

# 油脂体的组成、结构及氧化稳定性研究进展

王广婕, 赵焕宇, 苏成成, 韦旋, 吴梦果, 单迪, 黄萍, 马佳歌, 侯俊财\*, 姜瞻梅\*  
(东北农业大学食品学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

**摘要:** 油脂体 (oil body, OB) 是存在于植物种子中储藏脂质的亚细胞器, 由中性三酰基甘油 (triacylglycerol, TAG)、环绕在TAG外的单层极性磷脂和镶嵌在磷脂膜上的蛋白所组成, OB的组成成分及独特的结构使其具备一定的氧化稳定性。OB可通过水提取法和酶辅助法提取, OB乳液作为一种天然的预乳化水包油乳液, 已逐渐被应用于取代合成油滴, 在食品、医药及畜牧等领域具有广阔的应用价值。因此, 探究OB组成、结构及环境因素对于OB乳液氧化稳定性的影响具有一定的现实意义。本文综述了OB的组成、结构、提取工艺、OB乳液氧化稳定性及其在食品领域的应用前景, 可为OB的开发与利用提供参考。

**关键词:** 油脂体; 组成; 结构; 乳液; 氧化稳定性

## Research Progress on Composition, Structure and Oxidative Stability of Oil Bodies

WANG Guangjie, ZHAO Huanyu, SU Chengcheng, WEI Xuan, WU Mengguo, SHAN Di,  
HUANG Ping, MA Jiage, HOU Juncai\*, JIANG Zhanmei\*  
(College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** Oil bodies (OB) are subcellular organelles that store lipids in plant seeds, which are composed of neutral triacylglycerol (TAG), a monolayer of polar phospholipids surrounding TAG, and proteins embedded in the phospholipid membrane. The composition and unique structure of OB make it have good oxidation stability. OB can be extracted by water extraction and enzyme-assisted extraction. As a natural pre-emulsified oil-in-water emulsion, OB emulsions have been gradually used to replace synthetic oil droplets and are promising for broad applications in the fields of food, medicine and animal husbandry. Therefore, it is of practical significance to explore the effects of OB composition and structure as well as environmental factors on the oxidation stability of OB emulsions. In this paper, the composition, structure and extraction process of OB, the oxidation stability of OB emulsions and future prospects for its application in the food field are reviewed, which can provide a reference for the development and utilization of OB.

**Keywords:** oil bodies; composition; structure; emulsion; oxidative stability

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20221024-250

中图分类号: TS222+.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2023) 21-0293-10

引文格式:

王广婕, 赵焕宇, 苏成成, 等. 油脂体的组成、结构及氧化稳定性研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(21): 293-302.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20221024-250. <http://www.spkx.net.cn>

WANG Guangjie, ZHAO Huanyu, SU Chengcheng, et al. Research progress on composition, structure and oxidative stability of oil bodies[J]. Food Science, 2023, 44(21): 293-302. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20221024-250. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2022-10-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31871727)

第一作者简介: 王广婕 (1999—) (ORCID: 0000-0002-2756-2551), 女, 硕士研究生, 研究方向为生物与医药。

E-mail: wanguangj@163.com

\*通信作者简介: 侯俊财 (1975—) (ORCID: 0000-0003-2943-3398), 男, 教授, 博士, 研究方向为食品科学。

E-mail: jzhou@neau.edu.cn

姜瞻梅 (1976—) (ORCID: 0000-0002-7296-658X), 女, 教授, 博士, 研究方向为乳品化学。

E-mail: zhanmeijiang@neau.edu.cn

油脂体 (oil body, OB) 是由磷脂膜包裹液态三酰基甘油 (triacylglycerol, TAG) 而形成的球体, 磷脂膜是由单层磷脂分子及OB蛋白组成<sup>[1]</sup>。OB广泛存在于大豆和花生等油料作物中, OB的形成发生在内质网中, 是通过连续的蛋白质与磷脂将不断积累的TAG包裹的过程, TAG是种子萌发及早期生长中重要的能量与碳的来源<sup>[2]</sup>。种子萌发时, 液泡与OB交互, 液泡中的蛋白酶、磷脂酶、脂肪酶以及脂氧合酶 (lipoxygenase, LOX) 等酶与OB上各自的底物结合, 释放出TAG, 进行分解代谢促进生长。OB除了含有磷脂、蛋白质及脂质, 还含有生育酚、植物甾醇及碳水化合物等其他成分。为了获得更高的OB提取率、稳定性以及更完整的OB结构, 目前科研人员正在不断优化OB的提取方法。提取出的OB经过稀释可形成水包油乳液, 相对于由蛋白质和多糖等稳定的水包油乳液, OB作为天然的预乳化油, 不需再添加额外的乳化剂。OB乳液的氧化稳定性与其自身的蛋白质及生育酚有关。同时, OB的磷脂膜结构可以保持其完整性以及抗压性, 使OB间具有较高的静电斥力和空间位阻, 从而使OB具有较高的稳定性。然而在生产加工过程中, 由于液滴特性、电解质特性以及溶剂特性等, OB液滴会发生不同程度的聚集, 导致絮凝及凝结, 降低OB乳液的物理稳定性。此外, OB中的不饱和脂肪酸易发生氧化, 从而影响OB乳液的氧化稳定性<sup>[3]</sup>。OB中的脂肪酸绝大部分为油酸与亚油酸, 可以降低胆固醇以及预防动脉硬化, 在满足人们对天然营养食品需求的同时, 能够替代合成油滴应用于食品中, 如开发沙拉酱、蛋黄酱和冰淇淋等相关产品, 具有较大的发展潜力与较好的应用前景<sup>[4]</sup>。因此, 为了更好地将OB应用于食品、医药及畜牧等各个领域, 对OB乳液氧化稳定性机理的探究显得尤为重要。本文综述了OB的组成与结构、OB的提取工艺、OB乳液氧化稳定性的影响因素、提高乳液氧化稳定性的方法及其应用与发展前景, 以期对OB的进一步研究提供理论参考。

## 1 OB的组成与结构

### 1.1 OB的组成和结构

#### 1.1.1 OB的组成

OB由TAG、磷脂及蛋白质等成分组成。OB中的蛋白质可分为内源性蛋白与外源性蛋白, 由于提取OB时洗涤次数较少等原因, 导致OB表面结合着一些外源蛋白, 包括LOX与磷脂酶等。因此, 根据OB纯度的不同, 可将其分为两类: 含有外源蛋白的为粗油脂体, 不含有外源蛋白的为纯油脂体<sup>[5]</sup>。OB内部的TAG主要由不饱和的油酸及亚油酸等物质组成, 故容易被氧化生成脂质氢过氧

化物和二次氧化产物, 这一过程会降低食品的质量和风味, 缩短储藏期限。来自不同油料作物种子的OB在结构上高度相似, 但OB各成分的含量可能因其来源的不同而有所差异, 不同来源OB中的蛋白质、水分和脂肪相对含量如表1所示。

表1 OB中蛋白质、水分和脂肪的相对含量  
Table 1 Relative contents of protein, water and fat in OB

OB来源	蛋白质相对含量/%	水分相对含量/%	脂肪相对含量/%	参考文献
大豆	9.27±0.19	56.41±0.72	25.39±0.28	[6]
芝麻籽	7.30±0.40	17.50±0.80	74.20±1.10	[7]
榛子	4.60±0.30	22.60±0.60	72.30±1.00	[7]
黄豆	9.10±0.40	34.20±0.70	56.30±0.80	[7]
亚麻籽	1.80±0.11	44.40±0.34	52.28±0.42	[8]
油菜籽	3.46±0.09	32.30±0.23	61.65±0.41	[8]
山茶籽	1.04±0.14	11.50±0.47	82.55±4.12	[8]
花生	0.95±0.01	17.66±0.19	80.56±0.80	[9]
向日葵	2.00±0.06	26.59±0.20	70.77±0.05	[10]

#### 1.1.2 OB的结构

OB是储存脂肪的亚细胞颗粒, 是种子内部最小的细胞器之一, 可以通过透射电子显微镜观察到种子中OB的聚集状态及粒径大小<sup>[11]</sup>。激光扫描共聚焦显微镜可用于观察OB的显微结构, 扫描电子显微镜则用于观察OB界面蛋白的微观结构<sup>[12]</sup>。OB是由蛋白质-磷脂复合界面和其中包裹的TAG构成。TAG的80%区域被磷脂酰基覆盖, 20%区域被OB蛋白质覆盖, 油体蛋白的亲水端留在OB表面, 覆盖在单层磷脂的亲水区域, 疏水端则被锚定在OB的TAG核心中<sup>[13]</sup>。OB的结构模型如图1所示, OB一般为粒径0.2~2.5 μm的圆形球状体, 不同的OB来源、pH值、离子强度及油体蛋白等因素均会影响OB的粒径<sup>[14]</sup>。在OB界面结构中, OB间通过蛋白质-磷脂提供的低界面张力来维持OB乳液的稳定性<sup>[15]</sup>。油体蛋白通过提供空间位阻稳定OB, 被认为是天然的保护OB免受物理和化学作用破坏的有机物<sup>[16]</sup>。若OB蛋白发生降解, 则表现为OB的多分散性增强, 液滴界面弹性降低, 液滴之间的相互作用发生变化, 最终导致OB乳液不稳定。

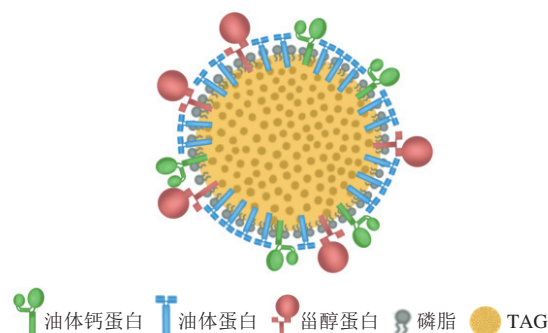


图1 OB的结构模型

Fig. 1 Structural model of OB

## 1.2 OB的组成成分

### 1.2.1 TAG及磷脂

TAG储存在OB内部,是由3个羟基和3个脂肪酸分子酯化生成的一种中性脂质。磷脂的一端为亲水的极性头,另一端为疏水的长烷基链,磷脂主要包括卵磷脂、磷脂酰乙醇胺及磷脂酰胆碱等成分<sup>[17]</sup>。不同OB来源以及不同pH值提取出的OB的中性脂质及磷脂相对含量不同,如表2所示。Sánchez-Albarrán等<sup>[18]</sup>发现不同种类牛油果OB的含油量与其粒径没有直接关系,美洲牛油果中果皮的含油量最低,并且其OB粒径最小;早生牛油果中果皮的含油量最高,但其OB粒径却比哈斯品种的OB粒径小。磷脂在稳定OB乳液稳定性方面的作用是不可或缺的,带负电的磷脂与OB蛋白的碱性氨基酸残基通过静电相互作用锚定,从而使OB乳液保持稳定<sup>[19]</sup>。Deleu等<sup>[20]</sup>通过重组油菜籽OB中的蛋白质与磷脂发现,只含有OB蛋白的OB乳液Zeta电势绝对值较低,乳液絮凝但不凝结,若再加入磷脂,Zeta电势绝对值增加,且不会发生絮凝,同时蛋白质-磷脂混合体系稳定乳状液的效率比单独添加蛋白质或磷脂时更高,界面更具有刚性和抗塌陷能力。

表2 OB中性脂质、蛋白质和磷脂的相对含量  
Table 2 Relative contents of neutral lipids, proteins and phospholipids in OB

OB来源	中性脂质 相对含量/%	蛋白质 相对含量/%	磷脂 相对含量/%	参考文献
pH 6.8-花生	95.74	2.45	0.82	[21]
pH 8.0-花生	96.79	1.91	0.36	[21]
pH 9.5-花生	97.84	1.32	0.19	[21]
pH 11.0-花生	97.94	1.15	0.16	[21]
pH 6.8-大豆	85.88	8.18	5.85	[22]
pH 8.0-大豆	90.45	6.10	3.30	[22]
pH 9.5-大豆	91.51	5.71	2.77	[22]
pH 11.0-大豆	91.89	5.42	2.70	[22]
pH 7.2-红花	92.60	7.30	—	[23]
pH 9.5-杏仁	10.20	4.30	—	[24]
pH 7.5-椰子	20.10	2.50	—	[25]

注:—没有检测到磷脂。

### 1.2.2 内源性蛋白

镶嵌在OB蛋白质-磷脂界面的低分子量碱性蛋白质有3种,分别为油体蛋白、油体钙蛋白以及甾醇蛋白。油体蛋白占OB中蛋白质总含量的80%~90%,是OB中最主要的蛋白质。油体蛋白的分子质量为15~26 kDa,含有3个结构域,分别为N端、C端和中间疏水区。两亲性的N端与C端共占油体蛋白的3/5,它们的末端结构域以伞状的结构位于OB的表面,促进了油体蛋白与磷脂极性头的结合,油体蛋白的结构与表面活性剂类似,为油体蛋白提供了显著的界面活性<sup>[26]</sup>。中心疏水结构域占油体蛋白的2/5,通过脯氨酸连接两条反向平行的 $\beta$ -折叠/ $\alpha$ -螺旋链

( $\beta$ -折叠/ $\alpha$ -螺旋根据测定蛋白质二级结构时所用的处理液决定),以发夹结构的形式插入到OB内部的TAG中。磷脂膜表面的油体蛋白与磷脂通过空间相互作用和静电排斥保持了OB间的稳定<sup>[27]</sup>。油体蛋白可以从OB中提取出来并在食品及化妆品中充当乳化剂。目前主要通过有机溶剂提取法提取油体蛋白,但此方法需要大量的有机溶剂,并且提取率较低。而通过聚合酶链式反应技术提取法和超声辅助提取法可以提高油体蛋白的提取率,并且不会对蛋白质的功能特性产生负面影响<sup>[28]</sup>。

油体钙蛋白不仅存在于种子的OB中,也存在于植物的叶绿体内质网和液泡中。油体钙蛋白的分子质量为25~35 kDa,含有两亲性的N端、C端和中间疏水区。油体钙蛋白类似于油体蛋白的发夹结构,C端有几个潜在的磷酸化结合位点,N端包含1个可以与钙结合的手型EF结构域,相对于油体蛋白具有更大的N端及更小的中间疏水区。甾醇蛋白的分子质量为39~55 kDa,仅含有N端与C端。N端为 $\alpha$ -螺旋结构,含有1个固醇脱氢酶结合域,C端含有还原型辅酶II结合域和甾醇结合域。甾醇蛋白A与甾醇蛋白B互为异构体,具有不同的甾醇结合位点。

### 1.2.3 外源性蛋白

OB中除了具有内源性蛋白,还有LOX、磷脂酶和蛋白酶等外源性蛋白。它们在种子研磨过程或脂肪动员过程中被释放出来,围绕在OB表面的最外层。在外源蛋白存在的条件下,OB粒径较大,等电点较低,Zeta电势的绝对值较低,增强了蛋白质-磷脂在防止黏连方面的协同作用,并且通过增加液滴之间的斥力和空间位阻,在OB液滴表面提供第二层保护,提高了OB乳液的物理稳定性<sup>[29]</sup>。但是外源性蛋白引起的桥连絮凝可能是造成OB聚集的一个重要因素,并且含有外源性蛋白的OB乳液氧化稳定性较差。若想提高OB乳液的氧化稳定性,可以通过调节pH值至碱性、离心及多次用9 mol/L尿素或蔗糖溶液洗涤等方法去除外源蛋白。

### 1.2.4 生育酚与植物甾醇

生育酚与植物甾醇存在于OB中,起到维持OB乳液氧化稳定性的作用。有研究表明,植物甾醇在长时间低温储存过程中抑制脂肪氧化的效果较好<sup>[30]</sup>。OB中的生育酚主要包括 $\alpha$ -、 $\beta$ -、 $\gamma$ -与 $\delta$ -生育酚,不同OB中的主要生育酚不同,其中 $\alpha$ -生育酚位于OB表面,对洗涤较为敏感,而 $\delta$ -生育酚在OB内部,在OB提取过程中不易被洗涤去除<sup>[31]</sup>。曾有研究通过调整提取花生OB时的pH值发现,随着pH值的升高,OB中 $\delta$ -生育酚的含量增加, $\alpha$ -生育酚与植物甾醇的含量降低<sup>[32]</sup>。

### 1.2.5 碳水化合物

有研究发现大豆OB中含有一定的碳水化合物,这些碳水化合物来源于糖蛋白、糖脂以及植物固醇,通过测定OB中的葡萄糖胺可以用来评价糖蛋白,半乳糖可以用

来评价糖脂,葡萄糖可以用来评价植物甾醇。但是在大豆OB中,存在的是半乳糖胺而非半乳糖,一般认为半乳糖胺是OB中主要的糖脂;同时,通过研究脱脂与非脱脂大豆OB中的碳水化合物含量,发现碳水化合物也是OB膜的一部分,随着提取OB时pH值的升高,碳水化合物的含量降低<sup>[22]</sup>。

### 1.2.6 其他成分

OB中还含有异黄酮及多酚等成分,其含量极少,可忽略不计。异黄酮类化合物与OB间呈被动关联,在OB洗涤与分离过程中,异黄酮类化合物损失较多,多酚类化合物则与OB间没有关联,所有的酚类化合物在OB洗涤与分离过程中都被洗脱。

## 2 OB的提取工艺及其影响因素

### 2.1 OB的提取方法

根据OB研究对象的不同,采用不同的提取方式获得粗油脂体或纯油脂体,粗油脂体可以通过反复洗涤离心等方式得到纯油脂体。OB的一般提取工艺流程如图2所示。水提取法是将种子浸泡在水介质中,通过机械处理等方式破坏细胞壁并释放出细胞内的物质,经过洗涤和离心后就可以收集到富含OB的乳剂<sup>[33]</sup>,其中的萃取介质通常选用去离子水或Tris-HCl缓冲液<sup>[34]</sup>。但是由于水提取法提取率较低,因此采用酶辅助提取法,以在更短的时间内获得更高的OB提取率以及更强的物理稳定性<sup>[35]</sup>。酶辅助提取法是通过单种酶及多种酶的混合物破坏植物细胞壁。Kapchie等<sup>[36]</sup>混合使用Multifect果胶酶FE、纤维素酶A和 $\beta$ -葡聚糖酶复合物以及水提取大豆OB,发现酶辅助提取法得到的大豆OB提取率可达84.65%,而水提取法得到的大豆OB提取率仅为28.65%~34.28%。若在酶辅助提取法中采用蛋白酶,虽然可以提高OB的提取率,但可能导致OB的相关蛋白质被水解为小肽<sup>[37]</sup>。选择OB提取方法时应从OB提取率、可操作性、生产成本及环保无污染等多方面考虑<sup>[1]</sup>。水提取法操作简单且无化学污染,已被广泛应用于不同来源的OB的提取,但是需要消耗大量的溶剂。酶辅助提取法需要严格控制酶含量、酶解时间、温度以及pH值,但OB提取率相对较高。因此,对于酶辅助提取法,需要寻找专一性酶,并且需要降低酶的用量以及成本,提高OB的提取效率与质量。

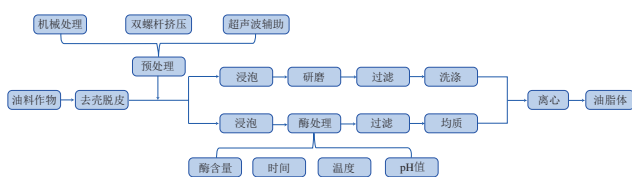


图2 OB的一般提取工艺流程

Fig. 2 General flow chart of OB extraction process

### 2.2 影响OB提取工艺的因素

在OB的提取过程中,物理因素与化学因素都会对OB的提取率以及稳定性产生不同的影响。物理因素主要包括浸泡、研磨以及预处理,这有利于破坏植物细胞结构,获得更高的提取率。浸泡可以使水分子渗透到细胞网络中,从而更有效地提取OB。研磨则可以使OB暴露出来,并且减小OB的尺寸,减少OB的聚集<sup>[38]</sup>。预处理除了传统的机械处理外,还有双螺杆挤压以及超声波辅助处理等方式。双螺杆挤压法可以提高OB的提取率,但设备的制造及维修成本较高,超声波辅助提取可以有效地促进蛋白-脂质的分离、缩短提取时间、提高OB的提取纯度<sup>[39-40]</sup>。化学因素主要包括蔗糖以及pH值。在水法提取中加入蔗糖可以在离心后使更多的OB位于清液上层,有利于OB的收集。由于OB来源及提取条件的不同,在不同pH值下提取OB可能导致OB组成成分的差异,进而表现出OB乳液稳定性的不同。有研究在pH 8.0~11.0的条件下提取大豆OB,发现随着提取pH值的升高,OB中脂肪含量增加,水分与蛋白质含量下降,OB的粒径变小,OB乳液的过氧化值(peroxide value, PV)与硫代巴比妥酸反应物(thiobarbituric acid reactive substances, TBARS)值均降低<sup>[41]</sup>。Liu Chen等<sup>[21]</sup>则发现碱性pH值条件提取花生OB时,可以去除OB中的部分蛋白质与磷脂,降低OB乳液的稳定性。

## 3 OB乳液氧化稳定性的研究

油脂的氧化是影响食品质量的一个重要因素,油脂中的不饱和脂肪酸通过与氧发生加成反应,使食品产生异味,同时也使食品的质地发生改变,营养价值降低。OB内部含有大量的不饱和脂肪酸,但是,OB的组成及其结构等因素使OB乳液具有一定的氧化稳定性。许多食品在加工过程中均会涉及酸碱处理和热处理,为了提高口感与品质而加入盐离子和表面活性剂等物质。这些条件的变化均会影响OB乳液的氧化稳定性。因此,探究OB乳液氧化稳定性的影响因素及提高乳液氧化稳定性的方法对食品生产具有理论价值和现实意义,可以为OB的开发与利用提供更广阔的应用前景。

### 3.1 OB组成与结构对其乳液氧化稳定性的影响

#### 3.1.1 蛋白质对OB乳液氧化稳定性的影响

蛋白质在水包油乳液中不仅相当于乳化剂,而且具有一定的抗氧化性能。OB的内源性蛋白阻止了外界的磷脂酶与磷脂的结合,防止了OB间的聚集凝结,抑制了OB乳液的氧化,同时,蛋白质还可通过螯合金属离子以及清除自由基中的氨基酸,使OB免于被氧化。但是,OB蛋白在储存时会被蛋白酶酶解,导致色氨酸基团的氧化降解与羰基化合物的形成<sup>[42]</sup>。蛋白酶降解OB蛋白发生

在种子中的脂肪被脂肪酶水解前,随着OB表面蛋白的氧化,蛋白质被泛素化、磷酸化所修饰,OB的表面屏障被破坏,OB中的多不饱和脂肪酸被氧化,脂质发生降解,与此同时,脂质的氧化产物还会与蛋白质的亲核氨基酸残基共价结合,反过来氧化蛋白质。

外源性蛋白为OB的第二层保护,但这种保护并不是致密的,不能阻止促氧化剂的侵入。Zhou Xuan等<sup>[43]</sup>研究发现,去除外源性蛋白的OB乳液氧化稳定性总是高于含有外源性蛋白的OB乳液。外源蛋白中还含有一种天冬氨酸蛋白酶,其通过水解OB中的内源性蛋白与外源性蛋白,进而影响OB乳液的氧化稳定性<sup>[44]</sup>。OB外源性蛋白中研究较多的为LOX。LOX是一种含铁的氧化还原酶,可以催化TAG中的多不饱和脂肪酸发生反应生成脂肪酸氢过氧化物,进而氧化OB<sup>[45]</sup>。有研究表明,提取OB时的pH值越高,OB表面的LOX越少<sup>[46]</sup>(图3)。在豆制品加工过程中,LOX会使不饱和脂肪酸发生氧化,生成醛酮类化合物,产生豆腥味。但是,LOX对热处理敏感性较高,因此,可以通过热烫处理等方式使LOX失活,还可以通过高压处理、微波脉冲电场以及添加LOX抑制剂等方式来抑制其活性,保证食品的质量与风味<sup>[47]</sup>。

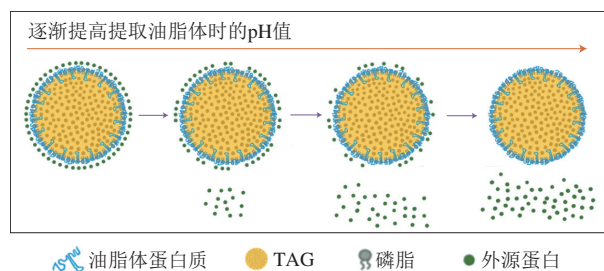


图3 提取OB时提高pH值对OB组成的影响

Fig. 3 Effect of increasing pH during OB extraction on OB composition

### 3.1.2 生育酚对OB乳液氧化稳定性的影响

绝大多数的生育酚与OB间存在紧密联系,生育酚的浓度及其在OB中的分布可影响生育酚的抗氧化活性,一定浓度的生育酚可以对OB起到抗氧化作用。Itri等<sup>[48]</sup>研究了从橄榄膏中提取的OB,发现OB乳液中多酚及生育酚类化合物的含量与特级初榨橄榄油中的含量相当,但是,OB乳液表现出更强的抗氧化能力。Gray等<sup>[49]</sup>对比了车前草OB乳液和具有相同生育酚特征的车前草油的氧化稳定性,发现后者的抗氧化效果较弱,这是由于其表面积与体积比前者高,导致其生育酚的有效浓度被稀释。

### 3.2 OB结构对OB乳液氧化稳定性的影响

García-Moreno等<sup>[50]</sup>在对水包鱼油乳液的研究中发现,同时采用酪蛋白与卵磷脂作为乳化剂不仅可以获得有利的界面结构与厚度,还可以减少脂质的氧化,这与OB的抗氧化方式相类似。油体蛋白的碱性氨基酸残基与带负电荷的磷脂结合,形成的致密薄膜覆盖在OB的整个表面,

可以阻挡氧气和活性过氧化氢的侵入,减少OB乳液氧化反应的发生。梁新婷等<sup>[51]</sup>对从高含油量与低含油量大豆中提取的OB乳液进行研究,可能是由于OB自身的蛋白质-磷脂层保护了易氧化的不稳定成分不受氢过氧化物的影响,降低了氧的渗透率,使得两种OB乳液都具有较好的氧化稳定性。在相同的食品加工条件下,由于OB的结构稳定性不同,不同来源的OB乳液会表现出不同的氧化稳定性。Wu Lichun等<sup>[52]</sup>对5种不同的OB乳液进行巴氏杀菌处理,发现巴氏杀菌可增强花生OB乳液及大豆OB乳液的氧化稳定性,而对葵花、芝麻和核桃OB乳液会有促进氧化的作用。

### 3.3 提取方法对OB乳液氧化稳定性的影响

OB的提取方法主要包括水提取法与酶辅助提取法,不同的提取方式会影响OB的提取率、OB组成、磷脂和生育酚的含量等,进而会影响OB乳液的氧化稳定性。有研究对比了缓冲液法、水相法和酶法3种提取方法对大豆OB乳液氧化稳定性的影响,发现在60℃储藏时,随着储藏时间的延长,用缓冲液提取得到的大豆OB乳液的PV显著高于用去离子水与酶提取得到的OB乳液,酶与去离子水提取的大豆OB乳液的PV无显著性差异,3种提取方式的TBARS值均平稳升高,但是酶法提取的OB乳液的TBARS值在第8天显著下降,后又稳定升高,对比发现酶法提取的OB乳液氧化稳定性最好<sup>[53]</sup>。Wei Songli等<sup>[54]</sup>利用酶辅助提取法提取了高油酸含量花生中的粗油脂体与纯油脂体,通过分析脂肪酸、氨基酸及生育酚的成分,发现纯OB乳液的氧化稳定性更强,并且具有更高的营养价值。Karkani等<sup>[55]</sup>采用超滤、离心以及等电点沉淀法获得了玉米胚芽OB,发现提取方式的不同会影响OB乳液的氧化稳定性与物理稳定性,其中通过超滤处理得到的OB乳液氧化稳定性最好。Zhao Luping等<sup>[56]</sup>通过水提取法提取了大豆OB,发现随着提取OB时pH值的升高,OB中外源蛋白的数量逐渐减少,OB乳液的氧化稳定性逐渐升高。

### 3.4 加工处理条件对OB乳液氧化稳定性的影响

#### 3.4.1 热处理对OB乳液氧化稳定性的影响

热处理主要通过影响OB表面蛋白质的活性来影响OB乳液的氧化稳定性,随着处理温度的升高,蛋白酶、磷脂酶及LOX逐渐变性失活,测得OB乳液的PV和TBARS值变小,OB乳液抗氧化能力增强。有研究在60℃与70℃水浴条件下提取大豆OB,发现由于蛋白酶的部分失活,OB乳液的氧化稳定性高于未加热的对照组,并且乳液的氧化稳定性随着水浴温度的升高而逐渐增强,当温度升高至100℃时,OB中的外源性蛋白发生变性,OB中的脂质发生自动氧化而非酶氧化,此时的OB乳液氧化稳定性最好<sup>[25]</sup>。Zaaboul等<sup>[57]</sup>研究了热处理与储藏温度对摩洛哥坚果OB乳液氧化稳定性的影响,结果表明,由于LOX的失活,经过95℃热处理后的OB乳液比

未加热的OB乳液具有更强的抗氧化活性,此外,通过对比5、25℃及37℃温度下储藏乳液的PV及顶空乙醇的形成,发现低温储藏降低了内源性蛋白酶的活性,从而阻止了OB蛋白的水解与OB表面膜被破坏,提高了OB乳液的氧化稳定性。Zielbauer等<sup>[58]</sup>发现,90℃加热条件下没有观察到大豆OB结构的变化,证实了大豆OB的高温稳定性,可用于生产巴氏杀菌等相关产品。

#### 3.4.2 pH值和过渡金属对OB乳液氧化稳定性的影响

OB表面有许多表面活性成分,如OB蛋白质及磷脂等。因此,不同pH值下OB界面所带的净电荷不同,进而影响OB乳液的氧化稳定性。与此同时,过渡金属的吸引也会影响OB乳液的氧化稳定性。过渡金属主要是 $Fe^{2+}$ 和 $Fe^{3+}$ ,其作为油脂的促氧化剂,可以加速脂肪初级氧化产物的分解。当pH值小于OB乳液等电点时,OB的高净电荷导致OB液滴间产生强烈的静电斥力,为过渡金属与液滴的接触提供了一个较大的表面积,进而促进OB乳液的氧化,在pH值大于OB乳液等电点的中性条件下,带负电的OB液滴与带正电的过渡金属相互吸引,但OB液滴之间相对较低的静电斥力则会限制OB乳液的氧化,pH值与过渡金属对OB液滴的影响如图4所示。Kapchie等<sup>[59]</sup>在不同pH值下将不同浓度的 $Fe^{3+}$ 加入OB乳液中,发现 $Fe^{3+}$ 通过促进脂质过氧化物的分解,显著影响OB乳液的氧化稳定性,且 $Fe^{3+}$ 浓度越高,OB乳液氧化稳定性越差,其还发现pH值为2时OB乳液的氧化稳定性高于pH值为7时的乳液氧化稳定性。

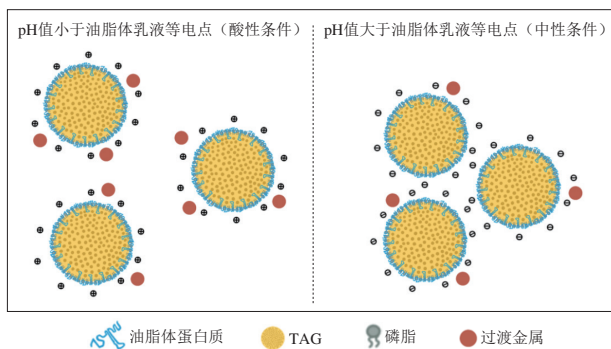


图4 pH值与过渡金属对OB液滴的影响示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the effect of pH and transition metal on OB droplets

#### 3.4.3 NaCl对OB乳液氧化稳定性的影响

NaCl可以在OB液滴间产生静电屏蔽作用,随着静电斥力的降低,未吸附的外源性蛋白附着在OB表面,进而通过疏水相互作用改变液滴间的聚集状态<sup>[60]</sup>。NaCl的存在一般会促进OB乳液的氧化,但可能由于OB的特殊结构及成分减少了氧气的渗透,或是因为蛋白质残基和磷脂残基比OB优先氧化,NaCl的添加量对OB乳液的氧化程度影响较小<sup>[58]</sup>。Zhou Xuan等<sup>[61]</sup>研究发现,NaCl抑制了

促氧化剂对未吸附于OB上蛋白质的氧化,加速了促氧化剂对OB的氧化。Hou Juncal等<sup>[62]</sup>在大豆、花生和葵花籽OB乳液中添加NaCl,发现当NaCl浓度为150 mmol/L时,3种OB乳液的PV均低于NaCl浓度为50 mmol/L和100 mmol/L时的PV,但是,对于同一种OB乳液,添加3种不同NaCl浓度时乳液的TBARS值均相对较低,表明NaCl浓度对这3种OB乳液氧化程度的影响不大。

#### 3.4.4 表面活性剂对OB乳液氧化稳定性的影响

表面活性剂可以增加OB液滴间的静电斥力,破坏OB蛋白间的疏水相互作用,增强OB乳液的物理稳定性,但是,加入某些表面活性剂会使OB的结构发生变化,从而影响OB乳液氧化稳定性,吐温80置换OB蛋白质的过程如图5所示。Sukhotu等<sup>[63]</sup>研究发现,阴离子表面活性剂十二烷基硫酸钠可以与OB缔合形成蛋白质-十二烷基硫酸钠复合物,破坏OB表面蛋白间的疏水相互作用,通过增强静电斥力来提高OB乳液的物理稳定性。Nikiforidis等<sup>[64]</sup>在玉米胚芽OB乳液中加入亲水性表面活性剂吐温80,发现吐温80会主要置换出OB表面的甾醇蛋白与油体钙蛋白,其次是油体蛋白。此时,金属离子以及自由基更容易地透过薄膜进入OB内部,导致OB乳液氧化速度加快<sup>[65]</sup>。

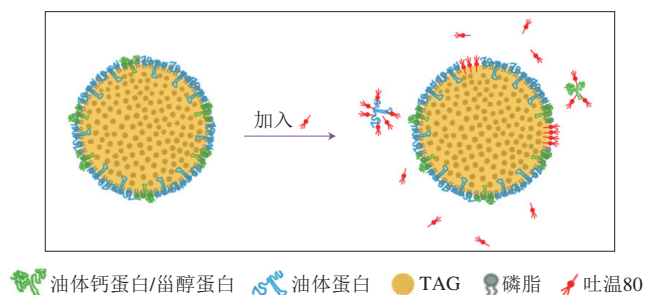


图5 吐温80置换OB蛋白质示意图

Fig. 5 Schematic diagram of Tween 80 displacement of OB proteins

### 3.5 提高OB乳液氧化稳定性的方法

#### 3.5.1 通过微胶囊化提高OB乳液氧化稳定性

微胶囊化是通过将OB嵌入保护基质中,将其与环境隔离。喷雾干燥是食品工业中常用的微胶囊化技术,被广泛应用于封装含有不饱和脂肪酸的油脂,是提高油脂和生物活性物质氧化稳定性的有效方法,可以帮助OB抵抗由不良环境带来的不利影响。Ding Jian等<sup>[66]</sup>分别采用麦芽糊精、麦芽糊精-壳聚糖偶联物和麦芽糊精-壳聚糖-表没食子儿茶素没食子酸酯偶联物作为封装材料,对大豆OB进行喷雾干燥制备微胶囊,发现对照组的OB由于缺少封装材料的保护,在储藏7 d内的PV与TBARS值分别显著增加了6.5倍与9.6倍,但是添加封装材料可以有效缓解OB的氧化,其中添加麦芽糊精-壳聚糖-表没食子儿茶素没食子酸酯偶联物的微胶囊抗氧化效果最好,并且

增强了OB的热稳定性,在消化过程中延迟了OB中脂质的释放。Zhu Jianyu等<sup>[67]</sup>研究发现,由麦芽糊精生产的葡萄糖当量为10的大豆OB微胶囊表现出最佳的水活性、吸湿性及流动性,产生了更有效的界面屏障,具有更好的热稳定性以及氧化稳定性。

### 3.5.2 通过添加多糖提高OB乳液氧化稳定性

OB可以通过添加果胶、海藻酸钠及阿拉伯胶等多糖来提高OB乳液的稳定性,多糖分子可以覆盖在OB表面,增加了OB间的静电斥力和空间位阻,同时降低了范德华力,从而提高OB乳液的聚集稳定性<sup>[68]</sup>。多糖包裹OB的示意图如图6所示。Wu Lichun等<sup>[69]</sup>在大豆和花生OB乳液中分别加入0.15 g/L苹果果胶,与对照组相比,苹果果胶的加入可以显著增加液滴间的静电斥力,减小两种OB的平均粒径,增加连续相的黏度和界面蛋白的含量,苹果果胶通过螯合金属离子,延缓OB中脂质的氧化,显著提高OB乳液在酸性条件下的氧化稳定性。

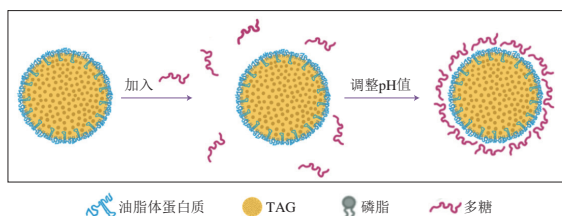


图6 多糖包裹OB示意图

Fig. 6 Schematic representation of polysaccharides encasing OB

### 3.5.3 通过添加多酚提高OB乳液氧化稳定性

多酚通过螯合过渡金属和清除乳液中的自由基,可达到提高OB乳液氧化稳定性的目的<sup>[70]</sup>。Ding Jian等<sup>[71]</sup>研究了加入表没食子儿茶素没食子酸酯的大豆OB乳液在3种不同pH值下的氧化稳定性,发现当pH值为5时,表没食子儿茶素没食子酸酯表现出促氧化活性,加速了OB乳液的氧化速率;当pH值为7时,表没食子儿茶素没食子酸酯可以有效提高OB乳液的氧化稳定性;而pH值为9时,由于表没食子儿茶素没食子酸酯被氧化为醌,实验组与对照组测得的PV没有观察到显著差异。Farooq等<sup>[72]</sup>通过将儿茶素、咖啡酸、绿原酸和单宁酸4种不同的氧化多酚与山茶OB共价交联,发现OB乳液的表面疏水性、热稳定性和抗氧化活性等功能特性都得到了一定程度的改善。

## 4 OB的应用

### 4.1 作为脂质替代物

植物种子中的油脂以OB的形式存在,OB中的生育酚和植物甾醇等成分以及蛋白质-磷脂界面结构使其具有一定的抗氧化性质。因此,可作为天然的抗氧化成分以及脂质替代物添加到食品产品中,提高食品在加工、

运输及储存过程中的稳定性。并且由于OB蛋白在乳液中充当乳化剂,OB乳液相较于商业蛋白制备的普通乳液,不需添加额外的乳化剂即可应用于奶油、蛋黄酱、冰淇淋、沙拉和饮料等食品的生产加工中。如今已有通过大豆OB代替乳脂来制备冰淇淋的工艺,不仅增加了冰淇淋中的不饱和脂肪酸含量以及消化过程中脂肪酸的释放,而且简化了工艺、降低了成本<sup>[73]</sup>。以蛋黄为原料的传统蛋黄酱中的胆固醇含量较高,而大豆OB替代蛋黄制备的低胆固醇低脂蛋黄酱不仅品质与传统蛋黄酱相差不大,并且OB在消化过程中可以释放更多的抗氧化活性成分,有益于健康<sup>[74]</sup>。在酸奶的生产过程中采用大豆OB替代乳脂可以增强酸奶的口感,改善酸奶的品质<sup>[75]</sup>。用玉米胚芽OB通过超滤浓缩制成的酸奶,相比于由全牛乳制得的酸奶,OB酸奶在冷藏过程中具有更好的物理及氧化稳定性,并且营养均衡,适合乳糖不耐及素食主义人群<sup>[76]</sup>。此外,由于OB乳液具有良好的氧化稳定性,可以抑制肉制品中的脂质氧化。Bibat等<sup>[77]</sup>用油菜籽OB替代猪肉脂肪生产的肉糜更柔软,黏性更小,并且肉糜的乳化和氧化稳定性得到提升。

### 4.2 作为可食性薄膜材料

可食用性薄膜具有较强的阻隔性能,更高的柔韧性以及更低的透水性,在食品运输与储藏过程中有助于保障食品的质量,并起到延长保质期的作用,但是其普遍存在抗氧化性低等问题。可食性薄膜是由多糖、蛋白质和脂类等为基础制得的。因此,OB可作为可降解材料生产可食用性薄膜。相比于植物油,将OB添加到可降解材料中,可避免其在制备过程中的均质化,获得均匀分布的小液滴。并且OB可以通过改善膜成分之间的相容性状态,进而提高可食性薄膜的抗氧化性,在食品包装及抗氧化剂载体方面具有潜在用途<sup>[78]</sup>。Matsakidou等<sup>[79]</sup>制备了由玉米胚芽OB和酪蛋白酸钠组成的复合薄膜,与不含OB的薄膜相比,玉米胚芽OB/酪蛋白酸钠复合薄膜的透水性和硬度较低、表面疏水性及柔韧性较高。Matsakidou等<sup>[80]</sup>又研究了含有玉米胚芽OB/酪蛋白酸钠-甘油的复合薄膜,与不含OB的复合薄膜相比,表现出更高的柔韧性和更低的拉伸强度。

## 5 结语

OB以TAG为核心,被磷脂与蛋白质所构成的单层膜包裹,可以在水相中形成水包油型乳液。OB的组成与结构、提取方法及加工处理条件都会对OB乳液的氧化稳定性产生一定的影响,可通过微胶囊化、添加多糖和多酚来提高OB乳液的氧化稳定性。OB可作为脂肪的替代物和抗氧化可食性薄膜应用于食品领域,增强食品的抗氧化功效。OB将是未来的热点研究对象,应设计出一种

成本更低、提取率更高以及结构更完整的OB提取方式。应加大力度探索食品加工工艺对OB乳液构效关系的影响,更加深入地挖掘OB各组分和结构的潜在功能,以及明晰OB的致敏性和毒性,以充分了解OB的应用系统。应充分利用OB中的不饱和脂肪酸、生育酚及植物甾醇等营养成分,开发新型营养健康食品,扩大OB的应用领域。目前,OB作为膳食补充剂的研究较为有限,有待深入研究。随着对OB分子间相互作用与OB乳液稳定性等方面研究的不断深入,OB可以逐步应用到食品、医药及畜牧等相关领域,更广泛地出现在人们的视野中。

#### 参考文献:

- [1] HAO Jia, LI Xiaoyu, WANG Qiuyu, et al. Recent developments and prospects in the extraction, composition, stability, food applications, and *in vitro* digestion of plant oil bodies[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2022, 99(8): 635-653. DOI:10.1002/aocs.12618.
- [2] WEISS J, ZHANG Hang. Recent advances in the composition, extraction and food applications of plant-derived oleosomes[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 106: 322-332. DOI:10.1016/j.tifs.2020.10.029.
- [3] ZHOU Xuan, ZHAO Jiale, ZHAO Xu, et al. Oil bodies extracted from high-oil soybeans (*Glycine max*) exhibited higher oxidative and physical stability than oil bodies from high-protein soybeans[J]. Food & Function, 2022, 13(6): 3271-3282. DOI:10.1039/d1fo03934b.
- [4] 韩昊天, 刘校男, 赵路苹, 等. 大豆油体富集物在豆乳饮品中的应用[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(2): 95-101. DOI:10.3969/j.issn.1003-0174.2021.02.016.
- [5] 官梦姝, 徐聪, 姜瑞, 等. 油脂体稳定性影响因素及机理的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(16): 421-428. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020080291.
- [6] WANG Wan, LI Jinzhe, WANG Min, et al. Soybean-oil-body-substituted low-fat ice cream with different homogenization pressure, pasteurization condition, and process sequence: physicochemical properties, texture, and storage stability[J]. Foods, 2022, 11(17): 2560. DOI:10.3390/foods11172560.
- [7] NIKIFORIDIS C V, DONSOUI S, KIOSSEOGLU V. The interplay between diverse oil body extracts and exogenous biopolymers or surfactants[J]. Food Research International, 2016, 83: 14-24. DOI:10.1016/j.foodres.2016.02.007.
- [8] ZHANG Shan, CHEN Hongjian, GENG Fang, et al. Natural oil bodies from typical oilseeds: structural characterization and their potentials as natural delivery system for curcumin[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 128: 107521. DOI:10.1016/j.foodhyd.2022.107521.
- [9] ZHANG Yuemei, YANG Nan, XU Yao, et al. Improving the stability of oil body emulsions from diverse plant seeds using sodium alginate[J]. Molecules, 2019, 24(21): 3856. DOI:10.3390/molecules24213856.
- [10] WANG Wan, CUI Chunli, WANG Qiuling, et al. Effect of pH on physicochemical properties of oil bodies from different oil crops[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(1): 49-58. DOI:10.1007/s13197-018-3453-y.
- [11] CHEN Chunling, PAN Yijun, NIU Yifei, et al. Modulating interfacial structure and lipid digestion of natural *Camellia* oil body by roasting and boiling processes[J]. Food Chemistry, 2022, 402: 134198. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.134198.
- [12] GAO Yuhang, ZHOU Longzheng, YAO Fei, et al. Effects of pH on the composition and physical stability of peanut oil bodies from aqueous enzymatic extraction[J]. Journal of Chemistry, 2021, 2021: 2441385. DOI:10.1155/2021/2441385.
- [13] HU Miao, DU Xiaoqian, LIU Guannan, et al. Investigation of structure-stability correlations of reconstructed oil bodies[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 165: 113740. DOI:10.1016/j.lwt.2022.113740.
- [14] ZHAO Daqiu, LI Tingting, LI Zhiyuan, et al. Characteristics of *Paeonia ostii* seed oil body and OLE17.5 determining oil body morphology[J]. Food Chemistry, 2020, 319: 126548. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.126548.
- [15] YANG Nan, SU Chunxia, ZHANG Yuemei, et al. *In situ* nanomechanical properties of natural oil bodies studied using atomic force microscopy[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2020, 570: 362-374. DOI:10.1016/j.jcis.2020.03.011.
- [16] GARCIA F L, MA S, DAVE A, et al. Structural and physicochemical characteristics of oil bodies from hemp seeds (*Cannabis sativa* L.)[J]. Foods, 2021, 10(12): 2930. DOI:10.3390/foods10122930.
- [17] ZHOU Longzheng, CHEN Fusheng, HAO Lihua, et al. Peanut oil body composition and stability[J]. Journal of Food Science, 2019, 84(10): 2812-2819. DOI:10.1111/1750-3841.14801.
- [18] SÁNCHEZ-ALBARRÁN F, SALGADO-GARCIGLIA R, MOLINA-TORRES J, et al. Oleosome oil storage in the mesocarp of two avocado varieties[J]. Journal of Oleo Science, 2019, 68(1): 87-94. DOI:10.5650/jos.ess18176.
- [19] BOURGEOIS C, GOMAA A I, LEFÈVRE T, et al. Interaction of oil bodies proteins with phospholipid bilayers: a molecular level elucidation as revealed by infrared spectroscopy[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 122: 873-881. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2018.10.211.
- [20] DELEU M, VACA-MEDINA G, FABRE J F, et al. Interfacial properties of oleosins and phospholipids from rapeseed for the stability of oil bodies in aqueous medium[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2010, 80(2): 125-132. DOI:10.1016/j.colsurfb.2010.05.036.
- [21] LIU Chen, CHEN Fusheng, XIA Yimiao, et al. Physicochemical and rheological properties of peanut oil body following alkaline pH treatment[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112590. DOI:10.1016/j.lwt.2021.112590.
- [22] CHEN Yeming, CAO Yanyun, ZHAO Luping, et al. Macronutrients and micronutrients of soybean oil bodies extracted at different pH[J]. Journal of Food Science, 2014, 79(7): C1285-C1291. DOI:10.1111/1750-3841.12516.
- [23] LAN Xinxin, QIANG Weidong, YANG Ying, et al. Physicochemical stability of safflower oil body emulsions during food processing[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 132: 109838. DOI:10.1016/j.lwt.2020.109838.
- [24] TROMBETTA D, SMERIGLIO A, DENARO M, et al. Understanding the fate of almond (*Prunus dulcis* (Mill.) D.A. Webb) oleosomes during simulated digestion[J]. Nutrients, 2020, 12(11): 3397. DOI:10.3390/nu12113397.
- [25] DAVE A C, YE A, SINGH H. Structural and interfacial characteristics of oil bodies in coconuts (*Cocos nucifera* L.)[J]. Food Chemistry, 2019, 276: 129-139. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.09.125.
- [26] NIKIFORIDIS C V. Structure and functions of oleosomes (oil bodies)[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2019, 274: 102039. DOI:10.1016/j.cis.2019.102039.



- [27] KAREFYLLAKIS D, VAN DER GOOT A J, NIKIFORIDIS C V. The behaviour of sunflower oleosomes at the interfaces[J]. *Soft Matter*, 2019, 15(23): 4639-4646. DOI:10.1039/c9sm00352e.
- [28] SUN Yufan, ZHONG Mingming, WU Lichun, et al. Effects of ultrasound-assisted salt (NaCl) extraction method on the structural and functional properties of Oleosin[J]. *Food Chemistry*, 2022, 372: 131238. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.131238.
- [29] PAYNE G, LAD M, FOSTER T, et al. Composition and properties of the surface of oil bodies recovered from *Echium plantagineum*[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2014, 116: 88-92. DOI:10.1016/j.colsurfb.2013.11.043.
- [30] CHEN Jingnan, TANG Guiyun, ZHOU Jinfen, et al. The characterization of soybean germ oil and the antioxidative activity of its phytosterols[J]. *RSC Advances*, 2019, 9(68): 40109-40117. DOI:10.1039/c9ra08771k.
- [31] ZAABOUL F, ZHAO Qiaoli, XU Yongjiang, et al. Soybean oil bodies: a review on composition, properties, food applications, and future research aspects[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 124: 107296. DOI:10.1016/j.foodhyd.2021.107296.
- [32] ZAABOUL F, RAZA H, CHEN C, et al. Characterization of peanut oil bodies integral proteins, lipids, and their associated phytochemicals[J]. *Journal of Food Science*, 2018, 83(1): 93-100. DOI:10.1111/1750-3841.13995.
- [33] DE CHIRICO S, DI BARI V, FOSTER T, et al. Enhancing the recovery of oilseed rape seed oil bodies (oleosomes) using bicarbonate-based soaking and grinding media[J]. *Food Chemistry*, 2018, 241: 419-426. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.09.008.
- [34] KERGMARD J, PABOEUF G, BAROUH N, et al. Stability to oxidation and interfacial behavior at the air/water interface of minimally-processed versus processed walnut oil-bodies[J]. *Food Chemistry*, 2021, 360: 129880. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.129880.
- [35] ROMERO-GUZMÁN M J, VARDAKA E, BOOM R M, et al. Influence of soaking time on the mechanical properties of rapeseed and their effect on oleosome extraction[J]. *Food and Bioprocess Processing*, 2020, 121: 230-237. DOI:10.1016/j.fbp.2020.03.006.
- [36] KAPCHIE V N, WEI D, HAUCK C, et al. Enzyme-assisted aqueous extraction of oleosomes from soybeans (*Glycine max*)[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(5): 1766-1771. DOI:10.1021/jf0721390.
- [37] LIU Chen, HAO Lihua, CHEN Fusheng, et al. Study on extraction of peanut protein and oil bodies by aqueous enzymatic extraction and characterization of protein[J]. *Journal of Chemistry*, 2020, 2020: 5148967. DOI:10.1155/2020/5148967.
- [38] ROMERO-GUZMÁN M J, KÖLLMANN N, ZHANG L, et al. Controlled oleosome extraction to produce a plant-based mayonnaise-like emulsion using solely rapeseed seeds[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 123: 109120. DOI:10.1016/j.lwt.2020.109120.
- [39] NTONE E, BITTER J H, NIKIFORIDIS C V. Not sequentially but simultaneously: facile extraction of proteins and oleosomes from oilseeds[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 102: 105598. DOI:10.1016/j.foodhyd.2019.105598.
- [40] ZDERIC A, ALMEIDA-RIVERA C, BONGERS P, et al. Product-driven process synthesis for the extraction of oil bodies from soybeans[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 185: 26-34. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2016.03.030.
- [41] 宋晗钰, 钟明明, 康梦雪, 等. 碱性pH值提取对大豆油脂体稳定性及消化特性的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(4): 57-63. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220403-036.
- [42] YI Jianhua, QIU Manyan, LIU Ning, et al. Inhibition of lipid and protein oxidation in whey-protein-stabilized emulsions using a natural antioxidant: black rice anthocyanins[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(37): 10149-10156. DOI:10.1021/acs.jafc.0c03978.
- [43] ZHOU Xuan, SUN Rongbo, ZHAO Jiale, et al. Enzymatic activity and stability of soybean oil body emulsions recovered under neutral and alkaline conditions: impacts of thermal treatments[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 153: 112545. DOI:10.1016/j.lwt.2021.112545.
- [44] CHEN Yeming, CHEN Yajing, ZHAO Luping, et al. A two-chain aspartic protease present in seeds with high affinity for peanut oil bodies[J]. *Food Chemistry*, 2018, 241: 443-451. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.09.020.
- [45] JIANG Yiming, WANG Shukun, HE Fang, et al. Inactivation of lipoxigenase in soybean by radio frequency treatment[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2018, 53(12): 2738-2747. DOI:10.1111/ijfs.13885.
- [46] YANG Xufeng, WU Yingying, LIU Yang, et al. Digestive characteristics of oil body extracted from soybean aqueous extract at different pHs[J]. *Food Research International*, 2022, 161: 111828. DOI:10.1016/j.foodres.2022.111828.
- [47] TIAN Qiying, HUA Yufei. Oxidation reactions in model systems simulating the processing of soybeans into soymilk: role of lipase and lipoxigenase in volatile flavors formation[J]. *International Journal of Food Properties*, 2021, 24(1): 192-202. DOI:10.1080/10942912.2021.1873363.
- [48] ITRI S, GALLO M, OREFICE C, et al. Oil bodies cream from olive paste: extraction of a functional ingredient for developing a stable food emulsion[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(12): 6019. DOI:10.3390/app12126019.
- [49] GRAY D A, PAYNE G, MCCLEMENTS D J, et al. Oxidative stability of *Echium plantagineum* seed oil bodies[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2010, 112(7): 741-749. DOI:10.1002/ejlt.200900280.
- [50] GARCÍA-MORENO P J, HORN A F, JACOBSEN C. Influence of casein-phospholipid combinations as emulsifier on the physical and oxidative stability of fish oil-in-water emulsions[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(5): 1142-1152. DOI:10.1021/jf405073x.
- [51] 梁新婷, 江连洲, 侯俊财, 等. 高油大豆与低油大豆油脂体组成及其稳定性的研究[J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(10): 11-17. DOI:10.3969/j.issn.1003-0174.2016.10.003.
- [52] WU Lichun, SUN Yufan, KANG Mengxue, et al. Effect of pasteurization on membrane proteins and oxidative stability of oil bodies in various crops[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2022, 57(7): 3944-3954. DOI:10.1111/ijfs.15562.
- [53] 冯雪, 钱珊珊, 于彤, 等. 提取方法对大豆油脂体组成及氧化稳定性的影响[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(1): 148-156. DOI:10.16429/j.1009-7848.2021.01.018.
- [54] WEI Songli, HUANG Jinian, ZHANG Lixia, et al. Physicochemical properties and stabilities of crude and purified oil bodies extracted from high oleic peanuts[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2020, 122(4): 1900183. DOI:10.1002/ejlt.201900183.
- [55] KARKANI O A, NENADIS N, NIKIFORIDIS C V, et al. Effect of recovery methods on the oxidative and physical stability of oil body emulsions[J]. *Food Chemistry*, 2013, 139(1/2/3/4): 640-648. DOI:10.1016/j.foodchem.2012.12.055.

- [56] ZHAO Luping, CHEN Yeming, YAN Zunhao, et al. Physicochemical and rheological properties and oxidative stability of oil bodies recovered from soybean aqueous extract at different pHs[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 61: 685-694. DOI:10.1016/j.foodhyd.2016.06.032.
- [57] ZAABOUL F, RAZA H, LAZRAQ A, et al. Chemical composition, physical properties, and the oxidative stability of oil bodies extracted from *Argania spinosa*[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2018, 95(4): 485-495. DOI:10.1002/aocs.12053.
- [58] ZIELBAUER B I, JACKSON A J, MAURER S, et al. Soybean oleosomes studied by small angle neutron scattering (SANS)[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2018, 529: 197-204. DOI:10.1016/j.jcis.2018.05.080.
- [59] KAPCHIE V N, YAO L, HAUCK C C, et al. Oxidative stability of soybean oil in oleosomes as affected by pH and iron[J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(3): 2286-2293. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.05.018.
- [60] ROMERO-GUZMÁN M J, PETRIS V, DE CHIRICO S, et al. The effect of monovalent ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) and divalent ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) cations on rapeseed oleosome (oil body) extraction and stability at pH 7[J]. *Food Chemistry*, 2020, 306: 125578. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.125578.
- [61] ZHOU Xuan, LIU Zhijing, WANG Wan, et al. NaCl induces flocculation and lipid oxidation of soybean oil body emulsions recovered by neutral aqueous extraction[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(9): 3752-3761. DOI:10.1002/jsfa.11723.
- [62] HOU Juncai, FENG Xue, JIANG Mengting, et al. Effect of NaCl on oxidative stability and protein properties of oil bodies from different oil crops[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 113: 108263. DOI:10.1016/j.lwt.2019.108263.
- [63] SUKHOTU R, SHI X, HU Q, et al. Aggregation behaviour and stability of maize germ oil body suspension[J]. *Food Chemistry*, 2014, 164: 1-6. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.05.003.
- [64] NIKIFORIDIS C V, KIOSSEOGLU V. Competitive displacement of oil body surface proteins by Tween 80: effect on physical stability[J]. *Food Hydrocolloids*, 2011, 25(5): 1063-1068. DOI:10.1016/j.foodhyd.2010.10.002.
- [65] ZHU Zhenbao, ZHAO Cui, YI Jianhua, 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. DOI:10.1021/acs.jafc.8b00590.
- [66] DING Jian, XU Zejian, QI Baokun, et al. Fabrication and characterization of soybean oil bodies encapsulated in maltodextrin and chitosan-EGCG conjugates: an *in vitro* digestibility study[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 94: 519-527. DOI:10.1016/j.foodhyd.2019.04.001.
- [67] ZHU Jianyu, LI Xiaotian, LIU Lu, et al. Preparation of spray-dried soybean oil body microcapsules using maltodextrin: effects of dextrose equivalence[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 154: 112874. DOI:10.1016/j.lwt.2021.112874.
- [68] SU Chunxia, FENG Younan, YE Jing, et al. Effect of sodium alginate on the stability of natural soybean oil body emulsions[J]. *RSC Advances*, 2018, 8(9): 4731-4741. DOI:10.1039/c7ra09375f.
- [69] WU Lichun, YUE Qiang, KANG Mengxue, et al. Stabilization of soybean and peanut oil bodies using apple pectin under acidic conditions[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 655: 130263. DOI:10.1016/j.colsurfa.2022.130263.
- [70] 官梦姝, 冯雪, 刘月, 等. 3种天然酚类物质对大豆油脂体稳定性及体外消化性的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(3): 10-18. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210302-020.
- [71] DING Jian, XU Zejian, QI Baokun, et al. Physicochemical and oxidative stability of a soybean oleosome-based emulsion and its *in vitro* digestive fate as affected by (-)-epigallocatechin-3-gallate[J]. *Food & Function*, 2018, 9(12): 6146-6154. DOI:10.1039/c8fo01215f.
- [72] FAROOQ S, AHMAD M I, ZHANG Y, et al. Fabrication, characterization and *in vitro* digestion of camellia oil body emulsion gels cross-linked by polyphenols[J]. *Food Chemistry*, 2022, 394: 133469. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.133469.
- [73] WANG Wan, WANG Min, XU Cong, et al. Effects of soybean oil body as a milk fat substitute on ice cream: physicochemical, sensory and digestive properties[J]. *Foods*, 2022, 11(10): 1504. DOI:10.3390/foods11101504.
- [74] WANG Wan, HU Chuanbing, SUN Hong, et al. Low-cholesterol-low-fat mayonnaise prepared from soybean oil body as a substitute for egg yolk: the effect of substitution ratio on physicochemical properties and sensory evaluation[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 167: 113867. DOI:10.1016/j.lwt.2022.113867.
- [75] DOU Nianxu, SUN Rongbo, SU Chengcheng, et al. Soybean oil bodies as a milk fat substitute improves quality, antioxidant and digestive properties of yogurt[J]. *Foods*, 2022, 11(14): 2088. DOI:10.3390/foods11142088.
- [76] MANTZOURIDOU F T, NAZIRI E, KYRIAKIDOU A, et al. Oil bodies from dry maize germ as an effective replacer of cow milk fat globules in yogurt-like product formulation[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 105: 48-56. DOI:10.1016/j.lwt.2019.01.068.
- [77] BIBAT M A D, ANG M J, EUN J B. Impact of replacing pork backfat with rapeseed oleosomes-natural pre-emulsified oil-on technological properties of meat model systems[J]. *Meat Science*, 2022, 186: 108732. DOI:10.1016/j.meatsci.2021.108732.
- [78] KHEDRI S, SADEGHI E, ROUHI M, et al. Bioactive edible films: development and characterization of gelatin edible films incorporated with casein phosphopeptides[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 138: 110649. DOI:10.1016/j.lwt.2020.110649.
- [79] MATSAKIDOU A, BILIADERIS C G, KIOSSEOGLU V. Preparation and characterization of composite sodium caseinate edible films incorporating naturally emulsified oil bodies[J]. *Food Hydrocolloids*, 2013, 30(1): 232-240. DOI:10.1016/j.foodhyd.2012.05.025.
- [80] MATSAKIDOU A, TSIMIDOU M Z, KIOSSEOGLU V. Storage behavior of caseinate-based films incorporating maize germ oil bodies[J]. *Food Research International*, 2019, 116: 1031-1040. DOI:10.1016/j.foodres.2018.09.042.