

冷等离子体处理的面筋蛋白对鸡肉糜凝胶品质特性的影响

韩西平, 计红芳, 张莹, 李丹丹, 张令文, 马汉军

Effect of Gluten Treated with Cold Plasma on Quality Properties of Chicken Gel

HAN Xiping, JI Hongfang, ZHANG Ying, LI Dandan, ZHANG Lingwen, and MA Hanjun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050171>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

用于调理鸡肉的大气等离子体冷杀菌工艺优化

Process Optimization of Nonthermal Sterilization of Atmospheric Plasma Technology Applied on Pre-processed Chicken

食品工业科技. 2019, 40(16): 145-150 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.16.024>

低温等离子体冷杀菌对盐水鸭货架期及风味品质的影响

Effects of Cold Plasma Sterilization on Shelf Life and Flavor Quality of Salted Duck

食品工业科技. 2021, 42(17): 70-77 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021010031>

高压电场低温等离子体对红枣干果的冷杀菌工艺优化及其对品质的影响

Optimization of Cold Sterilization Process and Its Effect on Quality of Dried Jujube by High Voltage Electric Field Cold Plasma

食品工业科技. 2021, 42(16): 317-324 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020120235>

低温等离子体对糙米蒸煮品质和物化特性的影响

Effects of Low Temperature Plasma on Cooking Quality and Physicochemical Properties of Brown Rice

食品工业科技. 2020, 41(2): 9-15 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.02.002>

甘草提取物对冷藏鸡肉糜脂肪和蛋白质氧化及品质特性的影响

Effects of Licorice Extract on Oxidation and Quality Characteristics of Fat and Protein in Refrigerated Chicken Meat Batter

食品工业科技. 2021, 42(1): 75-81,88 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020030319>

复乳凝胶作为脂肪替代物对鸡肉肠理化性质的影响

Effect of Double Emulsion Gels as Fat Replacers on the Physicochemical Properties of Chicken Sausage

食品工业科技. 2020, 41(8): 7-14 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.08.002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

韩西平, 计红芳, 张莹, 等. 冷等离子体处理的面筋蛋白对鸡肉糜凝胶品质特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(6): 84–90. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050171

HAN Xiping, JI Hongfang, ZHANG Ying, et al. Effect of Gluten Treated with Cold Plasma on Quality Properties of Chicken Gel[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(6): 84–90. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050171

· 研究与探讨 ·

冷等离子体处理的面筋蛋白对鸡肉糜凝胶品质特性的影响

韩西平¹, 计红芳^{1,2,*}, 张莹¹, 李丹丹¹, 张令文¹, 马汉军^{1,2}

(1. 河南科技学院食品学院, 河南新乡 453003;

2. 国家猪肉加工技术研发专业中心, 河南新乡 453003)

摘要: 以鸡肉为原料, 向其添加不同功率 (350、500、650、800、950 W) 冷等离子体处理的面筋蛋白, 制得鸡肉糜凝胶, 探究不同处理面筋蛋白对鸡肉糜凝胶蒸煮损失、保水性、流变特性、质构、化学作用力、微观结构和水分迁移等品质特性的影响。结果表明: 添加冷等离子体处理的面筋蛋白均可提高凝胶的保水性、降低蒸煮损失, 650 W 时保水性最高为 96.47%、蒸煮损失最低为 5.43%, 与其它组相比均差异显著 ($P < 0.05$); 面筋蛋白的添加显著提高了凝胶不易流动水的比例 ($P < 0.05$), 降低了自由水的比例, T_{21} 、 T_{22} 在 0~650 W 时向短方向移动, 650 W 时 T_{21} 、 T_{22} 最短。随冷等离子体处理功率的增加, 储能模量 G' 先升高后下降, 650 W 时最高; 硬度与咀嚼性持续上升, 而弹性和回复性先上升后下降, 二者均在 650 W 时达到最高, 分别为 0.954 和 0.367; 添加冷等离子体处理的面筋蛋白提高了凝胶的疏水作用和二硫键。冷等离子体处理的面筋蛋白可提高凝胶的形成能力、改善品质, 650 W 时凝胶的空间网状结构致密有序, 品质最佳。

关键词: 冷等离子体, 面筋蛋白, 功率, 鸡肉, 凝胶品质

中图分类号: TS251.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)06-0084-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050171



本文网刊:

Effect of Gluten Treated with Cold Plasma on Quality Properties of Chicken Gel

HAN Xiping¹, JI Hongfang^{1,2,*}, ZHANG Ying¹, LI Dandan¹, ZHANG Lingwen¹, MA Hanjun^{1,2}

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

2. National Pork Processing Technology Research and Development Professional Center, Xinxiang 453003, China)

Abstract: Gluten was treated by cold plasma with different powers (350~950 W), and then were added to chicken batter, which was used as raw material. The cooking loss, water holding capacity, texture, dynamic rheology, chemical forces, microstructure, water distribution and migration of chicken gel containing cold plasma treatment gluten were analyzed. Results showed that, the addition of cold plasma treated gluten could raise the water holding capacity and reduce cooking loss of the gel. When gluten treated by cold plasma with power of 650 W was added, the water holding capacity of gel reached to the highest (the value was 96.47%) and the cooking loss was the lowest (the value was only 5.43%), either of them was significantly different compared to other groups ($P < 0.05$). With addition of cold plasma treated gluten, the proportion of immobilized water in gel rose significantly while that of free water decreased ($P < 0.05$), and the transverse relaxation time of both T_{21} and T_{22} moved in the direction of short relaxation time. And both T_{21} and T_{22} reached to the shortest when cold plasma treatment power was 650 W. With the increase of cold plasma treatment power, G' first increased and then decreased, and reached the highest value at 650 W. Additionally, both the hardness and chewiness rose

收稿日期: 2023-05-15

基金项目: 河南省科技攻关项目 (222102110085, 212102110084); 河南省重大科技专项项目 (221100110500)。

作者简介: 韩西平 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 肉制品加工与品质控制, E-mail: hxp09042023@163.com。

* 通信作者: 计红芳 (1978-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 肉品科学, E-mail: jhf300@126.com。

continuously, while both the springiness and resilience increased first and then decreased, and reached the maximum at treatment power level of 650 W, their value was 0.954, and 0.367, respectively. Addition of cold plasma treated gluten could enhance both hydrophobic interaction and disulfide bonds. Addition of cold plasma treated gluten could strengthen gel formation ability and improve the quality of chicken gel. When the cold plasma treatment power was 650 W, the chicken gel was obtained with dense and uniform spatial network structure, and best quality.

Key words: cold plasma; gluten; power; chicken; gel properties

鸡肉营养丰富, 具有低脂肪、低胆固醇、高蛋白等优点, 其肉糜产品, 如肉丸、肉饼、香肠等深受消费者的喜爱^[1]。肉糜产品的品质取决于肉糜形成凝胶的性能, 在实际生产中, 往往添加植物蛋白、淀粉、亲水胶体等非肉类填充剂用以减少脂肪流失, 保持水分, 改善制品的乳化性、持水性和质构特性等^[1-3]。植物蛋白既能平衡肉制品的氨基酸组成, 又能赋予肉制品特殊的组织结构与风味, 是一种相对理想的肉类产品填充剂^[4-6]。

面筋蛋白是小麦淀粉生产过程中的副产物, 因其资源丰富、营养价值高, 且含有人体必需的 8 种氨基酸, 是营养丰富的植物蛋白资源^[7]。面筋蛋白由于内部大量的疏水性基团和非极性氨基酸的存在, 导致其水溶性不理想, 极大地限制了其在食品领域的应用。因此, 采用适当的技术对面筋蛋白进行改性, 扩大其应用范围变得极其重要。面筋蛋白常用的改性方法有微波改性^[8]、超声改性^[9]、糖基化改性^[10]和脱酰胺改性^[11], 其中冷等离子体作为一种耗时短、效率高、环境友好等优势的方法引起研究者的广泛关注^[12-14]。王若兰等^[13]研究发现冷等离子体处理可以增强面筋蛋白聚合度, 增加面筋强度, 改善面筋质量。何鑫^[14]研究发现冷等离子体处理可使蛋白质二级结构发生改变, 促使蛋白质组间发生聚合作用, 使大分子量聚合体含量增加, 同时增强面筋的品质。

本课题组前期研究表明, 经冷等离子体处理的面筋蛋白可以提高其溶解度、持水力, 改变其二级结构等, 但尚未见有将其加入到鸡肉制成肉糜, 研究改性面筋蛋白对鸡肉凝胶品质影响的报道。因此, 本实验通过测定凝胶蒸煮损失、保水性、质构特性、流变特性、化学作用力、微观结构、水分迁移等指标, 探讨冷等离子体处理的面筋蛋白对鸡肉凝胶特性改善规律, 可为拓宽面筋蛋白在肉类食品中的应用提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

白羽鸡胸肉 河南新乡鸿运来超市; 面筋蛋白 河南密丹儿商贸有限公司; 戊二醛、无水乙醇、叔丁醇、硫酸钾、盐酸、硫酸铜、氢氧化钠、硼酸、氯仿等均为国产分析纯。

HAAKE MARS III 旋转式流变仪 德国 Thermo Fisher Scientific 公司; UMC-5C 斩拌机 德国 Stephan 公司; 核磁 PQ001 台式 NMR 分析仪 上海

纽迈电子有限公司; JRJ-100 绞肉机 山东嘉信食品机械有限公司; TS-PL50 大气等离子表面处理机 宁波新芝生物科技股份有限公司; Quanta 200 扫描电镜 美国 FEI 公司; AU120 电子天平 日本岛津公司; U2810 型紫外-可见分光光度计 日本日立高新技术公司; 3-18K 台式高速冷冻离心机 德国 Sigma 公司; TA-XT 质构仪 英国 SMS 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 冷等离子体处理面筋蛋白 参考杜艳丽等^[15]的方法并稍作修改。将 30 g 面筋蛋白平铺在玻璃平皿中, 加入 90 mL 蒸馏水使其吸水完全, 然后置于冷等离子体载物台上, 分别用 350、500、650、800、950 W 功率的冷等离子体处理面筋蛋白, 时间为 150 s, 将处理好的面筋蛋白冻干后研磨成粉备用。

1.2.2 共混凝胶的制备 参考 Zhao 等^[16]的方法并稍作修改。将鸡肉切除脂肪, 剔除可见结缔组织和血管, 每组取鸡肉糜 100 g, 加入 2% 食盐、25% 冰水, 第 1 组不加面筋蛋白, 第 2 组加 6 g 面筋蛋白不处理, 3~7 组加 6 g 面筋蛋白(分别为冷等离子功率 350、500、650、800、950 W 处理), 高速搅拌 2~3 次, 每次 30 s, 混合均匀后称 48 g 装入离心管中, 配平, 1342×g 离心 10 min, 放入水浴锅中, 85 °C, 30 min, 取出冷却。

1.2.3 蒸煮损失的测定 将 48 g 经搅拌均匀的鸡肉糜转移至离心管, 记录为煮前重量 m_1 。经 85 °C 水浴处理 30 min, 取出冷却, 将凝胶倒在滤纸上, 吸干表面流出汁液, 称重, 记录为煮后重量 m_2 ^[17]。

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

1.2.4 保水性的测定 将煮好的凝胶用滤纸吸干表面流出汁液, 切为高 20 mm 的圆柱形, 称其重量, 记录为 m_1 。将其置于离心管中, 5368×g 离心 10 min, 取出擦干后再次称重, 记录为 m_2 ^[18]。

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

1.2.5 质构特性的测定 参考 Zhu 等^[19]的方法并稍作修改。采用 TA-XT 质构仪对凝胶样品进行测定, 样品规格为 2 cm×2 cm 圆柱形, 探头型号为 P/36R, 测定速度为 2 mm/s, 压缩比为 40%, 时间为 5 s, 触发力为 5 g。试验重复 6 次取平均值。

1.2.6 流变特性的测定 采用旋转式流变仪振荡模

式,参数:狭缝宽度 0.5 mm,平板直径 50 mm,应变 2%,频率 0.1 Hz,加样后用石蜡密封。在 20 °C 保温 5 min,以 2 °C/min 的速率在 20~80 °C 范围内进行加热扫描,测定储能模量 G' 变化^[20]。

1.2.7 化学作用力的测定 参照 Gómez-Guillén 等^[21]的方法稍作修改。配制 A、B、C、D、E 等 5 种溶液,其中 A 为 0.05 mol/L NaCl; B 为 0.6 mol/L NaCl; C 为 0.6 mol/L NaCl+1.5 mol/L 尿素; D 为 0.6 mol/L NaCl+8 mol/L 尿素; E 为 0.6 mol/L NaCl+8 mol/L 尿素+1.5 mol/L β -巯基乙醇溶液。实验分为 5 组,每组取凝胶 2 g,分别加入 10 mL 的 A、B、C、D、E 溶液,混匀,4 °C 静置 1 h,5368×g 离心 20 min,双缩脲法测定上清液中的蛋白质量浓度。以凝胶在不同溶液中测定的蛋白质含量差值表示离子键、氢键、疏水性相互作用和二硫键。

1.2.8 微观结构的分析 凝胶被分割成小片后用戊二醛(25 mg/mL)浸泡固定 24 h。先用 pH6.8 磷酸缓冲液(0.1 mol/L)洗涤 10 min,接着用不同体积浓度乙醇溶液梯度脱水 10 min,氯仿脱脂 30 min,无水乙醇:叔丁醇=1:1,叔丁醇分别处理 10 min^[22]。真空干燥后进行拍照观察。

1.2.9 水分迁移的测定 参照朱东阳等^[23]的方法稍作修改。将凝胶样品转移至直径 15 mm 的核磁管中,根据 Carr-Purcell-Meiboom-Gill(CPMG)脉冲序列测定样品的横向弛豫时间(T_2)。测试参数为:TW=5000,SW=100 kHz,NS=8,NACH=5000。每个处理组测定 4 个平行样品。利用仪器自带的 Multi Exp Inv 分析软件获得 T_2 分布和峰面积比值。

1.3 数据处理

每个试验重复 3 次,采用 Excel 进行数据处理,SPSS2018 进行方差分析,使用 Duncan multiple range test 进行多重比较($P<0.05$),数值以平均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 冷等离子体处理的面筋蛋白对鸡肉糜凝胶蒸煮损失与保水性的影响

由图 1 可知,与对照组相比,添加面筋蛋白可以提高凝胶的保水性,降低凝胶的蒸煮损失,这与计红芳等^[6]研究结果相同。随着冷等离子体功率的升高,保水性呈先升高后降低,冷等离子体功率为 650 W 时保水性最高,为 96.47%;而蒸煮损失先降低后升高,冷等离子体功率为 650 W 时蒸煮损失最低,为 5.43%。在冷等离子体处理面筋蛋白的过程中,一些亲水基团如羟基、羧基和氨基被加入到面筋蛋白分子内^[24],提高面筋蛋白分子的亲水能力,从而提高凝胶的保水性,降低了蒸煮损失;但当功率过高时,会造成面筋蛋白分子交联或发生聚集行为^[25],从而影响凝胶的保水性和蒸煮损失。

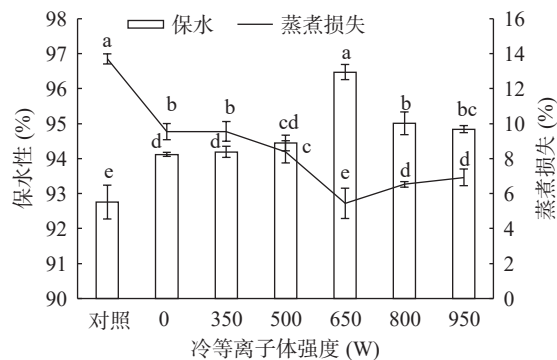


图 1 冷等离子体处理的面筋蛋白对鸡肉糜凝胶蒸煮损失和保水性的影响

Fig.1 Effects of gluten treated with cold plasma on cooking loss and water retention of chicken gel

注:同一指标,不同小写字母表示差异显著, $P<0.05$,图 3、图 5 同。

2.2 冷等离子体处理的面筋蛋白对鸡肉糜凝胶质构的影响

如表 1 所示,随着冷等离子体功率的增加,凝胶的硬度、咀嚼性均呈上升趋势,在 800 和 950 W 时差异不显著($P>0.05$),在 950 W 时达到最大值,分别为 8647 和 5630 g,为对照组的 1.57 倍和 1.78 倍;凝胶的弹性和回复性随着冷等离子体功率的增加,均呈先升高后降低的趋势,在功率为 650 W 时达到最大,与其它组存在显著性差异($P<0.05$),与对照相比回复性上升了 29.03%,弹性上升了 7.07%。面筋蛋白中含有醇溶蛋白和麦谷蛋白,使其具有独特的黏弹性^[26]。冷等离子体处理可以增强面筋强度,改善面筋质量,提高面筋指数^[14,27-28],当添加到鸡肉糜凝胶中,可以促进肌原纤维蛋白和面筋蛋白之间的结合,使面筋蛋白充分填充到凝胶网络之中,使凝胶的组织结构更为紧密,进而增强了凝胶的弹性和回复性^[29]。但冷等离子体功率过高时,蛋白分子组织结构遭到破坏,导致凝胶呈现过硬过韧现象,从而降低凝胶的弹性和回复性。

表 1 冷等离子体处理的面筋蛋白对鸡肉糜凝胶质构的影响
Table 1 Effect of gluten treated with cold plasma on the texture of chicken minced meat gel

冷等离子体处理强度 (W)	硬度 (g)	回复性	咀嚼性 (g)	弹性
对照	5514±134 ^e	0.279±0.005 ^c	3163±167 ^e	0.891±0.001 ^d
0	6753±68 ^c	0.329±0.005 ^c	4314±186 ^c	0.915±0.005 ^{bc}
350	6013±207 ^d	0.295±0.003 ^d	3380±140 ^{de}	0.904±0.003 ^c
500	6366±205 ^{cd}	0.298±0.009 ^d	3677±136 ^d	0.918±0.007 ^b
650	7238±444 ^b	0.367±0.007 ^a	4799±229 ^b	0.954±0.014 ^a
800	8494±229 ^a	0.347±0.009 ^b	5407±281 ^a	0.926±0.006 ^b
950	8647±96 ^a	0.342±0.005 ^b	5630±97 ^a	0.921±0.003 ^b

注:同一指标,不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

2.3 冷等离子体处理的面筋蛋白对鸡肉糜凝胶流变学特性的影响

肉糜凝胶中的蛋白质分子在加热过程中会受热变性展开和重新排列聚合两个过程,储能模量(G')可

以反映其过程, 同时还能反映凝胶质构的变化^[30-31]。由图 2 可知, 未加面筋蛋白的对照组峰值出现的温度均小于其他组, 这可能是由于面筋蛋白推迟了肌球蛋白头部和尾部的变性温度。添加面筋蛋白后, 各组凝胶在 20~46 °C 时, G' 随着温度的升高而缓缓下降, 可能是在搅拌的过程中, 蛋白质由长链转变为短链, 蛋白之间氢键作用减弱有关^[32]; 在 46 °C 左右时, G' 开始缓慢增加, 并在 51 °C 达到第一个峰值, 此峰为肌球蛋白头部变性峰, 随后加热至 62 °C 时, 因肌球蛋白尾部变性, 改变原有的蛋白网络结构导致其迅速下降; 在 62~80 °C 时 G' 快速上升, 最终形成稳定的凝胶结构。当冷等离子体功率为 650 W 时, G' 值最高, 此时凝胶品质最好, 与质构所表现的一致(表 1)。

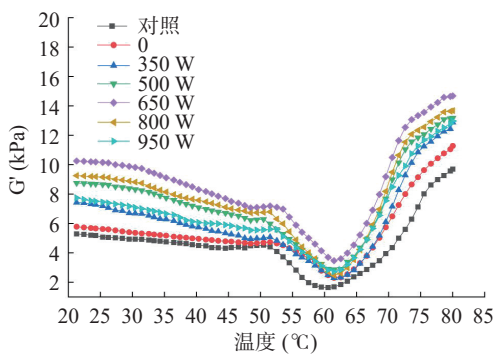


图 2 冷等离子体处理的面筋蛋白对鸡肉糜凝胶流变学特性的影响

Fig.2 Effect of cold plasma treated gluten on rheological properties of chicken gel

2.4 冷等离子体处理的面筋蛋白对鸡肉糜凝胶化学作用力的影响

维持蛋白凝胶三维网络结构的作用力主要有氢键、离子键、疏水作用和二硫键^[33]。由图 3 所示, 凝胶氢键、疏水作用和二硫键随冷等离子体功率的增加, 呈现先上升后下降的趋势, 疏水相互作用力在功率为 650 W 时最高, 对应的蛋白溶解量为 8.434 mg/mL, 且与功率 800 和 950 W 相比差异不显著 ($P > 0.05$), 二硫键在功率为 650 W 时也最高(该值高达 4.98 mg/mL), 氢键在 650 W 和 800 W 时差异不显著 ($P > 0.05$)。实验结果显示, 冷等离子 650 W 时处理的面筋蛋白对凝胶的疏水相互作用力、二硫键和氢键增强效果最佳。离子键随着冷等离子体功率的升高而增加, 但所对应的蛋白溶解量均小于

1 mg/mL, 因此与氢键和疏水相互作用力相比较, 离子键在凝胶形成网络结构的过程中发挥作用最小。Belon^[34] 研究结果表明, 醇溶蛋白和麦谷蛋白相互作用会被氢键和疏水作用所影响。在水浴加热过程中, 可能会造成面筋蛋白的分子结构被展开, 从而促进了疏水相互作用的增强以及巯基—二硫键的交换, 而冷等离子处理面筋蛋白可以增强面筋蛋白的疏水相互作用并且促进巯基—二硫键的交换^[35-36], 从而使肌原纤维蛋白与面筋蛋白间的交联聚集得到加强, 形成的三维网络结构更复杂均匀^[37-38]。

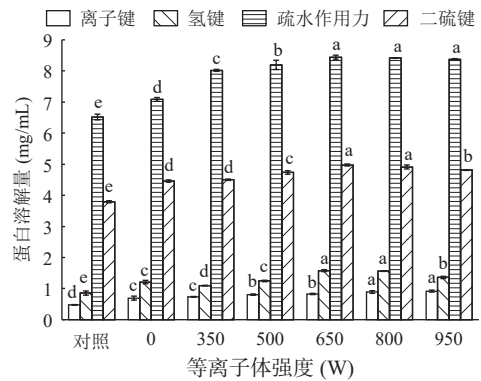
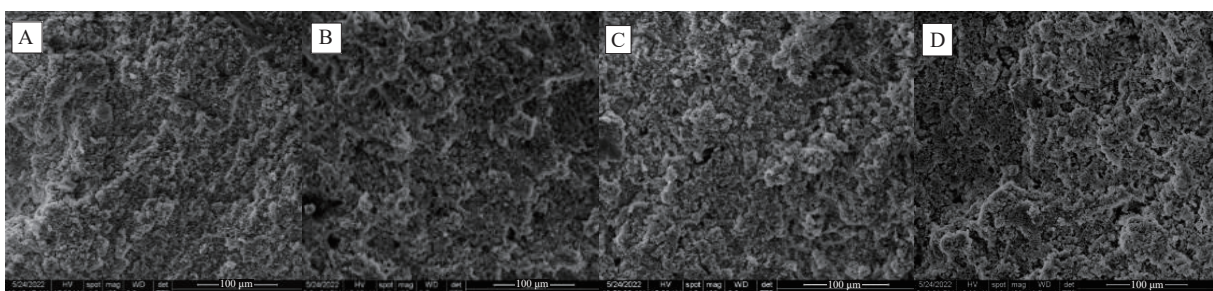


图 3 冷等离子体处理的面筋蛋白对鸡肉糜凝胶主要化学作用力的影响

Fig.3 Effect of cold plasma treated gluten protein on chemical force of chicken gel

2.5 冷等离子体处理的面筋蛋白对鸡肉糜凝胶微观结构的影响

如图 4 所示, 对照组的凝胶结构较为粗糙, 蛋白质分子之间呈颗粒状相互聚集, 表面不平整^[39]; 随着冷等离子体功率的增加, 凝胶表面逐渐变得平整、有序, 结构逐渐致密, 蛋白质分子间呈片状相互凝聚, 冷等离子体功率为 650 W 时, 凝胶结构最为致密, 形成的空间三维网状结构更加均匀有序, 可能是冷等离子体功率的增加改变了面筋蛋白的结构, 影响了氢键和蛋白质的水合性质^[40-41], 从而提高蛋白质的持水性, 影响凝胶的结构。均匀致密的网络结构, 可以减少蛋白质、水分等物质的损失, 捕获更多的水分^[42], 提高凝胶保水性、改善质构。当冷等离子体功率继续升高, 凝胶表面孔隙增大, 结构变得粗糙, 可能是冷等离子体功率过高, 使面筋蛋白包藏在分子内部的疏水基团暴露出来, 影响了水与肌肉蛋白以及肌肉蛋白与面筋蛋白之间的相互作用, 造成凝胶的硬度过高, 弹性减小。



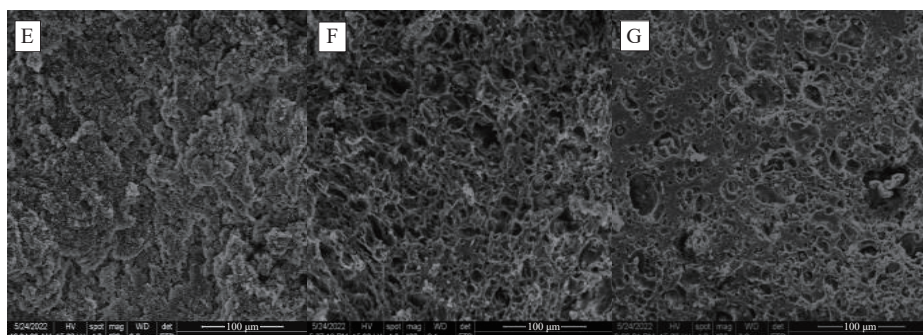


图4 冷等离子体处理的面筋蛋白对鸡肉糜凝胶扫描电镜结果的影响(100 μm)

Fig.4 Effect of cold plasma treated gluten on microstructure of chicken gel (100 μm)

注:冷等离子体功率: A: 对照; B: 0 W; C: 350 W; D: 500 W; E: 650 W; F: 800 W; G: 950 W。

2.6 冷等离子体处理的面筋蛋白对鸡肉糜凝胶水分迁移的影响

由图5A可知,所有凝胶样品均在1~400 ms内

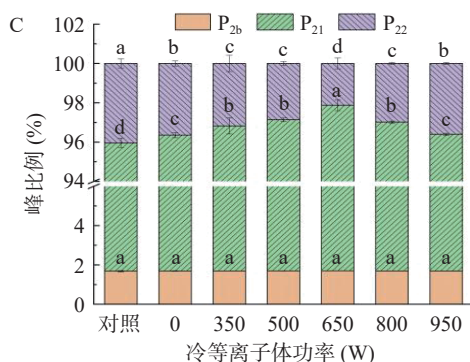
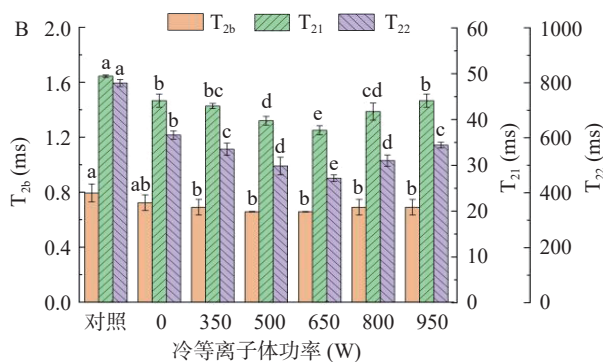
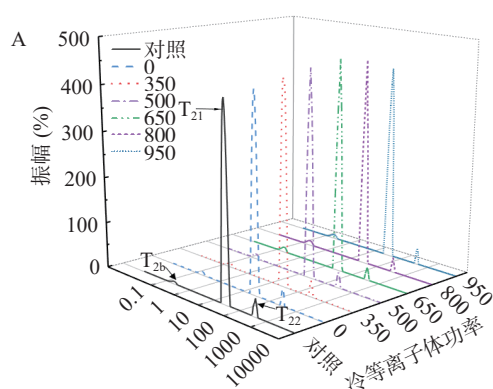


图5 冷等离子体处理的面筋蛋白对鸡肉糜凝胶弛豫时间(A)、T₂弛豫时间(B)和P₂峰面积比值(C)的影响

Fig.5 Effects of cold plasma treated gluten on relaxation time (A), T₂ relaxation time (B) and P₂ peak area ratio (C) of chicken gel

有三个峰, T_{2b} 代表结合水(0~10 ms); T₂₁ 代表不易流动水(10~100 ms); T₂₂ 代表自由水(100~1000 ms), 其中不易流动水占比最多^[43]。由图5B可知, 添加面筋蛋白后各组间 T_{2b} 值无显著性差异(P>0.05), 表明结合水受到的影响较小, 可能是肌肉蛋白与结合水结合的过于紧密造成的^[44]。随着冷等离子体功率的增加, T₂₁ 与 T₂₂ 均为先下降后升高的趋势, 在功率为650 W 时达到最低, T₂₁ 与 T₂₂ 越低, 表明底物与水分子结合越牢固^[32]。图5C为三种状态水的峰面积比值, 由图可知各组凝胶之间的结合水 P_{2b} 差异不显著(P>0.05)。不易流动水 P₂₁ 先增加后降低, 而自由水 P₂₂ 先下降后升高, 均在功率为650 W 时达到峰值, 该结果与 T₂ 弛豫时间的结果一致, 表明在添加面筋蛋白后凝胶中部分自由水可能向不易流动水转移。这可能是面筋蛋白的添加使凝胶的结构更加均匀致密, 捕获更多的水分, 与微观结构观察的结果一致。

3 结论

添加经冷等离子体处理的面筋蛋白能够提高鸡肉糜凝胶的形成能力、改善鸡肉糜凝胶的品质。添加经冷等离子体处理的面筋蛋白能够改善凝胶的质构, 降低凝胶蒸煮损失和自由水的比例, 提高保水性和不易流动水的比例; 当面筋蛋白经650 W 的冷等离子体处理后, 制备的鸡肉糜凝胶网络结构更加均匀细腻、富有弹性。本研究结果可为拓宽面筋蛋白在肉类食品中的应用提供一定的科学依据, 同时也为冷等离子体在食品加工中的应用提供一定的基础数据。

参考文献

[1] 计红芳, 李莎莎, 张令文, 等. 豌豆蛋白对鸡肉糜热诱导凝胶品质特性与微观结构的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(4): 74-79.
 [2] JI H F, LI S S, ZHANG L W, et al. Effect of pea protein on quality properties and microstructure of heat-induced gel of chicken batter[J]. Food Science, 2020, 41(4): 74-79.
 [3] PETRACCI M, BIANCHI M, MUDALAL S, et al. Functional ingredients for poultry meat products[J]. Trends in Food Science and Technology, 2013, 33(1): 27-39.
 [4] YADAV S K, TANWAR V K, SHARMA J K, et al. Effect of added soy protein on physico-chemical properties of chevon

- patties[J]. *Journal of Meat Science and Technology*, 2013, 1(1): 35–39.
- [4] 赵泽润,邢通,赵雪,等.大豆分离蛋白添加量对低盐木质化鸡肉糜凝胶特性的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(6): 49–56. [ZHAO Z R, XING T, ZHAO X, et al. Effect of addition of soy protein isolate on the gelation properties of low-salt wooden chicken breast meat batter[J]. *Food Science*, 2022, 43(6): 49–56.]
- [5] 刘骁,王莹娟,赵电波,等.鹰嘴豆分离蛋白对黄河鲤鱼鱼丸凝胶品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(22): 8–13. [LIU X, WANG Y J, ZHAO D B, et al. Effect of chickpea protein isolate on the gel quality of yellow river carp (*Cyprinus carpio*) fish balls[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(22): 8–13.]
- [6] 计红芳,李莎莎,张令文,等.添加面筋蛋白对猪肉热诱导凝胶品质及水分迁移特性的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(18): 58–63. [JI H F, LI S S, ZHANG L W, et al. Effect of gluten on quality properties and water migration of heat-induced gel from pork[J]. *Food Science*, 2020, 41(18): 58–63.]
- [7] 刘海荣,沈益荣,舒满夫.小麦面筋蛋白结构、改性及应用现状[J]. *粮食与饲料工业*, 2021(4): 5–9. [LIU H R, SHEN Y R, SHU M F. Research status on the structure, modification and application of wheat gluten protein[J]. *Cereal and Feed Industry*, 2021(4): 5–9.]
- [8] 刘海波,廖超,郑万琴,等.微波处理小麦面粉对淀粉及蛋白性质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(14): 91–97. [LIU H B, LIAO C, ZHENG W Q, et al. Effect of microwave-treated wheat flour on starch and protein properties[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(14): 91–97.]
- [9] 张洪新.多频超声改性面筋蛋白对其面条品质的影响和机制研究[D].重庆:西南大学,2020. [ZHANG H X. Study on the effect and mechanism of multi-frequency ultrasound modified of gluten on its noodle quality[D]. Chongqing: Southwest University, 2020.]
- [10] 杨雪飞,臧艳妮,赵妍嫣,等.微波预处理对小麦面筋蛋白糖基化改性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(1): 10–17. [YANG X F, ZANG Y N, ZHAO Y Y, et al. Effect of microwave pretreatment on the glycosylation modification of wheat gluten[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2019, 34(1): 10–17.]
- [11] 王淑敏.脱酰胺对小麦面筋蛋白酶解敏感性及其热诱导凝胶性质的影响[D].合肥:合肥工业大学,2018. [WANG S M. Effect of deamidation on the proteolysis susceptibility and heat-induced gel properties of wheat gluten[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.]
- [12] CHENG J H, LI J, SUN D W. Effects of dielectric barrier discharge cold plasma on structure, surface hydrophobicity and allergenic properties of shrimp tropomyosin[J]. *Food Chemistry*, 2022, 409.
- [13] 王若兰,何鑫,王向阳,等.冷等离子体处理对小麦粉理化性质改善效果研究[J]. *粮食与油脂*, 2021, 34(6): 1–5,17. [WANG R L, HE X, WANG X Y, et al. The study of cold plasma treatment on improving physicochemical characteristics of wheat flour[J]. *Cereals and Oils*, 2021, 34(6): 1–5,17.]
- [14] 何鑫.冷等离子体处理对小麦品质的影响[D].郑州:河南工业大学,2021. [HE X. Effect of cold plasma treatment on wheat quality[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2021.]
- [15] 杜艳丽,黄国清,张彤,等.减压等离子体处理对大豆分离蛋白功能性质的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(23): 20–25. [DU Y L, HUANG G Q, ZHANG T, et al. Effect of reduced pressure plasma treatment on functional properties of soybean protein isolate[J]. *Food Science*, 2017, 38(23): 20–25.]
- [16] ZHAO X Y, GUO R T, LI X X, et al. Effect of oil-modified crosslinked starch as a new fat replacer on gel properties, water distribution, and microstructures of pork meat batter[J]. *Food Chemistry*, 2022, 409: 135337.
- [17] 王昱,袁晶晶,赵电波,等.膳食纤维对低盐鸡胸肉糜凝胶特性的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(8): 16–22. [WANG Y, YUAN J J, ZHAO D B, et al. Effects of dietary fibers on gelation properties of low-salt chicken breast surimi[J]. *Food Science*, 2023, 44(8): 16–22.]
- [18] QIN H, XU P, ZHOU C L, et al. Effects of L-arginine on water holding capacity and texture of heat-induced gel of salt-soluble proteins from breast muscle[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 63(2): 912–918.
- [19] ZHU M M, LI H J, XING Y, et al. Understanding the influence of fluctuated low-temperature combined with high-humidity thawing on gelling properties of pork myofibrillar proteins[J]. *Food Chemistry*, 2023, 404: 134238.
- [20] KANG Z L, XIE J J, LI Y P, et al. Effects of pre-emulsified safflower oil with magnetic field modified soy 11S globulin on the gel, rheological, and sensory properties of reduced-animal fat pork batter[J]. *Meat Science*, 2022, 198: 109087.
- [21] GÓMEZ-GUILLÉN M C, BORDERIAS A J, MONTERO P. Chemical interactions of nonmuscle proteins in the network of sardine (*Sardina pilchardus*) muscle gels[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 1997, 30(6): 602–608.
- [22] 郑海波,朱金鹏,李先保,等.高压和食盐对鸡肉肠品质特性的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(21): 109–115. [ZHENG H B, ZHU J P, LI X B, et al. Effect of high pressure and salt on quality properties of chicken sausage[J]. *Food Science*, 2018, 39(21): 109–115.]
- [23] 朱东阳,康壮丽,何鸿举,等.猪血浆蛋白乳化棕榈油对猪肉糜凝胶特性的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(5): 71–75. [ZHU D Y, KANG Z L, HE H J, et al. Effect of pre-emulsified palm oil with porcine plasma protein on gel characteristics of pork meat batters[J]. *Food Science*, 2018, 39(5): 71–75.]
- [24] SPYRIDES S, ALENCASTRO F S, GUIMARAES E F, et al. Mechanism of oxygen and argon low pressure plasma etching on polyethylene (UHMWPE)[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 378: 124990.
- [25] WONGSAGONSUP R, DEEYAI P, CHAIWAT W, et al. Modification of tapioca starch by non-chemical route using jet atmospheric argon plasma[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2014, 102: 790–798.
- [26] TUHUMURY H C D, SMALL D M, DAY L. The effect of sodium chloride on gluten network formation and rheology[J]. *Journal of Cereal Science*, 2014, 60(1): 229–237.
- [27] BAHRAMI N, BAYLISS D, CHOPE G, et al. Cold plasma: A new technology to modify wheat flour functionality[J]. *Food Chemistry*, 2016, 202: 247–253.
- [28] 王然,龚维,郭晓璐,等.冷等离子体处理改性大豆分离蛋白及改善其界面性能[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(12): 101–109. [WANG R, GONG W, GUO X L, et al. Modification of soybean protein isolate by cold plasma treatment and improvement of its interface properties[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2022, 38(12): 101–109.]
- [29] BUCHERT J, CURA D E, MA H, et al. Crosslinking food proteins for improved functionality[J]. *Annual Review of Food Sci-*

- ence and Technology, 2010, 1(1): 113-138.
- [30] 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): 963-997.
- [31] SUN J X, WU Z, XU X L, 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.
- [32] TOMBE R G E. Effect of heat on meat proteins-implication on structure and quality of meat products[J]. *Meat Science*, 2005, 70(3): 493-508.
- [33] 邹怡茜, 陈海强, 潘卓官, 等. 超高压耦合热处理过程对鳙鱼鱼糜凝胶特性及水分迁移的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(23): 70-79. [ZOU Y Q, CHEN H Q, PAN Z G, et al. Effects of gel properties and water migration during ultra-high pressure coupled heat treatment on bighead carp surimi[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(23): 70-79.]
- [34] BELTON P S. Mini review: On the elasticity of wheat gluten[J]. *Journal of Cereal Science*, 1999, 29(2): 103-107.
- [35] ANNALISA S, MISRA N N, CULLEN P J, et al. Atmospheric pressure cold plasma (ACP) treatment of whey protein isolate model solution[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2015, 29: 247-254.
- [36] JI H, DONG S, HAN F, et al. Effects of dielectric barrier discharge (DBD) cold plasma treatment on physicochemical and functional properties of peanut protein[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2018, 11(2): 344-354.
- [37] LI X, MASATCIOGLU M T, KOKSEL F. Physical and functional properties of wheat flour extrudates produced by nitrogen injection assisted extrusion cooking[J]. *Journal of Cereal Science*, 2019, 89: 102811.
- [38] ORTOLAN F, CORREA G P, CUNH R, et al. Rheological properties of vital wheat glutes with water or sodium chloride[J]. *LWT- Food Science and Technology*, 2017, 79: 647-654.
- [39] 李睿智, 王菟, 仪淑敏, 等. 白鲢鱼鱼糜凝胶过程中水分及凝胶特性的变化[J]. *现代食品科技*, 2016, 32(5): 91-97. [LI R Z, WANG W, YI S M, et al. Changes in water and gel properties of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi during gelation process[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2016, 32(5): 91-97.]
- [40] 仪淑敏, 马兴胜, 励建荣, 等. 聚丙烯酸钠与面筋蛋白相结合对鲢鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. *中国食品学报*, 2016, 16(4): 43-50. [YI S M, MA X S, LI J R, et al. Effects of combination between PAAS and wheat gluten on gel properties of silver carp surimi gels[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2016, 16(4): 43-50.]
- [41] 周迎雪, 刘连杰, 张琳琳, 等. 介质阻挡放电等离子体处理对大豆分离蛋白结构及凝胶特性的影响[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(3): 10-17, 42. [ZHOU Y X, LIU L J, ZHANG L L, et al. The effects of dielectric barrier discharge plasma treatment on the structure and gelling properties of soy protein isolate[J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 43(3): 10-17, 42.]
- [42] 王菟, 马兴胜, 仪淑敏, 等. 面筋蛋白和大米蛋白对鲢鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(11): 46-51. [WANG Y, MA X S, YI S M, et al. Effects of gluten and rice protein on gel properties of silver carp surimi[J]. *Food Science*, 2017, 38(11): 46-51.]
- [43] ENGELSEN S B. 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.
- [44] CAI L Y, ZHANG W D, CAO A L, et al. Effects of ultrasonics combined with far infrared or microwave thawing on protein denaturation and moisture migration of *Sciaenops ocellatus* (red drum)[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 55: 96-104.