

三种干燥技术对红枣脆片干燥特性和品质的影响

钱婧雅¹, 张茜², 王军¹, 方小明^{1,3},
张卫鹏¹, 高振江¹, 刘嫣红¹, 肖红伟^{1*}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 石河子大学机械电气工程学院, 石河子 832000;
3. 中国农业科学院蜜蜂研究所, 北京 100094)

摘要:为了解决传统油炸红枣脆片含油率高、维生素 C 损失严重及褐变等问题,探索红枣脆片新的加工方法,该文以新鲜脆熟期红枣为原料,利用气体射流冲击、中短波红外、真空脉动 3 种干燥技术进行非油炸红枣脆片的生产加工,对比了 3 种干燥方式对红枣脆片的干燥特性、色泽、维生素 C 保留率、复水性能、质地以及微观结构的影响。结果表明:1) 红枣脆片在 3 种干燥方式下均表现为降速干燥,其中气体射流冲击干燥时间最短,为 105 min,气体射流冲击、中短波红外、真空脉动干燥方式的水分有效扩散系数分别为 1.55×10^{-9} 、 1.03×10^{-9} 、 $0.89 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$; 2) 干燥方式对枣片色泽具有显著性影响 ($P < 0.05$),真空脉动干燥所得枣片与新鲜枣片色泽最为接近; 3) 气体射流冲击、中短波红外、真空脉动干燥方式干燥后红枣脆片的维生素 C 保留率分别为 51.5%、49.0%、66.6%,真空脉动干燥所得枣片维生素 C 含量保存率明显高于其他两种干燥方式 ($P < 0.05$); 4) 气体射流冲击、中短波红外、真空脉动干燥方式加工的红枣脆片脆度分别为 8.64、8.77、11.38 N,真空脉动干燥方式所得枣片最为酥脆; 5) 扫描电镜观测表明 3 种干燥方式均能得到疏松多孔的组织结构,真空脉动干燥所得枣片比气体射流和中短波红外干燥所得枣片组织结构更为疏松。从干燥时间来看气体射流冲击干燥耗时最短,但 3 种干燥方式所得红枣脆片色泽、维生素 C 保留率、复水性能和质地均以真空脉动干燥最优。该研究为低含油率和高品质红枣脆片的加工工艺选择提供了一定的理论依据。

关键词:干燥; 品质控制; 模型; 红枣脆片; 色泽; 维生素 C; 脆度

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.034

中图分类号: TS255.36; TS255.42

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-17-0259-07

钱婧雅, 张茜, 王军, 方小明, 张卫鹏, 高振江, 刘嫣红, 肖红伟. 三种干燥技术对红枣脆片干燥特性和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 259—265. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.034 <http://www.tcsae.org>
Qian Jingya, Zhang Qian, Wang Jun, Fang Xiaoming, Zhang Weipeng, Gao Zhenjiang, Liu Yanhong, Xiao Hongwei. Effects of three drying technologies on drying characteristics and quality attributes of jujube crisps[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(17): 259—265. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.034 <http://www.tcsae.org>

0 引言

红枣 (*Zizyphus jujuba dates*) 是鼠李科枣属植物枣树的果实^[1], 含有丰富的糖类、氨基酸、维生素 C、有机酸和多酚类等生物活性物质^[2-3]。近年来随着国民经济的发展, 作为休闲食品的酥脆枣片以其特有的质地和风味口感逐渐赢得了市场的青睐。低温真空油炸技术是目前生产果蔬脆片最广泛、最成熟的方法^[4], 已被应用于木薯片^[5]、苹果片^[6]、香蕉片^[7]等的加工生产中, 虽然真空油炸脆片具有口感和风味的优势, 但是含油率高, 产品贮藏性较差, 而且长期食用高油脂产品对健康不利。

使用干燥技术加工果蔬脆片是一种新的非油炸加工

方法。气体射流冲击干燥技术和中短波红外干燥技术是目前果蔬干燥加工的新技术。张茜等^[8]研究了哈密瓜片的气体射流冲击干燥技术下的干燥动力学和干燥模型。高鹤等^[9]对番木瓜片的中短波红外干燥和热风干燥进行了比较研究, 结果表明相同温度下中短波红外干燥速率要快, 色泽变化较小。郑霞等^[10]将中短波红外联合气体射流冲击技术应用于哈密瓜片的干燥中, 研究显示干燥时间较热风干燥、变温压差膨化干燥、真空冷冻干燥大幅缩短。此外, 真空脉动干燥技术是一种新型干燥技术, 在干燥过程中干燥室处于真空与常压交替循环状态, 不仅可以使物料内部组织形成蜂窝状孔隙结构, 还能破坏物料表层蒸汽压与干燥室内压力的平衡状态, 具有干燥效率高、产品品质好等优点^[11]。尽管真空脉动干燥技术已被应用于葡萄^[12]、胡萝卜^[13]等物料的干燥研究中, 但在果蔬脆片的加工应用中尚未见报道。

本文将气体射流冲击干燥技术、中短波红外干燥技术、真空脉动干燥技术应用于红枣脆片的加工, 以干燥特性、色泽、维生素 C 含量、复水比、质地和微观结构为指标, 分析比较 3 种干燥技术对红枣脆片干制的影响, 为选择合适的红枣脆片干制工艺提供理论和技术依据。

收稿日期: 2016-04-12 修订日期: 2016-06-23

基金项目: 国家农业科技成果转化基金项目 (2014GB2G410112); 国家自然科学基金项目 (31501548, 31360399); 国家科技支撑计划项目 (2015BAD19B010201)

作者简介: 钱婧雅, 女, 河北石家庄人, 主要从事农产品的加工与贮藏研究。北京 中国农业大学工学院, 100083。Email: qianjingting@163.com

*通信作者: 肖红伟, 男 (汉), 河南商丘人, 副教授, 博士, 博士生导师, 主要从事农产品加工技术和装备的研究。北京 中国农业大学工学院, 100083。Email: xhwcaugxy@163.com

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验原料为新鲜脆熟期赞皇大枣, 产自河北省赞皇县。为确保试验结果的可靠性, 随机挑选若干同一批次表面无机械损伤、无腐烂的红枣为试验材料。红枣的平均质量为 $(12\pm 2)\text{g}$ /个, 长度为 $(35\pm 2)\text{mm}$, 直径为 $(24\pm 2)\text{mm}$, 湿基含水率为 $80.74\%\pm 0.43\%$ (直接干燥法, $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干 24 h), 初始维生素 C 质量分数为 $(5.91\pm 0.30)\text{mg/g}$ (2,6-二氯酚酚滴定法^[14])。根据前期预试验, 红枣去核切片, 厚度为 4 mm 。试验前将红枣用聚乙烯塑料密封包装后, 于 $(4\pm 1)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下保存待用。

1.2 主要试验装置

DHG-9140A 型电加热恒温鼓风干燥箱 (上海一恒科技有限公司), 功率为 1.6 kW ; 中短波红外干燥箱 (江苏泰州圣泰科红外科技有限公司), 红外加热管功率范围 $0\sim 2\text{ kW}$; 气体射流干燥机^[15]、真空脉动干燥机^[16] (中国农业大学工学院农产品加工技术与装备实验室), 功率分别为 2.2 、 4.45 kW ; YP 型电子秤 (上海精密科学仪器有限公司, 精度 0.1 g); TA-XT2i 物性测定仪 (英国 Stable Micro System 公司); SMY-2000SF 型色差仪 (北京盛名扬技术开发有限公司); DZQ400/2D 型真空包装机 (北京市天月缘包装机械有限公司), 手摇切片机 (哈尔滨瑞华厨房设备厂)。

1.3 试验方法

参考果蔬干燥的相关报道^[8,17-18]以及预试验的较优结果, 结合装备自身特点确定试验参数如表 1 所示。

表 1 试验设计和试验参数

Table 1 Design and parameters for experiments

干燥技术	试验参数
Drying technology	Experimental parameters
气体射流冲击干燥	温度 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, 风速 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Air impingement drying	
中短波红外干燥	温度 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, 风速 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Medium and short infrared wave drying	
真空脉动干燥	温度 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 脉动比 $10:2$
Pulsed vacuum drying	

试验前选取无破损腐烂的原料, 洗净后用去核器去掉枣核, 再经过切片机将红枣切成厚度为 4 mm 的均匀枣片, 将枣片单层平铺在料盘上, 平均质量为 $(100\pm 5)\text{g}$ 。按表 1 的参数进行试验, 气体射流冲击与中短波红外干燥条件下每隔 15 min 称量 1 次, 直至质量不再变化; 真空脉动干燥条件下第一次间隔 10 min 称量, 第二次以后每隔 12 min 称量 1 次, 直至质量不再变化。每组试验重复 3 次, 取平均值。干燥后将样品取出、冷却后装入聚乙烯塑料袋, 密封包装。

1.4 干燥参数的计算方法

枣片干燥过程中的干燥曲线采用水分比 (moisture ratio, MR) 随干燥时间变化的曲线。不同干燥时间枣片水分比的计算如公式 (1) 所示^[19]

$$\text{MR} = \frac{M_t}{M_0} \quad (1)$$

式中 M_0 为物料初始干基含水率, g/g ; M_t 为物料在 t 时刻

的干基含水率, g/g 。

干燥速率 (drying rate, DR) 的计算采用如下公式^[20]

$$\text{DR} = \frac{M_{t_1} - M_{t_2}}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

式中 DR 为干燥过程中时间在 t_1 和 t_2 之间的物料的干燥速率, $\text{g}/(\text{g}\cdot\text{min})$; M_{t_1} 和 M_{t_2} 为干燥过程中时间为 t_1 和 t_2 时物料的干基含水率, g/g 。

干基含水率 (moisture content on dry basis) 计算公式为^[21]

$$M_t = \frac{W_t - G}{G} \quad (3)$$

式中 W_t 为在任意干燥 t 时刻的总质量, g ; G 为干物质质量, g 。

干燥过程中的水分扩散规律可以使用费克第二定律描述^[22]

$$\text{MR} = \frac{M_t}{M_0} \approx \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{L^2} t\right) \quad (4)$$

式中 D_{eff} 为水分有效扩散系数, m^2/s ; L 为枣片的厚度, m ; t 为干燥时间, s 。对公式 (4) 的两边取自然对数得到如下方程^[23]

$$\ln \text{MR} = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{L^2} t \quad (5)$$

由公式 (5) 可知: 枣片干燥水分比的对数 $\ln \text{MR}$ 与干燥时间 t 呈线性关系, 通过线性回归可求出斜率 k , 将斜率 k 代入公式 (6) 中即可求出水分有效扩散系数 D_{eff} 。

$$D_{\text{eff}} = -\frac{r^2}{\pi^2} k \quad (6)$$

1.5 色泽的测定

将干燥后的枣片去掉边缘的枣皮磨成粉, 采用 SMY-2000SF 型色差仪, 依据 CIELAB 表色系统测量其色度 L^* 、 a^* 、 b^* 值。同时对处理组和原料总色泽差异值 ΔE^* 进行评价^[24]

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (7)$$

1.6 维生素 C 含量的测定

采用 2,6-二氯酚酚滴定法测定^[14]。

1.7 复水比的测定方法

取 2.0 g 枣片干样于 100 mL 三角瓶中, 加入 50 mL 蒸馏水, 置于 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴箱中浸泡, 每隔 30 min 取出, 用滤纸吸干表面水分后称量。复水比 (rehydration ratio, RR) 按照公式 (8) 计算^[25-26]

$$\text{RR} = \frac{W_w}{W_d} \quad (8)$$

式中 RR 为复水比; W_w 为复水后枣片的质量, g ; W_d 为复水前枣片的质量, g 。

1.8 脆度的测定方法

采用 TA-XT2i 物性测定仪^[27]在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下测定枣片的脆度; 第一个较明显的峰值为脆度, 单位用 N 表示。

测试采用直径为 1 cm 的圆柱型探头, 测试前速率 1 mm/s , 测试速率 0.5 mm/s , 测试后速率 1 mm/s , 样品

变形量为 50%，每个样品重复测定 3 次，取平均值。

1.9 微观结构的测定方法

新鲜枣片的微观结构采用 Quanta 环境扫描电子显微镜（荷兰 FEI 公司，200 F），使用刀片将枣片切成 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 薄片，然后用双面胶带将样品固定在样品台上，以 1 000 倍的放大倍数在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，15 kV 的加速电压，400 Pa 的压力下观察。

干燥后的枣片样品则使用扫描电子显微镜观察，样品首先被安装在磁控溅射仪（英国 Quorum 科技有限公司，SC7640）上，进行 5 min 喷金处理，并在 10 kV 加速电压下对样品表面组织微观结构用扫描电子显微镜（日本东京日立集团，S3400）进行观察。

1.10 数据处理方法

干燥试验、色泽分析试验、维生素 C 质量分数的测定、脆度的测定以及复水性能试验中每组均设置 3 次平行试验，做图及数据分析时均采用平均值。试验数据采用 Excel 2010 和 SPSS 20.0 软件进行统计分析，差异显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 不同干燥技术对红枣脆片干燥特性的影响

2.1.1 不同干燥技术对红枣脆片干燥曲线的影响

3 种不同干燥技术下红枣脆片的干燥动力学曲线如图 1 所示。由图 1 可以看出，真空脉动干燥过程较为缓慢，整个干燥过程需要 154 min，而气体射流冲击和中短波红外干燥所需的时间分别约为 105 和 120 min。真空脉动干燥比气体射流冲击和中短波红外干燥时间分别延长 46.7%和 28.3%。

真空脉动干燥所采用的干燥温度较高，但是干燥时间最长。这可能是因为真空脉动干燥为物料与加热源接触式传热，传热效率低，且随着干燥过程的进行，物料水分比逐渐降低，枣片开始收缩，物料发生变形^[28]，导致枣片与电热板接触面积减小，后期干燥时间增加。而气体射流冲击干燥技术是通过加压的高速热气流直接冲击物料表面，对流换热系数高；中短波红外干燥技术则能够穿透物料耦合水分子，加热能力强，因此相对真空脉动干燥技术二者能够获得较短的干燥时间。

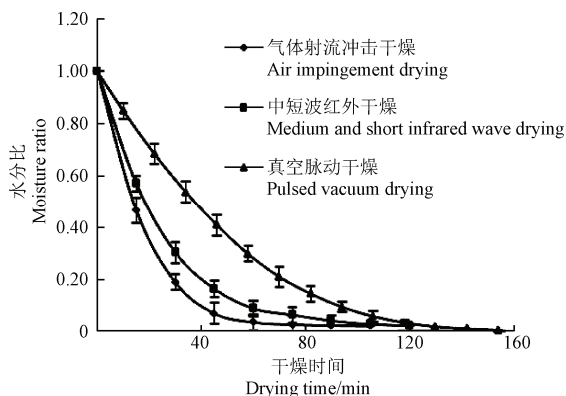


图 1 不同干燥技术下红枣脆片干燥曲线

Fig.1 Drying curves of jujube slices at different drying technologies

2.1.2 不同干燥技术对红枣脆片干燥速率的影响

3 种不同干燥技术下红枣脆片的干基含水率与干燥速率的关系如图 2 所示。三种干燥方式下枣片的干燥速率曲线均没有明显的匀速干燥阶段，整个干燥过程均为降速干燥阶段，这与巨浩羽^[29]等利用中短波红外干燥苹果片得出的结果相一致。这说明枣片的干燥主要由内部水分扩散控制。

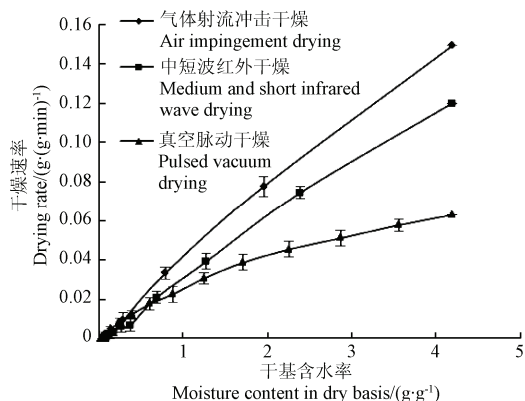


图 2 不同干燥技术下红枣脆片干燥速率曲线

Fig.2 Drying rate curves of jujube slices at different drying technologies

由图 2 可以得到，气体射流冲击、中短波红外、真空脉动三者最高干燥速率分别为 0.149、0.120、0.063 g/(g·min)，平均干燥速率分别为 0.039、0.034、0.027 g/(g·min)。其中，在干燥前期，气体射流冲击干燥的速率>中短波红外干燥>真空脉动干燥，而当枣片干基含水率依次达到 0.68 g/g 和 0.30 g/g 以下时，真空脉动的干燥速率则分别高于中短波红外干燥和气体射流冲击干燥（ $P<0.05$ ）。这可能是因为干燥后期真空脉动通过多次抽真空，使干燥室内空气的水蒸气分压力降低，加大了物料表面水蒸气分压与环境水蒸气分压的差距，提高了水分蒸发驱动力，从而当枣片水分降低到一定数量后，依然能够保证传质的动力，提高干燥速率。

2.1.3 不同干燥技术对红枣脆片水分有效扩散系数的影响

有效扩散系数反映了物料在一定干燥条件下的脱水能力，是干燥工艺优化设计的重要参数之一。由于枣片在干燥过程中属于降速干燥，由内部水分扩散控制，因此可以使用费克第二定律来描述干燥过程中水分的扩散规律。

通过线性回归计算出枣片的水分有效扩散系数如表 2 所示。由表 2 可知水分有效扩散系数由大到小的顺序为气体射流冲击>中短波红外>真空脉动干燥，分别为 1.55×10^{-9} 、 1.03×10^{-9} 、 $0.89 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ，这与水分扩散越慢，干燥时间越长的一般规律相一致。

2.2 不同干燥技术对红枣脆片色泽的影响

色泽是果蔬干制品评价的重要指标之一，对商品价值有重要影响^[30]。表 3 反映了气体射流冲击干燥、中短波红外干燥、真空脉动干燥三种不同干燥技术对红枣脆片色泽的影响。

表 2 lnMR 线性回归拟合公式和水分有效扩散系数
Table 2 lnMR linear regression formulas and effective moisture diffusion coefficients of jujube slices

干燥技术 Drying technology	线性回归公式 Linear regression formula	决定系数 Coefficient of determination	水分有效扩散系数 Effective diffusivity coefficient/ (10 ⁻⁹ m ² ·s ⁻¹)
气体射流冲击干燥 Air impingement drying	lnMR=-9.57×10 ⁻⁴ t-0.0308	0.9967	1.55
中短波红外干燥 Medium and short infrared wave drying	lnMR=-6.34×10 ⁻⁴ t-0.0224	0.9934	1.03
真空脉动干燥 Pulsed vacuum drying	lnMR=-5.52×10 ⁻⁴ t+0.4517	0.9911	0.89

注: MR 表示 t 时刻物料干燥水分比, t 为干燥时间, s。
Note: MR represents the moisture ratio of jujube slices at time t , t represents drying time, s.

表 3 不同干燥技术对红枣脆片色泽参数和品质的影响
Table 3 Effects of different drying technologies on color parameters and qualities of jujube slices

干燥技术 Drying technology	色泽参数 Color parameters				品质指标 Quality indexes		
	L^*	a^*	b^*	ΔE^*	维生素 C 质量分数 Vitamin C content/(mg·g ⁻¹)	复水比 Rehydration ratio	脆度 Crispness/N
未干燥 Non-dried	70.78±0.07 ^d	-3.76±0.01 ^b	23.11±0.03 ^a	0.00±0.00 ^d	5.91±0.30 ^a	-	-
气体射流冲击干燥 Air impingement drying	89.70±0.12 ^b	-2.33±0.16 ^a	13.60±0.02 ^c	21.23±0.15 ^b	2.97±0.18 ^c	4.05±0.10 ^b	8.64±0.31 ^b
中短波红外干燥 Medium and short infrared wave drying	92.17±0.07 ^a	-2.30±0.03 ^a	12.29±0.11 ^d	24.02±0.15 ^a	2.85±0.10 ^c	4.20±0.05 ^b	8.77±0.25 ^b
真空脉动干燥 Pulsed vacuum drying	88.01±0.04 ^c	-4.23±0.04 ^c	17.84±0.19 ^b	18.03±0.14 ^c	3.85±0.12 ^b	4.75±0.21 ^a	11.38±0.49 ^a

注: L^* 值表示亮度, a^* 值表示红色至绿色的范围, b^* 值表示从蓝色至黄色的范围, ΔE^* 为色差综合评定指标。同一列标注相同字母表示无显著差异 ($P>0.05$), 标注不同字母表示有显著差异 ($P<0.05$)。
Note: L^* represents the brightness value, a^* represents the range of red to green, b^* represents the range of blue to yellow, ΔE^* is the comprehensive evaluation index of chromatic aberration. Values followed by the same alphabet in the same column are not significantly different ($P>0.05$) by Duncan's ANOVA test.

从表 3 可以看出, 3 种干燥方式所得亮度 L^* 值显著高于干燥前 ($P<0.05$), 说明 3 种干燥方式均可增加枣片亮度。此外, 气体射流冲击和中短波红外干燥所制得的枣片绿/红值 a^* 和蓝/黄值 b^* 明显低于真空脉动干燥 ($P<0.05$), 表明真空脉动干燥所得枣片与中短波红外与气体射流冲击干燥技术相比色泽偏黄。

叶绿素的降解、酶促褐变以及美拉德反应是使干燥产品色泽变化的主要原因^[31]。而红枣中存在着大量还原糖和氨基酸。因此, 气体射流冲击和中短波红外所得枣片绿/红值 a^* 增加可能是因为干燥过程中叶绿素降解和美拉德反应所致。而真空脉动长时间真空环境能够隔绝氧气, 减少不良反应的发生。

由色差 ΔE^* 的数值可知, 各处理组色差具有显著性差异 ($P<0.05$), 相较中短波红外干燥与气体射流冲击干燥, 真空脉动干燥所得枣片与未干燥前枣片色泽最为接近, 效果最好。此结论与 Chua 等^[11]的研究结果一致, 他们发现真空脉动干燥可以减少胡萝卜和土豆干燥过程中的色泽变化。

2.3 不同干燥技术对红枣脆片维生素 C 含量的影响

维生素 C 是人体所必需的一类营养元素。维生素 C 不稳定, 易受水分含量、温度、氧气、pH 值、金属离子等因素的影响而发生降解^[32]。如果物料在干燥过程中维生素 C 能够得到很好的保存, 那么其他营养物质也将能够得到很好甚至更高的保留^[33]。因此, 维生素 C 的保存情况被作为一个常用的营养成分评价指标^[34]。

表 3 反映了三种不同干燥技术对红枣脆片维生素 C 含量的影响。可以看出, 新鲜枣片维生素 C 含量为 5.91 mg/g, 不同干燥方式下维生素 C 含量均显著低于新鲜脆枣 ($P<0.05$), 其中真空脉动干制后的枣片维生素 C 能够保留 66.6%, 远高于气体射流冲击和中短波红外的 51.5% 和 49.0%。这可能是因为真空脉动干燥由于大部分

时间在真空低氧环境下进行, 减少了物料发生氧化还原反应的机率, 有利于维生素 C 的保存。于静静^[35]等研究了不同干燥方式对红枣品质的影响, 研究结果显示真空干燥下维生素 C 含量要明显高于热风、变温压差膨化等方式干燥的产品。但真空脉动干燥并没有将枣片维生素 C 保留率提高到和鲜枣大致相当的水平, 可能是因为干燥过程中随着枣片含水率的逐渐降低, 物料温度逐步升高, 更多的维生素 C 被暴露在空气环境中, 从而加剧了维生素 C 的降解。

2.4 不同干燥技术对红枣脆片复水性的影响

复水是指干制品吸收水分后复原的过程, 复水比越高, 说明干燥对产品的结构组织破坏程度越小, 干制品的品质越好^[36]。

3 种不同干燥技术下红枣脆片的复水比如表 3 所示。由表 3 可以看出, 干燥方式对枣片的复水性能有显著影响 ($P<0.05$)。真空脉动干燥的样品复水性能最好, 达到 4.75, 其次为中短波红外和气体射流冲击干燥的样品, 分别为 4.20 和 4.05。

产品的复水性主要取决于干燥过程中物料的细胞和结构的完整程度, 干燥期间如果能够形成疏松多孔的结构, 则产品能得到较高的复水性^[37]。真空脉动具有较高的复水比可能是因为枣片本身就是多孔性物料, 干燥过程中通过压力的不断脉动过程能够促进物料孔隙的扩充, 从而增大了枣片干燥后的复水性。曹志向^[38]等在滚筒式真空脉动压干燥胡萝卜丁的试验研究中发现, 真空脉动干燥的胡萝卜丁的复水比比恒真空干燥的提高了 13.2%。

2.5 不同干燥技术对红枣脆片脆度和结构的影响

对于休闲红枣脆片, 脆度是消费者选择产品的一个最重要指标, 脆度越高口感越好, 产品的被接受度越高。

3 种不同干燥技术下红枣脆片的脆度如表 3 所示。由

表 3 可以看出, 气体射流冲击、中短波红外、真空脉动三种干燥方式下红枣脆片的脆度分别为 8.64、8.77 和 11.38 N。真空脉动干燥所得红枣脆片的脆度显著高于气体射流冲击与中短波红外干燥 ($P<0.05$), 所得产品的酥脆性最好。这可能是因为真空脉动干燥在真空和常压的交替作用下, 在枣片内部产生膨化作用, 使孔道扩充, 质地更加酥脆。

为了进一步佐证三种干燥技术对于脆度的影响, 分别采用环境扫描电子显微镜对新鲜枣片以及扫描电子显微镜对干燥后的枣片进行微观结构观察, 观察结果如图 3 所示。

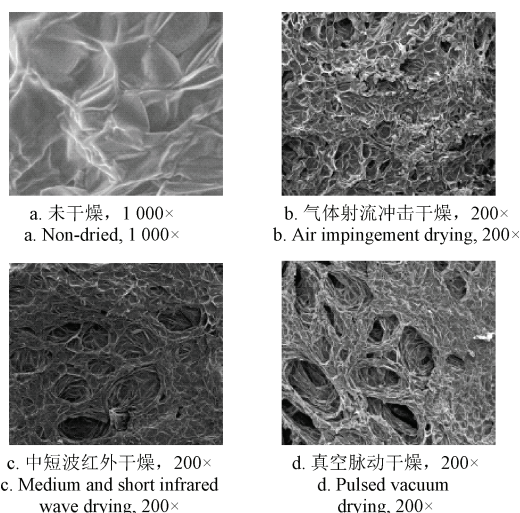


图 3 不同干燥技术下红枣切片微观结构

Fig.3 Microstructures of jujube slices at different drying technologies

由图 3 可以看出, 不同干燥技术下枣片的微观结构具有明显差异。三种干燥方式所得枣片的微观组织结构与鲜样也相差较大。可以看到新鲜枣片组织结构紧密, 而干燥后的枣片均形成蜂窝状孔洞。气体射流冲击干燥的枣片呈现出规则结构, 孔洞较小且不规则; 中短波红外干燥所得枣片结构较平整, 可看到小部分产生明显空腔, 但大部分结构依然比较致密; 真空脉动干燥所得枣片则组织结构疏松, 可看到明显的较气体射流和中短波红外大而多的孔洞空腔, 而且孔洞轮廓也较清晰。物料的宏观特性往往是由其微观结构所决定的^[39]。微观结构观测印证了真空脉动干燥确实能够改变枣片微观结构, 对物料空隙具有扩充和增强效果, 使枣片获得更酥脆的口感及更高的复水性能。

3 结 论

1) 三种干燥方式对枣片的干燥特性均具有显著影响, 气体射流冲击干燥的枣片干燥时间为 105 min, 平均干燥速率为 0.039 g/(g·min), 与中短波红外和真空脉动干燥真空脉动相比耗时最短, 平均干燥速率最快。真空脉动干燥相较气体射流冲击、中短波红外干燥时间分别延长了 46.7%和 28.3%。

2) 气体射流冲击、中短波红外、真空脉动三种干燥

技术均对枣片的色泽有显著影响 ($P<0.05$), 真空脉动干燥所得枣片与鲜样的色差值最小, 颜色最接近于鲜样。

3) 通过对比三种干燥方式下维生素 C 的保存含量和复水比和酥脆性发现, 相比于其他方式, 真空脉动干燥能够保存较多的维生素 C 及得到更好的脆度和复水性能。

4) 气体射流冲击所得枣片的微观结构不规则, 孔洞凌乱, 中短波红外干燥下的枣片可看到小部分产生明显空腔, 而真空脉动干燥下的枣片则能产生明显的大而多的孔洞结构, 这进一步佐证了不同干燥方式对产品复水性能及质地的影响。

5) 3 种干燥方式所得红枣脆片色泽、维生素 C 保留率、复水性能和质地均以真空脉动最优, 可见相对气体射流冲击与中短波红外, 真空脉动干燥更加适用于红枣脆片的干燥加工, 干燥方式较优。但从干燥特性曲线分析可知真空脉动干燥时间较长, 干燥工艺仍需进一步优化。

[参 考 文 献]

- [1] Wojdyło A, Carbonell-Barrachina Á A, Legua P, et al. Phenolic composition, ascorbic acid content, and antioxidant capacity of Spanish jujube (*Ziziphus jujube* Mill.) fruits[J]. Food Chemistry, 2016, 201(12): 307—314.
- [2] Guo S, Duan J A, Zhang Y, et al. Contents Changes of Triterpenic Acids, Nucleosides, Nucleobases, and Saccharides in Jujube (*Ziziphus jujuba*) Fruit During the Drying and Steaming Process[J]. Molecules, 2015, 20(12): 22329—22340.
- [3] Gao Q H, Wu C S, Wang M. The jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) fruit: a review of current knowledge of fruit composition and health benefits[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2013, 61(14): 3351—3363.
- [4] Zou K, Teng J, Huang L, et al. Effect of osmotic pretreatment on quality of mango chips by explosion puffing drying[J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 51(1): 253—259.
- [5] García-Segovia P, Urbano-Ramos A M, Fiszman S, et al. Effects of processing conditions on the quality of vacuum fried cassava chips (*Manihot esculenta* Crantz)[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 69: 515—521.
- [6] Mariscal M, Bouchon P. Comparison between atmospheric and vacuum frying of apple slices[J]. Food Chemistry, 2008, 107(4): 1561—1569.
- [7] 张岩, 吴继军, 唐道邦, 等. 香蕉片的真空油炸工艺及质构品质初探[J]. 现代食品科技, 2010, 26(9): 987—990. Zhang Yan, Wu Jijun, Tang Daobang, et al. Effects of processing conditions on the quality and texture of the vacuum-fried banana chips[J]. Modern Food Science and Technology, 2010, 26(9): 987—990. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张茜, 肖红伟, 代建武, 等. 哈密瓜片气体射流冲击干燥特性和干燥模型[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊 1): 382—388. Zhang Qian, Xiao Hongwei, Dai Jianwu, et al. Air impingement drying characteristics and drying model of Hami melon flake[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(Sup.1): 382—388. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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, 31(2): 190—195. Gao He, Yi Jianyong, Bi Jinfeng, 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, 31(2): 190—195. (in Chinese with English abstract)
- [10] 郑霞, 肖红伟, 王丽红, 等. 红外联合气体射流冲击方法缩短哈密瓜片的干燥时间[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(1): 262—269.
Zheng Xia, Xiao Hongwei, Wang Lihong, et al. Shorting drying time of Hami-melon slice using infrared radiation combined with air impingement drying[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(1): 262—269. (in Chinese with English abstract)
- [11] Chua K J, Chou S K. On the experimental study of a pressure regulatory system for bioproducts dehydration[J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 62(2): 151—158.
- [12] 高振江, 吴定伟, 张树阁, 等. 滚筒式真空脉动干燥机设计[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(3): 113—116.
Gao Zhenjiang, Wu Dingwei, Zhang Shuge, et al. Design of pulsed vacuum drum dryer[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(3): 113—116. (in Chinese with English abstract)
- [13] Dueik V, Marzullo C, Bouchon P. Effect of vacuum inclusion on the quality and the sensory attributes of carrot snacks[J]. *Food Science and Technology*, 2013, 50(1): 361—365.
- [14] GB/T 6195-1986. 中华人民共和国国家标准水果、蔬菜维生素 C 含量测定法(2,6-二氯酚酚滴定法)[S].
- [15] 张茜, 肖红伟, 杨旭海, 等. 预处理对线辣椒气体射流冲击干燥特性和色泽的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(1): 276—281.
Zhang Qian, Xiao Hongwei, Yang Xuhai, et al. Effects of pretreatment on air impingement drying characteristics and product color for line pepper[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(1): 276—281. (in Chinese with English abstract)
- [16] 方小明, 张晓琳, 王军, 等. 荷花粉真空脉动干燥特性和干燥品质[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(10): 287—295.
Fang Xiaoming, Zhang Xiaolin, Wang Jun, et al. Vacuum pulsed drying characteristics and quality of lotus pollen[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(10): 287—295. (in Chinese with English abstract)
- [17] 白峻文, 王吉亮, 肖红伟, 等. 基于 Weibull 分布函数的葡萄干燥过程模拟及应用[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(16): 278—285.
Bai Junwen, Wang Jiliang, Xiao Hongwei, et al. Weibull distribution for modeling drying of grapes and its application[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(16): 278—285. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王雪媛, 高琨, 陈芹芹, 等. 苹果片中短波红外干燥过程中水分扩散特性[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(12): 275—281.
Wang Xueyuan, Gao Kun, Chen Qinqin, et al. Medium and short wave infrared drying characteristics and color changing of apple slices[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015(12): 275—281. (in Chinese with English abstract)
- [19] Xiao H W, Pang C L, Wang L H, et al. Drying kinetics and quality of Monukka seedless grapes dried in an air-impingement jet dryer[J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 105(2): 233—240.
- [20] 张卫鹏, 高振江, 肖红伟, 等. 基于 Weibull 函数不同干燥方式下的茯苓干燥特性[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(5): 317—324.
Zhang Weipeng, Gao Zhenjiang, Xiao Hongwei, et al. Drying characteristics of poriacocos with different drying methods based on Weibull distribution[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(5): 317—324. (in Chinese with English abstract)
- [21] 张卫鹏, 肖红伟, 高振江, 等. 中短波红外联合气体射流干燥提高茯苓品质[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(10): 269—276.
Zhang Weipeng, Xiao Hongwei, Gao Zhenjiang, et al. Improving quality of Poriacocos using infrared radiation combined with air impingement drying[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(10): 269—276. (in Chinese with English abstract)
- [22] 肖红伟, 张世湘, 白峻文, 等. 杏子的气体射流冲击干燥特性[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(7): 318—323.
Xiao Hongwei, Zhang Shixiang, BaiJunwen, et al. Air impingement drying characteristics of apricot[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(7): 318—323. (in Chinese with English abstract)
- [23] Wang D, Dai J W, Ju H Y, et al. Drying kinetics of American ginseng slices in thin-layer air impingement dryer[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2015, 11(5): 701—711.
- [24] Xiao H W, Law C L, Sun D W, et al. Color change kinetics of American ginseng (*Panax quinquefolium*) slices during air impingement drying[J]. *Drying Technology*, 2014, 32(4): 418—427.
- [25] Xiao H W, Gao Z J, Lin H, et al. Air impingement drying characteristics and quality of carrot cubes[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2010, 33(5): 899—918.
- [26] 赵海燕, 方小明, 王军, 等. 乙醇浸渍对切片茄子干燥特性和品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(9): 233—240.
Zhao Haiyan, Fang Xiaoming, Wang Jun, et al. Effect of ethanol dipping pretreatment on drying characteristics and quality of eggplant slices[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(9): 233—340. (in Chinese with English abstract)
- [27] 毕金峰, 方蕾, 丁媛媛, 等. 菠萝变温压差膨化干燥工艺优化[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(10): 334—339.
Bi Jinfeng, Fang Lei, Ding Yuanyuan, et al. Optimization of explosion puffing drying for pineapple at variable temperature and pressure difference[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 25(10): 334—339. (in Chinese with English abstract)
- [28] 韦玉龙, 于宁, 许铭强, 等. 热风干燥温度对枣果微观组织结构的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(7): 244—251.
Wei Yulong, Yu Ning, Xu Mingqiang, et al. Effect of hot air drying temperature on microstructure of Chinese jujube[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(7): 244—251. (in Chinese with English abstract)
- [29] 巨浩羽, 肖红伟, 白峻文, 等. 苹果片的中短波红外干燥特性和色泽变化研究[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(S2): 186—191.
Ju Haoyu, Xiao Hongwei, BaiJunwen, et al. Medium and short wave infrared drying characteristics and color changing of apple slices[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(S2): 186—191. (in Chinese with English abstract)
- [30] Bai J W, Sun D W, Xiao H W, et al. Novel high-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) pretreatment enhances drying kinetics and color attributes of seedless grapes[J].

- Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2013, 20: 230—237.
- [31] Vega-Gálvez A, Scala K D, Rodríguez K, et al. Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties, antioxidant capacity, colour and total phenolic content of red pepper (*Capsicum annuum*, L. var. Hungarian)[J]. Food Chemistry, 2009, 117(4): 647—653.
- [32] Uddin M S, Hawlader M N A, Zhou L W. Kinetics of ascorbic acid degradation in dried kiwifruits during storage[J]. Drying Technology, 2001, 19(2): 437—446.
- [33] Bai J W, Gao Z J, Xiao H W, et al. Polyphenol oxidase inactivation and vitamin C degradation kinetics of Fuji apple quarters by high humidity air impingement blanching[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2013, 48(6): 1135—1141.
- [34] Xiao H W, Bai J W, Sun D W, et al. The application of superheated steam impingement blanching (SSIB) in agricultural products processing-a review[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 132(1): 39—47.
- [35] 于静静, 毕金峰, 丁媛媛. 不同干燥方式对红枣品质特性的影响[J]. 现代食品科技, 2011, 27(6): 610—614.
Yu Jingjing, Bi Jinfeng, Ding Yuanyuan. Effect of drying treatment methods on the quality properties of red jujube[J]. Modern Food Science and Technology, 2011, 27(6): 610—614. (in Chinese with English abstract)
- [36] Xiao H W, Bai J W, Xie L, et al. Thin-layer air impingement drying enhances drying rate of American ginseng (*Panax quinquefolium* L.) slices with quality attributes considered[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 94(2): 581—591.
- [37] Xiao H W, Gao Z J. Chapter 11: The application of scanning Electron Microscope (SEM) to Study the microstructure changes in the field of agricultural products drying[M]. Rijeka, Croatia, INTECH Press, 2012: 213—226.
- [38] 曹志向, 高振江, 林海. 滚筒式真空脉动压干燥胡萝卜丁试验研究[J]. 食品科技, 2009, 34(3): 81—85.
Cao Zhixiang, Gao Zhenjiang, Lin Hai. Experimental investigation of roller vacuum pulsating pressure carrots drying[J]. Food Science and Technology, 2009, 34(3): 81—85. (in Chinese with English abstract)
- [39] Dai J W, Rao J Q, Wang D, et al. Process-based drying temperature and humidity integration control enhances drying kinetics of apricot halves[J]. Drying Technology, 2015, 33(3): 365—376.

Effects of three drying technologies on drying characteristics and quality attributes of jujube crisps

Qian Jingya¹, Zhang Qian², Wang Jun¹, Fang Xiaoming^{1,3}, Zhang Weipeng¹,
Gao Zhenjiang¹, Liu Yanhong¹, Xiao Hongwei^{1*}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. College of Mechanical and Electric Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000; 3. Bee Research Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: With rich contents of vitamin C, various amino-acids, polysaccharide and phytochemicals, jujube is widely planted and consumed in China. Seasonality and perishability of fresh jujube demand to apply preservation technologies, such as vacuum-fried, but the favored product after this processing has the potential risk on our health because of its higher oil content and low nutrient retention. To realize product diversification and satisfy requirements of novel-health products for human beings, it is essential to exploit new processing method of jujube. In order to reduce the oil content of jujube crisps, improve the retention rate of vitamin C and explore new drying techniques for jujube crisps production, fresh jujube slices (thickness of 4 mm) in crisp ripe stage were dried with 3 new types of drying technologies, namely air impingement drying (temperature of 70 °C, air velocity of 8 m/s), medium and short infrared wave drying (temperature of 70 °C, air velocity of 8 m/s) and pulsed vacuum drying (temperature of 80 °C, vacuum and normal pressure retention time of 10 and 2 min, respectively). Effects of the 3 drying technologies on the drying characteristics, color parameters, retention of vitamin C content, crispness, rehydration ratio and microstructures were investigated. Results showed that: 1) All drying process of the three drying methods showed the falling rate period without constant speed stage, and the shortest drying time was obtained under air impingement drying technology, which the drying time was only 105 min. 2) Effective moisture diffusivities were 1.55×10^{-9} , 1.03×10^{-9} , and 0.89×10^{-9} m²/s for air impingement drying, medium and short infrared wave drying, and pulsed vacuum drying, respectively. 3) Drying methods had a significant impact on the color of dried samples, and the color of jujube crisps under pulsed vacuum drying was very similar to that of the fresh ones. 4) Pulsed vacuum drying could keep more vitamin C content compared to the other two drying technologies. The retention rates of vitamin C were 51.5%, 49.0%, 66.6% for the samples dried by air impingement drying, medium and short infrared wave drying, and pulsed vacuum drying, respectively. 5) Compared with air impingement drying and medium and short infrared wave drying, jujube crisps dried by pulsed vacuum drying had the highest crispness. 6) Microstructure detection indicated that all the 3 drying technologies could make a porous structure and thus change the properties of jujube slices. The pulsed vacuum drying led to a more uniform porous structure, which probably contributed to the higher crispness and rehydration ratio of the samples dried by pulsed vacuum drying. In conclusion, although pulsed vacuum drying technology took a relatively long drying time to get the same moisture ratio, the qualities of jujube crisps by pulsed vacuum drying were much better than those by air impingement drying and medium and short infrared wave drying. The findings of current work can provide theoretical basis and technical support for the practical application of pulsed vacuum drying to produce jujube crisps.

Keywords: drying; quality control; models; jujube crisps; color; vitamin C; crispness