

转谷氨酰胺酶添加量及暂存条件 对传统鱼糕品质的影响

高汉朴^{1,2} 苏兆新^{1,2} 刘 婷³ 熊善柏^{1,2}

(1. 华中农业大学食品科学技术学院, 湖北 武汉 430070; 2. 国家大宗淡水鱼加工技术研发分中心(武汉),
湖北 武汉 430070; 3. 荆州市依顺食品有限公司, 湖北 荆州 434000)

摘要: [目的] 解决鱼糕工业化生产过程中因暂存条件不当导致的凝胶品质下降问题。[方法] 以冷冻鱼糜为原料制备鱼糕, 研究微生物转谷氨酰胺酶(MTGase)添加量及暂存温度和时间对鱼糕力学特性、外观色度、持水特性和感官品质的影响, 并通过响应面法优化工艺参数。[结果] MTGase添加量、暂存温度和暂存时间对鱼糕的全质构分析(TPA)参数、穿刺特性、色度、持水特性和感官评分有显著影响($P < 0.05$)。经响应面法优化获得最佳工艺参数为: MTGase添加量 0.35 U/g 鱼糜、暂存温度 19.2 °C、暂存时间 55.4 min, 在此条件下制作的鱼糕凝胶强度和感官评分最高, 分别为 24.15 N·mm 和 37.38。[结论] 在鱼糕工业化生产过程中, MTGase适宜添加量为 0.35 U/g 鱼糜, 混合鱼浆的暂存条件宜选择较低的暂存温度(不高于 19.2 °C), 暂存时间不宜超过 55.4 min。

关键词: 鱼糕; 冷冻鱼糜; 转谷氨酰胺酶; 暂存条件

Effects of transglutaminase addition amount and temporary storage conditions on the quality of traditional fish cake

GAO Hanpu^{1,2} SU Zhaoxin^{1,2} LIU Ting³ XIONG Shanbai^{1,2}

(1. College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China;
2. National R&D Branch Center for Conventional Freshwater Fish Processing (Wuhan), Wuhan, Hubei 430070, China;
3. Jingzhou Yishun Food Co., Ltd., Jingzhou, Hubei 434000, China)

Abstract: [Objective] To deal with the gel quality degradation caused by improper temporary storage conditions during the industrial production of fish cake. [Methods] Frozen surimi is used as the raw material to produce fish cake. The effects of microbial transglutaminase (MTGase) addition amount, temporary storage temperature, and time on mechanical properties, appearance chroma, water retention properties, and sensory quality of fish cake are studied. The process parameters are optimized by a response surface test. [Results] MTGase addition amount, temporary storage temperature, and temporary storage time have significant effects on texture profile analysis (TPA) parameters, puncture characteristics, chroma, water retention properties, and sensory scores of fish cake ($P < 0.05$). The optimal process parameters are as follows: an MTGase addition amount of 0.35 U/g surimi, a temporary storage temperature of 19.2 °C, and a temporary storage time of 55.4 min. Under these conditions, the gel strength and sensory score of the fish cake are the highest, which are 24.15 N·mm and 37.38, respectively. [Conclusion] During the industrial production of fish cake, MTGase is suitable to add at the amount of 0.35 U/g surimi. The temporary storage conditions of mixed fish surimi should be selected at a lower temporary storage temperature (not higher than 19.2 °C), and the temporary storage time should not exceed 55.4 min.

Keywords: fish cake; frozen surimi; transglutaminase; temporary storage condition

基金项目: 湖北省技术创新计划项目(编号: 2023BBB137)

通信作者: 熊善柏(1963—), 男, 华中农业大学教授, 硕士。E-mail: xionsb@mail.hzau.edu.cn

收稿日期: 2024-11-29 改回日期: 2025-05-04

引用格式: 高汉朴, 苏兆新, 刘婷, 等. 转谷氨酰胺酶添加量及暂存条件对传统鱼糕品质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(6): 121-128.

Citation: GAO Hanpu, SU Zhaoxin, LIU Ting, et al. Effects of transglutaminase addition amount and temporary storage conditions on the quality of traditional fish cake[J]. Food & Machinery, 2025, 41(6): 121-128.

鱼糕是原产荆楚、颇具中国特色的传统鱼糜制品,距今有 4 000 多年的历史,因其具有营养丰富、色如羊脂、清香弹软的特点深受消费者喜爱^[1]。传统鱼糕是以鱼糜、蛋清、食盐等为原料,辅以猪肥膘、淀粉、调味料等辅料,经擂溃、装模、高温蒸制、冷却等工序制成的凝胶类产品^[2]。国内外较多学者分别研究了鱼糜漂洗^[1,3]、擂溃和加热^[1,4]、减菌保鲜^[5-7]等工艺条件及配方^[2,8]对鱼糕品质的影响,包括制备高内相乳液替代猪油以提高鱼糕的品质^[9-10],还开发出了乌龙茶鱼糕^[11]、雪花鱼糕^[12]等新品种,极大地丰富了鱼糕的种类。

转谷氨酰胺酶(transglutaminase, EC.2.3.2.13, TGase)可诱导鱼糜中肌原纤维蛋白(myofibrillar protein, MP)交联^[13],常被添加到混合鱼浆中以提高鱼糜凝胶的交联程度、凝胶强度和弹性^[14-16]。微生物转谷氨酰胺酶(microbial transglutaminase, MTGase)已被应用于鱼糕的工业化生产,以提高其凝胶强度、弹性和口感。然而在实际生产中发现,加入 MTGase 的混合鱼浆在蒸制之前的暂存条件会影响凝胶品质,特别是暂存过程中温度过高、时间过久会导致蒸熟后鱼糕的凝胶强度低、弹性和口感差。研究拟以冷冻鲢鱼糜为原料,研究 MTGase 添加量、暂存温度和暂存时间对鱼糕品质的影响,确定适宜传统鱼糕生产的 MTGase 添加量及暂存条件,旨在为传统鱼糕工业化生产提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

白鲢冷冻鱼糜:AAA 级,洪湖市井力水产食品股份有限公司;

鸡蛋、大葱、生姜、食盐和白砂糖等:市售;

精制猪油:山东临沂金锣有限公司;

羟丙基淀粉:河南恒瑞淀粉科技股份有限公司;

酵母抽提物 TL39:安琪酵母股份有限公司;

谷氨酰胺转氨酶:120 U/g,江苏一鸣生物股份有限公司。

1.2 仪器与设备

分析天平:AC210S 型,德国 Sartorius 公司;

高速离心机:AVANTIJ-26XP 型,美国 Beckman Coulter 公司;

色差仪:CR-400 型,日本柯尼卡美能达公司;

质构分析仪:TA.XT.plus 型,英国 Stable Micro System 公司;

食品调理机:CombiMax600 型,德国博朗公司。

1.3 试验方法

1.3.1 鱼糕制作工艺 参考张茜等^[8]的方法并修改。将冷冻鱼糜于 4℃放置 12 h 解冻,然后称取解冻的鱼糜 300 g 装入调理机中,添加 24 g 鸡蛋清、165 g 葱姜水和

0.9 g 谷氨酰胺转氨酶(0.36 U/g 鱼糜,先混入葱姜水中)并斩拌 2 min(空斩);加入 6 g 食盐并斩拌 1 min(盐斩),再加入 1.5 g 白砂糖、1.5 g 酵母抽提物、30 g 羟丙基淀粉、30 g 猪油并斩拌 2 min(调味斩);将斩拌好的物料于 40℃静置 30 min(暂存),再装入方型模具中并铺平,于 100℃蒸制 25 min 制成成品鱼糕。

1.3.2 试验设计

(1) 单因素试验:在 1.3.1 基础上,分别研究 MTGase 添加量(0, 0.12, 0.24, 0.36, 0.48, 0.60 U/g 鱼糜)、暂存温度(10, 20, 30, 40℃)和暂存时间(30, 60, 90 min)对鱼糕质构、穿刺、耐折度、色度、持水性、蒸煮损失率和感官特性的影响,以明确 MTGase 添加量和暂存条件对鱼糕品质的影响规律。

(2) 响应面试验:根据单因素试验的结果,将凝胶强度和感官评分作为响应值,选择 MTGase 添加量、暂存温度和暂存时间 3 个因素为自变量,使用 Design-Expert 13 软件,进行三因素三水平试验设计。

1.3.3 TPA 参数测定 参考 Mi 等^[17]的方法并稍作修改。将平衡至室温的鱼糕切成边长为 2 cm 的正方体,置于测试台上进行测试。测试条件:P/36 R 探头,测前速度为 5 mm/s,测中、测后速度均为 1 mm/s,样品压缩比 50%,两次压缩间隔时间 5 s,触发力 0.05 N。

1.3.4 穿刺特性测定 参考杜智翔等^[2]的方法。

1.3.5 耐折度测定 参考尹贝贝等^[18]的方法并稍作修改。将鱼糕切成 3 mm 厚,取 5 个试样进行测定打分:5 分,连续对折两次不断裂;4 分,连续对折两次发生断裂;3 分,对折一次不断裂;2 分,对折一次断裂但两半仍相连;1 分,对折一次完全断裂成两半。取平行试样的耐折分数平均值划分等级:AA 级,4~5 分;A 级,3~4 分;B 级,2~3 分;C 级,1~2 分。

1.3.6 色度测定 参考仪淑敏等^[19]的方法。

1.3.7 持水性测定 参考杜智翔等^[2]的方法。

1.3.8 蒸煮损失率测定 参考施咏淇等^[20]的方法并修改。将鱼糕切成 2 cm×2 cm×1 cm 的立方体并称量质量,放入蒸煮袋内并封口,100℃水浴蒸煮 25 min,滤纸吸干鱼糕表面液体,测定蒸煮后鱼糕质量。按式(1)计算鱼糕的蒸煮损失率。

$$C_L = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

C_L ——蒸煮损失率,%;

M_1 ——蒸煮前鱼糕的质量,g;

M_2 ——蒸煮后鱼糕的质量,g。

1.3.9 感官评价 参考聂景贵等^[21]的方法并修改。由经过培训的 8 人对鱼糕的色泽、气味、滋味、组织形态和口感感官指标进行评价,感官评价标准见表 1。

表1 鱼糕的感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria for fish cake		
指标	评价标准	分值
色泽	整体洁白,表面光泽感明显	7~9
	整体微黄,表面有光泽感	4~6
	整体偏黄,表面光泽感黯淡	1~3
气味	无鱼腥味	7~9
	稍有鱼腥味	4~6
	有较重鱼腥味	1~3
滋味	鲜味明显,回味绵长	7~9
	有鲜味,回味适中	4~6
	无鲜味,有苦味和酸涩味	1~3
组织形态	断面紧密,有小气孔,无大气孔	7~9
	断面基本密实,有大气孔	4~6
	断面松软,有大气孔且分布不均匀	1~3
口感	弹软,细腻易咀嚼且不粘牙	7~9
	弹软,稍有腻感或略有粘牙感	4~6
	有颗粒感,有腻感,粗老或有粘牙感	1~3

1.4 数据处理

试验重复3次,结果用平均值±标准差表示。采用Excel 2016软件处理数据,采用SPSS 25软件对数据进行单因素方差分析,使用Design-Expert 13软件进行响应面试验设计及分析。

2 结果与分析

2.1 MTGase添加量对鱼糕品质的影响

微生物转谷氨酰胺酶(MTGase)可诱导鱼糜中肌原纤维蛋白交联^[13],已被应用到传统鱼糕的工业化生产,以提高冻藏后鱼糕的凝胶强度、弹性和口感。MTGase添加量对鱼糕TPA参数、穿刺特性、色度、持水特性和感官评分的影响见表2。

由表2可知,MTGase添加量对鱼糕的硬度、弹性、内聚性、咀嚼性、回复性、破断力、破断距离、凝胶强度、耐折度、持水性、蒸煮损失率、 L^* 、 a^* 、白度以及色泽、滋味、组织形态和总体可接受性评分有显著影响($P<0.05$),但对鱼糕的 b^* 、气味和口感的评分无显著影响($P>0.05$)。随着MTGase添加量增加,鱼糕的硬度、弹性、内聚性、咀嚼性、回复性、破断力、破断距离、凝胶强度、持水性、亮度和白度值均显著增大,蒸煮损失率显著降低。鱼糜肌原纤维蛋白在MTGase作用下发生交联,MTGase添加量增大使得鱼糜蛋白分子间交联程度增加,形成了更致密的三维网状结构凝胶体,并限制了凝胶中水分子的流动^[22-24]。色度的变化可能是由于MTGase通过改变鱼糕的内部网络结构,使猪油更加均匀地分布在凝胶基质中,使鱼糕具有更强的光散射效应和更高的光反射率,因此白度更高^[25-27]。随着MTGase添加量增加,鱼糕的色泽、滋味、组织形态评分和总评分逐渐增加,分别在MTGase添加量为0.60,0.48,0.48,0.48 U/g鱼糜时最高。MTGase添加量为0.24~0.48 U/g鱼糜时,鱼糕亮白均匀、组织致密且口感

表2 MTGase添加量对鱼糕品质的影响[†]

Table 2 Effects of MTGase addition amount on fish cake quality								
MTGase添加量/ (U·g ⁻¹)	硬度/N	弹性	内聚性	咀嚼性/N	回复性	破断力/N	破断距 离/mm	凝胶强度/ (N·mm)
0.00	19.13±1.32 ^f	0.75±0.03 ^c	0.42±0.04 ^c	7.71±0.65 ^c	0.21±0.02 ^c	1.79±0.07 ^c	5.00±0.23 ^c	8.92±0.55 ^c
0.12	26.16±1.48 ^e	0.80±0.05 ^b	0.44±0.08 ^c	8.60±0.90 ^c	0.22±0.04 ^c	2.16±0.21 ^d	6.02±0.31 ^d	12.97±1.39 ^d
0.24	30.92±0.63 ^d	0.82±0.02 ^{ab}	0.47±0.04 ^c	11.93±1.46 ^d	0.24±0.03 ^c	2.43±0.09 ^c	6.65±0.24 ^{bc}	16.16±0.86 ^c
0.36	32.44±0.26 ^c	0.80±0.01 ^b	0.54±0.03 ^b	14.02±1.00 ^c	0.29±0.02 ^b	2.63±0.14 ^b	6.53±0.33 ^c	17.12±0.61 ^c
0.48	33.80±0.41 ^b	0.84±0.03 ^a	0.57±0.02 ^b	15.87±1.12 ^b	0.29±0.04 ^b	2.74±0.06 ^{ab}	6.90±0.28 ^{ab}	18.92±0.82 ^b
0.60	40.03±1.27 ^a	0.84±0.02 ^a	0.66±0.05 ^a	20.47±0.91 ^a	0.36±0.03 ^a	2.86±0.13 ^a	7.20±0.30 ^a	20.58±1.07 ^a
MTGase添加量/ (U·g ⁻¹)	L^*	a^*	b^*	W	持水性/%	蒸煮损 失率/%	耐折度	感官评 价总分
0.00	81.53±0.34 ^d	-1.05±0.03 ^d	7.48±0.31 ^b	80.04±0.36 ^d	70.02±0.48 ^d	13.45±0.40 ^a	C	29.00±2.65 ^b
0.12	82.47±0.35 ^c	-0.85±0.02 ^a	8.50±0.16 ^a	80.49±0.36 ^c	75.17±2.03 ^c	12.97±0.58 ^a	B	29.70±2.77 ^{ab}
0.24	82.74±0.32 ^{bc}	-0.88±0.02 ^a	8.42±0.28 ^a	80.78±0.37 ^{bc}	77.59±1.98 ^{bc}	10.61±1.63 ^b	A	31.83±3.97 ^{ab}
0.36	82.79±0.43 ^{bc}	-0.99±0.03 ^c	8.27±0.14 ^a	80.88±0.41 ^{bc}	78.97±0.47 ^b	9.11±0.76 ^c	A	32.83±3.37 ^{ab}
0.48	82.95±0.40 ^b	-0.92±0.05 ^b	8.19±0.19 ^a	81.06±0.33 ^{ab}	79.44±1.44 ^b	8.48±0.74 ^c	A	33.67±3.27 ^a
0.60	83.34±0.40 ^a	-0.95±0.04 ^{bc}	8.34±0.40 ^a	81.34±0.43 ^a	85.41±0.93 ^a	5.18±1.91 ^d	AA	32.50±2.07 ^{ab}

[†] 同列小写字母不同表示存在显著性差异($P<0.05$)。

适中,可作为MTGase添加量的适宜范围。

2.2 暂存温度对鱼糕品质的影响

在 0~40 ℃范围内,暂存温度越高则 MTGase 诱导的肌原纤维蛋白交联反应越快。在固定 MTGase 用量和暂存时间下,研究了暂存温度对鱼糕品质的影响,结果见表 3。

由表 3 可知,暂存温度对鱼糕的硬度、内聚性、咀嚼性、回复性、破断力、破断距离、凝胶强度、耐折度、 L^* 、白度、持水性、蒸煮损失率、组织形态和口感评分及总分有显著影响($P<0.05$),但对鱼糕的弹性、 a^* 、 b^* 以及色泽、气味和滋味评分无明显影响($P>0.05$)。暂存温度为 10~40 ℃时,随着暂存温度升高,鱼糕的硬度、内聚性、咀嚼性、回复性、破断力、破断距离、凝胶强度、耐折度、 L^* 、白度、持水性逐渐下降。混合鱼浆在 10,20 ℃下暂存一定时间后制备的鱼糕品质明显优于 30,40 ℃下暂存的。其原因可能是,混合鱼浆在 30,40 ℃下暂存时,MTGase 诱导的肌原纤维蛋白交联反应速度快,在暂存中部分形成凝胶体,在随后的挤出成型时因剪切作用而导致凝胶体结构

破坏^[28]。任洋莹等^[29]也发现,物料温度为 20 ℃时,形成的鱼丝网络结构更好。可见在较低温度下暂存,有利于抑制成型前 MTGase 诱导的肌原纤维蛋白交联,可以制得高品质的鱼糕,这与蔡礼彬等^[28]的研究结果相似。

2.3 暂存时间对鱼糕品质的影响

表 4 显示了不同暂存时间的鱼糕的 TPA 参数、穿刺特性、色度、持水特性和感官评分。由表 4 可知,暂存时间对鱼糕的硬度、内聚性、咀嚼性、回复性、破断力、破断距离、凝胶强度、耐折度、持水性以及色泽、组织形态、口感评分和总分有显著影响($P<0.05$),但对鱼糕的弹性、 L^* 、 a^* 、 b^* 、 W 、蒸煮损失率以及气味和滋味评分无显著影响($P>0.05$)。

随着暂存时间延长,鱼糕的硬度、内聚性、咀嚼性、回复性、破断力、持水性以及组织形态、口感评分和总分呈先增加后下降趋势,且均在暂存时间为 60 min 达到最大值。随着暂存时间延长,鱼糕的破断距离显著增加,而色泽显著下降。暂存时间为 90 min 的鱼糕的内聚性、咀嚼性、回复性、破断力、凝胶强度、持水性及组织形态评分与

表 3 暂存温度对鱼糕品质的影响[†]
Table 3 Effects of temporary storage temperature on fish cake quality

暂存温度/℃	硬度/N	弹性	内聚性	咀嚼性/N	回复性	破断力/N	破断距离/mm	凝胶强度/(N·mm)
10	43.12±0.96 ^a	0.85±0.03	0.68±0.02 ^a	24.20±0.96 ^a	0.38±0.01 ^a	3.04±0.12 ^a	7.40±0.50 ^{ab}	22.56±0.94 ^a
20	42.88±1.45 ^a	0.85±0.01	0.69±0.03 ^a	24.60±1.60 ^a	0.38±0.02 ^a	3.00±0.07 ^{ab}	7.86±0.24 ^a	23.57±0.54 ^a
30	39.78±1.24 ^b	0.84±0.02	0.66±0.05 ^{ab}	20.22±0.78 ^b	0.36±0.03 ^{ab}	2.88±0.12 ^b	7.24±0.38 ^b	20.84±1.19 ^b
40	37.79±0.91 ^c	0.83±0.02	0.62±0.03 ^b	18.54±2.36 ^b	0.35±0.02 ^b	2.73±0.09 ^c	6.98±0.13 ^b	19.06±0.90 ^c
暂存温度/℃	L^*	a^*	b^*	W	持水性/%	蒸煮损失率/%	耐折度	感官评价总分
10	83.96±0.27 ^a	-1.12±0.04	7.16±0.49	82.39±0.41 ^a	85.83±1.05 ^{ab}	4.71±0.39 ^b	AA	34.50±1.46 ^a
20	83.88±0.40 ^a	-1.16±0.04	7.21±0.60	82.29±0.50 ^{ab}	87.04±0.44 ^a	4.33±1.23 ^b	AA	34.70±1.79 ^a
30	83.29±0.29 ^b	-1.13±0.05	6.84±0.36	81.91±0.30 ^b	84.96±0.81 ^b	5.16±0.48 ^{ab}	A	31.90±0.96 ^b
40	82.06±0.40 ^c	-1.11±0.10	7.27±0.39	80.61±0.42 ^c	84.40±0.78 ^b	6.41±0.39 ^a	A	31.70±1.04 ^b

[†] 同列小写字母不同表示存在显著性差异($P<0.05$)。

表 4 暂存时间对鱼糕品质的影响[†]
Table 4 Effects of temporary storage time on fish cake quality

暂存时间/min	硬度/N	弹性	内聚性	咀嚼性/N	回复性	破断力/N	破断距离/mm	凝胶强度/(N·mm)
30	37.79±0.91 ^c	0.83±0.02	0.62±0.03 ^b	18.54±2.36 ^b	0.35±0.02 ^b	2.73±0.09 ^b	6.98±0.13 ^b	19.06±0.90 ^b
60	43.69±2.01 ^a	0.85±0.02	0.70±0.04 ^a	25.26±2.42 ^a	0.39±0.02 ^a	3.12±0.21 ^a	7.26±0.47 ^b	22.63±1.37 ^a
90	40.85±0.99 ^b	0.85±0.02	0.67±0.03 ^a	23.91±1.75 ^a	0.37±0.03 ^{ab}	2.94±0.14 ^{ab}	7.76±0.32 ^a	22.87±1.79 ^a
暂存时间/min	L^*	a^*	b^*	W	持水性/%	蒸煮损失率/%	耐折度	感官评价总分
30	82.06±0.40	-1.11±0.10	7.27±0.39	80.61±0.42	84.40±0.78 ^b	6.41±0.39	A	31.70±1.04 ^b
60	81.87±0.35	-1.14±0.05	7.18±0.47	80.46±0.41	86.53±0.45 ^a	4.61±1.31	AA	34.30±1.30 ^a
90	81.80±0.24	-1.15±0.07	7.12±0.40	80.42±0.22	86.33±0.97 ^a	4.95±0.64	AA	30.40±2.43 ^b

[†] 同列小写字母不同表示存在显著性差异($P<0.05$)。

暂存时间为 60 min 的差异不明显,但暂存时间为 90 min 的鱼糕的硬度、口感和感官评分总分显著低于暂存时间为 60 min 的,这可能与混合鱼浆长时间暂存后凝胶化程度较高而后又在挤压成型过程中鱼糜凝胶被破坏有关^[28-30]。整体来看,暂存过久会导致鱼糕的品质降低,60 min 是较为理想的暂存时间。

2.4 工艺条件的响应面优化

2.4.1 响应面试验设计及结果 在上述试验基础上,确定响应面试验因素及水平见表 5,响应面试验设计及结果见表 6。

运用 Design-Expert 13 软件对鱼糕的凝胶强度和感官评分试验结果进行回归分析,得到的二次多项式回归方程分别为

$$Y_1 = 23.94 - 0.77X_1 - 0.58X_2 - 0.54X_3 + 0.10X_1X_2 + 0.13X_1X_3 - 0.11X_2X_3 - 0.61X_1^2 - 0.45X_2^2 - 1.24X_3^2, \quad (2)$$

表 5 响应面试验因素及水平

水平	X ₁ MTGase 添加量/(U·g ⁻¹)	X ₂ 暂存温度/℃	X ₃ 暂存时间/min
-1	0.24	15	45
0	0.36	20	60
1	0.48	25	75

表 6 响应面试验设计及结果

试验号	X ₁	X ₂	X ₃	Y ₁ 凝胶强度/(N·mm)	Y ₂ 感官评分
1	0	1	1	21.06	34.80
2	0	0	0	24.03	37.30
3	0	1	-1	22.36	37.16
4	0	0	0	23.93	37.30
5	0	-1	-1	23.21	36.46
6	0	0	0	23.91	37.30
7	0	0	0	23.82	37.40
8	1	1	0	21.62	37.10
9	-1	0	-1	23.54	35.10
10	1	-1	0	22.65	36.60
11	-1	-1	0	24.35	34.50
12	1	0	-1	21.71	37.20
13	-1	0	1	22.20	33.10
14	0	-1	1	22.35	33.90
15	0	0	0	23.98	37.50
16	1	0	1	20.88	34.20
17	-1	1	0	22.90	36.00

$$Y_2 = 37.36 + 0.80X_1 + 0.45X_2 - 1.24X_3 - 0.25X_1X_2 - 0.25X_1X_3 + 0.05X_2X_3 - 0.995X_1^2 - 0.315X_2^2 - 1.46X_3^2. \quad (3)$$

回归模型及各项系数的方差分析结果见表 7 和表 8。

表 7 凝胶强度的回归模型及各项系数的方差分析[†]

Table 7 Regression model of gel strength and variance analysis of each coefficient

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	19.57	9	2.17	375.74	<0.000 1	**
X ₁	4.69	1	4.69	810.92	<0.000 1	**
X ₂	2.67	1	2.67	460.93	<0.000 1	**
X ₃	2.34	1	2.34	404.67	<0.000 1	**
X ₁ X ₂	0.04	1	0.04	7.51	0.028 9	*
X ₁ X ₃	0.06	1	0.06	11.03	0.012 8	*
X ₂ X ₃	0.05	1	0.05	8.61	0.021 9	*
X ₁ ²	1.56	1	1.56	269.48	<0.000 1	**
X ₂ ²	0.84	1	0.84	144.60	<0.000 1	**
X ₃ ²	6.52	1	6.52	1 126.16	<0.000 1	**
残差	0.04	7	0.01			
失拟项	0.02	3	0.01	0.97	0.489 5	
纯误差	0.02	4	0.01			
总和	19.61	16				

[†] *为差异显著($P < 0.05$), **为差异极显著($P < 0.01$); $R^2 = 0.997 9$, $R^2_{Adj} = 0.995 3$ 。

由表 7 可以看出, Y_1 模型的 P 值 $< 0.000 1$, 表明模型极显著, 而失拟项不显著($P = 0.489 5 > 0.05$), 表明方程拟合程度较好。决定系数 $R^2 = 0.997 9$, 说明实际值和预测值相关性较高。因此, 该模型可以较好地反映各因素与凝胶强度的关系并预测最佳工艺条件。由方程各项系数方差分析可知, X_1X_2 、 X_1X_3 和 X_2X_3 对鱼糕凝胶强度的影响均显著($P < 0.05$), X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 和 X_3^2 对鱼糕凝胶强度的影响极显著($P < 0.01$)。由 F 值可知, 3 个因素对鱼糕凝胶强度的影响顺序为 MTGase 添加量 $>$ 暂存温度 $>$ 暂存时间。

由表 8 可以看出, Y_2 模型的 P 值 $< 0.000 1$, 表明模型极显著, 而失拟项不显著($P = 0.528 0 > 0.05$), 表明方程拟合程度比较好。决定系数 $R^2 = 0.998 5$, 说明实际值和预测值相关性较高。因此, 该模型可以较好地反映各因素与感官评价的关系并预测最佳工艺条件。由方程各项系数方差分析可知, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1X_2 、 X_1X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 和 X_3^2 对鱼糕感官评分的影响均为极显著($P < 0.01$)。由 F 值可知, 3 个因素对鱼糕感官评分的影响顺序为暂存时间 $>$ MTGase 添加量 $>$ 暂存温度。

2.4.2 响应面分析 运用 Design-Expert 13 软件作各因素之间交互作用对鱼糕的凝胶强度和感官评分影响的等高

表 8 感官评价总分的回归模型及各项系数的方差分析†
Table 8 Regression model of total sensory evaluation score and variance analysis of each coefficient

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	34.30	9	3.81	505.33	<0.000 1	**
X ₁	5.12	1	5.12	678.79	<0.000 1	**
X ₂	1.62	1	1.62	214.77	<0.000 1	**
X ₃	12.30	1	12.30	1 630.79	<0.000 1	**
X ₁ X ₂	0.25	1	0.25	33.14	0.000 7	**
X ₁ X ₃	0.25	1	0.25	33.14	0.000 7	**
X ₂ X ₃	0.01	1	0.01	1.33	0.287 4	
X ₁ ²	4.17	1	4.17	552.65	<0.000 1	**
X ₂ ²	0.42	1	0.42	55.39	0.000 1	**
X ₃ ²	9.04	1	9.04	1 198.05	<0.000 1	**
残差	0.05	7	0.01			
失拟项	0.02	3	0.01	0.87	0.528 0	
纯误差	0.03	4	0.01			
总和	34.36	16				

† *为差异显著($P<0.05$),**为差异极显著($P<0.01$); $R^2=0.998\ 5$, $R^2_{Adj}=0.996\ 5$ 。

线及响应曲面图,见图 1 和图 2。综合等高线和响应曲面图可以得出:MTGase 添加量与暂存温度、MTGase 添加量与暂存时间和暂存温度与暂存时间的交互作用对凝胶强度影响显著($P<0.05$)。MTGase 添加量与暂存温度、MT-

Gase 添加量与暂存时间的交互作用对感官总评分影响显著($P<0.05$),暂存温度与时间的交互作用对感官评分影响不显著。

2.4.3 最优工艺条件预测及验证 通过 Design-Expert 13 软件对试验数据进行优化预测,得到鱼糕的最佳工艺条件为 MTGase 添加量 0.35 U/g 鱼糜,暂存温度 19.2℃,暂存时间 55.4 min,该工艺条件下预测鱼糕的凝胶强度为 24.10 N·mm,感官评分为 37.47。选取 MTGase 添加量 0.35 U/g 鱼糜,暂存温度 19.2℃,暂存时间 55.4 min,进行 3 次验证实验,测得鱼糕的凝胶强度为 (24.15 ± 0.39) N·mm,感官评分为 37.38 ± 1.06 ,与优化前鱼糕相比分别提高了 41.06%,13.86%。

3 结论

MTGase 添加量、暂存温度和暂存时间对鱼糕的 TPA 参数、穿刺特性、色度、持水特性和感官评分有显著影响($P<0.05$)。暂存温度过高、暂存时间过长均会因 MTGase 作用而使肌原纤维蛋白发生交联、后期挤压成型时又因剪切作用破坏已形成的凝胶网络结构,导致鱼糕凝胶品质下降。经响应面优化试验,得到鱼糕的最佳工艺条件为 MTGase 添加量 0.35 U/g 鱼糜,暂存温度 19.2℃,暂存时间 55.4 min,在此条件下,鱼糕的凝胶强度为 24.15 N·mm,感官评分为 37.38。在鱼糕工业化生产过程中,MTGase 适宜添加量为 0.35 U/g 鱼糜,混合鱼浆的暂存条件宜选择较低的暂存温度(不高于 19.2℃),暂存时

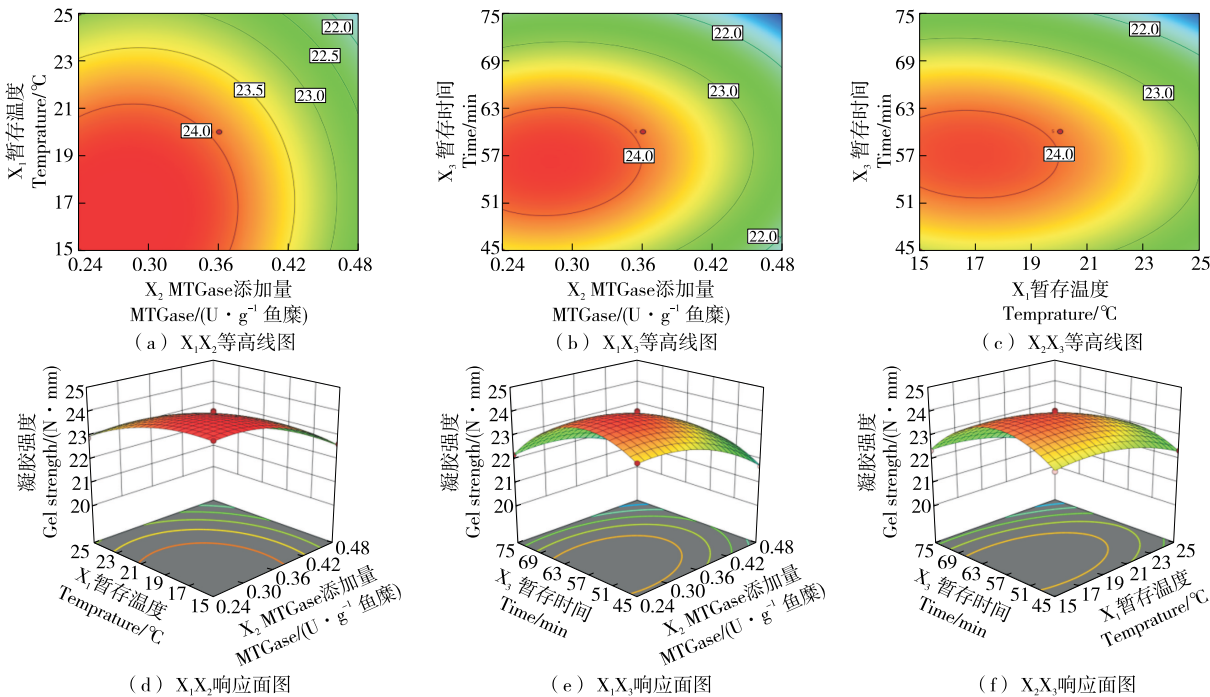


图 1 各因素交互作用对鱼糕凝胶强度的影响

Figure 1 Effects of interaction of various factors on gel strength of fish cake

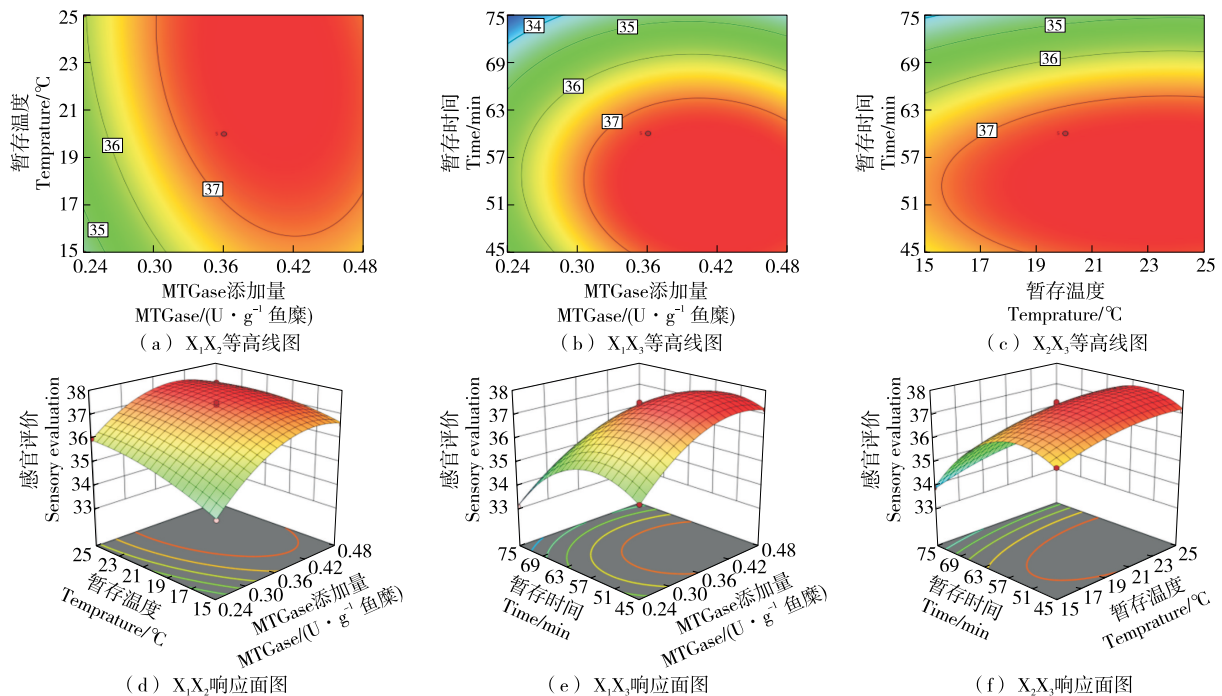


图2 各因素交互作用对鱼糕感官评分的影响

Figure 2 Effects of interaction of various factors on sensory score of fish cake

间不宜超过 55.4 min,在该暂存条件范围内可以保持鱼糕的凝胶网络结构不被破坏,凝胶品质良好。

参考文献

- [1] 李孚杰. 传统鱼糕的工艺和配方优化及防腐保鲜研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008: 1-2.
LI F J. Study on the optimization of the factors of craft and supplementary materials and preservation of traditional fish cake [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008: 1-2.
- [2] 杜智翔, 张茜, 黄琪琳, 等. 酵母抽提物对鱼糕凝胶品质和风味特性的影响[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(1): 219-228.
DU Z X, ZHANG Q, HUANG Q L, et al. Effects of yeast extracts on gel qualities and flavor characteristics of fish cakes [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(1): 219-228.
- [3] 彭瑶, 钟秋平. 漂洗工艺对罗非鱼鱼糕凝胶特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(12): 51-54.
PENG Y, ZHONG Q P. Effects of washing process on gel properties of Tilapia fish cake[J]. Food Research and Development, 2015, 36(12): 51-54.
- [4] WANG B, SUN Y D, JIANG Q X, et al. Effects of different reheating methods on lipid oxidation in frozen silver carp fish cakes[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2024, 59(11): 8 191-8 203.
- [5] 杜杰, 余永, 戴宏杰, 等. 臭氧联合二氧化氯处理对草鱼鱼糕保质期及品质的影响[J]. 肉类研究, 2020, 34(2): 80-85.
DU J, YU Y, DAI H J, et al. Effect of ozone combined with chlorine dioxide treatment on shelf life and quality of grass carp fish cake[J]. Meat Research, 2020, 34(2): 80-85.
- [6] JIANG C Y, CHEN Y, LI S, et al. Ready-to-eat fish cake processing methods and the impacts on quality and flavor[J]. Foods, 2022, 11(21): 3 321.
- [7] LEE H S, KIM N C, MIN S C. Inactivation of *Salmonella* in steamed fish cake using an in-package combined treatment of cold plasma and ultraviolet-activated zinc oxide[J]. Food Control, 2022, 135: 108772.
- [8] 张茜, 熊善柏, 黄琪琳, 等. 酵母抽提物替代味精的主料配方优化及其对传统鱼糕品质的影响[J]. 中国调味品, 2021, 46(11): 12-17, 26.
ZHANG Q, XIONG S B, HUANG Q L, et al. Formula optimization of main ingredients of yeast extract instead of monosodium glutamate and its effect on the quality of traditional fish cake[J]. Chinese Condiments, 2021, 46(11): 12-17, 26.
- [9] LIU Y, HUANG Y Z, WANG Y, et al. Application of cod protein-stabilized and casein-stabilized high internal phase emulsions as novel fat substitutes in fish cake[J]. LWT-Food Science & Technology, 2023, 173: 114267.
- [10] LIU Y, TAN Z F, HUANG Y Z, et al. pH-shift strategy improving the thermal stability and oxidation stability of rice starch/casein-based high internal phase emulsions for the application in fish cake[J]. Food Chemistry: X, 2023, 18: 100694.
- [11] 乔冬, 刘铁玲. 乌龙茶鱼糕的加工工艺研究[J]. 食品工程,

- 2018(3): 22-25.
- QIAO D, LIU T L. Study on processing technology of oolong tea fish cake[J]. Food Engineering, 2018(3): 22-25.
- [12] 傅海庆, 林泳锋. 客家美食雪花鱼糕产业化加工工艺初探[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(17): 132-135.
- FU H Q, LIN Y F. A preliminary study on the industrialized processing technology of Hakkagourmet snow fish-cake[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2020, 26(17): 132-135.
- [13] 安玥琦, 熊善柏. 肌原纤维蛋白转谷氨酰胺酶交联程度对鱼糜凝胶及其风味释放影响的研究进展[J]. 食品科学, 2015, 36(7): 235-239.
- AN Y Q, XIONG S B. Effect of transglutaminase-catalyzed cross-linking degree of myofibrillar protein on surimi gelation and flavor release[J]. Food Science, 2015, 36(7): 235-239.
- [14] 杜涓, 舒雄辉, 张晨曦, 等. 基于 TG 酶介导的莲藕风味鱼糕配方优化研究及其品质评价[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(2): 176-185.
- DU J, SHU X H, ZHANG C X, et al. Optimization of lotus root flavored kamaboko formula based on transglutaminase mediation and its quality evaluation[J]. China Food Additives, 2024, 35(2): 176-185.
- [15] 李琳, 代媛媛, 李美莹, 等. TG 酶复合物对巴沙鱼鱼丸品质特性的影响[J]. 保鲜与加工, 2022, 22(6): 72-80.
- LI L, DAI Y Y, LI M Y, et al. Effects of TG enzyme complex on quality characteristics of basa fish balls[J]. Storage and Process, 2022, 22(6): 72-80.
- [16] FANG Q, SHI L F, REN Z Y, et al. Effects of emulsified lard and TGase on gel properties of threadfin bream (*Nemipterus virgatus*) surimi[J]. LWT-Food Science & Technology, 2021, 146: 111513.
- [17] MI H B, LI Y, WANG C, et al. The interaction of starch-gums and their effect on gel properties and protein conformation of silver carp surimi[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 112: 106290.
- [18] 尹贝贝, 蒋爱民, 栗俊广, 等. 几种添加剂对巴浪鱼丸品质的影响[J]. 食品与机械, 2014, 30(5): 253-259.
- YIN B B, JIANG A M, LI J G, et al. Effects of ingredients on properties of *Decapterus maruadsi* fish ball[J]. Food & Machinery, 2014, 30(5): 253-259.
- [19] 仪淑敏, 吕柯明, 张诗雯, 等. 芹菜茎对金线鱼鱼糕凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(20): 1-5.
- YI S M, LV K M, ZHANG S W, et al. Effect of celery petiole on the gel properties of *Nemipterus virgatus* fish cake[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(20): 1-5.
- [20] 施咏淇, 王攀, 周思瑞, 等. 芋头粉对白鲢鱼糜制品品质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(24): 63-71.
- SHI Y Q, WANG P, ZHOU S R, et al. Effects of taro powder on quality of silver carp products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(24): 63-71.
- [21] 聂景贵, 张茜, 黄琪琳, 等. 酵母抽提物替代味精对鱼糕冻藏品质的影响及其品质预测模型的建立[J]. 中国调味品, 2023, 48(5): 24-30, 43.
- NIE J G, ZHANG Q, HUANG Q L, et al. Effect of yeast extract replacing monosodium glutamate on frozen storage quality of fish cake and establishment of its quality prediction model[J]. Chinese Condiment, 2023, 48(5): 24-30, 43.
- [22] KAEWUDOM P, BENJAKUL S, KIJROONGROJANA K. Properties of surimi gel as influenced by fish gelatin and microbial transglutaminase[J]. Food Bioscience, 2013, 3(1): 39-47.
- [23] MURTHY L N, PHADKE G G, JEYAKUMARI A, et al. Effect of added calcium and heat setting on gel forming and functional properties of *Sardinella fimbriata* surimi[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58(2): 427-436.
- [24] 杨明柳, 周迎芹, 方旭波, 等. 谷氨酰胺转氨酶对鳊鱼鱼糜凝胶的品质影响[J]. 食品科学, 2021, 42(12): 37-44.
- YANG M L, ZHOU Y Q, FANG X B, et al. Effect of transglutaminase on the quality of mandarin fish (*Siniperca chuatsi*) surimi gel[J]. Food Science, 2021, 42(12): 37-44.
- [25] SHI L, WANG X F, CHANG T, et al. Effects of vegetable oils on gel properties of surimi gels[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 57(2): 586-593.
- [26] GANI A, BENJAKUL S. Impact of virgin coconut oil nanoemulsion on properties of croaker surimi gel[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 82: 34-44.
- [27] PIETROWSKI B N, TAHERGORABI R, MATAK K E, et al. Chemical properties of surimi seafood nutrified with ω -3 rich oils[J]. Food Chemistry, 2011, 129(3): 912-919.
- [28] 蔡礼彬, 李想, 易林, 等. 鱼浆静置时间对鱼丝品质及其微观结构的影响[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(6): 237-246.
- CAI L B, LI X, YI L, et al. Effects of setting time of fish paste on quality and microstructure of fish vermicelli[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(6): 237-246.
- [29] 任洋莹, 安玥琦, 杨眉, 等. 响应面法优化双蛋白鱼丝的加工工艺[J]. 肉类研究, 2022, 36(8): 6-12.
- REN Y Y, AN Y Q, YANG M, et al. Optimization of the production process of fish noodle incorporated with chicken meat by response surface methodology[J]. Meat Research, 2022, 36(8): 6-12.
- [30] 刘海梅. 鲢鱼糜凝胶及形成机理的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007: 37-42.
- LIU H M. Studies on silver carp surimi gel and gel-forming mechanism[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007: 37-42.