

木瓜蛋白酶嫩化鹅胸肉的工艺优化

张惠朋^{1,2}, 林奕云³, 杨怀谷², 唐道邦², 阮奇珺³, 刘学铭², 邹金浩², 程静蓉², 王旭莘², 王治同^{1*},
林耀盛^{2*}

(1. 吉林农业大学食品科学与工程学院, 吉林长春 130118) (2. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610)
(3. 中国广州分析测试中心, 广东省分析测试技术公共实验室, 广东广州 510070)

摘要: 为改善鹅肉品质, 该研究采用木瓜蛋白酶嫩化技术旨在分析不同处理条件对鹅肉的影响。在单因素试验的基础上, 采用响应面分析进行四因素三水平工艺优化试验。分别以酶的质量分数(A)、温度(B)、pH值(C)、时间(D)四个因素作为自变量, 以感官特征作为响应面指标, 通过回归分析确定了获得最佳感官的加工条件为酶的质量分数0.076%, 温度60℃, pH值7.6, 时间55 min。此条件下的感官评价可以达到82.5分, 于鹅肉处理前(59.7)有显著提高, 剪切力为26.47 N, 相比于嫩化前下降了38.83%, 整体品质有明显的改善。实际感官品质结果与模型值接近, 说明该模型具有良好的预测效果。为建立酶法嫩化技术提供了一定的数据和理论基础。

关键词: 鹅肉; 酶法; 嫩化; 响应面优化

文章编号: 1673-9078(2023)02-29-35

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.2.1045

Process Optimization of Tenderizing Goose Meat with Papain

ZHANG Huipeng^{1,2}, LIN Yiyun³, YANG Huaigu², TANG Daobang², RUAN Qijun³, LIU Xueming², ZOU Jinhao²,
CHENG Jingrong², WANG Xuping², WANG Zhitong^{1*}, LIN Yaosheng^{2*}

(1.College of Food Science and Engineering, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

(2.Sericultural& Agri-Food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China) (3.Analysis and Testing Center, Guangdong Public Laboratory of Analysis and Testing Technology, Guangzhou 510070, China)

Abstract: To improve the quality of goose meat, enzymatic tenderization with papain was used, and the effects of different treatment conditions on goose meat were analyzed. Based on the results of single-factor experiments, response surface methodology with four factors and three levels was applied for process optimization. Papain concentration (A), temperature (B), pH (C), and incubation time (D) were used as independent variables, and sensory characteristics were set as the response surface indicator. Through regression analysis, the optimal process conditions for obtaining the best sensory properties were enzyme concentration of 0.076%, temperature of 60 °C, pH of 7.6, and incubation time of 55 min. The predicted score of sensory evaluation under these conditions was 82.5, which was significantly improved from the value without treatment (59.7). The shear force was 26.47 N, which was 38.83% lower than that before tenderization, and the overall quality was significantly

引文格式:

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

ZHANG Huipeng, LIN Yiyun, YANG Huaigu, et al. Process optimization of tenderizing goose meat with papain [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(2): 29-35

收稿日期: 2022-08-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(31972074); 广东省现代农业产业共性关键技术研发创新团队建设项目(2021KJ117; 2022KJ117); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2019B1515210018); 揭阳市科技计划项目(Dzxny010); 惠来家禽产业链“链长制”科技支撑服务项目; 广东省农业科技创新推广项目(粤财农〔2021〕170号); 广东省农业科学院食品营养与健康研究中心建设运行经费(XTXM202205)

作者简介: 张惠朋(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 畜禽加工, E-mail: coolpp1997@163.com

通讯作者: 王治同(1974-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 农产品加工, E-mail: 632483553@qq.com; 共同通讯作者: 林耀盛(1985-), 男, 硕士, 副研究员, 研究方向: 畜禽加工, E-mail: liny.s163@163.com

improved. The actual sensory quality results were close to the model values, indicating that the model exhibited satisfactory predictive performance. This work provides preliminary data and builds a theoretical foundation to establish practical processing techniques for the enzymatic tenderization of goose meat.

Key words: goose meat; enzymatic method; tenderization; response surface optimization

《本草拾遗》中描述鹅肉补脾益胃,润燥止渴。鹅肉中富含人体所需的各种营养物质,其中蛋白质含量高达 22%,显著高于猪肉、鸡肉、鸭肉等其他种类的传统畜禽肉^[1,2]。鹅肉的必需氨基酸含量较高,组分与人体需求相近。鹅肉中的脂肪含量及其熔点都低于其他禽肉,容易被人体消化吸收^[3]。鹅肉的经济附加值远高于鸡肉,目前鹅在我国的年需求量约为 8~9 亿只,产值逾 600 亿元,并且长期处于供小于求的市场状态,因此拥有广阔的消费空间^[4]。但鹅肉的肌纤维较粗,肉质相较于其他禽肉较硬,难于咀嚼,在口感上存在一定的缺陷。如能得到有效改善,鹅肉的市场容积可能会被进一步扩充。在行业需求和市场牵引下,在鹅肉加工过程中亟需开发相应的鹅肉嫩化处理技术^[5]。

现今报道的对各种肉类的嫩化方式主要包括:化学嫩化法^[6,7]、物理嫩化法^[8,9]、生物嫩化法^[10,11]。但物理嫩化法需要复杂和昂贵的机械设备,并且嫩化效果较差,因此在实际生产中较少被采用^[12]。化学嫩化法是通过化学物质的加添加改变肉的持水性以及蛋白质的结构以达到嫩化的目的,但存在一定的生物安全风险,与当下的健康绿色食物理念存在可能的矛盾^[13]。生物嫩化法则主要是利用天然蛋白酶(如:木瓜蛋白酶、菠萝蛋白酶、无花果酶等)分解肌肉与结缔组织,其来源广泛且安全、操作简便且高效,在肉类的嫩化技术中被普遍采用^[14,15]。

鹅肉的嫩度与肌肉中的结缔组织蛋白、肌原纤维蛋白和肌浆蛋白组成有关,但肌肉中自含的内源性蛋白水解酶较少,进而影响了鹅肉的嫩度。木瓜蛋白酶作为肉类嫩化中最常见的酶种之一,可以从番木瓜的根、茎、叶中提取,具有水解能力强、适用范围广等优点,有利于肉类嫩化和肉类菜肴独特风味的形成^[16,17]。朱秀娟等^[18]使用木瓜蛋白酶对牦牛肉进行了嫩化处理,嫩化后的牦牛肉剪切力相比于嫩化前下降了 31.51%; Xu 等^[19]报道了木瓜蛋白酶可以通过水解肌原纤维和肌浆蛋白实现对鱿鱼的嫩化;还有研究证实了添加适当的木瓜蛋白酶可以提高发酵鱼的感官品质^[20]。然而,鲜有将木瓜蛋白酶用于鹅肉加工的研究文献。考虑到木瓜蛋白酶可能会导致过度嫩化和肉的表面糊化,因此需要对工艺条件加以控制^[21]。本文以剪切力和感官品质作为评价指标,通过单因素试验和响应面设计试验筛选优化木瓜蛋白酶嫩化鹅肉的最佳

处理参数,为后期的工业化生产提供可行的试验数据支撑和理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鹅购自当地养殖场,均为公鹅,屠宰后从胴体上取下胸肉,尽可能去除筋膜,结缔组织和脂肪组织,4℃成熟 24 h 后真空包装,于-20℃保存,实验前于 4℃解冻 24 h。试剂均为分析纯。木瓜蛋白酶:生物制剂,上海生工,酶活 2 000 u/mg。

1.2 仪器与设备

C-LM4 型数显式肌肉嫩度测定仪,东北农业大学研制生产。

1.3 实验方法

1.3.1 原料处理

去除表面筋膜、脂肪,将鹅胸肉分割成 30 mm×30 mm×20 mm 的均匀块状。按照每 50 g/10 mL 的注射量向肉中注射酶液,冰水浴滚揉均匀,随后将样品浸泡在配制好的木瓜蛋白酶溶液中,嫩化结束后立刻用水冲去表面残留的木瓜蛋白酶。

1.3.2 单因素试验

分别考察酶的质量分数(0.02%、0.04%、0.06%、0.08%、0.10%)、pH 值(5、6、7、8、9)、反应温度(40、45、50、55、60℃)、反应时间(20、40、60、80、100 min)对鹅肉剪切力以及感官评价的影响。

1.3.3 响应面优化试验设计

表 1 试验设计因素水平

Table 1 Experiment design factor levels				
水平	因素			
	A 浓度/%	B pH 值	C 时间/min	D 温度/℃
-1	0.06	6	40	50
0	0.08	7	60	55
1	0.10	8	80	60

1.3.4 剪切力的测定

将样品置于蒸煮袋中,在 85℃水浴中煮至中心温度达到 75℃后取出,冷却至室温,用吸水纸擦干表面水分。使用圆形取样器平行于肌纤维方向取样,

长度不低于 25 mm，使用肌肉嫩度仪测定剪切力，每组至少测定三次。

1.3.5 感官评价

参考金惠玉等^[22]的方法选择接受过系统培训的

十人感官评价小组进行感官评价，鹅肉品质从色泽、口感、气味、形态四个方面进行，最后计算平均值和每个处理的综合得分。

表 2 感官评分标准

Table 2 Sensory scoring criteria

分值	1~9	10~19	20~25
色泽	鹅肉表面暗淡无光泽，颜色不均匀	鹅肉表面有一定光泽，颜色较为均匀	鹅肉表面富有光泽，颜色均匀
口感	口感过于软糯或者较硬，咀嚼性差	口感较软或者较硬，咀嚼性较差	口感适中，不柴并且咀嚼性较好
气味	有不愉快气味，整体气味不协调	气味较为浓郁，整体气味较为协调	气味浓郁，留香持久
形态	肉块结构松散不完整，弹性较差	肉块较为松散，具有一定弹性	肉块结构完整，弹性好

1.4 数据处理

使用 Origin 2019 进行单因素图形绘制。使用 Design expert 12 设计 Box-Behnken 响应面试验及分析。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 酶的质量分数对鹅肉嫩度的影响

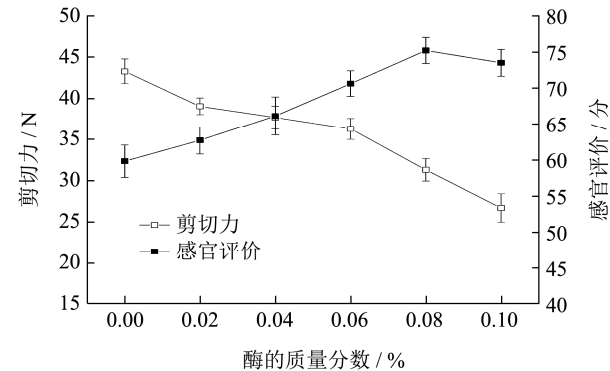


图 1 酶的质量分数对剪切力、感官评价的影响

Fig.1 The influence of enzyme concentration on shear force and sensory evaluation

采用不同的酶质量分数进行鹅肉的嫩化，考察剪切力和感官评价的变化情况，结果如图 1。木瓜蛋白酶通过将肌原纤维蛋白中的-CO-NH-断裂，生成小分子的多肽以达到本试验嫩化的目的^[23]。随着酶质量分数的增高，鹅肉的剪切力呈下降趋势，虽然提高酶质量分数可能继续降低剪切力，但是一味降低剪切力并不利于实际条件下的品质优化，当酶质量分数达到 0.10%时感官评价出现了下降，这是由于木瓜蛋白酶对鹅肉肌原纤维蛋白的降解作用，导致了鹅肉持水性的降低以及结构的损伤，同时肉中蛋白质的过度酶解产生了风味变差的现象，这也是感官评价降低的主要原因之一，这与王清波等^[24]的研究结果相一致。因此为了满足剪切力与感官评价的较优条件，此时 0.08%

的酶质量分数作为最佳效果，剪切力达到了最低值 26.25 N，感官评价可以达到 75.2 分。

2.1.2 反应温度对鹅肉嫩度的影响

木瓜蛋白酶在不同温度下存在催化效果差异，图 2 显示在 40~55 ℃范围，剪切力随着温度的升高而降低，当温度达到 55 ℃时剪切力达到了最低值 25.53 N，此时的感官评价分数达到 77.25，为组中最高，但温度继续升高后剪切力呈现出上升的趋势，感官评价也相应降低。由于此时的反应温度相对较高，鹅肉的蛋白质发生了一定程度的变性，蛋白质保水网络结构被破坏，导致了水分的流失，从而影响了鹅肉的嫩度。同时过高的温度超过了木瓜蛋白酶的最适温度，催化活性受到了一定的影响。原因在于木瓜蛋白酶的三级结构中存在三个二硫键，具有较高的热稳定性，他们可以确保木瓜蛋白酶在高温环境下不会被立刻破坏而失活，所以随着温度的升高并超过最适温度后，木瓜蛋白酶不会立刻失去催化效果而是逐渐降低催化效率，这代表着木瓜蛋白酶具有广泛的活性温度范围^[16]。最后根据试验的结果选择了 50、55、60 ℃作为响应面的因素水平进行后续试验。

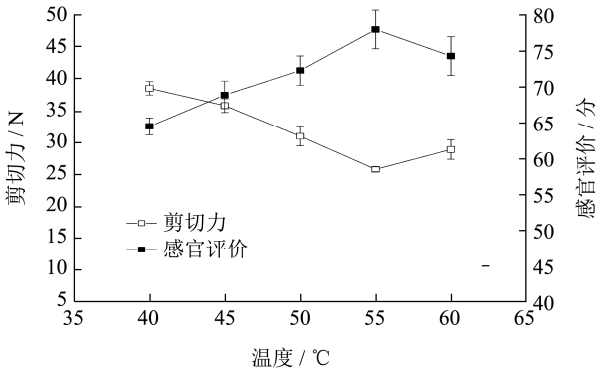


图 2 温度对剪切力、感官评价的影响

Fig.2 The influence of treatment temperature on shear force and sensory evaluation

2.1.3 反应 pH 值对鹅肉嫩度的影响

木瓜蛋白酶作为一种生物催化剂，在不同 pH 值

下具有不同的活性,pH 值对酶活性造成的影响主要是由于底物和酶带电状态变化造成酶与底物结合能力的增强或减弱,有研究表明在中性范围木瓜蛋白酶具有较好的活性^[25]。通过图 3 可以明显的看出剪切力在 pH 值 5.0~9.0 之间呈现先下降再上升的趋势,其中 pH 值为 7 时的剪切力最低,为 28.67 N,感官评价分数达到 76.2,当 pH 值为 7 时嫩化效果最佳,证明此时的木瓜蛋白酶达到了最适状态;同时随着剪切力的降低感官评价相应升高,pH 值为 7 时达到了感官评价的最高值。因此选择 pH 值为 7 进行下一步试验,选择 pH 值 6、7、8 作为响应面分析的的因素水平。

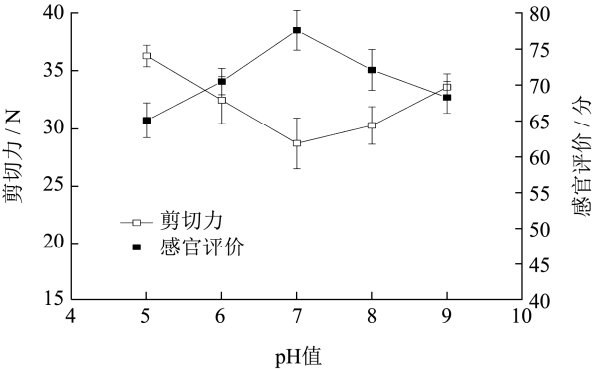


图 3 pH 值对鹅肉剪切力、感官评价的影响

Fig.3 The influence of pH on shear force and sensory evaluation

2.1.4 嫩化时间对鹅肉嫩度的影响

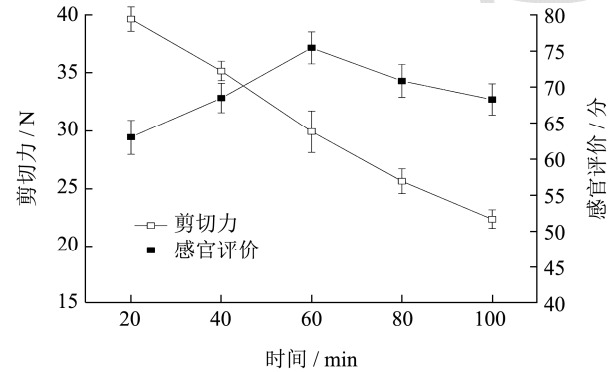


图 4 时间对鹅肉剪切力、感官评价的影响

Fig.4 The influence of treatment time on shear force and sensory evaluation

由于本试验所需的酶解进程并不属于完全酶解,因此需要合理控制进度。当嫩化时间过长时容易导致肉质变得过于松散,而嫩化时间太短则达不到理想的嫩化效果,嫩化时间的把控显得至关重要^[26]。根据图 4 可以清楚的看出随着嫩化时间的增加,剪切力也随之降低,80 min 之后的剪切力下降幅度变得平缓,可能是由于长时间的反应导致酶活的降低^[27]。嫩化时间超过 60 min 后,感官评价显示出了下降趋势,可能是过度酶解导致肉的外观和结构被严重破坏,导致保水性下降,肉质过于松散,适口性变差,并由于长时

间的反应产生带有苦味的肽类小分子物质,使味道变差,综合造成了感官品质的整体劣变。因此综合试验中的感官品质和嫩化效果指标,选择 40、60、80 min 作为响应面试验的因素水平。

2.2 响应面优化实验

2.2.1 响应面试验设计与结果

表 3 响应面试验设计与结果

Table 3 Response surface test design and results

试验号	A 酶的质量分数	B 温度	C pH 值	D 时间	感官评价 /分	剪切力 /N
1	-1	-1	0	0	70.1	31.75
2	1	-1	0	0	71.9	26.57
3	-1	1	0	0	74.9	27.28
4	1	1	0	0	63.2	22.96
5	0	0	-1	-1	65.5	29.23
6	0	0	1	-1	70.9	29.14
7	0	0	-1	1	60.8	27.93
8	0	0	1	1	72.2	26.74
9	-1	0	0	-1	72.3	30.63
10	1	0	0	-1	60.4	25.89
11	-1	0	0	1	61.3	28.23
12	1	0	0	1	65.0	24.47
13	0	-1	-1	0	72.6	28.27
14	0	1	-1	0	62.3	25.20
15	0	-1	1	0	69.2	27.53
16	0	1	1	0	76.6	26.87
17	-1	0	-1	0	61.7	30.93
18	1	0	-1	0	61.6	25.15
19	-1	0	1	0	75.4	29.12
20	1	0	1	0	65.1	24.80
21	0	-1	0	-1	68.5	28.86
22	0	1	0	-1	76.0	26.27
23	0	-1	0	1	74.4	26.89
24	0	1	0	1	71.8	24.11
25	0	0	0	0	76.7	28.25
26	0	0	0	0	77.5	28.13
27	0	0	0	0	78.0	28.50

结合上述单因素试验结果,采用 Box-Behnken 法设计响应面试验优化鹅肉嫩化工艺条件,最后得到四因素三水平的设计方法。将剪切力和感官评价作为评价嫩化效果的参考指标,存在剪切力较低但感官评价同样较低的现象,但同时也我们发现一般当感官品质较高时的剪切力也处于较低值,综合考虑将鹅肉的感

官评价作为响应值,考察酶的质量分数、温度、pH 值、时间的影响,优化试验结果如表 3。

2.2.2 模型的建立与分析

利用 Design Expert 软件对表 3 数据进行回归拟合,计算得出回归模型进行回归方程各项系数及方差分析,见表 4。

利用 Design Expert 软件和 Box-Behnken 中心组合试验方法建立数学模型对表 3 数据进行多元回归拟合,得到回归方程: 感官评价 $Y_1=77.40-2.37A-0.1583B+3.74C-0.675D-3.38AB-2.55AC+3.90AD+4.42BC-2.53BD+1.50CD-6.83A^2-0.75B^2-5.45C^2-4.80D^2$ 。

从构建的模型可以看出回归模型达到了极显著水平 ($P<0.01$), 失拟项不显著 ($P>0.05$), 决定系数 R^2 、 R^2_{Adj} 分别为 0.953 6、0.899 6, 说明线性关系良好, 模型可以模拟 95.36%的试验响应值变化, 因此此模型可以合理的反映感官评价与酶的质量分数、pH 值、温度、时间的关系, 在四个因素中 pH 值、酶的质量分数对感官品质影响极显著 ($P<0.01$), 反应时间对感官品质有显著的影响 ($P<0.05$), 根据 F 值可以得到四个因素对感官评价的影响主次顺序为: pH 值>酶的质量分数>时间>温度。

表 4 鹅肉嫩化的回归方差分析

Table 4 Regression analysis of variance for goose tenderization						
方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	p 值	显著性
模型	862.14	14	61.58	17.63	<0.000 1	**
A (酶的质量分数)	67.69	1	67.69	19.38	0.000 9	*
B (温度)	0.300 8	1	0.300 8	0.086 1	0.774 2	不显著
C (pH)	168.00	1	168.00	48.11	<0.000 1	**
D (时间)	5.47	1	5.47	1.57	0.234 7	不显著
AB	45.56	1	45.56	13.05	0.003 6	*
AC	26.01	1	26.01	7.45	0.018 3	*
AD	60.84	1	60.84	17.42	0.001 3	*
BC	78.32	1	78.32	22.43	0.000 5	*
BD	25.50	1	25.50	7.30	0.019 2	*
CD	9.00	1	9.00	2.58	0.134 4	不显著
A ²	248.43	1	248.43	71.14	<0.000 1	**
B ²	3.00	1	3.00	0.859 0	0.372 3	不显著
C ²	158.41	1	158.41	45.36	<0.000 1	**
D ²	122.88	1	122.88	35.19	<0.000 1	**
残差	41.91	12	3.49			
失拟性	41.05	10	4.10	9.55	0.098 5	不显著
纯误差	0.860 0	2	0.430 0			
总和	904.05	26				

注: **表示差异极显著 ($P<0.01$); *表示差异显著 ($P<0.05$)。

2.2.3 响应面中各因素交互效应分析

响应面法可以对试验因素的各个水平连续地分析,使用 Design Expert 软件进行拟合,得到酶的质量分数 (A)、温度 (B)、pH (C)、时间 (D) 交互作用的响应面图,响应面的坡度越陡,说明交互作用越为明显,相对如果坡面越圆滑则说明因素之间关系不显著^[28]。各因素之间的关系如图 5 所示,从图 5 可以看出,接近曲面中心的位置感官评价也较高,接近边缘则感官评价较低,这与周珠法等^[29]的研究结果一致。四个因素之中反应温度 (B) 与 pH (C), 酶的质量分数 (A) 与反应时间 (D) 之间交互作用显著性较强

($P<0.05$)。BC 交互响应面图象的陡峭程度大于其他组合,说明温度与 pH 交互作用对模型的影响最大,这与赵立等^[30]的研究结果相同。

2.3 最佳工艺条件与验证试验

通过 Design Expert 软件预测木瓜蛋白酶嫩化鹅肉最佳工艺条件为:酶的质量分数 0.076%,温度 59.95 ℃, pH 值 7.62, 时间 54.93 min, 感官评价预测值为 81.2, 根据实际操作性将条件设置为酶质量分数 0.076%, 温度 60 ℃, pH 值 7.6, 时间 55 min, 采用该条件进行验证性试验,得到鹅肉的感官评价为 82.5 分,与预测

值接近。该条件下剪切力为 26.47 N, 说明该条件在具有较高感官评价的同时也具备较好的嫩化效果, 并表明了模型与实际情况拟合良好, 具有一定的可行性。

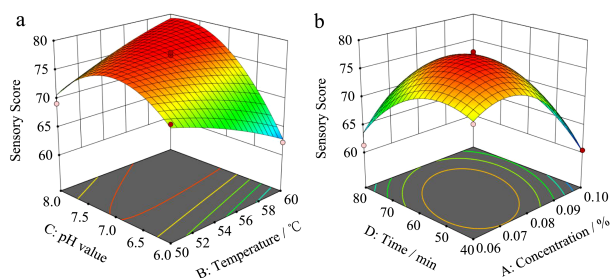


图5 各因素对鹅肉感官评价影响的响应面图

Fig.5 Response surface diagram of the influence of various factors on the sensory evaluation of goose meat

注: a: 反应温度与 pH 的影响; b: 酶的质量分数与反应时间的影响。

3 结论

本试验通过单因素试验发现了酶的质量分数、pH 值、处理时间、反应温度对鹅肉剪切力和感官评价的影响关系。通过响应面建立数学模型, 得到了最佳工艺条件: 酶质量分数 0.076%, 温度 60 °C, pH 值 7.6, 时间 55 min。在此条件下的鹅肉具有较好的嫩度和感官评价, 为日后鹅肉的嫩化加工提供了一定的参考。

通过本试验我们发现酶对鹅肉的品质改善具有良好的效果, 但同时也发现了单一的酶法处理依旧存在一定的不足之处, 如嫩化时间仍略久。目前已有超声波辅助酶法改善鸡胸肉品质^[31]、高静水压辅助木瓜蛋白酶嫩化^[25]等相关报道, 采用其他工艺与酶法联用的方法或许是提高加工效率的可行途径。未来我们的研究方向可能会倾向于采用多种手段共同加工从而达到更好鹅肉品质优化的效果, 完善现有手段的不足之处。

参考文献

- [1] 陈春梅, 周惠健, 沈银涵, 等. 煮制时间对鹅肉蛋白结构的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(4): 6-11
- [2] Wołoszyn J, Woreńska M, Goluch Z, et al. The selected goose meat quality traits in relation to various types of heat treatment [J]. Poultry Science, 2020, 99(12): 7214-7224
- [3] 刘磊, 夏强, 曹锦轩, 等. 不同解冻方法对鹅腿肉理化特性和品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(15): 256-261
- [4] Hamadani H, Khan A A, Salahudin M, et al. Slaughter and carcass characteristics, sensory attributes and consumer acceptability of geese meat [J]. Indian Journal of Poultry Science, 2013, 48(2): 223-227
- [5] 高海燕, 潘润淑, 马汉军. 超高压技术对鹅肉嫩度的影响[J].

食品科学, 2011, 32(8): 107-110

- [6] 高海燕, 张瑞瑶, 贾甜, 等. 不同嫩化方法对鹅肉品质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(7): 182-186
- [7] Li X, Sun Y, Pan D, et al. The effect of CaCl₂ marination on the tenderizing pathway of goose meat during conditioning [J]. Food Research International, 2017, 102: 487-492
- [8] Guoyuan X, Xiaoyi F, Dongmei P, et al. Influence of ultrasound-assisted sodium bicarbonate marination on the curing efficiency of chicken breast meat [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 60(C): 104808
- [9] Han G, Chen Q, Xia X, et al. High hydrostatic pressure combined with moisture regulators improves the tenderness and quality of beef jerky [J]. Meat Science, 2021, 181: 108617
- [10] 余德敏. 鹅肉的嫩化及鹅肉肠的开发研究[D]. 重庆: 西南大学, 2008
- [11] Shang S, Wu B, Fu B, et al. Enzyme treatment-induced tenderization of puffer fish meat and its relation to physicochemical changes of myofibril protein [J]. LWT, 2022, 155: 112891
- [12] Madhusankha G D M P, Thilakarathna R C N. Meat tenderization mechanism and the impact of plant exogenous proteases: A review [J]. Arabian Journal of Chemistry, 2021, 14(2): 102967
- [13] Bhat Z F, Morton J D, Mason S L, et al. Applied and emerging methods for meat tenderization: a comparative perspective [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2018, 17(4): 841-859
- [14] Doneva M, Nacheva I, Dyankova S, et al. Application of plant proteolytic enzymes for tenderization of rabbit meat [J]. Biotechnology in Animal Husbandry, 2018, 34(2): 229-238
- [15] Tacias Pascacio V G, Castañeda Valbuena D, Morellon Sterling R, et al. Bioactive peptides from fisheries residues: A review of use of papain in proteolysis reactions [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 184: 415-428
- [16] 李有花. 木瓜蛋白酶的定向固定化研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021
- [17] Barekat S, Soltanizadeh N. Improvement of meat tenderness by simultaneous application of high-intensity ultrasonic radiation and papain treatment [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 39: 223-229
- [18] 朱秀娟, 余群力, 李儒仁, 等. 采用响应面优化法研究木瓜蛋白酶嫩化耗牛肉的条件[J]. 食品工业科技, 2013, 34(20): 230-234

- [19] Jun-hui X, Hui-juan C, Bin Z, et al. The mechanistic effect of bromelain and papain on tenderization in jumbo squid (*Dosidicus gigas*) muscle [J]. Food Research International, 2020, 131: 108991
- [20] Xu W, Jiang C, Liu A, et al. Moderate papain addition improves the physicochemical, microbiological, flavor and sensorial properties of Chouguiyu, traditional Chinese fermented fish [J]. Food Bioscience, 2022, 46: 101587
- [21] Islam M, Toribio E M. Development of a meat tenderizer based on papaya peel [J]. Revista de I + D Tecnológico, 2013, 9(2): 24-29
- [22] 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
- [23] 陶瑞,汤晓艳,龚艳,等.响应面法优化木瓜蛋白酶-复合磷酸盐嫩化低档部位牛肉工艺[J].食品科学,2016,37(20):13-18
- [24] 王清波,张慊,杨朝晖.响应面法优化超声波辅助木瓜蛋白酶嫩化牛肉[J].山东农业科学,2018,50(5):136-142
- [25] Pizarro-Oteiza S, Briones-Labarca V, Pérez-Won M, et al. Enzymatic impregnation by high hydrostatic pressure as pretreatment for the tenderization process of Chilean abalone (*Concholepas concholepas*) [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 65: 102451
- [26] 夏军军,李洪军,耿铁柱,等.响应面法优化酶嫩化牛肉工艺[J].西南大学学报(自然科学版),2015,37(12):17-24
- [27] 林耀盛,林奕云,张惠娜,等.响应面优化微波结合酶法制备米糠多肽过程中黄曲霉毒素 B₁ 的降解工艺[J].现代食品科技,2019,35(7):173-181
- [28] 徐静,宋健,武杰,等.响应面法优化柠檬酸嫩化鸭肉效果的研究[J].安徽科技学院学报,2019,33(3):60-65
- [29] 周珠法.响应面法优化木瓜蛋白酶嫩化牛肉工艺[J].食品工业科技,2018,39(2):86-91
- [30] 赵立,陈军,李苗云,等.木瓜蛋白酶嫩化鸭肉效果的研究[J].食品与发酵科技,2015,51(6):41-46
- [31] Cao C, Xiao Z, Tong H, et al. Effect of ultrasound-assisted enzyme treatment on the quality of chicken breast meat [J]. Food and Bioprocess Processing, 2021, 125: 193-203