

不同方式干燥的火龙果果皮粉加工与贮藏品质的比较

冉思婷, 梁晓锋, 王杰*

(华南农业大学食品学院, 广东广州 510642)

摘要: 以火龙果果皮粉为研究对象, 分析热风、微波、真空冷冻干燥的火龙果果皮粉加工与贮藏过程中理化指标、活性物质及抗氧化活性的差异。结果表明, 真空冷冻干燥的果皮粉含水率最低为 3.76%、复水比最高为 3.67、色差值最小为 26.11。其总黄酮(36.81 mg/g)、维生素 C (42.22 mg/100 g) 和花青素含量 (28.06 mg/100 g) 及 FRAP 总抗氧化能力 (1.02 Fe²⁺/100 g) 显著高于其他处理 ($P<0.05$); 微波干燥果皮粉总酚含量最高为 271.01 mg/100 g, 有最佳的羟基自由基清除能力 (82.77%)、DPPH·清除能力 (95.10%) 和 ABTS⁺清除能力 (96.86%)。贮藏期间, 真空冷冻干燥果皮粉色差下降幅度最小, 总黄酮和总酚含量保留最好, 且具有最佳 ABTS⁺清除能力 (84.10%) 和 FRAP 总抗氧化能力 (0.84 Fe²⁺/100 g); 微波干燥果皮粉对花青素和维生素 C 保留最好, 具有最佳羟基自由基清除能力 (88.82%); 热风干燥果皮粉活性物质保留效果差。综上, 真空冷冻干燥火龙果果皮粉具有最佳的加工和贮藏品质。该研究可为火龙果果皮粉的生产加工提供一定的参考依据。

关键词: 火龙果果皮粉; 干燥方式; 加工与贮藏; 抗氧化性

文章编号: 1673-9078(2023)10-185-193

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.10.1214

Comparison of Pitaya Peel Powder Dried Quality Using Different Processing and Storage Methods

RAN Siting, LIANG Xiaofeng, WANG Jie*

(College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Differences in the physical and chemical indices, active substances, and antioxidant activities of dried pitaya peel powder during processing and storage were analyzed using various methods, including hot air, microwave, and vacuum freeze drying. The results showed that the lowest moisture content (3.76%), highest rehydration ratio (3.67), and lowest color difference (26.11) were attained via vacuum freeze-drying peel powder. Moreover, the total flavonoid (36.81 mg/g), vitamin C (42.22 mg/100 g), and anthocyanin (28.06 mg/100 g) contents, as well as the total antioxidant capacity, as measured by fluorescence recovery after photobleaching (FRAP; 1.02 Fe²⁺/100 g) were significantly higher in freeze-dried samples compared to other samples ($P<0.05$). Meanwhile, the microwave-dried pitaya peel powder had the highest total phenolic content (271.01 mg/100 g) and exhibited the best scavenging capacity for hydroxyl (82.77%), DPPH (95.10%), and ABTS⁺ radicals (96.86%) during storage, the vacuum-freeze-dried pitaya peel powder exhibited the lowest color difference reduction, best preservation of total flavonoids and total phenols, highest ABTS⁺ scavenging capacity (84.10%), and highest total antioxidant capacity, as measured by FRAP (0.84 Fe²⁺/100 g). Furthermore, microwave-dried powder demonstrated the highest anthocyanin and vitamin C retention ability, and the highest hydroxyl radical scavenging capacity (88.82%). In contrast, the retention of active substances in hot air-dried pitaya peel powder was inadequate. In conclusion, vacuum freeze-dried pitaya peel powder exhibited the highest quality during processing and storage. This study provides a useful reference for the production and processing of pitaya peel powder.

Key words: pitaya peel powder; drying method; processing and storage; oxidation resistance

引文格式:

冉思婷, 梁晓锋, 王杰. 不同方式干燥的火龙果果皮粉加工与贮藏品质的比较[J]. 现代食品科技, 2023, 39(10): 185-193

RAN Siting, LIANG Xiaofeng, WANG Jie. Comparison of pitaya peel powder dried quality using different processing and storage methods [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(10): 185-193

收稿日期: 2022-09-24

基金项目: 广东省科技特派员扶贫专项 (20210722)

作者简介: 冉思婷 (2000-), 女, 在读硕士研究生, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: ransiting666@163.com

通讯作者: 王杰 (1978-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: wjcasey@scau.edu.cn

火龙果 (*Hylocereus undatus*) 属仙人掌科, 是原产于中美洲热带沙漠地区的热带水果, 因其易栽培、病虫害少的特点在全球广泛分布, 主要在北美洲、东南亚等地区种植, 在我国主要产在海南、广东、广西、台湾等省份^[1]。火龙果含有丰富的天然红色素、维生素、蛋白质及氨基酸、膳食纤维、多酚类化合物等多种活性物质, 具有保护胃肠道黏膜、治疗糖尿病和便秘、抗衰老、保护心脑血管等多种功能^[1]。

鲜火龙果不耐运输与贮藏, 深加工是解决其采摘期短、易腐烂、延长生产链的有效方法。目前火龙果的深加工主要是果肉型的产品, 火龙果果皮常作为加工过程的废料被直接丢弃, 造成了资源浪费和环境污染。火龙果皮中含有多酚、黄酮、维生素 C、花青素等多种活性物质, 其中花青素等的含量显著高于火龙果果肉^[2], 多酚、花青素等具有较强的抗氧化能力可提高免疫力、抗衰老等。火龙果果皮质量约为整果的 30%, 对火龙果果皮进行深加工不仅能提高火龙果的综合利用价值, 还能解决废弃果皮带来的环境污染。

果粉是水果加工业的主要产品形式之一, 具有营养丰富、使用方便、易于保存等特点^[3]。干燥是制备果粉的关键步骤之一, 适合的干燥方法和干燥条件对果粉的品质至关重要。干燥方法主要包括热风干燥、真空冷冻干燥、微波干燥等, 干燥方式的选择通常从营养、感官、经济等多因素考虑, 不同的干燥方法对不同的研究对象表现出各自的优缺点。研究表明, 热风干燥成本较低, 但高温易发生美拉德反应使果粉变黄^[4]; 微波干燥效率高, 但过热会导致焦化现象^[5]; 真空冷冻干燥后果粉色泽鲜亮、能较好保留活性物质且有良好的抗氧化能力^[6], 但其能耗大、成本高^[7]。此外, 干燥方式不仅影响干制产品的加工品质, 对贮藏过程中产品的外观品质、营养价值、生物活性等也有影响。但目前的研究多集中于干燥方法对果粉加工品质的影响, 而对果粉贮藏品质影响的关注较少。

为此, 本文拟用鲜火龙果果皮为原料, 采用热风干燥、微波干燥、真空冷冻干燥三种方式制备火龙果果皮粉, 分析不同干燥方式火龙果果皮粉加工与贮藏前后常见指标、活性物质及抗氧化活性的差异, 旨在为火龙果果皮粉的加工工艺提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

红肉火龙果, 选购于天河区五山超市 (选择果体匀称、新鲜、无损坏的火龙果)。实验中所用全部化学试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

101-b 型不锈钢数显电热鼓风干燥箱, 上海浦东荣丰科学仪器有限公司; Alpha 2-4 LDplus 真空冷冻干燥机, 广州市元晞生物科技有限公司; G80F20CN2L-B8(S0)微波炉, 广东格兰仕微波生活电器制造有限公司; AR124CN 电子分析天平, 奥豪斯 (常州) 有限公司; LFP-800A 高速多功能粉碎机, 永康红太阳机电有限公司; JYL-C19V 九阳粉碎机, 九阳股份有限公司; UV-1200 型紫外可见分光光度计, 上海美谱达仪器有限公司; DC-P3A 新型色彩色差仪, 北京纽利德科技有限公司; KQ-100DE 数控超声波清洗器, 昆山市超声仪器有限公司; R-1001VN 旋转蒸发仪, 郑州长城科工贸有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 火龙果果皮粉加工

将新鲜火龙果清洗干净, 用水果刀切除表面突出鳞片、去除果肉, 稍微晾干后把果皮纵向平分成六等份, 分为热风干燥、微波干燥和真空冷冻干燥三个处理, 每个处理 3 个平行。处理得到的火龙果皮粉用 PE 食品袋密封包装, 常温避光贮藏 320 d。

热风干燥法: 温度 70 °C, 风速 2.1 m/s, 时间 10 h。称取火龙果皮 500 g, 均匀铺在铁盘上, 放入预热好的热风干燥箱内干燥, 每隔 2 h 进行翻动, 确保受热均匀。

真空冷冻干燥法: 冷阱温度 -56 °C, 0.04 kPa, 时间 36 h。称取火龙果皮 500 g, 将果皮切成厚 2 mm 条状, 均匀平铺在玻璃器皿内, -82 °C 冰箱内预冻 4 h 后进行干燥。

微波干燥法: 功率 700 W, 频率 2 450 MHz, 总时长 24 min。称取火龙果皮 500 g, 放入微波炉内中火干燥 6 min, 间隔 1 min, 重复 4 次。

称取干燥的火龙果皮 50 g 放入多功能粉碎机内, 粉碎时间为 20 s, 间隔 2 min, 重复 4 次。接着把粗粉放入九阳粉碎机内再次粉碎, 制粉步骤同上。粉碎后过 80 目筛, 过筛后粉末置于 4 °C 冰箱内冷藏备用。

1.3.2 火龙果果皮粉品质指标

1.3.2.1 含水率的测定

称取 1 g 火龙果皮粉, 采用水分测定仪测定, 平行测 3 次。

1.3.2.2 复水比的测定

参照 Giri 等^[8]方法稍作修改, 称取 2 g 的火龙果皮粉浸入 50 mL 蒸馏水中, 1 h 后沥干称质量。

$$F = \frac{m_{后}}{m_{前}} \quad (1)$$

式中:

F —复水比;

$m_{后}$ —火龙果皮粉复水沥干后的质量;

$m_{前}$ —火龙果皮粉复水前的质量。

1.3.2.3 色泽的测定

参考 Sun 等^[9]的方法。色差仪校正后将样品置于测量探头下与其充分接触, 平行测 3 次, 通过公式计算:

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

式中:

L^* 、 a^* 、 b^* 值—分别为经干燥处理红龙果皮粉的亮度、红度、黄度;

L_0 、 a_0 、 b_0 值—分别为新鲜红龙果皮粉的亮度、红度、黄度。

1.3.2.4 黄酮含量测定

参照 Jia 等^[10]的方法。取 1 g 火龙果果皮粉加入 20 mL $\varphi=80\%$ 的乙醇溶液浸提 2 h, 超声辅助提取 30 min 后离心得到提取液。取 100 μ L 提取液于离心管中, 加入 $m=8\%$ 亚硝酸钠溶液 0.3 mL 摇匀放置 6 min; 加入 $m=10\%$ 氯化铝 0.3 mL 反应 6 min, 随后加入 $m=7.4\%$ NaOH 溶液 2.0 mL, 无水乙醇定容, 静置 10 min 测定 510 nm 波长处吸光值, 以芦丁为标样制作标准曲线。

1.3.2.5 总酚含量测定

参考 Sellappan 等^[11]的方法。取 1.3.2.4 中提取液 0.5 mL 于试管中, 加入 1 mL 福林酚试剂, $m=20\%$ 的 Na_2CO_3 溶液 1.5 mL 和蒸馏水 5.5 mL 混合, 25 $^\circ\text{C}$ 避光放置 30 min, 在 760 nm 波长处测定吸光度, 用没食子酸为标样绘制标准曲线。

1.3.2.6 维生素 C 含量测定

维生素 C 含量的测定采用分光光度法^[12], 取 1 g 火龙果皮粉加入 $\varphi=0.5\%$ 三氯乙酸溶液 25 mL 研磨提取, 过滤后得提取液。取 0.5 mL 提取液加入 0.5% 三氯乙酸溶液 1.5 mL、无水乙醇 1 mL 混合均匀, 再加入 4% 磷酸-乙醇溶液 0.5 mL、 $\varphi=5\%$ 邻菲罗啉-乙醇溶液 1 mL 和 $m=0.3\%$ 三氯化铁-乙醇溶液 0.5 mL, 混合后置于 30 $^\circ\text{C}$ 水浴 1 h。以加入 2 mL 三氯乙酸溶液的试剂为空白, 测量 534 nm 处的吸光值。

$$Q_1 = \frac{V \times C}{V_s \times W \times 1000} \times 100 \quad (3)$$

式中:

Q_1 —抗坏血酸含量, mg/100 g;

C —由标准曲线求得的抗坏血酸的微克数, μg ;

V_s —滴定时所用样品提取液体积, mL;

V —样品提取液总体积, mL;

W —样品质量, g。

1.3.2.7 花青素含量测定

花青素含量的测定采用 pH 示差法^[13]。取 1 g 火龙果皮粉放入锥形瓶内, 加入 $\varphi=80\%$ 无水乙醇 20 mL, 用 HCl 调节 pH 值至 3, 在暗处浸提 16 h 后离心。将 1 mL 提取液分别加 pH 值 1.0 的氯化钾缓冲液和 pH 值 4.5 的醋酸钠缓冲液各 9 mL 混匀静置 15 min, 分别在 510 nm 与 700 nm 处测量吸光值, 以蒸馏水作空白。

$$A = (A_{510\text{nm}} - A_{700\text{nm}})_{\text{pH}1.0} - (A_{510\text{nm}} - A_{700\text{nm}})_{\text{pH}4.5} \quad (4)$$

$$Q_2 = \frac{A \times M_w \times DF \times 1000}{\epsilon} \quad (5)$$

式中:

Q_2 —花青素含量, mg/100 g;

A —吸光值;

M_w —449.38;

DF —稀释倍数;

ϵ —26 900。

1.3.2.8 羟基自由基清除能力测定

参照 Franzoni 等^[14]的方法。称取 1 g 火龙果皮粉, 加入 $\varphi=70\%$ 乙醇 20 mL 避光提取 2 h, 离心后得提取液。加入 0.2 mmol/L 磷酸盐缓冲液 400 μ L、50 mmol/L 脱氧核糖 50 μ L、1 mmol/L Na_2EDTA 50 μ L、3.2 mmol/L FeCl_3 50 μ L、50 mmol/L H_2O_2 50 μ L 和提取液 150 μ L 混合均匀。再加入 1.8 mmol/L 的抗坏血酸 50 μ L 启动反应, 在 50 $^\circ\text{C}$ 孵育 20 min 后用 $\varphi=10\%$ 三氯乙酸 250 μ L 终止反应。然后, 加入 $\varphi=5\%$ TBA 150 μ L, 在 105 $^\circ\text{C}$ 的烤箱中加热 15 min 显示颜色, 以缓冲液作空白测量 530 nm 处吸光值。羟自由基清除活性表示为:

$$S_1 = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中:

S_1 —羟自由基清除能力, %;

A_0 —空白溶液的吸光值;

A —样品溶液的吸光值。

1.3.2.9 DPPH 自由基清除能力测定

参照 Kumaran 等^[15]的方法。取 1.3.2.4 中提取液 1 mL 与 3 mL DPPH 反应液 (1,1-二苯基苦基苯肼) 混匀后避光 30 min, 于 517 nm 处测定吸光值 A_i 。将 1 mL 提取液与 3 mL 甲醇混合作为误差, 测得吸光值 A_j ; 1 mL 蒸馏水与 3 mL DPPH 反应液混合作为空白对照, 测得吸光值 A_1 。通过公式计算:

$$S_2 = \frac{1 - (A_i - A_j)}{A_1} \times 100\% \quad (7)$$

式中:

S_2 —DPPH清除能力, %;

A_1 —空白溶液的吸光值;

A_2 —提取液与 DPPH 反应液混合溶液的吸光值;

A_3 —提取液与甲醇混合溶液的吸光值。

1.3.2.10 ABTS⁺自由基清除能力测定

参照 Kriengsak 等^[16]的方法。将 14 mmol/L ABTS 溶液和 4.9 mmol/L 过硫酸钾水溶液等量混合避光静置 12~16 h, 然后用 $\varphi=70\%$ 乙醇稀释为 734 nm 波长下吸光值为 0.50~0.90 的工作液。取 1.3.2.4 中 100 μL 提取液加入 ABTS 工作液 3.9 mL 震荡 30 s, 常温静置 6 min 在 734 nm 处测量吸光值 A_4 ; 将 100 μL 提取液加 3.9 mL 蒸馏水作为空白对照测得吸光值 A_5 ; 将 $\varphi=70\%$ 乙醇 100 μL 和 ABTS 工作液 3.9 mL 混合测得吸光值 A_3 。通过公式计算:

$$S_3 = \frac{1 - (A_4 - A_5)}{A_3} \times 100\% \quad (7)$$

式中:

S_3 —ABTS⁺清除能力, %;

A_3 —乙醇和 ABTS 工作液混合溶液的吸光值;

A_4 —提取液与 ABTS 工作液混合溶液的吸光值;

A_5 —提取液与蒸馏水混合溶液的吸光值。

1.3.2.11 FRAP 抗氧化能力测定

参照张颖等^[17]的方法。取 100 μL 1.3.2.4 中提取液加入 3 mL FRAP 溶液混匀, 37 $^{\circ}\text{C}$ 保温 5 min 后在 593 nm 处测量吸光值, 以 FeSO_4 溶液为标样制作标准曲线。

1.4 数据分析

实验均平行重复 3 次, 结果以平均数 \pm 标准差表示。采用 IBM SPSS Statistics 26.0 软件和 Origin 2021 软件进行数据处理。

2 结果与讨论

2.1 干燥方式对火龙果果皮粉加工与贮藏过程中理化性质的影响

2.1.1 含水率

果皮粉含水量与其贮藏品质的好坏有关, 含水率越低越能抑制微生物生长, 有利于火龙果果皮粉的长期贮藏和运输。不同方式干燥的火龙果果皮粉加工与贮藏中的含水率变化如表 1 所示。其中真空冷冻干燥制得的火龙果果皮粉含水率为 3.48%, 显著低于微波干燥和热风干燥 ($P<0.05$)。贮藏期间三种方式制备的果皮粉含水率均呈现上升趋势, 这可能是由于干燥后火

龙果果皮粉中部分寡糖分解为吸湿性较强的小分子糖类, 如葡萄糖、果糖等, 从而导致火龙果果皮粉的吸湿性增强^[18]。其中, 热风干燥果皮粉贮藏期间含水率增加 2.93%, 显著低于真空冷冻干燥和微波干燥 ($P<0.05$), 这是因为热风干燥后形成了抗吸水覆盖层^[19], 冷冻干燥形成多孔状结构, 吸湿性较好^[20]。贮藏后真空冷冻干燥处理组的含水率仍最低, 为 3.76%。

表 1 干燥方式对火龙果果皮粉加工与贮藏过程中含水率的影响

Table 1 Effects of drying methods on moisture content of pitaya peel powder during processing and storage

干燥方式	加工处理火龙果果皮粉的含水率/%	贮藏后火龙果果皮粉的含水率/%
热风干燥	6.82 \pm 0.08 ^b	7.02 \pm 0.04 ^b
微波干燥	7.81 \pm 0.11 ^a	8.34 \pm 0.12 ^a
真空冷冻干燥	3.48 \pm 0.07 ^c	3.76 \pm 0.09 ^c

注: 同一列数据后不同小写字母表示样品间差异显著性 ($P<0.05$)。下同。

2.1.2 复水率

果蔬的复水性越好表明干制品的组织结构破坏程度越小, 品质越好^[21]。如表 2 所示, 真空冷冻干燥的火龙果果皮粉在加工过程和贮藏过程中均具有最高复水比 3.56, 显著高于热风干燥法和微波干燥法 ($P<0.05$), 说明真空冷冻干燥法对火龙果果皮粉组织结构破坏小。微波干燥法加工的果皮粉具有最低的复水比为 2.67, 但贮藏期间增幅最大为 6.74%, 显著高于热风干燥和真空冷冻干燥 ($P<0.05$)。热风干燥法的复水比较低且贮藏过程中复水比下降, 这可能是因为热风对火龙果果皮粉的细胞组织结构、孔径大小产生了不可逆的破坏, 复水时难与水分结合^[22]。Guo 等^[23]研究也表明低温干燥的毛豆复水性更佳。

表 2 干燥方式对火龙果果皮粉加工与贮藏过程中复水率的影响

Table 2 Effects of drying methods on rehydration rate of pitaya peel powder during processing and storage

干燥方式	加工处理火龙果果皮粉的复水比	贮藏后火龙果果皮粉的复水比
热风干燥	2.73 \pm 0.04 ^b	2.65 \pm 0.12 ^c
微波干燥	2.67 \pm 0.10 ^b	2.85 \pm 0.07 ^b
真空冷冻干燥	3.56 \pm 0.09 ^a	3.67 \pm 0.09 ^a

2.1.3 色泽

干燥过程中颜色变化与干燥的时间和温度有关, 色差值 ΔE 数值越大, 说明色差越大; 反之色差越小。火龙果果皮粉色差测定结果如表 3, 真空冷冻干燥法制得火龙果果皮粉色泽红紫、鲜亮, 色差值 ΔE 为 26.11, 显著低于热风干燥法和微波干燥法 ($P<0.05$)。Suna 等^[24]使用微波和热风干燥枸杞泥时, 结果也表明

微波干燥处理的色泽浅,热风干燥的色泽深。贮藏后真空冷冻干燥的火龙果果皮粉色泽减小,而微波干燥和热风干燥的色差偏离程度则增大,可能是因为火龙果果皮粉中的还原糖、氨基酸等成分因温度高发生了美拉德反应^[25]。其中真空冷冻干燥法制得火龙果果皮粉色泽减小 0.04%,显著优于其他处理 ($P<0.05$)。真空冷冻干燥的火龙果果皮粉色泽稳定且耐贮藏。

表3 干燥方式对火龙果果皮粉加工与贮藏过程中色差 ΔE 值的影响

Table 3 Effect of drying method on chromatic aberration ΔE value of pitaya peel powder during processing and storage

干燥方式	加工处理火龙果果皮粉的色差	贮藏后火龙果果皮粉的色差
热风干燥	36.35±0.96 ^a	43.64±0.95 ^a
微波干燥	30.01±1.04 ^b	37.49±0.59 ^b
真空冷冻干燥	26.15±0.87 ^c	25.04±0.92 ^c

2.2 干燥方式对火龙果果皮粉加工与贮藏过程中活性物质的影响

2.2.1 总黄酮含量

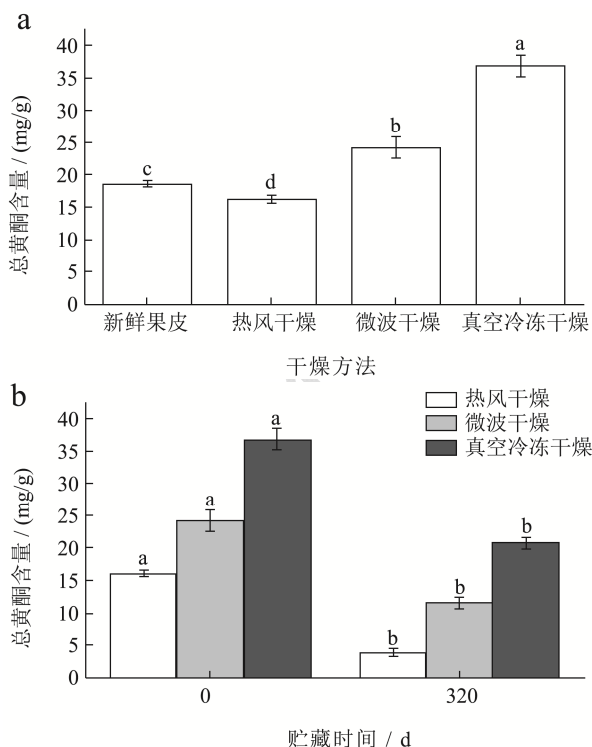


图1 干燥方式对火龙果果皮粉加工与贮藏过程中总黄酮含量的影响

Fig.1 Effects of drying methods on the content of total flavonoids in pitaya peel powder during processing and storage

注:小写字母代表加工和贮藏中各组间的显著性 ($P<0.05$)。下同。

黄酮类化合物具有较强的抗氧化活性,可以抑制自由基的生成、降低脂质过氧化^[26]。从图1可知,真空冷冻干燥的火龙果果皮粉总黄酮含量最高为36.81 mg/g,约为微波干燥的1.5倍、热风干燥的2.3倍。这可能是因为黄酮类物质在受热时易发生酚类氧化反应,温度越高、时间越长黄酮的损失越大^[27]。张文琴等^[28]在干燥黄刺玫果粉研究中也得出了低温有利于保留黄酮类物质的结论。贮藏期间各处理的总黄酮含量均减少,热风干燥法下降幅度显著大于真空冷冻干燥处理和微波干燥处理 ($P<0.05$)。这可能是因为黄酮类物质与其他物质相互作用,增加黄酮的不稳定性而导致黄酮类物质随时间减少。

2.2.2 总酚含量

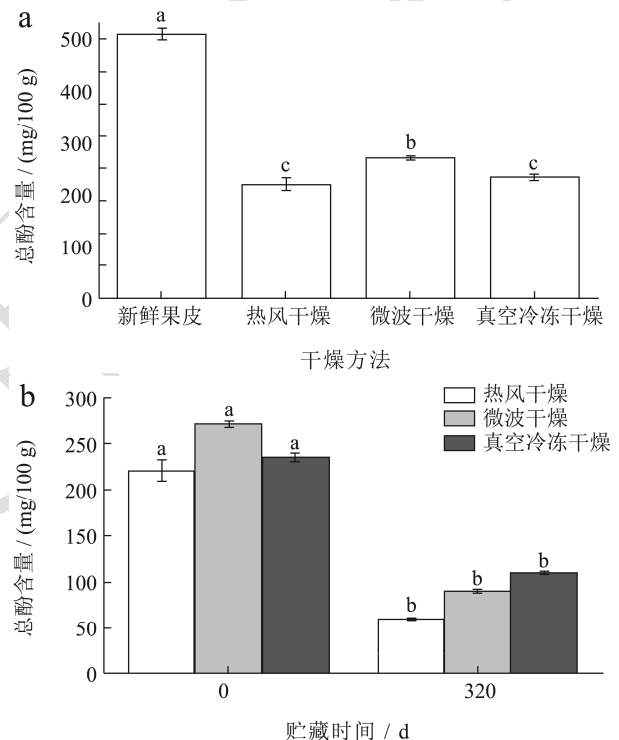


图2 干燥方式对火龙果果皮粉加工与贮藏过程中总酚含量的影响

Fig.2 Effects of drying methods on total phenol content of pitaya peel powder during processing and storage

总酚含量与 DPPH·清除能力和铁的螯合能力高度相关^[29]。从图2可知,微波干燥法制得火龙果果皮粉总酚含量最高为271.01 mg/100 g,显著高于真空冷冻干燥和热风干燥 ($P<0.05$)。微波干燥和热风干燥的火龙果果皮粉总酚含量较高,出现该现象可能的原因是加热时间和温度影响酶活性或酚类物质的降解^[30],高温可促进总酚含量的增加,且短时高温的效果更加^[31]。贮藏中三种干燥方法制备的火龙果皮粉总酚含量大幅度下降,其中真空冷冻干燥法的总酚含量下降53.24%,显著低于其他处理 ($P<0.05$)。这可能

是因为贮藏中酚类物质氧化产生自由基，消耗了部分总酚。热风干燥和微波干燥这类温度较高的处理对酚类物质有积极作用，温度较低的真空冷冻干燥对维持总酚物质具有稳定性。综上，在火龙果果皮粉中微波干燥对酚类物质的加工品质较好，真空冷冻干燥法则是贮藏性更佳。

2.2.3 维生素 C 含量

维生素 C 具有抗氧化能力，同时也易因为环境因素氧化而降解，该指标可反映加工与贮藏过程中果皮粉变质的程度。从图 3 可知，真空冷冻干燥法制得火龙果果皮粉的维生素 C 含量为 42.22%，显著高于微波干燥法和热风干燥法 ($P < 0.05$)。这是因为高温处理会使维生素 C 经过脱氢、内酯开环水解、再进一步降解生成木糖酮或 3-脱氧戊糖酮，降解的生成物可与氨基反应引起非酶褐变，导致维生素 C 含量较大幅度下降^[32]。在贮藏过程中，三种干燥处理的维生素 C 均大幅度下降，可能是因为维生素 C 易被氧化形成脱氢维生素 C。

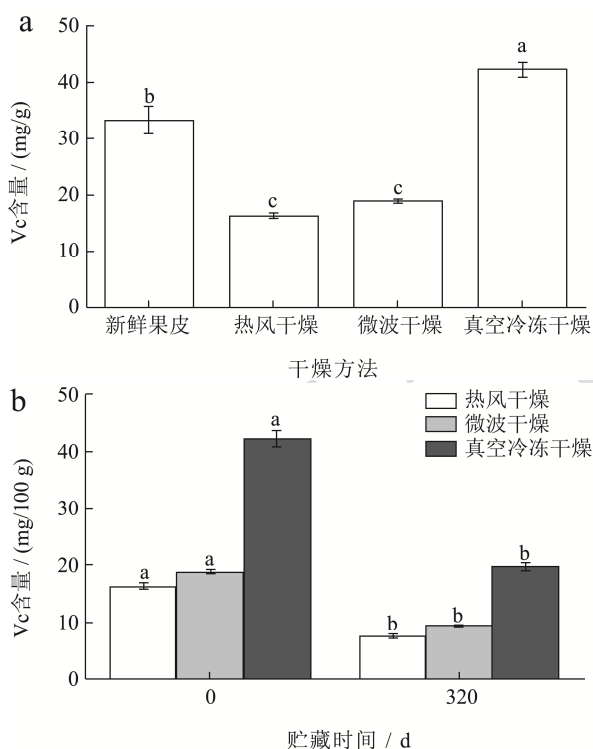


图 3 干燥方式对火龙果果皮粉加工与贮藏过程中 Vc 含量的影响

Fig.3 Effects of drying methods on Vc content of pitaya peel powder during processing and storage

2.2.4 花青素含量

火龙果果皮中大量花青素具有抗氧化活性，食源性花青素是良好的天然色素来源^[33]。如图 4，真空冷冻干燥法制得火龙果果皮粉花青素含量为 28.06 mg/100 g，分别是热风干燥的 2.05 倍、微波干燥的 2.74 倍。随着温度升高原花青素的降解速率会加快，可能是因为抗

坏血酸在高温的条件下容易氧化生成 H₂O₂ 使 2-苯基苯并吡喃阳离子的吡喃环断裂，使花青素进一步降解^[34]。在贮藏过程中，三种干燥方法制备的火龙果果皮粉花青素含量均呈现出大幅度下降趋势，且三者间无显著差异 ($P > 0.05$)。这可能是因为花青素稳定性不高，在贮藏中易受到光照、温度、氧气、pH 值等的影响而降解^[35]。

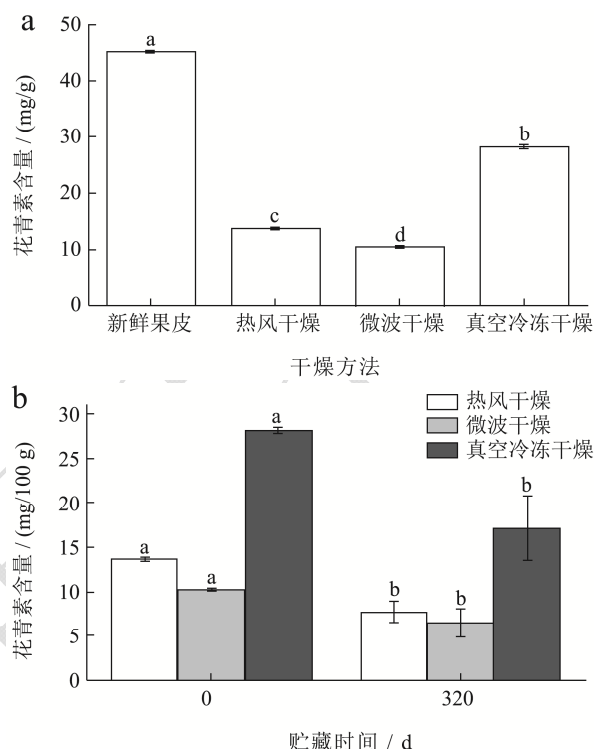


图 4 干燥方式对火龙果果皮粉加工与贮藏过程中花青素含量的影响

Fig.4 Effects of drying methods on anthocyanin content in pitaya peel powder during processing and storage

2.3 干燥方式对火龙果果皮粉加工与贮藏过程中抗氧化活性的影响

2.3.1 羟基自由基清除能力

羟基自由基清除能力是一种衡量物质抗氧化能力的重要指标。从图 5 可知，三种干燥处理的火龙果果皮粉羟基自由基清除能力无显著差异 ($P > 0.05$)。贮藏后，热风干燥和真空冷冻干燥法的羟基自由基清除能力下降趋势无显著差异 ($P > 0.05$)，而微波干燥法则上升 7.31%。这与总酚含量趋势相同，可能与果皮粉中的酚类等抗氧化物质的变化有关^[36]。王国锭等^[26]在果蔬粉抗氧化能力的研究中也得出相同结果。综上，微波干燥处理在加工与贮藏中均能保持火龙果果皮粉的最佳羟基自由基清除能力。

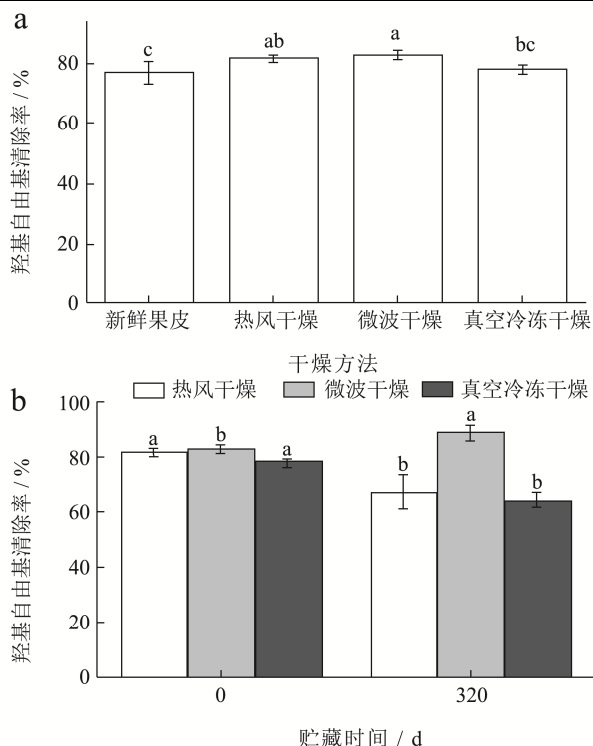


图5 干燥方式对火龙果果皮粉加工与贮藏过程中羟基自由基清除能力的影响

Fig.5 Effects of drying methods on hydroxyl radical scavenging ability of pitaya peel powder during processing and storage

2.3.2 DPPH·清除能力

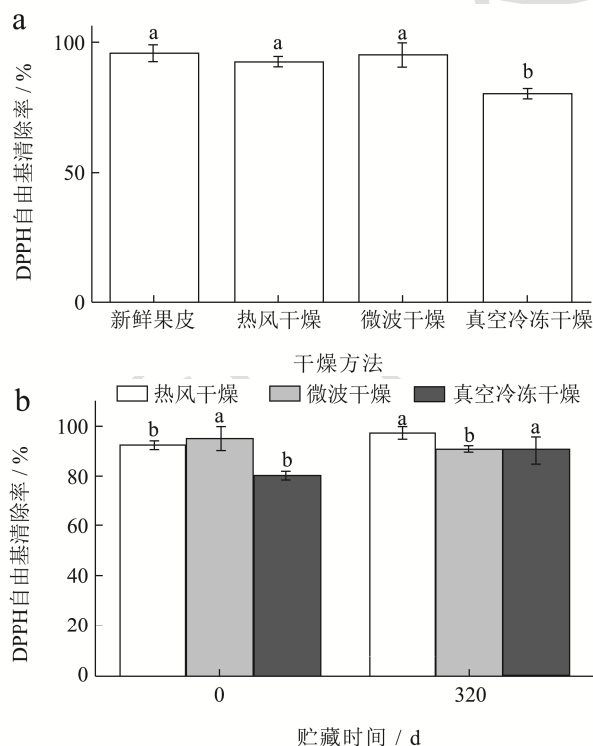


图6 干燥方式对火龙果果皮粉加工与贮藏过程中DPPH·清除能力的影响

Fig.6 Effects of drying methods on DPPH· scavenging ability of pitaya peel powder during processing and storage

当有抗氧化剂时, DPPH 孤对电子与抗氧化剂结合产生褪色反应, 褪色的程度与抗氧化剂清除的能力成定量关系^[15]。如图6所示, 热风干燥法和微波干燥法所制得的火龙果皮粉的DPPH·清除能力均在90%以上, 显著优于真空冷冻干燥处理 ($P < 0.05$), 该结果与总酚含量趋势相同。这可能是因为热风干燥法和微波干燥法的制粉温度破坏多酚氧化酶等的活性, 防止酚类活性物质的降解^[11], 也可能是在高温下褐变产生了有抗氧化活性的新化合物^[37]。在贮藏过程中, 真空冷冻干燥法的DPPH·清除能力上升11.90%显著高于其他处理 ($P < 0.05$), 这可能是低温很好的保留了果皮粉中的抗氧化物质。综上, 在加工中微波干燥的火龙果果皮粉的DPPH·清除能力最佳, 贮藏期间真空冷冻干燥法对DPPH·清除能力的保留效果最佳。

2.3.3 ABTS⁺清除能力

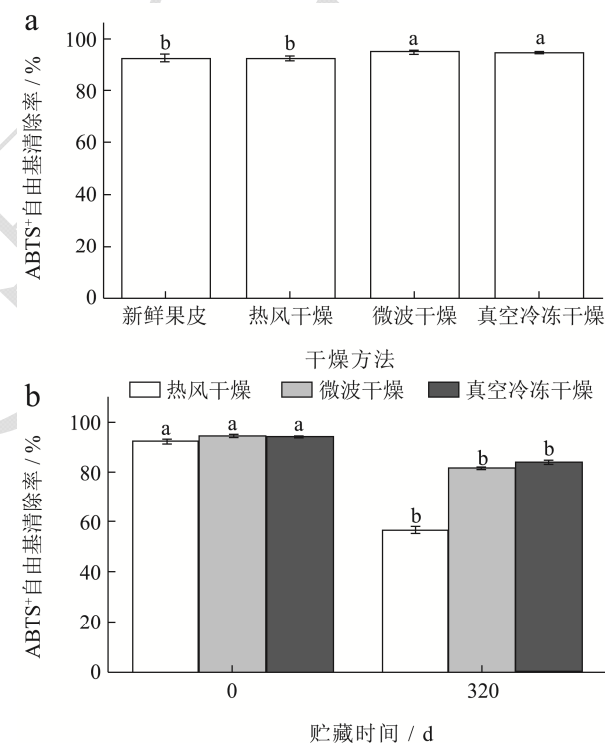


图7 干燥方式对火龙果果皮粉加工与贮藏过程中ABTS⁺清除能力的影响

Fig.7 Effects of drying methods on ABTS⁺ scavenging ability of pitaya peel powder during processing and storage

ABTS法是基于自由基ABTS⁺溶液在734 nm下呈蓝绿色, 当被自由基清除时ABTS⁺溶液的吸光度值可判断测定物质的清除能力。如图7所示, 微波干燥法加工的火龙果果皮粉ABTS⁺清除能力为96.86%, 显著高于热风干燥法和真空冷冻干燥法 ($P < 0.05$), 与总酚含量趋势相同。随着时间的推移火龙果果皮粉中的抗氧化物质降解、转化, 进而使ABTS⁺清除能力都有所下降。其中真空冷冻干燥法下降9.37%显

著低于其他处理 ($P < 0.05$), 这可能是低温能维持酚类物质的稳定性, 有助于抑制酚氧化酶活性, 降低酚类物质的缩合和降解^[38]。加工过程中微波干燥处理火龙果果皮粉 ABTS⁺清除能力最佳, 真空冷冻干燥处理在贮藏中的 ABTS⁺清除能力保留效果最佳。

2.3.4 FRAP 总抗氧化能力

FRAP 总抗氧化能力是利用抗氧化剂将体系中的 Fe³⁺还原成 Fe²⁺, Fe²⁺TPTZ 物质呈蓝色, 通过分光光度法检测其生成量间接反映活性物质的抗氧化能力^[17]。如图 8 所示, 不同干燥方法对火龙果果皮粉加工处理的总抗氧化能力具有显著性影响 ($P < 0.05$), 真空冷冻干燥法火龙果果皮粉 FRAP 值为 1.02 mmol Fe²⁺/100 g, 显著高于微波干燥法和热风干燥法。贮藏期间, 三种干燥方法制得的火龙果果皮粉总抗氧化能力都有所下降, 其中真空冷冻干燥法和微波干燥法波动幅度无显著差异 ($P > 0.05$), 且均小于热风干燥法 ($P < 0.05$)。Zafrill 等^[39]研究表明高温贮藏对总酚等抗氧化性物质的稳定性有负面影响, 导致在加工与贮藏过程中总抗氧化能力降低, 这与本研究中的结果相符。

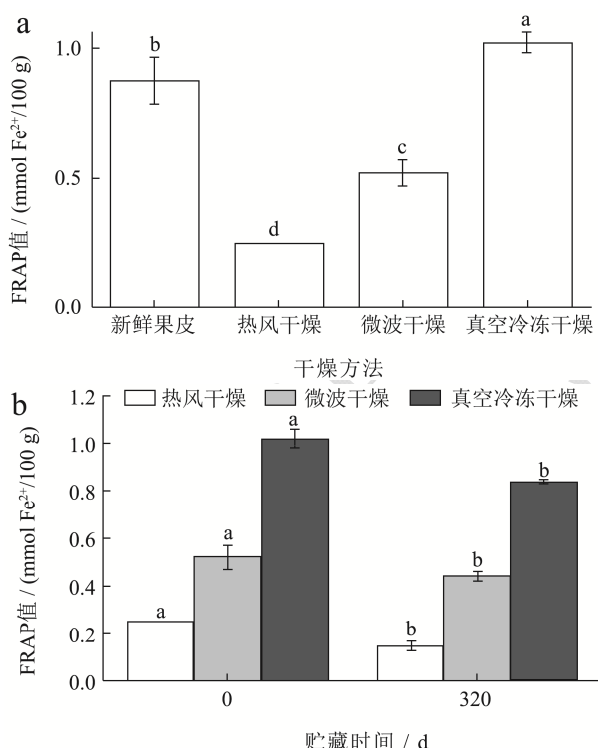


图 8 干燥方式对火龙果果皮粉加工与贮藏过程中 FRAP 总抗氧化能力的影响

Fig.8 Effects of drying methods on total antioxidant capacity of FRAP during processing and storage of pitaya peel powder

3 结论

本研究对干燥方式对火龙果果皮粉加工和贮藏过程中理化性质、活性物质保留及抗氧化能力指标进行

综合考量。结果表明, 真空冷冻干燥制备的火龙果果皮粉含水率、复水比、色差值分别为 3.48%、3.56、26.11, 总黄酮、维生素 C、花青素含量分别为 36.81 mg/g、42.22 mg/100 g、28.06 mg/100 g, FRAP 总抗氧化能力为 1.02 mmol Fe²⁺/100 g, 均表现最佳; 贮藏后其理化性质良好, 总黄酮含量、总酚含量、维生素 C 含量和花青素含量保留最好, 还具有最佳 ABTS⁺清除能力和 FRAP 总抗氧化能力。微波干燥制备的火龙果果皮粉复水比最低为 2.67, 总酚含量最高为 271.01 mg/100 g, 有最佳羟基自由基清除能力、DPPH·清除能力、ABTS⁺清除能力; 贮藏后复水率上升幅度最大并具有羟基自由基清除能力为 88.82%, 表现最佳。热风干燥在理化性质和活性物质保留方面均较差, 但羟基自由基清除能力和 DPPH·清除能力较稳定, 贮藏后具有最佳 DPPH·清除能力。综上, 真空冷冻干燥火龙果果皮粉具有最佳的加工和贮藏品质。

真空冷冻干燥法加工的火龙果果皮粉综合效果好, 但耗能大、周期长; 微波干燥和热风干燥的火龙果果皮粉耗时短、成本低, 但所得火龙果果皮粉的品质较差。从产品品质考虑, 真空冷冻干燥更适合加工火龙果果皮粉产品。在今后研究中可进一步建立真空冷冻干燥火龙果果皮粉的品质评价体系, 提高火龙果果皮粉的产品价值, 为真空冷冻干燥制备火龙果果皮粉的精加工提供理论依据。

参考文献

- [1] 高曼,甘祖于,王维,等.红肉火龙果营养价值及产品研发现状[J].贵州农机化,2022,1:16-20.
- [2] Tenore G C, Novellino E, Basile A. Nutraceutical potential and antioxidant benefits of red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) extracts [J]. *Functional Foods*, 2012, 4(1): 129-136.
- [3] 叶晓青,莫树平,庾文伟,等.农产品超微干粉加工的现状与应用前景[J].食品与机械,2014,30(2):258-261.
- [4] 孟令帅,王瑞,郑婷婷,等.不同干燥方式对红托竹荪感官品质的影响[J].食品与发酵工业,2023,49(7):249-263.
- [5] 胡如响,卢星宇,王鹏,等.香菇不同干燥技术的研究进展[J].食品科技,2021,46(12):63-68.
- [6] 符群,钟明旭,王萍.不同干燥方式对黑果腺肋花楸果粉品质的影响[J].中南林业科技大学学报,2021,41(1):180-187.
- [7] 王莹莹,武晔秋,刘玥.不同干燥方式对黄花菜干燥效果的影响[J].保鲜与加工,2022,22(6):81-84.
- [8] Giri S K, Prasad S. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms [J]. *Food Engineering*, 2007, 78(2): 512-521.
- [9] SUN Xiyun, YAN Zhicheng, TONG Zhu, et al. Effects on the

- color, taste, and anthocyanins stability of blueberry wine by different contents of mannoprotein [J]. *Food Chemistry*, 2019, 279: 63-69.
- [10] JIA Zhishen, TANG Mengcheng, WU Jianming. The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals [J]. *Food Chemistry*, 1999, 64: 555-559.
- [11] Sellappan S, Akoh C C, Krewer G. Phenolic compounds and antioxidant capacity of Georgia-grown blueberries and blackberries [J]. *Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(8): 2432-2438.
- [12] 曹建康,姜微波,赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导(1 版) [M]. 北京:中国轻工业出版社,2007.
- [13] 曾琳,韩成云,赵志刚,等. 不同提取方法黑米花青素的稳定性研究[J]. *食品工业*, 2018, 39(8): 6-10.
- [14] Franzoni F, Colognato R, Galetta F, et al. An *in vitro* study on the free radical scavenging capacity of ergothioneine: Comparison with reduced glutathione, uric acid and trolox [J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2006, 60(8): 453-457.
- [15] Kumaran A, Karunakaran R J. Activity-guided isolation and identification of free radical-scavenging components from an aqueous extract of *Coleus aromaticus* [J]. *Food Chemistry*, 2005, 100(1): 356-361.
- [16] Thaipong K, Boonprakob U, Crosby K, et al. Comparison of ABTS, DPPH, FRAP, and ORAC assays for estimating antioxidant activity from guava fruit extracts [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2006, 19(6): 669-675.
- [17] 张颖,曾艳,张丽姣,等. 不同食用菌菌糠多糖的组分分析与抗氧化活性评价[J]. *食品科学*, 2015, 36(5): 18-23.
- [18] Scher C F, de Oliveira Rios A, Noreña C P Z. Hot air drying of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and its effect on sugar concentrations [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2009, 44(11): 2169-2175.
- [19] Giovanelli G, Zanoni B, Lavelli V, et al. Water sorption, drying and antioxidant properties of dried tomato products [J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 52(2): 135-141.
- [20] 张群,舒楠,黄余年,等. 不同干燥方式对黄桃果干结构特性及营养品质的影响 [J]. *湖南农业科学*, 2021, 4: 86-89, 95.
- [21] 付西光,董英,马海乐. 食品真空冷冻干燥研究[J]. *江苏理工大学学报(自然科学版)*, 2001, 22(4): 19-23.
- [22] 何玉倩,宋晓燕,刘宝林. 干燥方式对火龙果果皮理化特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(2): 159-165.
- [23] HU Qingguo, ZHANG Min, DU Weihua, et al. Effect of different drying methods on the quality changes of the granular fruits and vegetables [J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2006, 2: 28-32.
- [24] Suna S. Effects of hot air, microwava and vacuum drying on drying characteristics and *in vitro* bioaccessibility of medlar fruit leather (pestil) [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2019, 28(5): 1465-1474.
- [25] Pietta P G. Flavonoids as antioxidants [J]. *Journal of Natural Products*, 2000, 63(7): 1035-1042.
- [26] 王国锭,黄昊,束庆,等. 不同干燥方法对黄洋葱粉品质的影响[J]. *保鲜与加工*, 2019, 19(1): 89-94.
- [27] 巨浩羽,赵士豪,赵海燕,等. 中草药干燥加工现状及发展趋势[J]. *南京中医药大学学报*, 2021, 37(5): 786-796.
- [28] 张文琴,王晓燕,宋高. 不同干燥方式对黄刺玫果粉品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2018, 44(7): 218-224.
- [29] Quek S Y, Chok N K, Swedlund P. The physicochemical properties of spray-dried water melon powders [J]. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 2007, 46(5): 386-392.
- [30] Chen Y, Martynenko A. Combination of hydrothermodynamic (HTD) processing and different drying methods for natural blueberry leather [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2018, 87: 470-477.
- [31] Alkaltham M S, Uslu N, Özcan M M, et al. Effect of drying process on oil, phenolic composition and antioxidant activity of avocado (cv. Hass) fruits harvested at two different maturity stages [J]. *LWT*, 2021, 148(148): 111716.
- [32] AN Nannan, SUN Weihong, LI Bingzheng, et al. Effect of different drying techniques on drying kinetics, nutritional components, antioxidant capacity, physical properties and microstructure of edamame [J]. *Food Chemistry*, 2022, 373(PB): 131412.
- [33] 马冰雪,潘腾,任中清,等. 火龙果皮花青素提取工艺研究[J]. *北京农业*, 2013, 12: 213-215.
- [34] 阙建全. 食品化学(3 版)[M]. 北京:中国农业大学,2008.
- [35] 卓毓光,刘儒华,古福生,等. 花青素稳定性影响因素与应用研究进展[J]. *广东化工*, 2018, 45(24): 70-72.
- [36] 陈聰,叶爽,王桂华,等. 不同干燥方式和粉碎程度对双孢蘑菇理化、营养和功能特性的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(1): 88-97.
- [37] Ahmad J, Langrish T A G. Optimisation of total phenolic acids extraction from mandarin peels using microwave energy: The importance of the Maillard reaction [J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 109(1): 162-174.
- [38] CAO Hui, YI Lunzhao, ZHONG Jiayi, et al. Investigation of new products and reaction kinetics for myricetin in DMEM via an *in situ* UPLC-MS-MS analysis [J]. *Food Frontiers*, 2020, 1(3): 243-252.
- [39] Pilar Z, Juana M, Juana M, et al. Changes during storage in conventional and ecological wine: Phenolic content and antioxidant activity [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(16): 4694-4700.