

磷脂在蛋白质乳液中的作用研究进展

李雪阳¹, 邹依彤¹, 涂向辉¹, 祁冰洁¹, 刘新², 杨庆余¹, 王丽娟¹

(1. 沈阳师范大学 粮食学院, 沈阳 110034; 2. 中粮日清(大连)有限公司, 辽宁 大连 116011)

摘要:蛋白质作为天然乳化剂对环境变化敏感, 磷脂与蛋白质的相互作用可降低蛋白质对环境变化的敏感性。旨在为利用蛋白质、磷脂的优势共同提高乳液的稳定性, 拓宽乳液工业应用提供参考, 综述了不同蛋白与不同磷脂的相互作用、蛋白质与磷脂相互作用的影响因素以及蛋白质-磷脂复合乳液的应用。磷脂与蛋白质之间通过疏水相互作用使蛋白质乳液表现出更强的稳定性。蛋白质与磷脂相互作用的影响因素有磷脂与蛋白的比例、pH、温度、盐浓度和制备乳液所使用的物理手段(如高压、超声)。蛋白质-磷脂复合乳液可用于递送生物活性物质、制备低脂食品和人工乳。蛋白质-磷脂复合乳液能够应用于对稳定性要求高的食品中, 为食品工业开发绿色稳定的乳化剂提供了新途径。

关键词:乳液; 蛋白质; 磷脂; 乳化剂

中图分类号: TQ645.96; TS229 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2025)01-0097-05

Research progress on the role of phospholipids in protein-based emulsions

LI Xueyang¹, ZOU Yitong¹, TU Xianghui¹, QI Bingjie¹, LIU Xin²,
YANG Qingyu¹, WANG Lijuan¹

(1. College of Grain Science and Technology, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China;
2. COFCO Riqing (Dalian) Co., Ltd., Dalian 116011, Liaoning, China)

Abstract: Proteins, as natural emulsifiers, are sensitive to environmental changes, and phospholipid-protein interactions can reduce the sensitivity of proteins to environmental changes. In order to provide a reference for using the advantages of proteins and phospholipids to jointly improve the stability of emulsions and broaden the industrial application of emulsions, the interaction between different proteins and different phospholipids, the influencing factors of the interaction between proteins and phospholipids, and the application of protein-phospholipid complex emulsions were reviewed. Through hydrophobic interactions between phospholipids and proteins, the protein emulsion shows a stronger stability. The factors influencing the interactions between proteins and phospholipids are the ratio of phospholipids to proteins, pH, temperature, salt concentration, and the physical means used to prepare the emulsions (e.g., high pressure, ultrasound). Protein-phospholipid complex emulsions can be used to deliver bioactive substances, prepare low-fat foods and artificial milk. Protein-phospholipid complex emulsions can be applied to food with high stability requirements, which can provide a new way to develop green and stable emulsifier for the food industry.

Key words: emulsion; protein; phospholipid; emulsifier

收稿日期: 2023-06-13; 修回日期: 2024-07-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(32172246); 校级大学生创新创业训练计划资助项目(202221031)

作者简介: 李雪阳(1999), 女, 硕士研究生, 研究方向为粮食工程(E-mail) 1378075833@qq.com。

通信作者: 王丽娟, 教授, 博士(E-mail) synuwl@126.com。

蛋白质和磷脂是食品中常用的天然乳化剂, 被广泛用于稳定食品工业中的乳液和泡沫^[1]。蛋白质作为乳化剂来源丰富, 乳清蛋白、胶原蛋白、大豆蛋白^[2-4]等动植物蛋白在食品中都有广泛的应用。然而蛋白质对 pH、离子强度和温度等环境条件的改变敏感, 使得由蛋白质稳定的乳液的稳定性易受环

境变化的影响^[5]。添加磷脂可以有效改善蛋白质乳液的稳定性。这种蛋白质与磷脂的复合在许多天然的食品胶体体系中就有存在,如乳脂肪球、油体和蛋黄^[6-8]等。磷脂与蛋白质相互作用,能够改变蛋白质分子的构象,改善蛋白质功能特性,提高其乳化性、乳液稳定性^[9],同时也提升了食品的营养价值。本文综述了不同蛋白与磷脂的相互作用,不同磷脂与蛋白质的相互作用,蛋白质与磷脂相互作用的影响因素,并介绍了蛋白质-磷脂复合乳液的应用,以期利用蛋白质、磷脂的优势共同提高乳液的稳定性,拓宽乳液工业应用提供参考。

1 不同蛋白与磷脂的相互作用

1.1 乳清蛋白与磷脂的相互作用

在乳清浓缩蛋白稳定的乳液体系中加入大豆卵磷脂,磷脂易吸附到油水界面,降低油水界面张力,同时磷脂可以与部分乳清蛋白竞争吸附位点,并取代一些已经吸附在液滴表面的蛋白质,因此可降低乳液粒径^[10]。韩天翔等^[11]研究发现,大豆乳清蛋白乳液中添加磷脂后,乳液平均粒径减小、乳化活性增强、Zeta 电位绝对值增加,乳液稳定性增强。在乳液体系中,磷脂吸附在乳液液滴表面使得 Zeta 电位绝对值增加,液滴间静电斥力增强,此时乳液不易发生聚结现象。在分子结构上,添加磷脂会使蛋白质的二级结构发生改变,磷脂倾向于与乳清蛋白的疏水性氨基酸结合,乳清蛋白-磷脂复合乳液中 α -螺旋含量减少、 β -折叠含量增加,磷脂与蛋白质的结合使氢键发生断裂和再生。蛋白质和磷脂之间发生强烈的疏水相互作用,会使乳液形成更稳定的网络结构^[12]。Wang 等^[13]采用大豆卵磷脂与乳清分离蛋白稳定乳液,结果发现,大豆卵磷脂的添加提高了乳液的冻融稳定性。

1.2 肌原纤维蛋白与磷脂的相互作用

肌原纤维蛋白是肉类食品中重要的盐溶性蛋白质^[14]。磷脂可以抑制肌原纤维蛋白发生盐析,保持乳液在高盐条件下的稳定性。Dai 等^[15]研究发现,大豆卵磷脂的亲水基团会增强肌原纤维蛋白与水分子之间的氢键作用,同时使肌原纤维蛋白暴露出更多的疏水性氨基酸,从而抑制肌原纤维蛋白的盐析现象,另外,添加大豆卵磷脂还增强了在高氯化钠浓度(0.7 mol/L)下肌原纤维蛋白溶液的乳化活性和乳化稳定性。Cha 等^[16]研究发现,由于疏水基团暴露,增强了磷脂与肌原纤维蛋白的相互作用,提高了肌原纤维蛋白乳液的乳化活性。

1.3 大豆蛋白与磷脂的相互作用

pH 在蛋白质等电点附近时,乳液液滴间的斥力

减小,液滴易发生聚集,使乳液失稳。Comas 等^[17]研究发现,大豆卵磷脂的加入能改善大豆蛋白乳液 pH 在等电点附近时的稳定性。Li 等^[18]用热力学分析了大豆分离蛋白与磷脂酰胆碱的相互作用,由焓和熵的变化说明疏水相互作用是其主要的结合力,并存在弱的静电相互作用。

2 不同磷脂与蛋白质的相互作用

Kasinos 等^[19]研究了不同磷脂〔阴离子型的 1,2-二肉豆蔻酰磷脂酰甘油(DMPG)、1,2-二棕榈酰磷脂酰甘油(DPPG)、1,2-二肉豆蔻酰基磷脂酸(DMPA)和 1,2-二棕榈酰基磷脂酸(DPPA),两性离子型的 1,2-二肉豆蔻酰磷脂酰胆碱(DMPC)、1,2-二棕榈酰磷脂酰胆碱(DPPC)、1-肉豆蔻酰磷脂酰胆碱(C14-LPC)〕与水溶液中乳清分离蛋白的相互作用,结果发现,阴离子型磷脂与乳清分离蛋白发生疏水相互作用,而两性离子型磷脂与乳清分离蛋白不发生相互作用。磷脂与蛋白质之间发生静电相互作用和界面吸附,可以使乳液液滴抗聚结并增强乳液液滴间空间网络的稳定性,提高乳液的物理稳定性。Wang 等^[20]研究了磷脂的脂肪酸组成对蛋白质乳液稳定性的影响,结果发现,富含不饱和脂肪酸的磷脂可以增强疏水相互作用,并协同用于提高乳液的稳定性和生物可及性。此外,不同类型的磷脂在油相中的相对溶解度不同,导致其与油水界面上的蛋白质置换量不同,从而对乳液稳定性造成不同的影响^[21]。

3 蛋白质与磷脂相互作用的影响因素

3.1 磷脂与蛋白的比例

磷脂能够从乳液液滴表面置换吸附蛋白质,这种置换会随着蛋白与磷脂在乳液中比例的差异而不同,从而影响油水界面的组成和结构,进而影响乳液的稳定性。Chen 等^[22]研究发现,乳清分离蛋白和磷脂(牛油磷脂)的比例显著影响乳液的相分离,不同蛋白/磷脂比例的乳液在油水界面的表面弹性不同,表明不同蛋白/磷脂比例的油水界面组成存在差异,分析其原因认为是在蛋白质与磷脂相互作用的过程中,磷脂会置换已被吸附在界面的蛋白质所致。当磷脂过量时,两种混合乳化剂之间会发生竞争性吸附^[23]。Phan 等^[24]采用从牛乳脂球中分离的蛋白和磷脂制备乳液,研究了不同磷脂(乳液中的质量分数分别为 0.3%、1.3%、2.3%)和蛋白(乳液中的质量分数分别为 0.3%、1.3%、2.3%)含量对乳液液滴表面蛋白和磷脂负载量的影响,结果表明:在蛋白含量不变的条件下,乳液液滴表面磷脂负载量随着磷脂含量的增加而增加;在磷脂含量不变的条件

下,乳液液滴表面的磷脂负载量随着蛋白含量的增加而显著降低,特别是在高磷脂含量(1.3%和2.3%)条件下,而乳液液滴表面蛋白负载量增加的程度较小;当磷脂含量增加到2.3%以上时,蛋白不会被吸附到液滴表面,会游离在乳液中或是松散地附着在界面上。刘聪慧等^[25]研究发现,当添加过量的大豆磷脂时,大豆分离蛋白-大豆磷脂稳定的亚麻籽油乳液稳定性变差。因此,添加适当比例的蛋白和磷脂才能使乳液具有更好的稳定性。

3.2 pH

pH决定了蛋白质和磷脂乳液的电离状态,是影响乳液形成和稳定性的主要环境因素。蛋白质在乳化过程中会吸附到乳液液滴表面形成稳定的膜,这层膜主要通过静电斥力防止液滴之间相互聚集,因此乳化效果受pH影响较大,这导致乳液pH在等电点附近时稳定性较差。蛋白质与磷脂之间的相互作用在一定程度上会减弱酸碱对乳液稳定性的影响,从而使乳液在碱性和酸性条件下保持稳定^[26-27]。郑建樟等^[28]研究表明,在酸性(pH 2.0)条件下大豆分离蛋白-磷脂复合乳液依然能保持稳定。赵电波等^[29]研究发现,基于内源性磷脂-乳清分离蛋白作用的磷虾油乳液在弱碱性条件下具有更好的稳定性。

3.3 温度

蛋白质在较高温度下结构伸展变性,一定程度上可限制脂滴运动,表现出增强乳液稳定性^[29]。Saffon等^[30]研究了热处理(65℃和80℃)对乳清蛋白与磷脂之间相互作用的影响,结果发现,磷脂明显改变了高温下乳液的微观结构,表明高温条件下磷脂能与乳清蛋白发生相互作用。

3.4 盐浓度

乳液中添加盐可使其pH降低,乳清分离蛋白溶液在低浓度高价盐离子下会变得不稳定^[31]。Sünder等^[32]选择两种乳清蛋白(乳清浓缩蛋白和乳清分离蛋白)与磷脂(水解和未改性的大豆卵磷脂)相结合,研究蛋白质、磷脂和盐(氯化钠)在乳液中的相互作用,结果表明,盐含量的增加导致蛋白质发生聚集,蛋白质乳液的稠度和黏度更高,从而使乳液稳定性降低。

3.5 物理手段

采用物理技术,如高压处理、超声处理等,可以使蛋白-卵磷脂复合体系更加稳定^[33]。覃小丽等^[34]研究发现,当延长超声时间或增大超声功率时,乳蛋白-磷脂复合体系的表面疏水性和溶解度

增大,而粒径减小。Yan等^[35]用高静水压力与磷脂协同改性大豆分离蛋白,结果表明,两者表现出良好的协同作用,磷脂的添加增加了大豆分离蛋白表面电荷,可防止颗粒团聚,有利于形成小颗粒的稳定乳液。

4 蛋白质-磷脂复合乳液的应用

4.1 递送生物活性物质

基于乳液的封装和递送系统已被应用于保护生物活性成分免于降解,提高生物利用度。磷脂的加入可以提高蛋白质乳液的稳定性并调整其界面/网络结构,从而促进基于蛋白质乳液的封装和递送系统的发展。磷脂与蛋白质结合可以获得具有良好封装特性的微胶囊壁^[36],蛋白质与磷脂的混合物会在液滴表面形成多层结构的皮肤状膜^[37],这种结构可构建空心胶囊应用于食品中封装物质。Chen等^[36]研究发现,用葵花籽磷脂与乳清浓缩蛋白、酪蛋白或大豆蛋白组合作为封装壁材制备的DHA微胶囊均具有较高的封装效率。Wang等^[20]研究发现,将乳清分离蛋白-磷脂乳液用于递送磷虾油,其在体内和体外实验中都表现出更好的生物可及性。

4.2 制备低脂食品

随着消费者健康意识的不断提高,食品工业在不断寻找和开发脂肪替代品,以减少人们对脂肪和胆固醇的摄入。然而,低脂食品的生产通常伴随着技术挑战,如质地差和不稳定。乳液作为液体植物油的新型结构化方法,可以将液体油转化为固体/半固体油,这种结构化的油脂可以模拟全脂产品中的脂肪质地,提供良好的口感和稳定性,具有作为脂肪替代品的巨大潜力。基于蛋白质的乳液可以设计为用于开发脂肪替代品的固态油脂,磷脂的加入可以改变乳液的界面性质,保持乳液不同pH和温度下的稳定性。Wang等^[13]用乳清分离蛋白-磷脂部分替代蛋黄酱中的脂肪,可以提高蛋黄酱的流变性能和冻融稳定性,使蛋黄酱在酸性条件下依然具有良好的冻融稳定性。乳清蛋白磷脂浓缩物主要由乳脂球膜中的乳清蛋白和乳脂组成,具有高持水能力、相对热稳定性以及凝胶特性,可以用于代替冰淇淋中的乳制品成分,降低冰淇淋的脂肪含量^[38]。郑环宇等^[39]研究发现,用大豆分离蛋白-磷脂复合物部分取代乳粉制备的冰淇淋,其融化率与传统低脂冰淇淋(用大豆分离蛋白部分取代乳粉)相比显著降低,同时,磷脂的加入使蛋白质与水的结合部位变少,冰淇淋中水分子分布更加均匀,使冰淇淋硬度降低。

4.3 制备人工乳

蛋白质和磷脂是乳脂球膜的主要成分,以蛋白

质-磷脂作为模型系统,可以模拟乳脂球膜的结构^[40]。Sun等^[41]研究了超声处理对乳脂球膜(富含磷脂)和乳蛋白浓缩物模拟人脂肪乳剂的影响,发现超声处理可提高模拟人脂肪乳剂的乳化稳定性。王霁月^[42]研究发现,在牛乳均质过程中添加外源性大豆磷脂,可对液态乳及喷雾干燥乳粉中的乳脂球膜结构进行保护。Zhu等^[43]将大豆卵磷脂添加于婴儿奶粉配方中,结果发现,大豆卵磷脂的加入改善了乳液稳定性,提高了奶粉中脂肪和蛋白质的消化率。

5 结 语

蛋白质作为天然两亲性分子具有良好的表面活性,磷脂使蛋白质乳液具有更加稳定的功能特性,使其在温度、pH等环境条件变化下仍然可以保持稳定。磷脂对蛋白质乳液乳化能力的提高,能减少食品中非天然乳化剂的使用。蛋白质-磷脂复合乳液与新兴物理技术的协同性展现出创新和应用潜力,可提高功能性食品中营养物质的稳定性和生物可及率。蛋白质-磷脂复合乳液能够应用于对稳定性要求高的食品中,为食品工业开发绿色稳定的乳化剂提供了新途径。蛋白质-磷脂复合乳液系统的复杂性使研究其在油水界面稳定机制仍有难度,仍需研究环境条件变化对蛋白质吸附的影响,以获得更稳定、保质期更长的产品。另外,蛋白质与磷脂种类的不同使乳液界面差异较大,随着对绿色发展与健康食品的追求,还需要关注更多的天然植物源蛋白与磷脂相互作用对乳液界面性质的改变。

参考文献:

- [1] MACGIBBON A K H, TAYLOR M W. Milk lipids: Phospholipids[M]//FUQUAY J W. Encyclopedia of dairy sciences. Amsterdam, Netherlands: Academic Press, 2011: 670-674.
- [2] KIM W, WANG Y, SELOMULYA C. Dairy and plant proteins as natural food emulsifiers[J]. Trends Food Sci Technol, 2020, 105: 261-272.
- [3] FAN Y, PENG G, PANG X, et al. Physicochemical, emulsifying, and interfacial properties of different whey protein aggregates obtained by thermal treatment[J/OL]. LWT-Food Sci Technol, 2021, 149: 111904[2023-06-13]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111904>.
- [4] 张根生, 岳晓霞, 李继光, 等. 大豆分离蛋白乳化性影响因素的研究[J]. 食品科学, 2006, 27(7): 48-51.
- [5] MCCLEMENTS D J, GUMUS C E. Natural emulsifiers: Biosurfactants, phospholipids, biopolymers, and colloidal particles: Molecular and physicochemical basis of functional performance[J]. Adv Colloid Interface, 2016, 234: 3-26.
- [6] 中国食品科学技术学会. 乳脂肪球膜及其配料的科学共识[J]. 中国食品学报, 2022, 22(4): 471-476.
- [7] NIKIFORIDIS C V. Structure and functions of oleosomes (oil bodies)[J/OL]. Adv Colloid Interface, 2019, 274: 102039[2023-06-13]. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.102039>.
- [8] 朱帅, 黄梦玲, 吴倩倩, 等. 蛋黄卵磷脂的结构、提取、功能与脂质体研究进展[J]. 粮油食品科技, 2020, 28(3): 18-25.
- [9] 刘宝华, 张菀坤, 伍丹, 等. 大豆蛋白-磷脂交互作用与乳液特性构效关系研究进展[J]. 中国食物与营养, 2017, 23(9): 31-35.
- [10] YAN B, PARK S H, BALASUBRAMANIAM V M. Influence of high pressure homogenization with and without lecithin on particle size and physicochemical properties of whey protein-based emulsions[J/OL]. J Food Process Eng, 2017, 40(6): e12578[2023-06-13]. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12578>.
- [11] 韩天翔, 李杨, 毕爽, 等. 磷脂对大豆乳清蛋白乳化特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(2): 13-20.
- [12] BARBANA C, PÉREZ M D. Interaction of α -lactalbumin with lipids and possible implications for its emulsifying properties: A review[J]. Int Dairy J, 2011, 21(10): 727-741.
- [13] WANG Y, LIN R, SONG Z, et al. Freeze-thaw stability and oil crystallization behavior of phospholipids/whey protein-costabilized acidic emulsions with four oil types[J/OL]. Food Hydrocolloid, 2022, 125: 707385[2023-06-13]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107385>.
- [14] ZHOU X, CHEN H, LYU F, et al. Physicochemical properties and microstructure of fish myofibrillar protein-lipid composite gels: Effects of fat type and concentration[J]. Food Hydrocolloid, 2019, 90: 433-442.
- [15] DAI H, SUN Y, XIA W, et al. Effect of phospholipids on the physicochemical properties of myofibrillar proteins solution mediated by NaCl concentration[J/OL]. LWT-Food Sci Technol, 2021, 141: 110895[2023-06-13]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.110895>.
- [16] CHA Y, SHI X, WU F, et al. Improving the stability of oil-in-water emulsions by using mussel myofibrillar proteins and lecithin as emulsifiers and high-pressure homogenization[J]. J Food Eng, 2019, 258: 1-8.
- [17] COMAS D I, WAGNER J R, TOMÁS M C. Creaming stability of oil in water (O/W) emulsions: Influence of pH on soybean protein- lecithin interaction[J]. Food Hydrocolloid, 2006, 20(7): 990-996.
- [18] LI Y, LIU B, JIANG L, et al. Interaction of soybean protein isolate and phosphatidylcholine in nanoemulsions: A fluorescence analysis[J]. Food Hydrocolloid, 2019, 87: 814-829.

- [19] KASINOS M, SABATINO P, VANLOO B, et al. Effect of phospholipid molecular structure on its interaction with whey proteins in aqueous solution [J]. *Food Hydrocolloid*, 2013, 32(2): 312–321.
- [20] WANG Z, ZHAO J, ZHANG T, et al. Impact of interactions between whey protein isolate and different phospholipids on the properties of krill oil emulsions: A consideration for functional lipids efficient delivery [J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2022, 130: 107692 [2023-06-13]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107692>.
- [21] FREDRICK E, WALSTRA P, DEWETTINCK K. Factors governing partial coalescence in oil-in-water emulsions [J]. *Adv Colloid Interface*, 2010, 153(1/2): 30–42.
- [22] CHEN M, SAGIS L M C. The influence of protein/phospholipid ratio on the physicochemical and interfacial properties of biomimetic milk fat globules [J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2019, 97: 105179 [2023-06-13]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105179>.
- [23] 孙向东, 李硕. 蛋白质乳化作用与置换吸附探讨[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(16): 405–408.
- [24] PHAN T T Q, LE T T, VAN DE WALLE D, et al. Combined effects of milk fat globule membrane polar lipids and protein concentrate on the stability of oil-in-water emulsions[J]. *Int Dairy J*, 2016, 52: 42–49.
- [25] 刘聪慧, 王欣. 大豆分离蛋白与大豆磷脂比例对超声乳化亚麻籽油乳液特性的影响[J]. *中国油脂*, 2022, 47(5): 41–46, 72.
- [26] 周洋, 管军军, 路新开, 等. 基于运动食品的蛋白-磷脂聚集体及其乳液的液滴特性[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(9): 103–113.
- [27] MANTOVANI R A, FATTORI J, MICHELON M, et al. Formation and pH-stability of whey protein fibrils in the presence of lecithin [J]. *Food Hydrocolloid*, 2016, 60: 288–298.
- [28] 郑建樟, 管军军, 路新开, 等. 酶解大豆分离蛋白-磷脂复合乳液的制备及稳定性分析[J]. *食品科学*, 2020, 41(16): 244–251.
- [29] 赵电波, 秦晓鹏, 詹海杰, 等. 基于内源性磷脂-乳清分离蛋白交互作用的磷虾油乳液稳定性研究[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(24): 68–76.
- [30] SAFFON M, JIMÉNEZ-FLORES R, BRITTEN M, et al. Effect of heating whey proteins in the presence of milk fat globule membrane extract or phospholipids from buttermilk [J]. *Int Dairy J*, 2015, 48: 60–65.
- [31] INCE-COSKUN A E, OZDESTAN-OCAK O. Effects of salt ions and heating on the behaviour of whey protein particle dispersions [J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2020, 101: 105433 [2023-06-13]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105433>.
- [32] SÜNDER A, SCHERZE I, MUSCHIOLIK G. Physico-chemical characteristics of oil-in-water emulsions based on whey protein-phospholipid mixtures [J]. *Colloid Surface B*, 2001, 21(1): 75–85.
- [33] 兰天彤, 宋亭喻, 钱圣, 等. 压力、超声物理场辅助构建蛋白-卵磷脂复合体系在递送系统中的研究进展[J]. *食品科学*, 2023, 44(19): 220–229.
- [34] 覃小丽, 杨溶, 钟金锋, 等. 超声作用下乳蛋白-磷脂复合体系对人乳脂类似物乳液形成与稳定的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(8): 20–26.
- [35] YAN G, CUI Y, LIA D, et al. The characteristics of soybean protein isolate obtained by synergistic modification of high hydrostatic pressure and phospholipids as a promising replacement of milk in ice cream [J/OL]. *LWT-Food Sci Technol*, 2022, 160: 113223 [2023-06-13]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113223>.
- [36] CHEN Y, GE H, ZHENG Y, et al. Phospholipid-protein structured membrane for microencapsulation of DHA oil and evaluation of its *in vitro* digestibility: Inspired by milk fat globule membrane [J]. *J Agric Food Chem*, 2020, 68(22): 6190–6201.
- [37] HE Q, ZHANG Y, LU G, et al. Dynamic adsorption and characterization of phospholipid and mixed phospholipid/protein layers at liquid/liquid interfaces [J]. *Adv Colloid Interface*, 2008, 140(2): 67–76.
- [38] LEVIN M A, BURRINGTON K J, HARTEL R W. Composition and functionality of whey protein phospholipid concentrate and delactosed permeate [J]. *J Dairy Sci*, 2016, 99(9): 6937–6947.
- [39] 郑环宇, 闫国森, 孙美馨, 等. 改性大豆分离蛋白-磷脂复合物对冰淇淋品质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(1): 48–54.
- [40] GALLIER S, GRAGSON D, JIMÉNEZ-FLORES R, et al. β -Casein-phospholipid monolayers as model systems to understand lipid-protein interactions in the milk fat globule membrane [J]. *Int Dairy J*, 2012, 22(1): 58–65.
- [41] SUN Y, YU X, HUSSAIN M, et al. Influence of milk fat globule membrane and milk protein concentrate treated by ultrasound on the structural and emulsifying stability of mimicking human fat emulsions [J/OL]. *Ultrason Sonochem*, 2022, 82: 105881 [2023-06-13]. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105881>.
- [42] 王霁月. 外源性磷脂添加对乳脂肪球结构和功能的影响[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2021.
- [43] ZHU X, WANG Q, LENG Y, et al. Lecithin alleviates protein flocculation and enhances fat digestion in a model of infant formula emulsion [J/OL]. *Food Chem*, 2021, 346: 128918 [2023-06-13]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128918>.