胡付侠, 马超, 王雪, 等. 不同干燥方式对脐橙果渣品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(17): 63−71. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025110206

HU Fuxia, MA Chao, WANG Xue, et al. Effects of Different Drying Methods on the Quality of *Citrus sinensis* Osbeck Pomace[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(17): 63−71. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025110206

·特邀主编专栏—果蔬基料制造: 基础理论、新型加工、质量控制与智能制造（客座主编: 徐贞贞、王永涛、李涛; 产业顾问: 李仁杰）·

不同干燥方式对脐橙果渣品质的影响

胡付侠[1], 马　超[1], 王　雪[2], 张博华[1], 张　明[1,*]

（1.中华全国供销合作总社济南果品研究所, 山东济南 250014;
2.山东农业工程学院, 山东淄博 255300）

摘　要: 采用热风干燥、热泵干燥及微波热泵联合干燥技术制备脐橙果渣粉，探究不同干燥方式对脐橙果渣粉物理性质、营养品质及抗氧化和抗炎活性的影响，为脐橙果渣的精深加工与高值化利用提供理论依据。结果表明：微波热泵联合干燥的干燥效率高于热风干燥和热泵干燥，其中微波 7 min+热泵 60 ℃ 干燥效率最高，较热风干燥缩短 300 min，且在粉体色泽和粉体流动性方面相对较好；60 ℃ 热泵干燥粉体的粒径最小且分布均匀，持水力和持油力分别为 3.79 g/g 和 1.86 mL/g；60 ℃ 热风干燥组的堆积密度最高，为 0.84 g/mL；60 ℃ 热泵干燥组的比表面积较大，可作为功能性原料吸附在食品表面。营养成分方面，微波 7 min+60 ℃ 热泵干燥样品的多酚含量最高为 9.07 mg/g，较热风干燥提高 53.73%，而 60 ℃ 热泵干燥样品的可溶性膳食纤维含量最高为 10.98%。抗氧化活性方面，60 ℃ 热泵干燥样品表现出较强的还原力与 DPPH 自由基清除能力，其还原力值和 DPPH 自由基清除率分别为 1.55 和 73.77%；在抗炎活性方面，60 ℃ 热泵干燥粉体能显著降低 LPS 诱导 RAW 264.7 细胞中 NO 的产生，较模型组下降 37.4%（P<0.05），表现出良好的抗炎活性。综上，微波 7 min+60 ℃ 热泵干燥粉体，在干燥效率、粉体色泽及粉体流动性等方面表现较优，且具有较好的营养品质，适宜作为功能配料添加到固体饮料等食品中；60 ℃ 热泵干燥样品因其较高的比表面积、抗氧化和抗炎活性，可用于功能食品开发或吸附在食品表面。

关键词: 脐橙果渣, 干燥方式, 物理性质, 营养品质, 功能活性
中图分类号: TS201.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)17−0063−09
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025110206
本文网刊:

Effects of Different Drying Methods on the Quality of *Citrus sinensis* Osbeck Pomace

HU Fuxia[1], MA Chao[1], WANG Xue[2], ZHANG Bohua[1], ZHANG Ming[1,*]

（1.Jinan Fruit Research Institute, China Supply and Marketing Cooperatives, Jinan 250014, China;
2.Shandong University of Agricultural Engineering, Zibo 255300, China）

Abstract: To promote the high-value utilization of *Citrus sinensis* Osbeck pomace, hot air drying (HAD), heat pump drying (HPD) and microwave-heat pump (MW-HPD) combined drying were used to prepare pomace powders. The effects of different drying methods on the physical properties, nutritional quality, and functional activity of the powders were systematically evaluated. Among the tested conditions, microwave pretreatment for 7 min followed by heat pump drying at 60 ℃ markedly shortened the drying time by approximately 300 min compared with conventional hot air drying, while simultaneously yielding powders with improved color characteristics and flowability. In terms of powder properties, the HPD (60 ℃) sample exhibited the smallest and most uniform particle size distribution, along with higher water-holding capacity

收稿日期: 2025−11−20
基金项目: 脐橙果渣风味物质高效利用技术及产业化示范（20261BCF320039）; 赣南特色水果提质增效键技术研究与产品研发（GXKJ-2024-011）; 赣州市重点研究计划-橙油品质提升关键技术研发与示范（2025KPCE0005）。
作者简介: 胡付侠（1996−）, 女, 硕士, 研究实习员, 研究方向: 天然产物提取及评价, E-mail: h18864801380@163.com。
*** 通信作者:** 张明（1988−）, 男, 硕士, 副研究员, 研究方向: 天然产物提取及功能食品开发, E-mail: zhangming_101@126.com。

(3.79 g/g) and oil-holding capacity (1.86 mL/g). The HAD (60 ℃) sample showed the highest bulk density (0.84 g/mL), suggesting better suitability for compression-based applications, whereas the HPD (60 ℃) sample possessed a relatively larger specific surface area, indicating its potential for use as a functional food ingredient. Regarding bioactive compounds, the MW-HPD (7 min, 60 ℃) sample showed the highest total phenolic content (9.07 mg/g), which was 53.73% higher than that of the HAD (60 ℃) sample, whereas the HPD (60 ℃) sample exhibited the highest soluble dietary fiber content (10.98%). In terms of functional activity, the HPD (60 ℃) sample exhibited strong reducing power and 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical-scavenging capacity, with reducing power value and DPPH radical-scavenging rate of 1.55 and 73.77%, respectively, and significantly reduced lipopolysaccharide (LPS)-induced nitric oxide (NO) production in RAW 264.7 cells (P<0.05), with a decrease of 37.4% compared to the model group, indicating notable anti-inflammatory activity. Overall, MW-HPD (7 min, 60 ℃) powder exhibited suitable characteristics for incorporation as a functional ingredient into solid beverages and various food systems, whereas HPD (60 ℃) powder, with its high specific surface area, antioxidant and anti-inflammatory capacities, was more suitable for surface adsorption in functional foods and for the formulation of functional products.

Key words: *Citrus sinensis* Osbeck pomace; drying method; physical properties; nutritional quality; functional activity

脐橙(*Citrus sinensis* Osbeck)又名抱子橘、双头橙,隶属于芸香科柑橘属,是我国栽培历史悠久的重要柑橘类水果,主要集中分布于江西、四川、重庆、湖北与湖南等地区[1]。其中,赣南地区是我国乃至全球重要的优质脐橙产区,独特的红壤丘陵地貌、亚热带湿润气候及显著的昼夜温差为其优良品质形成提供了适宜生态条件。据统计,2024 年赣南脐橙种植面积约 180 万亩,总产量超过 150 万吨,占全国脐橙总产量的近 40%,全产业链产值超过 300 亿元,已成为当地农业经济和乡村振兴的重要支柱产业[2]。

赣南脐橙是我国重要的特色柑橘资源,不仅风味独特,还富含维生素、多糖、矿物元素等营养物质,同时含有多酚、类黄酮及膳食纤维等具有生物活性的成分,具有良好的抗氧化、抗炎与免疫调节功能[3−5]。脐橙在果汁、果酱及果干等加工过程中,会产生大量副产物如脐橙果渣等。已有研究表明,脐橙果渣中富含多酚类化合物、膳食纤维及果胶等功能成分,具有较高的开发潜力和利用价值[6−7]。然而,目前脐橙果渣除少部分被用于饲料或有机肥外,大多未得到有效利用,造成资源浪费和环境污染。在橙果渣资源化利用过程中,干燥是实现其稳定化保存和深度加工的关键环节。然而,脐橙果渣中多酚等活性成分对温度和氧化条件较为敏感,易发生活性组分降解或结构破坏,从而影响其营养品质和功能特性。因此,开发高效、低耗且有利于保留活性成分的干燥工艺,对促进脐橙副产物的综合利用具有重要意义。

常用的果蔬干燥方式包括热风、热泵、微波及真空冷冻干燥等技术[8−9]。热风干燥因设备简单、运行成本低而应用广泛,但存在能耗偏高、处理时间较长及易导致品质下降等问题[10]。微波干燥可缩短干燥周期并提升能效,但易出现加热不均与局部过热现象[11]。真空冷冻干燥虽然能最大限度维持产品的色泽与活性物质,但设备投入及操作成本较高。热泵干燥作为一种新型节能干燥技术,凭借低温、高效、能耗低等优势,在果蔬高品质干制中得到广泛关注[12−13]。近年来,多种干燥方式的耦合应用受到广泛关注,其中微波–热泵联合干燥能够在提高干燥效率的同时减少热敏性成分降解,改善干燥均匀性与产品品质保持效果[14−15],在果蔬副产物高值化利用领域展现出良好的应用前景。本研究以赣南脐橙果渣为原料,采用热风干燥、热泵干燥及微波-热泵耦合干燥方式,系统比较不同干燥方式对脐橙果渣粉体物理特性、营养成分、抗氧化和抗炎活性的影响,旨在筛选出高效、节能且品质优良的干燥工艺,为脐橙果渣的精深加工与综合利用提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

赣南脐橙　购自江西省赣州市果园,果实直径在 80 mm 左右,成熟度七至八成,果实表面无机械损伤和病虫害;小鼠腹腔巨噬细胞 RAW 264.7　上海 ATCC 细胞库;福林酚　上海麦克林生化科技有限公司;铁氰化钾、淀粉葡萄糖苷酶(100000 U/g)　天津市大茂化学试剂厂;高温 α-淀粉酶(40000 U/g)、蛋白酶(50000 U/g)、NO 试剂盒、Cell Counting Kit-8(CCK-8)试剂　北京索莱宝科技有限公司;脂多糖(lipopolysaccharide, LPS)　美国 Sigma 公司;无水乙醇、氢氧化钠、三氯化铁、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠　均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

BT-9300H 激光粒度分布仪　丹东市百特仪器有限公司;WSC-S 测色色差计　上海仪电物理光学仪器有限公司;DGG-9070B 电热恒温鼓风干燥箱　上海森信实验仪器有限公司;1P 空气能热泵柜式烘干机　山东大琨能源科技有限公司;WZD4S-01 型微波设备　南京三乐微波技术发展有限公司;MA160-1CN 快速水分测定仪　北京赛多利斯科学仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1　脐橙果渣干燥工艺流程　新鲜赣南脐橙→果实筛选→鲜果清洗→榨汁→沥干果渣→热风干燥/热泵干燥/微波热泵耦合干燥→干制脐橙果渣→铝箔袋包装封口→成品。

1.2.2　脐橙果渣粉体制备　挑选出无病虫害、无机械损伤、无腐烂、形状相似、颜色均匀和大小相近的脐橙果实，纯净水洗净表面灰尘和污渍，沥干水分，榨汁机榨汁，取果渣，均匀平铺于干燥料盘中，物料厚度不超过 1 cm。分别采用热风干燥、热泵干燥、微波-热泵联合干燥三种方式干燥脐橙果渣，直至水分含量低于 10% 以下。热风干燥：干燥温度 60 ℃，风速 1.2 m/s。热泵干燥：干燥温度 60 ℃，风机转速 1.2 m/s。微波-热泵联合干燥：微波功率 1.0 kW、真空度 0.1 kPa，微波时间分别设置为 4、7 和 10 min，转入 60 ℃ 恒温热泵干燥[16]。采用多功能粉碎机粉碎不同干燥方式制得的脐橙果渣，过 80 目筛，得到脐橙果渣粉体，铝箔袋包装封口备用。

1.2.3　脐橙果渣粉体物理性质测定

1.2.3.1　含水率测定　采用快速水分测定仪测定脐橙果渣的含水率。

1.2.3.2　色泽测定　采用色差计对不同干燥方式处理的脐橙果渣粉体进行色泽测定，使用 CIELAB 表色系统测定样品的 L^*、a^*和 b^*值，以评估其色差变化。

1.2.3.3　粒径和比表面积测定　使用激光粒度分析仪对不同干燥的脐橙果渣进行粒径分布和比表面积的测定。

1.2.3.4　休止角、滑动角测定　休止角和滑动角的测定参照文献 [17−18]。

1.2.3.5　堆积密度测定　称取脐橙果渣粉体各 10.0 g 左右于 50 mL 量筒中，振实，直至量筒内物料体积不再变化，读取物料体积，重复测定三次，取平均值[19]。计算公式如下：

$$堆积密度(g/mL)=\frac{m}{V} \qquad 式（1）$$

式中：m 表示脐橙果渣粉体质量，g；V 表示物料体积，mL。

1.2.3.6　持水力测定　称取脐橙果渣粉体各 1.0 g 于 100 mL 烧杯中，加入 40 mL 蒸馏水，磁力搅拌器慢速搅拌 30 min，随后将样液转入 50 mL 离心管中，室温下 4000 r/min 离心 20 min，除去上清液，称量沉淀质量[20]。计算公式如下：

$$持水力(g/g)=\frac{m_2-m_1}{m_1} \qquad 式（2）$$

式中：m_1 表示脐橙果渣粉体质量，g；m_2 表示沉淀质量，g。

1.2.3.7　持油力测定　称取脐橙果渣粉体各 5.0 g 于 50 mL 离心管中，加入 40 mL 花生调和油，充分搅拌均匀后静置 30 min，4000 r/min 离心 20 min，记录上清油液体积[21]，计算公式如下：

$$持油力(mL/g)=\frac{40-V}{m} \qquad 式（3）$$

式中：m 表示脐橙果渣粉体质量，g；V 表示上清油液体积，mL。

1.2.4　脐橙果渣粉体营养品质分析

1.2.4.1　总多酚测定　参照王飞飞等[22]的方法稍作修改，以没食子酸标准品为对照品，测定样品溶液在 765 nm 波长处的吸光度，以没食子酸标准品的浓度 x（mg/mL）为横坐标、吸光度 y 为纵坐标，制作标准曲线，得到回归方程：y=0.0409x+0.0543，R^2=0.9996。

称取脐橙果渣粉体各 2.0 g 置于 50 mL 提取管中，按料液比 1∶10 加入 50% 乙醇，70 ℃ 水浴提取 1 h 后，滤液转入 50 mL 容量瓶中定容备用。取 100 μL 多酚提取液于具塞试管中，加入 1.0 mL 福林酚试剂，混匀静置 10 min，随后加入 1.0 mL 10% 的 Na_2CO_3 溶液混匀，室温下反应 30 min，765 nm 波长处测定吸光度。利用标准曲线计算脐橙果渣多酚的浓度，并依照下列公式计算多酚含量，以没食子酸计。

$$多酚含量(mg/g)=\frac{C\times V\times N}{m} \qquad 式（4）$$

式中：m 表示脐橙果渣粉体质量，g；C 表示脐橙果渣多酚浓度，mg/mL；V 表示提取液体积，mL；N 表示稀释倍数。

1.2.4.2　可溶性膳食纤维测定　采用 GB 5009.88-2023《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》方法，进行脐橙果渣可溶性膳食纤维含量的测定。

1.2.5　脐橙果渣粉体抗氧化活性测定

1.2.5.1　脐橙果渣样品溶液制备　称取 0.5 g 的脐橙果渣粉于 50 mL 离心管中，加入 25 mL 蒸馏水，室温超声提取 30 min 后 4000 r/min 离心 10 min，取上清液作为样品溶液。

1.2.5.2　总还原力测定　样品的总还原能力参照 CHANG 等[23]方法进行测定。将 2.0 mL 样品溶液加入 10 mL 具塞试管中，依次加入 2.5 mL 0.2 mol/L 磷酸缓冲液和 2.5 mL 1% 铁氰化钾溶液，混匀后在 50 ℃ 水浴中反应 20 min 后，冷却至室温。随后加入 2.5 mL 10% 三氯乙酸混匀，4000 r/min 离心 10 min。取 2.5 mL 上清液，加入等体积蒸馏水和 0.5 mL 0.1% 三氯化铁混匀，静置 10 min 后，于 700 nm 处测吸光度。

1.2.5.3　DPPH 自由基清除能力测定　参照 LE 等[24]的方法进行了适当修改。将 2.0 mL 样品溶液加入到 10 mL 具塞试管中，加入 2.0 mL DPPH 溶液（0.4 mmol/L）混匀，室温下避光反应 30 min，在 517 nm 处测吸光度。DPPH 自由基清除率计算公式如下：

$$清除率(\%)=\frac{A_0-(A_1-A_2)}{A_0}\times 100 \qquad 式（5）$$

式中：A_0 表示 2.0 mL 无水乙醇与 2.0 mL DPPH 的吸光度；A_1 表示 2.0 mL 样品与 2.0 mL DPPH 的吸光度；A_2 表示 2.0 mL 样品与 2.0 mL 无水乙醇的吸光度。

1.2.6 脐橙果渣粉体抗炎活性测定

1.2.6.1 脐橙果渣提取溶液制备 称取 0.5 g 的脐橙果渣粉于 50 mL 离心管中，加入 25 mL 蒸馏水，室温超声提取 30 min 后 4000 r/min 离心 10 min，取上清液冻干后备用。

1.2.6.2 细胞存活率的测定 将对数生长期的 RAW 264.7 细胞按 5×10^4 个/孔接种于 96 孔板中，于 37 ℃、5% CO_2 条件下培养 24 h。空白组加入基础培养基，LPS 组加入 1.0 μg/mL LPS，实验组分别加入 6.25、12.5、25、50、100 μg/mL 的脐橙果渣提取物。培养 24 h 后，每孔加入 10 μL CCK-8 试剂，在 37 ℃ 下培养 2 h，随后在 450 nm 处测定吸光度。细胞存活率计算公式如下：

$$细胞存活率(\%)=\frac{A_1}{A_0}\times100 \qquad 式（6）$$

式中：A_1 表示样品组的吸光度；A_0 表示空白组的吸光度。

1.2.6.3 NO 含量测定 将 RAW 264.7 细胞按 5×10^4 个/孔接种于 96 孔板中，培养 24 h 后，空白组加入基础培养基，模型组加入 1.0 μg/mL LPS，实验组加入 50 μg/mL 不同脐橙果渣提取样品（每组均加入 1.0 μg/mL LPS）。培养 24 h 后，用 NO 试剂盒测定 NO 产生量。

1.3 数据处理

数据采用 SPSS 13.0 进行 ANOVA 单因素方差分析和 Ducan's 多重检验（$P<0.05$），所有实验均重复 3 次，结果采用平均值±标准偏差表示，Origin 2024 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同干燥方式对脐橙果渣干燥速率的影响

不同干燥方式对脐橙果渣干燥速率的影响如图 1 所示。单一热风干燥耗时最长，约 480 min 可使含水率降至 10% 以下，干燥速率较低。热泵干燥虽较热风干燥效率有所提升，但由于传热与传质受限，其脱水速率仍较缓慢。微波-热泵联合干燥的脱水性能显著优于单一干燥方式，其中微波 7 min+60 ℃ 热泵组合干燥效率最佳，较单一热风干燥缩短约 300 min。这可能是由于微波可通过介电加热促进物料内部水分向外迁移，形成较大的水分梯度与传质驱动力，从而显著提高脱水效率并缩短干燥周期[25]。张明等[16] 采用不同的干燥方式对灵芝子实体进行干燥，结果发现微波 12 min+60 ℃ 热泵干燥时间，较单一热风干燥至少缩短 180 min，与本研究的结果基本一致。以上结果表明，微波-热泵联合干燥可以显著提高脐橙果渣的脱水速率，提高干燥的效率。

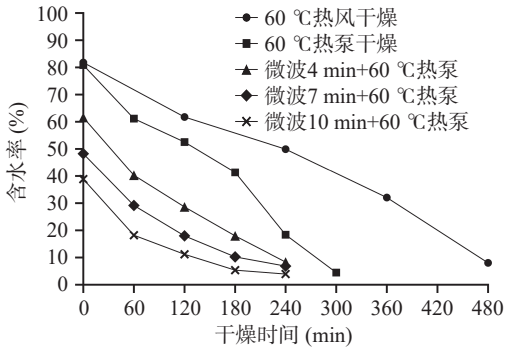


图 1 不同干燥方式对脐橙果渣干燥速率的影响

Fig.1 Effect of different drying methods on dehydration rate of *Citrus sinensis* Osbeck pomace

2.2 不同干燥方式对脐橙果渣色泽的影响

由表 1 可知，不同干燥方式对脐橙果渣粉体色泽影响差异较大。在 a^*值方面，60 ℃ 热泵干燥及微波-热泵联合干燥处理的 a^*值整体高于热风干燥处理，说明 60 ℃ 热泵干燥有利于脐橙果渣粉体红色程度增强，热风干燥粉体红色程度最浅。b^*值中 60 ℃ 热泵干燥组最高，能显著增加脐橙果渣粉体的黄色程度，而微波 10 min+60 ℃ 热泵干燥组 b^*值显著降低（$P<0.05$），这可能是由于微波时间过长导致类胡萝卜素等热敏性色素被氧化降解[26]。在 L^*值方面，微波-热泵联合干燥处理的 L^*值整体显著高于单一热风干燥和热泵干燥，其中微波 7 min+60 ℃ 热泵干燥组亮度最高，60 ℃ 热风干燥亮度最低，这说明适度微波预处理可以缩短干燥时间，避免物料长时间暴露在高温下发生褐变，从而更好地保持其天然亮度与色泽[27]；而单一热风干燥或过长微波处理则易造成色素降解及美拉德反应加剧，使粉体颜色加深、亮度下降[28−29]。总体而言，微波-热泵联合干燥能有效兼顾干燥效率与色泽保持，其中微波 7 min+60 ℃ 热泵干燥为脐橙果渣粉体色泽品质的最优组合。综合考虑，60 ℃ 热泵干燥、微波 7 min+60 ℃ 热泵干燥方式更有利于脐橙果渣粉体色泽品质的保留与改善。

2.3 不同干燥方式对脐橙果渣粒径的影响

不同干燥方式对脐橙果渣粉体粒径分布的影响如表 2 所示。D_{10}、D_{50} 和 D_{90} 分别表示粉体粒径小

表 1 不同干燥方式对脐橙果渣色泽的影响

Table 1 Effects of different drying methods on the color of *Citrus sinensis* Osbeck pomace

指标	不同干燥方式				
	60 ℃热风干燥	60 ℃热泵干燥	微波4 min+60 ℃热泵	微波7 min+60 ℃热泵	微波10 min+60 ℃热泵
L^*	70.23±0.17^c	73.53±0.17^d	75.47±0.20^c	78.66±0.32^a	76.20±0.16^b
a^*	13.59±0.17^b	14.33±0.37^a	13.77±0.11^b	13.89±0.09^b	14.22±0.13^a
b^*	43.44±0.19^d	53.00±0.27^a	49.77±0.15^b	46.08±0.14^c	40.90±0.11^e

注：每行中标注不同字母的值表示差异显著（$P<0.05$），表2、表3同。

表 2　不同干燥方式对脐橙果渣粒径的影响

Table 2　Effects of different drying methods on the particle sizes of *Citrus sinensis* Osbeck pomace

指标	不同干燥方式				
	60 ℃热风干燥	60 ℃热泵干燥	微波4 min+60 ℃热泵	微波7 min+60 ℃热泵	微波10 min+60 ℃热泵
D_{10}(mm)	13.78±0.11^{a}	11.73±0.15^{b}	10.67±0.05^{d}	11.16±0.06^{c}	11.72±0.06^{b}
D_{50}(mm)	64.19±0.17^{a}	43.92±0.27^{e}	47.69±0.10^{d}	48.55±0.13^{c}	53.69±0.46^{b}
D_{90}(mm)	180.13±2.20^{a}	133.79±0.86^{d}	131.48±0.82^{d}	139.07±1.99^{c}	149.93±1.57^{b}
跨度	2.59±0.01^{a}	2.45±0.02^{d}	2.46±0.01^{d}	2.55±0.01^{c}	2.57±0.01^{b}

于某一值时累积率为 10%、50% 和 90% 的粒径，其中 D_{50} 为粒径中值，具有较高代表性。与热风干燥相比，热泵干燥及微波-热泵联合干燥处理均显著降低了粉体的 D_{50} 值(P<0.05)，表明其更有利于获得粒径较小的粉体。其中，60 ℃ 热泵干燥所得粉体粒径最小，热风干燥粒径最大。跨度变化趋势同 D_{50} 一样，60 ℃ 热泵干燥跨度最小，粒度更均匀。这可能是由于热泵干燥的速率平稳、热传递均匀，减少因热应力引起的收缩和团聚现象，使物料在粉碎过程中更易破碎为细小颗粒[30]。而热风干燥处理时间较长，导致表面硬化并阻碍内部水分迁移，形成致密结构，粉碎时难以获得细小颗粒[31−32]。

2.4　不同干燥方式对脐橙果渣流动性和压缩成型性的影响

休止角和滑动角反映了粉体的流动特性，休止角数值越小，表明粉体流动性越好。由表 3 可见，与 60 ℃ 热风干燥相比，热泵干燥及微波-热泵联合干燥均显著降低了粉体的休止角和滑动角(P<0.05)，说明联合干燥方式有助于改善粉体流动性。其中，微波 7 min+60 ℃ 热泵组休止角与滑动角最小，表明其粉体流动性最佳，而 60 ℃ 热风干燥组休止角与滑动角最大，流动性最差，这与罗其琪等[33] 的研究结果一致。

堆积密度是评估粉体压缩特性的重要参数之一，可以反映粉体充填能力，堆积密度与粉体充填能力成正比。与热风干燥样品相比，微波-热泵联合干燥样品的堆积密度显著降低，表明其颗粒堆积更加疏松、孔隙率更高。这可能是因为热风干燥容易在表面形成坚硬外壳，所得粉体结构较致密、颗粒间隙小，因而堆积密度大；而微波-热泵干燥样品可以在负压状态下迅速升温、快速脱水，使其内部形成疏松多孔的网络结构，颗粒间间隙大，从而堆积密度较小[34]。比表面积的结果显示，60 ℃ 热泵干燥组的比表面积较大，显著高于其他处理组(P<0.05)，说明该粉体的粉体表面聚合力也越大，可作为功能性原料吸附在食品表面。

2.5　不同干燥方式对脐橙果渣持水力和持油力的影响

由图 2 可知，不同干燥方式对脐橙果渣粉体的持水力和持油力均产生显著影响(P<0.05)。与热风干燥相比，经热泵干燥及微波-热泵联合干燥处理后，粉体的持水力均较热风干燥有不同程度的提高，其中 60 ℃ 热泵和微波 10 min+热泵 60 ℃ 组的持水力较高，分别为 3.79 g/g 和 3.80 g/g，较热风干燥提高约 20%(P<0.05)。这表明热泵和微波干燥可以在较低温条件下有效保持物料内部孔隙结构和亲水性多糖网络，从而增强粉体与水分子的结合能力[35]。结合粒径分布结果也可知，热泵及微波-热泵联合干燥所得粉体粒径较小、比表面积更大，使更多极性官能团(如羟基、羧基)暴露于表面，增加了与水分子的相

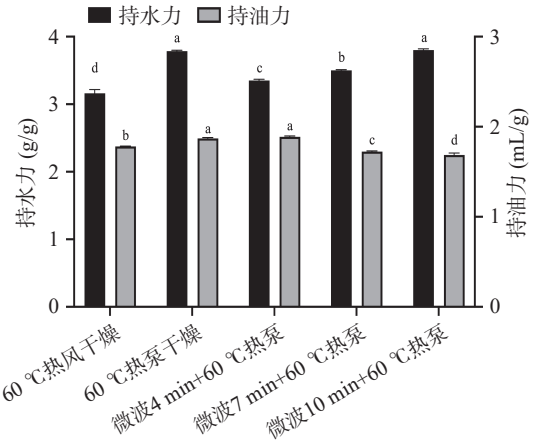


图 2　不同干燥方式对脐橙果渣持水力和持油力的影响

Fig.2　Effect of different drying methods on the water-holding and oil-holding capacity of *Citrus sinensis* Osbeck pomace

注：图中标注不同字母的值表示差异显著(P<0.05)，图 3~图 6 同。

表 3　不同干燥方式对脐橙果渣流动性和压缩成型性的影响

Table 3　Effects of different drying methods on the liquidity and compression molding of *Citrus sinensis* Osbeck pomace

指标	不同干燥方式				
	60 ℃热风干燥	60 ℃热泵干燥	微波4 min+60 ℃热泵	微波7 min+60 ℃热泵	微波10 min+60 ℃热泵
休止角(°)	43.43±0.67^{a}	35.67±0.55^{b}	31.50±0.75^{c}	26.43±0.57^{d}	27.10±0.44^{d}
滑动角(°)	48.20±0.60^{a}	43.83±0.75^{b}	41.83±0.45^{c}	37.47±0.55^{e}	38.60±0.46^{d}
堆积密度(g/mL)	0.84±0.01^{a}	0.79±0.02^{b}	0.71±0.02^{d}	0.68±0.01^{e}	0.76±0.02^{c}
比表面积(m^2/g)	0.081±0.01^{b}	0.089±0.00^{a}	0.081±0.00^{b}	0.070±0.01^{c}	0.080±0.00^{b}

互作用位点，因此表现出更高的持水力[36]。

在持油力方面，微波 4 min+60 ℃ 热泵干燥样品持油力最高，为 1.89 mL/g，与热泵干燥样品无显著性差异（P>0.05）。但随着微波时间的延长，持油力反而下降，可能是由于过度微波加热导致部分孔隙塌陷和表面结构收缩，降低了其对油脂的吸附[37]。综上所述，60 ℃ 热泵干燥样品具有较好的持水力与持油力。

2.6 不同干燥方式对脐橙果渣多酚和可溶性膳食纤维含量的影响

多酚和可溶性膳食纤维是脐橙果渣的主要活性成分，其含量的高低可作为评价干燥方式优劣的重要指标。由图 3 可知，微波 7 min+60 ℃ 热泵干燥样品的多酚含量最高，达到 9.07 mg/g，较热风干燥提高了 53.73%，这表明适度的微波预处理能够形成相对顺畅的内部传质通路，促进多酚物质的释放。CHONG 等[38] 研究发现，微波-热泵联合干燥苹果粉中总多酚含量比其他干燥技术提高 60%~70%。然而，随着微波时间的延长，多酚含量反而下降，可能是由于过度微波作用导致部分多酚发生氧化降解[39]。

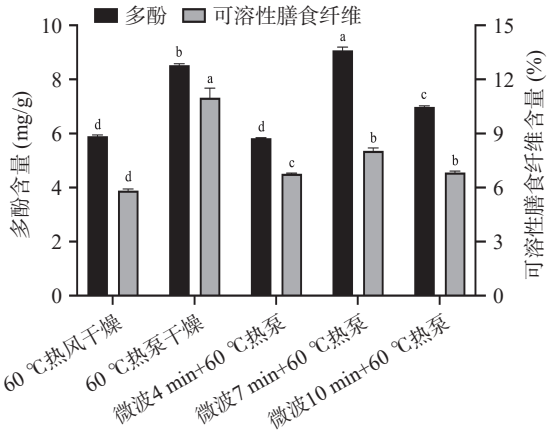


图 3 不同干燥方式对脐橙果渣多酚和可溶性膳食纤维含量的影响

Fig.3 Effect of different drying methods on the polyphenol and soluble dietary fiber content of *Citrus sinensis* Osbeck pomace

不同干燥方式对脐橙果渣可溶性膳食纤维含量也产生显著影响。膳食纤维的热敏性和结构完整性易受干燥温度及时间影响，这可能是导致不同干燥方法下可溶性膳食纤维含量差异的原因之一。其中，60 ℃ 热泵干燥样品的可溶性膳食纤维含量最高（10.98%），显著高于其他干燥方式（P<0.05）。GAO 等[40] 研究表明，热泵干燥可以在低温条件保持膳食纤维的结构完整性和理化特性，有效避免膳食纤维结构的降解和氧化。微波 7 min+60 ℃ 热泵干燥次之，为 8.04%，这是因为微波能够在短时间内加热样品，通过辐射加速水分蒸发，减少样品中可溶性膳食纤维的降解。而 60 ℃ 热风干燥样品的多酚和可溶性膳食纤维含量均最低，主要原因可能是长时间高温作用导致表面硬化、内部传质受阻，从而降低了多酚等物质的溶出[41]；另一方面是在长时间高温条件下多酚和可溶性膳食纤维易发生降解，导致含量降低[42]。

2.7 不同干燥方式对脐橙果渣抗氧化活性的影响

图 4 为不同干燥方式对脐橙果渣粉体还原力和 DPPH 自由基清除能力的影响。结果表明，60 ℃ 热泵干燥样品的还原力与 DPPH 自由基清除率均最高，分别为 1.55 和 73.77%，显著高于其他干燥处理组（P<0.05）。有研究表明，样品的抗氧化能力与其多酚、膳食纤维等活性成分的含量密切相关，多酚可以通过清除自由基发挥抗氧化作用，从而提高样品的抗氧化活性[43−44]；而可溶性膳食纤维则可以通过改善物料结构、稳定多酚或吸附金属离子等方式，从而发挥抗氧化作用[45−46]。热泵干燥粉体在较低温度条件下，能有效减少多酚等热敏性物质的降解，同时较高的膳食纤维含量在一定程度上增强样品的抗氧化能力[47]。微波 7 min+60 ℃ 热泵干燥样品的抗氧化能力次之，表明适度的微波预处理可在不显著破坏活性成分的情况下，促进多酚、黄酮等活性成分的溶出，从而保持较高的抗氧化性[48−49]。然而，随着微波时间的进一步延长，样品抗氧化活性明显下降，这是由于长时间微波预处理以及干燥不均匀等导致多酚降解或氧化失活，进而影响其还原力和 DPPH 自由基清除能力。张明等[16] 研究发现，微波时间超过 8 min 后，灵芝子实体的 DPPH 自由基清除能力逐渐下降。综上所述，60 ℃ 热泵干燥和微波 7 min+热泵干燥粉体具有良好的抗氧化活性，适合用于抗氧化功能性食品的开发。

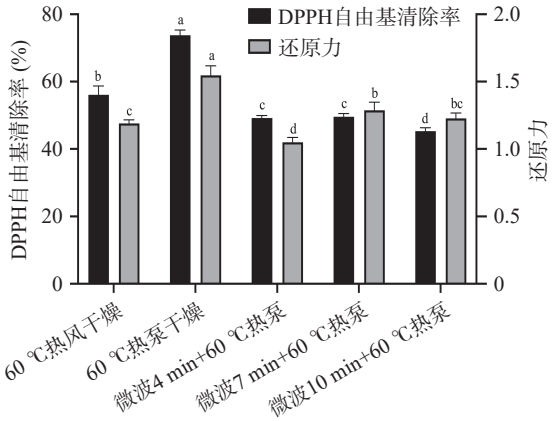


图 4 不同干燥方式对脐橙果渣还原力和 DPPH 自由基清除率的影响

Fig.4 Effect of different drying methods on the reducing power and DPPH radical scavenging rate of *Citrus sinensis* Osbeck pomace

2.8 不同干燥方式对脐橙果渣抗炎活性的影响

2.8.1 不同干燥方式的脐橙果渣对 RAW 264.7 细胞存活率的影响 图 5 为不同干燥方式的脐橙果渣对 RAW 264.7 细胞存活率的影响。结果表明，在 0~100 μg/mL 的浓度范围内，60 ℃ 热泵干燥、微波 4 min+60 ℃ 热泵干燥和微波 7 min+60 ℃ 热泵干燥样品细胞存活率均在 80% 以上，未出现细胞毒性。

而 60 ℃ 热风干燥和微波 10 min+60 ℃ 热泵干燥样品在浓度 100 μg/mL 时，细胞存活率显著下降（细胞存活率<80%），表明该干燥方式在较高剂量下会引发细胞毒性。基于上述结果，选择 50 μg/mL 脐橙果渣样品用于后续实验。

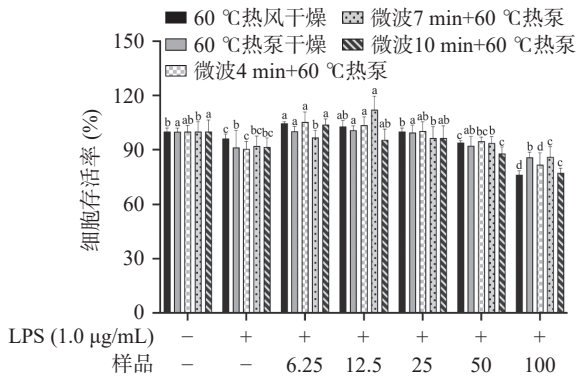


图 5　不同脐橙果渣对 RAW 264.7 细胞存活率的影响

Fig.5　Effect of different *Citrus sinensis* Osbeck pomace on the viability of RAW 264.7 cells

2.8.2　不同干燥方式的脐橙果渣对 RAW 264.7 细胞 NO 产生量的影响　LPS 可激活巨噬细胞并诱导大量一氧化氮 NO 生成，从而引发炎症反应[50]。因此，抑制 NO 的过量产生是评价样品抗炎活性的重要指标。由图 6 可知，与空白组相比，LPS 处理显著提高了细胞内 NO 含量（P<0.05），说明炎症模型构建成功。不同干燥样品在 50 μg/mL 下，均表现出显著的 NO 抑制作用（P<0.05）。其中，60 ℃ 热泵干燥样品表现出最强的 NO 抑制效果，其 NO 含量较 LPS 组下降了 37.4%，这一结果可能与其较高的活性成分含量有关。前期分析表明，60 ℃ 热泵干燥样品中多酚、膳食纤维等成分含量较高，这些成分具有良好的抗氧化与抗炎潜力，因此能够有效地抑制 NO 产生。综上所述，不同干燥方式的脐橙果渣均能显著抑制 NO 产生，其中 60 ℃ 热泵干燥样品具有较强的抗炎活性。

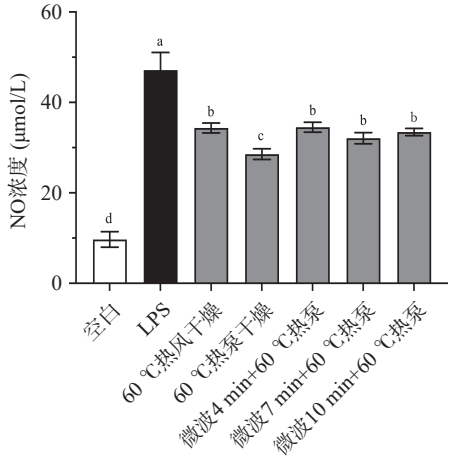


图 6　不同脐橙果渣对 RAW 264.7 细胞 NO 产生量的影响

Fig.6　Effect of different *Citrus sinensis* Osbeck pomace on the NO production of RAW 264.7 cells

3　结论

本研究系统比较了不同干燥方式对脐橙果渣干燥特性、粉体品质及功能活性的影响。结果表明，微波-热泵联合干燥显著提高了脱水速率，其中微波 7 min+60 ℃ 热泵干燥耗时最短，说明微波预处理可强化内部水分迁移并缩短干燥历程，同时在粉体色泽和流动性上表现最佳；60 ℃ 热泵干燥粉体粒径最小且分布均匀，持水力、持油力和比表面积较高，有利于改善粉体的水合和吸附能力；而 60 ℃ 热风干燥组的堆积密度最高，更适用于压片成型的胶囊及片剂制作。营养成分和功能活性分析显示，微波 7 min+60 ℃ 热泵干燥样品的多酚含量最高，而 60 ℃ 热泵干燥样品的可溶性膳食纤维含量最高，其还原力与 DPPH 自由基清除率及对 NO 生成的抑制作用显著优于其他干燥方式（P<0.05），表现出良好的抗氧化和抗炎潜力。综上，微波 7 min+60 ℃ 热泵干燥适用于对干燥效率、粉体色泽、流动性及多酚得率要求较高的功能配料加工，而 60 ℃ 热泵干燥在粉体细化、可溶性膳食纤维含量、抗氧化和抗炎活性上更具有优势，更适合用于功能产品的开发。本研究为脐橙果渣干燥工艺优化及其在功能食品原料中的应用提供了参考，但其抗氧化和抗炎活性成分的作用机制及其在食品体系中的功能表现仍有待进一步研究。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

［1］ 卢剑青. 赣南脐橙在贮藏与加工过程中品质特性及苦味物质的变化规律研究［D］. 南昌：江西农业大学, 2020. ［LU J Q. Study on the quality characteristics and flavor compounds of Gannan navel orange during storage and processing［D］. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2020.］

［2］ 中共赣州市委宣传部. 江西赣州 擦亮赣南脐橙金字招牌 描绘乡村产业振兴画卷［N］. 人民日报, 2024-11-16(7). ［The Propaganda Department of the Communist Party of China Ganzhou Municipal Committee. Ganzhou in Jiangxi polishes the golden brand of gannan tangerines and paints a picture of rural industrial revitalization［N］. People's Daily, 2024-11-16(7).］

［3］ LIU Yande, SUN Xudong, ZHOU Jianmin, et al. Linear and nonlinear multivariate regressions for determination sugar content of intact Gannan navel orange by Vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy［J］. Mathematical and Computer Modelling, 2010, 51(11−12): 1438−1443.

［4］ HOU Jinxue, LIANG Lu, SU Mingyue, et al. Variations in phenolic acids and antioxidant activity of navel orange at different growth stages［J］. Food Chemistry, 2021, 360: 129980.

［5］ ZHANG Jun, ZHANG Linyan, LAI Chunling, et al. Nutraceutical potential of navel orange peel in diabetes management: The chemical profile, antioxidant, α-glucosidase inhibitory and antiglycation effects of its flavonoids［J］. Food Bioscience, 2022, 49: 101943.

［6］ 陈依曼. 赣南脐橙皮（渣）功能成分联产技术研究［D］. 南昌：南昌大学, 2024. ［CHEN Yiman. Study on co-production tech-

nology of functional components from navel orange peel (residue) in southern Jiangxi[D]. Nanchang: Nanchang University, 2024.]
[7] 吴笑臣, 王科军, 钟金莲, 等. 响应面法优化脐橙渣中水溶性膳食纤维提取工艺[J]. 食品科学, 2012, 33(4): 109−114. [WU Xiaochen, WANG Kejun, ZHONG Jinlian, et al. Response surface methodology for optimization of extraction process of soluble dietary fiber from navel orange residue[J]. Food Science, 2012, 33(4): 109−114.]
[8] ZHANG Man, XING Suhui, FU Cuncun, et al. Effects of drying methods on taste components and flavor characterization of *Cordyceps militaris*[J]. Foods, 2022, 11(23): 3933.
[9] 耿铁, 孟斐, 杨卫东, 等. 不同干燥技术在农产品干燥领域的研究进展[J]. 农产品加工, 2022(14): 81−84. [GENG Tie, MENG Fei, YANG Weidong, et al. Research progress of different drying technologies in agricultural products drying field[J]. Farm Products Processing, 2022(14): 81−84.]
[10] JIMOH K A, HASHIM N, SHAMSUDIN R, et al. Assessment of performance and quality indices of glutinous rice under different drying methods[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2025, 73: 104161.
[11] ZHU R, SHEN J, LAW C L, et al. Combined calcium pretreatment and ultrasonic/microwave drying to dehydrate black chokeberry: Novel mass transfer modeling and metabolic pathways of polyphenols[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 83: 103215.
[12] 谢永康, 赵贺阳, 李萍, 等. 花生热泵干燥动力学及品质变化研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(14): 158−164. [XIE Yongkang, ZHAO Heyang, LI Ping, et al. Study on drying kinetics and quality changes of peanut by heat pump[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(14): 158−164.]
[13] 张晓敏, 徐玉娟, 余元善, 等. 龙眼间歇热泵干燥特性及干燥过程品质变化[J]. 食品工业科技, 2024, 45(23): 208−216. [ZHANG Xiaomin, XU Yujuan, YU Yuanshan, et al. Study on drying characteristics and quality properties of Longan (*Dimocarpus longan* Lour.) during intermittent heat pump drying[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(23): 208−216.]
[14] 黄毅成, 於海明, 缪磊, 等. 热泵干燥技术研究现状及发展趋势[J]. 农业工程, 2020, 10(6): 61−65. [HUANG Yicheng, YU Haiming, MIAO Lei, et al. Research status and development trend of heat pump drying technology[J]. Agricultural Engineering, 2020, 10(6): 61−65.]
[15] 杨博, 王未君, 李文林. 热泵-微波联合干燥技术研究进展[J]. 食品工业, 2022, 43(7): 202−206. [YANG Bo, WANG Weijun, LI Wenlin. The research progress of heat pump-microwave combined drying technology[J]. The Food Industry, 2022, 43(7): 202−206.]
[16] 张明, 孟晓峰, 吴茂玉, 等. 不同干燥方式对灵芝子实体干燥品质的影响[J]. 中国果菜, 2024, 44(3): 43−47. [ZHANG Ming, MENG Xiaofeng, WU Maoyu, et al. Effects of different drying methods on the drying quality of *Ganoderma lucidum* fruit body[J]. China Fruit & Vegetable, 2024, 44(3): 43−47.]
[17] ZHAO Xiaoyan, YANG Zaibin, GAI Guosheng, et al. Effect of superfine grinding on properties of ginger powder[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(2): 217−222.
[18] LECUMBERRI E, MATEOS R, IZQUIERDO-PULIDO M, et al. Dietary fibre composition, antioxidant capacity and physicochemical properties of a fibre-rich product from cocoa (*Theobroma cacao* L.)[J]. Food Chemistry, 2007, 104(3): 948−954.
[19] TSURUNAGA Y, TAKAHASHI T, KATSUBE T, et al. Effects of UV-B irradiation on the levels of anthocyanin, rutin and radical scavenging activity of buckwheat sprouts[J]. Food Chemistry, 2013, 141(1): 552−556.
[20] ZHANG Mengmeng, WU Caiyun, ZHANG Hexin, et al. Comparison of different drying technologies for kiwifruit pomace: Changes in physical characteristics, nutritional properties and antioxidant capacities[J]. Food Chemistry, 2024, 451: 139497.
[21] 吴兴雨, 孙凯杨, 姚玥, 等. 两种方法提取的亚麻籽蛋白持水性、持油性、溶解性和氨基酸组成比较[J]. 中国油脂, 2021, 46(4): 43−46,51. [WU Xingyu, SUN Kaiyang, YAO Yue, et al. Comparison of water holding capacity, oil holding capacity, solubility and amino acid composition of flaxseed protein extracted by two methods[J]. China Oils and Fats, 2021, 46(4): 43−46,51.]
[22] 王飞飞, 曹叶霞, 陈雪涛. 响应面法优化超声提取莜麦多酚及其生物活性分析[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(10): 90−96. [WANG Feifei, CAO Yexia, CHEN Xuetao. Optimization of ultrasonic extraction of polyphenols from naked oats by response surface methodology and its biological activity analysis[J]. Cereals & Oils, 2025, 38(10): 90−96.]
[23] CHANG H W, TAN T B, TAN P Y, et al. Microencapsulation of fish oil using thiol-modified β-lactoglobulin fibrils/chitosan complex: A study on the storage stability and *in vitro* release[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 80: 186−194.
[24] LE D D, JANG Y S, TRUONG V, et al. Bioactivities of quinic acids from *Vitex rotundifolia* obtained by supercritical fluid extraction[J]. Antioxidants, 2024, 13(10): 1235.
[25] TU Zongcai, HU Yueming, WANG Hui, et al. Microwave heating enhances antioxidant and emulsifying activities of ovalbumin glycated with glucose in solid-state[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(3): 1453−1461.
[26] 汪小婷, 宋江峰, 李大婧, 等. 真空微波干燥对南瓜片主要类胡萝卜素的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(21): 91−96. [WANG Xiaoping, SONG Jiangfeng, LI Dajing, et al. Effect of vacuum microwave drying on the main carotenoids of pumpkin[J]. Food Science, 2016, 37(21): 91−96.]
[27] TAN Si, MIAO Yiwen, ZHOU Chongbing, et al. Effects of hot air drying on drying kinetics and anthocyanin degradation of blood-flesh peach[J]. Foods, 2022, 11(11): 1596.
[28] CALÍN-SÁNCHEZ Á, LIPAN L, CANO-LAMADRID M, et al. Comparison of traditional and novel drying techniques and its effect on quality of fruits, vegetables and aromatic herbs[J]. Foods, 2020, 9(9): 1261.
[29] MASKAN M. Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying[J]. Journal of Food Engineering, 2001, 48(2): 169−175.
[30] 张明, 马超, 王兆磊, 等. 不同热泵干燥方式对南瓜低温超微粉体品质的影响[J]. 食品科技, 2025, 50(7): 20−28. [ZHANG Ming, MA Chao, WANG Zhaolei, et al. Effects of different heat pump drying methods on the quality of pumpkin low-temperature ultrafine powder[J]. Food Science and Technology, 2025, 50(7): 20−28.]
[31] ABBASPOUR-GILANDEH Y, KAVEH M, FATEMI H, et al. Combined hot air, microwave, and infrared drying of hawthorn fruit: Effects of ultrasonic pretreatment on drying time, energy, qualitative, and bioactive compounds' properties[J]. Foods, 2021, 10(5): 1006.
[32] TIAN Yuting, ZHAO Yingting, HUANG Jijun, et al. Effects

of different drying methods on the product quality and volatile compounds of whole shiitake mushrooms[J]. Food Chemistry, 2016, 197: 714−722.
[33] 罗其琪, 李咏富, 石彬, 等. 不同干燥方式对猕猴桃果粉理化性质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(15): 158−165. [LUO Qiqi, LI Yongfu, SHI Bin, et al. Effects of different drying methods on the physical and chemical properties of yellow flesh kiwifruit powder[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(15): 158−165.]
[34] 王秀丽, 赵龙, 刘立彬, 等. 热风、真空微波干燥红枣红豆浆的研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(16): 257−259. [WANG Xiuli, ZHAO Long, LIU Libin, et al. Study on hot-air, vacuum-microwave drying of processing jujube and red bean puree[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(16): 257−259.]
[35] ZHANG Qiuqiu, HUANG Renshuai, WANG Lisha, et al. Comparative study on the effects of different drying technologies on the structural characteristics and biological activities of polysaccharides from *Idesia polycarpa* maxim cake meal[J]. Food Chemistry, 2025, 26: 102348.
[36] YANG Tao, YAN Huiling, TANG Chuanhe. Wet media planetary ball milling remarkably improves functional and cholesterol-binding properties of okara[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 111: 106386.
[37] ZENG Shiyu, LI Mengge, LI Guohua, et al. Innovative applications, limitations and prospects of energy-carrying infrared radiation, microwave and radio frequency in agricultural products processing[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 121: 76−92.
[38] CHONG C H, FIGIEL A, LAW C L, et al. Combined drying of apple cubes by using of heat pump, vacuum-microwave, and intermittent techniques[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(4): 975−989.
[39] WOJDYŁO A, LECH K, NOWICKA P. Effects of different drying methods on the retention of bioactive compounds, on-line antioxidant capacity and color of the novel snack from red-fleshed apples[J]. Molecules, 2020, 25(23): 5521.
[40] GAO Q, ZHANG M, LI X, et al. Effect of drying methods on the structural and physicochemical properties of soluble dietary fiber from orange peel[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 159: 113172.
[41] HUANG Xinmeng, ZHANG Zunqi, LI Yuanpeng, et al. The effects of hot air and microwave drying on the structural and physicochemical properties of soluble dietary fiber from sugar beet pulp[J]. Foods, 2025, 14(19): 3435.
[42] 彭莉婷, 阮瑞梅, 赵广河, 等. 不同物理处理对柑橘皮粉和渣粉理化、功能和结构特性的影响[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2025, 43(1): 85−100. [PENG Liting, RUAN Ruimei, ZHAO Guanghe, et al. Physicochemical, functional and structural properties of *Citrus* peel and pomace powders affected by different physical treatments[J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2025, 43(1): 85−100.]
[43] IGNAT I, VOLF I, POPA V I. A critical review of methods for characterisation of polyphenolic compounds in fruits and vegetables[J]. Food Chemistry, 2011, 126(4): 1821−1835.
[44] 李素芬, 田心怡. 蒸汽爆破对不同品种米糠可溶性膳食纤维结构及特性的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(10): 110−117. [LI Sufen, TIAN Xinyi. Effects of steam explosion on structural and properties of soluble dietary fiber in rice bran from different varieties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(10): 110−117.]
[45] WANG Weihao, QUAN Zhigang, KOU Fang, et al. Preparation and characterization of soluble dietary fiber from tiger nut residues, showing enhanced antioxidant activity and metal-ion-binding properties[J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1275473.
[46] FU Mengqi, GAO Xin, XIE Zuorui, et al. Soluble dietary fiber from *Citrus unshiu* peel promotes antioxidant activity in oxidative stress mice and regulates intestinal microecology[J]. Foods, 2024, 13(10): 1539.
[47] 余雯, 钟子清, 叶秋萍, 等. 不同干燥方式对赣南脐橙片非酶褐变和品质的影响[J]. 福建农业科技, 2024, 55(11): 37−43. [YU Wen, ZHONG Ziqing, YE Qiuping, et al. Effects of different drying methods on non-enzymatic browning and quality of Gannan navel orange slices[J]. Fujian Agricultural Science and Technology, 2024, 55(11): 37−43.]
[48] 常森森, 牛阳雨, 杨舒曼, 等. 微波预处理八月瓜籽油成分及抗氧化活性影响的研究[J]. 中国粮油学报, 2026, 41(1): 136−144. [CHANG Miaomiao, NIU Yangyu, YANG Shuman, et al. Effects of microwave pretreatment on components and antioxidant activity of *Akebia trifoliata* seed oil[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2026, 41(1): 136−144.]
[49] 徐驰, 徐鹤宾, 朱芮, 等. 超声、微波辅助银杏叶多酚固液萃取的传质和 PID 控制研究[J]. 食品工业科技, 2025, 46(3): 120−132. [XU Chi, XU Hebin, ZHU Rui, et al. Ultrasonic and microwave-assisted solid-liquid extraction of *Ginkgo biloba* phenolics: Study about mass transfer and PID control[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(3): 120−132.]
[50] LEE S B, LEE W S, SHIN J S, et al. Xanthotoxin suppresses LPS-induced expression of iNOS, COX-2, TNF-α, and IL-6 via AP-1, NF-κB, and JAK-STAT inactivation in RAW 264.7 macrophages [J]. International Immunopharmacology, 2017, 49: 21−29.