

微波处理对豌豆淀粉结构、理化性质及消化性的影响

王佳萌, 孙慧君, 徐艺璇, 周裔彬, 余振宇*

(安徽农业大学食品与营养学院, 安徽省特色农产品高值化利用工程研究中心, 农业农村部江淮农产品精深加工与资源利用重点实验室, 茶树种质创新与资源利用全国重点实验室, 安徽合肥 230036)

摘要: 为探究微波处理对豌豆淀粉结构、理化及消化性的影响。该文以豌豆淀粉(PS)为原料, 在280 W的微波条件下分别处理30、60、90、120 s, 分析微波处理后的豌豆淀粉的粒径、微观结构、晶体结构、有序结构、热力学特性、流变学特性和消化特性。结果表明: 随着微波处理时间的延长, 豌豆淀粉颗粒吸水膨胀, 粒径增大; 拉曼光谱480 cm⁻¹处的半峰宽从16.20上升至20.59; 红外吸收峰比值 $R_{1047/1022}$ 从0.58下降至0.36; 结晶度从23.74%降低到8.46%, 长程有序性降低; 在水合性质方面, 豌豆淀粉的吸水指数、膨胀度及冷水溶解度显著增加, 分别由1.94 g·g⁻¹、1.91%、2.04%增加到5.34 g·g⁻¹、12.34%、7.81%, 淀粉的糊化参数明显下降, 热焓值由6.02 J·g⁻¹下降至消失。微波处理后淀粉的偏光特性逐渐消失, 储能模量与损耗模量均降低; 在消化特性方面, RS含量由30.89%下降到10.09%。以上结果表明, 微波处理可以改进豌豆淀粉的分子结构, 同时淀粉的溶解性和膨胀性提升; 糊化温度降低; 热稳定性增大; 改善淀粉的黏弹性。能够在绿色食品中可作增稠剂、稳定剂和营养补充剂; 在绿色材料领域, 用于生物塑料和包装材料, 增强其可降解性和机械性能。

关键词: 豌豆淀粉; 微波处理; 结构; 理化性质; 消化性

文章编号: 1673-9078(2026)07-104-113

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.7.0607

Effects of Microwave Treatment on the Structure, Physicochemical Properties, and Digestibility of Pea Starch

WANG Jiameng, SUN Huijun, XU Yixuan, ZHOU Yibin, YU Zhenyu*

(College of Food and Nutrition, Anhui Provincial High Value Utilization Engineering Research Center for Characteristic Agricultural Products, Key Laboratory of Deep Processing and Resource Utilization of Jianghuai Agricultural Products, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Key Laboratory of Tea Germplasm Innovation and Resource Utilization, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: Pea starch (PS) was subjected to microwave treatment at 280 W for 30, 60, 90, and 120 s to investigate the effects of microwave treatment on its structure, physicochemical properties, and digestibility. Subsequently, particle size, microstructure, crystal structure, ordered structure, thermodynamic properties, rheological properties, and digestion characteristics were analyzed. The results showed that because of water absorption, PS particles expanded as microwave treatment duration increased, leading to increased particle size. The Raman spectrum half-width at 480 cm⁻¹ increased from 16.20 to 20.59, whereas the infrared absorption peak ratio $R_{1047/1022}$ decreased from 0.58 to 0.36. Crystallinity decreased from 23.74% to 8.46%, indicating a reduction in long-range

引文格式:

王佳萌,孙慧君,徐艺璇,等.微波处理对豌豆淀粉结构、理化性质及消化性的影响[J].现代食品科技,2026,42(7):104-113.

WANG Jiameng, SUN Huijun, XU Yixuan, et al. Effects of microwave treatment on the structure, physicochemical properties, and digestibility of pea starch [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(7): 104-113.

收稿日期: 2025-04-29; 修回日期: 2025-07-07; 接受日期: 2025-07-12

基金项目: 安徽农业大学稳定与人才引进项目(rc352008); 安徽省高等学校科学研究重点项目(2024AH050479); 安徽农业大学茶树种质创新与资源利用全国重点实验室开放基金资助项目(NKLT0F20240123)

作者简介: 王佳萌(2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品化学、农产品精深加工, E-mail: 3308548917@qq.com

通讯作者: 余振宇(1992-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 食品化学、农产品精深加工, E-mail: yuzhenyuHF@163.com

order. Hydration properties were significantly improved, with water absorption index, swelling degree, and cold-water solubility increasing from $1.94 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$, 1.91%, and 2.04% to $5.34 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$, 12.34%, and 7.81%, respectively. Gelatinization parameters were markedly reduced, with gelatinization enthalpy decreasing from $6.02 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ to zero. After microwave treatment, PS birefringence was gradually lost; modulus and loss moduli decreased. Digestibility analysis revealed a reduction in resistant starch content from 30.89% to 10.09%. These findings suggest that microwave treatment modifies PS molecular structure, thereby enhancing its solubility and swelling power, reducing gelatinization temperature, increasing thermal stability, and improving its viscoelasticity. Therefore, microwave-treated PS may serve as a potential thickener, stabilizer, and nutrient supplement in green foods. In the green materials sector, PS can be utilized in bioplastics and packaging materials to enhance biodegradability and mechanical properties.

Key words: pea starch; microwave treatment; structure; physicochemical properties; digestibility

豌豆作为世界上第二大食用豆类，因高直链淀粉含量而著称，此外，其抗性淀粉含量高达至7.9%~22.2%。这种独特的组成使豌豆淀粉具有很高的应用潜力，被用作制造低血糖指数功能性食品的原料。豌豆淀粉在烹饪中常用于勾芡和制作凉粉、凉皮等食品。由于其较好的脆性，豌豆淀粉也常用于炸酥肉，给人酥脆的口感。此外，豌豆淀粉还可以用于制作糕点、糖果等食品，并且在制作豆腐等豆制品时也有应用；豌豆淀粉也可以作为增稠剂和乳化剂使用于饮料、酱料等食品中，提升食品的质地和口感。与玉米淀粉和马铃薯淀粉相比，豌豆淀粉易于提取且价格低廉而被广泛应用^[1]，但天然豌豆淀粉存在抗剪切性差、热稳定性低等缺陷，需要通过理化或酶改性的方法来改变淀粉的性质，扩大其应用范围^[2]。

目前，常用的物理改性淀粉的方法包括挤压、微波、辐射、超声等^[3]。微波处理因高效节能、绿色环保等特点备受关关注^[4,5]。微波作用机制研究表明，通过电磁场引发淀粉分子振动摩擦产热，导致氢键断裂和结晶区重组。这种作用效果受淀粉的种类、直链淀粉含量、含水量等影响，从而会影响淀粉的糊化程度和抗消化性等性质。Oyeyinka等^[6]指出，微波作用能破坏淀粉晶体结构，降低其结晶度，进而促使淀粉糊化温度上升；武云娇等^[7]也发现，微波处理破坏了淀粉的有序结晶结构，导致其偏光十字现象消失。以上研究共同揭示了微波对淀粉多尺度结构的调控机制。因豌豆淀粉含有较高的直链淀粉，一般的改性方法很难使其完全糊化，而微波处理能够使其完全糊化，但在前人研究微波改性淀粉中多研究的是功率或水分含量对豌豆淀粉的影响，所以，该研究采用不同微波时间处理豌豆淀粉。此外，微波处理后的豌豆淀粉其溶解性和膨胀性得到提升，这使得它可以作为优质的增稠剂和稳定剂应用于食品中，如在低糖食品、果汁饮料中应用。

因此，本文采用不同时间微波处理豌豆淀粉，探究微波处理对其结构、理化性质、消化特性的影响，

阐述微波处理对豌豆淀粉的影响机制，推动其在绿色材料及功能食品领域的应用。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

豌豆淀粉（蛋白质:0.18 g/100 g；脂肪:0.23 g/100 g；直链淀粉:33.17 g/100 g），皖神面制品有限公司；溴化钾，上海阿拉丁生化科技有限公司；氢氧化钠、碘、碘化钾，国药集团有限公司。

1.2 仪器与设备

Nicolet6700型傅立叶变换红外光谱仪（FT-IR），赛默飞世尔科技公司；Mastersizer2000型激光粒度仪（LPSA），英国Malvern公司；G70F20CN1L-DG型微波加热设备，广东格兰仕微波生活电器制造有限公司；BHS-2型偏光显微镜（PLM），日本Olympus公司；S-4800冷场发射扫描电子显微镜，日本日立Hitachi公司；D/max型X-射线衍射仪（XRD），日本理学电机；TecMaster型快速黏度分析仪（RVA）、DSC-8000差示扫描量热仪、激光共聚焦显微拉曼光谱（FRA），英国Renishaw公司；紫外分光光度计（LAMBDA），美国Perkin Elme公司；DHR-1旋转流变仪，美国TA仪器公司有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 豌豆淀粉微波处理

取15 g干基豌豆淀粉，用蒸馏水配置成30 wt.%的悬浮液，放在微波专用的容器中，微波功率设置为280 W，微波处理的时间分别为30、60、90、120 s，微波处理后的样品放在-80℃冰箱保存5 h，进行冷冻干燥处理，冻干后的样品放入粉碎机粉碎并过100目筛网过筛，即可得到微波处理后的豌豆淀粉。未处理的豌豆淀粉为对照组。

1.3.2 颗粒形态观察

用棉棒挑取少量样品, 均匀地涂覆在双面胶上, 放入表面处理机中喷金处理 30 s。载物台取出后置于扫描电子显微镜下, 分别在 1 000 倍和 2 500 倍放大倍数下观察淀粉的颗粒形貌。

1.3.3 偏光特性的测定

称取 0.1 g 干基豌豆淀粉样品制备成 1 wt.% 的悬浮液, 使用滴管将样品均匀涂布于载玻片表面, 覆盖盖玻片后转移至偏光显微镜载物台。记录样品在偏振光场中呈现的双折射特征。

1.3.4 粒径的测定

经微波处理后的淀粉悬浮液经震荡充分混匀后, 采用激光粒度仪进行粒度表征以评估颗粒尺寸分布特性。测试过程中选用手动操作模式, 参数配置时设定目标颗粒体系为淀粉乳液, 纯水为分散剂, 分析模型为通用模型。

1.3.5 晶体结构的测定

根据 Ahmad 等^[8]的设计思路, 通过 X-射线衍射法 (XRD), 判断豌豆淀粉的晶体类型并计算相对结晶度。取适量淀粉样品平铺在铜片中央, 保持样品平整并刮去周边残余部分, 将铺有样品的铜片放入 X 射线衍射仪的凹槽中, 采取步进扫描法, 利用 X 射线的衍射现象测定淀粉的晶体结构。按照刘敏等^[9]的方法计算样品的结晶度, 并通过 Origin2021 软件拟合得到。

1.3.6 傅立叶变换红外光谱测定

根据 Lv 等^[10]的方法, 并作适当修改。称量 1 mg 干基豌豆淀粉与 100 mg KBr 粉末于玛瑙研钵中充分磨研。在 20 MPa 压力条件下压制成透明薄片, 使用傅里叶变换红外光谱仪进行检测。

1.3.7 拉曼光谱测定

根据 Wang 等^[11]的方法, 测定样品的拉曼光谱。将样品在室温下平衡 24 h 后, 取少量放于玻璃样品舱中, 用激光发射器扫描样品, 并保持样品于激光光束垂直。

1.3.8 吸水指数的测定

准确量取 0.2 g 干基淀粉样品置于预称重的 50 mL 离心管中。定量加入 20 mL 纯水后, 于常温条件下涡旋振荡 (200 r·min⁻¹, 10 min) 实现固液充分混合。混合体系经高速冷冻离心机 (4 500 r·min⁻¹, 15 min) 分级分离后, 去除上清液, 称重残留沉淀质量。吸水指数用下列计算公式得出:

$$B = \frac{m_3 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

B—吸水指数 (WAI), %;

m_1 —所用淀粉质量, g;

m_2 —样品与离心管的总质量, g;

m_3 —剩余沉淀和离心管的总质量, g。

1.3.9 透明度测定

取 1 g 干基豌豆淀粉制备成 1 wt.% 的悬浮液于烧杯中, 在沸水中加热并搅拌 30 min, 冷却至室温。使用紫外分光光度计在 620 nm 波长处测量淀粉糊的透光率。

1.3.10 糊化特性的测定

称取 3 g 干基豌豆淀粉样品置于快速粘度分析仪专用铝制样品池中, 加入 25 mL 纯水, 采用配套旋转桨叶进行预分散处理, 设定仪器为 standard1 进行测定。

1.3.11 热力学特性和糊化度的测定

参照 Zhang 等^[12]方法测定淀粉的热力学特性, 并稍作修改。称取 2 mg 干基豌豆淀粉样品置于特定的液体铝坩埚中, 加 6 μ L 去离子水后, 用压片机将其密封后, 在 4 $^{\circ}$ C 条件下密封放置 12 h。仪器参数设置为: 检测区间 30~110 $^{\circ}$ C, 加热速度 10 $^{\circ}$ C·min⁻¹。以空白坩埚作为对照, 测定起始温度 (T_0)、峰值温度 (T_p)、终止温度 (T_c) 及相变焓 (ΔH) 等热力学参数。

1.3.12 冷水溶解度和膨胀度的测定

称取 0.2 g 干基豌豆淀粉样品与 10 mL 去离子水于 15 mL 离心管中, 记样品和去离子水总质量。在恒温条件下, 使用涡旋振荡仪持续混合 20 min 确保充分分散后, 以 4 000 r·min⁻¹ 离心力进行固液分离 (10 min)。将上清液定量转移至 105 $^{\circ}$ C 干燥箱中恒重处理, 记残留物质量; 同步收集离心管底部沉淀物并称重。冷水溶解率 (S) 计算见式 (2), 膨胀度 (SP) 计算见式 (3)。

$$S = \frac{m_2}{m_1} \times 100\% \quad (2)$$

$$C = \frac{m_3}{m_1 \times (1 - S)} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

S—冷水溶解度, %;

C—膨胀度 (SP), %;

m_1 —样品和去离子水总质量, g;

m_2 —残留物质量, g;

m_3 —离心管底部沉淀物质量, g。

1.3.13 流变特性的测定

实验参数根据 Cabrera 等^[13]的方案进行适当调整。称取 3 g 干基淀粉在烧杯中并加入 25 mL 纯水, 在 95 $^{\circ}$ C 水浴锅中搅拌 20 min, 待样品完全糊化后冷却至室温, 取少量样品均匀涂抹在感应板上, 通过旋转流变仪来测定微波处理后豌豆淀粉的流变学特性。

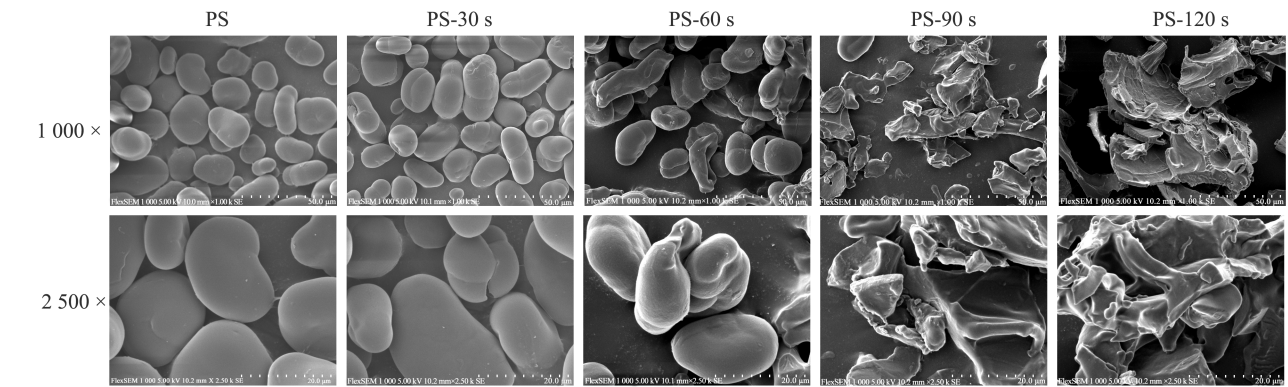


图 1 不同微波处理时间下豌豆淀粉的扫描电镜图

Fig.1 Pea starch SEM photos displaying diverse microwave treatment time conditions

1.3.14 体外消化的测定

根据曾凯骁等^[14]和 Englyst 等^[15]的方法适当修改。取 200 mg 干基淀粉样品放在离心管中，加 15 mL 的醋酸钠缓冲液（pH 值为 5.2）后充分搅拌均匀，在 95 ℃ 水浴条件下加热 30 min。取 5 mL 配制的混合酶溶液（含 α-淀粉酶 100 U·mg⁻¹ 和糖化酶 300 U·mL⁻¹），在 37 ℃ 的恒温水浴锅进行活化。反应 20 min 和 120 min 后，分别取出反应后的 5 mL 液体，立即加入含有 4 mL 无水乙醇的离心管中，以 4 500 r·min⁻¹ 离心 10 min。上清液在 520 nm 波长处测定吸光值。计算公式如下：

$$D_1 = \frac{(G_{120} - G_0) \times 0.9}{E} \times 100\% \tag{4}$$

$$D_2 = \frac{(G_{120} - G_{20}) \times 0.9}{E} \times 100\% \tag{5}$$

$$D_3 = (1 - D_1 - D_2) \times 100\% \tag{6}$$

式中：

- D_1 ——快消化淀粉含量（RDS），%；
- D_2 ——慢消化淀粉含量（SDS），%；
- D_3 ——抗性淀粉含量（RS），%；
- G_0 ——未水解时葡萄糖量，mg；
- G_{20} ——水解 20 min 内释放的葡萄糖量，mg；
- G_{120} ——水解 120 min 内释放的葡萄糖量，mg；
- E ——总淀粉干基质量（TS），mg。

1.3.15 数据处理与分析

实验数据利用 Origin 2021 软件绘图。所有数据均取三次以上重复实验的平均值，利用 SPSS 26.0 软件中的单因素检验进行显著性分析，采用最小显著差异法，结果表示为平均值 ± 标准差， $P < 0.05$ 表示差异显著性。

2 结果与分析

2.1 微波处理对豌豆淀粉结构的影响

2.1.1 微波处理对豌豆淀粉颗粒外观的影响

图 1 为豌豆淀粉在不同微波处理时间条件下呈现的微观结构。从图中可以观察到，未处理的天然豌豆淀粉颗粒表面较为光滑，且大多数呈现为圆形或椭圆形。随着微波处理时间延长，淀粉颗粒表面逐渐被破坏，淀粉之间的界限变的模糊，失去完整的结构。微波处理 90 s 后，淀粉颗粒失去原来的形状，微波处理 120 s 后，淀粉颗粒碎片之间发生团聚形成团聚物。文茜等^[16]在研究微波处理对不同水分含量的板栗淀粉的影响也观察到类似现象，天然板栗淀粉在微波处理后，淀粉颗粒吸水膨胀并发生团聚，且随着水分含量的增加糊化效应更明显，产生这一现象可能是处理过程中产生热能，这些热能使豌豆淀粉部分糊化，致使氢键断裂，颗粒受热吸水膨胀，使部分颗粒碎片聚集在一起形成聚集物^[17]。

2.1.2 微波处理对豌豆淀粉偏十字光影响

淀粉的结晶区与偏光十字紧密相关，而淀粉的结晶区主要由支链淀粉构成，当支链淀粉的含量发生改变时，可能会引发偏光十字的相应变化^[18]。从图 2 可以观察到，未经微波处理的天然豌豆淀粉的偏光十字非常清晰且明亮，但随着微波处理时间持续增加，淀粉的偏十字光逐渐消失且变得模糊。是因为微波处理后使淀粉的结晶区受损，部分支链淀粉裂解，提高了直链淀粉的比例，从而导致淀粉的偏十字光现象消失。陈平生等^[19]、张明^[20]的研究也指出，微波处理会破坏淀粉的晶体区域从而导致偏光十字的消失。

表 1 不同微波处理时间豌豆淀粉粒径参数的影响

Table 1 Effects of different microwave treatment times on pea starch particle size parameters						
样品	$D_{(4.3)}/\mu\text{m}$	$D_{(3.2)}/\mu\text{m}$	$D_{(0.1)}/\mu\text{m}$	$D_{(0.5)}/\mu\text{m}$	$D_{(0.9)}/\mu\text{m}$	$R_{1047/1022}$
PS	$25.98 \pm 0.14^{\text{d}}$	$24.16 \pm 0.44^{\text{d}}$	$17.06 \pm 0.04^{\text{d}}$	$25.08 \pm 0.21^{\text{d}}$	$36.18 \pm 0.03^{\text{c}}$	$0.85 \pm 0.02^{\text{a}}$
PS~30 s	$26.90 \pm 0.11^{\text{d}}$	$24.60 \pm 0.12^{\text{d}}$	$17.43 \pm 0.23^{\text{d}}$	$25.78 \pm 0.09^{\text{d}}$	$37.80 \pm 0.58^{\text{c}}$	$0.82 \pm 0.01^{\text{ab}}$
PS~60 s	$67.92 \pm 3.24^{\text{c}}$	$44.64 \pm 1.92^{\text{c}}$	$22.82 \pm 1.41^{\text{c}}$	$54.83 \pm 2.24^{\text{c}}$	$124.17 \pm 0.60^{\text{b}}$	$0.71 \pm 0.01^{\text{b}}$
PS~90 s	$169.04 \pm 1.17^{\text{b}}$	$57.50 \pm 1.40^{\text{b}}$	$52.61 \pm 0.32^{\text{b}}$	$154.80 \pm 2.64^{\text{b}}$	$274.38 \pm 1.91^{\text{a}}$	$0.55 \pm 0.03^{\text{c}}$
PS~120 s	$197.93 \pm 3.34^{\text{a}}$	$76.57 \pm 0.43^{\text{a}}$	$61.79 \pm 0.62^{\text{a}}$	$170.02 \pm 1.74^{\text{a}}$	$276.85 \pm 4.63^{\text{a}}$	$0.36 \pm 0.02^{\text{d}}$

注： $D_{(4.3)}$ 和 $D_{(3.2)}$ 表征颗粒体系的体积加权平均粒径参数，分别指代体积分布43%和32%时所对应的粒径值； $D_{(0.1)}$ 、 $D_{(0.5)}$ 、 $D_{(0.9)}$ 为粒度累积分布曲线上累计频率为10%、50%及90%的特征粒径指标。 $R_{1047/1022}$ 为吸光度在1 047和1 022 cm^{-1} 处的比值。表格中同一列数据若存在不同字母上标，表明组间在 $P<0.05$ 显著性水平下具有统计学差异，下同。

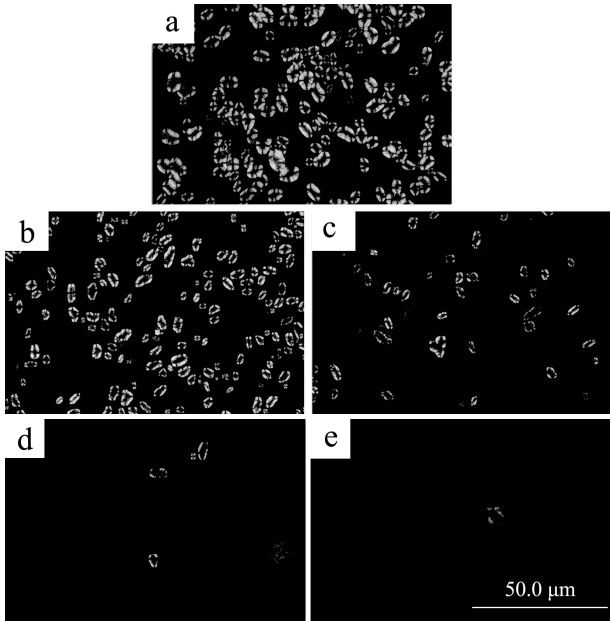


图 2 不同微波处理时间豌豆淀粉的偏光十字图

Fig.2 Pea starch polarized cross plots under different microwave durations

注：a 为 PS；b 为 PS-30 s；c 为 PS-60 s；d 为 PS-90 s；e 为 PS-120 s。

2.1.3 微波处理对豌豆淀粉粒径分布的影响

由图 3 可以观察到，豌豆淀粉粒径呈现多峰分布，且随着微波时间的延长，淀粉的粒径开始向右分布。表 1 是豌豆淀粉在不同微波处理时间下的粒径参数。由表 1 可知，随着微波时间的延长， $D_{(0.1)}$ 、 $D_{(0.5)}$ 、 $D_{(0.9)}$ 分别从 17.06、25.08、36.18 μm 增加至 61.79、170.02、276.85 μm ，这说明微波处理时间的延长能够增大淀粉的粒径。这一现象归因于微波处理时间的延长会使淀粉内部的氢键逐渐断裂，在高温处理条件下，淀粉颗粒会吸水膨胀，从而导致粒径增加，还可能因为糊化后的淀粉凝胶粉碎时强度比原淀粉高，更有韧性，粉碎更困难，因此测定的粒度增加，此外，在压热及微波处理时，水分子会渗入淀粉颗粒内部，使颗

粒表面膨胀且局部糊化^[21]。Wang 等^[22]在研究微波对马铃薯淀粉和普通玉米淀粉的影响时发现，微波处理会导致淀粉颗粒的普遍破坏，并且产生更大尺寸的颗粒。

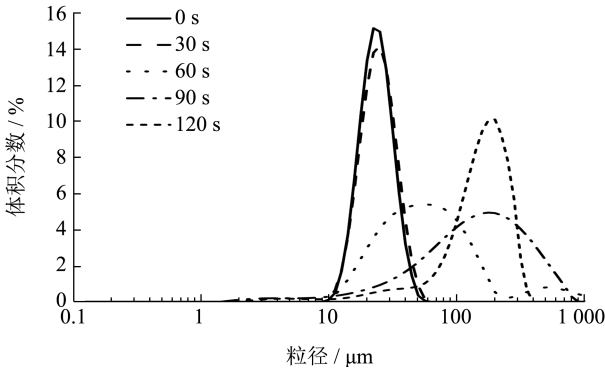


图 3 不同微波处理时间对豌豆淀粉粒径的影响

Fig.3 The effect of different microwave treatment times on the particle size of pea starch

2.1.4 微波处理对豌豆淀粉晶体结构的影响

由图 4 可以观察到，天然豌豆淀粉在衍射角 2θ 为 5.6° 、 15.18° 、 17.04° 和 23.12° 处显示出典型的 C 型晶体特征峰，经过微波处理后淀粉的晶体结构不发生改变。然而，随着微波处理时间的延长，豌豆淀粉的衍射峰强度逐渐降低，图谱趋于平缓。结晶度从 23.74% 下降到 8.46%。一方面是淀粉颗粒的有序结构在微波处理后发生改变，导致支链淀粉向直链淀粉转变，以及双螺旋解旋等原因造成的^[23]；另一方面是因为在微波处理过程中，水分子剧烈振动和高温作用导致淀粉颗粒膨胀和结构破坏，进而降低了淀粉的结晶度，而结晶度的降低主要归因于微波处理过程中淀粉分子间氢键的断裂，从而导致其晶体及双螺旋构象的瓦解。在 Liu 等^[24]对微波处理藜麦淀粉的改性研究中发现，微波处理时间会引起淀粉颗粒有序结构的不可逆扭曲并产生无定形相，淀粉的结晶度降低。与偏光十字实验相印证。

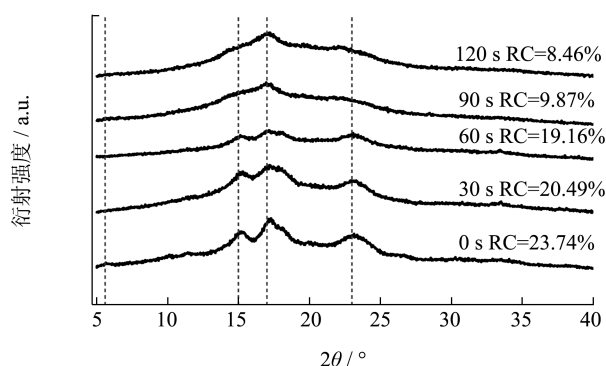


图4 不同微波处理时间对豌豆淀粉 XRD 图谱

Fig.4 XRD patterns of pea starch treated with different microwave processing times

2.1.5 微波处理对豌豆淀粉FT-IR的影响

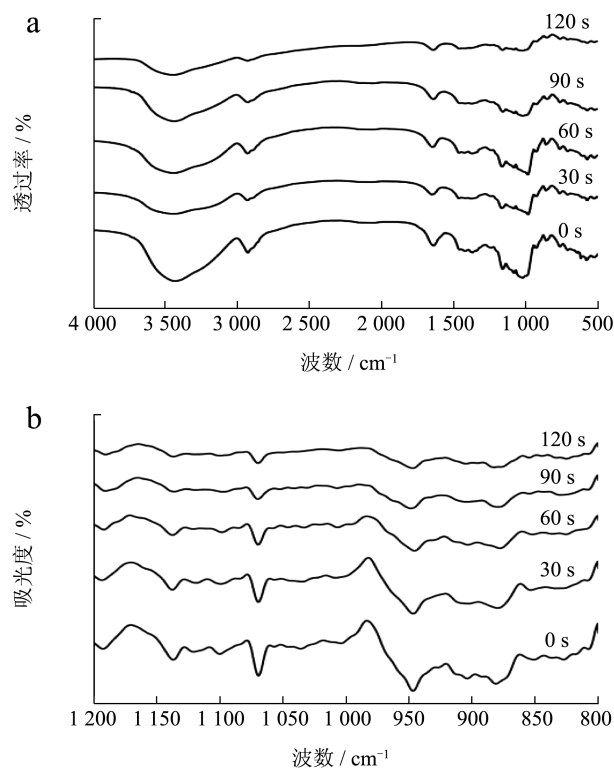


图5 不同微波处理时间对豌豆淀粉 FT-IR 的影响

Fig.5 FT-IR spectral modifications in pea-derived starch subjected to differential microwave processing periods

从图5可以观察到,微波处理后的淀粉红外光谱与原生淀粉相同,没有新的键生成,也没有键消失。经研究发现可知,在 $1\ 047$ 、 $1\ 022$ 和 995 cm^{-1} 处的淀粉吸收峰与淀粉中的晶体结构密切相关,在 $R_{1047/1022}$ 处吸光度比值可以表示淀粉的短程有序性与双螺旋含量的变化^[25]。随着微波处理的时间延长,淀粉的 $R_{1047/1022}$ 从 0.85 下降至 0.36 ,说明微波处理破坏了淀粉的有序结构,可能是因为微波处理使淀粉分子内部的氢键显著破坏,直链淀粉断裂为较短的链段,难以形成紧密

的双螺旋结构,进而致使短程有序性降低。此外,在微波处理过程中,淀粉峰的强度减弱,可能是因为微波处理时产生的热效应破坏了淀粉的内部氢键,导致直链淀粉分解成较短的链段,使原本有序的分子结构变得无序。还可能是使淀粉的结晶区域发生改变,导致与结晶结构相关的红外光谱峰消失或减弱。这与XRD图谱的结果相符。

2.1.6 微波处理的豌豆淀粉拉曼光谱的影响

拉曼光谱可以用于检测淀粉短程有序结构的变化。在拉曼光谱中, 480 cm^{-1} 处的峰与碳骨架的振动有关联,该峰的半峰宽与淀粉的晶体结构紧密相关,半峰宽越窄,表明淀粉的晶体结构越完善,其结晶度也越高^[26,27]。从图6可以观察到,所有样品均未出现新振动峰或峰位偏移,说明微波处理未引起化学键重构。且随着微波时间的延长, 480 cm^{-1} 处的FWHM从 16.20 增加到 20.59 ,说明微波处理能破坏淀粉的短程有序性,可能是因为微波能量诱导的淀粉分子链断裂所导致的。

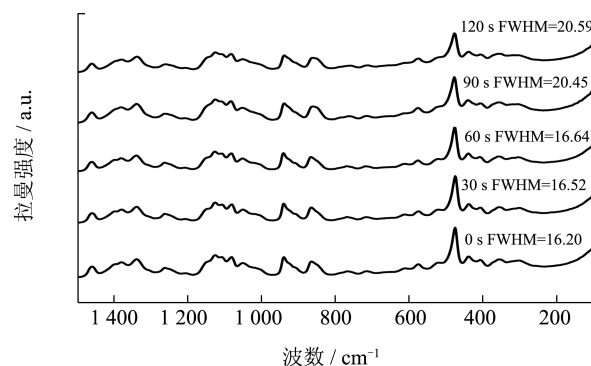


图6 不同微波处理的豌豆淀粉拉曼光谱

Fig.6 Raman spectra of pea starch treated with different microwaves

2.2 微波处理对豌豆淀粉特性的影响

2.2.1 微波处理对豌豆淀粉吸水指数的影响

吸水指数是离心后剩余沉淀吸收水分的能力,在一定程度上反映了淀粉颗粒与水分子的结合程度。由图7可以观察到,随着微波处理时间的延长,豌豆淀粉的吸水指数逐渐增加,从 $1.94\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 上升到 $5.34\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$,一方面是因为微波处理破坏了淀粉颗粒的完整性,使淀粉颗粒表面变得粗糙,甚至形成了许多的颗粒碎片,所以导致淀粉颗粒与水的接触的表面积和比表面积增大;另一方面是微波处理使淀粉分子的内氢键断裂暴露更多的内部羟基,羟基与水分子更容易发生缔合,所以导致吸水指数增加。此外,糊化淀粉的吸水率远高于生淀粉。

表 2 不同微波处理对豌豆淀粉糊化特性参数的影响

Table 2 Effects of different microwave treatments on gelatinization characteristic parameters of pea starch							
样品	峰值黏度/cP	谷值黏度/cP	崩解值/cP	最终黏度/cP	回生值/cP	峰值时间/min	糊化温度/℃
PS	2 854.00 ± 49.11 ^b	2 320.00 ± 25.53 ^b	534.00 ± 23.58 ^a	5 138.00 ± 81.50 ^b	2 818.00 ± 56.47 ^a	4.80 ± 0.00 ^c	73.18 ± 0.46 ^{bc}
PS~30	3 115.67 ± 43.66 ^a	2 526.00 ± 34.39 ^a	589.67 ± 13.05 ^a	5 541.67 ± 76.12 ^a	3 015.67 ± 76.22 ^a	4.65 ± 0.04 ^c	73.43 ± 0.06 ^b
PS~60	2 727.00 ± 131.46 ^c	2 375.00 ± 54.81 ^b	203.00 ± 58.03 ^c	3 967.67 ± 48.64 ^c	1 592.67 ± 51.87 ^c	5.29 ± 0.20 ^b	75.29 ± 0.20 ^d
PS~90	2 578.00 ± 102.72 ^{bc}	2 292.33 ± 51.05 ^b	434.68 ± 34.56 ^b	5 229.00 ± 30.77 ^b	2 936.67 ± 21.75 ^a	7.00 ± 0.00 ^a	76.90 ± 0.48 ^a
PS~120	2 028.67 ± 81.83 ^d	1 779.67 ± 65.03 ^c	249.00 ± 17.09 ^c	1 778.67 ± 65.03 ^d	2 044.33 ± 78.34 ^b	7.00 ± 0.00 ^a	73.23 ± 0.97 ^c

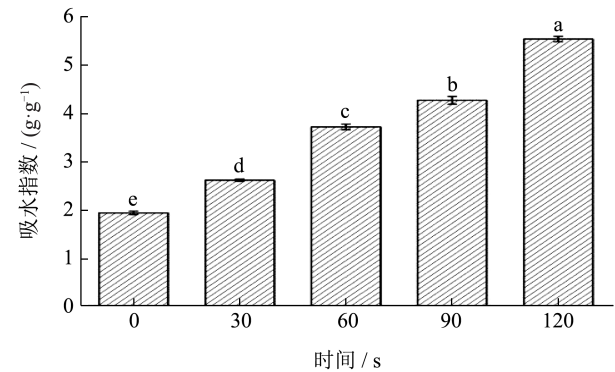


图 7 不同微波处理对豌豆淀粉冷水吸水指数的影响

Fig.7 Impact of variable microwave exposure parameters on hydroponic capacity of pisum sativum starch

2.2.2 微波处理对豌豆淀粉透明度的影响

淀粉的透明度通常用来表示淀粉吸附水分的程度，一般用透光率 T 来表示淀粉的透明度。如图 8 所示，微波处理后淀粉在 620 nm 的透光率明显低于原淀粉，随着微波处理时间的延长，淀粉的透明度呈现下降的趋势。这可能是由于微波处理破坏了淀粉的原有结构，使淀粉的支链部分发生分解，产生了大量的短直链淀粉，使之容易发生聚集回生导致淀粉的持水能力下降，所以导致了淀粉的透明度下降。

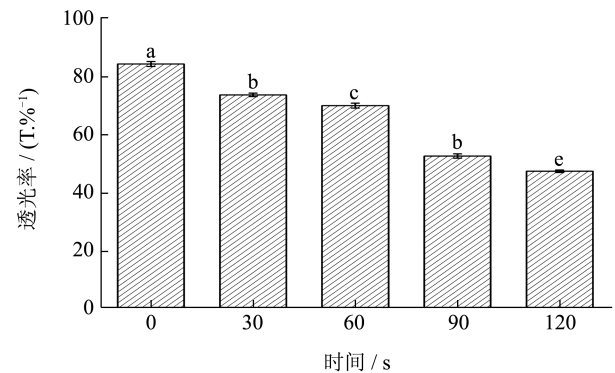


图 8 不同微波处理对豌豆淀粉透光率的影响

Fig.8 The effect of different microwave treatments on the transmittance of pea starch

2.2.3 微波处理对豌豆淀粉糊化特性的影响

从图 9 中可以观察到，微波处理后的豌豆淀粉糊

化趋势与天然的豌豆淀粉基本相似，但是随着微波处理时间的延长，总体呈现下降的趋势。由表 2 可知，改性样品的峰值黏度呈现先上升后下降的趋势。在微波处理 30 s 时，淀粉的峰值黏度为 3115.67 cP，可能是因为微波处理时产生热能，淀粉快速吸水膨胀导致部分颗粒破裂，释放出更多的淀粉分子，增加了体系的黏度。微波处理 60 s 后淀粉的峰值黏度下降是因为糊化时，淀粉颗粒的内部网络结构破坏而引起的峰值黏度下降^[28]，产生这一现象是因为淀粉颗粒的完整形态受到破坏，增强了水合作用；同时微波处理会影响淀粉之间的相互作用力，从而使淀粉的黏度降低。回生值从 2 818.00 cP 显著降低至 2 044.33 cP。其中，30 s 时的回升值为 3 015.67 cP，该变化源于微波能量诱导的淀粉分子链断裂重组，具体表现为长链淀粉发生解聚，导致短链组分占比提升。微波处理后的豌豆淀粉显示出更高的耐应力及耐热性，这表明微波处理有助于增强豌豆淀粉的糊化特性。

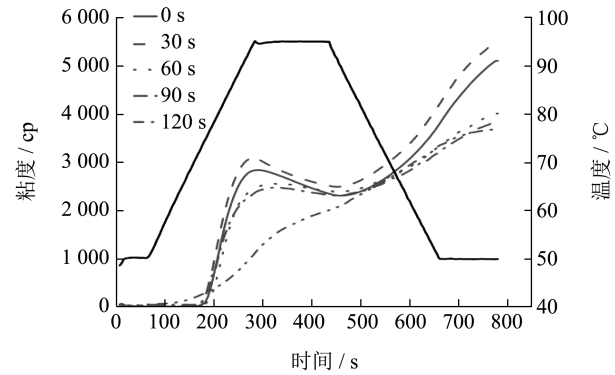


图 9 不同微波处理对豌豆淀粉糊化特性的影响

Fig.9 The effect of different microwave treatments on the gelatinization characteristics of pea starch

2.2.4 微波处理对豌豆淀粉热特性的影响

DSC 通常被用于检测淀粉的热力学性质。升温期间淀粉糊化温度的变化可以反映晶体的热稳定性。随着温度的上升，淀粉颗粒的无定形区与水分子形成结晶结构，这一结构在一定的温度范围内会呈现出吸热熔融峰。热焓值 ΔH 的值表示解开淀粉双螺旋结构所需的能量，反映了淀粉微晶区的双螺旋结构和分子顺

序^[29]。由图 10 可以观察到,随着微波处理时间的延长,豌豆淀粉的吸热熔融峰逐渐降低,说明微波处理破坏了淀粉的有序结构。由表 2 可知,随着微波处理时间的延长,豌豆淀粉样品的焓值(ΔH)从 0 至 60 s 呈下降趋势,微波处理 90 s 后焓值消失,焓值减少可能是因为微波处理破坏了淀粉分子间的氢键,引起淀粉颗粒的解构,分子间的相互作用减弱,因此分解淀粉分子结构所需的能量就会减少。此外,吸收峰之所以消失是因为已经糊化的淀粉没有糊化过程。DSC 实验结果与 FT-IR 和显微镜结果相佐证,表明淀粉晶体结构被影响,淀粉的糊化程度增大。

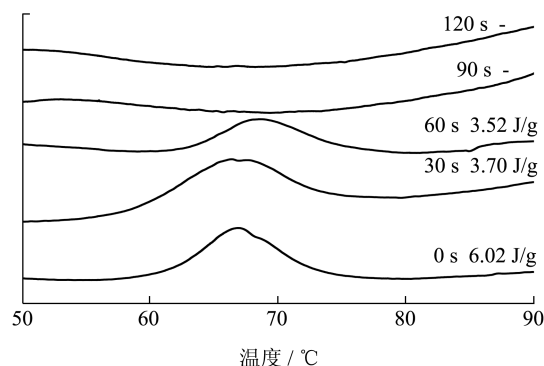


图 10 不同微波处理时间对豌豆淀粉热特性的影响

Fig.10 Modulation of *pisum sativum* starch thermochemical characteristics by temporal variations in microwave irradiation

2.2.5 微波处理对豌豆淀粉冷水溶解度和膨胀度的影响

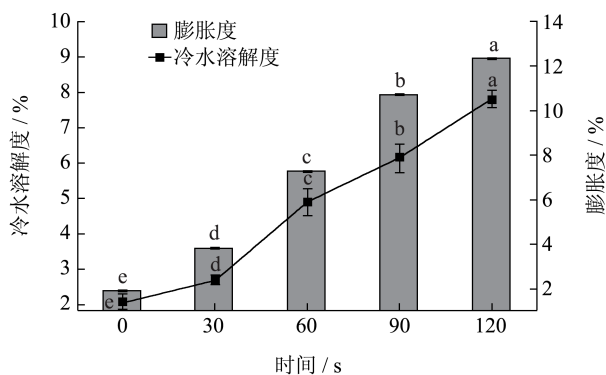


图 11 不同微波处理时间对豌豆淀粉冷水溶解度和膨胀度的影响

Fig.11 The effect of different microwave treatment times on the cold water solubility and swelling degree of pea starch

从图 11 可以观察到,改性后豌豆淀粉的冷水溶解度由对照组的 2.04% 提升至 7.81%,膨胀度从 1.91% 增加至 12.34%。可能是在微波处理时,直链淀粉大量溶出且淀粉网络结构遭到破坏,致使更多可溶性成分溶出,使淀粉的冷水溶解度升高^[30]。此外,微波处理会使淀粉颗粒表面变得粗糙甚至产生裂隙,促进了与

水结合的能力,致使水分子更易与淀粉中游离的羟基相结合,此外淀粉形态的改变也促使水分子更易渗入颗粒内部^[31]。

2.2.6 微波处理对豌豆淀粉动态流变特性的影响

动态流变特性可用于分析淀粉及其制品凝胶体系在外力作用下的黏弹性响应,主要通过储能模量(G')和损耗模量(G'')进行表征。从图 12 可以观察到, G' 和 G'' 随频率增加而降低,且 G' 始终大于 G'' ,这表明豌豆淀粉凝胶表现出弱凝胶特性。可能是淀粉颗粒的完整性在微波处理后发生改变,使得结构变得疏松,减弱了相互作用力,进而导致豌豆淀粉的凝胶黏度的降低^[32]。同时,微波处理也破坏了豌豆淀粉的短程有序性,使淀粉原有的刚性结构被破坏,而导致豌豆淀粉的凝胶黏度降低^[33]。

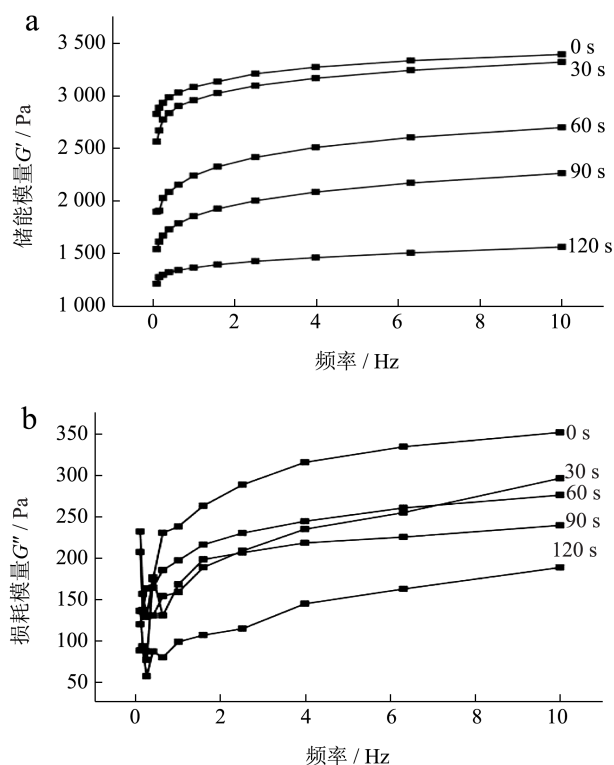


图 12 不同微波处理时间对豌豆淀粉流变特性的影响

Fig.12 The effect of different microwave treatment times on the rheological properties of pea starch

2.2.7 微波处理对豌豆淀粉体外消化的影响

由表 3 可知,经过微波处理后豌豆淀粉的 RDS 从 28.19% 上升至 70.81%; SDS、RS 分别从 40.92%、30.89% 下降至 19.10%、10.09%;说明微波处理初期能够高效破坏淀粉颗粒的结构,会使颗粒表面产生裂痕和凹陷,同时结构变得较为疏松,这样消化酶就能更加容易地渗透进淀粉颗粒内部,有利于于 α -淀粉酶的水解作用,进而减少了抗性淀粉(RS)的含量^[34]。

此外,微波能诱导豌豆淀粉发生分子构象改变及晶体结构分解,会使淀粉更容易被酶消化。在 Li 等^[35]的研究当中发现,较高的水分含量的小米淀粉在经过微波处理后,微波效应破坏了淀粉无定形区域,部分支链淀粉降解为多糖,同时高水分含量增强了分子间氢键并对晶体和非晶区造成更严重的损害,加速了淀粉酶的催化过程,导致淀粉快速水解过程的速率显着提高。

表 3 不同微波处理时间下豌豆淀粉的RDS, SDS和RS含量

Table 3 RDS of pea starch under different microwave treatment times, SDS and RS content			
样品	RDS/%	SDS/%	RS/%
PS	28.19 ± 0.21 ^e	40.92 ± 0.40 ^b	30.89 ± 0.61 ^a
PS~30 s	30.11 ± 0.60 ^d	53.56 ± 0.63 ^a	16.87 ± 0.23 ^b
PS~60 s	48.39 ± 0.50 ^c	36.23 ± 0.38 ^c	12.60 ± 0.28 ^c
PS~90 s	62.49 ± 3.17 ^b	25.55 ± 2.71 ^d	11.96 ± 0.6 ³ d
PS~120 s	70.81 ± 0.21 ^a	19.10 ± 0.47 ^e	10.09 ± 0.5 ³ e

3 结论

豌豆淀粉经微波处理后,其结构和理化性质发生明显的变化。该结果表明,随着微波处理时间的延长,豌豆淀粉颗粒的微观形貌发生显著改变,淀粉颗粒表面粗糙,原始结构被破坏,形态呈现不规则特征。XRD 结果表明,淀粉结晶度由 23.74% 显著下降至 8.46%,证实微波能导致晶体结构解离。结合傅里叶变换红外光谱分析, $R_{1044/1022}$ 处特征峰强度比值由 0.85 降低到 0.36,同时拉曼光谱在 480 cm^{-1} 处的半峰宽从 16.20 增加到 20.59,双指标共同表明淀粉分子链的有序排列结构发生解构。偏光显微成像进一步显示,特征性双折射现象随处理时间延长逐渐减弱直至完全消失,淀粉颗粒内部结晶区的破坏。微波作用引发粒径分布显著变化。在理化性质方面,淀粉吸水指数提升,流变学显示峰值粘度降低,而 DSC 热分析中糊化焓值显著下降至消失。在消化特性方面,微波处理过后的 RS 含量下降,RDS 含量上升。因此,微波处理后的豌豆淀粉可满足消费者在绿色材料及特膳食品的需求,如胃肠道功能较弱的人群,微波处理后的淀粉可以减轻人体胃肠的消化负担,有助于改善消化系统的健康状况。

参考文献

[1] LI L, YUAN T Z, AI Y. Development, structure and *in vitro* digestibility of type 3 resistant starch from acid-thinned and debranched pea and normal maize starches [J]. Food Chemistry, 2020, 318: 126485.

[2] LI G, GE X, GUO C, et al. Effect of ultrasonic treatment on

structure and physicochemical properties of pea starch [J]. Foods, 2023, 12(13): 2620.

[3] SHARMA A, RANI M, LATA H, et al. Global dimension of root rot complex in garden pea: Current status and breeding prospective [J]. Crop Protection, 2022, 158: 106004.

[4] GHARIBZAHEDI S M T, SMITH B. The functional modification of legume proteins by ultrasonication: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 98: 107-116.

[5] 江敏仪,吴志成,相红丽.微波处理对食品营养成分的影响研究[J].食品安全导刊,2022,33:129-131.

[6] OYEYINKA S A, UMARU E, OIATUNDE S J, et al. Effect of short microwave heating time on physicochemical and functional properties of Bambara groundnut starch [J]. Food Bioscience, 2019, 28: 36-41.

[7] 武云娇,王一飞,魏明智,等.微波复合酶解改性对小米淀粉结构表征及其理化特性的影响[J].中国粮油学报,2023,38(11):44-51.

[8] AHMAD M, GANI A, MASOODI F A, et al. Influence of ball milling on the production of starch nanoparticles and its effect on structural, thermal and functional properties [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 151: 85-91.

[9] 刘敏,邢倩,柯胜,等.脱支玉米淀粉-壳聚糖复合物的制备及结构表征[J].中国食品学报,2024,24(2):169-178.

[10] LV Y, ZHANG L, LI M, et al. Physicochemical properties and digestibility of potato starch treated by ball milling with tea polyphenols [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 129: 207-213.

[11] WANG H W, DING J T, XIAO N Y, et al. Insights into the hierarchical structure and digestibility of starch in heat-moisture treated adlay seeds [J]. Food Chemistry, 2020, 318:126489.

[12] ZHANG Z, ZHU M L, XING B. Effects of extrusion on structural properties, physicochemical properties and *in vitro* starch digestibility of Tartary buckwheat flour [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 135: 108197.

[13] CABRERA A H, MORALES E, MENDEZ G, et al. Structural changes in popped sorghum starch and their impact on the rheological behaviorr [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 186: 686-694.

[14] 曾凯骁,王鹏杰,任发政,等.高直链玉米III型抗性淀粉制备及其结构和特性[J].食品科学,2022,43(22):52-59.

[15] ENGLYST H N, KINGNAN S M, CUMMINGS J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions [J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46: S33-50.

[16] 文茜,张希讯,刘畅,等.微波处理对板栗淀粉结构和消化性的影响[J].食品与发酵工业,2025,51(12):236-241.

[17] 林国荣,张丽芬,黄晓玲.微波处理对枇杷核淀粉理化性质和消化性能的影响[J].食品工业科技,2023,44(15):55-61.

[18] 王萌.超声波和微波双重处理对淀粉理化性质和功能性质的影响[D].北京:北京林业大学,2021.

[19] 陈平生,黄智君,王娟,等.不同热处理方式对大蕉抗性淀粉理化性质的影响[J].现代食品科技,2012,28(1):9-13,51.

[20] 张明.湿热协同微波处理对淀粉理化性质及消化性的影响[D].广州:华南理工大学,2015.

[21] 边雪洁,马丽苹,董晓琳,等.油莎豆抗性淀粉结构特征及体外消

- 化特性研究[J].中国粮油学报,2023,38(11):52-59.
- [22] WANG L, WANG M, ZHOU Y, et al. Influence of ultrasound and microwave treatments on the structural and thermal properties of normal maize starch and potato starch: A comparative study [J]. Food Chemistry, 2022, 377: 131990.
- [23] 李世杰,段春月,刘畅.微波对板栗淀粉结构和理化性质的影响[J].中国粮油学报,2020,35(2):31-35,49.
- [24] LIU G, ZHANG R, HUO S, et al. Insights into the changes of structure and digestibility of microwave and heat moisture treated quinoa starch [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 246: 125681.
- [25] ASLIHAN Y, NURCAN T. Effect of ultrasound-microwave and microwave-ultrasound treatment on physicochemical properties of corn starch [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 98: 106516.
- [26] WANG S, WANG J, ZHANG W, et al. Molecular order and functional properties of starches from three waxy wheat varieties grown in China [J]. Food Chemistry, 2015, 181: 43-50.
- [27] FECHNER P M, WARTEWIG S, KLEINEBUDDE P, et al. Studies of the retrogradation process for various starch gels using Raman spectroscopy [J]. Carbohydrate Research, 2005, 340(16): 2563-2568.
- [28] CHENH, HUANG Q, FU X, et al. Ultrasonic effect on the octenyl succinate starch synthesis and substitution patterns in starch granules[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 35: 636-643.
- [29] DORNELES M S, DE AZEVEDO E S, NOREÑA C P Z. Effect of microwave followed by cooling on structural and digestive properties of pinhão starch [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 126981.
- [30] YADAV P, BHARATHI U, SURUTHI K, et al. Effect of ultrasonic modification on physiochemical, structural, functional properties and *in vitro* starch digestibility of Amaranthus paniculatus (Rajgeera) starch [J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2024, 14(16): 19017-19024.
- [31] OKONKWO V C, KWOFIE E M, MBA O I, et al. Impact of thermo-sonication on quality indices of starch-based sauces [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 73: 105473.
- [32] KAUR H, GILL B S. Effect of high-intensity ultrasound treatment on nutritional, rheological and structural properties of starches obtained from different cereals [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 126: 367-375.
- [33] 韩蕊,许秀颖,侯璟瑶,等.冻融循环次数对超声改性玉米淀粉凝胶特性和结构的影响[J].食品科学,2023,44(2):9-17
- [34] 韩倪.小麦损伤淀粉的结构性质及其无麸质模型面团面包品质特性研究[D].合肥:合肥工业大学,2022.
- [35] LI Y, HU A J, WANG X Y, et al. Physicochemical and *in vitro* digestion of millet starch: Effect of moisture content in microwave [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 134: 308-315.