不同加工方式下山兰红米粉预估血糖生成指数及理化性质的比较

符书梦，夏雨露，楼可俐，张一诺，何海*，冯棋琴*

（海南医科大学（海南省医学科学院），公共卫生学院，热带转化医学教育部重点实验室，海南海口 571199）

摘要：山兰红米是种具有低血糖生成指数（Glycemic Index，GI）食品开发潜力的特色稻米资源，加工方式显著影响其淀粉理化性质及消化特性。为筛选低预估血糖生成指数（Estimated Glycemic Index，eGI）山兰红米熟粉的适宜加工方式，采用烘烤、微波及高压蒸制三种方式熟化制粉，以生粉为对照，测定各组样品 eGI、黏度、结晶结构及微观形貌。结果表明，高压蒸制组 eGI（71.73±1.91）显著高于生粉（61.83±1.92）、烘烤（63.17±2.02）和微波（65.73±1.45）组（P<0.05）；生粉、烘烤、微波三组间 eGI 无显著差异。微波与高压蒸制组各黏度参数均显著低于生粉组（P<0.05），且高压蒸制组降幅更大。生粉、烘烤与微波组均为 A 型结晶，结晶度分别为 17.85%、13.38%、8.94%；高压蒸制组转变为 V 型结晶，结晶度为 5.39%。淀粉颗粒及细胞结构破坏程度与 eGI 的趋势相符，高压蒸制组破坏最严重。烘烤与微波处理能较好保留淀粉结构完整性且 eGI 值较低。本研究结果为低 GI 山兰红米粉加工工艺优化及相应低 GI 食品的开发提供了理论基础。

关键词：山兰红米；加工方式；预估血糖生成指数；理化性质；体外消化

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.8.0942

Comparison of Estimated Glycemic Index and Physicochemical Properties of Shanlan Red Rice Flour Prepared from Different Processing Methods

FU Shumeng, XIA Yulu, LOU Keli, ZHANG Yinuo, HE Hai*, FENG Qiqin*

(Key Laboratory of Tropical Translational Medicine of Ministry of Education, School of Public Health, Hainan Academy of Medical Sciences, Hainan Medical University, Haikou 571199, China)

Abstract: Shanlan red rice is a characteristic rice resource with potential for developing low glycemic index (GI) foods, and its starch physicochemical properties and digestive characteristics can be significantly affected by processing methods. To screen suitable processing methods for preparing Shanlan red rice cooked flour with a low estimated glycemic index (eGI), three treatments—baking, microwave, and high-pressure steaming—were applied to heat-treat Shanlan red rice, which was subsequently milled into flour. The eGI value, viscosity, crystalline structure, and microstructure of each sample group were determined, with raw Shanlan red rice flour as the control. The results showed that the eGI of the high-pressure steaming group (71.73±1.91) was significantly higher than that of the raw flour (61.83±1.92), baking (63.17±2.02), and microwave (65.73±1.45) groups (P<0.05); no significant differences were found among the raw flour, baking, and microwave groups. All viscosity parameters of the microwave and high-pressure steaming groups were significantly lower than those of the raw flour group (P<0.05), with a greater reduction observed in the high-pressure steaming group. Raw flour, baking, and microwave groups all exhibited A-type crystalline structure, with crystallinities of 17.85%, 13.38%, and 8.94%, respectively; the high-pressure steaming group transformed to V-type with crystallinity of 5.39%. The degree of damage to starch granules and cellular structures was consistent with the trend of eGI, and the high-pressure steaming group showed the most severe damage. The structural integrity of starch could be effectively preserved by baking and microwave treatments, while relatively low eGI values were maintained. These findings provide a theoretical basis for optimizing the processing technology of low-GI Shanlan red rice flour and for developing corresponding low-GI food products.

Key words : shanlan red rice; processing methods; estimated glycemic index; physicochemical properties; *in vitro* digestion

收稿日期：2026-06-24；修回日期：2026-08-24；接受日期：2026-08-25

基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目（82304137）；国家级大学生创新创业训练计划项目（202211810027）

作者简介：符书梦（2001-），女，本科，研究方向：营养与健康，E-mail：1794943296@qq.com

通讯作者：冯棋琴（1982-），女，硕士，副教授，研究方向：营养与健康，E-mail：fengqiqin1842@163.com；共同通讯作者：何海（1988-），男，博士，讲师，研究方向：营养与健康，E-mail：scuthehai@hotmail.com

《中国居民营养与慢性病状况报告（2020 年）》显示，我国成人糖尿病患病率 11.9%，糖尿病前期检出率 35.2%，以 2 型糖尿病为主[1]。血糖生成指数（GI）是评价食物碳水化合物引起餐后血糖升高速率的指标，对合理膳食有重要指导意义。体外模拟消化因操作简便快速，被广泛用于 GI 估算，结果称为预估血糖生成指数（eGI）[2]。

全谷物摄入有助于延缓血糖应答，降低 2 型糖尿病发病风险，这与其结构屏障、抗性淀粉及活性多酚组分密切相关[3-5]。但不同加工方式会破坏其天然保护体系，影响其 eGI[4,5]。烘烤、微波和高压蒸制是常用热加工方式，均可改变全谷物 eGI，但机制不同。烘烤（干热）破坏细胞结构屏障，促进淀粉消化，升高 eGI；但低水分抑制糊化，且部分结构屏障保留，限制 eGI 升幅[6-8]。微波（干热）通过高能电磁波破坏淀粉颗粒表面结构、降低结晶度，升高 eGI；同时可诱导分子链重排，促进抗性淀粉生成，缓冲 eGI 上升[9]。高压蒸制（湿热）高温高湿促进淀粉充分糊化，瓦解结构屏障，使 eGI 大幅升高；但冷却阶段回生重结晶可部分缓冲 eGI 增幅[8,10]。三者的传热模式、水分条件和结构修饰效果各异，对淀粉消化特性影响不同。因此，探究适宜的热加工方式对开发低 GI 谷物食品具有重要意义。

海南山兰稻是当地黎族、苗族长期选育的特有旱稻品种，已被认定为中国重要农业文化遗产[11]。依籽粒颜色分为白、红、黑米。其中山兰红米等有色米富含花青素等多酚类活性物质，可抑制消化酶活性并与淀粉相互作用，降低淀粉消化率，延缓餐后血糖应答[12-15]。山兰红米淀粉中快消化淀粉（Rapidly Digestible Starch，RDS）、抗性淀粉（Resistant Starch，RS）含量分别为（14.08±0.57）%和（73.32±5.82）%，RDS 明显低于普通大米（约 31%），RS 则远高于普通大米（约 43%）[16,17]。此外，其直链淀粉含量为 16.53%，消化后升至 21.64%[16]。王德生等[18]报道，海南山兰红米成糊温度、回生值和热焓值较高，抗酶解能力较强，具有低 GI 谷物原料开发潜力。

目前，山兰米主要用于五色饭、山兰酒和鱼茶等传统食品制作，加工以蒸煮和发酵为主，研究多聚焦于工艺优化及微生物演替与风味变化[11,19]；对其淀粉消化特性的关注较少，不同加工方式对其 eGI 的系统比较尚未见报道。探究不同加工方式对 eGI 的影响，有助于拓展山兰米加工应用范围。因此，本研究以海南山兰红米为原料，以生粉为对照，比较烘烤、微波、高压蒸制三种热加工方式对其熟粉 eGI 的影响，并从理化性质角度探讨其影响机制，以期为低 GI 代餐食品的原料选择与工艺优化提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 原料

山兰红米：水分 12.64 g/100 g（参照 GB 5009.3-2016 直接干燥法）；淀粉 72.47 g/100 g（参照 GB 5009.9-2023 酶水解法）；蛋白质 8.90 g/100 g（参照 GB 5009.5-2025 凯氏定氮法）；脂肪 2.17 g/100 g（参照 GB 5009.6-2025 索氏抽提法）。原料购自海南省白沙县山兰米种植基地。

1.2 主要试剂

α-淀粉酶（2 500 U/g）、胃蛋白酶（3 000~3 500 U/g）、淀粉葡萄糖苷酶（100 000 U/g）、猪胰酶（淀粉酶 128 000 U/g、脂肪酶 12 000 U/g、蛋白酶 126 000 U/g），上海阿拉丁生化科技股份有限公司；葡萄糖试剂盒，南京建成生物研究所；氯化钠、氯化钾、二水氯化钙、盐酸、碳酸钠、胆酸盐，分析纯，广州化学试剂厂。

1.3 主要仪器设备

Synergy HTX 多功能酶标仪，美国 BioTek 公司；DHG-9140A(S)电热恒温鼓风干燥箱，宁波江南仪器厂；SU8600 扫描电子显微镜，日本日立公司；D8 ADVANCE 多功能 X 射线衍射仪，德国布鲁克 AXS 公司；RVA-TecMaster 快速黏度分析仪，瑞典 Perten 仪器公司；FD50A 高压蒸汽灭菌锅，合肥雨泽生物科技有限公司；LC-12N-50C 真空冷冻干燥机，上海力辰科技有限公司；HK-350 万能粉碎机，广州市旭朗机械有限公司；M1-L213C 微波炉，美的集团；SPX-100B-D 恒温振荡培养箱，常州诺基仪器有限公司；FA2204C+电子分析天平，上海 Techcomp 有限公司。

1.4 试验方法

1.4.1 山兰红米粉制备

将适量山兰红米按料液比 1:3（g:mL）于室温（约 25 ℃）下浸泡 30 min，沥干水分，分别进行以下处理：

山兰红米生粉（简称生粉）：取适量山兰红米，用多功能粉碎机粉碎，过 60 目筛，备用。

微波山兰红米熟粉（简称微波米粉）：参照文献[20]并适当调整，取米粒平铺于瓷盘（厚约 1 cm），700 W 下间歇微波处理（微波 90 s-停 60 s-微波 90 s-停 60 s-微波 60 s）至无白心且不爆腰。自然冷却后粉碎，过 60 目筛，备用。

烘烤山兰红米熟粉（简称烘烤米粉）：参照文献[21]并适当调整，将米粒单层平铺于瓷盘，置于电热鼓风干燥箱中，80 ℃熟化 2 h 至无白心。自然冷却后粉碎，过 60 目筛，备用。

高压蒸制山兰红米熟粉（简称高压蒸制米粉）：参照文献[22]并适当调整，将米粒装入瓷碗，覆盖锡纸，置于高压蒸汽灭菌锅中，在 121 ℃、0.2 MPa 下蒸制 20 min。结束后立即冰浴冷却，随后于-80 ℃冷冻 2 h，再真空冷冻干燥 24 h。将干燥后的米粒粉碎，过 60 目筛，备用。

1.4.2 体外模拟消化实验

模拟口腔消化阶段[2,20,23]：准确称取 0.764 g NaCl、1.491 g KCl 及 0.133 g $CaCl_2$，溶于 1L 蒸馏水中，使用 1 mol Ł$^{-1}$ HCl 和 $NaHCO_3$ 调节 pH 值至 6.9，混匀得到口腔模拟电解液。临用前，取 50 mL 上述电解液，加入 5.000 g *α*-淀粉酶，混匀后即为口腔模拟消化液。称取 1.000 g 红米粉于 100 mL 锥形瓶中，加入 5 mL 蒸馏水及 5 粒玻璃珠，置于 37 ℃摇床振摇预热 10 min。随后，加入 5 mL 预热至 37 ℃的口腔模拟消化液，于相同条件下继续振摇反应 3 min，模拟口腔消化阶段。

模拟胃部消化阶段[2,20,23]：准确称取 1.100 g KCl、3.100 g NaCl、0.150 g $CaCl_2$ $2H_2O$ 及 0.600 g $NaHCO_3$，溶于 1 L 蒸馏水中，使用 1 mol Ł$^{-1}$ HCl 调节 pH 值至 2.0，混匀得到胃模拟电解液。临用前，取 50 mL 上述电解液，加入 5.000 g 胃蛋白酶，混匀溶解后即为模拟胃液。向上述口腔消化物（10 mL）中加入等体积（10 mL）预热至 37 ℃的模拟胃液，充分混匀后置于 37 ℃摇床振摇反应 30 min，模拟胃部消化阶段。

模拟肠道消化阶段[2,20,23]：准确称取 0.650 g KCl、5.400 g NaCl、0.110 g KH_2PO_4、7.140 g $NaHCO_3$、0.330 g $CaCl_2$ $2H_2O$，溶于 1 L 蒸馏水中，使用 1 mol Ł$^{-1}$ NaOH 调节 pH 值至 7.0，得到肠模拟电解液。临用前，取 100 mL 上述电解液，加入 0.500 g 胰酶、0.160 g 淀粉葡萄糖苷酶及 12.5 mL 胆酸钠溶液（4%），混匀后即为模拟肠液。向上述胃消化混合液（20 mL）中加入等体积（20 mL）预热至 37 ℃的模拟肠液，立即用 1 mol Ł$^{-1}$ NaOH 调节 pH 值至 7.0，充分混匀后置于 37 ℃摇床振摇反应 2.5 h。分别于肠消化的 0、20、40、60、80、100、120 及 150 min 时取样 1 mL，转移至 2 mL 离心管中，立即置于沸水浴加热 10 min 灭酶，随后在 5 500 r min^{-1} 下离心 5 min，取上清液待测。

淀粉水解率计算[20]：采用葡萄糖试剂盒（GOD-POD 法）测定各时间点样品中的葡萄糖含量，公式如下：

$$H_t = \frac{G_t \times 0.9}{S_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

H_t——t 时刻的淀粉水解率，%;

G_t——t 时刻水解液中葡萄糖的释放量，mg;

0.9——葡萄糖与脱水葡萄糖单元的换算系数;

S_0——是初始样品中淀粉的总质量（以干基计），mg。

1.4.3 体外预估血糖生成指数（eGI）计算

以水解时间为横坐标，上述淀粉水解率为纵坐标，绘制淀粉水解曲线，进行一阶动力学拟合，公式为[24,25]：

$$C_t = C_\infty(1-e^{-kt}) \quad (2)$$

式中：

C_t——水解时间 t 时刻淀粉水解率，%;

C_∞——反应平衡时淀粉水解率，%;

K——淀粉一级水解动力学速率常数，min^{-1}。

根据各样品和白面包（参考食物）淀粉水解曲线下面积（Area Under the Curve，AUC），计算水解指数（Hydrolysis

Index，HI），公式如下[24,25]：

$$HI = \frac{AUC_{sample}}{AUC_{rederence}} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

AUC_{sample}——待测山兰红米粉的淀粉水解率-时间曲线下积分面积；

$AUC_{reference}$——参比食物白面包的淀粉水解率-时间曲线下积分面积。

参照 Goñi 等[24]的方法，根据水解指数（HI）估算待测样品的预估血糖生成指数（eGI），公式如下：

$$eGI = 39.71 + 0.549HI \quad (4)$$

1.4.4 理化性质测定

糊化特性测定：参照文献[20]并适当调整。称取 2.80 g 样品，加入蒸馏水至 28 g。测定条件：50 ℃保温 1 min，以 12 ℃ min^{-1} 升温至 95 ℃并保温 2.5 min；再以 12 ℃ min^{-1} 降温至 50 ℃保温 2 min；搅拌转速前 10 s 为 960 r min^{-1}，之后保持 160 r min^{-1}。

结晶特性测定：参照文献[26]并适当调整。取适量米粉装填至样品槽内，刮除多余样品使表面平整。X 射线衍射仪（XRD）测定条件：铜靶，扫描范围 2θ 为 5°~50°，扫描速率 5 °min^{-1}。利用 Jade 9 软件解析衍射图谱，并计算样品淀粉的相对结晶度（Relative Crystallinity，RC）。

$$RC = \frac{A_c}{A_c + A_a} \times 100\% \quad (5)$$

式中：

RC——相对结晶度，%；

A_c——结晶衍射峰积分总面积；

A_a——非晶无定形弥散峰积分总面积。

扫描电子显微镜观察：参照文献[27]并适当调整。取适量样品均匀撒布于贴有导电胶的样品台上，经喷金处理提高样品导电性后，采用扫描电子显微镜观察淀粉颗粒形貌结构。测试条件：加速电压 5 kV，选取适宜放大倍数进行形貌观察与图像采集，以生粉为对照。

1.5 数据分析方法

实验均进行 3 次平行测定，水解指数（HI）、预估血糖生成指数（eGI）及糊化特性参数为连续定量指标，结果以平均值±标准差表示。方差齐时，采用单因素方差分析进行整体比较，若差异有统计学意义，采用 Tukey HSD 法进行两两比较；方差不齐时，整体比较采用 Welch 校正方差分析，两两比较采用 Dunnett T3 法。检验水准 α=0.05，以 P<0.05 为差异具有统计学意义。

2 结果与讨论

2.1 体外模拟消化特性比较

图 1 为白面包（参照食物）及不同加工方式山兰红米粉的淀粉消化动力学曲线。由图可见，与白面包相比，各加工样品平衡期水解率均较低，其中高压蒸制样品最高，生粉最低，微波与烘烤样品居中。反应初期（0~40 min），各样品葡萄糖释放速率较快；随反应时间延长（40~100 min），速率逐渐减缓；100 min 后水解趋于平衡。该趋势与袁攀等[28]报道的热加工促进淀粉糊化、提高酶解效率的结果相似。动力学过程符合底物消耗规律：初始阶段淀粉底物充足，酶解反应迅速；随易水解组分减少，反应速率下降，最终达到平台期[29]。

以白面包为体外消化参照（HI=100，白面包基准 eGI=100），4 种加工山兰红米粉的 HI、白面包基准 eGI 及葡萄糖基准 eGI 测定结果见表 1。其中，葡萄糖基准 eGI 由白面包基准 eGI 乘以系数 0.7 换算得到[30,31]。

由表 1 可见，高压蒸制米粉的 HI 与 eGI 显著高于生粉、烘烤米粉及微波米粉（P<0.05）；而生粉、烘烤米粉、

微波米粉三组间 HI 与 eGI 均无显著差异（P>0.05）。表明高压蒸制显著提高了淀粉消化率和预估血糖指数，而烘烤和微波处理对 eGI 的影响有限。可能与以下因素有关：本研究采用了低温烘烤（80 ℃），其有利于保留谷物内源活性组分，提升慢消化淀粉和抗性淀粉占比[32]；同时，烘烤过程水分流失限制了淀粉充分糊化，结晶结构得以保留，从而延缓消化、弱化升糖效应[33]。微波处理因升温迅速、时间较短，虽可诱导部分淀粉糊化，但颗粒内部有序结构未被完全破坏，升糖效应增加幅度有限[34]。高压蒸制则因高温高湿环境使淀粉充分糊化，颗粒崩解、有序结构解离，更易被酶水解，导致 eGI 大幅升高[35]。此外，热加工可能造成有色稻米中花青素等多酚类活性物质降解，且不同热加工方式对多酚的降解程度及存在形式影响各异[13,33]，其对淀粉消化行为的调控机制有待后续定量分析。本研究中，高压蒸制组因含水量高，采用冰浴冷却后冷冻干燥的处理方式，而微波与烘烤组为自然冷却。冰浴快速降温可诱发淀粉短期回生，理论上会导致高压蒸制组 eGI 测定结果偏低；若各组采用完全一致的冷却方式，高压蒸制组与其他加工组的实际 eGI 差异可能更大。

已有文献报道，热处理对食物 eGI 的影响具有原料特异性。萌动青稞经微波、烘烤、蒸煮后 eGI 显著升高[36]，与本研究中热处理效果一致；而皱粒豌豆经三种热处理后 eGI 均低于未处理样品[25]。这种差异可能源于原料淀粉颗粒结构及蛋白质、多酚、膳食纤维等组分对热处理的不同响应：山兰红米和青稞淀粉颗粒在热处理下易于崩解，而皱粒豌豆中较高的膳食纤维和蛋白质可能对淀粉颗粒起到保护作用，限制消化率提升。综上，系统比较不同加工方式对特定谷物原料的消化特性具有重要应用价值。

为揭示不同加工方式对山兰红米粉消化特性及 eGI 的影响机制，进一步采用快速黏度分析、X 射线衍射及扫描电镜进行综合分析。

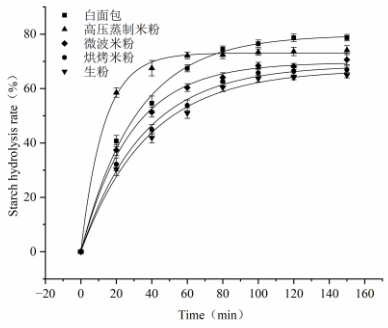


图 1 白面包及不同加工方式处理的山兰红米粉体外消化淀粉水解率曲线

Fig.1 *In vitro* starch hydrolysis curves of white bread and Shanlan red rice flour subjected to different processing methods (*n*=3)

表 1 白面包和不同加工方式处理的山兰红米粉模拟体外消化水解动力学特征参数和 eGI 值

Table 1 Kinetic parameters and eGI values of *in vitro* starch hydrolysis of white bread and Shanlan red rice flour subjected to different processing methods (*n*=3)

项目	白面包（参照）	生粉	烘烤米粉	微波米粉	高压蒸制米粉
HI/%	10.00	79.90±4.74^{a}	83.20±4.97^{a}	89.47±3.57^{a}	104.26±4.71^{b}
白面包基准eGI	100.00	88.34±2.75^{a}	90.25±2.88^{a}	93.90±2.07^{a}	102.48±2.73^{b}
葡萄糖基准eGI	70.00	61.83±1.92^{a}	63.17±2.02^{a}	65.73±1.45^{a}	71.73±1.91^{b}

注：白面包为体外消化参照，不参与统计检验；同行数据右肩不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。下表同。

2.2 黏度特性结果分析

由表 2 可见，与生粉相比，微波与高压蒸制处理组米粉的峰值黏度、谷值黏度、衰减值、最终黏度及回生值均显著降低（P＜0.05），且高压蒸制组降幅更大。烘烤处理组与生粉相比，峰值黏度、谷值黏度及糊化温度无明显变化，仅最终黏度及回生值显著下降（P<0.05），且降幅低于微波与高压蒸制组。文献中亦有类似规律报道，Villanueva 等[37]发现微波处理可使米粉的峰值黏度、回生值和衰减值显著降低（降幅最高分别可达 42%、34%和 86%），其机制可能在于微波快速加热破坏淀粉结晶结构、降解支链淀粉，并使颗粒表面产生微孔[38]。高压蒸制在高温高压高湿条件下使山兰红米淀粉充分糊化，颗粒崩解、直链淀粉游离，结晶度下降，分子降解更为显著[39,40]，

故各项黏度指标降幅最大。烘烤为干热处理，淀粉糊化程度有限，加热主要影响颗粒表层结构，故峰值黏度与谷值黏度未发生显著变化；糊化温度无明显改变亦提示淀粉结晶结构未受到严重破坏。此外，本研究还观察到微波组糊化温度显著上升（$P<0.05$），可能是微波处理主要破坏淀粉颗粒的无定形区及部分稳定性较差的结晶区，而热稳定性更高的结晶区则被保留下来[41]。

黏度特性变化与前述消化特性及 eGI 结果基本一致，可能机制为：高压蒸制使淀粉颗粒崩解，酶解位点充分暴露，酶解效率提升，eGI 升高；微波处理选择性破坏了稳定性较差的结晶区，同时保留了更稳定的结晶区；烘烤处理对淀粉结晶结构破坏有限，糊化程度较低，故二者对 eGI 影响较小[9,40]。综上所述，在本研究条件下，糊化特性参数可作为评估山兰红米淀粉消化行为的辅助参考指标。

表 2 不同加工方式处理的山兰红米粉的黏度特性

Table 2 Pasting properties of Shanlan red rice flour subjected to different processing methods (n=3)

项目	生粉	烘烤米粉	微波米粉	高压蒸制米粉
峰值粘度/cP	1 907.33±37.45^a	1 984.33±20.82^a	1 213.67±43.52^b	56.00±2.00^c
谷值粘度/cP	1 327.67±29.16^a	1 373.33±15.01^a	1 035.33±27.50^b	51.67±1.53^c
衰减值/cP	579.67±14.22^a	611.00±7.21^b	178.33±16.04^c	4.33±0.58^d
最终粘度/cP	3 637.33±45.76^a	3 283.33±24.54^b	2 411.00±80.02^c	74.67±3.06^d
回生值/cP	2 309.67±22.86^a	1 910.00±13.00^b	1 375.67±52.54^c	23.00±1.73^d
糊化温度/℃	88.28±0.45^a	87.23±0.07^a	90.72±0.51^b	ND

注：ND 表示未检出，不纳入统计分析。

2.3 结晶特性结果分析

淀粉 A 型结晶结构的特征衍射峰在 15°、17°、18°、23°（2θ）处；B 型晶特征峰位于 5°、17°、22°（2θ）；C 型是 A、B 型的混合晶型；V 型（直链淀粉-脂质复合物）特征峰位于 7°、13°、20°（2θ），以 20°峰最为典型[42,43]。

XRD 结果显示，生粉、烘焙及微波处理米粉均在 15°、17°、18°、23°（2θ）处出现特征衍射峰，均为 A 型晶型；三者的相对结晶度依次为 17.85%、13.38%、8.94%，表明烘烤与微波处理均对淀粉结晶区造成了一定程度的破坏。高压蒸制样品衍射峰移至 20°（2θ），晶型转变为 V 型，结晶度降至 5.39%；可能是高温高压促使直链淀粉与内源脂质结合，形成了少量直链淀粉-脂质复合物的 V 型结晶结构[43]。详见图 2 和表 2。

结合体外消化结果与结晶度变化（表3），本研究发现结晶度与eGI总体呈负向趋势：生粉结晶度最高（17.85%），eGI 最低（61.76）；烘烤、微波、高压蒸制使结晶度分别降至 13.38%、8.94%和 5.39%，eGI 相应升至 63.19、65.66 和 72.26。表明结晶度降低可促进淀粉消化，但颗粒形貌、晶型转变及分子链降解等同样对消化特性有重要影响[8-10]。

高压蒸制样品晶型由 A 型转变为 V 型，结晶度最低，eGI 最高。V 型结晶虽由直链淀粉-脂质复合物形成，具有一定抗酶解性[43]，但高压蒸制引起的颗粒完全崩解和无定形区域大幅增加对消化的促进作用更为显著。烘烤和微波处理仍保持 A 型晶型，结晶度下降，eGI 升幅较小，进一步表明结晶度降低是 eGI 升高的重要因素，但非唯一决定因素。

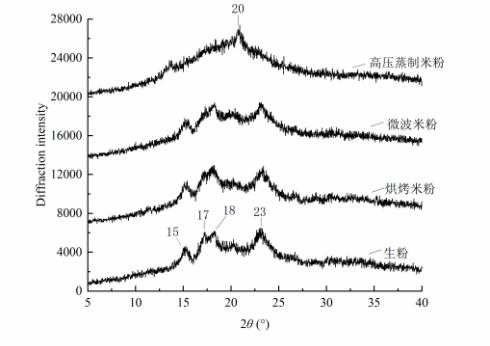


图 2 不同加工方式处理的山兰红米粉的 X-射线衍射线图谱

Fig.2 X-ray diffraction patterns of Shanlan red rice flour as affected by different thermal processing treatments

表 3 不同加工方式处理的山兰红米粉的 X-射线衍射分析结果

Table 3 X-ray diffraction results of Shanlan red rice flour subjected to different thermal processing treatments

项目	生粉	烘烤米粉	微波米粉	高压蒸制米粉
晶型	A 型	A 型	A 型	V 型
相对结晶度/%	17.85%	13.38%	8.94%	5.39%

2.4 电镜扫描结果分析

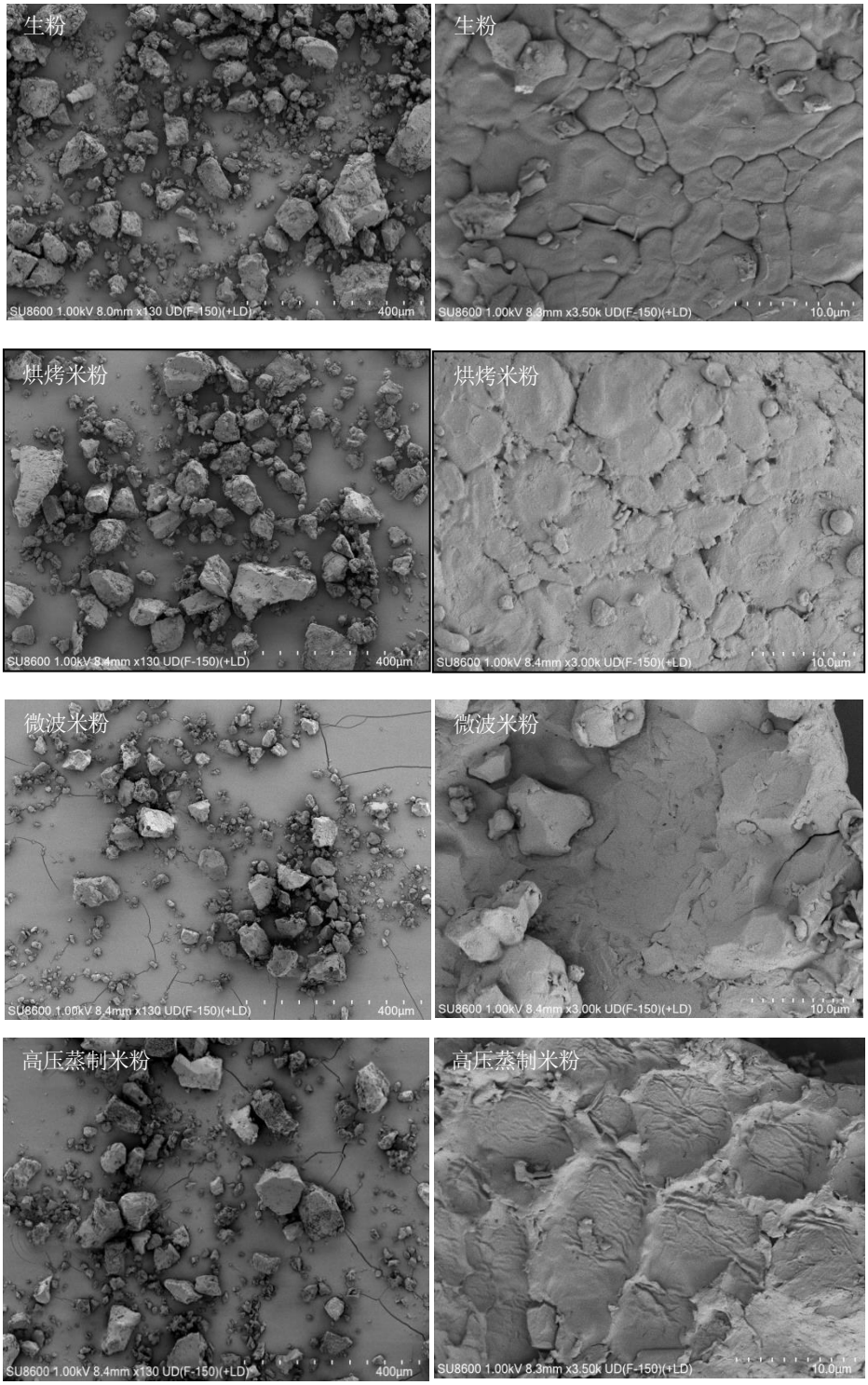


图 3 不同加工方式下的山兰红米粉的电镜扫描图

Fig.3 SEM images of Shanlan red rice flour as affected by different thermal processing treatments

注：左图放大 130 倍，右图放大 3 000 倍。

SEM 观察结果（图 3）显示，生粉淀粉颗粒形态规整、表面光滑、结构完整。烘烤处理后颗粒轮廓完好，仅表面出现少量凹陷；微波处理使颗粒表面粗糙，产生明显裂纹与局部塌陷，损伤程度高于烘烤组；高压蒸制对颗粒破坏最显著，原有形态完全消失，形成疏松多孔的连续熔融片状结构。不同加工方式对淀粉颗粒微观结构的破坏程度依次为：高压蒸制>微波>烘烤>生粉。

上述差异可能与各加工方式的热传递机制及水分条件有关。烘烤为低水分处理，损伤主要局限于颗粒表层，内部结晶结构得以保留，故仍保持 A 型晶型，结晶度降幅较小；微波热效应与分子振动协同作用，对颗粒造成更深层破坏，结晶度进一步降低；高压蒸制使淀粉完全糊化，颗粒崩解重组，晶体结构基本消失，结晶度降至最低[7,9,40]。

Chen 等[8]报道，微波处理可使小麦淀粉颗粒表面产生微孔、内部结构疏松，与本研究中微波导致山兰红米粉颗粒表面裂纹与局部塌陷的现象类似。Gao 等[10]对板栗淀粉湿热处理的微观形貌观察亦发现类似的颗粒崩解与熔融片状结构，与本研究高压蒸制结果一致。上述结果表明，不同热处理对淀粉颗粒多尺度结构的破坏程度存在规律性差异，且这种差异在不同谷物原料中具有普遍性。结合微观结构与 eGI 结果可知：颗粒结构越完整（生粉），酶可及性越低，eGI 最低；颗粒破坏越严重（高压蒸制），酶与底物接触机会越大，eGI 最高。

2.5 研究局限性

本研究尚存在若干局限性：第一，直链淀粉含量引用本实验室前期数据，未在本批次样品中同步测定，后续可补充该指标以完善机制解析；第二，eGI 基于静态体外消化模型获得，难以完全模拟体内消化吸收的复杂生理过程，所得结果仅为血糖应答的初步估算，有待通过人体试验进一步验证；第三，本研究仅选用海南单一产地的山兰红米，未涵盖不同品种与产地来源，后续可扩大样品范围以考察原料差异对结果的影响；第四，烘烤温度为 80 ℃，与工业常用高温焙烤工艺存在差异，结论外推至生产场景时需设置温度梯度加以验证；第五，未测定多酚、黄酮、花青素及膳食纤维等组分，这些活性物质亦可能参与调控淀粉消化特性，后续可补充相关检测，以更全面地阐明热处理影响 eGI 的多元机制。

3 结论

本研究表明，烘烤、微波及高压蒸制三种加工方式可通过改变山兰红米粉的黏度特性、结晶结构及淀粉颗粒完整性，进而影响其预估血糖生成指数（eGI）。烘烤与微波处理对淀粉结构破坏程度较轻，且对 eGI 无显著影响，均为制备较低 eGI 山兰红米熟粉的适宜加工方式。相比之下，微波兼具快捷、节能等优势，后续可进一步探究其对山兰红米粉感官品质、风味及储藏稳定性的影响，以全面评价其应用可行性。

参考文献

[1] 国家卫生健康委员会.成人糖尿病食养指南（2023 年版）[J].全科医学临床与教育,2023,21(5):388-391.

[2] BRODKORB A, EGGER L, ALMINGER M, et al. Infogest static *in vitro* simulation of gastrointestinal food digestion [J]. Nature Protocols, 2019, 14(4): 991-1014.

[3] O'HEARN M, LARA-CASTOR L, CUDHEA F, et al. Incident type 2 diabetes attributable to suboptimal diet in 184 countries [J]. Nature Medicine, 2023, 29(4): 982-995.

[4] WU W J, QIU J, WANG A L, et al. Impact of whole cereals and processing on type 2 diabetes mellitus: a review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(9): 1447-1474.

[5] 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.

[6] BAY YILMAZ B, SERIN S, BEKIROGLU H, et al. Bioactive and nutritional properties of kilned whole-grain snacks: focus on buckwheat, oat, and rye [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2026, 20: 7405-7421.

[7] 江蕾,吕庆云,王学东,等.烘烤加工对谷物代餐粉 GI 值及其理化特性的影响[J].食品工业科技,2024,45(12):101-111.

[8] CHEN X Y, ZHU L, ZHANG H, et al. Multiscale structure barrier of whole grains and its transformation during heating as starch digestibility controllers in digestive tract: A review [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 159: 110606.

[9] CAI M D, ZHANG Y, CAO H W, et al. Exploring the remarkable effects of microwave treatment on starch modification: From structural evolution to changed physicochemical and digestive properties [J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 343: 122412.

[10] GAO X Y, YUAN J W, DU B, et al. Thermal processing modulates starch and non-starch macromolecules digestibility in chestnut: Structural reconfiguration and molecular interactions [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 319(Part 1): 145319.

[11] 许力丹,滕王滕菲,李志东,等.海南农业文化遗产保护传承的现状与对策探究[J].中国热带农业,2026,1:33-40.

[12] ZHANG L, YU J, DENG B, et al. Genotypic variation and genetic control of phenolic compounds and antioxidant activity in Shanlan upland rice landrace [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2025, 26(19): 9800.

[13] ZHANG W, ZHU H, RONG L, et al. Purple red rice bran anthocyanins reduce the digestibility of rice starch by forming V-type inclusion complexes [J]. Food Research International, 2023, 166: 112578.

[14] AALIM H, LUO Z S. Insight into rice (Oryza sativa L.) cooking: Phenolic composition, inhibition of α-amylase and α-glucosidase, and starch physicochemical and functional properties [J]. Food Bioscience, 2021, 40: 100917.

[15] OU S J L, YANG D, PRANATA H P, et al. Postprandial glycemic and lipidemic effects of black rice anthocyanin extract fortification in foods of varying macronutrient compositions and matrices [J]. npj Science of Food, 2023, 7: 59.

[16] 黎保莲,黄一帆,曹榆沛,等.2 种 A 型淀粉的消化特性研究[J].粮食与油脂,2024,37(5):7-11+21.

[17] 赖双定.大米、玉米、马铃薯及其淀粉功能特性比较研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2025.

[18] 王德生,王睿,商文婷,等.不同品种大米理化性质的探究[J].食品研究与开发,2021,42(11):8-16.

[19] 郭晓雪.海南山兰米酒的微生物区系、代谢特征及发酵剂研制[D].哈尔滨:东北农业大学,2024.

[20] 张子敬.预处理和蒸煮方式对红米品质和储藏特性影响的研究[D].无锡:江南大学,2022.

[21] 马丽华,王英俊,周浓.番石榴海红米复合营养粉的研制[J].食品工业,2022,43(5):51-55.

[22] 雷宁宇,卢楹,宋萧萧,等.不同压力下蒸煮处理对鹰嘴豆淀粉结构及理化特性的影响[J].食品科学,2023,44(15):80-86.

[23] 汪磊.刺梨多糖的分离纯化、降血糖作用及其对肠道微生态的影响[D].广州:华南理工大学,2019.

[24] GOÑI I, GARCIA-ALONSO A, SAURA-CALIXTO F. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index [J]. Nutrition Research, 1997, 17(3): 427-437.

[25] 洪凌宇,王佳凯,王立,等.不同加工方式对皱粒豌豆粉预估血糖生成指数的影响[J].粮油食品科技,2025,33(6):118-126.

[26] TIAN Y N, CHEN G L, ZHANG Y, et al. The effect of different milling methods on the physicochemical and *in vitro* digestibility of rice flour [J]. Foods, 2023, 12(16): 3099.

[27] 张明珠,郝明欣,桑喆.玉米淀粉的扫描电镜分析方法[J].理化检验-物理分册,2022,58(8):21-24,28.

[28] 袁攀,吴乾媛,孙全娇,等.不同热加工萌动青稞活性差异及微波处理的萌动青稞对高脂饮食小鼠糖脂代谢的调控[J].现代食品科技,2026,42(8):152-166.

[29] DHITAL S, SHRESTHA A K, GIDLEY M J. Relationship between granule size and *in vitro* digestibility of native and hydrothermally modified rice starches [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 82(3): 739-747.

[30] ATKINSON F S, BRAND-MILLER J C, FOSTER-POWELL K, et al. International tables of glycemic index and glycemic load values 2021: a systematic review [J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2021, 114(5): 1625-1632.

[31] ATKINSON F S, FOSTER-POWELL K, BRAND-MILLER J C. International tables of glycemic index and glycemic load values: 2008 [J]. Diabetes Care, 2008, 31(12): 2281-2283.

[32] HU J H, FAN Z Y, WEI J, et al. Roasting oat-based paste modulates postprandial glucose and insulin sensitivity: Roles of acrylamide, texture, and starch fractions [J]. Food Research International, 2026, 223(Part 1): 117894.

[33] PARK J Y, OH S K, CHUNG H J, et al. Effect of steaming and roasting on the quality and resistant starch of brown rice flour with high amylose content [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 162: 113801.

[34] SOLAESA Á G, VILLANUEVA M, VELA A J, et al. Impact of microwave radiation on in vitro starch digestibility, structural and thermal properties of rice flour: From dry to wet treatments [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 222(Pt B): 1768-1777.

[35] LEE S W, LEE J H, HAN S H, et al. Effect of various processing methods on the physical properties of cooked rice and on in vitro starch hydrolysis and blood glucose response in rats [J]. Starch-Stärke, 2005, 57(11): 531-539.

[36] 孙全娇,李雅欣,黄俊铭,等.热加工对萌动青稞营养、结构及消化特性的影响[J].食品与发酵工业,2025,51(16):98-105.

[37] VILLANUEVA M, HARASYM J, MUÑOZ J M, et al. Microwave absorption capacity of rice flour. Impact of the radiation on rice flour

microstructure, thermal and viscometric properties [J]. Journal of Food Engineering, 2018, 224: 156-164.

[38] LEE S J, SANDHU K S, LIM S T. Effect of microwave irradiation on crystallinity and pasting viscosity of corn starches different in amylose content [J]. Food Science and Biotechnology, 2007, 16(5): 832-835.

[39] HA M Y, JEONG H Y, LIM S T, et al.The cooking method features controlling eating quality of cooked rice: An explanation from the view of starch structure in leachate and morphological characteristics [J]. Food Research International, 2022, 162: 111980.

[40] ZHU L, ZHANG Y Y, WU G C, et al. Characteristics of pasting properties and morphology changes of rice starch and flour under different heating modes [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 149: 246-255.

[41] MA M T, ZHANG Y, CHEN X J, et al. Microwave irradiation differentially affect the physicochemical properties of waxy and non-waxy hull-less barley starch [J]. Journal of Cereal Science, 2020, 95: 103072.

[42] POZO C, RODRÍGUEZ-LLAMAZARES S, CASTAÑO J, et al. Study of the structural order of native starch granules using combined FTIR and XRD analysis [J]. Journal of Polymer Research, 2018, 25(12): 266.

[43] WANG Z, LIU Y X, GAO R, et al. Impact of amylose, fatty acid chain length and unsaturation on the structural and digestive properties of maize starch–lipid complexes [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2026, 357: 151645.