

李明娟, 王颖, 张雅媛, 等. 5 种干燥方式对木薯酸淀粉性能的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(8): 134–142. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060176

LI Mingjuan, WANG Ying, ZHANG Yayuan, et al. Effects of Five Drying Methods on the Properties of Sour Cassava Starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(8): 134–142. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060176

· 研究与探讨 ·

## 5 种干燥方式对木薯酸淀粉性能的影响

李明娟<sup>1,2</sup>, 王颖<sup>1,2,+</sup>, 张雅媛<sup>1,2,\*</sup>, 游向荣<sup>1,2</sup>, 周葵<sup>1,2</sup>, 卫萍<sup>1,2</sup>, 韦林艳<sup>1</sup>

(1. 广西壮族自治区农业科学院农产品加工研究所, 广西南宁 530007;

2. 广西果蔬贮藏与加工新技术重点实验室, 广西南宁 530007)

**摘要:** 为探究不同干燥方法对木薯酸淀粉性能的影响, 本研究以木薯淀粉为原料, 经乳酸菌发酵后, 采用热风干燥、热泵干燥、真空冷冻干燥、喷雾干燥和太阳光晒干 5 种干燥方法制备木薯酸淀粉, 对其性能进行测定分析, 并采用变异系数法对性能进行综合评分。结果表明, 热风干燥的木薯酸淀粉粒径跨度最大, 为 2.36, 透明度、碘蓝值和持油性最小, 分别为 21.57%、8.96 和 1.74 g/g; 热泵干燥的木薯酸淀粉比表面积最小, 为 351.83 m<sup>2</sup>/kg, 堆积密度、析水率和凝沉性最高, 分别为 0.87 g/mL、33.02% 和 74.89%; 真空冷冻干燥的木薯酸淀粉堆积密度、休止角和析水率最低, 分别为 0.73 g/mL、37.49° 和 4.64%, 透明度、碘蓝值和持水性最高, 分别为 27.03%、19.64 和 1.43 g/g, 溶解性最高; 喷雾干燥的木薯酸淀粉比表面积、休止角和持油性最高, 分别为 407.43 m<sup>2</sup>/kg、54.11° 和 2.33 g/g, 凝沉性最低, 为 67.00%; 晒干的木薯酸淀粉跨度和持水性最低, 分别为 1.73 和 1.08 g/g。综合评分结果显示, 真空冷冻、喷雾、晒干、热风 and 热泵干燥的木薯酸淀粉性能综合评分分别为 0.60、0.38、0.18、-0.50 和 -0.64。综合分析, 真空冷冻干燥制备的木薯酸淀粉性能最好, 其次为喷雾干燥, 晒干次之, 热风和热泵干燥的最差。

**关键词:** 木薯酸淀粉, 热风干燥, 热泵干燥, 真空冷冻干燥, 喷雾干燥, 晒干, 淀粉性能

中图分类号: TS234

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)08-0134-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060176



本文网刊:

## Effects of Five Drying Methods on the Properties of Sour Cassava Starch

LI Mingjuan<sup>1,2</sup>, WANG Ying<sup>1,2,+</sup>, ZHANG Yayuan<sup>1,2,\*</sup>, YOU Xiangrong<sup>1,2</sup>, ZHOU Kui<sup>1,2</sup>, WEI Ping<sup>1,2</sup>, WEI Linyan<sup>1</sup>

(1. Institute of Agro-products Processing Science and Technology, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Fruits and Vegetables Storage-Processing Technology, Nanning 530007, China)

**Abstract:** In order to explore the effects of different drying methods on the properties of sour cassava starch (SCS), which were processed from cassava starch by lactobacillus fermentation, and then dried under five drying methods including hot air drying (HA), heat pump drying (HP), vacuum freeze drying (VF), spray drying (SD) and sun-drying (S). The properties of SCS were determined, and the comprehensive score was evaluated by coefficient of variation method. The results showed that the SCS processed by HA, with the highest span value of 2.36, had the lowest clarity, blue number and oil retention of 21.57%, 8.96 and 1.74 g/g, respectively. The SCS dried by HP had the lowest specific area of 351.83 m<sup>2</sup>/kg, had the highest bulk density, water separation and retrogradation of 0.87 g/m, 33.02% and 74.89%, respectively. The product dried by VF, with the lowest bulk density, repose angle and water separation of 0.73 g/mL, 37.49° and 4.64%,

收稿日期: 2023-06-19 +并列第一作者

基金项目: 广西重点研发计划项目(桂科 AB21196067); 国家自然科学基金项目(32060517, 31960456); 广西农业科学院基本科研业务专项(桂农科 2021YT115, 桂农科 2021YT114)。

作者简介: 李明娟(1986-), 女, 硕士, 副研究员, 研究方向: 农产品加工及产品开发, E-mail: limingjuan230@163.com。

王颖(1982-), 女, 本科, 高级工程师, 研究方向: 农产品加工及产品开发, E-mail: 421032125@qq.com。

\* 通信作者: 张雅媛(1981-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 谷物与淀粉资源的开发利用, E-mail: yayuanzhang325@hotmail.com。

respectively, with the highest clarity. Blue number and water-holding ability of 27.03%, 19.64 and 1.43 g/g, respectively, as well as the highest solubility. The SCS processed by SD had the highest specific area, repose angle and oil retention of 407.43 m<sup>2</sup>/kg, 54.11° and 2.33 g/g, respectively. However, it had the lowest retrogradation of 67.00%. The SCS dried by S, with the lowest span value and water-holding ability of 1.73 and 1.08 g/g. Comprehensive score results indicated that the SCS dried by VF, SD, S, HA and HP, with the comprehensive score of 0.60, 0.38, 0.18, -0.50 and -0.64, respectively. In summary, the best properties of SCS products could be obtained by VF, followed by SD, and then by S, HA and HP were the worst.

**Key words:** sour cassava starch; hot air drying (HA); heat pump drying (HP); vacuum freeze drying (VF); spray drying (SD); sun-drying (S); starch properties

木薯(*Manihot esculenta* Crantz)是三大薯类和六大粮食作物之一,被誉为“淀粉之王”和“地下粮食”,已在非洲、美洲和亚洲 100 多个国家广泛种植。我国从 1820 年开始种植木薯,目前主要分布在广西、广东、云南、海南等地,广西是我国木薯主产区,种植面积和产量均占全国的 60% 以上。木薯在我国被定义为非粮能源作物,但却是全球近 10 亿人口的主食<sup>[1-2]</sup>,为全球粮食安全和解除贫困做出了巨大贡献。木薯淀粉与小麦、玉米和马铃薯等淀粉一样,可为人类膳食提供丰富的碳水化合物,是很好的淀粉基原料。由于天然淀粉自身粉体性质,直接应用于食品、工业产品中存在一定的局限性,在国外通常将木薯经发酵改性后制备成具有新功能的木薯酸淀粉来应用。

在拉丁美洲、非洲等木薯主产区,木薯酸淀粉是常被制作成各种传统食品,如‘*polvilho azedo*’ ‘*fufu*’ ‘*gari*’ ‘*yakupa*’等进行消费<sup>[3-4]</sup>;在巴西和哥伦比亚,木薯酸淀粉也是一种典型的用于制作焙烤和油炸食品的原料<sup>[5]</sup>,极具开发利用价值。然而,木薯酸淀粉在我国则还尚未得到充分利用。木薯酸淀粉的性能是其应用的关键,已有研究发现,在发酵过程中产生的有机酸会侵蚀木薯酸淀粉颗粒结构,颗粒表面存在孔隙<sup>[6]</sup>,且出现聚集结团现象;木薯酸淀粉直链淀粉含量、膨胀性及峰值黏度降低,最终黏度和回生值增加<sup>[7]</sup>,前期研究仅初步涉及了木薯酸淀粉的颗粒结构、糊化特性,对其他性能的研究甚少。干燥是制备木薯酸淀粉的关键环节,不同干燥方法对其性能影响不同。目前国外发酵木薯酸淀粉主要沿用传统太阳晒干的方式制备获得,若管理不当容易产生物理污染,影响产品质量,存在食品安全隐患<sup>[8]</sup>,且干燥技术单一,受时间和天气影响,不利于木薯酸淀粉工业化生产。

因此,本实验以木薯淀粉为原料,经乳酸菌发酵后,采用热风干燥、热泵干燥、真空冷冻干燥、喷雾干燥和太阳光晒干等 5 种干燥方法制备木薯酸淀粉,对木薯酸淀粉颗粒性状和理化性质等性能进行系统研究,并采用变异系数法计算 12 项性能综合评分,综合考察 5 种不同干燥方法对木薯酸淀粉性能的影响,为木薯酸淀粉的加工应用提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

木薯淀粉 南宁大饭桌食品有限公司; DELVO-YOG® MY-1821 DSL 乳酸菌(0.2 u/3 g) 澳大利亚帝斯曼公司; 葡萄糖 河南万邦化工科技有限公司; 大豆油 益海嘉里食品营销有限公司; 碘、碘化钾 广西南宁泰诺生物工程有限公司。

BS-2FD 恒温培养箱 常州国宇仪器制造有限公司; WGLL-230BE 电热鼓风干燥箱 天津市泰斯特仪器有限公司; 太阳能热泵干燥仪 单位自主研发设备(专利号 ZL 201320617683.6); LGJ-18 真空冷冻干燥机 北京松源华兴科技发展有限公司; YC-1800 型低温喷雾干燥机 上海雅程仪器设备有限公司; WND-200 型高速中药粉碎机 浙江省兰溪市伟能达电器有限公司; SYWF-50 水浴恒温振荡器 天津市莱玻特瑞仪器设备有限公司; 3-18KS 台式高速冷冻离心机 德国 Sigma 公司; TU-1810 紫外可见分光光度计 北京普析通用仪器有限责任公司; BT-2001 型激光粒度分布仪 丹东市百特仪器有限公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 木薯酸淀粉的制备 称取一定量的木薯淀粉、葡萄糖(葡萄糖占干木薯淀粉质量百分比为 5%)、0.02% 乳酸菌、200% 蒸馏水,置于 1000 mL 三角瓶中,充分混合后,用四层保鲜膜封口,置于 35 °C 恒温箱中发酵 72 h; 发酵结束后,把上层发酵液倒掉,沉淀(物料)分别做不同干燥处理。

热风干燥:将物料置于不锈钢盘中,厚度约 0.3 cm,于 60 °C 的电热鼓风干燥箱中干燥 28 h。热泵干燥:将物料置于不锈钢盘中,厚度约 0.3 cm,于 60 °C 太阳能热泵烘房中烘干 24 h。真空冷冻干燥:将物料置于不锈钢盘中,厚度约 0.3 cm,于 -80 °C 预冻 48 h 以上,再置于真空度为 0.1 kPa、冷阱温度为 -40 °C 条件下,真空冷冻干燥 24 h。喷雾干燥:将物料加入等体积的蒸馏水中,在进风温度 110 °C,出风温度 60 °C,蠕动速度 22.0 RPM 条件下进行喷雾干燥。晒干:将物料置于不锈钢盘中,厚度约 0.2 cm,于太阳光下晒干至含水量为 14% 以下。

热风、热泵、真空冷冻干燥和晒干的木薯酸淀粉用粉碎机粉碎,喷雾干燥的木薯酸淀粉无需粉碎,所

有样品过 80 目筛后用封口袋密封包装,置于干燥器中保存备用。木薯淀粉水分含量为 12.96%,热风、热泵、真空冷冻、喷雾干燥和晒干的木薯酸淀粉水分含量分别为: 12.35%、11.80%、10.28%、11.40% 和 13.47%。

1.2.2 粒径大小及分布测定 参照文献 [9] 的方法,利用激光粒度分布仪湿法测定样品粒径大小及分布,在超声条件下以去离子水作为分散溶剂进行测定,采用跨度表征样品粒径大小、比表面积表征样品粒径分布。

1.2.3 堆积密度测定 采用量筒填充法测定样品堆积密度<sup>[10]</sup>: 取一个量程为 10 mL 的量筒,称重并记录为  $m_1$ ,将样品置于量筒中填充至 10 mL 刻度处,再称重并记录重量为  $m_2$ ,根据以下公式计算堆积密度。

$$\text{堆积密度(g/mL)} = \frac{m_2 - m_1}{10} \quad \text{式 (1)}$$

1.2.4 流动性测定 采用休止角来评价样品流动性<sup>[10]</sup>: 在试管架上固定一个漏斗,使漏斗颈部底端距桌面 6 cm,称量 15 g 样品放入漏斗中使其自由下落形成圆锥状,测量粉体圆锥的高度(h)和底部半径(r),根据以下公式计算休止角  $\alpha$ 。

$$\tan(\alpha) = \frac{h}{r} \quad \text{式 (2)}$$

1.2.5 溶解性、膨胀度测定 参照文献 [11-12] 的方法,称量样品,用蒸馏水配制成质量分数为 2% 的乳液,在常温(25 °C)、60、70 和 80 °C 条件下分别测定样品的溶解性与膨胀度。具体步骤:在相应温度下振荡摇匀 30 min,4000 r/min 离心 15 min,上清液于 105 °C 烘箱中干燥至恒重,称量下层沉淀质量。

$$\text{溶解性(\%)} = \frac{\text{上清液中干物质质量}}{\text{样品质量}} \times 100 \quad \text{式 (3)}$$

$$\text{膨胀度(\%)} = \frac{\text{下层沉淀质量}}{\text{样品质量} \times (100 - \text{溶解性})} \times 100 \quad \text{式 (4)}$$

1.2.6 碘蓝值测定 参照文献 [13] 的方法,称量 0.25 g 样品置于 100 mL 烧杯中,加入 65.5 °C 的蒸馏水 50 mL,置于 65.5 °C 水浴温度搅拌 5 min,取出静置 1 min 后过滤,滤液保持在 65.5 °C 水浴中,吸取 1 mL 于 50 mL 容量瓶中,加入 0.02 mol/L 的碘标准液 1 mL 后定容,以不加样品的处理作为空白调零,测定吸光度  $A_{650\text{nm}}$  值。

$$\text{碘蓝值} = A_{650\text{nm}} \times 54.2 + 5 \quad \text{式 (5)}$$

1.2.7 透明度测定 采用透光率来表示样品透明度: 称量样品,用蒸馏水配制成质量分数为 1% 的乳液,沸水浴 30 min(注意保持总体积不变)后,冷却至 25 °C,以蒸馏水为空白调零,测量波长 620 nm 处的透光率 T%。

1.2.8 冻融稳定性测定 采用析水率来表示样品冻

融稳定性<sup>[14]</sup>。称量样品,用蒸馏水配制成质量分数为 6% 的乳液,沸水浴 30 min 后冷却,称量 20.00 g 淀粉糊(记录具体质量  $m_1$ ),放入离心管中称重为  $m_2$ ,置于 -20 °C 冰柜中冷冻 24 h,取出后常温解冻 1 次(6 h),放入离心机中以 5000 r/min 的速度离心 20 min,称量离心管和沉淀质量为  $m_3$ ,根据以下公式计算析水率。

$$\text{析水率(\%)} = \frac{m_2 - m_3}{m_1} \times 100 \quad \text{式 (6)}$$

1.2.9 持水性测定 参照文献 [15] 的方法,称量样品为  $m_1$ ,放入离心管中称重为  $m_2$ ,加蒸馏水配制成质量分数为 2% 的乳液,常温振荡摇匀 30 min,放入离心机中以 4000 r/min 的速度离心 15 min,称量离心管和沉淀质量为  $m_3$ ,根据以下公式计算持水性。

$$\text{持水性(g/g)} = \frac{m_3 - m_2}{m_1} \quad \text{式 (7)}$$

1.2.10 持油性测定 参照文献 [16] 的方法,称量样品 0.500 g(记录具体质量  $m_1$ ),放入离心管中称重并记录为  $m_2$ ,加入大豆油 15 mL,常温振荡摇匀 60 min,置于离心机中以 4500 r/min 的速度离心 15 min,称量离心管和沉淀质量为  $m_3$ ,根据以下公式计算持油性。

$$\text{持油性(g/g)} = \frac{m_3 - m_2}{m_1} \quad \text{式 (8)}$$

1.2.11 凝沉性测定 参照文献 [17] 的方法,称量样品,用蒸馏水配制成质量分数为 1% 的乳液,沸水浴中振荡 20 min(注意保持总体积不变),冷却至室温后,取 15 mL 淀粉糊于刻度试管中,置于 30 °C 恒温箱中放置 48 h,记录上清液体积,根据以下公式计算凝沉性。

$$\text{凝沉性(\%)} = \frac{\text{上清液体积}}{\text{总体积}} \times 100 \quad \text{式 (9)}$$

1.2.12 综合评分 采用变异系数法计算 5 种干燥方法制备的木薯酸淀粉粉体特性综合评分<sup>[18]</sup>,探索不同干燥方法对木薯酸淀粉性能的影响,以确定木薯酸淀粉的较佳干燥方式。首先计算木薯酸淀粉 12 项性能指标的平均值、标准差和变异系数,再计算各指标的权重和标准化值,其中跨度、堆积密度、休止角、碘蓝值、析水率和凝沉性为逆指标,即试验数据值越小表明酸淀粉性能越好。因此,标准化值取相反数,将各指标标准化值分别与权重相乘后计算总和,即为综合评分。计算公式如下:

$$\text{变异系数} = \frac{\text{标准差}}{\text{平均值}} \quad \text{式 (10)}$$

$$\text{各项指标的权重} = \frac{\text{该项指标的变异系数}}{\text{所有指标的变异系数总和}} \quad \text{式 (11)}$$

$$\frac{\text{该项指标的标准化值} = \frac{\text{该项指标的实际变量值} - \text{平均值}}{\text{该项指标的标准差}}}{\text{式 (12)}}$$

$$\text{综合评分} = \sum \frac{\text{各项指标的标准化值} \times \text{该项指标对应的权重}}{\text{式 (13)}}$$

### 1.3 数据处理

所有指标均做 3 次平行试验, 数据表示为“平均值±标准偏差”。采用 Microsoft Excel 2016 和 DPS 7.05 软件对实验数据进行统计分析及制图, 并进行邓肯新复极差法分析差异显著性, 以  $P < 0.05$  表示差异显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 5 种干燥方法对木薯酸淀粉颗粒性状的影响

**2.1.1 5 种干燥方法对木薯酸淀粉粒径的影响** 跨度用于表征淀粉颗粒的均匀程度, 跨度值越小, 则粉体分布越均匀; 比表面积用于表征淀粉颗粒粒径, 比表面积越大, 则粉体粒径越小<sup>[19]</sup>。由表 1 可知, 木薯酸淀粉粒径跨度由低到高的干燥方法为: 晒干<真空冷冻干燥<喷雾干燥<木薯淀粉<热泵干燥<热风干燥, 说明晒干制备的产品粒径分布最均匀, 真空冷冻和喷雾干燥的次之。5 种干燥方法下木薯酸淀粉比表面积大小排序为: 木薯淀粉<热泵干燥<热风干燥<晒干<真空冷冻干燥<喷雾干燥, 喷雾干燥的产品比表面积最大(407.43 m<sup>2</sup>/kg), 其次是真空冷冻干燥的 388.67 m<sup>2</sup>/kg, 两者差异显著, 且均显著高于其他干燥方法( $P < 0.05$ ); 而晒干、热风和热泵干燥的产品比表面积相对较小, 且差异不显著。由于喷雾干燥是通过雾化器把物料均匀分散为小雾滴, 瞬间干燥成粉末状, 粉体粒径相对最小<sup>[20]</sup>; 真空冷冻干燥制备的产

品颗粒结构疏松, 易粉碎成小颗粒; 热风 and 热泵干燥用时较长, 物料表面硬化, 粉碎后粒径相对较大; 晒干过程中物料处于温和、静止状态, 料液随意组合, 分子间缔合较牢固, 粉碎后粒径也相对较大。

### 2.1.2 5 种干燥方法对木薯酸淀粉堆积密度的影响

堆积密度与淀粉粉体粒径大小、颗粒结构密切相关, 堆积密度越小, 则淀粉粉体越疏松。由表 2 可知, 5 种干燥方法制备的木薯酸淀粉堆积密度大小顺序为: 真空冷冻干燥<晒干<喷雾干燥<木薯淀粉<热风干燥<热泵干燥, 真空冷冻干燥的木薯酸淀粉堆积密度最小为 0.73 g/mL, 与晒干的差异不显著( $P > 0.05$ ), 两者均显著低于其他干燥方法( $P < 0.05$ ), 说明真空冷冻干燥制备的产品组织结构最疏松, 其次是晒干的; 热风和热泵干燥的产品堆积密度差异不大, 两者均显著高于其他干燥方法和木薯淀粉( $P < 0.05$ )。真空冷冻干燥是将预先冻结为固定骨架的液体物料直接升华, 产品结构疏松多孔, 因此堆积密度较小; 而热风和热泵干燥受长时间鼓风和温度的影响, 样品内部溶质随水分不断向表面迁移, 导致表面结晶硬化, 堆积密度较大。

### 2.1.3 5 种干燥方法对木薯酸淀粉流动性的影响

休止角反映粉体流动性, 其大小主要与淀粉粉体表面特性、粒径大小及水分含量有关, 休止角越大则流动性越差<sup>[18]</sup>。由表 3 可知, 休止角大小由高到低的干燥方法为: 喷雾干燥>晒干>热泵干燥>热风干燥>木薯淀粉>真空冷冻干燥, 喷雾干燥的产品休止角最大为 54.11°, 显著高于其他干燥方法( $P < 0.05$ ), 说明喷雾干燥所得木薯酸淀粉流动性最差, 这是由于喷雾干燥制备的产品比表面积最大, 粒径最小, 且颗粒表面比较黏、容易粘结; 其次是晒干处理的, 与热泵干燥的差异不显著, 热泵又与热风干燥的差异不大; 真空

表 1 5 种干燥方法对木薯酸淀粉粒径的影响

Table 1 Effects of five drying methods on particle size of sour cassava starch

指标	木薯淀粉	木薯酸淀粉				
		热风干燥	热泵干燥	真空冷冻干燥	喷雾干燥	晒干
跨度(μm)	2.04±0.05 <sup>e</sup>	2.36±0.04 <sup>a</sup>	2.10±0.02 <sup>b</sup>	1.83±0.03 <sup>d</sup>	1.88±0.01 <sup>d</sup>	1.73±0.01 <sup>c</sup>
比表面积(m <sup>2</sup> /kg)	350.47±1.64 <sup>c</sup>	352.63±5.52 <sup>c</sup>	351.83±7.95 <sup>c</sup>	388.67±7.75 <sup>b</sup>	407.43±8.63 <sup>a</sup>	353.07±11.12 <sup>c</sup>

注: 同行不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ), 表2~表5同。

表 2 5 种干燥方法对木薯酸淀粉堆积密度的影响

Table 2 Effects of five drying methods on bulk density of sour cassava starch

指标	木薯淀粉	木薯酸淀粉				
		热风干燥	热泵干燥	真空冷冻干燥	喷雾干燥	晒干
堆积密度(g/mL)	0.80±0.01 <sup>b</sup>	0.86±0.03 <sup>a</sup>	0.87±0.02 <sup>a</sup>	0.73±0.01 <sup>c</sup>	0.79±0.01 <sup>b</sup>	0.75±0.02 <sup>c</sup>

表 3 5 种干燥方法对木薯酸淀粉休止角的影响

Table 3 Effects of five drying methods on repose angle of sour cassava starch

指标	木薯淀粉	木薯酸淀粉				
		热风干燥	热泵干燥	真空冷冻干燥	喷雾干燥	晒干
休止角(°)	38.07±2.47 <sup>d</sup>	43.56±2.93 <sup>c</sup>	44.63±0.72 <sup>bc</sup>	37.49±2.07 <sup>d</sup>	54.11±1.79 <sup>a</sup>	47.79±2.39 <sup>b</sup>

冷冻干燥的产品休止角最小为 37.49°, 与木薯淀粉差异不显著, 流动性最好, 这是由于真空冷冻干燥制成的产品含水量最低(10.28%)、颗粒结构疏松, 因此容易流动。

**2.1.4 5种干燥方法对木薯酸淀粉溶解性的影响**  
溶解性反映了淀粉与水相互作用的水合能力, 直接影响淀粉在食品工业领域的应用, 溶解性大小与淀粉组分、颗粒大小、结构形态和分子量等因素有关。由表 4 可知, 各样品的溶解性与测定温度成正相关, 即随着测定温度的升高, 木薯淀粉和木薯酸淀粉的溶解性均不断增大, 溶解性能变好, 尤其温度高于 70 °C 后显著升高。5 种干燥方法制备的木薯酸淀粉溶解性比木薯淀粉高 17.57%~296.92%( $P<0.05$ ), 表明木薯淀粉经发酵改性后具备更好的水合能力, 这可能因为发酵后的木薯酸淀粉直链淀粉含量减少、游离淀粉含量增加、粒径变小从而提高了溶解度。真空冷冻干燥的木薯酸淀粉溶解性在相同测定温度条件下均表现为最高, 显著高于其他干燥方法( $P<0.05$ ), 这是由于真空冷冻干燥获得的木薯酸淀粉呈疏松多孔结构, 粉碎后更易溶于水, 溶解度最高; 常温(25 °C)下, 喷雾干燥的次之, 然后是晒干的; 60~80 °C 下, 晒干的次之, 然后是喷雾干燥的; 热风 and 热泵干燥的木薯酸淀粉相对较低, 这与其干燥制得的产品分子间缔合较牢固, 使得溶解性明显降低有关<sup>[21]</sup>。

**2.1.5 5种干燥方法对木薯酸淀粉膨胀度的影响**  
膨胀度是淀粉颗粒与水分子间相互作用并吸水膨胀能力的宏观体现<sup>[22]</sup>。由表 5 可知, 各样品的膨胀度均随着测定温度的升高而增大, 尤其温度高于 70 °C 后显著升高。25 °C 测定温度下, 喷雾和真空冷冻干燥制备的木薯酸淀粉膨胀度相对最高, 显著高于其他干燥方法( $P<0.05$ ), 其他干燥方法与木薯淀粉之间差异不显著。60~70 °C 下, 真空冷冻干燥和晒干的木薯酸淀粉膨胀度与木薯淀粉的相当, 三者显著高

于其他干燥方法( $P<0.05$ ); 80 °C 下, 木薯淀粉的膨胀度最高, 晒干的木薯酸淀粉次之, 然后是真空冷冻干燥的, 三者之间差异显著, 且均显著高于其他干燥方法( $P<0.05$ )。淀粉膨胀度不仅与温度有关, 还与淀粉颗粒内部结构、直链淀粉含量、淀粉与脂质和蛋白质之间相互作用等多种因素有关<sup>[23]</sup>, 已有研究发现直链淀粉含量、支链淀粉内部结构和直链淀粉分子之间相互缠绕均会影响淀粉的溶胀能力<sup>[24-25]</sup>; 此外, 蛋白质可阻碍水分进入淀粉颗粒内部, 脂肪会与直链淀粉形成复合物, 抑制淀粉以氢键形式再缔合, 而影响淀粉膨胀度<sup>[26]</sup>。可见, 不同干燥方法对木薯酸淀粉膨胀度的影响复杂, 需进一步研究。

**2.2 5种干燥方法对木薯酸淀粉理化性质的影响**

**2.2.1 5种干燥方法对木薯酸淀粉碘蓝值的影响**  
碘蓝值反映木薯酸淀粉被破坏而释放出游离淀粉的程度, 碘蓝值越高说明样品中游离淀粉越多, 淀粉颗粒结构越容易破损<sup>[27]</sup>。由图 1 可知, 5 种干燥方法制备的木薯酸淀粉碘蓝值比木薯淀粉高 3.23%~126.27%( $P<0.05$ ), 其大小排序为: 真空冷冻干燥>喷雾干燥>晒干>热泵干燥>热风干燥>木薯淀粉, 碘蓝值分别为: 19.64、14.14、11.74、9.61、8.96、8.68。由

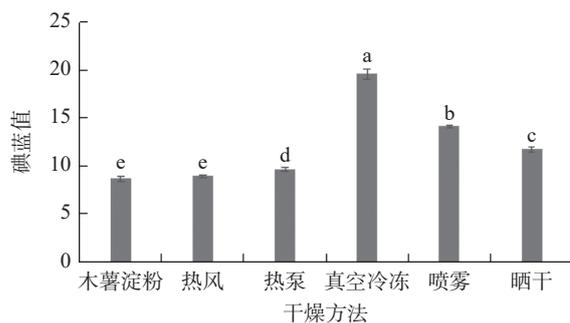


图 1 5种干燥方法对木薯酸淀粉碘蓝值的影响

Fig.1 Effects of five drying methods on blue number of sour cassava starch

注: 不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ), 图 2~图 6 同。

表 4 5种干燥方法对木薯酸淀粉溶解性的影响

Table 4 Effects of five drying methods on solubility of sour cassava starch

测定温度(°C)	木薯淀粉	木薯酸淀粉				
		热风干燥	热泵干燥	真空冷冻干燥	喷雾干燥	晒干
25	0.65±0.05 <sup>e</sup>	1.21±0.16 <sup>d</sup>	1.39±0.18 <sup>d</sup>	2.58±0.25 <sup>a</sup>	2.17±0.15 <sup>b</sup>	1.72±0.10 <sup>c</sup>
60	1.49±0.13 <sup>e</sup>	2.37±0.12 <sup>d</sup>	2.25±0.11 <sup>d</sup>	4.34±0.12 <sup>a</sup>	2.61±0.17 <sup>c</sup>	3.05±0.07 <sup>b</sup>
70	13.11±0.48 <sup>e</sup>	16.09±0.65 <sup>d</sup>	15.41±0.40 <sup>d</sup>	24.66±0.92 <sup>a</sup>	18.17±0.89 <sup>c</sup>	22.99±0.90 <sup>b</sup>
80	20.23±0.88 <sup>d</sup>	30.16±0.58 <sup>c</sup>	29.82±0.53 <sup>c</sup>	35.42±1.22 <sup>a</sup>	30.43±0.48 <sup>c</sup>	32.48±1.11 <sup>b</sup>

表 5 5种干燥方法对木薯酸淀粉膨胀度的影响

Table 5 Effects of five drying methods on expansion degree of sour cassava starch

测定温度(°C)	木薯淀粉	木薯酸淀粉				
		热风干燥	热泵干燥	真空冷冻干燥	喷雾干燥	晒干
25	2.09±0.01 <sup>c</sup>	2.13±0.08 <sup>bc</sup>	2.11±0.07 <sup>bc</sup>	2.26±0.09 <sup>ab</sup>	2.38±0.10 <sup>a</sup>	2.04±0.13 <sup>c</sup>
60	2.89±0.10 <sup>b</sup>	2.48±0.11 <sup>c</sup>	2.16±0.09 <sup>d</sup>	3.27±0.06 <sup>a</sup>	2.39±0.12 <sup>c</sup>	3.12±0.07 <sup>a</sup>
70	13.38±0.27 <sup>b</sup>	9.68±0.28 <sup>c</sup>	7.86±0.77 <sup>d</sup>	13.84±0.08 <sup>a</sup>	8.58±0.19 <sup>d</sup>	14.21±0.62 <sup>ab</sup>
80	29.88±0.86 <sup>a</sup>	22.02±0.19 <sup>d</sup>	16.60±1.09 <sup>c</sup>	24.88±0.69 <sup>c</sup>	17.40±0.14 <sup>c</sup>	27.36±1.09 <sup>b</sup>

于淀粉在冻藏和低温冷冻干燥过程中都发生了破损, 从而释放出大量游离淀粉<sup>[28]</sup>; 喷雾干燥温度太高也对淀粉造成损坏, 大的完整淀粉颗粒消失; 可能由于晒干过程中淀粉受到紫外线照射对其颗粒结构造成一定的损坏有关<sup>[29]</sup>, 已有研究表明, 暴露在紫外线下木薯淀粉直链和支链中出现羧基和羰基<sup>[30]</sup>; 而热风 and 热泵干燥过程中淀粉颗粒倾向于分离成小颗粒结构而不破裂, 但干燥过程表面易结成胶质层, 粉碎时需要较大的机械力, 对部分颗粒结构造成一定损伤<sup>[31]</sup>。

**2.2.2 5 种干燥方法对木薯酸淀粉透明度的影响**  
透明度是淀粉糊化时表现出的重要外在特征之一, 直接影响淀粉基食品的外观、用途及可接受度。透明度用样品糊化后的透光率来表征, 透光率高则说明淀粉的透明度越好。由图 2 可知, 5 种干燥方法制备的木薯酸淀粉透明度比木薯淀粉高 10.45%~38.40% ( $P<0.05$ ), 说明发酵有利于木薯酸淀粉透明度的提高; 木薯酸淀粉透明度由高到低的干燥方法为: 真空冷冻干燥(27.03%)>喷雾干燥(25.87%)>热泵干燥(23.47%)>晒干(22.10%)>热风干燥(21.57%)>木薯淀粉(19.53%), 与淀粉溶解度排序一致。由于真空冷冻和喷雾干燥对木薯酸淀粉颗粒结构破损严重, 木薯酸淀粉糊化后分子重新缔合, 提高了透光率<sup>[32]</sup>, 这与碘蓝值结果相吻合。

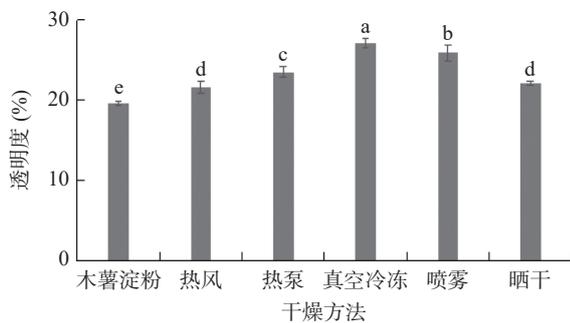


图 2 5 种干燥方法对木薯酸淀粉透明度的影响

Fig.2 Effects of five drying methods on clarity of sour cassava starch

**2.2.3 5 种干燥方法对木薯酸淀粉冻融稳定性的影响**  
冻融稳定性是评价木薯酸淀粉冻融处理过程中抵制劣变的能力, 反映产品在冷藏或冷冻食品中的应

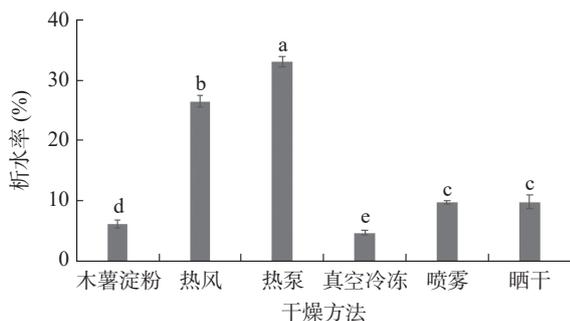


图 3 5 种干燥方法对木薯酸淀粉冻融稳定性的影响

Fig.3 Effects of five drying methods on freeze-thaw stability of sour cassava starch

用效果。冻融稳定性用样品冻融后的析水率来表示, 析水率越低则说明产品的冻融稳定性越好。由图 3 可知, 木薯酸淀粉析水率从小到大的干燥方法为: 真空冷冻干燥<木薯淀粉<喷雾干燥<晒干<热风干燥<热泵干燥, 可见, 真空冷冻干燥的木薯酸淀粉冻融稳定性最好, 这可能与真空及低温条件下淀粉糊化度低有关, 与张本山等<sup>[33]</sup>、沈存宽等<sup>[34]</sup>在玉米淀粉和马铃薯全粉中的研究结果一致; 热泵干燥的木薯酸淀粉冻融稳定性最差, 其次是热风干燥, 两者差异显著, 且均显著低于其他干燥方法( $P<0.05$ ), 这可能与长期较高温度引起糊化度较高有关。

**2.2.4 5 种干燥方法对木薯酸淀粉持水性的影响**  
持水性反应淀粉粉体与水结合并保持的能力, 其大小受多种因素如淀粉组分与改性、颗粒结构、粒径大小、颗粒结构破损程度等影响。由图 4 可知, 真空冷冻干燥的木薯酸淀粉持水性最高为 1.43 g/g, 显著高于其他干燥方法( $P<0.05$ ), 这可能是低温冻藏过程中淀粉颗粒结构被破损, 释放大量游离淀粉, 过多氢键暴露, 使得水更易进入淀粉颗粒内部与氢键结合<sup>[35]</sup>, 加上冻干后的木薯酸淀粉疏松多孔, 因而持水性最高<sup>[36]</sup>; 其次是热风、热泵和喷雾干燥, 三者差异不大, 这可能与干燥温度高、时间久导致淀粉发生了糊化、物料颗粒表面致密度较高以及喷雾干燥粒径较小有关<sup>[37]</sup>; 晒干的产品持水性最低为 1.08 g/g, 显著低于其他干燥方法和木薯淀粉( $P<0.05$ )。持水能力与淀粉分子内部束水位置有关, 当淀粉的羟基与水分子结合力小于淀粉羟基之间的结合力时, 则持水能力较小<sup>[38]</sup>, 这可能是影响晒干木薯酸淀粉持水性的主要原因, 有待进一步研究。

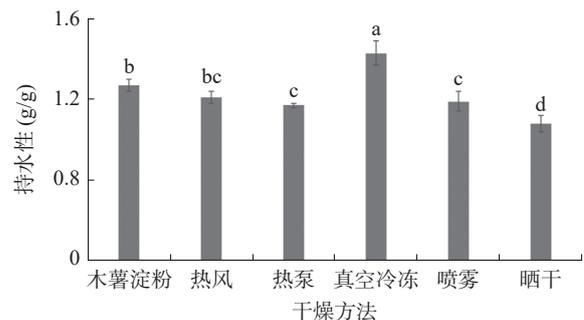


图 4 5 种干燥方法对木薯酸淀粉持水性的影响

Fig.4 Effects of five drying methods on water-holding ability of sour cassava starch

**2.2.5 5 种干燥方法对木薯酸淀粉持油性的影响**  
持油性反应木薯酸淀粉与油脂结合的能力, 是影响淀粉基原料加工应用的重要指标。由图 5 可知, 5 种干燥方法制备的木薯酸淀粉持油性比木薯淀粉高 18.37%~58.50% ( $P<0.05$ ), 其大小排序为: 喷雾干燥>晒干>真空冷冻干燥>热泵干燥>热风干燥>木薯淀粉, 可见发酵改性有利于木薯酸淀粉与油脂结合; 其中, 喷雾干燥制备的木薯酸淀粉持油性最高为 2.33 g/g, 其次为晒干的 2.10 g/g, 两者差异显著且均

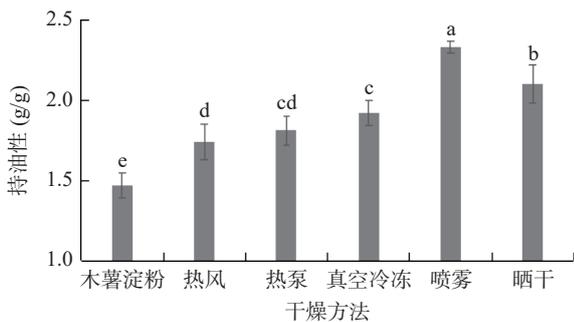


图 5 5 种干燥方法对木薯酸淀粉持油性的影响

Fig.5 Effects of five drying methods on oil retention of sour cassava starch

显著高于其他干燥方法( $P<0.05$ )。已有研究表明,淀粉持油能力的大小受淀粉颗粒大小、蛋白质等成分含量、加工条件和试验处理温度等多种因素的影响。

### 2.2.6 5 种干燥方法对木薯酸淀粉凝沉性的影响

凝沉性指木薯酸淀粉糊化后,放置一段时间,这个过程中淀粉链重新缔结成不溶性的淀粉分子微晶束,淀粉糊产生凝聚和沉淀的现象,反映淀粉糊的凝胶能力,上清液的体积越大则说明凝沉体积越小,凝胶能力越强,凝胶稳定性弱,不利于淀粉的应用<sup>[39]</sup>。由图 6 可知,5 种干燥方法制备的木薯酸淀粉凝沉后上清液体积比木薯淀粉高 3.25%~15.41%( $P<0.05$ ),其大小排序为:热泵干燥>真空冷冻干燥>热风干燥>晒干>喷雾干燥>木薯淀粉,其中喷雾干燥的木薯酸淀粉上清液体积最小,表明淀粉分子间重新排列和集聚的机会最小,其凝胶体系具有稳定的空间结构,不易凝沉;晒干次之,与喷雾干燥差异不显著;热泵干燥的

产品上清液体积最大,说明其凝沉性最强,凝胶稳定性最弱<sup>[40]</sup>。凝沉性大小通常受到淀粉加工方式、成分、温度、浓度、pH、淀粉分子特性(直/支链比例、分子结构、分子量和聚合度)等因素综合影响<sup>[41]</sup>。

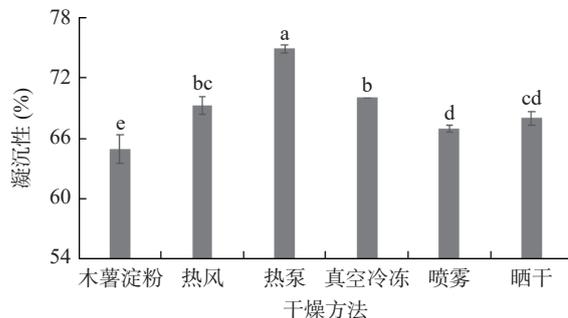


图 6 5 种干燥方法对木薯酸淀粉凝沉性的影响

Fig.6 Effects of five drying methods on retrogradation of sour cassava starch

### 2.3 5 种干燥方法对木薯酸淀粉性能综合评分的影响

由表 6 可知,木薯酸淀粉 12 项粉体特性指标中,冻融稳定性(析水率)、碘蓝值和溶解性在木薯酸淀粉产品评价中所占权重较大,分别为 0.33、0.15 和 0.14,说明这 3 项指标在评价木薯酸淀粉粉体特性时占有重要地位;其次是流动性(休止角)、跨度、持油性和持水性,权重在 0.05~0.06 之间。5 种干燥方法综合评分大小排序为:真空冷冻干燥>喷雾干燥>晒干>热风干燥>热泵干燥,综合评分分别为 0.60、0.38、0.18、-0.50 和 -0.64。本研究结果表明,真空冷冻干燥制备的木薯酸淀粉性能最佳,其次是喷雾干燥的,太阳光晒干的次之,热风和热泵干燥制备的木薯酸淀粉性能最差。

表 6 5 种干燥方法对木薯酸淀粉性能综合评分影响

Table 6 Effects of five drying methods on comprehensive score of the sour cassava starch

指标	平均值	标准差	变异系数	权重	标准化值					综合评分				
					热风	热泵	真空冷冻	喷雾	晒干	热风	热泵	真空冷冻	喷雾	晒干
跨度(μm)	1.98	0.25	0.13	0.06	-1.51	-0.48	0.60	0.40	0.99	-0.09	-0.03	0.03	0.02	0.06
比表面积(m <sup>2</sup> /kg)	370.73	25.81	0.07	0.03	-0.70	-0.73	0.70	1.42	-0.68	-0.02	-0.02	0.02	0.04	-0.02
堆积密度(g/mL)	0.80	0.06	0.08	0.04	-0.95	-1.11	1.11	0.16	0.79	-0.03	-0.04	0.04	0.01	0.03
休止角(°)	45.52	6.08	0.13	0.06	0.32	0.15	1.32	-1.41	-0.37	0.02	0.01	0.08	-0.08	-0.02
溶解性(%)	1.81	0.56	0.31	0.14	-1.07	-0.75	1.36	0.63	-0.17	-0.15	-0.11	0.19	0.09	-0.02
膨胀度(%)	2.18	0.14	0.06	0.03	-0.40	-0.55	0.56	1.45	-1.06	-0.01	-0.02	0.02	0.04	-0.03
碘蓝值	12.82	4.32	0.34	0.15	0.89	0.74	-1.58	-0.31	0.25	0.14	0.11	-0.24	-0.05	0.04
透明度(%)	24.01	2.37	0.10	0.04	-1.03	-0.23	1.27	0.79	-0.80	-0.05	-0.01	0.06	0.03	-0.04
析水率(%)	16.73	12.28	0.73	0.33	-0.79	-1.33	0.98	0.57	0.56	-0.26	-0.44	0.33	0.19	0.19
持水性(g/g)	1.22	0.13	0.11	0.05	-0.05	-0.36	1.65	-0.20	-1.05	0.00	-0.02	0.08	-0.01	-0.05
持油性(g/g)	1.98	0.24	0.12	0.05	-1.01	-0.71	-0.25	1.47	0.50	-0.05	-0.04	-0.01	0.08	0.03
凝沉性(%)	69.82	3.06	0.04	0.02	0.20	-1.66	-0.06	0.92	0.60	0.00	-0.03	0.00	0.02	0.01
综合评分										-0.50	-0.64	0.60	0.38	0.18

## 3 结论

本研究结果表明,5 种干燥方法对木薯酸淀粉性能有不同的影响,其中,热风和热泵干燥制备的木薯酸淀粉跨度和堆积密度较高,比表面积、溶解性、透

明度、碘蓝值和持油性较低,说明颗粒粒径较大且分布不均,溶解性、透明度和持油性差;尤其热泵干燥的木薯酸淀粉的冻融稳定性和抗凝沉性最差。真空冷冻干燥的木薯酸淀粉堆积密度、休止角和析水率

最低,溶解性、透明度和持水性最高,说明产品粉体疏松,流动性、冻融稳定性、溶解能力、透明度和持水能力最好。喷雾干燥的木薯酸淀粉持油性和抗凝沉性最好,但粉体容易结团、流动性和分散性差。晒干的木薯酸淀粉跨度和持水性最低,表明粉体颗粒分布均匀、分散性好,但粉体水合能力较弱。综合评分结果显示,真空冷冻干燥的木薯酸淀粉性能最好,其次为喷雾干燥,晒干次之,热风 and 热泵干燥的最差。由于真空冷冻干燥成本高且产能有限,在实际工业生产中可根据生产条件和成本选择喷雾干燥或晒干,后续将对木薯酸淀粉制备工艺进行优化,并对产品营养品质、加工特性和分子结构等进一步研究。本研究结果为木薯酸淀粉工业化干燥提供理论依据和技术参考。

© The Author(s) 2024. 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 ] MONTAGNAC J A, DAVIS C R, TANUMIHARDJO S A. Nutritional value of cassava for use as a staple food and recent advances for improvement[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2009, 8(3): 181-194.
- [ 2 ] 唐杰,李明娟,张雅媛,等.食用木薯的加工现状及发展前景[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(2): 469-476. [ TANG J, LI M J, ZHANG Y Y, et al. Processing utilization and development prospect of edible cassava[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(2): 469-476. ]
- [ 3 ] OYEYINKA S A, AJAYI O I, GBADEBO C T, et al. Physicochemical properties of gari prepared from frozen cassava roots[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 99: 594-599.
- [ 4 ] FALADE K O, AKINGBALA J O. Utilization of cassava for food[J]. *Food Reviews International*, 2011, 27(1): 51-83.
- [ 5 ] RODRIGUEZ-SANDOVAL E, FRANCO C M L, MANJARRES-PINZON K. Effect of fructooligosaccharides on the physicochemical properties of sour cassava starch and baking quality of gluten-free cheese bread[J]. *Starch/Stärke*, 2014, 66(7-8): 678-684.
- [ 6 ] GARCIA M, FRANCO C, JÚNIOR M, et al. Structural characteristics and gelatinization properties of sour cassava starch[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2016, 123(2): 919-926.
- [ 7 ] OYEYINKA S A, ADELOYE A A, OLAOMO O O, et al. Effect of fermentation time on physicochemical properties of starch extracted from cassava root[J]. *Food Bioscience*, 2020, 33: 100485.
- [ 8 ] PENIDO F C L, PILÓ F B, SANDES S H DE C, et al. Selection of starter cultures for the production of sour cassava starch in a pilot-scale fermentation process[J]. *Brazilian Journal of Microbiology*, 2018, 49(4): 823-831.
- [ 9 ] 王立东,侯越,刘诗琳,等.气流超微粉碎对玉米淀粉微观结构及老化特性影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(1): 86-93. [ WANG L D, HOU Y, LIU S L, et al. Effect of jet milling on microstructure and aging characteristics of maize starch[J]. *Food Science*, 2020, 41(1): 86-93. ]
- [ 10 ] 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. ]
- [ 11 ] 李欣,高菲,刘紫薇,等.高粱淀粉-多酚复合物与高粱淀粉的理化性质比较分析[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(6): 98-102. [ LI X, GAO F, LIU Z W, et al. Comparison and analysis of physicochemical properties of sorghum starch-polyphenol complex and sorghum starch[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(6): 98-102. ]
- [ 12 ] WU T Y, CHANG C R, CHANG T J, et al. Changes in physicochemical properties of corn starch upon modifications by atmospheric pressure plasma jet[J]. *Food Chemistry*, 2019, 283: 46-51.
- [ 13 ] 韦璐,陈悦,顾晶晶,等.复合干燥对紫薯全粉细胞破损及花青素含量的影响[J]. *食品科学技术学报*, 2021, 39(3): 160-166. [ WEI L, CHEN Y, GU J J, et al. Effect of combined drying on cell breakage and anthocyanin content of purple sweet potato granules[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2021, 39(3): 160-166. ]
- [ 14 ] 王慧云,赵阳,陈海华,等.亚麻多糖对薯类改性淀粉糊化特性和冻融稳定性的影响[J]. *中国食品学报*, 2014, 14(7): 176-184. [ WANG H Y, ZHAO Y, CHEN H H, et al. Effect of flaxseed polysaccharide on the pasting properties and freeze-thaw stability of modified tuber starch[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2014, 14(7): 176-184. ]
- [ 15 ] 施建斌,隋勇,蔡沙,等.板栗全粉-小麦混合粉面团的流变特性[J]. *现代食品科技*, 2021, 37(9): 162-168,312. [ SHI J B, SUI Y, CAI S, et al. Rheological properties of whole chestnut powder-wheat flour doughs[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2021, 37(9): 162-168,312. ]
- [ 16 ] 蔡沙,隋勇,施建斌,等.马铃薯膳食纤维物化特性分析及其对马铃薯热干面品质的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(4): 87-94. [ CAI S, SUI Y, SHI J B, et al. Physicochemical properties of potato dietary fiber and its influence on the quality of hot dry noodles made from potato starch[J]. *Food Science*, 2019, 40(4): 87-94. ]
- [ 17 ] 赵小梅,李清明,苏小军,等.桂淮系列淮山淀粉性质的测定[J]. *食品科学*, 2018, 39(18): 48-53. [ ZHAO X M, LI Q M, SU X J, et al. Starch properties of new Guihuai cultivars of chinese yam[J]. *Food Science*, 2018, 39(18): 48-53. ]
- [ 18 ] 乔小全,任广跃,乔梦,等.干燥方式对黑枣粉品质特性的影响[J]. *食品与机械*, 2018, 34(8): 189-194,220. [ QIAO X Q, REN G Y, QIAO M, et al. Effects of different drying methods on the powder quality characteristic in *Dateplum persimmon*[J]. *Food & Machinery*, 2018, 34(8): 189-194,220. ]
- [ 19 ] 刘素稳,赵希艳,常学东,等.机械剪切与研磨超微粉碎对海鲜菇粉体特性的影响[J]. *中国食品学报*, 2015, 15(1): 99-107. [ LIU S W, ZHAO X Y, CHANG X D, et al. Effects of characterization of stipe and cap powders of mushroom (*Hypsizygos marmoratus*) prepared by shear and milling superfine grinding methods[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2015, 15(1): 99-107. ]
- [ 20 ] 付露莹,原双进,陈浩,等.喷雾干燥与真空冷冻干燥对核桃粕红枣复合粉品质的影响[J]. *食品与机械*, 2019, 35(1): 204-208. [ FU L Y, YUAN S J, CHEN H, et al. Effects of spray drying and vacuum freeze-drying on the quality of walnut meal and jujube compound powder[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(1): 204-208. ]
- [ 21 ] 张华,王新天,宋佳宁,等.不同干燥方法对预糊化淀粉理化性质的影响[J]. *食品工业*, 2018, 39(7): 4-7. [ ZHANG H, WANG X T, SONG J N, et al. Effects of different drying methods on physico-

- ochemical properties of pregelatinized starch[J]. *The Food Industry*, 2018, 39(7): 4-7. ]
- [ 22 ] 代春华, 刘晓叶, 屈彦君, 等. 不同产地马铃薯全粉的营养及理化性质分析[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(19): 29-33. [ DAI C H, LIU X Y, QU Y J, et al. Analysis on the nutritional components and physical and chemical properties of potato granules from different provinces[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(19): 29-33. ]
- [ 23 ] VAMADEVAN V, BERTOFT E. Observations on the impact of amylopectin and amylose structure on the swelling of starch granules[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 103: 105663. ]
- [ 24 ] LI G T, ZHU F. Physicochemical properties of quinoa flour as affected by starch interactions[J]. *Food Chemistry*, 2017, 221: 1560-1568. ]
- [ 25 ] LI G T, ZHU F. Amylopectin molecular structure in relation to physicochemical properties of quinoa starch[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 164: 396-402. ]
- [ 26 ] OYEYINKA S A, SINGH S, VENTER S L, et al. Effect of lipid types on complexation and some physicochemical properties of bambara groundnut starch[J]. *Starch-Stärke*, 2017, 69(3-4): 1-31. ]
- [ 27 ] 惠宇晴, 沈卉芳, 姚鑫森, 等. 不同品种马铃薯雪花全粉品质分析[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(19): 356-365. [ HUI Y Q, SHEN H F, YAO X M, et al. Quality analysis of different varieties of potato snowflakes powder[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(19): 356-365. ]
- [ 28 ] AHMED J, THOMAS L, KHASHAWI R. Influence of hot-air drying and freeze-drying on functional, rheological, structural and dielectric properties of green banana flour and dispersions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 99: 105331. ]
- [ 29 ] BAJER D, KACZMAREK H, BAJER K. The structure and properties of different types of starch exposed to UV radiation: a comparative study[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 98(1): 477-482. ]
- [ 30 ] VATANASUCHART N, NAIVIKUL O, CHAROENREIN S, et al. Molecular properties of cassava starch modified with different UV irradiations to enhance baking expansion[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2005, 61(1): 80-87. ]
- [ 31 ] 钱丽, 杨瑞金, 赵伟, 等. 干燥工艺对紫薯全粉理化性质及花色苷的影响[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(11): 189-194. [ QIAN L, YANG R J, ZHAO W. Effect of different drying methods on physico-functional properties and anthocyanins of purple-fleshed sweet potato flours[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(11): 189-194. ]
- [ 32 ] 普红梅, 杨万林, 李燕山, 等. 两种干燥方式对马铃薯全粉营养品质和加工特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(19): 41-48. [ PU H M, YANG W L, LI Y S, et al. Influence of two drying processes on nutritional quality and processing characteristics of potato flours[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(19): 41-48. ]
- [ 33 ] 张本山, 高凌云, 陈福泉. 冷冻干燥处理后糊化玉米淀粉的性质[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(8): 105-110. [ ZHANG B S, GAO L Y, CHEN F Q. Properties of gelatinized corn starch after freeze-drying[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 38(8): 105-110. ]
- [ 34 ] 沈存宽, 王莉, 王初, 等. 不同干燥工艺对马铃薯全粉理化性质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(10): 117-121. [ SHEN C K, WANG L, WANG R, et al. Influence of drying techniques on the physicochemical properties of potato flours[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2016, 42(10): 117-121. ]
- [ 35 ] SANTIAGO M C, BELLO-PÉREZ L A, TECANTE A. Swelling-solubility characteristics, granule size distribution and rheological behavior of banana (*Musa paradisiaca*) starch[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2003, 56(1): 65-75. ]
- [ 36 ] 杨娇. 预处理对不同干燥方式制备的马铃薯全粉干燥特性及品质影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021. [ YANG J. Effect of pretreatment on drying characteristics and quality characteristics of potato flour prepared by different drying methods[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2021. ]
- [ 37 ] 张乐, 王赵改, 杨慧, 等. 不同干燥方法对板栗品质的影响[J]. *核农学报*, 2016, 30(12): 2363-2372. [ ZHANG L, WANG Z G, YANG H, et al. Effects of different drying methods on the quality of Chinese chestnut[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2016, 30(12): 2363-2372. ]
- [ 38 ] 段欣, 薛文通, 张惠. 不同品种甘薯全粉基本特性研究[J]. *食品科学*, 2009, 30(23): 119-122. [ DUAN X, XUE W T, ZHANG H. Physico-chemical properties of different varieties of sweet potato flour[J]. *Food Science*, 2009, 30(23): 119-122. ]
- [ 39 ] 高慧. 淀粉磷酸单酯的制备及毒理学安全性评价[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007. [ GAO H. Preparation and toxicological assessment of starch phosphate monoester[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007. ]
- [ 40 ] 张佳艳, 梁舒颖, 熊建文, 等. 响应面优化微波法制备马铃薯交联淀粉工艺[J]. *中国食品添加剂*, 2016(10): 135-141. [ ZHANG J Y, LIANG S Y, XIONG J W, et al. Optimization the reaction conditions of microwave-assisted preparation of cross-linked potato starch by response surface method[J]. *China Food Additives*, 2016(10): 135-141. ]
- [ 41 ] CHANG Q, ZHENG B D, ZHANG Y, et al. A comprehensive review of the factors influencing the formation of retrograded starch[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 186: 163-173. ]