DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260126004
引用格式: 计红芳, 张胤清, 张令文, 等. 冷等离子体改性芝麻粕蛋白对鸡肉糜凝胶性质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(10): 253–261.
JI HF, ZHANG YQ, ZHANG LW, *et al*. Effects of sesame cake protein modified with cold plasma on quality properties of chicken mince gel [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(10): 253–261. (in Chinese with English abstract).

冷等离子体改性芝麻粕蛋白对鸡肉糜凝胶性质的影响

计红芳[1,2], 张胤清[1], 张令文[1*], 王雪菲[1], 张晓娜[3], 张 莹[1], 崔文宣[1]

(1. 河南科技学院食品学院, 新乡 453003; 2. 农业农村部国家猪肉加工技术研发专业中心, 新乡 453003; 3. 新乡工程学院食品工程学院, 新乡 453003)

摘 要: 目的 探讨不同功率冷等离子体(cold plasma, CP)改性芝麻粕蛋白对鸡肉糜凝胶品质的影响。**方法** 采用 400~800 W CP 对芝麻粕蛋白进行改性, 并加入到鸡肉中, 分析比较肉糜凝胶的蒸煮得率和保水性, 并利用质构仪、扫描电镜和低场核磁共振仪分析其质构、微观结构和水分分布。**结果** 添加经功率 400~800 W 的 CP 改性芝麻粕蛋白鸡肉糜凝胶蒸煮得率、保水性、弹性和回复性先上升后下降, 均在 600 W 的 T4 组达到最佳, 比对照组分别增加了 4.89%、2.30%、1.78%、19.52%, 硬度和咀嚼性在 700 W 的 T5 组达到最佳, 分别为 7457 *g*、4832 *g*, 但与 T4 组差异不显著(P>0.05); 凝胶的 L^*总体下降, a^*、b^*先上升后下降; 600 W 的 T4 组凝胶微观结构更致密均匀, 孔隙较小。添加 CP 改性芝麻粕蛋白的肉糜凝胶 T_2 弛豫时间均向较短时间方向移动, 不易流动水峰比升高, 自由流动水峰比降低; 储能模量值变化趋势相似, 均可提高肉糜凝胶形成能力, 以 600 W 的 T4 组效果最佳。**结论** CP 功率 600 W 改性的芝麻粕蛋白能使鸡肉糜凝胶品质得到提升。本研究结果可为提高芝麻粕蛋白附加值, 拓宽芝麻粕蛋白在肉类食品中的应用提供一定的科学依据。

关键词: 冷等离子体; 芝麻粕蛋白; 鸡肉; 凝胶品质

Effects of sesame cake protein modified with cold plasma on quality properties of chicken mince gel

JI Hong-Fang[1,2], ZHANG Yin-Qing[1], ZHANG Ling-Wen[1*], WANG Xue-Fei[1], ZHANG Xiao-Na[3], ZHANG Ying[1], CUI Wen-Xuan[1]

(1. *School of Food Science*, *Henan Institute of Science and Technology*, *Xinxiang* 453003, *China*; 2. *National Pork Processing Technology Research and Development Professional Center*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Xinxiang* 453003, *China*; 3. *School of Food Engineering*, *Xinxiang Institute of Engineering*, *Xinxiang* 453003, *China*)

ABSTRACT: Objective To explore the influences of sesame cake protein modified by cold plasma (CP) with

收稿日期: 2026-01-26
基金项目: 河南省科技攻关项目(252102111062, 252102111061, 242102111040); 中央引导地方科技发展资金项目(YDZX2024043)
第一作者: 计红芳(1978—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为肉制品加工与品质控制。E-mail: jhf300@126.com
***通信作者:** 张令文(1977—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为传统食品加工与品质控制。E-mail: lingwen2008@163.com

different power on the quality of chicken mince gel. **Methods** Protein from sesame cake was modified by CP with different power (400–800 W), and then was added to chicken mince. The cooking yield, water holding capacity of chicken gel were analyzed, and their texture properties, microstructure and water distribution were measured by texture analyzer, scanning electron microscope and low-field nuclear magnetic resonance. **Results** The cooking yield, water holding capacity, the springiness and resilience of gel texture increased first and then decreased, and reached the maximum of T4 group at CP power level of 600 W. Compared with the upper value of the control group, the value of T4 rose by 4.89%, 2.30%, 1.78% and 19.52%, respectively. Both the hardness and chewiness reached the highest value of T5 at 700 W, and their value was 7457 *g* and 4832 *g*, respectively. While, there was no significant difference compared to either of T4 group (P>0.05). The L^* declined continuously, and a^* and b^* first rose and then declined. With addition of CP modified sesame cake protein, the transverse relaxation time of T_2 changed in the direction of short relaxation time, and the proportion of immobilized water in chicken mince gel rose significantly while that of free water decreased. The change of storage modulus value showed that the addition of CP modified sesame cake protein could improve the gel forming ability of chicken mince, especially T4 group with CP power level of 600 W had the best gel forming ability. Additionally, when the cold plasma treatment power was 600 W, the chicken mince gel of T4 was obtained with more compact and uniform microstructure and smaller pores. **Conclusion** Sesame cake protein modified with CP power level of 600 W could enhance the quality of chicken mince gel. The results of this study could provide certain scientific basis for improving the value-added of sesame cake protein and broadening the application of sesame cake protein in meat foods.

KEY WORDS: cold plasma; sesame cake protein; chicken; gel properties

0 引 言

鸡肉营养丰富, 味道鲜美, 以鸡肉为原料制成的肉糜类产品深受欢迎[1]。在实际生产中, 经常添加淀粉、植物蛋白等非肉类填充剂来提高产品的得率、减少脂肪流失、改善质构特性等。芝麻粕是芝麻榨取油脂后的副产物, 其粗蛋白含量高达 38%~50%, 具有均衡的氨基酸组成比例, 基本达到联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization, FAO)/世界卫生组织(World Health Organization, WHO)推荐的优质蛋白标准[2–3]。然而, 芝麻粕常作为饲料或肥料使用。从芝麻粕中提取芝麻粕蛋白, 可有效利用资源避免浪费。芝麻粕蛋白经过高温榨油、提取等工艺会使蛋白发生不同程度的变性, 不能较好满足食品加工需求, 需要对其进行修饰改性[4–5]。吴甜甜等[6]研究发现, 蒸汽爆破处理后芝麻饼粕蛋白溶解度增加, 持油、起泡和乳化性均得以改善, 二级结构也发生了变化。

冷等离子体(cold plasma, CP)可在大气压或一定真空条件下由气体通过辉光放电、介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)、微波放电和大气压等离子体射流(atmospheric pressure plasma jet, APPJ)放电等产生。其中, APPJ 和 DBD 放电设备结构相对简单、操作相对容易, 在食品领域的研究中被广泛采用[7]。CP 具有可在无外源化学物或酶的条件下, 较好改变天然蛋白质的结构和功能性质, 在提升蛋白质功能性质方面显示出比较优势。EAZHUMALAI 等[8]研究结果表明, 介质阻挡放电在较高电压激发的等离子体可导致燕麦蛋白形成更小的聚集体, 最终增强了燕麦蛋白的起泡性和乳化性。大豆分离蛋白经 CP 功率 50 W 处理 60 s 后, 其表面性能、持水力和持油力均显著提高[9]。80 V 的 CP 处理能使核桃分离蛋白的溶解度、持水性、持油性等达到最佳, 改善其功能特性[10]。

本团队前期研究发现, 适度的 CP 处理可以提高芝麻粕蛋白的溶解性、乳化、持水持油性, 改变表面疏水性、分子结构等, CP 改性芝麻粕蛋白是否有如大豆蛋白[11]、豌豆蛋白[12]、面筋蛋白[13]等改善鸡肉糜凝胶性质的效果, 鲜见报道。因此, 本研究把经 400~800 W 功率 CP 改性后的芝麻粕蛋白添加到鸡肉糜凝胶中, 对凝胶色泽、蒸煮得率、保水性、微观结构、低场核磁、质构、流变性质等进行测定, 探讨改性芝麻粕蛋白对肉糜凝胶特性影响, 可为提高产品的营养特性、有效利用植物源蛋白资源提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

芝麻粕蛋白由本课题组自制, 总蛋白含量 80%以上; 新鲜鸡胸肉, 新乡鸿运来生活超市。

磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、戊二醛、无水乙醇、叔丁醇(分析纯, 天津市科茂化学试剂有限公司); 二甲基硅油(分析纯, 天津市科密欧化学试剂有限公司); 食盐(食品级, 中国盐业集团有限公司)。

1.2　仪器与设备

TS-PL50mm 大气压冷等离子处理设备(河南先途智能科技有限公司); TU-1810 紫外可见分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司); CR-10 Plus 色差仪(日本 KONICA MINOLTA 公司); Quanta 200 扫描电子显微镜(美国 FEI 公司); PQ001 台式核磁共振分析仪(上海纽迈电子科技有限公司); TA-XT plus 质构分析仪(英国 Stable Micro Systems 公司); HAAKE MARS III旋转式流变仪(德国 Thenmo Scientific 公司); MA104 万分之一电子天平(瑞士梅特勒-托利多集团)。

1.3　实验方法

1.3.1　芝麻粕蛋白的 CP 改性

将 20 g 芝麻粕蛋白混悬于 60 mL 蒸馏水, 室温磁力搅拌 30 min 后转移至平皿中, 置于 APPJ CP 载物台上, 在芝麻粕蛋白混悬液液面与 CP 喷枪喷嘴距离 30 cm、工作速度 20%、工作频率 40 kHz, 气体类型为空气的条件下, 分别用功率 400、500、600、700、800 WCP 处理 180 s。在–80 ℃冷冻后, 置于冷冻干燥设备冻干后得 CP 改性芝麻粕蛋白。

1.3.2　鸡肉糜凝胶的制备

选取 150 g 新鲜鸡胸肉, 去除外部结缔组织, 再将肉块粗略碎切后加入 3 g 食盐和 6 g 经 CP 不同功率改性的芝麻粕蛋白, 同时加入 37.5 mL 冰水。高速均质 30 s, 连续操作 3 次至混合均匀。将肉糜混合物转移至 50 mL 离心管中, 3500 r/min 离心 10 min 后, 置于 85 ℃水浴加热 30 min, 室温冷却, 在 4 ℃冷藏 12 h 备用(表 1)。

表 1　添加 CP 改性芝麻粕蛋白的鸡肉糜凝胶

Table 1　Chicken mince gel added with sesame cake protein modified by CP

样品	芝麻粕蛋白添加量	食盐/g	鸡肉/g	冰水/mL
T0	不添加	3	150	37.5
T1	6 g 未改性芝麻粕蛋白	3	150	37.5
T2	6 g 400 W-CP 改性芝麻粕蛋白	3	150	37.5
T3	6 g 500 W-CP 改性芝麻粕蛋白	3	150	37.5
T4	6 g 600 W-CP 改性芝麻粕蛋白	3	150	37.5
T5	6 g 700 W-CP 改性芝麻粕蛋白	3	150	37.5
T6	6 g 800 W-CP 改性芝麻粕蛋白	3	150	37.5

1.3.3　凝胶色泽的测定

利用色差仪进行色度测量, 以标准白板作为参照物。记录亮度值(L^*)、红度值(a^*)以及黄度值(b^*)。

1.3.4　凝胶蒸煮得率与保水性测定

根据 KANG 等[14]的方法稍作改进。将混合均匀的鸡肉糜置于 50 mL 离心管中, 称量并记录蒸煮前重量 A_0, 然后将离心管置于 85 ℃水浴中加热 30 min, 样品冷却至室温, 在 4 ℃条件下静置 12 h。测量前将样品在室温下回温 2 h, 使其温度与环境温度一致。用滤纸吸附样品表面残留水分, 称量并记录煮后重量 A_1。蒸煮得率计算见公式(1):

$$蒸煮得率/\%=(\frac{A_1}{A_0})\times 100\% \quad (1)$$

参考 HONG 等[15]的方法适当调整。将蒸煮后的鸡肉糜凝胶切割成直径为 20 mm、高度为 20 mm 的圆柱体, 并进行称重, 标记为 m_1 (g)。将样品放入 50 mL 的离心管中, 以 5000 r/min 离心 15 min。用滤纸吸干表面水分, 再次进行称重, 标记为 m_2 (g)。保水性计算见公式(2):

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

1.3.5　凝胶微观结构分析

将凝胶切割成 5 mm×5 mm×5 mm 的立方体样品, 浸泡于 2.5%戊二醛溶液中, 4 ℃固定 48 h。接着, 用 0.1 mol/L、pH 7.2 的磷酸盐缓冲溶液洗涤样品 2 次。随后, 样品依次经过不同梯度乙醇(50%、70%、90%、95%和 100%)浸泡脱水, 每个梯度处理 15 min。脱水后, 样品在氯仿中浸泡 1 h 脱脂。再将样品依次浸泡于叔丁醇:无水乙醇(1:1, V:V)混合液、叔丁醇中, 每次浸泡 15 min。最后, 将处理后的样品置于真空干燥箱中, 在 30 ℃下真空干燥 4 h, 直至样品完全干燥, 喷金后用于观察凝胶的微观结构。

1.3.6　凝胶水分迁移的测定

参考 HAN 等[16]的方法并稍作修改。称取 2 g 样品, 置于直径 15 mm 的核磁管中, 并将其放入核磁共振仪器, 在质子共振频率为 22 MHz、温度为 32 ℃的条件下进行测定。利用仪器自带的分析软件得到 T_2 分布和峰面积比。

1.3.7　凝胶质构测试

参考郑欣茹等[17]的方法并稍做修改。样品切割成直径和高度均为 20 mm 的圆柱体, 使用 P/36R 探头进行测试。分析参数设置如下: 测试前速度、测试速度和测试后速度均为 2 mm/s, 压缩变形量为样品原始高度的 40%, 保持压缩状态的时间为 5 s。仪器采用自动触发模式, 触发力设置为 5 g。

1.3.8　鸡肉糜流变性质分析

选用直径为 50 mm 的不锈钢圆形平板探头, 设置平板间隙为 0.6 mm。将肌肉凝胶样品均匀涂抹于平板之间, 并用硅油密封四周缝隙, 以防止样品溢出或挥发。样品在 20 ℃下平衡 10 min, 使其温度稳定。随后, 以 2 ℃/min 的加热速率, 将温度从 20 ℃升高至 80 ℃。在整个加热过程中, 对样品施加频率为 0.1 Hz 的连续剪切应变, 记录鸡肉糜样品储能模量(G')变化。

1.4　数据处理

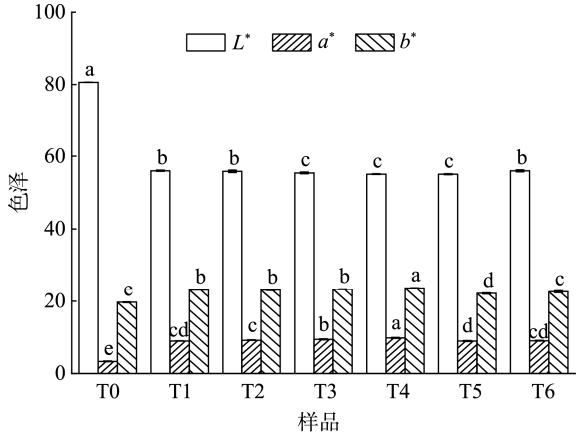
试验结果用平均数±标准差表示, 数据采用 Excel 2022、IBM SPSS Statistics 23 软件进行处理和方差分析, 差

异显著性分析采用最小显着差法检验法，P<0.05 表示显著性差异，并使用 Origin 2022 绘图。

2 结果与分析

2.1 凝胶色泽分析

与对照组相比，随 CP 功率的增加，凝胶 L^*整体上呈现下降趋势，添加改性芝麻粕蛋白的肉糜凝胶 L^*没有对照组高，而 a^*和 b^*呈先上升后下降的趋势，颜色偏向于红黄色(图 1)。经 CP 处理的芝麻粕蛋白冷冻干燥后呈现不同程度的暗黄色，加入到肉糜形成的凝胶表面结构致密，表面对光的吸收率增大，从而导致凝胶的亮度逐渐变暗。a^*和 b^*后续整体呈下降趋势，在加热过程中肌红蛋白结构伸展变性，转化为褐色的高铁肌红蛋白等复杂产物，导致 a^*下降[18]。王雪纯[19]用经超声联合酶改性的黑豆分离蛋白制作猪肉香肠，香肠的 L^*下降，a^*与 b^*显著上升(P<0.05)，认为可能由于黑豆分离蛋白本身的颜色特性、在香肠体系中的分散状态，以及加热过程中某些化学成分相互作用时发生了氧化还原反应等有关。



注：不同字母表示具有显著性差异(P<0.05)；下图同。

图 1 CP 改性芝麻粕蛋白对鸡肉糜凝胶色泽影响

Fig.1 Effects of sesame cake protein modified with CP on color of chicken mince gel

2.2 凝胶蒸煮得率与保水性的分析

随 CP 功率的增加，凝胶的蒸煮得率呈现先升高后降低趋势，且变化显著。与 T1 相比，T2~T4 的蒸煮得率升高；T4 达到最大为 89.19%，与 T1 相比(84.30%)增大了 4.89%(图 2)。保水性的变化与蒸煮得率基本一致，也呈现出先增大后减小的趋势。与保水性为 94.77%的 T1 相比，T2~T4 凝胶保水性持续上升，T4 最大为 97.07%，比 T1 上升了 2.30%(图 3)。

凝胶蒸煮得率与保水性的增大可能是由于蛋白的物理填充与包埋作用，CP 处理的蛋白粒径会变得更小，能充分分散在凝胶体系中，锁住水分和脂肪。同时，在 CP 处理下蛋白的乳化性、持水持油性等进一步改善，对水分的截留能力及与蛋白脂肪结合交联能力进一步增强，凝胶空间网络结构逐渐致密。于娇娇[20]研究认为介质阻挡放电产生的高能粒子通过对高温花生蛋白表面进行微米或纳米级刻蚀，扩大了与水分子相互作用的面积；CP 处理可以在蛋白链上引入新的羟基(-OH)、羧基(-COOH)、氨基(-NH_2)等亲水基团，直接增强了与水分子的结合能力；适度的水解和键断裂使蛋白分子柔韧性改变，净负电荷增加，分子间静电斥力增强，极大提高溶解性，这些变化在凝胶体系中表现为更易与肌肉蛋白发生相互作用，保水性与蒸煮得率得以提高[19]。CP 功率继续增加，与 T4 相比，T5~T6 下降，这可能是因为 CP 处理过度使得芝麻粕蛋白分子间发生过度交联，蛋白发生聚集，水合、乳化等能力下降，导致与鸡肉蛋白间结合作用力减弱，抑制了凝胶立体网络的形成[21]。袁晶晶[22]研究表明高压均质及热处理改性的鹰嘴豆蛋白能增强蛋白与蛋白、蛋白与水相互作用，增加猪肉糜凝胶的致密性，使蒸煮损失降低。将超声联合酶改性的豌豆-燕麦蛋白替代 50%脂肪制作的猪肉丸蒸煮损失率最低，质构特性良好[23]。

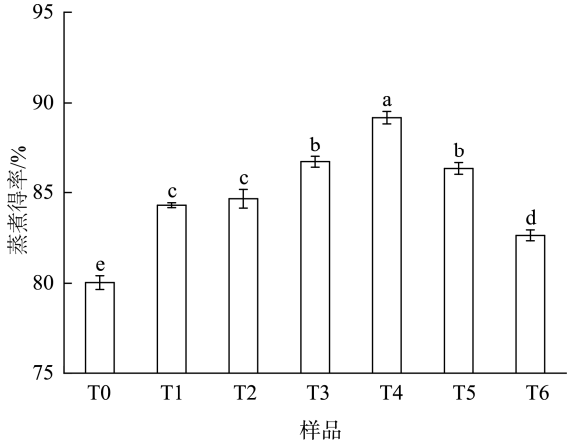


图 2 CP 改性芝麻粕蛋白对鸡肉糜凝胶蒸煮得率影响

Fig.2 Effects of sesame cake protein modified with CP on cooking yield of chicken mince gel

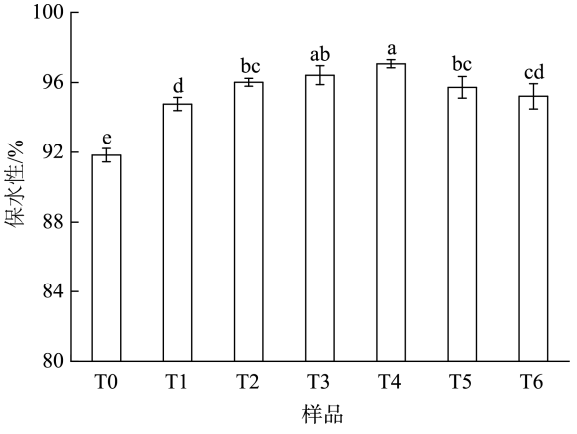


图 3 CP 改性芝麻粕蛋白对鸡肉糜凝胶保水性影响

Fig.3 Effects of sesame cake protein modified with CP on water holding capacity of chicken mince gel

2.3　凝胶微观结构的分析

扫描电镜图像描绘了蛋白聚集体的白色区域, 而黑色区域代表凝胶网络中的水孔和通道[24]。经 CP 处理后的芝麻粕蛋白对凝胶微观结构影响较大(图 4)。T0 和 T1 凝胶的微观结构表现为粗糙、疏松多孔且孔隙不规则; T2 和 T3 凝胶的微观结构表现为尺寸均匀、分布均匀的较大孔隙; T4 凝胶的微观结构表现凝胶结构变得致密均匀、孔隙较小且具有更规则、空间连续性更好的三维网络, 更有助于减少水分的流失通道, 原因可能是因为 CP 处理改善了芝麻粕蛋白的水合特性与乳化性等, 增强其与肌肉蛋白-水分子间的相互作用使凝胶具有更均匀分布的孔隙, 以捕获更多的水分子, 使保水性进一步增强。有研究报道, 小网格直径的均匀凝胶具有更好的保水性, 能降低水分子的流动性[25]。KAO 等[26]研究认为, 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。T5 和 T6 凝胶的微观结构重新表现为粗糙、孔隙不规则, 可能芝麻粕蛋白经高功率 CP 处理蛋白氧化聚集导致溶解度下降、乳化性变差等, 不能更好地与肌肉蛋白相互作用, 致使凝胶三维网络结构松弛。蛋白的乳化能力较强, 能促进蛋白与脂肪分子的结合, 从而能形成更加均匀细腻的香肠、汉堡等产品的组织结构[27]。黑豆分离蛋白经超声联合酶改性后乳化性能进一步提升, 制作的猪肉香肠具有更优异的切面结构, 本实验结果与此猪肉香肠研究中的结论相吻合, 进一步证实了芝麻粕蛋白尤其是经过 CP 适当改性的芝麻粕蛋白具有改善肉糜凝胶产品组织结构方面的潜力。

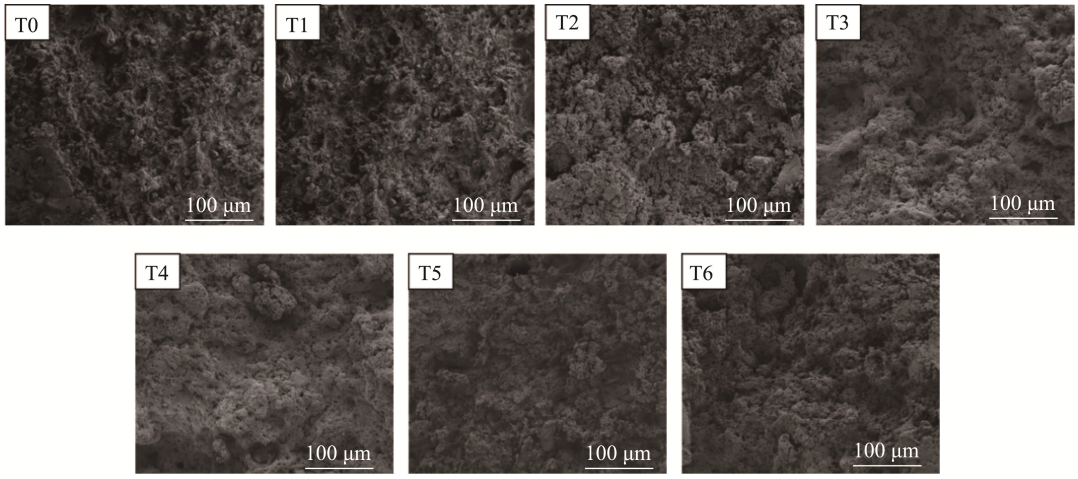


图 4　CP 改性芝麻粕蛋白对鸡肉糜凝胶微观结构影响(400×)

Fig.4　Effects of sesame cake protein modified with CP on microstructure of chicken mince gel (400×)

2.4　凝胶水分迁移特性的分析

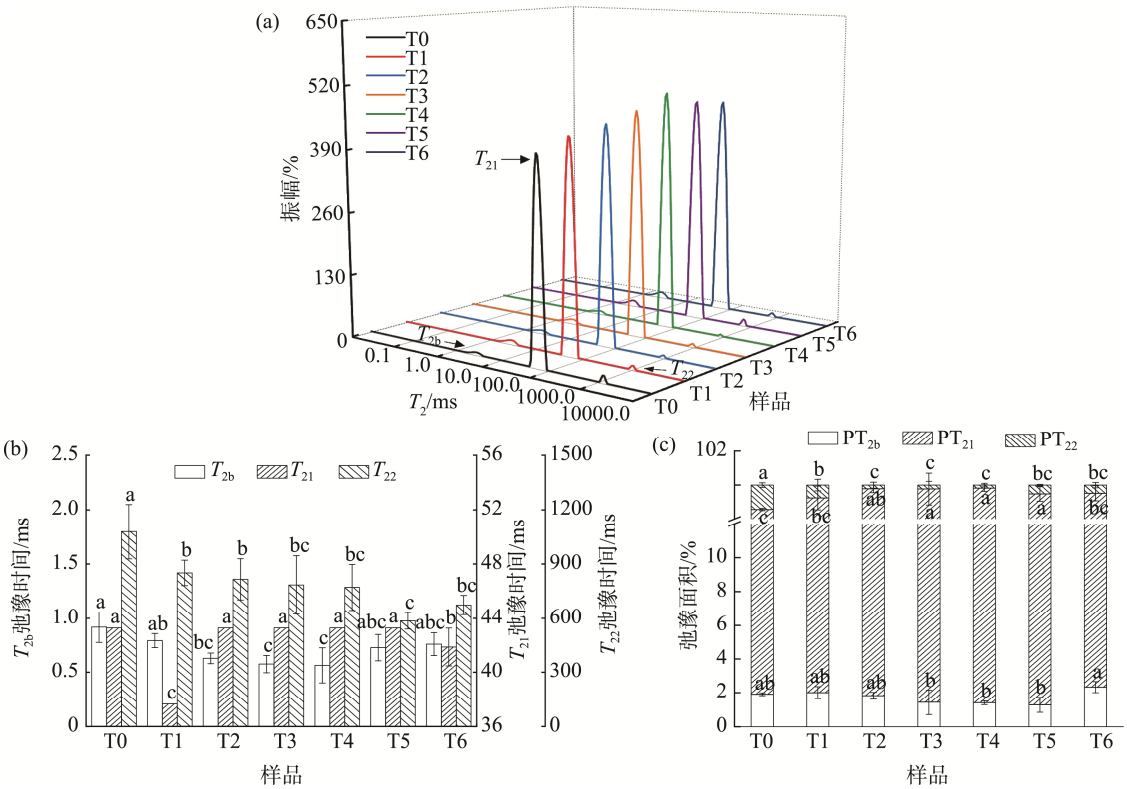
根据质子运动状态的差异, 横向弛豫时间(T_2)可分为 3 种类型, 分别对应不同结合状态下的水分。与固相物质结合越紧密的质子, 其运动性越低, T_2 越短; 反之, 自由度越高的质子, T_2 越长。结合水(T_{2b}, 1~10 ms)表示与蛋白质、淀粉等大分子物质相互作用, 流动性最差的水分; 不易流动水(T_{21}, 10~100 ms)和自由水(T_{22}, 100~1000 ms)则依次表示流动性逐渐增强的水分[28]。

与对照组(T0)相比, T1~T4 的 T_{2b} 峰值向较短时间方向移动, T1~T5 的 T_{22} 峰值也呈现类似趋势, T_{21} 峰值整体上也表现出向较短时间方向移动的趋势(图 5)。结果表明, 经 CP 处理后, 凝胶中不同状态水的流动性降低, 与蛋白等结合更加紧密, 自由水向不易流动水转化。当 CP 功率超过 700 W 时, 随 CP 功率增加, 凝胶样品 T_{2b} 和 T_{22} 的弛豫时间开始变长, 表明高功率处理的芝麻粕蛋白水合能力下降, 形成的凝胶孔隙大且不规则, 不能有效保留凝胶中的水分, 使得水分流动性重新增强。

随 CP 功率的增加, PT_{2b}、PT_{22} 的峰面积呈现先下降后上升的趋势, PT_{21} 的峰面积呈先上升后下降的趋势[图 5(c)]。与 T0 相比, T1~T5 的 PT_{2b} 峰面积下降, T1~T4 的 PT_{22} 峰面积下降, 与 T0 相比, T2~T5 的 PT_{21} 峰面积显著提高(P<0.05), 在 97.97%~98.43%之间, 表明不易流动水是凝胶中水分主要存在形态, T2~T5 凝胶的微观结构中有更多的水被捕获, 自由水转化为不易流动水, 水分从紧密结合状态, 更多地转变为被凝胶网络结构良好持留的不易流动水状态, 与保水性结果一致, CP 处理能够改变水分在凝胶中的分布与迁移状态。VERBEKEN 等[29]与 ZHANG 等[30]研究认为, T_2 弛豫时间越短, 表征凝胶网络结构越致密, 保水性越强。黄春阳等[31]研究表明不易流动水含量的增加, 可使香肠细腻多汁, 减少蒸煮损失, 提升产品品质。猪肉肌原纤维蛋白与高压均质改性的 11S 大豆球蛋白结合后, T_{2b}、T_{21} 和 T_{22} 的弛豫时间缩短, 水和蛋白质结合得更为紧密[32], 与本研究结果一致。

2.5　凝胶质构分析

随 CP 功率的增加, 凝胶硬度、咀嚼性、弹性和回复性均呈现先上升后下降的趋势。与 T0 相比, T1 至 T5 硬度



注: (a)弛豫时间三维图谱变化; (b)弛豫时间变化; (c)弛豫峰面积相对百分比变化。

图 5 CP 改性芝麻粕蛋白对鸡肉糜凝胶水分迁移特性影响

Fig.5 Effects of sesame cake protein modified with CP on moisture migration properties of chicken mince gel

和咀嚼性增大，在 T5 达到最大值，分别为 7457 *g*、4832 *g*，但与 T4 相比差异不显著(P>0.05)[图 6(a)]; T1~T4 弹性和回复性增大，且在 T4 达到最大值，分别为 0.915、0.349[图 6(b)]。这可能由于芝麻粕蛋白经 CP 处理后，影响了蛋白的水合及疏水性质，在加热过程中通过巯基-二硫键交换以及疏水相互作用等，增强了与肌肉蛋白、水分的相互作用，形成了更稳固的凝胶网络结构，改善了凝胶的质构特性。高压均质结合热处理改性的鹰嘴豆蛋白与肌原纤维蛋白所形成的复合凝胶强度增加了 126.88%，归因于体系内蛋白间增强的疏水相互作用、氢键二硫键的形成、α-螺旋结构解旋[33]。

随功率进一步增加，T6 硬度和咀嚼性下降，T5~T6 弹性和回复性也下降(图 6)。这可能因为 CP 功率过高导致芝麻粕蛋白二硫键交联增强，蛋白簇间的静电相互作用增强，蛋白簇间的距离增大，与肌肉蛋白结合力减弱，形成了相对脆弱的凝胶结构[34]。

2.6 凝胶流变性质分析

肉糜凝胶的形成过程可分为 2 个主要阶段：蛋白受热变性展开和变性蛋白重新排列聚合。G'可用于表征不同温度下蛋白分子展开和聚集的过程，G'越高，表明形成凝胶的能力越强[35]。

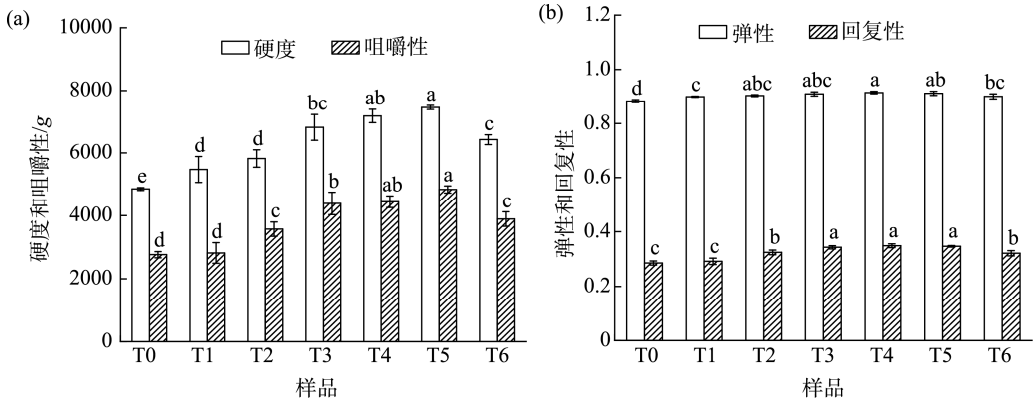


图 6 CP 改性芝麻粕蛋白对鸡肉糜凝胶质构的影响

Fig.6 Effects of sesame cake protein modified with CP on texture of chicken mince gel

所有样品的 G'变化趋势总体相似。在 21~58 ℃范围内，G'先缓慢下降，后快速下降(图 7)，这可能是温度升高加快了芝麻粕蛋白与肌肉蛋白的变性速度，导致原有凝胶结构遭到破坏。在 59~80 ℃范围内，G'迅速上升，可能是因为芝麻粕蛋白与肌肉蛋白完全变性，变性蛋白进一步聚集和交联，体系由溶胶状态转变为弹性胶体，形成了更加致密有序的凝胶网络结构[36]。加入 CP 改性芝麻粕蛋白的 T2 至 T6 凝胶最终的 G'均高于对照，且 T4 表现出最高的 G'，T4 (18.78 kPa)>T5 (17.35 kPa)>T3 (16.62 kPa)>T2 (16.12 kPa)>T6 (14.72 kPa)>T1 (13.93 kPa)>T0 (12.91 kPa)(图 7)，表明 CP 改性芝麻粕蛋白与鸡肉蛋白在热诱导凝胶形成过程中发生了更有效的物理化学交联，提高了凝胶形成能力，这与质构分析结果一致。CP 处理能够增强蛋白分子内部及与肌肉蛋白分子间的相互作用，如巯基的氧化、二硫键的形成、肌球蛋白头部二聚体的交联等，促进了更致密、更均一的凝胶网络结构的形成。GE 等[32]研究表明经高压均质改性的大豆 11S 球蛋白溶解度增大，表面疏水性基团和游离巯基进一步暴露，形成更多的活性结合位点，增强了与猪肉肌原纤维蛋白间的交联，凝胶 G'显著提高。

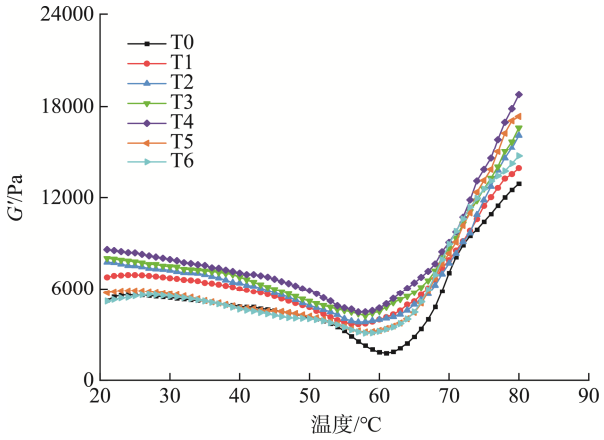


图 7　CP 改性芝麻粕蛋白对鸡肉糜凝胶流变性质影响

Fig.7　Effects of sesame cake protein modified with CP on rheological properties of chicken mince gel

3　讨论与结论

CP 技术作为一种极具潜力、绿色环保的蛋白物理改性技术，相较于化学法和酶法改性具有安全且成本低的优势[7,9,37]。适度的 CP 处理可通过增加蛋白表面疏水性、羰基和氨基间的共价作用及其二硫键的形成增强蛋白的交联，改善蛋白的凝胶性能；CP 过度处理会导致蛋白疏水作用减弱以及巯基含量的减少，从而影响蛋白的溶解度，进而影响凝胶特性[38–39]。

不同功率(400~800 W) CP 改性的芝麻粕蛋白均可在一定程度上改善鸡肉糜凝胶品质。添加 400~600 W 改性芝麻粕蛋白的 T2~T4 组凝胶蒸煮得率、保水性、弹性和回复性逐渐上升，均在 600 W 的 T4 组达到最好；400~700 W 的 T2~T5 组硬度和咀嚼性持续上升，在 T5 组达到最佳，且与 T4 组差异不显著。T4 组凝胶的微观结构致密均匀、孔隙较小、连续性强。凝胶 L^*总体下降，a^*、b^*先上升后下降。添加经 CP 处理的芝麻粕蛋白显著提升了凝胶的蒸煮得率、保水性和质构特性，尤以 600 W 处理的 T4 组效果最优，表现出更高的 G'和更致密的微观结构，自由水向不易流动水转化，保水能力进一步增强。添加 600 W CP 处理的芝麻粕蛋白可显著提升鸡肉糜凝胶品质特性。

参考文献

[1] 王昱，李新燕，白艳红，等. 鸡肉肌原纤维蛋白热诱导凝胶特性改善技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(8): 2528–2534.
WANG Y, LI XY, BAI YH, *et al*. Research progress on improvement techniques of chicken myofibrillar protein heat-induced gel properties [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(8): 2528–2534.

[2] 周际松，周倩，吴萍，等. 芝麻蛋白的组成、结构、功能特性及其应用[J]. 现代食品科技, 2025, 41(7): 359–370.
ZHOU JS, ZHOU Q, WU P, *et al*. Composition, structure, functional properties, and applications of sesame protein [J]. Modern Food Science & Technology, 2025, 41(7): 359–370.

[3] 侯莹，彭郁，郝建雄，等. 芝麻蛋白的提取、改性及应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2025, 46(11): 391–402.
HOU Y, PENG Y, HAO JX, *et al*. Advances in the extraction, modification and application of sesame protein [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(11): 391−402

[4] KIM DR, JUNG Y, RHO SJ, *et al*. Sonication of sesame meal protein isolates modified its microstructural and functional properties [J]. LWT, 2023, 186: 115242.

[5] BASKINIC T, GUL O. Modifications to structural, techno-functional and rheological properties of sesame protein isolate by high pressure homogenization [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 250: 126005.

[6] 吴甜甜，易军鹏，董晶寅，等. 蒸汽爆破预处理对芝麻粕蛋白结构与功能特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(23): 194–200.
WU TT, YI JP, DONG JY, *et al*. Effect of steam explosion pretreatment on the structure and functional properties of sesame meal protein [J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(23): 194–200.

[7] 郭峰，姜泽放，胡晖，等. 低温等离子体对植物蛋白功能特性的影响[J]. 中国食品学报, 2025, 25(8): 417–427.
GUO F, JIANG ZF, HU H, *et al*. Effects of cold plasma on the functional properties of plant protein [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(8): 417–427.

[8] EAZHUMALAI G, KALAIVENDAN RGT, ANNAPURE US. Effect of

atmospheric pin-to-plate cold plasma on oat protein: Structural, chemical, and foaming characteristics [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 242: 125103.

[9] 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 XL, *et al*. Modification of soybean protein isolate by cold plasma treatment and improvement of its interface properties [J]. Modern Food Science & Technology, 2022, 38(12): 101–109.

[10] 邓艳梅, 鲁燕玲, 袁国惠, 等. 低温等离子体处理对核桃分离蛋白结构和功能特性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(18): 102–109.
DENG YM, LU YL, YUAN GH, *et al*. Effects of cold plasma treatment on structural and functional properties of walnut protein isolate [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(18): 102−109.

[11] 张明成, 周凤超, 张春华. 添加不同配比 7S/11S 大豆球蛋白对鸡肉丸品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(9): 137–142.
ZHANG MC, ZHOU FC, ZHANG CH. Effects of 7S to 11S ratio of soybean globulin protein on the quality of chicken meatball [J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(9): 137–142.

[12] 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.
JI HF, LI SS, ZHANG LW, *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.

[13] 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.
HAN XP, JI HF, ZHANG Y, *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.

[14] KANG ZL, CHEN FS, MA HJ. Effect of pre-emulsified soy oil with soy protein isolate in frankfurters: A physical-chemical and Raman spectroscopy study [J]. LWT, 2016, 74(12): 465–471.

[15] HONG GP, KO SH, CHOI MJ, *et al*. Effect of glucono-*δ*-lactone and *κ*-carrageenan combined with high pressure treatment on the physico-chemical properties of restructured pork [J]. Meat Science, 2008, 79(2): 236–243.

[16] HAN M, WANG P, XU X, *et al*. Low-field NMR study of heat-induced gelation of pork myofibrillar proteins and its relationship with microstructural characteristics [J]. Food Research International, 2014, 62(8): 1175–1182.

[17] 郑欣茹, 刘琳琳, 吕铭守, 等. 不同乳酸菌发酵黄浆水对酸浆豆腐凝胶特性及其品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(4): 274–284.
ZHENG XR, LIU LL, LV MS, *et al*. Effects of different lactic acid bacteria fermented yellow serous water on gel properties and quality of fermented soybean whey tofu [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(4): 274–284.

[18] 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.
FENG Z, CHEN H, GUO LP, *et al*. Effects of high pressure combined with thermal treatment on myoglobin in pork [J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(2): 160–164, 175.

[19] 王雪纯. 超声结合酶处理提高黑豆分离蛋白凝胶性及其对香肠品质影响的研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2025.
WANG XC. Ultrasonic combined with enzyme treatment to improve the gelation properties of black bean protein isolate and its sausage quality [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2025.

[20] 于娇娇. 高温花生蛋白的低温等离子体结构修饰及物性研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2022.
YU JJ. Study on structural modification and physicochemical properties of high-temperature peanut protein by cold plasma [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2022.

[21] BALANGE A, BENJAKUL S. Enhancement of gel strength of bigeye snapper (*Priacanthus tayenus*) surimi using oxidised phenolic compounds [J]. Food Chemistry, 2009, 113(1): 61–70.

[22] 袁晶晶. 高压均质及热处理改性鹰嘴豆蛋白对减磷猪肉糜凝胶特性的影响机制[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2024.
YUAN JJ. Influence mechanism of high-pressure homogenization and heat treatment modified chickpea protein on the properties of reduced phosphate pork meat batter gels [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2025.

[23] 李梦晓. 豌豆-燕麦复合蛋白凝胶制备及在肉丸中的应用[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2025.
LI MX. Preparation of pea-oat complex protein gels and in application in meatballs [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2025.

[24] ZHUANG XB, HAN MY, JIANG XP, *et al*. The effects of insoluble dietary fiber on myofibrillar protein gelation: Microstructure and molecular conformations [J]. Food Chemistry, 2019, 275(3): 770–777.

[25] WANG X, XIA M, ZHOU Y, *et al*. Gel properties of myofibrillar proteins heated at different heating rates under a low-frequency magnetic field [J]. Food chemistry, 2020, 321: 126728.

[26] KAO FJ, SU NW, LEE MH. 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.

[27] ARGEL NS, RANALLI N, CALIFANO AN, *et al*. Influence of partial pork meat replacement by pulse flour on physicochemical and sensory

characteristics of low-fat burgers [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(10): 3932–3941.

[28] YANG W, PU H, WANG L, *et al*. Effect of bound water on the quality of dried *Lentinus edodes* during storage [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(5): 1971–1979.

[29] VERBEKEN D, NEIRINCK N, PVANDER M, *et al*. Influence of kappa-carrageenan on the thermal gelation of salt-soluble meat proteins [J]. Meat Science, 2005, 70(1): 161–166.

[30] ZHANG LL, XUE Y, XU J, *et al*. Effects of high-temperature treatment (≥100 ℃) on Alaska Pollock (*Theragra chalcogramma*) surimi gels [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 115(1): 115–120.

[31] 黄春阳, 王哲, 王灵娟, 等. 添加非肉蛋白对南京香肠品质特性的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(21): 91–96.
HUANG CY, WANG Z, WANG LJ, *et al*. Effect of non-meat protein addition on quality characteristics of Nanjing sausages [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(21): 91–96.

[32] GE Q, WU Y, YUAN N, *et al*. Effect of high pressure homogenization-modified soy 11S globulin on the gel and rheological properties of pork myofibrillar protein [J]. Foods, 2023, 12(4): 810.

[33] WANG Y, WANG J, LI K, *et al*. Effect of chickpea protein modified with combined heating and high-pressure homogenization on enhancing the gelation of reduced phosphate myofibrillar protein [J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141180.

[34] YANG K, WANG H, HUANG J, *et al*. Effects of direct current magnetic field treatment time on the properties of pork myofibrillar protein [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2020, 56(2): 733–741.

[35] 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 HF, LI SS, ZHANG LW, *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.

[36] 刘英丽, 谢良需, 丁立, 等. 小麦麸膳食纤维对猪肉肌原纤维蛋白凝胶功能特性的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(19): 15–23.
LIU YL, XIE LX, DING L, *et al*. Effect of wheat dietary fibers on functional properties of pork myofibrillar protein gels [J]. Food Science, 2016, 37(19): 15–23.

[37] 樊润泽, 祁苗, 张新颖, 等. 冷等离子体对肉蛋白的影响及其在肉品保藏加工中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(7): 250–259.
FAN RZ, QI M, ZHANG XY, *et al*. Effect of cold plasma on meat protein and its applications in meat processing and preservation: A comprehensive review [J]. Food Science, 2023, 44(7): 250–259.

[38] HSIEH KC, TING Y. Atmospheric cold plasma reduces Ara h 1 antigenicity in roasted peanuts by altering the protein structure and amino acid profile [J]. Food Chemistry, 2024, 441: 138115.

[39] OLATUNDE OO, SINGH A, SHIEKH KA, *et al*. Effect of high voltage cold plasma on oxidation, physiochemical, and gelling properties of myofibrillar protein isolate from Asian sea bass (*Lates calcarifer*) [J]. Foods, 2021, 10(2): 326.

(责任编辑：蔡世佳　安香玉)