

火龙果粉冷冻-真空微波干燥工艺优化及贮藏品质

靳学远¹,黄丽萍¹,张培旗²

(1. 海南科技职业大学 临床医药学院,海南 海口 571126;2. 郑州轻工业大学 食品与生物工程学院,河南 郑州 450000)

摘要: 为优化火龙果粉的冷冻干燥结合真空微波干燥工艺并研究其贮藏品质,以火龙果为原料,以复水比和维生素C保留率加权转化的综合评分为指标,通过单因素和响应面试验优化火龙果粉的工艺条件并分析其贮藏品质。结果表明,优化后的工艺条件为采用冷冻干燥将火龙果干燥到水分含量35%后,再采用真空度40 Pa、微波功率1500 W的真空微波干燥继续将其干燥至水分含量3.5%。该条件下,产品实际综合评分为85.17,与理论预测值基本吻合。联合干燥技术的产品在25℃、相对湿度65%的条件下贮藏30 d时,火龙果粉中的V_C保留率为(83.36±0.65)%,感官评分65.6,V_C的保留率和感官评分均较高,具有较好的贮藏品质。

关键词: 火龙果粉;冷冻干燥;真空微波干燥;工艺;贮藏特性

Freeze Drying Combined with Vacuum Microwave Drying Process and Storage Quality of Dragon Fruit Powder

JIN Xueyuan¹,HUANG Liping¹,ZHANG Peiqi²

(1. College of Clinical Medicine, Hainan Vocational University of Science and Technology, Haikou 571126, Hainan, China;2. College of Food and Biological Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450000, Henan, China)

Abstract: The freeze-drying combined with vacuum microwave-drying process and the storage quality of dragon fruit powder were studied. With the comprehensive score of weighted rehydration ratio and V_C retention rate as indicators, the preparation technology of dragon fruit powder from fresh dragon fruits were optimized by single factor and response surface tests, and then the storage quality of the powder was investigated. The preparation conditions were optimized as follows: dragon fruits were first freeze-dried to reach the moisture content of 35% and then dried by vacuum microwave at 40 Pa vacuum and 1500 W to reach the moisture content of 3.5%. Under these conditions, the comprehensive score reached 85.17, consistent with the predicted value. The products prepared with the combined drying technology were stored at 25℃ and the relative humidity of 65% for 30 days, and the dragon fruit powder showed the V_C retention rate of (83.36±0.65)% and the sensory score of 65.6, which indicated good storage quality.

Key words: dragon fruit powder; freeze-drying; vacuum wave drying; technology; storage characteristics

引文格式:

靳学远,黄丽萍,张培旗. 火龙果粉冷冻-真空微波干燥工艺优化及贮藏品质[J]. 食品研究与开发,2024,45(6):136-141,166.

JIN Xueyuan, HUANG Liping, ZHANG Peiqi. Freeze Drying Combined with Vacuum Microwave Drying Process and Storage Quality of Dragon Fruit Powder[J]. Food Research and Development, 2024, 45(6): 136-141, 166.

火龙果 (*Hylocereus undatus*) 为仙人掌科 (Cactaceae) 三角柱属植物, 近年来, 在我国海南、广西、福建等省被广泛种植^[1-2]。火龙果中含有丰富的矿物质^[3]、维生素^[4]、膳食纤维^[5]和黄酮^[6-8]等功能成分, 具有抗氧化^[9-10]和抗炎^[11]等作用。由于火龙果水分含量高, 长期贮藏困难, 通过适宜的干燥方式将火龙果进行干燥, 进一步加工为超微粉是开发利用火龙果的一种重要方法^[12]。

热风干燥是常用的果蔬干燥方法^[13-14], 王新茗等^[15]采用热风干燥方法干燥无花果, 研究不同温度热风干燥过程中水分含量变化情况及对无花果品质的影响, 发现低温烘干能更好地保持无花果的色泽, 而高温烘干样品中多酚类成分含量高; 金佳秀等^[16]研究热风干燥条件对桃干及葡萄干品质的影响, 发现热风温度和时间对桃干、葡萄干的品质有较大影响; 李子淳等^[17]研究热风干燥温度和风速 2 个因素对黄秋葵干燥品质的影响, 建立黄秋葵热风干燥的回归数学模型, 确定了黄秋葵热风干燥的最优工艺参数。为发挥各种干燥方法优点, 既减少干燥时间、降低能耗, 又较好地保持产品品质, 近年来联合干燥技术在果蔬干燥领域得到了应用^[18-19]。Chen 等^[20]将微波和红外干燥结合用于干燥胡椒、胡萝卜和哈密瓜中; Zhang 等^[21]将冷冻结合红外干燥应用在莲藕的干燥中, 效果均优于单一干燥方式。冷冻与真空微波联合干燥, 可在前期保持产品质量的基础上, 利用冷冻干燥除去大部分的水分, 后期利用真空微波的高强度干燥特点, 进一步除去残余水分, 实现既保持产品品质, 又有效降低能耗的目的, 而冷冻干燥与真空微波干燥联合应用在火龙果干燥中的研究较少。

因此, 本研究将冷冻干燥与真空微波联合应用在火龙果粉制备的干燥过程中, 优化干燥工艺条件。同时, 进一步研究不同干燥方法制备的火龙果粉在贮藏过程中的品质变化, 以期对火龙果的深加工利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

火龙果 (品种为“软枝大红”): 市售; 2,6-二氯酚靛酚、草酸、抗坏血酸 (均为分析纯): 国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

海尔 DW-86L338(J) 超低温冰箱: 青岛海尔股份有限公司; TD-02FA 型冷冻干燥机: 北京亚星仪科科技发展有限公司; YZWZ-1 真空微波箱: 南京火燥机械科技实力工厂; KCW-10 低温超微粉碎机: 北京锐捷玉诚机械设备有限公司; UV1800 紫外可见分光光度计: 日本岛津公司。

1.3 方法

1.3.1 果粉的制备

选择成熟度 7~8 成的火龙果, 去皮, 纵向切半后,

横向切成厚度 10~15 mm 薄片, 然后分别采用冷冻干燥、真空微波干燥和二者联合干燥的方法对火龙果进行干燥。冷冻干燥方法中, 火龙果薄片先在 -50 °C 超低温冰箱中预冻 2 h, 然后将预冻后的火龙果片放在冷冻干燥机的托盘中, 在冷阱温度 -30 °C、真空度 10 Pa 下进行干燥; 真空微波干燥方法中, 采用真空微波干燥箱中, 在 2 000 W、真空度 40 Pa 下进行干燥; 联合干燥中, 火龙果在 -50 °C 超低温冰箱中预冻 2 h 后, 将预冻后的火龙果片放在冷冻干燥机的托盘中, 在冷阱温度 -30 °C、真空度 10 Pa 下, 干燥到一定的水分含量, 然后放入真空微波干燥箱中继续进行干燥。最终, 在 3 种干燥方法下, 将火龙果干燥到水分含量 3.5%, 然后分别采用低温超微粉碎机粉碎, 过 200 目筛, 迅速密封。

1.3.2 联合干燥单因素试验设计

将火龙果片采用冷冻干燥到不同的水分含量 (15%、25%、35%、45%、55%), 放入微波真空干燥箱中, 在一定的微波功率 (500、1 000、1 500、2 000、2 500 W)、一定的真空度 (10、20、30、40、50 Pa) 下, 干燥到水分含量 3.5%, 冷冻粉碎机粉碎后过 200 目筛, 测定复水比和 V_c 保留率, 计算综合评分。

1.3.3 联合干燥响应面试验设计

根据单因素试验结果, 采用 Box-Behnken 中心组合设计原则, 以综合评分为响应值 (Y), 选取物料水分含量 (A)、真空度 (B) 和微波功率 (C) 为自变量进行三因素三水平试验设计, 试验的因素和水平见表 1。

表 1 响应面分析因素与水平

Table 1 Factors and levels of response surface analysis

水平	因素		
	A 水分含量/%	B 真空度/Pa	C 微波功率/W
-1	30	35	1 400
0	35	40	1 500
1	40	45	1 600

1.3.4 火龙果粉中 V_c 含量的测定

V_c 含量采用 GB 5009.86—2016《食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定》方法测定。

1.3.5 火龙果粉复水比的测定

称取干燥的火龙果粉 1 g, 放入离心管, 加入 20 mL 蒸馏水, 在 25 °C 条件下放置 1 h 后, 5 000 r/min 离心 20 min, 取沉淀, 称量, 按下式计算复水比。

$$R = \frac{m}{M}$$

式中: R 为火龙果粉的复水比; m 为火龙果粉复水后的质量, g; M 为火龙果粉复水前的质量, g。

1.3.6 火龙果粉 V_c 保留率的测定

测定不同火龙果粉干燥前、干燥后的 V_c 含量和不同贮藏时间的火龙果粉的 V_c 含量。按下式计算干燥前后 V_c 保留率 ($L, \%$)。

$$L = \frac{H_2}{H_1} \times 100$$

式中： H_1 为干燥前的 V_C 含量,mg/g; H_2 为干燥后的 V_C 含量,mg/g。

按下式计算贮藏前后 V_C 保留率(P ,%)。

$$P = \frac{H_4}{H_3} \times 100$$

式中： H_3 为贮藏前的 V_C 含量,mg/g; H_4 为贮藏后的 V_C 含量,mg/g。

1.3.7 火龙果粉品质的综合评分

将得到的复水比和干燥前后 V_C 保留率数据分别转化为百分制得分,进而加权分配,得到综合评分。根

据生产实际,复水比的最大值 5 对应百分制得分 100 分,最小值 1 对应百分制得分 0 分; V_C 保留率的最大值 100% 对应百分制得分 100 分,最小值 0 对应百分制得分 0 分。复水比和 V_C 保留率百分制的权重分别为 0.6 和 0.4,综合评分按下式计算。

$$Y = 0.6Y_1 + 0.4Y_2$$

式中： Y 为综合评分; Y_1 为复水比得分; Y_2 为 V_C 保留率得分。

1.3.8 火龙果粉的感官评价

参考杨妮等^[12]的方法进行适当调整。由 10 名评价员对产品的色泽、气味、口感、流动性、溶解性进行评价。评分标准见表 2。

表 2 感官评分标准

Table 2 Sensory evaluation criteria

色泽	气味	口感	流动性	溶解性	得分
紫红色,光泽好	具有浓郁的火龙果香气	清爽、细腻	粉体疏松,无结块	1 g 粉加入到 50 mL、60 °C 水中,搅拌后均匀分散	11~15
色泽红色,略有光泽	有火龙果风味,略有焦味	略粘口,略有粗糙颗粒感	基本疏松,有少量结块	1 g 粉加入到 50 mL、60 °C 水中,搅拌后有少量结块	6~<11
色泽灰白,无光泽	无火龙果风味,或焦味严重	粘口,粗糙颗粒感严重	粉体结块严重	1 g 粉加入到 50 mL、60 °C 水中,搅拌时结块严重,难分散	1~<6

1.3.9 果粉的贮藏品质评价

将冷冻干燥、微波干燥和联合干燥 3 种方法得到的火龙果粉放在聚乙烯塑料袋中,在 25 °C、相对湿度 65% 的条件下贮藏 30 d,每隔 10 d 测定产品的 V_C 保留率并进行感官评价。

1.4 数据处理

每组数据测定 3 次,以平均值±标准差表示;SPSS18.0 进行显著性分析, $P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 联合干燥过程中单因素对火龙果粉复水比和 V_C 保留率的影响

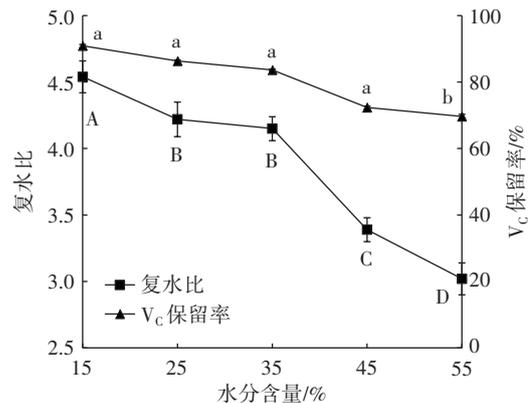
2.1.1 转换点水分含量对火龙果粉复水比和 V_C 保留率的影响

水分含量对火龙果粉复水比和 V_C 保留率的影响见图 1。

由图 1 可知,随着转换点水分含量的降低,复水比增大, V_C 保留率增加。这是因为在冷冻干燥和微波干燥结合干燥过程中,冷冻干燥阶段进行的时间越长,越有利于果粉形成疏松结构,越有利于 V_C 的保留。但当转换点水分含量达到 35% 后,继续降低转化点水分含量到 25%,转化点水分含量 25% 的产品同 35% 的产品相比,复水比和 V_C 保留率差异不显著($P>0.05$),因此,转换点水分含量 35% 较适宜。

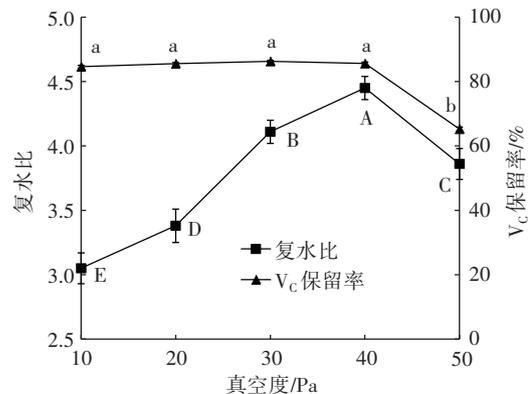
2.1.2 微波干燥真空度对火龙果粉复水比和 V_C 保留率的影响

真空度对火龙果粉复水比和 V_C 保留率的影响见图 2。



同一指标不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

图 1 转换点水分含量对火龙果粉复水比和 V_C 保留率的影响
Fig.1 Effect of moisture content at transition point on the rehydration ratio and V_C retention rate of dragon fruit powder



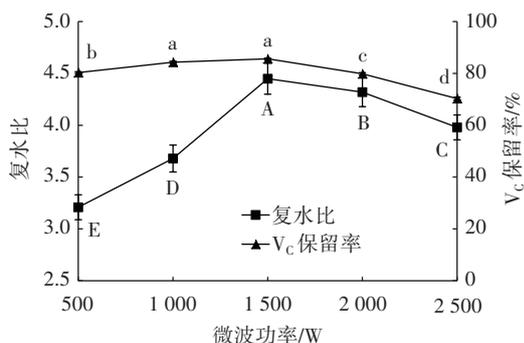
同一指标不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

图 2 真空度对复水比和 V_C 保留率的影响
Fig.2 Effect of vacuum degree on rehydration ratio and V_C retention

由图 2 可知,随着真空度增加,复水比增加, V_C 保留率增加,但达到 40 Pa 的真空度后,继续增加真空度,复水比下降,且 40 Pa 干燥的产品同 50 Pa 干燥的产品相比,复水比差异显著($P<0.05$)。因此,对于复水比,40 Pa 真空度较适宜;对于 V_C 保留率,在 40 Pa 前,随着真空度增加, V_C 保留率差异不显著($P>0.05$),但 40 Pa 后,随着真空度增加, V_C 保留率下降,且 50 Pa 干燥的产品同 40 Pa 干燥的产品相比, V_C 保留率差异显著($P<0.05$),因此,40 Pa 真空度较适宜。真空度增加,水的沸点变化,水蒸气逃逸速度增加,快速形成多孔的疏松结构,有利于复水比的增加,同时,真空度过高,容易形成真空放电现象,导致温度升高,火龙果中的糖、蛋白质发生焦化,反而不利于疏松结构的析出,并且导致 V_C 的破坏。综合二项指标计算综合评分,40 Pa 的综合评分为 86.00,因此,选择 40 Pa 作为适宜的真空度。

2.1.3 微波功率对火龙果粉复水比和 V_C 保留率的影响

微波功率对火龙果粉复水比和 V_C 保留率的影响见图 3。



同一指标不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

图 3 微波功率对火龙果粉复水比和 V_C 保留率的影响

Fig.3 Effect of microwave power on rehydration ratio and V_C retention

由图 3 可知,随着微波功率增加,火龙果粉复水比增加,但达到 1 500 W 后,继续增加功率,复水比反而降低,且 2 000 W 干燥的产品同 1 500 W 干燥的产品相比,复水比差异显著($P<0.05$)。这是因为功率增加,水分子汽化的速率增加,促进果干疏松结构的形成,但功率过大,物料内部水蒸气和外界压力过大,直接冲出物料内部,难以在物料内部多流道传输,形成多孔结构^[22]。对于 V_C 保留率,随着功率增加, V_C 保留率增加,但达到 1 500 W 后,继续增加功率, V_C 保留率下降,且 2 000 W 干燥的产品同 1 500 W 干燥的产品相比, V_C 保留率差异显著($P<0.05$)。这是因为一方面,过高的微波功率产生大量的能量,形成对 V_C 的破坏;另一方面,微波功率小,干燥需要的时间长,长时间的微波作用,也会造成 V_C 破坏增加,因此,综合二项指标计算综合评分,1 500 W 的综合评分为 86.00,为最大值,因此,

选择 1 500 W 为适宜的微波功率。

2.2 响应面优化联合干燥的工艺条件优化 响应面试验结果见表 3。

表 3 响应面试验结果

Table 3 Response surface experiment results

试验号	A	B	C	Y
1	-1	0	-1	73.71
2	0	-1	-1	73.81
3	1	0	-1	70.12
4	1	-1	0	72.89
5	1	1	0	72.12
6	0	0	0	85.12
7	0	0	0	85.20
8	-1	0	1	73.12
9	0	-1	1	70.87
10	0	0	0	85.26
11	-1	-1	0	70.89
12	1	0	1	66.12
13	0	1	-1	73.11
14	0	1	1	71.32
15	0	0	0	84.94
16	-1	1	0	76.01
17	0	0	0	85.14

通过 Design Expet 7.1.3 软件对表 3 的试验数据进行多元回归拟合,得到联合干燥的二次多项回归模型方程为 $Y=85.13-1.51A+0.51B-1.12C-1.47AB-0.95AC+0.29BC-0.88A^2-5.27B^2-7.58C^2$ 。

对该模型进行显著性检验,结果见表 4。

表 4 回归方程系数显著性检验

Table 4 Significance of regression equation coefficients

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	665.19	9	73.91	45.58	<0.000 1	**
A	18.24	1	18.24	11.25	0.012 2	*
B	2.10	1	2.10	1.30	0.292 4	
C	9.95	1	9.95	6.13	0.042 4	*
AB	8.67	1	8.67	5.35	0.054 0	
AC	3.63	1	3.63	2.24	0.178 3	
BC	0.33	1	0.33	0.20	0.665 3	
A ²	199.43	1	122.99	<0.000 1		
B ²	117.04	1	72.18	<0.000 1		
C ²	242.07	1	149.28	<0.000 1		
残差	11.35	7	1.62			
失拟项	11.29	3	3.76	259.24	<0.000 1	**
纯误差	0.058	4	0.015			
总误差	676.54	16				

注:*表示影响显著, $P<0.05$;**表示影响极显著, $P<0.01$ 。

由表 4 可知, F 值为 45.58, $P<0.000 1$,说明此模型具有显著性,可用于火龙果粉真空冷冻与微波联合干燥制备的理论预测。

响应面曲面可直观显示变量之间的交互作用,水分含量、真空度和微波功率的交互作用对干燥产品综合评价的响应面图如图4所示。

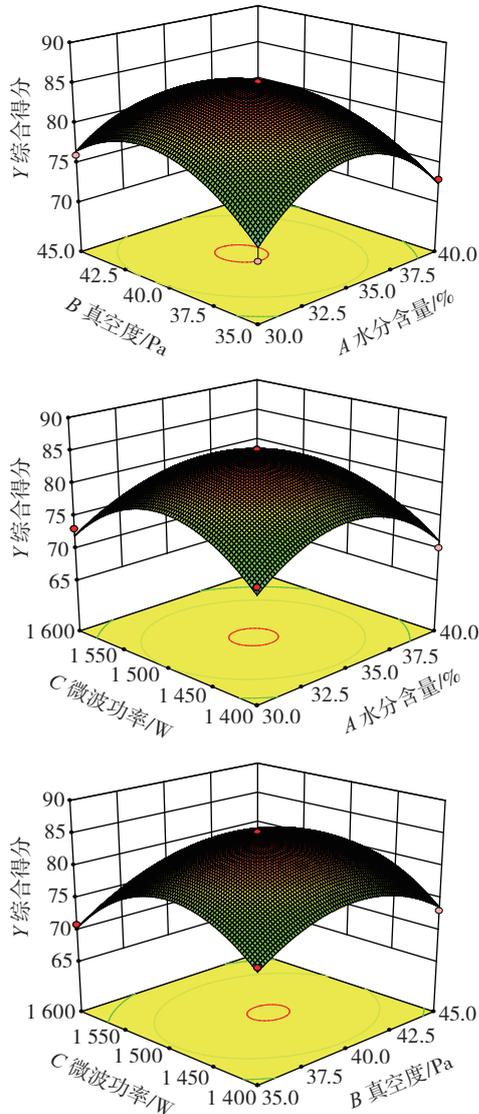


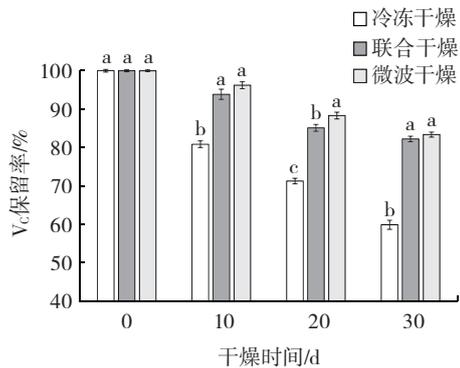
图4 各因素交互作用对综合评价得分的影响
Fig.4 Effects of interactions between factors on the comprehensive score

由图4可以看出,水分含量、真空度和微波功率的响应面图呈椭圆形且存在中心点,在中心点附近综合评价得分达到最大值。结合回归模型的数学分析,得到真空冷冻与微波联合干燥的最佳工艺条件为水分含量、真空度和微波功率,结合对回归方程进行一阶求导,得到响应值Y处于最大值时A、B、C的适宜条件为A=34.95%、B=40.32 Pa、C=1 489.55 W,此时由回归方程预测Y的理论值为85.19。对其进行修正,A=35%、B=40 Pa、C=1 500 W,在修正条件下,经3次验证试验,得到实际综合评分85.17,与理论预测值基本吻合。因此,利用响应面优化得到的真空冷冻与微波联合干燥工艺参数可靠,具有较好的使用价值。

2.3 不同干燥方式产品的贮藏特性

2.3.1 不同干燥方式所得火龙果粉贮藏期间V_C保留率的变化

贮藏方式对火龙果粉V_C保留率的影响见图5。



相同干燥时间不同字母表示不同干燥方式差异显著(P<0.05)。

图5 贮藏方式对火龙果粉V_C保留率的影响

Fig.5 Vitamin C retention rate of dragon fruit powder dried with different methods during the storage period

由图5可知,在贮藏过程中,冷冻干燥、微波干燥和联合干燥3种方法得到的火龙果粉的V_C的保留率均下降,贮藏30 d后,冷冻干燥、微波干燥和联合干燥3种方法得到的火龙果粉中的V_C的保留率分别为(59.84±1.18)%、(82.23±0.71)%、(83.36±0.65)%,微波干燥和联合干燥的V_C保留率差异不显著(P>0.05),冷冻干燥V_C保留率同微波干燥、联合干燥的V_C的保留率相比,差异显著(P<0.05)。这可能是由于冷冻干燥的火龙果粉组织酥松,吸湿性强,吸收的水分和疏松结构中的氧气导致贮藏过程中V_C的氧化。

2.3.2 不同干燥方式所得火龙果粉贮藏期间火龙果粉感官评分

不同贮藏方式下火龙果粉感官评分见图6。

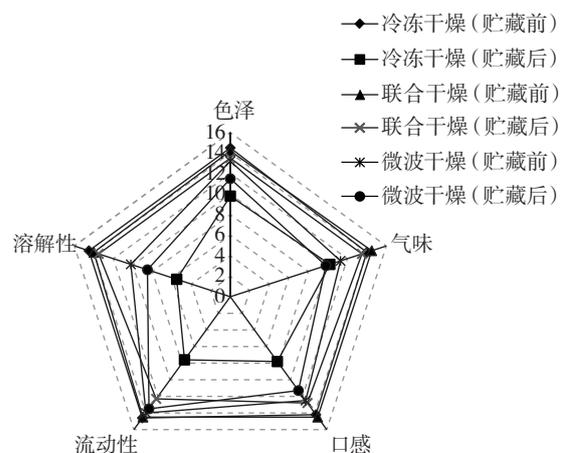


图6 不同贮藏方式下火龙果粉感官评分
Fig.6 Sensory scores of dragon fruit powder dried with different methods before and after storage

由图6可知,贮藏前评分依次为色泽:冷冻干燥>

联合干燥>微波干燥; 气味: 联合干燥>冷冻干燥>微波干燥; 口感: 联合干燥>冷冻干燥>微波干燥; 流动性: 冷冻干燥>联合干燥>微波干燥; 溶解性: 冷冻干燥>联合干燥>微波干燥。表明冷冻干燥和联合干燥指标较优于微波干燥, 这是微波干燥的能量对果粉成分造成一定的破坏; 但贮藏过程中, 冷冻干燥产品的各项指标下降较快。贮藏 30 d 后, 联合干燥、冷冻干燥、微波干燥 3 种干燥方法所得产品感官评分分别为 65.6、40.9 和 65.6。其中色泽: 联合干燥>微波干燥>冷冻干燥; 气味: 联合干燥>冷冻干燥>微波干燥; 口感: 联合干燥>微波干燥>冷冻干燥; 流动性: 联合干燥>微波干燥>冷冻干燥; 溶解性: 联合干燥>微波干燥>冷冻干燥。表明贮藏后联合干燥产品各项指标得分均较高。这是由于贮藏过程中, 由于冷冻干燥产品具有疏松的结构, 对水分吸收较快, 造成色素氧化、粉体粘结, 导致各项指标快速下降。

3 结论

冷冻干燥与真空微波干燥联合干燥的优化工艺条件为采用冷冻干燥将火龙果干燥到水分含量 35% 后, 再采用真空度 40 Pa、微波功率 1 500 W 的真空微波干燥继续将其干燥到水分含量 3.5%。在该条件下, 产品实际综合评分 85.17, 与理论预测值基本吻合。联合干燥后的火龙果果粉, 贮藏 30 d, V_c 保留率和产品各项感官评分均较高, 联合干燥的产品具有较好的贮藏品质。本研究为火龙果粉的工业化生产提供了一定的技术参考, 对火龙果粉的开发和利用的研究具有较好的参考价值。

参考文献:

- [1] 李健星, 谭艳芳, 李冬兴, 等. 基于转录组的不同火龙果品种抗性差异分析[J]. 广西植物, 2022, 42(2): 183-190.
LI Jianxing, TAN Yanfang, LI Dongxing, et al. Resistance difference between different varieties of pitaya based on transcriptome data[J]. Guihaia, 2022, 42(2): 183-190.
- [2] 胡文斌, 洪青梅, 李婧, 等. 火龙果主要商业品种 SSR 指纹图谱构建和遗传多样性分析[J]. 热带作物学报, 2021, 42(5): 1310-1317.
HU Wenbin, HONG Qingmei, LI Jing, et al. Genetic diversity analysis and SSR fingerprint construction of pitaya cultivars[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(5): 1310-1317.
- [3] 潘晓威, 杨春亮, 李培, 等. 石墨消解-等离子体质谱仪测定火龙果中 5 种微量元素[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(7): 1408-1411.
PAN Xiaowei, YANG Chunliang, LI Pei, et al. Determination of 5 microelements in pitaya by inductively coupled plasma mass spectrometry with automatic graphite digestion[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2021, 62(7): 1408-1411.
- [4] ARIVALAGAN M, KARUNAKARAN G, ROY T K, et al. Biochemical and nutritional characterization of dragon fruit (*Hylocereus* species)[J]. Food Chemistry, 2021, 353: 129426.
- [5] 牛春艳, 郑思蒙, 吴琼. 火龙果果皮中水溶性膳食纤维的制备[J]. 现代食品, 2020(1): 186-188.
NIU Chunyan, ZHENG Simeng, WU Qiong. Preparation of water-soluble dietary fiber from pitaya pericarp[J]. Modern Food, 2020(1): 186-188.
- [6] ZITHA E Z M, MAGALHÃES D S, DO LAGO R C, et al. Changes in the bioactive compounds and antioxidant activity in red-fleshed dragon fruit during its development[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 291: 110611.
- [7] 阳辛凤, 王盼, 郭晓杰, 等. 火龙果果实甜菜苷类色素组成与分布[J]. 食品与机械, 2021, 37(7): 20-25, 32.
YANG Xinfeng, WANG Pan, GUO Xiaojie, et al. Study on the components and distribution of betalain pigments in different species of pitaya fruit[J]. Food & Machinery, 2021, 37(7): 20-25, 32.
- [8] 吴冬凡, 庞杜贤, 林清盛. 火龙果果皮总黄酮和多糖的提取工艺及抗氧化研究[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2021, 53(5): 68-75.
WU Dongfan, PANG Duxian, LIN Qingsheng. On the extraction and antioxidation of total flavonoids and polysaccharides from pitaya peel (*Hylocereus undatus* 'Foo-lon')[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2021, 53(5): 68-75.
- [9] 何丽芳, 陈佩云, 刘最, 等. 红心火龙果原花青素超声辅助提取及其抗氧化活性[J]. 衡阳师范学院学报, 2021, 42(6): 86-91.
HE Lifang, CHEN Peiyun, LIU Zui, et al. On ultrasonic-assisted extraction and antioxidant activity of proanthocyanidins from red dragon fruits[J]. Journal of Hengyang Normal University, 2021, 42(6): 86-91.
- [10] 段秋霞, 李定金, 段振华, 等. 红心火龙果酒贮藏过程中抗氧化活性变化的研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(24): 43-49.
DUAN Qiuxia, LI Dingjin, DUAN Zhenhua, et al. Study on changes of antioxidant activity of red heart pitaya wines during storage[J]. Food Research and Development, 2020, 41(24): 43-49.
- [11] 王旭旭, 马领领, 马卓云, 等. 火龙果的功能及其作用机制研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(21): 352-360.
WANG Xuxu, MA Lingling, MA Zhuoyun, et al. Research progress on the function of pitaya and its mechanism[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(21): 352-360.
- [12] 杨妮, 熊康宁, 彭惠蓉. 喀斯特环境火龙果真空冷冻干燥工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(10): 86-90.
YANG Ni, XIONG Kangning, PENG Huirong. Study on vacuum freeze-drying process of dragon fruit in Karst rocky desertification environment[J]. Food Research and Development, 2020, 41(10): 86-90.
- [13] 楚文靖, 盛丹梅, 张楠, 等. 红心火龙果热风干燥动力学模型及品质变化[J]. 食品科学, 2019, 40(17): 150-155.
CHU Wenjing, SHENG Danmei, ZHANG Nan, et al. Hot-air drying of red-fleshed pitaya: Kinetic modelling and quality changes[J]. Food Science, 2019, 40(17): 150-155.
- [14] JOSEPH BASSEY E, CHENG J H, SUN D W. Improving drying kinetics, physicochemical properties and bioactive compounds of red dragon fruit (*Hylocereus* species) by novel infrared drying[J]. Food Chemistry, 2022, 375: 131886.
- [15] 王新茗, 贾传青, 王晓, 等. 无花果热风干燥过程中水分变化及其品质研究[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(11): 71-78.
WANG Xinming, JIA Chuangqing, WANG Xiao, et al. Detecting variations in water and quality of *Ficus carica* L. during hot air drying[J]. Food Research and Development, 2022, 43(11): 71-78.
- [16] 金佳秀, 商建宏, 王秋菊, 等. 热风干燥对桃干及葡萄干品质的影响[J]. 浙江农业科学, 2022, 63(7): 1382-1385, 1390.
JIN Jiaxiu, SHANG Jianhong, WANG Qiuju, et al. Effect of hot air drying on the quality of dried peach and raisins[J]. Journal of Zhejiang (下转第 166 页)

- 41(16): 1-7.
- [28] LIU D M, CHEN X, HUANG J C, et al. Stability of antioxidant peptides from duck meat after post-mortem ageing[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2017, 52(12): 2513-2521.
- [29] 梁杰, 赵晓旭, 汪秀妹, 等. 鲍鱼水解肽的抗氧化活性评价、组成分析及稳定性研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2019, 47(2): 279-284.
- LIANG Jie, ZHAO Xiaoxu, WANG Xiumei, et al. Antioxidant activity evaluation, composition analysis and stability study of the abalone hydrolytic peptides[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2019, 47(2): 279-284.
- [30] 李慧卿, 曹叶霞, 黄坊娇. DPPH·和 ABTS·比较研究毛建草多酚、黄酮和多糖的抗氧化协同作用[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2022, 42(3): 98-105.
- LI Huiqing, CAO Yexia, HUANG Fangjiao. Comparative Study of DPPH·and ABTS·methods on the antioxidant synergistic effects of polyphenols, flavonoids and polysaccharides of *Dracocephalum rupestre* Hance[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2022, 42(3): 98-105.
- [31] 郑志强, 刘晋, 魏晓娟, 等. 加工条件及模拟胃肠消化对小麦肽抗氧化稳定性的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 330-336.
- ZHENG Zhiqiang, LIU Jin, WEI Xiaojuan, et al. Effects of processing conditions and simulated gastrointestinal digestion on antioxidative stability of wheat peptide[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 330-336.
- [32] 胡晓, 吴静, 杨贤庆, 等. 添加物和体外模拟胃肠道消化对鳶乌贼抗氧化肽稳定性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(11): 91-96.
- HU Xiao, WU Jing, YANG Xianqing, et al. Effect of additives and gastrointestinal digestion *in vitro* on antioxidant stability of peptides derived from Purpleback flying squid(*Symplectoteuthis oval-aniensis*) [J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(11): 91-96.
- [33] 唐宁, 庄红. 玉米抗氧化肽 Leu-Pro-Phe 抗氧化稳定性研究[J]. 中国食品学报, 2015, 15(2): 49-55.
- TANG Ning, ZHUANG Hong. Studies on the antioxidative stability of corn antioxidant peptide leu-pro-phe[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(2): 49-55.
- [34] LIU K L, DU R F, CHEN F S. Stability of the antioxidant peptide SeMet-Pro-Ser identified from selenized brown rice protein hydrolysates[J]. Food Chemistry, 2020, 319: 126540.
- [35] 郑昌亮, 陈梦婷, 汪兰, 等. 鳙鱼肌原纤维蛋白源抗氧化肽的稳定性研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(8): 43-50.
- ZHENG Changliang, CHEN Mengting, WANG Lan, et al. Stability of antioxidant peptides from bighead carp (*Aristichthys nobilis*) myofibrillar protein[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(8): 43-50.

责任编辑:冯娜
收稿日期:2022-10-05

(上接第 141 页)

- ang Agricultural Sciences, 2022, 63(7): 1382-1385, 1390.
- [17] 李子淳, 耿文广, 刘芳, 等. 响应面法优化黄秋葵热风干燥工艺[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(13): 77-83.
- LI Zichun, GENG Wenguang, LIU Fang, et al. Optimization of hot-air drying okra by response surface methodology[J]. Food Research and Development, 2022, 43(13): 77-83.
- [18] 刘启玲, 王庆卫, 崔胜文. 不同预处理方式对红枣热风-微波联合干燥品质特性及抗氧化活性的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(24): 124-130.
- LIU Qiling, WANG Qingwei, CUI Shengwen. Effects of different pretreatment methods on quality characteristics and antioxidant activity of jujube drying by combined hot-air-microwave drying[J]. Food Research and Development, 2020, 41(24): 124-130.
- [19] 张强, 邓酥萍, 张娜英, 等. 微波-热风联合干燥在芒果果脯加工中的应用[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(14): 104-109.
- ZHANG Qiang, DENG Suping, ZHANG Naying, et al. Application of microwave-hot air combined with drying in processing preserved mango[J]. Food Research and Development, 2020, 41(14): 104-109.
- [20] CHEN B, ZHANG M, WANG Y C, et al. Comparative study of conventional and novel combined modes of microwave-and infrared-assisted thawing on quality of frozen green pepper, carrot and cantaloupe[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112842.
- [21] ZHANG L, YU X J, ARUN S M, et al. Effect of freeze-thaw pretreatment combined with variable temperature on infrared and convection drying of lotus root[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112804.
- [22] 段柳柳, 段续, 任广跃. 微波冻干怀山药脆片干燥过程中脆性变化与数学模型的建立[J]. 食品科学, 2018, 39(23): 29-35.
- DUAN Liuliu, DUAN Xu, REN Guangyue. Crispness variation and mathematical modeling of microwave-freeze drying of Chinese yam chips[J]. Food Science, 2018, 39(23): 29-35.

责任编辑:冯娜
收稿日期:2022-09-28