

刘鹏, 先于王翘, 孙敏, 等. 双螺杆挤压法生产小米方便粥的工艺优化 [J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(1): 125-132.
LIU Peng, XIAN Yuwangqiao, SUN Min, et al. The process optimization of millet instant porridge production with twin-screw extruder[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(1): 125-132.

双螺杆挤压法生产小米方便粥的工艺优化

刘 鹏^{1,2}, 先于王翘¹, 孙 敏¹, 赵小慧¹, 张睿涵¹, 于国萍²

(1 通化师范学院 食品科学与工程学院, 吉林 通化 134002; 2 东北农业大学 食品学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要:【目的】以小米粉为主要原料复配脱脂大豆粉, 用双螺杆挤压法开发升糖指数较低的方便粥, 并优化其加工工艺。【方法】根据 FAO/WHO 标准模式确定脱脂大豆粉复配比例。在单因素试验基础上运用 Box-Behnken Design(BBD) 方法设计优化试验, 研究挤压温度、螺杆转速、物料水分含量和烤炉温度对方便粥品质的影响, 最终确定最优加工工艺条件。【结果】脱脂大豆粉添加量 (w) 为 30% 时, 小米粉与其互补后必需氨基酸评分均大于 1, 符合 FAO/WHO 标准模式。最佳加工工艺条件为: 挤压温度 145 ℃, 螺杆转速 220 r/min, 水分含量 35%(w)。以优化出的工艺条件进行试验, 获得糊化度较高 (86.72%)、升糖指数较低 (63.21)、复水率较高 (305%) 并且感官评分较高 (93 分) 的小米方便粥产品。【结论】工艺条件对方便粥的理化性质和食用品质影响显著, 其变化规律可为其他相关产品的开发提供理论依据。

关键词: 小米; 方便粥; 挤压加工; 工艺优化; 升糖指数
中图分类号: TS217.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2021)01-0125-08

The process optimization of millet instant porridge production with twin-screw extruder

LIU Peng^{1,2}, XIAN Yuwangqiao¹, SUN Min¹, ZHAO Xiaohui¹, ZHANG Ruihan¹, YU Guoping²
(1 College of Food Science and Engineering, Tonghua Normal University, Tonghua 134002, China;
2 College of Food, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: 【Objective】 To develop a kind of instant porridge with a lower glycemic index by the twin-screw extrusion processing using millet flour as the main raw material to mix with defatted soybean flour, and optimize the processing technology. 【Method】 The mix ratio of defatted soybean flour was determined according to the FAO/WHO standard model. Based on the single-factor test, the Box-Behnken Design (BBD) method was used to design and optimize the experiment. The effects of extrusion temperature, screw speed, material moisture content, and oven temperature on the quality of instant porridge were studied to finally determine the optimal processing technology condition. 【Result】 When the addition amount of defatted soybean flour was 30% (w), the essential amino acid scores were all greater than one after complementing with millet flour, which complied with the FAO/WHO standard mode. The optimal processing conditions were the extrusion temperature of 145 ℃, the screw speed of 220 r/min and the material moisture content of 35%. Under the optimized conditions, the product with higher gelatinization (86.72%), lower glycemic index (63.21), high rehydration rate (305%) and

high sensory score (93 points) was obtained. 【Conclusion】 The process conditions have significant effects on the physicochemical property and eating quality of instant porridge, and their change law provides a theoretical basis for the development of other related products.

Key words: millet; instant porridge; extrusion processing; process optimization; glycemic index

谷子 *Setaria italica* 又称为粟, 去壳后称为小米, 在植物学上属禾本科 Gramineae 狗尾草属 *Setaria*, 起源于 8 700 年以前中国的黄河流域, 栽培历史悠久^[1-2]。小米营养丰富, 除了富含碳水化合物、蛋白质、脂肪三大营养素和多种维生素、矿物质等微量营养物质外, 小米特有的黄色素和小米多酚具有预防癌症、抗氧化和抑菌等生理保健功能^[3-6]。但是, 小米中赖氨酸含量远低于 FAO/WHO 建议的理想水平, 所以在开发食品时研究人员常用赖氨酸含量较高的大豆进行复配^[7]。

随着社会生活节奏的逐渐加快, 耗时耗力的传统蒸煮烹饪方式已经不能适应当代人们的需求, 方便速食粥的开发就变得尤为重要。方便粥的加工方式主要有生化法、浸泡法、喷雾干燥法、超高压法和挤压膨化法等, 其中挤压膨化法由于其方便高效、生产成本低廉而被广泛应用^[8-12]。食品挤压膨化技术属于高温高压加工技术, 特指利用螺杆挤压方式, 通过压力、剪切力、摩擦力及加温等作用所形成的对于固体原料的破碎、捏合、混炼、熟化、杀菌、预干燥和成型等加工处理方式^[13]。本文以小米复配大豆为原料, 利用双螺杆挤压加工方式, 研发出一种升糖指数 (Glycemic index, GI) 较低的小米方便粥, 为挤压方便粥的工业化生产提供一定的理论依据, 具有一定的现实指导意义。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验用小米购于甘肃省庆阳市农科院, 小米的淀粉质量分数为 66.10%(以干基计), 小米经粉碎机粉碎后, 过 80 目筛, 于-4 ℃ 贮存储备用, 试验用脱脂大豆粉购于新龙亚洲 (龙口) 大豆食品有限公司, 试验用 PI-3 200 真空上料系统、FM50-24 型挤压机、FMFC-600 型流化床系统和 FMDR-400 型烤箱均由湖南富马科食品工程技术有限公司生产。

1.2 小米蛋白质含量测定、必需氨基酸分析及氨基酸评分 (Amino acid score, AAS) 的计算

委托黑龙江省出入境检验检疫局检验检疫技术中心进行蛋白质含量及必需氨基酸的检测, 其中蛋白质含量根据《GB 5009.5—2016》^[14] 的方法进行测定, 苯丙氨酸、甲硫氨酸、赖氨酸、亮氨酸、苏氨酸、缬氨酸和异亮氨酸含量根据《GB 5009.124—2016》^[15] 的方法进行测定, 色氨酸含量根据《GB/T 18246—2019》^[16] 的方法进行测定。AAS 计算公式如下^[17]:

$$AAS = \frac{100 \text{ g样品中蛋白质氨基酸含量}}{100 \text{ g FAO/WHO的标准氨基酸含量}}^{\circ}$$

1.3 小米方便粥的制备及其性质测定

1.3.1 小米方便粥制备工艺流程 小米方便粥制备工艺流程如图 1 所示。

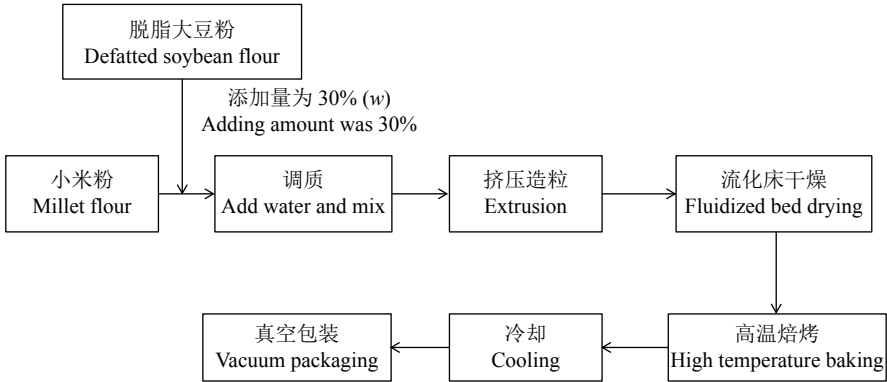


图 1 小米方便粥制备工艺流程

Fig. 1 Preparation process of millet instant porridge

1.3.2 单因素试验设计 利用单因素试验分别考察挤压温度 (80、100、120、140 和 160 ℃)、物料含水量 (w 为 8%、30%、32%、34% 和 36%)、螺杆转速

(200、220、240、260 和 280 r/min) 以及焙烤温度 (160、180、200、220 和 240 ℃) 对方便粥的糊化度、升糖指数、复水率的测定和感官品质的影响。各因

素固定工艺条件为挤压温度 120 ℃、物料含水量(w)32%、螺杆转速 240 r/min、焙烤温度 200 ℃, 产品在烤箱中滞留时间约为 20 s。

1.3.3 响应面优化试验设计 根据单因素试验结果和 Box-Benhknen 中心组合试验的设计原理, 选取挤压温度、物料含水量和螺杆转速 3 个影响因子, 各取 3 个水平, 进行因素水平共 17 个试验点的响应面分析试验, 并运用 Minitable 15 数据统计分析软件进行数据分析, 进而得到最佳生产工艺条件。

试验因素水平见表 1。

表 1 试验因素水平表
Table 1 Factor levels of the test

水平 Level	挤压温度/℃ Extrusion temperature (A)	螺杆转速/ (r·min ⁻¹) Screw speed (B)	w(水) /% Moisture content (C)
-1	120	180	30
0	140	200	33
1	160	220	36

1.3.4 升糖指数的测定 采用 Ferrer-Mairal 等^[18]的方法测定样品升糖指数。准确称取方便粥样品 0.1~0.2 g(含淀粉约 50 mg, 精确到 0.001 g)加入到 10 mL 浓度为 0.1 mol/L 的 HCl-KCl 缓冲液 (pH 1.5) 中, 然后加入 1 mg/mL 的胃蛋白酶溶液 0.2 mL, 在 40 ℃ 水浴锅中保温 1 h, 并不停搅拌。然后将水浴锅温度调至 37 ℃, 向其中加入 15 mL PBS 缓冲溶液 (pH 6.9) 和 5 mL α-淀粉酶 (2.6 U), 方便速食粥样品中的淀粉酶解反应开始, 此反应在 37 ℃ 条件下保温 3 h, 每 0.5 h 取样一次, 每次取样 1 mL, 将取出的样液在 100 ℃ 水中加热 5 min 使酶灭活, 然后冷却至室温, 在 3 000 r/min 下离心 10 min, 取上清液。采用 DNS 法测待测液中的葡萄糖浓度。以酶解反应时间为横坐标, 以淀粉水解率为纵坐标, 进行淀粉水解曲线的绘制。其中淀粉水解率 (SR) 为:

$$SR = \frac{(C_t - C_0) \times 30.2 \times 0.9}{50} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: C_t 为在反应时间为 t 时反应溶液体系中葡萄糖质量浓度, mg/mL; C_0 为酶解反应开始时, 即 0 min 时反应溶液体系中葡萄糖质量浓度, mg/mL; 30.2 为酶解反应初始体积, mL; 0.9 为葡萄糖与淀粉的转化当量。

因为淀粉水解曲线方程符合一级反应方程, 也就是葡萄糖生成曲线符合一级反应方程, 所以将淀

粉水解曲线转换成葡萄糖生成曲线后, 按下式计算酶解反应常数:

$$C_t - C_0 = C_{\max} \times (1 - e^{-kt}), \quad (2)$$

式中: $C_{\max}$ 为生成葡萄糖最大质量浓度, mg/mL; k 为酶解反应常数, min⁻¹。当算得酶解反应常数后, 按照下式计算淀粉水解曲线下面积 (AUC):

$$AUC = C_{\max} \times (t_f - t_0) - C_{\max} \times \frac{1 - e^{-k(t_f - t_0)}}{k}, \quad (3)$$

式中: t_f 为酶解反应结束时间, min; t_0 为酶解反应开始时间, min。然后计算 GI:

$$GI = 0.862 \times I_{Sh} + 8.189 = 0.862 \times \frac{AUC_{\text{方便粥}}}{AUC_{\text{白面包}}} + 8.198, \quad (4)$$

式中: I_{Sh} 为淀粉水解指数; $AUC_{\text{方便粥}}$ 为方便粥 AUC; $AUC_{\text{白面包}}$ 为白面包 AUC。

1.3.5 复水率的测定 准确称取方便粥的成品米粒质量 (m_1 /g), 置于烧杯中, 加 5 倍沸水后立即加盖, 复水 5 min 后立即沥干水分, 并用滤纸滤干表面水分, 称质量为 (m_2 /g), 复水率则用 m_1/m_2 表示^[19]。

1.3.6 感官评分的确定 邀请 10 名食品专业的老师和同学对复水后的方便粥进行感官评价, 评价指标及分值参考《GB/T15682—2008 稻谷、大米蒸煮食用品质感官评价方法》^[20]。

1.4 数据分析

运用 SPSS 20.0 软件和 Design-Expert 8.0.6 软件对试验数据进行分析, 采用 Origin 8.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 原料必需氨基酸评分

经测定, 原料小米的蛋白质质量分数为 11.96%, 含有人体必需的 8 种氨基酸, 但其含量不成比例。原料小米的氨基酸评分如表 2 所示。其中色氨酸和亮氨酸评分较高, 赖氨酸却严重不足。复配了 30%(w) 大豆粉后的小米粉的氨基酸评分如表 2 所示, 符合 FAO/WHO 的标准模式^[17]。

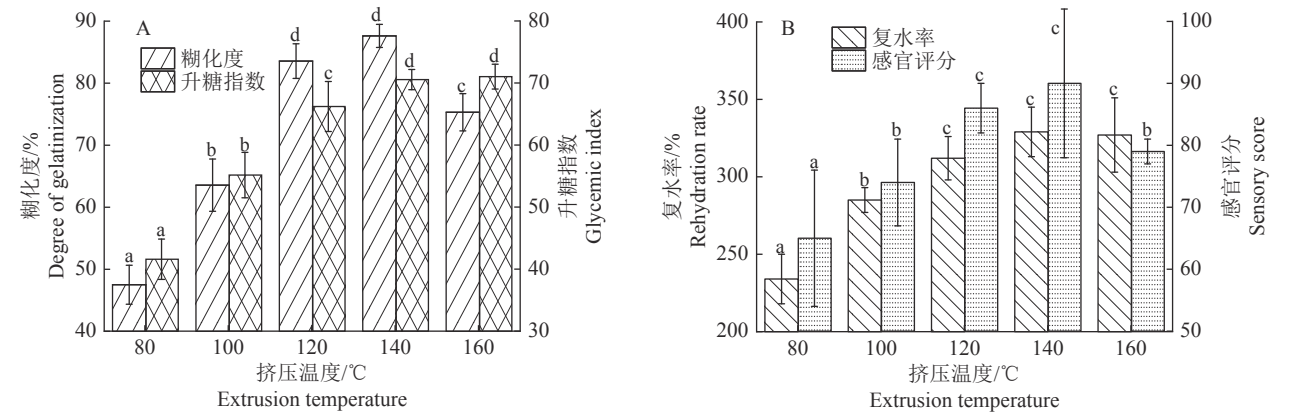
2.2 小米方便粥加工参数单因素试验

2.2.1 挤压温度对小米方便粥品质的影响 挤压温度对方便粥品质的影响如图 2 所示, 随着挤压温度的升高, 样品的糊化度先升高后降低, 最大值出现在 140 ℃, 此时糊化度为 87.62%; 样品的复水率也有相同的趋势, 最大值也出现在 140 ℃, 此时复水率为 329%; 样品的升糖指数随着挤压温度的升高而升高, 低温时升高较明显; 挤压温度对产品的感官品质影响也比较大, 感官品质得分随着挤压温度的升高而先升高后降低, 低温时升高较明显。

表 2 小米方便粥原料的必需氨基酸评分

Table 2 The scores of essential amino acids in raw materials of millet instant porridge

原料 Raw material	异亮氨 酸 Ile	甲硫氨 酸 Met	苯丙氨 酸 Phe	色氨酸 Try	苏氨酸 Thr	亮氨酸 Lue	赖氨酸 Lys	缬氨酸 Val
小米 Millet	1.22	1.25	1.86	2.32	1.31	2.66	0.42	1.46
小米-大豆(w=10%) Millet-defatted soybean flour	1.28	1.19	1.81	2.11	1.34	2.42	0.63	1.41
小米-大豆(w=20%) Millet-defatted soybean flour	1.33	1.11	1.74	2.04	1.36	2.28	0.91	1.39
小米-大豆(w=30%) Millet-defatted soybean flour	1.37	1.05	1.63	1.97	1.40	2.13	1.16	1.36



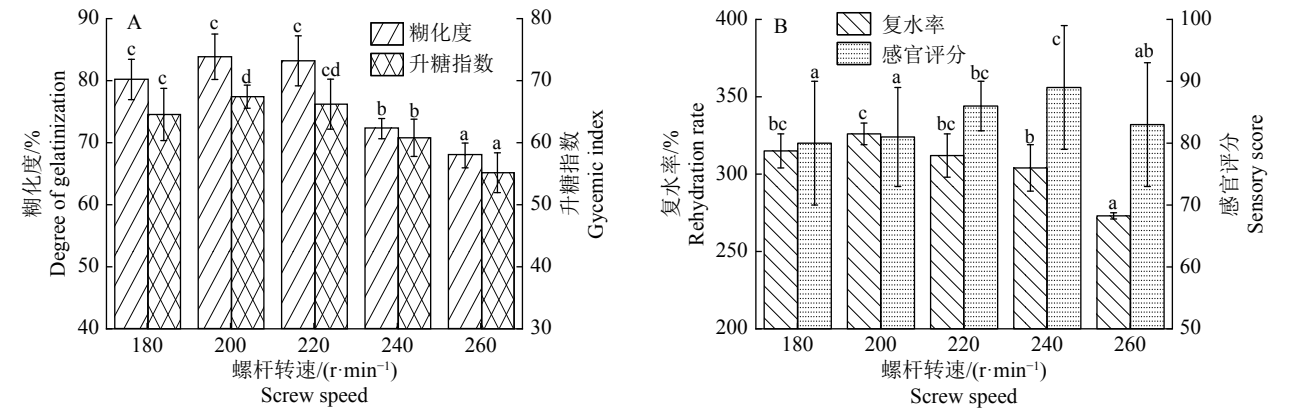
相同指标柱子上的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)
Different lowercase letters above the same indicator columns indicated significant differences ($P<0.05$, Duncan's test)

图 2 挤压温度对小米方便粥品质的影响

Fig. 2 Effects of extrusion temperature on quality characteristics of millet instant porridge

2.2.2 螺杆转速对小米方便粥品质的影响 螺杆转速对产品品质的影响如图 3 所示,开始时随着螺杆转速的增加物料的糊化度、复水率和升糖指数随之增加,这说明在低转速下剪切作用的增强有利于淀粉的糊化和复水,在螺杆转速达到 200 r/min 时,

物料的糊化度、升糖指数和复水率均达到最大值,分别为 84.22%, 67.42 和 316%。随后,物料的糊化度、升糖指数和复水率随着螺杆转速的升高而迅速下降。随着螺杆转速的增加,感官评分呈先升高后降低的趋势,并在 240 r/min 时达到最佳。



相同指标柱子上的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)
Different lowercase letters on the same indicator columns indicated significant differences ($P<0.05$, Duncan's test)

图 3 螺杆转速对小米方便粥品质的影响

Fig. 3 Effects of screw speed on quality characteristics of millet instant porridge

2.2.3 物料水分含量对小米方便粥品质的影响 物料水分含量对产品品质的影响如图 4 所示,随着进料水分的增加,糊化度先快速升高,在水分含量 (w) 为 30% 时糊化度达到 83.56%,随后样品的糊化

度升高不明显;升糖指数在含水量 (w) 为 33% 时达到最大值,随后略有降低;复水率在开始时随物料含水量升高而升高,含水量 (w) 为 33% 时达到最大值,随后降低,这是因为虽然物料含水量进一步升

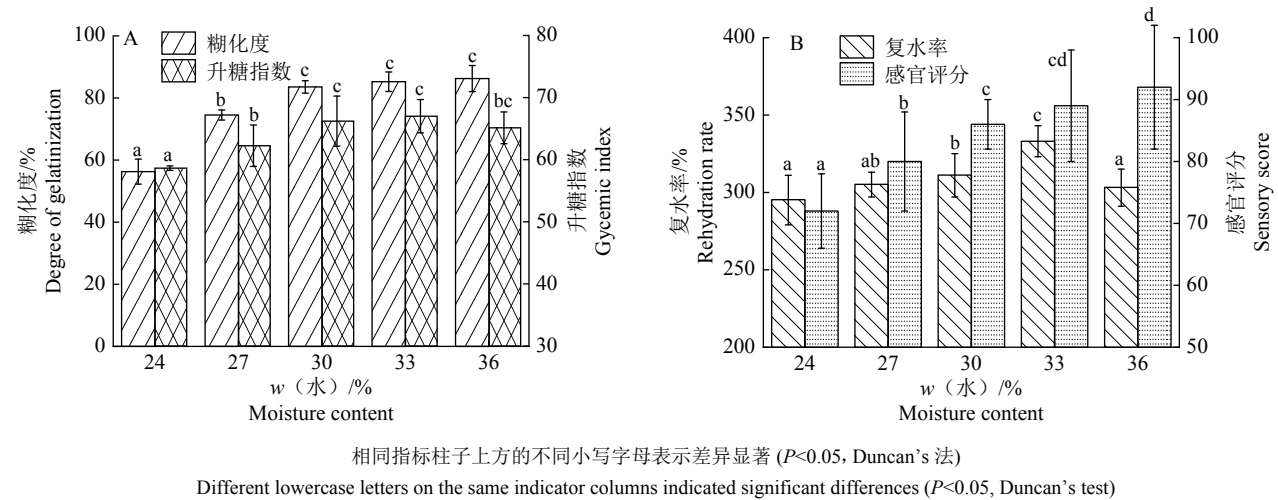


图 4 物料含水量对小米方便粥品质的影响

Fig. 4 Effects of moisture content of material on quality characteristics of millet instant porridge

高,但是糊化度的升高导致产品黏性过大,反而使复水率有所下降;物料的水分含量越高产品的感官得分越高。

2.2.4 焙烤温度对小米方便粥品质的影响 焙烤是样品加工的最后一道工序,起到使样品二次膨化

和干燥并延长样品货架期的重要作用,焙烤温度对产品品质的影响如图 5 所示。与其他加工条件相比焙烤温度对产品的糊化度、升糖指数和复水率影响不大,其分别为 80.23%~83.56%、63.21~67.52 和 306%~312%,而对感官品质影响极大。

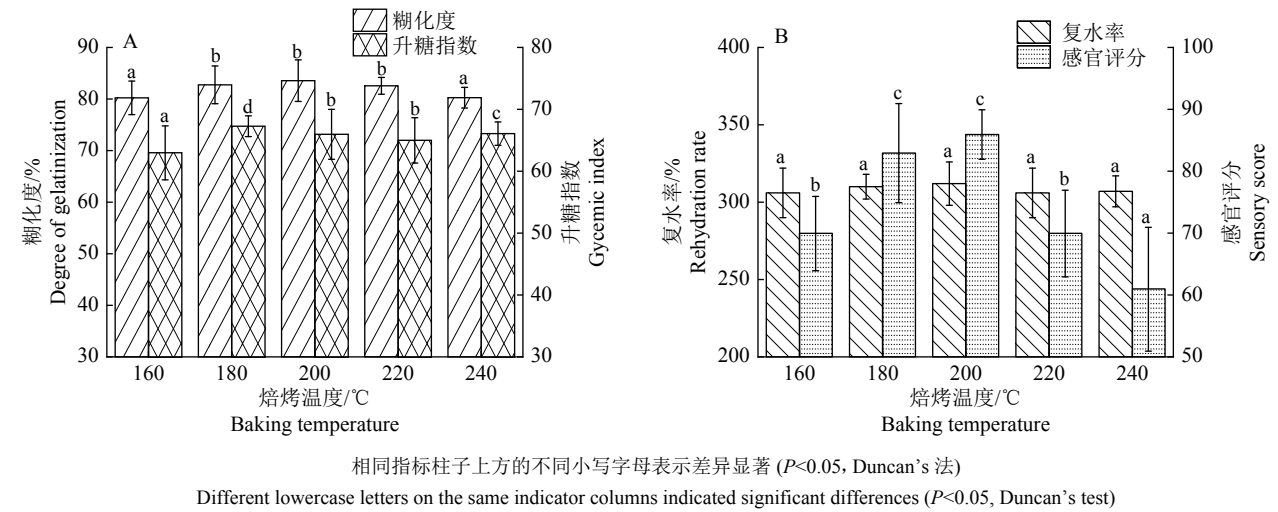


图 5 焙烤温度对小米方便粥品质的影响

Fig. 5 Effect of baking temperature on quality characteristics of millet instant porridge

2.3 小米方便粥加工工艺条件优化

为了得到更加精确的方便小米粥加工工艺条件,使用 Design-Expert 软件,设计了 3 因素 3 水平响应面分析试验,试验结果如表 3 所示。由表 3 可以看出,第 1 组试验条件下的糊化度最高,第 3 组试验条件下的升糖指数最低,第 4 组试验条件下的复水率最大,第 17 组试验条件下的感官评分最高。

通过 Design-Expert 软件,对方便小米粥的糊化度 (Y_1)、升糖指数 (Y_2)、复水率 (Y_3) 和感官评分 (Y_4) 进行回归分析,得到各自的二次回归方程,如表 4 所示。分析表 4 中的数据可知:糊化度 (Y_1) 回

归方程的显著性 F 值为 10.55,对应的 P 为 0.002 6 ($P<0.01$),说明此模型拟合性极显著;失拟项 F 为 0.49,对应的 P 为 0.710 5 ($P>0.05$),说明失拟性不显著,在试验范围内误差较小,回归模型与实际情况拟合程度很高。 R^2 越接近 1,模型拟合度越好,糊化度 (Y_1) 回归方程的 R^2 为 0.934 1,表明此模型可以解释响应值 93.41% 的变化。综上所述,此模型方程可以很好地分析和预测糊化度指标。同理,对其他 3 个模型方程进行相应的分析,由表 4 结果可知,这 3 个模型方程也都可以对升糖指数、复水率和感官评价进行很好地预测和分析。

表 3 方便粥加工工艺三因素三水平的响应面分析结果

Table 3 Response surface analysis results of three factors and three levels of instant porridge processing technology							
序号 No.	挤压温度/℃ Extrusion temperature	螺杆转速/(r·min ⁻¹) Screw speed	w(水)/% Moisture content	糊化度/% Degree of gelatinization	升糖指数 Glycemic index	复水率/% Rehydration rate	感官评分 Sensory score
1	160	200	36	92.15	77.54	328	87
2	140	200	33	88.06	80.97	332	91
3	140	220	36	91.41	56.88	316	94
4	120	220	33	84.67	60.02	334	89
5	140	200	33	85.31	81.27	328	93
6	120	200	30	85.56	72.25	326	86
7	140	200	33	85.36	81.24	333	90
8	120	200	36	86.25	70.56	315	88
9	160	180	33	85.24	74.23	325	87
10	120	180	33	83.06	64.31	320	87
11	140	180	30	87.62	67.58	321	90
12	140	200	33	85.29	80.52	327	91
13	140	200	33	85.27	80.97	332	92
14	140	220	30	85.47	77.12	329	90
15	160	200	30	84.22	80.62	327	80
16	160	220	33	84.06	66.31	331	87
17	140	180	36	91.52	66.12	316	95

表 4 单指标回归方程及分析结果

Table 4 Regression equation of single index and analysis result							
指标 Indicator	模型方程 ¹⁾ Model equation	F	P	失拟项 Lack of fit		R ²	
				F	P		
糊化度(Y ₁) Degree of gelatinization	Y ₁ =85.86+0.77A-0.23B+2.31C-0.7AB+1.81AC+0.51BC-1.78A ² +0.18B ² +3.97C ²	10.55	0.002 6	0.49	0.710 5	0.934 1	
升糖指数(Y ₂) Glycemic index	Y ₂ =80.99+3.95A-1.36B-3.43C-0.91AB-0.35AC-4.45BC-3.10A ² -11.67B ² -2.65C ²	12.50	0.001 6	232.05	0.065 2	0.940 3	
复水率(Y ₃) Rehydration rate	Y ₃ =345.60+0.5A-3.50B-5.00C-2.00AB-2.00BC-8.80A ² -9.30B ² -15.80C ²	41.18	<0.000 1	1.55	0.332 4	0.983 8	
感官评分(Y ₄) Sensory score	Y ₄ =91.40-1.13A+0.13B+2.25C-0.50AB-0.25BC-5.54A ² +1.55B ² -0.70C ²	15.93	0.000 7	1.09	0.449 5	0.953 5	

1)A: 挤压温度/℃; B: 螺杆转速/(r·min⁻¹); C: w(水)/%
1)A: Extrusion temperature; B: Screw speed; C: Moisture content

另外, 通过比较各模型方程回归系数绝对值的大小可以得出结论: 挤压温度 (A)、螺杆转速 (B)、水分含量 (C) 对糊化度 (Y₁) 影响程度的排序为 C>A>B, 对升糖指数 (Y₂) 影响程度的排序为 A>C>B, 对复水率 (Y₃) 影响程度的排序为 C>B>A, 对感官评分 (Y₄) 影响程度的排序为 C>A>B。

本文将这 4 个指标的重要性设置为 1:1:1:1。通过响应面试验最终获得糊化度较高、升糖指数较低、复水率较高并且感官评分较好的加工参数为:

挤压温度 144.53 ℃、螺杆转速 220 r/min、w(水) 35.12%。但考虑实际的加工情况, 将最终的加工参数调整为: 挤压温度 145 ℃、螺杆转速 220 r/min、w(水)35%、焙烤温度 200 ℃。预测试验结果为: 糊化度 89.54%, 升糖指数 61.53, 复水率 324%, 感官评分 93。

以优化出的条件进行试验, 重复 3 次, 获得挤压方便粥的各项指标为: 糊化度 86.72%(与预测值相差 3.14%), 升糖指数 63.21(与预测值相差 2.73%),

复水率 305% (与预测值相差 6.05%), 感官评分 93(与预测值吻合)。最终得到结果与预测较接近, 说明通过模型得到的优化条件具有实用价值。

3 讨论与结论

通过单因素试验可以看出: 挤压温度在 120~160 ℃ 范围内, 产品的糊化度、复水率和感官评分达到最佳值, 但是产品的升糖指数偏高。当挤压温度在 100 ℃ 以下时, 样品的糊化度仅为 60% 左右, 不能达到作为速食粥的要求, 所以选择 120~160 ℃ 范围进行响应面试验; 螺杆转速在 180~220 r/min 范围内产品的糊化度和复水率达到最佳值, 升糖指数偏高, 螺杆转速对产品感官品质影响不明显, 所以综合考虑选择该螺杆转速范围进行响应面试验; w(水) 为 30%~36% 范围内产品的糊化度、复水率和感官品质达到最佳值, 升糖指数偏高, 所以综合考虑选择该水分含量范围进行响应面试验; 焙烤温度仅对产品的感官品质影响显著, 在 200 ℃ 时达到最佳, 所以确定焙烤温度 200 ℃ 对前 3 个因素进行响应面试验。

随着挤压温度的升高, 产品的 4 个指标均有明显的升高。物料中淀粉的糊化是在适当的温度并吸收足够热量的条件下进行的, 只有吸收了足够的热量, 才能完成淀粉的糊化。但是机筒温度过高时可能会造成原料中的蛋白质与淀粉降解的糖发生美拉德反应, 导致糊化度和复水率的降低, 高温下产品过度膨化, 产生裂纹会导致产品的感官品质降低^[21]。随着螺杆转速的增加, 产品的糊化度、升糖指数和复水率呈逐渐下降的趋势, 这是由于螺杆转速的提高缩短了物料在挤压机机筒内的滞留时间, 与剪切作用相比, 滞留时间产生的作用占据了更主要的因素, 这与王东^[22]的研究基本一致。然而螺杆转速对产品的感官品质影响不明显, 这可能是因为这些性质的变化对于产品的口感、气味等因素影响不明显, 所以评价人员无法识别其中的差异所致。随着物料含水量的增加, 产品的感官品质逐渐提高, 这可能是由于物料的含水量越高, 在高温作用下的产品外表较圆润, 裂纹较少, 所以有良好的外观和较好的适口性。改变焙烤温度, 对产品的糊化度、升糖指数和复水率影响不明显, 是因为产品在烤炉中停留时间较短, 无法对产品内部产生大的影响^[23], 而随着焙烤温度的升高, 产品的色泽逐渐变黄加深, 但是当温度高于 200 ℃ 时产品色泽逐渐变为深褐色, 并且产生焦糊等对产品不利的气味, 所以对产品最终的感官品质影响极大。

目前, 通过优化挤压工艺生产低升糖指数食品的研究还鲜有报道, 所以挤压加工参数对食品升糖指数的影响机理还需更深入的研究。但近年来, 有研究学者通过添加辅料的方式来实现降低食品的升糖指数。例如, 蔡乔宇等^[24] 最新研究发现, 挤压重组米可以通过添加 0.35%(w) 的芦丁或富铬酵母改善体外的消化情况, 从而减缓糖的吸收; 马艳丽等^[25-26] 揭示了白芸豆提取物(白芸豆 α -AI) 对 α -淀粉酶的抑制作用机制, 并将其应用到低升糖指数方便粥的研发当中, 发现将白芸豆 α -淀粉酶抑制剂按 3.0%(w) 的添加量添加到方便粥(燕麦粥、青稞粥和莲子粥) 中, 升糖指数显著降低。此外, 在方便粥的生产工艺中加入乳化剂、增稠剂和营养物质(例如 B 族维生素) 等添加剂可以获得具有更好感官品质和营养价值的方便粥产品, 此类问题还有待于进一步研究。

本文采用单因素试验探讨工艺条件对挤压方便粥品质的影响后, 通过响应面法进行挤压参数优化, 得到最佳的加工工艺条件为: 挤压温度 145 ℃、螺杆转速 220 r/min 和水分含量 35%(w)。以优化出的条件进行验证试验, 获得挤压方便粥的各项指标为: 糊化度 86.72%, 升糖指数 63.21, 复水率 305%, 感官评分 93 分。低升糖指数小米方便粥的开发不但创新了小米的精深加工方式, 丰富了方便谷物食品的种类, 同时还会对肥胖和二型糖尿病的预防起到一定的积极作用。

致谢: 感谢国家粮食和物资储备局科学研究院刘明博士和谷伊家(山东) 食品有限公司给予的支持和帮助!

参考文献:

[1] YANG X, WANG Z, PERRY L, et al. Early millet use in Northern China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(10): 3726-3730.

[2] TAKHELLAMBAM R D, CHIMMAD B V, PR-KASAM J N. Ready-to-cook millet flakes based on minor millets for modern consumer[J]. Journal of Food Science Technology, 2016, 53(2): 1312-1318.

[3] 李暮男, 兰凤英. 小米的营养成分及保健功能研究进展[J]. 河北北方学院学报(自然科学版), 2017, 33(7): 56-60.

[4] SHEN R, YANG S, ZHAO G, et al. Identification of carotenoids in foxtail millet (*Setaria italica*) and the effects of cooking methods on carotenoid content[J]. Journal of Cereal Science, 2015, 61(1): 86-93.

[5] YANG Y, JIA G, DENG L, et al. Genetic variation of yellow pigment and its components in foxtail millet (*Setaria italica* (L.) P. Beauv.) from different eco-regions in

- China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(11): 2459-2469.
- [6] SHARMA S, SHARMA N, HANDA S, et al. Evaluation of health potential of nutritionally enriched Kodo millet (*Eleusine coracana*) grown in Himachal Pradesh, India[J]. Food Chemistry, 2017, 214(1): 162-168.
- [7] 岑文辉. 关于大豆小米饮料生产工艺的分析[J]. 现代食品, 2019, 23: 87-89.
- [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] 朱转, 侯磊, 沈群, 等. 浸泡和超高压预处理对米饭中淀粉消化特性的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(11): 85-87.
- [10] DEWITA D, SYAHRUL S, DESMELATI D, et al. 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]. Journal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia, 2016, 18(3): 315-320.
- [11] 刘明, 田晓红, 刘艳香, 等. 全谷物重组速煮糙米的理化性质和蒸煮品质研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(3): 71-75.
- [12] 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.
- [13] 刘鹏, 王世让, 刘艳秋, 等. 挤压加工对食品中营养物质的影响研究进展[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(6): 127-132.
- [14] 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. 食品安全国家标准食品中蛋白质的测定: GB 5009.5—2016 [S/OL]. [2019-09-20]. <http://down.foodmate.net/standard/yulan.php?itemid=50381>.
- [15] 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. 食品安全国家标准食品中氨基酸的测定: GB 5009.124—2016[S/OL]. [2019-09-20]. <http://down.foodmate.net/standard/yulan.php?itemid=50481>.
- [16] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 饲料中氨基酸的测定: GB/T 18246—2019[S/OL]. [2019-09-21]. <http://down.foodmate.net/standard/yulan.php?itemid=67138>.
- [17] 张爱霞, 张佳丽, 赵巍, 等. 小米蛋白提取及营养评价[J]. 食品科技, 2019, 44(8): 223-227.
- [18] FERRER-MAIRAL A, PEÑALVA-LAPUENTE C, IGLESIA I, et al. In vitro and in vivo assessment of the glycemic index of bakery products: Influence of the reformulation of ingredients[J]. European Journal of Nutrition, 2012, 51(8): 947-954.
- [19] MAYACHIEW P, CHARUNUCH C, DEVAHASTIN S. Physicochemical and thermal properties of extruded instant functional rice porridge powder as affected by the addition of soybean or mung bean[J]. Journal of Food Science, 2015, 80(12): 2782-2791.
- [20] 国家质量监督检验检疫总局. 粮油检验稻谷、大米蒸煮食用品质感官评价方法: GB/T15682—2008[S]. 北京: 全国粮油标准化技术委员会, 2008.
- [21] 王晶. 针对特殊人群蛋白粉的研制[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2017.
- [22] 王东. 双螺杆挤压生产配合营养方便米的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.
- [23] 岳崇慧. 糙米粉食特性及其在挤压速食粥中的应用研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- [24] 蔡乔宇, 徐晓茹, 周坚, 等. 不同辅料添加量对挤压重组米的消化特性的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(16): 16-20.
- [25] 马艳丽, 让一峰, 赵伟, 等. 白芸豆 α -淀粉酶抑制剂对 α -淀粉酶抑制特性的研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(12): 109-112.
- [26] 马艳丽, 让一峰, 赵伟, 等. 白芸豆 α -淀粉酶抑制剂在低 GI 方便粥中的应用[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2018, 39(1): 45-48.

【责任编辑 李晓卉】