, Xiong Weicheng, et al. Optimization of technology parameters of hot-air drying lemon [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2013(8): 34–37. (in Chinese with English abstract)
- [8] 章斌, 丁心, 侯小桢, 等. 柠檬片的低温冻结与真空冷冻干燥工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(22): 86–90. Zhang Bin, Ding Xin, Hou Xiaozhen, et al. Research on the processing technology of freezing and vacuum drying of lemon slices[J]. Food Research And Development, 2015, 36(22): 86–90. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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. Xie Zhenwen, Zhang Bangkui, Tu Xueling, et al. The optimization of the parameters of the lemon piece vacuum freeze-drying processing[J]. Food and Fermentation Technology, 2010, 46(3): 51–54. (in Chinese with English abstract)
- [10] 范兰娣. 冻干柠檬片生产工艺的研究[J]. 食品科技, 2009(5): 54–56. Fan Landi. Freezing and drying lemon piece's production process research[J]. Food Science and Technology, 2009(5): 54–56. (in Chinese with English abstract)
- [11] Kesbi O M, Sadeghi M, Mireei S A. Quality assessment and modeling of microwave-convective drying of lemon slices[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2016, 9(3): 216–223.
- [12] Chen H H, Hernandez C E, Huang T C. A study of the drying effect on lemon slices using a closed-type solar dryer[J]. Solar Energy, 2005, 78(1): 97–103.
- [13] García-Pérez J V, Cárcel J A, Riera E, et al. Influence of the applied acoustic energy on the drying of carrots and lemon peel[J]. Drying Technology, 2009, 27(2): 281–287.
- [14] Zhang M, Tang J, Mujumdar A S, et al. Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables[J]. Trends in Food Science & Technology, 2006, 17(10): 524–534.
- [15] Duan X, Zhang M, Mujumdar A S, et al. Trends in microwave-assisted freeze drying of foods[J]. Drying Technology, 2010, 28(4): 444–453.
- [16] Huang L, Zhang M, Mujumdar A S, et al. Studies on decreasing energy consumption for a freeze-drying process of apple slices[J]. Drying Technology, 2009, 27(9): 938–946.
- [17] Argyropoulos D, Heindl A, Müller J. Assessment of convection, hot-air combined with microwave-vacuum and freeze-drying methods for mushrooms with regard to product quality[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2011, 46(2): 333–342.
- [18] Tian Y T, Zhao Y T, Huang J J, et al. Effects of different drying methods on the product quality and volatile compounds of whole shiitake mushrooms [J]. Food Chemistry, 2016, 197(A): 714–722.
- [19] An K J, Zhao D D, Wang Z F, et al. Comparison of different drying methods on Chinese ginger (*Zingiber officinale* Roscoe): Changes in volatiles, chemical profile, antioxidant properties, and microstructure[J]. Food Chemistry, 2016, 197(B): 1292–1300.
- [20] 王海鸥, 胡志超, 屠康, 等. 真空冷却预处理在微波冻干胡萝卜片中的应用[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 358–363. Wang Haiou, Hu Zhichao, Tu Kang, et al. Application of vacuum-cooling pretreatment to microwave freeze drying of carrot slices[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(7): 358–363. (in Chinese with English abstract)
- [21] 农业部南京农业机械化研究所. 果蔬微波冷冻干燥脱水加工方法: 201010184053.5[P]. 2010-05-27.
- [22] 南京晓庄学院. 一种一体式辐射真空冻干设备及方法: 201510017464.8[P]. 2015-01-13.
- [23] GB/T 6195-1986. 水果、蔬菜维生素 C 含量测定法(2, 6-二氯靛酚滴定法)[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [24] Wang Y, Zhang M, Mujumdar A S, et al. Effect of blanching on microwave freeze drying of stem lettuce cubes in a circular conduit drying chamber[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 113(2): 177–185.
- [25] 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. Yan Jianchun, Hu Zhichao, Wu Penglai, et al. Optimization of hot-plate and microwave combined vacuum freeze drying process of water-oat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(1): 262–270. (in Chinese with English abstract)
- [26] 段续, 刘文超, 任广跃, 等. 双孢菇微波冷冻干燥特性及干燥品质[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 295–302. Duan Xu, Liu Wenchao, Ren Guangyue, et al. characteristics and quality of button mushrooms during microwave freeze drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(12): 295–302. (in Chinese with English abstract)
- [27] 宫元娟, 王博, 林静, 等. 香菇冷冻干燥工艺参数的试验研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 226–229. Gong Yuanjuan, Wang Bo, Lin Jing, et al. Experimental study on technological parameters of freeze-drying of mushroom[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(1): 226–229. (in Chinese with English abstract)
- [28] 吴建平, 牛丽影, 李大婧, 等. 鲜食糯玉米挥发性成分与感官属性相关性分析[J]. 食品科学, 2016, 37(16): 94–99. Wu Jianping, Niu Liying, Li Dajing, et al. Correlation analysis of volatile components and sensory properties in fresh waxy corn[J]. Food Science, 2016, 37(16): 94–99. (in Chinese with English abstract)
- [29] 金听祥, 张海川, 成剑, 等. 真空冷却技术的应用与研究进展[J]. 农业工程学报, 2008, 24(增刊 1): 234–238. Jin Tingxiang, Zhang Haichuan, Cheng Jian, et al. Application and research development of vacuum cooling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(Supp. 1): 234–238. (in Chinese with English abstract)
- [30] Santos P H S, Silva M A. Retention of vitamin C in drying processes of fruits and vegetables: A review[J]. Drying Technology, 2008, 26(12): 1421–1437.
- [31] 王海鸥, 陈守江, 扶庆权, 等. 不同预处理方式对苹果片真空冻结特性的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(11):

- 241—247.
Wang Haiou, Chen Shoujiang, Fu Qingquan, et al. Effect of different pretreatments on the vacuum-freezing characteristics of apple slices[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2016, 32(11): 241—247. (in Chinese with English abstract)
- [32] 周嶂, 王海鸥, 孙艳辉, 等. 不同前处理和冻结方式对苹果片真空冷冻干燥效率及干制品品质的影响[J]. *现代食品科技*, 2016, 32(12): 218—224.
Zhou Di, Wang Haiou, Sun Yanhui, et al. Effects of pre-processing and freezing methods on the efficiency of vacuum freeze-drying and quality of freeze-dried apple slices[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2016, 32(12): 218—224. (in Chinese with English abstract)
- [33] 唐秋实, 刘学铭, 池建伟, 等. 不同干燥工艺对杏鲍菇品质和挥发性风味成分的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(4): 25—30.
Tang Qiushi, Liu Xueming, Chi Jianwei, et al. Effects of different drying methods on quality and volatile components of *pleurotus eryngii*[J]. *Food Science*, 2016, 37(4): 25—30. (in Chinese with English abstract)
- [34] 邵小龙, 李云飞. 用低场核磁研究烫漂对甜玉米水分分布和状态影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(10): 302—306.
Shao Xiaolong, Li Yunfei. Effects of blanching on water distribution and water status in sweet corn investigated by using MRI and NMR[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 25(10): 302—306. (in Chinese with English abstract)
- [35] 杨文鸽, 张问, 王小飞, 等. 用低场核磁共振研究盐溶液漂洗对带鱼鱼糜凝胶品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(7): 263—269.
Yang Wen'ge, Zhang Wen, Wang Xiaofei, et al. Effect of salt solution rinse on properties of hairtail surimi gel by low-field nuclear magnetic resonance[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(7): 263—269. (in Chinese with English abstract)

Effect of different drying methods on drying characteristics and qualities of lemon slices

Wang Haiou^{1,2}, Xie Huanxiong^{1,3}, Chen Shoujiang², Fu Qingquan²,
Wang Rongrong², Zhang Wei², Hu Zhichao^{1,3*}

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China;

2. School of Food Science, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211171, China; 3. Nanjing Research Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China)

Abstract: Lemon tea has become one of indispensable health drinks in the market which are popular for many consumers (especially women consumers). Dried lemon slices are generally processed by air drying (AD) or freeze-drying (FD). FD has been considered as one of the best methods for obtaining dehydrated foods with high quality. However, conventional freeze-drying (CFD) process technology is characterized by many disadvantages including complicated process steps, large space occupation, huge equipment investment, frequent materials transferring, long drying time, and high production cost. In order to simplify the food CFD processes and shorten the drying time, a novel integrated freeze-drying processing technology (so-called vacuum-freezing-drying, VFD) was proposed based on the principle of vacuum cooling and vacuum freeze dryer. In order to investigate the effects of different drying methods on the drying characteristics and quality of lemon slices, comparison experiments and multi-index testing on the drying of lemon slices were conducted with the methods of VFD, CFD and AD. Two different freezing methods were adopted in VFD and CFD, which resulted in 25.62% and 4.55% mass loss in the lemon slice samples during freezing stage, respectively. The drying process time of VFD and CFD was 12.5 and 17.5 h, respectively, which was more than twice of that of AD. Compared with the CFD process, and the VFD process reduced by 2.5 h in either freezing stage or drying stage and saved 14.27% of power consumption, which was a considerable economic advantage. The retention ratio of vitamin C in dried lemon slices with VFD, CFD and AD was 66.03%, 45.45% and 19.14%, respectively, and the rehydration ratio was 4.60, 3.97 and 2.24, respectively, both showed the significant difference ($P < 0.05$). Color of lemon slice samples was measured with an automatic colorimeter. The comprehensive color difference index in air-dried lemon slice was significantly higher than that in the 2 kinds of freeze-dried lemon slices which showed no significant difference in the comprehensive color difference index ($P > 0.05$). Volatile components of lemon slices were analyzed by using solid-phase microextraction - gas chromatography - mass spectrometry (SPME-GC-MS). The top 5 volatile compounds were separated and identified from the dried lemon slices, which were ranked in descending order as d-limonene, terpinene, Levate- β -pinene, β -pinene and pinene. The highest retention ratio of the top 5 volatile compounds was achieved in the dried lemon slices by the VFD method, then the CFD method and the AD method. Transverse relaxation time (T_2) of dried lemon slices was measured with low field nuclear magnetic resonance (LF-NMR). Free water, non-flowing water and bond water were observed in the atlas of T_2 of the 3 groups of dried lemon slices. Bond water constituted the highest proportion of the residual water, and non-flowing water and free water constituted the much smaller proportion. And the T_2 peak of the hot-air dried lemon slices showed a slight right-shift trend compared with the other 2 groups. The sensory characteristics of the 2 groups of freeze-dried lemon slices showed little difference. The overall sensory characteristics of air-dried lemon slices were relatively weak. The sensory characteristic intensities in color, texture, and lemon flavor of air-dried lemon slices were much less than the 2 freeze-dried groups. The freeze-drying method is suitable for the processing of dried lemon slices with high quality and value. Compared with the CFD, the VFD method can shorten the process time, reduce energy consumption and obtain better or equivalent quality of lemon slices, deserving further application in the industry. All the above research conclusions can provide some theoretical and technical basis for the processing of lemon slices drying.

Keywords: drying; quality control; moisture; lemon slices; freeze-drying; vacuum freezing