

# 不同提取工艺下甘薯淀粉得率、微观结构及理化特性的变化比较

舒圣元<sup>1,2</sup>, 孙红男<sup>2\*</sup>, 马梦梅<sup>2\*</sup>, 木泰华<sup>2\*</sup>, 高飞虎<sup>3</sup>

(1. 新疆农业大学食品科学与药学学院, 新疆乌鲁木齐 830000) (2. 中国农业科学院农产品加工研究所农业农村部农产品加工综合性重点实验室, 北京 100193) (3. 重庆市农业科学院, 重庆 401329)

**摘要:** 该研究以商薯 19 为原料, 比较了传统磋磨法、常温静置法、传统磋磨-CaCl<sub>2</sub> 协同法、剪切乳化法对甘薯淀粉得率的影响, 结合环境扫描电镜、透射电子显微镜、激光共聚焦显微镜观察提取淀粉后甘薯渣的微观结构, 明确每种工艺提取甘薯淀粉的最佳参数; 在此基础上, 测定最佳工艺下甘薯淀粉的结构及理化特性。结果表明, 常温静置法、传统磋磨-CaCl<sub>2</sub> 协同法、剪切乳化法提取甘薯淀粉的最佳工艺参数分别为: 静置 3 d; CaCl<sub>2</sub> 质量分数 0.5% (m/m)、提取时间 16 h; 剪切乳化时间 15 min、剪切乳化速率 22 000 r/min; 在此条件下甘薯淀粉得率分别为 10.89%、11.56%、18.81%, 比传统磋磨法分别提高 2.71%、3.38%、10.63%。同时, 剪切乳化法所得甘薯渣中几乎无淀粉颗粒。此外, 不同处理未改变甘薯淀粉的颗粒形貌及晶型, 且剪切乳化法所得甘薯淀粉糊化特性、 $\Delta H$  (14.07 J/g) 最低, 说明该淀粉抗剪切和耐热性较强, 易于回生, 有利于形成结构稳定性强的淀粉凝胶。上述结果以期对剪切乳化法应用于产业化提取甘薯淀粉提供理论指导。

**关键词:** 甘薯淀粉; 提取工艺; 得率; 微观结构; 理化特性

文章编号: 1673-9078(2024)11-180-192

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.11.1164

## Changes in the Yield, Microstructure, and Physicochemical Properties of Sweet Potato Starch in Response to Different Extraction Techniques

SHU Shengyuan<sup>1,2</sup>, SUN Hongnan<sup>2\*</sup>, MA Mengmei<sup>2\*</sup>, MU Taihua<sup>2\*</sup>, GAO Feihu<sup>3</sup>

(1.College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830000, China)  
(2.Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Science; Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China)  
(3.Chongqing Academy of Agricultural Science, Chongqing 401329, China)

引文格式:

舒圣元,孙红男,马梦梅,等.不同提取工艺下甘薯淀粉得率、微观结构及理化特性的变化比较[J].现代食品科技, 2024,40(11):180-192.

SHU Shengyuan, SUN Hongnan, MA Mengmei, et al. Changes in the yield, microstructure, and physicochemical properties of sweet potato starch in response to different extraction techniques [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(11): 180-192.

收稿日期: 2023-09-26

基金项目: 重庆市与中国农业科学院战略合作项目; 国家甘薯产业技术体系 (CARS-10)

作者简介: 舒圣元 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 1239060107@qq.com

通讯作者: 孙红男 (1983-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 食品化学与营养, E-mail: sunhongnan@caas.cn; 共同通讯作者: 马梦梅 (1988-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 食品化学与营养, E-mail: meimei881020@163.com; 木泰华 (1964-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 食品化学与营养, E-mail: mutaihua@126.com

**Abstract:** The sweet potato cultivar Shangshu No.19 was used as a raw material to assess the effects of different extraction methods, including traditional grinding, static extraction at room temperature, traditional grinding-CaCl<sub>2</sub> synergistic extraction, and shear emulsification, on the yield of sweet potato starch. Additionally, environmental scanning electron microscopy, transmission electron microscopy, and laser confocal microscopy were used to examine the microstructure of sweet potato residues following starch extraction. On the basis of the findings thus obtained, the optimal parameters for the different extraction methods were determined, and the structure and physicochemical properties of sweet potato starch obtained under the optimal conditions were elucidated. The results indicated that the optimal parameters for extraction using static extraction at room temperature, traditional grinding-CaCl<sub>2</sub> synergistic extraction, and shear emulsification were as follows: standing for 3 days, 0.5% CaCl<sub>2</sub> (mass fraction, *m/m*), extraction time of 16 h, shear emulsification time of 15 min, and shear emulsification rate of 22 000 r/min. Under these conditions, the yields of sweet potato starch for the three methods were 10.89%, 11.56%, and 18.81%, respectively, which were 2.71%, 3.38%, and 10.63% higher than the corresponding yields obtained using the traditional grinding method. Notably, virtually no starch particles were detected in the sweet potato residues obtained under the optimal shear emulsification conditions. Moreover, no significant differences were observed in the morphology or crystal structure of sweet potato starch obtained using the different treatments. In addition, the pasting characteristics and  $\Delta H$  (14.07 J/g) of sweet potato starch obtained using the shear emulsification method were the lowest, thus indicating that this starch exhibits greater resistance to shearing and heat. These properties are conducive to regeneration, thereby facilitating the formation of starch gels with strong structural stability. These findings will provide theoretical guidance for the application of shear emulsification in the industrial extraction of sweet potato starch.

**Key words:** sweet potato starch; extraction technique; yield; microstructure; physicochemical property

甘薯 [*Ipomoea batatas* (L.) Lam] 隶属于旋花科 (Convolvulaceae) 一年或多年生蔓生草本植物, 又称红苕、红薯、地瓜等<sup>[1]</sup>。甘薯是世界第五大粮食作物, 据 FAO 最新统计数据 (2021 年) 显示, 我国甘薯种植面积和产量分别为 220.61 万 hm<sup>2</sup> 和 0.48 亿 t, 占世界甘薯总种植面积和产量的 30.40% 和 47.62%, 均居世界首位<sup>[2]</sup>。

淀粉是甘薯块根的主要成分, 占甘薯块根的 50%~80% (干基)<sup>[3]</sup>。酸浆法和旋流分离法是我国提取甘薯淀粉的主要方法, 磋磨是两种方法中最关键的共性环节, 目的是实现甘薯渣与淀粉乳的分离<sup>[4]</sup>。然而, 磋磨工艺提取淀粉后, 甘薯渣中仍然存在大量被膳食纤维和蛋白质包裹的淀粉颗粒, 导致淀粉提取率低, 降低了生产效率, 在一定程度上阻碍了我国甘薯淀粉产业的进一步发展<sup>[5]</sup>。目前, 已有学者研究了超声波、微波、剪切乳化等方法对谷物、豆类等原料淀粉得率、结构及理化特性的影响, 例如, Wang 等<sup>[6]</sup>研究显示超声辅助水法可将豌豆淀粉得率从 40.71% (仅水提法) 提高至 54.43%, 快速消化淀粉、抗性淀粉含量分别提高了 2.41% 和 1.70%, 慢速消化淀粉含量降低了 3.53%, 且豌豆淀粉的溶解度、膨胀势、黏度、回生值都得到提高。刘婷婷等<sup>[7]</sup>采用微波辅助水法提取马铃薯淀粉, 研

究发现马铃薯淀粉提取率从 87.54% 提高到 93.85%, 直链淀粉含量增加了 9%, 淀粉的成糊温度、峰值温度、透明度、溶解度、凝沉性提高。Samutsri 等<sup>[8]</sup>研究表明, NaCl、CaCl<sub>2</sub> 能够提高大米淀粉的糊化温度、降低大米淀粉的膨胀势。彭小燕等<sup>[9]</sup>采用剪切乳化法提取龙眼核淀粉, 淀粉得率与传统碱法相比提高 9.76%。由此可见, 提取淀粉的原料不同, 其最适的加工方式、参数及所得淀粉的结构、理化特性等不尽相同。目前, 尚未见不同提取工艺对甘薯淀粉得率及其结构、理化特性的影响研究。因此, 探索经济高效、环保的新型甘薯淀粉提取方法, 对提高甘薯淀粉得率及生产效率、促进甘薯淀粉加工行业可持续发展具有重要的现实意义。

本文以淀粉加工型甘薯—商薯 19 为研究对象, 探讨不同静置天数 (常温静置法)、不同 CaCl<sub>2</sub> 浓度及提取时间 (传统磋磨 -CaCl<sub>2</sub> 协同法)、不同剪切乳化时间及速率 (剪切乳化法) 对甘薯淀粉得率及提取淀粉后甘薯渣微观结构的影响, 优化不同提取工艺的最佳参数。在此基础上, 对比分析不同提取工艺最佳参数下制备甘薯淀粉的结构及理化特性, 以为新型甘薯淀粉提取方法提供基础数据和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

甘薯: 市售商薯 19; 总淀粉、直链淀粉试剂盒, Megazyme 公司(爱尔兰);  $\text{CaCl}_2$  (分析纯), 北京国药集团有限公司。

### 1.2 仪器

L50 高剪切乳化机, 上海依肯机械设备有限公司产品; BPG-9240A 精密鼓风干燥箱, 北京天林恒泰科技有限公司; GL-21M 离心机, 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司; 30B 万能粉碎机, 常州延陵干燥设备有限公司; SH2-300A 水浴摇床, 苏州培英实验设备有限公司; SDmatic 破损淀粉测定仪, 法国 CHOPIN 公司; FEI Quanta 200 环境扫描电子显微镜, 荷兰 FEI 公司; H-7500 透射电子显微镜, 日本日立公司; LS880 激光共聚焦显微镜, 德国卡尔蔡司; SU-8010 扫描电子显微镜, 日本日立公司; X-射线衍射仪, 日本理学株式会社; Baite 粒度分析仪, 丹东百特仪器有限公司; RVA-TecMaster 快速黏度分析仪, 瑞典 Perten 仪器有限公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 不同提取方法制备甘薯淀粉的工艺优化

##### 1.3.1.1 传统磋磨法

新鲜甘薯经清洗、去皮、切块后, 模拟产业化提取淀粉的方法, 将薯块与水以 1:1 ( $m/m$ ) 混合、打浆后, 得到淀粉浆液。将淀粉浆液依次过 80 和 120 目筛后, 采用离心机在 3 000 g 下离心 10 min, 去除上清液, 加水搅起底层淀粉再次离心, 反复 2 次后收集淀粉, 将收集的淀粉置于鼓风干燥箱中, 于 45 °C 条件下烘干过夜, 干燥后的淀粉用万能粉碎机粉碎、过 100 目筛, 备用<sup>[10]</sup>。

##### 1.3.1.2 常温静置法

新鲜甘薯经清洗、去皮、切块后, 将薯块与水以 1:1 ( $m/m$ ) 混合、打浆后, 在室温下分别静置 1、2、3、4、5 d, 用两层纱布过滤去除薯渣, 得到淀粉浆液。将淀粉浆液依次过 80 和 120 目筛后, 采用离心机在 3 000 g 下离心 10 min, 去除上清液, 加水搅起底层淀粉再次离心, 反复 2 次后收集淀粉, 将收集的淀粉置于鼓风干燥箱中, 于 45 °C 条件下烘干过夜, 干燥后的淀粉用万能粉碎机粉碎、过 100 目筛, 备用<sup>[10]</sup>。

##### 1.3.1.3 传统磋磨- $\text{CaCl}_2$ 协同法

新鲜甘薯经清洗、去皮、切块后, 将薯块分别与质量分数为 0.5%、1%、1.5%、2%、2.5% ( $m/m$ ) 的  $\text{CaCl}_2$  溶液以 1:1 ( $m/m$ ) 混合、打浆, 室温下分别静置 4、8、12、16、20 h 后, 用两层纱布过滤去除薯渣, 得到淀粉浆液。将淀粉浆液依次过 80 和 120 目筛后, 采用离心机在 3 000 g 下离心 10 min, 去除上清液, 加水搅起底层淀粉再次离心, 反复 2 次后收集淀粉, 将收集的淀粉置于鼓风干燥箱中, 于 45 °C 条件下烘干过夜, 干燥后的淀粉用万能粉碎机粉碎、过 100 目筛, 备用<sup>[10]</sup>。

##### 1.3.1.4 剪切乳化提取法

新鲜甘薯经清洗、去皮、切块后, 将薯块与水以 1:1 ( $m/m$ ) 混合、打浆, 进而采用剪切乳化设备分别在 10 000、13 000、16 000、19 000、22 000 r/min 下处理 3、6、9、12、15 min 后, 用两层纱布过滤去除薯渣, 得到淀粉浆液。将淀粉浆液依次过 80 和 120 目筛后, 采用离心机在 3 000 g 下离心 10 min, 去除上清液, 加水搅起底层淀粉再次离心, 反复 2 次后收集淀粉, 将收集的淀粉置于鼓风干燥箱中, 于 45 °C 条件下烘干过夜, 干燥后的淀粉用万能粉碎机粉碎、过 100 目筛, 备用<sup>[10]</sup>。

#### 1.3.2 不同方法提取淀粉基本性质测定

##### 1.3.2.1 甘薯淀粉纯度及得率

采用 AOAC 996.11 的方法测定不同工艺参数下甘薯淀粉的纯度 (Megazyme 试剂盒法), 甘薯淀粉得率参照 Mohamed 等<sup>[11]</sup>的方法并进行一定修改, 按下式进行计算:

$$Y = \frac{W_1 \times P}{W_2} \quad (1)$$

式中:

$Y$ —甘薯淀粉得率, %;

$W_1$ —粗淀粉质量, g;

$P$ —淀粉纯度, %;

$W_2$ —鲜薯质量, g。

##### 1.3.2.2 直链淀粉含量的测定

参照 Megazyme 试剂盒方法测定淀粉样品中的直链淀粉含量;

##### 1.3.2.3 水分含量的测定

参照 GB/T 5009.3-2009 烘箱法测定淀粉样品中的水分。

##### 1.3.2.4 破损淀粉含量的测定

参照 Ma 等<sup>[12]</sup>的方法采用 SDmatic 淀粉损伤仪

测定破损淀粉含量, 简述如下: 将 120 mL 蒸馏水、3.0 g 硼酸粉末、3.0 g 碘化钾粉末和 1~2 滴浓度为 0.1 mol/L 的硫代硫酸钠溶液加入 SDmatic 淀粉损伤仪的反应杯中, 置于固定位置后将机械臂向下折叠, 准确称量 1 g 淀粉样品, 放入反应勺中, 仪器循环 6~7 min 后, 记录样品的破损淀粉含量, 结果以肖邦的标准单位 UCD (Chopin Dubois Unit) 记录。

### 1.3.3 不同方法提取淀粉后甘薯渣的微观结构观察

#### 1.3.3.1 环境扫描电子显微镜

参照 Cenini 等<sup>[13]</sup>的方法并进行一定修改, 取少量甘薯渣粘在样品台上, 用离子溅射仪进行真空喷镀后, 采用 Quanta 200 环境扫描电子显微镜进行观察, 放大倍数为 1 000 倍。

#### 1.3.3.2 透射电子显微镜

参照 Kong 等<sup>[14]</sup>的方法并进行一定修改, 将甘薯渣用琼脂糖包裹后固定在戊二醛中, 经磷酸盐缓冲液洗涤后, 固定、脱水、置换、包埋、聚合、制成超薄切片, 通过透射电子显微镜进行观察, 放大倍数为 800 倍。

#### 1.3.3.3 激光共聚焦显微镜

参照 Liu 等<sup>[15]</sup>的方法并进行一定修改, 将甘薯渣用琼脂糖包裹后固定在戊二醛中, 经磷酸盐缓冲液洗涤后, 固定、脱水、置换、包埋、聚合、制成半薄切片。取半薄切片样品, 同时用罗丹明 B (质量浓度为 0.25 mg/mL) 和 FITC (质量浓度为 2.5 mg/mL) 进行染色, 用激光共聚焦显微镜进行观察。其中, 罗丹明 B 对甘薯渣中蛋白进行染色, FITC 对甘薯渣中淀粉进行染色。CLSM 条件为: 物镜放大倍数 20×, 目镜放大倍数 10×, FITC 和罗丹明 B 的激发波长分别为 488 和 568 nm, 发射波长分别为 518 和 625 nm。

### 1.3.4 不同提取方法制备甘薯淀粉的颗粒特性

#### 1.3.4.1 甘薯淀粉颗粒形貌观察

参照 Sujka 等<sup>[16]</sup>的方法并进行一定修改, 将干燥后的甘薯淀粉样品轻轻分散在附有导电双面胶带的样品台上, 然后喷金观察。加速电压 20 kV, 放大 300 倍。

#### 1.3.4.2 甘薯淀粉粒径测定

参照 Waliullah 等<sup>[17]</sup>的方法采用粒度分析仪测定甘薯淀粉的粒径。将甘薯淀粉悬浮于去离子水中, 将待测液倒入样品池中, 超声波分散 20 s 后进行测定。根据激光衍射法进行自动分析, 得到中位径 ( $D_{50}$ )、体积平均径 ( $D_{[4,3]}$ ) 和面积平均径 ( $D_{[3,2]}$ ) 数据。

#### 1.3.4.3 甘薯淀粉晶体结构测定

采用 Lin 等<sup>[18]</sup>的方法并进行一定修改, 采用 X-射线衍射仪进行测定。测定条件如下: 特征射线 Cu 靶, 管压 40 kV, 电流 50 mA, 测量角度  $2\theta$  为 5~60°, 步长 0.02 °, 扫描速度 15 °/min。根据衍射峰的强度, 将所得衍射峰分解为结晶和非结晶的两部分, 结晶度为结晶峰的面积与总面积的比值。淀粉的相对结晶度使用 Origin 8.5 软件进行计算。

### 1.3.5 甘薯淀粉的理化特性

#### 1.3.5.1 膨胀势、溶解度

采用 Wang 等<sup>[19]</sup>的方法测定不同提取方法制备甘薯淀粉的膨胀势和溶解度, 将约 500 mg 淀粉样品溶解于 20 mL 去离子水中, 70 °C 加热 30 min, 然后将淀粉浆液冷却至 25 °C, 3 000 g 离心 20 min, 精确称量沉淀, 仔细倒出上清, 110 °C 干燥 4 h, 收集干燥后沉淀, 并称重。膨胀势和溶解度的测定公式为:

$$B = \frac{m_1}{m_0 - m_2} \quad (2)$$

$$C = \frac{m_2}{m_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

$B$ ——膨胀势 (SP), g/g;

$C$ ——溶解度 (WSI), %;

$m_0$ ——甘薯淀粉样品的质量, g;

$m_1$ ——离心后的沉淀物质量, g;

$m_2$ ——上清液干燥至质量恒定后的质量, g。

#### 1.3.5.2 糊化特性

参考 Manjot 等<sup>[20]</sup>的方法并进行一定修改, 采用快速粘度分析仪 (Perten, RVA 4500, Huddinge, 瑞典) 进行测定。淀粉样品 (2.5 g) 分散于 25 mL 蒸馏水中, 分散液在 50 °C 下保持 1 min, 以 9.5 °C/min 的速率加热到 95 °C, 在 95 °C 下保持 2.5 min, 并以 11.84 °C/min 的速度冷却到 50 °C。计算淀粉的峰值黏度 (PV)、崩溃黏度 (BD) 最终黏度 (FV)、回生值 (SB) 和糊化温度 (PT)。

#### 1.3.5.3 热力学特性

参考 Song 等<sup>[21]</sup>的方法并进行一定修改, 在专用液体坩埚中准确称取 3 mg 甘薯淀粉, 按淀粉 / 去离子水 1:3 ( $m/V$ ) 的比例加入去离子水。密封坩埚, 在 4 °C 下平衡约 15 h, 空坩埚作为对照。采用 DSC (Q2000, TA Instruments, USA) 测定甘薯淀粉在糊化过程中的热力学性质, 测定条件为: 在 25 °C 保持 1 min, 以 10 °C/min 的速率连续加热至 115 °C, 然

后以 10 °C /min 的速率降至 40 °C。淀粉样品热力学参数包括焓变 ( $\Delta H$ )、起始温度 ( $T_0$ )、峰值温度 ( $T_p$ ) 和结束温度 ( $T_c$ )。

### 1.3.6 数据处理

采用 SAS 8.0 和 Origin 8.0 处理实验数据, 结果取 3 次实验的平均值。显著性检验方法为邓肯 (Duncan) 多重比较,  $P < 0.05$  为差异显著,  $P > 0.05$  为差异不显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同提取方法制备甘薯淀粉的工艺优化

#### 2.1.1 常温静置法

不同静置天数对甘薯淀粉得率的影响见图 1, 可以看出, 当静置时间由 0 d 延长至 3 d 时, 甘薯淀粉得率呈逐渐增加的趋势, 由 8.18% 提高至 10.89%; 当静置时间进一步延长至 4、5 d 时, 甘薯淀粉得率变化不显著, 分别为 11.15% 和 11.19%。这可能是因为静置过程中产生的微生物及乳酸菌, 其代谢会产生乳酸等, 适当浓度的乳酸会破坏甘薯的细胞壁网络, 有助于淀粉颗粒游离出来, 然而, 过高浓度的乳酸会使甘薯中的蛋白质变性, 抑制淀粉与蛋白质的分离<sup>[22]</sup>。

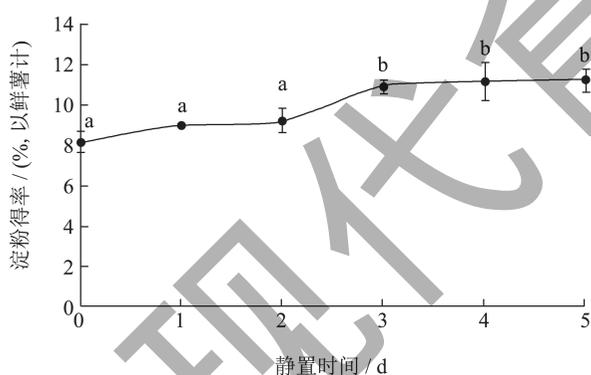


图 1 不同静置天数对甘薯淀粉得率的影响

Fig.1 Effects of different extraction time on the yield of sweet potato starch

注: “0” 代表传统磋磨法, 作为对照。图中所标字母表示差异显著。图 2、3 同。

#### 2.1.2 传统磋磨-CaCl<sub>2</sub>协同法

不同 CaCl<sub>2</sub> 提取时间及质量分数对甘薯淀粉得率的影响如图 2 所示。可以看出, 当固定 CaCl<sub>2</sub> 质量分数为 1.5% (m/m) 时, 随着 CaCl<sub>2</sub> 提取时间的延长 (0~16 h), 甘薯淀粉得率由 8.18% 逐渐增加至

11.12%, 当提取时间由 16 h 进一步延长至 20 h 时, 甘薯淀粉得率变化不显著 (10.38%) (图 2a)。这可能是因为一定时间范围内, CaCl<sub>2</sub> 溶液可以较好的促进淀粉分子的析出, 但是随着时间的增加, CaCl<sub>2</sub> 与淀粉结合形成结晶体, 从而使溶液变稠, 降低淀粉析出率<sup>[23]</sup>, 说明 Ca<sup>2+</sup> 可与马铃薯淀粉 (3%, m/V) 交联。

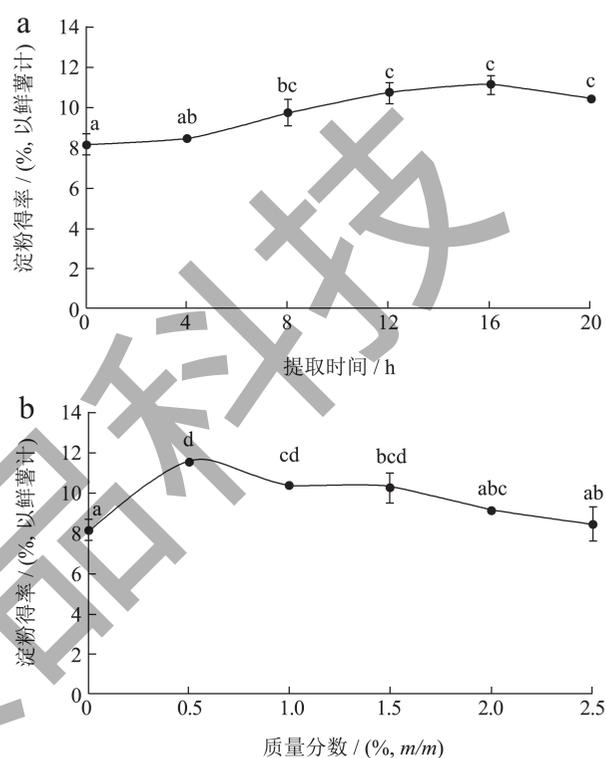


图 2 不同 CaCl<sub>2</sub> 提取时间 (a) 及质量分数 (b) 对甘薯淀粉得率的影响

Fig.2 Effects of different extraction time (a) and mass fractions (b) of CaCl<sub>2</sub> solutions on the yield of sweet potato starch

由图 2b 所示, 当固定 CaCl<sub>2</sub> 提取时间为 16 h 时, 甘薯淀粉得率随 CaCl<sub>2</sub> 质量分数的提高呈先增加后降低的趋势, 当 CaCl<sub>2</sub> 质量分数为 0.5% 时, 甘薯淀粉得率最高 (11.56%), 这可能是因为 CaCl<sub>2</sub> 可以增加甘薯细胞壁的开裂度, 有利于淀粉分子的释放, 进而提高淀粉得率<sup>[24]</sup>; 当 CaCl<sub>2</sub> 质量分数进一步增大, CaCl<sub>2</sub> 中的钙离子更容易和淀粉分子之间通过静电作用形成络合物, 并且随着钙离子浓度的增大, 络合物的稳定性增强, 从而降低了淀粉的析出<sup>[25]</sup>。

#### 2.1.3 剪切乳化法

不同剪切乳化时间及速率对甘薯淀粉得率的影响见图 3。结果显示, 当固定剪切速率为 16 000 r/min 时, 随着剪切时间的延长 (0~15 min), 甘薯淀粉得率呈

逐渐增加趋势,即由 8.18% 增加至 17.00%;当固定剪切时间为 15 min 时,随着剪切速率由 10 000 r/min 增加至 22 000 r/min 时,甘薯淀粉得率也由 13.86% 增加至 18.81%;当剪切时间为 15 min、剪切速率为 22 000 r/min 时,甘薯淀粉得率最高(18.81%)。彭小燕等<sup>[26]</sup>采用剪切乳化法提取龙眼核淀粉,研究表明当料液比 1:20 (g/mL)、溶液 pH 值 9、剪切速率 3 000 r/min、提取时间 30 min 时,龙眼核淀粉得率达到 25.12%,与传统碱法相比,提高了 9.76%。这可能是由于随着剪切乳化时间和速率的增加,剪切机对物料产生的剪切、撞击、振荡和气穴等机械力效应增大,更高的机械力效应有助于更好地粉碎细胞壁和蛋白质组织等,使其包裹的淀粉颗粒更容易被释放出来<sup>[27]</sup>。

综上所述,常温静置法、传统磋磨 -CaCl<sub>2</sub> 协同法、剪切乳化法提取甘薯淀粉的最佳工艺参数分别为:磋磨后常温静置提取 3 d;质量分数为 0.5% CaCl<sub>2</sub> 溶液磋磨提取 16 h;22 000 r/min 的条件下剪切提取 15 min。在上述 3 种不同提取方式的最佳条件下,甘薯淀粉得率分别为 10.89%、11.56%、18.81% (基于鲜薯质量),与传统磋磨 (8.18%) 相比,分别提高了 2.71%、3.38% 和 10.63%。

## 2.2 不同提取工艺最佳参数下制备甘薯淀粉的基本性质

不同提取工艺最佳参数下所得淀粉的基本性质,如淀粉纯度及直链淀粉、水分、破损淀粉含量如表 1 所示。结果显示,所得淀粉的纯度为 89.51%~93.61%,其中,以剪切乳化法提取甘薯淀粉的纯度最高,为 93.61%。此外,甘薯淀粉的直链淀粉含量范围为 23.39%~27.81%,传统磋磨 -CaCl<sub>2</sub> 协同法提取甘薯淀粉的直链淀粉含量最高 (27.81%),其他 3 种方法所得甘薯淀粉的直链淀粉含量无显著差异 ( $P < 0.05$ ),这可能是由于淀粉和盐离子之间的静电相互作用,加强了淀粉和盐之间对水的竞争,从而减少了直链淀粉的浸出<sup>[28]</sup>。不同提取工艺最佳参数下所得甘薯淀粉的水分含量在 4.96%~6.45%,其中剪切乳化法提取甘薯淀粉水分含量最高,为 6.45%,其次为传统磋磨 -CaCl<sub>2</sub> 协同法 (6.24%)、传统磋磨法 (6.18%) 和常温静置法 (4.69%),均符合 GB/T 34321-2017《食用甘薯淀粉》中对水分含量的规定。此外,破损淀粉是淀粉颗粒在处理过程中受到机械作用力造成的,从表 1 中可知剪切乳化法提取甘薯淀粉破损淀粉含量最高,为 26.35%,这说明剪切处理对淀粉颗粒内部结构造成破坏<sup>[29]</sup>。

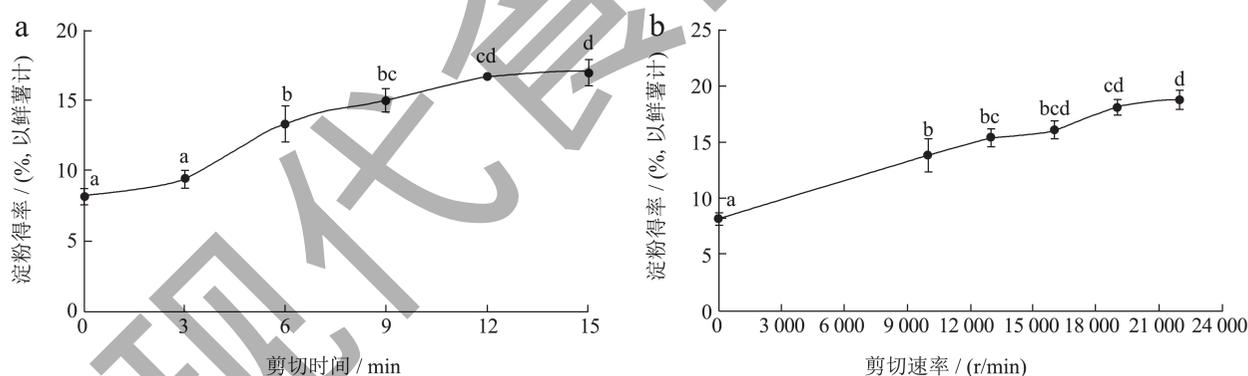


图 3 不同剪切时间 (a) 及速率 (b) 对甘薯淀粉得率的影响

Fig.3 Effects of different shear-emulsifying time (a) and rate (b) on the yield of sweet potato starch

表 1 不同提取工艺最佳参数下制备甘薯淀粉的基本性质

Table 1 Basic properties of sweet potato starch obtained under the optimized parameters from different extraction methods

样品	直链淀粉/(%, 干基)	淀粉纯度/(%, 干基)	水分含量/%	破损淀粉含量/(UCD)
传统磋磨法提取甘薯淀粉	23.78 ± 1.40 <sup>a</sup>	92.21 ± 4.91 <sup>bc</sup>	6.18 ± 0.78 <sup>ab</sup>	23.20 ± 0.14 <sup>a</sup>
常温静置法提取甘薯淀粉	23.75 ± 1.61 <sup>a</sup>	91.48 ± 4.70 <sup>b</sup>	4.69 ± 0.54 <sup>a</sup>	23.60 ± 0.28 <sup>a</sup>
传统磋磨 -CaCl <sub>2</sub> 协同法提取甘薯淀粉	27.81 ± 2.34 <sup>b</sup>	89.51 ± 1.77 <sup>a</sup>	6.24 ± 0.99 <sup>ab</sup>	24.95 ± 0.07 <sup>b</sup>
剪切乳化法提取甘薯淀粉	23.39 ± 0.97 <sup>a</sup>	93.61 ± 1.08 <sup>c</sup>	6.45 ± 0.63 <sup>b</sup>	26.35 ± 0.21 <sup>c</sup>

注: 同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ( $P < 0.05$ )。

### 2.3 不同方法提取淀粉后甘薯渣的微观结构观察

针对甘薯渣中残留淀粉与膳食纤维、蛋白质结合状态不明确等问题,采用环境扫描电子显微镜、透射电子显微镜、激光共聚焦显微镜对传统磋磨法、常温静置法、传统磋磨-CaCl<sub>2</sub>协同法、剪切乳化法提取淀粉后所得甘薯渣的微观结构以及残留淀粉与蛋白、膳食纤维等的结合形态进行观察与分析,以期甘薯淀粉的制备工艺设计及装备选型奠定基础,具体结果见图4~6。

传统磋磨法提取淀粉后,甘薯渣中仍有大量的淀粉颗粒被包裹在蛋白和膳食纤维组成的网状结构中,不易被提取出来(图4~6的a图)。常温静置法中,随着静置天数的增加,尽管甘薯渣中被蛋白质和膳食纤维包裹的淀粉颗粒数量逐渐减少(图5b~5d;图6b~6d),但大部分淀粉颗粒仍然附着在网状结构的表面(图4b~4d);当静置时间高于3d时,甘薯渣中残留的淀粉颗粒数量及大小变化不显著(图4~6的

e、f图),这与淀粉得率的变化趋势相一致。

传统磋磨-CaCl<sub>2</sub>协同法中,甘薯渣中被蛋白质和膳食纤维包裹的残留淀粉颗粒数量随CaCl<sub>2</sub>提取时间和浓度的增加呈先降低后增加的趋势(图4~6的g~p图),当CaCl<sub>2</sub>溶液质量分数为0.5%(m/m)、提取时间为16h时,甘薯渣中残留淀粉颗粒最少(图4~6的l图);然而,当提取时间超过16h后,由于钙离子与淀粉形成络合物,导致甘薯渣中淀粉颗粒的数量增多(图4~6的o~p图),这与淀粉得率变化规律基本一致。

在剪切乳化法中,甘薯渣中残留淀粉颗粒数量和粒径均随剪切时间、剪切速率的增加呈降低趋势,图4~6的q~z图)显示,剪切乳化处理明显破坏了蛋白质和纤维的网状结构,导致其中包裹的淀粉颗粒被释放出来。当剪切时间为15min、剪切转速为22000r/min时,甘薯渣中纤维和蛋白质网络结构的破坏程度最大,更多的淀粉颗粒被提取出来,甘薯渣中几乎无被包裹的淀粉颗粒(图4~6的z图)。

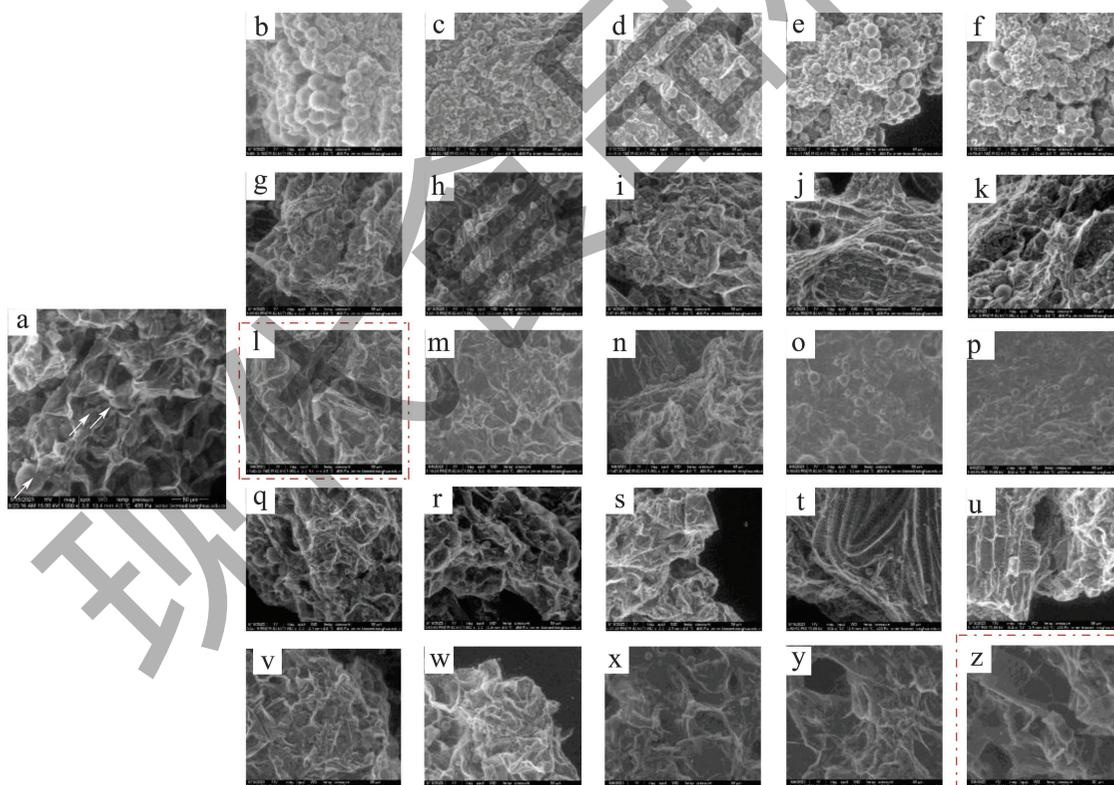


图4 传统磋磨及不同处理甘薯渣环境扫描电子显微镜图(×1000)

Fig.4 Environmental scanning electron microscope diagram of sweet potato residues obtained from different starch extraction methods (×1000)

注:a为传统磋磨工艺提取淀粉后甘薯渣;b、c、d、e、f为静置1、2、3、4、5d提取淀粉后甘薯渣;g、h、i、j、k为采用CaCl<sub>2</sub>静置4、8、12、16、20h提取淀粉后甘薯渣;l、m、n、o、p为质量分数0.5%、1%、1.5%、2%、2.5%CaCl<sub>2</sub>提取淀粉后甘薯渣;q、r、s、t、u为剪切3、6、9、12、15min提取淀粉后甘薯渣;v、w、x、y、z为10000、13000、16000、19000、22000r/min剪切提取淀粉后甘薯渣。图5、6同。

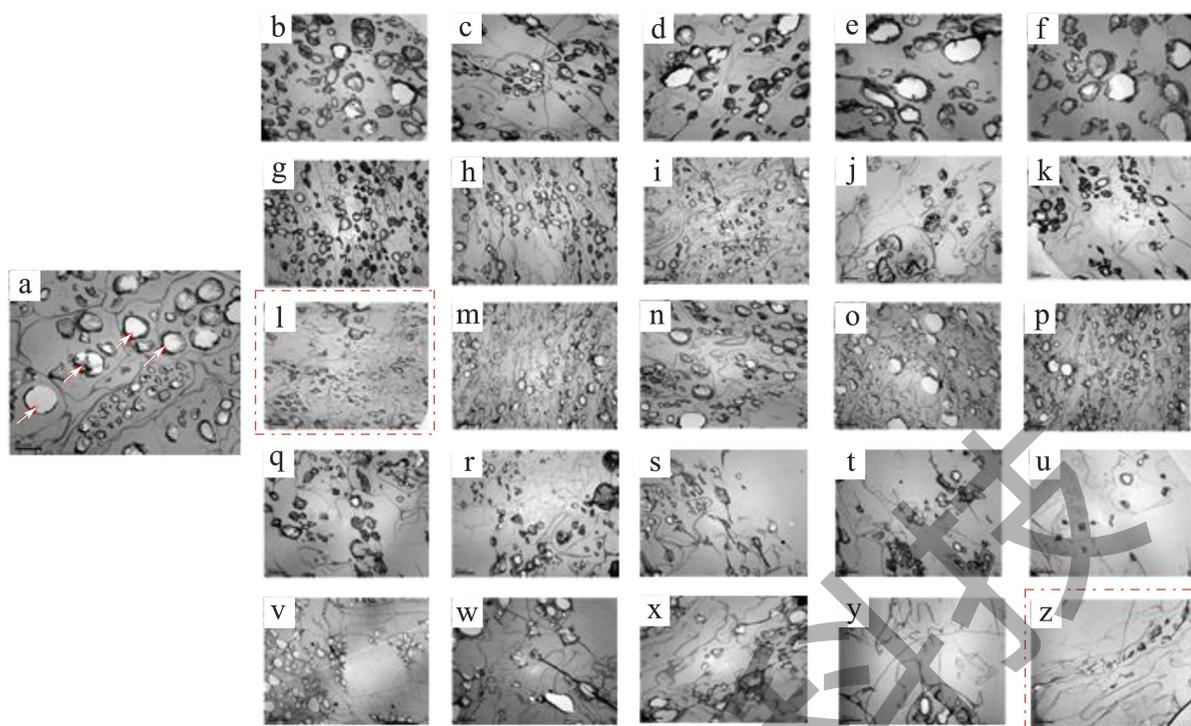


图 5 传统磋磨及不同处理甘薯渣透射电子显微镜图 ( × 800 )

Fig.5 Transmission electron microscopy diagram of sweet potato residues obtained from different starch extraction methods (×800)

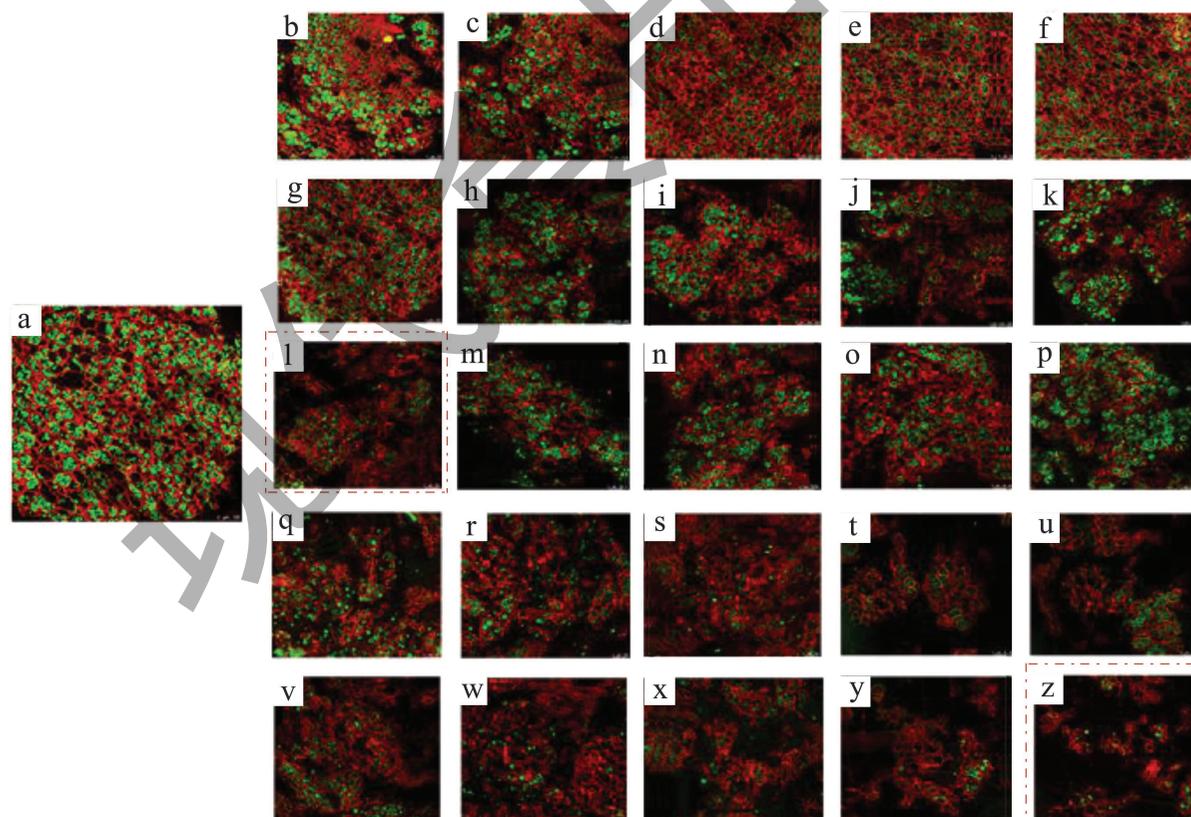


图 6 传统磋磨及不同处理甘薯渣激光共聚焦电子显微镜图 ( × 100 )

Fig.6 Laser confocal electron microscopy diagram of sweet potato residues obtained from different starch extraction methods (×100)

注: 绿色为淀粉颗粒, 红色为蛋白。

表 2 不同提取工艺最佳参数下制备甘薯淀粉的粒度分布 ( $\mu\text{m}$ )Table 2 Particle size distribution of sweet potato starch obtained under the optimized parameters from different extraction methods ( $\mu\text{m}$ )

样品	中位径 ( $D_{50}$ )	体积平均径 ( $D_{[4,3]}$ )	面积平均径 ( $D_{[3,2]}$ )
传统磋磨法提取甘薯淀粉	$20.84 \pm 0.04^c$	$23.15 \pm 0.15^c$	$8.65 \pm 0.01^c$
常温静置法提取甘薯淀粉	$20.89 \pm 0.03^c$	$23.57 \pm 0.02^d$	$8.92 \pm 0.13^d$
传统磋磨 -CaCl <sub>2</sub> 协同法提取甘薯淀粉	$19.66 \pm 0.02^b$	$22.38 \pm 0.01^b$	$8.57 \pm 0.13^b$
剪切乳化法提取甘薯淀粉	$19.48 \pm 0.01^a$	$22.02 \pm 0.01^a$	$8.53 \pm 0.26^a$

注: 同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ( $P < 0.05$ )。

## 2.4 不同提取方法制备甘薯淀粉的颗粒特性

### 2.4.1 甘薯淀粉颗粒形貌观察

常温静置法、传统磋磨 -CaCl<sub>2</sub> 协同法、剪切乳化法最佳工艺参数下提取甘薯淀粉的颗粒形貌见图 7b~7d, 并以传统磋磨法提取甘薯淀粉作为对照 (图 7a)。结果显示, 所有甘薯淀粉颗粒均呈圆形、椭圆形、多边形和铃铛状, 表面相对光滑, 说明不同提取方法所得甘薯淀粉的颗粒形貌没有显著差异<sup>[30]</sup>。但从甘薯淀粉颗粒大小来看, 剪切乳化法提取甘薯淀粉的粒径小于其他三种方法。

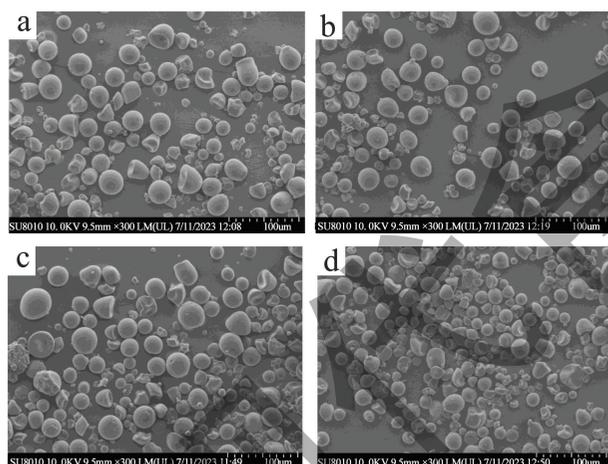


图 7 不同提取工艺最佳参数下制备甘薯淀粉的扫描电子显微镜图 ( $\times 300$ )

Fig.7 Scanning electron microscope diagram of sweet potato starch obtained under the optimized parameters from different extraction methods ( $\times 300$ )

注: a: 传统磋磨法提取甘薯淀粉, b: 常温静置法提取甘薯淀粉, c: 传统磋磨 -CaCl<sub>2</sub> 协同法提取甘薯淀粉, d: 剪切乳化法提取甘薯淀粉。

### 2.4.2 甘薯淀粉的粒径

从表 2 中可以得知, 不同提取方法制备甘薯淀粉颗粒的中位径大小 ( $D_{50}$ ) 依次为: 传统磋磨法 $\approx$ 常温静置法 $>$ 传统磋磨 -CaCl<sub>2</sub> 协同法 $>$ 剪切乳化法。此外, 常温静置法提取甘薯淀粉的体积平均径

( $D_{4,3}$ ) 和面积平均径 ( $D_{3,2}$ ) 均最大, 分别为 23.57 和 8.92  $\mu\text{m}$ , 其次为传统磋磨、传统磋磨 -CaCl<sub>2</sub> 协同法, 最小的是剪切乳化法提取甘薯淀粉 (22.02 和 8.53  $\mu\text{m}$ )。图 8 是不同提取方法制备甘薯淀粉颗粒的粒径分布曲线图, 也可以看出剪切乳化处理所得甘薯淀粉峰值出现在粒径 16.70~21.28  $\mu\text{m}$  处, 低于其他提取方法所得淀粉, 结果与表 2 相对应。侯淑瑶等<sup>[31]</sup>采用均质压力 80 MPa、均质次数为 25 次将甘薯淀粉的平均粒径从 11.89  $\mu\text{m}$  降至 214.3 nm, 说明剪切乳化法产生的机械力可以减小甘薯淀粉的粒径, 上述结果与 SEM 图像的结果对应。

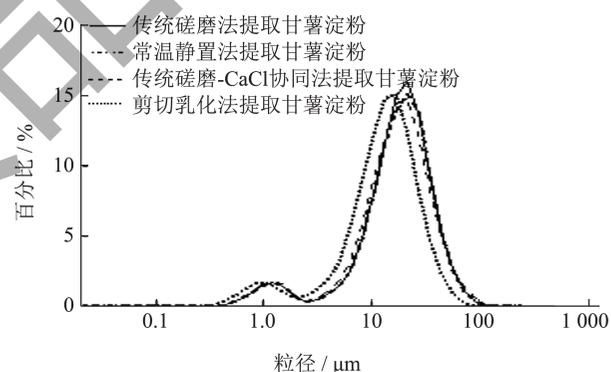


图 8 不同提取工艺最佳参数下制备甘薯淀粉的粒度分布曲线图  
Fig.8 Particle size distribution curves of sweet potato starch obtained under the optimized parameters from different extraction methods

### 2.4.3 甘薯淀粉的晶体结构

淀粉晶体类型可分为 A、B 和 C 型, 根据 XRD 图谱, A 型晶体在 15°、17°、18° 和 23° 处出现明显的衍射峰, B 型晶体在 5.6° 处有明显的特征峰, 在 15°、20°、22° 和 24° 处有弱衍射峰, C 型晶体则同时含有 A 型和 B 型晶体的衍射峰。另外, C 型晶体进一步可分为 C<sub>A</sub>、C<sub>B</sub> 和 C<sub>C</sub> 型, 这取决于 A、B 型晶体的相对含量。例如, C<sub>C</sub> 型晶体在 17° 和 23° 处表现出强烈的衍射峰, C<sub>B</sub> 型晶体在 5.6° 和 15° 处则呈现较弱的衍射峰, 与 C<sub>C</sub> 型相比, C<sub>A</sub> 型淀粉在 18° 处呈现一个肩峰<sup>[32]</sup>。图 9 为采用常温静

置法、传统磋磨-CaCl<sub>2</sub>协同法、剪切乳化法最佳工艺参数下提取甘薯淀粉的X-射线衍射图谱,可以反映甘薯淀粉的晶型和结晶度,并以传统磋磨法提取甘薯淀粉作为对照。结果表明,所有甘薯淀粉样品在15°、17°、18°、23°附近出现了明显的衍射峰,且在5.6°处未出现衍射峰,这表明所有甘薯淀粉均具有典型的A型晶体结构<sup>[23]</sup>。此外,上述4种方法提取甘薯淀粉的结晶度差异不显著,分别为30.21%、29.54%、30.52%和30.35%,说明4种提取方法并未对淀粉的晶体结构造成影响。Nie<sup>[33]</sup>等采用碱法、超声法、酶法提取青稞淀粉,也发现其对淀粉的晶形结构没有产生影响。

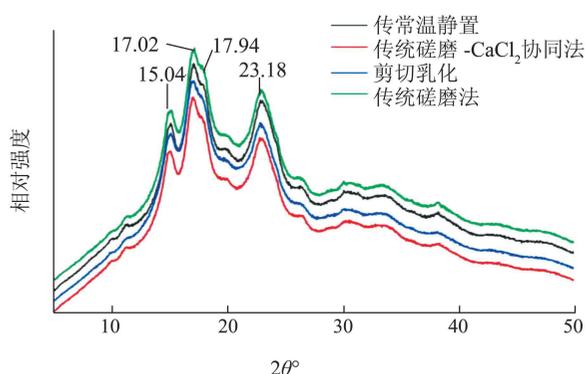


图9 不同提取工艺最佳参数下制备甘薯淀粉的X射线衍射图

**Fig.9 X-ray diffraction patterns of sweet potato starch obtained under the optimized parameters from different extraction methods**

## 2.5 甘薯淀粉的理化特性

### 2.5.1 溶解度、膨胀势

淀粉的溶解度和膨胀势可反映淀粉分子与水分子之间相互作用的大小,溶解度反映淀粉在水中的溶解程度,膨胀势代表淀粉颗粒吸水溶胀的能力,淀粉的溶解度和膨胀势受到多个因素的影响,包括温度、颗粒内部结合力的大小、直链及支链淀粉含量以及淀粉链长等<sup>[34]</sup>。由图10a所示,传统磋磨-CaCl<sub>2</sub>协同法提取甘薯淀粉的膨胀势最高(6.02 g/g),其次为常温静置法(5.04 g/g)、传统磋磨法(4.99 g/g),剪切乳化法提取甘薯淀粉的膨胀势最低(4.64 g/g)。这可能是因为CaCl<sub>2</sub>中的Ca<sup>2+</sup>与淀粉分子中的羟基(-OH)之间形成氢键和离子键,加强了淀粉分子与水分子之间的吸引力,使淀粉分子更容易在水中膨胀<sup>[35]</sup>。同时,图10b所示,传统磋磨-CaCl<sub>2</sub>协同法提取甘薯淀粉的溶解度最低(6.02%),而其他三种方法提取甘薯淀粉的溶解度无显著差异。说明CaCl<sub>2</sub>降低了淀粉的溶解度,这

可能是因为淀粉与Ca<sup>2+</sup>之间的静电相互作用减少了直链淀粉的浸出,从而降低了淀粉颗粒的溶解度,这也与表1中该方法制备淀粉中含有较高的直链淀粉相一致<sup>[36]</sup>。

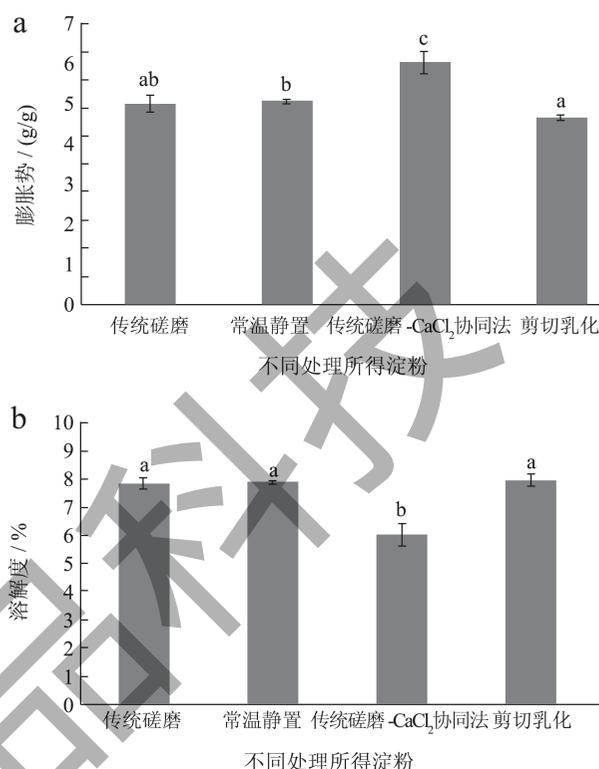


图10 不同提取工艺最佳参数下制备甘薯淀粉的膨胀势(a)和溶解度(b)

**Fig.10 Swelling power (a) and solubility (b) of sweet potato starch obtained under the optimized parameters from different extraction methods**

### 2.5.2 甘薯淀粉的糊化特性

淀粉的糊化特性是反映淀粉品质的重要指标,并影响淀粉的加工性能,主要包括峰值黏度、谷值黏度、崩溃黏度、最终黏度及回生值。峰值黏度是指淀粉吸水迅速膨胀,当温度达到一定值时,淀粉黏度达到最大,此时淀粉颗粒吸水膨胀到极限,其值越大说明淀粉糊黏度越大,热稳定性越差,更易吸水膨胀<sup>[37]</sup>。谷值黏度则表示淀粉颗粒在高度膨胀后的完整性,以及淀粉对剪切力和高温的抵抗能力<sup>[38]</sup>。崩溃黏度反映了淀粉颗粒的损伤程度和淀粉糊在加热过程中的稳定性,其与淀粉糊的热稳定性之间存在显著关联,崩溃黏度数值越低,说明淀粉糊耐高温和耐剪切的能力越强;当温度降低,淀粉分子发生重排,黏度增大,直到最终黏度;回生值代表最终黏度与谷值黏度之间的差异,用以揭示淀粉糊的回生特性<sup>[39,40]</sup>。

表 3 不同提取工艺最佳参数下制备甘薯淀粉的糊化特性

Table 3 Pasting characteristics of sweet potato starch obtained under the optimized parameters from different extraction methods

样品	PV/cP	TV/cP	BD/cP	FV/cP	SB/cP
传统磋磨法提取甘薯淀粉	1 634.21 ± 22.05 <sup>d</sup>	1 436.67 ± 12.67 <sup>c</sup>	289.78 ± 12.10 <sup>b</sup>	2 011.67 ± 4.00 <sup>d</sup>	631.31 ± 49.00 <sup>bc</sup>
常温静置法提取甘薯淀粉	1 618.66 ± 12.03 <sup>c</sup>	1 088.00 ± 3.21 <sup>b</sup>	330.66 ± 8.25 <sup>b</sup>	1 967.66 ± 11.46 <sup>c</sup>	649.66 ± 7.13 <sup>c</sup>
传统磋磨 -CaCl <sub>2</sub> 协同法提取甘薯淀粉	1 500.41 ± 20.56 <sup>b</sup>	1 100.50 ± 42.5 <sup>b</sup>	399.50 ± 22.50 <sup>c</sup>	1 683.50 ± 11.50 <sup>b</sup>	583.27 ± 24.51 <sup>b</sup>
剪切乳化法提取甘薯淀粉	919.66 ± 4.92 <sup>a</sup>	720.33 ± 17.70 <sup>a</sup>	199.33 ± 24.44 <sup>a</sup>	940.30 ± 7.78 <sup>a</sup>	219.66 ± 24.51 <sup>a</sup>

注：同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ( $P < 0.05$ )；淀粉样品的黏度参数定义为峰值黏度 (PV)、谷值黏度 (TV)、崩溃黏度 (BD)、最终黏度 (FV) 和回生值 (SB)。

表 4 不同提取工艺最佳参数下制备甘薯淀粉的热特性

Table 4 Thermal properties of sweet potato starch obtained under the optimized parameters from different extraction methods

样品	$T_0/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J/g})$
传统磋磨法提取甘薯淀粉	61.14 ± 0.33 <sup>a</sup>	74.65 ± 0.75 <sup>ab</sup>	87.99 ± 0.75 <sup>a</sup>	13.44 ± 0.27 <sup>a</sup>
常温静置法提取甘薯淀粉	63.24 ± 3.48 <sup>ab</sup>	73.69 ± 0.17 <sup>a</sup>	87.72 ± 0.66 <sup>a</sup>	15.28 ± 0.76 <sup>a</sup>
传统磋磨 -CaCl <sub>2</sub> 协同法提取甘薯淀粉	65.95 ± 0.56 <sup>ab</sup>	75.17 ± 0.90 <sup>b</sup>	87.27 ± 1.55 <sup>a</sup>	17.97 ± 0.24 <sup>b</sup>
剪切乳化法提取甘薯淀粉	61.96 ± 0.39 <sup>b</sup>	73.73 ± 0.07 <sup>a</sup>	87.64 ± 0.29 <sup>a</sup>	14.07 ± 2.60 <sup>a</sup>

注：同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ( $P < 0.05$ )；淀粉样品的糊化参数定义为起始温度 ( $T_0$ )、峰值温度 ( $T_p$ )、结束温度 ( $T_c$ ) 和焓变 ( $\Delta H$ )。

不同提取方法所得甘薯淀粉的糊化特性参数见表 3，结果表明，与其他 3 种甘薯淀粉相比，剪切乳化法提取甘薯淀粉的峰值黏度、谷值黏度、崩溃黏度、最终黏度及回生值均显著降低 ( $P < 0.05$ )，这是因为剪切乳化处理产生的机械力导致淀粉颗粒粒径降低，减弱了淀粉分子间及淀粉分子与水分子的相互作用力，阻碍了淀粉分子在水中的膨胀程度，从而降低黏度，这也与该淀粉粒径最小、膨胀势最低的结果相一致<sup>[41]</sup>。此外，剪切乳化处理所产生的机械力可能破坏淀粉颗粒内部结构，使淀粉链部分断裂，导致淀粉分子间相互聚集和交联缠绕形成双螺旋的能力减弱<sup>[42]</sup>，这也与 2.2 中剪切乳化法提取甘薯淀粉中破损淀粉含量较高相对应。上述结果说明剪切乳化法所得甘薯淀粉在加热糊化过程中的热稳定性更高，冷却过程中更易发生回生，有利于形成结构稳定性更强的凝胶。此外，传统磋磨法、常温静置法提取甘薯淀粉的峰值粘度、谷值粘度、崩溃粘度、回生值等均较大，说明其抗剪切和耐热性较差，回生速率慢<sup>[43]</sup>。Qiu 等<sup>[44]</sup>研究也发现，当均质压力达到 100 MPa 时，小麦淀粉的初始糊化温度、糊化峰值和焓值都有所下降。

### 2.5.3 甘薯淀粉的热力学特性

不同提取方法所得甘薯淀粉的热力学特性如表 4 所示。 $T_0$  和  $T_p$  的差异主要反映了淀粉颗粒内部有序结构的均匀性， $T_0$  和  $T_c$  分别代表颗粒中最

弱和最强的晶体的熔化温度， $\Delta H$  表示糊化过程中淀粉颗粒解离双螺旋所需能量的量度，与淀粉颗粒内分子有序的损失程度有关<sup>[45]</sup>。可以看出，传统磋磨 -CaCl<sub>2</sub> 协同法提取甘薯淀粉的  $T_0$ 、 $T_p$  和  $\Delta H$  均最大，与其他淀粉差异显著 ( $P < 0.05$ )，说明糊化该淀粉需要更高的温度。Viturawong 等<sup>[46]</sup>研究结果表明，添加 CaCl<sub>2</sub> 可以增加黄原胶与大米淀粉复合物样品的  $T_0$  和  $T_p$  值。这可能是由于甘薯淀粉颗粒中弱结晶结构被破坏，Ca<sup>2+</sup> 与淀粉之间的交联增强了淀粉颗粒的双螺旋结构<sup>[47]</sup>。

## 3 结论

本文采用常温静置法、传统磋磨 -CaCl<sub>2</sub> 协同法和剪切乳化法提取甘薯淀粉，通过单因素试验结合环境扫描电镜、透射电子显微镜、激光共聚焦显微镜观察提取淀粉后甘薯渣的微观结构，确定每种工艺提取甘薯淀粉的最佳参数分别为：常温静置 3 d，CaCl<sub>2</sub> 质量分数 0.5% ( $m/m$ ) 提取 16 h，剪切乳化速率 22 000 r/min 下提取 15 min，甘薯淀粉得率分别为 10.89%、11.56% 和 18.81%，相较于传统磋磨法分别提高了 2.71%、3.38% 和 10.63%。同时，常温静置法、传统磋磨 -CaCl<sub>2</sub> 协同法和剪切乳化法并未改性甘薯淀粉的颗粒形貌及晶体结构。此外，传统磋磨 -CaCl<sub>2</sub> 协同法制备甘薯淀粉的膨胀势最高、溶解度最低；剪切乳化法提取甘薯淀粉的粒径最小，

糊化特性、 $\Delta H$ 均最低,说明该淀粉在加热糊化过程中的热稳定性更高,冷却过程中更易于老化回生,有利于形成结构稳定性强的淀粉凝胶。后续可进一步探究剪切乳化法制备甘薯淀粉在粉条、粉丝、淀粉膜等不同领域的应用研究,为其应用于产业化提供指导。

### 参考文献

- [1] 季蕾蕾,孙红男,木泰华.12种甘薯淀粉产品的理化和卫生指标分析[J].食品科技,2019,44(3):245-251,255.
- [2] FAOSTAT. Production of sweet potato[DB/OL](2021-10-06)[2023-08-25].http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/browse/Q/QC/E
- [3] ABEGUNDE O K, MU T H, CHEN J W, et al. Physicochemical characterization of sweet potato starches popularly used in Chinese starch industry [J]. Food Hydrocolloids, 2013, 33(2): 169-177.
- [4] 刘文鼎,曾凡逵.酸浆法生产粉丝的工艺特点及其设备改进[J].农业工程技术,2016,36(23):61-64.
- [5] ZHU L L, MU T H, MA M M, et al. Nutritional composition, antioxidant activity, volatile compounds, and stability properties of sweet potato residues fermented with selected lactic acid bacteria and bifidobacterial [J]. Food Chemistry, 2021, 374(16): 131500.
- [6] WANG N, SHI N N, FEI H L, et al. Physicochemical, structural, and digestive properties of pea starch obtained via ultrasonic-assisted alkali extraction [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 89: 106136.
- [7] 刘婷婷,宋春春,王大为.微波辅助提取马铃薯淀粉及其特性研究[J].食品科学,2013,34(6):106-111.
- [8] SAMUTSRI W, SUPHANTHARIKS M. Effect of salts on pasting, thermal, and rheological properties of rice starch in the presence of non-ionic and ionic hydrocolloids [J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 87(2): 55.
- [9] 彭小燕,蔡香珍,叶丹榕,等.高速剪切辅助碱法从龙眼核中提取淀粉的研究[J].农产品加工,2019,7:27-30.
- [10] 邓福明.酸浆法与旋流分离法制备甘薯淀粉的物化特性及粉条品质比较研究[D].北京:中国农业科学院,2012.
- [11] MOHAMED NOOR MOHAMED HIZAM, NGADI NORZITA, SUHAIDI AMIRA NADZIRAH, et al. Response surface optimization of ultrasound-assisted extraction of sago starch from sago pith waste [J]. Starch-Stärke, 2022, 74(1-2): 2100012.
- [12] MA S, LI L, WANG X X, et al. Effect of mechanically damaged starch from wheat flour on the quality of frozen dough and steamed bread [J]. Food Chemistry, 2016, 202: 120-124.
- [13] CENINI V, GALLAGHER L, MCKERR G, et al. A novel approach for dynamic in-situ surface characterisation of milk protein concentrate hydration and reconstitution using an environmental scanning electron microscope [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 108: 105881.
- [14] KONG J, ZHANG Y, JU J, et al. Antifungal effects of thymol and salicylic acid on cell membrane and mitochondria of *Rhizopus stolonifer* and their application in postharvest preservation of tomatoes [J]. Food Chemistry, 2019, 285(1): 380-388.
- [15] LIU Z, WANG C, LIAO X, et al. Measurement and comparison of multi-scale structure in heat and pressure treated corn starch granule under the same degree of gelatinization [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 108: 106081.
- [16] SUJKAM, JAMROZ J. Ultrasound-treated starch: SEM and TEM imaging, and functional behavior [J]. Food Hydrocolloids, 2013, 31(2): 413-419.
- [17] WALIULLAH M H, MUT H, MAM M, et al. Effects of particle size on structural, physicochemical, and functional properties of potato residue from starch isolation and quality characteristics of residue-based starch noodles [J]. Food Science and Technology International, 2021, 27(5): 392-403.
- [18] LIN Y, LIU L, LI L, et al. Properties and digestibility of a novel porous starch from lotus seed prepared via synergistic enzymatic treatment [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 194: 144-152.
- [19] WANG H, XU K, MA Y, et al. Impact of ultrasonication on the aggregation structure and physicochemical characteristics of sweet potato starch [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 63: 104868.
- [20] SINGH M, ADEDEJI A A. Characterization of hydrothermal and acid modified proso millet starch [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 79: 21-26.
- [21] SONGZ, ZHONG Y, TIANW, et al. Structural and functional characterizations of  $\alpha$ -amylase-treated porous popcorn starch [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 108: 105606.
- [22] 郑梓威,王馨,吴孟仙,等.响应面优化生物法提取玉米淀粉的研究[J].中国食品添加剂,2023,34(6):101-108.
- [23] ZHANG H C, HE F L, WANG T, et al. Insights into the interaction of  $\text{CaCl}_2$  and potato starch: Rheological, structural and gel properties [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 220(8): 135.
- [24] HEDAYATIS, MAJZOOBIM, SHAHIDIF, et al. Effects of NaCl and  $\text{CaCl}_2$  on physicochemical properties of pregelatinized and granular cold-water swelling corn starches [J]. Food Chemistry, 2016, 213(7): 501-608.
- [25] JIANG X C, JIANG T, GAN L, et al. The plasticizing mechanism and effect of calcium chloride on starch/poly(vinyl alcohol) films [J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 90(4): 1677-1684.

- [26] 彭小燕,蔡香珍,叶丹榕,等.高速剪切辅助碱法从龙眼核中提取淀粉的研究[J].农产品加工,2019,7:27-30.
- [27] LIU H, FAN H, CAO R, et al. Physicochemical properties and *in vitro* digestibility of sorghum starch altered by high hydrostatic pressure [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 92(1): 753-760.
- [28] OOSTEN B J. Explanations for phenomena arising from Starch-electrolytes interactions [J]. Starch-Starke, 1983, 35(5): 166-169.
- [29] 宋安琪.不同粮食淀粉对重组面粉特性及面条品质的影响研究[D].郑州:河南工业大学,2023.
- [30] YANG Y, JIAO A, LIU Q, et al. The effects of removing endogenous proteins,  $\beta$ -glucan and lipids on the surface microstructure, water migration and glucose diffusion *in vitro* of starch in highland barley flour [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 127: 107457.
- [31] 侯淑瑶,代养勇,刘传富,等.高压均质法制备甘薯纳米淀粉及其表征[J].食品工业科技,2017,38(12):233-238,242.
- [32] 郭可.甘薯块根C-型淀粉结构特性及其对土壤温度变化的响应研究[D].扬州:扬州大学,2023.
- [33] NIE M, PIAO C H, LI J. et al. Effects of different extraction methods on the gelatinization and retrogradation properties of highland barley starch [J]. Molecules, 2022, 27: 6524.
- [34] 季蕾蕾,木泰华,马梦梅.非热物理场辅助酶法制备烘焙用淀粉基脂肪模拟物的理化特性比较[J].现代食品科技,2022,38(12):195-203.
- [35] 吴江燕,沈群.金属离子对自然沉降绿豆淀粉理化性质的影响[J].食品科技,2008,7:47-50.
- [36] SAMUTSRI W, SUPHANTHARIKA M. Effect of salts on pasting, thermal, and rheological properties of rice starch in the presence of non-ionic and ionic hydrocolloids [J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 87: 1559-1568.
- [37] ZHANG H Y, SUN H N, MA M M, et al. Dough rheological properties, texture, and structure of high-moisture starch hydrogels with different potassium and calcium-based compounds [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 137: 108337.
- [38] GALKOWSKAD, JUSZAK L. Effects of amino acids on gelatinization, pasting and rheological properties of modified potato starches [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 92: 143-154.
- [39] 王林.淀粉的糊化与凝胶特性及食用品质研究[J].保鲜与加工,2021,21(2):67-73.
- [40] 张正茂,王志华,颜永斌.不同来源淀粉的糊化特性研究[J].食品工业,2016,37(6):141-145.
- [41] HU A, LI Y, ZHENG J. Dual-frequency ultrasonic effect on the structure and properties of starch with different size [J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 106: 254-262.
- [42] TAN X, ZHANG B, CHEN L, et al. Effect of planetary ball-milling on multi-scale structures and pasting properties of waxy and high-amylose cornstarches [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2015, 30: 198-207.
- [43] RUOYU J, JULIAN D M, LEI D, et al. Improvement of pasting and gelling properties of potato starch using a direct vapor-heat moisture treatment [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 219(8): 1197-1207.
- [44] QIU S, LI Y, CHEN H, et al. Effects of high-pressure homogenization on thermal and electrical properties of wheat starch [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 128(3): 53-59.
- [45] GUNARATNE A, HOOVERR. The effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches [J]. Carbohydrate Polymers, 2001, 49(2): 425-437.
- [46] VITURAWONG Y, ACHAYUTHAKAN P, SUPHANTHARIKA M. Gelatinization and rheological properties of rice starch/xanthan mixtures: Effects of molecular weight of xanthan and different salts [J]. Food Chemistry, 2008, 111(2): 22-27.
- [47] WOJCIECH C, PIOTR T. Complexes of amylose and amylopectin with multivalent metal salts [J]. Journal of Inorganic Biochemistry, 2004, 98(12): 2039-2051.