

乳清粉营养豆腐加工工艺研究

冷进松¹, 郝晓玮²

(1. 吉林工商学院 食品工程学院/粮油食品深加工吉林省高校重点实验室, 吉林 长春 130062; 2. 吉林省博大生化有限公司, 吉林 吉林 132201)

摘要:为优化乳清粉营养豆腐加工工艺,应用 Plackett-Burman 析因设计进行了主效因子的筛选,根据主效应因子影响及变化方向进行爬陡坡试验,最后,应用二次旋转中心复合响应面设计对乳清粉营养豆腐加工工艺进行了优化,优化工艺条件为:葡萄糖酸- δ -内酯添加量 0.4%、乳清粉添加量 9%、凝固时间 20 min、凝固温度 85℃。最优条件下模型预测乳清粉豆腐感官得分为 97.046 23 分,验证试验结果为 97.55 分。该产品具有良好的感官性状,具有纯正的豆腐香味及淡淡的奶香风味,是一种营养丰富,开发前景广阔的产品。

关键词:乳清粉;豆腐;葡萄糖酸- δ -内酯;Plackett-Burman 析因设计;中心复合设计;响应面分析

中图分类号:TS214.2 **文献标识码:**A **DOI:**10.11861/j.issn.1000-9841.2015.03.0485

Processing Technological Study on Health Food of Whey Powder Tofu

LENG Jin-song¹, HAO Xiao-wei²

(1. College of Food Engineering, Jilin Business and Technology College/Jilin Province Key Laboratory of Grain and Oil Processing, Changchun 130062, China; 2. Jilin Boda Biochemical Co. Ltd., Changchun 130062, China)

Abstract: To investigate the optimal producing conditions of health food of whey powder Tofu, Plackett-Burman design was used to screen main factors affecting health food of whey powder Tofu production, steepest ascent experiment was adopted to approach the optimal region based the results from the factorial design. At last, quadratic rotating central composite design (QRCCD) was applied to optimize the health food of whey powder tofu producing parameters. The optimal condition for health food of whey powder tofu were 0.4% of GDL amount, 9% of whey powder amount, solidification time 20 min and solidification temperature 85℃. The predicted value and actual value of sensor score were 97.046 23 and 97.55. The product had good sensory properties, with pure tofu flavour and creamy flavor, was a nutrient rich, with broad prospects for development of products.

Keywords: Whey powder; Tofu; GDL; Plackett-Burman factorial design; Central composite design; Response surface methodology

豆腐是一种中国传统的非发酵豆制品,是大豆蛋白在凝固剂的作用下结合形成的一种高度水化的大豆蛋白质凝胶食品^[1]。豆腐营养丰富,富含铁、钙、磷、镁等人体必需的多种微量元素,还含有糖类、植物油和丰富的优质蛋白,素有“植物肉”之美称^[2]。豆腐的消化吸收率达 95% 以上。不含胆固醇,为高血压、高血脂、高胆固醇症及动脉硬化、冠心病患者的药膳佳肴,也是儿童、病弱者及老年人补充营养的食疗佳品;此外,豆腐含有丰富的植物雌激素,对防治骨质疏松症有良好的作用^[3]。

乳清粉是由牛奶加工干酪、凝乳酪或酪蛋白过程产生的非常有价值的副产物,主要成分是乳糖、乳蛋白和矿物质。乳清含有大量的乳清蛋白、乳糖、核黄素及几乎全部的水溶性盐类,含有组成蛋白质的全部 20 种氨基酸,与血浆蛋白质相似,属于全价蛋白质,并且具有良好的加工特性(溶解性、成胶性、持水性、黏附性、黏弹性、乳化性、起泡性)^[4]。乳清粉豆腐属于强化蛋白质豆腐,是在豆腐的加工过程中添加乳清粉来提高豆腐中蛋白质的含量,使

豆腐具有营养功效,并保持良好的食用品质。

本研究基于 Plackett-Burman 设计筛选影响乳清粉豆腐感官得分的主要因素,利用响应面试验优化乳清粉豆腐的最佳加工工艺,为乳清粉的综合开发利用提供参考^[5]。

1 材料与方法

1.1 材料

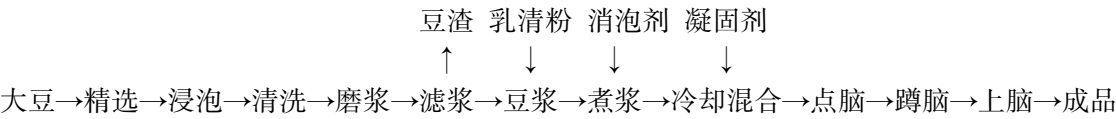
东北大豆(吉林省鑫来粮油集团有限公司);葡萄糖酸- δ -内酯(安徽省兴宙医药食品有限公司);乳清粉(广州利源食品添加剂有限公司);单硬脂酸甘油酯(天津塘沽金轮盐化有限公司)。

1.2 仪器与设备

JYDZ-56W 型九阳豆浆机(九阳股份有限公司);C21-SC001 九阳电磁炉(九阳股份有限公司);AY120 型岛津托盘电子分析天平(日本岛津制作所);TL-18M 高速台式离心机(上海离心机研究所)。

1.3 方法

1.3.1 工艺流程



1.3.2 操作要点

- (1)精选:挑选籽粒大小均匀饱满,无瘪粒,脐色浅,皮薄,有光泽,含蛋白质量高且水分在13%以下的大豆。去除原料中的杂质和变质,破损的大豆。
- (2)浸泡:浸泡使大豆吸收水分膨胀,从而能最大限度提取大豆破碎后的蛋白质。浸泡的大豆约为原干豆重量的10倍左右^[6]。
- (3)清洗:泡好的大豆清洗1~2次,去除漂浮的豆皮,降低泡豆的酸度。
- (4)磨浆:用豆浆机粗磨、细磨2~3次,尽可能提高蛋白质的提取率。一般磨浆的颗粒直径在2~3 μm^[7],用手指捻可感觉到豆浆细滑。磨浆的温度要适宜,温度过高,使蛋白部分变性,降低出品率。
- (5)滤浆:是把磨浆后沫糊进行浆、渣分离,为了充分提取沫糊中的蛋白质,过滤时静置30 min。
- (6)乳清粉的添加:将5%的乳清粉先溶于少量豆浆中,待全部溶化后加入到滤好的豆浆中。
- (7)煮浆:将豆浆边加热边搅拌,避免豆浆糊底。当温度加热至60~70℃时放入1%的食用消泡剂,把加热过程中产生的泡完全消掉为止。继续加热豆浆,温度控制在96~100℃,浆沸腾后保持2~3 min把浆煮透。
- (8)混合凝固:煮沸的豆浆静置2~3 min后,将

溶解好的0.5%的葡萄糖酸内酯加入豆浆中,搅拌均匀。

(9)蹲脑:又称养花,是大豆蛋白凝固过程的继续。蹲脑过程不宜过长,一般静置20 min,凝固温度控制在85~95℃,过长凝固时间,温度下降太多,导致成品品质,过短凝出不充分。

(10)上脑:将破碎的豆腐脑装入带有豆腐包的豆腐箱中。豆腐箱在压制时起固定外形和支撑的作用。豆腐包是具有一定孔眼的纺织物,相当于滤布。豆腐包将豆腐脑包起来,压制时水分可以从孔眼中排出(排出的水分称黄浆水或酸浆水),而凝固的蛋白质不能被排出。

1.3.3 豆腐感官评分方法 乳清粉豆腐的感官质量评定采用打分法,请10位具有一定食品感官鉴评人员对各组产品进行品尝,根据5个感官指标即结构状态、气味、滋味、色泽和可接受性,对同一产品的感官质量进行评分(表1)。其中豆腐的弹性是指试样在口中的感觉,通过直觉为牙齿间或是舌头和上牙之间对试样进行是对压迫的感知;口感风味即是凝固豆腐在口腔中对豆腐的颗粒感和在口腔中的感觉;色泽是指人通过视觉对豆腐的所具有的颜色感觉。最后对结果进行统计,求出平均值,做出综合评价。

表 1 乳清粉豆腐感官质量评定标准
Table 1 Sensory quality evaluation standard of whey protein bean curd

项目 Item	评价标准 Evaluation standard	得分 Score
结构状态 Structure	块形完整,软硬适度,富有一定的弹性,质地细嫩,结构均匀,无杂质	16~20
	块形基本完整,切面处可见比较粗糙或嵌有豆渣,质地不细嫩,弹性差,有黄色液体渗出,表面发粘	8~15
	块形不完整,组织结构粗糙而松散,触之易碎,无弹性,有杂质,表面发粘	0~7
气味 Odour	具有奶味和豆腐特有的香味	16~20
	豆腐特有香味较为平淡	8~15
	有豆腥味、馊味等不良气味或其他外来气味	0~7
滋味 Taste	口感细腻,豆香浓郁,无明显酸涩味	21~30
	较为细腻,豆香较淡,有少许酸味或涩味	11~20
	粗糙,无豆香,有明显酸涩味	0~10
色泽 Color	呈均匀的乳白色或淡红色,稍有光泽	11~15
	色泽变深直至呈浅红色,无光泽	6~10
	呈深灰色、深黄色或者红褐色	0~5
可接受性 Acceptable	很好,可以接受	11~15
	一般,勉强接受	6~10
	很差,难以接受	0~5

2 结果与分析

2.1 不同因素对豆腐感官得分的影响

2.1.1 料水比 由图 1 可知, 感官得分随料水比的增加呈先上升后下降的趋势。料水比过小, 豆浆浓度过高, 豆腐的感官质量差; 料水比过大, 豆浆浓度过低, 豆腐口感过嫩, 黄浆水过多; 料水比为 1:12 时, 豆腐在上脑时产生的黄浆水较少, 口感较嫩, 豆腐外观、组织结构和风味都比较理想, 综合得分最高。

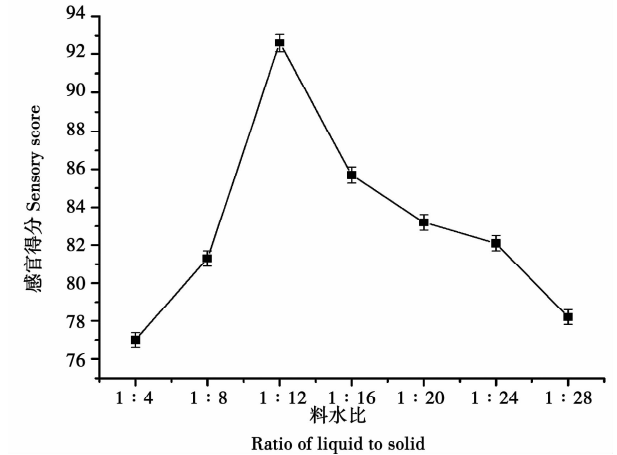


图 1 料水比对豆腐感官得分的影响

Fig. 1 The effect of liquid/solid ratio on the sensory score of Tofu

2.1.2 葡萄糖酸-δ-内酯(GDL)添加量 由图 2 可知, 感官得分随着添加量的增加呈先上升后下降趋势, 达到 0.4% 时, 豆腐综合得分最高。添加量过小豆腐过嫩, 添加量过大, 豆腐过老, 添加量适中, 豆腐口感较好。在添加量为 0.3% ~ 0.4% 豆腐凝固最好, 且产生的黄水较少, 口感较嫩。

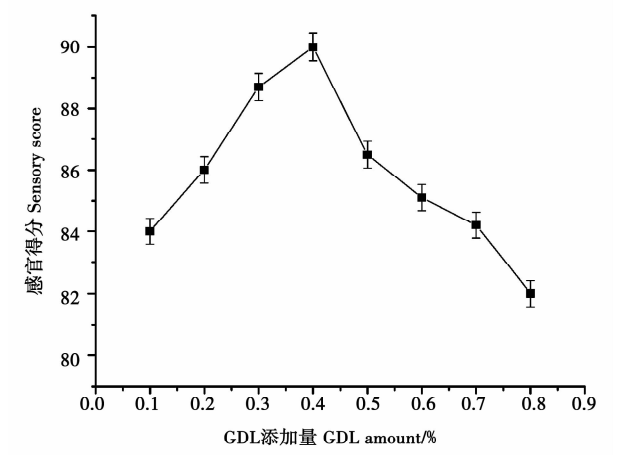


图 2 GDL 添加量对豆腐感官得分的影响

Fig. 2 The effect of GDL amount on the sensory score of Tofu

2.1.3 乳清粉添加量 由图 3 可知, 随着加水量的增加感官得分呈先上升后下降趋势, 加水量为 9% 时得分最高。由于乳清粉中蛋白变性后形成凝胶, 能吸收水分和脂肪, 增强产品的弹性。同时, 由于乳清粉中含有大量乳糖, 可改善产品风味。当乳清粉添加量过多时, 豆腐原始风味被掩盖, 产品感官得分下降。

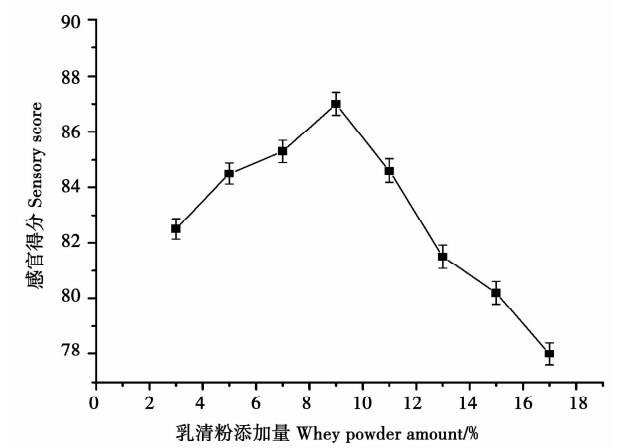


图 3 乳清粉添加量对豆腐感官得分的影响

Fig. 3 The effect of whey powder amount on the sensory score of Tofu

2.1.4 煮浆时间 由图 4 可知, 随着煮浆时间的延长感官得分呈先上升后下降趋势, 其中煮浆时间在 11 ~ 13 min, 感官得分最高。煮浆时间过长, 会造成滤汁蒸发量过大, 粘度增大, 形成较多气泡存在于滤汁中, 导致产品成海绵状, 口感不细腻, 使感官得分下降。

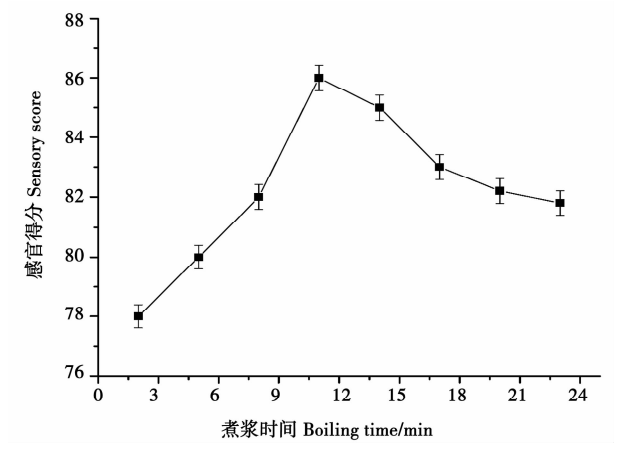


图 4 煮浆时间对豆腐感官得分的影响

Fig. 4 The effect of Time of boiling time on the sensory score of Tofu

2.1.5 凝固时间 由图 5 可知, 凝固时间在 20 ~ 25 min 范围内, 豆腐感官得分随明显增大, 但凝固时间超过 25 min 后, 感官得分呈下降趋势。豆腐是

由大豆蛋白质、脂肪和充填在其中的水构成的。豆腐中的蛋白质呈网状结构,而水分主要存在于这些网状结构内。适当的蛋白质凝固时间决定着豆腐的网状结构及其保水性、柔软性和弹性。豆腐的网状结构网眼较大,交织得比较牢固,豆腐的持水性就好,做成的豆腐柔软细嫩,产品得率亦高。豆腐凝胶结构的网眼小,交织得不牢固,则持水性差,做成的豆腐就僵硬、缺乏韧性,产品得率受到影响^[8]。

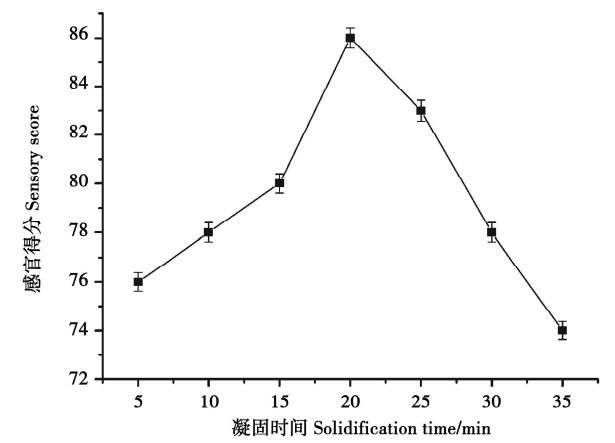


图5 凝固时间对豆腐感官得分的影响
Fig. 5 The effect of solidification time on the sensory score of Tofu

2.1.6 凝固温度 由图6可知,凝固温度对豆腐的感官得分的影响较大,凝固温度不同,制出豆腐的持水性和硬度也不同。随着凝固温度的上升,豆腐感官得分呈先上升后下降趋势,温度在85~90℃,感官得分较高。较高的温度有利于钙桥或镁桥的形成,90℃以上的温度凝固时,豆腐的硬度强而持水性较差,且豆浆处于微沸腾状态,在凝固过程中会出现许多气泡,致使豆腐质地粗硬,影响品质^[9];低于80℃,即使勉强制成豆腐,质地极差,易碎散。

2.2 Plackett-Burman 关键影响因子筛选

2.2.1 单因素效应分析 在单因素试验基础上,对料水比、GDL添加量、乳清粉添加量、煮浆时间、凝固时间、凝固温度6个因素进行考察,每个因素取低水平“-1”和高水平“1”。另设1个虚拟列,设计试验次数N=12的Plackett-Burman实验,以感官得分Y为回应值。Plackett-Burman试验因素及水平见表2,试验设计及结果见表3,利用Minitab16对试验结果进行回归分析,得到各影响因素的偏回归系数及其显著性(表4)。

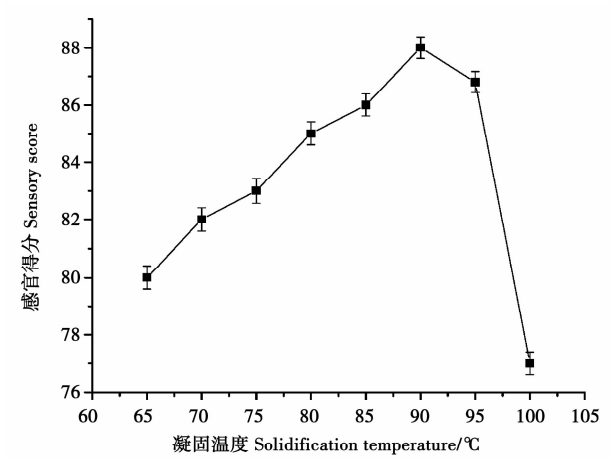


图6 凝固温度对豆腐感官得分的影响
Fig. 6 The effect of solidification temperature on the sensory score of Tofu

表2 Plackett-Burman 试验因素及水平
Table 2 Levels of independent variable in Plackett-Burman design

序列 No.	因素 Factor	名称 Item	编码水平 Code	
			- 1	1
1	A	料水比	1:8	1:16
2	B	GDL 添加量/%	0.3	0.5
3	C	乳清粉添加量/%	7	11
4	D	煮浆时间/min	11	17
5	E	凝固时间/min	15	25
6	F	凝固温度/℃	80	90
7	G	虚拟项 I	-	-

表3 Plackett-Burman 试验设计表及试验结果
Table 3 Plackett-Burman design and experimental results

序号 No.	A	B	C	D	E	F	G	Y(感官得分) Sensory score
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	95.2
2	1	1	-1	1	1	-1	1	90.3
3	1	1	1	-1	1	1	-1	84.2
4	1	-1	-1	-1	1	1	1	82.5
5	-1	1	1	1	-1	1	1	85.6
6	1	-1	1	-1	-1	-1	1	87.7
7	-1	1	1	-1	1	-1	-1	89.2
8	1	1	-1	1	-1	-1	-1	96.3
9	-1	-1	-1	1	1	1	-1	86.4
10	-1	1	-1	-1	-1	1	1	94.8
11	1	-1	1	1	-1	1	-1	80.4
12	-1	-1	1	1	1	-1	1	83.8

表 4 偏回归系数及影响因子的显著性分析
Table 4 Analysis of partial regression coefficient and significance of factors

项目 Item	效应 Efeect	系数 Coefficient	系数标准误 Standard	T	P	重要性排序 Sequence
A	-2. 167	-1. 083	0. 3997	-2. 71	0. 053	5
B	4. 167	2. 083	0. 3997	5. 21	0. 006	3
C	-5. 833	-2. 917	0. 3997	-7. 30	0. 002	1
D	-1. 833	-0. 917	0. 3997	-2. 29	0. 084	6
E	-3. 833	-1. 917	0. 3997	-4. 80	0. 009	4
F	-4. 833	-2. 417	0. 3997	-6. 05	0. 004	2

从单因素效应的检验结果可以看出:主效应中,因素 B(GDL 添加量)、C(乳清粉添加量)、E(凝固时间)、F(凝固温度)效应显著,其 P 分别为 0.006,0.002,0.009,0.004,均小于 0.05,可以作为进一步优化的因素。其它因素对结果影响不大,在进一步研究中,取中间水平,对影响效果不进行

分析。
2.2.2 最陡爬坡试验结果 根据 Plackett-Burman 试验设计试验,确定以 GDL 添加量(X_1)、乳清粉添加量(X_2)、凝固时间(X_3)、凝固温度(X_4)4 个主要因素为自变量,以感官得分(Y)为回应值,其因素水平编码见表 5。

表 5 最陡爬坡试验设计及结果
Table 5 The design and results of steepest ascent test

步骤 Step	GDL 添加量(X_1) GDL amount(X_1)/%	乳清粉添加量(X_2) Whey powder amount(X_2)/%	凝固时间(X_3) Solidification time(X_3)/min	凝固温度(X_4) Solidification temperature(X_4)/℃	感官得分(Y) Sensory score
-2	0.2	5	10	75	88.6
-1	0.3	7	15	80	92.3
0	0.4	9	20	85	96.5
1	0.5	11	25	90	91.6
2	0.6	13	30	95	92.4

由表 5 可知,第 3 组实验的豆腐感官得分最高,说明最优试验在第 3 组实验附近。故以实验 3 的条件为响应面实验因素水平的中心点,GDL 添加量、乳清粉添加量、凝固时间、凝固温度分别为 0.4%,9%,20 min,85℃,进行下一步研究。

2.2.3 中心组合试验优化乳清粉豆腐加工配方

利用 Design-Expert8.0.5b 进行 Response Surface Methodology (RSM) 响应面法优化影响豆腐感官得分的 4 个主要因素:GDL 添加量、乳清粉添加量、凝固时间、凝固温度进行优化组合。考察指标为感官得分,试验因素水平安排见表 6,根据以上水平编码设计试验表格并检测响应值(表 7)。

表 6 试验因素水平编码
Table 6 Level and code on experiment variables

水平 Level	GDL 添加量(X_1) GDL amount(X_1) /%	乳清粉添加量(X_2) Whey powder amount(X_2) /%	凝固时间(X_3) Solidification time(X_3) /min	凝固温度(X_4) Solidification temperature(X_4)
-1	0.3	7	15	80
0	0.4	9	20	85
1	0.5	11	25	90

对表 7 数据进行二次多元回归拟合,可求出影响因素的一次效应、二次效应以及交互效应的关联方程并可绘制出响应面图。该模型通过二阶经验模型对变量的响应行为进行表征,即:

$$Y=\beta_0+\sum_{i=1}^3\beta_ix_i+\sum_{i=1}^3\beta_{ii}x_i^2+\sum_{i=1,j=1}^2\sum_{i=1}^3\beta_{ij}x_ix_j$$

式中 Y 代表响应值, β_0 、 β_i 、 β_{ii} 分别表示偏移项、线性偏移和二阶偏移系数, β_{ij} 是交互效应系数, x_i 是

各因素的编码值。对表 7 试验数据进行多元回归拟合得到感官得分(Y)对编码自变量 X_1 、 X_2 、 X_3 和 X_4 的二次多项式回归方程:

$$Y=97.00+0.30X_1-0.32X_2-0.81X_3-0.017X_4-0.68X_1X_2-0.95X_1X_3-0.43X_1X_4-0.15X_2X_3+0.15X_2X_4-0.27X_3X_4-3.35X_1^2-4.21X_2^2-5.71X_3^2-1.65X_4^2$$

2.2.4 模型方差分析对上述回归模型进行方差分析

表8 结果表明,模型是显著的($P < 0.05$), R-Squared = 0.851 8, Adj R-Squared = 0.703 6,模型变

异系数为 2.18%,精密密度为 7.861,说明模型准确度和精密密度都较高,用该模型进行分析和预测是合理的。

表 7 响应面分析方案及结果

Table 7 Design and results of response surface methodology

序列 No.	$X_1/\%$	$X_2/\%$	X_3/min	$X_4/^\circ\text{C}$	Y Score
1	-1	0	0	1	91.5
2	0	0	0	0	97.0
3	0	0	0	0	97.0
4	0	-1	1	0	88.8
5	0	1	-1	0	87.1
6	-1	-1	0	0	88.5
7	0	-1	-1	0	89.2
8	0	0	0	0	97.0
9	1	0	0	-1	94.8
10	-1	1	0	0	87.7
11	1	1	0	0	86.2
12	-1	0	0	-1	93.5
13	0	0	-1	1	90.4
14	0	-1	0	1	91.1
15	1	0	1	0	87.6
16	0	1	0	1	94.0
17	-1	0	-1	0	87.8
18	0	1	1	0	86.1
19	0	0	0	0	97.0
20	1	0	-1	0	91.2
21	0	0	1	1	87.4
22	0	0	1	-1	86.6
23	1	0	0	1	91.1
24	0	0	-1	-1	88.5
25	0	1	0	-1	92.3
26	0	0	0	0	97.0
27	0	-1	0	-1	90.0
28	1	-1	0	0	89.7
29	-1	0	1	0	88.0

表 8 回归模型系数及显著性检验

Table 8 Variance analysis results of regression model

方差来源 Variance source	平方和 Sum of square	自由度 Freedom degree	均方 Mean of square	F 值 F value	P 值 P value	显著性 Significance
模型 Model	315.822 9	14	22.558 78	5.748 593	0.001 2	极显著
X_1	1.08	1	1.08	0.275 213	0.608 1	
X_2	1.267 5	1	1.267 5	0.322 994	0.578 8	
X_3	7.840 833	1	7.840 833	1.998 058	0.977 2	
X_4	0.003 333	1	0.003 333	0.000 849	0.179 3	

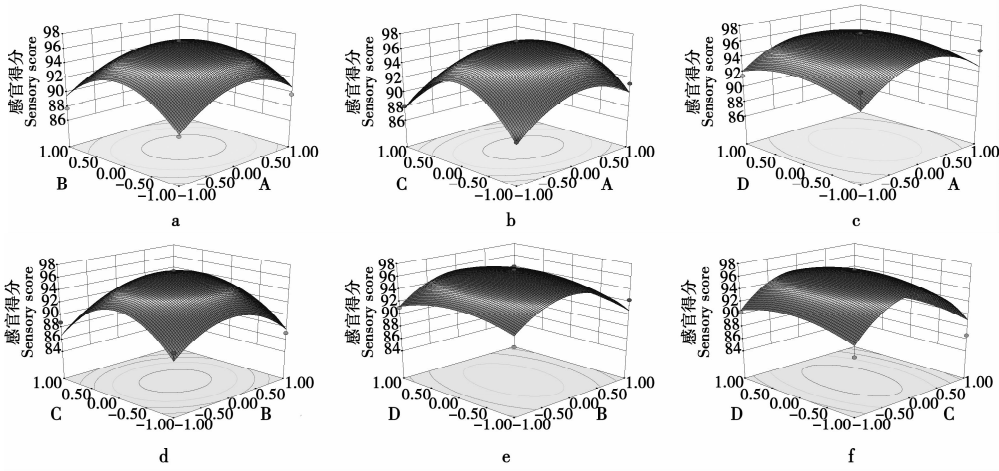
续表 8

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
Variance source	Sum of square	Freedom degree	Mean of square	F value	P value	Significance
X_1X_2	1.822 5	1	1.822 5	0.464 423	0.506 7	
X_1X_3	3.61	1	3.61	0.919 927	0.353 8	
X_1X_4	0.722 5	1	0.722 5	0.184 113	0.674 4	
X_2X_3	0.09	1	0.09	0.022 934	0.881 8	
X_2X_4	0.09	1	0.09	0.022 934	0.881 8	
X_3X_4	0.302 5	1	0.302 5	0.077 085	0.785 3	
X_1^2	72.613 63	1	72.613 63	18.503 93	0.000 7	极显著
X_2^2	114.876 1	1	114.876 1	29.273 57	< 0.000 1	极显著
X_3^2	211.362 6	1	211.362 6	53.860 97	< 0.000 1	极显著
X_4^2	17.5703 8	1	17.570 38	4.477 413	0.052 7	
残差 Residual	54.939 17	14	3.924 226			
失拟项 Lack of fit	54.939 17	10	5.493 917			不显著
纯误差 Pure error	0	4	0			
总离差 Cor total	370.762 1	28				

从表 8 可知,该二次回归方程的模型项、二次项及交互项中的 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 都表现出极显著,失拟项不显著。由 F 值和 $\text{Prob} > F$ 可知,影响豆腐感官得分的主要因素主次顺序为 $X_4 > X_2 > X_1 > X_3$,即凝固温度对豆腐感官得分影响最大,乳清粉添加量和 GDL 添加量影响次之,凝固时间影响最小。

2.2.5 回应曲面分析 绘制三维响应面曲线模型是分析各自不同变量对某个指标影响最好的方法^[10-11]。图 7 直观地反映了各因素间的交互作用。每个影响因子对豆腐感官得分都有一个最佳的稳定条件,可以在试验范围内寻找到最优点。利用 Design-Expert8.0 软件对试验结果进行分析处理,为了确定最佳工艺配方条件,对回归方程取一阶偏导

数等于零解方程组得 $X_1 = 0.060\ 239$, $X_2 = -0.041\ 69$, $X_3 = -0.075\ 18$, $X_4 = -0.008\ 91$,此时 $Y = 97.046\ 23$,即乳清粉豆腐的最佳工艺参数为 GDL 添加量为 0.406 023 9%,乳清粉添加量为 8.849 64%、凝固时间为 19.624 1 min、凝固温度为 84.955 45℃。为检验响应曲面法所得结果的可靠性,采用最佳工艺条件进行豆腐的加工,考虑到实际操作的便利,将工艺参数修正为:GDL 添加量为 0.4%,乳清粉添加量为 9%、凝固时间为 20 min、凝固温度为 85℃。为进一步验证回归模型的有效性,以优化结果进行 4 次重复试验,测得平均感官得分为 97.55,接近于预测值,表明模型可靠,预测结果准确。



A:GDL 添加量(%) ;B:乳清粉添加量(%) ;C:凝固时间(min) ;D:凝固温度(℃)。
A:GDL amount(%) ;B:Whey powder amount(%) ;C:Solidification time(min) ;D:Solidification temperature (℃)。

图 7 两因素交互作用对豆腐感官得分影响的响应曲面图

Fig.7 Response surface and contour plots showing the interaction effects of GDL amount, whey powder amount, solidification time, solidification temperature on Tofu quality

3 结 论

本文豆腐生产工艺条件的优化利用了 Plackett-Burman 试验设计,对较多的参考因素进行了筛选,利用最陡爬坡试验结合 Box-Behnken 设计对工艺配方参数进行数值优化并建立经验二阶多项式回归模型,对回归模型进行统计分析,获得最优化工艺。本试验结合了 Plackett-Burman (PBD)、SAE 和 Box-Behnken Design3 种设计方法,从试验结果看,PBD 找出了主要影响因素为 GDL 添加量,乳清粉添加量、凝固时间、凝固温度。BBD 设计对主要影响因素进行精确优化并建立了二阶经验数学模型。方差分析发现模型显著性 ($P < 0.05$),准确度和精密度的影响。

参考文献

[1] 燕平梅,薛文通,任媛媛,等. 豆腐凝固过程的研究概况[J]. 粮油加工与食品机械, 2005(3):75-77. (Yan P M, Xue W T, Ren Y Y, et al. The investigation of the tofu concretion process [J]. Machinery For Cereals Oil and Food Processing, 2005(3): 75-77.)

[2] 孙小凡,郭采平,朱明霞,等. 圣女果营养保健豆腐的工艺研究[J]. 粮油食品科技,2010,18(2):18-20. (Sun X F, Guo C P, Zhu M X, et al. Research on the technology of cherry-tomato bean curd [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2010,18(2):18-20.)

[3] 刘波,庄苑婷,黄燕云,等. 紫薯保健豆腐的工艺研究[J]. 食品研究与开发,2012,33(9):94-97. (Liu B, Zhuang Y T, Huang Y Y, et al. Technological study on health food of purple sweet potato tofu [J]. Food Research and Developent, 2012,33(9):94-97.)

[4] 郝晓玮. 乳清粉大豆豆腐加工工艺的研究[D]. 长春:吉林工商学院,2014:4-5. (Hao X W. Study on Nutrient Tofu processing

technology of whey powder [D]. Changchun: Jinlin Business and Technology College, 2014:4-5.)

[5] 冷进松,戴媛,朱珠,等. 乳清粉-玉米醇子馒头生产配方的优化设计[J]. 食品研究与开发,2014,35(2):57-58. (Leng J S, Dai Y, Zhu Z, et al. Optimum design of process formulation of whey powder&corn jiaozi steaded bread [J]. Food Research and Developent, 2014,35(2):57-58.)

[6] 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]. 食品工业科技,2010,31(7):275-277. (Zhang P A, Zhao Q Y, Song L J, et al. Effect of soaking processing conditions on quality of tofu [J]. Science and Technology of Food Industry, 2010,31(7):275-277.)

[7] 张振山,王家槐. 豆制品制作工艺[M]. 北京:中国劳动社会保障出版社,2007. (Zhang Z S, Wang J H. Maker of soybean products [M]. Beijing: China Labour and Social Security Press, 2007.)

[8] 郑明珠. 豆制品加工 200 问[M]. 长春:吉林科学技术出版社,2007:5-6. (Zheng M Z. 200 Question of soybean products processing [M]. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 2007:5-6.)

[9] 李俊英,张桂,陈学武,等. 内酯豆腐保水性能的研究[J]. 食品工业,2003(1):49-50. (Li J Y, Zhang G, Chen X W, et al. The study of water-holding capacity of bean curd [J]. The Food Industry, 2003(1):49-50.)

[10] Wei Z J, Liao A M, Zhang H X, et al. Optimization of supercritical carbon dioxide extraction of silkworm pupal oil applying the response surface methodology [J]. Bioresource Technology, 2009, 100:4214-4219.

[11] Xu X, Gao Y X, Liu G M, et al. Optimization of supercritical carbon dioxide extraction of sea buckthorn (*Hippophae thamnoides* L.) oil using response surface methodology [J]. LWT-Food Science and Technology, 2008,41:1223-1231.

[12] 肖怀秋,李玉珍. 海金沙草总黄酮提取工艺的响应面优化[J]. 氨基酸和生物资源,2010,34(3):68-72. (Xiao H Q, Li Y Z. Optimization of total flavonoid extraction technology by response surface methodology from *Lygodium japonicum* [J]. Amino Acids & Biotic Resources, 2010,34(3):68-72.)