

绿豆超微粉对面条血糖生成指数和品质特性的影响

伏静轩¹, 柴智², 王紫印³, 梁静¹, 盘赛昆^{1*}, 李莹^{2*}

(1. 江苏海洋大学海洋食品与生物工程学院, 江苏连云港 222005) (2. 江苏省农业科学院农产品加工研究所, 江苏南京 210014) (3. 江苏大学食品与生物工程学院, 江苏镇江 212003)

摘要: 为改善绿豆面条品质特性, 开发低血糖生成指数 (Glycemic Index, GI) 的豆类主食, 该研究利用不同比例的绿豆超微粉和小麦粉复配制备了面条, 对面条的感官品质、流变学特性、蒸煮特性、质构、微观结构、淀粉组分等进行评价, 同时通过人群试验测定了面条的 GI 值。研究表明, 当绿豆超微粉添加量为 30% 和 45% 时, 面条的感官评分较高; 流变学分析得到绿豆超微粉添加量愈高, 面团的储能模量 (G') 和损耗模量 (G'') 就愈高, 具有一定的粘弹特性。在绿豆超微粉添加量 45% 时, 淀粉颗粒被紧密包裹, 面条内部微观结构较为致密、均匀, 硬度为 11.58 N, 弹性为 1.35 mm, 熟断条率为 4.34%, 蒸煮品质较好。绿豆超微粉的添加可有效提高面条中慢消化淀粉和抗性淀粉的含量, 降低了面条的预估血糖生成指数 (Estimated Glycemic Index, eGI) 值; 通过人群血糖测试得出 45% 绿豆超微粉添加量的面条 GI 值为 49.93, 为低 GI 食品。本研究对于绿豆精深加工技术的升级与低 GI 健康主食的开发具有重要的意义。

关键词: 绿豆; 面条; 流变学特性; 质构; 淀粉; 血糖生成指数

文章编号: 1673-9078(2026)4-217-225

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.4.0032

Effects of Mung Bean Ultrafine Powder on the Glycemic Index and Quality Characteristics of Noodles

FU Jingxuan¹, CHAI Zhi², WANG Ziyin³, LIANG Jing¹, PAN Saikun^{1*}, LI Ying^{2*}

(1. College of Marine Food and Bioengineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China)
(2. Institute of Agro-product Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)
(3. School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: To improve the quality characteristics of mung bean noodles and develop a legume staple food with a low glycemic index (GI), noodles were prepared using different proportions of mung bean ultrafine powder and wheat flour. The sensory quality, rheological properties, cooking characteristics, texture, microstructure, and starch components of the noodles were evaluated, and the GI value of the noodles was determined through human testing. The results indicated that the sensory score of the noodles was higher when 30% or 45% mung bean ultrafine powder was added. Rheological analysis showed that a higher proportion of mung bean ultrafine powder contributed to higher storage modulus (G') and higher loss modulus (G'') of the dough, indicating certain levels of viscoelasticity. When 45% green bean ultrafine powder was used, the starch particles were tightly wrapped, and the internal microstructure of the noodles was relatively dense and uniform, with a hardness of 11.58 N, elasticity of 1.35 mm, cooked breakage

引文格式:

伏静轩,柴智,王紫印,等.绿豆超微粉对面条血糖生成指数和品质特性的影响[J].现代食品科技,2026,42(4):217-225.

FU Jingxuan, CHAI Zhi, WANG Ziyin, et al. Effects of mung bean ultrafine powder on the glycemic index and quality characteristics of noodles [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(4): 217-225.

收稿日期: 2025-01-08 ; 修回日期: 2025-02-14 ; 接受日期: 2025-02-14

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目 [CX (23) 1014]; 江苏省高等学校自然科学研究重大项目 (21KJA240004)

作者简介: 伏静轩 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与功能性食品, E-mail: 2596508122@qq.com

通讯作者: 盘赛昆 (1974-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品加工与功能性食品, E-mail: pskgx@163.com ; 共同通讯作者: 李莹 (1981-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 食品营养与健康, E-mail: hijoly@163.com

rate of 4.34%, and satisfactory cooking quality. The addition of mung bean ultrafine powder effectively increased the content of slowly digestible starch and resistant starch in the noodles and reduced the estimated GI value of the noodles. Human blood glucose testing revealed that the GI value of noodles with 45% mung bean ultrafine powder was 49.93, classifying the noodles as low GI food. This study is of great significance for upgrading the deep processing technology of mung beans and developing healthy low-GI staple foods.

Key words: green beans; noodles; rheological properties; texture; starch; glycemic index

目前,全球糖尿病患者已达到 5.37 亿,我国糖尿病患者也超过 1.43 亿。除遗传因素与个人代谢紊乱问题外,不健康饮食习惯也是造成糖尿病的主要原因之一,糖尿病患者大多具有餐后血糖水平持续较高的特点^[1]。低血糖生成指数(Glycemic Index, GI)食品指的是 GI 值 ≤ 55 的食品,据研究报道,低 GI 食品具有消化缓慢、餐后血糖峰值低的特点,可有效降低 2 型糖尿病患者的餐后血糖水平^[2]。国家卫健委在《中国居民膳食指南》(国卫办食品发〔2016〕12 号)中明确设定成人每日添加糖摄入量上限 ≤ 50 g,该指导性文件为低 GI 食品研发提供了良好的发展环境。据《2024 中国健康食品产业蓝皮书》数据显示,在此政策驱动下,2021~2023 年间低 GI 食品市场年复合增长率达 37.8%,预计 2025 年功能性健康食品市场规模将突破 5 000 亿元。

绿豆 [*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek] 是豆科豇豆属一年生直立草本植物,膳食纤维高达 12.62%,具有优异的糖脂代谢调节功效,是血糖异常人群的友好食品^[3],也是低 GI 健康食品的理想原料来源。作为传统特色经济作物,我国绿豆年种植面积稳定在 400 万亩以上^[4],且品种资源丰富。淀粉是绿豆中主要的碳水化合物,主要分为抗性淀粉和非抗性淀粉。其中抗性淀粉对改善食物引起的血糖波动和胰岛素血症反应有明显作用^[5]。血糖生成指数反映的是食物经人体内消化后引发血糖变化的能力,机体在摄入不同类型的食物时,会引起相应的血糖反应^[6]。研究发现,绿豆粉与香蕉粉复配的混合饼干的 GI 值为 33.2^[7],加入绿豆淀粉挤压制作的粉丝中多酚类物质较多,对血糖更加友好^[8]。《成人糖尿病食养指南(2023 年版)》中建议,全谷物或杂豆类等低 GI 食物应占主食摄入量的三分之一以上。

超微粉碎是通过碾磨、剪切等物理粉碎方法充分破坏原料原本结构,可将原料加工至微米级别的粉末^[9],能够有效改善原料特性,使其适应加工需求。经过超微粉碎处理后的豆类粉末在淀粉结构、理化特性等方面有显著改变^[10]。目前国内的绿豆加工方式还较为单一,大多是简单复配制成主食产品,市场中绿豆加工制品的种类和份额较少,已有绿豆类产品存在

功效成分含量低、产品成型难口感差、活性成分生物利用率低、营养价值与功能性未能充分发挥、并且缺乏明确功能评价等问题,以低 GI 为导向的绿豆健康产品加工研究更是鲜见报道。因此,围绕绿豆精深加工技术升级与低 GI 健康食品开发的迫切需求,本研究拟通过添加绿豆超微粉,提高绿豆面条的品质特性并降低面条的 GI 值,同时通过体外仿真消化和人群血糖实验,验证其降低血糖生成指数的效果,实现绿豆的高值化运用。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

绿豆(苏绿 7 号),江苏省农业科学院经济作物研究所;小麦粉、盐,市售;DNS 试剂,上海源叶生物有限公司;氢氧化钠,国药集团有限公司; α -淀粉酶($5 \text{ U}\cdot\text{mg}^{-1}$)、胃蛋白酶($250 \text{ U}\cdot\text{mg}^{-1}$)、胰酶($100 \text{ U}\cdot\text{mg}^{-1}$)、糖化酶($100 \text{ U}\cdot\text{mg}^{-1}$),上海源叶有限公司。

1.2 仪器与设备

TYG-DK 型双螺杆杂粮面条机,天阳机械制造有限公司;XDW-6A 型超微粉碎仪,济南峰许机械科技有限公司;ZJ-260 真空包装机,上海悦联包装器材有限公司;EVO-LS10 型扫描电子显微镜,德国 ZEISS 有限公司;TMS-TOUCH 型质构仪,美国 FTC 有限公司;ML204 型电子天平,梅特勒-托利多有限公司;EPOCH 微孔板酶标仪,美国伯腾仪器有限公司;DGG-9140A 型恒温干燥箱,上海森信试验仪器有限公司;Discovery HR10 流变仪,美国 TA 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 绿豆面条的制作

将绿豆打碎并过 80 目筛,对未通过 80 目筛的物料进行重复粉碎,直至物料全部通过 80 目筛后,再进行超微粉碎 10 min(粉体粒径为 $24.77 \mu\text{m}$),与小麦粉混合,绿豆粉添加量质量分数分别为 0%、15%、30%、45%、60% 加入质量分数为 1.5% 的盐溶液进行和面,成团后醒发 20 min。将醒发后的面团放入

TYG-DK 型双螺杆杂粮面条机中制备面条, 35 ℃烘干 10 min 后, 自然冷却至室温。真空封装后, 置于 2~4 ℃的冰箱中储藏备用。

1.3.2 扫描电镜分析

使用扫描电子显微镜 (ZX-01) 对绿豆面条进行观察, 可以直接观察面条表面形貌特征与成像。分别截取小麦面条和绿豆粉添加量质量分数为 (15%、30%、45%、60%) 的绿豆面条, 将其横截面向上固定在导电胶上, 喷金 40 s, 仪器加速电压为 10.0 kV, 电流为 10 mA, 分别在 500 倍和 1 000 倍的扫描电镜下观察 5 组面条横截面的表现形态。

1.3.3 质构测定

参考陈霞等^[11]的方法, 并稍作修改。将面条煮制内部没有白芯后捞出, 选取三根面条切成 6 cm, 并放置在载物台上。用 25 N 的力量感应元, 检测速度为 60 mm·min⁻¹, 设置起始力 0.1 N、放置时间为 5 s, 探头回升到样品表面高度为 10 mm。

1.3.4 流变学特性分析

参考马丽萍等^[12]的方法并稍作修改, 采用动态流变仪对面团样品的流变学特性进行表征。将 2.0 g 面团放置在 MARS 60 型流变仪上间距 3 mm、直径 20 mm 的平行板上, 使用 40 mm 的夹具, 在 0.1% 的恒定剪切应变 (线性粘弹性范围内) 条件下, 设置扫描频率范围为 0.01~10 Hz, 测定面团样品的储能模量 (G') 和损耗模量 (G'')。

1.3.5 蒸煮特性测定

挑选 20 根面条, 将长度切为 20 cm, 准确称量样品 (m_1) 放入 500 mL 的沸水中煮至内部没有白芯。根据面条的断条数 (n) 计算出断条率并称重 (m_2)。把煮制面条的面汤倒入 500 mL 容量瓶中, 使用纯水定容, 摇匀后, 量取 100 mL 于 250 mL 恒重烧杯 (m_0) 中, 将烧杯放在电炉上加热煮沸至烧杯中大部分水蒸发完后, 使用 105 ℃烘箱烘至恒重 (m_3)。计算公式如下:

$$D = \frac{n}{20} \times 100\%$$
 (1)

$$X = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\%$$
 (2)

$$S = \frac{(m_3 - m_0) \times 5}{m_1} \times 100\%$$
 (3)

式中:
 D ——断条率, %;
 n ——断条数, %;
 X ——吸水率, %;
 S ——蒸煮损失率, %。

1.3.6 绿豆粉添加量对于感官评价的影响

参考 GB/T 35875-2018《粮油检验 小麦粉面条加工品质评价》中的方法进行适当调整, 感官评分小组成员由 15 名经过培训且具有科研经验的人员组成, 感官评价得分以平均值进行统计分析。探究绿豆粉质量分数添加量 (0%、15%、30%、45%、60%) 对绿豆面条感官评价的影响。评价项目与评分细则如表 1 所示。

表 1 感官评价项目表		
Table 1 Sensory evaluation item list		
项目	权重	评分标准
色泽	5	颜色鲜亮 4.3~5 分; 亮度一般 3~4.3 分; 色泽灰暗 1~3 分
外观形态	20	表面光滑细腻、形状规整 17~20 分; 表面较为光滑、无变形 12~16 分; 表面粗糙、膨胀、变形 1~11 分
韧性	25	弹性较好 21~25 分; 弹性一般 15~21 分; 弹性较差 1~15 分
粘性	25	不粘牙 21~25 分; 略粘牙 15~21 分; 粘牙 1~15 分
坚实度	20	硬度适宜 17~20 分; 略软或硬 12~17 分; 过软或过硬 1~12 分
食味	5	有香气, 无异味 4.3~5 分; 无异味, 无香 3~4.3 分; 有异味 1~3 分

1.3.7 淀粉组分分析

参考文献报道^[13]的方法, 并稍作修改。称量 0.20 g 样品置于 20 mL 的醋酸钠缓冲液中 (pH 值 5.2, 0.5 mol·L⁻¹), 沸水浴糊化 30 min, 冷却至室温后加 5 mL 混合酶液 (含有 290 U·mL⁻¹ 猪胰 α -淀粉酶和 20 U·mL⁻¹ 葡萄糖苷酶), 放置在 37 ℃恒温摇床中, 设置 190 r·min⁻¹ 振荡培养, 在 0、20、60、90、120、180 min 时取上清液, 测定葡萄糖含量, 分别取 0.1 mL 水解液加入 1 mL 无水乙醇进行灭酶处理, 使用葡萄糖试剂盒测定还原糖含量。总淀粉含量参考 GB 5009.9-2016《食品安全国家标准 食品中淀粉的测定》中酸水解法测定。

$$B_1 = \frac{G_{20} - G_0}{T_s} \times 0.9 \times 100\%$$
 (4)

$$B_2 = \frac{G_{120} - G_{20}}{T_s} \times 0.9 \times 100\%$$
 (5)

$$B_3 = 1 - B_1 - B_2$$
 (6)

式中:
 G_0 ——初始还原糖含量, mg;
0.9——葡萄糖换算系数;
 B_1 ——快消化淀粉 (RDS) 含量, %;

B_2 ——慢消化淀粉 (SDS) 含量, %;

B_3 ——抗消化淀粉 (RS) 含量, %;

G_{20} ——酶解 20 min 时葡萄糖质量, mg;

G_{120} ——表示酶解 120 min 时葡萄糖质量, mg;

T_s ——底总糖含量, mg。

1.3.8 预估血糖生成指数测定

参考文献报道^[13]的方法并稍作修改。按照陈元震^[14]的方法配置模拟唾液, 称取 1 g 样品与 5 mL 模拟唾液混匀, 将 pH 值调节为 6.8, 振荡 2 min, 温度设置为 37 °C。称取 0.4 g 经过模拟口腔加工的样品, 放入 50 mL 离心管中, 在离心管中加入 10 mL 体积分数为 0.5% 的胃蛋白酶溶液和 5 颗玻璃珠, 加 50 mL 肠道酶液 (α -淀粉酶、290 U·mL⁻¹ 猪胰酶、20 U·mL⁻¹ 葡萄糖苷酶) 混匀后放入振荡水浴锅中, 温度设置为 37 °C, 以白面包为参考食品, 在 0、30、60、90、120、150、180 min 时取上清液测其中葡萄糖浓度, 计算样品淀粉水解率。

$$E = \frac{AUC_1}{AUC_2} \times 100\% \quad (7)$$

$$eGI = 0.862E + 8.1981 \quad (8)$$

式中:

E ——水解率 (HI), %;

AUC_1 ——样品食品曲线下面积;

AUC_2 ——参照食品曲线下面积。

1.3.9 血糖生成指数测定

参照 WS/T 652-2019《食物血糖生成指数测定办法》中的方法进行测定, 测定前三日受试者正常饮食; 测定前一日避免摄入高膳食纤维及高糖食物, 晚上 22 时开始禁食; 测定当日避免剧烈运动, 测试开始前 10 min 受试者需静坐休息。采取完空腹血样后, 受试者在 10 min 内进食完全部受试物。从第一次进食时间开始计时, 分别于餐后 15、30、45、60、90 和 120 min 于肘静脉采集血样 3 mL, 分离血清并测定血糖。每位志愿者应食用 2 次葡萄糖, 1 次绿豆面条, 在食用葡萄糖的测试中, 志愿者应摄入 50.0 g 葡萄糖, 绿豆面条的测试中, 志愿者应摄入 83.9 g 绿豆面条 (其中含有 50.0 g 可利用碳水化合物)。计算血糖应答曲线下面积增幅, 单位为 (mmol·min/L)。血糖应答曲线下面积增幅以及 GI 值计算公式如下:

$$\Delta C_t = C_t - C_0 \quad (9)$$

$$GI_n = IAUC_1 / IAUC_2 \quad (10)$$

$$GI = \sum GI_n / n \quad (11)$$

式中:

ΔC_t ——餐后血糖变化值, mmol·L⁻¹;

C_t ——某时间点血糖浓度, mmol·L⁻¹;

C_0 ——为空腹血糖基础值, mmol·L⁻¹;

GI_n ——受试者个体得出的 GI 值;

$IAUC_1$ ——待测食物血糖曲线下面积;

$IAUC_2$ ——2 次参考食物血糖曲线下面积的平均值;

GI ——待测食物 GI 值;

$\sum GI_n$ ——受试者得出的 GI 值之和;

n ——受试者个体数。

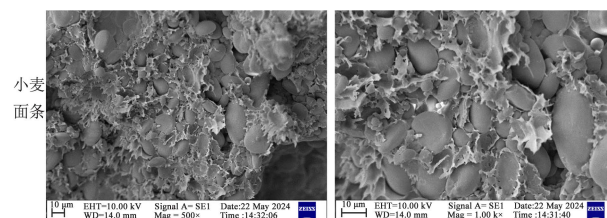
1.4 数据处理

实验数据以平均值 $\pm$ 标准差 ($\bar{X} \pm SD$) 表示, 以上实验除扫描电镜分析外, 其余实验测定 3 组平行。采用 SPSS 20.0 统计软件和 Origin 2018 软件进行数据分析与图表制作; 使用 Duncan 多重比较法进行差异显著性分析, 实验数据 $P < 0.05$ 表示差异显著, 具有统计学差异。

2 结果与讨论

2.1 绿豆超微粉添加量对面条微观结构的影响

由图 1 可以看出, 小麦面条的淀粉颗粒在面筋网络外裸露较多, 淀粉颗粒表面较为光滑, 因此容易被人体消化吸收, 引起血糖水平快速上升。随着绿豆超微粉的添加, 面筋网状结构包裹淀粉颗粒愈加紧密, 在绿豆超微粉添加量高于 30% 时几乎没有游离在外的淀粉颗粒, 淀粉与面筋蛋白结构结合得十分紧密, 可能有利于延缓淀粉的消化速度^[15]。在绿豆超微粉添加量为 45% 时, 面条微观结构更为致密、均匀, 这可能使得面条消化更加缓慢。另外, 随着绿豆超微粉的添加, 淀粉之间的间距逐渐变小, 这可能是因为超微粉碎处理导致绿豆中的淀粉、多糖和酚酸等物质溶出, 与小麦淀粉自组装使得结构更加紧密^[16]。这也解释了 2.2 中面条因为绿豆超微粉的添加而内聚性升高的原因, 与此同时, 面条表面结构逐渐紧密, 对水分子的结合能力可能呈现降低趋势, 这与蒸煮特性研究中吸水性的结果一致。



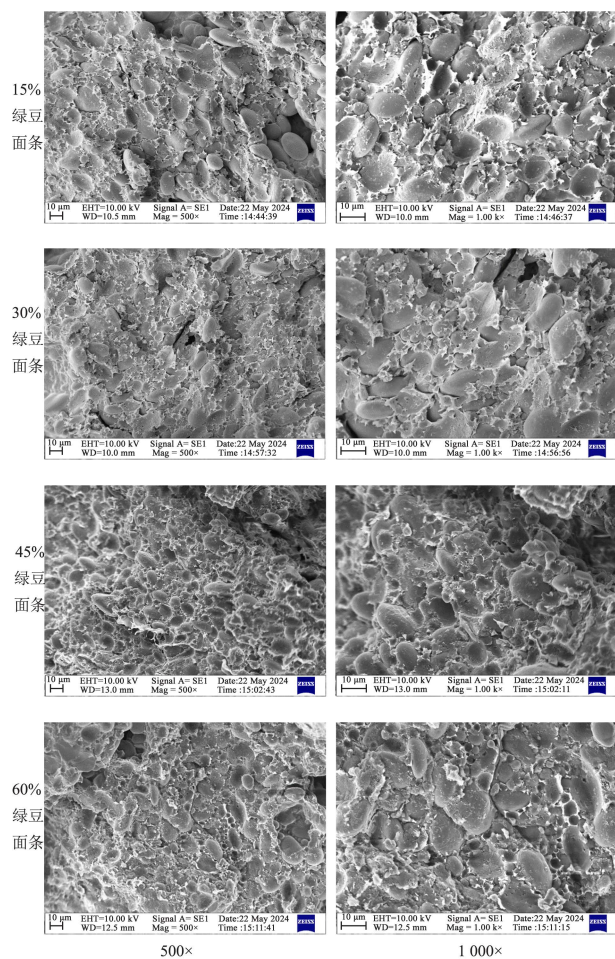


图1 小麦面条与绿豆面条的扫描电镜图

Fig.1 Scanning electron microscopy images of wheat noodles and mung bean noodles

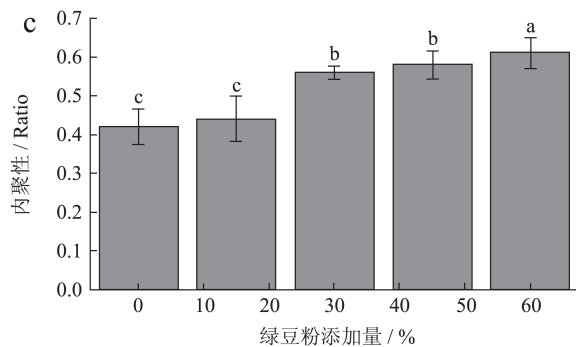
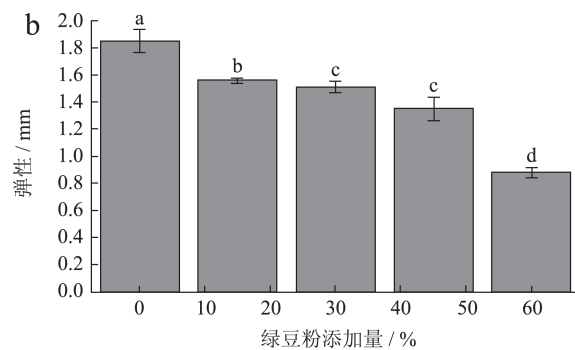
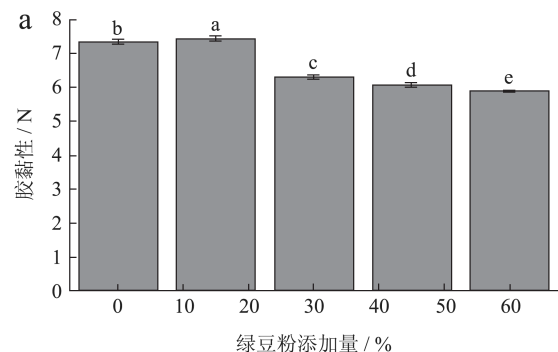
2.2 绿豆超微粉添加量对面条质构性质的影响

由图2可知,绿豆超微粉添加量对于面条的硬度、粘附性、内聚性、弹性、胶黏性均有显著影响。图2a显示面条的胶黏性在绿豆超微粉添加量15%时最高,为7.44 N,而后随着绿豆超微粉添加量的增加而降低。面条的弹性随着绿豆超微粉的添加而逐渐降低,弹性代表面条在受到外力时恢复到原来状态的能力,面条的弹性大,代表面条不容易容易断裂^[17]。随着绿豆超微粉添加量的增多,面条的硬度和内聚性逐渐升高,此时面条不容易形变,但受到外力时易折断。当绿豆超微粉添加量为60%时面条的硬度和内聚性最大,为别为13.64 N和0.61。这是因为绿豆粉经过超微粉碎处理后,粒径减小,比表面积变大,使得粉体与外界接触面更多,摩擦力加大,所以与小麦粉结合的更加紧密^[18]。

2.3 绿豆粉添加量对面团流变学特性的影响

通过流变仪对绿豆混粉面团进行频率扫描测试

得到储能模量(G')和损耗模量(G'')。其中储能模量(G')和损耗模量(G'')分别代表面团的弹性和粘度^[19]。由图3可知,随着绿豆超微粉的添加,面条的 G' 和 G'' 值逐渐变大, G' 值始终高于 G'' 值,表明面团体系为固态,具有粘弹特性。这可能是因为绿豆蛋白通过疏水相互作用与小麦谷蛋白的重复结构域结合,形成异源蛋白聚集体,提升了面筋网络密度^[20]。另外,多糖可以与蛋白质通过静电相互作用或氢键结合,形成更复杂的网络结构^[21]。Zhang等^[22]发现,膳食纤维具有亲水性,可以与面团中的淀粉相互作用形成复合物,从而影响面团的面筋结构,使得面团的黏弹性得到提高。高秀薇等^[23]发现不溶性纤维能够提高面团的粘弹性。由于绿豆中的膳食纤维含量高于小麦,随着绿豆粉超微的添加,面条中膳食纤维含量随之增多,这可能也是绿豆超微粉添加使得面团粘弹性上升的原因之一。



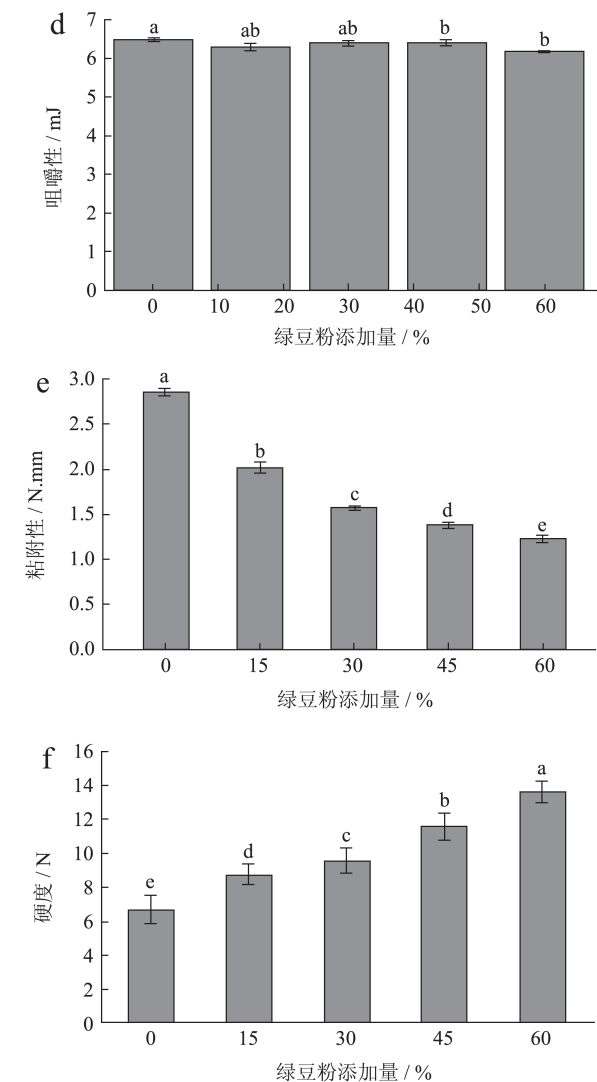


图2 绿豆超微粉添加量对面条质构的影响

Fig.2 The effect of green bean ultrafine powder addition on noodle texture

注: 不同小写字母表示显著性差异, ($P<0.05$), 下同。

2.4 绿豆超微粉添加量对面条蒸煮特性的影响

由表2可知,随着绿豆超微粉添加量的增多,面条熟断条率从1.03%上升到10.62%,说明添加绿豆超微粉会使面条断条率升高。2.2的结果显示面条的弹性随着绿豆超微粉的添加而降低,相应的面条失去弹性而硬度增加,导致面条恢复性减弱,容易折断,所以断条率升高。除此之外,小麦粉含量降低导致面筋质的含量减少,这也使得面条熟断条率增加^[24]。绿豆面条的吸水率随着绿豆超微粉的添加而降低,这可能是因为绿豆中不溶性纤维含量较高,且绿豆超微粉在成型时需要结合相对于小麦粉更多的水分,致使面条水分相对饱和,面条吸水率降低^[25]。在绿豆超微粉添加量为45%时,面条熟断条率为4.34%,符合GB/T 40636-2021《挂面》中断条率 $\leq 5.0\%$ 的要求。

当绿豆超微粉添加量达到60%时,面条的熟断条率为10.62%、蒸煮损失率为3.82%,蒸煮品质较低。

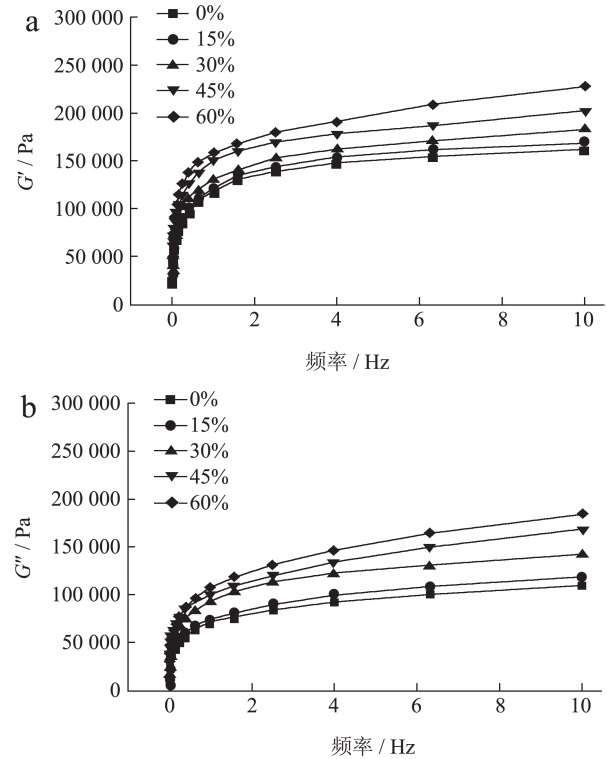


图3 绿豆超微粉添加量对面团流变学特性的影响

Fig.3 The effect of green bean ultrafine powder addition on the rheological properties of dough

注: (a) 储能模量; (b) 损耗模量。

表2 绿豆超微粉添加量对面条蒸煮特性的影响 (%)

Table 2 The influence of mung bean ultrafine powder addition on the cooking characteristics of noodles (%)

绿豆超微粉含量/%	熟断条率	吸水率	蒸煮损失率
0	1.03 ± 0.08 ^e	169.43 ± 0.19 ^e	2.19 ± 0.09 ^d
15	1.98 ± 0.05 ^d	162.78 ± 0.22 ^d	2.42 ± 0.05 ^c
30	2.59 ± 0.05 ^c	158.91 ± 0.18 ^c	2.71 ± 0.09 ^b
45	4.34 ± 0.09 ^b	146.31 ± 0.31 ^b	3.02 ± 0.05 ^a
60	10.62 ± 0.05 ^a	138.92 ± 0.12 ^a	3.82 ± 0.04 ^e

注: 不同小写字母表示显著性差异, ($P<0.05$), 下同。

2.5 绿豆粉添加量对面条感官品质的影响

由表3和图4可知,面条中绿豆超微粉添加量在高于15%时,添加量愈高,色泽评分愈高。感官评价总分和表观形态评分绿豆超微粉添加量为30%时最高,分别为84.5分和17.5分,但是当绿豆超微粉添加量超过30%以上时,面条的感官评价总分和表观形态评分开始下降。这是因为少量添加绿豆粉可提高面条的硬度,有利于保持面条形状,而过量添加绿豆超微粉使得面条表面变得粗糙,表观形态评分下降。面条

的韧性随着绿豆超微粉的添加整体呈下降趋势，面条的坚实度评分在 45% 添加量时最高，为 18.2 分，但是在 60% 添加量时降低至 15.3 分，这是因为过多添加绿豆超微粉使得面条过硬，同时弹性和适口性下降。整体感官评分在绿豆粉添加量为 60% 时最低，为 71.4 分。这可能是绿豆超微粉添加过多使面团的拉伸性能下降、面团筋力变弱^[12]而导致的。综合考量，绿豆超微粉添加量为 45% 时，可在尽可能提高绿豆粉添加量的同时，保证面条有相对良好感官品质。

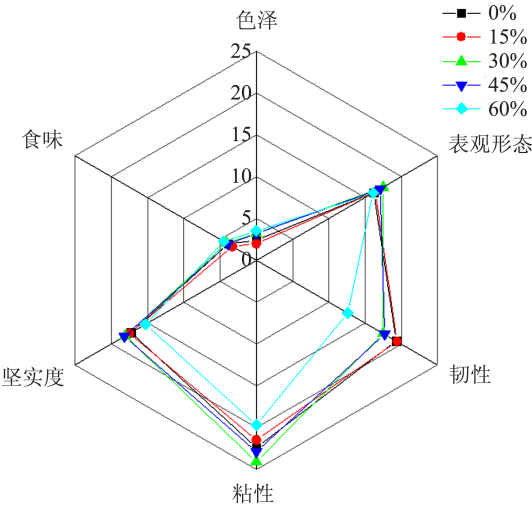


图 4 绿豆超微粉添加量对面条感官品质的影响
Fig.4 The effect of green bean ultrafine powder addition on the sensory quality of noodles

2.6 绿豆面条淀粉组分分析

添加不同比例绿豆超微粉对面条中的快消化淀粉、慢消化淀粉和抗性淀粉的影响由图 5 所示。其中快消化淀粉的质量分数含量随着绿豆超微粉的添加从 69.43% 下降到 40.98%，慢消化淀粉的质量分数含量随着绿豆超微粉的添加从 21.27% 下降至 16.09%，抗性淀粉含量则随着绿豆超微粉的添加从 9.3% 上升至 42.93%，说明绿豆超微粉的添加有利于控制餐后血糖。这可能是因为绿豆中慢消化淀粉、抗性淀粉含量较高，且绿豆抗性糊精具有较强的抗消化能力，能够延缓淀

粉在体内的消化速度^[26-28]。另外，超微粉碎处理通常能够有效剪切支链淀粉分枝，分子链段长的直链淀粉糊化后形成淀粉糊中由于分子间斥力较大难以聚集，而分子链段适中的直链淀粉更容易回生形成抗性淀粉^[29,30]。

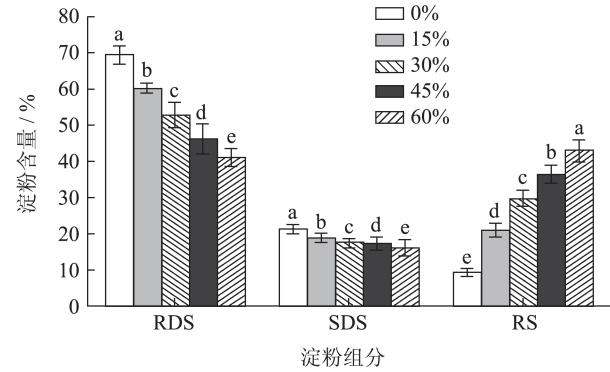


图 5 不同绿豆超微粉添加量对面条淀粉组分的影响
Fig.5 The effect of different amounts of mung bean ultrafine powder on the starch components of noodles

2.7 绿豆面条预估血糖生成指数分析

由表 4 和图 6 可知，绿豆面条的水解率与预估血糖生成指数（Estimated Glycemic Index, eGI）均显著低于普通小麦面条，且绿豆超微粉添加量越高，绿豆面条的水解率和 eGI 值越低，当绿豆超微粉添加量达到 30% 时，绿豆面条的 eGI 为 52.15，AUC 为 6195，HI 为 50.99。绿豆超微粉添加量为 60% 的绿豆面条的 eGI 最低，为 42.55。GI≤55 则为低 GI 食品，因此 30% 以上添加量的绿豆面条具有低 GI 特性^[31]。随着绿豆超微粉的添加，绿豆面条的抗性淀粉含量升高，快消化淀粉含量减少。抗消化淀粉能够延缓葡萄糖吸收速率，而快消化淀粉增加血糖波动，这可能是绿豆面条 eGI 值降低的原因之一。此外，绿豆的蛋白质含量高于小麦，而糊化过程中蛋白质网络分子形成促进淀粉-蛋白质聚集体的形成，其高密度结构阻碍了淀粉的水解，能够降低淀粉酶的活性，从而降低消化速率^[32]。因此，绿豆面条较普通小麦面条的淀粉消化更缓慢且释放葡萄糖速率更低，有利于控制血糖生成^[33]。

表 3 绿豆超微粉添加量对于感官评价的影响

Table 3 The effect of green bean ultrafine powder addition on sensory evaluation							
绿豆粉含量/%	色泽	表观形态	韧性	粘性	坚实度	食味	总分
0	2.4 ± 0.72 ^c	16.2 ± 0.41 ^d	19.3 ± 0.71 ^a	22.4 ± 0.47 ^c	17.3 ± 0.25 ^b	3.9 ± 0.12 ^b	81.5 ± 0.93 ^b
15	2.00 ± 0.41 ^d	16.4 ± 0.73 ^c	19.4 ± 0.81 ^a	21.5 ± 0.52 ^d	17.5 ± 0.35 ^b	3.3 ± 0.77 ^c	80.1 ± 0.69 ^c
30	3.2 ± 0.74 ^b	17.5 ± 0.13 ^a	17.5 ± 0.45 ^b	24.1 ± 0.82 ^a	18.1 ± 0.43 ^a	4.1 ± 0.81 ^{ab}	84.5 ± 1.04 ^a
45	3.2 ± 0.12 ^b	17.1 ± 0.29 ^b	17.7 ± 0.41 ^b	22.9 ± 0.81 ^b	18.2 ± 0.11 ^a	3.9 ± 0.34 ^b	83.0 ± 0.83 ^a
60	3.5 ± 0.85 ^a	16.1 ± 0.34 ^{cd}	12.6 ± 0.70 ^c	19.7 ± 0.87 ^c	15.3 ± 0.57 ^c	4.5 ± 0.30 ^a	71.4 ± 0.58 ^d

表 4 小麦面条、绿豆面条的预估血糖生成指数
Table 4 Estimated glycemic index of wheat noodles and mung bean noodles

绿豆超微粉添加量/%	AUC	HI	eGI
0	10 635	88.95	84.87
15	6 975	57.41	57.68
30	6 195	50.99	52.15
45	5 370	44.19	46.29
60	4 841	39.85	42.55

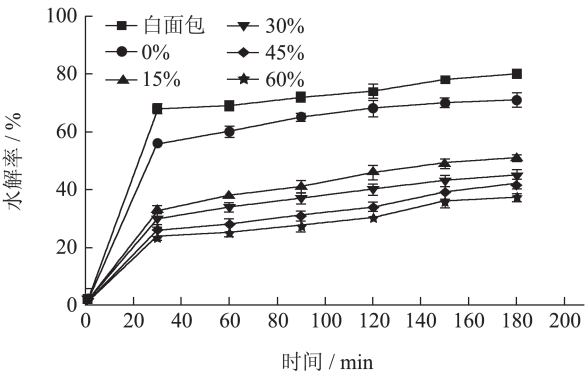


图 6 小麦面条、绿豆面条的淀粉水解曲线
Fig.6 Starch hydrolysis curves of wheat noodles and mung bean noodles

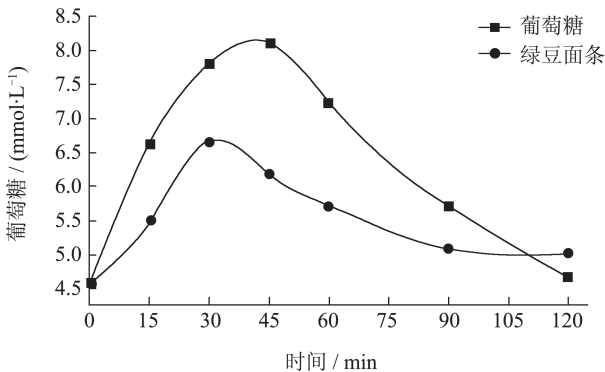


图 7 葡萄糖与绿豆面条的血糖应答曲线
Fig.7 Blood glucose response curve of glucose and mung bean noodles

2.8 绿豆面条的人群GI值测试

血糖应答曲线可以直观反映食用某种食物后受试者的血糖的变化趋势，如图 7 所示，从血糖应答曲线分析，绿豆超微粉添加量为 45% 的面条的餐后血糖波动小于葡萄糖，具体表现在于血糖峰值较低，曲线下降趋势缓慢，使得餐后血糖的变化相对稳定。此外，如表 5 所示对每个志愿者分别计算后取均值，得出绿豆超微粉添加量为 45% 的面条的 GI 值为 49.93，与 2.7 中的 eGI 研究结果 46.29 相近，并且该 GI 值 < 55，说明添加了绿豆超微粉添加量为 45% 的绿豆面条属于

低 GI 食品。添加了高含量绿豆超微粉的面条 GI 值低，这是因为绿豆本身就具有较低的 GI 值^[34]，2.6 中说明了添加了 45% 绿豆超微粉的面条有较多的慢消化淀粉以及抗性淀粉，延缓了消化速度，可以降低 GI 值^[35]。另外由图 4 可见当绿豆超微粉添加量达到 45% 时，面条的淀粉结构更加致密，不易分解，也有可能延缓消化。

表 5 血糖应答曲线下面积增幅与绿豆面条血糖生成指数
Table 5 Increase in area under blood glucose response curve and blood glucose generation index of mung bean noodles

志愿者	血糖应答曲线下面积增幅/(mmol·min·L ⁻¹)		GI _n	GI
	葡萄糖	绿豆面条		
1	109.45	64.01	58.48	49.93
2	91.62	2.71	2.96	
3	240.60	160.90	66.87	
4	258.50	145.40	56.25	
5	230.50	66.24	28.74	
6	291.55	192.30	65.96	
7	247.35	112.70	41.08	
8	216.40	118.40	54.71	
9	203.80	135.80	66.63	
10	296.70	185.50	62.52	
11	164.60	80.03	48.62	
12	436.90	202.40	46.33	

注: GI_n——受试者个体得出的 GI 值; GI——待测食物 GI 值。

3 结论

本文对不同绿豆超微粉添加量制备的面条的感官品质、流变学特性、质构、蒸煮特性、淀粉组分以及 eGI 值进行了测定，结果显示添加绿豆超微粉虽然使得面条硬度和内聚性增高，弹性下降，弱化了面条的筋力，提高面条的断条率，但是使得面条的 eGI 值降低，在绿豆超微粉添加量为 45% 时的面条感官评分为 83.0 分，熟断条率为 4.34%，蒸煮损失率为 3.02%，吸水率为 146.31%。绿豆超微粉的添加使得抗性淀粉含量升高，快消化淀粉含量降低，有利于延缓消化，降低血糖生成指数，绿豆超微粉添加量 45% 的面条 eGI 值为 46.29，明显低于普通小麦面条的 eGI 值 84.87，并且绿豆超微粉添加量为 45% 的面条 GI 值为 49.93，证实了此绿豆面条为低 GI 食品。综上所述，绿豆超微粉的添加虽然会增加面条的断条率，影响面条的部分感官品质，但是对于改善面条的淀粉结构、延缓面条消化速率和降低面条 GI 值有显著作用。本研究期望对绿豆的主食化推广和低 GI 食品的开发提供参考及理论依据。

参考文献

- [1] CAI H, ZHOU L, LIU J, et al. Independent and combined effects of liraglutide and aerobic interval training on glycemin control and cardiac protection in diabetic cardiomyopathy rats [J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2022, 629: 112-120.
- [2] HENRY C J, KAUR B, QUEK R Y C. Chrononutrition in the management of diabetes [J]. Nutrition & Diabetes, 2020,10(1): 6.
- [3] LI S, WARD R, GAO Q. Effect of heat-moisture treatment on the formation and physicochemical properties of resistant starch from mung bean (*Phaseolus radiatus*) starch [J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(7): 1702-1709.
- [4] 马智秀,邱军,高金锋,等.基于连续14年国家绿豆品种区域试验的中国绿豆品种产量和性状变化[J].干旱地区农业研究,2024, 1:1-13.
- [5] 艾燕,张翼飞,贾瑞坤,等.黑龙江省七份黑绿豆地方品种品质性状的鉴定与评价[J].黑龙江农业科学,2023,9:13-18.
- [6] 张卓琼,郭军.低血糖生成指数食品研究与开发应用现状[J].食品与发酵工业,2023,49(1):313-320.
- [7] DIANA N A, LILI N I S, DWI R S, et al. Analisis kandungan zat gizi, pati resisten, indeks glikemik, beban glikemik dan daya terima cookies tepung pisang kepok (musa Paradisiaca) termodifikasi enzimatis dan tepung kacang hijau (*Vigna radiata*) [J]. Jurnal Aplikasi Teknologi Pangan, 2020, 9(3): 101-107.
- [8] YUN L, LIYA N, CHAO S, et al. Comparison of *in vitro* starch digestibility and structure of matcha-fortified starch vermicelli from different botanical sources [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(15): 7775-7784.
- [9] HUANG X, DOU J Y, LI D, et al. Effects of superfine grinding on properties of sugar beet pulp powders [J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 87: 203-209.
- [10] 曾小峰,颜蜜,盖智星,等.超微粉碎对羊肚菌粉品质特性的影响[J].食品与机械,2024,40(9):192-199.
- [11] 陈霞,王文琪,朱在勤,等.食盐对面粉糊化特性及面条品质的影响[J].食品工业科技,2015,(2):98-101.
- [12] 马丽苹,王钰,李莹,等.绿豆糜/亲水胶体复合物流变学性质及在三维打印吞咽障碍食品中的应用研究[J].食品与发酵工业, 2024,50(10):169-179.
- [13] 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: 33-50.
- [14] 陈元震.超微粉碎对牛蒡粉特性及酚类物质肠道吸收的影响[D].舟山:浙江海洋大学,2022.
- [15] WU F, MENG Y, YANG N, et al. Effects of mung bean starch on quality of rice noodles made by direct dry flour extrusion [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 63(2): 1199-1205.
- [16] 曹伟超.含麦麸黑豆酸面团发酵面包的营养与烘焙特性[D].无锡:江南大学,2021.
- [17] 郝征红,张炳文,郭珊珊,等.振动式超微粉碎处理时间对绿豆淀粉理化性质的影响[J].农业工程学报,2014,30(18):317-324.
- [18] 张剑,张杰,李梦琴,等.绿豆配粉对面团特性及面条品质的影响[J].河南工业大学学报(自然科学版),2015,36(6):10-15.
- [19] ORISSA C M, LIDWINE G, RICHARD M N, et al. Rheological and textural properties of gluten-free doughs and breads based on fermented cassava, sweet potato and sorghum mixed flours [J]. LWT, 2019, 101: 575-582.
- [20] YUAN D, LI C, HUANG Q, et al. Ultrasonic degradation effects on the physicochemical, rheological and antioxidant properties of polysaccharide from *Sargassum pallidum* [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 239: 116230.
- [21] LI S Q, SHAH N P. Effects of *Pleurotus eryngii* poly saccharides on bacterial growth, texture properties, proteolytic capacity, and angiotensin-I-converting enzyme inhibitory activities of fermented milk [J]. Journal of Dairy Science, 2015, 98(5): 2949-2961.
- [22] ZHANG H, ZHANG Y Y, WANG X T, et al. Effects of bamboo shoot dietary fiber on mechanical properties, moisture distribution, and microstructure of frozen dough [J]. Journal of Chemistry, 2017, 2017: 4513410.
- [23] 高秀薇,刘晗,王玲玉,等.灵芝不溶性膳食纤维对面团及面条品质的影响[J].食品研究与开发,2024,45(15):85-92.
- [24] 柳先知,战林洁,李宏雁,等.脱支小麦淀粉对面条品质性能影响的研究[J].粮油食品科技,2025,33(1):138-146.
- [25] WANG C, YANG Z, GUO X, et al. Effects of insoluble dietary fiber and ferulic acid on the quality of steamed bread and gluten aggregation properties [J]. Food Chemistry, 2021, 364: 130444.
- [26] 刘瑜彬,马启航,颜瑾,等.低GI挤压重组米的制备及其品质特性比较[J].现代食品科技,2024,40(10):40-49.
- [27] JOANNA T B, WIOLETTA B, ARTUR S, et al. Molecular and supermolecular structure of co-mmmercial pyrodextrins [J]. Journal of Food Science, 2016, 81(7-9): C2135.
- [28] BAI Y, CAI L, DOUTCH J, et al. Structural changes from native waxy maize starch granules to cold-water-soluble pyrodex trin during thermal treatment [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(18): 4186-4194.
- [29] LIN S Y, LIU X, CAO Y, et al. Effects of xanthan and konjac gums on pasting,rheology, microstruc ture, crystallinity and *in vitro* digestibility of mung bean resistant starch [J]. Food Chemistry, 2021, 339: 128001.
- [30] WANG J Q, LV X R, TIAN L, et al. Modification in structural, physicochemical,functional, and *in vitro* digestive properties of kiwi starch by high-power ultrasound treatment [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 86: 106004.
- [31] 周淑蓝,叶发银,赵国华.绿豆淀粉的性质、改性及其应用[J].中国食品学报,2022,22(4):450-461.
- [32] 江军,刘思佳,李志雄,等.绿豆蛋白对魔芋葡甘聚糖基山茶油乳液膜结构和性能的影响[J].食品科学技术学报,2025,43(1):117-125.
- [33] YE J, HU X, LUO S, et al. Effect of endogenous proteins and lipids on starch digestibility in rice powder [J]. Food Research International, 2018, 106: 404-409.
- [34] SINGH M, MANICKAVASAGAN A, SHOBANA S, et al. Glycemic index of pulses and pulse-based products: a review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 61(9): 1567-1588.
- [35] MILAN K L, BRAJESH S, SRIGOPAL S, et al. Glycemic index of starchy crops and factors affecting its digestibility: a review [J]. Trends in Food Science and Technology, 2021, 111: 741-755.