

小米粥油的制作工艺优化

刘欣^{1,2}, 李会品^{1,2}, 艾志录^{1,2,3}, 杨勇^{1,3}, 姬生鑫^{1,2}, 郑帅帅^{1,3}

(1. 河南农业大学食品科学技术学院, 河南郑州 450002) (2. 国家速冻米面制品加工技术研发专业中心, 河南郑州 450002) (3. 农业农村部大宗粮食加工重点实验室, 河南郑州 450002)

摘要: 本研究以小米为原料, 研究米粥油的制作工艺。以感官评分、可溶性固形物含量和碘蓝值为考察指标, 通过单因素试验研究浸泡时间、浸泡温度和蒸煮时间对米粥油品质的影响, 确定各因素的最佳水平。在此基础上, 进一步采用 Box-Behnken 试验设计构建多项式回归方程模型, 并通过响应面试验分析, 确定了米粥油的最佳工艺参数为: 浸泡时间 41 min, 浸泡温度 51 °C, 蒸煮时间 47 min。此条件下, 米粥油的感官评分为 84.80 分, 可溶性固形物为 4.79 g/100 g, 碘蓝值为 0.48, 与理论值接近, 数据可靠。同时, 该工艺条件下制作出的米粥油具有剪切稀化特性, 有助于吞食困难人群的消费, 也有利于工业生产中的泵送和灌注工艺。本研究为米粥油的工业化生产提供了理论依据。

关键词: 米粥油; 响应面优化; 感官评分; 可溶性固形物; 表观黏度

文章编号: 1673-9078(2021)05-169-179

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.5.0885

Optimization of Production Process of Millet Porridge Oil

LIU Xin^{1,2}, LI Hui-pin^{1,2}, AI Zhi-lu^{1,2,3}, YANG Yong^{1,3}, JI Sheng-xin^{1,2}, ZHENG Shuai-shuai^{1,3}

(1.College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

(2.National R & D Center For Frozen Rice & Wheat Products Processing Technology, Zhengzhou 450002, China)

(3.Key Laboratory of Staple Grain Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In this work, millet was used as the raw material for investigating the production process of millet porridge oil. The sensory score, soluble solids content and iodine blue value were used as evaluation indicators. The effects of soaking time, soaking temperature and cooking time on the quality of millet porridge oil were studied by single factor experiments, and the optimal levels of these factors were determined. On the basis of these results, the Box-Behnken experiment design was further used to construct a polynomial regression equation model, and through response surface tests, the optimal process parameters for producing millet porridge oil were determined: soaking time 41 min, soaking temperature 51 °C, cooking time 47 min. Under these conditions, the sensory score of millet porridge oil was 84.80, the soluble solids content was 4.79 g/100 g, and the iodine blue value was 0.48 (which were close to the theoretical values, indicating that the data were reliable). In the meantime, the product obtained under such processing conditions exhibited shear thinning characteristics, which is beneficial not only to the people with difficulty in swallowing, but also to the pumping and perfusion processes in industrial production. This research provides a theoretical basis for the industrial production of millet porridge oil.

Key words: millet porridge oil; response surface optimization; sensory score; soluble solids content; apparent viscosity

引文格式:

刘欣,李会品,艾志录,等.小米粥油的制作工艺优化[J].现代食品科技,2021,37(5):169-179

LIU Xin, LI Hui-pin, AI Zhi-lu, et al. Optimization of production process of millet porridge oil [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(5): 169-179

小米又称粟米, 是禾本科狗尾草属植物, 是谷子脱壳后的产物^[1]。我国小米品种优良, 产量居世界第一^[2]。小米富含氨基酸、脂肪酸、维生素、矿物质

收稿日期: 2020-09-22

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0400605)

作者简介: 刘欣 (1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 米面制品研究

通讯作者: 艾志录 (1965-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工与品质控制

及碳水化合物等人体必需的营养物质^[3]。小米的多酚类提取物具有较好的抗氧化活性^[4]。此外, 小米还具有降脂、降压、滋阴养血、调节睡眠、抗菌、防止消化不良等功效, 是孕妇、儿童和病人的最佳食物^[5-10]。

近年来, 学者开发了众多小米产品, 如小米清蛋糕、小米饼、小米酸奶、小米饼干、小米饮料等^[11-15]。小米传统的食用方式以煮制为主。白云霏等^[16]研究了浸泡温度、 β -环状糊精、干燥方式对即食小米粥品质

的影响,并确定最佳的浸泡温度为 20 ℃、最佳的 β -环状糊精添加量为 3%,以及最佳干燥条件为烘干时间/冻干时间=40 min/16 h。辛卓霖等^[17]对速食小米粥的制作工艺进行探究,通过正交实验确定了最佳的工艺参数:浸泡温度 55 ℃,浸泡时间 40 min,蒸煮时间 10 min。牛宇等^[18]研制了速食小米粥,并研究了加工过程中料液比、煮粥时间与冻干温度对速食小米粥的复水性质与复水小米粥质构特性的影响。孙延修等^[19]通过正交试验对无糖小米南瓜营养即食糊的工艺进行优化,探究出最优配比为南瓜粉添加量 6%、木糖醇添加量 4%、麦芽糊精添加量 8%。

目前对小米粥的研究以方便速食产品为主,米粥油的研究报道较少。米粥油是米油的一种俗称,它一般是指米粥熬好后,上面浮着一层细腻、黏稠、形如膏油的物质。米粥油含有淀粉、水溶性蛋白质、游离氨基酸、矿物质、维生素等多种营养物质^[20,21]。米粥油营养丰富,对于生长发育期的婴幼儿及营养状况较差的中老年人,米粥油是极好的营养来源。

本研究通过试验探究浸泡时间、浸泡温度和蒸煮时间对米粥油品质的影响,并过响应面试验优化米粥油的最佳工艺参数,为工业化生产提供一定的理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 试验材料

沁州黄小米,购于山西半亩科技有限公司。

1.1.2 试剂

盐酸、碘、碘化钾等试剂,试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

苏兴牌 TG-304-D-001 型家用蒸煮锅;C21-WT2116 型电磁炉,美的集团有限公司;BS210S 型电子分析天平,北京赛多利斯天平有限公司;HH-S28S 型恒温水浴锅,金坛市大地自动化仪器厂;DHG-9245A 型鼓风干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司;UV-2800 型紫外可见分光光度计,上海舜宇恒平科学仪器有限公司;DHR-2 型旋转流变仪,美国 TA 仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 米粥油的工艺流程

小米→清洗→浸泡→蒸煮→滤去米粒→成品

1.3.2 工艺参数的确定

1.3.2.1 浸泡时间单因素试验

称量一定质量的小米,清洗除去灰尘和杂质,小米和水按一定比例浸泡,在 50 ℃水中分别浸泡 20、30、40、50 和 60 min。按照料水质量比为 1:25 称水(料水质量共 1820 g),把浸泡后的小米倒入沸水中蒸煮 40 min。蒸煮完成后,用 100 目筛滤去米粒,得到米粥油。通过感官评分、可溶性固形物和碘蓝值,研究不同浸泡时间对米粥油品质的影响。

1.3.2.2 浸泡温度单因素试验

称量一定质量的小米,清洗除去灰尘和杂质,小米和水按一定比例浸泡,分别在 30、40、50、60 和 70 ℃水中浸泡 40 min。其他步骤同 1.3.2.1。通过感官评分、可溶性固形物和碘蓝值,研究不同浸泡温度对米粥油品质的影响。

1.3.2.3 蒸煮时间单因素试验

称量一定质量的小米,清洗除去灰尘和杂质,小米和水按一定比例浸泡,分别在 50 ℃水中浸泡 40 min。按照料水质量比为 1:25 称水(料水质量共 1820 g),把浸泡后的小米倒入沸水中,分别蒸煮 30、35、40、45 和 50 min。其他步骤同 1.3.2.1。通过感官评分、可溶性固形物和碘蓝值,研究不同蒸煮时间对米粥油品质的影响。

1.3.2.4 响应面法优化米粥油的制作工艺

在单因素试验的基础上,以浸泡时间、浸泡温度、蒸煮时间为自变量,以感官评分、可溶性固形物和碘蓝值为响应值,根据 Box-Behnken 试验设计原理,进行三因素三水平的响应面试验。用所得拟合多元方程,对数据进行回归分析及显著性检验,以确定最优的生产工艺。试验因素与水平设计如表 1 所示。

表 1 Box-Behnken 因素与水平

Table 1 Factors and levels used in Box-Behnken design

水平	因素		
	浸泡时间/min	浸泡温度/℃	蒸煮时间/min
-1	30	40	40
0	40	50	45
1	50	60	50

1.3.3 指标测定

1.3.3.1 感官评定

参考胡海娥^[22]和刘建奎等^[23]的方法,并作修改:根据米粥油的特点,制定米粥油的评价标准。由 10 名专业人员组成的评定小组,对米粥油的色泽、风味、形态、口感进行感官评价,总分和各分指标得分为各评定人员评定结果的平均值,评分标准如表 2 所示。

表 2 感官评分表

Table 2 Sensory score table

指标	分值	评分标准	评分
色泽	20	颜色呈深黄色、黄色	16~20
		颜色较浅, 呈浅黄色、淡黄色	11~15
		颜色发白或发暗	6~10
风味	30	有较浓郁的小米香味	26~30
		有清淡的小米香味	18~25
		无小米香味	6~17
形态	20	有异味或令人不愉快的味道	0~5
		不分层, 浊度合适, 密度均匀, 粘稠度适中	16~20
		略显分层, 有一定的浊度和粘稠度	11~15
口感	30	分层明显, 较清澈	6~10
		口感很好, 粘度合适	26~30
		口感较好, 具有一定的粘度	20~25
总分	100	总分=色泽+风味+形态+口感	14~19

1.3.3.2 可溶性固形物的测定

参考陈培栋等^[24]的方法, 并作修改: 准确称取米粥油 10.00 g, 放入已知恒重质量的铝盒中, 于 105 °C 条件下干燥至恒重, 得到的固体物质量乘以 10, 即为 100 g 米粥油的可溶性固形物的含量。

$$\text{可溶性固形物含量} / (\text{g} / 100\text{g}) = \text{干物质质量} \times 10$$

1.3.3.3 碘蓝值的测定

参考李少寅等^[25]的方法, 并作修改: 准确称取米粥油 20.00 mL 置于 50 mL 离心管中, 以 3000 r/min 的转速离心 10 min, 取上清液 0.50 mL, 加 0.50 mL HCl (0.10 mol/L) 和 0.50 mL 碘液 (0.20 g/100 mL), 定容至 50.00 mL, 静置 15 min 以后, 以 0.50 mL HCl 和 0.50 mL 的碘液, 加蒸馏水, 定容至 50.00 mL 做空白, 用分光光度计于 660 nm 波长下测吸光值。

1.3.3.4 表观黏度的测定

设置参数: 剪切速率 0.01~100 s⁻¹, 温度 25 °C, 移取 1 mL 产品于流变仪平台上, 测定并绘制产品的表观黏度随剪切速率变化的关系曲线。

1.4 数据处理

采用 SPSS 16.0 软件进行单因素分析, Design Expert 8.0.6 进行响应面模拟并分析, 采用 Origin 8.5 软件作图, 每组试验做 3 组平行。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果与分析

2.1.1 不同浸泡时间对米粥油品质的影响

碘蓝值表示淀粉结合碘的能力, 反映样品中直链淀粉含量及蒸煮过程中直链淀粉溶出的程度。碘蓝值越大, 表明米汤中可溶性直链淀粉浓度越高, 从而表现出良好的适口性和黏弹性。米汤中的干物质含量(即蒸煮过程中溶解在水中的物质含量) 反映米汤的黏稠度, 米汤中的干物质越多, 口感越好^[26-28]。

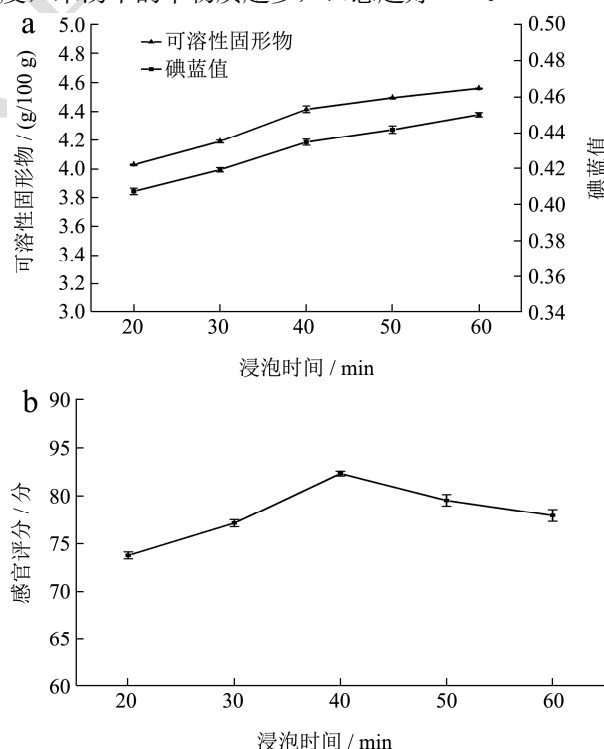


图 1 浸泡时间对米粥油品质的影响

Fig.1 Effect of soaking time on the quality of millet porridge oil

由图 1 可知, 随着浸泡时间的延长, 米粥油的可溶性固形物和碘蓝值均不断升高。当浸泡时间达到 40

min, 可溶性固形物为 4.42 g/100 g, 碘蓝值为 0.44, 此时米粥油的感官评分最高, 为 82.40 分。浸泡初期, 水分较易进入米粒, 进入淀粉颗粒的非结晶区破坏氢键, 结构变得更加疏松, 因而在蒸煮时米粒更易糊化, 可溶性物质更易溶出^[29], 可溶性固形物和碘蓝值升高, 感官评分升高。40 min 之后可溶性固形物和碘蓝值趋于平缓, 米粥油的感官评分降低, 60 min 时感官评分降低至 78.00 分。浸泡时间过长, 米粒吸水达到饱和^[30], 对可溶性固形物和碘蓝值影响较小。唐伟强等^[31]研究认为, 浸泡时间过长, 会造成水溶性的营养成分溶解到浸泡水中, 营养成分损失。综合考虑, 选择小米的最佳浸泡时间为 40 min。

2.1.2 不同浸泡温度对米粥油品质的影响

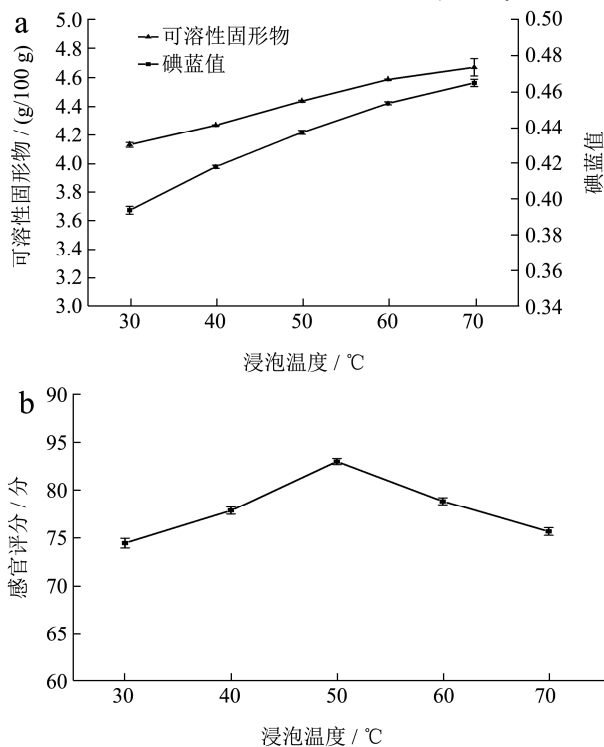


图 2 浸泡温度对米粥油品质的影响

Fig.2 Effect of soaking temperature on the quality of millet porridge oil

由图 2 可知, 米粥油的可溶性固形物和碘蓝值随着浸泡温度的升高而升高, 而米粥油的感官评分随着浸泡温度的升高呈现先升高后降低的趋势。可能是因为浸泡温度升高, 米粒不断吸水膨胀, 淀粉不断糊化, 蒸煮时米粒内容物更易进入米粥油中, 可溶性固形物含量升高。吴凤凤等^[29]研究浸泡处理对发芽糙米蒸煮食用品质的影响时, 也有类似的结果。同时, 温度升高, 使米粒的淀粉结构更加松散^[32], 蒸煮时更加有利于直链淀粉溶出, 碘蓝值增加, 感官评分升高。浸泡温度为 50 °C 的时候, 感官评分最高, 为 83.00 分, 此时, 可溶性固形物为 4.43 g/100 g, 碘蓝值为 0.44。当

温度到达 50 °C 后, 温度继续升高, 米粥油的可溶性固形物和碘蓝值趋于平缓。浸泡温度过高, 导致米粒中色素和少量可溶性营养物质损失, 蒸煮后米粥油色泽较差, 口感较差, 感官评分较低, 这与程科等^[33]的研究结果一致。综合考虑, 选择小米的最佳浸泡温度为 50 °C。

2.1.3 不同蒸煮时间对米粥油品质的影响

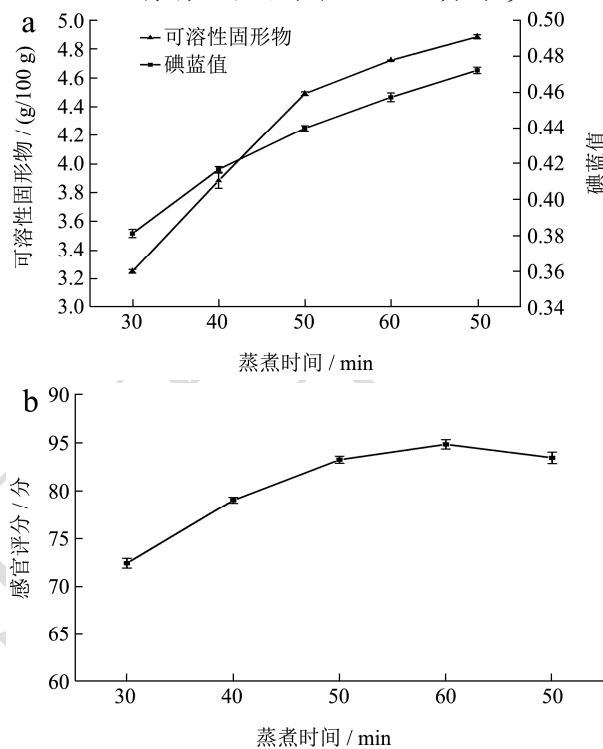


图 3 蒸煮时间对米粥油品质的影响

Fig.3 Effect of cooking time on the quality of millet porridge oil

由图 3 可知, 随着蒸煮时间的延长, 米粥油的可溶性固形物和碘蓝值均不断升高。随蒸煮时间的延长, 米粒大量吸水膨胀, 淀粉分子间的氢键破坏加剧, 淀粉糊化程度加深。到达最高时, 由于水化作用形成凝胶体系, 大量水分子处于淀粉分子间, 使米粒组织结构疏松化^[34,35], 利于可溶性物质的溶出, 可溶性固形物和碘蓝值升高, 感官评分升高。35 min 后碘蓝值升高速率减慢; 40 min 后可溶性固形物升高速率也减慢; 米粥油的感官评分在 30~35 min 之间, 升高速率较快, 35~45 min 升高速率减慢。杨柳^[36]研究认为随着蒸煮时间的继续延长, 从组织中将不会发生新的淀粉的游离, 游离出的直链及支链淀粉将逐渐包裹在米粒表面形成粘附层, 可溶性固形物和碘蓝值升高减缓。蒸煮时间过长, 米粥油可溶性物质较多, 导致其粘度不均匀。蒸煮时间达到 45 min 后感官评分下降, 50 min 时, 感官评分降低至 83.40 分。综合考虑, 选择小米的最佳蒸煮时间为 45 min。

表 3 响应面试验设计方案及结果

Table 3 Experimental design and results for response surface analysis

试验号	浸泡时间/min	浸泡温度/°C	蒸煮时间/min	感官评分/分	可溶性固形物/(g/100 g)	碘蓝值
1	0	0	0	85.20	4.81	0.463
2	0	0	0	85.60	4.80	0.474
3	0	1	-1	76.80	4.47	0.453
4	-1	0	-1	79.20	4.42	0.422
5	0	1	1	79.60	4.83	0.498
6	0	0	0	85.40	4.78	0.478
7	1	0	1	79.80	4.82	0.498
8	1	1	0	77.20	4.69	0.495
9	0	-1	-1	78.60	4.43	0.426
10	-1	1	0	78.60	4.65	0.478
11	-1	-1	0	78.00	4.57	0.451
12	0	0	0	86.20	4.80	0.474
13	1	0	-1	76.20	4.44	0.439
14	0	-1	1	81.20	4.75	0.485
15	-1	0	1	76.60	4.76	0.487
16	1	-1	0	79.60	4.59	0.454
17	0	0	0	86.40	4.78	0.462

表 4 感官评分响应面方差分析结果

Table 4 Analysis of variance for response surface regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	p 值
Model	211.468	9	23.496444	43.146671	<0.0001
A-浸泡时间	0.02	1	0.02	0.0367261	0.8535
B-浸泡温度	3.38	1	3.38	6.2067156	0.0415
C-蒸煮时间	5.12	1	5.12	9.4018888	0.0182
AB	2.25	1	2.25	4.1316894	0.0816
AC	9.61	1	9.61	17.646905	0.0040
BC	0.01	1	0.01	0.0183631	0.8960
A ²	76.231684	1	76.231684	139.98473	<0.0001
B ²	41.911684	1	41.911684	76.962694	<0.0001
C ²	53.212737	1	53.212737	97.714889	<0.0001
残差	3.812	7	0.5445714		
失拟项	2.74	3	0.9133333	3.4079602	0.1336
纯误差	1.072	4	0.268		
总和	215.28	16			
R ² =0.9823			R ² Adj=0.9595		

2.2 响应面试验结果与分析

2.2.1 以感官评分为响应值的响应面试验结果与分析

2.2.1.1 响应面优化试验结果及方差分析

采用 Design-Expert 8.0.6 软件中的 Box-Behnken 原理设计 3 因素 3 水平响应面试验, 试验组合和结果如

表 3 所示。以浸泡时间 A、浸泡温度 B、蒸煮时间 C 为自变量, 以感官评分 Y_1 为因变量, 得到的二次多项方程为: $Y_1=85.76000+0.050000A-0.65000B+0.80000C-0.75000AB+1.55000AC+0.050000BC-4.25500A^2-3.15500B^2-3.55500C^2$, $R^2=0.9823$, 校正系数 $R^2_{Adj}=0.9595$, 表明回归方程的拟合度较好, 此模型能够反映响应值的变化, 可用该模型对感官评分进行分析和预测。

由表 4 可知,该回归方程模型的 p 值小于 0.0001,表明模型非常显著;失拟项 p 值为 0.1336 ($p>0.05$),表明模型失拟不显著,与实际拟合程度较好、误差小。一次项 B (浸泡温度, $p=0.0415$) 和 C (蒸煮时间, $p=0.0182$) 影响显著;交互项 AC ($p=0.0040$) 影响显著,表明浸泡时间和蒸煮时间两因素间存在交互作用;二次项 A^2 ($p<0.0001$)、 B^2 ($p<0.0001$) 和 C^2 ($p<0.0001$) 影响极显著,其他一次项(A 浸泡时间)和交互项(AB 和 BC) 影响不显著。此外,根据 F 值大小可知,各因素对感官评分的影响程度依次是: C>B>A, 即蒸煮时间>浸泡温度>浸泡时间。

2.2.1.2 各因素间交互作用分析

根据多元线性回归方程,运用 Design-Expert 8.0.6 对试验结果进行分析,所得的响应面和等高线图如图 4 所示。响应曲面的曲率反应各因素对响应值的影响程度,曲率越大,对响应值的影响程度越大;等高线的形状反映不同因素交互作用强弱程度,若趋于圆形,则交互作用不显著;若趋于椭圆形,则交互作用显著^[37]。

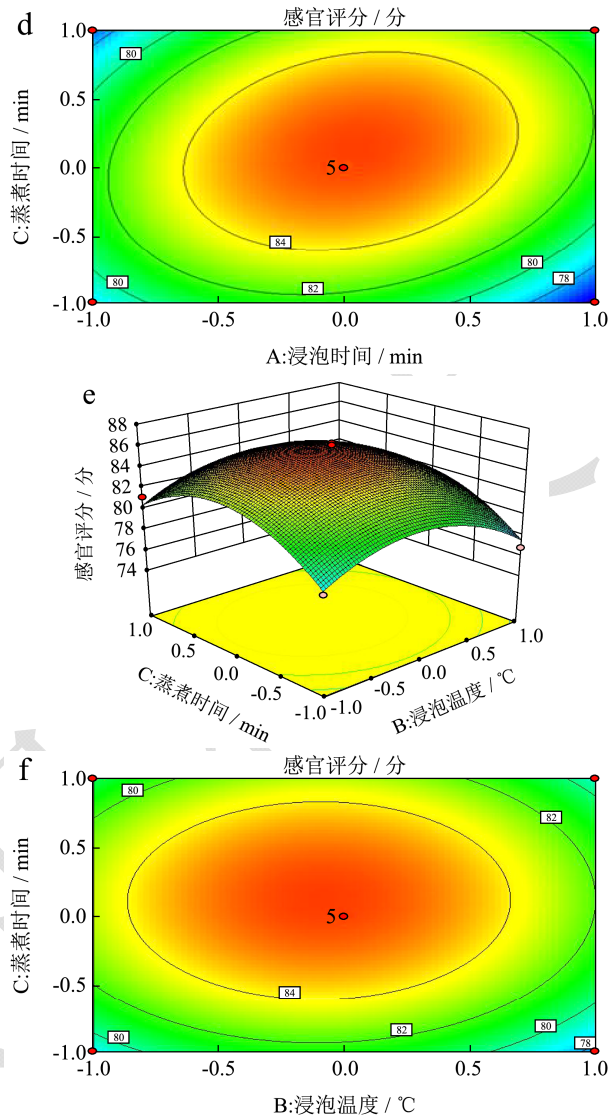
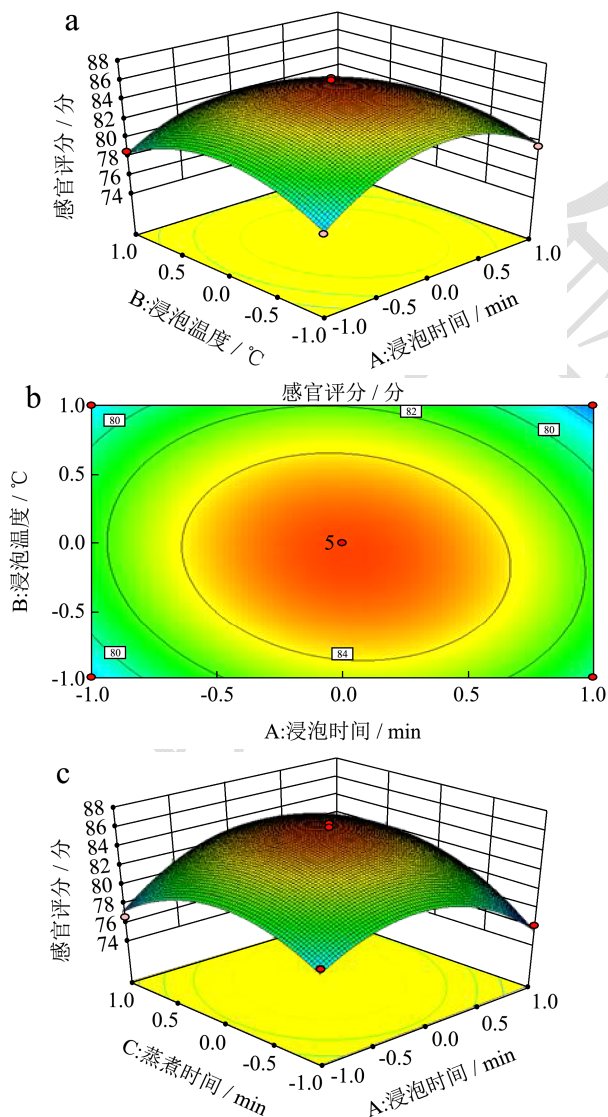


图 4 各交互作用对米粥油感官评分影响的响应面图与等高线图

Fig.4 Response surface and contour maps of the effects of interaction on sensory scores of millet porridge oil

由图 4 中 a、b 可知,当蒸煮时间为 45 min 时,浸泡温度的变化使得坡面曲率变化较大,浸泡时间的变化使得坡面曲率变化不大,说明浸泡温度对感官评分的影响较大,而浸泡时间对感官评分的影响较小。浸泡温度与浸泡时间两者之间等高线图近似圆形,说明两者交互作用不显著性 ($p>0.05$)。

由图 4 中 c、d 可知,当浸泡温度为 50 °C 时,浸泡时间的变化使得坡面曲率变化较小,其对感官评分的影响较小;蒸煮时间使得响应面坡面曲率变化较大,响应值受到蒸煮时间的影响较大,浸泡时间与蒸煮时间两者之间的等高线为椭圆形,说明两者交互作用显著 ($p<0.05$)。

由图 4 中 e、f 可知,当浸泡时间为 40 min 时,浸泡温度的变化使得坡面曲率变化较大,说明浸泡温

度的变化对感官评分的影响较大；蒸煮时间的变化，使得响应曲面的坡面曲率变化较大，说明蒸煮时间对感官评分的影响也较大，浸泡温度与蒸煮时间两者之间的等高线近似圆形，说明两者交互作用不显著性 ($p>0.05$)。

2.2.2 以可溶性固形物为响应值的响应面试验结果与分析

采用 Design-Expert 8.0.6 软件中的 Box-Behnken 原理设计 3 因素 3 水平响应面试验，试验组合和结果如表 3 所示。以浸泡时间 A、浸泡温度 B、蒸煮时间 C 为自变量，以可溶性固形物 Y_2 为因变量，得到的二次多项方程为： $Y_2 = -7.15637 + 0.059393A + 0.071263B + 0.35831C + 0.0000575AB + 0.0002300AC + 0.0002400BC - 0.0008848A^2 - 0.0008048B^2 - 0.0038290C^2$ ， $R^2 = 0.9953$ ，校正系数 $R^2_{Adj} = 0.9893$ ，表明回归方程的拟合度好，此模型能够反映响应值的变化，可用该模型对可溶性固形物进行分析和预测。

由表 5 可知，该回归方程模型的 p 值小于 0.0001，表明模型非常显著；失拟项 p 值为 0.2811 ($p>0.05$)，表明模型失拟不显著，与实际拟合程度较好、误差小。一次项 A (浸泡时间， $p=0.0132$)、B (浸泡温度， $p=0.0002$) 和 C (蒸煮时间， $p<0.0001$) 影响显著；交互项 p 值均大于 0.05，表明交互作用不显著；二次项 A^2 ($p<0.0001$)、 B^2 ($p<0.0001$) 和 C^2 ($p<0.0001$) 影响极显著，其他一次项 (A 浸泡时间) 和交互项 (AB

和 BC) 影响不显著。此外，根据 F 值大小可知，各因素对可溶性固形物的影响程度依次是：C>B>A，即蒸煮时间>浸泡温度>浸泡时间。

2.2.3 以碘蓝值为响应值的响应面试验结果与分析

采用 Design-Expert 8.0.6 软件中的 Box-Behnken 原理设计 3 因素 3 水平响应面试验，试验组合和结果如表 3 所示。以浸泡时间 A、浸泡温度 B、蒸煮时间 C 为自变量，以碘蓝值 Y_3 为因变量，得到的二次多项方程为： $Y_3 = -0.52079 + 0.0021158A + 0.0013292B + 0.032973C + 0.0000333AB - 0.0000283AC - 0.0000683BC - 0.0000240A^2 - 0.0000177B^2 - 0.0002527C^2$ ， $R^2 = 0.9577$ ，校正系数 $R^2_{Adj} = 0.9033$ ，表明回归方程的拟合度好，此模型能够反映响应值的变化，可用该模型对碘蓝值进行分析和预测。

由表 6 可知，该回归方程模型的 p 值为 0.0005 ($p<0.01$)，表明模型非常显著；失拟项 p 值为 0.4783 ($p>0.05$)，表明模型失拟不显著，与实际拟合程度较好、误差小。一次项 B (浸泡温度， $p=0.0012$) 和 C (蒸煮时间， $p<0.0001$) 影响显著；交互项 p 值均大于 0.05，表明交互作用不显著；二次项 A^2 ($p<0.0001$)、 B^2 ($p<0.0001$) 和 C^2 ($p<0.0001$) 影响极显著，其他一次项 (A 浸泡时间) 影响不显著。此外，根据 F 值大小可知，各因素对碘蓝值的影响程度依次是：C>B>A，即蒸煮时间>浸泡温度>浸泡时间。

表 5 可溶性固形物响应面方差分析结果

Table 5 Results of response surface analysis of variance of soluble solids

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	p 值
Model	0.3699828	9	0.0411092	165.28211	<0.0001
A-浸泡时间	0.0027011	1	0.0027011	10.860041	0.0132
B-浸泡温度	0.0120901	1	0.0120901	48.609101	0.0002
C-蒸煮时间	0.243602	1	0.243602	979.41702	<0.0001
AB	0.0001322	1	0.0001322	0.5317194	0.4896
AC	0.000529	1	0.000529	2.1268775	0.1881
BC	0.000576	1	0.000576	2.3158439	0.1719
A^2	0.0329593	1	0.0329593	132.51478	<0.0001
B^2	0.0272683	1	0.0272683	109.63397	<0.0001
C^2	0.0385822	1	0.0385822	155.12219	<0.0001
残差	0.0017411	7	0.0002487		
失拟项	0.0010083	3	0.0003361	1.834516	0.2811
纯误差	0.0007328	4	0.0001832		
总和	0.3717239	16			
	$R^2 = 0.9953$			$R^2_{Adj} = 0.9893$	

表6 碘蓝值响应面方差分析结果

Table 6 Results of response surface analysis of variance for iodine blue value

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	p值
Model	0.008508852	9	0.0009454	17.609119	0.0005
A-浸泡时间	0.000276125	1	0.0002761	5.1429807	0.0577
B-浸泡温度	0.001467014	1	0.001467	27.323944	0.0012
C-蒸煮时间	0.006460056	1	0.0064601	120.3221	<0.0001
AB	0.000044444	1	0.0000444	0.8278023	0.3932
AC	0.000008028	1	0.0000080	0.1495218	0.7105
BC	0.0000466944	1	0.0000467	0.8697098	0.3821
A ²	0.0000242526	1	0.0000243	0.4517187	0.5231
B ²	0.0000131415	1	0.0000131	0.2447681	0.6359
C ²	0.000168001	1	0.0001680	3.1291146	0.1202
残差	0.000375828	7	0.0000537		
失拟项	0.00016125	3	0.0000537	1.0019677	0.4783
纯误差	0.000214578	4	0.0000536		
总和	0.00888468	16			
R ² =0.9577			R ² Adj =0.9033		

2.3 米粥油响应面最优工艺结果及验证试验



图5 最优工艺条件下制作的米粥油

Fig.5 Millet porridge oil produced under the optimum technological conditions

感官评价在食品行业中有着重要作用,逐渐成为产品开发、品质改进等方面的重要参考;同时,感官评价和营养品质也是消费者对食品认可的重要依据,碘蓝值反映蒸煮过程中直链淀粉溶出的程度。考虑到中老年和婴幼儿等吞食困难人群的糖代谢能力较低,消化能力较弱,所以对3个响应值指标进行综合分析,分别赋予感官评分重要度为5,可溶性固形物为3,碘蓝值为2。通过 Design-Expert 8.0.6 进行统计分析,确定最优工艺条件为:浸泡时间 41.23 min,浸泡温度 50.70 °C,蒸煮时间 47.37 min,此条件下制作米粥油的感官评分为 85.31 分,可溶性固形物为 4.86 g/100 g,碘蓝值为 0.48。考虑到实际生产的可操作性及对单因素试验结果的分析,将工艺调整为:浸泡时间 41 min,浸泡温度 51 °C,蒸煮时间 47 min。为了验证模型分析的准确性,选取调整后的工艺进行验证,验证结果

见表7,试验重复3次取平均值。

表7 最优工艺下米粥油感官评分、可溶性固形物及碘蓝值的实际值和预测值

Table 7 Actual and predicted values of sensory score, soluble solids and iodine blue value of millet porridge oil under the optimal process

项目	感官评分/分	可溶性固形物/(g/100 g)	碘蓝值
实际值	84.80±0.60	4.79±0.05	0.477±0.006
预测值	85.31	4.86	0.484
相对误差	0.59%	1.40%	1.45%
sig 值	0.28	0.13	0.15

由表7可知,经过优化之后所得米粥油(图5)的感官评分,可溶性固形物含量和碘蓝值均与理论预测值接近,相对误差较小;同时,又以预测值为标准,对实际值进行单一样本 T 检验,结果表示感官评分、可溶性固形物和碘蓝值三者的实际值与预测值之间不存在显著性差异($p>0.05$)。以上分析表明经过优化的工艺参数可靠,可以为米粥油的工业化生产提供理论指导。

2.4 米粥油表观黏度的测定

在淀粉基食品加工设备设计、质量控制、贮藏稳定性、结构研究、产品的开发和感官评价等方面,其流变学性质尤为重要,现在淀粉及其淀粉糊的流变学特性研究已经成为食品研究者的热点之一^[38]。

在最优工艺条件下,对米粥油的表观黏度进行测

定。米粥油表观黏度与剪切速率关系如图 6, 由图可知随着剪切速率的增大, 米粥油的表观黏度降低, 并且剪切速率在 $0.01\sim 11.03\text{ s}^{-1}$ 之间表观黏度降低最快, 由 $2.35\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 降低到 $0.75\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。之后随着剪切速率逐渐增大, 黏度降低变缓慢。当剪切速率达到 68.36 s^{-1} 之后, 表观黏度趋于稳定。

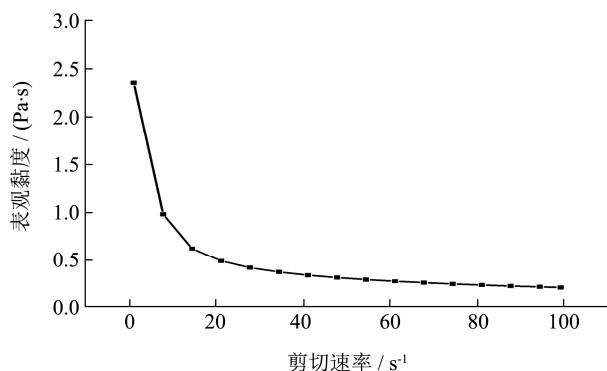


图 6 米粥油表观黏度随剪切速率变化的曲线

Fig.6 Curve of apparent viscosity of millet porridge oil with shear rate

淀粉类产品与水混合后, 无规则直链淀粉和支链淀粉相互缠绕形成一种较为稳定的三维结构^[39], 分子链的排列呈无规则状态, 对流动产生较大的黏性阻力。在低剪切速率时, 米粥油有较大的表观黏度。随着剪切速率的增大, 米粥油淀粉内部受到的剪切力增大, 原来缠绕在一起的分子被打开, 分子定向排列, 分子间缠结点减少, 所以米粥油表观黏度降低。当剪切速率达到某一数值时, 分子的定向排列基本完成, 表观黏度基本趋于稳定^[40-42]。

米粥油的这种现象属于剪切稀化现象, 在外力的作用下, 黏度会下降, 其流变性质也将发生变化^[43]。针对消化吸收及代谢功能较弱的中老年和婴幼儿等吞食困难人群, 产品剪切稀化的特性有利于吞食困难人群的食用, 防止食用时出现吞食危险的现象。同时, 在工业生产中, 产品的剪切稀化特性也有利于改善产品的物料泵送和灌注工艺。

3 结论

研究了米粥油的制作工艺, 在单因素试验的基础上通过响应面法优化米粥油制作工艺, 结合实际值确定最优工艺条件为: 浸泡时间 41 min , 浸泡温度 $51\text{ }^{\circ}\text{C}$, 蒸煮时间 47 min , 该条件下米粥油的感官评分为 84.80 分, 可溶性固形物为 $4.79\text{ g}/100\text{ g}$, 碘蓝值为 0.48 。在此工艺参数条件下得到的米粥油感官评分、可溶性固形物和碘蓝值实际值与理论值的相对误差较小, 说明该工艺参数具有实用价值, 可以为米粥油的工业化生产提供参考。同时, 产品具有剪切稀化特性, 利于吞

食困难人群的食用, 有便于食品在加工中的物料泵送和灌注。

参考文献

- [1] 王海滨, 夏建新. 小米的营养成分及产品研究开发进展[J]. 粮食科技与经济, 2010, 35(4): 36-38
WANG Hai-bin, XIA Jian-xin. Research progress in the nutritional ingredient of food development of millet [J]. Grain Science and Technology and Economy, 2010, 35(4): 36-38
- [2] 周文超. 我国不同地区特色品种小米淀粉理化性质的研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2013
ZHOU Wen-chao. Starch properties analysis of different varieties millet from different regions [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2013
- [3] 刘宇杰, 陈银焕, 杨修仕, 等. 小米营养及功能成分研究进展[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(5): 1-3
LIU Yu-jie, CHEN Yin-huan, YANG Xiu-shi, et al. Research progress on nutrition and functional components of millet [J]. Cereals & Oils, 2020, 33(5): 1-3
- [4] Sharma S, Saxena D C, Riar C S. Changes in the GABA and polyphenols contents of foxtail millet on germination and their relationship with *in vitro* antioxidant activity [J]. Food Chemistry, 2018, 245: 863-870
- [5] 宋东晓, 高德成. 小米的营养价值与产品开发[J]. 粮食加工, 2005, 1: 21-24
SONG Dong-xiao, GAO De-cheng. Nutrition price and product developing of small rice [J]. Grain Processing, 2005, 1: 21-24
- [6] Choi Y, Jeong H S, Lee J. Antioxidant activity of methanolic extracts from some grains consumed in Korea [J]. Food Chemistry, 2007, 103(1): 130-138
- [7] 赵陈勇, 王常青, 许洁, 等. 小米谷糠油降血脂和抗氧化作用的研究[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(7): 67-70
ZHAO Chen-yong, WANG Chang-qing, XU Jie, et al. Study on antioxidation and reducing blood lipid of the millet bran oil [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2012, 27(7): 67-70
- [8] 原敏. 小米糠油的应用研究[D]. 太原: 山西大学, 2014
YUAN Min. The application and research of millet bran oil [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2014
- [9] 郝志锋. 小米的价值及种植技术研究[J]. 科技与创新, 2014, 9: 159, 161
HAO Zhi-feng. Research millet cultivation technology and value [J]. Science and Technology & Innovation, 2014, 9: 159, 161

- [10] 范冬雪,李静洁,杨金芹,等.热处理对小米蛋白体外消化率的影响[J].中国食品学报,2016,16(2):56-61
FAN Dong-xue, LI Jing-jie, YANG Jin-qin, et al. Effects of heat treatments on the in vitro digestibility of millet protein [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(2): 56-61
- [11] 张怀珠,王立军,彭涛.豆渣小米清蛋糕加工工艺的研究[J].农业科技与信息,2011,21:58-60
ZHANG Huai-zhu, WANG Li-jun, PENG Tao. Study on processing technology of bean dregs millet cake [J]. Agricultural Science-Technology and Information, 2011, 21: 58-60
- [12] 于伟,李良玉,宋大巍,等.速冻小米饼的关键生产工艺研究[J].粮食与饲料工业,2016,12:23-28
YU Wei, LI Liang-yu, SONG Da-wei, et al. Key production technology of frozen millet cake [J]. Cereal & Feed Industry, 2016, 12: 23-28
- [13] 贺莹.响应面优化小米酸奶工艺优化[J].食品工业,2019,40(10):19-22
HE Ying. Research and development of response surface optimization for millet yoghurt [J]. The Food Industry, 2019, 40(10): 19-22
- [14] 姚焱.小米豆渣低糖纤维饼干工艺条件的优化[J].现代面粉工业,2020,34(2):53
YAO Yao. Optimization of the technological conditions of low-sugar fiber biscuits of millet bean dregs [J]. Modern Flour Milling Industry, 2020, 34(2): 53
- [15] 李根,杨志,马寅斐,等.小米谷物饮料制作工艺研究[J].中国果菜,2020,40(6):58-61,17
LI Gen, YANG Zhi, MA Yin-fei, et al. Research on the process of millet beverage [J]. China Fruit & Vegetable, 2020, 40(6): 58-61, 17
- [16] 白云霏,张清,沈群.即食小米粥的开发工艺及品质研究[J].食品科技,2011,36(11):130-134
BAI Yun-fei, ZHANG Qing, SHEN Qun. The processing technology and related quality evaluation of instant gruel of millet [J]. Food Science and Technology, 2011, 36(11): 130-134
- [17] 辛卓霖,李鸿萱,韩宛君,等.制作工艺及干燥方法对速食小米粥品质的影响探究[J].食品工业科技,2017,38(4):283-287,305
XIN Zhuo-lin, LI Hong-xuan, HAN Wan-jun, et al. Effect of processing technology and drying methods on the quality of instant millet gruel [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(4): 283-287, 305
- [18] 牛宇,张劲松,单璐,等.加工工艺对速食小米粥物理性质的影响[J].中国农学通报,2018,34(16):144-150
NIU Yu, ZHANG Jin-song, SHAN Lu, et al. Processing techniques affecting the physical properties of instant foxtail millet porridge [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(16): 144-150
- [19] 孙延修,孙佳凡.一种无糖小米南瓜营养即食糊工艺的优化[J].食品工业,2020,41(1):5-7
SUN Yan-xiu, SUN Jia-fan. The optimization on a nutritional sugar-free instant paste of millet and pumpkin [J]. The Food Industry, 2020, 41(1): 5-7
- [20] 杨军红,司萍,田曦,等.米油抑菌及吸附内毒素作用的实验研究[J].肠外与肠内营养,2015,22(2):116-118
YANG Jun-hong, SI Ping, TIAN Xi, et al. Experimental study of the bacteria inhibition and endotoxin absorption of rice oil [J]. Parenteral & Enteral Nutrition, 2015, 22(2): 116-118
- [21] 郑向华,叶宁,洪春燕,等.米汤的营养保健功能[J].福建稻麦科技,2011,29(3):77-79
ZHENG Xiang-hua, YE Ning, HONG Chun-yan, et al. Health and nutrition function of rice water [J]. Fujian Science and Technology of Rice and Wheat, 2011, 29(3): 77-79
- [22] 胡海娥.南瓜红米粥工艺研究[J].农产品加工(学刊),2013,18:35-37,40
HU Hai-e. The technology research of preparation of pumpkin red-rice porridge [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2013, 18: 35-37, 40
- [23] 刘建奎,常柳,段晓亮,等.小米粥的制作及食用品质感官评价方法[J].中国粮油学报,2019,34(8):42-47,60
LIU Jian-wei, CHANG Liu, DUAN Xiao-liang, et al. Method for sensory evaluation of foxtail millet porridge cooking and eating quality [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(8): 42-47, 60
- [24] 陈培栋,万忠民,王胜录,等.响应面法优化糙米微波改性工艺[J].食品工业科技,2018,39(6):152-158
CHEN Pei-dong, WAN Zhong-min, WANG Sheng-lu, et al. Optimization for microwave modification technology of brown rice by response surface methodology [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(6): 152-158
- [25] 李少寅,舒在习.米汤碘蓝值测定条件的探讨[J].粮食与饲料工业,2014,4:5-7,13
LI Shao-yin, SHU Zai-xi. Measurement conditions of rice-water iodine blue value [J]. Cereal & Feed Industry, 2014, 4: 5-7, 13
- [26] 路茜玉.粮油储藏学[M].北京:中国财政经济出版社,1999:

- 4-56
LU Xi-yu. Grain and Oil Storage [M]. Beijing: Chinese Financial & Economic Publishing House, 1999: 4-56
- [27] 战旭梅, 郑铁松, 陶锦鸿. 质构仪在大米品质评价中的应用研究[J]. 食品科学, 2007, 9: 62-65
ZHAN Xu-mei, ZHENG Tie-song, TAO Jin-hong. Study on application of texture analyzer in quality evaluation of rice [J]. Food Science, 2007, 9: 62-65
- [28] 朱转, 侯磊, 陈燕卉, 等. 浸泡和超高压处理对米饭食用品质的影响[J]. 中国食品学报, 2013, 13(10): 86-91
ZHU Zhuan, HOU Lei, CHEN Yan-hui, et al. Effects of soaking and ultrahigh-pressure pretreatment on edible quality of cooked rice [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013, 13(10): 86-91
- [29] 吴凤凤, 臧楠, 杨哪, 等. 浸泡处理对发芽糙米蒸煮食用品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(7): 6-9, 63
WU Feng-feng, ZANG Nan, YANG Na, et al. Effect of soaking process on edible quality of germinated brown rice [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2009, 24(7): 6-9, 63
- [30] 朱永义, 周显青, 赵秀萍. 米粒吸水特性及其影响因素的研究[J]. 粮食与饲料工业, 1998, 4: 3-5
ZHU Yong-yi, ZHOU Xian-qing, ZHAO Xiu-ping. Study on water absorption characteristics of rice grain and its influencing factors [J]. Cereal & Feed Industry, 1998, 4: 3-5
- [31] 唐伟强, 聂世涛, 廖良银, 等. 浸泡参数与米饭品质关系的研究[J]. 食品工业科技, 2010, 31(2): 158-159, 162
TANG Wei-qiang, NIE Shi-tao, LIAO liang-yin, et al. Study on rice quality with soaking parameters [J]. Science and Technology of Food Industry, 2010, 31(2): 158-159, 162
- [32] 杨航, 魏春磊, 丁文平, 等. 鲜湿方便米饭原料选择及蒸煮工艺研究[J]. 食品科技, 2018, 43(9): 209-214
YANG Hang, WEI Chun-lei, DING Wen-ping, et al. Study on raw material selection and cooking technology of fresh wet instant rice [J]. Food Science and Technology, 2018, 43(9): 209-214
- [33] 程科, 郭亚丽, 范露, 等. 蒸谷米浸泡工艺研究[J]. 粮食与饲料工业, 2019, 7: 1-4
CHENG Ke, GUO Ya-li, FAN Lu, et al. Research on soaking process of parboiled rice [J]. Cereal & Feed Industry, 2019, 7: 1-4
- [34] 赵谋明, 李璇, 林伟峰, 等. 常用食品胶粘度和悬浮力关系的研究[J]. 食品科学, 1997, 7: 6-10
ZHAO Mou-ming, LI Xuan, LIN Wei-feng, et al. Study on the relationship between viscosity and suspension force of common food gum [J]. Food Science, 1997, 7: 6-10
- [35] Han J A, Lim S T. Effect of presoaking on textural, thermal, and digestive properties of cooked brown rice [J]. Cereal Chemistry, 2009, 86(1): 100-105
- [36] 杨柳. 大米蒸煮溶出淀粉对米饭质构的影响及米饭质构的电化学评价[D]. 长春: 吉林大学, 2017
YANG Liu. The effect of leached starch on texture of cooked rice and electrochemical evaluation of texture of cooked rice [D]. Changchun: Jilin University, 2017
- [37] 徐昊, 李世瑶, 赵宇慧, 等. 响应面法优化枸杞粉抗结块工艺[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(11): 216-221
XU Hao, LI Shi-yao, ZHAO Yu-hui, et al. Optimization of wolfberry powder anticaking process by response surface methodology [J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(11): 216-221
- [38] 谭洪卓, 谭斌, 刘明, 等. 淀粉流变学特性的研究进展[J]. 中国粮油学报, 2008, 4: 215-220
TAN Hong-zhuo, TAN Bin, LIU Ming, et al. Research progress on rheological property of starch [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2008, 4: 215-220
- [39] 张涛, 余林翠, 吴鹏, 等. 响应面法优化一种营养面糊工艺[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(1): 185-191
ZHANG Tao, YU Lin-cui, WU Peng, et al. Formulation optimization for a nutritional batter by response surface methodology [J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(1): 185-191
- [40] 杨超, 赵娜, 田斌强, 等. 阴米淀粉糊的流变特性[J]. 食品科学, 2010, 31(11): 5-10
YANG Chao, ZHAO Na, TIAN Bin-qiang, et al. Rheological properties of yinmi starch paste [J]. Food Science, 2010, 31(11): 5-10
- [41] 卢玉栋. 新型淀粉基造纸助剂的研制及作用机理研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2004
LU Yu-dong. Preparation of novel starch-base papermaking additives and study on their function mechanisms [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2004
- [42] 高凌云, 张本山. 西米淀粉糊流变特性研究[J]. 食品工业科技, 2010, 31(2): 83-85, 88
GAO Ling-yun, ZHANG Ben-shan. Study on the rheological character of sago starch paste [J]. Science and Technology of Food Industry, 2010, 31(2): 83-85, 88
- [43] 陈克复. 食品流变学及测量[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1989
CHEN Ke-fu. Food Rheology and Measurement [M]. Beijing: China Light Industry Press, 1989