

# 富硒芋艿头重组米的制备及其消化特性研究

王霞<sup>1</sup>, 郭世龙<sup>2</sup>, 鹿保鑫<sup>1</sup>, 仇丹<sup>3</sup>, 杨庆余<sup>2</sup>, 杨国强<sup>2</sup>, 代岚<sup>2</sup>, 肖志刚<sup>2</sup>

(1. 黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163319) (2. 沈阳师范大学粮食学院, 辽宁沈阳 110034)

(3. 宁波工程学院奉化研究院, 浙江宁波 315211)

**摘要:** 本研究以粳米碎米和芋艿头全粉为主要原料, 辅以硒营养元素, L- $\alpha$ -磷脂酰胆碱和单甘酯作为复合质构调节剂。采用挤压膨化法制备富硒芋艿头重组米, 通过正交试验对富硒芋艿头重组米的工艺进行优化, 得到的最佳工艺参数为: 挤压膨化温度 140 °C, 螺杆转速 180 r/min, 含水量 25% 和喂料速度 20 kg/h。最佳工艺条件下制得的富硒芋艿头重组米的硬度为 401.17 g, 黏聚性为 0.75 mJ, 弹性为 1.63 mm, 胶着性为 396.23 g, 咀嚼性为 4.05 mJ, 蒸煮损失率为 4.12%, 与粳米的质构特性和蒸煮损失率接近, 综合品质好于粳米, 挤压膨化前后硒含量无明显变化。富硒芋艿头重组米的结晶度降低, 形成了直链淀粉-脂类复合物, 表面呈现粗糙和不规则形状, 颗粒不完整, 黏度降低, 热稳定性和抗老化性得到改善。富硒芋艿头重组米的快速消化淀粉含量降低、慢消化淀粉和抗性淀粉含量升高、增加, 挤压膨化提高了重组米抗性淀粉和缓慢消化淀粉的含量。研究结果为开发硒和芋艿头产品, 具有低消化性能的淀粉类食品提供依据。

**关键词:** 硒; 芋艿头; 重组米; 工艺; 消化特性

文章编号: 1673-9078(2019)08-142-152

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.8.022

## Preparation and Digestive Characteristics of Artificial Rice Supplemented by Selenium-rich Taro

WANG Xia<sup>1</sup>, GUO Shi-long<sup>2</sup>, LU Bao-xin<sup>1</sup>, QIU Dan<sup>3</sup>, YANG Qing-yu<sup>2</sup>, YANG Guo-qiang<sup>2</sup>, DAI Lan<sup>2</sup>, XIAO Zhi-gang<sup>2</sup>

(1. College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

(2. Institute of Food, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China)

(3. Ningbo Institute of Engineering Fenghua Research Institute, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** In this study, japonica broken rice and taro head powder were used as the main raw materials, supplemented by selenium nutrient, L- $\alpha$ -phosphatidylcholine and monoglyceride as the composite texture regulator. Selenium-rich taro was prepared by extrusion method, through the orthogonal experiment for process optimization, the best technological parameters were obtained: extrusion temperature of 140 °C, the screw rotation speed of 180 r/min, moisture content of 25% and feed speed of 20 kg/h. Under the optimal processing conditions, the hardness, cohesion, elasticity, gluttony, chewing and loss rate of se-rich taro head reconstituted rice were 401.17 g, 0.75 mJ, 1.63 mm, 396.23 g, 4.05 mJ and 4.12%, respectively. The results were similar to those of japonica rice in texture and loss rate of cooking. The overall quality was better than japonica rice. Selenium-rich taro head recombinant rice had lower crystallinity, amylose - lipid complex, and the improved rough surface, irregular shape, incomplete particles, reduced viscosity, thermal stability and aging resistance. The contents of fast digestible starch, slow digestible starch and resistant starch in recombinant rice of se-rich taro head were decreased, and the contents of resistant starch and slowly digestible starch were increased. Starch and resistant starch in the recombinant rice of se-rich taro head were decreased, and the contents of resistant starch and slowly digestible starch were increased by extrusion. The results provide basis for developing starch food with low digestibility containing se and taro products.

**Key words:** selenium; taro; artificial rice; process; digestive characteristics

收稿日期: 2019-03-07

项目基金: 黑龙江省普通高等学校谷物副产物综合利用重点实验室开放课题基金 (HGW2017004); 宁波工程学院奉化研究院科学基金项目 (FHI-018119); 沈阳市中青年科技创新人才计划项目 (RC170367); 辽宁省高等学校基本科研项目 (LQN201708); 沈阳师范大学博士、引进人才科研项目启动基金 (BS201829)

作者简介: 王霞 (1971-), 女, 副教授, 研究方向: 农产品加工及贮藏工程

通讯作者: 肖志刚 (1972-), 男, 教授, 研究方向: 粮食油脂及植物蛋白工程

大米作为人们日常生活中最重要的主食之一<sup>[1,2]</sup>,含有丰富的营养物质、淀粉、维生素、蛋白质和矿物质元素等<sup>[3]</sup>,但大米蛋白质和氨基酸构成比例不合理,且随着加工精度的提高,营养物质损失严重<sup>[4]</sup>,因此需要对大米进行加工。奉化芋艿头口感丝滑、细腻、风味极佳,膳食纤维含量高,脂肪含量低,氨基酸种类丰富,包含8种人体必须的氨基酸,其色氨酸是谷物中没有的必须氨基酸<sup>[5]</sup>。因而深受大家普遍的喜爱喜爱。目前,市面上对芋艿头的加工相对简单,以蒸煮和鲜切芋艿头等产品为主,因此,开展芋艿头的深加工,研发独具芋艿头风味的产品有着十分重要的意义。硒在人体内含量为千分之一,虽含量很少很少,作用却很大,它是人体所必不可少的微量元素,其在人体无法合成,须要从外界摄取<sup>[6]</sup>。研究表明,硒具有防止肝坏死、预防糖尿病、防止心血管疾病和抗衰老等作用,可有效的提高人体的免疫力,与人体健康密切相关<sup>[7,8]</sup>。食物是人体摄入硒的主要来源,而天然食物中的硒含量较低,需要外部的摄入以满足人体对硒的需求,开发富含硒元素的食物,引导人们进行膳食补硒,提高硒的生物利用度已成为近年来研究的热点。

目前,国内对大米进行加工的方法主要有浸吸法、表面涂膜法以及挤压膨化法等工艺<sup>[9,10]</sup>。但浸吸法、表面涂膜法存在营养素保留性及食味品质较差等特点<sup>[11]</sup>。李天真<sup>[12]</sup>以葡萄糖酸锌作为锌强化剂,采用浸吸法得到锌强化营养大米。Kyritsi等<sup>[13]</sup>采用浸泡和喷淋米粒的方法制备富含维生素B的强化大米,得到较好的维生素保留率。但是该方法存在营养损失大、不能完全被浸渍、成本高等问题,它们都难以推广,而挤压膨化法制备营养重组米能够很好的解决这些问题,该方法加工的重组米可较好的保留营养素,具有稳定性好、营养价值高等特点。

本研究以粳米碎米和芋艿头为原料,粉碎后添加一定量的硒溶液、L- $\alpha$ -磷脂酰胆碱和单甘酯进行挤压膨化获得重组米,通过对富硒芋艿头重组米加工工艺的优化,获得高品质重组米的较优加工参数。通过X-射线衍射分析法、扫描电镜法对富硒芋艿头重组米晶体结构和外表特征进行表征,并对其糊化特性及消化特性进行分析,以期制得综合品质较佳,独具芋艿头风味的富硒芋艿头重组米,满足了人体日常对硒的需求。不仅解决了大米加工过程中营养损失严重的问题,提高了碎米副产物的利用效率,控制血糖变化,为开发硒和芋艿头产品提供了可靠的理论依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 原料与试剂

芋艿头全粉,宁波工程学院奉化研究院;粳米、碎粳米,市售;单甘酯,河南恩苗食品有限公司;L- $\alpha$ -磷脂酰胆碱,山海研卉生物科技有限公司;硒浓缩液(食品级)、硒先生(辽宁)生物纳米科技股份有限公司; $\alpha$ -淀粉酶、淀粉葡萄糖苷酶, Sigma 公司;葡萄糖氧化试剂盒(GOPOD),爱尔兰 Megazyme 公司;醋酸钠、无水乙醇、葡萄糖等试剂均为分析纯。

### 1.2 主要仪器设备

AEY-220型电子天平,湘仪天平仪器设备有限公司;RAV-3D快速粘度分析仪,澳大利亚 Newport 科学仪器公司;TPA质构仪,英国 Stable Micro System 公司;MM721NG1-PW型美的微波炉,广东美的微波电器制造有限公司;DHG-9146A型电热恒温鼓风干燥箱,上海精宏实验设备有限公司;DS56-III型双螺杆挤压膨化机,济南赛信膨化机械有限公司;JB-60B型粉碎机,江阴市宝利机械制造有限公司;X-射线衍射仪(XRD),德国 Bruker 公司;S-4800型高分辨场发射扫描电镜,日本日立公司。

### 1.3 试验方法

将粳米碎米进行粉碎、过100目筛后,与芋艿头全粉、单甘酯、L- $\alpha$ -磷脂酰胆碱和硒稀释溶液混合均匀,在预试验的基础上,确定原料比例为粳米粉:芋艿头全粉=0.5:0.5,硒稀释溶液质量浓度为3 mg/L 添加L- $\alpha$ -磷脂酰胆碱和单甘酯的质量分数分别为0.47%和0.04%。按照一定质量含水率进行调湿后进入挤压膨化机中进行造粒成型。研究挤压膨化过程中含水量、挤压膨化温度、螺杆转速及喂料速度对富硒芋艿头重组米综合品质的影响规律,以期制备综合品质较好的富硒芋艿头重组米。获得的重组米于45℃恒温干燥箱中干燥8~12 h,冷却后进行包装。富硒芋艿头重组米制备的具体工艺流程如下:

碎粳米、芋艿头全粉→粉碎→过筛→称重→预混→调湿→挤压熟化→切割成型→干燥→冷却→包装→成品

### 1.4 芋艿头全粉和粳米原料的主要组成成分分析

水分含量测定:参照GB 5009.3-2016标准,直接干燥法;淀粉含量测定:参照GB 5009.9-2016标准,酶水解法;直链淀粉含量测定:碘显色法;粗蛋白含量测定:参照GB 5009.5-2016标准,凯氏定氮法;膳

食纤维含量测定:参照 GB5009.88-2014 食品中膳食纤维的测定;灰分含量测定:参照 GB 5009.4-2016 标准,马弗炉法;粗脂肪含量测定:参照 GB 5009.6-2016 标准,索氏抽提法。

表 1 正交试验设计表

Table 1 Factors and levels of orthogonal experiment

水平	因素			
	A 物料含水量/%	B 挤压膨化温度/°C	C 螺杆转速/(r/min)	D 喂料速度/(kg/h)
1	20	120	160	18
2	25	140	180	20
3	30	160	200	22
4	35	180	220	24

### 1.5 试验设计

#### 1.5.1 单因素试验设计

试验选取螺杆转速(140、160、180、200、220、240 r/min),水分含量(15%、20%、25%、30%、35%、40%),挤压膨化温度(100、120、140、160、180、200 °C),喂料速度(16、18、20、22、24、26 kg/h)。其中挤压

模孔为长方形,切刀转速为 1000~1700 r/min,以米粒的综合品质为考察指标,优选出最优加工参数范围。

#### 1.5.2 正交试验设计

在单因素试验的基础上,以物料含水量、挤压膨化温度、螺杆转速、喂料速度为考察因素,通过正交试验对富硒芋艿头重组米加工参数进行优化。正交试验设计采用 L<sub>16</sub>(4<sup>4</sup>)正交试验,正交试验设计见表 1。

### 1.6 感官评价

参考张辉<sup>[14]</sup>和 GB/T 15682-2008<sup>[15]</sup>的方法,稍有改动。称取 10 g 富硒芋艿头重组米米粒,放入陶瓷小碗中,对米粒进行感官评价。称取 10 g 富硒芋艿头重组米,加入适量蒸馏水,使之刚好覆盖重组米的表面,放入微波炉中,中高温加热 7 min,得到即食米饭,进行米饭感官评价。米粒、米饭感官评价标准表见表 2 和 3。由 10 人组成评分小组,分别对熟化后的富硒芋艿头重组米米饭进行评分,去掉一个最高分和一个最低分,结果取剩下 8 个评分的平均值。

样品米感官评分=米粒感官评分×30%+米饭感官评分×70%

表 2 米粒感官评价标准

Table 2 Standard of sensory evaluation table of rice

评定项目	评分标准	评分/分
颜色 (30 分)	米粒颜色均匀,有光泽,不暗	21~30
	米粒颜色不均匀,稍有光泽,稍暗	11~20
	米粒颜色很不均匀,无光泽,很暗	0~10
外形 (40 分)	米粒形状美观,大小均匀,表面光滑无裂纹	31~40
	米粒形状较美观,大小较均匀,表面有少量裂纹	16~30
	米粒形状不美观,大小不均匀,表面裂纹较多	0~15
透明度 (30 分)	对光观察,米粒透明	21~30
	对光观察,米粒较透明	11~20
	对光观察,米粒不透明	0~10

表 3 米饭感官评价标准

Table 3 Standard of sensory evaluation table of steamed rice

评定项目	评分标准	评分/分
外观 (30 分)	米饭颜色均匀,不暗	8~10 分
	米饭颜色较均匀,稍暗	4~7
	米饭颜色不均匀,很暗	0~3
	米饭有明显光泽	8~10
	米饭稍有光泽	4~7
	米饭无光泽	0~3
	米饭结构紧密,饭粒完整性好	8~10
	米饭大部分结构紧密完整	4~7
	米饭开裂严重	0~3

转下页

接上页		
气味 (20分)	无异味, 具有芋艿头香味或米饭特有香味	15~20
	无明显异味, 具有芋艿头香味或米饭特有香味	8~14
	有明显的异味, 无芋艿头香味或米饭特有香味	0~7
滋味 (20分)	咀嚼时, 有浓郁的清香和甜味	15~20
	咀嚼时, 有淡淡的清香和甜味	8~14
	咀嚼时, 无清香和甜味	0~7
口感 (30分)	咀嚼时, 有黏性, 不粘牙	8~10
	咀嚼时, 有黏性, 基本不粘牙	4~7
	咀嚼时, 粘牙, 或无黏性	0~3
	米饭有嚼劲	8~10
	米饭稍有嚼劲	4~7
	米饭无嚼劲, 疏松, 感觉有渣	0~3
	米饭软硬适中	8~10
	感觉略硬或略软	4~7
	感觉很硬或很软	0~3

### 1.7 质构特性

称取 10 g 样品置于蒸饭铝盒中, 按 1:1 加入蒸馏水, 迅速搅拌, 微波中高温蒸煮 7 min。然后每个样品分别选取 3 粒米放在质构仪载物台上进行测定, 每个样品平行测定 7 次, 去掉结果中的最大值和最小值, 取其余 5 个数值的平均值为最后结果。使用 TPA 质构分析仪, TA36 探头测定时具体参数设置如下: 测试前速度: 1.00 mm/s; 测试中速度: 5.00 mm/s; 测试后速度: 5.00 mm/s; 压缩程度: 70%; 停留间隔: 5.00 s; 触发值: 3.0 g。

### 1.8 蒸煮损失率

参考张辉<sup>[14]</sup>的方法稍略作调整。称取 5.00 g ( $m_0$ ) 样品置于陶瓷碗中, 加入 100 mL 沸水, 微波中高温熟化 7 min 后取出, 将烧杯中的米汤倒入已恒重 ( $m_1$ ) 的烧杯中, 在 105 °C 下烘干至恒重 ( $m_2$ )。重复测定 3 次, 取平均值, 按公式 (1) 计算。

$$\text{蒸煮损失率} (\%) = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

### 1.9 品质评价

富硒芋艿头重组米品质评价参考章丽琳<sup>[16]</sup>的方法, 由感官评分、质构评分、蒸煮损失评分 3 部分构成。

计算方法如下:

综合评分 = 感官评分 × 40% + 质构评分 × 30% + 蒸煮损失评分 × 30%

质构评分标准参考王会然<sup>[17]</sup>的方法:

质构评分 (100 分) = 硬度 (25 分) + 弹性 (25 分) + 黏聚性 (25 分) + 咀嚼性 (25 分)

弹性、黏聚性、咀嚼性指标评分计算方法如下:  
指标评分 = 25 × (A/B)

式中: A 为指标平均值与最小值之差; B 为指标最大值与最小值之差。

其中, 硬度指标与挤压重组米口感呈负相关, 其指标评分算法如下:

硬度指标评分 = 25 - 25 × (C/D)

式中: C 为硬度平均值与最小值之差; D 为硬度最大值与最小值之差。

蒸煮损失评分标准如表 4 所示。

表 4 蒸煮损失评分标准

等级	评分标准
1	蒸煮损失率 < 3%: 90~100 分
2	蒸煮损失率 3%~6%: 80~90 分
3	蒸煮损失率 6%~9%: 60~80 分
4	蒸煮损失率 > 9%: 40~60 分

### 1.10 扫描电镜的测定

称取少量干燥的粉末样品镀金 90 s, 粉末放置于 S-4800 N 扫描电镜操作台上观察, 加速电压为 5.00 kV, 放大倍数为 500 的条件下进行检测观察。

### 1.11 结晶结构的测定<sup>[18]</sup>

淀粉样品的 X-射线衍射分析, 采用德国 BRUKERD 的 D8 型 X-射线衍射仪测量, 采用 Cu-K $\alpha$  靶, 石墨单色器, 40 kV 和 2000 mA, 扫描速度为 5°/min

在  $2\theta=5^{\circ}\sim 40^{\circ}$  范围扫描测得。相对结晶度采用软件 MDI Jade 6.0 拟合处理, 对原始图进行平滑处理, 连接衍射曲线上左右两端的最低点做出基线, 采用非线性高斯 (Gaussian) 和洛伦兹 (Lorentz) 混合函数对图谱进行拟合计算, 根据拟合曲线在衍射峰的下边缘划出一条平滑的曲线, 位于基线和拟合曲线之间的面积为非衍射面积, 衍射峰与平滑曲线之间的面积即为结晶峰衍射面积, 相对结晶度按公式 (2) 计算:

$$X_c(\%) = \frac{A_c}{A_c + A_n} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $A_c$  和  $A_n$  分别代表结晶区域和无定型区域,  $X_c$  为结晶度。

### 1.12 糊化特性的测定

准确称取 3.00 g 样品粉末, 加入 25.00 mL 蒸馏水, 混合后使用快速黏度测定仪 (RVA) 进行测定。测定条件:  $50^{\circ}\text{C}$  下保持 1 min, 以  $12^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的速度上升到  $95^{\circ}\text{C}$  (耗时 3.75 min),  $95^{\circ}\text{C}$  下保持 2.5 min, 以  $12^{\circ}\text{C}/\text{min}$  下降到  $50^{\circ}\text{C}$  (耗时 3.75 min),  $50^{\circ}\text{C}$  下保持 1 min, 过程中搅拌器速度为 160 r/min。

### 1.13 硒含量测定

富硒芋头重组米和对照组市售粳米经微波蒸煮后冻干、粉碎后测定硒含量, 其测定方法参考 GB 5009.93-2017《食品安全国家标准食品中硒的测定》[19]。

### 1.14 消化特性测定<sup>[20]</sup>

试验方法为: 准确量取 200 mg 的富硒芋头重组米淀粉样品, 并将其完全移入离心管中, 并向每个离心管依次添加 15 mL 醋酸钠缓冲液 ( $0.2\text{ mol/L}$ , pH 5.2), 用漩涡混匀器混匀后, 依次加入 10 mL 由  $\alpha$ -淀粉酶 ( $290\text{ U/mL}$ ) 和葡萄糖苷酶 ( $15\text{ U/mL}$ ) 组成的混合酶液。将离心管旋紧后放入恒温水浴锅中振荡培养, 同时计时。培养条件模拟人体消化条件, 温度为  $37^{\circ}\text{C}$ , 转速为 150 r/min。在计时到 20 和 120 min 时分别用移液枪吸取 0.5 mL 上清液, 并向其中分别加入 4 mL 无水乙醇。将其在离心机离心后, 用葡萄糖氧化酶测定试剂盒测定样品的葡萄糖含量  $G_{20}$  和  $G_{120}$ 。

淀粉的消化特性,  $RDS$ 、 $SDS$ 、 $RS$  具体计算公式 (3) ~ (5) 如下:

$$RDS(\%) = \frac{(G_{20} - FG) \times 0.9}{TS} \quad (3)$$

$$SDS(\%) = \frac{(G_{120} - G_{20}) \times 0.9}{TS} \quad (4)$$

$$RS(\%) = \frac{[TS - (RDS + SDS)]}{TS} \quad (5)$$

式中:  $G_{20}$ : 水解 20 min 后产生的葡萄糖含量, mg;  $FG$ : 淀粉中游离葡萄糖含量, mg;  $G_{120}$ : 水解 120 min 后产生的葡萄糖含量, mg;  $TS$ : 总淀粉含量, mg。

## 1.15 数据统计分析方法

所得数据均为三次重复的平均值。采用 SPSS 20.0 进行分析, 显著性分析用 Duncan 进行分析 ( $p < 0.05$ ), 用 Excel 和 Origin 8.5 软件做图。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验结果

#### 2.1.1 物料含水量对富硒芋头重组米品质的影响

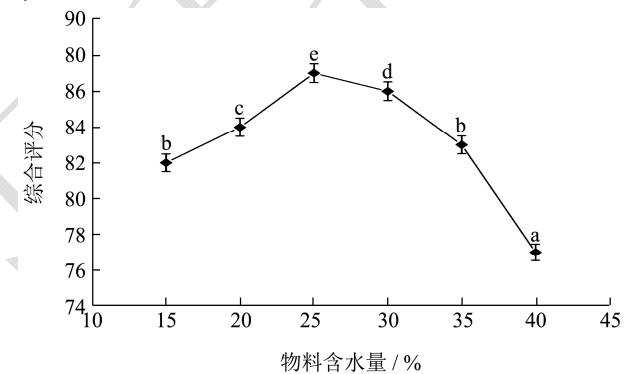


图 1 物料含水量对富硒芋头重组米品质的影响

Fig.1 Effect of material moisture content on the quality of selenium-enriched taro artificial rice

注: 小写字母不同表示有显著性差异 ( $p < 0.05$ )。图 2~4 同。

物料含水量对富硒芋头重组米综合评分如图 1 所示。随着物料含水量的增加, 富硒芋头重组米的综合评分呈先升高后降低的趋势, 综合评分在物料含水量为 25% 时达到最大值。水分含量影响物料在机筒中停留时间和出口处压力<sup>[21]</sup>, 当其他挤压膨化加工条件不变时, 若物料含水量过低则不利于淀粉团糊化, 导致挤出的产品难以成型, 且蒸煮后易断裂, 蒸煮损失率增大。若物料含水量过高时, 淀粉团流动性增强, 加工性能降低, 产品成型时出口压力降低, 产品的柔韧性差, 且出现黏牙和不爽滑的现象, 降低产品的食用品质<sup>[22]</sup>。因此, 考虑综合评分, 较适宜的含水量为 20%~35%。

#### 2.1.2 挤压膨化温度对富硒芋头重组米品质的影响

挤压膨化温度对富硒芋头重组米综合评分如图 2 所示。由图 2 可知, 随着挤压膨化温度的增大, 富

硒芋芋头重组米的综合评分呈先升高后降低的趋势,综合评分在挤压膨化温度为 140 °C 时达到最大值。当挤压膨化温度过低时,挤出产品结构较松散,不利于产品成型<sup>[23]</sup>,蒸煮损失较大。当挤压膨化温度过高时,挤出内外压力差过大造成产品表面膨化,冷却后表面不光滑,外观和蒸煮品质较差。因此,考虑综合评分,较适宜的挤压膨化温度为 120~180 °C。

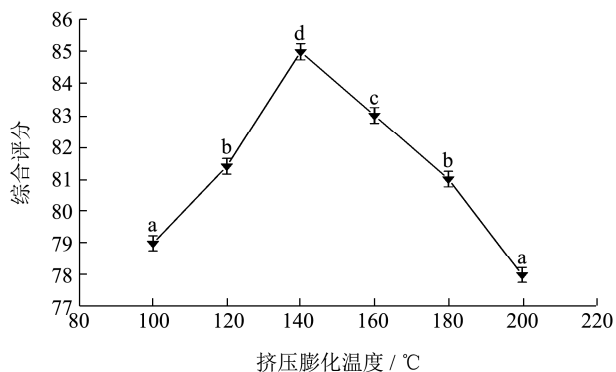


图2 挤压膨化温度对富硒芋芋头重组米品质的影响

Fig.2 Effect of extrusion temperature on the quality of selenium-enriched taro artificial rice

### 2.1.3 螺杆转速对富硒芋芋头重组米品质的影响

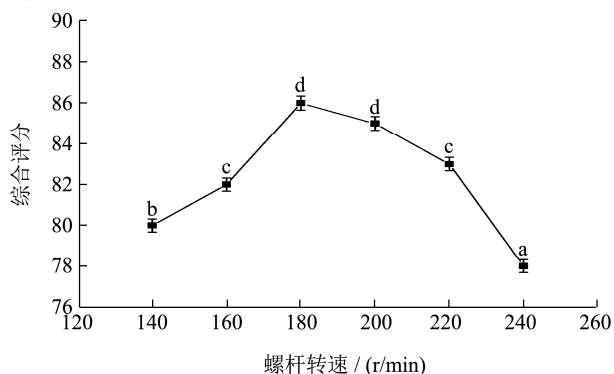


图3 螺杆转速对富硒芋芋头重组米品质的影响

Fig.3 Effect of screw rotation speed on the quality of selenium-enriched taro artificial rice

螺杆转速对富硒芋芋头重组米综合评分如图3所示。由图3可知,随着螺杆转速的增大,富硒芋芋头重组米的综合评分呈先升高后降低的趋势,综合评分在螺杆转速为 180 r/min 时达到最大值。螺杆转速直接影响物料粉在挤压膨化过程中的受力程度、受热时间以及挤出压力<sup>[24]</sup>,当螺杆转速较低时,物料淀粉粉团在机筒内受热时间延长,淀粉粉团糊化不均匀,且受力较弱,不利于产品成型。当螺杆转速过高时,物料淀粉粉团在机筒内受热时间过短,糊化程度不足,且粉团受力过大,淀粉分子结构被破坏,致使产品的感官品质下降。因此,考虑综合评分,较适宜的螺杆转速为 160~220 r/min。

### 2.1.4 喂料速度对富硒芋芋头重组米品质的影响

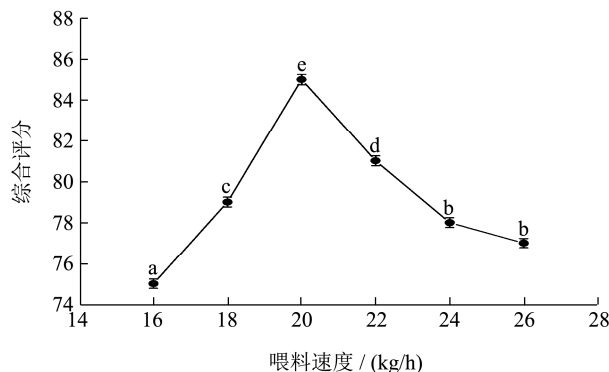


图4 喂料速度对富硒芋芋头重组米品质的影响

Fig.4 Effect of feeding speed on the quality of selenium-enriched taro artificial rice

喂料速度对富硒芋芋头重组米综合评分如图4所示。由图4可知,随着喂料速度的增大,富硒芋芋头重组米综合评分呈先升高后降低的趋势,综合评分在喂料速度为 20 kg/h 时达到最大值。这是因为喂料速度过低时,会导致单位时间内进入机筒内的物料减少,出于饥饿喂料状态,设备处于不正常运行状态。当喂料速度过大时,导致物料过量,堆积机腔,使其糊化不均匀,不利于产品成型。因此,考虑综合评分,较适宜喂料速度为 18~24 kg/h。

## 2.2 正交试验结果

根据单因素的试验结果,选取适宜范围的物料含水量、挤压膨化温度、螺杆转速、喂料速度为试验因素进行 L<sub>16</sub>(4<sup>4</sup>)正交试验,试验结果与分析见表5。

由表5可知,4个试验因素对富硒芋芋头重组米综合品质的影响顺序为:即物料含水量(A)>挤压膨化温度(B)>螺杆转速(C)>喂料速度(D),最佳挤压工艺参数是 A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>2</sub>D<sub>2</sub>,即物料含水量 25%、挤压膨化温度 140 °C、螺杆转速 180 r/min、喂料速度 20 kg/h。

## 2.3 验证试验

表6为富硒芋芋头重组米和市售粳米的感官评分和综合评分结果。由表6可以看出,在物料含水量 25%、挤压膨化温度 140 °C、螺杆转速 180 r/min、喂料速度 20 kg/h 条件下进行验证试验,重复3次,所得富硒芋芋头重组米的综合评分为 86.00 分,高于正交试验结果中最高综合评分,与正交试验结果相符。市售粳米的综合评分为 85.00 分,低于富硒芋芋头重组米的综合评分,说明富硒芋芋头重组米的综合品质优于市售粳米。

由表 6 可以看出,富硒芋头重组米的米粒颜色评分显著小于粳米,米粒外形、透明度及米饭外观小于粳米,而气味、口感、滋味评分高于市售粳米。原因是添加芋头全粉使富硒芋头重组米颜色加深,外观不规则,在挤压膨化过程的高温、高压作用下,发生的糊化及美拉德反应也会使富硒芋头重组米的颜色加深<sup>[25]</sup>,致使米粒感官评分降低。添加芋头全

粉赋予富硒芋头重组米独特的芋头香味和风味,提高了气味和滋味评分,使蒸煮后的米饭口感更好,提高了米饭感官评分。综合分析可知富硒芋头重组米的感官评分高于市售粳米。

### 2.4 芋头全粉和粳米原料的主要组成成分

芋头全粉和粳米原料的主要组成成分如表 7。

表 5 正交试验结果与分析

Table 5 Results and analysis of orthogonal experiment

试验号	A 物料含水量/%	B 挤压膨化温度/°C	C 螺杆转速/(r/min)	D 喂料速度/(kg/h)	综合评分
1	1 (20)	1 (120)	1 (160)	1 (18)	78.25
2	1	2 (140)	2 (180)	2 (20)	84.30
3	1	3 (160)	3 (200)	3 (22)	80.50
4	1	4 (180)	4 (220)	4 (24)	80.15
5	2 (25)	1	2	3	84.60
6	2	2	1	4	83.30
7	2	3	4	1	84.70
8	2	4	3	2	83.25
9	3 (30)	1	3	4	79.35
10	3	2	4	3	82.10
11	3	3	1	2	83.40
12	3	4	2	1	79.70
13	4 (35)	1	4	2	81.28
14	4	2	3	1	83.50
15	4	3	2	4	84.10
16	4	4	1	3	81.21
k <sub>1</sub>	80.800	80.870	81.540	81.537	
k <sub>2</sub>	83.962	83.300	83.175	83.058	
k <sub>3</sub>	81.138	83.175	81.650	82.102	
k <sub>4</sub>	82.522	81.078	82.058	81.725	
R	3.162	2.430	1.635	1.521	

表 6 富硒芋头重组米、市售粳米的感官评分和综合评分结果

Table 6 Sensory quality results and comprehensive score of selenium-enriched artificial rice and ordinary rice

样品	米粒感官评分			米饭感官评分			感官评分综合评分	
	颜色外形透明度			外观气味滋味口感				
富硒芋头重组米	24±0.16 <sup>a</sup>	34±0.19 <sup>a</sup>	24±0.22 <sup>a</sup>	26±0.31 <sup>a</sup>	18±0.89 <sup>a</sup>	18±0.23 <sup>a</sup>	28±0.25 <sup>a</sup>	88±0.68 <sup>a</sup> 86±0.31 <sup>a</sup>
市售粳米	27±0.17 <sup>b</sup>	35±0.11 <sup>a</sup>	25±0.15 <sup>a</sup>	27±0.35 <sup>a</sup>	17±0.18 <sup>a</sup>	16±0.17 <sup>a</sup>	27±0.22 <sup>a</sup>	87±1.44 <sup>a</sup> 85±0.11 <sup>a</sup>

注:数值表示为平均值±标准偏差;同列中不同字母表示有显著性差异 (p<0.05)。表 8、9 同。

表 7 芋头全粉和粳米的主要组成成分

Table 7 Main component of taro powder and japonica broken rice

样品	水分/%	淀粉/%		粗蛋白/%	膳食纤维/%	粗脂肪/%	灰分/%
		总量	直链				
芋头全粉	9.80	69.05	9.64	12.08	1.84	0.17	0.93
粳米	8.79	73.80	17.46	7.60	0.52	0.90	0.84
富硒芋头重组米	11.54	70.45	18.80	8.19	1.06	0.39	1.01

### 2.5 扫描电镜观察

图 5 为富硒芋头重组米与粳米的扫描电子显微镜照片。从图中 a 与 b 可以看出，碎粳米具有规则的外表，表面较平滑，颗粒完整性较好，且分布较松散，而富硒芋头重组米中淀粉颗粒外表不规则，表面较粗糙，颗粒几乎不完整。这是由于在挤压膨化过程中高温、高剪切作用下，富硒芋头重组米的淀粉发生糊化，颗粒的晶体结构被破坏，无序化程度增大，大分子的支链淀粉降解为直链淀粉和麦芽糊精等小分子物质。直链淀粉具有良好的成型性、成模型及凝胶性，直链淀粉含量增多，使得富硒芋头重组米的质构紧密，呈不规则外形<sup>[26]</sup>。

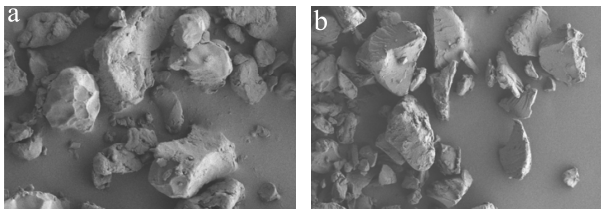


图 5 电子显微镜扫描图

Fig.5 Scan of electron microscope

注：a 为市售粳米，b 为富硒芋头重组米。图 6、7 同。

### 2.6 结晶结构

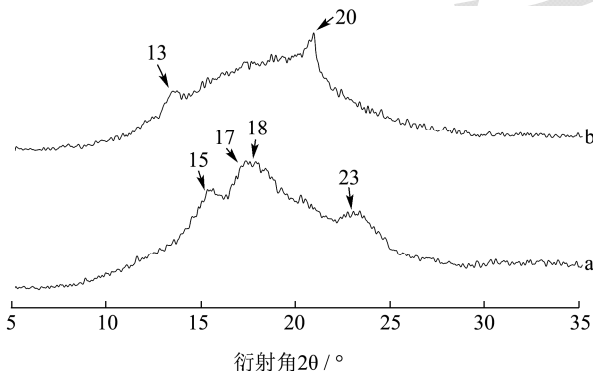


图 6 富硒芋头重组米与粳米的 X-射线衍射图谱

Fig.6 X-ray diffraction pattern of selenium-enriched taro artificial rice ordinary rice

富硒芋头重组米与粳米的结晶结构如图 6 所示。由图 6 可见，粳米在衍射角  $2\theta$  为  $15^\circ$ 、 $23^\circ$  附近有较强的衍射峰，在  $17^\circ$  和  $18^\circ$  附近有双峰，说明粳米淀粉是典型的 A-型晶体结构<sup>[27]</sup>。富硒芋头重组米在衍射角  $2\theta$  为  $13^\circ$  和  $20^\circ$  附近出现衍射特征峰，为典型的 A+V-型晶体结构，表明在体系中形成了直链淀粉-脂类复合物。经过挤压膨化处理后富硒芋头重组米的特征峰破坏明显，呈无规则的衍射特征峰，有序的晶型结构逐渐转变为非晶型，结晶度由 30.95% 下降到 7.62%，说明经挤压膨化处理后重组米的结晶区破坏

严重。这主要是因为支链淀粉是形成结晶的主要结构，结晶度减少，说明在挤压膨化过程中高剪切力作用下，淀粉颗粒破坏，支链淀粉发生降解，含量下降，直链淀粉和麦芽糊精等小分子物质增加。这与陈玲等<sup>[28]</sup>的研究挤压膨化处理有利于大米淀粉非晶化结果一致。

### 2.7 糊化特性

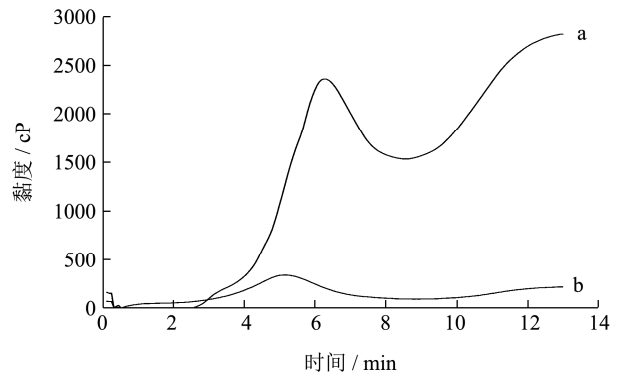


图 7 富硒芋头重组米与粳米的糊化特性曲线

Fig.7 Pasting characteristic curve of selenium-enriched artificial rice and ordinary rice

富硒芋头重组米与粳米的糊化特性如图 7 所示。由图 7 可知，粳米的糊化特征曲线总体呈上升趋势，其峰值黏度为 2360.00 cP，崩解值为 825.00 cP，回生值为 1283.00 cP。而富硒芋头重组米的糊化特征曲线基本为一条直线，其峰值黏度为 256.00 cP，崩解值为 248.00 cP，回生值为 46.00 cP，说明挤压膨化对大米糊化特性影响较显著，挤压膨化后富硒芋头重组米随时间变化不显著，表明其淀粉的热稳定性和抗老化性较好<sup>[29]</sup>。主要是因为挤压膨化作用下，淀粉与脂类形成了复合物，该复合物对淀粉颗粒糊化、溶胀和溶解有强烈的抑制作用，阻止了水分子和直链淀粉的析出，限制了淀粉在糊化过程中吸水溶胀，减少游离溶出的淀粉量，使得富硒芋头重组米黏度降低，热稳定性和抗老化性较好。说明 L- $\alpha$ -磷脂酰胆碱和单甘酯的添加能够抑制重组米的老化和回生<sup>[30,31]</sup>。

### 2.8 质构特性

富硒芋头重组米、粳米的质构特性和蒸煮损失率见表 8。由表 8 可知，富硒芋头重组米黏聚性、咀嚼性、弹性大于粳米，硬度和胶着性显著小于粳米。可能是因为富硒芋头重组米在机筒内已糊化，再经微波蒸煮发生二次糊化，淀粉再糊化会使黏聚性、弹性、咀嚼性增大，硬度、胶着性降低。张志清等<sup>[32]</sup>研究表明，挤压重组米口感与其质构特性中硬度呈负相关，与弹性、黏聚性、咀嚼性呈正相关。由此可推富硒芋头重组米口感优于粳米，与感官评分结果一致。



## 2.9 蒸煮损失率

由表 8 可知, 粳米的蒸煮损失率为 4.07%, 富硒芋艿头重组米蒸煮损失率为 4.12%, 说明富硒芋艿头重组米与粳米的蒸煮损失率相近。由于芋艿头和粳米在高温、高压、高剪切作用下发生裂解, 支链淀粉降

解为直链和小分子麦芽糊精, 水溶性碳水化合物增加, 导致富硒芋艿头重组米的蒸煮损失率较粳米高<sup>[33]</sup>, 此外, L- $\alpha$ -磷脂酰胆碱和单甘酯与淀粉分子形成复合物, 抑制了淀粉糊化, 导致黏度降低, 使其表面粗糙, 外形不规则, 形成较多粉末状物质, 蒸煮过程随水流失较多, 也会使富硒芋艿头重组米蒸煮损失率较粳米高。

表 8 富硒芋艿头重组米、粳米质构特性与蒸煮损失率

样品	硬度/g	黏聚性/mJ	弹性/mm	胶着性/g	咀嚼性/mJ	蒸煮损失率/%
市售粳米	717.43±1.47 <sup>a</sup>	0.65±0.02 <sup>a</sup>	1.54±0.27 <sup>a</sup>	643.67±5.29 <sup>a</sup>	3.42±0.11 <sup>b</sup>	4.07±0.03 <sup>a</sup>
富硒芋艿头重组米	401.17±1.28 <sup>b</sup>	0.75±0.04 <sup>a</sup>	1.63±0.12 <sup>a</sup>	396.23±5.10 <sup>b</sup>	4.05±0.17 <sup>a</sup>	4.12±0.07 <sup>a</sup>

表 9 富硒芋艿头重组米与粳米硒含量和消化特性

样品	硒含量/(mg/kg)	RDS/%	RS/%	SDS/%
粳米	0	76.83±0.86 <sup>a</sup>	10.87±0.12 <sup>b</sup>	12.30±0.04 <sup>b</sup>
富硒芋艿头重组米	0.23±0.02 <sup>a</sup>	62.56±0.53 <sup>b</sup>	18.95±0.15 <sup>a</sup>	18.49±0.10 <sup>a</sup>
硒溶液	0.25±0.07 <sup>a</sup>			

## 2.10 硒含量的测定

富硒芋艿头重组米与粳米中硒含量如表 9。由表 9 可知, 挤压膨化处理后富硒芋艿头重组米的硒含量大于粳米。经挤压膨化处理后制得的富硒芋艿头重组米硒含量为 0.23 mg/kg, 硒溶液中硒含量为 0.25 mg/kg, 挤压膨化处理后硒含量有所下降, 但无明显变化。这与何荣等<sup>[34]</sup>发现挤压膨化影响硒含量的结果一致。

## 2.11 消化特性

富硒芋艿头重组米与粳米的 RDS、SDS、RS 含量如表 8 所示。从结果中可以看到, 经挤压膨化后富硒芋艿头重组米的 RS 和 SDS 含量增加, RDS 含量降低。说明挤压膨化能够降低大米淀粉的消化性能, 促进 RDS 转化为 RS 和 SDS。主要是因为挤压膨化高温、高剪切力作用下, 淀粉颗粒破坏, 直链淀粉含量增加, 形成了直链淀粉-脂类复合物, 其结晶构型由 A 型转化为 A+V-型结晶结构。研究表明, 淀粉的消化性能与晶型、淀粉链结构有关, 且直链含量越高, 淀粉消化率越低<sup>[34-37]</sup>。如前所述, 挤压膨化后重组米的直链淀粉含量增加, 形成了 A+V-型结晶结构, 提高了抗性淀粉和缓慢消化淀粉的含量, 降低了淀粉的消化性能。故挤压膨化后快速消化淀粉含量降低, 抗性淀粉和缓慢消化淀粉含量增加。

## 3 结论

试验结果表明, 富硒芋艿头重组米较优的加工参数为: 挤压膨化温度 140 °C, 螺杆转速 180 r/min, 物

料含水量 25%及喂料速度 20 kg/h。加工参数的影响因素主要为物料含水量、挤压膨化温度、螺杆转速和喂料速度。在最优工艺条件下制得富硒芋艿头重组米的感官评分高于粳米, 质构特性和蒸煮损失率与粳米接近, 综合评分高于粳米, 挤压膨化后中硒含量无明显变化。通过 X-射线衍射分析法、扫描电镜表征发现, 经挤压膨化后富硒芋艿头重组米中部分支链淀粉发生了降解和重组, 结晶度明显减少, 结晶构型由 A-型变为 A+V-型, 形成了直链淀粉-脂类复合物, 淀粉颗粒呈现不规则形状, 通过对糊化特性及消化特性研究表明, 富硒芋艿头重组米黏度降低, 热稳定性和抗老化性较好, 具有良好的成型性。由于挤压膨化后重组米的直链淀粉含量增加, 形成了 V-型结晶结构, 导致淀粉的消化性能降低, 快消化淀粉含量降低, 慢消化淀粉和抗性淀粉含量升高、增加, 降低了淀粉的消化性能。本研究结果为加工获得低消化性能的淀粉类食品, 开发硒和芋艿头产品提供指导。

## 参考文献

- [1] 刘敏, 谭书明, 张洪礼, 等. 不同品种大米口感品质分析[J]. 食品科学, 2018, 39(15): 88-92  
LIU Min, TAN Shu-ming, ZHANG Hong-li, et al. Analysis on the taste quality of different varieties of rice [J]. Food science, 2018, 39(15): 88-92
- [2] 钱丽丽, 宋雪健, 张东杰, 等. 近红外光谱技术快速鉴别查哈阳大米[J]. 食品科学, 2017, 38(16): 222-227  
QIAN LI-li, SONG Xue-jian, ZHANG Dong-jie, et al. Fast identification of chha Yang rice by near infrared spectroscopy

- [J]. Food science, 2017, 38(16): 222-227
- [3] 潘伯良,胡晓溪,吴晖,等.碎米米乳饮料的研制[J].现代食品科技,2012,28(2):187-190  
PAN BO-liang, HU Xiao-xi, WU Hui, et al. Development of broken rice milk beverage [J]. Modern food science and technology, 2012, 28(2): 187-190
- [4] Kyritsi A, Tzia C, Karathanos V T. Vitamin fortified rice grain using spraying and Soaking methods [J], LWT-Food Science and Technology, 2011, 44: 312-320
- [5] 田方.奉化芋艿营养成分分析及其加工保鲜技术研究[D].宁波:宁波大学,2013  
TIAN Fang. Study on analysis of nutritional contents and processing technologies for processing and fresh-keeping of fenghua taro [D]. Ningbo: Ningbo University, 2013
- [6] 刘文玲,江洁,解彬,等.富硒香菇硒分布和蛋白质营养价值的评价[J].食品与发酵工业,2019,45(2):101-106  
LIU Wen-ling, JIANG Jie, XIE Bin. The distribution of selenium in the Lentinusedodes and the protein nutrient value evaluation [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(2): 101-106
- [7] 魏龙,郭楠楠,段秋虹.大豆发芽富硒工艺条件研究[J].粮食与油脂,2018,31(10):21-23  
WEI Long, GUO Nan-nan, DUAN Qiu-hong. Study on the processing conditions of soybean germination enriched with selenium [J]. Grain and Oil, 2018, 31(10): 21-23
- [8] Falandysz J, Borovicka J. Macro and trace mineral constituents and radionuclides in mushrooms: Health benefits and risks [J]. Apply Microbiol Biotechnol, 2013, 7(2): 477-501
- [9] 沈宇光,肖志刚,柴媛,等.工程重组米的研究进展[J].农产品加工,2019,1(2):63-65,70  
SHEN Yu-guang, XIAO Zhi-guang, CHAI Yuan, et al. Progress in engineering recombinant rice [J]. Agricultural Processing, 2019, 1(2): 63-65, 70
- [10] Liu C, Zhang Y, Liu W, et al. Preparation, physicochemical and texture properties of texturized rice produce by improved extrusion cooking technology [J]. Journal of Cereal Science, 2011, 54(3): 473-480
- [11] Prom-U-Thai C, Glahn R P, Cheng Z Q. The bioavailability of iron for tied in whole grain parboiled rice [J]. Food Chemistry, 2009, 112: 982-986
- [12] 李天真.强化工艺条件对锌强化营养米蒸煮食味品质的影响[J].农业工程学报,2007,23(7):222-225  
LI Tian-zhen. Effects of technological parameters of Zn enrichment on eating-and-cooking quality of rice [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(7): 222-225
- [13] Kyritsi A, Tzia C, Karathanos V T. Vitamin fortified rice grain using spraying and soaking methods [J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(1): 312-320
- [14] 张辉.马铃薯复配米配方及工艺优化[D].长沙:中南林业科技大学,2016  
ZHANG Hui. The formulation and process optimization of potato extrusion rice [D]. Chang Sha: Central South University of Forestry and Technology, 2016
- [15] 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.GB/T 15682-2008 粮油检验稻谷、大米蒸煮食用品质感官评价方法[S].北京:中国标准出版社,2008  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 15682-2008 Methods for Sensory Evaluation of Cooking Quality Of Rice And Rice [S]. Beijing: China standard press, 2008
- [16] 章丽琳.马铃薯挤压重组米制备及其品质研究[D].长沙:湖南农业大学,2017  
ZHANG Li-lin. Preparation and properties study of potato rice by extrusion cooking technology [D]. Changsha: Hunan agricultural university, 2017
- [17] 王会然,李宗军.响应面试验优化挤压米生产工艺[J].食品科学,2013,34(8):113-117  
WANG Hui-ran, LI Zong-jun. Process optimization for extruded rice production [J]. Food Science, 2013, 34(8): 113-117
- [18] 李佳栋,孙树坤,杨庆余,等.小麦淀粉-卵磷脂复合物制备及其结构和功能性质研究[J].食品工业,2016,37(10):60-63  
LI Jia-dong, SUN Shu-kun, YANG Qing-yu, et al. Preparation of wheat starch-lecithin complex and its structure and functional properties [J]. Food Industry, 2016, 37(10): 60-63
- [19] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会国家食品药品监督管理总局, GB 5009.93-2017 食品安全国家标准食品中硒的测定[S].北京:中国标准出版社,2017  
National Food and Drug Administration of the State Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, GB 5009.93-2017 Determination of Selenium in National Standard Food [S]. Beijing: China standard press, 2017
- [20] 任海斌.挤压酶解复合己二酸交联抗性淀粉的制备及形成机理研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2016

- REN Hai bin. Preparation and structural properties of resistant starch from processing of extrusion enzymatic and crosslinked with adipic acid [D]. Harbin: Northeast agricultural university, 2016
- [21] 丘春平,李义辉,谢彩锋,等.木薯粉丝的研制及工艺优化[J].中国食品添加剂,2016,9:156-163
- QIU CHUN-ping, LI YI-hui, XIE Cai-feng, et al. Development and process optimization of tapioca vermicelli [J]. Chinese Journal of Food Additives, 2016, 9: 156-163
- [22] 孟亚萍.挤压米粉加工及品质改良技术研究[D].无锡:江南大学,2015
- MENG YA-ping. Research on extrusion rice noodle processing and quality improvement technology [D]. Wuxi: Jiangnan university, 2015
- [23] Gimenez M A, Gonzalez R J, Wagner J, et al. Effect of extrusion conditions on physicochemical and sensorial properties of com-broad beans spaghetti type pasta [J]. Food Chemistry, 2013, 136(2):538-545
- [24] 蔡永艳.米粉干法生产工艺及品质改良的研究[D].郑州:河南工业大学,2011
- CAI Yong-yan. Research on dry rice noodle production process and quality improvement [D]. Zhengzhou: Henan university of technology, 2011
- [25] Prakash O, Ward R, Benu A, et al. Parboiled rice: Understanding from a materials science approach [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 124: 173-183
- [26] 马文,李喜宏,刘霞,等.支链淀粉与直链淀粉比例对重组营养强化米品质的影响[J].中国食品学报,2014,14(11):42-48
- MA WEN, LI XI-hong, LIU Xia, et al. Effect of ratio of amylopectin to amylose on quality of recombinant nutritionally enhanced rice [J]. Chinese Journal of Food Science, 2014, 14(11): 42-48
- [27] Diop C I K, LI H L, XIE B J, et al. Impact of the catalytic activity of iodine on the granule morphology crystalline structure, thermal properties and water solubility of acetylated corn (*Zea mays*) starch synthesized under microwave assistance [J]. Industrial Crops and Products, 2011,33:302-309
- [28] 陈玲,庞艳生,李晓玺,等.球磨对绿豆淀粉结晶结构和糊流变特性的影响[J].食品科学,2005,26(6):126-130
- CHEN Ling, PANG Yan-sheng, LI Xiao-xi, et al. Ball mill of mung bean starch crystal structure and the influence of paste rheological properties [J]. Journal of Food Science, 2005, 26(6): 126-130
- [29] 李娜,张英华.用 RVA 仪分析玉米淀粉的糊化特性[J].中国粮油学报,2011,26(6):20-24
- LI Na, ZHANG Ying-hua. Analysis of gelatinization characteristics of corn starch with RVA apparatus [J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2011, 26(6): 20-24
- [30] 郑广钊,肖志刚,王利民,等.L- $\alpha$ -磷脂酰胆碱含量对挤压重组米回生动力学影响[J].中国粮油学报,2012,27(3):6-10
- ZHENG Guang-zhao, XIAO Zhi-gang, WANG Li-min, et al. Effect of L- $\alpha$ -PC content on regeneration kinetics of extruded artificial rice [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2012, 27(3): 6-10
- [31] 郭吉.脂质对糙米重组米糊化回生特性的影响[D].武汉:武汉轻工大学,2016
- GUO Ji. Effect of lipid on gelatinization and regeneration of brown rice [D]. Wuhan: Wuhan University of Light Industry, 2016
- [32] 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 Zhi-qing, XIONG Shan-bo, LI Yuan-zhi, et al. The correlation analysis between engineering artificial rice texture determination (TPA) and sensory evaluation [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2011, 26(10): 1-5
- [33] 林雅丽,张晖,王立,等.挤压生产糙米重组米的研究[J].食品工业科技,2016,37(7):193-198
- LIN YA-li, ZHANG Hui, WANG Li, et al. Study on the preparation of reformed brown rice by extruding [J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(7): 193-198
- [34] 何荣,李倩,刘俊飞,等.发芽糙米的富硒及其微波干燥与挤压膨化工艺优化[J].食品科学,2015,36(6):82-85
- HE Rong, LI Qian, LIU Jun-fei, et al. Selenium enrichment of germinated brown rice and optimization of its microwave drying and extrusion process [J]. Food Science, 2015, 36 (6): 82-85
- [35] 高群玉,叶莹,王琳.湿热处理对不同晶型淀粉理化性质及消化性的影响[J].现代食品科技,2015,31(3):60-65
- GAO Qun-yu, YE Ying, WANG Lin. Effects of wet-heat treatment on physicochemical properties and digestibility of different crystalline starch [J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(3): 60-65
- [36] Xu J, Kuang Q, Wang K, et al. Insights into molecular structure and digestion rate of oat starch [J]. Food Chemistry, 2017, 220: 25-30
- [37] 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, 2017, 107: 1080-1085