

生浆法制作豆腐的工艺优化

何婉莹, 黄展锐*, 赵良忠, 刘海宇, 周小虎, 陈浩, 周晓洁

(邵阳学院食品与化学工程学院, 豆制品加工与安全控制湖南省重点实验室, 湖南邵阳 422000)

摘要: 为确定生浆法生产豆腐的最优参数, 该试验基于豆清发酵液点浆凝固大豆蛋白形成凝胶制作豆腐原理, 采用 Box-Behnken 中心组合设计方案, 研究豆水比、煮浆温度、煮浆时间和豆清发酵液添加量对豆腐品质特性(得率、蛋白质含量、水分含量和保水性)的影响。在单因素试验基础上, 以豆腐得率和蛋白质含量为响应值设置响应面试验, 进行方差分析和交互作用分析, 对生浆法制作豆腐工艺进行优化。结果表明: 生浆法中不同豆水比、煮浆温度、煮浆时间和豆清发酵液添加量下豆腐品质特性存在显著性差异($p < 0.05$), 最佳工艺参数为: 豆水比 1:4 (kg:kg), 煮浆时间 6.0 min, 煮浆温度为 105 °C, 豆清发酵液添加量 26.50%。在此工艺参数下制作豆腐的得率和蛋白质含量分别为 224.09 g/100 g、8.68%, 比未优化加工工艺制作的豆腐得率提高 33.15 g/100 g, 蛋白质含量提高 3.29%, 表明优化后生浆法工艺条件具有可行性, 可制作出高产率、高蛋白的豆腐。

关键词: 豆腐; 豆清发酵液; 生浆法; 响应面优化

文章编号: 1673-9078(2021)10-188-196

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.10.1087

Optimization of Tofu Production from Filtered Raw Soybean Milk

HE Wan-ying, HUANG Zhan-rui*, ZHAO Liang-zhong, LIU Hai-yu, ZHOU Xiao-hu, CHEN Hao, ZHOU Xiao-jie
(College of Food Science and Chemical Engineering, Shaoyang University, Hunan Provincial Key Laboratory of Soybean Products Processing and Safety Control, Shaoyang 422000, China)

Abstract: Tofu production process by filtering raw soybean milk (FRSM) was optimized according to protein coagulation of fermented soybean whey (FSW). The effects of the soybean-to-water ratio, cooking temperature and duration, and amount of FSW added on the characteristics (yield, protein and water contents, and water-holding capacity) of the produced tofu were evaluated using the Box-Behnken design. Based on single-factor experiments, response surfaces of tofu yields and protein contents were obtained. Analysis of variance and interaction analysis were performed to determine the optimal process parameters of FRSM tofu production. Significant differences were observed concerning the tofu characteristics depending on the different soybean-to-water ratios, cooking temperatures and time, and FSW contents applied in the production process ($p < 0.05$). The optimal tofu production conditions were the following: soybean-to-water ratio of 1:4 (kg:kg); cooking duration of 6.0 min, at a temperature of 105 °C; and a FSW content equal to 26.50%. Under these conditions, the yield and protein content of the tofu were 224.09 g/100 g and 8.68%, respectively, which were 33.15 g/100 g and 3.29% higher as compared with the values obtained before the protocol optimization. Altogether, these results indicate that FRSM is feasible for high-yield and high-protein content tofu production.

Key words: tofu; fermented soybean whey; raw soybean milk; response surface optimization

引文格式:

何婉莹, 黄展锐, 赵良忠, 等. 生浆法制作豆腐的工艺优化[J]. 现代食品科技, 2021, 37(10): 188-196

HE Wan-ying, HUANG Zhan-rui, ZHAO Liang-zhong, et al. Optimization of Tofu production from filtered raw soybean milk [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(10): 188-196

收稿日期: 2020-11-25

基金项目: 湖南省教育厅科学研究优秀青年项目 (20B530); 湖南创新型省份建设专项创新平台项目 (2019TP1028); 湖南创新型省份建设专项重点领域研发计划项目 (2019SK2122); 湖南创新型省份建设专项创新平台与人才计划项目 (2019NK4229)

作者简介: 何婉莹 (1992-), 女, 实验员, 研究方向: 豆制品加工与安全控制, E-mail: 168364207@qq.com

通讯作者: 黄展锐 (1992-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 豆制品加工与安全控制, E-mail: zhanrui_huang@163.com

豆腐是大豆蛋白的高度胶凝型产品, 含有丰富的蛋白质、异黄酮、维生素、矿物质等营养成分, 具有极高的营养价值, 是最具开发和食用潜力的营养食品之一^[1]。豆腐的高蛋白功效使其在国民日常膳食中起着不可或缺的作用, 长期食用豆腐会减少一些常见慢性疾病的发生, 例如高血压、高血脂、冠心病、心脑血管硬化等^[2,3]。

豆腐加工历史悠久, 其加工工艺多样复杂, 包括大豆浸泡、研磨、豆浆加热、过滤、凝固和压榨等工

序,其中制浆是豆腐生产过程中的核心关键工序^[4]。不同制浆工艺不仅对豆浆营养物质提取率及豆浆稳定性起着决定性作用,而且对豆腐品质和风味有显著影响^[4,5]。生浆法是将大豆匀浆液先过滤得到豆浆再煮沸制成豆腐的一种常用工艺方法。生浆工艺是将浸泡好的大豆磨浆,将磨好的大豆匀浆液过滤筛分离豆渣得到“生豆浆”,再进行加热煮浆及后续操作制备豆腐的工艺方法,该工艺对厂房、设备等要求比较低,操作方便且效率高,是我国农家及大部分企业生产豆腐最常用的制作方法^[6]。

大量研究表明,豆腐产率高和品质好坏,与大豆匀浆液粗细程度、煮浆与分离先后顺序、加热温度及时间、凝固剂添加量、凝固时间等因素密切相关^[7-9]。因此,研究不同加工工艺与豆腐品质评价指标之间的相关性,优化并确定最佳豆腐加工工艺参数,对豆腐生产者选择豆腐加工工艺、提高豆腐出品率、改善豆腐质构以及实现豆腐自动化生产具有重要价值。

豆清液是大豆蛋白与凝固剂反应而析出的上清液或豆腐在压榨制作过程中产生的黄色液体。据统计,豆制品工厂每加工1t黄豆会产生2~5t豆清液,直接排放极易污染环境并造成资源浪费,因此合理、高效地利用豆清液已成为趋势^[10]。团队前期研究中,豆清液经多菌种协同发酵,制备成富含有机酸(乳酸、醋酸、柠檬酸等)和益生菌(乳酸菌、醋酸菌等)的豆清发酵液^[11]。豆浆中大豆蛋白浓度一般低于10%,要想豆浆凝胶成型制作豆腐,必须加入凝固剂(例如石膏、 $MgCl_2$)促进豆浆蛋白形成凝胶^[12,13]。近年来,豆清发酵液常用作豆腐凝固剂,其凝固机理是将豆浆pH调至大豆蛋白等电点附近使蛋白质形成凝胶生产豆腐^[14]。研究表明,豆清发酵液能提高豆腐蛋白质及多糖提取率,通过豆清发酵液凝固制作出来的豆腐产品,营养价值高,韧性好,保水性高,风味独特^[15,16]。

本研究基于豆清发酵液凝固蛋白制作豆腐原理,采用生浆加工工艺,以豆腐水分含量、保水性、得率和蛋白质含量为评定指标,研究豆水比、煮浆温度、煮浆时间以及豆清发酵液添加量对豆腐品质的影响,根据响应面设计优化实验,在提高豆腐产量及蛋白质含量基础上确定最优工艺参数,旨在为豆清发酵液豆腐标准化工业生产提供有效的技术支持和理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料与试剂

大豆加拿大非转基因豆(蛋白质含量38%),购于岳阳市万越进出口贸易有限公司;豆清发酵液(总

酸含量: 4.49 ± 0.1 g/L,蛋白酶含量: 9.51 ± 0.2 U/mL),豆制品加工与安全湖南省重点实验室提供;消泡剂(食品级),南京金钥匙生物科技有限公司;氢氧化钠、盐酸、无水乙醇,购于北京中远华盾科贸有限公司;硫酸铜、硫酸钾、硫酸、硼酸,购于南京化学试剂股份有限公司;甲基红指示剂、溴甲酚绿指示剂、亚甲基蓝指示剂,购于上海振誉生物科有限公司。

1.2 仪器与设备

MZJJ-1 0.2 t 熟浆集成设备,北京康得利智能科技有限公司;EL204型电子天平,特勒-托利多仪器有限公司;UV-1780型分光光度计,北京京科瑞达科技有限公司;UDK139型凯氏定氮仪,意大利VELP公司;VELOCITY18R型台式冷冻离心机,澳大利亚达卡米公司;GZX-9140MBE型电热鼓风干燥箱,上海博迅实业有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 单因素试验设置

以豆水比、煮浆温度、煮浆时间和豆清发酵液添加量为单因素,按照Box-Behnken原理设计实验方案,运用响应面分析法建立二阶多项非线性回归方程和数据模型,以豆腐得率和蛋白质含量为指标优化豆腐工艺。豆水比选择1:3、1:4、1:5、1:6、1:7(*m:m*)五个水平;煮浆温度选择95℃、100℃、105℃、110℃、115℃五个水平;煮浆时间选择0 min、3 min、6 min、9 min、12 min五个水平;豆清发酵液添加量选择15%、20%、25%、30%、35%五个水平。在确保其他因素都不变的情况下,通过控制变量法改变其中一个因素,探究该因素对豆腐得率、蛋白质含量、保水性和水分含量的影响。

1.3.2 生浆工艺制作豆腐流程

工艺流程:

大豆→精选→洗净→浸泡→加水磨碎→浆渣分离→(豆渣再洗净分离)→加热→豆浆→豆清发酵液点浆→凝固→破脑→压榨→豆腐

1.3.3 豆腐得率的测定

豆腐得率参照Cai等^[17]方法进行测定。每组取三份5.0g豆腐样品,放入恒重的称量瓶中称量并记录。大豆样品放入干燥箱中干燥(101~105℃)4h后取出,在干燥器内冷却30min,称量并记录。豆腐湿重与大豆样品风干重的比值即为豆腐得率(g/100g)。

1.3.4 豆腐蛋白质含量的测定

采用全自动凯氏定氮仪测定豆腐蛋白质含量^[11]。每组取三份2.0g豆腐于消化管中,向管中加入

催化剂 (6 g K₂SO₄+0.4 g CuSO₄·5H₂O) 和 20 mL 浓 H₂SO₄, 置于消化器上按设定程序加热消化。消化程序为: 160 °C, 30 min; 420 °C, 120 min。消化至消化管中的液体呈绿色透明状, 取出冷却, 加入 50 mL 水。配置 40% NaOH、溴甲酚绿-甲基红指示剂、0.1 mol/L HCl 吸收液于全自动凯氏定氮仪的各对应容器中, 设定程序, 将消化液上机进行测定。记录滴定数据, 蛋白质换算系数选择 6.25, 根据式 (1) 计算豆腐蛋白质含量。

$$X = \frac{(V_1 - V_2) \times c \times 0.0140}{\frac{m}{100} \times 10} \times F \times 100 \% \quad (1)$$

式中:

X——样品蛋白质含量, %;

V₁——样品滴定消耗盐酸标准溶液体积, mL;

V₂——空白滴定消耗盐酸标准溶液体积, mL;

c——盐酸标准滴定溶液浓度, mol/L;

0.0140——1.0 mL 盐酸(0.1 mol/L)标准滴定溶液相当的氮的质量, g;

m——样品的质量, g;

F——氮换算为蛋白质的系数=6.25。

1.3.5 豆腐水分含量的测定

采用恒重法测定豆腐水分含量^[11]。每组取三份 5.0 g 豆腐样品, 放入干燥至恒重的称量瓶中, 精密称量并记录后, 放在干燥箱中干燥 (101~105 °C), 干燥 4 h 后取出, 在干燥器内冷却 30 min, 重复干燥至恒重, 称量并记录质量。前后质量差与豆腐质量的比值即为水分含量。

1.3.6 豆腐保水性的测定

保水性参照 Puppò 等^[18]方法并稍加修改进行测定。每组取三份 5.0 g 豆腐样品, 放于底部有脱脂棉的 50 mL 离心管中, 以 1000 r/min 转速离心 10 min 后称量豆腐质量并记录, 将称重后的豆腐稍加粉碎置于 105 °C 下干燥 4 h 后取出, 称量并记录质量。根据式 (2) 计算豆腐保水性。

$$WHC = \frac{W_1 - W_0}{W_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

WHC——表示豆腐保水性, %;

W₁——离心后豆腐质量, g;

W₀——干燥后豆腐质量, g。

1.3.7 响应面优化试验

在单因素基础上, 选取豆水比、煮浆温度、煮浆时间和豆清发酵液添加量中影响较大的因素进行响应面试验, 以豆腐得率和蛋白质含量为参考指标进行试

验优化, 每组进行 3 次重复试验。

1.3.8 验证性试验

根据响应面优化方案和工艺参数设置生浆工艺优化前后两个试验组制作豆腐, 每组重复 3 次, 评价实验组之间豆腐得率和蛋白质含量变化差异。

1.4 数据处理及分析

实验数据均以“平均值±标准差”表示, 使用 SPSS 22.0、Origin 2018 和 Design-Expert 8.0 进行统计分析和方差分析, 显著和极显著水平分别设置为 p<0.05 和 p<0.01, 以识别各组间显著性差异。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

2.1.1 生浆工艺豆水比对豆腐品质特性的影响

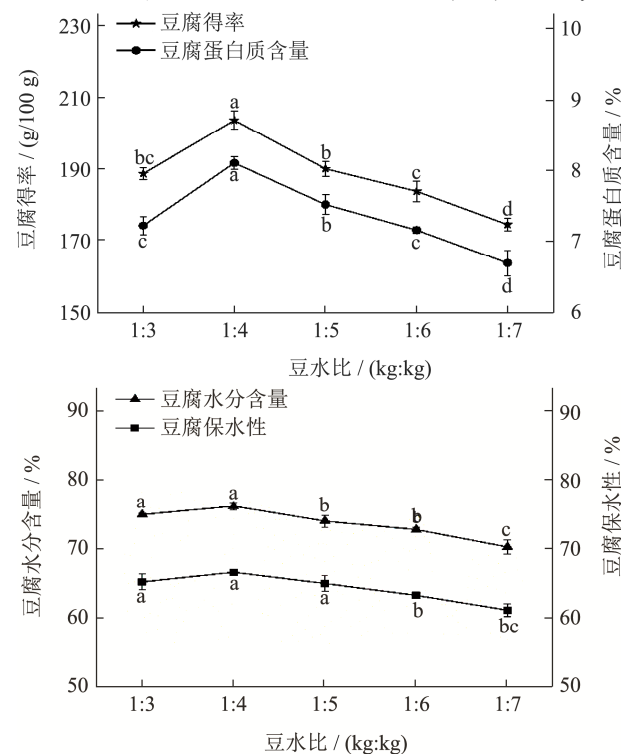


图 1 生浆工艺中不同豆水比对豆腐品质特性的影响

Fig.1 Effects of different soybean to water ratios on tofu quality characteristics in FBBT

注: 图中不同小写字母表示各组间差异显著 (p<0.05), 下同。

生浆工艺中不同豆水比对豆腐品质特性的影响如图 1 所示。随着磨浆豆水比下降, 豆腐得率、蛋白质含量、水分含量和保水性均呈先增加然后减少趋势。其中豆腐得率和蛋白质含量在豆水比为 1:4 时达到最高值, 且存在明显相关性。其原因可能是磨浆水量较低时, 豆浆中蛋白质浓度较高, 而添加一定量的豆清

发酵液时, 豆清发酵液中氢离子和蛋白酶与豆浆发生反应, 促进蛋白质凝胶形成而提高豆腐得率^[19,20]。随着磨浆水量增高, 豆浆中蛋白质含量被稀释而降低, 豆清发酵液中氢离子和蛋白酶含量逐渐降低, 一方面是由于蛋白质凝胶形成不完全, 导致豆腐得率和蛋白质含量下降, 另一方面是由于豆腐三维网络结构不致密, 导致豆腐水分含量和保水性降低。因此选择 1:3、1:4 和 1:5 (m:m) 豆水比进行响应面实验用于进一步优化。

2.1.2 生浆工艺煮浆温度对豆腐品质特性的影响

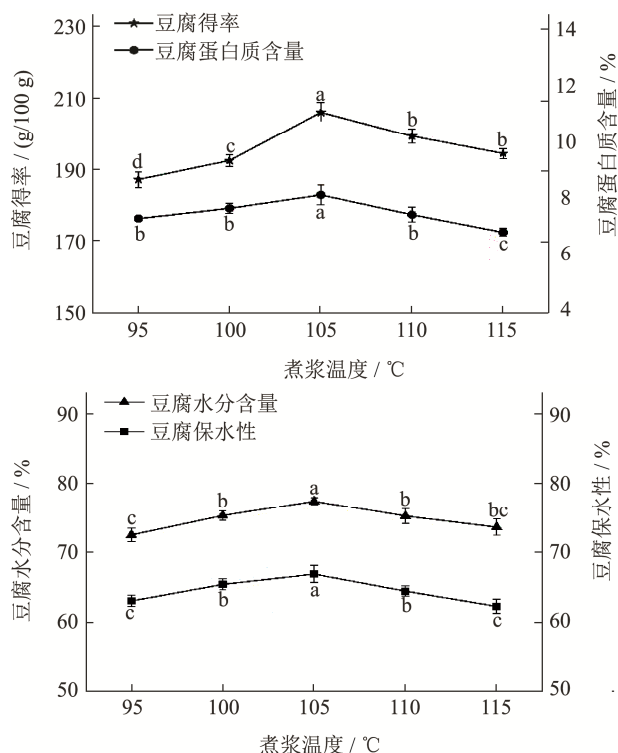


图2 生浆工艺中不同煮浆温度对豆腐品质特性的影响

Fig.2 Effects of different boiling temperatures on tofu quality characteristics in FABT

生浆工艺中不同煮浆温度对豆腐品质特性的影响如图2所示。豆腐得率、蛋白质含量、水分含量和保水性随煮浆温度升高呈先增后降变化趋势, 其中豆腐得率在 105 °C 时显著增高并达到最大值 204.33 g/100 g。其原因可能是由于煮浆温度上升, 大豆蛋白分子构象发生改变, 从天然的 β 折叠状态变为展开状态^[21], 大豆蛋白亲水基团充分暴露, 有利于大豆蛋白溶于水^[22]和蛋白粒子扩散^[23,24], 从而提高豆腐得率和蛋白质含量。当温度过高时, 豆浆蛋白质分子过度变性, 蛋白质二级结构遭受破坏, 疏水基团和活性基团失活, 致使豆腐三维网状结构稳定性随温度增加而逐渐下降, 最终导致豆腐各项品质特性下降。因此选择 100 °C、105 °C 和 110 °C 煮浆温度进行响应面实验用于

进一步优化。

2.1.3 生浆工艺煮浆时间对豆腐品质特性的影响

生浆工艺中不同煮浆时间对豆腐品质特性的影响如图3所示。随着煮浆时间延长, 豆腐得率、蛋白质含量、水分含量以及保水性均呈先增后降变化趋势, 均在 6 min 达到最高值, 表明生浆工艺最优煮浆时间为 6 min。推测原因可能是由于煮浆时间延长 (≤ 6 min), 蛋白分子内部的巯基和疏水性基团被暴露出来, 这些基团通过二硫键以及疏水相互作用等形成聚集集体^[25], 能增强豆腐凝胶强度, 从而使豆腐得率和蛋白质含量增加, 失水率减小。当煮浆时间过长 (>6 min), 豆浆蛋白分子的巯基发生过度氧化^[26], 引起豆腐三维网络结构发生改变, 导致豆腐品质指标下降。因此选择 3 min、6 min、9 min 煮浆时间进行响应面实验用于进一步优化。

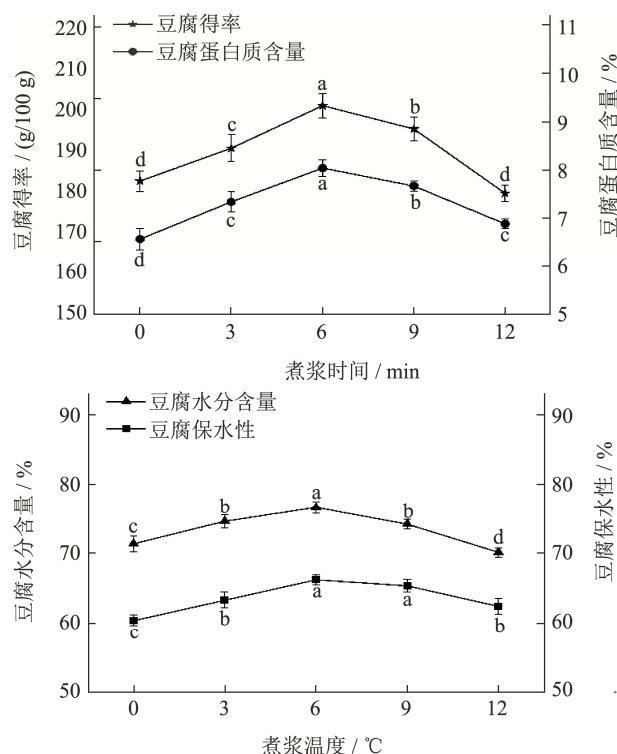


图3 生浆工艺中不同煮浆时间对豆腐品质特性的影响

Fig.3 Effects of different boiling times on tofu quality characteristics in FABT

2.1.4 生浆工艺豆清发酵液添加量对豆腐品质特性的影响

生浆工艺中不同豆清发酵液添加量对豆腐品质特性的影响如图4所示。随着豆清发酵液添加量增多, 豆腐各项品质特性指标均在 15~25% 时显著增高 ($p < 0.05$), 其原因可能是因为豆清发酵液中含有大量的乳酸等有机酸, 可产生 H^+ 降低豆浆 pH, 而弱酸性蛋白负离子易获取 H^+ , 降低了蛋白质表面带电量而呈

电中性,从而构成了较为稳定的豆腐凝胶体系^[27]。但豆腐各项品质特性指标均在30%~35%时略有下降,其原因可能是由于H⁺浓度增高,干扰了豆浆蛋白分子之间的凝聚力,致使豆腐三维网络胶凝结构松散^[28],最终导致豆腐各项品质特性指标出现下降。因此选择20%、25%、30%豆清发酵液添加量进行响应面试验用于进一步优化。

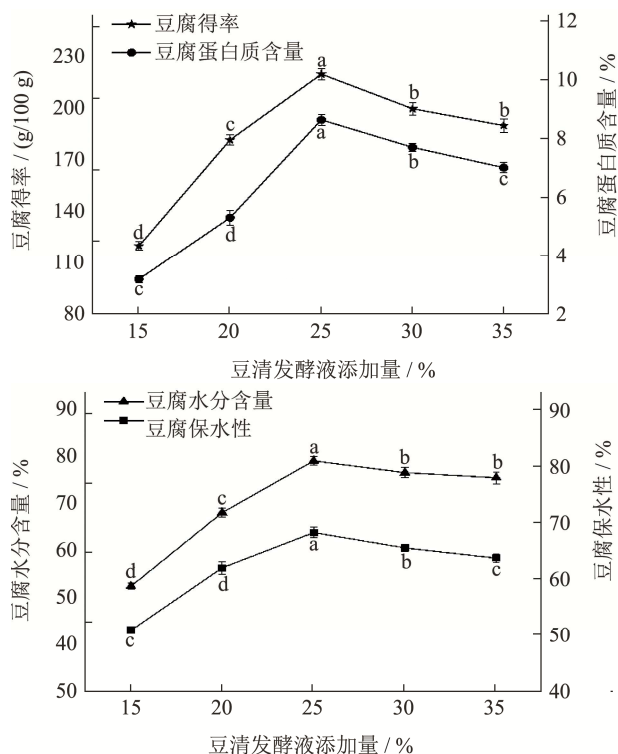


图4 生浆工艺中不同煮浆温度对豆腐品质特性的影响
Fig.4 Effects of different FYW contents on tofu quality characteristics in FABT

2.2 豆腐生浆工艺条件响应面优化试验结果

2.2.1 响应面优化试验结果

选取豆水质量比(A)、煮浆温度(B)、煮浆时间(C)和豆清发酵液添加量(D)4个因素3个水平进行响应面正交试验,以豆腐得率和蛋白质含量为参考指标进行试验优化,响应面正交试验因素水平设置见表1。响应面正交试验结果如表2所示,通过Design-expert 8.0软件对数据进行多元回归拟合,得到豆清发酵液豆腐得率(Y₁)和蛋白质含量(Y₂)的二次多项式回归方程为:

$$Y_1=218.80-3.67A+1.08B-1.33C+6.92D-2.00AB+1.50AC-3.00AD+4.75BC-2.00BD+0.75CD-15.98A^2-14.11B^2-14.98C^2-16.86D^2$$

$$Y_2=8.46-0.20A-0.13B-0.08C+1.06D+0.12AB-0.06AC-0.10AD-0.35BC-0.21BD+0.27CD-0.56A^2-0.85B^2-0.81C^2-1.50D^2$$

由表3响应面正交试验结果方差分析可知,豆腐得率和蛋白质含量模型P₁、P₂均小于0.01,表明回归模型影响呈极显著(p<0.01)。失拟项P₁=0.3232>0.05、P₂=0.9933>0.05,可知两个模型失拟项不显著,表明模型可靠。实验校正系数R₁²=99.29%、R₂²=99.46%,修正系数R₁²=98.57%、R₂²=98.92%,说明两个方程能够较好的反应各个单因素之间关系,拟合度高且实验误差小,能分别解释98.57%豆腐得率和98.92%豆腐蛋白质含量响应值变化,可用于对豆腐生浆工艺进行分析与预测。

表1 响应面正交试验因素水平表

Table 1 Level of response surface test factors

水平	A 豆水比 (m:m)	B 煮浆 时间/min	C 煮浆 温度/℃	D 豆清发酵液 添加量/%
-1	1:3	3	100	20
0	1:4	6	105	25
1	1:5	9	110	30

表2 工艺优化响应面正交试验结果表

Table 2 Response surface test results of process optimisation

试验号	A 豆水比 (m:m)	B 煮浆 时间/min	C 煮浆 温度/℃	D 豆清发酵液 添加量/%	豆腐得率/(g/100g)	豆腐蛋白质含量/%
1	-1	-1	0	0	186.50±0.92	6.84±0.47
2	-1	0	0	1	186.15±0.21	7.21±0.31
3	-1	0	0	-1	180.61±3.38	5.18±0.36
4	-1	0	-1	0	184.33±1.15	7.05±0.66
5	-1	0	1	0	184.92±2.80	6.75±0.07
6	-1	1	0	0	183.13±4.25	6.82±0.34
7	0	-1	-1	0	196.49±3.46	6.58±0.42
8	0	-1	0	1	195.93±3.05	7.51±0.25
9	0	-1	1	0	183.24±2.82	7.13±0.65

转下页

接上页

10	0	-1	0	-1	175.13±2.21	5.02±0.33
11	0	0	-1	-1	182.55±3.53	5.47±0.31
12	0	0	-1	1	194.62±1.58	6.98±0.41
13	0	0	0	0	219.89±0.16	8.58±0.66
14	0	0	1	-1	179.48±2.81	4.81±0.61
15	0	1	-1	0	188.39±1.92	7.11±0.46
16	0	1	1	0	194.13±0.96	6.24±0.34
17	0	1	0	1	195.90±4.27	6.77±0.35
18	0	0	0	0	217.00±2.51	8.68±0.17
19	0	0	1	1	194.13±3.27	7.41±0.52
20	0	0	0	0	220.25±3.28	8.35±0.12
21	0	0	0	0	218.88±1.19	8.46±0.64
22	0	1	0	-1	183.82±3.48	5.13±0.59
23	0	0	0	0	220.25±0.75	8.22±0.08
24	1	-1	0	0	191.28±4.31	7.55±0.35
25	1	0	0	1	199.80±2.09	7.75±0.47
26	1	0	0	-1	181.85±3.11	5.32±0.53
27	1	0	-1	0	193.90±3.28	7.31±0.13
28	1	0	1	0	187.88±1.62	7.26±0.21
29	1	1	0	0	196.68±0.78	7.04±0.06

表 3 豆腐得率和蛋白质含量响应面试验结果方差分析

Table 3 Analysis of variance of response surface methodology for tofu yield and protein content

方差来源	豆腐得率				豆腐蛋白质含量			
	平方和	F 值	P 值	显著性	平方和	F 值	P 值	显著性
模型	4942.59	139.03	<0.0001	**	33.52	184.57	<0.0001	**
A 豆水比	161.33	63.53	<0.0001	**	0.47	36.39	<0.0001	**
B 煮浆时间	14.08	5.55	0.0336	*	0.19	14.84	0.0018	**
C 煮浆温度	21.33	8.40	0.0117	*	0.068	5.20	0.0387	*
D 豆清发酵液添加量	574.08	226.08	<0.0001	**	13.44	1036.11	<0.0001	**
AB	16.00	6.30	0.0250	*	0.060	4.63	0.0494	*
AC	9.00	3.54	0.0807	*	0.016	1.20	0.2909	
AD	36.00	14.18	0.0021	**	0.040	3.08	0.1009	
BC	90.25	35.54	<0.0001	**	0.50	38.86	<0.0001	**
BD	16.00	6.30	0.0250	*	0.18	13.92	0.0022	**
CD	2.25	0.89	0.3625		0.30	22.90	0.0003	**
A ²	1657.08	652.58	<0.0001	**	2.05	158.12	<0.0001	**
B ²	1291.10	508.45	<0.0001	**	4.74	365.39	<0.0001	**
C ²	1456.22	573.48	<0.0001	**	4.25	327.93	<0.0001	**
D ²	1843.48	725.98	<0.0001	**	14.64	1128.55	<0.0001	**
Lack of fit		0.3232	Not significant			0.9933	Not significant	
R ²			99.29%				99.46%	
Adj. R ²			99.57%				98.92%	

注: *表示差异显著 (p<0.05); **表示差异极显著 (p<0.01)。

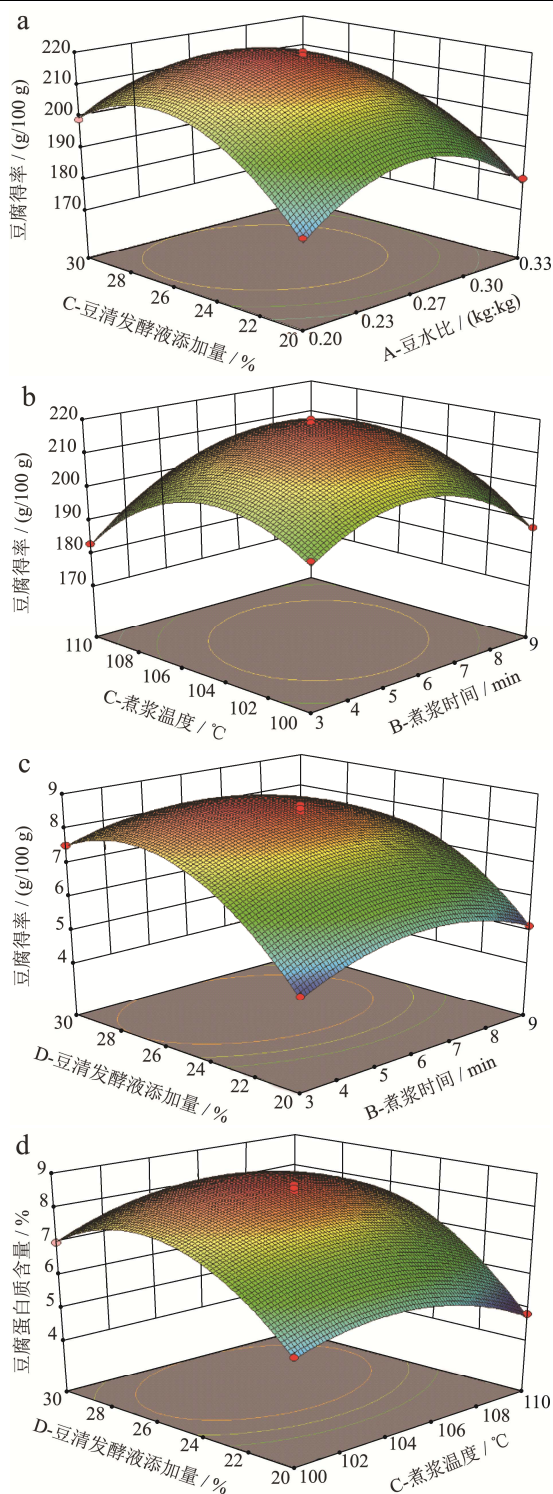


图5 各两因素交互作用对豆腐得率和蛋白质含量影响

Fig.5 Effects of the interaction of two factors on tofu yield and protein content

通过分析两个模型回归方程及方差分析结果可知, 各因素影响豆腐得率大小依次为: D (豆清发酵液添加量) > A (豆水比) > C (煮浆温度) > B (煮浆时间); 影响豆腐蛋白质含量大小依次: D (豆清发酵液添加量) > A (豆水比) > B (煮浆时间) > C (煮浆温度), 说明豆清发酵液添加量对豆腐得率和蛋白

质含量的影响最大, 豆水比的影响其次。豆清发酵液添加量起主要作用, 表明豆清发酵液决定了豆腐凝胶成型与否, 当豆清发酵液添加量过低时, 不能与豆浆充分反应促进凝胶成型; 当豆清发酵液添加量过高时, 会引起豆清液大量析出及营养物质流失, 导致豆腐得率和蛋白质含量下降^[29,30]。

2.2.2 交互作用分析

响应面模型可直观地、生动地描述两个变量(因素)之间的交互作用, 表达不同变量(因素)对某一性状指标的影响情况。豆水比、煮浆时间、煮浆温度和豆清发酵液添加量之间的相互作用对豆腐得率和蛋白质含量的影响如图5所示。由图可知, 每两个因素相互影响总体呈抛物线型关系, 均出现先增高后下降变化趋势, 且存在一个极值, 该值即为该响应面最优值。同时, 3D 曲面图中曲线越陡表明该因素对豆腐得率或蛋白质含量的影响越显著。由图可知, A (豆水比) 和 D (豆清发酵液添加量)、B (煮浆时间) 和 C (煮浆温度) 之间的交互效应对豆腐得率影响极显著 ($p < 0.01$), 这与回归方程 Y_1 中各偏回归系数显著性检验结果相吻合。B (煮浆时间) 和 D (豆清发酵液添加量)、C (煮浆温度) 和 D (豆清发酵液添加量) 之间的交互效应对豆腐蛋白含量影响极显著 ($p < 0.01$), 这与回归方程 Y_2 中各偏回归系数显著性检验结果相吻合。

2.2.3 最优条件及验证实验

根据 Design Expert 8.0 软件得出的优化方案, 可知豆腐得率最佳工艺参数配比为: 豆水比为 1:4, 煮浆时间为 5.91 min, 煮浆温度为 104.87 °C, 豆清发酵液添加量为 26.44%; 蛋白质含量最佳工艺参数配比为: 豆水比为 1:4, 煮浆时间为 6.10 min, 煮浆温度为 104.88 °C, 豆清发酵液添加量为 26.50%。通过 R^2 大小比较以及考虑到实际操作情况, 将工艺条件改为水豆比为 1:4, 煮浆时间为 6.0 min, 煮浆温度为 105 °C, 豆清发酵液添加量为 26.5%。在以上得出的最佳组合条件下设置验证试验并重复 3 次, 测定豆腐得率和蛋白质含量分别为 224.09 g/100 g、8.68%, 结果吻合预测值, 比实验优化前豆腐得率提高 33.15 g/100 g, 蛋白质含量提高 3.29%。

3 结论

本实验基于豆清发酵液凝固大豆蛋白原理下, 研究不同工艺条件对豆腐品质特性的影响, 设计响应面优化试验, 确定生浆工艺制作豆腐的最优工艺条件。通过研究发现豆水比、煮浆温度、煮浆时间和豆清发酵液添加量对豆腐得率及蛋白质含量均有显著影响,

其中豆清发酵液添加量对豆腐得率和蛋白质含量影响最显著。在单因素试验结果基础上,利用响应曲面法进行二次回归方程拟合、方差分析和交互作用分析,确定生浆工艺制作豆腐的最佳工艺参数为豆水比 1:4 (kg:kg),煮浆时间 6.0 min,煮浆温度 105 °C,豆清发酵液添加量 26.50%,根据以上工艺参数制作的豆腐得率和蛋白质含量分别为 224.09 g/100 g、8.68%。研究结果可为高品质、高产量豆腐标准化工业生产提供有效的技术支持和理论依据。

参考文献

- [1] Li J L, Qiao Z H, Eizo T, et al. A novel approach to improving the quality of bitter-solidified Tofu by W/O controlled-release coagulant. 2: using the improved coagulant in tofu processing and product evaluation [J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 7(6): 1801-1808
- [2] 吴聚兰,李秀珍,张海生,等.大豆及大豆制品的营养成分[J].农产品加工,2012,8:53-56,77
WU Ju-lan, LI Xiu-zhen, ZHANG Hai-sheng, et al. Nutrition ingredient of soybean and its products [J]. Aem Roducts Rocessing, 2012, 8: 53-56, 77
- [3] 李里特.中国传统豆腐类食品的保健价值[J].农产品加工, 2009,11:67-69
LI Li-te. Health value of Chinese traditional tofu food [J]. Aem Roducts Rocessing, 2009, 11: 67-69
- [4] 于寒松,陈今朝,张伟,等.两种工艺生产豆腐的营养成分与品质特性的关系[J].食品科学,2015,36(19):49-54
YU Han-song, CHEN Jin-zhao, ZHANG Wei. Relationship between nutritional components and texture profile of tofu from two preparation methods [J]. Food Science, 2015, 36(19): 49-54
- [5] Molamma P P, Conrad O P, Suresh V. Effect of different coagulants on the isoflavone levels and physical properties of prepared firm tofu [J]. Food Chemistry, 2005, 99(3): 492-499
- [6] 张碧莹,杨蕊莲,张静,等.不同预处理方式对豆浆品质特性的影响[J].食品与发酵工业,2017,43(2):134-140
ZHANG Bi-ying, YANG Rui-lian, ZHANG Jing, et al. Effect of different soybean pretreatment methods on the quality of soybean milk [J]. Food and Fermentation Industries, 2017, 43(2): 134-140
- [7] Hua H, Fan X, Zhou Z, et al. Acid-induced gelation behavior of soybean protein isolate with high intensity ultrasonic pre-treatments [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2013, 20(1): 187-195
- [8] Shi X D, Li J Y, Wang S M, et al. Flavor characteristic analysis of soymilk prepared by different soybean cultivars and establishment of evaluation method of soybean cultivars suitable for soymilk processing [J]. Food Chemistry, 2015, 185: 422-429
- [9] Soojung H, Seung M L, Jae-hoon S, et al. Effect of dry-and wet-milled rice flours on the quality attributes of gluten-free dough and noodles [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 116: 213-217
- [10] 孔彦卓,尹乐斌,雷志明,等.豆清液综合利用研究进展[J].现代农业科技,2017,1:247-249
KONG Yan-zhuo, YIN Le-bin, LEI Zhi-ming, et al. Research progress on comprehensive utilization of soybean processing wastewater [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2017, 1: 247-249
- [11] 刘海宇,范柳,赵良忠,等.基于豆清发酵液点浆的二次浆渣共熟生产豆腐的工艺优化[J].食品工业科技,2020,41(8): 189-195,209
LIU Hai-yu, FAN Liu, ZHAO Liang-zhong, et al. Process optimization of producing tofu based on the technology of pulped by soymilk and dreg repeated curing of soybean whey fermented liquid [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(8): 189-195, 209
- [12] Guo S T, Ono T. The role of composition and content of protein particles in soymilk on tofu curdling by glucono- δ -lactone or calcium sulfate [J]. Journal of Food Science, 2005, 70: 258-262
- [13] Chen Y C, Chen C C, Chen S T, et al. Proteomic profiling of the coagulation of milk proteins induced by glucono- δ -lactone [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 52: 137-143
- [14] Guo S T, Tsukamoto C, Takahasi K, et al. Incorporation of soymilk lipid into soy protein coagulum by the addition of calcium chloride [J]. Journal of Food Science, 2002, 67: 3215-3219
- [15] Tripathi M K, Mangaraj S, Giri S K, et al. Process development for utilization of fermented tofu whey as a source of tofu coagulant and antioxidants [J]. International Journal of Agricultural Engineering, 2012, 6: 296-303
- [16] Shi X D, Li J Y, Wang S M, et al. Flavor characteristic analysis of soymilk prepared by different soybean cultivars and establishment of evaluation method of soybean cultivars suitable for soymilk processing [J]. Food Chemistry, 2015, 185: 422-429
- [17] Cai T D, Chang K C. Processing effect on soybean storage proteins and their relationship with tofu quality [J]. Journal of

- Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47: 720-727
- [18] Puppo M C, Anon M C. Structural properties of heated-induced soy protein gels affected by ionic strength and pH [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46(9): 3583-3589
- [19] Wu H, Dong J J, Dai Y Q, et al. Effects of lactic acid bacteria fermented yellow whey on the protein coagulation and isoflavones distribution in soymilk [J]. Food Chemistry, 2021, 334: 127484
- [20] 赵贵丽,罗爱平,黄名正,等.乳酸乳球菌生物凝固剂对豆腐贮藏性的影响[J].食品工业,2018,39(1):141-144
ZHAO Gui-li, LUO Ai-ping, HUANG Ming-zheng, et al. Effects of biological coagulant fermented by lactococcus on storability of tofu [J]. Food Industry, 2018, 39(1): 141-144
- [21] 石彦国,刘琳琳.大豆蛋白与豆腐品质相关性研究进展[J].食品科学技术学报,2018,36(6):1-8
SHI Yan-guo, LIU Lin-lin. Research progress on correlation between soybean protein and tofu quality [J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 36(6): 1-8
- [22] Lee K H, Azhar M E, Noryati I. Effects of thermal treatments on texture of soy protein isolate tofu [J]. Food Processing and Preservation, 2000, 24: 275-286
- [23] Kyoko T, Kyoko C, Tomotada O. Effect of components extracted from okara on the physicochemical properties of soymilk and tofu texture [J]. Journal of Food Science, 2007, 72(2): 108-113
- [24] 钱虎君,盖钧镒,喻德跃.豆乳和豆腐加工过程中滤渣方法和絮凝时间对营养成分利用的影响[J].大豆科学,2001, 20(1):18-21
QIAN Hu-jun, GAI Jun-yi, YU De-yue. Effect of different filtering methods and coagulating time treatments to utilization of nutrients in soymilk and tofu processing [J]. Soybean Science, 2001, 20(1): 18-21
- [25] Wang C H, Damodaran S. Thermal gelation of globular proteins: influence of protein conformation on gel strength [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1991, 39(3): 433-438
- [26] 李里特,汪立君,李再贵,等.大豆蛋白热变性程度对豆腐品质的影响[J].中国粮油学报,2002,17(1):1-4
LI Li-te, WANG Li-jun, LI Zai-gui, et al. Effects of heat denaturation of soybean protein on tofu-gel [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2002, 17(1): 1-4
- [27] 王宸之,陈宇,万重,等.豆腐凝胶成型机理研究进展[J].东北农业大学学报,2017,48(10):88-96
WANG Chen-zhi, CHEN Yu, WANG Zhong, et al. Research progress on gelation mechanism of soybean curd processing [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2017, 48(10): 88-96
- [28] 孙丰婷.豆腐凝固剂的研究进展[J].农业与技术,2017,37(4): 236-237
SUN Feng-ting. Research progress of tofu coagulant [J]. Agriculture and Technology, 2017, 37(4): 236-237
- [29] Ringgenberg E, Alexander M, Corredig M. Effect of concentration and incubation temperature on the acid induced aggregation of soymilk [J]. Food Hydrocolloids, 2013, 30463-30469
- [30] Li C, Rui X, Zhang Y H, et al. Production of tofu by lactic acid bacteria isolated from naturally fermented soy whey and evaluation of its quality [J]. LWT - Food Science Technology, 2017, 82: 227-234

(上接第 296 页)

- [27] 欧菊芳.蔬菜中农药多残留气相色谱—质谱法测定中的基质效应研究[D].北京:中国农业科学院,2008
OU Ju-fang. Study on matrix effect in determination of pesticide residues in vegetables by gas chromatography-mass spectrometry [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008
- [28] 侯雪,易盛国,韩梅,等.串联质谱法检测洋葱中 36 种例行监测农药及其基质效应的探讨[J].现代科学仪器,2012,4:115-118
HOU Xue, YI Sheng-guo, HAN Mei, et al. Determination of 36 pesticides in onion by tandem mass spectrometry and its matrix effect [J]. Modern Scientific Instruments, 2012, 4: 115-118