

利用初榨大豆毛油制备 β -谷甾醇油脂凝胶

吴非¹, 吴楠¹, 李丹¹, 陈书曼¹, 张雪¹, 王立琦², 于殿宇^{1,*}, 张理博^{3,*}

(1. 东北农业大学食品学院, 黑龙江 哈尔滨 150030;

2. 哈尔滨商业大学计算机与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150028;

3. 九三集团哈尔滨惠康食品有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150069)

摘要: 利用初榨大豆毛油中天然磷脂, 通过添加 β -谷甾醇, 使其与天然磷脂形成复合凝胶剂制备油脂凝胶, 研究 β -谷甾醇添加量对油脂凝胶硬度、热力学性质、固体脂肪含量 (solid fat content, SFC)、凝胶晶型和微观结构的影响。结果表明: 在20 °C条件下, 油脂凝胶中 β -谷甾醇添加量不小于12%时, 即可出现凝胶行为。油脂凝胶的硬度和SFC都随着 β -谷甾醇添加量的增加而增加, 且在不同贮藏温度下硬度变化显著。 β -谷甾醇添加量对热力学特性影响较大, 熔化结晶均为单峰。油脂凝胶主要为 β 型晶体, 晶体为长针状并均匀分布, 随 β -谷甾醇添加量的增多, 油脂凝胶晶体密度增大, 尺寸变小, 形成的三维网状结构更加紧密, 截留植物油的能力不断提高, 表明 β -谷甾醇可以与初榨大豆毛油中的天然磷脂结合形成油脂凝胶, 该油脂凝胶中无反式脂肪酸, 富含天然营养成分, 具有适宜油脂凝胶硬度及良好的结构稳定性等优势。

关键词: 初榨大豆毛油; 天然磷脂; β -谷甾醇; 油脂凝胶; 凝胶特性

Preparation of β -Sitosterol Oleogels by Using Virgin Soybean Oil

WU Fei¹, WU Nan¹, LI Dan¹, CHEN Shuman¹, ZHANG Xue¹, WANG Liqi², YU Dianyu^{1,*}, ZHANG Libo^{3,*}

(1. College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2. School of Computer and Information Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China;

3. Harbin Hui Kang Food Company of Jiu San Group, Harbin 150069, China)

Abstract: Oleogels were prepared by the formation of composite gels from natural phospholipids in virgin soybean oil with added β -sitosterol. The effects of the amount of β -sitosterol on the hardness, thermodynamic properties, solid fat content (SFC), X-ray diffraction (XRD) pattern and microstructure of oleogels were investigated. The results showed that gel behavior could occur at 20 °C when the amount of β -sitosterol was no less than 12%. Both the hardness and SFC of oleogels increased with the addition of β -sitosterol, and the hardness changed significantly at different storage temperatures. The amount of β -sitosterol added had a great influence on the thermodynamic characteristics, and the molten crystals all showed single peaks. The oleogels mainly formed β crystals, which were long needle-like and evenly distributed. With β -sitosterol addition, the density of oleogel crystals increased, the size became smaller, and the three-dimensional network structure formed was more compact, along with a gradual increase in oil retention ability, indicating that β -sitosterol can combine with natural phospholipids in virgin soybean oil forming oleogels, which contained no trans fatty acids (TFAS), were rich in natural nutrients, and had desirable gel hardness and good structural stability.

Keywords: virgin soybean oil; natural phospholipid; β -sitosterol; oleogels; oleogels properties

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190129-370

中图分类号: TS225.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2019) 22-0014-06

收稿日期: 2019-01-29

基金项目: 黑龙江省教育厅课题 (TSTAU-R2018010; TSTAU-C2018011);

“十三五”国家重点研发计划重点专项 (2018YFD0401101)

第一作者简介: 吴非 (1968—) (ORCID: 0000-0001-7280-2473), 女, 教授, 博士, 研究方向为粮食、油脂及植物蛋白工程。

E-mail: Wfneau@163.com

*通信作者简介: 于殿宇 (1964—) (ORCID: 0000-0002-4227-0784), 男, 教授, 博士, 研究方向为粮食精深加工技术。

E-mail: dyu2000@126.com

张理博 (1973—) (ORCID: 0000-0003-4041-565X), 男, 学士, 研究方向为粮油加工技术。

E-mail: zlb1973@126.com

引文格式:

吴非, 吴楠, 李丹, 等. 利用初榨大豆毛油制备 β -谷甾醇油脂凝胶[J]. 食品科学, 2019, 40(22): 14-19. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190129-370. <http://www.spkx.net.cn>

WU Fei, WU Nan, LI Dan, et al. Preparation of β -sitosterol oleogels by using virgin soybean oil[J]. Food Science, 2019, 40(22): 14-19. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190129-370. <http://www.spkx.net.cn>

随着人们生活水平的不断提高和饮食习惯的改变, 烘焙、涂抹、膨化食品占据越来越高的比例, 这些食品中的反式脂肪酸严重超标^[1-2]。大量研究表明: 摄入过多的反式脂肪酸会严重影响人体的健康, 如容易诱发心脏病、高血脂、加速动脉硬化、提高糖尿病、心血管疾病的风险^[3-5]。这严重违背了消费者对食品安全和营养的要求, 因此迫切需要寻找一种含低饱和脂肪酸或不含反式脂肪酸的食品油脂替代传统的塑式脂肪^[6]。

近年来, 植物油的凝胶固态技术早已成为国内外的研究热点。油脂的凝胶化即在食用植物油中添加一些凝胶剂并在一定的加工条件下使液态植物油利用凝胶因子之间的超分子网络交连变成固态的塑性油脂^[7]。目前, 这种凝胶体系可以分为两类: 单一物质和混合物质。能够固化食用油的单一物质有甘一酯、甘二酯、蜡酯、脂肪酸、山梨糖醇单硬脂酸酯、脂肪醇、蜡、神经酰胺^[8-10]。混合物质有脂肪醇和脂肪酸、山梨醇三酯和卵磷脂、 γ -谷维素和植物甾醇等^[11-13]。研究发现, 凝胶剂复合使用时形成的混合自组装结构得到的油脂凝胶表现出来的物理性能要优于单一组分自组装结构得到的油脂凝胶^[14]。例如 β -谷甾醇和 γ -谷维素的复合凝胶剂, 这些凝胶剂分子形成数百微米长的螺旋状或扭曲的晶体带, 通过自组装形成中空管状结构, 进而组成纤维状有机凝胶网络^[15]。

β -谷甾醇作为一种植物活性成分, 对人体无毒害, 具有降低胆固醇和预防动脉硬化等生理功能和独特的营养特性^[16-17]。它单独与油脂混合并不能形成油脂凝胶, 但是与磷脂共同作为凝胶剂使用时可以通过改变谷甾醇在油脂中的堆积几何形貌(自组装体结构)使得凝胶化得以实现^[18]。从形成氢键所需官能团的角度分析, β -谷甾醇分子中带有有一个羟基, 磷脂分子中带有电负性较强的羰基, 因此可能会在凝胶剂分子之间或凝胶剂分子与水之间形成氢键, 通过氢键作用形成凝胶纤维网络结构, 进而将液态油脂包裹在该网络内^[19]。初榨大豆毛油是指采用物理压榨法将油脂从油料中分离出来, 未经过任何的精炼加工过程, 含有丰富的天然大豆磷脂和不饱和脂肪酸。大豆磷脂的组成成分复杂, 主要含有卵磷脂、脑磷脂、肌醇磷脂等。所以只需在初榨大豆毛油中外加 β -谷甾醇即可与天然磷脂结合形成油脂凝胶, 与外加经过加工浓缩后的磷脂不同, 具有天然磷脂特殊的功能特性以及良好的稳定性, 有降低血清胆固醇和预防心脑血管疾病等功效^[20-21]。因此, 以 β -谷甾醇和天然大豆磷脂为

复合凝胶剂制备得到的油脂凝胶具有零反式脂肪酸和低饱和脂肪酸的特点, 对人体的健康非常有利。

本实验以初榨大豆毛油为基料油, 研究通过添加 β -谷甾醇形成油脂凝胶的特性, 研究 β -谷甾醇添加量对油脂凝胶硬度、热力学性质、固体脂肪含量(solid fat content, SFC)、X-射线衍射以及微观结构的影响, 为开发生产富含天然磷脂的零反式脂肪酸的油脂凝胶提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

初榨大豆毛油 九三集团哈尔滨惠康食品有限公司; β -谷甾醇(纯度98%) 西安全奥生物科技有限公司; 其他试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

JY系列多功能电子分析天平 上海衡平仪器仪表厂; DF-集热式恒温加热磁力搅拌器 河南省予华仪器有限公司; TA1型质构分析仪 英国Lloyd公司; MQC-23脉冲核磁共振仪 英国Fxford公司; X-射线衍射仪 英国马尔文公司; Discovery系列差式扫描量热仪 美国TA仪器公司; Eclipse E200 POL偏光显微镜 日本尼康有限公司。

1.3 方法

1.3.1 油脂凝胶样品制备

初榨大豆毛油中分别加入质量分数0%、4%、8%、12%、16%、20%的 β -谷甾醇溶液, 将样品放入80℃的恒温磁力水浴锅中加热搅拌15 min, 直至完全溶解, 从水浴锅中拿出在5℃静置结晶24 h后备用。

1.3.2 初榨大豆毛油理化指标的测定

磷脂含量测定: 按照GB/T 5537—2008《粮油检验 磷脂含量的测定》; 过氧化值测定: 按照GB/T 5538—2005《动植物油脂过氧化值测定》; 酸值测定: 按照GB/T 5530—2005《动植物油脂酸值和酸度测定》; VE含量测定: 按照NY/T 1598—2008《食用植物油中维生素E组分和含量的测定 高效液相色谱法》。

1.3.3 油脂凝胶相变

将已制备好的含不同 β -谷甾醇添加量的油脂凝胶分别在5、10、15、20、25、30℃贮藏24 h后, 将油脂凝胶试管倒置, 对试管内油脂凝胶的形态变化进行描述, 并

用相变图分析研究油脂凝胶相的变化与 β -甾醇添加量和贮藏温度之间的关系。

1.3.4 油脂凝胶硬度

参照周绪霞等^[22]方法并做修改。取适量油脂凝胶样品,分别放置在5℃和25℃保持24 h后用质构仪测定其硬度。质构仪设定参数:探头为P5,测试前速率2 mm/s,测试中速率1 mm/s,测试后速率2 mm/s,当探头感受到5.0 g力后,下压10 mm,重复3次,获得平均值,研究 β -谷甾醇添加量与温度对油脂凝胶硬度的影响。

1.3.5 油脂凝胶热力学性质

采用差示扫描量热仪测定不同 β -谷甾醇添加量油脂凝胶的热力学性质。将约10 mg的油脂凝胶加入到铝盘中,温度以10℃/min速率从室温上升到90℃,保持3 min,以消除结晶记忆,然后降至20℃,保持3 min,再次加热到90℃,研究不同 β -谷甾醇添加量的油脂凝胶在熔化结晶过程中的热变化曲线及相关热力学参数。

1.3.6 油脂凝胶中SFC

参照李胜等^[23]方法并做修改。将一定量的油脂凝胶样品添加到脉冲式核磁共振的玻璃管中,使样品高度为(4±1) cm,在90℃保持20 min,以消除结晶记忆,随后放在0℃保持90 min,再测定其SFC,然后从0℃升温到70℃,每次升5℃,保留30 min,测定每一个温度下的SFC,考察各个温度下 β -谷甾醇添加量对油脂凝胶SFC的影响。

1.3.7 油脂凝胶的晶型分析

参照赵月等^[24]方法,用X-射线衍射仪对油脂凝胶进行晶型分析,并在检测片的圆孔中加入适量的样品。测定条件:室内温度20℃,采用Cu靶,40 mA电流,40 kV工作电压,狭缝距离为1.0 mm,接受狭缝0.1 mm,2 θ 扫描范围5°~40°,速率2°/min。使用Jade 6.5软件对X-射线衍射图谱进行分析。

1.3.8 油脂凝胶的结晶形态分析

将热熔油脂凝胶用毛细管吸取适量放在预热的载玻片上,盖上载玻片在5℃贮藏24 h,放大100倍,采用偏光显微镜观察研究油脂凝胶的微观结构形态,并对油脂凝胶的结晶形态进行拍照。

1.4 数据处理

数据以3次重复实验的平均值表示,采用SPSS 16.0软件进行方差分析以及多重比较分析,并利用Origin 9.0软件处理实验数据及画图。

2 结果与分析

2.1 初榨大豆毛油的主要理化指标测定结果

从表1可知,初榨大豆毛油中天然磷脂含量高达18.4 mg/g,且富含丰富的VE、甾醇、胡萝卜素。VE可以

防止胡萝卜素、肾上腺素、性激素及VA、VD、VK的氧化破坏,又由于VE极易被氧化,在精炼过程中会损失大量的维生素和亚麻酸等有益成分,所以与精炼大豆油相比,初榨大豆毛油具有较高的营养价值。因此,选用初榨大豆毛油为基料油,添加一定质量分数的 β -谷甾醇,观察并研究是否能够形成油脂凝胶。

表1 初榨大豆毛油的主要指标
Table 1 Main indicators of virgin soybean oil

理化指标	磷脂含量/ (mg/g)	过氧化值/ (mmol/kg)	酸值/ (mg/g)	VE含量/ (mg/100 g)
数值	18.4	4.18	1.72	125.91

2.2 β -谷甾醇添加量对油脂凝胶相变的影响

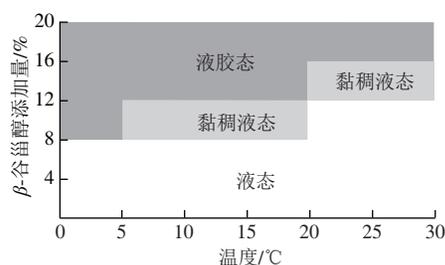


图1 β -谷甾醇不同添加量油脂凝胶的温度相变图

Fig. 1 Temperature phase transition diagram of oleogels with different amounts of β -sitosterol added

由图1可知,油脂凝胶的形成与 β -谷甾醇添加量和贮藏温度都有着一定的关系。当 β -谷甾醇添加量小于8%时,在任何温度下均未观察到黏稠状或凝胶化,处于液体状态。当 β -谷甾醇添加量大于8%,贮藏温度低于5℃时,处于凝胶状态;当 β -谷甾醇添加量大于12%时,在20℃以下即可形成凝胶;当贮藏温度高于20℃时,体系会转变为黏稠液体状态。实验结果表明贮藏温度为20℃时, β -谷甾醇添加量不小于12%时可较好地作为制备初榨大豆毛油油脂凝胶的凝胶剂,其中 β -谷甾醇添加量为12%是制备初榨大豆毛油油脂凝胶的临界值。该临界值的数值较大,可能与 β -谷甾醇化学组成成分有关,它可以通过 β -谷甾醇(羟基)和天然磷脂(羰基)的分子间氢键作用力将液体油很好地固定到三维网络中^[25],也可能因为大豆油的不饱和脂肪酸含量高,油的黏度较低,因而形成油脂凝胶所需 β -谷甾醇添加量也较大。为了更好地研究初榨大豆毛油油脂凝胶,后续实验中选择 β -谷甾醇添加量为12%(在20℃形成油脂凝胶的 β -谷甾醇添加临界值)、16%和20%(在20℃形成油脂凝胶的 β -谷甾醇添加量)的油脂凝胶,进一步研究其相关的凝胶行为特性及和微观结构。

2.3 β -谷甾醇添加量和贮藏温度对油脂凝胶硬度的影响

由图2可知,在相同的 β -谷甾醇添加量中,在较低贮藏温度下形成的油脂凝胶的硬度高于在较高温度下的硬

度, 并且硬度显著变化。贮藏温度为5℃时, 当β-谷甾醇添加量从12%增加到20%时, 油脂凝胶的硬度由2.78 N增至4.77 N, 硬度变化显著。这可能与油脂凝胶的分子间作用力及微观结构有关, 由于β-谷甾醇添加量的增多, 凝胶网络形成中的分子间作用力增大, 导致三维网络结构的紧密度相对增加, 因而油脂凝胶的硬度也就随之增大^[26], 并且较高的硬度通常是由三酰基甘油酯起重要作用的体系中较高的结晶度引起的^[14]。

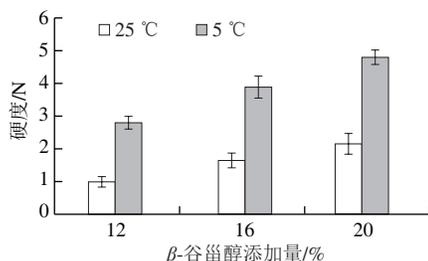


图2 β-谷甾醇不同添加量油脂凝胶的硬度变化

Fig. 2 Change in hardness of oleogels with different amounts of β-sitosterol added

2.4 β-谷甾醇添加量对油脂凝胶热力学性质的影响

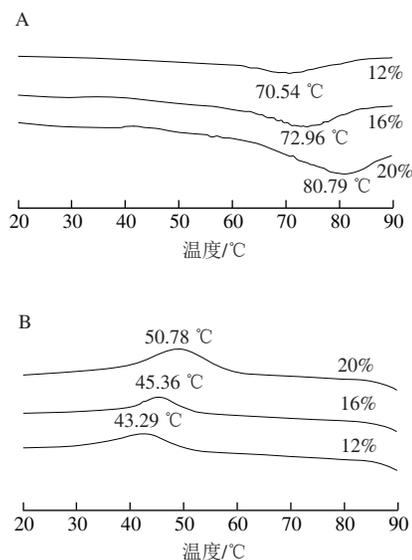


图3 β-谷甾醇不同添加量油脂凝胶熔化(A)和结晶曲线(B)

Fig. 3 Melting (A) and crystallization curves (B) of oleogels with different β-sitosterol contents

在加热过程中, 油脂凝胶会表现出相转变, 差示扫描量热仪可以通过测量样品相变过程中的热变化, 分析出相变发生的起始、峰值及终止温度。在同一升温、降温速率下, β-谷甾醇添加量为12%、16%、20%的油脂凝胶其熔化与结晶曲线随β-谷甾醇添加量的变化趋势如图3所示。图3曲线显示了明显的不对称峰值, 且不同β-谷甾醇添加量的油脂凝胶的熔化峰与结晶峰均为单峰。由图3可知, 随油脂凝胶中β-谷甾醇添加量的增加,

结晶峰值温度、熔化峰值温度均增加, 结晶过程产生的峰值温度低于熔化过程中产生的, 从而产生过冷现象, 过冷度随油脂凝胶中β-谷甾醇添加量增加而降低, 这表明油脂凝胶中β-谷甾醇添加量的增加会相对增加油脂凝胶结晶化速率, 同时油脂凝胶的结晶度也有所增加^[27-28]。结果表明, β-谷甾醇添加量对油脂凝胶的熔化与结晶均有一定影响。

表2 β-谷甾醇不同添加量油脂凝胶的热力学参数
Table 2 Thermodynamic parameters of oleogels with different amounts of β-sitosterol added

样品	熔化			结晶		
	起始温度 $T_i/^\circ\text{C}$	峰值温度 $T_m/^\circ\text{C}$	焓变 $\Delta H/(\text{J/g})$	起始温度 $T_i/^\circ\text{C}$	峰值温度 $T_m/^\circ\text{C}$	焓变 $\Delta H/(\text{J/g})$
12% β-谷甾醇	64.87	70.54	4.69	38.95	43.29	2.74
16% β-谷甾醇	67.71	72.96	6.31	42.61	45.36	4.67
20% β-谷甾醇	74.04	80.79	8.57	46.27	50.78	6.55

焓变能近似反映油脂凝胶形成的自发性, 焓变越大, 形成油脂凝胶的自发性越强^[29]。由表2可知, β-谷甾醇添加量对油脂凝胶的熔化结晶焓均具有一定影响, 随着β-谷甾醇添加量的增加, 焓变呈增加趋势, 表明体系中凝胶剂分子结晶的排列更加整齐^[30]且形成油脂凝胶的自发性增强。β-谷甾醇添加量为20%时, 结晶焓变为6.55 J/g, 表明该体系中结晶的凝胶剂分子排列的最为整齐。结果表明, β-谷甾醇添加量对油脂凝胶热力学特性存在一定影响。

2.5 β-谷甾醇添加量对油脂凝胶SFC的影响

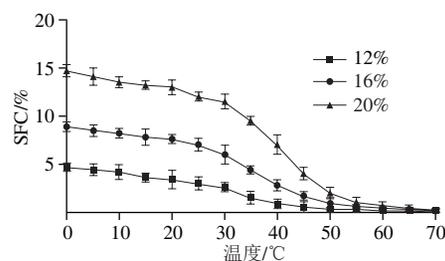


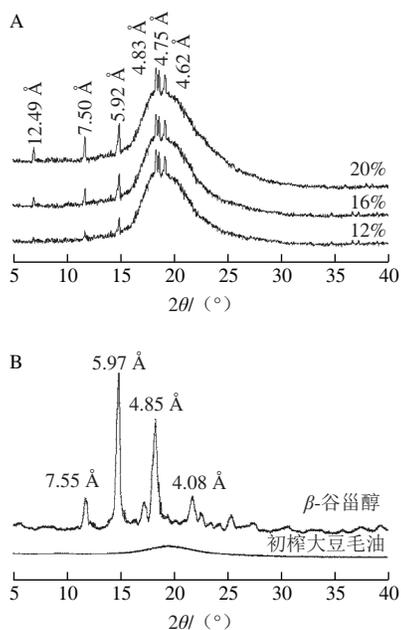
图4 β-谷甾醇不同添加量油脂凝胶的SFC曲线

Fig. 4 SFC curves of oleogels with different amounts of β-sitosterol added

SFC是评价食用油产品功能特性的一个重要指标, 通过SFC随温度变化情况反映出油脂凝胶的熔化范围, 从而确定其在食品体系中的用途^[31]。由图4可知, 当温度处于0℃时, β-谷甾醇添加量由12%增加到20%过程当中, SFC从4.7%上升到14.5%。β-谷甾醇添加量分别为12%、16%、20%的油脂凝胶在20℃前变化较平缓, 20℃附近晶体结构逐渐被破坏, SFC开始随温度急剧降低, 说明油脂凝胶的凝胶-溶胶转变温度范围在20~70℃之间。温度的升高会加剧凝胶油的熔融, 破坏其中的网状结构, 从而使其SFC下降。当温度低于20℃时, 此时

油脂凝胶构成三维网络结构,能有效截留液态植物油并将其凝胶化形成塑性脂肪,在油脂凝胶体系中,构成样品中SFC的是凝胶剂而不是植物油,所以油脂凝胶的SFC不同是由于油脂凝胶中 β -谷甾醇添加量不同导致的。

2.6 β -谷甾醇添加量对油脂凝胶晶型的影响



A. 油脂凝胶; B. 初榨大豆毛油和 β -谷甾醇。

图5 初榨大豆毛油、 β -谷甾醇和不同 β -谷甾醇添加量油脂凝胶的X-射线衍射图谱

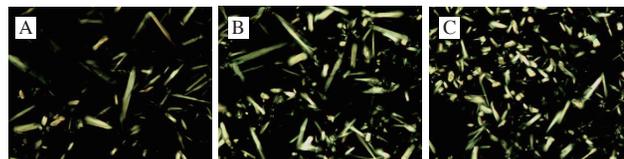
Fig. 5 XRD patterns of virgin soybean oil, β -sitosterol and oleogels

由图5A可知,不同 β -谷甾醇添加量形成的油脂凝胶均在4.75 Å和4.62 Å处存在较强的衍射峰。短间距在0.47 nm附近强衍射峰为 β 型晶体特征峰^[32],即表明油脂凝胶中主要存在 β 晶型,且 β -谷甾醇添加量对凝胶晶型影响不大。随着 β -谷甾醇添加量的增加,在12.49 Å和7.50 Å处出现新的衍射峰,说明油脂凝胶的结晶排列变得更加有序。由图5B可知,初榨大豆毛油在扫描范围内仅在20°附近出现一个非晶峰, β -谷甾醇纯体分别在7.55、5.97、4.85、4.08 Å处存在强衍射峰,而油脂凝胶X-射线衍射图谱中没有相应的衍射峰,说明油脂凝胶所形成的结晶可能来自 β -谷甾醇与天然磷脂的自组装,这与韩立娟等^[33]研究结果一致。

2.7 β -谷甾醇添加量对油脂凝胶结晶形态的影响

如图6所示,黑色部分为被束缚住的液态植物油,而较亮的部分为由凝胶剂形成的结晶结构,晶体整体分布较为均匀且呈针状结晶。 β -谷甾醇添加量为12%时,此时油脂凝胶的结晶分布稀疏,没有形成较为致密的凝胶网状结构。当 β -谷甾醇添加量为16%时,油脂凝胶结晶形态呈现长针状。根据Dassanayake等^[34]的说法,针状结构

是用于凝胶形成的良好晶体基质,因为长针能够在晶体网络中截留大量液体油。随着 β -谷甾醇添加量的增多,结晶大量增加且尺寸变小,说明凝胶剂形成了更加致密的三维网状结构,截留液态植物油的能力增强。所以, β -谷甾醇添加量为20%时形成的油脂凝胶硬度和SFC最大,进而验证了硬度和SFC的测定结果。



A. 12%; B. 16%; C. 20%。

图6 β -谷甾醇不同添加量油脂凝胶偏光显微镜图

Fig. 6 Polarized optical micrograph of oleogels with different amounts of β -sitosterol added

3 结论

以初榨大豆毛油为基料油,实验表明初榨大豆毛油中磷脂含量为1.84 mg/g,当 β -谷甾醇添加量大于12%时,在20 °C即可成功制备油脂凝胶。 β -谷甾醇添加量对油脂凝胶体系的硬度、SFC、熔化结晶性质均有显著的影响,随 β -谷甾醇添加量的增多,这些性质参数均呈上升趋势。当 β -谷甾醇添加量从12%增加到20%时,5 °C贮藏的油脂凝胶其硬度由2.78 N增至4.77 N,硬度随温度变化显著。0 °C贮藏的油脂凝胶SFC从4.7%上升到14.5%。 β -谷甾醇添加量为20%时,焓变最高,分别为8.57、6.55 J/g,体系中结晶的凝胶剂分子排列的最为整齐。X-射线衍射结果显示 β -谷甾醇添加量对油脂凝胶晶型影响不大,均存在 β 型晶体,晶体形状为细长针状,分布均匀。随 β -谷甾醇添加量的增加,其针状结晶尺寸减小,分布密度增加,即 β -谷甾醇添加量越高,硬度越大,结构化植物油的能力越强,形成油脂凝胶结构稳定性越好,为生产一种富含磷脂和VE等天然营养物质的零反式脂肪酸食品专用油脂开辟一条更为健康的新道路。

参考文献:

- [1] 钟金锋,覃小丽,刘雄. 凝胶油及其在食品工业中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2015, 36(3): 272-279. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201503051.
- [2] 傅红,赵霖,杨琳,等. 中国市售食品中反式脂肪酸含量的现状研究[J]. 中国食品学报, 2010, 10(4): 48-54. DOI:10.3969/j.issn.1009-7848.2010.04.007.
- [3] CHENG H N, RAU M W, DOWD M K, et al. Comparison of soybean and cottonseed oils upon hydrogenation with nickel, palladium and platinum catalysts[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2014, 91(8): 1461-1469. DOI:10.1007/s11746-014-2487-1.
- [4] HIDA H, ITOH D, MINOWA S, et al. Hydrogenation of soybean oil over various platinum catalysts: effects of support materials on

- trans fatty acid levels[J]. *Catalysis Communications*, 2015, 62: 1-5. DOI:10.1016/j.catcom.2014.12.025.
- [5] 谢明勇, 谢建华, 杨美艳, 等. 反式脂肪酸研究进展[J]. *中国食品学报*, 2010, 10(4): 14-26. DOI:10.3969/j.issn.1009-7848.2010.04.003.
- [6] 饶欢, 邓泽元. 加工零/低反式脂肪酸人造塑性油脂技术[J]. *中国食品学报*, 2012, 12(8): 118-126. DOI:10.3969/j.issn.1009-7848.2012.08.018.
- [7] HUGHES N E, MARANGONI A G, WRIGHT A J, et al. Potential food applications of edible oil organogels[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2009, 20(10): 470-480. DOI:10.1016/j.tifs.2009.06.002.
- [8] PATEL A R, SCHATTEMAN D, VOS W H D, et al. Shellac as a natural material to structure a liquid oil-based thermo reversible soft matter system[J]. *RSC Advances*, 2013, 3(16): 5324-5327. DOI:10.1039/C3RA40934A.
- [9] DASSANAYAKE L S K, KODALI D R, UENO S. Formation of oleogels based on edible lipid materials[J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2011, 16(5): 432-439. DOI:10.1016/j.cocis.2011.05.005.
- [10] JORGE F T, ROSALBA M P, MARCO M G, et al. Physical properties of organogels and water in oil emulsions structured by mixtures of candelilla wax and monoglycerides[J]. *Food Research International*, 2013, 54(2): 1360-1368. DOI:10.1016/j.foodres.2013.09.046.
- [11] SONIA C, GIORGIO M, SARA D P, et al. Effect of oil type on formation, structure and thermal properties of γ -oryzanol and β -sitosterol-based organogels[J]. *Food Biophysics*, 2014, 9(1): 69-75. DOI:10.1007/s11483-013-9318-z.
- [12] BOT A, ADEL R D, REGKOS C, et al. Structuring in β -sitosterol + γ -oryzanol-based emulsion gels during various stages of a temperature cycle[J]. *Food Hydrocolloids*, 2011, 25(4): 639-646. DOI:10.1016/j.foodhyd.2010.07.026.
- [13] ALHASAWI F M, ROGERS M A. Ternary phase diagram of β -sitosterol- γ -oryzanol-canola oil[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2013, 90(10): 1533-1540. DOI:10.1007/s11746-013-2302-4.
- [14] HAN L J, LI L, ZHAO L, et al. Rheological properties of organogels developed by sitosterol and lecithin[J]. *Food Research International*, 2013, 53(1): 42-48. DOI:10.1016/j.foodres.2013.03.039.
- [15] SAWALHA H, MARGRY G, ADEL R D, et al. The influence of the type of oil phase on the self-assembly process of γ -oryzanol+ β -sitosterol tubules in organogel systems[J]. *European Journal of Lipid Science & Technology*, 2013, 115(3): 295-300. DOI:10.1002/ejlt.201100395.
- [16] SCHOLZ B, GUTH S, ENGEL K H, et al. Phytosterol oxidation products in enriched foods: occurrence, exposure, and biological effects[J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2015, 59(7): 1339-1352. DOI:10.1002/mnfr.201400922.
- [17] 张蕾, 陈庆森, 阎亚丽, 等. 植物甾醇对心血管疾病作用的研究现状[J]. *食品科学*, 2013, 34(23): 344-350. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201323069.
- [18] 韩立娟. 超分子油脂凝胶微观结构衍变与宏观性能变化的关系研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [19] HAN L, LIN L, BING L, et al. Structure and physical properties of organogels developed by sitosterol and lecithin with sunflower oil[J]. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 2014, 91(10): 1783-1792.
- [20] WOJCIECHOWSKI K, ORCZYK M, TRAPP M, et al. Effect of triterpene and steroid saponins on lecithin bilayers[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2016, 510: 150-158. DOI:10.1016/j.colsurfa.2016.04.065.
- [21] KLEBER M E, DELGADO G E, LORKOWSKI S, et al. Trans-fatty acids and mortality in patients referred for coronary angiography: the Ludwigshafen risk and cardiovascular health study[J]. *Atherosclerosis*, 2016, 252(13): 175-181. DOI:10.1016/j.atherosclerosis.2016.06.049.
- [22] 周绪霞, 姜珊, 顾赛麒, 等. 油茶籽油对鱼糜凝胶特性及凝胶结构的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(9): 27-33. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201709005.
- [23] 李胜, 马传国, 刘君, 等. 分子蒸馏单甘酯对谷维素-谷甾醇凝胶油结构和性质的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(16): 126-132. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201816019.
- [24] 赵月, 邹德智, 李婷婷, 等. 米糠蜡对稻米油基凝胶油形成的影响及动力学[J]. *食品科学*, 2017, 38(23): 59-64. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201723010.
- [25] CHEN X W, CHEN Y J, WANG J M, et al. Tunable volatile release from organogel-emulsions based on the self-assembly of β -sitosterol and γ -oryzanol[J]. *Food Chemistry*, 2017, 221: 1491-1498. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.11.001.
- [26] 殷俊俊. 谷维素与甾醇结合交联固化植物油的规律研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2015.
- [27] DASSANAYAKE L S K, KODALI D R, UENO S, et al. Physical properties of rice bran wax in bulk and organogels[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2009, 86(12): 1163-1173. DOI:10.1007/s11746-009-1464-6.
- [28] ROGERS M A, WRIGHT A J, MARANGONI A G. Crystalline stability of self-assembled fibrillar networks of 12-hydroxystearic acid in edible oils[J]. *Food Research International*, 2008, 4(10): 1030-1034. DOI:10.1016/j.foodres.2008.07.012.
- [29] 李胜, 马传国, 刘君, 等. 谷维素/谷甾醇与单甘酯复合凝胶油形成过程及分子作用特性[J]. *食品科学*, 2018, 39(10): 89-96. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201810015.
- [30] YILMAZ E, OGUTCU M. Properties and stability of hazelnut oil organogels with beeswax and monoglyceride[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2014, 91(6): 1007-1017. DOI:10.1007/s11746-014-2434-1.
- [31] 李丹, 赵月, 李婷婷, 等. 油脂品种对肉桂酸基油脂凝胶形成及性质的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(12): 9-14. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201812002.
- [32] CHOPIN-DOROTEO M, MORALES-RUEDA J A, DIBILDOX-ALVARADO E, et al. The effect of shearing in the thermo-mechanical properties of candelilla wax and candelilla wax-tripalmitin organogels[J]. *Food Biophysics*, 2011, 6(3): 359-376. DOI:10.1007/s11483-011-9212-5.
- [33] 韩立娟, 陈浩, 刘胜, 等. 凝胶油基人造奶油质地和流变性能[J]. *食品科学*, 2018, 39(7): 14-19. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201807003.
- [34] DASSANAYAKE L S K, KODALI D R, UENO S, et al. Crystallization kinetics of organogels prepared by rice bran wax and vegetable oils[J]. *Journal of Oleo Science*, 2012, 61(1): 1-9. DOI:10.5650/jos.61.1.