

蛋白基乳液模板法构建油凝胶的研究进展

张 婷,朱婷伟,郭兴凤,陈复生,张丽芬

(河南工业大学 粮油食品学院,郑州 450001)

摘要:传统塑性脂肪带来健康问题,液态油固化成为构建零反式、低饱和脂肪酸塑性脂肪替代品的新策略。蛋白质是优质的食品营养组分,是来源广泛的可再生资源,具有独特的界面特性。为扩大蛋白资源的应用范围及促进功能性油脂的开发,对蛋白质的结构化及蛋白基乳液模板法构建油凝胶(结构化油脂)研究进展进行了综述,同时介绍了蛋白基乳液模板法构建的油凝胶的应用。蛋白质在一定条件下可作为凝胶剂固化液态油;蛋白基乳液模板法构建油凝胶具有安全性高、对环境污染小等优点。采用蛋白基乳液模板法构建的油凝胶可应用于替代传统塑性脂肪、荷载生物活性成分方面。

关键词:蛋白质;结构化油脂;油凝胶;乳液模板

中图分类号:TS224;O648.17

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2023)06-0061-06

Research progress of construction of oleogels by protein based emulsion template method

ZHANG Ting, ZHU Tingwei, GUO Xingfeng, CHEN Fusheng, ZHANG Lifan
(College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The traditional plastic fats cause health problem, and solidification of liquid oil is considered as a new strategy to obtain plastic fat with zero - *trans* and low - saturated fatty acids. As a high quality nutrition component of food, protein is a renewable resource with a wide range of sources, and it has unique interface properties. To expanding protein applications and development of functional fats, the research progress of structuring protein and constructing oleogels by protein based emulsion template method was reviewed. The application of oleogels constructed by protein based emulsion template method was also summarized. Under certain conditions, protein could be used as a gelling agent to solidify liquid oil to prepare oleogels. Constructing oleogels by protein based emulsion template method has the advantages of high safety and low environmental pollution. The oleogels constructed by protein based emulsion template method could be used to replace traditional plastic fats and load bioactive ingredients.

Key words: protein; structured oil; oleogel; emulsion template

塑性脂肪在食品加工过程中起着重要作用,作为现代油脂工业的重要产品之一,其需求量和销售规模不断增长,这给油脂加工行业带来了机遇和挑

战。无论是传统还是新兴的食品产业,对塑性脂肪的要求越来越高,特别是从食品结构理性设计的角度出发,开发健康的塑性脂肪已成为发展趋势。传统塑性脂肪大部分都是精炼的动植物固态油脂,或是氢化的植物油脂,在此过程中引入的饱和脂肪酸或反式脂肪酸对人体健康不利^[1-5]。构建油凝胶(结构化油脂)是采用凝胶剂将液态油结构化来提高油脂塑性的有效手段,是构建零反式、低饱和脂肪酸塑性脂肪替代品的新策略^[6]。目前用于构建油凝胶的传统凝胶因子主要有植物甾醇-卵磷脂、生物蜡、羟基化脂肪酸、单甘酯、甘二酯、脂肪醇等小分子凝胶剂^[7-10];小分子凝胶剂在以自组装诱导形成

收稿日期:2022-02-17;修回日期:2023-02-04

基金项目:国家自然科学基金(U21A20270);河南省重点研发与推广专项(212102110320);河南工业大学高层次人才基金项目(2020BS013);河南省自然科学基金(222300420424)

作者简介:张 婷(1997),女,硕士研究生,研究方向为蛋白质资源开发与利用(E-mail)2273518523@qq.com。

通信作者:郭兴凤,教授(E-mail)guoxingfeng@haut.edu.cn;朱婷伟,讲师(E-mail)zhutingwei@haut.edu.cn。

晶体或非晶体形式的网络结构过程中不易控制,或需要较高的形成温度使油脂易氧化,影响产品质量^[11]。蛋白质是优质的食品营养组分,同时也可作为潜在的凝胶剂结构化油脂制备油凝胶,这为开发营养健康的塑性脂肪替代品提供了新思路。基于此,本文就蛋白乳液模板法构建油凝胶方面的研究进展进行了综述,以期为扩大蛋白资源的应用范围及功能性油脂的构建提供理论参考。

1 蛋白质的结构化

蛋白质是一种天然的食物级大分子,因其具有独特的界面特性,且为来源广泛的再生资源,受到人们的关注。作为两亲性分子,蛋白质在乳液体系中不仅是良好的乳化剂,也是一种潜在的凝胶剂。一方面,两亲性的蛋白质可自发地扩散吸附到油水界面,对乳液的形成及结构起重要作用;但天然蛋白质界面吸附过程慢,且形成的界面膜致密度不够,存在界面空隙,极易受外界环境影响,导致乳液稳定性差^[12]。另一方面,蛋白质虽然对油相有一定的亲和力,但是蛋白质疏水基团都被包裹在内部,使其在油相中的分散性非常有限,无法将液态油固化^[13-14]。因此,需要通过一定条件对蛋白质进行改性使其结构化,从而具有凝胶剂的特性以结构化油脂制备油

凝胶,常见的处理方法有热诱导、盐诱导、酸诱导等。

热诱导蛋白质是通过加热使蛋白质变性,其内部的疏水性位点暴露出来,从而增加了蛋白质与油脂之间的疏水相互作用;当蛋白质浓度超过临界值时,蛋白质则形成了聚集或缠结分子的三维网络结构^[15],进而可以将液态植物油包裹在其中,得到蛋白基油凝胶(见图1)。De Vries 等^[16]将乳清蛋白溶液加热到蛋白质变性温度以上,使蛋白质因发生解折叠而聚集,然后再使用丙酮作为中间溶剂对葵花籽油进行溶剂交换构建油凝胶,结果发现,热固性乳清蛋白聚集体形成了三维网络结构,能够很好地将液态油凝胶化为油凝胶。Fernández 等^[17]以脱水全牛血浆为凝胶剂,在不同温度下加热溶液诱导蛋白质变性,并在连续搅拌下,将亚麻籽油缓慢添加到其中,经过静置和冷藏后完成凝胶化过程,最终冷冻干燥除去水分制得油凝胶。结果发现,80℃时加热制备的油凝胶具有更高的凝胶稳定性及凝胶强度,而60℃时制备的油凝胶具有较好的脂质氧化稳定性和涂抹性。热诱导形成蛋白质凝胶剂是热机制,虽然操作简单,但高温处理会伴有油脂氧化的问题,影响油凝胶的品质。

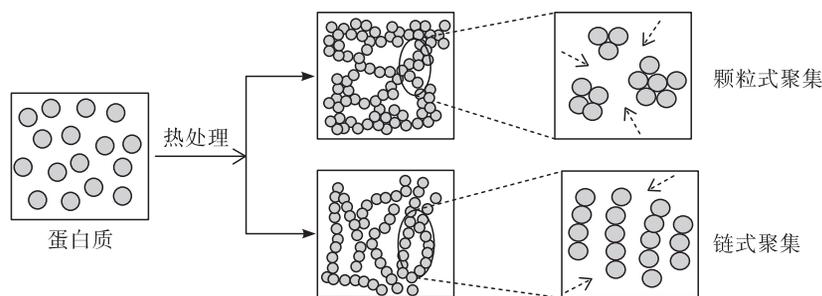


图1 热诱导蛋白质交联形成三维网络^[18]

与热机制诱导形成蛋白质凝胶剂相反的是冷机制诱导形成蛋白质凝胶剂,包括盐诱导及酸诱导,即在离子或 pH 调控下,使蛋白质能够形成蛋白质网络结构来包裹液态油脂达到结构化油脂的目的。一方面,当盐离子强度增加时,蛋白质之间的静电排斥作用降低,蛋白质分子之间的间隙变小,在范德华力、疏水作用和盐桥共同作用下,产生稳定致密的蛋白质三维网络结构^[19]。Nikiforidis 等^[20]将葵花籽油体和葵花籽蛋白混合得到高内相乳液(油体积分数为 0.91),并在热诱导条件下添加钙离子,结果发现,钙离子可诱导蛋白质聚集,增强了蛋白质网络结构,进而使油凝胶弹性增加。另一方面,调节蛋白质溶液的 pH,当

pH 逐渐靠近蛋白质等电点时,处于等电点附近的蛋白质分子所带电量减小,分子间静电排斥力减小,蛋白质分子逐渐靠近,暴露于蛋白质表面的巯基相互作用形成二硫键,最终通过分子间交联形成稳定的网络结构^[21]。Tavernier 等^[22]在热诱导和酸诱导条件下将大豆分离蛋白和卡拉胶进行复合,制备油凝胶。由此,冷机制诱导可形成致密的蛋白质网络结构,与热机制诱导结合可以弥补热机制缺点,从而提高油凝胶的硬度和氧化稳定性。不同处理方法蛋白质的结构化见表1。由于蛋白质自身结构的复杂性,在诱导结构化过程中反应复杂,存在的分子机制不明确,这对蛋白质类凝胶剂的开发研究有一定阻碍。

表1 不同处理方法蛋白质的结构化

蛋白种类	处理方法	油脂类型	参考文献
乳清蛋白	热诱导	葵花籽油	[16]
脱水全牛血浆	热诱导	亚麻籽油	[17]
葵花籽蛋白	热诱导/盐诱导	葵花籽油	[20]
大豆分离蛋白	热诱导/酸诱导	葵花籽油	[22]
菜籽分离蛋白	热诱导	菜籽油	[23]
大豆蛋白	热诱导	玉米油/大豆油	[24]
蚕豆蛋白	热诱导	菜籽油	[25]

2 蛋白基乳液模板法构建油凝胶

乳液模板法构建油凝胶是以液态油和具有良好界面稳定性的高分子聚合物分别为分散相和连续相通过均质制备成乳液,再经过烘箱干燥或冷冻干燥脱水,最后进行剪切即可得到稳定的油凝胶(见图2)^[13,26]。蛋白基乳液模板法是以乳液为模板,将不具备凝胶化能力的潜在凝胶因子转变为凝胶化所需的网络结构,进而将液态油裹入/嵌入网络结构中,最终呈现出含油量大于85%的凝胶化体系。在此过程中可通过调控模板乳液的结构来构建油凝胶。Romoscanu等^[27]在2006年首次证明了间接法可实现聚合物油凝胶化。他们采用 β -乳球蛋白稳定乳液,并将其作为模板,经过干燥后得到了油凝胶。深入研究发现,大分子多糖可与蛋白质通过静电复合或共价交联的方式修饰蛋白质分子结构及表面特性,得到界面结构及性能稳定的改性蛋白粒子,进而广泛应用于乳液模板的制备中,最终构建性能稳定的乳液模板油凝胶。Tavernier等^[22]采用乳液模板法制备大豆蛋白和 κ -卡拉胶的静电复合物,在大豆蛋白与 κ -卡拉胶比例为15:1、pH为3.0的条件下,可较好地稳定水包油型乳液,并进一步除水得到

油凝胶。Abdolmaleki等^[28]对酪蛋白酸钠、黄原胶、瓜尔豆胶浓度和干燥方法(烘箱干燥和冷冻干燥)等进行优化研究油凝胶制备过程,结果发现,在中等浓度的黄原胶和高浓度的酪蛋白酸钠和瓜尔豆胶条件下,采用冷冻干燥可以制得具有高持油率和回收率的油凝胶,且其流变特性和质构特性与工业起酥油非常相近。Wijaya等^[29]研究了pH和蛋白质与多糖比例对高内相乳液(HIPEs)模板油凝胶结构的影响,结果发现,在较高pH及较高的蛋白质与多糖比例下,形成的油凝胶表现出更好的抗油损失稳定性和更强的凝胶性能。Wang等^[30]以玉米醇溶蛋白/壳聚糖胶体颗粒稳定的Pickering乳液为模板进行进一步冷冻干燥形成了无油泄漏的固体状凝胶,其基质中含油量为92%,且能在3个月内保持稳定。Ren等^[31]以茶水不溶性蛋白/ κ -卡拉胶制备水包油型乳液,真空冷冻干燥48h除去水分后制备的鱼油油凝胶为高固体状,具有较好的弹性且无明显漏油现象。随着蛋白质资源的挖掘及蛋白质在食品乳液体体系应用中优势的突显,蛋白基乳液模板稳定的油凝胶及相关应用在食品行业中具有巨大的发展潜力。

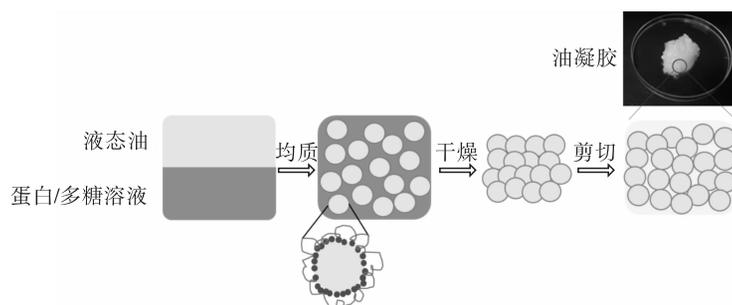


图2 乳液模板法制备油凝胶

3 蛋白基乳液模板法构建油凝胶的应用

3.1 作为传统塑性脂肪替代品

在油凝胶替代塑性脂肪研究领域,广泛利用有机凝胶因子对液态油进行结构化以替代或部分替代奶油、黄油、起酥油等塑性脂肪,用于焙烤食品、冰淇

淋、肉制品等食品加工中^[8,32]。蛋白基油凝胶体系一般具有较高的黏弹特性与剪切稀化特性^[33]。蛋白基乳液模板法构建的油凝胶替代传统塑性脂肪用于烘焙制品中,可减少反式脂肪酸或饱和脂肪酸的摄入。Tavernier等^[34]在酥皮糕点基料中加入大豆

分离蛋白结合小烛树蜡构建的乳液模板油凝胶,探究油酥面团和酥皮糕点的性质,结果发现,与人工黄油制备的油酥面团相比,油凝胶制备的油酥面团更具弹性和延展性,且对酥皮糕点的硬度无影响。Tang 等^[23]利用热变性菜籽分离蛋白(4%)作为凝胶剂稳定水包油型乳液构建油凝胶,用此油凝胶完全替代高饱和起酥油应用于蛋糕烘焙中,并以起酥油蛋糕作为对照,考察油凝胶蛋糕的性能。结果发现,油凝胶蛋糕较起酥油蛋糕具有更大的蛋糕比容、较低的硬度、较高的弹性和黏结性。此外,万铮等^[35]以低芥酸菜籽油为基料油,通过卵清蛋白和羟丙基淀粉协同稳定,并添加单宁酸增强油凝胶的稳定性,制备了皮克林乳液油凝胶,并以其替代人造奶油应用到蛋糕中,考察该油凝胶制作的蛋糕的性质。结果发现,油凝胶制作的蛋糕具有更好的起泡稳定性和持水性,结构更加蓬松,硬度和弹性也与市售的蛋糕相当。除此之外,蛋白基油凝胶替代脂质应用于冰淇淋产品中具有很好的发展前景。Silva - Avellaneda 等^[36]评估了温度、表面活性剂浓度、油和乳清蛋白浓度对油凝胶功能性质的影响,并探究用获得的油凝胶替代冰淇淋生产中的脂肪(奶油)的可行性。结果发现,相较于传统冰淇淋,使用油凝胶制成的冰淇淋其内聚性、咀嚼性和胶黏性较高,且硬度和弹性与传统冰淇淋无显著差异。

油脂为肉制品提供特有的质地和风味,随着对油凝胶研究的不断深入,其替代脂肪应用到肉制品加工中不仅能够保持脂肪的功能特性,还能减少反式脂肪酸和饱和脂肪酸的摄入。Scholten 等^[37]较为系统地研究了蛋白基油凝胶的结构化机制并将乳清蛋白基油凝胶用于制作法兰克福香肠,结果发现,乳清蛋白基油凝胶制备的香肠与猪肉脂肪制备的香肠具有同样的断裂强度,但乳清蛋白基油凝胶香肠锁水性更强,且二者感官评价上无显著差异。目前,关于有机油凝胶在肉制品中的应用已较为广泛,而蛋白基乳液模板法构建的油凝胶在肉制品中的应用还有待深入研究。另外,由于芝麻酱易发生油离析现象,Jiang 等^[38]利用玉米蛋白/果胶纳米颗粒基 Pickering 乳液稳定地包裹芝麻油,以期制备芝麻酱替代品,这为蛋白基乳液模板法构建的油凝胶在酱类制品中的应用奠定了基础。

3.2 在营养素递送系统中的应用

随着人们对食品营养及健康功能的日益关注,诸多食品及食品配料中的生物活性分子如类胡萝卜素、维生素等,成为现代食品工业研究的热点^[39]。然而,食品加工过程中脂溶性活性成分往往存在稳

定性差、生物利用率较低等问题,极大地限制了它们的应用^[40-41];亲水性化合物则难以直接分散在疏水性液体(如油脂)中,而油凝胶由于内部形成了三维网络结构,能够为其荷载功能活性物质提供有利条件。油凝胶作为营养素递送系统制备的食品原料兼具安全性和营养性,在食品工业中具有很大的应用潜力。Wang 等^[42]采用蛋白基乳液模板法构建油凝胶并负载 V_C ,探讨油脂类型和结晶温度对油凝胶物理性质、 V_C 荷载量和氧化稳定性的影响。结果发现,相较于亚麻籽油和山茶油,玉米油形成的油凝胶物理性能优异、氧化稳定性强,这为亲水性化合物在油基或油基食品中的充分分散提供了参考。随着可降低损失率和提高生物利用率优势的突显,蛋白基乳液模板法构建的油凝胶可以作为一种较好的生物活性成分输送载体进行相关应用,在今后食品行业中具有很大的发展空间。

4 结束语

随着油凝胶技术在开发含零反式、低饱和脂肪酸健康油脂方面优势的突显,在油凝胶构建、性能及应用方面展开了相关研究。蛋白质作为来源广泛的可再生资源,因其独特的界面特性且在一定条件下可作为凝胶剂结构化液态油脂构建油凝胶而受到关注;尤其是蛋白基乳液模板法构建的油凝胶具有安全性高、对环境污染小等优点。蛋白基乳液模板法构建的油凝胶在食品领域尤其是在替代塑性脂肪应用于食品加工、作为营养素递送系统荷载生物活性成分等方面具有很大的应用潜力。在今后的研究中,需进一步深入探究蛋白基乳液模板法构建油凝胶的工业化生产工艺、限制性关键参数、结构化机制等,以推进其在食品工业中的应用。

参考文献:

- [1] MONGUCHI T, HARA T, HASOKAWA M, et al. Excessive intake of *trans* fatty acid accelerates atherosclerosis through promoting inflammation and oxidative stress in a mouse model of hyperlipidemia[J]. *J Cardiol*, 2017, 70(2): 121 - 127.
- [2] OTENG A B, KERSTEN S. Mechanisms of action of *trans* fatty acids[J]. *Adv Nutr*, 2020, 11(3): 697 - 708.
- [3] SHAH B, THADANI U. *Trans* fatty acids linked to myocardial infarction and stroke: what is the evidence? [J]. *Trends Cardiovasc Med*, 2019, 29(5): 306 - 310.
- [4] ALBUQUERQUE T G, SANTOS J, SILVA M A, et al. An update on processed foods: relationship between salt, saturated and *trans* fatty acids contents[J]. *Food Chem*, 2018, 267: 75 - 82.
- [5] 郭桂萍,王匀. 反式脂肪酸的来源、危害和各国采取的措施[J]. *中国食物与营养*, 2005(11): 60 - 61.

- [6] PEHLIVANOĞLU H, DEMIRCI M, TOKER O S, et al. Oleogels, a promising structured oil for decreasing saturated fatty acid concentrations: production and food - based applications[J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2018, 58(8): 1330 - 1341.
- [7] 孟宗,李陆茵,李兴伟,等. 植物蜡及液态植物油构建油凝胶的物性研究[J]. *中国油脂*, 2019, 44(11): 17 - 22.
- [8] 柯翔宇,崔梦楠,高彦祥,等. 简述油凝胶及其在食品中的应用[J]. *食品科技*, 2019, 44(10): 110 - 115.
- [9] GAUDINO N, GHAZANI S M, CLARK S, et al. Development of lecithin and stearic acid based oleogels and oleogel emulsions for edible semisolid applications [J]. *Food Res Int*, 2018, 116: 79 - 89.
- [10] GÓMEZ - ESTACA J, HERRERO A M, HERRANZ B, et al. Characterization of ethyl cellulose and beeswax oleogels and their suitability as fat replacers in healthier lipid pâtés development [J]. *Food Hydrocolloid*, 2019, 87: 960 - 969.
- [11] PATEL A R, DEWETTINCK K. Edible oil structuring: an overview and recent updates[J]. *Food Funct*, 2016, 7(1): 20 - 29.
- [12] MARTINS A J, VICENTE A A, CUNHA R L, et al. Edible oleogels: an opportunity for fat replacement in foods[J]. *Food Funct*, 2018, 9(2): 758 - 773.
- [13] PATEL A R, RAJARETHINEM P S, CLUDTS N, et al. Biopolymer - based structuring of liquid oil into soft solids and oleogels using water - continuous emulsions as templates[J]. *Langmuir*, 2015, 31(7): 2065 - 2073.
- [14] YI J, GAN C, WEN Z, et al. Development of pea protein and high methoxyl pectin colloidal particles stabilized high internal phase pickering emulsions for β - carotene protection and delivery [J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2021, 113: 106497 [2022 - 02 - 17]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106497>.
- [15] BRYANTD C, MCCLEMENTS D. Molecular basis of protein functionality with special consideration of cold - set gels derived from heat - denatured whey[J]. *Trends Food Sci Technol*, 1998, 9(4): 143 - 151.
- [16] DE VRIES A, WESSELING A, VAN DER LINDEN E, et al. Protein oleogels from heat - set whey protein aggregates [J]. *J Colloid Interface Sci*, 2017, 486: 75 - 83.
- [17] FERNÁNDEZ C L, ROMERO M C, ROLHAISER F, et al. Fat substitutes based on bovine blood plasma and flaxseed oil as functional ingredients [J/OL]. *Int J Gastron Food Sci*, 2021, 25: 100365 [2022 - 02 - 17]. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100365>.
- [18] PENG X, REN C, GUO S. Particle formation and gelation of soymilk: effect of heat[J]. *Trends Food Sci Technol*, 2016, 54: 138 - 147.
- [19] LU X, LU Z H, YIN L J, et al. Effect of preheating temperature and calcium ions on the properties of cold - set soybean protein gel[J]. *Food Res Int*, 2010, 43(6): 1673 - 1683.
- [20] NIKIFORIDIS C V, SCHOLTEN E. High internal phase emulsion gels (HIPE - gels) created through assembly of natural oil bodies [J]. *Food Hydrocolloid*, 2015, 43: 283 - 289.
- [21] 张久龙,孟祥晨,桂仕林. 乳清蛋白冷凝胶形成机理的研究进展[J]. *食品科学*, 2008(10): 641 - 644.
- [22] TAVERNIER I, PATEL A R, VAN DER MEEREN P, et al. Emulsion - templated liquid oil structuring with soy protein and soy protein: κ - carrageenan complexes [J]. *Food Hydrocolloid*, 2017, 65: 107 - 120.
- [23] TANG Y R, GHOSH S. Canola protein thermal denaturation improved emulsion - templated oleogelation and its cake - baking application [J]. *RSC Adv*, 2021, 11(41): 25141 - 25157.
- [24] CHEN K L, ZHANG H. Fabrication of oleogels via a facile method by oil absorption in the aerogel templates of protein - polysaccharide conjugates[J]. *ACS Appl Mater Interf*, 2020, 12(6): 7795 - 7804.
- [25] JIANG Z Q, WANG J, STODDARD F, et al. Preparation and characterization of emulsion gels from whole faba bean flour[J/OL]. *Foods*, 2020, 9(6): 755 [2022 - 02 - 17]. <https://doi.org/10.3390/foods9060755>.
- [26] PATEL A R, CLUDTS N, SINTANG M D B, et al. Edible oleogels based on water soluble food polymers: preparation, characterization and potential application [J]. *Food Funct*, 2014, 5(11): 2833 - 2841.
- [27] ROMOSCANU A I, MEZZENGA R. Emulsion - templated fully reversible protein - in - oil gels [J]. *Langmuir*, 2006, 22(18): 7812 - 7818.
- [28] ABDOLMALEKI K, ALIZADEH L, NAYEBZADEH K, et al. Oleogel production based on binary and ternary mixtures of sodium caseinate, xanthan gum, and guar gum: optimization of hydrocolloids concentration and drying method[J]. *J Texture Stud*, 2020, 51(2): 290 - 299.
- [29] WIJAYA W, SUN Q Q, VERMEIR L, et al. pH and protein to polysaccharide ratio control the structural properties and viscoelastic network of HIPE - templated biopolymeric oleogels [J/OL]. *Food Struct*, 2019, 21: 100112 [2022 - 02 - 17]. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2019.100112>.
- [30] WANG L J, YIN S W, WU L Y, et al. Fabrication and characterization of Pickering emulsions and oil gels stabilized by highly charged zein/chitosan complex particles (ZCCPs) [J]. *Food Chem*, 2016, 213: 462 - 469.

- [31] REN Z Y, LI Z M, CHEN Z Z, et al. Characteristics and application of fish oil - in - water pickering emulsions structured with tea water - insoluble proteins/ κ - carrageenan complexes [J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2021, 114: 106562 [2022 - 02 - 17]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106562>.
- [32] OH I K, AMOAH C, LIM J, et al. Assessing the effectiveness of wax - based sunflower oil oleogels in cakes as a shortening replacer [J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2017, 86: 430 - 437.
- [33] LIU X, GUO J, WAN Z L, et al. Wheat gluten - stabilized high internal phase emulsions as mayonnaise replacers [J]. *Food Hydrocolloid*, 2018, 77: 168 - 175.
- [34] TAVERNIER I, DOAN C D, VAN DER MEEREN P, et al. The potential of waxes to alter the microstructural properties of emulsion - templated oleogels [J/OL]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2018, 120(3): 1700393 [2022 - 02 - 17]. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201700393>.
- [35] 万铮, 赵海洋, 曾朝喜, 等. 基于皮克林乳液的低芥酸菜籽油基凝胶油的性质及应用 [J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2021, 47(3): 361 - 368.
- [36] SILVA - AVELLANEDA E, BAUER - ESTRADA K, PRIETO - CORREA R E, et al. The effect of composition, microfluidization and process parameters on formation of oleogels for ice cream applications [J/OL]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 7161 [2022 - 02 - 17]. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86233-y>.
- [37] SCHOLTEN E, DE VRIES A. Proteins as building blocks for oil structuring [M]//PATEL A R. *Edible oil structuring*. London: The Royal Society of Chemistry, 2017: 150 - 174.
- [38] JIANG Y, LI F, LI D P, et al. Zein/pectin nanoparticle - stabilized sesame oil Pickering emulsions: sustainable bioactive carriers and healthy alternatives to sesame paste [J]. *Food Bioproc Technol*, 2019, 12(12): 1982 - 1992.
- [39] REZAEI A, FATHI M, JAFARI S M. Nanoencapsulation of hydrophobic and low - soluble food bioactive compounds within different nanocarriers [J]. *Food Hydrocolloid*, 2019, 88: 146 - 162.
- [40] KATOZIAN I, JAFARI S M. Nano - encapsulation as a promising approach for targeted delivery and controlled release of vitamins [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2016, 53: 34 - 48.
- [41] ASSADPOUR E, MAHDI JAFARI S. A systematic review on nanoencapsulation of food bioactive ingredients and nutraceuticals by various nanocarriers [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2019, 59(19): 3129 - 3151.
- [42] WANG X, WANG S J, YANG N, et al. The effects of oil type and crystallization temperature on the physical properties of vitamin C - loaded oleogels prepared by an emulsion - templated approach [J]. *Food Funct*, 2020, 11(9): 8028 - 8037.

(上接第 38 页)

- [15] 朱生辉. 精炼大豆油回色因素及延缓回色工艺的研究 [D]. 郑州:河南工业大学, 2013.
- [16] 华聘聘. 大豆色拉油抗结晶能力研究 [J]. *粮食与油脂*, 2003(11): 3 - 6.
- [17] ZHANG F H, LI J, YANG S P, et al. Inhibitory effect of antioxidants on biodiesel crystallization: revealing the role of antioxidants [J/OL]. *Fuel*, 2021, 297: 120782 [2022 - 06 - 02]. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120782>.
- [18] LO S, TAN C, LONG K, et al. Diacylglycerol oil - properties, processes and products: a review [J]. *Food Bioproc Technol*, 2008, 1(3): 223 - 233.
- [19] CHENG W W, LIU G Q, WANG L Q, et al. Glycidyl fatty acid esters in refined edible oils: a review on formation, occurrence, analysis, and elimination methods [J]. *Compr Rev Food Sci F*, 2017, 16(2): 263 - 281.
- [20] XIN Y, SHEN C, SHE Y, et al. Biosynthesis of triacylglycerol molecules with a tailored PUFA profile in industrial microalgae [J]. *Mol Plant*, 2019, 12(4): 474 - 488.
- [21] 吴端, 王力军, 杨仕梅, 等. 植物种子 α - 亚麻酸形成及调控机理研究进展 [J]. *植物遗传资源学报*, 2020(1): 49 - 62.
- [22] CARMAN G M. The discovery of the fat - regulating phosphatidic acid phosphatase gene [J]. *Front Biol*, 2011, 6(3): 172 - 176.
- [23] ROCHE J, MOULOUGUI Z, CERNY M, et al. Fatty acid and phytosterol accumulation during seed development in three oilseed species [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2016, 51(8): 1820 - 1826.
- [24] 杨万政, 曹秀君, 李金淑, 等. 紫外分光光度法测定沙棘油中总类胡萝卜素方法改进 [J]. *中央民族大学学报(自然科学版)*, 2009, 18(3): 5 - 8.
- [25] 周秀娟. 一级大豆油抗冻性能研究 [D]. 江苏镇江: 江苏大学, 2008.
- [26] PELC S E, LINDER C R. Emergence timing and fitness consequences of variation in seed oil composition in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Ecol Evol*, 2015, 5(1): 164 - 171.
- [27] 陈琼, 杨雪, 赵金利, 等. 酶法制备甘油二酯与甘油三酯的结晶特性研究 [J]. *中国油脂*, 2015, 40(11): 48 - 53.