

挤压膨化方便粥的工艺优化及品质特性分析

王 晨, 王 燕*, 吴卫国, 廖卢艳
(湖南农业大学食品科学技术学院 长沙 410128)

摘要 以复合谷物粉为原料,研究挤压方便粥的最佳工艺。基于前期单因素实验结果,通过 Box-Behnken Design 响应面法优化方便粥的工艺,以理化特性、感官评分、质构特性和蛋白质淀粉的消化率作为考察指标评价挤压方便粥品质。采用傅里叶红外光谱、X-射线衍射研究挤压前、后方便粥的结构。结果表明:挤压方便粥的最佳工艺为:螺杆转速 250 r/min,挤压温度 170 ℃,加水量 19%。验证试验中各变异系数均在 0~12%之间,优化后的方便粥工艺条件有良好的重现性且数据可靠。在此工艺条件下,挤压后方便粥蛋白质消化率和淀粉消化率较挤压前分别提高了 12.570%和 12.602%。傅里叶红外光谱分析表明,挤压前、后的主要官能团结构没有发生明显变化,挤压后部分特征峰强度有所减弱。X-射线衍射扫描分析表明,挤压前、后方便粥的晶体构型发生改变。挤压后方便粥的品质得到提高,微观结构发生了变化。

关键词 方便粥; 响应面; 理化特性; 质构特性; 品质

文章编号 1009-7848(2023)11-0170-12 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2023.11.017

随着物质生活水平的提高,大众对饮食的需求也逐步提升,从吃饱到吃好的转变,从而引发慢性代谢病的发生^[1]。精白米与杂粮相比,前者加工程度高,导致部分营养物质流失,后者加工程度低,基本保留其营养价值^[2]。常见杂粮一般有小米、荞麦面、燕麦、大麦、黑豆、蚕豆等^[3]。杂粮除了提供丰富的营养外,还具有几种活性物质,如 β -葡聚糖、多酚、植物类固醇等对预防各种肠胃疾病等慢性疾病都有帮助^[4]。除此之外,还具有软化血管,降低胆固醇,稳定精神,补脾止泻,促进人体肠道消化,增进食欲等^[5-6]特点。虽然近些年生产杂粮食品的企业有所增加,但是缺乏对杂粮产品的市场定位和杂粮消费理念的推广^[7]。挤压膨化技术因方便高效、生产成本低廉而被广泛应用^[8-10]。方便粥是利用挤压机挤压膨化而成,使方便粥有更为丰富的口感,更易消化吸收等优点^[11-12]。

杂粮复合粉,由多种杂粮粉碎过筛后混合而成,营养价值高,目前在优化挤压方便粥的工艺方面研究较少。本研究以杂粮复合粉为原料,以理化特性【吸水性指数(WAI)、水溶性指数(WSI)、糊化度】、感官评分、质构特性(硬度、黏度、咀嚼度、回复性)为指标对挤压杂粮复合方便粥进行响应面

优化,并进行挤压前、后品质对比,以期改善挤压杂粮方便粥品质。

1 材料与方法

1.1 材料

杂粮复合粉(由碎米、藜麦、大豆蛋白粉、燕麦、黑豆、黑米组成);糖化酶(1×10^5 U/mL),上海瑞永生物科技有限公司;猪胰 α -淀粉酶(300 U/mg)、胃蛋白酶(2 940 U/mg)、胰蛋白酶(300 U/mg),Sigma公司;其余所有试剂均为分析纯级。

1.2 仪器与设备

FWHE36-24 双螺杆挤压机,富马科公司;TA.XT. plus 质构仪,英国 Stable Micro System 公司;Spectrum100 傅里叶红外光谱仪,美国 Perkin-Elmer 公司;SU8010 扫描式电子显微镜,日立公司;101-3 型电热恒温鼓风干燥箱,上海路达实验仪器有限公司;CR20B2 高速冷冻离心机,日立公司;K1100 全自动凯氏定氮仪,海能仪器有限责任公司;DK-98-II 电热恒温水浴锅,天津市泰斯特仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 杂粮复合方便粉的制备 将碎米、藜麦、燕麦、黑豆、黑米粉碎过 80 目筛,按照配方(碎米 50%,大豆蛋白粉 14%,藜麦 20%,燕麦 5%,黑豆 5%,黑米 6%)配好杂粮复合粉备用。

收稿日期: 2022-11-02

基金项目: 湖南省重点研发项目(2019NK2131)

第一作者: 王晨,男,硕士生

通信作者: 王燕 E-mail: 693675748@qq.com

1.3.2 响应面优化挤压工艺试验 以挤压温度(A)、螺杆转速(B)、加水量(C)为自变量,以理化特性:糊化度、水溶性指数(Water solubility index, WSI)、吸水指数(Water absorption index, WAI)、感官评分,质构特性(硬度、黏度、咀嚼度、回复性)分别为响应值 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 、 Y_5 、 Y_6 、 Y_7 、 Y_8 ,设计三因素三水平响应面试验,试验设计因素水平表见表1。

表1 相应试验因素水平表

Table 1 Level of corresponding test factors

| 水平 | 因素 | | |
|----|----------------|---------------------------------|--------------|
| | 挤压温度 (A)/°C | 螺杆转速 (B)/r·min ⁻¹ | 加水量(C)/ % |
| -1 | 150 | 220 | 15 |
| 0 | 160 | 235 | 18 |
| 1 | 170 | 250 | 21 |

1.3.3 方便粥理化指标的测定

1.3.3.1 方便粥 WSI 与 WAI 的测定 参照 Kantrong 等^[13]的方法,稍作调整。精确称取质量为 2.0 g 粉碎过筛后样品 (m_0), 加入到洁净干燥的离心管 (m_1) 中, 加水振荡均匀后离心, m_2 为蒸发皿的净质量, m_3 为离心后取上清液至蒸发皿后烘干恒重的质量, m_4 为去掉上清液后离心管质量。计算方法见式(1)和(2)。

$$\text{WSI}(\%) = \frac{m_3 - m_2}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{WAI}(\%) = \frac{m_4 - m_1}{m_0} \times 100 \quad (2)$$

1.3.3.2 方便粥糊化度的测定 参考吴昊^[14]的方法,稍作调整。精确称取 1.0 g 粉碎过筛后样品,分别放入 2 个锥形瓶中(W_1 、 W_2),另取锥形瓶 W_0 ,不加样品做空白对照。于 3 个锥形瓶中分别加入 50 mL 蒸馏水,轻轻振荡至充分混合,将 W_1 锥形瓶在电炉上保持微沸糊化 20 min, 不要让其烧干并不断摇晃,然后冷却至室温。在 3 个锥形瓶中分别加入稀释的糖化酶 5 mL,充分混匀,50 °C 恒温水浴 1 h,及时取出加入 2 mL 盐酸(1 mol/L)终止反应,将反应物定容至 100 mL,过滤备用。移取滤液各 10 mL 分别放入 3 个标记碘量瓶中,并且加入 10 mL 碘液(0.05 mol/L)及 18 mL 氢氧化钠(0.1 mol/L)溶液,盖塞,在暗处放置 15 min,然后迅速加入 2 mL 硫酸,最终用硫代硫酸钠滴定至无色,记录其消耗体积。计算方法见式(3)。

$$\text{糊化度}(\%) = \frac{V_0 - V_2}{V_0 - V_1} \times 100 \quad (3)$$

式中, V_0 ——空白消耗硫代硫酸钠的体积, mL; V_1 ——电炉糊化后样品消耗硫代硫酸钠的体积, mL; V_2 ——不经电炉糊化的样品消耗硫代硫酸钠的体积, mL。

1.3.4 方便粥感官品质的测定 由 5 人组成品尝小组进行感官评分。眼睛观察方便粥冲泡前其表面的色泽、孔洞大小及密度;冲泡后观察粥的复水情况,入口咀嚼 5~8 s,感觉是否黏口、细腻、爽滑,慢慢感受粥的气味和口感,对上述感官进行打分,感官评分表指标及分值情况见表 2。

表2 方便粥感官评定标准

Table 2 Sensory evaluation standard of instant porridge

| 指标 | 分数/分 | 判定标准(评分范围) |
|-----|------|---|
| 冲泡前 | 色泽 | 10 粥粒颜色均(8~10分);颜色不均一,略有异色(5~7分);明显异色(0~4分) |
| | 外观状态 | 20 表面存在适量小孔,无裂缝(14~20分);粥粒存在少量大孔,表面轻微裂(8~13分);粥粒无固定形状,粒型难辨(0~7分) |
| 冲泡后 | 气味 | 10 具有天然浓郁的香味(8~10分);香味较淡(5~7分);无香味或有明显异味(0~4分) |
| | 分散性 | 10 粥粒分散均匀,无结块(8~10分);少量结块(5~7分);较多结块(0~4分) |
| | 复水性 | 15 粥粒适度膨大,复水时间短(10~15分);复水时间略长(5~9分);复水时间过长,粥粒软烂(0~4分) |
| | 适口性 | 20 黏稠适宜,口感细腻,不黏牙(14~20分);黏稠,口感略有粗糙,黏牙(8~13分);黏稠严重,口感粗糙,米粒黏牙严重(0~7分) |
| | 爽滑性 | 15 粥爽滑(8~15分);爽滑程度略差(5~7分);爽滑程度差(0~4分) |

1.3.5 方便粥质构特性的测定 参考 Zhou 等^[15]的方法,对方便粥质构特性的测定方法稍作调整。采用 P/36R 探头。参数设定:形变量 50%,速度 20 mm/s,起始力 5.0 g。

1.3.6 方便粥蛋白质消化率的测定 蛋白体外消化率的测定采用胃-胰蛋白酶两步消化法^[16],样品粗蛋白质量(g)和沉淀蛋白质量(g)的测定采用 GB 5009.5-2010 中的凯氏定氮法。计算方法见式(4)。

$$\text{体外消化率(\%)} = \frac{(\text{粗蛋白质量} - \text{沉淀蛋白质量})}{\text{粗蛋白质量}} \times 100 \quad (4)$$

1.3.7 方便粥淀粉消化率的测定 参照 Englyst 等^[17]的方法稍作调整。将猪胰 α -淀粉酶与淀粉葡萄糖苷酶混合制成酶溶液,称取 2 g 杂粮复合粉,放入 250 mL 烧杯中,加入 50 mL 蒸馏水、15 mL 乙酸钠缓冲液(pH 5.2)、5 mL 混合酶溶液,置于 37 °C 水浴振荡锅(100 r/min)中 3 h 后在沸水浴中加热 3 min 使酶失活,冷却后按 4 000 r/min 离心 15 min,取上清液,用 DNS 比色法测定葡萄糖的含量。计算方法见式(5)。

$$\text{淀粉消化率(\%)} = \frac{0.9 \times \text{葡萄糖质量(g)}}{\text{样品中淀粉总量(g)}} \times 100 \quad (5)$$

1.3.8 方便粥傅里叶红外测定 参照 Ying 等^[18]的方法,稍作调整。在波数 400~4 000 cm^{-1} 范围内,在 4 cm^{-1} 下扫描 50 次。使用光谱仪内置软件进行光谱的自动校正基线,平滑和归一化处理。

1.3.9 方便粥 X-衍射射线测定 原料使用粉末状,管压 40 kV、电流 30 mA,扫描宽度 5°~40°,步宽 0.02°。试验重复 3 次,结晶度由曲线拟合结晶峰(15°,17°,23°)积分面积定量计算^[19]。计算方法见式(6):

$$\text{相对结晶度(\%)} = \frac{S_{A\text{-type}}}{S_T} \times 100 \quad (6)$$

式中, $S_{A\text{-type}}$ ——A 型结晶峰积分面积,J/g; S_T 表示结晶区和非结晶区积分总面积,J/g。

1.4 数据处理与分析

采用 SPSS 25.0 软件进行数据处理;采用 Design-Expert.V8.6 软件进行响应面分析;采用 Origin 2019 软件进行图表绘制。以上各组均进行 3 组平行试验。

2 结果与分析

2.1 响应面法优化试验结果

2.1.1 响应面试验设计及结果 响应面试验遵循 Box Behnken 设计建立数学模型,具体设计与结果见表 3。分别以糊化度(Y_1)、WSI(Y_2)、WAI(Y_3)、感官评分(Y_4)、硬度(Y_5)、黏度(Y_6)、咀嚼度(Y_7)、回弹性(Y_8)为响应值。由 Design-Expert.V8.0.6 软件对试验数据进行回归拟合,得到二次多项式回归模型:

$$Y_1 = 97 + 0.25A + 0.75B + 0.25C - 0.75AB + 0.75AC - 1.75BC - 1.13A^2 + 1.88B^2 - 1.63C^2$$

$$Y_2 = 36.67 + 1.47A + 1.43B - 0.5C + 0.55AB + 0.83AC + 3.47BC - 0.3A^2 - 2.14B^2 + 1.53C^2$$

$$Y_3 = 469.57 + 5.69A - 4.3B - 10.92C - 0.46AB + 2.05AC - 5.39BC - 0.97A^2 + 12.37B^2 + 0.54C^2$$

$$Y_4 = 81.60 + 3.5A - 3.38B + 0.63C + 1.75AB + 5.25AC - 2.5BC + 4.2A^2 + 3.45B^2 - 0.55C^2$$

$$Y_5 = 111.04 + 0.99A - 11.93B + 11.93C + 33.71AB + 58.86AC - 3.1BC + 45.37A^2 + 37.17B^2 + 45.99C^2$$

$$Y_6 = 84.9 - 16.88A - 28.62B + 13.54C + 15.24AB + 47.22AC + 8.01BC + 38.86A^2 + 31.03B^2 + 31.78C^2$$

$$Y_7 = 74.44 - 4.02A - 25.59B + 28.53C + 12.89AB + 17.15AC + 1.07BC + 21.92A^2 + 42.34B^2 + 13.54C^2$$

$$Y_8 = 0.23 - 0.013A - 6.25 \times 10^3 B + 0.013C - 2.25 \times 10^3 AB - 3.25 \times 10^3 AC + 0.015BC + 0.03A^2 + 0.019B^2 + 0.018C^2$$

2.1.2 响应面显著性方差分析 由表 4 可知,各指标回归模型在统计学上呈显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$),说明试验模型有统计学意义;各指标失拟项($P > 0.05$)不显著,说明试验模型拟合度较好,模型选择合理。通过 P 值可知, B 、 A^2 对糊化度影响显著, BC 、 B^2 、 C^2 对糊化度影响极显著; A 、 B 、 B^2 对 WSI 影响显著, BC 对 WSI 影响极显著; A 对 WAI 影响显著, C 、 B^2 对 WAI 影响极显著; A 、 B 、 A^2 、 B^2 对感官评分影响显著, AC 对感官评分影响极显著; B 、 C 、 AB 、 AC 、 A^2 、 B^2 、 C^2 对硬度影响极显著; AB 对黏度影响显著, A 、 B 、 C 、 AC 、 A^2 、 B^2 、 C^2 对

表 3 响应面设计与结果

| Table 3 Response surface design and results | | | | | | | | | | | |
|---|--------------|------------------------------------|--------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 试验号 | 温度(A)/ °C | 螺杆转速 (B)/(r·min ⁻¹) | 加水量(C)/ % | 糊化度 (Y ₁)/% | WSI (Y ₂)/% | WAI (Y ₃)/% | 感官评分 (Y ₄)/分 | 硬度 (Y ₅) | 黏度 (Y ₆) | 咀嚼度 (Y ₇) | 回弹性 (Y ₈) |
| 1 | 160 | 235 | 18 | 98 | 37.595 | 474.338 | 82 | 101.232 | 83.306 | 64.563 | 0.233 |
| 2 | 150 | 235 | 15 | 95 | 37.593 | 479.023 | 85 | 245.448 | 215.976 | 102.942 | 0.28 |
| 3 | 160 | 235 | 18 | 97 | 38.296 | 462.296 | 85 | 113.608 | 69.063 | 60.643 | 0.227 |
| 4 | 160 | 250 | 15 | 99 | 34.206 | 491.248 | 86 | 175.058 | 94.366 | 82.55 | 0.229 |
| 5 | 170 | 235 | 15 | 94 | 38.853 | 487.681 | 82 | 131.089 | 74.974 | 48.537 | 0.247 |
| 6 | 170 | 235 | 21 | 95 | 39.879 | 463.348 | 96 | 277.135 | 189.559 | 151.161 | 0.267 |
| 7 | 150 | 220 | 18 | 96 | 31.373 | 479.843 | 93 | 238.303 | 209.426 | 176.935 | 0.286 |
| 8 | 160 | 235 | 18 | 97 | 33.624 | 473.355 | 80 | 114.179 | 88.629 | 75.52 | 0.234 |
| 9 | 160 | 235 | 18 | 97 | 36.684 | 474.163 | 79 | 124.301 | 93.783 | 86.403 | 0.234 |
| 10 | 160 | 235 | 18 | 96 | 37.151 | 463.689 | 82 | 102.034 | 89.698 | 85.095 | 0.216 |
| 11 | 160 | 250 | 21 | 97 | 39.773 | 465.205 | 80 | 188.237 | 144.388 | 130.482 | 0.285 |
| 12 | 170 | 250 | 18 | 98 | 38.199 | 481.166 | 89 | 216.337 | 130.64 | 126.244 | 0.265 |
| 13 | 150 | 250 | 18 | 99 | 34.148 | 472.061 | 79 | 148.315 | 121.132 | 96.424 | 0.282 |
| 14 | 150 | 235 | 21 | 93 | 35.302 | 446.491 | 78 | 156.059 | 141.669 | 136.969 | 0.313 |
| 15 | 160 | 220 | 15 | 94 | 39.298 | 488.957 | 84 | 194.015 | 167.054 | 132.312 | 0.275 |
| 16 | 160 | 220 | 21 | 99 | 30.994 | 484.487 | 88 | 219.606 | 185.043 | 175.956 | 0.272 |
| 17 | 170 | 220 | 18 | 98 | 33.222 | 490.783 | 96 | 171.501 | 157.972 | 155.197 | 0.278 |

表 4 方差分析表

| Table 4 Analysis of variance | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|-------|----------|------|---------|------|----------|-------|---------|-------|-----------|-------|-----------|------|----------|-------|----------|
| 方差来源 | 糊化度 | | WSI | | WAI | | 感官评分 | | 硬度 | | 黏度 | | 咀嚼性 | | 回弹性 | |
| | F 值 | P 值 | F 值 | P 值 | F 值 | P 值 | F 值 | P 值 | F 值 | P 值 | F 值 | P 值 | F 值 | P 值 | F 值 | P 值 |
| 模型 | 10.13 | 0.0030** | 5.87 | 0.0146* | 7.07 | 0.0087** | 6.11 | 0.0131* | 87.41 | <0.0001** | 36.06 | <0.0001** | 17.4 | 0.0005** | 13.91 | 0.0011** |
| 温度(A) | 0.88 | 0.3807 | 7.85 | 0.0264* | 7.69 | 0.0276* | 11.44 | 0.0117* | 0.13 | 0.7268 | 20.12 | 0.0028** | 0.81 | 0.3983 | 14.9 | 0.0062** |

(续表 4)

| 方差来源 | 糊化度 | | WSI | | WAI | | 感官评分 | | 硬度 | | 黏度 | | 咀嚼性 | | 回弹性 | |
|----------------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|--------|-----------|-------|-----------|-------|----------|-------|----------|
| | F 值 | P 值 | F 值 | P 值 | F 值 | P 值 | F 值 | P 值 | F 值 | P 值 | F 值 | P 值 | F 值 | P 值 | F 值 | P 值 |
| 螺杆转速(B) | 7.88 | 0.0263* | 7.46 | 0.0293* | 4.38 | 0.0746 | 10.64 | 0.0138* | 19.14 | 0.0033** | 57.83 | 0.0001** | 32.84 | 0.0007** | 3.44 | 0.1059 |
| 加水量(C) | 0.88 | 0.3807 | 0.91 | 0.3711 | 28.28 | 0.0011** | 0.36 | 0.5649 | 19.12 | 0.0033** | 12.94 | 0.0088** | 40.82 | 0.0004** | 15.48 | 0.0056** |
| AB | 3.94 | 0.0876 | 0.55 | 0.4813 | 0.025 | 0.8790 | 1.43 | 0.2706 | 76.34 | <0.0001** | 8.20 | 0.0242* | 4.17 | 0.0806 | 0.22 | 0.6510 |
| AC | 3.94 | 0.0876 | 1.25 | 0.2996 | 0.50 | 0.5032 | 12.87 | 0.0089** | 232.78 | <0.0001** | 78.72 | <0.0001** | 7.38 | 0.0300* | 0.47 | 0.5170 |
| BC | 21.44 | 0.0024** | 21.94 | 0.0022** | 3.45 | 0.1057 | 2.92 | 0.1313 | 0.65 | 0.4477 | 2.26 | 0.1761 | 0.029 | 0.8700 | 9.59 | 0.0174* |
| A ² | 9.33 | 0.0185* | 0.17 | 0.6922 | 0.12 | 0.7415 | 8.67 | 0.0216* | 145.61 | <0.0001** | 56.12 | 0.0001** | 12.68 | 0.0092** | 42.38 | 0.0003** |
| B ² | 25.9 | 0.0014** | 8.77 | 0.0211* | 19.08 | 0.0033** | 5.85 | 0.0462* | 97.72 | <0.0001** | 35.78 | 0.0006** | 47.32 | 0.0002** | 16.27 | 0.0050** |
| C ² | 19.46 | 0.0031** | 4.52 | 0.0710 | 0.036 | 0.8543 | 0.15 | 0.7112 | 149.59 | <0.0001** | 37.54 | 0.0005** | 4.84 | 0.0637 | 14.58 | 0.0066** |
| 失拟项 | 1.33 | 0.3813 | 0.24 | 0.8650 | 0.83 | 0.5430 | 2.44 | 0.2047 | 0.17 | 0.9114 | 1.53 | 0.3363 | 1.39 | 0.3665 | 2.21 | 0.2289x |

注: *表示显著(P<0.05), **表示极显著(P<0.01)。

表 5 方差结果分析表

| Table 5 Analysis of variance results | | WAI | | WSI | | 硬度 | | 黏度 | | 咀嚼性 | | 回弹性 | |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|-----|--|-----|--|
| R ² | 0.9287 | 0.8871 | 0.9008 | 0.8830 | 0.9912 | 0.9789 | 0.9572 | 0.9470 | | | | | |
| R ² _{Adj} | 0.8371 | 0.7419 | 0.7733 | 0.7327 | 0.9798 | 0.9517 | 0.9022 | 0.8790 | | | | | |
| CV/% | 0.78 | 3.45 | 1.22 | 4.08 | 4.50 | 8.02 | 11.37 | 3.66 | | | | | |

黏度影响极显著;AC对咀嚼度影响显著;B、C、A²、B²对咀嚼度影响极显著;BC对回弹性影响显著;A、C、A²、B²、C²对回弹性影响极显著。各指标中一次项、二次项、AB、AC、BC的交互作用对响应值均有较大的关系。

由表 5 可知,硬度、黏度、咀嚼度模拟的复相关系数 R² 和 R²_{Adj} 相近,说明该模型与实际试验之间有很好的拟合度;糊化度、WAI、WSI、感官评分、回弹性模拟的复相关系数 R² 和 R²_{Adj} 有所差距,说明建立的模型能良好的解释响应值的变化,该模型与实际试验之间有良好的拟合度^[20-21]。试验的精确度(CV)均在 0~12%之间,说明试验操作可靠^[22]。

2.1.3 响应面曲面试验结果分析 为了更直观地看出各参数之间的相互作用和最佳水平,选取对响应值影响显著的因素并绘制响应值对各因素所构成的曲面图和等高线图^[23]。由图 1~8 可见。等高线图可以反映两独立因素之间的交互作用,其中椭圆的离心率越接近 1,则椭圆越扁,交互作用就越强;反之椭圆越圆,交互作用越弱^[24]。

由图 1 可见,在螺杆转速(B)和加水量(C)对响应值糊化度的交互作用中,在低螺杆转速(220 r/min)时,随着加水量的增加,糊化度呈上升趋势;在高螺杆转速(250 r/min)时,随着加水量的增加,糊化度随之降低。在低加水量(15%)时,随着螺杆转速增加,糊化度随之上升,趋势陡峭;在高加水量(21%)时,随着螺杆转速的增加,糊化度先减小后增

加。此当固定挤压温度时,螺杆转速和加水量对糊化度存在显著的交互作用。

由图 2 可见,在螺杆转速(B)和加水量(C)对响应值 WSI 的交互作用中,在低螺杆转速(220 r/min)时,随着加水量增加,WSI 逐渐降低;在高螺杆转速(250 r/min)时,随着加水量的增加 WSI 逐

渐增高。在低加水量(15%)时,随着螺杆转速增加,WSI 先增后减,趋势缓和;在高加水量(21%)时,随着螺杆转速的增加,WSI 呈上升趋势,且坡度较陡。因此当固定挤压温度时,螺杆转速和加水量对 WSI 存在显著的交互作用。

由图 3 可见,在螺杆转速(B)和加水量(C)对

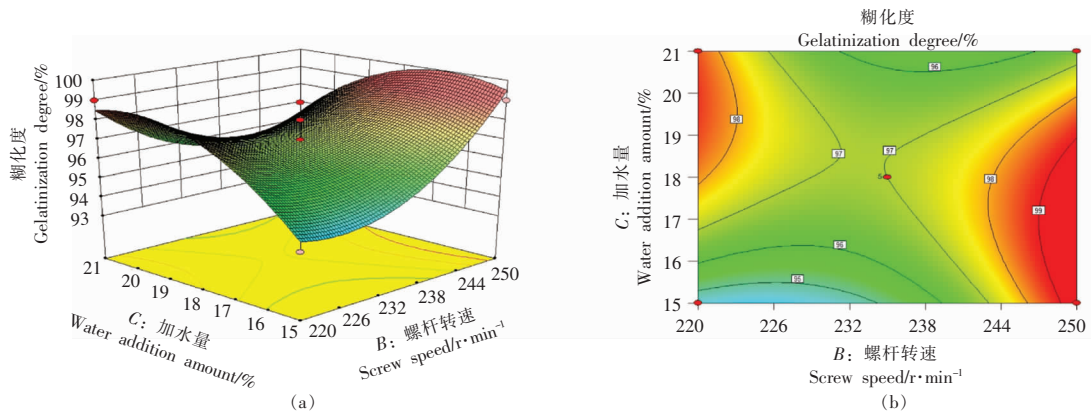


图 1 螺杆转速和加水量对糊化度的响应面图和等高线图

Fig.1 Response surface diagram and contour diagram of screw speed and water addition amount on gelatinization degree

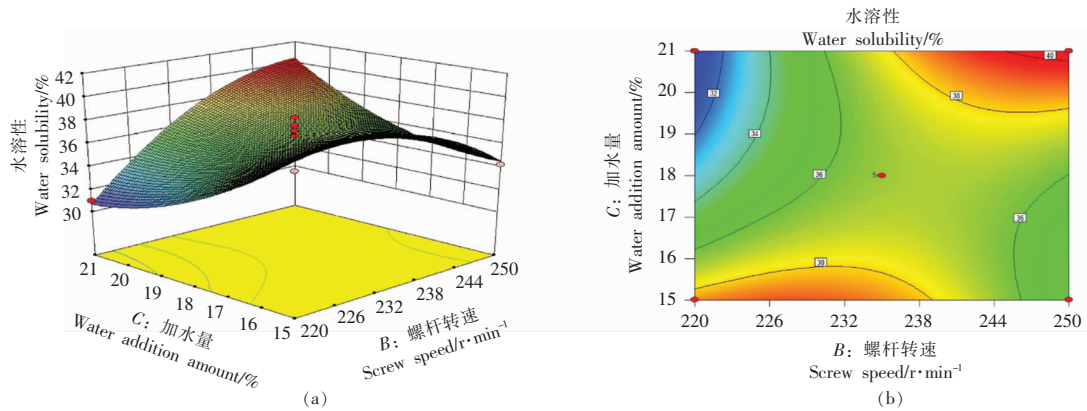


图 2 螺杆转速和加水量对水溶性的响应面图和等高线图

Fig.2 Response surface and contour map of screw speed and water addition amount on water solubility

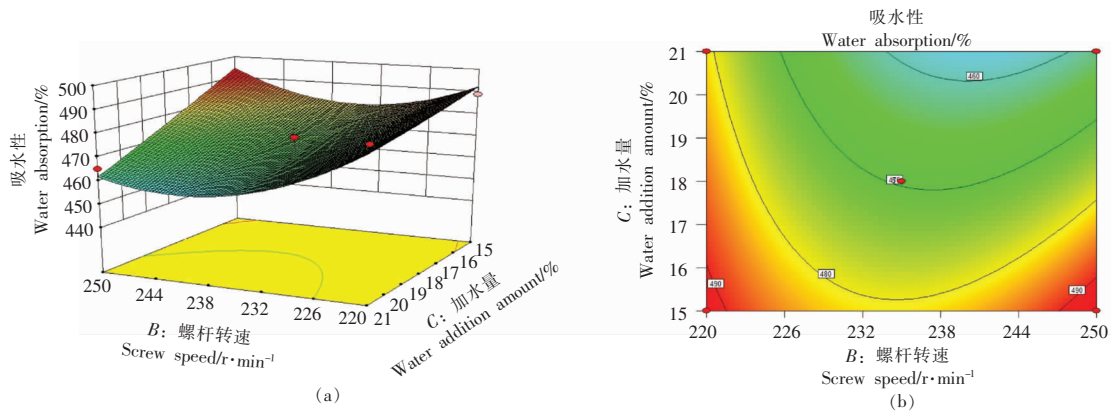


图 3 螺杆转速和加水量对吸水性的响应面图和等高线图

Fig.3 Response surface diagram and contour diagram of screw speed and water addition amount on water absorption

响应值 WAI 的交互作用中,在低螺杆转速(220 r/min)时,随着加水量增加,WAI 随之降低,下降幅度较为平缓;在高螺杆转速(250 r/min)时,随着加水量的增加,WAI 逐渐下降。在低加水量(15%)时,随着螺杆转速增加,WAI 先减后增;在高加水量(21%)时,随着螺杆转速的增加,WAI 同样是先减后增。因此当固定挤压温度时,螺杆转速和加水量对 WAI 存在显著的交互作用。

由图 4 可见,在温度(A)和加水量(C)对响应值感官评分的交互作用中,在低挤压温度(150 °C)时,随着加水量的增加,感官评分逐渐降低;在高挤压温度(170 °C)时,随着加水量的增加,感官评分逐渐上升。在低加水量(15%)时,挤压温度的上升,感官评分先减后增;在高加水量(21%)时,挤压温度的上升,感官评分持续上升。因此当固定螺杆转速时,挤压温度和加水量对感官评分存在

显著的交互作用。

由图 5 可见,在温度(A)和加水量(C)对响应值硬度的交互作用中,在低挤压温度(150 °C)时,随着加水量的增加,硬度逐渐降低,下降趋势趋于平缓;在高挤压温度(170 °C)时,随着加水量的增加,硬度随之增加。在低加水量(15%)时,随着挤压温度的升高,硬度逐渐降低;在高加水量(21%)时,随着挤压温度的升高,硬度逐渐增长,且坡度较陡。因此当固定螺杆转速时,挤压温度和加水量对硬度存在显著的交互作用。

由图 6 可见,在温度(A)和加水量(C)对响应值黏度的交互作用中,在低挤压温度(150 °C)时,随着加水量的增加,黏度逐渐降低;在高挤压温度(170 °C)时,随着加水量的增加,黏度逐渐上升。在低加水量(15%)时,随着挤压温度的升高,黏度逐渐降低;在高加水量(21%)时,随着挤压温度的升

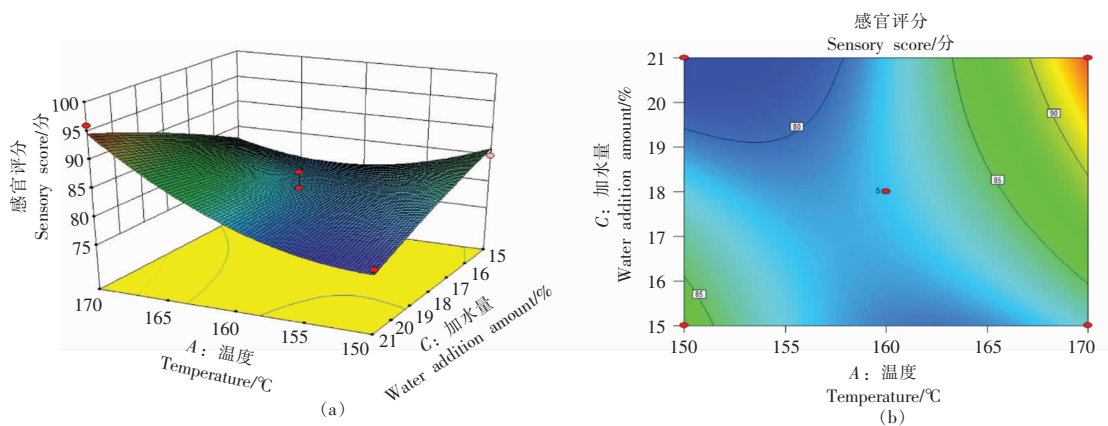


图 4 温度和加水量对感官评分的响应面图和等高线图

Fig.4 Response surface and contour map of temperature and water addition amount on sensory score

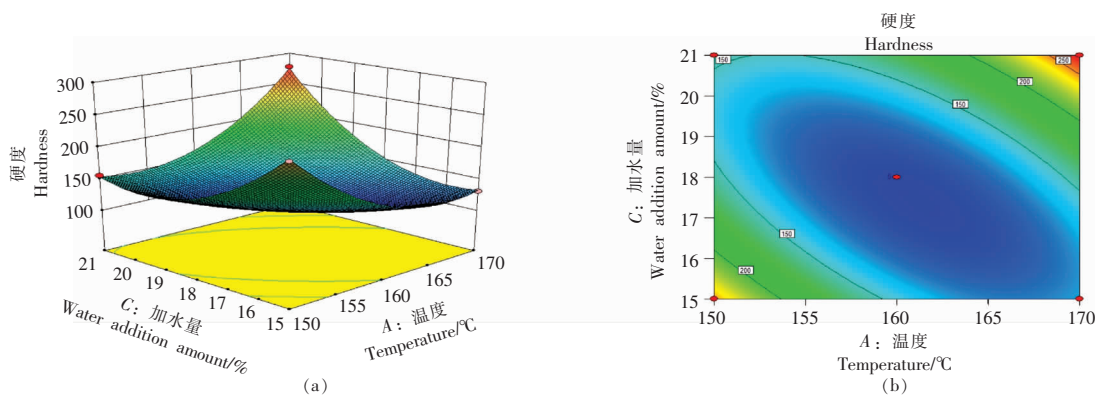


图 5 温度和加水量对硬度的响应面图和等高线图

Fig.5 Response surface diagram and contour diagram of temperature and water addition amount on hardness

高,黏度先增后减。因此当固定螺杆转速时,挤压温度和加水量对黏度存在显著的交互作用。

由图 7 可见,在温度(A)和加水量(C)对响应值咀嚼度的交互作用中,在低挤压温度(150℃)时,随着加水量的增加,咀嚼度逐渐上升,且幅度较缓;在高挤压温度(170℃)时,随着加水量的增

加,咀嚼度增加,且坡度较陡。在低加水量(15%)时,随着挤压温度的升高,咀嚼度下降;在高加水量(21%)时,随着挤压温度的升高,咀嚼度先减后增。因此当固定螺杆转速时,挤压温度和加水量对咀嚼度存在显著的交互作用。

由图 8 可见,在螺杆转速(B)和加水量(C)对

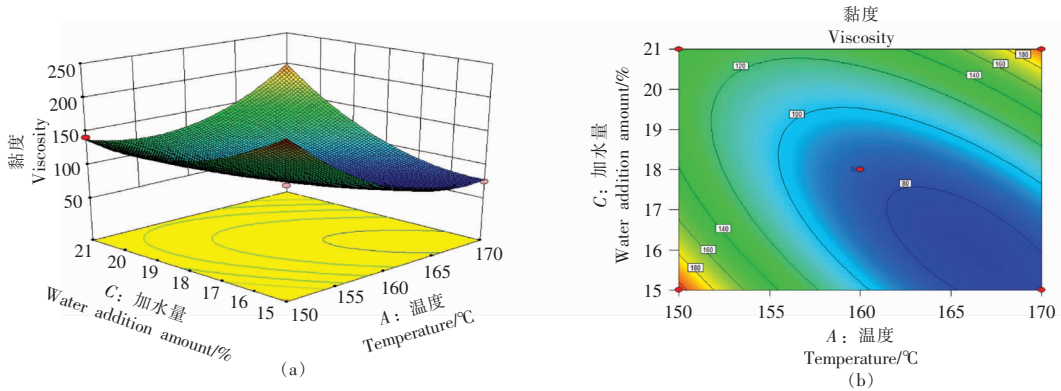


图 6 温度和加水量对黏度的响应面图和等高线图

Fig.6 Response surface diagram and contour diagram of temperature and water addition amount on viscosity

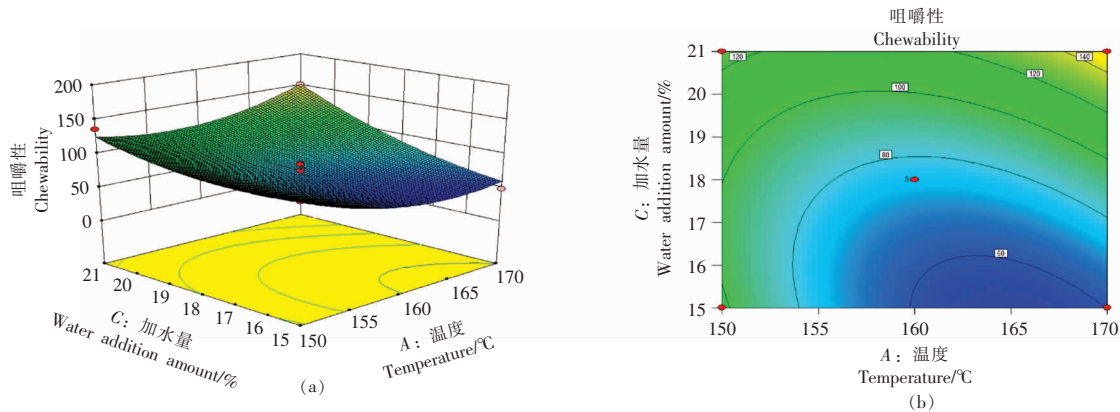


图 7 温度和加水量对咀嚼性的响应面图和等高线图

Fig.7 Response surface diagram and contour diagram of temperature and water addition amount on chewability

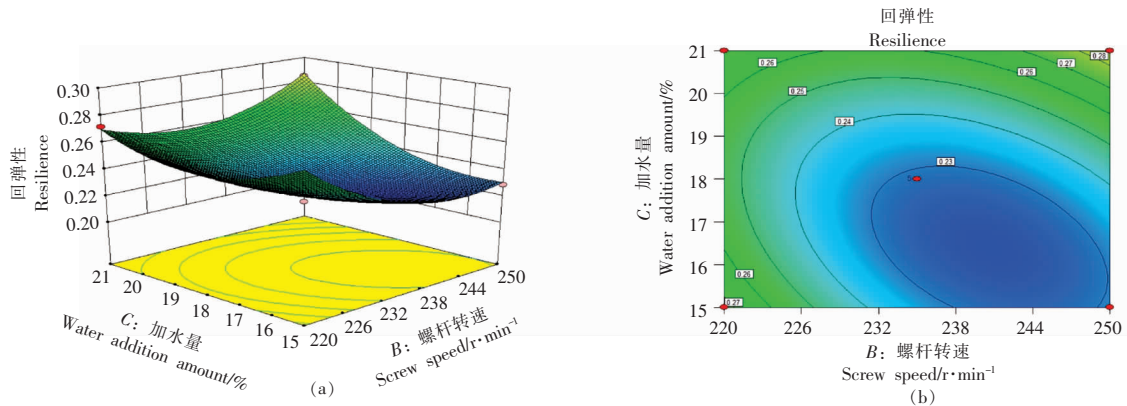


图 8 螺杆转速和加水量对回弹性的响应面图和等高线图

Fig.8 Response surface diagram and contour diagram of screw speed and water addition on resilience

响应值回弹性的交互作用中,在低螺杆转速(220 r/min)时,随着加水量的增加,回弹性先减后增;在高螺杆转速(250 r/min)时,随着加水量的增加,回弹性逐渐增加。在低加水量(15%)时,随着螺杆转速的增加,回弹性逐渐降低;在高加水量(21%)时,随着螺杆转速的增加,回弹性先减后增。因此当固定螺杆转速时,挤压温度和加水量对回弹性存在显著的交互作用。

2.1.4 最优水平验证试验 以理化指标、感官评

分、质构特性为响应值,利用 Design Expert 8.0.6 软件对回归模型进行分析和验证,结果见表 6。获得的最佳挤压条件:螺杆转速 250 r/min,挤压温度 170 °C,加水量 18.87%。考虑到实际操作的可行性,将其调整为螺杆转速 250 r/min,挤压温度 170 °C,加水量 19%。在调整后的条件下,进行 10 次的平行验证试验。预测值与实际值之间的 CV 均在 12% 以内,说明模型准确的预测了试验结果,具有良好的应用价值。

表 6 模拟预测值及试验验证结果

Table 6 Simulation predicted values and test verification results

| | 糊化度/% | 感官评分/分 | 吸水性/% | 水溶性/% | 硬度 | 黏度 | 咀嚼度 | 回复性 |
|------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| 预测 | 97.649 | 92.000 | 477.833 | 38.905 | 239.711 | 146.995 | 136.588 | 0.265 |
| 实际 | 98.672 ± 0.103 | 88.000 ± 1.000 | 481.385 ± 1.001 | 37.614 ± 0.563 | 223.735 ± 2.403 | 132.693 ± 3.216 | 116.728 ± 1.663 | 0.251 ± 0.007 |
| CV/% | 0.662 | 3.143 | 0.524 | 2.386 | 4.875 | 7.232 | 11.087 | 3.837 |

2.2 淀粉和蛋白质消化率

如图 9 所示,挤压后的杂粮复合方便粥的淀粉消化率显著提高,这是因为在加热过程中,淀粉分子吸收了大量的水分,淀粉颗粒转变为无定形态,分子间和分子内氢键断裂,且挤压会导致淀粉表明多孔且疏松,使酶更易于作用于淀粉内部酶的作用位点,从而提高淀粉酶的酶解效率^[25-26],继而提高了酶的降解能力,最终提高杂粮复合方便粥的淀粉消化率^[27]。

蛋白质受挤压机内高温、高压、高剪切力作用,其表面电荷重新分布且趋于均一化,次级化学键部分断裂,使蛋白质发生变性。食品中蛋白质的消化性取决于蛋白质的构象和水解度。由图 9 可知,在最优条件挤出后,杂粮方便粥的蛋白质体外消化率显著提高。说明挤压加工能有效的改变谷物的消化率。同时大分子蛋白质在挤压过程中会被降解成部分人体必须的氨基酸和分子质量较小的肽^[28]。

2.3 杂粮方便粥傅里叶红外测定

图 10 是挤压前、后样品的傅里叶红外光谱图。由图 10 可看出,挤压前、后的图谱相似,表明它们的结构基本相似。在特征光谱的区域内,920~1 160 cm^{-1} 处有明显的吸收峰,是由于 C-O 键的伸缩振动及 C-OH 键的弯曲振动^[29]。在 1 510~

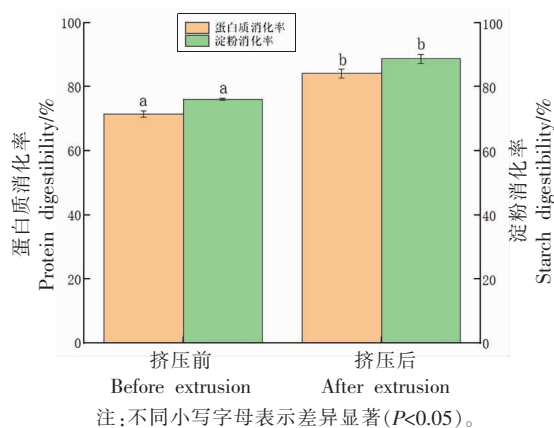


图 9 挤压处理对样品淀粉和蛋白质的体外消化率的影响

Fig.9 Effects of extrusion treatment on *in vitro* digestibility of sample starch and protein

1 650 cm^{-1} 处出现特征峰,这可能与淀粉分子中的结合水有关^[30],从图 10 可看出,最优工艺挤压出的产品在 1 648 cm^{-1} 处出现特征峰有较为明显的减弱,这说明挤压后淀粉分子中的结合水的能力减弱。在 2 917 cm^{-1} 处 C-H 伸缩振动明显减弱。在 3 375 cm^{-1} 处经最优工艺挤压后的杂粮方便粥有明显的增强,说明在挤压后淀粉保水能力增强^[31-32]。

2.4 杂粮方便粥的 XRD 的测定

原料和最优工艺挤压后的 X-射线衍射图谱如图 11 所示。原料在 2θ 为 15°, 17°, 23° 时都有出

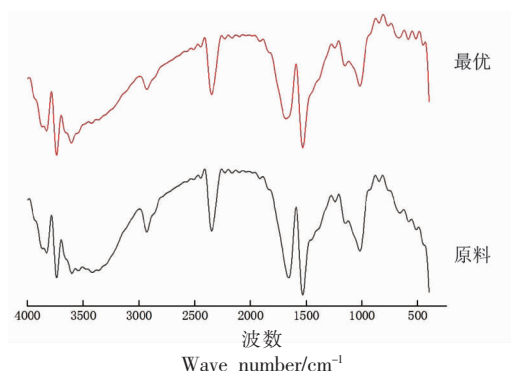


图 10 挤压前、后的傅里叶红外光谱图

Fig.10 Fourier infrared spectrum before and after extrusion

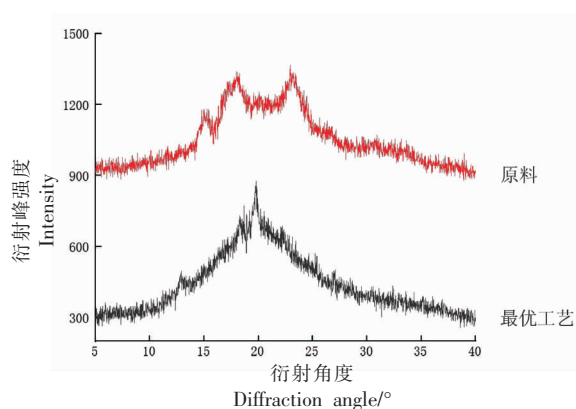


图 11 最优工艺、原料的 X 射线衍射图谱

Fig.11 X-ray diffraction pattern of optimal process and raw materials

峰,为典型的 A 型结构,结晶度为 44.26%。通过最优工艺的挤压处理后在 15°, 17°, 23° 的特征峰强度都明显降低或消失。这可能是因为挤压腔体内,淀粉发生了糊化降解随之改变了结晶结构,部分淀粉颗粒的结晶结构遭到了破坏,晶体溶解,无定型区域增加,结晶度下降^[33],为 12.18%。最优工艺的图谱中在 20° 出现了明显的特征峰,说明挤压过程中形成的淀粉-脂类复合物可促进淀粉 V 型结晶的形成,杂粮中的淀粉由 A 型结晶结构逐渐转变为 A+V 型结晶结构,阻碍直链淀粉老化,降低淀粉的回生值,进而延长老化所需时间^[34],有利于提升方便粥的品质。

3 结论

本研究通过响应面优化得到了挤压杂粮方便粥的最佳工艺参数:螺杆转速 250 r/min,加水量

19%,挤压温度 170 ℃。在该挤压条件下,得到的糊化度 98.672%,WAI 为 481.385%,WSI 为 37.614%,感官评分为 88 分,硬度为 223.735,黏度为 132.693,咀嚼度为 116.728,回弹性为 0.251。且各个预测值与实际值之间的 CV 均在 12% 以内,表明试验参数可靠,具有良好的应用价值。经最优工艺挤压后的杂粮方便粥具有更高的蛋白质和淀粉的消化率,在结构上淀粉的结晶型也发生了改变,致使结构变得更稳定、更易糊化且不易回生,进而提高了杂粮方便粥的品质。为今后研究生产挤压膨化杂粮方便粥提供了试验依据。

参 考 文 献

- [1] 陆再英,钟南山. 内科学[M]. 7 版. 北京:人民卫生出版社,2008:770.
LU Z Y, ZHONG N S. Internal medicine[M]. 7th ed. Beijing: People's Health Publishing House, 2008: 770.
- [2] 邹润琪,姜大伟,李凤林,等. 杂粮主食化研究现状及发展趋势[J]. 粮食问题研究,2022(1):20-22,43.
ZOU R Q, JIANG D W, LI F L, et al. Research status and development trend of staple food of coarse cereals[J]. Grain Issues Research, 2022(1): 20-22, 43.
- [3] 孙军涛,张智超,胡锦涛,等. 预熟化杂粮理化特性研究[J]. 食品科技,2020,45(1):221-224.
SUN J T, ZHANG Z C, HU J H, et al. Study on physicochemical properties of pre-ripening coarse cereals[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(1): 221-224.
- [4] FU J, ZHANG Y, HU Y, et al. Concise-review: Coarse cereals exert multiple beneficial effects on human health[J]. Food Chemistry, 2020, 325: 126761.
- [5] 于笛笛,李筐熹,袁艳秋,等. 不同磨粉方法对荞麦面团流变学性质的影响[J]. 中国粮油学报,2019,34(1):24-29.
YU D D, LI Y X, YUAN Y Q, et al. Effects of different milling methods on the rheological properties of buckwheat dough[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(1): 24-29.
- [6] 吴丽萍,金雅娟,金晶. 荞麦饼干品质改良工艺优化及品质分析[J]. 食品工业,2017,38(11):79-83.

- WU L P, JIN Y X, JIN J. Quality improvement optimization of processing and quality analysis of buckwheat biscuit[J]. *The Food Industry*, 2017, 38(11): 79–83.
- [7] 江鹏, 陆启玉. 营养强化面条研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2016, 29(8): 14–17.
- JIANG P, LU Q Y. Research progress of nutrient fortified noodles[J]. *Cereals and Oils*, 2016, 29(8): 14–17.
- [8] SMITH D A, RAO R N, LIUZZO J A, et al. Chemical treatment and process modification for producing improved quick-cooking rice [J]. *Journal of Food Science*, 1985, 50(7): 926–931.
- [9] DEWITA D, SYAHRUL S, DESMELATI D. Innovation on street food products (instant porridge and cookies) based on fortified patin fish protein concentrate with red palm oil and encapsulated oil fish [J]. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 2016, 18(3): 315–320.
- [10] DOLAPO A O, MOHAMMED N E, HENRIËTTE L K. Extrusion cooking of cassava-soy flour with 200 g/kg wheat bran promotes slower oral processing during consumption of the instant porridge and higher derived satiety[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 97(12): 778–786.
- [11] XU E, PAN X W, WU Z Z, et al. Response surface methodology for evaluation and optimization of process parameter and antioxidant capacity of rice flour modified by enzymatic extrusion[J]. *Food Chemistry*, 2016, 212: 146–154.
- [12] WEN H Y, YU X Z, WEI X S, et al. Effect of extrusion processing on the microstructure and *in vitro* digestibility of broken rice [J]. *LWT*, 2020, 119: 108835.
- [13] KANTRONG H, CHARUNUCH C, LIMSANGOUAN N. Influence of process parameters on physical properties and specific mechanical energy of healthy mushroom-rice snacks and optimization of extrusion process parameters using response surface methodology[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 55(9): 3462–3472.
- [14] 吴昊. 应用挤压膨化技术生产老年杂粮营养餐的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2011.
- WU H. Application of extrusion technology to produce nutritious food of older[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2011.
- [15] ZHOU Y, CAO H, HOU M, et al. Effect of konjac glucomannan on physical and sensory properties of noodles made from low-protein wheat flour [J]. *Food Research International*, 2013, 51(2): 879–885.
- [16] LIU T, ZHAO M. Physical and chemical modification of SPI as a potential means to enhance small peptide contents and antioxidant activity found in hydrolysates[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2010, 11(4): 677–683.
- [17] 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(2): 33–50.
- [18] YING D, HLAING M M, LERISSON J, et al. Physical properties and FTIR analysis of rice-oat flour and maize-oat flour based extruded food products containing olive pomace [J]. *Food Research International*, 2017, 100(Pt 1): 665–673.
- [19] PABLO D R, SILVIA C, ALBERTO E, et al. The staling of bread: An X-ray diffraction study [J]. *European Food Research and Technology*, 2004, 218(3): 219–223.
- [20] JACOBSEN S E, MUJICA A, JENSEN C R. The resistance of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to adverse abiotic factors [J]. *Food Reviews International*, 2003, 19(1/2): 99–109.
- [21] HONARY S, EBRAHIMI P, GHASEMITA P. Preparation of gold nanoparticles for biomedical applications using chemometric technique [J]. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 2013, 12(3): 295–298.
- [22] SRIDHAR K, CHARLES A L. *In vitro* antioxidant activity of Kyoho grape extracts in DPPH and ABTS assays: Estimation methods for EC₅₀ using advanced statistical programs [J]. *Food Chemistry*, 2019, 275(1): 41–49.
- [23] QIU J Z, SONG F F, QIU Y F, et al. Optimization of the medium composition of a biphasic production system for mycelia growth and spore production of *Aschersonia placenta* using response surface methodology [J]. *Journal of Invertebrate Pathology*, 2013, 112(2): 108–115.
- [24] 王娜, 李鸿梅, 吴洪峰, 等. 响应面法优化荷叶池沼公鱼鱼糕工艺配方 [J]. *保鲜与加工*, 2019, 19(4): 150–155, 161.
- WANG N, LI H M, WU H F, et al. Optimization

- of process formula of lotus leaf -pond smelt kamaboko gel by response surface method[J]. Storage and Process, 2019, 19(4): 150-155, 161.
- [25] BRAHMA S, WEIER S A, ROSE D J. Effects of selected extrusion parameters on physicochemical-properties and *in vitro* starch digestibility and β -glucan extractability of whole grain oats[J]. Journal of Cereal Science, 2016, 70: 85-90.
- [26] OROZCO - MARTÍNEZ T, BETANCUR - ANCONA D. Indigestible starch of *P. lunatus* obtained by pyroconversion: Changes in physicochemical properties [J]. Starch - Stärke, 2004, 56(6): 241-247.
- [27] CHEN L, TIAN Y, ZHANG Z, et al. Effect of pullulan on the digestible, crystalline and morphological characteristics of rice starch[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 63: 383-390.
- [28] BERGHOFER E. Kinetics of lysine and other amino acids loss during extrusion cooking of maize grits[J]. Journal of Food Science, 2003, 68(2): 496-502.
- [29] FANG J M. The chemical modification of a range of starches under aqueous reaction conditions[J]. Carbohydrate Polymers, 2004, 55(3): 283-289.
- [30] 宋晓燕. 早籼米辛烯基琥珀酸淀粉醋的制备及其理化性质的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- SONG X Y. Preparation and physicochemical properties of octenyl succinic anhydride modified early indica rice starches[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [31] FARAHAKEY A, ASKARI H, MAJZOBI M, et al. The impact of concentration, temperature and pH on dynamic rheology of psyllium gels[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100(2): 294-301.
- [32] VINOD V T P, SASHIDHAR R B, SURESH K I, et al. Morphological, physico-chemical and structural characterization of gum kondagogu (*Cochlospermum gossypium*): A tree gum from India[J]. Food Hydrocolloid, 2008, 22: 899-915.
- [33] WANG S J, YU J L, YU J G, et al. The partial characterization of C-type *Rhizoma dioscorea* starch granule during acid hydrolysis [J]. Food Hydrocolloids, 2008, 22(4): 531-537.
- [34] LIU Y, CHEN J, LUO S, et al. Physicochemical and structural properties of pregelatinized starch prepared by improved extrusion cooking technology [J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 175: 265-272.

Process Optimization of Extruded Instant Porridge and Analysis of Its Quality Characteristics

Wang Chen, Wang Yan*, Wu Weiguo, Liao Luyan

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

Abstract The optimum process of extruded instant porridge was studied with composite grain powder as raw material. Based on the previous single factor experiment results, the process of extruded instant porridge was optimized by box Behnken design response surface method. The quality of extruded instant porridge was evaluated by taking physical and chemical properties, sensory score, texture properties and digestibility of protein starch as investigation indexes. The structure of instant porridge before and after extrusion was studied by Fourier infrared spectroscopy and X-ray diffraction. The results showed that the best technology of extruding instant porridge was as follows: Screw speed 250 r/min, extrusion temperature 170 °C, water addition 19%. In the validation test, the coefficient of variation is between 0-12%, and the optimized process conditions of instant porridge have good reproducibility, indicating that the process parameters optimized by response surface are reliable. Under these conditions, The protein digestibility and starch digestibility of the instant porridge increased by 12.570% and 12.602%, respectively, after extrusion compared with that before extrusion. Fourier transform infrared spectroscopy analysis showed that the structure of main functional groups did not change significantly before and after extrusion, and the intensity of some characteristic peaks decreased after extrusion. X-ray diffraction scanning analysis showed that the crystal configuration of instant porridge changed before and after extrusion. After extrusion, the quality of instant porridge was improved and the microstructure changed.

Keywords instant porridge; response surface; physical and chemical properties; texture properties; quality