

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

刘海宇^{1,2,3}, 范柳^{1,2,3}, 赵良忠^{1,2,3,*}, 邓雅欣^{1,2,3}, 谢春平^{1,2,3},
沈国祥^{1,2,3}, 欧红艳^{1,2,3}, 林最奇⁴, 庾坤^{1,2,3}, 莫鑫^{1,2,3}
(1.邵阳学院食品与化学工程学院, 湖南邵阳 422000;
2.豆制品加工技术湖南省应用基础研究基地, 湖南邵阳 42200;
3.湖南省果蔬清洁加工工程技术研究中心, 湖南邵阳 422000;
4.北京康得利智能科技有限公司, 北京 100074)

摘要:采用豆清发酵液为豆腐点浆的凝固剂,通过单因素实验研究水豆质量比、煮浆温度、豆清发酵液的添加量和煮浆时间对豆腐品质影响。以豆腐得率和蛋白质含量为指标,通过 Box-Behnken 实验结合响应面法建立二阶多项非线性回归方程和数据模型优化豆腐工艺,结果表明,最佳加工工艺条件为水豆质量比是 6:1 kg/kg,煮浆温度是 105.7 ℃,煮浆时间是 5.8 min,豆清发酵液添加量 26.3%。在最佳工艺条件下得到的豆清发酵液豆腐的得率和蛋白质含量分别最高达 255%、11.12%,此时豆腐的水分含量及保水性达到最佳,优于市售同类产品,对于豆清发酵液豆腐的制作提供了借鉴价值。

关键词:二次浆渣共熟,豆清发酵液,点浆,豆腐,工艺优化

Process Optimization of Producing Tofu Based on the Technology of Pulped by Soymilk and Dreg Repeated Curing of Soybean Whey Fermented Liquid

LIU Hai-yu^{1,2,3}, FAN Liu^{1,2,3}, ZHAO Liang-zhong^{1,2,3,*}, DENG Ya-xin^{1,2,3}, XIE Chun-ping^{1,2,3},
SHEN Guo-xiang^{1,2,3}, OU Hong-yan^{1,2,3}, LIN Zui-qi⁴, YU Kun^{1,2,3}, MO Xin^{1,2,3}

(1.College of Food Science and Chemical Engineering, Shaoyang University, Shaoyang 422000, China;
2.Soybean Processing Techniques of the Application and Basic Research Base in Hunan Province, Shaoyang 422000, China;
3.Hunan Provincial Engineering Research Center for Fruits and Vegetables Cleaning Processing, Shaoyang 422000, China;
4.Beijing Kangdeli Intelligent Technology Co., Ltd., Beijing 100074, China)

Abstract: Using Soybean whey fermented liquid as a coagulant for tofu solidification process, the effects of water-to-bean mass ratio, boiling temperature, amount of soybean whey fermented and boiling time on tofu quality were studied by single factor experiments. Using tofu yield and protein content as indicators, Box-Behnken experiment combined with response surface method to establish a second-order polynomial non-linear regression equation and data model to optimize tofu technology. The results showed that the optimal processing technology condition was a water bean mass ratio of 6:1 kg/kg, cooking temperature was 105.7 ℃, cooking time was 5.8 min, and the amount of soybean whey fermented liquid was 26.3%. Under the optimal process conditions, the yield and protein content of tofu obtained from the tofu fermentation broth were up to 255% and 11.12%, respectively. At this time, the moisture content and water retention of tofu were the best, which was better than similar products on the market. The production of clear soybean whey fermented liquid tofu would provide reference value.

Key words: technology of pulped by soymilk and dreg repeated curing; soybean whey fermented liquid; point pulp; tofu; process optimization

中图分类号: TS214.2 文献标识码: B 文章编号: 1002-0306(2020)08-0189-08

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2020.08.030

引文格式: 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.

收稿日期: 2019-08-12

作者简介: 刘海宇(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬清洁加工, E-mail: 1020624881@qq.com。

* 通讯作者: 赵良忠(1962-), 男, 硕士, 教授, 研究方向: 食品科学技术, E-mail: sys169@163.com。

基金项目: 湖南创新型省份建设重点研发项目(2019SK2122); 湖南省果蔬清洁加工工程技术研究中心(2015TP2022); 邵阳学院 2018 年研究生科研创新项目(CX2018SY036)。

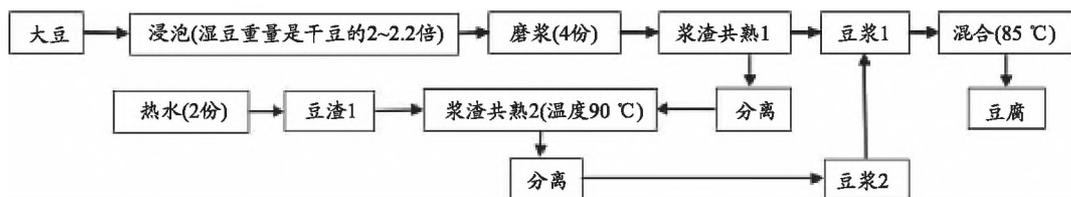


图1 二次浆渣共熟工艺流程图

Fig.1 Technology of pulped by soymilk and dreg repeated curing process flow chart

拥有 2000 多年历史的传统大豆制品—豆腐是大豆蛋白的高度胶凝型食品,具有极高的营养价值^[1]。100 g 豆腐中水分含量约 70%,膳食纤维 0.1 g,碳水化合物 4.3 g,脂肪 8.6 g,蛋白质 15.7 g,热量 611.2 kJ^[2-3]。Takahashi 等^[4]认为,豆腐具有抗癌效果,并减少许多疾病发病风险如高血压、高脂血症、高胆固醇血症、动脉硬化、冠状动脉心脏病。豆腐作为高蛋白制品的营养功效致使其在国民日常膳食中起着举足轻重的作用^[5],豆腐也被称为“植物肉”。

传统的豆腐加工包括大豆的浸泡、研磨、豆浆的加热、过滤、凝固和压榨等,是一个受众多因素影响的复杂过程^[6-7]。制浆工序是豆腐生产过程中的关键工序。根据过滤与热处理的先后顺序不同,将豆浆制备工艺分为生浆工艺与熟浆工艺^[8],生浆工艺是将磨好的豆糊过滤所得的豆浆加热煮熟的一种方法;熟浆工艺是将豆糊先煮熟^[9],再过滤得到豆浆的一种方法。二次浆渣共熟制浆工艺是“湘派”豆干中具有特色的制浆工艺,是后来在生产和实际应用中发展起来的熟浆工艺^[10]。二次浆渣共熟工艺是经三次煮浆,增加豆糊中纤维素的胀润度,使其分子体积增大,从而减少豆浆中粗纤维含量,使豆腐口感细腻;同时二次浆渣共熟能时豆浆中蛋白质形成更稳定的交联网状结构,提高豆腐的持水性和产品得率。

豆清发酵液是豆腐生产过程中产生的豆清液经多菌种协同发酵生产的一种新型豆腐凝固剂,豆清液的循环利用及其发酵条件研究^[11-14]是目前国内外豆制品工艺研究热点,赵贵丽等^[15]优化了豆清液的最适自然发酵条件,得到用于生产豆腐生物凝固剂的豆清发酵液,张影等^[16]利用豆清液自然发酵制备豆清发酵液凝固剂,确定了酸浆豆腐生产工艺的最佳条件,乔明武等^[17]用响应曲面法优化发酵豆清液制备豆腐凝固剂,制得的豆腐质地细腻,硬度、弹性最佳,豆腐香味浓。

通过二次浆渣共熟法制备豆清发酵液豆腐,产品韧性好、保水性高,豆腐风味独特,深受广大消费者欢迎^[18],同时也会提高豆腐蛋白质的提取率及豆浆中多糖的含量,使豆腐的品质得到了很大提升^[19]。本研究采用二次浆渣共熟加工方法,以豆腐水分含量、保水性得率和蛋白质含量为评定指标,研究水豆比、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,以期为提高豆腐的产量及蛋白质含量,也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 材料与方法

1.1 材料与仪器

大豆 加拿大非转基因豆(蛋白质含量 38%),

岳阳市万越进出口贸易有限公司;豆清发酵液 豆制品加工技术湖南省应用基础研究基地提供;消泡剂(食品级) 南京金钥匙生物科技有限公司;其他试剂 均为国产分析纯。

MZJJ-1 0.2 吨熟浆集成 北京康得利智能科技有限公司;EL204 型电子天平 梅特勒-托利多仪器有限公司;UV-1780 型紫外可见分光光度计 上海美谱达仪器有限公司;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;GZX-9140MBE 型电热鼓风干燥箱 上海博迅实业有限公司医疗设备厂。

1.2 实验方法

1.2.1 二次浆渣共熟工艺流程

1.2.2 豆清发酵液标准的统一 取澄清的豆清液,过滤掉豆花残渣,将加工好的豆清液加入菌液发酵,分别在不同时间条件下,测定豆清发酵液酸度、pH、蛋白酶酶活,研究出在豆清发酵液最佳酸度、pH、蛋白酶活性条件下的发酵时间。

1.2.3 豆清发酵液豆腐的制备 挑选 5 kg 饱满且无霉变的大豆,清洗,添加 3 倍水在常温条件下浸泡 8~12 h,根据二次浆渣共熟法生产豆腐,加入一定豆清发酵液后蹲脑,压制成型,冷却制成豆清发酵液豆腐。

1.2.4 单因素实验 固定水豆质量比 6:1 kg/kg、煮浆温度 105℃、煮浆时间 6 min、豆清发酵液添加量为 30% 配比,以豆腐得率、蛋白质含量、水分含量以及保水性为评价指标,依次对水豆比、煮浆温度、煮浆时间、豆清发酵液添加量进行考察,实验水平分别选择水豆质量比为 3:1、4:1、5:1、6:1、7:1 kg/kg;煮浆温度分别为 95、100、105、110、115℃;煮浆时间为 0、3、6、9、12 min;豆清发酵液添加量为 15%、20%、25%、30%、35%。

1.2.5 响应面试验设计 根据以上单因素实验结果确定水豆比、煮浆温度、煮浆时间和豆清发酵液添加量为实验因素,选取四者较优水平,采用四因素三水平进行响应面分析。

表1 响应面实验因素水平编码

Table 1 Levels and codes of BBD

| 水平 | 因素 | | | |
|----|-----------------|--------------|-------------|----------------|
| | A 水豆质量比 (kg/kg) | B 煮浆时间 (min) | C 煮浆温度 (°C) | D 豆清发酵液添加量 (%) |
| -1 | 5:1 | 3 | 100 | 20 |
| 0 | 6:1 | 6 | 105 | 25 |
| 1 | 7:1 | 9 | 110 | 30 |

1.2.6 豆腐得率的测定 豆清发酵液豆腐的得率参照 Cai 等^[20]方法进行测定。

湿豆腐得率(%) = 样品制成豆腐的湿重/大豆样品风干重 × 100

1.2.7 豆腐蛋白质及水分含量的测定 蛋白质含量的测定参照 GB 5009.5-2016^[21];水分含量的测定参照 GB 5009.3-2016^[22]。

1.2.8 豆腐保水性的测定 保水性(WHC)参照 Puppò 等^[23]的方法进行测定,稍加修改。精确称取 2.0000 g(精确到 0.0001 g)豆腐,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 后称重并记录(W_1),置于 105 °C 下干燥至恒重(W_0)。

$$\text{WHC}(\%) = \frac{W_1 - W_0}{W_1} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

式中:WHC 代表豆腐的保水性,% ; W_0 代表干燥至恒重的质量,g。

1.3 数据处理

运用 IBM SPSS Statistics 22、软件 Origin 9.0 软件以及 Design-Expert 8.0 进行数据处理分析,且每组实验重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 豆清发酵液参数标准的统一

随着发酵时间的梯增,豆清发酵液 pH 逐渐下降,酸度慢慢上升(图 2),而蛋白酶酶活先增加后减少(图 3)。因为随着发酵时间的增长,菌种在培养过程中产生了大量的酸性代谢物,其在豆发酵液中大量囤积,致豆清发酵液 pH 的降低,酸度上升;菌种迅速生长,从而要提高大量的营养成分,即菌种会分泌出大量的蛋白酶^[24],基质分解速度加快,蛋白酶酶活性随之升高,12 h 后,菌丝生长速度减缓,蛋白酶酶活性也随之呈下降趋势。综上,豆清发酵液应发酵在 12 h 左右,其酸度、pH、蛋白酶酶活达到最佳点浆要求,本文所用豆清发酵液在酸度、pH、蛋白酶酶活均为统一的。

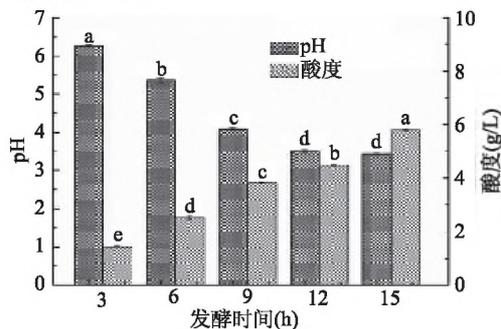


图 2 发酵时间对豆清发酵液 pH 和酸度的影响

Fig.2 Effects of fermentation time on pH and acidity of soybean clear fermentation broth

注:相同指标不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$);图 2~图 11 同。

2.2 水豆质量比对豆清发酵液豆腐品质的影响

随着磨浆水豆质量比的增加,豆腐的得率、蛋白质含量呈先增加然后减少的趋势(图 4),保水性先升

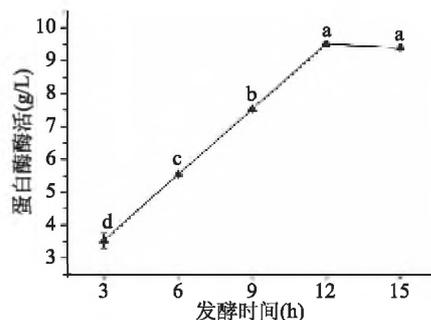


图 3 发酵时间对豆清发酵液蛋白酶活的影响

Fig.3 Effect of fermentation time on protease activity of soybean clear fermentation broth

后降(图 5)。因为磨浆水量较低时,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的含量不能完全和豆浆反应,致使蛋白质凝胶形成不完全,豆腐中三维网络结构不致密,从而导致豆腐网络结构锁定的水分较低,故豆腐的水分含量和保水性较低。随着磨浆水豆质量比的增加,豆清发酵液中氢离子和蛋白酶的含量逐渐上升,可以和豆浆反应逐渐完全,使豆腐保水性上升^[25-26]。但磨浆水豆质量比超过一定范围时,豆浆中蛋白质含量太低,从而不能形成较多的蛋白质凝胶和空间三维网络结构,豆腐的水分含量及保水性也随之降低。张玉静^[27]表明豆腐蛋白质含量与得率、豆腐水分含量、豆腐保水性呈极显著正相关,与本研究相符。

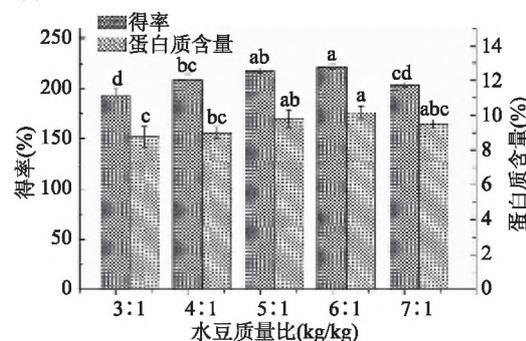


图 4 水豆质量比对豆腐得率和蛋白质含量的影响

Fig.4 Effects of water bean quality ratio on tofu yield and protein content

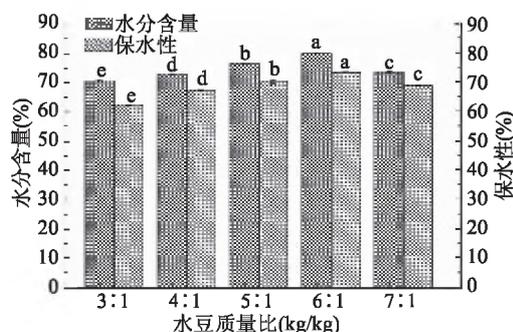


图 5 水豆质量比对豆腐水分含量和保水性的影响

Fig.5 Effects of water quality ratio on water content and water retention of tofu

2.3 煮浆温度对豆清发酵液豆腐品质的影响

豆腐的得率及蛋白质含量随着煮浆温度的升高而递增(图6),同时其水分含量和保水性也随之提高(图7)。因为煮浆温度上升,大豆蛋白分子的构象改变,从天然的 β 折叠状态变为展开状态^[28],大豆蛋白的亲水基团更多暴露,从而有利于大豆蛋白溶于水^[29],使豆浆中的蛋白颗粒增加^[30-31],豆渣中残留的蛋白质含量减少,从而使豆腐的得率和蛋白质含量提高。温度过高时豆腐的得率、蛋白质含量、水分含量及保水性会随之降低,因为温度过高会使豆浆中的蛋白质过度变性,使其导致暴露出疏水基团和其他活性基团失活,豆腐不能形成紧密的网络凝胶结构。

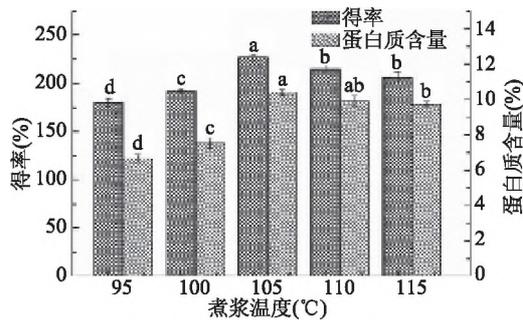


图6 煮浆温度对豆腐得率和蛋白质含量的影响
Fig.6 Effects of boiling temperature on tofu yield and protein content

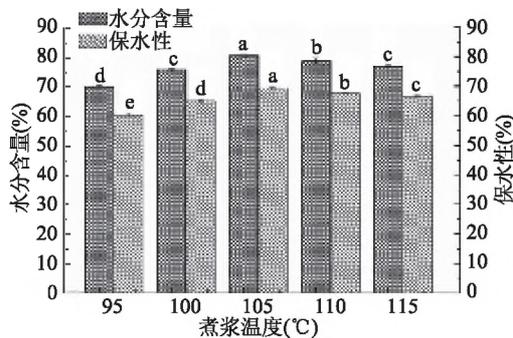


图7 煮浆温度对豆腐水分含量和保水性的影响
Fig.7 Effects of cooking temperature on moisture content and water retention of tofu

2.4 煮浆时间对豆清发酵液豆腐品质的影响

由图8、图9可知,随着煮浆时间的增加,豆腐的得率、蛋白质含量、水分含量以及保水性先增加后减少,由于随着煮浆时间延长,蛋白质分子内部的巯基和疏水性基团被暴露出来,这些暴露的基团之间通过二硫键以及疏水相互作用等形成聚集体^[32],可形成凝胶三维网络结构的变性蛋白质分子逐渐增多,使制得的豆腐凝胶的强度增大,失水率减小,得率、蛋白质含量增加,而随着时间的增加,豆浆中蛋白质分子上的巯基发生氧化,从而使豆腐中各项指标随之降低。

2.5 豆清发酵液添加量对豆清发酵液豆腐品质的影响

如图10、图11所示,随着豆清发酵液添加量的

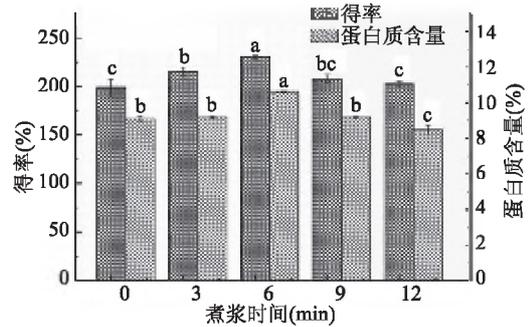


图8 煮浆时间对豆腐得率和蛋白质含量的影响
Fig.8 Effects of cooking time on tofu yield and protein content

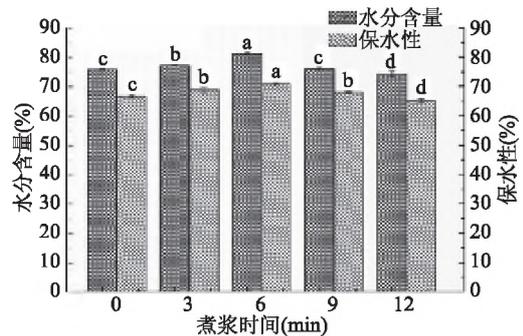


图9 煮浆时间对豆腐水分含量和保水性的影响
Fig.9 Effects of cooking time on moisture content and water retention of tofu

增多,豆腐各项指标先增加后减少,且呈现显著性相关,由图可知,添加量达到25%时,豆腐的得率、蛋白质含量、水分含量及保水性均为最高,因为豆清发酵液中有有机酸主要为乳酸,其产生的 H^+ 使豆浆的pH下降,弱酸性的蛋白质负离子易获取这种 H^+ ,使蛋白质表明带电量降低而呈电中性,形成致密、有序和稳定的三维蛋白网络结构,构成了宏观豆腐凝胶^[33],即豆腐的各项指标随之增加,而随着添加量的继续增加,豆腐各项指标随之下降,这是因为随着 H^+ 浓度的增大,会破坏豆浆中蛋白质分子之间的平衡力,豆腐的胶凝三维网络结构变的松散^[34]。

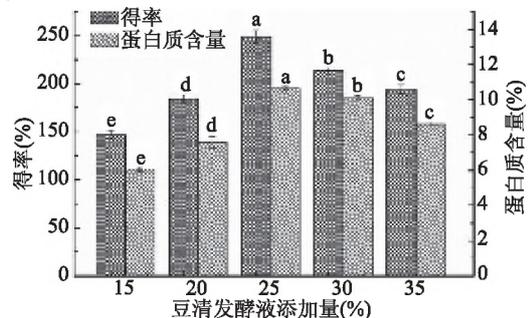


图10 豆清发酵液对豆腐得率和蛋白质含量的影响
Fig.10 Effects of bean curd fermentation broth on the yield and protein content of tofu

2.6 二次浆渣共熟工艺响应面优化试验结果

2.6.1 响应面实验结果及分析 响应面实验结果见表2,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(Y_1)和蛋白质含

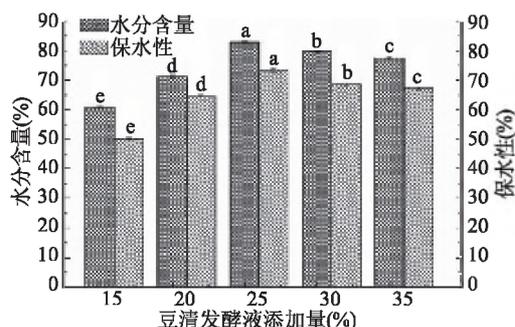


图 11 豆清发酵液对豆腐水分含量和保水性的影响

Fig.11 Effects of bean curd fermentation broth on moisture content and water retention of tofu

量(Y_2)的二次多项式回归模型为:

$$Y_1 = 250.00 - 1.83A + 6.25B - 2.17C + 12.58D - 3.75AB - 3.00AC + 2.25AD + BC + 6.50BD - 6.00CD - 25.25A^2 - 26.13B^2 - 23.25C^2 - 30.87D^2 \quad \text{式(1)}$$

$$Y_2 = 10.53 - 0.17A + 0.45B - 0.22C + 1.02D + 0.46AB + 0.22AC - 0.27AD + 0.43BC - 0.08BD + 0.01CD - 0.56A^2 - 1.47B^2 - 1.17C^2 - 1.87D^2 \quad \text{式(2)}$$

对回归模型式(1)和式(2)进行方差分析和回归系数显著性检验,结果见表3、表4。豆腐得率和蛋白质含量模型 P_1 、 P_2 均小于 0.01,表明回归模型影响呈极显著 ($P < 0.01$)。失拟项 $P_1 = 0.9913 > 0.05$ 、 $P_2 = 0.5195 > 0.05$,可知两个模型失拟项不显著,即模型较为可靠。实验的校正系数 $R_1^2 = 0.9915$ 、 $R_2^2 = 0.9918$,修正系数 $R_1^2 = 0.9852$ 、 $R_2^2 = 0.9836$,可知这两个模型能够较好的反应各个单因素之间的关系,拟合度高,实验误差小。

通过对两个模型的回归方程及方程分析可知:各因素影响豆腐得率大小依次为:D(豆清发酵液添加量) > C(煮浆温度) > B(煮浆时间) > A(水豆质量比);影响豆腐蛋白质含量大小依次为:D(豆清发酵液添加量) > C(煮浆温度) > A(水豆质量比) > B(煮浆时间),说明 D(豆清发酵液添加量)对豆腐得率、蛋白质含量的影响最大,A(水豆质量比)对豆腐得率的影响最小,而 B(煮浆时间)对豆腐蛋白质含量影响最小;两个回归模型中,豆清发酵液添加量均起主要作用,这可能是因为豆清发酵液决定了豆腐能否凝胶成型,添加量较少时,豆浆不能充分反应,豆腐不能完全成型,而添加量过度时,会析出大量豆清液,使豆腐中有效营养物质流出,即豆腐得率、蛋白质含量随之减少。

在回归模型 Y_1 中,由各偏回归系数的显著性检验结果可知,B(煮浆时间)和D(豆清发酵液添加量)之间的交互效应极显著 ($P < 0.01$),D(豆清发酵液添加量)和C(煮浆温度)之间的交互效应极显著 ($P < 0.01$),而A(水豆质量比)和D(豆清发酵液添加量)之间的交互效应不显著 ($P > 0.05$),B(煮浆时间)和C(煮浆温度)之间的交互效应不显著 ($P > 0.05$)。在回归模型 Y_2 中,A(水豆质量比)和D(豆清发酵液添加量)之间的交互效应极显著 ($P < 0.01$),B(煮浆时间)和C(煮浆温度)之间的交互效应极显著 ($P < 0.01$),而B(煮浆时间)和D(豆清发酵液添加量)之

表 2 响应面试验设计及结果
Table 2 Experimental design and results for response surface analysis

| 实验号 | 水豆比 | 煮浆时间 | 煮浆温度 | 豆清发酵液添加量 | 得率 (%) | 蛋白质含量 (%) |
|-----|-----|------|------|----------|--------|-----------|
| 1 | -1 | 0 | -1 | 0 | 204 | 9.16 |
| 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | 190 | 8.81 |
| 3 | -1 | 1 | 0 | 0 | 210 | 8.87 |
| 4 | -1 | 0 | 0 | 1 | 204 | 9.57 |
| 5 | -1 | 0 | 0 | -1 | 185 | 6.94 |
| 6 | -1 | 0 | 1 | 0 | 206 | 8.46 |
| 7 | 0 | -1 | -1 | 0 | 198 | 8.26 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 247 | 10.58 |
| 9 | 0 | 1 | 1 | 0 | 205 | 8.45 |
| 10 | 0 | 0 | -1 | 1 | 218 | 8.66 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 257 | 10.61 |
| 12 | 0 | -1 | 0 | -1 | 180 | 5.51 |
| 13 | 0 | -1 | 1 | 0 | 192 | 6.77 |
| 14 | 0 | 1 | 0 | -1 | 181 | 6.59 |
| 15 | 0 | -1 | 0 | 1 | 192 | 7.83 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 247 | 10.23 |
| 17 | 0 | 0 | 1 | 1 | 201 | 8.24 |
| 18 | 0 | 1 | 0 | 1 | 219 | 8.61 |
| 19 | 0 | 1 | -1 | 0 | 207 | 8.21 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 248 | 10.59 |
| 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 251 | 10.65 |
| 22 | 0 | 0 | 1 | -1 | 186 | 6.35 |
| 23 | 0 | 0 | -1 | -1 | 179 | 6.81 |
| 24 | 1 | 1 | 0 | 0 | 200 | 9.14 |
| 25 | 1 | 0 | -1 | 0 | 203 | 8.58 |
| 26 | 1 | 0 | 0 | 1 | 207 | 8.79 |
| 27 | 1 | -1 | 0 | 0 | 195 | 7.26 |
| 28 | 1 | 0 | 1 | 0 | 193 | 8.77 |
| 29 | 1 | 0 | 0 | -1 | 179 | 7.25 |

间的交互效应不显著 ($P > 0.05$),D(豆清发酵液添加量)和C(煮浆温度)之间的交互效应不显著 ($P > 0.05$)。

2.6.2 交互作用分析 根据上述回归方程及回归模型方差分析表,分别选取对两个指标影响极显著的因素绘出双因子效应分析图,如图12、图13。两因素之间的影响基本呈抛物线型关系,且均有一个极大值点,变化趋势是先增大后减小。

2.6.3 最优条件及验证实验 根据 Design Expert 8.0 软件提供的优化方案,可知豆腐得率最佳时最佳配比为:水豆质量比为 5.9:1 kg/kg,煮浆时间为 5.79 min,煮浆温度为 105.7 °C,豆清发酵液添加量为 26.13%;蛋白质含量最佳配比为:水豆质量比为 5.8:1 kg/kg,煮浆时间为 5.88 min,煮浆温度为 105.7 °C,豆清发酵液添加量为 26.23%。通过 R^2 大小的比较以及考虑到实际操作将加工条件改为水豆质量比为 6:1 kg/kg,煮浆时间为 5.8 min,煮浆温度为 106 °C,豆清发酵液添

表3 豆腐得率试验方差分析结果

Table 3 Results of variance analysis of tofu yield test

| 方差来源 | 平方和 | 自由度 | 均值 | F 值 | P 值 | 显著性 |
|----------------|---------|-----|---------|--------|---------|-----|
| 模型 | 14659.8 | 14 | 1047.13 | 145.51 | <0.0001 | *** |
| A | 40.33 | 1 | 40.33 | 5.6 | 0.0329 | * |
| B | 56.33 | 1 | 56.33 | 7.83 | 0.0142 | * |
| C | 468.75 | 1 | 468.75 | 65.14 | <0.0001 | *** |
| D | 1900.08 | 1 | 1900.08 | 264.03 | <0.0001 | *** |
| AB | 36 | 1 | 36 | 5 | 0.0421 | * |
| AC | 56.25 | 1 | 56.25 | 7.82 | 0.0143 | * |
| AD | 20.25 | 1 | 20.25 | 2.81 | 0.1156 | |
| BC | 4 | 1 | 4 | 0.56 | 0.4683 | |
| BD | 144 | 1 | 144 | 20.01 | 0.0005 | *** |
| CD | 169 | 1 | 169 | 23.48 | 0.0003 | *** |
| A ² | 4135.54 | 1 | 4135.54 | 574.67 | <0.0001 | *** |
| B ² | 3506.35 | 1 | 3506.35 | 487.23 | <0.0001 | *** |
| C ² | 4427.13 | 1 | 4427.13 | 615.18 | <0.0001 | *** |
| D ² | 6183.34 | 1 | 6183.34 | 859.22 | <0.0001 | *** |
| 残差 | 100.75 | 14 | 7.2 | | | |
| 失拟项 | 28.75 | 10 | 2.88 | 0.16 | 0.9913 | |
| 纯误差 | 72 | 4 | 18 | | | |
| 总离差 | 4760.55 | 28 | | | | |

注: * 代表差异显著, $P < 0.05$; *** 代表差异极显著, $P < 0.01$; 表 4 同。

表4 豆腐蛋白质含量试验方差分析结果

Table 4 Results of variance analysis of tofu protein content test

| 方差来源 | 平方和 | 自由度 | 均值 | F 值 | P 值 | 显著性 |
|----------------|--------------------|-----|----------|--------|---------|-----|
| 模型 | 51.88 | 14 | 3.71 | 121.14 | <0.0001 | *** |
| A | 0.34 | 1 | 0.34 | 11.12 | 0.0049 | *** |
| B | 0.58 | 1 | 0.58 | 18.99 | 0.0007 | *** |
| C | 2.46 | 1 | 2.46 | 80.32 | <0.0001 | *** |
| D | 12.51 | 1 | 12.51 | 408.79 | <0.0001 | *** |
| AB | 0.2 | 1 | 0.2 | 6.47 | 0.0234 | * |
| AC | 0.83 | 1 | 0.83 | 27.07 | 0.0001 | * |
| AD | 0.3 | 1 | 0.3 | 9.71 | 0.0076 | *** |
| BC | 0.75 | 1 | 0.75 | 24.46 | 0.0002 | *** |
| BD | 4.00×10^4 | 1 | 4.00E-04 | 0.013 | 0.9106 | |
| CD | 0.023 | 1 | 0.023 | 0.74 | 0.4055 | |
| A ² | 2.04 | 1 | 2.04 | 66.83 | <0.0001 | *** |
| B ² | 8.90 | 1 | 8.90 | 290.97 | <0.0001 | *** |
| C ² | 14.07 | 1 | 14.07 | 459.86 | <0.0001 | *** |
| D ² | 22.63 | 1 | 22.63 | 739.63 | <0.0001 | *** |
| 残差 | 0.43 | 14 | 0.031 | | | |
| 失拟项 | 0.31 | 10 | 0.031 | 1.07 | 0.5195 | |
| 纯误差 | 0.12 | 4 | 0.029 | | | |
| 总离差 | 52.31 | 28 | | | | |

加量为 26.3%。在最佳的组合条件下重复实验 3 次, 最终测定的豆清发酵液豆腐得率和蛋白质含量分别为 $255\% \pm 3\%$ 、 $11.12\% \pm 0.3\%$ 吻合预测值, 比实验优化前(水豆质量比为 5:1 kg/kg, 煮浆时间为 5 min, 煮浆温度为 105 °C, 豆清发酵液添加量为 30%) 得率提高 4.45%, 蛋白质含量提高 5.30%; 与卢义伯等^[35]用其他加工工艺制备的豆腐相比, 本研究制备

的豆腐在各项理化指标上具有明显的优势。说明得到的回归模型与实际情况拟合较好, 进一步验证了该模型的可行性, 具有实用价值。

3 结论

在单因素的实验基础上, 利用响应曲面法建立二次回归模型, 得出豆清发酵液豆腐二次浆渣共熟

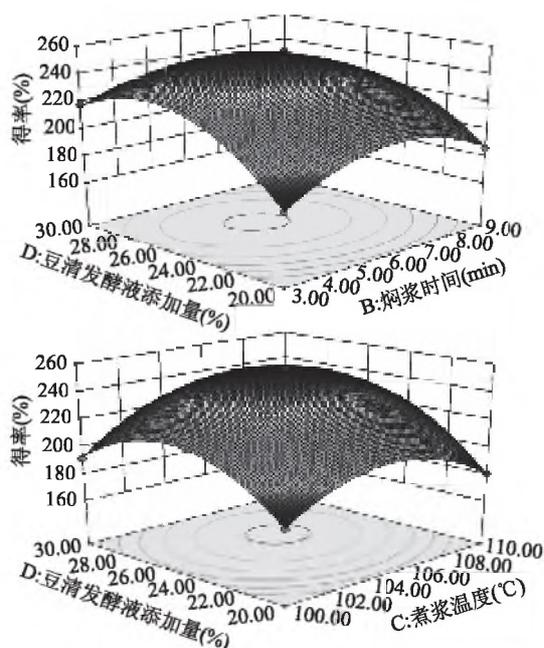


图12 各两因素交互作用对豆腐得率影响的响应曲面
Fig.12 Response surface of the effect of the interaction of two factors on the yield of tofu

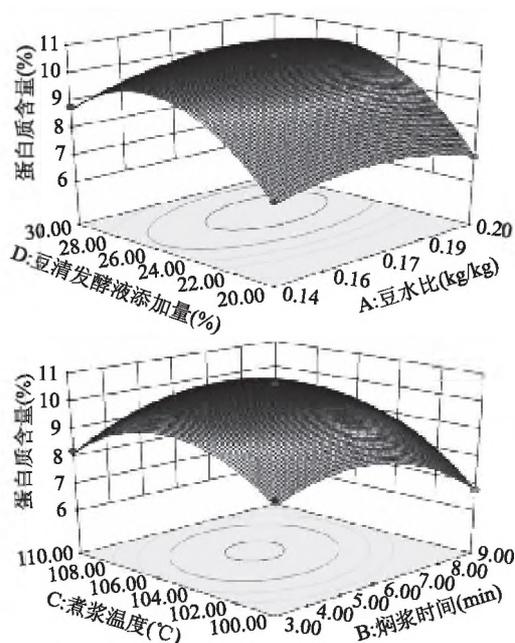


图13 各两因素交互作用对豆腐蛋白质含量的影响的响应曲面

Fig.13 Response surface of the effect of two factors on the protein content of tofu

浆工艺最佳工艺条件为水豆比为 6:1 kg/kg, 煮浆时间为 5.8 min, 煮浆温度为 106 °C, 豆清发酵液添加量为 26.3%, 得率和蛋白质含量分别为 255%、11.12%。通过优化二次浆渣共熟加工工艺制备豆清发酵液豆腐, 可以为豆清发酵液在豆制品生产中作为一种新型的良好凝固剂的运用提供可靠的理论依据和试验基础, 有利于扩大二次浆渣共熟工艺豆腐的生产规模, 促进豆腐市场的发展, 对我国豆制品发展具有重大意义。

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] 葛可佑.《中国居民膳食指南》(2007)(节录)[J].营养学报, 2008, 1: 2-18.

[3] 康瑞雪. 营养健康教育和个体化营养指导对孕妇营养状况和妊娠结局的影响[D]. 唐山: 河北联合大学, 2014.

[4] Takahashi Y, Konishi T. Tofu (soybean curd) lowers serum lipid levels and modulates hepatic gene expression involved in lipogenesis primarily through its protein, not isoflavone, component in rats [J]. Agric Food Chem, 2011, 59: 8976-8984.

[5] 张平安, 赵秋艳, 宋莲军, 等. 大豆浸泡工艺条件对豆腐品质的影响 [J]. 工艺技术, 2010, 31 (7): 275-277.

[6] Prabhakaran M P, Pereraco, Valiyaveetil S. Effect of different coagulants on the isoflavone levels and physical properties of prepared firm tofu [J]. Food Chemistry, 2006, 99 (3): 492-499.

[7] 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.

[8] 李旻怡. 豆浆工艺的嬗变 [J]. 大豆科技, 2014 (6): 6-11.

[9] 周小虎. 二次浆渣共熟-豆清蛋白发酵液点浆豆干自动化生产工艺研究及工厂设计 [D]. 邵阳: 邵阳学院, 2015.

[10] 谢灵来, 赵良忠, 尹乐斌, 等. 豆清发酵液点浆工艺研究 [J]. 食品与机械, 2017, 33 (01): 184-189, 194.

[11] 冯大伟, 周家春. 益生乳酸菌的纸片扩散法药敏性试验评价 [J]. 微生物学通报, 2010, 37 (3): 454-464.

[12] 徐进, 刘秀梅, 杨宝兰, 等. 中国常用益生菌菌种的耐药性研究 [J]. 卫生研究, 2008, 37 (3): 354-356.

[13] 李平兰, 潘伟好, 吕艳妮, 等. 微生物制剂中常用乳酸菌对抗生素的药敏性研究 [J]. 中国农业大学学报, 2004, 9 (1): 16-20.

[14] 凡琴, 刘书亮, 李娟, 等. 中国市售酸奶乳酸菌的耐药性分析 [J]. 卫生研究, 2012, 41 (3): 476-479.

[15] 赵贵丽, 罗爱平, 宋志敏, 等. 乳酸菌在大豆黄浆水中发酵条件的优化 [J]. 食品与机械, 2014, 30 (2): 216-218.

[16] 张影, 刘志明, 刘卫, 等. 酸浆豆腐的工艺研究 [J]. 农产品加工: 学刊, 2014 (2): 21-23.

[17] 乔明武, 田洁, 赵秋艳, 等. 用响应曲面法优化发酵黄浆水制备豆腐凝固剂的工艺 [J]. 江西农业学报, 2014, 26 (3): 85-89.

[18] 孙菁, 张臣飞, 尹乐斌, 等. 豆清发酵液中一株产细菌素乳酸球菌的分离鉴定 [J]. 农产品加工, 2016 (5): 44-48.

[19] 周娟, 谢灵来, 尹乐斌, 等. 二次浆渣共熟制浆工艺优化研究 [J]. 中国酿造, 2018, 37 (2): 194-197.

[20] 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.

[21] 国家食品药品监督管理总局, 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.5-2016 食品中蛋白质的测定 [S]. 北京: 中国标准 (下转第 209 页)

- [15] 曾怀才.全氟辛酸磺酸盐的神经发育毒性研究[D].武汉:华中科技大学,2010.
- [16] 吴远婵,臧红 T-Fenton 试剂荧光光谱法测定一次性纸杯中的双酚 A[J].化学分析计量,2018,27(5):76-79,83.
- [17] 宋守军,岳昕,卢栋,等.铭天青 S 分光光度法测定一次性纸杯中的铅[J].食品工业,2019,40(4):165-167.
- [18] Zabaleta I, Bizkarguenaga E, Bilbao D, et al. Fast and simple determination of perfluorinated compounds and their potential precursors in different packaging materials [J]. Talanta, 2016, 152:352-363.
- [19] Zafeiraki E, Costopoulou D, Vassiliadou I, et al. Determination of perfluorinated compound (PFCs) in various foodstuff packaging materials used in Greek market [J]. Chemosphere, 2014, 94:169-176.
- [20] 冯盘.食品接触材料中全氟辛酸和全氟辛酸磺酰基化合物的检测和溶出迁移规律研究[D].杭州:浙江大学,2011.
- [21] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会.GB 31604.35-2016 食品接触材料及制品 全氟辛酸磺酸(PFOS)和全氟辛酸(PFOA)的测定[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [22] 卫生和计划生育委员会.GB/T 31604-2015 食品接触材料及制品迁移试验通则[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [23] 国家体育总局.国家体育总局发布《2014 年国民体质检测公报》(全文)[EB/OL].(2015-11-25)[2019-07-02].http://sports.china.com.cn/quanminjianshen/quanminjianshenbaogao/detail1_2015_11/18/472339.html.
- [24] 卫生和计划生育委员会.GB 5009.156-2016 食品接触材料及制品迁移试验预处理方法通则[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [25] 联合国粮农组织,世界卫生组织.食品中化学物风险评估原则和方法[M].北京:人民卫生出版社,2012:177-212.
- [26] Hang L S, Salihovic S, Jogsten I E, et al. Levels in food and beverages and daily intake of perfluorinated compounds in Norway [J]. Chemosphere, 2010, 80(10):1137-1143.
- [27] 中国产业信息网.目前我国纸杯纸碗行业现状分析[EB/OL].(2015-07-17)[2019-07-02].http://www.chyxx.com/industry/201507/329364.html.
- [28] 中华人民共和国国家统计局.总人口[DB/OL].(2018)[2019-07-02].http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01&zb=A0301&sj=2018.
- [29] Haug L S, Thomsen C, Brantsæter A L, et al. Diet and particularly seafood are major sources of perfluorinated compounds in humans [J]. Environment International, 2010, 36(7):772-778.
- [30] Shoeib M, Harner T, Webster G M, et al. Indoor sources of poly- and perfluorinated compounds (PFCs) in Vancouver, Canada: Implications for human exposure [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(19):7999-8005.
- [31] Domingo J L. Health risks of dietary exposure to perfluorinated compounds [J]. Environment International, 2012, 40:187-195.
- [32] Wang C H, Damodaran S. Thermal gelation of globular proteins: Influence of protein conformation on geistrength [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 1991, 39(3):433-438.
- [33] 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.
- [34] 孙丰婷.豆腐凝固剂的研究进展[J].农业与技术,2017,37(4):236-237.
- [35] 卢义伯,潘超,祝义亮.豆腐生产中不同制浆工艺研究[J].食品工业科技,2007(8):182-184,187.
- [36] Preservation, 2000, 24:275-286.
- [37] Kyoko Toda, Kyoko Chiba, Tomotada Ono. 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.
- [38] 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.
- [39] Lee K H, Azharne, Noryatii. Effects of thermal treatments texture of soy protein isolate tofu [J]. Food Processing and Preservation, 2000, 24:275-286.
- [40] Kyoko Toda, Kyoko Chiba, Tomotada Ono. 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.
- [41] 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.
- [42] Wang C H, Damodaran S. Thermal gelation of globular proteins: Influence of protein conformation on geistrength [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 1991, 39(3):433-438.
- [43] 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.
- [44] 孙丰婷.豆腐凝固剂的研究进展[J].农业与技术,2017,37(4):236-237.
- [45] 卢义伯,潘超,祝义亮.豆腐生产中不同制浆工艺研究[J].食品工业科技,2007(8):182-184,187.

(上接第 195 页)

出版社,2016.

[22] 国家食品药品监督管理总局,国家卫生和计划生育委员会.GB 5009.3-2016 食品中水分的测定[S].北京:中国标准出版社,2016.

[23] Puppo M C, Añón M C. Structural properties of heated-induced soy protein gels affected by ionic strength and pH [J]. J Agric Food Chem, 1998, 46(9):3583-3589.

[24] 叶青.乳酸菌酸浆豆腐工艺优化及凝固机理初探[D].锦州:锦州医科大学,2018.

[25] 贺云.豆腐酸浆中乳酸菌的分离鉴定及其在酸浆豆腐中的应用[D].无锡:江南大学,2018.

[26] 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.

[27] 张玉静.不同大豆原料生产豆腐的适用性评价[D].杨凌:西北农林科技大学,2016.

[28] 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.

[29] Lee K H, Azharne, Noryatii. Effects of thermal treatments texture of soy protein isolate tofu [J]. Food Processing and

北大核心期刊,轻工优秀期刊

订阅热线:010-87244116 QQ:1787000719