

模糊数学结合响应面法优化兔汤的高压炖煮工艺

薛 山, 李昆仑

Optimization of High Pressure Stewing Process of Rabbit Soup by Fuzzy Mathematics Combined with Response Surface Methodology

XUE Shan and LI Kunlun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021050224>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于模糊数学综合评价法优化水晶虾仁的浆液配方

Formular optimization of starch in crystal shrimps based on the fuzzy mathematics evaluation

食品工业科技. 2017(11): 209-213

模糊数学结合响应面法优化啤酒鱼的煮制工艺

Optimization of Boiling Process of Beer Fish by Fuzzy Mathematics Combined with Response Surface Methodology

食品工业科技. 2021, 42(14): 161-168

模糊数学结合响应面法优化葛根酒发酵工艺参数及其香气成分分析

Optimization of Fermentation Process of Gegen Wine by Fuzzy Mathematics Combined with Response Surface Methodology and Analysis of Its Aroma Components

食品工业科技. 2019, 40(5): 193-200

模糊数学感官评价法结合响应面法优化即食莲子片的工艺研究

Study on Optimization of Instant Lotus Seed Slices Processing by Fuzzy Mathematical Evaluation Method and Response Surface Methodology

食品工业科技. 2020, 41(1): 158-164

模糊数学结合响应面法优化番茄调味酱的配方

The Optimization of Tomato Sauce Recipe Based on Fuzzy Mathematics and Response Surface Method

食品工业科技. 2019, 40(11): 211-217

基于模糊数学综合评价法优化香菇油辣椒酱的制作配方

Optimization of Production Recipe of *Lentinus edodes* Oil Chili Sauce Based on Fuzzy Mathematics Comprehensive Evaluation Method

食品工业科技. 2021, 42(21): 173-181



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

薛山, 李昆仑. 模糊数学结合响应面法优化兔汤的高压炖煮工艺 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(3): 195–202. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021050224

XUE Shan, LI Kunlun. Optimization of High Pressure Stewing Process of Rabbit Soup by Fuzzy Mathematics Combined with Response Surface Methodology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(3): 195–202. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021050224

· 工艺技术 ·

模糊数学结合响应面法优化兔汤的高压炖煮工艺

薛山^{1,2}, 李昆仑¹

(1. 闽南师范大学生物科学与技术学院, 福建漳州 363000;

2. 菌物产业福建省高校工程研究中心, 福建漳州 363000)

摘要: 为了研究闽南红曲酒兔汤高压炖煮工艺, 以福建黄兔为原料, 研究考察液料比、炖煮时间、炖煮压强、红曲酒添加量对兔汤模糊数学感官评分和可溶性蛋白含量的影响, 在单因素基础上设计 Box-Behnken Design 试验, 结合 Matlab 研究液料比、炖煮压强和炖煮时间对兔汤品质的影响。结果表明: 液料比对兔汤品质影响较大, 兼顾兔汤感官评分和蛋白浓度, 得到最优提取工艺参数取值为: 液料比 2:1 mL/g, 炖煮压强 49.65 kPa, 炖煮时间 30.77 min, 红曲酒添加量 3 mL/100 mL 时, 兔汤感官评分和蛋白浓度理论值分别可达 85.17 和 32.38 mg/mL, 模型显著可靠, 与实际值差异不显著 (85.20 ± 3.50 和 31.18 ± 1.58 mg/mL)。该研究为闽南特色兔汤的研发、创新和推广提供了动力与参考。

关键词: 红曲酒, 兔汤, 模糊数学法, 工艺优化

中图分类号: TS201.1

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2022)03-0195-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021050224

本文网刊:



Optimization of High Pressure Stewing Process of Rabbit Soup by Fuzzy Mathematics Combined with Response Surface Methodology

XUE Shan^{1,2}, LI Kunlun¹

(1. College of Biological Science and Technology, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, China;

2. Engineering Research Center of Fujian Province for Fungal Industry, Zhangzhou 363000, China)

Abstract: To study the high pressure stewing process of Minnan rabbit soup with red koji wine added, the yellow rabbit from Fujian province was used as raw material, and the effects of liquid-solid ratio, stew time, stew pressure and amount of red koji wine on fuzzy mathematical sensory score and soluble protein content of rabbit soup were investigated. The Box-Behnken Design experiment with Matlab was designed on the basis of single factor, and the effects of liquid-solid ratio, stew pressure and stew time on the quality of rabbit soup were studied. The results showed that the ratio of liquid to material had a great influence on the quality of rabbit soup. Considering the sensory score and protein concentration of rabbit soup, the optimal extraction process parameters were obtained as follows: Liquid-solid ratio 2:1 mL/g, stew pressure 49.65 kPa, stew time 30.77 min, red yeast wine addition amount 3 mL/100 mL. The theoretical values of rabbit soup sensory score and protein concentration could reach 85.17 and 32.38 mg/mL, respectively. The model was significantly reliable, and there was no significant difference from the actual values (85.20 ± 3.50 and 31.18 ± 1.58 mg/mL). This study provides impetus and reference for the research and development, innovation and promotion of Fujian characteristic rabbit soup.

收稿日期: 2021-05-27

基金项目: 闽南师范大学博士科研启动基金 (2006L21513); 福建省高校杰出青年科研人才培养计划项目; 福建省十三五教育科学规划项目: “厚”“呷”“一挖三创”探究闽台小吃文化融入食品专业课程的创新实践 (FJKCG20-087); 福建省科技特派员 (团队) 项目 (SKTP19005, 19SKTP02, SKTP20032020); 漳州市科技特派员 (团队) 项目 (20210100-44); 闽南师范大学新工科研究与改革实践项目 (1016-321324); 2021 福建省自然科学基金青年创新项目 (2021J05198); 2021 漳州市自然科学基金项目 (ZZ2021J07)。

作者简介: 薛山 (1988-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 肉类科学, E-mail: yixuanhenglun@sina.com。

Key words: red koji wine; rabbit soup; fuzzy mathematics; process optimization

汤在中国膳食中占据重要地位。中国悠久的烹饪史中,汤不仅仅是人们日常生活中不可或缺的菜肴,还可用作一种能够赋予其它菜品鲜味的增鲜剂,其中,最为常见的就是将高汤作为火锅、面食等的底汤。研究证明,喝汤不仅能够通过刺激唾液的分泌增加食欲,还能促进胃肠的蠕动便于食物消化吸收,汤中含有丰富的氨基酸、肽类、脂肪酸、矿物质和核苷酸等,具有很好的保健和疗养功效^[1-2]。

《本草纲目》记载:兔肉性寒味甘,具有补中益气、止渴健脾、凉血解热、利大肠之功效。据 ZOTTE 等^[3]报道,兔肉味美质嫩,营养丰富,具有“四高、四低”的优良特质,即:高蛋白质、高磷脂、高赖氨酸和高消化率;低脂肪、低饱和脂肪酸(Saturated fatty acid, SFA)、低胆固醇、低热量。近些年,世界兔肉市场的产值一直保持迅猛的增长态势,国内外兔肉制品呈现多元化发展趋势,深加工力度不断加大^[4-5]。我国是世界兔养殖和消费大国,兔肉的研究具有广阔的市场前景。从文献来看,汤类的研究多集中于畜禽汤和海鲜汤,而有关兔汤的研究罕有报道。

福建漳州坂里红曲酒是一种起源于三国时期的闽南传统老酒,素有中国酒文化“琼浆玉液”的美誉。在闽南地区,坂里红曲酒常添加于肉类等食材中一起高压炖煮成汤,不仅可以消除肉品自身的腥味,而且富含多酚、 γ 氨基丁酸、必需氨基酸等活性成分^[6-7],具有保健、美容等功效,自古以来就是产妇坐月子的重要滋补品。本研究考察不同因素对坂里红曲酒兔汤感官评分和蛋白质浓度的影响,采用模糊数学法、Box-Behnken Design 设计以及 Matlab 分析法优化兔汤的炖煮工艺,以期为闽南传统特色汤食的研发创新提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

长泰坂里红曲酒(500 mL/瓶,酒精度 15%±2%,总糖含量 6.41%±0.17%,粗脂肪含量 1.74%±0.22%,粗蛋白含量 12.09%±0.31%,总酚含量 289±1.26 μ g/g)

由坂里红曲酒厂提供;冷鲜福建黄兔(平均体重约 1 kg)、葱、姜、食用盐 均购于福建漳州大润发超市;蛋白浓度测定试剂盒(5×G250 染色液、PBS 稀释液、蛋白标准 5 mg/mL BSA) 购买于上海索宝生物科技有限公司。

Scout Pro 电子天平 常州奥豪斯有限公司;CYSB50YC69-100 全智能电压力锅 浙江苏泊尔股份有限公司;UV5100B 型紫外可见分光光度计 上海元析仪器有限公司;C-SDHCB06G 超薄电磁炉 浙江苏泊尔股份有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 兔汤制作工艺 兔肉→清洗→分块(3 cm×3 cm×3 cm)→沸水预煮(1 min)→沥干→加调味料

和水→加红曲酒→高压炖煮→放置冷却→指标测定

将冷鲜兔胴体剔除内脏、筋骨和表面的污渍,清洗后分割成约 3 cm×3 cm×3 cm 小块,在沸水中预煮 1 min 后捞出沥干以去除血水并降低腥味,随后加入一定量冷水,一定量的红曲酒和调味料(0.5% 老姜、0.8% 大葱和 0.7% 食盐),在一定压强条件下高压炖煮一定时间,待兔汤冷却至室温后进行各指标的测定。

1.2.2 单因素实验

1.2.2.1 液料比对兔汤感官评分和蛋白质浓度的影响 在红曲酒添加量 3%、炖煮压强 50 kPa、炖煮时间 30 min 的条件下,考察不同液料比(2:1、2.5:1、3:1、3.5:1、4:1 mL/g)对兔汤感官评分和蛋白质浓度的影响。

1.2.2.2 炖煮压强对兔汤感官评分和蛋白质浓度的影响 在液料比 2.5:1 mL/g,红曲酒添加量为 3%、炖煮时间 30 min 的条件下,考察不同炖煮压强(30、40、50、60、70 kPa)对兔汤感官评分和蛋白质浓度的影响。

1.2.2.3 炖煮时间对兔汤感官评分和蛋白质浓度的影响 在液料比 2.5:1 mL/g,炖煮压强 50 kPa,红曲酒添加量 3% 的条件下,考察不同炖煮时间(20、25、30、35、40 min)对兔汤感官评分和蛋白质浓度的影响。

1.2.2.4 红曲酒添加量对兔汤感官评分和蛋白质浓度的影响 在液料比 2.5:1 mL/g,炖煮压强 50 kPa,炖煮时间 35 min 的条件下,考察不同红曲酒添加量(1、2、3、4、5 mL/100 mL)对兔汤感官评分和蛋白质浓度的影响。

1.2.3 响应面优化试验 在单因素实验基础上,选取对兔汤感官评分和蛋白含量影响较大的液料比(A)、炖煮压强(B)、炖煮时间(C)作为试验因素进行 3 因素 3 水平响应面试验。其因素水平编码见表 1。

表 1 Box-Behnken 试验因素水平设计
Table 1 Factors and levels table of Box-Behnken design

因素	水平		
	-1	0	1
A: 液料比(mL/g)	2:1	2.5:1	3:1
B: 炖煮压强(kPa)	40	50	60
C: 炖煮时间(min)	30	35	40

1.2.4 高压红曲酒兔汤模糊数学感官评定

1.2.4.1 感官评价 模糊数学评定法是由 ZADEH 创建的一种评定方法,通过建立模糊综合评价的评判因素集、评语集、权重集以及建立矩阵和权重之间的运算,将模糊的、定性的指标转变为清晰的、定量的指标^[8-9]。将模糊数学评定法与感官评价相结合,能够大幅降低评价过程中人为主观误差,已广泛用于食

品工艺优化^[10]、食品品质检测^[11]、工作评价^[12]等多个领域。

根据 BRAGHIERI 等^[13]方法稍作改动,选定 10 名通过培训的食品专业学生(5 男 5 女),身体健康且无不良嗜好,组成感官评价小组对炖煮好的兔汤进行色泽、香气、口感评价,评价共分为好、中、差三个等级。评价标准见表 2。

1.2.4.2 模糊数学模型的建立 a. 建立模糊评判矩阵:通过模糊数学评价方法进行分析,以色泽、香气、口感为因素集;以好、中、差为评语集;根据感官评分,得到单因素评价矩阵。分别设定评价对象集为 X , $X=\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_i\}$; 因素集为 U , $U=\{\text{色泽 } u_1, \text{香气 } u_2, \text{口感 } u_3\}$; 评语集为 $V=\{\text{好 } v_1, \text{中 } v_2, \text{差 } v_3\}$; 权重集为 $W=\{\text{色泽 } 0.3, \text{香气 } 0.3, \text{口感 } 0.4\}$ 。记录感官评价小组对所有样品的每个因素评定结果,用票数除以人数(10 人),得到赞成的比率,将比率排列组合得到样品模糊评判矩阵 R_j (即第 j 号样品感官评价为好、中、差的赞成比率)。

b. 计算感官评价结果:根据模糊矩阵得到综合感官评价结果 Y_j 。 Y_j 计算公式如下:

$$Y_j = R_j \times W$$

式中: R_j 为比率排列组合得到第 j 号样品模糊评判矩阵; W 为权重。

c. 综合评判得分:对评定等级好、中、差,分别设定为 90 分、80 分、70 分,将评价结果 $Y_j=\{y_1, y_2, y_3\}$ 量化为 $\{90, 80, 70\}$,对上述结果进行加权求和得到 Z_j ,公式如下:

$$Z_j = \sum_{i=1}^n \times Y_j$$

式中: $j=1, 2, \dots, n$ 。

1.2.5 兔汤蛋白含量的测定 参考余力等^[14]的方法并略作修改,在 5 mL 1×G250 染色液中加入稀释的兔汤样品 0.5 mL,等待反应 3 min,反应液用滤纸过

滤,滤液于 595 nm 处测定吸光值 A 。以标准蛋白 BSA(0.2 mg/mL)的含量为横坐标,吸光值为纵坐标绘制标准曲线。得到回归方程 $y=6.5143x+1.271$, $R^2=0.9907$,最终单位为 mg/mL。

1.3 数据处理

每组数据测定 3 次,结果以平均值±标准偏差表示,采用 Origin 9.5 作图。多重比较采用 SPSS 20 软件完成。Box-Behnken 双响应试验使用 Design Expert 10.0.7 软件完成。Matlab 分析采用 Matlab 8.2 Software (The Mathworks, Natick, MA, USA)。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果

2.1.1 液料比对兔汤感官评分和蛋白浓度的影响

2.1.1.1 液料比对兔汤感官评价票数的影响 10 名感官评判员对各因素的投票分布情况如表 3 所示,随着液料比的升高,色泽差评增多,同时香气和口感好评比例呈现先升高后下降的趋势。

2.1.1.2 建立模糊数学矩阵 以评价对象 x_1 为例,根据感官评价结果建立评价对象的模糊数学矩阵得到:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.5 & 0.1 \\ 0.3 & 0.6 & 0.1 \\ 0.3 & 0.4 & 0.3 \end{bmatrix}$$

2.1.1.3 综合评判集 计算每个样品的综合评判结果 $Y_j=W \times R_j$,以 Y_1 为例可得感官质量评价结果如下:

$$Y_1 = W \times R_1 = \{0.3, 0.3, 0.4\} \times \begin{bmatrix} 0.4 & 0.5 & 0.1 \\ 0.3 & 0.6 & 0.1 \\ 0.3 & 0.4 & 0.3 \end{bmatrix} = \{y_1, y_2, y_3\}$$

$y_1=0.3 \times 0.4 + 0.3 \times 0.3 + 0.4 \times 0.3 = 0.33;$
 $y_2=0.3 \times 0.5 + 0.3 \times 0.6 + 0.4 \times 0.4 = 0.49;$
 $y_3=0.3 \times 0.1 + 0.3 \times 0.1 + 0.4 \times 0.3 = 0.18$
 $Y_1=\{0.33, 0.49, 0.18\}$

表 2 兔汤感官评价等级
Table 2 Sensory evaluation scale of rabbit soup

感官因素	感官等级		
	好(90分)	中(80分)	差(70分)
色泽	汤色纯正,均匀	色泽比较均匀	汤色不佳,不均匀
香气	香气明显风味愉悦	香味淡无不良风味	含不良气味或腥味重
口感	味道鲜美,醇厚,有回味	鲜味少,口感一般,无回味	无鲜味,口感差,回味差

表 3 不同液料比感官评价票数分布
Table 3 Distribution of sensory evaluation votes of different material liquid ratio

编号X	液料比(mL/g)	色泽			香气			口感		
		好	中	差	好	中	差	好	中	差
x_1	2	4	5	1	3	6	1	3	4	3
x_2	2.5	3	6	1	4	6	0	4	4	2
x_3	3	2	4	4	4	4	2	3	6	1
x_4	3.5	1	5	4	2	5	3	3	4	3
x_5	4	1	4	5	2	4	4	1	5	4

2.1.1.4 综合评判结果 根据公式: $Z_j = \sum_{i=1}^n x_i \times Y_j$ 得到样品 x_1 综合感官评分 Z_1 :

$$Z_1 = 900.33 + 800.49 + 700.18 = 81.5$$

同理, 其余样品感官评分为:

$$Z_2 = 82.6; Z_3 = 80.8; Z_4 = 78.8; Z_5 = 77$$

2.1.1.5 液料比对兔汤感官评分和蛋白浓度的影响

液料比对兔汤感官评价及蛋白浓度的影响均显著 ($P < 0.05$) (图 1)。随着液料比的增大, 感官评分和蛋白浓度均先升后降, 感官评分在液料比 2.5:1 mL/g 时有最大值, 而肉汤蛋白浓度在液料比 3:1 mL/g 时有最大值。汤炖煮的过程实质上就是原料在加热条件下, 不断使可溶性物质与呈味物质溶解到水中的过程^[15]。随着液料比的增加, 单位兔肉表面被更多水分包围, 有利于蛋白质和固形物溶解, 但当液料比继续增大, 蛋白浓度就会被稀释, 感官品质也会受到影响。综合考虑选择液料比 0 水平为 2.5:1 mL/g 进行后续试验。

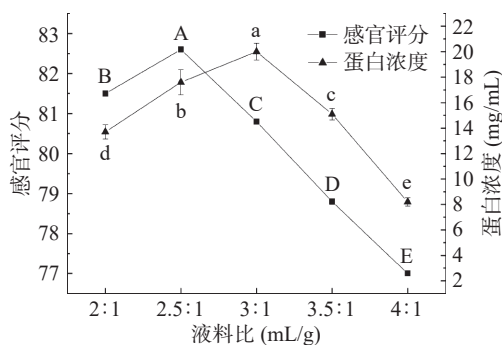


图1 液料比对兔汤感官评分和蛋白浓度的影响

Fig.1 Effect of different liquid to material ratio on sensory score and protein concentration of rabbit soup

注: 不同大小写字母表示差异显著, $P < 0.05$; 图 2~4 同。

2.1.2 炖煮压强对兔汤感官评分和蛋白浓度的影响

参照 2.1.1 得到压强对兔汤感官评分和蛋白浓度的影响如图 2 所示。随着炖煮压强的增大, 兔汤感官评分和蛋白浓度都呈现先显著升高后降低的趋势 ($P < 0.05$), 炖煮压强取 50 kPa 时, 二者有最大值。这可能是因为, 压强适度升高能增加兔肉蛋白的溶出, 但是当压强继续增大时, 部分蛋白有可能出现热解反

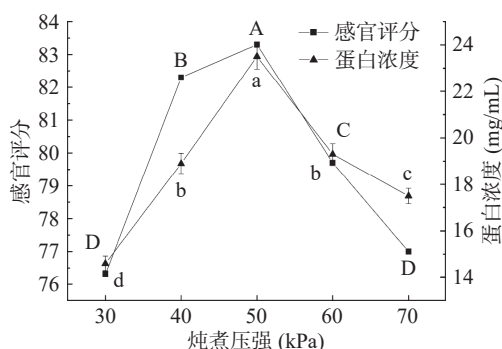


图2 炖煮压强对兔汤感官评分和蛋白浓度的影响

Fig.2 Effect of stewing pressure on sensory score and protein concentration of rabbit soup

应, 亦或是发生了美拉德反应, 生成硫化物、吡啶类等挥发性物质^[16]。因此, 选择压强 0 水平为 50 kPa 进行后续的响应面优化试验。

2.1.3 炖煮时间对兔汤感官评分和蛋白浓度的影响

模糊数学法评价炖煮时间对兔汤感官评分和蛋白浓度的影响如图 3 所示。随着炖煮时间的延长, 兔汤感官评分和蛋白浓度都呈现先显著升高后下降的现象 ($P < 0.05$), 且变化趋势较为相似。当炖煮时间 35 min 时兔汤的两个指标均达到最大值。通常来说, 肉汤炖煮初始阶段, 肉质结构较紧致, 炖煮时间过短则营养与风味物质难以溶出和释放, 随着炖煮时间的延长, 肉质结构变得松散, 促进了含氮物质和可溶性物质溶出^[17-18], 但是当炖煮超过 35 min 时, 兔汤会发生热解反应, 蛋白质分解的产物与红曲酒中的糖类发生美拉德反应, 生成杂环胺等挥发性物质, 进而影响汤的感官品质与蛋白浓度。因此选择 0 水平为 35 min 进行炖煮。

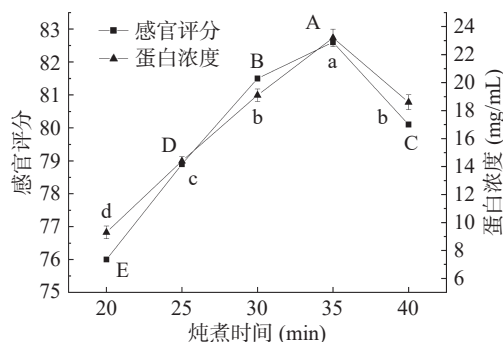


图3 炖煮时间对兔汤感官评价和蛋白浓度的影响

Fig.3 Effect of stewing time on sensory score and protein concentration of rabbit soup

2.1.4 红曲酒添加量对兔汤感官评分和蛋白浓度的影响

如图 4 可知, 红曲酒添加量对兔汤感官评分及蛋白浓度的影响未见明显的规律性变化趋势。在红曲酒添加量 1~5 mL/100 mL 范围内, 两个指标均呈波浪式变化, 在红曲酒添加量为 3 mL/100 mL 时感官评分有最大值, 兔汤蛋白浓度的最大值出现在红曲酒添加量为 4 mL/100 mL 时。红曲酒成分复杂, 其含有的游离氨基酸是汤类产品重要的滋味和香味

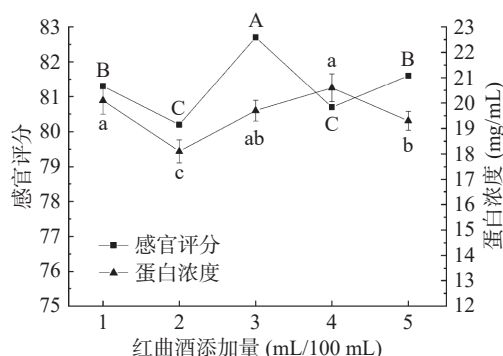


图4 不同红曲酒添加量对兔汤感官评分和蛋白浓度的影响

Fig.4 Effect of adding amount of *Monascus* wine on sensory score and protein concentration of rabbit soup

贡献者^[19],酒中的小分子物质可以在高压炖煮过程中与兔肉溶出物(如脂肪、核苷酸、氨基酸等)生成诸多挥发性风味物质^[20-21]。当红曲酒添加量为 3 mL/100 mL 时,兔汤感官评分最高,且汤中蛋白浓度与 4 mL/100 mL 红曲酒添加量时差异不显著($P>0.05$)。故综合考虑选定红曲酒添加量为 3 mL/100 mL。

2.2 响应面试验模糊评判感官指标的结果

由模糊综合评定小组的 10 位成员根据感官评价等级表,对响应面试验的 17 组不同样品进行评价。汇总评价结果见表 4。

2.2.1 建立模糊数学矩阵 以响应面试验中评价对象 x_1 为例,得到 R_1 ,其余评价对象参照 x_1 ,得到模糊数学矩阵 R_1 。

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.1 & 0.7 \\ 0.1 & 0.4 & 0.5 \\ 0.2 & 0.2 & 0.6 \end{bmatrix}$$

2.2.2 综合评判集 响应面试验中各评价对象的综合评判集结果见表 5。

2.2.3 综合评判结果 响应面试验各评价对象感官综合评分结果见表 6。

2.3 响应面试验优化与结果分析

2.3.1 模型建立 为得到兔汤最佳感官状态时的工艺条件,根据 Box-Behnken 设计原理,以液料比(A)、压强(B)、时间(C)三个因素为自变量,感官评分和可溶性蛋白浓度为响应值进行回归分析。试验设计及结果如表 7 所示。

2.3.2 响应面分析结果及显著性检验 利用 Design Expert 10.0.7 软件对试验数据进行不断分析得到响应面回归模拟方程:

$$y_1=86.46-1.46A+0.51B+0.60C+1.20AB+1.47AC-1.32BC-1.53A^2-5.43B^2-2.70C^2$$
$$y_2=18.62-5.42A+2.15B-2.60C+2.56AB+3.02AC+1.38BC+2.45A^2+2.56B^2+1.48C^2$$

对上述回归方程的有效性进行检验(见表 8 和表 9)。由表可知, y_1 和 y_2 模型极显著($P<0.01$),失拟项不显著($P>0.05$),说明该方程干扰因素小,自变量与因变量拟合效果好;回归系数 R^2 分别为 0.9894 和 0.9550,信噪比均大于 4,表明该回归方程的可信度很高、重现性好,较可靠^[22]。综上,以兔汤感官评分和蛋白浓度为响应值建立模型是合理的,且

表 4 Box-Behnken 响应面试验感官评价表
Table 4 Sensory evaluation of Box-Behnken response surface test

编号	感官指标	好	中	差	编号	感官指标	好	中	差	编号	感官指标	好	中	差
x_1	色泽	2	1	7	x_7	色泽	6	3	1	x_{13}	色泽	8	2	0
	香气	1	4	5		香气	8	2	0		香气	6	3	1
	口感	2	2	6		口感	6	4	0		口感	4	5	1
x_2	色泽	4	3	3	x_8	色泽	1	4	5	x_{14}	色泽	8	1	1
	香气	3	4	3		香气	3	4	3		香气	8	2	0
	口感	3	2	5		口感	2	5	3		口感	6	2	2
x_3	色泽	2	3	5	x_9	色泽	7	3	0	x_{15}	色泽	2	5	3
	香气	1	3	6		香气	8	2	0		香气	3	4	3
	口感	2	4	4		口感	7	2	1		口感	3	5	2
x_4	色泽	6	3	1	x_{10}	色泽	4	4	2	x_{16}	色泽	3	3	4
	香气	7	3	0		香气	4	3	3		香气	3	2	5
	口感	6	4	0		口感	3	5	2		口感	2	4	4
x_5	色泽	3	4	3	x_{11}	色泽	4	3	3	x_{17}	色泽	4	5	1
	香气	3	5	2		香气	3	5	2		香气	4	4	2
	口感	6	3	1		口感	2	4	4		口感	5	4	1
x_6	色泽	4	3	3	x_{12}	色泽	7	2	1					
	香气	3	5	2		香气	8	2	0					
	口感	2	4	4		口感	8	1	1					

表 5 Box-Behnken 响应面试验感官综合评判集
Table 5 Sensory comprehensive evaluation set of Box-Behnken response surface test

Y_j 综合评判集	Y_j 综合评判集	Y_j 综合评判集
$Y_1=\{0.17, 0.23, 0.6\}$	$Y_7=\{0.66, 0.31, 0.03\}$	$Y_{13}=\{0.58, 0.35, 0.07\}$
$Y_2=\{0.33, 0.29, 0.38\}$	$Y_8=\{0.2, 0.44, 0.36\}$	$Y_{14}=\{0.72, 0.17, 0.11\}$
$Y_3=\{0.17, 0.34, 0.49\}$	$Y_9=\{0.73, 0.23, 0.04\}$	$Y_{15}=\{0.27, 0.47, 0.26\}$
$Y_4=\{0.63, 0.34, 0.03\}$	$Y_{10}=\{0.36, 0.41, 0.23\}$	$Y_{16}=\{0.26, 0.31, 0.43\}$
$Y_5=\{0.42, 0.39, 0.19\}$	$Y_{11}=\{0.29, 0.4, 0.31\}$	$Y_{17}=\{0.44, 0.43, 0.13\}$
$Y_6=\{0.29, 0.4, 0.31\}$	$Y_{12}=\{0.77, 0.16, 0.07\}$	

表6 各评价对象感官综合评分结果

Table 6 Sensory comprehensive score results of each evaluation object

Z _i 评分结果(分)	Z _j 评分结果(分)	Z _j 评分结果(分)
Z ₁ =75.7	Z ₇ =86.3	Z ₁₃ =85.1
Z ₂ =79.5	Z ₈ =78.4	Z ₁₄ =86.1
Z ₃ =76.8	Z ₉ =86.9	Z ₁₅ =80.1
Z ₄ =86.0	Z ₁₀ =81.3	Z ₁₆ =78.3
Z ₅ =82.3	Z ₁₁ =79.8	Z ₁₇ =83.1
Z ₆ =79.8	Z ₁₂ =87.0	

表7 响应面优化试验及结果

Table 7 Response surface optimization test and results

试验号	A	B	C	y ₁ 感官评分(分)	y ₂ 蛋白浓度(mg/mL)
1	0	-1	-1	75.70	25.28
2	0	1	-1	79.50	24.33
3	1	-1	0	76.80	11.82
4	0	0	0	86.00	18.12
5	1	0	1	82.30	17.53
6	-1	1	0	79.80	30.33
7	0	0	0	86.30	17.85
8	1	0	-1	78.40	17.62
9	0	0	0	86.90	20.32
10	-1	-1	0	81.30	28.65
11	0	-1	1	79.80	18.25
12	0	0	0	87.00	19.50
13	-1	0	-1	85.10	33.62
14	0	0	0	86.10	17.32
15	1	1	0	80.10	23.73
16	0	1	1	78.30	22.82
17	-1	0	1	83.10	21.44

就影响程度而言,液料比>时间>压强。y₁模型中A、B、C两两因素交互均极显著($P<0.01$),y₂模型中BC交互不显著($P>0.05$),而AC交互作用极显著($P<0.01$)。当液料比2:1 mL/g,炖煮压强49.65 kPa,炖煮时间30.77 min时,感官评分和可溶性蛋白浓度有较大值,分别为85.17和32.38 mg/mL。

表8 y₁回归方程方差分析结果Table 8 Variance analysis of y₁ regression equation

来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	222.13	9	24.68	72.91	<0.0001	**
A	17.11	1	17.11	50.55	0.0002	**
B	2.10	1	2.10	6.21	0.0415	*
C	2.88	1	2.88	8.51	0.0224	*
AB	5.76	1	5.76	17.02	0.0044	**
AC	8.70	1	8.0	25.71	0.0014	**
BC	7.02	1	7.02	20.75	0.0026	**
A ²	9.86	1	9.86	29.12	0.0010	**
B ²	124.15	1	124.15	366.76	<0.0001	**
C ²	30.81	1	30.81	91.01	<0.0001	**
残差	2.37	7	0.34			
失拟项	52.00	3	0.51	2.37	0.2111	
纯误差	0.85	4	0.21			
总和	224.50	16				

注:*代表 $P<0.05$,**代表 $P<0.01$;表9同。

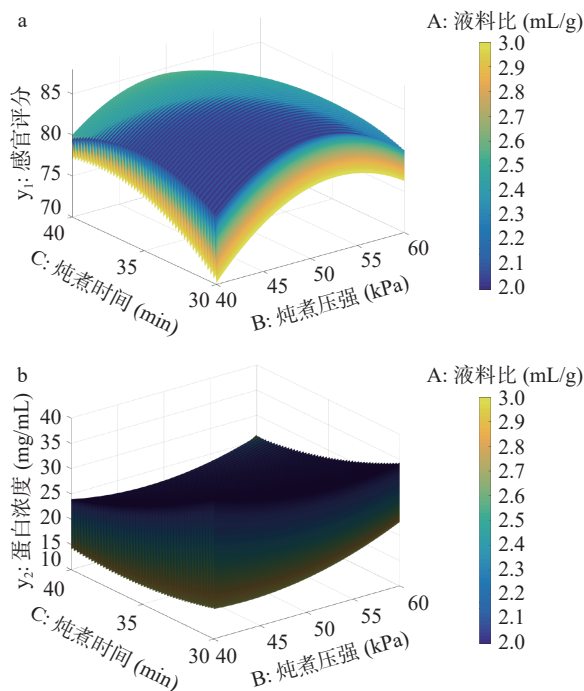
表9 y₂回归方程方差分析结果Table 9 Variance analysis of y₂ regression equation

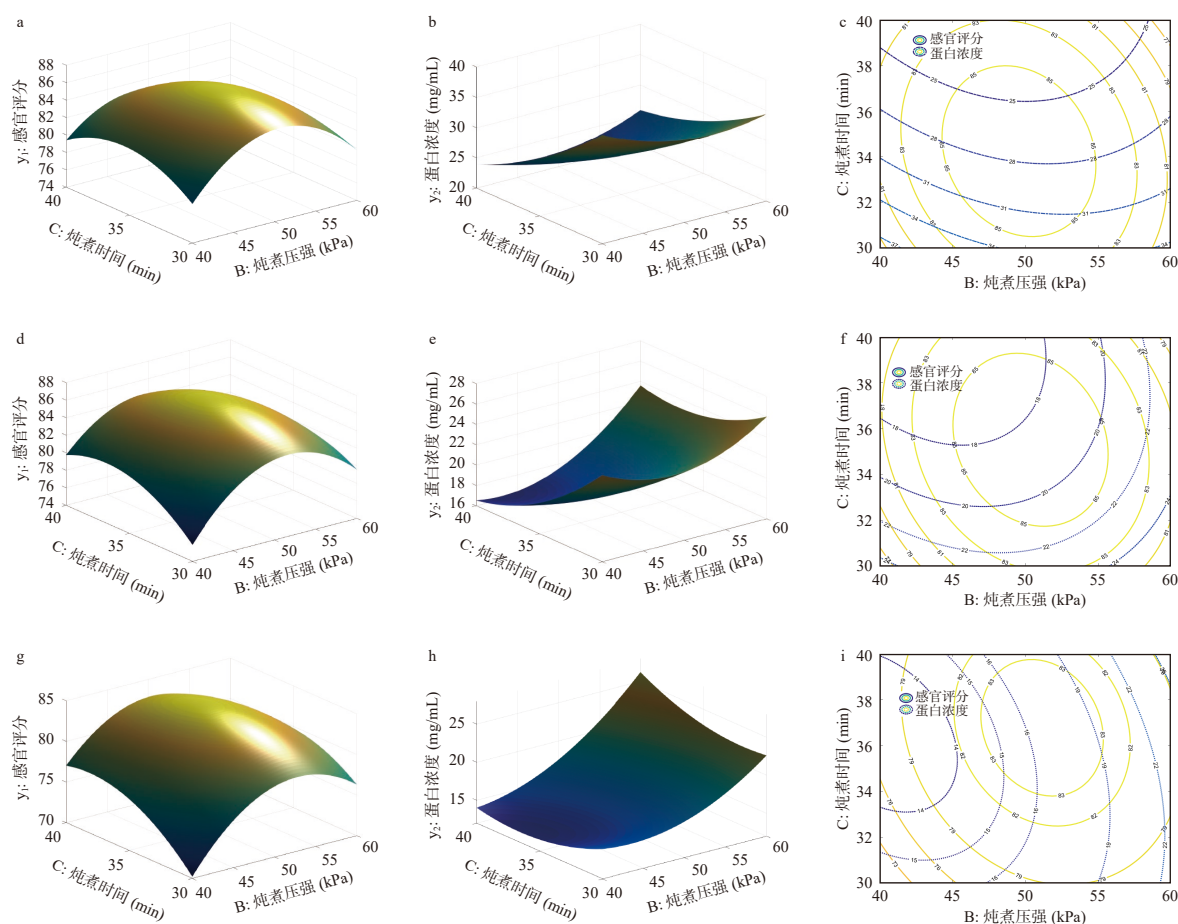
来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	465.24	9	52.10	17.13	0.0006	**
A	234.79	1	238.71	78.48	<0.0001	**
B	37.02	1	37.02	12.17	0.0101	*
C	54.13	1	52.27	17.18	0.0042	**
AB	26.16	1	26.16	8.60	0.0219	*
AC	36.54	1	38.75	12.74	0.0091	**
BC	7.62	1	7.61	2.50	0.1627	
A ²	25.20	1	24.28	7.98	0.0251	*
B ²	27.68	1	28.66	9.42	0.0207	*
C ²	9.27	1	8.72	2.87	0.1289	
残差	21.91	7	3.04			
失拟项	15.71	3	5.03	3.25	0.1430	
纯误差	6.20	4	1.55			
总和	487.15	16				

2.4 Matlab 四维及三维分析

经过 Matlab 分析,得到液料比(mL/g)(A),炖煮压强(kPa)(B)和炖煮时间(C)对兔汤感官评分(y₁) (图 5a)和蛋白浓度(y₂) (图 5b)影响的四维效果图。当 y₁ 取得理论最大值(86.81)时,通过矩阵计算得到 A 值 2.24:1 mL/g, B 值 49.80 kPa, C 值 34.90 min;同理,当 y₂ 取得理论最大值(37.94 mg/mL)时, A 值 2:1 mL/g, B 值 40 kPa, C 值 30 min。

为了更好地描述分析数据间的交互影响,分别绘制当液料比(A)低(2:1 mL/g),中(2.5:1 mL/g),高(3:1 mL/g)时,炖煮压强(B)与炖煮时间(C)对感官评分(y₁),蛋白浓度(y₂)交互影响的三维旋转曲面与等高线投影图(图 6a~6i)。

图5 基于 y₁ 和 y₂ 优化的四维交互曲面Fig.5 The 4-D interactive surface based on the optimizing of y₁ and y₂

图 6 各因素交互作用对 y_1 及 y_2 影响的等高线图和响应面图Fig.6 Contour plots and response surface plots of the effects of the interaction of various factors on the y_1 and y_2

当液料比(A)取下限值(2:1 mL/g)时,固定炖煮压强,随着炖煮时间的延长, y_1 先升高后降低(实线),而 y_2 有明显下降的趋势(虚线);固定炖煮时间,随着炖煮压强的增高, y_1 同样呈现先升高后下降的趋势, y_2 有先下降后升高的趋势。此时, y_1 取值范围为75.37~86.47分, y_2 取值范围为22.25~37.94 mL/g。当炖煮压强越趋近50 kPa附近,炖煮时间越接近30 min, y_1 和 y_2 可同时取得较大值,但无法取得最大值(图6a~6c)。

当液料比(A)取中间值(2.5:1 mL/g)时, y_1 和 y_2 的变化趋势与A=2:1 mL/g时较为类似。固定B值,随着C值增大, y_1 先增大后减小, y_2 逐渐减小,炖煮时间越趋近35 min附近, y_1 越能取得最大值;固定C值,随着B值的增大, y_1 先增大后减小, y_2 变化不显著。此时, y_1 取值范围为75.89~86.50分, y_2 取值范围为16.29~26.04 mg/mL,类似地,当炖煮压强越趋近50 kPa附近,炖煮时间越接近30 min, y_1 和 y_2 可同时取得较大值,但无法取得最大值(图6d~6f)。

当液料比(A)取上限值(3:1 mL/g)时, y_1 和 y_2 的变化趋势与A=2:1 mL/g和2.5:1 mL/g时有较大差异。固定B值,随着C值的增大, y_1 先升高后降低, y_2 先下降后升高;固定C值,随着B值的增大, y_1 先升高后下降, y_2 逐渐升高。此时, y_1 取值范

围为70.22~83.93分, y_2 取值范围为13.35~26.21 mL/g。当炖煮压强越接近52 kPa,炖煮时间越接近30 min时, y_1 和 y_2 可取得较大值,但同样无法同时取得最大值(图6g~6i)。

综上所述,当液料比取上限值(2.5:1 mL/g)时, y_1 可以取得较高理论值(86.50分),当液料比取下限值(2:1 mL/g)时, y_2 可以取得理论较大值(37.94 mL/g);当液料比取较低值(2:1 mL/g),炖煮压强越趋近50 kPa(49~51 kPa),炖煮时间越趋近30 min, y_1 和 y_2 的值越趋近最大值。经计算,当A取2:1 mL/g,B取49.65 kPa,C取30.77 min, y_1 和 y_2 同时取得较大值,分别为85.17分和32.38 mg/mL。按上述参数进行验证实验,得到 y_1 和 y_2 的实际值分别为 85.20 ± 3.50 和 31.18 ± 1.58 mg/mL,与理论值差异不显著($P > 0.05$)。

3 结论

以福建黄兔为原料,采用模糊数学法、Box-Behnken 响应面设计结合 Matlab 分析法优化闽南红曲酒兔汤高压炖煮工艺。兼顾兔汤感官评分和蛋白浓度,得到最优提取工艺参数取值(范围)为:液料比2:1 mL/g(下限值A=2:1 mL/g),炖煮压强49.65 kPa(49~51 mL/g),炖煮时间30.77 min(越趋近30 min),红曲酒添加量3 mL/100 mL时,兔汤感官评分和蛋白浓度理论值分别为85.17和32.38 mg/mL,

与实际值(85.20 ± 3.50 和 31.18 ± 1.58 mg/mL)差异不显著($P > 0.05$), 模型显著可靠。采用模糊数学法、Box-Behnken 响应面设计结合 Matlab 分析法, 不仅得到了闽南红曲酒兔汤最佳高压炖煮工艺参数, 也能够给出最优的工艺参数取值范围, 为闽南特色兔汤的研发创新与工业化生产推广提供理论基础和参考依据。

参考文献

- [1] KILINC B. Preparation of liquid anchovy (*Engraulis encrasicolus*) soup and microbiological and sensory changes during refrigerated storage[J]. *Journal of Muscle Foods*, 2010, 21(3): 451–458.
- [2] SUN Y, LV F, TIAN J, et al. Domestic cooking methods affect nutrient, phytochemicals, and flavor content in mushroom soup[J]. *Food Science Nutrition*, 2019, 7(6): 1969–1975.
- [3] ZOTTE A D, SZENDRŐ Z. The role of rabbit meat as functional food[J]. *Meat Science*, 2011, 88(3): 319–331.
- [4] 薛山. 我国兔产业发展现状及趋势展望[J]. *肉类研究*, 2016, 30(8): 44–48. [XUE S. Present status and future trends in the development of rabbit industry in China[J]. *Meat Research*, 2016, 30(8): 44–48.]
- [5] 薛山. 伊拉兔肌肉磷脂脂肪酸动态变化与功能特性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015. [XUE S. Research on dynamic change and functional characteristics of intramuscular phospholipid fatty acids of Inlarabbit[D]. Chongqing: Southwest University, 2015.]
- [6] SONG C, ZHU L, SHAO Y, et al. Enhancement of GABA content in Hongqu wine by optimisation of fermentation conditions using response surface methodology[J]. *Czech Journal of Food Science*, 2021, 39: 297–304.
- [7] TIAN Y, HUANG J, XIE T, et al. Oenological characteristics, amino acids and volatile profiles of Hongqu rice wines during pot-tery storage: Effects of high hydrostatic pressure processing[J]. *Food Chemistry*, 2023: 456–464.
- [8] 王哲铭, 王成财, 朱立宏, 等. 模糊数学结合响应面法优化啤酒鱼的煮制工艺[J/OL]. *食品工业科技*. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020090191>. [WANG Z M, WANG C C, ZHU L H, et al. Optimization of boiling process of beer fish by fuzzy mathematics combined with response surface methodology[J/OL]. *Science and Technology of Food Industry*, <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020090191>.]
- [9] MEULLENET J F C, GROSS J. Instrumental single and double compression tests to predict sensory texture characteristics of foods[J]. *Journal of Texture Studies*, 1999, 30(2): 167–180.
- [10] 高涛, 陈虹旭, 唐华丽. 模糊数学感官评价法优化三种干果复合固体饮料的配方[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(9): 175–180. [GAO T, CHEN H X, TANG H L. Optimization of the formulation of three kinds of dried fruit composite solid beverage by fuzzy mathematics sensory evaluation method[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(9): 175–180.]
- [11] 孙丽滢, 陈体昌, 钟龙. 基于模糊感官的虾皮对复合调味汁感官品质的影响分析[J]. *中国调味品*, 2020, 45(2): 167–170. [SUN L Y, CHEN T C, ZHONG L. Effect of dried small shrimps on sensory quality of compound seasoning based on fuzzy sensory evaluation[J]. *China Condiment*, 2020, 45(2): 167–170.]
- [12] 宋煜婷, 王晓芸, 丁筑红, 等. 外源菌种和辅助碳源发酵糟辣椒条件优化与品质分析评价[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(3): 131–137. [SONG Y T, WANG X Y, DING Z H, et al. Optimization of fermentation conditions for chili using exogenous strains and auxiliary carbon source and its quality evaluation[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(3): 131–137.]
- [13] BRAGHIERI A, PIAZZOLLA N, CARLUCCI A, et al. Development and validation of a quantitative frame of reference for meat sensory evaluation[J]. *Food Quality and Preference*, 2012, 25(1): 63–68.
- [14] 余力, 贺雅非, 李洪军, 等. 不同贮藏方式对高压鸡汤品质的影响及货架期预测模型的建立[J]. *食品科学*, 2016, 37(20): 274–281. [YU L, HE Z F, LI H J, et al. Effect of different storage methods on quality of high pressure processed chicken broth and establishment of shelf life prediction model[J]. *Food Science*, 2016, 37(20): 274–281.]
- [15] 冯雨, 邓梦琦, 陈志奇, 等. 响应面法优化鱼头汤熬煮工艺[J]. *肉类研究*, 2019, 33(11): 43–49. [FENG Y, DENG M Q, CHEN Z Q, et al. Optimization of cooking process for fish head broth by response surface methodology[J]. *Meat Research*, 2019, 33(11): 43–49.]
- [16] THRIMAWITHANA T R, YOUNG S, DUNSTAN D E, et al. Texture and rheological characterization of kappa and iota carageenan in the presence of counter ions[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2010, 82(1): 69–77.
- [17] 贡雯玉. 凝胶型鲫鱼汤产品的开发与研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015: 26–28. [GONG W Y. Development and study on processing technology of *Carassius auratus* gel soup[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015: 26–28.]
- [18] 蒋方国, 凌云坤, 徐宏, 等. 响应面法优化羊肚菌鸡脯汤料包工艺[J]. *中国调味品*, 2021, 46(3): 91–94, 99. [JIANG F G, LING Y K, XU H, et al. Optimization of the technology of *Morchella* and chicken breast soup package by response surface methodology[J]. *China Condiment*, 2021, 46(3): 91–94, 99.]
- [19] 王虎虎, 黄明远, 李潇, 等. 黄羽肉鸡汤煲炖煮工艺优化[J/OL]. *中国食品学报*, 2021. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4528.TS.20210318.1308.008.html>. [WANG H H, HUANG M Y, LI X, et al. Optimization of stew parameters of Yellow-feather broiler soup[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4528.TS.20210318.1308.008.html>.]
- [20] 吕雪娟, 梁兰兰. 游离氨基酸含量对食品风味特征的影响[J]. *食品科学*, 1996, 17(3): 10–12. [LV X J, LIANG L L. Effect of free amino acid content on food flavor characteristics[J]. *Food Science*, 1996, 17(3): 10–12.]
- [21] 戚军. 基于结构蛋白与风味物质结合的黄羽鸡汤风味形成研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2018. [QI J. Study on flavor formation of soup based on the interaction between structural protein and flavor compounds during stewing yellow-feathered chickens[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2018.]
- [22] 薛山, 肖夏, 陈舒怡, 等. 双响应面法结合 Matlab 法优化葡萄籽多酚提取工艺及羟自由基清除率评价[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(3): 160–167. [XUE S, XIAO X, CHEN S Y, et al. Dual response surface method combined with matlab to optimize extraction process of grape seed polyphenols and the evaluation on its hydroxyl radical scavenging rate[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(3): 160–167.]