

# 低GI挤压重组米的制备及其品质特性比较

刘瑜彬<sup>1</sup>, 马启航<sup>2</sup>, 颜瑾<sup>1</sup>, 罗珍<sup>1</sup>, 张元<sup>3</sup>, 王金梅<sup>2\*</sup>

(1. 无限极(中国)有限公司, 广东广州 510665) (2. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640) (3. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 广东广州 510610)

**摘要:** 大米是我国居民的日常主食, 但其高血糖生成指数 (Glycemic Index, GI) 使得肥胖及高血糖人群望而却步。为解决该问题, 该文采用挤压工艺制备外观品质和食用口感俱佳的低GI重组米, 以大米粉为主基料, 通过将桑叶提取物与抗性淀粉复配作为重组米中降低GI值的主要功能成分, 并通过添加单甘酯、燕麦麸皮以及大豆多糖对重组米的品质特性进行调节。研究发现, 添加了桑叶提取物和抗性淀粉的重组米的葡萄糖释放速率 ( $\leq 0.025 \text{ min}^{-1}$ ) 显著低于天然大米 ( $0.060 \text{ min}^{-1}$ ), 预测血糖生成指数 (Expected Glycemic Index, eGI)  $\leq 46.93$ 。重组米的结构均紧凑致密, 颗粒完整性良好。单甘酯和燕麦麸皮的添加可以增强重组米的硬度, 降低粘附性; 而大豆多糖的添加则使得重组米外观形貌较好, 且米饭口感更为软糯。基于感官评定, 添加了大豆多糖并以桑叶提取物与抗性淀粉为功能成分的重组米的总体评价较高, 其感官特性与天然大米更为相近, 因此该制备方案较佳, 更适于制备低GI重组米。

**关键词:** 血糖生成指数; 挤压; 重组米; 桑叶提取物; 感官评价; 理化性质

文章编号: 1673-9078(2024)10-40-49

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.10.0680

## Preparation and Characterization of Extruded Rice with a Low Glycemic Index

LIU Yubin<sup>1</sup>, MA Qihang<sup>2</sup>, YAN Jin<sup>1</sup>, LUO Zhen<sup>1</sup>, ZHANG Yuan<sup>3</sup>, WANG Jinmei<sup>2\*</sup>

(1. Infinitus (China) Company Ltd., Guangzhou 510665, China) (2. School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China) (3. Sericultural & Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510610, China)

**Abstract:** Rice is the primary staple food for people in China. However, people with obesity and the diabetes are discouraged from consuming rice due to its high glycemic index (GI). A low-GI extruded rice was prepared using the extrusion technique. The rice had good appearance, quality, and taste. Extrusion technique was employed to ensure that the extruded rice closely resembles natural rice. Rice flour was used as the main material, and a mixture of mulberry leaf extract and resistant starch was added for their bioactive function of GI reduction. Monoglycerides, oat bran, and soybean polysaccharides were added to modify the properties of the extruded rice. The glucose release rate during *in vitro* digestion significantly decreased (from  $0.060$  to  $0.025 \text{ min}^{-1}$ ) when the mixture of mulberry leaf extract and resistant starch was added, and the estimated GIs for the finished extruded rice samples were  $\leq 46.93$ . Moreover, their structure was compact

引文格式:

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.

LIU Yubin, MA Qihang, YAN Jin, et al. Preparation and characterization of extruded rice with a low glycemic index [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(10): 40-49.

收稿日期: 2024-05-17

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (2022B0202010002)

作者简介: 刘瑜彬 (1987-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 功能性食品开发, E-mail: Lewis.Liu@infinitus-int.com

通讯作者: 王金梅 (1982-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 蛋白质化学与工程, E-mail: fejmwang@scut.edu.cn

and tightly packed and their morphology was intact. The addition of monoglycerides and oat bran enhanced the hardness of the extruded rice and reduced its adherence, whereas the addition of soy polysaccharides improved its appearance and made the extruded rice softer and more glutinous. The total sensory evaluation score for the extruded rice prepared with soybean polysaccharides, mulberry leaf extract, and resistant starch as the functional components was the highest, and its sensory characteristics were closest to that of natural rice amongst the modified, low-GI versions. This suggests that this preparation method is superior and more suitable for low-GI extruded rice.

**Key words:** glycemic index; extrusion; extruded rice; mulberry leaf extract; sensory evaluation; physicochemical properties

随着经济的迅速发展和生活节奏的加快, 当代人的饮食习惯发生了明显变化, 对简单、精制碳水化合物(包括糖)的摄入量逐渐增加, 但复杂碳水化合物的摄入却有所减少<sup>[1]</sup>。然而, 简单、精制的碳水化合物通常为高血糖生成指数(Glycemic Index, GI)食品, 长期大量食用高GI食品容易导致人体血糖的不正常波动, 诱发II型糖尿病(Type 2 Diabetes, T2DM)。截至2023年, 我国T2DM病患者超1.26亿, 发病率高达11.52%<sup>[2]</sup>。

大米是我国居民的日常主食, 且以精制大米为主。然而, 精制大米的淀粉含量>90%, GI值高达80~90, 属于高GI食品<sup>[3]</sup>。对于糖尿病患者等特殊人群, 大米是一种需被严格控制摄入量的食物<sup>[4]</sup>。挤压工艺制备重组米的新技术发展为调整大米组分构成, 改善其食用特征和功能性质提供了可能。近年来, 关于大米中组分构成的调节、快消淀粉含量的降低成为了研究热点, 也是目前制备低GI挤压重组米的主要策略<sup>[5,6]</sup>。张阳<sup>[4]</sup>采用大米粉为基料, 与魔芋粉、抗性糊精、酸改性淀粉按一定配比混合并挤压制备低GI重组米(GI≈48); 代娇等<sup>[7]</sup>采用玉米粉为基料, 与青稞、鹰嘴豆等杂粮以及可溶性膳食纤维进行复配, 由此制备低GI重组米; 陈佳乐<sup>[8]</sup>则以红米粉为基料, 与藜麦、抗性淀粉等混合来制备低GI重组米。然而随着研究发现, 仅仅实现大米GI值的降低并不足够。当大米组分构成被改变时, 其微观结构随之发生明显变化, 进而宏观上导致米粒表面出现龟裂或爆腰现象, 此外其蒸煮品质和食用口感上也与天然大米存在较大差距, 难以被消费者接受<sup>[4,9]</sup>。

桑叶提取物是一种近年来发现的具有良好降血糖功效的天然成分<sup>[10,11]</sup>。研究通过将桑叶提取物与抗性淀粉进行复配作为重组米中降低GI值的主要功能成分, 并且采用大米粉作为重组米的主要基料, 考察桑叶提取物和抗性淀粉的添加对降低重组米GI

值的效果, 同时尝试添加单甘酯、燕麦麸皮以及大豆多糖对重组米的品质特性进行调节。进而, 对所制备的重组米的微观结构、宏观形貌、蒸煮品质、质构特性、感官评价和预测血糖生成指数(Expected Glycemic Index, eGI)进行表征, 分析比较不同组成对比对重组米功能性质与食用品质的影响, 并与天然大米作对比, 由此得出制备低GI重组米的较优方案, 为研发外观品质和食用口感俱佳的低GI重组米提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料与试剂

天然大米(粳米, 产地: 黑龙江), 购于山东东营香飘云端有限公司; 抗性淀粉, 购于罗盖特营养食品有限公司; 桑叶提取物和燕麦麸粉, 由广州无限极有限公司提供; 可溶性大豆多糖, 购于福建泉州味博食品有限公司; 单甘酯, 购于丹尼斯克(中国)有限公司; 还原糖含量测定试剂盒、蛋白含量测定试剂盒、o-邻苯二醛试剂, 购于北京鼎国生物试剂公司; D-葡萄糖试剂盒, 购于上海Megazyme公司; 胃蛋白酶(≥2 500 U/mg)、胰酶(≥8 U/mg), 购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 淀粉酶(≥160 U/mL), 购于上海麦克林生化科技有限公司; 所有试剂均为分析纯或食品级。

### 1.2 仪器与设备

FMHE-36双螺杆挤压机, 湖南富马科食品工程技术有限公司; CR22G台式离心机, 日立Hitachi(日本)公司; Merlin场发射扫描电子显微镜, 德国Zeiss公司; C40紫外可见分光光度计, 德国Implen公司; Instron5943质构仪, 美国Instron公司; DHG-9245A电热鼓风干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 重组米的制备

大米经粉碎后过 60 目筛由此获得大米粉，然后按照表 1 配方，将所需物料混合均匀。采用双螺杆挤压机制备不同添加组分的重组米，具体操作参数如下：固形物喂料速度 5.5 kg/h，水喂料量 23 wt.%，螺杆转速 160 r/min，切割机转速 1 300 r/min；分段控温程序设置如下：挤压输送区温度 60 °C，预糊化区温度 110 °C，糊化剪切区温度 100 °C，熔融区温度 60 °C，模头成型区温度 60 °C。经挤压获得的重组米采用 60 °C 热风干燥至水分含量为 10 wt.%，密封袋封装待用。

表 1 重组米配方 (kg)

Table 1 Formula of the recombinant rice

编号	大米粉	抗性淀粉	桑叶提取物	燕麦麸粉	单甘脂	大豆多糖
R0	2.0					
R1	1.6	0.4	0.015			
R2	1.6	0.4	0.015		0.02	
R3	1.6	0.4	0.015	0.072	0.02	
R4	1.6	0.4	0.015			0.02

#### 1.3.2 米饭的蒸煮

称取重组米或天然大米 50 g，按照 1:0.9 米/水比加入锅内，使用沸水进行加热蒸煮 15 min。然后保温 10 min，获得经蒸煮的重组米或天然大米。

#### 1.3.3 膨胀率的测定

首先称取一定质量 ( $W_0$ ) 的天然大米或重组米，按照方法 1.3.2 完成米饭的蒸煮，称量经蒸煮的重组米总质量 ( $W_1$ )。然后准确称量 50 g 米饭，置于 100 mL 量筒内，并加入 50 mL 水，记录此时米饭和水总体积 ( $V_1$ )，由此计算 50 g 米饭的体积  $V_2=V_1-50$ ，进而获得米饭总体积  $V_3=V_2 \times (W_1/50)$ 。按相同方法测定同等质量 ( $W_0$ ) 的蒸煮前重组米或天然大米的总体积 ( $V_0$ )，按式 (1) 计算样品的膨胀率 ( $E$ )。

$$E = \frac{V_3 - V_0}{V_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

$E$ —膨胀率，%；

$V_3$ —称取一定质量 ( $W_0$ ) 的天然大米或重组米经蒸

煮后的米饭总体积，mL；

$V_0$ —蒸煮前的总体积，mL。

#### 1.3.4 蒸煮损失率的测定

准确称量 2.00 g 天然大米或重组米，倒入 20 mL 蒸馏水，加热蒸煮 10 min。然后称量上清液 (米汤) 质量 ( $M_1$ ) 并转移至平皿内，烘箱 105 °C 加热至恒重，称量此时固形物质量 ( $M_2$ )。按式 (2) 计算样品的蒸煮损失率 ( $L$ )。

$$L = \frac{M_2 - M_1}{2} \times 100\% \quad (2)$$

式中：

$L$ —蒸煮损失率，%；

$M_1$ —上清液 (米汤) 的质量，g；

$M_2$ —上清液 (米汤) 所含固形物质量，g。

#### 1.3.5 吸水率的测定

准确称量 2.00 g 天然大米或重组米，倒入 20 mL 蒸馏水，加热蒸煮 10 min。然后沥干多余水分，称量剩余固形物质量 ( $m_1$ )。按式 (3) 计算样品的吸水率 ( $A$ )。

$$A = \frac{m_1 - 2}{2} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

$A$ —吸水率，%；

$m_1$ —大米或重组米经蒸煮后和沥干后的固形物质量，g。

#### 1.3.6 质构性质的测定

称取 35 g 经蒸煮的重组米或天然大米装入预压组件内 ( $\Phi 60$  mm $\times$ 40 mm)，用相同内径大小的平底瓶装入 150 g 水用于模拟 150 g 下压力对米饭进行处理，施力时间为 1 min，由此获得大小相等的样品模型。采用质构仪测定样品的质构特性，包括硬度、弹性、回复性、内聚性和粘附性。质构仪采用 P/36 探头，30 kg 力量感应元，测前、测中和测后速率均设定为 2 mm/s，测试压缩比例为 70%。

#### 1.3.7 感官评价的测定

由 8 名经过培训的食品专业人员担任感官评定员，对经蒸煮的重组米及天然大米进行感官评价测定。感官评定员的培训及感官评价标准参考国标《GB/T 15682-2008 粮油检验稻谷、大米蒸煮食用品质感官评价方法》<sup>[12]</sup>。感官评价评分标准见表 2。

表 2 感官评价评分标准

Table 2 Standard for sensory evaluation

一级指标分值	二级指标分值	具体特性描述, 分值
气味 20分	纯正性、浓郁性 20分	具有米饭特有的香气, 香气浓郁, 18~20分
		具有米饭特有的香气, 米饭清香, 15~17分
		具有米饭特有的香气, 香气不明显, 12~14分
		米饭无香味, 但无异味, 7~12分
外观结构 20分	颜色 7分	米饭有异味, 0~6分
		米饭颜色洁白, 5~7分
	光泽 8分	颜色正常, 4~5分
		米饭发黄或发灰, 0~3分
		有明显光泽, 7~8分
		稍有光泽, 5~6分
米饭完整性 5分	无光泽, 0~4分	
	米饭结构紧密, 饭粒完整性好, 4~5分	
	米饭大部分结构紧密完整, 3分	
适口性 30分	粘性 10分	米饭出现爆花, 0~2分
		清爽, 有粘性, 不黏牙, 8~10分
		有粘性, 基本不黏牙, 6~7分
	弹性 10分	有粘性、黏牙; 或无粘性, 0~5分
		米饭有嚼劲, 8~10分
		米饭颇有嚼劲, 6~7分
软硬度 10分	米饭疏松, 发硬, 感觉有渣, 0~5分	
	软硬适中, 8~10分	
	感觉略硬或略软, 6~7分	
滋味 25分	纯正性、持久性 25分	感觉很硬或很软, 0~5分
		咀嚼时, 有较浓郁的清香和甜味, 22~25分
		咀嚼时, 有淡淡的清香和甜味, 18~21分
		咀嚼时, 无清香和甜味, 但无异味, 16~17分
冷饭质地 5分	成团性、粘弹性、硬度 5分	咀嚼时, 无清香和甜味, 但有异味, 0~15分
		较松散, 粘弹性较好, 硬度适中, 4~5分
		结团, 粘弹性稍差, 稍变硬, 2~3分
		板结, 粘弹性差, 偏硬, 0~1分

### 1.3.8 体外消化试验

参考 Englyst 方法<sup>[13]</sup>测定经蒸煮的重组米和天然大米的体外消化过程, 并作适当修改。首先, 称取 2.00 g 蒸煮后重组米样品于烧杯中, 用研钵棒上下敲打 15 s。然后添加 18 mL 纯水, 并调节 pH 值为 3.0, 添加 2 mL 胃蛋白酶溶液 (2 000 U/mL, 含 0.02 mol/L HCl), 随后置于水浴摇床 (37 °C, 160 r/min) 保持 30 min, 由此模拟人体胃消化过程。进而, 调节样品 pH 值为 7.0, 添加 4 mL 醋酸盐缓

冲液 (0.20 mol/L, pH 值 6.0) 和 1 mL 混合酶液 (胰酶, 16 U/mL; 葡萄糖淀粉酶, 40 U/mL), 置于水浴摇床 (37 °C, 160 r/min) 保持 2 h, 由此模拟肠道消化过程。采取定点取样, 一定时间间隔取 0.1 mL 消化样品于 0.4 mL 无水乙醇中, 离心 (1 500 g, 10 min, 25 °C) 取上清液, 采用 D-葡萄糖试剂盒测定上清液的葡萄糖含量。

根据上述葡萄糖测定结果绘制消化时间 ( $t$ )-葡萄糖释放量 ( $C_t$ ) 关系曲线, 采用一阶动力学方

程(式(4))对曲线进行拟合,由此获得葡萄糖最终释放量( $C_{\infty}$ )、葡萄糖释放速率( $k$ )和相关系数( $r^2$ )<sup>[14]</sup>。对曲线下面积(Area Under Curve, AUC)进行积分统计,与标准品(白面包)的AUC相比,所得比值为样品的水解指数(Hydrolysis Index, HI),如式(5)所示。最后,根据式(6)计算出eGI<sup>[15]</sup>。

$$C_t = C_{\infty} (1 - e^{-kt}) \quad (4)$$

$$B = \frac{AUC_1}{AUC_0} \times 100\% \quad (5)$$

$$eGI = 0.862B + 8.189 \quad (6)$$

式中:

$C_t$ —消化时间为 $t$ 时的葡萄糖释放量, mg;

$C_{\infty}$ —葡萄糖最终释放量, mg/g;

$k$ —葡萄糖释放速率,  $\text{min}^{-1}$ ;

$B$ —水解指数, %;

$AUC_1$ —天然大米或重组米消化曲线的积分面积;

$AUC_0$ —标准品(白面包)消化曲线的积分面积;

eGI—预测血糖生成指数。

### 1.3.9 微观结构的观察

将蒸煮前以及蒸煮后的重组米和天然大米用刀片在其1/3和2/3处沿横轴方向切断,采用导电胶将切好的样品断裂面朝上粘于金属圆台,进行喷金处理后,采用扫描电镜观察样品的微观结构。

### 1.4 数据统计与分析

所有实验重复3次,采用SPSS 24软件处理数据,实验结果用平均值±标准差表示,不同组之间差异采用单因素ANOVA方法比较, $P < 0.05$ 表示差异显著。采用Origin Pro 9.1软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 重组米的理化特性

#### 2.1.1 蒸煮前重组米的微观结构及宏观形貌

观察蒸煮前重组米的宏观形貌(如图1所示),纯大米粉制备的重组米(R0)外观白皙透亮,颗粒完整。当添加一定的抗性淀粉和桑叶提取物后,重组米(R1)呈现略微泛黄,这可能是由于桑叶提取物中含有黄酮、矿物质及氨基酸等成分所致<sup>[10,11,16]</sup>。添加单甘酯、燕麦麸粉或大豆多糖会使得重组米颜色更为明显。相比于天然大米,经挤压制备的重组米颗粒完整性更佳,极少出现龟裂、爆腰等不良现象。

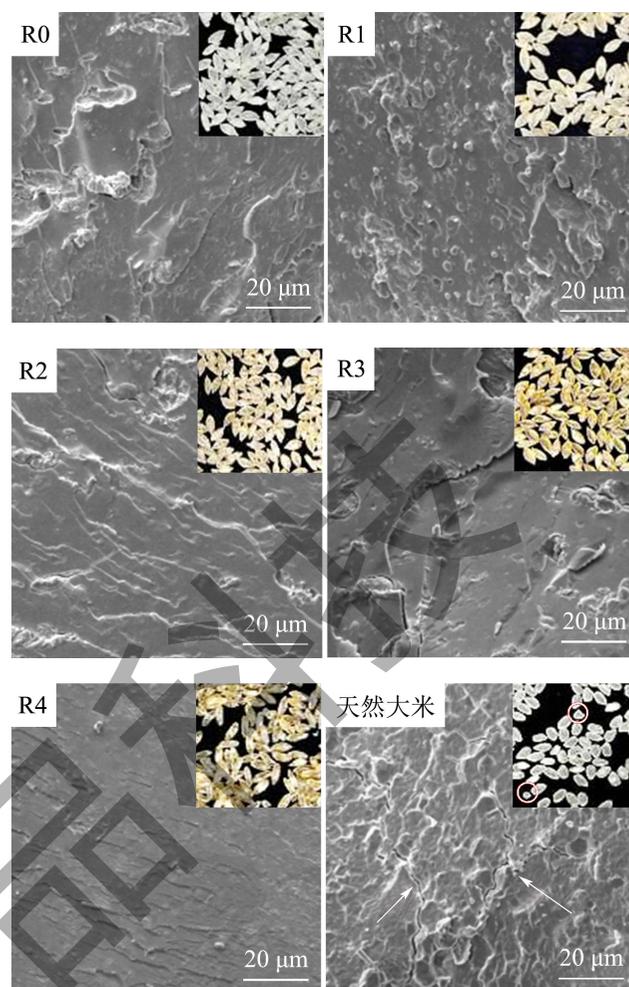


图1 蒸煮前重组米的微观结构和宏观形貌

Fig.1 Microstructure and macro-morphology of the recombined rice without cooking

采用扫描电镜观察重组米横截面的微观结构,发现天然大米存在较多细小的缝隙(图1箭头),说明天然大米内容结构相对松散,这也是造成天然大米表面容易龟裂、爆腰的原因。此外,还观察到细小的淀粉颗粒和胚乳细胞壁分布在天然大米的横截面上,说明未经蒸煮的天然大米的细胞结构较为完整,横切操作对大米微观结构影响较少<sup>[15]</sup>。纯大米粉制备的重组米(R0)在微观上未观察到胚乳细胞壁结构且仅有少数淀粉颗粒分布,这是由于挤压过程中的高温、高压和高剪切力作用破坏了胚乳细胞壁,同时大多数淀粉颗粒发生了糊化<sup>[9,17]</sup>;此外其内部微结构较为致密,横截面裂缝较少,这可能是因为在挤压作用下,各物质流动性加强,彼此融合更为均匀<sup>[4]</sup>。添加了抗性淀粉和桑叶提取物的重组米(R1)的横截面出现较多淀粉颗粒,猜测是抗性淀粉较难糊化所致。当添加单甘酯后,重组米(R2、R3)横截面变得光滑,结构更为致密,淀粉颗粒显

著减少<sup>[18]</sup>。当单甘酯与淀粉（特别是抗性淀粉）存在于同一体系时会发生相互作用，可诱导淀粉颗粒结构展开进而相互复合，同时还受到了挤压过程中的高温、高压作用影响，使得添加了单甘酯的重组米（R2、R3）的淀粉颗粒结构更容易展开<sup>[19]</sup>，因此其横截面的微结构变得更加均匀，细腻光滑。添加了大豆多糖的重组米（R4）横截面除了出现少量淀粉颗粒，整体结构同样较为均匀、致密。

由此可知，挤压制备的重组米，特别是添加了单甘酯、燕麦麸皮和大豆多糖的重组米（R2、R3和R4），其微结构均较为致密，各物质之间粘合紧密，使得所制备的重组米宏观上成型性较好，具有良好的机械强度，不易发生龟裂、暴腰。

### 2.1.2 蒸煮品质

吸水性、蒸煮损失率和膨胀率常用于衡量米饭的蒸煮品质。水的吸收是米粒糊化的前提，测定蒸煮过程中大米的吸水率可侧面反映米饭的糊化情况。表3显示了经挤压制备的不同重组米和天然大米的吸水率。天然大米的吸水率（172.99%）显著高于经挤压制备的重组米，这可能是由于重组米的制备过程涉及挤压处理，其内部淀粉在挤压过程中发生了一定程度的糊化，因此所制备的重组米的未糊化淀粉含量比天然大米少，蒸煮过程中吸水率相对较低。对比添加了不同组分制备的重组米，发现纯大米粉制备的重组米（R0）的吸水率与添加了抗性淀粉、桑叶提取物、单甘酯的重组米（R2、R3）的吸水率无显著性差异（147.50%），说明在蒸煮过程中三者的糊化程度相当。添加了燕麦麸皮和大豆多糖的重组米（R3、R4）吸水率均较差，为109.82%。

表3 重组米的蒸煮品质（%）

样品	吸水率	蒸煮损失率	膨胀率
R0	150.10 ± 2.86 <sup>b</sup>	6.50 ± 0.76 <sup>b</sup>	125.40 ± 4.49 <sup>c</sup>
R1	146.25 ± 3.04 <sup>b</sup>	4.25 ± 0.09 <sup>c</sup>	113.05 ± 0.40 <sup>d</sup>
R2	146.14 ± 4.84 <sup>b</sup>	4.33 ± 0.28 <sup>c</sup>	134.05 ± 2.35 <sup>b</sup>
R3	109.04 ± 3.94 <sup>c</sup>	4.71 ± 0.27 <sup>c</sup>	113.53 ± 1.08 <sup>d</sup>
R4	110.60 ± 9.24 <sup>c</sup>	3.43 ± 0.02 <sup>c</sup>	132.44 ± 4.63 <sup>bc</sup>
天然大米	172.99 ± 3.56 <sup>a</sup>	11.44 ± 0.95 <sup>a</sup>	174.83 ± 2.97 <sup>a</sup>

注：同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异（ $P < 0.05$ ）。

蒸煮损失率反映了蒸煮过程中大米组分溶解于米汤中的情况，适量的蒸煮损失率有利于改善米饭的口感与滋味<sup>[20]</sup>，但过量的蒸煮损失率则会导致

大米中营养成分的损失，同时影响米饭颗粒的完整性<sup>[8]</sup>。天然大米的蒸煮损失率较高（11.44%），经挤压制备的重组米的蒸煮损失率明显降低。这可能与大米的微结构有关，天然大米的内部结构较为松散，因此在蒸煮过程中容易发生崩解，导致较多组分溶出。而经挤压的重组米的内部结构均较为紧密，组分间粘合性良好（图1），因此蒸煮过程中各组分能较好地保留在米粒内。此外，添加抗性淀粉、桑叶提取物的重组米（R1、R2、R3和R4）相比于未添加的样品（R0）表现出更低的蒸煮损失率（4.18%）。

膨胀率是指经蒸煮后的米粒与蒸煮前的米粒的体积比值，反映了大米蒸煮前后的体积变化。天然大米的膨胀率最大，这与其蒸煮前所含淀粉未被糊化、结构相对松散，以及蒸煮过程具有较高的吸水率有关。而蒸煮前重组米中淀粉已发生部分糊化，且内部结构相对紧凑致密以及蒸煮过程中吸水率较低，因此重组米的膨胀率相对较小。

### 2.1.3 蒸煮后重组米的质构性质

表4显示了经蒸煮的不同重组米和天然大米的质构特性。在硬度、弹性、回复力和粘附性方面，蒸煮后的天然大米和纯米粉制备的重组米无显著性差异，天然大米的内聚性明显弱于重组米，这与其内部微结构有关（图1）。对比添加了不同组分制备的重组米，添加了大豆多糖的重组米相比于其他样品，硬度、弹性和回复性均明显减少，猜测该重组米经蒸煮后所形成的凝胶网络结构较弱<sup>[21]</sup>。此外，还发现重组米的组分对经蒸煮后的米饭的粘附性产生较大影响。添加抗性淀粉和桑叶提取物的重组米（R1）的粘附性明显高于纯米粉制备的重组米（R0），这会使得米饭更加的黏连糯口。当添加单甘酯后，米饭（R2）的粘附性显著下降，仅略高于纯米粉制备的重组米样品（R0）。这可能是由于所添加的脂质与淀粉形成了复合物，由此改变了米饭的质地<sup>[20]</sup>。当添加多糖时，由于多糖的粘稠特性使得经蒸煮的重组米样品（R3和R4）粘附性再次上升。

由此可知，纯大米制备的重组米经蒸煮后质构特性与天然大米最为接近。添加抗性淀粉、桑叶提取物和多糖可以促使重组米的口感更为软糯；而脂质可以充当重组米质构性质的中和剂，当添加上述成分使得重组米的米饭过于软糯时，可适当添加一定量的脂质来提高重组米的硬度，降低粘附性。

表 4 蒸煮后重组米的质构性质

Table 4 Texture properties of the recombinant rice after cooking

名称	硬度/N	弹性	回复性	内聚性	粘附性/(N·s)
R0	2.35 ± 0.18 <sup>a</sup>	0.96 ± 0.03 <sup>a</sup>	0.44 ± 0.02 <sup>a</sup>	0.90 ± 0.05 <sup>ab</sup>	3.89 ± 0.88 <sup>d</sup>
R1	1.28 ± 0.18 <sup>c</sup>	0.96 ± 0.03 <sup>a</sup>	0.36 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.86 ± 0.04 <sup>abc</sup>	13.88 ± 1.34 <sup>b</sup>
R2	1.79 ± 0.15 <sup>b</sup>	0.91 ± 0.03 <sup>ab</sup>	0.44 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.92 ± 0.03 <sup>a</sup>	4.06 ± 0.47 <sup>cd</sup>
R3	2.11 ± 0.39 <sup>ab</sup>	0.85 ± 0.06 <sup>bc</sup>	0.34 ± 0.03 <sup>bc</sup>	0.85 ± 0.04 <sup>abc</sup>	8.19 ± 0.05 <sup>c</sup>
R4	0.81 ± 0.77 <sup>d</sup>	0.85 ± 0.05 <sup>c</sup>	0.32 ± 0.02 <sup>c</sup>	0.83 ± 0.06 <sup>bc</sup>	18.28 ± 0.97 <sup>a</sup>
天然大米	2.134 ± 0.49 <sup>ab</sup>	0.92 ± 0.06 <sup>a</sup>	0.42 ± 0.03 <sup>a</sup>	0.82 ± 0.04 <sup>c</sup>	3.15 ± 0.65 <sup>d</sup>

注: 同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ( $P < 0.05$ )。

表 5 蒸煮后重组米的感官评价

Table 5 Sensory evaluation of the recombinant rice after cooking

名称	气味	颜色	光泽	米饭完整性	粘性	弹性	软硬度	滋味	冷饭质地	综合评分
R0	16.13 ± 2.59 <sup>ab</sup>	6.75 ± 0.71 <sup>a</sup>	4.88 ± 2.10 <sup>ab</sup>	4.50 ± 0.76 <sup>a</sup>	7.75 ± 2.66 <sup>ab</sup>	7.63 ± 1.77 <sup>ab</sup>	7.63 ± 1.06 <sup>a</sup>	20.50 ± 2.33 <sup>ab</sup>	4.50 ± 0.53 <sup>a</sup>	80.25 ± 6.67 <sup>a</sup>
R1	14.38 ± 2.00 <sup>b</sup>	3.63 ± 0.92 <sup>b</sup>	3.50 ± 2.62 <sup>b</sup>	4.25 ± 0.89 <sup>a</sup>	3.88 ± 0.64 <sup>c</sup>	6.25 ± 1.58 <sup>b</sup>	7.13 ± 1.81 <sup>a</sup>	15.75 ± 3.58 <sup>c</sup>	3.25 ± 0.46 <sup>b</sup>	62.00 ± 7.78 <sup>c</sup>
R2	14.50 ± 1.41 <sup>b</sup>	3.50 ± 0.76 <sup>b</sup>	3.38 ± 2.26 <sup>b</sup>	4.25 ± 0.71 <sup>a</sup>	7.00 ± 1.93 <sup>ab</sup>	7.75 ± 1.67 <sup>ab</sup>	7.13 ± 1.25 <sup>a</sup>	18.38 ± 2.77 <sup>abc</sup>	3.88 ± 0.83 <sup>ab</sup>	69.75 ± 6.80 <sup>bc</sup>
R3	15.50 ± 2.14 <sup>ab</sup>	3.13 ± 0.83 <sup>b</sup>	3.25 ± 2.12 <sup>b</sup>	4.13 ± 0.83 <sup>a</sup>	6.38 ± 1.41 <sup>ab</sup>	7.13 ± 1.73 <sup>ab</sup>	6.38 ± 0.92 <sup>a</sup>	15.88 ± 2.47 <sup>c</sup>	3.75 ± 0.71 <sup>ab</sup>	65.50 ± 6.50 <sup>bc</sup>
R4	15.25 ± 2.66 <sup>ab</sup>	3.88 ± 1.25 <sup>b</sup>	7.13 ± 1.36 <sup>a</sup>	4.13 ± 0.83 <sup>a</sup>	5.50 ± 0.76 <sup>bc</sup>	7.00 ± 1.69 <sup>ab</sup>	6.88 ± 2.17 <sup>a</sup>	17.63 ± 2.92 <sup>bc</sup>	3.88 ± 0.64 <sup>a</sup>	71.25 ± 8.01 <sup>b</sup>
天然大米	17.50 ± 2.51 <sup>a</sup>	7.50 ± 0.93 <sup>a</sup>	6.00 ± 0.93 <sup>a</sup>	4.75 ± 0.46 <sup>a</sup>	8.13 ± 2.75 <sup>a</sup>	8.75 ± 1.16 <sup>a</sup>	7.63 ± 1.06 <sup>a</sup>	21.00 ± 1.85 <sup>a</sup>	4.50 ± 0.53 <sup>a</sup>	85.75 ± 6.50 <sup>a</sup>

注: 同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ( $P < 0.05$ )。

## 2.1.4 蒸煮后重组米的宏观形貌及微观结构

进一步观察经蒸煮的重组米的宏观形貌和微观结构, 如图 2 所示。经蒸煮后的天然大米外观白皙, 颗粒形态圆润饱满, 这与其蒸煮过程中吸水率和膨胀率均较高有关。但是天然大米制备的米饭成型性相对较差, 此结果与蒸煮损失率相一致(表 3)。经挤压制备的重组米外观上颗粒完整性较好, 蒸煮获得的米饭粒粒分明。与纯大米粉制备的重组米(R0)不同, 添加了桑叶提取物的重组米外观上表现为淡黄色, 颜色与糙米相接近, 这是因为桑叶提取物中含有一定的黄色组分(如黄酮、花青素、矿物质等)导致的。

微观上, 经蒸煮后的重组米和天然大米的横截面均呈现一定的凝胶网络结构(图 2b)。经蒸煮后的天然大米的网孔较小且致密, 而纯大米粉制备的蒸煮后重组米(R0)的网孔较大, 这主要是因为重组米在挤压过程中, 其主要原材料大米粉中淀粉分子结构遭到破坏导致重组米成型后的凝胶结构网孔发生变化。添加抗性淀粉、桑叶提取物、单甘酯和燕麦麸皮后, 所得蒸煮后重组米的网孔大小逐渐变得均匀且致密, 这可能是因为这些添加物质和纯大米粉中的淀粉性质相近或由于相互作用从而结合在一起, 改变了网络性质。添加了大豆多糖的蒸煮后

重组米的网孔则变大, 且孔壁明显变厚, 这可能是由于多糖的添加增加了体系粘稠度, 组分间流动性变差所致<sup>[22]</sup>。

## 2.2 蒸煮后重组米的感官评价

对所制备的蒸煮后重组米进行感官评价, 结果如表 5 所示。经挤压制备的重组米在米饭完整性和口感软硬度方面均与天然大米无明显差别。但重组米在气味上稍弱于天然大米, 这可能是由于挤压过程中的高温高压作用使得风味物质容易挥发所致。颜色方面, 由于桑叶提取物的添加使得重组米 R1、R2、R3 和 R4 均为淡黄色, 色彩感官上比不上纯白色的重组米 R0 和天然大米。对比均添加了降血糖活性成分桑叶提取物和抗性淀粉的重组米(R1、R2、R3 和 R4)之间的感官特性差异, 发现相比于未添加单甘酯的重组米(R1), 单甘酯的加入会导致重组米(R2、R3)的光泽度下降, 但在粘弹性、软硬度、气味与滋味、冷饭质地方面有所改善。而大豆多糖的添加(R4)则能显著改善重组米的光泽, 同时其粘弹性、软硬度、气味与滋味、冷饭质地各方面均得到良好改善。对比含有降血糖活性成分的四组重组米, 添加了大豆多糖的重组米(R4)的感官综合评分最高, 与天然大米的感官特性最为接近。

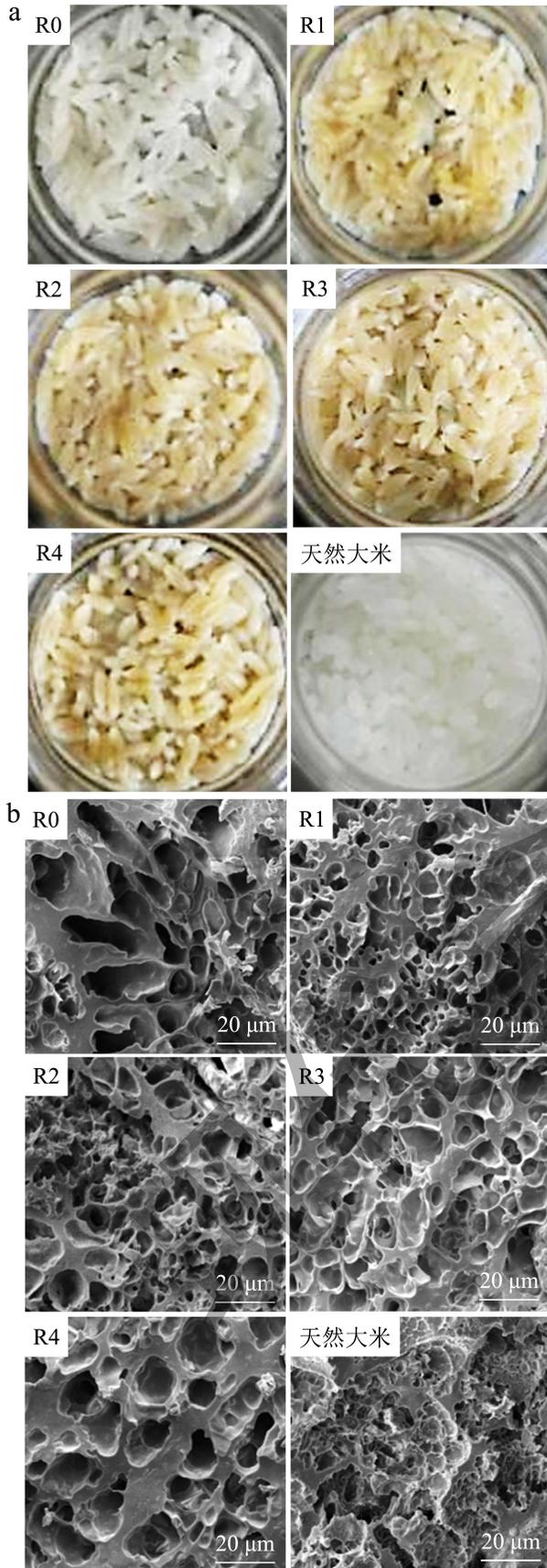


图2 蒸煮后重组米的宏观形貌 (a) 和微观结构 (b)

Fig.2 Macro-morphology (a) and microstructure (b) of the recombinant rice after cooking

### 2.3 体外消化试验

GI 值反映了食品在消化过程中被释放的葡萄糖对人体血糖的影响程度。一般而言, GI>70 为高 GI 食品, 70≥GI>55 为中 GI 食品, GI≤55 为低 GI 食品<sup>[23]</sup>。

图3显示了体外消化过程中不同添加组分的重组米和天然大米的葡萄糖释放情况, 并由此计算了各样品的  $C_{\infty}$ 、 $k$ 、HI 和 eGI, 结果如表6所示。由图3可知, 天然大米在消化过程中的葡萄糖释放量急剧增加,  $k$  为  $0.060 \text{ min}^{-1}$ ,  $C_{\infty}$  为  $772.93 \text{ mg/g}$ , HI 为 83.3%。消化过程中, 大米被快速水解并在短时间内释放大量的葡萄糖, 使得血糖显著增加。经计算天然大米的 eGI 为 80.01, 属于高 GI 食物。对比由纯大米粉制备的重组米 (R0), 发现它在消化过程中葡萄糖释放速率更快, 为  $0.079 \text{ min}^{-1}$ , HI 为 94.12%, 几乎被完全消化水解, 进一步计算得到其 eGI 为 89.33。重组米 R0 的 eGI 明显高于天然大米, 可能是由于大米粉经过了研磨、挤压, 使得所含的淀粉更容易被糊化, 分子结构充分展开暴露出更多的水解位点, 促使消化酶的结合并加速淀粉水解过程。添加了抗性淀粉、桑叶提取物、单甘酯、燕麦麸皮和 大豆多糖制备的重组米 (R1、R2、R3 和 R4) 的消化速率、水解指数均明显下降, eGI 均远低于 55, 达到低 GI 食物标准。这是由于这些添加组分可通过不同的作用方式延缓淀粉消化酶的水解, 从而抑制 eGI 的上升。值得注意的是, 添加了单甘酯的重组米 (R2) 的 eGI 下降最为明显, 根据 Farooq 等<sup>[24]</sup>报道, 大米淀粉在油脂存在并加热的条件下会发生晶型转变, 形成抗性淀粉。因此, 猜测该结果是由于单甘酯与大米粉中含有的直链淀粉发生相互作用, 形成了半结晶 V 型直链淀粉链-脂质复合物, 这种复合物能降低淀粉的溶解度和吸水率, 阻碍淀粉的糊化和降解, 有效抑制淀粉酶的消化水解<sup>[19]</sup>。

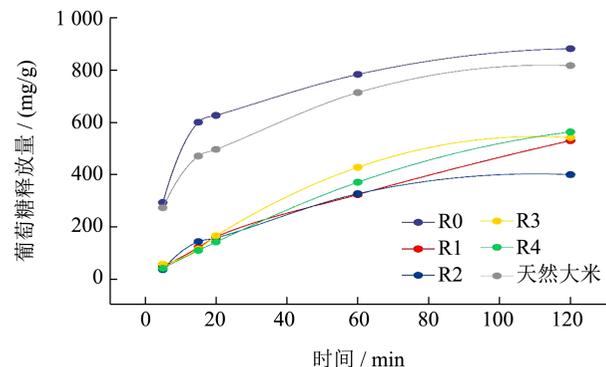


图3 葡萄糖释放曲线

Fig.3 Glucose release as a function of time

表 6 蒸煮后重组米的体外消化数据

Table 6 Data from *in vitro* digestion of the recombinant rice after cooking

样品	R0	R1	R2	R3	R4	天然大米
$C_{\infty}/(\text{mg/g})$	832.84 ± 33.52	702.06 ± 87.13	421.81 ± 15.47	640.51 ± 56.47	804.02 ± 27.57	772.93 ± 46.79
$k/\text{min}^{-1}$	0.079 ± 0.010	0.011 ± 0.002	0.025 ± 0.002	0.016 ± 0.003	0.010 ± 0.001	0.060 ± 0.011
$r^2$	0.968	0.992	0.996	0.991	0.999	0.942
HI/%	94.12	44.61	35.52	44.93	43.55	83.30
eGI	89.33	46.66	38.81	46.93	45.74	80.01

### 3 结论

大米是我国居民的日常主食，且以精制大米为主。然而精制大米属于高 GI 食品，肥胖及高血糖人群的日常饮食中被严格控制食用。为解决食用大米对特殊人群较大血糖波动的影响，本研究提出了一种外观品质和食用口感俱佳的低 GI 重组米的制备方法。以大米粉为基料，添加含降血糖活性成分的桑叶提取物和抗性淀粉，同时通过添加单甘酯、燕麦麸皮以及大豆多糖对所得重组米的品质特性进行调节。体外消化试验结果证明，添加了桑叶提取物和抗性淀粉的重组米的葡萄糖释放速率 ( $\leq 0.025 \text{ min}^{-1}$ ) 均显著低于天然大米 ( $0.060 \text{ min}^{-1}$ ) 和纯大米粉制备的重组米 ( $0.079 \text{ min}^{-1}$ )，所得 eGI 值均  $\leq 46.93$ ，属于低 GI 食品。此外，挤压制备的重组米内部结构紧凑致密，蒸煮后颗粒完整性良好，极少出现表面龟裂、爆腰现象。单甘酯和燕麦麸皮的添加可以调节重组米 (R2、R3) 的粘弹性和软硬度，同时改善米饭的气味与滋味、冷饭质地，但米粒外表光泽度有所下降。而添加了大豆多糖的重组米 (R4) 能显著改善其表面光泽，此外其粘弹性、软硬度、气味与滋味、冷饭质地各方面均得到良好改善，感官综合评分较高，与天然大米的感官特性相近；此外，相比于单甘酯，大豆多糖为天然来源食品添加剂，可以满足消费者对天然健康食品的追求。因此，选择使用桑叶提取物和大豆多糖作为制备低 GI 重组米的较佳方法，所制备的重组米 (R4) 不仅能满足特殊人群对米饭主食的感官享受与心理需求，还可避免餐后血糖剧烈波动带来的健康隐患。

### 参考文献

- [1] BARLOW P, MCKEE M, BASU S, et al. The health impact of trade and investment agreements: a quantitative systematic review and network co-citation analysis [J]. *Globalization and Health*, 2017, 13(1): 1-9.
- [2] LIU J, LIU M, CHAI Z, et al. Projected rapid growth in diabetes disease burden and economic burden in China: a spatio-temporal study from 2020 to 2030 [J]. *The Lancet Regional Health-Western Pacific*, 2023, 33: 100700.
- [3] JUKANTI A K, PAUTONG P A, LIU Q, et al. Low glycemic index rice-A desired trait in starchy staples [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 106: 132-149.
- [4] 张阳.低GI挤压重组米的配方优化及其食用品质和理化特性研究[D].重庆:西南大学,2021.
- [5] 刘文锐,肖志刚,贾永昊,等.响应面法优化马铃薯重组米生产工艺[J].农产品加工,2019,21:39-41.
- [6] 李娜,修琳,张浩,等.玉米重组米微波-热风联合干燥工艺优化[J].食品科技,2016,41(6):86-92.
- [7] 代娇,李凤林,谢天,等.低GI高膳食纤维重组米加工工艺研究[J].粮食与油脂,2022,35(6):30-35.
- [8] 陈佳乐.红米色素对淀粉慢消化作用及低GI重组红米的制备[D].郑州:河南工业大学,2023.
- [9] 刘成梅,方冲,刘云飞,等.不同添加物对挤压重组米血糖生成指数和理化性质的影响[J].中国食品学报,2020, 20(3):96-102.
- [10] DOI K, KOJIMA T, FUJIMOTO Y. Mulberry leaf extract inhibits the oxidative modification of rabbit and human low density lipoprotein [J]. *Biological and Pharmaceutical Bulletin*, 2000, 23(9): 1066-1071.
- [11] 李宏.桑叶对糖尿病大鼠治疗效果的研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2012.
- [12] 河南工业大学,湖北国家粮食质量监测中心,农业部谷物及制品质量监督检验测试中心,等.粮油检验稻谷、大米蒸煮食用品质感官评价方法[M].北京:中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2008:16.
- [13] QUIGLEY M E, HUDSON G J, ENGLYST H N. Determination of resistant short-chain carbohydrates (non-digestible oligosaccharides) using gas-liquid chromatography [J]. *Food Chemistry*, 1999, 65(3): 381-390.
- [14] TAN X, LI C, BAI Y, et al. The role of storage protein fractions in slowing starch digestion in chickpea seed [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 129: 107617.
- [15] WU J, MCCLEMENTS D J, CHEN J, et al. Improvement

- in storage stability of lightly milled rice using superheated steam processing [J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 71: 130-137.
- [16] 何德华,王家佩,次旺仁真,等.桑叶功效成分与作用的研究[J].*农业科技与装备*,2022,2:39-41.
- [17] ESPINOSA-RAM REZ J, RODR GUEZ A, DE LA ROSA-MILL N J, et al. Shear-induced enhancement of technofunctional properties of whole grain flours through extrusion [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 111: 106400.
- [18] 熊善波.挤压工程重组米生产工艺及品质改良研究[D].雅安:四川农业大学,2011.
- [19] WANG S, CHAO C, CAI J, et al. Starch-lipid and starch-lipid-protein complexes: A comprehensive review [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(3): 1056-1079.
- [20] 焦爱权,刘卿玥,杨月月,等.挤压重组米食用品质研究进展[J].*中国粮油学报*,2024,39(5):196-206.
- [21] 谢天.不同改性方法对挤压重组米原料品质影响及加工工艺参数的研究[D].长春:吉林农业大学,2019.
- [22] LIU X, ZHAO J, ZHANG X, et al. Enrichment of soybean dietary fiber and protein fortified rice grain by dry flour extrusion cooking: the physicochemical, pasting, taste, palatability, cooking and starch digestibility properties [J]. *RSC Advances*, 2018, 8(47): 26682-26690.
- [23] 靳玉龙.GI值的测定方法和影响因素及低GI食品生理学功能的研究进展[J].*现代食品科技*,2023,40(3):350-360.
- [24] FAROOQ A M, DHITAL S, LI C, et al. Effects of palm oil on structural and *in vitro* digestion properties of cooked rice starches [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 107: 1080-1085.

现代食品科技