

低GI复合挤压米原料配方优化及降血糖功能验证

王兴¹, 江蕾^{1,2}, 陈款¹, 张运辰¹, 刘良忠^{1,3}, 朱哲⁴, 吕庆云^{1,3}, 常宪辉^{1,3*}, 丁文平^{1,3}
(1. 武汉轻工大学食品科学与工程学院, 湖北武汉 430023) (2. 武汉商贸职业学院现代艺术与教育学院, 湖北武汉 430200) (3. 大宗粮油精深加工教育部重点实验室, 湖北武汉 430023)
(4. 武汉隆丰园生物科技有限公司, 湖北武汉 430040)

摘要: 以大米粉为主料, 复配白芸豆、鹰嘴豆、桑叶提取物以及大豆分离蛋白等辅料, 经过双螺杆挤压技术制备了低血糖生成指数 (GI 值) 复合挤压米, 并通过小鼠试验验证其降血糖的功能。采用响应面法, 优化了低 GI 复合挤压米的原料配方, 得出白芸豆添加比例 39.3%、鹰嘴豆添加比例 30.4%、桑叶提取物添加量 4.6%、大豆分离蛋白添加量 1.0%, 其中白芸豆添加量和鹰嘴豆添加量对复合挤压米原料 GI 值的影响较显著。低 GI 复合挤压米对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的抑制率分别为 33.4% 和 53.2%。对糖尿病小鼠的动物实验说明持续食用该低 GI 复合挤压米能够有效降低空腹血糖, 维持血糖平衡, 对链脲佐菌素诱导的糖尿病小鼠的糖耐量能力有明显改善作用。该研究为研发高营养、好品质的挤压米提供思路, 满足糖尿病人群对低 GI 值主食食品的需求。

关键词: 降血糖; 杂豆; 挤压米; GI 值; 体外消化; 动物实验

文章编号: 1673-9078(2024)10-32-39

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.10.1133

Raw Material Formulation Optimization of Low GI Composite Extruded Rice and Verification of Its Hypoglycemic Function

WANG Xing¹, JIANG Lei^{1,2}, CHEN Kuan¹, ZHANG Yuncheng¹, LIU Liangzhong^{1,3}, ZHU Zhe⁴, LYU Qingyun^{1,3},
CHANG Xianhui^{1,3*}, DING Wenping^{1,3}

(1. School of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China) (2. School of Modern Art and Education, Wuhan Business and Trade Vocational College, Wuhan 430200, China) (3. Key Laboratory for Deep Processing of Major Grain and Oil, Ministry of Education, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China) (4. Wuhan Longfengyuan Biotechnology Co. Ltd., Wuhan 430040, China)

Abstract: Here, low glycemic index (GI) composite extruded rice was prepared using twin-screw extrusion technology, with rice flour as the main ingredient and white kidney beans, chickpeas, mulberry leaf extract, and soy protein isolate (SPI) as auxiliary ingredients; further, the hypoglycemic function of this rice was verified in mice. Optimization of the raw material formulation of the low GI composite extruded rice using the response surface method revealed the following addition percentages to be the best: white kidney beans, 39.3%; chickpeas, 30.4%; mulberry leaf extract, 4.6%; SPI, 1.0%. Among

引文格式:

王兴,江蕾,陈款,等.低GI复合挤压米原料配方优化及降血糖功能验证[J].现代食品科技,2024,40(10):32-39.

WANG Xing, JIANG Lei, CHEN Kuan, et al. Raw material formulation optimization of low GI composite extruded rice and verification of its hypoglycemic function [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(10): 32-39.

收稿日期: 2023-09-20

基金项目: 国家重点研发计划项目 (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)

作者简介: 王兴 (1999-), 男, 硕士, 研究方向: 谷物资源开发利用, E-mail: 2725986547@qq.com

通讯作者: 常宪辉 (1982-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 谷物资源开发利用, E-mail: 173820165@qq.com

these, white kidney beans and chickpeas significantly affected the GI of the raw materials of the composite extruded rice. The inhibition rates of the low GI composite extruded rice in the context of α -amylase and α -glucosidase activity were 33.4% and 53.2%, respectively. Experiments in diabetic mice showed that continuous consumption of the low-GI composite extruded rice could effectively reduce fasting blood glucose levels, maintain blood glucose balance, and significantly improve the glucose tolerance in a mouse model of streptozotocin-induced diabetes. This study provides ideas for research on extruded rice with high nutritional value and good quality so as to meet the low GI staple food needs of individuals with diabetes.

Key words: hypoglycemia; mixed beans; extruded rice; GI value; indigestion *in vitro*; animal experiments

全球糖尿病患者截至 2021 年已高达 5.37 亿, 我国糖尿病患者居全球首位^[1], 糖尿病分为 I 型和 II 型两种^[2]。其中, II 型糖尿病患者最多, 主要表现为胰岛素分泌减少或其功能作用受阻, 以及葡萄糖代谢障碍导致的血糖升高。近年来, 国内外把防治糖尿病的药物锁定在具有降血糖的天然产物上^[3]。作为治疗各种类型糖尿病的基础, 用天然物质替代较强副作用的药物来控制糖尿病, 日常饮食控制成为治疗糖尿病最基本的方法^[4]。

杂粮、杂豆中含有丰富营养成分和生理活性成分, 在营养方面, 不仅蛋白质、膳食纤维和微量元素含量丰富, 还含有矿物质、多糖等功能活性成分, 能够为人体提供优质营养源, 预防和辅助改善各种慢性病。其中大部分豆类的餐后血糖生成指数较低^[5], 如白芸豆, 其含有丰富的氨基酸、多糖、膳食纤维^[6]、抗性淀粉^[7]以及多酚^[8], 研究发现白芸豆多糖可降低糖尿病大鼠血糖、糖化血清蛋白水平, 提高胰岛素水平, 在治疗高血糖、高血脂等疾病上具有较高的潜力^[9]。还有鹰嘴豆 (Chickpea), 余梦玲^[10]将鹰嘴豆添加到面条中, 发现添加鹰嘴豆的面条能够促进血清胰岛素升高, 血清糖化蛋白和空腹血糖明显降低, 口服糖耐量与血脂水平有了改善, 长期食用能够有效缓解糖尿病患者病情。

植物源天然抗氧化分子被认为是治疗氧化应激和糖尿病的一种方法。桑叶及其提取物中富含多种生物活性物质, 如多酚、生物碱、蛋白质、多糖等, 其中 1-脱氧野尻霉素是桑叶中含量最高的生物碱, 是一种糖代谢酶抑制剂, 能够显著抑制多糖的降解, 达到降血糖的效果^[11]。

挤压米是以粉碎后的可食用原料粉经过挤压制粒得到的感官品质、蒸煮性能和蒸煮方法与普通大米接近的米粒状食品^[12], 其优势是可以作为主食能定时定量食用, 同时适合根据消费者需求进行原料复配。本试验选取白芸豆、鹰嘴豆、桑叶提取物以及大豆分离蛋白与大米粉复配, 采用挤压成型技术

将原料加工成挤压米, 优化了该挤压米的原料配方, 并进行了降血糖功能验证。为研究高营养、好品质的挤压米提供思路, 满足糖尿病人群对低 GI 值主食食品的需求。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

大米粉 (总淀粉: 76.5%; 蛋白质: 7.5%; 脂肪: 1.8%; 水分: 13.5; *m/m* 过 80 目筛), 河南黄国粮业股份有限公司; 鹰嘴豆 (总淀粉: 57.4%; 蛋白质: 20.6%; 脂肪: 3.9%; 水分: 12.1%, *m/m*), 鹰哥生物科技有限公司; 白芸豆 (总淀粉: 55.4%; 蛋白质: 23.6%; 脂肪: 1.9%; 水分: 13.3%, *m/m*), 昆明纳沃商贸有限公司; 大豆分离蛋白、桑叶提取物, 武汉申试化工科技有限公司; 葡萄糖 (分析级), 国药集团化学试剂有限公司; α -淀粉酶、胃蛋白酶、胰酶、链脲佐菌素 (STZ), 美国 Sigma 公司; α -葡萄糖苷酶, 上海源叶生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

JXFM110 锤式旋风磨, 上海嘉定粮油仪器有限公司; FMHE36-24 智能化双螺挤压设备, TG16-WS 高速离心机, 上海知楚仪器有限公司; En Spire™ 多功能酶标仪, 美国 Perkin Elmer 公司; 活力型血糖仪, 上海罗氏制药有限公司; 低温高速离心机, 德国 Eppendorf 公司

1.3 方法

1.3.1 原料预熟化处理

将原料白芸豆、鹰嘴豆粉碎过 80 目筛, 再将大米粉、鹰嘴豆、白芸豆分别经双螺杆挤压机挤压处理, 挤出物置于 70 °C 的流化床中干燥 10 min, 再于烘箱中 55 °C 烘干至水分含量 12.0%±0.5%, 粉碎至 80 目, 密封备用, 挤压机的加工参数参考董状

等^[13]的研究,并略加修改,设置为工艺条件为螺杆转速 110 r/min、挤压温度 120 °C、水分含量 22%、喂料速度 18 kg/h。

1.3.2 体外消化

每组样品平行消化模拟 3 次,具体操作步骤如下:

(1) 葡萄糖含量测定

参考郭敏亮^[14]的方法,略作修改,用 DNS (称取 3.25 g 3,5-二硝基水杨酸溶于少量水中,移入 500 mL 容量瓶,加 2 mol/L NaOH 溶液 162.5 mL,再加入 22.5 g 丙三醇,摇匀,定容至 500 mL,储存于棕色瓶放置在冰箱中待用)测定还原糖质量分数,试验步骤为:取 0.5 mL 样品液加 1.5 mL DNS,后于沸水浴中加热煮沸 5 min。立刻用流水使其冷却后再分别向各试管中加入蒸馏水 4 mL,混匀,放置 20 min 后在 540 nm 下测定吸光度。

(2) 总淀粉含量 (TS) 和游离葡萄糖 (FG) 的质量分数测定

根据 GB 5009.9-2016《食品安全国家标准食品中淀粉的测定》中酸水解法进行测定 TS 的质量分数。参考林丽钦^[15]的方法测定 FG 的质量分数。

(3) 体外模拟消化

参考 Ana 等^[16]的方法,略作修改。消化液配制见表 1。

表 1 消化液的配制

项目	质量浓度/(g/L)	SSF/mL	SGF/mL	SIF/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

模拟口腔消化:将 5 g 样品中加入 5 mL 口腔消化液 (SSF) 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 °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 (SGF) 液,再加入胃蛋白酶,用 1 mol/L HCl 将 pH 值调节至 3.0,在 37 °C 水浴中避光加热振摇 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 (SIF) 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 °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 °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。

(4) 样品血糖生成指数的计算

参考 Isabel 等^[17]的方法以水解时间和淀粉水解速率分别为横、纵坐标制作淀粉水解率曲线来绘制淀粉水解率曲线,并计算样品在 0~180 min 期间淀粉水解曲线下的面积 (AUC₁ 和 AUC₂),得出样品水解指数 (HI) 和血糖生成指数 (GI),公式 (1)、(2) 如下:

$$B = \frac{AUC_1}{AUC_2} \times 100\% \quad (1)$$

$$C = 39.71 + (0.549 \times B) \quad (2)$$

式中:

B——水解指数 (HI),是指被测食物体外水解曲线下面积与等量标准食物 (大米) 体外水解曲线下面积之比, %

C——体外模拟血糖生成指数 (GI)。

1.3.3 低GI大米原料配方筛选单因素试验

表 2 各原料添加量单因素试验方案 (wt.%)

序号	白芸豆	鹰嘴豆	桑叶提取物	大豆分离蛋白
1	25	20	2	0
2	30	25	4	1
3	35*	30*	6*	2*
4	40	35	8	3
5	45	40	10	4

注:百分比以大米粉为基准,*为单因素试验时固定不变的参数。

经过预试验和查阅文献^[5-11],初步确定了低 GI 大米使用原料为大米粉、白芸豆、鹰嘴豆、桑叶提取物和大豆分离蛋白。选择白芸豆、鹰嘴豆、桑叶提取物和大豆分离蛋白的添加量为单因素进行试验,具体方案如表 2。分别以未添加白芸豆、鹰嘴豆、桑叶提取物和大豆分离蛋白的为对照组。

1.3.4 低GI大米原料配方筛选响应面试验

在得到单因素试验结果后,可以确定大豆分离蛋白添加量 1%,再进行响应面试验。利用

Box-Behnken 方法, 以复合粉 GI 值为考察指标进行响应面正交试验, 因素水平如表 3 所示。

表 3 响应面分析因素水平表

水平	因素		
	A-白芸豆添加量/%	B-鹰嘴豆添加量/%	C-桑叶提取物添加量/%
-1	35	30	4
0	40	35	6
1	45	40	8

1.3.5 低GI复合挤压米对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的活性抑制

未消化样品的制备参考王静等^[18]的方法进行修改, 取粉碎后 2 g 低 GI 复合挤压米粉末 (80 目) 放入离心管中, 加入 20 mL 含有体积分数 0.1% HCl、70% 甲醇的溶液, 在 500 W 下超声 40 min, 在 5 000 r/min 下离心 10 min, 取上清液。如此重复操作, 合并两次过提液作为未消化样品提取液。

1.3.5.1 对 α -淀粉酶抑制率测定

根据 Tao 等^[19]的方法, 1.0 mL 样品提取液与 0.3 mL 的 α -淀粉酶 (5 U/mL, 溶于磷酸盐缓冲液, pH 值 6.7) 在 37 °C 下放置 15 min, 加 0.4 mL 1 wt.% 淀粉溶液在 37 °C 下反应 20 min。再加入 0.5 mL DNS 试剂, 沸水浴 5 min, 冷却至室温, 去离子水定容至 25 mL, 在 540 nm 处测量吸光度。用去离子水代替样品提取液作为空白组, 去离子水代替 α -淀粉酶溶液作对照组, 抑制率公式 (3) 如下:

$$D_1 = \frac{(A_{BG1} - A_{BCG}) - (A_{SG1} - A_{SCG})}{A_{BG1} - A_{BCG}} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

D_1 ——对 α -淀粉酶抑制率 (IR_1), %;

A_{BG1} ——空白组测得的吸光度;

A_{BCG} ——空白对照组测得的吸光度;

A_{SG1} ——样品组测得的吸光度;

A_{SCG} ——样品对照组测得的吸光度。

1.3.5.2 对 α -葡萄糖苷酶抑制率测定

根据 Yang 等^[20]的方法略作修改。将 5 μ L α -葡萄糖苷酶溶液 (5 U/mL, 溶于磷酸盐缓冲液, pH 值 6.7) 加入 20 μ L 样品溶液中, 与 0.05 mol/L 磷酸盐缓冲液配制成 500 μ L。在 37 °C 下孵育 20 min, 再加入 10 μ L 的 pNPG (10 mmol/L) 作为底物, 再 37 °C 孵育 30 min, 最后加入 500 μ L 的 1 mol/L Na_2CO_3 终止反应。在 405 nm 处测定吸收, 用磷酸

盐缓冲液代替样品提取液作为空白组, 用磷酸盐缓冲液代替 α -葡萄糖苷酶溶液作对照组, 抑制率公式 (4) 如下:

$$D_2 = 1 - \frac{A_{SG2} - A_{BG2}}{A_{CG}} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

D_2 —— α -葡萄糖苷酶抑制率 (IR_2), %;

A_{SG2} ——样品组测得的吸光度;

A_{BG2} ——空白组测得的吸光度;

A_{CG} ——对照组测得的吸光度。

1.3.6 小鼠试验

选择 6~8 周龄体重相近的 C57BL/6J 小鼠, 各组雌雄各半。饲养时保持标准的昼夜交替周期 (12 h:12 h), 温度 20~26 °C, 湿度 50%~70%, 试验期间小鼠摄食与饮水自由。在适应性喂养 7 d 后, 取 6 只小鼠做空白对照组, 投喂维持饲料; 剩余小鼠作为模型组投喂高脂饲料。8 周后模型组小鼠注射 50 mg/kg·BW 的链脲佐菌素溶液, 空白对照组注射同剂量的柠檬酸缓冲溶液, 连续注射 5 d。一周后断尾取血, 使用人类血糖仪测定小鼠的空腹血糖, 空腹血糖大于 11.1 mmol/L 的小鼠即为糖尿病小鼠, 然后将糖尿病小鼠随机分组为:

模型对照组: 继续投喂高脂饲料 10 周;

样品组: 投喂含有低 GI 复合挤压米的自制饲料 10 周。

将正常小鼠做为空白对照组继续投喂维持饲料 10 周, 试验期间每天观察摄食量、饮水量。

1.3.6.1 空腹血糖 (FBG)

每周利用采血针取小鼠尾静脉血样, 迅速使用血糖仪和血糖试纸测定小鼠空腹血糖 (即 0 h 血糖值), 用 $\varphi=75\%$ 酒精擦拭采血伤口进行消毒。

1.3.6.2 葡萄糖耐量测定

进行口服葡萄糖耐量试验前将所有小鼠禁食过夜 (12 h 以上)。将各组小鼠灌胃喂入 1.5 g/kg·BW 的 40% 葡萄糖溶液, 利用血糖仪测定第 0、30、60、90、120、180 分钟的血糖值。以时间为横坐标, 血糖值为纵坐标。每只小鼠对应时间点的血糖值连成一条曲线, 绘制 OGTT 曲线。用曲线下面积 (AUC_{OGTT}) 表示该小鼠的葡萄糖耐受能力。公式如下:

$$AUC_{OGTT} = \frac{0.5 \times E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + 0.5 \times E_6}{30} \quad (5)$$

式中:

$E_1 \sim E_6$ ——分别为 0、30、60、90、120、180 min 时的血糖值。

表 4 各原料添加量对GI值的影响

Table 4 Influence of additive amount of each raw material on GI value

白芸豆/%	GI 值	鹰嘴豆/%	GI 值	桑叶提取物/%	GI 值	大豆分离蛋白/%	GI 值
对照组	65.57 ± 0.50 ^a	对照组	64.31 ± 0.50 ^a	对照组	58.41 ± 0.55 ^a	对照组	56.70 ± 0.20
25	59.90 ± 0.50 ^b	20	59.44 ± 0.50 ^b	2	57.72 ± 0.59 ^{ab}	1	56.65 ± 0.22
30	58.29 ± 0.15 ^c	25	57.44 ± 0.15 ^c	4	57.20 ± 0.40 ^{abc}	2	56.57 ± 0.23
35	56.57 ± 0.14 ^d	30	56.57 ± 0.14 ^c	6	56.57 ± 0.21 ^{bc}	3	56.52 ± 0.21
40	54.50 ± 0.10 ^c	35	54.26 ± 0.10 ^d	8	57.11 ± 0.80 ^{bc}	4	56.44 ± 0.20
45	53.19 ± 1.00 ^f	40	53.36 ± 1.00 ^d	10	57.46 ± 0.50 ^d		

注: 数据为平均值 ± 标准差 (n=3), 同列中不同字母表示有显著性差异 (P<0.05)。下表同。

1.4 数据处理与分析

使用 Excel 2016、SPSS 13.0 进行数据处理, 利用 Origin 2021 进行图形的绘制。

2 结果与讨论

2.1 单因素试验

如表 4 所示, 与对照组相比添加白芸豆可显著影响体外消化预测 GI 值, 随着白芸豆添加量的增加, GI 值逐渐降低。其中对照组的 GI 值为 64.3, 当白芸豆添加量为 25% 时, GI 值为 59.4, 此时 GI 值下降比较明显, 当白芸豆添加量为 40% 时, GI 值为 54.44, GI 值下降了 15.3%, 降到 55 以下, 达到低 GI 水平, 继续添加白芸豆时, GI 值持续降低, 当白芸豆添加量为 45% 时, GI 值降到最低, 此时 GI 值为 52.48。可能是白芸豆中含有 α -淀粉酶抑制剂, 能够有效抑制淀粉水解成单糖, 所以消化体系中水解的单糖含量较低, 随着白芸豆添加量的增加, 抑制剂含量随之增加, 抑制效果也越强, 淀粉水解率明显降低。马艳丽等^[21]的研究报告也说明, 白芸豆 α -淀粉酶抑制剂粗提物能够抑制 α -淀粉酶活性, 从而降低淀粉水解速率。

GI 值也随着鹰嘴豆添加量的增加而显著降低, 其中对照组的 GI 值为 65.6, 当鹰嘴豆添加量为 20% 时, GI 值为 59.9, 此时 GI 值下降比较明显, 当鹰嘴豆添加量为 35% 时, GI 值为 54.5, GI 值降到 55 以下, 达到低 GI 水平, 此时 GI 值低于丁长河等^[22]研究的低 GI 值馒头 (添加 60% 鹰嘴豆粉)。继续增加鹰嘴豆添加量时, GI 值继续降低, 当添加量为 40% 时, GI 值为 53.2, 可能是鹰嘴豆中直链淀粉占比较高^[23], 由于直链淀粉是紧密排列的线性双螺旋结构, 不容易被淀粉酶酶解成单糖, 另外鹰嘴豆中抗性淀粉含量较高, 抗性淀粉具有良好的耐热性, 在挤压加工处理后仍然能抗酶解, 不容易被消化^[24], 同时鹰嘴豆中含有皂苷、黄酮等活性成分,

其相互作用会影响淀粉酶与淀粉的接触, 从而降低淀粉的水解程度^[25]。

随着桑叶提取物添加量的增加, GI 值先下降再上升。其中对照组的 GI 值为 58.4, 桑叶提取物添加量为 0~6% 时, GI 值不断下降, 当桑叶提取物添加量为 6% 时, GI 值最低为 56.6, 比对照组下降了 1.8, 桑叶提取物中含有黄酮、多酚、生物碱等多种生理活性物质, 其中生物碱是一种糖代谢酶抑制剂, 能够有效抑制多糖的降解, 从而抑制淀粉水解速率使 GI 值降低^[14]。大豆分离蛋白添加量对 GI 值的影响不显著。

2.2 原料配方优化的响应面试验

(1) 响应面试验

表 5 响应面试验结果

Table 5 Response surface test

试验号	A-白芸豆添加量/%	B-鹰嘴豆添加量/%	C-桑叶提取物添加量/%	GI 值
1	35	30	6	56.57
2	35	35	4	54.60
3	45	30	6	53.36
4	40	30	4	54.41
5	35	40	6	53.19
6	40	40	8	49.82
7	40	35	6	52.38
8	40	35	6	53.40
9	45	40	6	49.53
10	40	30	8	54.85
11	45	35	4	50.32
12	40	35	6	52.95
13	35	35	8	54.77
14	40	35	6	52.57
15	45	35	8	50.32
16	40	40	4	51.21
17	40	35	6	52.71

(2) 配方优化的模型方差分析和模型验证

表 6 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	62.25	9	6.92	36.16	<0.000 1	**
A- 白芸豆添加量	30.42	1	30.42	159.01	<0.000 1	**
B- 鹰嘴豆添加量	29.80	1	29.80	155.76	<0.000 1	**
C- 桑叶提取物添加量	0.08	1	0.08	0.40	0.548 4	
AB	0.05	1	0.05	0.26	0.622 8	
AC	0.01	1	0.01	0.04	0.851 4	
BC	0.84	1	0.84	4.38	0.074 8	
A ²	0.09	1	0.09	0.46	0.517 5	
B ²	0.20	1	0.20	1.02	0.346 2	
C ²	0.83	1	0.83	4.35	0.075 4	
残差	1.34	7	0.19			
失拟性	0.72	3	0.24	1.55	0.333	不显著
纯误差	0.62	4	0.15			
总离差	63.59	16				

注: ** 表示极显著 ($P < 0.01$)。

响应面试验结果如表 5 所示。用 Design-Expert 8.06 软件对试验结果进行三元二次回归拟合, 方差分析结果见表 6, 模型 P 值 < 0.01 , 模型极显著, 失拟项 P 值 $0.333 > 0.05$, 失拟项不显著, $R^2 = 0.978 9$, 即该模型可以用来解释响应值得变化, 故该模型可用于优化原料添加比例。其中 A、B 的 P 值小于 0.01, 说明白芸豆添加量和鹰嘴豆添加量对 GI 值的影响极显著。由 F 值可知, 这 3 个因素对 GI 值的影响次序为: 白芸豆添加量 $>$ 鹰嘴豆添加量 $>$ 桑叶提取物添加量。由模型得到的回归方程为:

$$Y = 52.80 - 1.95 \times A - 1.93 \times B - 0.097 \times C - 0.11 \times A \times B - 0.043 \times A \times C - 0.46 \times B \times C + 0.15 \times A^2 + 0.22 \times B^2 - 0.44 \times C^2$$

以复合粉 GI 值达到低 GI 水平为条件进行原料添加量优化, 得到复合挤压粉原料的最适质量分数添加量为: 白芸豆为 39.3%, 鹰嘴豆为 30.4%, 桑叶提取物为 4.6%, 大豆分离蛋白为 1.0%, 预测 GI 值为 54.59。在最适添加量下进行验证试验, 测得此时 GI 值为 54.26, 与模型预测值相近, 说明此模型对实际操作有一定的指导意义。

2.3 低GI复合挤压米对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的抑制

如表 7 所示, 普通白米对 α - 淀粉酶抑制率和 α -

葡萄糖苷酶无明显抑制效果, 低 GI 复合挤压米对 α - 淀粉酶和 α - 葡萄糖苷酶有明显抑制效果, 抑制率分别为 33.4% 和 53.2%, 说明低 GI 复合挤压米能有效抑制 α - 淀粉酶和 α - 葡萄糖苷酶活性, 从而降低淀粉水解率, 挤压米的体外消化试验结果也证实了这点。与挤压前复合原料相比, 低 GI 复合挤压米对 α - 淀粉酶和 α - 葡萄糖苷酶的抑制效果有所降低, 可能是挤压过程中加热作用破坏了白芸豆和鹰嘴豆的组织结构, 导致其酚类化合物在高温下的热降解反应的发生, 从而减少了原料中酚类物质的含量^[26], 而导致了 α - 淀粉酶和 α - 葡萄糖苷酶抑制率的降低。

表 7 不同样品对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的抑制
Table 7 Different sample pairs α -Amylase and α -Inhibition of glucosidase

项目	对 α - 淀粉酶抑制率/%	对 α - 葡萄糖苷酶抑制率/%
普通白米	1.3 ± 0.2^a	0.9 ± 0.1^a
挤压前复合原料	48.8 ± 0.3^c	59.7 ± 0.5^c
低 GI 复合挤压米	33.4 ± 0.4^b	53.2 ± 0.6^b

2.4 小鼠试验结果分析

2.4.1 低GI复合挤压米对糖尿病小鼠空腹血糖的影响

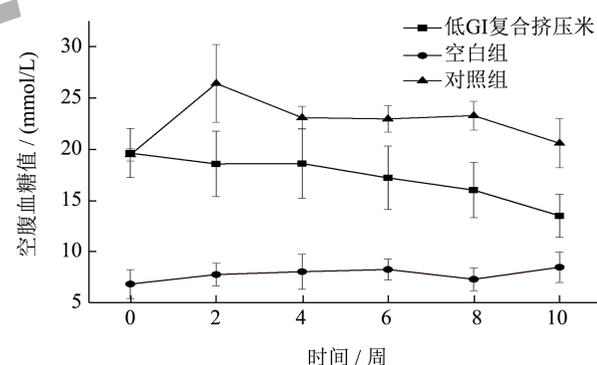


图 2 不同样品对糖尿病小鼠空腹血糖的影响

Fig.2 Effects of different samples on fasting blood glucose in diabetes mice

如图 2 所示, 为小鼠 10 周内每 2 周的空腹血糖检测结果, 在整个试验时间内, 空白组正常小鼠空腹血糖指数 (FBG) 变化不大, 一直在正常范围内波动。而在链脲佐菌素 (STZ) 诱导糖尿病小鼠中, 低 GI 复合挤压米组 FBG 不断下降, 对照组 FBG 先上升后下降, 但是最终值与初始 FBG 相近, STZ 诱导糖尿病小鼠开始时血糖值为 19.6 mmol/L 左右, 并且小鼠的空腹血糖值均显著高于空白组小鼠。饲养

2 周后, 与对照组相比, 低 GI 复合挤压米组 FBG 明显下降。饲养第 6~10 周时, 低 GI 复合挤压米组开始持续下降, 第 6 周时 FBG 为 16 mmol/L, 下降了 18.4%, 第 10 周时 FBG 达到最低为 13.5 mmol/L, 与饲养前相比下降了 31.1%, 说明持续食用低 GI 复合挤压米能够有效降低空腹血糖, 时间越长效果越佳, 由此表明, 低 GI 复合挤压米可以缓解 II 型糖尿病患者空腹高血糖症状。与田宝明^[28]低血糖指数挂面相比, 减低糖尿病小鼠的空腹血糖的效果更显著。

2.4.2 低GI复合挤压米对小鼠葡萄糖糖耐量的影响

如图 3 所示, 为不同样品对小鼠葡萄糖糖耐量的影响, 在 0~30 min 内, 三个组血糖值均持续升高, 在 30~120 min 内, 低 GI 复合挤压米组一直持续下降, 空白组和对照组 60 min 时已经趋于平衡, 血糖值无明显变化。餐后 0 min 时, 低 GI 复合挤压米组血糖值为 14.1 mmol/L, 对照组血糖值为 20.58 mmol/L, 说明长期食用低 GI 复合挤压米后, 能够有效控制餐后的瞬时血糖升高, 30 min 时, 三个组血糖均达到最大值, 此时低 GI 复合挤压米血糖值为 23.16 mmol/L, 对照组血糖值为 32.8 mmol/L, 与之相比下降了 29.4%, 120 min 时, 空白组血糖值与初始值无明显变化, 维持平衡, 对照组餐后血糖明显上升, 与 0 min 相比升高了 49.27%, 说明糖尿病患者不能食用高血糖的食品, 会导致血糖失去平衡, 低 GI 复合挤压米组血糖值为 14.63 mmol/L, 与初始值变化不显著, 与王向向^[29]不同面条和馒头的餐后小鼠血糖试验相比, 抑制餐后血糖升高的效果更显著。说明长期食用低 GI 复合挤压米组, 能够有效维持血糖平衡, 抑制血糖的增长, 更适于糖尿病患者食用。

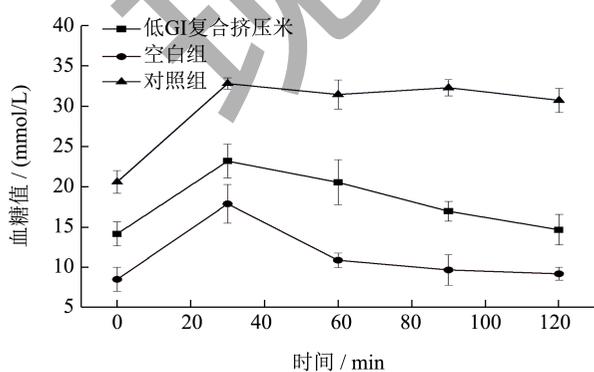


图 3 不同样品对糖尿病小鼠葡萄糖糖耐量的影响

Fig.3 Effects of different samples on glucose tolerance in diabetes mice

表 8 不同样品对AUC的影响

Table 8 Effect of different samples on AUC

样品名称	低 GI 复合挤压米	空白组	对照组
AUC	33.45 ± 6.00 ^b	23.58 ± 1.27 ^a	61.09 ± 1.90 ^c

葡萄糖糖耐量曲线下面积 (AUC) 能反映出葡萄糖代谢能力, 由表 8 可知, 对照组小鼠 AUC 水平显著高于空白组, 为空白组的 3 倍左右。与对照组相比, 低 GI 复合挤压米组显著降低了 STZ 诱导糖尿病小鼠的 AUC, 低 GI 复合挤压米组的 AUC 降低了 40%, 说明食用低 GI 复合挤压米后对 STZ 诱导糖尿病小鼠的糖耐量能力有明显改善作用, 对 II 型糖尿病患者能够提高机体糖耐量能力。

3 结论

研究了白芸豆、鹰嘴豆、桑叶提取物以及大豆分离蛋白四种原料复配对血糖生成指数的影响, 通过响应面试验得到的最适添加量的质量分数: 白芸豆为 39.3%, 鹰嘴豆为 30.4%, 桑叶提取物为 4.6%, 大豆分离蛋白为 1.0%, 此时该复合粉 GI 值为 54.26, 低于 55, 符合低 GI 要求。同时发现低 GI 复合挤压米对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的抑制率分别为 33.4% 和 53.2%。也验证了低 GI 复合挤压米对糖尿病小鼠的空腹血糖和葡萄糖糖耐量有显著改善, 说明长期食用低 GI 复合挤压米, 可以降低空腹血糖, 有效维持血糖平衡, 适于糖尿病患者食用。

参考文献

- [1] 王富军,王文琦.《中国2型糖尿病防治指南(2020年版)》解读[J].河北医科大学学报,2021,24(12):1365-1371.
- [2] 周莹,刘军彤,杨宇,等.中西医结合治疗糖尿病研究进展[J].辽宁中医药大学学报,2023,25(9):134-138.
- [3] 殷建华,李晋川,曹康,等.天然产物降血糖活性成分研究进展[J].成都医学院学报,2007,2(2):152-155.
- [4] 李秀娟.糖尿病患者饮食教育与观察[J].实用医学杂志,2008,24(22):3967-3968.
- [5] 刘芳,范志红,刘波,等.红小豆-粳米混合食物的碳水化合物体外消化速度研究[J].中国食品学报,2007,7(2):42-47.
- [6] TATJANA K, TEREZIJA G, MILICA K, et al. Dietary fibre content of dry and processed beans [J]. Food Chemistry, 2003, 80(2): 231-235.
- [7] 阚丽娇.不同豆类营养成分及抗氧化组分研究[D].南昌:南昌大学,2017.
- [8] 杜双奎,于修焯,李志西,等.食用杂豆乙醇提取物的体外

- 抗氧化活性研究[J].中国食品学报,2012,12(11):14-19.
- [9] MENG J X, BAI Z Y, HUANG W Q, et al. Polysaccharide from white kidney bean can improve hyperglycemia and hyperlipidemia in diabetic rats [J]. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 2020, 24: 100222.
- [10] 余梦玲.杂粮(豆)面条的研制及其对糖尿病小鼠糖脂代谢的影响[D].成都:西华大学,2022.
- [11] 杨玉珍.桑叶有效成分的提取、生物学功能及动物生产中的应用[J].饲料研究,2022,45(15):156-159.
- [12] 程力.挤压强化米的研究进展[J].农产品加工(创新版),2009,6:61-64.
- [13] 董状,吕庆云,沈汪洋,等.富硒发芽糙米及其挤压米制作工艺优化[J].食品科技,2021,46(6):174-180.
- [14] 郭敏亮.3,5-二硝基水杨酸比色法测定还原糖[J].江苏农学院学报,1990,2:40.
- [15] 林丽钦.山葵的硫葡萄糖苷酶活性及贮藏稳定性研究[J].食品科学,2005,1:100-102.
- [16] ANA-ISABEL M, LOTTI E, RETO P, et al. A standardised semi-dynamic *in vitro* digestion method suitable for food -an international consensus [J]. *Food & Function*, 2020, 11(2): 1702-1720.
- [17] ISABEL G, ALEJANDRA G, FULGENCIO S. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index [J]. *Nutrition Research*, 1997, 17(3): 427-437.
- [18] 王静,刘丁丽,罗丹,等.体外模拟消化对藜麦抗氧化活性、 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶抑制活性影响研究[J].中国粮油学报,2021,36(4):51-58.
- [19] TAO B, WANG Y, LI Y T, et al. Antioxidant and antidiabetic properties of tartary buckwheat rice flavonoids after *in vitro* digestion [J]. *Journal of Zhejiang University (Science B)*, 2016, 17(12): 941-951.
- [20] YANG X P, KONG F B. Evaluation of the *in vitro* α -glucosidase inhibitory activity of green tea polyphenols and different tea types [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2016, 96(3): 777-782.
- [21] 马艳丽,让一峰,赵伟,等.白芸豆 α -淀粉酶抑制剂对 α -淀粉酶抑制特性的研究[J].食品工业科技,2017,38(12):109-112.
- [22] 丁长河,张金叶,高雅君,等.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] 郑玲玲,裴凌鹏.鹰嘴豆黄酮对大鼠高血脂症形成过程中脂代谢的干预作用[J].中国民族医药杂志,2011,17(3):39-42.
- [24] 马宏,赵雅霞,杨美娟,等.浅析鹰嘴豆粉的营养功能性及其应用[J].农产品加工,2021(14):17-19,21.
- [25] VALENTINA S, PAUL A, ANDREW P, et al. Cauliflower by-products as a new source of dietary fibre, antioxidants and proteins in cereal based ready-to-eat expanded snacks [J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 87(4): 554-563.
- [26] JAISWAL A, GUPTA S, ABU-GHANNAM N. Kinetic evaluation of colour, texture, polyphenols and antioxidant capacity of Irish York cabbage after blanching treatment [J]. *Food Chemistry*, 2012, 131(1).
- [27] 田宝明.低血糖指数挂面的研制及其对糖尿病大鼠糖脂代谢影响的研究[D].重庆:西南大学,2015.
- [28] 王向向.粮食原料的筛选及其对糖尿病大鼠的影响[D].郑州:河南工业大学,2012.