

功能性油脂纳米乳研究及应用进展

史小峰^{1,2}, 王惠玲³, 曹莹¹

(1. 西安医学院 公共卫生学院, 西安 710021; 2. 陕西省公共安全医学防控研究中心, 西安 710021;

3. 西安医学院 药学院, 西安 710021)

摘要:功能性油脂纳米乳作为亲脂性物质载运体系被认为是有效且安全的,近年来国内外对功能性油脂纳米乳潜在价值的研究日渐深入,大量研究结果表明其应用前景广阔。为促进功能性油脂纳米乳的基础研究和产品开发,更好地拓展其应用领域,综述了功能性油脂纳米乳的构成、理化特性与制备方法,分析讨论其在脂溶性营养素包埋与传递、抗菌与抗氧化、营养药物递送载体等方面的探索性应用研究成果。建议重点探究、优化新型功能性油脂纳米乳的制备方法,赋予其更多的营养性、功能性,以满足食品工业对纳米乳体系优质原料的迫切需要。

关键词:功能性油脂;纳米乳;理化特性;制备;应用

中图分类号:TS222;TS221

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2023)08-0045-09

Progress in research and application of functional oils and fats nanoemulsion

SHI Xiaofeng^{1,2}, WANG Huiling³, CAO Ying¹

(1. College of Public Health, Xi'an Medical University, Xi'an 710021, China; 2. Research Center for Medical Prevention and Control of Public Safety of Shaanxi Province, Xi'an 710021, China; 3. College of Pharmacy, Xi'an Medical University, Xi'an 710021, China)

Abstract: As a lipophilic material transport system, functional oils and fats nanoemulsion is considered to be effective and safe. In recent years, the potential value of functional oils and fats nanoemulsion has been studied in depth at home and abroad, and the results of a large number of studies have shown its promising applications. In order to promote the basic research and product development of functional oils and fats nanoemulsion, expand the areas of its application, the composition, physicochemical properties and preparation methods of functional oils and fats nanoemulsion were reviewed, and the exploratory applications in fat-soluble nutrient embedding and delivery, antibacterial and antioxidant, nutrient drug delivery carrier and other aspects were discussed. It is suggested to focus on exploring and optimizing new preparation methods of functional oils and fats nanoemulsion, endowing it with more nutrition and functionality, so as to meet the urgent needs of the food industry for high-quality raw materials of nanoemulsion systems.

Key words: functional oils and fats; nanoemulsion; physicochemical property; preparation; application

功能性油脂富含特殊营养素或活性物质,具有调节机体功能、预防心血管疾病等作用,国内外一般将其作为保健因子添加到复配食品、功能食品中或制备功能性油脂类产品,主要用于婴幼儿、

孕妇、中老年等特殊人群消费。功能性油脂中的活性成分多不饱和脂肪酸等极易氧化酸败而丧失其特有功效,加之具有疏水特性和独特风味,以及受高温、氧气、光、湿度、pH和消化/代谢酶等因素影响,进而导致其与食品基质的相容性变差,生物利用度降低^[1]。

食品纳米乳作为一种“近热力学稳定”体系,已广泛应用于功能食品开发、活性成分稳定性与生物利用度提高、产品品质改良等方面,而针对功能性油

收稿日期:2022-05-26;修回日期:2023-04-09

作者简介:史小峰(1968),男,副教授,硕士,研究方向为食品营养与特医食品(E-mail) sxfxy990307@xjy.edu.cn。

通信作者:王惠玲,副教授(E-mail)279104478@qq.com。

脂,则主要集中在功能性油脂纳米乳的制备工艺、理化特性及脂溶性营养素包埋与传递等^[2]。研究表明,功能性油脂纳米乳能够防止功能性油脂营养成分被氧化,提高其水溶性、生物利用度、营养价值及稳定性,改善其外观、味觉和质地,一定程度上屏蔽了其本身存在的苦味、涩味等,更易被消费者所接受^[3-4]。

为促进功能性油脂纳米乳的基础研究和产业化开发利用,更好地拓展其应用领域,进而赋予功能性油脂更多的营养性、功能性,本文阐述了功能性油脂纳米乳的构成、理化特性、制备方法及应用研究现状。

1 功能性油脂纳米乳构成及理化特性

1.1 构成

功能性油脂纳米乳是由油相、水相混合形成的一种亲脂性活性物质载体体系,一般分为水包油(O/W)、油包水(W/O)、双连续(B. C)等类型^[5-6]。研究发现,油相碳链越短,纳米乳越稳定,而碳链较长则有助于增加药物的溶解^[7]。目前,用作功能性油脂纳米乳的油相主要包括沙棘果油^[3]、油茶籽油^[8]、玉米油^[9-10]、橄榄油^[11-12]、牡丹籽油^[13-14]、亚麻籽油^[15-17]、乳木果油^[18]、椰子油^[19-20]和杜仲籽油^[21]等。功能性油脂纳米乳的水相组成主要是乳化剂和助乳化剂,另外根据需要还可添加抗氧化剂、流变调节剂、防腐剂和金属离子螯合剂等。制备功能性油脂纳米乳的乳化剂首选安全无毒、消化利用率高且具有良好乳化活性的食品级乳化剂(如 β -乳球蛋白、乳清分离蛋白、酪蛋白酸钠等蛋白质,辛烯基琥珀酸变性淀粉,阿拉伯胶等多糖)^[21-22]。助乳化剂一般有短链醇、有机氨、单双氨基酸甘油酯等,短链醇使用较多的为乙醇、乙二醇、丙二醇和丙三醇等。

1.2 理化特性

1.2.1 粒径

乳滴粒径(Average drop size, ADS)会影响纳米乳的稳定性、外观及消化特性,小的乳滴粒径通常会改善稳定性。纳米乳油相、乳化剂的类型和含量及制备条件对纳米乳的形成及其粒径大小都有重要的影响。高巍等^[4]研究发现,茶叶籽油和分提椰子油纳米乳 ADS 的影响因素依次为乳化剂含量 > 超声时间 > 超声功率;胡伟等^[8]研究表明,油茶籽油纳米乳 ADS 的影响因素依次为油茶籽油体积分数 > 乳油比 > 超声功率;Li 等^[9]研究发现,蛋白质 α -螺旋和 β -转角含量与玉米油纳米乳 ADS (<245 nm)

极显著($p < 0.01$)或显著($p < 0.05$)相关;Ren 等^[11]研究显示,随着乳化剂 Tween-80 用量的增加,橄榄油纳米乳 ADS 先急剧下降,然后稳定在 39.22 nm。陈良红^[18]认为,影响乳木果油纳米乳 ADS 的因素依次为油浓度 > NaCl 浓度 > 乳化剂浓度,保温剂 1,3-丁二醇和 1,2-丙二醇等多元醇影响显著,油脂种类没有显著规律性影响。赵钰航等^[19]采用超声乳化法制备的椰子油纳米乳 ADS 随着椰子油添加量的增加而增大,各因素对 ADS 影响大小依次为超声功率 > 超声时间 > 油乳比 > (油 + 乳化剂)与水比例;Zhao 等^[23]研究表明,芝麻油和亚麻籽油纳米乳粒径较小,而核桃油纳米乳粒径较大。

1.2.2 多分散指数

多分散指数(Polydispersity index, PDI)表示纳米乳的粒径分布情况,是鉴定和评价纳米乳的重要指标及参数。由于奥斯特瓦尔德成熟程度较低,较低 PDI 的纳米乳可形成更稳定的胶体^[12]。PDI 在 0.2~0.5 说明纳米乳分布较为集中,分散效果较好,稳定性较高。影响 PDI 的因素有乳油比、油相浓度、盐离子浓度等。胡伟等^[8]研究表明,影响油茶籽油纳米乳 PDI 的因素依次为乳油比 > 油茶籽油体积分数 > 超声功率;陈良红^[18]制备乳木果油纳米乳时发现,NaCl 浓度对 PDI 影响较为显著,油和乳化剂浓度影响较小,在乳木果油含量 14%、乳化剂含量 5% 条件下,当 NaCl 含量由 0 增至 0.5%,乳木果油纳米乳 PDI 由 0.268 降至 0.177;赵钰航等^[19]在制备椰子油纳米乳时发现,影响椰子油纳米乳 PDI 的因素依次为超声功率 > 超声时间 > (油 + 乳化剂)与水比例 > 油乳比。

1.2.3 ζ -电位

ζ -电位用来表征纳米乳的表面电荷性质, ζ -电位的绝对值越大,说明其相互之间静电斥力越大,乳液体系越稳定。一般认为 ζ -电位绝对值小于 30 mV 时,乳液稳定性较弱,而 ζ -电位绝对值大于 30 mV 时,乳液稳定性较强。 ζ -电位与纳米乳制备过程中乳化剂、机械能强度等多种因素有关。Li 等^[9]研究证实,蛋白质的随机螺旋与玉米油纳米乳 ζ -电位显著相关($p < 0.05$);王爽爽^[21]研究认为,对杜仲籽油纳米乳 ζ -电位影响较大的是高压微射流作用产生的高剪切力,影响较小的是乳液组成及性质,各因素的影响大小依次为均质压力 > 杜仲籽油体积分数 > 表面活性剂浓度;张建润等^[24]选用乳清分离蛋白为壁材制备南极磷虾油纳米乳,其 ζ -电位为 (-4.25 ± 1.91) mV,相互排斥作用较弱,稳定性差,易聚集和沉淀,而选用酪蛋白酸钠、硬脂酸、玉米

醇溶蛋白为壁材制备的南极磷虾油纳米乳其 ζ -电位分别为 (-22.65 ± 3.32) mV、 (-61.95 ± 0.49) mV、 (-32.3 ± 3.39) mV,稳定性较好,不会产生聚沉现象;李杨等^[25]研究发现,所有条件下制备的紫苏油纳米乳 ζ -电位绝对值均小于25 mV,其中随大

豆分离蛋白质量分数和高压均质压力的增加 ζ -电位绝对值逐渐升高,尤其是大豆分离蛋白质量分数4%、均质压力140 MPa条件下 ζ -电位绝对值最高,稳定性较高。表1为部分功能性油脂纳米乳构成与理化指标。

表1 部分功能性油脂纳米乳构成与理化指标

纳米乳	油相	水相		ADS/nm	PDI	ζ -电位/mV
		乳化剂	助乳化剂			
沙棘果油纳米乳 ^[3]	沙棘果油	酪蛋白酸钠		156.3 ~ 173.4	<0.3	-50.51 ~ -57.95
油茶籽油纳米乳 ^[8]	油茶籽油	Tween-80		74.90 ± 0.85	0.17 ± 0.01	
牡丹籽油纳米乳 ^[14]	牡丹籽油	PEG-40 氢化蓖麻油	PEG400	88.44 ± 1.74	0.54 ± 0.08	-18.6 ± 2.8
乳木果油纳米乳 ^[18]	乳木果油	Tween-80、 Span-80	NaCl	168.7	0.170	
杜仲籽油纳米乳 ^[21]	杜仲籽油	Tween-80	无水乙醇	187.63		19.07
紫苏籽油纳米乳 ^[25]	紫苏籽油	大豆分离蛋白	磷脂酰胆碱	241.03	0.13	<25
辣木籽油纳米乳 ^[26]	辣木籽油、肉 豆蔻酸异丙酯	Tween-80	无水乙醇	12.76 ± 0.25	0.096	
薏苡仁油纳米乳 ^[27]	薏苡仁油	乳清蛋白、 香菇多糖		285.6	0.264	-32.4
亚麻籽油纳米乳 ^[28]	亚麻籽油	Tween-80、 Span-80	乙醇	60		
亚麻籽油纳米乳 ^[29]	亚麻籽油	Tween-80、 Span-20、乙醇		156 ~ 225	≤0.487	-24 ~ -41
美藤果油纳米乳 ^[30]	美藤果油	卵磷脂、蒸馏单硬 脂酸甘油酯、硬脂 酰乳酸钠		169.33 ± 7.60	0.115 ± 0.002	-56.80 ± 0.56
山茶油纳米乳 ^[31]	山茶油	大豆分离蛋白、 茶皂素		198.80 ± 1.56	0.14 ± 0.02	-53.60 ± 0.50
茶树籽油纳米乳 ^[32]	茶树籽油	Tween-80、 CMC		161.80 ± 3.97	0.21 ± 0.01	-12.33 ± 0.72
茶树籽油纳米乳 ^[33]	茶树籽油	Tween-20、 大豆磷脂	蒸馏水	36	<0.3	-20(不包埋) 1.5(包埋)
漆籽油纳米乳 ^[34]	漆籽油	酪蛋白酸钠		163.0	0.225	-41.01
小麦胚芽油纳米乳 ^[35]	小麦胚芽油	Tween-20、 麦芽糊精		114.70 ± 1.05	0.144 ± 0.006	-14.76 ± 0.49
八月瓜籽油纳米乳 ^[36]	八月瓜籽油	Tween-80	丙二醇	146.43 ± 0.47	0.16 ± 0.01	-25.67 ± 0.21
深海鱼油纳米乳 ^[37]	深海鱼油	Span-80、 Tween-80	无水乙醇	7 ~ 25	0.15 ~ 0.25	
鱼油纳米乳 ^[38]	鱼油	大豆蛋白	磷脂酰胆碱	245.0 ± 3.1	0.226 ± 0.019	-30.2 ± 0.6
鱼油纳米乳 ^[39]	鱼油	大豆分离蛋白	磷脂酰胆碱	287.82 ± 0.14		-33.4 ± 0.0
海藻油纳米乳 ^[40]	海藻油	酪蛋白酸钠	乙酸乙酯	76.8 ± 0.5	0.22 ± 0.01	-44.9 ± 0.4
藻油纳米乳 ^[41]	藻油	Tween-80		127.3 ± 1.7	0.24 ± 0.01	-23.3 ± 1.5
DHA藻油纳米乳 ^[42]	DHA藻油	乳清分离蛋白、 阿拉伯胶		354	0.222	-25
蛇油纳米乳 ^[43]	蛇油、肉豆 蔻酸异丙酯	Tween-80、 Span-80	PEG400	63.01	0.226	-19

由表1可看出,不同功能性油脂纳米乳ADS、PDI和 ζ -电位差异较大,这可能与制备过程中油

相、水相构成及制备条件有关。因此,需要选用合适油相、筛选和优化构成水相的乳化剂与助乳化剂类型及配比,同时辅以适宜的制备条件,从而获得 ADS、PDI、 ζ -电位等理化特性优良的功能性油脂纳米乳。

1.2.4 稳定性

稳定性是评价纳米乳的重要指标。Kampa 等^[12]研究发现,纳米乳的理化稳定性与功能性油脂中脂肪酸组成、抗氧化剂、游离脂肪酸和油滴大小等因素存在显著正相关($p < 0.05$),除此之外,环境因素也影响功能性油脂纳米乳的稳定性。陈程等^[14]研究认为,高温和低温储存均对牡丹籽油纳米乳稳定性影响较大,需 25 °C 常温储存;江连洲等^[38]对采用高压均质法制备的鱼油纳米乳稳定性进行研究,发现鱼油纳米乳在 4、25 °C 储存 30 d 稳定性良好,对一定浓度 Na^+ 表现出较好的抗性,碱性条件稳定性好,酸性条件稳定性差;孙勤等^[40]利用微射流高压均质结合溶剂蒸发法制备酪蛋白酸钠稳定的海藻油纳米乳(ADS 小于 100 nm),其对于离子强度、pH、

加热处理等环境因素物理稳定性较好。Cheong 等^[44]研究发现,红麻籽油纳米乳最适储存温度为 4 °C,在此温度下储存 8 周其生物活性物质稳定性和抗氧化活性保持最佳, V_E 、植物甾醇保留率分别为 90%、65%。Sahafi 等^[45]以冷榨石榴籽油为原料制备的纳米乳与冷榨葡萄籽油和橄榄油为原料制备的纳米乳相比,黏度和不饱和脂肪酸比例较高,液滴较大,乳液稳定性较低。

2 功能性油脂纳米乳的制备方法

2.1 高能乳化法

高能乳化法是利用机械外力将普通乳液的大液滴拉伸破碎分散为无数个小液滴而产生巨大的界面面积,而且机械外力所提供的能量用以克服内外相液体之间的界面能,有效降低内相液滴尺寸,获得 ADS 在纳米级别的纳米乳,此法为制备纳米乳最常用方法。高能乳化法包括高压均质乳化法、超声乳化法、微射流乳化法等,这几种方法的作用原理、特点及应用情况见表 2。

表 2 3 种高能乳化法的作用原理、特点及适用范围

制备方法	作用原理及特点	应用情况
高压均质乳化法	依靠空穴效应使蛋白质结构发生变化,使 ADS 降低形成纳米乳,提高乳液稳定性;均质压力越高、机械作用力越强,纳米乳 ADS 越小;均质压力过高、乳液液滴过小,会破坏油水之间界面膜而导致乳液 ADS 增大,引起乳液发生不稳定聚集;均质压力对乳液 ζ -电位影响不大 ^[40]	沙棘果油 ^[3] 、乳木果油 ^[18] 、紫苏籽油 ^[25] 、美藤果油 ^[30] 、山茶油 ^[31] 、八月瓜籽油 ^[36] 、深海鱼油 ^[37] 、鱼油 ^[38-39] 等纳米乳
超声乳化法	基于超声空化效应理论建立起来的一种较为实用、易行、高效的高能乳化法,表现为空化效应及一系列的热学、化学和机械的超声效应,通过优化超声频率、时间等工艺参数能够起到较好的乳化效果,可获得较为理想的粒径及其分布和乳滴分散度,减少能量的热损耗及乳化剂用量,兼顾油相含量、制备效率和产品质量,动力学稳定性较好,具有清洁高效、操控灵活等优势 ^[8,46]	油茶籽油 ^[8] 、茶树籽油 ^[33] 、葵花籽油 ^[46] 、蟹油 ^[47] 、海藻油 ^[48] 等纳米乳
微射流乳化法	采用微流化装置通过高压容量泵(>138 MPa)将进入反应室的粗乳液分为多股细流形成高速流体,然后以层流状态进入反应室冲击区,形成更加强烈的垂直对撞,将大部分能量释放出来,同时物料之间产生剪切和相互撞击作用,促使物料内部液滴高度破碎以实现物料的均质乳化;随着操作压力增高、循环次数增多,制备的纳米乳 ADS 越小、分布越均匀;在特定情况下产生不利作用(例如压力较高,乳化时间较长),可导致乳液液滴再聚结,另外存在生产成本偏高,设备构造要求精度高、操作条件严格等不足 ^[49]	杜仲籽油 ^[21] 、鱼油 ^[39] 、海藻油 ^[40] 等纳米乳

2.2 低能乳化法

低能乳化法是指利用化学制剂的结构潜能形成纳米乳。低能乳化法是一种极具应用前景的纳米乳制备技术,无需特殊的均质设备,具有改善产品活性成分的稳定性及生物利用度、能耗较少、成本低、操作简单、反应条件温和等优点,更适用于含生物脂质类纳米乳的制备。低能乳化法包括自发乳化法和转相法 2 种,转相法又分为相转变温度法、相转变组分

法、乳液转变点法和 D 相乳化法等。低能乳化法在功能性油脂纳米乳制备中有一定应用,如 Yukuyama 等^[50]采用 D 相乳化法得到 ADS 为 275 nm 的橄榄油纳米乳。

3 功能性油脂纳米乳应用研究现状

功能性油脂纳米乳能构建光学透明体系,提高疏水性化合物溶解性,增加包封活性营养物质的生物利用度和改善其稳定性,尤其在脂溶性营养素包

埋与传递、作为抗菌剂与抗氧化剂及营养药物递送载体等方面备受关注,获得较多探索性应用研究成果。

3.1 营养素包埋与传递

脂溶性生物活性物质(多不饱和脂肪酸、脂溶性维生素、植物甾醇、姜黄素、类胡萝卜素和类黄酮等)添加入食品前,必须克服水溶性差、结晶、化学不稳定性、半衰期短和生物利用度低等问题^[52-53]。功能性油脂纳米乳作为递送系统可实现生物活性物质的包埋和缓释,改善生物活性物质的稳定性、溶解性、不良风味、生物利用度等。

江连洲等^[38]研究认为,深海鱼油纳米乳可以提高深海鱼油水溶性,改善其腥味,防止鱼油中 EPA 和 DHA 被过早氧化。Cheong 等^[44]分析发现,红麻籽油纳米乳的总 α -生育酚生物利用度分别比红麻籽油和常规方法制备的红麻籽油乳剂提高了 1.7 和 1.4 倍。Sugasini 等^[53]利用富含 α -亚麻酸的姜黄素亚麻籽油纳米乳增加血清、肝脏、心脏和脑脂质中 DHA 浓度以满足素食人群特殊需求。Lane 等^[54]研究证实, ω -3 藻油纳米乳(ADS 为 258 nm)可改善草莓酸奶 DHA 吸收速率、吸收量和生物利用度。Chen 等^[55]研究表明,海藻油纳米乳具有较低鱼腥味和较好的氧化稳定性,可用于功能性食品和饮料、调味品等液体食品体系。Hu 等^[56]发现粒径为 (293.87 ± 6.55) nm 的紫苏籽油纳米乳具有较强的储藏稳定性、生物利用度,能够促进紫苏籽油在人体内消化吸收,可应用于功能性食品中。孙勤等^[40]认为海藻油纳米乳在饮料生产和疏水性生物活性物质的包封等方面潜在应用价值很高。王枫雅等^[47]制备的蟹油纳米乳(ADS 为 68.32 nm)的脂肪酸释放量及 β -胡萝卜素生物利用度均高于粗乳液,可作为食品添加剂应用于透明食品中。Sotomayor - Gerding 等^[57]研究发现,亚麻籽油纳米乳的物理和氧化稳定性增强后可以提高类胡萝卜素的生物可及性。Silva 等^[58]以橄榄油、亚麻籽油和鱼油为油相制备的含没食子酸和槲皮素的 O/W 型纳米乳可用作各种食品配方中的潜在脂肪替代品。李朝阳等^[59]以中链甘油三酯为油相利用高压均质法制备的槲皮素负载型纳米乳,表现出较高的稳定性和更慢的槲皮素降解速率,通过模拟胃肠道模型测得槲皮素的生物保留率得到极大改善。Zhao 等^[23]研究发现,芝麻油制备的番茄红素纳米乳具有更高的稳定性和较慢的番茄红素降解速率,番茄红素在芝麻油纳米乳中的生物利用度约为 25%,在核桃油纳

乳中的生物利用度为 18%。Ozturk 等^[60]选用玉米油或鱼油等长链甘油三酯制备的纳米乳能够显著增加维生素的生物可及性。张建润等^[24]研究认为,随着磷虾油纳米乳液滴粒径减小而暴露于胰脂肪酶的磷虾油表面积增加,其消化速率和程度逐渐增加,同时虾青素的生物可及性显著增加。Zhou 等^[61]提出棕榈油纳米乳是提高 β -胡萝卜素等脂溶性活性物质生物可及性和稳定性的最佳体系。Karthik 等^[62]研究表明,DHA 纳米乳可增加 DHA 释放量。Liu 等^[63]研究发现,中链甘油三酯纳米乳可提高脂质消化率和紫檀芪生物可及性。

3.2 作为抗菌剂与抗氧化剂

功能性油脂纳米乳可以通过抑制微生物生长来提高食品的质量,延长食品保质期,同时积极影响食品的物理化学和/或感官特性。许多肌肉食品由于含有高水平的多不饱和脂质容易发生脂质氧化并迅速变质,会导致肌肉食品的颜色和味道发生不良变化,以及有毒反应产物的潜在积累,从而降低其质量和保质期^[64]。Fallah 等^[5]以红花籽油、橄榄油、菜籽油和葵花籽油为原料制备的纳米乳处理肌肉食品,考察纳米乳对肌肉食品微生物和化学质量的影响,结果表明,制备的纳米乳能有效地控制微生物生长和减缓肌肉食品储藏期间的化学变化,储藏期间肌肉食品总嗜温菌、总嗜冷菌、乳酸菌和肠杆菌的生长速率分别降低 26.2%、19.0%、44.7% 和 31.8%。韩保庆^[16]、Han^[17]等研究证实,紫苏籽油纳米乳对大肠杆菌、肠炎沙门氏菌和托拉斯假单胞菌均具有显著的抑制效果,亚麻籽油纳米乳对金黄色葡萄球菌有明显的抑制效果。研究表明,橄榄油纳米乳在储存期间可以掩盖虹鳟鱼强烈的鱼腥味,同时对鱼片味道、气味和质地等感官品质有积极影响^[64]。Najafi - Taher 等^[65]抗菌实验结果表明,茶树籽油纳米乳(ADS 为 17.7 nm)对革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌具有良好的清除能力,将胶体银纳米颗粒引入茶树籽油纳米乳中可对大肠杆菌(FIC 0.48)产生协同效应,而对金黄色葡萄球菌(FIC 0.75)仅观察到加性效应。王昭人等^[66]研究发现,O/W 型茶树籽油纳米乳具有广谱抗菌活性,对常见的革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌和真菌均具有较强的体外抑制作用。

蒋忠荣等^[3]研究发现,沙棘果油纳米乳在高质量浓度下对 HepG2 细胞具有一定的抑制作用和良好的抗氧化活性。Ceylan^[35]、El - Bana^[67]等研究证实,小麦胚芽油纳米乳具有的高抗氧化能力,可以通过降低 NO 和 MDA 水平来减少氧化作用,通过降低

NF- κ B、TGF-1 和 Hyp 水平来减少炎症分子,通过降低 Caspase-3 来减少细胞凋亡,延缓熟鲭鱼片的快速氧化。Das 等^[64]研究发现,亚麻籽油纳米乳可提高鸡肉的氧化稳定性。

3.3 营养药物递送载体

局部给药被认为是获得皮肤相关疾病局部疗效的最理想给药途径,脂肪酸被公认为通过皮肤传递的药物渗透促进剂。作为安全、透明且具有生物相容性的亲脂性化合物新型药物载体,功能性油脂纳米乳具有较小的液滴粒径,有可能提高亲脂性活性成分的载药能力,确保有较大的界面表面积以促进药物吸收,增强药物的肠道淋巴转运,有效避免肝脏的首过效应^[68-69]。

Pereira 等^[70]研究表明,添加磷脂的葵花籽油和玫瑰果油纳米乳可能通过稳定较小粒径的液滴和增强油向靶细胞的递送来影响伤口愈合过程,从而提高伤口愈合率。Afzal 等^[71]利用奇亚籽油纳米乳负载白藜芦醇,通过绕过角质层屏障将药物转运到靶点,渗透率为 $(98.21 \pm 4.32) \mu\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$,增加了局部生物利用度和促炎介质的平衡,Wistar 大鼠的关节炎症状显著逆转。

Tou 等^[72]使用天然食用油如亚麻籽油、月见草油和橄榄油制备辅酶 Q10 纳米乳化霜,考察奥米伽脂肪酸对辅酶 Q10 通过模型皮肤膜输送的影响,结果表明,含有奥米伽脂肪酸的功能性油脂纳米乳可作为药物载体,并可增强辅酶 Q10 在皮肤上的传递。Cheong 等^[73]研究发现,红麻籽油纳米乳能增强红麻籽油的生物利用度,对胃溃疡的保护作用与标准药物奥美拉唑相当,且胆固醇降低性能、体质量控制和肝脏脂肪降低的效率更高。作为一种潜在的用于皮肤相关疾病治疗的递送系统,沈琪等^[74]制得的沙棘籽油纳米乳 ADS 为 $(52.2 \pm 4.8) \text{nm}$,平均载药量为 $0.24 \text{mg}/\text{mL}$ 。季方圆等^[37]认为深海鱼油纳米乳可以提高鱼油中有效成分的价值,且可制备成载药体系。Walia 等^[75]采用超声波技术制备的鱼油纳米乳(ADS 为 $300 \sim 450 \text{nm}$,维生素 D 包封率 $95.7\% \sim 98.0\%$),可用作各种亲脂性化合物药物递送载体。Alhakamy 等^[76]选用南瓜籽油、Tween 80 和聚乙二醇 200 优化他达拉非-南瓜籽油自纳米乳给药系统,使睾酮诱导良性前列腺增生后的前列腺指数在正常范围内,将他达拉非输送至前列腺的能力提高了 2 倍以上,睾丸激素诱导良性前列腺增生的乳头状突起和增生减少。邓楚瑶等^[77]采用高能乳化法制备基于功能性油脂(紫苏籽油、火麻仁油和山茶油)的川陈皮素纳米乳,并进行体外模拟

消化实验,结果表明,富含单不饱和脂肪酸的山茶油纳米乳最能提高川陈皮素的消化特性和生物可及性。

4 结束语

目前国内外对功能性油脂纳米乳的研究处于基础阶段,相关研究较多集中于纳米乳构成、制备方法及储存条件对其理化特性的影响方面(主要为高能乳化法制备 O/W 型纳米乳),大多研究是以简单的模型溶液进行的,开展以动物实验或大规模人群干预的实验研究几乎未见报道,而 W/O 型纳米乳及低成本、低风险适用于产业化加工的低能乳化法制备尚在探索研究阶段,报道极少。

为了进一步挖掘功能性油脂纳米乳在保健食品和生物医药等领域的发展潜力,加快功能性油脂纳米乳的研究应用进程,建议以提高亲脂性营养剂的生物利用度及安全性为最终目的制备功能性油脂纳米乳,未来重点关注功能性油脂纳米乳与真实食品基质中存在的其他大分子(如蛋白质、碳水化合物、纤维等)之间可能的相互作用,不断探究及优化新型功能性油脂纳米乳的制备方法,特别考虑负载广泛的生物活性物质或食品成分等,有效改善其物理稳定性、化学稳定性和生物利用度,使其具有普遍性、通用性和多用性,同时确定合适的操作方式及生产规模,以利于食品工业批量生产。

参考文献:

- [1] MCCLEMENTS D J, ÖZTÜRK B. Utilization of nanotechnology to improve the handling, storage and biocompatibility of bioactive lipids in food applications [J/OL]. *Foods*, 2021, 10 (2): 3652 [2022-05-26]. <https://doi.org/10.3390/foods10020365>.
- [2] MCCLEMENTS D J. Advances in edible nanoemulsions: digestion, bioavailability, and potential toxicity [J/OL]. *Prog Lipid Res*, 2020, 81: 1010812 [2022-05-26]. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2020.101081>.
- [3] 蒋忠荣,张涛,王涛,等. 沙棘果油纳米乳液的性质与抗氧化活性研究[J]. *中国油脂*, 2019, 44(12): 59-64.
- [4] 高巍,白新鹏,刘亚文,等. 特种油脂纳米乳液超声制备工艺优化及其特性研究[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(16): 131-139.
- [5] FALLAH A A, SANNAST E, JAFARI T, et al. Vegetable oil-based nanoemulsions for the preservation of muscle foods: a systematic review and meta-analysis [J/OL]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2022: 1-14 [2022-05-26]. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2057415>.
- [6] LIU Q, HUANG H, CHEN H, et al. Food-grade nanoemulsions: preparation, stability and application in

- encapsulation of bioactive compounds[J/OL]. *Molecules*, 2019, 24(23):4242 [2022-05-26]. <https://doi.org/10.3390/molecules24234242>.
- [7] 胡宏伟,李剑勇,吴培星,等. 纳米乳在药剂学中的研究进展及其应用[J]. *湖北农业科学*, 2009, 48(3): 747-750.
- [8] 胡伟,李湘洲,穆园园. 响应面法优化超声乳化制备油茶籽油纳米乳液及其稳定性研究[J]. *中国油脂*, 2017, 42(9):14-19.
- [9] LI Y, JIN H, SUN X, et al. Physicochemical properties and storage stability of food protein-stabilized nanoemulsions[J/OL]. *Nanomaterials (Basel)*, 2018, 9(1):25 [2022-05-26]. <https://doi.org/10.3390/nano9010025>.
- [10] 北京林业大学. 一种含红曲黄色素的功能性玉米油纳米乳液的制备方法:CN202111503084.7[P]. 2022-03-04.
- [11] REN J N, MAN D, HOU Y Y, et al. Effect of olive oil on the preparation of nanoemulsions and its effect on aroma release[J]. *J Food Sci Technol*, 2018, 55(10): 4223-4231.
- [12] KAMPA J, FRAZIER R, RODRIGUEZ - GARCIA J. Physical and chemical characterisation of conventional and nano/emulsions: influence of vegetable oils from different origins[J/OL]. *Foods*, 2022, 11(5):681 [2023-04-07]. <https://doi.org/10.3390/foods11050681>.
- [13] 郝慧敏,靳学远,刘艳芳. 超高压均质制备牡丹籽油纳米乳液及稳定性研究[J]. *粮食与油脂*, 2021, 34(9): 78-81.
- [14] 陈程,杜远东,廉婷,等. 基于白芨多糖的牡丹籽油纳米乳凝胶的制备与质量评价[J]. *中国油脂*, 2020, 45(12):84-87,125.
- [15] 郭鑫,卢宇宁,张涛,等. 生育酚对亚麻籽油纳米乳液稳定性的影响[J]. *中国油脂*, 2020, 45(11):141-144.
- [16] 韩保庆. 紫苏油、亚麻籽油及熊果酸复合纳米乳体系的构建及性能研究[D]. 长春:吉林大学,2020.
- [17] HAN B, YU B, LIU L, et al. Experimental investigation of the strong stability, antibacterial and anti-inflammatory effect and high bioabsorbability of a perilla oil or linseed oil nanoemulsion system [J]. *RSC Adv*, 2019, 9(44): 25739-25749.
- [18] 陈良红. 含乳木果油纳米乳液的制备技术及其应用研究[D]. 上海:上海应用技术学院,2015.
- [19] 赵钰航,肖英琛,冯棋琴,等. 椰子油纳米乳液制备工艺研究[J/OL]. *中国油脂*: 1-9 [2023-04-07]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.220620>.
- [20] 黄欢,田燕,刘一哲,等. 椰子油纳米乳液制备工艺优化及其稳定性分析[J/OL]. *食品工业科技*: 1-27 [2023-04-07]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022100110>.
- [21] 王爽爽. 高压微射流制备杜仲籽油纳米乳液的研究及应用[D]. 郑州:郑州轻工业大学,2020.
- [22] MOHAMMED N K, MUHIALDIN B J, MEOR HUSSIN A S. Characterization of nanoemulsion of *Nigella sativa* oil and its application in ice cream[J]. *Food Sci Nutr*, 2020, 8(6):2608-2618.
- [23] ZHAO C C, WEI L P, YIN B B, et al. Encapsulation of lycopene within oil-in-water nanoemulsions using lactoferrin: impact of carrier oils on physicochemical stability and bioaccessibility[J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 153:912-920.
- [24] 张建润,张晶,宋亮,等. 不同壁材对乳化溶剂蒸发法制备南极磷虾油纳米乳的影响[J]. *大连工业大学学报*, 2018, 37(3):157-162.
- [25] 李杨,胡森,谢凤英,等. 超高压均质对紫苏油纳米乳液稳定性的影响[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(8): 381-387.
- [26] 李威,缪菊连. 辣木籽油纳米乳的制备及其质量评价[J]. *广东化工*, 2022, 49(11):24-30.
- [27] 朱碧泉. 薏苡仁油纳米乳的制备及其在饮料中的应用[D]. 南昌:南昌大学,2022.
- [28] ALMASI K, ESNAASHARI S S, KHOSRAVANI M, et al. Yogurt fortified with omega-3 using nanoemulsion containing flaxseed oil: investigation of physicochemical properties [J]. *Food Sci Nutr*, 2021, 9(11): 6186-6193.
- [29] MAZONDE P, KHAMANGA S M M, WALKER R B. Design, optimization, manufacture and characterization of efavirenz-loaded flaxseed oil nanoemulsions [J/OL]. *Pharmaceutics*, 2020, 12(9):797 [2022-05-26]. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics12090797>.
- [30] 黄剑钊,黎攀,许锦伟,等. 美藤果油纳米乳液的制备及稳定性研究[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(11): 216-222.
- [31] 孙亚欣,郑晓燕,郑丽丽,等. 大豆分离蛋白-茶皂素复合乳化剂制备山茶油纳米乳液及其性质研究[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(22):27-34,42.
- [32] WEI S, ZHAO X, YU J, et al. Characterization of tea tree oil nanoemulsion and its acute and subchronic toxicity[J/OL]. *Regul Toxicol Pharm*, 2021, 124:104999 [2022-05-26]. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2021.104999>.
- [33] 吴秋林,国婷,李井雷. 茶树油纳米乳液抑菌活性以及促进皮肤创伤愈合作用研究[J]. *食品与营养科学*, 2020, 9(1):114-120.
- [34] 周昊,薛兴颖,陈虹霞,等. 漆籽油纳米乳液的制备及其抗氧化、防紫外辐射活性研究[J]. *林产化学与工业*, 2021, 41(1):45-52.
- [35] CEYLAN Z, MERAL R, KOSE YE, et al. Wheat germ

- oil nanoemulsion for oil stability of the cooked fish fillets stored at 4 °C [J]. *J Food Sci Technol*, 2020, 57(5):1798 – 1806.
- [36] 朱仁威, 武奕彤, 胡深德, 等. 八月瓜籽油纳米乳液制备及其稳定性评价[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(4): 137 – 144.
- [37] 季方圆, 何艳琳, 隋管, 等. 深海鱼油纳米乳制备方法研究[J]. *中国油脂*, 2018, 43(3): 75 – 78.
- [38] 江连洲, 綦玉曼, 马春芳, 等. 鱼油纳米乳运载体系构建与稳定性研究[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(10): 387 – 395.
- [39] 周麟依, 任双鹤, 郭亚男, 等. 均质工艺对制备鱼油微胶囊结构和理化性质的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(5): 99 – 105.
- [40] 孙勤, 王丽娟. 酪蛋白酸钠稳定的海藻油纳米乳液制备及表征[J]. *现代食品科技*, 2016, 32(6): 183 – 187.
- [41] 谭莹. 含血红素蛋白触发藻油乳液失稳和脂质过氧化的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2022.
- [42] 张程超, 蔡伊娜, 彭池方, 等. DHA 藻油纳米乳液制备及稳定性的研究[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(3): 88 – 94.
- [43] 李藤藤, 徐东升, 吴迪, 等. 蛇油纳米乳的制备及稳定性评价[J]. *中国油脂*, 2021, 46(11): 21 – 25, 49.
- [44] CHEONG A M, TAN C P, NYAM K L. Stability of bioactive compounds and antioxidant activities of kenaf seed oil – in – water nanoemulsions under different storage temperatures [J]. *J Food Sci*, 2018, 83(10): 2457 – 2465.
- [45] SAHAFI S M, GOLI S A H, KADIVAR M, et al. Preparation and characterization of bioactive oils nanoemulsions: effect of oil unsaturation degree, emulsifier type and concentration [J]. *J Disper Sci Technol*, 2018, 39(5): 676 – 686.
- [46] 王文苹, 李治芳, 徐晖, 等. 响应面法优化超声制备葵花籽油纳米乳的工艺研究[J]. *食品科技*, 2010, 35(11): 186 – 189.
- [47] 王枫雅, 林琳, 陆剑锋, 等. 蟹油纳米乳液制备工艺及特性研究[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(4): 174 – 181.
- [48] SARAVANA P S, SHANMUGAPRIYA K, GERENIU C R N, et al. Ultrasound – mediated fucoxanthin rich oil nanoemulsions stabilized by κ – carrageenan: process optimization, bio – accessibility and cytotoxicity [J]. *Ultrason Sonochem*, 2019, 55: 105 – 116.
- [49] 许晶, 李洋洋, 金花, 等. 纳米乳在食品工业中应用[J]. *东北农业大学学报*, 2017, 48(5): 89 – 96.
- [50] YUKUYAMA M N, KATO E, ARAOJO G D, et al. Olive oil nanoemulsion preparation using high – pressure homogenization and D – phase emulsification: a design space approach[J]. *J Drug Deliv Sci Tech*, 2019, 49: 622 – 631.
- [51] LI G, ZHANG Z, LIU H, et al. Nanoemulsion – based delivery approaches for nutraceuticals: fabrication, application, characterization, biological fate, potential toxicity and future trends[J]. *Food Funct*, 2021, 12(5): 1933 – 1953.
- [52] ZHANG R, ZHANG Z, MCCLEMENTS D J. Nanoemulsions: an emerging platform for increasing the efficacy of nutraceuticals in foods [J/OL]. *Colloid Surf B*, 2020, 194: 111202 [2022 – 05 – 26]. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2020.111202>.
- [53] SUGASINI D, LOKESH B R. Curcumin and linseed oil co – delivered in phospholipid nanoemulsions enhances the levels of docosahexaenoic acid in serum and tissue lipids of rats [J]. *Prostaglandins Leukot Essent Fatty Acids*, 2017, 119: 45 – 52.
- [54] LANE K E, LI W, SMITH C, et al. The bioavailability of an ω – 3 – rich algal oil is improved by nanoemulsion technology using yogurt as a food vehicle [J]. *Int J Food Sci Tech*, 2014, 49(5): 1264 – 1271.
- [55] CHEN X W, CHEN Y J, WANG J M, et al. Phytosterol structured algae oil nanoemulsions and powders: improving antioxidant and flavor properties [J]. *Food Funct*, 2016, 7: 3694 – 3702.
- [56] HU M, XIE F, ZHANG S, et al. Effect of nanoemulsion particle size on the bioavailability and bioactivity of perilla oil in rats [J]. *J Food Sci*, 2021, 86(1): 206 – 214.
- [57] SOTOMAYOR – GERDING D, OOMAH B D, ACEVEDO F, et al. High carotenoid bioaccessibility through linseed oil nanoemulsions with enhanced physical and oxidative stability [J]. *Food Chem*, 2016, 199: 463 – 470.
- [58] SILVA W, TORRES – GATICA M F, OYARZUN – AMPUERO F, et al. Double emulsions as potential fat replacers with gallic acid and quercetin nanoemulsions in the aqueous phases [J]. *Food Chem*, 2018, 253: 71 – 78.
- [59] 李朝阳, 窦中友, 张丽萍, 等. 载体油对槲皮素纳米乳液理化稳定性和生物利用度的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(12): 85 – 90.
- [60] OZTURK B, ARGIN S, OZILGEN M, et al. Nanoemulsion delivery systems for oil – soluble vitamins: influence of carrier oil type on lipid digestion and vitamin D₃ bioaccessibility [J]. *Food Chem*, 2015, 187(15): 499 – 506.
- [61] ZHOU X, WANG H, WANG C, et al. Stability and in vitro digestibility of β – carotene in nanoemulsions fabricated with different carrier oils [J]. *Food Sci Nutr*, 2018, 6(8): 2537 – 2544.
- [62] KARTHIK P, ANANDHARAMAKRISHNAN C. Enhancing ω – 3 fatty acids nanoemulsion stability and in – vitro digestibility through emulsifiers [J]. *J Food Eng*, 2016, 187: 92 – 105.
- [63] LIU Q, CHEN J, QIN Y, et al. Encapsulation of pterostilbene

- in nanoemulsions: influence of lipid composition on physical stability, in vitro digestion, bioaccessibility and Caco-2 cell monolayer permeability [J]. *Food Funct*, 2019, 10 (10): 6604-6614.
- [64] DAS A K, NANDA P K, BANDYOPADHYAY S, et al. Application of nanoemulsion - based approaches for improving the quality and safety of muscle foods: a comprehensive review[J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2020, 19(5): 2677-2700.
- [65] NAJAFI - TAHER R, GHAEMI B, KHARRAZI S, et al. Promising antibacterial effects of silver nanoparticle - loaded tea tree oil nanoemulsion: a synergistic combination against resistance threat [J]. *AAPS Pharm Sci Tech*, 2018, 19(3): 1133-1140.
- [66] 王昭人, 韩露露, 牛月月, 等. 水包油型茶树油纳米乳的制备及其体外抑菌活性研究[J]. *河南大学学报(医学版)*, 2022, 41(1): 22-28.
- [67] EL - BANA M A, ABDELALHEEM A H, EL - NAGGAR M E, et al. Formulation of wheat germ oil based on nanoemulsions to mitigate cisplatin's nephrotoxic effects [J/OL]. *Prostag Oth Lipid Med*, 2022, 158: 106603 [2023 - 03 - 26]. <https://doi.org/10.1016/j.prostaglandins.2021.106603>.
- [68] SINSUEBPOL C, CHANGSAN N. Effects of ultrasonic operating parameters and emulsifier system on sachinchi oil nanoemulsion characteristics[J]. *J Oleo Sci*, 2020, 69(5): 437-448.
- [69] KOMAIKO J S, MCCLEMENTS D J. Formation of food - grade nanoemulsions using low - energy preparation methods: a review of available methods[J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2016, 15(2): 331-352.
- [70] PEREIRA OLIVEIRA C N, NANI LEITE M, DE PAULA N A, et al. Nanoemulsions based on sunflower and rosehip oils: the impact of natural and synthetic stabilizers on skin penetration and an ex vivo wound healing model[J/OL]. *Pharmaceutics*, 2023, 15(3): 999 [2023 - 04 - 07]. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15030999>.
- [71] AFZAL O, ALTAMIMI A S A, ALAMRI M A, et al. Resveratrol - loaded chia seed oil - based nanogel as an anti - inflammatory in adjuvant - induced arthritis [J/OL]. *Gels*, 2023, 9(2): 131 [2023 - 04 - 07]. <https://doi.org/10.3390/gels9020131>.
- [72] TOU K A S, REHMAN K, ISHAK W M W, et al. Influence of *omega* fatty acids on skin permeation of a coenzyme Q10 nanoemulsion cream formulation: characterization, in silico and ex vivo determination[J]. *Drug Dev Ind Pharm*, 2019, 45(9): 1451-1458.
- [73] CHEONG A M, JESSICA K O H J X, PATRICK N O, et al. Hypocholesterolemic effects of kenaf seed oil, macroemulsion, and nanoemulsion in high - cholesterol diet induced rats [J]. *J Food Sci*, 2018, 83(3): 854-863.
- [74] SHEN Q, WANG M, TANG X H, et al. Preparation of a *Hippophae rhamnoides* Linn oil nanoemulsion and the visualization of its transdermal permeation [J]. *J Chin Pharm Sci*, 2019, 28(8): 579-594.
- [75] WALIA N, DASGUPTA N, RANJAN S, et al. Fish oil based vitamin D nanoencapsulation by ultrasonication and bioaccessibility analysis in simulated gastro - intestinal tract[J]. *Ultrason Sonochem*, 2017, 39: 623-635.
- [76] ALHAKAMY N A, FAHMY U A, AHMED O A A. Attenuation of benign prostatic hyperplasia by optimized yadalafil loaded pumpkin seed oil - based self nanoemulsion: in vitro and in vivo evaluation [J/OL]. *Pharmaceutics*, 2019, 11(12): 640 [2022 - 05 - 26]. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics11120640>.
- [77] 邓楚瑶, 冯炜婷, 陈亦璐, 等. 基于功能性油脂的川陈皮素纳米乳液制备及消化特性研究[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(18): 201-206.

· 公益广告 ·

适度加工，营养更丰富！

《中国油脂》宣

