

低eGI值复合挤压米成型工艺、理化特性及风味

吕庆云^{1,2*}, 陈款¹, 江蕾^{1,3}, 张运辰¹, 刘良忠^{1,2}, 朱哲⁴, 高红波⁵, 赵芃杰⁶

(1. 武汉轻工大学食品科学与工程学院, 湖北武汉 430023) (2. 大宗粮油精深加工教育部重点实验室, 湖北武汉 430023) (3. 武汉商贸职业学院现代艺术与教育学院, 湖北武汉 430205) (4. 武汉隆丰园生物科技有限公司, 湖北武汉 430040) (5. 湖北楚丰泉源农业股份有限公司, 湖北安陆 432614) (6. 个旧市大红屯粮食购销有限公司, 云南个旧 661017)

摘要: 该文研究了低 eGI 值复合挤压米成型工艺、理化特性及风味, 采用双螺杆挤压技术, 以普通白米粉为主料, 白芸豆、鹰嘴豆和桑叶提取物为辅料, 制备了适合糖尿病患者食用的低 eGI 复合挤压米。通过单因素实验和响应面优化得出最佳挤压加工参数为螺杆转速 110 r/min、挤压温度 116 ℃、挤压加水量 23% 和喂料速度 18 kg/h, 此时综合评分为 85.2 分, 复合挤压米 eGI 值为 53.81。比较普通白米与低 eGI 复合挤压米的糊化特性、质构特性、蒸煮特性及气味特性, 结果表明低 eGI 复合挤压米在硬度、吸水性和水溶性方面都显著高于普通白米, 扫描电镜观察发现低 eGI 复合挤压米表面较粗糙, 结构疏松多孔, 在风味上, 低 eGI 复合挤压米新增了更多特殊的风味物质, 有自己独特的香味, 异味也有所减少。该研究为低 eGI 复合挤压米的工艺及食用品质改善提供技术参考。

关键词: 鹰嘴豆; 低 eGI; 复合挤压米; GC-IMS; 食用品质

文章编号: 1673-9078(2024)10-14-25

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.10.0162

Processing Technology, Physicochemical Properties, and Flavor of Low-eGI Reconstituted Rice

LYU Qingyun^{1,2*}, CHEN Kuan¹, JIANG Lei^{1,3}, ZHANG Yunchen¹, LIU Liangzhong^{1,2}, ZHU Zhe⁴, GAO Hongbo⁵, ZHAO Pengjie⁶

(1.College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China) (2.Key Laboratory of the Ministry of Education for the Fine and Deep Processing of Bulk Grain and Oil, Wuhan 430023, China) (3.Faculty of Modern Art and Education, Wuhan Institute of Commerce and Trade, Wuhan 430205, China) (4.Wuhan Longfengyuan Biotechnology Co. Ltd., Wuhan 430040, China) (5. Hubei Chufeng Quanyuan Agricultural, Ltd., Anlu 432614, China) (6. Gejiu Dahongtun Food Purchasing and Selling Co. Ltd., Gejiu 661017, China)

Abstract: The processing technology, physicochemical properties, and flavor of low-estimated glycemic index (eGI) reconstituted rice were investigated. Using a twin-screw extruder, a low-GI reconstituted rice suitable for consumption by diabetic patients was prepared from regular white rice flour as the main ingredient and white kidney beans, chickpeas, and

引文格式:

吕庆云,陈款,江蕾,等.低eGI值复合挤压米成型工艺、理化特性及风味[J].现代食品科技,2024,40(10):14-25.

LYU Qingyun, CHEN Kuan, JIANG Lei, et al. Processing technology, physicochemical properties, and flavor of low-eGI reconstituted rice [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(10): 14-25.

收稿日期: 2024-02-03

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFF1104604-01; 2018YFC2001804-4); 湖北省重点研发计划项目 (2022BAD128); 湖北省中央引导地方科技发展专项 (2022BGE247); 云南省李庆龙专家工作站 (202305AF150003)

作者简介: 吕庆云 (1980-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 谷物资源开发利用, E-mail: lqingy2018@whpu.edu.cn

mulberry leaf extracts as excipients. The optimal extrusion process parameters were determined to be a screw speed of 110 r/min, temperature of 116 °C, water addition of 23%, and feed rate 18 kg/h using one-way tests and response surface methodology for optimization. Using these parameters, the overall rating was 85.2 and the eGI of the rice was 53.81. The gelatinization, textural, cooking, and flavor properties of the low-eGI reconstituted rice were subsequently compared with those of regular white rice. The results revealed that the hardness, absorptive capacity, and solubility of the low-eGI reconstituted rice were all significantly higher than those of the white rice. Furthermore, scanning electron microscopy observations revealed that compared with the regular white rice, the low-eGI reconstituted rice was characterized by a rougher surface and a looser more porous structure. In terms of flavor, the low-eGI reconstituted rice was established to have larger amounts of specific flavor compounds that imparted a unique fragrance and reduced odor. Our findings accordingly provide fundamental information to enhance the manufacturing and quality of low-eGI reconstituted rice.

Key words: chickpeas; low-eGI; reconstituted rice; gas chromatography-ion mobility spectrometry; food quality

与谷物相比, 杂豆含有优质的蛋白质以及丰富的矿物质、维生素和膳食纤维, 常被添加到各类食品中来降低食品血糖生成指数 (Glycemic Index, GI 值)^[1]。经过前期预实验, 将白芸豆、鹰嘴豆、桑叶提取物和大米粉复配, 可以将复合挤压米的 GI 值降低到 GI (≤ 55) 水平。白芸豆含有优质蛋白质、多糖、多酚等功能成分, 特别是含有 α -淀粉酶抑制剂, 可以减弱人体中淀粉酶作用效果, 能有效降低餐后血糖水平^[2]。鹰嘴豆的蛋白质含量约为 15%~30%^[3], 碳水化合物含量约为 52%~71%, 其中淀粉含量约为 40%~60%^[4], 且抗性淀粉含量极高, 已有研究将鹰嘴豆添加到杂粮粥和面包中, 并显著降低了产品的 GI 值^[5,6]。

挤压米在食用口感上与普通白米还具有一定差距, 通过调节挤压参数, 不仅能提高挤压米品质, 还能增加生产效率。杂豆含有更多的蛋白质, 淀粉含量低于谷物, 不利于成型, 需要对添加杂豆的挤压复合米成型工艺进行研究。Kadan 等^[7]探究挤压温度对大米食用品质的影响, 发现提高挤压温度, 能使大米吸水性和水溶性指数显著提升, 从而改善大米的食用口感。戚家慧等^[8]将马齿苋加入到碎米粉中制成复配米, 通过单因素实验和响应面优化, 在最佳加工工艺条件下制得的马齿苋复配米营养价值丰富, 口感较佳。

挥发性有机化合物 (Volatile Organic Compounds, VOCs) 显著影响食品风味, 从而影响食品的整体评价^[9]。气相-离子迁移谱 (Gas Chromatography-ion Mobility Spectrometry, GC-IMS) 是一种新兴 VOCs 的检测技术, 利用 GC 保留时间和 IMS 漂移时间鉴定被选择的化合物^[10], 具有无需样品前处理、检测速度快、灵敏度高和稳定性好等优势。

本文采用以上思路及分析方法研究了杂豆类低 eGI 值复合挤压米的成型工艺、食用品质及风味特征, 为改善挤压米的食用品质, 满足糖尿病人群对低 GI 值、高营养和口感好主食产品的需求, 也为研究高品质的挤压米提供思路。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

籼米粉, 河南黄国粮业股份有限公司; 鹰嘴豆, 鹰哥生物科技有限公司; 白芸豆, 昆明纳沃商贸有限公司; 桑叶提取物, 国圣生物科技企业店; 次氯酸钠溶液、盐酸、氢氧化钠, 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; α -淀粉酶 (1 000 U/mg protein)、胃蛋白酶 (2 500 U/mg protein)、胰酶, 美国 Sigma 公司。

1.2 主要仪器与设备

FMHE36-24 智能化双螺杆挤压设备、FMFC-400 流化床干燥箱, 湖南富马科食品工程有限公司; Super4 快速黏度分析仪, 瑞典波通公司; A.TOUCH 质构仪, 上海保圣实业发展有限公司; GC-IMS Flavour Spec®, 德国 GAS 公司; MIRA 场发射扫描电子显微镜, 捷克 TESCAN 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 低eGI值复合挤压米的制备

将籼米粉、白芸豆、鹰嘴豆和桑叶提取物分别粉碎 (或不粉碎) 过 80 目筛, 4 种原料的质量分数依次为 25.7%、39.3%、30.4%、4.6%, 使用双螺杆挤压设备挤压制粒, 将制作出的挤压米用流化床干燥箱预干燥, 后用热风干燥箱干燥至水分含量

13.0% 以内。

1.3.2 单因素实验

1.3.2.1 挤压温度对感官评分的影响

设置螺杆转速 110 r/min, 挤压加水量 23% (质量分数), 喂料速度 20 kg/h, 挤压温度选择 4 区温度, 其他区间温度保持不变, 2、3、5、6 区挤压温度分别为 65、105、75 和 65 °C, 研究 4 区挤压温度 (105、110、115、120、125 °C) 对低 eGI 复合挤压米感官评分的影响。

1.3.2.2 螺杆转速对感官评分的影响

设置 4 区挤压温度 115 °C, 挤压加水量 23% (质量分数), 喂料速度 20 kg/h, 研究螺杆转速 (90、100、110、120、130 r/min) 对低 eGI 复合挤压米感官评分的影响。

1.3.2.3 挤压加水量对感官评分的影响

设置螺杆转速 110 r/min, 挤压温度 115 °C, 喂料速度 20 kg/h, 研究挤压加水量 (19%、21%、23%、25%、27%, 质量分数) 对低 eGI 复合挤压米感官评分的影响。

1.3.2.4 喂料速度对感官评价的影响

设置螺杆转速 110 r/min, 挤压温度 115 °C, 挤压加水量 23% (质量分数), 研究喂料速度 (16、18、20、22、24 kg/h) 对低 eGI 复合挤压米感官评分的影响。

1.3.3 响应面实验设计

通过单因素实验, 确定挤压参数的范围。再通过查阅文献和预实验选择单因素实验中的 3 个因素进行 3 因素 3 水平的响应面实验, 响应面实验的中心点分别为: 螺杆转速 110 r/min, 挤压温度 115 °C, 挤压加水量 23%。以感官评价综合评分为考察指标进行响应面实验, 响应面分析因素水平如表 1 所示。

表 1 响应面分析因素水平表

Table 1 Response surface analysis factor level table

水平	因素		
	A- 挤压温度 /°C	B- 挤压加水量/%	C- 螺杆转速 /(r/min)
-1	110	21	100
0	115	23	110
1	120	25	120

1.3.4 感官评价

参考祝东品等^[1]的方法, 感官评价分为生米粒

感官评价和熟米饭感官评价。感官评价综合评分以生米粒感官评分占 30%、熟米饭感官评分占 70% 求和计算。

1.3.5 蒸煮品质的测定

1.3.5.1 水溶性指数 (WSI) 与吸水指数 (WAI)

参考陈轩等^[2]的方法。称取粉碎过 80 目筛的样品 (m_0), 置于干燥的离心管 (m_1) 中, 加入 25 mL 超纯水摇匀, 2 min 后在 30 °C 水浴锅中保持 30 min, 然后在离心机中离心 10 min, 转速为 3 000 r/min, 上清液置于干燥铝盒 (m_4) 中, 烘干称重 (m_3), 称量倒出上清液后的离心管及内容物质量 (m_2), 公式 (1) (2) 如下:

$$B_1 = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$B_2 = \frac{m_3 - m_4}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

B_1 ——水溶性指数 (WSI), %;

B_2 ——吸水指数 (WAI), %;

m_0 ——样品质量, g;

m_1 ——离心管质量, g;

m_2 ——离心沉淀和离心管质量, g;

m_3 ——烘干后上清液和铝盒质量, g;

m_4 ——铝盒质量, g。

1.3.5.2 蒸煮损失率 (CLR)

参考高帅等^[3]的方法。称取 5 g (m_5) 样品于烧杯中, 加入 50 mL 蒸馏水, 沸水浴 10 min, 将米汤倒入干燥的烧杯 (m_6) 中, 105 °C 烘箱中烘干至恒重 (m_7)。计算方法如公式 (3):

$$C = \frac{m_7 - m_6}{m_5} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

C ——蒸煮损失率 (CLR), %;

m_5 ——样品质量, g;

m_6 ——烧杯质量, g;

m_7 ——干燥后米汤和烧杯的质量, g。

1.3.6 质构特性的测定

参考祝东品等^[1]的方法略作修改, 用 TPA 模式, 随机取 3 粒完整米饭, 放在质构仪载物台上进行测定, 测试前速度 2.00 mm/s, 测试中速度 5.00 mm/s, 测试后速度 5.00 mm/s, 压缩程度 80%, 停留间隔 5.00 s, 触发值 3.0 g, 数据获取率 500 pps。测定普通白米、挤压白米和低 eGI 值复合挤压米的硬度、

黏着性、弹性、咀嚼性、胶着性、内聚性和回复性 7 个指标，每个样品平行测定 5 次，取平均值。

1.3.7 糊化特性 (RVA) 的测定

参考 GB/T 24852-2010《大米及米粉糊化特性测定 快速粘度仪法》。

1.3.8 GC-IMS 检测方法

参考 Sun 等^[14]的方法。将 3 g 样品放入带有匹配盖的 20 mL 密封玻璃顶空瓶中。500 r/min 培养 15 min。顶空气相进样体积为 500 μ L，进样针温度为 85 $^{\circ}$ C，载气（纯度为 99.99% 的氮气）流速前 2 min 为 2 mL/min，在 2~10 min 内线性增加至 10 mL/min，并在 10~20 min 内线性增大至 100 mL/min。

1.3.9 体外模拟消化

体外模拟消化参考 Mulet 等^[15]的方法进行测定。模拟口腔消化：将 5 g 样品中加入 5 mL 口腔消化液溶液，混合后加入 α -淀粉酶，用研杵破碎样品进行模拟咀嚼 1 min，并在 37 $^{\circ}$ C 下避光搅拌温育 2 min。

模拟胃部消化：模拟口腔消化后，继续向样品中加入 10 mL 胃消化液，再加入胃蛋白酶，用 1 mol/L HCl 将 pH 值调节至 3.0，在 37 $^{\circ}$ C 水浴中避光加热振荡 30 min，并维持 pH 值在 3 左右。模拟肠道消化：模拟胃部消化后，继续向样品中加入 20 mL 小肠消化液，再加入胰酶、猪胆盐，用 1 mol/L NaOH 溶液将 pH 值调节至 7.0，并在 37 $^{\circ}$ C 下避光振荡水浴 0、10、20、30、60、90、120、150 和 180 min 时取样，并维持 pH 值在 7 左右，取样后沸水浴 10 min 终止消化，冷却至室温，将消化物在 4 $^{\circ}$ C 下离心。取上清液进行检测，每个样品一式两份进行体外消化模拟。

血糖生成指数参考 Isabri 等^[16]的方法计算样品淀粉水解指数 (HI) 及样品体外血糖生成指数 (eGI 值)。

表 2 消化液的配置

项目	质量浓度 / (g/L)	口腔消化液 / mL	胃消化液 / mL	小肠消化液 / mL
KCl	37.7	3.02	1.38	1.36
KH ₂ PO ₄	68	0.74	0.18	0.16
NaHCO ₃	84	1.36	2.5	8.5
NaCl	117	—	2.36	1.92
MgCl ₂ (H ₂ O) ₆	30.5	0.1	0.08	0.22
(NH ₄) ₂ CO ₃	48	0.12	0.1	—
CaCl ₂	44.1	0.05	0.001	0.009

1.3.10 扫描电子显微镜 (SEM) 观察

采用扫描电子显微镜 (SEM) 观察挤压米在挤压前后的微观形貌变化，样品具体处理参考张阳等^[17]的方法。

1.3.11 数据处理与分析

利用 Excel 2016 进行数据处理，使用 Origin 2021 进行图形的绘制，Design-Expert 8.06 进行响应面结果分析。数据表示方法为平均值 \pm 标准差，蒸煮品质、质构特性、糊化特性、GC-IMS、体外模拟消化实验时做了生物重复实验，感官评价和扫描电镜未做生物重复实验。

2 结果与讨论

2.1 单因素实验

2.1.1 挤压温度对感官评价的影响

如图 1 所示，当挤压温度在 105~125 $^{\circ}$ C 时，生米粒与熟米饭感官评分均先升高后下降。可能是随着温度的升高，糊化程度增加，米粒趋于均匀，米粒的外观和米饭口感提高^[18]。而当挤压温度高于 115 $^{\circ}$ C 时，米粒膨化度增加，蒸煮时容易糊汤，从而导致挤压米口感变差，而且温度过高时，原料中的蛋白质、糖等发生美拉德反应，导致颜色加深^[19]，也会造成挤压米营养成分的损失^[20]。

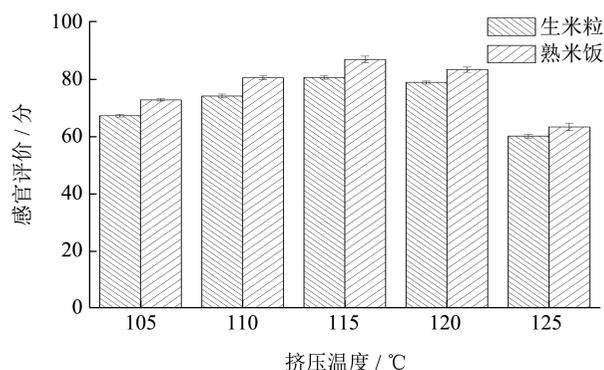


图 1 挤压温度对感官评价的影响

Fig.1 Effect of extrusion temperature on sensory evaluation

2.1.2 螺杆转速对感官评价的影响

由图 2 可知，螺杆转速增加的过程中，挤压米感官评分先上升后下降，当螺杆转速为 110 r/min 时感官评分达到最高，可能是由于原料在高剪切力的作用下，与水分充分混合，米粒饱满。当转速提高时，挤压米表面比较粗糙，米粒外观不够饱满，影响感官评分。

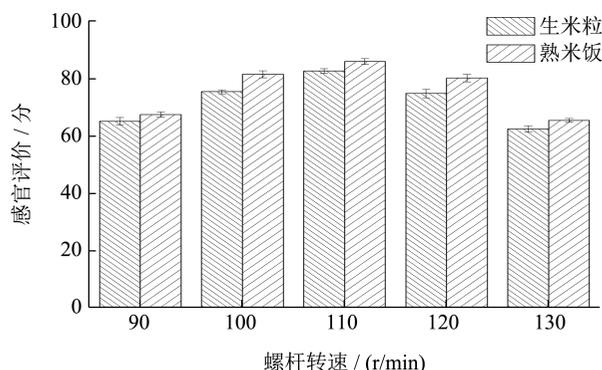


图2 螺杆转速对感官评价的影响

Fig.2 Effect of screw speed on sensory evaluation

2.1.3 挤压加水量对感官评价的影响

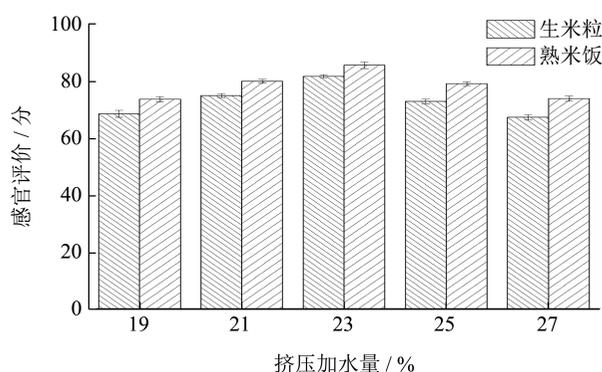


图3 挤压加水量对感官评价的影响

Fig.3 Effect of extrusion water addition on sensory evaluation

挤压加水量对挤压米的粘度和硬度影响较大^[21], 如图3, 随挤压加水量的增加, 感官评分先上升后下降。当挤压加水量低于23%时, 由于水分过低, 导致淀粉的糊化度偏低, 挤压米较硬, 感官评价也会相应下降^[21], 还会影响设备运行和正常生产。当挤压加水量高于23%时, 挤压米难以切割, 成型困难(米粒黏在一起), 影响挤压米的外观。

2.1.4 喂料速度对感官评价的影响

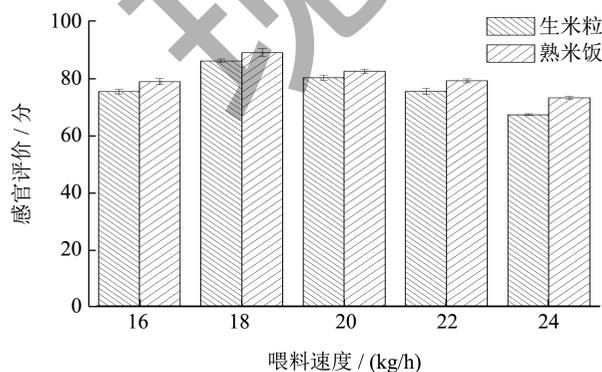


图4 喂料速度对感官评价的影响

Fig.4 Effect of feeding speed on sensory evaluation

如图4, 感官评分随喂料速度的提高先上升后下

降, 喂料速度为18 kg/h时评分最高, 此时喂料连续均匀, 米粒颗粒大小适中, 外观形态良好, 食用口感较好^[13]。喂料速度较低时, 米粒形状变扁, 颗粒不够饱满, 米饭口感变软。喂料速度过高时, 物料堆积在挤压机机筒内, 原料与水不能完全混合, 致使淀粉糊化程度降低, 硬度变大, 也导致米饭口感下降。

2.2 响应面实验

2.2.1 响应面实验结果与分析

响应面实验结果如表3所示。用Design-Expert 8.06软件对实验结果进行三元二次回归拟合, 方差分析结果见表4, 模型P值<0.01, 说明模型极显著, 失拟项P值0.065>0.05, 失拟项不显著, R²=0.9707, 表明其他因素对结果干扰较小, 故该模型能够反应综合评分的响应面结果。其中A的P值<0.01, 说明挤压温度对综合评分的影响显著, AC的P值<0.05, 说明AC对综合评分的影响显著。由F值可知, 这3个因素对综合评分的因素主次: 挤压温度>挤压加水量>螺杆转速。由模型得到的回归方程为:

$$Y=85.54+1.54\times A-0.26\times B-0.51\times C+0.2\times A\times B-1.63\times A\times C-0.4\times B\times C-3.74\times A^2-5.18\times B^2-4.25\times C^2$$

表3 响应面实验

实验号	A- 挤压温度/℃	B- 螺杆转速/(r/min)	C- 挤压加水量/%	综合评分/分
1	115	100	21	76.74
2	115	110	23	84.99
3	115	100	25	75.06
4	110	110	21	73.73
5	120	120	23	77.19
6	115	110	23	86.15
7	110	110	25	77.42
8	110	100	23	76.44
9	120	100	23	78.24
10	120	110	25	78.12
11	115	110	23	85.32
12	115	120	21	77.96
13	110	120	23	74.58
14	115	110	23	86.35
15	120	110	21	80.93
16	115	110	23	84.89
17	115	120	25	74.68

注: 感官评价综合评分以生米粒感官评分占30%、熟米饭感官评分占70%求和计算。

表 4 回归模型方差分析表

因素	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	309.43	9	34.38	25.75	0.00	**
A- 挤压温度	18.94	1	18.94	14.19	0.01	**
B- 螺杆转速	0.54	1	0.54	0.40	0.55	
C- 挤压加水量	2.08	1	2.08	1.56	0.25	
AB	0.16	1	0.16	0.12	0.74	
AC	10.56	1	10.56	7.91	0.03	*
BC	0.64	1	0.64	0.48	0.51	
A ²	59.01	1	59.01	44.20	0.00	**
B ²	113.14	1	113.14	84.75	0.00	**
C ²	75.92	1	75.92	56.87	0.00	**
残差	9.35	7	1.34			
失拟项	7.54	3	2.51	5.58	0.07	不显著
纯误差	1.80	4	0.45			
总离差	318.78	16				

注: ** 表示极显著 ($P < 0.01$), * 表示显著 ($P < 0.05$)。

2.2.2 低eGI复合挤压米挤压工艺参数优化和模型验证

通过响应面实验分析,以综合评分达到最大值进行条件优化,得出低 eGI 复合挤压米的最佳工艺条件为螺杆转速 109.8 r/min、挤压温度 116.1 °C、挤压加水量 22.8%、喂料速度 18 kg/h。所得产品的综合评分预测值为 85.7,进行验证实验,为方便操作,取螺杆转速 110 r/min、挤压温度 116 °C、挤压加水量 23%、喂料速度 18 kg/h,得到的低 eGI 复合挤压米综合评分为 85.2,与预测值相近,说明此模型对实际操作有一定的指导意义。

如表 5、6 和图 5 所示,经过计算普通白米、挤压白米和低 eGI 复合挤压米综合评分分别为 92.6、81.6和 85.0 分。低 eGI 复合挤压米香气评分(表 6)略低于普通白米,但高于挤压白米。低 eGI 复合挤压米色泽评分(表 6)较低,是由于部分原料本身颜色较深以及挤压过程中物料在高温下发生了美拉德反应,挤出米粒颜色较深^[19]。

表 5 不同样品的熟米饭感官评价结果

样品	气味	外观结构	适口性	滋味	冷饭质地	总分
普通白米	18.4	18.3	27.5	25.2	4.3	93.7
挤压白米	16.7	17.7	22.5	21.5	2.2	80.6
低 eGI 复合挤压米	15.9	16.9	26.5	23.6	3.3	86.2

表 6 不同样品的生米粒感官评价结果

样品	形状	色泽	香气	均匀度	总分
普通白米	27.8	17.4	22.4	22.3	89.9
挤压白米	25.4	17.2	20.1	21.3	84.0
低 eGI 复合挤压米	25.1	15.1	22.2	19.9	82.3

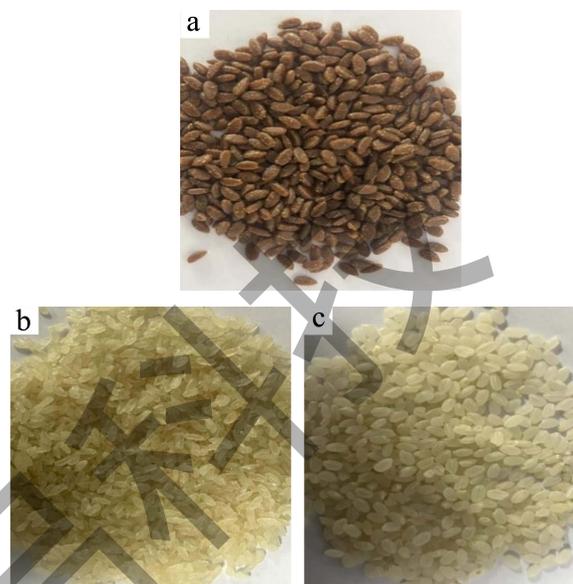


图 5 低 eGI 复合挤压米、挤压白米与普通白米的图片
Fig.5 Pictures of low GI composite extruded rice, extruded white rice, and ordinary white rice

注:(a) 低 eGI 复合挤压米;(b) 挤压白米;(c) 普通白米。

2.3 样品体外消化模拟和eGI值

如图 6 所示,前 20 min 两种大米淀粉水解率均快速上升,在 20~120 min 时低 eGI 复合挤压米淀粉水解率已经趋于水平,而挤压白米淀粉水解率还在不断增加,直到 120 min 时淀粉水解率才趋于稳定,是因为添加的鹰嘴豆、白芸豆能够降低淀粉水解速率^[22],提高慢消化性能^[23]。

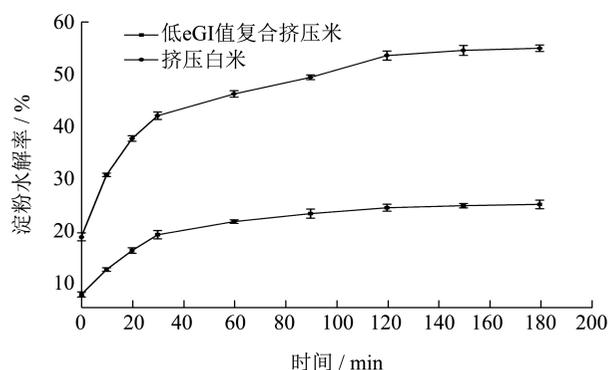


图 6 不同样品的淀粉水解曲线
Fig.6 Starch hydrolysis curve of different samples

由表 7 可知挤压白米血糖生成指数为 73.78, 超过 70 为高 GI 食物, 低 eGI 复合挤压米血糖生成指数为 53.81, 属于低 GI 食品^[24], 也可能是由于低 eGI 复合挤压米中抗性淀粉含量较高^[4], 且抗性淀粉不易被酶水解, 所以 eGI 值偏低^[25]。

表 7 不同样品的体外水解指数和血糖生成指数

Table 7 *In vitro* hydrolysis index and glycemic index of different samples

样品	HI/%	eGI
挤压白米	62.07 ± 0.50	73.78 ± 0.28
低 eGI 复合挤压米	25.68 ± 0.70	53.81 ± 0.30

注: 根据 GI 值可以将食物分为高 GI 食物 (GI ≥ 70)、中 GI 食物 (55 < GI < 70) 和低 GI 食物 (GI ≤ 55)。

2.4 蒸煮特性

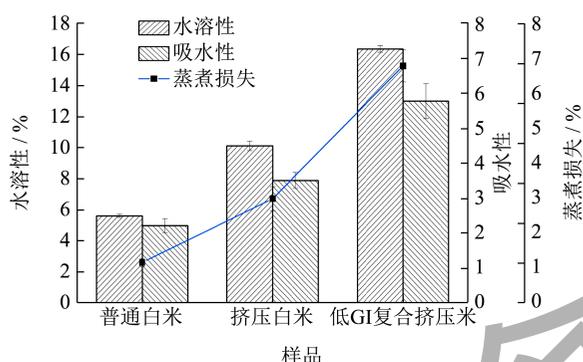


图 7 不同样品的蒸煮特性

Fig.7 Cooking characteristics of different samples

如图 7, 挤压后米粒的吸水性和水溶性增大, 说明挤压处理能显著提高挤出产品的吸水性和水溶性^[26], 其中低 eGI 复合挤压米的吸水性和水溶性最

大, 对比普通白米增加了 191.8% 和 161.1%。

挤压后蒸煮损失率显著提高, 低 eGI 复合挤压米蒸煮损失率为 6.93%, 对比普通白米增加了 244.8%, 可能是因为低 eGI 复合挤压米是由多种原料混合制成, 而混合体系不稳定, 在蒸煮过程中水分更易进入, 导致蒸煮损失偏高^[22], 这与 SEM 结果一致。

2.5 糊化特性

由表 8 所示, 挤压之后糊化特性各参数值均下降。峰值粘度降低是由于淀粉已经糊化, 没有明显峰值, 也可能因为低 eGI 复合挤压米中含有较高的蛋白质, 蛋白质在糊化过程中能与淀粉相互作用形成复杂的网络结构, 抑制淀粉吸水膨胀, 降低峰值粘度^[27]。对比挤压白米, 低 eGI 复合挤压米最低粘度、最终粘度、回生值以及峰值时间都有增加, 米粉粘度的变化主要与直链淀粉有关, 添加的鹰嘴豆、白芸豆增加了低 eGI 复合挤压米中直链淀粉含量^[4,28]。

2.6 质构特性

由表 9 所示, 挤压处理后的挤压米质构指标均不同程度增大, 硬度增大的原因可能是挤压米经过了高温、高压和高剪切力作用, 挤出后表面干燥后失水变硬, 形成坚硬外壳, 导致蒸煮后比较硬^[11]。其中, 低 eGI 复合挤压米硬度最高, 与普通白米对比增加了 116%, 可能是由于低 eGI 复合挤压米中蛋白质含量较高, 蛋白质与产品硬度成正比^[29]。低 eGI 复合挤压米的黏着性与普通白米没有显著差异。

表 8 不同样品的糊化特性

Table 8 Gelatinization characteristics of different samples

样品	峰值粘度/cp	最低粘度/cp	崩解值/cp	最终粘度/cp	回生值/cp	峰值时间/min	糊化温度/°C
普通白米	4 110.3 ± 109.3 ^a	2 973.5 ± 75.3 ^a	1 136.6 ± 51.5 ^a	4 767.0 ± 70.4 ^a	1 793.0 ± 30.4 ^a	6.6 ± 0.0 ^a	84.3 ± 0.4
挤压白米	495.6 ± 10.2 ^b	106.5 ± 2.5 ^c	389.0 ± 15.0 ^b	196.5 ± 9.5 ^c	77.7 ± 4.3 ^c	2.7 ± 0.2 ^c	—
低 eGI 复合挤压米	426.5 ± 16.5 ^c	233.0 ± 7.8 ^b	193.5 ± 5.5 ^c	355.5 ± 14.5 ^b	122.5 ± 5.0 ^b	4.9 ± 0.1 ^b	—

注: 不同小写字母表示差异显著 (P < 0.05), 下同。

表 9 不同样品的的质构特性

Table 9 Texture characteristics of different samples

样品	硬度/g	黏着性/(g·s)	弹性	咀嚼性	胶着性	内聚性	回复性
普通白米	2 993.40 ± 130.30 ^a	-16.74 ± 2.63 ^a	0.48 ± 0.04 ^a	863.00 ± 15.11 ^a	1 571.25 ± 49.40 ^a	0.58 ± 0.01 ^a	0.44 ± 0.01 ^a
挤压白米	4 429.19 ± 150.24 ^b	-54.65 ± 3.73 ^b	0.89 ± 0.02 ^c	2 957.79 ± 170.07 ^b	3 975.47 ± 140.29 ^b	0.90 ± 0.05 ^c	0.78 ± 0.04 ^c
低 eGI 复合挤压米	6 482.96 ± 140.50 ^c	-12.3 ± 1.55 ^a	0.80 ± 0.05 ^b	3 612.64 ± 170.50 ^c	5 253.21 ± 139.50 ^c	0.73 ± 0.03 ^b	0.65 ± 0.01 ^b

2.7 GC-IMS

2.7.1 直接对比样品挥发性有机物差异

通过图 8 和图 10 来表征样品中挥发性化合物的差异。横坐标 1.0 处的红色垂直线为反应离子峰 (RIP)。右边的每一点 RIP 峰的一侧表明样品中发现了一种 VOC，颜色的深浅代表物质的浓度，其中白色代表浓度低，红色代表浓度高。

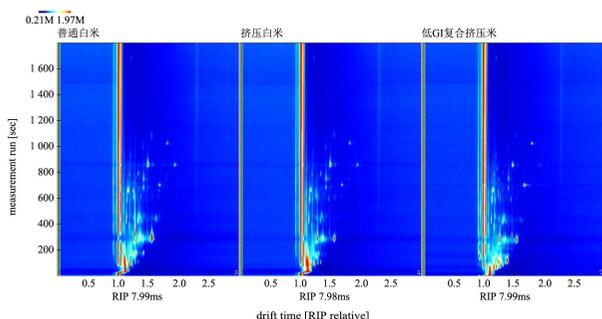


图 8 样品中挥发性风味化合物的俯视图

Fig.8 Top view of volatile flavor compounds in the sample

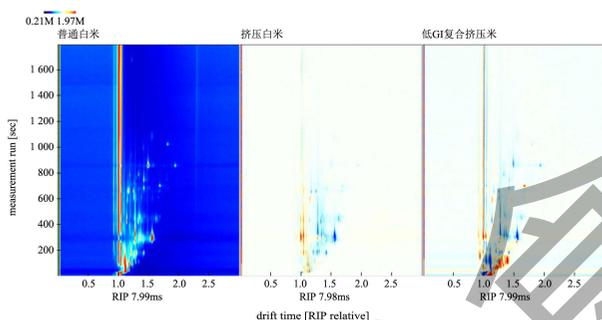


图 9 样品中挥发性风味化合物的差异对比图

Fig.9 Comparison of volatile compounds in samples

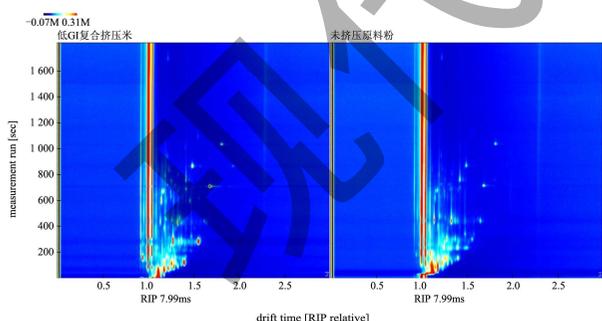


图 10 样品中挥发性风味化合物的俯视图

Fig.10 Top view of volatile flavor compounds in the sample

图 9 和图 11 分别以普通白米和低 eGI 复合挤压米光谱为参考，进行差异对比，其中白色、红色和蓝色分别代表演绎参考样品中 VOCs 的浓度与参考样品相同、更高和更低。如图 9 所示，低 eGI 复合挤压米中 VOCs 明显多于普通白米。如图 11 所示，原料粉挤压成低 eGI 复合挤压米后，VOCs 浓度发

生了变化，还出现了一些新的 VOCs。

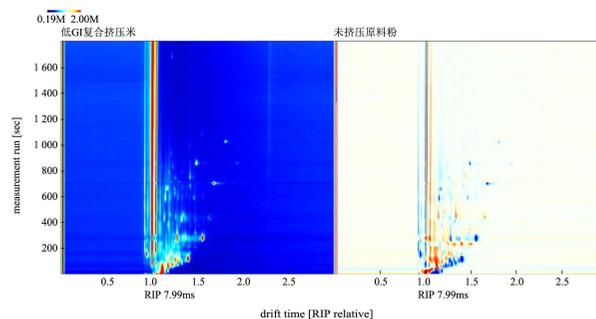


图 11 样品中挥发性风味化合物的差异对比图

Fig.11 Comparison of volatile flavor compounds in samples

2.7.2 样品的挥发性有机物指纹图谱对比和挥发性有机物定性分析

表 10 中显示，所有样品中共鉴定出醛、酮、醇和酯等 65 种挥发性化合物。这些化合物大多由单体和二聚体组成。但是离子迁移库中未识别出 2 种物质（分别是 25 和 57）。

图 12 为四种大米样品中 VOCs 的指纹图谱，低 eGI 复合挤压米与未挤压原料粉相比，低 eGI 复合挤压米中新增了丙位癸内酯、反 -2- 辛烯醛、邻甲氧基苯酚等，反式 -2- 己烯酸、丁酸乙酯等含量有所增加，其中醛类含量增加，可能是在挤压过程中高温促进了脂质氧化。增加的酚和酯含有水果的香气，常用于香精香料之中^[30]。而未挤压原料粉中含有的丙酸、异丁香酚甲醚等含量减少了，正戊醇、异丁酸等消失了。未挤压原料粉中含有强烈的豆腥味，主要是在粉碎过程中豆类中的多价不饱和脂肪酸被氧化，生成氢过氧化物，再降解成多种成小分子醇和酸等挥发性化合物，从而形成了大豆腥味^[31]。挤压白米对比普通白米，正辛酸、甲基异丁甲醇等含量减少，香叶醇、橙花醇等消失了。说明挤压处理后，挥发性物质种类有所减少。

低 eGI 复合挤压米与普通白米对比，低 eGI 复合挤压米中新增了丙位癸内酯、香叶醇、反 -2- 辛烯醛等，甲基异丁甲醇、4- 甲基 -1- 戊醇、丙酸、L- 香芹醇，甲基环戊烯醇酮含量减少。香叶醇是具有强烈绿色嫩叶清香气味的无色液体，可能是桑叶提取物中含有的，香气清新浓郁自然。相比普通白米，低 eGI 复合挤压米中增加的这些挥发性醛类，可能是豆腥味中的醇和酸通过挤压工艺而导致的脂质氧化产生，也为低 eGI 复合挤压米新增了许多特殊的风味物质，在风味上有自己独特的香味，这样更容易被消费者接受。

表 10 样品中VOCs的信息
Table 10 Information on VOCs in the sample

序号	化合物	保留时间/s	相对迁移时间/s	分子式	分子量	CAS 号	相对保量指数
1	正辛酸	851.64	1.94	C ₈ H ₁₆ O ₂	144.2	124-07-2	2 087.8
2	丙位癸内酯	588.68	1.46	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	170.3	706-14-9	1 735.0
3	(E)-1-(2,6,6-三甲基-1,3-环己二烯-1-基)-2-丁烯-1-酮	679.80	1.41	C ₁₃ H ₁₈ O	190.3	23726-93-4	1 857.3
4	1-甲氧基-4-[(Z)-1-丙烯基]苯	654.65	1.25	C ₁₀ H ₁₂ O	148.2	104-46-1	1 823.5
5	反式-2-己烯酸	743.88	1.26	C ₆ H ₁₀ O ₂	114.1	13419-69-7	1 943.3
6	苯乙醇	713.05	1.31	C ₈ H ₁₀ O	122.2	60-12-8	1 901.9
7	香叶醇	715.20	1.22	C ₁₀ H ₁₈ O	154.3	106-24-1	1 904.8
8	2-甲氧基-4-甲基苯酚	787.17	1.18	C ₈ H ₁₀ O ₂	138.2	93-51-6	2 001.3
9	甲基异丁醇	278.96	1.57	C ₆ H ₁₄ O	102.2	108-11-2	1 319.5
10	4-甲基-1-戊醇	289.05	1.37	C ₆ H ₁₄ O	102.2	626-89-1	1 333.1
11	3-羟基-2-丁酮	282.16	1.34	C ₄ H ₈ O ₂	88.1	513-86-0	1 323.8
12	2-壬酮	120.75	1.40	C ₉ H ₁₈ O	142.2	821-55-6	1 107.3
13	反-2-辛烯醛	93.11	1.29	C ₈ H ₁₄ O	126.2	2548-87-0	1 070.0
14	邻甲氧基苯酚	116.96	1.25	C ₇ H ₈ O ₂	124.1	90-05-1	1 102.2
15	苯乙醛	71.36	1.24	C ₈ H ₈ O	120.2	122-78-1	1 038.5
16	丙酸	439.47	1.13	C ₃ H ₆ O ₂	74.1	79-09-4	1 534.9
17	异丁香酚甲醚	424.73	1.32	C ₁₁ H ₁₄ O ₂	178.2	93-16-3	1 515.1
18	丙酸	443.30	1.26	C ₃ H ₆ O ₂	74.1	79-09-4	1 540.0
19	异丁酸	426.77	1.37	C ₄ H ₈ O ₂	88.1	79-31-2	1 517.8
20	丙酸	457.26	1.35	C ₃ H ₆ O ₂	74.1	79-09-4	1 558.7
21	5-甲基-2-噻吩甲醛	586.77	1.15	C ₆ H ₆ OS	126.2	13679-70-4	1 732.5
22	L-香芹醇	665.13	1.17	C ₁₀ H ₁₆ O	152.2	99-48-9	1 837.6
23	反式-2,4-庚二烯醛	59.54	1.18	C ₇ H ₁₀ O	110.2	4313-03-5	1 019.0
24	反式-2-十一烯醛	610.18	1.57	C ₁₁ H ₂₀ O	168.3	53448-07-0	1 763.9
26	丁位辛内酯	790.79	1.32	C ₈ H ₁₄ O ₂	142.2	698-76-0	2 006.2
27	3-苯丙酸乙酯	697.915	1.91	C ₁₁ H ₁₄ O ₂	178.2	2021-28-5	1 881.6
28	(E)-1-(2,6,6-三甲基-1,3-环己二烯-1-基)-2-丁烯-1-酮	615.92	1.38	C ₁₃ H ₁₈ O	190.3	23726-93-4	1 771.6
29	正辛醇	435.51	1.48	C ₈ H ₁₈ O	130.2	111-87-5	1 529.6
30	丁酸乙酯	79.64	1.18	C ₆ H ₁₂ O ₂	116.2	105-54-4	1 050.9
31	正戊醇	229.30	1.49	C ₅ H ₁₂ O	88.1	71-41-0	1 252.9
32	异丁酸	432.26	1.42	C ₄ H ₈ O ₂	88.1	79-31-2	1 525.2
33	反式-2,4-庚二烯醛	436.15	1.66	C ₇ H ₁₀ O	110.2	4313-03-5	1 530.4
34	苯乙醇	119.81	1.30	C ₈ H ₁₀ O	122.2	60-12-8	1 106.0
35	乙酸冰片酯	467.41	1.23	C ₁₂ H ₂₀ O ₂	196.3	76-49-3	1 572.3
36	2-乙酰基吡咯	750.52	1.46	C ₆ H ₇ NO	109.1	1072-83-9	1 952.2
37	顺式-3-辛烯醇	459.63	1.32	C ₈ H ₁₆ O	128.2	20125-84-2	1 561.9

续表

序号	化合物	保留时间/s	相对迁移时间/s	分子式	分子量	CAS 号	相对保量指数
38	甲基庚烯酮	330.27	1.19	C ₈ H ₁₄ O	126.2	110-93-0	1 388.4
39	苯甲酸甲酯	463.64	1.19	C ₈ H ₈ O ₂	136.1	93-58-3	1 567.3
40	香叶醇	658.71	1.69	C ₁₀ H ₁₈ O	154.3	106-24-1	1 829.0
41	橙花醇	606.80	1.67	C ₁₀ H ₁₈ O	154.3	106-25-2	1 759.4
42	甲基环戊烯醇酮	678.02	1.48	C ₆ H ₈ O ₂	112.1	80-71-7	1 854.9
43	苯甲醇	679.09	1.52	C ₇ H ₈ O	108.1	100-51-6	1 856.3
44	桃醛	436.73	1.58	C ₁₁ H ₂₀ O ₂	184.3	104-67-6	1 531.2
45	2-甲氧基-3-仲丁基吡嗪	177.10	1.30	C ₉ H ₁₄ N ₂ O	166.2	24168-70-5	1 182.9
46	丁二酸二乙酯	170.29	1.26	C ₈ H ₁₄ O ₄	174.2	123-25-1	1 173.7
47	乙基麦芽酚	178.67	1.20	C ₇ H ₈ O ₃	140.1	4940-11-8	1 185.0
48	正辛醇	460.02	1.44	C ₈ H ₁₈ O	130.2	111-87-5	1 562.4
49	5-甲基呋喃醛	460.02	1.44	C ₆ H ₆ O ₂	110.1	620-02-0	1 562.4
50	正戊醇	218.40	1.25	C ₅ H ₁₂ O	88.1	71-41-0	1 238.3
51	2-庚烯酸	179.74	1.42	C ₇ H ₁₂ O ₂	128.2	18999-28-5	1 186.4
52	二丙基二硫	110.96	1.26	C ₆ H ₁₄ S ₂	150.3	629-19-6	1 094.1
53	反式-2,4-庚二烯醛	55.92	1.19	C ₇ H ₁₀ O	110.2	4313-03-5	1 012.4
54	二甲基二硫	96.19	1.15	C ₂ H ₆ S ₂	94.2	624-92-0	1 074.2
55	2-甲基吡嗪	228.75	1.04	C ₅ H ₆ N ₂	94.1	109-08-0	1 252.2
56	丁酸乙酯	71.37	1.22	C ₆ H ₁₂ O ₂	116.2	105-54-4	1 038.5
58	2-甲基-3-羟基-4-吡喃酮	136.12	1.16	C ₆ H ₆ O ₃	126.1	118-71-8	1 127.9
59	4-乙基-2-甲氧基苯酚	252.22	1.25	C ₉ H ₁₂ O ₂	152.2	2785-89-9	1 283.7
60	2,6-二甲氧基苯酚	296.72	1.27	C ₈ H ₁₀ O ₃	154.2	91-10-1	1 343.4
61	反式-2-己烯-1-醇	328.04	1.48	C ₆ H ₁₂ O	100.2	928-95-0	1 385.4
62	2,5-二甲基吡嗪	277.27	1.51	C ₆ H ₈ N ₂	108.1	123-32-0	1 317.3
63	香叶醇	444.59	1.62	C ₁₀ H ₁₈ O	154.3	106-24-1	1 541.7
64	甲基环戊烯醇酮	661.38	1.15	C ₆ H ₈ O ₂	112.1	80-71-7	1 832.6
65	水杨酸甲酯	606.98	1.25	C ₈ H ₈ O ₃	152.1	119-36-8	1 759.6
25	未识别	854.07	1.58				2 091.1
57	未识别	110.46	1.33				1 093.5

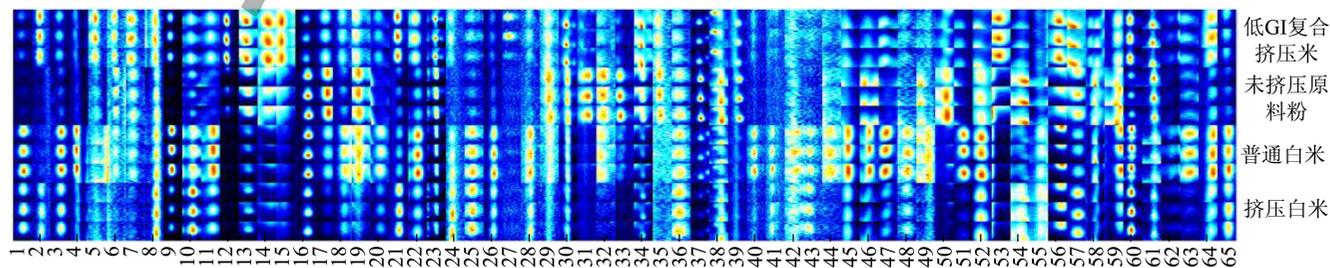


图 12 样品中 VOCs 的指纹图谱
Fig.12 Fingerprint of VOCs in the sample

2.7.3 样品的聚类分析

采用聚类分析 (PCA) 对样品中 VOCs 的差异进行区分, 从而对样品进行分类。四种大米 PCA 图, 如图 13 所示。PC1 (43.0%) 和 PC2 (28%) 的总方差贡献率分别为 71%, 说明四种大米样品之间存在显著差异。此外, 每种大米在 PCA 图中占有相对独立的空间, 说明他们的 VOCs 组成不相似。

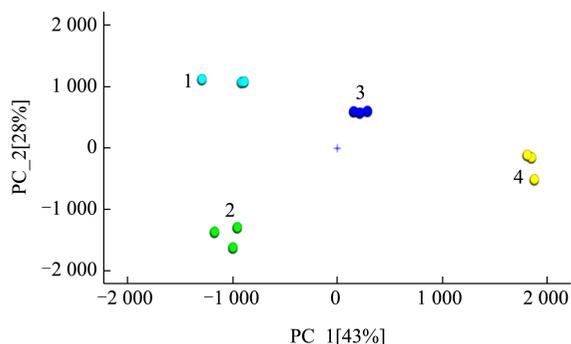


图 13 基于样品得到的信号强度的主成分分析

Fig.13 Principal component analysis of signal strength based on samples

注: 1 为低 eGI 复合挤压米, 2 为未挤压原料粉, 3 为普通白米, 4 为挤压白米。

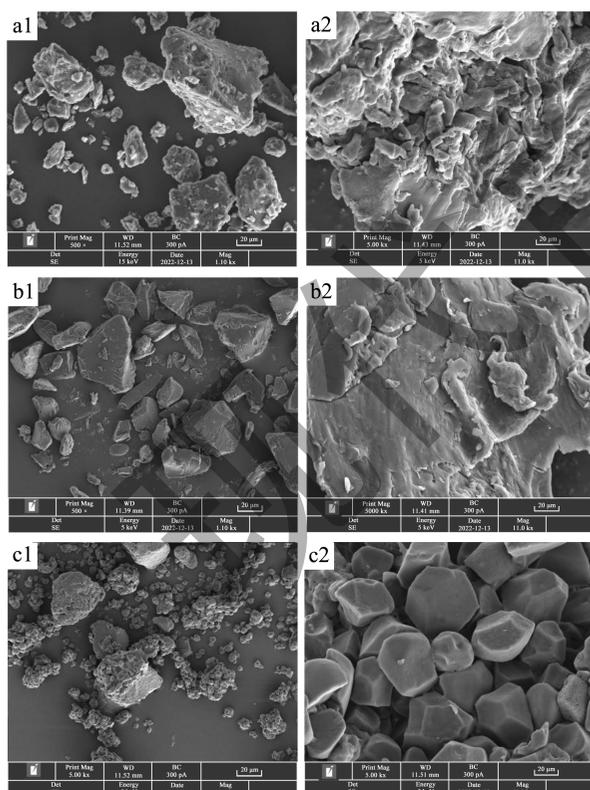


图 14 不同样品的扫描电子显微镜结果

Fig.14 Scanning electron microscope of different samples

注: a1、b1、c1 分别为放大 500 倍的低 eGI 复合挤压米、挤压白米和普通白米, a2、b2、c2 分别为放大 5 000 倍的低 eGI 复合挤压米、挤压白米和普通白米。

2.8 扫描电镜结果分析

如图 14 所示, 在 500 倍时, 普通白米淀粉多数呈块状, 淀粉颗粒紧密结合在一起, 经过挤压处理的挤压白米和低 eGI 复合挤压米, 由于糊化观察不到淀粉的颗粒结构, 而且低 eGI 复合挤压米微观结构表面较粗糙, 可能是因为添加了桑叶提取物等的不溶性小颗粒, 也可能是淀粉与蛋白质和脂肪形成复合物^[32]。在 5 000 倍时, 普通白米表面光滑结构紧密, 挤压白米淀粉糊化, 表面凹凸不平, 低 eGI 复合挤压米整体形状不规则, 结构疏松多孔, 这与蒸煮特性结果一致。

3 结论

通过单因素和响应面优化实验得出低 eGI 复合挤压米的最佳工艺条件为螺杆转速 110 r/min、挤压温度 116 °C、挤压加水量 23% 和喂料速度 18 kg/h, 此条件下制作的挤压米感官评分最高、米饭香气较浓郁。此时挤压米 eGI 值为 53.81, 达到低 GI 水平。比较了普通白米与低 eGI 复合挤压米的糊化特性、质构特性、蒸煮特性及微观结构, 低 eGI 复合挤压米吸水性和水溶性增加了 191.8% 和 161.1%, 蒸煮损失率增加了 244.8%, 硬度、咀嚼性和胶着性较大, 色泽变深。挤压处理后糊化特性的峰值粘度、最低粘度等参数均下降。扫描电镜结果说明低 eGI 复合挤压米结构疏松多孔, 淀粉颗粒破碎, 普通白米表面光滑, 淀粉颗粒结构紧密。通过这些结果说明低 eGI 复合挤压米在食用品质方面与普通白米存在一定差距, 低 eGI 复合挤压米经过高温挤压作用, 硬度、弹性等增加, 由于添加豆类、桑叶提取物导致易吸水、蒸煮损失增加。GC-IMS 分析发现, 低 eGI 复合挤压米风味物质更加丰富, 而且通过挤压处理将原料中存在的豆腥味去除了, 这样更容易被消费者接受。本研究为低 eGI 复合挤压米在加工、生产中提供理论指导。

参考文献

- [1] 张婷, 袁艺, 王鑫, 等. 杂豆分类、营养功效及其产品开发的研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(4): 428-437.
- [2] 郑虹君, 朱叙丞, 李耀基, 等. 白芸豆功能成分、生物活性及其产品开发研究进展[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(12): 277-285.
- [3] 薛照辉, 刘珊珊, 李勇, 等. 鹰嘴豆蛋白的制备及其抗氧化活性[J]. 中国油脂, 2008, 8: 24-26.
- [4] 孙悦. 微波辅助低共熔溶剂提取鹰嘴豆中生物活性成分

- 研究[D]. 石河子:石河子大学,2020.
- [5] 姜梦伟,白雪,霍瑞,等.低升糖指数杂粮粥的配方优化[J].食品研究与开发,2023,44(3):117-124.
- [6] JOHNSIN S K, THOMAS S J, HALL R S. Palatability and glucose, insulin and satiety responses of chickpea flour and extruded chickpea flour bread eaten as part of a breakfast [J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 2005, 59(2): 169-176.
- [7] KADAN R S, BRYANT R J, PEPPERMAN A B. Functional properties of extruded rice flours [J]. *Journal of Food Science*, 2003, 68(5): 1669-1672.
- [8] 戚家慧,陈善峰,闫玉红,等.马齿苋复配米工艺优化及抗氧化活性研究[J].食品与机械,2022,38(5):184-190.
- [9] 胡航伟,程晶晶,谢亚敏,等.气相离子迁移谱技术在谷物食品中的应用研究进展[J].食品安全质量检测学报,2024,15(5):253-259.
- [10] WANG S Q, CHEN H T, SUN B G. Recent progress in food flavor analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) [J]. *Food Chemistry*, 2020, 315: 126158.
- [11] 祝东品,吕庆云,周梦舟,等.青稞全粉挤压米工艺优化及品质研究[J].食品科技,2019,44(7):202-210.
- [12] 陈轩,马晓灵,向莉,等.军用方便米饭的回生特性研究[J].食品科技,2018,43(8):158-163.
- [13] 高帅.碎米重组米研制及其对肠道菌群影响的研究[D].哈尔滨:哈尔滨商业大学,2021.
- [14] SUN Z L, LYU Q Y, CHEN L, et al. An HS-GC-IMS analysis of volatile flavor compounds in brown rice flour and brown rice noodles produced using different methods [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 161: 113358.
- [15] MULET-CABERO A I, EGGER L, PORTMANN R, et al. A standardised semi-dynamic *in vitro* digestion method suitable for food-an international consensus [J]. *Food & Function*, 2020, 11(2): 1702-1720.
- [16] ISABRI G, ALEJANDRA G A, FULGENCIO S C. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index [J]. *Nutrition Research*, 1997, 17(3): 427-437.
- [17] 张阳,张琪,邓利玲,等.低GI挤压重组米配方优化及食用品质评价[J].中国粮油学报,2022,37(3):1-8.
- [18] 谢天,孙洪蕊,康立宁,等.双螺杆挤压对玉米重组米理化特性及品质特性的影响[J].食品科学,2019,40(17):183-189.
- [19] DA H J, SUN Y C, GI H R. Effect of extrusion process variable on physicochemical properties of extruded rice snack with mealworm [J]. *Korean Journal of Food Science and Technology*, 2017, 49(4): 444-452.
- [20] 张先,金铁,许青松,等.双螺杆挤压人参制品美拉德反应产物抗氧化活性研究[J].食品科技,2014,39(11):79-83.
- [21] 张琪,吴春艳,李想,等.马铃薯挤压米工艺参数优化[J].食品研究与开发,2019,40(2):57-62.
- [22] 丁长河,张金叶,高雅君.低GI馒头的工艺优化及营养评价[J].食品科技,2022,47(3):175-181.
- [23] 代娇.低GI谷物重组米研制及其品质特性分析[D].长春:吉林农业大学,2022.
- [24] 王润,党斌,杨希娟,等.低血糖生成指数食品的研究现状与展望[J].青海农林科技,2018,111(3):68-71.
- [25] VAN H P, DUYEN T T M, VAN T H, et al. Starch digestibility and quality of cookies made from acid and heat-moisture treated sweet potato starch and wheat flour composites [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2021, 15: 3045-3051.
- [26] 方浩标,郑经绍,余宏达,等.挤压膨化对紫糙米粉营养品质及理化性质的影响[J].食品工业科技,2021,42(19):70-77.
- [27] 李兆钊,吴卫国,廖卢艳,等.挤压杂粮重组米糊化特性研究[J].食品与机械,2020,36(5):54-58.
- [28] 殷欣,陈文,彭涛,等.小杂粮淀粉糊化及回生研究进展[J].中国酿造,2019,38(10):26-30.
- [29] 陆林.鹰嘴豆粉强化对饼干淀粉消化性与质构的影响及其机制[D].无锡:江南大学,2022.
- [30] LETTONEN M, KEKALAINEN S, NIKKILA I, et al. Active food packaging through controlled in situ production and release of hexanal [J]. *Food Chemistry: X*, 2020, 5: 100074.
- [31] 徐文,余小贞,张雪儿,等.基于电子鼻和GC-MS分析3种市售大豆组织蛋白中挥发性豆腥味物质[J].中国调味品,2022,47(8):145-149.
- [32] PIERRE F, JEAN C A, CHRISTELE I V. Mini review pasta brownness: An assessment [J]. *Journal of Cereal Science*, 2000, 32(3): 215-233.