

邓慧清, 吴卫国, 廖卢艳. 基于主成分分析法构建高蛋白重组米品质评价体系 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(20): 78–86. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120279

DENG Huiqing, WU Weiguo, LIAO Luyan. Development of the Quality Evaluation System of High Protein Recombinant Rice by Principal Component Analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(20): 78–86. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120279

· 研究与探讨 ·

基于主成分分析法构建高蛋白重组米品质评价体系

邓慧清, 吴卫国*, 廖卢艳

(湖南农业大学食品科学技术学院, 湖南长沙 410128)

摘要:为探究高蛋白重组米品质指标间相互关系, 以碎米与 16 种常见蛋白粉为原料通过挤压分别制备 16 种高蛋白重组米, 测定高蛋白重组米质构特性、蒸煮特性、糊化度、水溶性指数、吸水性指数、膨化度, 并运用主成分分析法计算不同高蛋白重组米的综合得分, 通过逐步回归对高蛋白重组米品质的评价指标进行筛选, 构建其综合评价体系。结果表明, 不同蛋白制备的高蛋白重组米蒸煮品质指标以及质构品质指标差异较大。主成分分析提取的 3 个主成分累计贡献率达到了 85.148%, 分别是 59.4725% (X_1)、17.527% (X_2)、8.149% (X_3), 其中, 胶粘性、米汤干物质、硬度、吸水性指数、咀嚼性、内聚性、糊化度、回复性、大米吸水率对第一主成分起主要作用; 弹性、膨化度和碘蓝值对第二主成分起主要作用; 水溶性指数是第三主成分的重要指标。以主成分分析得到的各高蛋白重组米综合得分为因变量 (F 值), 以参加主成分分析的各指标值为自变量, 通过逐步回归分析法建立高蛋白重组米综合品质评价的理论模型: $Y=0.915X_{\text{胶粘性}}+0.208X_{\text{糊化度}}-0.475X_{\text{米汤干物质}}+0.436X_{\text{回复性}}$ 。该模型得出高蛋白重组米的质量最优为大米蛋白重组米, 其次为大豆分离蛋白重组米, 与主成分综合得分呈极显著正相关 ($P<0.01$), 进一步证实该模型具有很高的可靠性。

关键词: 高蛋白重组米, 主成分分析, 逐步回归, 品质评价, 胶粘性, 固体溶出率, 糊化度, 回复性

中图分类号: TS213.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)20-0078-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120279



本文网刊:

Development of the Quality Evaluation System of High Protein Recombinant Rice by Principal Component Analysis

DENG Huiqing, WU Weiguo*, LIAO Luyan

(College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: In order to explore the relationship among quality indexes of high protein recombinant rice, 16 kinds of high protein recombinant rice were prepared by extrusion using broken rice and 16 kinds of common protein powder as raw materials. The texture properties, cooking characteristics, gelatinization degree, water solubility index, water absorption index and expansion degree of high protein recombinant rice were determined, and the comprehensive scores of different high protein recombinant rice were calculated by principal component analysis. The quality evaluation index of high protein recombinant rice was screened by stepwise regression, and the comprehensive evaluation system was constructed. The results showed that the cooking quality indexes and texture quality indexes of high protein recombinant rice prepared by different proteins were quite different. The cumulative contribution rate of the three principal components extracted by principal component analysis reached 85.148%, which were 59.4725% (X_1), 17.527% (X_2) and 8.149% (X_3), respectively. Gumminess, dissolution of solid material, hardness, water absorption index, chewiness, cohesion, gelatinization degree, resilience and rice water absorption played a major role in the first principal component, while elasticity, expansion and

收稿日期: 2021-12-27

基金项目: 湖南省重点领域研发项目 (2019NK2131)。

作者简介: 邓慧清 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 粮食加工, E-mail: 1368112039@qq.com。

* 通信作者: 吴卫国 (1968-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 粮油加工, E-mail: 1061051403@qq.com。

iodine blue value played a major role in the second principal component. Water solubility index was an important index of the third principal component. Taking the comprehensive score of high protein recombinant rice obtained by principal component analysis as dependent variable (F value), and each index value participating in principal component analysis as independent variable, the theoretical model of comprehensive quality evaluation of high protein recombinant rice was established by stepwise regression analysis: $Y=0.915X_{\text{gumminess}}+0.208X_{\text{gelatinization degree}}-0.475X_{\text{dissolution of solid material}}+0.436X_{\text{resilience}}$. According to the model, the best quality of high protein recombinant rice was rice protein recombinant rice, followed by soybean protein isolate recombinant rice, having a good agreement and significant positively correlated with the comprehensive score of principal components ($P<0.01$), which further confirmed that the model had high reliability.

Key words: high protein reformed rice; principal component analysis; stepwise regression; quality evaluation; gumminess; gelatinization degree; dissolution of solid material; resilience.

蛋白质是人体生长发育不可或缺的营养素之一,能够提供人体激素、酶、抗体等物质合成的所需基础氨基酸^[1]。为满足消费者对蛋白质含量较高产品的需求^[2], Yu 等^[3] 在高蛋白膨化产品配方原料中添加蛋白粉。根据《食品安全国家标准预包装食品营养标签通则》达到“高蛋白”的标准,产品的总蛋白的含量必须不小于 12 g/100 g(固体)。

高蛋白重组米是指以富含淀粉的材料为主要原料,通过添加适当辅料使蛋白含量不小于 12 g/100 g(固体),经过挤压、切割、干燥等一系列工序制成与天然大米类似的颗粒米状制品,故又称营养强化米^[4-5]。王玉琦等^[6] 以碎米为原料,添加乳化锌,采用挤压法制备了富锌强化大米。胡爱军等^[7] 以 L-赖氨酸盐作为营养强化剂,制得的强化米中赖氨酸含量为 0.296%。Hussain 等^[8] 以大米粉为原料,通过添加维生素 A 和焦磷酸铁作为营养强化物质,采用双螺杆挤压机制备维生素 A 和铁元素强化米。Beck 等^[9] 大米淀粉中添加豌豆蛋白和豌豆纤维,以满足对营养均衡的新型食品日益增长的需求。重组米因其独特的营养功能、食用操作简便、价格低廉等优点,受到广大消费者的青睐,它既不改变人们食用大米的习惯,又能通过日常饮食摄入所需营养,达到促进人体健康的目的。

目前,对重组米的研究主要集中在营养强化^[10-12] 和加工工艺优化^[13-15], 尚未见对高蛋白重组米综合品质评价体系的报道。随着我国重组米销售市场日渐增大,产品品质参差不齐,建立合适的高蛋白重组米品质评价体系对其进一步开发新产品具有重要意义。主成分分析法是一种将多个变量,通过线性变换以选出重要变量来反应原始数据所提供信息的一种多元统计分析方法^[16], 是综合评定高蛋白重组米品质较好的方法。冯云霄等^[17] 通过对 32 个品种梨进行主成分分析和回归分析筛选出梨汁品质评价核心指标,并建立了梨汁品质等级判别函数。尹玲等^[18] 采用主成分分析法将 10 份口感明显不同的南瓜的感官指标和质构指标缩为 3 个主成分,通过主成分综合得分评价,提出选出南瓜感官评价的关键指标。王达等^[19] 利用主成分分析法将 5 个不同物料水分重组米的 15 个指标浓缩为 3 个主成分。本研究选取碎

米为主要原料,16 种常见蛋白粉为辅料,采用双螺杆挤压技术制备高蛋白重组米。通过测定 16 种高蛋白重组米的蒸煮品质、质构品质、糊化度、吸水性、水溶性、膨化度,分析高蛋白重组米品质之间的相关性,并结合主成分分析建立高蛋白重组米品质评价模型,得出高蛋白重组米综合得分。通过逐步回归分析建立高蛋白重组米综合评价理论模型,以期为高蛋白重组米的生产及其品质评价提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

鹰嘴豆蛋白粉、玉米蛋白粉、蛋清蛋白粉 西安泽郎生物升级有限公司;牛骨蛋白粉、蚕蛹蛋白粉、绿豆蛋白粉、豌豆蛋白粉、小麦蛋白粉、大米蛋白粉、土豆蛋白粉 陕西四海生物科技有限公司;乳清分离蛋白粉 郑州万搏化工产品有限公司;大豆分离蛋白粉 临沂山松生物制品有限公司;花生蛋白粉 陕西川久生物科技有限公司;藜麦蛋白粉 鱼胶原蛋白粉、燕麦蛋白粉 西安恒基化工有限公司;碎米 湖南角山米业有限责任公司;单、双甘油脂肪酸酯 张家港市中鼎添加剂有限公司;碘液(2 g/L) 以达科技有限公司;盐酸标定液(0.1004 mol/L) 北京北方伟业计量技术研究院;盐酸、硼酸、浓硫酸、氢氧化钾、氢氧化钠 分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

TA-XT2i Plus 质构仪 英国 Stable Micro Systems 公司;MZ-SYS28-2B 美的中式电蒸锅 广东美的生活电器制造有限公司;Varioskan Flash 多功能读数仪 赛默飞世尔科技;TDZ5 台式低速离心机 湖南赫西仪器装备有限公司;RST-100RB 热泵烘干除湿箱 上海湿腾电器有限公司;ZNCL-B140×140 智能磁力搅拌机 巩义市中天仪器科技有限公司;FMHE36-24 双螺杆挤压机 湖南富马科食品工程技术有限公司;吸尘式粉碎机 长沙市岳麓区中南制药机械厂;GFL-230 电热鼓风干燥箱、DK-98- II 恒温水浴锅 天津市泰斯特仪器有限公司;VAP 50s OT 全自动凯氏定氮仪 德国 Gerhardt 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 配料设计 将碎米粉碎过 80 目后,根据预实验称取占进料干基比重为 11% 的鹰嘴豆蛋白粉、玉

米蛋白粉、蛋清蛋白粉、牛骨蛋白粉、蚕蛹蛋白粉、绿豆蛋白粉、豌豆蛋白粉、小麦蛋白粉、大米蛋白粉、土豆蛋白粉、乳清分离蛋白粉、大豆分离蛋白粉、花生蛋白粉、藜麦蛋白粉、鱼胶原蛋白粉、燕麦蛋白粉分别倒入碎米粉中,在每份样品中添加占进料干基比重为 0.3% 单、双甘油脂肪酸酯,搅拌均匀。

1.2.2 高蛋白重组米挤压制备 碎米(早籼米)→粉碎过筛→按比例混合→喂料→挤压蒸煮→切割造粒→干燥→冷却→成品

挤压工艺参数及干燥条件:喂料速度为 13 kg/h,物料加水量为 19%,螺杆转速为 160 r/min,切刀转速为 1400 r/min,挤压机腔体温度从进料端到出料端的各区(T2~T6)温度依次为 45、100、100、70、50 ℃。制备的挤压重组米首先在温度为 35 ℃ 的流化床中初步干燥 10 min,再置于 35 ℃ 烘箱中烘干 7 h,取出备用。

1.2.3 糊化度测定 参考王宝石等^[20]方法,并做适当修改。将样品粉碎过筛(80 目),取 0.1 g 样品悬浮于 49 mL 蒸馏水中,加 1 mL 10 mol/L 的 KOH 溶液,磁力搅拌 5 min 后,4500 r/min,离心 10 min。取 0.2 mL 上层清液,加 0.2 mL 的 0.2 mol/L HCl 溶液,再加入 15 mL 蒸馏水,最后加入碘液(1 g 碘、4 g 碘化钾溶解到 100 mL 蒸馏水中)0.2 mL,在波长为 600 nm 的酶标仪下测定吸光度, A_1 。

另取 0.1 g 样品悬浮于 47.5 mL 蒸馏水,加 2.5 mL 10 mol/L 的 KOH 溶液,磁力搅拌 5 min 后,4500 r/min 条件下离心 10 min。取 0.2 mL 上层清液,加入 0.2 mL 的 0.5 mol/L HCl 溶液,再加入 15 mL 蒸馏水,最后加入碘液 0.2 mL,在波长为 600 nm 的酶标仪下测定吸光度, A_2 。

$$\text{糊化度} = \frac{A_1}{A_2}$$

1.2.4 质构特性测定 参考陈轩等^[21]的方法并适当修改,采用物性测试仪对不同高蛋白重组米的硬度、弹性、内聚性、胶粘性、咀嚼性、回复性进行测定。称取重组米 10 g 放入铝盒中,在装有挤压重组米的小铝盒中加入 8 mL 水,然后迅速搅拌,并放入已预热的蒸锅中蒸 13 min,冷却 1 h 后,选取 4 粒米饭均匀对称放在质构仪载物台上,用 P/36R 探头进行测定,测试前速度 1.0 mm/s,测试速度 0.5 mm/s,测试返回速度 1.0 mm/s,压缩比 50%,触发力 5.0 g。每个样品平行测定 5 次,去掉结果中的最大值和最小值,取平均值为最后结果。

1.2.5 蒸煮特性的测定 蒸煮特性各指标参考王肇慈^[22]的方法测定并适当修改。

1.2.5.1 大米吸水率测定 称取 m_0 整大米样品,放入钢丝笼(m_1)中,置于 250 mL 的烧杯中,加入 50 ℃ 蒸馏水洗至 100 mL,在沸水锅中蒸 20 min,取出钢丝笼放置烧杯上至不再有米汤滴下,然后置于洁净的干纱布上冷却 30 min,称重 m_2 。米汤干物质以每克

干大米中含有干物质的毫克数来表示。

$$\text{大米吸水率}(\%) = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \times 100$$

1.2.5.2 米汤干物质测定 将米汤稀释至 100 mL,4500 r/min,离心 10 min。取 10 mL 放于干净铝盒(m_3)中,烘干,称重(m_4)。

$$\text{米汤干物质}(\%) = \frac{m_4 - m_3}{m_0} \times \frac{100}{10}$$

1.2.5.3 碘蓝值测定 取测定米汤干物质的离心液 1.0 mL 于约 10 mL 蒸馏水中,加入 0.5 mol/L HCl 溶液 5 mL 及 0.2 g/100 mL 碘试剂 1 mL,定容 50 mL,于波长 660 nm 处,测定吸光度。

1.2.6 水溶性指数(WSI)与吸水性指数(WAI)的测定 水溶性指数和吸水性指数参考文献 [4,23-24] 测定。称取 0.5 g 样品放入带盖离心管(m_1)中,加水 10 mL 后剧烈振荡使样品均匀分散于水中。于 30 ℃ 水浴下放置,每间隔 1 min 取出振荡,使样品粉末尽量维持悬浮状态,30 min 后取出以 4000 r/min 离心 10 min,离心后将上清液倒入干燥铝盒(m_2),于 105 ℃ 烘箱烘干至恒重(m_3),倒出上清液后称量离心管及内容物的重量(m_4)。WAI、WSI 分别依下列公式计算,每组样品测 3 次,取平均值。

$$\text{WSI} = \frac{m_3 - m_2}{0.5} \times 100$$

$$\text{WAI} = \frac{m_4 - m_1}{0.5} \times 100$$

1.2.7 径向膨化度测定 参考蒋卉^[25]方法测定。用游标卡尺测量重组米的直径,每批样品随机测定 10 次,取平均值 d_0 ,再除以模口直径 d_1 ,得到重组米的径向膨化度

$$\text{径向膨化度} = \frac{d_0}{d_1}$$

1.2.8 高蛋白重组米感官评价方法 参考 GB/T 15682-2008《粮油检验稻谷、大米蒸煮食用品质感官评价方法》并适当修改。称取挤压重组米各 25 g 分别放入蒸饭小铝盒中,在装有挤压重组米的小铝盒中加入 20 mL 水,迅速搅拌,放入已预热的蒸锅中蒸 15 min。选择 15 名食品专业同学,根据表 1 进行评分,去掉最高分和最低分,取平均值。

1.3 数据处理

本试验除特殊说明外,所有指标测定均重复三次,结果所示数据均为 3 次平行试验的平均值。选用 SPSS Statistics 25.0 软件对实验数据进行描述性分析、相关性分析、主成分分析、逐步回归分析,用 Origin 2018 64Bit 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同高蛋白重组米主要品质分析

由表 2 中可知,16 个样品糊化度的范围是 79.006%~97.227%,其中大米蛋白的糊化度最高,达

表 1 高蛋白重组米感官评价标准
Table 1 Sensory evaluation scale of high protein reformed rice

评定项目	具体特征	分值(分)	
气味(20分)	无米饭香气, 有不愉快味	0~9	
	无米饭香味, 但无异味	10~14	
	米饭香气清淡	15~17	
	米饭香气浓郁	18~20	
色泽(15分)	颜色发暗或有异色, 无光泽	0~7	
	颜色不均一, 稍有光泽	8~11	
	颜色均一, 有明显光泽	12~15	
	部分饭粒爆花或不完整	0~2	
形态(5分)	米饭大部分结构紧密	3	
	米饭结构紧密饱满, 饭粒完整性好	4~5	
适口性(30分)	黏性(4分)	有粘性, 黏牙; 或无黏性	1
		有粘性, 基本不粘牙	2~3
		滑爽, 有粘性, 不粘牙	4
		偏硬或偏软	1~6
	软硬度(12分)	感觉略硬或略软	7~10
		软硬适中	11~12
	弹性(14分)	米饭疏松, 干燥、有渣	1~6
		稍有嚼劲	7~11
		有嚼劲	12~14
		咀嚼时无清香和甜味, 但有异味	0~15
滋味(25分)	咀嚼时无清香和甜味, 但无异味	16~18	
	咀嚼时有淡淡清香和甜味	19~20	
	咀嚼时有浓郁的清香和甜味	21~25	
	冷饭质地(5分)	板结, 粘弹性差, 偏硬	0~1
结团, 粘弹性稍差, 稍变硬		2~3	
较松散, 粘弹性较好, 硬度适中		4~5	

到 97.227%, 这比方冲^[26]的结果要高, 这可能是由于挤压参数的差异; 回复性的范围是 0.464~0.603; 大米吸水率的范围是 301.025~397.612%; 膨化度的范围是 1.245~1.567; 米汤干物质含量、碘蓝值、胶粘性、咀嚼性、硬度分别为 32.396%、28.526%、21.200%、20.334%、19.100%, 样品间存在显著性差异, 其中米汤干物质又称固体溶出物, 在一定程度上反映内部结构的稳定性^[27]; 吸水性指数和水溶性指数的变异系数分别为 20.240%、18.684%, 这可能与所用蛋白质与水结合形成凝胶能力有关^[28]; 弹性变异系数为 3.561%, 内聚性的变异系数为 2.901%, 数据离散度较小, 其中内聚性反映物质内部结合程度^[29], 说明不同蛋白对重组米的弹性及其内聚性影响较小。综上所述, 说明试验选取的蛋白具有代表性。由表 3 可知, 12 号高蛋白重组米的蛋白含量最低, 为 12.068%, 14 号高蛋白重组米的蛋白含量最高, 为 17.564%, 均属于高蛋白食品。

2.2 高蛋白重组米不同指标间的相关性分析

对 13 个指标进行相关性分析, 如表 4 所示, 胶粘性、米汤干物质和吸水性指数与其他指标相关性最好, 受到 11 个指标的影响; 糊化度、硬度、内聚性受到 10 个指标的影响, 其中糊化度与吸水性指数呈极显著正相关($P<0.01$), 与水溶性指数呈显著负相关($P<0.05$), 这是因为在挤压过程中淀粉发生了糊化和

降解, 是此消彼长的关系^[30], 硬度与膨化度呈显著的负相关($P<0.05$), 这与前人的研究相一致^[31], 内聚性与米汤干物质呈极显著负相关($P<0.01$), 表明内聚性越大, 内部结构越紧密, 米汤干物质越小; 咀嚼性、回复性和大米吸水率受到 9 个指标的影响; 碘蓝值和水溶性指数受到 7 个指标的影响, 弹性与大米吸水率、米汤干物质、碘蓝值呈极显著正相关($P<0.01$), 与内聚性、吸水性指数呈显著负相关($P<0.05$); 膨胀度与其他指标相关性最差, 仅与硬度、胶粘性和咀嚼性呈显著性关系($P<0.05$)。可知, 各指标之间均存在不同程度的相关性, 从而导致各指标所提供的信息发生相互重叠, 因此有必要选取具有代表性的评价指标, 消除变量之间的相关性。

2.3 主成分分析

对 16 种不同高蛋白重组米的 13 个指标进行主成分分析, 以特征值 >1 为原则^[32], 提取出 3 个主成分 F_1 、 F_2 和 F_3 , 图 1 为其碎石图。由表 5 可知, 第一主成分、第二主成分、第三主成分的特征值分别为 7.731、2.278、1.059, 其累积贡献率分别为 59.472%、76.999%、85.148%, 信息损失较少, 能比较全面地反映出高蛋白重组米品质指标构成的原始信息。高蛋白重组米的载荷矩阵与特征向量如表 6 所示, 载荷图如图 2 所示, 载荷绝对值的大小与其对主成分的贡献率呈正比。由表 6 可知, 胶粘性、米汤干物质、

表 2 不同蛋白制备的高蛋白重组米主要品质指标变异情况

Table 2 Variation of main quality indexes of hi gh protein reformed rice with different protein

重组米编号	蛋白名称	糊化度(%)	硬度(g)	弹性	内聚性	胶粘性	咀嚼性	回复性	大米吸水率(%)	米汤干物质(%)	碘蓝值	水溶性指数(%)	吸水性指数(%)	膨化度
1	鹰嘴豆蛋白	94.850±0.764 ^a	958.920±12.038 ^{ef}	0.922±0.033 ^{bc}	0.749±0.015 ^{ab}	718.045±8.818 ^c	661.740±24.806 ^{cd}	0.540±0.028 ^{bc}	301.025±3.041 ^g	67.174±3.725 ^{ghi}	0.105±0.004 ^e	13.607±0.021 ^{def}	670.156±1.087 ^{cd}	1.107±0.029 ^a
2	玉米蛋白	94.325±0.980 ^a	769.527±26.926 ^b	0.916±0.037 ^{bc}	0.757±0.010 ^a	582.394±25.710 ^g	532.915±16.225 ^g	0.571±0.024 ^{ab}	317.648±8.003 ^f	71.705±3.362 ^{efh}	0.102±0.001 ^{ef}	14.646±0.289 ^{abc}	656.919±2.162 ^c	1.088±0.033 ^{ab}
3	蛋清蛋白	94.530±0.437 ^a	994.677±41.223 ^{de}	0.937±0.046 ^{bc}	0.735±0.009 ^b	730.510±24.169 ^f	684.721±44.568 ^c	0.526±0.021 ^{cd}	310.838±2.830 ^f	63.839±4.224 ⁱ	0.071±0.001 ^j	13.155±0.664 ^f	631.129±4.192 ^{cd}	1.071±0.023 ^{bcd}
4	牛骨胶原蛋白	79.006±0.663 ^b	611.951±41.661 ^f	0.944±0.068 ^{bc}	0.708±0.028 ^d	433.674±40.712 ^h	409.686±50.216 ^f	0.468±0.032 ^e	340.148±1.018 ^{cd}	108.222±7.330 ^d	0.104±0.002 ^{ef}	15.675±0.156 ^e	462.234±1.769 ^{gh}	1.038±0.023 ^{ef}
5	蚕蛹蛋白	86.854±0.397 ^c	619.021±22.086 ^f	0.979±0.007 ^b	0.705±0.012 ^d	436.440±18.888 ^h	427.329±19.111 ^h	0.474±0.037 ^e	346.865±3.770 ^e	107.122±4.695 ^d	0.104±0.003 ^{ef}	15.599±0.204 ^e	485.331±1.976 ^g	1.030±0.021 ^f
6	绿豆蛋白	89.552±0.704 ^c	781.889±19.798 ^h	0.912±0.084 ^c	0.746±0.010 ^{ab}	583.547±16.164 ^f	532.428±57.353 ^g	0.563±0.014 ^{ab}	314.104±2.406 ^f	66.300±0.121 ^{hi}	0.083±0.002 ⁱ	14.746±0.646 ^{abc}	608.767±0.868 ^{de}	1.088±0.017 ^{ab}
7	豌豆蛋白	96.751±0.839 ^a	1010.210±40.365 ^{cd}	0.915±0.050 ^{bc}	0.747±0.015 ^{ab}	755.054±43.405 ^{de}	690.151±44.682 ^c	0.580±0.029 ^a	330.155±6.235 ^e	74.380±4.063 ^f	0.113±0.002 ^d	13.496±0.241 ^{ef}	629.304±1.328 ^{cd}	1.091±0.016 ^{ab}
8	小麦蛋白	88.289±0.780 ^d	926.843±34.185 ^f	0.958±0.022 ^{bc}	0.710±0.010 ^d	658.057±19.450 ^f	629.988±11.574 ^{de}	0.496±0.014 ^{de}	326.697±1.418 ^e	76.262±3.033 ^f	0.110±0.003 ^d	10.120±0.452 ^h	444.324±1.662 ^h	1.035±0.012 ^{ef}
9	大米蛋白	97.227±0.374 ^b	1189.927±45.123 ^a	0.959±0.021 ^{bc}	0.762±0.015 ^a	905.858±21.270 ^a	869.143±37.850 ^f	0.602±0.027 ^a	302.531±2.362 ^g	56.381±2.193 ⁱ	0.084±0.001 ⁱ	5.925±0.172 ⁱ	747.665±1.239 ^a	1.089±0.015 ^{ab}
10	乳清分离蛋白	92.534±1.145 ^b	1051.323±29.903 ^{bc}	0.940±0.011 ^{bc}	0.749±0.007 ^{ab}	787.494±18.065 ^{cd}	740.102±17.442 ^b	0.504±0.028 ^{abc}	313.112±2.955 ^f	72.609±3.470 ^g	0.086±0.001 ⁱ	11.591±0.950 ^e	548.547±1.683 ^f	1.062±0.017 ^{cd}
11	大豆分离蛋白	86.083±0.517 ^{ef}	1089.524±42.719 ^f	0.924±0.033 ^{bc}	0.764±0.012 ^a	832.909±43.694 ^b	768.729±25.342 ^b	0.603±0.047 ^a	346.054±0.046 ^c	74.899±2.337 ^f	0.095±0.001 ^f	13.475±0.960 ^{ef}	711.465±1.733 ^b	1.073±0.020 ^{bc}
12	藜麦蛋白	79.998±1.056 ^b	862.315±49.297 ^g	0.916±0.010 ^{bc}	0.731±0.010 ^{bc}	629.996±37.100 ^f	577.183±36.588 ^g	0.474±0.012 ^e	334.124±5.153 ^{de}	100.297±2.778 ^e	0.101±0.001 ^f	14.320±0.138 ^{gde}	480.899±0.838 ^g	1.029±0.024 ^f
13	花生蛋白	93.001±1.284 ^b	1078.704±46.926 ^b	0.917±0.028 ^{bc}	0.766±0.012 ^a	825.998±43.537 ^{bc}	757.174±32.406 ^b	0.580±0.034 ^a	338.064±6.992 ^d	76.666±0.705 ^f	0.090±0.001 ^f	14.514±0.187 ^{bcd}	579.203±0.521 ^{ef}	1.066±0.025 ^{cd}
14	鱼胶原蛋白	85.596±0.826 ^f	794.431±25.882 ^h	0.954±0.021 ^{bc}	0.711±0.007 ^b	564.994±20.642 ^g	539.383±28.113 ^g	0.464±0.017 ^e	359.239±3.929 ^b	124.768±3.300 ^e	0.134±0.002 ^c	15.505±0.143 ^{ab}	380.887±0.050 ⁱ	1.026±0.020 ^f
15	燕麦蛋白	85.434±0.651 ^f	772.967±43.411 ^h	1.038±0.095 ^a	0.736±0.009 ^b	568.850±33.395 ^g	592.475±84.052 ^{ef}	0.534±0.027 ^{bcd}	390.706±4.531 ^a	137.875±1.872 ^h	0.168±0.001 ^b	15.453±0.822 ^{ab}	406.907±1.859 ⁱ	1.052±0.10 ^{de}
16	土豆蛋白	83.805±0.907 ^g	775.675±18.603 ^h	0.978±0.007 ^b	0.714±0.012 ^{cd}	553.853±13.891 ^g	541.918±16.568 ^g	0.500±0.015 ^{de}	397.612±2.267 ^a	153.244±2.136 ^f	0.188±0.001 ^a	14.922±0.283 ^{abc}	469.805±1.820 ^{gh}	1.032±0.018 ^f
最大值		97.227	1189.927	1.038	0.766	905.858	869.143	0.603	397.612	153.244	0.188	15.675	747.665	1.567
最小值		79.006	611.951	0.912	0.705	433.674	409.686	0.464	301.025	56.381	0.071	5.925	380.887	1.245
均值		89.240	892.994	0.944	0.737	660.480	622.192	0.530	335.558	89.484	0.109	13.547	557.096	1.383
标准差		5.742	170.564	0.034	0.021	140.024	126.518	0.049	28.293	28.983	0.031	2.531	112.759	0.099
变异系数(%)		6.435	19.100	3.561	2.901	21.200	20.334	9.201	8.432	32.390	28.526	18.684	20.240	7.148

注:每列不同小写字母代表数据的显著性差异(P<0.05)。

表 3 挤压后重组米蛋白质含量(干基)
Table 3 Protein content of reformed rice after extrusion (dry basis)

重组米编号	蛋白质(%)	重组米编号	蛋白质(%)
1	14.246	9	15.111
2	15.673	10	15.625
3	14.885	11	15.860
4	17.506	12	15.385
5	17.338	13	15.663
6	15.252	14	17.564
7	14.815	15	12.068
8	15.194	16	14.298

表 4 高蛋白重组米不同指标间的相关性
Table 4 Correlation between different indexes of hi gh protein reformed rice

指标	糊化度	硬度	弹性	内聚性	胶粘性	咀嚼性	回复性	大米吸水率	米汤干物质	碘蓝值	水溶性指数	吸水性指数	膨化度
糊化度	1												
硬度	0.635**	1											
弹性	-0.305	-0.329	1										
内聚性	0.637**	0.726**	-0.450*	1									
胶粘性	0.651**	0.996**	-0.352	0.785**	1								
咀嚼性	0.632**	0.988**	-0.205	0.746**	0.988**	1							
回复性	0.662**	0.648**	-0.314	0.886**	0.701**	0.680**	1						
大米吸水率	-0.620**	-0.450*	0.663**	-0.445*	-0.46*	-0.381	-0.321	1					
米汤干物质	-0.711**	-0.627**	0.670**	-0.641**	-0.646**	-0.570*	-0.585**	0.930**	1				
碘蓝值	-0.431*	-0.417	0.663**	-0.435*	-0.435*	-0.350	-0.302	0.880**	0.883**	1			
水溶性指数	-0.514*	-0.711**	0.040	-0.341	-0.685**	-0.722**	-0.380	0.520*	0.559*	0.369	1		
吸水性指数	0.703**	0.643**	-0.549*	0.803**	0.687**	0.630**	0.827**	-0.657**	-0.788**	-0.592**	-0.479*	1	
膨化度	-0.365	-0.477*	-0.204	-0.387	-0.471*	-0.525*	-0.383	-0.062	0.148	-0.083	0.278	-0.130	1

注: *和**分别表示达0.05和0.01显著水平。

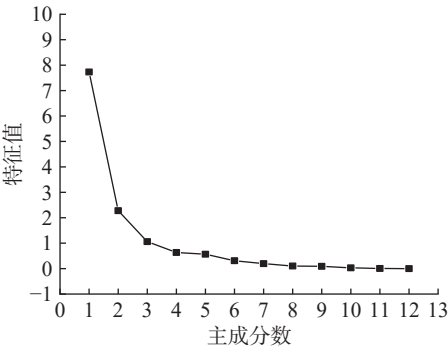


图 1 碎石图
Fig.1 Gravel map

硬度、吸水性指数、咀嚼性、内聚性、糊化度、回复性、大米吸水率对第一主成分起主要作用,载荷绝对值均大于 0.7;弹性、膨化度和碘蓝值对第二主成分起主要作用,其载荷值分别为 0.639、-0.690、0.613;水溶性指数是第三主成分的重要指标,其载荷值为 0.609。

为了消除不同单位和数据量纲的影响,需对各指标原始数据进行标准化处理,转化成均值为 0,标准差为 1 的无量纲数据,将标准化后的糊化度、硬度、弹性、内聚性、胶粘性、咀嚼性、回复性、大米吸水率、米汤干物质、水溶性指数、吸水性指数、膨化度以及碘蓝值数据记作 $X_1 \sim X_{13}$ 。根据表 7 中的特征向量可得出主成分得分,公式如下:

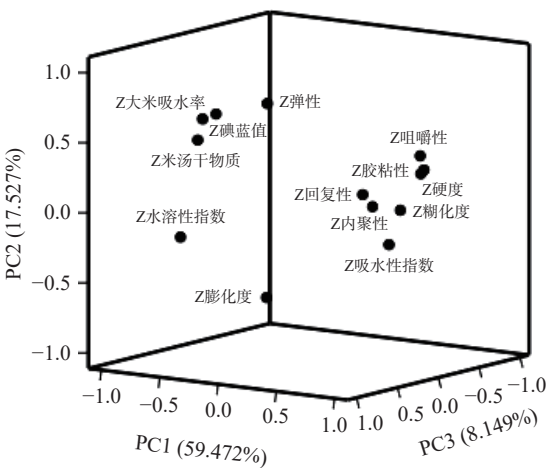


图 2 高蛋白重组米的因子载荷图

Fig.2 Plot factor loading of high protein reformed rice

$$F_1 = 0.288X_1 + 0.318X_2 - 0.193X_3 + 0.305X_4 + 0.325X_5 + 0.310X_6 + 0.284X_7 - 0.264X_8 - 0.318X_9 - 0.242X_{10} + 0.314X_{11} - 0.131X_{12} - 0.242X_{13}$$

式 (1)

$$F_2 = 0.036X_1 + 0.215X_2 + 0.423X_3 + 0.095X_4 + 0.205X_5 + 0.282X_6 + 0.152X_7 + 0.386X_8 + 0.262X_9 - 0.134X_{10} - 0.099X_{11} - 0.457X_{12} + 0.406X_{13}$$

式 (2)

表 5 主成分的特征值及贡献率

Table 5 Eigenvectors and percentage of accumulated contribution of principal components

成分	初始特征值			提取平方和载入		
	特征值	方差的贡献率(%)	累计贡献率(%)	合计	方差的贡献率(%)	累计贡献率(%)
1	7.731	59.472	59.472	7.731	59.472	59.472
2	2.278	17.527	76.999	2.278	17.527	76.999
3	1.059	8.149	85.148	1.059	8.149	85.148
4	0.634	4.875	90.023			
5	0.567	4.363	94.386			
6	0.309	2.378	96.764			
7	0.196	1.508	98.272			
8	0.101	0.778	99.05			
9	0.088	0.675	99.725			
10	0.031	0.241	99.966			
11	0.004	0.032	99.999			
12	0	0.001	100			

表 6 主因子载荷矩阵

Table 6 Principal component matrix

指标	载荷			特征向量		
	主成分1	主成分2	主成分3	主成分1	主成分2	主成分3
糊化度 X_1 (%)	0.800	0.054	0.021	0.288	0.036	0.020
硬度 X_2 (g)	0.883	0.325	-0.150	0.318	0.215	-0.146
弹性 X_3	-0.537	0.639	-0.260	-0.193	0.423	-0.253
内聚性 X_4	0.847	0.143	0.429	0.305	0.095	0.417
胶粘性 X_5	0.905	0.310	-0.079	0.325	0.205	-0.077
咀嚼性 X_6	0.861	0.425	-0.135	0.310	0.282	-0.131
回复性 X_7	0.789	0.229	0.466	0.284	0.152	0.453
大米吸水率 X_8 (%)	-0.734	0.583	0.252	-0.264	0.386	0.245
米汤干物质 X_9 (%)	-0.885	0.395	0.096	-0.318	0.262	0.093
水溶性指数 X_{10} (%)	-0.674	-0.202	0.609	-0.242	-0.134	0.592
吸水性指数 X_{11} (%)	0.872	-0.149	0.264	0.314	-0.099	0.257
膨化度 X_{12}	-0.363	-0.690	0.001	-0.131	-0.457	0.001
碘蓝值 X_{13}	-0.674	0.613	0.173	-0.242	0.406	0.168

$$F_3 = 0.020X_1 - 0.146X_2 - 0.253X_3 + 0.417X_4 - 0.077X_5 - 0.131X_6 + 0.453X_7 + 0.245X_8 + 0.093X_9 + 0.592X_{10} + 0.257X_{11} + 0.001X_{12} + 0.168X_{13}$$

式(3)

以第一、第二、第三主成分的方差贡献率为权重,可得高蛋白重组米的品质评价模型:

$$F = 0.595F_1 + 0.175F_2 + 0.081F_3$$

式(4)

通过式(4)计算,可得高蛋白重组米品质的综合评分,综合评分越高,高蛋白重组米品质越好,结果如表7所示。由表7可知,样品的感官评价和综合评价体系排名基本一致,因此可以认为基于主成分分析法的高蛋白重组米品质评价体系能较为客观地反映高蛋白重组米的品质,具有一定的可行性。依据此品质评价模型(表8),9号大米蛋白制备的高蛋白重组米综合评分最高,其次是11号大豆分离蛋白,评分最低的为4号牛骨胶原蛋白。因此,高蛋白重组米品质优劣对应的蛋白顺序为:大米蛋白、大豆分离蛋白、花生蛋白、乳清分离蛋白、豌豆蛋白、蛋清蛋白、鹰嘴豆蛋白、玉米蛋白、绿豆蛋白、小麦蛋白、藜麦

蛋白、燕麦蛋白、土豆蛋白、鱼胶原蛋白、蚕蛹蛋白、牛骨胶原蛋白。

2.4 高蛋白重组米综合品质评价理论模型的建立与验证

以主成分分析得到的各高蛋白重组米综合得分为因变量(F值),以参加主成分分析的各指标值为自变量,进行逐步回归分析,建立高蛋白重组米品质理论预测模型,结果表明,胶粘性、糊化度、米汤干物质以及回复性被引入公式,能够代表3个主成分,成为有效指标。因此,得到的回归模型为: $Y = 0.915X_{\text{胶粘性}} + 0.208X_{\text{糊化度}} - 0.475X_{\text{米汤干物质}} + 0.436X_{\text{回复性}}$, R^2 为 0.996, 调整 R^2 为 0.993, 接近 1, 说明估计的模型对观测值的拟合程度很高。方差分析结果表明 Sig 值 < 0.05, 因此认为回归方程有效。将不同高蛋白重组米的对应变量代入模型,得到每种高蛋白重组米综合品质的理论得分,并将该评分与利用主成分分析得到的综合得分进行相关性分析,如表9所示, $R = 0.996$ ($P < 0.01$), 说明该模型与实际评估结果相一致,具有很高的可靠

表 7 不同高蛋白重组米综合得分及感官评分排名

Table 7 Rankin g of comprehensive scores and sensory scores of different high protein reformed rice

重组米编号	评分及排名						
	F ₁ 得分	F ₂ 得分	F ₃ 得分	综合得分	综合排名	感官评分	感官排名
1	1.859	-0.863	0.268	1.082	7	70.38	4
2	0.877	-1.290	1.479	0.509	8	68.84	7
3	1.905	-0.493	-0.615	1.082	6	68.10	9
4	-3.775	-2.258	-0.227	-2.756	16	65.36	14
5	-3.437	-1.394	-0.403	-2.430	15	57.46	16
6	0.665	-1.477	0.974	0.298	9	68.40	8
7	1.890	-0.185	0.767	1.248	5	69.02	6
8	-0.266	0.520	-2.151	-0.296	10	66.88	9
9	4.923	0.948	-1.446	3.136	1	74.22	1
10	2.007	0.581	-1.139	1.255	4	69.98	5
11	2.563	0.826	1.235	1.870	2	71.76	2
12	-1.466	-1.452	-0.374	-1.182	11	67.48	10
13	2.456	0.742	1.014	1.768	3	71.30	3
14	-3.196	-0.041	-0.465	-2.084	14	66.70	12
15	-3.187	3.353	0.542	-1.485	12	62.28	15
16	-3.818	2.483	0.541	-2.014	13	66.44	13

表 8 高蛋白重组米预测模型得分及排名

Table 8 Prediction model score and ranking of high protein reformed rice

重组米编号	评分及排名		重组米编号	评分及排名	
	Y得分	排名		Y得分	排名
1	1.034	5	9	3.078	1
2	0.331	8	10	0.993	7
3	1.033	6	11	1.903	2
4	-2.714	16	12	-1.212	11
5	-2.340	15	13	1.874	3
6	0.201	9	14	-1.924	13
7	1.584	4	15	-1.495	12
8	-0.138	10	16	-2.207	14

表 9 理论模型得分与综合评价模型得分的相关性

Table 9 Correlation between theoretical model score and comprehensive evaluation model score

	综合得分	回归得分
综合得分	1	
回归得分	0.996**	1

注: **表示0.01显著水平。

性。基于此模型,未来可以对高蛋白重组米的胶粘性、糊化度、米汤干物质以及回复性 4 个指标进行测试,计算得分,对高蛋白重组米品质进行综合评价。

3 结论

不同蛋白制备的高蛋白重组米的质构品质、蒸煮品质具有较大的差异。本试验通过主成分分析,对不用蛋白制备高蛋白重组米的综合品质进行评价,结果表明大米蛋白制备的高蛋白重组米综合品质最好,其次是大豆分离蛋白,与感官评分结果具有较高的一致性。通过逐步回归法建立了高蛋白重组米综合品质评价理论模型: $Y=0.915X_{\text{胶粘性}}+0.208X_{\text{糊化度}}-0.475X_{\text{米汤干物质}}+0.436X_{\text{回复性}}$ 。此理论模型可以很好地和通过主成分分析建立的评价体系相拟合,说明其具有很高的可靠性。利用主成分法构建高蛋白重组

米的品质评价模型,可将多维问题简化,并对开发不同挤压营养米的质量评价方法具有一定的指导意义。

参考文献

[1] LV C, ZHAO G, NIN G Y. Interactions between plant proteins/ enzymes and other food components, and their effects on food quality[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(8): 1718-1728.

[2] DAY L, SWANSON B G. Functionality of protein-fortified extrudates[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2013, 12(5): 546-564.

[3] YU L, RAMASWAMY H S, BOYE J. Protein rich extruded products prepared from soy protein isolate-corn flour blends[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2013, 50(1): 279-289.

[4] 张克, 朱子博, 毕荃等. 二次挤压制备重组米的响应面优化及品质研究[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(16): 133-139. [ZHANG K, ZHU Z B, BI Q et al. Response surface optimization and quality research during the preparation of recombinant rice by two times of extrusion shaped[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(16): 133-139.]

[5] 张志清, 熊善波, 李远志等. 工程重组米质构测定 (TPA) 与感官评价相关分析[J]. *中国粮油学报*, 2011, 26(10): 1-5. [ZHANG Z Q, XION G S B, LI Z Y, et al. Relationship between texture profile analysis and sensory evaluation of artificial rice[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2011, 26(10): 1-5.]

[6] 王玉琦, 张如春, 张欣, 等. 挤压碎米制备富锌强化大米[J]. *食品科学*, 2019, 40(4): 279-285. [WANG Y Q, ZHANG R C, ZHAN G X, et al. Preparing zinc enriched rice by extruding broken rice[J]. *Food Science*, 2019, 40(4): 279-285.]

[7] 胡爱军, 郑捷, 王一鸣, 等. 赖氨酸营养强化米的工艺研究[J]. *粮油加工*, 2010(10): 59-62. [HU A J, ZHENG J, WANG Y M, et al. Study on the technology of lysine nutrient enhancement rice[J]. *Cereals and Oils Processing*, 2010(10): 59-62.]

[8] HUSSAIN S Z, SIN GH B, NAIK H R. Viscous and thermal behaviour of vitamin A and iron-fortified reconstituted rice[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2014, 49(5):

1324-1329.

[9] BECK S M, KNOERZER K, FOERSTER M, et al. Low moisture extrusion of pea protein and pea fibre fortified rice starch blends[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 231: 61-71.

[10] 郭世龙, 肖志刚, 陈革, 等. 芋艿头全粉对富硒芋艿头营养重组米结构及特性的影响[J]. *食品科技*, 2020, 45(1): 232-239.

[GUO S L, XIAO Z G, CHEN G, et al. Effects of whole taro flour on structure and characteristics of selenium-rich taro nutrition recombined rice[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(1): 232-239.]

[11] GANACHARI A, NIDONI U, HIREGOUDAR S, et al. Development of rice analogues fortified with iron, folic acid and vitamin A[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022: 1-8.

[12] SUMARDIONO S, BUDIYONO B, KUSUMAYANTI H, et al. Production and physicochemical characterization of analog rice obtained from sago flour, mung bean flour, and corn flour using hot extrusion technology[J]. *Foods*, 2021, 10(12): 3023.

[13] 刘小禾, 王宜崧, 张克, 等. 营养重组米的工艺优化及营养素对品质的影响[J]. *食品工业*, 2020, 41(7): 329-332. [LIU X H, WANG Y S, ZHANG K, et al. Process optimization of nutrient restructured rice and the effect of nutrients on quality[J]. *The Food Industry*, 2020, 41(7): 329-332]

[14] ZAMBRANO Y, CONTARDO I, MORENO M C, et al. Effect of extrusion temperature and feed moisture content on the microstructural properties of rice-flour pellets and their impact on the expanded product[J]. *Foods*, 2022, 11(2): 198.

[15] RESHI M, SIRWAL A A, HUSSAIN S Z, et al. Response surface approach for optimizing operational parameters of vitamin D₃ fortified extrudates from buckwheat and rice flour blends-physicochemical, glycemic response and storage stability studies[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021: e15973.

[16] 苏键, 陈军, 何洁. 主成分分析法及其应用[J]. *轻工科技*, 2012, 28(9): 12-13, 16. [SU J, CHEN J, HE J. Principal component analysis and its application[J]. *Light Industry Science and Technology*, 2012, 28(9): 12-13, 16.]

[17] 冯云霄, 何近刚, 程玉豆, 等. 非浓缩还原梨汁品质评价体系构建[J]. *食品科学*, 2021, 42(19): 74-80. [FEN G Y X, HE J G, CHEN G Y D, et al. Establishment of quality evaluation system for not from concentrate pear juice[J]. *Food Science*, 2021, 42(19): 74-80.]

[18] 尹玲, 王长林, 王迎杰, 等. 南瓜的感官品质、质构及生化分析[J]. *食品科学*, 2013, 34(5): 26-30. [YIN L, WAN G C L, WANG Y J, et al. Sensory quality, texture and chemical composition analysis of pumpkin[J]. *Food Science*, 2013, 34(5): 26-30.]

[19] 王达, 周彩欣, 简沛仪, 等. 物料加水量对重组米品质的影响及其评价模型的研究[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(16): 29-36.

[WANG D, ZHOU C X, JIAN P Y, et al. Establishment of a model to evaluate effects of water quantity recombined rice quality[J]. *Food Research and Development*, 201, 42(16): 29-36]

[20] 王宝石, 郑明珠, 闵伟红, 等. 响应曲面法对双螺杆挤压蒸煮玉米粉条件的优化[J]. *食品科学*, 2012, 33(14): 16-19. [WANG B S, ZHEN G M Z, MIN W H, et al. Optimization of two-screw ex-

trusion cooking process for corn flour by response surface methodology[J]. *Food Science*, 2012, 33(14): 16-19.]

[21] 陈轩, 向莉, 马晓灵, 等. 军用方便米饭的配方及食用品质[J]. *食品工业*, 2019, 40(6): 41-46. [CHEN X, XIANG L, MA X L, et al. Prescription and edible quality of military instant rice[J]. *The Food Industry*, 2019, 40(6): 41-46.]

[22] 王肇慈. 粮油食品品质分析[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2000. [WAN G Z C. Quality analysis of grain and oil[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2000.]

[23] 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.

[XIE T, SUN H R, KAN G L N, et al. Effect of twin-screw extrusion on physicochemical properties and quality characteristics of corn flour[J]. *Food Science*, 2019, 40(17): 183-189.]

[24] HAILU A, BEKELE Y, MOHAMMED A. Twin-screw extrusion of rice flour, carrot flour and soy protein isolate (SPI) blends: A response surface analysis[J]. *Ethiopian Journal of Applied Science and Technology*, 2019, 10(2): 40-45.

[25] 蒋卉. 杂粮复合米方便米饭品质改良研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2013. [JIANG H. Researches on quality improvement of coarse cereals mixed convenient rice[D]. Wuhan: University of Wuhan Polytechnic, 2013.]

[26] 方冲. 不同添加物对挤压重组米血糖生成指数及性质的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2018. [FANG C. Effects of different additives on glycemic index and properties of extruded rice[D]. Nanchang: University of Nanchang, 2018.]

[27] 杜雅荣. 高大豆膳食纤维复合米的研制[D]. 天津: 天津科技大学, 2017. [DU Y R. Properties of the rice analogues using extrusion technology of high soybean dietary fiber[D]. Tianjin: University of Tianjin, 2017]

[28] PHONGTHAI S, D'AMICO S, SCHOENLECHNER R, et al. Effects of protein enrichment on the properties of rice flour based gluten-free pasta[J]. *LWT*, 2017, 80: 378-385.

[29] 刘惠惠, 吴卫国, 廖卢艳. 市售挤压方便米饭品质评价[J]. *食品科学技术学报*, 2021, 39(6): 135-143. [LIU H H, WU W G, LIAO L Y. Quality evaluation of extruded instant rice sold in market[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2021, 39(6): 135-143.]

[30] 杜江美. 双螺杆挤压制备谷物早餐的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2012. [DU J M. Study on the influence of different modification methods on the quality of extruded rice raw materials and processing parameters[D]. Wuxi: University of Jiannan, 2012.]

[31] BORDOLOI R, GANGULY S. Extrusion technique in food processing and a review on its various technological parameters[J]. *Indian Journal of Scientific Research and Technology*, 2014, 2(1): 1-3.

[32] 刘伟, 张群, 李志坚, 等. 不同品种黄花菜游离氨基酸组成的主成分分析及聚类分析[J]. *食品科学*, 2019, 40(10): 243-250.

[LIU W, ZHAN G Q, LI Z J, et al. Principal component analysis and cluster analysis for evaluating free amino acids of different cultivars of daylily buds[J]. *Food Science*, 2019, 40(10): 243-250.]