DOI:10.12441/spyswjs.20241109001 [文章编号] 1673-1689(2026)01-0165-08

改性方式对油莎豆粉加工特性的影响

孙孝威[1] 宋春丽[1,2] 任 健[1,2*]

(1. 齐齐哈尔大学食品与生物工程学院,黑龙江 齐齐哈尔 161006; 2. 齐齐哈尔大学植物性食品加工技术教育部工程研究中心,黑龙江 齐齐哈尔 161006)

摘要:【目的】探究3种改性方式对油莎豆粉加工特性的影响。**【方法】**采用超微粉碎、微波处理和酶解改性3种方式对油莎豆粉进行处理,分析不同处理方式对油莎豆粉持油性、水合特性、质构特性、流变特性等加工特性的影响。**【结果】**与未改性油莎豆粉相比,超微粉碎处理增加了粉体的比表面积,持油性提升了74.57%,损耗角(tan δ)显著增大;该处理所制面团的硬度、内聚性和咀嚼性均显著提高,分别提升了9.27%、15.00%和35.00%,因此超微粉碎油莎豆粉更适合制作对面筋结构要求较低的食品。微波处理促使油莎豆粉淀粉糊化,增加了粉体可溶性物质质量分数,改善了粉体的吸水性指数(water absorption index,WAI)、水溶性指数(water solubility index,WSI)及膨胀势(swelling power,SP),分别提升了13.04%、2.05%和10.19%;该处理所制面团的内聚性、弹性、胶黏性均呈上升趋势,分别提升了65.00%、80.00%和69.35%,因此微波处理油莎豆粉更适合用于制作糊状食品。酶解改性使油莎豆粉结构变得疏松并形成孔隙结构,显著改善了粉体的持油性、WAI、WSI、SP,分别提升了73.72%、36.13%、48.21%和92.55%;该处理所制面团的硬度、胶黏性分别下降了18.85%和8.06%,且tan δ最低,更适合用于制作冲调类食品。**【结论】**3种改性方式均能显著改善油莎豆粉的加工特性,为油莎豆在不同类型食品中的应用提供了参考。

关键词:超微粉碎;微波;酶法;油莎豆;加工特性

Effects of Modification Methods on the Processing Properties of *Cyperus esculentus* Powder

SUN Xiaowei[1] *SONG Chunli*[1,2] *REN Jian*[1,2*]

(1. College of Food and Bioengineering, Qiqihar University, Qiqihar 161006, China; 2. Plant Food Processing Technology Engineering Research Center of the Ministry of Education, Qiqihar University, Qiqihar 161006, China)

Abstract: [**Objective**] This study aims to explore the effects of three modification methods on the processing properties of *Cyperus esculentus* powder. [**Method**] Three modification methods (superfine grinding, microwave treatment, and enzymatic treatment) were employed to process *Cyperus esculentus* powder. The effects of these treatments on the processing properties including oil holding capacity, hydration properties, textural properties, and rheological properties of *Cyperus esculentus* powder were analyzed. [**Result**] In comparison to the native *Cyperus esculentus* powder, ultrafine grinding treatment increased the specific surface area of the powder, enhanced the oil holding capacity by 74.57%, and significantly increased the loss angle (tan δ). Additionally, this treatment significantly increased the hardness, cohesiveness, and chewiness of the dough by 9.27%, 15.00%, and 35.00%, respectively. Therefore, the ultrafine powder was more suitable for producing foods requiring a lower gluten structure. Microwave treatment promoted starch gelatinization and increased the mass fraction of soluble substances, improving the water absorption index (WAI), water solubility index (WSI), and swelling potential

通信作者:任健(1970—),男,博士,教授,博士研究生导师,主要从事通过酶工程与物理化学技术提高富含油脂的植物蛋白生物利用度和玉米主食工业化研究。E-mail:renjian1970789@163.com

收稿日期:2024-11-09 **修回日期:**2025-01-17

(SP) of the powder by 13.04%, 2.05%, and 10.19%, respectively. Additionally, the cohesiveness, elasticity, and adhesiveness of dough prepared with microwave-treated powder increased by 65.00%, 80.00%, and 69.35%, respectively. Therefore, microwave-treated powder was suitable for preparing paste-based foods. Enzymatic treatment loosened the starch structure and created a porous framework, significantly increasing the oil holding capacity, WAI, WSI, and SP of the powder by 73.72%, 36.13%, 48.21%, and 92.55%, respectively. The hardness and adhesiveness of the prepared dough decreased by 18.85% and 8.06%, respectively. Additionally, the lowest tan δ of the prepared dough indicated that the modified powder was suitable for preparation of brewing foods. [**Conclusion**] The three distinct modification methods significantly enhanced the processing properties of *Cyperus esculentus* powder, providing a reference for its potential application in various types of food.

Keywords: superfine grinding; microwave; enzymatic method; *Cyperus esculentus*; processing property

油莎豆是一种高产、优质、综合利用价值高的新型油料作物[1]，其主要应用领域是食用油的生产，但综合利用率仍处于较低水平。油莎豆缺乏面筋蛋白，且纤维含量较高，对其产品品质造成了不利影响，导致产品出现口感粗糙、黏弹性差、适口性不佳等问题，进而极大地限制了油莎豆在食品加工中的应用。因此，运用现代加工技术提升油莎豆产品的品质与加工利用率，对于油莎豆产品的研发和推广具有重要意义。

谷物经改性处理后，其加工性质会发生改变，进而改善粉体品质。颗粒较小的粉体具有更大的比表面积，而超微粉碎技术能够使粉体更易与水结合。此外，粒径较小的颗粒有助于降低产品的粗糙感，改善粉体的加工品质。研究发现，荞麦颗粒经超微粉碎处理后，可获得均匀的微米级或纳米级粉末结构，这种处理使粉体的比表面积和孔隙率增大，从而提高了淀粉的透光率、溶解度、膨胀力、持水性和浸出率[2]。微波处理可通过影响谷物的温度、水分含量、脂肪酸组成以及蛋白质与淀粉的结构和性质改变谷物的理化性质、营养成分、加工特性，针对不同谷物采用适宜的微波处理条件，可显著改善其加工特性。吴丽萍等[3]研究发现，微波处理后的燕麦麸水溶性膳食纤维可显著提升发酵乳的品质及抗氧化活性。酶解改性能够在淀粉糊化温度以下对淀粉进行修饰，进而改变淀粉的结构与性质，使谷物粉的品质得到改善[4]。林嘉聪等[5]研究发现，酶解改性提高了杂粮代餐粉的生物活性物质及抗氧化活性。因此，采用改性处理方式来改善油莎豆粉加工特性是一种可行的产品制备方法，但经改性处理后，油莎豆粉的加工特性及适用范围仍需进行系统分析。

基于此，作者以油莎豆作为原料，通过超微粉碎、微波处理、酶解改性3种方式对油莎豆进行改性处理，测定并分析改性油莎豆粉的加工特性，旨在明确不同改性油莎豆粉在加工特性上的差异及其应用场景，为油莎豆相关产品的研发提供理论依据，拓展油莎豆的应用领域。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

油莎豆：沈阳好易收油莎豆种植专业合作社；α-淀粉酶（1 400 U/g）：河南高宝实业有限公司；纤维素酶（10 000 U/g）：南宁庞博生物工程有限公司；乙醇（分析纯）：国药集团化学试剂有限公司；FITC（化学纯）：新维创生物科技（重庆）有限公司。

1.2 设备与仪器

超微粉碎机：30型，山东鼎信超微粉碎技术有限公司；空腔射流微波膨化机：XP-4kW型，山东宣沛超微设备有限公司；胶体磨：LTJM-80T型，廊坊市廊通机械有限公司；扫描电子显微镜（SEM）：S-3400型，日本日立株式会社；激光共聚焦显微镜（CLSM）：LSM710型，德国蔡司公司；质构仪：QTS-25型，美国博乐飞公司；高级旋转流变仪：Kinexus型，英国马尔文公司。

1.3 方法

1.3.1 改性油莎豆粉的制备

1）未改性油莎豆粉：筛选颗粒圆润的油莎豆，清洗去除杂质后，粉碎并过80目筛，封袋保存。

2）超微粉碎油莎豆粉：筛选颗粒圆润的油莎豆，清洗去除杂质后，先经粉碎机初步粉碎并过筛，再采用超微粉碎机粉碎5 min，随后过200目筛，封袋保存。

3）微波处理油莎豆粉：筛选颗粒圆润的油莎

豆，清洗去除杂质后，采用空腔射流微波膨化机处理1.5 min，粉碎并过80目筛，封袋保存。

4）酶解改性油莎豆粉：筛选颗粒圆润的油莎豆，清洗去除杂质后，粉碎并过80目筛，再将过筛的油莎豆粉经胶体磨细磨；按质量分数0.4%添加α-淀粉酶，在65 ℃条件下酶解50 min；再加入质量分数1.0%的纤维素酶，在50 ℃条件下酶解2 h；酶解结束后，煮沸10 min灭酶，冷冻干燥后封袋保存。

1.3.2 持油性测定

参照Zhao等[6]的方法，在离心管中加入1.0 g样品，再加入30 mL大豆油并充分混匀。将混合液置于沸水浴中处理20 min，期间持续搅拌；取出冷却后，于3 000 r/min条件下离心15 min。离心结束后，倒出上清液，将离心管倒置15 min以排出残余液体，称质量。根据式（1）计算样品的持油性。

$$X=\frac{m_1-m_2}{m} \quad (1)$$

式中：

X——持油性；

m_1——样品和离心管总质量，g；

m_2——离心管和样品沉淀物总质量，g；

m——样品质量，g。

1.3.3 水合特性测定

参照Sonkar等[7]的方法，准确称取2.5 g样品，加入30 mL蒸馏水并充分混匀，于30 ℃水浴30 min，期间持续搅拌；随后以6 000 r/min的转速离心10 min，分离并保留上清液，对沉淀物进行称质量；将上清液于105 ℃烘干至恒质量。样品的WAI按式（2）计算，WSI按式（3）计算，SP按式（4）计算。

$$L=\frac{m_4}{m_3} \quad (2)$$

式中：

L——WAI；

m_3——样品质量，g；

m_4——沉淀物质量，g。

$$Y=\frac{m_5}{m_3} \quad (3)$$

式中：

Y——WSI；

m_3——样品质量，g；

m_5——上清液残留物质量，g。

$$Z=\frac{m_4}{m_3-m_5} \quad (4)$$

式中：

Z——SP；

m_3——样品质量，g；

m_4——沉淀物质量，g；

m_5——上清液残留物质量，g。

1.3.4 质构特性测定

参照王綦等[8]的方法，将样品制成4 cm×4 cm×2 cm的长方体面团，于室温下静置10 min，将样品面团置于质构仪上。设置参数为：测前速度2 mm/s，距离30 mm，测试速度5 mm/s，间隔时间5 s，形变量50%，测后速度10 mm/s，每组样品重复3次。

1.3.5 流变特性测定

参照Hu等[9]的方法，将面团置于平板上，采用PU20平行板，调节夹板间距为1 mm，在25 ℃条件下，于0.1~10.0 Hz频率进行测试，记录面团的弹性模量（G'）和黏性模量（G''）变化。

1.3.6 CLSM观察微观结构

参照Zheng[10]等的方法，称取5 mg样品，加入1 mL含0.1 mg/mL FITC的乙醇溶液，于37 ℃振荡染色30 min；随后在25 ℃、3 000 r/min条件下离心1 min，弃去上清液；再加入1 mL乙醇，重复离心并弃去上清液；最后加入1 mL乙醇充分混匀，取10 μL样品滴加至载玻片上，观察样品的微观结构。

1.3.7 SEM观察微观结构

将样品均匀涂抹在裁剪成小块的导电胶上，再将导电胶粘贴在样品台上；随后对样品表面进行喷金处理，处理完成后，采用SEM观察样品的微观结构。

1.4 数据统计

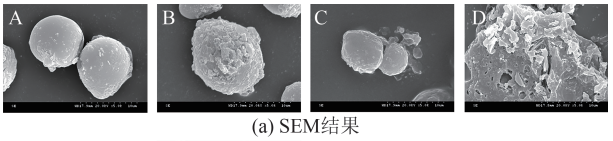
试验结果均采用平均值±标准差表示，使用Microsoft Office Excel 2020、Origin 2019软件进行数据处理和制图，采用SPSS 25.0进行数据显著性分析，$P<0.05$表示差异显著。

2 结果与讨论

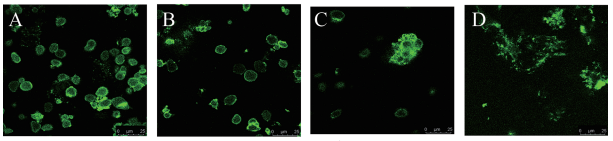
2.1 改性方式对油莎豆粉中淀粉微观结构的影响

CLSM和SEM可观察油莎豆粉中淀粉微观结构的变化，为深入分析油莎豆粉中淀粉的变化规律提供依据。淀粉作为一种多糖，分子间通过氢键结

合，排列紧密且难溶于冷水，因此淀粉的结构与性质变化对油莎豆粉的性能具有重要影响。由图1(a)可以看出，未改性油莎豆粉的淀粉颗粒多呈圆形且表面圆润光滑。经超微粉碎处理后，淀粉颗粒在机械力作用下外观变得粗糙，部分淀粉颗粒表面出现沟壑和凹陷，进而增大了粉体的比表面积。微波处理时，油莎豆在高温作用下内部细胞壁膨胀变形，淀粉发生糊化，大量淀粉颗粒堆积黏结形成大分子的热聚集体，可溶性物质增多[4]。酶解改性后，淀粉颗粒变形较为严重，呈不规则形状，这一现象可能是由于淀粉颗粒因酶解导致分子间氢键断裂，破坏了原有的缔合状态，使结构变得疏松并形成孔隙结构，这种结构变化不仅使淀粉颗粒表面出现更多可与水分子结合的氢键位点，也让水分子更容易渗入淀粉颗粒内部[11]。CLSM观察结果同样证实了油莎豆粉的淀粉颗粒结构发生了上述变化，见图1(b)。有研究表明，淀粉颗粒的分子结构变化会直接影响其功能与性质[12]，因此3种改性方式对油莎豆粉中淀粉结构的改变，必然会进一步影响油莎豆粉的加工特性。



(a) SEM结果



(b) CLSM结果

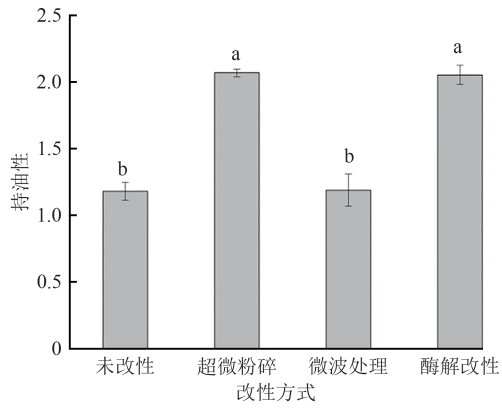
A—未改性油莎豆粉；B—超微粉碎油莎豆粉；C—微波处理油莎豆粉；D—酶解改性油莎豆粉。

图1 改性方式对油莎豆粉中淀粉微观结构的影响

Fig. 1 Effects of modification methods on the microstructure of starch in *Cyperus esculentus* powder

2.2 改性方式对油莎豆粉持油性的影响

食品的持油能力与其脂肪流失特性密切相关，该能力对食品的质地、口感和营养价值具有重要影响，在饼干、糕点等食品的加工中具有重要作用。超微粉碎和酶解改性处理显著提高了油莎豆粉的持油性，较未改性油莎豆粉分别提升了74.57%和73.72%，而微波处理对油莎豆粉的持油性影响相对较小，见图2。超微粉碎处理后油莎豆粉的持油性升高，可能是由于在机械力作用下细胞被破坏，部分亲油活性基团得以暴露；同时，超微粉碎使淀粉颗粒表面出现沟壑和凹陷，增大了粉体的比表面积，进而增强了其油脂吸附能力[13]。酶解改性油莎豆粉的持油性升高，是因为酶解破坏了淀粉原有的完整结构，使淀粉结构变得疏松并产生孔洞，这些孔洞提供了更多的油脂结合位点，提升了淀粉的吸附性能[14]，使得粉体的油脂吸附能力提高，这与油莎豆粉淀粉微观结构的分析结果一致。



不同字母表示差异显著(P<0.05)。

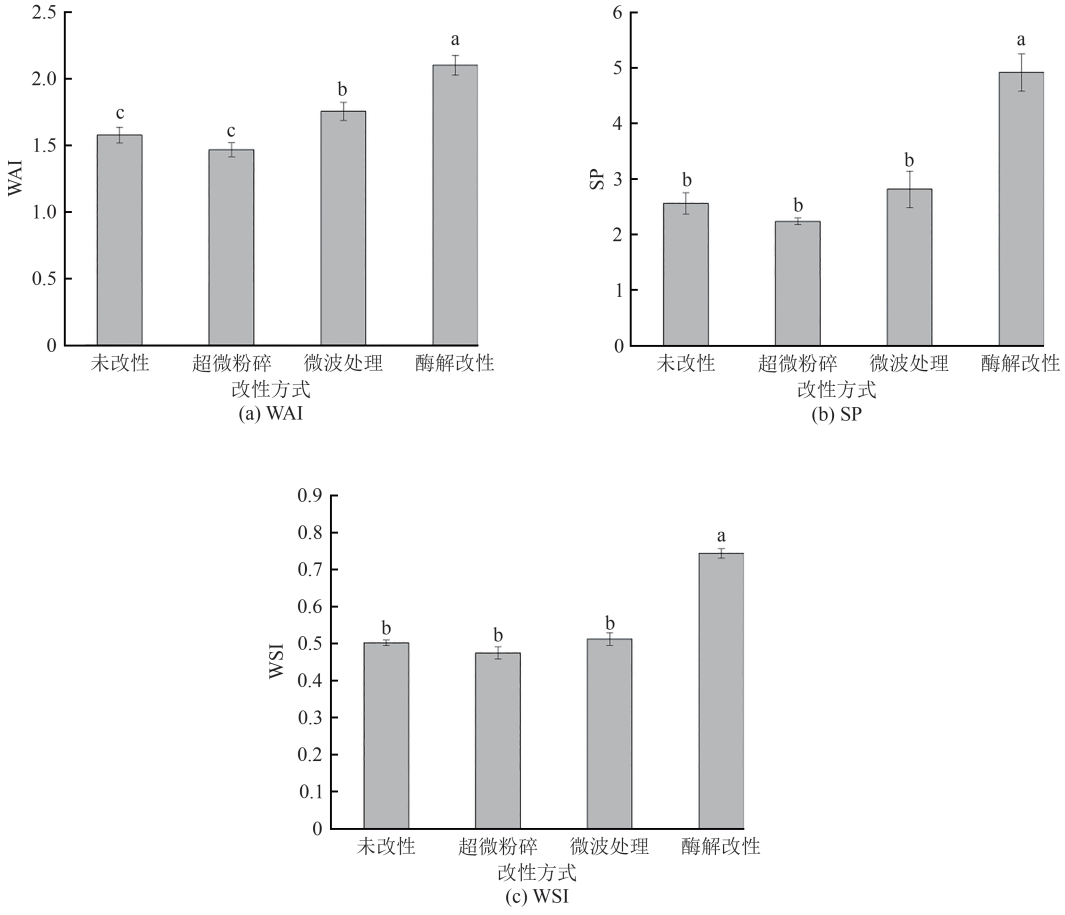
图2 改性方式对油莎豆粉持油性的影响

Fig. 2 Effects of modification methods on oil holding capacity of *Cyperus esculentus* powder

2.3 改性方式对油莎豆粉水合特性的影响

WAI、WSI和SP可表征油莎豆粉的水合特性，其中WAI反映油莎豆粉的吸水力，WSI反映其溶解性，SP反映其持水力。通常样品的持水力越低，越适合制作糕点类食品，反之则更适合制作糊状食品。

由图3可知，与未改性油莎豆粉相比，超微粉碎油莎豆粉的WAI、WSI、SP均呈下降趋势。这可能是由于超微粉碎减小了油莎豆粉的粒径，增大了比表面积，从而增加了与水的接触面积；但油



不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。

图3　改性方式对油莎豆粉水合特性的影响

Fig. 3　Effects of modification methods on the hydration properties of *Cyperus esculentus* powder

莎豆粉作为油料作物，本身油脂含量较高，超微粉碎过程中细胞结构被破坏，导致样品中亲油活性基团暴露，进而增强了疏水作用。因此，超微粉碎改性油莎豆粉更适合用于制作饼干、糕点类食品。

微波处理油莎豆粉的WAI、WSI和SP较未改性样品分别提升了13.04%、2.05%和10.19%。这可能是由于在高温条件下，物料中不溶性成分的分子键发生断裂，转化为可溶性成分；同时，原料中的淀粉、膳食纤维、蛋白质等大分子物质吸收的热量逐渐增加，导致水分子动能提高。其中，WAI与大分子的亲水性和成胶能力密切相关，因此WAI的提升使得产品结合水的能力增强，粉体的成糊稳定性也得到改善；而随着大分子物质的降解，粉体中的小分子物质含量增加，进而提高了WSI[15]。因此，微波处理改性油莎豆粉更适合用于制作糊状食品。

酶解改性油莎豆粉的WAI、WSI、SP均显著升高，较未改性样品分别提升了36.13%、48.21%和92.55%，表明其吸水力、溶解性和持水力均得到显著改善。这可能是由于酶解改性使淀粉颗粒膨胀与破裂更为彻底，导致其结构变得疏松并形成孔隙；该过程不仅降低了淀粉的相对分子质量，增加了小分子糖类等可溶性物质的含量，还使得淀粉颗粒表面暴露更多与水分子氢键结合的位点，进而改善了粉体的亲水性、成胶能力、冲调特性、加工特性及流变特性[16]。因此，酶解改性油莎豆粉更适合用于制作冲调类食品。

2.4　改性方式对油莎豆粉所制面团质构特性的影响

质构特性是食品在力学、触觉、视觉及听觉等方面所表现出的综合特征，能够从侧面反映食物的感官体验，质构特性主要包括食品的硬度、弹性、内聚性和咀嚼性等指标。由表1可以看出，与未改性油莎豆粉所制面团相比，超微粉碎油莎豆粉所制面团的硬度、内聚性和咀嚼性均显著增强，

表 1　不同改性方式的油莎豆粉所制面团的质构特性

Table 1　Effects of different modification methods on texture properties of the dough prepared from *Cyperus esculentus* powder

改性方式	硬度/N	内聚性	弹性/mm	胶黏性/N	咀嚼性/N
未改性	3.13±0.35^{b}	0.20±0.00^{c}	0.30±0.05^{b}	0.62±0.11^{b}	0.20±0.10^{c}
超微粉碎	3.42±0.18^{a}	0.23±0.06^{b}	0.39±0.10^{b}	0.73±0.11^{b}	0.27±0.12^{b}
微波处理	3.08±0.11^{b}	0.33±0.12^{a}	0.54±0.17^{a}	1.05±0.33^{a}	0.60±0.36^{a}
酶解改性	2.54±0.12^{c}	0.20±0.00^{c}	0.33±0.02^{b}	0.57±0.04^{c}	0.20±0.00^{c}

注：同列不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。

微波处理油莎豆粉所制面团的内聚性、弹性、胶黏性和咀嚼性也显著增强，而酶解改性油莎豆粉所制面团的硬度和胶黏性显著降低。其中，超微粉碎油莎豆粉所制面团的质构特性改善最为显著，这可能是由于超微粉碎后油莎豆粉的粒径减小，小粒径颗粒之间易相互吸附，使得面团内部空隙减少，进而降低了面团的蓬松度；同时，油莎豆粉不含面筋蛋白，无法形成完整的面筋蛋白网络结构，这一特性导致面团硬度增大，进而使面团的胶黏性、弹性和咀嚼性有所上升[17]，因此超微粉碎油莎豆粉更适合添加到对面筋结构需求较低的面制品中。微波处理破坏了大部分易糊化淀粉的颗粒结构，油莎豆粉经预糊化后，吸水能力显著增强，淀粉分子间更易形成较强的氢键，进而形成稳定的凝胶结构。这一过程显著提高了面团的内聚性和弹性[18]，使其更适合用于糊状食品的制作。油莎豆粉经酶解改性处理后，粉体中的淀粉、纤维素含量降低，相对分子质量较大的物质被分解为相对分子质量较小的糊精、葡萄糖和低聚糖。这一过程改变了淀粉分子间的孔隙结构，削弱了分子间的相互作用力，导致面团的硬度和胶黏性降低[4]，使其更适合用于制作冲调类食品。

2.5　改性方式对油莎豆粉所制面团流变特性的影响

流变学是研究物体在载荷下变形和流动的科学，涉及弹性、塑性、黏滞性和强度等基本流变特性概念[7]。由图 4 可以看出，3 种改性油莎豆

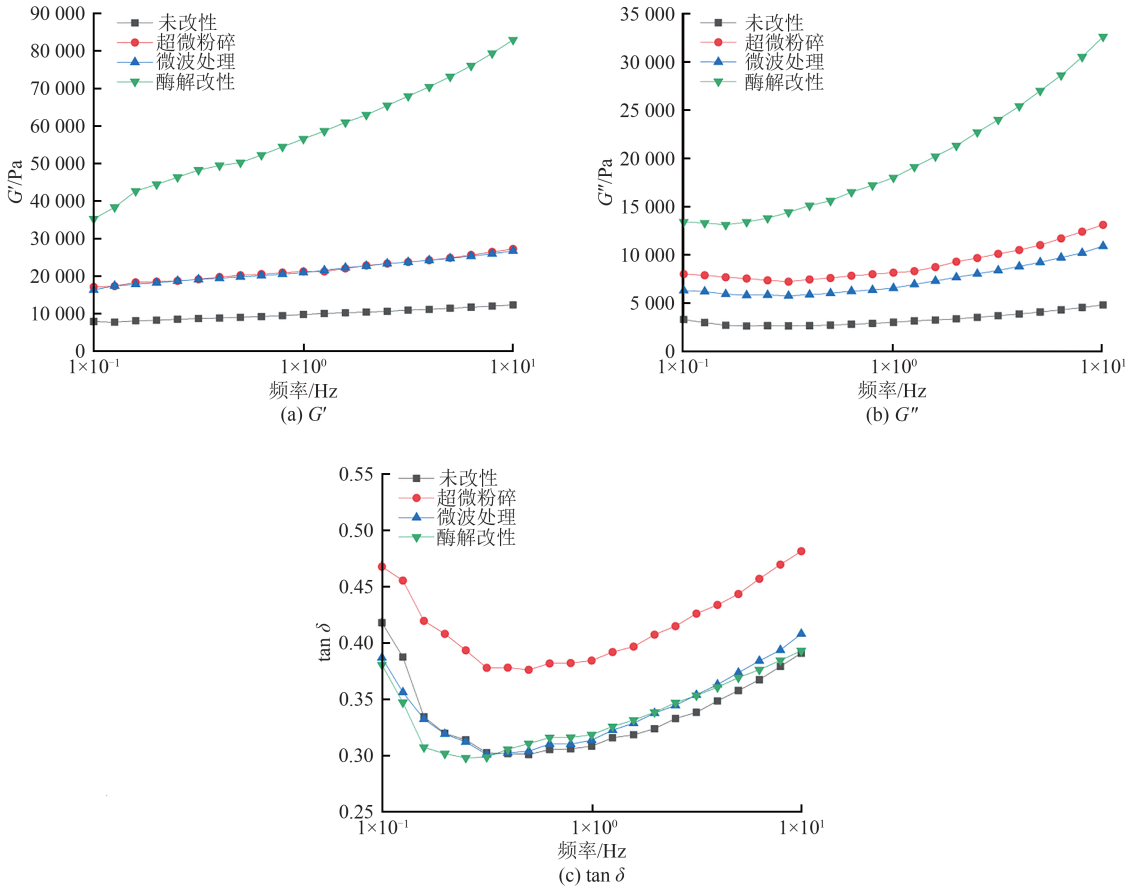


图 4　不同改性方式的油莎豆粉所制面团的流变特性

Fig. 4　Effects of different modification methods on rheological properties of the dough prepared from *Cyperus esculentus* powder

粉所制面团的G'与G''均随扫描频率的增加而升高，且始终满足$G'>G''$，这表明面团具有更明显的弹性特征。其中，酶解改性油莎豆粉所制面团的G'和G''明显高于超微粉碎油莎豆粉和微波处理油莎豆粉所制面团，这可能是由于α-淀粉酶将淀粉水解成小分子多糖，同时加热促使淀粉分子与多糖发生交联反应，形成致密的网状结构，进而提高了面团的弹性和黏性[19]。

不同改性油莎豆粉所制面团的tan δ呈现先减小后增大的趋势。其中，超微粉碎油莎豆粉所制面团在10 Hz时的tan δ为0.48，明显高于微波处理油莎豆粉所制面团（0.40）和酶解改性油莎豆粉所制面团（0.39）。tan δ越大，面团中黏性成分比例越大、流动性越强，面筋弱化度也越高，因此超微粉碎油莎豆粉所制面团的面筋强度低于另外2种油莎豆粉所制面团。这一结果与徐小云[20]的研究结论一致，进一步表明超微粉碎油莎豆粉更适合添加到对面筋结构需求较低的面制品中。

3 结论

作者通过超微粉碎、微波处理和酶解改性3种方式处理油莎豆粉，并对其加工特性进行测定与分析。结果表明，3种改性油莎豆粉的加工特性均得到显著改善，但各改性方式对应的改善指标存在差异。超微粉碎处理使油莎豆粉的淀粉颗粒表面形成沟壑与凹陷，增大了比表面积，同时显著提升了粉体的持油性，改善了膨胀势及损耗角。微波处理使油莎豆粉内部细胞壁膨胀变形，淀粉发生糊化并堆积黏结形成大分子热聚集体，可溶性物质有所增加；此外，微波处理还显著改善了油莎豆粉的水合特性、持油性等。酶解改性对淀粉结构的破坏作用更为明显，使淀粉结构变得疏松并形成孔隙，显著改善了粉体的水合特性，同时改变了该处理所制面团的硬度和胶黏性。综上所述，超微粉碎油莎豆粉适合添加到对面筋结构需求较低的食品中，微波处理油莎豆粉适合用于糊状食品的加工，而酶解改性油莎豆粉更适合制作冲调类食品。本研究为改善油莎豆粉的加工特性提供了参考，也为油莎豆相关产品的开发与高效利用提供了理论依据和技术支持。

参考文献

[1] 王瑞元，王晓松，相海. 一种多用途的新兴油料作物：油莎豆[J]. 中国油脂，2019，44(1)：1-4.
WANG R Y，WANG X S，XIANG H. A multi-purpose novel oil crop：*Cyperus esculentus*[J]. China Oils and Fats，2019，44(1)：1-4.(in Chinese)

[2] WANG L J，TANG H Q，LI Y，et al. Milling of buckwheat hull to cell-scale：influences on the behaviors of protein and starch in dough and noodles[J]. Food Chemistry，2023，423：136347.

[3] 吴丽萍，孙虹，董康珍，等. 改性燕麦麸水溶性膳食纤维对发酵乳品质及抗氧化活性的影响[J]. 食品与生物技术学报，2021，40(9)：40-49.
WU L P，SUN H，DONG K Z，et al. Effects of modified oat bran soluble dietary fiber on quality and antioxidant activity of fermented milk[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2021，40(9)：40-49.(in Chinese)

[4] 白洋. 不同处理方法对油莎豆乳稳定性影响的研究[D]. 长春：长春大学，2021.

[5] 林嘉聪，邱丽青，林志汉，等. 改性工艺和干燥方法对代餐粉营养与功能组分的影响[J]. 食品与生物技术学报，2024，43(2)：73-80.
LIN J C，QIU L Q，LIN Z H，et al. Effects of modification process and drying method of meal substitute powder on its nutritional/functional components[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2024，43(2)：73-80.(in Chinese)

[6] ZHAO H B，CHEN J，HEMAR Y，et al. Improvement of the rheological and textural properties of calcium sulfate-induced soy protein isolate gels by the incorporation of different polysaccharides[J]. Food Chemistry，2020，310：125983.

[7] SONKAR S，JADDU S，PRADHAN R C，et al. Effect of atmospheric cold plasma (pin type) on hydration and structure properties of kodo-millet starch[J]. LWT-Food Science and Technology，2023，182：114889.

[8] 王蓁，程力，洪雁，等. 鲜食糯玉米食用品质与淀粉性质的相关性研究[J]. 食品与生物技术学报，2023，42(12)：43-52.
WANG Q，CHENG L，HONG Y，et al. Correlation between edible quality and starch properties of fresh waxy corn[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2023，42(12)：43-52.(in Chinese)

[9] HU H，ZHOU X Y，ZHANG Y X，et al. Influences of particle size and addition level on the rheological properties and water mobility of purple sweet potato dough[J]. Foods，2023，12(2)：398.

[10] ZHENG Z Q，STANLEY R，GIDLEY M J，et al. Structural properties and digestion of green banana flour

as a functional ingredient in Pasta[J]. Food & Function, 2016,7(2):771-780.

[11] 刘晓飞,贾春艳,李祥,等. 淀粉改性对米线品质影响的研究进展[J]. 食品工业科技,2025,46(8):420-430.
LIU X F,JIA C Y,LI X,et al. Research progress on the effect of modified starch on the quality of rice noodles[J]. Science and Technology of Food Industry,2025,46(8):420-430.(in Chinese)

[12] 景孝男,党斌,杨希娟,等. 热处理对不同品种青稞全粉结构及理化特性的影响[J]. 食品与机械,2021,37(9):44-52.
JING X N,DANG B,YANG X J,et al. Effect of heat treatment on the structure and physicochemical properties of the whole barley powder of different varieties[J]. Food and Machinery,2021,37(9):44-52.(in Chinese)

[13] 杨蕾,贾艳菊,刘敬科,等. 超微粉碎技术对粮食产品营养物质及特定生理功能影响的研究进展[J]. 食品与机械,2023,39(12):200-207,213.
YANG L,JIA Y J,LIU J K,et al. Research progress on the effects of ultrafine grinding technology on nutrients and specific physiological functions of grain products[J]. Food & Machinery, 2023, 39(12): 200-207, 213.(in Chinese)

[14] MIAO M,JIANG B,ZHANG T,et al. Impact of mild acid hydrolysis on structure and digestion properties of waxy maize starch[J]. Food Chemistry,2011,126(2):506-513.

[15] 徐斌. 微波辐射对小麦胚芽的稳定化作用机制及其应用研究[D]. 镇江:江苏大学,2011.

[16] 李雪,许晶冰,杨世雄,等. 改性甘薯淀粉及其在食品工业中的应用研究进展[J]. 食品与发酵工业,2024,50(9):370-380.
LI X, XU J B, YANG S X, et al. Advances in modification of sweet potato starch and its application in food industry[J]. Food and Fermentation Industries, 2024,50(9):370-380.(in Chinese)

[17] DING Y Y,WANG J R,SUN L N,et al. Effect of kansui on the physicochemical, structural, and quality characteristics of adlay seed flour-fortified wheat noodles[J]. LWT-Food Science and Technology,2021,146:111458.

[18] CAO X Y, TONG J Y, DING M Y, et al. Physicochemical properties of starch in relation to rheological properties of wheat dough (*Triticum aestivum* L.)[J]. Food Chemistry,2019,297:125000.

[19] 李坤,孙鹤,邢淑婕,等. 酶解工艺及山药多糖对板栗汁稳定性及营养成分释放的影响[J]. 食品科技,2023,48(12):74-83.
LI K, SUN H, XING S J, et al. Effect of enzymatic hydrolysis process and yam polysaccharides on the stability and nutrient release of chestnut juice[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(12): 74-83.(in Chinese)

[20] 徐小云. 麦麸超微粉碎对面团流变学特性及馒头品质影响研究[D]. 合肥:安徽农业大学,2018.