

周梦琪, 陈昌琳, 吕远平. 超声渗糖工艺对猕猴桃冻干时间的影响及响应面优化 [J]. 福建农业学报, 2022, 37 (7): 929–937.
ZHOU M Q, CHEN C L, LYU Y P. Effect of Ultrasonic-assisted Sugar Osmotic Pretreatment on Dehydration Time and Optimization of Freeze-drying Kiwifruits [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 37 (7): 929–937.

超声渗糖工艺对猕猴桃冻干时间的影响及 响应面优化

周梦琪¹, 陈昌琳², 吕远平^{1,3*}

(1. 四川大学轻工科学与工程学院, 四川 成都 610065; 2. 四川省农业科学院经济作物育种栽培研究所, 四川 成都 610300; 3. 四川大学健康食品科学评价体系研究中心, 四川 成都 610065)

摘要:【目的】优化猕猴桃渗糖工艺, 缩短猕猴桃冷冻干燥时间, 提高冻干猕猴桃的品质。【方法】采用单因素试验, 确定理想的糖液质量分数及超声作用时间、温度和功率范围, 并通过响应面法优化冻干猕猴桃的超声渗糖工艺。【结果】单因素试验表明, 猕猴桃的干燥时间随着超声作用温度的增加而延长, 40 ℃ 以上的温度会使干燥时间陡增; 相反地, 随着超声功率和糖液质量分数的增加, 猕猴桃干燥时间整体上呈现缩短的趋势; 此外, 猕猴桃干燥时间随着超声作用时间的延长而缩短, 并逐渐趋于稳定。响应面优化并修正后的超声渗糖最佳工艺条件: 糖液质量分数 45%, 超声作用时间、功率和温度分别为 50 min、200 W 和 24 ℃。该条件下猕猴桃干的干燥时间为 43.07 h, 硬度 14616.01 g, 咀嚼性 7795.61 mJ, 维生素 C 和总糖含量分别为 0.19% 和 62.82%, 并且感官品质得到进一步提升。【结论】优化后的超声渗糖工艺较传统糖渍工艺 (不使用超声辅助) 可显著缩短猕猴桃冻干时间, 并且最终的产品质量更佳, 口感更为酥脆。

关键词: 冷冻干燥; 猕猴桃; 超声渗糖工艺; 冻干时间; 响应面优化

中图分类号: TS 255.1

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2022) 07-0929-09

Effect of Ultrasonic-assisted Sugar Osmotic Pretreatment on Dehydration Time and Optimization of Freeze-drying Kiwifruits

ZHOU Mengqi¹, CHEN Changlin², LYU Yuanping^{1,3*}

(1. College of Biomass Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China; 2. Industrial Crop Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu, Sichuan 610300, China; 3. Healthy Food Evaluation Research Center, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: 【Objective】The process to freeze-dry kiwifruits was optimized using an ultrasonic-assisted sugar osmotic pretreatment to shorten the drying time and improve the product quality. 【Method】Single factor tests were conducted to determine the ranges of sugar concentration as well as ultrasonic application time, temperature, and power for the pretreatment prior to process optimization by a Box-Behnken response surface experiment. 【Result】The time required to freeze-dry kiwifruits increased significantly when the treatment temperature was raised, especially, beyond 40 ℃. On the other hand, the time was shortened as the ultrasonic power and sugar concentration increased. Prolonged ultrasonic application also reduced the drying time to a leveled off minimum. The optimized pretreatment applied 200W ultrasound at 24 ℃ for 50m on fresh kiwifruits impinged with 45% (w/w) sugar. The freeze dehydration took 43.07h to yield kiwifruit pieces with a hardness measurement of 14,616.01g, a chewiness of 7,795.61mJ, a vitamin C content of 0.19%, and a total sugars content of 62.82%. The sensory evaluation rated the test product much superior to control without pretreatment. 【Conclusion】The freeze-drying process optimized with ultrasonic-assisted sugar osmotic pretreatment on kiwifruits required significantly shortened dehydration time and produced products with superior quality in comparison with the conventional technology.

收稿日期: 2021-12-27 初稿; 2022-04-10 修改稿

作者简介: 周梦琪 (1997–), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工及贮藏工程 (E-mail: 928427635@qq.com)

* 通信作者: 吕远平 (1971–), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品科学与工程 (E-mail: 364943477@qq.com)

基金项目: 四川省重点研发项目 (2020YFN0149)

Key words: freeze-drying; kiwifruit; ultrasonic-assisted sugar osmotic process; dehydration time; response surface optimization

0 引言

【研究意义】猕猴桃 (Kiwifruit) 营养丰富, 果干是其重要的加工方向^[1-3]。目前兴起的冷冻干燥技术干燥时间长、能耗大, 造成产品成本较高, 在一定程度上制约了冷冻干燥猕猴桃干市场的发展^[4]。为了缩短冷冻干燥时间, 调整产品口味, 常在冻干前对猕猴桃进行渗糖处理。自然渗糖脱水工艺具有样品水分扩散速度慢, 渗糖效率低, 耗时长等问题^[5]。为进一步提高渗糖脱水效率, 前期渗糖过程可采用超声辅助渗糖脱水^[6]。采用超声辅助渗糖脱水工艺处理猕猴桃片, 有助于缩短猕猴桃干冷冻干燥时间, 为生产实践中提高猕猴桃果干加工效率、降低生产成本提供理论参考。【前人研究进展】在一定压强下, 向液体辐射声波时, 液体中出现的微小气泡随着声压的变化而脉动、振荡, 或伴随着生长、收缩以致破灭的现象称为空化效应^[7]。超声产生的空化效应可引起固液界面湍流的产生, 使水分迁移阻力减小, 有利于提高传质效率, 加快物料脱水^[8-9]。同时, 超声波可产生周期性压缩和膨胀作用, 令细胞组织排列杂乱, 破坏内部结构。经过超声处理后, 物料水分含量减少, 同时内部形成疏松结构, 有利于冻结过程中生成升华通道, 从而缩短冷冻干燥时间^[5,10,11]。近年来采用超声对各类水果进行渗糖脱水处理的研究报道日益增多。PRITHANI R 等通过 Weibull 模型拟合发现超声预处理可使水分加速流失, 从而导致脱水速度加快。超声预处理后的猕猴桃片与未处理样品相比有效水分扩散率和溶质扩散率均有所提高^[12]。BOZKIR 等^[13]探究了柿子对流干燥前超声和渗透脱水预处理的效果, 发现超声辅助渗透脱水显著缩短了干燥时间, 提高了干燥速率, 在 30 分钟内有效水扩散率增加了 21%。FONG-IN 等^[14]对冷冻前的荔枝进行超声辅助渗糖脱水预处理。结果表明, 超声预处理可有效增加荔枝的水分损失 (28.73%)。SANTACATALINA 等^[15]发现, 超声渗糖脱水可有效缩短苹果的低温干燥时间。在 10 ℃ 和 -10 ℃ 两种温度下, 超声波功率越高, 干燥时间越短, 干燥时间的最多缩短了 80.3%。【本研究切入点】不同超声渗糖处理条件对猕猴桃冷冻干燥时间的影响鲜见报道。【拟解决的关键问题】在单因素试验的基础上, 通过 Box-Behnken 中心组合试验设计, 对超声渗糖工艺进行响应面优化, 旨在改进猕

猴桃深加工工艺, 缩短猕猴桃冷冻干燥时间, 降低冻干猕猴桃干生产成本, 为超声渗糖脱水处理技术应用于猕猴桃深加工产品提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 主要材料与仪器

材料: 国产徐香绿心猕猴桃, 购于四川省成都市青石桥水果批发市场; 氢氧化钠、盐酸、浓硫酸、蒽酮、L (+)-抗坏血酸, 均为分析纯, 购于四川省成都市科隆化学品有限公司; 无水柠檬酸, 购于河南万邦化工有限公司; 果葡糖浆 (质量分数 60%), 购于中粮融氏生物科技有限公司。

仪器: SQP 型电子天平 (感量 0.001 g) (北京赛多利斯科学仪器有限公司); QH-139 切片机 (德国坤展厨具用品有限公司); KQ5200DE 型数控超声波清洗器 (昆山超声仪器有限公司); SCIENTZ-10N 冷冻干燥机 (宁波新芝生物科技有限公司); BCD-520WDPD 型冰箱 (海尔智家股份有限公司); UV-1800BPC 紫外可见分光光度计 (上海美普达仪器有限公司); TA.XT.plus 物性测试仪 (英国 SMS 公司)。

1.2 试验方法

1.2.1 猕猴桃干生产工艺 猕猴桃→筛选→去皮切片→护色液浸泡→漂烫处理→冷却沥干→超声渗糖→预冻→真空冷冻干燥→成品

筛选: 挑选大小相近, 成熟度一致, 无病虫害和机械损伤的猕猴桃。

去皮切片: 取约 300 g 去皮后的猕猴桃, 用切片机切为厚度 5 mm, 直径约 50 mm 的猕猴桃片。

护色液浸泡: 采用质量分数为 0.45% 的柠檬酸护色液 500 mL 浸泡 30 min。

漂烫: 将猕猴桃片在 60 ℃ 热水中漂烫 60 s, 然后用 15 ℃ 冷水冷却, 取出沥水。

超声渗糖: 将猕猴桃片放入不同质量分数的糖液中, 采用不同超声条件进行处理。

预冻: 将渗糖处理后的猕猴桃片捞出, 沥除多余糖液, 装袋, 放置于 -20 ℃ 冷冻 24 h。

真空冷冻干燥: 迅速将预冻好的猕猴桃片放入冻干机。设置冷阱温度为 -45 ℃, 真空度 10 Pa, 待冻干机操作界面显示样品温度达到恒定即为干燥结束, 此时取出, 真空包装。

1.2.2 单因素试验 试验组经不同超声条件 (超声

温度、超声功率、糖液质量分数、超声时间)处理后,测定其超声渗糖后失重率、冷冻干燥时间。每组试验重复3次,具体参数如下:

超声温度的影响:在超声功率160 W,超声时间30 min,糖液质量分数45%的条件下,调节超声温度分别为20、30、40、50、60℃。

超声功率的影响:在超声温度20℃,超声时间30 min,糖液质量分数45%的条件下,调节超声功率分别为0、80、120、160、200 W。

糖液质量分数的影响:在超声功率200 W,超声温度20℃,超声处理时间30 min的条件下,调节糖液质量分数分别为0%、15%、30%、45%、60%。

超声时间的影响:在超声功率200 W,超声温度20℃,糖液质量分数45%的条件下,调节超声时间分别为0、15、30、45、60 min。

1.2.3 失重率测定 超声渗糖处理后,将猕猴桃片捞出,擦干表面糖液,称重。猕猴桃片失重率可依据式(1)计算:

$$\text{失重率}/\% = \frac{m_0 - m}{m} \times 100 \quad (1)$$

式中: m_0 为猕猴桃片初始质量(g); m 为超声渗糖后猕猴桃片质量(g)。

1.2.4 响应面试验 在单因素试验的基础上确定超声渗糖工艺的各项参数范围,以超声时间(A)、超声功率(B)、超声温度(C)和糖液质量分数(D)为考察因素,冷冻干燥时间为响应值,利用Box-Behnken原理设计并进行响应面试验。

1.2.5 总酸测定 采用GB12456-2021相关方法测定猕猴桃干总酸含量。

1.2.6 维生素C含量测定 采用紫外分光光度法^[16],测定猕猴桃干维生素C含量。

1.2.7 总糖测定 采用蒽酮比色法^[17]对猕猴桃干的总糖含量进行测定。

1.2.8 糖酸比的计算 糖酸比可采用式(2)进行计算:

$$\text{糖酸比} = \frac{\text{总糖含量}}{\text{总酸含量}} \quad (2)$$

1.2.9 质构测定 采用TA.XT.plus物性测试仪,选用P/36R探头,选择TPA模式,进行压缩试验,测前速率 $2.00 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,测中速率 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,测后速率 $5.0 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,得到质构特征曲线。取最高峰值F记为硬度, T_1 、 T_2 取值如图1所示。采用式(3)计算咀嚼性:

$$\text{咀嚼性} = F \times \frac{T_1}{T_2} \quad (3)$$

1.2.10 感官评定 组织10名经过培训的感官分析员

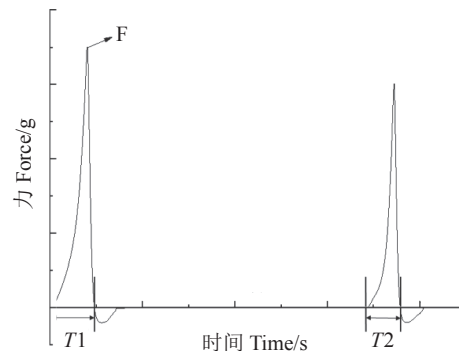


图1 TPA质构特征曲线

Fig. 1 TPA texture characteristic curve

评价猕猴桃干的色泽、滋味及气味、组织形态、口感等品质,并按照感官评定标准打分。感官评定标准参照表1。

1.2.11 数据处理与统计分析 每组试验重复3次,结果以“平均值±标准差”的形式给出,并采用IBM SPSS statistics 26进行数据处理与统计分析,显著性差异 $P < 0.05$,利用Origin 2018进行绘图。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

2.1.1 超声温度对产品失重率与冻干时间的影响

图2显示超声温度改变,失重率略有增加,但总体稳定在20%~25%。当超声温度为20℃时,失重率最低。当超声温度升高至30℃和40℃时,失重率显著提高,当超声温度升高至50℃和60℃时,失重率继续显著升高。超声温度在30℃时,冷冻干燥所需时间最短,为45.23 h。超声温度在20~40℃时,干燥时间无显著性差异,超声温度超过40℃,出现显著性差异,干燥时间明显增长,温度为60℃时,冷冻干燥时间为50.77 h。这可能是由于温度过高,猕猴桃片受热,组织结构遭到严重破坏,导致糖液渗进猕猴桃片内部,与其内部水分结合,不利于冻干时水分逸出。同时,超声温度超过40℃,猕猴桃干出现一定程度的黄褐色,对其色泽产生较大影响。超声温度过高会使得蛋白质变性,破坏细胞结构,损坏猕猴桃内部组织结构。同时高温使色素遭到破坏,影响产品的色泽和口感。因此为有效缩短干燥时间,同时较好保持猕猴桃色泽,超声温度应保持在20~40℃。

2.1.2 超声功率对产品失重率与冻干时间的影响

由图3可知,随着超声功率从0升高至150 W,失重率显著增加,渗糖脱水效率提高,150 W后提升超声功率,失重率无显著性差异。超声功率是影响超声渗糖脱水的重要因素。超声功率越大,其所

表 1 感官评定标准
Table 1 Sensory evaluation standards

项目 Items	分数 Score	描述 Description
色泽 (2.0分) Color (Score:2.0)	1.6~2.0分 Score:1.6~2.0	接近绿色, 均匀一致 Close to green, uniform
	0.9~1.5分 Score:0.9~1.5	呈浅绿色, 基本一致 Light green, almost uniform
	0~0.8分 Score:0~0.8	接近黄绿色, 严重不均匀 Near yellowish green, severe unevenness
滋味及气味 (3.0分) Taste and smell (Score:3.0)	2.0~3.0 分 Score:2.0~3.0	甜度适中, 无异味, 有猕猴桃特有的果味 Moderate sweetness, no peculiar smell, the unique fruit taste of kiwifruit
	1.0~1.9分 Score:1.0~1.9	甜度适中, 无异味, 猕猴桃的果味不够明显 Moderate sweetness, no peculiar smell, the unique fruit taste of kiwifruit was not obvious
	0~0.9分 Score:0~0.9	过酸或过甜, 有异味 Too sour or too sweet, smelly
组织形态 (2.0分) Structure (Score:2.0)	1.6~2.0 分 Score:1.6~2.0	硬度适中, 无气泡, 薄厚适宜 Moderate hardness, no bubbles, suitable thickness
	0.9~1.5分 Score:0.9~1.5	偏硬或偏软, 少量气泡, 薄厚不均匀 Hard or soft, a few bubbles, uneven thickness
	0~0.8分 Score:0~0.8	严重偏软或偏硬, 大量气泡, 过薄或过厚 Severe soft or hard, lots of bubbles, too thin or too thick
口感 (3.0分) Mouthfeel (Score:3.0)	2.0~3.0分 Score:2.0~3.0	口感酥脆, 适口 Crispy and palatability
	1.0~1.9 分 Score:1.0~1.9	口感较酥脆, 较适口 Almost crisp and palatability
	0~0.9分 Score:0~0.9	口感不酥脆, 不适口 Not crisp and palatability

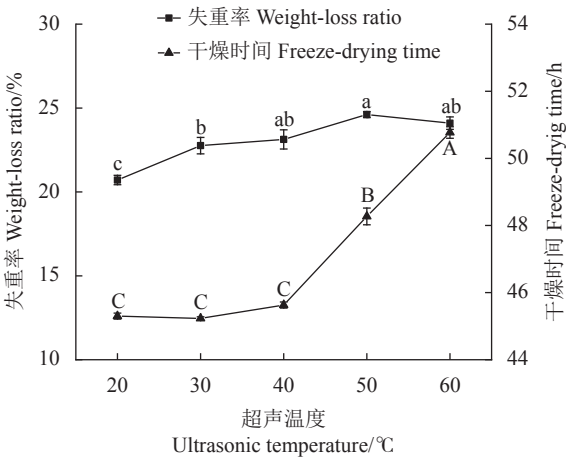


图 2 超声温度对失重率及干燥时间的影响
同一指标不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。图 3-5 同。

Data with different letters indicate significant differences at $P<0.05$. Same for Figs. 3-5.

图 2 超声温度对失重率及干燥时间的影响

Fig. 2 Effects of pretreatment temperature on kiwifruit weight loss and drying time

产生的空化效应越强, 声冲击流越强, 使得固液界面的扩散边界层变薄, 同时减小固液界面质量分数梯度差, 减小传质阻力, 扩大微扰效应, 强化微孔

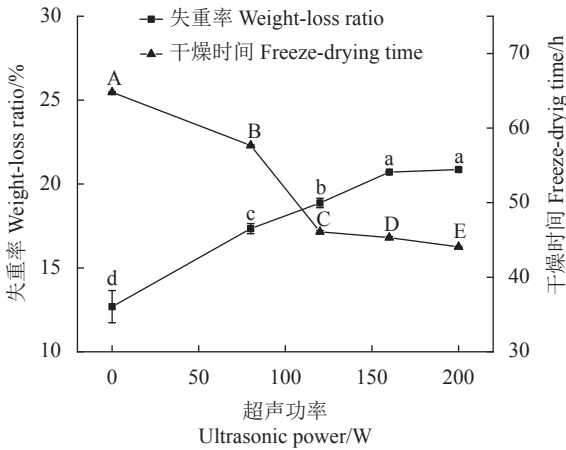


图 3 超声功率对失重率及干燥时间的影响

Fig. 3 Effects of ultrasonic power on kiwifruit weight loss and drying time

扩散, 提高失重率^[18]。超声功率 200 W 时失重率最高, 为 20.86%。起初随着超声功率升高, 猕猴桃冷冻干燥时间逐渐缩短, 超声功率达到 120 W 后, 超声功率提高, 失重率虽提高, 但冷冻干燥时间已呈现逐渐稳定的趋势, 各组均存在显著性差异。200 W 时所需干燥时间最短, 为 44.07 h, 相较未经超声处

理的猕猴桃冻干时间缩短 31.99%。因此从节能方面考虑，为提高渗糖脱水效率，同时较好地缩短冷冻干燥时间，超声功率范围应在 120~200 W。

2.1.3 糖液质量分数对产品失重率与冻干时间的影响

由图 4 可知，随着糖液质量分数升高，失重率呈升高趋势，糖液质量分数为 0%，失重率最低。糖液质量分数升高至 15%，失重率显著提高。糖液质量分数提升至 30%，失重率无显著性差异，继续提升糖液质量分数至 45% 和 60%，失重率显著升高。加大糖液质量分数，会扩大质量分数梯度差，增大渗透压差，提高水分扩散速率，提升脱水效率，从而使猕猴桃失重率升高^[19]。糖液质量分数增大，干燥时间先缩短后趋于稳定，糖液质量分数从 0 升高至 45%，干燥时间显著缩短，45% 后提升糖液质量分数，干燥时间无显著性差异。糖液质量分数为 45% 时，干燥时间最短，为 44.07 h。糖液质量分数增大，渗糖脱水效率提高，使得失重率升高，猕猴桃在冻干阶段的初始含水量下降，冻干时间缩短。但随着糖液质量分数的继续升高，渗透进猕猴桃内部与水分结合的糖分子增多，不利于干燥。同时糖液质量分数升高会增大糖液黏度，使猕猴桃外表变黏，冷冻干燥时传质阻力增大，影响干燥速率。由此得出，适宜糖液质量分数范围为 30%~60%。

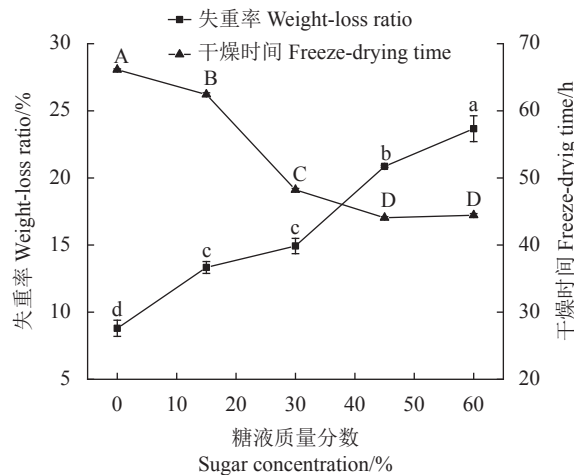


图 4 糖液质量分数对失重率及干燥时间的影响
Fig. 4 Effects of sugar concentration on kiwifruit weight loss and drying time

2.1.4 超声时间对产品失重率与冻干时间的影响

由图 5 可知，超声时间增长，失重率逐渐升高，各组均存在显著性差异。60 min 时失重率最高，为 29.93%。超声时间增长，冷冻干燥所需时间缩短，各组也均存在显著性差异。超声 30 min 可使冻干时间缩短为 44.45 h。超声时间超过 30 min，冻干时间略有增长。这可能是由于适当时间的超声处理可增强渗糖脱水效果，缩短干燥时间。超声时间

的延长使得声波的压缩膨胀效应、空化效应等充分作用于猕猴桃，减弱水分与猕猴桃组分间的作用力，利于改变物料内部细胞间结构，打通微孔道，加快水分的迁移扩散^[7]。同时在渗糖初始阶段，渗透压差大，因此水分扩散速率快，利于失重率的提升。但随着渗糖过程的持续，猕猴桃中的水分进入糖液中，使渗透压差减小，水分扩散速率减慢，失重率变化减缓^[18]。超声时间过短，超声产生的各类效应来不及作用于猕猴桃内部，渗糖脱水效果差，猕猴桃冻干前的含水量高，冻干时间长。超声时间过长，由于声波产生的周期性压缩和膨胀作用使得猕猴桃内部介质质点不断交替受到压缩和拉伸，使猕猴桃细胞发生容积和运动的变化，使细胞组织排列杂乱，破坏内部结构，闭塞已形成的微孔道，不利于冻干时水分逸出^[20]。为有效缩短冷冻干燥时间，超声时间范围应在 30~60 min。

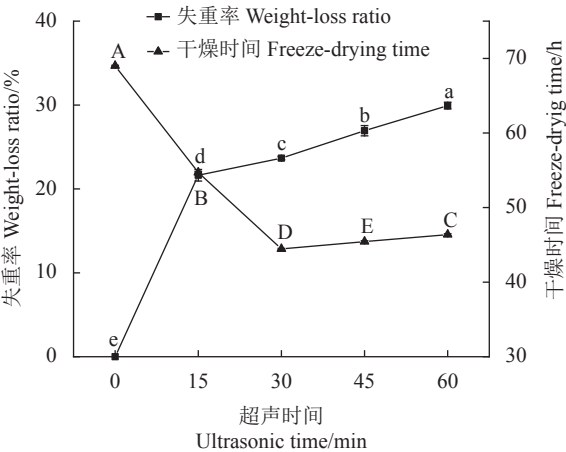


图 5 超声时间对失重率及干燥时间的影响
Fig. 5 Effects of ultrasonic application time on kiwifruit weight loss and drying time

2.2 响应面结果分析

2.2.1 Box-Behnken 响应面设计及结果 由单因素试验可知，失重率虽能反映出渗糖脱水效率，但并不能完全说明超声处理条件对于冷冻干燥时间的影响。因此，在单因素试验基础上，使用 Design-Expert10.0.7 软件进行四因素三水平响应面试验设计，以超声时间 (A)、超声功率 (B)、超声温度 (C) 和糖液质量分数 (D) 作为考察因素，冷冻干燥时间作为响应值，共设计 27 组试验，表 2 为试验因素水平，表 3 为试验设计和结果。

试验结果采用 Design Expert 10.0.7 软件进行统计分析，对表 3 的数据进行二次多项式拟合，得到二次多元回归模型为：

冷冻干燥时间=43.97-0.60A-1.48B+0.07C-0.05D-0.23AB-0.10AC-0.08AD+0.30BC-0.13BD+0.05CD+

表 2 Box-Behnken 试验因素水平
Table 2 Factors and levels of Box-Behnken experiment

因素 Factor	水平 Levels		
	-1	0	1
A: 超声时间 A: ultrasonic time/min	30	45	60
B: 超声功率 B: ultrasonic power/W	120	160	200
C: 超声温度 C: ultrasonic temperature/℃	20	30	40
D: 糖液质量分数 D: sugar concentration/%	30	45	60

表 3 Box-Behnken 试验设计及结果
Table 3 Design and results of Box-Behnken experiment

序 号 No.	A: 超声 时间 time/ min	B: 超声 功率 power/ W	C: 超声 温度 temperature/ ℃	D: 糖液 质量分数 concentration/ %	冷冻干燥 时间 Freeze- drying time/h
1	30	160	30	60	48.2
2	60	160	40	45	45.1
3	45	200	30	60	45.0
4	60	160	20	45	45.3
5	60	160	30	60	46.4
6	45	120	40	45	46.1
7	45	160	30	45	43.8
8	45	120	30	30	48.4
9	30	120	30	45	47.6
10	45	160	20	30	45.8
11	30	160	40	45	45.7
12	30	160	30	30	48.0
13	60	160	30	30	46.5
14	45	160	40	60	46.0
15	45	160	30	45	44.1
16	45	200	40	45	43.9
17	45	120	20	45	46.5
18	45	200	20	45	43.1
19	45	160	30	45	44.0
20	45	120	30	60	48.3
21	60	200	30	45	43.0
22	45	160	40	30	45.9
23	60	120	30	45	46.5
24	30	200	30	45	45.0
25	45	160	20	60	45.7
26	45	200	30	30	45.6
27	30	160	20	45	45.5

$1.15A^2+0.68B^2+0.13C^2+2.03D^2$

表 4 所示的是冷冻干燥时间的方差分析结果。

由表 4 可看出, 回归模型结果高度显著 ($P<0.0001$), 失拟项不显著 ($P>0.05$), 回归方程能够很好地解

表 4 回归模型的方差分析结果及显著性检验
Table 4 Analysis of variance and significance test

方差 来源 Source	平方和 Sum of squares	自由 度 df	均方 Mean square	F 值 F value	P 值 ($Pr>F$) P value ($Pr>F$)	显著性 Significance
模型 Model	57.68	14	4.12	23.71	<0.0001	**
A	4.32	1	4.32	24.86	0.30×10^{-3}	*
B	26.40	1	26.40	151.96	<0.0001	**
C	0.05	1	0.05	0.31	0.59	
D	0.03	1	0.03	0.17	0.69	
AB	0.20	1	0.20	1.17	0.30	
AC	0.04	1	0.04	0.23	0.64	
AD	0.02	1	0.02	0.13	0.73	
BC	0.36	1	0.36	2.07	0.18	
BD	0.06	1	0.06	0.36	0.56	
CD	0.01	1	0.01	0.06	0.81	
A ²	7.10	1	7.10	40.89	<0.0001	**
B ²	2.46	1	2.46	14.16	0.002	*
C ²	0.09	1	0.09	0.519	0.49	
D ²	21.96	1	21.96	126.39	<0.0001	**
残差 Residual	2.085	12	0.17			
失拟项 Lack of fit	2.04	10	0.20	8.74	0.11	
纯误差 Pure error	0.05	2	0.02			

$R^2=0.9651$, $R_{Adj}^2=0.9244$; $P<0.0001$ 为高度显著, 用“***”表示; $P<0.05$ 为显著, 用“*”表示。
 $R^2=0.9651$; $R_{Adj}^2=0.9244$; Significant difference at $P<0.0001$ is highly significant, denoted by “***”; significant difference at $P<0.05$ is significant, denoted by “*”.

释超声时间 (A)、超声功率 (B)、超声温度 (C) 和糖液质量分数 (D) 与冷冻干燥时间之间的关系。由调整系数可知, 利用此模型可以解释响应曲面中 92.44% 的可变性, 预测值与真实值间有较高关联性。通过比较 F 值, 各因素对猕猴桃冷冻干燥时间的影响顺序为 $B>A>C>D$ 。超声功率对猕猴桃冷冻干燥时间影响高度显著 ($P<0.0001$); 超声时间对猕猴桃冷冻干燥时间影响显著 ($P<0.05$)。A²、D² 对猕猴桃冷冻干燥时间影响高度显著, B² 对猕猴桃

冷冻干燥时间影响显著。

2.2.2 预测最佳工艺条件的验证性试验 通过软件预测可得，超声渗糖工艺的最佳条件：超声时间 50.21 min，超声功率 192.76 W，超声温度 23.95 ℃，糖液质量分数 44.97%，在此条件下预测猕猴桃冷冻干燥时间为 42.95 h。为便于操作，提高操作可控性，修正工艺参数的最佳条件：超声时间 50 min，超声功率 200 W，超声温度 24 ℃，糖液质量分数 45%。利用此参数条件，进行 3 次平行验证，测得的猕猴桃冷冻干燥时间均值为 43.07 h，和理论预测值 42.95 h 相比较，误差仅为 0.12 h，证明回归方程及模型对猕猴桃超声渗糖工艺的实际情况的拟合较好，预测较真实，对猕猴桃冷冻干燥时间进行了可靠的分析以及预测。

2.3 超声渗糖优化冻干猕猴桃与糖渍冻干猕猴桃品质比较

采用质量分数为 45% 的糖液浸渍且不经超声处理的样品作为空白对照，与超声渗糖优化样品的各项品质指标及感官评定结果进行比较。优化组与空白对照组的各项品质指标见表 5。

表 5 响应面优化前后猕猴桃干品质指标
Table 5 Quality indicators of kiwifruits freeze-dried with and without process optimization

样品名称 Sample name	糖渍样品 Sample produced without the assistance of ultrasonic	超声渗糖样品 Sample produced by ultrasonic-assisted sugar osmotic process
干燥时间 Freeze-drying time/h	64.00±0.08 a	43.07±0.02 b
水分含量 Moisture content/%	5.92±0.06 a	5.83±0.04 a
维生素C含量 Vitamin C content/%	0.13±0.03 a	0.19±0.04 b
感官得分 Sensory evaluation score	8.06±0.39 b	8.29±0.43 a
总糖含量 Total sugar content/%	68.57±0.25 a	62.82±0.22 b
总酸含量 Total acid content/%	2.13±0.01 b	2.24±0.01 a
糖酸比 Sugar-acid ratio	32.16±0.01 a	28.07±0.01 b
硬度 Hardness/g	17650.29±1247.39 a	14616.01±981.81 b
咀嚼性 Chewiness/mJ	8851.40±1025.83 a	7795.61±1019.65 b

同行数据后不同小写字母表示差异显著（*t*检验，*P*<0.05）。
Date with different letters on same row indicate significant differences at *P*<0.05, using the *t* test.

由表 5 可知，两组样品水分含量相差不大，但经超声渗糖优化后的试验组冷冻干燥时间显著缩

短。数值显示，该处理组维生素 C 含量较糖渍样品（对照组）升高 0.06%，这是由于冷冻干燥时间缩短，减少了维生素 C 的损失。总糖含量为 62.82%，较糖渍样品显著降低了 5.75%。水果产品的甜酸口感滋味是总糖和总酸共同作用的综合结果，可通过糖酸比表示水果产品的甜度。适当的酸味可使水果产品口感更丰富，使产品达到更好的风味^[21]。糖渍样品与超声渗糖样品相比糖酸比更大，即口感偏甜。因此超声渗糖样品对于甜酸的调和平衡更好，口感酸甜适中、更为可口。

超声渗糖工艺得到的猕猴桃干硬度为 14 616.01 g，咀嚼性 7795.61 mJ，相比糖渍样品均有下降。超声处理可破坏猕猴桃表面和内部结构，增大细胞孔隙，使内部形成更为疏松的结构，因此，超声渗糖工艺得到的冷冻干燥猕猴桃干，硬度较糖渍冷冻干燥猕猴桃干小，细胞间结合力较小，对咀嚼的抵抗力小，适口性更好。

在感官评定方面，优化后猕猴桃干感官评分提高，这可能是因为优化后改善了原本仅糖渍工艺得到的猕猴桃干过甜的滋味，同时超声处理使得猕猴桃内部产生微通道，形成更加疏松的结构，使其口感更加酥脆。

3 讨论与结论

干燥速率与传质阻力、物料含水量、物料结构性质等方面有关。通过前期对物料进行超声渗糖，可减少物料含水量、改变物料结构性质，达到提高干燥速率，降低干燥能耗的效果。宋悦等^[22]经过超声辅助渗透处理后，桃鲜样孔隙增大，细胞壁扭曲，进而造成其水分状态的变化，自由水弛豫时间从 357.07 ms 缩短到 310.78 ms，有利于后期干燥。曾祥媛等^[23]采用超声渗糖工艺，提高了气体射流冲击干燥速率，使单位能耗由 22 kJ·g⁻¹ 下降至 13 kJ·g⁻¹。王忠合等^[24]采用超声波对柠檬片进行预处理后发现，热风干燥柠檬片的干燥速率增加，干燥所需时间至少缩短 20%，热风干燥阶段耗能量明显降低。

渗糖过程中，糖分子从高质量分数处向低质量分数处扩散，同时猕猴桃中的水分向溶液扩散，从而使猕猴桃损失部分水分，降低其含水量。超声产生的空化效应在局部会产生高温高压和强剪切力，使物料组分对水分子的束缚力减弱，形成内部挤水渗流，同时改变物料内部细胞间结构，形成微小的孔道，加快水分扩散速率，提高渗糖脱水效果^[5]。不同的超声条件可对物料产生不同程度的影响，进而影响后期冷冻干燥速率。

在选择超声条件时,应注意超声温度、超声功率、超声时间和糖液质量分数的范围。升高超声温度可提高扩散速度,从而提高失重率,有利于缩短后期冷冻干燥时间。然而超声温度过高会破坏猕猴桃内部结构,影响后期冻干速率和产品的色泽和口感。提高超声功率,可使超声所产生的空化效应更强,同时扩大微扰效应,提高扩散效率,从而提高失重率,缩短后期冻干时间。加大糖液质量分数,可增大渗透压差,提高脱水效率,但随着糖液质量分数继续增高,渗透进猕猴桃内部与水分结合的糖分子增多,导致猕猴桃外表变黏,冷冻干燥时传质阻力增大,不利于干燥。超声时间的延长可使超声充分作用于猕猴桃,减弱水分与猕猴桃组分间的作用力,利于改变物料内部细胞间结构,打通微孔道,加快水分的迁移扩散。超声时间继续延长,由于声波持续作用,猕猴桃细胞呈现杂乱排列,内部结构受到破坏,闭塞已形成的微孔道,不利于冻干时水分逸出,影响后期冻干。

本研究在单因素试验基础上,采用响应面法对冻干猕猴桃的超声渗糖工艺进行优化,最佳工艺条件为:超声时间 50 min,超声功率 200 W,超声温度 24 ℃,糖液质量分数 45%,在该条件下得到的猕猴桃干冷冻干燥时间为 43.07 h,较糖渍冻干样品冷冻干燥时间缩短 20.93 h,缩短冻干时间的效果明显。维生素 C 含量为 0.19%,相较糖渍样品含量提高了 0.06%,较好地减少了维生素 C 的损失。同时,优化后总糖降低 5.75%,改善了优化前猕猴桃干偏甜的滋味。优化后样品硬度为 14616.01 g,咀嚼性为 7795.61 mJ,相较糖渍冻干样品分别提高了 3034.28 g 和 1055.79 mJ,拥有更酥脆的口感。优化后样品感官评定得分为 8.29,相比优化前提高了 0.23。研究结果可为猕猴桃深加工工艺的改良提供参考依据,有利于猕猴桃深加工产业的发展。

参考文献:

- [1] 王英珍,潘芝梅.二十二份毛花猕猴桃种质资源果实品质的主成分分析与综合评价[J].浙江农业学报,2021,33(5):825-830.
WANG Y Z, PAN Z M. Comprehensive evaluation of 22 *Actinidia Eriantha* germplasm resources based on principal components analysis[J]. *Journal of Zhejiang Agriculture*, 2021, 33(5): 825-830. (in Chinese)
- [2] TRAFFANO-SCHIFFO M V, LAGHI L, CASTRO-GIRADEZ M, et al. Osmotic dehydration of organic kiwifruit pretreated by pulsed electric fields and monitored by NMR[J]. *Food Chemistry*, 2017, 236: 87-93.
- [3] 陈志伟,戢小梅,李秀丽,等.猕猴桃贮藏及加工研究进展[J].农业与技术,2019,39(24):38-45.
- CHEN Z W, JI X M, LI X L, et al. Research progress of kiwifruit storage and processing[J]. *Agriculture and Technology*, 2019, 39(24):38-45. (in Chinese)
- [4] 王新珂,杨锡洪,吴帆,等.果蔬冷冻干燥节能新技术研究进展[J].食品与机械,2020,36(6):226-232.
WANG X K, YANG X H, WU F, et al. Research progress on the new freeze-drying technology of fruits and vegetables[J]. *Food and Machinery*, 2020, 36(6):226-232. (in Chinese)
- [5] 罗登林,苏孟开,杨日福,等.超声在食品干燥领域中的研究进展[J].中国粮油学报,2020,35(5):188-196.
LUO D L, SU M K, YANG R F, et al. Progress of food drying assisted by ultrasound[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(5):188-196. (in Chinese)
- [6] 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/OL].食品科学,1-11[2021-09-16]<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20210816.1140.012.html>.
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/OL]. *Food Science*, 1-11[2021-09-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20210816.1140.012.html>. (in Chinese)
- [7] 孙宝芝,姜任秋,淮秀兰,等.声空化强化渗透脱水[J].化工学报,2004,10:1714-1718.
SUN B Z, JIANG R Q, HUAI X L, et al. Enhancing osmotic dehydration with acoustic cavitation. [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2004, 10: 1714-1718. (in Chinese)
- [8] TAO Y, WANG P, WANG Y L, et al. Power ultrasound as a pretreatment to convective drying of mulberry (*Morus Alba* L) leaves: Impact on drying kinetics and selected quality properties[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, 31: 310-318.
- [9] RICCE C, ROJAS M L, MIANO A C, et al. Ultrasound pretreatment enhances the carrot drying and rehydration[J]. *Food Research International*, 2016, 89: 701-708.
- [10] CORREA J L G, PEREIRA L M, VIERIA G S, et al. Mass transfer kinetics of pulsed vacuum osmotic dehydration of guavas[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 96(4):498-504.
- [11] SALAZAR-LOPEZ E I, JIMENEZ M, SALAZAR R, et al. Incorporation of microcapsules in pineapple intercellular tissue using osmotic dehydration and micro-encapsulation method[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 8(8):1699-1706.
- [12] PRITHANI R, DASHK K. Mass transfer modelling in ultrasound assisted osmotic dehydration of kiwifruit[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2020, 64: 102407.
- [13] BOZKIR H, ERGUN A R, SERDAR E, et al. Influence of ultrasound and osmotic dehydration pretreatments on drying and quality properties of persimmon fruit[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 54: 135-141.
- [14] FONG-IN S, NINITKEATKAI H, PROMMAJAK T, et al. Ultrasound-assisted osmotic dehydration of litchi: Effect of pretreatment on mass transfer and quality attributes during frozen

- storage [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2021, 15 (4): 3590–3597.
- [15] SANTACATALINA J V, CONTRERAS M, SIMAL S, et al. Impact of applied ultrasonic power on the low temperature drying of apple [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, 28: 100–109.
- [16] 马宏飞, 卢生有, 韩秋菊, 等. 紫外分光光度法测定五种果蔬中维生素C的含量 [J]. *化学与生物工程*, 2012, 29 (8): 92–94.
- MA H F, LU S Y, HAN Q J, et al. Determination of vitamin C content in five kinds of fruits and vegetables by UV spectrophotometry [J]. *Chemistry and Bioengineering*, 2012, 29 (8): 92–94. (in Chinese)
- [17] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅, 等. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2017: 28–37.
- [18] 马空军, 贾殿赠, 包文忠, 等. 超声场强化渗透脱水传质机理模型研究 [J]. *食品科学*, 2011, 32 (13): 94–101.
- MA K J, JIA D Z, BAO W Z, et al. Mass transfer mechanism and mathematical model for ultrasonic-enhanced osmotic dehydration [J]. *Food Science*, 2011, 32 (13): 94–101. (in Chinese)
- [19] 刘云宏, 吴建业, 刘建学, 等. 超声渗透脱水-热风干燥梨的研究 [J]. *食品科学*, 2014, 35 (3): 23–28.
- LIU Y H, WU J Y, LIU J X, et al. Ultrasonic-assisted osmotic dehydration and subsequent hot-air drying of pear slices [J]. *Food Science*, 2014, 35 (3): 23–28. (in Chinese)
- [20] 陈立夫, 裴斐, 张里明, 等. 超声辅助渗透处理对冷冻干燥双孢蘑菇冻干效率和品质的影响 [J]. *食品科学*, 2017, 38 (23): 8–13.
- CHEN L F, PEI F, ZHANG L M, et al. Effect of ultrasound-assisted osmotic pretreatment on freeze-drying efficiency and quality of *agaricus bisporus* [J]. *Food Science*, 2017, 38 (23): 8–13. (in Chinese)
- [21] 郑丽静, 聂继云, 闫震. 糖酸组分及其对水果风味的影响研究进展 [J]. *果树学报*, 2015, 32 (2): 304–312.
- ZHENG L J, NIE J Y, YAN Z. Advances in research on sugars, organic acids and their effects on taste of fruits [J]. *Journal of Fruit Science*, 2015, 32 (2): 304–312. (in Chinese)
- [22] 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. (in Chinese)
- [23] 曾祥媛, 赵武奇, 卢丹, 等. 超声波对猕猴桃片的渗糖效果及干燥能耗与品质的影响 [J]. *中国农业科学*, 2019, 52 (4): 725–737.
- ZENG X Y, ZHAO W Q, LU D, et al. Effects of ultrasound on the sugar permeability effect, drying energy consumption and quality of kiwifruit slices [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52 (4): 725–737. (in Chinese)
- [24] 王忠合, 王军, 林倩仪. 超声辅助热风干燥柠檬片的动力学研究及其维生素C含量的变化 [J]. *中国食品学报*, 2020, 20 (4): 187–196.
- WANG Z H, WANG J, LIN J Y, et al. Kinetic study of ultrasonic-assisted hot air drying of lemon slices and changes in vitamin C content [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2020, 20 (4): 187–196. (in Chinese)

(责任编辑: 吴宇琳)