

微波处理对燕麦淀粉结构、理化特性及消化性的影响

孙慧君^{1,2,3,4} 徐艺璇^{1,2,3,4} 王佳萌^{1,2,3,4} 周裔彬^{1,2,3,4} 余振宇^{1,2,3,4}

(1. 安徽农业大学食品与营养学院, 安徽 合肥 230036; 2. 安徽省特色农产品高值化利用工程研究中心, 安徽 合肥 230036; 3. 农业农村部江淮农产品精深加工与资源利用重点实验室, 安徽 合肥 230036; 4. 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: [目的] 探究微波处理对燕麦淀粉结构、理化及消化特性的影响。[方法] 以燕麦淀粉(OAT)为研究对象, 考察微波处理时间对燕麦淀粉粒径分布、微观结构、结晶结构、短程有序结构、热力学、流变学和消化特性的影响。[结果] 随着微波处理时间的延长, 燕麦淀粉颗粒膨胀, 粒径显著增加, 结晶度从 12.32% 下降至 5.33%, 红外吸收比值 $R_{1\,047\text{ cm}^{-1}/1\,022\text{ cm}^{-1}}$ 由 0.73 下降至 0.62, 拉曼光谱在 480 cm^{-1} 处的半峰宽从 15.94 增加至 20.16, 短程有序性降低。在理化性质方面, 燕麦淀粉的吸水指数、冷水溶解度和膨胀度显著增加, 黏度和崩解值显著下降, 热焓值 ΔH 由 7.71 J/g 下降至消失。在消化性方面, 随着微波处理时间的延长, RDS 含量逐渐上升, SDS 和 RS 含量逐渐下降。[结论] 微波处理可以改善燕麦淀粉的理化性质, 提升燕麦淀粉的消化性能。

关键词: 燕麦; 微波处理; 淀粉结构; 理化性质

Effect of microwave treatment on structure, physicochemical properties, and digestibility of oat starch

SUN Huijun^{1,2,3,4} XU Yixuan^{1,2,3,4} WANG Jiameng^{1,2,3,4} ZHOU Yibin^{1,2,3,4} YU Zhenyu^{1,2,3,4}

(1. School of Food and Nutrition, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China; 2. Anhui Engineering Research Center for High Value Utilization of Characteristic Agricultural Products, Hefei, Anhui 230036, China; 3. Key Laboratory of Jianghuai Agricultural Product Fine Processing and Resource Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hefei, Anhui 230036, China; 4. State Key Laboratory of Tea Plant Germplasm Innovation and Resource Utilization, Hefei, Anhui 230036, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effect of microwave treatment on the structure, physicochemical, and digestibility of oat starch. [Methods] Oat starch (OAT) is taken as the research object to analyze the effects of different microwave treatment times on the particle size distribution, microstructure, crystalline structure, short-range ordered structure, thermodynamics, rheology, and digestibility of OAT. [Results] With the prolongation of microwave treatment time, OAT granules are expanded, and the particle size is significantly increased. Additionally, the crystallinity is decreased from 12.32% to 5.33%, the infrared absorption ratio $R_{1\,047\text{ cm}^{-1}/1\,022\text{ cm}^{-1}}$ is decreased from 0.73 to 0.62, and the half width peak of the Raman spectrum at 480 cm^{-1} is increased from 15.94 to 20.16. The short-range orderliness is decreased. For physicochemical properties, the water absorption index, cold water solubility, and swelling degree of OAT are significantly increased,

基金项目: 安徽农业大学稳定与人才引进项目(编号:rc352008); 安徽省高等学校科学研究重点项目(编号: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(编号:NKLTOF20240123); 安徽省重点研究与开发计划项目(编号:2023n06020038, 2023n06020039)

通信作者: 余振宇(1992—), 男, 安徽农业大学讲师, 博士。E-mail: yuzhenyuHF@163.com

收稿日期: 2025-03-14 **改回日期:** 2025-08-09

引用格式: 孙慧君, 徐艺璇, 王佳萌, 等. 微波处理对燕麦淀粉结构、理化特性及消化性的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(12): 19-27.

Citation: SUN Huijun, XU Yixuan, WANG Jiameng, et al. Effect of microwave treatment on structure, physicochemical properties, and digestibility of oat starch[J]. Food & Machinery, 2025, 41(12): 19-27.

while viscosity and breakdown value are significantly decreased. The enthalpy value ΔH is decreased from 7.71 J/g to 0. For digestibility, as the microwave treatment time is increased, the rapid digestible starch (RDS) content is gradually increased, while the slow digestible starch (SDS) and resistant starch (RS) content is gradually decreased. [Conclusion] Microwave treatment can improve the physicochemical properties and digestibility of OAT.

Keywords: oat; microwave processing; starch structure; physicochemical property

燕麦富含淀粉、 β -葡聚糖、酚类、脂质及活性多肽等组分,具有降胆固醇、控血糖、调节肠道菌群等生理功能^[1]。燕麦淀粉主要存在于燕麦颗粒胚乳中,质量分数为 50%~65%^[2],直链淀粉含量约为 2%~34%。近年来,燕麦淀粉因其较高的营养价值,常被作为其他谷物淀粉的替代品,被广泛应用于食品工业中。为了进一步改善燕麦淀粉的功能特性,可以对燕麦淀粉进行改性处理,如物理、化学和生物改性。物理改性具有污染物少、流程简单等优点,无论是在科研领域,还是食品工业领域,亦或是其他诸多领域,都有着广阔的工业前景^[3]。

Kumar 等^[4]研究发现,随着处理时间的延长,马铃薯淀粉颗粒表面出现破损、凹陷,淀粉的短程有序结构发生变化,晶体结构被破坏。Liu 等^[5]研究发现,随着水分含量和微波功率的增加,藜麦淀粉颗粒团聚,粒径增大,淀粉的短程有序性、结晶度、热稳定性均有所提高,抗消化能力因淀粉含水量不同而改变。林国荣等^[6]研究发现,经微波改性后,枇杷核淀粉颗粒形貌发生一定变化,淀粉的糊化特性、溶解度和膨润力均呈上升趋势,相对结晶度降低,结晶类型未改变。

研究拟考察微波处理时间对燕麦淀粉理化特性的影响,阐述微波处理对燕麦淀粉的影响机制,推动其在绿色材料及功能食品领域的应用,以及微波改性燕麦淀粉在代谢综合征患者膳食干预、运动员机能补给以及术后康复营养支持等领域的应用价值。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料

燕麦米:内蒙古自治区赤峰市;

NaOH:分析纯,无锡市展望化工试剂有限公司;

溴化钾:分析纯,上海阿拉丁生化科技有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

微波加热设备:G70F20CN1L-DG 型,广东格兰仕微波生活电器制造有限公司;

激光粒度仪:Mastersizer2000 型,英国 Malvern 公司;

扫描电子显微镜:S-4800 型,日本日立 Hitachi 公司;

射线衍射仪:D/max X 型,日本理学电机;

傅里叶变换红外光谱仪:Nicolet 6700 型,赛默飞世尔科技公司;

激光共聚焦显微拉曼光谱:英国 Renishaw 公司;

紫外分光光度计:LAMBDA 型,美国 Perkin Elme 公司;

差示扫描量热仪:DSC 8000 型,美国 Perkin Elme 公司;

快速黏度分析仪:RVA-TecMaster 型,美国 Perkin Elme 公司;

旋转流变仪:DHR-1 型,美国 TA 公司。

1.2 方法

1.2.1 样品处理

(1) 燕麦淀粉的提取:参考郝宗围等^[7]的方法稍作修改。将燕麦米破碎处理后制成浆液,过 100 目筛网,滤液用 0.2% 氢氧化钠溶液调节 pH 至 10,持续搅拌 4 h,室温静置过夜,待沉淀充分形成后收集。4 000 r/min 离心 15 min,重复离心至无沉淀。45 °C 烘干,粉碎后干燥保存。

(2) 燕麦淀粉微波处理:称取 6 g 燕麦淀粉,用蒸馏水配制成 10% 的淀粉溶液并放入微波专用器皿,微波功率 350 W,微波时间分别为 20, 40, 60, 80 s。微波处理后的样品放入 -80 °C 贮藏 5 h,冷冻干燥,粉碎,过 100 目筛,备用。以未处理的燕麦淀粉为对照组。

1.2.2 燕麦淀粉粒径分布测定 参考 Chen 等^[8]的方法稍作修改。采用激光粒度仪评估颗粒尺寸分布特性。测试过程中选用手动操作模式,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。

1.2.3 燕麦淀粉微观结构观察 参考文茜等^[9]的方法稍作修改。用棉签蘸取适量试样,均匀涂布在导电胶表面并固定于样品台。经喷镀金膜处理(30 s)后,将样本转移至扫描电子显微镜,于加速电压 5 kV 下进行微观结构表征。放大倍数为 1 000, 2 500 倍。

1.2.4 燕麦淀粉晶体结构测定 参考 Zhan 等^[10]的方法稍作修改。准确称取试样装入样品载样台,剔除冗余物料后采用压片法确保测试面平整,通过 X 射线衍射分析淀粉晶体结构特征。根据 Ahmad 等^[11]的方法计算结晶度,并用 MDI Jade6 软件拟合。

1.2.5 燕麦淀粉的 FTIR 光谱测定 参考 Zhang 等^[12]的方法稍作修改。称量 1 mg 样品与 100 mg KBr 粉末于玛瑙研钵中充分磨研。20 MPa 下压制成透明薄片,使用傅里叶变换红外光谱仪进行检测。

1.2.6 燕麦淀粉的拉曼光谱图测定 参考 Wang 等^[13]的方法稍作修改。将样品于室温平衡 24 h,取少量放入玻璃样品舱中,用激光发射器扫描样品,并保持样品与激光光束垂直。

1.2.7 淀粉透明度测定 参考蒲华寅等^[14]的方法稍作修改。将 0.1 g 淀粉配成 1.0% 的淀粉悬浮液,沸水浴糊化 30 min,自然冷却至室温。蒸馏水作空白,采用紫外分光

光度计测定 620 nm 处吸光度。

1.2.8 吸水指数(WAI)测定 参考赵忠云等^[15]的方法稍作修改。称 0.2 g 燕麦淀粉至 50 mL 离心管中,加 20 mL 纯水,搅拌 20 min,4 ℃、4 500 r/min 离心 15 min,去除上清液,称重。按式(1)计算吸水指数。

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

式中:

R ——吸水指数,%;

m_1 ——样品质量,g;

m_2 ——样品和离心管的总质量,g;

m_3 ——沉淀与离心管质量,g。

1.2.9 溶解度和膨胀度测定 参考Yadav等^[16]的方法稍作修改。称取 0.2 g 燕麦淀粉样品与 10.00 mL 去离子水于 50 mL 离心管中,恒温条件下,使用涡旋振荡仪持续混合 20 min,4 500 r/min 离心 15 min。将上清液定量转移至 105 ℃干燥箱中干燥至恒重,同步收集离心管底部沉淀物并称重。分别按式(2)、式(3)计算溶解度和膨胀度。

$$A = \frac{W_2}{W_1} \times 100\%, \quad (2)$$

$$B = \frac{W_3}{W_1 \times (100 - A)} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

A ——冷水溶解度,%;

B ——膨胀度,%;

W_1 ——淀粉质量,g;

W_2 ——上清液干燥后的质量,g;

W_3 ——离心后下层沉淀质量,g。

1.2.10 糊化特性测定 参考Cao等^[17]的方法稍作修改。称取 3.00 g 豌豆淀粉样品置于快速黏度分析仪专用铝制样品盒中,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。

1.2.11 热力学特性测定 参考Lutfi等^[18]的方法稍作修改。称取 2 mg 淀粉,6 μL 水于专用铝制坩埚中,4 ℃静置 24 h,仪器参数:检测区间 30~110 ℃,加热速度 10 ℃/min。

1.2.12 流变特性测定 参考王宇等^[19]的方法稍作修改。将 1.2.10 糊化淀粉于室温平衡 8 min,用旋转流变仪(夹具 40 mm,间隙 1 000 μm)测定流变特性。

1.2.13 消化特性测定 参考Wang等^[20]的方法稍作修改。称取 200 mg 淀粉样品于离心管中,加入 15 mL 预先配制的醋酸—醋酸钠缓冲体系(pH 5.2),并投入 5 颗玻璃珠辅助分散。将混合体系于 37 ℃水浴 10 min,通过梯度降温使体系温度稳定至 25 ℃,随后定量注入 5 mL 含 α-淀粉酶(100 U/mg)与糖化酶(300 U/mL)的复合酶工作液,混匀后重新调节水浴温度为 37 ℃,在反应起始(0 min)、中期(20 min)及终期(120 min)3 个特征时间点分别取 5 mL

反应混合液,加入 4 mL 95% 乙醇钝化酶活。4 500 r/min 离心 10 min,取上清液,测定 520 nm 处吸光度。采用葡萄糖氧化酶试剂盒定量测定葡萄糖含量。分别按式(4)~式(6)计算快消化淀粉、慢消化淀粉和抗性淀粉含量。

$$RDS = \frac{(G_{20} - G_0) \times 0.9}{T_s} \times 100\%, \quad (4)$$

$$SDS = \frac{(G_{120} - G_{20}) \times 0.9}{T_s} \times 100\%, \quad (5)$$

$$RS = (1 - RDS - SDS) \times 100\%, \quad (6)$$

式中:

RDS ——快消化淀粉含量,%;

SDS ——慢消化淀粉含量,%;

RS ——抗性淀粉含量,%;

G_0 ——样品未发生水解时的葡萄糖量,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;

T_s ——总淀粉干基的质量,mg。

1.2.14 数据处理 利用Origin2021 软件绘图,各试验重复 3 次取平均值。运用 SPSS 26.0 软件的单因素检验进行显著性分析,整个分析过程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。

2 结果与分析

2.1 微波处理对燕麦淀粉结构的影响

2.1.1 对燕麦淀粉粒径分布的影响 由图 1 可知,不同样品的粒径均表现出多峰分布,呈现两个粒径峰。随着微波处理时间的延长,燕麦淀粉的粒径分布呈现出右移的趋势且峰型变宽。由表 1 可知,随着微波处理时间的延长, $D_{0.1}$ 、 $D_{0.5}$ 、 $D_{0.9}$ 分别从 0.92、7.73、19.08 μm 增加到 8.11、17.22、40.60 μm,表明燕麦淀粉经微波处理后粒径显著增加;微波处理使得淀粉分子内部的温度升高,淀粉分子受热膨胀,分子间距增大,从而导致燕麦淀粉的粒径增加。

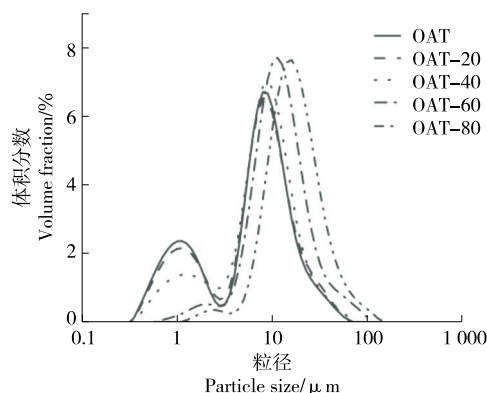


图 1 微波处理对燕麦淀粉粒径分布的影响

Figure 1 Effect of microwave treatment on the particle size distribution of OAT

表 1 微波处理对燕麦淀粉粒径参数的影响[†]

Table 1 Effect of microwave treatment on the particle size parameters of OAT μm					
样品	$D_{(4,3)}$	$D_{(3,2)}$	$D_{0.1}$	$D_{0.5}$	$D_{0.9}$
OAT	9.34 ± 0.06^e	2.81 ± 0.01^e	0.92 ± 0.06^e	7.73 ± 0.05^d	19.08 ± 0.12^d
OAT-20	9.64 ± 0.02^d	2.97 ± 0.03^d	0.98 ± 0.05^d	7.79 ± 0.08^d	20.21 ± 0.08^e
OAT-40	10.52 ± 0.03^e	3.87 ± 0.05^e	1.35 ± 0.05^e	8.55 ± 0.06^e	20.47 ± 0.12^e
OAT-60	15.90 ± 0.04^b	8.89 ± 0.09^b	5.46 ± 0.07^b	12.21 ± 0.07^b	29.40 ± 0.08^b
OAT-80	22.00 ± 0.08^a	13.49 ± 0.12^a	8.11 ± 0.06^a	17.22 ± 0.03^a	40.60 ± 0.22^a

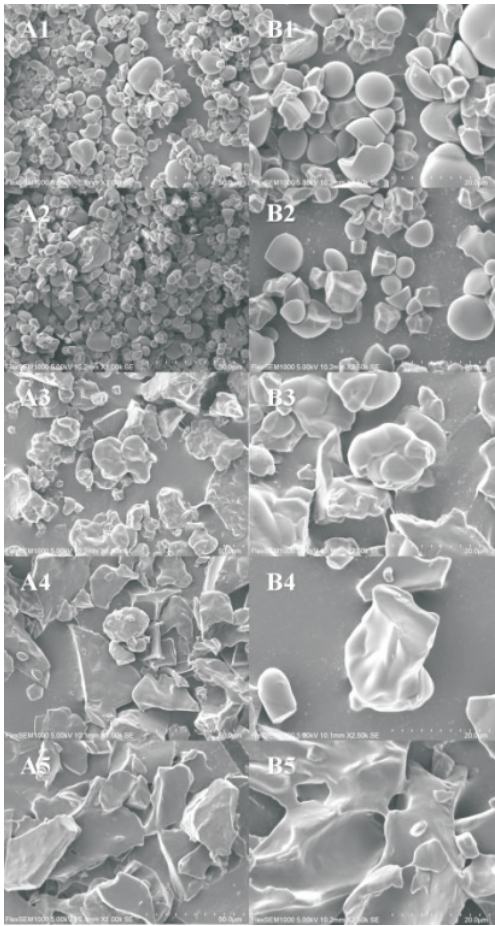
[†] $D_{(4,3)}$ 和 $D_{(3,2)}$ 表征颗粒体系的体积加权平均粒径参数,分别指代体积分布43%和32%时所对应的粒径值;字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

Wang等^[21]研究发现,微波处理会导致淀粉颗粒普遍被破坏,且产生更大尺寸的颗粒。

2.1.2 对燕麦淀粉微观结构的影响 天然燕麦淀粉颗粒形状多不规则,大多呈圆形或椭圆形^[22],表面光滑,以簇状聚集结构呈现。由图2可知,随着微波处理时间的延长,淀

粉颗粒被破坏,由光滑变粗糙,表面逐渐膨胀并进一步聚集。微波处理40 s后,淀粉颗粒膨胀效应加剧,部分淀粉破碎物相互粘连在一起形成团聚物。微波处理60 s后,大部分淀粉颗粒形貌消失,淀粉凝胶化效果明显,冷冻干燥后样品破碎程度增大。综上,微波条件下,淀粉分子间氢键被破坏,淀粉链受热吸水膨胀,淀粉颗粒间黏附性增加,因此淀粉的平均粒径增大,与文茜等^[9]的研究结果类似。

2.1.3 对燕麦淀粉晶体结构的影响 由图3可知,天然燕麦淀粉在衍射角 2θ 为 15.3° , 17.0° , 18.0° , 23.0° 处显示出典型的A型晶体特征峰。随着微波时间的延长,燕麦淀粉的晶体结构发生显著变化,由原来的A型晶型转变为V型晶型,在 13.0° , 20.0° 处均出现符合V型结构特征的衍射峰。这可能是因为微波过程中,高热能的水分子进入淀粉颗粒内部,并作用于结晶区,破坏了双螺旋之间的氢键,在回生过程中,直链淀粉与天然淀粉中的脂质形成复合物^[23]。衍射峰面积与总面积的比例通常用于表征淀粉的结晶度。由图3可知,原燕麦淀粉的相对结晶度为12.32%,随着微波处理时间的延长,淀粉的结晶度降低至5.33%,表明燕麦淀粉的晶体结构被破坏,且淀粉的无定形区域相应增加。Negi等^[24]研究发现,支链淀粉主要负责淀粉中的结晶度,微波破坏了支链淀粉链内和分子间



从上至下分别为微波时间0,20,40,60,80 s;从左至右分别为放大1 000,2 500倍

图2 微波处理燕麦淀粉的扫描电镜图

Figure 2 Scanning electron microscopy images of microwave treated OAT

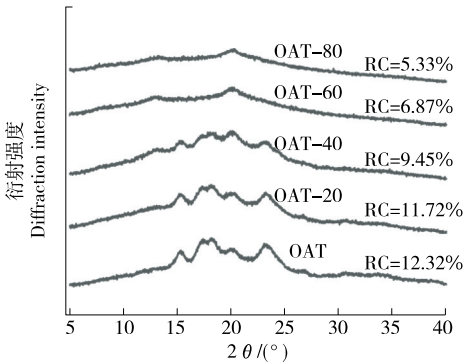


图3 微波处理对燕麦淀粉XRD图谱的影响

Figure 3 Effect of microwave treatment on X-ray diffraction (XRD) patterns of OAT

氢键,导致其晶体结构被破坏,结晶度降低。

2.1.4 对燕麦淀粉红外光谱的影响 由图4可知,所有样品均显示出相似的光谱,未出现新的吸收峰,表明微波处理未导致燕麦淀粉形成新的化学键或官能团。淀粉在 $1\,047, 1\,022\text{ cm}^{-1}$ 处分别对结晶区和非结晶区敏感,因此可通过 $1\,047, 1\,022\text{ cm}^{-1}$ 吸光度比($R_{1\,047\text{ cm}^{-1}/1\,022\text{ cm}^{-1}}$)表征

淀粉的短程有序结构^[25]。由表2可知,天然燕麦淀粉的 $R_{1\,047\text{ cm}^{-1}/1\,022\text{ cm}^{-1}}$ 为0.73,随着微波处理时间的延长下降至0.62,表明微波处理改变了淀粉颗粒中的分子构象,导致淀粉的双螺旋构象发生解离,结合XRD图谱可知,淀粉的短程有序程度下降^[26],该趋势与晶体结构分析结果存在关联性。

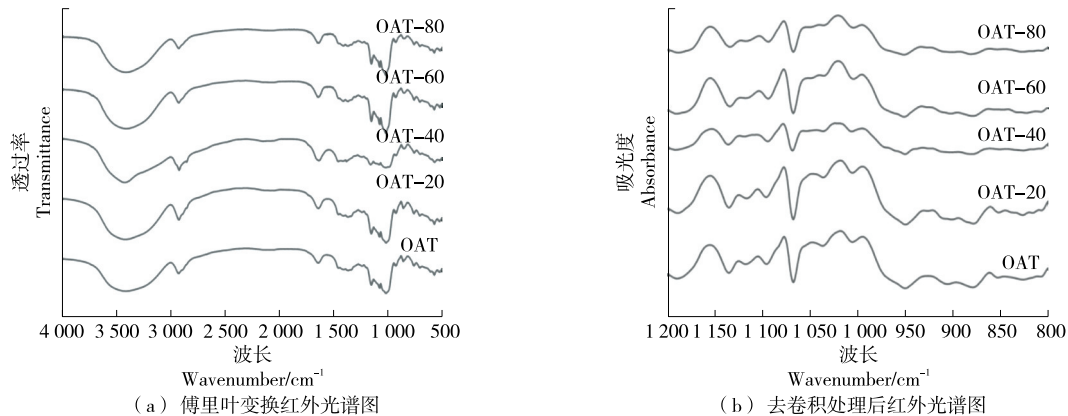


图4 微波处理对燕麦淀粉红外光谱的影响

Figure 4 Effect of microwave treatment on the infrared spectroscopy of OAT

表2 微波处理对燕麦淀粉 $R_{1\,047\text{ cm}^{-1}/1\,022\text{ cm}^{-1}}$ 和半峰宽的影响[†]

Table 2 Effect of microwave treatment on OAT

$R_{1\,047\text{ cm}^{-1}/1\,022\text{ cm}^{-1}}$ and half width peak		
样品	$R_{1\,047\text{ cm}^{-1}/1\,022\text{ cm}^{-1}}$	480 cm^{-1} 处半峰宽
OAT	0.74 ± 0.01^a	15.94 ± 0.05^c
OAT-20	0.71 ± 0.01^b	16.54 ± 0.01^c
OAT-40	0.69 ± 0.03^c	19.36 ± 0.52^b
OAT-60	0.66 ± 0.01^c	20.05 ± 0.07^a
OAT-80	0.62 ± 0.01^d	20.16 ± 0.06^a

[†] 字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

2.1.5 对燕麦淀粉拉曼光谱的影响 由图5可知, $1\,200 \sim 1\,500\text{ cm}^{-1}$ 处的特征峰主要显示—CH的形变振动,而C—C和C—O对称伸缩的特征峰在 $950 \sim 1\,200\text{ cm}^{-1}$ 。拉曼光谱中间波段 480 cm^{-1} 处的碳骨架振动与其半峰宽(FWHM)有较强的正相关性,FWHM可以衡量淀粉的短程有序性。拉曼光谱图 480 cm^{-1} 处的峰值强度越低,FWMH越高,淀粉结晶结构越混乱,从而有序性越低。随着微波处理时间的延长,光谱图中未出现新特征峰或是特征峰的位移,表明微波处理燕麦淀粉FWHM未使其产生新的官能团或化学键。原淀粉在 480 cm^{-1} 处的FWHM为15.94,随着微波处理时间延长增加至20.16,同时峰值强度降低,表明微波处理导致燕麦淀粉短程有序结构被破坏,可能是由于机械力作用使淀粉分子内的糖苷键和结晶区氢键发生断裂或解离所致。

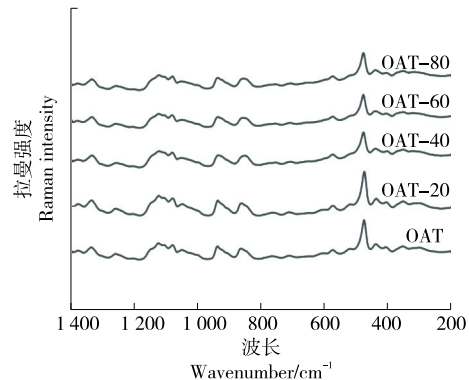


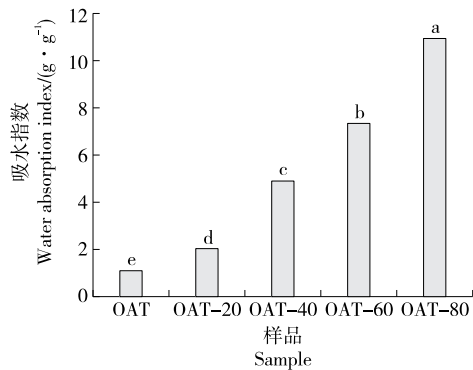
图5 微波处理对燕麦淀粉拉曼光谱的影响

Figure 5 Effect of microwave treatment on the Raman spectroscopy of OAT

2.2 微波处理对燕麦淀粉特性的影响

2.2.1 对燕麦淀粉吸水指数的影响 由图6可知,燕麦淀粉的吸水指数与微波处理时间呈正相关。当微波时间为80 s时,淀粉的吸水指数从 1.13 g/g 上升到 10.97 g/g ,可能是由于微波处理破坏了燕麦淀粉原本的颗粒结构,使得水分子更容易与淀粉中的活性羟基结合,导致淀粉吸水能力增强,最终燕麦淀粉的吸水指数明显提升^[27],与Liu等^[5]的研究结果一致。

2.2.2 对燕麦淀粉溶解度和膨胀度的影响 由图7可知,淀粉的溶解度和膨胀度均呈上升趋势。燕麦淀粉的冷水溶解度从 1.25% 增加到 3.75% ,可能是微波处理破坏了淀



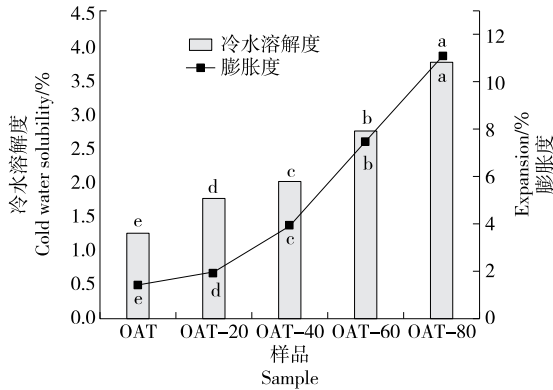
字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图6 微波处理对燕麦淀粉吸水指数的影响

Figure 6 Effect of microwave treatment on OAT water absorption index

粉颗粒,使得水分子更容易渗透到颗粒内部并通过氢键与直链淀粉/支链淀粉中游离羟基结合^[28]。Kamble 等^[29]研究表明,微波处理会导致小麦淀粉的溶解度和膨胀度的增加。

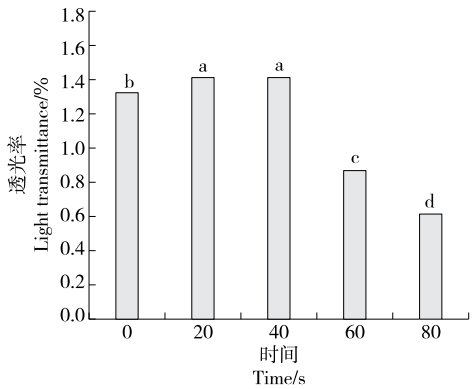
2.2.3 对燕麦淀粉透明度的影响 由图8可知,随着微波处理时间的延长,淀粉的透光率呈先增大后减小趋势。



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图7 微波处理对燕麦淀粉冷水溶解度和膨胀度的影响

Figure 7 Effect of microwave treatment on the cold water solubility and swelling degree of OAT



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图8 微波处理对燕麦淀粉透明度的影响

Figure 8 Effect of microwave treatment on OAT transparency

一方面,微波处理促使淀粉分子结构发生解构重组,这种物理改性作用显著增强了淀粉的亲水特性,使其透明度增大。另一方面,由于淀粉结构的破坏,淀粉支链发生解离,产生了大量的短直链淀粉,淀粉聚集回生导致其持水能力下降,故淀粉的透明度下降。

2.2.4 对燕麦淀粉糊化特性的影响 由图9和表3可知,与未处理样品相比,经过微波处理后的淀粉,其峰值黏度先上升后下降,40 s时峰值黏度最高(4 938 mPa·s),80 s时峰值黏度最低。这可能是微波使燕麦淀粉颗粒膨胀,使得淀粉颗粒表现为孔洞结构,增强了淀粉颗粒与水分子的结合能力,使淀粉颗粒更容易吸水膨胀,导致峰值黏度显著增加^[30]。当微波时间为60 s时,水分子与淀粉颗粒之间发生剧烈摩擦和碰撞,使燕麦淀粉在短时间内迅速升温,从而使淀粉颗粒造成严重损伤并破坏淀粉的分子结构,弱化淀粉分子间的相互作用力,导致燕麦淀粉的峰值黏度显著降低^[31],与王新智等^[32]的研究结果相似。

2.2.5 对燕麦淀粉热特性的影响 由图10可知,天然燕麦淀粉在60℃处检测到吸收峰,该峰强度随着微波处理时间的延长呈现出衰减趋势,当微波处理时间为60 s时,吸收峰消失。原因是燕麦淀粉微晶束解体,结构破坏严重,与XRD分析结果一致。焓值 ΔH 值主要反映了淀粉中双螺旋顺序的损失。由表4可知,与天然燕麦淀粉相

表3 微波处理对燕麦淀粉糊化特性参数的影响[†]

Table 3 Effect of microwave treatment on OAT pasting property parameters

mPa·s

样品	峰值黏度	谷值黏度	崩解值	最终黏度	回生值
OAT	4 156.00 ± 4.24 ^e	2 744.50 ± 7.78 ^c	1 411.50 ± 3.54 ^b	5 479.00 ± 28.28 ^b	2 734.50 ± 2.51 ^b
OAT-20	4 655.50 ± 174.66 ^b	2 972.50 ± 41.72 ^b	1 683.00 ± 132.94 ^a	5 866.50 ± 85.56 ^a	2 894.00 ± 43.84 ^{ab}
OAT-40	4 937.50 ± 57.28 ^a	3 123.50 ± 71.42 ^a	1 814.00 ± 14.14 ^a	6 019.50 ± 71.42 ^a	2 996.00 ± 141.42 ^{ab}
OAT-60	3 824.00 ± 9.90 ^d	2 510.00 ± 19.80 ^d	1 314.00 ± 9.90 ^b	5 561.50 ± 231.22 ^b	3 051.50 ± 211.42 ^a
OAT-80	3 387.75 ± 80.26 ^c	2 265.75 ± 15.20 ^c	1 122.00 ± 95.05 ^c	5 373.75 ± 38.54 ^b	3 108.00 ± 53.74 ^a

[†] 字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

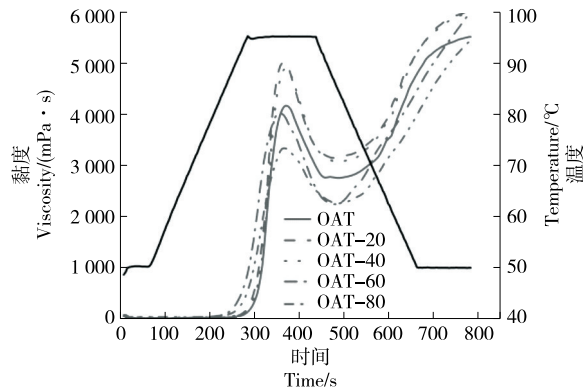
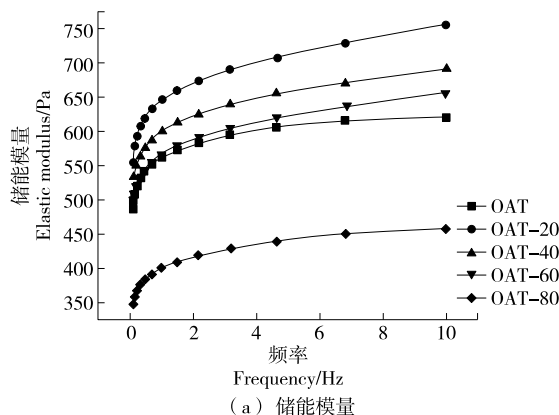


图9 微波处理对燕麦淀粉糊化特性的影响

Figure 9 Effect of microwave treatment on the pasting properties of OAT

比,随着微波处理时间的延长,燕麦淀粉的 ΔH 表现出明显下降的趋势,由5.51下降至消失,原因是微波处理条件下,燕麦淀粉颗粒的结晶区和非结晶区域中存在的一些双螺旋结构可能已被破坏,淀粉颗粒内氢键网络稳定性下降,分子间结合强度减弱,因此淀粉双螺旋构象的解离过程所需热力学能量降低。卢志阳等^[33]研究发现,微波处理下,莲子淀粉的热焓值普遍下降,其中二价无机盐离子(Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cu^{2+})显著加剧了下降趋势,这与微波诱导的淀粉双螺旋结构破坏及无机盐离子对结晶区的影响密切相关。

2.2.6 对燕麦淀粉流变学特性的影响 动态模量(G' 、 G'')是表征淀粉糊流变特性的关键参数,储能模量 G' 为凝胶形变过程中储存的能量,损耗模量 G'' 为淀粉凝胶形变过程释放的能量。由图11可知,随着频率的升高,燕麦淀粉凝胶的 G' 、 G'' 均呈递增趋势,其中 G' 始终高于 G'' ,损耗因子($\tan \delta$)数值均 <1 。表明该凝胶体系呈现出典型的弱凝胶特性^[34]。 G' 和 G'' 随着处理时间的延长呈先上升后下降趋势,可能是淀粉晶体结构和结晶区域均被微波作用破坏,使其抗剪切能力下降。微波处理破坏了燕麦淀



(a) 储能模量

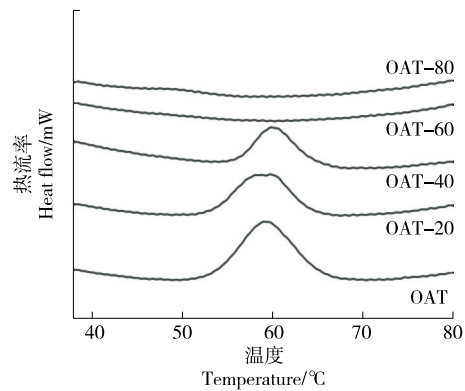


图10 微波处理对燕麦淀粉热特性的影响

Figure 10 Effect of microwave treatment on OAT thermal properties

表4 微波处理对燕麦淀粉热特性参数的影响[†]

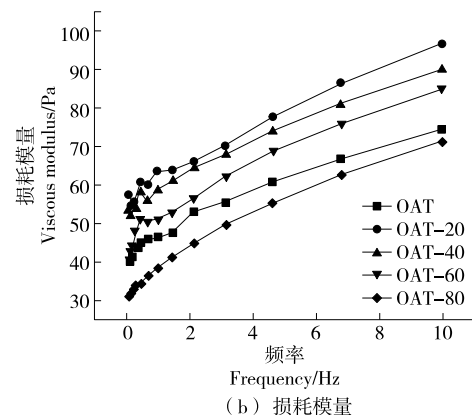
Table 4 Effect of microwave treatment on thermal property parameters of OAT

样品	$T_O/^\circ\text{C}$	$T_P/^\circ\text{C}$	$T_C/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$
OAT	54.27 ± 0.16^c	59.01 ± 0.34^b	64.53 ± 0.27^a	7.71 ± 0.05^a
OAT-20	53.77 ± 0.04^c	58.88 ± 1.13^b	63.17 ± 0.11^c	5.51 ± 0.13^b
OAT-40	56.65 ± 0.09^b	59.86 ± 0.08^b	63.83 ± 0.24^b	3.43 ± 0.33^c
OAT-60	61.29 ± 0.06^a	61.56 ± 0.19^a	61.90 ± 0.13^d	
OAT-80	60.80 ± 0.69^a	61.62 ± 0.11^a	61.92 ± 0.25^d	

[†] 字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

粉的短程有序性,淀粉原本的刚性结构被破坏,淀粉凝胶强度降低。

2.2.7 对燕麦淀粉消化特性的影响 基于淀粉水解的速率,可以将淀粉分为3类,即快消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)和抗性淀粉(RS)。由表5可知,原燕麦淀粉RDS、SDS、RS含量分别为9.81%、10.93%、79.26%,随着微波处理时间的延长,RDS和SDS含量上升,RS含量下



(b) 损耗模量

图11 微波处理对燕麦淀粉流变特性的影响

Figure 11 Effect of microwave treatment on OAT rheological behavior

表 5 燕麦淀粉在不同微波处理时间下的 RDS、SDS 和 RS 含量[†]

Table 5 RDS, SDS, and RS content of OAT under different microwave treatment times %

样品	RDS	SDS	RS
OAT	9.81±7.28 ^d	10.93±4.30 ^c	79.26±3.11 ^a
OAT-20	15.24±6.11 ^d	14.36±4.35 ^b	70.40±3.55 ^a
OAT-40	28.24±1.33 ^c	32.55±8.87 ^a	39.20±9.78 ^b
OAT-60	46.91±5.39 ^b	33.43±6.14 ^a	19.65±7.40 ^c
OAT-80	62.31±9.53 ^a	25.77±7.01 ^b	11.91±2.63 ^c

[†] 字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

降。这可能是由于微波能量场诱导燕麦淀粉双螺旋结构解离,淀粉分子链断裂导致其空间稳定性降低,使消化酶更易渗透分子内部催化水解反应,降低 RS 的形成能力。

3 结论

随着微波处理时间的延长,燕麦淀粉颗粒的微观形貌发生显著改变:淀粉颗粒原始结构被破坏,形态呈现不规则特征。XRD 结果表明,淀粉结晶度由 12.32% 下降至 5.33%,证实微波能导致晶体结构解离。结合 FTIR 分析, $R_{1044\text{ cm}^{-1}/1022\text{ cm}^{-1}}$ 特征峰强度比值降低,同时拉曼光谱在 480 cm^{-1} 处的半峰宽增加,双指标共同表明淀粉分子链的有序排列结构发生解离,微波作用引发粒径分布显著变化。功能特性方面,淀粉吸水指数提升,流变学显示峰值黏度降低,而 DSC 热分析中糊化焓值显著下降至消失。在消化特性方面,微波处理过后的抗性淀粉含量下降,快消化淀粉含量上升。综上,微波处理表现出改变燕麦淀粉性质的能力,从而可以拓宽其在各种食品或非食品中的应用。后续可在微波处理制备燕麦淀粉复合物方向进行进一步探索,开发具有特定功能性质的淀粉基产品,此过程仍需进一步研究。

参考文献

[1] 任长忠, 闫金婷, 董锐, 等. 燕麦营养成分、功能特性及其产品的研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(12): 438-446.
REN C Z, YAN J T, DONG R, et al. Research progress on oat nutrients, functional properties and related products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(12): 438-446.

[2] PUNIA S, SANDHU K S, DHULL S B, et al. Oat starch: Physico-chemical, morphological, rheological characteristics and its applications: a review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 154: 493-498.

[3] 李超敏, 孙永军, 鞠文明, 等. 燕麦淀粉的制备及物理改性研究进展[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2023, 42(5): 87-98.
LI C M, SUN Y J, JU W M, et al. Research progress on preparation, and physical modification of oat starch[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2023, 42(5):

87-98.

[4] KUMAR Y, SINGH L, SHARANAGAT V S, et al. Effect of microwave treatment (low power and varying time) on potato starch: microstructure, thermo-functional, pasting and rheological properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 155: 27-35.

[5] LIU G X, 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.

[6] 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.
LIN G R, ZHANG L F, HUANG X L. Effect of microwave treatment on the physicochemical and digestive properties of loquat kernel starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(15): 55-61.

[7] 郝宗围, 余振宇, 胡尧, 等. 冷冻球磨处理对糯米淀粉结构、特性及消化性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(11): 39-47.
HAO Z W, YU Z Y, HU Y, et al. Effect of freezing ball milling treatment on the structure, properties and digestibility of waxy rice starch[J]. Food Science, 2023, 44(11): 39-47.

[8] CHEN C J, LI G T, HEMAR Y, et al. Physicochemical properties and molecular structure of lotus seed starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 305: 120515.

[9] 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.
WEN Q, ZHANG X X, LIU C, et al. Effect of microwave modification on structure and digestibility of chestnut starch[J]. Food and Fermentation Industry, 2025, 51(12): 236-241.

[10] ZHAN Q, YE X T, ZHANG Y, et al. Starch granule-associated proteins affect the physicochemical properties of rice starch[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105504.

[11] 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.

[12] ZHANG M, XU S Q, ZUO Z Y, et al. Modulation of rice starch physicochemical properties and digestibility: the role of highland barley non-starch polysaccharide fractions[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 279: 135206.

[13] 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.

[14] 蒲华寅, 陈旭艳, 郭思敏, 等. 微波处理对不同链支比玉米淀粉结构及理化性质的影响[J]. 陕西科技大学学报, 2022, 40(2): 39-45.
PU H Y, CHEN X Y, GUO S M, et al. Effects of microwave treatment on structure and physicochemical properties of corn starches with different amylose/amylopectin ratios[J]. Journal

- of Shaanxi University of Science & Technology, 2022, 40(2): 39-45.
- [15] 赵忠云, 徐慧, 吴宗俊, 等. 冷冻球磨处理对燕麦淀粉结构、理化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(16): 54-62.
ZHAO Z Y, XU H, WU Z J, et al. Effect of frozen ball milling treatment on the structure and physicochemical properties of oat starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(16): 54-62.
- [16] YADAV P, BHARATHI U, SURUTHI K, et al. Effect of ultrasonic modification on physicochemical, structural, functional properties and *in vitro* starch digestibility of *Amaranthus paniculatus* (Rajgeera) starch[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2024, 14(16): 19 017-19 024.
- [17] CAO S P, YU Y T, YIN Y P, et al. Combination mechanism and structural properties of complexes between lipid and small granule starch isolated from *Agriophyllum squarrosum* (L.) moq. seeds[J]. Starch-Stärke, 2022, 74(7/8): 2100215.
- [18] LUTFI Z, KALIM Q, SHAHID A, et al. Water chestnut, rice, corn starches and sodium alginate. A comparative study on the physicochemical, thermal and morphological characteristics of starches after dry heating[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 184: 476-482.
- [19] 王宇, 李超, 谷宗艳, 等. 超声处理对黑米粉结构、理化及消化性的影响研究[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(5): 69-78.
WANG Y, LI C, GU Z Y, et al. Effect of ultrasonic treatment on structure, physicochemical and digestibility of black rice flour[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(5): 69-78.
- [20] WANG X Y, ZHAO Q, LI R J, et al. Effect of microwave treatment on the structural and physicochemical properties of amylose partially removed sorghum starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 300: 140285.
- [21] WANG L Y, WANG M, ZHOU Y H, 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.
- [22] ZHANG M Y, CHEN G Y, LI M Y, et al. Effects of microwave on microscopic, hydration, and gelatinization properties of oat and its application on noodle processing[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(4): e16470.
- [23] CHEN X Y, ZHANG H, ZHU L, et al. The combined actions of the granule surface barrier and multiscale structural evolution of starch on *in vitro* digestion of oat flour[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 259: 129334.
- [24] NEGI P, JOIA S, AHMAD SIDDIQI R, et al. Impact of microwave treatment on the physicochemical, structural, and rheological properties of buckwheat (*Fagopyrum esculentum* L.) starch[J]. Starch-Stärke, 2025, 77(4): e202400162.
- [25] CAO H W, NI D F, HUANG R H, et al. Elucidating the modulation of oat starch-protein complex molecular structure and starch digestion under microwave field treatment[J]. Food Bioscience, 2025, 63: 105712.
- [26] ZHI W L, ZHOU Y, WANG R B, et al. Effect of microwave treatment on the properties of starch in millet kernels[J]. Starch-Stärke, 2022, 74(9/10): 2200063.
- [27] 张明月. 微波预糊化对燕麦全粉挤压面条品质的影响[D]. 天津: 天津科技大学, 2022: 18-19.
ZHANG M Y. Effect of microwave pre-gelatinization on the quality of extruded whole oat noodles[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2022: 18-19.
- [28] ZHOU Y H, WANG M, WANG L Y, et al. Comparison of the effect of ultrasound and microwave on the functional properties and *in vitro* digestibility of normal maize starch and potato starch[J]. Journal of Food Process Engineering, 2023, 46(2): e14222.
- [29] KAMBLE D B, SINGH R, PAL KAUR B, et al. Effect of microwave processing on physicochemical properties, antioxidant potential, *in vitro* protein digestibility and microstructure of durum wheat semolina[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2020, 14(2): 761-769.
- [30] 郑玉玉, 杨晔, 尹登科, 等. 微波对玉米淀粉结构及理化性质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(11): 99-104.
ZHENG Y Y, YANG Y, YIN D K, et al. Effect of microwave on the structure and physicochemical properties of maize starch [J]. Food Science, 2022, 43(11): 99-104.
- [31] MA M T, ZHANG Y, CHEN X J, et al. Microwave irradiation differentially affect the physicochemical properties of waxy and non-waxy hull-less barley starch[J]. Journal of Cereal Science, 2020, 95: 103072.
- [32] 王新智, 王天池, 吴玉柱, 等. 微波间歇干燥对玉米籽粒中淀粉理化特性的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(2): 179-190.
WANG X Z, WANG T C, WU Y Z, et al. Effects of microwave intermittent drying on physicochemical properties of starch in corn kernels[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(2): 179-190.
- [33] 卢志阳, 涂东堃, 雷艳平, 等. 微波作用下无机盐离子对莲子淀粉结构特性和理化性质的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2023, 52(3): 415-422.
LU Z Y, TU D K, LEI Y P, et al. Effect of inorganic salt ions on the structure and physicochemical properties of lotus seed starch under microwave irradiation[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2023, 52(3): 415-422.
- [34] XU Y, ZHANG R S, WANG K Y, et al. Effect of carboxymethyl cellulose and/or wheat gluten on the pasting, rheological and quality properties of wheat starch-based batter for deep-fried products[J]. Food Chemistry: X, 2025, 26: 102262.