

# 基料油对水致复合油凝胶性质的影响

胡冰洁, 兰雅淇\*

(华南农业大学食品学院, 广东广州 510642)

**摘要:** 油凝胶在食品、药品、化妆品等领域具有广泛的应用。近年来, 复合油凝胶因其优异的可调性备受关注。该研究以不同的基料油性质来调控神经酰胺-卵磷脂水致复合油凝胶体系的性质。流变仪测试表明, 基料油极性和粘度增大导致凝胶的强度从 223.22 Pa 增加到 1 954.71 Pa。差示扫描量热和偏光显微结构显示, 凝胶强度的增加是由于结晶焓的增加(从 6.60 J/g 增加到 8.09 J/g)。傅里叶变换红外光谱结果表明, 在 3 750~3 100  $\text{cm}^{-1}$  的氢键强度从 2.49 增大至 7.12。研究表明, 基料油的粘度和极性性质可通过影响凝胶体系的结晶度和氢键相互作用强度来影响宏观性质。但上述的非同步变化说明可能还有其他因素, 如晶体颗粒与水的接触也影响凝胶的宏观性质。该研究为基料油调控油凝胶性质方面提供了新思路。

**关键词:** 油凝胶; 基料油性质; 神经酰胺; 大豆卵磷脂

文章编号: 1673-9078(2022)12-67-73

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.12.0018

## Effects of Base Oil on the Properties of Water-induced Multi-component Oleogels

HU Bingjie, LAN Yaqi\*

(College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** Oleogels are widely used in food, medicine, cosmetics, and other fields. Because of their excellent tunability, multi-component oleogels have recently attracted considerable attention. In this study, the properties of water-induced ceramide-*lecithin* oleogels were regulated by changing the properties of the base oil. With the increase in polarity and viscosity of the base oil, the gel strength increased from 223.22 to 1 954.71 Pa. Differential scanning calorimetry and polarized microscopy showed that the gel strength increased owing to the increase in crystallization enthalpy (from 6.60 to 8.09 J/g). Additionally, the area of the hydrogen bond peak at 3 750~3 100  $\text{cm}^{-1}$  in the Fourier transform infrared spectra increased from 2.49 to 7.12. Overall, the viscosity and polarity of the base oil affected hydrogen bonds and crystallinity, and thus affected the macroscopic properties of the oleogel. However, the above nonsynchronous variation suggests that there may be other factors, such as the contact between crystal particles and water, that affect the macroscopic properties of the gel.

**Key words:** oleogels; oil properties; ceramide; soybean lecithin

引文格式:

胡冰洁, 兰雅淇. 基料油对水致复合油凝胶性质的影响[J]. 现代食品科技, 2022, 38(12): 67-73

HU Bingjie, LAN Yaqi. Effects of base oil on the properties of water-induced multi-component oleogels [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(12): 67-73

传统固态脂肪含有大量的饱和脂肪酸或反式脂肪酸。因此大量食用含传统固态脂肪的食品会增加患心血管疾病和其他代谢紊乱疾病的风险<sup>[1-3]</sup>。有机凝胶是

收稿日期: 2022-01-06

基金项目: 广东省自然科学杰出青年基金项目(2018B030306034); 广东省科协青年科技人才培养计划项目(SKXRC202203)

作者简介: 胡冰洁(1994-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 新型健康结构化油脂, E-mail: bingjie00819@163.com

通讯作者: 兰雅淇(1988-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 自组装有机分子凝胶体系的凝胶机理及其在食品、化妆品中的应用, E-mail: yaqilan@scau.edu.cn  
指在有机液体中加入凝胶剂, 从而具有了与类固体相

似物理性质的软材料<sup>[4-6]</sup>。其中, 油凝胶是以液态植物油为有机相的传统固态脂肪替代品。油凝胶在保留植物油低饱和、零反式脂肪酸的营养特性的同时也具有良好的稳定性和可塑性<sup>[1,7]</sup>。根据凝胶剂的分子量, 油凝胶可分为大分子油凝胶和小分子油凝胶<sup>[3]</sup>; 油凝胶的制备方法可分为直接制备法和间接制备法。小分子油凝胶可通过直接法制备, 即将凝胶剂直接溶解于加热的液态基料油中。在冷却过程中凝胶剂分子通过自组装形成三维结晶网络将液态基料油固化<sup>[8]</sup>。目前已有许多研究探究了巴西棕榈蜡<sup>[9]</sup>、蜂蜡<sup>[10]</sup>、单甘脂<sup>[11]</sup>等单组分油凝胶的性质。以上凝胶剂因结晶性强、成本低等

优点受到广泛的关注。但也存在着性质可控性差等缺点。因此,许多研究致力于构建复合油凝胶体系,如 $\beta$ 谷甾醇和 $\gamma$ -谷维素<sup>[12]</sup>、单甘酯和植物甾醇<sup>[13]</sup>、吐温20和硬脂酸<sup>[14]</sup>、脂肪酸和脂肪醇<sup>[15]</sup>等。复合凝胶剂在特定比例下通过分子共组装机形成油凝胶的性能优于任一单组分。复合油凝胶能更好的模仿传统固态脂肪,在加工中提供所需的硬度、可延展性、高持油率和高成型温度等性能<sup>[16,17]</sup>。复合油凝胶仅通过改变两个凝胶剂的比例便可调整油凝胶的宏观性质,构建满足不同加工需求的油凝胶。因此,复合有协同作用的凝胶剂是一种调控油凝胶宏观性质更有效的方式。

影响油凝胶性质的主要因素为凝胶剂种类、浓度、植物基料油的性质和冷却温度等。在油凝胶中,基料油的重量占整体凝胶重量的90%甚至更高。基料油的类型是除了凝胶剂种类和浓度之外影响凝胶结晶网络结构、流变和热性能的重要因素<sup>[7]</sup>。已有研究利用葵花籽油、玉米油、橄榄油、菜籽油、榛子油等各种植物油来制备油凝胶<sup>[18-21]</sup>。研究发现,基料油的脂肪酸组成,极性和粘度是影响油凝胶理化性质的主要因素。由于油凝胶的内部是一个复杂的结晶微结构构建的网络。这种网络由凝胶剂-凝胶剂、凝胶剂-基料油之间的相互作用共同构建<sup>[4,22]</sup>。所以,基料油的性质直接影响了凝胶剂和基料油分子之间的相互作用和分子堆积。因此,在研究油凝胶体系的形成机制以及如何调整凝胶剂的堆积几何结构来改变超分子网络结构时,考虑基料油的差异十分重要。

目前有研究首次报道了通过以水诱导神经酰胺和卵磷脂晶体的排列重组来构建新的复合油凝胶体系<sup>[23]</sup>。在特定的比例下,神经酰胺和卵磷脂无法形成一个稳定的油凝胶。但在加入水后,水诱导了晶体之间的连接,与晶体一起形成了稳定的油凝胶。水诱导油凝胶转化的典型一个例子是卵磷脂。随着微量的极性溶剂(即水)的加入,卵磷脂能够自组装在其中通过单轴生长逆转胶束,产生能够固定液体油的纠缠圆柱形结构。这种圆柱形结构能够将有机溶剂凝胶化<sup>[24]</sup>。本研究中,水诱导了神经酰胺和卵磷脂结晶颗粒之间形成毛细管桥,共同形成凝胶网络。此构建方式为开发传统固态脂肪的替代材料提供了可行方案,也增加了在油脂产品中添加水溶性营养物质的可能性。少有研究探讨基料油的差异对水诱导油凝胶形成机制及宏观结构的影响,本研究结合偏光显微镜、流变仪、差示扫描量热仪、傅立叶红外光谱仪等表征技术对制备的水诱导复合凝胶体系进行凝胶特性分析和探究基料油极性影响油凝胶性质的机制。研究对于复合油凝胶的制备以及它们在食品、药品和化工工业中的应用具

有深远意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

神经酰胺3(纯度>92%),德国赢创工业集团;大豆卵磷脂(纯度>98%),上海阿拉丁试剂公司;葵花籽油,山东鲁花集团;石蜡油(化学纯),上海泰坦科技股份有限公司;蓖麻油(分析纯)、中链甘油三酯(化学纯),上海泰坦科技股份有限公司。

### 1.2 仪器与设备

AL104 万分之一电子天平,梅特勒-托利多仪器有限公司;RCT basic 磁力加热搅拌器,德国IKA集团;Canon 数码相机,日本佳能集团;FYL-YS-150L 恒温箱,北京福意联医疗设备有限公司;MCR502 流变仪,奥地利安东帕有限公司;DSC8000 差示扫描量热仪,美国珀金埃尔默仪器有限公司;Bruker Vertex70 傅立叶变换红外光谱仪,来自德国布鲁克公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 水致复合凝胶体配制

在120℃下使用磁搅拌器将神经酰胺和卵磷脂完全溶解在基料油中,并在(20±1)℃的培养箱中冷却4h。随后,在1,500 r/min的磁力搅拌下,向冷却样品中加入一定量的水,持续搅拌10 min,最后将样品放置在(20±1)℃下储存24 h。神经酰胺、卵磷脂和水的总浓度保持在15%(m/m)。葵花籽油浓度保持在85%(m/m)。选择质量比为卵磷脂:神经酰胺:水=7:6:2的样品(7L6C2W)探究不同基料油对水致复合体系的影响。基料油有:石蜡油(PFO)、葵花籽油(SFO)、80%葵花籽油+20%蓖麻油(8SFO+2CSO)、50%葵花籽油+50%蓖麻油(5SFO+5CSO)、20%葵花籽油+80%蓖麻油(2SFO+8CSO)、蓖麻油(CSO)(以上六种基料油的极性和粘度逐渐增大)和中链甘油三酯(MCT)共七种(基料油的极性和粘度见表1)。由此,样品分别表示为PFO、SFO、8SFO+2CSO、5SFO+5CSO、2SFO+8CSO、CSO和MCT。

#### 1.3.2 偏光显微镜

将少量样品均匀涂抹在粘附性载玻片上,立即盖上盖玻片,使用像素为5 616×3 744 pixel的数码相机进行拍摄,放大倍数为400×(40×10)。

#### 1.3.3 流变学测试

选择直径为25 mm的平行板探头测试,间隙设置为0.5或1 mm,将适量样品放置于样品台上,设置参

数进行测试。振幅扫描：频率常数为 1 Hz，测量温度为 20 °C，应力为 0.01~1 000 Pa，或者应变为 0.001%~100%。频率扫描：压力常数为 1 Pa 或者 0.5%，测量温度为 20 °C，测试范围为 0.01~10 Hz。温度扫描：温度扫描范围为 20~120 °C，扫描速率为 3 °C/min。恢复性测试：三段式扫描，测量温度为 20 °C，扫描程序为 0.01%-10%-0.01%，每段扫描 2 min。以第一段测试的粘度平均值视为 100%，与第三段测试的粘度平均值比较，计算样品的恢复百分比。

### 1.3.4 相变行为测试

称量 10 mg 左右样品于高压盘中进行测试，测试程序设置为：在 20 °C 保持 1 min，随后从 20 °C 升温到 120 °C，速率为 5 °C/min，在 120 °C 保持 5 min 后进行降温程序，从 120 °C 降到 20 °C，速率为 5 °C/min，最后在 20 °C 保持 1 min 后结束程序。使用系统自带软件进行相变开始温度、峰值温度和焓变值的数据采集。

### 1.3.5 傅立叶变换红外光谱测试

选择 ATR 附件，将适量样品放置于晶体上，使其被完全覆盖，在室温下进行测试。分辨率：4 cm<sup>-1</sup>，扫描次数：64 次，测试范围：4 000~400 cm<sup>-1</sup>。

## 1.4 数据处理

所有实验均重复三次，实验结果采用平均值±标准差 (mean±SD) 表示。所有数据均采用 Origin Pro 2018 进行统计分析，不同组间的数据采用单因素方差分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 凝胶结果与微观结构

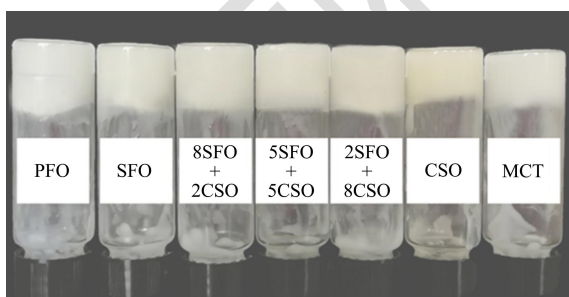


图1 不同基料油制备样品的凝胶结果

Fig.1 Visual appearance images of oleogels with different oil properties

样品在 20 °C 凝胶 24 h 后，采用倒置法观察凝胶结果。从图 1 可以看出，在倒置 1 h 后，所有的样品均没有下流或者分层现象，即样品均形成凝胶。可见基料油的不同对此复合凝胶的形成结果无显著影响。然而，基料油本身颜色对凝胶的外观略有影响，如 CSO 本身的颜色较其他基料油偏黄，因此由 CSO 制备的凝胶的

颜色较其他凝胶的颜色更深。Yang<sup>[25]</sup>等的研究结果也表明，基料油的类型会影响油凝胶的颜色和外观。在油凝胶中，基料油的重量占整体凝胶重量的 85%。所以，基料油的颜色会影响油凝胶的表现颜色。

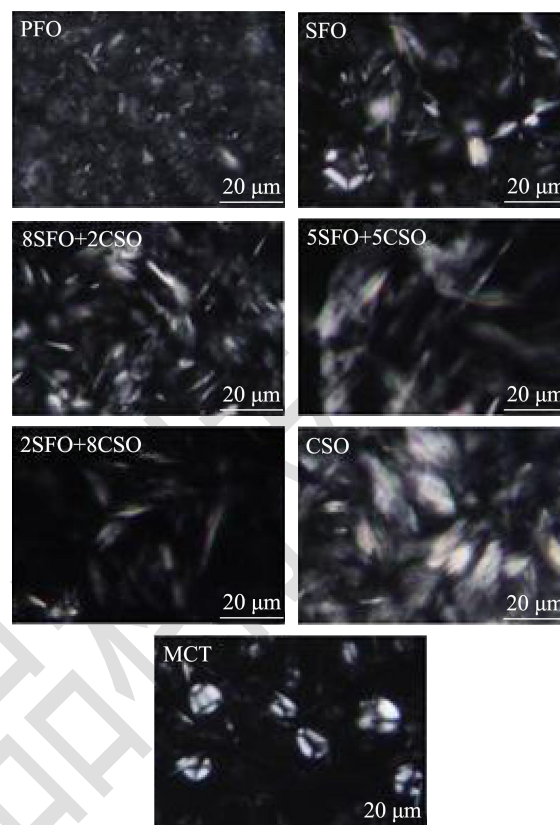


图2 不同基料油制备凝胶的偏光晶体图

Fig.2 Polarized light microscopy images of oleogels with different oil properties

凝胶结晶网络微观结构采用偏光显微镜进行观察。如图 2，由不同基料油制备的样品的微观结构具有明显差异：PFO 表现为由细短纤维径向聚集的小球状晶体；SFO 为片状和针状晶体，8SFO+2CSO 与 SFO 类似，这可能是因为在 8SFO+2CSO 中，葵花籽油占总油含量的 80% (m/m)；从 5SFO+5CSO 中观察到半透明状的片状晶体；从 2SFO+8CSO 中观察到小纤维束晶体；CSO 呈现为大纤维束晶体；MCT 晶体为马耳他十字。SFO、8SFO+2CSO、5SFO+5CSO、2SFO+8CSO 和 CSO，这几个凝胶的晶体形态相似，而与 PFO 和 MCT 完全不同。虽然这些晶体的尺寸大小与基料油的极性或者粘性大小无明显相关性，但基料油的类型明显影响了结晶的形态。相似的研究也证明这种现象。Lupi<sup>[26]</sup>使用稻米油、向日葵油和蓖麻油，以单甘酯和二十八烷醇的混合物为凝胶剂研究基料油的极性对凝胶宏观性质的影响。发现基料油的种类改变了凝胶剂结晶的形态，在不同基料油形成的油凝胶偏光照片中也发现了玫瑰状、针状等形态结晶。在小分子油凝胶

中非共价相互作用是驱动凝胶因子自组装形成结晶网络的核心。Caroline 等<sup>[27]</sup>认为由于溶剂性质改变了凝胶体系内的非共价相互作用，从而影响了结晶的形态。

## 2.2 流变学性质

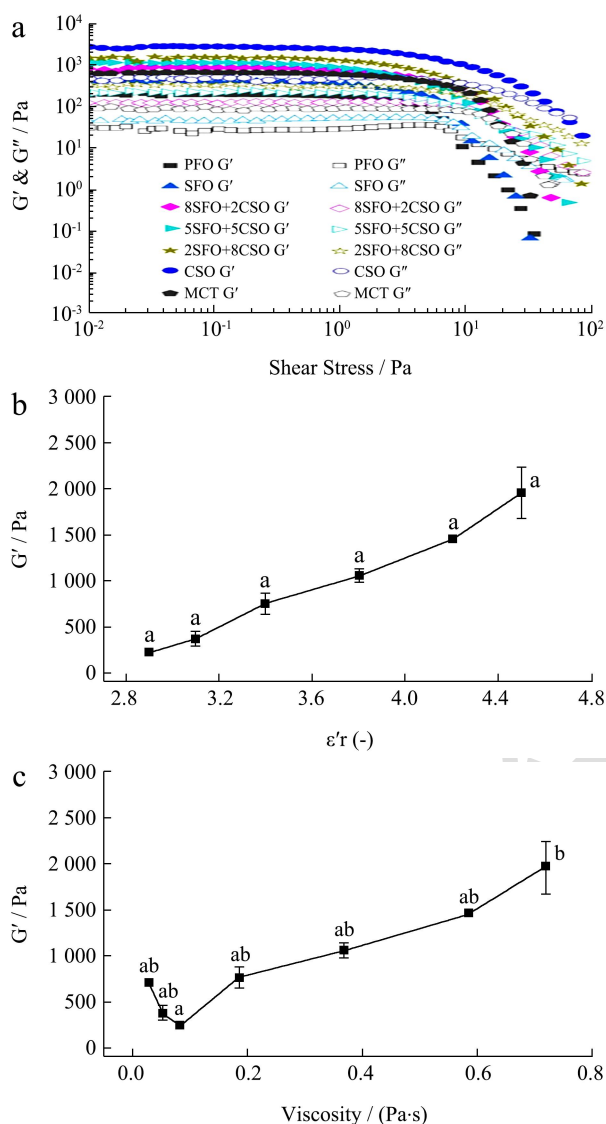


图3 (a) 不同基料油制备凝胶的振幅扫描图 (b) LVR 范围内  $G'$  值与基料油极性的相关性折线图 (c) LVR 范围内  $G'$  值与基料油粘度的相关性折线图

**Fig.3 (a) Amplitude sweeps for oleogels with different oil properties; (b) The storage modulus ( $G'$ ) in the LVR range of oleogels with different oil polarity had compared; (c) The storage modulus ( $G'$ ) in the LVR range of samples with different oil viscosity had compared**

对不同基料油样品进行小振幅破坏性扫描，扫描结果见图 3a。从图中可以看出，所有样品在整个 LVR 范围内都表现出  $G' > G''$ ，表明样品呈现固态或半固

态性质，结果与从倒置法观察到的一致（图 1）。随着剪切应力的增大，凝胶的结构逐渐被破坏瓦解，表现为样品的  $G'$  和  $G''$  值迅速下降。采用 LVR 范围内的  $G'$  平均值表征和比较由不同基料油制备的样品的三维网络的强度<sup>[28]</sup>（图 3b、3c）。结果显示，随着基料油极性的增大， $G'$  值逐渐增加（图 3b），其中， $G'_{\min} = 223.22 \text{ Pa}$ ， $G'_{\max} = 1954.71 \text{ Pa}$ ，对应的基料油分别为 PFO 和 CSO。随着基料油粘度的增大， $G'$  值有增加的趋势，且由粘度为  $0.72 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ （CSO）与  $0.082 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ （PFO）基料油制备的样品呈现显著性差异（图 3c）。结果表明，凝胶网络的强度随着极性增大而增大。

凝胶网络中的结晶颗粒由 LEC 和 CER 两凝胶剂共组装形成。结晶颗粒之间由水形成毛细管桥连接，共同形成凝胶网络<sup>[29,30]</sup>。这种水致复合油凝胶的微观结构对宏观性质的调控更为复杂。诸多研究讨论了毛细管悬浮液形成凝胶的影响因素，发现水与颗粒接触角的影响占据主要地位<sup>[29,31,32]</sup>。本研究与 Danov 等<sup>[33]</sup>的研究结果一致。在探究大豆油与十六烷对悬浮液的强度的影响实验中发现，在颗粒体积份数相同时，极性更大的大豆油基料油导致水与颗粒的接触角从  $70^\circ$  减小到  $12^\circ$ ，因此，含有极性较大豆油的悬浮液强度从  $1000 \text{ Pa}$  增加到  $4500 \text{ Pa}$ 。

## 2.3 热力学性质

研究表明，基料油的性质会影响油凝胶的熔化和结晶行为<sup>[34]</sup>。实验对不同基料油样品进行 DSC 温度扫描。样品的热流图中在加热过程中观察到多个熔化峰，这是样品的多组分性质导致的<sup>[35,36]</sup>。冷却过程中凝胶仅出现一个结晶峰，因此仅对样品的液相-凝胶相相变温度和焓值与基料油的极性和粘度进行相关性分析，分析结果见图 4。如图所示，随着基料油极性和粘度的增大，凝胶结晶的峰值温度呈下降趋势，最高结晶温度为  $67.54^\circ\text{C}$ ，最低结晶温度为  $54.53^\circ\text{C}$ ；随着基料油极性和粘度的增大，焓变绝对值逐渐增大，最终趋于平稳。最高焓变值为  $8.09 \text{ J/g}$ ，最低焓变值为  $6.60 \text{ J/g}$ 。结晶温度降低和焓变绝对值增大都表明：在结晶过程中，基料油的极性增大后，样品凝胶的结晶度增高<sup>[36]</sup>。结晶度的增加表明体系中形成了更多的结晶颗粒。直接导致凝胶的网络结构增强，进而强化凝胶宏观性质。而结晶度随极性的进一步增加趋于平稳则表明凝胶宏观性质的增加不仅仅是因为结晶度，也可能源于基料油极性同时也影响了其他因素。而这种复杂的多种影响途径为定制特种用途的油脂提供了可能。

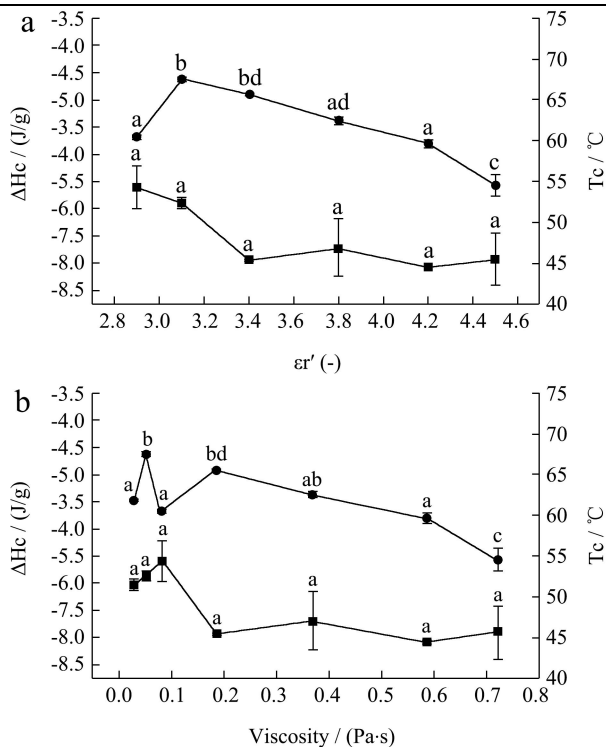


图4 (a) 不同基料油制备凝胶的结晶温度和结晶焓值与基料油极性的相关性折线图; (b) 不同基料油制备凝胶的结晶温度和结晶焓值与基料油粘度的相关性折线图

Fig.4 The crystallization enthalpy of oleogels had compared

(a) The oleogels with different oil polarity, (b) The samples with different oil viscosity

### 2.4 氢键强度

油凝胶的形成是由非共价作用,如氢键<sup>[22,37]</sup>、范德华力<sup>[38]</sup>、 $\pi$ - $\pi$ 共轭<sup>[39]</sup>、疏水相互作用<sup>[40]</sup>、静电作用<sup>[41]</sup>、金属配位相互作用<sup>[42]</sup>等驱动的,这些非共价作用存在于溶剂与溶剂之间,溶剂与凝胶剂之间以及凝胶剂分

子之间。实验利用傅立叶红外光谱仪分析了不同植物基料油制备凝胶在形成过程中存在的非共价相互作用,光谱图见图5。如图所示,不同基料油 73 600~3 000  $\text{cm}^{-1}$  范围内的吸收表明氢键的存在,此凝胶体系的非共价驱动力主要为氢键。为了比较不同样品间的作用力大小,各个样品氢键吸收峰的面积见表1。结果表明,随着基料油的极性和粘度的增大,氢键强度从 2.49 增大至 7.12 且表现出显著性差异 ( $p<0.05$ )。研究认为,基料油的极性和粘度通过调节凝胶网络的形成来影响乳液和油凝胶的性质。在凝胶形成过程中,粘度和极性影响凝胶分子的溶解度和体系内的氢键相互作用<sup>[43-45]</sup>。结果显示,基料油的高极性可增加了体系内的氢键相互作用。有研究表明对于超分子结构的油凝胶,氢键是形成超分子凝胶的推动力,随极性的增大体系氢键相互作用增加,形成的凝胶的宏观性质更强。Gravelle 等<sup>[20]</sup>研究了在乙基纤维素凝胶中加入能形成氢键相互作用的表面活性剂。研究表明溶剂中的极性物质会和凝胶网络形成氢键相互作用,使凝胶的宏观性质增强。

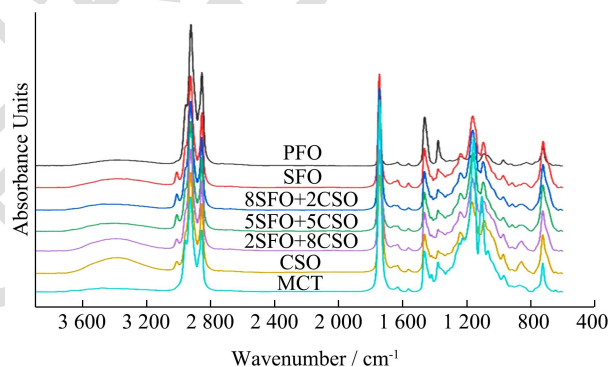


图5 不同基料油制备凝胶的傅立叶红外光谱图

Fig.5 FT-IR spectra of oleogels with different oil properties

表1 凝胶在 3 750~3 100  $\text{cm}^{-1}$  范围内的红外吸收峰面积

Table 1 FT-IR spectra absorption peak area of oleogels with different oil properties in 3 750~3 100  $\text{cm}^{-1}$

基料油	极性 (-)	粘度/(Pa·s)	峰面积 (3 750~3 100 $\text{cm}^{-1}$ )
PFO	2.9	0.082	2.49±0.42 <sup>ade</sup>
SFO	3.1	0.052	4.03±0.06 <sup>c</sup>
8SFO:2CSO	3.4	0.186	3.54±0.32 <sup>ce</sup>
5SFO:5CSO	3.8	0.368	3.64±0.30 <sup>cd</sup>
2SFO:8CSO	4.2	0.586	5.69±0.24 <sup>b</sup>
CSO	4.5	0.720	7.12±0.25 <sup>b</sup>
MCT	-	0.029	1.56±0.06 <sup>a</sup>

注: 同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ( $p<0.05$ )。

### 3 结论

本实验以神经酰胺和大豆卵磷脂为凝胶剂,通过添加少量的水构建了水致复合油凝胶,研究了基料油

性质对复合体系的影响。采用流变仪、差示扫描量热仪、偏光显微镜、傅立叶变换红外等技术手段对构建的体系进行了初步表征和影响机理的探究。选择不同极性和粘度的基料油进行实验。结果表明,基料油性

质对凝胶的最终形成与否不产生显著影响,但是改变了凝胶的微观结构和宏观性质。随着基料油极性和粘度的增大,凝胶的强度增大,油凝胶中的结晶度增加。FT-IR 结果表明,使用高极性和高粘度的基料油制备凝胶的过程中会产生更多的氢键。研究结果证明了基料油对该凝胶体系的影响,可以通过改变基料油来定制具有特定性质的油凝胶。

### 参考文献

- [1] Siraj N, Shabbir M A, Ahmad T, et al. Organogelators as a saturated fat replacer for structuring edible oils [J]. *International Journal of Food Properties*, 2015, 18(9): 1973-1989
- [2] Singh A, Auzanneau F I, Rogers M A. Advances in edible oleogel technologies - A decade in review [J]. *Food Research International*, 2017, 97: 307-317
- [3] Chaves K F, Barrera-Arellano D, Badan Ribeiro A P. Potential application of lipid organogels for food industry [J]. *Food Research International*, 2018, 105: 863-872
- [4] Moghtadaei M, Soltanizadeh N, Goli S A H. Production of sesame oil oleogels based on beeswax and application as partial substitutes of animal fat in beef burger [J]. *Food Research International*, 2018, 108: 368-377
- [5] CAO Yiping, Mezzenga R. Design principles of food gels [J]. *Nature Food*, 2020, 1(2): 106-118
- [6] Perneti M, van Malssen K, Kalnin D, et al. Structuring edible oil with lecithin and sorbitan tri-stearate [J]. *Food Hydrocolloids*, 2007, 21(5-6): 855-861
- [7] Pehlivanoglu H, Demirei M, Toker O S, et al. Oleogels, a promising structured oil for decreasing saturated fatty acid concentrations: Production and food-based applications [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(8): 1330-1341
- [8] Okuro P K, Martins A J, Vicente A A, et al. Perspective on oleogelator mixtures, structure design and behaviour towards digestibility of oleogels [J]. *Current Opinion in Food Science*, 2020, 35: 27-35
- [9] Toro-Vazquez J F, Morales-Rueda J A, Dibildox-Alvarado E, et al. Thermal and textural properties of organogels developed by candelilla wax in safflower oil [J]. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 2007, 84(11): 989-1000
- [10] Jana S, Martini S. Effect of high-intensity ultrasound and cooling rate on the crystallization behavior of beeswax in edible oils [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(41): 10192-10202
- [11] Giacomozzi A S, Palla C A, Carrin M E, et al. Physical properties of monoglycerides oleogels modified by concentration, cooling rate, and high-intensity ultrasound [J]. *Journal of Food Science*, 2019, 84(9): 2549-2561
- [12] Bot A, Agterof W G M. Structuring of edible oils by mixtures of gamma-oryzanol with beta-sitosterol or related phytosterols [J]. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 2006, 83(6): 513-521
- [13] Bin Sintang M D, Rimaux T, Van de Walle D, et al. Oil structuring properties of monoglycerides and phytosterols mixtures [J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2017, 119(3): 1500517
- [14] Uvanesh K, Sagiri S S, Banerjee I, et al. Effect of tween 20 on the properties of stearate oleogels: an in-depth analysis [J]. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 2016, 93(5): 711-719
- [15] Callau M, Sow-Kebe K, Nicolas-Morgantini L, et al. Effect of the ratio between behenyl alcohol and behenic acid on the oleogel properties [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2020, 560: 874-884
- [16] Draper E R, Adams D J. How should multicomponent supramolecular gels be characterised? [J]. *Chemical Society Reviews*, 2018, 47(10): 3395-3405
- [17] Patel A R, Dewettinck K. Edible oil structuring: an overview and recent updates [J]. *Food & Function*, 2016, 7(1): 20-29
- [18] Doan C D, Van de Walle D, Dewettinck K, et al. Evaluating the oil-gelling properties of natural waxes in rice bran oil: rheological, thermal, and microstructural study [J]. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 2015, 92(6): 801-811
- [19] Fayaz G, Goli S A H, Kadivar M, et al. Potential application of pomegranate seed oil oleogels based on monoglycerides, beeswax and propolis wax as partial substitutes of palm oil in functional chocolate spread [J]. *Lwt - Food Science and Technology*, 2017, 86: 523-529
- [20] Gravelle A J, Barbut S, Marangoni A G. Ethylcellulose oleogels: Manufacturing considerations and effects of oil oxidation [J]. *Food Research International*, 2012, 48(2): 578-583
- [21] Panagiotopoulou E, Moschakis T, Katsanidis E. Sunflower oil organogels and organogel-in-water emulsions (part II): Implementation in frankfurter sausages [J]. *Lwt-Food Science and Technology*, 2016, 73: 351-356
- [22] Baddi S, Nayak R R, Palanisamy A. Organogelation of self-assembling segmented poly (urethane acylsemicarbazides) and their dye adsorbing properties [J]. *Polymer*, 2017, 114:

- 199-208
- [23] GUO Shenglan, SONG Mingyue, HE Xiaoting, et al. Water-induced self-assembly of mixed gelator system (ceramide and lecithin) for edible oil structuring [J]. *Food & Function*, 2019, 10(7): 3923-3933
- [24] Shchipunov Y A. Lecithin organogel - A micellar system with unique properties [J]. *Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects*, 2001, 183: 541-554
- [25] YANG Shu, LI Guode Saleh Ahmed S M, et al. Functional characteristics of oleogel prepared from sunflower oil with beta-sitosterol and stearic acid [J]. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 2017, 94(9): 1153-1164
- [26] Lupi F R, Gabriele D, Greco V, et al. A rheological characterisation of an olive oil/fatty alcohols organogel [J]. *Food Research International*, 2013, 51(2): 510-517
- [27] Ferro A C, Okuro P K, Badan A P, et al. Role of the oil on glyceryl monostearate based oleogels [J]. *Food Research International*, 2019, 120: 610-619
- [28] Tavernier I, Doan C D, Van de Walle D, et al. Sequential crystallization of high and low melting waxes to improve oil structuring in wax-based oleogels [J]. *Rsc Advances*, 2017, 7(20): 12113-12125
- [29] Hien Nho Gia N, Zhao C-F, Millet O, et al. An original method for measuring liquid surface tension from capillary bridges between two equal-sized spherical particles [J]. *Powder Technology*, 2020, 363: 349-359
- [30] Georgiev M T, Danov K D, Kralchevsky P A, et al. Rheology of particle/water/oil three-phase dispersions: Electrostatic vs. capillary bridge forces [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2018, 513: 515-526
- [31] Hauf K, Koos E. Structure of capillary suspensions and their versatile applications in the creation of smart materials [J]. *Mrs Communications*, 2018, 8(2): 332-342
- [32] Bossler F, Koos E. Structure of particle networks in capillary suspensions with wetting and nonwetting fluids [J]. *Langmuir*, 2016, 32(6): 1489-1501
- [33] Danov K D, Georgiev M T, Kralchevsky P A, et al. Hardening of particle/oil/water suspensions due to capillary bridges: Experimental yield stress and theoretical interpretation [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2018, 251: 80-96
- [34] Yang S, Zhu M, Wang N, et al. Influence of oil type on characteristics of -sitosterol and stearic acid based oleogel [J]. *Food Biophysics*, 2018, 13(4): 362-373
- [35] Okuro P K, Malfatti-Gasperini A A, Vicente A A, et al. Lecithin and phytosterols-based mixtures as hybrid structuring agents in different organic phases [J]. *Food Research International*, 2018, 111: 168-177
- [36] Wijamprecha K, de Vries A, Santiwattana P, et al. Microstructure and rheology of oleogel-stabilized water-in-oil emulsions containing crystal-stabilized droplets as active fillers [J]. *Lwt - Food Science and Technology*, 2019, 115: 108058
- [37] Satapathy D, Biswas D, Behera B, et al. Sunflower-oil-based lecithin organogels as matrices for controlled drug delivery [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, 129(2): 585-594
- [38] Patel A R. A colloidal gel perspective for understanding oleogelation [J]. *Current Opinion in Food Science*, 2017, 15: 1-7
- [39] Tomasini C, Castellucci N. Peptides and peptidomimetics that behave as low molecular weight gelators [J]. *Chemical Society Reviews*, 2013, 42(1): 156-172
- [40] CAO Huiqun, WANG Fenglong, ZENG Haoxun, et al. Morphology tunable organogels based on benzoylhydrazine derivatives [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2014, 196: 94-97
- [41] Geiger D K, Geiger H C, Moore S M, et al. Structural characterization, gelation ability, and energy-framework analysis of two bis(long-chain ester)-substituted 4,4'-biphenyl compounds [J]. *Acta Crystallographica Section C-Structural Chemistry*, 2017, 73: 791
- [42] Liu K, He P, Fang Y. Progress in the studies of low-molecular mass gelators with unusual properties [J]. *Science China-Chemistry*, 2011, 54(4): 575-586
- [43] Sawalha H, den Adel R, Venema P, et al. Organogel-emulsions with mixtures of beta-sitosterol and gamma-oryzanol: influence of water activity and type of oil phase on gelling capability [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(13): 3462-3470
- [44] Calligaris S, Manzocco L, Valoppi F, et al. Effect of palm oil replacement with monoglyceride organogel and hydrogel on sweet bread properties [J]. *Food Research International*, 2013, 51(2): 596-602
- [45] YANG Danxia, CHEN, Xiaowei, YANG Xiaoquan. Phytosterol-based oleogels self-assembled with monoglyceride for controlled volatile release [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(2): 582-589