

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.02.021

珠蛋白水解物对肌球蛋白大豆油乳液理化性质的影响

李亚凯, 周存六, 李锐, 潘冬梅, 周辉, 徐宝才

(合肥工业大学 食品与生物工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 文章研究珠蛋白水解物对肌球蛋白大豆油乳液理化性质的影响。结果表明:与血球蛋白粉和珠蛋白相比,珠蛋白水解物具有较高的溶解度($P < 0.05$),但铁离子质量比较低($P < 0.05$);相比于血球蛋白粉和珠蛋白,珠蛋白水解物降低了肌球蛋白大豆油乳液的分层指数和粒径($P < 0.05$),提高了肌球蛋白大豆油乳液的乳化活力指数和乳化稳定性($P < 0.05$)。微观结构表明,与血球蛋白粉和珠蛋白相比,珠蛋白水解物有利于形成更小、更均匀的液滴。与空白组相比,珠蛋白水解物、珠蛋白和血球蛋白粉均促进肌球蛋白大豆油乳液中过氧化物和硫代巴比妥酸的生成($P < 0.05$),但珠蛋白水解产物加速脂质氧化的效果最弱($P < 0.05$)。研究结果表明珠蛋白水解物有效地增强了肌球蛋白大豆油乳液的物理稳定性,且对脂质氧化的不利影响最小,在食品工业中具有潜在的应用价值。

关键词: 血球蛋白粉;珠蛋白;珠蛋白水解物;乳液;稳定性

中图分类号: TS251.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2024)02-0275-08

Effects of globin hydrolysates on physicochemical properties of myosin-soybean oil emulsion

LI Yakai, ZHOU Cunliu, LI Rui, PAN Dongmei, ZHOU Hui, XU Baocai

(School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: This work focused on the effects of globin hydrolysates on physicochemical properties of myosin-soybean oil emulsion. The results showed that globin hydrolysates had higher solubility ($P < 0.05$) but lower iron content ($P < 0.05$) than blood cell powder and globin. Globin hydrolysates dropped creaming index and particle size ($P < 0.05$), whereas enhanced emulsifying activity and emulsifying stability ($P < 0.05$) of myosin-soybean oil emulsion compared with blood cell powder and globin. Microstructural observations showed that compared with blood cell powder and globin, globin hydrolysates were conducive to the formation of smaller and more uniform emulsion droplets. Compared with the blank group, globin hydrolysates, globin and blood cell powder all accelerated the peroxides and thiobarbituric acid-reactive substances ($P < 0.05$) of myosin-soybean oil emulsion, but globin hydrolysates were the least effective in accelerating the oxidation of lipids ($P < 0.05$). Summarily, globin hydrolysates effectively enhanced the physical stability of myosin-soybean oil emulsion with the least adverse effects on lipid oxidation, displaying a potential role in food industry.

Key words: blood cell powder; globin; globin hydrolysates; emulsion; stability

收稿日期:2022-09-13;修回日期:2022-10-19

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFD2100804)

作者简介:李亚凯(1998—),男,河南周口人,合肥工业大学硕士生;

周存六(1970—),男,安徽舒城人,博士,合肥工业大学教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:zhoucl4@hfut.edu.cn;

周辉(1972—),男,湖南岳阳人,合肥工业大学研究员,硕士生导师;

徐宝才(1973—),男,安徽颍上人,博士,合肥工业大学研究员,博士生导师。

0 引言

血红蛋白是一种低廉的蛋白质资源,约占血液总蛋白质质量分数的 80%。血红蛋白含有约 4% 的血红素,它导致血红蛋白腥味和不良色泽,限制了血红蛋白在食品工业中的应用^[1]。脱血红素对于血红蛋白的使用很有必要。

目前为止,已开发一系列血红蛋白脱血红素的方法。文献^[2]在 pH 值为 4 的酸性条件下使用丙酮溶液(80%)分离血红素铁,但存在成本高、有机溶剂耗损高等缺点;文献^[3]在 pH 值为 3.0 条件下用羧甲基淀粉钠吸附血红素的方法去除血红素铁,但效果有限;文献^[4]用过氧化氢水溶液氧化血红素铁进行脱色,但存在过氧化氢残留等缺点。表面活性剂已被证明可有效分离血红素铁和珠蛋白^[5],有工艺简单、成本低和效率高等优点。

因溶解度、凝胶性和乳化性差,珠蛋白难以直接用于食品加工。文献^[6]采用羧甲基纤维素法从牛血红蛋白制备的珠蛋白溶解度低、乳化能力差。因此,珠蛋白分子在使用前必须进行修饰以改善其功能特性。酶水解被认为是提高蛋白质溶解性等功能性质的有效方法。研究证明玉米醇溶蛋白水解物可改善肌原纤维蛋白基水包油乳液的乳化和氧化稳定性^[7]。在中性条件下,添加 9% 大豆肽的蛋清粉具有最佳发泡性能^[8]。添加超过 20 g/kg 的猪血浆水解物可抑制微生物的生长,并改善乳化香肠的质地^[9]。因此,以蛋白质水解物改善食品品质引起了学者的广泛兴趣。然而,关于珠蛋白水解物在食品制造中应用的相关报道很少。肌球蛋白具有乳化和凝胶等性质,对最终产品的保水、保油和质构等品质属性具有决定性影响^[10]。珠蛋白水解物是血球蛋白粉通过脱色和酶解工艺处理得到的产物。因此,本文通过比较血球蛋白粉、珠蛋白和珠蛋白水解物对肌球蛋白大豆油乳液理化性质的影响,研究脱色和酶解对血球蛋白粉理化性质的影响,为血球蛋白粉在食品工业中的应用奠定基础。研究结果将为畜禽血液的深加工提供理论参考。

1 材料与方 法

1.1 材料与设备

1.1.1 材料

血球蛋白粉(三元龙胜有限公司);大豆油(合家福超市);表面活性剂(国药集团化学试剂有限

公司);胃蛋白酶(10 000 U/g)(宏润宝顺科技有限公司);其他试剂均为分析纯。

从大润发超市购买 4 批新鲜猪后腿肉。在去除所有肉眼可见的结缔组织和脂肪后,将猪后腿肉切成块状(约 2 cm×2 cm×2 cm),并用食物切碎机切碎 2 次(每次 1 min)。

1.1.2 设备

GL-21M 型高速冷冻离心机(湘仪仪器开发有限公司);WTC10002 型电子天平(杭州万特衡仪器有限公司);PHS-3E 型 pH 计(上海仪电科学仪器股份有限公司);HH-54 型水浴锅(金坛市医疗仪器厂);K9840 型凯氏定氮仪(海能科学仪器有限公司);PD500 型高速剪切乳化机(PRIMA(德国));TCS SP8 型激光共聚焦显微镜(徕卡(德国)照相机有限公司)。

1.2 实验方案

1.2.1 珠蛋白的制备

根据文献^[5]的方法制备珠蛋白,向血球蛋白粉溶液(7.6 g 血球蛋白粉溶于 300 mL 蒸馏水)中加入 100 mL 质量分数为 4% 的表面活性剂溶液,使用 12 mol/L 盐酸将混合物的 pH 值调至 1.5,然后将混合物水浴从 40 °C 加热至 80 °C。在混合物颜色从红色变为紫色并且其上层出现白色泡沫后,继续将混合物加热 5 min,然后冷却至室温。在 13 000g 离心 15 min 后,用 10 mol/L 氢氧化钠溶液将上清液的 pH 值调节至 7.0。将上清液在 4 450g 下离心 15 min,用 400 目尼龙滤网收集沉淀物(珠蛋白),并用蒸馏水润洗 2 次,然后在气压小于 10 Pa 下冷冻干燥 24 h。收集干燥的沉淀物即为珠蛋白。

1.2.2 珠蛋白水解物的制备

由 1.2.1 获得的珠蛋白被用于制备珠蛋白水解物,向珠蛋白溶液(20 mg/mL)加入 250 U/g 的胃蛋白酶,用浓盐酸将 pH 值调至 1.5,37 °C 下孵育 1 h 后使用 10 mol/L 氢氧化钠将 pH 值调节至 7.0;然后将混合物在沸水中加热 10 min 以使酶失活。在 11 300g 离心 15 min 后收集上清液,并在气压小于 10 Pa 下冷冻干燥 24 h。珠蛋白水解物在 4 °C 条件下保存待用。

1.2.3 大豆油预处理

根据文献^[11]的方法去除大豆油中的生育酚,大豆油和氧化铝(质量比 2:1)混合并避光搅拌 24 h,离心(4 000g,10 min)后去除沉淀。收集处理后的大豆油备用。

1.2.4 肌球蛋白提取

按照文献[10]的方法提取肌球蛋白,使用双缩脲法测定提取的肌球蛋白浓度,并用 PBS 缓冲液(0.6 mol/L KCl、10 mmol/L 磷酸钾溶液, pH 值 6.5)将肌球蛋白稀释到 8 mg/mL 并在 4 °C 下储存,48 h 内使用完。

1.2.5 肌球蛋白大豆油乳液的制备

按照文献[10]的方法制备肌球蛋白大豆油乳液。将 48 g 肌球蛋白和 12 g 大豆油的混合物在 10 000 r/min 下均质 2 min,分别将质量分数为 0.08% 的血球蛋白粉、珠蛋白、珠蛋白水解物与 48 g 肌球蛋白充分混合并在相同条件下均质,依次命名为乳液 1~乳液 4。向乳液中添加叠氮化钠(0.2 mg/mL)以防止微生物繁殖。所有乳液在 25 °C 条件下储藏。

1.2.6 溶解度的测定

血球蛋白粉、珠蛋白或珠蛋白水解物溶解度根据文献[12]的方法进行测定。血球蛋白粉、珠蛋白或珠蛋白水解物(20 g/L)溶解在 100 mL 的 PBS 缓冲液中,充分搅拌混匀后在 10 000g 离心 20 min,然后将沉淀冷冻干燥并称重。使用凯氏定氮仪测定血球蛋白粉、珠蛋白、珠蛋白水解物及其各自在 PBS 缓冲液中沉淀物的蛋白质质量分数。并计算其溶解度,具体公式如下:

$$\text{溶解度} = [(m_0 w_0 - m_1 w_1) / (m_0 w_0)] \times 100\%$$

其中: m_0 为血球蛋白粉、珠蛋白或珠蛋白水解物的初始质量; m_1 为冻干后沉淀的质量; w_0 为血球蛋白粉、珠蛋白或珠蛋白水解物中蛋白质的质量分数; w_1 为冻干后沉淀中蛋白质质量分数。

1.2.7 铁离子质量比测定

根据 GB 5009.268—2016^[13] 测定血球蛋白粉、珠蛋白和珠蛋白水解物中铁离子质量比。

1.2.8 分层指数及乳化性质测定

分层指数根据文献[14]的方法测定。

按照文献[11]的方法测定乳化活力指数(emulsification activity index, EAI)和乳化稳定性指数(emulsion stability index, ESI)。

1.2.9 乳液粒径分布及体积平均粒径

根据文献[14]的方法使用百特激光粒度仪测定乳液第 1、3、5 天的粒径分布和体积平均粒径($D_{4.3}$)。

1.2.10 显微结构的测定

根据文献[15]的方法,在第 1、3、5 天观察乳液的光学显微镜图像。用等体积 PBS 缓冲液稀释乳液,稀释后的乳液(50 μ L)滴在载玻片上并用

盖玻片压紧,以确保没有气泡。在物镜下观察样品,每个样品随机观察至少 3 个不同的位置。

在第 1、3、5 天,使用激光扫描共聚焦显微镜(confocal laser scanning microscope, CLSM)观察乳液中的油和蛋白质分布^[14]。在每种情况下随机捕获至少 3 个不同的位置。

1.2.11 脂质氧化的测定

采用文献[11]方法测量乳液在室温下 1、3、5 d 的过氧化值;使用分光光度法测定乳液在室温下 1、3、5 d 的硫代巴比妥酸值^[11]。

1.2.12 数据分析

所有实验均重复 3 次,结果以(平均值 \pm 标准差)表示。使用 SPSS 25.0 软件对所有数据进行方差分析(ANOVA)评估。不同大写字母(A~C)表示相同处理下、不同储存时间下的结果有显著性差异;不同小写字母(a~d)表示在相同储存时间、不同处理下的结果有显著性差异; $P < 0.05$ 表示有显著差异, $P > 0.05$ 表示无显著性差异。

2 结果与分析

2.1 溶解度和铁离子质量比分析

2.1.1 溶解度

溶解度与蛋白质的功能特性密切相关,如凝胶和乳化性。血球蛋白粉、珠蛋白和珠蛋白水解物的溶解度见表 1 所列,从表 1 可以看出,珠蛋白在 PBS 缓冲液中的溶解度(1.07%)明显低于血球蛋白粉(74.44%)($P < 0.05$)。这可能是由于珠蛋白制备过程中在强酸和加热条件下发生变性(更多的疏水基团暴露)^[16]。此外,PBS 缓冲液的 pH 值接近珠蛋白的等电点($pI \approx 7.0$)^[6],这也是珠蛋白溶解度较低的原因。溶解度低的蛋白质通常具有较差的乳化和胶凝性能。因此,使用胃蛋白酶水解珠蛋白以提高溶解度。珠蛋白水解物在 PBS 缓冲液中的溶解度达到 95.80%。文献[8]的研究发现,从牛血中提取的珠蛋白的溶解度在经过胃蛋白酶限制性水解后显著提高。

表 1 血球蛋白粉、珠蛋白及其水解物的溶解度和铁离子质量比

样品	溶解度/%	铁离子质量比/(mg/kg)
血球蛋白粉	74.44 \pm 1.285 ^b	2 210.0 \pm 1.526 ^a
珠蛋白	1.07 \pm 0.054 ^c	385.5 \pm 0.568 ^b
珠蛋白水解物	95.80 \pm 0.582 ^a	2.6 \pm 0.384 ^c

2.1.2 铁离子质量比

铁离子能够催化蛋白质和脂质的氧化。脂质氧化易导致食品质量降低、保质期缩短,并生成有

害物质,如醛类和酮类物质。此外,蛋白质氧化可导致结构变化和功能特性降低^[17](如凝胶性和乳化性)。因此,最大限度地去除血红素铁,对于拓展血红蛋白在食品工业中的应用至关重要。

血球蛋白粉、珠蛋白和珠蛋白水解物的铁离子质量比见表 1 所列。由表 1 可知,血球蛋白粉、珠蛋白和珠蛋白水解物中的铁离子质量比分别为 2 210.0、385.5、2.6 mg/kg。结果表明:在珠蛋白制备过程中,血球蛋白粉中约 82.56% 的铁离子被去除。这可能归因于在酸性、加热和表面活性剂共同作用下,血红蛋白中大多数血红素分离和沉淀^[6];在酶水解期间,珠蛋白中约 99.32% 的铁离子被去除,这可能归因于酶水解期间珠蛋白中残余血红素的释放^[18]。珠蛋白制备和酶水解过程中铁离子质量比的降低可能对扩大血红蛋白及其衍生物在食品工业和其他领域的利用具有重要意义。

2.2 分层指数分析

分层指数用于反映储存期间乳液的物理稳定性。不同处理对肌球蛋白大豆油乳液分层指数的影响如图 1 所示。由图 1 可知,随着储存时间延长,所有样品中的分层指数增加,这可能归因于肌球蛋白大豆油乳液的热力学不稳定性^[14]。乳液 2 的分层指数在 120 h 下降到 30.13%,表明血红蛋白可显著提高肌球蛋白大豆油乳液的物理稳定性。此外,文献^[18]报道血红蛋白可以作为乳化剂,吸附在大豆油水界面上。乳液 3 在储存期间的分层指数略高于乳液 1($P>0.05$),表明珠蛋白不能有效影响肌球蛋白大豆油乳液的物理稳定性,这可能与珠蛋白溶解度差有关。如上所述,乳化性能是蛋白质的重要功能特性。目前的研究表明,珠蛋白不适合用于食品加工。在所有乳液中,乳液 4 在 120 h 时具有最低分层指数(16.96%),表明珠蛋白水解物在改善肌球蛋白大豆油乳液的物理稳定性方面比血球蛋白粉更有效。文献^[7]的研究发现玉米醇溶蛋白水解物降低了肌原纤维蛋白制备的水包油乳液的分层指数,并提高 EAI 和 ESI。文献^[19]的研究发现玉米蛋白水解物能够提高基于大豆分离蛋白的 O/W 乳液的蛋白质覆盖率。上述文献推测,由于玉米蛋白水解物与大豆分离蛋白、玉米醇溶蛋白水解物与肌原纤维蛋白之间的非共价相互作用,使得玉米蛋白水解产物、玉米醇溶蛋白水解物吸附到油水界面,并增加界面蛋白的覆盖率。因此,珠蛋白水解物可能吸附在大豆油水界面上,并增加界面蛋白的覆盖

率,从而在当前条件下降低分层指数。本文研究结果表明,血红蛋白及其水解物均能有效改善肌球蛋白大豆油乳液的物理稳定性,在乳化食品生产中具有一定潜力。

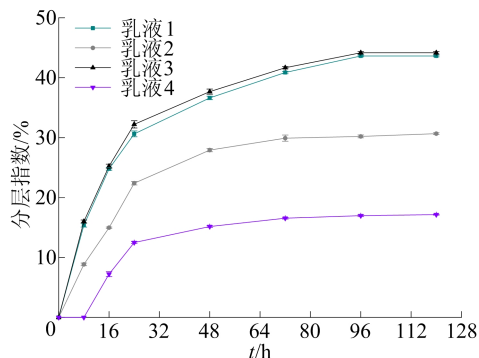


图 1 不同处理对肌球蛋白大豆油乳液分层指数的影响

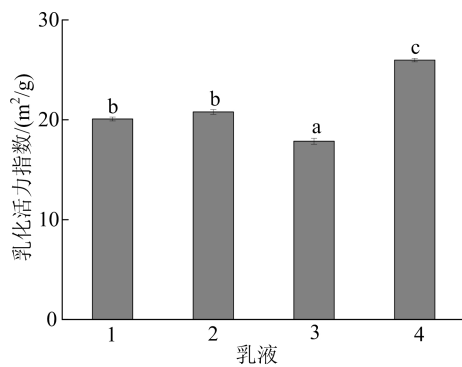
2.3 乳化性质分析

EAI 反映蛋白质快速结合液滴界面的能力,ESI 反映蛋白质在一段时间内保持乳液稳定的能力^[20]。为了评估新制备乳液的物理稳定性,本研究测定了 EAI 和 ESI。

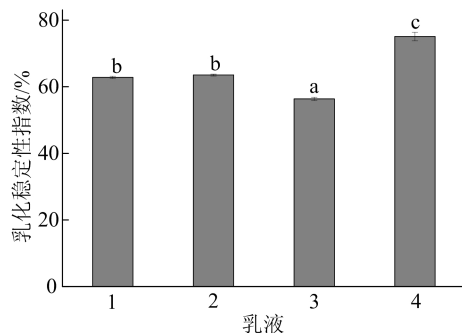
不同处理对肌球蛋白大豆油乳液的 EAI 和 ESI 影响如图 2 所示。从图 2a 可以看出:乳液 2 的 EAI 略高于乳液 1($P>0.05$),表明血球蛋白粉不能有效影响肌球蛋白大豆油乳液的 EAI;考虑到乳液 2 中加入血球蛋白粉的量相当于肌球蛋白的 10% 以及 EAI 的定义,可以推测血红蛋白被吸收至大豆油水界面且展开;乳液 3 的 EAI 最低(17.85 m^2/g),表明珠蛋白在大豆油水界面既不吸附也不展开,这可能与珠蛋白的溶解度差和刚性结构密切相关^[6];乳液 4 具有最高的 EAI(25.98 m^2/g),表明珠蛋白水解物增强了肌球蛋白大豆油乳液的 EAI。文献^[19]的研究发现,玉米蛋白水解物通过非共价相互作用导致更多大豆分离蛋白吸附到界面上。文献^[21]提出肽可以通过非共价相互作用与蛋白质特异性结合,这些作用改变蛋白质肽系统的凝胶、乳化和其他功能特性。因此,珠蛋白水解物能导致更多的肌球蛋白吸附在大豆油水界面上,并提高肌球蛋白的 EAI。另外,文献^[22]发现碱性蛋白酶水解使得绿豆蛋白结构从刚性转化为柔性。珠蛋白经胃蛋白酶水解后结构可能由刚性转化为柔性,方便其吸附至大豆油水界面上并导致覆盖率的增加,即有更高的 EAI。

由图 2b 可知,不同乳液之间的 ESI 差异与分

层指数中的差异一致。



(a) 乳化活力指数



(b) 乳化稳定性指数

图2 不同处理对肌球蛋白大豆油乳液乳化性质的影响

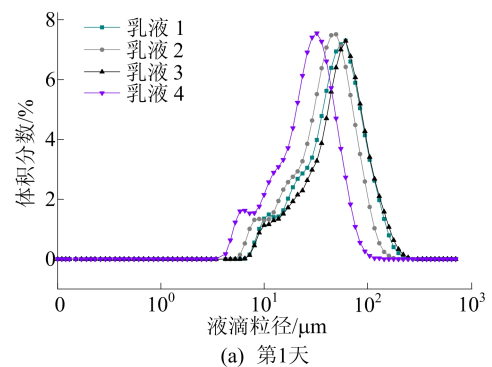
2.4 乳液粒径分布和体积平均粒径($D_{4,3}$)分析

乳液的粒径分布和体积平均粒径($D_{4,3}$)通常用于反映乳液的物理稳定性。不同处理对肌球蛋白大豆油乳液粒径分布的影响结果如图3所示。

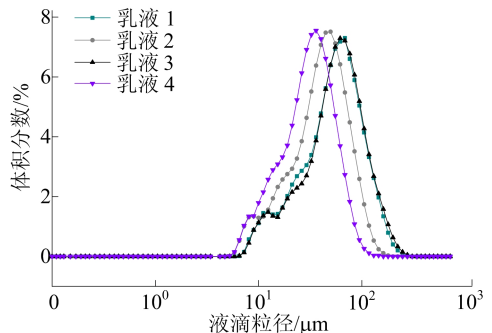
由图3可知,乳液液滴尺寸主要分布在4~400 μm 的范围内,且随着储藏时间的延长所有乳液的粒径均向较大颗粒尺寸的方向移动,表明发生了液滴的絮凝和聚集。这可能是肌球蛋白大豆油乳液的热力学不稳定性导致的。

由图3可知,乳液3的分布峰与乳液1的分布峰相似;与乳液1相比,乳液2和乳液4的分布峰均向较小尺寸的方向移动,后者的移动更为显著。为了定量描述不同乳液在储存过程中的变化,使用激光粒度分布分析软件(Ver 6.0)进一步计算它们的体积平均粒径,结果见表2所列。由表2可知,乳液3和乳液1的 $D_{4,3}$ 在整个储存过程中显著增加($P < 0.05$),而乳液2和乳液4的 $D_{4,3}$ 在最初3 d显著增加($P < 0.05$),但在接下来的2 d内没有显著变化($P > 0.05$)。结果表明:珠蛋白对乳液液滴粒径的影响较小;血球蛋白粉和珠蛋白水解物均显著降低乳液液滴粒径,且珠蛋白水解物比血球蛋白粉更有效。乳液液滴粒径的

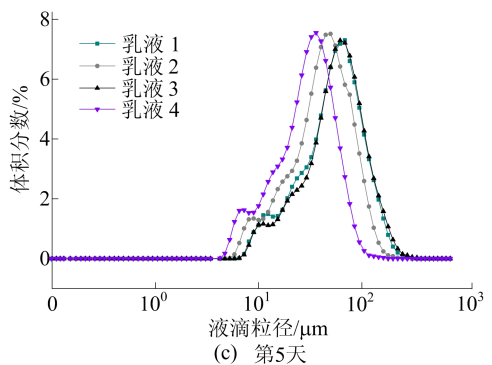
增加与其在储存期间的聚集和絮凝密切相关。



(a) 第1天



(b) 第3天



(c) 第5天

图3 不同处理对肌球蛋白大豆油乳液粒径分布的影响

表2 不同处理对肌球蛋白大豆油乳液 $D_{4,3}$ 的影响

储藏时间/d	乳液	$D_{4,3}/\mu\text{m}$
1	1	55.67±0.512 ^{Aa}
	2	35.67±1.081 ^{Ab}
	3	56.95±0.493 ^{Aa}
	4	29.77±0.818 ^{Ac}
3	1	60.12±0.235 ^{Ba}
	2	45.23±0.980 ^{Bb}
	3	61.43±0.506 ^{Ba}
	4	36.52±0.513 ^{Bc}
5	1	65.33±0.114 ^{Ca}
	2	46.99±0.648 ^{Bb}
	3	66.08±0.754 ^{Ca}
	4	36.98±0.671 ^{Bc}

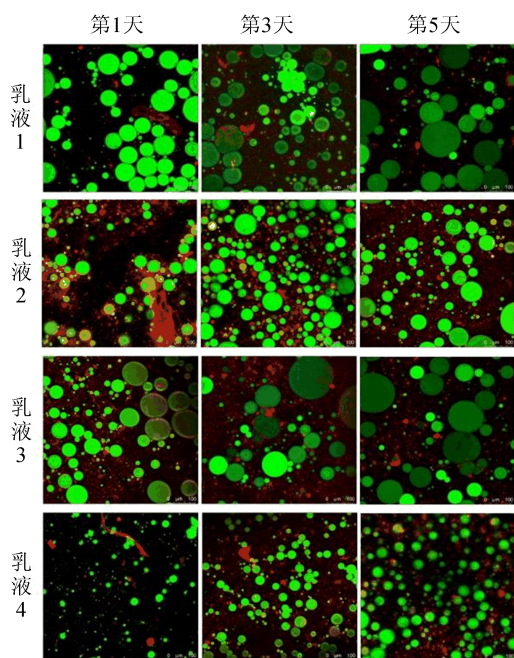
因此,本研究结果表明,血球蛋白粉和珠蛋白

水解物都有效抑制了乳液中液滴的絮凝和聚集,且珠蛋白水解物的效果优于血球蛋白粉。这可能与珠蛋白水解物可以增加肌球蛋白大豆油乳液界面的蛋白质覆盖率有关。文献[7]的研究发现玉米醇溶蛋白水解物降低了肌原纤维蛋白制备的水包油乳液的 $D_{4.3}$ 。该结果与上述 EAI、ESI 和分层指数的结论一致。

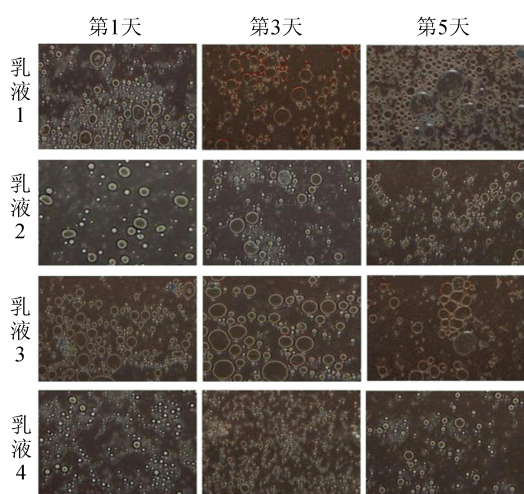
2.5 乳液微观结构分析

使用 40 倍 CLSM 物镜和 20 倍光学显微镜观察乳液的微观结构。不同处理对乳液微观结构的影响如图 4 所示。

通过 CLSM 可以直观地观察乳液中的蛋白质(红色)和油滴(绿色)。



(a) CLSM预测结果



(b) 光学显微镜观测结果

图 4 不同处理对肌球蛋白大豆油乳液微观结构的影响

由图 4a 可知,在所有样品中,随着储存时间的延长,液滴变得更大。在相同的储存时间时,乳液 1 和乳液 3 中发现了严重的絮凝和聚集,而乳液 2 和乳液 4 在储存过程中发现了轻微的絮凝和聚集。此外,与乳液 2 和乳液 4 相比,絮凝和聚集明显受到抑制。这与 $D_{4.3}$ 一致,并为不同处理引起的肌球蛋白大豆油乳液的物理稳定性(分层指数、EAI 和 ESI)差异提供了合理的解释。由图 4b 可知,使用光学显微镜也观察到类似的现象。由于絮凝和聚集,空白组中观察到大液滴;血球蛋白粉和珠蛋白水解物抑制肌球蛋白大豆油乳液在储存过程中的絮凝和聚集,且珠蛋白水解物更有效;然而,珠蛋白很少有效。珠蛋白水解物处理使液滴很少絮凝,更加均匀。这些结果与上述分层指数、ESI 和 $D_{4.3}$ 的结果一致。

2.6 脂质氧化分析

脂质氧化程度被认为是反映乳液化学稳定性的重要指标之一,与食品风味和可接受性密切相关^[23]。过氧化物和硫代巴比妥酸是脂质氧化的一级和二级产物。因此,在第 1、3、5 天测定了肌球蛋白大豆油乳液中过氧化值和硫代巴比妥酸值。

不同处理对肌球蛋白大豆油乳液脂质氧化的影响如图 5 所示。由图 5 可知,随着储存时间的延长,所有乳液的过氧化值和硫代巴比妥酸值均显著增加($P < 0.05$)。在相同的储存时间内,过氧化值从大到小依次为乳液 2、乳液 3、乳液 4、乳液 1,不同乳液之间的过氧化值差异显著($P < 0.05$),特别是乳液 2 与乳液 3 和乳液 4 之间。与未经任何处理的肌球蛋白大豆油乳液相比,在第 1 天,用珠蛋白或血球蛋白粉处理的乳液中的硫代巴比妥酸值显著高于空白组($P < 0.05$),用珠蛋白水解物处理的乳液略高于空白组($P > 0.05$);然而,在第 3 天和第 5 天不同乳液之间的过氧化值的差异与硫代巴比妥酸值的差异相似。结果表明,血球蛋白粉、珠蛋白和珠蛋白水解物都能够加速脂质氧化,其能力从高到低依次为血球蛋白粉、珠蛋白、珠蛋白水解物。铁离子是一种重要的促氧化剂,能够催化脂质氧化^[24]。因此,目前的结果可能与血球蛋白粉、珠蛋白和珠蛋白水解物中的铁离子质量比有关。血球蛋白粉、珠蛋白和珠蛋白水解物的铁离子质量比分别为 2 210.0、385.5、2.6 mg/kg。铁离子质量比越低,促进脂质氧化程度越小。

如前所述,脂质氧化通常导致营养物质损失、

不良气味,甚至形成有害物质,对食品质量和安全造成不利影响。因此,血球蛋白粉、珠蛋白和珠蛋白水解物在食品制造中的应用可能受到限制。然而,与血球蛋白粉相比,珠蛋白尤其是珠蛋白水解物加速脂质氧化的能力非常弱,这与它们中铁离子含量有关。结果表明,通过去除血球蛋白粉及其衍生物中铁离子可以在很大程度上降低脂质氧化的程度,对畜禽血液的综合利用有一定的实际意义。

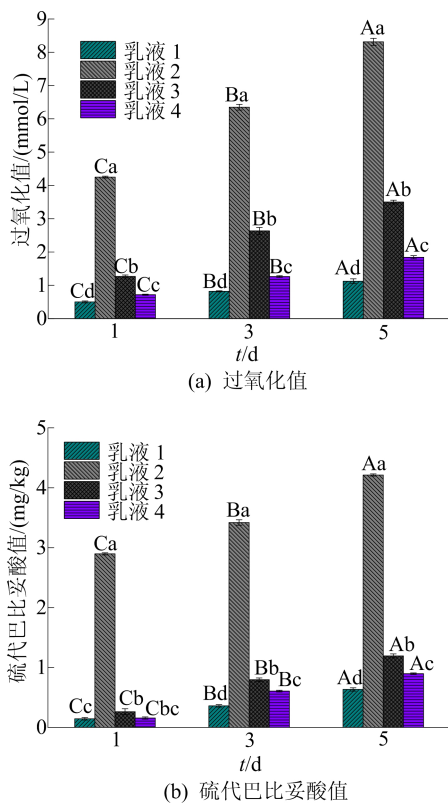


图5 不同处理对肌球蛋白大豆油乳液脂质氧化的影响

3 结 论

与血球蛋白粉和珠蛋白相比,珠蛋白水解物在增强肌球蛋白大豆油乳液的物理稳定性方面更有效,并且显示出较弱的促进氧化特性。结果表明,通过去除血红素铁和酶水解可以改善血球蛋白粉的乳化性能,并显著抑制其促进氧化能力,在食品工业中的应用具有一定潜力。本研究为畜禽血液的综合利用提供了依据。

[参 考 文 献]

[1] SHI J, ROOS A D, SCHOUTEN O, et al. Properties of hemoglobin decolorized with a histidine-specific protease[J].

Journal of Food Science, 2015, 80(6): E1202-E1208.

- [2] LIU X Q, YONEKURA M, SUTSUMI M, et al. Physicochemical properties of aggregates of globin hydrolysates [J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 1996, 44(10): 2957-2961.
- [3] SATO Y, HAYAKAWA S, HAYAKAWA M. Preparation of blood globin through carboxymethyl cellulose chromatography [J]. International Journal of Food Science and Technology, 1981, 16(1): 81-91.
- [4] WISMER-PEDERSEN J. Use of haemoglobin in foods—a review [J]. Meat Science, 1988, 24(1): 31-45.
- [5] 杨海, 唐章勇, 张革, 等. 十六烷基三甲基溴化铵制备高纯度血红素 [J]. 华西药学杂志, 2018, 33(1): 49-51.
- [6] NAKAAKAMUR R, HAYAKAWA S, YASUDA K, et al. Emulsifying properties of bovine blood globin: a comparison with some proteins and their improvement [J]. Journal of Food Science, 1984, 49(1): 102-104.
- [7] LI Y, KONG B, LIU Q, et al. Improvement of the emulsifying and oxidative stability of myofibrillar protein prepared oil-in-water emulsions by addition of zein hydrolysates [J]. Process Biochemistry, 2017, 53: 116-124.
- [8] TANG T, LIU J, TANG S, et al. Effects of soy peptides and pH on foaming and physicochemical properties of egg white powder [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 153: 112503.
- [9] JIN S K, CHOI J S, KIM G D. Effect of porcine plasma hydrolysate on physicochemical, antioxidant, and antimicrobial properties of emulsion-type pork sausage during cold storage [J]. Meat Science, 2021, 171: 108293.
- [10] HU Y, WANG Y, PAN D, et al. Individual effects of rosemary extract and green tea polyphenols on the physicochemical properties of soybean oil-myosin emulsion with larginine or lysine [J]. Food Chemistry, 2022, 395: 133582.
- [11] YANG J, XIONG Y L. Comparative time-course of lipid and myofibrillar protein oxidation in different biphasic systems under hydroxyl radical stress [J]. Food Chemistry, 2018, 243: 231-238.
- [12] GAO K, ZHA F, YANG Z, et al. Structure characteristics and functionality of water-soluble fraction from high-intensity ultrasound treated pea protein isolate [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 125: 107409.
- [13] 中华人民共和国卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中多元素的测定: GB 5009. 268—2016 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2016: 1-5.
- [14] ZHU X, LI L, LI S, et al. L-Arginine/L-lysine improves emulsion stability of chicken sausage by increasing electrostatic repulsion of emulsion droplet and decreasing the interfacial tension of soybean oil-water [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 492-502.
- [15] LAD V N, MURTHY Z V P. Enhancing the stability of oil-in-water emulsions emulsified by coconut milk protein with the application of acoustic cavitation [J]. Industrial & Engineering

- Chemistry Research, 2012, 51(11):4222-4229.
- [16] MOTOYAMA M, VENIEN A, LOISON O, et al. In situ characterization of acidic and thermal protein denaturation by infrared microspectroscopy[J]. Food Chemistry, 2018, 248:322-329.
- [17] NAWAZ A, IRSHAD S, ALIKHANI I, et al. Protein oxidation in muscle-based products; effects on physicochemical properties, quality concerns, and challenges to food industry[J]. Food Research International, 2022, 157:111322.
- [18] ÁLVAREZ C, TIWARI B K, RENDUELES M, et al. Use of response surface methodology to describe the effect of time and temperature on the production of decolorized, antioxidant and functional peptides from porcine hemoglobin by sub-critical water hydrolysis [J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 73:280-289.
- [19] WANG Y H, WANG J M, WAN Z L, et al. Corn protein hydrolysate as a new structural modifier for soybean protein isolate based O/W emulsions[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 118:108763.
- [20] SHEVKANI S K, SINGH N, RANA J C, et al. Relationship between physicochemical and functional properties of amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) protein isolates [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2014, 49:541-550.
- [21] KOSTERS H A, WIERENGAL P A, GRUPPEN H. SELDI-TOF-MS as a rapid tool to study food related protein-peptide interactions[J]. Food Hydrocolloids, 2010, 24:667-673.
- [22] LIU F F, LI Y Q, WANG C Y, et al. Physicochemical, functional and antioxidant properties of mung bean protein enzymatic hydrolysates[J]. Food Chemistry, 2022, 393:133397.
- [23] KELLERBY S S, MCCLEMENTS D J, DECKER E A. Role of proteins in oil-in-water emulsions on the stability of lipid hydroperoxides [J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2006, 54(20):7879-7884.
- [24] WANG G, WANG T. Oxidative stability of egg and soy lecithin as affected by transition metal ions and pH in emulsion[J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2008, 56(23):11424-11431.

(责任编辑 闫杏丽)

(上接第 274 页)

- [7] 王绍清, 曹红, 曹宝森. 扫描电镜法观察鸡蛋壳超微结构形貌[J]. 食品科学, 2013, 34(13):110-114.
- [8] CHEN Z Y, LI J K, TU Y G, et al. Changes in gel characteristics of egg white under strong alkali treatment[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 45:1-8.
- [9] CHANG C H, SU Y J, GU L P, et al. Microwave induced glycosylation of egg white protein; study on physicochemical properties and baking performance[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 118:106596.
- [10] LI J H, ZHANG Y F, FAN Q, et al. Combination effects of NaOH and NaCl on the rheology and gel characteristics of hen egg white proteins[J]. Food Chemistry, 2018, 250:1-6.
- [11] AI M M, ZHOU Q, GUO S G, et al. Characteristics of intermolecular forces, physicochemical, textural and microstructural properties of preserved egg white with Ca(OH)₂ addition[J]. Food Chemistry, 2020, 314:126206.
- [12] ZHOU X X, CHEN T, LIN H H, et al. Physicochemical properties and microstructure of surimi treated with egg white modified by tea polyphenols[J]. Food Hydrocolloids 2019, 90:82-89.
- [13] XUE H, TU Y G, XU M, et al. Changes in physicochemical properties, gel structure and in vitro digestion of marinated egg white gel during braising[J]. Food Chemistry, 2020, 330:127321.
- [14] CHEN S X, NI Z J, THAKUR K, et al. Effect of grape seed power on the structural and physicochemical properties of wheat gluten in noodle preparation system[J]. Food Chemistry, 2021, 355:129500.
- [15] AI M M, TANG T, ZHOU L D, et al. Effects of different proteases on the emulsifying capacity, rheological and structure characteristics of preserved egg white hydrolysate[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 87:933-942.
- [16] AI M M, ZHOU Q, GUO S G, et al. Effects of tea polyphenol and Ca(OH)₂ on the intermolecular forces mechanical, rheological, and microstructural characteristics of duck egg white gel [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 94:11-19.
- [17] AI M M, ZHOU Q, XIAO N, et al. Enhancement of gel characteristics of NaOH-induced duck egg white gel by adding Ca(OH)₂ with/without heating[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 103:105654.
- [18] BAO M J, SHEN J, JIA Y L, et al. Apple polyphenol protects against cigarette smoke-induced acute lung injury [J]. Nutrition, 2013, 29:235-243.
- [19] 徐怀德, 王临宾, 张立佳. 苹果叶多酚的纯化及其抗氧化性研究[J]. 食品科学, 2010, 31(20):72-78.

(责任编辑 张 镗)