

食品工业科技

Science and Technology of Food Industry

ISSN 1002-0306, CN 11-1759/TS



《食品工业科技》网络首发论文

题目: 三种传统热加工方式对木薯理化特性及结构的影响
作者: 董久晨, 赵康云, 陈小爱, 张继月, 张雨桐, 王旭, 张彦军
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023090191
网络首发日期: 2024-02-26
引用格式: 董久晨, 赵康云, 陈小爱, 张继月, 张雨桐, 王旭, 张彦军. 三种传统热加工方式对木薯理化特性及结构的影响[J/OL]. 食品工业科技.
<https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023090191>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

作者简介: 董久晨 (1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 热带作物农产品加工。E-mail: 1015914721@qq.com。

*通信作者: 张彦军 (1982—), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 热带作物加工。E-mail: zhangyanjun0305@163.com。

基金项目: 海南省重点研发计划项目 (编号: ZDYF2022SHFZ122); 中国热带农业科学院基本科研业务费专项资金 (编号: 1630142022007); 海南省科技人才创新项目 (编号: KJRC2023C28)。

三种传统热加工方式对木薯理化特性及结构的影响

董久晨^{1,2,3,4}, 赵康云^{1,2,3,4}, 陈小爱^{2,3,4}, 张继月^{2,3,4}, 张雨桐^{2,3,4}, 王旭^{2,3,4}, 张彦军^{2,3,4*}

(1.吉林农业大学食品科学与工程学院, 吉林长春 130118; 2.中国热带农业科学院香料饮料研究所, 海南万宁 571533; 3.国家重要热带作物工程技术研究中心, 海南万宁 571533; 4.海南省特色热带作物适宜性加工与品质控制重点实验室, 海南万宁 571533)

摘要: 木薯 (*Manihot esculenta* Crantz) 是世界三大薯类作物之一, 木薯的食用需经过热加工过程, 而热加工对木薯理化及结构特性的影响尚不明确。本文采用三种传统热加工方式 (水煮、汽蒸、油炸) 对木薯进行热处理, 通过扫描电子显微镜、傅里叶变换红外光谱仪、X 射线衍射仪、差热扫描量热仪等表征手段对三种热加工后木薯的理化性质 (化学组成、糊化特性、热特性) 和结构变化 (微观结构、长程有序性、短程有序性) 进行比较。结果表明热处理后, 木薯的总淀粉含量均显著降低, 直链淀粉含量显著增加。木薯中的淀粉相对结晶度及短程有序性降低, 其中油炸处理晶体结构下降了 74.35% (油炸), 汽蒸处理晶体结构则下降 65.2%。热加工对木薯糊化特性的影响显著: 经过热处理后峰值粘度、崩解值呈现整体上升的趋势, 而糊化温度均显著降低。水煮和汽蒸处理导致回生值分别上升 49.67% 和 43.98%, 而油炸处理则下降 25.25%。不同热处理后木薯之间热特性及红外光谱基团没有显著性差异。总体来看, 汽蒸处理对木薯中淀粉结晶结构破坏最少, 水煮处理使木薯凝胶性增强, 易老化, 油炸处理后木薯的热稳定性最好。研究结果可为木薯在食品热加工方式的选择以及木薯产品多元化的设计提供理论参考。

关键词: 热加工方式; 木薯; 糊化特性; 热特性; 微观结构

Effects of Three Traditional Heat Processing Methods on the Physicochemical Properties and Structure of Cassava

DONG Jiuchen^{1,2,3,4}, ZHAO Kangyun^{1,2,3,4}, CHEN Xiaoi^{2,3,4}, ZHANG Jiyue^{2,3,4}, ZHANG Yutong^{2,3,4},
WANG Xu^{2,3,4}, ZHANG Yanjun^{2,3,4*}

(1.College of Food Science and Engineering, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 2.Spice and Beverage Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Wanning 571533, China; 3.National Research Center of Important Tropical Crops Engineering and Technology, Wanning 571533, China; 4.Key Laboratory of Processing Suitability and Quality Control of the Special Tropical Crops of Hainan Province, Wanning 571533, China)

Abstract: Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) is one of the three major potato crops in the world. Consumption of cassava necessitates thermal processing, and the impact of such processing on the physicochemical and structural characteristics of cassava remains unknown. In this paper, three traditional thermal processing methods (boiling,

steaming and deep-frying) were used to heat-treat cassava. The physicochemical properties (chemical composition, pasting properties, thermal properties) and structural changes (microstructure, long-range ordering, and short-range ordering) of the of processed cassava and untreated cassava was characterized by Scanning electron microscopy, Fourier transform infrared spectrometry, X-ray diffractometer, and differential thermal scanning calorimetry. The findings indicated a significant reduction in the total starch content of cassava following diverse heat treatments, accompanied by a notable increase in amylose content. The relative crystallinity and short-range ordering of starch in cassava decrease, with a 74.35% decrease in crystal structure after frying and a 65.2% decrease in crystal structure after steaming. The effect of heat treatment on the gelatinization characteristics of cassava is significant: after heat treatment, the peak viscosity and disintegration value show an overall upward trend, while the gelatinization temperature significantly decreases. Boiling and steaming treatments resulted in a 49.67% and 43.98% increase in recovery value, respectively, while frying treatment decreased by 25.25%. There were no significant differences observed in the thermal properties and infrared spectrum groups among cassava samples that underwent different heat treatments. Generally, steam treatment exhibited minimal damage to the crystal structure of starch in cassava, boiling treatment enhanced its gel formation and susceptibility to aging while frying treatment demonstrated superior thermal stability. The results can serve as a theoretical reference for selecting appropriate heat processing methods for cassava in food applications and designing a variety of cassava products.

Key words: heat treatment; cassava; pasteurization properties; thermal properties; microstructure

中图分类号: TS215

文献标志码: A

DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2023090191

木薯 (*Manihot esculenta* Crantz), 为大戟科 (Euphorbiaceae) 植物, 是世界三大薯类作物之一, 作为人类饮食的第三大碳水化合物来源, 在全世界大约有 5 亿人依靠木薯摄入必需营养^[1, 2]。在发展中国家, 木薯也有着可以解决粮食危机的潜力^[3], 但木薯含有的单宁、皂苷和毒素 (氰化物糖苷), 根据摄入量的不同, 可能对健康产生不利影响^[4]。因此, 食用木薯前必须进行适当的热加工处理, 李煜芳等人^[5]研究漂烫、蒸和微波加热处理马铃薯和紫山药中淀粉结构和消化性质, 发现不同加工方式对其淀粉结构和理化性质有显著性影响。李丹等人^[6]研究了高温油炸对马铃薯淀粉特性的影响, 表明高温油炸对淀粉结构破坏性强, 有助于提高消化性。故表明不同的热加工方法对食品的营养成分、淀粉理化性质及其结构变化有显著影响。

目前,木薯在中国已经广泛作为食品行业、化工行业、饲料等工业原料中,长期以来木薯在我国被定义为非粮能源作物,较少食用,对木薯深加工研究还较浅,主要以木薯鲜薯烹饪食品为主,处于产品初级研发、产品附加值不高阶段^[7]。水煮和汽蒸是烹饪木薯最广的加工方式。由于全球炸薯条市场持续增长,炸薯条是全球最受欢迎的热处理方式之一^[8],故本研究采用这三种传统热加工方式,探究其加工后结构和理化性质。Oscar 等人^[9]通过开发木薯蛋糕、甜点等食物,评估了烹饪对木薯食物质量的影响,结果表明木薯与其他添加剂结合可保留其加工特性,是制备烘焙产品、调味饮料和冰淇淋的理想原料。丁媛媛^[10]等人通过油炸对糯米糕的淀粉结构和消化率进行了研究,表明蒸饼和油炸饼中的淀粉结构完全糊化和破坏,淀粉结构随着加工条件的变化而发生更严重的改变,进一步影响了淀粉消化率。本研究结果有助于进一步解析不同热处理对木薯的消化性机制以及探究处理后制得的木薯粉是否适合作为制作其他食品的加工原料,可以为拓展木薯多元化产品的开发及其木薯食用化提供理论指导,进而提高木薯附加值,以便提高市场竞争力。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜木薯 (SC9) 中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所儋州木薯种质资源圃提供;

直链淀粉标准品和支链淀粉标准品 Sigma 公司；石油醚、无水乙醇、盐酸 分析纯，汕头西陇科学股份有限公司；溴化钾、乙酸铅 分析纯，上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

SZ30V2 型三层不锈钢复底蒸锅 浙江苏泊尔股份有限公司；志高商用油炸锅电炸炉 山东滨州志高商用厨具有限公司；RVA TecMaster 快速粘度糊化测定仪 美国 PerkinElmer 公司；NDA 701 型杜马斯定氮仪 意大利 Velp 公司；傅里叶变换近红外光谱 赛默飞世尔；Scientz-18ND 型冷冻干燥机 宁波新芝生物科技股份有限公司；S4800 型扫描电子显微镜 日本 Hitachi 公司；Q2000 型差式扫描量热仪 美国 TA 公司；Rigaku Ultima-IV 型 X-射线衍射仪 日本 Rigaku Corporation 公司；房太太多功能粉碎机 东莞市房太电器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 原料处理

1.2.1.1 未处理木薯粉的制备

根据 Nongnuch 等人^[11]的方法稍加修改。木薯根去皮，洗净，用刀切成块状，在 -80°C 下放置 24 h，冷冻后真空冻干，干燥后的木薯由多功能粉碎机研磨过 $150\ \mu\text{m}$ 孔径网筛，密封于塑料袋中， 4°C 低温避光保存。

1.2.1.2 热加工后木薯粉制备

原料处理方法在 Ana 等人^[12]与 Romani 等人^[13]的基础上稍加修改。

水煮或汽蒸：选取中间直径为 $5\pm 0.5\ \text{cm}$ 大小的新鲜木薯，去除外皮及内皮，并切除头尾，取中段，洗净并切成厚度为 $2\ \text{cm}$ 的圆柱形。称取 $250\ \text{g}$ 木薯进行水煮或汽蒸，时间为 $25\ \text{min}$ ，水煮处理和汽蒸处理分别加入 $2500\ \text{mL}$ 和 $1000\ \text{mL}$ 蒸馏水。

油炸：将无皮的木薯切成 $10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}\times 50\ \text{mm}$ 的长条，在 -20°C 放置 24 h。称取 $250\ \text{g}$ 木薯条于 $2\ \text{L}$ 油中进行烹炸，油温为 180°C ，炸 $4\ \text{min}$ ，用吸油纸轻拭表面并冷却至室温。

水煮、汽蒸、油炸样品干燥、过筛均参照未处理木薯粉的制备，其中干燥后的油炸处理样品通过索氏提取法^[14]进行脱脂然后将样品在 40°C 的烘箱中干燥 $1\ \text{h}$ ，密封于塑料袋中， 4°C 低温避光保存。

1.2.2 基本组分测定

水分含量的测定采用水分测量仪法；淀粉含量的测定参照《食品中淀粉的测定》(GB/T5009.9-2016)中酸水解法^[15]；直链淀粉含量的测定参照《水稻、玉米、谷子籽粒直链淀粉测定法》(NY/T 55-1987)中碘比色法^[16]；脂肪含量的测定参照《食品中脂肪的测定》(GB/T5009.6-2016)中索氏抽提法^[14]；蛋白质含量的测定参照《食品中蛋白质的测定》(GB/T5009.5-2016)中杜马斯燃烧法^[17]。

1.2.3 微观结构分析

将未处理和热处理的木薯分别切成厚度为 $1\ \text{mm}$ 的薄片，冷冻干燥。分别将木薯薄片和木薯粉用双面导电胶固定在样品台上，真空喷金后通过扫描电子显微镜 (SEM) 进行拍摄，加速电压为 $10\ \text{kV}$ ，放大倍数分别为 700 与 1400 倍。

1.2.4 糊化特性分析

使用快速粘度分析仪 (RVA) 测定木薯粉的糊化特性^[18]。将 $2.5\ \text{g}$ 木薯粉 (10% 水分基) 和 $25\ \text{mL}$ 蒸馏水加入铝筒，以 $960\ \text{r/min}$ 的速度搅拌 $10\ \text{s}$ ，之后以 $160\ \text{r/min}$ 的速度搅拌至测试完毕。样品在 50°C 下保持 $1\ \text{min}$ ，以 $6^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率加热至 95°C ，在 95°C 下保持 $5.0\ \text{min}$ ，以 $6^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率冷却至 50°C ，然后在 50°C 下保持 $2.0\ \text{min}$ 。记录峰值粘度、谷值粘度、崩解值、最终粘度、回生值和糊化温度。

1.2.5 长程有序性分析

根据 Ye 等人^[19]方法稍加修改, 利用 Rigaku Ultima-IV 型 X-射线衍射仪 (XRD) 对木薯粉进行测定。实验条件参数为射线波长 0.154 nm, 电压 40 kV, 电流 200 mA, 扫描范围为 4°~45°, 扫描速度 10 (°)/min, 扫描步长 0.02, 用 Jade 软件计算样品的相对结晶度 (RC)。

RC(%) = (Ac / (Ac + Aa)) × 100

式中: Ac 代表结晶区域面积; Aa 代表无定形区域面积。

1.2.6 短程有序性分析

将木薯粉与 KBr 粉末按 1:100 (w/w) 混合并压制成片, 利用傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR) 快速扫描测定, 扫描范围为 4000~400 cm⁻¹, 分辨率为 4 cm⁻¹, 扫描次数为 64 次^[20]。

1.2.7 热特性分析

木薯粉与水的比例 1:3 (w/v), 将铝盘密封, 置于室温平衡 24 h, 利用差式扫描量热仪 (DSC) 测定, 扫描条件: 速率 10°C/min, 温度 30~120°C。利用 Ta 软件计算样品的起始凝胶温度、峰值凝胶温度、终止凝胶温度和焓变值^[21]。

1.2.8 统计分析

使用 Origin 2021 绘制图表, 使用 SPSS 26.0 进行方差分析和显著性差异分析。

2 结果与分析

2.1 基本组分

未处理与经热处理后木薯制得木薯粉的基本组分如表 1 所示。经油炸处理后木薯脂肪含量、总淀粉含量均比水煮和汽蒸处理的木薯样品高 (P<0.05)。经油炸处理的木薯脂肪含量显著升高而其他处理并无显著性差异 (P>0.05), 其原因与木薯在油炸过程中吸收了油脂有关^[22]。经热处理后木薯蛋白含量和总淀粉含量均降低 (P<0.05), 可能与高温下的淀粉水解和蛋白热解有关^[23]。相比未处理木薯, 热加工后木薯直链淀粉含量显著增加 (P<0.05), 其增加量顺序为油炸>汽蒸>水煮, 其原因可能与热处理过程中淀粉分子的降解导致支链淀粉的平均分子大小随着温度的升高而减小有关^[24]。

表 1 经不同热加工方式加工后制得木薯粉的基本组分

Table 1 The basic components of cassava powder prepared after different heat processing methods

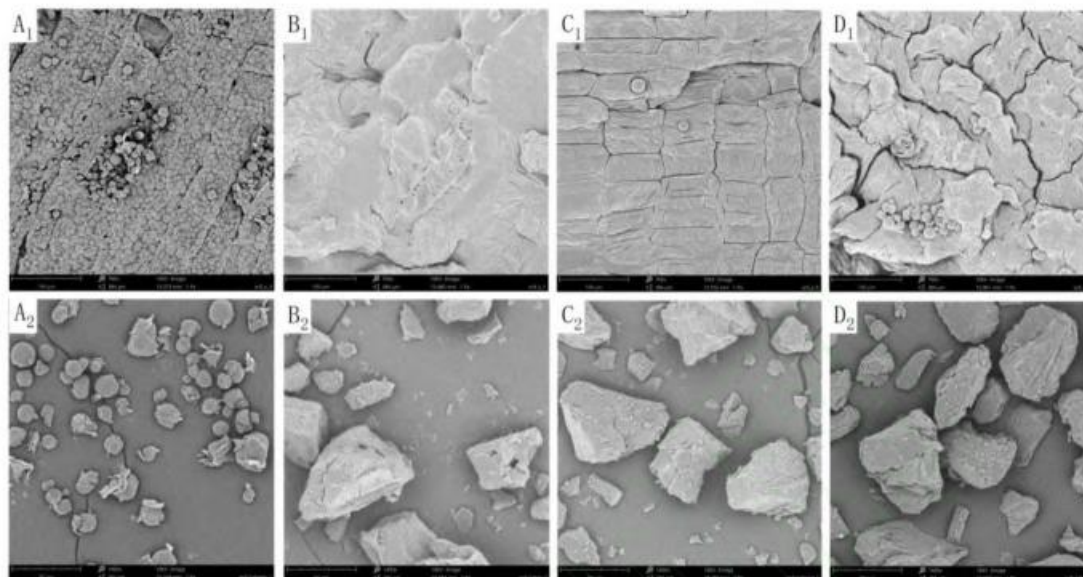
热加工方式	水分 (%)	粗脂肪 (% db)	蛋白质 (% db)	总淀粉含量 (% db)	直链淀粉含量 (% db)
未处理	8.43±0.36 ^a	0.43±0.01 ^b	1.86±0.06 ^a	80.28±0.84 ^a	23.96±0.24 ^c
水煮	6.41±0.42 ^b	0.30±0.02 ^b	0.76±0.05 ^c	72.16±1.39 ^c	28.47±0.23 ^b
汽蒸	6.31±0.26 ^b	0.37±0.02 ^b	1.18±0.11 ^b	71.69±1.39 ^c	28.84±0.15 ^{ab}
油炸	8.31±0.20 ^a	10.64±0.20 ^a	0.93±0.08 ^c	76.71±1.72 ^b	29.25±0.23 ^a

注: 同列标注字母不同表示差异显著 (P<0.05); db: 干基。

2.2 微观结构

经不同热加工处理的木薯与未处理木薯表面微观结构如图 1 所示。从木薯截面微观图 (图 1A₁-D₁) 可以看出, 木薯淀粉包裹在细胞内, 且细胞完整呈规则排列, 经水煮和油炸处理后木薯横截面细胞排列有序性消失, 经汽蒸处理的细胞排列有序, 而经三种热加工后细胞中的淀粉都几乎糊化, 其截面分别呈现三种不同的状态: 糊状 (水煮), 聚集块状 (汽蒸) 和紧密挤压状 (油炸), 截面表面存在少部分游离淀粉, 其截面微观状态呈现明显变化。从木薯粉微观图 (图 1A₂-D₂) 可以看出, 未处理制得的木薯粉形状多呈球缺形及不规则椭圆形, 表面附着破碎的细胞壁等杂质, 与王金梦等人^[25]研究一致。不同热加工处理后制得的木薯粉均呈现不规则块状结构, 油炸木

薯制得的木薯粉块状表面比水煮和汽蒸处理制得的木薯粉块状表面小碎块较少。经水煮处理后制得的木薯粉样品中有部分块状有孔洞，可能更容易在消化过程中被酶水解。这种截面以及木薯粉间出现的差异可能与热加工方式的传热介质作用方式不同有关，水煮与汽蒸均利用水作为传热介质，而油炸则是以油作为传热介质，导致了木薯截面及木薯粉呈现不同形貌^[22]。



注：A，未处理；B，水煮；C，汽蒸；D，油炸；下标 1：木薯样品横截面；下标 2：木薯粉。

图 1 经不同热加工方式加工后木薯微观结构

Fig.1 Cassava microstructure after different heat processing methods

2.3 糊化特性

未处理与经热处理后制得木薯粉的糊化特性如图 2 和表 2 所示。由表 2 可见，与未处理木薯相比，经热处理木薯的峰值粘度均上升，峰值粘度主要反映结合水的能力或颗粒溶胀程度，峰值粘度越高，样品的粘度就越强^[26]。其峰值粘度顺序为水煮、汽蒸、油炸、未处理，其中水煮处理和汽蒸处理峰值粘度均高于未处理和油炸处理的木薯 ($P<0.05$)。崩解值主要反映淀粉糊的热稳定性与耐剪切性能，崩解值越小，则淀粉糊热稳定性越强^[27]。研究表明热处理后的木薯热稳定性下降，其中油炸热稳定性最强 (2543.33 ± 46.76 cP)，水煮和汽蒸处理之间无显著性差异 ($P>0.05$)。回生值反映淀粉糊形成凝胶能力的强弱和老化趋势^[28]。通过分析经热处理的木薯回生值发现，水煮和汽蒸处理的木薯 (974.33 ± 30.66 cP 和 937.33 ± 17.04 cP) 凝胶性强，容易老化，反之，油炸处理的木薯 (499.67 ± 12.70 cP) 凝胶性弱，不易老化。与未处理木薯比，水煮与汽蒸处理的木薯回生值分别上升 49.67%和 43.98%，而油炸处理则下降 25.25%。未处理的木薯糊化温度为 73.23°C ，经过不同热加工处理的木薯糊化温度皆为 50.15°C 左右。并且经热加工处理的木薯几乎全部预糊化 (图 2)，与后续的 DSC 研究结果一致。代表经水煮与汽蒸处理制得的木薯粉更能够提高其粘性和稠度，可用于食品调味品的增稠剂或生产糕点等相关食物的凝胶剂，而本文中油炸处理后制得的木薯粉与未处理木薯粘度差异不大，但是其抗老化性质显著增加，其处理有利于延长食物保质期。

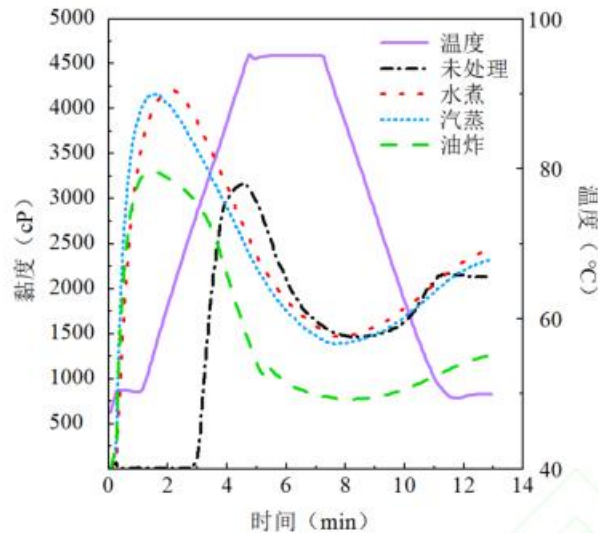


图 2 经不同热加工方式加工后制得木薯粉的糊化曲线

Fig.2 Gelatinization curves of cassava powder prepared after different heat processing methods

表 2 经不同热加工方式加工后制得木薯粉的糊化特性

Table 2 Gelatinization characteristics of cassava powder prepared after different heat processing methods

热加工方式	峰值粘度 (cP)	谷值粘度 (cP)	崩解值 (cP)	最终粘度 (cP)	回生值 (cP)	糊化温度 (°C)
未处理	3170.67±30.66 ^b	1462.00±32.51 ^a	1708.67±8.08 ^c	2113.00±37.99 ^c	651.00±29.82 ^b	73.23±0.51 ^a
水煮	4208.67±118.95 ^a	1468.00±22.52 ^a	2740.67±99.80 ^a	2442.33±52.99 ^a	974.33±30.66 ^a	50.15±0.00 ^b
汽蒸	4165.33±167.11 ^a	1387.67±39.93 ^b	2777.67±129.56 ^a	2325.00±23.07 ^b	937.33±17.04 ^a	50.15±0.00 ^b
油炸	3311.33±55.08 ^b	768.00±11.53 ^c	2543.33±46.76 ^b	1267.67±23.16 ^d	499.67±12.70 ^c	50.13±0.03 ^b

注：同列标注字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)。

2.4 长程有序结构

图 3 为未处理与经热处理后制得的木薯粉 XRD 衍射图，未处理的木薯在 2θ 约为 15° 、 23° 处为单峰，在 17° 和 18° 处具有未分离的双峰，为 A 型结晶结构，经过不同热加工处理后，衍射图谱峰型发生变化。经水煮与汽蒸的木薯均在 17° 附近有特征峰，而经油炸处理的木薯特征峰基本消失，表明木薯在不同热加工下的晶体结构被破坏，形成了无定形区域。水煮和汽蒸处理木薯形成的特征峰原因可能是样品在低温储藏过程中形成了微型结晶态^[28]，油炸处理木薯未形成特征峰的原因可能与其晶形类型、水分含量有关。Wang 等人^[29]研究报道了不同晶型淀粉油炸过程中的转变，其中 A 型结晶淀粉油炸后 XRD 峰型与本文研究一致。如表 3 所示，经不同热处理后，未处理木薯的相对结晶度分别下降了 67.57%（水煮）、65.16%（汽蒸）、74.35%（油炸），其中汽蒸处理相对结晶度破坏最小，而油炸处理则相反。相对结晶度的变化可能与不同的热加工类型以及木薯所含有的脂肪、蛋白和非淀粉多糖等物质有关，使木薯在低温回生的过程中淀粉结晶的结构发生改变，该结果与上文傅里叶变换红外光谱反映的趋势相一致。

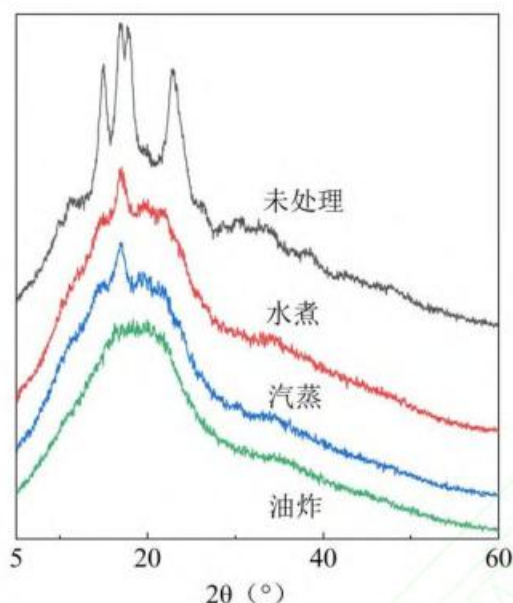


图3 经不同热加工方式加工后制得的木薯粉 X 射线衍射图

Fig .3 X-ray diffraction of cassava powder prepared after different heat processing methods

2.5 短程有序结构

通过傅里叶红外光谱分析未处理与经热处理后制得的木薯粉短程有序性结构发现，经过不同热处理的木薯特征吸收峰基团没有消失或新增（图 4），表明三种不同热处理对木薯基团没有影响，与彭军炜等人^[30]研究不同烹饪方式对淮山短程有序性结构结果一致。波数在 3440 cm^{-1} 处的峰值表明淀粉颗粒内部水合作用的发生，其中热处理后木薯在 $3500\sim 3100\text{ cm}^{-1}$ 吸收峰宽度为油炸>汽蒸>水煮，表明—NH 拉伸增加，表示不同热加工对木薯含氢基团差异显著^[31]，导致双螺旋结构解离程度不同，其结果与表 3 中双螺旋结构含量相一致。从表 3 可以看出，木薯经三种热处理后制得的木薯粉 $R_{1047/1022}$ 均比未处理的木薯粉小，比值大小分别为 0.80 ± 0.05 （未处理）、 0.78 ± 0.03 （汽蒸）、 0.75 ± 0.07 （水煮）、 0.73 ± 0.06 （油炸），与 XRD 结果趋势相一致，但经热处理的木薯 $R_{1047/1022}$ 的减少不显著（ $P>0.05$ ）。木薯 $R_{1022/995}$ 为 2.38 ± 0.12 （油炸）、 2.08 ± 0.03 （汽蒸）、 2.03 ± 0.02 （水煮）、 1.02 ± 0.07 （未处理），热处理后的木薯 $R_{1022/995}$ 显著增加（ $P<0.05$ ）。同时，油炸与水煮和汽蒸差异显著（ $P<0.05$ ），而水煮和汽蒸之间无显著差异（ $P>0.05$ ），可能是因为水煮与汽蒸同属湿热加工，以水为传质，而油炸涉及水和油的传质^[32]。

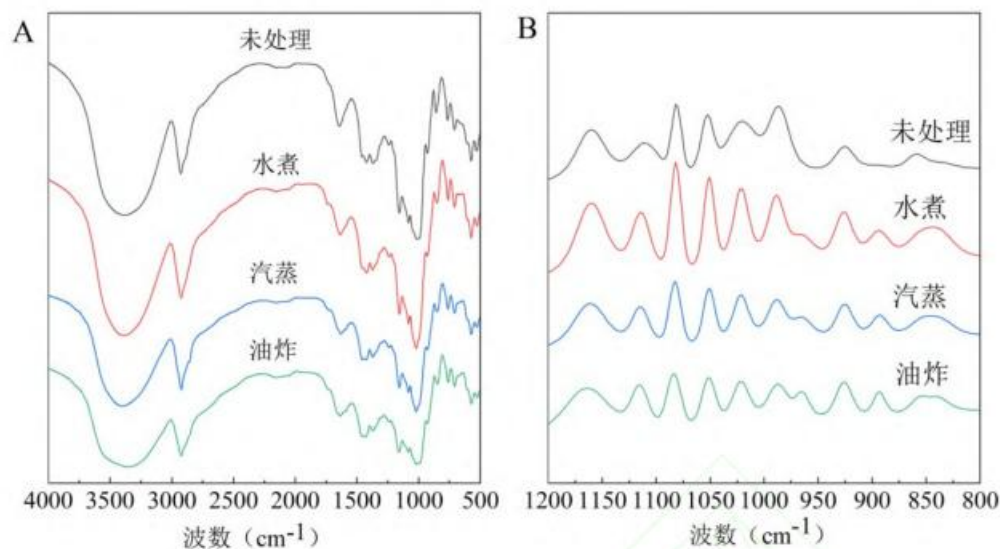


图 4 经不同热加工方式加工制得木薯粉的傅里叶近红外光谱图 (A) 和去卷积的红外光谱图 (B)

Fig. 4 Fourier near-infrared spectra (A) and deconvolution spectra (B) of cassava powder prepared after different heat processing methods

表 3 经不同热加工方式加工后制得的木薯粉吸光度比及相对结晶度

Table 3 The absorbance ratio and relative crystallinity of cassava powder prepared after different heat processing methods

热加工方式	$R_{1047/1022}$	$R_{1022/995}$	相对结晶度 (%)
未处理	0.80 ± 0.05^a	1.02 ± 0.07^c	34.04
水煮	0.75 ± 0.07^a	2.03 ± 0.02^b	11.04
汽蒸	0.78 ± 0.03^a	2.08 ± 0.03^b	11.86
油炸	0.73 ± 0.06^a	2.38 ± 0.12^a	8.73

注：同列标注字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)； $R_{1047/1022}$ 为 1047cm^{-1} 和 1022cm^{-1} 处吸光度值之比，表示木薯粉的短程有序程度； $R_{1022/995}$ 为 1022cm^{-1} 和 995cm^{-1} 处吸光度值之比，表示木薯粉双螺旋结构程度。

2.6 热特性

通过差式扫描量热仪 (DSC) 测得未处理与经热处理后制得的木薯粉热力学性质参数发现，未处理木薯的初始凝胶温度、峰值温度、结束温度、糊化焓分别为 64.66°C 、 72.21°C 、 77.13°C 、 10.54J/g 。根据图 5 经三种热加工方式处理后制得的木薯粉图谱的吸热峰均消失，表明颗粒崩解不在需要更多热能，热处理后制得的木薯粉中的淀粉完全糊化，失去了淀粉颗粒结构，显著降低了糊化温度。其结果与 XRD 和 RVA 测定分析结果一致。Ai 等人^[33]发现挤压蒸煮导致了特征峰的消失，豆粉的淀粉完全糊化和蛋白质变性，改变了糊化性能和溶剂保留能力，与本研究的结果相一致。Bai 等人^[34]研究了经不同热加工处理藏青科籽粒淀粉的结构变化和组分相互作用，其中通过热流化处理对其淀粉的热特性影响趋势与本文一致，表明通过热流化热处理的藏青科籽粒淀粉完全糊化。三种不同热加工处理均使木薯高度糊化，表明热加工对木薯热特性的影响之间差异不显著 ($P > 0.05$)。

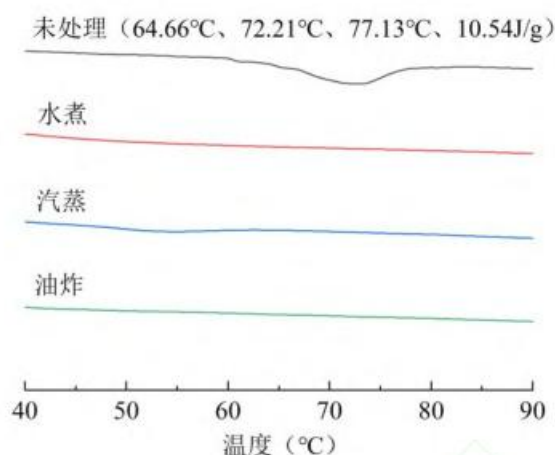


图 5 经不同热加工方式加工后制得木薯粉的热力学图谱

Fig. 5 Thermodynamic spectra of cassava powder prepared after different heat processing methods

3 结论

本文研究了水煮、汽蒸、油炸三种加热方式对木薯的理化特性和结构的影响。与未处理木薯相比，三种热处理均显著影响了木薯截面及其细胞内淀粉的微观结构，提高了双螺旋结构含量与直链淀粉含量，降低了总淀粉含量，改变了木薯糊化特性。其中，水煮与汽蒸处理使木薯的峰值粘性和回生值显著提高，而油炸处理木薯的峰值粘度不显著，而回生值则显著下降。在不同热处理之间，水煮处理木薯的峰值粘度与回生值最高，可能适用于食品调味品的增稠剂或生产糕点等相关食品的凝胶剂。油炸处理木薯的峰值粘度和回生值均比水煮和汽蒸处理低，表明油炸处理有利于延长食物的保质期，不易老化。汽蒸处理的木薯相对结晶度与短程有序性最大，这种加工方式可能有助于降低木薯的消化性，为特殊膳食需要人群提供选择。本研究通过分析不同热加工后制得的木薯粉理化特性及结构的变化，有助于进一步解析木薯消化性的机制及加工特性，为利用不同热加工后制得的木薯粉进行多元化的产品设计以及木薯在热加工方式的合理选择提供理论参考。

参考文献

- [1]严华兵, 叶剑秋, 李开绵. 中国木薯育种研究进展[J]. 中国农学通报, 2015,31(15):63-70. [YAN HUABING, YE JIANQIU, LI KAIMIAN. Research progress of cassava breeding in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015,31(15):63-70.]
- [2]NEELAKANDAN K, KARUPPASAMI K M, KARUPPUSAMY N, et al. A combined nutrient/biocontrol agent mixture improve cassava tuber yield and cassava mosaic disease[J]. Agronomy, 2021,11(8):1650.
- [3]许元明, 梁任龙, 张贞发. 浅谈木薯资源的利用价值[J]. 科技视界, 2012(34):12-13. [XU YUANMING, LIANG RENLONG, ZHANG ZHENFA. Discussion on utilization value of cassava resources[J]. Science and Technology Vision, 2012(34):12-13.]
- [4]PANGHAL A, MUNEZERO C, SHARMA P, et al. Cassava toxicity, detoxification and its food applications: a review[J]. Toxin reviews, 2021,40(1):1-16.
- [5]李煜芳. 加工方式对马铃薯和紫山药中淀粉结构及其消化性的影响[D].天津: 天津科技大学, 2019.
- [6]李丹. 高温油炸对马铃薯淀粉特性的影响研究[D].郑州: 郑州轻工业学院, 2018.
- [7]罗春芳, 杨龙, 欧珍贵, 等. 木薯食品加的现状 & 前景展望[J]. 江西农业学报, 2019,31(03):107-112. [LUO CHUNFANG, YANG LONG, OU PRECIOUS, et al. Current situation and prospect of cassava food processing[J]. Jiangxi Journal of Agriculture, 2019,31(03):107-112.]
- [8]ZHOU X, ZHANG S, TANG Z, et al. Microwave frying and post-frying of French fries[J]. Food Research International,

2022,159:111663.

[9]VEGA O, CARVAJAL L M, RODRÍGUEZ F, et al. Effect of thermal pretreatments and cooking characteristics on physicochemical, rheological, and sensorial properties of food products based on cassava (*Manihot esculenta* Crantz)[J]. Journal of Food Process Engineering, 2018,41(1):e12612.

[10]DING Y, YANG L, XIA Y, et al. Effects of frying on starch structure and digestibility of glutinous rice cakes[J]. Journal of Cereal Science, 2018,83:196–203.

[11]CHAROENKUL N, UTTAPAP D, PATHIPANAWAT W, et al. Physicochemical characteristics of starches and flours from cassava varieties having different cooked root textures[J]. LWT–Food Science and Technology, 2011,44(8):1774–1781.

[12]DE LIMA A C S, DA ROCHA VIANA J D, DE SOUSA SABINO L B, et al. Processing of three different cooking methods of cassava: Effects on in vitro bioaccessibility of phenolic compounds and antioxidant activity[J]. LWT–Food Science and Technology, 2017,76:253–258.

[13]ROMANI S, BACCHIOCCA M, ROCCULI P, et al. Influence of frying conditions on acrylamide content and other quality characteristics of French fries[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2009,22(6):582–588.

[14]中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定: GB 5009.6–2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[15]中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中淀粉的测定: GB 5009.9–2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[16]中华人民共和国农牧渔业部. 水稻、玉米、谷子籽粒直链淀粉测定法: NY/T 55–1987 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1987.

[17]中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定: GB/T5009.5–2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[18]ZHANG Y, ZHU K, HE S, et al. Characterizations of high purity starches isolated from five different jackfruit cultivars[J]. Food hydrocolloids, 2016,52:785–794.

[19]YE J, LIU C, LUO S, et al. Modification of the digestibility of extruded rice starch by enzyme treatment (β -amylolysis): An in vitro study[J]. Food Research International, 2018,111:590–596.

[20]LI B, ZHANG Y, ZHANG Y, et al. A novel underutilized starch resource—*Lucuma nervosa* A.DC seed and fruit[J]. Food Hydrocolloids, 2021,120:106934.

[21]DONG H, VASANTHAN T. Effect of phosphorylation techniques on structural, thermal, and pasting properties of pulse starches in comparison with corn starch[J]. Food Hydrocolloids, 2020,109:106078.

[22]WANG Y, CHEN L, YANG T, et al. A review of structural transformations and properties changes in starch during thermal processing of foods[J]. Food hydrocolloids, 2021,113:106543.

[23]KAN L, LI Q, XIE S, et al. Effect of thermal processing on the physicochemical properties of chestnut starch and textural profile of chestnut kernel[J]. Carbohydrate Polymers, 2016,151:614–623.

[24]YANG Y, WANG L, LI Y, et al. Investigation the molecular degradation, starch–lipid complexes formation and pasting properties of wheat starch in instant noodles during deep-frying treatment[J]. Food Chemistry, 2019,283:287–293.

[25]王金梦, 张思维, 赵康云, 等. 不同品种木薯淀粉理化 and 结构性质的比较[J]. 食品工业科技, 2023,44(02):115–122.[WANG JINMENG, ZHANG SIWEI, ZHAO KANGYUN, et al. Comparison of physicochemical and structural properties of different varieties of cassava starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023,44(02): 115–122.]

[26]DANG B, ZHANG W, ZHANG J, et al. Effect of thermal treatment on the internal structure, physicochemical properties and storage stability of whole grain highland barley flour[J]. Foods, 2022,11(14):2021.

[27]米旺, 陈吉, 余佳, 等. 武陵山区4种块根类淀粉的糊化特性和冲调性质分析[J]. 食品与机械, 2023,39(02):159–163.[MI WANG, CHEN JI, YU JI, et al. Gelatinization and impact properties of four root starch tubers in Wuling Mountain Area[J]. Food and Machinery, 2023,39(02): 159–163.]

[28]WANG S, SUN Y, WANG J, et al. Molecular disassembly of rice and lotus starches during thermal processing and its effect on starch digestibility[J]. Food Function, 2016,7(2):1188–1195.

- [29]WANG Y, MCCLEMENTS D J, LONG J, et al. Structural transformation and oil absorption of starches with different crystal types during frying[J]. Food Chemistry, 2022,390:133115.
- [30]彭军伟, 邹金浩, 苏小军, 等. 不同烹饪方式对淮山结构和糊化性质的影响[J]. 食品科学, 2021,42(17):63–68.[PENG JUNWEI, ZOU JINHAO, SU XIAOJUN, et al. Effects of different cooking methods on the structure and pasting properties of Chinese yam tubers(*dioscorea oppositifolia* thumb.)[J]. Food Science, 2019,42(17): 63–68.]
- [31]包辰. 薏苡仁抗性淀粉结构特性及其对肠道菌群调节机制的研究[D].福州: 福建农林大学, 2017.
- [32]YANG Z, ZHANG Y, WU Y, et al. Factors influencing the starch digestibility of starchy foods: A review[J]. Food Chemistry, 2023,406:135009.
- [33]AI Y, CICHY K A, HARTE J B, et al. Effects of extrusion cooking on the chemical composition and functional properties of dry common bean powders[J]. Food Chemistry, 2016,211:538–545.
- [34]BAI Y, ZHOU H, GUO X, et al. Structural changes and components interactions alter the digestion property of in-kernel starch from thermally processed Tibetan Qingke[J]. Food Research International, 2022,162:111950.