

孙宏涛, 马燕, 郭洪涛, 等. 乳液体系包埋亚麻籽油研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(24): 444–451. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120221

SUN Hongtao, MA Yan, GUO Hongtao, et al. Research Progress on Embedding Flaxseed Oil in Emulsion System[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(24): 444–451. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120221

· 专题综述 ·

乳液体系包埋亚麻籽油研究进展

孙宏涛¹, 马燕¹, 郭洪涛², 宋莲军¹, 孙晓冬³, 乔明武¹, 黄现青^{1,*}

(1. 河南农业大学食品科学技术学院, 河南郑州 450002;

2. 河南森林假日食品科技发展有限公司, 河南漯河 462005;

3. 河南唐玺亲水胶体研究院, 河南郑州 451162)

摘要: 亚麻籽油富含多不饱和脂肪酸, 具有多种生物活性功能, 同时, 亚麻籽油亦存在氧化稳定性差、水溶性低、生物利用度低等缺陷, 严重限制了其在食品及其它领域的应用。利用乳液体系包埋亚麻籽油是解决这些缺陷的一种潜力方法。本文归纳总结了普通乳液、微乳液、纳米乳液、Pickering 乳液、多层乳液以及乳液凝胶等不同乳液体系的特点及其包埋亚麻籽油的研究现状, 分析了不同乳液体系提高亚麻籽油氧化稳定性和生物利用度的原因, 对乳液体系包埋后亚麻籽油的应用现状进行综述, 旨在为乳液体系的深入研究以及亚麻籽油的广泛应用提供一定理论参考。

关键词: 乳液体系, 亚麻籽油, 氧化稳定性

中图分类号: TS221

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)24-0444-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120221



本文网刊:

Research Progress on Embedding Flaxseed Oil in Emulsion System

SUN Hongtao¹, MA Yan¹, GUO Hongtao², SONG Lianjun¹, SUN Xiaodong³, QIAO Mingwu¹, HUANG Xianqing^{1,*}

(1. College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

2. Henan Forest Holiday Food Technology Development Co., Ltd., Luohe 462005, China;

3. Henan Tangxi Hydrocolloid Research Institute, Zhengzhou 451162, China)

Abstract: Flaxseed oil is rich in polyunsaturated fatty acids and has a variety of physiological functions, at the same time, flaxseed oil has poor oxidation stability, low water solubility and low bioavailability, which seriously limits its application in food and other fields. Embedding flaxseed oil in emulsion system is a potential approach to address these deficiencies. This paper summarizes the characteristics of different emulsion systems, such as ordinary emulsion, microemulsion, nanoemulsion, Pickering emulsion, multiple emulsion and gelled emulsion, as well as the research status of embedding flaxseed oil. Based on the reasons of oxidative stability and bioavailability, the application status of flaxseed oil after embedding in emulsion system is reviewed, aiming to provide some theoretical reference for the in-depth study of emulsion system and the wide application of flaxseed oil.

Key words: emulsion system; flaxseed oil; oxidation stability

亚麻, 从属亚麻科亚麻属, 在世界范围内广泛种植, 是一种常见的油料作物^[1], 亚麻籽油 (Flaxseed oil) 含量达 35%~45% (按总质量计)^[2]。亚麻籽油含有 73% 的多不饱和脂肪酸 (polyunsaturated fatty acids, PUFAs)^[3], 已被证明在促进大脑发育^[4]、降低

心血管疾病的发病率^[5]、控制炎症^[6]、抑制肿瘤癌变^[7]等方面发挥重要作用, 近年来, 随着亚麻籽油研究的不断深入, 其相应功能产品陆续开发出来, 如微胶囊化亚麻籽油产品、粉末油脂等。亚麻籽油在食品领域应用范围也逐渐扩大: 亚麻籽油具有良好的抗融

收稿日期: 2021-12-21

基金项目: 2022 年河南省研究生联合培养基地项目 (YJS2022JD16)。

作者简介: 孙宏涛 (1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 1179291488@qq.com。

* 通信作者: 黄现青 (1977-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品营养与安全, E-mail: hxq8210@126.com。

性,可用于冰激凌和雪糕生产;亚麻籽油可加工成人造奶油,广泛用于乳制品和糕点制品中。然而,亚麻籽油在实际应用中存在不少缺陷,如在水性食品体系中缺乏混溶性,富含多不饱和脂肪酸易于氧化以及生物利用率低等,导致其在食品及其他领域的应用深度和广度严重受限^[8-9]。因此需要采用一定技术解决此问题。乳液是一种常见的运载体系,在药物、食品等领域广泛应用^[10],也是近年来食品工业研究热点之一,研究证实不同乳液包埋技术均在一定程度上抑制了多不饱和脂肪酸的氧化^[11-12],利用乳液体系包埋亚麻籽油可有效解决其应用缺陷,是一种较有潜力的方法。

乳液体系常用来包埋对环境因素敏感的功能活性物质(如亚麻籽油,叶黄素,维生素 A)以提高稳定性、改善水溶性及生物利用率。已有文献对利用食品运载体系包埋叶黄素、 β -胡萝卜素、姜黄素研究现状进行综述,但对于利用乳液体系包埋高含量多不饱和脂肪酸的亚麻籽油相关研究尚不够深入。本文分析了限制亚麻籽油广泛应用的原因,对比介绍几种乳液体系的特性和优势,并针对不同乳液体系提高亚麻籽油氧化稳定性和生物利用度的研究现状进行论述,最后对制约不同乳液应用的因素进行展望,旨在为利用乳液体系解决亚麻籽油应用缺陷提供一定理论参考。

1 亚麻籽油成分及应用受限原因

亚麻籽油具体脂肪酸组成见表 1,其中 α -亚麻酸占比较高, α -亚麻酸可在体内代谢合成二十二碳六烯酸(DHA)和二十碳五烯酸(EPA)^[13],作为必需脂肪酸维持机体正常生理活动。 α -亚麻酸、DHA 和 EPA 统称为 ω -3(或 n-3)系列脂肪酸,中国居民膳食指南推荐 ω -6/ ω -3 摄入比例为 4~6:1,但传统饮食中其摄入比例在 15:1 左右, ω -3 系列脂肪酸的长期缺乏,将导致机体处于亚健康状态, α -亚麻酸是 ω -3 系列脂肪酸的主要来源,因此适量摄入亚麻籽油可以有效补充 ω -3 系列脂肪酸,从而预防多种疾病的发生。

表 1 亚麻籽油的主要脂肪酸成分^[14]
Table 1 Main fatty acid composition of flaxseed oil^[14]

中文名	脂肪酸	质量分数
棕榈酸	C _{16:0}	4~10
软脂酸	C _{16:1}	<0.5
硬脂酸	C _{18:0}	2~8
油酸	C _{18:1}	10~20
亚油酸	C _{18:2}	14~20
亚麻酸	C _{18:3}	45~65
二十碳饱和脂肪酸	C _{20:0}	<0.5
二十碳烯酸	C _{20:1}	<0.5

亚麻籽油高含量的多不饱和脂肪酸限制其在食品及其它行业广泛应用,多不饱和脂肪酸极易受到外界因素(光、热、氧气等)影响^[15],导致亚麻籽油在加工和贮藏等过程中发生光氧化、酶促氧化或自动氧

化^[16],其中自动氧化最为复杂,即使隔除光、热等因素影响也能发生氧化。Yadav 等^[17]在研究亚麻籽油氧化潜在机制时,发现主要脂肪酸、 α -亚麻酸和亚油酸都存在容易受到两边双键活化影响的隔离双键(-CH=CH-CH₂-CH=CH-),隔离双键受影响后非常活跃,引发亚麻籽油自动氧化,导致油脂营养价值损失,品质劣变。为解决亚麻籽油氧化问题,研究人员进行了大量研究工作。目前,控制亚麻籽油氧化策略主要分为两大类:添加抗氧化剂和利用包埋技术。添加抗氧化剂是食品工业中常用的抗氧化方式,其中抗氧化剂丁基化羟基甲苯(BHT)、丁基化羟基茴香醚(BHA)、叔丁基对苯二酚(TBHQ)等是常用的抑制氧化的物质^[18],然而,这些非天然抗氧化剂由于潜在毒性而逐渐不受消费者青睐,因此研究者转向新型加工方法—包埋技术。其中乳液体系包埋亚麻籽油抑制氧化效果较好。此外,亚麻籽油水溶性差、生物利用率低也是应用受限的原因,这些问题也可通过乳液包埋得到解决^[19]。乳液体系是油脂在食品中存在的一种重要形式,对于提高亚麻籽油氧化稳定性和更好地发挥亚麻籽油的功能性作用具有重要意义。

2 乳液体系

在食品、药品等领域,许多营养成分(维生素、矿物质、不饱和脂肪酸等)因存在稳定性差、生物利用度低等问题产生了应用瓶颈^[20]。乳液是将营养成分通过表面活性剂以高能量或低能量乳化法包埋于另一种与之不溶的物质内而形成的分散体系^[21],一般由分散相、连续相和表面活性剂(助表面活性剂)几部分按一定比例构成,乳液体系能够解决活性物质应用时存在的稳定性差、水溶性差、生物利用度低等问题^[22],由于乳液制备简单,乳液体系已在食品行业中广泛应用。乳液稳定性受较多因素影响,主要包括油脂性质、界面膜性质以及乳液类型^[23]。相关研究普遍认为乳液中油脂不饱和脂肪酸含量与氧化速率成正比,随着不饱和脂肪酸含量的增加,油脂氧化速率显著增大,乳液中不饱和脂肪酸的氧化稳定性也受到影响;乳液都有一个油-水界面层,厚度一般在 1~40 nm 左右,界面的厚度、电荷和组成被认为是影响不饱和脂肪酸氧化速率的最重要因素^[24];乳液体系根据不同类别分为普通乳液、微乳液、纳米乳液、Pickering 乳液、多层乳液和乳液凝胶(图 1),不同乳液优缺点对比见表 2。

3 不同乳液包埋亚麻籽油研究概况

3.1 普通乳液

普通乳液是将一种或多种物质通过表面活性剂以液滴的形式分散于另一种与之不溶的液体中而形成的分散体系^[27],通常是用一层表面活性剂稳定,粒径在 0.1~10 μ m 之间。表面活性剂吸附在油水界面,与本体油相比,由于某些表面活性剂形成的界面层的保护作用,普通乳液可以有效地抑制脂质氧化^[28]。蛋白质、多糖和磷脂等表面活性剂被广泛用于稳定乳

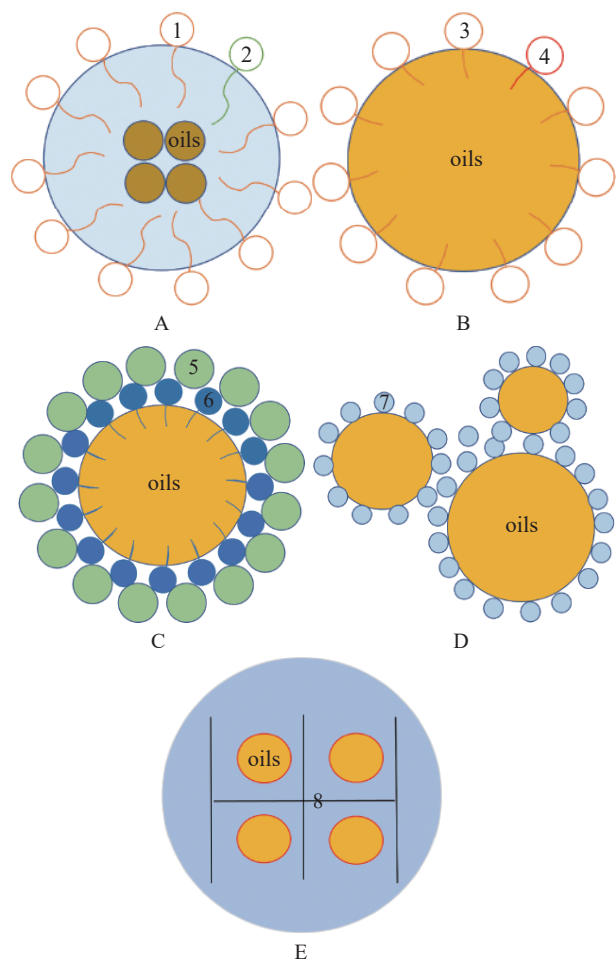


图1 油为分散相的不同类型乳液

Fig.1 Different types of emulsions with oil as the dispersed phase

注: A.微乳液; B.纳米乳液; C.多层乳液; D.Pickering 乳液; E.乳液凝胶; 1~6 为不同种类表面活性剂, 7 为固体颗粒, 8 为凝胶基质。

液, 对多不饱和脂肪酸氧化具有一定的控制作用^[29]。普通乳液包埋亚麻籽油不仅能提高亚麻籽油的溶解度和生物利用率, 更能在一定程度保护其免受外界不稳定因素影响而发生氧化。Lamothe 等^[30] 通过研究不同表面活性剂对亚麻籽油乳液氧化稳定性的影响, 发现蛋白质(酪蛋白酸钠、鱼明胶)乳化稳定的亚麻籽油乳液显示出更好的抗氧化性和油脂消化程度; Goyal 等^[28] 也证明了不同浓度的乳清浓缩蛋白-80(5% 除外)制备的亚麻籽油乳液与散装油对比具有更好的氧化稳定性。这些研究对于普通乳液包埋

亚麻籽油有一定指导意义。

普通乳液由于使用单层表面活性剂制备, 其稳定性很大程度上取决于表面活性剂。此外, 乳液是热不稳定性体系, 这就导致普通乳液在加工和储藏过程中易受环境影响, 出现絮凝^[31]、上浮^[32]、沉降^[33]、奥氏熟化^[34] 等现象, 从而影响乳液稳定性^[35], 因此普通乳液中多不饱和脂肪酸氧化现象依然存在^[35]。针对这一问题, 研究人员设计了多种不同结构和性质的乳液体系, 如微乳液、纳米乳液、Pickering 乳液、多层乳液、乳液凝胶等。

3.2 微乳液

微乳液是将分散相通过表面活性剂和助表面活性剂均匀分散于另一种与之不溶的液体内部而形成的稳定热力学体系^[36](图 1A)。与普通乳液相比, 微乳液由表面活性剂和助表面活性剂共同稳定, 在长期静置情况下, 不易发生相分离、絮凝或奥氏熟化现象, 具有更好的稳定性, 同时也具有提高食品组分消化率及抗氧化的作用, 因而在食品领域应用范围不断扩展。Szumala 等^[37] 通过以 PEG-40 氢化蓖麻油为表面活性剂, 甘油为助表面活性剂制备亚麻籽油微乳液, 研究不同储存条件下微乳液氧化稳定性, 结果表明微乳液中油的氧化稳定性均高于散装油; 此外 Sugasini 等^[38] 通过给大鼠服用微乳化形式的亚麻籽油, 研究微乳液形式在体内消化吸收以及转化的影响, 结果表明微乳化形式亚麻籽油比散装亚麻籽油具有更好的吸收转化水平。微乳液作为一种运载体系可同时包埋多种功能活性成分, 采用高压均质法将亚麻籽油和槲皮素同时包埋到微乳液中, 研究表明槲皮素能有效保护亚麻籽油, 显著增加了亚麻籽油的贮藏稳定性, 并且微乳作为亚麻籽油和槲皮素的载体可以使二者互补, 同时改善其水溶性和生物利用度^[39]。然而, 微乳液制备过程中由表面活性剂和助表面活性剂共同稳定且添加量较大, 这增加了微乳的潜在毒性; 此外, 微乳结构在加工和储藏过程中会受到其它成分的添加而导致微乳相变, 这些制约了微乳的应用^[36]。

3.3 纳米乳液

纳米乳液与微乳液在结构上相似^[8], 都是由表面活性剂和助表面活性剂的尾基形成包埋分散相的疏水内核(图 1B), 组分上也基本相同。不同的是纳米乳液的结构与性质很大程度上取决于制备的方法, 而

表2 不同乳液优缺点对比^[25-26]Table 2 Comparison of advantages and disadvantages of different emulsions^[25-26]

乳液类型	优点及缺点
普通乳液	制备简单, 热力学不稳定, 易出现分层、聚集、破乳等现象
微乳液	制备过程简单, 提高食品组分消化率、抑菌性、抗氧化活性, 热力学稳定体系; 易发生微乳相变
纳米乳液	粒径小, 对产品外观影响小, 储存过程中不易发生沉淀, 热力学不稳定, 对热敏感
多层乳液	包封率高, 可同时包封亲疏性不同的物质, 受吸附层数和吸附顺序影响较大
Pickering 乳液	具有低毒性、高抗聚结稳定性和高储存稳定性, 共存组分多反应复杂
乳液凝胶	可作为脂肪替代物, 结构稳定性高, 控制释放包埋物质, 受凝胶基质影响较大

微乳液取决于制备时所使用的温度及组分间的比例^[40]。相比于普通乳液和微乳液,纳米乳液在应用上具有更多的优点^[41],纳米乳液的粒径更小,通常在 1~100 nm 之间,较小的粒径可降低颗粒间聚集的趋势,减轻在静置过程中由于奥氏熟化和重力作用引起的絮凝、分层等现象;相比微乳液,制备纳米乳液使用表面活性剂的比例较低,因此使用纳米乳液包埋亚麻籽油有着广泛的应用。亚麻籽油纳米乳液的氧化稳定性与制备工艺、储存条件等多种因素相关,Szumala 等^[37]以突变相反转(CPI)方法制备亚麻籽油纳米乳液并对不同储存条件下纳米乳液的氧化稳定性进行研究,结果表明,与微乳液相比,室温条件下纳米乳液氧化稳定性更好,但随着温度升高其氧化稳定性降低,而 Han 等^[42]采用高压均质法制备的亚麻籽油纳米乳液在不同氯化钠浓度、贮藏温度下均具有良好的物理稳定性和氧化稳定性;亦有研究表明脂质伴随物,如生育酚对纳米乳液物理无影响,但显著提高了亚麻籽油纳米乳液贮藏期间的氧化稳定性^[43]。此外,Han 等^[42]在小鼠腹膜内注射亚麻籽油和亚麻籽油纳米乳液,后者吸收率显著增强,表明亚麻籽油纳米乳液也可提高亚麻籽油的生物利用率。

尽管纳米乳液包埋技术具有诸多优势,但热力学不稳定是目前纳米乳液应用受限原因之一,另外纳米乳液在食品基质中的相容性不够,也阻碍着其发展^[44],因此还需要深入研究纳米乳液,以扩大其在食品行业应用范围。

3.4 多层乳液

多层乳液是由两层及两层以上的表面活性剂通过静电相互作用稳定的乳液体系(图 1C)。利用层层自组装(layer-by-layer, LBL)方法将带相反电荷的聚电解质吸附到初级乳液表面上形成双层乳液^[45];类似地添加表面活性剂形成三层乳液或更多层乳液。与普通乳液相比,多层乳液稳定性更强,包封率更高,还可同时包封亲疏性不同的物质。Huang 等^[46]采用卵磷脂和壳聚糖膜通过层层自组装方法制备亚麻籽油多层乳液,结果表明壳聚糖吸附在初级乳液表面可以提高亚麻油的氧化稳定性;Kartal 等^[47]发现酪蛋白酸钠/果胶稳定的双层乳液中的亚麻油比酪蛋白酸钠稳定的单层乳液中的油更稳定,不易氧化。即多层结构对改善常规乳液的物理和氧化稳定性具有积极作用。此外,还有研究表明包埋亚麻籽油的多层乳液不影响消化率的同时具有一定的控释效果^[48]。多层乳液包埋的亚麻籽油比普通乳液有更多的优点,可归功于乳液具有厚的界面层,由于其“屏障”效应,可以保护亚麻籽油免受氧化。

多层乳液的层数以及表面活性剂吸附的顺序影响着包埋物的氧化稳定性。Gudipati 等^[49]发现与柠檬酸盐/壳聚糖稳定的双层乳液相比,用柠檬酸盐/壳聚糖/藻酸盐稳定的三层乳液在储存过程中加速了多不饱和脂肪酸的氧化速率;Fustier 等^[50]发现在储存

21 d 后,内层为乳清分离蛋白(WPI),外层为鱼明胶(FG)的乳液比吸附顺序相反的乳液具有更好的氧化稳定性。总体而言,多层乳液包埋亚麻籽油能提高油脂储藏稳定性,并起到缓释的作用,是保护其免受氧化的有效方法,但在设计多层乳液时,需要考虑表面活性剂吸附顺序、表面电荷和界面层数。

3.5 Pickering 乳液

Pickering 乳液是一类新型乳液(图 1D),与其它乳液不同,Pickering 乳液采用固体颗粒代替表面活性剂稳定制备。这些固体颗粒既不溶于水相也不溶于油相,而是在两相中部分润湿,与水相接触夹角被称为三相接触角(θ),是判断乳液特性的关键参数^[51]。Pickering 乳液是由固体颗粒不可逆地吸附在油水界面稳定形成的,与普通乳液相比,一方面固体颗粒的使用大大降低表面活性剂所带来的潜在毒性,另一方面由于固体颗粒形成界面层厚具有较好的稳定性,不易受外界因素(pH、离子强度、温度等)的影响,同时还可以包埋生物活性成分,并对其成分起到保护、递送、控制释放等作用^[52],因此成为近几年食品乳液领域研究的热点。Nasrabadi 等^[53]研究 Pickering 乳液在不同因素下氧化稳定性,表明乳液在储存 28 d 内还能保持稳定,并在不同酸碱度和盐浓度下表现出良好的稳定性。Tong 等^[54]以茶多酚衍生的纳米粒子为稳定剂,亚麻籽油为油相制备 Pickering 乳液,稳定性实验和抗氧化分析均表明,Pickering 乳液具有显著的稳定性。Pickering 乳液中,由颗粒形成的厚界面层起着物理屏障的作用,它减少了水相中的前氧化剂与液滴界面处的氢过氧化物之间的相互作用^[55],此外,颗粒的存在减少了水相和油相之间的接触,从而有效地减少发生氧化反应的表面^[56]。

与单一成分的颗粒相比,复合颗粒显示出更好的稳定 Pickering 乳液的能力。Nasrabadi 等^[57]采用以亚麻籽蛋白(FP)和亚麻籽粘液(FM)络合得到的自组装颗粒制成湿润角为 70°的水包油 Pickering 乳液,通过对比研究 Pickering 乳液和散装油、聚山梨酯 80 稳定的常规乳液氧化情况,Pickering 初级氧化产物和二次氧化产物含量均明显低于对照组,结果表明在 Pickering 乳液中亚麻籽油的氧化稳定性提高。相似地,Nasrabadi 等^[53]通过复合粒子制成的 Pickering 乳液成功地抑制了 4 和 50 °C 下亚麻籽油的氧化。这些研究为通过使用植物基生物聚合物粒子保护生物活性成分的稳定化提供了科学依据,同时也为生产天然的和无表面活性剂的乳液开辟了一条有前途的途径。

Pickering 乳液稳定性关键因素在于固体颗粒,目前常用固体颗粒有多糖、蛋白质和两者复合颗粒,这些固体颗粒与油脂及其它活性分子相互作用会影响 Pickering 乳液的稳定性。此外随着 Pickering 乳液发展目前的固体颗粒逐渐无法满足加工要求。因此,寻找或开发新型固体颗粒和探究 Pickering 乳液

共存组分相互作用机制,将是促进 Pickering 乳液发展的关键。

3.6 乳液凝胶

乳液凝胶是通过直接对普通乳液加热、酸、酶等处理或加入促进乳液中生物聚合物(如蛋白质和多糖)的交联制备而成^[58],在乳液凝胶中,油滴被固定在凝胶基质网络中(图 1E);由于其独特的结构特性,乳液凝胶有广阔的应用前景。研究发现,将多不饱和脂肪酸结合到乳液凝胶中是保护多不饱和脂肪酸免受氧化的有效方法^[59],Szumala 等^[37]研究发现与非凝胶亚麻籽油纳米乳液相比,以卡波姆聚合物为增稠剂的凝胶纳米乳液在 45 ℃ 储存 12 d 后,过氧化值显著降低了 27%。

与非凝胶乳液相比,乳液凝胶由于水相粘度的增加和抗氧化剂的增效,对多不饱和脂肪酸具有更好的保护作用,乳液凝胶中多不饱和脂肪酸的保护是由于水相粘度的增加延缓了氧化过程中活性物质的迁移和转移^[60]。Chen 等^[61]发现与酪蛋白酸盐稳定的纳米乳液相比,包裹在含有酪蛋白酸盐水凝胶珠中的亚麻籽油的过氧化值和硫代巴比妥酸反应物降低了 75% 以上。此外,已经证明乳液凝胶增强了抗氧化剂的效果^[62]。另一方面乳液凝胶近年来作为脂肪替代物被广泛研究,摄入饱和或反式脂肪酸过多将严重危害人体健康,现代慢性病也与不合理的脂肪酸摄入有关,乳液凝胶将高含量的多不饱和脂肪酸油脂包埋,不仅可以模仿动物脂肪硬度和口感,还可以改善脂肪酸组成,是脂肪代替物的良好选择。Poyato 等^[63]制备的亚麻籽油乳液凝胶是多不饱和脂肪酸合适的亲脂性递送系统,可作为香肠中的部分脂肪替代品,

与传统香肠对比,此种香肠多不饱和脂肪酸含量显著高于对照组,且感官差异较小。

乳液凝胶具有乳液和凝胶的双重特性,在食品领域有着广阔应用前景。然而,乳液凝胶稳定性和质构特性受凝胶基质、油相和界面物质组成等因素影响,如何有效调控乳液凝胶硬度和粘度以改善质构特性来提高稳定性、探究乳液凝胶在混合体系相互作用机制和作为脂肪替代物的感官评价等方面还需进一步研究。同时,乳液凝胶作为脂肪替代物以及包埋生物活性物质已初显优势,乳液凝胶存在广阔的应用前景。

综上,目前关于亚麻籽油乳液体系有普通乳液以及在此基础上设计改进的多种不同结构和性质的乳液体系,如微乳液、纳米乳液、Pickering 乳液、多层乳液、乳液凝胶等,其体系稳定性以及对亚麻籽油性质影响主要取决于乳液类型、表面活性剂和乳化方法。普通乳液常用的表面活性剂含有酪蛋白酸钠、鱼明胶、乳清浓缩蛋白等;微乳液、纳米乳液常用表面活性剂含有氢化蓖麻油、甘油、吐温 80 等;Pickering 乳液一般是由蛋白质、多糖的单一颗粒或两者复合颗粒制备;乳液凝胶则由酪蛋白酸盐水凝胶珠或卡拉胶作为表面活性剂,以上乳液除微乳液采用反相乳化法和相转变温度法、多层乳液选用静电层层组装技术制备,其余多采用高压均质法制备。不同乳液类型包埋亚麻籽油的表面活性剂种类、制备方法和对亚麻籽油应用的影响如表 3 所示。这些乳液体系均对亚麻籽油的稳定性、水溶性和生物利用率有不同程度的提升,但在实际应用中一方面需要根据不同情况选择合适的乳液体系,另一方面也需要对乳

表 3 不同类型亚麻籽油乳液对比

Table 3 Comparison of different types of flaxseed oil emulsions

乳液类型	表面活性剂	制备方法	研究结论/乳液特点	参考文献
普通乳液	酪蛋白酸钠、鱼明胶	高压均质法	蛋白质(酪蛋白酸钠、鱼明胶)乳化稳定的亚麻籽油乳液显示出更好的抗氧化性和油脂消化程度	[30]
	乳清浓缩蛋白-80	高压均质法	与散装油对比,使用乳清分离蛋白-80(5%除外)制备的亚麻籽油乳液表现出更好的氧化稳定性	[20]
微乳液	PEG-40氢化蓖麻油、甘油为助表面活性剂	反相乳化法	研究表明在所有测试条件下,乳液中油的氧化稳定性高于散装油	[37]
	吐温80	相转变温度	表现出更好的抗氧化水平	[38]
纳米乳液	PEG-40氢化蓖麻油、甘油为助表面活性剂	突变相反转	在室温条件下,微乳液和纳米乳液的氧化过程非常相似,纳米乳液氧化稳定性高于微乳液	[37]
	乳清分离蛋白(WPI)	高压均质法	生育酚会显著降低亚麻籽油纳米乳液中脂质氧化产物含量,进而提高乳液的氧化稳定性	[44]
多层乳液	酪蛋白酸钠作为初级乳液表面活性剂;果胶溶液制备次级乳液	静电层层组装技术	多层乳液对改善常规乳液的物理和氧化稳定性具有积极作用	[48]
	吐温20、卵磷脂	静电层层组装技术	有效提高亚麻籽油氧化稳定性,良好的稀释和储存稳定性	[47]
Pickering乳液	亚麻籽蛋白(FP)和亚麻籽粘液(FM)络合得到的自组装颗粒	高速剪切和高压均质	Pickering乳液可用作保护亚麻籽油免受氧化的一种方法,生物利用度增加	[58]
	FP+FM络合颗粒对比FP+吐温80	高速剪切和高压均质	复杂生物颗粒稳定的亚麻籽油乳液对各种环境胁迫条件(pH、盐和温度)的稳定性更高	[54]
乳液凝胶	酪蛋白酸盐水凝胶珠	高压均质法	亚麻籽油滴被包埋在乳液凝胶中时的氧化稳定性比散装和包埋在纳米乳液时好	[62]
	卡拉胶	高压均质法	亚麻籽油乳液凝胶可作为香肠的部分脂肪替代物且感官差异较小	[63]

液体系的稳定性和安全性等方面进行深入研究,并开发更多更好的包埋体系,为亚麻籽油在食品工业的广泛应用提供技术支撑。

4 结论与展望

近年来研究表明,摄入适量亚麻籽油不仅可以促进大脑发育,还可预防心脑血管疾病、抗肿瘤等,因此亚麻籽油相关研究成为热点,其在食品工业中也备受关注。然而由于亚麻籽油富含多不饱和脂肪酸易被氧化,且在水溶食品体系中缺乏混溶性和生物利用率低等,严重限制了其在食品加工中的应用。随着研究深入,各种乳液体系被用来改善亚麻籽油的稳定性、水溶性和生物利用率。在开发亚麻籽油乳液体系时,也存在着一些不足之处,如普通乳液对储存条件敏感性,微乳液的潜在毒性,纳米乳液的热力学不稳定性,多层乳液表面活性剂吸附顺序和界面层数的复杂性, Pickering 乳液的多组分混合体系相互影响性,乳液凝胶的基质影响等。还要注意的,乳液本身是个复杂的体系,各种乳液中油脂氧化更是一个相当复杂的过程,它取决于许多因素,包括表面活性剂、界面特性、油相特性、抗氧化剂等,如果处理不好,乳液包埋的亚麻籽油可能比散装油更易氧化,严重影响油脂营养和生物活性功能。因此,未来研究方向应聚焦在乳液体系的稳定性、安全性、多组分相互作用机制、消化吸收机制,以及开发更多由天然食品级聚合物组装而成的包埋体系,为乳液体系的开发制备提供一定的科学参考,也为亚麻籽油的增值利用提供理论支撑。

参考文献

- [1] 周政. 我国亚麻籽油产业发展现状及存在问题[J]. 中国油脂, 2020, 45(9): 134–136. [ZHOU Z. Development status and existing problems of flaxseed oil industry in China[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(9): 134–136.]
- [2] 刘婷婷, 石少侠, 段虎平, 等. 亚麻籽营养成分提取及其功能和应用研究进展[J]. 中国油脂, 2020, 45(3): 90–97. [LIU T T, SHI S X, DUAN H P, et al. Advances in nutrients extraction, functions and applications of flaxseed[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(3): 90–97.]
- [3] 祁惠芳, 程子良, 孔维宝, 等. 亚麻籽有效成分的提取及其综合利用研究进展[J]. 中国油脂, 2019, 44(11): 102–107. [QI H F, CHENG Z L, KONG W B, et al. Progress in extraction and comprehensive utilization of effective components in flaxseed[J]. China Oils and Fats, 2019, 44(11): 102–107.]
- [4] DERBYSHIRE E. Brain health across the lifespan: A systematic review on the role of omega-3 fatty acid supplements[J]. Nutrients, 2018, 10(8): 1094–1112.
- [5] ELAGIZI A, LAVIE C J, MARSHALL K, et al. Omega-3 polyunsaturated fatty acids and cardiovascular health: A comprehensive review[J]. Progress in Cardiovascular Diseases, 2018, 61(1): 76–85.
- [6] LAYÉ S, NADJAR A, JOFFRE C, et al. Anti-inflammatory effects of omega-3 fatty acids in the brain: Physiological mechanisms and relevance to pharmacology[J]. Pharmacological Reviews, 2018, 70(1): 12–38.
- [7] D'ELISEO D, VELOTTI F. Omega-3 fatty acids and cancer cell cytotoxicity: Implications for multi-targeted cancer therapy[J]. Journal of Clinical Medicine, 2016, 5(2): 15–29.
- [8] 于坤. 内源性脂质伴随物对亚麻籽油及其纳米乳液稳定性的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020. [YU K. Effect of lipid concomitants on the stability of flaxseed oil and oil-in-water nanoemulsions[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.]
- [9] 林传舟. 亚麻籽油多层乳液及其微胶囊的制备研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015. [LIN C Z. Study on the preparation of multi-layer emulsion and microcapsule of flaxseed oil[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.]
- [10] 黄娟. 复配 ω -3 多不饱和脂肪酸和天然多酚类活性物的微纳米载体的构建和评价[D]. 南京: 东南大学, 2019. [HUANG J. Construction and evaluation of micro- and nano- delivery systems containing ω -3 polyunsaturated fatty acids and natural polyphenols[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.]
- [11] BERTON-CARABIN C C, ROPERS M H, GENOT C. Lipid oxidation in oil-in-water emulsions: Involvement of the interfacial layer[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2014, 13(5): 945–977.
- [12] ZHU Z, ZHAO C, YI J, et al. Impact of interfacial composition on lipid and protein co-oxidation in oil-in-water emulsions containing mixed emulsifiers[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(17): 4458–4468.
- [13] LANE K E, LI W, SMITH C J, et al. The development of vegetarian omega-3 oil in water nanoemulsions suitable for integration into functional food products[J]. Journal of Functional Foods, 2016, 23: 306–314.
- [14] 万分龙. 亚麻籽油的研究现状及其展望[J]. 轻工科技, 2019, 35(8): 17–19. [WAN F L. Research status and prospect of flaxseed oil[J]. Light Industry Science and Technology, 2019, 35(8): 17–19.]
- [15] 于坤, 禹晓, 程晨, 等. 制油工艺对亚麻籽油品质及脂质伴随物含量的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 233–243. [YU K, YU X, CHEN C, et al. Effects of processing techniques on the quality properties and lipid concomitants of flaxseed oil[J]. Food Science, 2020, 41(16): 233–243.]
- [16] 曹文明, 薛斌, 袁超, 等. 油脂氧化酸败研究进展[J]. 粮食与油脂, 2013, 26(3): 1–5. [CAO W M, XUE B, YUAN C, et al. Research progress on oxidative rancidity of oils[J]. Cereals & Oils, 2013, 26(3): 1–5.]
- [17] YADAV R K, SINGH M, ROY S, et al. Modulation of oxidative stress response by flaxseed oil: Role of lipid peroxidation and underlying mechanisms[J]. Prostaglandins & Other Lipid Mediators, 2018, 135: 21–26.
- [18] TONG L M, SASAKI S, MCCLEMENTS D J, et al. Antioxidant activity of whey in a salmon oil emulsion[J]. Journal of Food Science, 2000, 65(8): 1325–1329.
- [19] HUANG J, WANG Y, BAI H, et al. Preparation and characterization of flaxseed oil and coenzyme Q10 co-loaded emulsions

- [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(6): 292–299.
- [20] 王健, 邓苏梦, 戴燕, 等. 不同包埋技术构建的食品级运载体系负载 β -胡萝卜素的研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(3): 380–385. [WANG J, DENG S M, DAI Y, et al. Research progress in the food-grade delivery systems in different encapsulating technology loading beta-carotene[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(3): 380–385.]
- [21] OEHLKE K, ADAMIUK M, BEHSNILIAN D, et al. Potential bioavailability enhancement of bioactive compounds using food-grade engineered nanomaterials: A review of the existing evidence[J]. Food & Function, 2014, 5(7): 1341–1359.
- [22] 李季楠, 吴艳, 胡浩, 等. 食品纳米乳液的研究进展[J]. 食品与机械, 2019, 35(2): 217–225. [LI J N, WU Y, HU H, et al. Research progress of food nanoemulsion[J]. Food & Machinery, 2019, 35(2): 217–225.]
- [23] 梁彬, 姬长建, 侯汉学, 等. 水包油乳液中油脂氧化稳定性的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(15): 4994–5000. [LIANG B, JI C J, HOU H X, et al. Research progress on oxidative stability of lipid in oil-in-water emulsion[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2019, 10(15): 4994–5000.]
- [24] JACOBSEN C. Enrichment of foods with omega-3 fatty acids: A multidisciplinary challenge[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2010, 1190(1): 141–150.
- [25] 任爽, 董文霞, 刘锦芳, 等. 食品运载体系包埋姜黄素的研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(9): 264–274. [REN S, DONG W X, LIU J F, et al. Research progress on food delivery systems for curcumin encapsulation[J]. Food Science, 2021, 42(9): 264–274.]
- [26] 郭静, 胡坦, 潘思轶. 食品运载体系包埋叶黄素的研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(1): 313–320. [GUO J, HU T, PAN S Y. Research progress on food delivery systems for lutein encapsulation[J]. Food Science, 2022, 43(1): 313–320.]
- [27] 黄娟, 王云娟, 白华, 等. 复配亚麻籽油和辅酶 Q10 乳液的制备及表征[J]. 农业工程学报, 2020, 36(6): 292–299. [HUANG J, WANG Y J, BAI H, et al. Preparation and characterization of flaxseed oil and coenzyme Q10 co-loaded emulsions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(6): 292–299.]
- [28] GOYAL A, SHARMA V, UPADHYAY N, et al. Development of stable flaxseed oil emulsions as a potential delivery system of ω -3 fatty acids[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(7): 4256–4265.
- [29] BUSH L, STEVENSON L, LANE K E. The oxidative stability of omega-3 oil-in-water nanoemulsion systems suitable for functional food enrichment: A systematic review of the literature[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(7): 1154–1168.
- [30] LAMOTHE S, JOLIBOIS É, BRITTEN M. Effect of emulsifiers on flaxseed oil emulsion structure, lipolysis and oxidation during *in vitro* digestion[J]. Food & Function, 2020, 11(11): 10126–10136.
- [31] GHOSH S, COUPLAND J N. Factors affecting the freeze-thaw stability of emulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2008, 22(1): 105–111.
- [32] ROBINS M M. Emulsions—creaming phenomena[J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2000, 5(5-6): 265–272.
- [33] TCHOLAKOVA S, DENKOV N D, IVANOV I B, et al. Coalescence stability of emulsions containing globular milk proteins[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2006, 123: 259–293.
- [34] KABALNOV A. Ostwald ripening and related phenomena[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2001, 22(1): 1–12.
- [35] JULIO L M, COPADO C N, DIEHL B W K, et al. Chia bilayer emulsions with modified sunflower lecithins and chitosan as delivery systems of omega-3 fatty acids[J]. Food Science and Technology, 2018, 89: 581–590.
- [36] 杨冠杰, 梁鹏. 微乳液在食品营养与安全领域的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(8): 210–217. [YANG G J, LIANG P. Research progress of microemulsions in the field of food nutrition and safety[J]. Food Research and Development, 2020, 41(8): 210–217.]
- [37] SZUMALA P, WYSOCKA I. Effect of gelation and storage conditions on the oxidative stability of microemulsion and nanoemulsion delivery systems[J]. European Journal of Pharmaceutical Sciences, 2018, 124: 17–25.
- [38] SUGASINI D, LOKESH B R. Rats given flaxseed oil in microemulsion forms enriches the brain synaptic membrane with docosahexaenoic acid and enhances the neurotransmitter levels in the brain[J]. Nutritional Neuroscience, 2015, 18(2): 87–96.
- [39] HUANG J, WANG Q, SUN R, et al. Antioxidant activity, *in vitro* digestibility and stability of flaxseed oil and quercetin co-loaded submicron emulsions[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2018, 120(3): 1700441.
- [40] 邓伶俐, 余立意, 买尔哈巴·塔西帕拉提, 等. 纳米乳液与微乳液的研究进展[J]. 中国食品学报, 2013, 13(8): 173–180. [DENG L L, YU L Y, MAIERHABA T, et al. The research progress on nanoemulsion and microemulsion[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013, 13(8): 173–180.]
- [41] MASON T G, WILKING J N, MELESON K, et al. Nanoemulsions: Formation, structure, and physical properties[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2006, 18(41): R635–R666.
- [42] 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 flaxseed oil nanoemulsion system[J]. RSC Advances, 2019, 9(44): 25739–25749.
- [43] 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. [GUO X, LU Y Y, ZHANG T, et al. Effect of tocopherol on stability of flaxseed oil nanoemulsions[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(11): 141–144.]
- [44] KUMAR D H L, SARKAR P. Encapsulation of bioactive compounds using nanoemulsions[J]. Environmental Chemistry Letters, 2018, 16(1): 59–70.
- [45] SIVAPRATHA S, SARKAR P. Multiple layers and conjugate materials for food emulsion stabilization[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(6): 877–892.

- [46] HUANG J, WANG Q, LI T, et al. Multilayer emulsions as a strategy for flaxseed oil and α -lipoic acid micro-encapsulation: Study on preparation and *in vitro* characterization[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(9): 3513–3523.
- [47] KARTAL C, UNAL M K, OTLES S. Flaxseed oil-in-water emulsions stabilized by multilayer membranes: Oxidative stability and the effects of pH[J]. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2016, 37(12): 1683–1691.
- [48] 李进伟, 林传舟, 刘元法. 制备亚麻籽油多层乳液及其稳定性研究[J]. *食品科学*, 2016, 37(11): 1–6. [LI J W, LIN C Z, LIU Y F. Preparation and stability of multilayer emulsions of flaxseed oil by electrostatic layer-by-layer deposition[J]. *Food Science*, 2016, 37(11): 1–6.]
- [49] GUDIPATI V, SANDRA S, MCCLEMENTS D J, et al. Oxidative stability and *in vitro* digestibility of fish oil-in-water emulsions containing multilayered membranes[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(13): 8093–8099.
- [50] FUSTIER P, ACHOURI A, TAHERIAN A R, et al. Protein–protein multilayer oil-in-water emulsions for the microencapsulation of flaxseed oil: Effect of whey and fish gelatin concentration[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2015, 63(42): 9239–9250.
- [51] 陈家雪, 孙哲浩. 食品级 Pickering 乳状液稳定剂研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(10): 210–217, 224. [CHEN J X, SUN Z H. Advances in food-grade Pickering emulsion stabilizers[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(10): 210–217, 224.]
- [52] TAVERNIER I, WIJAYA W, VAN DER MEEREN P, et al. Food-grade particles for emulsion stabilization[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 50: 159–174.
- [53] NASRABADI M N, GOLI S A H, DOOST A S, et al. Bioparticles of flaxseed protein and mucilage enhance the physical and oxidative stability of flaxseed oil emulsions as a potential natural alternative for synthetic surfactants[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2019, 184: 110489.
- [54] TONG Q, YI Z, RAN Y, et al. Green tea polyphenol-stabilized gel-like high internal phase Pickering emulsions[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, 9(11): 4076–4090.
- [55] PAN Y, TIKEKAR R V, WANG M S, et al. Effect of barrier properties of zein colloidal particles and oil-in-water emulsions on oxidative stability of encapsulated bioactive compounds[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 43: 82–90.
- [56] KARGAR M, SPYROPOULOS F, NORTON I T. The effect of interfacial microstructure on the lipid oxidation stability of oil-in-water emulsions[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2011, 357(2): 527–533.
- [57] NASRABADI M N, DOOST A S, GOLI S A H, et al. Effect of thymol and Pickering stabilization on *in-vitro* digestion fate and oxidation stability of plant-derived flaxseed oil emulsions[J]. *Food Chemistry*, 2020, 311: 125872.
- [58] FARJAMI T, MADADLOU A. Fabrication methods of biopolymeric microgels and microgel-based hydrogels[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 62: 262–272.
- [59] MATALANIS A, DECKER E A, MCCLEMENTS D J. Inhibition of lipid oxidation by encapsulation of emulsion droplets within hydrogel microspheres[J]. *Food Chemistry*, 2012, 132(2): 766–772.
- [60] SUN C, GUNASEKARAN S, RICHARDS M P. Effect of xanthan gum on physicochemical properties of whey protein isolate stabilized oil-in-water emulsions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2007, 21(4): 555–564.
- [61] CHEN F, LIANG L, ZHANG Z, et al. Inhibition of lipid oxidation in nanoemulsions and filled microgels fortified with omega-3 fatty acids using casein as a natural antioxidant[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 63: 240–248.
- [62] GALLAHER J J, HOLLENDER R, PETERSON D G, et al. Effect of composition and antioxidants on the oxidative stability of fluid milk supplemented with an algae oil emulsion[J]. *International Dairy Journal*, 2005, 15(4): 333–341.
- [63] POYATO C, ANSORENA D, BERASATEGI I, et al. Optimization of a gelled emulsion intended to supply ω -3 fatty acids in meat products by means of response surface methodology[J]. *Meat Science*, 2014, 98(4): 615–621.