

DHA 稳态化技术研究进展

刘佳炜¹, 王旭¹, 曹雁平^{1,2,*}, 许朵霞^{1,2,*}

(1.北京食品营养与人类健康高精尖创新中心, 北京工商大学, 北京 100048;

2.食品添加剂与配料北京高校工程研究中心, 北京工商大学, 北京 100048)

摘要:二十二碳六稀酸(docosahexaenoic acid, DHA)具有重要的生理功能,但因 DHA 不稳定,对氧气、光和热极为敏感,易氧化以及存在特殊的气味等,在应用上受限。应用中通常采用稳态化技术,减缓 DHA 氧化降解过程,降低其氧化,提高 DHA 稳定性和产品品质。本文对近年来 DHA 稳态化研究中常用的喷雾干燥技术、凝聚技术、乳状液与纳米脂质载体等技术研究现状进行总结,并对存在的问题和发展方向进行了讨论和展望。

关键词:二十二碳六稀酸(DHA),稳态化,微胶囊,乳状液

Research Progress in Technologies of DHA Stabilization

LIU Jia-wei¹, WANG Xu¹, CAO Yan-ping^{1,2,*}, XU Duo-xia^{1,2,*}

(1.Beijing Advanced Innovation Center for Food Nutrition and Human Health,
Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;

2.Beijing Higher Institution Engineering Research Center of Food Additives
and Ingredients, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: Docosahexaenoic acid(DHA) has many important physiological functions. However, DHA is unstable and sensitive to oxygen, light and heat due to oxidation, which limits its application in food products. DHA stabilization technology is usually used to slow down the DHA oxidation process, reduce its oxidation and improve product stability and quality. In this article, the techniques of spray drying, coagulation, emulsion and nano-lipid carrier, which were commonly used in DHA stabilization research in recent years, were summarized, and the existing problems and development directions were discussed and forecasted.

Key words: docosahexaenoic acid(DHA); stabilization; microcapsules; emulsion

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2019)07-0273-05

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2019.07.047

引文格式: 刘佳炜, 王旭, 曹雁平, 等. DHA 稳态化技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(7): 273-277.

二十二碳六稀酸(Docosahexaenoic acid, DHA), 分子式 $C_{22}H_{32}O_2$, 分子量 328.4, 分子结构式见图 1, 属于 ω -3 多不饱和脂肪酸。 ω -3 脂肪酸是人类必需脂肪酸之一, 具有预防心血管疾病、免疫调节等作用^[1]。国内外众多研究表明, 属于 ω -3 脂肪酸的 DHA 具有预防动脉硬化、冠心病^[2]; 降低血压、胆固醇^[3]; 改善视力^[4]; 抗癌^[5]; 抑制肿瘤^[6-7] 和促进婴幼儿发育^[8-9] 等重要的生理功能。DHA 广泛地应用于食品、保健品等多个领域, 具有良好的应用前景^[10]。DHA 主要有两个来源, 一是通过浮游生物及藻类中生物合成^[11], 二是通过食物链积蓄于甲壳类、鱼类和海洋动物中^[12]。目前在食品行业 DHA 的产品有婴幼儿食品、DHA 保健食品、DHA 强化食品等^[13-15]。随着研究的不断深入, DHA 的应用种类以及应用范围也在

不断丰富。

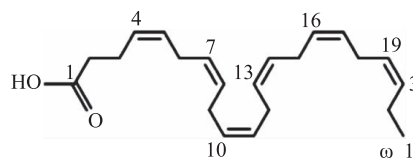


图1 DHA 分子式

Fig.1 DHA formula

DHA 自身结构存在六个双键, 在光、氧气和热及金属元素等条件下容易氧化。在使用过程中常常由于它的不稳定性而受到限制^[16]。DHA 的氧化会造成自身功能成分的破坏、品质破坏、货架期缩短; 氧化产物摄入体内会引发生理异常、危害健康; 氧化过程中也会有不良风味产生, 影响产品品质^[2]。同时

收稿日期: 2018-08-10

作者简介: 刘佳炜(1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品添加剂, E-mail: 18800111610@163.com。

* 通讯作者: 曹雁平(1961-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品化学与安全, E-mail: caoy@th.btbu.edu.cn。

许朵霞(1986-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品添加剂与功能性配料, E-mail: xdx@btbu@126.com。

基金项目: 北京市科技计划课题(Z1711100001317004); 国家自然科学基金项目(31371722, 31501486); 北京市自然科学基金三元联合资助项目(15S0003); “十三五”时期北京市属高校高水平教师队伍支持计划(CIT & TCD201804018)。

DHA 藻油、鱼油与其他原料不易混匀,不利于储藏与应用。通常采用一定的方法和技术来提高 DHA 的稳定性,使其更好地发挥生理功能、丰富产品类别,改善人们的生活。本文对近年来国内外 DHA 稳态化常用的方法和技术按制得 DHA 稳态化产品的固态和液态形式进行分类总结,并展望 DHA 稳态化研究及应用的前景。

1 DHA 固态稳态化技术

国内外常采用微胶囊技术将 DHA 制成固态形式稳态化体系,便于存贮、运输和工业化生产需要。微胶囊化是将微小的固体颗粒、液滴或气体等采用天然或合成高分子材料包埋,形成具有半透性或密封性的微胶囊(microcapsules, MC)的过程^[17-18]。其中制备成 DHA 固态稳态化体系常用的方法是喷雾干燥法^[19-22]和复合凝聚法^[23-24]。

1.1 喷雾干燥技术

喷雾干燥技术首先制备 DHA 芯材和壁材混合,而后在干燥器内进行喷雾干燥。经过雾化后形成的雾滴与热干燥介质接触,进行热交换和质交换,工艺流程如图 2^[22]。该方法适合于疏水物质,效果随疏水性增强而增强^[10]。优点:粒度小、溶解性好、成本低。缺点:颗粒不均、有空颗粒、挥发性物质损失、芯材在加热与氧气条件下易氧化、需要选择良好的壁材^[25]。

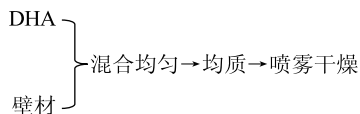


图2 DHA 喷雾干燥流程

Fig.2 Spray-drying processing of DHA

目前研究结果显示,采用喷雾干燥技术制备 DHA 固态稳态化体系具有良好的包封率(>90%)。白春清等^[20]采取喷雾干燥法制备藻油微胶囊,用环糊精空穴结构进行包埋,以包封率为指标进行优化,最后制备微藻油的包封率达到 93.37%。吕军伟等^[21]使用喷雾干燥法以大豆分离蛋白和麦芽糊精为壁材对藻油进行包埋,利用正交优化配方和工艺参数,得到微胶囊包埋率达 92.8%。

有研究者对传统喷雾干燥进行条件优化和改良,获得更稳定的 DHA 稳态化体系。沈国辉等^[22]利用喷雾干燥法制备 DHA 微胶囊粉末,对工艺条件进行优化,得到最佳工艺条件:喷雾干燥进风温度 170℃、出风温度 80℃、均质压力 40 MPa、均质温度 45℃。Vishnu 等^[24]采用喷雾干燥法制备沙丁鱼油 DHA 微胶囊,获得具有良好的氧化稳定性的微胶囊粉末。Jiménezmartín 等^[26]用喷雾干燥法制备鱼油微胶囊,研究表明多层乳液的包封效率和负载量比双层乳液效果好。

近年来,有学者通过研究喷雾干燥壁材,获得了包封性能更好的 DHA 稳态化体系。Chen 等^[27]采用喷雾干燥法研究不同壁材制备 DHA 微胶囊的特性,使用酪蛋白、葡萄糖和乳糖三种共同作为壁材制备的 DHA 微胶囊包埋率最高(98.66%)。Augustin 等^[28]采用黄油制备的副产品酪乳作为新的包封材

料,利用喷雾干燥法制备鱼油 DHA 微胶囊,研究发现,与使用脱脂乳相比,使用酪乳可提高鱼油的包封性能。

1.2 凝聚技术

凝聚技术是一种在 DHA 稳态化研究中常采用的微胶囊技术之一。该方法用水溶性壁材包埋脂溶性材料,分为单凝聚法和复凝聚法^[29]。单凝聚法是使用一种壁材制备。复合凝聚(Complex Coacervation)是指用两种带相反电荷的物质做包埋物,通过改变体系 pH、温度或水溶液浓度,壁材组分间相互作用,凝聚析出,分离、固化后形成微胶囊^[30-31]。复合凝聚法的工艺是壁材先溶解,加入芯材乳化,通过调节 pH 和温度等方法,使得带相反电荷的聚合物间发生静电作用,使壁材溶解度降低,从而包裹在芯材周围,形成微胶囊,工艺流程图如图 3^[32-33]。优点:载量高、对脂溶性芯材具有良好的延缓氧化及控制释放的功能^[34-35]。缺点:工艺成本较高、能耗大、壳材料选择的局限性、固定化所用的固定剂多为醛类,在体内消耗过程会产生一定的毒性,限制在食品中的应用^[20]。

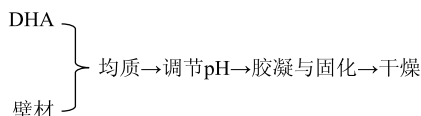


图3 DHA 凝聚流程

Fig.3 Coacervation processing of DHA

为获得稳态化效果更优良的壁材和固化剂,目前研究集中于凝聚壁材、固化剂等对 DHA 稳态化的影响。孙昱^[31]采用复合凝聚法包埋 DHA,确定最佳壁材为明胶与阿拉伯胶,采用谷氨酰氨酶作为固化剂,并确定了最佳固化温度 10℃,时间 12 h。利用谷氨酰氨酶固化得到的 DHA 微胶囊产品有轻微的腥味,固化效果不能完全替代戊二醛。刘盛楠^[32]通过复合凝聚法制备鱼油微胶囊,研究五种不同壁材,确定最佳为阿拉伯胶与明胶,微胶囊包埋后 DHA 保留率高达 96.28%。董志俭等^[36]采用复合凝聚法,使用明胶、桃胶为壁材,制备鱼油微胶囊,研究发现低温储存可以减慢氧化速率,在强酸碱条件下具有良好的氧化稳定性。

近年来,有学者对 DHA 固态稳态化产品的稳定性进行研究,采用添加抗氧化剂等新的方法来提高 DHA 固态形式微胶囊的稳定性。胡莉^[37]采用复合凝聚法制备鱼油微胶囊,壁材为壳聚糖和阿拉伯胶,获得制备工艺,冷冻干燥后发现 POV 值增大,同时添加抗氧化剂 VE 可以有效抑制其氧化。Yang 等^[38]使用大豆分离蛋白与壳聚糖作为壁材,采用复合凝聚法构建 DHA 微胶囊,研究表明,与单一大豆分离蛋白相比,大豆分离蛋白与壳聚糖通过凝聚形成的微胶囊具有更高的包封率、更好的抗氧化性。Habibi 等^[39]采用复合凝聚法利用明胶、阿拉伯胶制备鱼油微胶囊,并将冷冻干燥微胶囊用于强化果汁,研究发现,微胶囊中鱼油的释放取决于存储时间,用 0.07% 的鱼油微胶囊强化果汁具有良好的可接受性。Xia

等^[40]使用脂肪酶水解鲑鱼油得到 DHA、EPA 浓缩物,并采用复合凝聚法制备 DHA 微胶囊,结果表明,经脂肪酶浓缩的微胶囊具有更高的强度与稳定性。

1.3 固态稳态化其他技术

1.3.1 包络结合法 包络结合法是在分子水平上的微胶囊方法,通常用 β -环糊精作为包埋剂,主要利用其特殊的空腔结构形成微细稳定的固体包络物。优点:成本低、包合物吸湿性低。缺点:条件难以控制、载量低。苏阳等^[41]以 β -环糊精为壁材,利用包络结合法制备微胶囊,确定最优工艺为芯壁比 1:7,搅拌时间 2 h,搅拌温度 45 ℃,乳化剂用量 0.3 g/g 鱼油,此条件下包埋率为 90.75%。张忠等^[42]将藻油 DHA 作为芯材,利用制备的多孔淀粉包埋,优化结构后制备 DHA 微胶囊包埋率达到 92.08%。

1.3.2 锐孔-凝固浴法 锐孔凝固浴法是利用微孔装置将鱼油和壁材混合加入凝固浴中凝聚固化。优点:方法简单、成本低。缺点:产品颗粒大。方承志等^[43]采用锐孔法包埋鱼油,制得微胶囊颗粒包埋率为 87.5%,氧化稳定性良好。黄美鹅等^[44]采用锐孔法制备鳕鱼微胶囊,通过正交试验确定最佳工艺条件:海藻酸钠浓度 1.5 g/100 mL,乳化剂 0.5 g,制得微胶囊包埋率最高达 97.27%。

1.3.3 冷冻干燥法 冷冻干燥法是乳状液通过升华从冻结中去除水分形成微胶囊的过程,配制的乳状液低温冻结后置于冷冻干燥装置中,通入氮气冷冻干燥^[36]。优点:工艺过程对芯材损害小、芯材不易氧化。缺点:对设备要求高、工艺复杂。刘维维等^[45]采用真空冷冻干燥制备微藻 DHA 粉末,外观呈乳白色,冻干后粒径为 211 nm,均匀细腻。

2 DHA 液态稳态化技术

将 DHA 制备成液态形式实现稳态化,推动 DHA 的应用范围,研制更新颖食品,丰富 DHA 食品的种类推动食品工业发展。

2.1 乳状液

乳状液是一种液体以液珠形式分散在另一种液体中,且两者不相溶,形成的具有一定稳定性的体系,一般由油相、水相和乳化剂构成^[46]。制备工艺见图 4。优点:乳状液可以将油包埋在水相当中,形成稳定均一的体系、对于开发液态产品应用方便。缺点:对稳态化壁材乳化性有一定的要求,长期放置会发生破裂、分层,易氧化,不便于储存。

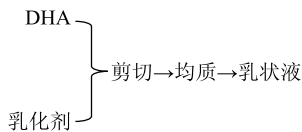


图 4 DHA 乳状液制备流程

Fig.4 Flow path of DHA emulsion processing

针对 DHA 液态形式的稳态化,目前国内已有的研究主要在乳化剂以及乳化工艺上。祝艳梅等^[47-48]采用高压均质技术制备 DHA 乳液,制备 O/W 型乳液,改善水溶性,拓宽应用范围,结果表明乳状液可以延缓氧化;分别添加 DHA 乳状液、DHA 油和 DHA 微胶囊于豆奶中,添加 DHA 乳状液的分散效果最

好。李凯等^[49]使用 DHA 和二十碳四烯酸为芯材,研究三种乳清蛋白壁材,制备得到粒径尺寸最小的乳状液。郑敏英等^[46]用食品级 Span 系列乳化剂和羧甲基纤维素钠制备鱼油乳状液,研究工艺参数对鱼油乳液稳定性的影响,确定了最佳工艺,制备得到的鱼油乳状液形态均一、呈现典型剪切变稀流变行为,同时鱼油具有一定的粘弹性。何镇宏等^[50]采用表面活性肽作为表面活性剂制备 DHA 乳状液,在浊度、粒径、Zeta-电位和流变学角度等优于 Tween 80/丙三醇等其他表面活性剂制备的乳状液。

与此同时,国内外研究集中于 DHA 乳状液物理化学稳定性,通过采取新的技术、乳化剂、多种乳化剂结合,提高了 DHA 乳液的理化稳定性。李昕等^[51]使用大豆多糖、乳铁蛋白,分别制备大豆多糖 DHA 乳状液、乳铁蛋白 β -胡萝卜素乳状液,两者异型聚集可以改善乳状液的热变性与凝固性等。吕平^[52]研究制备高稳定化的 DHA 藻油乳状液,优化得到制备条件,在此条件下乳状液保留率保持在 95.6% 以上。黄明丽^[53]使用酪蛋白酸钠和藻酸丙二醇酯为乳化剂,研究两者相互作用对鱼油乳液稳定性的影响,粒径等结果表明蛋白与多糖作用可以提高乳液稳定性,延缓氧化。桂任林等^[54]使用蔗糖酯为乳化剂对藻油 DHA 包埋,确定最佳乳化条件:乳化剂添加量高于 5%,pH>5,均质压力 35 MPa,均质 3 次。

近年来,纳米技术在提高生物活性化合物递送等方面表现巨大潜力,纳米乳液在液态 DHA 稳态化技术的研究不断增加^[55]。Zimet 等^[56]使用 β -乳球蛋白和低甲氧基果胶制备 DHA 纳米微胶囊,微胶囊平均粒径为 100 nm,可以有效抑制 DHA 氧化分解,具有良好的稳定性。Karthik 等^[57]采用吐温-40(T-40),酪蛋白酸钠(Na-ca)和大豆卵磷脂(SL)乳化剂制备 DHA 水包油纳米乳剂,在不同的储存条件下研究纳米乳液的物理化学稳定性,结果表明,T-40 制备得到的纳米乳液显示更低的平均直径(148 nm),更好地保留纳米乳液的结构特征,过氧化值更低,具有更高的化学稳定性。

2.2 纳米脂质载体

纳米脂质载体在功能成分的研究方面具有广泛的应用,制备工艺流程见图 5。脂质纳米载体分两类,第一代脂质纳米载体是室温下固态脂质,利用表面活性剂将成分包埋水相中。优点:更高的稳定性、包封率、载量。缺点:结晶高度有序最终降低活性成分包封率^[58]。第二代脂质纳米载体是由两种脂质或固/液多种脂质经过加热后结晶制备而来。优点:添加液态油可以增加生物活性物质的溶解,同时形成无序结晶提高包封率和载量,降低储存过程泄露^[59]。

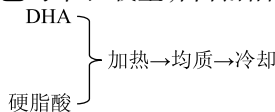


图 5 DHA 纳米脂质载体工艺流程

Fig.5 DHA nanostructured lipid carriers processing

目前纳米脂质载体在 DHA 稳态化中应用的研究集中于工艺条件及稳定性方面。徐弟等^[60]采用高

压均质法制备 DHA 纳米结构脂质载体,得到优化后的高压均质条件为均质压力 80 MPa,循环次数 5 次。DHA 纳米结构脂质载体在 1 个月内具有良好稳定性。胡本涛^[61]对藻油 DHA 进行包埋,研究得到 DHA 脂质纳米颗粒最佳制备工艺,并对理化性质进行分析,同时在婴儿液态配方仿制乳品添加 DHA 脂质纳米颗粒,发现具有良好的感官和稳定性。

3 展望

目前针对 DHA 功能性油脂的稳态化技术已有一定的研究水平,DHA 固态和液态形式稳态化产品在一定程度上均可实现 DHA 高包埋率和一定的稳定性,可以延长食品的保质期或货架期。不同的方法对 DHA 包埋壁材都有一定的要求,固态和液态稳态化方法都存在一定的局限性,喷雾干燥法、乳状液氧化稳定性差;凝聚技术、冷冻干燥法成本高;锐孔凝固浴法产品颗粒大等。近年来,DHA 稳态化的研究大多集中于对工艺、壁材、乳化剂和 DHA 稳定性。目前市场上有关 DHA 的产品也在不断丰富,如 DHA 配方奶粉、DHA 蛋白粉、DHA 乳品,但在稳态化产品应用研究中,针对 DHA 稳态化产品在具体食品中的应用研究还相对较少。

综上所述,未来的研究可以着眼于一下几个方面:其一、DHA 固态、液态壁材、乳化剂等选择可更加多样化,进行植物蛋白、多糖等的开发利用以及复合壁材的开发,植物蛋白、多糖等成本较低,具有一定的功能性,可以赋予 DHA 稳态化产品新的特性和功能性。其二、在传统常用稳态化方法的基础上,采取新的技术、手段或改良传统制备工艺,简化工艺流程,从而更好地提高 DHA 的稳定性。其三、DHA 稳态化产品的应用以及 DHA 功能性油脂稳态化产品消化吸收特性研究,开发新型的 DHA 产品,丰富食品种类,促进食品工业的发展。在今后,随着科学技术的发展,针对 DHA 功能性油脂的稳态化技术将会有更进一步的发展,从而使得 DHA 得到更广泛的利用。

参考文献

- [1] 杨彩霞,计成,戎易.鱼油及 n-3 不饱和脂肪酸营养功能的研究进展[J].中国农业大学学报,1997(1):65-70.
- [2] 曹万新,孟橘,田玉霞.DHA 的生理功能及应用研究进展[J].中国油脂,2011,36(3):1-4.
- [3] 杨贤庆,吕军伟,林婉玲,等.DHA 功能特性以及抗氧化性研究进展[J].食品工业科技,2014,35(2):390-394.
- [4] Dasilva G, Pazos M, García-Ejido E, et al. Lipidomics to analyze the influence of diets with different EPA:DHA ratios in the progression of metabolic syndrome using SHROB rats as a model[J]. Food Chemistry, 2016, 205:196-203.
- [5] Kitson A P, Metherell A H, Chen C T, et al. Effect of dietary docosahexaenoic acid (DHA) in phospholipids or triglycerides on brain DHA uptake and accretion [J]. Journal of Nutritional Biochemistry, 2016, 33:91-102.
- [6] Lauritzen L, Brambilla P, Mazzocchi A, et al. DHA effects in brain development and function[J]. Nutrients, 2016, 8(1):6-23.

- [7] Swanson D, Block R, Mousa S A. Omega-3 fatty acids EPA and DHA: Health benefits throughout life [J]. Advances in Nutrition, 2012, 3(1):1-7.
- [8] Mozaffarian D, Wu J H. (n-3) fatty acids and cardiovascular health: are effects of EPA and DHA shared or complementary [J]. Journal of Nutrition, 2012, 142(3):614S-625S.
- [9] Horrocks L A, Yeo Y K. Health benefits of docosahexaenoic acid (DHA) [J]. Pharmacological Research, 1999, 40(3):211-225.
- [10] 齐金峰.微胶囊化藻油 DHA 的稳态化研究[D].南昌:南昌大学,2008:2-6.
- [11] 吴昊.EPA/DHA 浓缩分离与稳态化技术的研究[D].大连:大连工业大学,2010:2-5.
- [12] 周东群,崔波,胡敏.鱼油的保健功能与开发前景[J].齐鲁工业大学学报:自然科学版,1998(3):56-60.
- [13] 李鹤,胡文忠,姜爱丽,等.不同来源 DHA 提取技术及其在食品工业中的应用进展[J].食品工业科技,2017,38(7):390-394.
- [14] 黄菊华,李蕴成.DHA 的功能及在食品添加中的应用研究[J].中国食物与营养,2014,20(4):76-79.
- [15] 周东群,崔波,胡敏.鱼油的保健功能与开发前景[J].齐鲁工业大学学报:自然科学版,1998(3):56-60.
- [16] 韩丹.微藻油微胶囊制备及贮藏稳定性研究[D].南昌:南昌大学,2010:7-10.
- [17] 田先卉. ω -3 多不饱和脂肪酸的稳态化研究[D].天津:天津科技大学,2015:7-12.
- [18] Champagne C P, Fustier P. Microencapsulation for the improved delivery of bioactive compounds into foods [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2007, 18(2):184-190.
- [19] 李红艳.多不饱和脂肪酸在婴儿配方奶粉中稳态化的研究[D].南昌:南昌大学,2009:1-10.
- [20] 白春清,韩丹,熊华,等.微藻油微胶囊配方优化及其稳定性研究[J].食品科学,2010,31(18):5-9.
- [21] 吕军伟,杨贤庆,林婉玲,等.藻油的微胶囊化[J].食品与发酵工业,2015,41(7):75-80.
- [22] 沈国辉,吴卫国.DHA 微胶囊的婴幼儿奶粉制备技术研究[J].农产品加工·综合刊,2011(2):75-77.
- [23] Semenova M. Advances in molecular design of biopolymer-based delivery micro/nanovehicles for essential fatty acids [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 68:114-121.
- [24] Vishnu K V, Chatterjee N S, Ajeeshkumar K K, et al. Microencapsulation of sardine oil: Application of vanillic acid grafted chitosan as a bio-functional wall material [J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 174:540-548.
- [25] 张义明.DHA 的来源及合理应用[J].食品工业科技,2003,24(8):98-100.
- [26] Jiménezmartín E, Antequera R T, Gharsallaoui A, et al. Fatty acid composition in double and multilayered microcapsules of ω -3 as affected by storage conditions and type of emulsions [J]. Food Chemistry, 2016, 194:476-486.
- [27] Chen W, Wang H, Zhang K, et al. Physicochemical properties and storage stability of microencapsulated DHA-Rich oil with different wall materials [J]. Appl Biochem Biotechnol, 2016, 179

- (7):1-14.
- [28] Augustin M A, Bhail S, Cheng L J, et al. Use of whole buttermilk for microencapsulation of omega-3 oils[J]. Journal of Functional Foods, 2015, 19(6):859-867.
- [29] 苏阳, 徐方旭, 冯叙桥. 鱼油微胶囊化研究进展[J]. 食品研究与开发, 2013(12):133-136.
- [30] 吴珺. 复合凝聚法可控制备生姜精油微/纳米胶囊[D]. 无锡: 江南大学, 2014:5-8.
- [31] 孙昱. 天然维生素 E 与 DHA 的微囊稳态化研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2011:6-7.
- [32] 刘盛楠. 鱼油的微胶囊化及氧化控制技术研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012:10-23.
- [33] 马铁铮, 赵宏亮, 王静. 复合凝聚法制备脂溶性食品配料微胶囊的壁材研究进展[J]. 食品工业科技, 2016, 37(13):365-369.
- [34] Yang X, Gao N, Hu L, et al. Development and evaluation of novel microcapsules containing poppy-seed oil using complex coacervation[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 161:87-93.
- [35] Jain A, Thakur D, Ghoshal G, et al. Microencapsulation by complex coacervation using whey protein isolates and gum acacia: An approach to preserve the functionality and controlled release of β -carotene[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(8):1635-1644.
- [36] 董志俭, 王庆军, 邵飞先, 等. 明胶/桃胶复合凝聚凝胶化鱼油微胶囊的氧化稳定性研究[J]. 中国食品学报, 2014, 14(7):66-72.
- [37] 胡莉. 壳聚糖/阿拉伯胶复凝聚制备鱼油微胶囊的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010:51-61.
- [38] Yuan Y, Kong Z Y, Sun Y E, et al. Complex coacervation of soy protein with chitosan: Constructing antioxidant microcapsule for algal oil delivery[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 75:171-179.
- [39] Habibi A, Keramat J, Hojjatoleslami M, et al. Preparation of fish oil microcapsules by complex coacervation of gelatin-gum arabic and their utilization for fortification of pomegranate juice[J]. Journal of Food Process Engineering, 2016, 40(2).
- [40] Xia Q, Wang B, Akanbi T O, et al. Microencapsulation of lipase produced omega-3 concentrates resulted in complex coacervates with unexpectedly high oxidative stability[J]. Journal of Functional Foods, 2017, 35:499-506.
- [41] 苏阳, 匡立学, 周金星, 等. 包络结合法制备 β -环糊精鱼油微胶囊[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(10):76-80.
- [42] 张忠, 胡居吾, 熊华, 等. 粳米多孔淀粉制备及微藻油 DHA 微胶囊化的研究[J]. 食品工业科技, 2012(1):211-213.
- [43] 方承志, 张曼琳, 方翊, 等. 鱼油微胶囊食品的开发与研究[J]. 轻工科技, 1998(4):27-30.
- [44] 黄美娥, 江能文, 唐小雨, 等. 鳕鱼油微胶囊化工艺条件研究[J]. 食品工业, 2016(7):82-84.
- [45] 刘维维, 吴鹏, 王昭凯, 等. 真空冷冻干燥微藻 DHA 油纳米乳工艺研究[J]. 海洋科学, 2017, 41(4):51-56.
- [46] 郑敏英, 刘峰, 王正武, 等. 鱼油乳液的制备及其流变特性研究[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2010, 28(3):280-285.
- [47] 祝艳梅, 张连富. DHA 油乳液制备研究[J]. 食品工业科技, 2010(3):314-316.
- [48] 祝艳梅. 水分散性 DHA 乳油制备及稳定性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009:5-10.
- [49] 李凯, 肖光辉, 钱镭. 影响乳清蛋白乳液稳定性的因素研究[J]. 食品工业, 2015(12):49-51.
- [50] 何镇宏, 赵海珍, 陆兆新. Surfactin 作为表面活性剂对 o/w 型藻油 DHA 乳液物理和氧化稳定性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(21):146-151.
- [51] 李昕, 王旭, 李玮克, 等. 热处理对乳铁蛋白- β -胡萝卜素/大豆多糖-DHA 乳液微流变特性的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(18):1-7.
- [52] 吕平. DHA 藻油乳液制备及稳定度研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(10):85-88.
- [53] 黄明丽. 酪蛋白酸钠与藻酸丙二醇酯相互作用及其对鱼油乳液稳定性的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [54] 桂仕林, 邢慧敏, 李琳, 等. 藻油乳化液的制备及稳定性研究[J]. 食品研究与开发, 2014(3):51-54.
- [55] Ezhilarasi P N, Karthik P, Chhanwal N, et al. Nanoencapsulation techniques for food bioactive components: A review[J]. Food & Bioprocess Technology, 2013, 6(3):628-647.
- [56] Zimet P, Livney Y D. Beta-lactoglobulin and its nanocomplexes with pectin as vehicles for ω -3 polyunsaturated fatty acids[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(4):1120-1126.
- [57] Karthik P, Anandharamakrishnan C. Enhancing omega-3 fatty acids nanoemulsion stability and *in-vitro* digestibility through emulsifiers[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 187:92-105.
- [58] 王佳丽. 纳米结构脂质载体的制备、表征及相关性质研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013:14-16.
- [59] Radtke M, Souto E B, Müller R H. Nanostructured lipid carriers: A novel generation of solid lipid drug carriers[J]. Pharmaceutical Technology Europe, 2005, 17(4):45-50.
- [60] 徐弟, 夏强, 徐峰, 等. DHA 纳米结构脂质载体的制备和表征[J]. 食品科技, 2009, 38(6):29-32.
- [61] 胡本涛. DHA 固体脂质纳米颗粒 (SLN) 制备、性质及应用[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013:42-44.

权威 · 核心 · 领先 · 实用 · 全面