

油脂体的提取方法及其在食品中应用的研究进展

张亚靖¹, 陈复生¹, 王颖颖¹, 刘晨¹, 郑乾坤¹, 殷丽君²

(1. 河南工业大学 粮油食品学院, 郑州 450001; 2. 中国农业大学 食品科学与营养工程学院, 北京 100083)

摘要:旨在为油脂体的开发利用提供参考, 综述了油脂体的结构与组成及提取方法, 并介绍了油脂体在食品中的应用现状。油脂体以三酰甘油酯为核心, 外层由磷脂-蛋白质膜覆盖, 其主要由中性脂质、蛋白质和磷脂组成, 此外还含有一些次要生物活性成分。油脂体的提取方法有水剂法、双螺杆压榨法和水酶法, 可依据实际情况选择合适的提取方法。油脂体的特定结构以及生物活性成分使其作为天然预乳化水包油乳液具有良好的稳定性和乳化性能, 在制备仿乳制品、可食用膜、乳液-凝胶以及作为脂肪替代品和生物活性物质运输载体等方面具有广阔的应用前景。未来的研究应充分探索基于油脂体应用系统的组成和结构对其生物可利用性、生物利用度和功能的影响, 进一步推动其在食品工业的发展。

关键词:油脂体; 结构; 组成; 提取; 应用

中图分类号: TS221; TS201.2 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2024)08-0131-06

Research progress on extraction methods and application in food of oleosomes

ZHANG Yajing¹, CHEN Fusheng¹, WANG Yingying¹, LIU Chen¹, ZHENG Qiankun¹, YIN Lijun²

(1. College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming to provide reference for the development and utilization of oleosomes, the structure and composition of oleosomes and its extraction methods were reviewed, and the current status of the application of oleosomes in food was introduced. Oleosomes have triacylglycerol as the core, and the outer layer is covered by phospholipid-protein membrane, which mainly consists of neutral lipids, proteins and phospholipids, in addition to some minor bioactive components. The extraction methods of oleosomes are aqueous extraction, twin-screw pressing extraction and aqueous enzymatic extraction, and suitable extraction methods could be selected based on actual conditions. The specific structure of oleosomes and their bioactive components enable them to be used as natural pre-emulsified oil-in-water emulsions with good stability and emulsification properties, and they have broad application prospects in the preparation of dairy imitation products, edible membranes, emulsions-gels and as fat substitutes and delivery carriers of bioactive substances. Future studies should fully explore the influence of the composition and structure of the oleosomes-based body application system on its bioaccessibility, bioavailability and functionality to further promote its development in the food industry.

Key words: oleosomes; structure; composition; extraction; application

收稿日期: 2022-08-14; 修回日期: 2024-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(联合基金)重点项目(U21A20270)

作者简介: 张亚靖(2000), 女, 硕士, 研究方向为食品资源开发与利用(E-mail)2597438237@qq.com。

通信作者: 陈复生, 教授, 博士(E-mail)fusheng@haut.edu.cn。

植物油是人类饮食中必需营养素的重要来源, 可直接食用, 或与蛋白质、磷脂和表面活性剂等乳化剂混合、均质化形成稳定的水包油乳液用于生产奶油、蛋黄酱、冰淇淋等其他食品。油脂体是油料中的

储存脂类,也被称为油体、脂滴和球体^[1-2],油脂体不需要添加乳化剂或均质化即可均匀分散到水相中形成较稳定的水包油乳液,可直接用于半液体或液体食品的制备,如蛋黄酱、核桃乳等。不同提取条件所得的油脂体表面会吸附不同的外源性蛋白质,而外源性蛋白质可能会增加油脂体的稳定性^[3-4],此外油脂体还会吸附一些植物甾醇、维生素 E、黄酮等生物活性成分,油脂体的特定结构以及吸附的生物活性成分使其具有良好的氧化稳定性和分散性,在食品工业中具有良好的应用前景^[5]。但目前油脂体提取方法及应用缺乏相关总结,因此本文对油脂体的结构与组成、提取方法以及油脂体在食品中的应用进行综述,以期对油脂体的进一步开发利用提供参考。

1 油脂体的结构与组成

1.1 油脂体的结构

油脂体是以三酰甘油酯(TAG)为核心,外围由磷脂和内源性蛋白质组成的半单位膜所覆盖而形成的细胞器,蛋白质和磷脂通过静电排斥和空间位阻使油脂体稳定并保持为小的独立结构,同时可抵御极端环境条件(如化学和机械压力)对于油脂体的破坏作用,油脂体的结构如图 1 所示^[2]。

油脂体表面大约 80% 被磷脂单分子层覆盖,磷脂分子中位于半单位膜内侧的 2 个疏水酰基与疏水的三酰甘油酯相互作用,位于半单位膜外侧的亲水性磷酸基团与细胞液直接接触。

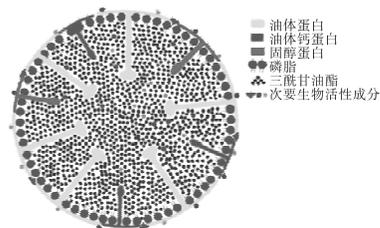


图 1 油脂体的结构

1.2 油脂体的组成

油脂体主要由中性脂质、蛋白质和磷脂组成,此外还含有一些次要生物活性成分,如生育酚、植物甾醇、黄酮和碳水化合物等^[2,6-7]。不同来源油脂体的大小和组分含量有很大差异,同时会受环境的影响。不同油料中油脂体大小与组成如表 1 所示^[8]。

表 1 不同油料中油脂体大小与组成

油料	平均直径/ μm	中性脂质/%	蛋白质/%	磷脂/%
大豆	0.25 ~ 1.75	88.51 ~ 93.72	5.21 ~ 9.72	0.80
花生	1.00 ~ 2.00	75.99 ~ 98.17	0.94 ~ 9.20	0.45 ~ 0.82
油菜籽	0.65	94.21	3.46	1.97
亚麻籽	1.34 ~ 1.50	97.65	1.34	0.90
芝麻	2.00	97.37	0.59	0.57
葵花籽	2.30	96.00 ~ 98.63	1.06	0.31
红花籽	0.28 ~ 1.40	92.60	7.30	

构成油脂体膜的磷脂可分为主要磷脂和次要磷脂,主要磷脂包括磷脂酰胆碱(PC)和磷脂酰丝氨酸(PS),次要磷脂包括磷脂酰肌醇(PI)、磷脂酰乙醇胺(PE)和磷脂酸(PA)^[9]。不同油料中油脂体磷脂组成与含量如表 2 所示^[8]。

表 2 不同油料中油脂体磷脂组成与含量

油料	PC	PS	PE	PI	PA
花生	50.60 ~ 61.60	10.80 ~ 25.00	5.00 ~ 16.76	8.40 ~ 23.04	5.33 ~ 10.00
油菜籽	59.90	20.20	5.90	14.00	
亚麻籽	57.20	33.10	2.80	6.90	
芝麻	41.20	22.10	15.80	20.90	
葵花籽	79.00 ~ 81.00		13.00	5.00	
杏仁	31.90		6.63	15.80	39.30
玉米胚芽	64.10	20.20	8.10	7.60	
车前叶蓝蓟籽	52.40 ~ 55.10	30.70 ~ 32.60	11.70 ~ 13.20	4.00 ~ 5.20	

2 油脂体的提取方法

2.1 水剂法

水剂法提取油脂体的一般步骤是先将油料浸泡在水介质中,然后通过混合或挤压破坏植物细胞壁结构并释放胞内物质,最后经离心和洗涤后产生富含油脂体的乳液。Ding 等^[10]采用水剂法提取油脂体,按照料液比 1:5 将大豆与去离子水进行混合,在 4℃ 下浸泡 20 h,将混合液均质 8 min 后通过 3 层粗

棉布过滤浆液,收集滤液,25 000 g 离心 30 min 后获得富含油脂体的乳液,用去离子水进行洗涤,离心分离后得到大豆油脂体,其组成为蛋白质 7.85%、脂类 91.92%、磷脂 0.80%。将大豆油脂体以 20% 的含量分散在磷酸盐缓冲液(pH 7.0)中,并分别在 65、75、85℃ 和 95℃ 下热处理 15 min,发现油脂体乳液稳定性降低。Zaaboul 等^[6]按照料液比 1:9 用去离子水提取花生油脂体,其将去离子水分成 4 等份,

第一份去离子水与花生混合后用搅拌机研磨 2 min,对浆液进行过滤,然后将滤饼与第二份去离子水混合,研磨 1 min 并过滤,该步骤重复 2 次,将所得浆液混合,将其与蔗糖混合后进行均质化处理。将混合物等分,用 0.1 mol/L HCl 溶液和 1 mol/L NaOH 溶液分别将 pH 调节至 6.8、8.0 和 11.0,以 25 000 g 离心 25 min 后获得油脂体。Tontul 等^[11]采用响应面法优化了水剂法提取石榴籽油脂体的工艺,将石榴籽研磨至粒径小于 1.6 mm,在料液比 1:10 下浸泡 48 h,过滤除去去离子水,然后按照料液比 1:5 添加去离子水,使用 NaOH 溶液将混合物 pH 调至 9.0,当均质速度为 14 000 r/min,均质时间为 4.8 min 时,石榴籽油脂体的提取率为 46.3%。水剂法操作简便但油脂体提取率低。

2.2 双螺杆压榨法

双螺杆压榨法是采用双螺杆压榨机将浸泡后的植物油料进行压榨,再通过离心、洗涤制得油脂体。在油脂体制取过程中,通过调节螺杆的长度和间隙,从而延长油料的停留时间以获得较高的油脂体提取率^[2]。Romero - Guzmán 等^[12]采用双螺杆压榨法提取油菜籽油脂体,按照料液比 1:1 添加超纯水将油菜籽浸泡 24 h,然后采用双螺杆压榨机在螺杆转速 82 r/min 的条件下处理预浸泡的油菜籽,在 4℃ 下以 10 000 g 离心 30 min 制取油脂体,油脂体提取率约为 68%。Ntone 等^[13]以油菜籽为原料,按照质量比 1:8 添加去离子水,室温下搅拌 4 h,然后加入 NaOH 溶液调节混合物的 pH 至 9.0,采用双螺杆压榨机处理混合物,在 4℃ 下以 10 000 g 离心 30 min 得到油脂体,油脂体提取率为 82.8%。双螺杆压榨法在提取油脂体过程中对细胞屏障造成更大程度的破坏,因此可以在更短的时间内获得较高的油脂体提取率,但双螺杆压榨机结构复杂,制造及维修成本高。

2.3 水酶法

水酶法是利用纤维素酶、半纤维素酶、果胶酶、木聚糖酶等细胞壁降解酶针对性地破坏油料细胞的细胞壁,裂解脂多糖等复合结构,从而释放油脂体,其油脂体提取率高^[14]。Liu 等^[15]采用复合植物水解酶(Viscozyme L)提取花生油脂体,所得油脂体湿基组成为蛋白质 1.95%、中性脂质 75.99%、磷脂 0.65% 和水分 20.62%。Niu 等^[16]对比了纤维素酶、果胶酶、Viscozyme L 及其复配酶对花生油脂体提取率的影响,发现在花生与蒸馏水料液比 1:4,纤维素酶与果胶酶的酶活力比 1:1,最适温度下孵育

80 min 时花生油脂体的提取率最高,为 90.7%。Xu 等^[17]按照质量比 1:6 将米糠与 1.0 mmol/L 磷酸盐缓冲液混合,在混合酶(植物提取酶与木聚糖酶质量比 1:1)添加量 2%,50℃ 下孵育 90 min,以 4 500 g 离心 20 min 后,米糠油脂体的提取率达到 76.95%。由于细胞壁成分和植物油料的多样性,酶的高度特异性限制了其对细胞壁的水解程度^[8],且酶价格较高,因此开发专用酶、降低酶制剂用量和成本是目前油脂体产业化开发必须解决的主要问题。

3 油脂体在食品中的应用

3.1 制备仿乳制品

油脂体作为一种天然乳液在制备仿乳制品方面显示出良好的前景,如植物基乳、酸奶、冰淇淋和蛋黄酱等^[2]。由于乳糖不耐症以及对素食主义和健康的需求,消费者对牛奶替代品的需求不断增加。植物基乳因含有膳食纤维、维生素、矿物质和天然抗氧化剂等通常被认为是健康的。一般来说,植物基乳是由分散在水相中的油脂体、固体颗粒和淀粉颗粒组成的乳化体系,油脂体取代乳脂滴及其表面水溶性蛋白质的存在改善了植物基乳的质地、稳定性和营养特性。植物基乳在加热时可以保持其香气特征和生物活性成分,并表现出良好的物理稳定性和氧化稳定性^[8]。Shakerardekani 等^[18]以开心果油脂体为天然预乳化乳液,添加 5.0% 的糖、0.02% 的香草制备了开心果乳。韩昊天等^[19]以大豆油脂体为原料制作豆乳饮品,不需要添加乳化剂且无均质过程,在不加任何防腐剂的情况下制作的豆乳饮品在 4℃ 可保存 30 d 以上。周莉等^[20]采用葵花籽油脂体制备低脂冰淇淋,发现在无均质的条件下添加适量油脂体的效果与棕榈油相似,且可以简化冰淇淋的生产工艺,降低成本。陈业明等^[21]制备的花生油脂体稳定乳状体系克服了油脂伴随物的过度脱除和油脂氢化的反式脂肪酸生成问题,可应用于奶茶、色拉酱等食品。Idogawa 等^[22]采用水剂法提取大豆油脂体并用 0.1 mol/L Na₂CO₃ 溶液洗涤两次以制备豆浆,结果发现豆浆中油脂体的稳定性依赖于油体蛋白的存在,且大豆油脂体在整个豆浆生产过程中不聚集。Mantzouridou 等^[23]通过水剂法提取玉米胚芽油脂体,然后通过超滤浓缩制备酸奶,与以全脂牛奶制备的酸奶相比,基于油脂体的酸奶表现出更好的脂质结构和宜人的香气,且由于内源性生物活性成分的存在,其具有更好的氧化稳定性。综上所述,油脂体被用于制备仿乳制品可赋予产品更高的营养价值以及更好的品质,应用前景广阔。

3.2 作为肉制品中的脂肪替代品

加工肉制品中通常含有大量的动物脂肪,而动物脂肪中饱和脂肪酸和胆固醇含量较高,因此过量摄入肉制品存在潜在的健康风险。通过提高单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸与饱和脂肪酸的比例,用植物油代替动物脂肪已被视为实现更健康肉制品的可行策略。然而,将植物油直接掺入肉制品中进行调制可能会导致其质地柔软黏稠、氧化稳定性降低^[24-25]。研究表明,利用预乳化形式的油可以缓解肉制品的品质劣变^[26]。油脂体作为一种天然预乳化水包油乳液,具有良好的热稳定性和氧化稳定性,有助于抑制肉制品中的脂质氧化。Bibat等^[27]发现用油菜籽油脂体替代猪肉模型体系中的猪背膘,可以产生更柔软、低黏度、更易咀嚼的猪肉制品,并改善其乳化稳定性和氧化稳定性。同时,考虑到油菜籽油脂体在猪肉模型体系中的总体影响,利用油脂体对猪肉模型体系中的猪背膘进行部分替代(替代率 $\leq 50\%$),其工艺特性的改变是可以接受的。

3.3 制备可食用膜

基于生物可降解材料如多糖、蛋白质、脂类和复合材料制成的可食用膜在食品包装和作为抗氧化剂和抗菌剂等活性化合物的载体方面具有潜在用途^[28]。然而,水溶性亲水胶体可食用膜的阻水性能较差,而将植物油添加到生物可降解材料中可降低其水蒸气渗透性,另外为减少均质化可加入天然油脂体替代植物油^[8]。Matsakidou等^[29]制备玉米胚芽油脂体复合酪蛋白酸钠可食用膜,与不含油脂体的膜相比,该复合膜呈乳白色,同时具有较高的表面疏水性、较低的透水性、较高的柔韧性和较低的硬度,但油脂体的存在导致复合膜表面表现出不规则性。Matsakidou等^[30]再次利用玉米胚芽油脂体制备酪蛋白酸钠-甘油复合膜,与不含油脂体的膜相比,复合膜的柔韧性更高以及拉伸强度更低,同时在温度 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和相对湿度 53% 的条件下储存两个月后复合膜吸水率显著降低。综上所述,利用油脂体制备的可食用膜具有更高的柔韧性以及更低的透水性,具有良好的经济意义。

3.4 制备油脂体基乳液-凝胶

乳液-凝胶是一种典型的半固态食品体系,其由充满油/脂肪液滴的凝胶基质组成。蛋白质(明胶、大豆蛋白、酪蛋白)和多糖(淀粉、卡拉胶、果胶、海藻酸钠、亚麻籽胶)等是常用的基质^[8]。乳液-凝胶由于其结构和组成的多样性,在减脂、释放益生菌和控制风味等方面具有广泛的应用前景^[31]。由于油脂体的营养价值和天然乳化特性,其可替代传

统凝胶中的油/脂肪液滴。Nikiforidis等^[32]使用葵花籽油脂体制备高内相乳液-凝胶,油脂体乳液离心后所得浓缩乳液中油体积分数为 91% ,蛋白质含量为 2.5% ,向其添加 $0.1\sim 0.4\text{ mmol/L}$ 的钙离子并在 $72\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下加热 10 min ,形成的凝胶剪切弹性模量介于 $10^2\sim 10^5\text{ Pa}$ 之间,储能模量增加两个数量级。Kirimlidou等^[33]将油脂体-明胶混合物的pH调至 $5.8\sim 6.2$,发现带正电荷的明胶分子与带负电荷的油脂体表面蛋白质发生静电相互作用,使大量分散的油脂体作为明胶基质网络的填充材料,油脂体的加入使凝胶形成时间缩短 $20\%\sim 30\%$,并提高了复合凝胶的凝胶强度。Yang等^[34]构建了以大豆油脂体为填充油/脂液滴、 κ -卡拉胶(KC)为凝胶基质的乳液-凝胶,通过调节油脂体乳液的pH,改变油脂体表面蛋白质的电荷数量,进而影响KC与油脂体之间的静电相互作用,与KC凝胶和Tween-80乳液凝胶相比,油脂体的添加使复合凝胶的润滑性能显著提高,同时获得了超低边界摩擦系数(0.038),这对于研究油脂体乳液-凝胶在半固态食品中的应用具有重要意义。

3.5 作为运输生物活性物质的载体

油脂体具有独特的磷脂-蛋白质膜结构和疏水核心,其疏水核心对非极性生物活性物质具有较好的溶解性,因此油脂体可作为一种新型载体对生物活性物质进行运输^[35]。王钧渤^[36]研究发现花生和核桃油脂体乳液均表现出良好的消化特性,且制备的核桃油脂体运载 β -胡萝卜素乳液经肠消化后游离脂肪酸释放量为 $42.7\text{ }\mu\text{mol/mL}$, β -胡萝卜素释放率可达 47% 。Zhao等^[37]将具有强抗氧化性的高敏感分子虾青素包封到花生油脂体中,发现微胶囊化可提高虾青素的保留率和储存稳定性。为了保持天然油脂体结构的完整性,研究者开发了pH驱动和超声辅助负载方法。Zheng等^[35]将姜黄素溶解在pH大于8的强碱溶液中,使羟基去质子化,导致姜黄素的负电荷数量和亲水性增加,将该溶液与酸化的油脂体悬浮液混合,混合体系的最终pH约为中性或更低,这导致水相中的姜黄素变为非极性,并进入油脂体的疏水内部,形成负载姜黄素的油脂体,其经过模拟胃肠道消化过程后姜黄素仍具有相对高的稳定性和生物可及性。Liu等^[38]用大豆油脂体包封的姜黄素乳液在pH为 2.0 和 $6.0\sim 10.0$ 时稳定性良好,同时在模拟肠道条件下姜黄素释放率持续增加,表明大豆油脂体是一种良好的天然乳化剂和新型的亲脂性生物活性分子载体。Sun等^[39]通过超声辅助处理成功制备了稳定的负载姜黄素的油脂

体乳液,其稳定性归因于超声处理产生的压力和剪切力使油脂体乳液颗粒变小,有效增加了吸附在大豆油脂体表面的游离外源性蛋白质的数量,最终形成的界面蛋白质浓度更高,促进了姜黄素通过疏水相互作用与油脂体蛋白质的疏水区域结合。

4 结束语

植物油脂体作为天然乳液具有良好的稳定性和乳化性能,其用于食品工业可以满足营养健康和绿色安全的要求,具有非常高的潜在应用价值。不同的提取工艺会对油脂体的组成、提取率和理化性质产生影响,因此开发一种低成本、高提取率、可持续性、获得油脂体结构完整的提取工艺是必要的。油脂体的特殊结构可为人工油脂体的开发提供参考,油脂体及其单个组分的潜在功能也值得探讨。未来的研究应充分探索基于油脂体应用系统的组成和结构对其生物可利用性、生物利用度和功能的影响;另外,天然油脂体潜在的过敏行为和毒性问题也不容忽视,需要进行体外和体内研究。随着油脂体提取技术的发展以及其应用领域研究的扩展与深入,可以预见,油脂体的开发利用具有更广阔的发展前景。

参考文献:

- [1] ZAABOUL F, ZHAO Q, XU Y, et al. Soybean oil bodies: A review on composition, properties, food applications, and future research aspects [J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2022, 124: 107296 [2022 - 08 - 14]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107296>.
- [2] ABDULLA H, WEISS J, ZHANG H. Recent advances in the composition, extraction and food applications of plant - derived oleosomes [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2020, 106: 322 - 332.
- [3] 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.
- [4] 赵路苹. 大豆油体富集物的蛋白质组成及其对油体乳液性质的影响研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2017.
- [5] 杨旭凤, 侯文淇, 郭本虎, 等. 植物油体消化特性研究的进展[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(11): 297 - 304.
- [6] ZAABOUL F, RAZA H, CHEN C, et al. Characterization of peanut oil bodies integral proteins, lipids, and their associated phytochemicals[J]. *J Food Sci*, 2018, 83(1): 93 - 100.
- [7] CHEN Y, CAO Y, ZHAO L, et al. Macronutrients and micronutrients of soybean oil bodies extracted at different pH[J]. *J Food Sci*, 2014, 79(7): C1285 - C1291.
- [8] HAO J, LI X, WANG Q, et al. Recent developments and prospects in the extraction, composition, stability, food applications, and *in vitro* digestion of plant oil bodies[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2022, 99(8): 635 - 653.
- [9] ZHOU L Z, CHEN F S, HAO L H, et al. Peanut oil body composition and stability[J]. *J Food Sci*, 2019, 84(10): 2812 - 2819.
- [10] DING J, XU Z, QI B, et al. Thermally treated soya bean oleosomes: The changes in their stability and associated proteins[J]. *Int J Food Sci Tech*, 2020, 55(1): 229 - 238.
- [11] TONTUL I, SERT D. Extraction and purification of oil bodies from pomegranate seeds [J/OL]. *J Food Process Pres*, 2021, 45(8): e15053 [2022 - 08 - 14]. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15053>.
- [12] 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 Bioprod Process*, 2020, 121: 230 - 237.
- [13] NTONE E, BITTER J H, NIKIFORIDIS C V. Not sequentially but simultaneously: Facile extraction of proteins and oleosomes from oilseeds [J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2020, 102: 105598 [2022 - 08 - 14]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105598>.
- [14] LIU C, CHEN F, XIA Y, et al. Physicochemical and rheological properties of peanut oil body following alkaline pH treatment [J/OL]. *LWT - Food Sci Technol*, 2022, 154: 112590 [2022 - 08 - 14]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112590>.
- [15] LIU C, CHEN F S, XIA Y M. Composition and structural characterization of peanut crude oil bodies extracted by aqueous enzymatic method [J/OL]. *J Food Compos Anal*, 2022, 105: 104238 [2022 - 08 - 14]. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104238>.
- [16] NIU R, CHEN F, LIU C, et al. Composition and rheological properties of peanut oil bodies from aqueous enzymatic extraction [J]. *J Oleo Sci*, 2021, 70(3): 375 - 383.
- [17] XU D, GAO Q, MA N, et al. Structures and physicochemical characterization of enzyme extracted oil bodies from rice bran [J/OL]. *LWT - Food Sci Technol*, 2021, 135: 109982 [2022 - 08 - 14]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109982>.
- [18] SHAKERARDEKANI A, KARIM R, VASELI N. The effect of processing variables on the quality and acceptability of pistachio milk [J]. *J Food Process Pres*, 2013, 37(5): 541 - 545.
- [19] 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.
- [20] 周莉, 赵路苹, 刘莹, 等. 葵花籽油体富集物添加量对

- 低脂冰淇淋浆料及产品品质的影响[J]. 中国油脂, 2023, 48(8):121-127, 148.
- [21] 陈业明, 李惠纳, 华欲飞, 等. 一种制备花生油脂体稳定乳状体系的方法: CN109463470B[P]. 2021-09-10.
- [22] IDOGAWA S, ABE N, ABE K, et al. Effect of oleosins on the stability of oil bodies in soymilk[J]. Food Sci Technol Res, 2018, 24(4): 677-685.
- [23] 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 Sci Technol, 2019, 105: 48-56.
- [24] ZHU Y, GUO L, TANG W, et al. Beneficial effects of Jerusalem artichoke powder and olive oil as animal fat replacers and natural healthy compound sources in Harbin dry sausages[J]. Poult Sci, 2020, 99(12): 7147-7158.
- [25] NACA K B, ÖZTÜRK - KERİMOĞLU B, YILDIZ D, et al. Peanut and linseed oil emulsion gels as potential fat replacer in emulsified sausages[J/OL]. Meat Sci, 2021, 176: 108464 [2022-08-14]. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108464>.
- [26] UTAMA D T, JEONG H S, KIM J, et al. Fatty acid composition and quality properties of chicken sausage formulated with pre-emulsified perilla-canola oil as an animal fat replacer[J]. Poult Sci, 2019, 98(7): 3059-3066.
- [27] 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/OL]. Meat Sci, 2022, 186: 108732 [2022-08-14]. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108732>.
- [28] JEYA JEEVAHAN J, CHANDRASEKARAN M, VENKATESAN S P, et al. Scaling up difficulties and commercial aspects of edible films for food packaging: A review[J]. Trends Food Sci Technol, 2020, 100: 210-222.
- [29] MATSAKIDOU A, BILIADERIS C G, KIOSSEOGLOU V. Preparation and characterization of composite sodium caseinate edible films incorporating naturally emulsified oil bodies[J]. Food Hydrocolloid, 2013, 30(1): 232-240.
- [30] MATSAKIDOU A, TSIMIDOU M Z, KIOSSEOGLOU V. Storage behavior of caseinate-based films incorporating maize germ oil bodies[J]. Food Res Int, 2019, 116: 1031-1040.
- [31] LIN D, KELLY A L, MIAO S. Preparation, structure-property relationships and applications of different emulsion gels: Bulk emulsion gels, emulsion gel particles, and fluid emulsion gels[J]. Trends Food Sci Technol, 2020, 102: 123-137.
- [32] NIKIFORIDIS C V, SCHOLTEN E. High internal phase emulsion gels (HIPE-gels) created through assembly of natural oil bodies[J]. Food Hydrocolloid, 2015, 43: 283-289.
- [33] KIRIMLIDOU M, MATSAKIDOU A, SCHOLTEN E, et al. Composite gels structured by a gelatin protein matrix filled with oil bodies[J]. Food Struct, 2017, 14: 46-51.
- [34] YANG N, FENG Y, SU C, et al. Structure and tribology of κ -carrageenan gels filled with natural oil bodies[J/OL]. Food Hydrocolloid, 2020, 107: 105945 [2022-08-14]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105945>.
- [35] ZHENG B, ZHANG X, PENG S, et al. Impact of curcumin delivery system format on bioaccessibility: Nanocrystals, nanoemulsion droplets, and natural oil bodies[J]. Food Funct, 2019, 10(7): 4339-4349.
- [36] 王钧渤. 两种油体乳液及运载 β -CE乳液的稳定性与体外消化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [37] ZHAO X, WANG K, ZHAO J, et al. Physical and oxidative stability of astaxanthin microcapsules prepared with liposomes[J]. J Sci Food Agric, 2022, 102(11): 4909-4917.
- [38] LIU C, WANG R, HE S, et al. The stability and gastro-intestinal digestion of curcumin emulsion stabilized with soybean oil bodies[J/OL]. LWT - Food Sci Technol, 2020, 131: 109663 [2022-08-14]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109663>.
- [39] SUN Y, ZHONG M, WU L, et al. Loading natural emulsions with nutraceuticals by ultrasonication: Formation and digestion properties of curcumin-loaded soybean oil bodies[J/OL]. Food Hydrocolloid, 2022, 124: 107292 [2022-08-14]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107292>.