



马铃薯基乳液对鱼糜凝胶品质的影响

卢会敏^{1,2}, 赵瑞璇², 张良², 刘伟²,
刘倩楠², 刘书成^{1*}, 胡宏海^{2*}

(1. 广东海洋大学食品科技学院, 广东省水产品加工与安全重点实验室,
广东省海洋生物制品工程实验室, 广东省海洋食品工程技术研究中心,

广东省水产预制食品加工与品质控制工程技术研究中心, 广东 湛江 524088;

2. 中国农业科学院农产品加工研究所, 农业农村部马铃薯主食化加工技术集成实验室,
农业农村部农产品加工重点实验室, 北京 100080)

摘要: 为了研究马铃薯基乳液 (PE) 对鱼糜凝胶品质的影响, 实验采用玉米油 (CO) 或 PE 按不同添加量 (0%~14%) 与鱼糜混合, 以鱼糜凝胶质构、水分、色泽、分子间相互作用、流变特性和微观结构为考察指标, 探究 PE 作为脂肪替代物对鱼糜凝胶品质的影响及机理。结果显示, 在相同的油添加量下, 与 CO 相比, PE 能避免油滴对鱼糜凝胶质构特性和持水能力产生的劣化效果, 使样品表现出更高的弹性模量和黏度; 另外, 横向弛豫时间结果显示, PE 抑制了不易流动水向自由水的转变, 使更多的不易流动水被束缚, 这可能增强了光线漫反射, 从而使 PE 样品白度更高。微观结构和分子间作用力测定结果显示, PE 样品中油滴分布更均匀, 氢键、疏水相互作用和二硫键更强, 凝胶网络因淀粉颗粒的填充效应而更致密。十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳结果表明, PE 组中油滴对鱼糜蛋白交联的干预程度更小。研究表明, PE 可作为脂肪替代物提升鱼糜凝胶制品品质。本研究可为淀粉基脂肪替代物的开发及其在鱼糜凝胶产品中的应用提供理论基础。

关键词: 鱼糜凝胶; 马铃薯; 乳液; 脂肪替代物

中图分类号: S 985.1; TS 254.5

文献标志码: A

鱼糜凝胶制品具有柔软的质地, 富含优质蛋白, 深受消费者喜爱。鱼糜作为鱼糜凝胶制品的主要原料, 通常经漂洗去除脂肪, 浓缩肌原纤维蛋白, 提高产品储藏性能和食用品质^[1], 但产品营养价值也因此降低。在鱼糜加工过程中, 需添加适量的脂质以提升鱼糜产品凝胶特性和营养价值^[2]。但是, 油脂的直接添加可能会降低肌原纤维蛋白间的交联程度, 促进蛋白氧化。目前, 鱼

油^[3]、南极磷虾油^[4]、橄榄油^[5]等制备的预乳化油脂已被证明能在鱼糜凝胶中引入油脂脂肪酸的同时, 有效地提升凝胶的质构特性和持水能力, 并降低脂肪氧化。

含有预乳化油脂的鱼糜凝胶作为复杂的乳化体系, 其品质极大地受到乳化剂的影响。常见的乳化剂包括蛋白质、淀粉和多酚等, 其中, 淀粉具有易获得、低过敏性、价格低廉等优点, 在乳

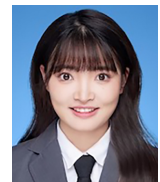
收稿日期: 2024-03-17 修回日期: 2024-04-15

资助项目: 中国农业科学院科技创新工程 (CAAS-ASTIP-G2022-IFST-04); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (S2023JBKY-04); 广东省高等学校海洋食品绿色加工技术创新团队 (2019KCXTD011); 国家现代农业产业技术体系 (CARS-09-P27)

第一作者: 卢会敏 (照片), 从事水产品贮藏与加工及马铃薯加工与品质调控研究, E-mail: 2514723877@qq.com

通信作者: 刘书成, 从事水产品贮藏与加工研究, E-mail: liusc@gdou.edu.cn;

胡宏海, 从事马铃薯加工与品质调控研究, E-mail: huhonghai@caas.cn



液的工业化生产和应用方面更具优势^[6]。此外, 淀粉具有高吸水和膨胀性, 常用于提高鱼糜凝胶性能和产量^[7]。然而, 淀粉的提取过程复杂, 且需要物理或化学手段来改善其乳化性能, 这些理化方法可能操作复杂或在过度使用后对健康不利^[8-9]。另外, 含有淀粉的二元或多元组分已用于制备稳定的淀粉基乳液, 例如天然黑米颗粒^[9]、苦荞颗粒^[10]、马铃薯淀粉-乳清蛋白体系^[11]等。因此, 含有淀粉的天然乳化剂可能有潜力用于开发鱼糜产品中的脂肪替代物。

马铃薯 (*Solanum tuberosum*) 不仅含有丰富的淀粉 (约 70%, 干重), 还含有非过敏性蛋白、纤维素和多酚等天然乳化物质, 具有作为天然淀粉基乳化剂的潜力^[12]。前期结果证明, 50% 糊化度的马铃薯粉制备的乳液具有一定的稳定性和可塑性^[13], 但其脂肪替代潜力仍需进一步验证。因此本研究以马铃薯基乳液 (PE) 和玉米油 (CO) 作为不同相态的油脂加入鱼糜凝胶中, 并通过质构仪、低场核磁共振仪、色度计和流变仪对含油量为 6%~14% 的鱼糜凝胶特性进行分析。借助扫描电镜 (scanning electron microscope, SEM) 和激光共聚焦显微镜 (confocal laser scanning microscope, CLSM) 分别对样品凝胶微观网络结构和油滴分布进行观察。通过分子间作用力和十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳 (SDS-PAGE) 图谱阐述样品中蛋白相互作用。本研究可为脂肪替代物的开发和鱼糜凝胶产品品质的提升提供可行性策略。

1 材料与amp;方法

1.1 实验材料

黄线狭鳕 (*Gadus chalcogrammus*) 鱼糜 (FA 级) 购买于山东南启水产贸易有限公司, 储藏于 -20 °C 备用; 马铃薯采自中国甘肃, 于 4 °C 储存备用; 玉米油 (中粮福临门食品营销有限公司) 从当地超市购买, 常温保存。所有化学试剂均为分析纯。双缩脲和考马斯亮蓝蛋白定量试剂盒购买于上海源叶生物科技有限公司。蛋白上样缓冲液购买于北京索莱宝生物科技有限公司。考马斯亮蓝快速染色液和脱色液购买于北京酷来搏科技有限公司。

1.2 马铃薯粉制备

将马铃薯块茎去皮, 立即切成方块 (1.5 cm ×

1.5 cm × 1.5 cm), 浸泡在水中, 沥干水分密封于高阻隔袋内, 随后 -20 °C 冷冻 12 h, 流动水解冻 4 h, 利用 G-1 MINI PLUS 型挤压脱水机 (厦门深度绿生物科技有限公司) 对马铃薯块进行挤压脱水。将冻融脱水的马铃薯块冷冻干燥, 研磨成粉末, 过 60 目筛以获得马铃薯粉, 其水分含量为 13.64%±1.28%, 淀粉含量为 79.89%±1.23%, 蛋白质含量为 5.80%±0.08%。

1.3 马铃薯基乳液制备

根据已有方法^[14], 制备糊化度为 50% 的马铃薯糊 (马铃薯粉浓度为 12 wt%) 作为连续相。将 35 g 上述马铃薯糊和 15 g 玉米油加入到 100 mL 烧杯中, 13 400 r/min 均质 2 min 以获得 30 wt% 含油量的 O/W 马铃薯基乳液。

1.4 鱼糜凝胶制备

鱼糜凝胶的制备参考 Yan 等^[15] 的方法并略作修改。将冷冻鱼糜于 4 °C 冰箱中解冻 12 h, 称取 100 g 解冻鱼糜于 QSJ-B02X5 型绞肉机 (小熊电器股份有限公司) 中, 4 800 r/min 下斩拌 3 min, 随后加入 2.5 g NaCl, 继续斩拌 2 min, 加入 PE 或 CO, 使鱼糜溶胶中油含量分别为 6%、8%、10%、12% 和 14%, 继续斩拌 5 min, 同时按照相同操作设置不含油的鱼糜溶胶, 作为空白对照。称取约 30 g 鱼糜溶胶于 50 mL 离心管中, 在 3 000 r/min 下离心 5 min (Allegra 64R 型台式高速冷冻离心机, Beckman Coulter, 美国) 以除去样品中空气。将样品进行二段式水浴加热, 制备鱼糜凝胶样品。参数设置: 40 °C 水浴加热 30 min, 95 °C 水浴加热 20 min。将样品置于 4 °C 下平衡 12 h, 用于后续指标测定。

1.5 鱼糜凝胶全质构 (TPA) 特性测定

将凝胶切割为直径 25 mm, 高度 25 mm 的圆柱体, 用 CT3 型质构仪 (Bookfield, 美国) 对样品进行测定, 采用直径 35 mm 圆柱形探头, 进行 2 次循环压缩, 探头下降速度为 1 mm/s, 压缩距离为 10 mm, 触发力 5 g, 记录硬度、弹性、内聚性、咀嚼性和胶着性。每个样品至少 7 次平行。

1.6 鱼糜凝胶白度测定

将凝胶切割为直径 25 mm, 高度 25 mm 的圆柱体, 利用 CR-400 型手持色差计 (柯尼卡美能达有限公司, 日本) 对样品白度进行测定, 记录红度

和蓝度值。每个样品重复测定 10 次, 根据下述公式计算白度 (W):

$$W = 100 - [(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{1/2}$$

式中, L^* 为亮度值, a^* 为红度值, b^* 为黄度值。

1.7 鱼糜凝胶持水力 (WHC) 测定

参考 Mi 等^[16] 的方法, 略作修改。将凝胶切为约 2 mm 薄片, 准确称量记为 M_1 , 用 3 层滤纸折叠包裹后, 放入离心管中, 于 4 °C 下, 10 000 r/min 离心 10 min, 取出后用滤纸吸干样品表面水分, 样品重量记为 M_2 , 每组样品平行测定 7 次, 按公式计算持水力:

$$\text{WHC}(\%) = \frac{M_2}{M_1} \times 100\%$$

1.8 鱼糜凝胶水分类型及分布测定

参考 Zhuang 等的方法^[17], 略作修改。将凝胶切割成直径 25 mm, 高度 25 mm 的圆柱体, 利用 PQ-001 型低场核磁共振波谱仪 (苏州纽迈分析仪器股份有限公司), 室温下设置条件参数: 质子共振频率为 22.6 MHz, T_2 弛豫时间以 CPMG 序列测量, 重复扫描 35 次, 12 000 个回波。记录 T_2 横向弛豫时间和占比并对样品进行磁共振成像。

1.9 鱼糜凝胶流变特性测定

参考 Chen 等^[18] 的方法, 将鱼糜溶胶置于 50 mm 流变仪 (Physica MCR 301 型, 奥地利安东帕有限公司) 平行板上, 狭缝宽度 1 mm, 刮去多余鱼糜溶胶, 用硅油覆盖住样品以防止水分蒸发。设置剪切应变为 0.05%, 在 0.01~100.00 Pa 内进行应力扫描, 确定鱼糜溶胶线性黏弹性区间 (LVR)。在 LVR 内, 稳态剪切测试在 0.01~100.00 s⁻¹ 剪切速率下进行, 记录表观黏度。温度扫描测试中, 样品从 25 °C 以 2 °C/min 加热至 90 °C, 记录弹性模量 (G') 和黏性模量 (G'') 随温度变化情况。

1.10 鱼糜凝胶微观结构测定

将鱼糜凝胶切至 1 mm 厚方块, 冷冻干燥, 贴于双面胶带上, 随后喷金, 设置 30 kV 的加速电压, 利用扫描电镜 (SU8010 型, HITACHI, 日本), 观察鱼糜凝胶微观结构, 每个样品观察 12 个区域。

1.11 鱼糜凝胶油滴分布测定

参考 Xu^[19] 的方法, 利用 LSM 980 型激光

扫描共聚焦显微镜 (卡尔蔡司, 德国) 对鱼糜凝胶中油滴分布情况进行观察。分别用尼罗红 (1 mg/mL, 溶于乙醇) 和尼罗蓝-A (1 mg/mL, 溶于乙醇) 对油滴和蛋白进行染色。将鱼糜凝胶置于 -80 °C 冷冻 15 min 后, 切成小片 (约 1 mm 厚), 吸取 40 μL 的染液滴于样品表面, 暗处孵化 5 min 后, 用蒸馏水将多余的染液洗去, 分别在 633 和 488 nm 波长下对油滴和蛋白进行观察。

1.12 鱼糜凝胶分子间作用力测定

参考 Mi 等^[16] 的方法, 称取 2 g 鱼糜凝胶样品, 分别加入到 20 mL 0.05 mol/L NaCl 溶液 (R_1)、0.60 mol/L NaCl 溶液 (R_2)、0.60 mol/L NaCl + 1.50 mol/L 尿素溶液 (R_3)、0.60 mol/L NaCl + 8.00 mol/L 尿素溶液 (R_4) 和 0.60 mol/L NaCl + 8.00 mol/L 尿素 + 0.50 mol/L β-巯基乙醇溶液 (R_5), 将混合物在 10 000 r/min 下均质 1 min, 再于 4 °C 下 10 000 r/min 离心 15 min, 利用考马斯亮蓝法测定上清液中蛋白浓度。基于不同溶液中蛋白浓度, 鱼糜凝胶中分子间作用力计算方法:

$$\text{离子键} = A_2 - A_1$$

$$\text{氢键} = A_3 - A_2$$

$$\text{疏水相互作用} = A_4 - A_3$$

$$\text{二硫键} = A_5 - A_4$$

式中, A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 和 A_5 分别为溶液 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 和 R_5 中上清液蛋白浓度。

1.13 鱼糜凝胶 SDS-PAGE 图谱测定

参考 Buamard 等^[20] 的方法, 称取 3 g 鱼糜凝胶, 加入 27 mL 浓度为 5% 的 SDS 溶液, 于 10 000 r/min 下均质 2 min, 随后在 3 000 r/min 下离心 15 min 除去不溶性蛋白。稀释上清液至蛋白浓度为 2 mg/mL, 将其与 2×蛋白变性上样缓冲液等体积混合, 沸水浴 5 min。吸取 20 μL 混合物, 加入到电泳凝胶 (4% 浓缩胶, 10% 分离胶) 泳道中, 在 100 V 电压下进行电泳 [Bio Rad Mini Protean (II/3/TETRA system), 美国]。利用考马斯亮蓝快速染色液和脱色液对胶板进行染色和脱色, 随后对胶板成像。

1.14 数据分析

样品 TPA 和 WHC 数据通过 7 次平行测定获得, 其余实验平行测定 3 次, 数据结果表示为平均值±标准差。采用 IBM SPSS (Version 22.0) 软件进行数据分析, 若 $P < 0.05$ 则认为数据间有显著差异。

2 结果

2.1 鱼糜凝胶全质构特性

不同油含量的 PE 和 CO 鱼糜凝胶 TPA 特性如表 1 所示。所有样品的弹性和内聚性无显著变化 ($P>0.05$)。随 CO 添加量的提高, 样品硬度、胶

着性和咀嚼性呈现降低趋势, 但对于 PE 鱼糜凝胶, 在较低的油添加量下, PE 样品硬度显著从 1 073 g (空白) 提升到 1 159 g (6% PE 样品) ($P<0.05$)。另外, PE 样品硬度、胶着性和咀嚼性始终显著高于 CO 样品 ($P<0.05$)。

表 1 不同油含量鱼糜凝胶 TPA 特性

Tab. 1 The TPA properties of surimi gels with different oil content

样品 sample	油含量/% oil content	硬度/g hardness	内聚性 cohesiveness	弹性/mm springiness	胶着性/g gumminess	咀嚼性/mJ chewiness
对照 control	0	1 073.00±87.26 ^{Ba}	0.70±0.04 ^{Aa}	8.97±0.16 ^{Aa}	754.82±84.99 ^{ABa}	66.46±8.10 ^{ABa}
CO	6	837.33±104.82 ^b	0.71±0.04 ^a	8.91±0.18 ^a	587.78±69.75 ^b	51.39±6.67 ^b
	8	802.25±66.50 ^b	0.67±0.08 ^a	9.03±0.2 ^a	538.38±94.41 ^b	47.89±9.60 ^b
	10	571.44±56.70 ^c	0.72±0.05 ^a	8.97±0.18 ^a	409.44±35.37 ^c	36.01±3.22 ^c
	12	437.00±51.55 ^d	0.69±0.03 ^a	8.73±0.22 ^a	298.25±29.78 ^d	25.50±2.30 ^{cd}
	14	342.00±25.34 ^d	0.69±0.03 ^a	8.82±0.15 ^a	234.33±11.06 ^d	20.27±0.99 ^d
PE	6	1 159.78±68.56 ^{A*}	0.72±0.06 ^A	8.97±0.12 ^A	805.44±73.81 ^{A*}	70.87±4.24 ^{A*}
	8	1 118.10±112.84 ^{AB*}	0.67±0.03 ^A	9.02±0.16 ^A	755.20±65.27 ^{AB*}	66.80±6.06 ^{AB*}
	10	987.70±55.52 ^{BC**}	0.69±0.02 ^A	8.95±0.90 ^A	677.90±33.59 ^{BC**}	59.53±3.20 ^{BC**}
	12	903.91±99.10 ^{C**}	0.68±0.02 ^A	9.00±0.14 ^A	615.45±60.58 ^{C**}	54.39±6.13 ^{C**}
	14	690.28±48.52 ^{D***}	0.71±0.03 ^A	8.96±0.18 ^A	491.14±41.47 ^{D***}	43.19±4.19 ^{D***}

注: 不同的大写字母和小写字母分别表示不同的PE和CO添加量对鱼糜凝胶TPA特性具有显著影响($P<0.05$); *和**分别表示不同油类型对鱼糜凝胶TPA特性具有显著和极显著影响($P<0.01$), PE.马铃薯基乳液, CO.玉米油, 下同。

Notes: Different uppercase letters and lowercase letters indicate that different amounts of PE and CO have significant effects on the TPA characteristics of surimi gel ($P<0.05$); "*" and "***" respectively indicate that different oil types have significant and extremely significant effects ($P<0.01$) on TPA characteristics of surimi gel, PE. potato-based emulsions, CO. corn oil, the same below.

2.2 鱼糜凝胶色度特性

不同油添加量鱼糜凝胶色度特性如表 2 所示。与对照组相比, 低于 10% CO 添加量下, 鱼糜凝胶 L^* 、 b^* 和 W 随油添加量提高而提高; CO 添加

量从 10% 提高到 14% 后, 白度从 87.25 降低到 86.62; 无论油含量如何, 相比于空白对照, PE 样品 L^* 、 a^* 、 b^* 和 W 均增大。

表 2 不同油含量鱼糜凝胶色泽特性

Tab. 2 The color characteristics of surimi gels with different oil content

油含量/% oil content	亮度值(L^*) luminance		红度值(a^*) redness		黄度值(b^*) yellowness		白度值(W) whiteness	
	CO	PE	CO	PE	CO	PE	CO	PE
0	79.67±0.76 ^{Dd}		3.11±0.07 ^{Fd}		1.44±0.14 ^{Cd}		79.33±0.30 ^{Dd}	
6	87.03±0.56 ^c	86.92±0.22 ^C	-1.57±0.19 ^a	-1.51±0.04 ^E	5.77±0.36 ^{ab}	6.06±0.14 ^B	85.71±0.58 ^c	85.50±0.20 ^C
8	89.13±0.25 ^{a**}	87.81±0.49 ^B	-1.75±0.04 ^{bc**}	-1.32±0.06 ^D	5.89±0.14 ^{**}	6.31±0.08 ^A	87.51±0.25 ^{**}	86.21±0.43 ^B
10	88.70±0.59 ^a	87.87±0.59 ^B	-1.73±0.05 ^{b**}	-1.13±0.02 ^C	5.63±0.20 ^{bc**}	6.42±0.12 ^A	87.25±0.52 ^{a*}	86.23±0.57 ^B
12	88.13±0.36 ^b	88.22±0.23 ^{AB}	-1.82±0.04 ^{**}	-1.05±0.01 ^B	5.48±0.17 ^{**}	6.52±0.12 ^A	86.80±0.31 ^b	86.49±0.18 ^{AB}
14	87.97±0.54 ^{ab*}	88.74±0.23 ^A	-1.81±0.02 ^{**}	-0.88±0.03 ^A	5.56±0.10 ^{**}	6.49±0.11 ^A	86.62±0.25 ^b	86.97±0.25 ^A

2.3 鱼糜凝胶持水能力

不同油添加对鱼糜凝胶 WHC 的影响如图 1 所示。随 CO 添加量在 0%~8% 范围内提高, 鱼糜凝胶的 WHC 从 73.31% 显著增加到了 79.52%;

但 CO 添加量增加到 14% 时, 样品 WHC 显著低于空白对照。相比于空白对照, PE 鱼糜凝胶持水力显著提高 ($P<0.05$), 但随油添加量提高表现出降低趋势, 6% 和 14% 油含量的 PE 鱼糜样品 WHC

分别增加了约 17.7% 和 12.3%。另外, 在相同油添加量下, PE 添加组的 WHC 显著高于 CO 添加组 ($P < 0.05$)。

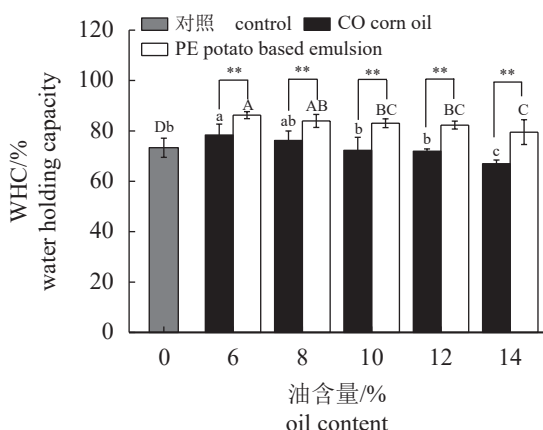


图 1 不同油含量鱼糜凝胶 WHC

Fig. 1 The WHC of surimi gels with different oil contents

2.4 鱼糜凝胶水分类型及分布特性

鱼糜凝胶 T_2 弛豫时间和占比分别如图 2-a 和图 2-b 所示。样品中存在 3 个氢质子弛豫峰, 其中 T_{2b} (0~10 ms) 约占总信号强度的 0.79%~1.28%, 这部分水表示与凝胶基质中大分子通过共价相互作用连接的结合水; T_{21} (20~400 ms) 是三种水类型中占比最大的 (>75.20%), 表示存在于凝胶网络中的不易流动水; T_{22} (400~2000 ms) 表征的是不被凝胶网络束缚的自由水^[20]。 P_{2b} 、 P_{21} 、 P_{22} 则分别为对应结合水、不易流动水和自由水的弛豫峰占比。相比于对照组, 样品中 T_2 弛豫时间延长; P_{2b} 变化并不显著, 表明油添加对凝胶中结合水影响不大。另外, 随着油添加量的提高, 样品 P_{21} 呈现明显的减小趋势, 而 P_{22} 则不断增加, 这表明凝胶网络中的不易流动水转变为了自由水。在相同油添加量下, PE 鱼糜凝胶中 T_{21} 所对应的峰振幅更高, 且 P_{21} 占比更大, 表明 PE 的引入, 束缚住了鱼糜凝胶中更多的不易流动水, 具有更高的持水能力^[21]。

鱼糜凝胶核磁共振成像 (MRI) 质子密度伪彩照片如图 3 所示。图中红色表示高质子密度, 蓝色表示低质子密度^[22]。在 6% 油添加量下, 样品表现出与对照类似的红色分布, 且随着油添加量的提高, 红色不断减少且均匀性降低; 在相同的油添加量下, 乳液鱼糜凝胶表现出比玉米油鱼糜凝胶更多和更亮的红色区域, 且蓝色小点更少。

2.5 鱼糜凝胶流变特性

鱼糜体系黏度随剪切速率变化曲线如图 4 所示。所有样品的表观黏度随剪切速率的增加而降低, 呈现出典型的剪切稀化特性。相比于空白对照, 随 CO 添加量提高, 样品黏度在低剪切速率下先增大后减小; 而 PE 使鱼糜凝胶黏度显著提升。

鱼糜凝胶体系温度扫描结果如图 5 所示。样品的储能模量 (G') 随温度的变化趋势表现出典型的肌球蛋白热诱导凝胶化行为。样品的温度扫描曲线表现出 3 个阶段。首先, 随温度提高到 35~40 °C, G' 缓慢达到最大值, 此阶段称为“suwari”; 随后在 40~60 °C 范围内, 鱼糜凝胶 G' 急剧降低, 达到最小值, 此阶段称为“modori”; 温度继续提升, 样品 G' 继续提高并达到稳定, 此阶段称为“kamaboko”^[23]。与对照组相比, 随着油添加量增加, 样品 G' 达到最高值时所需的温度更高, 样品最终的 G' 逐渐降低; 相同的油添加量下, PE 样品比 CO 样品具有更高的 G' 。

2.6 鱼糜凝胶 SEM 照片

图 6 为鱼糜凝胶样品 SEM 照片。对照样品表现出精细多孔的凝胶网络结构。随着 CO 添加量的提高, 凝胶网络逐渐变得粗糙, 孔洞的均匀性降低且变得不规则。在较低的油含量下 (6%~8%), PE 组样品的网络精细程度并没有被明显破坏, 且淀粉颗粒填充于网络孔隙中, 形成比 CO 样品更紧密的微观结构。随 PE 添加量的提高, 样品中孔洞逐渐消失, 网络结构变得粗糙, 更多的淀粉颗粒嵌入网络中。

2.7 鱼糜凝胶 CLSM 照片

图 7 为鱼糜凝胶样品 CLSM 照片。鱼糜凝胶中蛋白为尼罗蓝染色的蓝色部分, 油滴为尼罗红染色的红色部分, 黑色部分为凝胶网络中的孔隙。油滴分散于蛋白凝胶基质中, 随着油含量的提升, 样品中油滴粒径和网络孔隙逐渐增加。PE 使更小的油滴均匀地嵌入凝胶基质, 使油滴分散更均匀, 网络空隙更小。

2.8 鱼糜凝胶分子间作用力

表 3 为不同油添加量鱼糜凝胶中离子键、氢键、疏水相互作用及二硫键含量变化。PE 的引入使样品疏水相互作用从 1.67 mg/mL (对照) 提高到 1.80 mg/mL (6% 油含量) 和 1.74 mg/mL (8% 油含

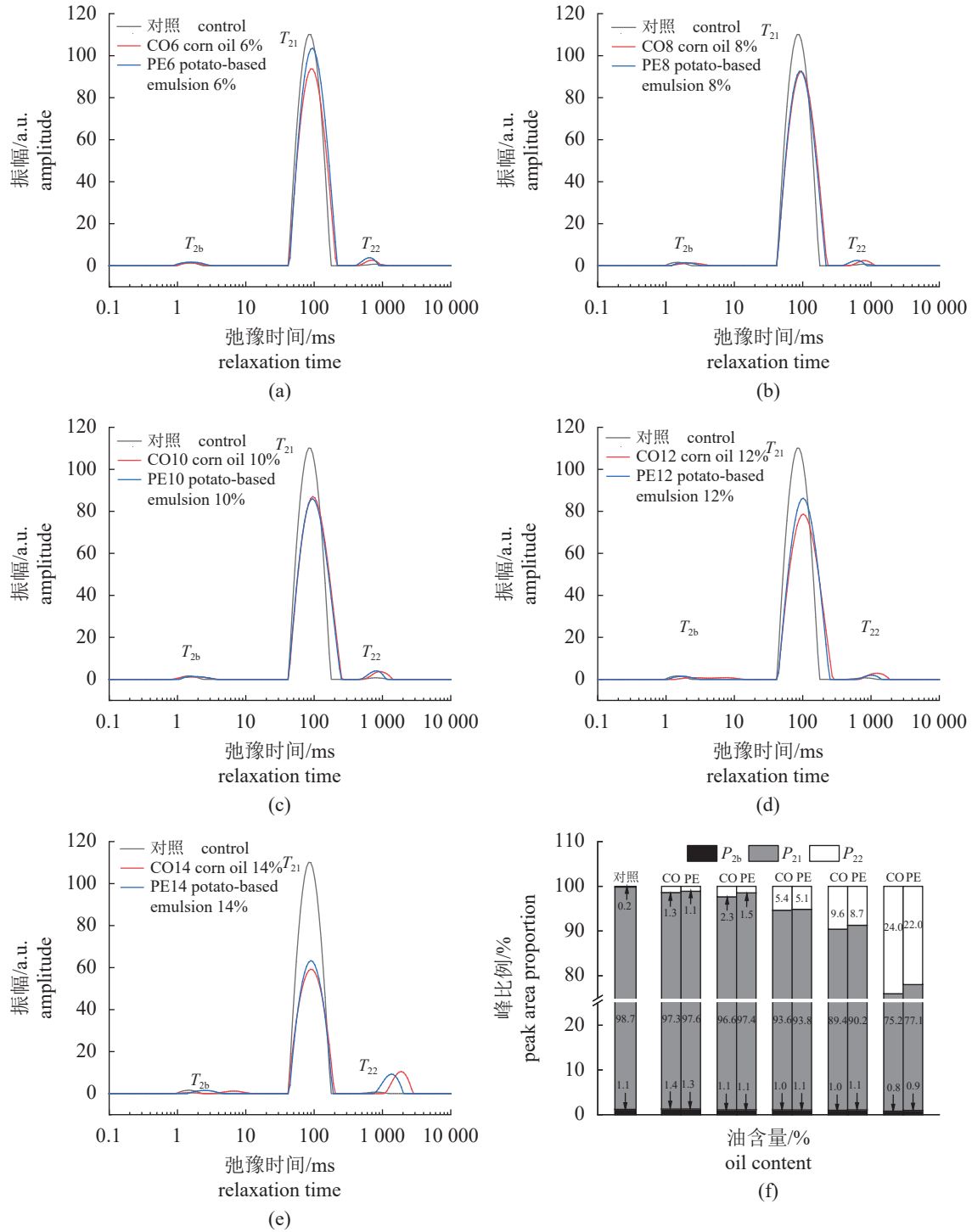


图 2 不同油含量鱼糜凝胶 T_2 弛豫时间 [(a)~(e)] 和 T_2 峰占比 (f)

图中 T_{2b} 、 T_{21} 、 T_{22} 分别表示结合水、不易流动水和结合水弛豫时间所对应的峰； P_{2b} 、 P_{21} 、 P_{22} 分别表示结合水、不易流动水和结合水占比。

Fig. 2 T_2 relaxation time distribution curve [(a)~(e)] and T_2 peak ratio (f) of surimi gels with different oil content

T_{2b} , T_{21} , and T_{22} denote the peaks corresponding to the relaxation time of bound water, immobile water, and free water, respectively; and P_{2b} , P_{21} , and P_{22} denote the percentage of bound water, immobile water, and free water, respectively.

量), 继而随油含量提高而降低。8% 和 10% 油含量的 PE 样品中疏水相互作用显著高于对应油含量

的 CO 添加组。低油添加对样品中二硫键含量并无显著影响 (6% CO、6% 和 8% PE 鱼糜凝胶样品),

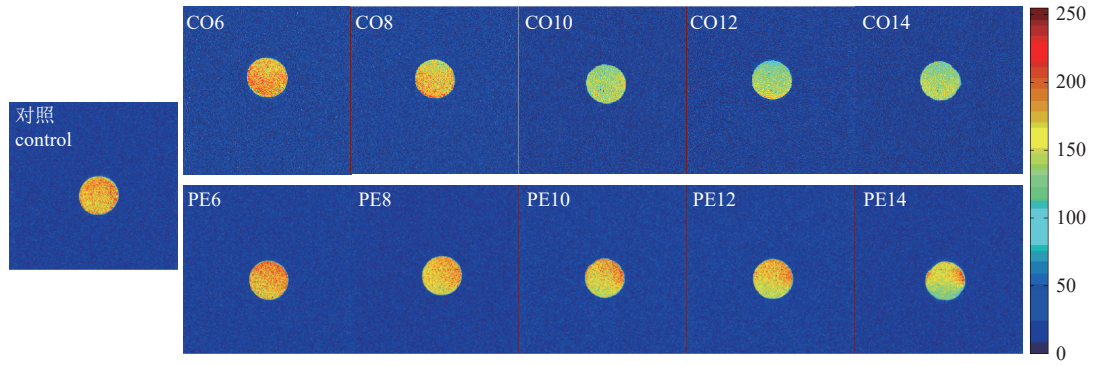
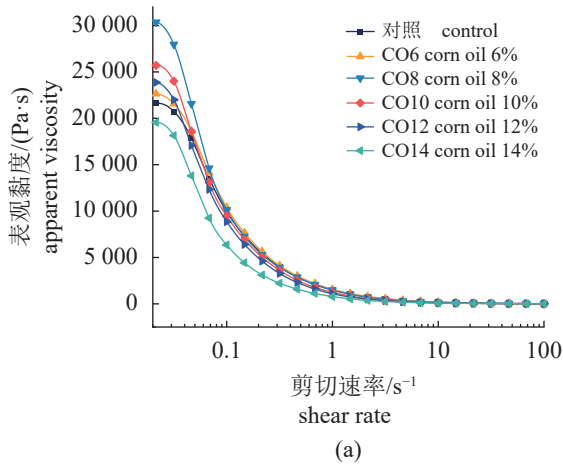


图3 不同油含量鱼糜凝胶质子密度加权图像

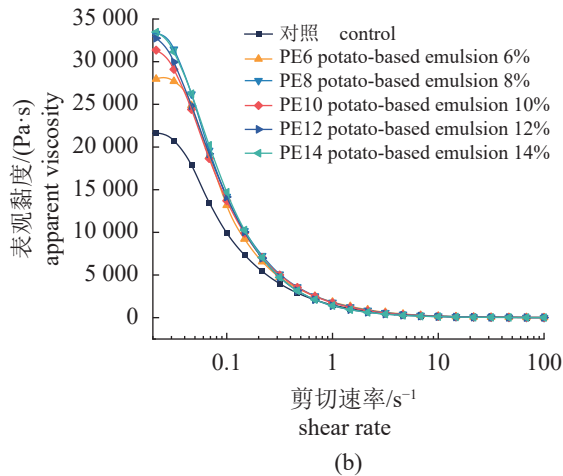
CO6-CO14 表示含油量为 6%~14% 的玉米油鱼糜凝胶, PE6-PE14 表示含油量 6%~14% 的马铃薯基乳液鱼糜凝胶, 下同; 右侧图例为无单位的灰度值。

Fig. 3 Proton density-weighted images of surimi gels with different oil contents

CO6-CO14 represent corn oil surimi gel with an oil content of 6%-14%, PE6-PE14 refer to potato based emulsion surimi gel with oil content of 6%-14%, the same below; the grayscale values without unit are marked on the right side of the image.



(a)

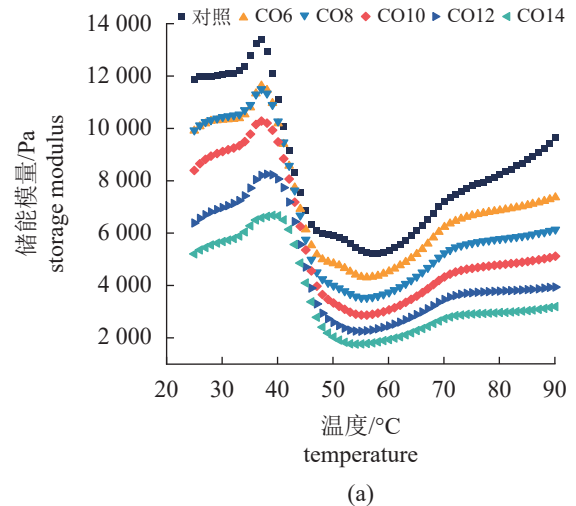


(b)

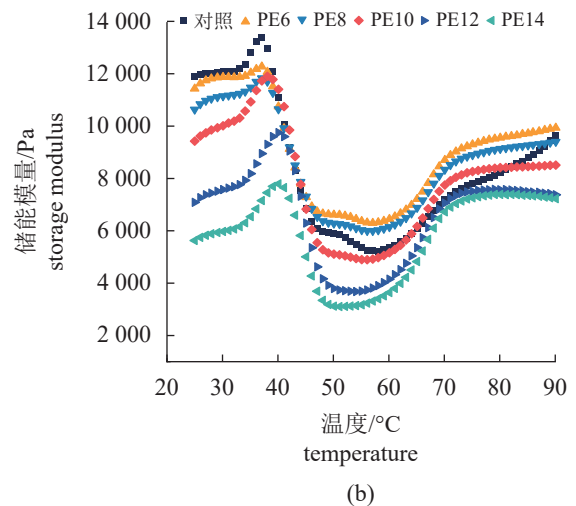
图4 不同油含量鱼糜凝胶表观黏度变化曲线

Fig. 4 Changes in apparent viscosity of surimi gels with different oil contents

但随油含量提高, 二硫键含量降低, 相同油添加量下, PE 组中二硫键含量显著高于 CO 组。与对



(a)



(b)

图5 不同油含量鱼糜凝胶温度扫描变化曲线

Fig. 5 Changes in storage modulus of surimi gels with different oil contents during temperature sweep

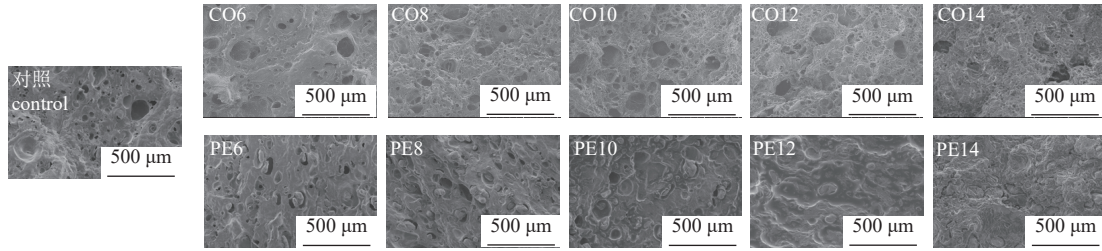


图 6 不同油含量鱼糜凝胶 SEM 照片

Fig. 6 SEM images of surimi gels with different oil contents

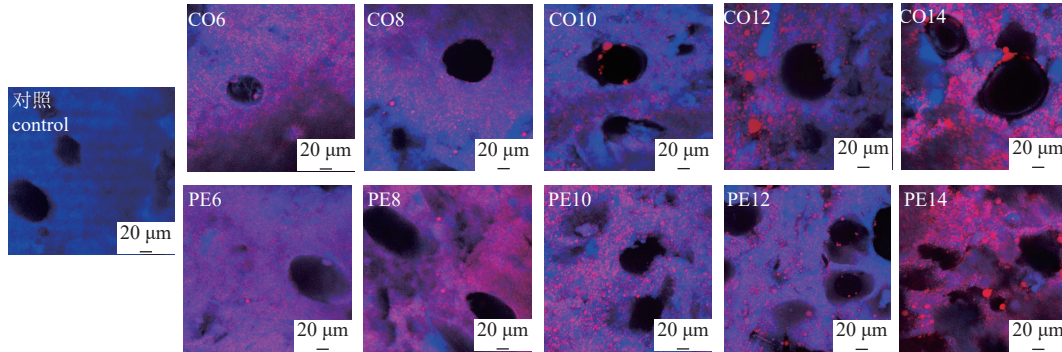


图 7 不同油含量鱼糜凝胶 CLSM 照片

Fig. 7 CLSM images of surimi gels with different oil contents

表 3 不同油含量鱼糜凝胶基于化学作用力的可溶性蛋白含量

Tab. 3 Dissolved protein contents according to the chemical forces of surimi gels with different oil contents

油含量/% oil content	离子键/(mg/mL) ionic bond		氢键/(mg/mL) hydrogen bond		疏水相互作用/(mg/mL) hydrophobic interaction		二硫键/(mg/mL) disulfide bond	
	CO	PE	CO	PE	CO	PE	CO	PE
0	0.10±0.02 ^{Aa}		0.28±0.00 ^{Ca}		1.67±0.09 ^{BCab}		0.64±0.07 ^{ABa}	
6	0.11±0.00 ^a	0.10±0.04 ^A	0.30±0.02 ^{a*}	0.36±0.06 ^A	1.79±0.11 ^a	1.80±0.03 ^A	0.62±0.04 ^a	0.76±0.12 ^A
8	0.11±0.00 ^a	0.10±0.01 ^A	0.15±0.01 ^{b**}	0.33±0.02 ^B	1.59±0.16 ^{b*}	1.74±0.04 ^{AB}	0.24±0.08 ^{b**}	0.66±0.03 ^{AB}
10	0.11±0.10 ^a	0.11±0.00 ^A	0.14±0.00 ^{bc**}	0.26±0.03 ^{CD}	1.53±0.04 ^{b*}	1.62±0.02 ^C	0.14±0.01 ^{bc**}	0.57±0.01 ^B
12	0.10±0.02 ^a	0.11±0.01 ^A	0.12±0.00 ^{c**}	0.24±0.02 ^D	1.14±0.04 ^c	1.17±0.11 ^D	0.09±0.01 ^{c**}	0.35±0.06 ^C
14	0.10±0.00 ^a	0.11±0.02 ^A	0.06±0.03 ^d	0.13±0.04 ^E	0.88±0.12 ^d	0.93±0.08 ^E	0.08±0.08 ^c	0.24±0.05 ^C

对照组相比, PE 添加组中氢键含量随油添加呈现出先增加后降低的趋势; CO 组氢键含量随油添加呈先不变后降低趋势, 且显著低于 PE 组。CO 和 PE 添加对离子键并没有显著影响。

2.9 鱼糜凝胶 SDS-PAGE 图谱

鱼糜凝胶样品在还原条件下 SDS-PAGE 图谱如图 8 所示。样品条带中包括肌球蛋白重链 (MHC, 分子质量约 245 ku)、肌动蛋白 (Actin, 分子质量约 48 ku)、肌球蛋白轻链 (MLC, 分子质量约 18 ku)、肌钙蛋白 (Tn, 分子质量约为 37 ku) 和肌原球蛋白 (Tm, 分子质量约为 35 ku)^[24]。空白对照与样品表现出类似的蛋白条带。样品泳道顶端

存在一条高分子蛋白条带, 这表明蛋白分子发生交联而无法进入泳道。所有样品 Actin 和 MLC 条带浓度变化不明显, 但随着油含量提升, 蛋白聚集和 MHC 条带浓度降低, 而 Tn 和 Tm 条带浓度提高。PE 添加组样品具有比 CO 组更明显的蛋白聚集条带; 且 MHC 条带强度比 CO 样品更弱。

3 讨论

3.1 鱼糜凝胶全质构特性

鱼糜凝胶的全质构特性常用于评价凝胶类产品品质, 是影响消费者接受度的关键指标^[17]。直接添加 CO 会削弱凝胶网络的强度, 但是马铃薯

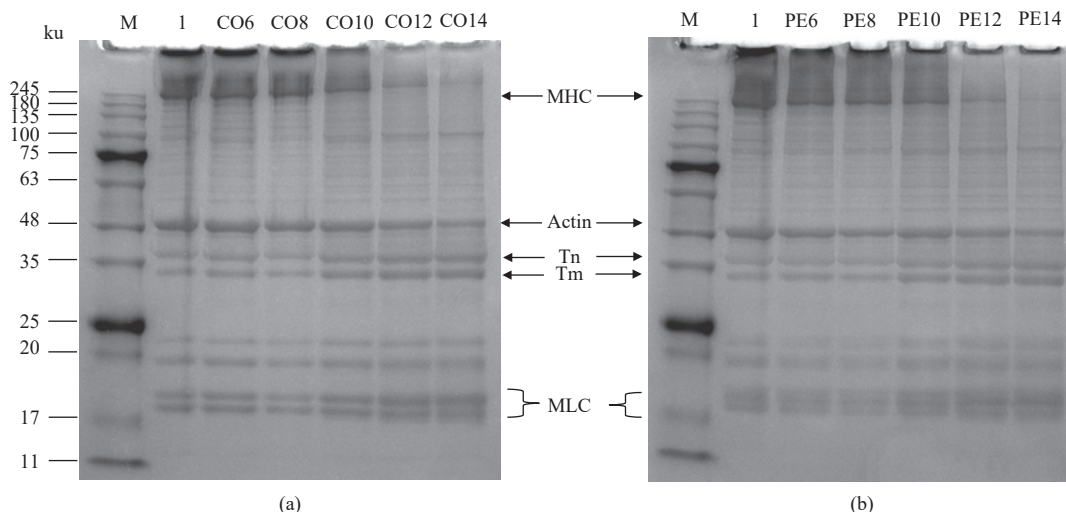


图 8 不同油添加量鱼糜凝胶 SDS-PAGE 图谱

M 表示蛋白 marker, 1. 对照。MHC、Actin、MLC、Tn、Tm 分别表示肌球蛋白重链、肌动蛋白、肌球蛋白轻链、肌钙蛋白和肌原球蛋白。(a) 玉米油添加组, (b) 马铃薯基乳液添加组。

Fig. 8 The SDS-PAGE images of surimi gels with different oil contents

M, protein marker, 1, control. MHC, Actin, MLC, Tn and Tm are myosin heavy chain, actin, myosin light chain, troponin, and tropomyosin, respectively. (a) and (b) are the images of surimi for corn oil- and potato-based emulsion surimi gel, respectively.

粉稳定的乳液滴则能一定程度上保持凝胶网络的致密程度, 补偿 CO 对网络结构的破坏作用。相比于 CO, PE 具有更小的油滴, 这使油滴在鱼糜中更容易分散而不破坏肌原纤维蛋白网络。另外, PE 中的淀粉颗粒可能在热诱导鱼糜凝胶的过程中发生了吸水膨胀, 填充了蛋白凝胶网络间隙, 使凝胶基质更致密。因此, 当 PE 作为脂肪替代物时, 能削弱油滴对鱼糜凝胶品质的劣变效果, 制备富有良好质构特性的鱼糜凝胶。

3.2 鱼糜凝胶色度特性

色度通常用于评估鱼糜产品品质, 因为它将直接影响消费者购买欲望。通常鱼糜凝胶产品白度越高, 产品品质越好^[25]。由于肌原纤维蛋白在油-水-蛋白体系中发生乳化作用, 增强了凝胶的光散射, 使含油鱼糜凝胶样品表现出更高的白度^[26]。Jiao 等^[2]的研究结果也表明, 在 12% 以内的鱼油添加量以下, 随添加量的提高, 鲑鱼糜凝胶白度提高。CO 由于含有胡萝卜素^[27]而在较高油含量下使鱼糜凝胶白度降低; 而 PE 则使鱼糜凝胶白度逐渐提高, 这使消费者对产品色泽的可接受性提高。肌原纤维蛋白和马铃薯粉在鱼糜体系中可能具有双重乳化作用^[28], 使得油滴更均匀地分布在 PE 样品的凝胶基质中, 提高凝胶保水性, 从而使光反射强度增强。另外, 有研究表明鱼糜凝胶白度可能与蛋白降解有关, PE 中含有的马铃

薯蛋白酶抑制剂, 可能会降低肌原纤维蛋白在热诱导过程中因组织蛋白酶存在而发生的降解, 使凝胶白度随添加量提高而显著提升^[29]。因此, PE 有潜力作为脂肪替代物显著提升鱼糜凝胶产品白度。

3.3 鱼糜凝胶持水能力

鱼糜凝胶的持水能力高低与凝胶网络的强度直接相关^[30]。适量的油分子在凝胶网络中可能作为屏障, 阻止水分迁移, 这可能是由于水-蛋白-油脂网络结构的形成^[28], 增强了鱼糜凝胶网络对水分子的束缚能力。然而, 过量的油脂可能会破坏凝胶网络结构而无法抵抗外界的机械离心力, 使水分子脱离束缚。相比于 CO, PE 可能与鱼糜凝胶网络或水分子发生更强烈的相互作用, 使网络结构更紧密。类似的研究表明, 预乳化的菜籽油能形成致密的吸附层, 增强水-脂质结合性能, 使鹅肝酱形成更均匀、精细的凝胶网络, 将水-油混合物包裹于网络间隙, 提高 WHC^[31]。另外, 马铃薯中的淀粉一方面可由空间位阻作用, 使鱼糜体系中局部蛋白浓度增加, 促进蛋白聚集和交联; 另一方面可以吸水膨胀作为活性填充剂, 减小凝胶中三维网络间隙, 从而增强凝胶基质的水束缚能力。马铃薯中的淀粉分子骨架带有很多的极性基团, 这也有利于样品 WHC 的提高^[32]。因此, PE 作为脂肪替代物加入鱼糜体系, 在保证鱼糜凝胶产品脂肪含量的同时能保证多汁的口感。

3.4 鱼糜凝胶水分类型及分布特性

鱼糜凝胶水分分布特性可以通过低场核磁借助 T_2 弛豫时间及质子密度加权图像表示。油滴分子引入后, 鱼糜凝胶中水分流动性增强, 与油添加样品 WHC 降低这一结果相一致, 这可能归因于更多的肌原纤维蛋白充当界面膜, 使得肌原纤维蛋白交联减少, 凝胶网络对水分子的束缚能力减弱^[33]。油脂经过马铃薯粉预乳化后, 能更均匀、分散地分布于肌原纤维蛋白网络中, 降低了油滴在凝胶化过程中对蛋白交联的阻碍作用^[31], 增强了凝胶网络中不易流动水的稳定性。在鲑鱼糜中加入南极磷虾 (*Euphausia superba*) 虾油-酪蛋白高内相乳液和肌原纤维蛋白稳定的高内相乳液制备油脂加强型鱼糜凝胶时发现了类似的研究结果^[4, 28]。另外, PE 中的淀粉颗粒经吸水膨胀后可以填充凝胶网络或参与网络形成, 从而限制了水分流动性。在较高的油添加量下, 即使体系中淀粉含量提升, 由于增强的异质性, 凝胶网络相互作用力减弱, 因此水分子在凝胶网络中更易聚集, 流动性增强^[34]。

MRI 作为一种快速、无损的方法, 可用于检测食品中水分分布, 进而量化食品结构变化^[35]。在较低的油添加量下, 小油滴分散程度高, 可作为屏障阻碍水分流动^[36]。而在高油添加量下, 大油滴可能作为非活性填充, 使鱼糜凝胶中水分流失。因此, PE 作为脂肪替代物时, 能更好地保持凝胶持水能力和水分分布的均匀性, 这与横向弛豫时间变化一致。

3.5 鱼糜凝胶流变特性

在鱼糜体系的斩拌过程中添加油能形成光滑的乳化鱼糜体系, 有利于鱼糜制品的加工生产^[37]。鱼糜体系显现剪切变稀现象, 这是由于剪切力使样品中分子沿剪切方向渐进排列, 样品间摩擦力降低。在低油含量下, 体系内油-蛋白-水的缠结作用被促进, 但是过量的油阻碍了肌原纤维蛋白交联。PE 鱼糜体系中油滴分散更均匀, 使分子结合更紧密, 因此呈现出更高的黏度。

油脂会削弱鱼糜溶胶体系中分子相互作用, 抑制蛋白展开速率^[38], 提高蛋白变性温度。PE 中含有的马铃薯蛋白酶抑制剂使组织蛋白酶活性降低, 削弱了凝胶化过程中的蛋白降解程度, 另外马铃薯粉的存在也增大了凝胶网络的刚度^[39], 因而 PE 组表现出比空白组和 CO 组更高的 G' 。 G' 的大小与凝胶网络的强度相关, G' 越大, 则凝胶网

络越强, 温度扫描的结果与凝胶硬度结果一致。Gani 等^[38]将酪蛋白酸钠稳定的初榨椰子油纳米乳液作为脂肪替代物, 以 5% 的比例加入鱼糜凝胶中时, G' 和凝胶硬度提高。

3.6 鱼糜凝胶 SEM 照片

由于体系油含量提升, 油水的流动性增加, 在凝胶化过程中形成了油水流动通道, 网络结构破坏程度加深^[40]。Jiao 等^[2]的研究也发现, 随着鱼油添加量的增加, 鱼糜凝胶网络逐渐变得松散且孔隙增大。另外, Okazaki 等^[41]的研究表明, 当斩拌速率和时间增加时, 鱼糜体系中鱼油油滴尺寸降低, 凝胶网络更精细, 凝胶形成能力提高。因此, 相比于 CO 样品, PE 样品更均匀的网络结构和更佳的凝胶特性与体系中更小的油滴尺寸相关。淀粉颗粒能在凝胶网络中产生局部压力, 增加凝胶刚度, 并提供保水空间^[42], 这可能是 PE 样品具有更高的硬度和 WHC 的原因。PE 添加量提高后, 凝胶网络变得粗糙, 一方面, 体系中较高含量的马铃薯淀粉增强了体系的异质性。另一方面, 淀粉颗粒与蛋白竞争吸水, 水分子得到固定, 由水分流动形成的孔隙和通道消失。

3.7 鱼糜凝胶 CLSM 照片

油脂的添加将破坏凝胶网络的连续性, 使蛋白交联程度降低, 而 PE 中油滴具有更小的尺寸, 减小了油滴对网络的破坏程度。类似的研究表明, 由大豆磷脂和酪蛋白酸钠乳液作为脂肪替代物加入鱼糜凝胶中时, 能填充或与鱼糜蛋白共交联, 使油滴分散更均匀, 形成致密的凝胶网络^[43]。CLSM 结果表明 PE 具有脂肪替代物的潜力, 能增强鱼糜凝胶网络的致密性和有序性。

3.8 鱼糜凝胶分子间作用力

疏水相互作用力是鱼糜凝胶中的最主要作用力, 与凝胶网络致密程度, 凝胶特性密切相关^[16]。疏水基团常位于蛋白 α -螺旋结构内部, 热诱导使蛋白结构展开, 疏水基团暴露, 相邻分子间的非极性作用增强^[44]。油脂中的疏水性脂肪酸长链会促进肌原纤维蛋白疏水交联^[45], 从而在低油添加量下提高疏水相互作用, 但随着含油量的提高, 较强的乳化作用导致更多疏水基团吸附在油滴界面, 从而减少疏水基团间的相互交联^[46]。1%~5% 的橄榄油加入到鱼糜凝胶中时具有类似的结果^[47]。另外, 相比于 CO 样品, PE 样品中马铃薯淀粉粉骨

架上的羟基和葡萄糖残基参与了蛋白凝胶网络形成, 从而表现出更强的疏水相互作用。

二硫键也是鱼糜凝胶中的主要作用力, 二硫键的形成通常与肌球蛋白头对头或尾对尾交联有关^[48]。油含量的提高可能抑制了蛋白分子的展开和重排, 使更多的活性巯基位于蛋白结构内部, 导致热诱导过程中蛋白间二硫交联减少, 这与 Alzagat 等^[49]的研究结果一致。PE 组中存在的马铃薯蛋白在热诱导过程中也存在巯基氧化, 弥补了油滴对鱼糜蛋白二硫交联的削弱效果, 从而表现出比空白样品和 CO 样品更高的二硫键含量^[50]。

氢键通常与蛋白质-水相互作用相关^[24]。直接添加 CO 会降低蛋白-水相互作用, 但 PE 能补偿油添加对氢键的减少效果, 这是由于大量油脂的引入降低了样品中水分的含量, 过多的油滴抑制了油滴表面蛋白水化层的形成^[15], 而预乳化的油脂将减少蛋白消耗, 一定程度上保证蛋白水化层的形成。PE 中氢键含量的降低还可能和活性亲水基团(羟基和羧基)与蛋白竞争性结合游离水相关^[51]。

3.9 鱼糜凝胶 SDS-PAGE 图谱

在本研究中, 肌钙蛋白和肌原球蛋白共同参与非二硫键蛋白聚集形成, 而油滴会阻碍蛋白间非二硫键交联。相比于空白和 CO 组样品, PE 样品中具有更广泛的非二硫键共价交联。高油浓度下, MHC 可能发生了聚集沉淀或变性, 使样品中 MHC 条带浓度变浅。另外, 在高油含量下, PE 样品中 MHC 条带比 CO 样品更浅, 这是由于 PE 中含有的马铃薯蛋白和淀粉与肌原纤维蛋白残基发生相互作用, 形成了复合物, 使这部分肌原纤维蛋白无法被电泳过程提取^[50], 且在高油含量下, 这种作用更明显。

本研究探讨了 PE 作为脂肪替代物对鱼糜凝胶特性、化学作用力和微观结构的影响。结果表明, PE 添加组比相同含油量的 CO 添加组具有更高的硬度、胶着性、内聚性、黏度和储能模量。另外, PE 能充当鱼糜凝胶基质中的活性填充剂和共聚物参与凝胶网络形成, 降低水分的可流动性, 提升鱼糜凝胶 WHC, 从而增强光线的漫反射, 提高样品亮度。油添加量的提高会显著降低样品中氢键、疏水相互作用和二硫键, 而 PE 可以减少油滴在凝胶化过程中对蛋白交联的影响, 表现出更强的分子间相互作用和更清晰的蛋白聚集条带。由于 PE 中马铃薯粉对油脂的预乳化, 油滴在凝胶

基质中更小且分布更均匀, 呈现出更致密、精细的凝胶网络。因此, 马铃薯基乳液可作为脂肪替代物, 用于生产具有优良特性的鱼糜凝胶产品。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] Liu C K, Li W X, Lin B Y, *et al.* Comprehensive analysis of ozone water rinsing on the water-holding capacity of grass carp surimi gel[J]. *LWT*, 2021, 150: 111919.
- [2] Jiao X D, Cao H W, Fan D M, *et al.* Effects of fish oil incorporation on the gelling properties of silver carp surimi gel subjected to microwave heating combined with conduction heating treatment[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 94: 164-173.
- [3] Yu J, Song L L, Xiao H, *et al.* Structuring emulsion gels with peanut protein isolate and fish oil and analyzing the mechanical and microstructural characteristics of surimi gel[J]. *LWT*, 2022, 154: 112555.
- [4] Lv Y Y, Sun X S, Jia H, *et al.* Antarctic krill (*Euphausia superba*) oil high internal phase emulsions improved the lipid quality and gel properties of surimi gel[J]. *Food Chemistry*, 2023, 423: 136352.
- [5] Lurueña-Martínez M A, Vivar-Quintana A M, Revilla I. Effect of locust bean/xanthan gum addition and replacement of pork fat with olive oil on the quality characteristics of low-fat frankfurters[J]. *Meat Science*, 2004, 68(3): 383-389.
- [6] Zhao X Y, Wang X F, Zeng L J, *et al.* Effects of oil-modified crosslinked/acetylated starches on silver carp surimi gel: texture properties, water mobility, microstructure, and related mechanisms[J]. *Food Research International*, 2022, 158: 111521.
- [7] Kong W J, Zhang T, Feng D D, *et al.* Effects of modified starches on the gel properties of Alaska Pollock surimi subjected to different temperature treatments[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 56: 20-28.
- [8] Wang L, Zhu S P, Chen Y, *et al.* Fabrication and characterization of O/W emulsion stabilized by octenyl succinic anhydride (OSA) modified resistant starch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 141: 108750.
- [9] Lu X X, Huang Q Q, Xiao J, *et al.* Milled miscellaneous black rice particles stabilized Pickering emulsions with enhanced antioxidation activity[J]. *Food Chemistry*,

- 2022, 385: 132639.
- [10] Zhang S, Geng S, Shi Y Z, *et al.* Fabrication and characterization of Pickering high internal phase emulsions stabilized by Tartary buckwheat bran flour[J]. *Food Chemistry: X*, 2022, 16: 100513.
- [11] Guan Y F, Zhao G H, Thaiudom S. Evaluation of the physico-chemical properties of potato starch-based foods and their interactions with milk protein and soybean oil[J]. *Food Chemistry: X*, 2022, 16: 100495.
- [12] Raigond P, Jayanty S S, Parmar V, *et al.* Health-promoting compounds in potatoes: tuber exhibiting great potential for human health[J]. *Food Chemistry*, 2023, 424: 136368.
- [13] Lu H M, Zhao R X, Zhang L, *et al.* Interactions between partially gelatinized starch and nonstarch components in potato flour and their performance in emulsification[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 269: 132044.
- [14] Xu F, Liu W, Zhang L, *et al.* Retrogradation and gelling behaviours of partially gelatinised potato starch as affected by the degree of pre-gelatinisation[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2022, 57(1): 426-435.
- [15] Yan B W, Jiao X D, Zhu H P, *et al.* Chemical interactions involved in microwave heat-induced surimi gel fortified with fish oil and its formation mechanism[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 105: 105779.
- [16] Mi H B, Li Y, Wang C, *et al.* The interaction of starch-gums and their effect on gel properties and protein conformation of silver carp surimi[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 112: 106290.
- [17] Zhuang X B, Han M Y, Bai Y, *et al.* Insight into the mechanism of myofibrillar protein gel improved by insoluble dietary fiber[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 74: 219-226.
- [18] Chen J X, Deng T Y, Wang C, *et al.* Effect of hydrocolloids on gel properties and protein secondary structure of silver carp surimi[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(5): 2252-2260.
- [19] Xu Y Q, Yu J, Xue Y, *et al.* Enhancing gel performance of surimi gels via emulsion co-stabilized with soy protein isolate and κ -carrageenan[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 135: 108217.
- [20] Buamard N, Benjakul S. Improvement of gel properties of sardine (*Sardinella albella*) surimi using coconut husk extracts[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 51: 146-155.
- [21] He X L, Lv Y N, Li X P, *et al.* Improvement of gelation properties of silver carp surimi through ultrasound-assisted water bath heating[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 83: 105942.
- [22] Yang Z M, Liu S C, Sun Q X, *et al.* Insight into muscle quality of golden pompano (*Trachinotus ovatus*) frozen with liquid nitrogen at different temperatures[J]. *Food Chemistry*, 2022, 374: 131737.
- [23] Rawdkuen S, Benjakul S, Visessanguan W, *et al.* Effect of cysteine proteinase inhibitor containing fraction from chicken plasma on autolysis and gelation of Pacific whiting surimi[J]. *Food Hydrocolloids*, 2007, 21(7): 1209-1216.
- [24] Wang Y D, Zhuang Y, Zhang J Y, *et al.* Effects of different pH values and monovalent/divalent cations in washing on the physicochemical characteristics of silver carp surimi gel[J]. *LWT*, 2024, 196: 115865.
- [25] Fowler M R, Park J W. Effect of salmon plasma protein on Pacific whiting surimi gelation under various ohmic heating conditions[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2015, 61(2): 309-315.
- [26] Zhou X X, Jiang S, Zhao D D, *et al.* Changes in physicochemical properties and protein structure of surimi enhanced with camellia tea oil[J]. *LWT*, 2017, 84: 562-571.
- [27] Chalermthai B, Giwa A, Moheimani N, *et al.* Techno-economic strategies for improving economic viability of β -carotene extraction using natural oil and supercritical solvent: a comparative assessment[J]. *Algal Research*, 2022, 68: 102875.
- [28] Pei Z S, Wang H B, Xia G H, *et al.* Emulsion gel stabilized by tilapia myofibrillar protein: application in lipid-enhanced surimi preparation[J]. *Food Chemistry*, 2023, 403: 134424.
- [29] Chen N, Gao P, Jiang Q X, *et al.* Effects of deheading and rinsing pretreatment on the quality of white leg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) surimi based on endogenous proteases[J]. *Food Research International*, 2022, 160: 111678.
- [30] Shi L, Wang X F, Chang T, *et al.* Effects of vegetable oils on gel properties of surimi gels[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2014, 57(2): 586-593.
- [31] Xiong G Y, Han M Y, Kang Z L, *et al.* Evaluation of protein structural changes and water mobility in chicken

- liver paste batters prepared with plant oil substituting pork back-fat combined with pre-emulsification[J]. *Food Chemistry*, 2016, 196: 388-395.
- [32] Sun F Y, Huang Q L, Hu T, *et al.* Effects and mechanism of modified starches on the gel properties of myofibrillar protein from grass carp[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2014, 64: 17-24.
- [33] Zhang R F, Zhang T, Hu M Y, *et al.* Effects of oleogels prepared with fish oil and beeswax on the gelation behaviors of protein recovered from Alaska Pollock[J]. *LWT*, 2021, 137: 110423.
- [34] Zhuang X B, Jiang X P, Zhou H Y, *et al.* Insight into the mechanism of physicochemical influence by three polysaccharides on myofibrillar protein gelation[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 229: 115449.
- [35] Hills B. Food properties, applications of NMR[M]//Lindon J C, Tranter G E, Koppenaal D W. Encyclopedia of spectroscopy and spectrometry. 3rd ed. Oxford: Academic Press, 2017: 686-693.
- [36] Patil R S, Waghmare J, Annapure U. Comparative assessment of the frying performance of palm olein and sunflower oil during deep-fat frying of Indian battered food products[J]. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2023, 14: 100778.
- [37] Youssef M K, Barbut S, Smith A. Effects of pre-emulsifying fat/oil on meat batter stability, texture and microstructure[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2011, 46(6): 1216-1224.
- [38] Gani A, Benjakul S. Impact of virgin coconut oil nanoemulsion on properties of croaker surimi gel[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 82: 34-44.
- [39] Jiao X D, Yang H Y, Li X Y, *et al.* Green and sustainable microwave processing of surimi seafood: a review of protein component interactions, mechanisms, and industrial applications[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2024, 143: 104266.
- [40] i Yu J, Xiao H, Xue Y, *et al.* Effects of soybean phospholipids, ovalbumin, and starch sodium octenyl succinate on the mechanical, microstructural, and flavor properties of emulsified surimi gels[J]. *LWT*, 2022, 161: 113260.
- [41] Okazaki E, Yamashita Y, Omura Y. Emulsification of fish oil in surimi by high-speed mixing and improvement of gel-forming ability[J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 2002, 68(4): 547-553.
- [42] Jia R, Katano T, Yoshimoto Y, *et al.* Sweet potato starch with low pasting temperature to improve the gelling quality of surimi gels after freezing[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 81: 467-473.
- [43] Yu J, Xiao H, Song L L, *et al.* Impact of O/W emulsion stabilized by different soybean phospholipid/sodium caseinate ratios on the physicochemical, rheological and gel properties of surimi sausage[J]. *LWT*, 2023, 175: 114461.
- [44] Lin Y D, Shi X J, Zhou C Y, *et al.* Insight into the effects of chitosan on the gelling properties of tilapia surimi gel under microwave heating treatment[J]. *Food Bioscience*, 2024, 58: 103619.
- [45] Zhou L, Yang Y L, Wang J Y, *et al.* Effects of low fat addition on chicken myofibrillar protein gelation properties[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 90: 126-131.
- [46] Zhou L, Zhang J, Lorenzo J M, *et al.* Effects of ultrasound emulsification on the properties of pork myofibrillar protein-fat mixed gel[J]. *Food Chemistry*, 2021, 345: 128751.
- [47] Lu Y F, Zhu Y J, Ye T, *et al.* Physicochemical properties and microstructure of composite surimi gels: the effects of ultrasonic treatment and olive oil concentration[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 88: 106065.
- [48] Damodaran S, Parkin K L, Fennema O R. Fennema's food chemistry [M]. Karabas City: CRC Press, 2007.
- [49] Alzagat A A, Alli I. Protein-lipid interactions in food systems: a review[J]. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 2002, 53(3): 249-260.
- [50] Masijn Q, Libberecht S, Meyfroot A, *et al.* Structure and physical stability of plant-based food gel systems: impact of protein (mung bean, pea, potato, soybean) and fat (coconut, sunflower)[J]. *Heliyon*, 2023, 9(9): e18894.
- [51] Zhang T, Li Z J, Wang Y M, *et al.* Effects of konjac glucomannan on heat-induced changes of physicochemical and structural properties of surimi gels[J]. *Food Research International*, 2016, 83: 152-161.

Effects of potato-based emulsions on the quality of surimi gels

LU Huimin^{1,2}, ZHAO Ruixuan², ZHANG Liang², LIU Wei²,
LIU Qiannan², LIU Shucheng^{1*}, HU Honghai^{2*}

(1. *Guangdong Provincial Key Laboratory of Aquatic Product Processing and Safety,
Guangdong Province Engineering Laboratory for Marine Biological Products,
Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center of Seafood,*

*Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center of Prefabricated Seafood Processing and Quality Control,
College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;*

2. *Integrated Laboratory of Potato Staple Food Processing Technology, Key Laboratory of Agricultural Product Processing and Storage,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Food Science and Technology,
Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100080, China)*

Abstract: To investigate effects of potato-based emulsion (PE) on the quality of surimi gels, corn oil (CO) or PE was mixed with surimi at different additive levels (0%-14%), and the effects of PE as a fat replacer on the quality and mechanism of surimi gels were investigated by texture, moisture, color, intermolecular interactions, rheological properties, and microstructure of the surimi gels. At the same oil addition level, PE could avoid the degrading effect of oil droplets on the textural properties and water-holding capacity of surimi gels compared with CO, so that the samples added with PE exhibited higher elastic modulus and viscosity; in addition, the results of transverse relaxation time showed that PE inhibited the transition from immobile to free water, so that more immobile water was bound, which might enhance the diffuse reflection of light, thus resulting in the higher whiteness of the PE-added samples. The results of microstructure and intermolecular force measurements showed that the oil droplets in PE samples were more uniformly distributed, the hydrogen bonding, hydrophobic interactions and disulfide cross-linking were stronger, and the gel network was denser due to the filling effect of starch granules; the results of sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis showed that the neutralization of oil droplets in the PE group intervened less in the cross-linking of surimi proteins. These results indicate that PE can be used as a fat substitute to improve the quality of surimi gels, and this study provides a theoretical basis for the development of starch-based fat substitutes and their application in surimi gelatine products

Key words: surimi gel; potatoes; emulsion; fat substitute

Corresponding authors: LIU Shucheng. E-mail: liusc@gdou.edu.cn;

HU Honghai. E-mail: huhonghai@caas.cn

Funding projects: Agricultural Science and Technology Innovation Program of Institute of Food Science and Technolaogy (CAAS-ASTIP-G2022-IFST-04); Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (S2023JBKY-04); Guangdong Innovation Team of Seafood Green Processing Technology (2019KCXTD011); Earmarked fund for China Agriculture Research System (CARS-09-P27)