

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.02.032

谷氨酰胺转氨酶处理对鸭血豆腐品质的影响

Effects of the transglutaminase treatment on the quality of duck blood tofu

王 斌^{1,2} 陈希玲^{1,2}WANG Bin^{1,2} CHEN Xi-ling^{1,2}

(1. 江南大学食品学院, 江苏 无锡 214122;

2. 江苏省食品安全与质量控制协同创新中心, 江苏 无锡 214122)

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 2. Collaborative Innovation Center of Food Safety and Quality Control in Jiangsu Province, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

摘要:采用物性分析仪、高精度分光测色仪、低场核磁共振分析仪及扫描电子显微镜等技术手段,研究谷氨酰胺转氨酶添加量和保温时间对鸭血豆腐持水能力、质构特性、颜色的影响。在单因素试验基础上,以酶添加量和保温时间为正交试验设计因素水平,以蒸煮损失率为指标,确定最佳酶处理方式:谷氨酰胺转氨酶添加量为 0.25%, 40 °C 下保温 30 min。通过弛豫时间与水分分布、全质构、微观结构的测定证实,该水平下谷氨酰胺转氨酶的添加可以显著提高鸭血豆腐的持水性、改善鸭血豆腐的胶着性和内聚性。

关键词:鸭血豆腐;谷氨酰胺转氨酶;持水性;质构

Abstract: In order to improve the quality of duck blood tofu, the effect of transglutaminase on the duck blood gel properties was studied. The effects of transglutaminase dosage and holding time on the water holding capacity, texture and color of duck blood tofu were studied by means of physical property analyzer, high-precision spectrophotometry color analyzer, low-field nuclear magnetic resonance analyzer and scanning electron microscope. On the basis of single factor experiment, the optimum enzyme treatment method was determined by orthogonal design factor level of enzyme addition amount and holding time, and the steaming loss rate was taken as index. The best enzyme treatment method was determined as follows: the amount of transglutaminase added was 0.25% and kept at 40 °C for 30 minutes. The results of relaxation time, water distribution, texture and microstructure showed that the addition of transglutaminase could significantly improve the water holding capacity, adhesion and cohesion of duck blood tofu at this level.

基金项目:2017 年度苏北科技专项项目(编号:SZ-XZ2017027)

作者简介:王斌(1984—),女,江南大学副教授,博士。

E-mail: wangbin@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2018-10-08

Keywords: duck blood tofu; transglutaminase; water holding capacity; texture

鸭血豆腐是以新鲜鸭血为原料,加入水、食盐等配料,经过促凝、蒸煮杀菌、冷却成型等工艺流程制成的一种凝胶态食品。传统鸭血豆腐的生产主要依靠小作坊手工制作,所得产品均一程度不高,卫生安全也得不到保障^[2]。目前,市售的鸭血豆腐以冷藏方式为主,仍存在货架期短、起孔、色泽暗等问题。

谷氨酰胺转氨酶(Transglutaminase, TG)是一种通过催化酰基转移反应加速蛋白质共价交联的酶,具有来源广泛、反应条件温和、对营养成分破坏小等特点。TG 能够催化蛋白质中谷氨酰胺残基与赖氨酸之间的酰基转移反应,形成空间网络结构。通过改善蛋白质的结构与特性赋予产品更好的质构特性,提高食品的凝胶性与可塑性。Li 等^[3]研究了 TG 对猪肉和鱼糜混合物质量和凝胶特性的影响,发现 0.4% TG 不仅可以改善相同肉蛋白之间的交联,还能增强猪肉和鲢鱼蛋白质之间的协同作用,为提高肉制品质量提供思路。

本试验拟研究谷氨酰胺转氨酶反应条件对鸭血豆腐品质的影响,并通过单因素和正交试验优化确定最佳的酶处理方式,为运用谷氨酰胺转氨酶改善鸭血豆腐的加工品质提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

新鲜鸭血:无锡市锡南路农贸菜场;

谷氨酰胺转氨酶:最适温度 40~45 °C, pH 6.0~7.0, 泰兴市东圣食品科技有限公司;

氯化钠、柠檬酸钠、氯化钙、戊二醛、磷酸盐、无水乙醇:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

恒温水浴锅:DK-8AXX 型,上海森信实验仪器有限公司;

物性分析仪:TA.XT2i 型,英国 Stab.Micro Systems 公司;

高精度分光测色仪:UltraScan Pro1166 型,美国 Hunterlab 公司;

高速落地离心机: Sorvall LYNX6000 型,德国 Thermo 公司;

低场核磁共振分析仪: MesoMR23-060V-I 型,苏州纽迈分析仪器股份有限公司;

真空干燥箱: DZF-6020 型,上海森信实验仪器有限公司;

扫描电子显微镜: su1510 型,日本日立株式会社。

1.2 方法

1.2.1 鸭血豆腐工艺流程

鸭血抗凝→加入盐溶液,调节 pH 至中性→添加 TG→抽气→40℃保温→促凝→蒸煮→冷却→贮藏^{[4]15}

1.2.2 操作要点

(1) 鸭血抗凝:选取柠檬酸钠为抗凝剂,每 50 mL 鲜鸭血中加入 1% 抗凝剂 50 mL 后搅拌均匀。

(2) 抽气:将全血置于真空干燥箱中,40℃、真空度 0.08 MPa 抽 10 min。

(3) 促凝:选取氯化钙为凝固剂,每 15 mL 鸭血与抗凝剂的混合液中加入 1% 的凝固剂 1 mL。

(4) 保温:谷氨酰胺转氨酶的最适温度范围是 40~45℃。王芳等^[5]将谷氨酰胺转氨酶于 40℃ 条件下保温,探究加酶量等因素对猪血浆蛋白凝胶特性的影响,故本研究选定酶作用温度为 40℃。

(5) 蒸煮、冷却:90℃ 水浴加热 30 min 后立刻放入冰水混合物中冷却至室温,然后置于 4℃ 下保存过夜。

1.2.3 单因素试验

(1) 酶添加量对鸭血豆腐品质的影响:取 40 mL 鸭血混合液 6 份,在保温时间 40 min 的条件下,按质量比分别添加 0.00%,0.10%,0.15%,0.20%,0.25%,0.30% 的 TG,进行质构、色差、持水力、蒸煮损失的测定,比较酶添加量对鸭血豆腐品质的影响。

(2) 保温时间对鸭血豆腐品质的影响:取 40 mL 鸭血混合液 6 份,添加 0.20% TG,分别在 40℃ 下保温 0,20,40,60 min,进行质构、色差、持水力、蒸煮损失的测定,比较保温时间对鸭血豆腐品质的影响。

1.2.4 酶处理条件优化 根据单因素试验结果,进一步采用正交试验方案进行优化。以蒸煮损失率为指标,确定酶量和保温时间的最优参数组合。

1.2.5 持水力测定 称取 1.000 0 g 鸭血豆腐置于 2 mL

离心管中,于 4℃、10 000×g 离心 15 min,取出后先用移液枪吸去上层水分,再用滤纸擦拭表面水分,记录离心管的总质量。按式(1)计算持水力:

$$WHC = \left(1 - \frac{W_2 - W}{W_1 - W}\right) \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

WHC——持水力,%;

W——空离心管的重量,g;

W₁——为离心前离心管+鸭血豆腐的重量,g;

W₂——去除离心水分后离心管+鸭血豆腐的重量,g。

1.2.6 蒸煮损失测定 根据文献[6],修改如下:称取蒸煮前鸭血豆腐的质量记为 m₁,于自封袋中封口,沸水蒸煮 5 min 后捞出冷却,蒸煮后鸭血豆腐的质量记为 m₂,按式(2)计算蒸煮损失率。

$$\omega = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

ω——蒸煮损失率,%;

m₁——蒸煮前的质量,g;

m₂——蒸煮后的质量,g。

1.2.7 全质构(TPA)测定 将 Φ 15 mm×8 mm 的圆柱体样品放于物性仪载物台,采用 TPA 模式对样品进行二次压缩。参数设定:探头型号 P/35,测前速率 2.0 mm/s,测中速度 1.0 mm/s,返回速率 5.0 mm/s,两次下压之间间隔 5 s,压缩比 50%,触发力 Auto-5 g,每组样品重复测定 5 次。

1.2.8 红度测定 根据文献[7],采用标准测色仪测定鱼糜凝胶的亮度 L*,红度 a*,黄度 b* 值。

1.2.9 横向弛豫时间(T₂)测定及弛豫数据反演 选用 CPMG 序列测定鸭血豆腐凝胶的横向弛豫时间 T₂。切取 1~2 g 块状样品,处理后放入核磁共振仪中 25 mm 的直径核磁管并进行分析。测试参数设置:质子共振频率为 21 MHz,30℃ 下测量。

1.2.10 微观结构分析 根据文献[8],修改如下:将鸭血豆腐样品切成规格为 4 mm×4 mm×4 mm 的立方体,在 pH 7.2、体积分数 2.5% 的戊二醛中进行前固定,再用 pH 7.2、0.1 mol/L 的磷酸缓冲液洗涤 3 次,每次间隔 30 min;然后分别用 30%,50%,70%,80%,90% 的乙醇进行梯度脱水 3 次,每次 15 min;接着用无水乙醇脱水 3 次,每次持续 15 min。将处理后的样品置于 -20℃ 预冷的真空冷冻干燥机中干燥 27~28 h,喷金处理后用扫描电子显微镜进行冻干鸭血豆腐的微观结构观察。

1.2.11 数据处理与分析 通过软件 SPSS 19.0 的单因素方差分析和 LSD 后特设测试(最小显著差异)对数据进行统计分析,采用 Excel、Origin 进行图表处理。

2 结果与分析

2.1 单因素试验条件优化

2.1.1 TG添加量对鸭血豆腐品质的影响

(1) 持水力和蒸煮损失:持水性是反映蛋白凝胶稳定性的重要参数^[9]。蒸煮损失主要损失的是水,因此持水性较高的样品蒸煮损失率相应较低。由表1可知,0.10%~0.15% TG时,持水性下降,0.20%~0.30% TG时持水性改善最佳。这是因为TG促进蛋白质分子内或分子间的交联形成牢固的凝胶网络结构,截留了大量的水,从而提高了鸭血豆腐持水性。但继续添加TG,持水性变化不大,可能是蛋白质浓度是固定的,TG浓度增加的同时底物浓度并未随之增加,因此无法促进更多的蛋白质发生交联,截留的水分含量也就变化极微。

(2) 全质构:不同添加量的TG能够影响鸭血豆腐的质构特性,其对硬度、弹性、内聚性、回复性的影响不显著;但胶着性却随着酶添加量的增加而显著增加(表2, $P<0.05$),在添加量0.25%时达到最高值691.99,较空白

组增加了57.40%。胶着性是模拟样品破裂成吞咽状态时所需要的能量,它反映的是分子间结合作用的强弱或者样品在抵抗外界损坏时保留自身完整性的能力,该数值的上升说明TG的存在促进了血浆蛋白之间的交联,赋予鸭血豆腐更好的韧性。因此添加0.25% TG的鸭血豆腐在运输过程中更能经受外界的损坏。

表1 TG添加量对鸭血豆腐持水力和蒸煮损失的影响[†]

Table 1 Effects of TG dosage on WHC and stewing loss of duck blood tofu %

TG添加量	持水力	蒸煮损失率
0.00	73.00±5.00	12.43±0.66
0.10	70.97±5.20	10.93±1.29
0.15	71.50±1.65	13.20±1.58
0.20	82.95±5.45*	10.18±0.82
0.25	81.74±2.08*	10.06±1.05
0.30	82.70±2.98*	11.81±1.47

† *表示与空白组比较, $P<0.05$ 。

表2 TG添加量对鸭血豆腐全质构的影响[†]

Table 2 Effects of TG dosage on the texture of duck blood tofu

TG添加量/%	硬度/g	弹性	内聚性	胶着性	回复性
0.00	534.10±53.79	0.96±0.05	0.82±0.03	439.62±38.47	0.35±0.01
0.10	660.27±73.51	0.94±0.04	0.84±0.02	552.44±86.67*	0.39±0.02
0.15	709.93±138.40	0.97±0.03	0.83±0.02	587.64±88.10*	0.38±0.05
0.20	764.65±112.66	0.96±0.01	0.83±0.04	633.42±73.04*	0.38±0.04
0.25	839.44±92.74	0.94±0.03	0.83±0.03	691.99±59.79*	0.36±0.04
0.30	529.02±104.65	0.97±0.01	0.83±0.09	441.09±89.38	0.38±0.01

† *表示与空白组比较, $P<0.05$ 。

(3) 色度: L^* 和 a^* 对人的感官影响更为密切,应当作为评价鸭血豆腐品质的主要参考指标^{[4]36}。由表3可知,添加TG后红度显著增加,添加量在0.15%以后红度值趋于稳定,因此添加TG能够有效改善鸭血豆腐颜色暗沉的情况。

硬度与样品的保水性等相关,内聚性反映鸭血豆腐

表3 TG添加量对鸭血豆腐色度的影响[†]

Table 3 Effects of TG dosage on the color parameters of duck blood tofu

TG添加量/%	L^*	a^*	b^*
0.00	40.96±2.02	5.31±1.78	7.03±1.35
0.10	43.16±1.42*	8.04±0.56*	8.13±0.91
0.15	41.51±0.34	10.66±0.61*	9.80±0.66*
0.20	40.76±0.26	10.22±0.14*	9.04±0.12
0.25	41.03±0.57	10.55±0.19*	9.48±0.29
0.30	41.14±0.54	10.41±0.22*	9.22±0.33

† *表示与空白组比较, $P<0.05$ 。

的完整性、韧性,是质构测定时的重要参数。TG添加量0.25%时,鸭血豆腐质构特性最好,色泽暗沉的问题也得以改善,该水平下的鸭血豆腐持水力优于空白,因此选择0.25%作为最佳酶处理量。

2.1.2 保温时间对鸭血豆腐品质的影响

(1) 持水力和蒸煮损失:由表4可知,持水性和蒸煮损失率的变化趋势基本保持一致,二者在40 min前呈上升趋势,继续保温至60 min时反而有所下降,但差异性不

表4 TG保温时间对鸭血豆腐持水力和蒸煮损失的影响

Table 4 Effects of holding time on WHC and stewing loss of duck blood tofu

保温时间/min	持水性/%	蒸煮损失率/%
0	77.54±5.20	12.43±0.66
20	80.54±5.37	9.02±1.48
40	79.48±1.45	9.74±1.81
60	75.78±6.45	13.21±1.72

显著($P>0.05$)。说明保温时间对鸭血豆腐持水力和蒸煮损失率的影响不大。

(2) 全质构:由表 5 可知,与空白组相比,不同保温时间下的鸭血豆腐在弹性、胶着性、内聚性、回复性 4 个指标上并无显著差异($P>0.05$),说明在添加相同量谷氨酰胺转氨酶的情况下,保温时间的改变对鸭血豆腐弹性、胶着性、内聚性、回复性的影响不大。但硬度随保温时间延

长而增大,40 min 时达到最大值(869.70),40 min 以后又出现回落,可能是保温时间过长导致已经完成交联的蛋白质凝胶劣化,因此硬度有所下降。

(3) 色度:由表 6 可知,试验组鸭血豆腐的红度均显著高于空白组($P<0.05$)。添加 0.20% TG 于 40 °C 保温条件下,红度 a^* 在 40 min 左右达到最大值(10.22),此时色泽是最好的。

表 5 保温时间对鸭血豆腐全质构的影响[†]

Table 5 Effects of holding time on the texture of duck blood tofu

保温时间/min	硬度/g	弹性	内聚性	胶着性	回复性
0	534.10±53.79	0.96±0.05	0.82±0.03	439.62±38.47	0.35±0.01
20	758.71±59.32	0.91±0.05	0.85±0.01	645.61±56.07	0.38±0.02
40	869.70±125.69*	0.91±0.16	0.87±0.04	659.75±99.54	0.40±0.08
60	833.05±49.42*	0.97±0.02	0.84±0.02	688.17±51.87	0.34±0.04

† *表示与空白组比较, $P<0.05$ 。

表 6 保温时间对鸭血豆腐色度的影响[†]

Table 6 Effects of holding time on the color parameters of duck blood tofu

保温时间/min	L^*	a^*	b^*
0	40.96±2.02	5.31±1.78	7.03±1.35
20	36.89±2.32	8.70±1.42*	7.53±0.89*
40	40.76±0.26	10.22±0.14*	9.04±0.12*
60	35.96±3.00	8.87±1.42*	5.60±0.91*

† *表示与空白组比较, $P<0.05$ 。

根据硬度和色度的相关指标,保温 40 min 的鸭血豆腐产品质量优于其他试验组,因此保温时间选择 40 min 为宜。

2.2 酶处理条件的正交优化

2.2.1 正交优化试验 为进一步优化加酶处理鸭血豆腐的生产工艺,根据单因素试验结果,选择加酶量、保温时间做两因素三水平正交试验(表 7)。分析正交处理鸭血后所得产品的蒸煮损失率,从而进一步确定最佳酶处理方式。试验设计及结果见表 8。由表 8 可知,因素影响的主次关系为加酶量>保温时间,最优组合为 A_2B_1 ,即添加 0.25% TG,40 °C 下保温 30 min。

2.2.2 最佳组合的验证实验

(1) 弛豫时间与水分分布:低场核磁测试作为一种新型的无损检测方法可以监测食品中的水分状态和移动情

表 7 正交因素水平

Table 7 Factors and levels of the orthogonal test

水平	A 加酶量/%	B 保温时间/min
1	0.20	30
2	0.25	40
3	0.30	50

表 8 正交试验设计与结果

Table 8 Design and result of orthogonal test

试验号	A	B	蒸煮损失率/%
1	1	1	8.58±2.41
2	1	2	8.31±1.84
3	1	3	8.71±0.87
4	2	1	8.99±1.81
5	2	2	7.21±1.21
6	2	3	8.90±1.52
7	3	1	7.67±1.12
8	3	2	9.88±2.81
9	3	3	9.53±1.02

K_1	8.53	8.41	
K_2	8.37	8.47	
K_3	9.03	8.81	
R	0.73	0.40	

况,为提高产品的稳定性提供了有力的保证^[10]。由表 9 可知,不同处理方式的鸭血豆腐凝胶在 1~10 000 ms 内 T_2 分布出现了 4 个峰,这 4 个峰代表了 4 个组分, T_{21} (<1 ms)、 T_{22} (<10 ms)是最难迁移的水,即与大分子紧密结合的水,根据蛋白结合水性质的微弱不同可以分为结构结合水和吸附结合水, T_{23} 是滞留于凝胶网络结构中不易移动的水, T_{24} 为鸭血凝胶中的自由水。

T_2 弛豫时间是对样品内部氢质子所处化学环境的反映,它与氢质子所受束缚力大小及其自由度有关。当氢质子所受束缚越大或自由度越小,则 T_2 弛豫时间越短,在 T_2 谱上峰出现的位置越靠左;反之 T_2 弛豫时间越长,峰位置则越靠右^[11]。试验组鸭血凝胶 T_{23} 弛豫时间整体较空白组向左迁移,这说明添加 TG 酶处理后鸭血豆腐内

表 9 处理方式对鸭血凝胶弛豫时间的影响[†]

Table 9 Effects of different approaches on relaxation time of duck blood gel ms

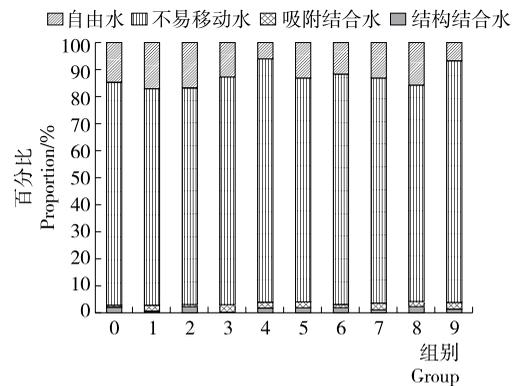
组别	T_{21}	T_{22}	T_{23}	T_{24}
未添加 TG 未保温	0.56±0.03	4.64±0.43	49.77±0.00	1 002.43±80.63
0.20% TG+30 min	0.25±0.03	3.05±1.73	37.65±0.00*	811.13±0.00*
0.20% TG+40 min	0.75±0.20	4.33±2.47	37.65±0.00*	811.13±0.00*
0.20% TG+50 min	0.44±0.08	1.61±0.25	54.74±4.30	811.13±0.00*
0.25% TG+30 min	0.31±0.11	2.24±0.46	43.29±0.00*	811.13±0.00*
0.25% TG+40 min	0.35±0.05	2.02±0.28	43.29±0.00*	811.13±0.00*
0.25% TG+50 min	0.57±0.16	4.64±1.98	43.29±0.00*	811.13±0.00*
0.30% TG+30 min	0.27±0.11	3.07±1.56	43.29±0.00*	811.13±0.00*
0.30% TG+40 min	0.37±0.06	2.37±0.65	37.65±0.00*	811.13±0.00*
0.30% TG+50 min	0.55±0.10	1.91±0.68	62.93±5.81	811.13±0.00*

[†] * 表示与空白组比较, P<0.05。

部的水分受到的束缚力增加,其中加入 TG 酶处理使 T_{23} 和 T_{24} 明显降低,这表明不易流动水分子和自由水的移动性显著降低,从而证明谷氨酰胺转氨酶的加入促使水分结合地更紧密。

鸭血凝胶保水性主要取决于不易移动水。鸭血豆腐保水性的变化也正是因为自由水减少、结合水上升所引起的。这可能是交联过程中蛋白质的亲水基团暴露,使自由水转化为不易移动水。如图 1 所示,0.25% TG+40 °C 下保温处理 30 min 的鸭血豆腐中自由水含量减少,结合水与不易移动水占比增加最为显著。这是因为 TG 酶增加了蛋白之间的交联,形成致密的网络结构,包含更多的水分,因此鸭血豆腐品质也是最优的。

(2) 全质构测定:由表 10 可知,第 4 组(0.25% TG+30 min)鸭血豆腐内聚性和回复性分别为 0.90 和 0.42,均达到最高水平,说明添加 0.25% TG,保温 30 min 促进了蛋白交联,但又不至于过分交联导致鸭血豆腐韧性过大,



0. 未添加 TG 未保温 1. 0.20% TG+30 min 2. 0.20% TG+40 min 3. 0.20% TG+50 min 4. 0.25% TG+30 min 5. 0.25% TG+40 min 6. 0.25% TG+50 min 7. 0.30% TG+30 min 8. 0.30% TG+40 min 9. 0.30% TG+50 min

图 1 处理方式对各峰面积百分数的影响

Figure 1 Effects of different methods on proportion of various peak areas

表 10 处理方式对鸭血豆腐全质构的影响[†]

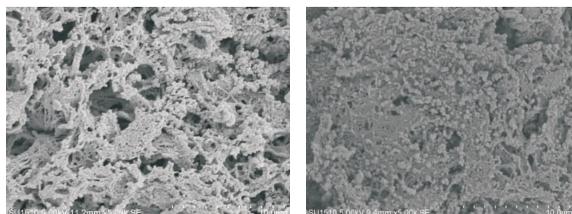
Table 10 Effects of different approaches on the texture of duck blood curd

组别	硬度/g	弹性	内聚性	胶着性	回复性
未添加 TG 未保温	935.36±41.11	0.96±0.01	0.82±0.01	764.14±24.90	0.28±0.01
0.20% TG+30 min	1 224.50±152.18	0.98±0.03	0.86±0.01	1 048.23±103.89*	0.38±0.02*
0.20% TG+40 min	1 091.29±136.46	0.99±0.02	0.87±0.01	946.17±17.42*	0.37±0.04*
0.20% TG+50 min	1 268.27±40.68	0.97±0.04	0.85±0.02	1 080.49±150.89*	0.35±0.01
0.25% TG+30 min	953.95±138.37	0.98±0.03	0.90±0.03*	853.14±82.69	0.42±0.04*
0.25% TG+40 min	1 439.83±141.78	0.96±0.03	0.86±0.03	1 225.08±100.49*	0.34±0.01
0.25% TG+50 min	856.34±132.58	0.99±0.01	0.87±0.01	748.76±74.46	0.40±0.02*
0.30% TG+30 min	1 267.51±155.61	0.97±0.02	0.87±0.01	1 107.14±107.57*	0.35±0.03
0.30% TG+40 min	825.09±97.89	0.98±0.01	0.84±0.01	1 129.21±52.29*	0.31±0.01
0.30% TG+50 min	743.15±184.14	0.97±0.04	0.85±0.06	703.30±68.72*	0.40±0.08*

[†] * 表示与空白组比较, P<0.05。

因此该处理方式下的鸭血豆腐的品质优于其他组。

(3) 微观结构: 较强凝胶强度形成的原因是存在规则的结构。由图 2 可以观察到天然状态下形成的鸭血凝胶体系是由纤维蛋白形成的错综复杂的网状结构, 孔径较大、杂乱无章, 水分容易渗漏。这种粗糙、不规则的网状结构会导致不理想的硬度、口感。加入 0.25% TG、40 °C 下保温 30 min 的鸭血凝胶中蛋白质交联、堆积在自身凝胶体系中, 形成更均一、紧密的网络结构, 该凝胶结构网孔变小, 能够有效包合水分, 防止鸭血豆腐脱水皱缩^[12], 也赋予产品较好的可塑性。



(a) 空白组 (b) 0.25% TG+40 °C 保温 30 min
图 2 鸭血豆腐的扫描电镜图

Figure 2 Scanning electron micrographs of duck blood curd by different methods (×5 000)

3 结论

利用单因素试验研究了加酶量、保温时间对鸭血豆腐的质构、颜色、持水性等指标的影响, 通过两因素三水平正交试验对条件进行优化, 确定最佳的酶处理方式: 添加 0.25% TG 并在 40 °C 下保温 30 min。利用此优化条件进行实验验证, 最终所得鸭血豆腐的持水性提高、胶着性、内聚性等质构特性得到明显改善。食用胶具有改善蛋白热诱导凝胶的特性, 后续可进一步探究谷氨酰胺转氨酶与食用胶复配对鸭血豆腐品质的影响。

参考文献

[1] 李鹏, 王宝维, 孙京新. 超声波处理对鸭血豆腐品质的影响[J]. 肉类工业, 2017(6): 30-33.
 [2] 郑亚美, 王宇, 尚永彪. 酶法制备猪血热诱导凝胶的配方优化[J]. 食品科学, 2013, 34(22): 322-326.
 [3] LI Qing-chen, GUI Ping, HUANG Zhan, 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.
 [4] 陈菲. 鸭血豆腐加工工艺优化及品质改善技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
 [5] 王芳, 贾万利, 李会珍. 谷氨酰胺转氨酶对猪血浆蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2013(8): 52-56.
 [6] ROHRER G A, NONNEMAN D J, MILLER R K, et al. Association of single nucleotide polymorphism (SNP)

markers in candidate genes and QTL regions with pork quality traits in commercial pigs[J]. Meat Science, 2012, 92(4): 511-518.

[7] 杨明, 文勇立, 王建文, 等. 牦牛与黄牛背长肌与肱二头肌宰后色差变化及差异性分析[J]. 食品科学, 2009, 30(19): 104-108.
 [8] WANG Peng, XU Xing-lian, HUANG Ming, et al. Effect of pH on heat-induced gelation of duck blood plasma protein[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 35(1): 324-331.
 [9] MAJUMDAR R K, SAHA A, DHAR B, et al. Effect of garlic extract on physical, oxidative and microbial changes during refrigerated storage of restructured product from Thai pangas (pangasianodon hypophthalmus) surimi[J]. Journal of Food Science & Technology, 2015, 52(12): 7 994-8 003.
 [10] HAN Min-yi, ZHANG Ying-jun, FEI Ying, et al. Effect of microbial transglutaminase on NMR relaxometry and microstructure of pork myofibrillar protein gel[J]. European Food Research & Technology, 2009, 228(4): 665-670.
 [11] 李银, 李侠, 张春晖, 等. 利用低场核磁共振技术测定肌原纤维蛋白凝胶的保水性及其水分含量[J]. 现代食品科技, 2013(11): 2 777-2 781.
 [12] 杨雪松, 孙杨赢, 潘道东, 等. 阿拉伯胶、瓜尔豆胶复配对鸭血凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(5): 26-32.

(上接第 156 页)

[18] 孙庆雷, 王晓, 刘建华, 等. 黄酮类化合物抗氧化反应性的构效关系[J]. 食品科学, 2005, 26(4): 69-73.
 [19] 李会军, 李萍, 张重义, 等. 金银花中药提取物清除自由基的作用[J]. 中国药科大学学报, 2002, 33(6): 496-498.
 [20] RYSMAN T, UTRERA M, MORCUENDE D. Apple phenolics as inhibitors of the carbonylation pathway during in vitro metalcatalyzed oxidation of myofibrillar proteins[J]. Food Chemistry, 2016, 211: 784-790.
 [21] 卢娟芳, 刘盛雨, 芦旺, 等. 不同类型桃果肉酚类物质及抗氧化活性分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(16): 3 205-3 214.
 [22] 孙建平, 张文娜, 段长青. 葡萄酒中酚类物质抗氧化活性及构效关系[J]. 中国食品工业, 2005(10): 54-55.
 [23] 孟江飞, 杨学威, 房玉林, 等. 不同采收期对梅尔诺葡萄和葡萄酒酚类物质及抗氧化活性的影响[J]. 中国食品学报, 2012, 12(10): 155-162.
 [24] 张国栋, 胡博然. 不同发酵工艺对红葡萄酒酚类物质和抗氧化性的影响[J]. 食品科技, 2015(2): 56-60.
 [25] 宋建强, 梁海忠, 姜文广, 等. 果穗日光暴露对葡萄酒酚类物质和感官品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(4): 137-141.