

响应面法优化豆腐柴干叶豆腐的加工条件

罗东升¹, 余萍¹, 阚建全^{1,2,*}

(1.西南大学食品科学学院, 重庆 400715;

2.重庆市农产品加工及贮藏重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 本文以采摘自重庆市石柱县的豆腐柴鲜叶, 经人工干燥后制得豆腐柴干叶为原料, 通过单因素实验和响应面优化分析法研究了豆腐柴干叶豆腐的加工工艺条件。研究表明: 豆腐柴干叶豆腐加工最佳工艺条件为豆腐柴干叶热风干燥温度为 50℃、干燥时间 24h, 促凝剂 CaCO₃ 浓度 0.08%, 料液比 1:25 及其凝固时 pH 为 4.0; 在此条件下制得的豆腐柴干叶豆腐的硬度为 115.121g, 凝胶强度为 89.502g, 渗出液为 28.5mL/100g, 出品率为 1263.2%, 且产品的感官品质良好。

关键词: 豆腐柴干叶, 豆腐, 响应面法, 加工工艺条件

Processing condition optimization of *Premna Microphylla* Turcz Tofu by response surface methodology

LUO Dong-sheng¹, YU Ping¹, KAN Jian-quan^{1,2,*}

(1.College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2.Chongqing key Laboratory of Produce Processing and Storage, Chongqing 400715, China)

Abstract: Leaves of *Premna Microphylla* Turcz from Shizhu of Chongqing were dried artificially as raw material, the research was made on processing conditions of *Premna Microphylla* Turcz Tofu by a single factor experiment method and response surface methodology. The results showed that the best processing conditions for *Premna Microphylla* Turcz Tofu were the drying temperature 50℃, drying time 24h, calcium carbonate concentration 0.08%, liquid/solid ratio 0.04 (1:25) and pH 4.0; *Premna Microphylla* Turcz Tofu was obtained under those conditions which its hardness was 115.121g, gel strength was 89.502g, exudates was 28.5mL/100g and yield was 1263.2%, and the appearance and texture of the production were good.

Key words: *Premna microphylla* turcz; Tofu; response surface; processing conditions

中图分类号: TS201.1

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2013)17-0241-08

豆腐柴(*Premna microphylla* Turcz) 又称豆腐木、观音草, 属马鞭草科豆腐柴属的落叶灌木, 生于林缘和林下, 适宜生长于微酸性至酸性土壤^[1-3], 广泛分布于华东、华中、中南、西南各省。豆腐柴叶中含有丰富的果胶、植物蛋白质、糖类、氨基酸和矿物质等营养成分^[4-9], 而且含有木栓酮、木栓醇、十八碳酸、甾醇、胡萝卜苷、柚皮素、香草酸、黄酮等多种药用成分, 使豆腐柴具有较高营养、保健作用及很多重要的药用功效, 成为一种药食兼用植物^[10-13]。从豆腐柴叶中提取的果胶, 可用于食品、化妆、医药工业的胶凝剂、乳化剂、稳定剂等^[14-16]。在民间, 人们常用其鲜叶搓揉后的滤汁加入饱和的草木灰澄清液, 制成一种绿色的叶豆腐, 具有口感细腻爽滑, 肉质透明饱满之特点, 深受人们的青睐。但由于工艺不稳定, 质量安全成问题, 保质期仅 1~3 天, 同时, 其鲜叶不易保藏, 上市期短, 无法常年生产, 这严重影响了其规模的扩

大和资源的开发。但考虑到豆腐柴叶营养丰富, 有较高的医疗保健作用, 资源也比较充足, 而国内外关于豆腐柴鲜叶豆腐的研究报道很少, 关于豆腐柴干叶豆腐的研究报道仍还没有。所以本实验就以重庆市石柱县豆腐柴鲜叶, 经人工干燥后制得的豆腐柴干叶为原料, 通过单因素实验和响应面优化实验法, 对形成豆腐柴干叶豆腐的外界影响因子及最佳加工工艺进行了探讨, 试图研究豆腐柴干叶豆腐的最佳加工工艺参数, 为其工厂规模化生产, 提供理论数据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

豆腐柴鲜叶 于 2011 年 6 月份采自重庆市石柱县; 柠檬酸、氢氧化钠、碳酸钙、氯化钙等均为分析纯 成都市科龙化工试剂厂; 酚酞(指示剂) 成都市科龙化工试剂厂。

1.2 仪器与设备

TA-XT2i 物性测定仪 英国 stable micro system 公司; HR1707 二合一搅拌机 飞利浦有限公司; KQ3200DB 超声波清洗器 昆山市超声仪器有限公司

收稿日期: 2013-01-25 * 通讯联系人

作者简介: 罗东升(1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品化学与营养学。

司;PHS-3C 酸度计 成都世纪方舟科技有限公司;
JH-722 分光光度计 上海菁华科技仪器有限公司;
KQ-100B 超声波振荡器 昆山市超声仪器有限公司;
G80D23CN2P-TT 微波炉 格兰仕有限公司;
DHG-9240 电热恒温鼓风干燥箱 上海恒科技有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 豆腐柴干叶豆腐的基本生产工艺流程 豆腐柴鲜叶→挑选→洗净→人工干燥→粉碎→浸提→过滤→滤汁→加促凝剂→灌装→凝固→成品

1.3.2 豆腐柴干叶豆腐加工工艺参数的单因子实验

1.3.2.1 不同干燥方法对豆腐柴干叶豆腐形成品质的影响 取 1000g 豆腐柴鲜叶分别以自然、普通热风 and 微波三种常见的方式干燥。将干燥好的豆腐柴干叶粉碎至 30 目,各取干叶粉 50g,分别用 1000mL 水浸提 30min 后过滤;按传统制作豆腐柴鲜叶豆腐的方法,向滤汁中加入 5% 饱和草木灰澄清液(按豆腐柴干叶计算)并使其 pH 调到 4.0,室温下静置 1h 后待其凝固。以成型好、具有一定的凝胶强度、硬度适中、渗出液少、口感嫩滑为品质评判标准^[17-18],以确定适当的干燥方法。

1.3.2.2 不同料液比对豆腐柴干叶豆腐形成品质的影响 取 50g 豆腐柴干叶粉(30 目),按料液比分别为 1:15、1:20、1:25、1:30、1:35、1:40,将豆腐柴干叶粉溶于蒸馏水中,浸提 30min 后,过滤,取滤液。采用 1.3.2.1 豆腐柴干叶豆腐制法及品质评判标准,确定合适的料液比。

1.3.2.3 钙盐及其浓度对豆腐柴干叶豆腐形成品质的影响 分别配制 1% 碳酸钙溶液和 1% 氯化钙溶液,按不同添加量加入到 500mL 等量体积的合适料液比的豆腐柴干叶滤汁中,使滤汁中含试剂的浓度分别为 0.02%、0.04%、0.06%、0.08%^[19-20],代替 5% 的饱和草木灰澄清液。采用 1.3.2.1 豆腐柴干叶豆腐制法及品质评判标准,确定钙盐及其浓度。

1.3.2.4 不同 pH 对豆腐柴干叶豆腐形成品质的影响 以合适的料液比滤汁溶液,用 0.5mol/L 柠檬酸和 0.5mol/L 氢氧化钠溶液将豆腐柴干叶滤汁的 pH 分别调至 8、7、6、5、4^[21]。采用 1.3.2.1 豆腐柴干叶豆腐制法及品质评判标准,确定 pH。

1.3.3 豆腐柴干叶豆腐加工工艺参数响应面优化实验 响应面优化实验采用 Design Expert 7.0.0 Box- Behnken 中心组合原理进行设计。根据单因素实验结果,选取叶片干燥温度、料液比(为方便响应面设计 1:20 = 0.05、1:25 = 0.04、1:30 ≈ 0.03)、pH 以及 CaCO₃ 浓度作为实验因素,以凝胶强度、硬度、出品率、渗出液为响应值,实验因素及水平见表 1。

1.4 分析测定方法

1.4.1 凝胶强度的测定^[22] 采用 TA-XT2i 物性测定仪进行测定。测定参数:探头型号 P/0.5,探头前进速度:5mm/s,探头测量时速度:1mm/s,探头返回速度 5mm/s,触发力 5g,最大移动距离 15mm,同一样品选择 5 个不同的部位测定,取平均值。

1.4.2 硬度的测定^[23] 采用 TA-XT2i 物性测定仪进

行测定。测定模式:T.P.A。测定参数:探头型号P/0.5,探头前进速度:5mm/s,探头测量时速度:1mm/s,探头返回速度 5mm/s,触发力 5g,压缩比 30%,触发力 5g,同一样品选择 5 个不同的部位测定,取平均值。

表 1 Box-Behnken 设计实验因素水平及编码

因素	水平		
	-1	0	1
X ₁ 干燥温度(°C)	45	50	55
X ₂ CaCO ₃ 浓度(%)	0.04	0.06	0.08
X ₃ 料液比	0.03	0.04	0.05
X ₄ pH	3.5	4	4.5

1.4.3 渗出液测定^[22] 待成品凝固好后,室温下放置 2h 后,将渗出液倒出,测量渗出液的体积。

1.4.4 出品率的测定^[23] 出品率(%) = [豆腐柴干叶豆腐质量(g)/豆腐柴干叶原料的质量(g)] × 100

1.4.5 感官评价 感官评价方法和评分标准见表 2^[24]。选择经过训练具有一定经验的感官评定人员 10 名进行感官评价。感官评价前将试样切分为 2cm × 2cm × 2cm 的正方体,并用三位数对试样进行随机编号。

表 2 豆腐感官评价评分标准

评分项目	评分参考标准	
硬度	稍硬	8~9
	一般	6~7
	稍软	1~5
风味	有浓郁的豆香味及甜味,无异味	7~9
	豆香味及甜味较弱,无异味	4~6
	无豆香味及甜味	1~3
口感	口感柔软、细腻、弹性适中、无粗糙的沙粒感	7~9
	口感稍硬或弹性较差或略微带渣	4~6
	口感僵硬,弹性差,带渣	1~3
色泽	色泽为深黄色,均一,无其它颜色	7~9
	色泽为淡黄色,均一,无其它颜色	4~6
	色泽为深白色,均一,无其它颜色	1~3
总体可接受性	很好,可以接受	7~9
	较好,可以接受	4~6
	一般,勉强接受	2~3
	很差,难以接受	1

1.5 实验数据处理方法

所有的实验均重复 3 次,利用 Excel 软件对实验结果进行分析。

2 结果与分析

2.1 豆腐柴干叶豆腐加工工艺参数的单因素实验结果

2.1.1 不同干燥方法对豆腐柴干叶豆腐形成品质的影响 由表 3 可知,采用微波干燥豆腐柴鲜叶,干燥快,制成的叶豆腐颜色好,凝胶强度和硬度最大,渗出液最少;普通热风干燥的豆腐柴干叶,制成的豆腐

表 3 不同干燥方法对豆腐柴干叶豆腐形成品质的影响

Table 3 Effect of drying methods on the quality of the formation of *Premna Microphylla* Turcz Tofu

干燥方法	鲜重 (g)	干重 (g)	干燥时间 (h)	失水率 (%)	凝胶强度 (g)	硬度 (g)	渗出液 (mL/100g)	豆腐色泽
热风 45℃	1000	320	28	68	83.364 ± 0.122	98.356 ± 0.050	25.6 ± 0.2	黄绿色
热风 50℃	1000	280	24	72	94.285 ± 0.077	103.479 ± 0.034	23.0 ± 0.3	黄绿色
热风 55℃	1000	260	20	74	102.917 ± 0.073	110.792 ± 0.065	20.2 ± 0.5	黄绿色
微波(中火)	1000	300	0.05	70	111.652 ± 0.031	119.501 ± 0.030	13.9 ± 0.3	黄绿色
晒干(室温 35℃)	1000	250	32	75	75.041 ± 0.032	87.624 ± 0.028	28.0 ± 0.6	土黄

注:凝胶强度、渗出液、硬度值为平均值 ± 标准差,测量次数 n = 6,表 4~表 6 同。

表 4 不同料液比对豆腐柴干叶豆腐品质的影响

Table 4 Effect of liquid/solid ratio on the quality of *Premna Microphylla* Turcz Tofu

料液比 (m/v)	渗出液 (mL/100g)	凝胶强度 (g)	硬度 (g)	豆腐形态
1:15	13.5 ± 0.6	101.576 ± 0.073	105.586 ± 0.086	有大量气泡,海绵状,光滑固体
1:20	21.8 ± 0.5	92.652 ± 0.086	104.327 ± 0.105	无气泡,透明,光滑固体
1:25	28.5 ± 0.7	85.393 ± 0.092	91.584 ± 0.097	无气泡,透明,光滑固体
1:30	34.5 ± 0.6	71.279 ± 0.053	79.852 ± 0.045	无气泡,透明,光滑固体
1:35	51.2 ± 0.8	56.418 ± 0.102	62.743 ± 0.122	无气泡,透明,光滑固体
1:40	-	-	-	溶液

表 5 钙盐及浓度对豆腐柴干叶豆腐形成品质的影响

Table 5 Effect of calcium salt and the concentration on the quality of the formation of *Premna Microphylla* Turcz Tofu

促凝剂	浓度 (%)	渗出液 (mL/100g)	凝胶强度 (g)	硬度 (g)	豆腐形态
CaCO ₃	0.01	2.5 ± 0.1	85.654 ± 0.013	96.129 ± 0.086	无气泡,透明,光滑固体
	0.02	4.8 ± 0.2	101.489 ± 0.025	115.371 ± 0.049	无气泡,透明,光滑固体
	0.04	15.7 ± 0.4	117.325 ± 0.038	129.058 ± 0.028	无气泡,透明,光滑固体
	0.08	20.4 ± 0.4	128.692 ± 0.112	137.504 ± 0.023	无气泡,透明,光滑固体
CaCl ₂	0.01	5.9 ± 0.2	80.291 ± 0.086	89.853 ± 0.105	无气泡,透明,固体表面不光滑
	0.02	10.0 ± 0.3	97.375 ± 0.092	104.517 ± 0.097	无气泡,透明,固体表面不光滑
	0.04	21.6 ± 0.3	114.176 ± 0.053	118.442 ± 0.122	无气泡,透明,固体表面不光滑
	0.08	28.5 ± 0.2	120.942 ± 0.102	127.390 ± 0.050	无气泡,透明,固体表面不光滑

柴干叶豆腐凝胶强度和硬度较大,其中在 55℃ 下干燥的豆腐柴叶制成的豆腐柴干叶豆腐凝胶强度和硬度最大,渗出液最少;自然干燥的豆腐柴鲜叶制成的豆腐柴干叶豆腐品质最差。这是由于干燥速度越快,干燥时对豆腐柴叶内的果胶及其它成分破坏就越小,所形成豆腐的品质就越高。因此,不同干燥方法的优劣顺序为:微波干燥 > 热风 55℃ > 热风 50℃ > 热风 45℃ > 晒干。但考虑到工业上微波烘干设备的价格高且与热风干燥的效果相差不大,因此在响应面实验中就选用热风干燥,更接近实际的工业生产干燥方法。

2.1.2 不同料液比对豆腐柴干叶豆腐形成品质的影响 由表 4 可知,料液比小于 1:20,滤汁过于粘稠,难以过滤,并且产生很多小气泡悬浮于滤汁中,使形成的豆腐成海绵状,口感不细腻,影响其感官品质和口味;料液比大于 1:30,滤汁过稀,豆腐柴干叶豆腐不能凝固成型,凝胶强度和硬度也小。因而,采用豆

腐柴干叶制作叶豆腐时,料液比控制在 1:20~1:30 为宜,此时形成的豆腐柴干叶豆腐渗出液、凝胶强度、硬度适中,感官品质较高。

2.1.3 钙盐及浓度对豆腐柴干叶豆腐形成品质的影响 由表 5 可知,相对于 CaCO₃ 难溶于水来说,由于 CaCl₂ 是可溶物质,使豆腐柴叶凝胶过快成型,且渗出液相对较多,形成的豆腐柴干叶豆腐不均匀,影响感官品质。因此,为了得到质地均匀,硬度和凝胶强度适中,成型快的豆腐柴干叶豆腐,应选用 CaCO₃ 为凝固剂,浓度在 0.04%~0.08% 之间。

2.1.4 不同 pH 对豆腐柴干叶豆腐形成品质的影响 由表 5 可知,随着 pH 增大,豆腐柴干叶豆腐的凝胶强度和硬度都减小,渗出液增多;而 pH 在 4~5 之间形成质地较好的豆腐柴干叶豆腐;按合适料液比得到的豆腐柴干叶滤汁的 pH 为 6 时,经加工处理室温静置 1h,其表面可形成薄薄的凝胶;而当 pH 为 7 或 8 时,不能形成凝胶状叶豆腐。

表6 不同 pH 对豆腐柴干叶豆腐品质的影响

Table 6 Effect of pH on the quality of *Premna Microphylla* Turcz Tofu

pH	渗出液 (mL/100g)	胶凝强度 (g)	硬度 (g)	豆腐形态
4	6.5 ± 0.3	135.822 ± 0.035	147.408 ± 0.112	无气泡,透明,光滑固体
5	7.8 ± 0.1	126.747 ± 0.009	133.402 ± 0.059	无气泡,透明,光滑固体
6	24.3 ± 0.4	103.691 ± 0.013	114.097 ± 0.124	无气泡,透明,光滑固体
7	-	溶胶	-	-
8	-	溶胶	-	-

表7 豆腐柴叶豆腐的加工工艺参数的响应面优化分析实验设计及结果

Table 7 Experimental design for response surface analysis and corresponding experimental data of the processing parameters of the *Premna Microphylla* Turcz Tofu

实验号	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Y ₁ 硬度 (g)	Y ₂ 凝胶强度 (g)	Y ₃ 渗出液 (mL)	Y ₄ 出品率 (%)
1	1	1	0	0	116.32	85.464	29.5	1222.8
2	1	0	0	-1	113.480	81.020	28.7	1228.1
3	0	0	0	0	113.008	85.632	28.2	1224.0
4	-1	-1	0	0	108.104	83.988	28.0	1216.5
5	0	0	1	1	113.271	81.106	27.5	1243.0
6	0	1	1	0	116.110	83.051	30.8	1245.2
7	-1	0	0	1	106.947	82.402	27.0	1220.3
8	1	0	1	0	116.477	81.489	28.7	1234.3
9	1	-1	0	0	113.495	82.246	25.5	1221.6
10	0	0	-1	1	109.418	86.471	28.0	1236.2
11	0	1	0	-1	111.957	83.026	30.2	1226.7
12	-1	1	0	0	110.928	85.222	29.7	1217.4
13	0	0	-1	-1	110.524	85.810	28.1	1226.8
14	0	0	1	-1	112.129	80.001	30.5	1230.2
15	-1	0	0	-1	106.947	81.396	28.7	1225.7
16	1	0	0	1	113.480	82.955	25.0	1223.3
17	0	0	0	0	112.487	85.830	28.5	1262.0
18	-1	0	1	0	111.085	82.748	30.7	1226.6
19	0	-1	1	0	113.286	81.545	28.5	1219.7
20	0	0	0	0	112.832	85.929	29.2	1260.0
21	0	0	0	0	113.225	85.870	28.5	1266.0
22	-1	0	-1	0	107.230	87.680	27.0	1219.5
23	0	0	0	0	112.004	85.346	27.8	1263.0
24	0	-1	0	1	110.289	82.226	23.7	1227.0
25	0	1	0	1	113.151	85.721	27.5	1226.4
26	0	-1	0	-1	109.148	81.596	28.0	1230.1
27	1	0	-1	0	112.737	86.098	26.5	1217.5
28	0	-1	-1	0	109.546	86.919	26.2	1222.2
29	0	1	-1	0	112.256	89.189	28.0	1220.8

2.2 豆腐柴干叶豆腐的加工工艺参数的响应面优化分析实验

2.2.1 回归模型的建立 干燥温度 (X₁)、CaCO₃ 浓度 (X₂)、料液比 (X₃)、pH (X₄) 为自变量,叶豆腐的硬度 (Y₁)、凝胶强度 (Y₂)、渗出液 (Y₃) 以及出品率 (Y₄) 为因变量,建立回归模型。回归方程分别为:

$$Y_1 = 112.72 + 2.80X_1 + 1.40X_2 + 1.72X_3 + 0.29X_4 + 2.500E - 004X_1X_2 - 0.029X_1X_3 + 0.29X_1X_4 + 0.029X_2X_3 + 0.013X_2X_4 + 0.56X_3X_4 - 0.90X_1^2 + 0.17X_2^2 + 0.10X_3^2 - 1.71X_4^2 \quad \text{式(1)}$$

$$Y_2 = 85.56 - 0.35X_1 + 1.10X_2 - 2.96X_3 + 0.67X_4 + 0.50X_1X_2 + 0.081X_1X_3 + 0.23X_1X_4 - 0.19X_2X_3 + 0.52X_2X_4 + 0.11X_3X_4 - 1.17X_1^2 - 0.23X_2^2 - 8.967E - 003X_3^2 - 2.29X_4^2 \quad \text{式(2)}$$

$$Y_3 = 28.44 - 0.600X_1 + 1.32X_2 + 1.40X_3 - 1.60X_4 + 0.58X_1X_2 - 0.37X_1X_3 - 0.50X_1X_4 + 0.12X_2X_3 + 0.40X_2X_4 + 0.20X_3X_4 - 0.18X_2^1 - 0.11X_2^2 + 0.017X_3^2 - 0.93X_4^2 \quad \text{式(3)}$$

$$Y_4 = 1263.00 + 1.80X_1 + 1.85X_2 + 4.67X_3 + 0.72X_4 + 0.075X_1X_2 + 2.43X_1X_3 + 0.15X_1X_4 + 6.73X_2X_3 +$$

表8 豆腐柴叶豆腐硬度回归模型方差分析表

Table 8 Variance analysis of regression model for hardness of the *Premna Microphylla* Turcz Tofu

方差来源	均方和	自由度	均方	F 值	p 值	显著性
模型	180.74	14	12.91	56.94	<0.0001	**
X ₁	94.11	1	94.11	415.09	<0.0001	
X ₂	14.42	1	14.42	66.76	<0.0001	**
X ₃	35.52	1	35.52	156.68	<0.0001	**
X ₄	1.03	1	1.03	4.54	0.0514	
X ₁ X ₂	2.500E-007	1	2.500E-007	1.103E-006	0.9992	
X ₁ X ₃	3.306E-003	1	3.306E-003	0.015	0.9056	
X ₁ X ₄	0.33	1	0.33	1.44	0.2504	
X ₂ X ₃	0.033	1	0.033	2.64	0.1481	
X ₂ X ₄	0.12	1	0.12	0.46	0.5208	
X ₃ X ₄	1.26	1	1.26	5.57	0.0333	
X ₁ ²	5.22	1	5.22	23.04	0.0003	
X ₂ ²	0.18	1	0.18	0.78	0.3916	
X ₃ ²	0.065	1	0.065	0.29	0.6006	
X ₄ ²	18.94	1	18.94	83.52	<0.0001	
残差	3.17	14	0.23			
失拟项	2.31	10	0.23	1.07	0.5163	不显著
纯误差	0.86	4	0.22			
总和	183.92	28				
相关系数(R ²)		0.9827				
调整复相关系数(R ² _{adj})		0.9655				
C.V.(%)		0.43				

注: ** 表示差异极显著, $p < 0.01$; * 表示差异显著, $p < 0.05$, 表 9~表 11 同。

$$0.70X_2X_4 + 0.85X_3X_4 - 23.46X_1^2 - 20.61X_2^2 - 14.91X_3^2 - 14.69X_4^2 \quad \text{式(4)}$$

2.2.2 回归模型的方差分析

2.2.2.1 硬度回归模型方差分析及响应面 由表 8 可知,模型极显著($p < 0.0001$),因变量与所考察自变量之间的线性关系显著($R^2 = 0.9827$),模型调整复相关系数 $R^2_{adj} = 0.9655$,说明该模型能解释 96.55% 响应值的变化,拟合程度极好;失拟项不显著($p > 0.05$),说明未知因素对实验结果干扰小,残差均由随机误差引起;离散系数(C.V.)表示实验的精确度,其值越小,实验结果的可靠性越高,本实验的 $C.V. = 0.43\%$,在可接受范围内,说明实验结果可靠,实验所得二次回归方程能很好地对响应值进行预测。

由回归方程系数显著性检验可知,模型(1)的一次项 X_1 、 X_2 和 X_3 ($p < 0.01$)影响极显著, X_4 ($p > 0.05$)影响不显著;二次项 X_1^2 和 X_4^2 ($p < 0.01$)影响极显著, X_2^2 和 X_3^2 ($p > 0.05$)影响不显著;交互项 X_3X_4 ($p < 0.05$)影响显著,其它交互项影响均不显著。参照王钦德等人^[25]的方法,对一次项回归系数的绝对值大小进行比较可知,对豆腐柴干叶豆腐硬度影响作用的大小顺序为: $X_1 > X_3 > X_2 > X_4$,即热风干燥温度 > 料液比 > $CaCO_3$ 浓度 > pH。

2.2.2.2 凝胶强度回归模型方差分析及响应面 由表 8 可知,模型极显著($p < 0.0001$),因变量与自变量之间的线性关系显著($R^2 = 0.9803$),模型调整复相关系数 $R^2_{adj} = 0.9606$,拟合程度极好,失拟项不显著($p >$

0.05),离散系数 $C.V. = 0.55\%$,实验所得二次回归方程能很好地对响应值进行预测。分析方法同 2.2.2.1 对凝胶强度影响作用的大小顺序为: $X_3 > X_2 > X_4 >$

X_1 ,即料液比 > $CaCO_3$ 浓度 > pH > 热风干燥温度。

2.2.2.3 渗出液回归模型方差分析及响应面 由表 10 可知,模型极显著($p < 0.0001$),因变量与自变量之间的线性关系显著($R^2 = 0.9765$),模型调整复相关系数 $R^2_{adj} = 0.9530$,拟合程度极好,失拟项不显著($p > 0.05$),离散系数 $C.V. = 0.40\%$,说明实验结果可靠,实验所得二次回归方程能很好地对响应值进行预测。分析同 2.2.2.1 可知对渗出液影响作用的大小顺序为: $X_4 > X_3 > X_2 > X_1$,即 pH > 料液比 > $CaCO_3$ 浓度 > 热风干燥温度。

2.2.2.4 出品率回归模型方差分析及响应面 由表 11 可知,模型极显著($p < 0.0001$),因变量与自变量之间的线性关系显著($R^2 = 0.9550$),模型调整复相关系数 $R^2_{adj} = 0.9100$,拟合程度极好,失拟项不显著($p > 0.05$),离散系数 $C.V. = 0.38\%$,说明实验结果可靠,实验所得二次回归方程能很好地对响应值进行预测。分析同 2.2.2.1 可知对出品率影响作用的大小顺序为: $X_3 > X_2 > X_1 > X_4$,即料液比 > $CaCO_3$ 浓度 > 热风干燥温度 > pH。

综上所述,不同加工条件对硬度、凝胶强度、渗出液和出品率的影响,根据单因素实验得到的最佳影响范围,综合考虑并采用 Design Expert 7.0 软件,通过 Box-Behnken 中心组合原理设计得到硬度、凝胶强度、

表9 豆腐柴叶豆腐凝胶强度回归模型方差分析表

Table 9 Variance analysis of regression model for gel strength of the *Premna Microphylla* Turcz Tofu

方差来源	均方和	自由度	均方	F 值	p 值	显著性
模型	150.42	9	10.74	49.57	<0.0001	**
X ₁	1.44	1	1.44	6.69	0.0215	
X ₂	14.42	1	14.42	66.76	<0.0001	**
X ₃	86.55	1	86.55	400.78	<0.0001	**
X ₄	5.38	1	5.38	24.89	0.0002	**
X ₁ X ₂	0.98	1	0.98	4.56	0.0509	
X ₁ X ₃	0.026	1	0.026	0.12	0.7334	
X ₁ X ₄	0.22	1	0.22	1.00	0.3345	
X ₂ X ₃	0.15	1	0.15	0.68	0.4248	
X ₂ X ₄	1.07	1	1.07	4.94	0.0433	*
X ₃ X ₄	0.049	1	0.049	0.23	0.6402	
X ₁ ²	8.82	1	8.82	40.83	<0.0001	**
X ₂ ²	0.34	1	0.34	1.59	0.2275	
X ₃ ²	5.215E-004	1	5.215E-004	2.415E-003	0.9615	
X ₄ ²	33.96	1	33.96	157.26	<0.0001	**
残差	3.02	14	0.22			
失拟项	2.52	10	0.25	2.02	0.2602	不显著
纯误差	0.50	4	4	0.13		
总和	153.44	28				
相关系数(R ²)		0.9803				
调整复相关系数(R _{Adj} ²)		0.9606				
C.V.(%)		0.55				

表10 豆腐柴叶豆腐渗出液回归模型方差分析表

Table 10 Variance analysis of regression model for exudates of the *Premna Microphylla* Turcz Tofu

方差来源	均方和	自由度	均方	F 值	p 值	显著性
模型	89.03	14	6.36	41.53	<0.0001	**
X ₁	4.32	1	4.32	28.21	0.0001	**
X ₂	20.80	1	20.80	135.86	<0.0001	**
X ₃	23.52	1	23.52	153.61	<0.0001	**
X ₄	30.72	1	30.72	200.63	<0.0001	**
X ₁ X ₂	1.32	1	1.32	8.64	0.0108	*
X ₁ X ₃	0.56	1	0.56	3.67	0.0759	
X ₁ X ₄	1.00	1	1.00	6.53	0.0229	*
X ₂ X ₃	0.063	1	0.063	0.41	0.5322	
X ₂ X ₄	0.64	1	0.64	4.18	0.0602	
X ₃ X ₄	0.16	1	0.16	1.04	0.3240	
X ₁ ²	0.22	1	0.22	1.41	0.2547	
X ₂ ²	0.075	1	0.075	0.49	0.4956	
X ₃ ²	1.986E-003	1	1.986E-003	0.013	0.9109	
X ₄ ²	5.64	1	5.64	36.84	<0.0001	**
残差	2.14	14	0.15			
失拟项	1.09	10	0.11	0.42	0.8817	不显著
纯误差	1.05	4	0.26			
总和	91.17	28				
相关系数(R ²)		0.9756				
调整复相关系数(R _{Adj} ²)		0.9530				
C.V.%		0.40				

表 11 豆腐柴叶豆腐出品率回归模型方差分析表

Table 11 Variance analysis of regression model for yield of the *Premna Microphylla* Turcz Tofu

方差来源	均方和	自由度	均方	F 值	p 值	显著性
模型	6623.76	14	473.13	21.22	<0.0001	**
X ₁	38.88	1	38.88	1.74	0.2079	
X ₂	41.07	1	41.07	1.84	0.1962	
X ₃	261.33	1	261.33	11.72	0.0041	**
X ₄	6.61	1	6.61	0.28	0.6073	
X ₁ X ₂	0.023	1	0.023	1.009E-003	0.9751	
X ₁ X ₃	23.52	1	23.52	1.05	0.3218	
X ₁ X ₄	0.090	1	0.090	4.036E-003	0.9502	
X ₂ X ₃	180.90	1	180.90	8.11	0.0129	
X ₂ X ₄	1.96	1	1.96	0.088	0.7712	
X ₃ X ₄	2.89	1	2.89	0.13	0.7242	
X ₁ ²	3570.74	1	3570.74	160.11	<0.0001	**
X ₂ ²	2755.95	1	2755.95	123.58	<0.0001	
X ₃ ²	1442.48	1	1442.48	64.68	<0.0001	
X ₄ ²	1399.28	1	1399.28	62.74	<0.0001	**
残差	312.22	14	22.30			
失拟项	292.22	10	29.22	5.84	0.0518	不显著
纯误差	20.00	4	5.00			
总和	6935.97	28				
相关系数(R ²)		0.9550				
调整复相关系数(R _{Adj} ²)		0.9100				
C.V.(%)		0.38				

渗出液、出品率与干燥温度、CaCO₃ 浓度、料液比、pH 关系的回归模型进行工艺参数的优化组合,得出的最佳工艺条件为:热风干燥温度为 50.24℃, CaCO₃ 浓度为 0.08%, 料液比为 0.042 (即 1:25), pH4.02, 此时硬度为 115.197g, 凝胶强度为 89.728g, 渗出液为 28.497mL/100g, 出品率为 1263.54%。

2.2.3 验证实验 为检验实验结果与真实情况的一致性,对上述优化条件进行验证实验并对验证实验所得产品进行感官评定。同时考虑到实际操作的便利,将最佳工艺条件修正为:热风干燥温度为 50℃, CaCO₃ 浓度为 0.08%, 料液比为 0.04(1:25), pH 为 4.0, 在此条件下进行 3 次平行实验,得到实际硬度为 115.121g, 凝胶强度为 89.502g, 渗出液为 28.5mL/100g, 出品率为 1263.2%, 与响应面优化所得结果相比,其相对误差在 1% 之内,且感官评价各项指标的评分总和为 40(满分 45)。所以从响应面优化所得结果的相对误差和感官评分上看,经响应面法优化所得的最佳工艺参数不仅准确可靠,且具有实际应用价值。

3 结论

以上研究是在对民间豆腐柴叶豆腐制作的基础上,又系统地研究了关键因素干燥温度、料液比、pH、CaCO₃ 浓度对豆腐柴叶豆腐形成的品质影响规律,通过单因素实验确定了不同因素的影响作用,进一步采用响应面优化,分析了各种单因素间的综合作用。最终得出豆腐柴干叶豆腐的最佳制作工艺参数

为:热风干燥温度 50℃、料液比为 0.04(1:25)、pH 为 4.0、CaCO₃ 浓度为 0.08%, 在此条件下得到的豆腐柴干叶豆腐的硬度为 115.121g, 凝胶强度为 89.502g, 渗出液为 28.5mL/100g, 出品率为 1263.2%, 且产品感官和质地良好。

参考文献

[1] 李梅青,王媛莉,董明,等.豆腐柴的研究与应用综述[J].食品工业科技,2011,32(3):462-464.
 [2] 陈燕,姚宗凡,李中岳,等.经济植物开发指南[M].合肥:中国科学技术出版社,1990:291-294.
 [3] 楚文靖,王世强,谢可为.豆腐柴的开发及利用现状[J].食品研究与开发,2011,32(7):175-177.
 [4] 吴峰华,杨虎清,何志平.豆腐柴叶蛋白提取工艺研究[J].食品工业科技,2010,31(2):240-244.
 [5] 罗曼,杨永年.豆腐柴叶蛋白营养及安全性研究[J].应用与环境生物学报,1999,5(3):283-287.
 [6] 张驰,吴永尧,彭振坤,等.豆腐柴中有效成分复合分离提取研究[J].食品科学,2005,26(8):234-238.
 [7] 高贵珍,曹穗根,蔡红,等.野生豆腐柴叶营养成分分析及评价[J].植物资源与环境学报,2003,12(1):60-61.
 [8] 刘世彪,冯运明,郭荣亮,等.豆腐柴叶果胶含量的季节性变化及胶冻加工[J].食品工业科技,2009,30(4):90-92.
 [9] 罗文谦,王琳,鲁绪会,等.野生豆腐柴总黄酮及微量元素的测定[J].安徽农业科学,2009,37(14):6429-6430.

(下转第 251 页)

表4 方差分析
Table 4 Analysis of variance

方差来源	平方和 SS	自由度 f	均方 MS	F 值	p
HPMC 添加量	315.932	3	105.311	47.176 **	0.005
米糠膳食纤维添加量	104.352	3	34.784	15.582 *	0.025
干酵母添加量	74.047	3	24.682	11.057 *	0.040
白糖添加量	10.032	3	3.344	1.498	0.374
误差	6.697	3	2.232		

注:表中“*”和“**”分别表示不同水平间比较具有显著性差异($p < 0.05$)和极显著差异($p < 0.01$)。

表5 各因素水平的多重比较
Table 5 Multiple comparison of various factors and levels

HPMC 添加量 (%)			米糠膳食纤维添加量 (%)			干酵母添加量 (%)			白糖添加量 (%)		
水平	平均值	差异显著性	水平	平均值	差异显著性	水平	平均值	差异显著性	水平	平均值	差异显著性
1	75.5	c	1	77.9	b	1	77.9	b	1	81.6	a
2	77.9	c	2	79.5	b	2	79.9	b	2	79.5	a
3	82.47	b	3	80.8	b	3	81.2	a	3	80.8	a
4	87.1	a	4	84.8	a	4	83.9	a	4	81.0	a

注:不同字母表示采用 LSD 法多重比较具有显著性差异($p < 0.05$)。

不同添加量对米粉面包品质有不同程度的影响。强化米糠膳食纤维的米粉面包基本能达到小麦面包的品质,并能有效补充人体所需的膳食纤维,满足部分南方人对米粉的喜好,具有较好的发展前景。在单因素研究的基础上,通过正交实验获得了米粉面包的最佳配方,即 HPMC 添加量为 2.5%、米糠膳食纤维添加量为 6%、活性干酵母添加量可选择 2.1% 或 2.5%。

参考文献

[1] 范周,陈正行.米粉面包的开发研究[J].食品工业科技,2006,27(3):129-133.
 [2] 刘玮,孙爱景,张劲松,等.米粉面包生产工艺的研究[J].食品科学,2004,25:108-111.
 [3] 徐树来,杨春瑜,贾春铃,等.添加挤压米糠粉对面粉流变学特性影响的研究[J].中国粮油学报,2007,22(4):9-13.
 [4] 徐树来.米糠面包的物性分析及其感官质量的模糊综合评判[J].中国粮油学报,2009,24(3):21-24.
 [5] 范周,陈正行.米粉面包的开发研究[J].食品工业科技,2006,27(3):129-133.
 [6] 楚炎沛,刘伟森.面包品质评价体系的研究进展[J].粮油食品科技,2010,18(2):7-9.
 [7] 中华人民共和国国家标准[S].GB20981-2007 小麦面包评分标准.北京:中国标准出版社,2007.
 [8] Sudha Sairam · A G, Gopala Krishna · asna Urooj. Physico-chemical characteristics of defatted rice bran and its utilization in a bakery product [J]. J Food Sci Technol, 2011, 48(4):478-483.
 [9] 张晨,杨文杰.豆渣水溶性膳食纤维的最新应用[J].中国食品添加剂,2005(3):78-82.
 [10] Azizah Abdul-Hamid, Yu Siew Luan. Functional properties of dietary fiber prepared from defatted rice bran [J]. Food Chemistry, 2000(68):15-19.
 [11] 李钦,沈月毛,李萍.思茅豆腐柴中的黄酮类化学成分研究[J].中国药学杂志,2008,43(6):417-419.
 [12] 高贵珍,曹稳根,刘晓阳,等.豆腐柴根提取物对小鼠非特异性免疫功能的影响[J].生物学杂志,2003,20(1):25-26.
 [13] 方雪梅,曹稳根.豆腐柴鲜叶β-胡萝卜素及维生素C的含量测定[J].淮北煤炭师范学院学报,2004,25(4):66-68.
 [14] 唐涌连,彭志刚.黄酮类化合物的抗血液肿瘤作用[J].中国实用医药,2010,5(17):197-199.
 [15] Seller S. Metabolic effects of dietary pectins related to human health [J]. Food Technology, 1987, 41(2):91-99.
 [16] 霍艳荣,高前欣.豆腐柴鲜叶凝胶形成因素的研究[J].食品科技,2011,36(7):91-94.
 [17] 王存文,徐汶,王为国,等.提取豆腐柴叶果胶的动力学研究[J].林产化学与工业,2008,28(5):16-20.
 [18] 芦鑫,程永强,李里特.高温冷冻豆腐的研究[J].食品工业科技,2009,30(11):128-131.
 [19] 温靖,肖更生,陈卫东,等.甜玉米营养果冻加工工艺研

究[J].食品工业科技,2009,30(7):260-261.
 [20] Fu J T, Rao M A. The influence of sucrose and sorbitol on gel-sol transition of low-methoxyl pectin + Ca²⁺ gels [J]. Food Hydro colloids, 1999, 13(5):371-380.
 [21] Holme D J, Peck H. Analytical Biochemistry [M]. London: Longman Group Limited. 1983:391-392.
 [22] Sharon A B, Smit C J B. The grading of low-ester pectin for use in dessert gels [J]. Journal of Food Science, 1972, 37(5):726-729.
 [23] 王森,吴朋.转谷氨酰胺酶对豆腐凝胶性能的影响[J].粮油食品科技,2004,12(4):17-19.
 [24] 陈菲,王道营,诸永志,等.不同加热时间对鸭血豆腐品质的影响[J].西南农业学报,2011,24(4):1515-1518.
 [25] 朱叶,刘海杰,李里特,等.酸性电解水对成品豆腐的杀菌效果及品质影响研究[J].食品科学,2007,28(7):37-40.
 [26] 王钦德,杨坚.食品实验设计与统计分析[M].北京:中国农业大学出版社,2002:402-420.

(上接第 247 页)