

超声预处理对真空冷冻干燥猕猴桃片品质的改善作用

陈学玲^{1,2}, 黄文俊^{2,3}, 钟彩虹^{2,3}, 范传会^{1,2}, 张琦^{2,3}, 家志文^{1,2}, 何建军^{1,2*}

(1. 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 武汉 430064; 2. 中国科学院猕猴桃产业技术工程实验室, 武汉 430074; 3. 中国科学院武汉植物园, 武汉 430074)

摘 要: **目的** 探究超声预处理对真空冷冻干燥猕猴桃片品质的改善作用。**方法** 分别采用不同功率(60、120、180、240、300 W)和时间(1、5、10、15、20 min)的超声波预处理猕猴桃, 经真空冷冻干燥制成真空冷冻干燥猕猴桃片, 分析真空冷冻干燥果片的水分含量、可溶性糖、可滴定酸、维生素 C 含量、水分活度、色度等指标, 探讨超声预处理对真空冷冻干燥果片品质的影响规律。**结果** 超声功率为 60~180 W 时, 真空冷冻干燥猕猴桃片的含水量提高 2.51%~13.70%; 超声时间为 1~10 min 时, 含水量提高 9.23%~11.75%。与空白相比, 所有超声组的可溶性糖含量、糖酸比均略有提高, 但维生素 C 含量平均下降 9.66%。超声预处理降低真空冷冻干燥猕猴桃片的水分活度, 60~300 W 超声组的水分活度下降 4.29%~20.86%; 1~5 min 超声组的真空冷冻干燥猕猴桃片水分活度下降 4.91%~15.34%。所有超声组的 a^* 均下降, 且多数超声组的 a^* 显著下降($P<0.05$), 其中 300 W 超声波使 a^* 下降 20.95%, 超声冻干果片颜色更绿。**结论** 猕猴桃在真空冷冻干燥加工之前, 使用功率 120~240 W 和时间 1~5 min 超声波进行预处理, 有助于改善真空冷冻干燥猕猴桃片的整体品质。

关键词: 超声波; 预处理; 猕猴桃; 真空冷冻干燥

Improvement of quality of vacuum freeze drying kiwifruit slices by ultrasonic pretreatment

CHEN Xue-Ling^{1,2}, HUANG Wen-Jun^{2,3}, ZHONG Cai-Hong^{2,3}, FAN Chuan-Hui^{1,2},
ZHANG Qi^{2,3}, JIA Zhi-Wen^{1,2}, HE Jian-Jun^{1,2*}

(1. Institute for Farm Products Processing and Nuclear-agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China; 2. Kiwifruit Industry Technology Engineering Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China; 3. Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China)

ABSTRACT: Objective To explore the effects of ultrasonic pretreatment on improving the quality of vacuum freeze drying kiwifruit slices. **Methods** Kiwifruit slices were prepared by vacuum freeze drying after ultrasonic pretreatment with different powers (60, 120, 180, 240, 300 W) and time (1, 5, 10, 15, and 20 min), the moisture, soluble sugar, titratable acid, vitamin C content, moisture activity, and color of the vacuum freeze drying fruit

基金项目: 中国科学院猕猴桃产业技术工程实验室项目(KFJ-PTXM-008)、湖北省农业科技创新中心项目(2020-620-000-001-25)

Fund: Supported by the Project of Kiwifruit Industrial Technology Engineering Laboratory of Chinese Academy of Sciences (KFJ-PTXM-008), and the Hubei Agricultural Science and Technology Innovation Center Project (2020-620-000-001-25)

***通信作者:** 何建军, 研究员, 主要研究方向为农产品加工与贮藏。E-mail: 920025354@qq.com

***Corresponding author:** HE Jian-Jun, Professor, Institute for Farm Products Processing and Nuclear-agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, No.5, Nanhu Avenue, Hongshan District, Wuhan 430064, China. E-mail: 920025354@qq.com

slices were analyzed, and the effects of ultrasonic pretreatment on the quality of the vacuum freeze drying fruit slices was explored. **Results** The moisture content of the vacuum freeze drying kiwifruit slices increased by 2.51%–13.70% when the ultrasonic power was 60–180 W; the moisture content increased by 9.23%–11.75% when the ultrasonic time was from 1 to 10 min. Compared with the blank group, the soluble sugar content, and sugar acid ratio were slightly increased in all ultrasonic groups, but the vitamin C content was decreased by 9.66% on average. Ultrasonic pretreatment reduced the water activity of vacuum freeze drying kiwifruit slices, and the water activity of the 60–300 W ultrasonic group decreased by 4.29%–20.86%; the water activity of the vacuum freeze drying kiwifruit slices in the 1–5 min ultrasound group was decreased by 4.91%–15.34%. The a^* of all ultrasound groups were decreased, and the a^* of most ultrasound groups were significantly lower than those of the blank group ($P<0.05$), among them, 300 W ultrasound reduced the a^* by 20.95%, and the color of the ultrasonic lyophilized fruit slices was greener. **Conclusion** Before vacuum freeze drying processing, ultrasonic wave with power of 120–240 W and time of 1–5 min is used for pretreatment on kiwifruit, which is helpful to improve the overall quality of kiwifruit slices in vacuum freeze drying.

KEY WORDS: ultrasonic; pretreatment; kiwifruit; vacuum freeze drying

0 引言

猕猴桃酸甜适口, 富含维生素 C (vitamin C, VC)、果酸、多糖、多酚和矿物质等营养物质^[1-2], 是一种老少皆宜的水果。猕猴桃除了鲜食之外, 还可采用真空低温油炸^[3]、热风干燥^[4-5]、微波干燥^[6-7]等技术加工成休闲食品。但是这些技术加工温度高、耗时长, 易导致脱水产品的色泽和风味劣变, 质构特性变差, VC 等营养成分和活性成分损失严重。真空冷冻干燥(简称冻干)适用于热敏性或易氧化的物料, 能较好地保存物料原有的营养成分、色泽、风味和组织结构^[8-9], 已广泛应用于果蔬干燥加工中^[10]。本研究前期已研发了冻干猕猴桃片, 但是口感偏酸涩, 失绿较多, 作为休闲水果片并不受欢迎。因此, 需要研究冻干前的预处理方法, 以期提高产品的质量。

超声波是频率大于 20 kHz 的声波, 超声波与介质相互作用产生热效应、机械效应和空化效应, 从而强化物料的干燥过程^[11-14]。超声波有助于提高物料中水分的扩散, 除去结合水, 从而促进缩短干燥时间, 同时其钝化酶活、杀菌特性对产品感官、营养品质及延长货架期具有积极的影响^[15], 因此常用于果蔬干燥前处理过程。

目前, 超声波主要集中在番茄、草莓等果蔬干燥预处理的研究。ERHAN 等^[16]在番茄切片微波热风组合干燥中, 研究了超声波预处理对番茄切片的干燥时间和干后品质的影响, 发现经超声预处理 40 min, 干燥时间减少 7.38%。ZHANG 等^[17]研究了超声波预处理对冻干草莓片品质的影响, 发现经超声预处理后, 干片的 a^* 、抗氧化物质(总花青素含量、总黄酮含量、总酚含量等)及硬度等均显著提高。陈文敏等^[18]使用 350 W 超声处理红枣, 所得中短波红外干燥制品在 3 种处理方式中 VC、总酚、总黄酮含量最高, 糖酸比最高, 色泽最优, 能耗最少。在 200~600 W 超声功

率和 10~30 min 超声时间预处理热风干燥猕猴桃片的研究中^[19], 超声波引起猕猴桃片中水分流动的变化和重新分布, 从而加快热风干燥过程中水分的迁移和蒸发。综上所述可知, 超声波可用于多种干燥过程中, 在一定程度上实现了干燥速率、产品品质和生产耗能 3 者间的平衡^[20-22]。然而超声波在冻干果蔬中的应用较少, 关于冻干猕猴桃的研究更少。本研究采用超声波处理猕猴桃, 重点研究超声功率和超声时间对冻干猕猴桃片的品质影响, 以期改善冻干产品的品质提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

“海沃德”猕猴桃购于武汉市武泰闸市场。选择大小基本一致, 重量 110 ± 5 g, 硬度 2000~3000 g/cm² 的猕猴桃^[23]。果形、果色良好, 清洁, 无腐烂、畸形、异味、病虫害及机械伤害的猕猴桃。

蔗糖、浓硫酸、氢氧化钠(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

BSA2202S 型电子天平(精度 0.01 g, 赛多利斯科学仪器北京有限公司); 3K15 型高速冷冻离心机(德国 Sigma 公司); Lab Master neo 型水分活度仪(瑞士 Novasina 公司); CS-580A 型分光测色仪(杭州彩谱科技有限公司); UV1100 型紫外可见分光光度计(北京莱伯泰科仪器股份有限公司); LYO-2(CJP)型真空冷冻干燥机(上海东富龙科技股份有限公司); KQ-500VDV 型超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 冻干猕猴桃片制备

猕猴桃去皮后切分成 3~4 mm 厚度的果片, 每组样品

400 g $\pm$ 10 g, 放入装有双蒸水的烧杯中, 置于超声波设备中(双蒸水至四分之三处)。设超声时间 5 min, 超声功率分别为 0、60、120、180、240 和 300 W。设超声功率 120 W, 超声时间分别为 0、1、5、10、15 和 20 min。超声功率 0 W 或超声时间 0 min 的组别是空白组, 未经超声波处理。超声处理后的样品经-40℃预冻 24 h 后, 在真空冷冻干燥机中干燥 20 h (-20℃), 冻干样品用复合铝箔袋包装, 常温贮存, 以待下一步检测。

1.3.2 水分含量的测定

采用直接干燥法测定, 参见 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》。每组冻干样品测 3 次, 取平均值。

1.3.3 可溶性糖含量的测定

参照曹建康等^[24]方法测定。每组冻干样品测 3 次, 取平均值。

1.3.4 可滴定酸含量的测定

参照曹建康等^[24]方法测定。每组冻干样品测 3 次, 取平均值。

1.3.5 VC 含量的测定

采用 2,6-二氯酚滴定法测定 VC 含量, 参见 GB 5009.86—2016《食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定》。每组冻干样品测 3 次, 取平均值。

1.3.6 色泽的测定

将所制取的冻干猕猴桃片粉碎, 混合均匀。采用分光测色仪测量 L^* 、 a^* 、 b^* , 计算 ΔE 值。每组冻干样品测 9 次, 取平均值。

1.3.7 水分活度的测定

使用快速水分活度仪测定各组样品的水分活度(water activity, Aw)。每组冻干样品测 3 次, 取平均值。

1.4 数据分析

使用 Origin 2021 进行处理数据、方差分析及作图, $P < 0.05$ 为具有显著性差异。

2 结果与分析

2.1 超声预处理对冻干猕猴桃片水分含量的影响

水分含量是冻干产品的重要品质指标, 影响其货架期。经测定, 空白组冻干猕猴桃片的水分含量为 7.15%, 功率 60、120、180、240 和 300 W 超声预处理的冻干猕猴桃片的水分含量分别为 8.13%、7.45%、7.33%、7.04%和 7.17%; 时间 1、5、10、15 和 20 min 超声预处理的冻干猕猴桃片的水分含量分别为 7.81%、7.84%、8.00%、7.42%和 7.35%。可知, 所有组别的水分含量均低于 8.20%, 有利于冻干果片的贮藏。但是超声预处理对冻干猕猴桃片水分含量有一定的影响。与空白组相比, 超声功率为 60~180 W 时, 含水量提高了 2.51%~13.70%; 超声时间为 1~10 min 时, 含水量提高了 9.23%~11.75%。可能是因为在前述超声条件下猕猴

桃果肉中形成细微通道^[19], 细胞中自由水、可溶性糖(见表 1)增加释放。在干燥过程中二者逐渐紧密结合, 部分自由水不易脱离, 以致超声处理组的水分含量相对空白组的高。随着超声功率增大(240~300 W)或时间延长(15~20 min), 冻干猕猴桃片水分含量与空白组差异不大。

2.2 超声预处理对冻干猕猴桃片糖酸的影响

猕猴桃中糖和酸的含量较高, 其糖酸比影响鲜果和加工制品的风味。由表 1 可知, 可溶性糖在冻干猕猴桃片中所占比例较大, 均超过了 57%。与空白组相比, 超声处理组的可溶性糖含量均升高。随着超声功率增大、超声时间延长, 可溶性糖含量呈现出先增大后减小的趋势, 但超声功率的大小对其影响不显著($P > 0.05$), 而部分超声时间的长短对其影响显著($P < 0.05$)。可溶性糖含量增大, 可能是由于短时或低功率的超声处理使可溶性糖与猕猴桃组织细胞的结合力降低, 释放速率大于扩散到介质水中的速率, 导致可溶性糖含量增大。另一方面, 当超声功率过大、时间过长时, 会破坏物料组织结构, 细胞液中渗透压改变, 造成可溶性糖向介质水中扩散速率增大, 导致猕猴桃片中的可溶性糖含量降低。

冻干猕猴桃片中可滴定酸含量随超声功率增加存在显著变化, 呈先增加后降低趋势, 究其原因可能与可滴定酸在细胞内外的释放速率和扩散速率有关, 但超声时间的长短对可滴定酸含量影响不显著($P > 0.05$)。在超声预处理角醋栗汁^[25]研究中, 与空白相比, 超声组的可滴定酸含量变化同样不显著($P > 0.05$)。

从表 1 可以看出, 超声预处理对冻干果片的糖酸比有所提高, 但各组间差异不显著($P > 0.05$)。类似地, 陈文敏等^[18]研究发现, 红枣经超声处理后, 其短波红外干燥制品的总糖、总酸和糖酸比有所提高。

2.3 超声处理对冻干猕猴桃片 VC 含量的影响

VC 含量是猕猴桃加工制品的重要营养品质指标之一。空白组冻干猕猴桃片的 VC 含量为 242.57 mg/100 g, 功率 60、120、180、240 和 300 W 超声预处理的冻干猕猴桃片的 VC 含量分别为 223.39、228.46、234.07、226.30 和 221.21 mg/100 g; 时间 1、5、10、15 和 20 min 超声预处理的冻干猕猴桃片的 VC 含量分别为 206.36、216.10、221.63、208.79 和 205.27 mg/100 g。由此可知, 与空白组相比, 超声处理组冻干猕猴桃片的 VC 含量均有下降, 平均下降达 9.66%。可能是因为超声处理后, 产生空化作用及机械作用, 导致细胞内 VC 更容易释放到介质水中^[26], 不利于猕猴桃片中 VC 的保留。曾凡杰等^[8]研究发现, 猕猴桃切片后表面组织损伤严重, 超声波处理后结构松散, 水溶性 VC 更容易流出, 导致细胞 VC 含量减少。然而, AGUILAR 等^[26]认为超声处理的果汁中 VC 含量显著下降, 是因为该处理在有氧条件下进行, 致使 VC 发生降解。在本研究中, VC 的流出与氧化降解可能同时存在。

表 1 超声预处理对冻干猕猴桃片糖酸的影响($n=3$)
Table 1 Effects of ultrasonic pretreatments on the sugar and acid content of freeze drying kiwifruit slices ($n=3$)

处理	水平	可溶性糖含量/%	可滴定酸含量/%	糖酸比
超声功率/W	0	57.94±0.95 ^a	7.49±0.28 ^{bc}	7.74±0.19 ^a
	60	61.94±1.96 ^a	7.20±0.20 ^c	8.60±0.12 ^a
	120	63.84±3.89 ^a	7.89±0.20 ^{ab}	8.09±0.31 ^a
	180	69.14±7.40 ^a	8.11±0.17 ^a	8.53±0.95 ^a
	240	62.74±4.26 ^a	7.80±0.15 ^{ab}	8.04±0.38 ^a
	300	62.31±3.20 ^a	7.70±0.23 ^{abc}	8.09±0.66 ^a
超声时间/min	0	57.94±0.95 ^b	7.51±0.28 ^a	7.72±0.19 ^a
	1	69.37±4.51 ^a	7.81±0.84 ^a	8.88±0.54 ^a
	5	69.01±1.31 ^a	7.84±0.23 ^a	8.80±0.10 ^a
	10	67.43±4.80 ^a	7.80±0.52 ^a	8.64±1.15 ^a
	15	65.69±2.05 ^{ab}	7.42±0.65 ^a	8.85±0.70 ^a
	20	65.48±0.41 ^{ab}	7.35±0.06 ^a	8.91±0.10 ^a

注: 同一列中不同小写字母者表示有显著性差异($P<0.05$), 下同。

在超声功率方面, 60 和 300 W 超声处理组的冻干猕猴桃片 VC 含量分别比空白组下降 7.91%、8.81%, 120~240 W 处理组的 VC 含量降低 3.50%~6.71%。超声功率和时间对冻干猕猴桃片 VC 含量的影响并未呈负相关。在超声时间方面, 5 个超声组的冻干猕猴桃片 VC 含量平均下降 12.77%, 其中 5、10 min 超声处理组的 VC 含量降低略小, 分别为 10.91%、8.63%。可见, 超声功率对 VC 含量下降的影响小于超声时间。

2.4 超声预处理对冻干猕猴桃片 Aw 的影响

Aw 值反映了水分在产品中的游离程度, 其大小可反映产品的贮藏性, 是最受关注的物理性质之一^[27]。空白组冻干猕猴桃片的 Aw 为 0.163, 功率 60、120、180、240 和 300 W 超声预处理的冻干猕猴桃片的 Aw 分别为 0.156、0.129、0.131、0.132 和 0.133; 时间 1、5、10、15 和 20 min 超声预处理的冻干猕猴桃片的 Aw 含量分别为 0.155、0.138、0.137、0.138 和 0.141。由此可知, 超声功率和超声时间对冻干猕猴桃片 Aw 的影响是相似的, 二者均引起 Aw 显著下降($P<0.05$)。60~200 W 超声波预处理猕猴桃, 其冻干果片 Aw 下降 4.29%~20.86%; 1~5 min 超声波预处理, 冻干猕猴桃片 Aw 下降 4.91%~15.34%。类似的研究发现, 蘑菇片经 35 kHz 超声波预处理 30 min, 其热风干燥产品的 Aw 显著下降 19.0% ($P<0.05$)^[28]。但是, 超声功率介于 120~300 W 或超声时间介于 5~20 min 范围内, 冻干猕猴桃片 Aw 的变化趋于平稳并略有提升。结合水分含量和 Aw 指标, 可以对冻干果片的货架期进行判断和预测。

2.5 超声预处理对冻干猕猴桃片色泽的影响

颜色是评价新鲜果蔬及其制品的重要感官品质指标,

直接影响消费者的购买行为。由表 2 可见, 超声处理影响冻干猕猴桃片的色泽, 且不同的超声功率和超声时间对色泽影响显著($P<0.05$)。与空白对照组相比, 随着超声功率的增大, 冻干猕猴桃片的 L^* 、 b^* 及 ΔE 基本上呈上升趋势, 而 a^* 呈下降趋势, 可知超声波预处理有利于提高冻干猕猴桃片的亮度、绿色。以未经超声处理的冻干猕猴桃片色泽为基准, 经超声功率 300 W 处理后, 冻干果片的 L^* 、 b^* 及 ΔE 分别提高 6.48%、28.40%、538%, a^* 下降 20.95%。

表 2 超声预处理对冻干猕猴桃片色泽的影响($n=9$)
Table 2 Effects of ultrasonic pretreatments on the color of freeze drying kiwifruit slices ($n=9$)

处理	水平	L^*	a^*	b^*	ΔE
超声功率/W	0	64.33 ^d	-3.15 ^a	11.69 ^d	0 ^d
	60	67.44 ^c	-3.30 ^b	14.72 ^{bc}	4.37 ^c
	120	67.73 ^c	-3.52 ^c	15.42 ^a	5.08 ^{ab}
	180	67.95 ^{bc}	-3.68 ^d	14.38 ^c	4.56 ^{bc}
	240	68.62 ^a	-3.75 ^c	14.71 ^{bc}	5.30 ^a
	300	68.50 ^{ab}	-3.81 ^c	15.01 ^{ab}	5.38 ^a
超声时间/min	0	64.33 ^d	-3.15 ^a	11.69 ^d	0 ^c
	1	66.45 ^c	-3.24 ^a	12.15 ^d	2.19 ^d
	5	66.83 ^{bc}	-3.78 ^b	13.40 ^c	3.13 ^c
	10	67.33 ^b	-3.81 ^{bc}	15.01 ^a	4.54 ^b
	15	68.50 ^a	-3.89 ^{cd}	14.63 ^{ab}	5.16 ^{bc}
	20	68.36 ^a	-3.94 ^d	14.52 ^b	4.99 ^a

在时间方面, 超声处理 1 min 即显著提高冻干果片的 L^* 及 ΔE ($P < 0.05$), 增加值分别达到 3.30%、219%, 同时降低 a^* 值达 2.85%。随着超声时间的增加, L^* 、 b^* 及 ΔE 呈整体上升趋势, 而 a^* 呈下降趋势。

因此, 超声处理有利于加深冻干猕猴桃片的绿色。可能是因为猕猴桃片在超声过程中, 猕猴桃片中产生自由基和声化物质, 使产品颜色改变^[22]。随着超声功率增大、超声时间增长, VC 及其他物质的含量随之变化, 使得超声处理过的猕猴桃果片色泽发生明显变化。

曾凡杰等^[8]采用超声波处理(200 W、20 min)猕猴桃, 冻干制成猕猴桃片, 与未经超声处理组相比, 超声组果片的 L^* 、 a^* 、 b^* 及 ΔE 无显著差异($P > 0.05$)。分析其结论与本研究的差异, 是因为曾凡杰等^[8]测定的是冻干猕猴桃片切面色泽, 而本研究测定的是冻干猕猴桃片的均匀果粉的色泽。另外, 二者所用原料品种不同, 也可能导致结论不同。

3 结 论

猕猴桃富含糖类和酸类, 冻干后含水量较低, 糖酸比下降, 酸味更加突出, 不如香蕉、榴莲等冻干果片受消费者喜爱。本研究将超声波用于猕猴桃冻干前处理过程中, 使冻干果片的水分含量、可溶性糖含量、可滴定酸含量、糖酸比等均有不同程度提高, 体现在冻干产品具有较好的适口性, 改善了口腔中酸涩、干燥的不适感。控制果蔬干燥制品的色泽下降是科研人员关注的重点^[29-31]。猕猴桃经超声预处理后, 其冻干果片的 L^* 、 b^* 和 ΔE 有所增加, a^* 下降显著, 与未超声冻干的果片相比颜色更绿, 可见超声波预处理提高了冻干猕猴桃片的绿色品质。超声预处理冻干猕猴桃片的 A_w 显著降低, 更有利于提高产品的贮藏性。虽然所有超声组冻干猕猴桃片的 VC 含量略有下降, 但 VC 保存率较高, 超声预处理对 VC 的不利影响在可接受范围。总体而言, 超声预处理适用于冻干猕猴桃。与仅冻干的猕猴桃片相比, 经超声冻干的猕猴桃片的适口性、色泽、贮藏性均有提高, 综合品质有提升, 使消费者更易接受。其中, 功率 120~240 W 和时间 1~5 min 的超声波预处理, 有利于提高冻干猕猴桃片的综合品质。本研究中, 超声处理组的水分含量高于未超声组, 此结果尚未见报道, 下一步可深入探讨超声波对猕猴桃冻干过程中水分分布、迁移的影响。在改善冻干猕猴桃片品质的基础上, 超声处理是否能兼顾减少干燥时间、降低能耗, 也是今后系统研究的重点。

参考文献

- [1] 黄佳. 猕猴桃酒发酵及陈酿过程中多酚及多糖的变化规律[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
HUANG J. Change of polyphenol and polysaccharides during kiwi wine fermentation and ageing [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2016.
- [2] 左丽丽. 狗枣猕猴桃多酚的抗氧化与抗肿瘤效应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
ZUO LL. Characterization of antioxidant and anti-tumor of *Actinidia kolomikta* polyphenol [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [3] 王强, 李华佳, 邓长阳, 等. 不同油炸温度对猕猴桃脆片品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(16): 150-155.
WANG Q, LI HJ, DENG CY, et al. Effect of different frying temperatures on the quality of kiwi crisp [J]. Food Res Dev, 2020, 41(16): 150-155.
- [4] 邓红, 尤毅娜, 李宁, 等. 猕猴桃片的热风干燥特性[J]. 食品发酵与工业, 2014, 40(11): 165-170.
DENG H, YOU YN, LI N, et al. The hot air drying on kiwi fruit slices [J]. Food Ferment Ind, 2014, 40(11): 165-170.
- [5] 李梁, 程秀峰, 杨尚雄, 等. 基于低场核磁共振的热风干燥猕猴桃切片含水率预测模型[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 252-260.
LI L, CHENG XF, YANG SX, et al. Model for predicting the moisture content of kiwifruit slices during hot air drying based on low-field nuclear magnetic resonance [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2020, 36(10): 252-260.
- [6] 曾目成, 毕金峰, 陈芹芹, 等. 基于 Weibull 分布函数猕猴桃切片微波真空干燥过程模拟及应用[J]. 中国食品学报, 2015, 15(6): 129-135.
ZENG MC, BI JF, CHEN QQ, et al. Weibull distribution for modeling microwave vacuum drying of kiwifruit slices and its application [J]. J Chin Ins Food Sci Technol, 2015, 15(6): 129-135.
- [7] 张付杰, 辛立东, 代建武, 等. 猕猴桃片旋转托盘式微波真空干燥特性分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S1): 501-508.
ZHANG FJ, XIN LD, DAI JW, et al. Rotating tray microwave vacuum drying characteristics of kiwifruit slices [J]. Trans Chin Soc Agric Mach, 2020, 51(S1): 501-508.
- [8] 曾凡杰, 孟莉, 吕远平. 不同前处理和冻结方式对猕猴桃片干制品品质的影响[J]. 食品科技, 2017, 42(8): 63-68.
ZENG FJ, MENG L, LV YP. Effect of different pre-processing and freezing methods on the dry products quality of kiwi fruit slices [J]. Food Sci Technol, 2017, 42(8): 63-68.
- [9] HUANG D, LI WF, SHAO HJ, et al. Colour, texture, microstructure and nutrient retention of kiwifruit slices subjected to combined air-impingement jet drying and freeze drying [J]. Int J Food Eng, 2017, 13(7): 20160344.
- [10] 毕金峰, 冯舒涵, 金鑫, 等. 真空冷冻干燥技术与产业的发展及趋势[J]. 核农学报, 2022, 36(2): 414-421.
BI JF, FENG SH, JIN X, et al. Current status and development trend of freeze drying technology and industry [J]. J Nucl Agric Sci, 2022, 36(2): 414-421.
- [11] 吕豪, 韩清华, 吕为乔, 等. 果蔬微波干燥与低频超声协同干燥应用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(11): 180-185.
LV H, HAN QH, LV WQ, et al. Trends in microwave and low-frequency ultrasonic assisted drying of fruit and vegetables [J]. Food Res Dev, 2018, 39(11): 180-185.
- [12] 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): 1-11.
YANG HZ, XIAO YD, WANG J, et al. Optimization of ultrasonic pretreatment process for cauliflower and analysis of moisture status during drying [J]. Mod Food Sci Technol, 2022, 38(5): 1-11.
- [13] 薛扬, 刘恩宠, 耿鸣阳, 等. 铁棍山药超声强化热泵干燥的品质特性研

- 究[J/OL]. 食品与发酵工业: 1-14. [2022-07-14]. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.030200
- XUE Y, LIU ENC, GENG MY, *et al.* Quality characteristics of dioscorea oppositifolia by ultrasound-enhanced heat pump drying [J/OL]. Food Ferment Ind: 1-14. [2022-07-14]. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.030200
- [14] 石晓微, 刘云宏. 超声-远红外辐射干燥对香蕉片品质的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(1): 204-209.
- SHI XW, LIU YH. Effects of ultrasound combined far-infrared radiation drying on the quality of banana slices [J]. Food Mach, 2021, 37(1): 204-209.
- [15] 安可婧, 魏来, 唐道邦, 等. 果蔬干燥前处理技术的应用及研究进展[J]. 现代食品科技, 2019, 35(6): 314-316.
- AN KJ, WEI L, TANG DB, *et al.* Application and research progress of pretreatment technology for drying of fruits and vegetables [J]. Mod Food Sci Technol, 2019, 35(6): 314-316.
- [16] ERHAN H, HAWAR JJ, MEDENI M. Ultrasonication as pretreatment for drying of tomato slices in a hot air-microwave hybrid oven [J]. Drying Technol, 2017, 35(7): 849-859.
- [17] ZHANG LH, LIAO L, QIAO Y, *et al.* Effects of ultrahigh pressure and ultrasound pretreatments on properties of strawberry chips prepared by vacuum-freeze drying [J]. Food Chem, 2020, 303: 1-9.
- [18] 陈文敏, 彭星星, 马婷, 等. 超声处理对中短波红外干燥红枣时间及品质的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(8): 74-80.
- CHEN WM, PENG XX, MA T, *et al.* Impact of ultrasonic treatment on drying time and quality of red jujubes dried by medium-and short-wavelength infrared radiation [J]. Food Sci, 2015, 36(8): 74-80.
- [19] 苑丽婧, 何秀, 林蓉, 等. 超声预处理对猕猴桃水分状态及热风干燥特性的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(13): 263-272.
- YUAN LJ, HE X, LIN R, *et al.* Effects of ultrasound pretreatment on water state and hot-air drying characteristics of kiwifruit [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2021, 37(13): 263-272.
- [20] FILIP D, MLADEN B, SVEN K, *et al.* Ultrasound-assisted infrared drying of pear slices: Textural issues [J]. J Food Process Eng, 2013, 36(3): 397-406.
- [21] 巩鹏飞, 赵庆生, 赵兵. 超声波应用于食品干燥的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(44): 196-199.
- GONG PF, ZHAO QS, ZHAO B. Research progress of ultrasound in foodstuff drying [J]. Food Res Dev, 2017, 38(44): 196-199.
- [22] NOWACKAM, TYLEWICZ U, ROMANI S, *et al.* Influence of ultrasound-assisted osmotic dehydration on the main quality parameters of kiwifruit [J]. Innov Food Sci Emerg Technol, 2017, 41: 71-78.
- [23] 冯银杏, 李汴生. 果实成熟度对冻干猕猴桃片品质影响[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(9): 144-148.
- FENG YX, LI BS. Effect of the fruit maturities on the quality of freeze-dried kiwifruit slices [J]. Food Ferment Ind, 2017, 43(9): 144-148.
- [24] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2017.
- CAO JK, JIANG WB, ZHAO YM. Experiment guidance of postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2017.
- [25] ORDONEZ-SANTOS LE, MARTINEZ-GIRON J, ARIAS-JARAMILLO ME. Effect of ultrasound treatment on visual color, vitamin C, total phenols, and carotenoids content in cape gooseberry juice [J]. Food Chem, 2017, 233: 96-100.
- [26] AGUILAR K, GARVIN A, IBARZ A, *et al.* Ascorbic acid stability in fruit juices during thermosonication [J]. Ultrason Sonochem, 2017, 37: 375-381.
- [27] HUANG D, MEN KY, LI DP, *et al.* Application of ultrasound technology in the drying of food products [J]. Ultrason Sonochem, 2020, 63: 104950.
- [28] RUKEN ŞÇ, ONUR T, HAMZA B, *et al.* Effects of electrical and sonication pretreatments on the drying rate and quality of mushrooms [J]. Food Sci Technol 2016, 69: 197-202.
- [29] GULLCIN Y, GOKCEN L. The effect of ultrasound pretreatment on quality attributes of freeze-dried quince slices: Physical properties and bioactive compounds [J]. J Food Process Eng, 2019, 42(5): 13223.
- [30] ALLAHADAD Z, NASIRI M, VARIDI M, *et al.* Effect of sonication on osmotic dehydration and subsequent air-drying of pomegranate arils [J]. J Food Eng, 2019, 244: 202-211.
- [31] AMAMI E, KHEZAMI W, MEZRIGUI S, *et al.* Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of strawberry [J]. Ultrason Sonochem, 2017, 36: 286-300.

(责任编辑: 张晓寒 韩晓红)

作者简介



陈学玲, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为果蔬加工与贮藏。

E-mail: 17810686@qq.com



何建军, 研究员, 主要研究方向为农产品加工与贮藏。

E-mail: 920025354@qq.com