

植物种子油体的研究与应用进展

邢 星^{1,2}, 王瑛瑶², 魏安池¹, 方 冰²

(1. 河南工业大学 粮油食品学院, 河南 郑州 450001;

2. 国家粮食局科学研究院, 北京 100037)

摘要:油体是由半单位膜包裹液态三酰甘油酯而成的球体, 作为一种天然乳液具有良好的稳定性。综述了植物种子油体的结构与组成、油体相关蛋白的种类和特征, 重点介绍了国内外与油体应用相匹配的提取和纯化技术的研究进展, 并对油体性质以及不同领域的潜在应用, 尤其是食品领域中的应用研究做了阐述。

关键词:油体; 结构与组成; 提取; 性质; 应用

中图分类号:TQ 645.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7561(2015)03-0045-05

Research and application progress on oil body of plant seeds

XING Xing^{1,2}, WANG Ying-Yao², WEI An-Chi¹, FANG Bing²

(1. College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou Henan 450001;

2. Academy of State Administration of Grain, Beijing 100037)

Abstract: Oil body is a spherical mass of liquid tri-acylglycerols surrounded by half unit membrane, and it owns good stability as a kind of natural emulsion. The structure and components of seed oil body, the variety and characteristics of proteins associated with oil body were summarized, and the research progress in oil bodies' extraction and purifying technology at home and abroad suiting for their application were focused on. Its properties and potential application in different fields, especially the exploitation research in food industry were elaborated.

Key words: oil body; structure and components; extraction; properties; application

脂类是植物种子中能量贮存最有效的形式, 与蛋白质和碳水化合物相比, 单位质量脂肪提供的能量更多。植物种子的脂类物质主要以三酰甘油酯(triacylglycerols, TAG)的形式贮藏。这些三酰甘油酯分子被一层半单位膜所包围, 形成许多小的相对稳定的亚细胞微滴, 这些小的亚细胞微滴就是油体(oil bodies), 也称为油脂体(lipid bodies)或油质体(oleosomes)^[1]。20世纪90年代开始, 国内外学者对油体的分子结构、蛋白质成分、结构功能进行了广泛的研究, 为更好地适应油体在不同领域的应用需要, 之后国内外有关油体提取纯化技术以及性质研究的内容也不断深入。近年来, 油体因其具有人为制备的乳液所不具备的稳定性、致敏反应低等优势, 在食品、化妆品及制药工业等领域中得到越来越多的重视。

为更好地推动植物油料来源天然油体的应用,

本文重点介绍了油体结构特点以及提取技术研究进展, 并对油体的应用前景进行了探讨。

1 油体结构与组成

1.1 油体的结构

油体是植物细胞中最小的细胞器之一, 大小因植物种类不同而有所差异, 同一类种子的不同组织细胞中, 油体的大小也不尽相同, 此外, 也会受到营养和环境的影响。油体内部液态基质为三酰甘油酯, 外围被一层磷脂(phospholipid)和其镶嵌蛋白质组成的“半单位”膜所覆盖, 磷脂占油体表面成分的80%, 其余20%为油体蛋白。油体结构模型^[2]如图1所示, 油体表面大部分都被油体蛋白所覆盖, 以阻止外部的磷脂酶作用于单层磷脂“半单位”膜, 磷脂层的疏水酰基与内部的三酰甘油酯相互作用, 而亲水头部基团则面向细胞液, 因此油体的表面有一定的亲水性。油体表面除了镶嵌油体蛋白以外, 还镶嵌少量其他蛋白, 如油体钙蛋白(caleosin)。迄今为止, 油体蛋白和油体钙蛋白是被研究最多的两种油体结合蛋白。

收稿日期: 2015-01-05

基金项目: 国家863计划课题(2013AA102104)

作者简介: 邢星, 1989年出生, 女, 河南鹤壁人, 硕士。

通讯作者: 王瑛瑶, 1978年出生, 女, 浙江金华人, 研究员, 博士。

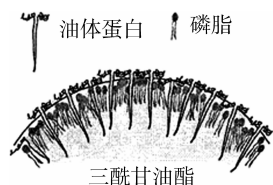


图1 油体结构模型图

在干燥种子细胞内或者体外经离心分离的上浮液中,油体之间并不会发生融合或聚合,甚至经过长时间储存也能保持稳定,说明油体无论在细胞中还是在游离状态下,均具有良好的稳定性。

1.2 油体的组成

油体主要组成为:三酰甘油酯、磷脂和油体相关蛋白。表1列出了7种植物油料种子油体的主要组成,可以看出,不同植物油体的平均直径差异较大。油体的大小取决于蛋白质、磷脂、三酰甘油酯的比例,油体蛋白(oleosin)含量较高的物种其油体体积较小^[3]。此外,油体中还含有少量的细胞色素C还原酶,某些植物(如蓖麻和大豆)成熟种子的油体膜上还有脂酶和酰基甘油酶。

表1 不同植物中油体的平均直径和各项生化组成^[3]

植物	平均直径/ μm	主要组成(w/w)/%				磷脂组成(w/w)/%			
		中性脂类	蛋白质	磷脂	游离脂肪酸	卵磷酰胆碱	磷脂酰乙醇胺	磷脂酰肌醇	磷脂酰丝氨酸
花生	1.95	98.17	0.94	0.80	0.09	61.6	5.0	8.4	25.0
玉米	1.45	97.58	1.43	0.91	0.09	64.1	8.1	7.6	20.2
油菜	0.65	94.21	3.46	1.97	0.36	59.9	5.9	14.0	20.2
芥菜	0.73	94.64	3.25	1.60	0.17	53.1	15.5	13.1	18.3
棉花	0.97	96.99	1.70	1.18	0.13	58.6	4.6	18.1	18.7
亚麻	1.34	97.65	1.34	0.90	0.11	57.2	2.8	6.9	33.1
芝麻	2.00	97.37	0.59	0.57	0.13/1.47*	41.2	15.8	20.9	22.1

注: *表示0.13%和1.47%分别是新鲜油料种子和储藏数月后的油料种子油体中的游离脂肪酸含量。

2 油体相关蛋白

油体的半单位膜中,目前报道的除油体蛋白外,已经在芝麻中发现了油体钙蛋白(caleosin(sop1))、油体固醇蛋白[steroleosin(sop2、sop3)]^[4]。

2.1 油体蛋白

油体蛋白只存在于种子油体中^[5],是种子油体中含量最丰富的结构蛋白,占种子总质量的0.4%~1.6%^[1],油体蛋白的含量可能影响到油体大小^[3]。绝大多数油体蛋白位于油体的半单位膜上,少量位于油体附近的内质网片段上^[6]。植物种子中的油体蛋白相对分子量范围在 $15 \times 10^3 \sim 26 \times 10^3$ 之间,是疏水的小分子量碱性蛋白,油体蛋白的氨基酸序列高度保守,包含3个结构域:一个高度疏水的伸入三酰甘油酯内的中心结构域,极性的C-末端和N-末端^[7],这种结构利于油体蛋白嵌入油体的膜

内。油体表面的疏水相互作用是油体稳定的基础。

同时,每个油体蛋白分子的3/5覆盖于油体大部分表面,可以阻止细胞质中磷脂酶作用于油体表面的磷脂,以维持油体的稳定。Tzen和Huang^[8]用胰蛋白酶处理提取出的油体,其稳定性被破坏,但是用磷脂酶处理,油体仍保持完整,稳定性很好。这很好地证实了油体镶嵌蛋白在油体中的存在方式。油体蛋白的等电点为5.7~6.6,当pH为中性时,油体表面呈负电荷,油体之间相互排斥,在空间上阻止油体间相互聚合^[9]。在pH达到等电点时,由于组氨酸残基的质子化,油体蛋白呈中性,油体表面因失去电荷互不排斥,导致油体聚合,这些结果进一步证明了油体蛋白稳定油体的作用。油体蛋白的这种特性能够保证种子在脱水状态下其油体仍处于小而分散的状态,从而保持结构稳定。

2.2 油体钙蛋白与油体固醇蛋白

油体钙蛋白和油体固醇蛋白与油体蛋白一样,也包括3个明显的结构域:N端和C端亲水区,中心疏水区。

油体钙蛋白的N末端亲水性极强,含有一个与 Ca^{2+} 结合的EF-hand结构域,它可能直接参与膜和油体的融合,这个融合过程受钙的调节^[10]。油体钙蛋白具有稳定油体的功能,对油体中储存脂类的降解也具有重要作用。

普遍认为,植物种子长期保存后,油体结构不会发生相互聚合而仍能保持稳定,这与油体表面镶嵌的蛋白有关。人造油体稳定性的研究结果进一步表明,对油体结构起稳定作用的是油体蛋白和油体钙蛋白而不是油体固醇蛋白^[11]。因此推测,N端乙酰化作用能提高油体结构稳定性,并且阻止泛素化作用降解这两种油体结构蛋白,以长期保护细胞器的生物功能^[12]。

3 油体的提取与纯化

油体提取方法主要有水相提取法、缓冲溶液提取法和酶辅助提取法三种。水相提取法简单方便,不涉及大量的缓冲液和有机溶剂,但得到的油体纯度不如缓冲溶液提取法。酶辅助法虽反应时间较长,但油脂回收率高,油体提取效率高。

美国专利US6183762 B1^[13]公布了一种只用水清洗离心提取油料中油体的适合工业化生产的方法。Kiosseoglou等^[14]用水萃取的方式提取了玉米胚乳中的油体,并研究了水介质的pH值、玉米胚乳的破碎状态、萃取次数等对油体得率的影响,发现在碱性条件下提取3次,油体得率就能达到95%

以上。

1997年, Tzen^[15]首先提出了缓冲液提取、纯化油体的方法, 萃取、离心沉淀后得到的粗油体经过去污清洗液(0.1%的 Tween-20, 0.2 mol/L 蔗糖, 5 mmol/L pH 7.5 的磷酸钠缓冲液)清洗、盐离子洗脱、离散剂(尿素)处理等步骤, 除去了油体中非特异性结合蛋白及杂质, 能得到纯正完整的油体。其中粗油体的提取主要是在 pH、粘度和离子强度可控制的水性介质中研磨进行, 并加入蔗糖和 NaCl 形成适宜的渗透压保护油体的完整性。离散剂以及有机溶剂等通常是破坏生物分子使其变性的化学试剂, 但该研究中, Tzen 等人采用相对剧烈的化学试剂洗涤油体, 有效地清除了油体表面非共价结合的蛋白, 达到了纯化油体的目的, 在这种过程中油体的回收率为 60%。

粗油体纯度较低, 要得到纯度高、颜色较浅的油体制品, 可采用不同的液体多次洗涤, 洗涤还能除去可促进微生物生长的化合物, 提高油体贮存期。洗涤液体及洗涤条件(如 pH 和温度)可根据所用种子类型的不同而不同。洗涤液体可以为水、缓冲液(如浓度为 0.01~2 mol/L 的 NaCl 溶液、0.1 mol/L 的 Na₂CO₃ 溶液、50 mmol/L pH 7.5 的 Tris-HCl 低盐缓冲液等)、有机溶剂、去污清洗液或其他液体。一般而言, 采用多个不同 pH 条件洗涤粗油体, 有利于分步除去其中的杂质, 特别是蛋白质。SDS 凝胶电泳或其他分析技术可以监测洗涤过程中油体中其他蛋白质和杂质的去除情况。Jacks 等^[16]用 0.02 mol/L/0.05 mol/L 的 Tris-HCl 含 NaCl 的溶液(pH 7.2)和蒸馏水多次洗涤粗油体, 得到的油体纯度达 99.55%。

赵路苹等^[17]研究了 NaCl、尿素、EDTA-2Na、SDS 和温度等提取条件对大豆油体表面蛋白质的影响, 结果发现, 用大于 6 mol/L 尿素处理和 80~100 °C 加热处理 15 min 都有利于去除油体表面结合的大豆蛋白质, 得到高纯度的油体, 但 NaCl 和 EDTA-2Na 对去除油体表面结合的蛋白质没有作用。

H. M 等^[18]研究发现, 与未洗涤的粗油体相比, 纯度高的油体在加热(60~80 °C)时能吸收更多外部添加的水, 这一性质对于扩大油体在涉及加热处理的工艺中的应用极为有利; 经洗涤的油体制品在冷却离心处理后仍能保持稳定且更粘稠, 而未经洗涤的粗油体则出现相分离, 这说明经洗涤后的油体稳定性增加; 而纯油体粘稠度增加的特性可以减少

相应食品加工中增稠剂的用量。D. Fisk^[19]发现水洗的油体用麦芽糊精作为载体, 喷雾干燥后油保留率达到 89%~93%, 这表明水洗的油体在喷雾干燥过程中也能保持稳定。

Kapchie 等^[20-23]发表了酶辅助水提取大豆油体的方法, 60 °C、150 r/min 条件下, 用复合果胶酶、纤维素酶、 β -葡聚糖酶混合物处理豆粉 20 h 后过滤, 然后滤液离心得到油体, 油体回收率最高达 84.65%。电镜观察发现提取的油体结构完整, 表明酶辅助提取方法不会影响油体结构的完整性。同时比较了超声和高压两种前处理方法对油体提取率的影响, 结果表明高压和超声处理 3 min 即可提高油脂回收率。中试规模的大豆油体提取产率上升至 93.40%。该方法大豆油体效率高, 为大豆油体的工业化生产奠定了很好的技术基础。

4 油体的性质及应用

4.1 油体的性质

油体中不到 2% 的油体蛋白稳定了大约 70% 以上的油脂, 在一些研究中油体的稀释悬浮液被称为油体天然乳液, 这种天然预乳化的油, 在很长时间内能处于非常稳定的状态。一般的乳液是必须加入一定量的乳化剂和乳化稳定剂才能让体系中油水分散体系稳定, 而油体作为天然乳液具有与常规乳液相当或者更优的稳定性, 上述性质为研发油体新型功能食品奠定了很好的基础。

油体可耐受强酸强碱, 可以在低至 pH 2 的酸性条件和高于 pH 10 的碱性条件下长时间暴露, 但在 pH 12 的条件下, 油体会丧失部分结构完整性, 损失少量油。曹艳芸等^[24]考察了高碱性提取条件对大豆油体成分的影响。结果表明, 高碱性下提取能够获得纯净、不含有过敏性蛋白及其他杂蛋白的油体, 但它在一定程度上仍会改变所提取油体的成分和性质, 对大豆油体表面的蛋白质和磷脂成分产生较为显著的影响; 而对中性脂的核心部分(脂肪酸、生育酚)基本无影响。证明了油体特殊的天然乳化结构可以保护其内的三酰甘油酯。

油体还可耐高温, 一定程度的加热不会引起油体的聚合。H. M 等^[18]将油体 100 °C 加热 2 h, 发现油体仍能保持稳定, 这可能与油体及油体蛋白的特殊结构有关, 加热过程中, 油体蛋白的疏水性末端能牢固的插入到三酰甘油酯内部而不会暴露于水中, 因此能使油体结构保持稳定^[25]。但油体经缓慢冻融后则会凝结成团块, 物理外观发生改变, 稳定性受到破坏。可采用以下方法来防止冻融后的油体形成团块:

(1)在液氮中速冻而不是在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 缓慢冷冻;(2)冷却前向油体制品中加入高于5%(V/V)的甘油^[18]。

此外,油体对多种有机溶剂(包括甲醇、乙醇、己烷、异丙醇和乙酸乙酯等)、表面活性剂有耐受性,用不同的有机溶剂萃取基本不会影响油体的完整性,油体也可经受与阴离子表面活性剂(十二烷基硫酸钠)、阳离子表面活性剂(十六烷三甲基溴)和非离子表面活性剂(Tween-80)混合,但在十二烷基硫酸钠(SDS)存在下煮沸油体制品可以导致肉眼可见的油体结构部分丧失完整性^[18]。赵路苹等^[17]研究发现 SDS 可以取代油体蛋白,破坏油体天然结构。

4.2 油体的应用

含多不饱和脂肪酸的油脂氧化易导致应用体系产生严重的异味物质不饱和醛,尤其是富含 $\omega-3$ 多不饱和脂肪酸的油脂,从而影响应用体系的可接受性。由于油体本身的稳定作用,如果油体作为食物或药物中的添加物,其中的多不饱和脂肪酸就不易被氧化。基于此,油体在多种新型乳液食品、化妆品、药物中的应用开发成了研究热点。

食品中,油体的物理化学性质和流变学行为对油体在食品中的应用有很大影响。因而,其应用研究主要集中在怎样提高油体在水溶液中的稳定性。目前文献中研究较多的是大豆、花生、玉米和葵花籽等油料来源的油体。

Rujira Sukhotu 等人^[26]为了将玉米胚芽油体作为添加剂应用到食品工业中,研究了玉米胚芽油体在不同的 pH、离子强度、加热处理下的聚合和稳定性。结果表明,高浓度盐和酸性 pH 下会导致油体聚合和不稳定性,但加热不会影响胚芽油体的稳定性。盐会影响油体悬浮液的电位,因此,在应用时必须尽可能少添加盐,以抑制盐对油体稳定性的不利影响,维持悬浮液的稳定。阴离子表面活性剂 SDS 在低 pH 值可能会减少油体之间的聚合。表面活性剂的存在不仅导致静电排斥增加,还破坏了油体表面疏水蛋白质之间的相互作用。

吴娜娜等^[25]研究了大豆油体乳液的基本物理性质,大豆油体乳液在远离等电点(pH 4.5)和低盐浓度(NaCl 溶液浓度小于 50 mmol/L)下是稳定的,即使在 30~90 $^{\circ}\text{C}$ 加热处理后放置也不会出现聚集和乳析现象。这为大豆油体乳液在一定环境条件下作为天然的植物油资源应用于食品工业提供了很好的基础。Adams 等^[27]以南瓜籽为原料,用水从中提取油体,测定粒度、电位和微结构,对南瓜籽油体的基本物理化学性质进行了研究,发现南瓜籽油

体等电点为 pH 3~3.5,在远离等电点和低盐浓度(<50 mmol/L)下该油体具有较好的稳定性,可以将其应用于食品和医疗用途。

此外,很多研究者为提高油体乳液稳定性,进一步研究了油体和其他成分的相互作用对油体稳定性的影响。Kiosseoglou 等^[28]在油体乳液中加入 0.1% 的黄原胶,发现油体乳液的稳定性大为提高,并且蛋白含量越高的油体乳液稳定性提高幅度越大。McClements 等^[29]研究证实用果胶包裹油体可以显著提高油体的稳定性。Wu 等^[30]研究发现 pH 3 和 7 时, ι -卡拉胶稳定的大豆油体乳液经过冻融循环仍然能够保持稳定,说明 ι -卡拉胶的存在提高了大豆油体乳液的稳定性。Olga A. Karkani 将绿茶提取物和自然油体乳液混合作为功能性饮料基料,并研究其乳化行为,发现绿茶多酚会与油体相互结合导致出现分散型极不稳定物,但添加少量的卡拉胶后即可使体系保持稳定^[31]。

专利 US2014/0045940 A1^[32]提出了一种制备天然干燥油体的方法:在粗油体洗涤后得到的纯净油体中加入蛋白质或糖载体进行喷雾干燥,获得粉末状的干燥油体。干燥的油体可以储存至少 6 个月而不发生相分离、氧化或微生物腐蚀,并且可以再水化生成稳定的、物理结构完整油体悬浮液。这种干燥的油体可广泛应用于食品、个人护理产品和医药用品等。

除食品以外,油体在化妆品和药物中的应用也很广泛。专利 CN1863506A^[33]提出了一种制备包含油体及活性成分制剂的新方法,将药学、治疗学、皮肤病学、营养学或化妆品学中的一种或多种疏水或两亲活性物制剂作为生物活性剂分配至油体的内部油核、脂质膜上、脂质膜内或附于油体的脂质膜外表面,制备成含有生物活性剂的乳状液,这种含活性剂的油体在个人护理和皮肤病制品的应用中相当方便。

5 展望

随着人们生活水平的提高,生产营养健康、绿色安全和风味良好的食品将成为未来食品产业的发展趋势。油体作为天然存在的食品原料,营养丰富并且性质优良,应用于食品工业既不需乳化剂,也不需均质过程,既能满足营养健康和绿色安全的要求,又可以节约能源。纯度高的油体贮存期长,颜色、气味和粘稠度均较优,同时也有较好的吸水吸油特性,除去大量蛋白质后的纯净油体在食品应用中可以减少食品的致敏性,因而纯度高的油体制品的应用前景

更为广阔。今后,研究高纯度油体的制备技术,并建立切实经济、技术上可行的应用方法,将是该领域的重点。

参考文献:

- [1] Anthony H, Huang C. Oil bodies and oleosins in seeds[J]. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biot.*, 1992, 43(4): 177-200.
- [2] Linna Wang. Properties of soybean oil bodies and oleosin proteins as edible films and coatings[D]. West Lafayette, USA; Purdue University, 2004, 5.
- [3] Tzen J, Cao Y, Laurent P, et al. Lipids, proteins, and structure of seed oil bodies from diverse species[J]. *Plant Physiol.*, 1993, 101(1): 267-276.
- [4] Chen E C F, Tai S S K, Peng C C, et al. Identification of three novel unique proteins in seed oil bodies of sesame[J]. *Plant Cell Physiol.*, 1998, 39(9): 935-941.
- [5] 屠宝玉, 贾美慧, 李立新. 植物油脂及其结构蛋白研究[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(10): 5689-5694.
- [6] 程红焱, 宋松泉. 种子的贮油细胞器-油体及其蛋白[J]. *植物学通报*, 2006, 23(4): 418-430.
- [7] Frandsen G I, Mundy J, Tzen J T, et al. Oil bodies and their associated protein, oleosin and caleosin physiology[J]. *Plantarum*, 2001, 112(3): 301-307.
- [8] Tzen J T C, Huang A H C. Surface structure and properties of plant seed oil bodies[J]. *Cell Boil.*, 1992, 117(2): 327-335.
- [9] White D A, Fisk I D, Mitchell J R, et al. Sunflower-seed oil body emulsions: Rheology and stability assessment of a natural emulsion[J]. *Food Hydrocolloids*, 2008, 22(7): 1224-1232.
- [10] Henrik N, Frandsen G I, Guang-Yuh J, et al. Caleosins: Ca^{2+} -binding proteins associated with lipid bodies[J]. *Plant Molecular Biology*, 2000, 44(4): 463-476.
- [11] Chen M C M, Chyan C L, Lee T T T, et al. Constitution of stable artificial oil bodies with triacylglycerol, phospholipid, and caleosin[J]. *J. Agric. Food Chem.*, 2004, 52(12): 3982-3987.
- [12] Li-Jen Lin, Pao-Chi Liao, Hsueh-Hui Yang, et al. Determination and analyses of the N-termini of oil-body proteins, steroleosin, caleosin and oleosin[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2005, 43(8): 770-776.
- [13] Sembiosys Genetics Inc., Calgary (CA). Oil Body based personal care products; United States, US6183762 B1[P]. 2001-02-06.
- [14] Nikiforidis C V, Kiosseoglou V. Aqueous extraction of oil bodies from maize germ (*Zea Mays*) and characterization of the resulting natural oil-in-water emulsion[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(12): 5591-5596.
- [15] Tzen J T C, Peng C C, Cheng D J, et al. A new method for seed oil body purification and examination of oil body integrity following germination[J]. *The Journal of Biochemistry*, 1997, 121(4): 762-768.
- [16] Jacks T J, Hensarling T P, Neucere J N, et al. Isolation and physicochemical characterization of half-unit membranes of oilseed lipid bodies[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 1990, 67(6): 353-361.
- [17] 赵路苹, 陈业明, 张彩猛, 等. 提取条件对大豆油体表面蛋白质去除效果的研究[J]. *大豆科学*, 2013, 32(6): 835-839.
- [18] H. M 戴克斯, G. 范路易珍, J. 布斯, 等. 油体的用途: 加拿大, CN1258198A[P]. 1998-12-03.
- [19] Fisk I D, Linforth R, Trophard G, et al. Entrapment of a volatile lipophilic aroma compound (D-limonene) in spray dried water-washed oil bodies naturally derived from sun flower seeds (*Helianthus annuus*) [J]. *Food Research International*, 2013, 54(1): 861-866.
- [20] Kapchie V N, Towa L T, Hauck C, et al. Evaluation of enzyme efficiency for soy oleosome isolation and ultrastructural aspects [J]. *Food Research International*, 2010, 43(1): 241-247.
- [21] Kapchie V N, Towa L T, Hauck C, et al. Recycling of aqueous supernatants in soybean oleosome isolation[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2010, 87(2): 223-231.
- [22] Towa L T, Kapchie V N, Hauck C, et al. Pilot plant recovery of soybean oleosome fractions by an enzyme-assisted aqueous process [J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2011, 88(5): 733-741.
- [23] Kapchie V N, Towa L T, Hauck C, et al. Recovery and functional properties of soy storage proteins from lab- and pilot-plant scale oleosome production[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2012, 89(5): 947-956.
- [24] 曹艳芸, 陈业明, 华欲飞. 高碱性提取的大豆油体的成分变化研究[J]. *中国粮油学报*, 2014, 29(3): 37-41.
- [25] 吴娜娜, 杨晓泉, 郑二丽, 等. 大豆油体乳液稳定性和流变性质分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(1): 369-374.
- [26] Sukhotu R, Shi X, Hu Q, et al. Aggregation behaviour and stability of maize germ oil body suspension[J]. *Food Chemistry*, 2014, 164(3): 1-6.
- [27] Adams G G., Imran S, Wang S, et al. Harding. Extraction, isolation and characterisation of oil bodies from pumpkin seeds for therapeutic use[J]. *Food Chemistry*, 2012, 134(4): 1919-1925.
- [28] Nikiforidis C V, Kiosseoglou V. Physicochemical stability of maize germ oil body emulsions as influenced by oil body surface-xanthan gum interactions[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(1): 527-532.
- [29] Iwanaga D, Gray D A, Fisk I D, et al. Stabilization of soybean oil bodies using protective pectin coatings formed by electrostatic deposition[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(6): 2240-2245.
- [30] Wu N N, Huang X, Yang X Q, et al. Stabilization of soybean oil body emulsions using ι -carrageenan: Effects of salt, thermal treatment and freeze-thaw cycling[J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 28: 110-120.
- [31] 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(1-4): 640-648.
- [32] David Gray. Oil body extraction and uses; United States, US2014/0045940 A1[P]. 2014-02-13.
- [33] 伊丽莎白·旺达·默里, 约瑟夫·布斯, 南希·安马克里. 制备含活性成分油体的方法: 加拿大, CN1863506A[P]. 2005-04-07. ☞