



响应面法优化柠檬豆腐生产工艺

谢秀玲, 金宏杏, 杞文静, 邱柱红, 苏海香, 朱建凯

(昆明理工大学津桥学院, 云南 昆明 650000)

摘要:为促进新型天然凝固剂的应用,本研究在豆腐加工中利用柠檬汁作为新型天然酸类凝固剂,采用响应面法对生产工艺进行优化。以质构特性和感官评分为评价指标,对料水比、柠檬汁添加量、点浆温度及养花时间进行单因素试验,在此基础上进行 Box-Behnken 响应曲面设计,得到最佳加工条件。结果表明:在料水比 1:10、柠檬汁添加量 50%、点浆温度 74 °C、养花时间 22 min 的条件下,制得的豆腐色泽光亮,有浓郁的豆香味,口感细腻,断面光滑,内部空隙均匀一致。研究结果为新型天然有机酸类凝固剂在豆腐加工上的应用提供一定理论依据。

关键词:柠檬豆腐;质构特性;感官评分;响应面法

Optimization of Lemon Tofu by Response Surface Methodology

XIE Xiuling, JIN Hongxing, QI Wenjing, QIU Zhuhong, SU Haixiang, ZHU Jiankai

(Oxbridge College, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650000, China)

Abstract: To promote the application of new natural coagulants, in the process of tofu processing, lemon juice was used as a new type of natural acid coagulant, and the response surface method was used to optimize the production process. With texture characteristics and sensory scores as evaluation indexes, single-factor tests were conducted on the ratio of material to water, the amount of lemon juice added, the temperature of coagulant added and solidification time. On this basis, Box-Behnken response surface was designed to obtain the optimal processing conditions. The results showed that under the conditions of material/water ratio 1:10, lemon juice volume 50%, coagulant added temperature 74 °C and solidification time 22 min, the tofu was bright in color, with rich bean flavor, delicate taste and smooth section. Internal voids are uniform. The results provide a theoretical basis for the development of new natural organic acid coagulants application in tofu processing.

Keywords: lemon tofu; texture properties; sensory scores; response surface methodology

豆腐作为中国饮食文化的传统食物,最早由淮南王刘安发明,距今已有两千多年的历史。古代称为“福黎”^[1],是经浸泡、磨浆、加热、点浆后,在疏水相互作用、氢键、静电相互作用下形成的胶凝产物^[2]。凝固剂在豆腐加工中必不可少,常用凝固剂有盐类、酶类以及酸类凝固剂,因凝固剂不同,制作的豆腐凝胶特性及消化特性有明显差别^[3-4]。由于对豆腐品质、口感、产量等方面的影响,不同种类的凝固剂被分别选用,满足人们的多种需求。如石膏凝固剂是最早用来制作豆腐的盐类凝固剂,石膏豆腐深受消费者欢迎,目前已发展成工业化标准单元操作的生产模式^[5];酶类凝固剂制得的豆腐无酸涩味、硬度低、口感好,适合老年人食用^[6];酸类凝固剂制作的豆腐更有利于消化吸收^[4],其致敏性也有降低的趋势^[7]。

在大健康背景下,人们更关注零添加的天然绿色食品。因此就有不少学者开始研究新型天然有机酸类凝固剂,如采用青梅汁、山楂汁、木胡瓜和酸橙的混合汁、百香果汁等含天然有机酸的汁液作为

凝固剂,制得的豆腐天然健康,既有浓郁的豆香味,营养价值也较高^[8-11]。而对于柠檬汁在豆腐加工中的应用研究较少,柠檬汁中总酸量达到 40.3 g·L⁻¹,富含柠檬酸、苹果酸、亚油酸、油酸、棕榈酸等酸性物质^[12],作为豆腐凝固剂加工豆腐是可行的。课题组经初步研究,结合感官评定和模糊数学评价法,利用柠檬汁作为天然酸性凝固剂,制得的豆腐断面光滑细腻,持水力好^[13]。

为进一步积累柠檬汁作为天然凝固剂的实践基础,本研究利用响应面分析法,结合质构测定的质构特性结果初步分析柠檬豆腐凝固机理,为柠檬汁的开发利用提供参考,旨在为天然有机酸类凝固剂的应用提供理论依据,更好地满足人们对绿色食品的追求。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

大豆:呼伦贝尔大豆;柠檬:福建众农果蔬有限公司。

电子天平,上海越平科学仪器有限公司;FDM-Z100II-40 型磨浆机,巧厨娘食品机械有限公司;HR1833 飞利浦榨汁机,深圳飞利浦投资有限公司;HH-4 数显恒温水浴箱,常州荣华仪器制造有限公司;TA-XTPlusC 质构仪,英国 Stable Micro System。

1.2 方法

1.2.1 工艺流程及要点 精选大豆→清洗→浸泡→清洗→磨浆→过滤→煮浆→冷却→点浆(加入粗柠檬汁)→养花→倒入模具→压制→成品。

挑选颗粒饱满、皮薄、表面光亮、脐色浅、无霉变、无病斑的大豆,清洗去除灰尘等杂质和漂浮的豆皮,减小泡豆的酸度。用 25 ℃ 水浸泡 12 h,使大豆细胞结构软化,蛋白质吸水溶胀,磨浆时易溶出^[14]。磨浆机粗磨、细磨 2 次,尽可能提高蛋白质的抽提率,磨好的渣应手感细腻无颗粒^[15]。在磨浆过程中需不断加水,防止摩擦产热使砂轮温度升高,致使大豆蛋白变性,影响豆腐得率。用 100 目纱布将浆、渣分离,重复过滤 2~3 次。煮浆时边加热边搅拌,搅拌频率随豆腐黏稠度调整,防止豆浆糊底。将制好的柠檬汁缓慢的滴入豆浆,并搅拌使豆浆与柠檬汁混合均匀形成豆花,在一定温度的恒温

水浴锅中静置一段时间后,将豆花倒入铺有 100 目纱布的豆腐模具中,用纱布包好盖上磨具盖子,在盖子上加 10 kg 重物压制 30 min。

粗柠檬汁制备:新鲜柠檬直接榨汁得到粗汁,测得粗汁中有机酸总酸度 39.228 g·kg⁻¹,可溶性固形物含量 8.504%。

1.2.2 单因素试验设计 分别分析料水比、柠檬汁添加量、点浆温度、养花时间各因素对柠檬豆腐质构特性的影响。以料水比(干黄豆质量:磨浆时添加水质量)、柠檬汁添加量(柠檬汁质量/干黄豆质量)、点浆温度、养花时间为单因素。设置试验因素水平为料水比 1:6、1:8、1:10、1:12、1:14、1:16;柠檬汁添加量为 35%、40%、45%、50%、55%、60%;点浆温度为 60、65、70、75、80、85 ℃;养花时间为 18、20、22、24、26、28 min。

1.2.3 响应面试验设计 在单因素试验结果的基础上,选定料水比、柠檬汁添加量、点浆温度、养花时间为自变量,以感官评分为响应值,应用 Design-Expert 11,以中心组合 Box-Behnken 试验设计方法优化试验,确定豆腐最佳制备工艺,试验因素及水平如表 1 所示。

表 1 柠檬豆腐工艺优化响应面试验因素水平
Table 1 Response surface test factors for process optimization of lemon tofu

水平 Level	因素 Factor			
	A	B	C	D
	料水比 Material/water ratio	柠檬汁添加量 Lemon juice volume/%	点浆温度 Coagulant added temperature/℃	养花时间 Solidification time/min
-1	1:8	45	70	20
0	1:10	50	75	22
1	1:12	55	80	24

1.3 检测方法

1.3.1 质构特性测定 将样品做成 2 cm×2 cm×2 cm 的正方体,使用配备 P35 型号探头的质构仪对柠檬豆腐样品的硬度、咀嚼性、弹性、凝聚性进行测定,触发力 5 g,压缩形变率 75%,测试速率 100 mm·min⁻¹^[16]。

1.3.2 感官评分 根据 GB 2712-2014《食品安全国家标准 豆制品》规定,参考江振桂等^[17]制定的感官评分标准,分别对柠檬豆腐的色泽、风味、口感、组

织状态进行评分。参照标准 GB/T 16291.1-2012《感官分析 选拔、培训与管理评价员一般导则》规定的感官标准,感官评价小组由 10 人组成,按照表 2 中标准进行感官评价。

1.4 数据分析

运用 Design-Expert 11 进行响应面分析,采用 IBM SPSS 25.0、Origin 2018 软件进行数据处理与分析,其中每组数据重复 3 次取平均值。

表 2 柠檬豆腐感官评价标准

Table 2 Sensory evaluation standard of lemon tofu

指标(分数)	评价标准	分值
Index(score)	Evaluation standard	Score
色泽(20)	色泽光亮均一,呈白色	16~20
	色泽均一,呈白色	10~15
	颜色暗淡,无光泽	1~9
风味(20)	有浓郁的豆香味,无酸涩味,无异味	16~20
	豆香味较弱,微酸,无异味	10~15
	无豆香味,有酸味或异味	1~9
口感(30)	口感柔软、细腻、弹性适中,无粗糙的渣感,不粘牙	26~30
	口感稍硬或弹性较差或略带渣感,不粘牙	10~25
	口感僵硬,弹性差,有明显的渣感,粘牙	1~9
组织状态(30)	形态完整,组织细腻,断面光滑,内部孔隙小且均匀一致	26~30
	形态较完整,断面光滑,内部孔隙较均匀	10~25
	形态不完整,断面粗糙,内部孔隙不均匀、大小不一	1~9

2 结果与分析

2.1 单因素对柠檬酸豆腐质构特性的影响

2.1.1 料水比 如表 3 所示,随着料水比的下降,硬度、咀嚼性整体呈现逐渐降低的趋势,弹性、凝聚性变化差异不显著。当料水比为 1:8~1:12 时,硬度、咀嚼性、凝聚性的变化均先上升后下降,料水比

直接影响豆浆浓度和蛋白质浓度。一方面,高的豆浆浓度使豆乳中蛋白聚集程度增强,硬度、咀嚼性增大^[18];另一方面,随着蛋白质浓度的升高,制得的豆腐破裂应力增大,硬度就越大^[19]。从质构变化趋势角度考虑,为形成较好的柠檬豆腐质构特性,料水比为 1:8~1:12。

表 3 料水比对柠檬豆腐质构特性的影响

Table 3 Effects of material to water ratio on the texture properties of lemon tofu

料水比	硬度	咀嚼性	弹性	凝聚性
Material/water ratio	Hardness/g	Mastication	Elasticity	Cohesiveness
1:6	1176.30±0.32 b	242.48±0.26 b	0.76±0.06 a	0.28±0.01 a
1:8	1155.90±0.68 c	210.81±0.35 c	0.73±0.02 ab	0.24±0.01 b
1:10	1249.15±0.48 a	265.12±0.71 a	0.72±0.04 ab	0.28±0.01 a
1:12	901.50±1.03 f	196.93±0.74 d	0.72±0.03 ab	0.27±0.02 ab
1:14	938.29±0.32 d	170.56±0.22 e	0.66±0.01 b	0.28±0.01 a
1:16	921.72±0.13 e	170.79±0.21 e	0.66±0.03 b	0.27±0.01 ab

注:平均值±标准差。同列均值不同小写字母表示存在显著性差异($P<0.05$)。下同。

Note: Average value ± standard deviation. Average values with different letters in the same column indicate there were significant differences ($P<0.05$). The same below.

2.1.2 柠檬汁添加量 如表 4 所示,随着柠檬汁添加量的增加,硬度、咀嚼性、凝聚性呈现先上升后下降的趋势,弹性整体变化不明显。柠檬汁添加量为 40% 时,硬度、咀嚼性、凝聚性达到最大,柠檬汁添加量为 60% 时,柠檬豆腐质构特性的数值均最低。酸类凝固剂机理是降低豆浆 pH,减少蛋白分子表面负

电荷,导致静电力下降,从而形成凝胶^[20]。硬度是反映凝胶抵抗外界压力的能力,Rui 等^[21]和曹凤红等^[22]在研究中也发现,随着酸类凝固剂浓度的升高,硬度先增大后减小,咀嚼性、弹性与硬度呈现一致的趋势。综合分析,柠檬汁添加量为 45%~55% 时,质构特性较好。

表 4 柠檬汁添加量对柠檬豆腐质构特性的影响

Table 4 Effects of lemon juice volume on the texture properties of lemon tofu

柠檬汁添加量 Lemon juice volume/%	硬度 Hardness/g	咀嚼性 Mastication	弹性 Elasticity	凝聚性 Cohesiveness
35	1040.33 ± 0.24 b	112.84 ± 0.04 c	0.53 ± 0.05 bc	0.22 ± 0.01 c
40	1133.63 ± 0.38 a	190.75 ± 0.88 a	0.60 ± 0.02 ab	0.26 ± 0.02 b
45	984.46 ± 0.10 c	169.44 ± 0.31 b	0.44 ± 0.07 cd	0.52 ± 0.02 a
50	515.81 ± 0.07 e	68.59 ± 0.74 e	0.66 ± 0.03 a	0.17 ± 0.03 d
55	562.51 ± 0.19 d	78.07 ± 0.66 d	0.55 ± 0.03 b	0.24 ± 0.01 bc
60	376.69 ± 0.65 f	22.66 ± 0.91 f	0.43 ± 0.04 d	0.16 ± 0.02 d

2.1.3 点浆温度

如表 5 所示,当点浆温度为 80 ℃时,硬度、咀嚼性、弹性、凝聚性均达到最大,超过 80 ℃时,各质构参数明显下降。原因可能是大豆分离蛋白的自由氨基浓度、自由巯基含量及表面疏水性增高,致使大豆分离蛋白的凝胶强度有先上升后下降的趋势^[23]。低温时,形成凝胶的主要作用力是疏水相互作用和氢键,凝胶硬度、弹性、凝聚性均较低;高温时,主要作用力是二硫键和疏水相互作用,凝胶硬度、弹性、凝聚性均较高^[24]。故点浆温度为 70 ~ 80 ℃时制作得到的柠檬豆腐质构特性均较好。

表 5 点浆温度对柠檬豆腐质构特性的影响

Table 5 Effects of coagulant added temperature on the texture properties of lemon tofu

点浆温度 Coagulant added temperature/℃	硬度 Hardness/g	咀嚼性 Mastication	弹性 Elasticity	凝聚性 Cohesiveness
60	1490.52 ± 0.31 c	301.37 ± 0.40 d	0.85 ± 0.03 a	0.26 ± 0.02 b
65	1253.44 ± 0.22 e	223.53 ± 0.27 f	0.63 ± 0.03 c	0.25 ± 0.01 b
70	1181.57 ± 0.31 f	288.69 ± 0.36 e	0.74 ± 0.03 b	0.33 ± 0.03 a
75	1565.77 ± 0.50 b	314.74 ± 0.19 c	0.74 ± 0.01 b	0.26 ± 0.03 b
80	1585.61 ± 0.32 a	475.89 ± 0.04 a	0.86 ± 0.00 a	0.34 ± 0.01 a
85	1339.04 ± 0.56 d	325.81 ± 0.09 b	0.85 ± 0.03 a	0.30 ± 0.02 ab

2.1.4 养花时间

如表 6 所示,随着养花时间的增加,硬度、咀嚼性、弹性、凝聚性呈现先上升后下降的趋势;养花时间 22 min 时,各质构特性参数均达到最大;而当养花时间超过 24 min 后,凝聚性不再有变化。可能因为随着养花时间的延长,变性蛋白分子数目逐渐增多^[25],形成的凝胶网络结构较紧密;当养花时间继续延长时,蛋白分子上的巯基发生氧化^[26],致使凝胶强度降低。因此养花时间为 20 ~ 24 min 时,制作得到的柠檬豆腐的质构特性均较好。

表 6 养花时间对柠檬豆腐质构特性的影响

Table 6 Effects of solidification time on the texture properties of lemon tofu

养花时间 Solidification time/min	硬度 Hardness/g	咀嚼性 Mastication	弹性 Elasticity	凝聚性 Cohesiveness
18	375.44 ± 0.34 e	24.72 ± 1.02 f	0.45 ± 0.03 c	0.17 ± 0.05 b
20	396.33 ± 0.38 d	58.08 ± 0.64 b	0.64 ± 0.03 ab	0.26 ± 0.05 a
22	698.53 ± 0.26 a	102.68 ± 0.28 a	0.64 ± 0.04 ab	0.29 ± 0.04 a
24	432.47 ± 0.27 c	47.98 ± 0.87 d	0.37 ± 0.04 d	0.16 ± 0.03 b
26	460.06 ± 0.44 b	54.10 ± 0.57 c	0.65 ± 0.03 a	0.16 ± 0.03 b
28	350.63 ± 0.37 f	30.26 ± 0.44 e	0.57 ± 0.03 b	0.16 ± 0.03 b

2.2 响应面优化柠檬豆腐最优加工工艺

2.2.1 响应面试验设计结果与方差分析 在单因素的基础上,根据表 1 的因素与水平,以感官评价(Y)为响应值,利用 Design-Expert 11 设计试验并进

行回归拟合,获得回归方程: $Y = 88.40 + 0.75A + 0.83B - 1.33C + 1.25D - 2.25AB - 1.25AC + 3.25AD - 1.25BC - 0.50BD - 2.00CD - 3.91A^2 - 4.28B^2 - 6.53C^2 - 5.91D^2$ (表 7)。

表 7 响应面试验设计及结果
Table 7 Response surface test design and results

单位:分

编号 No.	A	B	C	D	感官评价(Y) Sensory evaluation(Y)	编号 No.	A	B	C	D	感官评价(Y) Sensory evaluation(Y)
1	0	1	0	1	80	16	1	1	0	0	80
2	0	1	0	-1	78	17	0	-1	0	-1	75
3	0	0	0	0	88	18	-1	-1	0	0	74
4	0	0	0	0	90	19	-1	0	0	-1	83
5	0	0	0	0	88	20	1	-1	0	0	81
6	0	1	1	0	75	21	0	0	-1	-1	73
7	0	0	1	1	73	22	0	0	0	0	89
8	1	0	0	-1	76	23	0	-1	-1	0	80
9	1	0	-1	0	80	24	-1	1	0	0	82
10	1	0	1	0	78	25	0	-1	1	0	78
11	0	1	-1	0	82	26	-1	0	1	0	78
12	-1	0	0	1	77	27	0	-1	0	1	79
13	1	0	0	1	83	28	0	0	-1	1	81
14	0	0	0	0	87	29	-1	0	-1	0	75
15	0	0	1	-1	73						

如表 8 所示,该回归模型极显著($P < 0.000\ 1$),失拟项不显著($P = 0.090\ 1 > 0.05$),从方差分析得到的回归方程显示,模型的拟合度 R^2 和矫正拟合度 R^2_{Adj} 分别为 0.913 0 和 0.826 1,说明该回归模型对试验拟合良好,具有较高的可信度,可以用于柠檬豆腐感官评分的分析与推测。由表 8 可知,点浆温度(C)、料水比与柠檬汁添加量的交互作用(AB)显著($P < 0.05$),料水比与养花时间的交互作用(AD)、料水比二次项(A^2)、柠檬汁添加量二次项(B^2)、点浆温度二次项(C^2)、养花时间二次项(D^2)极显著($P < 0.01$),表明这几个因素对豆腐感官评分影响较大。 F 检验得到因素贡献率为: $C > D > B > A$,即点浆温度 > 养花时间 > 柠檬汁添加量 > 料水比,与前期利用模糊数学结合评价法研究结果基本一致^[11]。

2.2.2 响应面相互作用分析 响应曲面和等高线

图能直观反映交互作用对响应值的影响强度,曲面越陡,等高线越密集,则影响越显著,等高线越接近椭圆,两个因素的交互作用越强^[27]。图 1a 中,等高线为椭圆形,说明料水比与柠檬汁添加量的交互作用对柠檬豆腐感官评分显著;图 1b 中,随着料水比和养花时间的增加,感官评分先增大后减小,响应曲面陡峭,说明料水比与养花时间的交互作用显著,与方差分析结果一致。

2.2.3 最佳工艺验证试验 利用响应面优化得到的最佳工艺条件:料水比 1:10.351 4、柠檬汁添加量 50.316 9%、点浆温度 74.242 3 ℃、养花时间 22.353 5 min。考虑实际情况,最终条件为料水比 1:10、柠檬汁添加量 50%、点浆温度 74 ℃、养花时间 22 min。在此条件下制得的柠檬豆腐感官评分为 88 分,与模型预测值 88.704 2 相比,偏差为 0.8%,说明此响应面优化的模型参数可靠,具有实用价值。

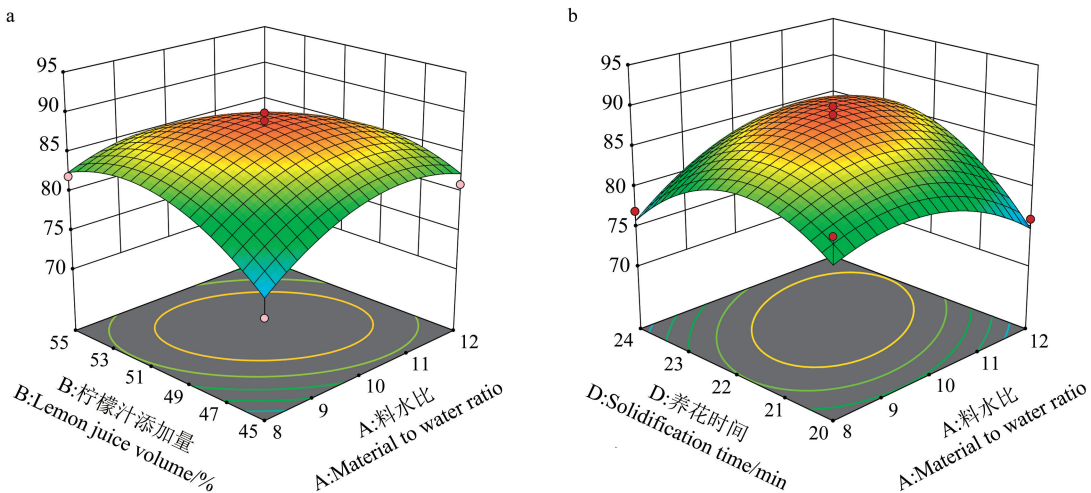
表 8 二次回归方程模型方差分析结果

Table 8 Variance analysis results of quadratic regression equation model

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值
Source of variance	Degree of freedom	Sum of squares	Mean square	F value	P value
模型 Model	14	625.83	44.70	10.50	< 0.0001 **
A	1	6.75	6.75	1.59	0.2286
B	1	8.33	8.33	1.96	0.1836
C	1	21.33	21.33	5.01	0.0420 *
D	1	18.75	18.75	4.40	0.0545
AB	1	20.25	20.25	4.76	0.0468 *
AC	1	6.25	6.25	1.47	0.2458
AD	1	42.25	42.25	9.92	0.0071 **
BC	1	6.25	6.25	1.47	0.2458
BD	1	1.00	1.00	0.23	0.6355
CD	1	16.00	16.00	3.76	0.0730
A ²	1	99.08	99.08	23.27	0.0003 **
B ²	1	119.01	119.01	27.95	0.0001 **
C ²	1	276.87	276.87	65.02	< 0.0001 **
D ²	1	226.43	226.43	53.17	< 0.0001 **
残差 Residual error	14	59.62	4.26		
失拟 Misfit	10	54.42	5.44	4.19	0.0901
纯误差 Pure error	4	5.20	1.30		
总误差 Total error	28	685.45			

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

Note: * mean the difference is significant ($P < 0.05$)；** mean the difference is extremely significant ($P < 0.01$) .



注：a. 料水比与柠檬汁添加量对感官评分的影响；b. 料水比与养花时间对感官评分的影响。

Note: a. Effects of feed-water ratio and lemon juice content on sensory score; b. Effects of feed-water ratio and solidification time on sensory score.

图 1 因素间交互作用对柠檬豆腐感官评分的影响

Fig. 1 Effects of interaction of two factors on the sensory evaluation of lemon tofu

3 讨论

本研究通过对柠檬豆腐加工配方的优化,以质构特性和感官评分为指标,分析探讨天然有机酸豆腐凝胶机制。由响应面分析可知,各因素对柠檬豆腐感官品质影响的顺序为:点浆温度、养花时间、柠檬汁添加量、料水比。

研究发现,随着点浆温度的升高,柠檬豆腐的凝胶强度有先上升后下降的趋势,金杨等^[24]在探究凝固温度对豆腐凝胶分子间作用力影响时也发现,温度不同,凝胶分子间各作用力比例不同,随着温度的升高,氢键和离子键的比例下降,二硫键和疏水相互作用比例升高,使得凝胶结构减弱。

养花是大豆蛋白相互结合形成三维网状结构的过程,本研究发现养花时间对豆腐凝胶的质构特性影响较大,当养花时间 22 min 时,硬度、咀嚼性、弹性、凝聚性均达到最大,与赵雷等^[5]的研究结果相近,在一定养花时间内,形成凝胶网络的作用力较强,此时硬度、弹性、咀嚼性较好;随着养花时间的延长,由于蛋白分子上巯基的氧化^[26],使得凝胶内部粗糙,豆腐品质则降低。

柠檬汁富含有机酸,有研究表明,有机酸类物质释放水合氢离子,能够中和豆浆中蛋白质表面负电荷,蛋白质疏水基团相互聚集沉淀形成豆腐凝胶^[28]。本研究中,随着柠檬汁添加量的增加,豆腐质构特性呈现先增大后减小的趋势。Jacob 等^[29]研究也发现当酸类凝固剂添加一定量时,所有的蛋白质都参与到凝胶网络,此时凝胶强度达到最大;随着 pH 值的继续下降,凝胶中分子间作用力开始减小,凝胶强度减弱^[30]。

料水比直接影响到磨浆后豆浆中蛋白质的浓度,本研究结果表明随着料水比的增大,豆腐的硬度、咀嚼性整体呈现降低的趋势,弹性和凝聚性变化则较小,与李娟娟^[31]的结论一致,随着料液比的增加,凝胶强度逐渐降低。Wang 等^[32]也发现高浓度大豆分离蛋白液在酸凝胶过程中凝固时间短,凝胶强度大,因为蛋白浓度越高,暴露出的疏水基团越多,相互聚集程度越高。因此,后续研究将从微观结构深入探讨柠檬豆腐的凝胶机制。

4 结论

根据单因素和响应面优化的试验结果,以豆腐的质构特性和感官评分为指标,得出在料水比1:10、柠檬汁添加量 50%、点浆温度 74 ℃、养花时间

22 min 的条件下,制得的豆腐色泽光亮,有浓郁的豆香味,口感细腻,断面光滑,内部空隙均匀一致。研究结果可为新型天然有机酸类凝固剂的应用提供理论依据。

参考文献

[1] 罗清铃. 彩色豆腐加工工艺及品质研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2020. (LUO Q L. Study on processing technology and quality of colored tofu[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2020.)

[2] KHODER R M, YIN T, LIU R, et al. Effects of nano fish bone on gelling properties of tofu gel coagulated by citric acid[J]. Food Chemistry, 2020, 332: 127401.

[3] 张志衡. 不同凝固剂对豆乳凝固过程及豆腐凝胶特性影响的研究[D]. 太原: 山西农业大学, 2022. (ZHANG Z H. Study on the influence of different coagulants on the solidification process of soybean milk and the gel characteristics of tofu[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2022.)

[4] 刘明, 顾萱, 唐婷, 等. 不同类型的凝固剂对豆腐中蛋白质消化特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(5): 206-212. (LIU M, GU X, TANG T, et al. Effects of different coagulants on protein digestibility of tofu[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(5): 206-212.)

[5] 赵雷, 朱杰, 苏恩谊, 等. 南豆腐加工过程中品质及蛋白质结构的变化[J]. 食品科学, 2019, 40(1): 62-69. (ZHAO L, ZHU J, SU E Y, et al. Effect of processing conditions on quality and protein secondary structure in southern tofu [J]. Food Science, 2019, 40(1): 62-69.)

[6] 刘宁, 高艺笑, 孙钰姬, 等. 豆腐凝固剂的研究进展[J]. 中国调味品, 2021, 46(3): 189-194. (LIU N, GAO Y X, SUN Y J, et al. Research progress of tofu coagulants [J]. China Condiment, 2021, 46(3): 189-194.)

[7] 邢广良. 乳酸菌: MTG 酶共诱导条件下双蛋白乳的凝胶行为及其蛋白体外消化率和抗原性的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2019. (XING G L. Study on gel behavior of double protein milk and its protein digestibility and antigenicity in vitro under the co-induction of *Lactobacillus*-MTG enzyme[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.)

[8] 王玉娇, 陈晓红, 李伟, 等. 青梅汁酸凝豆腐质构优化及显微结构分析[J]. 食品科学, 2014, 35(6): 40-43. (WANG Y J, CHEN X H, LI W, et al. Textural properties and microstructure of tofu coagulated by plum juice[J]. Food Science, 2014, 35(6): 40-43.)

[9] 李健, 王璐, 刘宁, 等. 山楂酸豆腐凝固剂的应用工艺研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(24): 358-360. (LI J, WANG L, LIU N, et al. Study on applied technology about tofu coagulant of the acidic components of hawthorn[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(24): 358-360.)

[10] SITANGGANG A B, ALEXANDER R, BUDIJANTO S. The utilization of bilimbi (*Averrhoa bilimbi*) and lime (*Citrus*

aurantifolia) juices as natural acid coagulants for tofu production [J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(12): 4660-4670.

[11] 农双宁, 谢文佩, 郭茵, 等. 响应面优化百香果豆腐的加工工艺及品质研究[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(11): 164-170. (NONG S N, XIE W P, GUO Y, et al. Optimization of processing technology and quality of passion fruit tofu by response surface methodology[J]. Food Research and Development, 2022, 43(11): 164-170.)

[12] MOUFIDA S, MARZOUK B. Biochemical characterization of blood orange, sweet orange, lemon, bergamot and bitter orange [J]. Phytochemistry, 2003, 62(8): 1283-1289.

[13] 谢秀玲, 吴静静, 童慕贤, 等. 基于模糊综合评价的柠檬豆腐工艺研究[J]. 大豆科学, 2019, 38(3): 443-448. (XIE X L, WU J J, TONG M X, et al. Study on the production process and quality of lemon tofu based on fuzzy synthetical evaluation[J]. Soybean Science, 2019, 38(3): 443-448.)

[14] 郑凤荣, 于美恒. 黑豆大豆复合豆腐工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(17): 83-85, 122. (ZHENG F R, YU M H. Study on composite technology of black soybean and soybean curd [J]. Food Research and Development, 2015, 36(17): 83-85, 122.)

[15] 冷进松, 郝晓玮. 乳清粉营养豆腐加工工艺研究[J]. 大豆科学, 2015, 34(3): 485-492. (LENG J S, HAO X W. Processing technological study on health food of whey powder tofu [J]. Soybean Science, 2015, 34(3): 485-492.)

[16] 刘昱彤. 全豆腐加工工艺及质构特性的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013. (LIU Y T. Study on processing technology and textural characteristics of tofu prepared from whole soybeans[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.)

[17] 江振桂, 王秋普, 张一震, 等. 不同凝固剂对豆腐品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(7): 229-234. (JIANG Z G, WANG Q P, ZHANG Y Z, et al. Effects of different coagulants on the quality of tofu [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(7): 229-234.)

[18] 吴元浩, 李玥, 金雪花, 等. 高浓度煮浆对豆腐品质提升的作用及其机制[J]. 食品科学, 2022, 43(7): 61-66. (WU Y H, LI Y, JIN X H, et al. Enhancing effect and mechanism of high concentrations of soymilk on tofu quality [J]. Food Science, 2022, 43(7): 61-66.)

[19] CHENG Y, SHIMIZU N, KIMURA T. The viscoelastic properties of soybean curd (tofu) as affected by soymilk concentration and type of coagulant [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2005, 40(4): 385-390.

[20] 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 C Z, CHEN Y, WAN C, et al. Research progress on gelation mechanism of soybean curd processing [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2017, 48(10): 88-96.)

[21] RUI X, FU Y, ZHANG Q, et al. A comparison study of bioaccessibility of soy protein gel induced by magnesiumchloride, glucono- δ -lactone and microbial transglutaminase [J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 71: 234-242.

[22] 曹凤红. 有机酸诱导豆腐的形成及凝胶机理研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018. (CAO F H. The study of organic acid induced tofu formation and gelation mechanism [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.)

[23] 李倩如, 熊瑶, 林嘉诺, 等. 酸化速率对大豆蛋白凝胶结构的调控[J]. 食品科学, 2020, 41(6): 31-35. (LI Q R, XIONG Y, LIN J N, et al. Regulatory effect of acidification rate on soy protein isolate gels induced by glucono- δ -lactone [J]. Food Science, 2020, 41(6): 31-35.)

[24] 金杨, 刘丽莎, 张小飞, 等. 凝固温度对填充豆腐凝胶特性及分子间作用力的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(23): 49-55. (JIN Y, LIU L S, ZHANG X F, et al. Effect of coagulation temperature on gelling properties and chemical forces of tofu coagulated with glucono- δ -lactone [J]. Food Science, 2020, 41(23): 49-55.)

[25] CHEN Y, ZHANG F, WANG T, et al. Hydraulic retention time affects stable acetate production from tofu processing wastewater in extreme-thermophilic (70 $^{\circ}$ C) mixed culture fermentation [J]. Bioresource Technology, 2016, 216: 722-728.

[26] KAMIZAKE N K K, SILVA L C P, PRUDENCIO S H. Effect of soybean aging on the quality of soymilk, firmness of tofu and optimum coagulant concentration [J]. Food Chemistry, 2016, 190: 90-96.

[27] 刘清, 吴美芳, 赵玉强, 等. 热风-微波联合干燥对油菜籽品质的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(7): 180-183, 193. (LIU Q, WU M F, ZHAO Y Q, et al. Effect on quality of rapeseed treating by hot air-microwave drying [J]. Food & Machinery, 2017, 33(7): 180-183, 193.)

[28] KOHYAMA K, SANO Y, DOI E. Rheological characteristics and gelation mechanism of tofu (soybean curd) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1995, 43(7): 1808-1812.

[29] JACOB M, NÖBEL S, JAROS D, et al. Physical properties of acid milk gels: Acidification rate significantly interacts with cross-linking and heat treatment of milk [J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(5): 928-934.

[30] SUN X D, ARNTFIELD S D. Molecular forces involved in heat-induced pea protein gelation: Effects of various reagents on the rheological properties of salt-extracted pea protein gels [J]. Food Hydrocolloids, 2012, 28(2): 325-332.

[31] 李娟娟. 酸浆豆腐加工工艺的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2020. (LI J J. Study on processing technology of *Physalis* tofu [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2020.)

[32] WAN Y, LI Y, GUO S. Characteristics of soy protein isolate gel induced by glucono- δ -lactone: Effects of the protein concentration during preheating [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 113: 106525.