

豌豆蛋白的添加 对猪肉盐溶蛋白凝胶特性的影响

计红芳^{1,2}, 李莎莎¹, 张令文¹, 王雪菲¹, 陈复生², 马汉军^{1,*}

(1.河南科技学院食品学院, 河南新乡 453003;

2.河南工业大学食品科学与工程博士后流动站, 河南郑州 450001)

摘要:将豌豆蛋白加入到猪肉盐溶蛋白溶液中制备凝胶, 研究豌豆蛋白对其共混热诱导凝胶色泽、蒸煮得率、保水性、质构、动态流变性、微观结构及水分迁移等特性的影响。结果表明, 随豌豆蛋白添加量的增加, 凝胶的 L^* 值、 a^* 值均呈下降趋势, b^* 值上升; 保水性和蒸煮得率均持续增加, 4% 时保水性为 86.84%, 与 10% 相比差异不显著 ($p > 0.05$), 蒸煮得率为 88.31%, 与 6%、8% 相比, 差异不显著 ($p > 0.05$), 但与 10% 相比, 差异显著 ($p < 0.05$); 硬度、咀嚼性持续上升, 弹性与回复性先上升后下降, 添加量为 4% 时最大, 分别为 0.961、0.405; 储能模量 G' 值随豌豆蛋白添加量的增加而升高, 且初始值与终值均高于对照 ($p < 0.05$); 豌豆蛋白可以提高共混凝胶不易流动水的比例, 降低自由水的比例; 豌豆蛋白添加量为 4% 时, 凝胶网络结构高度有序、均匀致密。因此, 豌豆蛋白可以提高猪肉盐溶蛋白形成凝胶的能力; 添加量为 4% 时, 形成的共混凝胶品质最好。

关键词:豌豆蛋白, 猪肉盐溶蛋白, 凝胶特性, 低场核磁共振

Effect of Pea Protein Addition on Gel Properties of Pork Salt – soluble Protein

Ji Hong-fang^{1,2}, Li Sha-sha¹, Zhang Ling-wen¹, Wang Xue-fei¹, Chen Fu-sheng², Ma Han-jun^{1,*}

(1.School of Food Science, Henan Institute of Science and Technology, Xinxing 453003, China;

2.Food Science and Engineering Post-doctoral Research Station, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To prepare gel, pea protein was added to pork salt-soluble protein. Effects of pea protein on the color, cooking yield, water holding capacity, texture, dynamic rheology, microstructure, and water migration of heat induced gel were investigated. Results indicated that, with the increasing of pea protein addition, both L^* value and a^* value of the gels decreased, while b^* value increased. And the water holding capacity and cooking yield rose continuously with the addition of pea protein. When at 4%, the water holding capacity was 86.84%, which was not significantly different from that of 10% ($p > 0.05$). Cooking yield was 88.31% at 4% pea protein, and the difference was not significant compared with that of 6% and 8% ($p > 0.05$), but it was significant ($p < 0.05$) compared with that of 10%. Both the hardness and chewiness increased with the addition of pea protein, while the springiness and resilience increased firstly and then decreased. When at 4%, both the springiness (0.961) and resilience (0.405) reached to the highest. Additionally, the storage modulus G' values increased with the addition of pea protein, and both of the initial value were higher than those of the control ($p < 0.05$). Pea protein could increase the proportion of non-flow water, and reduce the proportion of free water. When the amount of pea protein was 4%, the gel could be obtained with meticulous and uniform, highly ordered network structure. So pea protein could improve the gel forming ability of pork salt protein. When the addition amount of pea protein was 4%, the gel quality of the blends was the best.

Key words: pea protein; pork salt-soluble protein; gel properties; low field nuclear magnetic resonance (LF-NMR)

中图分类号: TS251.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2019)14-0031-07

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2019.14.005

引文格式: 计红芳, 李莎莎, 张令文, 等. 豌豆蛋白的添加对猪肉盐溶蛋白凝胶特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2019, 40 (14): 31-36, 41.

收稿日期: 2018-11-12

作者简介: 计红芳 (1978-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 肉制品加工与品质控制, E-mail: jhf300@126.com。

* 通讯作者: 马汉军 (1965-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 肉制品加工与品质控制, E-mail: xxhjm@126.com。

基金项目: 河南省科技攻关项目 (192102110218); 河南省重大科技专项项目 (161100110600); 河南省博士后基金 (2017); 河南科技学院博士后基金 (2017)。

蛋白质是肉中的主要成分,约占肉重的 18%~20%。肉制品生产的成功与否,主要取决于肉蛋白质的凝胶性、保水性、保脂性和乳化性等。在肉制品加工中,常采用添加外源性物质,例如添加淀粉、膳食纤维、胶体、非肉蛋白等作为增稠剂、赋形剂和填充剂来提高产品出品率、降低脂肪含量,改善产品品质^[1]。栗俊广等^[2]研究发现,木薯淀粉可以改善猪肉盐溶蛋白凝胶的质构和保水性;Choi 等^[3]研究表明,添加 1% 米糠纤维的猪肉盐溶蛋白凝胶的水分含量、溶解性和保水能力达到最高;Gao 等^[4]研究发现,0.7% 的卡拉胶和 5% 的大豆分离蛋白混合添加可以明显提高猪肉盐溶蛋白凝胶的强度和保水性;张巍^[5]研究表明,添加大豆分离蛋白可显著提高猪肉盐溶蛋白凝胶的硬度、弹性及保水能力。非肉蛋白和肉类盐溶蛋白的相互作用是通过非肉蛋白添充或改变共凝胶体系的内部构造,从而影响肉制品的品质。豌豆蛋白对猪盐溶蛋白凝胶品质的影响相关研究较少,是否有与大豆分离蛋白改善凝胶品质相似的功效,有待进一步研究。

豌豆蛋白占豌豆组成的 23%~25%,必需氨基酸比例协调,基本可称为全价蛋白,符合 FAO/WHO 的推荐标准,兼具调节肠胃、降低血压及动脉粥样硬化、肿瘤等发病风险。豌豆蛋白具有良好的溶解性、起泡性、乳化性和胶凝性等,是一种优质的植物蛋白资源^[6-7]。近年来,豌豆蛋白的应用价值逐渐被挖掘,相关研究主要集中在豌豆蛋白的提取制备^[8-9]、功能特性及改性^[7,10]和酶解制备活性产物^[11],以及在肉乳制品、水产品、面制品、焙烤制品等领域的应用^[12-13]。然而在肉制品领域中的应用研究较少,豌豆蛋白添加到香肠中,可改善香肠的热稳定性、颜色、质构和感官品质等^[14-16]。本文研究了豌豆蛋白对猪肉盐溶蛋白凝胶特性的影响,为豌豆蛋白在肉制品中的应用提供理论依据,以期提高豌豆蛋白的综合利用价值,旨在使豌豆蛋白在食品生产过程中得到普遍的应用与推广。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

猪背最长肌(日龄约 180 d 的三元杂交猪) 新乡世纪华联超市;豌豆蛋白(蛋白含量 80%) 烟台东方蛋白科技有限公司;氯化钠、氢氧化钠、戊二醛、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、乙醇、氯仿等 均为国产分析纯。

DZKW-4 型电子恒温水浴锅 北京中兴伟业仪器有限公司;UMC-5C 斩拌机 德国 Stephan 公司;TA-XT plus 质构仪 英国 Stable Micro Systems 公司;绞肉机 山东嘉信食品机械有限公司;BP221S 型电子天平 德国 Sartorius 公司;WFG7200 型可见分光光度计 上海优尼柯仪器有限公司;T25 型高速分散器 德国 IKA 公司;CR-400 色差仪 日本 Konica Minolta 公司;Quanta 200 扫描电子显微镜 美国 FEI 公司;PQ001 台式 NMR 分析仪 上海纽迈电子有限公司;Haake Mars 60 旋转流变仪、台式高速冷冻离心机 德国 Thermo Fisher Scientific 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 猪肉盐溶蛋白提取及凝胶的制备 盐溶性蛋白的提取参考 Sun 等^[17]和栗俊广等^[18]的方法,并进行适当修改。将新鲜猪背最长肌剔除脂肪和结缔组织,切块,用绞肉机绞成肉糜,加入 4 倍质量的提取液(0.6 mol/L NaCl),混匀均质,调 pH7.0,4 ℃ 放置 24 h,10 000 r/min 离心 10 min,上清液即盐溶蛋白。

将豌豆蛋白 0、0.6、1.2、1.8、2.4、3 g(质量体积比分别为 0、2%、4%、6%、8%、10%,g/mL),加入到 30 mL 50 mg/mL 盐溶蛋白溶液中,充分混匀,均质,4 ℃ 冰箱静置 12 h,25~85 ℃ 水浴,85 ℃ 保持 5 min,冷却至室温,4 ℃ 冰箱,放置 12 h,制备凝胶。

1.2.2 色泽的测定 采用 CR-400 色差仪,以标准白板作为对照,对样品进行测定。每组随机取三块平行样品,每块样品在固定的某一表面随机选取三个点测定,记录 L^* 、 a^* 和 b^* 值,分别为亮度指数、红度指数和黄度指数^[19]。

1.2.3 蒸煮得率的测定 参考 Zhu 等^[20]的方法并稍作改动。将混合蛋白样品装入 50 mL 离心管,称重,即为蒸煮前的重量。将此样品在 25~85 ℃ 水浴,85 ℃ 保持 5 min,煮制后冷却至室温,在 4 ℃ 条件下放置 12 h,室温下环境回温 2 h,用滤纸吸干表面水分,称量并记录重量,即为蒸煮后重量。

蒸煮得率(%) = 蒸煮后的重量/蒸煮前的重量 $\times 100$

1.2.4 保水性的测定 参考王希希等^[21]的方法并稍作改动。将制备好的凝胶称重,记为 M_1 ,置于离心管中,4 ℃、5000 $\times g$ 离心 15 min,滤纸吸干表面水分,再次称量,记为 M_2 ,离心后凝胶重量占原重的百分比,即为保水性(water holding capacity,WHC)。

$WHC(\%) = M_2/M_1 \times 100$

1.2.5 质构的测定 参考 Zhou 等^[22]的方法并稍作修改。对凝胶样品($\Phi 2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$)进行质构测试,探头类型为 P/36R,参数:测试前速 2 mm/s,测试速度 2 mm/s,测试后速 2 mm/s,压缩样品高度为 40%,时间 5 s,触发类型为自动,触发力 5 g。测定指标为硬度、咀嚼性、弹性和恢复性。每组样品测定 6 次求平均值。

1.2.6 流变特性的测定 参考 Kang 等^[23]的方法并稍作修改。用 50 mm 不锈钢圆形平板探头,间隙为 0.6 mm,将样品均匀涂抹在 2 个平板间,外周涂一层薄的硅油,以防止水分蒸发。在 25 ℃ 保温 10 min,然后从 25~85 ℃ 升温,加热速率为 2 ℃/min。在加热过程中,在一个固定的频率为 0.1 Hz 和一个振荡模式下对样品进行连续剪切,记录储能模量 G' 的变化。每个处理测定 3 次。

1.2.7 微观结构的测定 将凝胶样品切成 2 mm 的小条,用 2.5% 的戊二醛(pH6.8)浸泡 24 h。先用 0.1 mol/L pH6.8 的磷酸缓冲液洗 3 次,每次为 15 min,再用 50%~90% 的乙醇脱水,每次为 15 min,无水乙醇脱水 3 次,每次 10 min。采用氯仿进行脱脂 1 h,无水乙醇:叔丁醇 = 1:1 (v/v),以及叔丁醇各进行一次置换,每次为 15 min。真空干燥后进行扫描

观察^[24]。

1.2.8 NMR 自旋-自旋弛豫时间(T_2)的测定 参考邵俊花等^[25]的方法并稍做修改。质子共振频率为 22 MHz,测量温度为 32 ℃。将大约 2 g 样品放入直径为 15 mm 的核磁管中,并将其放入仪器。自旋-自旋弛豫时间 T_2 用 CPMG 序列进行测量。使用参数为: η ~值(90° 脉冲和 180° 脉冲之间的时间)为 200 μ s,重复扫描 32 次,重复间隔时间为 110 ms,得到 12000 个回波。每组样品测定 6 次求平均值。

1.3 数据处理

数据用 Excel 2010 进行处理,SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析(one-way analysis of variance, ANOVA)及最小显著差法(LSD)进行统计分析, $p < 0.05$ 为差异显著。每组试验均重复 3 次,结果表示为平均值 $\pm$ 标准差($\bar{X} \pm SD$)。

2 结果与分析

2.1 豌豆蛋白添加量对猪盐溶蛋白凝胶色泽的影响

色泽是评价凝胶外观的一个较为重要的指标。由图 1 可知,凝胶的 L^* 、 a^* 值均随豌豆蛋白添加量的增加而下降, L^* 值在添加量为 10% 时为 77.12,与对照相比下降 3.01%;添加量为 8% 和 10% 时 a^* 值差异不显著($p > 0.05$),二者与对照相比下降显著($p < 0.05$); b^* 值随豌豆蛋白添加量的增加而升高,未添加豌豆蛋白时,凝胶 b^* 值为 -3.16,添加量为 10% 时,达到 7.83。有文献表明,肌红蛋白在加热过程中结构伸展变性,转化为褐色的高铁肌红蛋白等复杂产物,致使红度下降^[26],这可能是豌豆蛋白-猪盐溶蛋白共混凝胶 a^* 值下降的原因之一。另外,豌豆蛋白呈淡黄色,其添加量越大,共混凝胶的颜色就越黄越暗。雷跃磊等^[27] 研究发现,添加大豆蛋白可使鱼肉猪肉复合凝胶的 L^* 值下降, b^* 值上升,与本试验结果一致。

2.2 豌豆蛋白添加量对猪盐溶蛋白凝胶保水性和蒸煮得率的影响

由图 2 可知,随豌豆蛋白添加量的增加,凝胶的保水性和蒸煮得率均呈上升趋势。添加量为 4% 时保水性为 86.84%、蒸煮得率为 88.31%,与对照相比分别上升了 5.4% 和 3.7% ($p < 0.05$)。添加量为 4% 的保水性,与 6%~10% 相比,差异不显著($p > 0.05$);添加量为 4% 的蒸煮得率,与 6%、8% 相比,差异不显著($p > 0.05$),但与 10% 相比,差异显著($p < 0.05$)。有研究表明,在凝胶形成过程中,蛋白质相互聚集、

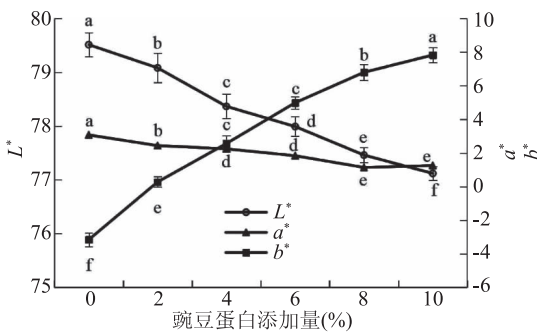


图 1 豌豆蛋白添加量对凝胶色泽的影响

Fig.1 Effects of pea protein addition on the color of gel
注:不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$),图 2 同。

相互交联形成有序三维网状结构,豌豆蛋白填充于网络结构间隙,可以束缚水分子的运动,更好的把水分截留在网络体系中,减少水分流失^[28]。因此,随豌豆蛋白添加量的增加,保水性升高,蒸煮得率也随之上升。

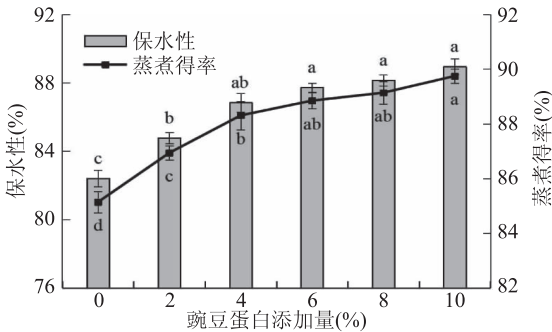


图 2 豌豆蛋白添加量对凝胶保水性和蒸煮得率的影响

Fig.2 Effects of pea protein addition on the water holding capacity and cooking yield of gel

2.3 豌豆蛋白添加量对猪盐溶蛋白凝胶质构的影响

由表 1 可知,随豌豆蛋白添加量的增加,凝胶的硬度、咀嚼性均呈上升趋势。硬度和咀嚼性在豌豆蛋白添加量为 10% 时最大,分别为 988、688 g,是对照的 2.57 和 2.74 倍;凝胶的弹性与回复性随豌豆蛋白添加量的增加,均呈先升高后下降的趋势,但都显著高于对照组($p < 0.05$),在添加量为 4% 时达到最大值,分别为 0.961、0.405,与对照相比增加了 2.67% 和 12.19%。

在加热形成共混凝胶的过程中,豌豆蛋白良好的乳化性、胶凝性和保水性,会得以更好体现。豌豆蛋白的添加,可对凝胶网络结构进行机械充填与包

表 1 豌豆蛋白添加量对猪盐溶蛋白凝胶质构的影响

Table 1 Effects of pea protein addition on texture of pork salt-soluble protein gel

添加量 (%)	硬度(g)	弹性	咀嚼性(g)	回复性
0	385 $\pm$ 15 ^e	0.936 $\pm$ 0.001 ^d	251 $\pm$ 50 ^d	0.361 $\pm$ 0.006 ^d
2	438 $\pm$ 18 ^e	0.947 $\pm$ 0.003 ^c	278 $\pm$ 76 ^d	0.379 $\pm$ 0.005 ^c
4	554 $\pm$ 15 ^d	0.961 $\pm$ 0.001 ^a	375 $\pm$ 55 ^c	0.405 $\pm$ 0.007 ^a
6	693 $\pm$ 23 ^c	0.954 $\pm$ 0.002 ^b	496 $\pm$ 43 ^b	0.390 $\pm$ 0.004 ^b
8	797 $\pm$ 45 ^b	0.952 $\pm$ 0.003 ^b	574 $\pm$ 54 ^b	0.381 $\pm$ 0.006 ^{bc}
10	988 $\pm$ 57 ^a	0.945 $\pm$ 0.004 ^c	688 $\pm$ 25 ^a	0.374 $\pm$ 0.003 ^c

注:同列不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$),表 2 同。

埋,硬度和咀嚼性、弹性与恢复性等均增加,但豌豆蛋白过量添加,超过4%以后,由于其自身吸水性较强,阻碍了猪肉盐溶蛋白和水之间的相互作用^[29],使体系游离的水变少,凝胶变得又韧又硬,硬度和咀嚼性升高,弹性与恢复性则下降。吴振等^[30]研究发现,在大豆分离蛋白与鸡肉盐溶蛋白共混凝胶形成过程中,由于大豆分离蛋白自身凝胶结构的形成,促进了与盐溶蛋白的相互作用,增强了共混凝胶的质构特性。刁新平等^[31]研究了大豆蛋白对牛肉凝胶特性的影响,结果表明,随大豆蛋白添加量的增加,凝胶弹性大体呈先增加后下降趋势,到3%后,弹性显著降低。大豆蛋白添加量的增加,会造成固形物的增加,可能与牛肉蛋白竞争可利用的水分,从而对蛋白相产生浓缩效应,降低了凝胶的弹性,与本文研究结果一致。

2.4 豌豆蛋白添加量对猪盐溶蛋白凝胶流变特性的影响

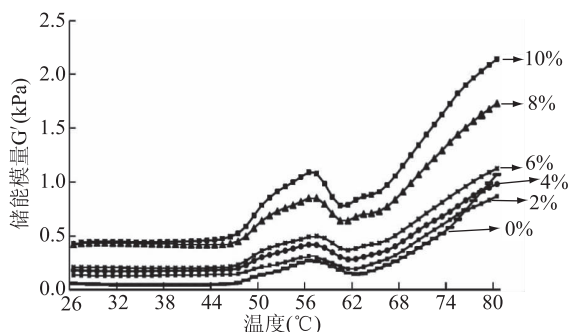


图3 豌豆蛋白添加量对盐溶蛋白凝胶储能模量的影响

Fig.3 Effects of pea protein addition on storage modulus of pork salt-soluble protein gel

凝胶的形成主要经历两个过程,首先蛋白质受热变性展开,然后展开的蛋白质因为凝集作用而形成较大分子的凝胶体。储能模量 G' 既反映了不同温度下蛋白分子展开和凝集的过程^[32-33],也反映了蛋白凝胶的弹性和凝胶性的强弱^[34]。由图3可知,在整个加热过程中,盐溶蛋白凝胶的储能模量出现3个阶段的变化。在26~41℃区间,储能模量 G' 基本保持不变,随着温度从42℃增加到56℃, G' 逐渐上升,并且在56℃达到第一个峰值,这是凝胶网络形成的初始阶段,此时肌球蛋白头部通过二聚体作用开始交联,形成弹性或蛋白质网络结构^[35];继续加热, G' 值下降,并在62℃左右达到最小值,这是由于肌球蛋白分子尾部发生变性,导致蛋白分子发生重组,破坏了先前形成的蛋白网络结构;随后在63~80℃, G' 值快速上升,此时盐溶性蛋白由粘性溶胶转变成一个黏弹性好的凝胶网状结构^[36]。共混凝胶 G' 的初始值和终值均高于对照,且随豌豆蛋白添加量的增加而升高,总体变化趋势与盐溶蛋白相似,与硬度结果一致,表明豌豆蛋白能够提高猪肉盐溶蛋白形成凝胶的能力,可以显著改善凝胶的质构特性。李可等^[37]研究发现,随竹笋膳食纤维添加量的增加,猪肉盐溶蛋白凝胶的 G' 值明显增加;Gao等^[4]研究表明,大豆分离蛋白能提高猪肉盐溶蛋白的胶凝能力;

Chang等^[38]研究发现,豆渣可以使猪肉肉糜凝胶的 G' 值显著增加,添加量越大, G' 值越高,均与本文的研究结果一致。

2.5 豌豆蛋白添加量对猪盐溶蛋白凝胶微观结构的影响

由图4可知,未添加豌豆蛋白的凝胶网络结构较为粗糙松散,并且出现较多的孔洞。添加豌豆蛋白后,豌豆蛋白对网络结构有支撑作用,填补了蛋白网络结构间的空隙。添加量为4%时,空洞基本消失,形成了高度致密、均一、有序的三维网络结构。添加量大于4%时,多余的豌豆蛋白颗粒散落在凝胶体系,不能进行有效的填充和包埋,添加量越高,散落的豌豆蛋白颗粒越多,凝胶结构越粗糙。可见,适量的豌豆蛋白可以有效填充凝胶网络结构,与本实验中保水性、质构的结果一致。与松散粗糙的凝胶结构相比,均匀致密的凝胶体系具有较高的持水能力,小孔可以更牢固地锁住水分^[39]。Gao等^[4]研究表明,大豆分离蛋白与猪肉盐溶蛋白间的化学作用力包括二硫键与疏水相互作用。冯婷等^[29]研究发现,添加2.5%的花生浓缩蛋白可以使鸡肉盐溶蛋白凝胶的三维网络结构更加紧密、有序,蛋白质交联度更高。Sun等^[32]研究认为,花生蛋白可与鸡肉盐溶蛋白发生交联,使盐溶蛋白凝胶孔洞变小,改善凝胶网络结构。

2.6 豌豆蛋白添加量对猪盐溶蛋白共混凝胶水分迁移的影响

豌豆蛋白对猪盐溶蛋白凝胶体系中水分分布和迁移的影响,可通过质子NMR测量自旋-自旋弛豫时间(T_2)来反映。 T_2 弛豫时间越短,表明水与底物结合越紧密, T_2 越长,表明水分越松散^[40]。结合水弛豫时间在0~10ms之间,表征凝胶网络结构内部的水,用 T_{2b} 表示; T_{21} 和 T_{22} 弛豫时间分别在10~100ms和250~400ms之间,分别表示不易流动水和游离水,即凝胶网络结构间的水分和自由水^[41]。由表2与图5可知,本实验出现3个特征峰,即 T_{2b} 、 T_{21} 和 T_{22} 。随豌豆蛋白添加量的增加, T_{2b} 、 T_{21} 、 T_{22} 均呈现出峰值向较短时间方向移动的趋势,添加量为10%时, T_{2b} 、 T_{21} 、 T_{22} 均降至最低。峰面积代表此部分水所占百分比,随豌豆蛋白添加量的增加, P_{2b} 虽然也在增加,但最高也只有1%左右,表明结合水在凝胶体系中所占百分比极小,不是凝胶中水分主要存在形态。 P_{21} 持续增加, P_{22} 持续下降,添加量为4%与10%的 P_{21} 差异不显著($p>0.05$),在87.43%~90.95%之间,表明不易流动水是凝胶中水分主要存在形态,且添加量为4%的豌豆蛋白就能够将更多的自由水束缚在凝胶结构中,限制了水分的移动,充分降低了凝胶的水分损失,提高了凝胶的保水能力。栗俊广等^[2]研究表明,木薯淀粉添加量为1.5%时,可以显著增加猪肉盐溶蛋白凝胶不易流动水的比例,降低自由水的比例,提高了共混凝胶的保水性。

3 结论

豌豆蛋白可以有效改善猪肉盐溶蛋白的凝胶品质,提高共混凝胶的形成能力。添加豌豆蛋白,可以

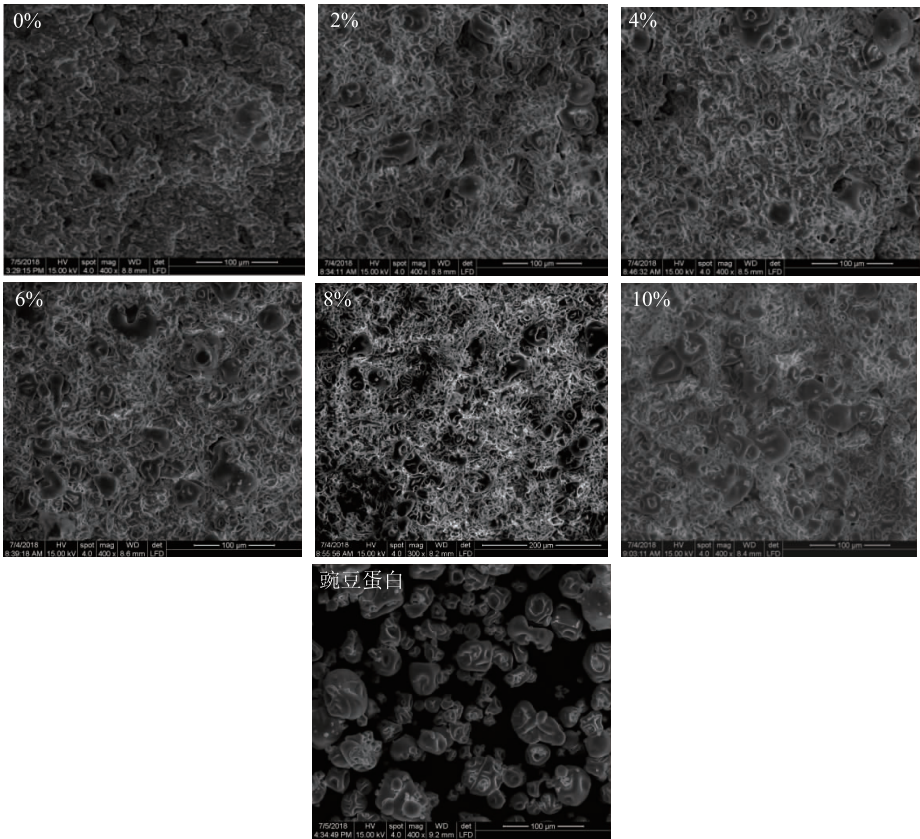


图4 豌豆蛋白添加量对凝胶微观结构的影响

Fig.4 Effects of pea protein addition on the microstructure of gel

表2 豌豆蛋白对猪盐溶蛋白共混凝胶水分迁移的影响

添加量 (%)	T ₂ 弛豫时间 (ms)			T ₂ 弛豫峰面积相对百分比 (%)		
	T _{2b}	T ₂₁	T ₂₂	P _{2b}	P ₂₁	P ₂₂
0	3.51 ± 0.12 ^a	36.74 ± 1.65 ^a	229.14 ± 3.16 ^a	0.63 ± 0.14 ^c	78.41 ± 0.55 ^d	20.96 ± 0.54 ^a
2	2.63 ± 0.11 ^b	30.32 ± 1.46 ^b	205.29 ± 2.96 ^b	0.78 ± 0.07 ^{bc}	81.38 ± 1.42 ^c	17.84 ± 0.62 ^b
4	2.13 ± 0.12 ^c	26.49 ± 1.72 ^c	179.12 ± 4.13 ^c	0.89 ± 0.06 ^b	87.43 ± 1.48 ^b	11.37 ± 0.61 ^c
6	1.80 ± 0.16 ^d	21.76 ± 1.62 ^d	168.34 ± 4.31 ^d	1.14 ± 0.13 ^a	89.26 ± 1.52 ^{ab}	9.60 ± 0.76 ^d
8	1.77 ± 0.13 ^d	20.90 ± 1.73 ^d	167.75 ± 4.22 ^d	1.21 ± 0.07 ^a	90.95 ± 1.68 ^a	8.02 ± 0.90 ^d
10	1.82 ± 0.14 ^d	20.36 ± 1.83 ^d	163.62 ± 4.19 ^d	1.26 ± 0.12 ^a	89.97 ± 1.54 ^{ab}	8.59 ± 0.66 ^d

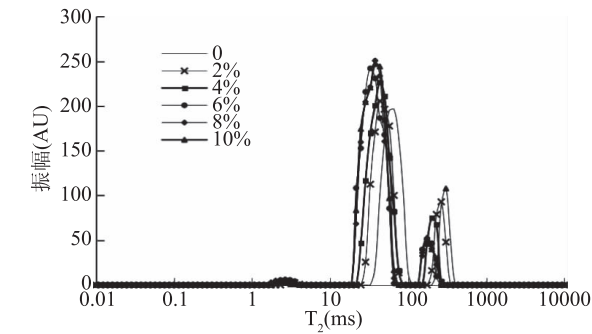


图5 豌豆蛋白添加量对凝胶弛豫时间 T₂ 及峰面积的影响

Fig.5 Effect of pea protein addition on the

transverse relaxation times(T₂) and peak area of gel

提高共混凝胶不易流动水的比例,降低自由水的比例,提高了凝胶保水性与蒸煮得率,改善了凝胶的质构;豌豆蛋白添加量为4%时,凝胶网络结构均匀致

密,高度有序。将豌豆蛋白添加到猪肉盐溶蛋白形成共混凝胶,不仅可以增加凝胶类产品的营养价值与保健功能,还可以对豌豆蛋白进行深度的利用与挖掘,可为豌豆蛋白在肉制品中的应用提供理论支撑。豌豆蛋白来源广泛,价格低廉,在肉制品行业应用前景十分广阔。然而,在豌豆蛋白与猪肉盐溶蛋白形成共混凝胶过程中,猪肉盐溶蛋白构象变化规律及豌豆蛋白-猪肉盐溶蛋白凝胶网络结构形成中最主要相互化学作用力,还不完全清楚,将是今后重点的研究方向。

参考文献

[1] Wu M, Xiong Y L, Chen J, et al. Rheological and microstructural properties of porcine myofibrillar protein – lipid emulsion composite gels [J]. Journal of Food Science, 2010, 74 (4) :207-217.

- [2] 栗俊广, 蒋爱民, 白艳红, 等. 木薯淀粉对猪肉盐溶蛋白凝胶特性的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(11): 123-127.
- [3] Choi Y S, Choi J H, Han D J, et al. Effects of rice bran fiber on heat-induced gel prepared with pork salt-soluble meat proteins in model system[J]. Meat Science, 2011, 88(1): 59-66.
- [4] Gao X Q, Hao X Z, Xiong G Y, et al. Interaction between carrageenan/soy protein isolates and salt-soluble meat protein[J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 100: 47-53.
- [5] 张巍. 大豆分离蛋白(SPI)与猪肉盐溶蛋白共凝胶的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2011.
- [6] 周向军, 朱敏涛, 袁毅君. 赤藓糖醇对豌豆分离蛋白结构和功能特性的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(8): 73-77, 84.
- [7] Costa G E D A, Queiroz-Monici K D S, Reis S M P M, et al. Chemical composition, dietary fibre and resistant starch contents of raw and cooked pea, common bean, chickpea and lentil legumes[J]. Food Chemistry, 2006, 94(3): 327-330.
- [8] Tömösközi S, Lásztity R, Haraszi R, et al. Isolation and study of the functional properties of pea proteins[J]. Nahrung, 2001, 45(6): 399-401.
- [9] 李慧, 王琪, 付鑫, 等. 豌豆蛋白挤出物制备抗氧化肽工艺优化及其分离[J]. 食品工业科技, 2018, 39(6): 165-169.
- [10] Sun X D, Arntfield S D. Gelation properties of myofibrillar/pea protein mixtures induced by transglutaminase crosslinking[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 27(2): 394-400.
- [11] 王琪, 李慧, 陆文伟, 等. 木瓜蛋白酶酶解豌豆蛋白挤出物产物自由基清除活性评价[J]. 山东理工大学学报: 自然科学版, 2018, 32(4): 30-34.
- [12] 王正德, 金玉红, 杜金华. 豌豆分离蛋白对小麦粉面团特性及挂面品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(3): 21-26, 63.
- [13] 马宁, 魏姜勉. 豌豆蛋白的改性及其开发利用研究进展[J]. 中国市场, 2015, 32: 231-233.
- [14] 白一凡, 王辉, 杨震, 等. 豌豆蛋白加工特性及在乳化香肠中的应用[J]. 肉类研究, 2014, 28(12): 14-16.
- [15] 杨震, 曲超, 贡慧, 等. 豌豆蛋白组织化挤压工艺参数优化及其在肉制品中的应用[J]. 延边大学农学学报, 2016, 38(4): 317-324.
- [16] Su Y K, Bowers J A, Zayas J F. Physical characteristics and microstructure of reduced-fat frankfurters as affected by salt and emulsified fats stabilized with nonmeat proteins[J]. Journal of Food Science, 2010, 65(1): 123-128.
- [17] Sun J, Wu Z, Xu X, et al. Effect of peanut protein isolate on functional properties of chicken salt-soluble proteins from breast and thigh muscles during heat-induced gelation[J]. Meat Science, 2012, 91(1): 88-92.
- [18] 栗俊广, 李增, 蒋爱民, 等. 蒜粉添加量对猪肉盐溶蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(17): 15-18.
- [19] 伍梦婷, 罗凯凯, 郭娟娟, 等. 木薯改性淀粉对鹅血凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(6): 95-99, 113.
- [20] Zhu D Y, Kang Z L, Ma H J, et al. Effect of sodium chloride or sodium bicarbonate in the chicken batters: A physico-chemical and raman spectroscopy study[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 83: 222-228.
- [21] 王希希, 李康, 黄群, 等. 刺麒麟菜对鸡胸肉糜凝胶特性和流变特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(5): 76-80.
- [22] Zhou Y Z, Chen C G, Chen X, et al. Contribution of three ionic types of polysaccharides to the thermal gelling properties of chicken breast myosin[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(2): 2655-2662.
- [23] Kang Z L, Li B, Ma H J, et al. Effect of different processing methods and salt content on the physicochemical and rheological properties of meat batters[J]. International Journal of Food Properties, 2016, 19(7): 1604-1615.
- [24] Wattanachant S, Benjakul S, Ledward D A. Effect of heat treatment on changes in texture, structure and properties of thai indigenous chicken muscle[J]. Food Chemistry, 2005, 93(2): 337-348.
- [25] 邵俊花, 张骏龙, 贾娜, 等. 加热温度对热诱导乳化凝胶形成过程中¹H分布状态及迁移规律的影响[J]. 中国食品学报, 2018, 18(3): 44-52.
- [26] 冯哲, 陈辉, 郭丽萍, 等. 高压结合热处理对猪肉肌红蛋白的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(2): 160-164, 175.
- [27] 雷跃磊, 刘茹, 王卫芳, 等. 三种添加物对鱼肉猪肉复合凝胶品质的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(5): 281-284.
- [28] Han M Y, Zhang Y J, Fei Y, et al. Effect of microbial transglutaminase on NMR relaxometry and microstructure of pork myofibrillar protein gel[J]. European Food Research and Technology, 2009, 228(4): 665-670.
- [29] 冯婷, 孙京新, 吴振, 等. 花生浓缩蛋白对鸡胸肉盐溶蛋白热诱导凝胶性能的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(10): 97-102, 128.
- [30] 吴振, 杨传玉, 孙京新, 等. 不同添加剂对鸡肉盐溶蛋白质热诱导凝胶性质的影响[J]. 中国食品学报, 2012, 12(8): 60-66.
- [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, 11: 30-32, 41.
- [32] 杜洪振, 孙钦秀, 杨振, 等. 转谷氨酰胺酶对鲤鱼肌原纤维蛋白乳化活性和凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(6): 126-130, 278.
- [33] Kang Z L, Zou Y F, Xu X L, et al. Effect of various amounts of pork and chicken meat on the sensory and physicochemical properties of Chinese-style meatball (kung-wan)[J]. Food Science and Technology Research, 2013, 19(6): 963-970.
- [34] 于巍, 周坚. 草鱼盐溶蛋白保水性及流变性质的研究[J]. 食品与发酵工业, 2007, 33(10): 72-75.
- [35] Xiong Y L, Brekke C J. Physicochemical and gelation properties of pre- and post-rigor chicken salt-soluble proteins[J]. Journal of Food Science, 2010, 55(6): 1544-1548.
- [36] Wang S F, Smith D M, Steffe J F. Effect of pH on the dynamic rheological properties of chicken breast salt-soluble proteins during heat-induced gelation[J]. Poultry Science, 1990, 69(12): 2220-2227.
- [37] 李可, 刘俊雅, 扶磊, 等. 竹笋膳食纤维对猪肉盐溶性蛋白热诱导凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(4): 56-61.

超滤平均通量和树脂有效运行时间均提高 10%。综合结果表明,将 PA 与 PP 酶进行复合使用,可以有效解决浓缩苹果清汁产业化加工中的色值下降及不稳定的问题,对于提升产品品质具有显著效果。

3 结论

通过果胶酶 PA 和 PP 的复合使用,可以有效提高浓缩苹果清汁加工过程中的色值,其中优化得到了复合酶解工艺为 PA 和 PP 酶的添加量分别为 25 mL/t 和 10 mL/t,于 50~55 °C 温度下酶解 60 min。同时,复合果胶酶的使用可以显著提高浓缩苹果清汁贮藏过程中的色值稳定性,使其日褐变量可降低至 0.05%;同时,超滤平均通量及树脂有效运行时间可提高 10% 以上。综上所述,PA 与 PP 酶的复合使用可有效解决浓缩苹果清汁产业化加工中的色值下降及不稳定的问题,显著提升产品的市场竞争力。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中华人民共和国国家统计局数据库 [EB/OL]. 2019-03-02. <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- [2] 梁亚男,叶发银,雷琳,等. 苹果汁褐变控制技术进展[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(3): 280-286.
- [3] 邓健康,刘璇,吴昕烨,等. 基于层次分析和灰色关联度法的苹果(等外果)汁品质评价[J]. 中国食品学报, 2017, 17(4): 197-208.
- [4] Cruz M G, Bastos R, Pinto M, et al. Waste mitigation: From an effluent of apple juice concentrate industry to a valuable ingredient for food and feed applications[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 193: 652-660.
- [5] Liu X, Deng J K, Bi J F, et al. Cultivar classification of cloudy apple juices from substandard fruits in China based on aroma profile analyzed by HS-SPME/GC-MS[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 102: 304-309.
- [6] 郭倩. 浓缩苹果汁的褐变因素及控制措施[J]. 食品安全导刊, 2016(6): 72.
- [7] Paravisini L, Peterson D G. Role of reactive carbonyl species in non-enzymatic browning of apple juice during storage[J]. Food Chemistry, 2018, 245: 1010-1017.
- [8] Al-Obaidi M A, Kara-Zaïtri C, Mujtaba I M. Optimum design of a multi-stage reverse osmosis process for the production of highly concentrated apple juice[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 214: 47-59.
- [9] 张更. 浓缩苹果清汁色值控制技术的控制[D]. 杨凌: 西北

农林科技大学, 2008.

- [10] 张建新, 张更, 余清谋, 等. 浓缩苹果清汁生产中的色值控制措施研究[J]. 农业工程学报, 2008(7): 255-259.
- [11] 张建新, 张更, 余清谋, 等. 不同树脂对浓缩苹果清汁色值控制的研究[J]. 保鲜与加工, 2008(2): 45-47.
- [12] 孙艳, 高雪丽, 孟楠, 等. 控制苹果汁加工中发生褐变的研究[J]. 农产品加工(学刊), 2011(1): 24-26, 30.
- [13] Córdova A, Saavedra J, Mondaca V, et al. Quality assessment and multivariate calibration of 5-hydroxymethylfurfural during a concentration process for clarified apple juice[J]. Food Control, 2019, 95: 106-114.
- [14] 章金英. 苹果汁加工工艺中果汁褐变控制[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [15] 舒念辉. 果汁褐变及控制研究[J]. 食品与发酵科技, 2011, 47(5): 59-61, 71.
- [16] 米热班古·木太力甫, 马泽鑫, 敬思群. 苹果汁褐变影响因素的研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(14): 8604-8606, 8630.
- [17] 周会玲, 段长青, 周存田, 等. 不同品种苹果汁的褐变及其抑制方法研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2001(1): 91-93.
- [18] 陈颖, 杜邵龙, 曾祥奎. 超滤脱色苹果汁应用工艺[J]. 食品与发酵工业, 2005, 31(9): 138.
- [19] 王思新, 焦中高, 孙治军, 等. 树脂吸附法提高苹果浓缩清汁色值和透光率研究[J]. 果树学报, 2001, 18(1): 35-38.
- [20] 易建华, 仇农学, 朱振宝, 等. 树脂法生产无色浓缩苹果汁的初步研究[J]. 饮料工业, 2001, 4(4): 6-7.
- [21] 田洪磊, 田呈瑞. 浓缩苹果汁生产中控制褐变的研究[J]. 中国酿造, 2005(10): 14-16.
- [22] 宋莲军, 杨月, 唐贵芳. 复合抑制剂对苹果汁防褐变效果的影响[J]. 河南农业大学学报, 2010, 44(5): 585-590.
- [23] An X C, Hu Y X, Wang N, et al. Continuous juice concentration by integrating forward osmosis with membrane distillation using potassium sorbate preservative as a draw solute[J]. Journal of Membrane Science, 2019, 573: 192-199.
- [24] 李敏, 龚小梅, 李喜宏, 等. 树脂与流速对浓缩苹果汁色值及稳定性的影响[J]. 食品科技, 2016, 41(1): 41-43, 47.
- [25] Sawitri A, Munir M M, Edikresnha D, et al. An investigation on bilayer structures of electrospun polyacrylonitrile nanofibrous membrane and cellulose membrane used as filtration media for apple juice clarification[J]. Materials Research Express, 2018, 5(5): 054003.
- [26] GB/T 18963-2012 浓缩苹果汁[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.

(上接第 36 页)

- [38] Chang T, Wang C, Wang S, et al. Effect of okara on textural, color and rheological properties of pork meat gels[J]. Journal of Food Quality, 2014, 37(5): 339-348.
- [39] Kao F J, Su N W, Lee M H. Effect of calcium sulfate concentration in soymilk on the microstructure of firm tofu and the protein constitutions in tofu whey[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(21): 6211-6216.

- [40] 韩敏义, 费英, 徐幸莲, 等. 低场 NMR 研究 pH 对肌原纤维蛋白热诱导凝胶的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(6): 2098-2104.
- [41] Tornberg E, Wahlgren M, Brondum J, et al. Pre-rigor conditions in beef under varying temperature - and pH - falls studied with rigometer, NMR and NIR[J]. Food Chemistry, 2000, 69(4): 407-418.