

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.07.004

廖林, 贺稚非, 李洪军. 超声波辅助复合蛋白酶对冬菜扣肉品质的影响研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(7): 29-39.

超声波辅助复合蛋白酶 对冬菜扣肉品质的影响研究

廖林¹, 贺稚非^{1,2}, 李洪军^{1,2}

1. 西南大学 食品科学学院, 重庆 400715; 2. 川渝共建特色食品重庆市重点实验室, 重庆 400715

摘要: 以冬菜扣肉为研究对象, 为缩短传统冬菜扣肉加工过程的蒸制时间, 减少经济能耗, 确定冬菜扣肉的工业化生产, 采用超声波和蛋白酶对冬菜扣肉的鲜肉进行预处理, 以剪切力和感官评分为测定指标, 利用响应面实验优化出超声波辅助复合蛋白酶的最佳工艺条件. 结果表明: 在复合蛋白酶(木瓜蛋白酶和菠萝蛋白酶)比例为 2:1, 添加量为 420 U/mL, 嫩化温度为 38 °C, 嫩化时间为 33 min 时嫩化效果最佳, 冬菜扣肉的剪切力最小, 感官评分最高.

关键词: 冬菜扣肉; 超声波; 复合蛋白酶; 剪切力

中图分类号: S879.2; TS251.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2024)07-0029-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on the Processing Technology of Ultrasound-assisted Compound Protease on Quality of Winter Vegetable Buckle

LIAO Lin¹, HE Zhifei^{1,2}, LI Hongjun^{1,2}

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

2. Chongqing Key Laboratory of Special Food Co-built by Sichuan and Chongqing, Chongqing 400715, China

Abstract: In order to shorten the steaming time of the traditional winter vegetable buckle meat processing, reduce the economic energy consumption, and determine the industrial production of winter vegetable buckle meat, taking winter vegetable buckle meat as the research object, the fresh meat for winter vegetable buckle meat was pretreated by ultrasonic and protease. The shear force and sensory score were used as

收稿日期: 2023-06-25

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项(CSTB2022TIAD-KPX0080); 川渝地区家兔产业协同创新与关键技术集成示范项目(2022YFQ0033); 重庆市特色食品工程技术研究中心能力提升项目(cstc2014pt-gc8001).

作者简介: 廖林, 硕士研究生, 主要从事肉类科学与酶工程研究.

通信作者: 李洪军, 教授, 博士研究生导师.

the measurement index, and the optimal process conditions of ultrasound-assisted complex protease were optimized by response surface experiment. The results showed that the tenderization effect was the best when compound protease ratio (papain : bromelain) was 2 : 1, the complex protease was 420 U/mL, the tenderization temperature was 38 °C, and the tenderization time was 33 min. The shear force of winter vegetable buckle meat was the smallest and the sensory score was the highest.

Key words: winter vegetables buckle meat; ultrasonic; complex proteases; shear force

冬菜扣肉口感细腻、滋味鲜美,但其制作工艺复杂,蒸制时间较长,往往只在重大宴席上才会出现.通常长时间的烹饪会使产品的营养流失和加工技术中的不可控因素增大,而超声波或蛋白酶处理能够有效嫩化肉制品,缩短加工时间,减少营养物质的流失.张坤等^[1]发现超声波处理能够显著改变鹅肉的蛋白质特性,改善其嫩度,提升其食用价值.木瓜蛋白酶和菠萝蛋白酶是国际认证的可用于食品加工中的蛋白酶,木瓜蛋白酶能提升牛肉干^[2]、羊肉干^[3]、猪排^[4]、兔肉丁^[5]、鸡肉丁^[6]和猪大肠^[7]等的嫩度.肖夏等^[8]发现复合蛋白酶能够有效地发挥蛋白酶的嫩化作用.有研究发现,一定的超声强度^[9]和超声时间^[10]能够提高蛋白酶的活性.于如梦^[11]通过研究发现超声波和菠萝蛋白酶联用能够在较低的蛋白酶添加量下有效地提高牛肉的嫩度,提升牛肉的品质,为牛肉产品的研发提供新思路.此外,蛋白酶的加入还能增加肉制品的口感和风味,Ye等^[12]发现菠萝蛋白酶能改变烟熏鸭的口感,使其变得多汁,并能为烟熏鸭增添独特的风味,为鸭肉产品的开发提供了一定的数据支持.综上所述,超声波和蛋白酶均对肉制品的嫩度有一定的积极影响.

基于此,本文以冬菜扣肉为研究对象,通过研究超声波影响下复合蛋白酶的比例、复合蛋白酶添加量、嫩化温度、嫩化时间对冬菜扣肉剪切力的影响,以剪切力和模糊数学感官评价为响应值,通过 Design Expert 8.0 中的响应面实验设计对各条件进行优化,旨在得到超声波和复合蛋白酶的最佳使用条件和添加量,为获得一款低成本、口味佳的冬菜扣肉提供数据支撑,也为改良冬菜扣肉加工工艺提供一定的理论依据.

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

从重庆永辉超市购买带皮的宝肋肉,用低温泡沫箱(4 °C左右)快速运送到实验室,于-18 °C储藏备用,实验前 12 h 取出放入恒温恒湿箱(4 °C,湿度 75%)中解冻备用.实验所用的盐、料酒、老抽和卤料等调料均购买于重庆永辉超市.

木瓜蛋白酶(酶活力 10 万 U/g)、菠萝蛋白酶(酶活力 10 万 U/g),河南万邦化工科技有限公司.

1.2 仪器与设备

物性测定仪,英国 Stable Micro System 公司;电子分析天平,上海豪晟科学仪器有限公司;低温恒湿箱,东莞市巨亚检测仪器设备有限公司;单缸炸炉,广州佛洛丽斯厨具设备有限公司;超声波清洗机,宁波新芝生物科技股份有限公司;真空包装机,上海人民包装股份有限公司.

1.3 实验方法

1.3.1 样品制备

猪肉→切片→预处理→预煮→油炸上色→加入冬菜→蒸制→包装→杀菌→成品待测

操作要点:

1) 原料肉切片:选择肥瘦分散比较均匀(1 : 1)的带皮宝肋肉,切成 6 cm×6 cm×0.6 cm 的薄片(根据前期预实验和文献确定的厚度).

- 2) 预处理: 采用浸泡式超声处理, 将肉片放入一定量的酶液中, 酶液与肉的比例为 2 : 1, 同时将含有酶液的肉片放入超声波清洗仪中进行超声, 超声和酶解同时进行.
- 3) 预煮: 超声结束后, 将肉片放入含有卤料的沸水中煮 3 min, 料液比 2 : 1.
- 4) 油炸上色: 猪皮和猪肉油炸时间分别计时, 先对猪皮进行油炸, 再对整个肉片进行油炸.
- 5) 蒸制: 油炸后的肉片放入模具, 盖上冬菜, 加入酱汁, 放入上汽的蒸锅中蒸制一定时间.
- 6) 包装: 待冬菜扣肉冷却至室温后, 进行真空包装.
- 7) 杀菌: 采用水浴巴氏杀菌(85 ℃, 30 min)后冷却至室温, 冷冻备用.

1.3.2 单因素实验设计

根据预实验结果, 固定超声波功率 200 W, 选定木瓜蛋白酶和菠萝蛋白酶进行蛋白酶的复配. 以复合蛋白酶比例、复合蛋白酶添加量、嫩化温度、嫩化时间为影响因子, 考察各因素对冬菜扣肉的剪切力和感官评分的影响.

在预实验的基础上, 固定复合蛋白酶添加量 400 U/g, 嫩化温度 40 ℃, 嫩化时间 30 min, 研究不同木瓜蛋白酶和菠萝蛋白酶比例(4 : 1, 2 : 1, 1 : 1, 1 : 2, 1 : 4)对冬菜扣肉的剪切力和感官评分的影响.

在预实验的基础上, 固定复合蛋白酶比例 1 : 1, 嫩化温度 40 ℃, 嫩化时间 30 min, 考察复合蛋白酶添加量(100, 200, 300, 400, 500 U/g)对冬菜扣肉的剪切力和感官评分的影响.

在预实验的基础上, 固定复合蛋白酶比例 1 : 1, 复合蛋白酶添加量 400 U/g, 嫩化时间 30 min, 考察嫩化温度(10, 20, 30, 40, 50 ℃)对冬菜扣肉的剪切力和感官评分的影响.

在预实验的基础上, 固定复合蛋白酶比例 1 : 1, 复合蛋白酶添加量 400 U/g, 嫩化温度 40 ℃, 探究嫩化时间(10, 20, 30, 40, 50 min)对冬菜扣肉的剪切力和感官评分的影响.

1.3.3 响应面实验设计

根据单因素实验的结果, 选择复合蛋白酶比例、复合蛋白酶添加量、嫩化温度、嫩化时间为影响因素, 用软件 Design Expert 8 中的 Box-Behnken 功能进行响应面设计, 以剪切力和感官评分为响应值, 按照表 1 进行响应面实验设计.

表 1 响应面水平设计

水平	因素			
	复合蛋白酶比例	复合蛋白酶添加量/(U · g ⁻¹)	嫩化温度/℃	嫩化时间/min
—1	4 : 1	300	30	20
0	2 : 1	400	40	30
1	1 : 1	500	50	40

1.3.4 剪切力的测定

参考郑娇等^[13]的方法, 略作修改. 将冬菜扣肉沿着肌肉纹理的方向制备成 1.5 cm×1.5 cm×0.6 cm 的样品, 采用 A/MORS 探头, 测后速度、测中速度和测前速度分别为 10 mm/s, 2 mm/s 和 1 mm/s, 剪切压缩率为 90%, 感应力为 10 g, 测试环境为常温.

1.3.5 模糊数学感官评价

1) 权重集(X)的确定

参考代文婷等^[14]的方法, 略作修改. 权重采取用户调查法, 抽取 10 名食品专业的学生(5 男 5 女), 进行统一培训后, 对冬菜扣肉的色泽、口感、气味和滋味进行打分, 最后得到 $X = \{\text{色泽, 口感, 气味, 滋味}\} = \{0.225, 0.273, 0.228, 0.274\}$.

2) 评价等级集(N)的确定

参考来静等^[15]的方法, 略作修改. 根据评价标准表 2 的等级划分, 将冬菜扣肉分为 4 个等级, 分别为优、良、中和差, 即 $N = \{\text{优, 良, 中, 差}\} = \{10, 7, 4, 1\}$.

表 2 冬菜扣肉感官评分表

评价 指标	评价等级与标准			
	优(9~10)	良(6~8)	中(3~5)	差(0~2)
色泽	肉呈亮红色，冬菜呈褐色，有光泽	肉呈暗红色，冬菜呈暗黑色，无明显光泽	肉呈浅红色，冬菜呈暗黑色，无光泽	肉颜色发白，冬菜暗黑色，无光泽
口感	肉质柔软细腻，入口即化；咸甜适中，肥而不腻	肉质较柔软细腻，具有一定的咀嚼感；咸甜略合适，略有些油腻	肉质软硬不适，口感一般；咸甜较淡或者较重	肉质过软或过硬，口感差；咸甜不适口，油腻
气味	肉具有冬菜的清香	肉略有冬菜的清香	肉略有腥味，香味不明显	肉有异味，香气很淡
组织状态	组织状态完整，排列整齐美观	组织状态略有分离，排列大致整齐美观	组织状态破损严重，但不影响整体美观	组织状态破损严重，影响美观

3) 模糊数学评价变换原理

模糊数学评价变换原理为

$$D=(X\times R)\times N$$

式中： D 为对象集， X 为权重集， R 为模糊矩阵， N 为评价等级集。

1.3.6 主成分分析综合评价法

采用黄本婷^[16]的方法，略作修改。主成分分析是通过将规范化后的数据进行修饰，再进行降维处理，然后将不同数据分成不同的主成分，按照公式(1)进行主成分综合得分计算。将综合得分按照公式(2)进行标准化处理，将其数据转化为 0~1。

$$Y=\sum_i\frac{PC_i}{\sum PC_i}\times S_i$$
(1)

$$Y'=\frac{Y-Y_{\min}}{Y_{\max}-Y_{\min}}$$
(2)

式中： i 为主成分个数； S 为成分得分； PC 为方差百分比； $\sum PC_i$ 为累积方差百分比； Y 为综合得分； Y' 为规范化综合得分。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 26 软件对冬菜扣肉的理化指标数据进行分析处理，并采用 Duncan 检验进行显著性差异分析；采用 Design Expert 8 软件进行响应面设计，采用 Origin 2018 软件进行绘图。

2 结果与分析

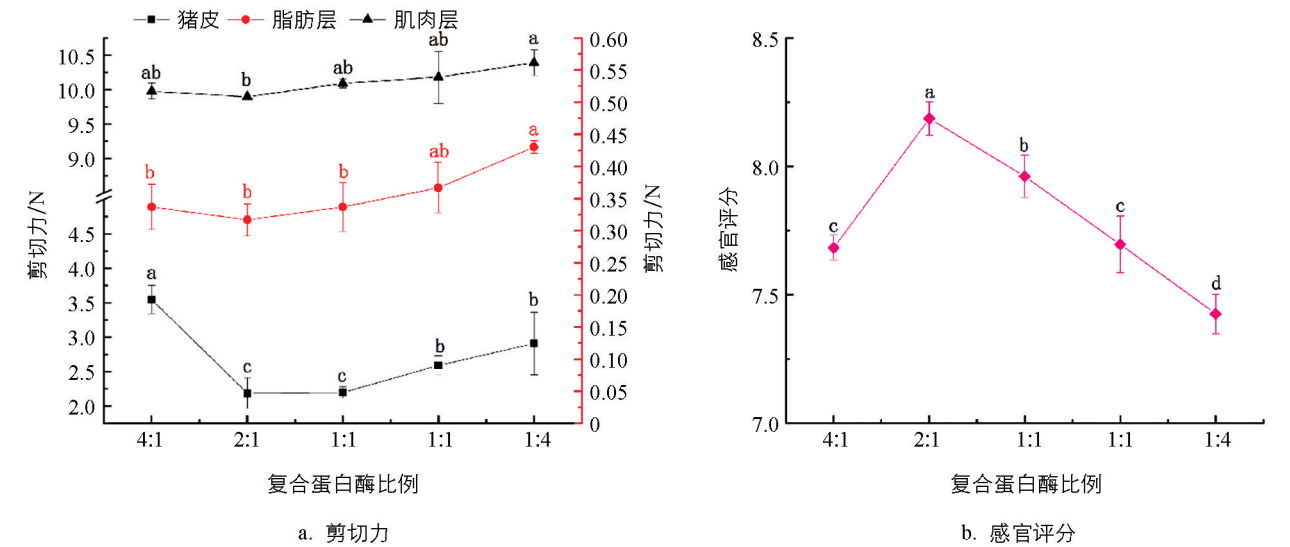
2.1 单因素结果分析

2.1.1 木瓜蛋白酶和菠萝蛋白酶比例对冬菜扣肉剪切力和感官评分的影响

由图 1a 可知，随着复合蛋白酶比例(木瓜蛋白酶和菠萝蛋白酶)的增大，剪切力整体都呈现先减小后增加的趋势。复合蛋白酶比例对猪皮剪切力的影响有统计学意义($p<0.05$)，在 2:1 时剪切力最小，在 4:1 时剪切力最大；对脂肪层剪切力的影响在比例超过 1:1 时变化明显，其中在比例为 2:1 时剪切力最小；对肌肉层的剪切力影响较小，其中在比例为 2:1 时剪切力最小。主要原因是木瓜蛋白酶对肌原纤维蛋白质的特异水解能力优于菠萝蛋白酶^[17]，所以当比例为 2:1 时对剪切力影响最大。

由图 1b 可知，随着复合蛋白酶比例的增大，感官评分呈现先增大后降低的趋势，其中在比例为 2:1 时评分最高。在 2:1 时，冬菜扣肉的口感最佳，软硬适中；在比例为 4:1 时肌肉层适口性低，主要是因为此时的木瓜蛋白酶含量高，促使肉制品中的肌动球蛋白被大量分解为肌球蛋白和肌动蛋白^[18]，从而使肌肉

层变得干硬, 难以咀嚼。随着复合蛋白酶比例的增大, 猪皮的咀嚼性得到了一定的缓和, 但是肌肉层的咀嚼性仍较差, 所以感官评分较低。



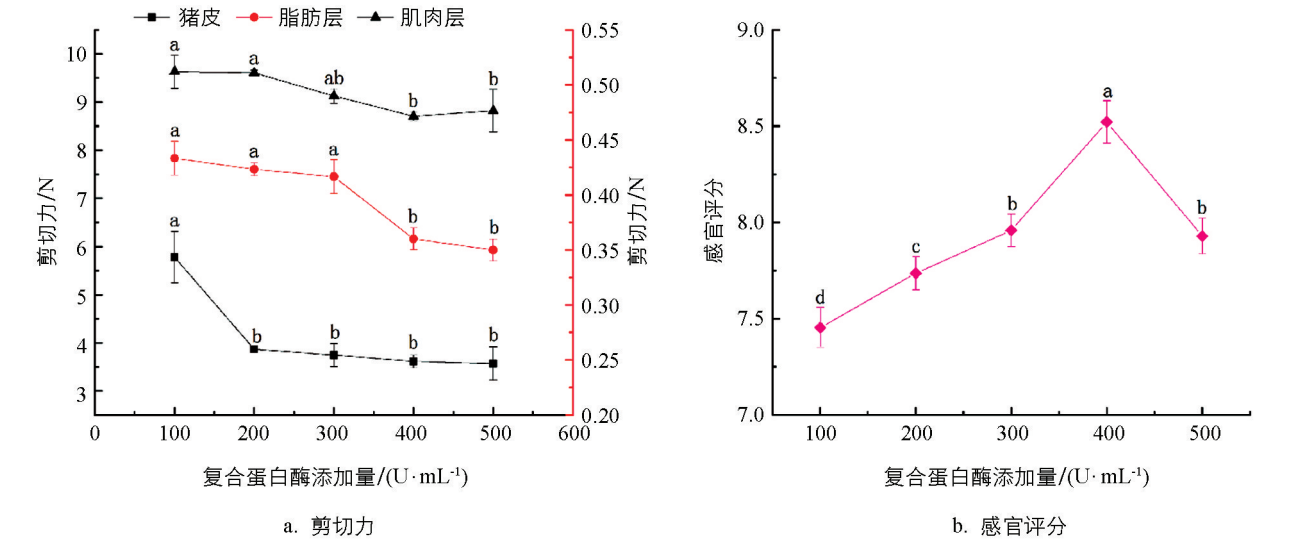
小写字母不同表示 $p < 0.05$, 差异有统计学意义。

图 1 复合蛋白酶比例对冬菜扣肉剪切力和感官评分的影响

2.1.2 复合蛋白酶添加量对冬菜扣肉剪切力和感官评分的影响

由图 2a 可知, 复合蛋白酶添加量越大, 剪切力越小。当复合蛋白酶添加量为 200 U/mL 时, 猪皮的剪切力显著降低($p < 0.05$), 然后随着复合蛋白酶添加量的增大变化无统计学意义($p > 0.05$); 当复合蛋白酶添加量大于 400 U/mL 时, 脂肪层和肌肉层的剪切力变化有统计学意义($p < 0.05$), 均呈现明显的下降趋势。添加量的增加会使剪切力持续下降, 但蛋白酶的过度降解会影响产品的品质^[19]。

由图 2b 可知, 随着复合蛋白酶添加量的增加, 感官评分呈现先增大后减小的趋势, 在添加量为 400 U/mL 时评分最高。当添加量低于 400 U/mL 时, 冬菜扣肉的硬度不适中, 不能达到入口即化、肥而不腻的口感; 但当添加量高于 400 U/mL 时, 冬菜扣肉被过分水解, 肥瘦分离, 组织状态不佳, 明显影响了冬菜扣肉的质地和外观。



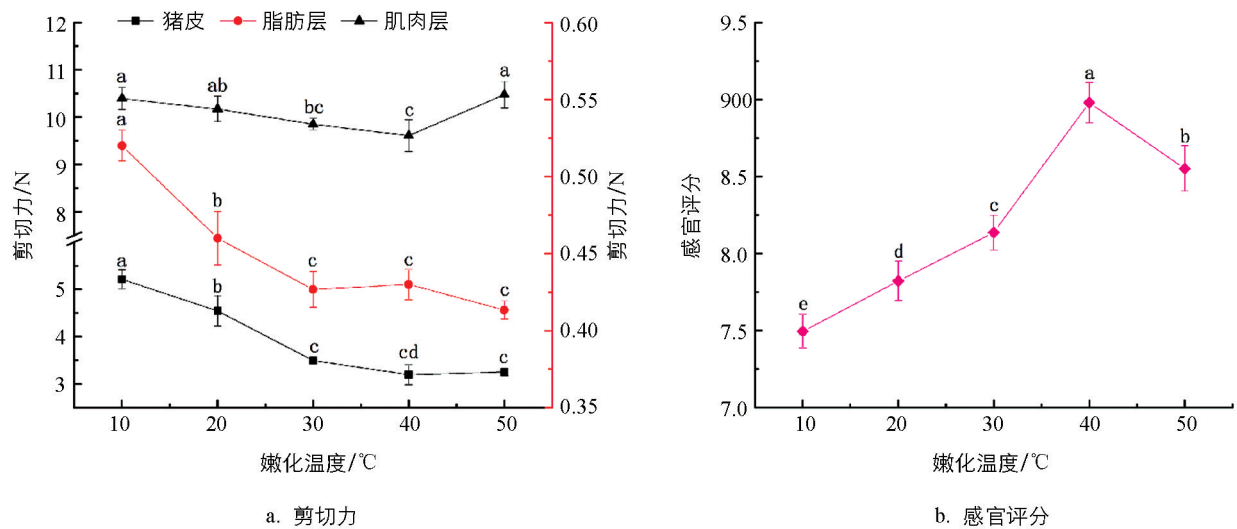
小写字母不同表示 $p < 0.05$, 差异有统计学意义。

图 2 复合蛋白酶添加量对冬菜扣肉剪切力和感官评分的影响

2.1.3 嫩化温度对冬菜扣肉剪切力和感官评分的影响

由图 3a 可知,随着嫩化温度的升高,猪皮和脂肪层的剪切力呈现逐渐下降的趋势.当嫩化温度为 30 ℃时,猪皮与脂肪层的剪切力显著降低($p<0.05$),而后随着嫩化温度的升高,剪切力变化无统计学意义($p>0.05$).当嫩化温度为 40 ℃时,肌肉层的剪切力最低,剪切力整体呈现出先降低后升高的趋势,可能是因为蛋白酶在最适的温度下活性最强,温度较高或较低均会影响蛋白酶的活性.蒋小锋^[20]发现木瓜蛋白酶和菠萝蛋白酶的最适温度在 50 ℃左右,但本实验在 40 ℃时蛋白酶都表现出较高的活性,可能是因为超声波处理能够增强蛋白酶的活性,让蛋白酶能够在低于最适温度下发挥最大活性^[21].

由图 3b 可知,嫩化温度使冬菜扣肉的感官评分呈现先升高后降低的趋势.在嫩化温度为 40 ℃时冬菜扣肉的口感最佳,感官评分最高.温度较低时,未能达到复合蛋白酶的最适温度,其活性不强;温度较高,又会使部分蛋白酶丧失活性,使蛋白酶水解能力降低,影响口感.



小写字母不同表示 $p<0.05$, 差异有统计学意义.

图 3 嫩化温度对冬菜扣肉剪切力和感官评分的影响

2.1.4 嫩化时间对冬菜扣肉剪切力和感官评分的影响

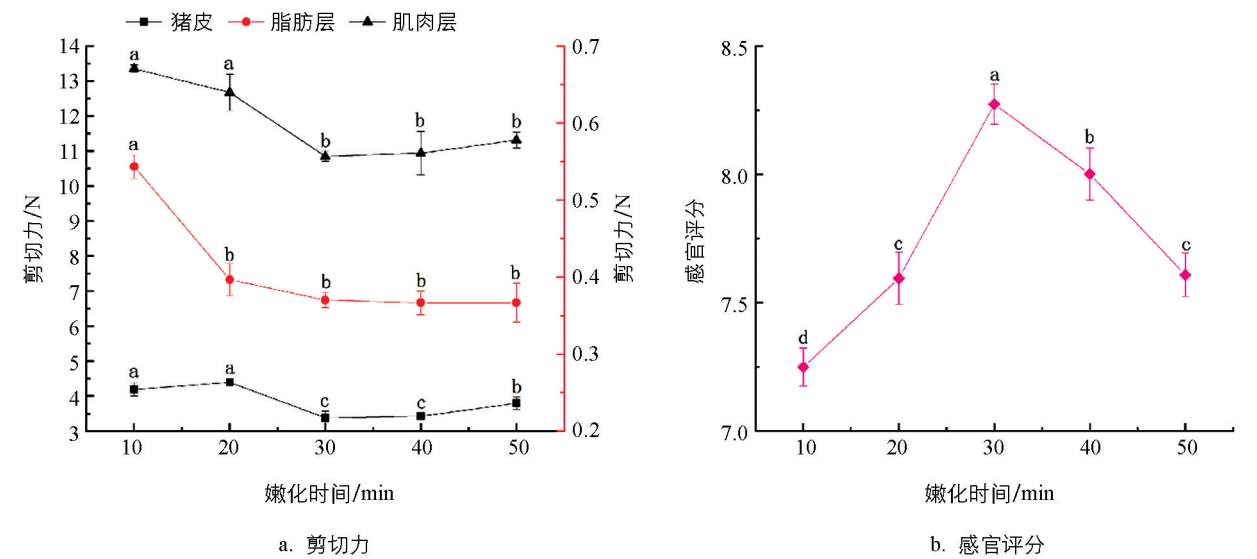
由图 4a 可知,嫩化时间对冬菜扣肉的剪切力有较大的影响,整体呈现先下降后上升的趋势.在 20 min 时,脂肪层剪切力显著降低($p<0.05$);当嫩化时间为 30 min 时,猪皮和肌肉层的剪切力显著下降($p<0.05$),这可能是因为超声处理有利于蛋白酶活性中心暴露,加强了与底物之间的反应^[22],使剪切力显著下降;当嫩化时间超过 40 min 时,猪皮的剪切力反而上升,可能是因为长时间的超声破坏了蛋白酶的活性和引起肌原纤维间空隙增大,这与 Cao 等^[21]的研究结果一致.

由图 4b 可知,随着嫩化时间的增加,感官评分发生了显著性变化($p<0.05$),主要呈现出先上升后下降的趋势.在 30 min 时,冬菜扣肉的综合口感最佳,感官评分最高.这是由于短时间的超声处理能够增强蛋白酶的活性,长时间的超声处理会破坏蛋白酶的结构或性能,反而影响其活性^[23].

2.2 响应面优化实验结果分析

2.2.1 响应面实验设计与结果

以复合蛋白酶比例(A)、复合蛋白酶添加量(B)、嫩化温度(C)、嫩化时间(D)为优化因素,剪切力(Y_1)和感官评分(Y_2)为响应值,进行响应面实验,实验结果如表 3.



小写字母不同表示 $p < 0.05$, 差异有统计学意义。

图 4 嫩化时间对冬菜扣肉剪切力和感官评分的影响

表 3 响应面优化实验结果

序号	复合蛋白 酶比例	复合蛋白 酶添加量	嫩化 温度	嫩化 时间	剪切力/N				感官评分
					猪皮	脂肪层	肌肉层	综合得分	
1	0	-1	-1	0	2.26	0.37	10.8	-0.43	6.85
2	-1	1	0	0	2.10	0.35	10.83	-0.57	5.77
3	1	0	0	1	2.84	0.31	11.55	-0.17	6.10
4	1	1	0	0	2.83	0.36	10.34	-0.44	6.51
5	0	1	-1	0	2.48	0.33	11.70	-0.18	6.23
6	1	0	0	-1	4.54	0.35	12.60	1.07	6.47
7	0	0	0	0	1.90	0.38	9.20	-1.16	7.41
8	0	0	0	0	2.10	0.40	10.30	-0.55	6.84
9	0	0	0	0	2.23	0.19	10.51	-1.41	7.43
10	0	0	-1	1	2.16	0.41	10.74	-0.32	6.24
11	0	0	1	1	2.58	0.53	11.59	0.73	6.74
12	1	0	1	0	3.19	0.37	10.77	-0.10	6.18
13	-1	0	0	1	2.55	0.25	12.20	-0.32	6.75
14	0	-1	0	-1	3.23	0.38	12.45	0.64	6.74
15	-1	0	1	0	2.36	0.57	11.19	0.67	6.37
16	0	-1	1	0	1.72	0.46	10.51	-0.38	5.85
17	0	1	1	0	2.76	0.45	11.30	0.32	6.47
18	-1	0	-1	0	2.71	0.41	11.43	0.15	6.12
19	0	0	0	0	1.71	0.36	9.85	-1.08	7.40
20	1	-1	0	0	3.46	0.53	12.38	1.39	6.10
21	0	1	0	-1	3.90	0.36	12.77	0.95	6.72
22	0	0	0	0	1.90	0.40	9.20	-1.07	7.37
23	0	-1	0	1	3.23	0.29	11.55	-0.14	6.42
24	0	0	-1	-1	4.22	0.36	11.75	0.67	6.61
25	-1	-1	0	0	3.51	0.44	11.71	0.73	6.30
26	1	0	-1	0	4.71	0.42	11.50	1.04	5.70
27	-1	0	0	-1	2.88	0.35	12.23	0.28	5.72
28	0	0	1	-1	1.94	0.46	11.44	0.10	6.59
29	0	1	0	1	3.16	0.25	11.32	-0.41	6.05

2.2.2 响应面实验多元回归模型分析

将表 3 中 29 组数据利用 Design Expert 8.0 软件进行多元回归拟合, 分别得到剪切力和感官评分的二次回归方程模型:

$$Y_1 = -1.05 + 0.15A - 0.18B + 0.034C - 0.36D - 0.13AB - 0.42AC - 0.16AD + 0.11BC - 0.14BD + 0.41CD + 0.77A^2 + 0.49B^2 + 0.59C^2 + 0.69D^2$$

$$Y_2 = 7.29 + 0.003A - 0.044B + 0.039C - 0.046D + 0.23AB + 0.055AC - 0.35AD + 0.31BC - 0.085BD + 0.13CD - 0.7A^2 - 0.46B^2 - 0.47C^2 - 0.32D^2$$

由表 4 可知, 两个回归模型中剪切力模型为差异有统计学意义($p < 0.05$)、感官评分模型为差异有统计学意义($p < 0.01$), 且失拟项差异无统计学意义($p > 0.05$). 两者回归模型系数分别为 0.997 5 和 0.978 3, 校正系数分别为 0.967 5 和 0.948 6, 表明两个模型的拟合性都较好, 能够反应 4 个因素对剪切力和感官评分的影响. 以剪切力为响应值的回归系数显著性可知, D 能够显著($p < 0.05$)影响冬菜扣肉的剪切力, 且各因素的影响程度从大到小依次为: 嫩化时间、复合蛋白酶添加量、复合蛋白酶比例、嫩化温度. 以感官评分为响应值的回归系数显著性可知, 各因素的影响程度从大到小依次为: 嫩化时间、复合蛋白酶添加量、嫩化温度、复合蛋白酶比例, 交互作用中 AD , BC 水平差异有统计学意义($p < 0.05$), 表明 4 个因素对冬菜扣肉感官评分存在显著的交互作用.

表 4 复合蛋白酶优化冬菜扣肉方差分析

方差来源	剪切力综合得分					感官评分				
	平方和	自由度	均方	F 值	p 值	平方和	自由度	均方	F 值	p 值
模型	10.98	14	0.780	2.79	0.032 2*	5.770	14	0.41	5.10	0.002 2**
A	0.29	1	0.290	1.02	0.330 6	8.59E-05	1	8.59E-05	1.06E-03	0.974 5
B	0.38	1	0.380	1.36	0.263 1	0.023	1	0.023	0.28	0.603 5
C	0.01	1	0.014	0.05	0.826 5	0.018	1	0.018	0.22	0.645 7
D	1.57	1	1.570	5.59	0.033 0*	0.025	1	0.025	0.31	0.584 2
AB	0.07	1	0.070	0.25	0.624 7	0.220	1	0.220	2.72	0.121 2
AC	0.69	1	0.690	2.45	0.139 5	0.012	1	0.012	0.15	0.703 6
AD	0.10	1	0.100	0.36	0.555 5	0.490	1	0.490	6.10	0.027 0*
BC	0.05	1	0.051	0.18	0.677 5	0.380	1	0.380	4.69	0.048 2*
BD	0.08	1	0.084	0.30	0.592 7	0.029	1	0.029	0.36	0.559 5
CD	0.66	1	0.660	2.34	0.148 6	0.067	1	0.067	0.83	0.377 3
A ²	3.88	1	3.880	13.82	0.002 3**	3.160	1	3.160	39.17	<0.000 1**
VB ²	1.57	1	1.570	5.59	0.033*	1.370	1	1.370	16.93	0.001 1**
C ²	2.26	1	2.260	8.06	0.013 1*	1.410	1	1.410	17.48	0.000 9**
D ²	3.11	1	3.110	11.07	0.005**	0.660	1	0.660	8.18	0.012 6*
残差	3.93	14	0.280			1.130	14	0.081		
失拟项	3.54	10	0.350	3.60	0.114 2	0.870	10	0.087	1.35	0.413 5
纯误差	0.39	4	0.098			0.260	4	0.065		
分离差	14.91	28				6.900	28			

注: * 表示 $p < 0.05$, ** 表示 $p < 0.01$, 差异有统计学意义.

2.2.3 响应面实验各因素交互作用分析

响应面图能够说明各指标间的交互强度. 图 5 为 4 因素两两交互作用对剪切力的影响, 其中复合蛋白

酶添加量和嫩化时间、嫩化温度和嫩化时间的椭圆较明显, 证明它们的交互作用对冬菜扣肉的剪切力影响较大. 图 6 为 4 因素两两交互作用对感官评分的影响, 复合蛋白酶比例和嫩化时间、复合蛋白酶添加量和嫩化温度的椭圆较明显, 证明它们的交互作用对冬菜扣肉的感官评分影响较大.

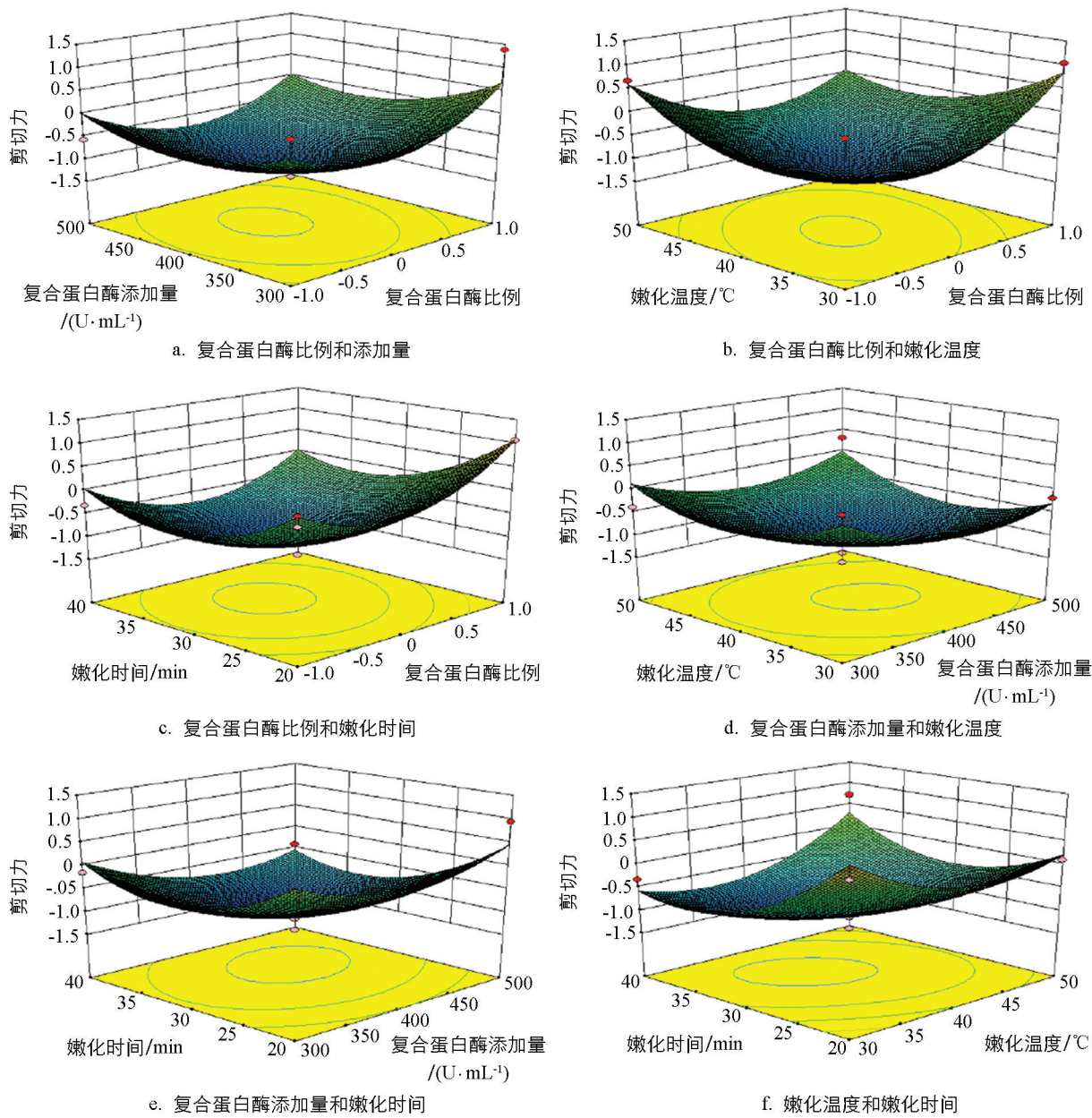


图 5 4 因素交互作用剪切力的响应面图

2.2.4 最佳工艺的确定和验证实验

剪切力越小, 感官评分越高, 表明复合蛋白酶处理条件对冬菜扣肉品质影响越好, 通过 Design Expert 8.0 软件进行优化设计, 根据剪切力得到冬菜扣肉复合蛋白酶最佳处理条件, 当复合蛋白酶比例为 2 : 1, 复合蛋白酶添加量为 423.41 U/mL, 嫩化温度为 37.96 ℃, 嫩化时间为 33.29 min 时, 剪切力预测值为 -1.15; 根据感官评分得到冬菜扣肉复合蛋白酶最佳处理条件, 当复合蛋白酶比例为 2 : 1, 复合蛋白酶添加量为 418.15 U/mL, 嫩化温度为 38.19 ℃, 嫩化时间为 31.94 min 时, 感官评分预测值为 7.27 分. 为了方便验证, 将优化条件改为复合蛋白酶比例 2 : 1, 复合蛋白酶添加量 420 U/mL, 嫩化温度 38 ℃, 嫩化时间 33 min, 将最佳预测值进行 3 次重复实验, 根据主成分分析拟合得到剪切力为 -1.24, 感官评分为

7.29 分, 相对误差分别为 7.26% 和 0.27%, 表明响应面实验优化的回归模型具有可靠性.

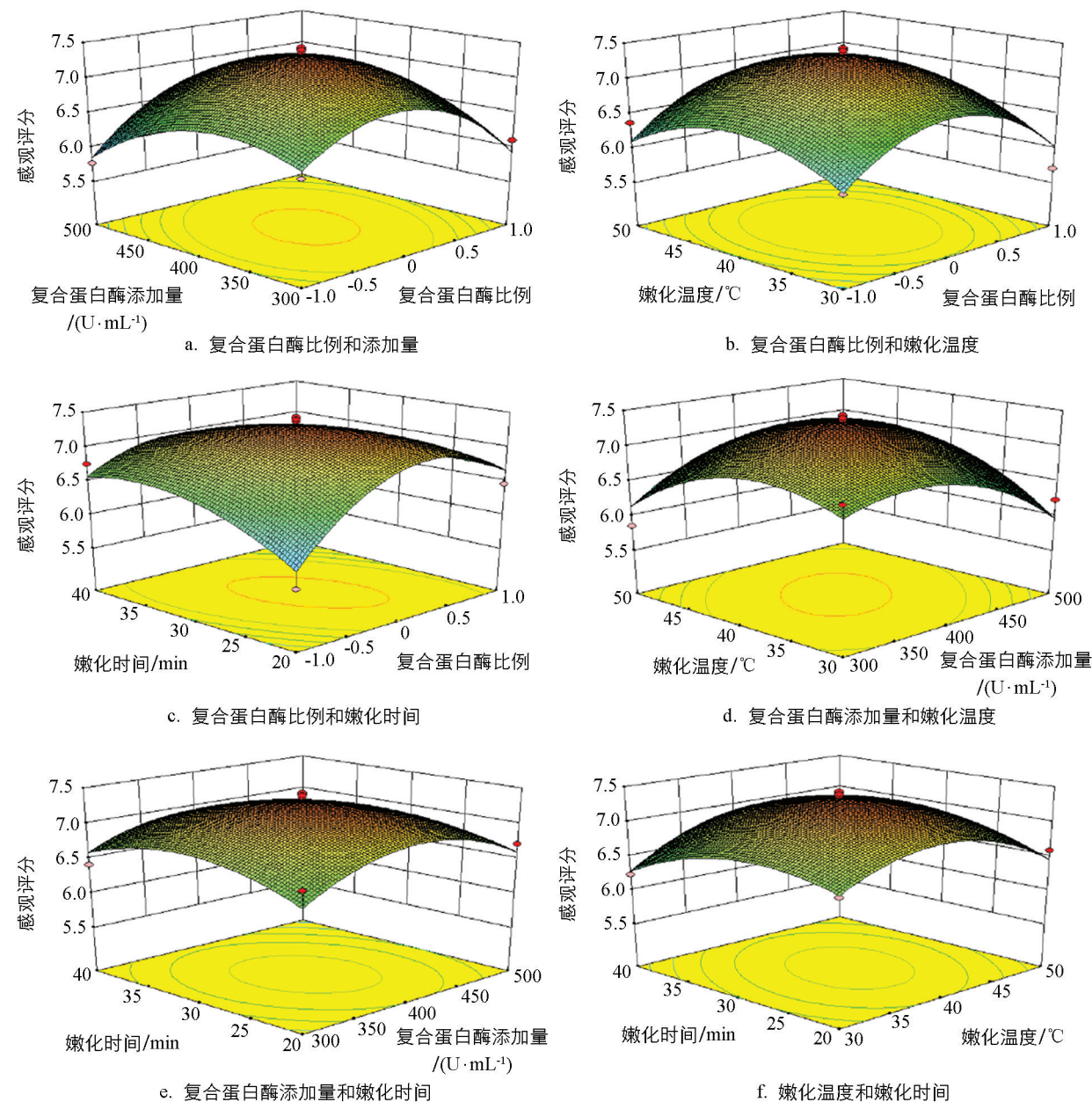


图 6 4 因素交互作用感官评分的响应面图

3 结论

通过研究复合蛋白酶(木瓜蛋白酶、菠萝蛋白酶)的反应条件(比例、添加量、温度、时间)对冬菜扣肉的剪切力和感官评分的影响, 并采用 Design Expert 8.0 进行响应面优化得到复合蛋白酶最佳条件为复合蛋白酶比例 2 : 1, 复合蛋白酶添加量 420 U/mL, 嫩化温度为 38 °C, 嫩化时间为 33 min. 本文探究了缩短冬菜扣肉蒸制时间的工业化生产参数, 为超声波和蛋白酶联合应用于冬菜扣肉工业化加工做出了第一步尝试, 为冬菜扣肉工业化发展提供了一定的数据支撑.

参考文献:

[1] 张坤, 邹烨, 王道营, 等. 高强度超声处理对鹅胸肉肌动球蛋白特性的影响 [J]. 食品科学, 2018, 39(21): 59-65.

[2] 金惠玉, 张筠, 王欢欢. 木瓜蛋白酶对牛肉干嫩化的影响 [J]. 中国调味品, 2013, 38(8): 26-29, 33.

[3] 朱建, 陈海霞, 侯大军. 木瓜蛋白酶处理对羊肉干嫩度的影响 [J]. 食品与发酵科技, 2017, 53(4): 64-67, 72.

[4] 柳艳霞, 张豪, 赵莉君, 等. 木瓜蛋白酶嫩化调理猪排工艺条件的优化 [J]. 现代食品科技, 2018, 34(8): 172-179, 23.

[5] 乔学彬, 王林. 麻油兔肉丁嫩化工艺优化研究 [J]. 肉类工业, 2019(7): 33-35.

[6] 侯大军, 杨雨馨, 范淑英, 等. 香辣鸡丁加工工艺研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(4): 78-87.

[7] 程成鹏, 贺稚非, 唐春, 等. 不同嫩化剂改善猪大肠嫩度的工艺优化 [J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(15): 249-256.

[8] 肖夏, 袁先铃. 加酶腌制对牛肉品质的影响 [J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2018, 31(2): 7-13.

[9] KARASEVA E I, METELITZA D I. Stabilization of Glucoso-6-Phosphate Dehydrogenase by Its Substrate and Cofactor in an Ultrasonic Field [J]. Russian Journal of Bioorganic Chemistry, 2006, 32(5): 436-443.

[10] SINISTERRA J V. Application of Ultrasound to Biotechnology: an Overview [J]. Ultrasonics, 1992, 30(3): 180-185.

[11] 于如梦. 自热杏鲍菇牛肉菜肴的开发及关键技术研究 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2020.

[12] YE Z Q, ZHANG J, LORENZO J M, et al. Effects of Bromelain on the Quality of Smoked Salted Duck [J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(8): 4473-4483.

[13] 郑娇, 唐善虎, 李思宁, 等. 有机酸前处理对风干牦牛肉理化性质及挥发性风味物质的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(7): 97-104.

[14] 代文婷, 王远, 邢丽杰, 等. 蟠桃-葡萄-黑枸杞复合饮料的配方优化 [J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(1): 172-179.

[15] 来静, 张宏丽, 朱迎春. 基于模糊数学评价法及脂质氧化程度优化过油肉的制作工艺 [J]. 食品研究与开发, 2021, 42(17): 62-67.

[16] 黄本婷. 川菜家常菜肴回锅肉工业化加工技术研究 [D]. 成都: 成都大学, 2020.

[17] 高雪琴, 刘航江, 张雨菁, 等. 三种蛋白酶复配对牛肉嫩化效果的影响 [J]. 现代牧业, 2022, 6(1): 19-24, 29.

[18] 崔莹莹. 挂糊油炸猪肉片嫩化工艺优化及机理研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2020.

[19] 张惠朋, 林奕云, 杨怀谷, 等. 木瓜蛋白酶嫩化鹅胸肉的工艺优化 [J]. 现代食品科技, 2023, 39(2): 29-35.

[20] 蒋小锋. 不同蛋白酶处理对马肉嫩度及其挥发性风味物质和超微结构的影响 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2015.

[21] CAO C W, XIAO Z C, TONG H Q, et al. Effect of Ultrasound-assisted Enzyme Treatment on the Quality of Chicken Breast Meat [J]. Food and Bioproducts Processing, 2021, 125: 193-203.

[22] 张琼. 超声波协同半胱氨酸促进木瓜蛋白酶嫩化肉块的应用研究 [D]. 成都: 成都大学, 2021.

[23] 徐轲鹏, 赵静, 唐月梅, 等. 促进超声波场中木瓜蛋白酶活力的工艺优化 [J]. 食品工业, 2022, 43(11): 33-36.

责任编辑 周仁惠