

# 改性莲子淀粉多尺度结构与体外消化特性的关系

谢雅曼<sup>1</sup>, 张楠<sup>1</sup>, 潘娟<sup>1</sup>, 李玉坤<sup>2</sup>, 刘创<sup>2</sup>, 符树勇<sup>2</sup>, 杨文安<sup>2</sup>, 高向阳<sup>1\*</sup>

(1. 华南农业大学食品学院, 广东省功能食品活性物重点实验室, 广东广州 510642)

(2. 广州酒家集团利口福食品有限公司, 广东广州 511442)

**摘要:** 为探究莲子抗性淀粉结构对抗消化能力的影响机制, 采用不同物理处理(压热、超高压、微波)结合普鲁兰酶改性莲子淀粉。结果表明, 改性后莲子淀粉粒径增大, 颗粒表面粗糙且形成不规则块状, “马耳他”十字消失, 相对结晶度(从31.02%降至18.19%)和短程有序度(从1.56降至0.97)显著降低( $P<0.05$ ), 其晶型从C型变为B型。体外消化实验表明, 超高压协同酶改性淀粉的抗性淀粉含量最高(56.50%)。莲子抗性淀粉的抗消化特性与支链淀粉链长分布、短程有序结构及结晶结构存在显著相关性, 淀粉分子的短程有序度、相对结晶度、B1链和B2链含量的提高, 有利于增强莲子抗性淀粉的抗酶水解性, 这些结构可实现对消化特性的调控。该研究分析了改性莲子淀粉多尺度结构与消化特性的关系, 为采用新型食品加工技术制备抗消化能力强的莲子抗性淀粉提供参考依据, 指导低GI莲子淀粉降血糖功能食品的生产。

**关键词:** 莲子抗性淀粉; 物理协同酶法; 多尺度结构; 消化特性

文章编号: 1673-9078(2024)10-68-78

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.10.1271

## Relationship between Multiscale Structure and *in Vitro* Digestive Properties of Modified Lotus Seed Starch

XIE Yaman<sup>1</sup>, ZHANG Nan<sup>1</sup>, PAN Juan<sup>1</sup>, LI Yukun<sup>2</sup>, LIU Chuang<sup>2</sup>, FU Shuyong<sup>2</sup>, YANG Wenan<sup>2</sup>, GAO Xiangyang<sup>1\*</sup>

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Nutraceuticals and Functional Foods, College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

(2. Guangzhou Restaurant Group Likoufu Food Co. Ltd., Guangzhou 511442, China)

**Abstract:** To investigate the mechanism of the impact of the structure of lotus seed resistant starch on digestibility, lotus seed starch was modified using different physical treatments (autoclaving, ultra-high pressure, microwave) combined with pullulanase. The results showed that the particle size of the modified lotus seed starch increased, the surface of the particles was rough and formed irregular lumps, the “Maltese cross” formation disappeared, the relative crystallinity (from 31.02% to 18.19%) and short-range ordering (1.56 to 0.97) significantly decreased ( $P<0.05$ ), and the crystalline type changed from C-type to B-type. *In vitro* digestion experiments confirmed that starch treated with ultra-high pressure combined with enzymatic modification contained the highest content of high-resistant starch (56.50%). The digestion properties of lotus seed

引文格式:

谢雅曼,张楠,潘娟,等.改性莲子淀粉多尺度结构与体外消化特性的关系[J].现代食品科技,2024,40(10):68-78.

XIE Yaman, ZHANG Nan, PAN Juan, et al. Relationship between multiscale structure and *in vitro* digestive properties of modified lotus seed starch [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(10): 68-78.

收稿日期: 2024-06-28

基金项目: 企业委托项目(31-C-2020-006)

作者简介: 谢雅曼(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品工程, E-mail: yamanxie@163.com

通讯作者: 高向阳(1966-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 发酵与功能食品化学, E-mail: gaoxiangyang@scau.edu.cn

resistant starch were significantly correlated with the branched amylose chain length distribution and the short-range ordering structure and crystalline structure. The increase in short-range ordering, relative crystallinity, and B1 chain and B2 chain content of the starch molecules was conducive to the enhancement of the resistance of lotus seed resistant starch to enzymatic hydrolysis, which may be related to the regulation of digestive properties. The relationship between the multiscale structure of modified lotus seed starch and its digestive properties, were analyzed herein to provide a reference for the preparation of lotus seed resistant starch with strong anti-digestive ability using novel food processing technology, and to guide the production of low-GI lotus seed starch food with hypoglycemic function.

**Key words:** lotus seed resistant starch; physical-enzymatic synergy; multi-scale structure; digestive characteristics

莲子作为我国重要的特产经济作物和药食两用植物,具有抗肿瘤、抗肥胖、抗炎和维持血糖稳定等生理功能<sup>[1]</sup>。淀粉是莲子的主要成分(60%, *m/m*),直链淀粉约占淀粉总量的40% (*m/m*),易老化回生形成抗性淀粉(Resistant Starch, RS)<sup>[2]</sup>,莲子淀粉在控制糖尿病食品配方中具有广阔的应用前景。莲子抗性淀粉(Lotus Seed Resistant Starch, LRS)因不能被人体小肠和胃消化吸收可以促进有益肠道细菌的增值,在降低血糖和血脂水平方面起着重要作用<sup>[3,4]</sup>。

天然莲子淀粉抵抗酶消化能力较弱,煮沸过程易使淀粉完全糊化、消化率提高,RS仅有15.8%<sup>[5]</sup>。同时,加工糊化易引起凝胶硬度高、分散稳定性差、质地厚重等一系列问题<sup>[6]</sup>,改性技术对于调控莲子淀粉消化特性及品质具有重要作用。目前,常见的改性方法包括物理法、化学法、酶法和复合法<sup>[7]</sup>。化学改性易留下有害的化学残留物而增加消费者的安全隐患,绿色改性即环境友好型改性技术已成为国内外研究热点<sup>[8]</sup>。Liu等<sup>[9]</sup>对青稞淀粉进行干热改性,其直链淀粉含量、糊化温度、热焓值和糊化粘度均降低,而快消化淀粉含量增加。采用湿法研磨改性木薯淀粉可以极大破坏短程有序结构并将其转化为非结晶相,淀粉中壳层屏障的破坏对消化速率的提高最为关键,其次是短程有序结构的破坏<sup>[10]</sup>。目前虽有研究发现协同酶法<sup>[11]</sup>、微波法<sup>[12]</sup>、湿热处理<sup>[13]</sup>等手段可改变莲子淀粉的结构和理化特性,且评价了莲子抗性淀粉的降血糖功效<sup>[14]</sup>,但莲子淀粉结构变化与消化特性之间的影响机制尚缺乏系统的研究。

本研究拟从淀粉精细结构角度分析影响莲子淀粉消化率的机理,通过物理法、酶法、物理协同酶法多种方法制备莲子抗性淀粉,深入探讨多尺度结构与消化特性的关系,为莲子抗性淀粉在功能性抗糖尿病食品的开发应用提供参考,促进健康淀粉类食品的发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

湘潭1号、湘潭2号、湘潭9成熟莲、湘潭磨皮老莲、常规太空莲、太空莲36号、边莲、江西通心白莲、湖北磨皮白莲、泰莲10份不同莲子样品,均由湖南省岳阳市岳阳楼区梅溪桥东大市场提供;直链淀粉含量检测试剂盒,北京索莱宝科技有限公司;总淀粉含量检测试剂盒,爱尔兰Megazyme公司;猪胰 $\alpha$ -淀粉酶(50 U/mg),美国Sigma公司;淀粉葡萄糖苷酶(10万 U/mL),上海麦克林生化科技股份有限公司;普鲁兰酶(2 000 U/g),上海麦克林生化科技股份有限公司;葡聚糖标准品,美国sigma公司。

DZ-6BIV数显精密真空干燥箱,菲斯福仪器(河北)有限公司;FS-70B恒温培养摇床,菲斯福仪器(河北)有限公司;C16KB台式高速冷冻离心机,广州佰博生物科技有限责任公司;722sp可见分光光度计,上海棱光技术有限公司;HH-4数显恒温水浴锅,常州澳华仪器有限公司;YX-24HDD手提式压力蒸汽灭菌锅,江阴滨江医疗设备有限公司;SHPP-57DZM-600 HPP高静压设备,山西三水德福科技有限公司;WP700TL23-6微波炉,广东格兰仕集团有限公司;Thermo Fisher Scientific离子色谱系统,Thermo公司;OLYMPUS CX41光学显微镜,日本奥林巴斯;EVO MA 15扫描式电子显微镜,ZEISS;Ultima IV X射线衍射仪,株式会社理学;Vertex 70傅立叶变换红外光谱仪,布鲁克公司;DSC3 STAR差示扫描量热仪,METTLER TOLEDO公司;Mastersizer 3000激光粒度分析仪,Malvern公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 总淀粉及直链淀粉含量测定

将成熟的莲子磨成粉末过100目筛,按照以下

方法测定。总淀粉含量使用 Megazyme 总淀粉试剂盒测定；直链淀粉含量使用 Solarbio 直链淀粉检测试剂盒测定，具体步骤如下：取 0.01 g 烘干莲子淀粉于研钵中研碎，加入 1 mL 试剂一，充分匀浆后转移到 EP 管中，80 °C 水浴提取 30 min，3 000×g，25 °C 离心 5 min，弃上清，留沉淀，加入 1 mL 试剂二（乙醚）振荡 5 min，3 000×g，25 °C 离心 5 min，弃上清，留沉淀，加入 5 mL 试剂四充分溶解，90 °C 水浴 10 min，冷却后 3 000×g，25 °C 离心 5 min，取上清，在分光光度计双波长为 550 nm 和 485 nm 下测定。

## 1.2.2 莲子淀粉的提取方法

采用水浸提取法提取莲子淀粉，将湘潭磨皮老莲在蒸馏水中浸泡过夜，反复洗涤表面残膜，加入 4 倍体积蒸馏水，用榨汁机破壁过 100 目筛，滤液静置 6 h。弃去白色淀粉层上方的黄色杂质层，用蒸馏水对淀粉沉淀物洗涤三次，将洗涤后的淀粉置于 45 °C 真空干燥箱中干燥至恒重。粉碎过 100 目筛，即得莲子淀粉，命名为 LS（纯度为 80%）。

## 1.2.3 莲子抗性淀粉的制备

### 1.2.3.1 普鲁兰酶脱支法

参考 Manimegalai 等<sup>[15]</sup>方法并稍作修改。称取 30 g 莲子淀粉与蒸馏水混合，配置成 30% (m/V) 淀粉悬浮液，于 80 °C 水浴搅拌预糊化 20 min，制成预糊化淀粉。待冷却至 55 °C，加入 0.05 mol/L 盐酸溶液调整 pH 值至 5.5，添加 20 U/g 普鲁兰酶，55 °C 恒温培养摇床振荡 12 h 脱支处理，100 °C 水浴 15 min 灭酶。待冷却至室温再置于 4 °C 冷藏 24 h，于 -18 °C 冰箱中冷冻过夜，冷冻干燥后研磨并过 80 目筛，即得酶改性莲子淀粉，命名为 PLRS。

### 1.2.3.2 压热法

按 1.2.3.1 方法制得 30% (m/V) 淀粉悬浮液，移入高压灭菌锅中 121 °C 压热 60 min，待冷却至室温再置于 4 °C 冷藏 24 h，于 -18 °C 冰箱中冷冻过夜，冷冻干燥后研磨并过 80 目筛，即得压热改性莲子淀粉，命名为 HLRS。

### 1.2.3.3 超高压法

按 1.2.3.1 方法制得 30% (m/V) 淀粉悬浮液，置于聚乙烯袋内，排除气泡后真空包装机密封。将经过包装的样品放入压力腔内，在室温下以 600 MPa 处理 30 min<sup>[16]</sup>。置于 4 °C 冷藏 24 h，于 -18 °C 冰箱中冷冻过夜，冷冻干燥后研磨并过 80 目筛，即得超高压改性莲子淀粉，命名为 ULRS。

### 1.2.3.4 微波法

按 1.2.3.1 方法制得 30% (m/V) 淀粉悬浮液，放入微波炉中火（490 W）处理 120 s，待冷却至室温再置于 4 °C 冷藏 24 h，于 -18 °C 冰箱中冷冻过夜，冷冻干燥后研磨并过 80 目筛，即得微波改性莲子淀粉，命名为 MLRS。

### 1.2.3.5 物理协同酶法

按 1.2.3.1 方法制得未经冷藏的酶改性莲子淀粉，分别按压热法、超高压法、微波法进行改性，即可得到压热酶解改性莲子淀粉（命名为 H-PLRS）、超高压酶解改性莲子淀粉（命名为 U-PLRS）、微波酶解改性莲子淀粉（命名为 M-PLRS）。

## 1.2.4 扫描电子显微镜观察

将样品均匀平涂在金属铝盘上的黑色双面胶面上，并喷涂金片，3~10 kV 的加速电压，1 000×、5 000×、10 000× 放大倍率扫描电镜观察。

## 1.2.5 光学显微镜观察

称取 10 mg 淀粉与 1 mL 50% (m/V) 甘油充分混合，配成 1% (m/V) 淀粉悬浮液，400× 放大倍率光学显微镜偏振光下观察。

## 1.2.6 淀粉粒度分布

采用激光粒度分析仪测定淀粉的粒径分布。缓慢往储水器加入淀粉，混合叶片充分搅拌均匀，遮盖度达到 10%~15% (m/V) 开始测试。采用具有水相（1.33）和淀粉颗粒（1.53）折射率的多分散模式进行分析。

## 1.2.7 支链淀粉链长分布

采用 Thermo ICS5000 离子色谱系统（ICS5000+，Thermo Fisher Scientific, USA）和 Dionex™ CarboPac™ PA200（250×4.0 mm, 10 μm）液相色谱柱测定淀粉链长分布。称取 10 mg 淀粉与 5 mL 水混合，100 °C 下加热 60 min，冷却至室温，加入 50 μL 醋酸钠（0.6 mol/L，pH 值 4.4）、10 μL 2% NaN<sub>3</sub> (m/V) 和 10 μL 异淀粉酶（1 400 U）于 37 °C 孵育 24 h，加入 0.5% (m/V) 硼氢化钠溶液，涡旋混匀后放置 20 h。将 600 μL 混合物吸入离心管中，室温下氮吹干燥。加入 30 μL NaOH（1 mol/L）溶解 60 min，取 570 μL 水进行稀释，12 000×g 离心 5 min，取 5 μL 上清液进样。流动相 A 相：NaOH（0.2 mol/L）；B 相：NaOH（0.2 mol/L）/NaAC（0.2 mol/L），柱温为 30 °C，流速 0.4 mL/min；洗脱梯度：0 min A/B（90:10 V/V），10 min A/B（90:10 V/V），30 min A/B（40:60 V/V），50 min A/B（40:60 V/V）；50.1 min A/B

(90:10 V/V); 60 min A/B (90:10 V/V)<sup>[17]</sup>。

### 1.2.8 结晶结构测定

采用 X 射线多晶粉末仪对淀粉晶体长程有序结构进行测试, 辐射光源 Cu-K $\alpha$ , 电压 40 kV, 电流 40 mA, 2 $\theta$  (扫描范围) 4~40°, 扫描速度 4°/min。在 MDI jade 6.0 软件下, 使用所得的 X 射线光谱计算相对结晶度 (Relative Crystallinity, R<sub>C</sub>)。

### 1.2.9 短程有序结构测定

称取淀粉 (1.00 mg) 和 KBr (100.00 mg), 放入玛瑙研钵中, 均匀混合压成薄片, 采用傅里叶变换红外光谱仪扫描, 分辨率 4 cm<sup>-1</sup>, 扫描次数 64 次, 光谱范围 400~4 000 cm<sup>-1</sup>, 利用 OMNIC 软件进行傅里叶去卷积处理, 半峰宽度和增强因子分别为 19 cm<sup>-1</sup> 和 1.9, 计算吸收峰强度比值 R<sub>1047/1022 cm<sup>-1</sup></sub> (DO) 及 R<sub>995/1022 cm<sup>-1</sup></sub> (DD)。

### 1.2.10 热力学性质测定

采用差示扫描量热法测定淀粉的热力学性质。用 40  $\mu$ L 铝制 DSC 盘精确称取 3.0 mg 样品与 9  $\mu$ L 去离子水混合, 室温下平衡 12 h。以空坩埚为参照, 升温速率 10 °C/min, 温度范围 25~105 °C, 氮气流量 20 mL/min。采用仪器自带分析软件对热流曲线分析得出起始糊化温度 (T<sub>0</sub>)、峰值糊化温度 (T<sub>p</sub>)、终止糊化温度 (T<sub>c</sub>) 和热焓值 ( $\Delta H$ )。

### 1.2.11 消化特性测定

参照 Englyst 等<sup>[18]</sup>的方法测量淀粉样品的体外消化率, 并稍作修改。将 200 mg 淀粉样品悬浮于 15.0 mL 醋酸缓冲液 (200 mmol/mL, pH 值 5.2) 中, 加入 5 个玻璃珠。注入 10 mL 混合酶液 (290 U/mL 猪胰  $\alpha$ -淀粉酶和 15 U/mL 糖化酶), 37 °C 恒温培养箱 150 r/min 振荡。酶解 0、20、60、90、120、180 min 时取出 1 mL 酶解液加入 4 mL 无水乙醇使酶失活, 4 000 r/min 离心 10 min, 取 0.5 mL 上清液稀释至一定倍数, 使用 3,5-二硝基水杨酸法 (DNS) 测定其葡萄糖含量, 将葡萄糖含量乘以因子 0.9 以计算水解淀粉的量。淀粉样品中快速消化淀粉 (Rapid Digestible Starch, RDS)、慢消化淀粉 (Slowly Digestible Starch, SDS) 以及抗性淀粉 (Resistant Starch, RS) 含量计算公式 (1)、(2)、(3) 如下:

$$B_1 = \frac{(G_{20} - D) \times 0.9}{C} \times 100\% \quad (1)$$

$$B_2 = \frac{(G_{120} - G_{20}) \times 0.9}{C} \times 100\% \quad (2)$$

$$B_3 = 100\% - B_1 - B_2 \quad (3)$$

式中:

B<sub>1</sub>—快速消化淀粉含量 (RDS), %;

B<sub>2</sub>—慢消化淀粉含量 (SDS), %;

B<sub>3</sub>—抗性淀粉含量 (RS), %;

D—消化前酶解液中葡萄糖含量 (FG), mg;

G<sub>20</sub>—消化 20 min 时释放的葡萄糖含量, mg;

G<sub>120</sub>—消化 120 min 时释放的葡萄糖含量, mg;

C—样品总淀粉质量 (TS), mg。

## 1.3 数据处理

所有实验均重复三次, 并使用 IBM SPSS 25.0 软件进行单因素方差分析 (ANOVA), 将分析数据结果表示为平均  $\pm$  标准差, 采用最小显著性差异 (LSD) 检验进行差异分析, 显著水平为 95% ( $P < 0.05$ ), 使用 Origin 2024 软件绘图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 直链淀粉及总淀粉含量测定

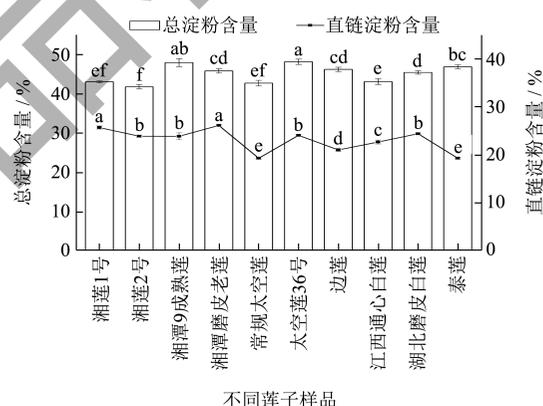


图 1 不同莲子样品的直链淀粉及总淀粉含量分布情况

Fig.1 Distribution of straight chain starch and total starch content in different lotus seed samples

对收集的 10 份不同莲子样品的直链淀粉及总淀粉含量进行测定。如图 1 所示, 10 份莲子样品的直链淀粉及总淀粉含量范围分别为 19.33%~26.17% (m/m) 和 41.79%~47.97% (m/m)。其中“湘潭磨皮老莲”的直链淀粉含量最高, 显著高于“湘潭 9 成熟莲” ( $P < 0.05$ )。抗性淀粉含量与莲子品种和成熟过程结构变化有关, 根据孙思薇等<sup>[19]</sup>研究表明, 同一品种不同成熟度的莲子中直链淀粉、抗性淀粉含量随着成熟度的加强而升高。高直链淀粉含量更有利于淀粉链之间的再结合和退化, 形成具有更高酶抗性的结构<sup>[20]</sup>。故选择直链淀粉含量最高的“湘潭磨皮老莲”进行改性制备莲子抗性淀粉。

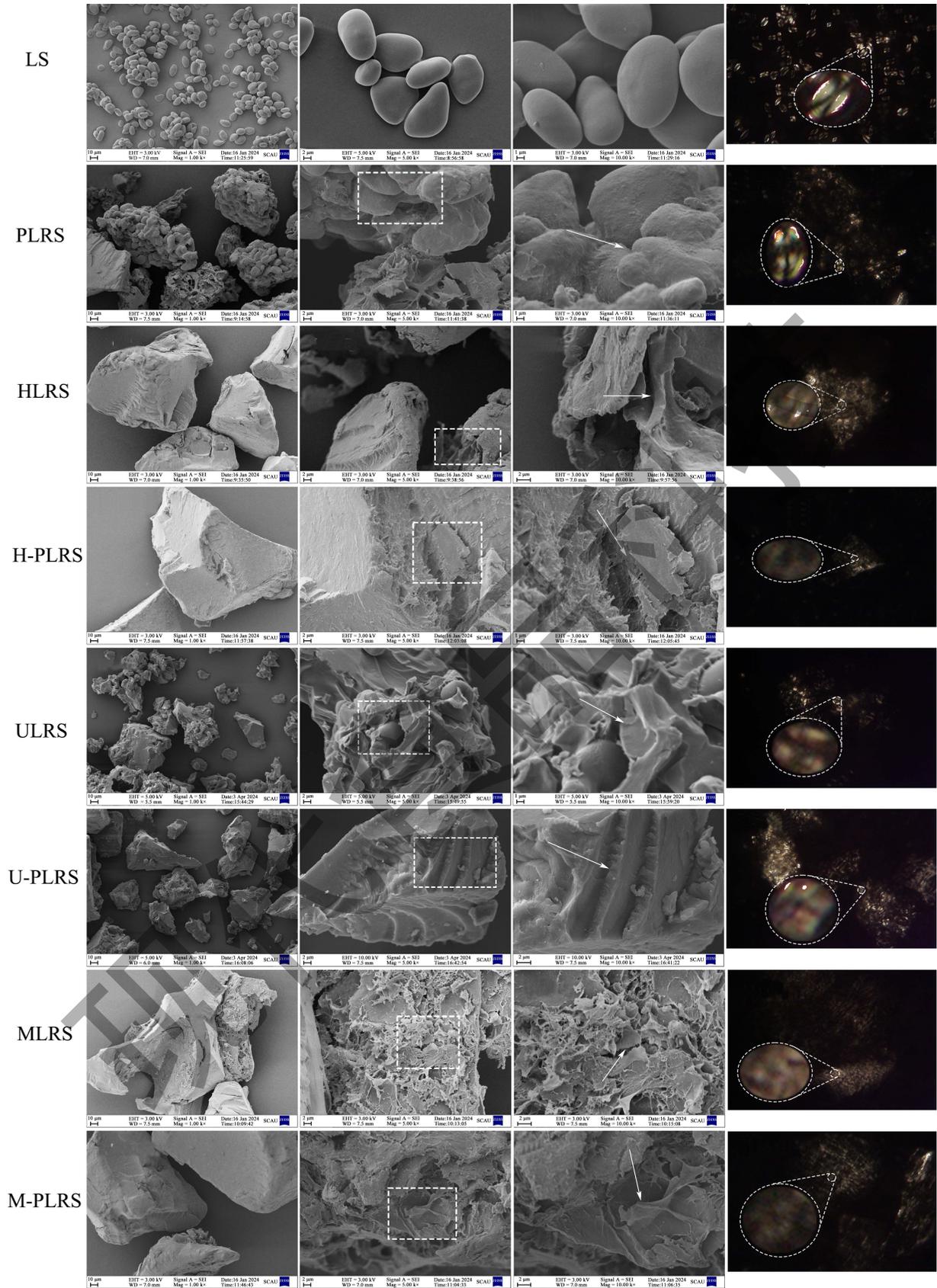


图 2 改性莲子淀粉的扫描电子显微镜和偏光显微镜图

Fig.2 Scanning electron microscopy and polarised light micrographs of modified lotus starch

注：图像从左至右分别代表被观察样品在放大倍数为 1 000×、5 000× 及 10 000× 下的扫描电子显微镜图像及 400× 偏光显微镜图像结果；图中白色方框所圈为特征结构区域，白色箭头所指为主要结构特征，白色椭圆所圈为偏光十字放大图形。

表 1 改性莲子淀粉的粒度分布特征 ( $\mu\text{m}$ )Table 1 Particle size distribution characteristics of modified lotus starch ( $\mu\text{m}$ )

样品	$D_{[4,3]}$	$D_{[3,2]}$	$D_{10}$	$D_{50}$	$D_{90}$
LS	$20.13 \pm 0.47^{\text{e}}$	$11.10 \pm 0.10^{\text{h}}$	$7.22 \pm 0.02^{\text{h}}$	$13.97 \pm 0.06^{\text{e}}$	$25.50 \pm 0.72^{\text{h}}$
PLRS	$152.67 \pm 0.58^{\text{c}}$	$66.10 \pm 0.00^{\text{c}}$	$44.07 \pm 0.12^{\text{c}}$	$144.33 \pm 0.58^{\text{c}}$	$273.67 \pm 1.15^{\text{e}}$
HLRS	$224.00 \pm 1.00^{\text{ab}}$	$140.67 \pm 1.15^{\text{a}}$	$104.33 \pm 1.15^{\text{b}}$	$211.00 \pm 1.00^{\text{ab}}$	$367.00 \pm 0.00^{\text{b}}$
H-PLRS	$221.33 \pm 1.15^{\text{b}}$	$136.00 \pm 2.00^{\text{b}}$	$102.33 \pm 0.58^{\text{c}}$	$209.67 \pm 0.58^{\text{b}}$	$363.00 \pm 1.00^{\text{c}}$
ULRS	$145.33 \pm 0.58^{\text{f}}$	$48.07 \pm 0.12^{\text{e}}$	$27.60 \pm 0.17^{\text{e}}$	$132.67 \pm 0.58^{\text{f}}$	$282.33 \pm 2.08^{\text{f}}$
U-PLRS	$166.67 \pm 1.53^{\text{d}}$	$62.03 \pm 0.75^{\text{f}}$	$40.93 \pm 0.50^{\text{f}}$	$158.67 \pm 1.53^{\text{d}}$	$301.00 \pm 1.00^{\text{c}}$
MLRS	$225.33 \pm 2.52^{\text{a}}$	$130.67 \pm 2.31^{\text{c}}$	$105.67 \pm 0.58^{\text{a}}$	$212.00 \pm 2.00^{\text{a}}$	$377.00 \pm 2.00^{\text{a}}$
M-PLRS	$180.00 \pm 1.00^{\text{c}}$	$86.37 \pm 1.57^{\text{d}}$	$71.63 \pm 0.74^{\text{d}}$	$165.67 \pm 1.15^{\text{c}}$	$311.67 \pm 1.53^{\text{d}}$

注:  $D_{[4,3]}$ 即体积平均粒径;  $D_{[3,2]}$ 即表面积平均粒径;  $D_{10}$ 、 $D_{50}$ 、 $D_{90}$ 表示体积分数分别为10%、50%、90%的粒径。同列不同小写字母表示具有显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 下同。

## 2.2 淀粉颗粒的微观结构

采用扫描电子显微镜和偏光显微镜获取天然莲子淀粉 (LS) 和改性莲子淀粉 (LRS) 的形态特征, 结果如图 2 所示。从图中, 可观察到 LS 颗粒表面光滑结构完整, 呈椭圆形或少量为圆形, 具备完整淀粉颗粒的马耳他十字, 十字形中心位于颗粒脐。与天然淀粉不同, 酶改性和物理改性通过促进淀粉链之间的相互作用, 导致形成更多表面粗糙的大块聚集颗粒, 马耳他十字消失, 淀粉晶体结构完全被破坏。改性过程破坏了淀粉壳层屏障, 使得消化酶更易渗透进颗粒内层, 针对淀粉分子上的糖苷键进行水解。其中, 酶改性淀粉 (PLRS) 中糊化的淀粉颗粒粘连在一起形成聚集颗粒, 表面逐渐受到侵蚀变得粗糙, 偏振交叉变得不清晰。热处理物理改性淀粉 (HLRS、H-PLRS、MLRS、M-PLRS) 四周均以聚集体形式存在, 颗粒结构完全消失。冷处理物理改性淀粉 (ULRS、U-PLRS) 的凝胶网络大空腔被破坏, 产生较多碎片, 颗粒尺寸明显小于热改性淀粉, 但 U-PLRS 形成了更致密的鳞片结构。

## 2.3 淀粉粒径分布

采用激光粒度仪测量改性前后淀粉颗粒大小, 天然莲子淀粉 (LS) 和改性莲子淀粉 (LRS) 粒度分布曲线如图 3。LS 粒径表现为三个峰, 粒度分布不均匀存在明显的粒径差异。经改性后, LRS 体积粒径  $D_{[4,3]}$  和面积粒径  $D_{[3,2]}$  均显著大于 LS ( $P < 0.05$ , 表 1), 呈现明显的单峰曲线, 这与部分 LS 颗粒在形成 LRS 过程中反复膨胀、聚集或结晶有关。此外, HLRS、H-PLRS、MLRS 的单峰比其他改性淀

粉的单峰更尖锐且最大分布峰右移, 从  $174.27 \mu\text{m}$  增至  $224.95 \mu\text{m}$ 。HLRS ( $224 \mu\text{m}$ )、H-PLRS ( $221 \mu\text{m}$ )、MLRS ( $225 \mu\text{m}$ )、M-PLRS ( $180 \mu\text{m}$ ) 体积平均粒径  $D_{[4,3]}$  显著大于 PLRS ( $152 \mu\text{m}$ )、ULRS ( $145 \mu\text{m}$ )、U-PLRS ( $166 \mu\text{m}$ )。这可能是压热及微波处理过程中水分子进入到淀粉颗粒内部, 颗粒表面呈现膨胀及局部糊化<sup>[21]</sup>。

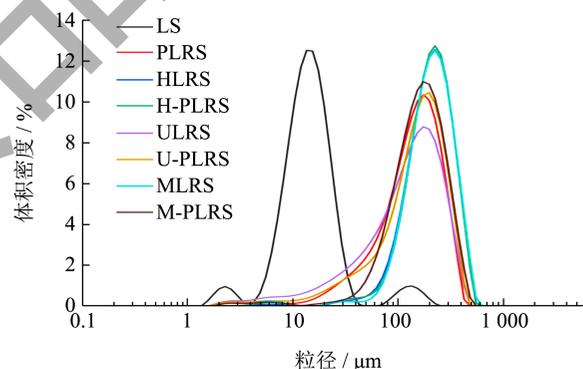


图 3 改性莲子淀粉的粒度分布曲线

Fig.3 Particle size distribution curve of modified lotus seed starch

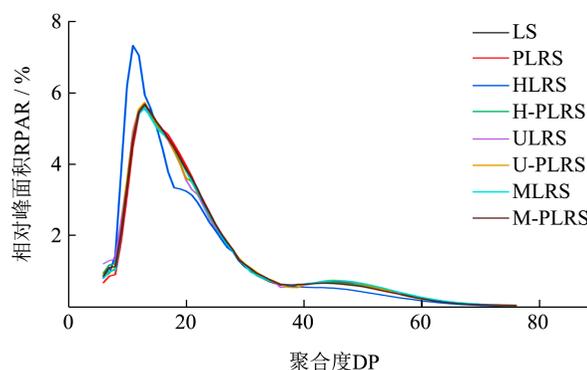


图 4 改性莲子淀粉的链长分布曲线

Fig.4 Chain length distribution curves of modified lotus starch

表 2 改性莲子淀粉的链长分布 (%)

Table 2 Chain length distribution of modified lotus seed starch (%)

样品	DP6-12	DP13-24	DP25-36	DP37-76	平均聚合度
LS	18.74 ± 0.14 <sup>c</sup>	50.81 ± 0.41 <sup>bc</sup>	14.83 ± 0.23 <sup>bc</sup>	15.62 ± 0.42 <sup>abc</sup>	22.96 ± 0.21 <sup>ab</sup>
PLRS	17.41 ± 0.41 <sup>d</sup>	51.71 ± 0.15 <sup>a</sup>	15.09 ± 0.11 <sup>abc</sup>	15.79 ± 0.33 <sup>ab</sup>	23.16 ± 0.24 <sup>a</sup>
HLRS	27.77 ± 0.08 <sup>a</sup>	45.97 ± 0.11 <sup>c</sup>	14.67 ± 0.13 <sup>c</sup>	11.60 ± 0.20 <sup>c</sup>	20.82 ± 0.13 <sup>c</sup>
H-PLRS	19.11 ± 0.79 <sup>c</sup>	50.78 ± 0.44 <sup>bc</sup>	15.22 ± 0.22 <sup>abc</sup>	14.90 ± 0.43 <sup>cd</sup>	22.69 ± 0.06 <sup>b</sup>
ULRS	20.40 ± 0.59 <sup>b</sup>	49.39 ± 0.27 <sup>d</sup>	15.09 ± 0.40 <sup>abc</sup>	15.11 ± 0.55 <sup>bcd</sup>	22.63 ± 0.27 <sup>b</sup>
U-PLRS	19.06 ± 0.50 <sup>c</sup>	50.21 ± 0.75 <sup>c</sup>	15.56 ± 0.56 <sup>a</sup>	15.17 ± 0.39 <sup>bcd</sup>	22.83 ± 0.17 <sup>ab</sup>
MLRS	18.44 ± 0.08 <sup>c</sup>	50.37 ± 0.27 <sup>c</sup>	14.98 ± 0.38 <sup>abc</sup>	16.21 ± 0.31 <sup>a</sup>	23.20 ± 0.10 <sup>a</sup>
M-PLRS	18.79 ± 0.51 <sup>c</sup>	51.23 ± 0.27 <sup>ab</sup>	15.45 ± 0.15 <sup>ab</sup>	14.53 ± 0.08 <sup>d</sup>	22.64 ± 0.19 <sup>b</sup>

## 2.4 支链淀粉链长分布

根据聚合度 (DP), 支链淀粉链长分布可分为 A 链 (DP6-12)、B1 链 (DP13-24)、B2 链 (DP25-36) 和 B3 链 (DP37-76)<sup>[22]</sup>。淀粉链长分布是调节淀粉消化率和血糖反应的重要决定因素之一, 通过改变淀粉的链长和结构能够调控消化速度<sup>[23]</sup>。对样品的支链淀粉链长分布进行测定, 结果如表 2 所示。改性前后支链淀粉的链长呈现双峰分布 (图 4), DP11-12 时达到峰值, DP45 处出现一个低峰, 以 B1 链含量最高。压热改性淀粉 (HLRS) 的链长分布曲线峰变尖锐且上移, 其 A 链含量为 27.77%, 显著高于其他样品 (17.41%~20.40%) ( $P < 0.05$ ), B1 和 B3 链分别下降了 4.84% 和 4.02%。这可能是因为压热处理导致淀粉分子链间的氢键断裂, 使得到更多短链。张素敏等<sup>[24]</sup>通过压热处理黄米淀粉, 研究发现 A 链含量比原淀粉增加 3.1%, 压热处理后更容易使支链淀粉分子暴露, 从而被淀粉水解酶水解得到更多短链。而酶脱支改性淀粉 (PLRS) 其 A 链含量显著低于原淀粉 ( $P < 0.05$ ), 这可能由于普鲁兰酶可通过剪切  $\alpha$ -1,6-D-糖苷键再发生聚集重结晶导致其短链含量减少<sup>[25]</sup>, 同时中长链比例升高。微波改性淀粉 (MLRS) 含有较多的长链, B3 链含量均高于其他改性淀粉。淀粉在微波的作用下被迅速加热糊化, 快速的加热速度使支链淀粉的双螺旋紧密堆积, 形成了 RS3 抵抗淀粉消化酶的作用<sup>[26]</sup>。

## 2.5 淀粉结晶结构分析

采用 XRD 图谱分析确定了天然莲子淀粉 (LS) 和改性莲子淀粉 (LRS) 的长程晶型结构 (如图 5)。LS 在 15.1°、17°、17.8° 及 23° 处有明显的衍射峰,

以及在 5.5° 和 20° 处出现弱的衍射峰, 同时具备了 A 型及 B 型结晶结构的特征峰, 属于典型的 C 型结晶结构<sup>[27]</sup>。LRS 在 17° 处的衍射峰均比 LS 更强, 在 20.78° 和 25.10° 处显示双峰, 而特征峰 17.8°、23° 消失以及 15° 处的衍射峰变弱, 晶体峰型从 C 型转变为 B 型。Martens 等<sup>[28]</sup>研究结果表明结晶度越高的淀粉具备较低的消化率, 高结晶度的淀粉因其紧密有序的结晶结构, 能够有效延缓淀粉酶的扩散速度, 从而具有较强的抗消化性。莲子淀粉经物理、酶和复合处理导致  $R_c$  含量显著降低 ( $P < 0.05$ ), 从 31.02% 降至 18.19%, HLRS 和 ULRS 的  $R_c$  含量最低。高温及剪切力破坏了原淀粉的完整晶粒, 导致样品在改性处理后相对结晶度下降。同时发现酶改性对于提高  $R_c$  含量有辅助作用, 可能是物理改性比酶法改性对结晶区的破坏程度更大, 物理协同酶处理改性相比单一物理改性能更能显著提高淀粉的  $R_c$  含量。Geng 等<sup>[29]</sup>通过预热和支链淀粉酶处理对大米淀粉改性, 结果发现酶解改性主要对淀粉颗粒表层进行破坏, 对晶体内部长程有序程度破坏程度较弱。

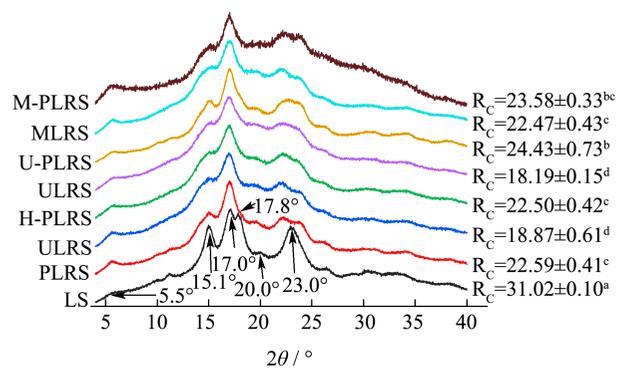


图 5 改性莲子淀粉的 XRD 图谱

Fig.5 XRD patterns of modified lotus seed starch

2.6 淀粉短程有序结构分析

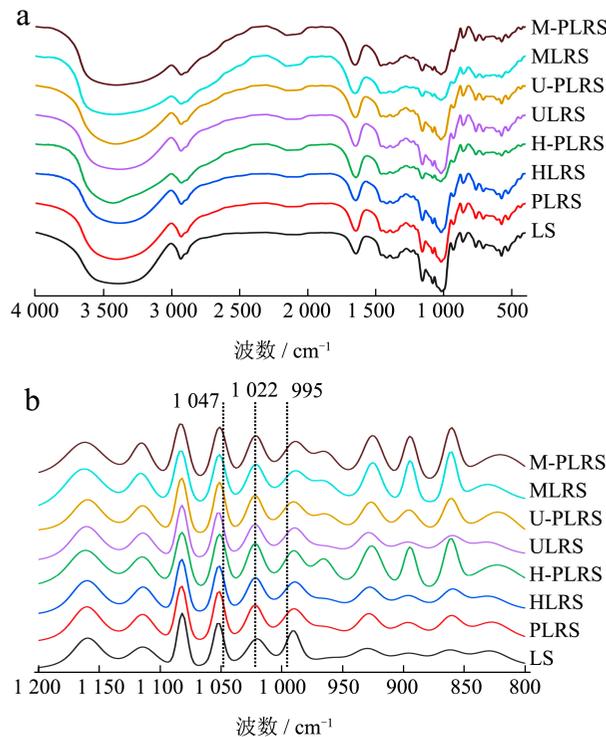


图 6 改性莲子淀粉的傅里叶变换光谱

Fig.6 Fourier transform spectra of modified lotus starch

注：(a) 为样品的原始红外光谱；(b) 为样品的去卷积光谱。

采用红外光谱分析天然莲子淀粉 (LS) 和改性莲子淀粉 (LRS) 的短程结构 (图 6)。从图 6 可观察到所有样品呈现出相似的光谱, 特征峰分别在  $3\ 395\ \text{cm}^{-1}$  和  $2\ 932\ \text{cm}^{-1}$  处, 对应于 -O-H 和 C-H 键的振动。在改性淀粉的 FT-IR 光谱中未发现峰的消失或新峰的产生, 表明常见的物理改性及酶改性不会导致莲子淀粉分子的化学变化, 仅涉及氢键淀粉链的重新组装, 此过程中没有形成新的官能团。一般地,  $995\ \text{cm}^{-1}$  和  $1\ 047\ \text{cm}^{-1}$  处的吸收带与淀粉的有序结构有关,  $1\ 022\ \text{cm}^{-1}$  处的吸收带与无定形结构有关,  $R_{1047/1022\ \text{cm}^{-1}}$  和  $R_{995/1022\ \text{cm}^{-1}}$  分别代表淀粉分子的有序度 (DO) 和双螺旋度 (DD)<sup>[30]</sup>。由去卷积结果 (表 3) 可知, 改性莲子淀粉的 DO 和 DD 值显著均低于莲子淀粉 ( $P < 0.05$ ), 表明改性使莲子淀粉的短程有序结构降低, 与糊化破坏了支链淀粉的有序晶体结构有关。在所有改性淀粉中, 超高压-酶解改性淀粉 (U-PLRS) 的 DO 值最高, 其次为酶解改性淀粉 (PLRS)。Kim 等<sup>[31]</sup>研究表明支链淀粉 B1 链 (DP13-24) 可以形成稳定的双螺旋, 使结构排列更加紧密形成有序结构域。结合 2.4 支链淀粉链长分布数据, PLRS 中 B1 链的比例较高, 其双螺

旋度 (DD) 在所有改性淀粉中含量最高, 淀粉短程有序程度显著提升。

表 3 改性莲子淀粉的去卷积结果

Table 3 Deconvolution results for modified lotus starch

样品	$R_{1047/1022\ \text{cm}^{-1}}$	$R_{995/1022\ \text{cm}^{-1}}$
LS	$1.56 \pm 0.03^a$	$1.45 \pm 0.03^a$
PLRS	$1.27 \pm 0.05^b$	$1.06 \pm 0.05^b$
HLRS	$1.05 \pm 0.01^{de}$	$0.98 \pm 0.06^{bcd}$
H-PLRS	$1.15 \pm 0.05^c$	$0.85 \pm 0.04^c$
ULRS	$0.97 \pm 0.03^c$	$1.02 \pm 0.03^{bc}$
U-PLRS	$1.32 \pm 0.07^b$	$0.90 \pm 0.07^{de}$
MLRS	$1.03 \pm 0.01^{de}$	$0.93 \pm 0.03^{cde}$
M-PLRS	$1.08 \pm 0.02^{cd}$	$1.03 \pm 0.03^{bc}$

2.7 淀粉热力学性质

天然莲子淀粉 (LS) 和改性莲子淀粉 (LRS) 的 DSC 热特性参数如表 4、热流曲线如图 7。LS 的起始温度 ( $T_0$ )、峰值温度 ( $T_p$ ) 和结束温度 ( $T_c$ ) 分别为  $70.05$ 、 $75.49$  和  $80.28\ ^\circ\text{C}$ 。大部分改性莲子淀粉 (HLRS、H-PLRS、ULRS、MLRS、M-PLRS) 的吸热峰消失, 与莲子淀粉颗粒内部结构遭到物理处理的破坏有关, 致使其完全糊化。与其他改性方法不同, 酶改性 (PLRS) 和超高压-酶改性 (U-PLRS) 均可提高莲子淀粉的峰值糊化温度 ( $T_p$ ), 从  $75.49\ ^\circ\text{C}$  升至  $83.04\ ^\circ\text{C}$ , 酶解和超高压-酶解通过强化莲子淀粉分子链相互作用, 从而形成热稳定性更高的有序结构。天然淀粉的糊化焓变 ( $\Delta H$ ) 反映了加热过程中双螺旋和结晶的破坏, 较高的  $\Delta H$  存在更有序的淀粉结构<sup>[32]</sup>。而改性后的莲子淀粉糊化焓显著降低 ( $P < 0.05$ ), 表明改性破坏了莲子淀粉颗粒内部的双螺旋结构。

表 4 改性莲子淀粉的热力学参数

Table 4 Thermodynamic parameters of modified lotus starch

样品	$T_0/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J/g})$
LS	$70.05 \pm 1.07^a$	$75.49 \pm 0.23^b$	$80.28 \pm 0.80^b$	$11.22 \pm 0.18^a$
PLRS	$79.19 \pm 0.41^a$	$83.04 \pm 0.94^a$	$88.78 \pm 0.59^a$	$1.37 \pm 0.07^c$
HLRS	—	—	—	—
H-PLRS	—	—	—	—
ULRS	—	—	—	—
U-PLRS	$78.89 \pm 1.16^a$	$82.59 \pm 0.88^a$	$87.95 \pm 0.98^a$	$2.67 \pm 0.40^b$
MLRS	—	—	—	—
M-PLRS	—	—	—	—

注：“—”表示样品中未检测到变化； $T_0$ 、 $T_p$ 、 $T_c$  分别表示开始、峰值和结束的温度， $\Delta H$  代表焓变。

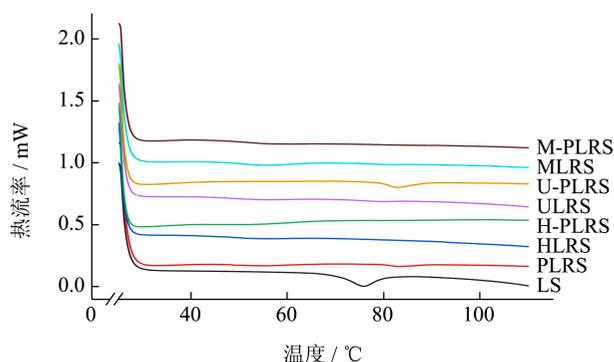


图 7 改性莲子淀粉的 DSC 曲线

Fig.7 DSC curves of modified lotus starch

### 2.8 淀粉的体外消化特性

表 5 改性莲子淀粉的体外消化特性 (%)

Table 5 *In vitro* digestion properties of modified lotus starch

样品	RDS	SDS	RS
LS	3.02 ± 0.03 <sup>g</sup>	7.43 ± 0.35 <sup>f</sup>	89.56 ± 0.38 <sup>a</sup>
PLRS	30.37 ± 1.44 <sup>dc</sup>	23.14 ± 0.72 <sup>d</sup>	46.49 ± 2.15 <sup>c</sup>
HLRS	36.94 ± 1.32 <sup>b</sup>	27.29 ± 0.74 <sup>b</sup>	35.77 ± 0.70 <sup>e</sup>
H-PLRS	31.92 ± 1.30 <sup>cd</sup>	25.80 ± 0.37 <sup>e</sup>	42.28 ± 1.42 <sup>d</sup>
ULRS	38.91 ± 0.99 <sup>a</sup>	31.27 ± 0.33 <sup>a</sup>	29.82 ± 0.97 <sup>f</sup>
U-PLRS	26.40 ± 0.51 <sup>f</sup>	17.10 ± 0.54 <sup>e</sup>	56.50 ± 0.27 <sup>b</sup>
MLRS	32.90 ± 0.81 <sup>c</sup>	26.68 ± 0.56 <sup>bc</sup>	40.42 ± 0.27 <sup>d</sup>
M-PLRS	29.26 ± 0.60 <sup>c</sup>	23.74 ± 0.22 <sup>d</sup>	47.00 ± 0.76 <sup>c</sup>

注: RDS、SDS、RS 分别表示快消化淀粉、慢消化淀粉、抗性淀粉。

根据淀粉在人体内的消化特性, 可以将其分为快速消化淀粉 (Rapid Digestible Starch, RDS)、慢消化淀粉 (Slowly Digestible Starch, SDS) 以及抗性淀粉 (Resistant Starch, RS)<sup>[33]</sup>。天然莲子淀粉 (LS) 和改性莲子淀粉 (LRS) 的体外消化结果如表 5 所示, LS 含有 3.02% 的 RDS、7.43% 的 SDS 和 89.56% 的 RS, 这与许多天然淀粉难以消化有关, 天然淀粉未经糊化, 持有较高的分子有序性, Sopawong 等<sup>[34]</sup>研究表明天然藕粉中 RS 含量为 80.72%。经过改性后, 莲子淀粉的 RS 显著下降, 而 RDS 和 SDS 显著上升。其中, U-PLRS 具有最低的 RDS (26.40%) 和最高的 RS (56.50%), 这可能因为具有淀粉分子较高的结晶度及分子有序度。PLRS (46.49%) 的 RS 含量显著高于 HLRS (35.77%)、ULRS (29.82%)、MLRS (40.42%)。ULRS 和 HLRS 的低结晶度和低分子有序度使其对酶水解反应更敏感, 导致 RS 含量降低。物理

改性通过高温或高剪切力, 使产生的直链淀粉在回生过程中进行了重结晶, 形成更有序的抗酶解结构<sup>[35]</sup>, 酶解改性则是普鲁兰酶作用于  $\alpha$ -1,6 糖苷键而产生更多的直链淀粉, 有助于双螺旋结构的形成, 热稳定性得到增强。与单一物理改性淀粉 (HLRS、ULRS、MLRS) 比较, 酶协同物理改性淀粉 (H-PLRS、U-PLRS、M-PLRS) 的 RS 含量分别比其高 6.51%、26.68%、6.58%。因此, 物理改性前进行酶脱支对于 RS 的提升效果更明显。

### 2.9 淀粉结构与消化特性相关性分析

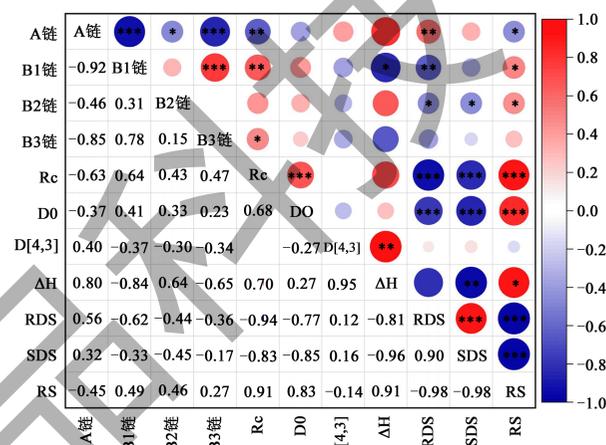


图 8 改性莲子淀粉的结构和理化特性的相关性分析

Fig.8 Correlation analysis of structural and physicochemical properties of modified lotus starch

注: “\*”表示  $P \leq 0.05$ , 相关性显著; “\*\*”表示  $P \leq 0.01$ , 相关性非常显著; “\*\*\*”表示  $P \leq 0.001$ , 相关性极显著。

改性莲子淀粉 (LRS) 多尺度结构和理化特性之间的 Pearson 相关性分析如图 8 所示, 热图中红色和蓝色越深分别代表正相关和负相关越强。在 LRS 的消化特性中, RS 与 B1 链、B2 链、 $R_c$ 、DO、 $\Delta H$  均呈显著正相关 ( $P \leq 0.05$ )。其中, 与  $R_c$  ( $r=0.906^{***}$ ,  $P \leq 0.001$ ) 和 DO ( $r=0.831^{***}$ ,  $P \leq 0.001$ ) 呈现极显著正相关,  $R_c$  与 DO 也呈极显著正相关 ( $r=0.682$ ,  $P \leq 0.001$ ), 淀粉的相对结晶度越高淀粉分子越有序, 这表明相对结晶度的增加可能是 RS 含量增加的关键结构因素。同时, RS 与 B1 链 ( $r=0.487^*$ ,  $P \leq 0.05$ ) 和 B2 ( $r=0.458^*$ ,  $P \leq 0.05$ ) 链均呈显著的正相关。相比于短支链淀粉, 中长链淀粉更有利于形成淀粉双螺旋结构, 使得中长链含量高的改性莲子淀粉血糖升高越缓慢。同时,  $\Delta H$  与 RS ( $r=0.909^*$ ,  $P \leq 0.05$ ) 呈显著正相关, 且

与  $R_c$  和 DO 呈正相关。 $\Delta H$  值与凝胶化过程中晶体的熔融和双螺旋结构的解开有关, 较高的结晶度和较短的有序结构需要更多的热来破坏它们, 从而导致较大的  $\Delta H$ 。对于 RS 含量越高的莲子抗性淀粉, 其热稳定性也越强。同时可发现, LRS 的消化特性与淀粉颗粒粒径无显著相关性, 从 SEM 观察的形态结构来看, 在改性过程中, 原淀粉的颗粒结构被破坏, 颗粒聚集在一起形成微米级聚集体, 这种改性使微米尺度的聚集体尺寸增大。虽然产生了更多 and 更大的聚集颗粒, 并没有对提高酶水解的抗性产生帮助。

### 3 结论

本研究以莲子淀粉 (LS) 为原料, 采用酶法、物理法 (压热、超高压、微波)、物理协同酶法制备莲子抗性淀粉 (LRS)。与莲子淀粉相比, 莲子抗性淀粉的颗粒形貌由表面光滑且完整逐渐变得粗糙并聚集形成不规则块状, 马耳他十字几乎消失, 淀粉晶体峰型从 C 型转变为 B 型, FT-IR 光谱未观察到化学结构变化。相对结晶度 ( $R_c$ )、短程有序度 (DO)、双螺旋度 (DD) 和糊化焓变 ( $\Delta H$ ) 均显著低于莲子淀粉 ( $P < 0.05$ ), 而颗粒粒径显著增大 ( $P < 0.05$ )。体外消化实验结果表明, U-PLRS 的 RS 含量显著高于其他改性淀粉 ( $P < 0.05$ ), 更适用于制备高 RS 产品。通过 Pearson 相关性分析, 对于短程有序结构, DO 与 RS 和  $R_c$  呈极显著正相关, 短程有序结构有利于增强 LRS 的酶解抗性。在结晶结构方面,  $R_c$  与 RS 呈极显著正相关, 淀粉分子相对结晶度越高其抵抗淀粉酶的水解能力越强。对于支链淀粉链长分布, B1 和 B2 链与 RS 呈显著正相关, 中长链淀粉含量的增加也有助于双螺旋结构的形成。通过 SEM 观察, 改性还导致淀粉在微米尺度上聚集, 但对提高酶水解抗性无益。本研究从多尺度结构变化的角度揭示改性对莲子淀粉消化率的影响, 为深入分析加工方式对 LRS 结构-消化作用提供了理论依据, 并为进一步研发以莲子淀粉为原料的低 GI 功能性食品奠定基础。

### 参考文献

[1] YU X J, WANG Y T, YAN X L, et al. Metabolomics combined with correlation analysis revealed the differences in antioxidant activities of lotus seeds with varied cultivars [J]. *Foods*, 2024, 13(7): 1084.  
[2] SANJU B D, CHANDAK A, COLLINS M N, et al. Lotus

seed starch: a novel functional ingredient with promising properties and applications in food - A review [J]. *Starch-stärke*, 2022, 74(9-10): 2200064.  
[3] ZENG H L, HE S Q, XIONG Z X, et al. Gut microbiota-metabolic axis insight into the hyperlipidemic effect of lotus seed resistant starch in hyperlipidemic mice [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 314: 120939.  
[4] WANG Q, ZHENG Y F, ZHUANG W J, et al. Genome-wide transcriptional changes in type 2 diabetic mice supplemented with lotus seed resistant starch [J]. *Food Chemistry*, 2018, 264: 427-434.  
[5] ZENG S X, CHEN B Y, ZENG H L, et al. Effect of microwave irradiation on the physicochemical and digestive properties of lotus seed starch [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64(12): 2442-2449.  
[6] GUO Z B, JIA X Z, ZHAO B B, et al. C-type starches and their derivatives: structure and function [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2017, 1398(1): 47-61.  
[7] YI M X, TANG X C, LIANG S X, et al. Effect of microwave alone and microwave-assisted modification on the physicochemical properties of starch and its application in food [J]. *Food Chemistry*, 2024, 446: 138841.  
[8] ROSTAMABADI H, NOWACKA M, KUMAR Y, et al. Green modification techniques: Sustainable approaches to induce novel physicochemical and technofunctional attributes in legume starches [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2024, 146: 104389.  
[9] LIU S, LIU H, GAO S S, et al. Dry heating affects the multi-structures, physicochemical properties, and *in vitro* digestibility of blue highland barley starch [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2023, 10: 1191391.  
[10] LI X X, YUE X R, HUANG Q L, et al. Effects of wet-media milling on multi-scale structures and *in vitro* digestion of tapioca starch and the structure-digestion relationship [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 284: 119176.  
[11] LIN Y J, LIU L, LI L X, 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.  
[12] NAWAZ H, AKBAR A, ANDALEEB H, et al. Microwave-induced modification in physical and functional characteristics and antioxidant potential of *Nelumbo nucifera* rhizome starch [J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2020, 28(11): 2965-2976.  
[13] ALI N A, DASH K K, ROUSTRAY W. Physicochemical characterization of modified lotus seed starch obtained through acid and heat moisture treatment [J]. *Food Chemistry*, 2020, 319: 126513.  
[14] 王琦. 莲子抗性淀粉降血糖功效及其机理研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2019.

- [15] MANIMEGALAI P, PARIMALAVALLI R. Effect of pullulanase debranching on the yield of retrograded pearl millet starch and its intrinsic qualities [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2023, 17(3): 2566-2575.
- [16] GUO Z B, ZHAO B B, CHEN J, et al. Insight into the characterization and digestion of lotus seed starch-tea polyphenol complexes prepared under high hydrostatic pressure [J]. *Food Chemistry*, 2019, 297: 124992.
- [17] 刘娇. 淀粉絮凝菌的筛选及其对豌豆淀粉性质的影响[D]. 锦州: 锦州医科大学, 2023.
- [18] ENGLYST H N, KINGMAN S M, CUMMINGS J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions [J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 1992, 46(S2): S33-S50.
- [19] 孙思薇, 林鸿, 杨炳昆, 等. 不同品种、成熟期鲜莲中淀粉的结构特性研究[J]. *热带作物学报*, 2019, 40(9): 1831-1837.
- [20] LIU S, REIMER M, AI Y. *In vitro* digestibility of different types of resistant starches under high-temperature cooking conditions [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 107: 105927.
- [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] HANASHIRO I, ABE J I, HIZUKURI S. A periodic distribution of the chain length of amylopectin as revealed by high-performance anion-exchange chromatography [J]. *Carbohydrate Research*, 1996, 283: 151-159.
- [23] GEBRE B A, ZHANG C C, LI Z J, et al. Impact of starch chain length distributions on physicochemical properties and digestibility of starches [J]. *Food Chemistry*, 2024, 435: 137641.
- [24] 张素敏, 崔艳, 陈振家, 等. 压热改性对黄米淀粉多尺度结构及理化性质的影响[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(18): 80-87.
- [25] CHANG R R, XIONG L, LI M, et al. Fractionation of debranched starch with different molecular weights via edible alcohol precipitation [J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 83: 430-437.
- [26] FAN D, WANG L, CHEN W, et al. Effect of microwave on lamellar parameters of rice starch through small-angle X-ray scattering [J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 35: 620-626.
- [27] 郑明静. 莲子淀粉与亲水性胶体协效性及其作用机理的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013.
- [28] MARTENS B M J, GERRITS W J J, BRUININX E M A M, et al. Amylopectin structure and crystallinity explains variation in digestion kinetics of starches across botanic sources in an *in vitro* pig model [J]. *Journal of Animal Science & Biotechnology*, 2019, 10(1): 119-131.
- [29] GENG D H, ZHANG X J, ZHU C Y, et al. Structural, physicochemical and digestive properties of rice starch modified by preheating and pullulanase treatments [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 313: 120866.
- [30] LIU D, TANG W, XIN Y, et al. Comparison on structure and physicochemical properties of starches from adzuki bean and dolichos bean [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 105: 105784.
- [31] KIM Y Y, WOO K S, CHUNG H J. Starch characteristics of cowpea and mungbean cultivars grown in Korea [J]. *Food Chemistry*, 2018, 263: 104-111.
- [32] LI Z H, KONG X L, ZHOU X R, et al. Characterization of multi-scale structure and thermal properties of Indica rice starch with different amylose contents [J]. *Rsc Advances*, 2016, 6 (109): 107491-107497.
- [33] ENGLYST H N, KINGMAN S M, CUMMINGS J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions [J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 1992, 46 (Suppl 2): S33.
- [34] SOPAWONG P, WARODOMWICHIT D, SRICHAMNONG W, et al. Effect of physical and enzymatic modifications on composition, properties and *in vitro* starch digestibility of sacred lotus (*Nelumbo nucifera*) seed flour [J]. *Foods*, 2022, 11(16): 2473.
- [35] 王则徐, 周文菊, 陈正行, 等. 不同制备方法对青稞抗性淀粉消化性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(1): 189-195.