

γ -聚谷氨酸对鸡肉糜凝胶特性的影响

白登荣¹, 温佳佳¹, 贺雪华¹, 尚永彪^{1,2,3,*}

(1.西南大学食品科学学院, 重庆 400715; 2.农业部农产品贮藏保鲜质量安全评估实验室(重庆), 重庆 400715;
3.重庆市特色食品工程技术研究中心, 重庆 400715)

摘要:以鸡胸肉为原料,制备鸡肉糜凝胶,研究不同添加量的 γ -聚谷氨酸(γ -polyglutamic acid, γ -PGA)在不同NaCl添加量条件下对鸡肉糜凝胶特性的影响。研究表明:单独添加0.9‰的 γ -PGA可以显著降低鸡肉糜凝胶蒸煮损失率,提高凝胶强度和保水性,明显改善凝胶的硬度、弹性、内聚性和咀嚼性,对鸡肉糜凝胶白度值影响较小。在一定NaCl添加量条件下, γ -PGA对鸡肉糜凝胶特性的改善作用更为明显,且在NaCl添加量为3.0%、 γ -PGA添加量为0.6‰时,鸡肉糜凝胶蒸煮损失率最小,保水性、凝胶强度、硬度、弹性、内聚性和咀嚼性都达到最大值;在NaCl添加量为3.0%、 γ -PGA添加量为1.2‰时鸡肉糜凝胶白度值最小。流变学曲线变化表明, γ -PGA能够提高凝胶的形成能力。通过十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳研究发现, γ -PGA与蛋白质分子间有一定的交联作用。

关键词: γ -聚谷氨酸;鸡肉糜;凝胶特性;蒸煮损失率

Effect of γ -Polyglutamic Acid on Gelation Properties of Minced Chicken Breast Meat

BAI Dengrong¹, WEN Jiajia¹, HE Xuehua¹, SHANG Yongbiao^{1,2,3,*}

(1. College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Laboratory of Quality and Safety Risk Assessment for Agro-Products on Storage and Preservation (Chongqing), Ministry of Agriculture, Chongqing 400715, China;
3. Chongqing Engineering Research Center for Special Foods, Chongqing 400715, China)

Abstract: In this study, the effect of γ -polyglutamic acid and NaCl on gelation properties of minced chicken breast meat was investigated. The results showed that the addition of 0.9‰ γ -polyglutamic acid alone could significantly reduce the cooking loss rate, increase the gel strength and water-holding capacity, and significantly improve the hardness, springiness, chewiness and cohesiveness of chicken meat gels, but it had little effect on the whiteness of the gels. The effect of γ -polyglutamic acid on gelation properties of chicken breast muscle was enhanced by the addition of a certain amount of NaCl. The addition of both 3.0% NaCl and 0.6‰ γ -polyglutamic acid resulted in the smallest cooking loss rate and highest water-holding capacity, gel strength, hardness, springiness, chewiness and cohesiveness of chicken breast meat gels. The whiteness of the gels was the smallest when the addition of NaCl and γ -polyglutamic acid were 3.0% and 1.2‰. Rheological curves showed that γ -polyglutamic acid could improve the gel-forming capacity of chicken breast meat proteins. Sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) studies indicated that γ -polyglutamic acid and myofibrillar proteins were cross-linked with each other.

Key words: γ -polyglutamic acid; minced chicken; gelation properties; cooking loss rate

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201715026

中图分类号: TS251.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2017)15-0158-07

引文格式:

白登荣, 温佳佳, 贺雪华, 等. γ -聚谷氨酸对鸡肉糜凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(15): 158-164. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201715026. <http://www.spkx.net.cn>

BAI Dengrong, WEN Jiajia, HE Xuehua, et al. Effect of γ -polyglutamic acid on gelation properties of minced chicken breast meat[J]. Food Science, 2017, 38(15): 158-164. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201715026. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2017-01-15

基金项目: 四川省科技支撑计划项目; 肉鸡特色产品精深加工关键技术研究产业化示范项目(2016NZ0003-05)

作者简介: 白登荣(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为食品质量与安全控制。E-mail: 1689614879@qq.com

*通信作者: 尚永彪(1964—), 男, 教授, 博士, 研究方向为农产品加工。E-mail: shangyb64@sina.com

目前常见的肉糜制品种类繁多,但以鱼肉糜和猪肉糜等为主^[1]。鸡肉蛋白质含量高、种类多、脂肪含量低,且所含的脂肪多为不饱和脂肪酸,因此深受消费者的青睐^[2]。肉糜凝胶的形成过程实质上是蛋白质变性展开和聚集成大分子凝胶体的过程^[3-5]。肉糜的凝胶特性决定了肉糜类制品的质地、组织状态、外观和出品率,且受众多因素的影响^[5]。由于鸡肉肌原纤维蛋白的凝胶弹性较差,且其肉糜加工制品保水性和切片性也较差,从而严重限制了鸡肉糜制品的产业化发展^[2]。为了改善鸡肉糜凝胶特性,目前研究较多的是加入添加剂,如谷氨酰胺转氨酶、大豆分离蛋白、食用胶、淀粉、生物保鲜剂和多聚磷酸盐及其他盐类等。此外,如漂洗、斩拌、超高压处理、水浴加热、微波加热及超声波处理等凝胶制备工艺的优化也从很大程度上改善了鸡肉糜的品质。

γ -聚谷氨酸(γ -polyglutamic acid, γ -PGA)是一种水溶性、可生物降解、无毒性的高分子氨基酸聚合物^[6-7]。目前采用的生产方法主要有微生物发酵法、化学合成法、酶转化法和提取法等,微生物发酵法因其工艺简单、成本低、纯度高、产量大而成为工业上普遍采用的生产方法和主流研究方向,一般以芽孢杆菌属的一些细菌作为常用菌种。 γ -PGA具有增稠、凝胶、乳化、成膜、保湿和黏接等功能,正逐渐应用于化妆品、食品加工、农业、医药和环保等领域。大量研究表明, γ -PGA在食品中可作为抗冻剂^[8]、苦味消除剂^[9]、果汁饮料增稠剂和稳定剂、保湿剂等。此外,它还可以增强面团的流变性质和热性质、延缓面团的老化、改善面团质地^[10-11]、减少煎炸食品中油的吸收^[12]以及促进矿物质吸收^[13-14]等, γ -PGA诸多独特的优良性质使其备受关注,但是目前关于 γ -PGA对肉糜类制品品质影响的研究尚不多见。实验以冷冻鸡胸肉为原料,主要研究不同添加量的 γ -PGA在不同NaCl水平条件下对鸡肉糜凝胶品质特性及流变学性质的影响,并通过十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳(sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis, SDS-PAGE)研究 γ -PGA对蛋白质的影响,以期 γ -PGA在“低盐化”肉制品中的应用及解决鸡肉糜凝胶特性差等问题提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鸡胸肉购于重庆北碚永辉超市, -18℃冷冻备用。

γ -PGA(食品级) 南京轩凯生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

HH-6数显恒温水浴锅 金坛市富华仪器有限公司;
CT-3质构分析仪 美国Brookfield公司; UltraScan PRO
测色仪 美国HunterLab公司; 电子分析天平 赛多

利斯科学仪器有限公司; RZ-288c搅肉机 美的集团;
DW-25W518冰箱 青岛海尔电器有限公司; 5810型台式高速离心机 德国Eppendorf公司; PHS-4C⁺酸度计成都世纪方舟科技有限公司; HR-1流变仪 美国TA公司; Mini-PROTEAN[®]电泳槽 美国Bio-Rad公司。

1.3 方法

1.3.1 鸡肉糜凝胶的制备

将冷冻鸡胸肉在4℃条件下解冻12 h后剔除可见脂肪和结缔组织,切丁,分别加入不同添加量的NaCl(0.0%、1.5%、2.0%、2.5%、3.0%)搅拌均匀,斩拌2 min,静置1.5 min;再加入10%冰水和不同添加量的 γ -PGA(0.0‰、0.3‰、0.6‰、0.9‰、1.2‰),斩拌10 min,取一定质量生肉糜充填于50 mL离心管中,1 500 r/min离心10 min后称其总质量记为 m ,然后在40℃水中保温30 min,80℃水中保温20 min,迅速冷却,4℃条件下静置过夜后进行凝胶相关特性测定。

1.3.2 蒸煮损失率的测定

将离心管从冰箱中取出,室温条件下平衡30 min,然后将肉糜凝胶从离心管中取出,用柔软纸巾吸去离心管和肉糜制品表面的水分,蒸煮损失率计算公式如式(1)所示。

$$\text{蒸煮损失率}/\% = \frac{m - m_1 - m_2}{m - m_1} \times 100 \quad (1)$$

式中: m 为离心管和生肉糜质量/g; m_1 为离心管质量/g; m_2 为去水后的鸡肉糜凝胶质量/g。

1.3.3 保水性的测定

保水性(water-holding capacity, WHC)的测定参照Kocher等^[15]的方法并稍作修改。将制备好的凝胶在室温条件下平衡30 min,然后取一定量鸡肉糜凝胶样品称质量记为 m_1 ,置于内有多层滤纸的50 mL离心管中,在4℃条件下以5 000 r/min离心15 min,除去滤纸称质量,记为 m_2 。保水性计算公式如式(2)所示。

$$\text{保水性}/\% = \frac{m_2}{m_1} \times 100 \quad (2)$$

式中: m_1 为离心前样品质量/g; m_2 为离心后样品质量/g。

1.3.4 白度的测定

采用UltraScan PRO色差仪进行凝胶白度分析,色差仪先用白、黑板校正,然后将样品垂直紧扣在镜口,测定并记录 L^* (亮度)、 a^* (红度)、 b^* (黄度),所有样品做3次平行实验,每个样品取3个点进行测定,每个点重复3次,结果取平均值,白度值计算公式如式(3)所示。

$$\text{白度值} = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad (3)$$

1.3.5 凝胶强度的测定

参考吴润峰等^[16]的方法并稍作修改。将凝胶切分成1 cm厚的规则圆柱体,用CT-3质构分析仪进行测定。测定参数设置如下:目标值:50%;触发点负载:5 g;测试速率:1.00 mm/s;返回速率:1 mm/s;循环次数:1.0;探头:TA10。

1.3.6 质构分析

参考徐谓等^[17]的方法并稍作修改。将凝胶切分成1 cm厚的规则圆柱体用CT-3质构分析仪进行质构分析。测定参数设置如下:目标值:50%;触发点负载:5 g;测试速率:1.00 mm/s;返回速率:1 mm/s;循环次数:2.0;探头:TA44。

1.3.7 流变学性质的测定

参考Westphalen等^[18]的方法并适当修改。取一定质量的生肉糜加入2.5% NaCl搅拌均匀,斩拌2 min,静置1.5 min;再加入10%的冰水和不同添加量的 γ -PGA(0.0‰、0.3‰、0.6‰、0.9‰、1.2‰),充分搅拌后在4℃条件下静置4 h,进行流变学性质测定。流变仪具体参数设置如下:夹具40 mm,振荡频率1 Hz,应变0.002 5,狭缝宽度1.0 mm;以1℃/min的速率对样品从20~85℃进行扫描,并在85℃保持3 min。

1.3.8 肌原纤维蛋白的提取

参考Xiong Youling L.^[19]的方法并稍作修改。取一定量的鸡肉糜加入4倍体积0.05 mol/L磷酸盐缓冲溶液(0.1 mol/L NaCl、5 mmol/L乙二胺四乙酸(ethylenediaminetetraacetic acid, EDTA), pH 7.0), 10 000 r/min高速匀浆60 s后冷冻离心(4℃、5 500 r/min) 15 min,弃去上清液,将所得沉淀按上述步骤重复提取两次,然后将所得沉淀与4倍体积0.1 mol/L NaCl溶液(pH 6.25)混合,6 000 r/min高速匀浆30 s,4℃、5 500 r/min离心15 min,将所得沉淀与8倍体积0.1 mol/L NaCl溶液(pH 6.25)混合,过滤、去除结缔组织,4℃、5 500 r/min离心15 min后所得沉淀即为肌原纤维蛋白,用双缩脲法测定蛋白含量。

1.3.9 肌原纤维蛋白SDS-PAGE分析

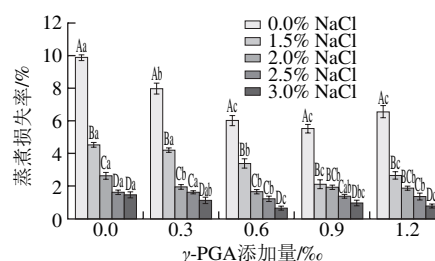
参考Laemmli^[20]的方法进行SDS-PAGE测定。取一定量的肌原纤维蛋白分别用0.3、0.4、0.5、0.6 mol/L NaCl溶液(pH 7.0)配制成蛋白质质量浓度为1 mg/mL的溶液,加入不同添加量的 γ -PGA混匀,4℃静置4 h后进行电泳样品的制备。分离胶为12%,浓缩胶为5%,电泳开始时先采用恒定电流15 mA,待样品进入分离胶后将电流调节至25 mA。

1.4 数据处理

所有实验重复3次,采用Excel 2016和Origin软件对数据进行处理及绘图,用SPSS Statistics 17.0软件对数据进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 γ -PGA添加量对鸡肉糜凝胶蒸煮损失率的影响



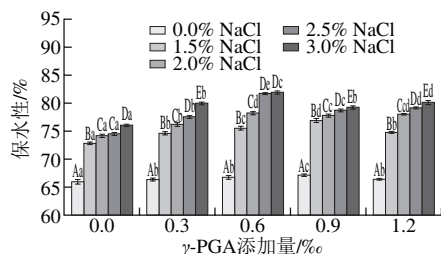
小写字母不同表示同一NaCl添加量下,不同 γ -PGA添加量之间差异显著($P<0.05$);大写字母不同表示同一 γ -PGA添加量下,不同NaCl添加量之间差异显著($P<0.05$)。下同。

图1 γ -PGA添加量对鸡肉糜凝胶蒸煮损失率的影响

Fig. 1 Effect of γ -polyglutamic acid content on cooking loss of chicken breast meat gels

由图1可知,当NaCl添加量为0.0%~1.5%时,在同一NaCl添加水平下,鸡肉糜凝胶蒸煮损失率随着 γ -PGA添加量的增加呈先下降后上升的趋势,在 γ -PGA添加量为0.9‰时鸡肉糜凝胶蒸煮损失率最小,在 γ -PGA添加量为1.2‰时蒸煮损失率有所上升,但较0.9‰时变化都不显著($P>0.05$);与空白对照组相比(未添加NaCl和 γ -PGA),单独添加0.9‰的 γ -PGA使蒸煮损失率显著减少了4.35%($P<0.05$),这可能是因为 γ -PGA侧链上存在的大量羧基使得分子链的空间伸展较大,从而阻碍了水分的蒸出^[21];当NaCl添加量为2.0%~3.0%时,在同一NaCl添加水平下,鸡肉糜凝胶蒸煮损失率随着 γ -PGA添加量的增加呈先下降后上升再下降的趋势,在 γ -PGA添加量为0‰~0.6‰时鸡肉糜凝胶蒸煮损失率逐渐减少,在 γ -PGA添加量为0.9‰和1.2‰时蒸煮损失率虽然有所变化,但较0.6‰时变化都不显著($P>0.05$)。

在同一 γ -PGA添加水平下,鸡肉糜凝胶蒸煮损失率随着NaCl添加量的增加逐渐减小,当 γ -PGA添加量在0.3‰~1.2‰、NaCl添加量在2.5%~3.0%的范围内增加时,鸡肉糜凝胶蒸煮损失率明显减少($P<0.05$)。与空白对照组相比,单独添加3.0%的NaCl时鸡肉糜凝胶蒸煮损失率最低,孟祥忍等^[22]通过研究食盐添加量对鸡肉蒸煮损失率的影响发现,食盐添加量在0.0%~3.0%范围内增加时,鸡肉蒸煮损失率明显降低。此外,Jang等^[23]研究指出凝胶蒸煮损失率会随着离子强度的上升而有所下降,这与NaCl添加量对鸡肉糜凝胶蒸煮损失率的影响结果一致。在NaCl添加量为3.0%、 γ -PGA添加量为0.6‰时鸡肉糜凝胶蒸煮损失率最低。与空白对照组相比,单独添加NaCl或在一定NaCl添加量条件下添加 γ -PGA后,鸡肉糜凝胶蒸煮损失率都显著减少($P<0.05$)。

2.2 γ -PGA添加量对鸡肉糜凝胶保水性的影响图2 γ -PGA添加量对鸡肉糜凝胶保水性的影响Fig. 2 Effect of γ -polyglutamic acid content on water-holding capacity of chicken breast meat gels

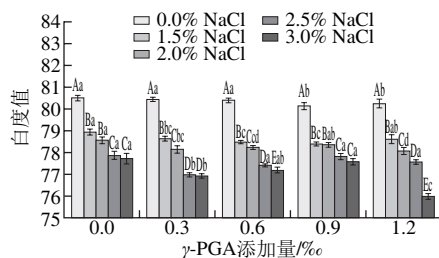
由图2可知, 当NaCl添加量为0.0%~1.5%时, 在同一NaCl添加水平下, 鸡肉糜凝胶保水性随着 γ -PGA添加量的增加呈先上升后下降的趋势, 在 γ -PGA添加量为0.9‰时鸡肉糜凝胶保水性最大, 然而当 γ -PGA添加量进一步增大时凝胶保水性显著下降 ($P<0.05$)。 γ -PGA侧链上存在大量活性较高的游离羧基^[24], 一定添加量的 γ -PGA能使体系中的负电荷增加, 静电斥力也随之增加, 蛋白质分子间的空隙增大, 从而使凝胶保水性提高, 然而 γ -PGA添加量过高时可能会造成蛋白质与水分子之间的相互作用减弱, 导致凝胶保水性能下降; 与空白对照组相比, 单独添加0.9‰的 γ -PGA使保水性显著增加了1.21% ($P<0.05$); 当NaCl添加量为2.0%~3.0%时, 在同一NaCl添加水平下, 鸡肉糜凝胶保水性随着 γ -PGA添加量的增加呈先上升后下降再上升的趋势, 在 γ -PGA添加量为0.6‰~0.9‰时鸡肉糜凝胶保水性下降显著 ($P<0.05$)。

在同一 γ -PGA添加水平下, 鸡肉糜凝胶保水性随着NaCl添加量的增加逐渐增大, 当 γ -PGA添加量在0.3‰~1.2‰、NaCl添加量在0.0%~2.5%的范围内增加时, 鸡肉糜凝胶保水性显著增大 ($P<0.05$), 这与李继红等^[25]的研究结果相似。在NaCl添加量为3.0%、 γ -PGA添加量为0.6‰时鸡肉糜凝胶保水性达到最大值, 与空白对照组相比增加了16.04%。保水性对肉制品的可口性和可接受性起到重要作用, 而肌原纤维蛋白具有特有的保水结构, 在一定范围内提高NaCl添加量可使凝胶的网络结构更均匀、致密^[26], 加之 γ -PGA在受热过程中发生水解, 在内源酶的催化作用下与肌原纤维蛋白之间发生交联使凝胶网络结构变得更加紧密^[27], 从而使更多的水分包埋或被结合在凝胶结构中。

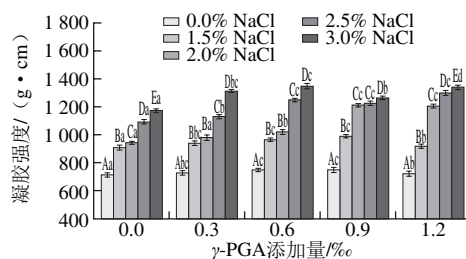
2.3 γ -PGA添加量对鸡肉糜凝胶白度值的影响

由图3可知, 当NaCl添加量为0.0%~1.5%时, 在同一NaCl添加水平下, 鸡肉糜凝胶白度值随着 γ -PGA添加量的增加呈先下降后上升的趋势, 当 γ -PGA添加量在0.0‰~0.9‰的范围内增加时鸡肉糜凝胶白度值逐渐减

小, 这可能是由于 γ -PGA添加量的增加加速了第二阶段加热过程中的Maillard反应^[28], 有色物质的生成使其凝胶白度值下降, 然而当 γ -PGA添加量为1.2‰时白度值有所上升, 这可能是因为此时的凝胶样品与其他实验组相比自由水含量较高, 从而减缓了Maillard反应的进行^[29]。添加 γ -PGA后, 鸡肉糜凝胶白度值均有不同程度的下降, 与空白对照组相比, 单独添加0.9‰的 γ -PGA时鸡肉糜凝胶白度值最低且其凝胶白度值仅降低了0.46%; 当NaCl添加量为2.0%~3.0%时, 在同一NaCl添加水平下, 鸡肉糜凝胶白度值随着 γ -PGA添加量的增加呈先下降后上升再下降的趋势, 在 γ -PGA添加量为0.3‰时鸡肉糜凝胶白度值显著减小 ($P<0.05$), 在 γ -PGA添加量为0.6‰~0.9‰时鸡肉糜凝胶白度值有所上升, 这可能是因为钠离子与蛋白质内部的氨基酸结合, 从而在一定程度上阻碍了Maillard反应的进程^[30]。

图3 γ -PGA添加量对鸡肉糜凝胶白度值的影响Fig. 3 Effect of γ -polyglutamic acid content on whiteness of chicken breast meat gels

在同一 γ -PGA添加水平下, 鸡肉糜凝胶白度值随着NaCl添加量的增加逐渐减小, 与空白对照组相比, 单独添加3.0%的NaCl时鸡肉糜凝胶白度值显著减小 ($P<0.05$) 了3.45%, 刁新平等^[31]研究发现, 随着NaCl添加量的增加, 牛肉糜凝胶的亮度 L^* 值显著降低, 光泽变暗, 这与NaCl添加量对鸡肉糜凝胶白度值的影响结果一致。在NaCl添加量为3.0%、 γ -PGA添加量为1.2‰时鸡肉糜凝胶白度值最小, 与空白对照组相比减少了5.61%。

2.4 γ -PGA添加量对鸡肉糜凝胶强度的影响图4 γ -PGA添加量对鸡肉糜凝胶强度的影响Fig. 4 Effect of γ -polyglutamic acid content on gel strength of chicken breast meat gels

由图4可知,当NaCl添加量为0.0%~2.0%时,在同一NaCl添加水平下,鸡肉糜凝胶强度随着 γ -PGA添加量的增加呈先上升后下降的趋势,添加 γ -PGA后,鸡肉糜凝胶强度均有不同程度的提高,与空白对照组相比,在 γ -PGA添加量为0.9‰时,鸡肉糜凝胶强度显著($P<0.05$)增大,在 γ -PGA添加量为1.2‰时凝胶强度有所下降;与空白对照组相比,单独添加0.9‰的 γ -PGA使凝胶强度显著增加了4.90%($P<0.05$);当NaCl添加量为2.5%~3.0%时,在同一NaCl添加水平下,鸡肉糜凝胶强度随着 γ -PGA添加量的增加呈先上升后下降再上升的趋势,此变化趋势与保水性变化趋势一致,在 γ -PGA添加量为0.9‰时凝胶强度有所下降,这可能是因为当 γ -PGA添加量较高时使得肌原纤维蛋白分子过度交联,造成凝胶网络无序化,从而影响凝胶强度的提高。

在同一 γ -PGA添加水平下,鸡肉糜凝胶强度随着NaCl添加量的增加逐渐增加,当 γ -PGA添加量在0.0‰~0.6‰、NaCl添加量在2.0%~3.0%的范围内增加时,鸡肉糜凝胶强度增加显著($P<0.05$)。与空白对照组相比,单独添加3.0%的NaCl时鸡肉糜凝胶强度明显增大了64.30%($P<0.05$),这与Siegel等^[32]的研究结果一致。一定浓度的NaCl可以促进肌原纤维蛋白的溶解,有助于蛋白质之间发生黏结,并且在凝胶化阶段形成富有弹性的凝胶体^[33],从而可以明显改善蛋白质的凝胶特性。在NaCl添加量为3.0%、 γ -PGA添加量为0.6‰时鸡肉糜凝胶强度达到最大值,与空白对照组相比增加了88.68%。

2.5 γ -PGA添加量对鸡肉糜凝胶质构特性的影响

由表1可知,当NaCl添加量为0.0%~2.0%时,在同一NaCl添加水平下,鸡肉糜凝胶硬度、弹性、内聚性和咀嚼性随着 γ -PGA添加量的增加呈先上升后下降的趋势;添加 γ -PGA后,鸡肉糜凝胶质构特性均有不同程度的提高,与空白对照组相比,添加0.9‰的 γ -PGA时,鸡肉糜凝胶硬度、弹性和咀嚼性显著增大($P<0.05$),且都在0.9‰时取得最大值,这可能是因为 γ -PGA使肌原纤维蛋白分子发生交联后凝胶的网络结构变得更加紧密造成的;与空白对照组相比,单独添加0.9‰的 γ -PGA使凝胶硬度、弹性、内聚性和咀嚼性分别增加了26.85%、5.94%、10.42%和49.16%;当NaCl添加量为2.5%~3.0%时,在同一NaCl添加水平下,鸡肉糜凝胶硬度、弹性、内聚性和咀嚼性随着 γ -PGA添加量的增加呈先上升后下降再上升的趋势,在 γ -PGA添加量为0.9‰时凝胶硬度、弹性、内聚性和咀嚼性较0.6‰时均有不同程度的下降。

在同一 γ -PGA添加水平下,鸡肉糜凝胶硬度、弹性、内聚性和咀嚼性随着NaCl添加量的增加逐渐增大。一定量的食盐能使底物蛋白浓度增加,从而促进交联反应的发生,形成富有弹性的三维凝胶网络结构,进而使鱼糜制品黏弹性增强^[34]。与空白对照组相比,添加NaCl或者 γ -PGA后,所有凝胶样品的质构特性都有所改善,

在NaCl添加量为3.0%、 γ -PGA添加量为0.6‰时,凝胶硬度、弹性、内聚性和咀嚼性都取得最大值,而且与蒸煮损失率、保水性、凝胶强度结果一致,这可能是由于受凝胶网络结构紧密程度的影响使得各个指标之间产生内在联系。

表1 γ -PGA添加量对鸡肉糜凝胶质构特性的影响

Table 1 Effect of γ -polyglutamic acid content on texture properties of chicken breast meat gel

NaCl添加量/%	γ -PGA添加量/‰	硬度/g	弹性/mm	内聚性	咀嚼性/mJ
0.0	0.0	216.00±5.44 ^{AA}	4.04±0.03 ^{AA}	0.48±0.00 ^{AA}	4.17±0.09 ^{AA}
	0.3	226.00±6.80 ^{BA}	4.12±0.05 ^{BA}	0.49±0.00 ^{BA}	4.54±0.10 ^{BA}
	0.6	262.00±6.94 ^{CA}	4.20±0.04 ^{CA}	0.50±0.01 ^{CA}	5.51±0.10 ^{CA}
	0.9	274.00±9.67 ^{DA}	4.28±0.07 ^{CA}	0.53±0.01 ^{DA}	6.22±0.10 ^{DA}
	1.2	240.00±7.76 ^{BA}	4.06±0.04 ^{AA}	0.49±0.01 ^{BA}	4.67±0.11 ^{BA}
1.5	0.0	328.00±7.41 ^{AB}	4.19±0.04 ^{AB}	0.50±0.01 ^{AB}	6.85±0.11 ^{AB}
	0.3	374.00±7.59 ^{BB}	4.28±0.06 ^{BB}	0.51±0.01 ^{BB}	8.17±0.17 ^{BB}
	0.6	388.00±7.79 ^{BB}	4.45±0.07 ^{BB}	0.52±0.01 ^{BB}	9.16±0.21 ^{BB}
	0.9	405.00±8.96 ^{CB}	4.54±0.06 ^{CB}	0.53±0.01 ^{CB}	9.75±0.18 ^{BB}
	1.2	344.00±5.91 ^{AB}	4.31±0.04 ^{BB}	0.51±0.01 ^{AB}	7.41±0.17 ^{BB}
2.0	0.0	360.00±8.16 ^{AC}	4.24±0.05 ^{AB}	0.52±0.01 ^{AC}	7.93±0.18 ^{CB}
	0.3	389.00±7.04 ^{BC}	4.37±0.05 ^{BB}	0.53±0.01 ^{BB}	9.01±0.22 ^{BB}
	0.6	414.00±6.94 ^{CC}	4.46±0.04 ^{BB}	0.55±0.01 ^{CC}	10.18±0.17 ^{CC}
	0.9	416.00±7.87 ^{CB}	4.57±0.04 ^{CB}	0.54±0.00 ^{BB}	10.21±0.22 ^{BB}
	1.2	408.00±6.18 ^{BC}	4.38±0.07 ^{BB}	0.54±0.00 ^{CC}	9.65±0.21 ^{CC}
2.5	0.0	422.00±6.18 ^{AD}	4.48±0.07 ^{CC}	0.54±0.01 ^{AD}	10.21±0.13 ^{AD}
	0.3	427.00±8.99 ^{CC}	4.59±0.05 ^{CC}	0.55±0.01 ^{CC}	10.78±0.17 ^{CC}
	0.6	498.00±8.58 ^{BD}	4.73±0.05 ^{CC}	0.57±0.01 ^{CD}	13.43±0.16 ^{DD}
	0.9	476.00±9.46 ^{CC}	4.68±0.07 ^{BB}	0.55±0.01 ^{CC}	12.25±0.16 ^{CC}
	1.2	482.00±8.58 ^{BD}	4.69±0.07 ^{CC}	0.56±0.01 ^{CD}	12.66±0.21 ^{DD}
3.0	0.0	460.00±7.41 ^{AE}	4.67±0.07 ^{CC}	0.55±0.01 ^{EE}	11.80±0.13 ^{EE}
	0.3	502.00±8.81 ^{BD}	4.71±0.07 ^{CC}	0.56±0.01 ^{BD}	13.24±0.22 ^{DD}
	0.6	566.00±9.39 ^{EE}	4.77±0.07 ^{CC}	0.58±0.00 ^{EE}	15.66±0.17 ^{EE}
	0.9	528.00±6.24 ^{CD}	4.69±0.04 ^{BB}	0.56±0.00 ^{DD}	13.87±0.12 ^{DD}
	1.2	550.00±8.99 ^{EE}	4.70±0.06 ^{CC}	0.57±0.00 ^{EE}	14.72±0.18 ^{EE}

注:小写字母不同表示同一NaCl添加量下,不同 γ -PGA添加量之间差异显著($P<0.05$);大写字母不同表示同一 γ -PGA添加量下,不同NaCl添加量之间差异显著($P<0.05$)。

2.6 γ -PGA添加量对鸡肉糜流变学性质的影响

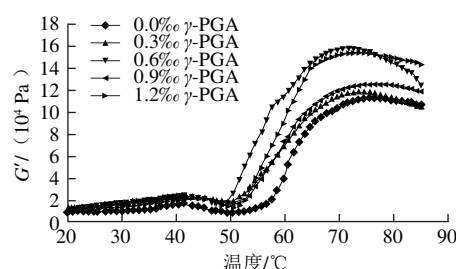


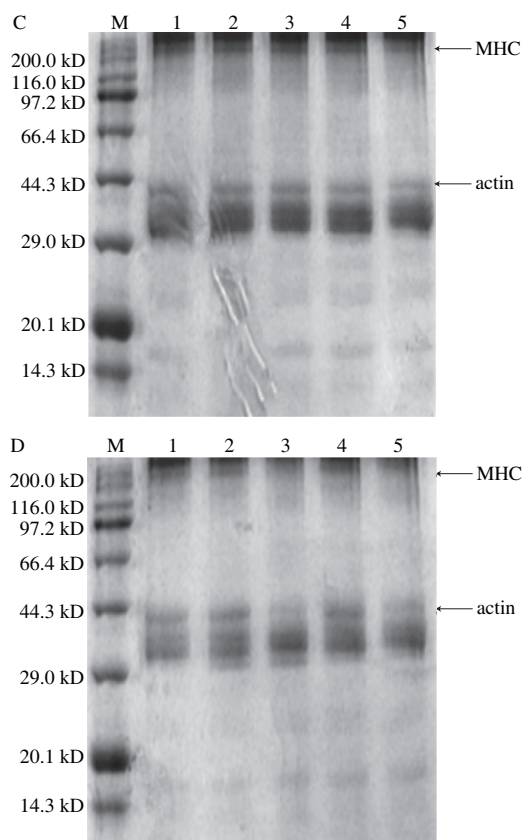
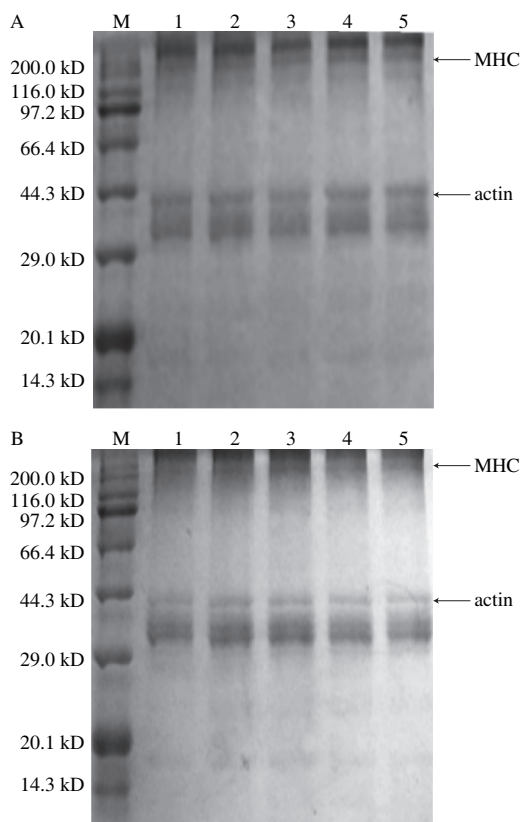
图5 γ -PGA添加量对鸡肉糜存储模量(G')的影响

Fig. 5 Effect of γ -polyglutamic acid content on storage modulus (G') of chicken breast meat gels

γ -PGA添加量对鸡肉糜存储模量(G')的影响如图5所示。在动态流变学测定过程中, G' 可以作为不同 γ -PGA添加量在升温过程中对鸡肉糜凝胶能力的一个重

要指标, G' 值越高则凝胶能力越强。由图5可知, 不同 γ -PGA 添加量下 G' 变化为先增大后减小再增大而后又继续减小的趋势, 在 39°C 前 G' 随着温度的升高逐渐增大, 在 $40\sim 43^\circ\text{C}$ 时分别出现了第1个峰值, 这主要是因为肌球蛋白结构发生变化, 导致蛋白质之间相互交联, 弹性网络结构初步形成, 相比于空白对照组, 加入 γ -PGA 的样品较早的出现峰值, 这表明 γ -PGA 对鸡肉糜凝胶的形成有一定的促进作用。 44°C 之后随着温度的升高 G' 缓慢减小, 在 $48\sim 50^\circ\text{C}$ 时分别出现了第2个峰值 (最小值), 这可能是因为随着温度的升高, 蛋白质开始变性, 肌球蛋白尾部的螺旋结构发生转变, 使蛋白质的流动性增强^[35], 但加入 γ -PGA 的样品其 G' 最小值显著大于空白对照组的 G' 最小值。 50°C 之后 G' 值随着温度的升高迅速增加, 在 $71\sim 75^\circ\text{C}$ 时分别出现了第3个峰值 (最大值), 这可能是因为二硫键和疏水相互作用下, 蛋白质发生交联或凝聚, 形成了不可逆凝胶, 相比于空白对照组, 加入 γ -PGA 的样品较早的达到 G' 最大值, 这表明 γ -PGA 可以提高凝胶的形成能力。在 75°C 时对照组达 G' 最大值 ($114\ 027\ \text{Pa}$), 在 71°C 时 γ -PGA 添加量为 0.6% 的样品达 G' 最大值 ($159\ 918\ \text{Pa}$), 在 73°C 时 γ -PGA 添加量为 1.2% 的样品达 G' 最大值 ($155\ 384\ \text{Pa}$), 而在 80°C 时, γ -PGA 添加量为 1.2% 的样品 G' 值 ($149\ 887\ \text{Pa}$) 大于 γ -PGA 添加量为 0.6% 的样品 G' 值 ($147\ 261\ \text{Pa}$), 且高于其他样品的 G' 值, 这与图4所得结果基本一致。

2.7 肌原纤维蛋白SDS-PAGE图谱



A. $0.3\ \text{mol/L}\ \text{NaCl}$; B. $0.4\ \text{mol/L}\ \text{NaCl}$; C. $0.5\ \text{mol/L}\ \text{NaCl}$; D. $0.6\ \text{mol/L}\ \text{NaCl}$; M. 标准蛋白 (marker); 泳道1~5. γ -PGA 添加量分别为 0.0% 、 0.3% 、 0.6% 、 0.9% 、 1.2% ; MHC. 肌球蛋白重链; actin. 肌动蛋白。

图6 γ -PGA 在不同添加量条件下制得肌原纤维蛋白的SDS-PAGE图谱
Fig. 6 SDS-PAGE patterns of chicken breast myofibrillar proteins with different concentrations of γ -polyglutamic acid and NaCl

NaCl 浓度肌原纤维蛋白SDS-PAGE图谱如图6所示。在不同NaCl浓度条件下, 与未添加 γ -PGA 的肌原纤维蛋白样品相比, 加入 γ -PGA 后肌球蛋白重链 (分子质量为 $200\ \text{kD}$) 条带明显减弱, 这可能是由于一定浓度的NaCl促进了蛋白质的溶解, 并对鸡肉蛋白质中的内源酶产生作用, 从而催化 γ -PGA 与肌原纤维蛋白之间发生交联。刘文娟^[36]通过对带鱼肌肉蛋白的研究发现, 单独添加 γ -PGA 可以使肌球蛋白重链条带减弱, 交联蛋白条带明显增强, 这与 γ -PGA 添加量对鸡肉肌原纤维蛋白SDS-PAGE图谱的结果一致。在NaCl浓度为 $0.3\sim 0.4\ \text{mol/L}$ 时, 随着 γ -PGA 添加量的增加, 肌球蛋白重链、肌动蛋白 (分子质量为 $43\ \text{kD}$) 和肌球蛋白轻链 (分子质量为 $17\sim 20\ \text{kD}$) 条带都逐渐减弱, 在NaCl浓度为 $0.4\ \text{mol/L}$ 时, 肌球蛋白重链条带减弱更为明显, 然而当 γ -PGA 添加量为 1.2% 时, 肌球蛋白重链条带略有增加, 这可能是因为内源酶的活性有限, 当 γ -PGA 添加到一定量时, 会出现底物饱和和效应。在NaCl浓度为 $0.5\ \text{mol/L}$ 时, 随着 γ -PGA 添加量的增加, 肌球蛋白重链和肌动蛋白条带逐渐减弱, 表明 γ -PGA 与蛋白质之间的交联作用增强, 这可能是因为较

高浓度的NaCl使肌球蛋白解聚成单体,从而增加了其与 γ -PGA之间的相互作用,然而在 γ -PGA添加量大于0.6‰时,肌球蛋白重链和肌动蛋白条带变化并不明显。在NaCl浓度为0.6 mol/L时,随着 γ -PGA添加量的增加,肌球蛋白重链和肌动蛋白条带逐渐减弱,在 γ -PGA添加量为0.9‰和1.2‰时,肌球蛋白重链和肌动蛋白条带先增强后减弱,且变化明显,这一结果与图4的结果一致,说明 γ -PGA对鸡肉糜凝胶强度有一定的增强作用。

3 结论

在鸡肉糜凝胶制作过程中,添加0.9‰的 γ -PGA可以显著减少鸡肉糜凝胶蒸煮损失率,提高凝胶强度和保水性,明显改善凝胶的硬度、弹性、内聚性和咀嚼性,且对凝胶白度值影响较小; G' 曲线变化表明, γ -PGA能够提高凝胶的形成能力;SDS-PAGE分析表明, γ -PGA与肌原纤维蛋白之间有一定的交联作用。在一定NaCl添加量条件下,添加 γ -PGA对鸡肉糜凝胶特性的改善作用更为明显,且在NaCl添加量为3.0%、 γ -PGA添加量为0.6‰时,鸡肉糜凝胶特性较好。高钠盐是导致高血压和心血管疾病的重要原因,目前,消费者对低钠盐健康食品的需求日益增加,而在肉糜类制品加工过程中,盐类是不可缺少的添加剂与咸味剂,寻求钠盐替代物将是肉制品“低盐化加工”的重要发展方向。因此,用 γ -PGA来代替部分食盐用于低盐产品的开发将具有广阔的前景。

参考文献:

- [1] 邓丽,芮汉明.变性淀粉对鸡肉糜品质影响的研究[J].食品工业科技,2005,3(13):72-73;75. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2005.03.013.
- [2] 张海峰,白杰,张英.宰后处理方式对鸡肉品质及加工性能的影响[J].肉类研究,2009,23(8):32-36.
- [3] 胡飞华.梅鱼鱼糜超高压凝胶化工艺及凝胶机理的研究[D].杭州:浙江工商大学,2010:6.
- [4] 张莉莉.高温(100~120℃)处理对鱼糜及其复合凝胶热稳定性的影响[D].青岛:中国海洋大学,2013:4-6.
- [5] 倪学文,严文莉,汪芳丽,等.魔芋胶对鸡肉和猪肉混合肉糜凝胶特性的影响[J].食品工业科技,2015,36(8):305-308. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2015.08.055.
- [6] BAJAJ I, SINGHAL R. Poly (glutamic acid)-an emerging biopolymer of commercial interest[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(10): 5551-5561. DOI:10.1016/j.biortech.2011.02.047.
- [7] OGUNLEYE A, BHAT A, IRORERE V U, et al. Poly- γ -glutamic acid: production, properties and applications[J]. Microbiology, 2015, 161: 1-17. DOI:10.1099/mic.0.081448-0.
- [8] MITSUIKI M, MIZUNO A, TANIMOTO H, et al. Relationship between the antifreeze activities and the chemical structures of oligo-and poly(glutamic acids)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46(3): 891-895. DOI:10.1021/jf970797m.
- [9] SAKAI K, SONODA C, MURASE K. Bitterness relieving agent: PCT/JP1999/005559[P]. (2000-04-20)[2017-01-05].
- [10] SHYU Y, SUNG W. Improving the emulsion stability of sponge cake by the addition of γ -polyglutamic acid[J]. Journal of Marine Science and Technology-Taiwan, 2010, 18(6): 895-900. DOI:10.6119/JMST.
- [11] SHYU Y S, HWANG J Y, HSU C K. Improving the rheological and thermal properties of wheat dough by the addition of γ -polyglutamic acid[J]. LWT-Food Science Technology, 2008, 41: 982-987. DOI:10.1016/j.lwt.2007.06.015.
- [12] LIM S M, KIM J M, SHIM J Y, et al. Effect of poly- γ -glutamic acids (PGA) on oil uptake and sensory quality in doughnuts[J]. Food Science and Biotechnology, 2012, 21(1): 247-252. DOI:10.1007/s10068-012-0032-2.
- [13] TANIMOTO H, MORI M, MOTOKI M, et al. Natto mucilage containing poly- γ -glutamic acid increases soluble calcium in the rat small intestine[J]. Bioscience Biotechnology and Biochemistry, 2001, 65(3): 516-521. DOI:10.1271/bbb.65.516.
- [14] HO G H, HO T I, HSIEH K H, et al. Gamma-Polyglutamic acid produced by *Bacillus subtilis* (natto): structural characteristics, chemical properties and biological functionalities[J]. Journal of the Chinese Chemical Society, 2006, 53(6): 1363-1384. DOI:10.1002/jccs.200600182.
- [15] KOCHER P N, FOEGEDING E A. Microcentrifuge-based method for measuring water-holding of protein gels[J]. Journal of Food Science, 1993, 58(5): 1040-1046. DOI:10.1111/j.1365-2621.1993.tb06107.x.
- [16] 吴润锋,袁美兰,赵利,等.不同辅料对草鱼鱼糜品质的影响[J].食品科学,2014,35(7):53-57.
- [17] 徐谓,李洪军,徐明悦,等.亚麻籽胶对猪、兔肉混合肉糜凝胶特性的影响[J].食品工业科技,2015,36(24):296-300. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2015.24.056.
- [18] WESTPHALEN A D, BRIGGS J L, LONERGAN S M. Influence of muscle type on rheological properties of porcine myofibrillar protein during heat-induced gelation[J]. Meat Science, 2006, 72(4): 697-703. DOI:10.1016/j.meatsci.2005.09.021.
- [19] XIONG Youling L. A comparison of the rheological characteristics of different fractions of chicken myofibrillar proteins[J]. Journal of Food Biochemistry, 1993, 16(4): 217-227.
- [20] LAEMMLI U K. Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4[J]. Nature, 1970, 227: 680-685. DOI:10.1038/227680a0.
- [21] 王静心,李政,张健飞,等.聚谷氨酸水凝胶研究与应用进展[J].微生物学通报,2014,41(8):1649-1654. DOI:10.13344/j.Microbiol.china.130708.
- [22] 孟祥忍,王恒鹏,杨章平.食盐添加量对鸡肉糜热性质及流变性的影响[J].中国家禽,2015,37(16):39-43. DOI:10.16372/j.issn.1004-6364.2015.16.009.
- [23] JANG H S, CHIN K B. Emulsifying and gelling properties of pork myofibrillar protein as affected by various NaCl levels and pH values[J]. Korean Journal of Food Science and Animal Resources, 2011, 31(5): 727-730. DOI:10.5851/kosfa.2011.31.5.727.
- [24] 李晶博,李丁,邓毛程,等. γ -聚谷氨酸的特性、生产及应用[J].化工进展,2008,27(11):1789-1792;1799. DOI:10.16085/j.issn.1000-6613.2008.11.016.
- [25] 李继红,彭增超.温度、盐浓度和pH对盐溶蛋白热诱导凝胶影响的研究[J].肉类工业,2004(4):39-41.
- [26] 李继红.不同种类肉盐溶蛋白凝胶特性的研究[D].保定:河北农业大学,2004:8-16.
- [27] SOOTTAWAT B, WONNOP V, SUTTIRAK P. Suwari gel properties as affected by transglutaminase activator and inhibitors[J]. Food Chemistry, 2004, 85(1): 91-99. DOI:10.1016/j.foodchem.2003.06.007.
- [28] TARR H L. Ribose and the Maillard reaction in fish muscle[J]. Nature, 1953, 171: 344-345. DOI:10.1038/171344b0.
- [29] ZHANG Y, ZHANG Y. Formation and reduction of acrylamide in Maillard reaction: a review based on the current state of knowledge[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2007, 47(5): 521-542. DOI:10.1080/10408390600920070.
- [30] 杨振,孔保华,夏秀芳,等.魔芋粉对鲤鱼肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J].食品科学,2012,33(11):116-120.
- [31] 刁新平,孔保华,郑冬梅.食盐和大豆蛋白对牛肉凝胶特性的影响[J].食品科技,2003,28(11):29-31;40. DOI:10.13684/j.cnki.splkj.2003.11.012.
- [32] SIEGEL D G, CHURCH K E, SCHMIDT G R. Gel structure of nonmeat proteins as related to their ability to bind meat pieces[J]. Journal of Food Science, 1979, 44(5): 1276-1279. DOI:10.1111/j.1365-2621.1979.tb06418.x.
- [33] 王锡昌,汪之和.鱼糜制品加工技术[M].北京:中国轻工业出版社,1997:3-4.
- [34] 贺江航.酶促交联技术在速冻重组鱼排开发中的应用研究[D].福州:福建农林大学,2012:37.
- [35] CHAN J K, GILL T A, PAULSON A T. Thermal aggregation of myosin subfragments from cod and herring[J]. Food Science, 1993, 58: 1057-1069. DOI:10.1111/j.1365-2621.1993.tb06111.x.
- [36] 刘文娟.凝胶增强剂对带鱼肌肉蛋白质热凝胶形成的影响及机理研究[D].杭州:浙江大学,2015:81-82.