

干燥方式对木瓜果粉性状品质的影响

茹超, 王奕然, 邱荔, 王燕君, 郭振宇, 商国楚, 汪远斌, 鲁周民

Effect of Drying Method on Character and Quality of *Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne Powder

RU Chao, WANG Yiran, QIU Li, WANG Yanjun, GUO Zhenyu, SHANG Guochu, WANG Yuanbin, and LU Zhoumin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024100001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同干燥方式桑叶粉物理特性、氨基酸及挥发性成分分析

Analysis of Physical Properties, Amino Acids and Volatile Aroma Components of Mulberry Leaf Powder by Different Drying Methods

食品工业科技. 2022, 43(9): 108-118 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021080343>

浑浊型光皮木瓜果汁的稳定性研究

Research on the Stability of *Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne Cloudy Juice

食品工业科技. 2021, 42(8): 194-198 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020060293>

不同前处理方式对冻干蓝莓粉品质特性的影响

Effects of Different Pretreatment Methods on Quality Characteristics of Freeze-dried Blueberry Powder

食品工业科技. 2023, 44(6): 89-95 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022050357>

干燥方式对苹果干品质特性及风味的影响

Effects of Drying Methods on Quality Characteristics and Flavor of Dried Apples

食品工业科技. 2024, 45(17): 221-231 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023090258>

不同护色处理和干燥方式对芦笋粉品质的影响

Effects of Different Color Protection and Drying Methods Treatment on the Quality of Asparagus Powder

食品工业科技. 2023, 44(11): 54-64 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022060091>

不同干燥方式对苹果蟠桃纸的感官品质和理化特性的影响

Effects of Different Drying Methods on the Sensory Quality and Physical and Chemical Properties of Apple-peach Flat Leather

食品工业科技. 2022, 43(20): 51-59 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021120099>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

茹超, 王奕然, 邱荔, 等. 干燥方式对木瓜果粉性状品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(17): 203–212. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024100001

RU Chao, WANG Yiran, QIU Li, et al. Effect of Drying Method on Character and Quality of *Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne Powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(17): 203–212. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024100001

· 研究与探讨 ·

干燥方式对木瓜果粉性状品质的影响

茹超¹, 王奕然¹, 邱荔², 王燕君¹, 郭振宇¹, 商国楚², 汪远斌², 鲁周民^{1,*}

(1. 西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100;

2. 白河县木瓜产业办公室, 陕西白河 725800)

摘要: 为揭示不同干燥条件下所加工木瓜果粉的性状品质差异, 给精细分类条件下深加工产品的原料选择提供理论依据。以新鲜木瓜为原料, 经切片护色后, 采用不同干燥方式处理并制粉, 分析比较果粉的物理特性和主要成分含量差异。结果表明: 不同干燥方式的能耗存在较大差异, 对果粉的物理特性和主要成分含量也有显著影响。真空冷冻干燥能很好地保持果粉的色泽 (L^* 值 (79.57)、 ΔE 值 (4.73)、WI 值 (30.06)) 和主要成分含量 (抗坏血酸 6.48 mg/g、类胡萝卜素 4.19 mg/100 g、可溶性蛋白 13.08 mg/g、总酚 75.57 mg/g、黄酮 214.95 mg/g、三萜酸 107.14 mg/g 和单宁 81.23 mg/g), 其中酚类组分儿茶素、表儿茶素、原花青素 B_1 和原花青素 B_2 含量分别为 13.17、2.40、27.70、66.99 mg/g, 显著高于其余干燥组 ($P < 0.05$), 但能耗 (77.19 kW·h/kg) 高; 自然干燥的果粉流动性 (35.93°) 最好, 持水性 (2.45 g/g) 和持油性 (2.44 mL/g) 显著高于其他干燥组 ($P < 0.05$), 有较好的冲调性能, 抗坏血酸和可溶性蛋白含量仅次于真空冷冻干燥果粉; 热风干燥果粉的总酸 (10.28%) 和总糖 (170.97 mg/g) 含量高, 其中苹果酸和山梨醇含量高, 分别为 56.26 mg/g 和 98.64 mg/g, 总酚、黄酮和单宁含量仅次于真空冷冻干燥果粉。综合考虑, 真空冷冻干燥果粉适于作为医疗保健类高附加值产品原料, 自然干燥果粉适用于加工液体饮料类产品, 热风干燥果粉适用于加工固体或半固体类食品。

关键词: 木瓜, 果粉, 干燥方式, 能耗, 物理特性, 主要成分

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)17-0203-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024100001



本文网刊:

Effect of Drying Method on Character and Quality of *Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne Powder

RU Chao¹, WANG Yiran¹, QIU Li², WANG Yanjun¹, GUO Zhenyu¹, SHANG Guochu²,
WANG Yuanbin², LU Zhoumin^{1,*}

(1. Forestry College, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2. Baihe County Chinese Flowering Quince Industry Office, Baihe 725800, China)

Abstract: This study aimed to evaluate the character and quality differences in *Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne fruit powder processed under various drying conditions, providing a theoretical basis for selecting raw materials in the production of value-added products under fine classification conditions. Fresh *Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne was used as the raw material, which was sliced and color-protected before being processed into powder using different drying methods, and the physical properties and main component content differences of the powder were analyzed and compared. The results indicated that energy consumption varied among drying methods, significantly affecting the physical properties and main component content of the fruit powder. Vacuum freeze drying best preserved the color (L^* value: 79.57, ΔE value: 4.73, WI value: 30.06) and main component content, including ascorbic acid (6.48 mg/g), carotenoids (4.19 mg/100 g), soluble protein (13.08 mg/g), total phenols (75.57 mg/g), flavonoids (214.95 mg/g), triterpenoid acids (107.14 mg/g) and

收稿日期: 2024-10-08

基金项目: 财政部“以大学为依托的农业科技推广模式建设”项目 (TGZX2022-18); 白河县政府横向课题“白河木瓜科技服务工作站建设” (K4050422456)。

作者简介: 茹超 (2000-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 经济林果品加工利用, E-mail: 1468496332@qq.com。

* 通信作者: 鲁周民 (1966-), 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 经济林果品加工利用, E-mail: lzm@nwafu.edu.cn。

tannins (81.23 mg/g). The contents of phenolic compounds, including catechin (13.17 mg/g), epicatechin (2.40 mg/g), proanthocyanidin B₁ (27.70 mg/g), and proanthocyanidin B₂ (66.99 mg/g), were also significantly higher than those in the other drying groups ($P<0.05$), although its energy consumption (77.19 kW·h/kg) was the highest. Naturally dried fruit powder had the best fluidity (35.93°), significantly higher water-holding (2.45 g/g) and oil-holding (2.44 mL/g) than the rest of the drying groups ($P<0.05$), with better dilution and brewing properties, and the ascorbic acid and soluble protein contents were second only to the vacuum freeze-dried fruit powder. Hot-air dried fruit powder had high contents of total acid (10.28%) and total sugar (170.97 mg/g), as well as the highest levels of malic acid (56.26 mg/g) and sorbitol (98.64 mg/g). The total phenols, flavonoids, and tannins were second only to those in vacuum freeze-dried powder. In conclusion, vacuum freeze-dried *Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne powder is best suited for high-value medical and health products, natural dried powder is ideal for liquid beverage processing, and hot-air dried powder is recommended for solid or semi-solid food applications.

Key words: *Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne; fruit powder; drying method; power consumption; physical characteristics; main component

木瓜 (*Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne) 是原产中国的蔷薇科木瓜属植物, 果实干燥后果皮仍光滑不皱缩, 俗称“光皮木瓜”^[1], 因富含黄酮类、多糖类、有机酸等成分, 是中国传统的药食同源果品。现代医学研究表明, 木瓜在治疗急性过敏、咳嗽、病毒性感冒和糖尿病等方面有很好的效果^[2-3]。新鲜木瓜含水量较高, 难以长时间保鲜贮藏^[4], 民间自古就有切丝腌制后食用的习惯。由于木瓜果实本身含有较多的木质素和不溶性膳食纤维, 质地较硬, 口感酸涩, 难以鲜食, 目前生产中除了少量新鲜木瓜原料以加工产品如木瓜果酱、木瓜果脯、木瓜丝、木瓜酒和木瓜果醋等^[5-6]形式销售外, 多数以加工成果粉供应功能成分提取以及糕点、月饼、果丹皮等的再加工原料。

干燥技术是通过将果蔬等含水量高的食品原料进行脱水处理, 有效抑制果蔬中的酶活性以及微生物生长繁殖, 从而延长保质期并保持果蔬品质的方法^[7]。干燥作为果粉加工中的关键工艺环节, 因干燥方式以及工艺参数不同会对产品性状品质造成较大影响。目前, 自然干燥 (Natural Drying, ND)、热风干燥 (Hot Air Drying, HAD)、真空干燥 (Vacuum Drying, VD)、真空冷冻干燥 (Vacuum Freeze Drying, VFD) 和真空微波干燥 (Vacuum Microwave Drying, VMD) 在食品加工方面应用广泛。Kim 等^[8]研究了不同干燥方式柘木果粉的抗氧化活性, 发现 60 °C 热风干燥的柘木果粉的抗氧化活性更强, 可用作冷藏鸡胸肉天然抗氧化剂和嫩化剂。Zhang 等^[9]研究了不同干燥方式对猕猴桃果渣的物理特性、营养成分和抗氧化能力的影响, 认为真空微波干燥是实际工业生产中的优势技术。不同干燥方式由于所采用技术的差异, 会造成干制成本和干制产品质量性状的不同^[4]; 在同一种干燥方式下因温度、时间等参数的改变也会对木瓜干制产品的质量性状产生较大影响, 巨浩羽等^[10]通过真空脉动干燥联合神经网络模型, 得出木瓜的最佳干燥工艺是温度 60 °C、真空时间 10 min、常压时间 4 min。而果蔬的加工适应性对深加工产品多元化背后的原料品质性状指标差异的侧重提出了不同的要求^[11], 因此, 不同干燥条件下加工的果粉性状品

质也会存在较大差异, 从而进一步影响再加工产品的性状。然而, 有关不同干燥方式影响木瓜物理特性和主要成分含量的系统研究鲜见报道, 经不同干燥方式干制后制得果粉的性状品质差异也不清楚。因此, 本研究以新鲜木瓜为材料, 研究 5 种不同干燥方式对木瓜果粉物理特性和主要成分含量的影响, 旨在揭示不同方式干制木瓜所加工果粉的性状品质差异, 给精细分类条件下深加工产品的原料选择提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

成熟期木瓜 于 2023 年 11 月初在陕西省咸阳市杨陵区西北农林科技大学南校区采摘; 食品级柠檬酸 (纯度: 98%~99%) 汇泉生物科技有限公司; 氢氧化钠、浓硫酸等 西陇科学有限公司; 无水乙醇、抗坏血酸、碳酸钠、冰乙酸等分析纯试剂 广东光华科技股份有限公司; 福林酚、牛血清蛋白等分析纯试剂 北京索莱宝科技有限公司; 苹果酸、酒石酸等有机酸标准品、山梨醇、葡萄糖等可溶性糖标准品 上海源叶生物科技有限公司; 色谱级甲醇 美国 MEDIA 天地试剂公司; 色谱级 50% 氢氧化钠、儿茶素、表儿茶素等酚类标准品 美国 Sigma-Aldrich 公司。

DGG-9140 型电热恒温鼓风干燥箱 上海森信实验仪器有限公司; DZF-6050 真空干燥箱 上海新苗医疗器械制造有限公司; LGJ-12A 型冷冻干燥机 北京四环起航科技有限公司; VYS-4ZH1/2V 真空微波干燥机 上海万木春生物工程有限公司; MULTISKAN GO 全波长酶标仪、ICS5000+ 离子色谱仪 美国赛默飞世尔科技有限公司; 1260 INFINITY II 高效液相色谱仪 美国安捷伦科技有限公司; QTRAP5500 液质联用仪 美国 AB SCIEX 公司; SU8600 冷场发射扫描电子显微镜 日本日立高新技术公司。

1.2 实验方法

1.2.1 木瓜预处理 选取果形、色泽、成熟度一致, 无机械损伤和病虫害的新鲜木瓜 (水分含量 76.40%±

1.75%,以湿基计),清洗、沥干,用切片机均匀切成厚度约 2.50 mm 的薄片,去核后按每组 300.00 g 浸入 1.2% 柠檬酸溶液(w/v=1:2)护色 30 min,取出沥干,收集备用。

1.2.2 干燥条件 木瓜片均匀平铺于干燥盘,分别进行 ND(温度 25±2 ℃、湿度 17%±1%、风速 1.94±0.78 m/s)、HAD(温度 50 ℃、额定功率 1.39 kW)、VD(温度 50 ℃、真空度 0.08 MPa、额定功率 1.4 kW、真空泵功率 0.37 kW)、VFD(-80 ℃ 预冻 12 h,冷阱温度-50 ℃、真空度 30 Pa、额定功率 0.95 kW,真空泵功率 0.4 kW)和 VMD(温度下限 45 ℃、温度上限 55 ℃、微波功率 300 W、真空度 0.086 MPa、额定功率 12 kW)处理,不同干燥方式的参数设定依据前期预实验数据获得,干燥至恒重后置于研磨机粉碎过 60 目筛装入密封袋中待测(ND、HAD、VD、VFD 和 VMD 果粉的干基含水量分别为 6.83%±0.52%、5.65%±0.03%、5.01%±0.10%、4.61%±0.11% 和 4.95%±0.15%)。

1.2.3 产率 按照 Zhang 等^[9]的方法,测定并计算产率。

1.2.4 水分含量 参考 GB 5009.3-2016,采用 105 ℃ 直接干燥法,通过式(1)计算干基含水量:

$$\text{干基含水量}(\%) = (m_1 - G)/G \times 100 \quad \text{式(1)}$$

式中: m_1 为干燥 t 时刻的果粉质量, g; G 为干物质质量, g。

1.2.5 干燥能耗 参考宋娟等^[12]的方法测定干燥能耗,采用设备额定功率,通过式(2)计算干燥能耗:

$$\text{干燥能耗}(\text{kW} \cdot \text{h}/\text{kg}) = P \times t/M \quad \text{式(2)}$$

式中: P 为额定功率, kW; t 为干燥时间, h; M 为物料质量, kg。

1.2.6 物理特性

1.2.6.1 色泽参数 用色差仪测定样品的 L^* 、 a^* 和 b^* 值,参考 Pathare 等^[13]的方法,分别通过式(3)和(4)计算 ΔE 和 WI :

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2} \quad \text{式(3)}$$

$$WI = \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad \text{式(4)}$$

式中: ΔE 表示木瓜鲜样和干燥样的色差; WI 表示干燥样白度; L^* 和 L_0 、 a^* 和 a_0 、 b^* 和 b_0 分别表示木瓜干燥样和鲜样的亮度、红绿度和黄蓝度。

1.2.6.2 微观结构观察 取少量木瓜果粉置于 SEM 载物台喷金处理,在 10 kV 的加速电压下放大 500 倍观察木瓜果粉微观形态。

1.2.6.3 流动性 参考王阳等^[14]的方法测定休止角(θ),10.0 g 木瓜果粉倒入垂直于桌面且具有一定高度的漏斗中,使果粉从漏斗自然流出,在坐标纸上形成锥形,测量圆锥底部直径和高,通过式(5)计算休

止角:

$$\text{休止角}(\theta)(^\circ) = \tan^{-1}(H/R) \quad \text{式(5)}$$

式中: H 为圆锥高度, cm; R 为圆锥底部半径, cm。

1.2.6.4 吸湿率 参考张文琴等^[15]的方法测定吸湿率,一定质量的木瓜果粉在相对湿度 75%、温度 25 ℃ 的环境中保存 24 h,测定吸湿前后质量,通过式(6)计算吸湿率:

$$\text{吸湿率}(\%) = (m_2 - m_1)/m_1 \times 100 \quad \text{式(6)}$$

式中: m_1 为吸湿前果粉质量, g; m_2 为吸湿后果粉质量, g。

1.2.6.5 堆积密度和溶解度 参考张乐道等^[16]的方法测定堆积密度和溶解度,木瓜果粉装入 10 mL 量筒中,填充果粉至 10 mL 刻度线后,测定总质量,通过式(7)计算堆积密度:

$$\text{堆积密度}(\text{g}/\text{mL}) = (m_2 - m_1)/V \quad \text{式(7)}$$

式中: m_1 为量筒的质量, g; m_2 为果粉和量筒的总质量, g; V 为果粉体积, mL。

称取 0.50 g 木瓜果粉,加入 30 mL 超纯水,充分搅拌 10 min,4000 r/min 离心 10 min,取上清液 20 mL 倒入干燥皿置于 105 ℃ 烘箱中干燥 4 h,测定总质量,通过式(8)计算溶解度:

$$\text{溶解度}(\%) = \frac{(m_2 - m_1) \times V_1}{m_3 \times V_2 \times (1 - w)} \quad \text{式(8)}$$

式中: m_1 为干燥皿质量, g; m_2 为烘干后固体残渣与干燥皿总质量, g; m_3 为果粉质量, g; V_1 为超纯水体积, mL; V_2 为上清液体积, mL; w 为果粉水分含量, %。

1.2.6.6 持水性和持油性 参考 Zhang 等^[9]的方法测定持水性和持油性,称取 1.0 g 木瓜果粉与 40 mL 超纯水在 50 mL 离心管中充分混匀,室温下静置 12 h 后 8000 r/min 离心 15 min,分离上清液测定离心沉淀的质量,通过式(9)计算持水性:

$$\text{持水性}(\text{g}/\text{g}) = (m_2 - m_1)/m_1 \quad \text{式(9)}$$

式中: m_1 为果粉吸水前质量, g; m_2 为果粉吸水后质量, g。

称取 1.0 g 木瓜果粉与 6 mL 豆油在 10 mL 离心管中充分混匀,室温下静置 12 h 后 8000 r/min 离心 15 min,测定上层油体积,通过式(10)计算持油性:

$$\text{持油性}(\text{mL}/\text{g}) = (V_1 - V_2)/m \quad \text{式(10)}$$

式中: V_1 为总豆油体积, mL; V_2 为上层油体积, mL; m 为果粉质量, g。

1.2.7 主要成分

1.2.7.1 总酸 按照 GB 12456-2021,采用酸碱滴定法测定,以苹果酸计。

1.2.7.2 总糖 采用蒽酮硫酸法^[17]测定并作调整,称取 1.0 g 木瓜果粉与 8 mL 超纯水充分混匀,80 ℃ 水

浴加热 30 min, 冷却后 300 W 超声 10 min, 10000 r/min 离心 15 min, 取上清液依次加入饱和中性醋酸铅、草酸钠并过滤, 收集所得滤液进行含量测定。以 0.2 mg/mL 葡萄糖溶液为标准品, 加入 5 mL 2 g/L 蒽酮-硫酸溶液后沸水浴加热 10 min, 冷却后于 620 nm 波长处测定吸光值。葡萄糖浓度为横坐标(X), 吸光值为纵坐标(Y)绘制标准曲线回归方程, 总糖含量表达式: $Y=2.04167X+0.07789$, $R^2=0.9990$ 。

1.2.7.3 抗坏血酸 采用钼蓝比色法^[9]测定并作调整, 称取 0.5 g 木瓜果粉与 8 mL 草酸-EDTA 溶液充分混匀, 300 W 超声 30 min, 10000 r/min 离心 15 min, 收集上清液进行含量测定。以 0.5 mg/mL 抗坏血酸溶液为标准品, 依次加入偏磷酸-冰乙酸溶液和 5% 硫酸溶液, 充分混匀, 加入 5% 钼酸铵溶液, 摇匀后 30 ℃ 水浴 15 min, 于 760 nm 波长处测定吸光值。抗坏血酸浓度为横坐标(X), 吸光值为纵坐标(Y)绘制标准曲线回归方程, 抗坏血酸含量表达式: $Y=4.62321X+0.04189$, $R^2=0.9991$ 。

1.2.7.4 类胡萝卜素 参考郑伟等^[18]的方法测定, 通过式(11)计算类胡萝卜素含量:

$$\text{类胡萝卜素(mg/100 g)} = A \times V \times 1000 / (E_{1\text{cm}}^{1\%} \times m) \quad \text{式 (11)}$$

式中: A 为样品在 450 nm 波长处的吸光值; V 为提取液体积, mL; $E_{1\text{cm}}^{1\%}$ 为 β -胡萝卜素在己烷中的消光系数(2560); m 为果粉质量, g。

1.2.7.5 可溶性蛋白 采用考马斯亮蓝法^[11]测定并作调整, 称取 0.3 g 木瓜果粉与 5 mL 超纯水充分混匀, 30 ℃ 水浴 30 min, 10000 r/min 离心 15 min, 收集上清液进行含量测定。以 0.1 mg/mL 牛血清蛋白溶液为标准品, 加入 5 mL 考马斯亮蓝 G-250 试剂, 混匀后, 于 595 nm 波长处测定吸光值。牛血清蛋白浓度为横坐标(X), 吸光值为纵坐标(Y)绘制标准曲线回归方程, 可溶性蛋白含量表达式: $Y=0.00218X+0.49601$, $R^2=0.9995$ 。

1.2.7.6 总酚 采用 Folin-酚比色法^[19]测定并作调整, 称取 0.30 g 木瓜果粉与 8 mL 70% 乙醇充分混匀, 300 W 超声 30 min, 10000 r/min 离心 10 min, 收集上清液进行含量测定。以 0.2 mg/mL 没食子酸溶液为标准品, 加入 1 mL 福林酚, 混匀, 5 min 后加入 7.5% 碳酸钠溶液 2 mL, 45 ℃ 水浴 15 min, 于 760 nm 波长处测定吸光值。没食子酸浓度为横坐标(X), 吸光值为纵坐标(Y)绘制标准曲线回归方程, 总酚含量表达式: $Y=6.26786X+0.09021$, $R^2=0.9992$ 。

1.2.7.7 黄酮 采用硝酸铝-氢氧化钠显色法^[12]测定并作调整, 提取方法同 1.2.7.6, 以 1 mg/mL 芦丁溶液为标准品, 加入 5% 亚硝酸钠溶液 0.30 mL, 放置 5 min, 加入 10% 硝酸铝溶液 0.30 mL, 放置 6 min, 加入 1.0 mol/L 氢氧化钠溶液 2 mL, 混匀后于 510 nm

波长处测定吸光值。芦丁浓度为横坐标(X), 吸光值为纵坐标(Y)绘制标准曲线回归方程, 黄酮含量表达式为: $Y=2.85071X+0.05339$, $R^2=0.9994$ 。

1.2.7.8 三萜酸 采用香草醛-冰乙酸显色法^[19]测定并作调整, 提取方法同 1.2.7.6, 以 2 mg/mL 熊果酸溶液为标准品, 置于沸水浴中挥干溶剂后, 依次加入 5% 香草醛-冰乙酸溶液 0.3 mL, 高氯酸 1 mL, 60 ℃ 水浴 15 min, 冷却后加入 5 mL 冰乙酸充分混匀, 于 545 nm 波长处测定吸光值。熊果酸浓度为横坐标(X), 吸光值为纵坐标(Y)绘制标准曲线回归方程, 三萜酸含量表达式: $Y=4.74087X+0.07208$, $R^2=0.9993$ 。

1.2.7.9 单宁 按照 NY/T 1600-2008, 采用分光光度法测定, 提取方法同 1.2.7.6。

1.2.8 有机酸单体组分测定 采用高效液相色谱法测定, 参考李怡诺等^[20]的方法并加以修改。称取 0.50 g 木瓜果粉与 6 mL 超纯水充分混匀, 在 80 ℃ 水浴锅中加热 30 min, 冷却后 300 W 超声 10 min, 10000 r/min 离心 15 min, 取上清液过 0.22 μm 滤膜测定有机酸单体组分。

标准品: 精确称量草酸、酒石酸、奎宁酸、苹果酸和丙酮酸标准品, 使用超纯水溶解并按照比例连续稀释, 制备不同浓度梯度的混合标准品工作液。

色谱柱: LaChrome C₁₈ (250 mm×4.6 mm, 5.0 μm); 流动相 A: 2.5% 甲醇; 流动相 B: 97.5% (0.1% 磷酸); 流速: 0.5 mL/min; 柱温: 40 ℃; 进样量: 10 μL ; 检测器: 紫外检测器; 检测波长: 210 nm; 检测时长: 30 min。

1.2.9 可溶性糖单体组分测定 采用高压离子色谱法测定, 参考李怡诺等^[20]的方法并加以修改。提取方法同 1.2.8, 测定可溶性糖单体组分。

标准品: 精确称量山梨醇、葡萄糖、果糖和蔗糖标准品, 使用超纯水溶解并按照比例连续稀释, 制备不同浓度梯度的混合标准品工作液。

色谱柱: Dionex CarboPac PA1 (4 mm×250 mm, 10 μm); 流动相: 200 mmol/L NaOH; 流速: 1 mL/min; 柱温: 30 ℃; 进样量: 25 μL ; 检测器: IntAmp 检测器; 参比电极: AgCl; 检测时长: 10 min。

1.2.10 酚类单体组分测定 采用液相色谱质谱联用法测定。提取方法同 1.2.7.6, 取上清液过 0.22 μm 滤膜测定酚类组分。

色谱条件: Inert Sustain TM AQ-C₁₈ 色谱柱 (150 mm×4.6 mm, 5 μm), 流速 0.7 mL/min, 柱温箱 25 ℃。流动相 A: 0.1% 甲酸水; 流动相 B: 乙腈。梯度洗脱: 0~1 min, 25%B; 1~5 min, 25%B 升至 95%B; 5~6.5 min, 95%B; 6.5~6.6 min, 95%B 降至 25%B; 6.6~10 min, 25%B。

质谱条件: 电喷雾电离源(ESI), 负离子模式, 离子化电压-4.5 kV, 离子源 TurboIonSpray 探针的加

热器气体温度为 600 ℃,喷雾气(GS1)和辅助加热气(GS2)分别为 60 psi,气帘气为 35 psi。采用多反应监测 MRM 扫描方法对酚类物质进行碎裂和扫描。

1.3 数据处理

每组实验设置 3 次生物学重复,数据以平均值±标准差形式表示,利用 SPSS 26.0 进行显著性分析和方差分析, $P<0.05$ 表示差异显著,运用 Origin 2024b 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同干燥方式木瓜果粉的能耗与产率

能耗是衡量干燥技术在实际生产应用中的重要参数,木瓜采用不同方式干制的能耗以及果粉的产率存在较大差异(表 1)。VMD 干燥时间最短,仅为 0.52 h,与 ND(20 h)相比干燥时间缩短 97.4%,能耗为 22.54 kW·h/kg,这主要是因为微波具备很强的穿透性,干燥效率高,在真空状态下加速了水分蒸发向外扩散^[21]。VFD 和 VD 的干燥时间较长,导致能耗较高。ND 果粉由于干制过程耗时长,滞留水分较多,果粉产率也最高,达到 22.55%。

表 1 不同干燥方式木瓜果粉能耗与产率
Table 1 Energy consumption and yield of *Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne fruit powder in different drying methods

干燥方式	干燥时间(h)	能耗(kW·h/kg)	产率(%)
ND	20.00±1.73 ^a	—	22.55±0.30 ^a
HAD	6.04±0.19 ^c	29.08±0.56 ^b	21.34±0.28 ^b
VD	11.94±0.50 ^b	73.48±2.55 ^a	21.25±1.12 ^b
VFD	14.43±0.84 ^b	77.19±4.80 ^a	20.97±0.17 ^b
VMD	0.52±0.02 ^d	22.54±0.77 ^b	21.10±0.30 ^b

注: 同列不同小写字母表示干燥组间有显著性差异, $P<0.05$, 表2~表4同。

2.2 干燥方式对木瓜果粉物理性状的影响

2.2.1 干燥方式对木瓜果粉色泽和微观结构的影响

色泽作为消费者衡量食品感官性能的重要指标,不但影响消费者的接受度,也进一步影响市场价值。通过测定木瓜果粉的 L^* 、 a^* 、 b^* 值可实现对加工后产品色泽品质的评价,计算 ΔE 值可表示干燥品与新鲜木瓜之间的总色差, WI 值表示干燥品的变色程度, ΔE 值和 WI 值越小,干燥品色泽与新鲜木瓜越接近^[13]。干燥方式对木瓜果粉的 L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE 值和 WI 值均有显著影响且不同干燥方式间差异显著($P<0.05$)(表 2)。VFD 果粉的 L^* 值(79.57)显著高于

其余干燥组($P<0.05$), a^* (4.07)、 b^* (21.67)、 ΔE 值(4.73)和 WI 值(30.06)显著低于其余干燥组($P<0.05$),色泽与新鲜木瓜果粉最接近,这是因为在低温和真空条件下冻结水分,水分以结晶态直接升华实现木瓜脱水,有效抑制了氧化和褐变的发生。其次是 HAD 果粉, ΔE 值(11.28)和 WI 值(36.53)显著低于除 VFD 外的干燥组($P<0.05$),这与段续等^[22]在杜仲雄花干燥处理研究中 HAD 对色泽影响较大的结果存在差异。这可能与原料之间有机酸含量差异较大有关,木瓜由于有机酸含量高,主要活性成分原花青素^[3]在酸性条件有较好的稳定性,与抗坏血酸可形成协同效应具有较好的抗氧化作用^[23],有效遏制木瓜的氧化和褐变。ND 因长时间在自然环境中与氧气接触发生酶促褐变,果粉的 ΔE 值(20.76)和 WI 值(44.83)显著高于其余干燥组($P<0.05$),褐变最严重; VMD 干燥效率高,水分迅速以气态形式凭借压差逸出,受热不均易生成类黑素类物质^[24],并伴有“边角效应”^[25],导致局部焦化,整体色泽偏暗。5 种干燥方式果粉的 ΔE 值和 WI 值大小变化趋势依次是 ND>VD>VMD>HAD>VFD($P<0.05$)。

不同干燥方式木瓜果粉的微观结构差异明显(图 1)。ND 果粉颗粒以片状为主,尺寸大小和表面褶皱有所差异,这与 ND 温度低、时间长有直接关系。因热处理下细胞收缩造成表面出现折叠、褶皱和粗糙化等现象^[26],导致 HAD 果粉颗粒表面皱缩且形状不规则。VD 果粉颗粒表面皱缩、堆叠紧密、形态各异,可能是因为热处理和真空破坏了原有结构,导致果粉形成了不规则间隔和局部致密结构^[27]。VFD 果粉颗粒表面光滑平整,团聚现象严重,这主要是因为木瓜通过升华脱水,骨架结构保存完整,粉体结构疏松多孔,研磨后颗粒细且薄,强化了分子间的静电作用,导致粉体出现团聚现象^[16]。VMD 果粉颗粒以片状为主,表面基本光滑,这主要是因为木瓜迅速脱水一定程度上抑制了因水分迁移导致的表面皱缩^[7]。

2.2.2 干燥方式对木瓜果粉堆积储存性能和稀释冲调性能的影响 流动性、堆积密度和吸湿率是衡量果粉堆积储存性能的关键指标。不同干燥方式木瓜果粉的流动性、堆积密度和吸湿率差异显著($P<0.05$)(表 3)。休止角(θ)是评价果粉流动性的重

表 2 干燥方式对木瓜果粉色泽的影响

Table 2 Effect of drying methods on the color of *Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne fruit powder

干燥方式	L^*	a^*	b^*	ΔE	WI
鲜样	83.07±0.13 ^a	1.60±0.06 ^d	23.67±0.15 ^c		29.15±0.15 ^f
ND	63.97±0.03 ^c	9.63±0.35 ^a	24.87±0.30 ^b	20.76±0.18 ^a	44.83±0.26 ^a
HAD	72.87±0.38 ^c	6.30±0.75 ^b	23.60±0.06 ^c	11.28±0.38 ^d	36.53±0.29 ^d
VD	68.57±0.23 ^d	8.87±0.23 ^a	29.37±0.20 ^a	17.20±0.08 ^b	43.92±0.00 ^b
VFD	79.57±0.13 ^b	4.07±0.27 ^c	21.67±0.12 ^d	4.73±0.28 ^e	30.06±0.09 ^e
VMD	73.47±0.29 ^c	7.47±0.09 ^b	29.87±0.17 ^a	12.85±0.25 ^c	40.64±0.28 ^c

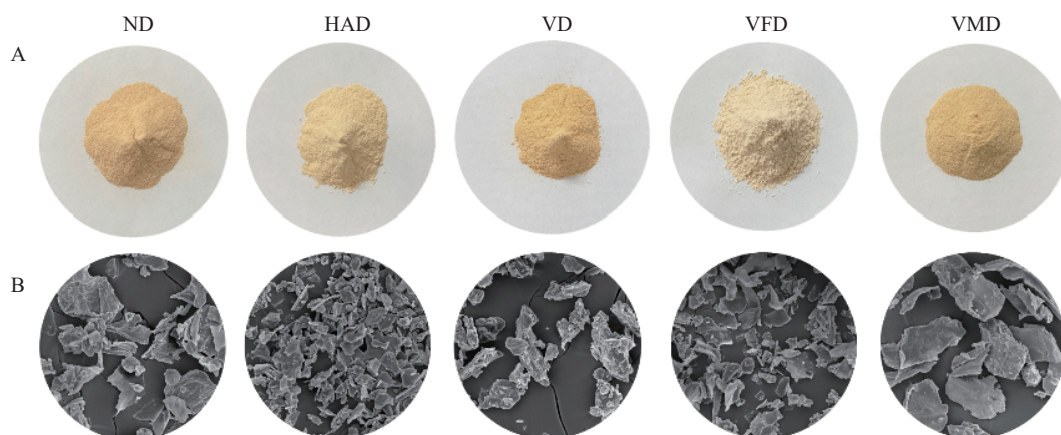


图1 不同干燥方式木瓜果粉图(A)和扫描电子显微镜图(B)(放大倍数为 500×)

Fig.1 Figures of *Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne fruit powder (A) and scanning electron microscope (B) (magnification at 500×) of different drying methods

表3 干燥方式对木瓜果粉堆积储存性和稀释冲调性能的影响

Table 3 Effect of drying methods on stacking storability and dilution and brewing properties of *Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne fruit powder

干燥方式	堆积储存性能			稀释冲调性能		
	休止角(θ)($^{\circ}$)	堆积密度(g/mL)	吸湿率(%)	持油性(mL/g)	持水性(g/g)	溶解度(%)
ND	35.93±0.23 ^d	0.33±0.00 ^d	17.31±0.02 ^a	2.44±0.07 ^a	2.45±0.08 ^a	50.28±0.35 ^a
HAD	45.08±0.23 ^c	0.35±0.00 ^c	17.18±0.50 ^a	1.76±0.04 ^c	2.06±0.00 ^c	49.36±3.85 ^a
VD	46.72±0.20 ^b	0.47±0.00 ^a	13.52±0.47 ^b	1.60±0.00 ^{cd}	1.97±0.02 ^c	39.20±1.94 ^b
VFD	49.33±0.33 ^a	0.25±0.00 ^e	17.43±0.12 ^a	2.26±0.05 ^b	2.31±0.10 ^b	48.48±0.35 ^a
VMD	46.27±0.14 ^b	0.43±0.00 ^b	18.07±0.47 ^a	1.55±0.07 ^d	2.31±0.05 ^b	51.11±0.20 ^a

余干燥组($P<0.05$),流动性好,符合果粉运输的基本要求^[14]。VFD果粉的休止角(49.33°)显著高于其余干燥组($P<0.05$),流动性差,堆积密度(0.25 g/mL)显著小于其余干燥组($P<0.05$)。这主要是因为VFD保留了木瓜原有的组织结构,果粉细胞体积的收缩程度小,粉体细腻且疏松多孔,比表面积大,表面聚力和黏着力增强,颗粒间的相互作用力增强,导致果粉流动性差、堆积密度小,这与刘岩龙等^[28]对樱桃果粉的研究结果一致。VD果粉的吸湿率(13.52%)显著小于其余干燥组($P<0.05$),这可能与粉体内部组织的疏松程度有关,VD果粉的堆积密度(0.47 g/mL)最大,果粉表面空隙小且颗粒堆叠紧密,吸附水分较少,导致吸湿率低,也可能与VD果粉的总糖和可溶性蛋白含量低有关^[15],后续需进一步深入研究。

持油性、持水性和溶解度是果粉稀释冲调性能的主要体现,良好的稀释冲调性能还能显著提升果粉在即溶、调配及混合加工作业中的便捷性与兼容性。不同干燥方式木瓜果粉的持油性、持水性和溶解度差异显著($P<0.05$)(表3)。ND果粉的持油性(2.44 mL/g)和持水性(2.45 g/g)显著高于其余干燥组($P<0.05$),有良好的稀释冲调性能,VD果粉的稀释冲调性能最差,原因可能是ND的干燥温度低,对细胞结构的影响较小,相比之下VD干燥温度高、耗时长,果粉颗粒基体坍塌严重、内部结构皱缩和紧密堆叠^[29],且果粉细胞壁多糖(如木质素和膳食纤维)遭

到破坏,而木质素和膳食纤维在持油^[30]和持水^[9]方面发挥关键作用,其结构受损可能导致果粉的稀释冲调性能下降。因为VFD果粉的细胞体积收缩程度小,果粉的堆积密度最小,在与溶液混合时易产生漂浮现象,导致VFD果粉在完整状态下的稀释冲调性能低于ND果粉。VMD果粉的溶解度(51.11%)高,是因为VMD耗时短,抑制了颗粒表面皱缩^[7],亲水基团的暴露使得果粉具备高溶解度和高持水性的特性。

2.3 干燥方式对木瓜果粉主要成分含量的影响

干燥食品中主要成分含量的多少受到多种因素制约,包括但不限于干燥方式的选择、原料的材料特性、细胞内成分的构成及分布状况^[31],且干燥过程中温度、时间和湿度也对干燥食品的成分含量有显著影响^[32]。不同干燥方式木瓜果粉的主要成分含量差异显著($P<0.05$)(表4、图2)。VFD果粉的抗坏血酸(6.48 mg/g)、类胡萝卜素(4.19 mg/100 g)、可溶性蛋白(13.08 mg/g)、总酚(75.57 mg/g)、黄酮(214.95 mg/g)、三萜酸(107.14 mg/g)和单宁(81.23 mg/g)含量均显著高于其余干燥组($P<0.05$),这与不同干燥方式对猕猴桃^[9]和西兰花^[11]主要成分含量影响的研究结果一致,表明低温、真空环境是保持热敏性、易氧化成分稳定和活性的关键条件^[33]。ND果粉的三萜酸含量(89.65 mg/g)显著高于除VFD外的3种高温干燥方式($P<0.05$),因干制时间不同,3种高温干燥果粉的三萜酸含量大小依次是VMD>HAD>VD。HAD

表 4 干燥方式对木瓜果粉主要营养成分的影响

Table 4 Effect of drying methods on the main nutrient components of <i>Chaenomeles sinensis</i> (Thouin) Koehne fruit powder					
干燥方式	总酸(%)	总糖(mg/g)	抗坏血酸(mg/g)	类胡萝卜素(mg/100 g)	可溶性蛋白(mg/g)
ND	8.53±0.04 ^b	159.26±1.53 ^c	6.25±0.02 ^b	2.58±0.13 ^d	12.70±0.03 ^b
HAD	10.28±0.22 ^a	170.97±1.10 ^a	5.74±0.04 ^c	3.55±0.05 ^b	12.36±0.05 ^c
VD	5.43±0.16 ^d	141.87±1.88 ^d	4.16±0.04 ^e	3.14±0.05 ^c	10.58±0.06 ^d
VFD	10.27±0.04 ^a	167.95±0.90 ^{ab}	6.48±0.07 ^a	4.19±0.02 ^a	13.08±0.04 ^a
VMD	7.34±0.13 ^c	164.36±0.49 ^b	5.33±0.02 ^d	3.72±0.06 ^b	12.25±0.03 ^c

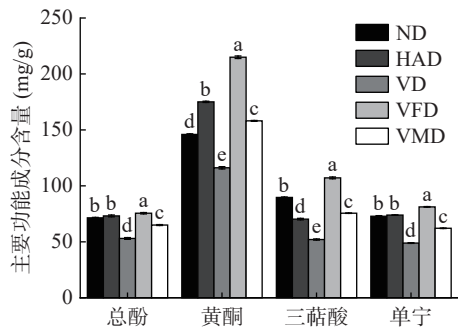


图 2 干燥方式对木瓜果粉主要功能成分的影响

Fig.2 Effect of drying methods on the main functional components of *Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne fruit powder

注: 不同小写字母表示干燥组间有显著性差异, $P<0.05$ 。

果粉的总酸(10.28%)和总糖(170.97 mg/g)含量高,且总酚、黄酮和单宁含量仅次于 VFD 果粉,与大部分研究认为 HAD 会严重损失原料主要成分的结论^[9,11-12]存在差异。这可能与原料之间的有机酸含量不同有关,木瓜的有机酸含量高,酸性条件下活性成分自身氧化降解能力弱,HAD 在特定温度阈值内适当升温,可促进活性成分(例如木质素^[27]、结合态酚和黄烷醇^[34-35]等)发生热裂解^[19],果粉中的主要成分含量升高,但部分可溶性蛋白结构严重损坏发生分解或转化为不溶状态^[36],导致可溶性蛋白含量较低。同为高温干燥的 VD 和 VMD,果粉的部分主要成分含量显著低于其余干燥组($P<0.05$),其原因可能是 VD 在干燥过程中会产生大量冷凝水,密封干燥环境的相对湿度大,水分扩散缓慢,氧化降解时间长,美拉德反应消耗主要成分多;VMD 的干燥效率高,表面

硬化严重,且微波的强穿透性^[21]导致主要成分的结构遭到破坏,从而难以保留或提取活性成分^[27]。

2.3.1 干燥方式对木瓜果粉有机酸单体组分和可溶性糖单体组分的影响 不同干燥方式木瓜果粉的有机酸单体和可溶性糖单体含量差异显著(表 5)。木瓜的有机酸单体以苹果酸为主,不同干燥方式木瓜果粉的苹果酸占总有机酸的 66.46%~72.93%。HAD 果粉的苹果酸含量(56.26 mg/g)显著高于其余干燥组($P<0.05$)且其他有机酸含量也较高,主要原因是热处理能够促进木瓜细胞壁破裂,有助于活性成分的热裂解和释放,进而形成一系列新的活性物质,如有机酸、呋喃衍生物和木质素等^[27]。VD 和 VMD 同为热处理但有机酸含量低,其原因可能是 VD 在长时间的干燥过程中,脱水、脱羧和美拉德反应消耗的有机酸含量较多^[37];在微波的作用下,木瓜的分子内能增加,加速了有机酸的脱羧和酯化反应,导致 VMD 果粉的有机酸含量降低,且部分苹果酸转化为琥珀酸导致苹果酸含量低^[38]。

在木瓜干燥过程中,蔗糖水解生成葡萄糖和果糖,而美拉德反应消耗葡萄糖和果糖,两个过程共同决定了葡萄糖和果糖的终含量^[34]。木瓜的可溶性糖单体以山梨醇为主,含量占总可溶性糖的 54.33%~59.15%,其中 HAD 果粉的山梨醇含量(98.64 mg/g)显著高于 ND 果粉(90.58 mg/g)和 VD 果粉(92.82 mg/g)($P<0.05$)。VMD 果粉的蔗糖含量(8.10 mg/g)显著低于其余干燥组($P<0.05$),可能是 VMD 条件下物料内外同时加热引起蔗糖快速水解引起的。HAD 和 ND 果粉的蔗糖含量显著高于其余真空条件干燥

表 5 干燥方式对木瓜果粉有机酸单体组分和可溶性糖单体组分的影响

Table 5 Effect of drying methods on organic acid monomer fraction and soluble sugar monomer fraction of *Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne fruit powder

单体成分	ND	HAD	VD	VFD	VMD
草酸(mg/g)	0.64±0.05 ^a	0.72±0.03 ^a	0.38±0.01 ^b	0.63±0.04 ^a	0.42±0.01 ^b
酒石酸(mg/g)	5.10±0.14 ^b	5.81±0.23 ^a	4.07±0.04 ^c	5.35±0.24 ^{ab}	4.43±0.07 ^c
奎宁酸(mg/g)	2.11±0.01 ^b	1.70±0.02 ^{bc}	1.21±0.08 ^{cd}	0.71±0.03 ^d	3.27±0.55 ^a
苹果酸(mg/g)	45.82±0.33 ^b	56.26±0.40 ^a	31.39±1.88 ^d	50.64±1.10 ^b	36.42±2.19 ^c
丙酮酸(mg/g)	9.81±0.26 ^b	13.61±0.53 ^a	5.99±0.35 ^c	14.60±0.73 ^a	10.26±0.83 ^b
山梨醇(mg/g)	90.58±0.95 ^c	98.64±1.23 ^a	92.82±0.68 ^{bc}	93.84±1.98 ^{abc}	96.28±2.29 ^{ab}
葡萄糖(mg/g)	26.73±0.39 ^b	32.24±0.42 ^a	26.19±0.31 ^b	30.76±0.87 ^a	32.41±0.95 ^a
果糖(mg/g)	26.74±1.31 ^b	35.04±1.26 ^a	26.36±0.73 ^b	31.88±2.00 ^{ab}	33.75±2.32 ^a
蔗糖(mg/g)	17.17±0.12 ^a	15.62±1.25 ^a	11.56±0.20 ^b	13.16±0.74 ^b	8.10±0.34 ^c

注: 同行不同小写字母表示干燥组间有显著性差异, $P<0.05$, 表6同。

组($P<0.05$),这可能是因为真空条件下有利于果粉中蔗糖降解为单糖^[39]。ND 和 VD 果粉的葡萄糖(26.73 mg/g 和 26.19 mg/g)和果糖(26.74 mg/g 和 26.36 mg/g)含量显著低于其余 3 种干燥组($P<0.05$),可能是因为 ND 和 VD 干燥时间长,美拉德反应消耗葡萄糖和果糖多。ND 果粉的蔗糖含量(17.17 mg/g)显著高于 VD 果粉(11.56 mg/g)($P<0.05$),这可能是在 VD 条件下温度高,物料中蔗糖水解速度和美拉德反应速度都加快,因此,VD 果粉的蔗糖含量显著低于 ND 果粉,而葡萄糖和果糖含量在两者之间无显著差异。

2.3.2 干燥方式对木瓜果粉酚类单体组分的影响

不同干燥方式木瓜果粉的酚类单体组分含量差异显著(表 6),以原花青素为主,其中原花青素 B₂ 含量占

酚类组分的 54.17%~56.71%。VFD 对木瓜的酚类单体组分保留效果好,其儿茶素(13.17 mg/g)、表儿茶素(2.4 mg/g)、原花青素 B₁(27.7 mg/g)和原花青素 B₂(66.99 mg/g)4 种黄烷醇含量显著高于其余干燥组($P<0.05$)。VFD 和 ND 果粉的绿原酸含量(1.59 mg/g 和 1.57 mg/g)显著高于其余 3 种高温干燥方式($P<0.05$),原因可能是绿原酸作为咖啡酸和奎宁酸酯化而成的化合物,结构中的邻羟基有很强的氢离子结合能力^[34],受热易分解。HAD 果粉的 4 种黄烷醇含量低于 VFD,但与 ND 果粉无显著性差异,这是黄烷醇在高温条件下会出现氧化聚合、差向异构、裂解等化学修饰,其最终状态受诸多因素影响^[35,40]。不同方式干燥条件下果粉中的芦丁、柚皮苷和金丝桃苷含量差异不明显。

表 6 干燥方式对木瓜果粉酚类组分的影响

Table 6 Effect of drying methods on phenolic fractions of *Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne fruit powder

酚类组分	ND	HAD	VD	VFD	VMD
绿原酸(mg/g)	1.57±0.06 ^a	1.21±0.07 ^b	0.67±0.01 ^c	1.59±0.04 ^a	1.07±0.08 ^b
儿茶素(mg/g)	10.75±0.38 ^b	11.59±0.18 ^b	5.88±0.12 ^d	13.17±0.42 ^a	8.39±0.29 ^c
表儿茶素(mg/g)	2.08±0.07 ^b	2.10±0.09 ^b	1.09±0.04 ^d	2.40±0.02 ^a	1.58±0.05 ^c
原花青素B ₁ (mg/g)	23.90±0.63 ^b	24.61±0.73 ^{ab}	17.08±1.35 ^c	27.70±0.59 ^a	19.54±1.05 ^c
原花青素B ₂ (mg/g)	59.00±1.08 ^b	60.12±2.66 ^b	36.72±1.43 ^d	66.99±0.27 ^a	46.30±2.38 ^c
芦丁(mg/g)	3.57±0.37 ^{ab}	2.79±0.24 ^b	2.90±0.11 ^{ab}	2.85±0.29 ^{ab}	3.70±0.10 ^a
柚皮苷(mg/g)	2.08±0.05 ^a	2.02±0.13 ^a	2.30±0.03 ^a	2.06±0.06 ^a	1.98±0.16 ^a
金丝桃苷(mg/g)	1.75±0.16 ^a	1.55±0.13 ^a	1.14±0.05 ^b	1.89±0.04 ^a	1.80±0.13 ^a

3 结论

通过 5 种方式干制木瓜,系统分析比较不同干制木瓜所加工果粉的性状品质差异。结果表明:不同干燥方式的能耗存在较大差异,对果粉的物理特性和主要成分含量也有显著影响。5 种干燥方式中,VFD 可以有效保持果粉的色泽和主要成分含量,ΔE 值(4.73)和 WI 值(30.06)显著低于其余干燥组($P<0.05$),抗坏血酸(6.48 mg/g)、类胡萝卜素(4.19 mg/100 g)、可溶性蛋白(13.08 mg/g)、总酚(75.57 mg/g)、黄酮(214.95 mg/g)、三萜酸(107.14 mg/g)和单宁(81.23 mg/g)含量显著高于其余干燥组($P<0.05$),但能耗高(77.19 kW·h/kg),适于作为医疗保健类高附加值产品原料;ND 果粉的流动性(35.93°)最好,符合果粉运输的基本要求,持油性(2.44 mL/g)和持水性(2.45 g/g)显著高于其余干燥组($P<0.05$),冲调性能最好,抗坏血酸和可溶性蛋白含量仅次于 VFD 果粉,适用于加工果汁、果醋类液体饮料类产品;HAD 果粉的总酸(10.28%)和总糖(170.97 mg/g)含量高,保色效果和总酚、黄酮和单宁含量仅次于 VFD 果粉,较好地保留了木瓜原有风味,适用于加工果脯、果泥类固体或半固体类食品。

成本和品质是企业生产最关注的两个问题。VMD 耗时短、能耗低,但木瓜果粉品质不够理想,其高效的干燥性能是后续木瓜干燥方法改良的首要选

择。VD 存在诸多问题,如果粉品质差、生产成本高且效率低。未来可以进一步探索契合木瓜品质特性的干燥技术,联合机器算法优化干燥工艺,为木瓜果粉干燥技术的精深化发展和实际企业生产提供科学依据。

© The Author(s) 2025. 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] 石静亚,张志广,李孟,等.光皮木瓜中酚性成分研究[J].中国药学杂志,2020,55(20):1666-1672. [SHI J Y, ZHANG Z G, LI M, et al. Phenolic constituents from the fruit of *Chaenomeles sinensis*[J]. Chinese Pharmaceutical Journal, 2020, 55(20): 1666-1672.]
- [2] LÜ T T, QIN Z, LIU H M, et al. Chemical composition and antioxidant capacity of proanthocyanidins from Chinese quince (*Chaenomeles sinensis*) fruit at different growth stages[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2024, 18(3): 2318-2330.
- [3] DU H, WU J, LI H, et al. Polyphenols and triterpenes from *Chaenomeles* fruits: Chemical analysis and antioxidant activities assessment[J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(4): 4260-4268.
- [4] 巨浩羽,赵海燕,张菊,等.基于 Dincer 模型不同干燥方式下光皮木瓜干燥特性研究[J].中草药,2020,51(15):3911-3921. [JU H Y, ZHAO H Y, ZHANG J, et al. Drying characteristics of

- Chaenomeles sinensis* with different drying methods based on Dincer model[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2020, 51(15): 3911–3921.]
- [5] 向进乐, 罗磊, 马丽苹, 等. 木瓜酒和木瓜醋发酵工艺及其有机酸组成分析[J]. *食品科学*, 2016, 37(23): 191–195. [XIANG J L, LUO L, MA L P, et al. Fermentation and organic acid composition of wine and vinegar from *Chaenomeles sinensis* fruits[J]. *Food Science*, 2016, 37(23): 191–195.]
- [6] SUO A, WU C, FAN G J, et al. Optimization of fermentation conditions and quality evaluation of *Chaenomeles sinensis* glutinous rice wine[J]. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 2024, 61(6): 1138–1147.
- [7] 袁迪, 李洋, 陈丰, 等. 蓝莓微波冷冻干燥特性及品质分析[J]. *中国食品学报*, 2024, 24(6): 248–263. [YUAN D, LI Y, CHEN F, et al. Analysis of microwave freeze-drying characteristics and quality of blueberry[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2024, 24(6): 248–263.]
- [8] KIM H, CHIN K B. Effects of different drying methods on antioxidant activities of *Cudrania tricuspidata* fruit powder and its effects on the product quality of marinated chicken breast[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(10): e15830.
- [9] ZHANG M M, WU C Y, ZHANG H X, et al. Comparison of different drying technologies for kiwifruit pomace: Changes in physical characteristics, nutritional properties and antioxidant capacities[J]. *Food and Machinery*, 2024, 451: 139497.
- [10] 巨浩羽, 赵士豪, 赵海燕, 等. 光皮木瓜真空脉动干燥特性及神经网络模型[J]. *食品与机械*, 2022, 38(3): 147–153. [JU H Y, ZHAO S H, ZHAO H Y, et al. Drying characteristics of *Chaenomeles sinensis* with vacuum pulsed drying technology based on BP neural network mode[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(3): 147–153.]
- [11] 李子煜, 吴婷, 马帅楠, 等. 不同干燥方式对西兰花茎和叶品质的影响[J]. *食品科学*, 2024, 45(14): 179–188. [LI Z Y, WU T, MA S N, et al. Effects of different drying methods on the quality of broccoli stems and leaves[J]. *Food Science*, 2024, 45(14): 179–188.]
- [12] 宋娟, 张海燕, 曾朝珍, 等. 干燥方式对苹果干品质特性及风味的影响[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(17): 221–231. [SONG J, ZHANG H Y, ZENG C Z, et al. Effects of drying methods on quality characteristics and flavor of dried apples[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(17): 221–231.]
- [13] PATHARE P B, OPARA U L, AL-SAID F A. Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: A review[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2013, 6(1): 36–60.
- [14] 王阳, 颜才植, 叶发银, 等. 膳食纤维粉体流动性与其颗粒结构的关系[J]. *食品科学*, 2018, 39(10): 84–88. [WANG Y, YAN C Z, YE F Y, et al. Relationship between flowability and particle structure of dietary fiber powders[J]. *Food Science*, 2018, 39(10): 84–88.]
- [15] 张文琴, 王晓燕, 宋高林. 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. [ZHANG W Q, WANG X Y, SONG G L. Effect of drying methods on the quality of *Rosa xanthina* Lindl powder[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2018, 44(7): 218–224.]
- [16] 张乐道, 曹世英, 云月英, 等. 干燥方法对沙葱粉品质特征的影响[J]. *中国食品学报*, 2024, 24(4): 285–293. [ZHANG L D, CAO S Y, YUN Y Y, et al. Effect of drying method on quality characteristics of *Allium mongolicum* regel powder[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2024, 24(4): 285–293.]
- [17] 张相钊, 郑伟, 李娜, 等. 白河县不同性状木瓜单株果实品质分析与综合评价[J]. *西北林学院学报*, 2025, 40(2): 31–41. [ZHANG X Z, ZHENG W, LI N, et al. Analysis and comprehensive evaluation of fruit quality of *Chaenomeles sinensis* single plants with different traits in Baihe County[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2025, 40(2): 31–41.]
- [18] 郑伟, 张相钊, 邓鑫峰, 等. 枇杷原浆护色配方优化及贮藏期间品质变化[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(14): 184–193. [ZHENG W, ZHANG X Z, DENG X F, et al. Optimization of loquat puree color protection formula and quality change during storage[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(14): 184–193.]
- [19] 代建武, 周厚彬, 黄杰, 等. 不同干燥方式对红托竹荪干燥特性和品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(6): 90–100. [DAI J W, ZHOU H B, HUANG J, et al. Effects of different drying technologies on the drying characteristics and quality of *Dictyophora rubrovolva*[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(6): 90–100.]
- [20] 李怡诺, 王洋, 赵小娜, 等. 7个产区大五星枇杷果实品质差异研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(12): 29–38. [LI Y N, WANG Y, ZHAO X N, et al. Differences in fruit quality of Dawuxing loquat from seven production regions[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2023, 51(12): 29–38.]
- [21] MICHALSKA A, WOJDYLO A, LYSIAK G P, et al. Functional relationships between phytochemicals and drying conditions during the processing of blackcurrant pomace into powders[J]. *Advanced Powder Technology*, 2017, 28(5): 1340–1348.
- [22] 段续, 宋艳红, 陈俊亮, 等. 不同干燥方式对杜仲雄花品质特性及挥发性成分的影响[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(6): 101–110. [DUAN X, SONG Y H, CHEN J L, et al. Effects of different drying methods on the quality and volatile components of *Eucommia ulmoides* male flowers[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(6): 101–110.]
- [23] 洪新, 唐克, 鞠广龙. 葡萄籽中原花青素稳定性研究[J]. *粮油食品科技*, 2013, 21(4): 61–64. [HONG X, TANG K, JU G L. The stability of proanthocyanidins in grape seeds[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2013, 21(4): 61–64.]
- [24] GAO K, ZHOU L Y, BI J F, et al. Research on the nonenzymatic browning reactions in model systems based on apple slices dried by instant controlled pressure drop drying[J]. *Drying Technology*, 2017, 35(11): 1302–1311.
- [25] 马玉荷, 田晓菊, 王应强, 等. 热风温度对苹果丁微波对流耦合加热干燥特性与品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(16): 77–84. [MA Y H, TIAN X J, WANG Y Q, et al. Effect of air temperature on microwave-convective coupled heating and drying characteristics and quality of diced apple[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(16): 77–84.]
- [26] AN N N, SUN W H, LI B Z, 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: 131412.
- [27] WANG A N, WANG Y, KAN H, et al. Comparison of different drying techniques for *Zanthoxylum bungeanum* leaves: Changes in color, microstructure, antioxidant capacities, and volatile components[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2023, 188: 115469.
- [28] 刘岩龙, 张彩丽, 李婷婷, 等. 不同干燥方式对樱桃果粉品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(7): 26–30. [LIU Y L, ZHANG C L, LI T T, et al. Effect of different drying methods on the

- quality of cherry powder[J]. Food Research and Development, 2020, 41(7): 26–30.]
- [29] ZHAO Q, XIONG H, SELOMULYA C, et al. Effects of spray drying and freeze drying on the properties of protein isolate from rice dreg protein[J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(7): 1759–1769.
- [30] LLAVATA B, PICINELLI A, SIMAL S, et al. Cider apple pomace as a source of nutrients: Evaluation of the polyphenolic profile, antioxidant and fiber properties after drying process at different temperatures[J]. Food Chemistry-X, 2022, 15: 100403.
- [31] LIU J C, JIAO Z G, ZHANG C L, et al. Effects of different drying methods on phenolic contents, antioxidant, and tyrosinase inhibitory activity of peach blossoms[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2018, 12(4): 2339–2348.
- [32] 李明娟, 张雅媛, 游向荣, 等. 不同干燥技术对核桃粕蛋白粉体特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(16): 164–170. [LI M J, ZHANG Y Y, YOU X R, et al. Effects of different drying technologies on the characteristics of walnut dregs protein powder[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(16): 164–170.]
- [33] WANG L Q, HU Q H, PEI F, et al. Influence of different storage conditions on physical and sensory properties of freeze-dried *Agaricus bisporus* slices[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 97: 164–171.
- [34] LIU Y X, LIAO Y X, GUO M R, et al. Comparative elucidation of bioactive and volatile components in dry mature jujube fruit (*Ziziphus jujuba* Mill.) subjected to different drying methods[J]. Food Chemistry-X, 2022, 14: 100311.
- [35] LIU X W, LE B C, GUYOT S, et al. Reactivity of flavanols: Their fate in physical food processing and recent advances in their analysis by depolymerization[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(5): 4841–4880.
- [36] 陈璵, 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. [CHEN C, YE S, WANG G H, et al. Effects of different drying methods and crushing degrees on the physicochemical, nutritional and functional properties of *Agaricus bisporus*[J]. Food Science, 2023, 44(1): 88–97.]
- [37] TANMAY S, MOLLA S, KUMAR S H, et al. The impact of raw and differently dried pineapple (*Ananas comosus*) fortification on the vitamins, organic acid and carotene profile of dairy Rasgulla (sweetened cheese ball)[J]. Heliyon, 2020, 6(10): e05233.
- [38] 汤林月, 原江锋, 赖钰婷, 等. 微波催陈对黑米酒中酚类、有机酸类和酯类含量的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(7): 7–12. [TANG L Y, YUAN J F, LAI Y T, et al. Effects of microwave aging on the content of phenols, organic acids and esters in black rice wine[J]. Food & Machinery, 2022, 38(7): 7–12.]
- [39] LIU X C, ZHANG X L, ZHANG X T, et al. Effects of different drying methods on the physicochemical and antioxidative characteristics of *Osmunda japonica* Thunb. polysaccharides[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(10): e14742.
- [40] GOVINDA S, EFREN D, DAWN V, et al. Preservation of phenols, antioxidant activity, and cyclic adenosine monophosphate in jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) fruits with different drying methods[J]. Plants-Basel, 2023, 12(9): 1804.