

响应面法优化泡椒牛蛙加工工艺

余静雅, 杨静, 孙可馨, 熊强, 李新福*
(南京工业大学食品与轻工学院, 江苏南京 211800)

摘要: 以新鲜牛蛙和泡椒为主要原料, 添加香辛料、食盐等配料制作泡椒牛蛙。首先, 通过单因素试验探究泡椒质量分数、煮制温度、煮制时间、腌制时间对泡椒牛蛙感官、色泽、质构的影响。其次, 在单因素试验的基础上, 选取三个单因素, 以感官评分为响应值, 采用响应面法优化泡椒牛蛙加工工艺。最后, 对成品泡椒牛蛙的持水力和菌落总数进行测定。优化后泡椒牛蛙最佳工艺配方为泡椒质量分数 30%、煮制温度 80 ℃、煮制时间为 15 min, 腌制时间 3 h。经测定, 泡椒牛蛙的持水力为 80.00%, 降低了 9.42%, 损失较小, 仍可以保持肉质的鲜嫩; 菌落总数为 55 CFU/(g·mL), 数量低于国家规定限量。此外, 还对泡椒牛蛙的风味和滋味进行了测定分析。最佳工艺条件下生产的泡椒牛蛙色泽淡黄、有光泽; 有泡椒产品的酸辣香气、无异味; 骨肉紧密相连、无脱骨现象; 有层次感, 滋味鲜美且咀嚼感较好, 最终产品感官评分为 83 分, 可接受性好。该研究可为我国泡椒牛蛙产品的开发及标准化生产提供参考。

关键词: 泡椒牛蛙; 腌制; 响应面设计; 风味; 滋味

文章编号: 1673-9078(2025)07-271-285

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.7.0397

Response Surface Optimization of Processing Technology for Pickled Pepper Bullfrog

YU Jingya, YANG Jing, SUN Kexin, XIONG Qiang, LI Xinfu*

(College of Food Science and Light Industry, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China)

Abstract: Fresh bullfrogs and pickled peppers were used as the main raw materials to prepare pickled pepper bullfrog, along with spices, salt, and other ingredients. Firstly, the effects of the mass fraction of pickled peppers, cooking temperature, cooking time, and pickling time on the sensory properties, color, and texture of pickled pepper bullfrog were investigated through single-factor experiments. Secondly, based on the single-factor experimental results, three single factors were selected to optimize the processing technology for pickled paper bullfrog with the help of response surface methodology by using the sensory score as the response value. Finally, the water-holding capacity and the total number of colonies of the finished pickled bullfrog were measured. The optimal parameters for preparing pickled pepper bullfrog are as follows: a 30% mass fraction of pickled peppers, cooking temperature at 80 ℃, cooking time of 15 min, and pickling time of 3 h. The results show that the water-holding capacity of pickled pepper bullfrog is reduced by 9.42%, to 80%. This loss is relatively small, and the flesh is still fresh and tender. The total number of colonies is 55 CFU/(g·mL), which is lower than the national limit. In addition, the flavor and taste of the pickled pepper bullfrog were determined and analyzed. The pickled pepper bullfrog

引文格式:

余静雅, 杨静, 孙可馨, 等. 响应面法优化泡椒牛蛙加工工艺[J]. 现代食品科技, 2025, 41(7): 271-285.

YU Jingya, YANG Jing, SUN Kexin, et al. Response surface optimization of processing technology for pickled pepper bullfrog [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(7): 271-285.

收稿日期: 2024-03-28

基金项目: 南京工业大学引进人才科研启动专项经费资助 (39829117)

作者简介: 余静雅 (2001-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品安全与质量控制, E-mail: yujingya@njtech.edu.cn

通讯作者: 李新福 (1982-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品安全与质量控制, E-mail: lixinfu316@126.com

obtained under the optimal parameters is light yellow and shiny. It possesses a sour and spicy aroma characteristic of pickled pepper products without any peculiar smell. The bone and meat are closely connected, and no bone detachment is noted. The pickled pepper bullfrog has a layered, delicious taste and good chewing texture. The final product has a sensory score of 83 points and good acceptability. This study can serve as a reference for the development and standardized production of pickled pepper bullfrog products in China.

Key words: pickled pepper bullfrog; pickling; response surface design; flavor; taste

牛蛙是一种两栖动物,是我国的主要养殖蛙类,自 20 世纪 50 年代以来一直在中国进行商业养殖,目前已经形成了较为完整的养殖产业链,且牛蛙养殖的市场还在继续扩大。2022 年我国牛蛙产量已达 21.5 万 t^[1],2023 年已经超过 100 万 t,增长幅度大。牛蛙是世界上最具有经济价值的养殖两栖动物之一^[2],蛋白质含量高,脂肪含量低,煮熟后肉质地柔软,味道鲜美,被许多人认为是一种美味佳肴^[3],不仅中国,全世界牛蛙的消费量都在不断增加^[4]。

泡椒是我国西南地区的传统特色美食^[5],具有辣而不燥、辣中微酸的特点,辣味和酸味相互作用,形成了独特的口感和滋味。泡椒在发酵过程中产生的菌群,具有一定的益生作用,可以增进食欲、促进肠胃消化吸收,深受人们喜爱^[6]。

目前牛蛙的加工主要集中在牛蛙火锅、干锅牛蛙、香辣牛蛙等餐饮食品,市场上鲜有牛蛙加工的即食休闲肉制品。因此开发牛蛙休闲食品,有庞大的潜力,市场前景开阔。将牛蛙和泡椒结合起来加工成泡椒牛蛙,首先从卖点上讲,口味独特、方便即食,其次从产品功能上讲,又具有方便性、健康营养性的特点,有很大的市场需求,将会是一种深受消费者欢迎的休闲肉制品。休闲肉制品是一种可以让消费者感到休闲放松和愉悦的肉制品,具有健康营养、口味独特等特点,且易于人们携带保存,方便即食,是人们居家和旅游必备的休闲美食。随着经济的发展,人们生活水平不断提高,即食休闲肉制品行业发展十分迅速,市场规模呈几何式增长,消费量愈来愈大。目前市场上即食休闲肉制品风味多元,不仅酱卤等肉制品,泡椒肉制品也有很大的市场需求,如泡椒凤爪、泡椒猪皮、泡椒鱼皮等,需求量大,受众群体广泛,是一种老少皆宜的产品^[7]。

该研究计划以牛蛙和泡椒为主要原料,添加食盐、香辛料等配料,经过煮制和腌制等工艺加工泡椒牛蛙。首先,以感官、质构、色泽为主要指标,通过单因素试验探究泡椒质量分数、煮制温度、煮

制时间、腌制时间对泡椒牛蛙品质的影响。其次,在单因素试验的基础上使用响应面法优化泡椒牛蛙的加工工艺。该研究不仅丰富了泡椒肉制品的种类,同时也为泡椒牛蛙产品的开发提供了参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜牛蛙,购于江苏省南京市浦口区江佑铂庭农贸市场;泡椒,四川广乐食品有限公司;葱姜蒜、香辛料、柠檬、食盐、白醋、米醋、糖、鸡精、味精,购于江苏省南京市浦口区永辉超市;嫩肉粉,重庆佳仙食品有限公司;LB,青岛高科技工业园海博生物技术有限公司;琼脂粉,北京奥博生物技术有限公司。

FA/JA 电子天平,上海舜宇恒平科学仪器;FTC 质构仪,北京盈盛恒泰科技有限责任公司;NS 810 分光测色仪,深圳市三恩驰科技有限公司;H/T16MM 离心机,湖南赫西仪器装备有限公司;FlavourSpec® 气相离子迁移谱,德国 G.A.S. 公司;CTC-PAL 3 静态顶空自动进样装置,瑞士 CTC Analytics AG 公司;LA8080 氨基酸分析仪,日本 HITACHI 公司。

1.2 试验方法

1.2.1 泡椒牛蛙制备工艺

1.2.1.1 工艺流程

泡椒牛蛙制备工艺流程如下:

原料的选择→清洗→食盐干腌→嫩肉粉腌制→香辛料水的制备→煮制,浸泡调味→取出,沥干水分→装袋真空包装

1.2.1.2 操作要点

a. 原料的选择:选用无公害养殖基地养殖,符合 GB/T 19163-2010《牛蛙》的标准,并经抽检合格的优良品种的牛蛙。泡椒选择优质、成熟的野山椒。

- b. 清洗：牛蛙宰杀后去除内脏，剥离蛙皮，切除前后爪。多次清洗，去除血水。
- c. 食盐干腌：用 5% (*m/m*) 的食盐干腌牛蛙，腌制 30 min。
- d. 嫩肉粉腌制：用 5% (*m/m*) 的嫩肉粉腌制牛蛙，腌制 15 min。
- e. 香辛料水的配制：向水中等比加入辣椒、八角、陈皮、山楂、花椒和少量香叶以及生姜和大蒜，水沸腾后，调至小火进行熬制，小火熬制 10 min 后，加入大葱和洋葱，然后继续熬制 30 min。
- f. 煮制，浸泡调味：牛蛙煮制后，和泡椒、3% 食盐 (*m/m*)、1% 糖 (*m/m*)、1% 米醋 (*m/m*)、2% 白醋 (*m/m*)、1% 泡椒水 (*m/m*)、1% 鸡精 (*m/m*) 和 2% 味精 (*m/m*) 一起加入香辛料水中，浸泡腌制。
- g. 取出、沥干水分：将浸泡好的牛蛙捞出，沥干浸泡液。
- h. 袋装真空包装：牛蛙进行抽真空密封处理。

1.2.2 单因素试验

以感官评分、色泽、质构为指标，按照 1.2.1 中的加工方法，分别考察泡椒质量分数、煮制温度、煮制时间、腌制时间对泡椒牛蛙的影响。首先固定煮制温度、煮制时间、腌制时间，对泡椒质量分数（15%、20%、25%、30%、35%）进行单因素试验；固定泡椒质量分数、煮制时间、腌制时间，对煮制温度（60、70、80、90、100 ℃）进行单因素试验；固定泡椒质量分数、煮制温度、腌制时间，对煮制时间（10、15、20、25、30 min）进行单因素试验；固定泡椒质量分数、煮制温度、煮制时间，对腌制时间（1、2、3、4、5 h）进行单因素试验。通过单因素试验综合分析选取合适的工艺参数。

1.2.2.1 泡椒牛蛙感官评价指标

参照 GB/T 29605-2013《感官分析 食品感官质量控制导则》，选择 10 名感官品评员对泡椒牛蛙进行感官评分。评价指标包括色泽、风味、组织状态、口感、总体可接受性五个，每评定完 1 个样品用苏打水漱口后再评价下一个样品。总分为 100 分，五个指标均占 20 分。评分人员对泡椒牛蛙进行评分后统计数据，取平均值进行数据处理。感官评分表见表 1。

1.2.2.2 泡椒牛蛙质构的测定

使用质构仪测定泡椒牛蛙的质构，主要测定指标为硬度、咀嚼性和弹性。参考于小番等^[8]的方法并

略作修改。将牛蛙大腿肉切成 20 mm×20 mm×20 mm 的小块，使用质构仪对切好的牛蛙进行测定。采用 P/50 探头，测试参数为：测试前、中、后的速率均为 1.0 mm/s、触发点负载为 5 g，压缩形变量为 50%，间隔时间为 5.00 s。

表 1 泡椒牛蛙感官评价标准
Table 1 Standard for sensory evaluation of pickled pepper bullfrog

项目	评分标准	得分
色泽	色泽淡黄、有光泽	60~90
	色泽较淡、光泽较暗	30~60
	色泽较白，没有光泽	0~30
风味	具有泡椒产品的酸辣香味、无异味	60~90
	泡椒味较淡、略有异味	30~60
	泡椒味几乎没有、有异味	0~30
组织状态	骨肉紧密相连	60~90
	存在脱骨现象	30~60
	脱骨现象严重	0~30
口感	有泡椒产品特有的酸辣味、味道鲜美、有层次感，咀嚼感好	60~90
	酸辣味道较淡、层次感较差，咀嚼感较差	30~60
	几乎没有酸辣味、没有层次感，咀嚼感差	0~30
总体可接受性	较好	60~90
	中等	30~60
	较差	0~30

1.2.2.3 泡椒牛蛙色泽的测定

肉制品的色泽是影响消费者购买的决定性因素^[9]。使用色差仪测定泡椒牛蛙大腿肉的色泽。用已校准的色差计测定泡椒牛蛙亮度值（*L**）、红度值（*a**）和黄度值（*b**）。对于泡椒牛蛙，*L** 值可以反映其光泽度，*b** 值可以一定程度上反映牛蛙的浸泡上色程度，*b** 值越大说明牛蛙色泽越好。测定时在每个牛蛙样品表面随机测定 6 个点后取平均值，最终三次试验取平均值。

1.2.3 响应面试验

在单因素试验的基础上，采用 Box-Behnken 模型，选取三个因素为自变量，以感官评分为响应值，对泡椒牛蛙工艺进行优化，确定最佳配方。采用 Design Expert 13 软件设计响应面试验，响应面试验因素水平如表 2 所示。

表 2 响应面试验因素水平表			
Table 2 Response surface experimental factor level table			
因素水平	因素		
	A 泡椒质量分数/%	B 煮制温度/℃	C 腌制时间/h
-1	25	70	2
0	30	80	3
1	35	90	4

1.2.4 泡椒牛蛙菌落总数测定

按照 GB 4789.2-2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》中的方法进行菌落总数测定。微生物总数应不大于 1×10^5 CFU/(g·mL)，三组平行试验取平均值。

1.2.5 泡椒牛蛙持水力的测定

测定鲜牛蛙以及泡椒牛蛙的持水力。参照杨眉等^[10]的方法并稍作修改。称取 2 g 左右的牛蛙肉，用干燥的滤纸包裹牛蛙肉，折叠后放入 50 mL 离心管中，3 600 r/min、离心 15 min。离心后剥去滤纸称重，计算公式如下，三次试验取平均值。

$$\omega=(1-\frac{m_1-m_2}{m_1})\times 100\%$$

(1)

式中：

ω ——泡椒牛蛙持水力，%；

m_1 ——离心前牛蛙肉的质量，g；

m_2 ——离心后牛蛙肉的质量，g。

1.2.6 泡椒牛蛙挥发性风味物质测定

挥发性风味物质采用气相离子迁移谱仪（GC-IMS）测定。称取 2 g 样品置于 20 mL 顶空瓶中，60 ℃ 孵育 20 min 后进样，共 3 次平行试验。

进样条件：孵化温度：60 ℃；孵化时间：20 min；进样体积：500 μL；不分流进样；孵化转速：500 r/min；进样针温度：85 ℃。

GC 条件：色谱柱温度：60 ℃；载气：高纯氮气（纯度≥ 99.999%）；程序升压：初始流量 2.0 mL/min，在 8 min 内线性增至 10.0 mL/min，在 10 min 内线性增至 100.0 mL/min，保持 20 min。色谱运行时间：40 min；进样口温度：80 ℃。

IMS 条件：电离源：氚源（³H）；迁移管长度：53 mm；电场强度：500 V/cm；迁移管温度：45 ℃；漂移气：高纯氮气（纯度≥ 99.999%）；流速：75.0 mL/min；正离子模式。

1.2.7 游离氨基酸的测定

参考王琳等^[11]的方法并略作修改。称取 2 g 样品于 50 mL 容量瓶中，充分溶解后，加水定至刻度，

混匀，放置 24 h，吸取上清液 20 mL 于 10 mL 离心管中，加入 20 mL 5% 磺基水杨酸溶液混匀，6 000 g 离心力离心 10 min，吸取上清液 20 mL 在旋转蒸发仪中蒸干，加入 1 mL 柠檬酸钠缓冲液溶解后用 0.45 μm 膜过滤上样，试验测定三次取平均值。

1.3 数据处理

对单因素试验数据进行整理后，采用 SPSS 27 软件进行差异显著性分析（ $P<0.05$ ）。试验均重复三次取平均值，结果用平均值 ± 标准偏差表示。使用 Origin 2022 软件进行绘图。响应面试验数据采用 Design Expert 13 软件处理。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果与分析

2.1.1 泡椒质量分数对泡椒牛蛙品质的影响

2.1.1.1 泡椒质量分数对泡椒牛蛙感官品质的影响

泡椒质量分数对泡椒牛蛙感官评分的影响结果见图 1。

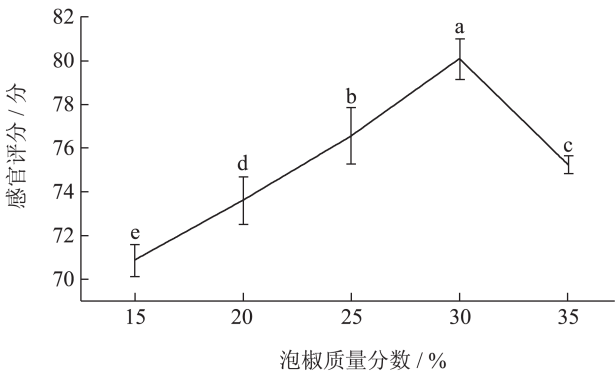


图 1 泡椒质量分数对泡椒牛蛙感官评分的影响

Fig.1 Effect of mass fraction of pickled pepper on sensory score of pickled pepper bullfrog

注：不同字母表示显著性差异（ $P<0.05$ ）。下同。

由图 1 可知，随着泡椒量的增加，泡椒牛蛙的感官评分呈现显著上升再下降的趋势（ $P<0.01$ ），当泡椒质量分数为 30% 的时候，感官评分最高，为 80.08 分。泡椒会赋予牛蛙酸辣味和咸味，泡椒添质量分数少时感官评分较低，可能是因为泡椒添加量少而导致泡椒风味不足。之后随着泡椒量的增加，泡椒牛蛙的颜色逐渐变深，泡椒的色素进入牛蛙肉当中，牛蛙肉由开始的白色逐渐转为淡黄色，同时泡椒的酸辣味进入到牛蛙肉中，因此牛蛙的泡椒风味越来越显著，酸味和辣味越来越明显，层次感变

得更加丰富。但由于泡椒量的不断增加，导致最后一组牛蛙的酸辣味过重，味道过咸，泡椒味掩盖了肉本身的香味，因此最终总体可接受性下降。因此当泡椒质量分数为 30% 时，泡椒牛蛙呈淡黄色、有光泽，具有泡椒产品的酸辣味、无异味，且酸辣味适中，总体可接受性最高，感官评价最好。

2.1.1.2 泡椒质量分数对泡椒牛蛙质构的影响

泡椒质量分数对泡椒牛蛙质构的影响结果见图 2。

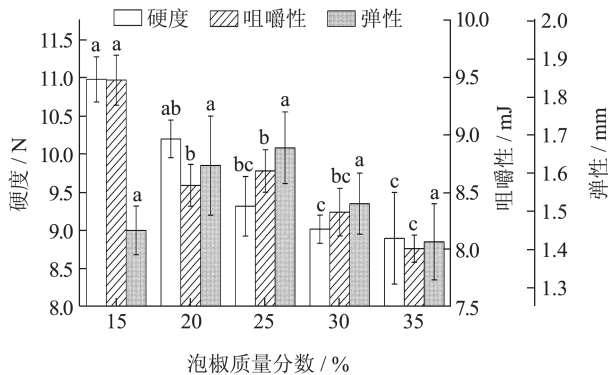


图 2 泡椒质量分数对泡椒牛蛙质构的影响

Fig.2 Effect of mass fraction of pickled pepper on texture of pickled pepper bullfrog

质构是肉类最重要的性状，影响着消费者对肉类质量的评价。由图 2 可知，随着泡椒量的增加，牛蛙的硬度和咀嚼性呈下降趋势 ($P < 0.01$)，弹性没有变化 ($P > 0.05$)。造成这一现象可能的原因是成品泡椒中含有大量盐分，肉中食盐浓度的增加会降低剪切力^[12]。食盐可以通过改变肉制品的保水能力，从而影响肉制品的质地特性^[13]。肉的保水能力与蛋白质的空间结构有关，随着食盐浓度的增加，蛋白质发生变性，氯离子被束缚在肌原纤维之间，增加了静电斥力，导致肌原纤维膨胀，因此牛蛙保水性增加，硬度和咀嚼性降低。 Na^+ 离子也会产生积极的水合作用，稳定蛋白质的天然构象，提高肉组织的保水性^[14]。此外食盐还有助于肉中盐溶性蛋白质的溶出^[15]，增强乳化力，使得体系中形成更好的凝胶网状结构，从而提高对水的束缚力。姜晶丹等^[16]发现，草鱼在腌制时硬度随着盐浓度的升高而降低，这与本研究结果相似。结合感官评价的结果，确定泡椒质量分数的范围为 25%~35%。

2.1.1.3 泡椒质量分数对泡椒牛蛙色泽的影响

泡椒质量分数对泡椒牛蛙色泽的影响结果见表 3。

表 3 泡椒质量分数对泡椒牛蛙色泽的影响

Table 3 Effect of mass fraction of pickled pepper on color of pickled pepper bullfrog

泡椒质量 分数/%	L^*	a^*	b^*
15	56.63 ± 1.13^a	0.97 ± 0.37^a	19.86 ± 0.74^a
20	56.41 ± 1.76^a	1.28 ± 0.43^a	20.53 ± 0.55^a
25	55.73 ± 0.59^a	1.42 ± 0.75^a	20.51 ± 0.41^a
30	55.69 ± 1.26^a	1.51 ± 0.35^a	20.99 ± 1.09^a
35	55.18 ± 0.43^a	0.99 ± 0.59^a	21.28 ± 0.36^a

注：不同字母表示显著性差异 ($P < 0.05$)。下表同。

由表 3 可知，随着泡椒量的增加，泡椒牛蛙的 L^* 值、 a^* 值和 b^* 值并没有显著的变化趋势 ($P > 0.05$)。因此泡椒质量分数对牛蛙的色泽没有显著影响。

综合感官评分和硬度，当泡椒质量分数为 30% 时，泡椒牛蛙的评价最好。

2.1.2 煮制温度对泡椒牛蛙品质的影响

2.1.2.1 煮制温度对泡椒牛蛙感官品质的影响

煮制温度对泡椒牛蛙感官评分的影响结果见图 3。

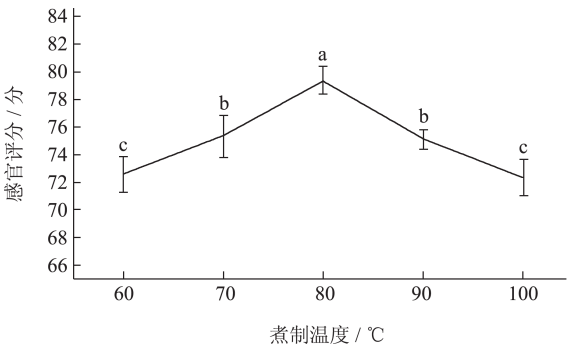


图 3 煮制温度对泡椒牛蛙感官评分的影响

Fig.3 Effect of cooking temperature on sensory score of pickled pepper bullfrog

由图 3 可知，随着煮制温度的升高，感官评分呈现显著上升后下降的趋势 ($P < 0.01$)。煮制温度主要影响牛蛙的质构，因此感官评价员主要通过观察组织状态和咀嚼口感来进行感官评价。当煮制温度较低时，牛蛙骨肉紧密相连，尝起来肉质紧实，但随着温度的逐渐升高，牛蛙肉开始脱骨。当煮制温度为 90 °C 时，牛蛙小腿肉出现脱骨现象，当煮制温度为 100 °C 时，牛蛙脱骨现象严重，牛蛙的小腿大腿均出现严重脱骨现象，骨肉分离，肉质松弛，

咀嚼感较差。因此当煮制温度为 80 ℃时，牛蛙骨肉紧密相连、不存在脱骨现象，咀嚼感较好，感官评分最高，为 79.33 分。

2.1.2.2 煮制温度对泡椒牛蛙质构的影响

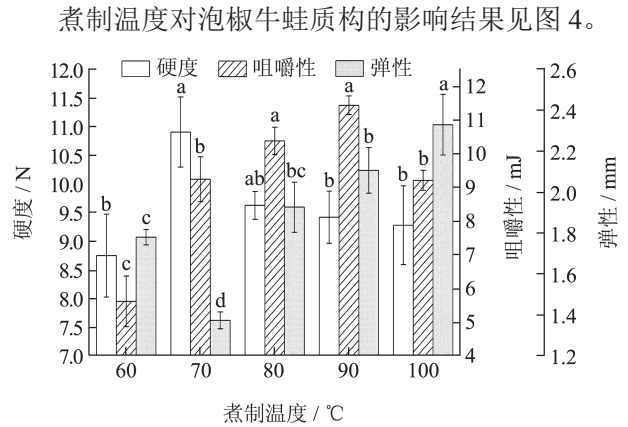


图 4 煮制温度对泡椒牛蛙质构的影响

Fig.4 Effect of cooking temperature on texture of pickled pepper bullfrog

由图 4 可知，随着煮制温度的升高，牛蛙的硬度和咀嚼性呈现先上升后下降的趋势 ($P<0.05$)，弹性呈先下降后上升的趋势 ($P<0.01$)。在 70 ℃时，牛蛙的硬度达到最大，为 10.91 N，弹性最低，为 1.37 mJ。然后随着温度的升高，牛蛙的硬度下降，弹性升高。李苓等^[17]发现鳊鱼的硬度随着煮制温度的升高呈先上升后下降的趋势，这与本试验研究结果相似。一般随着温度的升高，肉制品的硬度也会随之增高，可能是由于温度升高，导致肌球蛋白、肌动蛋白和胶原蛋白收缩的热变性，而蛋白质的变性会导致肌肉纤维聚集和脱水，肌肉纤维的聚集和脱水导致肌肉收缩，肌肉浆液从肌纤维中被挤出，从而导致肉的硬度增加，咀嚼性增高，弹性降低^[18]。之后随着温度的继续升高，牛蛙的硬度和咀嚼性出现下降的趋势，这可能是胶原溶解度随着温度的升高而增加^[19]，胶原蛋白溶解度增加，牛蛙的硬度和咀嚼性降低。胶原蛋白发生水解和交联反应，形成弹性的凝胶状物质，弹性升高。还有可能是随着温度的升高，蛋白质的降解导致肌纤维束受到严重破坏后断裂变松，最终导致硬度和咀嚼性降低^[20]。温度高于 80 ℃的嫩化作用也可能是由于肉类胶原蛋白的糊化作用导致的质构变化^[21]。因此结合感官评价的结果，确定煮制温度范围为 70~90 ℃。

2.1.2.3 煮制温度对泡椒牛蛙色泽的影响

煮制温度对泡椒牛蛙色泽的影响结果见表 4。

表 4 煮制温度对泡椒牛蛙色泽的影响

Table 4 Effect of cooking temperature on the color of pickled pepper bullfrog

煮制温度/℃	<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *
60	57.56 ± 0.96 ^a	2.28 ± 0.93 ^a	19.36 ± 2.00 ^a
70	53.29 ± 0.63 ^b	1.91 ± 0.38 ^a	19.11 ± 0.46 ^a
80	53.63 ± 1.28 ^b	1.45 ± 0.62 ^a	20.09 ± 0.84 ^a
90	50.35 ± 1.39 ^c	2.55 ± 0.82 ^a	20.06 ± 1.39 ^a
100	52.10 ± 0.85 ^{bc}	1.55 ± 0.76 ^a	19.34 ± 0.58 ^a

由表 4 可知，随着煮制温度的升高， L^* 值总体呈现下降的趋势 ($P<0.05$)， a^* 和 b^* 值变化没有明显的规律 ($P>0.05$)。因此可知煮制温度只对牛蛙的亮度有影响，而对牛蛙的红度值和黄度值没有显著的影响。

开始当煮制温度为 60 ℃时，牛蛙的亮度最大，为 57.56，而之后随着煮制温度的增加，泡椒牛蛙的亮度呈现下降的趋势。随着煮制温度升高牛蛙的白度下降的原因可能是由于煮制温度的不断升高导致了牛蛙的成熟度增加，而成熟度增加则会使牛蛙的白度降低^[22]。还可能是由于温度的升高使肌肉失水，牛蛙肉纤维聚集，汁液溶出增加使其亮度降低。但由于加热后蛋白质已经失去活性，所以即使牛蛙的白度呈下降趋势但变化趋势不大，这与张佳伟等^[23]的研究结果相类似。

结合感官评分、硬度和色泽的综合影响，当煮制温度为 80 ℃时，泡椒牛蛙的总体评价最好。

2.1.3 煮制时间对泡椒牛蛙品质的影响

2.1.3.1 煮制时间对泡椒牛蛙感官品质的影响

煮制时间对泡椒牛蛙感官评分的影响结果见图 5。

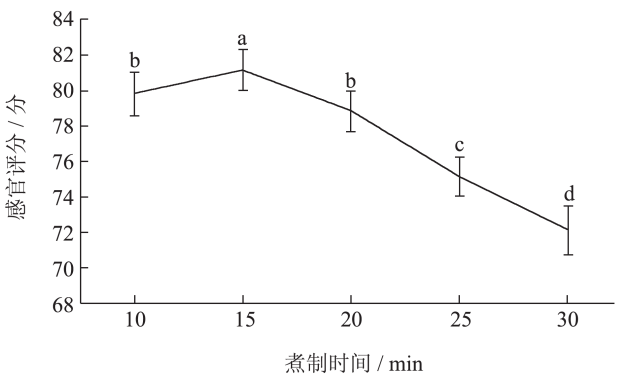


图 5 煮制时间对泡椒牛蛙感官评分的影响

Fig.5 Effect of cooking time on sensory score of pickled pepper bullfrog

由图 5 可知,随着煮制时间的增加,泡椒牛蛙的感官评分呈现先增加后降低的趋势 ($P<0.01$)。当煮制时间为 15 min 时,泡椒牛蛙的感官评分最高,为 81.13 分,当煮制时间为 30 min 时,泡椒牛蛙的感官评分最低,为 72.13 分。煮制时间对泡椒牛蛙的质构有显著的影响。开始煮制时间合适,牛蛙肉质紧实,咀嚼感较好,但随着煮制时间的不断增加,煮制时间过长导致牛蛙肉的保水性下降,牛蛙肉质变干变硬,咀嚼感越来越差,且肉质变硬后腌制时泡椒味难以渗入内部,因此使牛蛙肉外部泡椒味适中而内部味道寡淡。且随着煮制时间的延长牛蛙出现脱骨现象,到煮制时间为 30 min 时,牛蛙已经完全骨肉分离,感官较差。因此,当煮制时间为 15 min 时,泡椒牛蛙的骨肉紧密相连,泡椒味合适,咀嚼感较好,感官评分最高。

2.1.3.2 煮制时间对泡椒牛蛙质构的影响

煮制时间对泡椒牛蛙质构的影响结果见图 6。

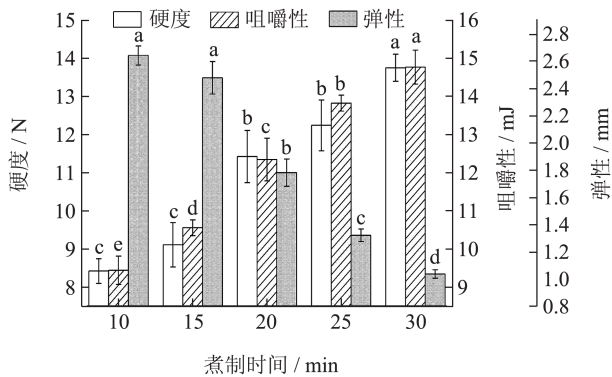


图 6 煮制时间对泡椒牛蛙质构的影响

Fig.6 Effect of cooking time on texture of pickled pepper bullfrog

由图 6 可知,随着煮制时间的增加,泡椒牛蛙的硬度和咀嚼性呈显著上升的趋势 ($P<0.01$),弹性呈显著降低趋势 ($P<0.01$)。当煮制时间为 30 min 时,泡椒牛蛙的硬度最大,为 13.75 N,咀嚼性最大,为 14.77 mJ,弹性最低。开始由于煮制时间较短,牛蛙的硬度和咀嚼性较小,富有弹性,但随着煮制时间的增加,牛蛙蛋白质变性越来越严重,蛋白质变性导致肌肉纤维严重收缩聚集,使肌细胞被破坏^[24],蛋白质分子和水之间的相互作用力减弱,牛蛙的保水能力降低,失水越来越多^[25],从而导致硬度和咀嚼性增大。蛋白质变性以及结构被破坏,弹性降低。范海龙等^[26]发现小龙虾内部肉硬度随着加热时间的增加而增加,这与本研究结果相似。因此综合感官评价的结果,煮制时间为 15 min

时,牛蛙的总体可接受性最高。

2.1.3.3 煮制时间对泡椒牛蛙色泽的影响

煮制时间对泡椒牛蛙色泽的影响结果见表 5。

表 5 煮制时间对泡椒牛蛙色泽的影响

Table 5 Effect of cooking time on the color of pickled pepper bullfrog

煮制时间/min	<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *
10	56.28 ± 0.49 ^a	1.98 ± 0.06 ^{ab}	23.15 ± 0.78 ^a
15	55.46 ± 0.46 ^{bc}	2.31 ± 0.29 ^a	22.75 ± 0.13 ^a
20	55.42 ± 0.26 ^b	2.12 ± 0.12 ^{ab}	23.78 ± 0.13 ^a
25	53.95 ± 0.75 ^{cd}	2.24 ± 0.16 ^a	22.83 ± 0.64 ^a
30	52.54 ± 0.65 ^d	1.74 ± 0.15 ^b	23.78 ± 0.82 ^a

由表 5 可知,随着煮制时间的增加,牛蛙的 L^* 值呈显著降低的趋势 ($P<0.01$), a^* 值和 b^* 值没有明显的变化趋势 ($P>0.05$)。当煮制时间为 10 min 时,牛蛙的 L^* 值最大,之后亮度降低。可能是由于煮制时间延长,肌纤维的严重收缩导致牛蛙失水严重,而水分的减少导致牛蛙的 L^* 值降低^[27]。持续的加热也会导致牛蛙的成熟度增加,使牛蛙的亮度值降低。王辅霞等^[28]发现随着煮制时间的增加,鲟鱼的 L^* 值降低,这与本研究试验结果相似。

综合感官评价、硬度和色泽的综合影响,牛蛙最佳煮制时间为 15 min。考虑到煮制时间为 10、15、20 min 时的感官评分相差较小,故煮制时间不作为响应面优化参数。

2.1.4 腌制时间对泡椒牛蛙品质的影响

2.1.4.1 腌制时间对泡椒牛蛙感官品质的影响

腌制时间对泡椒牛蛙感官评价的影响结果见图 7。

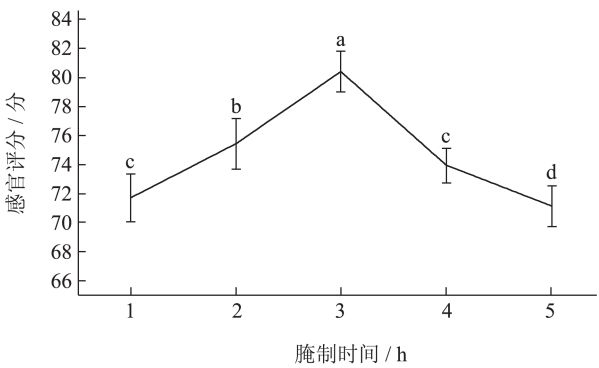


图 7 腌制时间对泡椒牛蛙感官评分的影响

Fig.7 Effect of pickling time on sensory score of pickled pepper bullfrog

由图 7 可知,随着腌制时间的增加,泡椒牛蛙的感官评分呈先上升后下降的趋势 ($P<0.05$),当腌制时间为 3 h 时,泡椒牛蛙的感官评价分数最高,为 80.38 分。开始时腌制时间较短,泡椒的酸味和辣味没有充分渗透进入牛蛙内部,牛蛙的色泽较浅,泡椒的酸辣香味不突出,酸辣味道较淡,层次感较差。但随着腌制时间的增加,牛蛙的色泽开始变深,泡椒的香味突出,味道也变重。但最后腌制时间过长会使牛蛙的酸味和辣味过重,掩盖了肉本身的味道,感官评分又有所下降。因此当腌制时间为 3 h 时,泡椒牛蛙的色泽淡黄、有光泽,有泡椒产品的应有的酸辣香味、没有异味,且牛蛙的酸味和辣味适中,味道鲜美,层次感较好,总体可接受性最高。

2.1.4.2 腌制时间对泡椒牛蛙质构的影响

腌制时间对泡椒牛蛙质构的影响结果见图 8。

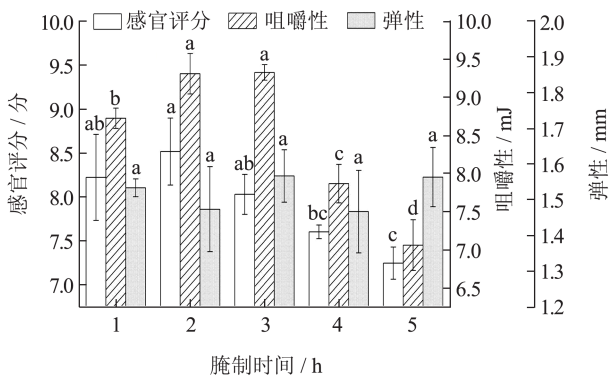


图 8 腌制时间对泡椒牛蛙质构的影响

Fig.8 Effect of pickling time on texture of pickled pepper bullfrog

由图 8 可知,随着腌制时间的增加,牛蛙的硬度总体呈下降的趋势 ($P<0.05$),咀嚼性呈先上升后下降的趋势 ($P<0.01$),弹性数值上下波动,但不显著 ($P>0.05$)。牛蛙质构改变的原因可能是腌制前期腌制液向内渗透的速率小于牛蛙肉水分向外转移的速率,牛蛙肉失水,但由于变化较小对硬度影响不显著。后期腌制液向内渗透的速率大于牛蛙肉水分向外转移的速率,牛蛙肉吸水^[29],最终导致牛蛙肉硬度和咀嚼性的显著变化。因此,结合感官评价的结果,确定泡椒牛蛙的腌制时间范围为 2~4 h。

2.1.4.3 腌制时间对泡椒牛蛙色泽的影响

腌制时间对泡椒牛蛙色泽的影响结果见表 6。

由表 6 可知,随着腌制时间的增加,牛蛙的亮度总体呈下降的趋势 ($P<0.05$),这与钟楠等^[30]的研究结果相似。牛蛙的 a^* 值无显著变化 ($P>0.05$), b^* 值总体上呈先上升后降低的趋势 ($P<0.05$)。当

腌制时间为 2 h 时,牛蛙的黄色最大。可能是由于刚开始时牛蛙肉为白色,但随着腌制时间的增加,香辛料及泡椒的色泽逐渐进入牛蛙肉中,导致牛蛙肉色变深, b^* 值增大。到腌制后期,牛蛙肉对色素的吸附作用达到极限,肉的颜色变深而缺乏肉的光泽和色泽, L^* 值下降。

表 6 腌制时间对泡椒牛蛙色泽的影响

Table 6 Effect of pickling time on the color of pickled pepper bullfrog

腌制时间/h	<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *
1	58.54 ± 1.72 ^a	2.26 ± 0.26 ^a	20.49 ± 0.55 ^c
2	58.04 ± 0.58 ^a	2.78 ± 1.01 ^a	23.78 ± 0.91 ^a
3	57.82 ± 2.26 ^a	2.91 ± 1.04 ^a	22.73 ± 1.05 ^{ab}
4	50.62 ± 2.91 ^b	2.88 ± 0.57 ^a	21.12 ± 0.81 ^{bc}
5	51.24 ± 3.34 ^b	2.43 ± 1.09 ^a	21.81 ± 0.38 ^{bc}

结合感官评价、硬度和色泽的综合影响,当腌制时间为 3 h 时,泡椒牛蛙的总体评价最好。

2.2 响应面优化试验结果与分析

2.2.1 试验结果

在单因素试验基础上,以感官评分为响应值,对泡椒质量分数、煮制温度、腌制时间三个因素进行泡椒牛蛙工艺的优化,确定泡椒牛蛙最佳工艺配方。响应面试验方案及结果见表 7。

表 7 响应面试验方案及结果

Table 7 Response surface experimental scheme and results

试验号	A 泡椒质量分数/%	B 煮制温度/℃	C 腌制时间/h	Y 感官评分
1	35	90	3	75
2	25	70	3	75
3	30	80	3	82
4	35	80	4	76
5	25	80	4	76
6	30	70	2	76
7	30	80	3	83
8	25	80	2	76
9	30	90	4	80
10	30	90	2	77
11	30	70	4	78
12	25	90	3	76
13	30	80	3	82
14	35	70	3	71
15	30	80	3	82
16	35	80	2	72
17	30	80	3	82

2.2.2 回归模型的建立与方差分析

运用 Design expert 13 软件对表 7 的数据进行处理，得到回归方程 $Y=82.25-1.18A+1.11B+1.03C+0.825\ 0AB+0.792\ 5AC+0.137\ 5BC-5.32A^2-2.64B^2-1.69C^2$ 。对最后的结果进行方差分析和可信度分析，结果如表 8、表 9 所示。

表 8 方差分析表
Table 8 Analysis of variance table

方差来源	偏差平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	209.26	9	23.25	62.04	<0.000 1	**
A	11.21	1	11.21	29.91	0.000 9	**
B	9.88	1	9.88	26.36	0.001 3	**
C	8.45	1	8.45	22.53	0.002 1	**
AB	2.72	1	2.72	7.26	0.030 9	*
AC	2.51	1	2.51	6.70	0.036 0	*
BC	0.075 6	1	0.075 6	0.201 8	0.666 9	
A ²	119.03	1	119.03	317.59	<0.000 1	**
B ²	29.39	1	29.39	78.41	<0.000 1	**
C ²	12.09	1	12.09	32.26	0.000 8	**
残差	2.62	7	0.374 8			
失拟项	1.43	3	0.475 0	1.59	0.325 3	
纯误差	1.20	4	0.299 6			
总误差	211.88	16				

注：** 为极显著 ($P<0.01$)；* 为显著 ($P<0.05$)。

表 9 回归模型可信度分析表
Table 9 Regression model reliability analysis table

项目	决定系数 R^2	校正决定系数 R^2_{adj}	变异系数 C.V./%	信噪比
数值	0.987 6	0.971 7	0.787 8	23.595 1

由表 3 可知，模型的偏差平方和为 209.26， F 值为 62.04，表明该模型是有意义的，且 P 值小于 0.000 1，结果为极显著，表明模型合理。失拟项 $P=0.325\ 3>0.05$ ，表明了该模型误差小，失拟项不显著。回归模型的决定系数 $R^2=0.987\ 6$ ，说明该模型与实际情况的拟合度较高，校正决定系数 $R^2_{adj}=0.971\ 7$ ，表明试验值与预测值高度拟合；C.V.=0.787 8%，远小于 10%，表明试验变量的方差较小，试验结果稳定；回归模型的信噪比为 23.595 1，远大于 4，说明模型设计合理，可信度高。综上分析，该模型拟合度高，能很好的反应响应值与自变量之间的关系。

由表 8 还可知 A、B、C、A²、B²、C² 对模型

影响十分显著，AB、AC 对模型影响显著。由 P 值可知，各因素对模型的影响程度为 $A>B>C$ ，即泡椒质量分数相对另外两个因素对模型影响最大，腌制时间相对其他两个因素对模型的影响稍小。

2.2.3 交互作用分析

泡椒质量分数与煮制温度对泡椒牛蛙感官评分交互作用影响如图 9a 所示。当泡椒质量分数不变时，感官评分随着煮制温度的增加出现缓慢上升又缓慢减小的趋势；当煮制温度不变时，随着泡椒质量分数的增加，感官评分出现显著增大后减小的趋势。由图 9a 可知，响应面曲面坡度较陡，等高线呈椭圆形，说明泡椒质量分数与煮制温度之间的交互作用显著。

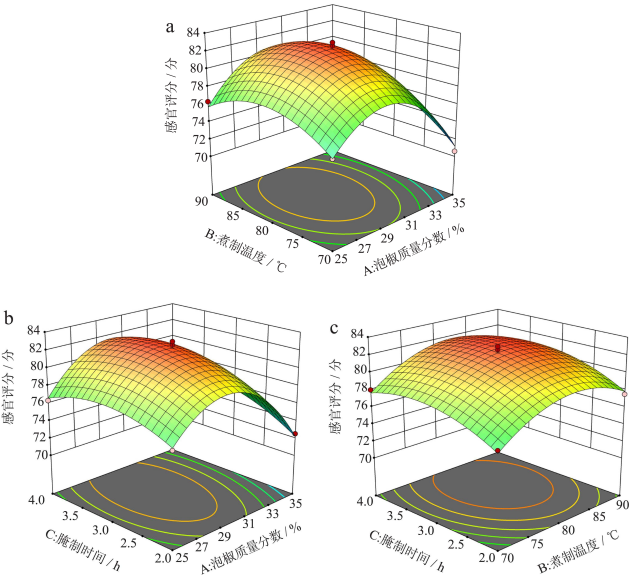


图 9 两因素交互作用对泡椒牛蛙感官评分影响的响应面曲面图

Fig.9 Response surface diagram of the effect of two-factor interaction on the sensory score of pickled pepper bullfrog

泡椒质量分数与腌制时间对泡椒牛蛙的感官评分的交互作用影响如图 9b 所示。当泡椒质量分数不变时，随着腌制时间的增加，泡椒牛蛙的感官评分呈缓慢上升后下降的趋势，；当腌制时间不变时，随着泡椒质量分数的增加，泡椒牛蛙的感官评分呈显著上升后下降的趋势。由图 9b 可知，响应面曲面坡度较陡，等高线呈椭圆形，说明泡椒质量分数与腌制时间的交互作用显著。

煮制温度与腌制时间对泡椒牛蛙的感官评分交互作用影响如图 9c 所示。由图 9c 可知，响应面曲面坡度较平缓，等高线呈圆形，说明煮制温度与腌制时间的交互作用不显著。

2.2.4 泡椒牛蛙最佳工艺配方的确定

经响应面试验,用 Design-Expert 13 软件优化出泡椒牛蛙的最佳配方为泡椒质量分数 30%,煮制温度 82 ℃,腌制时间 3 h,对泡椒牛蛙进行验证试验。考虑到操作的方便性,将煮制温度调为 80 ℃,在此条件下制作的泡椒牛蛙评分为 83 分,与软件预测的 82 分非常相近,误差小,说明该试验方案可行。

2.2.5 泡椒牛蛙菌落总数

在确定泡椒牛蛙的最佳配方后,按照最佳配方制作泡椒牛蛙,测定泡椒牛蛙的菌落总数。经测定,只有稀释 10 倍时的平板有菌落生长,且数量极少,小于计数范围。按国标 GB 4789.2-2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》计算得到的菌落数为 55 CFU/(g·mL),远小于 1×10^5 CFU/(g·mL),因此泡椒牛蛙的菌落总数符合国家标准。

2.2.6 泡椒牛蛙的持水力

持水力是评价肉制品嫩度、多汁性和口感等的重要指标。经测定泡椒牛蛙的持水力为 80.00%,鲜牛蛙的持水力为 89.42%。经过加工,牛蛙的持水力下降了 9.42%,但仍可以保持泡椒牛蛙柔软鲜嫩的口感。

2.2.7 泡椒牛蛙风味的测定

图 10 和图 11 分别是泡椒牛蛙挥发性风味物质的 GC-IMS 的三位谱图和二维谱图,三个坐标轴分别表示迁移时间(X轴)、保留时间(Y轴)和信号峰强度(Z轴),红色表示风味物质浓度高,白色表示风味物质浓度低。图 12 是泡椒牛蛙三组平行样品中挥发性成分 GC-IMS 差异谱图,如果目标样品和参比组中的挥发性有机物含量一样,则扣减后的背景为白色,而红色代表该物质的浓度在目标样品中高于参比,蓝色代表该物质的浓度在目标样品中低于参比。由图 8 可知三组平行样品不同区域的信号强度存在一定的差异,但差异较小。图 13 是泡椒牛蛙的挥发性成分指纹图谱,可以比较每一个样品之间不同挥发物的浓度高低,红色越深代表含量越高。由图 13 可知三个平行样品之间不同挥发物存在一定的差异,这可能是由于测定的泡椒牛蛙的部位不同而导致了差异的产生,但总体差异并不显著。

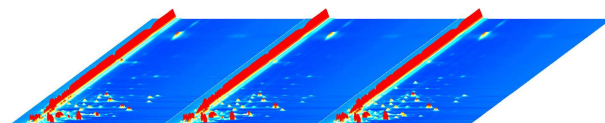


图 10 泡椒牛蛙挥发性风味物质的 GC-IMS 三维谱图

Fig.10 GC-IMS three-dimensional spectrum of volatile flavor compounds of pickled pepper bullfrog

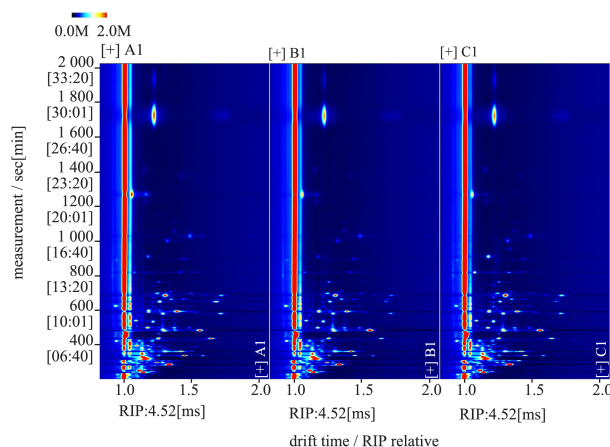


图 11 泡椒牛蛙挥发性风味物质的 GC-IMS 二维谱图

Fig.11 GC-IMS two-dimensional spectrum of volatile flavor compounds of pickled pepper bullfrog

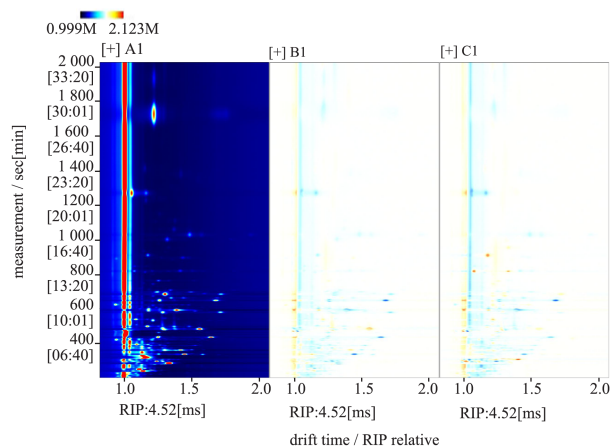


图 12 泡椒牛蛙平行样品中挥发性成分 GC-IMS 差异谱图

Fig.12 GC-IMS difference spectra of volatile components in parallel samples of pickled pepper bullfrog

肉制品的风味与原料、辅料和加工的方式密切相关。由表 10 可知,泡椒牛蛙中共鉴定出 77 种挥发性风味物质,其中醛类 17 种,醇类 16 种,酮类 11 种,酯类 15 种,醚类 3 种,烃类 9 种,还有其它少数种类共 6 种。

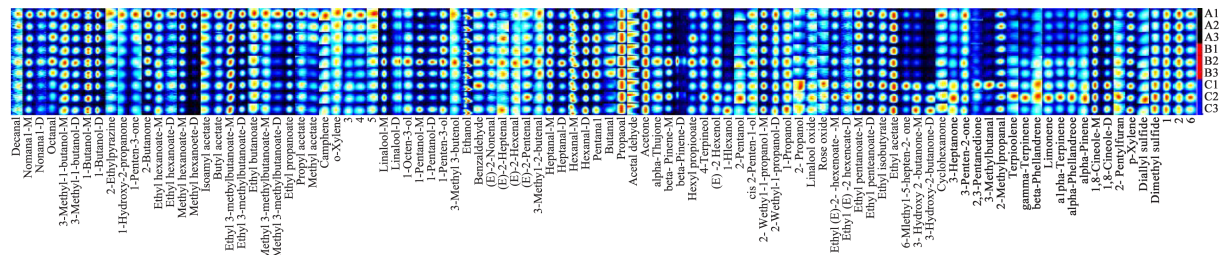


图 13 泡椒牛蛙挥发性成分指纹图谱

Fig.13 Fingerprint of volatile components in pickled pepper bullfrog

表 10 泡椒牛蛙风味物质成分

Table 10 Flavor components of pickled pepper bullfrog

编号	化合物种类	化合物名称	英文名称	分子式	保留时间/s	百分比含量/%
1	醛类	辛醛	Octanal	C ₈ H ₁₆ O	817.87	0.53
2		反-2-庚烯醛	(E)-2-Heptenal	C ₇ H ₁₂ O	894.37	0.09
3		苯甲醛	Benzaldehyde	C ₇ H ₆ O	1 410.77	0.45
4		反-2-壬烯醛	(E)-2-Nonenal	C ₉ H ₁₆ O	1 376.08	0.60
5		癸醛	Decanal	C ₁₀ H ₂₀ O	1 341.45	0.25
6		庚醛	Heptanal	C ₇ H ₁₄ O	662.53	0.32
7		反-2-戊烯醛	(E)-2-Pentenal	C ₅ H ₈ O	569.05	0.17
8		己醛	Hexanal	C ₆ H ₁₂ O	954.18	4.49
9		戊醛	Pentanal	C ₅ H ₁₀ O	361.63	2.20
10		壬醛	Nonanal	C ₉ H ₁₈ O	1 028.05	0.26
11		正丁醛	Butanal	C ₄ H ₈ O	279.65	0.20
12		丙醛	Propanal	C ₃ H ₆ O	240.19	6.10
13		乙醛	Acetaldehyde	C ₂ H ₄ O	215.77	1.53
14		2-甲基丙醛	2-Methylpropanal	C ₄ H ₈ O	245.89	0.10
15		3-甲基-2-丁烯醛	3-Methyl-2-butenal	C ₅ H ₈ O	689.44	0.05
16		反-2-己烯醛	(E)-2-Hexenal	C ₆ H ₁₀ O	711.64	0.06
17		3-甲基丁醛	3-Methylbutanal	C ₅ H ₁₀ O	307.64	0.21
18	醇类	4-萜醇	4-Terpineol	C ₁₀ H ₁₈ O	1 927.60	3.23
19		1-己醇	1-Hexanol	C ₆ H ₁₄ O	954.18	0.11
20		芳樟醇	Linalool	C ₁₀ H ₁₈ O	1 721.48	4.97
21		1-辛烯-3-醇	1-Octen-3-ol	C ₈ H ₁₆ O	1 221.43	0.43
22		氧化芳樟醇	Linalool oxide	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	1 145.25	0.15
23		1-戊醇	1-Pentanol	C ₅ H ₁₂ O	763.61	0.08
24		戊烯醇-3	1-Penten-3-ol	C ₅ H ₁₀ O	625.03	1.06
25		1-丁醇	1-Butanol	C ₄ H ₁₀ O	593.05	5.63
26		反-2-己烯醇	(E)-2-Hexenol	C ₆ H ₁₂ O	1 055.27	0.40
27		2-甲基-1-丙醇	2-Methyl-1-propanol	C ₄ H ₁₀ O	498.01	0.83
28		正丙醇	1-Propanol	C ₃ H ₈ O	424.77	0.82
29		乙醇	Ethanol	C ₂ H ₆ O	316.64	24.99
30		2-戊醇	2-Pentanol	C ₅ H ₁₂ O	510.01	0.10
31		3-甲基-3-丁烯醇	3-Methyl 3-butenol	C ₅ H ₁₀ O	747.59	0.10
32		异丙醇	2-Propanol	C ₃ H ₈ O	308.56	0.31
33		3-甲基-1-丁醇	3-Methyl-1-butanol	C ₅ H ₁₂ O	697.83	0.53
34		顺-2-戊烯-1-醇	cis-2-Penten-1-ol	C ₅ H ₁₀ O	890.41	0.31

续表 10

编号	化合物种类	化合物名称	英文名称	分子式	保留时间/s	百分比含量/%
35	酮类	丙酮	Acetone	C ₃ H ₆ O	250.15	6.35
36		6-甲基-5-庚烯-2-酮	6-Methyl-5-hepten-2-one	C ₈ H ₁₄ O	908.88	0.91
37		1-羟基-2-丙酮	1-Hydroxy-2-propanone	C ₃ H ₆ O ₂	846.89	0.20
38		3-羟基-2-丁酮	3-Hydroxy-2-butanone	C ₄ H ₈ O ₂	819.19	0.10
39		环己酮	Cyclohexanone	C ₆ H ₁₀ O	812.60	0.19
40		α-侧柏酮	alpha-Thujone	C ₁₀ H ₁₆ O	1 107.91	0.19
41		3-戊烯-2-酮	3-Penten-2-one	C ₅ H ₈ O	507.53	0.30
42		3-庚酮	3-Heptanone	C ₇ H ₁₄ O	608.49	0.12
43		1-戊烯-3-酮	1-Penten-3-one	C ₅ H ₈ O	373.63	0.24
44		2-丁酮	2-Butanone	C ₄ H ₈ O	297.64	1.63
45		2,3-戊二酮	2,3-Pentanedione	C ₅ H ₈ O ₂	448.21	0.06
46	酯类	己酸乙酯	Ethyl hexanoate	C ₈ H ₁₆ O ₂	708.86	0.05
47		丙酸己酯	Hexyl propionate	C ₉ H ₁₈ O ₂	895.69	0.44
48		戊酸乙酯	Ethyl pentanoate	C ₇ H ₁₄ O ₂	580.91	1.54
49		己酸甲酯	Methyl hexanoate	C ₇ H ₁₄ O ₂	649.30	2.15
50		乙酸丁酯	Butyl acetate	C ₆ H ₁₂ O ₂	462.12	0.42
51		3-甲基丁酸乙酯	Ethyl 3-methylbutanoate	C ₇ H ₁₄ O ₂	435.76	2.61
52		丙酸乙酯	Ethyl propanoate	C ₅ H ₁₀ O ₂	337.64	2.70
53		醋酸丙酯	Propyl acetate	C ₅ H ₁₀ O ₂	353.64	0.04
54		丁酸乙酯	Ethyl butanoate	C ₆ H ₁₂ O ₂	418.91	0.90
55		3-甲基丁酸甲酯	Methyl 3-methylbutanoate	C ₆ H ₁₂ O ₂	435.76	0.19
56		乙酸乙酯	Ethyl acetate	C ₄ H ₈ O ₂	284.64	9.07
57		乙酸甲酯	Methyl acetate	C ₃ H ₆ O ₂	257.65	0.13
58	醚类	异丁酸乙酯	Ethyl isobutyrate	C ₆ H ₁₂ O ₂	337.05	0.61
59		醋酸异戊酯	Isoamyl acetate	C ₇ H ₁₄ O ₂	546.23	0.21
60		反-2-己烯酸乙酯	Ethyl (E)-2-hexenoate	C ₈ H ₁₄ O ₂	1 000.82	0.13
61		烯丙基硫醚	Diallyl sulfide	C ₆ H ₁₀ S	599.08	0.09
62	烯类	二甲硫醚	Dimethyl sulfide	C ₂ H ₆ S	227.98	0.55
63		玫瑰醚	Rose oxide	C ₁₀ H ₁₈ O	883.36	0.05
64		γ-萜品烯	gamma-Terpinene	C ₁₀ H ₁₆	745.26	0.15
65		莰烯	Camphene	C ₁₀ H ₁₆	428.63	0.23
66	烃类	α-蒎烯	alpha-Pinene	C ₁₀ H ₁₆	402.13	0.24
67		β-蒎烯	beta-Pinene	C ₁₀ H ₁₆	532.39	1.59
68		萜品油烯	Terpinolene	C ₁₀ H ₁₆	799.05	0.30
69		二戊烯	Limonene	C ₁₀ H ₁₆	675.77	0.21
70		β-水芹烯	beta-Phellandrene	C ₁₀ H ₁₆	620.62	0.05
71		α-水芹烯	alpha-Phellandrene	C ₁₀ H ₁₆	689.46	0.27
72		α-萜品烯	alpha-Terpinene	C ₁₀ H ₁₆	644.89	0.27
73		邻二甲苯	o-Xylene	C ₈ H ₁₀	656.11	0.05
74	其它	对二甲苯	p-Xylene	C ₈ H ₁₀	539.02	1.46
75		1,8-桉叶素	1,8-Cineole	C ₁₀ H ₁₈ O	686.80	1.21
76		2-戊基呋喃	2-Pentylfuran	C ₉ H ₁₄ O	729.82	0.06
77		2-乙基吡嗪	2-Ethylpyrazine	C ₆ H ₈ N ₂	933.43	0.10

醛类化合物通常阈值较低，对肉制品风味起着十分重要的作用。泡椒牛蛙中醛类化合物种类最多，有 17 种，不饱和脂肪酸的氧化可能是其主要形成途径^[31]。其中辛醛、庚醛等物质具有甜香味，是泡椒牛蛙中主要的挥发性风味物质之一。醇类化合物主要来源于脂肪酸的氧化降解，香辛料可能也是其来源之一，其中不饱和脂肪醇类如 1-辛烯-3-醇有青草和蘑菇香气，对泡椒牛蛙风味贡献较大，而饱和脂肪醇类一般阈值较高，对泡椒牛蛙的风味贡献不大^[32]。酮类化合物主要来源于美拉德反应和脂质氧化^[33]，对泡椒牛蛙的香味形成也起着重要作用。酯类化合物一般呈清淡的果香气味，所含种类共有 15 种，对泡椒牛蛙风味的形成起着重要的作用。醚类化合物所含种类少，但对泡椒牛蛙风味形成也起着一定的作用。泡椒牛蛙中烃类化合物均为烯烃类，主要来源于香辛料，但由于烃类物质阈值较高，对风味影响较小。此外，2-戊基呋喃、2-乙基吡嗪等杂环化合物都被认为是构成肉制品香气的重要化合物，对泡椒牛蛙的风味形成起着一定的作用。

首先，在煮制过程中肉中的蛋白质等与还原糖发生美拉德反应，形成吡嗪类风味化合物，赋予了牛蛙风味。其次在煮制过程中脂质氧化也会形成一些过氧化物，这些过氧化物继续分解一些香气阈值很低的挥发性物质，有些参与到美拉德反应当中，使牛蛙肉的香味更加浓郁。此外，在煮制过程中蛋白质的分解也会产生醇、醛等化合物，对牛蛙风味的形成起着重要的作用。

香辛料也是泡椒牛蛙风味形成的重要成分之一。正确的使用香辛料会给泡椒牛蛙的风味带来积极的效果。香辛料中含有许多芳香化合物，添加香辛料会引入许多新的风味化合物，这些成分可能会和原有的基质发生反应形成新的化合物从而增加成品的风味。香辛料可能是最终产品中的酚、醚类物质和烃类物质的主要来源，其中也含有一些苦味化合物如芳樟醇等，但通过不同香辛料的搭配使用，不仅可以突出牛蛙的特征香味，还可以去除膻腥味，赋予牛蛙独特的风味。在加工过程中泡椒风味的形成是关键，对于最终产品的风味起着重要的作用，泡椒中含有的烃类、酯类、醇类等化合物，赋予了泡椒牛蛙丰富的风味。

2.2.8 泡椒牛蛙滋味的测定

游离氨基酸在肉的滋味形成中起着十分重要的作用，氨基酸种类和含量的不同，导致了滋味的不

同。氨基酸可以分为鲜味氨基酸、甜味氨基酸和苦味氨基酸。由表 11 可知，牛蛙中共测到 17 种氨基酸，其中氨基酸含量最高的为谷氨酸，为 448.7 mg/100 g，是泡椒牛蛙的主要鲜味贡献者，天冬氨酸是另一个含量较高的鲜味氨基酸，对泡椒牛蛙的滋味形成也起着重要的作用。

表 11 泡椒牛蛙中游离氨基酸含量
Table 11 Free amino acid content in pickled pepper bullfrog

味道	氨基酸	含量/(mg/100 g)
鲜味	天冬氨酸 Asp	180.67 ± 0.46
	谷氨酸 Glu	448.67 ± 0.70
	苏氨酸 Thr	122.00 ± 0.23
甜味	丝氨酸 Ser	101.67 ± 0.38
	甘氨酸 Gly	107.33 ± 0.07
	丙氨酸 Ala	143.67 ± 0.07
	脯氨酸 Pro	144.67 ± 0.07
	缬氨酸 Val	114.67 ± 0.04
	蛋氨酸 Met	64.00 ± 0.02
苦味	异亮氨酸 Ile	115.33 ± 0.04
	亮氨酸 Leu	204.33 ± 0.08
	酪氨酸 Tyr	80.67 ± 0.04
	苯丙氨酸 Phe	98.33 ± 0.03
	组氨酸 His	35.67 ± 0.01
	赖氨酸 Lys	245.33 ± 0.16
	精氨酸 Arg	54.67 ± 0.07
	半胱氨酸 Cys	27.33 ± 0.01
鲜味氨基酸总量		629.34 ± 1.46
甜味氨基酸总量		619.34 ± 0.29
苦味氨基酸总量		1 040.33 ± 0.65
游离氨基酸总量		2 289.01 ± 0.97

牛蛙本身含有许多氨基酸，其中鲜味氨基酸和甜味氨基酸含量丰富。尤其是鲜味氨基酸含量相对许多鱼类较高，这是牛蛙味道鲜美的主要原因。在加工过程当中加入的许多调味物质，这对泡椒牛蛙滋味的形成起着重要的作用，但在加工过程中一些程序如蒸煮可能也导致了部分鲜味氨基酸的损失。因此，添加的鸡精和味精对最终产品牛蛙的鲜味起着重要的改善作用，使最终的产品仍保持味道鲜嫩。

在加工过程中香辛料对泡椒牛蛙的滋味也起着重要的作用，香辛料本身具有一定的滋味，还会增强肉制品原有的滋味，减少异味。如香辛料中的小茴香含量最高的氨基酸为谷氨酸，谷氨酸作为一种

鲜味氨基酸对泡椒牛蛙的鲜味形成有着重要意义,八角等香辛料中的生物碱减少了因脂质氧化而产生的不良风味,还对于肉制品的甜味起着重要作用,但香叶等香辛料对苦味的形成有明显的作用,而白糖添加则可能是泡椒牛蛙呈甜味的重要原因。总之,由表 11 可知,泡椒牛蛙的甜味氨基酸含量普遍较高,而苦味氨基酸虽然种类较多,但其含量却比鲜味氨基酸和甜味氨基酸少。因此鲜味氨基酸和甜味氨基酸含量总和远大于苦味氨基酸,最终使泡椒牛蛙有较好的滋味。

2.2.9 泡椒牛蛙加工前后

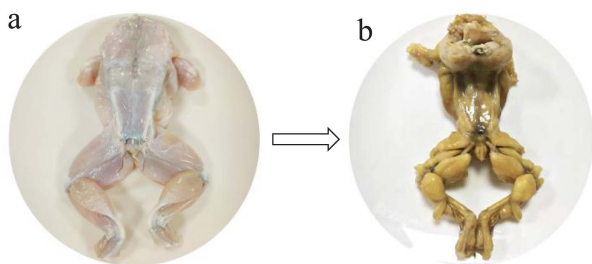


图 14 牛蛙加工前与加工后

Fig.14 The bullfrog before and after processing

注: (a) 新鲜牛蛙胴体; (b) 泡椒牛蛙成品。

牛蛙加工前后如图 14 所示,牛蛙在经过加工后色泽淡黄、有光泽,味道鲜美,有泡椒产品的特殊风味和酸辣滋味。

3 结论

本研究以牛蛙和泡椒为主要原料,添加食盐、糖、米醋、白醋等其他配料,首先对泡椒质量分数、煮制温度、煮制时间、腌制时间四个因素进行了单因素试验,在感官、质构、色泽三个方面对泡椒牛蛙的品质进行了改善。然后在单因素试验的基础上选取了三个主要因素,采用响应面法优化泡椒牛蛙加工工艺。最终用 Design Expert 13 软件优化出的泡椒牛蛙最佳工艺配方为:泡椒质量分数为 30%、煮制温度为 82 ℃、腌制时间为 3 h。考虑到操作的可行性,将煮制温度调为 80 ℃,制作泡椒牛蛙。在此条件下加工制成的泡椒牛蛙评价最好,色泽淡黄、有泡椒产品的酸辣风味,口感鲜嫩爽滑,酸辣爽口,总体可接受性较高,最终感官评分为 83 分。最终测定泡椒牛蛙持水力为 80.00%,降低了 9.42%,损失较小;菌落总数为 55 CFU/(g·mL),数量远低于国家规定限量。本研究可为泡椒牛蛙产品开发提供参考。

通过气相离子迁移谱仪和氨基酸分析仪对泡椒牛蛙的风味和滋味进行测定分析,共测出 77 种挥发性风味物质和 17 种游离氨基酸,分析结果表明泡椒牛蛙有较好的风味和滋味。泡椒牛蛙风味和滋味的形成是一个复杂的过程,与原料、辅料以及加工方式等息息相关,但文章最后只测定了最终产品的风味和滋味物质,而其形成过程还并不完全清晰。目前市面上并没有泡椒牛蛙相关类型产品,我国牛蛙产量的不断上升以及休闲肉制品的巨大市场需求也使得开发相关产品具有一定的研究价值。本研究主要对影响泡椒牛蛙感官评价等指标的主要相关因素进行了优化,未来还可以继续不断优化其他指标,如食盐添加量和香辛料的使用种类和使用量等,同时还可以对泡椒牛蛙的贮藏期以及贮藏期间的风味变化进行研究。

参考文献

- [1] SU F, WANG L, SONG K, et al. Dietary calcium requirement of bullfrog (*Lithobates catesbeiana*) [J]. Aquaculture Reports, 2023, 33: 101751.
- [2] WANG Z, ZHANG C, LU K, et al. Effects of supplementing intestinal autochthonous bacteria in plant-based diets on growth, nutrient digestibility, and gut health of bullfrogs (*Lithobates catesbeianus*) [J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 739572.
- [3] LAN W, ZHANG B, DU J, et al. Synergistic effect of combined treatment with allicin and antioxidant of bamboo leaves and preservation of bullfrogs (*Lithobates catesbeiana*) during refrigeration storage [J]. Foods, 2023, 12(18): 3467.
- [4] DU J, LAN W, XIE J. Quality characteristics and moisture migration of refrigerated bullfrog (*Lithobates catesbeiana*) under slightly acidic electrolyzed water combined with composite preservative treatment [J]. Food Bioscience, 2023, 55: 102947.
- [5] ZHANG Q, ZHANG F, GONG C, et al. Physicochemical, microbial, and aroma characteristics of Chinese pickled red peppers (*Capsicum annuum*) with and without biofilm [J]. RSC Advances, 2020, 10(11): 6609-6617.
- [6] YE Z, SHANG Z, LI M, et al. Effect of ripening and variety on the physicochemical quality and flavor of fermented Chinese chili pepper (*Paojiao*) [J]. Food Chemistry, 2022, 368: 130797.
- [7] 张隐,赵靓,王永涛,等.超高压处理对泡椒凤爪微生物与品质的影响[J].食品科学,2015,36(3):46-50.
- [8] 于小番,袁亚明,叶宇,等.不同热处理方式下虾肉品质和蛋白质结构变化的差异[J].现代食品科技,2021,37(5): 160-168.
- [9] 徐云强,王鸿泽,严书林,等.腌制蒸煮猪肉切片冷藏期间色泽变化与氮的存在形式及氧化状态的关系[J].食品工

- 业科技,2020,41(4):242-246,251.
- [10] 杨眉,安玥琦,任洋莹,等.响应面法优化猪肉/鱼肉复合调理狮子头的加工工艺[J].现代食品科技,2023,39(7):227-236.
- [11] 王琳,韩森森,李聪,等.基于多元统计分析不同品牌牛肉汤的水溶性滋味物质差异对比[J].现代食品科技,2024,40(3):272-280.
- [12] DURANTON F, SIMONIN H, CHÉRET R, et al. Effect of high pressure and salt on pork meat quality and microstructure [J]. Journal of Food Science, 2012, 77(8): E188-E194.
- [13] VIDAL V A S, BIACHI J P, PAGLARINI C S, et al. Reducing 50% sodium chloride in healthier jerked beef: An efficient design to ensure suitable stability, technological and sensory properties [J]. Meat Science, 2019, 152: 49-57.
- [14] ZHANG D, LI H, EMARA A M, et al. Study on the mechanism of KCl replacement of NaCl on the water retention of salted pork [J]. Food Chemistry, 2020, 332: 127414.
- [15] 高霞,冯庆祥,胡杨,等.高强度超声与低氯化钠盐协同作用下鲢鱼糜凝胶的品质变化[J].现代食品科技,2023,39(11):197-204.
- [16] 姜晶丹,杨明远,许长华,等.湿腌时盐质量浓度对草鱼肌肉组织结构和品质的影响[J].食品科学,2021,42(8):40-45.
- [17] 李苓,杨明柳,周迎芹,等.加热温度对鳊鱼肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J].食品与发酵工业,2023,49(19):242-248.
- [18] JIANG Q, HAN J, GAO P, et al. Effect of heating temperature and duration on the texture and protein composition of bighead carp (*Aristichthys nobilis*) muscle [J]. International Journal of Food Properties, 2018, 21(1): 2110-2120.
- [19] VASANTHI C, VENKATARAMANUJAM V, DUSHYANTHAN K. Effect of cooking temperature and time on the physico-chemical, histological and sensory properties of female carabeef (buffalo) Meat [J]. Meat Science, 2007, 76(2): 274-280.
- [20] ZHANG J, YAO Y, YE X, et al. Effect of cooking temperatures on protein hydrolysates and sensory quality in crucian carp (*Carassius auratus*) soup [J]. Journal of Food Science and Technology, 2011, 50(3): 542-548.
- [21] PALKA K. Changes in intramuscular connective tissue and collagen solubility of bovine *m.semitendinosus* during retorting [J]. Meat Science, 1999, 53(3): 189-194.
- [22] 吴彬彬,傅采琪,胥伟,等.热处理中八角莽草酸对鸭腿色泽的影响[J].食品科学,2022,43(12):101-106.
- [23] 张佳伟,汪峰,韩森森,等.超声结合低温清卤两段热加工对鸡肉品质和风味的影响[J].食品工业科技,2024,45(3): 207-217.
- [24] 徐若瑗,薛纪元,王敏,等.不同热处理方式对牛肉嫩度和挥发性风味物质的影响[J].食品工业科技,2023,44(4):77-87.
- [25] RABELER F, FEYISSA A H. Kinetic modeling of texture and color changes during thermal treatment of chicken breast meat [J]. Food and Bioprocess Technology, 2018, 11(8): 1495-504.
- [26] 范海龙,朱华平,范大明,等.微波加热对小龙虾品质的影响[J].食品工业科技,2020,41(18):8-16.
- [27] 贺紫琼,张立彦.粤式豉油鸡传统烹煮过程中的质地及风味变化[J].现代食品科技,2024,40(2):292-301.
- [28] 王辅霞,毕保良,李秀芬,等.响应面优化即食风味鲟鱼加工工艺及其贮藏品质分析[J].中国调味品,2024,49(3):8-14.
- [29] 付丽,高雪琴,申晓琳,等.牛肉湿腌及超声波辅助湿腌过程中腌制液渗透速率的研究[J].食品科技,2019,44(4): 104-109.
- [30] 钟楠,李京九,王宏勋,等.卤鸭腿中桂皮提取液添加工艺优化及理化品质影响[J].中国调味品,2023,48(4):37-42,49.
- [31] 吴若彤,王兴伟,夏书芹,等.外源氨基酸对牡蛎肽美拉德反应产物风味特性的调控作用[J].食品与生物技术学报,2023,42(3):30-37.
- [32] 袁丽萍,彭斌,钟比真,等.紫外减菌联合低温对草鱼肉品质及挥发性风味的影响[J].食品与机械,2023,39(12):117-125.
- [33] 林婉玲,曾姣,郑秋纯,等.不同卤料处理方式对卤味鹅肝挥发性风味物质的影响[J].现代食品科技,2024,40(6): 243-251.