

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2025.06.016

谷氨酰胺转胺酶预制鱼肉牛排配方的优化

吴晨昕^{1,2}, 兰娇娇^{1,2}, 官辉扬², 梁鹏^{1,2*}, 黄建仙³

(1. 福州海洋研究院 海洋食品研发中心, 福建 福州 350002; 2. 福建农林大学 食品科学学院, 福建 福州 350002; 3. 福建佳客来食品股份有限公司, 福建 福州 350016)

摘要: 以鲈鱼和牛肉为原料, 利用谷氨酰胺转胺酶(glutamine transaminase, TG)酶预制鱼肉牛排产品。以凝胶强度、质构、色泽和感官评分为考察指标, 在单因素试验的基础上, 以凝胶强度和感官评分为响应值进行响应面优化试验, 建立一种新型健康预制鱼肉牛排配方。结果表明: 最佳配方以牛肉、鱼肉总质量为基准, 牛肉添加量为 34.00%、鱼肉添加量为 66.00%、食盐添加量为 1.90%、TG 酶添加量为 0.80%。在此条件下, 预制鱼肉牛排口感细腻、肉质紧实、味道适宜, 凝胶强度为 4 443.18 g·mm, 感官评分为 84.40, 与模型预测值的凝胶强度(4 461.78 g·mm)、感官评分(84.45)接近。获得的鱼肉牛排是一款适宜大众消费的新型健康牛排产品。

关键词: 谷氨酰胺转胺酶; 牛排; 鲈鱼; 配方; 感官评价

Optimization of Prepared Fish-Beef Steak Formula Based on Glutamine Transaminase

WU Chenxin^{1,2}, LAN Jiaojiao^{1,2}, GUAN Huiyang², LIANG Peng^{1,2*}, HUANG Jianxian³

(1. Marine Food Research and Development Center, Fuzhou Institute of Oceanography, Fuzhou 350002, Fujian, China; 2. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China; 3. Fujian Joycaller Food Co., Ltd., Fuzhou 350016, Fujian, China)

Abstract: Employing sea bass and beef as raw materials, this paper adopted glutamine transaminase (TG) to prepare fish-beef steak products. By taking the gel strength, texture, color, and sensory score as the investigation indexes and based on the single-factor test, the response surface optimization test was carried out with the gel strength and sensory score as the response values to finally propose a formula for new healthy prepared fish-beef steaks. The results showed that the optimal formula was based on the total quality of beef and fish, with the beef content of 34.00%, fish of 66.00%, salt of 1.90%, and TG of 0.80%. In these conditions, the prepared fish-beef steak had a delicate flavor, firm texture, and sound taste, with the gel strength of 4 443.18 g·mm and a sensory score of 84.40, which was close to the gel strength of 4 461.78 g·mm and sensory score of 84.45 predicted by the model. Therefore, the prepared fish-beef steak is a new healthy steak product suitable for the public.

Key words: glutamine transaminase; steak; sea bass; formula; sensory scoring

引文格式:

吴晨昕, 兰娇娇, 官辉扬, 等. 谷氨酰胺转胺酶预制鱼肉牛排配方的优化[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(6): 121-129.

WU Chenxin, LAN Jiaojiao, GUAN Huiyang, et al. Optimization of Prepared Fish-Beef Steak Formula Based on Glutamine Transaminase[J]. Food Research and Development, 2025, 46(6): 121-129.

牛肉因含有丰富的蛋白质、维生素、矿物质元素和 8 种人体必需氨基酸而深受消费者青睐^[1-2]。随着人们生活水平的提高和生活节奏的加快, 牛肉预制菜产品因营养、健康、便捷等特点, 已成为牛肉加工业的重要发展方向, 如将牛肉加工成牛排产品。邓思杨等^[3]研

究了不同洋葱汁添加量和滚揉时间对预制牛排品质的影响; Baugreet 等^[4]研制出符合老年人营养需求的重组牛排。但目前牛排产品仍存在营养和形式单一等实际瓶颈, 不足以满足消费者对多元化牛排产品的需求。因此, 开发新型健康牛排预制菜产品是未来的发展趋势。

基金项目: 福州海洋研究院科技项目(2022F01)

作者简介: 吴晨昕(1999—), 女(汉), 在读硕士研究生, 研究方向: 水产品加工与贮藏。

*通信作者: 梁鹏(1985—), 男(藏), 副教授, 博士, 研究方向: 水产油脂化学与营养。

海鲈鱼(*Lateolabrax japonicas*)是我国重要的海洋经济鱼类之一,富含蛋白质、氨基酸、维生素、微量元素、二十碳五烯酸(eicosapentaenoic acid, EPA)和二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA)等营养元素,其肉质细腻、营养丰富,深受消费者喜爱,目前主要分布在广东、福建等沿海省份^[5-7]。近年来,已有关于鱼肉和猪肉^[8]、鸡肉^[9]、虾肉^[10]等重组复合肉制品的相关研究,这极大地丰富了其消费市场,但目前关于牛肉和鱼肉复合重组肉制品的产品仍有空缺。谷氨酰胺转氨酶(glutamine transaminase, TG)酶是一种应用于肉制品中较为普遍的酶型黏合剂。不仅可以使碎肉粘接起来,提高肉产品的附加值,还可以改善肉制品的口感、风味、组织结构,提升肉制品的营养价值^[11]。

本研究利用TG酶重组技术,将牛肉和鱼肉相结合,实现畜产品和水产品之间营养互补,以期开发出一款兼具牛肉香味又具鱼肉鲜味的预制鱼肉牛排产品,为开发新型多元化预制牛排产品提供新方向。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

西冷牛肉:福建佳客来食品股份有限公司;海鲈鱼、食盐:市售;TG酶(食品级,酶活120 U/g):山东元泰生物工程有限公司。

物性测定仪(TA-XT plus型):英国Stable Micro System公司;色差计(WSC-S型):上海仪电物理光学仪器有限公司;斩拌机(HX-J3038型):佛山市海迅电器有限公司;滚揉机(KA-6189型):深圳市瑞丰电器有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 预制鱼肉牛排的制备

预制鱼肉牛排制作工艺:原料牛肉、鱼肉预处理→斩拌→加食盐斩拌→加TG酶滚揉→压模排气→静腌→包装→冷冻待用。

参考张佳敏等^[12]的重组牛排加工工艺,并在此基础上进行适当修改。将西冷牛肉去脂肪和筋膜,清水洗净;取鲈鱼背腹肉去皮和刺等杂质,4℃冰水漂洗3次。擦干鱼肉、牛肉表面水分,切成小块放入4℃冰箱备用。取一定质量比的牛肉和鱼肉放入斩拌机中混合斩拌30 s,加入一定量的食盐斩拌2 min,加入TG酶置于滚揉机中滚揉2 h,滚揉速度为3 r/min,控制温度不超过4℃。将滚揉后的肉装入模具,压制成型,排出空气,放入4℃冰箱中静置腌制12 h至凝胶成型后,置于-18℃冷冻24 h以上待用。

1.2.2 单因素试验

以牛肉、鱼肉总质量为基准,按1.2.1工艺流程制作预制鱼肉牛排。固定食盐添加量1.5%、TG酶添加量0.6%、牛肉与鱼肉质量比3:7,探究牛肉与鱼肉质量

比(0:10、1:9、2:8、3:7、4:6、5:5)、食盐添加量(0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%、3.0%)、TG酶添加量(0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%、1.2%)对预制鱼肉牛排凝胶强度、质构、色泽、感官评分的影响。

1.2.3 响应面试验

在单因素试验基础上,选取牛肉与鱼肉质量比、食盐添加量、TG酶添加量作为试验因素,凝胶强度和感官评分作为响应值,采用三因素三水平的Box-Behnken设计响应面试验,试验因素与水平见表1。

表1 响应面试验因素与水平
Table 1 Factors and levels of response surface test

水平	因素		
	A 牛肉与鱼肉质量比	B 食盐添加量/%	C TG酶添加量/%
-1	2:8	1.0	0.4
0	3:7	1.5	0.6
1	4:6	2.0	0.8

1.2.4 凝胶强度的测定

参照Baugreet等^[13]的方法,并稍作修改,测定前将样品在室温下解冻2~3 h至中心温度达到0℃,然后将样品切成3 cm×2 cm×2 cm小块。产品的凝胶强度采用物性测定仪测定,采用P/5柱形探头,设定测前速度2 mm/s,测中速度1 mm/s,测后速度10 mm/s,测试距离15 mm,测量力10 g,每个样品重复测定3次,取平均值(g·mm)。

1.2.5 质构的测定

参照杨眉等^[14]的方法,并稍作修改。将解冻后的样品在沸水中煮制10 min至中心温度达到72℃以上,切成3 cm(直径)×2 cm(高)圆柱冷却待测。采用全质构测试(texture profile analysis, TPA)模式,P/36 R圆柱型平底探头,设定测前速度2 mm/s,测中速度1 mm/s、测后速度2 mm/s,测试程度50%,测试时间5 s,测定参数为硬度、弹性、内聚性、胶着性、咀嚼性、回复性。

1.2.6 色泽的测定

参照李龙祥等^[15]的方法,将解冻后的样品切成3 cm×2 cm×2 cm的肉块,在生鲜状态下使用色差计测定样品的色泽。

1.2.7 感官评价

参照Cofrades等^[16]的方法,并稍作修改。将样品自然解冻至室温,切成4 cm×4 cm×1.2 cm大小,电磁炉功率2100 W,不粘平底锅中加入3 mL橄榄油,待油温达到160℃放入预制鱼肉牛排煎制至中心温度72℃,将煎制好的牛排切成小块装盘,冷却至室温后食用。参照GB/T 22210—2008《肉与肉制品感官评定规范》进行感官评价,评定小组由10名经过训练的食品专业研究生组成,筛选外观色泽、组织质地、风味气味、口感滋味4个指标作为感官描述性词汇,感官评价标准见表2。

表2 感官评价标准

Table 2 Sensory evaluation criteria

项目	评定标准	评分
外观色泽	表面及内部有光泽;颜色均匀	18~25
	表面及内部光泽较暗;颜色较均匀	9~<18
	表面有其他杂色、无光泽;颜色不均匀	0~<9
组织质地	组织紧密、无气孔;富有弹性;切面界面平整,切片性好	18~25
	组织较紧密、略有气孔;弹性一般;切面界面较平整,切片性好	9~<18
	组织松散、气孔多;缺乏弹性;切面界面不平整,切片性差	0~<9
风味气味	鱼香、肉香味浓郁;无腥味、异味	18~25
	鱼香、肉香味较为浓郁;稍有腥味、异味	9~<18
	鱼香、肉香味较淡或过浓;有强烈腥味、异味	0~<9
口感滋味	咸淡适中;咀嚼性适中;口感细嫩、无粗糙感	18~25
	稍咸稍淡;咀嚼性较大或较小;口感较细嫩、有稍许粗糙感	9~<18
	过咸或过淡;无咀嚼性或咀嚼性强;口感无细嫩感、粗糙感重	0~<9

1.3 数据处理

使用统计软件 Excel 2016 和 IBM SPSS Statistics 26 对数据进行计算汇总和显著性检验, Origin 2017 软件进行绘图, Design-Expert 10.0.6 软件进行响应面设计。所有试验重复测定 3 次, 数据结果以平均值±标准差表示, 保留小数点后两位。

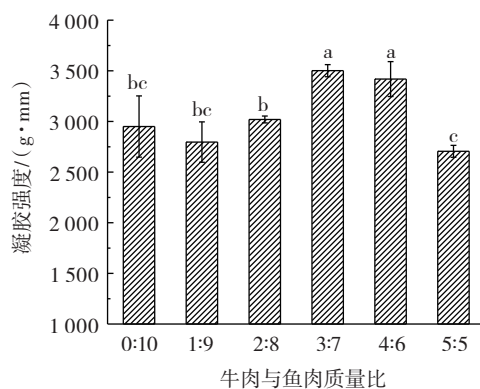
2 结果与分析

2.1 单因素试验结果分析

2.1.1 牛肉与鱼肉质量比对预制鱼肉牛排品质的影响

牛肉与鱼肉质量比对预制鱼肉牛排凝胶强度的影响见图 1。

由图 1 可以看出, 随着牛肉添加量的增加, 预制鱼肉牛排凝胶强度整体呈现先增大后减小的趋势, 在牛肉与鱼肉质量比为 3:7 时, 凝胶强度最大, 且显著高于未添加牛肉的纯鱼肉排 ($P<0.05$), 说明添加适量牛肉可以提高产品凝胶强度, 但添加过多时会使其凝胶强度降低。这是因为牛肉和鱼肉属于两种不同的肉类, 而不同肉类的肌球蛋白存在差异。当牛肉与鱼肉质量比为 3:7 时, 两种肌球蛋白的交联作用可能被促进, 从



不同小写字母表示具有显著性差异, $P<0.05$ 。

图1 牛肉与鱼肉质量比对预制鱼肉牛排凝胶强度的影响

Fig.1 Effect of beef/fish mass ratio on gel strength of prepared fish-beef steaks

而改善凝胶网络结构, 提高凝胶强度^[17]。相关研究表明, 鸡肉与鱼肉^[18]、虾肉与鱼肉^[19]混合鱼糜的凝胶强度均大于单一鱼糜的凝胶强度, 这与本试验的研究结果相似。

牛肉与鱼肉质量比对预制鱼肉牛排质构的影响见表 3。

表3 牛肉与鱼肉质量比对预制鱼肉牛排质构的影响

Table 3 Effect of beef/fish mass ratio on texture of prepared fish-beef steaks

牛肉与鱼肉质量比	硬度/g	弹性	内聚性	胶着性	咀嚼性	回复性
0:10	4 527.68±842.28 ^b	1.38±0.57 ^a	0.63±0.13 ^a	2 859.98±8.08 ^b	3 816.29±1 465.09 ^{ab}	0.31±0.02 ^a
1:9	4 945.26±454.49 ^b	0.85±0.03 ^b	0.65±0.01 ^a	3 206.31±259.14 ^b	2 710.00±191.94 ^b	0.27±0.01 ^b
2:8	5 970.53±1 512.93 ^{ab}	0.83±0.01 ^b	0.65±0.01 ^a	3 911.87±982.45 ^{ab}	3 244.63±817.52 ^{ab}	0.28±0.01 ^b
3:7	7 752.09±1 465.05 ^a	0.89±0.02 ^b	0.63±0.01 ^a	4 890.47±885.06 ^a	4 343.36±823.72 ^a	0.27±0.02 ^b
4:6	6 369.45±1 540.47 ^{ab}	0.85±0.03 ^b	0.58±0.02 ^a	3 707.33±915.75 ^{ab}	3 151.90±752.17 ^{ab}	0.22±0.01 ^c
5:5	5 195.59±441.03 ^b	0.85±0.02 ^b	0.57±0.05 ^a	2 936.81±217.37 ^b	2 481.83±213.27 ^b	0.20±0.02 ^d

注: 同列不同小写字母表示具有显著性差异, $P<0.05$ 。

从表 3 可以看出, 当牛肉与鱼肉质量比从 1:9 增加到 5:5 时, 其弹性、内聚性的变化不显著 ($P>0.05$), 硬度、胶着性、咀嚼性和回复性均呈现先增大后减小的

趋势, 当牛肉与鱼肉质量比为 3:7 时回复性较大, 硬度、胶着性、咀嚼性均达到最大值, 且均高于未添加牛肉的纯鱼肉排样品, 这与凝胶强度的结果一致, 再次证

实了牛肉与鱼肉质量比3:7时可以明显改善预制鱼肉牛排的质构特性。

牛肉与鱼肉质量比对预制鱼肉牛排色差的影响见表4。

表4 牛肉与鱼肉质量比对预制鱼肉牛排色差的影响

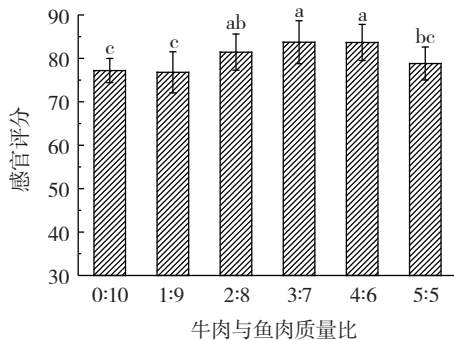
Table 4 Effect of beef/fish mass ratio on color difference of prepared fish-beef steaks

牛肉与鱼肉质量比	L*值	a*值	b*值
0:10	67.42±0.85 ^a	-11.38±1.05 ^e	18.50±0.93 ^c
1:9	61.43±0.65 ^b	-7.63±1.05 ^d	24.45±0.34 ^{ab}
2:8	56.55±0.28 ^c	-3.61±0.68 ^e	22.79±0.35 ^b
3:7	52.65±1.24 ^d	0.90±0.29 ^b	23.51±0.84 ^b
4:6	50.39±0.92 ^e	3.55±0.82 ^a	23.76±2.07 ^{ab}
5:5	48.90±0.47 ^f	4.34±0.47 ^a	25.72±0.90 ^a

注:同列不同小写字母表示具有显著性差异, $P < 0.05$ 。

从表4可以看出,随着牛肉添加量的增加,样品的亮度(L*值)显著下降($P < 0.05$)。当牛肉与鱼肉质量比为3:7时,红度值(a*值)呈现正值,并随着牛肉添加量的增加,a*值逐渐升高。与纯鱼肉排相比,添加牛肉的黄度值(b*值)偏高。这是因为牛肉属于红肉,其肌肉的结构、肌红蛋白和血红蛋白的化学状态及含量与肉的颜色和亮度形成有关,所以牛肉添加量会影响预制鱼肉牛排的色泽^[20]。

牛肉与鱼肉质量比对预制鱼肉牛排感官评分的影响见图2。



不同小写字母表示具有显著性差异, $P < 0.05$ 。

图2 牛肉与鱼肉质量比对预制鱼肉牛排感官评分的影响

Fig.2 Effect of beef/fish mass ratio on sensory score of prepared fish-beef steaks

表5 食盐添加量对预制鱼肉牛排质构的影响

Table 5 Effect of salt addition on texture of prepared fish-beef steaks

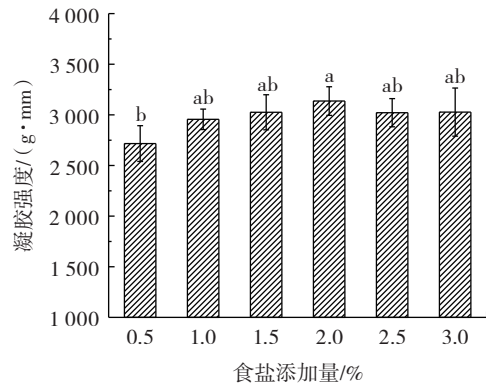
食盐添加量/%	硬度	弹性	内聚性	胶着性	咀嚼性	回弹力
0.5	5 257.68±370.01 ^c	0.90±0.02 ^{ab}	0.51±0.01 ^d	2 657.06±156.63 ^d	2 396.92±157.70 ^e	0.16±0.01 ^c
1.0	5 972.18±77.35 ^d	0.89±0.03 ^b	0.54±0.02 ^c	3 250.32±116.33 ^c	2 890.23±79.51 ^d	0.18±0.01 ^c
1.5	8 285.06±190.02 ^c	0.89±0.01 ^b	0.62±0.02 ^b	5 121.17±107.65 ^b	4 557.72±51.83 ^c	0.27±0.02 ^b
2.0	8 824.21±596.23 ^{bc}	0.91±0.01 ^{ab}	0.63±0.02 ^b	5 518.81±507.42 ^b	5 036.27±489.62 ^b	0.27±0.01 ^b
2.5	9 377.50±184.39 ^{ab}	0.90±0.01 ^{ab}	0.66±0.01 ^a	6 240.46±166.42 ^a	5 594.25±94.32 ^a	0.32±0.01 ^a
3.0	9 586.28±217.74 ^a	0.93±0.03 ^a	0.67±0.02 ^a	6 424.76±308.06 ^a	5 954.45±244.57 ^a	0.32±0.02 ^a

注:同列不同小写字母表示具有显著性差异, $P < 0.05$ 。

从图2可以看出,未添加牛肉的纯鱼肉排鱼腥味较重,而添加适量牛肉既可以掩盖鱼腥味,还能使产品同时具有牛肉的香味和鱼肉的鲜味。但因为牛肉粗纤维含量较多,所以牛肉添加量过多时,会使样品鱼香味较淡,咀嚼感较强,颗粒感较重。当牛肉与鱼肉质量比为3:7时,产品的感官评分最高。综上所述,选取牛肉与鱼肉质量比为2:8、3:7、4:6进行后续的响应面试验。

2.1.2 食盐添加量对预制鱼肉牛排的品质影响

食盐添加量对预制鱼肉牛排凝胶强度的影响见图3。



不同小写字母表示具有显著性差异, $P < 0.05$ 。

图3 食盐添加量对预制鱼肉牛排凝胶强度的影响

Fig.3 Effect of salt addition on gel strength of prepared fish-beef steaks

从图3可以看出,随着食盐添加量的增加,产品的凝胶强度先增大后减小,在食盐添加量为2.0%时达到最大值,但变化不明显。研究表明,食盐可以作用于肉制品蛋白体系,提高蛋白质的水合能力,使得蛋白质间的相互作用得到稳定,从而增强蛋白质的结合特性,提高凝胶强度,改善肉制品质地;但食盐添加过量可能会使肌肉蛋白过度溶解,导致凝胶强度有所下降^[21]。所以,适量添加食盐可以在凝胶体系形成中起到一定的促进作用。

食盐添加量对预制鱼肉牛排质构的影响见表5。

由表5可知,随着食盐添加量的增加,预制鱼肉牛排的硬度、弹性、内聚性、胶着性、咀嚼性、回弹力整体均逐渐增加。当食盐添加量为1.5%时,各项质构指标

已达到较大值,这可能是由于食盐的添加使鱼肉和牛肉中的盐溶性肌原纤维蛋白溶出,促进蛋白质多肽链之间的交联作用,形成稳定的三维网络结构,从而提高质构特性^[22]。

食盐添加量对预制鱼肉牛排色差的影响见表6。

表6 食盐添加量对预制鱼肉牛排色差的影响

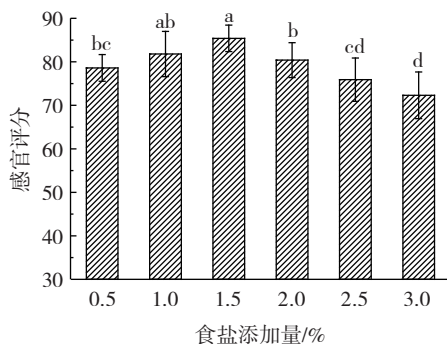
Table 6 Effect of salt addition on color of prepared fish-beef steaks

食盐添加量/%	L*值	a*值	b*值
0.5	55.45±0.52 ^b	9.98±1.57 ^a	25.17±0.69 ^b
1.0	57.48±0.23 ^a	7.99±0.96 ^{ab}	27.01±1.20 ^a
1.5	51.40±0.62 ^c	7.74±0.60 ^b	21.32±1.36 ^c
2.0	50.61±0.60 ^{cd}	7.64±0.53 ^b	19.03±0.20 ^d
2.5	49.81±0.57 ^d	7.54±1.82 ^b	19.19±1.07 ^d
3.0	48.03±1.21 ^c	7.46±1.09 ^b	18.64±0.61 ^d

注:同列不同小写字母表示具有显著性差异, $P<0.05$ 。

从表6可以看出,随着食盐添加量的增加,预制鱼肉牛排的亮度值(L*值)和黄色值(b*值)整体呈现先上升后下降的趋势,红度值(a*值)逐渐下降,这可能是由于食盐添加量的增加会加快肌红蛋白体系的氧化速率,对肌肉色泽产生不利影响,从而导致产品色泽变暗、不够鲜红^[23]。

食盐添加量对预制鱼肉牛排感官评分的影响见图4。



不同小写字母表示具有显著性差异, $P<0.05$ 。

图4 食盐添加量对预制鱼肉牛排感官评分的影响

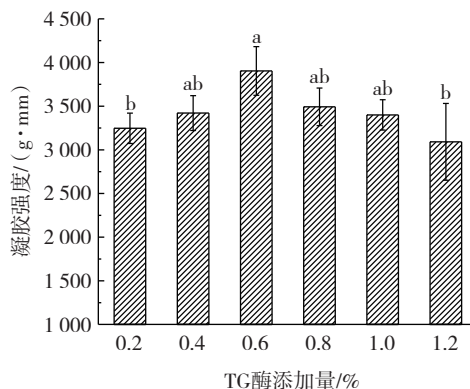
Fig.4 Effect of salt addition on sensory score of prepared fish-beef steaks

从图4可以看出,当食盐添加量从0.5%增加至1.5%时,感官评分呈现上升趋势。这是因为鱼肉和牛

肉中含有蛋白质、脂肪等具有鲜味的成分,添加一定量的食盐可以使其口味更加鲜美^[24]。当食盐添加量大于1.5%时,随着食盐添加量的增加,样品色泽逐渐变暗,肉质变硬,口味变咸,肉香味被食盐掩盖,导致感官评分下降。当食盐添加量为1.5%时,感官评分最高,此时样品的品质最佳、口感细腻、肉香突出、咸味适中。综上所述,选取食盐添加量为1.0%、1.5%、2.0%进行后续的反应面试验。

2.1.3 TG酶添加量对预制鱼肉牛排的品质影响

TG酶添加量对预制鱼肉牛排凝胶强度的影响见图5。



不同小写字母表示具有显著性差异, $P<0.05$ 。

图5 TG酶添加量对预制鱼肉牛排凝胶强度的影响

Fig.5 Effect of TGase addition on gel strength of prepared fish-beef steaks

从图5可以看出,随着TG酶添加量的增加,凝胶强度呈现先上升后下降的趋势,且在TG酶添加量为0.6%时,凝胶强度最大。这是因为TG酶是一种催化酰胺基转移反应的转移酶,可以通过蛋白质分子间或分子内发生交联反应,提高产品的凝胶特性^[25]。由于TG酶添加量的增加,催化了鱼肉、牛肉中蛋白质分子和TG酶分子肽键中谷氨酸胺残基 γ -羧基酰胺基和伯胺之间的酰胺基转移反应,形成蛋白质分子内和分子间 ϵ -(γ -谷氨酰)赖氨酸异肽键,使蛋白质分子之间发生交联反应,形成了稳定的蛋白质网状结构^[26]。但是,TG酶过量反而会使产品的凝胶强度下降,这是由于复合肉制品体系中维系蛋白质凝胶网络稳定所需的共价键数目有限^[27]。

TG酶添加量对预制鱼肉牛排质构的影响见表7。

表7 TG酶添加量对预制鱼肉牛排质构的影响

Table 7 Effect of TGase addition on texture of prepared fish-beef steaks

TG酶添加量/%	硬度	弹性	内聚性	胶着性	咀嚼性	回弹力
0.2	6 481.38±578.89 ^c	0.91±0.03 ^a	0.62±0.05 ^a	4 009.85±252.34 ^c	3 649.42±125.60 ^c	0.26±0.02 ^a
0.4	7 192.51±380.81 ^{bc}	0.92±0.04 ^a	0.66±0.04 ^a	4 715.41±82.40 ^b	4 357.74±192.02 ^b	0.29±0.03 ^a
0.6	9 046.39±564.45 ^a	0.91±0.01 ^a	0.63±0.03 ^a	5 729.82±146.95 ^a	5 193.11±93.70 ^a	0.29±0.01 ^a
0.8	7 614.74±84.40 ^b	0.93±0.03 ^a	0.64±0.02 ^a	4 834.75±125.12 ^b	4 494.14±88.60 ^b	0.28±0.01 ^a
1.0	7 075.68±771.42 ^{bc}	0.93±0.01 ^a	0.65±0.02 ^a	4 612.86±421.77 ^b	4 299.90±448.93 ^b	0.29±0.01 ^a
1.2	6 457.84±134.79 ^c	0.92±0.02 ^a	0.63±0.06 ^a	4 078.59±422.28 ^c	3 741.91±402.58 ^c	0.27±0.04 ^a

注:同列不同小写字母表示具有显著性差异, $P<0.05$ 。

从表7可以看出,随着TG酶添加量的增加,弹性、内聚性和回弹力变化均不显著($P>0.05$)。硬度、胶着性、咀嚼性均随着TG酶添加量的增加,呈现先上升后下降的趋势,这与凝胶强度变化趋势一致,二者均在TG酶添加量为0.6%时,达到最大值。这可能是因为TG酶作用于复合肉制品中,使其蛋白质之间发生交联,使得鱼肉和牛肉交联紧密,从而提高质构特性^[26]。Li等^[8]研究发现添加TG酶可以提高鱼肉和猪肉混合肉糜的凝胶强度和质构特性,这与本试验结果相似。

TG酶添加量对预制鱼肉牛排色差的影响见表8。

表8 TG酶添加量对预制鱼肉牛排色差的影响

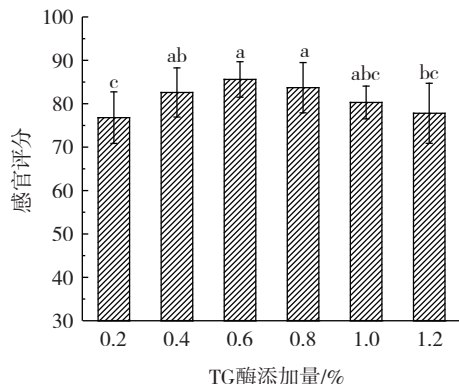
Table 8 Effect of TGase addition on color of prepared fish-beef steaks

TG酶添加量/%	L^* 值	a^* 值	b^* 值
0.2	46.79±1.61 ^{bc}	20.44±0.41 ^c	33.68±4.57 ^a
0.4	47.64±0.35 ^{abc}	25.21±2.29 ^b	26.00±5.12 ^b
0.6	48.54±0.34 ^a	25.18±1.83 ^b	20.49±5.74 ^{bc}
0.8	48.14±0.62 ^{ab}	28.34±0.89 ^a	17.81±4.52 ^c
1.0	46.28±1.12 ^c	29.60±0.82 ^a	16.85±0.95 ^c
1.2	45.96±0.67 ^c	29.74±0.65 ^a	16.01±1.99 ^c

注:同列不同小写字母表示具有显著性差异, $P<0.05$ 。

由表8可以看出,随着TG酶添加量的增加,预制鱼肉牛排的红色值(a^* 值)呈现上升趋势,黄度值(b^* 值)呈现下降趋势,亮度值(L^* 值)呈现先升高后降低的变化趋势,在TG酶添加量为0.6%时, L^* 值达到最大值。这可能是由于TG酶催化的共价交联作用,使预制鱼肉牛排的结构更紧密均匀,从而增加亮度,黄度值下降,使其呈现更好的色泽^[28]。

TG酶添加量对预制鱼肉牛排感官评分的影响见图6。



不同小写字母表示具有显著性差异, $P<0.05$ 。

图6 TG酶添加量对预制鱼肉牛排感官评分的影响

Fig.6 Effect of TGase addition on sensory scores of prepared fish-beef steaks

由图6可以看出,随着TG酶添加量的增加,预制鱼肉牛排的感官评分呈现先升高后降低的变化趋势。

当TG酶添加量为0.2%时,预制鱼肉牛排的口感较为粗糙,咀嚼后有肉渣感,内部出现气孔;当TG酶添加量大于0.8%时,TG酶味道较重,肉香味减弱,导致感官评分降低。综上所述,选取TG酶添加量为0.4%、0.6%、0.8%进行后续的响应面试验。

2.2 响应面试验结果分析

2.2.1 响应面试验设计及结果分析

响应面试验结果见表9。

表9 响应面试验结果

Table 9 Results of response surface tests

序号	A 牛肉与鱼肉质量比	B 食盐添加量	C TG酶添加量	凝胶强度/(g·mm)	感官评分
1	-1	-1	0	3 056.24	79.00
2	1	-1	0	1 957.70	78.30
3	-1	1	0	3 120.74	81.20
4	1	1	0	4 100.09	81.90
5	-1	0	-1	2 713.27	80.10
6	1	0	-1	3 198.14	79.40
7	-1	0	1	2 883.61	84.40
8	1	0	1	3 396.29	84.30
9	0	-1	-1	2 984.28	76.40
10	0	1	-1	3 536.98	81.60
11	0	-1	1	2 992.25	84.00
12	0	1	1	4 432.09	84.20
13	0	0	0	3 373.45	84.10
14	0	0	0	3 140.28	83.70
15	0	0	0	3 516.14	84.20
16	0	0	0	3 310.93	84.00
17	0	0	0	3 245.54	83.80

采用 Design-Expert 10.0.6 软件对表9的数据进行多元拟合回归分析,以牛肉与鱼肉质量比(A)、食盐添加量(B)、TG酶添加量(C)为因变量,以预制鱼肉牛排凝胶强度(Y_1)和感官评分(Y_2)为响应值,得到二次回归方程: $Y_1=3317.27+109.80A+524.93B+158.95C+519.47AB+6.95AC+221.79BC-348.57A^2+90.00B^2+79.13C^2$; $Y_2=83.96-0.12A+1.20B+2.58C+0.35AB+0.15AC-0.95BC-1.56A^2-2.36B^2-0.35C^2$ 。

回归方程方差分析结果见表10和表11。

根据表10可知,回归模型的 P 值小于0.01,为极显著;失拟项的 P 值为0.1382 >0.05 ,不显著。其中 $R^2=0.9400$,说明有94%的响应面值符合此模型,可信度高; $R^2_{Adj}=0.8628$,说明该回归模型不能解释说明的变异仅有13.72%,表明可以较好地利用此回归模型进行预测。方差分析结果显示,一次项A和交互项AB、二次项 A^2 的 P 值均小于0.01,对预制鱼肉牛排凝胶强度的影响极显著。根据所测得的 F 值可知,影响预制鱼肉牛排凝胶强度的影响作用大小依此为 $B>C>A$,即食盐添加量>TG酶添加量>牛肉与鱼肉质量比。

表 10 回归方程方差分析(凝胶强度为响应值)

Table 10 Variance analysis of regression equation (gel strength as response value)

方差来源	平方和	自由度	方差	F 值	P	显著性
模型	4 330 344.69	9	481 149.40	12.18	0.001 7	**
A	96 440.04	1	96 440.04	2.44	0.162 2	
B	2 204 401.54	1	2 204 402	55.79	0.000 1	**
C	202 110.55	1	202 110.60	5.12	0.058 2	
AB	1 079 406.71	1	1 079 407	27.32	0.001 2	**
AC	193.32	1	193.32	0.004 9	0.946 2	
BC	196 754.34	1	196 754.30	4.98	0.060 8	
A ²	511 594.24	1	511 594.20	12.95	0.008 8	**
B ²	34 103.91	1	34 103.91	0.86	0.383 8	
C ²	26 366.97	1	26 366.97	0.67	0.440 9	
残差	276 572.34	7	39 510.33			
失拟项	197 356.03	3	65 785.34	3.32	0.138 2	
纯误差	79 216.32	4	19 804.08			
合计	4 606 917.04	16				

注:**表示影响极显著, $P<0.01$ 。

表 11 回归方程方差分析(感官评分为响应值)

Table 11 Variance analysis of regression equation (sensory scores as response values)

方差来源	平方和	自由度	方差	F 值	P	显著性
模型	104.08	9	11.56	203.91	<0.000 1	**
A	0.08	1	0.08	1.41	0.273 7	
B	15.68	1	15.68	276.47	<0.000 1	**
C	47.05	1	47.05	829.51	<0.000 1	**
AB	0.49	1	0.49	8.64	0.021 7	*
AC	0.09	1	0.09	1.59	0.248 1	
BC	6.25	1	6.25	110.20	<0.000 1	**
A ²	11.88	1	11.88	209.54	<0.000 1	**
B ²	20.01	1	20.01	352.82	<0.000 1	**
C ²	0.22	1	0.22	3.93	0.088 0	
残差	0.40	7	0.06			
失拟项	0.23	3	0.08	1.74	0.296 1	
纯误差	0.17	4	0.04			
合计	104.48	16				

注:**表示影响极显著, $P<0.01$; *表示影响显著, $P<0.05$ 。

如表 11 所示,一次项 B、C,交互项 BC、二次项 A² 和 B² 对预制鱼肉牛排感官评分的影响极显著,同时模型的 R²=0.996 2,说明有 99.62% 的响应面值符合此模型,可信度高;R²_{Adj}=0.991 3,说明该回归模型不能解释说明的变异仅有 0.87%,说明该模型具有一定的可靠性,能够用来拟合试验。通过比较各因素的 F 值可知,影响预制鱼肉牛排感官评分的影响作用大小依次为 TG 酶添加量>食盐添加量>牛肉与鱼肉质量比。综上,该模型可以与实际有较好的拟合,可以用于预制鱼肉牛排最优配方工艺的分析和预测。

2.2.2 响应面交互作用分析

各因素对预制鱼肉牛排凝胶强度、感官评分交互

影响的响应面见图 7、图 8。

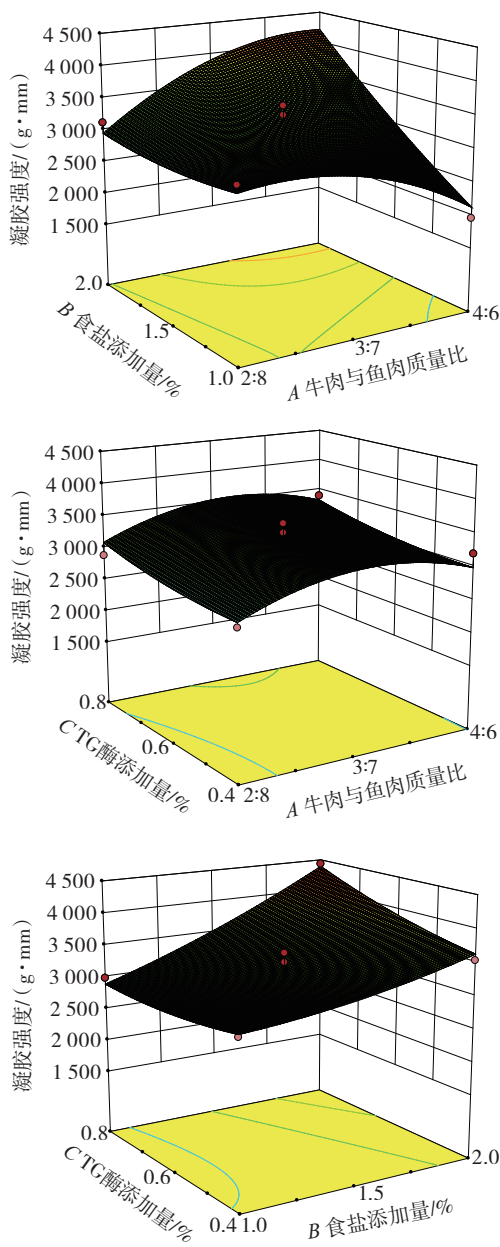
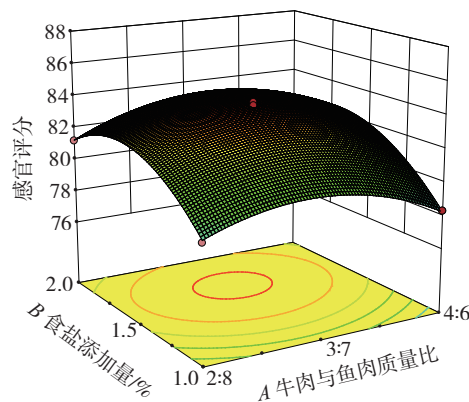


图 7 各因素对预制鱼肉牛排凝胶强度交互影响的响应面

Fig.7 Response surface of interaction of factors on gel strength of prepared fish-beef steaks



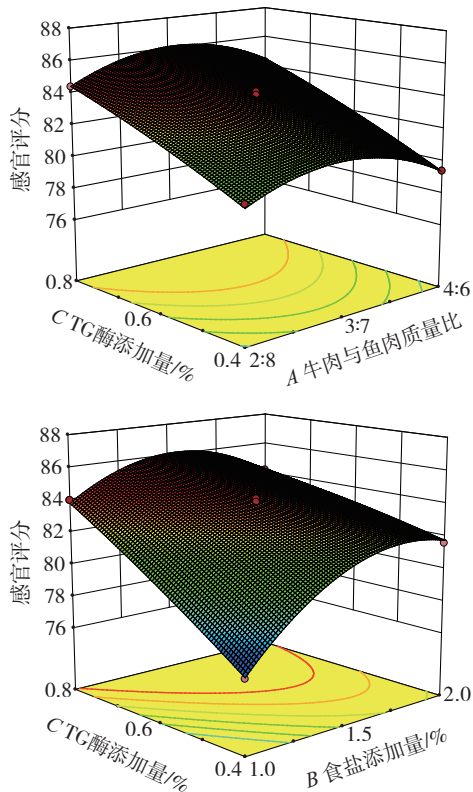


图8 各因素对预制鱼肉牛排感官评分交互影响的响应面

Fig.8 Response surface of interaction of factors on sensory score of prepared fish-beef steaks

根据回归方程得出不同影响因素的响应面图,在响应面图中,曲面越陡峭,则该曲面的自变量对响应值的影响越显著^[29]。由图7可以看出,牛肉与鱼肉质量比和食盐添加量的响应面图变化斜面更为陡峭,表明这两个因素对预制鱼肉牛排凝胶强度的影响最显著,与方差分析结果相符。由图8可以看出,各因素对预制鱼肉牛排感官评分的交互影响各不相同,其中,食盐添加量和TG酶添加量的交互影响最显著,这与方差分析结果一致。

2.3 最佳配方的确定及验证试验

通过响应面试验,采用 Design-Expert 10.0.6 软件进行优化,得到预制鱼肉牛排的最佳配方为以牛肉、鱼肉总质量为基准,牛肉添加量为 33.96%,鱼肉添加量为 66.04%,食盐添加量为 1.94%,TG酶添加量为 0.80%,模型预测最高凝胶强度为 4 461.78 g·mm,感官评分为 84.45。考虑到实际操作,调整配方为牛肉添加量 34.00%、鱼肉添加量 66.00%、食盐添加量 1.90%、TG酶添加量 0.80%,在此配方下制作出的预制鱼肉牛排的实际凝胶强度为 4 443.18 g·mm,感官评分为 84.40,与模型预测值接近,表明该模型可靠。

3 结论

以鲑鱼、牛肉为主要原料制作预制鱼肉牛排,以凝

胶强度、质构、色泽和感官评分为考察指标进行单因素试验。在单因素试验基础上,以凝胶强度和感官评分为响应值,通过响应面试验优化预制鱼肉牛排的配方。结果表明:以牛肉、鱼肉总质量为基准,最佳配方为牛肉添加量 34.00%、鱼肉添加量 66.00%、食盐添加量 1.90%、TG酶添加量 0.80%,在此配方下制作出的牛排口感细腻、肉质紧实、味道适宜,凝胶强度为 4 443.18 g·mm,感官评分为 84.40,与模型预测值接近,本研究为进一步开发新型牛排提供新思路。

参考文献:

- [1] 陈浩,王纯洁,斯木吉德,等.牛肉品质及其影响因素研究进展[J].动物营养学报,2021,33(2):669-678.
CHEN Hao, WANG Chunjie, Smujid, et al. Research progress of beef quality and its influencing factors[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2021, 33(2): 669-678.
- [2] MONTEIRO P A M, MACIEL I C F, ALVARENGA R C, et al. Carcass traits, fatty acid profile of beef, and beef quality of Nellore and Angus×Nellore crossbred young bulls finished in a feedlot[J]. Livestock Science, 2022, 256: 104829.
- [3] 邓思杨,张岱玉,石硕,等.洋葱汁添加量及滚揉时间对预制牛排品质和贮藏稳定性的影响[J].食品工业科技,2018,39(24):80-85.
DENG Siyang, ZHANG Daiyu, SHI Shuo, et al. Effect of onion sauce additions and tumbling time on qualities and storage stability of prefabricate steak[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(24): 80-85.
- [4] BAUGREET S, KERRY J P, BRODKORB A, et al. Optimisation of plant protein and transglutaminase content in novel beef restructured steaks for older adults by central composite design[J]. Meat Science, 2018, 142: 65-77.
- [5] NIE S, LI L H, WU Y Y, et al. Exploring the roles of microorganisms and metabolites in the fermentation of sea bass (*Lateolabrax japonicus*) based on high-throughput sequencing and untargeted metabolomics[J]. LWT - Food Science and Technology, 2022, 167: 113795.
- [6] 吴燕燕,李冰,朱小静,等.养殖海水和淡水鲈鱼的营养组成比较分析[J].食品工业科技,2016,37(20):348-352,359.
WU Yanyan, LI Bing, ZHU Xiaojing, et al. Comparison of nutrient composition of cultured sea bass and cultured fresh-water bass, *Lateolabrax japonicus* and *Micropterus salmoides*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(20): 348-352, 359.
- [7] MARTÍNEZ O, SALMERÓN J, EPELDE L, et al. Quality enhancement of smoked sea bass (*Dicentrarchus labrax*) fillets by adding resveratrol and coating with chitosan and alginate edible films[J]. Food Control, 2018, 85: 168-176.
- [8] LI Q Z, GUI P, HUANG Z, et al. Effect of transglutaminase on quality and gel properties of pork and fish mince mixtures[J]. Journal of Texture Studies, 2018, 49(1): 56-64.
- [9] 朱士臣,冯媛,刘书来,等.即食重组纤维感鱼糜制品的制备及特性表征[J].食品与发酵工业,2022,48(23):209-216.
ZHU Shichen, FENG Yuan, LIU Shulai, et al. Preparation and characterizations of ready-to-eat reconstructed fiber surimi products [J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(23): 209-216.
- [10] 许刚,丁浩宸,张燕平,等.畜禽肉和鱼肉对南极磷虾凝胶制品挥发性风味成分的影响[J].食品与发酵工业,2016,42(5):132-139.

- XU Gang, DING Haochen, ZHANG Yanping, et al. Effect of meat or fish content on volatile flavor components in Antarctic krill gel products[J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(5): 132-139.
- [11] 刘香海, 刘璘. TG 酶性质及在肉类重组产品中的应用[J]. 中国食品添加剂, 2012(2): 149-154.
- LIU Xianghai, LIU Lin. Characteristics of transglutaminase and its applications in reconstructed-meat processing[J]. China Food Additives, 2012(2): 149-154.
- [12] 张佳敏, 唐占敏, 冉渺, 等. 响应面优化重组牛排加工工艺[J]. 食品工业科技, 2017, 38(4): 263-266, 271.
- ZHANG Jiamin, TANG Zhanmin, RAN Miao, et al. Optimization of processing conditions for restructured steak by response surface methodology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(4): 263-266, 271.
- [13] BAUGREET S, KERRY J P, ALLEN P, et al. Physicochemical characteristics of protein-enriched restructured beef steaks with phosphates, transglutaminase, and elasticised package forming[J]. Journal of Food Quality, 2018, 2018: 4737602.
- [14] 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.
- YANG Mei, AN Yueqi, REN Yangying, et al. Optimizing the preparation of pork-fish lion's head meatballs using response surface methodology[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(7): 227-236.
- [15] 李龙祥, 赵欣欣, 孔保华. 复合磷酸盐添加量对调理重组牛肉品质特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(2): 1-5, 85.
- LI Longxiang, ZHAO Xinxin, KONG Baohua. The effect of compound phosphate on quality characteristics of ready-to-eat restructured beef products[J]. Food Research and Development, 2017, 38(2): 1-5, 85.
- [16] COFRADES S, LÓPEZ-LÓPEZ I, RUIZ-CAPILLAS C, et al. Quality characteristics of low-salt restructured poultry with microbial transglutaminase and seaweed[J]. Meat Science, 2011, 87(4): 373-380.
- [17] DONDERO M, FIGUEROA V, MORALES X, et al. Transglutaminase effects on gelation capacity of thermally induced beef protein gels[J]. Food Chemistry, 2006, 99(3): 546-554.
- [18] WANG R H, GAO R C, XIAO F, et al. Effect of chicken breast on the physicochemical properties of unwashed sturgeon surimi gels [J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 113: 108306.
- [19] 袁莉莉, 刘书成, 解万翠, 等. 虾肉和鱼肉混合肉糜凝胶特性的研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(12): 246-250.
- YUAN Lili, LIU Shucheng, XIE Wancui, et al. Study on gel properties of surimi mixed by shrimp and fish meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(12): 246-250.
- [20] 王鑫, 李光鹏. 牛肉质性状及其影响因素[J]. 动物营养学报, 2019, 31(11): 4950-4959.
- WANG Xin, LI Guangpeng. Meat quality traits of cattle and its influence factors[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2019, 31(11): 4950-4959.
- [21] FENG J H, CAO A L, CAI L Y, et al. Effects of partial substitution of NaCl on gel properties of fish myofibrillar protein during heating treatment mediated by microbial transglutaminase[J]. LWT - Food Science and Technology, 2018, 93: 1-8.
- [22] 李龙祥, 赵欣欣, 夏秀芳, 等. 食盐对调理重组牛肉制品品质及水分分布特性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(19): 143-148.
- LI Longxiang, ZHAO Xinxin, XIA Xiufang, et al. Effect of salt on quality and water distribution characteristics of ready-to-eat restructured beef products[J]. Food Science, 2017, 38(19): 143-148.
- [23] 李雪蕊. 关键加工工艺对调理牛排品质影响的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
- LI Xuerui. Effect of key processing technology on the quality of prepared beef steak[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.
- [24] 廖帆. 非钠代用盐的开发、口感改良及应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- LIAO Fan. Research on the development, taste improvement and application of a non-sodium salt[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [25] TOKAY F G, ALP A C, YERLIKAYA P. Production and shelf life of restructured fish meat binded by microbial transglutaminase[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 152: 112369.
- [26] 范伟杰, 张俊杰, 高世峰, 等. 重组朗德鹅肉排工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(16): 125-133.
- FAN Weijie, ZHANG Junjie, GAO Shifeng, et al. Process optimization for reconstituted Landes goose steak[J]. Food Research and Development, 2023, 44(16): 125-133.
- [27] 雷跃磊, 刘茹, 王卫芳, 等. 三种添加物对鱼肉猪肉复合凝胶品质的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(5): 281-284.
- LEI Yuelei, LIU Ru, WANG Weifang, et al. Effect of three additives on gel properties of fish/pork mixed gels[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(5): 281-284.
- [28] 李宗豪. 低硝西式熏煮火腿工艺优化与品质改良及贮藏特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- LI Zonghao. Study on process optimization, quality improvement and storage characteristics of low-nitrate western-style smoked ham [D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [29] 陈慕雪, 刘淑慧, 张雪莹, 等. 响应面法优化重组罗非鱼肉制备工艺[J]. 肉类研究, 2021, 35(6): 15-21.
- CHEN Muxue, LIU Shuhui, ZHANG Xueying, et al. Optimizing the preparation process of restructured *Tilapia* meat by response surface methodology[J]. Meat Research, 2021, 35(6): 15-21.

加工编辑:张昱
收稿日期:2023-12-26