

莫云锋, 陈镠炫, 彭俊莹, 等. 干燥工艺对南瓜粉的物理特性、活性成分及抗氧化能力的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(9): 123-132. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040072

MO Yunfeng, CHEN Zixuan, PENG Junying, et al. Effects of Drying Process on Physical Properties, Active Ingredients and Antioxidant Capacity of Pumpkin Powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(9): 123-132. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040072

· 研究与探讨 ·

干燥工艺对南瓜粉的物理特性、活性成分及抗氧化能力的影响

莫云锋, 陈镠炫, 彭俊莹, 卢圣杰, 宋贤良*
(华南农业大学食品学院, 广东广州 510642)

摘要: 为探究不同干燥工艺对南瓜粉的物理特性、活性成分及抗氧化能力的影响, 采用真空冷冻干燥 (VFD)、热风干燥 (HAD)、热泵干燥 (HPD) 对南瓜进行干燥处理, 并进行扫描电镜 (SEM)、X 射线衍射 (XRD) 和傅里叶红外光谱 (FTIR) 表征。结果表明, VFD 南瓜粉的粒径最小 (D_{50} 为 $54.63 \pm 0.90 \mu\text{m}$), 颜色接近鲜样原色, 吸附性和溶解性最好, 但流动性和填充性不及 HAD 和 HPD 南瓜粉。VFD 南瓜粉的总酚 ($3.56 \pm 0.02 \text{ mg/g}$) 等活性成分含量均最高, 抗氧化能力整体最强, 在 HAD 和 HPD 中, $50 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 下南瓜粉的总酚、总黄酮含量较高, 且抗氧化能力较强, 而 $40 \sim 45 \text{ }^\circ\text{C}$ 下南瓜粉的维生素 C、 β -胡萝卜素等含量较高。与 HAD 和 HPD 南瓜粉相比, VFD 南瓜粉表面光滑且内部有孔洞, 相对结晶度较低, 但它们的官能团类型没有差异。研究结果可为选择合适的南瓜加工工艺提供一定的理论依据。

关键词: 南瓜粉, 干燥工艺, 物理特性, 活性成分, 抗氧化能力

中图分类号: TS255.36

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2026)09-0123-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040072



本文网刊:

Effects of Drying Process on Physical Properties, Active Ingredients and Antioxidant Capacity of Pumpkin Powder

MO Yunfeng, CHEN Zixuan, PENG Junying, LU Shengjie, SONG Xianliang*

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

Abstract: In order to explore the effects of different drying processes on the physical properties, active ingredients and antioxidant capacity of pumpkin powder, the vacuum freeze drying (VFD), hot air drying (HAD), and heat pump drying (HPD) were used for drying pumpkin and characterized by SEM, XRD, and FTIR. The results showed that the pumpkin powder of VFD had the smallest particle size (the D_{50} was $54.63 \pm 0.90 \mu\text{m}$), great intact color, the best adsorption and solubility, but the flow and filling properties were poor. The pumpkin powder of VFD had the highest content of active ingredients such as total phenolics ($3.56 \pm 0.02 \text{ mg/g}$), and the strongest antioxidant capacity, and in HAD and HPD, the total phenol, total flavonoid and the antioxidant capacity of pumpkin powder were higher at $50 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$, while the content of vitamin C, β -carotene were higher at $40 \sim 45 \text{ }^\circ\text{C}$. The pumpkin powder of VFD had smooth surface and internal pores, lower relative crystallinity compared to HAD and HPD, but there was no difference in the types of functional group. The results can provide experimental basis for choosing suitable pumpkin process.

Key words: pumpkin powder; drying process; physical properties; active ingredients; antioxidant capacity

中国是南瓜的种植大国, 产量位居世界第一^[1], 南瓜富含胡萝卜素、多酚化合物、维生素 C 等活性

物质^[2], 具有一定的降糖、降脂等保健作用, 但南瓜水分含量极高, 微生物容易繁殖导致腐烂变质, 不适合

收稿日期: 2025-04-07

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (2023B0202050001)。

作者简介: 莫云锋 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品营养与健康, E-mail: 18316470715@163.com。

* 通信作者: 宋贤良 (1969-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品加工新技术, E-mail: songxl2000@163.com。

长时间运输和保存,将南瓜干燥制粉能很好地解决上述问题。

目前常见的干燥工艺有热风干燥(HAD)、热泵干燥(HPD)、真空冷冻干燥(VFD)等,不同的干燥工艺及不同的干燥温度都可能对物料产生不一样的影响,从而影响其品质^[3]。热风 and 热泵干燥^[4-5]能对物料进行大批量干燥,具有操作方便、简单等优点;真空冷冻干燥^[6]具有减缓氧化过程,较好地保留物料形态、品质等优点,但其单批次处理量较低。刘战霞等^[7]对籽用南瓜的热风干燥工艺进行优化,对比自然干燥,发现当热风温度为 65 °C 时,南瓜片的感官品质好,营养成分保留率高,但其并未与其它干燥方式进行对比。王贾悦等^[8]探究热风干燥、微波干燥和真空干燥对南瓜粉品质的影响,发现在热风 70 °C 的条件下,南瓜粉的总酚含量最高,但 β -胡萝卜素含量却较低,表明过高的热风干燥温度不利于南瓜粉整体活性的保留。葛邦国等^[9]研究表明,与热风干燥等相比,真空冷冻干燥下南瓜粉的总糖和还原糖含量最高,但没有测定其它的活性成分(总酚、总黄酮等)。综上,尽管已经有很多关于不同干燥工艺对南瓜粉理化特性影响的报道,但它们的干燥温度较高且单一,对南瓜粉整体的活性成分破坏较大,而较低温度下的不同干燥工艺对南瓜粉理化特性的影响却鲜有报道。

因此,本文探究热风 and 热泵干燥(40、45、50、55、60 °C)、真空冷冻干燥对南瓜粉的物理特性(粒径、持水力、持油力等)、活性成分(总酚、总黄酮、 β -胡萝卜素等)和抗氧化能力(DPPH 和 ABTS⁺自由基清除率、总还原能力)的影响,并进行扫描电镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)、傅里叶红外光谱(FTIR)表征,以期选择合适的南瓜干燥加工工艺提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

密本南瓜 市售; β -胡萝卜素、芦丁、没食子酸对照品(>99%) 上海如吉生物科技有限公司;2,4,6-三吡啶基三嗪(TPTZ)、DNS 试剂(NY/T 法) 上海源叶生物科技有限公司;2,2-二苯基-1-苦基脒(DPPH)、2,2'-氮氮基-双(3-乙基苯并噻唑-6-磺酸)盐二胺(ABTS) 上海麦克林生化科技股份有限公司;其它试剂 均为分析纯。

XL-30C 超微粉碎机 广州旭朗机械设备有限公司;FUD-1200 真空冷冻干燥机 上海爱郎仪器有限公司;DGG-9140B 电热恒温鼓风干燥箱 上海森信实验仪器有限公司;WRH-100TB1 闭环除湿热泵干燥机 广东威而信实业有限公司;Mastersizer 3000 激光粒度分析仪 Malvern 公司;NR20XE 三恩驰色差计 深圳三恩驰科技有限公司;Vertex 70 傅里叶变换红外光谱仪 布鲁克公司;XD-2X/M4600X 射线粉末衍射仪 北京普析通用仪器公司;SP-756P 紫外可见光光度计 上海光谱仪器有限公司;

司;KQ-500DE 数控超声波清洗器 昆山市超声仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 南瓜的预处理 将新鲜的密本南瓜清洗,去皮、去籽,切成 5~6 mm 南瓜片。随后将南瓜片置于 95 °C 热水中漂烫 10 s,再在护色液中浸泡 10 min^[10],捞出沥干备用。

1.2.2 南瓜粉的制备 真空冷冻干燥(VFD):将预处理好的南瓜片,置于-80 °C 的冰箱中,预冻 24 h,将预冻好的南瓜片置于真空冷冻干燥机中进行干燥,设置真空冷冻干燥机冷阱温度为-50 °C,真空度维持在 17 Pa 左右,干燥 17 h 左右。

热风干燥(HAD)和热泵干燥(HPD):将预处理好的南瓜片均匀铺在托盘上,注意南瓜片之间不能堆叠,设定不同的干燥温度(40、45、50、55、60 °C)对南瓜片进行干燥,干燥时间随着温度改变会有所不同。

上述干燥中,待样品最终含水量在 5%~6% 之间时即完成干燥,将干燥好的南瓜片用超微粉碎机进行粉碎,南瓜粉收集好后置于 4 °C 冰箱中保存待测。

1.2.3 物理特性的测定

1.2.3.1 粒径 采用激光粒度分析仪进行测定,确定样品的粒径及其分布,其中跨度值(Span)和细胞破碎率^[11](φ)的计算公式如式(1)和式(2)所示,比表面积直接由仪器中得出。

$$\text{Span} = \frac{D_{90} - D_{10}}{D_{50}} \quad \text{式(1)}$$

$$\varphi = 1 - \left(1 - \frac{10}{D_{50}}\right)^3 \quad \text{式(2)}$$

式中: D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 分别为粒度达到 10%、50%、90% 的粒径值。

1.2.3.2 色差 采用三恩驰色差计测定样品的色差值,并记录样品的 L^* 、 a^* 、 b^* 值。

1.2.3.3 持水力、持油力、溶解性的测定 参考文献 [12] 方法,并稍作修改。准确称取一定质量的南瓜粉于空离心管中,加入 15 mL 的蒸馏水/花生油,振荡均匀后,于 45 °C 中水浴 15 min,随后 10000 r/min,离心 15 min。将水和花生油倒出,倒扣静置 30 min,再称离心管的总质量。持水力和持油力的计算公式如式(3)所示。

$$\text{持水、持油力(g/g)} = \frac{m_2 - m_0 - m_1}{m_1} \quad \text{式(3)}$$

式中: m_2 为倒扣静置后离心管的总质量, g; m_1 为南瓜粉的质量, g; m_0 为空离心管的质量, g。

准确称取一定质量的南瓜粉,加入 15 mL 蒸馏水于离心管中,振荡均匀后,置于 45 °C 中水浴 15 min,随后 10000 r/min,离心 15 min。将上清液倒进空称量瓶中,并将其置于 105 °C 的烘箱中,烘干至恒重,再次称其质量。溶解性的计算公式如式(4)所示。

$$\text{溶解性(g/g)} = \frac{m_2 - m_0}{m_1} \quad \text{式(4)}$$

式中: m_2 为烘干至恒重的称量瓶总质量, g; m_1 为南瓜粉的质量, g; m_0 为空称量瓶的质量, g。

1.2.3.4 堆积密度、休止角、滑角的测定 参考文献 [13–15] 的方法, 并稍作修改。将量筒置于 105 °C 的烘箱中干燥至恒重, 随后向空量筒中倒满南瓜粉, 轻轻刮去多余的南瓜粉使之与量筒口平齐, 随后称重, 并记录量筒的体积。南瓜粉的堆积密度的计算公式如式(5)所示。

$$\text{堆积密度(g/mL)} = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad \text{式(5)}$$

式中: m_1 为空量筒的质量, g; m_2 为装有南瓜粉量筒的质量, g; V 为量筒的体积, mL。

将玻璃漏斗固定在一定高度, 漏斗尾端距离水平面距离为 2.00 cm。将南瓜粉缓慢地倒入漏斗中, 垂直落入平面, 形成圆锥体。当圆锥体最高点与漏斗最下端接触后, 记录此刻圆锥体的高度 h , 直径 $2r$ 。用反正切函数计算圆锥体表面和水平面的夹角即为休止角。计算公式如(6)所示。

$$\text{休止角}(\alpha^\circ) = \arctan \frac{h}{r} \quad \text{式(6)}$$

式中: h 为圆锥体的高度, cm; r 为圆锥体的半径, cm。

取干净的玻璃板于 105 °C 烘箱中干燥至恒重, 随后称取 0.5 g 样品于玻璃板上, 轻微振动均匀后, 缓慢调节玻璃板的倾斜角度。当样品开始移动时, 记录此刻玻璃板距水平面的高度 H , 玻璃板的长度 L 。用反正弦函数计算滑角, 计算公式如式(7)所示。

$$\text{滑角}(\beta^\circ) = \arcsin \frac{H}{L} \quad \text{式(7)}$$

式中: H 为玻璃板距水平面的垂直高度, cm; L 为玻璃板的长度, cm。

1.2.4 活性成分的测定

1.2.4.1 总酚的测定 采用 Folin-Ciocalteu 法^[16] 测定样品中总酚的含量。称取 1.0 g 南瓜粉于离心管中, 加入 20 mL 75% 的乙醇溶液, 在 500 W 条件下, 超声 30 min 提取总酚, 随后在 10000 r/min 条件下, 离心 10 min, 取上清液, 用蒸馏水定容到 100 mL 的容量瓶中。吸取 1 mL 样液, 1 mL 福林酚溶液, 3 mL 7.5% 碳酸钠溶液和 5 mL 的蒸馏水于离心管中摇匀, 室温避光反应 2 h, 随后在 765 nm 处测定吸光度值, 对照标准曲线换算总酚的含量(mg/g DW)。没食子酸标准曲线为 $y_1 = 119.67x_1 + 0.0063$, $R^2 = 0.9992$ 。

1.2.4.2 总黄酮的测定 采用 $\text{NaNO}_2\text{-Al}(\text{NO}_3)_3\text{-NaOH}$ 比色法^[17] 测定样品中总黄酮含量。称取 1.0 g 南瓜粉于离心管中, 加入 20 mL 75% 的乙醇, 在 500 W 条件下, 超声 30 min 提取总黄酮。随后在 10000 r/min 条件下, 离心 10 min, 取上清液 1 mL, 加入 5% 的 NaNO_2 0.75 mL, 摇匀后静置 6 min, 加入

10% 的 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 0.75 mL, 摇匀后静置 6 min, 加入 4% 的 NaOH 5 mL, 摇匀后静置 15 min, 在 510 nm 下测定吸光度值, 并对照标准曲线换算总黄酮的含量(mg/g DW)。芦丁标准曲线为 $y_2 = 11.306x_2 - 0.0071$, $R^2 = 0.999$ 。

1.2.4.3 β -胡萝卜素的测定 参考文献的方法^[18] 测定样品中的 β -胡萝卜素含量。称取 0.2 g 南瓜粉, 加入 20 mL 石油醚于离心管中, 在 300 W 条件下, 超声 10 min 提取 β -胡萝卜素, 随后在 10000 r/min 条件下, 离心 10 min, 取上清液, 用石油醚定容于 100 mL 棕色容量瓶中, 随后在 450 nm 下测定吸光度值, 并对照标准曲线换算 β -胡萝卜素的含量(mg/g DW)。 β -胡萝卜素标准曲线为 $y_3 = 0.1841x_3 - 0.0129$, $R^2 = 0.9991$ 。

1.2.4.4 还原糖与总糖的测定 参考文献方法^[19], 采用 3,5-二硝基水杨酸比色法(DNS)测定。

还原糖与总糖的提取液制备: 称取 0.5 g 南瓜粉于烧杯中, 加入 250 mL 蒸馏水, 在 500 W 条件下, 超声提取 10 min, 利用纱布过滤掉南瓜粉渣, 得提取液。

还原糖的测定: 取 1 mL 提取液于试管中, 加蒸馏水补充体积至 2 mL, 加入 4 mL DNS, 沸水浴 5 min, 随后取出试管用自来水冷却至室温, 再加入 4 mL 蒸馏水, 摇匀。在 540 nm 处测定吸光度值, 并对照标准曲线换算还原糖的含量(mg/g DW)。

总糖的测定: 取 1 mL 提取液于试管中, 加入 6 mol/L 的 HCl 溶液 1 mL, 沸水浴 10 min, 随后取出试管用自来水冷却至室温, 再加入 6 mol/L 的 NaOH 溶液 1 mL 中和, 随后摇匀, 静置 1 min。再从中吸取 1 mL 溶液于试管中, 加蒸馏水补充体积至 2 mL, 加入 4 mL DNS, 沸水浴 5 min, 随后取出试管用自来水冷却至室温, 再加入 4 mL 蒸馏水, 摇匀。在 540 nm 处测定吸光度值, 并对照标准曲线换算还原糖的含量(mg/g DW), 总糖含量以还原糖含量计。无水葡萄糖标准曲线为 $y_4 = 15.245x_4 - 0.022$, $R^2 = 0.9978$ 。

1.2.4.5 V_C 含量的测定 采用 GB 5009.86-2025《食品中抗坏血酸的测定》中的 2,6-二氯靛酚滴定法测定样品中的 V_C 含量。

1.2.5 抗氧化能力的测定 参考文献的方法^[20], 称取一定样品, 加入 100 mL 无水乙醇于烧杯中, 随后 500 W, 超声 15 min, 随后利用纱布过滤掉南瓜粉渣, 得滤液待测。

1.2.5.1 DPPH 自由基清除率的测定 参考文献的方法^[21], 并稍作修改。取上述样液 2 mL 与 0.2 mmol/L 的 DPPH 乙醇溶液 2 mL 混合均匀后, 室温下避光反应 30 min。反应完毕后, 于 517 nm 下测定吸光度值。DPPH 自由基清除率(%)的计算公式如式(8)所示。

$$\text{DPPH自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_i - A_j}{A_c}\right) \times 100 \quad \text{式(8)}$$

式中: A_i 为 2 mL 样液+2 mL DPPH 乙醇溶液的

吸光度值; A_j 为 2 mL 的样液+2 mL 无水乙醇的吸光度值; A_c 为 2 mL 无水乙醇+2 mL DPPH 乙醇溶液的吸光度值。

1.2.5.2 ABTS⁺ 自由基清除率的测定 参考文献 [22] 方法, 并稍作修改。取上述样液 0.5 mL 和 2.5 mL 的 ABTS 工作液混合均匀后, 室温下避光反应 6 min, 随后在 734 nm 处测定吸光度值。ABTS⁺ 自由基清除率(%)的计算公式如(9)所示。

$$\text{ABTS}^+ \text{ 自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{B_i - B_j}{B_c}\right) \times 100 \quad \text{式(9)}$$

式中: B_i 为 0.5 mL 的样液+2.5 mL ABTS 工作液的吸光度值, B_j 为 0.5 mL 样液+2.5 mL 无水乙醇的吸光度值; B_c 为 0.5 mL 无水乙醇+2.5 mL ABTS 工作液的吸光度值。

1.2.5.3 总还原能力的测定(FRAP 法) 参考文献 [23]的方法, 并稍作修改。取上述样液 1 mL, 加入 3 mL 的 FRAP 溶液(醋酸盐缓冲液:10 mmol/L TPTZ 溶液:20 mmol/L FeCl₃ 溶液=10:1:1)摇匀, 室温下避光, 静置 10 min, 在 593 nm 测定其吸光度, 以 FeSO₄·7H₂O 建立标准曲线, 对照标准曲线换算浓度, 总还原能力最终以 μmol/L 表示。FeSO₄·7H₂O 标准曲线为 $y_5 = 18.706x_5 + 0.0155$, $R^2 = 0.9901$ 。

1.2.6 表征 扫描电镜(SEM): 对南瓜粉进行形态样貌表征, 其中扫描电压为 10 kV, 所有样品在成像前都预先进行喷金镀膜处理。X 射线衍射(XRD): 采用 X 射线粉末衍射仪对样品进行测定, 其中扫描范围为 4°~50°, 扫描速度为 10°/min。傅里叶变换红外光谱(FTIR): 采用傅里叶变换红外光谱仪对样品进行测定, 称取 1.5 mg 样品粉末与 100 mg KBr 混合, 充分研磨后压片, 扫描范围为 4000~400 cm⁻¹, 扫描 64 次, 光谱分辨率为 0.01 cm⁻¹。

1.3 数据处理

每组实验重复 3 次, 结果均以平均值±标准差表示; 采用 Origin2024b 进行绘图, SPSS Statistics 20

进行显著性差异分析, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 不同干燥工艺对南瓜粉物理特性的影响

2.1.1 粒径、比表面积、跨度值、细胞破碎率

D_{50} 表示粉体的平均粒度。跨度(Span)越小, 表明粒分布越窄。比表面积指单位质量物料具有的总面积。细胞破碎率(φ)表示细胞的破碎程度。由表 1 可得, VFD 南瓜粉的 D_{50} (54.63±0.90 μm)最小, 比表面积(663.00±3.69 m²/g)和细胞破碎率(0.45±0.01)均为最大且 Span(5.33±0.12)较小, 在 HAD 和 HPD 中, 随干燥温度升高, 二者南瓜粉的 D_{50} 逐渐增大, 而比表面积和细胞破碎率, 以及 Span 均逐渐减小。原因可能是, 在 HAD 和 HPD 中, 南瓜粉表面因加热而失水皱缩, 同时果胶降解导致组织结构变得紧密^[24], 当温度越高, 物料紧密程度就越高, 粉碎效果就越差, 导致南瓜粉的粒径增大, 粉碎不够充分, 粉体整体以大颗粒为主, 颗粒分布较窄, 因此 Span 变小, 反之亦然。在 VFD 中, 由于冰晶直接升华, 使得粉体内部出现孔洞结构, 且粉体的细胞壁和纤维在干燥过程中会变得更脆^[25], 因此在同一粉碎条件下, 粉体粉碎得更充分, 其粒径最小, 表面积和细胞破碎率最大, 且粒度分布相对均匀。

2.1.2 色差 颜色是感官评价中最重要的指标之一, 其中 L^* 代表亮度值, a^* 代表红度值, b^* 代表黄度值。由表 2 可得, 与鲜样对比, 不同干燥工艺下南瓜粉的 L^* 和 b^* 值均得到显著提升($P < 0.05$), 其中 L^* 值的增加可能与光线的折射有关^[26], 当水分降低后, 物料表面能减少对光线的散射而增强其折射, 从而使得南瓜粉的亮度提升, Chen 等^[27]在探究不同干燥方式对大枣切片颜色的影响中, 也有类似的情况, 而在加热干燥的过程中, 会发生美拉德反应, 生成红棕色物质, 同时色素发生氧化, 整体导致南瓜粉的颜色加深, a^* 和 b^* 值增大。由表 2 可以看出, VFD 南瓜粉的 L^* 值(85.86±0.51)最高, b^* 值(39.34±0.18)与鲜样(24.22±3.43)最为接近, 这可能是由于物料没有暴露在高温

表 1 不同干燥工艺下南瓜粉的粒径、比表面积、跨度值、细胞破碎率

Table 1 Particle size, specific surface area, Span value, cell fragmentation rate of pumpkin powder under different drying processes

| 样品 | D_{10} (μm) | D_{50} (μm) | D_{90} (μm) | 比表面积(m ² /g) | 跨度(Span) | 细胞破碎率(φ) |
|-----------|-------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|
| VFD | 9.02±0.04 ^h | 54.63±0.90 ^h | 300.00±9.17 ^c | 663.00±3.69 ^a | 5.33±0.12 ^c | 0.45±0.01 ^a |
| HAD-60 °C | 14.67±0.12 ^b | 142.00±2.00 ^a | 635.67±6.81 ^a | 400.07±2.880 ^b | 4.37±0.10 ^{de} | 0.20±0.00 ^e |
| HAD-55 °C | 13.90±0.40 ^e | 93.77±8.92 ^c | 511.00±36.29 ^b | 446.57±0.31 ^f | 5.31±0.20 ^c | 0.29±0.02 ^c |
| HAD-50 °C | 10.03±0.06 ^g | 62.17±2.05 ^{feh} | 424.67±28.92 ^b | 613.83±4.91 ^b | 6.66±0.26 ^b | 0.41±0.01 ^b |
| HAD-45 °C | 11.47±0.21 ^e | 61.47±3.46 ^{feh} | 423.00±72.79 ^b | 619.63±0.42 ^b | 6.67±0.82 ^b | 0.41±0.02 ^b |
| HAD-40 °C | 10.05±0.05 ^g | 63.35±0.02 ^{efg} | 440.00±7.00 ^b | 614.02±3.72 ^b | 6.79±0.12 ^b | 0.40±0.00 ^b |
| HPD-60 °C | 15.73±0.32 ^a | 122.67±3.79 ^b | 510.33±21.73 ^b | 388.60±7.98 ^b | 4.03±0.05 ^e | 0.23±0.01 ^f |
| HPD-55 °C | 14.60±0.10 ^b | 92.50±1.95 ^c | 488.00±15.72 ^b | 428.77±3.65 ^g | 5.12±0.09 ^{cd} | 0.29±0.01 ^e |
| HPD-50 °C | 10.80±0.26 ^f | 78.20±8.60 ^d | 513.33±70.06 ^b | 553.30±24.90 ^c | 6.41±0.20 ^b | 0.34±0.03 ^d |
| HPD-45 °C | 11.57±0.25 ^e | 72.50±3.42 ^d | 473.33±40.27 ^b | 528.60±13.41 ^d | 6.36±0.26 ^b | 0.36±0.01 ^{cd} |
| HPD-40 °C | 12.03±0.21 ^d | 69.67±3.29 ^e | 613.00±113.58 ^a | 507.63±11.93 ^e | 8.59±1.26 ^a | 0.37±0.02 ^c |

注: 同列中不同小写字母表示各组间差异显著($P < 0.05$), 表2同。

表 2 不同干燥工艺下南瓜粉的色差

Table 2 Color of pumpkin powder under different drying processes

| 样品 | L^* | a^* | b^* |
|-----------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 鲜样 | 58.70±2.96 ^h | 12.85±0.94 ^e | 24.22±3.43 ^f |
| VFD | 85.86±0.51 ^a | 12.02±0.45 ^f | 39.34±0.18 ^e |
| HAD-60 °C | 80.58±0.55 ^b | 16.55±0.26 ^d | 45.67±0.18 ^b |
| HAD-55 °C | 75.35±1.10 ^{de} | 18.40±0.31 ^e | 45.35±0.09 ^{bc} |
| HAD-50 °C | 75.60±1.32 ^{de} | 16.91±0.41 ^d | 44.07±0.04 ^{bcd} |
| HAD-45 °C | 74.98±2.47 ^{de} | 19.51±0.15 ^{ab} | 44.27±2.92 ^{bcd} |
| HAD-40 °C | 71.81±0.62 ^g | 19.76±0.11 ^{ab} | 41.92±0.61 ^d |
| HPD-60 °C | 79.68±0.45 ^{bc} | 17.11±0.24 ^d | 48.49±0.10 ^a |
| HPD-55 °C | 73.50±2.15 ^{ef} | 19.14±0.56 ^{bc} | 46.61±0.35 ^{ab} |
| HPD-50 °C | 77.31±0.63 ^{cd} | 16.98±0.16 ^d | 46.60±0.58 ^{ab} |
| HPD-45 °C | 80.16±0.77 ^b | 16.53±0.21 ^d | 45.22±0.19 ^{bc} |
| HPD-40 °C | 70.02±1.69 ^g | 20.09±0.88 ^a | 42.76±2.25 ^{cd} |

的条件下,减少美拉德反应,而 b^* 值增大的原因可能是在真空冷冻条件下,依然会引起色素的氧化^[28],由此可看出,VFD 能尽可能保留南瓜粉的色泽。在 HAD 和 HPD 中,二者南瓜粉的 L^* 值和 b^* 值随干燥温度增加而增大,而 a^* 值则逐渐减小,原因可能是,温度越高,色素氧化程度越重,同时干燥时间越短,导致美拉德反应的程度减弱,红棕色产物生成量减少,最终使得 b^* 值增大而 a^* 值降低,同时温度越高,南瓜粉最终的水分含量越低,对于光线的折射越强, L^* 值增大。

2.1.3 持水力、持油力、溶解性、休止角、滑角、堆积

密度 由图 1 可得,VFD 南瓜粉的持水力(2.17±0.00 g/g)、持油力(1.37±0.02 g/g)、溶解性(0.74±0.01 g/g)、休止角(36.70°±0.37°)和滑角(32.56°±0.05°)均为最大,而堆积密度(0.11±0.02 g/mL)最小,HAD 和 HPD 南瓜粉的持水力、持油力、溶解性、休止角和滑角均随着干燥温度降低而增大,而堆积密度则有减小趋势。这可能与南瓜粉的粒径有关,当粒径减小时,表明粉体内部结构被破坏,更多的极性和非极性基团暴露,能增加南瓜粉与水 and 油的结合位点^[29],但粒径减小的同时会导致内容物溶出增多,粉体之间的黏性增强,摩擦力增大,导致休止角和滑角增大,流动性减弱。结合表 1 可知,VFD 南瓜粉的粒径最小,因此其粉体拥有良好的吸附能力和溶解性,但流动性较差,在 HAD 和 HPD 中,随温度升高,二者南瓜粉的粒径逐渐增大,因此二者粉体的吸附能力和溶解性逐渐降低,而流动性逐渐变好。由图 1F 可得,VFD 南瓜粉的堆积密度最小,可能是因为冰晶升华,物料呈现出疏松多孔的结构,粉碎时,粉体内部可夹带和吸附更多的空气,使得粉体之间的空隙率增大^[30],粉体变得更加蓬松,体积变大,在空量筒体积一定的前提下,可填充的南瓜粉质量减少,从而导致其堆积密度最小,填充性最差。在 HAD 和 HPD 中,随温度升高,粉体粒径增大,内容物暴露较少,粉体之间黏性较弱,不容易粘结成团,因此在填充时反而能装填更多的南瓜粉,因此使得堆积密度增大。

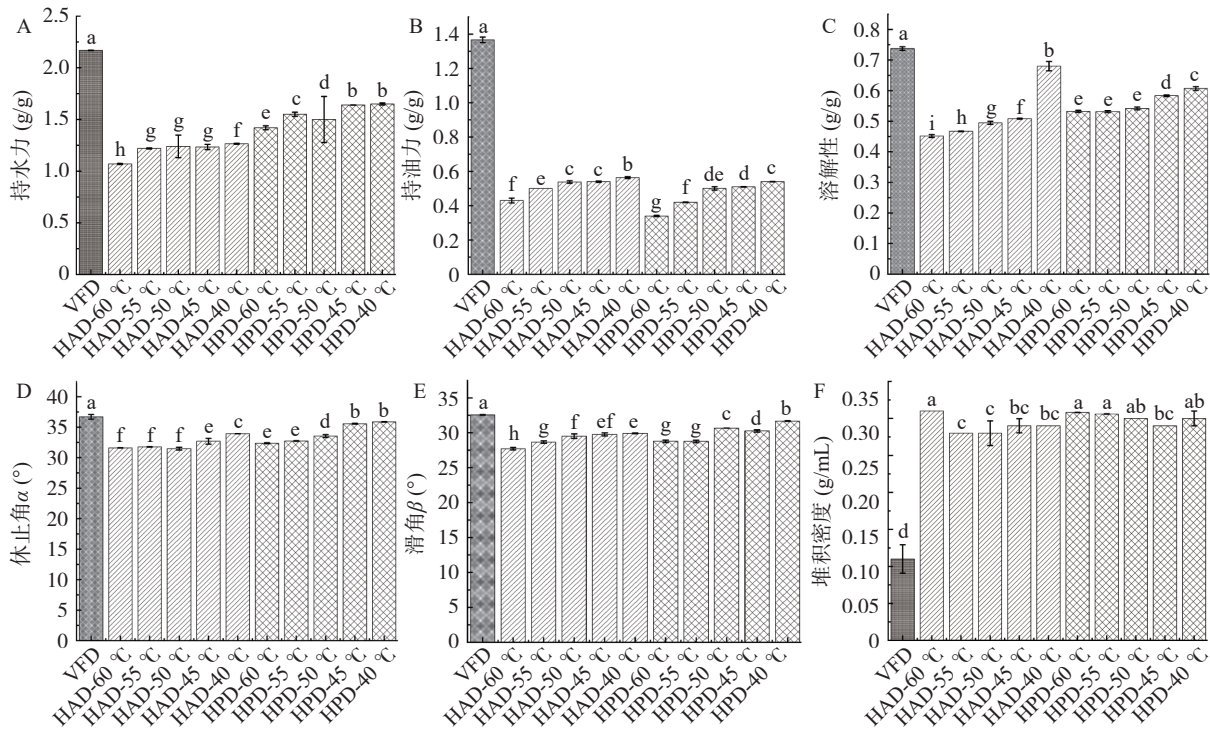


图 1 不同干燥工艺对南瓜粉的持水力(A)、持油力(B)、溶解性(C)、休止角(D)、滑角(E)、堆积密度(F)的影响

Fig.1 Effects of different drying processes on water holding capacity (A), oil holding capacity (B), solubility (C), angle of repose (D), angle of slip (E), and packing density (F) of pumpkin powder

注:图中不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),图 2、图 3 同。

2.2 不同干燥工艺对南瓜粉活性成分的影响

由图 2 可得,对比鲜样,不同干燥工艺均使得南瓜粉的总黄酮、总酚、维生素 C、 β -胡萝卜素、还原糖和总糖的含量显著下降($P<0.05$),其中 VFD 南瓜粉的各项活性成分含量最高,依次为 2.76 ± 0.04 、 3.56 ± 0.02 、 78.29 ± 1.08 、 1.01 ± 0.00 、 181.24 ± 0.53 、 640.35 ± 0.60 mg/g,而在 HAD 和 HPD 南瓜粉中,各项活性成分含量随温度降低而呈现不同的变化。在 HAD 和 HPD 中,南瓜粉的总黄酮含量随温度降低而整体下降,其中 HAD-60 $^{\circ}\text{C}$ (2.13 ± 0.03 mg/g)和 HPD-60 $^{\circ}\text{C}$ (1.95 ± 0.01 mg/g)南瓜粉的总黄酮含量最高,而总酚含量随温度降低,先上升后下降,其中 HAD-55 $^{\circ}\text{C}$ (2.80 ± 0.01 mg/g)和 HPD-50 $^{\circ}\text{C}$ (2.71 ± 0.01 mg/g)南瓜粉的总酚含量最高,原因可能是当干燥温度升高时,细胞结构被破坏,能起到促进总酚和总黄酮提取的作用^[31-32],但温度过高,会对二者造成破坏,温度过低,干燥时间延长,导致物料与氧气长时间接触,造成总酚和总黄酮的氧化损失。由图 2C 可得,随干燥温度升高,HAD 和 HPD 南瓜粉的 V_C 含量均整体下降,表明温度越高, V_C 会因受到氧化而被破坏^[33],其中 HAD-40 $^{\circ}\text{C}$ (31.53 ± 0.41 mg/g)和 HPD-45 $^{\circ}\text{C}$ (35.24 ± 0.41 mg/g)南瓜粉的 V_C 含量最高。由图 2D~F 可得, β -胡萝卜素、还原糖和总糖的含量均在 HAD-45 $^{\circ}\text{C}$ 和 HPD-45 $^{\circ}\text{C}$ 时最高,原因可能是,当干燥温度超过 45 $^{\circ}\text{C}$ 时,高温会使 β -胡萝卜素发生降解^[34],还原糖与总糖则会因发生美拉德反应^[35]而造成损失,但同时,高温也会起到一定的促进活性物质溶出

的作用,同时高温意味着干燥时间相对较短,因此也能保持较高的 β -胡萝卜素、还原糖和总糖含量,而当温度为 40 $^{\circ}\text{C}$ 时,干燥温度最低,干燥时间最长,物料长时间与空气接触, β -胡萝卜素、还原糖和总糖被氧化而造成损失。在 VFD 中,由于低温和真空的原因,能降低各种氧化酶的活性,减缓各种氧化反应的速率,从而最大程度保留各种活性成分含量^[36],也可能是在冻干预冷的过程中生成的冰晶对细胞结构有一定的破坏,使得各种活性物质释放,含量增加^[37]。

2.3 不同干燥工艺对南瓜粉抗氧化能力的影响

由图 3 可得,与鲜样相比,经不同干燥工艺处理,南瓜粉的 DPPH 自由基清除率、ABTS⁺自由基清除率、总还原能力均显著下降($P<0.05$),其中 VFD 南瓜粉的 DPPH 自由基清除率 ($87.49\%\pm 0.36\%$)、ABTS⁺自由基清除率 ($87.58\%\pm 1.01\%$)和总还原能力 (46.80 ± 0.05 $\mu\text{mol/L}$)均最高,而 HAD 和 HPD 南瓜粉的抗氧化能力,随温度改变而发生不同的变化。

在 VFD 中,由于低温和真空的原因,能够尽可能地减少抗氧化物质(总酚、总黄酮等)的损失^[38],因此能保留良好的抗氧化能力,VFD 南瓜粉的各项抗氧化能力均为最高。在 HAD 和 HPD 中,二者南瓜粉的 DPPH 和 ABTS⁺自由基清除率均随温度降低,整体先上升后下降,总还原能力则整体降低。其中 HAD-50 $^{\circ}\text{C}$ 和 HPD-50 $^{\circ}\text{C}$ 南瓜粉的 DPPH 和 ABTS⁺自由基清除率最强 ($65.84\%\sim 77.87\%$),原因可能是,由图 2 可得,当温度为 50 $^{\circ}\text{C}$ 时,南瓜粉仍有着相对较高的活性成分含量,因此其 DPPH 和 ABTS⁺自由

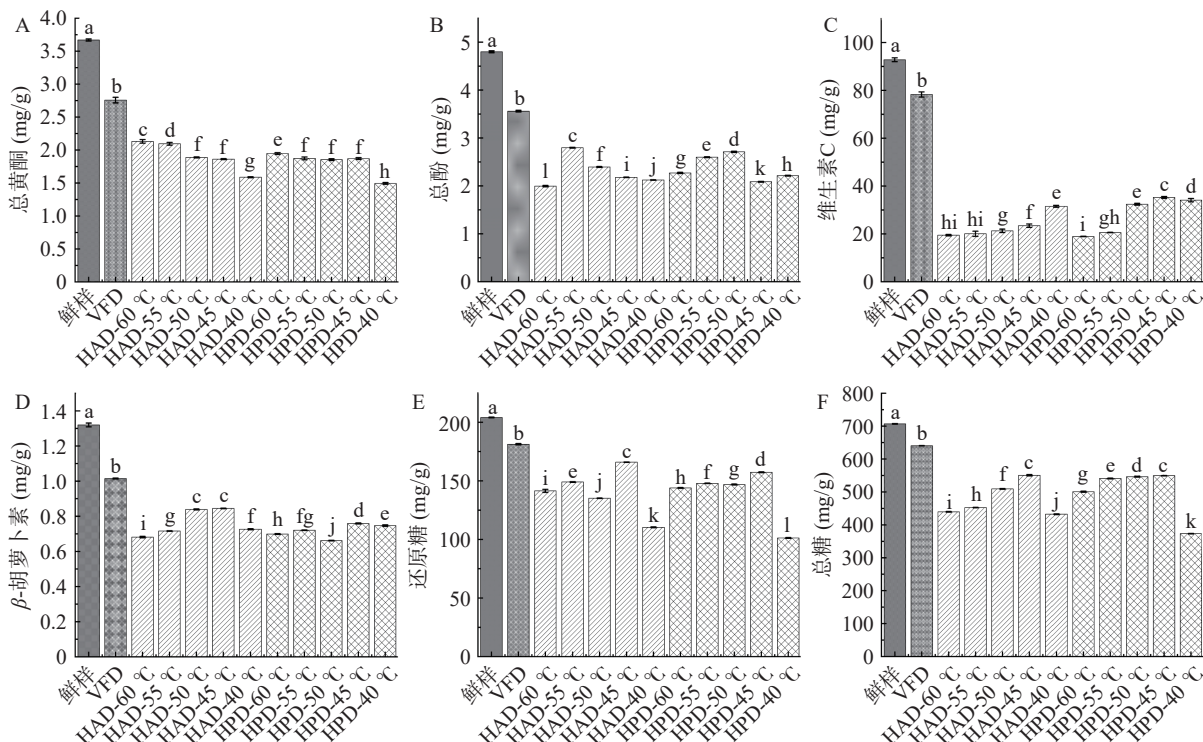


图 2 不同干燥工艺对南瓜粉的总黄酮(A)、总酚(B)、维生素 C(C)、 β -胡萝卜素(D)、还原糖(E)、总糖(F)含量的影响

Fig.2 Effects of different drying processes on total flavonoid (A), total phenol (B), vitamin C (C), β -carotene (D), reducing sugar (E), and total sugar (F) of pumpkin powder

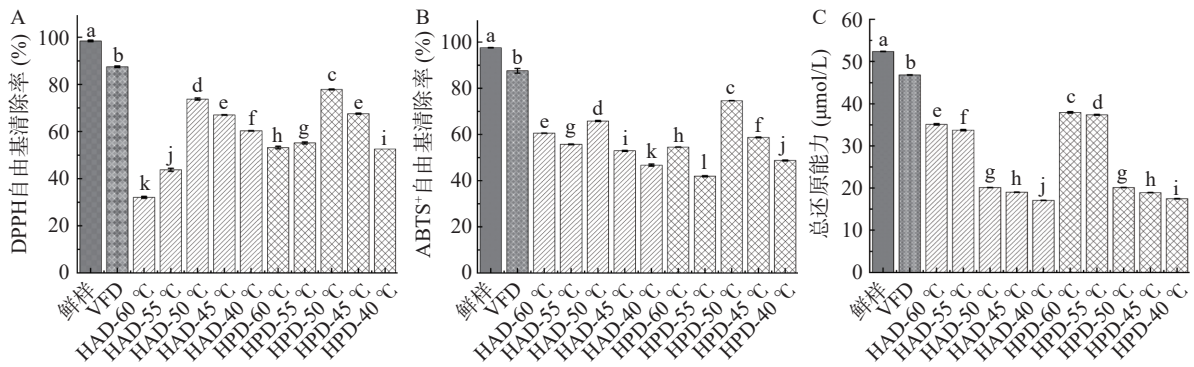


图 3 不同干燥工艺对南瓜粉 DPPH 自由基清除率(A)、ABTS⁺自由基清除率(B)、总还原能力(C)的影响

Fig.3 Effects of different drying processes on DPPH radical scavenging (A), ABTS⁺ radical scavenging (B), and total reducing capacity (C) of pumpkin powder

基清除率最高。HAD-60 °C 和 HPD-60 °C 南瓜粉的总还原能力最高(分别为 35.13±0.18 和 37.96±0.20 µmol/L),原因可能是,有研究表明,高温条件下发生美拉德反应,能生成某种中间产物而提高活性^[39],因此在 60 °C 时表现出最高的总还原能力。

2.4 表征

选取 VFD, HAD-40、50、60 °C 和 HPD-40、50、60 °C 的南瓜粉,进行 SEM、XRD、FTIR 表征,探究不同干燥工艺及不同干燥温度对南瓜粉微观结构的影响。

2.4.1 SEM 分析 由图 4A 可得,在 VFD 中,在真空的环境下,物料内部的冰晶直接升华,升华后原本的位置形成中空,因此可以看到粉体内部有孔洞,且由于低温,物料的表面避免了由于加热而造成的皱缩,因此其表面光滑无褶皱,表明经 VFD 处理,能最大程度保持物料的结构。如图 4B~G 所示, HAD 和 HPD 的南瓜粉的表面均出现不同程度的皱缩,表现为沟壑和裂缝,这是由于物料在加热的条件下,表面失水,细胞受热发生结构形变^[40],果胶物质发生降解,同时由于在干燥的过程中,水分是由内向外迁移的,到干燥后期,内部水分难以去除,会导致物料表面和

内部水分分布不均匀,综合导致物料内部塌陷^[41],因而发生形变而产生沟壑裂缝。

2.4.2 XRD 分析 由图 5 可得,不同干燥工艺下南瓜粉的 XRD 图谱呈现与淀粉相似的典型“C”型衍射峰,其中各样品均在 2θ=17°时出现衍射峰,表明各粉体的晶体结构均为 A 型^[42],且各南瓜粉的 XRD 图无明显差异。通过 Jade6.0 计算各样品的相对结晶度(CI),结果如表 3 所示,可以看出,随 HAD 和 HPD 的温度升高,南瓜粉的 CI 逐渐增大,其中 VFD、HAD-40 °C 和 HPD-40 °C 南瓜粉的 CI 均较低。原因可能是,在 VFD 中,由于真空冻干的原因,物料呈现出疏松多孔的结构,在 HAD-40 °C 和 HPD-40 °C 中,物料在较低的温度下进行干燥,表面皱缩程度相对较低,因此上述条件的南瓜粉在粉碎时,对粉体的

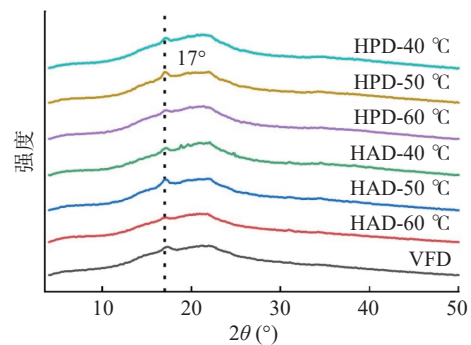


图 5 不同干燥工艺下南瓜粉的 XRD

Fig.5 XRD of pumpkin powder under different drying processes

表 3 不同干燥工艺下南瓜粉的相对结晶度

Table 3 Relative crystallinity of pumpkin powder under different drying processes

| 样品 | 相对结晶度(%) |
|-----------|----------|
| VFD | 15.20 |
| HAD-40 °C | 11.87 |
| HAD-50 °C | 32.26 |
| HAD-60 °C | 27.39 |
| HPD-40 °C | 13.66 |
| HPD-50 °C | 23.15 |
| HPD-60 °C | 27.33 |

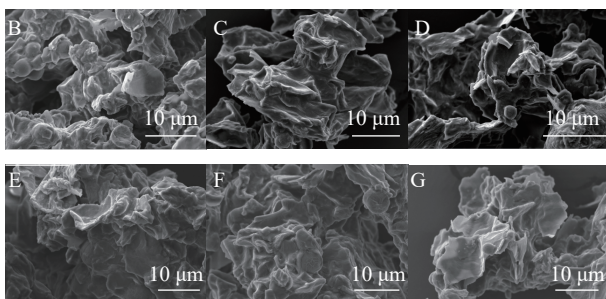
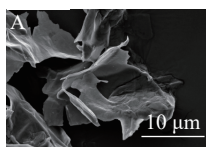


图 4 南瓜粉的 SEM 图(3000×)

Fig.4 SEM of pumpkin powder (3000×)

注: VFD(A), HAD-40 °C(B)、50 °C(C)、60 °C(D), HPD-40 °C(E)、50 °C(F)、60 °C(G)。

破坏程度大,使得淀粉和纤维等大分子物质破裂,晶体从有序变为无序,最终使得 CI 较低,而 HAD 和 HPD 在 50 °C 和 60 °C 下,由于干燥温度较高,物料的紧密程度高,不利于粉碎,对结晶区的破坏程度低,因此 CI 普遍较高。

2.4.3 FTIR 分析 由图 6 可得,不同南瓜粉的 FTIR 图,均呈现出典型的多糖特征吸收峰。3400 cm^{-1} 为-OH 的伸缩振动峰和 N-H 的伸缩振动峰,1000~1400 cm^{-1} 为吡喃糖环的特征吸收峰^[43],是糖苷键上 C-O-C 伸缩振动峰和羟基 C-O-H 变角振动峰。2930 cm^{-1} 的吸收峰是-CH₂ 的 C-H 伸缩振动峰,属于糖的特征峰^[44]。1620 cm^{-1} 和 1420 cm^{-1} 附近有弱吸收峰,表明存在糖醛酸^[45]。1410 cm^{-1} 和 1416 cm^{-1} 的吸收峰是 C-H 变角振动峰,923 cm^{-1} 和 849 cm^{-1} 有微弱的吸收峰,表明存在 α 键和 β 键^[46]。综上所述,各南瓜粉的 FTIR 图相似,表明不同干燥工艺下南瓜粉的官能团并没有发生改变。

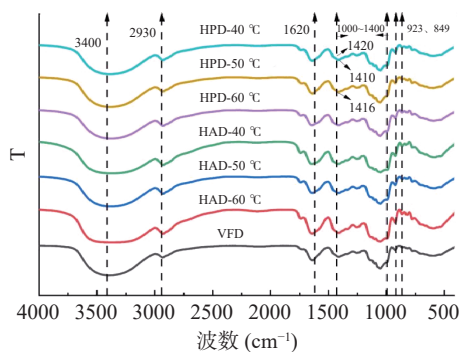


图 6 不同干燥工艺下南瓜粉的 FTIR

Fig.6 FTIR of pumpkin powder under different drying processes

3 结论

不同干燥工艺对南瓜粉的理化性质均有显著的影响。VFD 南瓜粉的粒径最小,粉体颜色接近鲜样原色,有着最好的吸附性和溶解性,但流动性和填充性却远不如 HAD 和 HPD 南瓜粉。VFD 在保留整体活性成分和抗氧化能力方面均具有显著的优势,在 HAD 和 HPD 中,50~60 °C 对总酚、总黄酮的保留效果最好,同时整体的抗氧化能力较优,而 40~45 °C 对维生素 C、 β -胡萝卜素、还原糖和总糖等的保留效果较好。SEM、XRD 和 FTIR 的结果表明,VFD 南瓜粉的表面光滑且内部有孔洞,HAD 和 HPD 南瓜粉表面均出现不同程度的皱缩,VFD、HAD-40 °C 和 HPD-40 °C 的相对结晶度均较低,但它们的官能团类型没有差异。综上,经 VFD 处理,南瓜粉的综合品质最好,但它并不能连续大批量地处理物料,具有一定的局限,而 HAD 和 HPD 能大批量处理物料,一定程度上节约了成本,同时在适当温度下,也能获得较好品质的南瓜粉,因此该研究结果希望能在实际生产应用中,为选择合适的南瓜加工工艺,提供一定的理论依据。

© 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] 陈良鑫. 不同品种南瓜品质差异分析及南瓜糕产品研发[D]. 南昌:南昌大学,2023. [CHEN Liangxin. Analysis of quality differences between different varieties of pumpkin and development of pumpkin cake products[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.]
- [2] KULCZYŃSKI B, SIDOR A, GRAMZA-MICHAŁOWSKA A. Antioxidant potential of phytochemicals in pumpkin varieties belonging to *Cucurbita moschata* and *Cucurbita pepo* species[J]. CyTA-Journal of Food, 2020, 18(1): 472-484.
- [3] 刘芳,任启飞,张果,等. 不同干燥方法对'丰花'玫瑰品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(11): 47-53. [LIU Fang, REN Qifei, ZHANG Guo, et al. Effect of different drying methods on the quality of *Rosa rugosa* 'Feng Hua'[J]. Food Research and Development, 2024, 45(11): 47-53.]
- [4] 张艮,牛坡,赖于树,等. 干燥条件对西兰花干燥特性及理化性质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(6): 257-263. [ZHANG Gen, NIU Po, LAI Yushu, et al. Effects of drying conditions on drying characteristics and physicochemical properties of broccoli[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(6): 257-263.]
- [5] 姜龙,霍秀娜,李兴凯,等. 生姜热泵干燥条件优化及产品品质研究[J]. 农产品加工, 2024(12): 32-39. [JIANG Long, HUO Xiuna, LI Xingkai, et al. Effects of different heat pump drying conditions on the quality of ginger[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2024(12): 32-39.]
- [6] 史秋艳,林端权,何文雄,等. 预冻与真空冷冻干燥对金线鱼肌原纤维蛋白理化性质和凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(9): 41-51. [SHI Qiuyan, LIN Duanquan, HE Wenxiong, et al. Effects of pre-freezing and vacuum freeze-drying on physicochemical properties and gelling characteristics of myofibrillar protein from *Nemipterus virgatus*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(9): 41-51.]
- [7] 刘战霞,郭慧静,贾文婷,等. 籽用南瓜热风干燥工艺优化及其对加工品质的影响[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(12): 89-97. [LIU Zhanxia, GUO Huijing, JIA Wenting, et al. Optimization of hot-air drying process for seed pumpkin and its effect on processing quality[J]. China Food Additives, 2022, 33(12): 89-97.]
- [8] 王贾悦,王子扬,吕彦霖,等. 不同干燥方式对南瓜粉品质的影响[J]. 农产品加工, 2018(6): 34-37. [WANG Jiayue, WANG Ziyang, LÜ Yanlin, et al. The influence of different drying methods on the pumpkin powder quality[J]. Farm Products Processing, 2018(6): 34-37.]
- [9] 葛邦国,高玲. 不同干燥方式对南瓜粉品质的影响[J]. 中国果菜, 2019, 39(6): 1-6. [GE Bangguo, GAO Ling. Effects of different drying methods on the quality of pumpkin powder[J]. China Fruit & Vegetable, 2019, 39(6): 1-6.]
- [10] 石晓玲,周爱梅,王敏儿,等. 南瓜护色工艺的研究[J]. 食品科技, 2011, 36(12): 83-86,91. [SHI Xiaoling, ZHOU Aimei, WANG Miner, et al. Color-protecting technique of pumpkin[J]. Food Science and Technology, 2011, 36(12): 83-86,91.]
- [11] GAN Lujing, CHEN Weili, CHEN Shutian, et al. Effect of superfine grinding mulberry leaves (*Morus alba* Linn.) powder on biscuit properties[J]. International Journal of Food Science & Tech-

- nology, 2024, 59(12): 9500–9511.
- [12] 张浩. 不同干燥方式对山楂粉食用品质及在面包中应用特性的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022. [ZHANG Hao. Effects of different drying methods on edible quality and application characteristics in bread of hawthorn powder[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2022.]
- [13] 高涛. 紫色马铃薯全粉加工工艺及其应用于面条的特性研究[D]. 成都: 成都大学, 2024. [GAO Tao. Study on processing technology of purple potato powder and its application in noodles[D]. Chengdu: Chengdu University, 2024.]
- [14] 赵愉涵. 芹菜叶超微粉的制备及性质研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2022. [ZHAO Yuhan. Study on the preparation and properties of celery leaf superfine powder[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2022.]
- [15] LIANG Kehong, ZHU Hong, ZHANG Yue. Effect of mechanical grinding on the physicochemical, structural, and functional properties of foxtail millet (*Setaria italica* (L.) P. Beauv) bran powder[J]. Foods, 2022, 11(17): 2688.
- [16] 洪慧晨, 郑文琪, 王迪, 等. 萌发燕麦蛋白质营养价值及功能性物质含量研究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(12): 167–173. [HONG Huichen, ZHENG Wenqi, WANG Di, et al. Study on protein nutritional value and functional components content of germinating oat[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(12): 167–173.]
- [17] 张康逸, 杨妍, 何梦影, 等. 青麦仁总黄酮提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(12): 145–149. [ZHANG Kangyi, YANG Yan, HE Mengying, et al. Study on extraction process and antioxidant activity of total flavonoids from green wheat berry[J]. Cereals & Oils, 2021, 34(12): 145–149.]
- [18] 向珊珊, 张楠, 潘晴, 等. 木鳖果假种皮中 β -胡萝卜素的提取工艺优化及稳定性研究[J]. 食品工业科技, 2018, 39(21): 191–195, 201. [XIANG Shanshan, ZHANG Nan, PAN Qing, et al. Extraction technology optimization and stability of β -carotene from *Momordica cochinchinensis* aril[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(21): 191–195, 201.]
- [19] 李小晗. 酶处理南瓜浆对面包和蛋糕品质的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023. [LI Xiaohan. The effect of enzyme-hydrolyzed pumpkin (*Cucurbita moschata* Duch.) pulp supplementation on bread and cake quality[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023.]
- [20] 娄世豪, 孙小晶, 李丹丹, 等. 干燥方式对山楂总黄酮含量及抗氧化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(1): 121–129. [LOU Shihao, SUN Xiaojing, LI Dandan, et al. Effects of different drying methods on total flavonoids content and antioxidant activity of hawthorn[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(1): 121–129.]
- [21] DENOYA G I, PATARO G, FERRARI G. Effects of postharvest pulsed light treatments on the quality and antioxidant properties of persimmons during storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 160: 111055.
- [22] 王士佳. 超微粉碎对鹰嘴豆芽粉品质、结构特性及代谢组成的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023. [WANG Shijia. Effects of superfine grinding on the quality, structural characteristics and metabolic composition of chickpea sprout powder[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023.]
- [23] 陈卓尔, 陈美安, 黄燕琼, 等. 响应面法优化 3 味山姜属中药挥发油提取工艺及总抗氧化能力研究[J]. 辽宁中医药大学学报, 2024, 26(9): 74–80. [CHEN Zhuoer, CHEN Meian, HUANG Yanqiong, et al. Optimization of extraction technology and total antioxidant capacity of essential oil of three *Alpinia* Chinese medicines by RSM[J]. Journal of Liaoning University of Traditional Chinese Medicine, 2024, 26(9): 74–80.]
- [24] 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.
- [25] LIU Suwen, YU Jincheng, ZOU Jing, et al. Effects of different drying and milling methods on the physicochemical properties and phenolic content of hawthorn fruit powders[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(6): e14460.
- [26] 贺紫琼, 张立彦. 粤式豉油鸡传统烹煮过程中的质地及风味变化[J]. 现代食品科技, 2024, 40(2): 292–301. [HE Ziqiong, ZHANG Liyan. Changes in texture and flavor of Cantonese soy sauce chicken during traditional cooking[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(2): 292–301.]
- [27] CHEN Qinqin, BI Jinfeng, WU Xinye, et al. Drying kinetics and quality attributes of jujube (*Zizyphus jujuba* Miller) slices dried by hot-air and short- and medium-wave infrared radiation[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 64(2): 759–766.
- [28] CHOO C O, CHUA B L, FIGIEL A, et al. Hybrid drying of *Murraya koenigii* leaves: Energy consumption, antioxidant capacity, profiling of volatile compounds and quality studies[J]. Processes, 2020, 8(2): 240.
- [29] 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.
- [30] 陈如, 何玲. 超微粉碎对苹果全粉物化性质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(13): 150–154. [CHEN Ru, HE Ling. Effect of superfine grinding on physicochemical properties of apple powder[J]. Food Science, 2017, 38(13): 150–154.]
- [31] 马乐. 热风干燥对新疆药桑粉品质的影响及其产品的研制[D]. 石河子: 石河子大学, 2023. [MA Le. Effect of hot air drying on the quality of Xinjiang medicinal mulberry powder and the development of its products[D]. Shihezi: Shihezi University, 2023.]
- [32] CHENG Ke, DONG Wenjiang, LONG Yuzhou, et al. Evaluation of the impact of different drying methods on the phenolic compounds, antioxidant activity, and *in vitro* digestion of green coffee beans[J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(3): 1084–1095.
- [33] MIESZCZAKOWSKA-FRĄC M, CELEJEWSKA K, PŁOCHARSKI W. Impact of innovative technologies on the content of vitamin C and its bioavailability from processed fruit and vegetable products[J]. Antioxidants, 2021, 10(1): 54.
- [34] MULTARI S, MARSOL-VALL A, KESKITALO M, et al. Effects of different drying temperatures on the content of phenolic compounds and carotenoids in quinoa seeds (*Chenopodium quinoa*) from Finland[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2018, 72: 75–82.
- [35] 靳政时, 牛犇, 刘瑞玲, 等. 干燥方式对猕猴桃果干品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(24): 62–71. [JIN Zhengshi, NIU Ben, LIU Ruiling, et al. Effects of drying methods on the quality of dried kiwifruit[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(24): 62–71.]
- [36] WANG Li, WEN Haichao, YANG Ningwei, et al. Effect of vacuum freeze drying and hot air drying on dried mulberry fruit quality[J]. PLoS One, 2023, 18(6): e0283303.
- [37] ERICK CÉSAR L V, ANA LILIA C M, OCTAVIO G V, et

- al. Energy and exergy analyses of a mixed-mode solar dryer of pear slices (*Pyrus communis* L.) [J]. *Energy*, 2021, 220: 119740.
- [38] XU Y Y, XIAO Y D, LAGNIKA C, et al. A comparative evaluation of nutritional properties, antioxidant capacity and physical characteristics of cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata* var L.) subjected to different drying methods [J]. *Food Chemistry*, 2020, 309: 124935.
- [39] HORUZ E, BOZKURT H, KARATAŞ H, et al. Effects of hybrid (microwave-convectional) and convectional drying on drying kinetics, total phenolics, antioxidant capacity, vitamin C, color and rehydration capacity of sour cherries [J]. *Food Chemistry*, 2017, 230: 295–305.
- [40] 魏盟想, 贺黎铭, 罗舒, 等. 不同干燥方式下灵芝茸干燥特性和品质的比较 [J]. *现代食品科技*, 2025, 41(11): 222–230. [WEI Mengxiang, HE Liming, LUO Shu, et al. Comparison of the drying characteristics and quality of baby *Ganoderma lucidum* dried by different drying methods [J]. *Modern Food Science & Technology*, 2025, 41(11): 222–230.]
- [41] 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 Ziyu, WU Ting, MA Shuainan, et al. Effects of different drying methods on the quality of broccoli stems and leaves [J]. *Food Science*, 2024, 45(14): 179–188.]
- [42] PALAVECINO P M, PENCI M C, RIBOTTA P D. Effect of planetary ball milling on physicochemical and morphological properties of sorghum flour [J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 262: 22–28.
- [43] XING Li, MIAO Yelian, LI Na, et al. Molecular structure features and lactic acid fermentation behaviors of water- and alkali-soluble polysaccharides from *Dendrobium officinale* [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2021, 58(2): 532–540.
- [44] WANG Ruijiao, LIU Wei, LIU Lu, et al. Characterization, *in vitro* digestibility, antioxidant activity and intestinal peristalsis in zebrafish of *Dioscorea opposita* polysaccharides [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 250: 126155.
- [45] de ARAUJO D F, da COSTA MADEIRA J, CUNHA A P, et al. Structural characterization of anticoagulant and antithrombotic polysaccharides isolated from *Caesalpinia ferrea* stem barks [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 175: 147–155.
- [46] CHEN Guangjing, FANG Chuchu, CHEN Xuhui, et al. High-pressure ultrasonic-assisted extraction of polysaccharides from *Mentha haplocalyx*: Structure, functional and biological activities [J]. *Industrial Crops and Products*, 2019, 130: 273–284.