

超声辅助不同小分子糖渗透处理后真空冷冻干燥油柑的品质比较

彭进明, 梁贵强, 肖宇燊, 温文俊, 丘苑新, 王琴*, 肖更生*

(仲恺农业工程学院轻工食品学院, 农业农村部岭南特色食品绿色加工与智能制造重点实验室, 广东省岭南特色食品科学与技术重点实验室, 广东广州 510225)

摘要: 该研究评价了超声辅助五种小分子糖渗透处理后冻干油柑的理化特性及体外抗氧化活性。结果表明: 相比对照组, 经超声辅助渗糖处理的油柑水分损失率、固形物增加率升高; 冻干油柑内部孔隙更加致密, 硬度显著提高、脆度基本保持, 复水性下降; 低聚异麦芽糖处理组的吸湿率 (18.25%) 低于对照组 (22.54%); 葡萄糖和麦芽糖处理组的冻干油柑色差 ΔE 小, 分别为 2.73 和 1.71, 即颜色保留率高; 低聚麦芽糖和蔗糖对冻干油柑的风味强化效果较好; 蔗糖、葡萄糖和麦芽糖处理组的冻干油柑可滴定酸含量较低; 与对照组玻璃化转变温度 ($T_g=43.66\text{ }^\circ\text{C}$) 相比, 麦芽糖处理组的 T_g 升高到 $45.53\text{ }^\circ\text{C}$, 其他处理组则显著降低了样品的 T_g ; 除木糖醇处理组 (9.44 mg/g) 外, 不同超声渗糖处理组的总酚保留率均较高; 蔗糖和低聚异麦芽糖渗透处理可有效保持冻干油柑的体外抗氧化能力。总的来说, 超声辅助蔗糖和低聚异麦芽糖渗透处理的冻干油柑品质较好, 其中低聚异麦芽糖可作为一种蔗糖替代品用于开发功能性冻干油柑。

关键词: 油柑; 超声辅助渗糖; 真空冷冻干燥; 品质

文章编号: 1673-9078(2024)04-215-224

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.4.0509

Quality Comparison of Vacuum Freeze-dried *Phyllanthus emblica* after Ultrasound-assisted Osmotic Treatment with Different Small Molecular Sugars

PENG Jinming, LIANG Guiqiang, XIAO Yushen, WEN Wenjun, QIU Yuanxin, WANG Qin*, XIAO Gengsheng*

(Key Laboratory of Green Processing and Intelligent Manufacturing of Lingnan Specialty Food, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Science and Technology of Lingnan Specialty Food, College of Light Industry and Food Science, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China)

Abstract: The physicochemical properties and antioxidant activities of freeze-dried *Phyllanthus emblica* (FDP)

引文格式:

彭进明, 梁贵强, 肖宇燊, 等. 超声辅助不同小分子糖渗透处理后真空冷冻干燥油柑的品质比较[J]. 现代食品科技, 2024, 40(4): 215-224.

PENG Jinming, LIANG Guiqiang, XIAO Yushen, et al. Quality comparison of vacuum freeze-dried *Phyllanthus emblica* after ultrasound-assisted osmotic treatment with different small molecular sugars [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(4): 215-224.

收稿日期: 2023-05-03

基金项目: 广东省科技计划项目 (2022B0202160004); 广东省区域联合基金青年基金项目 (2021A1515110660); 广东省驻镇帮镇扶村科技特派员项目 (KTP20210380)

作者简介: 彭进明 (1992-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 果蔬加工与功能食品, E-mail: pengjmiyz@163.com

通讯作者: 王琴 (1973-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 果蔬加工与功能食品, E-mail: qwang1230@126.com; 共同通讯作者: 肖更生 (1965-), 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 果蔬加工与功能食品, E-mail: gshxiao@aliyun.com

obtained by ultrasound-assisted osmotic treatment with five types of small molecular sugars were evaluated. The results showed that the water loss rate and the solid content rate increased, and the internal pores became denser, with significantly increased hardness and maintained brittleness, but decreased rehydration rate compared with the control group. The hygroscopic rate of the isomalto-oligosaccharide treatment group (18.25%) was lower than that of the control group (22.54%). The ΔE of the glucose and maltose treatment groups was 2.73 and 1.71, respectively, indicating that they exhibited potent color protection. Isomalto-oligosaccharide and sucrose treatment had a flavor-strengthening effect on FDP. The sucrose, glucose, and maltose treatments reduced the titrable acid content of FDP. The glass transition temperature (T_g) of the maltose treatment group increased to 45.53 °C, whereas the T_g of other treatment groups significantly decreased compared with the control group (43.66 °C). Except for the xylitol treatment group (9.44 mg/g), the total phenol retention rate was high in the different treatment groups. The antioxidant capacity of FDP was maintained by sucrose and isomaltose osmosis. In conclusion, the quality and antioxidant activity levels of FDP treated using ultrasound-assisted sucrose and isomalto-oligosaccharide osmosis were higher than those of other treatments. Thus, isomalto-oligosaccharide emerges as a viable substitute for sucrose in the development of functional lyophilized *P. emblica*.

Key words: *Phyllanthus emblica*; ultrasound-assisted osmotic treatment; vacuum freeze-drying; quality

油柑 (*Phyllanthus emblica* L.) 是一种药食同源的岭南特色果品, 风味独特、营养丰富, 深受消费者喜爱和研究者关注。油柑鲜果水分含量高, 采后易被微生物污染, 在自然条件下贮藏易失水、褐变、腐败^[1]。另外, 鲜食油柑时有强烈的酸涩感, 部分消费者难以接受, 这导致产品市场发展受限。因此, 需要寻求适宜的加工技术, 为油柑的现代化生产提供便捷。

真空冷冻干燥 (简称冻干) 是一种既能保留食品色香味和营养成分, 也能延长食品贮藏期, 降低物流成本的新型干燥技术^[2]。在冷冻干燥脆块类食品生产过程中, 若物料初始密度小、含糖量低, 则冻干后产品硬脆度低, 感官品质差^[3]。目前已有许多方法应用于果蔬冷冻干燥预处理, 如超声波、漂烫、渗透脱水、高压脉冲电场和真空冷却等^[4]。其中, 糖渗透处理是提高冷冻干燥效率、改善冻干产品品质的有效途径, 在果蔬干燥中的应用十分广泛。Natalia^[5]发现苹果片在经过蔗糖浸渍后再冻干, 能减少苹果片的冻干时间及褐变反应。研究表明, 糖渗透处理有助于提高草莓和覆盆子冷冻干燥制品的硬度^[6,7]; 糖渗透处理可降低冻干草莓的吸湿性, 且葡萄糖的效果强于蔗糖和淀粉糖浆^[8]。此外, 与传统糖渍相比, 超声波辅助渗糖提高了果蔬水分扩散速率和渗糖效率, 同时有利于果蔬干制品的质地和颜色保持^[9,10]。目前超声波辅助渗糖已作为干燥前处理工艺应用于菠萝、草莓和香蕉, 然而尚未应用于加工油柑冻干制品, 亟待进一步研究。

因此, 本文选取了五种商品化的小分子糖 (蔗

糖、低聚异麦芽糖、葡萄糖、麦芽糖和木糖醇) 对油柑进行超声辅助渗透脱水, 随后真空冷冻干燥, 研究超声辅助糖液渗透处理对冷冻干燥油柑理化和营养特性的影响, 为开发高品质冻干油柑生产提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

“晚九号”油柑采摘于广东省普宁市。选择新鲜油柑, 无机械损伤、病虫害, 形状、大小颜色均一的油柑, 4 °C 保藏。蔗糖、低聚异麦芽糖、葡萄糖、麦芽糖和木糖醇 (食品级), 浙江一诺生物科技有限公司; 福林酚、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 (DPPH)、2,2'-联氨-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸) (ABTS), 上海源叶生物科技有限公司; 甲醇、乙醇、盐酸、氢氧化钠、氯化钠和过硫酸钾 (分析纯), 国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

BSA323S 电子天平, 德国 Sartorius 公司; 超声波发生器, 南京先欧仪器制造有限公司; DK-S26 电热恒温水浴锅, 上海精宏实验设备有限公司; LG-03 真空冷冻干燥机, 北京松源华兴科技发展有限公司; ZG-WYA2S 手持阿贝折光仪, 上海卓光仪器有限公司; CM-700D 色差仪, 日本 Konica 公司; PEN3 电子鼻, 德国 Airsense 公司; TA.XT 2i/50 型质构仪, 英国 SMS 公司; S4800 型扫描电子显微镜, 日本

Hitachi 公司;Q20 差示扫描量热仪,美国 TA 仪器公司。

1.3 试验方法

1.3.1 超声辅助渗糖处理

新鲜油柑清洗后去核备用。蔗糖、低聚异麦芽糖、葡萄糖、麦芽糖和木糖醇用纯水配制成 25 °Brix (阿贝折光仪校正) 的糖液。将去核油柑 (5.10±0.27) g 放入灌有渗透液的自封袋内进行超声渗糖处理,油柑与糖液料液比为 1:10 (m/V), 参照陈腊梅等^[11]的方法设置超声条件 (功率、时间和温度分别为 200 W、90 min 和 40 °C)。渗糖完成后,用纯水冲洗油柑残留糖液,接着擦干表面水分,最后称重记录。对照组为纯水超声处理。

1.3.2 水分损失率和固形物增加率测定

采用水分损失率和固形物增加率来评价超声辅助渗糖的效率,水分损失率和固形物增加率分别按公式 (1) 和 (2)^[12]计算。

$$A = \frac{(m_0' - m_0) - (m_t' - m_t)}{m_0'} \times 100\% \quad (1)$$

$$B = \frac{m_t - m_0}{m_0'} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

A—油柑的水分损失率 (WL), %;

B—油柑的固形物增加率 (SG), %;

m_0' —油柑初始鲜重, g;

m_t' —油柑 t 时刻鲜重, g;

m_0 —油柑初始干重, g;

m_t —油柑 t 时刻干重, g。

1.3.3 真空冷冻干燥

将渗糖处理后的油柑取出,于 -80 °C 冰箱中预冻 12 h,之后将在冷阱温度 -50 °C、真空度 10 Pa 下进行真空冷冻干燥,干燥完成后将样品充氮密封,在 -20 °C 冰箱保存备用。

1.3.4 吸湿率测定

采用康维皿静态称重法测定吸湿率^[13],室温条件下先将饱和氯化钠溶液倒入康维皿外环,密封平衡 20 h 以上,保持皿内相对湿度约 75%,然后将冻干油柑放置于康维皿中心。间隔 0.25、0.5、1、1.5、2、4、8、12、24、72、120 和 168 h 取样称量,吸湿率按公式 (3) 计算。

$$\omega = \frac{m_t - m}{m} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

ω —冻干油柑的吸湿率, g/100 g;

m —冻干油柑的初始质量, g;

m_t — t 时刻冻干油柑的质量, g。

1.3.5 色泽测定

参考 Liu 等^[14]的方法,采用色差仪依 CIELAB 表色系统测定冻干油柑的 L^* 、 a^* 、 b^* ,测定 6 个平行,色差 ΔE 按公式 (4) 计算。

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2} \quad (4)$$

式中:

L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* —分别为对照组冻干油柑的亮度、红绿度和黄蓝度;

L^* 、 a^* 、 b^* —分别表示超声辅助渗糖组冻干油柑的亮度、红绿度和黄蓝度。

1.3.6 风味测定

参考 Song 等^[15]的方法稍作修改,准确称取 1 g 冻干油柑粉末到进样瓶,加盖密封,置于 60 °C 烘箱中加热 1 h。借助配备 10 种不同传感器 (W1C、W3S、W2W、W2S、W1W、W1S、W5C、W6S、W3C 和 W5S) 的 PEN3 电子鼻测定样品风味,用洁净空气清洗系统 1.5 min 后,室温下采集样品 1 min,流速 0.4 L/min。

1.3.7 硬度和脆度测定

参考 Feng 等^[16]的方法略微修改,采用 P/0.25 探头进行阻力测试,设置检测前、检测中、检测后的速率分别为 2、0.5、10 mm/s,触发力和测试距离分别为 10 g 和 10 mm。测试中产生最高峰的数值定义为硬度 (g),断裂距离定义为脆度 (mm)。

1.3.8 微观结构观察

参考 Wang 等^[17]方法稍作修改,切取冻干油柑断面进行微观形貌分析,将样品粘在样品台的导电胶上,喷金处理 120 s,在加速电压 15.0 kV,放大倍率为 50 倍的扫描电子显微镜下成像观察。

1.3.9 复水比测定

参考杨慧珍等^[18]的方法的方法略微修改,取冻干油柑 (约 0.5 g) 置于 500 mL 烧杯中,加入 300 mL 纯水,25 °C 恒温水浴锅中维持 20 min,用滤纸吸干样品表面水分,复水比按公式 (5) 计算。

$$C = \frac{m_t}{m_0} \quad (5)$$

式中:

C—冻干油柑的复水比, g/g;

m_1 —复水后冻干油柑的质量, g;

m_0 —复水前冻干油柑样的质量, g。

1.3.10 可滴定酸含量测定

冻干油柑中可滴定酸含量测定参考 GB 12456-2021《食品安全国家标准食品中总酸的测定》的方法。

1.3.11 玻璃化转变温度测定

参考 Zhang 等^[19]方法, 借助差示扫描量热仪测定玻璃化转变温度, 称取约 10 mg 冻干油柑粉末置于铝坩锅中密封, 在 25 °C 下测定样品, 以空坩锅作参照。扫描程序: 升降温速率为 10 °C/min, 先从 25 °C 冷却至 -80 °C, 平衡 2 min, 再从 -80 °C 升温到 100 °C, 下平衡 2 min。采用仪器自带软件分析得到玻璃化转变温度范围内的中间点, 并以此作为 T_g 。

1.3.12 总酚含量测定

采用 Folin-Ciocalteu 法测定冻干油柑中的总酚含量^[20]。称取 1 g 冻干油柑粉末, 用 60% (V/V) 甲醇溶液定容, 超声提取 30 min, 抽滤、浓缩后定容至 15 mL。待样液离心 (12 000 r/min, 15 min) 后, 取 1 mL 上清液与 1 mL Folin-Ciocalteu 试剂混合, 5 min 后加入 10 mL 15% (m/V) 的 Na_2CO_3 溶液, 定容至 15 mL, 混合后于 45 °C 避光反应 1 h, 酶标仪记录 778 nm 处的吸光度。根据没食子酸标准曲线 ($y=2.3545x-0.0359$, $R^2=0.9991$) 计算总酚含量。

1.3.13 体外抗氧化活性分析

参考 Peng 等^[21]方法测定 DPPH 和 ABTS^+ 自由基清除能力。DPPH 自由基清除率测定: 将 1.3.12 中的样品溶液适当稀释, 取 5 μL 与 DPPH 溶液 (195 μL , 60 $\mu\text{mol/L}$) 于 96 孔板中混合, 暗处静置 30 min 后, 于 515 nm 波长处测定吸光度。 ABTS^+ 自由基清除率测定: 取 10 μL 稀释样品和 190 μL ABTS 工作液于 96 孔板中混合, 暗处静置 10 min 后, 于 734 nm 波长处测定吸光度。DPPH/ ABTS^+ 自由基清除率按式 (6) 计算。

$$X = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中:

X —DPPH/ ABTS^+ 自由基清除率;

A_0 —DPPH/ ABTS 溶液吸光值;

A_1 —样品溶液吸光值。

参考 Zhang 等^[22]的方法测定 Fe^{3+} 还原能力。配制 FRAP 试剂, 取 10 μL 稀释样品以及 30 μL 去离子水, 加入 FRAP 试剂 (150 μL) 放于 96 孔板中,

在酶标仪中加热至 37 °C, 于 593 nm 波长处测定吸光度。

1.4 数据统计与分析

采用 GraphPad Prism 5.1 软件绘图, 借助 SPSS 20.0 软件进行数据显著性分析, 运用 Tukey 法进行多重比较, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与讨论

2.1 超声辅助不同小分子糖渗透处理对鲜油柑水分损失率和固形物增加率的影响

由表 1 可知, 对照组的水分损失率 (WL=-3.27%) 和固形物增加率 (SG=-4.63%) 均为负值, 这可能是由于超声致使油柑细胞破裂、出现孔隙, 随后发生内部自由水截留和外界超纯水渗入; 超声处理下传质速率加快, 油柑可溶性固形物流失、含量下降^[23]。相比对照组, 所有渗糖组的 WL 和 SG 均显著 ($P < 0.05$) 提高。其中, 葡萄糖和木糖醇渗透组 WL (葡萄糖, 28.46%; 木糖醇, 27.39%)、固形物增加率 (葡萄糖, 5.99%; 木糖醇, 6.13%) 最大, Nirmali 等^[24]同样发现超声辅助葡萄糖和果糖处理的杨桃片 WL 和 SG 显著大于蔗糖处理组, 这可能因为它们的分子量小, 同浓度糖溶液的渗透压大。另外, 不同渗糖组的油柑 WL 都远大于 SG, 这与超声波辅助蔗糖渗透木瓜和香蕉^[25,26]的结果类似, 这是由于水分子比糖分子小, 水分子运动更快、传质速率更高^[27]。然而, 由于渗糖过程十分缓慢, 超声辅助下也难以在短时间内实现平衡, 因此后续研究应考虑糖液黏度等因素对渗透过程的影响。

表 1 超声辅助渗糖处理对冻干油柑水分损失率和固形物增加率的影响

Table 1 Effects of ultrasound-assisted sugar osmotic treatment on water loss rate and solid increase rate of freeze-dried

<i>Phyllanthus emblica</i>		
组别	水分损失率/%	固形物增加率/%
对照	-3.27 ± 0.01 ^d	-4.63 ± 0.02 ^d
蔗糖	19.37 ± 0.65 ^b	4.42 ± 0.18 ^b
低聚异麦芽糖	11.51 ± 0.63 ^c	1.45 ± 0.04 ^c
葡萄糖	28.46 ± 0.79 ^a	5.99 ± 0.16 ^a
麦芽糖	12.05 ± 1.14 ^c	1.51 ± 0.06 ^c
木糖醇	27.39 ± 1.30 ^a	6.13 ± 0.18 ^a

注: 同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ($P < 0.05$), 下表同。

2.2 超声辅助不同小分子糖渗透处理对冻干油柑的吸湿率的影响

如图1所示,在前24 h内,木糖醇的吸湿速度最快,低聚异麦芽糖的吸湿速度最慢。对照组和渗糖组的吸湿率都在72 h后基本稳定,168 h时对照组、超声辅助蔗糖、低聚异麦芽糖、葡萄糖、麦芽糖和木糖醇渗透处理组的冻干油柑吸湿率分别为22.54%、23.19%、18.25%、28.54%、21.66%和28.04%。由此可见,葡萄糖和木糖醇渗透组的吸湿率较高,低聚异麦芽糖渗透组的吸湿率较低,蔗糖和麦芽糖渗透组对吸湿率的影响较小,这表明超声辅助葡萄糖和木糖醇渗透处理会加剧冻干油柑在贮藏过程中吸湿,超声辅助低聚异麦芽糖渗透处理能抑制冻干油柑的吸湿作用,抑制率为19.22%。然而,陈腊梅等^[1]发现超声辅助蔗糖、麦芽糖、葡萄糖和低聚异麦芽糖渗透处理均能抑制冻干桃脆片的吸湿作用,这说明水果冻干制品的吸湿率不仅受小分子糖的影响,还受物料种类影响。综上所述,冻干油柑生产可选择低聚异麦芽糖,以降低产品的吸湿性,提高其储藏稳定性。

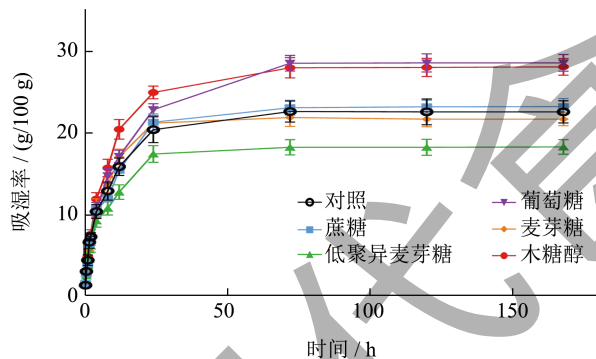


图1 超声辅助渗糖处理对冻干油柑吸湿率的影响

Fig.1 Effects of ultrasound-assisted sugar osmotic treatment on hygroscopicity of freeze-dried *Phyllanthus emblica*

2.3 超声辅助不同小分子糖渗透处理对冻干油柑色泽的影响

由表2可知,与未渗透处理组相比,不同糖超声辅助渗透处理对冻干油柑的色泽有显著影响; L^* 代表亮度,相比对照组(51.19),低聚异麦芽糖和木糖醇渗透处理后冻干油柑的 L^* 值显著($P<0.05$)提高(低聚异麦芽糖,61.43;木糖醇,66.16),即亮度显著提高,而其他糖处理组对冻干油柑 L^* 值无显著($P>0.05$)影响;当 a^* 值为正数代表偏红,负数代表偏绿,不同种类糖渗透处理均显著($P<0.05$)降低了冻干油柑的 a^* 值,这说明超声

渗糖处理后冻干油柑更接近绿色。当 b^* 值为正数代表偏黄,负数代表偏蓝,相比对照组(15.65),蔗糖和低聚异麦芽糖处理后冻干油柑的 b^* 值显著($P<0.05$)提高(蔗糖,17.94;低聚异麦芽糖,19.09),即更接近黄色,其他糖处理组的 b^* 值无显著($P>0.05$)变化。 ΔE 越小则表明冻干油柑颜色与对照组颜色越接近,葡萄糖($\Delta E=2.73$)和麦芽糖($\Delta E=1.71$)渗透处理的冻干油柑与对照组颜色相近,蔗糖渗透组 ΔE 为6.86,另外两种小分子糖渗透处理对产品色泽的不利影响较大。Abdul等^[28]比较超声辅助不同种类糖渗透处理后烘干李子的色差,结果发现葡萄糖渗透组的色差($\Delta E=4.48$)显著小于蔗糖渗透组($\Delta E=5.64$),这与本文发现的结果类似。因此,在五种小分子糖中,葡萄糖和麦芽糖渗透处理对冻干油柑有较好的色泽保持效果。

表2 超声辅助渗糖处理对冻干油柑色泽的影响

Table 2 Effects of ultrasound-assisted sugar osmotic treatment on color of freeze-dried *Phyllanthus emblica*

组别	L^*	a^*	b^*	ΔE
对照	51.19 ± 1.49 ^{bc}	2.75 ± 0.26 ^a	15.65 ± 0.45 ^b	
蔗糖	57.24 ± 2.70 ^b	0.46 ± 0.14 ^c	17.94 ± 0.60 ^a	6.86
低聚异麦芽糖	61.43 ± 4.20 ^{ab}	-1.39 ± 0.23 ^d	19.09 ± 0.59 ^a	11.57
葡萄糖	52.94 ± 3.52 ^{bc}	0.67 ± 0.06 ^c	15.86 ± 0.48 ^b	2.73
麦芽糖	50.37 ± 2.29 ^{bc}	1.26 ± 0.22 ^b	15.48 ± 0.84 ^b	1.71
木糖醇	66.16 ± 1.74 ^a	-1.46 ± 0.11 ^d	16.22 ± 0.57 ^b	15.56

2.4 超声辅助不同小分子糖渗透处理对冻干油柑风味的影响

感受器W1C、W3S、W2W、W2S、W1W、W1S、W5C、W6S、W3C和W5S分别对芳香成分、烷烃、有机硫化物、乙醇、硫化物、甲烷、烷烃芳香成分、氢气、氨水/芳香成分以及氮氧化合物敏感^[29]。如图2所示,对照组和不同种类糖渗透组的冻干油柑风味成分的组成和分布基本一致,其中排列前五的感受器响应值强弱顺序为W1S>W2W>W1W>W5S>W2S,即风味主成分为甲烷、有机硫化物、硫化物、氮氧化合物和乙醇。不同种类糖渗透处理后的冻干油柑风味强弱顺序为低聚麦芽糖=蔗糖>葡萄糖=麦芽糖>木糖醇>对照。相比对照组(W1S=3.77),超声辅助蔗糖、低聚异麦芽糖、葡萄糖、麦芽糖和木糖醇渗透处理组对甲烷的响应值分别为5.00、5.01、4.34、4.39和3.68。然而,李卓豪等^[30]研究超声辅助不同糖渗透对冻干草莓风味

的影响时发现, 相比对照组, 蔗糖处理组风味基本不变, 低聚异麦芽糖处理组风味减弱, 这说明同一小分子糖对不同冻干水果风味形成的作用不同。综上, 超声辅助渗糖和冷冻干燥过程可使油柑风味更加浓郁, 低聚麦芽糖和蔗糖风味强化效果较好, 而木糖醇渗透的风味强化效果甚微。

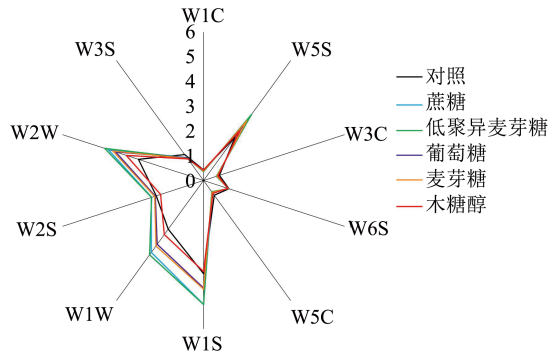


图2 超声辅助渗糖处理对冻干油柑风味的影响

Fig.2 Effects of ultrasound-assisted sugar osmotic treatment on flavor of freeze-dried *Phyllanthus emblica*

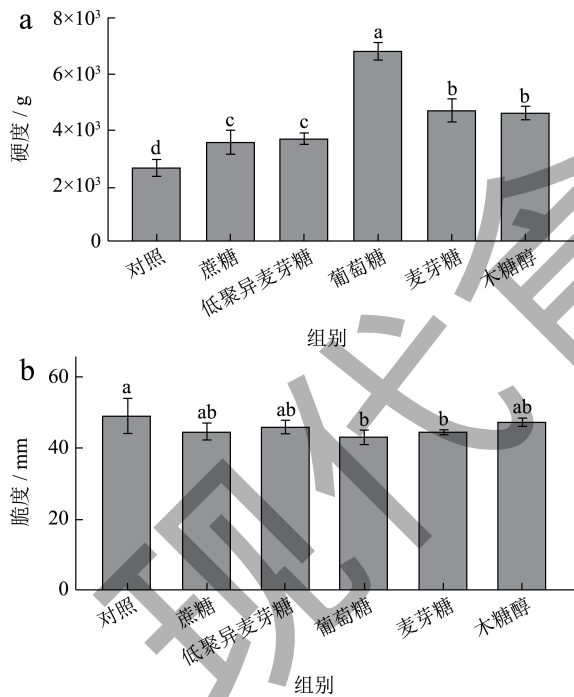


图3 超声辅助渗糖处理对冻干油柑质构特性的影响

Fig.3 Effects of ultrasound-assisted sugar osmotic treatment on the texture properties of freeze-dried *Phyllanthus emblica*

注: (a) 为超声辅助渗糖处理对冻干油柑硬度的影响, (b) 为超声辅助渗糖处理对冻干油柑脆度的影响, 不同字母代表具有显著差异 ($P < 0.05$)。

2.5 超声辅助不同小分子糖渗透处理对冻干油柑质构特性的影响

超声辅助不同种类糖渗透处理对真空冷冻干

燥油柑硬度和脆度的影响如图3所示。相比对照组 (2 663.67 g), 所有糖渗透处理组的冻干油柑硬度均显著 ($P < 0.05$) 升高。张莉会等^[31]也发现经过超声辅助蔗糖渗透处理的冻干草莓硬度远高于对照样品。硬度的提高可能是由于油柑失水收缩, 孔壁厚度增加, 且小分子糖在氢键的驱使下与果胶交联^[32]。其中超声辅助葡萄糖渗透处理的冻干油柑硬度最高 (6 814.08 g), 其次是麦芽糖 (4 744.29 g) 和木糖醇 (4 613.47 g) 处理组。相比对照组, 葡萄糖和麦芽糖渗透处理组的冻干油柑脆度显著 ($P < 0.05$) 降低, 分别降低了 11.41% 和 10.27%, 其他处理组的冻干油柑脆度均无显著 ($P > 0.05$) 变化, 这说明超声辅助渗糖和冷冻干燥过程可基本保持冻干油柑的脆性。

2.6 超声辅助不同小分子糖渗透处理对冻干油柑微观结构的影响

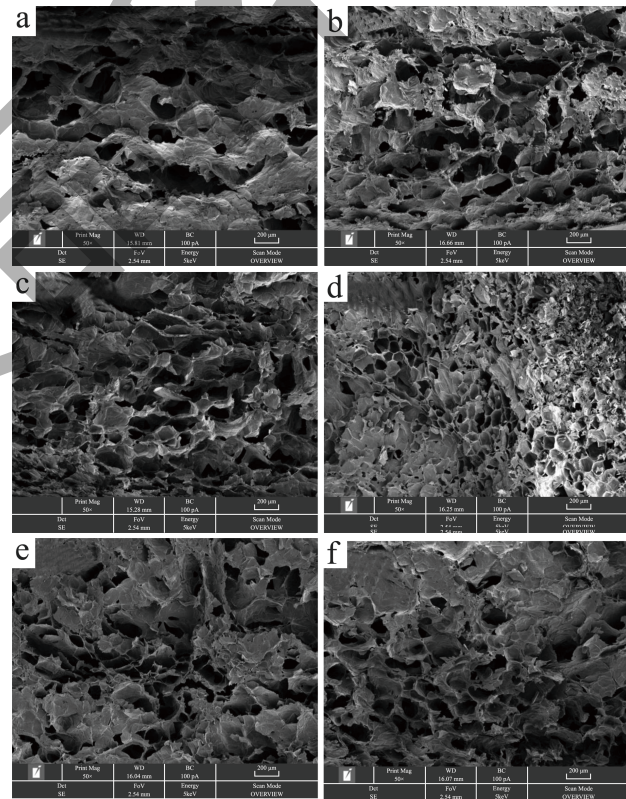


图4 超声辅助渗糖处理对冻干油柑微观结构的影响

Fig.4 Effects of ultrasound-assisted sugar osmotic treatment on micro-structure of freeze-dried *Phyllanthus emblica*

注: (a) 对照; (b) 蔗糖; (c) 低聚麦芽糖; (d) 葡萄糖; (e) 麦芽糖; (f) 木糖醇。

为进一步解释超声辅助渗糖影响冻干油柑硬度的作用机制, 本研究借助扫描电镜分析了超声辅助渗糖对冻干油柑微观结构的影响。如图4所示, 相比对照组, 经超声辅助不同种类糖渗透处理的冻

干油柑微观形貌均出现不同程度的破坏。超声辅助渗糖后样品孔隙更多、组织结构更紧密，因此所有处理组的冻干油柑硬度提高；其中葡萄糖处理组的冻干油柑孔隙最小、密度最大，对应的硬度也最大，这与陈腊梅等^[11]研究冻干桃脆片时发现的规律一致。超声辅助葡萄糖渗透组微观结构十分不均匀，且孔隙较小，这与 Ma 等^[33]观察到现象类似，超声辅助葡萄糖渗透后的冻干苹果片微观结构崩溃、破裂，这可能是其脆度降低的原因之一。

2.7 超声辅助不同小分子糖渗透处理对冻干油柑复水比的影响

复水性是指果蔬干制品后吸水恢复到原来新鲜程度的能力^[34]。如表 3 所示，相比对照组，经超声辅助不同种类糖渗透处理的冻干油柑复水比下降，且不同种类糖渗透处理的冻干油柑复水比无显著性 ($P>0.05$) 差异。Ciurzyńska 等^[35]同样发现相比对照组，蔗糖和葡萄糖渗透脱水的冻干草莓再水化能力降低。对照组的高复水比 (6.03 g/g) 可能是由于新鲜油柑经超声空化作用后内部形成了更多孔隙，冷冻油柑经真空冷冻干燥后冰晶升华，孔隙进一步增多，其吸水能力增强^[36]。而经超声辅助渗糖处理的冻干油柑复水比下降，这可从两个方面来解释，一方面是渗糖干燥后冻干油柑表面存在残留糖液，这将阻碍水分进入组织内部，同时超声辅助渗糖处理后冻干油柑硬度大，水分迁移的阻力大；另一方面，超声辅助渗糖引起冻干油柑内部结构塌陷、孔隙变小，这些都会干扰水分进入样品^[11]。

2.8 超声辅助不同小分子糖渗透处理对冻干油柑可滴定酸的影响

有机酸是水果的重要风味物质，也是评价其品质的主要参考因素。由表 3 可知，相比对照组 (0.34 mg/g)，经蔗糖、葡萄糖和麦芽糖渗透处理后冻干油柑可滴定酸含量显著 ($P<0.05$) 降低，它们的可滴定酸含量分别为 0.21、0.28 和 0.30 mg/g，Paulina 等^[37]发现发现蔗糖渗透处理后的苹果、樱桃和覆盆子可滴定酸含量均低于对照组；经低聚异麦芽糖渗透处理的冻干油柑可滴定酸含量显著 ($P<0.05$) 升高，木糖醇渗透处理对冻干油柑可滴定酸含量无显著 ($P>0.05$) 影响。由于油柑具有强烈酸涩感，故开发冻干油柑时可通过超声渗透蔗糖、葡萄糖或麦芽糖来降低酸度，这有助于提升产品的口感。

2.9 超声辅助不同小分子糖渗透处理对冻干油柑玻璃化转变温度的影响

玻璃化转变温度 (T_g) 是预测干制品的储藏稳定性的重要参数，当干制品低于 T_g 下贮藏时，可使其保持较长时间的稳定状态^[38]。超声辅助渗透处理使得小分子糖进入冻干油柑内部，改变了基质内成分的组成，这将影响样品的 T_g ^[39]。由表 3 可知，相比对照组 (43.66 °C)，不同种类糖渗透处理对冻干油柑 T_g 影响显著，其中超声辅助麦芽糖渗透脱水处理的冻干油柑 T_g 显著 ($P<0.05$) 升高了 1.87 °C，而其他种类糖渗透处理组的冻干油柑 T_g 显著 ($P<0.05$) 降低，陈腊梅等^[11]同样发现超声辅助麦芽糖渗透的冻干桃脆片 T_g 最高，这可能是麦芽糖的分子量较其他糖大，结构坚固、不易变形，进而使冻干油柑的 T_g 升高。经过超声辅助木糖醇渗透处理的样品 T_g 最低，与对照组相比降低了 10.83 °C，这是因为木糖醇属于小分子糖且具有最低的 T_g 。然而，混合体系的 T_g 都受到每个组分占比和丰度的影响^[40]，冻干油柑除了渗入的小分子糖外，其自身还含有其他糖类，因此后续还需进一步研究冻干油柑自身糖组成对 T_g 的影响。

表 3 超声辅助渗糖处理对冻干油柑复水比、可滴定酸含量及玻璃化转变温度的影响

Table 3 Effects of ultrasound-assisted sugar osmotic treatment on rehydration ratio, titratable acid and glass transition temperature of freeze-dried *Phyllanthus emblica*

组别	复水比/(g/g)	可滴定酸/(mg/g)	$T_g/^\circ\text{C}$
对照	6.03 ± 0.34 ^a	0.34 ± 0.02 ^b	43.66 ± 0.29 ^b
蔗糖	4.18 ± 0.55 ^b	0.21 ± 0.01 ^d	41.45 ± 0.22 ^d
低聚异麦芽糖	4.76 ± 0.48 ^b	0.43 ± 0.03 ^a	40.71 ± 0.12 ^d
葡萄糖	4.21 ± 0.44 ^b	0.28 ± 0.02 ^c	42.28 ± 0.28 ^c
麦芽糖	4.50 ± 0.40 ^b	0.30 ± 0.01 ^c	45.53 ± 0.33 ^a
木糖醇	3.78 ± 0.32 ^b	0.35 ± 0.02 ^b	32.83 ± 0.41 ^e

2.10 超声辅助不同小分子糖渗透处理对冻干油柑总酚含量以及抗氧化能力的影响

如图 5a 所示，相比对照组冻干油柑的总酚含量 (11.57 mg/g)，除木糖醇处理组总酚含量 (9.44 mg/g) 显著 ($P<0.05$) 降低以外，其他种类糖渗透处理对冻干油柑总酚含量均无显著 ($P>0.05$) 影响。Hamza 等^[41]发现相比对照组，超声辅助蔗糖渗透后的烘干柿子片总酚含量显著 ($P>0.05$) 降低，可能的原因是烘干导致多酚损失。这说明超声辅助渗糖和冷冻干燥过程可较好地保留冻干油柑的总酚。

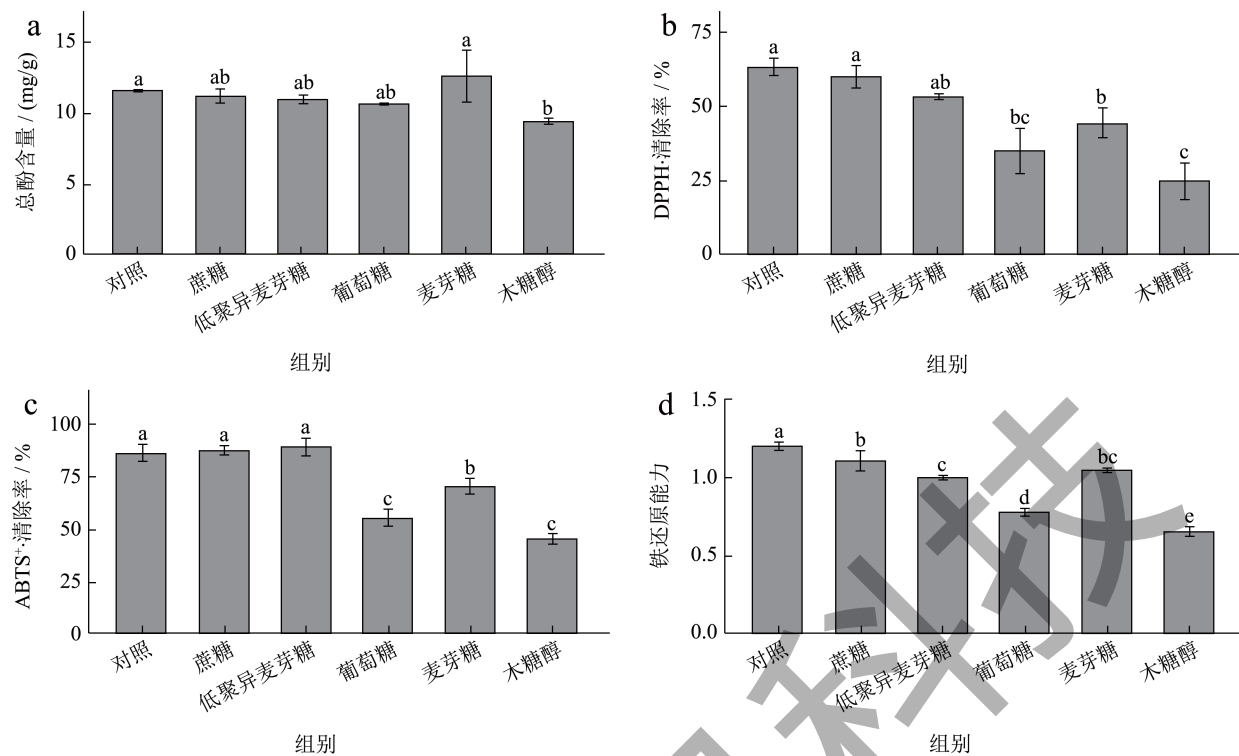


图5 超声辅助渗糖处理对冻干油柑总酚含量以及抗氧化能力的影响

Fig.5 Effects of ultrasound-assisted sugar osmotic treatment on total phenol content and antioxidant capacities of freeze-dried *Phyllanthus emblica*

注: 不同字母代表具有显著差异 ($P < 0.05$)。

由图 5b 可知, 相比对照组 (63.35%), 蔗糖和低聚异麦芽糖渗透处理对冻干油柑的 DPPH 自由基清除率无显著 ($P > 0.05$) 影响, 清除率分别为 60.08% 和 53.28%; 葡萄糖、麦芽糖和木糖醇渗透处理的冻干油柑 DPPH 自由基抑制率显著 ($P < 0.05$) 降低, 抑制率分别为 35.17%、44.47% 和 25.23%。由图 5c 可知, 相比对照组 (86.53%), 蔗糖和低聚异麦芽糖处理对冻干油柑的 ABTS⁺ 自由基清除率无显著 ($P > 0.05$) 影响, 清除率分别为 87.23% 和 89.12%; 葡萄糖、麦芽糖和木糖醇处理的冻干油柑 DPPH 自由基抑制率显著 ($P < 0.05$) 降低, 抑制率分别为 54.95%、70.05% 和 45.82%。由图 5d 可知, 相比对照组, 所有糖渗透处理组的冻干油柑铁还原能力均显著 ($P < 0.05$) 降低, 其中蔗糖、麦芽糖和低聚异麦芽糖的铁还原能力较强。尽管葡萄糖和木糖醇等溶质具有还原性, 可能会对油柑多酚具有一定的保护作用, 然而不同种类小分子糖的渗透率存在差异^[33], 且它们对油柑细胞的破坏程度不同。李卓豪等^[30]同样发现相比其他小分子糖, 蔗糖和低聚异麦芽糖渗透处理的冻干草莓抗氧化能力较强, 由此可见, 蔗糖和低聚异麦芽糖渗透

处理可较好地保持冻干油柑的抗氧化活性。

3 结论

超声辅助五种糖液渗透处理均可显著提高冻干油柑的水分损失率和固形物增加率。低聚异麦芽糖处理组的吸湿率 (18.25%) 低于对照组 (22.54%)。葡萄糖和麦芽糖处理的冻干油柑颜色保留率高 (ΔE 分别为 2.73 和 1.71), 其他糖渗透处理后产品色泽保留率低。超声辅助渗糖联合真空冷冻干燥可使油柑风味更加浓郁, 不同种类糖渗透处理后的冻干油柑风味强弱顺序为低聚麦芽糖 = 蔗糖 > 葡萄糖 = 麦芽糖 > 木糖醇 > 对照。相比对照组 (2 663.67 g), 超声辅助五种糖液渗透处理后冻干油柑的硬度均变大, 其中葡萄糖处理组硬度最大 (6 814.08 g), 这可能是超声辅助渗糖后油柑孔隙分布更加紧密的结果; 另外, 相比对照组, 葡萄糖和麦芽糖渗透处理组的冻干油柑脆度显著 ($P < 0.05$) 降低, 分别降低了 11.41% 和 10.27%, 其他处理组的冻干油柑脆度均无显著 ($P > 0.05$) 变化。经超声辅助渗糖处理后的冻干油柑复水比均下降; 超声辅助蔗糖、葡萄糖和麦芽糖渗透处理可降低冻干油柑的可滴定酸含

量；与对照组玻璃化转变温度 ($T_g=43.66\text{ }^\circ\text{C}$) 相比，麦芽糖处理组的 T_g 升高到 $45.53\text{ }^\circ\text{C}$ ，其他处理组则显著降低了样品的 T_g ；除木糖醇处理组 (9.44 mg/g) 外，不同超声渗糖处理组的总酚保留率均较高；蔗糖和低聚异麦芽糖渗透处理可较好的保持冻干油柑的体外抗氧化能力。以上结果表明超声辅助蔗糖和低聚异麦芽糖渗透处理的冻干油柑品质较好，其中低聚异麦芽糖可作为一种蔗糖替代品用于开发功能性冻干油柑。

参考文献

- [1] HUANG W Y, HUANG D, QIN Y T, et al. Ultrasound-assisted hot air drying characteristics of *Phyllanthus emblica* [J]. Journal of Food Process Engineering, 2023, 46(4): e14286.
- [2] DUAN X, YANG X T, REN G Y, et al. Technical aspects in freeze-drying of foods [J]. Drying Technology An International Journal, 2016, 34(11): 1271-1285.
- [3] RAMYA V, JAIN N K. A review on osmotic dehydration of fruits and vegetables: an integrated approach [J]. Journal of Food Process Engineering, 2017, 40(3): e12440.
- [4] DENG L Z, ARUN S M, ZHANG Q, et al. Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: Effects on drying characteristics and quality attributes-a comprehensive review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(9): 1408-1432.
- [5] NATALIA S, DANIELA M S, CAROLINA S. Physicochemical and mechanical properties of apple disks subjected to osmotic dehydration and different drying methods [J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5: 1790-1802.
- [6] VALENTINA P, IAN N. Influence of osmotic dehydration pre-treatment on oven drying and freeze drying performance [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 80: 401-408.
- [7] PAULA S, DANIELA S, CAROLINA S. Physical and mechanical properties of raspberries subjected to osmotic dehydration and further dehydration by air-and freeze-drying [J]. Food and Bioproducts Processing, 2016, 100: 156-171.
- [8] CIURZYNSKA A, LENART A. Rehydration and sorption properties of osmotically pretreated freeze-dried strawberries [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 97(2): 267-274.
- [9] RASHMI P, KSHIROD K D. Mass transfer modelling in ultrasound assisted osmotic dehydration of kiwi fruit [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 64(1): 102407.
- [10] MALGORZATA N, MALGORZATA W. Effect of ultrasound treatment on microstructure, colour and carotenoid content in fresh and dried carrot tissue [J]. Applied Acoustics, 2016, 103: 163-171.
- [11] 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.
- [12] ZHAO J H, LIU F, PANG X L, et al. Effects of different osmo-dehydrofreezing treatments on the volatile compounds, phenolic compounds and physicochemical properties in mango (*Mangifera indica* L.) [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2016, 51(6): 1441-1448.
- [13] LUO Z C, ZHOU L G, ZHU Y W, et al. Effects of different drying methods on the physicochemical property and edible quality of fermented *Pyracantha fortuneana* fruit powder [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(2): 773-784.
- [14] LIU Z L, XIE L, MAGDALENA Z, et al. Improvement of drying efficiency and quality attributes of blueberries using innovative far-infrared radiation heating assisted pulsed vacuum drying (FIR-PVD) [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2022, 77: 102948.
- [15] SONG F H, XIANG H, LI Z F, et al. Monitoring the baking quality of Tieguanyin via electronic nose combined with GC-MS [J]. Food Research International, 2023, 165: 112513.
- [16] FENG L, XU Y Y, XIAO Y D, et al. Effects of pre-drying treatments combined with explosion puffing drying on the physicochemical properties, antioxidant activities and flavor characteristics of apples [J]. Food Chemistry, 2021, 338: 128015.
- [17] WANG H, LI X Y, WANG J, et al. Effects of postharvest ripening on water status and distribution, drying characteristics, volatile profiles, phytochemical contents, antioxidant capacity and microstructure of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) [J]. Food Control, 2022, 139: 109062.
- [18] 杨慧珍, 肖亚冬, 王娟, 等. 花椰菜超声波预处理工艺优化及干燥过程中水分状态分析 [J]. 现代食品科技, 2022, 38(5): 199-208.
- [19] ZHANG Y, ZHAO J H, DING Y, et al. Changes in the vitamin C content of mango with water state and ice crystals under state/phase transitions during frozen storage [J]. Journal of Food Engineering, 2018, 222: 49-53.
- [20] PENG J M, WEN W J, LIANG G Q, et al. *Camellia oleifera* shells polyphenols inhibit advanced glycation end-products (AGEs) formation and AGEs-induced inflammatory response in RAW264.7 macrophages [J]. Industrial Crops and Products, 2023, 197: 116589.
- [21] PENG J M, JIA Y Y, DU X, et al. Study of physicochemical stability of anthocyanin extracts from black peanut skin

- and their digestion enzyme and adipogenesis inhibitory activities [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 107: 107-116.
- [22] ZHANG M, MA X M, XIAO Z, et al. Polyphenols in twenty cultivars of blue honeysuckle (*Lonicera caerulea* L.): profiling, antioxidant capacity, and α -amylase inhibitory activity [J]. *Food Chemistry*, 2023, 421: 136148.
- [23] JIANG J H, ZHANG M, SAKAMON D, et al. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatments on drying and quality characteristics of pulsed fluidized bed microwave freeze-dried strawberries [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 145: 111300.
- [24] NIRMALI B, LAXMIKANT S B. Effect of ultrasound and centrifugal force on carambola (*Averrhoa carambola* L.) slices during osmotic dehydration [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 34: 37-44.
- [25] PATRICIA M A, MARIANA da R A, SOFIA S B O, et al. Improvement of water transport and carotenoid retention during drying of papaya by applying ultrasonic osmotic pretreatment [J]. *Food Engineering Reviews*, 2015, 7(2): 185-192.
- [26] FABIANO A N F, SUELI R. Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: dehydration of banana [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 82(2): 261-267.
- [27] MANDALA I G, ANAGNOSTARAS E F, OIKONOMOU C K. Influence of osmotic dehydration conditions on apple air-drying kinetics and their quality characteristics [J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 69(3): 307-316.
- [28] ABDUL R, ZENG X A, ANKITA K, et al. Influence of ultrasound-assisted osmotic dehydration on texture, bioactive compounds and metabolites analysis of plum [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 58: 104643.
- [29] SHI J, NIAN Y Q, DA D D, et al. Characterization of flavor volatile compounds in sauce spareribs by gas chromatography-mass spectrometry and electronic nose [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 124: 109182.
- [30] 李卓豪, 毕金峰, 易建勇, 等. 不同小分子糖渗透草莓的传质动力学及对真空冷冻干燥草莓品质的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(17): 95-104.
- [31] 张莉会, 廖李, 汪超, 等. 超声和渗透预处理对干燥草莓片品质及抗氧化活性影响[J]. *现代食品科技*, 2018, 34(12): 196-203.
- [32] MARILU A S E, MARIA del M C, NURIA M N. Use of different biopolymers as carriers for purposes of obtaining a freeze-dried orange snack [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 127: 109415.
- [33] MA Y C, YI J Y, BI J F, et al. Understanding of osmotic dehydration on mass transfer and physical properties of freeze-dried apple slices: a comparative study of five saccharides osmotic agents [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2022, 46(3): e16328.
- [34] CINTHIA R, MELIZA L R, ALBERTO C M, et al. Ultrasound pre-treatment enhances the carrot drying and rehydration [J]. *Food Research International*, 2016, 89: 701-708.
- [35] CIURZYNSKA A, LENART A. Rehydration and sorption properties of osmotically pretreated freeze-dried strawberries [J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 97(2): 267-274.
- [36] ZHOU C S, FENG Y B, ZHANG L, et al. Rehydration characteristics of vacuum freeze-and hot air-dried garlic slices [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 143: 111158.
- [37] PAULINA N, ANETA W, KRZYSZTOF L, et al. Chemical composition, antioxidant capacity, and sensory quality of dried sour cherry fruits pre-dehydrated in fruit concentrates [J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2015, 8: 2076-2095.
- [38] PRAVEEN K S, BALUNKESWAR N, G PETER van W. 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.
- [39] XIN Y, ZHANG M, BENU A. Effect of trehalose and ultrasound-assisted osmotic dehydration on the state of water and glass transition temperature of broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *botrytis* L.) [J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 119(3): 640-647.
- [40] SWATI M, ZHU Z W, SUN D W. Glass transitions as affected by food compositions and by conventional and novel freezing technologies: a review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 94: 1-11.
- [41] HAMZA B, AHSEN R E, EMINE S, et al. Influence of ultrasound and osmotic dehydration pretreatments on drying and quality properties of persimmon fruit [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 54: 135-141.