

渗透处理对真空微波干燥大果山楂脆片质构品质的影响

刘 艳^{1,2,3} 蒙炎梅¹ 唐小闲^{1,2,3} 张 巧^{1,2,3} 任爱清^{1,2,3} 段振华^{1,2,3}

(1. 贺州学院食品与生物工程学院, 广西 贺州 542899; 2. 广西康养食品科学与技术重点实验室, 广西 贺州 542899; 3. 贺州学院食品科学与工程技术研究院, 广西 贺州 542899)

摘要: [目的] 探究蔗糖溶液渗透处理条件对真空微波干燥大果山楂脆片质构品质的影响。[方法] 采用不同渗透液糖度 (20, 35, 50 °Brix) 和渗透温度 (30, 65, 100 °C) 对新鲜大果山楂片进行渗透处理, 制备真空微波干燥大果山楂脆片, 对大果山楂脆片色泽、质构、膨化率、表观密度、体积比和孔径分布等质构品质进行分析。[结果] 渗透液糖度 35 °Brix 渗透后制备的大果山楂脆片色泽最好。渗透液糖度 50 °Brix 渗透后, 制备的大果山楂脆片具有最小的硬度和咀嚼性, 酥脆性和体积比最大, 膨化率高达 118.80%, 膨化效果最佳。100 °C 渗透后经真空微波干燥制得的大果山楂脆片, 其硬度和咀嚼性适中, 膨化率达到 89.37%, 其表观密度、体积比和比表面积较大。不同渗透处理后, 大果山楂脆片孔径分布范围均在 2~50 nm, 为介孔孔径。[结论] 渗透液糖度 50 °Brix、渗透温度 100 °C 为大果山楂片最佳渗透处理条件。

关键词: 大果山楂脆片; 渗透处理; 真空微波干燥; 质构; 膨化率; 孔径分布

Effects of permeation treatment on textural quality of *Malus doumeri* (Bois) Chev. fruit chips dried by vacuum microwave

LIU Yan^{1,2,3} MENG Yanmei¹ TANG Xiaoxian^{1,2,3} ZHANG Qiao^{1,2,3} REN Aiqing^{1,2,3} DUAN Zhenhua^{1,2,3}

(1. School of Food and Biological Engineering, Hezhou University, Hezhou, Guangxi 542899, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Health Care Food Science and Technology, Hezhou, Guangxi 542899, China; 3. Research Institute of Food Science and Engineering Technology, Hezhou University, Hezhou, Guangxi 542899, China)

Abstract: [Objective] To explore the effects of permeation conditions with sucrose solution on the textural quality of *Malus doumeri* (Bois) Chev. fruit chips dried by vacuum microwave. [Methods] Fresh *M. doumeri* fruit chips are subjected to permeation treatment with permeating agents with different sugar content (20, 35, and 50 °Brix) and at different permeation temperatures (30, 65, and 100 °C). Then, the pretreated samples are dried by vacuum microwave. The texture quality of dried *M. doumeri* fruit chips is evaluated regarding the color, texture, expansion rate, apparent density, volume ratio, and pore size distribution. [Results] The *M. doumeri* fruit chips pretreated by the permeating agent with 35 °Brix show the best color. The fruit chips pretreated by the permeating agent with 50 °Brix display the lowest hardness and chewiness, the highest crispness and volume ratio, and the highest expansion rate (118.80%). The fruit chips pretreated by permeation at 100 °C and then dried by vacuum microwave demonstrate moderate hardness and chewiness and an expansion rate of 89.37%. Moreover, they have higher apparent density, volume ratio, and specific surface area. After permeation under different conditions, the pore size distribution of *M. doumeri* fruit chips is within the range of 2~50 nm, which indicates a mesoporous pore size. [Conclusion] The optimal permeation conditions for *M. doumeri* fruit chips are the permeating agent with 50 °Brix and the permeation temperature of 100 °C.

基金项目: 贺州学院博士科研启动基金项目 (编号: 2024BSQD08); 广西自然科学基金青年科学基金项目 (编号: 2025GXNSFAA069983); 广西重点研发计划项目 (编号: 桂科 AB23049007)

通信作者: 唐小闲 (1984—), 女, 贺州学院副研究员, 硕士。E-mail: tangxiaoxian2016@163.com

收稿日期: 2025-03-06 **改回日期:** 2025-08-21

引用格式: 刘艳, 蒙炎梅, 唐小闲, 等. 渗透处理对真空微波干燥大果山楂脆片质构品质的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(4): 182-191.

Citation: LIU Yan, MENG Yanmei, TANG Xiaoxian, et al. Effects of permeation treatment on textural quality of *Malus doumeri* (Bois) Chev. fruit chips dried by vacuum microwave[J]. Food & Machinery, 2026, 42(4): 182-191.

Keywords: *Malus doumeri* (Bois) Chev. fruit chips; permeation treatment; vacuum microwave drying; texture; expansion rate; pore size distribution

大果山楂又称广山楂,是蔷薇科苹果亚科苹果属植物台湾林檎(*Malus doumeri* (Bois) Chev.)的成熟果实^[1],主要分布在广西、广东等地,广西已逐步发展成为大果山楂的主产地,在桂林、贺州、百色、靖西、河池、柳州等市均有种植。作为广西特色优势果品,大果山楂产量高,果实呈青绿色,酸甜且清香,单果质量达75~100 g^[2]。大果山楂含有丰富的营养及功能成分,如总糖、黄酮类、有机酸类、三萜类、氨基酸、维生素及微量元素等^[3-4]。大量研究结果证实,大果山楂具有护肝^[5]、抗氧化^[6]、抗增殖^[7]、降血脂^[8]、降血压和抑菌^[9]等药用价值。新鲜大果山楂在贮藏过程中易失水,表皮发生皱缩,果肉内部褐变,这都极大地限制了大果山楂鲜果的保存期。

干燥作为一种成熟且高效的技术,可以降低产品的含水率和水分活性,防止微生物和酶促过程导致的腐烂,是提高产品贮藏寿命、减少损失以及控制运输和运输成本的关键因素^[10]。真空微波干燥作为一种干燥效率高、产品品质优的新型加工技术,将微波加热和真空干燥相结合^[11],不仅能提高干燥效率,降低能耗,还对保持产品营养成分和改善感官特性有较好的效果^[12]。真空微波干燥在果蔬加工中应用广泛,劳风华等^[13]研究不同干燥方式对冻融大果山楂片品质的影响,发现真空微波脉冲干燥制备的冻融大果山楂片,其品质优于其他干燥方式。卢辉等^[14]采用分段式微波真空干燥对贺州香芋工艺条件进行研究,结果表明分段式微波真空干燥不仅可以提高新鲜香芋干燥效率,还可提升香芋全粉的风味。谭德馨等^[15]采用真空微波干燥技术加工马蹄脆片,在微波功率2 000 W,真空度0.095 MPa下得到的马蹄脆片酥脆可口,色泽亮,风味浓。

渗透脱水作为一种常见的干燥前处理方式,是将样品置于高渗溶液中,利用水分梯度和浓度差,使样品中水分渗出和溶液中溶质渗入,从而除去样品部分水分的一种方法^[16]。渗透过程中的质量传递与渗透液种类、渗透液浓度、渗透温度等因素密切相关,当渗透液浓度增加,渗透温度提高,物质传递效率也相应提高^[17],通过控制渗透条件,不仅可提高原料渗透速率,同时使干燥效率增加,还可提升干燥产品色泽、质地、微观结构、营养成分等品质。王俊涛等^[18]采用山梨糖醇溶液对香蕉干进行渗透后,接着微波真空干燥,探究渗透—微波真空干燥对软香蕉干品质的影响,结果显示,渗透—微波真空干燥可实现调控软香蕉干产品口感和质构的目的。陈腊梅等^[19]研究不同糖液超声辅助渗透处理对真空冷冻干燥桃脆片品质的影响,结果表明,糖液渗透和超声两者协同影响桃脆片的品质,不仅能增加冻干桃脆片硬度和颜色保留率,降低冻干桃脆片吸湿性和复水比,还可改变冻干桃脆片的玻

璃化转变温度。

目前,渗透脱水应用于大果山楂干燥前处理的研究未见报道。研究拟以新鲜大果山楂为原料,经不同渗透液糖度和渗透温度处理后进行真空微波干燥,比较不同渗透处理后大果山楂片的水分损失率和固形物增量率以及微波真空干燥后大果山楂脆片色泽、质构、膨化率、微观结构、表面密度、体积比以及孔径等质构品质的差异,以期为高品质大果山楂脆片加工提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

大果山楂鲜果:产地为广西壮族自治区贺州市,无病虫害、成熟度一致、大小均匀,单果重80 g左右,于-4℃冷库中贮藏备用;

蔗糖:云南绥悦轩食品有限公司;

无水柠檬酸、焦亚硫酸钠:河南万邦化工科技有限公司;

其他试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

真空微波干燥机:WBZ-10型,贵阳新奇微波工业有限责任公司;

物性测定仪:TAXT PLUS型,英国 Stable Micro System公司;

电子天平:JJ1000型,常熟市双杰测试仪器厂;

数显恒温水浴锅:HH-4型,常州国华电器有限公司;

水分测定仪:MA 150型,北京赛多利斯仪器系统有限公司;

色差仪:CR-400型,日本柯尼卡美能达公司;

可见分光光度计:722型,上海佑科仪器仪表有限公司;

摇摆式高速粉碎机:DFY-600D型,温岭市林大机械有限公司;

扫描电子显微镜:QUANTA FEG-400型,美国FEI公司;

手持糖量计:WZS-60型,上海仪电物理光学仪器有限公司;

比表面及孔径分析仪:JW BK200A 01型,北京精微高博科学技术有限公司。

1.3 大果山楂片制备

新鲜大果山楂洗净去皮、去核后,切成厚度3 mm的薄片,加入0.1%柠檬酸和0.05%焦亚硫酸钠的复合护色液内,大果山楂片与复合护色液的质量比为2:3,浸渍护色10 min,取出大果山楂片并擦拭表面护色液和水分,装入保鲜袋密封备用。

1.4 大果山楂片渗透液渗透处理

1.4.1 渗透液糖度对真空微波干燥大果山楂脆片质构品

质的影响 选取蔗糖为渗透剂,分别制备 20,35,50 °Brix 的渗透溶液备用,采用手持糖量计对渗透液糖度进行校准测定。设定 $V_{\text{山楂片}}:V_{\text{渗透液}}=1:2$,将护色后的大果山楂片样品置于 $(100.0\pm0.5)^\circ\text{C}$ 不同糖度蔗糖溶液中进行渗透,当渗透溶液温度再次达到 100°C 时,每间隔 5 min 取出样品进行称重,直至渗透达到平衡,将大果山楂片取出并用吸水纸擦干样品表面的渗透液,采用真空微波干燥制备大果山楂脆片,并对其质构品质进行分析。

1.4.2 渗透温度对真空微波干燥大果山楂脆片质构品质的影响 选取固定糖度(35 °Brix)渗透液,将蔗糖溶液分别预热至 (30.0 ± 0.5) , (65.0 ± 0.5) , $(100.0\pm0.5)^\circ\text{C}$ 进行渗透试验,将护色后的大果山楂片置于不同温度的渗透溶液中,每间隔 30 min(渗透温度为 100°C 时,间隔时间为 2 min)取出大果山楂片进行称重,直至达到渗透平衡。渗透结束将大果山楂片取出,用吸水纸擦干其表面的渗透液后进行真空微波干燥,制得大果山楂脆片,并分析大果山楂脆片质构品质。

1.5 真空微波干燥制备大果山楂脆片

渗透后的大果山楂片采用间歇式真空微波进行干燥,根据真空微波设备特性,经过大量预试验,确定了适宜的真空微波干燥时间。将 2 000 g 渗透后的大果山楂片平铺于托盘中,再放入真空微波干燥机腔体中,按照表 1 所示的真空微波干燥条件制备大果山楂脆片,得到的大果山楂脆片最终含水率均低于 5%。

表 1 大果山楂脆片真空微波干燥的具体参数†
Table 1 Parameters of vacuum microwave drying for *Malus doumeri* (Bois) Chev. fruit chips

干燥阶段	微波功率/W	干燥时间/min	干燥阶段	微波功率/W	干燥时间/min
1	2 000	3	5	500	15
2	1 500	4	6	0	2
3	0	1	7	300	30
4	1 000	10			

† 真空度 0.095 MPa。

1.6 指标测定

1.6.1 水分损失率 准确称量每组渗透样品鲜样质量、渗透后质量、样品干基质量,参照文献[20]计算水分损失率。

1.6.2 固形物增量率 试验过程中称量每组样品鲜样质量和样品渗透过程中的干基质量,参照文献[21]计算固形物增量率。

1.6.3 色泽 采用色差计测定大果山楂片表面的色泽 L^* 、 a^* 、 b^* 值,以新鲜大果山楂片色泽为参照标准,按式(1)计算色差。

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

式中:

ΔE ——色差;
 L^* 、 a^* 、 b^* ——干燥后大果山楂片的色度值;
 L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* ——新鲜大果山楂片的色度值。

1.6.4 质构 采用物性测定仪对大果山楂脆片的质构(硬度、脆度、咀嚼性)特性进行分析,具体参数:P/2 型探头,测前速度 1.0 mm/s,测试速度 2.0 mm/s,测后速度 10.0 mm/s,测试距离 2.0 mm,触发力 2 N。每个样品平行测定 5 次,结果取其平均值。

1.6.5 膨化率 采用石英砂法,体积的测量以石英砂作为置换介质,分别测定大果山楂片真空微波干燥前后的体积,按式(2)计算膨化率^[22]。

$$P = \frac{V_3 - V_1}{V_2 - V_1} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:
 P ——膨化率,%;
 V_1 ——石英砂的体积, cm^3 ;
 V_2 ——石英砂和干燥前大果山楂片的体积, cm^3 ;
 V_3 ——石英砂和干燥后大果山楂片的体积, cm^3 。

1.6.6 体积比 采用体积置换法^[23]测定样品的体积,以超细石英砂作为填料,每次测定 10 片样品体积,重复测定 3 次,大果山楂片体积为总体积减去石英砂体积,参照文献[13]计算体积比。

1.6.7 表观密度 采用超细石英砂填充法测定表观密度,将一定量干燥后的大果山楂片样品轻轻放入 100 mL 量筒中,加入超细石英砂,用橡皮锤敲击量筒底部,直至体积不减少为止,分别测定总体积和填充物的体积,按式(3)计算表观密度^[13]。

$$\rho = \frac{M}{V_{\text{总}} - V_{\text{填}}}, \quad (3)$$

式中:
 ρ ——表观密度, g/mL ;
 M ——大果山楂脆片的质量,g;
 $V_{\text{总}}$ ——大果山楂脆片和填充物的总体积, mL ;
 $V_{\text{填}}$ ——填充物体积, mL 。

1.6.8 微观结构 采用扫描电子显微镜观察大果山楂脆片的微观结构,将脆片固定在样品台进行喷金处理,然后在加速电压 5.0 kV、250 倍放大倍数下观察样品并拍照。

1.6.9 孔径和比表面积 称取 2.0 g 大果山楂脆片并装入样品管中,在真空状态下进行预处理,设置加热温度 100°C ,加热时间 1 h。预处理完成后,在电脑的操作下采用物理吸附法使大果山楂脆片样品吸附 N_2 ,从而进行大果山楂脆片比表面积和孔径测定。

1.7 数据处理

所有试验数据均用平均值±标准差表示。用 SPSS 22.0 软件进行方差分析,Duncan 法进行多重比较分析,显著性水平 $P<0.05$,并采用 Origin 2025 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 渗透处理对大果山楂片水分损失率和固形物增量率的影响

2.1.1 渗透液糖度对大果山楂片水分损失率和固形物增量率的影响 由图1和图2可知,随着渗透时间的变化,大果山楂片的水分损失率和固形物增量率变化较明显,渗透时间与水分损失率和固形物增量率呈正相关,随着渗透时间延长,水分损失率及固形物增量率逐渐上升。当渗透液糖度为20 °Brix时,大果山楂片水分损失率和固形物增量率最小,而当渗透液糖度50 °Brix渗透时,大果山楂片水分损失率和固形物增量率最大。高糖度的渗透液脱水速度加快,水分损失率及固形物增量率也逐渐上升。渗透30 min后,渗透液糖度为50 °Brix的大果山楂片水分损失率达到52.2%,固形物增量率为3.55%。原因是渗透过程以渗透压作为动力,而渗透压受到渗透液糖度的影响,渗透液糖度越高渗透压越大,则渗透动力就越大^[24],从而加快大果山楂片内部组织的水分渗出,高渗透液促使溶质进入大果山楂片组织内部,从而增加固形物

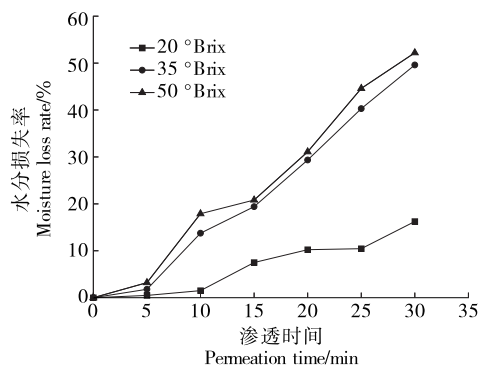


图1 不同渗透液糖度下大果山楂片水分损失率变化

Figure 1 Changes in moisture loss rate of *Malus doumeri* (Bois) Chev. fruit chips pretreated with the permeating agents with different sugar content

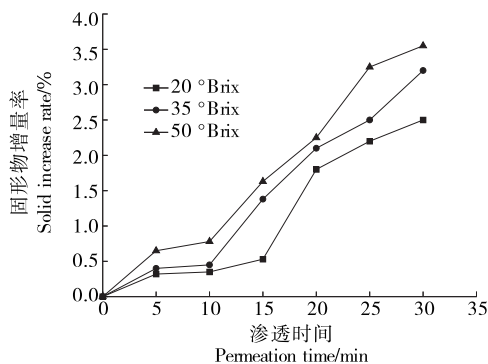


图2 不同渗透液糖度下大果山楂片固形物增量率变化

Figure 2 Changes in solid increase rate of *Malus doumeri* (Bois) Chev. fruit chips pretreated with the permeating agents with different sugar content

含量^[22]。因此,选用渗透液糖度50 °Brix较适宜。

2.1.2 渗透温度对大果山楂片水分损失率和固形物增量率的影响 由图3和图4可知,不同渗透温度下,大果山楂片的水分损失率及固形物增量率随着渗透时间的增加而明显上升。随着渗透时间的增加,渗透液的糖度不断稀释,大果山楂片内外的渗透压逐渐降低,从而制约了渗透溶液和大果山楂片之间的水分交换^[25],故渗透后期,大果山楂片的水分损失率变慢。水分损失率和固形物增量率随着渗透温度的升高而增加,当渗透温度为30,65 °C时,渗透处理150 min后,大果山楂片水分损失率分别为31.1%,33.5%,固形物增量率分别为1.30%,1.33%;而在100 °C下渗透处理10 min后,大果山楂片水分损失率和固形物增量率分别达41.2%,18.85%。表明提高渗透温度加快了渗透过程中水分损失,且固形物加速进入大果山楂片组织细胞内。原因是在渗透液糖度固定的情况下,渗透温度升高,加快了溶液中溶剂和溶质的运动频率,使得大果山楂片和渗透液之间的物质快速交换^[26]。故渗透温度为100 °C时,大果山楂片的渗透效率最高。

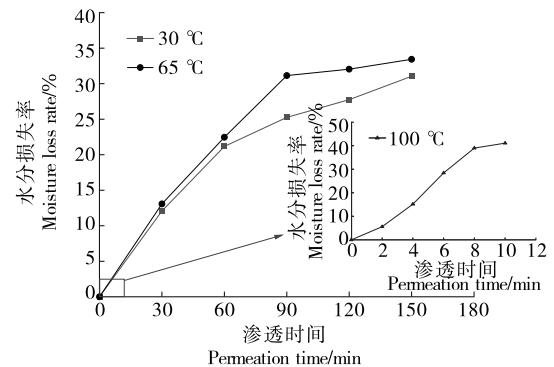


图3 不同渗透温度下大果山楂片水分损失率变化

Figure 3 Changes in moisture loss rate of *Malus doumeri* (Bois) Chev. fruit chips pretreated at different permeation temperatures

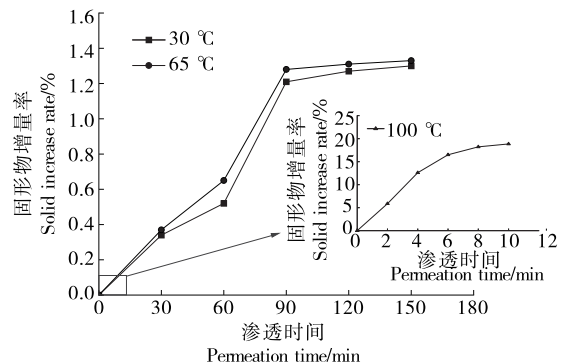


图4 不同渗透温度下大果山楂片固形物增量率变化

Figure 4 Changes in solid increase rate of *Malus doumeri* (Bois) Chev. fruit chips pretreated at different permeation temperatures

2.2 渗透处理对真空微波干燥大果山楂脆片色泽的影响

2.2.1 渗透液糖度对大果山楂脆片色泽的影响 由表 2 可知,与新鲜大果山楂片相比,干燥后大果山楂脆片的 L^* 值和 a^* 值显著增大($P<0.05$),而 b^* 值显著降低($P<0.05$)。不同渗透温度对大果山楂脆片色泽具有明显影响。随着渗透液糖度的增大,大果山楂脆片的 L^* 值显著降低($P<0.05$),而 a^* 值和 b^* 值随着渗透液糖度增加先增大后降低。对于 ΔE ,渗透液糖度 35 °Brix 渗透后,大果山楂脆片的 ΔE 值最低,即与新鲜大果山楂片的色泽差异最小。而 50 °Brix 渗透液渗透后,真空微波干燥得到的大果山楂脆片呈现较大的 ΔE 值($\Delta E=32.99$),可能是较高糖度的糖类物质渗透进入大果山楂片组织中,在真空微波干燥过程中发生轻微的美拉德反应,导致大果山楂脆片色泽变化较大。

表 2 渗透液糖度对真空微波干燥大果山楂脆片色泽的影响[†]
Table 2 Influences of sugar content of permeating agent on the color parameters of *Malus doumeri* (Bois) Chev. fruit chips dried by vacuum microwave

渗透液糖度/°Brix	L^*	a^*	b^*	ΔE
鲜样	55.45±0.85 ^d	2.35±0.34 ^d	22.13±0.20 ^a	—
20	78.41±0.53 ^a	7.95±0.09 ^a	21.92±0.11 ^b	31.15±0.45 ^b
35	77.18±0.18 ^b	6.17±0.08 ^c	17.05±0.32 ^d	27.97±0.56 ^c
50	73.34±0.25 ^c	7.60±0.11 ^b	20.19±0.84 ^c	32.99±0.79 ^a

[†] 同列小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

2.2.2 渗透温度对大果山楂脆片色泽的影响 由表 3 可知,与新鲜大果山楂片相比,经过渗透干燥后,大果山楂脆片的 L^* 值显著增大,不同渗透温度对 L^* 值影响显著($P<0.05$),在 65 °C 渗透的大果山楂片经真空微波干燥后其 L^* 值最大。与新鲜大果山楂相比,干燥后的大果山楂脆片 a^* 值显著增加($P<0.05$),但经 65, 100 °C 渗透后的大果山楂脆片 a^* 值差异不显著($P>0.05$),说明这两个温度对 a^* 值影响的差异性不大。干燥后的大果山楂脆片 b^* 值显著低于新鲜大果山楂片的,且随着渗透温度的增加而

表 3 渗透温度对真空微波干燥大果山楂脆片色泽的影响[†]
Table 3 Influences of permeation temperature on the color parameters of *Malus doumeri* (Bois) Chev. fruit chips dried by vacuum microwave

渗透温度/°C	L^*	a^*	b^*	ΔE
鲜样	55.45±0.85 ^d	2.35±0.34 ^c	22.13±0.20 ^a	—
30	74.90±0.81 ^b	7.25±0.14 ^b	21.32±0.59 ^b	32.72±0.09 ^b
65	77.85±1.05 ^a	7.73±0.21 ^a	19.13±0.84 ^c	29.21±0.22 ^c
100	71.30±1.89 ^c	7.64±0.10 ^a	18.75±0.50 ^c	33.46±0.07 ^a

[†] 同列小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

降低。不同渗透温度对大果山楂脆片 ΔE 值影响显著($P<0.05$),65 °C 渗透后,真空微波干燥得到的大果山楂脆片呈现最小的 ΔE 值,说明该大果山楂脆片与新鲜大果山楂片色泽最接近。而 100 °C 渗透后,大果山楂脆片的 ΔE 值最大,可能是较高温度渗透时,渗透液迅速且大量渗入大果山楂片组织内部,同时高温下大果山楂片内发生美拉德反应,从而导致大果山楂片较大的色泽变化。

2.3 渗透处理对真空微波干燥大果山楂脆片质构的影响

2.3.1 渗透液糖度对大果山楂脆片质构特性的影响 由图 5 可知,随着渗透液糖度的增大,大果山楂脆片的硬度和脆度值均显著降低($P<0.05$),原因是渗透液糖度不同,导致不同渗透液糖度与大果山楂片内部水分子相互作用的程度不同,从而大果山楂脆片的硬度随着渗透液糖度上升而减小。而大果山楂脆片的脆度值随着渗透液糖度增大而减小,即大果山楂脆片的酥脆性随着渗透液糖度增大而增加。而大果山楂脆片的咀嚼性随着渗透液糖度增大而降低,当渗透液糖度增大到 35, 50 °Brix 时,大果山楂片的咀嚼性差异不显著($P>0.05$)。当渗透液糖度为 50 °Brix 时,大果山楂脆片的硬度和咀嚼性较小,酥脆性最高,大果山楂脆片的质构特性最佳。

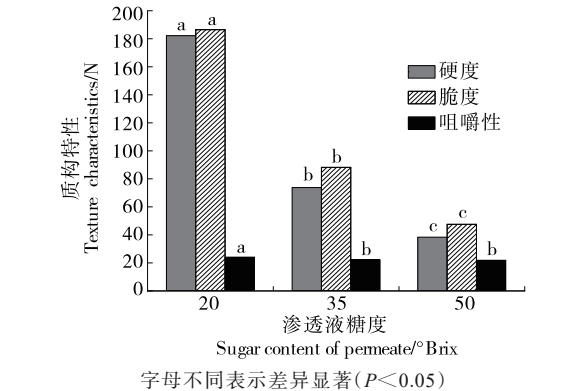
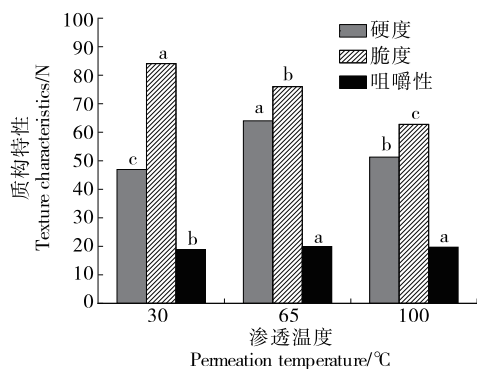


图 5 渗透液糖度对真空微波干燥大果山楂脆片质构特性的影响
Figure 5 Influences of sugar content of permeating agent on the texture characteristics of *Malus doumeri* (Bois) Chev. fruit chips dried by vacuum microwave

2.3.2 渗透温度对大果山楂脆片质构特性的影响 由图 6 可知,经过不同渗透温度处理后,大果山楂脆片的硬度、脆度和咀嚼性存在显著差异($P<0.05$)。随着渗透温度增加,大果山楂脆片的硬度先增大后降低,当渗透温度为 30 °C 时,大果山楂脆片的硬度最低,原因是渗透温度低,渗糖速度较慢,使大果山楂片渗透不完全,经真空微波干燥后硬度较低。当渗透温度为 65 °C 时,大果山楂脆片硬度最大,可能与大果山楂脆片致密的微观结构有关。张凤娟等^[27]研究发现,样品微观结构越致密,结构越紧实,则其硬度越大。当渗透温度为 100 °C 时,渗糖速度加



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图6 渗透温度对真空微波干燥大果山楂脆片质构特性的影响

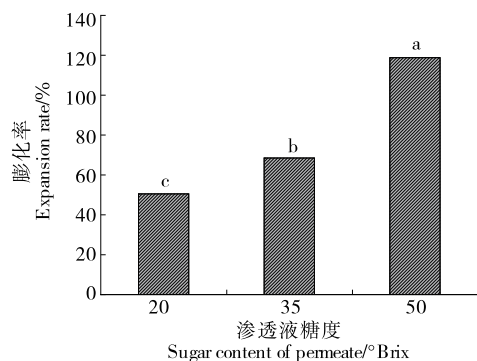
Figure 6 Influences of permeation temperature on the texture characteristics of *Malus doumeri* (Bois) Chev. fruit chips dried by vacuum microwave

快,大果山楂片组织内部形成小孔,导致硬度有所降低。而真空微波干燥大果山楂脆片的脆度值随着渗透温度的增大显著降低 ($P < 0.05$),即渗透温度越高,大果山楂脆片的酥脆性越高,这可能是渗透温度高,渗透液迅速且大量渗入大果山楂片组织内部,糖物质附着于大果山楂片上,增加的固形物导致真空微波干燥后大果山楂片结构变坚固及弹性损失,使得大果山楂脆片的酥脆性增加^[28]。渗透温度对大果山楂脆片的咀嚼性有一定影响,随着渗透温度升高,咀嚼性有所增加,但当渗透温度为65,100 °C时,大果山楂脆片的咀嚼性增加不显著 ($P > 0.05$)。因此,渗透温度为100 °C时,大果山楂脆片具有适宜的硬度和咀嚼性,酥脆性较高。

2.4 渗透处理对真空微波干燥大果山楂脆片膨化率的影响

2.4.1 渗透液糖度对大果山楂脆片膨化率的影响 由图7可知,膨化率随着渗透液糖度的增加而显著增大 ($P < 0.05$),渗透液糖度为20 °Brix时膨化率仅50.50%,而渗透液糖度为50 °Brix时膨化率高达118.80%。原因是在渗透过程中,渗透液大量渗入大果山楂片组织内部并占据组织内部空间,在真空微波干燥过程中,一定程度上支撑起大果山楂内部结构,从而强化了膨化的效果^[29]。

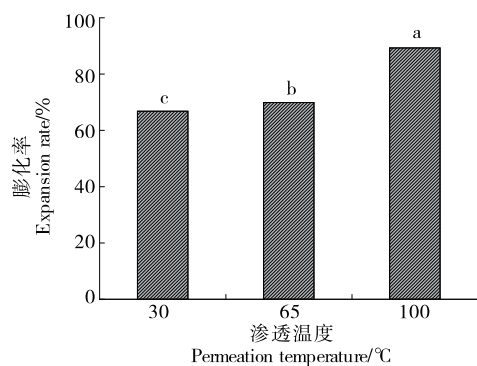
2.4.2 渗透温度对大果山楂脆片膨化率的影响 由图8可知,渗透温度对真空微波干燥大果山楂的膨化率影响显著 ($P < 0.05$),随着渗透温度升高,其膨化率也随之增大,表明渗透液温度越高,大果山楂脆片膨化效果越好。原因是渗透温度高使外部渗透液大量流向大果山楂片组织内部,一定程度上起到支撑大果山楂片内部细胞骨架作用^[30],有助于真空微波干燥过程中大果山楂细胞的孔隙扩大,进而使得膨化率增加。因此,较高的渗透温度有利于真空微波干燥过程中大果山楂片的膨化。



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图7 渗透液糖度对真空微波干燥大果山楂脆片膨化率的影响

Figure 7 Influences of sugar content of permeating agent on the expansion rate of *Malus doumeri* (Bois) Chev. fruit chips dried by vacuum microwave



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图8 渗透温度对真空微波干燥大果山楂脆片膨化率的影响

Figure 8 Influence of permeation temperature on the expansion rate of *Malus doumeri* (Bois) Chev. fruit chips dried by vacuum microwave

2.5 渗透处理对真空微波大果山楂脆片体积比和表观密度的影响

2.5.1 渗透液糖度对大果山楂脆片体积比和表观密度的影响 由图9可知,渗透液糖度对大果山楂脆片的表观密度影响显著 ($P < 0.05$),渗透液糖度为20 °Brix时,大果山楂片的表观密度最大,为0.82 g/mL,渗透液糖度为35,50 °Brix时,膨化程度较好,表观密度相对较小。表观密度越小,说明大果山楂脆片内部越蓬松,膨化程度越好^[13]。真空微波干燥大果山楂脆片的体积比随着渗透液糖度的增大而显著增大 ($P < 0.05$),经渗透液糖度50 °Brix渗透后,大果山楂脆片体积比高达0.955,表明50 °Brix渗透处理后,大果山楂脆片体积收缩率最小,极大地保持了大果山楂片原有的外观形态。可能是大果山楂片在渗透液处理过程中,渗透液渗透到组织内部,将大果山楂片内部支撑起来,达到体积增大的效果。

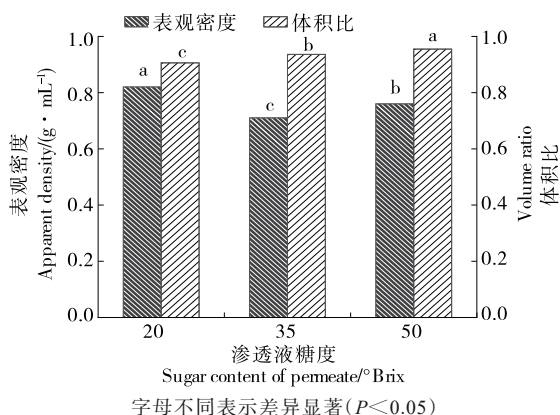


图9 渗透液糖度对真空微波干燥大果山楂脆片表观密度和体积比的影响

Figure 9 Influences of sugar content of permeating agent on the apparent density and volume ratio of *Malus doumeri* (Bois) Chev. fruit chips dried by vacuum microwave

2.5.2 渗透温度对大果山楂脆片体积比和表观密度的影响 由图10可知,渗透温度对真空微波干燥大果山楂脆片表观密度和体积比的影响情况一致。当渗透温度为30,65℃时,大果山楂脆片的表观密度和体积比均差异不显著($P>0.05$),即30,65℃的渗透温度对大果山楂脆片的表观密度和体积比影响不大。但当渗透温度达100℃时,大果山楂脆片表观密度和体积比显著增大($P<0.05$),明显高于30,65℃渗透处理的样品,表明经100℃渗透后,大果山楂脆片的体积收缩率越小,保持了样品原有的外观形态。

2.6 渗透处理对真空微波大果山楂片微观结构的影响

由图11可知,20°Brix渗透液处理后,大果山楂脆片微观结构发生明显的皱缩现象,但表面较光滑。35°Brix

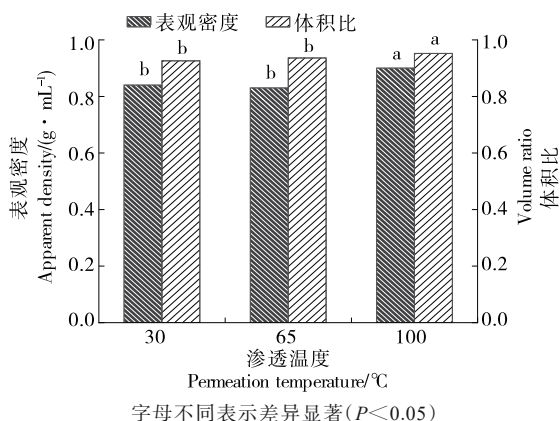


图10 渗透温度对真空微波干燥大果山楂脆片表观密度和体积比的影响

Figure 10 Influences of permeation temperature on the apparent density and volume ratio of *Malus doumeri* (Bois) Chev. fruit chips dried by vacuum microwave

处理后,经真空微波干燥得到的大果山楂脆片表面较为粗糙,存在细胞严重皱缩和凹陷。渗透液糖度为50°Brix时,大果山楂脆片细胞坍塌,组织结构表面较光滑紧致,还呈现少量大孔隙结构。这是由于渗透液进入大果山楂片内部,组织细胞被挤压而塌陷。30℃渗透处理后,大果山楂脆片表面较为粗糙,但组织结构较为完整,可能是渗透温度低,从而渗透速率较小,对组织细胞破坏程度较小。65℃渗透处理的大果山楂脆片组织结构塌陷较严重,微观结构较致密,其主要原因是渗透过程中渗透液的渗入和较多的水分损失,使细胞收缩,导致细胞壁扭曲,细胞坍塌^[31]。如图11(f)所示,100℃渗透处理得到的大果山楂脆片,其组织结构塌陷,并形成了少量孔隙。原因是渗透液在100℃高温条件下渗透,蔗糖大量且快速进入

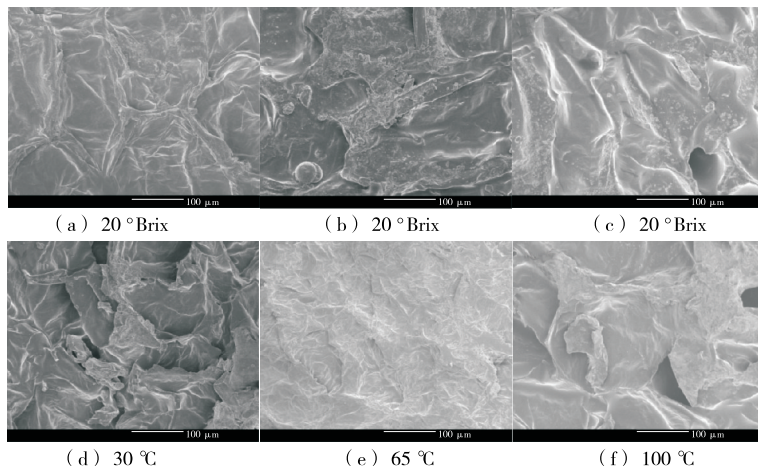


图11 渗透处理后真空微波干燥大果山楂脆片的微观结构

Figure 11 Microstructures of *Malus doumeri* (Bois) Chev. fruit chips pretreated by permeation under different conditions and then dried by vacuum microwave (250×)

大果山楂片中,对大果山楂内部的细胞骨架进行支撑,真空微波干燥过程中组织部分发生了断裂坍塌,从而形成了孔隙结构^[32]。

2.7 渗透处理对真空微波大果山楂脆片孔径分布和比表面积的影响

2.7.1 渗透液糖度对大果山楂脆片孔径分布和比表面积的影响

国际纯粹与应用化学协会(IUPAC)将孔径可分为三类,分别为微孔孔径($<2\text{ nm}$)、介孔/中孔孔径($2\sim 50\text{ nm}$)和大孔孔径($>50\text{ nm}$)。由图12(a)可知,不同渗透液糖度处理下,大果山楂脆片的孔径主要分布范围在 $2\sim 50\text{ nm}$,主要是介孔孔径类型,即大果山楂脆片以中孔为主。尖锐的峰值表示相似大小的孔隙范围,峰值越高,该大小的孔隙越多^[33]。经渗透液糖度20,35 °Brix渗透的真空微波大果山楂脆片孔径分布曲线朝左侧小孔径区域呈多处尖峰分布,即大果山楂脆片是非均一孔径尺寸的中孔空隙。而在渗透液糖度50 °Brix渗透处理下,大果山楂脆片孔径分布曲线朝左侧小孔径区域尖峰较少,说明大果山楂脆片孔径尺寸较为均一。

由图12(b)可知,大果山楂片经不同糖度渗透液渗透

后,大果山楂脆片的比表面积主要分布范围在 $0.3\sim 0.5\text{ m}^2/\text{g}$,其中,35 °Brix渗透液渗透处理后,真空微波干燥大果山楂脆片的比表面积较大。

2.7.2 渗透温度对大果山楂脆片孔径分布和比表面积的影响

由图13(a)可知,在不同渗透温度处理下,大果山楂脆片的孔径分布在 $2\sim 50\text{ nm}$ 范围内,其中孔径集中在 25 nm 左右,为介孔孔径类型,大果山楂脆片以介孔为主。经 $65\text{ }^\circ\text{C}$ 渗透后,得到真空微波大果山楂脆片孔径分布曲线朝左侧小孔径区域呈多处尖峰分布,即大果山楂脆片是非均一孔径尺寸。而 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 渗透处理后,大果山楂脆片孔径分布曲线尖峰较少,说明大果山楂脆片孔径尺寸较为均一,可能是渗透过程在食品内部产生压力,促使食品的微观结构发生改变,原本紧密的结构被撑开,形成许多细小的孔隙。

由图13(b)可知,30, 65, $100\text{ }^\circ\text{C}$ 的比表面积分别为 $0.4, 0.4, 0.5\text{ m}^2/\text{g}$,其中 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 渗透处理后,大果山楂脆片的比表面积峰值较大。原因是渗透温度高,加速渗透液渗透进入大果山楂片组织内部,且组织内渗透物质的量更高,组织内渗透物质增大使得组织中孔隙体积增大,孔

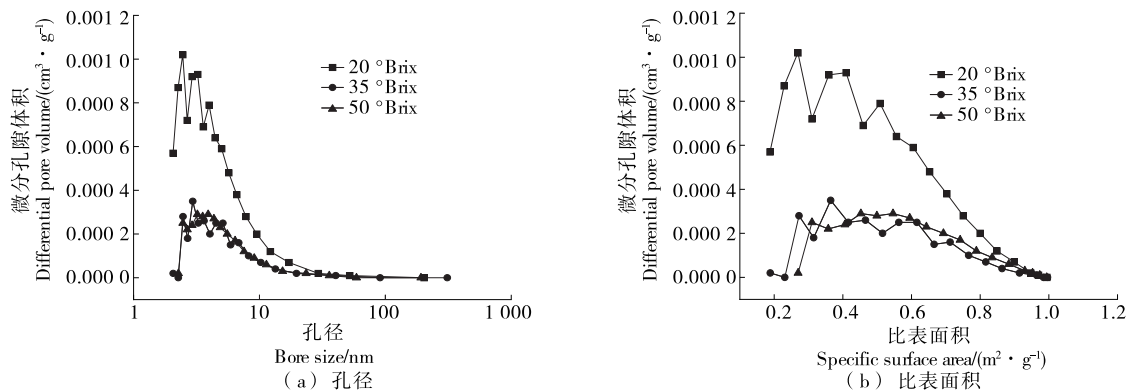


图12 不同渗透液糖度下真空微波干燥大果山楂脆片孔径分布及比表面积曲线

Figure 12 Pore size distribution and specific surface area curves of *Malus doumeri* (Bois) Chev. fruit chips pretreated with the permeating agents with different sugar content and then dried by vacuum microwave

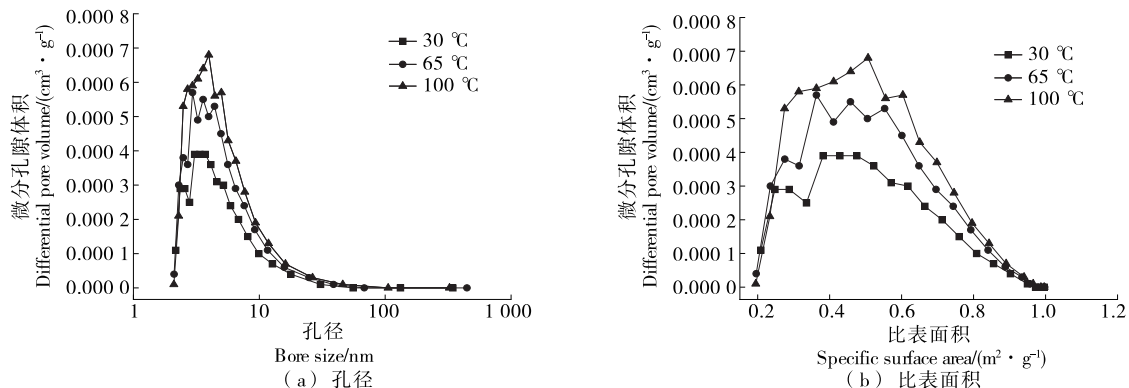


图13 不同渗透温度下真空微波干燥大果山楂脆片孔径分布及比表面积曲线

Figure 13 Pore size distribution and specific surface area curves of *Malus doumeri* (Bois) Chev. fruit chips pretreated at different permeation temperatures and then dried by vacuum microwave

径也相应增大;另外,大果山楂脆片体积膨胀后,其外部轮廓也会变得更加复杂,不再是原来较为规整的形状。除了内部孔隙增加了表面积外,外部表面也可能会有一些凹凸不平的结构,进一步增大了表面积,故 100℃渗透后大果山楂脆片的比表面积最大。

3 结论

以大果山楂为原料,研究渗透液糖度和渗透温度处理对真空微波大果山楂片质构品质的影响。研究发现,大果山楂片的水分损失率和固形物增量率随着渗透液糖度和渗透温度的升高而增加。色泽方面,渗透液糖度 35℃Brix 和渗透温度 65℃处理后,真空微波干燥得到的大果山楂脆片色泽保持相对较好。50℃Brix 渗透液渗透处理后,大果山楂脆片的硬度和咀嚼性最小,酥脆性最好,体积比最大,膨化率高达 118.80%,产品适口性最好,微观结构较为光滑紧致,存在少量孔隙。100℃渗透得到的真空微波干燥大果山楂脆片,其硬度和咀嚼性适中,膨化率达到 89.37%,膨化效果较好,其表观密度、体积比和比表面积较大,形成了孔隙结构。经过不同渗透处理后,真空微波干燥大果山楂脆片孔径分布范围在 2~50 nm,均为介孔孔径。通过渗透条件的改变,可调控真空微波干燥大果山楂脆片质构相关品质,综合分析,渗透液糖度 50℃Brix、渗透温度 100℃是较好的渗透处理条件,可促使真空微波干燥大果山楂脆片形成酥脆质地。

参考文献

- [1] 谷粹芝,李朝鉴.台湾林檎及其近缘种的研究[J].广西植物,1990(1): 11-14.
GU C Z, LI C L. Study on *Malus doumeri* and its relatives[J]. Guihaia, 1990(1): 11-14.
- [2] 廖正遵,吴凤莲,李定金.广西大果山楂无硫护色工艺的研究[J].农业研究与应用,2023,36(5): 69-74.
MO Z Z, WU F L, LI D J. Study on sulfur-free color protection technology of Guangxi *Malus doumeri* (Bois) Chev. [J]. Agricultural Research and Application, 2023, 36(5): 69-74.
- [3] 陈秋虹,黄岛平,蒋艳芳.大果山楂营养成分与功能成分分析及评价[J].轻工科技,2016(11): 3-4.
CHEN Q H, HUANG D P, JIANG Y F. Analysis and evaluation of nutritional components and functional components of large fruit hawthorn[J]. Light Industry Science and Technology, 2016 (11): 3-4.
- [4] 李璐雨.广西不同产地大果山楂主要营养成分比较分析[J].现代食品,2022,28(11): 185-188.
LI L Y. Comparative analysis of main nutritional components of hawthorn from different producing areas in Guangxi[J]. Modern Food, 2022, 28(11): 185-188.
- [5] 潘莹,林启云,欧贤红,等.大果山楂总黄酮护肝作用的实验研究[J].广西中医学院学报,2004(2): 7-10.
PAN Y, LIN Q Y, OU X H, et al. Experimental study on the hepatoprotective effect of total flavonoids from *Malus domeri* (Bois) Chev. [J]. Journal of Guangxi Traditional Chinese Medical University, 2004(2): 7-10.
- [6] 孙博,霍华珍,蔡爱华,等.不同产地大果山楂总黄酮含量及抗氧化活性[J].广西科学,2020,27(4): 356-361.
SUN B, HUO H Z, CAI A H, et al. Total flavonoids content and antioxidant activity of *Malus doumeri* fruit from different producing areas[J]. Guangxi Sciences, 2020, 27(4): 356-361.
- [7] 温玲蓉.北山楂和大果山楂的活性成分及其抗氧化与抗增殖活性研究[D].广州:华南理工大学,2016: 97-106.
WEN L R. Study on the bioactive chemical constituents and their antioxidative and anti-proliferative activities of *Crataegus pinnatifida* and *Malus doumeri* fruits[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016: 97-106.
- [8] 黄欣欣.大果山楂黄酮类物质的提取及其抗氧化性和降血脂功能研究[D].南宁:广西大学,2015: 35-37.
HUANG X X. Study on the antioxidant activity and hypolipemic effect of *Malus domeri* (Bois) Chev. flavonoid extract[D]. Nanning: Guangxi University, 2015: 35-37.
- [9] 林启云,潘晓春,方敏.广西大果山楂药理作用研究[J].广西中医药,1990(3): 45-47.
LIN Q Y, PAN X C, FANG M. Pharmacological study of Guangxi *Malus domeri* (Bois) Chev. [J]. Guangxi Traditional Chinese Medicine, 1990(3): 45-47.
- [10] THAKUR A, SHARMA R, VAIDYA D, et al. Effect of slice thickness and pretreatments on the quality of dried apple slices (*Golden Delicious*) [J]. Journal of Food Biochemistry, 2024, 2024(1): 1711150.
- [11] 程新峰,周守标,杭华,等.基于 LF-NMR 的香芋微波真空干燥中水分扩散特性研究[J].现代食品科技,2019,35(2): 17-23, 46.
CHENG X F, ZHOU S B, HANG H, et al. Study on water diffusion characteristics of taro slices during microwave vacuum drying based on LF-NMR[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(2): 17-23, 46.
- [12] PU Y Y, ZHAO M, O'DONNELL C, et al. Nondestructive quality evaluation of banana slices during microwave vacuum drying using spectral and imaging techniques[J]. Drying Technology, 2018, 36(13): 1542-1553.
- [13] 劳风华,郭婷,段振华,等.干燥方式对冻融大果山楂片品质的影响[J].食品工业,2020,41(1): 92-96.
LAO F H, GUO T, DUAN Z H, et al. Effect of drying treatment methods on the quality characteristics of freeze-thaw *Malus domeri* (Bois) Chev slices[J]. The Food Industry, 2020, 41(1): 92-96.
- [14] 卢辉,罗源,龚钰雯,等.贺州香芋分段式微波真空干燥工艺及风味研究[J].食品与机械,2024,40(12): 16-24.
LU H, LUO Y, GONG Y W, et al. Segmented microwave vacuum drying process and flavor of Hezhou taro[J]. Food & Machinery, 2024, 40(12): 16-24.
- [15] 谭德馨,唐小闲,张奕涛,等.马蹄脆片微波真空干燥工艺优化及其水分变化[J].食品研究与开发,2024,45(3): 107-115.
TAN D X, TANG X X, ZHANG Y T, et al. Optimization of

- microwave vacuum drying process for water chestnut crisps and its moisture change[J]. Food Research and Development, 2024, 45(3): 107-115.
- [16] 肖敏, 易建勇, 毕金峰, 等. 水苏糖渗透对压差闪蒸联合干燥苹果片品质的影响[J]. 中国食品学报, 2019, 19(8): 138-146.
- XIAO M, YI J Y, BI J F, et al. Influence of osmotic treatment using stachyose on qualities of apple chips dried by hot air coupled with instant controlled pressure drop[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(8): 138-146.
- [17] LAZARIDES H N, KATSANIDIS E, NICKOLAIDIS A. Mass transfer kinetics during osmotic preconcentration aiming at minimal solid uptake[J]. Journal of Food Engineering, 1995, 25(2): 151-166.
- [18] 王俊涛, 滕建文, 韦保耀, 等. 渗透—微波真空干燥对软香蕉干质构调控及贮藏稳定性的影响[J]. 中国调味品, 2020, 45(7): 17-22.
- WANG J T, TENG J W, WEI B Y, et al. Effect of permeation-microwave vacuum drying on texture control and storage stability of soft dried banana[J]. China Condiment, 2020, 45(7): 17-22.
- [19] 陈腊梅, 金鑫, 毕金峰, 等. 超声辅助糖液渗透处理对真空冷冻干燥桃脆片干制品品质及吸湿性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(17): 117-123.
- CHEN L M, JIN X, BI J F, et al. Effect of ultrasonic-assisted sugar osmotic pretreatment on quality and hygroscopicity of vacuum freeze-dried peach chips[J]. Food Science, 2022, 43(17): 117-123.
- [20] 宋璐瑶, 刘东红. 芒果片真空预处理联合超声辅助渗透脱水的传质动力学及品质分析[J]. 现代食品科技, 2021, 37(11): 231-238, 230.
- SONG L Y, LIU D H. Mass transfer kinetics and quality analysis of mango under vacuum pretreated and ultrasound assisted osmotic dehydration[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(11): 231-238, 230.
- [21] 张竞竞, 彭健, 易建勇, 等. 渗透温度对压差闪蒸干燥胡萝卜脆条质构调控作用研究[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(10): 159-165.
- ZHANG J J, PENG J, YI J Y, et al. Study of osmotic temperature on the textural properties of instant controlled pressure drop (DIC) dried carrot chips[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(10): 159-165.
- [22] 郎旭敏, 徐亚元, 肖亚冬, 等. 不同组合干燥方式对胡萝卜脆片品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(2): 493-502.
- LANG X M, XU Y Y, XIAO Y D, et al. Effects of different combined drying methods on the quality of carrot chips[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2021, 37(2): 493-502.
- [23] CUI Z W, LI C Y, SONG C F, et al. Combined microwave-vacuum and freeze drying of carrot and apple chips[J]. Drying Technology, 2008, 26(12): 1 517-1 523.
- [24] 王俊涛, 滕建文, 韦保耀, 等. 不同渗透方式对芒果脱水效率和品质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(1): 149-156.
- WANG J T, TENG J W, WEI B Y, et al. Effects of different osmosis methods on the dehydration efficiency and quality of mango fruits[J]. Food Science, 2021, 42(1): 149-156.
- [25] 赵红伟, 曹彬彬, 张谐天, 等. 不同渗透方式对芒果脱水效率和品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(15): 98-105.
- ZHAO H W, CAO B B, ZHANG X T, et al. Comparison of dehydration efficiency and quality of mango with different osmotic methods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(15): 98-105.
- [26] DEGHANNYA J, GORBANI R, GHANBARZADEH B. Shrinkage of mirabelle plum during hot air drying as influenced by ultrasound-assisted osmotic dehydration[J]. International Journal of Food Properties, 2016, 19(5): 1 093-1 103.
- [27] 张凤娟, 滕建文, 韦保耀, 等. 固态渗透预处理对冻干芒果加工过程减排、资源消耗及产品品质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(3): 112-119.
- ZHANG F J, TENG J W, WEI B Y, et al. Effect of solid-state osmotic pretreatment on emission reduction, resource consumption and product quality in the processing of freeze-dried mango[J]. Food Science, 2023, 44(3): 112-119.
- [28] 宋悦, 金鑫, 毕金峰, 等. 超声辅助渗透处理对热风干燥及真空冷冻干燥黄桃片品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(15): 177-185.
- SONG Y, JIN X, BI J F, et al. Effect of ultrasonic-assisted osmotic dehydration on the quality characteristics of hot air dried and vacuum freeze dried yellow peach chips[J]. Food Science, 2020, 41(15): 177-185.
- [29] 宋一凡, 陈海峰, 袁越锦. 猕猴桃 CO₂-低温高压渗透膨化干燥工艺优化[J]. 食品科学, 2020, 41(4): 229-234.
- SONG Y F, CHEN H F, YUAN Y J. Optimization of CO₂-low temperature high pressure permeation drying process of kiwifruit[J]. Food Science, 2020, 41(4): 229-234.
- [30] 赵亚, 张越翔, 徐燕, 等. 渗透剂预处理对压差膨化香菇脆品质特性的影响[J]. 食品科学技术学报, 2023, 41(5): 153-164.
- ZHAO Y, ZHANG Y X, XU Y, et al. Effect of osmotic agents pretreatment on quality characteristics of *Lentinus edodes* crisps produced by instant controlled pressure drop puffing[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 41(5): 153-164.
- [31] ALLAHDAD Z, NASIRI M, VARIDI M, et al. Effect of sonication on osmotic dehydration and subsequent air-drying of pomegranate arils[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 244: 202-211.
- [32] 常大伟, 任娜, 牛瑶, 等. 预处理对热风—压差膨化干燥香菇脆片品质的影响[J]. 陕西科技大学学报, 2024, 42(2): 62-71.
- CHANG D W, REN N, NIU Y, et al. Effect of pretreatment methods on the quality of shiitake mushroom chips during hot air-explosion puffing drying[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2024, 42(2): 62-71.
- [33] TAMER C, ISCI A, KUTLU N, et al. Effect of drying on porous characteristics of orange peel[J]. International Journal of Food Engineering, 2016, 12(9): 921-928.