

压差闪蒸干燥改善红枣脆片理化和营养品质的研究

侯皓男, 毕金峰, 陈芹芹, 宋建新, 乔叶宁, 贾雨朦

(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: 为了探究更好的红枣脆片干燥技术, 本研究以传统热风干燥 (HAD) 作为对照, 对红枣片进行热泵干燥 (HPD)、真空冷冻干燥 (FD) 和压差闪蒸干燥 (DIC), 测定了红枣片及干燥后红枣脆片的理化品质和营养品质。结果表明: 四种方式干燥后的红枣脆片水分含量均在 4.5% 左右。在质构方面 DIC 和 FD 相对 HAD 显著降低红枣脆片的硬度同时显著提高了脆度 ($p < 0.05$); 外观方面: FD 和 DIC 相对 HAD 红枣脆片体积皱缩较小, DIC 尤为显著 ($p < 0.05$), 红枣脆片体积增加了 3.57%, 色泽方面 HPD 的红枣脆片表面亮白 ($\Delta E = 1.24$), DIC 的红枣脆片表面呈诱人的枣红色 ($\Delta E = 7.19$); 在营养品质方面: 四种干燥方式的多糖含量和黄酮含量均降低 (以干质量计, 下同) DIC 的多糖保留率最高且与其他干燥方式差异显著, HPD 和 DIC 的红枣脆片黄酮保留率显著高于 HAD 和 FD。综上, DIC 对红枣脆片外观及营养品质均有显著提升, 产业加工具有明显优势, 应用前景广阔。

关键词: 红枣脆片; 压差闪蒸干燥; 质构; 外观; 多糖

文章编号: 1673-9078(2019)11-161-169

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.11.023

Improvement of Physicochemical and Nutritional Quality of Red Jujube Chips by Instant Controlled Pressure Drop

HOU Hao-nan, BI Jin-feng, CHEN Qin-qin, SONG Jian-xin, QIAO Ye-ning, JIA Yu-meng

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

Abstract: In order to obtain the better drying technology of red jujube chips, jujube slices were dried by heat pump drying (HPD), vacuum freeze drying (FD) and instant controlled pressure drop (DIC) with hot air drying (HAD). The physicochemical and nutritional quality of red jujube slices and dried red jujube chips (RJC) were evaluated and performed a comparative study. Results showed that moisture contents of RJC after four drying methods were all around 4.5%. In terms of texture, HPD, FD and DIC significantly reduced the hardness of RJC and significantly increased the brittleness ($p < 0.05$). As for appearance, compared with HAD, the volume shrinkages of RJC dried by FD and DIC were small, especially for DIC treatment, in which the volume of RJC increased by 3.57%. The least color difference (ΔE) value (1.24) of RJC with brighter surface color was obtained by HPD. However, RJC dried by DIC presented attractive redder surface color even though had a larger ΔE value of 7.19. In terms of nutritional properties, the polysaccharide and flavonoid contents of RJC with four drying treatments all decreased. The highest polysaccharide retention rate was obtained by DIC, which was significantly different from other drying methods. The retention rate of flavonoids in HPD and DIC was significantly higher than that of HAD and FD. In conclusion, DIC can significantly improve the appearance and nutritional quality of RJC, and have a broad industrial application prospects.

Key words: red jujube chips; instant controlled pressure drop; texture; appearance; polysaccharide

枣 (*Zizyphus jujube* Mill) 是一种鼠李科枣属水果, 原产于中国, 产量占世界的 99%^[1]。枣的用途有鲜食、干制和鲜干两用等。枣, 作为我国食药同源的特色资源, 是传统中药和滋补保健佳品, 具有镇静、安神、

收稿日期: 2019-06-27

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0400900; 2017YFD0400904)

作者简介: 侯皓男 (1992-), 男, 硕士生, 研究方向: 果蔬精深加工及综合利用

通讯作者: 陈芹芹 (1985-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 果蔬精深加工及综合利用

补血、健脑、抗癌等功效^[2]。随着人民生活品质提升, 红枣的消费需求也日益旺盛, 但是市场上红枣产品仍以原枣销售为主, 加工占比较低, 基本为初级加工品, 科技含量低, 产业链不长, 同质化严重^[3], 不能满足消费者的需求。

红枣脆片是一种主要的红枣干制产品, 而红枣脆片在干制过程中的皱缩及结构塌陷、营养损失等是制约其产业发展的主要问题。目前, 我国 80% 以上的枣被干制加工, 不同的干燥技术有着不同的干燥原理, 对枣干制产品的食用口感和营养品质均有影响。例如

干燥后枣产品是否皱缩、酥脆和是否存在营养流失。目前,已有学者研究了不同干制方式对枣品质特性的影响,但多集中在鲜食冬枣和脆熟期枣的营养品质和香气品质,如沈静等^[4]人应用微波真空冷冻干燥、微波真空膨化、真空冷冻干燥和中短波红外干燥4种干制加工的鲜食冬枣食用及营养品质分析,钱婧雅^[5]等研究了新鲜脆熟期赞皇大枣的干燥特性和品质;沈静^[6]等、陈恺^[7]等从干制的鲜食枣和脆熟全红期红枣中鉴定了枣脆片香气成分,得出枣脆片的综合得分。然而,对于全红干熟期红枣的干制加工尤其对干制后外观品质方面研究甚少。目前,枣加工产业上应用最广泛的仍旧是热风干燥,但容易造成产品色泽变暗、体积皱缩、营养变化等品质劣变^[8]问题,不符合消费者对食品“外观好,营养价值高”的消费需求。近年来,产业上开始应用热泵干燥、真空冷冻干燥和压差闪蒸干燥技术产业化程度也越来越高。热泵干燥是基于逆卡诺循环原理建立起来的一种节能、环保制热技术,目前在产业上的应用逐渐扩大,是近年来备受关注的新能源技术,具有显著的经济效益、节能效益、环境效益和社会效益^[9],是一种颇具产业化潜力的干燥方式,姬长英^[10]等为了提高干制辣椒的品质和降低干燥能耗,研究了热泵干燥辣椒的工艺参数,为热泵技术应用于辣椒干制提供了参考。食品真空冷冻干燥技术被广泛的应用于食品、药品、保健品等行业^[11],真空冷冻干燥脱水过程与其他干燥方式不同,水分由冰晶直接升华脱除。魏婷^[12]等人研究了真空冷冻干燥过程中鲜食枣营养品质的变化,分析了冻干过程中枣片糖类、有机酸类和抗氧化能力的变化规律。压差闪蒸干燥是一种新型、环保的非油炸果蔬干燥技术,利用气体热压效应使物料内部瞬间抽为真空状态,引起水分迅速升温气化、组织减压膨胀^[13],这对红枣脆片皱缩方面有较大影响,已有学者^[14]研究了压差闪蒸干燥苹果丁,发现压差闪蒸干燥显著抑制了苹果丁在干燥过程中的形变。因此本研究对比热风干燥,通过热泵干燥、压差闪蒸干燥和真空冷冻干燥对红枣片进行干制处理,进一步明确可以改善红枣脆片理化和营养品质的干燥技术,旨在为红枣脆片产业上的干制加工生产优质枣干制品提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

红枣品种选择全红干熟期灰枣,水分含量 26.50% $\pm$ 1.20%,购自新疆阿克苏地区,选择无病虫害、无机械损伤、成熟度一致的枣果。在 4℃冷库贮藏备用;

芦丁标准品(纯度 $\geq$ 97%)、葡萄糖标准品(纯度 $\geq$ 98%),购自上海源叶生物科技有限公司;甲醇、亚硝酸钠、九水合硝酸铝、氢氧化钠、苯酚、硫酸(均为分析纯),购自国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

电热鼓风干燥箱 DHG-9123A,上海精宏实验设备有限公司;真空冷冻干燥机 VO200,德国 CHRIST 公司;热泵烘干机 ZWH-KFY-BT4I/HG,正旭新能源设备科技有限公司;水分活度仪 Aqualab Pre,美国 Decagon 公司;差式扫描量热仪 Q200,美国 TA 公司;数码相机 Nikon D700,尼康 Nikon 公司;游标卡尺, Mitutoyo 公司;TA.XT2i/50 质构仪,英国 Stable Micro System 公司;压差闪蒸干燥机组 QDPH1021,天津勤德新材料科技有限公司;电子眼色彩分析系统, LensEye-NET Version1.5.5.0 美国;紫外分光光度计 UV1800,日本岛津公司;电热恒温水浴锅 DK-S26,上海精宏实验设备有限公司;低场核磁共振分析仪,苏州纽迈分析仪器股份有限公司;离心机 5424 R,艾本德中国有限公司;超声波清洗机 SB25-12 DTN,宁波新芝生物科技股份有限公司;循环水式多用真空泵 SHZ-D,河南予华仪器有限公司;天平 BSA224S,赛多利斯科学仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 原料前处理

灰枣原料经自来水清洗后置于筛网上沥去水分,去核器去核,横切为 3 mm 的红枣片备用。

1.3.2 红枣脆片的干燥工艺

在前期预实验的基础上,确定了不同干燥方式加工红枣脆片的工艺条件,如表 1 所示。

表 1 四种干燥方式的红枣脆片干燥工艺条件

Table 1 Drying conditions of four drying methods of jujube slices

干燥方式	工艺条件
热风干燥(HAD)	干燥温度 60℃, 干燥时间 7 h
热泵干燥(HPD)	干燥温度 60℃, 干燥时间 6 h
真空冷冻干燥(FD)	预冻温度-80℃ 12 h, 冷阱温度-65℃, 真空度 0.12 Mbar, 干燥温度 25℃, 干燥时间 36 h
压差闪蒸干燥(DIC)	闪蒸温度 90℃, 停滞时间 10 min, 抽空温度 60℃, 真空度 0.08 Mbar, 抽空时间 3 h

1.3.3 指标测定方法

1.3.3.1 水分含量及水分活度测定

水分含量依据 GB/T 5009.3-2016《食品中水分的测定》测定^[15]。

1.3.3.2 水分状态测定

干燥前后的红枣片的水分状态采用配备有 0.5 T 永久磁铁对应于 23.2 MHz 的组迈脉冲核磁共振分析仪进行测定, 参照 Jin^[16]等的方法略有修改。具体参数为, 温度: 32.00±0.02 °C; 自动寻找 90°脉宽; 弛豫时间测定的主要参数 TW (time waiting)=6500 ms; TE (time echo)=0.4 ms; NECH (number of echoes)=16000; NS (number of scan)=16。

1.3.3.3 玻璃化转变温度测定

采用 Q200 型差示扫描量热仪测量玻璃化转变温度(T_g), 使用 Goula^[17]等人的方法。称 7~10 mg 枣粉放入铝锅样品盒中封口待测, 以空铝锅为参照。样品冷却的温度以 20 °C/min 从室温冷却至 -70 °C, 在 -70 °C 平衡 5 min 后以 20 °C/min 的速度升温至 100 °C, 通过观察热流与温度变化测定玻璃化转变温度, 玻璃化转变温度包括起始温度 T_{gi} 、中间温度 T_{gm} 、终止温度 T_{ge} , 本研究选择 T_{gm} 作为测定样品的 T_g 。

1.3.3.4 色泽测定

采用色彩分析系统 LensEye-NET Version 1.5.5.0 测定干燥前后红枣片的色泽变化。具体操作步骤为: 首先进行标准色板校正, 之后将红枣脆片样品放置于图像采集区域, 经尼康 D700 相机拍摄获取图像, 扣除背景后得到被测样品的分析区域, 采用 LensEye-NET 软件测定分析区域的 L^* 、 a^* 、 b^* 值。 ΔE 为被测样品的色泽 L^* 、 a^* 、 b^* 与原红枣脆片色泽的色差值 ΔE , 计算公式如下:

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

式中: a^* 、 b^* 、 L^* 为干燥后的色泽值, a_0^* 、 b_0^* 、 L_0^* 为干燥前的色泽值。

1.3.3.5 体积测定

表面积的测定采用 Balunkeswar^[18]等和 Carolina^[19]的方法加以改进, 采用图像处理软件 image J 进行图像分析。首先通过尼康 D700 进行图像采集, 对图像进行二值化处理完成图像中目标和背景的分割, 从而计算目标物在图像中所占区域的比重。通过采集实际面积 S_0 为 1 cm×1 cm 的正方形标准板的图像来确定标准板所占区域比重 K_0 , 红枣脆片所占区域比重 K 可由 image J 分析获得, 从而折算出红枣脆片的实际面积 S , 其中相机像素为 1000×655 且保持不变。

$$S = \frac{KS_0}{K_0} \quad (2)$$

记干燥前红枣脆片表面积为 S_1 , 干燥后表面积为

S_2 , 那么干燥后的红枣脆片表面积变化率 B 为:

$$B = \frac{S_1 - S_2}{S_1} \times 100\% \quad (3)$$

表 2 Image J 图像处理软件计算红枣脆片的表面积

Table 2 Calculate the surface area of jujube slices using image J

software			
项目	干燥前	标准黑板	干燥后
图像			
像素区域	0.661	0.177	0.601
实际面积 cm^2	3.734	1	3.395

将切好的红枣片采用五点法标记, 利用游标卡尺测定五个点的厚度值, 记干燥前红枣片厚度值为 l_1 , 干燥后的厚度值为 l_2 , 那么红枣片干燥后的厚度变化率 H 为:

$$H = \frac{l_1 - l_2}{l_1} \times 100\% \quad (4)$$

采用 Wang^[20]的办法稍作修改, 将红枣脆片视为空心圆柱体, 那么红枣脆片的体积的皱缩率 VR 计算公式为:

$$VR = \frac{s_1 l_1 - s_2 l_2}{s_1 l_1} \times 100\% \quad (5)$$

1.3.3.6 硬度和脆度测定

硬脆度的测定参照 Peng^[21]的方法, 采用 TA.XT2i/50 质构仪进行测定。本研究根据最大力反映样品的硬度, 根据峰的个数决定样品脆度, 峰个数越多证明样品越脆^[22], 每种干燥处理的样品重复 12 次。

1.3.3.7 微观结构

枣片样品制备参照丁媛媛^[23]等人的方法, 四种干燥方式下制得的红枣脆片样品横切片后横面贴至扫描样品台, 在扫描电子显微镜下放大 40 倍观察并采集图谱。

1.3.3.8 多糖提取与测定

多糖的提取参照 Zhao^[24]和 Wang^[25]等人的方法, 稍作修改。精密称取粉碎后的枣粉样品 1.00 g, 加入蒸馏水, 料液比为 1:30, 在 90 °C 的恒温水浴锅中浸提 1 h, 40 °C 超声浸提 1 h 后抽滤, 然后旋转蒸发至 10 mL, 加无水乙醇至溶液乙醇体积分数为 80%, 在 4 °C 环境中放置 24 h 进行醇沉, 抽滤取沉淀, 并离心滤液取沉淀, 合并沉淀, 加蒸馏水定容至 100 mL, 用该提取液测定多糖含量。

采用紫外-可见分光光度计测定 490 nm 波长下的吸光度(A 值)。以葡萄糖浓度(mg/L)为横坐标, 吸光度为纵坐标绘制标准曲线, 曲线方程为 $y=0.0158x+0.0073$, 相关系数 $R^2=0.9999$ 。精密量取提取液 0.5 mL,

置具塞试管中,加水 1.5 mL,按照标准曲线制备项下的方法,测定 A 值,代入标准曲线,多糖含量以葡萄糖测定值(mg/g)表示。

1.3.3.9 黄酮测定

精确称量枣粉 2.00 g 溶于 10 mL, 80% (V/V) 的甲醇中,超声提取 2 h (100 W 功率、40 kHz、25 °C), 10000 r/min 离心 10 min, 取上清液,重复上述方法提取 1 次,合并上清液,放置于 4 °C 条件下,利用该提取液测定黄酮含量, 24 h 内测完。

黄酮的测定参照 Sun^[26]的方法,稍作修改,以芦丁作为标准品,结果表示为芦丁当量 (mg 芦丁/g 干燥样品)。以不加样品为空白,于 510 nm 波长下测定吸光度,以质量浓度 (μg/mL) 为横坐标,吸光度为纵坐标绘制标准曲线,曲线方程为 $y=4.2714x+0.0126$, 相关系数 $R^2=0.9993$, 通过标准曲线方程计算不同样品中的黄酮含量。

1.4 数据处理

本研究中除硬脆度测定 12 个平行之外,其他所有指标测定均进行 3 次重复,结果显示的数据均为平均值。采用 Excel 2010、SPSS、origin 9.0 进行数据处理与分析,不同小写字母表明显著性差异水平 $p<0.05$ 。

2 结果与讨论

2.1 理化品质

表 3 红枣片及四种干燥方式下红枣脆片水分及玻璃化转变温度变化

Table 3 Changes of water content, water activity and glass transition temperatures of red jujube slices and chips

样品	水分含量/%	总积分面积 A	T_g / °C
RJ	26.50±1.20 ^a	1436.92±11.52 ^a	-10.65±0.87 ^d
HAD	4.65±0.03 ^b	65.08±1.15 ^b	33.67±0.09 ^b
HPD	4.45±0.07 ^b	40.22±3.73 ^c	32.29±0.92 ^{bc}
DIC	4.31±0.07 ^b	39.76±0.56 ^c	43.35±1.22 ^a
FD	4.52±0.04 ^b	59.47±0.06 ^b	31.31±0.13 ^c

注: RJ (灰枣片); HAD (热风干燥); HPD (热泵干燥); DIC (压差闪蒸干燥); FD (真空冷冻干燥)。同列肩标小写字母不同表示差异显著 ($p<0.05$)。

由表 3 可知, 4 种干燥方式下的红枣脆片水分含量之间无显著差异 ($\approx 4.5\%$), 其符合 GB/T 23787-2009 《非油炸水果、蔬菜脆片》对水分含量的要求。食品中的水分具体可以分为自由水、不易流动水和结合水, 一般认为弛豫时间在 1~10 ms 为结合水、10~100 ms 为不易流动水、100~1000 ms 为自由水^[27], 不同状态

的水可以通过低场核磁共振仪进行测定, NMR 信号幅值与样品的氢质子数量成正比^[28], 信号幅值可以间接表示样品中的水分含量, 即通过峰积分面积的大小反映样品中不同状态水的含量, 根据图 1 红枣脆片样品的峰积分得到峰面积 A 值如表 3, 水分含量与峰面积 A 值线性关系式为 $y=62.943-231.02$ ($R^2=0.9999$)。由图 1 可以直观的看出红枣片和四种方式干燥后红枣脆片的 H 质子弛豫时间分布图谱, T2 通常用来表示样品中水分的流动性, 弛豫时间的长短可以反映水分子的流动性大小, 弛豫时间越短说明水分子与底物结合越紧密, 反之弛豫时间越长的水分流动性越好^[29]。可以看出, 四种干燥后的红枣脆片弛豫时间在 1~10 ms 为结合水, 干燥能脱去大部分的不易流动水, 而结合水由于和大分子物质结合, 束缚力较强, 一般不能通过短时间干燥全部去除^[30], 4 种方式干燥后红枣脆片的不易流动水减少, 剩下的水分为结合水和少量不易流动水, 图 1 可以明显看出压差闪蒸干燥和真空冷冻干燥的样品弛豫时间相比热风 and 热泵干燥数值更小, 说明这两种干燥方式下的样品水分状态结合的更紧密。

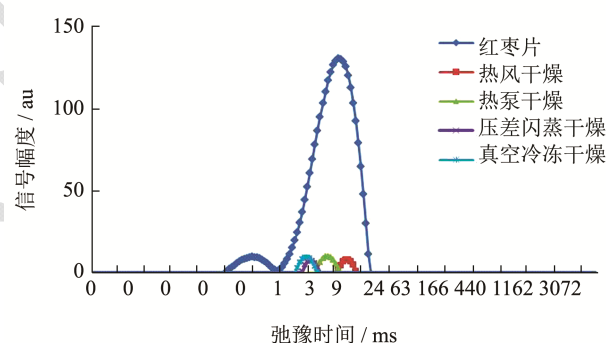


图 1 红枣片及四种干燥方式下红枣脆片的横向弛豫时间 T2 反演谱

Fig.1 Inversion spectrums of transverse relaxation time T2 of red jujube slices and chips

玻璃化转变温度(T_g)是指非晶态聚合物(包括晶态聚合物的非晶态部分)从玻璃态到橡胶态或橡胶态到玻璃态转变的特征温度^[31]。玻璃化转变温度可以作为参考参数来表征食品的性质, 质量和稳定性^[32], 当体系温度低于 T_g , 所处的状态为玻璃态, 玻璃态食品常被认为是稳定的。由表 3 可得 4 种干燥方式的红枣脆片玻璃化转变温度均高于室温 25 °C, 均处于玻璃态, DIC 的红枣脆片玻璃化转变温度最高, 常温下更稳定。水分和小分子糖酸组分等是影响样品玻璃化转变温度的重要因素^[33], 水分子的塑化作用会减弱物料内部的氢键作用^[34], 水分含量越低塑化作用越低, 氢键作用力就越强, 玻璃化转变温度则随着水分含量的降低显

著升高,其中 DIC 处理可显著提高红枣脆片的玻璃化转变温度。

2.1.1 质构品质

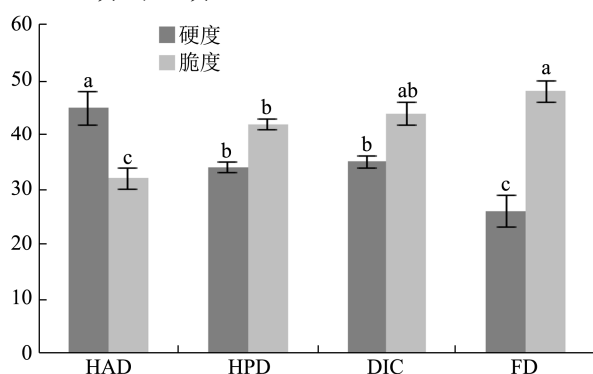


图 2 4 种干燥方式对红枣脆片质构的影响

Fig.2 Effect of four drying methods on texture of red jujube chips

注: HAD (热风干燥); HPD (热泵干燥); DIC (压差闪蒸干燥); FD (真空冷冻干燥)。小写字母不同表示差异显著 ($p < 0.05$)。下图 4~7 同。

由图 2 可以看出,经 4 种干燥方式处理后,红枣脆片的硬度值大小为 $HAD > DIC > HPD > FD$,HAD 与其他 3 种干燥方式具有显著差异 ($p < 0.05$),HPD 和 DIC 无显著差异。HAD 样品硬度最大且 FD 硬度最小,这与丁媛媛^[23]等对甘薯的研究一致,同样在于静静^[35]在干燥方式对红枣品质特性的影响的研究中也得出硬度值的大小顺序为热风干燥>压差膨化干燥>真空冷冻干燥。分析原因是由于红枣脆片干燥起始点为半干枣,半干枣本身含水量不高且基本为不易流动水,热风干燥是由外到内加热的,样品内部水分未能及时转移至表面,容易导致表面形成干硬膜^[36],干硬膜的形成会导致红枣脆片的硬度增加;FD 物料温度低,冷冻干燥下物料中水分直接由冰晶状态升华,最大程度保持了原有形状,硬度小;HPD 与 DIC 的红枣脆片相对于 HAD 硬度较小且无显著差异,HPD 由于其独特的除湿干燥特性,是一种温和的干燥方式,可使物料表面水分的蒸发速度与内部向表面迁移的速度比较接近^[37],这就避免了表面形成干硬膜的现象,所以硬度低于 HAD。由图 2 可知,经 4 种干燥方式处理后,红枣脆片的脆度值大小为 $FD > DIC > HPD > HAD$,其中 DIC 与 HPD 和 FD 均无显著差异 ($p > 0.05$)。

从图 3 可以看出 4 种干燥方式红枣脆片和红枣片的微观结构,红枣片的表面结构较为紧实,有较少较小的孔隙(图 3b),经过干燥处理后孔隙均增多和扩大。脆性与样品的微观结构密切相关,通常,具有更多孔隙结构的样品脆性更高^[38]。由图 3a 可知,HAD

的红枣脆片表面出现了断裂,分析原因是干燥过程中内部水分未能及时转移至表面形成了干硬膜,当红枣脆片内部干燥收缩时出现内部空隙,使红枣脆片表面产生应力,容易开裂破损^[18];HPD 的红枣脆片微观结构与热风干燥的大小与分布较为一致,但没有断裂现象,这是由于热泵干燥过程样品表面的水分蒸发速度与内部水分迁移速度相当,不易出现硬壳现象,因此没有发现表面断裂现象;真空冷冻干燥是在低温条件下进行,水分直接由冰晶升华脱去,形成的微观结构空隙较小,孔隙由红枣片原孔隙扩大而成,形成多孔性结构,FD 的红枣脆片硬度最小;DIC 过程中由于环境从常压状态瞬时变为负压状态,红枣片中的水分瞬间被抽出,膨胀产生的孔隙最大,从而红枣脆片具有良好的硬度和脆度。

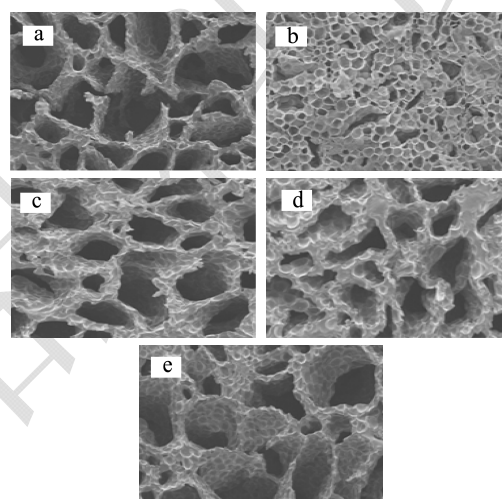


图 3 4 种干燥方式的红枣脆片扫描电子显微镜图 ($\times 40$)

Fig.3 Effect of four drying methods on scanning electron micrographs of red jujube chips ($\times 40$)

注: a: 热风干燥, HAD; b: 红枣片, RJ; c: 热泵干燥, HPD; d: 真空冷冻干燥, FD; e: 压差闪蒸干燥, DIC。

2.1.2 色泽

色泽是干制产品的重要指标之一,影响产品的感官特性,四种干制方式对红枣脆片色泽的影响如图 4 所示。HPD 的红枣脆片 L^* 值最大,与红枣片的亮度值最为接近, a^* 值和 b^* 值最小,与其他 3 种干燥方式均有显著差异 ($p < 0.05$), ΔE 值为 1.24,表面色泽较为亮白,姜正^[37]等人解释了热泵干燥由于其封闭循环式的干燥原理对干品颜色保留较好;DIC 的红枣脆片 L^* 较低, a^* 值较高;FD 的红枣脆片 ΔE 略高于 HPD,颜色保留也较好,这与李伟等人^[39]的研究结果一致,真空冷冻干燥由于干燥温度较低,对呈色物质破坏较小,能较好的保持原有色泽;DIC 的红枣脆片 ΔE 值最高,表面呈现诱人的枣红色。

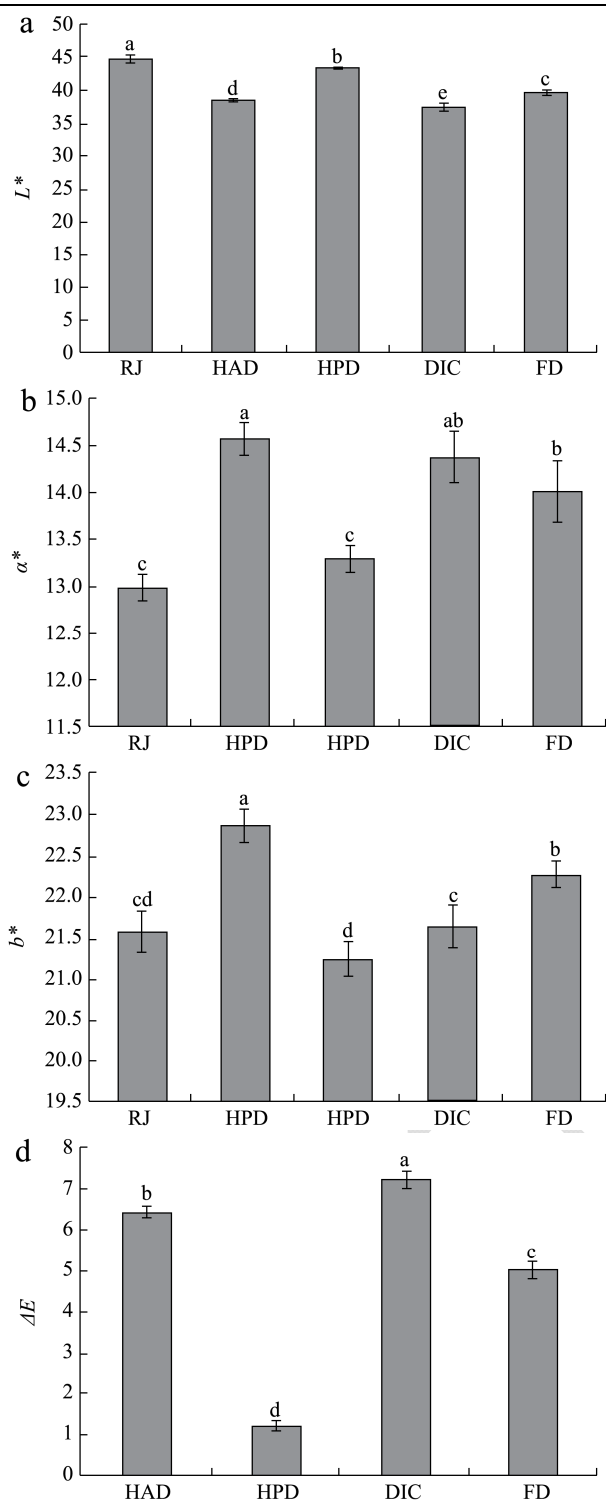


图4 4种干燥方式对红枣脆片色泽的影响

Fig.4 Effect of four drying methods on color of red jujube chips

2.1.3 体积

除色泽外, 体积变化也是干制品外部感官重要的指标, 本实验根据红枣脆片表面积和厚度变化研究了4种干燥方式红枣脆片的体积皱缩。从图5可以看出, HAD和HPD的红枣脆片表面积变化率无显著性差异; DIC的红枣脆片由于瞬时改变环境压强作用使红枣脆片受到膨胀作用, 表面积没有减小反而有所增大,

表面积变化率与其他3种干燥方式具有显著性差异($p<0.05$)。DIC和FD的红枣脆片厚度变化率显著降低, 仅为1.77%和1.36%。DIC由于膨胀压并且红枣脆片始终处于真空状态, 有效控制了红枣脆片的皱缩, Li^[40]通过DIC对苹果丁进行干燥, 发现DIC对苹果丁体积有显著的膨大作用, FD水分直接由冻结的冰晶升华脱除, 厚度基本可以保持原有形状。

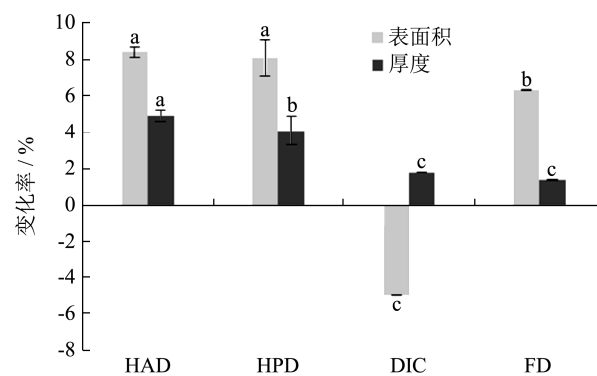


图5 4种干燥方式对红枣脆片表面积和厚度的影响

Fig.5 Effect of four drying methods on Surface area and thickness of red jujube chips

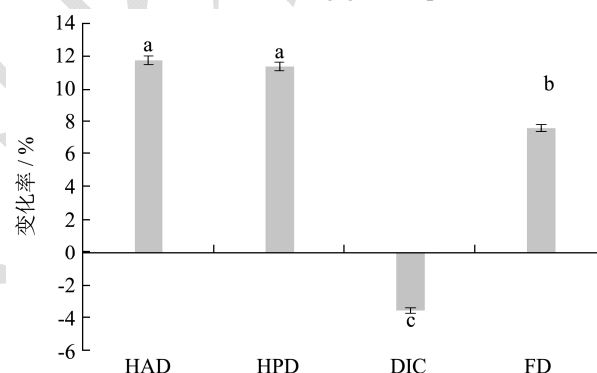


图6 4种干燥方式的红枣脆片体积皱缩率

Fig.6 Volume shrinkage rate of red jujube chips in four drying methods

由图6可以看出4种方式干燥后红枣脆片的体积变化率, 变化率最大的是HAD和HPD的红枣脆片且无显著性差异, FD的红枣脆片体积变化率为7.61%, DIC的红枣脆片体积没有变小反而增大了3.57%, 有效的控制了红枣脆片的皱缩。

2.2 营养品质

由图7可知, 红枣片的多糖含量为17.93 mg/g、黄酮含量为7.73 mg/g (以干质量计, 下同), 干燥加工后红枣脆片多糖和黄酮含量均有降低。其中多糖以DIC的保留率最高为14.50 mg/g, HPD和DIC的黄酮保留率最高。HAD、HPD和FD多糖含量均低于DIC且具有显著性差异($p<0.05$)。秦樱瑞^[41]等人研究了不同干燥方式与工艺下的多糖含量变化发现热加工时间

越短多糖含量越高, 本研究中 DIC 时间低于 HAD 和 HPD, DIC 的样品多糖含量最高; HAD 和 HPD 时间和温度相同, 两者多糖含量无显著性差异, 这与秦樱瑞^[41]的研究结果保持一致。真空冷冻干燥的多糖含量降低可能由于冻干过程中红枣脆片随冻干时间的延长温度升高, 因此部分酶被激活, 促进了大分子糖类代谢比如多糖的降解^[39]。研究表明干燥时间是影响原料黄酮含量的重要因素, 其次是干燥温度^[42]。四种干燥方式中, 由图 7 可知, HPD 和 DIC 的干燥时间要显著低于 HAD 和 FD, HPD 和 DIC 处理的红枣脆片的黄酮保留率较高但二者之间无显著性差异, 其研究结果与顾熟琴的研究结论^[43]保持一致。

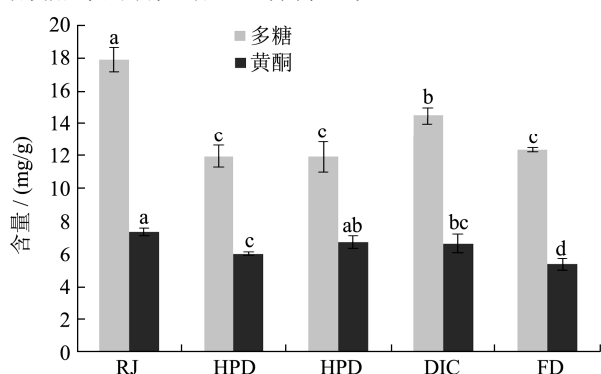


图 7 4 种干制方式对红枣脆片多糖和黄酮含量的影响

Fig.7 Effect of four drying methods on the contents of polysaccharide and flavonoids in red jujube chips

3 结论

本文研究了 HAD、HPD、DIC 和 FD 对红枣脆片的理化品质和营养品质的影响。研究发现 DIC 相对于其他干燥方式显著改善了红枣脆片的理化品质和营养品质, 具体表现为: DIC 的红枣脆片玻璃化转变温度最高 (43.35 °C), 其在常温下放置时处于稳定的玻璃态, 具有良好的贮藏稳定性; 在质构方面 DIC 的红枣脆片硬脆度高; 外观品质方面, 由于 DIC 过程中瞬时压差导致红枣脆片膨胀, 从而显著增大了其表面积, 有效控制了红枣脆片的皱缩现象, 色泽方面表现出诱人的枣红色; 营养品质方面, DIC 的红枣脆片黄酮保留率较高, 多糖含量保留率最高且与其他干燥方式差异显著 ($p < 0.05$)。综上所述, 对于目前产业上传统且使用范围最广泛的热风干燥来说, 压差闪蒸干燥可以明显改善红枣脆片的产品品质, 是取代热风干燥较为理想的干燥方式。

参考文献

[1] 刘孟军,王玖瑞,刘平,等.中国枣生产与科研成就及前沿进展[J].园艺学报,2015,42(9):1683-1698

LIU Meng-jun, WANG Jiu-rui, LIU Ping, et al. Historical achievements and frontier advances in the production and research of Chinese jujube (*ziziphus jujube*) in China [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2015, 42 (9): 1683-1698

[2] 王为为.枣的糖分构成分析及低聚糖研究[D].保定:河北农业大学,2013

WANG Wei-wei. Study on sugar composition and oligosaccharides in Chinese jujube [D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2013

[3] 李春艳,廖晓军.我国红枣产业发展情况分析[J].农产品市场周刊,2016,49:34-37

LI Chun-yan, LIAO Xiao-jun. Analysis on the development of jujube industry in China [J]. *Agrotechny*, 2016, 49: 34-37

[4] 沈静,魏婷,冀晓龙,等.干制方式对鲜食枣食用及营养品质的影响[J].食品科学,2017,7:70-76

SHEN Jing, WEI Ting, JI Xiao-long, et al. Effect of drying methods on eating and nutritional qualities of Chinese jujube fruits (*ziziphus jujuba* mill. cv. dongzao) [J]. *Food Science*, 2017, 7: 70-76

[5] 钱婧雅,张茜,王军,等.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

QIAN Jing-ya, ZHANG Qian, WANG Jun, et al. 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

[6] 沈静,杜若曦,魏婷,等.干制方式对鲜食枣脆片香气品质的影响[J].食品科学,2017,38(18):131-137

SHEN Jing, DU Ruo-xi, WEI Ting, et al. Effect of drying methods on aroma components of jujube fruits (*ziziphus jujube* mill. cv. dongzao) [J]. *Food Science*, 2017, 38(18): 131-137

[7] 陈恺,李琼,周彤,等.不同干制方式对新疆哈密大枣香气成分的影响[J].食品科学,2017,38(14):158-163

CHEN Kai, LI Qiong, ZHOU Tong, et al. Effects of drying conditions on aroma compounds of hami jujube from Xinjiang [J]. *Food Science*, 2017, 38(14): 158-163

[8] 陈锦屏,穆启运,田呈瑞,等.不同升温方式对烘干枣品质影响的研究[J].农业工程学报,1999,15(3):237-240

CHEN Jin-ping, MU Qi-yun, TIAN Cheng-rui, et al. Study on the effect of the different heating processes on the quality of the chinese date [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 1999, 15(3):237-240

[9] 陈万庆.浅谈热泵技术[J].中国新技术新产品,2012,3:124

- CHEN Wan-qing. Talking about the heat pump technology [J]. China New Technologies and Products, 2012, 3: 124
- [10] 姬长英,蒋思杰,张波,等.辣椒热泵干燥特性及工艺参数优化[J].农业工程学报,2017,33(13):296-302
- JI Chang-ying, JIANG Si-jie, ZHANG Bo, et al. Heat pump drying properties of chili and optimization of technical parameters [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(13): 296-302
- [11] 宋凯,徐仰丽,郭远明,等.真空冷冻干燥技术在食品加工应用中的关键问题[J].食品与机械,2013,6:232-235
- SONG Kai, XU Yang-li, GUO Yuan-ming, et al. Some key issues on vacuum freezing technology in food application [J]. Food & Machinery, 2013, 6: 232-235
- [12] 魏婷,高彩凤,沈静,等.真空冷冻干燥过程中鲜食枣营养品质的变化研究[J].现代食品科技,2017,33(5): 161-167
- WEI Ting, GAO Cai-feng, SHEN Jing, et al. Changes in nutritional properties of jujube fruits during different stages of vacuum freeze-drying [J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(5): 161-167
- [13] 吕健,桃脆片加工工艺优化及品质评价研究[D].北京:中国农业科学院,2013
- LYU Jian. Research on the processing technology and quality evaluation for explosion puffing dried prach chips [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Science, 2013
- [14] Xiao Li, Jinfeng Bi, Qinqin Chen, et al. Texture improvement and deformation inhibition of hot air-dried apple cubes via osmotic pretreatment coupled with instant control pressure drop (DIC) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 101: 351-359
- [15] GB/T 5009.3-2016 食品中水分的测定.[S]
- GB/T 5009.3-2016 Determination of Moisture in Food [S]
- [16] Fang-fang Xu, Xin Jin, Lu Zhang, et al. Investigation on water status and distribution in broccoli and the effects of drying on water status using NMR and MRI methods [J]. Food Research International, 2017, 96: 191
- [17] A M Goula, T D Karapantsios, D S Achilias, et al. Water sorption isotherms and glass transition temperature of spray dried tomato pulp [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 85 (1): 73-83
- [18] Praveen Kumar Sappati, Balunkeswar Nayak, G Peter van Walsum. Effect of glass transition on the shrinkage of sugar kelp (*Saccharina latissima*) during hot air convective drying [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 210: 50-61
- [19] Carolina Gumeta-Cha'vez, Jose' Jorge Chanona-Pe'rez, Jorge AlbertoMendoza-Pe'rez, et al. Shrinkage and deformation of agave atrovirens karw tissue during convective drying: Influence of structural arrangements [J]. Drying Technology, 2011, 29 (6): 612-623
- [20] J Wang, CL Law, PK Nema, et al. Pulsed vacuum drying enhances drying kinetics and quality of lemon slices [J]. Journal of Food Engineering, 2018, 224: 129-138
- [21] Jian Peng, Jin-feng Bi, Jian-yong Yi, et al. Engineering texture properties of instant controlled pressure drop (DIC) dried carrot chips via modulating osmotic conditions [J]. Food & Bioprocess Technology, 2018, 11 (2):1-12
- [22] 肖敏,易建勇,毕金峰,等.不同聚合度糖渗透对苹果片干燥特性及品质的影响[J].食品科学,2017,38(9):53-58
- XIAO Min, YI Jian-yong, BI Jin-feng, et al. Effect of sugars with different degrees of polymerization on apple hot-air drying behavior and physical characteristics of instant controlled pressure drop dried apple chips [J]. Food Science, 2017, 38(9): 53-58
- [23] 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. Effect of different drying methods on quality of sweet potato products [J]. Food Science, 2011, 32(16): 108-112
- [24] Zhao Q, Dong B, Chen J, et al. Effect of drying methods on physicochemical properties and antioxidant activities of wolfberry (*Lycium barbarum*) polysaccharide [J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 127: 176-181
- [25] Wang C C, Chang S C, Inbaraj B S, et al. Isolation of carotenoids, flavonoids and polysaccharides from *Lycium barbarum* L. and evaluation of antioxidant activity [J]. Food Chemistry, 2010, 120(1): 184-192
- [26] Sun L J, Zhang J B, Lu X Y, et al. Evaluation to the antioxidant activity of total flavonoids extract from persimmon (*Diospyros kaki* L.) leaves [J]. Food and Chemical Toxicology, 2011, 49(10): 2689- 2696
- [27] 谢小雷,李侠,张春晖,等.牛肉干中红外-热风组合干燥工艺中水分迁移规律[J].农业工程学报,2014,30(14):322-330
- XIE Xiao-lei, LI Xia, ZHANG Chun-hui, et al. Moisture mobility mechanism of beef jerky during combined mid-infrared and hot air drying [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(14): 322-330
- [28] 孙炳新,赵宏侠,冯叙桥,等.基于低场核磁和成像技术的鲜枣贮藏过程水分状态的变化研究[J].中国食品学报,2016, 16(5):252-257

- SUN Bing-xin, ZHAO Hong-xia, FENG Xu-qiao, et al. Studies on the change of moisture state of fresh jujube during storage base on LF-NMR and MRI [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(5): 252-257
- [29] Lu Z, Seetharaman K. ¹H Nuclear magnetic resonance(NMR) and differential scanning calorimetry (DSC) studies of water mobility in dough systems containing barley flour [J]. Cereal Chemistry, 2013, 90(2): 120-126
- [30] 张绪坤,祝树森,黄俭花,等.用低场核磁分析胡萝卜切片干燥过程的内部水分变化[J].农业工程学报,2012,28(22):282-287
- ZHANG Xu-kun, ZHU Shu-sen, HUANG Jian-hua, et al. Analysis on internal moisture changes of carrot slices during drying process using low-field NMR [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(22): 282-287
- [31] Islam M Z, Kitamura Y Yamano Y, et al. Effect of vacuum spray drying on the physicochemical properties, water sorption And glass transition phenomenon of orange juice powder [J]. Journal of Food Engineering. 2015, 169:130-141
- [32] 石启龙,赵亚,马占强,等.真空干燥雪莲果粉玻璃化转变温度与贮藏稳定性研究[J].农业机械学报,2014,45(2):215-219
- SHI Qi-long, ZHAO Ya, MA Zhan-qiang, et al. Glass transition temperature and storage stability of vacuum-dried yacon powder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 215-219
- [33] Nadia Djendoubi Mrad, Catherine Bonazzi, Nourhène Boudhrioua, et al. Influence of sugar composition on water sorption isotherms and on glass transition in apricots [J]. Journal of Food Engineering. 2012, 111, 403-411
- [34] 刘华,钟业俊,李资玲,等.冻干圣女果粉的水分吸附性质及玻璃化转变温度[J].食品科学,2015,36(23):95-99
- LIU Hua, ZHONG Ye-jun, LI Zi-lin, et al. Water sorption characteristics and glass transition temperature of freeze-dried cherry tomatoes [J]. Food Science, 2015, 36 (23): 95-99
- [35] 于静静,毕金峰,丁媛媛,等.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 Jing-jing, BI Jin-feng, DING Yuan-yuan, et al. Effect of drying neatment methods on the quality properties of red jujube [J]. Modern Food Science and Technology, 2011, 27(6): 610-614
- [36] 徐成发.罗非鱼片渗透传质模型与渗透微波脱水初步研究[D].海口:海南大学,2011
- XU Cheng-fa. Studies on mass transfer model of tilapia fillets during osmotic process and its dehydration characteristic under osmotic and microwave [D]. Haikou: Hainan University, 2011
- [37] 娄正,刘清,赵玉强,等.空气源热泵干燥技术在农产品产后处理中的应用[J].农业工程,2017,7(5):68-72
- LOU Zheng, LIU Qing, ZHAO Yu-qiang, et al. Application of air source heat pump drying technology in post-harvest treatment of agricultural products [J]. Agdcuhural Engineering, 2017, 7(5): 68-72
- [38] Yi J Y, Lyu J Bi, J F Zhou, et al. Hot air drying and freeze drying pre-treatments coupled to explosion puffing drying in terms of quality attributes of mango, pitaya, and papaya fruit chips [J]. Journal of Food Processing & Preservation, 2017, 41(6): e13300
- [39] 李伟,邵海燕,陈杭君,等.不同干燥方式对杨梅果粉品质的影响[J].食品科学,2017,38(13):77-82
- LI Wei, GAO Hai-yan, CHEN Hang-jun, et al. Effect of drying methods on quality characteristics of bayberry powder [J]. Food Science, 2017, 38(13): 77-82
- [40] Li Xiao, Bi Jinfeng, Chen Qinqin, et al. Texture improvement and deformation inhibition of hot air-dried apple cubes via osmotic pretreatment coupled with instant control pressure drop (DIC) [J]. LWT-Food Sci Technol, 2019, 101: 351-359
- [41] 秦樱瑞,曾艺涛,杨娟,等.不同干燥方法对桑叶降糖成分含量的影响[C].全国蚕桑资源多元化利用学术研讨会论文集,2014
- QIN Ying-rui, ZENG Yi-tao, YANG Juan, et al. The influence of different drying methods on the hypoglycemic components of mulberry-leaf [C], 2014
- [42] Fei Pei, Ying Shi, Xingyang Gao, et al. Changes in non-volatile taste components of button mushroom (*Agaricus bisporus*) during different stages of freeze drying and freeze drying combined with microwave vacuum drying [J]. Food Chemistry, 2014, 165, 547-554
- [43] 顾熟琴,盛文军,卢大新,等.热风干燥和微波干燥对油枣总黄酮含量影响的研究[J].食品科学,2004, 25(11):154-157
- GU Shu-qin, SHENG Wen-jun, LU Da-xin, et al. Study on effects of forced-air drying and microwave drying on flavonoids of the you jujube [J]. Food Science, 2004, 25(11): 154-157