申媛媛, 唐忠海, 郭时印, 等. 超声辅助制备莲子淀粉-脂质复合物及其在低 GI 重组米中的应用 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(18): 211−221. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080015

SHEN Yuanyuan, TANG Zhonghai, GUO Shiyin, et al. Preparation of Lotus Seed Starch-Lipid Complex by Ultrasound and Its Application in Low GI Reconstituted Rice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(18): 211−221. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080015

· 工艺创新与智能制造 ·

超声辅助制备莲子淀粉-脂质复合物及其在低 GI 重组米中的应用

申媛媛[1], 唐忠海[1], 郭时印[1], 范　伟[1], 张　娜[2,*]

（1.湖南农业大学食品科学技术学院, 湖南省菜籽油营养健康与深度开发工程技术研究中心, 湖南长沙 410128;
2.塔里木大学食品科学与工程学院, 南疆特色农产品深加工兵团重点实验室, 新疆阿拉尔 843300）

摘　要: 基于超声辅助水热法制备莲子淀粉-脂质复合物，探究了超声功率对其理化性质及消化特性的影响，随后以复合物、籼米粉及杂粮粉为原料制备重组米，以感官、质构和蒸煮品质为指标，采用单因素及响应面试验优化重组米制备工艺，并通过小鼠实验测定血糖生成指数（Glycemic Index，GI）。结果表明：超声功率为 360 W 时，莲子淀粉-脂质复合物的复合指数显著提高，溶解度与膨胀度明显低于莲子淀粉（P<0.05）；红外光谱结果表明其有序度增加，抗性淀粉（Resistant Starch，RS）含量最高（38.06%±0.10%），体外消化水解曲线整体下移，表明其耐消化特性最优。优化后的重组米制备工艺为：复合物添加量 24%、水分含量 36%、挤压温度 121 ℃、螺杆转速 160 r/min。重组米适口性感官评分、粘性、内聚性、弹性、咀嚼性及回复性等指标显著高于市售籼米（P<0.05），说明重组米口感更佳。进一步于小鼠体内实验测得 GI 为 46.07±7.56，属低 GI 食品，本研究为低 GI 重组米的开发提供了理论依据和技术参考。

关键词: 莲子, 淀粉-脂质复合物, 超声处理, 重组米, 低 GI

中图分类号: TS213.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)18−0211−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080015　　本文网刊:

Preparation of Lotus Seed Starch-Lipid Complex by Ultrasound and Its Application in Low GI Reconstituted Rice

SHEN Yuanyuan[1], TANG Zhonghai[1], GUO Shiyin[1], FAN Wei[1], ZHANG Na[2,*]

（1.Hunan Engineering Technology Research Center for Rapeseed Oil Nutrition Health and Deep Development, College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;
2.Production & Construction Group Key Laboratory of Special Agricultural Products Further Processing in Southern Xinjiang, College of Food Science and Engineering, Tarim University, Alar 843300, China）

Abstract: Lotus seed starch–lipid complexes were prepared using an ultrasound-assisted hydrothermal method, and the effects of ultrasonic power on their physicochemical properties and digestibility were investigated. Subsequently, reconstituted rice was produced using the complexes, indica rice flour, and coarse grain flour as raw materials. The processing conditions were optimized by single-factor experiments and response surface methodology, with sensory evaluation, texture profile, and cooking quality as indicators. The glycemic index (GI) of the optimized reconstituted rice was further determined in mice. The results showed that at an ultrasonic power of 360 W, the complexing index of the lotus seed starch–lipid complex increased significantly, while solubility and swelling power were markedly lower than those of native lotus seed

收稿日期: 2025−08−10

基金项目: 国家自然科学基金（32360579）; 兵团科技计划基础研究项目（2024DA045）; 郴州国家可持续发展议程创新示范区建设专项（2022SFQ49）。

作者简介: 申媛媛（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品资源开发与利用, E-mail: 15931984399@163.com。

*** 通信作者:** 张娜（1981−）, 女, 博士, 副教授, 研究方向: 天然产物研究与开发利用, E-mail: 1571040348@qq.com。

starch (P<0.05). Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy indicated an increase in structural order, and the resistant starch (RS) content reached its highest level (38.06%±0.10%). The *in vitro* hydrolysis curve shifted downward, suggesting improved resistance to digestion. The optimized processing parameters for reconstituted rice were as follows: complex addition level of 24%, moisture content 36%, extrusion temperature 121 ℃, and screw speed 160 r/min. The reconstituted rice exhibited significantly higher sensory acceptability, viscosity, cohesiveness, springiness, chewiness, and resilience than commercial indica rice (P<0.05), indicating a superior eating quality. *In vivo* mouse experiments further confirmed a GI value of 46.07±7.56, classifying it as a low-GI food. This study provides a theoretical basis and technical reference for the development of low-GI reconstituted rice.

Key words: lotus seed; starch-lipid complex; ultrasonication processing; reconstituted rice; low GI

根据国际糖尿病联盟统计，目前全球约有 4.63 亿糖尿病患者[1]，而中国是糖尿病患病人口最多的国家，总数高达 1.4 亿[2]，主要的患病类型为Ⅱ型糖尿病（Type 2 Diabetes Mellitus, T2DM）。为应对这一严峻健康威胁，国家卫健委“健康中国 2030”战略大力提倡低 GI（Glycemic Index, GI）饮食。大米是我国居民的日常主食，而大米蒸煮后米饭的 GI 值超过 80，属于高 GI 食物[3]，不利于糖尿病患者长期食用。挤压重组米是以大米粉为原料，辅助改良剂或者营养强化物质，经高温、高压、挤压和剪切作用，得到类似米粒形态的主食产品[4]。针对于不同人群，重组米可根据需求添加功能性辅料。开发一款食用品质较好且具有抗消化特性的低 GI 重组米具有重要意义和广阔的市场前景。

当前，低 GI 重组米的开发主要集中在添加抗性淀粉（Resistant Starch, RS）[5]、膳食纤维[6] 或蛋白质[7] 等成分。淀粉-脂质复合物是一种新型 RS，能够明显改善淀粉加工性质、品质特性及功能特性[8]。淀粉-脂质复合物的制备方法有很多，其中超声制备技术因效率高、无污染、易操作以及能耗较低等优点受到了越来越多的关注。已有研究证明[9]，淀粉-脂质复合物能够缓解Ⅱ型糖尿病小鼠“多食、多尿和体重减轻”症状，改善血糖水平，降低甘油三酯、总胆固醇浓度，减轻肝脏的炎症病变程度。HASJIM 等[10] 发现高直链玉米淀粉-棕榈酸复合物能够降低人体血糖水平。因此，淀粉-脂质复合物为调节血糖、血脂，以及低 GI 重组米的开发提供新方向。

莲子作为一种典型的药食同源作物[11]，淀粉含量约 50%，其中直链淀粉含量超过 40%[12]，能与油酸[13]、亚油酸[14]、亚麻酸[15] 形成结构稳定、抗消化性良好的复合物。孙思薇[16] 研究发现莲子淀粉-共轭亚油酸复合物的形成显著降低了莲子淀粉的消化速率（P<0.05），与莲子原淀粉相比降低了约 27%。贾茹[17] 研究了莲子淀粉-茶多酚复合物对肥胖小鼠糖脂代谢的调节作用，结果表明该复合物可以缓解肥胖小鼠的体重上升，缓解小鼠糖耐量以及对胰岛素的敏感度，降低Ⅱ型糖尿病的发病风险。这些研究说明莲子淀粉-脂质复合物在开发低 GI 功能食品上具有良好的前景。但目前莲子产品多是干制、提取物等传统形态[18]，少有关于莲子淀粉-脂质复合物用于生产低 GI 食品的研究。菜籽油是我国主要食用植物油[19]，饱和脂肪酸含量较低，不饱和脂肪酸含量高达 90% 以上，具有重要的氧化稳定性和营养特性，被认为是一种有利于人体健康的食用油[20]。菜籽油中的不饱和脂肪酸可以有效降低人体中有害胆固醇的含量，调节甘油三酯水平以及改善血细胞黏度，降低心脑血管疾病、癌症和糖尿病等疾病的风险[21]。而且菜籽油的成本低于高纯度的单一脂肪酸，更适合用于糖尿病功能性产品。所以，本研究以菜籽油为脂质与莲子淀粉制备淀粉-脂质复合物，并用于制备低 GI 重组米，以拓展莲子淀粉的深加工路径，满足糖尿病患者对健康主食的需求。

本文采用超声辅助水热法制备莲子淀粉-脂质复合物，对比不同超声功率对复合物理化性质及消化特性的影响。通过单因素和响应面试验优化重组米工艺参数，探究莲子淀粉-脂质复合物添加量、水分含量、挤压温度及螺杆转速对重组米的感官、质构和蒸煮品质的影响，并通过动物实验测定重组米的 GI 值，最终获得兼具优良食用品质与低 GI 特性的主食产品。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

磨皮干白莲子　湖南忆莲堂莲业有限公司；菜籽油　道道全粮油有限公司；籼米　湖南角山米业有限责任公司；雄性 KM 小鼠（12 只，8 周龄，体重为 37±2 g）　成都达硕生物科技有限公司（生产许可证号：SCXK（川）2025-0030）；猪胰 α-淀粉酶（9.4 U/mg）　上海源叶生物科技有限公司；淀粉葡萄糖苷酶（70 U/mg）、胃蛋白酶（2500 U/mg）、胰酶（8×USP specifications）、胆盐　美国 Sigma 公司。

FMHE36 双螺杆挤压机　湖南富马科食品工程技术有限公司；BL25B31 搅拌机　美的集团有限公司；92-IIN 超声波破碎仪　宁波新芝生物科技股份有限公司；SCIENTA-100YG/A 冷冻干燥机　宁波新芝生物科技有限公司；IRAffinity-1 傅里叶红外光谱仪　日本 Shimadzu 公司；TA.XT PlusC 物性测试仪　英国 Stable Micro Systems 公司。

1.2 实验方法

1.2.1　莲子淀粉的提取　参考郭建军等[22] 的方法。按质量比 1∶2 称取磨皮干莲子和蒸馏水，倒入搅拌机进行磨浆。浆液经纱布过滤，滤渣再与蒸馏水混

合、磨浆，重复 3 次。合并全部滤液，加入足量蒸馏水搅拌均匀，静置 8 h 后收集沉淀。沉淀经蒸馏水洗涤、静置，再用 95% 食品级乙醇洗涤，5000 r/min 离心 5 min。所得沉淀经冷冻干燥后粉碎，即得莲子淀粉，标记为 LS。

1.2.2　莲子淀粉-脂质复合物的制备　配制质量分数 5% 的 LS 溶液，放入 80 ℃ 水浴搅拌 30 min。将糊化液置于超声波破碎仪中，固定超声频率和温度，分别在 0、240、360、480、600 W 功率下处理 30 min。随后加入 10% 菜籽油（以淀粉干基质量计），75 ℃ 水浴搅拌 1 h，4000 r/min 离心 15 min，所得沉淀经冷冻干燥后粉碎，即得莲子淀粉-脂质复合物，分别标记为 LS-0、LS-240、LS-360、LS-480、LS-600。

1.2.3　莲子淀粉-脂质复合物的复合指数测定　参考 SUN 等[23] 的方法。称取 0.3 g 样品，加入 4.7 g 蒸馏水混匀，沸水浴 10 min。冷却后加入 25 mL 蒸馏水涡旋 2 min，4000 r/min 离心 15 min。取 0.5 mL 上清液，加入 15 mL 蒸馏水和 2 mL 碘液，振荡摇匀后于 620 nm 波长处测定吸光度。根据公式（1）计算复合指数（Complex Indexes, CI）：

$$CI(\%) = \frac{Abs_{空白} - Abs_{样品}}{Abs_{空白}} \times 100 \qquad 式（1）$$

式中：$Abs_{空白}$为莲子淀粉的吸光度；$Abs_{样品}$为莲子淀粉-脂质复合物的吸光度。

1.2.4　莲子淀粉-脂质复合物的溶解度和膨胀度测定　参考陈振家等[24] 的方法，稍作修改。配制质量分数 2% 的样品溶液，置于 90 ℃ 水浴搅拌 30 min。冷却后 4000 r/min 离心 15 min，收集上清液，于 85 ℃ 烘箱干燥至恒重。根据式（2）~式（3）计算溶解度和膨胀度：

$$溶解度(\%) = \frac{C}{M} \times 100 \qquad 式（2）$$

$$膨胀度(g/g) = \frac{W}{M} \qquad 式（3）$$

式中：C 是干燥后固形物质量，g；M 是样品质量，g；W 是离心后沉淀质量，g。

1.2.5　莲子淀粉-脂质复合物的红外光谱分析　将样品与溴化钾以 1∶100（w/w）混匀、压片，以溴化钾为背景，扫描波段为 4000~400 cm^{-1}，扫描次数为 32 次，扫描分辨率为 4 cm^{-1}。

1.2.6　莲子淀粉-脂质复合物的体外消化性　参考 ENGLYST 等[25] 的方法。称取 0.2 g 样品，加入 15 mL 乙酸钠缓冲液（0.2 mol/L，pH5.2），于 80 ℃ 水浴搅拌 30 min。然后加入 5 mL 混合酶液（含有 2900 U 猪胰 α-淀粉酶和 600 U 淀粉葡萄糖苷酶），37 ℃ 恒温水浴搅拌。分别在 0、20、40、80、120、160、180 min 取 0.5 mL 消化液，加入 4.5 mL 无水乙醇，涡旋 1 min 后以 5500 r/min 离心 15 min。取 300 μL 上清液，加入 200 μL 蒸馏水和 1.5 mL DNS 试剂，沸水浴 5 min。冷却后用蒸馏水定容至 10 mL，于 540 nm 波长处测定吸光度。根据式（4）~式（6）计算快消化淀粉（Rapidly Digestible Starch, RDS）、慢消化淀粉（Slowly Digestible Starch, SDS）和 RS 含量：

$$RDS(\%) = \frac{(G_{20} - G_0) \times 0.9}{TS} \times 100 \qquad 式（4）$$

$$SDS(\%) = \frac{(G_{120} - G_{20}) \times 0.9}{TS} \times 100 \qquad 式（5）$$

$$RS(\%) = 100\% - (RDS\ 含量 + SDS\ 含量) \qquad 式（6）$$

式中：G_{20} 为水解 20 min 产生的葡萄糖含量，mg；G_0 为水解 0 min 产生的葡萄糖含量，mg；G_{120} 为水解 120 min 产生的葡萄糖含量，mg；TS 为样品的总淀粉含量，mg。

根据公式（7）计算淀粉消化水解率：

$$淀粉消化水解率(\%) = \frac{G_t \times 0.9}{TS} \times 100 \qquad 式（7）$$

式中：G_t 是水解 t 时间产生的葡萄糖含量，mg；TS 是样品的总淀粉含量，mg。

1.2.7　重组米的制备　所有物料以其占混合粉质量之比，计算添加量。将莲子淀粉-脂质复合物、籼米粉碎，过 120 目筛备用。固定杂粮粉添加量 20%，籼米粉添加量随莲子淀粉-脂质复合物添加量变化而调整（两者添加量之和恒定），另加入质量分数 0.5% 的单双甘油脂肪酸酯，混合均匀后投入双螺杆挤压机。每次制备重组米的混合粉质量相同。制得重组米于 35 ℃ 流化床干燥 2 h，然后置于 35 ℃ 烘箱干燥 6 h。空白重组米不添加莲子淀粉-脂质复合物，其他操作同。

1.2.8　单因素实验　固定双螺杆挤压机的喂料速率。在莲子淀粉-脂质复合物添加量 20%、螺杆转速 160 r/min、挤压温度 110 ℃ 和水分含量 40% 的条件下，只改变其中一个因素，分别设置复合物添加量 15%、20%、25%、30%，水分含量 30%、35%、40%、45%，挤压温度 100、110、120、130 ℃，螺杆转速 150、160、170、180 r/min，考察各因素对重组米感官、质构和蒸煮品质的综合得分的影响。

1.2.9　响应面试验　根据单因素实验结果，选择莲子淀粉-脂质复合物添加量、挤压温度和水分含量 3 个因素，分别选取 3 个水平，以重组米的感官、质构和蒸煮品质的综合得分为考察指标，进行响应面试验设计，如表 1 所示。

表 1　响应面试验因素及水平

Table 1　Factors and levels in the response experiments

因素	水平		
	−1	0	1
莲子淀粉-脂质复合物添加量（%）	20	25	30
水分含量（%）	30	35	40
挤压温度（℃）	110	120	130

1.2.10 重组米感官评价 称取 10 g 样品与 12 mL 蒸馏水，蒸煮 15 min。参考 GB/T 15682-2008《粮油检验 稻谷、大米蒸煮食用品质感官评价方法》，稍作修改。选择 10 名食品专业研究生对米饭的气味、外观结构、适口性、滋味及冷饭质地进行评分，评价标准和分值见表 2。从评分结果中去掉一个最高分和一个最低分，取剩余评分的平均值作为最终感官评分。

表 2 米饭感官评价标准

Table 2 Standard of sensory evaluation table of steamed rice

一级指标分值	二级指标分值	具体特征描述及分值(分)
气味（20分）	纯正性、浓郁性（20分）	香气浓郁，无异味：18~20
		香气明显，无异味：15~17
		香气较淡，无异味：13~14
		无香气，无异味：7~12
		有异味：0~6
外观结构（20分）	颜色（7分）	颜色均匀，为预期颜色：6~7
		颜色较均匀，较预期颜色暗淡：4~5
		颜色不均匀，与预期颜色相差很大：0~3
	光泽（8分）	有明显光泽：7~8
		稍有光泽：5~6
		无光泽：0~4
	饭粒完整性（5分）	结构紧密，饭粒完整性好：4~5
		大部分结构紧密完整：3
		饭粒出现爆花：0~2
适口性（30分）	粘性（10分）	滑爽，有粘性，不粘牙：8~10
		有粘性，基本不粘牙：6~7
		有粘性，粘牙；或无粘性：0~5
	弹性（10分）	米饭有嚼劲：8~10
		米饭稍有嚼劲：6~7
		米饭疏松、发硬，感觉有渣：0~5
	软硬度（10分）	软硬适中：8~10
		略硬或略软：6~7
		很硬或很软：0~5
滋味（25分）	纯正性、持久性（25分）	咀嚼时，有较浓郁的清香和甜味：22~25
		咀嚼时，有淡淡的清香和甜味：18~21
		咀嚼时，无清香和甜味，无异味：16~17
		咀嚼时，无清香和甜味，但有异味：0~15
冷饭质地（5分）	成团性、粘弹性、硬度（5分）	较松散，粘弹性较好，硬度适中：4~5
		结团，粘弹性稍差，稍变硬：2~3
		板结，粘弹性差，偏硬：0~1

1.2.11 重组米的质构特性 称取 4 g 样品放入蒸饭圆盒(底径为 3.8 cm)中，加入 4.8 mL 水，置于蒸锅中蒸煮 15 min。去掉上层凸出的饭粒，使米饭厚度均约 0.8 cm。将盛有米饭的圆盒放在质构仪载物台上进行测定，设置测定模式 TPA，探头型号 P/36R，测前速度 2 mm/s，测时速度 2 mm/s，测后速度 2 mm/s，触发力 5 g，压缩力度 50%，两次压缩间隔 5 s。

1.2.12 重组米的蒸煮品质

1.2.12.1 吸水率的测定 参考 KUMARI 等[26] 的方法。准确称取 2.00 g 样品，加入 20 mL 蒸馏水，蒸煮 10 min 后沥干米汤，根据公式(8)计算吸水率：

$$吸水率(\%)=\frac{m_1-2}{2}\times100 \quad 式（8）$$

式中：m_1 为样品经蒸煮、沥干后的固形物质量，g。

1.2.12.2 损失率的测定 收集 1.2.12.1 的米汤，置于 85 ℃ 烘箱干燥至恒重，根据公式(9)计算损失率：

$$损失率(\%)=\frac{M_1}{2}\times100 \quad 式（9）$$

式中：M_1 为米汤经干燥后得固形物质量，g。

1.2.13 综合评价 参考苏伟航等[27] 的方法。采用熵权法计算感官评分、硬度、粘性、弹性、粘聚性、咀嚼性、回复性、吸水率及蒸煮损失率的权重。单因素实验有 16 个评价对象(n)，9 个评价指标(m)，首先将所有数据标准化，硬度、粘性、吸水率和蒸煮损失率属于负向指标，根据公式(10)计算；其余指标属于正向指标，根据公式(11)计算。接着根据公式(12)计算各评价对象的指标值占全部评价对象指标值之和的比重，根据公式(13)计算各评价指标信息熵。最后根据公式(14)计算各评价指标的熵权系数。

$$X_{ij}=\frac{\max(X_{ij})-X_{ij}}{\max(X_{ij})-\min(X_{ij})} \quad 式（10）$$

$$X_{ij}=\frac{X_{ij}-\min(X_{ij})}{\max(X_{ij})-\min(X_{ij})} \quad 式（11）$$

$$P_{ij}=X_{ij}\sum_{j=1}^{n}X_{ij} \quad 式（12）$$

$$e_j=-kP_{ij}\ln P_{ij} \quad 式（13）$$

$$W_j=1-\frac{e_j}{\sum_{j=1}^{m}(1-e_j)} \quad 式（14）$$

式中，i 表示评价对象；j 表示评价指标；X_{ij} 表示第 i 个评价对象的第 j 个指标经标准化的值；P_{ij} 表示各评价对象的指标值占全部评价对象指标值之和的比重；$k=\frac{1}{\ln n}$；e_j 表示各评价指标信息熵；W_j 表示各评价指标的熵权系数。

感官评分、硬度、粘性、弹性、粘聚性、咀嚼性、回复性、吸水率及蒸煮损失率的权重见表 3。综合评分＝0.0755×感官总分+0.0401×硬度+0.2709×粘性+0.0549×弹性+0.1172×粘聚性+0.1777×咀嚼性+0.0627×回复性+0.0822×吸水率+0.1189×蒸煮损失率。

1.2.14 小鼠实验测定重组米的 GI 值 参考蔡攀福[28] 的方法。将 12 只雄性 KM 小鼠随机分成 3 笼，每笼 4 只。适应性喂养一周后，各组禁食不禁水 8 h，将葡萄糖、市售籼米、莲子重组米和空白重组米制备的悬液以 0.72 g/kg·BW 进行灌胃，在灌胃后 0、15、30、45、60、90、120 min 取小鼠尾尖血测定血糖浓

表 3　各评价指标的权重

Table 3　Weight of the evaluating indicator

评价指标	信息熵值	熵权系数
感官总分	0.9374	0.0755
硬度	0.9668	0.0401
粘性	0.7753	0.2709
弹性	0.9544	0.0549
粘聚性	0.9028	0.1172
咀嚼性	0.8526	0.1777
回复性	0.9480	0.0627
吸水率	0.9318	0.0822
蒸煮损失率	0.9014	0.1189

度。以时间(t)为横坐标，血糖浓度为纵坐标，绘制小鼠血糖反应曲线及血糖变化反应曲线，计算血糖变化曲线下面积 AUC。根据公式(15)计算 GI：

$$GI = \frac{AUC_{样品}}{AUC_{葡萄糖}} \times 100 \qquad 式（15）$$

式中：$AUC_{样品}$为样品的血糖变化曲线下积分面积；$AUC_{葡萄糖}$为葡萄糖的血糖变化曲线下积分面积。

1.3　数据处理

所有试验均重复 3 次，结果以平均值±标准差表示。使用 SPSS27 软件进行方差分析，在 0.05 显著性水平上确定均值间差异的显著性。采用 Origin2024 软件绘制图形。使用 Design-Expert13 软件进行响应面制图及分析。使用 Graphpad Prism 10.1 软件计算曲线下积分面积。

2　结果与分析

2.1　莲子淀粉-脂质复合物的复合指数

复合指数(CI)是反映 LS 和脂质结合程度的重要指标[29]。由图 1 可知，复合物 CI 值排序为：LS-360>LS-480>LS-240>LS-600>LS-0。与 LS-0 相比，超声处理组的 CI 值均显著升高(P<0.05)，表明超声处理能有效促进 LS 与脂质的复合。这归因于超声产生的空化效应及机械力作用，破坏了淀粉颗粒完整性，释放出更多直链淀粉片段参与复合反应[30]。超声功率大小对复合效果具有显著影响(P<0.05)，LS-360 的 CI 值最高，为 36.98%±0.12%。LIU 等[31] 研究发现，水热处理可能会破坏 LS 的螺旋结构，但在超声处理后脂肪酸更易进入 LS 的螺旋腔，并且随着超声功率增大，LS 与脂肪酸的 CI 值先显著升高后降低(P<0.05)。过高的超声功率一方面导致淀粉颗粒的破损程度和孔隙率增加，促使水分子与淀粉羟基形成更紧密的结合，淀粉过度糊化，从而阻碍脂质分子与淀粉的有效结合[32]；另一方面导致直链淀粉的解聚严重，产生更多不能与脂质形成复合物的短链，导致 CI 值降低。

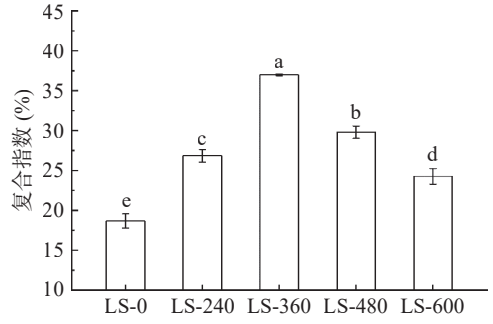


图 1　不同超声功率处理莲子淀粉-脂质复合物的复合指数

Fig.1　Complex index of the lotus seed starch-lipid complex with different ultrasound power

注：不同小写字母表示差异显著(P<0.05)，图 2、图 5~图 8、图 10 同。

2.2　莲子淀粉-脂质复合物的溶解度和膨胀度

溶解度和膨胀度数值大小反映了淀粉颗粒相互结合的能力和持水能力[33]。由图 2 可知，与 LS 相比，所有复合物的溶解度和膨胀度均显著降低(P<0.05)。这是因为复合物具有致密有序的结构，阻碍了水分子向淀粉颗粒内部的扩散，进而抑制了淀粉的溶胀。随着超声功率的升高，复合物的溶解度和膨胀度均呈现先降低后升高的趋势。在 0~360 W 较小功率范围内，复合物的形成是导致淀粉溶解度和膨胀度降低的主要因素，而当超声功率持续升高至 600 W，这时较高功率下淀粉颗粒破损严重，水分子在淀粉颗粒无定形区域内的扩散增强，易与淀粉中游离的羟基相结合，导致溶解度和膨胀度增加[34]。

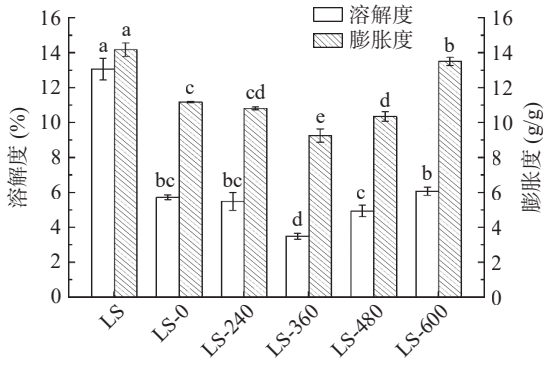


图 2　不同超声功率处理莲子淀粉-脂质复合物的溶解度和膨胀度

Fig.2　Solubility and swelling power of lotus seed starch-lipid complex with different ultrasound power

2.3　莲子淀粉-脂质复合物的红外光谱分析

由图 3 可知，6 组样品的红外光谱图相似，未出现新基团特征峰，这一结果与 RAZA 等[33] 的结论相似，即淀粉与脂质复合时仅发生了分子间的相互作用，未发生化学反应，不同样品的峰强、峰宽和出峰位置略有不同。3400 cm^{-1} 附近的吸收峰对应的是-OH 的伸缩振动峰。与 LS 相比，复合物的-OH 振动峰均发生红移，表明淀粉与脂质复合时通过氢键发生作用[8]。LS-360 和 LS-480 红移幅度明显，说明其复合程度较高。复合物在 3000~3700 cm^{-1} 区间的吸收峰变宽，进一步证明氢键相互作用增强[35]。不同超声功率处理的复合物在 880 cm^{-1} 附近的峰强度不同，

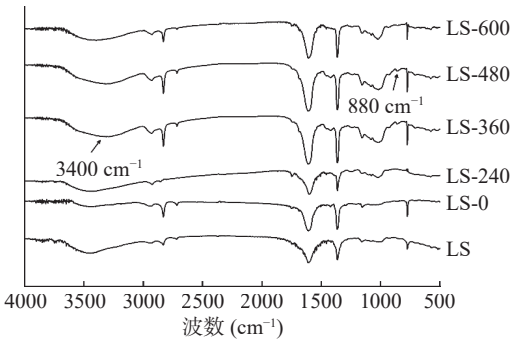


图 3 不同超声功率处理莲子淀粉-脂质复合物的红外光谱图

Fig.3 Infrared spectra of the lotus seed starch-lipid complex with different ultrasound power

这是由于复合过程中淀粉结晶区和无定形区 α-1,4 糖苷键的排列发生了变化, 反映了复合物结构有序度的改变[32]。

2.4 莲子淀粉-脂质复合物的体外消化性

由图 4 可知, 所有样品均表现出初始阶段水解率急剧增加, 80 min 后曲线变缓, 在 180 min 时水解率排序为: LS>LS-0>LS-600>LS-240>LS-480>LS-360。复合物的水解率低于 LS, 表明复合物的形成能抑制淀粉的消化, 这是由于脂质进入淀粉螺旋内部, 与淀粉牢固地结合, 阻碍了消化酶对淀粉的接触[36]。总体而言, LS-360 和 LS-480 水解率曲线低于其他复合物。这是因为过低超声功率不利于复合物形成, 过高超声功率处理破坏了淀粉颗粒, 增加其表面积, 提高了消化酶对淀粉底物的可及性。

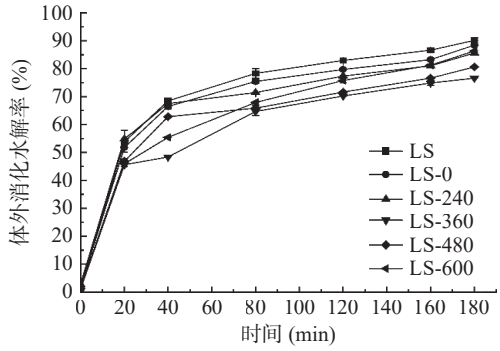


图 4 不同超声功率处理莲子淀粉-脂质复合物的体外消化水解率曲线

Fig.4 Starch hydrolysis rate curves of the lotus seed starch-lipid complex with different ultrasound power

表 4 为 LS 及其复合物的 RDS、SDS 和 RS 的具体含量。与 LS 相比, LS-0 的 RDS 含量显著降低, RS 含量显著升高 1.54%(P<0.05), 这一变化与淀粉-脂质复合物的形成相关。不同超声功率处理能够调控原淀粉形成不同消化段的形成, 从而制备具有不同消化特性的淀粉-脂质复合物[37]。LS-360 的 RDS 含量显著低于 LS-0, 而 RS 含量显著高于其他超声处理组(P<0.05), 表明 LS-360 具有更强的延缓血糖生成能力。综上, 360 W 超声辅助制备的莲子淀粉-脂质复合物更适合用于制备低 GI 重组米。

表 4 不同超声功率处理莲子淀粉-脂质复合物的体外消化淀粉组分含量(%)

Table 4 *In vitro* digestible starch content of the lotus seed starch-lipid complex with different ultrasound power (%)

样品名称	RDS	SDS	RS
LS	53.37±0.11^{a}	12.03±0.27^{d}	34.60±0.32^{e}
LS-0	50.06±0.19^{e}	13.80±0.30^{c}	36.14±0.16^{c}
LS-240	48.18±0.45^{d}	18.90±0.45^{ab}	32.92±0.01^{f}
LS-360	43.82±0.41^{f}	18.12±0.38^{b}	38.06±0.10^{a}
LS-480	44.92±0.11^{e}	19.44±0.20^{a}	35.63±0.14^{d}
LS-600	51.18±0.99^{b}	12.18±0.63^{d}	36.64±0.37^{b}

注: 同一列不同小写字母表示差异显著(P<0.05), 表7~表8同。

2.5 单因素实验结果

由图 5 可知, 重组米的综合评分随着莲子淀粉-脂质复合物添加量的增加, 先升高后降低, 当添加量为 25% 时综合评分最高, 为 0.63±0.02。这是因为复合物含量的增加提高了体系内直链淀粉含量, 而直链淀粉含量与淀粉的粘性、凝胶特性及老化程度等具有密切关系[38], 进而影响重组米的食用品质。在高温加工条件下, 物料直链淀粉含量过高时, 制出的重组米较硬, 米饭无光泽; 物料直链淀粉含量低时, 由于淀粉的理化特性和结构主要受支链淀粉影响, 淀粉颗粒结构疏松致使蒸煮出的米饭粘软、咀嚼性差。

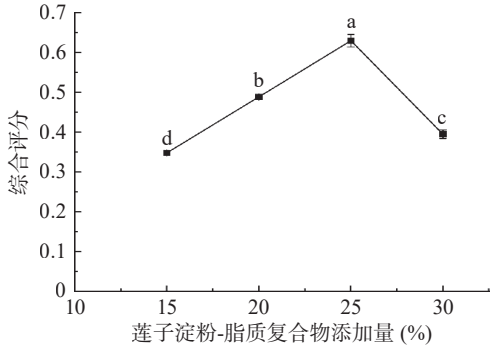


图 5 莲子淀粉-脂质复合物添加量对重组米品质的影响

Fig.5 Effect of adding lotus seed starch-lipid complex on reconstituted rice

由图 6 可知, 重组米的综合评分随水分含量的增加, 呈现出先升后降的趋势, 在水分含量 35% 时达到最高, 为 0.42±0.01。这是因为水分含量影响淀粉

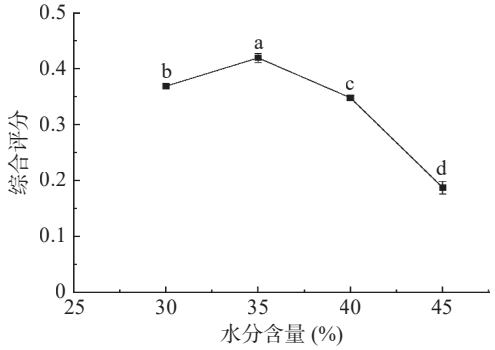


图 6 水分含量对重组米品质的影响

Fig.6 Effect of moisture content on reconstituted rice

糊化，当水分含量低时，物料间摩擦增大，受热糊化不完全，出料口易堵塞，产品颗粒不饱满；当水分含量高时，物料流动性增强，挤出物粘稠，后期干燥时间长，能耗增加[39]。

由图 7 可知，重组米的综合评分随挤压温度的升高，呈先升后降的趋势，在挤压温度为 120 ℃ 时最高，为 0.52±0.04。这是因为温度影响淀粉糊化，当挤压温度低时，淀粉糊化不完全，导致挤出的米粒结构疏松，咀嚼性较差，粘性低，而且疏松结构导致重组米在后续蒸煮中持水性和稳定性差，蒸煮损失率增加；当挤压温度高时，重组米在蒸煮时会易产生溶出物，导致重组米颗粒间过度粘连，影响外观[40]。

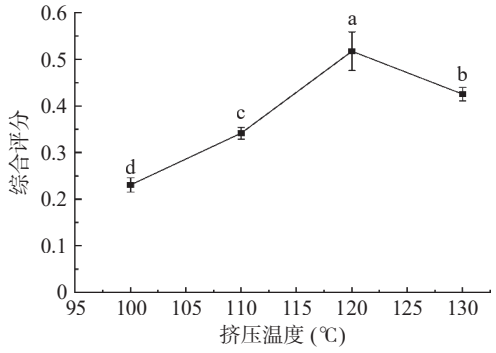


图 7　挤压温度对重组米品质的影响

Fig.7　Effect of extrusion temperature on reconstituted rice

已有研究表明，当螺杆转速低时，物料所受的摩擦热不足，剪切程度弱，模头处挤出压力不足，淀粉糊化程度低，最终重组米硬度大，弹性差；当螺杆转速高时，物料在机筒内停留时间过短，热能传递不完全，淀粉糊化程度不同，最终重组米外观和质构品质不佳[41]。由图 8 可知，重组米的综合评分在所选螺杆转速区间（150~180 r/min）内随转速变化不显著（P>0.05），这主要归因于螺杆转速梯度设置相对集中，未包含可能产生显著影响的临界区间。因此，为便利后续响应面试验的操作，固定螺杆转速 160 r/min 进行重组米的制备。

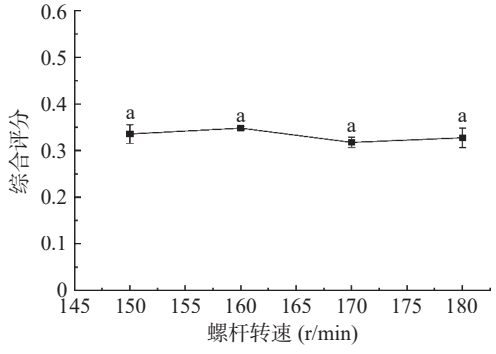


图 8　螺杆转速对重组米品质的影响

Fig.8　Effect of screw speed on reconstituted rice

2.6　响应面试验结果

响应面试验设计和结果如表 5 所示，回归方程为：

$$Y=0.4462-0.0153A+0.0140B+0.0112C-0.0280AB+0.0228AC+0.0341BC-0.0457A^2-0.0841B^2-0.0482C^2$$

进一步对该模型及回归系数进行回归分析，结果见表 6。该回归模型 P<0.0001，其失拟项 P=0.4932>0.05，说明模型可靠。模型回归系数 R^2=0.9768，说明拟合程度良好。变异系数 4.19 较低，说明试验精确度较高，可靠性强。通过分析及相关数据可以看出 C 对重组米品质的影响不显著（P>0.05），A、B、AC 交互项对响应值影响显著（P<0.05），AB、BC、A^2、B^2、C^2 对响应值影响极显著（P<0.01）。影响响应值的因素顺序由大到小为：A>B>C。

表 5　响应面试验设计和结果

Table 5　Box-Behnken design and results

实验号	A: 莲子淀粉-脂质复合物添加量	B: 水分含量	C: 挤压温度	Y: 综合评分
1	1	0	−1	0.2946
2	0	−1	1	0.2801
3	0	0	0	0.4477
4	0	−1	−1	0.3242
5	−1	0	−1	0.3893
6	−1	1	0	0.3668
7	1	−1	0	0.3219
8	0	0	0	0.4432
9	1	1	0	0.2988
10	0	0	0	0.4699
11	−1	0	1	0.3642
12	1	0	1	0.3607
13	0	0	0	0.4401
14	0	0	0	0.4300
15	−1	−1	0	0.2778
16	0	1	−1	0.2793
17	0	1	1	0.3716

表 6　回归方程方差分析

Table 6　Variance analysis of regression equation

因素	平方和	自由度	均方	F值	P值
模型	0.0677	9	0.0075	32.68	<0.0001
A	0.0019	1	0.0019	8.09	0.0249
B	0.0016	1	0.0016	6.86	0.0345
C	0.0010	1	0.0010	4.32	0.0763
AB	0.0031	1	0.0031	13.62	0.0078
AC	0.0021	1	0.0021	9.03	0.0198
BC	0.0046	1	0.0046	20.17	0.0028
A^2	0.0088	1	0.0088	38.24	0.0005
B^2	0.0298	1	0.0298	129.36	<0.0001
C^2	0.0098	1	0.0098	42.54	0.0003
残差	0.0016	7	0.0002		
失拟项	0.0007	3	0.0002	1.12	0.4932
纯误差	0.0009	4	0.0002		
总差	0.0694	16			
R^2=0.9768		R^2_{Adj}=0.9468		C.V.%=4.19	

由回归方程分析可以得出最佳参数为：莲子淀粉-脂质复合物添加量 24.10%，水分含量 35.69%，挤压温度 121.22 ℃，最终得分 0.449。考虑实际生产操作，将最佳参数条件优化为莲子淀粉-脂质复合物添加量 24%，水分含量 36%，挤压温度 121 ℃。优化

后，重组米综合得分为 0.442±0.039，与理论计算值相对误差为 1.56%，说明该优化方案合理、可行。

2.7 产品感官评价

图 9 为不同米的外观图。由表 7 可知，莲子重组米感官总分与市售籼米相近，说明莲子重组米的感官接受度能达到与市售籼米接近的水平。气味方面，市售籼米具有浓郁的饭香气，莲子重组米气味较淡。颜色和色泽方面，莲子重组米颜色呈澄黄色，有光泽，感官接受度高于空白重组米。饭粒完整度方面，莲子重组米优于市售籼米，这与其紧密结构有密切关系。适口性方面，莲子重组米粘性、弹性分数比市售籼米高，表明莲子重组米口感软弹、不粘牙。莲子重组米滋味评分与市售籼米接近，表明重组米无异味。



图 9 不同米的外观

Fig.9 Image of different rice

注：(A)莲子重组米；(B)空白重组米；(C)市售籼米。

2.8 产品质构特性的测定

由表 8 可知，莲子重组米硬度与市售籼米没有显著性差异，粘性绝对值显著高于市售籼米（$P<0.05$），说明莲子重组米较市售籼米更粘糯可口。莲子重组米的弹性、内聚性、咀嚼性和回复性均显著大于市售籼米（$P<0.05$），说明重组米内部结构更加紧密，蒸煮后米粒完整性更好，口感也更富有弹性，这一结果与感官评价中适口性评分保持一致。

2.9 产品蒸煮特性的测定

吸水率可以反映米粒在蒸煮过程中吸收水分能力的强弱。由图 10 可知，吸水率依次为空白重组米>莲子重组米≈市售籼米，这是由于挤压破坏了部分淀粉的晶体结构[42]，从而使两种重组米具有较高的吸水率。重组米的蒸煮损失率高于市售籼米，这可能是因为在高温挤压过程中，体系中大分子物质断裂成小分子物质，可溶性物质增加[43]，进而蒸煮损失率上升。YU 等[44] 研究淀粉-脂质复合物对挤压荞麦面条蒸煮品质的影响，结果显示与对照组相比，含有淀粉-脂质复合物的处理组的吸水率和蒸煮损失率显著下降（$P<0.05$）。面条中的淀粉-脂质复合物在淀粉分子表面产生一层致密的屏障，延缓了可溶性物质的溶解，并在蒸煮过程中阻碍水分子的扩散，从而降低面条的吸水率和损失率[45]。本实验中，添加莲子淀粉-脂质复合物后，重组米的吸水率和损失率显著下降（$P<0.05$），表明莲子重组米的内部淀粉颗粒之间结合紧密，水分不易扩散，在蒸煮时能较好地维持结构。

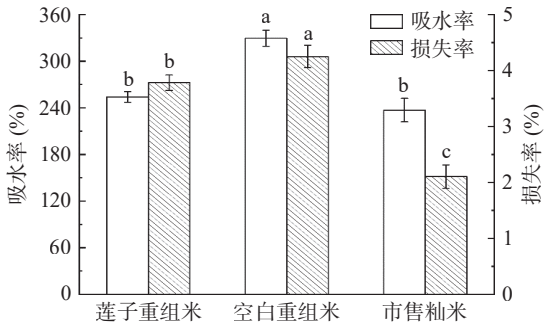


图 10 不同米的蒸煮品质

Fig.10 Cooking physicochemical properties of different rice

2.10 产品 GI 值的测定

从图 11(A)可看出，莲子重组米血糖反应曲线较葡萄糖和市售籼米平缓，说明莲子重组米餐后葡萄糖释放缓慢，这有利于维持饱腹感，减缓饥饿感的产生。由图 11(B)可知，各组均在 30 min 时血糖浓度增加值最大，但莲子重组米血糖浓度增加值低于其他组，表明莲子重组米餐后消化最慢。小鼠实验测定不同米的 GI 值，可知莲子重组米为 46.07±7.56，空白重组米为 60.01±5.42，市售籼米 GI 值为 79.46±5.08，三者均存在显著性差异（$P<0.05$），且市售籼米属于高 GI 食品，莲子重组米属于低 GI 食品。

表 7 不同米的感官评价结果

Table 7 Sensory results of different rice

样品名称	外观结构				适口性			滋味	冷饭质地	总分
	气味	颜色	光泽	饭粒完整度	粘性	弹性	软硬度			
莲子重组米	14.00	6.00	5.00	4.50	8.00	8.75	9.25	21.75	4.50	81.75
空白重组米	14.00	5.50	4.75	4.00	7.75	7.50	8.50	21.25	4.00	77.25
市售籼米	18.25	6.50	6.50	4.00	6.75	6.25	7.50	23.50	4.00	83.25

表 8 不同米的质构特性

Table 8 Texture and sensory results of different rice

样品名称	硬度(g)	粘性(g·s)	弹性	内聚性	咀嚼性(g)	回复性
莲子重组米	1923.95±13.17^{b}	−41.07±2.14^{c}	0.98±0.01^{a}	0.81±0.01^{a}	1621.86±60.62^{b}	0.40±0.01^{a}
空白重组米	2481.28±40.71^{a}	−12.28±1.43^{a}	0.96±0.04^{a}	0.78±0.06^{a}	2018.66±6.98^{a}	0.39±0.01^{a}
市售籼米	1831.89±216.00^{b}	−31.92±2.91^{b}	0.59±0.05^{b}	0.39±0.01^{b}	623.15±48.47^{c}	0.19±0.04^{b}

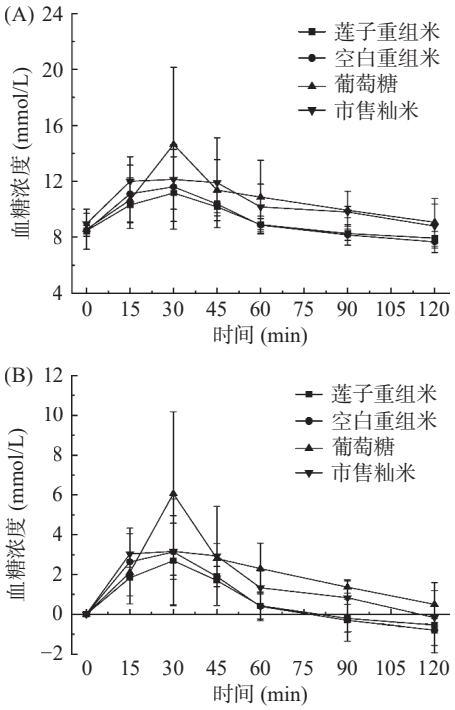


图 11　小鼠血糖反应曲线(A)及血糖变化反应曲线(B)

Fig.11　Blood glucose concentration curve (A) and change curve (B)

3　结论

超声辅助水热法可有效改善莲子淀粉-脂质复合物的理化性质及消化特性，其中 360 W 超声处理可显著提升淀粉与脂质的复合程度(P<0.05)，诱导复合物形成更致密的有序结构，抑制淀粉溶胀，从而表现出优良的耐消化特性。然后以 360 W 超声辅助制备的莲子淀粉-脂质复合物、籼米粉及杂粮粉为原料，制备了重组米，通过单因素和响应面实验，获得影响重组米综合品质的因素顺序：莲子淀粉-脂质复合物>水分含量>挤压温度，确定了最优工艺参数为：莲子淀粉-脂质复合物添加量 24%，水分含量 36%，挤压温度 121℃。在此条件下，制得的重组米感官品质与市售籼米接近，弹性、内聚性、咀嚼性、回复性显著优于市售籼米(P<0.05)，动物实验测得 GI 值为 46.07±7.56，符合低 GI 食品的要求(GI≤55)。本研究不仅拓宽了莲子淀粉-脂质复合物的应用范围，也为开发兼具优良食用品质与功能的低 GI 主食产品提供了重要参考。后续可以采用动物实验模型，研究长期食用低 GI 莲子重组米对Ⅱ型糖尿病小鼠血糖、组织及器官的影响，评价其慢升糖功效，为低 GI 莲子重组米的应用提供科学依据。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] SAEEDI P, PETERSOHN I, SALPEA P, et al. Global and regional diabetes prevalence estimates for 2019 and projections for 2030 and 2045: Results from the International Diabetes Federation Diabetes Atlas, 9th edition[J]. Diabetes Research and Clinical Practice, 2019, 157: 107843.

[2] LI Hao, CHANG Guoying, JIANG Yihong, et al. System dynamic model simulates the growth trend of diabetes mellitus in Chinese population: Implications for future urban public health governance[J]. International Journal of Public Health, 2022, 67: 1605064.

[3] FAROOQ M A, YU J M. Starches in rice: Effects of rice variety and processing/cooking methods on their glycemic index[J]. Foods, 2025, 14(12): 2022.

[4] KANG Lingtao, LUO Jiaqian, SU Zhipeng, et al. Effect of sprouted buckwheat on glycemic index and quality of reconstituted rice[J]. Foods, 2024, 13(8): 1148.

[5] PILUK P, KHEMTHONG C, CHUPEERACH C, et al. Development and characterization of high protein and fiber gluten free bread formulations from egg white powder and resistant starch[J]. LWT, 2025, 227: 117984.

[6] 李凤林, 钱召影, 刘静雪, 等. 基于苦荞的低 GI 高膳食纤维面条挤压工艺研究[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(11): 162−168. [LI Fenglin, QIAN Zhaoying, LIU Jingxue, et al. Optimization of low GI and high dietary fiber noodles extrusion process based on Tartary buckwheat[J]. China Food Additives, 2024, 35(11): 162−168.]

[7] 吴俊灵, 廖卢艳, 邓慧清, 等. 高蛋白重组米理化特性、结构特征与营养品质研究[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(5): 37−45. [WU Junling, LIAO Luyan, DENG Huiqing, et al. Physicochemical properties, structural characteristics and nutritional quality of high protein reorganized rice[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(5): 37−45.]

[8] 郭宏伟, 赵城彬, 吴玉柱, 等. 红豆淀粉-脂质复合物结构及体外消化性质[J]. 食品科学, 2019, 40(21): 21−27. [GUO Hongwei, ZHAO Chengbin, WU Yuzhu, et al. Structure and *in vitro* digestibility of adzuki bean (*Vigna angularis*) starch-lipid complexes[J]. Food Science, 2019, 40(21): 21−27.]

[9] 位雅莉. 淀粉-脂质复合物的制备及其对糖尿病小鼠的影响[D]. 济南: 山东大学, 2021. [WEI Yali. Preparation of starch-lipid complex and its effect on diabetic mice[D]. Jinan: Shandong University, 2021.]

[10] HASJIM J, LEE S O, HENDRICH S, et al. Characterization of a novel resistant-starch and its effects on postprandial plasma-glucose and insulin responses[J]. Cereal Chemistry, 2010, 87(4): 257−262.

[11] PUNIA BANGAR S, DUNNO K, KUMAR M, et al. A comprehensive review on lotus seeds (*Nelumbo nucifera* Gaertn.): Nutritional composition, health-related bioactive properties, and industrial applications[J]. Journal of Functional Foods, 2022, 89: 104937.

[12] ZENG Shaoxiao, WU Xiaoting, LIN Shan, et al. Structural characteristics and physicochemical properties of lotus seed resistant starch prepared by different methods[J]. Food Chemistry, 2015, 186: 213−222.

[13] 贾祥泽. 超高压致莲子直链淀粉—脂肪酸复合物的形成机理及其理化特性的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2018. [JIA Xiangze. Formation mechanism and physicochemical properties of lotus seed amylose-fatty acid complexes induced by ultra-high pressure treatment[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2018.]

[14] LIU Sidi, SUN Siwei, CHEN Wenjing, et al. Structural,

physicochemical properties, and digestibility of lotus seed starch-conjugated linoleic acid complexes[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 214: 601−609.
[15] LIU Lu, LIN Qi, ZHANG Yixiang, et al. Formation and structural dynamics of Lotus seed starch-linolenic acid complexes under high pressure microfluidization and their evolution during simulated gastrointestinal digestion[J]. Food Chemistry, 2025, 484: 144400.
[16] 孙思薇. OSA 改性莲子淀粉-共轭亚油酸复合物的制备及理化特性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2020. [SUN Siwei. Research on the preparation and physicochemical properties of OSA modified lotus seed starch-conjugated linoleic acid complex[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2020.]
[17] 贾茹. 莲子淀粉-EGCG 复合物介导肠道菌群改善小鼠肥胖的作用机制[D]. 福州: 福建农林大学, 2024. [JIA Ru. The mechanism of lotus seed starch-EGCG complex mediated gut microbiota improvement on obesity in mice[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2024.]
[18] 王晔洋, 李伟荣, 黄莎, 等. 莲子在食品领域的开发研究现状[J]. 农产品加工, 2024(14): 80−86. [WANG Yeyang, LI Weirong, HUANG Sha, et al. Research progress on food development of lotus seed[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2024(14): 80−86.]
[19] 蒋璐, 廖卢艳, 吴卫国. 菜籽油加工技术研究进展[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(3): 179−187. [JIANG Lu, LIAO Luyan, WU Weiguo. Research progress on rapeseed oil processing technology [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(3): 179−187.]
[20] 梁欣梅. 油茶籽油生物酶法精炼工艺研究及其对高尿酸血症的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2023. [LIANG Xinmei. Study on enzymatic refining of camellia seed oil and its effect on hyperuricemia[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.]
[21] 马改琴. 菜籽油在加工过程中脂质伴随物及品质变化研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024. [MA Gaiqin. Study on the Changes of Lipid Concomitants and Quality of Rapeseed Oil during Processing[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2024.]
[22] 郭建军, 曾静, 王通, 等. 嗜热酸性Ⅲ型普鲁兰水解酶协同压热制备莲子抗性淀粉的工艺优化及其功能特性研究[J]. 食品工业科技, 2024, 45(11): 195−204. [GUO Jianjun, ZENG Jing, WANG Tong, et al. Optimization of the preparation of lotus seed resistant starch through thermoacidophilic type Ⅲ pullulan hydrolase synergistic high-pressure heat treatments and its functional characteristics[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(11): 195−204.]
[23] SUN Shenglin, HONG Yan, GU Zhengbiao, et al. An investigation into the structure and digestibility of starch-oleic acid complexes prepared under various complexing temperatures[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 138: 966−974.
[24] 陈振家, 琚魏波, 陈琼玲, 等. 超高压处理对高粱淀粉理化性质的影响[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(11): 105−113. [CHEN Zhenjia, JU Weibo, CHEN Qiongling, et al. Effects of high hydrostatic pressure treatment on physicochemical properties of sorghum starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(11): 105−113.]
[25] 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-S50.
[26] KUMARI A, ROY A. Impact of the degree of starch gelatinization on the texture, soaking, and cooking characteristics of high amylose rice: An experimental and numerical study[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2024, 18(10): 8200−8217.
[27] 苏伟航, 王东东, 刘俊昌, 等. 熵权法结合响应面法优化沙枣叶水提取工艺及其体内外抗氧化活性研究[J]. 中南药学, 2025, 23(2): 448−454. [SU Weihang, WANG Dongdong, LIU Junchang, et al. Optimization of the water extraction of *Elaeagnus angustifolia* L. leaves by entropy weight method combined with response surface method and its antioxidant activity *in vivo* and *in vitro*[J]. Central South Pharmacy, 2025, 23(2): 448−454.]
[28] 蔡攀福. 低升糖指数高纤面条的研发[D]. 广州: 华南理工大学, 2017. [CAI Panfu. Development of high-fiber noodles with low glycemic index[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.]
[29] CHUMSRI P, PANPIPAT W, CHEONG L Z, et al. Formation of intermediate amylose rice starch-lipid complex assisted by ultrasonication[J]. Foods, 2022, 11(16): 2430.
[30] HAO Zongwei, LI Zhaofeng, ZHOU Qianxin, et al. Investigation of the effect of ultrasonication on starch-fatty acid complexes and the stabilization mechanism[J]. Food Research International, 2024, 191: 114711.
[31] LIU Huifang, YAO Yingning, ZHANG Yi, et al. Ultrasonication-mediated formation of V-type lotus seed starch for subsequent complexation with butyric acid[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 236: 124000.
[32] 王宇. 超声制备黑米淀粉-没食子酸复合物及其理化和消化性研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2024. [WANG Yu. Preparation of black rice starch-Gallic acid complexes by ultrasound and investigation of their physicochemical and digestive properties[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2024.]
[33] RAZA H, LIANG Q F, AMEER K, et al. Dual-frequency power ultrasound effects on the complexing index, physicochemical properties, and digestion mechanism of arrowhead starch-lipid complexes[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 84: 105978.
[34] 徐慧, 赵忠云, 吴宗俊, 等. 超声处理对黑米淀粉结构及理化性质的影响[J]. 食品科技, 2024, 49(12): 267−275. [XU Hui, ZHAO Zhongyun, WU Zongjun, et al. Effect of ultrasonic treatment on the structure and physicochemical properties of black rice starch [J]. Food Science and Technology, 2024, 49(12): 267−275.]
[35] 缪文慧. 改性山药淀粉的制备及其特性研究[D]. 济南: 济南大学, 2024. [MIAO Wenhui. Study on preparation and characteristics of modified yam starch[D]. Jinan: University of Jinan, 2024.]
[36] 董营, 代养勇, 曹健, 等. 湿磨辅助制备淀粉-脂质复合物及其结构和性能研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2023, 44(5): 61−68. [DONG Ying, DAI Yangyong, CAO Jian, et al. Preparation of starch-lipid complex assisted by wet grinding and its structure and prop-erties analysis[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 44(5): 61−68.]
[37] SHI Miaomiao, WANG Fei, LAN Ping, et al. Effect of ultrasonic intensity on structure and properties of wheat starch-monoglyceride complex and its influence on quality of norther-style Chinese steamed bread[J]. LWT, 2021, 138: 110677.
[38] ZHAO Y T, DAI X G, MACKON E, et al. Impacts of protein from high-protein rice on gelatinization and retrogradation properties in high- and low-amylose reconstituted rice flour[J]. Agronomy, 2022, 12(6): 1431.
[39] 王达, 周彩欣, 简沛仪, 等. 物料加水量对重组米品质的影响及其评价模型的研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(16): 29−36.

［WANG Da, ZHOU Caixin, JIAN Peiyi, et al. Establishment of a model to evaluate the effects of water quantity on recombinant rice quality[J]. Food Research and Development, 2021, 42(16): 29−36.］

［40］朱凤霞, 张源泉, 刘博, 等. 糙米重组米制备工艺优化及其品质分析[J]. 粮食科技与经济, 2021, 46(4): 106−109. ［ZHU Fengxia, ZHANG Yuanquan, LIU Bo, et al. The preparation technology of reconstituted brown rice[J]. Grain Science and Technology and Economy, 2021, 46(4): 106−109.］

［41］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级结构的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(12): 212−219. ［WANG Kexin, WANG Lishuang, HUO Jinjie, et al. Effect of extrusion screw speed on the multiscale structure of starch in restructured rice[J]. Food Science, 2024, 45(12): 212−219.］

［42］张裕聪, 杨月月, 周童童, 等. 不同亲水胶体对挤压重组米理化性质、食用品质和消化性的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(15): 40−48. ［ZHANG Yucong, YANG Yueyue, ZHOU Tongtong, et al. Effects of different hydrophilic colloids on physicochemical properties, eating quality and digestibility of extruded reconstituted rice[J]. Food Science, 2024, 45(15): 40−48.］

［43］LIU Ruohai, GENG Zhanhui, LI Ting, et al. Effects of different extrusion temperatures on the physicochemical properties, edible quality and digestive attributes of multigrain reconstituted rice[J]. Food & Function, 2024, 15(11): 6000−6014.

［44］YU Menglan, ZHANG Shuyi, TANG Peiqi, et al. Effects of fatty acids and glycerides on the structure, cooking quality, and *in vitro* starch digestibility of extruded buckwheat noodles[J]. Food Research International, 2024, 191: 114713.

［45］LIU Qing, WANG Yihui, YANG Yueyue, et al. Structure, physicochemical properties and *in vitro* digestibility of extruded starch-lauric acid complexes with different amylose contents[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 136: 108239.