

油莎豆淀粉结构变化对其粉体冲调性的影响

孙孝威¹ 宋春丽^{1,2,3} 任 健^{1,2,3}

(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. 黑龙江省玉米主食工业化工程技术研究中心, 黑龙江 齐齐哈尔 161006; 3. 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]探究油莎豆淀粉结构变化对其表观黏度、吸水性指数和稳定性等指标的影响。[方法]采用超微粉碎、微波处理、酶法处理 3 种改性方式处理油莎豆粉, 分析不同改性方式所引起的淀粉结构变化对粉体冲调性的影响。[结果]与未改性油莎豆粉相比, 酶法改性后油莎豆相对结晶度由 43.49% 降低至 20.69%, 淀粉结构破裂程度最为显著, 冲调性显著改善。粉体分散液的表观黏度、稳定性显著提高, 吸水性指数与水溶性指数分别提高了 34.39% 和 100.03%。微波处理引起油莎豆淀粉分子聚集, 淀粉相对结晶度降低至 30.55%, 冲调性略有改善, 表现为粉体分散液表观黏度、稳定性提高, 离心沉淀率与吸水性指数分别提高了 1.30% 和 12.10%。超微粉碎对油莎豆粉淀粉结构影响最小, 相对结晶度降低至 37.41%, 但是粉体表观黏度、稳定性、吸水性指数均下降, 不利于冲调性的改善。[结论]超微粉碎、微波处理、酶法处理都会引起油莎豆淀粉结构变化, 进而影响其粉体冲调性, 其中酶法改性效果显著。

关键词: 油莎豆; 淀粉结构; 超微粉碎; 微波处理; 酶法处理; 冲调性; 表观黏度

Effects of starch structural changes on the dispersibility of *Cyperus esculentus*

SUN Xiaowei¹ SONG Chunli^{1,2,3} REN Jian^{1,2,3}

(1. School of Food and Bioengineering, Qiqihar University, Qiqihar, Heilongjiang 161006, China; 2. Heilongjiang Corn Staple Food Industrial Engineering Technology Research Center, Qiqihar, Heilongjiang 161006, China; 3. Plant Food Processing Technology Engineering Research Center of the Ministry of Education, Qiqihar, Heilongjiang 161006, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of structural changes in *Cyperus esculentus* starch on its apparent viscosity, water absorption index, and stability, providing theoretical support for its development and application in blended powders. [Methods] *C. esculentus* powder was modified by three methods, i.e., ultrafine grinding, microwave treatment, and enzymatic treatment. The effects of starch structure changes caused by these modifications on powder dispersibility were analyzed. [Results] Compared with native *C. esculentus* powder, enzymatic treatment reduced the relative crystallinity from 43.49% to 20.69%, causing the most significant starch structure disruption and notably improving dispersibility. The apparent viscosity and stability of the powder dispersion increased significantly, and the water absorption index and water solubility index increased by 34.39% and 100.03%, respectively. Microwave treatment caused aggregation of starch molecules, reduced relative crystallinity to 30.55%, and slightly improved dispersibility, as indicated by increased apparent viscosity, stability, centrifugal sedimentation rate, and water absorption index by 1.30% and 12.10%, respectively. Ultrafine grinding had the least effect on starch structure, with relative crystallinity decreasing to 37.41%, but apparent viscosity, stability, and water absorption index all decreased, which was unfavorable for dispersibility improvement. [Conclusion] Ultrafine grinding, microwave treatment, and enzymatic treatment all induced structural changes in *C. esculentus* starch, thereby affecting powder dispersibility, with enzymatic treatment showing the most significant effect.

通信作者: 任健(1970—), 男, 齐齐哈尔大学教授, 博士生导师, 博士。E-mail: renjian1970789@163.com

收稿日期: 2024-11-18 改回日期: 2025-06-27

引用格式: 孙孝威, 宋春丽, 任健. 油莎豆淀粉结构变化对其粉体冲调性的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(9): 23-29.

Citation: SUN Xiaowei, SONG Chunli, REN Jian. Effects of starch structural changes on the dispersibility of *Cyperus esculentus*[J]. Food & Machinery, 2025, 41(9): 23-29.

Keywords: *Cyperus esculentus*; starch structure; ultrafine grinding; microwave treatment; enzymatic treatment; dispersibility; apparent viscosity

油莎豆是一种集粮、油、牧、饲、药于一体的多功能油料作物,也是一种健康食品及食品原料^[1]。油莎豆可通过炒制、水煮等工艺制成可以直接食用的休闲食品,也可直接粉碎研磨做成豆浆食用。在西班牙,油莎豆会被用于制作一种名为“horchata”的饮料。由于油莎豆副产物中含大量的纤维,因此也可用于制备富含纤维的肉制品^[2]。此外,油莎豆也是生产冲调粉的良好原料。然而,油莎豆中淀粉含量高(14%~37%),其分子间通过氢键结合,排列紧密,导致粉体存在速溶性差和不稳定等缺陷,表现为固体粒子在介质水中不易分散为细小颗粒,并且容易产生沉淀^[3]。

通过改性处理能够改变谷物淀粉结构,从而达到改善谷物冲调品质的目的。超微粉碎处理能够增加谷物比表面积,使得粉体(粒径在 10 μm)更容易与水结合,能够有效改善谷物冲调粉的溶解性^[4]。适当的微波处理,可以改善谷物粉末的冲调性能^[5],利用藜麦经微波熟化后冲调性发生的变化,可制备出高抗氧化活性的藜麦冲调粉^[6]。此外,复合酶法有利于提高油莎豆乳稳定性^[7],挤压膨化可使玉米粉糊类冲调谷物制品糊化更完全^[8]。究其原因,改性处理改变了谷物原料的分子结构,如谷物颗粒中淀粉的结构,而淀粉结构变化程度对粉体冲调性的影响未见报道。

研究拟以油莎豆为原料,采用超微粉碎、微波、酶法 3 种改性方式处理油莎豆,对改性油莎豆粉的淀粉结构、流变性质、冲调性进行测定和对比分析,以期剖析改性油莎豆淀粉结构差异对粉体冲调性的影响,以此来拓展油莎豆的应用场景。

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:酶活力 1 400 U/g,河南高宝实业有限公司;

纤维素酶:酶活力 10 000 U/g,南宁庞博生物工程有限公司。

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;

真空冷冻干燥机:Alpha2.4/LSC 型,北京思达兴业仪器有限公司;

中药粉碎机:LD-200 型,长沙市宏精领望科技有限公司;

胶体磨:LTJM-80T 型,廊坊市廊通机械有限公司;

流变仪:Kinexus Pro+ 型,英国马尔文公司;

射线衍射仪:D8 X 型,美国布鲁克公司;

扫描电子显微镜:S-3400 型,日本日立株式会社;

激光共聚焦显微镜:LSM710 型,德国蔡司公司;

电热恒温水浴锅:HH-S 4 型,常州市荣华仪器制造有限公司;

低速大容量台式离心机:TDL-5A 型,上海安亭科学仪器厂。

1.3 试验方法

1.3.1 改性油莎豆粉制备

(1) 未改性油莎豆粉:筛选颗粒饱满圆润的油莎豆,清洗除杂,使用粉碎机粉碎过 80 目筛,封袋保存。

(2) 超微粉碎油莎豆粉:筛选颗粒饱满圆润的油莎豆,清洗除杂,用粉碎机初步粉碎,再用超微粉碎机碾磨 5 min,过 200 目筛,封袋保存。

(3) 微波处理油莎豆粉:筛选颗粒饱满圆润的油莎豆,清洗除杂,用空腔射流微波膨化机处理油莎豆 1.5 min,粉碎过 80 目筛,封袋保存。

(4) 酶解处理油莎豆粉:先对油莎豆进行清洗除杂,粉碎过 80 目筛,取 100 g 油莎豆粉按料液比 1:12 (g/mL) 加入蒸馏水打浆。按 0.4 g/100 g 添加 α -淀粉酶,于 65 $^{\circ}\text{C}$ 下酶解 50 min,再按 1 g/100 g 添加纤维素酶,于 50 $^{\circ}\text{C}$ 下酶解 2 h,煮沸 10 min 灭酶,冻干后封袋保存。

1.3.2 激光共聚焦显微镜(CLSM)观察 参考 Zheng 等^[9]的方法。取 5 mg 粉末样品,加入含有 0.1 mg/mL FITC 的乙醇 1 mL,在 37 $^{\circ}\text{C}$ 下振荡染色 30 min,离心(3 000 r/min、1 min),收集沉淀,加入 1 mL 乙醇,再次离心后获取沉淀。随后,将沉淀重悬于 1 mL 乙醇,混匀后取 10 μL 样品滴加至载玻片,在 600 倍下观察样品的微观结构。

1.3.3 扫描电子显微镜(SEM)观察 将样品涂抹在裁剪成小块的导电胶上后,粘贴于样品台上,将样品表面进行喷金处理,喷金处理后,在扫描电子显微镜下进行观察。

1.3.4 红外光谱检测 采用溴化钾压片法对油莎豆淀粉进行傅立叶红外扫描分析,将制备好的样品进行干燥,样品与溴化钾按 1:180 的质量比混合均匀,研磨、压片后进行全波段扫描。

1.3.5 X 射线衍射分析 将样品在饱和盐溶液下平衡水分 12 h,后将样品在玻璃表面上均匀放开,以 2 ($^{\circ}$)/min 扫

描步长扫描样品,衍射角(2θ)设置在 $4^\circ\sim 40^\circ$ 的范围内,X射线发生器的运行参数设置为40 kV和30 mA。

1.3.6 流变学性质 参考王冬等^[3]的方法。称取10 g油莎豆粉样品,置于20 mL 80℃的热水中,充分搅拌1 min,冷却10 min,即得样品溶液。取1.2 mL样品溶液注入夹具中(直径为40 mm;锥角为 0.5°),于25℃下静置5 min,在 $0.1\sim 100.0\text{ s}^{-1}$ 时测定样品的表观黏度。

1.3.7 冲调性指标测定

(1) 离心沉淀率:参考乐梨庆等^[10]的方法。取50 mL离心管干燥称重,准确称取10 g油莎豆粉样品放入离心管中,加入90 g 80℃的热水,充分搅拌使其溶解,将30 g分散液转移至50 mL离心管中,4 000 r/min离心10 min,弃上清,将离心管倒置20 min后称重。按式(1)计算离心沉淀率。

$$C = \frac{M_3 - M_1}{M_2} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

C ——离心沉淀率,%;

M_1 ——50 mL离心管干重,g;

M_2 ——30 g分散液的质量,g;

M_3 ——装有沉淀物离心管的质量,g。

(2) 稳定性:参考张颖^[11]的方法。称取5 g的油莎豆粉样品置于100 mL量筒中,将蒸馏水(45 mL、60℃)加入量筒,玻璃棒搅拌30 s使其混合均匀,静置3 min后分别测量上清液的高度和混合液的总高度,按式(2)计算冲调液的稳定性。

$$K = \frac{H}{h} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

K ——稳定性,%;

H ——上清液高度,mL;

h ——混合液高度,mL。

(3) 吸水性指数和水溶性指数:参考Rashid等^[12]的方法。取2.5 g样品与30 mL蒸馏水混匀后,30℃水浴30 min(每10 min取出并振荡1次),离心(6 000 r/min、10 min),上清液于105℃烘至恒重,冷却后称重。分别按式(3)、式(4)计算样品的吸水性指数(WAI)与水溶性指数(WSI)。

$$W = \frac{m_2}{m_1}, \quad (3)$$

$$S = \frac{m_3}{m_1}, \quad (4)$$

式中:

W ——吸水性指数,g/g;

S ——水溶性指数,g/g;

m_1 ——样品质量,g;

m_2 ——沉淀物质量,g;

m_3 ——上清液残留物干重,g。

1.4 数据统计

结果用3次重复试验的平均值±标准差表示,利用SPSS 25.0软件进行差异显著性分析、相关性分析, $P < 0.05$ 为显著性差异,采用Origin 2019作图。

2 结果与讨论

2.1 改性方式对油莎豆淀粉结构的影响

2.1.1 油莎豆淀粉微观结构分析 超微粉碎、微波、酶法3种改性方式对油莎豆淀粉微观结构的影响如图1所示。相较于未改性的油莎豆淀粉颗粒,超微粉碎后油莎豆淀粉结构变化最小,酶解处理后油莎豆淀粉结构变化最显著。

未改性油莎豆淀粉颗粒呈圆形颗粒状且表面圆润光滑;超微粉碎处理对油莎豆中的淀粉结构的破坏并不显著,淀粉颗粒的表面略显粗糙;微波处理导致油莎豆淀粉颗粒严重变形,这是因为微波的作用使油莎豆内部的细

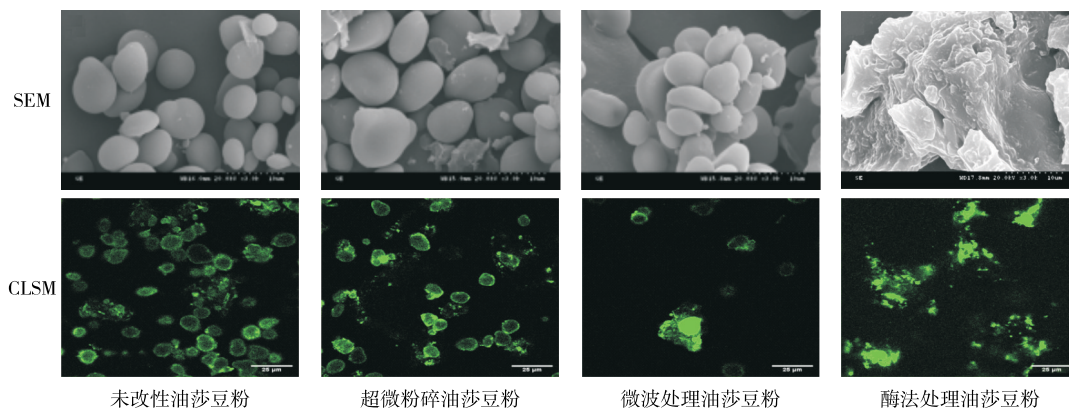
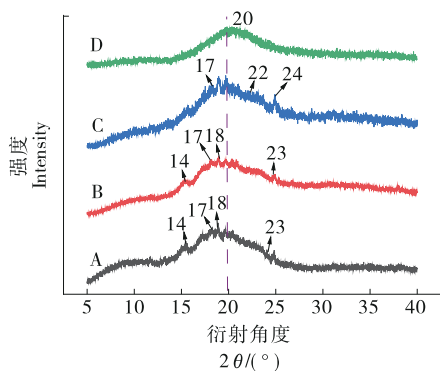


图1 不同改性油莎豆粉中淀粉微观结构变化

Figure 1 Microstructure changes of starch in different modified *Cyperus esculentus* powders

胞壁膨胀变形,淀粉发生糊化,进而导致大量淀粉发生堆积和黏结,形成了大分子的热聚集体^[7,13];酶法处理后,油莎豆淀粉颗粒明显变大,且颗粒变形较为严重,呈现不规则形,这可能是由于淀粉酶将淀粉水解,使得大量水分子进入淀粉分子内部,水分子与淀粉结合后,在有限的空间内,淀粉颗粒膨胀并相互挤压而变形,在老化过程中这些直链淀粉分子会不断靠近、交联,最终形成大块结晶聚集体^[14-15]。油莎豆淀粉颗粒在 3 种处理方式下均发生了不同程度的变形。

2.1.2 改性方式对油莎豆粉淀粉晶体结构的影响 淀粉颗粒是一种复杂的多晶体系,根据 X 射线衍射图谱的不同,淀粉分为 A 型、B 型、C 型和 V 型^[16]。图 2 为不同改性处理油莎豆粉的 X 射线衍射图谱。



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. 酶法处理油莎豆粉

图 2 不同改性方式下油莎豆粉中淀粉的 X 射线图
Figure 2 X-ray images of starch in *Cyperus esculentus* powder under different modification methods

从图 2 可以看出,不同改性方式处理后,油莎豆粉中淀粉的衍射峰发生了显著变化。未改性油莎豆淀粉在 14°, 17°, 18°, 23° 附近出现强衍射峰,表现为典型的 A 型结晶模式。超微粉碎后油莎豆淀粉的 X 射线衍射图谱与未改性油莎豆淀粉类似,呈现典型的 A 型晶体结构。

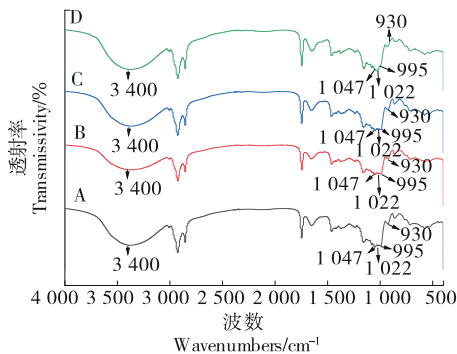
然而,经微波处理的油莎豆淀粉在 20° 附近出现尖峰,呈现典型的 V 型衍射图样。同时,在 17°, 22°, 24° 附近也有观察到高峰,这些高峰是 B 型晶体结构的特征衍射峰,同时,这些峰值还包含 A 型晶体结构的代表性峰,表现出 C 型晶体结构的特征,最终呈现为 C+V 型晶体结构,可能是由于微波处理后的油莎豆淀粉在 4 °C 低温回生过程中发生重结晶,导致晶体结构改变。微波处理使得直链淀粉溶出更多,在老化回生的过程中,有更多的直链淀粉相互结合成双螺旋结构,形成紧密的晶体结构,这与 Zhang 等^[17]的研究结果类似。此外,酶法处理的油莎豆淀粉在 20° 处只有一个单峰,且是一个宽分散的峰,表现出

非晶淀粉的 X 射线衍射图谱特征,表明油莎豆淀粉的螺旋结构发生了变化,晶体结构被破坏,淀粉发生糊化^[18]。

未改性油莎豆淀粉、超微粉碎油莎豆淀粉、微波油莎豆淀粉、酶法油莎豆淀粉的相对结晶度分别为 43.49%, 37.41%, 30.55%, 20.69%, 表明改性处理后,油莎豆粉中淀粉的无定型结构增多,这有利于水分进入油莎豆淀粉颗粒的内部。通过 X 射线衍射图谱可以发现,3 种改性粉的淀粉晶型及相对结晶度存在显著差异,而晶型及结晶度的差异可能是由淀粉颗粒结构的变化引起的。

2.1.3 改性方式对油莎豆粉淀粉红外光谱的影响 3 种改性油莎豆粉中淀粉的傅里叶红外光谱扫描结果如图 3 所示。3 400 cm^{-1} 附近的吸收峰与淀粉分子间氢键数量呈正相关。由图 3 可知,酶法处理后的淀粉吸收峰强度明显更强,这主要因为酶处理过程产生短直链淀粉,与游离羟基以及分子间和分子内的羟基发生反应,从而产生更多氢键^[19]。此外,930 cm^{-1} 附近的吸收峰是淀粉亲水性特征指标之一,该区域的吸收峰强度为超微粉碎油莎豆粉 < 未改性油莎豆粉 < 酶法处理油莎豆粉 < 微波处理油莎豆粉,表明酶法处理和微波处理都使淀粉亲水性增加,这可能是由于酶法处理使淀粉分解成低相对分子质量的糊精或麦芽糖,这些小分子更易与水分子结合,因此表现出更高的亲水性。而微波处理则使淀粉颗粒内部的分子振动加剧,导致分子间的非共价键断裂,从而使淀粉颗粒膨胀和糊化,进一步增加了淀粉的亲水性^[20],Paramakishnan 等^[21]也报道了类似的结果。

淀粉红外光谱有 3 个典型的吸收峰,分别对应波数 995, 1 022, 1 047 cm^{-1} ^[21]。有研究^[22]表明,吸收峰强度的比值 $R_{1\,047/1\,022}$ 可以反映淀粉分子在短程范围内的有序性,



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. 酶法处理油莎豆粉

图 3 不同改性方式下油莎豆粉淀粉的傅里叶红外图谱变化

Figure 3 Changes of Fourier transform infrared spectra of starch in *Cyperus esculentus* powder with different modification methods

一般其值越大,淀粉分子结晶度和有序性就越高,而 $R_{1\ 022/955}$ 能够反映淀粉分子双螺旋结构的变化,一般其值越大,所形成的双螺旋结构就越多。如表1所示,油莎豆酶法改性粉的 $R_{1\ 047/1\ 022}$ 较未改性油莎豆粉显著降低,表明酶法处理破坏了淀粉分子短程有序结构,导致结晶度降低,这与X射线衍射分析结果一致。Ma等^[23]也得到了相似的结果。

2.2 改性方式对油莎豆粉冲调性的影响

由表2可知,与未改性油莎豆粉相比,超微粉碎处理

表1 淀粉短程有序度和双螺旋度的变化[†]

Table 1 Changes in the degree of short-range molecular orders and double helix of starches

样品	$R_{1\ 022/955}$	$R_{1\ 047/1\ 022}$
未改性油莎豆粉	1.022 ± 0.030^a	0.941 ± 0.003^b
超微粉碎油莎豆粉	1.026 ± 0.055^a	0.978 ± 0.016^a
微波处理油莎豆粉	1.013 ± 0.045^b	0.939 ± 0.032^b
酶法处理油莎豆粉	0.789 ± 0.025^c	0.926 ± 0.028^c

† 同列字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

表2 改性处理对油莎豆粉冲调性的影响[†]

Table 2 Effect of modification treatment on the dispersibility of *Cyperus esculentus* powder

样品	离心沉淀率/%	稳定性/%	WAI/(g·g ⁻¹)	WSI/(g·g ⁻¹)
未改性油莎豆粉	15.37 ± 0.10^b	75.12 ± 0.60^b	1.57 ± 0.06^c	0.34 ± 0.00^b
超微粉碎油莎豆粉	14.02 ± 0.16^c	77.27 ± 0.51^c	1.47 ± 0.05^c	0.34 ± 0.06^b
微波处理油莎豆粉	15.57 ± 0.22^b	67.59 ± 0.44^b	1.76 ± 0.06^b	0.33 ± 0.05^b
酶法处理油莎豆粉	20.20 ± 0.73^a	3.28 ± 0.12^a	2.11 ± 0.09^a	0.69 ± 0.01^a

† 同列字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

2.3 油莎豆粉冲调性参数相关性分析

由表3可知,各参数间相关性较好,因此可以用于评价改性处理对油莎豆粉冲调性的影响。离心沉淀率与WAI、WSI呈正相关(r 值分别为0.936,0.963),与稳定性现负相关(r 值为-0.948),表明离心沉淀率越高,WAI、WSI越大,稳定性越小;稳定性与WAI、WSI呈负相关(r 值分别为-0.998,-0.921),表明稳定性越大,WAI、WSI越小;WAI与WSI呈正相关(r 值为0.893),表明WAI越大,WSI越大。

2.4 流变性质

从图4可以看出,不同改性处理的油莎豆粉,其表观黏度随着剪切速率的增加而下降,表现为非牛顿流体特性(黏度随剪切速率的增加而降低)。在相同的剪切速率下,酶法处理的油莎豆粉分散液表观黏度显著高于其他样品。结果表明,超微粉碎油莎豆粉分散液表观黏度低于未改性的样品,这是由于超微粉碎显著减小了粉体的粒度,增加了比表面积,与此同时粉体颗粒与外界环境的

后油莎豆粉吸水性指数降低、稳定性变差,冲调性改善不显著,这是因为油莎豆经过超微粉碎后,粉体的粒径减小,与此同时比表面积也在增加,增加的比表面积使得粉体与水的接触面积变大,但由于油莎豆粉含油量较高,超微粉碎将油莎豆细胞结构破坏,导致样品中亲油活性基团暴露多,疏水作用增加^[24]。微波改性粉冲调性有所改善,表现为粉体的离心沉淀率、吸水性指数分别提高了1.30%,12.10%,稳定性数值下降了10.02%,可能是由于微波的热效应使得原料中的淀粉、膳食纤维、蛋白质等大分子物质吸收的热量逐渐增加,导致了水分子动能提高,从而使大分子物质发生降解,淀粉糊化,进而改善了物料吸水溶胀性和成胶性^[25]。酶法处理显著改善了油莎豆粉的冲调性,表现为粉体稳定性数值降低至3.28%,吸水性指数、水溶性指数分别提高了34.39%,100.03%,可能是由于酶法处理改变了淀粉的结构和性能,淀粉颗粒膨胀、破裂得更为彻底,生成低相对分子质量的糊精或麦芽糖,小分子物质增加,从而改善了淀粉的溶解度、黏度、糊化特性、回生特性以及流变性能^[20]。

表3 油莎豆粉冲调性参数相关性分析[†]

Table 3 Correlation analysis of dispersibility parameters of *Cyperus esculentus* powder

参数	离心沉淀率	稳定性	WAI	WSI
离心沉淀率	1.000			
稳定性	-0.948	1.000		
WAI	0.936	-0.998**	1.000	
WSI	0.963*	-0.921	0.893	1.000

† *在0.05级别(双尾),相关性显著;**在0.01级别(双尾),相关性显著。

接触面积增加,使得粉体在液体中的分散更加均匀,从而降低了表观黏度。酶法处理能够使油莎豆粉分散液表观黏度显著升高,体系更加稳定,可能是因为在酶的作用下,油莎豆淀粉的结构被更彻底地破坏,形成不平整的表面结构,导致其比表面积增大,这有利于增加它们与水分接触的面积,使得在淀粉加热糊化的过程中能够充分吸

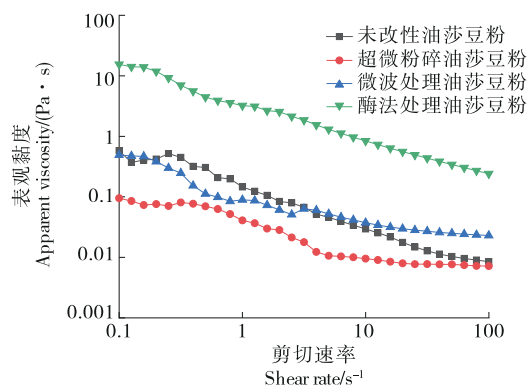


图 4 不同改性方式下油莎豆粉分散液的表现黏度

Figure 4 Apparent viscosity of *Cyperus esculentus* powder dispersions obtained by different modification methods

水膨胀出现了糊化现象^[26],提高了表现黏度。

3 结论

油莎豆淀粉的结构变化对其粉体冲调性具有显著影响。通过超微粉碎、微波、酶法 3 种改性处理方式,使得油莎豆淀粉结构发生了不同程度的变化。利用扫描电子显微镜、激光共聚焦显微镜、X 射线衍射、红外光谱等技术进行结构表征,结果表明,酶法处理能更有效地破坏淀粉颗粒的结构,使其原本排列紧密的状态被破坏,淀粉的晶型和结晶度出现显著差异,同时无定型结构增多,这一变化使水分更容易进入油莎豆粉颗粒的内部,从而显著改善粉体的冲调性。与此同时,分散液的表现黏度、稳定性和粉体的吸水性指数、水溶性指数均显著提高。因而,酶法处理更适合用于油莎豆冲调食品的加工。

参考文献

- [1] 郭婷婷, 万楚筠, 黄凤洪, 等. 油莎豆主要营养成分及生理功能研究进展[J]. 中国油料作物学报, 2021, 43(6): 1 174-1 180.
GUO T T, WAN C Y, HUANG F H, et al. Research progress on the main nutritional components and physiological functions of tiger nut (*Cyperus esculentus* L.) [J]. Chinese Journal of Oil Crops Sciences, 2021, 43(6): 1 174-1 180.
- [2] ROSELLO-SOTO E, POOJARY M M, BARBA F J, et al. Tiger nut and its by-products valorization: from extraction of oil and valuable compounds to development of new healthy products [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 45: 306-312.
- [3] 王冬, 宋春丽, 任健, 等. 干燥温度对黑珍珠糯玉米粉分散性的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(10): 320-326.
WANG D, SONG C L, REN J, et al. Effects of drying temperature on dispersion capacity of black pearl waxy corn flour[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and

Technology, 2024, 24(10): 320-326.

- [4] 黄姗, 白天. 冷冻超微粉碎对油莎豆品质特性的影响研究[J]. 中国食物与营养, 2023, 29(12): 26-31.
HUANG S, BAI T. Effect of freezing-superfine grinding on the quality properties of *Cyperus esculentus* powder[J]. Food and Nutrition in China, 2023, 29(12): 26-31.
- [5] 刘腾怒. 发芽黑米冲调粉的制备及其性质研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021: 4-5.
LIU T N. Study on the preparation and properties of germinated black rice instant powder[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021: 4-5.
- [6] 张蕊蕊. 微波焙烤对藜麦功能特性及其应用的影响研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2018: 28-32.
ZHANG X R. Study on the effects of microwave baking on functional properties and application of chenopodium quinoa [D]. Xianyang: Northwest University of Agriculture and Forestry, 2018: 28-32.
- [7] 白洋. 不同处理方法对油莎豆乳稳定性影响的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2021: 9-16.
BAI Y. Study on the influence of different processing methods on the stability of the *Cyperus esculentus* milk[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2021: 9-16.
- [8] FU Z Q, CHE L M, LI D, et al. Effect of partially gelatinized corn starch on the rheological properties of wheat dough[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 66: 324-331.
- [9] 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 Funct, 2016, 7(2): 771-780.
- [10] 乐梨庆, 万燕, 向达兵, 等. 藜麦奇亚籽冲调粉的研制及工艺优化[J]. 食品工业, 2020, 41(8): 81-85.
LE L Q, WAN Y, XIANG D B, et al. Development and process optimization of quinoa and chia seed powder[J]. The Food Industry, 2020, 41(8): 81-85.
- [11] 张颖. 高膳食纤维红枣谷物早餐粉的制备研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014: 11.
ZHANG Y. Study on the preparation of breakfast cereal powder with high dietary fibre from jujube[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014: 11.
- [12] RASHID S, RAKHA A, ANJUM F M, et al. Effects of extrusion cooking on the dietary fibre content and water solubility index of wheat bran extrudates[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2015, 50(7): 1 533-1 537.
- [13] 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.
BIAN X J, MA L P, DONG X L, et al. Structural characteristics and in vitro digestibility of resistant starch from *Cyperus esculentus*[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils, 2023, 38(11): 52-59.

- [14] 刘文静. 酶法液化高浓度玉米淀粉乳的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013: 24-26.
- LIU W J. Study on the enzymatic liquification of corn starch at a high concentration[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013: 24-26.
- [15] 刘敏. 不同方法制备的马铃薯抗性淀粉结构与性质的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018: 17-18.
- LIU M. Study on the structure and properties of potato resistant starch prepared with different methods[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018: 17-18.
- [16] 王可心, 王丽爽, 霍金杰, 等. 挤压螺杆转速对碎米重组米中淀粉多层次结构的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(12): 212-219.
- WANG K X, WANG L S, HUO J J, et al. Effect of extrusion screw speed on the multiscale structure in restructured rice[J]. Food Science, 2024, 45(12): 212-219.
- [17] ZHANG Y, ZENG H L, WANG Y, et al. Structural characteristics and crystalline properties of lotus seed resistant starch and its prebiotic effects[J]. Food Chemistry, 2014, 155 (15): 311-318.
- [18] DANG B, ZHANG W G, ZHANG J, et al. Effect of thermal treatment on the internal structure, physicochemical properties and storage stability of whole grain highland barley flour[J]. Foods, 2022, 11(14): 11142021.
- [19] SORAGENTINI D A, WAGNER J R, ANON M C. Effects of thermal treatment of soy protein isolate on the characteristics and structure-function relationship of soluble and insoluble fractions[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1995, 43(9): 15 607-15 613.
- [20] 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. Research progress on modified sweet potato starch and its application in food industry[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(9): 370-380.
- [21] PARAMAKRISHNAN N, JHA S, JAYARAM KUMAR. Physicochemical and tablet properties of *Cyperus alulatus* rhizomes starch granules[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 76: 320-325.
- [22] 朱秀清, 王子玥, 李美莹, 等. 热处理对汉麻乳稳定性的影响及蛋白结构表征[J]. 食品科学, 2021, 42(7): 68-73.
- ZHU X Q, WANG Z Y, LI M Y, et al. Effects of heat treatment on the stability of hemp seed milk and characterization of protein structure[J]. Food Science, 2021, 42(7): 68-73.
- [23] MA Z, YIN X X, HU X Z, et al. Structural characterization of resistant starch isolated from Laird lentils (*Lens culinaris*) seeds subjected to different processing treatments[J]. Food Chemistry, 2018, 263: 163-170.
- [24] 肖佳豪, 张群, 潘兆平, 等. 低温超微粉碎对茶枝柑果肉粉理化性质和功能特性的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(20): 220-231.
- XIAO J H, ZHANG Q, PAN Z P, et al. Effect of low-temperature superfine grinding on the physicochemical and functional properties of the pulp powder of citrus reticulata 'Chachi'[J]. Food Science, 2024, 45(20): 220-231.
- [25] 张颖, 姜启兴, 许艳顺, 等. 挤压加工对谷物早餐粉膳食纤维成分和物理性质的影响[J]. 食品与机械, 2014, 30(3): 19-24.
- ZHANG Y, JIANG Q X, XU Y S, et al. Effect of extrusion processing on physical properties and functional ingredients of high fiber cereal breakfast powder[J]. Food & Machinery, 2014, 30(3): 19-24.
- [26] 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.