

基于模糊数学和正交法优化重组鹅肝工艺

李翠锶¹, 刘畅¹, 林婉玲^{1*}, 罗东辉^{2,3}, 张泽伟¹, 刘亚群¹, 刘汉旭⁴, 薛映珠², 蔡雪媛², 林欣媛¹, 邱丽萍¹
(1. 韩山师范学院生命科学与食品工程学院, 广东潮州 521041) (2. 化学与精细化工广东省实验室潮州分中心, 广东潮州 521011) (3. 广东海洋大学阳江校区食品科学与工程学院, 广东阳江 529500)
(4. 韩山师范学院物理与电子工程学院, 广东潮州 521041)

摘要: 为了研究重组鹅肝的工艺配方, 以鹅肝、鸡肉、木薯淀粉、大豆蛋白作为主要原料, 通过谷氨酰胺转氨酶 (Transglutaminase, TG 酶) 的交联作用增强重组鹅肝产品的凝胶特性, 采用单因素实验、正交试验以及模糊数学法对重组鹅肝的配方进行优化, 并以感官评价、熟化损失率和质构特征作为评价指标。结果显示, 以鹅肝和鸡肉为总质量标准, 重组鹅肝的最佳工艺配方如下: 鹅肝的添加量为 25 wt.%、鸡肉的添加量为 75wt.%、TG 酶添加量为 1.75 wt.%、木薯淀粉添加量为 10 wt.%、大豆蛋白添加量为 2.75 wt.%。在此条件下所得到的重组鹅肝产品的熟化损失率为 0.13%、白度为 54.87, 硬度为 27.77 N, 弹性为 4.56 mm, 咀嚼性为 83.32 mj。产品表面光滑, 咀嚼性和弹性较好, 结构紧密, 风味浓郁, 品质的综合得分为 89.60 分, 与模型预测得分 (87.15 分) 差距不显著。该研究结果可为普通鹅肝的精深加工及产品多样化提供理论依据。

关键词: 鹅肝; 重组; 模糊数学法

文章编号: 1673-9078(2025)12-200-208

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.12.1467

Optimized Processing of Recombined Goose Livers using Fuzzy Mathematics and An Orthogonal Method

LI Cuisi¹, LIU Chang¹, LIN Wanling^{1*}, LUO Donghui^{2,3}, ZHANG Zewei¹, LIU Yaqun¹, LIU Hanxu⁴,
XUE Yingzhu², CAI Xueyuan², LIN Xinyuan¹, QIU Liping¹

(1.School of Life Science and Food Engineering, Hanshan Normal University, Chaozhou 521041, China)
(2.Chaozhou Branch of Chemistry and Chemical Engineering Guangdong Laboratory, Chaozhou 521011, China)
(3.School of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Yangjiang 529500, China)
(4.School of Physics and Electronic Engineering, Hanshan Normal University, Chaozhou 521041, China)

Abstract: The formulation of restructured goose livers was developed using goose liver, chicken, tapioca starch, and soy protein as the primary ingredients. The cross-linking effect of transglutaminase (TGase) was used to enhance the gel properties of the restructured goose livers product. Single-factor experiments, orthogonal tests, and fuzzy mathematics methods were applied to optimize the restructured goose liver formulation, with sensory evaluation, cooking loss rate, and textural characteristics serving as evaluation indicators. The results revealed that, based on the combined weight of goose liver and chicken meat, the optimal

引文格式:

李翠锶,刘畅,林婉玲,等.基于模糊数学和正交法优化重组鹅肝工艺[J].现代食品科技,2025,41(12):200-208.

LI Cuisi, LIU Chang, LIN Wanling, et al. Optimized processing of recombined goose livers using fuzzy mathematics and an orthogonal method [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(12): 200-208.

收稿日期: 2024-10-01; 修回日期: 2024-11-21; 接受日期: 2024-11-25

基金项目: 韩江实验室自主创新科研资助项目 (HJ202202B004); 大学生创新创业训练项目 (S202310578026; 2022182)

作者简介: 李翠锶 (2003-), 女, 本科生, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: 2911272922@qq.com

通讯作者: 林婉玲 (1979-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 食品加工与质量安全, E-mail: lwlscsf@163.com

formulation for the restructured goose liver product was as follows: 25wt.% goose liver, 75wt.% chicken, 1.75wt.% TGase, 10wt.% tapioca starch, and 2.75wt.% soy protein. Under these conditions, the restructured goose liver product exhibited a cooking loss rate of 0.13%, whiteness of 54.87, hardness of 27.77 N, elasticity of 4.56 mm, and chewiness of 83.32 mj. The product surface was smooth, with good chewiness and elasticity, a compact structure, rich flavor, and an overall quality score of 89.60 points, which did not differ markedly from the model-predicted score of 87.15 points. The findings of this research provide a theoretical basis for the comprehensive processing and diversification of conventional goose liver products.

Key words: goose liver; restructured; fuzzy mathematics

鹅肝是一类营养非常丰富的食物,其中含有蛋白质、维生素、卵磷脂、不饱和脂肪酸以及铁、锌、磷等多种营养物质^[1],并且蛋白质的消化率高达97%,而脂肪含量很低,维生素A很高^[2,3],很适合作为人类的高营养物质。虽然鹅肝的营养丰富,但是目前鹅肝的利用率很低,除了部分主要以肥鹅肝的形式加工成粉肝、法式鹅肝以及鹅肝酱外,普通鹅肝的利用价值非常低,大部分作为下脚料或者作为动物饲料,甚至丢弃。普通鹅肝的综合利用率低主要是由于其的腥味严重,颗粒感非常明显,消费者很难接受^[4],导致鹅肝深加工程度低,目前只有大部分开发的不同品种的鹅肝酱^[5,6],其他鹅肝相关的产品较少,如林婉玲等^[4]开发卤制鹅肝、陈唱^[7]利用鹅肝与鹅肉加工成为鹅肝肠,产品形式相对单一,种类极少。因此,利用鹅肝营养特性及品质特征,进行产品多样化的开发,对鹅肝产业的发展具有重要的促进作用。

重组加工技术是借助机械和添加辅料对肌肉纤维中的蛋白进行提取,利用物理、化学或生物的方法将肉糜或肉颗粒粘连起来,得到其他肉制品方法的统称^[8]。重组技术可以将未得到充分利用的产品和低价值的肉类充分利用^[9],目前已经应用于产品研发、肉制品加工工艺,如曾令英^[10]利用兔肉、猪肉和其他辅料加工成兔肉排、李琴^[8]将豆腐酶解后与猪肉重组成火腿、路鑫^[11]将鳕鱼、猪肉、鸡蛋白等加工成新的肉制品、Oliveira等^[12]通过添加纤维和木瓜蛋白酶改善重组肉糜的质构和营养特性、祁智男^[13]将鹿肉和猪肉通过TG酶、磷酸盐等重组成新的肉制品等。同时目前也有部分学者利用3D打印技术对重组肉进行成型,如金铮等^[14]利用3D打印技术将鲟鱼肉、鸭肉和山药进行重组、Kim等^[15]利用冷冻鱼糜与土豆淀粉等进行重组成仿蟹肉等。研究已经证明重组技术可以很好将蛋白含量高的肉与其他原料进行结合而成为风味和口感好的新的肉制品。由此可见,通过重组技术制备重组鹅肝制品,对于丰富鹅肝制品、促进鹅肝产业的发展具有重要的意义。

模糊数学法是建立模糊数学模型对产品进行综合评价的方法。对单项指标加以评定,对各项指标授予权重,使用模糊矩阵运算方法得到综合的评价结果,更能全面地综合每个评价者的意见,得到更客观准确的评价^[16]。如曹田欣^[17]基于模糊数学法优化乌梅多糖果冻配方、利用模糊数学法对不浓缩枸杞汁加工工艺进行优化和品质评价^[18]、基于模糊数学对浓香型白酒质量综合评价^[19]等。因此,利用模糊数学法对重组鹅肝制品的工艺进行优化,有利于进一步提升重组鹅肝的品质和加工产品的开发。

因此,本研究以鹅肝与鸡胸肉、木薯淀粉、大豆分离蛋白、TG酶等进行重组,运用模糊数学评价法对配方进行优化,提高重组鹅肝的口感与风味,从而为鹅肝的精深加工及产品多样化提供理论依据,进一步促进鹅肝深加工产业的健康发展。

1 材料与方法

1.1 实验原料

新鲜鹅肝、鸡胸肉均为市售;木薯淀粉、大豆分离蛋白、卡拉胶、食用磷酸盐、TG酶、肠衣、实验中所用到的各种香辛料均购于京东商城;肉桂、八角、川砂仁、小茴香、香叶、肉豆蔻、草果、山奈、花椒、丁香等卤料,均购于京东商城;黑、白胡椒,购于祥厨有限公司;白砂糖购于舒可曼,京东自营旗舰店;蚝油,购于海天有限公司;植物油,购于福临门食品有限公司;食用盐,购于广盐集团股份有限公司。

1.2 仪器与设备

DHG-9075A 电热鼓风干燥箱、HWS-24 电热恒温水浴锅,上海一恒科学仪器有限公司产品;FA2004N 电子天平,上海菁海仪器有限公司产品;S30-LA569 绞肉机,九阳股份有限公司产品;TA-XT2 质构仪,英国 SMS 公司产品;CR-400 色差仪,日本柯尼达美能达公司产品。

1.3 实验方法

1.3.1 工艺制作

冷冻鹅肝、鸡胸肉于 4 ℃解冻 → 鹅肝剔去筋膜、脂肪、血管 → 鸡胸肉低速斩拌 30 s → 加入鹅肝低速斩拌 30 s → 依次加入食盐、大豆分离蛋白和木薯淀粉、冰卤汤和冰水、调味料、TG 酶，每加入一种料低速斩拌 2 min → 加入食用油低速斩拌 1 min → 灌肠 → 恒温 40 ℃反应 40 min → 恒温 80 ℃灭酶 20 min → 沸水浴灭菌 15 min → 包装

1.3.2 产品基础配方

设鹅肝及鸡胸肉总质量为 250 g，鸡胸肉质量分数为鹅肝及鸡胸肉总质量的分数的分数，其他添加物质以 250 g 计算。

大豆蛋白 2.5 wt.%、食盐 1.4 wt.%、TG 酶 1.5 wt.%、木薯淀粉 10 wt.%、白胡椒粉 1.5 wt.%、黑胡椒粉 1.5 wt.%、蚝油 3 wt.%、白糖 1.2 wt.%、冰卤汤 8 wt.%、冰水 2 wt.%、植物油 3 wt.%、卡拉胶 0.3 wt.%、复合磷酸盐 0.3 wt.%。

1.3.3 单因素试验

以 250 g 的鹅肝和鸡肉为总质量标准，其他添加物质量比例以此进行计算，通过改变鸡胸肉、TG 酶、木薯淀粉、大豆分离蛋白的添加量，以感官评价为指标，考察单因素的变化对感官品质的影响，其单因素水平见表 1。

表 1 不同原料添加量的单因素水平表				
Table 1 Single factor level of different raw materials				
水平	因素/(wt.%)			
	鸡胸肉	TG 酶	木薯淀粉	大豆分离蛋白
1	60.00	0.00	6.00	0.00
2	70.00	0.75	8.00	1.00
3	80.00	1.50	10.00	1.50
4	90.00	2.00	12.00	2.00

1.3.4 感官评价

以重组鹅肝制品的风味、硬度、弹性、咀嚼性、组织状态、色泽作为感官评价的指标。组织 10 名食品专业相关评定人员，无感官方面缺陷，年龄在 20~40 岁之间。在评价前禁止吸烟、喝酒、吃东西，禁止相互讨论，不同产品之间的评价需进行清水漱口。参加评定人员按照表 2 中的 4 个得分等级进行评价，具体评分依据见表 2。

表 2 感官评价得分表		
Table 2 Sensory evaluation score sheet		
指标	评分标准	分值
风味	有浓郁鹅肝香味，无鹅肝腥味	18~20
	香味较为明显，无鹅肝腥味	12~17
	有微弱香味，无明显鹅肝腥味	6~11
	有明显鹅肝腥味	1~5
硬度	咬劲良好	13~15
	咬劲中等	9~12
	咬劲较差	4~8
	咬劲差，口感软	1~3
弹性	回弹性较好，口感好	13~15
	回弹性中等，口感较好	9~12
	有轻微回弹性，口感一般	4~8
	无回弹性	1~3
咀嚼性	可咀嚼次数良好（约为 10 次以上）	18~20
	可咀嚼次数适中（约为 8~10 次）	12~17
	可咀嚼次数中等（约为 5~8 次）	6~11
	可咀嚼次数少（约为 1~5 次）	1~5
组织状态	断面结构细腻紧密均匀，气孔较少	18~20
	断面结构较为细腻紧密均匀，气孔较少	12~17
	断面结构较为松散，气孔较多	6~11
	断面结构松散，气孔较多且较大	1~5
色泽	呈鹅肝制品应有的颜色，表面有光泽，色泽均匀	8~10
	呈鹅肝制品应有的颜色，表面略有光泽，色泽较为均匀	5~7
	色泽较为暗淡，表面光泽较差，色泽不均匀	2~4
	色泽暗淡，无光泽，色泽不均匀	1

1.3.5 模糊数学评价法

参照《GB/T 10220-2012 感官分析方法学 总论》^[20]，采用调查问卷方法，调查人数共 80 人。对重组鹅肝制品的风味、硬度、弹性、咀嚼性、组织状态、色泽等指标按照其所占比重进行分析评价，得出重组鹅肝制品的权重集，结果见表 3。

表 3 重组鹅肝制品因素权重值						
Table 3 Factor weight value of restructured goose livers products						
因素	风味	硬度	弹性	色泽	咀嚼性	组织状态
权重值/%	0.2	0.15	0.15	0.1	0.2	0.2

由表 3 可得重组鹅肝制品 6 个指标的权重集指标权重集 $K=(X1 \text{ 风味}, X2 \text{ 硬度}, X3 \text{ 弹性}, X4 \text{ 咀嚼性}, X5 \text{ 组织状态}, X6 \text{ 色泽})=(0.2,0.15,0.15,0.1,0.2,0.2)$ 。

设置一定的分值区域，使之与评价集对应，将最终结果转化为具体评分。由评价小组人员评价得出鹅肝重组制品的4个评价等级：优（V1）、良（V2）、中（V3）、差（V4），从而得出的评语集 $V=(V1、V2、V3、V4)$ ，四个等级分值区间分别对应（80~100）、（60~80）、（40~60）、（0~40）。取四个等级的可靠中间值进行计算，即 $V=(V1、V2、V3、V4)=(90,70,50,30)$ 。

根据感官评价得分，可建立模糊矩阵C，评定结果为指标权重集K与模糊矩阵C的合成。根据模糊矩阵乘法运算， $Y=KC$ ，重组鹅肝制品的最终得分为 $U=YV$ 。

1.3.6 正交试验

根据单因素试验的结果，选择鸡胸肉、木薯淀粉、大豆蛋白、TG酶为重组鹅肝制品的主要影响因素，将重组鹅肝制品的比例进行缩小范围进行优化，采用 $L_9(3^4)$ 正交试验。正交因素见表4，正交试验设计表见表5，最终以熟化损失、色度和质构确定最后配比。

表 4 正交因素水平表
Table 4 Orthogonal factor level table

水平	因素/(wt.%)			
	A 鸡胸肉	B TG 酶	C 木薯淀粉	D 大豆分离蛋白
1	75.00	1.25	9.00	2.25
2	80.00	1.50	10.00	2.50
3	85.00	1.75	11.00	2.75

表 5 正交试验设计表
Table 5 Orthogonal experimental design table

编号	因素/(wt.%)			
	A 鸡胸肉	B TG 酶	C 木薯淀粉	D 大豆分离蛋白
1	75.00	1.25	9.00	2.25
2	75.00	1.50	11.00	2.50
3	75.00	1.75	10.00	2.75
4	80.00	1.25	11.00	2.75
5	80.00	1.50	10.00	2.25
6	80.00	1.75	9.00	2.50
7	85.00	1.25	10.00	2.50
8	85.00	1.50	9.00	2.75
9	85.00	1.75	11.00	2.25

1.3.7 指标测定

1.3.7.1 熟化损失率的测定

熟化损失率根据黄颖等^[21]的方法进行。准确称量

熟化前样品的质量，将熟化后的样品冷却至室温，擦去表面的水分并称量质量，根据测得的重量差计算蒸煮损失率，每个样品重复3次，结果取平均值。计算公式如下：

$$X=\frac{m_1}{m_2}\times 100\%$$

式中：
 X ——熟化损失率，%；
 m_1 ——熟化前样品的质量，g；
 m_2 ——熟化后样品的质量，g。

1.3.7.2 色度的测定

重组鹅肝制品颜色的测定使用色差仪测定，测定前用零位校正和白板校正，以仪器白板为标准。测定后记录 $L^*、a^*、b^*$ 三个数据，每个样品重复9次，结果取平均值。白度计算公式如下：

$$W=100-\sqrt{(100-L^*)^2+a^{*2}+b^{*2}}$$

式中：
 W ——白度；
 L^* ——亮度值；
 a^* ——红绿值；
 b^* ——黄蓝值。

1.3.7.3 质构测定（TPA）

将重组鹅肝制品取样为直径2 cm、高度2 cm的圆柱体进行测定。仪器参数：探头型号P/35；测前速率：1 mm/s；测试速率：2 mm/s；测后速率：2 mm/s；压缩变形量30%；循环次数：2次；数据采集速率：200 s⁻¹；负载类型：Auto-5g，输入速率：2 mm/s；数据采集速率：200/s；力感量程：1 000 N。每个样品重复5次，结果取硬度、弹性、咀嚼性、胶粘性四个指标。

1.4 正交结果分析

对九组重组鹅肝制品分别按熟化损失、色度、质构特性三个指标的结果进行打分，最优为100分，最差为20分。三个指标得分相加，得出每组重组鹅肝制品的总得分。每组重组鹅肝制品的总分按照40%、20%、40%的比例折算，得出各组的综合得分，综合得分最高组即为重组鹅肝制品最优配方。

1.5 模糊数学法预测

建立重组鹅肝制品评价表（见表6）。参照1.3.5的方法，对正交试验的九组重组鹅肝制品进行模糊数学评价，得到模糊数学预测表，预测重组鹅肝制品的得分。

表 6 重组鹅肝制品评价表		
Table 6 Evaluation form of restructured goose livers products		
指标	评分标准	等级
风味	有浓郁鹅肝香味, 无鹅肝腥味	优
	香味较为明显, 无鹅肝腥味	良
	有微弱香味, 无明显鹅肝腥味	中
	有明显鹅肝腥味	差
硬度	咬劲良好	优
	咬劲中等	良
	咬劲较差	中
	咬劲差, 口感软	差
弹性	回弹性较好, 口感好	优
	回弹性中等, 口感较好	良
	有轻微回弹性, 口感一般	中
	无回弹性	差
咀嚼性	可咀嚼次数良好 (约为 10 次以上)	优
	可咀嚼次数适中 (约为 8~10 次)	良
	可咀嚼次数中等 (约为 5~8 次)	中
	可咀嚼次数少 (约为 1~5 次)	差
组织状态	断面结构细腻紧密均匀, 气孔较少	优
	断面结构较为细腻紧密均匀, 气孔较少	良
	断面结构较为松散, 气孔较多	中
	断面结构松散, 气孔较多且较大	差
色泽	呈鹅肝制品应有的颜色, 表面有光泽, 色泽均匀	优
	呈鹅肝制品应有的颜色, 表面略有光泽, 色泽较为均匀	良
	色泽较为暗淡, 表面光泽较差, 色泽不均匀	中
	色泽暗淡, 无光泽, 色泽不均匀	差

1.6 数据处理

数据使用 SPSS、Excel 进行数据统计分析处理。

2 结果与讨论

2.1 单因素实验结果分析

2.1.1 不同鸡胸肉添加量对鹅肝重组制品的影响

根据感官评价的得分, 可得模糊矩阵 C_1 :

$$C_1 = \begin{pmatrix} 2 & 2 & 3 & 3 \\ 1 & 2 & 5 & 2 \\ 0 & 1 & 6 & 3 \\ 0 & 2 & 5 & 3 \\ 0 & 1 & 6 & 3 \\ 2 & 3 & 3 & 2 \end{pmatrix}$$

根据模糊矩阵的计算方法, $Y_1=KC_1=(0.1,0.165,0.42,0.16)$, 最终得分 $U_1=Y_1V=(0.1,0.165,0.42,0.16) \times (90,70,50,30)=46.35$ 。同理可得 $U_2=66.45$, $U_3=83.25$, $U_4=77.55$ 。具体见图 1。

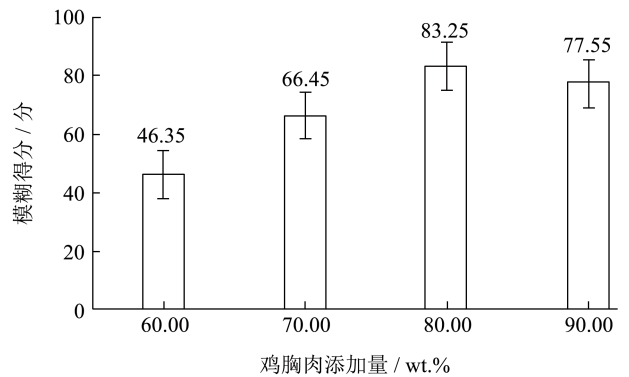


图 1 鸡胸肉添加量对重组鹅肝制品的影响
Fig.1 Effect of chicken breast addition on restructured goose livers products

由图 1 可知, 随着鸡胸肉添加量的不断增加, 重组鹅肝制品的模糊得分呈现先增加后降低的趋势。当鸡胸肉添加量为 60 wt.%, 鹅肝添加量为 40 wt.% 时, 重组鹅肝制品模糊得分最低, 为 46.35 分。随着鸡肉含量的增高, 重组鹅肝的感官评价总分逐渐升高。当鸡胸肉与鹅肝比例为 4:1 时, 也就是鸡肉含量为 80 wt.% 时, 重组鹅肝的感官评价得分最高, 继续添加鸡胸肉的含量感官评价得分下降。鹅肝的腥味较重, 当含量过高时会影响重组鹅肝制品的风味, 接受性下降, 当鹅肝含量逐渐下降, 鹅肝特殊腥味也随着减弱, 接受性增强。另外, 不同比例和不同来源的蛋白质对凝胶制品的凝胶特性有协同增强作用^[22]。鸡胸肉中主要蛋白为肌原纤维蛋白, 在重组肠的凝胶特性中起着重要的作用, 而肝脏类中主要蛋白质为水溶性蛋白, 其次为肌原纤维蛋白^[23]。在重组肠中, 影响制品的凝胶特性的蛋白质主要时肌原纤维蛋白, 因此, 鸡胸肉的添加量在重组肠的凝胶特性起关键的作用。

2.1.2 不同大豆蛋白添加量对重组鹅肝制品的影响

由图 2 可知, 随着大豆蛋白添加量的不断增加, 重组鹅肝制品的模糊得分呈现先增加后降低的趋势。当大豆蛋白添加量为 2.5 wt.% 时, 重组鹅肝制品模糊得分最高, 为 83.85 分。大豆蛋白具有良好的凝胶性质和形成纤维结构的潜力^[24], 其含有两个球状片段, 分别为 7S 和 11S 蛋白, 在 70 ℃ 左右无法变性, 导致复合凝胶的结构松散, 特性下降^[25]。TG 酶处理后的大豆蛋白可以在较低温的情况下交联而产生变性, 有利于提高肉制品的凝胶特性^[26]。因此, 大豆蛋白适量的添加, 可以提高重组鹅肝肠的品质。

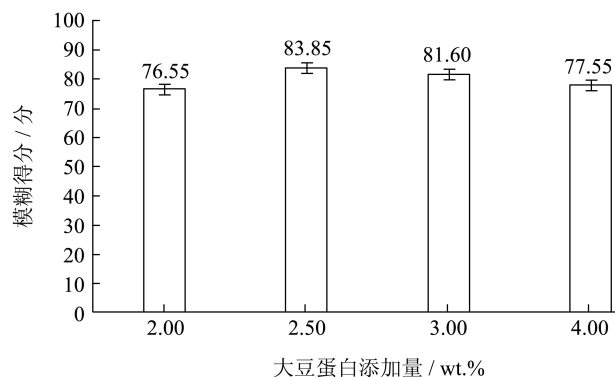


图2 大豆蛋白添加量对重组鹅肝制品的影响

Fig. 2 Effect of soybean protein addition on restructured goose livers products

2.1.3 不同TG酶添加量对重组鹅肝制品的影响

由图3可知,随着TG酶添加量的不断增加,重组鹅肝制品的模糊得分呈现先增加后降低的趋势。当不添加TG酶时,重组鹅肝制品的模糊得分为44.55,而当TG酶的添加量为1.5wt.%时,重组鹅肝制品模糊得分最高,为不添加TG酶的1.86倍,呈显著性增加。TG酶通过催化大豆蛋白的转酰基反应,形成新的共价键,与鸡肉和鹅肝中的肌原纤维蛋白交联形成致密均匀的凝胶网络^[23],提高重组鹅肝制品的品质。因此,筛选适量的TG酶,对于提高重组鹅肝制品的品质至关重要。

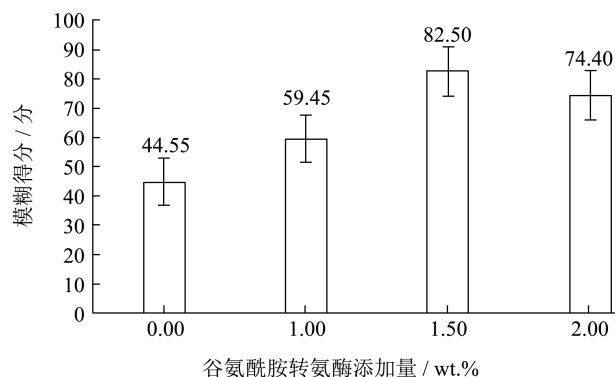


图3 TG酶添加量对重组鹅肝制品的影响

Fig.3 Effect of TGase addition on restructured goose livers products

2.1.4 不同木薯淀粉添加量对重组鹅肝制品的影响

由图4可知,不同木薯淀粉添加量对重组鹅肝品质有明显的影响作用。天然木薯淀粉具有出色的糊化黏度、糊化透明度、冻融稳定性等显著特性^[27]。随着木薯淀粉添加量的不断增加,重组鹅肝制品的模糊得分呈现先增加后降低的趋势。当木薯淀粉添加量为6 wt.%时,重组鹅肝制品模糊得分最低,为59.55分。随着木薯淀粉含量的增加,感官评分升高,接受程度增加,当木薯淀粉添加量为10 wt.%时,模糊得

分达到最高,为79.2分,但是当木薯淀粉添加量为12 wt.%时,重组鹅肝制品模糊得分稍微下降。适当的淀粉含量可以提高重组鹅肝肠的品质,这是因为随着温度升高,淀粉发生糊化,重组鹅肝肠中多余水分被吸收膨胀,填充在重组肠的网络结构空隙中,可以增强网络结构的稳定性^[28]。当木薯淀粉添加量过低时,无法完全填充重组鹅肝中的网络结构空隙,而当木薯淀粉添加量过高时,多余的糊化后淀粉只能在表面,硬度增大,导致口感变差。

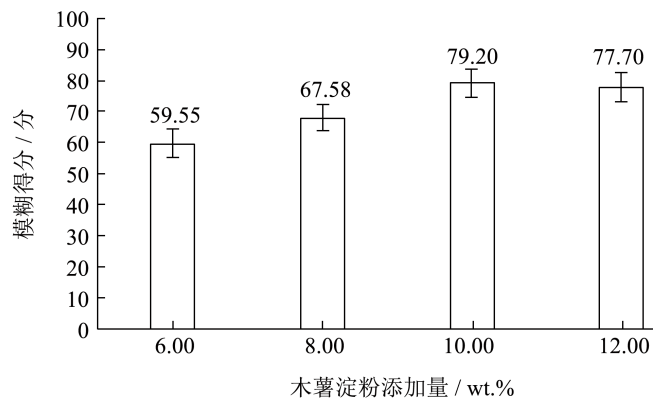


图4 木薯淀粉添加量对重组鹅肝制品的影响

Fig.4 Effect of tapioca starch addition on restructured goose livers products

综合以上结果,重组鹅肝制品中鸡胸肉、大豆分离蛋白、TG酶、木薯淀粉四个单因素的添加量分别为80 wt.%、2.5 wt.%、1.5 wt.%和10 wt.%。为了进一步确定最优的配方,采用 $L_9(3^4)$ 正交试验进行优化,根据熟化损失、色度、质构特性的结果进行每种成分的最适添加量的优化。

2.2 正交试验结果分析

2.2.1 熟化损失

熟化损失可用于评价产品在加工过程中的品质保持能力,反映其熟化过程中水分、蛋白质等物质损失程度^[29,30],熟化损失率越低说明制品的品质越好。由表6中可知,重组鹅肝制品的熟化损失率由高到低为 $5>7>6>4>1>9>8>2>3$, $A_1B_3C_2D_3$ 的熟化损失率最低。

2.2.2 色度分析

色泽是直接反应产品外观和消费者接受的主要因素,在肉制品的品质判断中起着主要作用。从表7中可以看出,四种原料的改变对重组鹅肝的色泽有明显的影响。9组重组鹅肝制品的亮度值 L 、 a 、 b 和白度值 W 呈现一定差异,结果为 $W_3>W_5>W_2>W_6>W_9>W_1>W_7>W_8>W_4$ 。白度值最能反映重组鹅肝

制品的外观色泽的综合情况， $A_1B_3C_2D_3$ 、 $A_2B_2C_2D_1$ 和 $A_2B_3C_1D_2$ 的白度值均高于 52，并且三者之间相差不大。从这三组来看，大豆分离蛋白含量高，所需的 TG 酶含量也高，TG 酶在重组鹅肝制品的加工过程对大豆分离蛋白的酶解作用起着关键作用，从而有利于形成较好的白度。

表 6 重组鹅肝制品熟化损失率
Table 6 Ripening loss rate of restructured goose livers products

组号	熟化损失平均率/%
1	0.19 ± 0.02
2	0.17 ± 0.07
3	0.13 ± 0.06
4	0.19 ± 0.05
5	0.35 ± 0.17
6	0.21 ± 0.13
7	0.26 ± 0.09
8	0.15 ± 0.07
9	0.17 ± 0.25

表 7 重组鹅肝制品色度分析
Table 7 Color analysis of restructured goose livers products

组号	平均值			W
	L*	a*	b*	
1	55.52 ± 1.18	5.97 ± 0.26	17.03 ± 0.43	52.00 ± 1.09
2	56.20 ± 2.01	6.08 ± 0.50	16.33 ± 0.77	52.86 ± 2.11
3	58.23 ± 1.38	5.71 ± 0.56	16.08 ± 0.98	54.87 ± 1.61
4	53.01 ± 1.05	6.42 ± 0.45	16.81 ± 0.85	49.67 ± 1.18
5	56.58 ± 1.46	6.72 ± 0.27	14.72 ± 0.94	53.66 ± 1.61
6	56.20 ± 1.21	5.77 ± 0.37	16.71 ± 0.57	52.77 ± 1.33
7	55.06 ± 1.32	6.01 ± 0.33	15.77 ± 0.62	51.99 ± 1.35
8	54.13 ± 1.20	5.85 ± 0.27	15.86 ± 0.51	51.11 ± 1.27
9	55.75 ± 1.03	5.95 ± 0.24	16.18 ± 0.52	52.51 ± 1.07

2.2.3 质构特性结果分析

重组鹅肝制品的硬度、弹性、咀嚼性在一定程度上会影响消费者对其的接受度。由表 8 可知，各因素的改变对重组鹅肝的硬度、胶粘性和咀嚼性有一定的影响。随着鸡胸肉添加量的增加，硬度逐渐升高，重组鹅肝制品的硬度和咀嚼性有所提高；弹性、胶粘性均与木薯淀粉添加量成正相关关系。大豆蛋白的抗变能力较强，因此在肉制品的加工过程中与肌肉蛋白之间无交互作用，但是在 TG 酶作用下，肌肉中蛋白质和大豆蛋白会发生交联，有利于增强肉制品的凝胶

特性^[26]。随着鸡胸肉含量的增加，鸡胸肉的水分含量相对较低，鹅肝的水分含量相对较高，在混合搅拌的过程中，鸡肉蛋白、鹅肝蛋白、大豆蛋白产生吸水竞争，鹅肝中的水分向鸡胸肉和大豆蛋白中转移，使重组鹅肝制品中的蛋白质密度增加，从而使硬度和咀嚼性增加。

表 8 重组鹅肝制品质构特性分析
Table 8 Analysis of the quality and composition characteristics of restructured goose livers

组号	硬度/N	弹性/mm	咀嚼性/mj
1	28.87 ± 0.49	4.11 ± 0.06	71.29 ± 3.67
2	33.91 ± 1.22	4.49 ± 0.05	94.72 ± 1.07
3	27.77 ± 1.46	4.56 ± 0.10	83.32 ± 3.06
4	29.04 ± 0.64	4.23 ± 0.04	76.00 ± 0.67
5	41.99 ± 0.51	4.73 ± 0.05	122.71 ± 4.20
6	31.63 ± 1.64	4.64 ± 0.09	91.87 ± 3.59
7	43.28 ± 0.91	4.40 ± 0.10	128.68 ± 3.20
8	29.36 ± 0.83	4.25 ± 0.06	79.42 ± 2.50
9	39.95 ± 0.60	5.12 ± 0.04	126.11 ± 4.32

2.2.4 正交试验结果分析

根据熟化损失、色度、质构特性三个指标，按照 40%、20%、40% 的比例计算各组重组鹅肝制品的综合得分。为确定各因素对重组鹅肝制品制作工艺的影响，对正交试验结果进行极差分析。表中 K 表示任一系列上水平号为 i 时，所对应的试验结果之和； $k=K/s$ ，其中 s 为任一系列上各水平出现的次数；R 表示任一系列上 $R=\max \{k\}-\min \{k\}$ 。

由表 9 可知，第 3 组综合得分最高，为 89.60 分。结合 K 值得出正交试验最优的重组鹅肝制品的组合为 $A_1B_3C_2D_3$ ，此配方制作的重组鹅肝制品的品质最优。由极差 R 值可得，各因素对重组鹅肝制品的影响大小为 $B>C>A>D$ ，即 TG 酶>木薯淀粉>鸡胸肉>大豆蛋白。

2.2.5 模糊数学预测

根据重组鹅肝制品评价表，得到重组鹅肝制品模糊数学得分表，如表 10。根据表 10 结果建立模糊矩阵 C，评定结果为指标权重集 K 与模糊矩阵 C 的合成，根据模糊矩阵乘法运算， $Y=K C$ ，重组鹅肝制品的最终得分为 $U=Y V$ 。其中，指标权重集 $K=(X_1 \text{ 风味}, X_2 \text{ 硬度}, X_3 \text{ 弹性}, X_4 \text{ 咀嚼性}, X_5 \text{ 组织状态}, X_6 \text{ 色泽})=(0.2,0.15,0.15,0.1,0.2,0.2)$ ， $V=(V_1、V_2、V_3、V_4)=(90,70,50,30)$ 。

表 9 重组鹅肝制品正交试验结果

Table 9 Orthogonal test results of restructured goose livers products

编号	因素				综合得分
	A	B	C	D	
1	1	1	1	1	47.04
2	1	2	3	2	85.12
3	1	3	2	3	89.60
4	2	1	3	3	44.80
5	2	2	2	1	64.96
6	2	3	1	2	60.48
7	3	1	2	2	67.20
8	3	2	1	3	56.00
9	3	3	3	1	85.12
K1	226.24	159.04	163.52	197.12	
K2	170.24	210.56	221.76	194.40	
K3	208.32	235.20	219.52	212.28	
k1	75.41	53.01	54.51	65.71	
k2	56.75	70.19	73.92	72.43	
k3	69.44	78.40	73.17	63.47	
R	18.67	25.39	19.41	8.96	
最佳水平	A ₁	B ₃	C ₂	D ₃	

表 10 重组鹅肝制品模糊数学得分表

Table 10 Fuzzy mathematical score scale for restructured goose livers products

因素		编号								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
风味	优	2	5	6	4	3	5	5	3	3
	良	2	4	4	3	4	3	5	3	3
	中	3	1	0	1	3	1	0	3	3
	差	3	0	0	2	0	0	0	1	1
硬度	优	1	5	5	5	2	5	5	3	3
	良	2	3	5	4	4	4	4	2	3
	中	5	2	0	1	4	1	1	3	3
	差	2	0	0	0	0	0	0	2	1
弹性	优	0	5	6	4	2	4	6	2	4
	良	1	4	4	5	4	4	4	4	3
	中	6	1	0	1	3	1	0	3	2
	差	3	0	0	0	1	1	0	1	1
色泽	优	0	5	5	5	3	4	4	3	3
	良	2	4	5	3	4	3	4	4	3
	中	5	1	0	2	3	3	1	3	2
	差	3	0	0	1	0	0	1	0	2
咀嚼性	优	1	5	5	4	2	6	4	3	3
	良	1	2	4	3	3	3	5	5	3
	中	5	3	1	2	5	1	1	2	3
	差	3	0	0	1	0	0	0	0	1
组织状态	优	3	6	6	5	3	5	5	2	3
	良	3	2	3	2	4	3	4	3	2
	中	3	1	1	2	2	1	1	4	4
	差	1	1	0	1	1	1	0	1	1

根据表 10 的数据，可得模糊矩阵 D_1 ：

$$D_1=\begin{pmatrix}2&2&3&3\\1&2&5&2\\0&1&6&3\\0&2&5&3\\0&1&6&3\\2&3&3&2\end{pmatrix}$$

根据模糊矩阵的计算方法， $Y_1=KD_1=(0.1,0.165,0.42,0.16)$ ，即最终得分 $U_1=Y_1V=(0.1,0.165,0.42,0.16)\times(90,70,50,30)=46.35$ 。

同理可得， $U_2=81.60$ ， $U_3=87.15$ ， $U_4=74.40$ ， $U_5=66.45$ ， $U_6=79.20$ ， $U_7=82.50$ ， $U_8=59.45$ ， $U_9=67.56$ 。依据得分，可知 $A_1B_3C_2D_3$ 的组合得分最高，为 87.15 分，与综合得分的最高分组合一致。因此，该结论可为重组鹅肝制品正交试验的综合得分提供理论基础。

3 结论

本研究以鹅肝和鸡肉为主要原料，添加大豆蛋白、木薯淀粉、TG 酶与鹅肝进行重组。基于模糊数学法和正交试验，优化并得出重组鹅肝制品的最优配方为：鸡胸肉 75 wt.%、鹅肝 25 wt.%、大豆蛋白 2.75 wt.%、谷氨酰胺转氨酶 1.75 wt.%、木薯淀粉 10 wt.%、食盐 1.4 wt.%、冰卤汤 8 wt.%。在此条件所得到的重组鹅肝产品表面光滑，熟化损失低，各因素对重组鹅肝制品的影响大小为 TG 酶>木薯淀粉>鸡胸肉>大豆蛋白。产品白度为 54.87，硬度为 27.77 N，弹性为 4.56 mm，咀嚼性为 83.32 mj，色泽、咀嚼性和弹性较好，结构紧密，风味浓郁，品质的综合得分为 89.60 分，模糊数学预测为 87.15 分。该方法可为普通鹅肝的精深加工及产品多样化提供理论依据。

参考文献

[1] 吴婷婷,刘溪,周蒙蒙,等.樱桃鹅肝的改良工艺[J].食品工业,2020,41(9):68-71.

[2] 陈唱.鹅肝深加工产品的研制[D].南京:南京农业大学,2018.

[3] 谢章斌.鹅肥肝营养、风味物质及鹅肥肝酱的开发研究[D].南昌:南昌大学,2012.

[4] 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.

[5] 张国蓉,刘有志,刘安军,等.新型鹅肝酱的制备技术研究[J].食品科技,2006,7:100-104.

[6] 邢建荣,郑美瑜,邵敏,等.胡萝卜鹅肝酱罐头制作技术[J].农村新技术,2008,12:35-36.

[7] 陈唱.营养鹅肝肠的研制及其营养价值分析[J].食品工业科技,2018,39(11):232-239,247.

[8] 李琴.碎猪肉与豆腐重组火腿产品开发[D].成都:四川农业大学,2015.

[9] SAMAD A, ALAM N A, KUMARI S, et al. Modern concepts of restructured meat production and market opportunities [J]. Food Science of Animal Resources, 2024, 44 (2): 284-298.

[10] 曾令英.低温重组兔肉排工艺及其加工贮藏品质变化[D].重庆:西南大学,2020.

[11] 路鑫.鲑鱼与猪肉的重组加工研究[D].长春:吉林农业大学,2013.

[12] OLIVEIRA W R, MIDORI M O, MIRIAN S D, et al. Improving the textural and nutritional properties in restructured meat loaf by adding fibers and papain designed for elderly [J]. Food Research International, 2023, 165, 112539.

[13] 祁智男.新型重组肉制品的重组特性研究[D].长春:吉林大学,2007.

[14] 金铮,于婉莹,赵文字,等.鲑鱼重组鱼排3D打印特性的研究[J].食品与发酵工业,2024,50(3):241-249.

[15] KIM S M, KIM H W, PARK H J. Preparation and characterization of surimi-based imitation crab meat using coaxial extrusion threedimensional food printing [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 71: 102711.

[16] 白杰,李国锋,丁玉,等.基于模糊数学法优化肉苁蓉小茴香咀嚼片的制备工艺[J].食品工业,2023,44(11):59-65.

[17] 曹田欣,闫小娟,张海悦.基于模糊数学和感官评分优化乌梅多糖果冻配方研究 [J].中国调味品,2024,49(10):94-100.

[18] MENG X T, YE D D, PAN Y, et al. Optimisation of not-from-concentrate Goji juice processing using fuzzy mathematics and response surface methodology and its quality assessment [J]. Applied Sciences, 2024, 14 (18): 8393.

[19] LIU Y B, QIAO Z N, ZHAO Z J, et al. Comprehensive evaluation of Luzhou-flavor liquor quality based on fuzzy mathematics and principal component analysis [J]. Food Science & Nutrition, 2022, 10 (6): 1780-1788.

[20] GB/T 10220-2012,感官分析 方法学 总论[S].

[21] 黄颖,王逐鹿,杨宁,等.马蹄粉对拉氏南美南极鱼鱼肠制品品质的改良[J].大连工业大学学报,2019,38(5):321-326.

[22] 李岩.栉孔扇贝闭壳肌凝胶特性研究及贝肉香肠研发[D].锦州:渤海大学,2020.

[23] 李鑫.鹅肝蛋白的提取及其加工特性研究[D].南京:南京农业大学,2018.

[24] ZHANG T Y, DOU W, ZHANG X, et al. The development history and recent updates on soy protein-based meat alternatives [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 109: 702-710.

[25] 耿亚鑫.大豆分离蛋白及其酶解物对肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[D].天津:天津商业大学,2021.

[26] 孙健.转谷氨酰胺酶及其他功能性添加物对鸡肉肠质构特性的影响[D].南京:南京农业大学,2004.

[27] ZHAO Y X, ZHENG Z J, ZHAO Y, et al. Cross-linked modification of tapioca starch by sodium Trimetaphosphate: An influence on its structure [J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101670.

[28] 冷雪娇,章林,黄明,等.高压腌制对鸡胸肉食用品质的影响[J].食品科学,2013,34(17):53-56.

[29] 金铮,于婉莹,赵文字,等.鲑鱼重组鱼排3D打印特性的研究[J].食品与发酵工业,2024,50(3):241-249.

[30] PIETRASIK Z, LI E C Y. Binding and textural properties of beef gels as affected by protein, κ -carrageenan and microbial transglutaminase addition [J]. Food Research International, 2002, 35(1): 91-98.