扶庆权, 吴迪, 杨金堂, 等. 柑橘纤维对低盐条件下鸡肉肌原纤维蛋白乳液稳定性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(2): 77−83. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120255
FU Qingquan, WU Di, YANG Jintang, et al. Effects of Citrus Fiber on the Stability of Chicken Myofibrillar Protein Emulsions Under Low-salt Conditions[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(2): 77−83. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120255

· 研究与探讨 ·

柑橘纤维对低盐条件下鸡肉肌原纤维蛋白乳液稳定性的影响

扶庆权[1], 吴　迪[1], 杨金堂[2], 陈全战[1], 秦　春[3,*], 张　伟[1]
（1.南京晓庄学院食品科学学院, 江苏南京 211171;
2.安徽省药品审评查验中心, 安徽合肥 230041;
3.南京农业大学生命科学学院, 江苏南京 210095）

摘　要: 本实验以鸡胸肉为原料提取肌原纤维蛋白制作乳液，通过测定乳液表观稳定性、Turbiscan 稳定指数、液滴粒径、流变特性、微观结构以及油水相吸附蛋白含量，研究不同柑橘纤维浓度（0%、1.5%、3%、4.5%）对低盐条件下（0.3 mol/L NaCl）鸡肉肌原纤维蛋白乳液稳定性的影响。结果表明，随着柑橘纤维浓度的增加，乳液 Turbiscan 稳定指数值和液滴粒径逐渐减小，而乳液表观稳定性、表观粘度、储能模量、损耗模量和乳液层吸附蛋白含量明显增加。激光共聚焦结果表明，肌原纤维蛋白均匀分布在油滴周围，而冷冻电镜结果表明，油滴均匀分布在柑橘纤维形成的三维网状结构中。当柑橘纤维添加量为 4.5% 时，制作的乳液在 4 ℃ 贮藏 7 d 已达到一个相对稳定的状态，未见乳液出现分层。以上结果表明，柑橘纤维在改善低盐肌原纤维蛋白乳液的稳定性方面可能是一种有潜力的乳化剂。

关键词: 肌原纤维蛋白, 乳液, 柑橘纤维, 稳定性, 低盐
中图分类号: TS251.5　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)02−0077−07
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120255
本文网刊:

Effects of Citrus Fiber on the Stability of Chicken Myofibrillar Protein Emulsions Under Low-salt Conditions

FU Qingquan[1], WU Di[1], YANG Jintang[2], CHEN Quanzhan[1], QIN Chun[3,*], ZHANG Wei[1]
（1.School of Food Science, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211171, China;
2.Anhui Drug Evaluation and Certification Center, Hefei 230041, China;
3.College of Life Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China）

Abstract: In this experiment, myofibrillar proteins were extracted from chicken breast meat to prepared emulsions. The effects of different concentrations of citrus fiber (0%, 1.5%, 3%, 4.5%, CF) on the stability of chicken myofibrillar protein (MP) emulsions under low-salt conditions (0.3 mol/L NaCl) were investigated by measuring the apparent stability, Turbiscan stability index, droplet size, rheological properties, microstructure of emulsion and the content of adsorbed protein in the oil-water phase. The results showed that with the increase of citrus fiber concentration, Turbiscan stability index value and oil droplet size of the emulsions gradually decreased, while the apparent stability, apparent viscosity, storage modulus, loss modulus, and adsorbed protein content of the emulsion layer obviously increased. Laser confocal results showed that myofibrillar proteins were uniformly distributed around the oil droplets, and cryo-electron microscopy results showed that the oil droplets were uniformly distributed in the three-dimensional network structure formed by citrus fibers. When the addition amount of citrus fiber was 4.5%, the prepared emulsions reached a relatively stable state after

收稿日期: 2024−12−20
基金项目: 南京晓庄学院高层次培育项目（2022NXY06）; 南京市农产品质量与安全重点实验室（宁教高师 [2021]16 号）。
作者简介: 扶庆权（1975−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 畜产品加工与质量控制、乳液凝胶及食品添加剂和配料, E-mail: fuqingquan@126.com。
*** 通信作者:** 秦春（1981−）, 男, 硕士, 实验师, 研究方向: 植物原食品加工与质量控制, E-mail: qinchun@njau.edu.cn。

being stored at 4 ℃ for 7 days, and no emulsion stratification was observed. These above results indicate that citrus fiber might be a potential emulsifier in improving the stability of low-salt myofibrillar protein emulsions.

Key words: myofibrillar protein; emulsion; citrus fiber; stability; low salt

乳液是油滴通过乳化剂均匀分散在水中形成的一种混合体系,而乳化型肉糜制品就是一种典型的水包油型乳液[1]。乳液通常是一种热不稳定体系,在贮藏过程中容易发生聚集、絮凝甚至分层沉淀,最终导致油水分离[2]。因此,添加乳化剂是一种有效改善乳液稳定性的方法。纯肉糜中肌原纤维蛋白的含量约占肉蛋白总量的 55%~60%[3],它是一种优良的天然乳化剂,能够吸附在油滴的表面形成界面膜从而稳定乳液[4],在保持乳化型肉制品的质构中起着关键的作用[5]。然而,肌原纤维蛋白是一种盐溶性蛋白,需要在 0.6 mol/L 氯化钠的高盐溶液中才能充分溶解发挥作用。而长期过量食盐的摄入则对消费者的健康有害,容易引起高血压、心血管疾病和胃癌等疾病[6]。因此,生产中通常加入其它合成或天然乳化剂才能保证乳液的稳定性并实现减盐目的。出于安全考虑,近年来天然来源的乳化剂逐渐受到食品行业的青睐。

柑橘纤维是从柑橘皮渣中提取出来的一种天然膳食纤维,其主要成分为纤维素、半纤维素、木质素、果胶及少量的蛋白和橙皮苷[7],具有良好的保水保油性、增稠性、抗氧化性和乳化稳定性[8],因此,柑橘纤维广泛应用于饮料、乳制品,冰淇淋、焙烤制品和肉制品中[9]。目前,关于柑橘纤维在乳化型肉制品中的应用主要集中在香肠动物脂肪替代[10]和香肠持水力改善[11]方面,然而柑橘纤维对低盐条件下鸡肉肌原纤维蛋白乳液稳定性影响及对乳化型肉制品品质影响的潜在机制还未见报道。

因此,本研究将不同浓度的柑橘纤维(0%、1.5%、3%、4.5%)添加到水包油型乳液中,通过测定表观稳定性、Turbiscan 稳定指数、液滴粒径、流变性质、微观结构和油水界面吸附蛋白浓度等指标,研究不同浓度柑橘纤维对乳液稳定性影响,以期为柑橘纤维在乳化型肉制品中的应用和开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜白羽肉鸡鸡胸肉 南京市江宁区天印山农贸市场;柑橘纤维颗粒(粒径<150 μm,蛋白含量为 5.2%,总膳食纤维含量为 87.58%,可溶性膳食纤维含量为 8.02%,不溶性膳食纤维含量为 79.56%) 北京美年美月生物科技有限公司;金龙鱼一级食用大豆油 南京苏果超市江宁店;无水磷酸氢二钠、无水磷酸二氢钠、六水氯化镁、乙二醇双(2-氨基乙基醚)四乙酸、无水氯化钠、氢氧化钠、五水硫酸铜、牛血清蛋白 南京化学试剂有限公司;尼罗红、尼罗蓝 美国 Sigma-Aldrich 公司;以上化学试剂均为分析纯。

IMS-100 全自动雪花制冰机 常熟市雪科电器有限公司;PX224ZH 电子天平 奥豪斯仪器(常州)有限公司;XHF-DY 高速分散机 宁波新芝生物科技有限公司;HR21M 高速冷冻离心机 湖南赫西仪器装备有限公司;UV-2400 紫外可见分光光度计 日本岛津公司;Mastersizer 3000 激光粒度仪 英国马尔文公司;Turbiscan 稳定性分析仪 法国 Formulaction 仪器公司;MCR301 流变仪 奥地利安东帕公司;TCS SP8 X 激光共聚焦显微镜 德国徕卡公司;SU8010 冷冻扫描电镜 日本日立公司;164-5050 电泳仪 美国 Bio-Rad 公司;GT-800F 扫描仪 日本爱普生公司。

1.2 实验方法

1.2.1 肌原纤维蛋白的提取 肌原纤维蛋白的提取参考 FU 等[12]的方法。新鲜鸡胸肉去掉筋膜和可见脂肪,称取 200 g 鸡胸肉用搅拌机搅碎,加入 4 倍体积预冷的磷酸盐缓冲液(0.1 mol/L NaCl, 2 mmol/L $MgCl_2$, 1 mmol/L EGTA, 10 mmol/L NaH_2PO_4, pH 7.0),使用高速分散机以 10000 r/min 匀浆 60 s,匀浆过程中匀浆 30 s 停 30 s,匀浆液接着以 2000 r/min 离心 10 min,沉淀物以上述相同的条件重复提取 3 次。得到的沉淀接着加入 0.1 mol/L 氯化钠溶液(pH 6.25)润洗 3 次,每次均以 2000 r/min 离心 10 min。在最后一次离心前需使用 100 目纱布过滤匀浆液中的结缔组织,离心后得到的沉淀即为肌原纤维蛋白。蛋白浓度以牛血清蛋白做标准品并采用双缩脲方法进行测定[13]。蛋白整个提取过程中均控制在 4 ℃ 条件下进行操作。

1.2.2 蛋白乳液的制备 蛋白乳液的制备参考 FU 等[14]的方法。每个样品乳液制作总体积为 60 mL。不同质量的柑橘纤维加入适量的低盐缓冲液(0.3 mol/L NaCl, 10 mmol/L NaH_2PO_4, pH7.0)浸泡过夜目的是进行溶胀,接着加入一定比例的肌原纤维蛋白溶液,用均浆机以 10000 r/min 匀浆 60 s,匀浆 30 s 停 30 s,接着加入 15 mL 大豆油,同样以上述相同的转速和时间进行匀浆,所有制得的粗乳液最终蛋白浓度为 15 mg/mL,脂肪浓度为 25%,食盐浓度为 0.3 mol/L,柑橘纤维浓度分别为 0%、1.5%、3%、4.5%(根据预实验结果选择的 3 个添加量)。获得的新鲜乳液在 24 h 内使用完毕。

1.2.3 乳液表观稳定性观察 新鲜乳液用一次性胶头滴管加入到干净的 20 mL 顶空瓶中,所有乳液高度保持一致,接着放入 4 ℃ 冰箱进行贮藏 7 d,观察不同乳液在 1 h、1 d 和 7 d 三个时间点的稳定性情况并用手机进行拍照。

1.2.4 乳液 Turbiscan 稳定性指数测定 乳液 Turbis

can 稳定性指数根据 FU 等[15] 的方法采用 Turbiscan 稳定性分析仪进行测定。取 20 mL 新鲜制备的乳液加入专用圆柱形玻璃样品槽中，要求乳液不能有气泡，仪器平衡后立即进行测定。测定条件设置为总扫描时间 150 min，90 s 扫描一次，测定温度为 25 ℃，波长 800 nm，测定结果通过仪器自带软件自动获得。

1.2.5　乳液液滴粒径测定　乳液液滴粒径采用马尔文激光粒度分析仪进行测定。1 mL 新鲜乳液加入石英比色皿中，采用动态光散射进行测定。测定条件为折射率 1.436，吸收指数 0.001，测定温度为 25 ℃。

1.2.6　乳液流变特性测定　乳液的表观粘度和频率扫描使用流变仪进行测定，流变仪带有直径为 50 mm 的平行板，间隔为 1.0 mm。新鲜乳液在 25 ℃ 条件下平衡 120 s，然后进行测定。表观粘度采用剪切速率在 0.1~100 s^{-1} 范围内进行测定，频率扫描包括储能模量(G')和损耗模量(G")采用角频率在 0.1~10 rad/s 范围内进行测定，剪切应变为 1%。所有的测量都是通过振荡应变扫描在线性范围内进行的。

1.2.7　乳液激光共聚焦观察　乳液中油滴和蛋白的大小和分布根据 HU 等[16] 的方法采用激光共聚焦进行观察。1 mL 新鲜乳液加入 40 μL 含有 0.01% 尼罗蓝和 0.01% 尼罗红的混合液进行染色，取 50 μL 染色后的样品装在载玻片上，盖上载玻盖，使用配备 40 倍放大镜捕捉蛋白乳液的微观结构。尼罗河蓝和尼罗河红的激发波长分别为 488 nm 和 633 nm。

1.2.8　乳液冷冻扫描电镜观察　乳液微观结构和网络结构根据 FU 等[17] 的方法用放大 500 倍下的冷冻扫描电镜进行观察。新鲜乳液用超纯水稀释 10 倍，取 20 μL 滴在专用平板上，盖上盖子，然后在–196 ℃ 的液氮下冷冻 2 min，样品接着转移到冷冻室并进行断裂，再在–70 ℃ 的真空状态下升华 5 min，然后用 10 mA 电流镀金 60 s，在 3 kV 加速电压下观察样品。

1.2.9　乳液界面蛋白浓度及组成测定　新鲜乳液吸收蛋白和非吸收蛋白的浓度和组成根据 LI 等[18] 的方法进行测定。30 mL 乳液在 4 ℃ 以 10000 r/min 离心 30 min，底部水相部分的非吸附蛋白含量用双缩脲方法进行测定，而顶部油相部分的吸附蛋白含量用乳液总蛋白含量减去水相部分蛋白含量来表示。水相非吸附蛋白的组成直接用十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳(SDS-PAGE)来鉴定，而乳化层的吸附蛋白先用低盐缓冲液(0.3 mol/L 氯化钠，10 mmol/L 磷酸二氢钠，pH7.0，1∶4，v/v)溶解，接着在 4 ℃ 以 10000 r/min 离心 30 min，重复上述步骤 3 次以获得更纯的吸附蛋白(乳化层)。获得的乳化层用定量滤纸进行过滤，收集滤纸上的脱水乳化层同样用 SDS-PAGE 鉴定其吸附蛋白的组成。每孔上样 10 μL，标准蛋白上样 4 μL，采用 5% 浓缩胶和 10% 分离胶分别以 80、120 V 进行电泳。电泳结束后，取出凝胶用染色液染色 2 h，再进行脱色直到看到清晰的条带为止，使用扫描仪进行扫描获得凝胶图片。

1.3　数据处理

每个处理组重复测定 3 次，每个样品至少平行测定 3 次，数据均用平均值和标准差进行表示。使用 SAS 8.1 软件对数据进行单因素 ANOVA 方差分析，Duncan 多重比较用于分析数据的显著性差异($P<0.05$)，使用 Origin 8.5 软件对数据进行作图。

2　结果与分析

2.1　乳液表观稳定性

乳液表观观察是评价乳液稳定性最直观的方法，乳液分层越少表明其稳定性越好[19]。由图 1 可知，柑橘纤维的添加对乳液贮藏 7 d 期间有显著的影响。当贮藏 1 h 后，不管是否添加柑橘纤维，乳液均很稳定，未出现分层现象。然而当贮藏 1 d 后，随着柑橘纤维添加量的增加，乳液稳定性提高，当柑橘纤维添加量为 4.5% 时，乳液稳定性最好，未出现分层现象。当贮藏 7 d 后，不管是否添加柑橘纤维，所有乳液均趋于稳定，未出现进一步分层现象。以上结果表明，随着柑橘纤维浓度的增加，乳液稳定性显著改善，这些结果可能与柑橘纤维含有的蛋白质和可溶性膳食纤维含量有关。柑橘纤维中的蛋白质具有较好的乳化活性，能够提高乳液的乳化能力。而水溶性膳食纤维能够增加乳液的粘度，不溶性膳食纤维则抑制了油滴的分散，从而诱导包裹在脂肪球表面的蛋白出现位阻排出和皮克林效应[20−21]，因此柑橘纤维的添加提高了乳液的稳定性。该研究结果与 ZHU 等[22] 报道的结果部分相同，其研究认为水溶性柑橘纤维改善了羊肉肌原纤维蛋白乳液物理稳定性，而不溶性膳食纤维则严重影响羊肉蛋白乳液的稳定性。

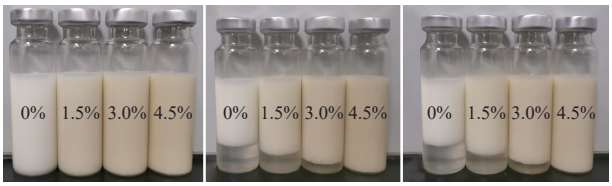


图 1　不同浓度柑橘纤维对低盐肌原纤维蛋白乳液表观稳定性的影响

Fig.1　Effects of different concentrations of CF on apparent stability of low-salt MP emulsions

2.2　乳液 Turbiscan 稳定指数（TSI）

为了证实柑橘纤维乳液的稳定性，接着进一步测定 TSI 值研究新鲜乳液的整体稳定性。TSI 值越小表明乳液稳定性越好[15]。由图 2 可知，对照组乳液的 TSI 值随着贮藏时间的延长而快速增加，而添加柑橘纤维乳液的 TSI 值则随着贮藏时间的延长而缓慢增加，这表明乳液稳定性均随着贮藏时间的延长而变差。从图 2 还可看出，乳液 TSI 值随着柑橘纤维添加量的增加而减小，说明柑橘纤维的添加有利于维持乳液稳定性。这个结果与上面乳液的表观稳定

性结果相一致，其主要原因可能是柑橘纤维的添加增加了乳液的粘度导致液滴均匀分散从而改善乳液稳定性。柑橘纤维中含有果胶，其可以水合形成弱凝胶网络结构，这种较弱的凝胶结构可以限制脂肪颗粒的聚集，获得更好的乳液稳定性[23]。

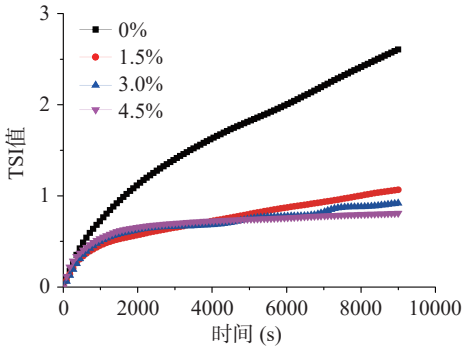


图 2 不同浓度柑橘纤维对低盐肌原纤维蛋白乳液 TSI 的影响

Fig.2 Effects of different concentrations of CF on TSI of low-salt MP emulsions

2.3 乳液粒径

乳液的液滴大小是评价乳液稳定性的重要指标，液滴尺寸越小乳液越稳定[24]。乳化过程、乳化剂的种类以及亲水胶体决定乳液的油滴大小[25]。由图 3 可知，乳液的粒径呈现两个峰，尤其是第二峰，随着柑橘纤维浓度的增加峰的轮廓趋向于左迁移，这表明液滴的粒径随着柑橘纤维浓度的增加逐渐减小。此结果的可能原因有两个，一方面柑橘纤维含有的膳食纤维增加乳液的粘度，防止油滴在贮藏过程中形成聚集；另一方面柑橘纤维的蛋白和可溶性膳食纤维和肌原纤维蛋白相互作用，在脂肪的表面形成界面膜从而防止油滴聚集[26]。ZHU 等[22] 研究发现，柑橘纤维的添加也使乳液粒径呈现明显的两个峰分布，可溶性柑橘纤维降低了乳液的油滴尺寸，而不溶性柑橘纤维却增加了乳液的油滴尺寸，分析原因可溶性柑橘纤维增加了蛋白质之间的聚集作用，而不溶性柑橘纤维含有大量的水合纤维素也导致蛋白质的聚集[27]。如表 1 所示，当柑橘纤维添加量为 3.0% 或 4.5% 时，乳液粒径较低且差异不显著（P>0.05），即再提高添加量可能对乳液粒径的影响较低，并且 4.5% 添加量时，乳液稳定性表现已良好。

表 1 不同浓度柑橘纤维对低盐肌原纤维蛋白乳液油滴平均粒径的影响

Table 1 Effects of different concentrations of CF on the average droplet size of low-salt MP emulsions

膳食纤维添加量(%)	$D_{[4,3]}$ (μm)
0	45.38±3.95^{a}
1.5	37.96±3.63^{b}
3.0	31.44±0.92^{c}
4.5	30.30±1.14^{c}

注：表中不同小写字母表示差异显著，P<0.05。

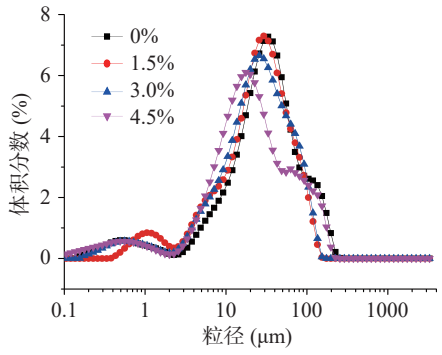


图 3 不同浓度柑橘纤维对低盐肌原纤维蛋白乳液油滴粒径分布及平均粒径的影响

Fig.3 Effects of different concentrations of CF on the distribution of low-salt MP emulsion droplets

2.4 乳液流变性质

膳食纤维尤其多糖类物质在乳液水相中形成三维凝胶网络，能够捕获油滴并具有较高的粘度[28]，而粘度增加可以改善乳液的物理稳定性。由图 4 可知，所有乳液显示的流动曲线是相似的，随着剪切速率的增加乳液的表观粘度均下降，这表明乳液具有剪切变稀行为，类似于假塑性流体[29]。随着柑橘纤维浓度的增加乳液的粘度逐渐增加，这表明柑橘纤维的添加改善了乳液的稳定性。其可能原因是柑橘纤维中的可溶性多糖增加乳液的粘度，防止了油滴的聚集和絮凝，从而增加了乳液稳定性。另外柑橘含有的蛋白质也能起到很好的乳化作用，通过降低界面张力和增加油水界面的静电排斥作用改善乳液稳定性[30]。本研究结果和 ZHOU 等[31] 的研究结果具有相似的趋势，发现羧甲基纤维素的添加改善了猪肉肌原纤维蛋白乳液的表观粘度，且随着纤维素浓度的增加乳液表观粘度随之增加。ZHAO 等[32] 也研究发现，改性膳食纤维的添加增加了肉糜乳液的表观粘度，而且随着改善膳食纤维添加量增加，其表观粘度越大。

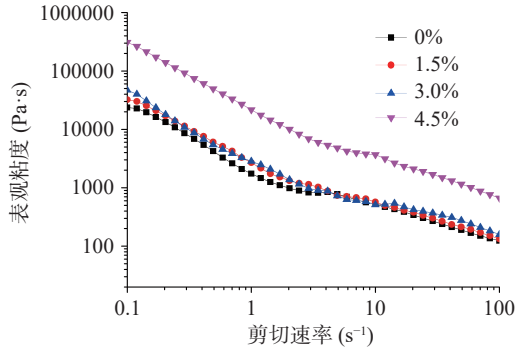


图 4 不同浓度柑橘纤维对低盐肌原纤维蛋白乳液表观粘度的影响

Fig.4 Effects of different concentrations of CF on apparent viscosity of low-salt MP emulsions

由图 5 可知，无论是否添加柑橘纤维，乳液的 G'和 G"值随着角频率的增加均在一定程度上呈现上升的趋势，且乳液的 G'值总是大于 G"值，这表明乳液具有较好的粘弹性和类似凝胶行为。由图 5 还可

看出，乳液的 G'和 G"值随着柑橘纤维浓度的增加而增大，这表明柑橘纤维的添加对乳液的整体结构有重要的影响。G'和 G"值的增加表明乳液具有相对较高的弹性，柑橘纤维中的果胶与水形成弱凝胶网络结构，并随着柑橘纤维浓度的增加，网络结构稳定性更好。ZHOU 等[31] 的研究表明，羧甲基纤维素的添加增加了肌原纤维蛋白乳液的 G'和 G"值，且随时羧甲基纤维添加量的增加 G'和 G"值快速增加。FU 等[15] 也研究表明，改性纤维素的添加增加了蛋白乳液的 G'和 G"值，且 G'和 G"值随着纤维素浓度的增加而增加。

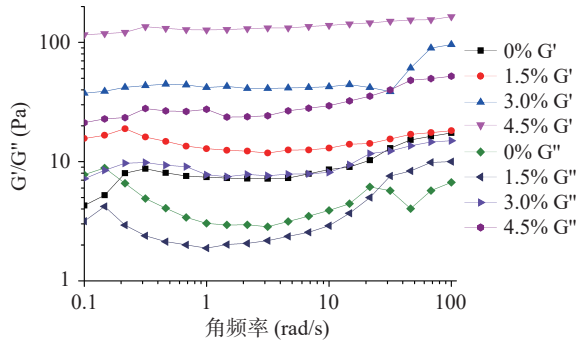


图 5　不同浓度柑橘纤维对低盐肌原纤维蛋白乳液 G'和 G"值的影响

Fig.5　Effects of different concentrations of CF on G' and G" values of low-salt MP emulsions

2.5　乳液激光共聚焦

激光共聚焦是一种有效的观察乳液油滴实际大小和分布以及蛋白和油滴相互作用的方法[32]。由图 6 可知，对照组乳液的油滴分布不均匀且油滴尺寸较大，而加入柑橘纤维后的乳液油滴和蛋白尺寸均变小且油滴数量显示较多，蛋白也均匀分布在油滴周围。随着柑橘纤维浓度的增加，油滴和蛋白尺寸均减小且分布越来越均匀，这表明柑橘纤维的添加有利于乳液油滴和蛋白的均匀分布，且促进了蛋白质和油滴的分散。与此同时，蛋白质包裹在油滴的表面，从而保护油滴不聚集或絮凝，最终形成稳定的乳液。

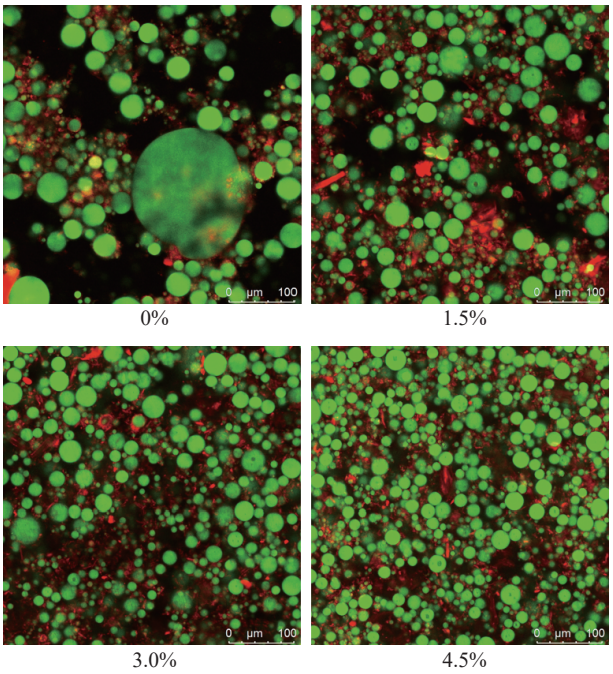


图 6　不同浓度柑橘纤维对低盐肌原纤维蛋白乳液激光共聚焦图像的影响

Fig.6　Effects of different concentrations of CF on CLSM images of low-salt MP emulsions

2.6　乳液冷冻扫描电镜

由图 7 可知，随着柑橘纤维浓度的增加乳液形成的网状结构变得更加稠密，所有油滴均分布在网络中，对照组油滴尺寸大且呈现椭圆形，而随着柑橘纤维浓度的增加，油滴尺寸减小。这可能的原因是柑橘纤维含有的多糖增加乳液的粘度并形成凝胶网络结构[15]，从而使得乳液随着柑橘纤维含量的增加而更加稳定。这个研究结果和粒径测定结果以及激光共聚焦测定结果一致。

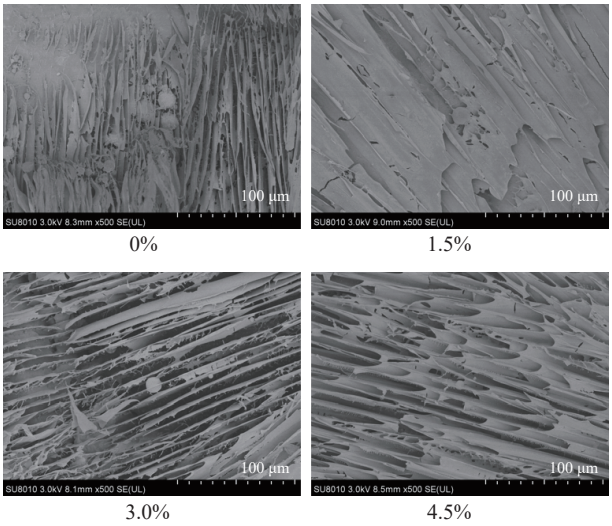


图 7　不同浓度柑橘纤维对低盐肌原纤维蛋白乳液冷冻电镜图像的影响

Fig.7　Effects of different concentrations of CF on cryo-SEM images of low-salt MP emulsions

2.7　界面蛋白的鉴定

蛋白质是一种优良的乳化剂，它能均匀分布在油滴的表面形成界面膜，从而将油滴分布在水相中[27]。肌原纤维蛋白降低油滴表面周围界面张力的能力与吸附蛋白的含量密切相关，而蛋白吸附量的增加会增加蛋白质膜的厚度和油滴的密度，从而进一步提高乳液的稳定性[33]。由乳液共聚焦图 6 结果可知，随着柑橘纤维添加量增加，蛋白包裹油滴使其不易形成大颗粒乳液液滴，乳液尺寸的降低增加了整体结构的灵活性，易快速形成油滴周围的蛋白界面膜，降低界面张力[18]。由图 8 电泳结果可知，水相中的非吸收蛋白和油相中吸收蛋白均含有肌球蛋白重链、α-辅肌动蛋白、肌动蛋白、原肌球蛋白、肌球蛋白轻链 1 和肌球蛋白轻链 2。随着柑橘纤维浓度的增加，乳液水相中的肌球蛋白重链、肌动蛋白、原肌球蛋白和肌球蛋白轻链含量显著降低，而油相中的肌

球蛋白重链、肌动蛋白、原肌球蛋白和肌球蛋白轻链含量则显著增加，这表明柑橘纤维的添加改善了乳液稳定性。其可能原因是肌球蛋白和肌动蛋白分布在油滴的表面降低了界面张力并增加油滴的静电排斥从而改善了乳液稳定性[34]。

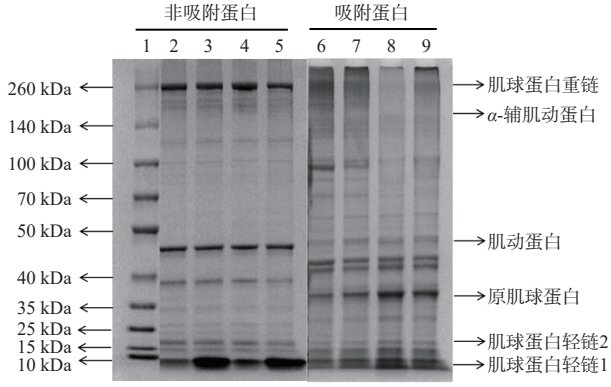


图 8 不同浓度柑橘纤维对低盐肌原纤维蛋白乳液凝胶电泳图像的影响

Fig.8 Effects of different concentrations of CF on SDS-PAGE pattern of low-salt MP emulsions

注：1 表示标准 Mark 蛋白样品，2~5、6~9 分别表示添加 0%、1.5%、3.0%、4.5% 柑橘纤维制备的蛋白乳液样品。

3 结论

柑橘纤维添加量对低盐肌原纤维蛋白乳液的稳定性、粒径、流变性质和微观结构具有显著的影响。油滴尺寸的减小和乳液粘度的增加可能是改善低盐肌原纤维蛋白乳液稳定性的主要原因。当柑橘纤维浓度为 4.5% 时，乳液稳定性表现最好。总之，柑橘纤维对稳定水包油型乳液可能是一种有效的乳化剂，有望在乳化型肉制品行业发挥潜在的应用。然而，柑橘纤维吸水能力强，继续增加乳液中的柑橘纤维浓度会使得溶液非常粘稠。另外，柑橘纤维在乳化型肉制品中的实际应用还未研究，未来的研究将聚焦柑橘纤维在乳化型肉制品中的实际应用。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] LAM R S H, NICKERSON M T. Food proteins: A review on their emulsifying properties using a structure–function approach[J]. Food Chemistry, 2013, 141(2): 975−984.

[2] SANTHI D, KALAIKANNAN A, SURESHKUMAR S. Factors influencing meat emulsion properties and product texture: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(10): 2021−2027.

[3] ZHU Chaozhi, JIN Haoquan, YIN Feng, et al. Emulsion-forming properties of heat-induced pork myofibrillar protein affected by NaCl[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(6): 3016−3025.

[4] ZHAO Xue, WU Tao, XING Tong, et al. Rheological and physical properties of O/W protein emulsions stabilized by isoelectric solubilization/precipitation isolated protein: The underlying effects of varying protein concentrations[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 95: 580−589.

[5] WEI Sumeng, YANG Yuling, FENG Xiao, et al. Structures and properties of chicken myofibrillar protein gel induced by microwave heating[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(7): 2691−2699.

[6] WANG Ji, HUANG Xuhui, ZHANG Yuying, et al. Effect of sodium salt on meat products and reduction sodium strategies: A review[J]. Meat Science, 2023, 205: 109296.

[7] HUANG Jiayi, LIAO Jinsong, QI Junru, et al. Structural and physicochemical properties of pectin-rich dietary fiber prepared from *Citrus* peel[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 110: 106140.

[8] XUE Xiuheng, DONG Jinhua, HE Haiyong, et al. Emulsification and stabilization of diacylglycerol-in-water Pickering emulsions stabilized by ultrafine grinding oat bran insoluble fiber-gelatinized starch hybrid granules[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 112: 106322.

[9] LUNDBERG B, PAN X J, WHITE A, et al. Rheology and composition of *Citrus* fiber[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 125: 97−104.

[10] TOMASCHUNAS M, ZÖRB R, FISCHER J, et al. Changes in sensory properties and consumer acceptance of reduced fat pork Lyon-style and liver sausages containing inulin and *Citrus* fiber as fat replacers[J]. Meat Science, 2013, 95(3): 629−640.

[11] SONG Junhong, PAN Teng, WU Jianping, et al. The improvement effect and mechanism of *Citrus* fiber on the water-binding ability of low-fat frankfurters[J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(12): 4197−4204.

[12] FU Qingquan, LIU Rui, WANG Haiou, et al. Effects of oxidation *in vitro* on structures and functions of myofibrillar protein from beef muscles[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(20): 5866−5873.

[13] GORNALL A G, BARDAWILL C J, DAVID M M. Determination of serum proteins by means of the biuret reaction[J]. Journal of Biological Chemistry, 1949, 177(2): 751−766.

[14] FU Qingquan, CHENG Jingrong, SHI Haibo, et al. Effects of xanthan gum and *Psyllium* husk powder with different ratios on the emulsification and oxidative stability of low-salt myofibrillar protein emulsions prepared by ultrasound[J]. Food Chemistry: X, 2025, 25: 102214.

[15] FU Qingquan, LIU Rui, ZHOU Lei, et al. Effects of *Psyllium* husk powder on the emulsifying stability, rheological properties, microstructure, and oxidative stability of oil-in-water emulsions[J]. Food Control, 2022, 134: 108716.

[16] HU Hongyan, XING Lujuan, HU Yaya, et al. Effects of regenerated cellulose on oil-in-water emulsions stabilized by sodium caseinate[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 52: 38−46.

[17] FU Qingquan, SHI Haibo, ZHOU Lei, et al. Effects of ultrasound power on the properties of non-salt chicken myofibrillar protein emulsions[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(4): 2523−2534.

[18] LI Ke, FU Lei, ZHAO Yingying, et al. Use of high-intensity ultrasound to improve emulsifying properties of chicken myofibrillar protein and enhance the rheological properties and stability of the emulsion[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 98: 105275.

[19] UMAÑA M, TURCHIULI C, EIM V, et al. Stabilization of oil-in-water emulsions with a mushroom (*Agaricus bisporus*) by-product[J]. Journal of Food Engineering, 2021, 307: 110667.

［20］ AYADI M A, KECHAOU A, MAKNI I, et al. Influence of carrageenan addition on Turkey meat sausages properties[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 93(3): 278−283.
［21］ SHAO Ping, FENG Jieru, SUN Peilong, et al. Recent advances in improving stability of food emulsion by plant polysaccharides[J]. Food Research International, 2020, 137: 109376.
［22］ ZHU Chenyan, ZHANG Shunliang, ZHU Ning, et al. Effects of *Citrus* fiber on the emulsifying properties and molecular structure of mutton myofibrillar protein: An underlying mechanisms study[J]. Food Bioscience, 2023, 51: 102304.
［23］ POWELL M J, SEBRANEK J G, PRUSA K J, et al. Evaluation of *Citrus* fiber as a natural replacer of sodium phosphate in alternatively-cured all-pork Bologna sausage[J]. Meat Science, 2019, 157: 107883.
［24］ TAO Ye, CAI Jiaming, WANG Peng, et al. Exploring the relationship between the interfacial properties and emulsion properties of ultrasound-assisted cross-linked myofibrillar protein[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 146: 109287.
［25］ XU Wei, XIONG Yongzhao, LI Zhifan, et al. Stability, microstructural and rheological properties of complex prebiotic emulsion stabilized by sodium caseinate with inulin and konjac glucomannan[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 105: 105772.
［26］ FU Qingquan, ZHOU Lei, SHI Haibo, et al. Synergistic effects of *Psyllium* husk powder and different levels of methylcellulose on the storage stability of sodium caseinate emulsion[J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1125312.
［27］ FU Qingquan, QIN Chun, CHEN Quanzhan, et al. Effects of *Flammulina velutipes* powder on the emulsion properties of chicken myofibrillar protein under low-salt conditions[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2025, 105(4): 2118−2127.
［28］ VERKEMPINCK S H E, KYOMUGASHO C, SALVIA-TRUJILLO L, et al. Emulsion stabilizing properties of *Citrus* pectin and its interactions with conventional emulsifiers in oil-in-water emulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 85: 144−157.
［29］ MOROS J E, FRANCO J M, GALLEGOS C. Rheology of spray-dried egg yolk-stabilized emulsions[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2002, 37(3): 297−307.
［30］ KURT A, GENÇCELEP H. Enrichment of meat emulsion with mushroom (*Agaricus bisporus*) powder: Impact on rheological and structural characteristics[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 237: 128−136.
［31］ ZHOU Lei, JIANG Jinyuan, FENG Fan, et al. Effects of carboxymethyl cellulose on the emulsifying, gel and digestive properties of myofibrillar protein-soybean oil emulsion[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 309: 120679.
［32］ ZHAO Yinyu, HOU Qin, CAO Songmin, et al. Effect of regenerated cellulose fiber on the properties and microstructure of emulsion model system from meat batters[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 87: 83−89.
［33］ JIANG Jiang, XIONG Y L. Extreme pH treatments enhance the structure-reinforcement role of soy protein isolate and its emulsions in pork myofibrillar protein gels in the presence of microbial transglutaminase[J]. Meat Science, 2013, 93(3): 469−476.
［34］ PENG Weiwei, KONG Xiangzhen, CHEN Yeming, et al. Effects of heat treatment on the emulsifying properties of pea proteins[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 52: 301−310.